

DRAKONTOS

El mundo como obra de arte

En busca del diseño profundo de la naturaleza

Frank
Wilczek

Premio Nobel de Física

CRÍTICA



Índice

Portada

Mención especial

Dedicatoria

Instrucciones de uso

La pregunta

Pitágoras I: pensamiento y objeto

Pitágoras II: número y armonía

Platón I: estructura por simetría; sólidos platónicos

Platón II: escapando de la caverna

Newton I: método y locura

Newton II: color

Newton III: belleza dinámica

Maxwell I: la estética de Dios

Maxwell II: las puertas de la percepción

Preludio a la simetría

Belleza cuántica I: música de las Esferas

Simetría I: el pasodoble de Einstein

Belleza cuántica II: exuberancia

Simetría II: color local

Belleza cuántica III: la belleza del corazón de la naturaleza

Simetría III: Emmy Noether, tiempo, energía y cordura

Belleza cuántica IV: en la belleza confiamos

¿Una bella respuesta?

Agradecimientos

Cronología

Términos del arte

Lecturas recomendadas

Créditos de las ilustraciones

Ilustraciones

Notas

Créditos

Te damos las gracias por adquirir este EBOOK

Visita **Planetadelibros.com** y descubre una nueva forma de disfrutar de la lectura

iRegístrate y accede a contenidos exclusivos!

Próximos lanzamientos
Clubs de lectura con autores
Concursos y promociones
Áreas temáticas
Presentaciones de libros
Noticias destacadas

PlanetadeLibros.com

**Comparte tu opinión en la ficha del libro
y en nuestras redes sociales:**



Explora Descubre Comparte



Esta obra fue preparada especialmente para *El mundo como obra de arte* por He Shuifa, un maestro moderno del arte y la caligrafía chinos tradicionales. Es célebre por el vigor y la sutileza de sus pinceladas y por la profundidad espiritual de sus representaciones de flores, aves y escenas naturales. He aquí una traducción simple de la inscripción: «El doble pez del Taiji es la esencia de la cultura china. Esta imagen fue pintada por He Shuifa junto a un lago a principios del invierno». El aspecto juguetón del «doble pez» del Taiji toma vida en la imagen de He Shuifa. El yin y el yang parecen dos carpas que juegan juntas, y se intuyen sus ojos y sus aletas. En Henan, junto al río Amarillo, hay una cascada llamada Puerta del Dragón. Las carpas de Yulong intentan saltar la catarata, aunque es muy difícil para ellas. Las que lo consiguen se convierten en dragones felices. Con sentido del humor, podemos asociar ese episodio con la transformación de las partículas virtuales en partículas reales, un proceso cuántico esencial que, según se piensa ahora, subyace al origen y la estructura del universo (véase las Láminas XX y AAA). De manera alternativa, podemos identificar a la carpa con nosotros mismos, y sus esfuerzos con nuestra búsqueda del entendimiento.

*A mi familia y amigos:
respuestas bellas del segundo tipo*

Instrucciones de uso

- La «Cronología» se centra sobre todo en acontecimientos mencionados o aludidos en el libro. Sirve para lo que sirven las cronologías. No pretenden ser historias completas de nada, y no lo son.
- La sección «Términos del arte» contiene definiciones explicativas y exposiciones de los términos y conceptos clave que aparecen en el texto principal. Como se puede deducir de su extensión, es bastante más que un glosario convencional. Incluye perspectivas alternativas sobre muchas ideas expuestas en el texto, y desarrolla alguna por nuevos caminos.
- La sección «Notas» contiene el material que, en un contexto académico», aparecería como notas a pie de página. Matiza el texto y aporta algunas referencias técnicas adicionales sobre puntos concretos. Y hasta tiene un par de poemas.
- La breve sección «Lecturas recomendadas» no es una lista rutinaria de libros divulgativos, ni de libros de texto, sino un conjunto cuidadosamente evaluado de recomendaciones para profundizar en el espíritu del texto, y centrado en las fuentes primarias.

Espero que ya hayas disfrutado del frontispicio, que marca de forma bella el tono para nuestra reflexión.

También hay unas «Instrucciones de uso»... pero eso ya lo sabías.

La pregunta

Este libro es una larga reflexión sobre una sola pregunta:

¿Encarna el mundo ideas bellas?

Nuestra pregunta puede parecer extraña. Las ideas son una cosa, los cuerpos físicos otra muy distinta. ¿Qué quiere decir «encarnar» una «idea»?

Encarnar ideas es lo que hacen los artistas. Partiendo de ideas visionarias, los artistas producen objetos físicos (o productos cuasifísicos, como partituras que se convierten en sonido). Nuestra pregunta bella, entonces, es parecida a esta:

¿Es el mundo una obra de arte?

Planteada de esta forma, nuestra Pregunta conduce a otras. Si tiene sentido considerar el mundo como una obra de arte, ¿es una obra de arte lograda? ¿Es el mundo físico, considerado como una obra de arte, bello? Para conocer el mundo físico recurrimos al trabajo de los científicos, pero si queremos hacer justicia a nuestras preguntas debemos reclutar también las percepciones y las contribuciones de los artistas dispuestos a ayudarnos.

Cosmología espiritual

Nuestra Pregunta es muy natural en el contexto de la cosmología espiritual. Si un Creador energético y poderoso hizo el mundo, tal vez lo que Le —o La, o Les o Lo— impulsó a crearlo fuera hacer algo bello, precisamente. Con todo lo natural que pueda ser esta idea, cabe poca duda de que *no* es una idea

ortodoxa, según la mayoría de las tradiciones religiosas. Al Creador se le han atribuido muchas motivaciones, pero la ambición artística no suele hallarse entre las más prominentes.

En las religiones abrahámicas, la doctrina convencional sostiene que el Creador pretendía engendrar algún tipo de combinación entre la bondad y la rectitud, y crear un monumento a Su propia Gloria. Las religiones animistas y politeístas han concebido seres y dioses que crean y gobiernan distintas partes del mundo con toda clase de motivos, con un espectro que abarca desde la benevolencia hasta la lujuria sin olvidar la exuberancia despreocupada.

En un plano de mayor altura teológica, se dice a veces que las motivaciones del Creador son tan formidables que los finitos intelectos humanos no pueden esperar comprenderlos. En vez de eso, se nos dan revelaciones parciales que debemos creer, no analizar. O, alternativamente, Dios es Amor. Ninguna de estas ortodoxias contradictorias ofrece razones acuciantes para esperar que el mundo encarne ideas bellas; ni insinúan que debamos esforzarnos por hallar esas ideas. La belleza puede formar parte de su narración cósmica, pero suele relegarse a un papel marginal, no al corazón del asunto.

Muchos espíritus creativos, sin embargo, se han inspirado en la idea de que el Creador podría ser, entre otras cosas, un artista cuyas motivaciones estéticas podemos apreciar y compartir. O incluso, ya en una especulación audaz, que el Creador sea *ante todo* un artista creativo. Esos espíritus se han implicado en nuestra Pregunta, de maneras diversas y evolutivas, a lo largo de muchos siglos. Inspirados por ella, han generado una filosofía profunda, una gran ciencia, una literatura cautivadora y una imaginería impresionante. Algunos han producido trabajos que combinan varios, si no todos, de esos rasgos. Esos trabajos conforman una veta de oro que recorre oculta nuestra civilización.

Galileo Galilei hizo de la belleza del mundo físico un punto central de su propia fe profunda, y se lo recomendó a todos:

La grandeza y la gloria de Dios brillan maravillosamente en todos Sus trabajos, y puede leerse sobre todo en el libro abierto de los cielos.

... Como también hicieron Johannes Kepler, Isaac Newton y James Clerk Maxwell. Para todos estos buscadores, encontrar la belleza encarnada en el mundo físico, reflejando la gloria de Dios, era el objetivo de su búsqueda. Inspiró su trabajo y santificó su curiosidad. Y, con sus descubrimientos, su fe resultó recompensada.

Aunque nuestra Pregunta encuentra apoyo en la cosmología espiritual, también se sostiene por sí misma. Y por más que su respuesta positiva pueda inspirar una interpretación espiritual, no requiere ninguna.

Volveremos a estos pensamientos hacia el final de nuestra reflexión, cuando estemos mucho mejor preparados para evaluarlos. Entretanto, el mundo puede hablar por sí mismo.

Aventuras heroicas

Así como el arte tiene una historia, con criterios en desarrollo, asimismo la tiene el concepto del mundo como obra de arte. En la historia del arte, estamos acostumbrados a la idea de que los viejos estilos no están meramente obsoletos, sino que pueden seguir disfrutándose por sí mismos, y también ofrecer un contexto importante para los avances posteriores. Aunque esa idea resulta mucho menos familiar en ciencia, y aunque en ciencia está sujeta a limitaciones importantes, el enfoque histórico de nuestra Pregunta ofrece muchas ventajas. Nos permite —de hecho, nos fuerza— a proceder de las ideas más simples a las más complejas. Al mismo tiempo, explorando cómo los grandes pensadores lucharon y a menudo se perdieron, ganamos perspectiva sobre la extrañeza inicial de unas ideas que se han vuelto, por la familiaridad, demasiado «obvias» y cómodas. Y, por último, pero de ningún modo menos importante, los humanos estamos especialmente adaptados a pensar de modo argumental y narrativo, a asociar ideas con nombre y caras, y a encontrar persuasivos los cuentos sobre conflictos y su resolución, incluso cuando esos conflictos son de ideas y no se derrama sangre (en realidad, se derrama poca...).

Por estas razones cantaremos, para empezar, canciones de héroes: Pitágoras, Platón, Filippo Brunelleschi, Newton, Maxwell (más tarde una gran heroína, Emmy Noether, hará su entrada también). Esos nombres correspondieron a personas reales, ¡y bien interesantes! Pero para nosotros no son meramente personas, sino también leyendas y símbolos. Los he retratado tal y como pienso en ellos, en ese estilo, anteponiendo la claridad y la simplicidad a los matices académicos. Aquí la biografía es un medio, no un fin. Cada héroe hace avanzar nuestra reflexión varios pasos:

- *Pitágoras* descubrió, en su famoso teorema de los triángulos rectángulos, una de las más fundamentales relaciones entre los números, por un lado, y los tamaños y las formas, por otro. Puesto que el Número es el producto más puro de la mente, mientras que el Tamaño es una característica primaria de la Materia, ese descubrimiento reveló una unidad oculta entre Mente y Materia.

Pitágoras también descubrió, en las leyes de los instrumentos de cuerda, unas relaciones simples y sorprendentes entre los números y la armonía musical. Ese descubrimiento completa una trinidad, Mente-Materia-Belleza, con el Número como cuerda de engarce. ¡Un tema embriagador! Condujo a Pitágoras a conjeturar que Todas las Cosas son Número. Con estos descubrimientos y especulaciones, nuestra Pregunta toma vida.

- *Platón* pensaba a lo grande. Propuso una teoría geométrica de los átomos y el universo, basada en las cinco formas simétricas que ahora llamamos sólidos platónicos. En este modelo audaz de la realidad física, Platón valoraba la belleza por encima de la exactitud. Los detalles de esta teoría son por completo erróneos. Y, sin embargo, aportó una visión tan deslumbrante del aspecto que podría tener una respuesta positiva a nuestra Pregunta que inspiró a Euclides, Kepler y muchos otros hacia unos trabajos brillantes siglos más tarde. De hecho, nuestras teorías modernas y asombrosamente logradas sobre las partículas elementales, codificadas en nuestra Teoría Central (véase **Consumación cuántica**), se fundamentan en unas ideas intensificadas de simetría que seguramente

harían sonreír a Platón. Y cuando intento adivinar qué vendrá después, a menudo sigo la estrategia de Platón, proponiendo objetos de belleza matemática como modelos de la naturaleza.

Platón fue también un gran artista literario. Su metáfora de la cueva captura importantes aspectos emocionales y filosóficos de nuestra relación, como interrogadores humanos, con la realidad. En su núcleo está la creencia de que la vida diaria nos ofrece una mera sombra de la realidad, pero que, mediante aventuras de la mente, y una expansión sensorial, podemos acceder a su esencia. Y que la esencia es más clara y bella que su sombra. Platón imaginó un *demiurgo* mediador, que podría interpretarse como *Artesano*, que traducía el ámbito de las Ideas perfectas y eternas a una copia imperfecta, el mundo que experimentamos. Aquí el concepto del mundo como una obra de arte se hace explícito.

- *Brunelleschi* importó nuevas ideas a la geometría desde las necesidades del arte y la ingeniería. Su *geometría proyectiva*, que trataba de la apariencia real de las cosas, trajo ideas —la relatividad, la invariancia, la simetría— no sola bellas en sí mismas, sino preñadas de potencial.
- *Newton* elevó el entendimiento matemático de la naturaleza a niveles completamente nuevos de ambición y precisión.

Un tema común impregna el trabajo titánico de Newton sobre la luz, las matemáticas del cálculo, el movimiento y la mecánica. Es el método que llamó análisis y síntesis. El método de análisis y síntesis propone una estrategia en dos fases para alcanzar el entendimiento. En la fase de análisis, consideramos las partes más pequeñas de lo que estamos estudiando sus «átomos», en sentido figurado. En un análisis exitoso, identificamos partes pequeñas que tengan propiedades simples que podamos resumir en leyes precisas. Por ejemplo:

- En el estudio de la luz, los átomos son rayos de colores puros del espectro.
- En el estudio del cálculo, los átomos son infinitesimales y sus proporciones.
- En el estudio del movimiento, los átomos son velocidad y aceleración.
- En el estudio de la mecánica, los átomos son fuerzas.

(Más tarde trataremos esto en mayor detalle.) En la fase de síntesis ascendemos, mediante el razonamiento lógico y matemático, desde el comportamiento de los átomos individuales hasta la descripción de sistemas que contienen muchos átomos.

Exponiéndolo de esta forma tan general, el método de análisis y síntesis no parece demasiado impresionante. Está, después de todo, relacionado de forma estrecha con las reglas generales que se usan cada día, como por ejemplo «para resolver un problema complejo, divide y vencerás», lo que malamente supone una revelación electrizante. Pero Newton demandó precisión y completitud de entendimiento, al decir:

Es mucho mejor hacer un poco con certeza y dejar el resto para otros que vengan después de ti que explicar todas las cosas mediante conjeturas sin asegurarse de nada.

Y en los impresionantes ejemplos citados, alcanzó sus ambiciones. Newton mostró de forma convincente que la propia naturaleza funciona por análisis y síntesis. Realmente hay simplicidad en los «átomos», y la naturaleza opera en efecto dejándoles hacer sus cosas.

También Newton, en su investigación del movimiento y la mecánica, enriqueció nuestro concepto de lo que son las leyes físicas. Sus leyes del movimiento y de la gravedad son leyes *dinámicas*. En otras palabras, son leyes del cambio. Las leyes de este tipo encarnan un concepto de belleza diferente de la perfección estática tan amada por Pitágoras y (especialmente) por Platón.

La belleza dinámica trasciende los objetos y fenómenos particulares, y nos invita a imaginar la amplitud de las posibilidades. Por ejemplo, los tamaños y formas de las órbitas planetarias reales no son simples. Tampoco son los círculos (compuestos) de Aristóteles, Ptolomeo y Copérnico, ni siquiera las casi exactas elipses de Kepler, sino curvas que deben calcularse numéricamente, como funciones del tiempo, y que evolucionan de maneras complicadas que dependen de la masa y la posición del Sol y los demás planetas. Hay una gran belleza y

simplicidad aquí, pero solo se hace totalmente evidente cuando comprendemos el diseño profundo. La apariencia de los objetos particulares no agota la belleza de las leyes.

- *Maxwell* fue el primer físico en verdad moderno. Su trabajo en electromagnetismo dio paso a un nuevo concepto de realidad, y también a un nuevo método de la física. El nuevo concepto, que Maxwell desarrolló a partir de las intuiciones de Michael Faraday, es que los ingredientes primarios de la realidad física no son partículas parecidas a puntos, sino *campos* que llenan el espacio. El nuevo método es la *conjetura inspirada*. En 1864 Maxwell codificó las leyes conocidas de la electricidad y el magnetismo como un sistema de ecuaciones, pero descubrió que ese sistema era incoherente. Como Platón, que metió con calzador cinco sólidos perfectos en cuatro elementos más el universo, Maxwell no se rindió. Vio que, añadiendo un nuevo término, podía hacer que las ecuaciones parecieran más simétricas y a la vez hacerlas matemáticamente coherentes. El sistema resultante, conocido como las ecuaciones de Maxwell, no solo unificó la electricidad y el magnetismo, sino que derivó la luz como una consecuencia, y ha sobrevivido hasta nuestros días como un firme fundamento de esas disciplinas.

¿En qué se inspira la «conjetura inspirada» de los físicos? La coherencia lógica es necesaria, pero apenas suficiente. Más bien fueron la belleza y la simetría las que guiaron a Maxwell y sus seguidores —es decir, a todos los físicos modernos— a acercarse a la verdad, como veremos.

También Maxwell, en su trabajo sobre la percepción del color, descubrió que la cueva metafórica de Platón refleja algo muy real y específico: lo insignificante de nuestra experiencia sensorial en comparación con la realidad disponible. Y su trabajo, al clarificar los límites de la percepción, nos permite trascender esos límites. Porque el instrumento definitivo para realzar los sentidos es una mente inquisitiva.

Consumación cuántica

El definitivo «sí» en respuesta a nuestra Pregunta no llegó hasta el siglo xx, con el desarrollo de la teoría cuántica.

La revolución cuántica nos hizo esta revelación: al fin hemos aprendido qué es la Materia. Las ecuaciones necesarias son parte de la estructura teórica denominada a menudo Modelo Estándar. Ese nombre soporífero difícilmente puede hacer justicia al logro, y aquí voy a continuar mi campaña, que empecé en *La levedad del ser*, para reemplazarlo por algo más adecuadamente imponente:

Modelo Estándar → Teoría Central

Este cambio está más que justificado, porque

1. «Modelo» connota una chapuza provisional desecharable, en espera de ser reemplazado por la «cosa de verdad». Pero la Teoría Central ya es una representación precisa de la realidad física, que cualquier futura e hipotética «cosa de verdad» deberá tener en cuenta.
2. «Estándar» connota «convencional», e insinúa que hay otra sabiduría superior. Pero no hay ninguna sabiduría superior disponible. De hecho, yo creo —y montañas de evidencias lo avalan— que, aunque la Teoría Central será suplementada, su núcleo persistirá.

La Teoría Central encarna ideas bellas. Las ecuaciones de los átomos y la luz son, casi literalmente, las mismas que gobiernan los instrumentos musicales y el sonido. Un puñado de diseños elegantes sostienen la exuberante construcción de la naturaleza, desde piezas simples, del mundo material.

Nuestras Teorías Centrales de las cuatro fuerzas de la naturaleza —gravedad, electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil— encarnan en su médula un principio común: *simetría local*. Como leerás más tarde, este principio consuma y a la vez trasciende los anhelos de Pitágoras y Platón por la armonía y la pureza conceptual. Y como se verá más tarde, este principio desarrolla y a la vez trasciende la geometría artística de Brunelleschi y los brillantes descubrimientos de Newton y Maxwell sobre la naturaleza del color.

La Teoría Central completa, en la práctica, el análisis de la materia. Usándola, podemos *deducir* qué clases de núcleos atómicos, de átomos, de moléculas —y de estrellas— existen. Y podemos orquestar de manera fiable el comportamiento de grandes ensamblajes de estos elementos, para hacer transistores, láseres o Grandes Colisionadores de Hadrones. Las ecuaciones de la Teoría Central se han puesto a prueba con mucha más precisión, y bajo unas condiciones mucho más extremas, de lo que se requiere para sus aplicaciones en química, biología, ingeniería o astrofísica. Aunque por supuesto hay muchas cosas que no entendemos —¡mencionaré algunas importantes en un momento!—, sí que entendemos la Materia de la que estamos hechos y que encontramos en la vida normal (incluso si somos químicos, ingenieros o astrofísicos).

Pese a sus abrumadoras virtudes, la Teoría Central es imperfecta. De hecho, precisamente por ser una descripción fiel de la realidad, debemos, en pos de nuestra Pregunta, elevarla a los más altos niveles estéticos. Y al escrutarla de ese modo, la Teoría Central revela taras. Sus ecuaciones son asimétricas y contienen varias piezas conectadas con demasiada holgura. Más aún, la Teoría Central no explica las llamadas materia oscura y energía oscura. Aunque estas formas tenues de la materia son despreciables en nuestra vecindad inmediata, persisten en el vacío interestelar e intergaláctico, y por tanto llegan a dominar la masa total del universo. Por estas y otras razones, no podemos darnos por satisfechos.

Una vez que hemos degustado la belleza en el corazón del mundo, se nos ha abierto el apetito. En esta expedición no creo que haya una guía más prometedora que la propia belleza. Te propondré algunas pistas que insinúan posibilidades concretas para mejorar nuestra descripción de la naturaleza. Como aspiro a la conjectura inspirada, la belleza es mi inspiración. Me ha funcionado bien varias veces, como verás.

Variedades de belleza

Distintos artistas tienen distintos estilos. No esperamos hallar el color reluciente de Renoir en las sombras místicas de Rembrandt, ni la elegancia de Rafael en ninguno de los dos. La música de Mozart proviene por completo de un mundo diferente, la de los Beatles de otro, y la de Louis Armstrong de otro más. Del mismo modo, la belleza encarnada en el mundo físico es una forma particular de belleza. La naturaleza, como artista, tiene un estilo distintivo.

Para apreciar el arte de la naturaleza debemos introducirnos en su estilo con solidaridad. Galileo, siempre elocuente, lo expresó así:

La filosofía [la Naturaleza] está escrita en el gran libro que tenemos siempre delante de los ojos —me refiero al universo—, pero no podemos entenderlo si no aprendemos primero el lenguaje y captamos los símbolos en que está escrito. El libro está escrito en lenguaje matemático, y los símbolos son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin cuya ayuda resulta imposible comprender una sola palabra de él; sin las cuales uno merodea en vano por un laberinto oscuro.

Hoy hemos penetrado mucho más en el gran libro, y hemos descubierto que sus últimos capítulos utilizan un lenguaje más imaginativo y menos familiar que la geometría euclidianas que conocía Galileo. Dominar ese idioma con fluidez es el trabajo de una vida (o al menos de varios años en la facultad). Pero, así como una licenciatura en historia del arte no es un prerequisito para implicarse con el mejor arte del mundo y hallar en ello una experiencia profundamente gratificante, del mismo modo confío, en este libro, ayudar a implicarte con el arte de la naturaleza, haciendo su estilo accesible. Tu esfuerzo será recompensado, pues como Einstein podría haber dicho:

Sutil es el Señor, pero no malicioso.

Dos obsesiones son el sello del estilo artístico de la naturaleza:

- Simetría: amor por la armonía, el equilibrio y la proporción.
- Economía: satisfacción en producir efectos abundantes a partir de unos medios muy limitados.

Busca esos dos temas a medida que aparecen una y otra vez, crecen y se desarrollan a lo largo de nuestra narrativa y le dan unidad. Nuestra apreciación de ellos ha evolucionado desde la intuición y la ilusión hasta generar unos métodos precisos, poderosos y fructíferos.

Y ahora un descargo de responsabilidad. Hay muchas variedades de belleza que están poco representadas en el estilo de la naturaleza, según se expresa en su sistema operativo fundamental. Nuestro deleite en el cuerpo humano y nuestro interés por los retratos expresivos, nuestro amor a los animales y a los paisajes campestres, y muchas otras fuentes de belleza artística no entran en juego. La ciencia no lo es todo, a Dios gracias.

Conceptos y realidades; Mente y Materia

Nuestra Pregunta puede leerse en dos direcciones. La más obvia es como una pregunta sobre el mundo. Esa es la dirección que hemos subrayado hasta ahora. Pero la otra dirección es igualmente fascinante. Cuando averiguamos que *nuestro* sentido de la belleza cobra realidad en el mundo, estamos descubriendo algo sobre el mundo, pero también algo sobre nosotros mismos.

El reconocimiento humano de las leyes fundamentales de la naturaleza es un desarrollo reciente en la escala de tiempo evolutiva, e incluso en la histórica. Más aún, esas leyes se revelan solo después de operaciones complejas —mirar por sofisticados microscopios y telescopios, romper los átomos y sus núcleos, procesar largas cadenas de razonamientos matemáticos — que no vienen de manera espontánea. Nuestro sentido de la belleza no está, en ninguna forma muy directa, adaptado a los mecanismos fundamentales de la naturaleza. Y sin embargo no cabe duda de que nuestro sentido de la belleza se emociona con lo que descubrimos allí.

¿Cómo se explica esa armonía milagrosa entre Mente y Materia? Sin una explicación de ese milagro, nuestra Pregunta sigue siendo misteriosa. Este es un asunto que nuestra reflexión tratará repetidamente. Por ahora, dos breves anticipaciones a cuenta:

1. Los seres humanos somos, sobre todo, criaturas visuales. Nuestro sentido de la vista, por supuesto, y de muchas formas menos obvias nuestros modos más profundos de pensamiento, están condicionados por nuestra interacción con la luz. Cada uno de nosotros, por ejemplo, nace destinado a convertirse en un consumido, aunque inconsciente, profesional de la geometría proyectiva. Esa habilidad está programada en nuestro cerebro. Es lo que nos permite interpretar la imagen bidimensional que llega a nuestra retina como representación de un mundo de objetos en el espacio tridimensional.

Nuestro cerebro contiene módulos especializados que nos permiten construir, muy deprisa y sin esfuerzo consciente, una visión del mundo dinámica basada en objetos tridimensionales localizados en el espacio tridimensional. Hacemos esto empezando con dos imágenes bidimensionales en las retinas de nuestros ojos (que a su vez son el producto de rayos de luz emitidos o reflejados desde la superficie de los objetos externos, que se propagan hasta nosotros en líneas rectas). Reconstruir a partir de las imágenes que recibimos los objetos que las causan es un problema complicado de geometría proyectiva inversa. Dicho así, de hecho, es un problema imposible, porque no hay ni de lejos la información suficiente en las proyecciones para hacer una reconstrucción inequívoca. Un problema básico es que, ya para empezar la tarea, tenemos que separar los objetos del fondo (o del primer plano). Explotamos toda clase de trucos basados en las propiedades típicas de los objetos que encontramos, como el contraste de colores o de texturas y las fronteras distintivas, para lograrlo. Pero, incluso después de completar ese paso, nos queda un problema geométrico difícil, para el que la naturaleza nos ha dotado amablemente, en nuestro córtex visual, con un excelente procesador especializado.

Otra importante propiedad de la visión es que la luz llega a nosotros desde muy lejos, y nos abre una ventana a la astronomía. El movimiento regular aparente de las estrellas y el ligeramente menos regular de los planetas nos dan unas pistas tempranas de un universo regido por leyes, y

aportó la primera inspiración y campo de pruebas para la descripción matemática de la naturaleza. Como un buen libro de texto, contiene problemas de distintos niveles de dificultad.

En las partes de la física más modernas y avanzadas, aprendemos que la propia luz es una forma de materia, y de hecho que la materia en general, cuando se entiende a fondo, es extraordinariamente parecida a la luz. Así que, de nuevo, nuestro interés y experiencia con la luz, que está profundamente enraizado en nuestra naturaleza esencial, se demuestra afortunado.

Las criaturas que, como la mayoría de los mamíferos, perciben el mundo principalmente a través del sentido del olfato lo pasarían mucho peor para llegar a la física tal y como la conocemos, incluso si fueran muy inteligentes por lo demás. Uno puede imaginar que los perros, por ejemplo, evolucionaran hasta unas criaturas sociales extremadamente inteligentes, desarrollaran el lenguaje y experimentaran unas vidas intensas llenas de interés y alegría, pero privadas del tipo particular de curiosidad y perspectiva, basado en la experiencia visual, que conduce a nuestra clase de entendimiento profundo del mundo físico. Su mundo estaría lleno de reacciones y descomposiciones, tendrían grandes juegos de química, una cocina elaborada, afrodisíacos y, al modo de Proust, memorias evocadoras. Pero quizás no tanta geometría proyectiva ni astronomía. Comprendemos que el olfato es un sentido químico, y estamos empezando a entender los procesos moleculares que lo sustentan. Pero el problema «inverso» de reconstruir, a partir de los olores, las moléculas y sus leyes, y al final la física que conocemos, parece desesperadamente difícil.

Los pájaros, por otro lado, son criaturas visuales como nosotros. Y además su estilo de vida les daría una ventaja adicional sobre los humanos a la hora de iniciarse en la física. Porque los pájaros, con su libertad de vuelo, experimentan la simetría esencial del espacio tridimensional de una forma intuitiva que nos es ajena. También experimentan las regularidades básicas del movimiento, y especialmente el papel de la inercia, en su vida diaria, puesto que funcionan en un entorno casi carente de fricción. Los pájaros nacen, podemos decir, con

un conocimiento intuitivo de la mecánica clásica y la relatividad galileana, así como de la geometría. Si alguna especie de ave evolucionara hasta obtener una inteligencia altamente abstracta —es decir, si abandonaran su cabeza de chorlito—, su física se desarrollaría deprisa. Los humanos, por otro lado, tienen que desaprender la mecánica aristotélica lastrada por la fricción que utilizan en su vida diaria para alcanzar un conocimiento más profundo. ¡Históricamente eso supuso un enorme esfuerzo!

Los delfines, en su entorno acuoso, y los murciélagos, con su ecolocalización, nos ofrecen interesantes variaciones sobre esos temas. Pero no los desarrollaré aquí.

Un asunto filosófico general, ilustrado por estas consideraciones, es que el mundo no suministra su propia interpretación única. El mundo ofrece muchas posibilidades para los diferentes universos sensoriales, que apoyan unas interpretaciones muy diferentes del significado del mundo. En este sentido, lo que denominamos universo es ya un multiverso en gran medida.

2. Una percepción competente implica una inferencia sofisticada, porque la información que tomamos del mundo es muy parcial y está plagada de ruido. Pese a todos nuestros poderes innatos, también debemos aprender a ver mediante la interacción con el mundo, formulando expectativas y comparando nuestras predicciones con la realidad. Cuando nuestras predicciones resultan ser correctas, experimentamos placer y satisfacción. Esos mecanismos de recompensa alientan un aprendizaje logrado. También estimulan —en realidad *son*, en el fondo— nuestro sentido de la belleza.

Reuniendo las observaciones anteriores, descubrimos una explicación de por qué encontramos bellos los fenómenos interesantes (¡los fenómenos de los que podemos aprender!). Una consecuencia importante es que valoramos especialmente las experiencias que son sorprendentes, pero no demasiado sorprendentes. El reconocimiento rutinario y superficial no supone ningún desafío, y no será recompensado como

aprendizaje activo. Por otro lado, los patrones cuyo significado no podemos captar en absoluto tampoco nos aportan una experiencia gratificante; no son más que ruido.

Y en esto también somos afortunados, en que la naturaleza emplea, en sus mecanismos básicos, la simetría y la economía de medios. Porque estos principios, como nuestro entendimiento intuitivo de la luz, promueven la predicción exitosa y el aprendizaje. A partir de la apariencia de solo una parte de un objeto simétrico, podemos predecir (¡con éxito!) la apariencia del resto; a partir del comportamiento de las partes de los objetos naturales podemos predecir (¡a veces con éxito!) el comportamiento de los todos. La simetría y la economía de medios, por tanto, son exactamente la clase de cosas que estamos capacitados para experimentar como bellas.

Nuevas ideas e interpretaciones

Además de nuevas valoraciones de algunas ideas muy viejas y otras no tan viejas, encontrarás en este libro varias ideas nuevas y esenciales. Quisiera mencionar ahora algunas de las más importantes.

Mi presentación de la Teoría Central como geometría, y mis especulaciones sobre los siguientes pasos más allá de ella, son adaptaciones de mi trabajo técnico en física fundamental. Ese trabajo, por supuesto, desarrolla el trabajo de muchos otros. Mi utilización de campos de color como un ejemplo de las dimensiones extra, y mi explotación de las posibilidades que abren para ilustrar la simetría local, son (por todo lo que sé) nuevas.

Mi teoría de que la promoción del aprendizaje subyace a —y es la causa evolutiva de— nuestro sentido de la belleza en casos importantes, y la aplicación de esa teoría a la armonía musical, que ofrece una explicación racional para los descubrimientos musicales de Pitágoras, forman una constelación de ideas que he contemplado en privado durante mucho tiempo, pero que presento aquí en público por primera vez. No se admiten reclamaciones.

Mi explicación de la expansión de la percepción del color se basa en un programa en curso de investigación aplicada que, espero, conducirá al desarrollo de productos comerciales. Hay patentes solicitadas.

Me gustaría pensar que Niels Bohr habría aprobado mi amplia interpretación de la complementariedad, y hasta habría reconocido su paternidad... pero no estoy seguro de ello.

Pitágoras I: pensamiento y objeto

El Pitágoras en la sombra

Hubo una persona llamada Pitágoras que vivió y murió alrededor de 570-495 a. C., pero se sabe muy poco de él. O quizá se «sabe» un montón sobre él, pero la mayor parte es seguramente falsa, porque el rastro documental está repleto de contradicciones. Combina lo sublime, lo ridículo, lo increíble y lo simplemente estrafalario.

Se dijo de Pitágoras que era hijo de Apolo, que tenía un muslo de oro y que brillaba. Quizá defendía el vegetarianismo y quizá no. Entre sus dichos más notorios está el mandato de no comer alubias, porque «las alubias tienen alma». Sin embargo, varias fuentes cercanas en el tiempo niegan de manera explícita que dijera o creyera nada parecido. Más fiable resulta que Pitágoras creyera en la trasmigración de las almas, y que lo enseñara. Hay varias historias —todas dudosas, ciertamente— que parecen corroborarlo. Según Aulo Gelio, Pitágoras recordaba cuatro de sus vidas pasadas, entre ellas la que pasó como un bello cortesano llamado Alco. Jenófanes cuenta que Pitágoras, al oír los aullidos de un perro que estaba recibiendo una paliza, se apresuró a detenerla, asegurando que había reconocido la voz de un amigo fallecido. Pitágoras también, como haría san Francisco siglos después, predicaba a los animales. La «Enciclopedia Stanford de Filosofía» —un recurso en línea gratis y extremadamente valioso— lo resume así:

La imagen moderna y popular de Pitágoras es la de un maestro de las matemáticas y la ciencia. Las evidencias cercanas a su época muestran, sin embargo, que, aunque Pitágoras fue famoso en sus días e incluso ciento cienuenta años después, en la época de Platón y Aristóteles, no era en la matemática ni en la ciencia en lo que se basaba su fama. Pitágoras era famoso:

1. Como experto en el destino del alma después de la muerte, que enseñaba que el alma era inmortal y pasaba por una serie de reencarnaciones.
2. Como experto en el ritual religioso.
3. Como un remedio milagroso que tenía un muslo de oro y podía estar en dos sitios a la vez.
4. Como fundador de un estilo de vida estricto que preconizaba restricciones dietéticas y una autodisciplina rigurosa.

Unas cuantas cosas parecen claras. El Pitágoras histórico nació en la isla griega de Samos, viajó mucho y se convirtió en el inspirador y fundador de un movimiento religioso inusual. Su culto floreció brevemente en Crotona, sur de Italia, y desarrolló sucursales en otros lugares antes de ser reprimido en todas partes. Los pitagóricos formaban sociedades secretas, y en ellas se centraba la vida de los iniciados. Estas comunidades, que incluían tanto hombres como mujeres, proclamaban una especie de misticismo intelectual que a la mayoría de sus contemporáneos les parecía maravilloso, pero extraño y amenazador. Su visión del mundo se centraba en la veneración de los números y en la armonía musical, que según ellos reflejaba la estructura profunda de la realidad (como veremos, algo de razón tenían).

El Pitágoras real

Aquí está de nuevo la «Enciclopedia Stanford»:

La imagen de Pitágoras que emerge de las evidencias no es por tanto la de un matemático, que ofrecía demostraciones rigurosas, ni la de un científico, que hiciera experimentos para descubrir la naturaleza del mundo natural, sino más bien la de alguien que ve un significado especial y asigna una prominencia especial a las relaciones matemáticas que circulaban ampliamente.

Bertrand Russell fue más sucinto:

Una combinación de Einstein y Mary Baker Eddy.

Para los estudiosos de la biografía factual, uno de los mayores problemas es que los seguidores posteriores de Pitágoras atribuyeron sus ideas al propio Pitágoras. De esa forma esperaban revestir sus ideas de autoridad y a la vez, reforzando la autoridad de Pitágoras, promover su comunidad, que había sido fundada por él. De esta forma, unos magníficos descubrimientos en diferentes campos de las matemáticas, la física y la música, así como un inspirador misticismo, una filosofía seminal y una moralidad pura fueron todos representados como el legado de una sola figura casi divina. Esa figura formidable es, para nosotros, el Pitágoras *real*.

No es del todo inadecuado atribuir al (histórico) Pitágoras en la sombra algún mérito del Pitágoras real, porque los grandes logros del segundo en matemáticas y ciencia surgieron de la forma de vida que el primero inspiró, y de la comunidad que fundó.

(Los lectores inclinados a ello pueden trazar paralelos con las diferentes carreras en la vida y, después de ella, de otras grandes figuras religiosas...).

Gracias a Rafael, sabemos qué aspecto tenía el Pitágoras real. En la Lámina B* se le representa profundamente concentrado en escribir en un gran libro, y rodeado de admiradores.

Todas las Cosas son Número

Es difícil distinguir lo que está escribiendo Pitágoras, pero me gusta fantasear que es alguna versión de su credo más fundamental:

Todas las Cosas son Número.

También es difícil saber, a tanta distancia en el tiempo y el espacio, qué es exactamente lo que Pitágoras quería decir con eso. Así que tenemos que usar la imaginación.

El teorema de Pitágoras

Para empezar, Pitágoras estaba poderosamente impresionado por el teorema de Pitágoras. Tanto que, cuando lo descubrió, en un notable desliz de su vegetarianismo, ofreció una hecatombe —el sacrificio ritual de cien bueyes, seguido de una fiesta— a las musas, a modo de agradecimiento.

¿A qué tanto alboroto?

El teorema de Pitágoras es una afirmación sobre los triángulos rectángulos; es decir, triángulos que contienen un ángulo de 90° , o en otras palabras una esquina de un cuadrado. El teorema dice que, si levantas cuadrados sobre los tres lados del triángulo, la suma de las áreas de los dos cuadrados pequeños equivale al área del cuadrado grande. Un ejemplo clásico es el triángulo rectángulo 3-4-5, que se muestra en la Figura 1:

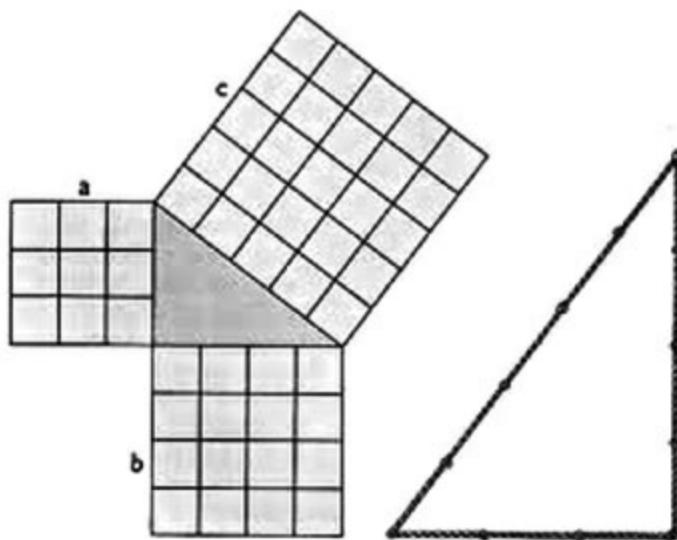


FIGURA 1. El triángulo rectángulo 3-4-5, un caso simple del teorema de Pitágoras.

Las áreas de los dos cuadrados pequeños son $3^2 = 9$ y $4^2 = 16$, como podemos ver, en el espíritu pitagórico, *contando* las subunidades. El área del cuadrado mayor es $5^2 = 25$. Y verificamos que $9 + 16 = 25$.

El teorema de Pitágoras ahora nos resulta familiar a la mayoría de la gente, aunque solo sea como un vago recuerdo de las clases de geometría del colegio. Pero si escuchas su mensaje como si volvieras a empezar, con los oídos de Pitágoras, por decirlo así, te das cuenta de que lo que dice es totalmente deslumbrante. Te dice que la *geometría* de los objetos incorpora

relaciones *numéricas* ocultas. Te dice, en otras palabras, que el Número describe, si no todas las cosas, al menos sí algo muy importante sobre la realidad física, en concreto los tamaños y las formas de los objetos que moran en ella.

Más tarde en esta reflexión trataremos con unos conceptos mucho más avanzados y sofisticados, y tendré que recurrir a metáforas y analogías para transmitir su significado. La alegría especial que uno encuentra en el pensamiento matemático preciso, cuando los conceptos definidos con nitidez encajan juntos a la perfección, se pierde con la *traducción*. Pero aquí tenemos la oportunidad de experimentar esa alegría especial. Parte de la magia del teorema de Pitágoras es que uno puede demostrarlo con una preparación mínima. Las mejores demostraciones son inolvidables, y su recuerdo perdura toda la vida. Han inspirado a Aldous Huxley y Albert Einstein —¡por no mencionar a Pitágoras!— y espero que te inspiren a ti.

La demostración de Guido

«¡Así de simple!»

Eso es lo que dice Guido, el joven héroe del relato de Aldous Huxley *El joven Arquímedes*, cuando describe su demostración del teorema de Pitágoras. La demostración de Guido se basa en las formas representadas en la Lámina C.

El juguete de Guido

Expliquemos lo que a Guido le resultaba obvio de un vistazo.

Cada una de las dos imágenes contiene cuatro triángulos de colores que son iguales en una y otra. Todos los triángulos de colores son rectángulos, y todos tienen el mismo tamaño. Digamos que el lado más pequeño tiene una longitud a , el de tamaño intermedio b , y el más largo (la hipotenusa) c . Entonces es fácil ver que el lado de cualquiera de los dos cuadrados grandes

(las dos imágenes totales) tiene una longitud $a + b$, y que esos dos cuadrados tienen la misma área. Por tanto, las partes no triangulares de las dos imágenes han de tener también áreas iguales.

Pero ¿qué son esas áreas iguales? En la primera imagen tenemos un cuadrado azul de lado a , y un cuadrado rojo de lado b . Sus áreas son a^2 y b^2 , y su área combinada es $a^2 + b^2$. En la segunda imagen tenemos un cuadrado gris de lado c . Su área es c^2 . Recordando el párrafo anterior, concluimos que

$$a^2 + b^2 = c^2$$

... ¡que es el teorema de Pitágoras!

La demostración (?) de Einstein

En sus *Notas autobiográficas*, Einstein recuerda:

Recuerdo que un tío me habló del teorema de Pitágoras antes de que el cuadernillo de geometría sagrada cayera en mis manos. Tras mucho esfuerzo conseguí «demostrar» el teorema basándome en triángulos similares; al hacerlo me pareció «evidente» que las relaciones de los lados de los triángulos rectángulos tendrían que venir determinadas por uno de los ángulos agudos.

No hay realmente el suficiente detalle en ese recuento para reconstruir la demostración de Einstein con certeza, pero aquí, en la Figura 2, presento mi mejor conjetura. Esta conjetura merece ser cierta, porque es la demostración más simple y más bella del teorema de Pitágoras. En particular, esta demostración clarifica de manera brillante por qué son los *cuadrados* de las longitudes los que están implicados en el teorema.

Una joya pulida

Empezamos con la observación de que los triángulos rectángulos que tienen un ángulo común φ son similares entre sí, en el sentido preciso de que puedes transformar uno en otro sin más que cambiar la escala (aumentarlo o

encogerlo). También: si cambiamos la escala del triángulo por un factor, entonces cambiamos su área por el cuadrado de ese factor.

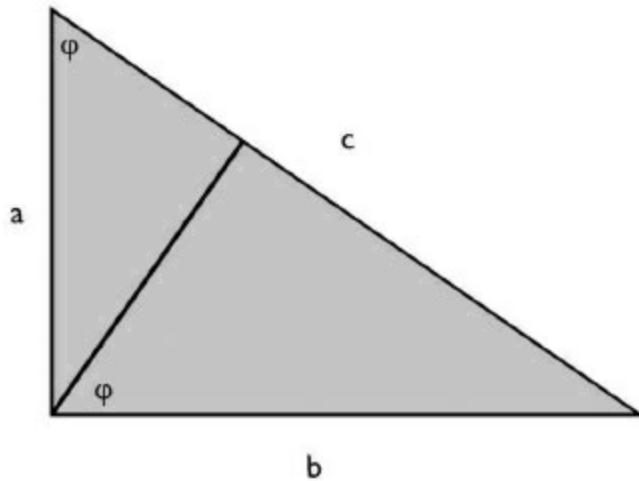


FIGURA 2. Una reconstrucción plausible de la demostración de Einstein a partir de sus *Notas autobiográficas*.

Ahora consideremos los tres triángulos rectángulos que aparecen en la Figura 2: la figura total y los dos sub-triángulos que contiene. Cada uno de ellos contiene el ángulo φ , de modo que son similares. Sus áreas son por tanto proporcionales a a^2 , b^2 , c^2 , yendo de menor a mayor. Pero, como los dos sub-triángulos suman el triángulo total, las áreas correspondientes deben sumar también, y por tanto

$$a^2 + b^2 = c^2$$

... ¡el teorema de Pitágoras salta de repente!

Una bella ironía

Supone una bella ironía que el teorema de Pitágoras se pueda usar para socavar su propia doctrina de que Todas las Cosas son Número.

Ese resultado escandaloso es el único resultado de la escuela pitagórica que no se atribuyó a Pitágoras, sino a su pupilo Hipaso. Poco después de su descubrimiento, Hipaso se ahogó en el mar. Si su muerte debe atribuirse a la ira de los dioses, o a la de los pitagóricos, es objeto de debate.

El razonamiento de Hipaso es muy inteligente, pero no demasiado complicado. Demos un paseo por él.

Consideremos un triángulo rectángulo isósceles, es decir, con los dos catetos iguales; en otras palabras, $a = b$. El teorema de Pitágoras nos dice que

$$2 \times a^2 = c^2$$

Ahora supongamos que las longitudes a y c son números enteros. Si *todas* las cosas son números, ¡más vale que lo sean! Pero hallaremos que eso es imposible.

Si tanto a como c son números pares, podemos considerar un triángulo similar de la mitad de tamaño. Y podemos seguir reduciéndolo hasta que alcanzamos un triángulo donde al menos uno de los dos (a, c) es impar.

Pero, sea cual sea nuestra elección, llegamos a una contradicción. Primero supongamos que c es impar. Entonces también lo es c^2 . Pero $2 \times a^2 = c^2$ es obviamente par, puesto que contiene un factor 2. De modo que no podemos tener $2 \times a^2 = c^2$, como nos dice el teorema de Pitágoras. ¡Contradicción!

Alternativamente, supongamos que c es par, digamos $c = 2 \times p$. Entonces $c^2 = 4 \times p^2$. Entonces el teorema de Pitágoras nos dice, después de dividir ambos lados de la ecuación por 2, que $a^2 = 2 \times p^2$. Y por tanto a no puede ser impar, por el mismo razonamiento que antes. ¡Contradicción!

Así que todas las cosas no pueden ser números enteros, después de todo. No puede haber un átomo de longitud, tal que todas las posibles longitudes sean múltiplos enteros de la longitud de ese átomo.

A los pitagóricos no parece haberseles ocurrido que se puede extraer una conclusión diferente, salvando así el Todas las Cosas son Número. Después de todo, se *puede* imaginar un mundo en el que el espacio se construya a partir de muchos átomos idénticos. De hecho, mis amigos Ed Fredkin y Stephen Wolfram defienden modelos de nuestro mundo basados en autómatas celulares,

que tienen exactamente esa propiedad. Y la pantalla de tu ordenador, basada en átomos de luz a los que llamamos píxeles, ¡demuestra que un mundo así puede parecer muy realista! Lógicamente, la conclusión correcta que debe extraerse es que, en ese mundo, no se pueden construir triángulos rectos isósceles exactos. Algo tiene que ir ligeramente mal. O bien el ángulo «recto» no tiene exactamente 90 grados, o bien los dos lados cortos no son exactamente iguales, o —como en la pantalla del ordenador— los lados de tus triángulos no serán exactamente rectos.

Esta no es la opción que eligieron los matemáticos griegos. En su lugar, consideraron la geometría en su forma continua más atractiva, donde permitimos coexistir los ángulos rectos exactos y la igualdad exacta de los lados. (Esta es también la opción que se ha demostrado más fructífera para la física, como aprenderemos de Newton.) Para hacerlo, tuvieron que dar prioridad a la geometría sobre la aritmética, porque —como hemos visto— los números enteros son inadecuados para describir incluso las figuras geométricas más simples. Así que abandonaron la letra, aunque no el espíritu, de *Todas las Cosas son Número*.

Pensamiento y objeto

Porque la verdadera esencia del credo de Pitágoras no es la afirmación literal de que el mundo debe encarnar números enteros, sino la convicción optimista de que el mundo debería encarnar *conceptos bellos*.

La lección por la que Hipaso pagó con su vida es que debemos estar dispuestos a aprender de la naturaleza cuáles son esos conceptos. En esta empresa, la humildad es obligatoria. La geometría no es menos bella que la aritmética. De hecho, resulta apropiada de una forma más natural a nuestros cerebros altamente visuales, y la mayoría de la gente la prefiere. Y la geometría no es menos conceptual, ni un mundo de la Mente menos puro, que la aritmética. Gran parte de la matemática de los antiguos griegos, epitomizada por los *Elementos* de Euclides, se dedicó a mostrar exactamente eso: que la geometría es un sistema de la *lógica*.

A medida que progresemos en nuestra reflexión, hallaremos que la naturaleza es inventiva en su lenguaje. La naturaleza amplía nuestra imaginación con nuevos tipos de números, nuevos tipos de geometría e incluso, en el mundo cuántico, nuevos tipos de lógica.

Pitágoras II: número y armonía

La esencia de cualquier instrumento de cuerda, ya sea la lira antigua o los modernos chelo, piano o guitarra, es la misma: producen sonido por el movimiento de cuerdas. La calidad exacta del sonido, o timbre, depende de muchos factores complejos, incluyendo la naturaleza del material del que está hecha la cuerda, la forma de las superficies —«tableros de sonido»— que vibran por simpatía y la manera en que la cuerda se pulse, se toque con un arco o se golpee con un martillo. Pero en todos los instrumentos hay un tono principal, o altura, que reconocemos como la nota que se está tocando. Pitágoras —el real— descubrió que esa nota obedece dos reglas extraordinarias. Esas reglas establecen conexiones directas entre los números, las propiedades del mundo físico y nuestro sentido de la armonía (que es un aspecto de la belleza).

La siguiente figura, que no es de Rafael, muestra a Pitágoras en acción, haciendo experimentos sobre la armonía.

Armonía, número y longitud: una conexión pasmosa

La primera regla de Pitágoras es una relación entre la longitud de la cuerda vibrante y nuestra percepción de su tono. La regla dice que dos copias del mismo tipo de cuerda, ambas sujetas a la misma tensión, producen tonos que suenan bien juntos precisamente cuando las longitudes de las cuerdas forman fracciones de números enteros pequeños. Así, por ejemplo, cuando la relación de longitudes es 1:2, los tonos forman una octava. Cuando la relación es 2:3, escuchamos la quinta; cuando la relación es 3:4, la cuarta. En notación musical (en la tonalidad de *do*), estas corresponden a tocar dos *do*, uno más agudo que

el otro, a tocar *do-sol*, o *do-fa*, respectivamente. La gente encuentra atractivas esas combinaciones de tonos. Son los principales bloques de construcción de la música clásica y de la mayoría del folk, el pop y el rock.



FIGURA 3: Un grabado de la Europa medieval que representa a Pitágoras trabajando en la armonía musical. Podemos inferir de la figura que Pitágoras escuchaba cómo variaban los sonidos producidos por el instrumento cuando él variaba dos cosas diferentes. Presionando una cuerda con firmeza en distintas posiciones, podía variar la longitud efectiva de la parte vibrante de la cuerda. Y cambiando el peso que estira la cuerda, podía variar su tensión.

Al aplicar la regla de Pitágoras, la longitud que debemos considerar es, por supuesto, la longitud eficaz, esto es, la longitud de la porción de cuerda que realmente vibra. Pisando la cuerda para crear una zona muerta, podemos cambiar el tono. Los guitarristas y los violonchelistas explotan esa posibilidad cuando «pisan» con los dedos de su mano izquierda. Cuando hacen eso están, lo sepan o no, reencarnando a Pitágoras. En el dibujo vemos a Pitágoras ajustando la longitud eficaz mediante una abrazadera acabada en punta, que es una técnica que permite una medición precisa.

Cuando los tonos suenan bien juntos, decimos que están en armonía, o que son concordantes. Lo que Pitágoras descubrió, por tanto, es que las armonías de tonos percibidas reflejan relaciones en un mundo que parece totalmente distinto: el mundo de los números.

Armonía, número y peso: una conexión asombrosa

La segunda regla de Pitágoras se refiere a la tensión de la cuerda. La tensión puede ajustarse, de manera controlada y fácil de medir, cargando la cuerda con distintas pesas, como muestra la Figura 3. Aquí el resultado es incluso más extraordinario. Los tonos están en armonía si las tensiones son fracciones de los *cuadrados* de los números enteros pequeños. A mayor tensión, mayor altura de la nota. Así, una relación de tensiones 1:4 genera la octava, y así sucesivamente. Cuando los músicos de cuerda afinan sus instrumentos antes de la actuación, estirando o relajando las cuerdas al girar sus clavijas, de nuevo vuelve Pitágoras.

Esta segunda relación es todavía más impresionante que la primera como evidencia de que las Cosas se ocultan en los Números. La relación está mejor escondida porque esos números deben ser procesados —elevados al cuadrado, para ser exactos— antes de que la relación se haga evidente. La impresión del descubrimiento es por tanto mayor. La relación también introduce el peso. Y el peso, de manera más inequívoca que la longitud, nos conecta con las Cosas del mundo material.

Descubrimiento y visión del mundo

Ahora hemos abordado tres grandes descubrimientos pitagóricos: el teorema de Pitágoras sobre los triángulos rectángulos y dos reglas de consonancia musical. En conjunto vinculan forma, tamaño, peso y armonía, con el nexo común siendo el Número.

Para los pitagóricos, esa trinidad de descubrimientos era más que suficiente para sujetar una visión mística del mundo. La vibración de las cuerdas es la fuente del sonido musical. Esas vibraciones no son más que movimientos periódicos; es decir, movimientos que se repiten a intervalos regulares. También vemos al Sol y los planetas moviéndose a intervalos regulares por el cielo, e inferimos su movimiento periódico en el espacio. Así que también ellos deben emitir sonido. Sus sonidos forman la Música de las Esferas, una música, que llena el cosmos.

A Pitágoras le gustaba cantar. También aseguraba, en realidad, escuchar la Música de las Esferas. Hay estudiosos modernos que especulan que el Pitágoras histórico sufría de tinnitus, o zumbar de oídos. El Pitágoras real, por supuesto, no tenía nada de eso.

En cualquier caso, el asunto general es que Todo es Número, y el Número sujeta la Armonía. Los pitagóricos, borrachos de matemáticas, habitaban un mundo lleno de armonía.

La frecuencia es el mensaje

Las reglas musicales de Pitágoras merecen, creo yo, considerarse las primeras leyes cuantitativas de la naturaleza descubiertas jamás. (Las regularidades astronómicas, empezando por la alternancia regular de noche y día, se habían percibido mucho antes. Mantener el calendario y leer el horóscopo, utilizando las matemáticas para predecir o reconstruir la posición del Sol, la Luna y los planetas, ya eran tecnologías significativas antes de que naciera Pitágoras. Pero las observaciones empíricas sobre objetos específicos son muy diferentes de las leyes generales de la naturaleza.)

Es irónico, por tanto, que todavía no entendamos por qué son ciertas. Hoy tenemos una comprensión mucho mejor de los procesos físicos implicados en la producción, transmisión y recepción del sonido, pero la conexión entre ese conocimiento y la percepción de «notas que suenan bien juntas» ha resultado esquiva hasta ahora. Creo que hay un conjunto prometedor de ideas al respecto. Esas ideas están cerca del asunto central de nuestra reflexión, porque (si son ciertas) elucidan un origen importante de nuestro sentido de la belleza.

Nuestra explicación del *porqué* de las reglas de Pitágoras tiene tres partes. La primera parte empieza con la cuerda vibrando y llega a nuestros tímpanos. La segunda parte empieza en el tímpano y llega a los impulsos nerviosos primarios. La tercera parte empieza con los pulsos nerviosos primarios y llega hasta la armonía percibida.

La vibración de una cuerda experimenta una serie de transformaciones antes de llegar a nuestra mente como un mensaje. La vibración perturba de manera directa el aire circundante, simplemente empujándolo. El sonido de una cuerda aislada es bastante débil, sin embargo. Los instrumentos musicales prácticos emplean tableros de resonancia, que responden a la vibración de la cuerda con sus propias vibraciones más fuertes. El movimiento del tablero de resonancia empuja el aire circundante de manera más robusta.

La perturbación del aire cerca de la cuerda o el tablero de resonancia adquiere entonces una vida propia, y se convierte en una perturbación que se propaga: una onda de sonido que se extiende hacia fuera en todas las direcciones. Toda onda de sonido es un ciclo recurrente de compresión y descompresión. El aire que vibra en cada región del espacio ejerce una presión en las regiones adyacentes y las hace vibrar a su vez. Finalmente, una porción de esa onda sonora, encauzada por la complicada geometría de la oreja, llega a una membrana llamada tímpano, unos pocos centímetros dentro de la oreja. Los tímpanos sirven como tableros de resonancia inversos, donde ahora las vibraciones del aire inducen el movimiento mecánico, y no al revés.

Las vibraciones del tímpano disparan más reacciones, como veremos en un momento. Antes de eso, sin embargo, tenemos que hacer una observación simple pero fundamental. Esta larga serie de transformaciones puede parecer desconcertante, y cabe preguntarse cómo de una señal significativa, que refleja lo que la cuerda estaba haciendo, puede extraerse tantos pasos después en la cadena. La clave es que, a través de todas esas transformaciones, hay una propiedad que permanece invariante. La velocidad de vibración o, como la llamamos, su *frecuencia*, ya se refiera a las vibraciones de la cuerda, el tablero de resonancia, el aire o el tímpano —o en los osículos, el fluido coclear, la membrana basilar y las células ciliadas más adelante en la cadena— permanece invariante. Porque en cada transformación los empujones y tirones de una etapa inducen las compresiones y descompresiones de la

siguiente, una por una, y por tanto las diferentes clases de perturbaciones están sincronizadas o, como decimos, «a tiempo». Podemos anticipar, por tanto, y hallaremos, que la cosa útil para detectar, si queremos que nuestra percepción refleje una propiedad de la vibración inicial, es la frecuencia de las vibraciones que finalmente dispara en nuestra cabeza.

El primer paso para entender las reglas de Pitágoras, por tanto, es expresarlas en términos de frecuencia. Hoy tenemos ecuaciones fiables de la mecánica que nos permiten calcular cómo cambia la frecuencia de vibración de una cuerda cuando variamos su longitud o su tensión. Utilizando esas ecuaciones, hallamos que la frecuencia cae en proporción a la longitud, y crece en proporción a la raíz cuadrada de la tensión. Por tanto, las reglas de Pitágoras, traducidas en frecuencia, hacen la misma afirmación simple. De ambos modos afirman que las notas suenan bien juntas si sus frecuencias están en fracciones de números enteros pequeños.

Una teoría de la armonía

Retomemos ahora nuestra historia, en la segunda etapa. El tímpano está asociado a un sistema de tres huesecillos, los osículos, que a su vez están unidos a una «ventana oval» membranosa que se abre a una estructura con forma de caracol, la cóclea. La cóclea es el órgano crucial para la audición, y tiene un papel aproximadamente análogo al que el ojo tiene en la visión. Está rellena de un fluido que se pone en movimiento por las vibraciones de la ventana oval. Inmersa en ese fluido está una membrana que se estrecha a lo largo de su longitud, la membrana basilar, que serpentea por las curvas del caracol coclear. Paralelo a la membrana basilar corre el órgano de Corti. El órgano de Corti es donde, finamente, el mensaje de la cuerda —después de muchas transformaciones— se traduce a impulsos nerviosos. Los detalles de todas estas transformaciones son complejos, y fascinantes para los expertos, pero el cuadro global es simple y no depende de esos detalles. El cuadro global es que la frecuencia de la vibración original se traduce en disparos neuronales que tienen la misma frecuencia.

Un aspecto importante de la traducción es especialmente bonito, y de espíritu pitagórico. Le valió a Georg von Békésy un premio Nobel en 1961. Puesto que la membrana basilar se va estrechando a lo largo de su longitud, sus distintas zonas prefieren oscilar a distintas velocidades. Las zonas más anchas tienen más inercia, así que prefieren vibrar más lento, a frecuencias más bajas, mientras que las zonas más estrechas prefieren vibrar a frecuencias más altas. (Un efecto similar es responsable de la diferencia general de tono entre las voces típicas de hombres y mujeres. En la pubertad, las cuerdas vocales del varón se ensanchan marcadamente, causando unas frecuencias más bajas de vibración y una voz más profunda.) De este modo, cuando un sonido, después de muchas tribulaciones, pone en movimiento al fluido circundante, la respuesta de la membrana basilar será diferente en diferentes lugares a lo largo de su longitud. Un tono de baja frecuencia pondrá las zonas más anchas en vigoroso movimiento, mientras que un tono de alta frecuencia pondrá las zonas más finas en vigoroso movimiento. De esta forma, ¡la información sobre la frecuencia se codifica como información sobre la posición!

Si la cóclea es el ojo de la audición, el órgano de Corti es la retina. El órgano de Corti corre paralelo a la membrana basilar, y cerca de ella. Su estructura es compleja en los detalles, pero a trazos gruesos consiste en células ciliadas y neuronas, a razón de una célula ciliada por neurona. El movimiento de la membrana basilar, acoplado mediante un fluido intermediario, ejerce fuerzas en las células ciliadas. Las células ciliadas se mueven en respuesta, y su movimiento desencadena pulsos eléctricos en las neuronas correspondientes. La frecuencia de los pulsos es la misma que la frecuencia de estimulación, que a su vez es la misma que la frecuencia del tono original. (Para expertos: los patrones de pulsos tienen ruido, pero contienen un fuerte componente a la frecuencia de la señal.)

Como el órgano de Corti linda con la membrana basilar, sus neuronas heredan de esa membrana la frecuencia dependiente de la posición. Esto es muy importante para nuestra percepción de los acordes, porque significa que, cuando varios tonos suenan simultáneamente, sus señales no se embarullan del todo. ¡Distintas neuronas responden preferentemente a distintos tonos! Este es el mecanismo fisiológico que nos permite hacer un trabajo tan bueno discriminando diferentes tonos.

En otras palabras, nuestros oídos internos siguen el consejo de Newton —y anticipan su análisis de la luz— al desempeñar un excelente análisis del sonido entrante como tonos puros. (Como veremos más adelante, nuestra capacidad sensorial para analizar las frecuencias de las señales contenidas en la luz, o en otras palabras los componentes de color de la luz, se basa en principios distintos y es mucho más deficiente.)

Esto compone la escena para la tercera fase de nuestra historia. En ella, las señales de las neuronas sensoriales primarias del órgano de Corti se combinan y se transfieren a las capas neuronales subsiguientes del cerebro. Aquí nuestro conocimiento es bastante menos preciso. Pero es solo aquí cuando podemos enfrentarnos finalmente con nuestra pregunta principal

*¿Por qué los tonos cuyas frecuencias están en proporción de números enteros pequeños suenan bien juntos?*¹

Consideremos lo que se ofrece al cerebro cuando dos sonidos de frecuencia diferente se tocan de manera simultánea. Entonces tenemos dos conjuntos de neuronas primarias que responden con fuerza, cada uno disparando con la misma frecuencia que las vibraciones de la cuerda que los excitan. Esas neuronas primarias disparan sus señales en dirección al cerebro, hacia niveles «superiores» de neuronas, donde sus señales se combinan y se integran.

Algunas de las neuronas del siguiente nivel recibirán *inputs* de ambos conjuntos activos de neuronas primarias. Si las frecuencias de las primarias están en proporción de números enteros pequeños, sus señales resultarán sincronizadas. (Para esta exposición simplificaremos la respuesta real, ignorando el ruido y tratándola como exactamente periódica.) Por ejemplo, si los tonos forman una octava, un conjunto disparará el doble de rápido que el otro, y todo disparo del conjunto más lento tendrá la misma relación predecible con el disparo del primero. Así, las neuronas sensibles a ambos obtendrán un patrón repetitivo que es predecible y fácil de interpretar. A partir de experiencias previas, o tal vez por un instinto innato, esas neuronas secundarias —o las neuronas posteriores que interpretan su comportamiento— «entenderán» la señal. Porque será posible anticipar el *input* futuro (es decir,

más repeticiones) de forma simple, y las predicciones simples del comportamiento futuro serán confirmadas, a lo largo de muchas vibraciones, hasta que el sonido cambie de carácter.

Hay que mencionar que las vibraciones sonoras que podemos oír tienen frecuencias desde unas pocas decenas hasta varios miles por segundo, de forma que incluso los sonidos breves producirán muchas repeticiones, excepto en el extremo de muy baja frecuencia. Y en el extremo de muy baja frecuencia nuestro sentido de la armonía se extingue, en coherencia con la línea de pensamiento que seguimos.

Los niveles más altos de neuronas, que combinan a los combinantes, necesitan un *input* coherente para progresar en su trabajo. De modo que, si nuestros combinantes están produciendo mensajes sensatos, y sobre todo si sus predicciones satisfacen la prueba del tiempo, a los niveles superiores les interesa recompensarlos con algún tipo de retroalimentación positiva, o al menos dejarles en paz. Y al contrario, si los combinantes están generando predicciones erróneas, los errores se propagarán a los niveles más altos, produciendo al final malestar y el deseo de hacerlo parar.

¿Cuándo generan los combinantes predicciones erróneas? Ocurre cuando las señales primarias están casi sincronizadas, pero no del todo. Porque entonces las vibraciones se refuerzan una a otra durante unos pocos ciclos, y los combinantes extrapolan ese patrón. Esperan que continúe, ¡pero no lo hace! Y en efecto son los tonos que están solo un poco fuera de fase —como *do* y *do#*, por ejemplo— los que suenan más penosos al tocarse juntos.

Si esta idea es correcta, entonces la base de armonía es la predicción exitosa en las fases iniciales de la percepción. (Este proceso de predicción no necesita implicar una atención consciente, y generalmente no la implica.) Ese éxito se experimenta como placer, o belleza. A la inversa, una predicción fracasada es una fuente de dolor, o fealdad. Un corolario es que, expandiendo nuestra experiencia, y nuestro aprendizaje, podemos llegar a escuchar armonías que antes permanecían ocultas para nosotros, y a retirar así las fuentes de dolor.

Históricamente, en la música occidental, la paleta de combinaciones aceptables de notas se ha expandido con el tiempo. Los individuos también pueden aprender, exponiéndose a ellas, a disfrutar de combinaciones de tonos

que al principio parecen desagradables. De hecho, si estamos hechos para disfrutar de *aprender* a hacer predicciones exitosas, las predicciones que surgen de forma demasiado fácil no generarán el mayor placer posible, que requiere también novedades.

Platón I: estructura por simetría; sólidos platónicos

Los sólidos platónicos están revestidos de un aura mágica. Han sido, y son, objetos para conjurar. Se remontan a las profundidades de la prehistoria humana, y persisten como generadores de buena o mala suerte en algunos de los juegos más complejos, en especial Dungeons & Dragons. Su mística ha inspirado, además, algunos de los episodios más fructíferos en el desarrollo de las matemáticas y la ciencia. Una reflexión digna sobre la belleza encarnada debe detenerse en ellos.

En su *Melancolía I* (Figura 4), Alberto Durero alude a la seducción de los sólidos regulares, aunque el sólido que aparece no es exactamente un sólido platónico. (Técnicamente, es un trapezoedro triangular truncado. Puede construirse estirando los lados de un octaedro de una manera peculiar.) Quizá la filósofa está melancólica porque no puede entender por qué un siniestro murciélagos ha arrojado ese sólido concreto, no exactamente platónico, en su estudio, en lugar de un ejemplo directo.



FIGURA 4. La *Melancolía I* de Durero. Representa un sólido platónico truncado, un cuadrado muy mágico y muchos otros símbolos esotéricos. Para mí, capta bien las frustraciones que yo mismo experimento a menudo cuando utilizo el pensamiento puro para comprender la realidad. Por fortuna, no siempre ocurre así.

Polígonos regulares

Para apreciar los sólidos platónicos, empecemos con algo más simple: sus análogos bidimensionales más cercanos, los polígonos regulares. Un polígono regular es una figura plana con todos los lados iguales, que se encuentran a ángulos iguales. El polígono regular más simple, con tres lados, es un triángulo equilátero. Después tenemos los cuadrados, con cuatro lados. Luego están los pentágonos regulares (el símbolo elegido por los pitagóricos, y también la planta de un famoso cuartel general militar), los hexágonos (la unidad de las colmenas de las abejas y, como veremos, del grafeno), los heptágonos (algunas monedas), los octógonos (las señales de *stop*), los nonágonos... La serie continúa indefinidamente: para cada número entero, empezando por el tres, hay un único polígono regular. En cada caso, el número de vértices es igual al número de lados. También podemos considerar el círculo como un caso límite de polígono regular, donde el número de lados es infinito.

Los polígonos regulares capturan, en algún sentido intuitivo, la noción de regularidad ideal para los «átomos» planos. Nos servirán como átomos conceptuales, a partir de los cuales construimos unas ideas de orden y simetría cada vez más ricas y más complejas.

Los sólidos platónicos

Cuando pasamos de las figuras planas a las sólidas, en busca de la máxima regularidad, podemos generalizar los polígonos regulares de varias maneras. Una elección muy natural, que resulta ser la más fructífera, conduce a los sólidos platónicos. Lo que pedimos son cuerpos sólidos cuyas caras son polígonos regulares, todos idénticos, que se encuentran de manera idéntica en cada vértice. Entonces, en vez de una serie infinita de soluciones, ¡hallamos exactamente cinco!

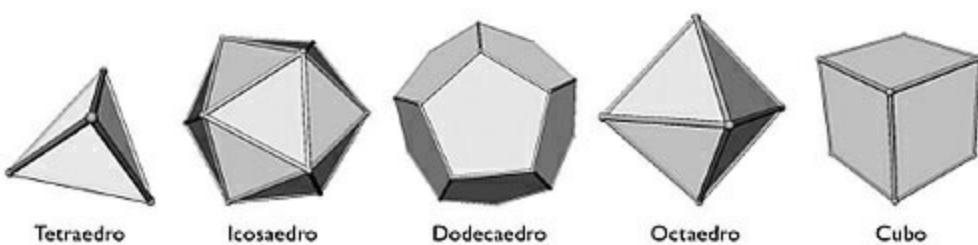


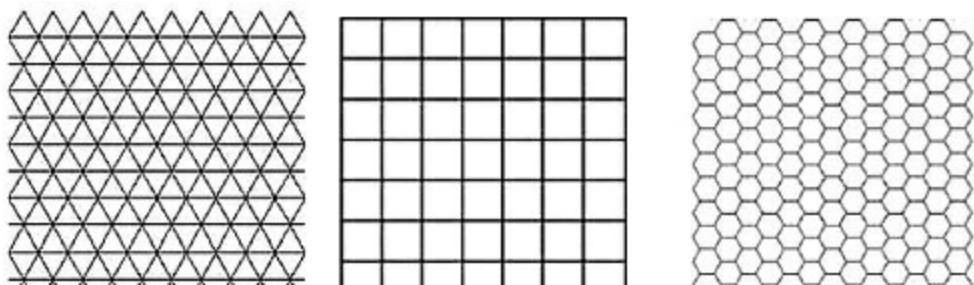
Figura 5. Los cinco sólidos platónicos: objetos para conjurar.

Estos cinco sólidos platónicos son:²

- El *tetraedro*, con cuatro caras triangulares, cuatro vértices y tres caras que se juntan en cada vértice.
- El *octaedro*, con ocho caras triangulares, seis vértices y cuatro caras que se juntan en cada vértice.
- El *icosaedro*, con veinte caras triangulares, doce vértices y cinco caras que se juntan en cada vértice.
- El *dodecaedro*, con doce caras pentagonales, veinte vértices y tres caras que se juntan en cada vértice.
- El *cubo*, con seis caras cuadradas, ocho vértices y tres caras que se juntan en cada vértice.

La existencia de estos cinco sólidos es fácil de captar, ya que se pueden imaginar y construir modelos sin gran dificultad. Pero ¿por qué solo hay esos cinco? (¿O es que hay otros?)

Para meter la cabeza en esa pregunta, nos damos cuenta de que los vértices del tetraedro, el octaedro y el icosaedro presentan tres, cuatro y cinco triángulos juntándose, y nos preguntamos: ¿qué pasa si continuamos con seis? Entonces percibimos que seis triángulos equiláteros que comparten un vértice *yacen planos*. Repetir ese bloque de construcción plano no nos permitirá completar una figura finita, que envuelva un volumen sólido. En vez de eso, conduce a una disección infinita de un plano, como se ve en la Figura 6:



Hijos pródigos platónicos

FIGURA 6. Las tres superficies infinitas platónicas. Solo se muestran unas porciones finitas de ellas. Estas tres disecciones regulares del plano pueden (y deben) considerarse familiares de los sólidos platónicos tradicionales: son sus hermanos pródigos que se van y nunca vuelven a casa.

Encontramos resultados similares si juntamos cuatro cuadrados, o tres hexágonos. Estas tres disecciones regulares del plano son unos suplementos dignos de los sólidos platónicos. Los encontraremos encarnados en el microcosmos (Figura 29)

Si intentamos juntar más de seis triángulos equiláteros, más de cuatro cuadrados, o más de tres de cualquiera de los polígonos de más lados, nos quedamos sin espacio: simplemente, no podemos acomodar los ángulos acumulados. Y por tanto los cinco sólidos platónicos son los únicos sólidos regulares finitos.

Es extraordinario que un número finito específico —esto es, cinco— emerja de consideraciones de regularidad geométrica y simetría. La regularidad y la simetría son cosas naturales y bellas que considerar, pero no tienen una conexión directa u obvia con números específicos. Platón interpretó esta emergencia profunda de una manera asombrosamente creativa, como veremos.

Prehistoria

Ocurre a menudo que la gente famosa se lleva el mérito por los descubrimientos de otros. Se trata del «efecto Mateo» identificado por el sociólogo Robert Merton, basado en esta observación del Evangelio según San Mateo:

Porque al que tiene se le dará más y tendrá en abundancia, pero al que no tiene se le quitará aun lo que tiene.

Y así es para los sólidos platónicos.

En el Museo Ashmoleano de la Universidad de Oxford se puede ver un exhibidor³ con cinco piedras talladas procedentes de Escocia y datadas de 2000 a. C. que parecen ser materializaciones de los sólidos platónicos

(aunque algunos estudiosos lo debaten). Lo más probable es que se utilizaran en algún tipo de juego de dados. Imaginemos unos hombres de las cavernas apiñados alrededor del fuego comunal, absortos en una versión paleolítica de Dungeons & Dragons. Pero es probable que fuera un contemporáneo de Platón, Teeteto (417-369 a. C.), quien *probara* matemáticamente por primera vez que esos cinco cuerpos son los únicos sólidos regulares posibles. No está claro hasta qué punto Teeteto fue inspirado por Platón, o viceversa, o si había algo en el aire ateniense que ambos respiraban. En cualquier caso, los sólidos platónicos recibieron ese nombre porque Platón los utilizó creativamente, en un trabajo de genio imaginativo, para construir una teoría visionaria del mundo físico.



FIGURA 7. Anticipaciones preplatónicas de los sólidos platónicos, probablemente utilizados en juegos de dados cerca de 2000 a. C.

Retrocediendo mucho más, percibimos ahora que algunas de las criaturas más simples de la biosfera, incluidos los virus y las diatomeas (que no son pares de átomos, sino unas algas marinas que suelen desarrollar complejos exoesqueletos platónicos), no solo «descubrieron», sino que encarnaron literalmente los sólidos platónicos mucho antes de que el ser humano llegara a la Tierra. El herpesvirus, el virus de la hepatitis B, el virus del sida y muchos otros bichos asquerosos tienen la forma del icosaedro o del dodecaedro. Empaquetan su material genético —sea ADN o ARN— en exoesqueletos de

proteínas, que determinan su forma externa, como se ve en la Lámina D. El exoesqueleto de la imagen lleva un código de colores donde los colores idénticos significan piezas de construcción idénticas. Los tríos de pentágonos distintivos del dodecaedro saltan a la vista. Si juntamos los centros de las regiones azules con líneas rectas, emerge el icosaedro.

Las criaturas microscópicas más complejas, incluidos los radiolarios retratados tan amorosamente por Ernst Haeckel en su maravilloso libro *Kunstformen der Natur* («Obras de arte de la naturaleza»), también encarnan los sólidos platónicos. En la Figura 8, lo que vemos son los intrincados exoesqueletos de sílice de esos organismos de una sola célula. Los radiolarios son una forma de vida muy antigua, representados entre los primeros fósiles. Siguen prosperando en los océanos actuales. Cada uno de los cinco sólidos platónicos se materializa en varias especies. Algunos nombres de esas especies engloban los de las formas, como *Circoporus octahedrus*, *Circogonia icosahedra* y *Circorrhema dodecahedra*.

La inspiración de Euclides

Los *Elementos* de Euclides es, con mucha diferencia, el mejor libro de texto de todos los tiempos. Trajo sistema y rigor a la geometría. Desde una perspectiva más amplia, estableció, por ejemplo, el método de Análisis y Síntesis en el dominio de las ideas.

Análisis y Síntesis es la formulación del «reduccionismo» favorita de Newton, y de mí mismo. Aquí está Newton:

Mediante esta forma de Análisis podemos proceder de los compuestos a los ingredientes, y de los movimientos a las fuerzas que los producen; y en general de los efectos a sus causas, y de las causas particulares a otras más generales, hasta que el argumento acaba en la más general. Ese es el método de Análisis: y la Síntesis consiste en asumir las causas descubiertas, y establecidas como principios, y explicar mediante ellas los fenómenos que proceden de ellas, y demostrar las explicaciones.

Esta estrategia camina paralela al enfoque de la geometría de Euclides, donde parte de los *axiomas* simples e intuitivos para deducir unas consecuencias fértiles y sorprendentes. El gran *Principia* de Newton, el documento fundacional de la moderna física matemática, también sigue el estilo expositivo de Euclides, procediendo de axiomas a resultados importantes paso a paso, a través de una construcción lógica.

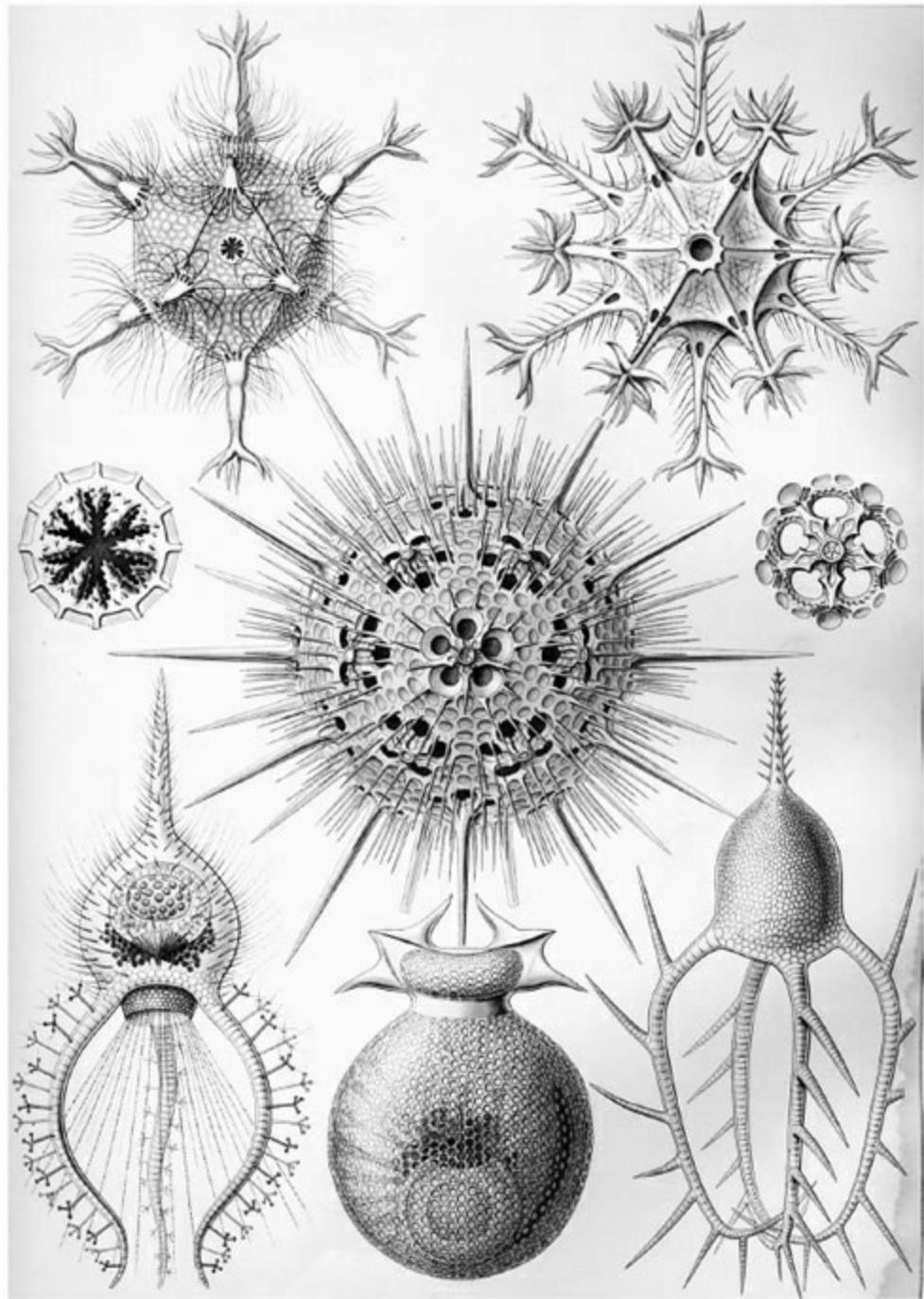


FIGURA 8. Los radiolarios se visualizan con un modesto microscopio. Sus exoesqueletos exhiben a menudo la simetría de los sólidos platónicos.

Es importante subrayar que los axiomas (o las leyes de la física) no te dicen qué hacer con ellos. Encadenándolos uno tras otro sin propósito, es fácil generar hordas de verdades inútiles y poco memorables; como una obra de

teatro o una pieza musical que vaga sin rumbo y no llega a ninguna parte. Como han descubierto quienes han intentado utilizar la inteligencia artificial para hacer matemáticas creativas, identificar los *objetivos* suele ser el reto más difícil. Con un objetivo que merezca la pena en mente, resulta más fácil hallar los medios para alcanzarlo. Mi galleta de la fortuna favorita de todos los tiempos resumía esto de manera brillante:

El trabajo te enseñará cómo hacerlo.

También, desde luego, por lo que toca a la presentación, resulta atractivo para los estudiantes y los lectores potenciales tener a la vista un objetivo inspirador; e impresionante para ellos percibir, desde el principio, que tienen por delante la experiencia de una proeza asombrosa de construcción que edifica, mediante pasos inexorables, desde los axiomas «obvios» hasta unas conclusiones en absoluto obvias.

Entonces: ¿cuál era el objetivo de Euclides en los *Elementos*? El decimotercero y último volumen de esa obra maestra concluye con unas construcciones de los cinco sólidos platónicos, y con una demostración de que solo hay cinco. Me resulta agradable —y convincente— pensar que Euclides tenía esta conclusión en mente cuando empezó a esbozar la obra, y que trabajó hacia ello. En todo caso, es una conclusión adecuada y gratificante.

Los sólidos platónicos como átomos

Los antiguos griegos reconocieron cuatro bloques de construcción, o elementos, del mundo material: fuego, agua, tierra y aire. Quizá te des cuenta de que cuatro, el número de elementos, está cerca de cinco, el número de sólidos regulares. ¡Platón se dio cuenta, desde luego! En su influyente, visionario e inescrutable *Timeo* puedes encontrar una teoría de los elementos basada en los sólidos. Aquí viene:

Cada uno de los elementos se construye con una variedad diferente de átomo. Los átomos toman la forma de sólidos platónicos. Los átomos de fuego son tetraedros, los átomos de agua son icosaedros, los átomos de tierra son cubos y los átomos de aire son octaedros.

Hay cierta plausibilidad en estas asignaciones. Tienen poder explicativo. Los átomos de aire tienen puntas agudas, lo que explica por qué el contacto con el fuego es doloroso. Los átomos de agua son los más lisos y redondeados, de modo que pueden fluir uno alrededor del otro de manera suave. Los átomos de tierra pueden empaquetarse muy juntos, y llenar el espacio sin dejar huecos. El aire, siendo a la vez caliente y húmedo, presenta unos átomos intermedios entre los de fuego y agua.

Sin embargo, aunque cinco está cerca de cuatro, no es del todo igual a este, así que no puede darse un encaje perfecto entre los sólidos regulares, considerados como átomos, y los elementos. Un pensador meramente brillante podría haberse desalentado por esa dificultad, pero Platón, un genio, no se dejó desanimar. Se lo tomó como un reto y una oportunidad. El sólido regular restante, el dodecaedro, propuso, sí que figura en la construcción del Creador, pero no como un átomo. No, el dodecaedro no es un mero átomo: es la forma del universo en su conjunto.

Aristóteles, que estaba totalmente decidido a superar a Platón, propuso una variación de la teoría más conservadora e intelectualmente consistente. Dos de las grandes ideas más influyentes del filósofo fueron: que la Luna, los planetas y las estrellas habitan un reino celestial hecho de un material diferente de los que encontramos en el mundo corriente; y que «la naturaleza aborrece el vacío», de modo que los espacios celestiales no pueden estar vacíos. Así que la consistencia requería un quinto elemento, o quintaesencia, diferente de tierra, aire, fuego y agua para llenar el reino celeste. Los dodecaedros, por tanto, encuentran su lugar como los átomos de la quintaesencia, o el éter.

Es difícil hoy estar de acuerdo con los detalles de esas teorías, en cualquier versión. No hemos encontrado útil, en ciencia, analizar el mundo en términos de esos cuatro (o cinco) elementos. Ni los átomos modernos son cuerpos duros y sólidos, menos aún materializaciones de los sólidos platónicos. La teoría de los elementos de Platón, vista desde la perspectiva actual, es a la vez grosera y, en sus detalles, rematadamente errónea.

Estructura por simetría

Y sin embargo, aunque fracasa como teoría científica, la visión de Platón tiene éxito como profecía y, me atrevería a decir, como una obra de arte intelectual. Para apreciar esas virtudes más amplias, tenemos que alejarnos de los detalles y mirar al gran cuadro. La intuición más profunda, nuclear, de la visión de Platón sobre el mundo físico es que el mundo físico debe, de un modo fundamental, encarnar conceptos bellos. Y esta belleza tiene que ser de un tipo muy especial: la belleza de la regularidad matemática, de la simetría perfecta. Para Platón, como para Pitágoras, esa intuición era al mismo tiempo una fe, un anhelo y un principio rector. Ambos buscaban armonizar Mente y Materia mostrando que la Materia se construye con los productos más puros de la Mente.

Es importante destacar que Platón empujó sus ideas más allá del nivel de las generalidades filosóficas para hacer propuestas específicas sobre qué es la materia. Sus ideas específicas, aunque erróneas, no caen en la categoría ignominiosa de «ni siquiera erróneas». Platón incluso hizo algunos gestos en la dirección de comparar su teoría con la realidad, como hemos visto. El fuego duele porque los tetraedros tienen puntas agudas, el agua fluye porque los icosaedros se deslizan uno sobre otro con facilidad, y así sucesivamente. En su diálogo *Timeo*, donde todo esto se desarrolla en detalle, también puedes encontrar algunas explicaciones caprichosas de lo que podríamos llamar reacciones químicas y propiedades de los materiales compuestos (es decir, no elementales) basadas en la geometría de los átomos. Pero estos esfuerzos de usar y tirar se quedan tristemente cortos para cualquier cosa que pudiéramos sentirnos tentados de considerar una comprobación experimental seria de una teoría científica, y más lejos aún de la explotación de la perspicacia científica con propósitos prácticos.

Con todo, la visión de Platón anticipa las modernas ideas que ahora están en la vanguardia del pensamiento científico, de varias maneras.

Aunque los bloques de construcción de la materia que propuso Platón no son los que conocemos hoy, la idea de que *hay* solo unas pocas clases de bloques de construcción, que existen en muchas copias idénticas, sigue siendo fundamental.

Más allá de ese nivel de vaga inspiración, la estrategia más específica de la visión de Platón, derivar *estructura* de la *simetría*, resuena a lo largo de las épocas. Nos conduce a un pequeño número de estructuras especiales a partir de consideraciones puramente matemáticas —consideraciones de simetría— y se las propone a la naturaleza como elementos candidatos para su diseño. El tipo de simetría matemática que invocaba Platón, para llegar a su lista de bloques de construcción, es algo diferente de la simetría que utilizamos hoy. Pero la idea de que *hay* simetría en los cimientos de la naturaleza ha llegado a dominar nuestra comprensión de la realidad física. La inverosímil idea de que *la simetría dicta la estructura* —que se pueden usar requerimientos exigentes de perfección matemática para converger en una pequeña lista de posibles materializaciones, y luego usar la lista como un manual de construcción para nuestro modelo del mundo— se ha convertido, en los confines aún por cartografiar de lo desconocido, la estrella que nos guía. Es una idea casi blasfema de pura audacia, pues pretende que podemos descifrar los métodos de trabajo del Artesano, e indica precisamente cómo hacerlo. Y, como veremos, ha resultado ser profundamente correcta.

Platón usaba la palabra «demiurgo» para denotar al Creador del mundo físico tal y como lo conocemos. «Artesano» es una traducción convencional. La palabra ha sido elegida con cuidado. Refleja la creencia de Platón de que el mundo físico no es la realidad última. Al contrario, hay un mundo eterno, intemporal, de las Ideas, que existe antes, e independientemente, de cualquier encarnación necesariamente imperfecta de ellas. Una Inteligencia inquieta y artística —el Artesano— fabrica sus creaciones a partir de las Ideas, usándolas como moldes.

El *Timeo* no es fácil de interpretar, y puede resultar tentador tomar la oscuridad por profundidad. Dicho lo cual, a mí me parece interesante e inspirador que Platón no se detenga en los sólidos platónicos, sino que considere cómo los átomos de esas formas pueden a su vez construirse, como objetos físicos, a partir de triángulos más primitivos. Los detalles, por supuesto, son «ni siquiera erróneos», pero el instinto de tomarse en serio su modelo, hablar en su lenguaje y empujarlo hasta el límite es profundamente correcto. La idea de que los átomos pueden tener subcomponentes anticipa la ambición moderna de analizar cada vez más hondo. Y la idea de que esos

subcomponentes tal vez no existan normalmente como objetos separados, y que solo puedan hallarse formando parte de objetos más complejos, es una posibilidad materializada en los actuales quarks y gluones, confinados eternamente en el interior de los núcleos atómicos.

Por encima de todo, encontramos en las especulaciones de Platón la idea central de nuestra reflexión: la idea de que el mundo, en su estructura más profunda, encarna belleza. Ese es el espíritu que anima las conjeturas de Platón. Propone que las estructuras más básicas del mundo —sus átomos— son encarnaciones de unos conceptos puros que pueden ser descubiertos y articulados por la Mente pura.

Economía de medios

Volviendo a los virus: ¿dónde aprendieron *ellos* su geometría?

Este es un caso de simplicidad disfrazada de sofisticación o, dicho con más precisión, de reglas simples que dan lugar a estructuras de apariencia compleja que, al pensarlo mejor, se vuelven idealmente simples. La clave es que el ADN de los virus, que debe instruirles en todas las facetas de su existencia, tiene un tamaño muy limitado. Para economizar en la longitud de ese manual de construcción, conviene fabricar el producto a partir de partes simples, idénticas e idénticamente ensambladas. Ya hemos oído esa canción: «partes simples, idénticas e idénticamente ensambladas» ¡es justo la definición de un sólido platónico! Puesto que la parte genera el todo, el virus no necesita «saber» de dodecaedros ni de icosaedros, sino solo de triángulos, y de una regla o dos para encajar unos con otros. Son los cuerpos más diversos, irregulares y superficialmente aleatorios —como el cuerpo humano— los que requieren unas instrucciones de ensamblaje más detalladas. La simetría emerge como la estructura por defecto cuando la información y los recursos son limitados.

El joven Kepler y la Música de las Esferas

Dos milenios después del trabajo de Platón, el joven Johannes Kepler halló en él su vocación. También aquí el número 5 fue central. Kepler, un converso precoz y apasionado por la idea de Copérnico de poner el Sol en el centro de la creación, buscaba entender la estructura del Sistema Solar. En aquel tiempo se conocían seis planetas: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. Seis, como habrás notado, está muy cerca de cinco. ¿Coincidencia? Kepler pensaba que no. ¿Qué puede ser más digno del Creador que utilizar, al diseñar la creación, los objetos geométricos más perfectos?

Copérnico, como Ptolomeo, basó su astronomía en el movimiento circular. Esto fue otro aborto espontáneo de la belleza, respaldado (y en gran medida engendrado) por Platón y Aristóteles. Solo la figura más perfecta —el círculo— podía ser digno de la creación. Se suponía que los planetas eran transportados en esferas celestiales. Copérnico y Ptolomeo tenían distintos puntos de vista sobre dónde poner el centro de esas esferas (el Sol, o la Tierra), pero ambos dieron por hecha su existencia, y así lo hizo también el joven Kepler. Así que Kepler consideraba que había seis grandes esferas centradas en el Sol. Y se preguntó: ¿por qué seis? ¿Y por qué tienen los tamaños que tienen?

La respuesta le asaltó a Kepler un día mientras daba una clase introductoria de astronomía. Uno puede circunscribir un sólido platónico diferente alrededor de cada una de las primeras cinco esferas, e inscribirlo dentro de la siguiente. ¡Por tanto los cinco sólidos platónicos pueden mediar entre seis esferas! El sistema solo funcionará, sin embargo, si las esferas tienen los tamaños adecuados. De esta forma, Kepler podía predecir las distancias relativas entre los distintos planetas y el Sol. Convencido de que había hallado el plan de Dios, Kepler anunció su descubrimiento en un libro exultante, *Mysterium cosmographicum*, repleto de citas como esta:

Me siento transportado y poseído por una euforia inenarrable ante el espectáculo divino de la armonía celestial.

Y esta:

El mismo Dios era demasiado bondadoso para permanecer ocioso, y empezó a jugar a las firmas, firmando su imagen en el mundo; por tanto me arriesgo a pensar que toda la naturaleza y el cielo elegante están simbolizados en el arte de la geometría.

Se trata en verdad de un sistema precioso, como se puede ver en el modelo, construido de forma espléndida, de la Figura 9.

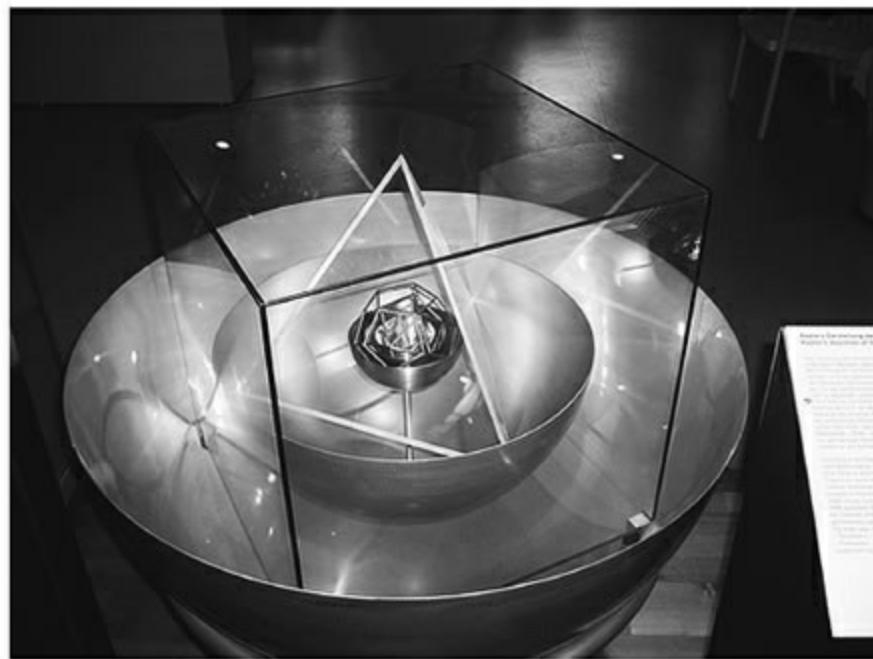


FIGURA 9. Los sólidos platónicos inspiraron a Kepler a proponer un modelo del tamaño y la forma del Sistema Solar, que se representa aquí. Los planetas son transportados por las revoluciones de esferas celestes cuyo espaciado se controla por superficies platónicas interpuestas entre ellas a modo de andamiaje.

Es evidente que Kepler se había hecho a sí mismo, y creyó que había respondido, nuestra Pregunta: el mundo *sí* que encarna belleza, muy en la línea de lo que Platón había anticipado. Luego proseguía tratando, en todo detalle, la naturaleza precisa de la música emitida por esas esferas giratorias... ¡y escribió la partitura!

El entusiasmo de Kepler le condujo a una vida llena de infortunios, tanto personales como profesionales. Vivió cerca del centro del vórtice turbulento de guerra, religión y política que barrió Europa central después de la Reforma. Su madre fue juzgada por bruja. Y su esfuerzo honrado y laborioso para describir el movimiento de los planetas de manera precisa acabó, debido a sus propios descubrimientos, por derrocar su sueño juvenil. Porque los planetas no describen círculos, sino elipses (primera ley de Kepler), y el Sol no está en el centro de esas elipses (para expertos: está en uno de sus focos). Al final

emergieron bellezas más profundas del retrato maduro y más preciso que hizo Kepler de la naturaleza, pero eran muy diferentes de los sueños de su juventud, y él no vivió para verlos.

Verdades profundas

El gran físico danés Niels Bohr (1885-1962), una figura fundadora de la teoría cuántica y autor del principio de complementariedad que destacaremos más adelante en el libro, apreciaba mucho el concepto que él llamaba «verdad profunda». Es un buen ejemplo de la propuesta de Ludwig Wittgenstein de que toda la filosofía puede, y seguramente debe, expresarse en forma de chistes.

Según Bohr, las proposiciones ordinarias se agotan en su significado literal, y habitualmente lo contrario de una verdad es una falsedad. Las proposiciones profundas, sin embargo, tienen un significado que penetra debajo de su superficie. Se puede reconocer una verdad profunda por la propiedad de que su contraria también es una verdad profunda. En este sentido, la sobria conclusión

El mundo, ay, no está hecho según principios matemáticos en la forma que Platón predijo

... expresa una verdad profunda. Al igual que, desde luego, hace su contraria:

El mundo *está* hecho según principios matemáticos, como Platón predijo.

La Última cena de Dalí

Parece apropiado concluir esta subreflexión con una obra de arte moderna que se aprovecha de sus temas.

La Lámina E, la obra maestra de Salvador Dalí *El sacramento de la última cena*, contiene muchos temas geométricos ocultos. Pero de esos temas, el más extraño y llamativo es la aparición de varios pentágonos, grandes pero solo parcialmente representados, que se ciernen sobre el conjunto de la

escena. Parece claro que se proponen juntarse en un dodecaedro que abarca no solo a los participantes en la cena, sino también al espectador. Y nosotros tenemos que recordar la concepción de Platón de que esta forma enmarca el universo.

Platón II: escapando de la caverna

Nuestra Pregunta, al interesarse por la Belleza, depende en parte de la relación entre la realidad física y nuestra percepción de ella. Ya hemos hablado de esto para el oído, y más tarde lo volveremos a tratar para la visión.

Pero hay otra dimensión de nuestra Pregunta, que es la relación entre la realidad física y la realidad definitiva. O, si te sientes (comprensiblemente) incómodo con el concepto de realidad definitiva, expresemos solo el gran cuadro: cómo conectamos la naturaleza profunda de la realidad física con nuestras esperanzas y sueños. ¿Qué significa todo, si es que significa algo? Esos asuntos son elementos importantes a la hora de apreciar (o no) la belleza del mundo, una vez que superamos el nivel de la percepción primaria.

Platón insinuó hace mucho algunas respuestas a estas preguntas. Sus respuestas se basaban en la intuición mística y en una lógica dudosa, y no en la ciencia. Con todo, han inspirado trabajos científicos, y siguen haciéndolo. Tendremos muchas ocasiones de volver sobre ellas. Y su influencia alcanza más allá de la ciencia, hasta la filosofía, el arte y la religión. Alfred North Whitehead lo expresó divinamente:

La caracterización general más segura de la tradición filosófica europea es que consiste en una serie de notas a pie de página de la obra de Platón.

Así que visitemos ahora la caverna de Platón, donde encontraremos el núcleo místico de su visión del mundo, capturado en imaginería visionaria.

Alegoría de la caverna

La alegoría de la caverna de Platón aparece en su obra de mayor peso, la *República*. La pone, como muchos de sus pensamientos, en boca de Sócrates, su reverenciado maestro. Sócrates describe la caverna a Glaucon, el hermano mayor de Platón, que también fue estudiante de Sócrates. Este escenario, así como el reparto de personajes, subrayan la importancia central de la caverna en el pensamiento de Platón.

Así lo introduce:

Sócrates. Y ahora, dije, déjame mostrar en una figura hasta dónde está iluminada u oscura nuestra naturaleza: ¡Aquí está! Seres humanos que viven en una guarida subterránea, que tiene una boca abierta hacia la luz y que alcanza todo lo largo de la guarida; han estado ahí desde niños, y tienen encadenadas las piernas y el cuello de manera que no se pueden mover, y solo pueden mirar hacia delante, pues las cadenas les impiden girar la cabeza. Encima y detrás de ellos, un fuego resplandece en la distancia, y entre el fuego y los prisioneros hay un camino alzado; y verás, si miras, una pared baja construida a lo largo del camino, como la pantalla que tienen delante los titiriteros, sobre la cual muestran las marionetas.

Glaucon. Lo veo.

Sócrates. ¿Y puedes ver, dije, hombres que pasan a lo largo de la pared llevando toda clase de vasijas, y estatuas y figuras de animales hechas de madera y piedra y varios materiales, que aparecen sobre la pared? Algunos hablan, otros callan.

Glaucon. Me has mostrado una extraña imagen, y esos son unos extraños prisioneros.

Sócrates. Como nosotros.

El argumento es simple y claro: los prisioneros ven una proyección de la realidad, no la realidad misma. Como la proyección es todo lo que conocen, la dan por hecha. Es su mundo. Pero nosotros no debemos sentirnos superiores a esos prisioneros ignorantes, porque nuestra propia situación no es diferente, según Sócrates (esto es, según Platón). Las palabras «como nosotros» llegan con la fuerza de un puñetazo.

La historia de la caverna no *prueba* ese argumento, por supuesto. Solo es una historia, después de todo. Pero sí que nos persuade a considerar, como una posibilidad lógica, que hay más realidad de la que nuestros sentidos detectan. Y esta historia profundamente subversiva emite desafíos: no aceptes limitaciones. Lucha para ensayar diferentes formas de ver las cosas. Duda de tus percepciones. Sospecha de las autoridades.

La visión platónica de la realidad más allá del mundo de las apariencias se captura de forma hermosa en la Lámina F, una versión cósmica de la caverna.

Debo mencionar que Platón, como pensador político, era un reaccionario utópico. No defendía esas ideas subversivas para su adopción general. Su receta de librepensamiento no pretendía ser una recomendación para todo el mundo, sino solo una orientación para un grupo pequeño y selecto de tutores que serían los filósofos a cargo de dirigir las cosas. ¡Se supone que ellos son los lectores a los que se dirige!

Visión de la eternidad; paradoja de la estasis

La visión de Platón de una realidad más allá de las apariencias unifica dos corrientes de pensamiento. Ya nos hemos zambullido en una de ellas, la pitagórica de Todas las Cosas son Número. Como vimos, varios descubrimientos hermosos dieron apoyo a ese credo. La propia teoría atómica de Platón, que vimos en el capítulo precedente, fue otro intento de similar espíritu (salvo que carece de evidencia o verdad).

Una segunda corriente era más propiamente filosófica, en el sentido moderno. Es una pieza de *metafísica*, o «después de la física». (Las raíces de esta palabra son interesantes. Cuando se recopilaron las obras de Aristóteles, los libros siguientes a su *Física* se denominaron «después de la física» por la sencilla razón de que así estaban encuadrados. Esos libros se ocupaban de los primeros principios de las cosas. En la metafísica, asuntos tales como el ser, el espacio, el tiempo, el conocimiento y la identidad no se abordan con experimentos u observaciones, sino con el razonamiento puro, como las matemáticas. Esa ambiciosa pero escurridiza misión intelectual se llama metafísica desde entonces.)

He aquí una típica pieza de metafísica debida a Parménides, según la describe Bertrand Russell, un magistral filósofo y matemático del siglo xx. Demuestra por qué nada puede cambiar nunca (!):

Cuando piensas, piensas *en* algo; cuando usas un nombre, debe ser el nombre *de* algo. Así, tanto el pensamiento como el lenguaje requieren objetos fuera de sí mismos. Y puesto que puedes pensar en una cosa o hablar de ella en cierto tiempo y también en otro tiempo, todo aquello en lo que puede pensarse o de lo que puede hablarse debe existir en todos los tiempos. Por tanto, no puede haber cambio, pues el cambio consiste en cosas que empiezan a ser o dejan de ser.

A pesar de esa lógica inexpugnable, no es del todo fácil convencerse a uno mismo, psicológicamente, de que nada cambia nunca. Si el cambio es una ilusión, es una bastante convincente.

Ciertamente parece como si las cosas se movieran, por ejemplo. El primer paso para superar esa ilusión es socavar la ingenua fe en las apariencias. Un estudiante de Parménides, Zenón de Elea, fue un maestro de la subversión. Inventó cuatro paradoxas que pretendían mostrar que las ideas ingenuas sobre el movimiento están irremediablemente confundidas.

La más famosa es la paradoja de Aquiles y la tortuga. Aquiles, el gran héroe de la *Iliada* de Homero, era un guerrero renombrado por su velocidad y su fuerza. Se nos pide imaginar una carrera entre Aquiles y una tortuga ordinaria; digamos, para ser concretos, una carrera de cincuenta metros. Damos a la tortuga una ventaja de diez metros. Cabría esperar que ganara Aquiles. «¡Error!», dice Zenón, y explica que, para adelantar a la tortuga, Aquiles debe primero alcanzarla. Y eso es un problema grave. De hecho, es un problema infinitamente grave. Supongamos que, al principio, la tortuga está en la posición *A*. Aquiles corre hasta *A*, pero cuando llega allí, la tortuga se ha movido hasta *A'*. Entonces Aquiles correrá hasta *A'*, pero cuando llega allí, la tortuga ha avanzado hasta *A''*. Ya se ve adónde nos lleva esto: no importa cuántas veces repitamos el proceso, Aquiles nunca alcanza a la tortuga realmente.

Puede resultar difícil negar el movimiento, como nos recomienda Parménides. Pero peor aún, arguye Zenón, es aceptarlo. Eso ya no es difícil, es lo siguiente.

Bertrand Russell rememoró a Zenón con estas palabras:

Tras inventar cuatro argumentos, todos de una enorme sutileza y profundidad, la ordinariet de los filósofos subsiguientes le calificó de mero malabarista ingenioso, y a sus argumentos de sofismas. Después de dos mil años de refutación continua, estos

sofismas fueron restaurados, y constituyeron el fundamento de un renacimiento matemático.

Lo cierto es que la respuesta física adecuada a Zenón solo surgió con la mecánica de Newton y las matemáticas que incorpora, como veremos un poco más adelante.

Hoy parece posible, en el marco de la teoría cuántica, estar de acuerdo con Parménides, y sin embargo hacer justicia a las apariencias. El cambio podría ser en realidad una mera apariencia. Justificaré esa afirmación escandalosa hacia el final de nuestra reflexión.

Pero retomemos nuestra narrativa, y regresemos al orden histórico de las cosas.

El ideal

En la teoría platónica de los Ideales, esas dos corrientes de pensamiento —las intuiciones pitagóricas de armonía y perfección, y la realidad inmutable de Parménides— fluyen juntas. (La teoría de Platón suele llamarse teoría de las Ideas, pero creo que «Ideal» corresponde mejor a lo que Platón tenía en mente, así que usaré esa palabra.)

Los Ideales son los objetos perfectos, de los que los objetos reales son copias imperfectas. Así, por ejemplo, hay un Gato Ideal. Los animales reales son gatos en la medida en que comparten las propiedades de ese Gato. El Gato Ideal, desde luego, nunca muere, ni puede cambiar de ninguna forma. Esta teoría incorpora la metafísica de Parménides: hay un reino de los Ideales, la realidad más profunda, que es eterno e inmutable, y que aporta la fuente de todo lo que podemos nombrar o de lo que podemos hablar. Y desarrolla a Pitágoras: llegamos a un contacto cercano con el mundo de los Ideales eternos y perfectos cuando manejamos conceptos matemáticos como los números o los sólidos platónicos.

Hay una tercera corriente, esta subterránea, que también se alimentó, seguramente, de la teoría de los Ideales. Es la corriente de la religión órfica. Esa era, por así decir, la cara seria de la mitología griega. Los detalles del orfismo, que practicaba rituales herméticos, están oscurecidos en la niebla de

la historia (¡ese es el destino de los secretos!), y no tenemos que ocuparnos de ellos aquí. Pero su plato fuerte era la doctrina de la inmortalidad de las almas, que tenía (y por supuesto sigue teniendo) un atractivo emocional sublime. La Wikipedia la describe así:

Caracteriza las almas humanas como divinas e inmortales, pero condenadas a vivir (durante un período) en un «círculo penoso» de vidas corporales sucesivas a través de la metempsícosis, o transmigración de las almas.

Estas ideas encajan de forma elegante en la teoría de los Ideales. Cada uno de nosotros, por nuestra naturaleza, participa del mundo de los Ideales. La parte de nosotros que participa es nuestra alma, que es imperecedera. Mientras vivimos en la Tierra, nuestra atención se distrae con las apariencias y, si no las trascendemos, seremos solo vagamente conscientes de los Ideales, y nuestra alma dormitará. Pero a través de la filosofía, las matemáticas y una dosis de misticismo (las ceremonias misteriosas del orfismo) podemos despertarla. Hay una caverna... y hay una salida de ella.

Liberación

Platón describe el proceso de liberación:

Sócrates. Y ahora mira otra vez, y contempla lo que pasará de forma natural si los prisioneros son liberados ... El resplandor le angustiará, y será incapaz de ver las realidades de las que, en su estado anterior, había visto las sombras ... ¿No imaginará que las sombras que veía antes son más verdaderas que los objetos que ahora se le muestran?

Glaucón. Mucho más verdaderas.

.....

Sócrates. Tendrá que irse acostumbrando a la visión del mundo superior. Al principio verá mejor las sombras, luego los reflejos de los hombres y de otros objetos en el agua, y después los objetos en sí mismos; entonces mirará la luz de la luna y de las estrellas y el cielo sembrado de lentejuelas; y verá el cielo y las estrellas de noche mejor que la luz del sol de día, ¿no?

Glaucón. Desde luego.

Es digno de atención que Platón (a través de Sócrates) describe la liberación como un proceso activo, un proceso de aprendizaje y compromiso. Esto es muy diferente de otras ideas que son más populares, pero en mi opinión menos inspiradoras, donde la salvación llega a través de la gracia externa, o por la renuncia.

Si la liberación llega por el compromiso con una realidad oculta, ¿cómo podemos alcanzarla? Hay dos caminos, hacia dentro y hacia fuera.

Por el camino hacia dentro, examinamos nuestros conceptos de manera crítica, y tratamos de desnudarlos de la escoria de mera apariencia, para alcanzar su significado ideal (es decir, Ideal). Este es el camino de la filosofía y la metafísica.

Por el camino hacia fuera, tomamos las apariencias con sentido crítico e intentamos desnudarlas de las complicaciones para hallar su esencia oculta. Este es el camino de la ciencia y la física. Como hemos anticipado, y como trataremos en profundidad, el camino hacia fuera conduce efectivamente a la liberación.

Deshaciendo la proyección: mirando al frente

En su intuición central, Platón estaba muy en lo cierto; de hecho, más profundamente en lo cierto de lo que él podía haber sabido. La visión del mundo que nos viene dada de modo natural no es más que una proyección tenebrosa del mundo como es realmente. Nuestros sentidos desnudos solo toman unas muestras miserables de la cornucopia de información que el mundo pone en oferta. Con la ayuda de microscopios, descubrimos un universo microcósmico repleto de extrañas criaturas diminutas, algunas amigas y otras enemigas nuestras, y los aún más extraños constituyentes de nuestro ser material, cosas que juegan según las estrañafarias reglas de la mecánica cuántica. Con la ayuda de telescopios ópticos, descubrimos la enormidad del cosmos que empequeñece nuestra Tierra, mostrando espacios vastos, oscuros y (aparentemente) vacíos rociados con millones de billones de soles y

planetas variados. Con la ayuda de receptores de radio, llegamos a «ver» radiaciones invisibles que llenan el espacio, y a ponerlas en uso. Y así sucesivamente...

Y como ocurre con nuestros sentidos, así ocurre con nuestras mentes. Sin entrenamiento y ayuda, no pueden ni empezar a hacer justicia a la riqueza de la realidad que conocemos, no hablemos ya de la que no conocemos todavía: las incógnitas desconocidas. Vamos al colegio, leemos libros, buscamos en Internet y utilizamos cuadernos de notas, programas de ordenador y otras herramientas para ayudarnos a mantener en orden las ideas complicadas, resolver las ecuaciones que gobiernan el universo y visualizar sus consecuencias.

Esas ayudas a la sensación y la imaginación abren las puertas de la percepción, permitiéndonos salir de la caverna.

El regreso a la ingenuidad

Pero Platón, que no sabía nada de ese futuro, se centró en el camino hacia dentro. Aquí explica por qué:

Sócrates. Por tanto, debemos usar el cielo bordado como un ejemplo para ilustrar nuestras teorías, del mismo modo que se pueden usar diagramas exquisitos dibujados por un buen artista como Dédalo. Un experto en geometría, enfrentado a tales diseños, admiraría su acabado y destreza, pero no soñaría con estudiarlos totalmente en serio, esperando que todos los ángulos y longitudes se ajusten exactamente a los valores teóricos.

Glaucón. Eso sería absurdo, desde luego.

Sócrates. El astrónomo genuino, entonces, adoptará la misma perspectiva para estudiar los movimientos de los planetas. Admitirá que el cielo y todo lo que contiene han sido colocados por su creador tan perfectamente como las cosas puedan ser... No imaginará que esos cambios visibles y materiales proceden eternamente sin la menor alteración o irregularidad, y no malgastará su esfuerzo tratando de encontrar en ellos una perfecta exactitud.

Glaucón. Ahora que lo expresas así, estoy de acuerdo.

Sócrates. Entonces, si pretendemos estudiar la astronomía haciendo un uso adecuado del intelecto innato del alma, debemos proceder como hacemos con la geometría, trabajando en problemas matemáticos, y no perder el tiempo

observando los cielos.

Podemos resumir ese diálogo unilateral como una desigualdad. Dice, de forma muy simple, que lo Real no está a la altura de lo Ideal. Lo Real es estrictamente menos:

$$\text{Real} < \text{Ideal}$$

El Artesano, que crea el mundo físico a partir del mundo de los Ideales, es un artista, y de los buenos. Y, sin embargo, el Artesano es al final un copista cuyas creaciones reflejan el desorden de los materiales disponibles. El Artesano pinta con brocha gorda y enturbia los detalles. El mundo físico es una representación defectuosa de la realidad última que deberíamos perseguir.

Para expresarlo de otra forma: Platón recomienda ingenuidad. Si tus teorías son bellas, pero no concuerdan exactamente con las observaciones... bueno, pues peor para las observaciones.

Dos tipos de astronomía

¿Por qué Platón, en su búsqueda de la verdad última, se volvió hacia dentro, alejándose del mundo físico? Parte de la razón, sin duda, fue que amaba demasiado a sus teorías, y no logró hacerse a la idea de que pudieran ser erróneas. Esa actitud, muy humana, sigue aún con nosotros: es convencional en política, común en las ciencias sociales y no desconocida incluso en física.

Pero otra parte de la razón emergió del estudio de la naturaleza, en la astronomía, el tema al que alude su diálogo.

Llevar un calendario preciso era importante para las sociedades del mundo antiguo, cuya base económica era la agricultura, y especialmente para las que dependían de sistemas de irrigación. También era importante, y no por casualidad, para los objetivos religiosos, porque los rituales se ponían en las fechas adecuadas para obtener ayuda divina en la siembra y la cosecha. Todo esto requería astronomía. También la requería el arte de adivinar el futuro mediante la astrología. Los antiguos babilonios se hicieron grandes expertos en predecir la fecha de los sucesos astronómicos, como la variación de la

posición del Sol al amanecer y al atardecer, los equinoccios, los solsticios y los eclipses de Luna y Sol. Su método era simple, en principio, y casi independiente de la teoría. Acumularon siglos de observaciones precisas, percibieron regularidades (periodicidades) en los comportamientos y extrapolaron esas regularidades al futuro. En otras palabras, supusieron que los futuros ciclos de comportamiento en el reino celestial reproducirían el comportamiento pasado, como se había observado que hacían repetidamente en el pasado. Los «datos masivos» (*Big data*) están hoy de rabiosa actualidad, pero el concepto básico se remonta muy atrás, porque no es otra cosa que el método de la antigua astronomía babilónica.

El trabajo babilónico estaba madurando en época de Platón, y lo más probable es que el filósofo no tuviera más que un vago conocimiento de él. En todo caso, su enfoque «de abajo a arriba», con mucho peso en los datos y poco en la teoría, estaba en los antípodas de los objetivos y métodos de Platón.

Para Platón, como hemos visto, lo que parecía abrumadoramente importante era el alma humana: su ascenso a la sabiduría, la pureza y un Ideal trascendente. Así que, para formular una explicación de los movimientos planetarios, lo más importante es que la teoría sea bella, no que sea enteramente precisa. El objetivo primario es identificar los Ideales que inspiraron al Artesano. Las concesiones que Le impusiera la tosquedad de los materiales de construcción son una cuestión secundaria.

En astronomía, las periodicidades dominantes —y más simples— son los ciclos regulares de día y noche y de las estaciones, que se asociaban al movimiento aparente de las estrellas por el cielo y con la trayectoria aparente del Sol. Hoy entendemos que esos ciclos se asocian a la rotación diaria de la Tierra sobre su eje, y a su revolución anual alrededor del Sol. Como ambos movimientos están bastante cerca de ser movimientos circulares a velocidad constante, los fenómenos observados podrían describirse (con una excelente aproximación) mediante una teoría extremadamente bella, como sigue:

La figura geométrica más perfecta es el círculo. Porque es la única figura cerrada que tiene la misma apariencia en cualquier parte a lo largo de su extensión. Cualquier otra figura exhibe diferencias entre sus distintas partes, y por tanto no todas esas partes pueden ser la mejor posible, ni por tanto lo puede ser el todo. De manera similar, el movimiento más perfecto en círculo

es el movimiento a velocidad constante. Además, el movimiento en círculo a velocidad constante es tan inmutable como pueda ser un movimiento, porque tiene la misma forma en todo momento. Por estas consideraciones «de arriba abajo», deducimos que el Ideal del movimiento es el movimiento en círculo a velocidad constante. Y cuando miramos al cielo, descubrimos que, combinando esos dos movimientos perfectos, podemos hacer coincidir el movimiento observado del Sol y las estrellas, con bastante acierto.

Esto es, a primera vista, un éxito deslumbrante. Continúa en el espíritu de los descubrimientos de Pitágoras, identificando las relaciones numéricas y geométricas que funcionan en el mundo físico. Supera a esos descubrimientos en grandeza y nobleza, porque el Sol y las estrellas emanan directamente del Artesano, mientras que meros artesanos humanos son responsables de los instrumentos musicales.

Por desgracia, cuando intentamos ir más allá de ese éxito inicial, las cosas se embrollan mucho y muy deprisa. Los movimientos aparentes de los planetas, y la Luna, resultan ser mucho más difíciles de describir. El enfoque de arriba abajo requiere que expliquemos las apariencias en términos de movimiento Ideal (es decir, circular uniforme). Los astrónomos matemáticos respondieron a ese desafío poniendo las propias trayectorias circulares (hipotéticas) de los planetas en movimiento circular. Eso no funcionó, así que pusieron los círculos de movimiento de las trayectorias circulares de los planetas en movimiento circular... Con el número suficiente de estos ciclos de ciclos, organizados con ingenio, es posible reproducir las apariencias. Pero en esos sistemas complicados y manifiestamente artificiales, la promesa inicial de pureza y belleza se había perdido. Uno podía tener belleza o verdad, pero no las dos a la vez.

Platón insistía en la belleza, y estaba dispuesto a comprometer —o podríamos decir mejor, a deponer— la precisión. Ese desdén por los hechos, detrás de su fachada de orgullo, revela una profunda falta de confianza, y una especie de agotamiento. Abandona la ambición de tenerlo todo, emparejando belleza y precisión. Lo Real y lo Ideal. Platón apuntó hacia ese camino fuera del mundo, y sus discípulos lo siguieron hasta mucho más allá. La atracción de

alejarse del mundo en aquellos tiempos oscuros es comprensible, ya que el mundo tenía en oferta guerra, pobreza, enfermedad y el colapso de la civilización griega clásica.

El sucesor y rival de Platón, Aristóteles, era en algunos aspectos un estudioso más genuino de la naturaleza. Él y sus estudiantes recolectaron especímenes biológicos, hicieron muchas observaciones agudas y registraron sus resultados en detalle y con honradez. Por desgracia, al concentrarse desde el principio en objetos y problemas muy complicados, se dejaron escapar la simplicidad clarificadora de la geometría y la astronomía. No buscaron, ni podían esperar encontrar, el Ideal matemático dentro de esas ramas nudosas de lo Real. Pusieron el acento en la descripción y la organización, y no se esforzaron por la belleza o la perfección. Cuando los aristotélicos se volvieron hacia la física y la astronomía, limitaron sus ambiciones de la misma forma. Allí donde los científicos posteriores (y anteriores) demandarían ecuaciones precisas, ellos se conformaron con amplias descripciones verbales.

Subjetividad objetiva: geometría proyectiva

Siglos después, en el Renacimiento, una cultura con renovada confianza redescubrió a Platón. Retomó su cruzada por el Ideal, y a la vez abandonó su alejamiento del mundo.

Los artistas y los artesanos —humanos— marcaron el camino. El desafío al que se enfrentaron es muy básico: ¿cómo puede una pintura bidimensional representar la geometría de los objetos del espacio tridimensional? Esto era un problema concreto y práctico. En un tiempo en que no se conocía la fotografía, y en que unas significativas fortunas privadas se estaban acumulando, los patrones querían tener imágenes que ofrecieran un registro permanente de cómo eran realmente ellos y sus posesiones.

A primera vista, puede parecer que nada podría estar más lejos del deseo de Platón de acceder a una realidad más profunda más allá de la apariencia superficial de las cosas. La ciencia artística de la perspectiva trata por entero de ¡capturar la apariencia superficial de las cosas!

Y, sin embargo, hay un sentido en que dominar la apariencia de las cosas nos acerca a su esencia. Porque, entendiendo cómo la misma escena puede parecer diferente, según el punto de vista desde el que se percibe, aprendemos a separar los accidentes del punto de vista de las propiedades de la cosa en sí misma. Tratando objetivamente la subjetividad, la dominamos.

Hasta aquí las generalidades. Los primeros pasos de este trabajo ya nos revelan sorpresas deliciosas. Simplifiquemos el problema hasta su esencia desnuda, tomando una sección transversal del lienzo y el paisaje, de modo que ambos aparecen como líneas, en la Figura 10.

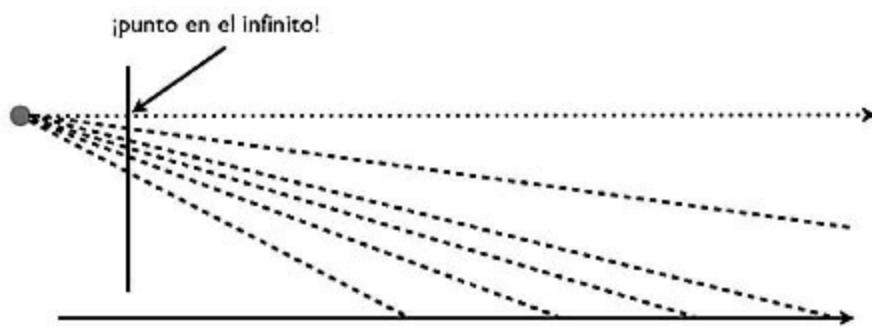


FIGURA 10. Los puntos a lo largo de la línea horizontal (el suelo) se proyectan sobre un segmento de la línea vertical (el lienzo). El límite infinito de la línea horizontal, que nunca se alcanza en la realidad, se proyecta pese a ello sobre un «punto en el infinito» real y finito en el lienzo.

Los puntos de nuestro paisaje simplificado al máximo —un plano horizontal que se reduce en sección transversal a una línea— proyectan la luz en líneas rectas hacia el espectador. Son las líneas discontinuas de la figura. Siguiendo esas líneas hasta su intersección con el lienzo (cuya sección transversal es la línea gruesa vertical), determinamos dónde los distintos puntos del paisaje deben aparecer en la pintura.

Como se ve, los puntos cada vez más lejanos se proyectan cada vez más arriba en el lienzo. Pero, cuando consideramos puntos del paisaje cada vez más distantes, la velocidad a la que sus imágenes escalan por el lienzo va reduciéndose. Los rayos de luz que los conectan tienden a un límite horizontal,

representado en la figura por la línea de puntos. Esa línea límite no corresponde a ningún punto real del paisaje; y, sin embargo, interseca el lienzo en un punto específico.

Justo ante nuestros ojos ha ocurrido un milagro conceptual: ¡hemos capturado el infinito! Cuando miramos el paisaje, hay un horizonte. El horizonte no es una cosa física, sino una idealización. Representa la frontera de nuestra visión, y yace a una distancia infinita. Y aun así, la imagen que el horizonte proyecta en nuestro lienzo es incuestionablemente real. Es un punto único y específico: el punto en el infinito.

Otras maravillas nos esperan cuando restauramos tanto el lienzo como la base del paisaje (ambos un plano) a sus dos dimensiones originales. Supongamos, para simplificar, que el lienzo es perpendicular a la llanura.

Ahora tenemos que imaginar muchas líneas rectas en el paisaje. Cada una se extiende hasta el horizonte, y cada una proyecta su punto en el infinito asociado sobre el lienzo. Descubrimos, sin embargo, que todas las líneas paralelas de la llanura se dirigen hacia el mismo punto del horizonte. Esto salta a la vista en la Figura 11.

Llamamos a ese punto el *punto de fuga* de la familia de paralelas. En el idioma adecuado para el lienzo, podemos decir que *las líneas paralelas se encuentran en el punto de fuga*.



FIGURA 11. Las paralelas se encuentran en el horizonte, en un «punto de fuga» común. Una vez que estés atento a este fenómeno, lo verás por todas partes a tu alrededor.

Aquí la poesía mística emerge como una descripción directa de la realidad artística.

Distintas familias de líneas paralelas definen distintos puntos de fuga, que juntos definen el horizonte. Si lo proyectamos de vuelta al lienzo, el horizonte genera una línea horizontal, capturando el horizonte como una colección de puntos al infinito. El horizonte conceptual, en otras palabras, se proyecta sobre el lienzo como la línea tangible al infinito.

Descubrimientos como estos emocionaron y fortalecieron al artista-científico-ingeniero renacentista Brunelleschi. Desarrolló esas percepciones en una técnica poderosa para producir dibujos realistas. En un famoso experimento, utilizó la geometría proyectiva para dibujar una representación precisa del aspecto que tendría el Baptisterio de San Juan, en Florencia, visto desde la entrada de una catedral vecina, entonces en construcción. Como se muestra en la Figura 12, lo organizó de forma que un espectador pudiera comparar el dibujo, reflejado en un espejo, con el baptisterio de verdad, revelado cuando se retira el espejo (un agujerito en el dibujo permitía la visión).

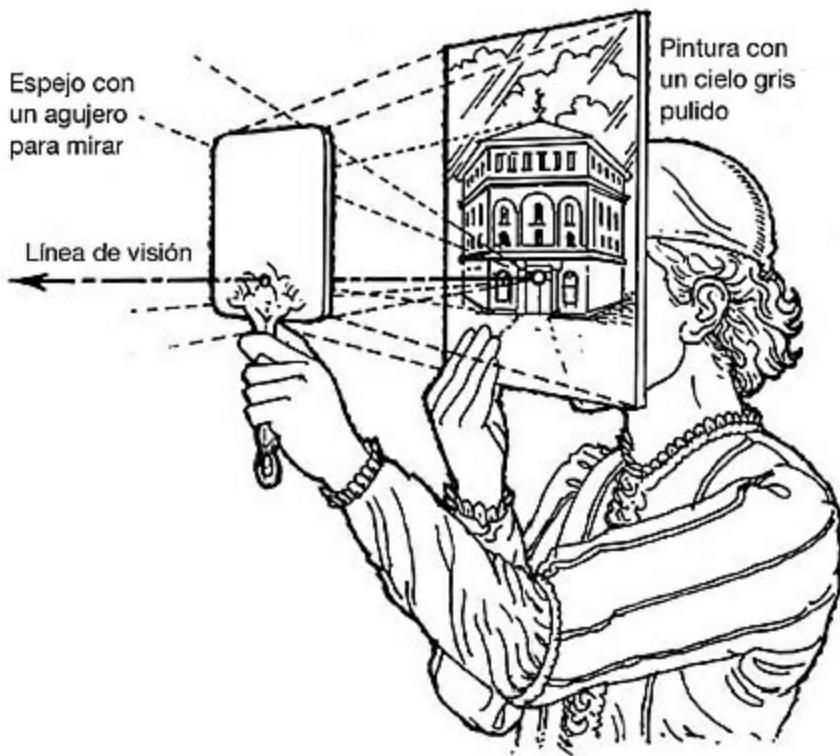


FIGURA 12. Artilugio de Brunelleschi para comparar su dibujo, basado en la nueva ciencia de la perspectiva, con la realidad.

Esta ingeniosa demostración produjo una enorme impresión en los artistas de la época, que adoptaron con entusiasmo las técnicas de Brunelleschi y las desarrollaron con ímpetu. Poco después, el júbilo exuberante de la perspectiva infundía obras maestras como *Entrega de las llaves a San Pedro* (Lámina G), de Pietro Perugino. La perspectiva es aquí un jugador activo que aporta un sentido especial de orden, armonía y autoridad a este acontecimiento fundacional de la iglesia Católica. El fresco está en la Capilla Sixtina.

En la Lámina H he esbozado el proceso por el que puedes hacer un dibujo preciso en perspectiva de un suelo pavimentado con baldosas cuadradas, visto de frente y desde arriba, y que se extiende a lo lejos hasta un horizonte infinito. Todo lo que necesitas es un lápiz, una regla y un borrador (la regla que usan los artistas no suele llevar marcas de distancia; por supuesto, una regla con marcas de distancia puede servir también: ¡basta que las ignores!).

El proceso de construcción se indica en la parte de arriba de la figura. Trazamos una línea, indicada en negro, que será el horizonte. Empezamos con una baldosa cuadrada, indicada en azul abajo del todo. No se dibuja cuadrada, por supuesto, porque estamos viendo el suelo de forma oblicua. Los lados opuestos del «cuadrado», cuando se prolongan, se encuentran en el horizonte, en sus puntos de fuga. Estas prolongaciones están también en azul. Así que con eso empezamos: una baldosa y el horizonte. El desafío es entonces dibujar todos los demás cuadrados iguales del pavimento como aparecerían (en perspectiva) a un observador real.

La observación clave es que las diagonales de los cuadrados también forman una familia de rectas paralelas. Esa familia de paralelas también se encontrará en el horizonte, en su punto de fuga. Podemos dibujar la prolongación roja de la diagonal de nuestro cuadrado original para localizar el punto de fuga. Y luego volvemos desde ese punto de fuga, con las líneas naranjas, ¡para obtener las diagonales de los cuadrados vecinos! Una vez situadas esas diagonales, sabemos que las intersecciones de las líneas naranjas y azules son vértices de las baldosas vecinas. Las líneas amarillas, que pasan por esos vértices y por los puntos de fuga adecuados, contienen por tanto los lados de esas baldosas. Y ahora podemos seguir: las intersecciones de las líneas amarillas «laterales» con las líneas naranjas «diagonales» son los vértices de nuevos cuadrados... Puedes repetir el proceso tantas veces como quieras, hasta que pierdas la paciencia, se te gaste el lápiz... o tus baldosas se encojan hasta dimensiones atómicas.

Para completar la construcción, no tienes más que borrar las diagonales, y (opcionalmente) poner todas las líneas del mismo color, para llegar a la figura de abajo. El escorzo en esta figura es extremo —como si estuviéramos viendo el suelo a vista de hormiga, de cerca y desde poca altura— para enfatizar lo muy distintas que pueden aparecer unas formas iguales, como estas baldosas. Por supuesto, puedes mover el libro y ver la imagen desde distintas perspectivas: verás distintos tamaños aparentes de las baldosas, pero siempre el mismo patrón de intersecciones.

He dibujado esta construcción una docena de veces o más, y aun así cada vez siento un estremecimiento cuando emerge ese suelo pavimentado. Es un pequeño, pero genuino, acto de creación.

Me parece que es el tipo de cosa que cualquier Artesano disfrutaría.

Me he dado cuenta de que valorar estas ideas básicas de la perspectiva abre mis ojos. Más exactamente, esas ideas llevan el mensaje de mis ojos a un contacto más directo con mi mente consciente. Sobre todo en un entorno urbano, descubro a menudo muchos conjuntos de líneas (físicamente) paralelas, alejándose hacia distintos puntos de fuga. Cuando estoy atento a estas cosas, mi experiencia es más plena y vívida. Ojalá te pase a ti también. Mediante una imaginación disciplinada, trascendemos la caverna de la sensación ignorante.

Cuestiones de perspectiva: relatividad, simetría, invariancia, complementariedad

Muchas de las ideas recientes de la moderna física fundamental le resultan poco familiares a la mayoría de la gente. Pueden parecer abstractas e intimidatorias si se presentan de forma abrupta, en los contextos extraños que constituyen su hábitat natural. Por esta razón, aquellos de nosotros que intentamos llevar esas ideas a una audiencia amplia trabajamos a menudo con metáforas y analogías. Es un desafío encontrar metáforas que sean a la vez fieles a las ideas originales y fácilmente comprensibles, y un desafío aún mayor hacerlo de modo que haga justicia a su belleza. He luchado muchas veces contra ese problema a lo largo de los años. Aquí estoy feliz de presentar una solución que me ha proporcionado un verdadero sentimiento de satisfacción.

La *geometría proyectiva*, esa innovación artística del Renacimiento, contiene no ya meras metáforas, sino *modelos* genuinos, en una galería de grandes ideas ingeniosas y formidablemente significativas:

- *Relatividad* es la idea de que el mismo objeto puede representarse, fielmente y sin pérdidas, de muchas maneras distintas. La relatividad, en este sentido, es la misma esencia de la geometría proyectiva. Podemos pintar la misma escena desde muchas perspectivas diferentes. Las

disposiciones de la pintura en el lienzo serán diferentes, pero todas ellas representarán la misma información sobre el objeto, solo que codificadas de distintos modos.

- La *simetría* es una idea estrechamente relacionada con la relatividad, pero con la atención dirigida al objeto en vez de al espectador. Por ejemplo, si rotamos el objeto de nuestra pintura, parecerá diferente desde cualquier perspectiva fijada. Pero su descripción proyectiva —es decir, la totalidad de visiones que ofrecen todas las perspectivas posibles— sigue siendo la misma (porque los pintores pueden recolocar sus caballetes para compensar la rotación). Podemos resumir esta situación diciendo que la rotación del objeto es una *simetría* de su descripción proyectiva. Podemos cambiar el objeto, rotándolo, sin cambiar su descripción proyectiva. Como volveremos a destacar en posteriores ocasiones, la esencia de la simetría es el Cambio sin Cambio.
- La *invariancia* es el contrapunto de la relatividad. Muchos aspectos del objeto se representan de forma diferente cuando cambiamos de perspectiva, pero algunos rasgos son comunes a todas esas representaciones. Por ejemplo, las líneas rectas del objeto aparecerán siempre como líneas rectas desde cualquier perspectiva (aunque su orientación y posición en el lienzo variará); y si tres líneas rectas se intersecan en el objeto, sus representaciones se encontrarán en un punto, desde cualquier perspectiva. Los rasgos que son comunes a todas las representaciones se definen como *invariantes*. Las cantidades invariantes son profundamente importantes, porque definen rasgos del objeto que son válidos desde cualquier perspectiva.
- La *complementariedad* es una intensificación de la relatividad. Es uno de los principios profundos de la teoría cuántica, pero su importancia, como entendimiento de la naturaleza de las cosas, va más allá de la física. (La complementariedad es, según creo, un descubrimiento genuinamente metafísico: una verdadera *rara avis*.)

En su forma más simple, la complementariedad dice que puede haber muchas visiones distintas del objeto que son igualmente válidas, en principio, pero que, para observar el objeto (o para pintarlo, o describirlo), tienes que elegir una en concreto.

Si eso fuera todo, la complementariedad sería un comentario menor de la relatividad. La novedad que surge en la teoría cuántica es que resulta *imposible* que dos retratistas cuánticos retraten, desde diferentes perspectivas, el mismo objeto al mismo tiempo. Porque en el mundo cuántico debemos tener en cuenta que la observación es un proceso activo, por el que interactuamos con nuestro objeto de estudio.

Tratemos de ver un electrón, por ejemplo. Para hacerlo, tenemos que irradiarlo con luz (o con rayos X). Pero la luz transmite energía y momento al electrón, y por tanto puede alterar su posición, ¡que es justo lo que queríamos determinar!

Tomando las precauciones adecuadas, y jugueteando con el electrón de forma casual, podemos organizar nuestras mediciones para que capturen algunos aspectos del objeto correctamente. Pero solo a costa de sacrificar otros, puesto que se destruyen en el proceso de observación. Con distintos arreglos y precauciones, podemos elegir nuestra división preferida entre lo observado y lo sacrificado de diferentes formas, pero no podemos evitar tener que elegir. Al pintar el mundo cuántico, tenemos que elegir una de entre todas las posibles perspectivas, y trabajar para conseguirla. Si hay otro pintor trabajando, y jugueteando con nuestro electrón a su manera y con sus propios propósitos, nublará nuestro retrato (y nosotros arruinaremos el suyo).

La versión fuerte de la complementariedad, la que la lleva más allá de la relatividad, es la siguiente: hay muchas visiones del objeto igualmente válidas —perspectivas, en el sentido general de la palabra—, pero son mutuamente excluyentes. En el mundo cuántico, solo podemos materializar una perspectiva cada vez. El cubismo cuántico es imposible.

Estas grandes ideas —relatividad, simetría, invariancia, complementariedad— conforman el corazón de la física moderna. Deberían ser, aunque aún no lo son, centrales para la filosofía y la religión modernas. En todos esos contextos, a veces aparecen en formas extrañas y abstractas que pueden resultar desconcertantes. Es una posibilidad maravillosa, en caso de confusión, recordar la geometría proyectiva, donde podemos verlas encarnadas en imágenes artísticas bellas y tangibles.

Newton I: método y locura

La revolución científica clásica no fue solo un suceso histórico, sino un período intenso que se extendió más o menos entre 1550 y 1700, y que estuvo marcado por progresos espectaculares en muchos campos, pero sobre todo en física, matemáticas y astronomía. La activa curiosidad e inventiva de los artistas-ingenieros del Renacimiento, como Filippo Brunelleschi y Leonardo da Vinci, vaticinó su espíritu, pero es la obra de Copérnico *De revolutionibus orbium coelestium* («Sobre las revoluciones de las esferas celestes») la que suele tomarse como su documento seminal. Copérnico presentó argumentos serios, basados en el análisis matemático de las observaciones astronómicas, a favor de que la Tierra ni era el centro del universo ni estaba inmóvil, sino que rotaba como un satélite del Sol. Esa conclusión era una ofensa al sentido común, no hablemos ya de las doctrinas cosmológicas de la iglesia, influidas poderosamente por Platón y Aristóteles. Pero las matemáticas eran tozudas. Los pensadores radicales que decidieron basarse en su precisión, en lugar de secuestrar su influencia, acabaron triunfando. Los descubrimientos de Galileo, Kepler y René Descartes culminaron en la síntesis de Isaac Newton: una singularidad intelectual en la que se centra esta parte de nuestra reflexión.

Análisis y síntesis

Más allá de su tesoro de descubrimientos concretos, la revolución científica fue una revolución de la ambición y, en un sentido profundo, del *gusto*. Los nuevos pensadores no se conformaban con un resumen de la realidad a vista de pájaro, al estilo de Aristóteles. Exigían que se respetara por completo la visión de la hormiga, además de la del pájaro. Tampoco estaban dispuestos a renunciar a ningún detalle para acomodar algún punto de vista mentalmente

superior, al estilo de Platón. Exigían observación, medición y descripción precisa, con el uso de la geometría, de las ecuaciones y de una matemática sistemática allí donde fuera posible.

Newton capturó la esencia de esta nueva visión como sigue:

Así como en las matemáticas, también en la filosofía natural la investigación de las cosas difíciles por el método del análisis debe siempre preceder al método de composición ... Mediante esta forma de análisis podemos proceder de los compuestos a los ingredientes, y de los movimientos a las fuerzas que los producen; y, más en general, de los efectos a sus causas ... Y la síntesis consiste en asumir las causas descubiertas, y establecidas como principios, y mediante ellas explicar los fenómenos que proceden de ellas, y aportar las explicaciones.

Desarrollemos esta poderosa declaración metodológica más a fondo, y enriqueciendo el contexto.

Exigiendo precisión

Una hormiga tiene que preocuparse de conocer la topografía local con exactitud, mientras que un pájaro vuela deprisa por un cielo esencialmente abierto. Una hormiga que mire al cielo se tropezará con las piedras, o se caerá en algún hoyo, mientras que un pájaro que se fije en los detalles del suelo se acabará estrellando contra la ladera de una montaña. De modo similar, hay una tensión entre los objetivos de la *precisión* y la *ambición*: entre decir solo la verdad, por un lado, y tener mucho que decir, por el otro.

En capítulos anteriores tratamos la decisión de Platón de abandonar la precisión, y centrarse por completo en la ambición. Para él fue una decisión consciente, motivada por su esperanza de descubrir, mediante ejercicios intelectuales y espirituales, un mundo mejor, del que el nuestro es una copia imperfecta. Pitágoras había descubierto unas leyes de la armonía musical maravillosas pero subjetivas, y por tanto imprecisas. La astronomía parecía codificar leyes precisas, pero no del todo rigurosas, como ya hemos visto. Solo las leyes de la propia matemática —nuestra ventana al Ideal— podían ser, según Platón, a la vez precisas y siempre correctas.

Esta tensión entre lo Real y lo Ideal alcanza el nivel de una contradicción orwelliana en los escritos del predecesor de Newton, Johannes Kepler. Ya hemos mencionado la obsesión juvenil de Kepler con un modelo del Sistema Solar basado en los sólidos platónicos. Aunque igualmente (es decir, completamente) errónea, la idea de Kepler alcanza un nivel más alto, científicamente, que las especulaciones de Platón en el *Timeo*. Porque Kepler, a diferencia de Platón, intenta ser a la vez preciso y específico. La esfera de Mercurio sujeta un octaedro circunscrito, que está inscrito en la esfera de Venus. Luego tenemos un icosaedro, un dodecaedro, un tetraedro y un cubo que interpolan, respectivamente, Venus-Tierra, Tierra-Marte, Marte-Júpiter y, por último, Júpiter-Saturno. Ese esquema hace predicciones numéricas concretas sobre los tamaños relativos de las órbitas planetarias, que Kepler comparó con los valores observados. La concordancia, aunque no exacta, estaba lo bastante cerca para convencer a Kepler de que estaba en el camino correcto. Alentado por ello, tuvo el valor de ponerse a afinar su modelo y compararlo con mejores datos, de modo que sacara a relucir con más claridad la Música de las Esferas.

Así que el modelo de Kepler disparó su histórica trayectoria en astronomía. Su arduo trabajo de cálculo le condujo a descubrir regularidades entre las órbitas de los planetas —sus tres célebres leyes del movimiento planetario—, que en efecto tienen una validez precisa. Las leyes de Kepler del movimiento planetario desempeñaron un papel central en la mecánica celeste de Newton, como veremos en el capítulo «Newton II».

Kepler estaba encantado con estos descubrimientos, y justamente orgulloso de ellos. Y, sin embargo, socavaron de manera fatal los fundamentos de su propio y hermoso sistema de esferas celestiales sujetas por los sólidos platónicos. En sus esfuerzos por hacer justicia a las exquisitamente precisas observaciones de Tycho Brahe, Kepler descubrió que la órbita de Marte no es circular en absoluto, sino que traza una elipse. ¡Hasta aquí llegaron las esferas celestiales!

El propio trabajo de Kepler había destruido el fundamento conceptual de su modelo, y su concordancia aproximada con las observaciones no sobrevivió a los trabajos más precisos. Y aun así Kepler nunca abandonó su sistema ideal. Preparó una versión posterior y muy expandida del *Mysterium*

en 1621. Allí las leyes precisas aparecen en las notas al pie, socavando el texto como un sobrio interrogatorio que contradice las palabras de un testigo propenso a la fantasía. ¿Símbolo o modelo? Al renunciar a elegir entre ellos, Kepler volvió a caer en la tentación platónica, para anteponer su Ideal teórico a la realidad que lo contradecía.

Con Newton, la ruptura es decisiva. Las teorías que no describen la realidad son, para Newton, meras hipótesis que se pasan de castaño a oscuro:

Cualquier cosa que no se deduzca de los fenómenos debe considerarse una hipótesis; y las hipótesis, sean físicas o metafísicas, o basadas en cualidades ocultas, o mecánicas, no tienen sitio en la filosofía experimental.

Y la descripción que ofrecen las teorías debe ser precisa. El historiador y filósofo de la ciencia Alexandre Koyré identificó esta *subida del listón* como el logro más revolucionario de Newton, el que puso el remate a la revolución científica:

Para abolir el mundo del «más o menos», el mundo de las cualidades y la percepción sensorial, el mundo del reconocimiento de nuestra vida diaria, y para reemplazarlo por el universo (arquimedeano) de la precisión, de las mediciones exactas, de la determinación estricta.

¡Estos criterios más exigentes de realismo y precisión no son fáciles de cumplir! Platón declaró que eran mutuamente excluyentes, y en la práctica incluso Kepler se conformó con satisfacer uno u otro. Newton, con su trabajo sobre la luz y la mecánica, mostró que los dos criterios *podían* satisfacerse. Y así aportó unos modelos con el tipo de excelencia teórica a la que nosotros, sus seguidores, aspiramos hoy. Para satisfacer esos criterios, uno tiene que refrenar la ambición prematura, como Newton reconoció:

Explicar toda la naturaleza es una tarea demasiado difícil para un solo hombre, o inclusa para una sola época... Es mucho mejor hacer un poco con certeza y dejar el resto para otros que vengan después de ti que explicar todas las cosas mediante conjeturas si asegurarse de nada.

Educando la ambición

Y aun así el propio Newton era ambicioso en grado supremo. Su curiosidad se extendía en muchas direcciones, y en sus vastos cuadernos se pueden hallar montones de hipótesis sobre todo tipo de cosas. Leer a Newton es una experiencia estimulante pero agotadora, porque las ideas —inteligentes— llegan copiosas y veloces. Hace observaciones abundantes sobre la fermentación, la contracción muscular y las transformaciones de la materia registradas en la vieja alquimia y la química moderna.

Para reconciliar su ambición con su exigencia de rigor, Newton utilizaba dos técnicas básicas. Una consistía en un método de trabajo intelectual, la otra en un truco de presentación.

Me gusta pensar que su *método* es un proceso de selección: una especie de lucha darwiniana por la supervivencia en el mundo de las ideas. Newton siempre intentaba poner sus suposiciones a trabajar derivando de ellas unas consecuencias que pudiera comparar con observaciones. Algunas sobrevivían a este ensayo, o dejaban descendencia viable, mientras que otras se extinguían.

Hay muchas ideas en los cuadernos que se desinflaron y nunca se hicieron públicas. El famoso alegato de Newton

No sé lo que puedo parecerle al mundo, pero para mí mismo parezco haber sido solo como un niño jugando en la playa, distrayéndome al encontrar de vez en cuando una piedra más pulida o una concha más bonita de lo habitual, mientras el océano grandioso de la verdad yace inexplorado ante mí

... suele interpretarse como una señal de apropiada modestia. Yo no lo veo así. Newton no era un hombre modesto, pero sí honesto. Él más que nadie era consciente de lo mucho que se había dejado sin hacer.

Otras de sus suposiciones sobrevivieron, pero no prosperaron lo bastante para alcanzar el listón establecido por Newton. Y este listón lo escondía de la luz pública con un truco.

El *truco* de Newton es de una encantadora transparencia. Se trata de la técnica de meter las declaraciones entre signos de interrogación. Porque entonces ya no son aserciones, ni hipótesis, sino solo Indagaciones. El último

trabajo científico de Newton consiste, de hecho, en un conjunto de 31 *Indagaciones* que adjuntó a las ediciones tardías de su *Óptica*.

Las primeras Indagaciones son preguntas cortas y destacadas, por lo general redactadas en negativo. Esta es la primera, por ejemplo:

¿No actúan los cuerpos sobre la luz a distancia, y por su acción curvan sus rayos; y no es esta acción más fuerte cuanto menor es la distancia?

Esta Indagación, como muchas de las demás, era realmente una propuesta de investigación. Y como muchas de las demás, se demostró muy fructífera. Podemos leerla como una anticipación del curvado de la luz por el Sol y por las galaxias distantes: importantes descubrimientos de la física del *siglo XX*.

Aunque él mismo no parece haberlo hecho en detalle, no es difícil aplicar la ley de la gravitación universal de Newton a la luz, si consideramos la luz — como Newton solía hacer — como compuesta de partículas materiales. Las órbitas de las partículas de luz seguirían, según esta idea, el mismo tipo de órbitas que unos planetas que tuvieran la misma velocidad. (La fuerza gravitatoria es proporcional a la masa, y la fuerza en general equivale a la masa multiplicada por la aceleración; por tanto, al calcular la aceleración debida a la gravedad, la masa se anula). Newton sabía de la determinación astronómica de la velocidad de la luz que había hecho Ole Rømer, y se refiere a ella en la *Óptica*, donde menciona que la luz emplea entre siete y ocho minutos en viajar del Sol a la Tierra. Así que Newton estaba en condiciones de estimar el curvado de la luz por el Sol debido a la gravedad. Es un efecto muy pequeño, demasiado para medirlo con la tecnología de tiempos de Newton. Einstein calculó la curvatura de la luz por el Sol, primero esencialmente como Newton lo habría hecho, y después usando su nueva teoría de la relatividad general, que da una respuesta del doble, en 1915. Su predicción se sometió a prueba por una expedición internacional durante el eclipse solar de 1919, cuando las posiciones de las estrellas circundantes se vieron distorsionadas. El éxito de la expedición, que marcó el retorno de los valores comunes europeos tras el fiasco de la primera guerra mundial, causó sensación y convirtió a Einstein en una celebridad mundial.

Unas masas y distancias mucho mayores entran en juego cuando la luz de galaxias distantes pasa cerca de otras galaxias que están en primer plano, lo que conduce al fenómeno espectacular de la lente gravitatoria. Las imágenes de las galaxias distantes resultan a veces distorsionadas por el paso de su luz a través de los campos gravitatorios de la materia interpuesta, de modo similar a la distorsión de la imagen de una paja cuando se ve a través del agua. En la Figura 13, por ejemplo, los arcos son imágenes distorsionadas de una población de galaxias muy distante situada de cinco a diez veces más lejos que el racimo galáctico que hace de lente.

¡Seguro que Newton habría disfrutado de esta vindicación cósmica de su primera Indagación!

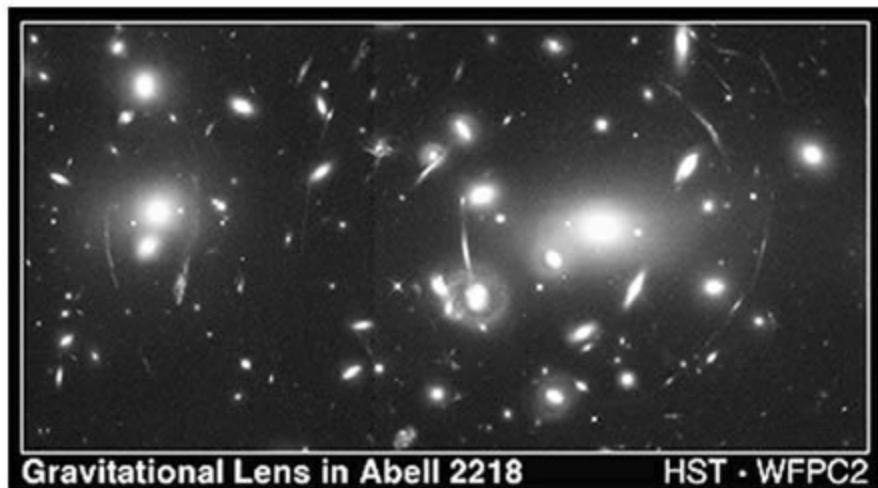


FIGURA 13. Los campos gravitatorios de los cuerpos causan que la luz se curve, creando lentes cósmicas. Aquí se pueden ver unas imágenes enormemente distorsionadas de galaxias, que aparecen como finos arcos.

Mirando a todas partes

Las Indagaciones posteriores abren unas argumentaciones cada vez más amplias, hasta que en la Indagación 31 los signos de interrogación se dejan implícitos. Aquí llegamos a la hipótesis más grandiosa de todas las de Newton, y a sus últimas palabras sobre la luz y la naturaleza:

Hasta donde podemos conocer por la filosofía natural cuál es la primera Causa, qué poder tiene él sobre nosotros, y qué beneficios recibimos de él, hasta allí llegará nuestro deber con él, así como el de unos con otros, aparecerá ante nosotros por la luz de la naturaleza. Y sin duda, si la adoración de falsos dioses no hubiera cegado a los paganos, su filosofía moral habría llegado más lejos que la de las cuatro virtudes cardinales; y en vez de enseñar la transmigración de las almas, y adorar al Sol y la Luna, y a los héroes muertos, nos habrían enseñado a adorar a nuestro verdadero Autor y Benefactor, como sus ancestros hicieron bajo el gobierno de Noé y sus hijos antes de que se corrompieran.

A algunos les parecerá extraño que el mayor héroe de la revolución científica se atreviera con estas cuestiones teológicas y éticas. Pero Newton veía el mundo en su conjunto.

John Maynard Keynes, un erudito polímata famoso sobre todo por su trabajo en economía, hizo un estudio pionero de los voluminosos artículos inéditos de Newton. Keynes resumió sus impresiones en «*Newton, el hombre*», un ensayo extraordinario que recomienda efusivamente (véase «Lecturas recomendadas»). Según Keynes,

Él consideraba el universo un criptograma planteado por el Todopoderoso.

Para Newton, la naturaleza no era la única fuente de respuestas a los enigmas de la existencia:

La filosofía, tanto especulativa como activa, no solo puede hallarse en el volumen de la naturaleza, sino también en las Sagradas Escrituras, como el Génesis, Job, Salmos, Isaías y otros. En el conocimiento de esta filosofía, Dios hizo a Salomón el mayor filósofo del mundo.

Newton creía que los antiguos poseían un vasto conocimiento que codificaban en textos y simbologías esotéricos, incluyendo en concreto las visiones proféticas de Ezequiel y la Revelación, las medidas del templo de Salomón y el trabajo preñado de símbolos de los alquimistas. Newton escribió millones de palabras de densos comentarios sobre estas materias, incluido uno que publicó, el refinado *La cronología de los reinos antiguos enmendada*, una obra de más de ochenta mil palabras cuyo genio ilegible prefigura el *Finnegans Wake* de Joyce. Newton también pasó muchos años en

Cambridge haciendo un intenso trabajo experimental en un laboratorio especial que construyó él mismo, con el doble objetivo de clarificar y desarrollar las transformaciones de los alquimistas.

Hay que destacar que, mientras Isaac Newton trabajaba en la erudición bíblica o en la alquimia, seguía siendo Isaac Newton. Keynes escribe:

Todos sus trabajos inéditos sobre asuntos esotéricos y teológicos están marcados por un aprendizaje meticuloso, un método preciso y una sobriedad extrema de expresión... Casi todos se llevaron a cabo durante los mismos veinticinco años que sus estudios matemáticos.

Y aquí añadiría yo una Indagación de mi propia factura: ¿no es antinatural separar nuestro entendimiento del mundo en partes que no buscamos reconciliar?

Es a esa Indagación a la que este libro, para mí, responde.

Apuntes de una biografía

Las hazañas de Isaac Newton plantean un reto a los partidarios de la eugenésia y a los teóricos de la educación infantil. Su padre, que también se llamaba Isaac, era un campesino terrateniente iletrado e inculto, aunque próspero, descrito como «un hombre salvaje y extravagante». Su madre, Hannah Ayscough, era una pariente pobre de la aristocracia rural. Él era un hijo póstumo, nacido prematuramente el día de Navidad de 1642, tan pequeño que su madre dijo que podía «cabrer en una cacerola». Su madre se casó en segundas nupcias cuando Newton tenía tres años, dejándole (a petición de su nuevo marido) al cuidado de su abuela, hasta que Hannah enviudó de nuevo y se reunió con su hijo en 1659. Los orígenes de Newton fueron, para abreviar, a la vez humildes y dificultosos.

Y por tanto hay una chispa de gracia divina en la curiosidad abarcadora, la creatividad y el sentido de la aventura intelectual que el joven Newton trajo a este mundo.

De niño siguió el rastro de las sombras del Sol, construyendo relojes solares meticulosamente calibrados y registrando las variaciones estacionales del amanecer y la puesta de sol, convirtiéndose en el árbitro local de confianza para la medida del tiempo en aquella campiña privada de relojes. También construyó e hizo volar unas cometas complicadas, y en una ocasión alarmó a los vecinos al adosarles unos faroles para hacerlas volar de noche (¡inspirando una precoz alerta por ovnis!).

Del joven Isaac se esperaba que fuera un granjero, pero él detestaba la labranza, y se le daba mal. Por otro lado, había sido un excelente estudiante en la escuela local, y Henry Stokes, el maestro de allí, logró persuadir de algún modo tanto a Hannah como a la universidad de que Isaac debía estudiar en Cambridge. Fue admitido como *subsizar*, una figura peculiar del Cambridge de la época que implica disfrutar de ayuda financiera a cambio de actuar como sirviente para los estudiantes más pudientes.

En los años 1665-1666 estalló un brote de peste bubónica en Inglaterra. La Universidad de Cambridge cerró, lo que devolvió al estudiante de veintidós años a la granja de su familia en Woolsthorpe. En ese período Newton hizo descubrimientos rompedores en matemáticas (series infinitas y cálculo), mecánica (la idea de la gravedad universal) y óptica (teoría de los colores). Como él mismo describió:

Todo esto ocurrió en los dos años de la peste, 1665 y 1666, porque en aquellos días yo estaba en la edad de la plenitud para la invención, y me interesaba en las matemáticas y la filosofía como lo he hecho desde entonces.

Quizá nada capture tanto el espíritu de autosuperación de Newton como un experimento que realizó en aquellos días para clarificar la relación entre el mundo externo y la sensación interna de la visión. Aquí está su descripción, incluyendo tanto el texto como el dibujo que hizo (Figura 14):

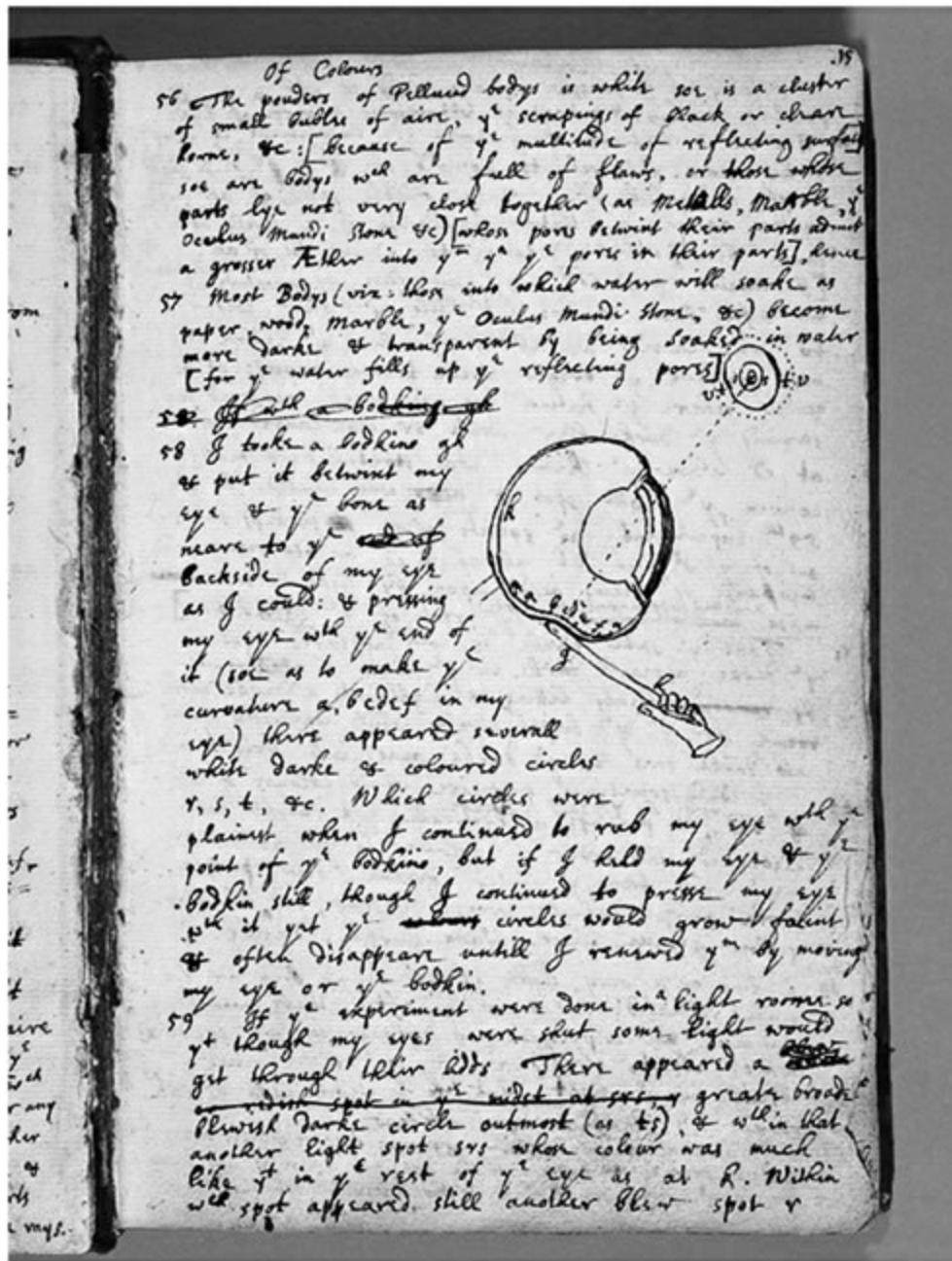


FIGURA 14. El flemático recuento de Newton de un experimento inquietante que hizo con su propio ojo para comprender a fondo la percepción de la luz, y su posible causa mecánica.

Tomé un punzón y me lo metí entre el ojo y el hueso, tan cerca de la parte trasera del ojo como pude: y presionando el ojo con su punta (de manera que hiciera la curvatura a, bcdef en mi ojo), aparecieron varios círculos oscuros y coloreados r, s, t y c. Esos círculos eran más evidentes cuando me seguí frotando el ojo con la punta del punzón,

pero si dejaba quietos el ojo y el punzón, y aunque siguiera presionando el ojo con él, los círculos se hacían más débiles y a menudo desaparecían hasta que los retiré moviendo el ojo o el punzón.

Newton trabajó con una intensidad furibunda y sin descanso hasta mediado el año 1693, cuando, después de más de veinticinco años de concentración que pocas veces, si alguna, se habrán igualado en la historia de la humanidad, sufrió lo que ahora llamaríamos un brote psicótico. No podía dormir durante varios días seguidos, imaginaba que sus amigos estaban conspirando contra él (y les escribía unas cartas vitriólicas) y padecía temblores, amnesia y una confusión generalizada. Newton se describió a sí mismo como «sumamente preocupado por el embrollo en que estoy, no he comido ni dormido bien en los últimos doce meses, y he perdido mi antigua coherencia mental». Los síntomas persistieron aún varios meses, y después remitieron de forma gradual. Es posible que el envenenamiento por mercurio, una consecuencia de su trabajo con ese epítome de las sustancias alquímicas, tuviera parte de la culpa de su enfermedad.

En 1694 dejó Cambridge para aceptar un puesto en la Real Casa de la Moneda, en Londres. Sus preocupados amigos habían organizado lo que pensaron sería una sinecura para él allí, un empleo bien pagado y con poca tarea. Newton se volvió una persona mucho más «normal» y, durante los veinticinco años siguientes, un funcionario muy eficaz, pero sus días de indagación furiosa se habían acabado.

La evocadora imagen de la Figura 15 es el único retrato de Newton que, para mí, parece expresar su espíritu y su poder. Se volvió canoso siendo aún muy joven.

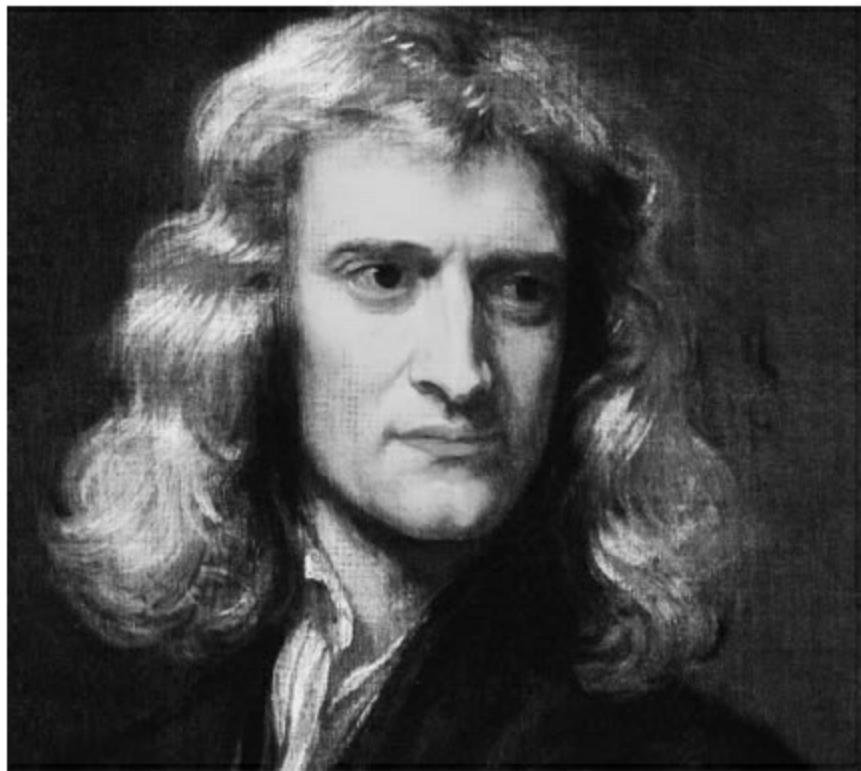


FIGURA 15. Isaac Newton en su plenitud.

Newton II: color

Los colores son las sonrisas de la naturaleza.

LEIGH HUNT

De lo expuesto resulta también evidente que la blancura de la luz solar está compuesta de todos los colores con los que las varias clases de rayos de que la luz consiste, cuando por sus diversas refringencias son separados uno de otro, tiñen el papel o cualquier otro cuerpo blanco sobre el que caigan. Pues esos colores ... son inmutables, y cuando quiera que esos rayos con esos colores suyos se mezclan de nuevo, reproducen la misma luz blanca de antes.

ISAAC NEWTON

La primera cita no necesita explicación: los humanos disfrutan del color, como disfrutan de las sonrisas, de forma espontánea. La segunda, cuya explicación ocupará este capítulo, inaugura una reflexión más profunda del color, que ocupará gran parte de nuestra reflexión, e iluminará mucho nuestra Pregunta.

Las mentes más puras y reflexivas son las que más aman el color.

JOHN RUSKIN, *Las piedras de Venecia*

Esos somos nosotros: así que vamos a ello.

Purificando la luz

El blanco ha sido desde tiempos remotos un color que significa pureza. En el antiguo Egipto los sacerdotes y sacerdotisas de Isis vestían siempre de lino blanco, ¡como hacían las momias, listas para la vida eterna! Es el color tradicional en las bodas, uniones de los puros de corazón. En el simbolismo cristiano es el color del Cordero, y el del huésped celestial, y el del Cristo triunfante, como se puede ver en la Lámina I.

Esta asociación del blanco con la pureza suena bien. El blanco es el color de la fuente primaria de iluminación natural, nuestro Sol, cuando brilla en todo lo alto del cielo. El blanco es el color de las superficies más brillantes, como las nevadas, las que mejor reflejan el Sol.

Pero el análisis científico cuenta una historia distinta.

Cuando un rayo de luz solar pasa a través de un prisma de cristal, emerge un arcoíris —o un espectro, en la jerga— de colores. Un efecto similar, que implica el paso de la luz a través de las gotas de agua, es responsable de los arcos iris naturales.

Antes del trabajo de Newton, la opinión común era que los colores que emergen de los prismas o las gotas de lluvia resultaban de la degradación de la luz blanca que viajaba a su través. Se pensaba que los colores eran mezclas del negro (la oscuridad) con el blanco, en proporciones variables. Según cuánta distancia viaje la luz a través del prisma, resulta más o menos degradada, y por tanto aparece como un color diferente. La idea tiene el atractivo de la simplicidad: ¿por qué introducir muchos ingredientes si dos (o uno) pueden bastar?

Newton, sin embargo, propuso que la luz blanca —incluyendo en concreto la luz del Sol— es una mezcla de muchos ingredientes básicos. Según esta idea, el prisma no degrada la luz blanca, sino que separa la luz solar en ingredientes más básicos: unos ingredientes que ya estaban presentes al principio.

Un experimento simple pero profundo, que Newton citó como el *experimentum crucis* (el «experimento crucial») para su propuesta, presenta el argumento visiblemente, como se ve en la Lámina J. Los colores espectrales, en los que la luz blanca es analizada por un prisma, pueden reensamblarse como luz blanca utilizando un segundo prisma. Cuando solo se usa una parte del espectro, la luz combinada no es blanca, sino una mezcla de

los colores que se han recuperado originalmente. Cuando la luz solar natural se utiliza como fuente original, y el extremo azul del espectro se deja fuera, el verde domina como color percibido. Cuando solo se deja pasar una estrecha banda de colores —el rojo, en este ejemplo—, solo emerge luz de ese color.

El fondo de la cuestión es que, con un segundo prisma, podemos revertir la separación y regresar a la luz blanca, una luz indistinguible en sus propiedades de la luz solar con la que empezamos. Como indica nuestra imagen, podemos también decidir combinar solo una parte del espectro. Y entonces emergen rayos de colores intermediarios, en vez de blancos. En resumen, el prisma lleva a cabo un Análisis de la luz blanca entrante.

Es fácil interpretar este experimento si asumimos que la luz solar consiste en fotones. (Aunque el término no empezó a usarse hasta siglos después, para evitar la confusión me referiré a los átomos de luz como fotones.)

Los fotones podrían venir en distintas clases —con distintas formas, digamos, o con masas diferentes— que resultan afectadas de modo distinto por el cristal del prisma. Entonces el prisma, al torcer mucho o poco las trayectorias de los diferentes tipos de átomos de luz, los separaría y, efectivamente, los clasificaría. Actuaría como una máquina expendedora moderna que separa los diferentes tipos de monedas. Las diferentes clases de fotones afectarían también a nuestros ojos de maneras diferentes, produciendo la sensación de diferentes colores.

Newton no se comprometió con eso, ni con ningún modelo concreto. ¡Eso habría sido una Hipótesis! Pero se quedó con esas ideas en mente, como guías para profundizar en la investigación experimental.

¿Hasta dónde se puede llevar la idea de clasificar la luz? Podemos bloquear todo el espectro salvo una pequeña porción para obtener rayos de color puro del espectro. Los componentes de esos rayos filtrados, sean lo que sean, se tuercen en la misma medida cuando pasan por el prisma. ¿Ha clasificado ese proceso la luz en partes idénticas y fundamentales? ¿O puede que un procesamiento más avanzado revele una estructura adicional, y demande por tanto una purificación ulterior?

Newton sometió a sus rayos purificados, los rayos de colores espectrales, a una amplia variedad de vejaciones. Los reflejó en diversas superficies, y los hizo pasar por lentes y prismas de muchos diferentes

materiales transparentes (o parcialmente transparentes), no solo de vidrio común. Halló que esos procesos respetan la clasificaciónpectral realizada por el prisma.

El amarillo espectral, cuando se refleja, sigue siendo amarillo; el azul espectral sigue siendo azul, y así sucesivamente. La luz es absorbida a menudo por los objetos que vemos coloreados. Por ejemplo, un objeto que vemos azul absorbe todos los colores espectrales excepto los cercanos al azul: y por eso aparece azul. Pero nunca encontramos el amarillo espectral reflejado como azul espectral, ni como cualquier otra cosa que no sea amarillo espectral.

La misma regla se aplica al paso *a través* de materiales (refracción). Los colores espectrales mantienen su integridad. Los diferentes colores resultan torcidos en distinta medida, por supuesto —así es como el prisma los separó en primer lugar—, pero un material refractará los rayos de un color espectral dado en una manera concreta.

Mediante experimentos como estos, Newton estableció que los rayos de luz derivados de los colores espectrales son sustancias puras, con propiedades fijas y reproducibles. El blanco no aparece en el espectro. Los rayos de luz blanca siempre pueden analizarse en colores espectrales componentes, y siempre revelan ser una mezcla. De forma irónica y a pesar de su simbolismo, cuando se le considera simplemente como luz, el blanco nunca es puro.

(Aquí, para ser exacto, debo mencionar una complicación interesante. No es del todo cierto que los colores espectrales no se puedan analizar más a fondo. Es posible una separación dicotómica más allá, en dos diferentes *polarizaciones*. Resultará natural tratar esta complicación más adelante, en conexión con el trabajo de Maxwell. Aunque es posible, no es del todo fácil separar la luz de un solo color espectral en sus dos componentes polarizados, y por tanto podemos ignorar esta distinción para muchos propósitos. Se da una situación similar con los elementos químicos de las sustancias, que pueden ser mezclas de isótopos que son difíciles, pero no imposibles, de separar.)

Aunque nunca he oído describirlo de esta forma, creo que es adecuado considerar lo que Newton estaba haciendo aquí, y en toda la *Óptica*, como la determinación de la química de la luz. El Análisis, o la purificación, es el primer paso de la química.

La química de la luz

Una vez purificada la luz, estamos preparados para estudiar su química en mayor profundidad.

Nuestro análisis ha sido hasta ahora coherente con el principio rector de que la luz está hecha de fotones, y de que los diferentes tipos de fotones se tuercen en distinta medida por el cristal, de modo que pueden separarse pasándolos por un prisma. Cada color espectral, entonces, es una selección purificada, que solo contiene fotones de un tipo. De esta forma, hemos identificado los elementos de la luz.

Comparemos y contrastemos la química de la luz con la más familiar, aunque desarrollada más tarde, y mucho más complicada, química de las sustancias, empezando con sus tablas periódicas:

- La tabla periódica de la luz solo tiene una fila: el arco iris de colores espectrales. Los colores espectrales son sus elementos. La tabla periódica de las sustancias tiene varias filas, con los elementos organizados en columnas que muestran unas propiedades químicas más o menos similares, pero distintas. También hay dos tramos largos y singulares —los lantánidos (tierras raras) y los actínidos— en las que poca cosa cambia, químicamente.
- La tabla periódica de la luz puede materializarse de manera tangible y física. De hecho, pasando a través de un prisma un rayo de luz solar, o la luz producida por cualquier cuerpo caliente y brillante, y proyectando el resultado en una pantalla, ya tenemos lo esencial de la tabla. La tabla periódica de las sustancias, en cambio, es una construcción intelectual. No existe un objeto en la naturaleza que corresponda a ella.
- La tabla periódica de la luz es continua, mientras que la tabla periódica de las sustancias es discreta.
- Los elementos de la luz solo interactúan entre sí de manera muy débil. De hecho, los rayos de luz que se cruzan pasan uno por el otro libremente, sin reaccionar. (No echan chispas, por ejemplo, ni dejan tras de sí un

residuo de moléculas de luz.) En estos sentidos, cada elemento de luz se asemeja a los elementos químicos denominados «gases nobles» o «inertes».

Desde una perspectiva más amplia, es natural considerar juntos los dos tipos de química, como la ciencia de los átomos y sus interacciones, incluyendo tanto los átomos de luz como los de sustancia. En ese marco ampliado, los átomos de luz ya no aparecen tan inertes. Aunque no se combinan fácilmente uno con otro, sí se combinan con los átomos de sustancia, siguiendo reglas definidas. Tendremos mucho más que decir sobre esto más adelante, y profundizaremos en ello cuando lleguemos a «Belleza cuántica I: Música de las Esferas».

Uno de los principales objetivos de la alquimia era producir la piedra filosofal, que transformaría una clase de átomo en otra, por ejemplo el plomo en el mucho más valioso oro. Para los átomos de luz hay una piedra filosofal: ¡el movimiento! Si nos movemos hacia un rayo de luz espectralmente pura, se nos aparecerá como luz espectral de un color diferente. Los colores se desplazan en la dirección del rojo al azul, y decimos que están desplazados al azul. La magnitud del desplazamiento es proporcional a la velocidad del movimiento relativo, y es muy pequeña a menos que esa velocidad sea cercana a la velocidad de la luz. Los desplazamientos son mucho más pequeños de lo que podía observar Newton. Para la mayoría de los casos prácticos, podemos ignorarlos. Pero el desplazamiento al rojo de las galaxias distantes —en concreto, el cambio que provoca ese desplazamiento al rojo en la posición de las líneas oscuras y claras del espectro— codifica cuán deprisa se están alejando de nosotros esas galaxias, y nos permite cartografiar la expansión del universo.

La idea de que la luz está hecha de partículas o, como las hemos estado llamando, fotones, ha tenido una historia enrevesada. Como hemos visto, Newton se sentía atraído por la idea, pero no llegó a casarse con ella (flirteó, sí, pero no se comprometió con ella de forma exclusiva). Su autoridad fue tal, sin embargo, que las teorías de partículas sobre la luz dominaron hasta bien entrado el siglo XIX, cuando las teorías ondulatorias tomaron el relevo. Con el advenimiento de la explicación electromagnética de la luz por Maxwell, que

trataremos a fondo más adelante, el triunfo de la teoría ondulatoria parecía consumado. Pero en el siglo XX, con la llegada de la mecánica cuántica, la teoría de partículas hizo una reentrada, con los átomos de luz bautizados oficialmente como fotones. Ahora comprendemos que partículas y ondas ofrecen perspectivas complementarias de la realidad de la luz. La práctica de Newton de mantener muchas alternativas en juego, renunciando a proponer una Hipótesis en exclusiva, anticipa la complementariedad moderna.

Sacando provecho del Análisis

Newton extrajo un uso práctico de su entendimiento fundamental del color para mejorar los telescopios. Antes de su trabajo, los telescopios utilizaban dos lentes, normalmente en los extremos de un tubo largo, para recoger la luz de los objetos distantes, y después enfocar su imagen de forma magnificada. Debido a que los diferentes colores de la luz siguen diferentes trayectorias a través de una lente, no todos los colores se pueden enfocar con precisión al mismo tiempo, y se obtiene una imagen borrosa. Este es el problema de la *aberración cromática*. Newton propuso que se podía usar un espejo reflectante cóncavo para recoger la luz, en vez de una lente, y diseñó unos telescopios basados en esa idea. Sus telescopios reflectantes redujeron la aberración cromática, y además son más simples de fabricar. Virtualmente todos los telescopios modernos son telescopios reflectantes.

El análisis de la luz ha sido una fuente profundamente fructífera de descubrimientos científicos. Entre muchos posibles ejemplos, describiré aquí uno que es fácil de explicar, enormemente importante y dotado de un toque de poesía. (Encontraremos otros más adelante.)

La impresión general que uno obtiene cuando mira al espectro producido por la luz solar es una gradación continua de intensidad. Pero si uno usa un cristal de muy alta calidad en el prisma, y separa la luz con más precisión, descubre una abundancia de detalles finos. Joseph von Fraunhofer, pionero de este campo a principios del siglo XIX, descubrió nada menos que 574 líneas oscuras dentro de ese aparente continuo. La razón de estas líneas no se comprendió hasta la década de 1850, cuando Robert Bunsen y Gustav

Kirchhoff mostraron cómo unas líneas similares se podían producir en la Tierra. Cuando se pone un volumen de gas frío frente a una fuente caliente de luz, el gas absorberá parte de la luz. El gas es por lo general bastante selectivo en su absorción, y retira solo unos componentes de la luz en bandas espectrales estrechas. Cuando se analiza la luz, los colores que se han absorbido están ausentes, dejando unas líneas oscuras en el espectro.

Diferentes tipos de gas (por ejemplo, gases basados en distintos elementos químicos) absorben diferentes colores espectrales. Así, si tienes un gas de composición desconocida, ¡puedes deducir de qué está hecho viendo qué luz absorbe! En el lenguaje de nuestra química generalizada, el mensaje de las líneas oscuras de Fraunhofer, interpretado por Bunsen y Kirchhoff, es que un átomo de sustancia dado se combina —es decir, absorbe— con solo algunos elementos específicos de luz —es decir, colores espectrales— mientras que ignora a los demás. También se da el efecto inverso, que un gas calentado emite luz de ciertos colores preferentes, creando líneas brillantes del espectro. En conjunto, esas líneas oscuras y brillantes son como huellas digitales que identifican a las sustancias responsables.

Así pues, analizando la luz de una estrella, y comparando sus líneas oscuras y brillantes con las observadas en gases de laboratorio, los astrónomos pueden determinar de qué está hecha la estrella (y muchos otros detalles sobre las condiciones de su atmósfera, donde la luz se origina). Esto se convirtió enseguida, y sigue siendo hasta hoy, el pan y la sal de la astronomía física. Lo más fundamental es que nos enseña que las estrellas están hechas de los mismos materiales que observamos en la Tierra, y están sujetas a las mismas leyes físicas.

Unas observaciones desconcertantes de Norman Lockyer y Pierre Janssen sobre la corona solar parecieron desafiar en una ocasión esa gran conclusión, pero acabaron por reforzarla. En 1868, durante un eclipse de Sol, observaron una línea brillante que nunca se había visto que produjera ningún gas terráqueo. La responsabilidad se adjudicó a un elemento nuevo e intrínsecamente celestial, el «coronio». Pero en 1895 dos químicos suecos, Per Cleve y Nils Abraham Langlet, e independientemente William Ramsay, descubrieron que la misma línea es producida por un gas que emanaba del

mineral de uranio. De esta forma, las relaciones familiares entre el cielo y la tierra quedaron restauradas. El nuevo elemento fue (re)bautizado *helio*, en honor a Helios, el dios griego del Sol.

Newton III: belleza dinámica

Las leyes básicas de la mecánica newtoniana son leyes dinámicas, es decir, leyes sobre cómo cambian las cosas. Las leyes dinámicas son diferentes de las reglas de la geometría, o del tipo de leyes expuestas por Pitágoras y Platón, que describen objetos o relaciones particulares.

Las leyes dinámicas nos invitan a extender nuestra búsqueda de la belleza. Deberíamos considerar no solo el mundo de lo que *es*, sino también —y de forma primaria— el mundo mucho más vasto e imaginativo de *lo que puede ocurrir*. El mundo de la mecánica newtoniana es un mundo de *posibilidades*.

Esa búsqueda expandida descubre oro en la montaña de Newton (Figura 17). Pero necesitamos un poco de preparación antes de poder visitarla.

Tierra contra cosmos

Los predecesores inmediatos de Newton dejaron a la filosofía natural con una gran tarea inacabada.

El *Sidereus nuncius* («Mensajero de las estrellas») de Galileo contiene docenas de sus bocetos de la Luna, tal y como la veía por el primer telescopio astronómico, una lente de aumento 20x de su propia construcción. Los patrones de luz y sombra revelan claramente que la Luna tiene una topografía rugosa (Figura 16).

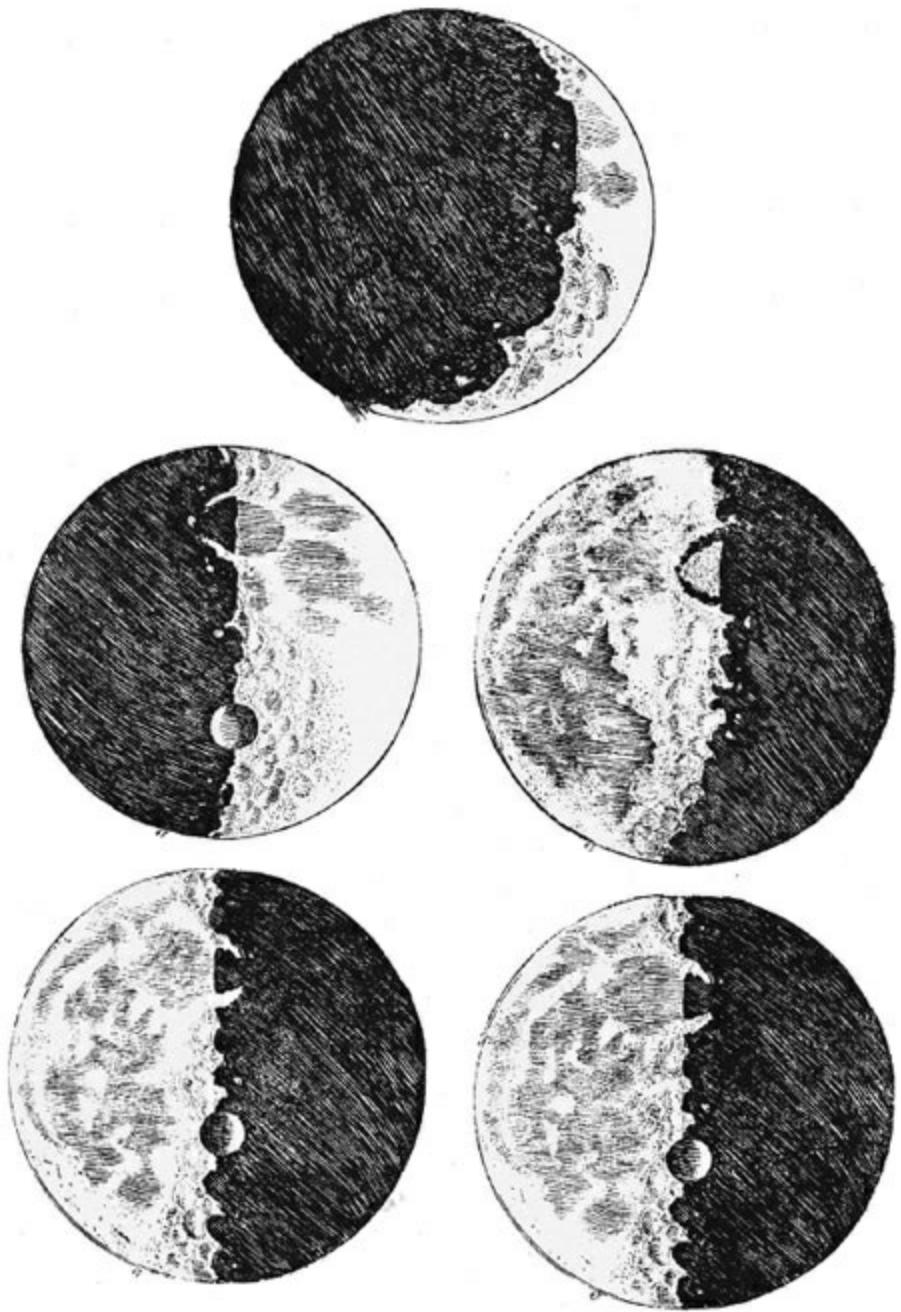


FIGURA 16. Algunos de los llamativos dibujos de Galileo de la Luna telescopica.

Mientras Galileo trajo a tierra las esferas celestiales, Copérnico puso la Tierra en movimiento, como un planeta entre muchos otros, y Kepler halló regularidades precisas de los movimientos planetarios. Aunque aquí no debemos preocuparnos de los detalles, voy a enumerar las tres leyes de Kepler, de forma que luego pueda suscitar dos puntos cruciales:

1. La órbita de un planeta es una elipse, con el Sol en un foco.
2. La línea que conecta un planeta al Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.
3. El cuadrado del período (es decir, la duración del «año» del planeta) es proporcional al cubo del eje mayor de la elipse.

El primer punto es que estas *no* son leyes dinámicas. Describen relaciones consumadas, no reglas del cambio. El segundo punto es que son reglas sobre el movimiento de los planetas. No tienen nada que decir sobre los movimientos que observamos más cerca de casa, en nuestra experiencia terrenal. Son informes alienígenas llegados de un universo conceptual diferente, ¡incluso aunque la Tierra misma es un planeta!

La gran tarea inacabada, entonces, era reconciliar la Tierra con el cosmos. ¿Cuáles son las leyes comunes que gobiernan a la vez esos reinos visiblemente similares?

La montaña de Newton

Hay muchos diagramas geométricos en los *Principia* de Newton, y varias tablas numéricas, pero solo un dibujo (Figura 17). Para mí, es el dibujo más bello de toda la literatura científica.

Obviamente, visto solo como una pieza de aptitud artística, este dibujo es un logro más bien modesto. Lo que lo hace bello son las ideas que nos invita a imaginar. Es una invitación a un experimento mental, que insinúa que los objetos que caen a la Tierra y los cuerpos celestes que orbitan en el espacio están haciendo el mismo tipo de cosa, y por tanto sugiere la posibilidad de una fuerza universal de la gravedad.

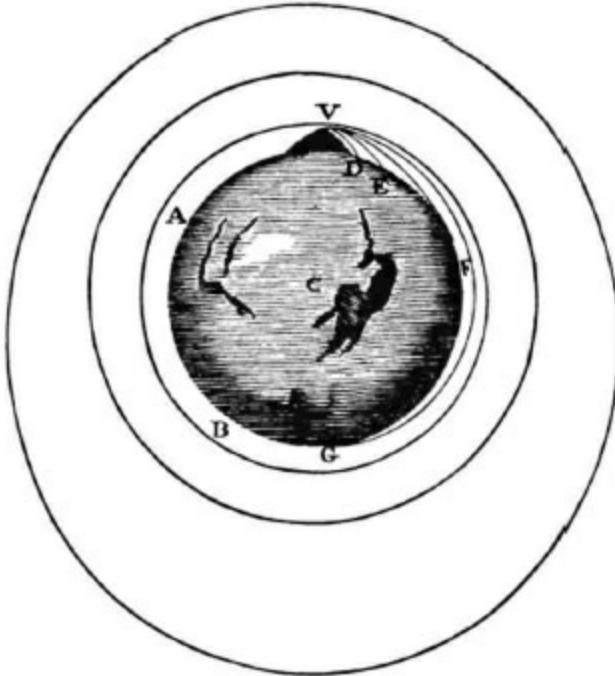


FIGURA 17. La montaña de Newton: un gran experimento mental.

Estás en la cima de una montaña y arrojas una piedra horizontalmente, es decir, paralela a la superficie de la Tierra. Si la lanzas a pequeña velocidad, solo recorrerá una corta distancia mientras desciende hacia la superficie. Si la lanzas más fuerte, recorrerá más distancia antes de caer. En la práctica, ningún mortal puede arrojar una piedra con la suficiente fuerza para que recorra una fracción significativa de la circunferencia de la Tierra. Pero no importa: esto es un experimento mental, y se nos anima a sustituir el poder físico por el mental. Lánzala más fuerte. Con el ojo de tu mente verás, como en el dibujo, que el punto final de la trayectoria empieza a acercarse sigilosamente al punto de partida.

Y entonces, a medida que lanzas aún más fuerte, llega un momento en que tienes que agacharte ¡para que la piedra no te dé en la nuca! Una vez tomada esa precaución, puedes ver que la piedra repite su actuación, porque ha alcanzado una órbita circular. (¿Y la resistencia del aire? ¡Por favor, esto es un experimento mental!) Puedes poner tu yo mental en la cima de montañas

imaginarias y aplicar la misma lógica para ver la posibilidad de que los cuerpos orbiten la Tierra a cualquier distancia, bajo la influencia de su gravedad.

Puedes imaginar una montaña realmente alta, y una piedra realmente grande... y cuando la piedra esté en órbita, llamarla la Luna.

He hablado del cuerpo de la figura como si fuera la Tierra, pero está dibujado como una idealización, con unos rasgos de superficie vagamente definidos y una montaña de proporciones poco realistas. La clave aquí es precisamente que el cuerpo *no tiene* por qué ser la Tierra. El mismo experimento mental puede aplicarse al Sol, y explicar cómo la gravedad del Sol mantiene a los planetas en sus órbitas. O a Júpiter, explicando cómo la gravedad de Júpiter mantiene las lunas galileanas en sus órbitas.

La idea de una gravedad *universal*, que actúa entre cuerpos de toda clase, lleva este experimento mental mucho más allá de donde nosotros (o Newton) tenemos derecho a extrapolar el tipo de experiencia diaria —una piedra que cae al suelo— que nos lanzó a este viaje de la imaginación. ¡Los experimentos mentales no prueban nada! Pero pueden indicar caminos fructíferos que merece la pena seguir con una investigación más cuidadosa. Si el resultado imaginado de un experimento mental parece lógico, eso es bueno. Si es bello, eso es mejor aún. Y si obtienes de él más de lo que pusiste, mejor que mejor. La montaña de Newton lo tiene todo.

Hay una famosa leyenda, que parece surgir de algunos recuerdos improvisados de Newton en su edad proyecta, que sostiene que lo que le condujo a pensar en la posibilidad de una gravedad universal fue ver una manzana cayendo al suelo en su casa de Woolsthorpe. En su versión escrita no hay manzana, sino solo esto:

Empecé a pensar en la gravedad extendiéndose a la órbita de la Luna, y habiendo hallado cómo estimar la fuerza con que un cuerpo que giraba dentro de una esfera presiona la superficie de la esfera: de la regla de Kepler sobre los tiempos periódicos de los planetas... deduje que las fuerzas que mantienen los planetas en sus órbitas deben ser recíprocamente como los cuadrados de sus distancias a los centros sobre los que giran: y así comparé la fuerza requerida para mantener la Luna en su órbita con la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra, y hallé que responden muy cerca.

Fuera o no su pensamiento estimulado por la caída de una manzana, ese fenómeno en sí mismo no podría dar mucho que pensar. Yo creo que lo más probable es que algo parecido a la montaña de Newton fuera la percepción que convirtió la gravedad universal, para Newton, en una visión persuasiva.

También creo que existe una trayectoria plausible que comienza con el pensamiento de la manzana como un destello de entendimiento, y conduce al pensamiento de la montaña como su desarrollo. La idea es simple, pero muy bonita. Si pensamos que la influencia de la Tierra «se extiende a la esfera de la Luna» mediante la gravedad, como una explicación de la órbita de la Luna, estamos asumiendo una conexión entre dos tipos de movimiento que parecen muy diferentes. La gravedad, observada desde la Tierra —mirando manzanas, digamos—, es un proceso de *caída* hacia el centro de la Tierra. El movimiento de la Luna *orbitando* sobre la Tierra es, a primera vista, algo enteramente distinto. La clave del experimento mental de la montaña, sin embargo, es mostrar que el movimiento orbital es un proceso de caída constante, pero (desde el punto de vista de la piedra) ¡hacia un objetivo móvil! Y se puede ver en el dibujo que, en cada punto de la órbita circular, la velocidad de la piedra es paralela a la superficie de la Tierra (es decir, es localmente «horizontal»), mientras que la curvatura de la órbita que va hacia dentro se va doblando hacia la superficie. Una vez que hemos visto, desde nuestro punto de vista en la cima de la montaña, que orbitar es una forma de caer, podemos conectar la Luna a la manzana.

El tiempo como dimensión

Incluso los mejores experimentos mentales no prueban nada. Ante nosotros se abre un viaje, que conduce desde la visión de la montaña de Newton al tipo de teoría matemática precisa al que él aspiraba. Es un viaje a través de una nueva dimensión: el tiempo, imaginado de nuevo.

Las curvas en el dibujo de la montaña de Newton son trayectorias: cada una es una colección de puntos ocupados por un cuerpo (nuestra piedra) a tiempos sucesivos. Ellas mismas no son, desde luego, cuerpos en el espacio, ni objetos físicos en ningún obvio sentido directo. Y aun así las trayectorias

definen objetos geométricos, y las trayectorias son —como veremos— fundamentales para comprender la física del movimiento. Para apreciarlas de forma adecuada, vamos a darles un hogar.

Una trayectoria contiene información sobre el movimiento de un cuerpo, pero de la simple curva no podemos inferir cuándo pasó el cuerpo por cada parte. Podríamos poner marcas temporales a lo largo de los puntos de la curva, restaurando así la información perdida. Pero eso se vuelve muy incómodo si queremos considerar varias trayectorias a la vez, porque cualquier tiempo corresponde a un batiburrillo de puntos, uno en cada trayectoria, con sus patrones desviándose al pasar el tiempo. Un procedimiento mejor es considerar al tiempo como otra dimensión. Las trayectorias tienen su hogar natural en el universo conceptual ampliado que resulta: el espacio-tiempo.

Para plantear la naturaleza esencial de este profundo remodelado, revisitemos una situación más simple que la montaña de Newton, como es la carrera paradójica entre Aquiles y la tortuga. En primer lugar, date cuenta de que, en este cuento, las trayectorias en el espacio no son más que dos líneas rectas parcialmente solapantes: ¡algo no muy informativo! Ascendiendo al punto de vista del espacio-tiempo, podemos remirar la carrera entre Aquiles y la tortuga de un modo que haga más justicia a su carrera, y por extensión al movimiento en general.

Si queremos sincronizar nuestras descripciones de las dos trayectorias, tiene sentido introducir el tiempo como una cantidad separada —una nueva dimensión— y poner los puntos que marcan las posiciones de los dos corredores a cada tiempo. La Figura 18 lo expone.

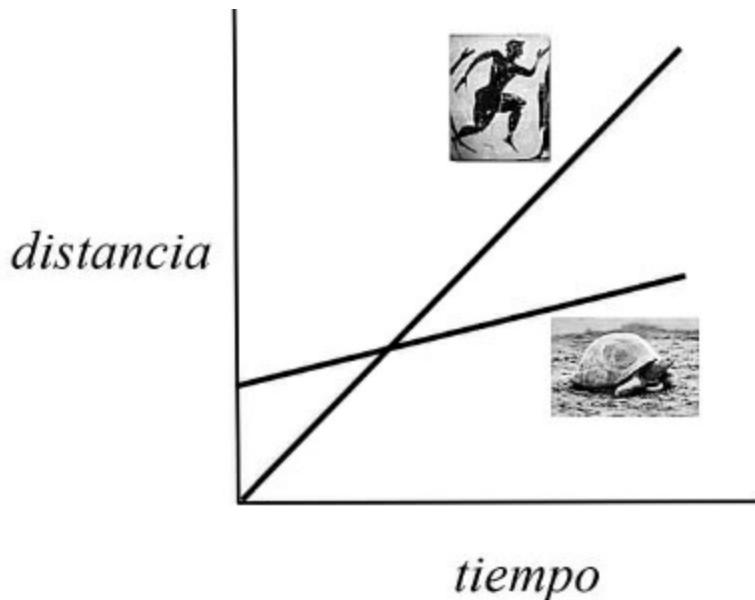


FIGURA 18. A medida que el tiempo progresá (hacia la derecha) tanto Aquiles como la tortuga avanzan por la pista (que aquí se representa hacia arriba). La trayectoria de Aquiles es más empinada, porque él cubre una mayor distancia en un intervalo dado de tiempo. Aquí el tiempo se ha convertido en una dimensión hecha y derecha, al mismo nivel que la distancia (es decir, el espacio).

En esta figura, la estructura lógica del argumento de Zenón se expone al desnudo, y la paradoja se disipa. En el espacio-tiempo, las dos trayectorias, una más empinada que la otra, ¡no pueden evitar cruzarse! (Puedes divertirte un poco hallando el tiempo en que Aquiles alcanza el punto de salida de la tortuga, luego el tiempo en que Aquiles alcanza el punto al que la tortuga se había desplazado entonces, cuando Aquiles había alcanzado el punto de salida de la tortuga... y así recrear, y desactivar, la formulación original de Zenón.)

Si queremos volver a las trayectorias, en el sentido original, solo tenemos que *proyectar* las trayectorias espacio-temporales horizontalmente sobre el eje de las distancias, suprimiendo por tanto toda la información sobre el tiempo.

Las trayectorias de la montaña de Newton ya están dibujadas en el espacio bidimensional, así que sus versiones espacio-temporales tendrán que vivir en tres dimensiones. En ese espacio-tiempo tridimensional, las órbitas circulares se despliegan como hélices.

También puedes, en un ejercicio de imaginación matemática, proceder al revés: toma el espacio de dos (o de tres) dimensiones, ¡y finge que es espacio-tiempo! De esa manera las curvas geométricas ordinarias se reinterpretan como trayectorias dinámicas. O dicho de otra forma, las consideramos como *movimientos* de un punto a través del espacio. Newton desarrolló esa idea básica con gran profundidad. Para él, era la esencia conceptual de lo que hoy llamamos cálculo. Newton, que inventó esa materia, la llamó *método de fluxiones*. Según este método, las curvas (y otros objetos matemáticos) no se consideran objetos completados, sino entidades construidas a lo largo del tiempo, mediante cambios suaves en sus componentes infinitesimales.

Análisis del movimiento

La Figura 19 es un diagrama clave de los *Principia*, que muestra cómo se analiza el movimiento. Kepler había hallado leyes matemáticas que describían el movimiento de los planetas, pero no tenía cómo derivar esas leyes a partir de principios físicos más profundos. En esta figura, utilizando su método característico de Análisis —romper las cosas en partes pequeñas—, Newton desvela el significado íntimo de las leyes de Kepler.

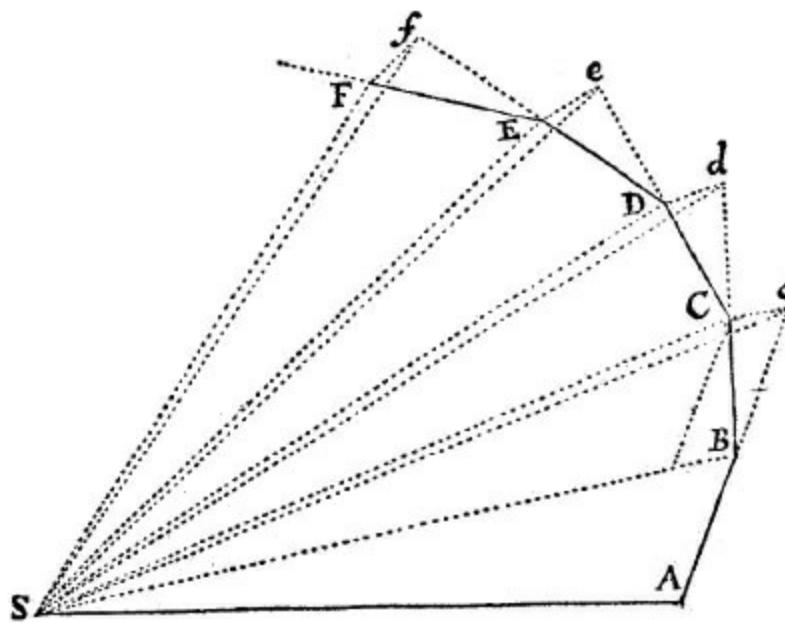


FIGURA 19. Análisis del movimiento por Newton. Las desviaciones del movimiento en línea recta se deben a fuerzas.

La órbita es descompuesta en un gran número de pasos, cada uno cubriendo un pequeño intervalo de tiempo. Como estos pasos no son físicos, sino idealizaciones matemáticas, podemos hacerlos tan pequeños como queramos. En un intervalo lo bastante pequeño, la órbita puede aproximarse a una línea recta, y la velocidad del objeto es más o menos constante. Una de las leyes del movimiento de Newton es que un cuerpo que no está sujeto a ninguna fuerza continuará en su estado de movimiento: es decir, seguirá moviéndose en la misma dirección y a la misma velocidad. En el diagrama, vemos las extensiones, como líneas de puntos, de los segmentos orbitales, indicando el camino que seguiría el cuerpo si la fuerza se apagara de pronto. Pero la órbita real difiere de esas extrapolaciones, precisamente porque hay una fuerza.

Mediante un detallado examen matemático del problema, podemos determinar qué tipo de fuerza se requiere para mantener una órbita dada. Newton lo hizo para las órbitas de los planetas, utilizando las regularidades que Kepler había descubierto (las tres leyes que expusimos en «Voy a enumerar las tres leyes de Kepler, de forma que...»). Mediante este análisis, Newton dedujo que la fuerza se dirige hacia el Sol, y disminuye con el cuadrado de la distancia al Sol.

No se nos debe escapar que este análisis es, en esencia, una ejecución matemática de los conceptos básicos que vimos en la montaña de Newton, su visionario experimento mental.

El anagrama de Newton

El análisis del movimiento en partes infinitesimales, con fuerzas que causan cualquier desviación del movimiento «natural» (es decir, el movimiento a velocidad constante), es la esencia de la mecánica newtoniana. Reacio a compartir sus secretos, pero ansioso por asegurar su prioridad, Newton publicó este anagrama:

6a cc d æ ff 7i 3l 9n 4o 4q rr

4s 8t 12u x

Su solución* es una frase en latín:

Data æquatione quotcunque fluentes quantitates involvente, fluxiones invenire; et vice versa

Vladimir Arnold, distinguido matemático del siglo xx y profundo erudito de la obra de Newton, lo traduce amablemente como:

Es útil resolver ecuaciones diferenciales.

A continuación ofrecemos una traducción más efusiva que resume nuestra argumentación:

El análisis del movimiento considerando sus partes más pequeñas es una buena cosa. Te permite determinar las fuerzas a partir de las trayectorias, o las trayectorias a partir de las fuerzas.

El sistema del mundo

Una vez inferida la ley universal de la gravitación partiendo de las leyes de Kepler del movimiento planetario, Newton la usó para predecir un impresionante abanico de nuevas consecuencias. Esto era la Síntesis, que fluía de su Análisis. He aquí una lista parcial:

- La naturaleza general de la fuerza de la gravedad que sentimos en la Tierra. Y su magnitud, dado el movimiento de la Luna. Y cómo varía con la posición en la Tierra.
- Los movimientos de las lunas de Júpiter y Saturno, y de nuestra Luna.
- El movimiento de los cometas.
- La causa de las mareas (que es la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol) y sus principales propiedades.
- La forma de la Tierra: ligeramente achatada.

- Un ligero bamboleo de la dirección del eje de la Tierra, más o menos de un grado cada setenta y dos años. Los efectos de esta «precesión de los equinoccios» habían sido observados por los astrónomos de la Grecia antigua, pero hasta entonces ni ellos ni ningún otro se había acercado a explicarlos.

Cada una de esas aplicaciones era cuantitativa, y varias de ellas podían ser verificadas con gran precisión. Todas podían ser refinadas por mejores observaciones y cálculos más extensos, sin ningún cambio en los principios.

Newton llamó al tercer libro de los *Principia*, donde llevaba a cabo su Síntesis, *El sistema del mundo*. Jamás se había dado algo parecido hasta entonces. Se había echado encima algunos de los más grandiosos problemas de la cosmología, y los había resuelto mediante principios matemáticos, con una precisión desconocida hasta entonces, y potencialmente ilimitada.

Real *e* Ideal.

Belleza dinámica

Las leyes dinámicas de Newton revelan belleza en el mundo físico, pero esa belleza es de una clase distinta de la que Pitágoras y Platón habían anticipado. La belleza dinámica es menos obvia, y apreciarla requiere más imaginación. Es una belleza de las leyes, más que de los objetos o de las sensaciones.

Podemos ver la diferencia comparando el modelo del Sistema Solar de Kepler, basado en los sólidos platónicos, con el Sistema del mundo de Newton. En el modelo de Kepler, el propio Sistema Solar es un objeto bello, que materializa una simetría perfecta. Sus elementos son esferas, espaciadas por los cinco sólidos ideales de Platón. En el sistema de Newton, las órbitas reales de los planetas reflejan las condiciones iniciales de Dios, tal vez algo erosionadas al pasar el tiempo (volveremos a esto más adelante). Dios puede tener, y probablemente tuvo, otras consideraciones en mente aparte del misticismo matemático, así que la belleza en las propias órbitas no es lo esperable, ni lo que encontramos. Lo que *es* bello no son las órbitas concretas,

sino los principios generales que subyacen a todas las órbitas posibles, y a la totalidad de las órbitas. Es la belleza de la montaña de Newton, realizada por su desarrollo preciso.

La reducción es expansionista

El método de Newton de Análisis y Síntesis tiene también otro nombre: reduccionismo. Se dice que un objeto complejo se ha «reducido» a algo más simple cuando se ha mostrado, o se ha hecho verosímil, que la cosa más compleja puede analizarse en partes más simples, y que su comportamiento puede sintetizarse a partir del comportamiento de esas partes.

El reduccionismo tiene mala reputación, entre otras cosas porque el «reduccionismo» *es un mal nombre**. La implicación pura y dura de la palabra es que, cuando has entendido algo por el método de Análisis y Síntesis, lo has reducido de alguna manera. Tu objeto complejo y sofisticado es ahora «nada más» que la suma de sus partes. Ya puestos —y aquí, más cerca de casa, es donde la cosa se vuelve turbadora—, puede que tú mismo, y las personas que amas, sean «nada más» que colecciones de moléculas haciendo lo que deben, que es comportarse de acuerdo a reglas matemáticas.

Los poetas y artistas de la época romántica, en respuesta a los triunfos de la «reducciónista» ciencia newtoniana, expresaron el desasosiego que les producía ese implícito «nadamásque»-ísmo. John Keats, el más lírico de los poetas líricos, escribió:

¿No escapan todos los encantos
al mero toque de la filosofía fría?
Hubo una vez un arco iris imponente en el cielo:
conocemos su trama, su textura; se da por hecho
en el pesado catálogo de las cosas comunes.
La filosofía cortará las alas de un ángel,
conquistará todos los misterios por regla y línea,
vaciará el aire embrujado y la mina de duendes:
destejerá un arco iris...

William Blake protestaba contra la visión miope del reduccionismo (Lámina K). En esta representación de Isaac Newton trabajando, los sentimientos encontrados de Blake por su personaje saltan a la vista. Su Newton es una figura de extraordinaria concentración y resolución, para no mencionar su anatomía sobrehumana. Por otro lado, se le muestra mirando para abajo, perdido en abstracciones y volviendo literalmente la espalda al paisaje vívido y extraño. Y aun así Blake admitía (como lo hacía Keats) que el orden matemático gobierna el mundo (Lámina L). En la compleja mitología de Blake, Urizen, representado aquí, es una figura paterna dual, que da la vida a la vez que la constriñe. Resulta difícil ignorar una cierta semejanza con el dibujo precedente. ¿Es Newton el intérprete de Urizen, o su reencarnación?

Para contrarrestar una reacción emocional, una buena imagen puede resultar más poderosa que la retórica edificante. Aquí, verdaderamente, «una imagen vale más que mil palabras». Te ruego que ignores por un momento el pie de foto cuando veas la Lámina M, una obra de arte abstracto de impresionante belleza.

Vale, ahora lee el pie de foto (si no lo has hecho ya). ¿Acaso saber que la imagen puede «reducirse» a unas matemáticas estrictas le resta belleza? Para mí, y confío en que para ti, la revelación de que unas matemáticas pueden codificar esta estructura le *añade* belleza. Sigue pareciendo igual, por supuesto, como imagen. Pero ahora puedes también, con el ojo de la mente, verlo desde otra perspectiva, como una encarnación de conceptos. Es a la vez Real e Ideal.

Y al revés, la belleza de la imagen resalta la belleza de las matemáticas. Rumiando la lógica del programa generador, sin haber visto lo que es capaz de producir, es un ejercicio moderadamente entretenido. Una vez que has visto la imagen, ese mismo proceso se convierte en una indagación espiritual, que alcanza lo sublime.

Lo Real es más persuasivo por ser Ideal, y lo Ideal es más persuasivo por ser Real.

Y lo que pasa con las imágenes fractales tiene una validez más general: el entendimiento no resta nada de la experiencia; más bien añade perspectivas alternativas. En el espíritu de la complementariedad, podemos disfrutar de

todas las alternativas, si no de forma simultánea, al menos sí de manera secuencial.

Por cierto, es una apuesta segura afirmar que Keats no dominaba la teoría científica del arco iris. Si la hubiera conocido, ¡tendríamos un poema suyo para elogiar su belleza! Porque el mismo John Keats escribió:

Cuando la vejez devaste a esta generación
tú permanecerás, en medio de otra aflicción
que no es la nuestra, amiga del hombre, y dirás
«La belleza es verdad, la verdad belleza»: es todo
lo que sabes en la tierra, y lo que necesitas saber.

Arrancando

Hay otro aspecto de la visión dinámica del mundo, que a Newton le condujo a Dios, y que plantea unos desafíos que siguen sin resolverse.

Las leyes dinámicas son leyes del movimiento. Relacionan el estado del mundo en un tiempo con su estado en otros tiempos. Si conocemos el estado en un tiempo, podemos predecir el futuro, o extrapolar al pasado. En la mecánica de Newton, en concreto, una vez que conocemos las posiciones, las velocidades y las masas de todas las partículas en un tiempo dado, y las fuerzas que actúan entre ellas, podemos inferir sus posiciones y sus velocidades (y sus masas: eso no cambia) a cualquier otro tiempo, por mero cálculo. Esas cantidades especifican el estado del mundo porque, en la mecánica newtoniana, suministran una descripción completa de la materia.

Hay graves dificultades prácticas que obstaculizan la ejecución real de esos cálculos, como cualquier meteorólogo puede testificar. Hay montones y montones de partículas, y resulta por completo impracticable conseguir todas sus coordenadas y medir todas sus velocidades. Incluso si se pudiera, e incluso si conociéramos las leyes de sus fuerzas con exactitud, la computación requerida aturdiría a cualquier mente concebible. Para rematarlo, un resultado central de la teoría del caos es que los pequeños errores en cualquier parte del

proceso —en las condiciones iniciales, en las leyes de fuerza o en las computaciones numéricas— tienden a crecer hasta producir grandes errores con el paso del tiempo.

Dejando aparte las dificultades prácticas, el punto esencial es este: ¡que necesitas un punto de partida! Las ecuaciones dinámicas no son autosuficientes. En la jerga convencional, decimos que requieren unas *condiciones iniciales*. Para empezar a computar el comportamiento del mundo utilizando las ecuaciones dinámicas, primero tienes que especificar el estado del mundo a un tiempo dado, como *input*.

(Por supuesto, si estás interesado en algo más pequeño que el mundo entero, y lo puedes aislar eficazmente del resto, solo necesitas saber el estado de tu subsistema. Para simplificar, seguiré hablando del «mundo».)

La descripción del mundo se divide en dos partes:

- Ecuaciones dinámicas
- Condiciones iniciales

Del orden y la regularidad del Sistema Solar —con todos sus planetas girando alrededor del Sol casi en círculos, todos en un plano común, todos en la misma dirección—, Newton conjeturó, en el «Escolio General» que concluye los *Principia*, que las condiciones iniciales habían sido organizadas conscientemente:

Este sistema tan elegante del sol, los planetas y los cometas no podría haber surgido sin el designio y la soberanía de un ser inteligente y poderoso.

Hoy tenemos unas ideas más prosaicas y basadas en la física sobre el origen del Sistema Solar, pero la cuestión de fondo permanece. Aunque la mecánica newtoniana, como teoría fundamental, ha sido desbanquada, ese rasgo de ella ha sobrevivido. Todavía tenemos ecuaciones dinámicas, y todavía necesitan unas condiciones iniciales. Disponemos de una excelente teoría para lo primero, pero solo observaciones empíricas y especulaciones incompletas y más o menos verosímiles respecto a lo segundo.

Si tomamos el universo en el espacio-*tiempo*, desplegado para ofrecer una visión de la realidad «a vista de Dios», para ser fundamental, nos vemos abocados a una versión moderna del Uno inmutable de Parménides. El gran matemático y físico del siglo xx Hermann Weyl,⁴ cuyos libros constituyeron gran parte de mi educación, lo expresó de esta forma, en lo que para mí es uno de los pasajes más bellos, y también más profundos, de toda la literatura:

El mundo objetivo simplemente *es*, no *ocurre*. Solo para la mirada de mi conciencia, gateando por la línea de vida de mi cuerpo, una sección de este mundo adquiere vida como una imagen fugaz en el espacio que cambia continuamente en el tiempo.

Si Parménides y Weyl están en lo cierto, y el espacio-tiempo en su conjunto es la realidad primaria, deberíamos aspirar a una descripción fundamental de su totalidad. En esa descripción, no habría sitio para las condiciones iniciales.

Maxwell I: la estética de Dios

La física verdaderamente moderna empieza en 1864, con el artículo de James Clerk Maxwell «Una teoría dinámica del campo electrodinámico». En ese artículo se pueden encontrar, por primera vez, unas ecuaciones que siguen apareciendo en la Teoría Central actual.

Esas ecuaciones —las ecuaciones de Maxwell— cambiaron muchas cosas. Las ecuaciones de Maxwell cambiaron el espacio de mero receptáculo a medio material: una especie de océano cósmico. Nunca más un mero Vacío, el espacio está lleno de fluidos que gobiernan el mundo.

Las ecuaciones de Maxwell nos dieron un entendimiento completamente nuevo de lo que es la luz, y predijeron la existencia de unas formas insospechadas de radiación, que son nuevos tipos de «luz». Condujeron directamente a la radio, e inspiraron varias otras tecnologías de gran importancia.

Las ecuaciones de Maxwell también marcan un gran avance hacia la respuesta de nuestra Pregunta, porque exponen bellas ideas encarnadas profundamente en el mundo. Su belleza se deriva de muchas fuentes: de la manera en que fueron descubiertas, de su forma y de su poder para inspirar otras buenas ideas.

- La belleza como herramienta: porque la imaginación y el juego de Maxwell, guiados por el sentido de la belleza matemática, fueron herramientas supremas de descubrimiento; ¡y él mostró que esas herramientas funcionan!
- La belleza como experiencia: las ecuaciones de Maxwell pueden escribirse de manera pictórica, en términos de flujos. Cuando se presentan así, dibujan una especie de danza. Yo las visualizo así a menudo, como una danza de conceptos por el espacio y el tiempo, lo que es un placer. Incluso a primera vista, las ecuaciones de Maxwell dan una

impresión de belleza y equilibrio. Como el impacto de las obras de arte más convencionales, esa impresión es más fácil de experimentar que de explicar. De manera paradójica, hay una palabra para describir la belleza que no se puede describir con palabras: «inefable». Una vez que has experimentado la belleza inefable de las ecuaciones de Maxwell, te sentirías decepcionado si fueran erróneas. Como dijo Einstein en un contexto similar, cuando le preguntaron si su teoría de la relatividad se podría mostrar errónea: «Entonces lo sentiría por el buen Señor».

- Belleza y simetría: un reconocimiento más profundo de las ecuaciones de Maxwell, adquirido en las décadas que siguieron a su descubrimiento, condujeron a una perspectiva complementaria e intelectualmente más precisa de su belleza. Son un sistema de ecuaciones muy *simétrico*, en un sentido matemático preciso de la palabra, como trataremos. Las lecciones extraídas de las ecuaciones de Maxwell —que las *ecuaciones* pueden exhibir simetría, y que la naturaleza ama el uso de esas ecuaciones— nos guía a la Teoría Central, y quizá más allá.

¡Abramos nuestra mente a su espíritu!

¿Los átomos y el vacío?

La física de Newton dejó vacío el espacio, pero él no estaba satisfecho con ello. Su ley de la gravedad universal postula unas fuerzas atractivas que actúan de inmediato, sin demora en el tiempo, entre cuerpos que están separados en el espacio. Más aún, la magnitud de la fuerza depende de la separación de los cuerpos, decreciendo con el cuadrado de la distancia. Pero si el espacio, en ausencia de cuerpos, es simplemente *nada*, ¿cómo se transmite la fuerza? ¿Cómo salta el hueco? ¿Y por qué tendría que depender la magnitud de la fuerza de exactamente cuánta «*nada*» se interponga?

Para Newton, su propia teoría suscitaba estas preguntas. Pero no encontró ninguna respuesta. No porque no lo intentara: Newton llenó muchas páginas de sus cuadernos privados con ideas alternativas de la gravedad, pero ninguna

pudo competir con la ley que él mismo, en su correspondencia privada, llamó un absurdo:

Que un cuerpo pueda actuar sobre otro a distancia a través del vacío sin la mediación de ninguna otra cosa, mediante la cual su acción y fuerza pueda transmitirse de uno a otro, es para mí un absurdo tan grande que, según creo, ningún hombre que tenga la facultad de pensar con competencia en asuntos filosóficos podría jamás caer en él.

Newton también se vio arrastrado, con recelos, a usar el Vacío en su trabajo sobre la luz. Sus partículas de luz se mueven en línea recta a través del espacio, en ausencia de material, más bien en el espíritu del atomismo antiguo. Según esa doctrina, y expresado poéticamente por Lucrecio: «Por convención hay dulzura, por convención amargura, por convención color, en realidad solo átomos y el Vacío».

Y aun así en el mismo final de los *Principia* hallamos la siguiente expresión de fe, o de deseo, que parece propia de un libro diferente:

Y ahora podríamos añadir algo que concierne a cierto Espíritu de lo más sutil, que permea y se esconde en todos los cuerpos sólidos; por cuya fuerza y acción las partículas de los cuerpos se atraen unas a otras a corta distancia, y se cohesionan si son contiguas; y los cuerpos eléctricos operan a mayores distancias, ya sea repeliendo o atrayendo a los corpúsculos vecinos; y la luz se emite, se refleja, se refracta, se declina y calienta los cuerpos; y toda sensación se excita, y los miembros de los cuerpos animales se mueven por orden de la voluntad, es decir, por las vibraciones de este Espíritu, propagadas mutuamente a lo largo de los filamentos sólidos de los nervios, desde los órganos sensoriales externos hasta el cerebro, y del cerebro a los músculos. Pero estas son cosas que no puede explicarse en pocas palabras, ni estamos equipados con los suficientes experimentos que se requieren para una determinación y una demostración precisa de las leyes por las que opera este Espíritu eléctrico y elástico.

En las décadas que siguieron, la física basada en el Vacío acumuló un triunfo tras otro. Las observaciones más precisas del movimiento lunar, las mareas y las trayectorias de los cometas concordaban a la perfección con los cálculos más precisos basados en las leyes de Newton. Asombrosamente, tanto las fuerzas eléctricas (entre cuerpos cargados) como las magnéticas (entre polos magnéticos) se midieron y resultaron seguir el mismo patrón que

la gravitación: actúan a través del espacio vacío, y decrecen con el cuadrado de la distancia. (Así, la fuerza es cuatro veces más débil al doble de distancia, nueve veces más débil al triple de distancia, etcétera).

Los seguidores de Newton abandonaron enseguida sus escrúpulos. Se volvieron más «newtonianos» de lo que nunca fue Newton. El horror al vacío del propio Newton fue rebajado al estatus de prejuicio filosófico o, en el fondo, teológico, e ignorado en un avergonzado silencio. La nueva ortodoxia pretendía describir todas las fuerzas de la física, y a la larga de la química, al estilo de la gravedad de Newton, como fuerzas que actúan a distancia, con una magnitud dependiente de la distancia. Los físicos matemáticos fraguaron unas herramientas matemáticas complejas para extraer consecuencias de ese tipo de leyes. Unas pocas leyes de fuerza más y la historia estaría completa.

El vacío eludido

Michael Faraday nació en Inglaterra, el tercer hijo de una familia pobre de cristianos heterodoxos. Su padre era herrero, y él recibió una escasa educación formal. Durante los siete años de la adolescencia que Faraday pasó como aprendiz de un encuadernador de Londres, se quedó fascinado por algunos libros que pasaron por sus manos, sobre todo por los que trataban de autosuperación y de ciencia. Al asistir a las conferencias públicas del popular químico Humphry Davy, tomando unas notas muy meticulosas, Faraday atrajo la atención de Davy, y consiguió un empleo como ayudante suyo. Pronto empezó a hacer descubrimientos por sí mismo... y el resto es historia.

Faraday nunca llegó muy lejos con las matemáticas. Sabía algo de álgebra y un poco de trigonometría, nada más. Sin la preparación necesaria para captar las teorías matemáticas existentes («newtonianas») de la electricidad y el magnetismo, desarrolló sus propios conceptos e imágenes. He aquí la descripción que hizo Maxwell del resultado:

Faraday vio, con el ojo de su mente, líneas de fuerza que atravesaban todo el espacio, allí donde los matemáticos veían centros de fuerza que atraían a distancia; Faraday vio un medio donde ellos no veían nada más que una distancia; Faraday buscó la sede de los

fenómenos en unas acciones reales que ocurrían en el medio, mientras que ellos se conformaban con haberlo encontrado en el poder de la acción a distancia.

El concepto clave aquí es el de *líneas de fuerza*. Su significado queda más claro en una imagen que en palabras: véase la Figura 20.

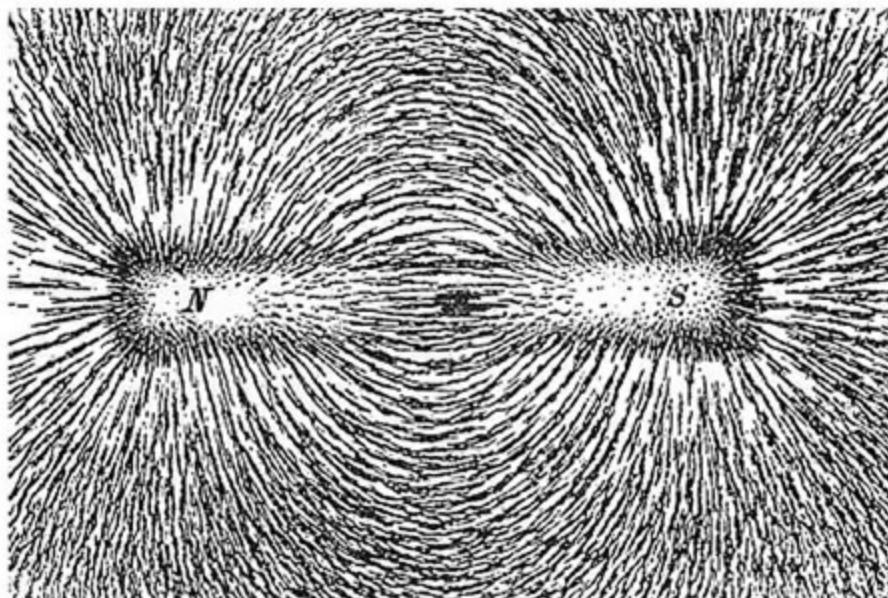


FIGURA 20. Las líneas de fuerza de Faraday, hechas visibles.

Las limaduras de hierro, moviéndose con libertad en una hoja fina de papel sujetada sobre un imán, dibujan un patrón asombroso. Las limaduras de hierro forman fila bajo la influencia del imán y se alinean en un sistema de líneas curvas que llenan el espacio. Esas son las líneas de fuerza (magnética) de Faraday.

La teoría basada en el Vacío de fuerzas a distancia no tiene problemas para explicar esta manifestación: cada trocito de hierro siente las fuerzas que provienen de los dos polos del imán, actuando a través del espacio vacío, y se alinea como corresponde. Las líneas de fuerza son un subproducto emergente, casi accidental, de unos principios subyacentes más profundos y simples.

Pero la interpretación de Faraday era diferente, y más visceral. Según Faraday, las limaduras meramente *revelan* el estado de un medio que llena el espacio, un medio *que está allí aunque no haya limaduras, ni ya puestos un*

imán. El imán agita ese medio, o ese fluido (como lo llamaremos siguiendo a Faraday y Maxwell), y las limaduras sienten el estado de excitación del fluido, mediante la presión de sus tirones y empujones.

Podemos hacer analogías con un fluido más familiar: nuestra atmósfera, cerca de la superficie de la Tierra. La atmósfera nos rodea, llenando el espacio. Si la atmósfera está en movimiento, decimos que hace viento. Los vientos son invisibles en sí mismos, pero se revelan a través de las fuerzas que ejercen sobre cuerpos más visibles y tangibles, como las veletas de viento, los pájaros y las nubes. Si imaginamos que agitamos el aire con un ventilador, y que usamos un sistema de veletas para registrar el patrón, los muchos alineamientos de las veletas definirán las «líneas de fuerza» atmosféricas muy al estilo de las limaduras de hierro de Faraday. En este caso, por supuesto, las veletas se alinearán con la dirección local del flujo de aire, o viento.

Insistiendo en esa analogía, podemos imaginar que supplementamos nuestras veletas con medidores de velocidad (anemómetros), para muestrear tanto la dirección como la velocidad del viento. Podemos hacer esto en cualquier punto del espacio, y también a diferentes tiempos. De esta forma definimos un *campo* de velocidades, que llena tanto el tiempo como el espacio.

El campo de velocidades del viento codifica el estado de excitación de un fluido, en este caso el aire.

Faraday propuso que una lógica similar se puede aplicar al magnetismo, y también a la electricidad. Según Faraday, un cuerpo de prueba cargado eléctricamente actúa como una combinación de velet y anemómetro combinada, muestreando el estado del fluido eléctrico. El cuerpo de prueba siente una fuerza debida al estado de excitación del fluido eléctrico —el «viento eléctrico», por así decir— en un lugar y un tiempo concretos. Si dividimos la fuerza que experimenta el cuerpo de prueba por la carga del cuerpo de prueba, obtenemos una cantidad que es independiente del tipo de cuerpo de prueba que usemos para medirla. Llamamos a ese cociente el valor del campo eléctrico.

Ahora, para evitar confusiones posteriores, debo hacer una breve digresión para describir, y después resolver, una irritante ambigüedad que los físicos se han infligido a sí mismos, a sus estudiantes y al mundo exterior

durante décadas. A saber, la práctica convencional de usar el término «campo eléctrico» para dos cosas por completo distintas. Una es el campo de *valores* de la fuerza partido por la carga. Como acabamos de exponer, esto es análogo a la velocidad del viento. Por desgracia, también es convencional usar «campo eléctrico» para referirse al medio subyacente (es decir, el fluido eléctrico en sí mismo), por oposición a su estado de excitación. Es como usar la misma palabra para el viento y para el aire. En este libro, utilizaré términos como «flujo eléctrico» y «flujo magnético» (y más tarde «flujo de gluones»...) para los fluidos allí donde la distinción sea importante. Esta decisión me llevará a utilizar algunas expresiones ligeramente inusuales, como «teoría cuántica de fluidos» donde normalmente leerías «teoría cuántica de campos». Creo que la mayor claridad compensa la excentricidad aparente (fin de la digresión).

El enfoque de Faraday le condujo a una serie de descubrimientos extraordinarios, uno de los cuales —el más extraordinario de todos— estamos a punto de abordar. Pese a ello, la mayoría de sus contemporáneos siguió sin convencerse de las ideas *teóricas* de Faraday. Antes de la mecánica celeste de Newton, el sistema más influyente había sido el de Descartes, que atribuía el movimiento de los planetas a la influencia de unos vórtices que llenaban el espacio, y que arrastraban a los planetas con ellos. Newton había reemplazado esas vagas nociones por unas leyes simples y matemáticamente precisas del movimiento y la gravedad, que funcionaban espectacularmente bien. Los mismos principios básicos —acción a distancia, declive con el cuadrado de la distancia— estaban ofreciendo una buena explicación de las fuerzas eléctrica y magnética también. ¿Cambiar ese marco sólido, apoyado en cálculos concretos y mediciones cuantitativas, por los sueños desacreditados de un visionario autodidacta? ¡No parecía una estrategia científica muy sensata!

Pero Maxwell tenía una perspectiva distinta sobre las especulaciones de Faraday. En «**¿Para qué sirve eso?**», describiré al propio Maxwell, como una personalidad individual (revelación completa: es mi físico favorito). Por ahora, me limitaré a decir que Maxwell encaró los problemas de la ciencia, y de la vida en general, con un espíritu juguetón. Creo que vio los nuevos fluidos de Faraday como unos juguetes maravillosos, y que estaba encantado de ser paciente mientras jugaba con ellos.

El camino hacia las ecuaciones de Maxwell

El primer artículo importante de Maxwell sobre electricidad y magnetismo (electromagnetismo), escrito en 1856, antecede a la «Teoría dinámica» en casi diez años. Se titulaba «Sobre las líneas de fuerza de Faraday». Dice:

Mi propósito es ver cómo, mediante una aplicación estricta de las ideas y métodos de Faraday, la conexión de los muy diferentes tipos de fenómenos que ha descubierto puede ser expuesta con claridad ante la mente matemática.

A lo largo de 75 páginas de trabajo sustancial, Maxwell desarrolló las imaginativas visiones de Faraday como conceptos geométricos precisos, y después como ecuaciones matemáticas.

Su segundo gran artículo apareció en 1861, titulado «Sobre las líneas de fuerza físicas». Su trabajo previo, y el de Faraday, había empaquetado los hechos observados del electromagnetismo en una forma nueva. Se interpretaban como leyes que gobernaban las excitaciones de un medio que llenaba el espacio, el fluido electromagnético (que consistía, naturalmente, en los fluidos eléctrico y magnético). Ahora Maxwell estaba listo para aventurar un modelo mecánico de los propios fluidos. Hélo aquí, tal como lo dibujó (Figura 21).

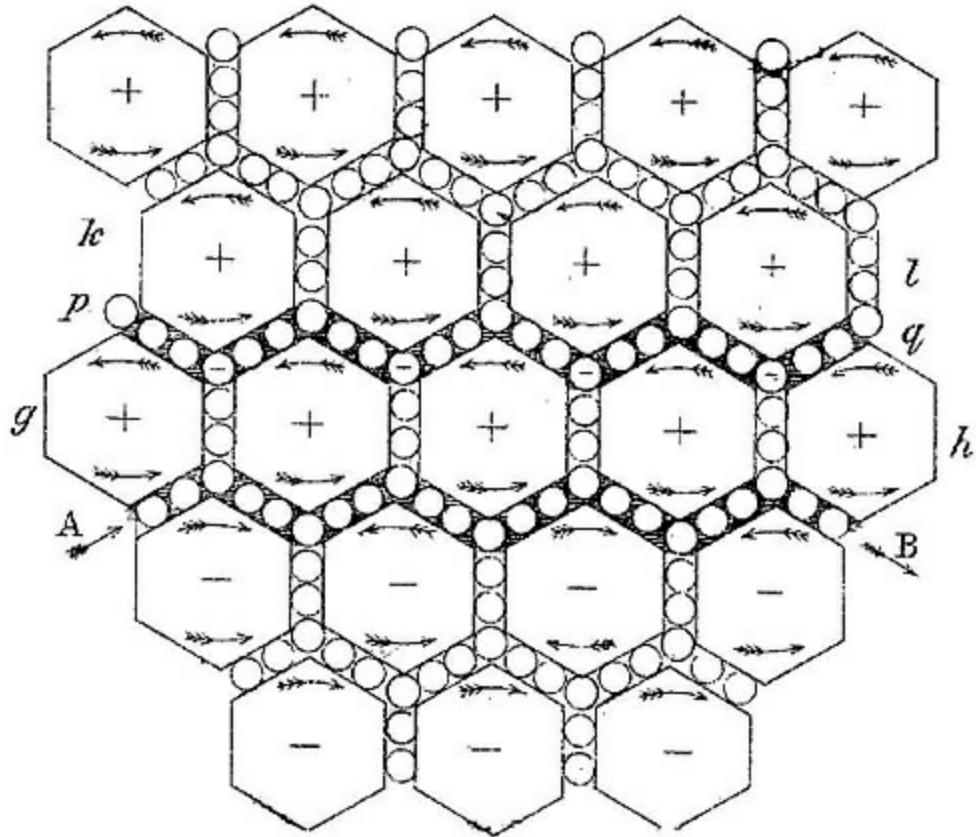


FIGURA 21. El modelo mecánico de Maxwell del espacio lleno de un medio material cuyos movimientos causan los campos y fuerzas electromagnéticos.

El modelo de Maxwell incluye átomos de vórtices magnéticos (los hexágonos) lubricados por esferas conductoras de la electricidad. Los campos magnéticos describen la velocidad y dirección de las rotaciones de los vórtices magnéticos, y los campos eléctricos describen el campo de velocidad, o «viento», asociado con el flujo de las esferas. Aunque por completo ficticio, el modelo daba una representación fidedigna de las leyes conocidas de la electricidad y el magnetismo, e insinúa otras nuevas.

Puede ser muy divertido y mentalmente desafiante jugar con el modelo de Maxwell, pero es un *hobby* difícil y no del gusto de todo el mundo, así que no voy a aportar aquí un manual. En cualquier caso, los detalles del modelo son más inteligentes que creíbles, como Maxwell apreció y admitió libremente.

Pero la gran virtud de un modelo de trabajo —o de su boceto— es que te fuerza a ser concreto y coherente. Escribir ecuaciones, o programas informáticos, implica el mismo tipo de disciplina. Tienes que equilibrar la

ambición y la precisión.

En el modelo de Maxwell, cuando los átomos de vórtice magnético giran, se vuelven achatados —aplanados en los polos y ensanchados en el ecuador, ¡como la Tierra rotando de Newton!— y empujan a su alrededor a las esferas conductoras. A la inversa, los flujos de esferas conductoras ejercen fuerzas sobre los átomos de vórtice, y les pueden hacer girar. La excitación de cualquiera de los dos fluidos puede conducir a la excitación del otro. Por tanto el modelo predice que los campos magnéticos inducen campos eléctricos, y viceversa, de maneras concretas.

De esta forma, además de los fenómenos conocidos del electromagnetismo, el modelo de Maxwell predijo algo nuevo.

Faraday había descubierto de manera experimental que, cuando los campos magnéticos cambian con el tiempo, producen campos eléctricos. La ley de inducción de Faraday, como se la conoce, subyace al diseño de los motores y generadores eléctricos, y supuso un enorme estímulo para la tecnología. También constituyó una vindicación de la intuición de Faraday de que los campos, en sí mismos, son elementos de la realidad física. ¡Porque esta es una ley que resulta casi imposible de formular sin referirse a ellos! El modelo de Maxwell, construido para acomodar la ley de Faraday, reveló un efecto dual, con los papeles de los campos eléctrico y magnético invertidos. La ley de Maxwell, como yo la llamo, dice que los campos eléctricos que cambian con el tiempo producen campos magnéticos.

La combinación de estos dos efectos conduce, como vio Maxwell, a nuevas posibilidades espectaculares. A partir de campos magnéticos variables en el tiempo, Faraday nos da campos eléctricos, que también varían en el tiempo. A partir de campos eléctricos variables en el tiempo, Maxwell nos da campos magnéticos, que también varían en el tiempo. Y el ritmo sigue:

... → Faraday → Maxwell → Faraday → Maxwell → ...

De modo que una excitación de los campos eléctrico y magnético puede adquirir vida propia, con los campos bailando como una pareja, cada uno inspirando al otro.

Maxwell pudo calcular con su modelo a qué velocidad se moverían esas excitaciones por el espacio. Halló que viajan a una velocidad que coincide con la velocidad de la luz medida experimentalmente. Y aquí es donde encontramos el más extenso uso de cursivas de toda la obra de Maxwell:

La velocidad de las ondulaciones transversales en nuestro medio hipotético... concuerda tan exactamente con la velocidad de la luz ... que apenas podemos eludir la inferencia de que *la luz consiste en las ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos*.

Para Maxwell resultaba obvio que ese acuerdo de velocidades no era una coincidencia: sus perturbaciones electromagnéticas *son* luz, y la luz es, en el fondo, nada más que una perturbación de los campos eléctrico y magnético.

Cuando leo ese pasaje me sorprendo a mí mismo imaginando lo que sintió Maxwell, y después reviviendo algunos episodios de mi propia carrera cuando de pronto las cosas encajaban, y después recordando estas líneas de Keats:

Entonces me sentí como un vigilante de los cielos
cuando un nuevo planeta se desliza hasta su conocimiento,
o como el recio Cortés cuando con vista de águila
divisó el Pacífico —y todos sus hombres
se miraron uno a otro en osada conjectura—
en silencio, sobre una montaña en Darién.

¡Es un pasaje que me gusta revisitar!

La inferencia de Maxwell representaba, de ser correcta, una unificación fantástica del electromagnetismo y la óptica. Por encima de todo, aportaba una nueva visión deslumbrante de la propia luz. «Reducía» la luz al electromagnetismo: ¡una reducción expansiva como ninguna otra!

Pero la osada conjectura de Maxwell, mientras permaneciera confundida en un modelo de cartón piedra, era como una chispa de oro en una fundición sucia: una promesa de belleza, pero incumplida. Una osada conjectura. El siguiente paso sería retirar la escoria.

Spider Men

Antes de que pasemos a las propias ecuaciones de Maxwell, me gustaría compartir una fantasía que se me ocurrió mientras preparaba este capítulo.

Imagina que surge una raza de arañas, tan inteligentes, que empiezan a componer una física arácnida. ¿Qué aspecto tendría?

Las arañas no tienen mucha vista, así que no partirían del punto que nuestra percepción visual nos insinúa: un mundo de objetos inconexos libres de moverse en un receptáculo: el espacio. En vez de eso, el universo sensorial de las arañas está basado en el tacto. Más en concreto, las arañas detectan las vibraciones de los hilos de sus telarañas, y a partir de esas vibraciones infieren la existencia de los objetos que las causan (en particular, almuerzos potenciales). Para las arañas inteligentes, concebir las líneas de fuerza no requeriría un gran salto imaginativo. Las redes que conducen la fuerza y llenan el espacio son su modo de vida. Su mundo es un mundo de conexiones y vibraciones.

Sabrían con las tripas, por así decir, que las fuerzas se transmiten por unos medios que llenan el espacio, y viajan por ellos a una velocidad finita. Evitarían el vacío, de manera intuitiva. Todas serían Faradays, e inventarían enseguida una *world wide web* (Figura 22).

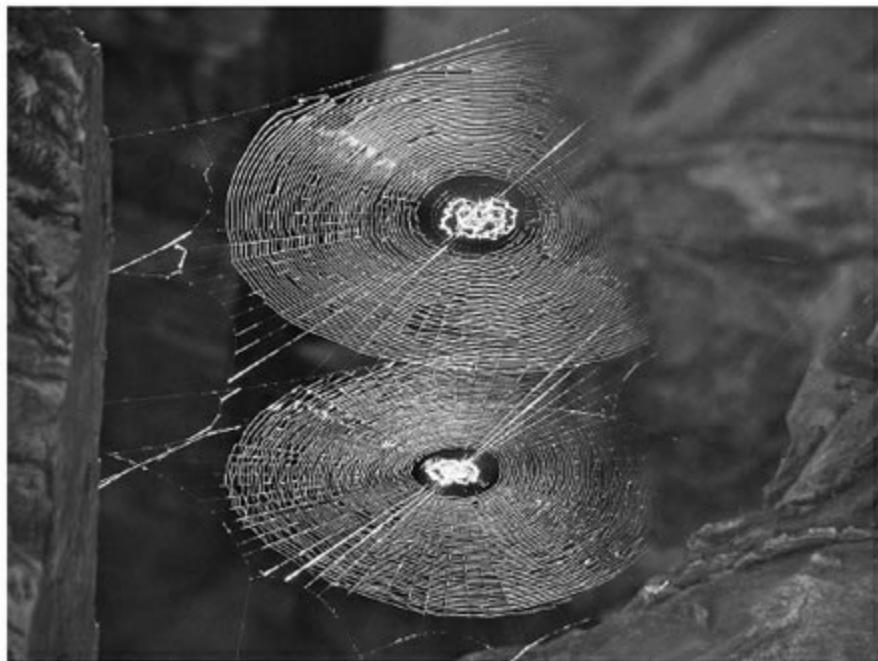


FIGURA 22. Las arañas inteligentes tendrían una buena posición de salida para la teoría de campos. ¡Compara esta construcción arácnida con las Figuras 20 y 21!

Las ecuaciones de Maxwell

En «Una teoría dinámica del campo electrodinámico» Maxwell empieza otra vez desde cero. «Sobre las líneas físicas de fuerza» había parecido una gigantesca Indagación, estirando las consecuencias de una Hipótesis especulativa, buscando signos estimulantes en la Naturaleza. «Teoría dinámica» sigue más bien el estilo de los *Principia*, razonando desde los hechos observados hasta un sistema de ecuaciones básicas.

Mientras que Newton se apoyó en las leyes de Kepler del movimiento planetario, Maxwell ensambló cuatro leyes descubiertas por varios investigadores anteriores: dos leyes de Gauss, la ley de Ampere y la ley de inducción de Faraday. (Se describen más abajo, y también en «Términos del arte».) Expresó esas leyes en el lenguaje de Faraday de fluidos eléctricos y magnéticos, que Maxwell había convertido en un lenguaje preciso y matemático en su trabajo anterior.

Maxwell también añadió su propia ley, dual a la de Faraday. Esa adición *no* estaba basada en evidencias experimentales. Como ya hemos visto, Maxwell se vio inducido originalmente a postular esa nueva ley examinando las consecuencias de su modelo de cartón piedra. En el nuevo tratamiento, mostró que la nueva ley *era* necesaria para hacer coherentes a las viejas!

La Lámina N presenta las ecuaciones de Maxwell. ¡Que puedan representarse en imágenes es un aspecto importante de su belleza! Este sistema de cuatro ecuaciones, que combina cuatro leyes conocidas previamente junto a una nueva adición, se conoce ahora universalmente como las ecuaciones de Maxwell. (Las cuatro ecuaciones codifican cinco leyes, puesto que una de las ecuaciones suma dos efectos físicos.) Sigue siendo hasta nuestros días nuestra mejor descripción fundamental del electromagnetismo y la luz.

Aquí, no puedo resistirme a explicar el contenido real de las ecuaciones de Maxwell. ¡Después de todo el anterior desarrollo, el lector podría sentir curiosidad por ver de qué va *exactamente* todo esto!

Intentaré hacerlo de una forma que es razonablemente breve, precisa y comprensible. Pero hay cierta tensión entre esos objetivos, y en consecuencia es posible que encuentres difícilso este pasaje. Mi consejo es que te aproximes a él como te aproximarías a una obra de arte que te resultara poco familiar: como una oportunidad, no como un lastre. Tal vez quieras leerlo un poco a la ligera la primera vez, y estudiando las imágenes, para obtener una impresión general. Después puedes decidir si quieres darle una segunda lectura más atenta. Y espero que lo hagas: después de todo, las ecuaciones de Maxwell son una *gran* obra de arte. Puedes hacerlo a conveniencia, porque ninguna de nuestras reflexiones posteriores hará referencia a estos detalles. También puedes consultar «Términos de arte», que explora el mismo territorio desde unas perspectivas algo diferentes. También he indicado, en las notas finales, algunas webs excelentes y gratuitas⁵ donde puedes examinar las ecuaciones de Maxwell de forma interactiva.

Para cada una de las cinco leyes incluidas en las cuatro ecuaciones de Maxwell, daré primero una versión informal, y después una más precisa, en palabras y en imágenes. Para seguir el argumento consulta la Lámina N, porque vamos a examinarla línea por línea.

Para empezar voy a explicar los símbolos que aparecen en los dibujos: \vec{E} quiere decir campo eléctrico, \vec{B} campo magnético, y \vec{E} , \vec{B} la velocidad de cambio de esas cantidades con el tiempo. Q significa carga eléctrica, I significa corriente eléctrica. (Las flechitas son recordatorios de que estas cantidades tienen direcciones además de magnitudes.)

Y ahora vamos con las leyes:

- La *ley eléctrica de Gauss* iguala el flujo del campo eléctrico que sale de volumen a la cantidad de carga eléctrica dentro de ese volumen. Nos dice que las cargas eléctricas son las semillas de las líneas de fuerza eléctricas (o las semillas de su destrucción). Ellas son donde las líneas de fuerza eléctricas pueden empezar o terminar.

La forma más fácil de entender la definición de flujo es por referencia al flujo de un fluido. El campo eléctrico en un punto es una cantidad con magnitud y dirección, como ya hemos señalado. El campo de velocidades en un líquido que fluye tiene el mismo carácter. Ahora, dado un volumen

y el campo de velocidades, podemos calcular lo deprisa que el fluido está saliendo del volumen. Eso, por definición, es el flujo de fluido que abandona el volumen. Si hacemos sobre el campo eléctrico las mismas operaciones matemáticas que hemos hecho en un campo de velocidades para calcular su flujo, obtenemos (por definición) el flujo de campo eléctrico.

La *ley magnética de Gauss* afirma que el flujo de campo magnético que sale de cualquier volumen es cero. La ley magnética de Gauss es, por supuesto, muy parecida a la ley eléctrica de Gauss, pero con la simplificación adicional de que ¡no puede haber una carga magnética! Nos dice que los campos magnéticos no tienen semillas: las líneas de fuerza magnéticas no pueden terminar nunca, sino que deben continuar para siempre, o bien cerrarse sobre sí mismas.

- La *ley de Faraday* es especialmente interesante porque introduce el tiempo. Forja una relación entre los campos eléctricos y la *velocidad de cambio* de los campos magnéticos. Dice que, cuando los campos magnéticos cambian con el tiempo, causan que los campos eléctricos giren alrededor de ellos.

Para formular la ley de Faraday con precisión, consideremos una curva que forma la frontera de una superficie. La ley de Faraday iguala la circulación del campo eléctrico alrededor de la curva a (con signo menos) la velocidad de cambio del flujo magnético a través de la superficie. La circulación, como el flujo, se entiende mejor con referencia al campo de velocidades del flujo de un fluido. Imaginemos que expandimos la curva para formar una tubería circular estrecha, y computamos la cantidad de fluido que se mueve alrededor de la tubería por unidad de tiempo. Esa es la circulación del flujo del fluido. Si hacemos con el campo eléctrico las mismas operaciones matemáticas que hemos hecho con el campo de velocidades para calcular su circulación, obtenemos (por definición) la circulación del campo eléctrico.

Por último, para ser totalmente precisos, tenemos que resolver las ambigüedades de la dirección: al definir la circulación, ¿en qué sentido nos movemos alrededor de la curva? Al definir el flujo, ¿en qué sentido atravesamos la superficie? Para conseguir una relación definida, tenemos

que correlacionar esas elecciones. La manera convencional es la llamada regla de la mano derecha: si giramos por la curva siguiendo los dedos de la mano derecha (al ir cerrando el puño), entonces tomamos el flujo en la dirección del pulgar.

- La *ley de Ampère* forja una relación entre los campos magnéticos y las corrientes eléctricas. Dice que las corrientes eléctricas causan que los campos magnéticos giren alrededor de ellas.

Para formular con precisión la ley de Ampère, consideremos una curva que forma la frontera de una superficie. La ley de Ampère iguala la circulación del campo magnético alrededor de la curva al flujo de corriente eléctrica a través de la superficie.

Merece la pena fijarse en que los mismos conceptos de flujo y circulación aparecen varias veces en estas leyes. Flujo y circulación son maneras muy básicas de hacerse con el concepto de campo. Codifican el brotar y el girar de las líneas de fuerza, respectivamente. Su prominencia en las leyes físicas es un regalo de la Materia a la Mente.

Bien, cuando Maxwell ensambló esas cuatro leyes juntas, halló... ¡una contradicción! (Pero la quinta ley de Maxwell lo arregla.) Para verlo, observemos la Lámina O.

El problema surge cuando intentas aplicar la ley de Ampère a situaciones en que la corriente se interrumpe. En el dibujo de la Lámina O, tenemos corriente eléctrica que fluye hasta o desde un par de placas separadas por un hueco. (Los expertos reconocerán esto como el esquema de un condensador.) Según Ampère, la circulación magnética alrededor de un anillo es igual al flujo de corriente a través de cualquier superficie limitada por el anillo. Pero aquí obtenemos respuestas diferentes para ese flujo, ¡dependiendo de la superficie que elijamos! Si tomamos un disco dentro del hueco (azul), nos da cero. Si tomamos un hemisferio que se interseca con el cable (amarillo), obtenemos la corriente entera.

¡Uy!

Para arreglar esta contradicción, necesitamos algo nuevo. Gracias a su trabajo anterior con el modelo, Maxwell estaba preparado con esto:

- La *ley de Maxwell*, una especie de inversa de la ley de Faraday, que intercambia el papel del campo eléctrico y el magnético. Dice que, cuando los campos eléctricos cambian con el tiempo, causan que los campos magnéticos giren alrededor de ellos.

El disco azul dentro del hueco no intercepta ningún flujo de corriente, pero sí abarca un campo eléctrico cambiante. El hemisferio amarillo predice una circulación magnética debida a la ley de Ampère, mientras que el disco azul predice una circulación magnética debida a la ley de Maxwell: ¡pero ambos predicen el mismo resultado! Contradicción resuelta. Tras añadir la ley de Maxwell, el sistema entero de las ecuaciones de Maxwell se vuelve coherente.

En este tratamiento —una versión aseada de «Una teoría dinámica del campo electrodinámico»—, la ley de Maxwell alcanza un nuevo estatus. Ha perdido sus nexos con los modelos mecánicos, los átomos de vórtices y las esferas lubricantes. Aquí la vemos como una necesidad lógica, requerida para la coherencia de otras leyes que habían sido derivadas de los experimentos.

El arrebato de Maxwell

Maxwell era un cristiano creyente, y se tomaba su fe muy en serio. Al reflexionar sobre su trabajo que había establecido los fluidos de la electricidad y el magnetismo, se sentía muy complacido:

Las vastas regiones interplanetarias e interestelares ya no se verán como espacios malgastados del universo, a los que el Creador no ha considerado dignos de llenar con los símbolos del orden múltiple de Su reino. Ahora veremos que ya están llenos de este medio maravilloso; tan llenos que ningún poder humano podrá retirarlo ni de la más ínfima porción de espacio, ni producir el menor error de su continuidad infinita.

«Más sabio que nosotros»

James Clerk Maxwell murió en 1879, a la edad de cuarenta y ocho años. Por entonces, su teoría de campos electromagnéticos se consideraba interesante, pero no convincente. Aún se investigaba muy en serio en las teorías rivales de acción a distancia. La predicción más espectacular de la teoría de Maxwell, que los campos eléctricos y magnéticos podían adquirir vida propia y propagarse como ondas auto-renovadas, no se había verificado.

Fue Heinrich Hertz quien primero diseñó, y desde 1886 realizó, unos experimentos que podían someter a prueba la idea de Maxwell. En retrospectiva, podemos decir que Hertz creó la primera generación de transmisores y receptores de radio.

La capacidad (aparentemente) mágica de comunicarse entre grandes distancias, por el espacio vacío, mediante la radio, nació de la visión de que el espacio vacío *no* está vacío. Está lleno de fluidos, y preñado de posibilidades.

Heinrich Hertz murió en 1894, a los treinta y seis años. Pero antes de morir escribió este hermoso tributo a las ecuaciones de Maxwell que llega hasta el corazón de nuestra Pregunta:

No se puede esquivar el sentimiento de que esas fórmulas matemáticas tienen una existencia por sí mismas y una inteligencia propia, que son más sabias que nosotros, más incluso que sus descubridores, que extraemos más de ellas de lo que se puso inicialmente en ellas.

Hemos mirado, y admirado, la sabiduría de las propias ecuaciones de Maxwell. Hertz está diciendo aquí, sobre las ecuaciones, el tipo de cosa que suele decirse de las grandes obras de arte: que su significado se extiende más allá de la intención de su creador.

¿Qué es ese «más» al que se refiere Hertz?

Tres cosas, al menos:

- Poder
- Belleza generativa
- Una nueva idea inspiradora: la *simetría de las ecuaciones*

Poder

Maxwell conjeturó, a partir de sus ecuaciones, que la luz es una onda electromagnética. Pero la luz visible es solo la punta de un iceberg mucho más grande, invisible para nosotros y casi por completo desconocido en tiempos de Maxwell. Hay ondas electromagnéticas de cualquier longitud de onda especificada,* y el espectro de Newton de la luz visible no es más que una astilla de ese continuo, como vemos en la Lámina P. Las soluciones de las ecuaciones de Maxwell describen mucho más que la luz visible. Hay soluciones en que las oscilaciones entre los campos eléctricos y magnéticos tienen lugar a diferentes distancias (longitudes de onda). El espectro visible corresponde a un estrecho intervalo de longitudes de onda en el continuo infinito de las puras ondas electromagnéticas.

Ya he mencionado el trabajo pionero de Hertz, que nos dio las ondas de radio y floreció como tecnología de la radio. Las ondas de radio son «luz» con una longitud de onda mucho mayor, y una frecuencia mucho menor, que la luz visible. Dicho de otra forma, en las ondas de radio las oscilaciones entre los campos eléctrico y magnético ocurren de manera más gradual en el espacio, y más lenta en el tiempo. Si nos movemos desde las radioondas hacia longitudes de onda más cortas, encontramos microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Cada una de estas muchas formas de la «luz» ha evolucionado desde una construcción puramente teórica —en otras palabras, un sueño— hasta un manantial de tecnología moderna. Todas están en las ecuaciones de Maxwell. ¡Eso es poder!

Belleza generativa

Cuando las resuelves, hallas a menudo que las ecuaciones de Maxwell revelan estructuras bellas y simples.

En la Lámina Q, por ejemplo, se muestra la sombra que proyecta una cuchilla de afeitar, o cualquier cosa con un filo recto y agudo, si la iluminas con luz purificada. Al magnificar la sombra proyectada por luz purificada, descubrimos un patrón exquisito y hermoso.

El razonamiento geométrico, basado en la idea tosca de que la luz viaja estrictamente en línea recta, te habría dicho que la sombra sería una nítida división entre la oscuridad y la luz. Pero cuando calculamos las perturbaciones ondulatorias en los campos eléctrico y magnético, descubrimos que hay mucha más estructura. La luz penetra en la oscuridad (o sea, en la región geométrica de sombra), y la oscuridad penetra en la luz. Puedes calcular el patrón con precisión utilizando las ecuaciones de Maxwell. Y hoy, cuando disponemos de láseres monocromáticos brillantes, podemos comparar sus predicciones directamente con la realidad. Mirando esta imagen, solo tienes que decir: ¿no es bonita?

Simetría de las ecuaciones

El estudio de las ecuaciones de Maxwell trajo una idea esencialmente nueva que, la verdad, no había tenido un gran papel en la ciencia hasta entonces. La idea es que las *ecuaciones*, como los objetos, pueden tener simetría, y que las ecuaciones que la naturaleza gusta de usar en sus leyes fundamentales tienen una enorme cantidad de simetría. El propio Maxwell era inconsciente de esa idea. ¡Así que esto es definitivamente un caso de sacar de ello más de lo que pusiste allí!

¿Qué quiere decir que las ecuaciones tengan simetría? Aunque la palabra «simetría» tiene varios, y a menudo vagos, significados en la vida diaria, en física y matemáticas ha llegado a significar algo muy preciso. En esos contextos, simetría quiere decir Cambio sin Cambio. Una definición que puede parecer mística, y hasta paradójica, pero que significa algo muy concreto.

Veamos para empezar cómo se aplica a los objetos esa extraña definición de simetría. Decimos que un objeto es simétrico si podemos hacer en él transformaciones que podrían haberlo cambiado, pero que no lo hacen. Por ejemplo, un círculo es muy simétrico porque puedes rotarlo sobre su centro y, aunque todos sus puntos se mueven, al final sigue siendo el mismo círculo; mientras que, si tomas una forma más asimétrica y la rotas, siempre obtienes una cosa diferente. Un hexágono regular tiene menos simetría porque tienes que rotarlo 60 grados (la sexta parte de una vuelta) para volver a la misma

forma, y un triángulo equilátero tiene todavía menos porque tienes que rotarlo 120 grados (la tercera parte de una vuelta). Una forma general y desequilibrada no tiene ninguna simetría en absoluto.

También puedes proceder al revés. Podemos empezar con una simetría y llegar a los objetos. Por ejemplo, podemos pedir curvas que no cambien por las rotaciones sobre cierto punto, solo para descubrir que los círculos son la única encarnación de esa simetría.

La misma idea se puede aplicar a las ecuaciones. He aquí una ecuación sencilla:

$$X = Y$$

que, como puedes ver, está equilibrada limpiamente entre la X y la Y. Podrías estar tentado de decir que es simétrica. Y en verdad lo es, según la definición matemática. Porque si cambias la X por la Y, y la Y por la X, obtienes una ecuación diferente:

$$Y = X$$

Esta nueva ecuación difiere en forma, pero tiene exactamente el mismo contenido que la vieja. Así que tenemos un Cambio sin Cambio: una simetría.

Por otro lado, cuando intercambiamos X e Y, la ecuación $X = Y + 2$ se convierte en $Y = X + 2$, que no significa lo mismo en absoluto. Así que esta ecuación *no* es simétrica.

La simetría es una propiedad que tienen ciertas ecuaciones, o sistemas de ecuaciones, pero no otros.

Resulta que las ecuaciones de Maxwell tienen una cantidad enorme de simetría. Hay muchos tipos de transformaciones que puedes hacer sobre las ecuaciones de Maxwell que cambian su forma, pero no su contenido general. Las interesantes simetrías de las ecuaciones de Maxwell son bastante más complicadas que el ejemplo de juguete que acabamos de considerar, pero el principio es el mismo.

Al igual que con los objetos, también con las ecuaciones podemos explorar el camino inverso. En vez de formular ecuaciones y deducir las simetrías que permiten,

ecuaciones \Rightarrow simetría

... podemos empezar con las simetrías y averiguar qué ecuaciones las permiten:

simetría \Rightarrow ecuaciones

De manera extraordinaria, ese camino conduce de vuelta ¡a las ecuaciones de Maxwell! En otras palabras, las ecuaciones de Maxwell son esencialmente las únicas ecuaciones que tienen la simetría que tienen. Son los círculos definidos por sus propias y muy evolucionadas rotaciones. De esta forma, las ecuaciones de Maxwell encarnan una correspondencia perfecta:

ecuaciones \Leftrightarrow simetría

No supone un gran vuelo ver esta relación como un ejemplo de nuestro deseado

Real \Leftrightarrow Ideal

En la física moderna nos hemos aprendido esta lección hasta la médula. Hemos aprendido a trabajar desde la simetría hacia la verdad. En vez de usar los experimentos para inferir las ecuaciones, y después descubrir (para nuestra delicia y asombro) que las ecuaciones tienen un montón de simetría, proponemos ecuaciones con una enorme simetría y después las ponemos a prueba para ver si la naturaleza las utiliza. Y ha sido una estrategia con un éxito asombroso.

Los temas de la conexión, la simetría y la luz que hemos visto en este capítulo se combinan en el arte del *mandala*. Los mandalas son representaciones simbólicas del universo. Se utilizan como herramientas de meditación y trance. Por lo común exhiben una simetría a gran escala entre partes intrincadas y conectadas, y suelen ser muy coloridas. La Lámina R ofrece, según creo, una conclusión adecuada.

Maxwell II: las puertas de la percepción

Si las puertas de la percepción se limpiaran todo aparecería ante el hombre como es, infinito.

Porque el hombre se ha acercado a sí mismo, hasta que ve todo por las rendijas estrechas de su caverna.

WILLIAM BLAKE. *El casamiento del cielo y el infierno*

En este capítulo nos centramos en un aspecto especial de nuestra Pregunta: la hermosa idea de que, entendiendo mejor nuestra experiencia del mundo, podemos expandir esa experiencia.

El libro onírico y multimedia de William Blake *El casamiento del cielo y el infierno* aspira a unir, como él dice, «lo que los religiosos llaman el Bien y el Mal» (véase Lámina S). Según Blake, «El Bien es el pasivo que obedece a la Razón. El Mal es el activo que emana de la Energía. Bien es Cielo. Mal es Infierno». Los objetivos de nuestra reflexión, armonizar lo Ideal con lo Real y ver las cosas por entero, apelan al mismo anhelo.

Blake menciona una caverna, y la mención trae a la mente la caverna de Platón. Los prisioneros de la caverna de Platón experimentan el mundo en blanco y negro, y se pierden por completo la belleza del color. Aunque nuestro caso sea menos extremo, también nosotros experimentamos solo una pequeña parte de lo que la luz tiene en oferta.

Vamos a comparar la realidad entera de la asignatura que estudia la visión —la luz— con la proyección de la realidad que captura la visión humana. Es un tema que le encantaba a Maxwell, y que él mismo aclaró muchísimo.

En ese contexto, comprobaremos la intuición visionaria de Blake respondiendo las dos preguntas que suscita:

- *¿Hay infinitos a los que somos ciegos?* Sí. El mundo de los colores físicos es un espacio de dimensión doblemente infinita, del que solo percibimos una proyección tridimensional.
- *¿Podemos descubrirlos?* Sí. La cuestión no es *si eso es posible*, pues lo es con certeza, sino *cómo se hace*, en la práctica.

Nuestra exploración de la percepción del color también demostrará ser una preparación maravillosa para entender el diseño profundo de la naturaleza, en capítulos posteriores.

Dos clases de amarillo

El amarillo es uno de los colores que aparecen en el arco iris, y en el espectro que genera un prisma con la luz solar. El amarillopectral es uno de los colores puros de Newton. También lo son el rojo, el verde y el azulspectrales.

Pero hay otra forma muy diferente de luz que aparece amarilla. Podemos combinar rojopectral y verdepectral para producir un color *no spectral* pero convincente que percibimos como amarillo (véase la Lámina T). El amarillo producido de esta forma es muy diferente del amarillopectral, como entidad física, aunque ambos se perciben como idénticos.

De forma similar, no hace falta sumar todos los colores del espectro de la luz solar, en justamente las mismas proporciones que tienen en la luz solar, para obtener un blanco que *parece* como el de la luz solar. Como se puede ver en la Lámina T, es posible conseguir un blanco perceptual convincente mezclando solo tres colores spectrales, como aquí el rojo, el verde y el azul. Si pasaras ese rayo «blanco» por un prisma, no obtendrías un arco iris continuo, sino solo tres líneas. Como entidad física, este rayo es muy diferente de la luz solar, pero la visión humana los percibe idénticos.

Date cuenta de que los resultados que obtienes mezclando varios *rayos de luz* de colores, como se ilustra en la Lámina T, difieren radicalmente de los que obtienes mezclando *pigmentos* de esos mismos colores, como se hace al mezclar pinturas o emborronar un papel con lápices de colores. Cuando

combinas rayos de luz de colores, estás simplemente sumando la luz que contienen. Con los pigmentos es muy distinto. Solemos ver los pigmentos, por ejemplo los que aparecen en un lienzo, bajo luz solar reflejada (o algún buen suplente artificial). El color que vemos en la luz reflejada depende de qué colores espectrales hayan retirado de la reflexión, o absorbido, los pigmentos. El color que vemos, por supuesto, representa una mezcla de la luz que no ha sido absorbida. Así que cuando, en una pintura o un dibujo, combinas el efecto de dos pigmentos, estás sumando sus poderes de *absorción*. El proceso de sumar colores, como en los rayos de luz, o de sumar la absorción de colores, como en los pigmentos, son muy diferentes. Por ejemplo, es bastante fácil obtener negro —la ausencia de reflexión— combinando los suficientes pigmentos, pero imposible sumando rayos de luz. Así que poca sorpresa es que, en general, haya unas reglas muy diferentes para combinar los colores de los rayos y para combinar los colores de los pigmentos. Sumar rayos es conceptualmente más simple, y físicamente más fundamental, que sumar pigmentos, y eso es lo que voy a tratar a continuación.

Peonzas de color y cajas de color

La observación básica de que mezclas diferentes de colores espectrales pueden parecer iguales conduce con naturalidad a una cuestión más amplia: ¿qué mezclas, exactamente, parecen iguales? ¿Qué tipo de espacio es el espacio de los colores percibidos?

Antes, durante y después de su trascendental trabajo teórico que estableció la naturaleza electromagnética de la luz, Maxwell hizo bastante trabajo experimental precisamente en esas mismas cuestiones. Sus resultados en este campo fueron, en su menor alcance, igualmente fundamentales. Ha conducido a tecnologías importantes y promete conducir a más, como veremos.

En el retrato de un joven Maxwell de la Figura 23, se puede ver que tiene en la mano un objeto circular de diseño peculiar. Se trata de una peonza que diseñó para ayudar a elucidar la percepción del color. Habrás visto que la

fotografía es en blanco y negro. La fotografía en color no se había inventado aún: ¡Maxwell lo haría un poco después!



FIGURA 23. Maxwell con una versión inicial de peonza de color.

La peonza de color parece un juguete, y a cierto nivel lo es, pero también es mucho más. Una idea simple pero profunda la convierte en un instrumento poderoso para elucidar la percepción del color.

Aunque nos da la impresión de que nuestra visión revela el estado instantáneo del mundo, ofreciéndonos un reflejo continuo e inconsútil de los hechos según están ocurriendo en el tiempo, la realidad es otra. Nuestra visión es más bien una serie de instantáneas, cada una con un tiempo de exposición de 1/25 de un segundo. Nuestro cerebro rellena los huecos entre esas

instantáneas, para dar una impresión de continuidad. Las películas y la televisión explotan ese hecho: si las imágenes que presentan se actualizan con la suficiente rapidez, no percibimos que son una secuencia de fotogramas, o una veloz serie de renovaciones de píxeles. La peonza de color se aprovecha de ese mismo efecto, la persistencia de la visión.

En sus peonzas de color, Maxwell dispuso unos papeles de colores en dos tiras circulares, como en la Lámina U. Gracias a la persistencia de la visión, cuando hacemos girar deprisa esos discos de dos bandas alrededor de su centro, percibiremos las mezclas de color que generan los segmentos de color de cada banda, como si esos colores fueran producidos por rayos luminosos. Ese es el genio de la peonza de color de Maxwell: cuando vemos la peonza, nuestros ojos suman los *rayos* reflejados. Las peonzas de color que siguen el diseño de Maxwell nos permiten enumerar, de una manera totalmente sistemática y cuantitativa, qué combinaciones de colores parecen iguales.

Por supuesto, tenemos que comprobar también que distintas personas perciben las mismas relaciones. Esto es esencialmente cierto, aunque hay pequeñas variaciones entre individuos normales. También debemos contar con excepciones para varios tipos de daltonismo o ceguera al color, y posiblemente para una población de gente con poderes superiores de discriminación del color. Trataremos más tarde esas desviaciones de la norma. En la mayoría de las ocasiones, sin embargo, la mayor parte de la gente coincide. Bien, la cuestión de si distintas personas tienen la misma *experiencia subjetiva* de, digamos, el rojo, es un tópico inagotable para lóbregos debates filosóficos. Lo que podemos afirmar con seguridad es que mi *mapa*, o proyección, de la luz física sobre los colores percibidos coincide con el tuyo, casi por completo. Ambos vemos muchas mezclas de colores espectrales como amarillo, y muchas otras como magenta. Y lo más importante, estamos de acuerdo en qué mezclas dan qué color. ¡La conversación humana sobre los colores sería muy confusa en caso contrario!

El resultado central que emerge de estos estudios es que, utilizando solo *tres* colores en la tira interior, podemos coincidir *cualquier* color de la tira exterior. Así, por ejemplo, podemos utilizar rojo, verde y azul espectrales, en las proporciones adecuadas, para obtener naranja, malva, verde amarillento, castaño rojizo, celeste, peonía tostada o cualquier otro color al que quieras

dar un nombre. Los tres colores básicos no tienen por qué ser rojo, verde y azul (RVA, o RGB en sus siglas inglesas): casi cualquier grupo de tres puede valer, incluyendo las mezclas, siempre que sean independientes. (Si uno de tus colores básicos se puede obtener como una mezcla de los otros dos, no permite nuevas posibilidades.) Por otro lado, necesitamos tres colores básicos. Si te restringes a dos colores básicos —no importa cuáles sean—, la mayoría de los colores no puede coincidir mezclándolos.

Dicho de otra forma, podemos especificar cualquier color percibido diciendo cuánto rojo, cuánto verde y cuánto azul supone armonizarlo. Esto es totalmente análogo a cómo podemos especificar un lugar en el espacio diciendo lo lejos que está en las direcciones norte-sur, este-oeste y vertical. El espacio ordinario es un continuo tridimensional, *y eso mismo es el espacio de los colores percibidos*.

Volviendo a la Lámina T, podemos decir que nuestro resultado central afirma que, ajustando las intensidades relativas de los diferentes rayos, podemos hacer que *cualquier* color perceptual, no solo el blanco, aparezca en el centro, donde la luz de los tres rayos solapa.

En investigaciones posteriores, Maxwell se las ingenió para combinar rayos de luz directamente, usando unos artefactos a los que llamó cajas de color. La idea estratégica es simple: extraes colores de un arco iris prismático, en lugares y proporciones bajo tu control, luego recombinálos utilizando espejos y lentes. Los detalles tácticos, dada la limitada tecnología de la época, eran muy complicados. La única fuente disponible de luz era la del sol, y el detector disponible era un ojo humano, por ejemplo. Las cajas de color de Maxwell eran enormes —casi dos metros de largo— y alojaban espejos, prismas y lentes. Pero, por inmanejables que fueran, las cajas de color permitían un trabajo mucho más preciso que las peonzas de color.

La idea de Maxwell de procesar el color por separación, manipulación y recombinación iba por delante de su tiempo. Las tecnologías modernas deberían permitirnos intentar unas manipulaciones del color mucho más ambiciosas, como trataré más abajo.

Usándolo

El hecho de que se puedan sintetizar todos los colores percibidos mezclando tres se explota ampliamente en la fotografía, la televisión y la computación gráfica en color modernas. Por ejemplo, en la fotografía en color, se usa tres tipos de pigmentos sensibles al color. En los monitores de ordenador, hay tres tipos de fuentes de luz de color. Cuando ves la opción de «millones de colores», se refiere a los millones de maneras diferentes de ajustar la intensidad relativa de esas tres fuentes. En otras palabras, se muestran *millones de puntos* distintos, pero todos en un *espacio de tres dimensiones*.

Para los artistas, la posibilidad de obtener el mismo color perceptual de muchas maneras diferentes abre posibilidades creativas. Puedes añadir textura local al tiempo que mantienes intacto el color general (en promedio). Esto es esencialmente otra clase de peonza de color que explota la persistencia de la visión en el espacio, en vez de en el tiempo. El promediado espacial es menos grosero, y por tanto soporta una paleta de variaciones más nutrida. Los impresionistas, sobre todo, crearon obras maestras con esas posibilidades, como en la pintura que se muestra en la Lámina V, *Grainstack (Atardecer)*, de la serie «Almiares» de Monet.

Al aplicar los distintos pigmentos *separadamente*, en partes distintas (aunque muy cercanas) del lienzo, en lugar de *superponerlas*, los impresionistas seguían una estrategia similar a la usada en las peonzas de color de Maxwell, transportada del tiempo al espacio. En ambos casos, la luz de las diferentes regiones se combina según las reglas de los rayos: porque uno no mezcla los pigmentos, sino más bien la luz que reflejan.

Infinitos perdidos

Maxwell nos dio nuevos conceptos sobre qué es la luz, y sobre qué es nuestra percepción de la luz. ¡Y esas son cosas muy diferentes! De hecho, como anticipó Blake, son *infinitamente* diferentes.

Comparando la totalidad de lo que está ahí fuera con la información que capturamos, podemos formular lo que se ha perdido con mucha precisión. Y después podemos pensar con inteligencia cómo recuperar parte de ello.

La materia prima: ondas electromagnéticas

He expuesto la manera en que la luz emerge de las ecuaciones de Maxwell en el capítulo anterior. Ahora me gustaría explorarlo con algo más de profundidad. Como recompensa, conseguiremos un buen entendimiento de los infinitos perdidos.

Maxwell describió de esta forma su explicación fundamental de la luz:

¿Qué es, entonces, la luz según la teoría electromagnética? Consiste en perturbaciones magnéticas transversales alternas y opuestas de período rápido, acompañadas de desplazamientos eléctricos, estando estos desplazamientos eléctricos en ángulo recto a la perturbación magnética, y ambas en ángulo recto a la dirección del rayo.

La Lámina W pone al descubierto esa descripción.

Los campos eléctrico y magnético en cualquier punto tienen tanto magnitud como dirección, de modo que podemos dibujarlos como flechas de colores que emanan de ese punto. Lo que ocurre es que, si hiciéramos eso en todos los puntos del espacio, armaríamos un embrollo de flechas superpuestas, así que en la imagen solo se muestran los campos a lo largo de una línea.

Si imaginas todo este patrón moviéndose en la dirección de la flecha negra, verás que, en cualquier punto, los campos eléctricos (en rojo) cambian y los campos magnéticos (en azul) cambian. Como expusimos en el capítulo anterior, el campo eléctrico cambiante produce campos magnéticos, y los campos magnéticos cambiantes producen campos eléctricos. Puedes ver cómo, si las cosas van como deben, la perturbación móvil puede ser autogenerativa: es decir, el cambio en los campos eléctricos hace que los campos magnéticos cambien de manera que hagan los campos eléctricos que hicieron los campos magnéticos, y el proceso entero adquiere una vida propia. Es una proeza digna del barón de Münchhausen, que —según el barón de Münchhausen— podía levitar tirando de los cordones de sus zapatos. Pero en el electromagnetismo no se trata de un cuento de hadas, ni de realismo mágico, sino de *magia realista*.

En cualquier punto, al progresar el tiempo, la flecha del campo eléctrico sube y baja, como la superficie del agua en una ola. De forma general, llamamos ondas electromagnéticas a estas perturbaciones electromagnéticas móviles y auto-generativas.

Nuestra lámina muestra una onda electromagnética especialmente simple, donde el patrón de perturbaciones eléctricas y magnéticas se repite después de cierta distancia (y, técnicamente, sigue una función sinusoidal). Llamaré a esto una onda *pura*, por razones que quedarán claras en un momento. En ese caso, decimos que el espaciado entre las repeticiones es la «longitud de onda» de esa onda. El patrón también se repetirá en el tiempo, a una velocidad que llamamos la «frecuencia» de esa onda.

Una propiedad *muy* importante de las ondas electromagnéticas es que se puede multiplicar y sumar. Es decir, si tenemos una solución de las ecuaciones de Maxwell que sea una onda electromagnética, y multiplicamos los campos eléctrico y magnético que contiene por un factor común, el resultado seguirá siendo una solución de las ecuaciones de Maxwell. Así, si duplicamos todos los campos de una solución, por ejemplo, obtenemos otro tipo de perturbación que también es una solución. Eso es tanto como sumar la solución original a sí misma. También podemos sumar una solución a otra, y el resultado será una solución. Estas posibilidades *matemáticas* corresponden a las posibilidades *físicas* de aumentar o reducir el brillo de un rayo de luz (multiplicación) o combinar un rayo con otro (suma).

Sabemos por experiencia que aumentar el brillo y combinar son cosas que podemos hacer con los rayos de luz. Así que nos meteríamos en un lío si, cuando estamos intentando identificar la luz como una forma de onda electromagnética, no pudiéramos hacer lo mismo con las ondas electromagnéticas. Por fortuna, sí podemos.

Por último, tratemos de encajar los detalles de la descripción verbal de Maxwell, citada arriba, con nuestra versión pictórica. Puedes ver en la imagen que los campos eléctricos y magnéticos son perpendiculares (o forman ángulos rectos, en otras palabras) entre sí, y que la dirección del movimiento es perpendicular a ambos. Esa es exactamente la geometría que Maxwell

describe con palabras. Y las oscilaciones rápidas y alternas (es decir, arriba y abajo) que menciona son exactamente lo que observarás, en cualquier punto dado, según progresá la onda.

Vuelve la luz purificada

Tenemos soluciones de las ecuaciones de Maxwell que son ondas electromagnéticas puras para cualquier longitud de onda, viajando en cualquier dirección.

Las ondas electromagnéticas puras con longitudes de onda dentro de un estrecho intervalo específico —de unos 370 a unos 740 nanómetros, cuantitativamente— son la materia prima de la visión humana. Corresponden a la luz pura revelada en el espectro prismático de Newton. En términos musicales, la gama visual humana cubre una octava (una duplicación de la longitud de onda). Cada colorpectral corresponde a una longitud de onda precisa, como se muestra en la Lámina P.

La inmensa mayoría del espectro electromagnético se escapa por completo a nuestra visión. Por ejemplo, no vemos las ondas de radio, y de no ser por los receptores de radio seríamos ajenos a su existencia. Por otro lado, casi toda la radiación electromagnética del Sol que penetra la atmósfera terrestre está concentrada cerca de la parte visible del espectro, de modo que esa es la parte más útil a la que se pueden sintonizar las criaturas terrícolas. Por así decir, es donde la señal se enciende.

Por el momento, concentrémonos en el recurso que la iluminación de nuestro Sol nos ofrece en abundancia, y consideremos solo la parte visible del espectro.

¿Aprovecha nuestra percepción la totalidad de ese recurso? No. Ni de lejos.

¿En qué consistiría un análisis completo de la señal que nos entra por los ojos? La respuesta a esa pregunta tiene dos aspectos, que son muy distintos. El primero es el aspecto *espacial*. La señal contiene información sobre las direcciones de los rayos luminosos que llegan desde diferentes objetos. Usamos esa información para formar imágenes. El segundo es el aspecto del

color. Captura un tipo diferente de información. Podemos tener imágenes en blanco y negro, y podemos tener patrones de color —en el caso extremo, simplemente colores uniformes que llenan todo el campo visual— que no forman imágenes.

Color, tiempo y dimensiones ocultas

Durante nuestra exposición de las ondas electromagnéticas y su espectro de posibilidades, hemos sentado las bases para una perspectiva profunda y muy hermosa sobre qué es el color. Mientras que la imaginería revela información sobre lo que ocurre en el espacio, el color nos habla de lo que ocurre en el *tiempo*. En concreto, el color nos da información sobre las variaciones rápidas de los campos electromagnéticos que llegan a nuestros ojos.

Para evitar una posible confusión, subrayaré que la información temporal que transporta el color es muy diferente de —y complementaria a— la información temporal que utilizamos en nuestra reconstrucción cotidiana del orden temporal de los hechos. *Grosso modo*, los ojos nos dan instantáneas 25 veces por segundo, y el cerebro crea la ilusión de una película continua a partir de esas instantáneas. Esa interpretación subyace a nuestro sentido cotidiano del flujo del tiempo. En el proceso de recolectar luz para esas instantáneas —como dicen los fotógrafos, durante el tiempo de exposición— la luz simplemente se suma, o se integra. Como la luz que llega a diferentes tiempos dentro de cada *fotograma* se amontona toda junta, la información sobre el tiempo de llegada, dentro de cada instantánea, se pierde.

El color, tal y como lo percibimos, es una forma de preservar cierta información muy útil sobre la microestructura temporal de la señal que sobrevive al proceso de promediado. Los colores nos dan información sobre la variación de los campos electromagnéticos en lapsos de tiempo *mucho* más cortos, ¡del rango de 10^{-14} a 10^{-15} —milésimas de billonésima— de un segundo! Como ningún objeto cotidiano puede moverse mucho, ni hacer algo digno de mención, durante semejantes intervalos de tiempo, las dos clases de información temporal, la codificada en los cambios de un fotograma al siguiente, y la codificada en los colores, son del todo independientes.

Por ejemplo, cuando percibimos el amarillo puro espectral, nuestros ojos nos están diciendo que las ondas electromagnéticas entrantes son ondas puras que se repiten unas 520.000.000.000.000 veces por segundo. Cuando percibimos el rojo espectral, el mensaje es que las repeticiones ocurren unas 450.000.000.000.000 veces por segundo.

Mejor dicho, nuestros ojos *estaría*n diciéndonos esas cosas si no confundieran el posible mensaje «amarillo espectral» con una variedad de otras posibles mezclas que también *parecen* amarillo, y el posible mensaje «rojo espectral» con una serie (diferente) de mezclas que parecen rojo. El mensaje real que transmiten es ambiguo porque ¡muchos posibles *inputs* dan el mismo *output*!

Un verdadero análisis del color de la señal entrante tiene que revelar la misma información que el análisis prismático de Newton. Es decir, un verdadero análisis resolvería la señal entrante en sus componentes espectrales puros, cada uno con su propia fuerza independiente. Para informar del resultado de ese análisis, tendríamos que especificar un *infinito continuo* de números, uno para la fuerza de cada componente espectral puro. Por tanto, el espacio de la información potencial sobre el color no es meramente infinito, sino *infinito-dimensional*, esto es, con un número infinito de dimensiones. En vez de eso, la proyección de nuestros ojos sobre esa información captura, como descubrió Maxwell, solo tres números.

En resumen: el espacio de la información del color es infinito-dimensional, pero nosotros percibimos, como color, solo una superficie tridimensional, sobre la que se proyectan esas infinitas dimensiones.

Para completar la historia debería mencionar también otro tipo de información electromagnética que está en oferta, pero es también ignorada, en la señal que nos entra por los ojos. Si volvemos a la Lámina W, podemos ver que los campos eléctricos (en rojo) oscilan en dirección vertical, mientras que los campos magnéticos (en azul) lo hacen en horizontal. Hay también otra solución, en la que rotas el patrón entero 90 grados, de modo que los campos eléctricos son horizontales y los magnéticos verticales. Esta solución rotada oscila a la misma frecuencia que la original, de modo que representa el mismo color espectral. Pero es físicamente distinta. La nueva propiedad que corresponde a esta distinción se llama polarización de la onda. Así que la

información electromagnética que entra por los ojos en cada punto de la imagen es infinito-dimensional dos veces, porque para cada color espectral hay dos posibles polarizaciones, y cada una puede tener una fuerza independiente. La visión humana pasa por alto esa información, porque los ojos no pueden distinguir entre las distintas polarizaciones de la luz.

Receptores del color

El resultado central de los experimentos con el color de Maxwell, que basta mezclar tres colores básicos para generar cualquier color perceptual, revela un hecho profundo sobre el «qué» de la percepción humana, pero también plantea la cuestión del «cómo». Una respuesta hermosa e instructiva a la cuestión del «cómo» emergió a mediados del siglo XX, cuando los biólogos estudiaron el fundamento molecular de la visión en color. (Tiene gracia que los físicos resolvieran la biología, y después los biólogos resolvieran la física.)

El resultado central de la historia molecular de la visión es que tres tipos distintos de moléculas de proteína (rodopsinas) extraen la información sobre el color. Cuando la luz incide en una de estas moléculas, hay cierta probabilidad de que la molécula absorba una unidad de luz —un fotón— y cambie de forma. El cambio de forma desencadena pequeños pulsos de electricidad, que son los datos que el cerebro utiliza para crear nuestro sentido de la visión.

Bien, la probabilidad de que una unidad de luz sea absorbida depende tanto de su color espectral como de las propiedades de la molécula receptora. Un tipo de receptor tiene una mayor probabilidad de absorber luz de la parte roja del espectro, otro prefiere la verde y el tercero la azul, aunque estas preferencias no son nítidas (véase la Lámina Y). Con los niveles de iluminación habituales hay montones de fotones, así que hay muchos sucesos de absorción, y esas probabilidades se traducen en tres medidas precisas de la cantidad de energía que contiene la luz entrante, promediada sobre los tres rangos espectrales diferentes.

De esta forma, nos volvemos sensibles no solo a la cantidad total de luz que llega, sino también a su composición. Si es luz roja espectral, estimulará el disparo desde los receptores *rojos* más que desde los otros, y ello resultará en una señal totalmente diferente de la que produciría una luz azul espectral (que, por supuesto, estimula más a los receptores *azules*).

Por otro lado, cualquier tipo de luz entrante que tenga la misma capacidad para estimular cada una de las tres clases de receptores —en otras palabras, que genere los mismos tres promedios ponderados— será «visto» igual por cada uno de nuestros receptores de color, y resultará por tanto en la misma percepción visual. Hacen falta tres números para tener una concordancia: en eso, ¡las moléculas concuerdan con las peonzas de color!

Variedades de visión en color

Ahora que sabemos qué buscar —qué está en oferta en la señal entrante— podemos explorar el mundo biológico, contando receptores y midiendo sus propiedades de absorción, para ganar nuevas perspectivas sobre la percepción del color.

Los mamíferos, en general, tienen una mediocre visión en color. El rojo de la capa del torero es para beneficio de los espectadores humanos, no del toro, porque los toros solo perciben tonos de gris. Los perros lo hacen algo mejor; ven un espacio bidimensional de colores. Podemos reconstruir el punto de vista que tiene del mundo un perro, como en la Lámina X, basada en los *dos* receptores de los perros.

Las personas daltónicas ven solo un espacio bidimensional de colores percibidos. Les falta una de las clases de proteína receptora, o tienen proteínas mutantes con una discriminación mediocre. El daltonismo afecta a pocas mujeres, pero es bastante común en los hombres: lo padece más o menos uno de cada doce hombres del norte de Europa. Un daltónico puede casar cualquier color en el círculo externo de una peonza de colores si solo hay dos colores básicos —rojo y verde, digamos— en el círculo interno (véase la Lámina U). Hay también mujeres que ven un espacio tetradimensional de colores: las *tetracrómatas*. Tienen una proteína receptora

extra, que es una mutación de una de las habituales. Pueden discriminar entre mezclas de colores espectrales que la mayoría de la gente percibe como indistinguibles. Esta capacidad parece ser infrecuente, y no ha sido muy estudiada.⁶

Con luz escasa, todos nos volvemos daltónicos. El color hace su entrada en nuestro mundo perceptivo al salir el Sol, y lo abandona cuando se pone. Esta es, desde luego, una observación común. La hacemos, literalmente, todos los días. Pero a mí me parece una experiencia fascinante, cuando estoy atento a ella, en los largos atardeceres veraniegos.

Por otro lado, muchos tipos de insectos y de pájaros tienen cuatro y hasta cinco receptores de color, incluyendo a veces la sensibilidad al ultravioleta, e incluso sensibilidad a la polarización. Muchas flores poseen patrones vívidos en el ultravioleta, para seducir a sus polinizadores. En el universo sensorial del color, exploran dimensiones que eluden nuestra conciencia.

Y luego está la langosta mantis, o galera. En realidad no es una especie, sino un orden (estomatópodos) con cientos de especies distintas que comparten muchos rasgos y siguen un estilo de vida similar. Son unas criaturas extraordinarias en muchos sentidos. Puede crecer hasta unos treinta centímetros y son predadores marinos solitarios. Se agrupan en dos grandes variedades, arponeras (o perforadoras) y boxeadoras (o trituradoras). Los dos tipos golpean con asombrosa rapidez y gran fuerza. Son difíciles de mantener en acuarios, porque pueden romper las paredes de cristal.

Pero la característica más extraordinaria de la langosta mantis es su sistema visual. Según la especie, pueden ver entre 12 y 16 dimensiones de color. Su gama de sensibilidad se extiende al infrarrojo y al ultravioleta (véase la Lámina Y), y también codifica cierta información sobre la polarización de la luz.

Por qué la langosta mantis ha desarrollado su peculiar genio para el color es una cuestión fascinante. Una respuesta verosímil es que lo usen para enviar mensajes secretos a otras langostas mantis. Lo que a mí me parece más probable es que utilicen sus propios cuerpos para hacer unas exhibiciones de color impresionantes —¡de las que nos perdemos la mayor parte!— para publicitar su buen estado de forma a las parejas potenciales. Es como la cola del pavo real dopada con anabolizantes. En apoyo de estas ideas, podemos

fijarnos en que algunas especies de langosta mantis parecen en verdad muy coloridas —¡incluso a nosotros, como vemos en la Lámina Z!— y que las especies con la visión en color más avanzada son por lo general las más coloridas.

¿Cómo pueden esos pequeños cerebros crustáceos manejar semejante chorro de *input* sensorial? Esta pregunta es ahora mismo objeto de investigación. A mí me parece probable que utilicen una técnica que los ingenieros de la información conocen como «cuantificación vectorial»: un término de la jerga que explicaré a continuación. Los humanos rellenamos nuestro espacio de color tridimensional de manera muy fina. Somos capaces de distinguir puntos cercanos en ese espacio, y por tanto de experimentar millones de percepciones de color distintas. Las langostas mantis usan probablemente una representación de grano mucho más grueso, con *inputs* de grandes regiones de su espacio 16-dimensional que producen el mismo *output*. Mientras que nosotros podemos resolver puntos dentro de un espacio relativamente pequeño, ellas localizan borrones que dividen un espacio mucho mayor. Nosotros hacemos una proyección (tridimensional) muy cruda del *input* electromagnético infinito-dimensional, pero exploramos esa proyección con precisión, mientras que la langosta mantis hace una proyección mucho más sofisticada, pero la explora groseramente.

Sentido del espacio y sentido del tiempo

Una vez examinados el «qué» y el «cómo» de la visión en color, estamos preparados para abordar la pregunta «¿por qué?». Dos preguntas «por qué» surgen con naturalidad:

¿Por qué los humanos, y muchas otras criaturas, se ocupan tanto de las oscilaciones ultrarrápidas de los campos electromagnéticos?

Fijémonos en que, si hubiera formulado la pregunta de la forma «¿Por qué los humanos, y muchas otras criaturas, se ocupan del color?», nos vendrían a la cabeza tantas respuestas que la pregunta parecería ridícula.

Pero si la formulamos de la primera forma, que en realidad viene a decir lo mismo, plantea un punto profundo. La información sobre las oscilaciones rápidas en los campos electromagnéticos es importante para nosotros, como criaturas biológicas, porque es importante para los electrones en los materiales. Esos electrones suelen responder de diversas formas, según su entorno material, a las oscilaciones electromagnéticas de diferentes frecuencias. Debido a ello, la luz que se origina en el Sol, tras interactuar con la materia y transmitirse a nosotros, porta información sobre la materia interpuesta, impresa por sus electrones.

Dicho en plata: los colores de los objetos codifican la sustancia de la que están hechos. Tú ya sabías eso por experiencia, naturalmente. ¡Pero ahora también sabes, en términos fundamentales, qué es exactamente lo que has experimentado!

¿*Por qué* la visión es tan diferente de la audición? Después de todo, ambos sentidos se ocupan de una información que viaja hasta nosotros por vibraciones, que nos llegan en forma de ondas. La vista se ocupa de las vibraciones de los campos electromagnéticos, el oído de las vibraciones del aire. Pero la forma en que percibimos los acordes de luz y los acordes de sonido son profunda y cualitativamente diferentes.

Seamos precisos sobre esto. Cuando recibimos varias notas puras que suenan juntas, oímos acordes en que las notas retienen su identidad individual. En un acorde de *do* mayor, puedes oír el *do*, el *mi* y el *sol* separadamente, y no te quepa duda de que notarás una diferencia cualitativa si una de ellas está ausente, o si es mucho más ruidosa que las demás. Y puedes oír acordes más complicados, con más notas separadas, cada una sonando de un modo diferente, casi sin límite (al final empiezan a sonar como fango sonoro, pero siempre es un fango con componentes identificables).

Por otro lado, como ya hemos visto, cuando recibimos varios tonos de luz puros —es decir, colores espectrales— juntos, percibimos un nuevo color en que la identidad de los originales queda sumergida. Por ejemplo, mezclar verde y rojo da un amarillo perceptual que es indistinguible de (la percepción del) amarillopectral. Es como si tocas *do* y *mi* a la vez, y como resultado ¡escuchas un *re*!

Claramente, el oído hace un mejor trabajo manejando su material basado en el tiempo.

La física de la audición es la física de la vibración solidaria, o por simpatía, como vimos antes. Hay una buena razón física por la que la luz debe ser tratada de un modo diferente. Las oscilaciones de los campos electromagnéticos en la gama de la luz visible son demasiado rápidas para que las pueda seguir cualquier sistema mecánico práctico. Así que la estrategia que usamos para oír, donde las vibraciones del aire son canalizadas para disparar vibraciones solidarias en nuestra cabeza, no puede funcionar en la visión. Para sintonizarnos con las vibraciones de la luz tenemos que usar unos receptores mucho más pequeños y ágiles.

Para la luz, los receptores útiles son los electrones individuales. Pero, en el mundo subatómico de los electrones, hace su entrada la mecánica cuántica, y eso cambia las reglas del juego. La transferencia de información de la luz a los electrones solo puede ocurrir mediante la transferencia de parte de la energía de la luz. Según las reglas cuánticas, sin embargo, esas transferencias de energía se dan en sucesos discretos del tipo «todo o nada» —absorción de fotones— que ocurren en momentos impredecibles. Estos efectos hacen de la transferencia de información una transcripción menos fidedigna y más difícil de controlar.

Y eso —cuando se analiza de modo más riguroso— explica por qué nuestra percepción de la estructura temporal de la luz, codificada como color, es más grosera que nuestra percepción de la estructura temporal del sonido, codificada como armonía musical. La culpa es de la mecánica cuántica. Con varios tipos distintos de receptores, sintonizados a distintas características, rescatamos algo de la información temporal de la luz. Pero no hay un análogo visual de las membranas vibrantes del oído interno donde, para el sonido, todo queda expuesto con nitidez, como en las teclas de una pianola.

Por otro lado, para transportar información sobre la estructura en el *espacio*, la luz tiene una gran ventaja sobre el sonido. El problema con las ondas de sonido, como portadoras de información espacial, es simplemente que son grandes. Su longitud de onda —y no por coincidencia— es comparable al tamaño de los instrumentos musicales, como las guitarras, los pianos o los tubos de un órgano de iglesia. Así que no pueden resolver

estructuras mucho más pequeñas que eso. Con la luz no hay ese problema: las longitudes de onda de la luz visible son algo menores de una *millonésima* de metro.

La vista es primariamente un sentido espacial, mientras que el oído es primariamente un sentido temporal, por sólidas razones físicas.

Abriendo las puertas

Y ahora demos un salto con la imaginación, elevándonos desde la tierra firme del «qué», «cómo» y «por qué» hasta el paisaje onírico del «¿y qué sí...?», «¿por qué no?» y las instrucciones de uso.

Nuestros ojos son unos maravillosos órganos sensoriales, pero se dejan mucho en el tintero. Basándose en la información espacial que contiene la luz entrante —la dirección de los rayos luminosos entrantes, fundamentalmente—, producen una secuencia de imágenes del mundo externo. Tal y como hemos explorado ya con cierto detalle, sin embargo, rescatan solo una pequeña parte de la información temporal que contiene la luz entrante, y pierden por completo el registro de la polarización. Cada píxel de nuestro campo visual suministra potencialmente un acorde doblemente infinito, pero solo vemos el color, una proyección tridimensional.

La mente humana es nuestro órgano sensorial definitivo. La mente ha descubierto que hay infinitos invisibles escondidos en la luz. Nuestra percepción del color proyecta el espacio doblemente infinito-dimensional del color físico en el muro tridimensional de nuestra caverna interior. ¿Podemos escapar de esa caverna para muestrear las dimensiones adicionales?

Creo que sí, y voy a indicar brevemente cómo. (Mi filosofía: si la langosta mantis puede, nosotros también.)

Tiempo y daltonismo

Como aperitivo, consideremos una versión simplificada del problema que ya tiene importancia práctica. Conocemos con bastante precisión qué información se pierden los daltónicos, es decir, el promedio concreto de intensidades espectrales que codifica la proteína receptora que les falta. ¿Cómo podemos recuperar esa información?

Bien, para hacerlo tenemos que presentar la información sobre el color en el lugar que le corresponde, integrada en las imágenes visuales. Así que debemos hacer uso de los receptores disponibles para sintetizar otros nuevos. Y dentro de las imágenes, queremos que la nueva información esté amarrada a los lugares correctos. Para concretar, llamemos «Verde» a lo que suministra normalmente el receptor que falta, y «*Verde*» a nuestra señal artificial de repuesto. Entonces, lo que queremos es estar seguros de que las partes de la imagen que contienen mucho Verde reciban *Verde* en proporción.

Para satisfacer esos requisitos —añadir información localmente, utilizando los receptores existentes—, necesitamos poner en la señal una nueva estructura que los receptores existentes puedan reconocer. Una manera elegante de hacerlo es manipular la señal en el *tiempo*. Por ejemplo, podemos codificar *Verde* como *centelleo* añadido, *pulsación* o, más en general, *modulación temporal* —texturas que varían en el tiempo— en los colores perceptibles, cuya intensidad local es proporcional al Verde de la imagen original.

Reflexionemos sobre lo que estamos haciendo aquí. La información perdida, el Verde, estaba diciendo algo sobre la estructura de la luz, como señal electromagnética, en el tiempo. La estamos recuperando como *Verde*, de nuevo una señal temporal, pero ralentizada para casar con el ritmo humano del procesamiento de la información. Estamos usando el tiempo y el cerebro para abrir las puertas de la percepción.

En beneficio de la gente con una visión normal del color, lo habitual es que codifiquemos las imágenes en un formato de tres colores, y las decodifiquemos con un proyector de tres colores. En cualquier contexto en que se haga esto —en monitores de ordenador (¡incluyendo pantallas miniaturizadas instaladas en las gafas, o en las gafas google!), o teléfonos

móviles, o proyectores digitales, por ejemplo—, nuestra solución para el daltonismo puede aplicarse en el *software* como un mapeo modificado entre *input* y *output*.

También podemos considerar la posibilidad de aplicar el mismo enfoque general en el *hardware*. Por ejemplo, hay materiales llamados electrocrómicos cuya tendencia a absorber luz en una región concreta del espectro puede modularse aplicando voltaje. Si equipamos unas gafas ordinarias con unas capas electrocrómicas, y les aplicamos un voltaje que varíe con el tiempo, estaremos abriendo nuevos canales de color.

Métodos y recursos

Las mismas ideas generales nos permitirán abrir dimensiones esencialmente nuevas a la visión en color, como se ve en la Lámina AA. Por supuesto, antes de hacer accesible esta nueva información, tenemos que recolectarla en primer lugar. El hecho de que la fotografía digital y la computación gráfica se basen en tres colores básicos, y no en más, no se debe a ninguna consideración física fundamental. Como hemos visto, hay un doble infinito de colores ahí fuera, esperando a nuestra mirada limpia. Las razones por las que la tecnología se ha estabilizado en tres colores son:

1. Tres colores básicos nos permiten sintetizar cualquier color perceptual, como nos enseñó Maxwell.
2. Dos colores básicos no bastan.
3. Lo más simple y barato es utilizar el menor número que sea suficiente.

Pero, una vez que decidimos extendernos a dimensiones extra del espacio de color, la tecnología parece muy viable (y ya se ha utilizado de forma exploratoria). Un diseño sencillo para cuatro dimensiones, viable tanto para la recepción como para la transmisión digital, se muestra en la Lámina BB.

Podemos crear cuatro (o cinco...) clases distintas de receptores de color en formación ceñida con un estilo parecido al que usamos ahora para tres. En la parte del *output* podemos hacer que tres transmisores de color hagan un trabajo doble, superponiendo un centelleo, o bien —como en la Lámina BB— reservar una clase especial de píxeles para el nuevo canal. En cualquier caso, unos canales extra se vuelven disponibles cuando abrimos el *output* a una variación artificial del tiempo, cuya posición y fuerza se controla por las señales de los nuevos receptores.

Será muy divertido, creo yo, experimentar colores adicionales de esta forma.

«¿Para qué sirve eso?»

Ha sido una alegría para mi comulgar con Maxwell a través de sus escritos y del testimonio de sus amigos. Se ha convertido en mi físico favorito. Aquí voy a esbozar un pequeño retrato impresionista de él. Según su amigo y biógrafo Lewis Campbell:

Durante su niñez, su pregunta permanente era: «¿Para qué sirve eso? ¿Qué hace?». Y no se contentaba con una respuesta vaga, sino que insistía «Pero ¿para qué sirve *en concreto?*».

La correspondencia de Maxwell con su familia y amigos recuerda a la de Mozart. Está llena de juegos de palabras, dibujos cómicos y calor humano. Lo que sigue es un extracto de una carta a su joven primo Charles Cay. En una línea alude a su «Teoría dinámica», la obra maestra que tratamos antes; en la siguiente, sin mediar una pausa, describe unas observaciones sobre su nuevo perro:

He sacado también un artículo a flote, con una teoría electromagnética de la luz, que, hasta que me convenza de lo contrario, creo que es una bomba.

Spice se está volviendo de primera clase: es la principal paciente bajo el oftalmoscopio, y gira los ojos cuando se lo pido, mostrando el tapetum, el nervio óptico o cualquier otra cosa que haga falta.

Durante toda su vida escribió poesía. Uno de sus mejores poemas es una canción, «*Rigid Body*», que cantaba acompañándose con la guitarra. En cada estrofa, el propio Maxwell se queja de lo difícil que es calcular cómo se mueven los cuerpos rígidos; entonces el propio cuerpo rígido responde diciendo, en esencia, «yo solo hago mi trabajo». Recurre a la canción de Robert Burns «*Comin' thro' the rye*», y está salpicada de giros escoceses.

Cuando un cuerpo encuentra un cuerpo
volando por el aire,
cuando un cuerpo golpea a un cuerpo,
¿volará? ¿Y adónde?
Todo impacto tiene una medida,
y ninguna tengo yo,
pero todos me miden,
o al menos lo intentan.
Cuando un cuerpo encuentra un cuerpo
libre por entero,
cómo viajan después
es algo que no siempre vemos.
Todo problema tiene su método
altamente analítico;
para mí, no conozco ninguno,
pero ¿soy peor por eso?

Muerte y vida

En la primavera de 1877, antes de haber cumplido cuarenta y seis años, Maxwell empezó a notar síntomas de indigestión, dolor y fatiga. En los meses siguientes sus síntomas empeoraron, y pronto quedó claro que tenía cáncer abdominal, la misma enfermedad que se había llevado a su madre a una edad similar, cuando Maxwell era un niño de nueve años. Maxwell sabía que no le quedaba mucha vida. Según Campbell:

En las últimas semanas su sufrimiento era muy grande, pero él apenas lo mencionaba; y ... su mente estaba en absoluta calma. El único pensamiento que le pesaba, y al que se refería constantemente, era el del futuro bienestar y comodidad de la señora Maxwell.

Maxwell murió en 1879, a los cuarenta y ocho años.

Cuando tenía veintitrés, Maxwell había hecho una anotación concienzuda en su diario privado, en la que anticipaba la vida que iba a llevar:

Feliz es el hombre que puede reconocer en su trabajo de hoy una parte conectada al trabajo de su vida y una encarnación del trabajo de la Eternidad. El fundamento de su confianza es inmutable, porque se ha hecho partícipe del Infinito. Resuelve de manera extenuante sus quehaceres diarios porque el presente le viene dado por una obsesión.

Así debiera ser el hombre una imitación del divino proceso de la naturaleza, y para mostrar la unión de lo infinito con lo finito, sin despreciar su existencia temporal, recordando que solo en ella es posible la acción individual, pero sin ocultar a su visión lo que es eterno, sabiendo que el Tiempo es un misterio cuya contemplación no puede aguantar el hombre hasta que la Verdad eterna lo ilumine.

Preludio a la simetría

La simetría, definida en un sentido tan estrecho o tan amplio como se quiera, es una idea por la que el hombre ha intentado en todas las épocas comprender y crear orden, belleza y perfección.

HERMANN WEYL

La naturaleza parece aprovecharse de las representaciones matemáticas simples de las leyes de la simetría. Cuando uno se para a contemplar la elegancia y la hermosa perfección del razonamiento matemático implicado, y lo contrasta con sus consecuencias físicas complejas y trascendentales, nunca deja de desarrollar un sentido profundo de respeto por las leyes de la simetría.

C. N. (FRANK) YANG

Pero, aunque las simetrías se nos oculten, podemos sentir que están latentes en la naturaleza, gobernándolo todo sobre nosotros. Esta es la idea más emocionante que conozco: que la naturaleza es mucho más simple de lo que parece.

STEVEN WEINBERG

Durante todo el siglo xx, y todavía hoy, la *simetría* ha venido dominando cada vez más nuestro mejor entendimiento de las leyes fundamentales de la naturaleza. Así lo dicen los maestros. Las partes finales de nuestra reflexión, que nos traen a las fronteras actuales y más allá, celebran los grandes triunfos de la simetría, y profetizan más.

Cambio sin Cambio. ¡Qué mantra tan extraño e inhumano para el alma de la creación! Y aun así su misma irrealidad nos da una oportunidad: podemos extender nuestra visión imaginativa haciendo nuestra su sabiduría.

Nuestra Pregunta nos pide que descubramos la belleza en las raíces del mundo físico. Para responder a su desafío, tenemos que actuar en sus dos caras. Debemos agrandar nuestro sentido de la belleza, mientras agrandamos también nuestra comprensión de la realidad. Porque la belleza del diseño profundo de la naturaleza, como comprobaremos, es tan extraña como bella es su extrañeza.

Por consiguiente, veremos unas cuantas «rupturas de la simetría» a medida que excavamos hacia las raíces profundas del mundo físico; leves interludios que exploran la forma concreta de belleza que comprobaremos al final: la *simetría*, expandida y fortalecida.

Un viaje con Galileo

Para empezar, haremos bien en unirnos a Galileo en un viaje de la imaginación.

Enciérrate con un amigo en el camarote principal bajo la cubierta de un barco grande, y lleva contigo unas cuantas moscas, mariposas y otros pequeños animales voladores. También un acuario con algunos peces; cuelga una botella que se vacíe gota a gota en una vasija que tenga debajo. Mientras el barco está atracado, observa con atención cómo los animales vuelan con la misma velocidad hacia todas las paredes del camarote. Los peces nadan indistintamente en todas direcciones; las gotas caen a la vasija de debajo; y, si tiras algo a tu amigo, no tienes que lanzarlo más fuerte en una dirección que en otra, siempre que la distancia sea la misma; si saltas con los pies juntos, alcanzas la misma distancia en cualquier dirección. Cuando has observado todas estas cosas atentamente (aunque sin duda mientras el barco esté quieto todo debe ocurrir de esa forma), haz que el barco se mueva a la velocidad que quieras, siempre que la velocidad sea uniforme y o fluctúe de un lado a otro. No descubrirás el menor cambio en ninguno de los efectos anteriores, ni podrías deducir de ellos si el barco está quieto o en movimiento ... La causa de todas estas relaciones entre efectos es el hecho de que el movimiento del barco es común a todas las cosas contenidas en él, incluido el aire. Por eso dije que debías estar bajo cubierta; porque si esto tuviera lugar arriba al aire libre, un aire que no seguiría el curso del barco, verías unas diferencias más o menos evidentes en algunos de esos efectos.

Lo que Galileo estaba aquí combatiendo era sin duda la mayor barrera psicológica para la aceptación de la astronomía copernicana. Copérnico puso la Tierra (y todo lo que está en ella) en movimiento rápido: la rotación diaria sobre su eje, y la revolución anual alrededor del Sol. Las velocidades implicadas son enormes por los criterios cotidianos. Para la rotación: algo más de mil seiscientos kilómetros por hora. Para la revolución: algo más de ciento ocho mil kilómetros por hora. Pero nosotros *sentimos* que no nos estamos moviendo, en absoluto, ¡menos aún a esa velocidad!

La respuesta de Galileo es que el movimiento invariable —es decir, el movimiento a velocidad constante, en línea recta— es indetectable, porque no cambia ningún aspecto del comportamiento físico. Y en un sistema cerrado —como el camarote de Galileo, o la Tierra que viaja por el espacio—, experimentado desde dentro, el movimiento a velocidad constante, por muy grande que sea esa velocidad, se siente exactamente como si no hubiera movimiento en absoluto. (La rotación y la revolución de la Tierra implican círculos, o líneas rectas, pero los círculos son tan grandes que parecen líneas rectas incluso en tramos largos.)

Es fácil expresar la observación de Galileo como una simetría. *Cambiamos* el mundo —o una parte grande de él, como el interior de un buque— moviendo todo a una velocidad común, *sin cambiar* la manera en que se comportan las cosas.

En honor a Galileo, llamamos a esa clase de transformación una *transformación galileana*. En consecuencia, llamamos a su postulado de *simetría galileana* o *invariancia galileana*.

Según la simetría galileana, podemos cambiar el estado de movimiento del universo, imprimiendo una velocidad global constante —darle un empujón, por así decir— sin cambiar las leyes físicas a las que obedece. Las transformaciones galileanas mueven el mundo físico a velocidad constante, y la simetría establece que el contenido de las leyes físicas no cambia por tales transformaciones.

Belleza cuántica I: música de las Esferas

La ciencia clásica de Newton y Maxwell ha traído nuevos temas a nuestra reflexión que *parecen* entrar en conflicto con las visiones e intuiciones anteriores de Pitágoras y Platón, con las que habíamos empezado. Pero en el mundo cuántico de los átomos, un mundo extraño que resulta ser también el nuestro, ocurre un milagro. Las viejas ideas vuelven a la vida, vistiendo unas formas nuevas y espléndidas. En su forma resucitada esas ideas alcanzan nuevos niveles de precisión, verdad y, de manera sorprendente, *musicalidad*.

He aquí cómo lo nuevo acoge a lo viejo:

- *Del corazón de la materia, música*: no hay ninguna razón lógica para esperar que unas matemáticas que se desarrollaron para entender la música tengan nada que ver con la física atómica. Y, sin embargo, resulta que los mismos conceptos y ecuaciones gobiernan ambos dominios. Los átomos son instrumentos musicales, y la luz que emiten hace visibles sus notas.
- *De leyes bellas, objetos bellos*: las leyes básicas no postulan la existencia de átomos. Los átomos *emergen* de las leyes, y emergen como objetos bellos (véase la lámina CC). Los átomos físicos, descritos matemáticamente, son objetos tridimensionales que, para el espíritu vivificante de un artista, producen imágenes de belleza excepcional.
- *De la dinámica, permanencia*: las leyes básicas son ecuaciones que describen cómo cambian las cosas con el tiempo. Pero esas ecuaciones tienen algunas soluciones importantes que *no* cambian con el tiempo. Esas soluciones, y solo esas, describen los átomos que forman nuestro mundo cotidiano, y a nosotros mismos.
- *De lo continuo, lo discreto*: las funciones de onda que describen a los electrones de los átomos son campos de probabilidad (distribuciones de probabilidad) que llenan el espacio. Son continuos y similares a nubes.

Pero los patrones nubosos estables son discretamente diferentes, y llevan el sello del Número.

Vuelve Pitágoras

En los primeros días de la teoría cuántica moderna no había todavía un libro de texto, naturalmente. Los aspirantes a la profesión, ansiosos por utilizar la nueva teoría atómica, se fijaron entonces en un libro de texto sobre una asignatura diferente: la *Theory of Sound* de lord Rayleigh. Porque encontraron ahí las matemáticas necesarias para describir cómo funcionan los átomos. Se habían desarrollado antes, ¡para describir cómo funcionan los instrumentos musicales! Aunque los símbolos significan cosas diferentes, aparecen esencialmente las mismas ecuaciones, y se pueden usar las mismas técnicas para resolverlas. Eso le habría gustado a Pitágoras.

El yoga de los instrumentos musicales

La física de los instrumentos musicales es la física de las *ondas estacionarias*. Las ondas estacionarias son ondas en objetos finitos o en espacios confinados. Así, las vibraciones de las cuerdas en los instrumentos musicales, o las de sus cajas de resonancia, son ondas estacionarias. Las ondas estacionarias deben contrastarse con las *ondas de desplazamiento*. Cuando hablamos de ondas sonoras, por ejemplo, solemos referirnos a ondas de desplazamiento que se expanden, o se *propagan*, desde una fuente. Las vibraciones de la caja de resonancia de un piano de cola, que son ondas estacionarias, empujan el aire circundante de acá para allá. El aire en movimiento ejerce fuerzas sobre su aire vecino, que ejerce fuerzas en su aire vecino, y así sucesivamente, lo que resulta en una perturbación que adquiere vida propia.

Las ondas estacionarias son el tipo de movimiento que puedes establecer en el agua de una bañera cuando chapoteas, o en las vibraciones de un gong o de un diapasón cuando lo golpeas. En cada uno de estos casos —chapoteo en

el baño, golpe al gong, toque al diapasón—, después de un comienzo ruidoso, el movimiento se estabiliza para volverse regular en el espacio y periódico en el tiempo. Esa es la clave de un diapasón: que «quiere» vibrar a una frecuencia característica, y por eso produce un tono fiable y puro. Un gong típico genera un patrón de sonido más complicado e interesante. Volveremos a él en breve.

Podemos centrar la atención en el yoga de los instrumentos musicales con más claridad considerando el instrumento musical de simplicidad suprema, que es de hecho el instrumento de Pitágoras: una cuerda tensa, clavada en los dos extremos (Figura 24). En la simple geometría unidimensional de un segmento lineal finito, podemos explorar los patrones naturales de la onda estacionaria de un vistazo.

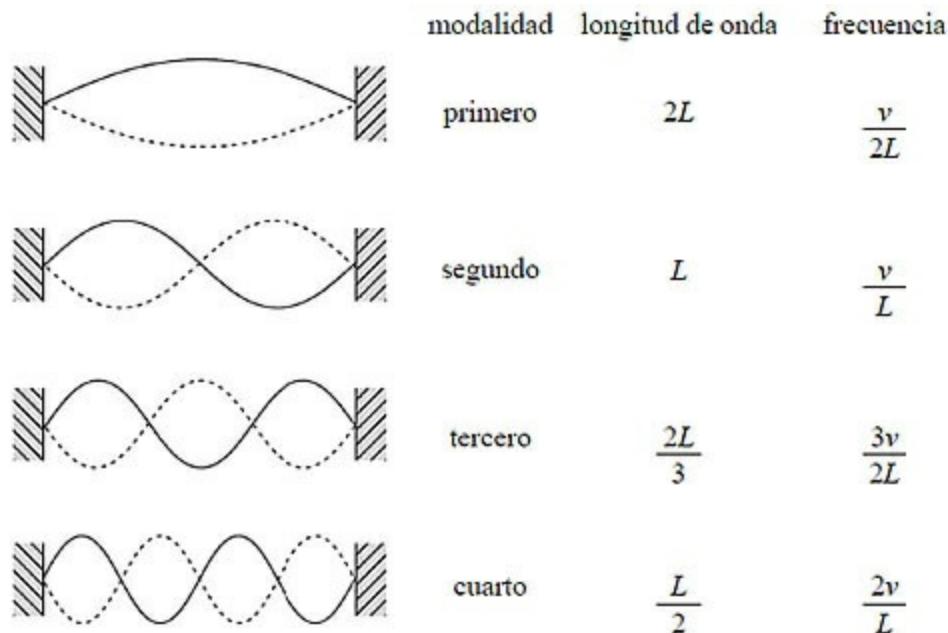


FIGURA 24. En la simple geometría unidimensional de un segmento lineal finito, podemos explorar los patrones lineales de la onda estacionaria de un vistazo. ¡Tienen que encajar! Este simple requisito geométrico aporta números enteros y un carácter discreto a la descripción del comportamiento en un continuo.

En la figura, las líneas continuas y las líneas de puntos muestran la forma de la cuerda a tiempos diferentes, en cuatro patrones naturales de onda estacionaria. (El tamaño, o amplitud, de la distorsión está muy exagerado para

una mayor visibilidad.) En los tiempos intermedios, los puntos de la cuerda se mueven arriba y abajo, a medida que la línea continua procede suavemente hacia la punteada, luego la punteada hacia la continua, en un ciclo.

Un simple requisito geométrico aporta números enteros y un carácter discreto a la descripción de estos patrones basados en un continuo. ¡Tienen que encajar! Recorriendo la figura de arriba abajo, y comparando los patrones, vemos que la variación, según nos movemos por la cuerda de izquierda a derecha, es dos, tres y cuatro veces más rápida.

Uno puede tener vibraciones naturales que acomodan tres ciclos, o dos, o cuatro, o cualquier número entero, pero *no* algo entre medias. Como resultado, las frecuencias naturales de nuestro instrumento son discretas o, como solemos decir, *cuantizadas*.

A diferencia de la proverbial vaca esférica,* nuestro instrumento musical pitagórico no está muy lejos de la realidad. Y, lo que es más importante, las lecciones que aprendemos de nuestro instrumento simple —que *las restricciones geométricas en los objetos finitos conducen al carácter discreto (cuantización) de sus patrones naturales de vibración*, y por tanto de sus frecuencias naturales— es perfectamente general. En la mecánica cuántica, esa lección se convierte en el eje de la física atómica, como trataremos más adelante.

Vibraciones naturales, frecuencias resonantes

También puedes obtener ondas estacionarias en la caja de resonancia de una guitarra cuando tocas una cuerda, o en una placa cuando golpeas sus lados (Figura 25). Los patrones se hacen visibles. La idea básica es la misma que acabamos de tratar para una cuerda fija. La onda estacionaria es un movimiento arriba y abajo que es mayor (o de más amplitud, en la jerga) en unos lugares que en otros. Hay curvas a lo largo de las cuales la fuerza de vibración se desvanece, y no hay movimiento en absoluto. Esos puntos se llaman nodos, y las curvas se llaman nodales. Si echas arena en la placa, se acumulará a lo largo de las curvas nodales, y eso es lo que se ve en la imagen.

La geometría de estos vibradores bidimensionales es más complicada que la de una cuerda. En consecuencia, los patrones de las vibraciones naturales son más complicados.

En estos ejemplos, para obtener uno u otro de los patrones de vibración simples, en lugar de una mezcla de varios, imponemos fuerzas que se repiten regularmente o, como solemos decir, periódicamente en el tiempo. La guitarra nos permite hacer esto pulsando una cuerda: ¡para eso es para lo que sirven las cuerdas! Un patrón diferente dominará, dependiendo de lo rápido que las fuerzas motrices oscilen (es decir, de su frecuencia).

Cada patrón de vibración natural se repite en el tiempo. Las fuerzas que cada pieza móvil de cuerda, madera o metal ejerce en sus vecinos son diferentes en los diferentes patrones, y el ritmo al que cambian las cosas es diferente en cada uno. Los patrones que varían deprisa en el espacio tienden a causar mayores fuerzas, y por tanto un movimiento más rápido, de mayor frecuencia. Cada patrón de vibración natural ocurre en su propia frecuencia natural.

La frecuencia natural se llama también frecuencia resonante, por la siguiente razón. Si la frecuencia de la fuerza motriz está próxima a la frecuencia natural de vibración de algún patrón, ese patrón saltará como una respuesta poderosa. Porque en ese caso, y solo en ese caso, la fuerza motriz externa coincide con las fuerzas internas, ciclo tras ciclo, para construir la magnitud del movimiento. Cualquiera que haya flexionado las piernas y estirado el cuerpo para dar fuerza al movimiento de un columpio, o haya empujado en uno a un niño, sabe lo importante que es eso.

Cuando golpeas un diapasón o un gong, la vibración irradia desde el punto de impacto, luego rebota en los bordes y regresa, como el eco en una sala. Los movimientos complicados disipan su energía deprisa en forma de ondas sonoras de desplazamiento y calor, dejando solo un patrón perdurable (en el diapasón) o solo unos pocos (en el gong), cada uno vibrando a su frecuencia resonante. Eso es lo que escuchas como un tono estable, o como un acorde que evoluciona despacio, después del comienzo ruidoso. Los gongs producen un acorde evolutivo, perdiendo gradualmente la complejidad hasta que se convierte en un tono simple, porque hay varios patrones perdurables que decaen a velocidades distintas.

Los patrones de vibración, u ondas estacionarias, de la caja de resonancia de una guitarra forman patrones geométricos que reflejan la interacción entre la forma y moldeado de la madera y la frecuencia de oscilación de la cuerda motriz, como se muestra en la Figura 25. Los patrones de ondas estacionarias en una placa cuadrada vibrante (en la parte de abajo de la figura) son similares, pero más simétricos. Estos patrones tienen un parecido asombroso con los patrones de nubes electrónicas (Figura 26). El parecido entre las ecuaciones que los gobiernan es profundo, y más asombroso todavía.

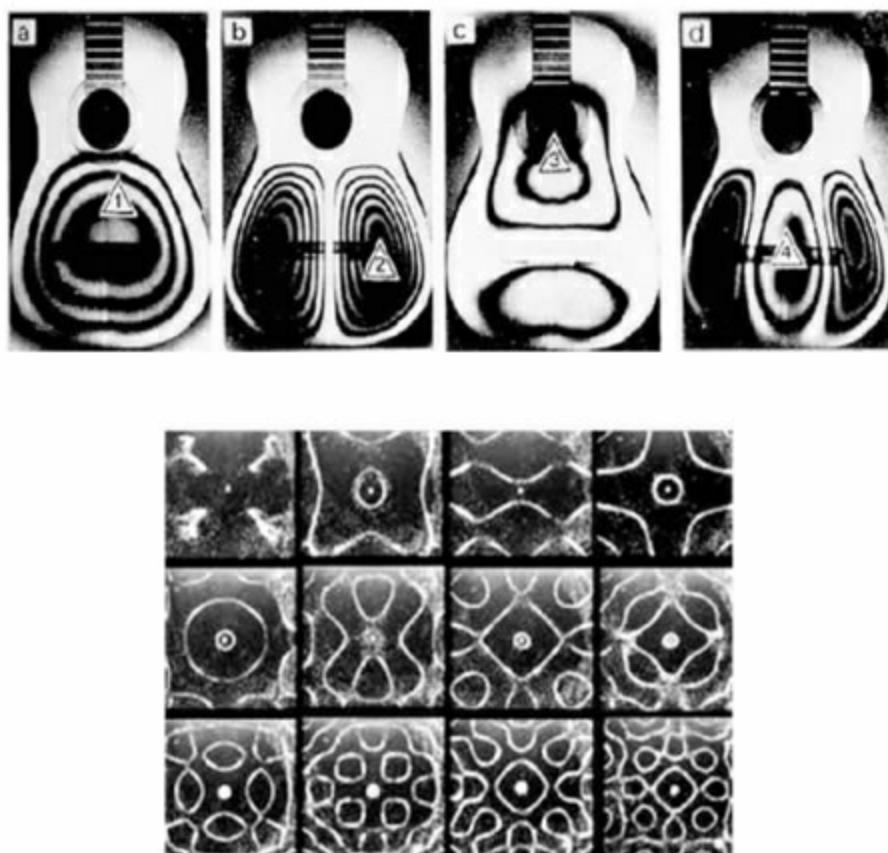


FIGURA 25. Los patrones de vibración, u *ondas estacionarias*, de la caja de resonancia de una guitarra forman patrones geométricos que reflejan una interacción entre la forma y moldeado de la madera y la frecuencia de vibración de la cuerda motriz.

Una oportunidad perdida

Es una verdadera pena que los pitagóricos no hicieran un seguimiento de sus descubrimientos con cuerdas vibratorias para considerar «instrumentos» un paso más complicados, como nuestras placas bidimensionales. Una estupenda interacción entre geometría, movimiento y música, que iba mucho más allá de las reglas simples de las cuerdas, estaba allí esperándoles para que la disfrutaran y la exploraran de oído, a ojo y con la mente. Se habrían dado un fiestón.

También habrían descubierto un camino más fácil y accesible hacia las leyes básicas de la mecánica que el rodeo dificultoso a través de la astronomía que finalmente, siglos más tarde, condujo allí. Y, como veremos pronto, habrían asfaltado una autopista hacia la teoría cuántica.

La Música de las Esferas: esta vez de verdad

La tercera ley de la predicción de Arthur C. Clarke dice:

Cualquier tecnología lo bastante avanzada es indistinguible de la magia.

Me gustaría añadir una observación, ampliamente justificada por nuestra reflexión:

La tecnología de la *naturaleza*, con la que se construye el mundo material, es muy avanzada.

Por fortuna, la naturaleza nos deja estudiar sus trucos. Prestando mucha atención, nosotros mismos nos volvemos magos.

Hipótesis escandalosas

En el mundo cuántico de los átomos y la luz, la naturaleza nos obsequia con un espectáculo de proezas extrañas y aparentemente imposibles.

Dos de estas proezas parecían, cuando se descubrieron, especialmente imposibles.

(La historia temprana de la teoría cuántica es complicada. Otras paradojas menos directas tuvieron también un papel importante para guiar el pensamiento de los pioneros, y la gente también se metió en muchos callejones sin salida. Aquí he esbozado una historia clara y relativamente simple que es una idealización extrema de la historia real. En la historia, a diferencia de lo que ocurre con la estructura profunda de la naturaleza, lo Real y lo Ideal difieren enormemente. Un sabio maestro —el padre Jim Malley, de la Compañía de Jesús— me obsequió esta valiosa perla: «Es más santo pedir perdón que pedir permiso».)

Una se refiere a la luz; la otra a los átomos.

- La luz viene en paquetes. Esto se demuestra por el efecto fotoeléctrico, como trataremos en un momento. Fue una conmoción para los físicos. Después de que la teoría electromagnética de Maxwell sobre la luz fuera confirmada por los experimentos de Hertz (y luego por muchos otros), los físicos pensaban que habían entendido lo que era la luz. A saber, que la luz es una onda electromagnética. ¡Pero las ondas electromagnéticas son continuas!
- Los átomos tienen partes, pero son perfectamente rígidos. Los electrones fueron claramente identificados en 1897, por J. J. Thomson. Los hechos más básicos sobre los átomos se elucidaron en los siguientes quince años, más o menos. En concreto: los átomos consisten en minúsculos núcleos que contienen casi toda la masa y toda su carga positiva, rodeados de los suficientes electrones, con carga negativa, para que el conjunto sea neutro. Los átomos vienen en diferentes tamaños, según el elemento químico, pero todos están en el rango de 10^{-8} centímetros, una unidad de longitud llamada un angstrom. Los núcleos atómicos, sin embargo, son cien mil veces más pequeños. La paradoja: ¿cómo puede ser estable una estructura semejante? ¿Por qué los electrones, simplemente, no sucumben a la fuerza atractiva del núcleo y caen sobre él?

Estos hechos paradójicos condujeron a Einstein y a Bohr, respectivamente, a proponer unas hipótesis escandalosas y medio correctas que sirvieron como puntos de apoyo en el empinado ascenso a la teoría cuántica moderna.

El efecto fotoeléctrico consiste en que, cuando haces que brille la luz (o mejor aún, la radiación ultravioleta) sobre los materiales adecuados, estos emiten electrones. Los paneles solares, que convierten la luz en electricidad, explotan ese efecto.

La idea de que la luz pueda acelerar a los electrones, incrementar su energía y tal vez, ocasionalmente, hacerles saltar de los átomos no es sorprendente en sí misma. Los campos eléctricos de la luz *deberían* hacer cosas de ese tipo. Lo chocante era la forma en que ocurría. Podrías esperar que la energía se tomara un tiempo para irse acumulando, de manera que, bajando la intensidad de la luz, no hallarías al principio electrones salientes. Pero, en vez de eso, el efecto «se enciende» de forma inmediata. También podrías esperar que la frecuencia de la luz —es decir, su color espectral— fuera menos importante que su fuerza o brillo. Y en vez de esto, lo que encuentras es que los colores espectrales cercanos al extremo rojo del espectro son inútiles. Si la luz es demasiado rojiza, se liberan pocos electrones por muy brillante que sea la luz que incide en el material.

Einstein explicó estos efectos (y otros) con su hipótesis del fotón. Según esa hipótesis, la luz viene en unidades, los *fotones*, que no pueden descomponerse en nada más pequeño. La cantidad de energía en una unidad mínima, o cuanto, de luz es proporcional a la frecuencia de la luz. Así, los fotones del extremo azul del espectro tienen cerca del doble de energía que los fotones del extremo rojo, y los fotones ultravioletas tienen aún más.

La hipótesis del fotón da una explicación simple y cualitativa a los elementos paradójicos del efecto fotoeléctrico. Como cada fotón suministra o bien toda su energía o bien ninguna, no hace falta ninguna acumulación gradual, ni un tiempo de arranque. Como los fotones rojizos suministran menos energía, son menos efectivos; y si no tienen bastante energía para liberar un electrón, simplemente no lo hacen.

La hipótesis del fotón de Einstein no era parte de un gran sistema, como las ecuaciones de Maxwell o la mecánica celeste de Newton. De hecho, *contradecía* esencialmente lo que parecía ser la implicación directa de las ecuaciones de Maxwell. Explicaba algunos hechos a costa de socavar el marco existente, y de gran éxito, que explicaba muchos otros. Era escandalosa. Al nominar a Einstein para la Academia Prusiana de las Ciencias, en 1913, Planck escribió:

El hecho de que alguna vez pueda haber errado el tiro con sus especulaciones, como por ejemplo con su hipótesis de los cuantos de luz, no se le puede echar demasiado en cara, realmente, porque no es posible introducir ideas realmente nuevas, incluso en las ciencias exactas, sin arriesgarse de vez en cuando.

Einstein había introducido los cuantos de luz, o lo que ahora llamamos fotones, en 1905: ¡ocho años antes! Ocho años más tarde, en 1921, cuando recibió el premio Nobel, fue el trabajo de Einstein sobre los cuantos de luz el que fue citado específicamente. Para entonces, había demostrado su valor.

Para abordar nuestra segunda paradoja, la paradoja de los átomos estables y rígidos, Niels Bohr introdujo la idea de que los átomos solo pueden existir en *estados estacionarios*. En la mecánica clásica, las posibles órbitas abarcaban un continuo, como vimos en la montaña de Newton. Bohr propuso que, en un átomo, los electrones orbitan alrededor del núcleo, atados a él por fuerzas eléctricas, pero que solo un subconjunto discreto de órbitas es posible. Para el átomo más simple, el hidrógeno, propuso una regla simple y precisa para identificar cuáles eran esas órbitas. (Para expertos: el requisito es que la integral del momento, ponderada por la longitud —la llamada integral de acción—, tomada sobre la órbita, tiene que ser un *número entero* de veces la constante de Planck.) Cuando un electrón sigue una de las órbitas *permitidas*, decimos que el átomo está en estado estacionario. El electrón permanece en esa órbita concreta mientras no le golpees con *demasiada* fuerza, porque las otras posibles órbitas son todas muy diferentes, ¡y un golpecito con el codo no

basta para llevarlo allí! Por último: los átomos no se colapsan porque todas las órbitas permitidas mantienen a los electrones a una distancia segura del núcleo.

La hipótesis del estado estacionario de Bohr tampoco era parte de un gran sistema. De hecho, *contradecía* lo que parecía ser la implicación directa de una teoría de gran éxito, la mecánica de Newton. ¿Quién era Bohr para decir a los electrones dónde podían estar o no, o qué velocidades podían tener y cuáles no? Era escandaloso: explicaba algunos hechos, pero a costa de socavar el marco existente y enormemente exitoso que explicaba muchos otros.

Las reglas de Bohr para el hidrógeno podían ser —y desde luego fueron — comprobadas experimentalmente. El éxito hizo creíble su hipótesis escandalosa.

Tanto Einstein como Bohr eran muy conscientes de lo que estaban haciendo — y de lo que *no* estaban haciendo— al proponer sus hipótesis escandalosas. No estaban proponiendo unas «teorías del todo» coherentes, ni siquiera grandes síntesis al estilo de la mecánica celeste de Newton o el electromagnetismo de Maxwell. Más bien, en el espíritu explorador de Pitágoras, o del trabajo de Newton sobre la luz, o el de Maxwell sobre la percepción, estaban simplemente identificando unos patrones llamativos de hechos que podrían encontrar una explicación más profunda en el futuro.

Una parte importante de la buena estrategia científica es distinguir entre áreas de problemas que pueden estar listas para una gran síntesis, y áreas de problemas donde un enfoque oportunista dará más frutos. Una teoría de *algo* exitosa puede ser más valiosa que una Teoría del *Todo* tentativa.

«La forma más alta de musicalidad»

Los átomos de cierto tipo —por ejemplo, átomos de hidrógeno— absorben ciertos colores de la luz espectral de manera mucho más eficaz que otros. (Más en general, absorben ondas electromagnéticas de ciertas frecuencias de manera mucho más eficaz que otras.) Los mismos átomos, cuando se calientan,

emiten la mayoría de su radiación en esos mismos colores espectrales. El patrón de colores preferidos es diferente para distintas clases de átomos, y forma una especie de huella dactilar por la que podemos identificarlos. El patrón de colores preferidos de un átomo se llama *espectro*.

En su modelo atómico, Bohr postuló que los electrones de un átomo solo pueden existir en un conjunto discreto de estados estacionarios. Los posibles valores de la energía del electrón, entonces, también forman un conjunto discreto. Y he aquí cómo conectó Bohr esa idea con la realidad, mediante otra hipótesis escandalosa. Asumió que, además de sus movimientos regulares «permitidos», en los estados estacionarios, un electrón podía dar en ocasiones un *salto cuántico* entre un estado estacionario y otro. ¿Por qué? ¿Cómo? No hagas preguntas. Pero el proceso del salto cuántico viene acompañado por la emisión o absorción de un fotón. Los saltos cuánticos hacen los espectros atómicos.

En su por lo demás iconoclasta modelo, Bohr mantuvo un principio sagrado: la conservación de la energía. Insistió en que la energía tenía que conservarse, incluso en el proceso del salto cuántico.

Pero la energía de un fotón, según Einstein, es proporcional a su frecuencia, y su frecuencia está codificada en su color. Y entonces las ideas de Bohr convergen en un paquete predictivo: los colores del espectro de un átomo reflejan sus posibilidades de transición entre estados estacionarios, y revelan las diferencias de energía entre sus estados estacionarios. El modelo de Bohr, al predecir esas energías, predijo los colores del espectro del hidrógeno. ¡Y funcionó!

Reflexionando sobre el trabajo de Bohr, Einstein escribió:

Que este fundamento inseguro y contradictorio fuera suficiente para permitir a un hombre con el instinto y el tacto únicos de Bohr para descubrir las leyes principales de las líneas espectrales y de las capas electrónicas de los átomos ... me pareció un milagro, y sigue pareciéndomelo incluso hoy. Esta es la forma más alta de musicalidad en la esfera del pensamiento.

Einstein se equivocaba en esto, sin embargo. La mejor música estaba aún por llegar.

La nueva teoría cuántica: los átomos como instrumentos musicales

El éxito de Bohr dejó a los teóricos con un problema de ingeniería inversa. Su modelo aportaba una «caja negra» como descripción de los átomos, que describía «qué» hacían, pero no «cómo». Al esbozar la respuesta a una pregunta desconocida, Bohr había inaugurado un gran juego de riesgo. Los físicos tenían que encontrar las ecuaciones para las que el modelo de Bohr era la solución.

Tras una lucha épica que se prolongó durante más de una década de esfuerzo y debate, emergió una respuesta. Se ha mantenido erguida hasta hoy mismo, y sus raíces han crecido a tal profundidad que parece improbable que se venga abajo algún día.

¿Qué es la teoría cuántica?

Resulta que describir el comportamiento de la materia a escala atómica y subatómica no requería solo añadir algo a lo que se sabía antes, sino también construir un marco radicalmente diferente, en el que muchas ideas que se creían a salvo tuvieron que abandonarse. El marco conocido como teoría cuántica, o mecánica cuántica, estaba mayormente fijado hacia finales de los años treinta. Desde entonces, nuestras técnicas para bregar con los desafíos matemáticos que impone la teoría cuántica han mejorado enormemente, y hemos alcanzado una comprensión mucho más detallada y penetrante de las principales fuerzas de la naturaleza, como veremos en los siguientes capítulos. Pero esos avances han ocurrido *dentro* del marco de la teoría cuántica.

Muchas teorías físicas pueden describirse como afirmaciones razonablemente específicas sobre el mundo físico. La relatividad especial, por ejemplo, es básicamente la doble afirmación de la simetría galileana junto a la invariancia de la velocidad de la luz.

La teoría cuántica, como se entiende hoy, no es como eso. La teoría cuántica no es una hipótesis específica, sino una red de ideas estrechamente entrelazadas. No estoy insinuando que la teoría cuántica sea vaga: no lo es.

Con raras y por lo general transitorias excepciones, cuando se enfrentan con cualquier problema físico concreto, todos los profesionales competentes de la mecánica cuántica coinciden sobre lo que significa abordar ese problema usando la teoría cuántica. Pero pocos, si es que hay alguno, podrán decir exactamente qué suposiciones han hecho para llegar ahí. Llegar a un acuerdo con la teoría cuántica es un proceso, por el cual *el trabajo te enseñará cómo hacerlo*.

Vamos a ello.

Funciones de onda, nubes de probabilidad y complementariedad

En la descripción cuántica del mundo, los objetos fundamentales no son partículas que ocupan posiciones en el espacio, ni los fluidos de Faraday y Maxwell, sino *funciones de onda*. Cualquier pregunta física válida sobre un sistema físico puede responderse consultando su función de onda. Pero la relación entre la pregunta y la respuesta no es directa. Tanto la manera en que las funciones de onda responden preguntas como las respuestas que dan tienen unas propiedades sorprendentes, por no decir extravagantes.

Aquí me centraré en los tipos concretos de función de onda que necesitamos para describir el átomo de hidrógeno y descubrir su musicalidad. (Para más información, véase «Términos del arte», sobre todo las entradas *Teoría cuántica* y *Función de onda*.)

Lo que nos interesa, entonces, es la función de onda que describe a un solo electrón atado por fuerzas eléctricas a un protón minúsculo y mucho más pesado.

Antes de tratar la función de onda del electrón, haremos bien en describir su *nube de probabilidad*. La nube de probabilidad está muy relacionada con la función de onda. La nube de probabilidad es más fácil de entender que la función de onda, y su significado físico es más obvio, pero menos fundamental. (Estas afirmaciones proféticas tomarán cuerpo en un momento.)

En la mecánica clásica las partículas ocupan, a cualquier tiempo dado, alguna posición definida en el espacio. En la mecánica cuántica, la descripción de la posición de una partícula es muy diferente. La partícula no ocupa una posición definida a cada tiempo; en vez de eso, se le asigna una nube de probabilidad que se extiende por todo el espacio. La forma de una nube de probabilidad puede cambiar con el tiempo, aunque no lo hace en algunos casos *muy* importantes, como veremos pronto.

Como su nombre indica, podemos visualizar la nube de probabilidad como un objeto extendido, que tiene en cada punto alguna densidad no negativa; es decir, positiva o cero. La densidad de la nube de probabilidad en un punto representa la probabilidad relativa de encontrar la partícula en ese punto. Así, es más probable encontrar la partícula donde la densidad de su nube de probabilidad es alta, y menos probable encontrarla donde la densidad de la nube es baja.

La mecánica cuántica no da ecuaciones simples para las nubes de probabilidad. Más bien, las nubes de probabilidad se calculan a partir de las funciones de onda.

La función de onda de una partícula individual, como su nube de probabilidad, asigna una amplitud a todas las posibles posiciones de la partícula. En otras palabras, asigna un número a cada punto del espacio. La amplitud de la función de onda es un número complejo, de modo que la función de onda es una asignación de un número complejo a cada punto del espacio. (Si esto te resulta un territorio poco familiar, tal vez quieras consultar «Términos del arte», o simplemente interpretarlo como poesía. No nos apoyaremos en las propiedades detalladas de los números complejos, por muy bellas que sean.)

Para plantear preguntas, tenemos que llevar a cabo experimentos particulares que sondeen la función de onda de distintas formas. Podemos hacer, por ejemplo, experimentos que midan la posición de la partícula, o experimentos que midan el momento de la partícula. Esos experimentos abordan las siguientes preguntas: ¿dónde está la partícula? ¿Cuán rápido se mueve?

¿Cómo responde la función de onda a esas preguntas? Primero hace un procesamiento, y luego te da probabilidades.

Para la cuestión de la posición, el procesamiento es muy simple. Tomamos el valor, o amplitud, de la función de onda —un número complejo, recuerda— y elevamos su magnitud al cuadrado. Eso nos da, para cada posible posición, un número positivo o cero. Ese número es la probabilidad de encontrar la partícula en esa posición, como ya hemos visto.

Para la cuestión del momento, el procesamiento es bastante más complicado, y no voy a intentar describirlo en detalle. Para averiguar la probabilidad de observar cierto momento, primero tienes que hacer una media ponderada de la función de onda —la manera exacta de hacer la ponderación depende del momento en que estés interesado— y luego elevar esa media al cuadrado.

Responder a estas preguntas requiere diversas formas de procesar la función de onda, que resultan ser mutuamente incompatibles. Es imposible, según la teoría cuántica, responder ambas preguntas al mismo tiempo. No puedes hacerlo, por más que cada pregunta sea por sí misma perfectamente legítima y tenga una respuesta informativa. Si alguien descubriera cómo hacerlo, de manera experimental, habría refutado la teoría cuántica, porque la teoría cuántica dice que no se puede hacer. Einstein intentó de manera insistente concebir experimentos de ese tipo, pero nunca tuvo éxito, y al final admitió su derrota.

Tres puntos esenciales son:

- Obtienes probabilidades, no respuestas definitivas.
- No obtienes acceso a la función de onda en sí misma, sino solo un vistazo a sus versiones procesadas.
- Responder preguntas distintas puede requerir procesar la función de onda de distintas formas.

Cada uno de estos puntos plantea grandes temas.

El primero plantea el asunto del *determinismo*. ¿Es calcular probabilidades realmente lo mejor que podemos hacer?

El segundo plantea el asunto de los *muchos mundos*. ¿Qué describe la función de onda total, cuando no estamos mirando? ¿Representa una gigantesca expansión de la realidad, o no es más que una herramienta mental, nada más

que un sueño?

El tercero plantea el asunto de la *complementariedad*. Para abordar distintas preguntas, debemos procesar la información de distintas maneras. En casos importantes, esos métodos de procesamiento resultan ser mutuamente incompatibles. De modo que ningún enfoque, por astuto que sea, puede suministrar respuestas a todas las posibles preguntas. Para hacer verdadera justicia a la realidad, tenemos que enfrentarnos a ella desde distintos ángulos. Este es el principio filosófico de la *complementariedad*. Es una lección de humildad que la teoría cuántica nos obliga a aceptar. Tenemos, por ejemplo, el principio de incertidumbre de Heisenberg: no puedes medir la posición y el momento de las partículas a la vez. Teóricamente, se deduce de las matemáticas de las funciones de onda. Experimentalmente, surge porque las mediciones requieren una implicación activa con el objeto que está siendo medido. Sondar es interactuar, e interactuar es potencialmente perturbar.

Cada uno de estos asuntos es fascinante, y los dos primeros han recibido mucha atención. A mí, sin embargo, el tercero me parece especialmente bien fundamentado y significativo. La complementariedad es a la vez una propiedad de la realidad física y una lección de sabiduría, a la que volveremos.

Estado estacionario como vibraciones naturales

La ecuación que describe cómo evoluciona en el tiempo la función de onda de un electrón se llama ecuación de Schrödinger. La ecuación de Schrödinger, considerada como una pieza matemática, está muy relacionada con las ecuaciones que utilizamos para describir los instrumentos musicales.

El átomo de hidrógeno, visto como un instrumento musical, es como un gong tridimensional que es rígido en el exterior —lejos del protón— pero más fácil de poner en movimiento cerca del centro. Esto significa que las «vibraciones» de nuestro instrumento, cuya fuerza está codificada en la magnitud de la función de onda, tiende a concentrarse cerca del centro. Así que la función de onda tiende a concentrarse cerca del centro, como también hace, desde luego, su nube de probabilidad asociada. ¡Esta es la forma mecanocuántica rigurosa de la afirmación de que el protón atrae al electrón!

Ahora estamos listos para entender cómo la moderna mecánica cuántica, basada en funciones de onda y la ecuación de Schrödinger, captura y a la vez trasciende la «más alta musicalidad» de Bohr.

El paso más importante para comprender cómo funciona cualquier instrumento musical, desde una perspectiva física, es entender sus vibraciones naturales. Corresponden a sus «notas», los patrones de vibración que el instrumento puede mantener durante lapsos de tiempo sustanciales, y que son fáciles de excitar (es decir, de tocar).

En ese espíritu, dado que la ecuación de Schrödinger para un electrón en un átomo se parece mucho a la ecuación para las vibraciones de un instrumento musical, deberíamos considerar las soluciones que se parecen a vibraciones naturales. Resulta que una vibración natural de la *función de onda* significa algo en extremo simple y atractivo para su *nube de probabilidad*: a saber, ¡que no cambia en absoluto!

(En más detalle, usando números complejos: cuando hablamos de una cuerda vibrante, como en la Figura 24, lo que «vibra» —es decir, lo que cambia con el tiempo— son las posiciones de los elementos de la cuerda. Para una función de onda, lo que cambia es el patrón de números complejos que asigna a los diferentes puntos del espacio. En las vibraciones naturales, el cambio es simple: la magnitud de los números complejos permanece fija, pero sus fases cambian, todas en igual cantidad. De ahí que los cuadrados de sus magnitudes, que es lo que aparece en la nube de probabilidad, no cambien en absoluto.)

Estas vibraciones naturales de la función de onda, que corresponden a nubes de probabilidad invariantes, tienen las propiedades que anticipó Bohr con sus «estados estacionarios». El electrón persistirá en cualquiera de esos patrones de manera indefinida, y ningún otro patrón tiene esa propiedad. Más aún, se puede calcular la energía asociada a esas vibraciones naturales, y resulta que coinciden con las energías de las «órbitas permitidas» de Bohr.

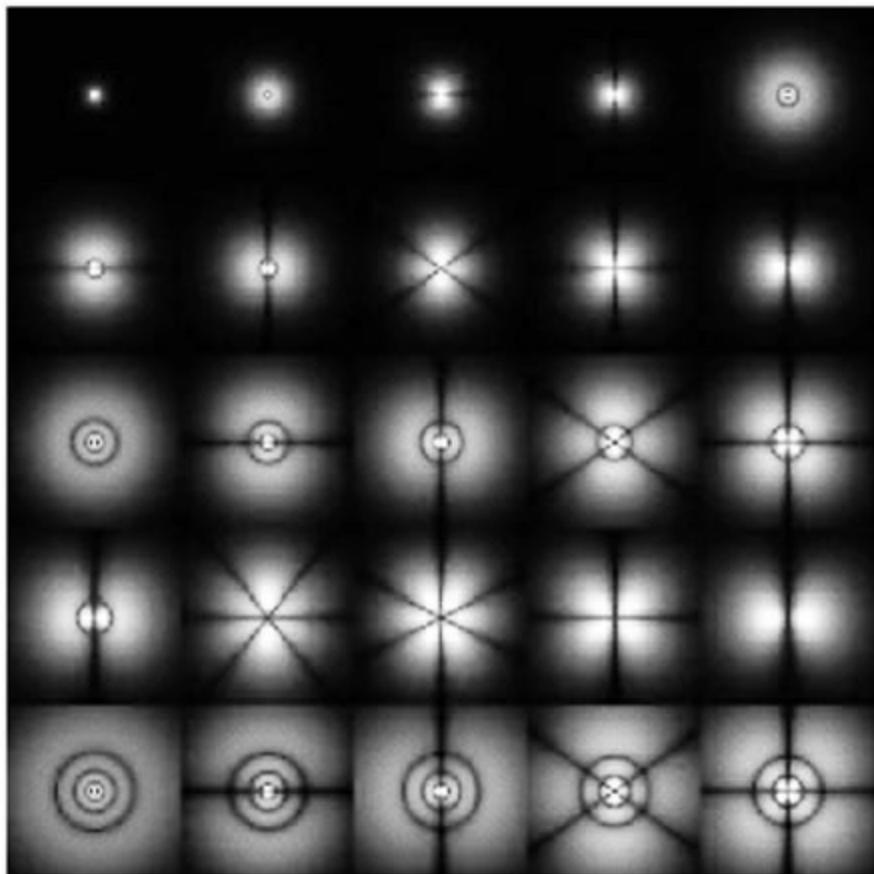


FIGURA 26. Cada imagen muestra una instantánea de la nube de probabilidad de un electrón, tomada en cada uno de los estados estacionarios del hidrógeno. Es más probable que el electrón se encuentre donde la nube es más brillante. En cada caso, un solo protón está en el centro de la nube. (Las mismas formas orbitales se aplican a los electrones en otros átomos, como el de carbono.)

Echemos un vistazo a algunos de esos estados estacionarios. La Figura 26 muestra sus nubes de probabilidad. En todos los casos, el protón está en el centro, y lo que vemos es el perfil bidimensional de una nube tridimensional. El brillo de la nube indica su tamaño como función matemática, de modo que es más probable que el electrón se encuentre, en cada uno de estos estados, donde la nube es más brillante. Las nubes más compactas corresponden a los estados estacionarios de menor energía.

Hacer justicia a las funciones de onda en sí mismas, en oposición a sus nubes proyectadas de probabilidad, requiere más trabajo, pero da unas recompensas más fértiles. En la Lámina CC vemos uno solo de los estados

estacionarios. Las superficies son superficies donde la magnitud de la función de onda tiene un valor constante. Aparecen seccionadas, de modo que podemos ver su interior. Los colores indican la fase de la función de onda, como un número complejo. Tienes que imaginar esta imagen como una instantánea. Al pasar el tiempo, los colores cambian en ciclos. ¡Los átomos son psicodélicos!

La moderna teoría cuántica, pese a su mayor complejidad, tiene unas ventajas abrumadoras sobre el modelo pionero de Bohr:

- En la moderna teoría cuántica, la transición entre estados estacionarios ocurre como una consecuencia lógica de las ecuaciones. Físicamente, surgen debido a la interacción entre los electrones y el *fluido electromagnético*. Como esa interacción es bastante débil, comparada con las fuerzas eléctricas básicas que atan a los electrones, solemos hacer bien en incluirlas como una corrección, mientras retenemos los estados estacionarios como punto de partida. En este tratamiento, hallamos que las transiciones no son auténticas discontinuidades, aunque ocurren deprisa.
- La regla de Bohr para determinar qué órbitas se «permiten» fue formulada claramente solo para electrones individuales. En los años de Peligro, más o menos entre 1913 y 1925, hubo muchos intentos de adivinar las reglas para situaciones más complicadas. Pero, cuando Schrödinger (y algo antes Heisenberg) surgió con su ecuación, era tan obviamente superior, e incluso tan «obviamente correcta», que casi de inmediato emergió como el consenso, y evolucionó deprisa hasta la moderna teoría cuántica. Y, a juzgar por su éxito abrumador y continuado, parece que también a la naturaleza le gusta la teoría cuántica.
- ¡Es más musical!

El proceso que reemplaza a los saltos cuánticos es especialmente interesante. En él, el electrón engendra energía electromagnética, en forma de un fotón, donde al principio no había ninguna. Esto ocurre cuando el electrón encuentra actividad espontánea en el fluido electromagnético y, aportando un

poco de su propia energía, amplifica esa actividad. De esa forma, el electrón transita a un estado de menor energía, un fotón virtual se convierte en un fotón real, y se hace la luz.

Frío, austero y precioso

Antes de seguir adelante, me gustaría detenerme un momento para pelearme con un héroe de mi juventud, Bertrand Russell, quien escribió:

La matemática, bien mirada, no solo posee verdad, sino belleza suprema: una belleza fría y austera, como la de la escultura, sin atractivo para ninguna parte de nuestra naturaleza más débil, sin las trampas preciosas de la pintura o la música, y aun así de una pureza sublime, y capaz de una perfección adusta que solo el arte más grande puede exhibir.

No es exactamente que yo esté en desacuerdo con esa afirmación, pero creo que su tono puritano resulta desacertado (y, viniendo de Russell, muy raro). La belleza fría y austera puede ser maravillosa, pero las trampas preciosas lo pueden ser también. Son complementarias. La ecuación de Schrödinger es tan fría y austera como se pueda ser. ¡Pero también es la fuente de la Lámina CC!

Átomos artesanos

En años recientes, las fronteras de la física atómica se han movido de la observación al control y la creación. Los estudiosos del Artesano se han licenciado, para convertirse en artistas por derecho propio.

En una frontera, los ingenieros atómicos han hallado formas de atrapar átomos aislados. Esto permite echar una mirada limpia sobre los procesos cuánticos básicos. Por ejemplo, uno puede registrar los cambios repentinos de estado que ocurren cuando un átomo individual emite o absorbe luz, y observar los «saltos cuánticos» de Bohr en tiempo real. Los ingenieros atómicos pueden también manipular esos átomos, exponiéndolos a campos

eléctricos o magnéticos, o a la luz. Esto permite un control exquisito. Los átomos individuales son unos materiales maravillosos para la ingeniería, porque están esencialmente libres de rozamiento, y sus propiedades pueden modularse (usando los campos) y anticiparse de manera fiable (usando la teoría). Los átomos son los mejores relojes del mundo, por ejemplo. Actualmente, los mejores relojes atómicos tienen una precisión de un segundo por cada mil millones de años.

Otra frontera es hacer nuevas clases de átomos. Los puntos cuánticos (*quantum dots*) son estructuras artificiales que están basadas en los mismos principios que los átomos naturales, pero hechas a medida de los requisitos humanos. En realidad, son nuevas clases de instrumentos musicales, diseñados para trabajar con la luz en vez de con el sonido. En esencia, un punto cuántico consiste en un pequeño número de electrones confinados en un pequeño espacio, en el que han sido atrapados por unos campos eléctricos esculpidos con ingenio. Los puntos cuánticos confieren una flexibilidad enorme para el diseño de detectores y generadores de luz. Eso puede resultar muy útil para extender la percepción del color, como vimos antes, y para muchas otras aplicaciones.

Los pioneros de la física atómica nunca soñaron con manipular átomos individuales, no hablamos ya de hacer átomos artificiales. En sus escritos iniciales, hasta se pueden encontrar declaraciones que niegan la posibilidad de la ingeniería cuántica. Bohr, en particular, subrayó la división entre un «mundo clásico» y un «mundo cuántico» distinto que podría observarse (¡de formas limitadas!), pero no aprovecharse para la ingeniería. Pero su investigación, conducida al principio por la búsqueda de la belleza y por simple curiosidad, ha engendrado nuevas tecnologías maravillosas e infinitamente prometedoras.

Hay una lección que extraer de esto.

Hay muchos tipos de recompensas que se dan a la gente por servicios tangibles. Esas recompensas pueden darse en forma de salarios, beneficios, estatus social y cosas así. Pero la riqueza acumulada de la ciencia básica y del arte suele derivar de esfuerzos cuyo valor definitivo no es inmediatamente obvio. Incluso en los casos en que un descubrimiento tiene una clara importancia, pueden pasar muchos años hasta que el trabajo rinda algún beneficio económico; o el beneficio puede ser íntegramente cultural y no

convertirse nunca en económico, en el sentido usual. La gente que se esfuerza por incrementar este tipo particular de riqueza consagra su carrera profesional a una inversión a largo plazo en mejorar la vida de la humanidad en su conjunto. ¿Y qué terco hombre de negocios, o qué consumidor, va a pagar por eso? Con todo, la historia nos enseña que esa devoción compensa con creces a largo plazo, y para el bien común. Una sociedad sabia debería valorar las oportunidades de estimular esa devoción.

Vuelve Platón

Los detalles de la teoría atómica de Platón, basada en átomos que toman la forma de los sólidos platónicos, son por completo erróneos. Y aun así los átomos de Platón sirven como una metáfora hermosa y adecuada de la cosa real, porque capturan verdades centrales.

La materia realmente *está* hecha de unas pocas clases de átomos. Los átomos realmente *existen* en un gran número de copias perfectamente idénticas. Las propiedades de los materiales realmente *están* determinadas por las propiedades de los átomos que los construyen. Y lo que era más importante para Platón: *los átomos encarnan Ideales*.

En la teoría original de Platón, los átomos encarnaban la geometría hermosa de la simetría. En la teoría moderna, los átomos son las soluciones de hermosas ecuaciones. (Un estrato más abajo, como verás, ¡volvemos a la simetría!) Si tienes un ordenador lo bastante potente, y le metes las ecuaciones adecuadas, el ordenador podrá predecir cualquier propiedad del átomo que pueda medirse. No hace falta nada más. En ese sentido preciso, los átomos *encarnan* las ecuaciones.

La belleza de la restricción

Las leyes fundamentales de la física moderna son leyes dinámicas. Son leyes, en otras palabras, que gobiernan cómo cambian las cosas con el tiempo. Convierten los *inputs* (las condiciones en un tiempo dado) en *outputs* (las

condiciones en otro tiempo). Pero les gusta trabajar con cualquier *input*, y por tanto no imponen ninguna estructura.

A primera vista, entonces, los átomos que conocemos son un producto improbable de las ecuaciones dinámicas que los producen. Los átomos de un cierto tipo —átomos de hidrógeno, digamos— son unas estructuras que existen en un número enorme de copias idénticas. Y ni evolucionan ni se desgastan ni, en un ambiente estable, exhiben ninguna propiedad que varíe con el tiempo. Mirando atrás en la historia, gracias a la velocidad finita de la luz, podemos ver, mediante su espectro, que los átomos de las galaxias hace mucho tiempo, y muy muy lejos, se comportan del mismo modo que los átomos que vemos en la Tierra hoy. También podemos comparar, con exquisita precisión, los espectros en laboratorios vecinos, o en el mismo laboratorio dos semanas después.

En la manufactura humana, el uso de partes intercambiables fue una innovación revolucionaria, y muy ardua de alcanzar. ¿Cómo lo consiguió la naturaleza? ¿Cómo puede la uniformidad, cuando se ha logrado por un ajuste cuidadoso, resistir a las servidumbres del tiempo? Y si los bloques de construcción son estables en grado supremo, y resistentes al cambio, ¿cómo surgieron en primer lugar?

Maxwell estaba atento a este asunto, e intrigado por él, ya que lo veía como una evidencia de un Creador benevolente. Así lo expresó:

Como sabemos, hay causas naturales funcionando que tienden a modificar, si no a destruir a largo plazo, todas las dimensiones de la Tierra y del Sistema Solar entero. Pero, aunque con el paso de las épocas han ocurrido catástrofes y aún puede que ocurran en los cielos, aunque los sistemas antiguos pueden disolverse y otros nuevos evolucionar de sus ruinas, las moléculas con los que se construyen esos sistemas —las piedras fundacionales del universo material— permanecen intactas y sin estrenar.

Continúan hoy tal y como fueron creadas, perfectas en número y tamaño y peso, y por los imborrables caracteres impresos en ellas podemos aprender que la aspiración de exactitud en la medida, verdad en la afirmación y justicia en la acción, que tenemos por nuestros más nobles atributos como hombres, son nuestros porque son constituyentes esenciales de Aquel que el principio creó no solo los cielos y la Tierra, sino también los materiales con los que los cielos y la Tierra se construyen.

Newton se maravillaba de la estabilidad del Sistema Solar (y pensaba que ello requería alguna reparación ocasional del Creador). En la cita anterior, por razones similares pero aún más convincentes, Maxwell se maravilla de la estabilidad de las estructuras materiales, revelada por su precisa similitud, y por la posibilidad de una química precisa.

Átomos frente a sistemas solares

Si no es por supervisión divina, ¿cómo *emergen* los átomos de la química moderna, con sus propiedades exactamente reproducibles y estables, a partir de unas ecuaciones que son, esencialmente, ecuaciones del cambio?

Para apreciar la fuerza de esa pregunta, contrastémosla con otra pregunta de aspecto similar que tiene una respuesta muy diferente. Es, como vimos, la pregunta que inspiró a Kepler: ¿qué determina el tamaño y la forma de nuestro Sistema Solar?

Para la pregunta de Kepler, la respuesta moderna es, esencialmente: «Se trata de un accidente; ningún principio fundamental fija el tamaño y la forma de nuestro Sistema Solar». Hay muchas formas posibles en que la materia se puede condensar como una estrella rodeada de planetas y lunas, como también hay muchas posibles manos de póquer: la que te toque es cuestión de suerte. De hecho, los astrónomos están ahora explorando sistemas planetarios en estrellas distintas a nuestro Sol, y hallando que están organizados de muchas maneras diferentes. Todos estos sistemas evolucionan según las leyes de la física. Pero esas leyes son dinámicas. No establecen el punto de partida. La perspectiva dinámica de Newton vence a la aspiración kepleriana de un ideal geométrico.

¿Significa esto que todo vale? Desde luego que no. *Podemos* relacionar muchos rasgos del tamaño y la forma del Sistema Solar con principios fundamentales. Algunos se pueden rastrear hasta su origen en el colapso gravitatorio de una gran nube de polvo y gas. (Vemos que este proceso ocurre en otras partes de la galaxia, y en particular en la nebulosa de Orión.) Que el grueso de la masa acabe en una estrella central, como nuestro Sol, es una consecuencia lógica. Porque la gravitación universal estimula la acumulación

de materia, y las acumulaciones muy grandes de masa generan la suficiente presión central para encender reacciones nucleares y formar una estrella. Los hechos que impresionaron tanto a Newton —que todos los planetas orbitan más o menos en el mismo plano (la eclíptica) y en la misma dirección— reflejan su papel como almacenes de momento angular, centrifugados a medida que se condensaba la nube de gas original. Otras propiedades reflejan la larga influencia de la historia, que va limando las rebabas, por decir así. El hecho de que la misma cara de la Luna mire siempre hacia la Tierra es una de esas propiedades: la rotación de la Luna generaría poderosas mareas, que actúan como rozamiento. Es de suponer que, en el pasado remoto, ocurría esa rotación, pero que se ha ido apagando. (Por razones similares, la duración del día terrestre se ha ido incrementando. El registro geológico, que muestra fluctuaciones diarias en los depósitos de los estuarios, indica que en el Período Cámbrico, hace unos seiscientos millones de años, el día duraba unas veintiuna horas.)

También podemos «predecir» de manera aproximada el tamaño y la forma de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, partiendo de una consideración de un tipo muy diferente. Esto es: si el tamaño y la forma de esa órbita fueran muy diferentes, ¡no habría vida inteligente que pudiera observarla! Porque en esas circunstancias, cualquier forma de vida que se pareciera siquiera de lejos a la que conocemos sería imposible (o al menos muy difícil). Entre otros problemas: si la órbita es mucho menor, el agua superficial se pierde por evaporación; si la órbita es mucho mayor, el agua superficial se congela; si la órbita no es más o menos circular, tenemos violentos cambios de temperatura.

Los argumentos de ese tipo, que elevan las condiciones para nuestra existencia a la categoría de principios, se llaman argumentos antrópicos. En su forma más general, los argumentos antrópicos plantean muchas preguntas.⁷ En primer lugar, ¿quién es el «nuestra» en ese «nuestra existencia»? Si exigimos que todo lo que sea necesario para la existencia de, digamos, Frank Wilczek —o para la tuya, lector—, estaremos convirtiendo en principios muchas circunstancias especiales que, realmente, no queremos considerar propiedades fundamentales del universo, ni del Sistema Solar, ni siquiera de la Tierra. Un enfoque más razonable, seguramente, es basar las «predicciones» antrópicas

en el requisito más laxo de que emerja algún tipo de inteligencia capaz de hacer observaciones y predicciones. Incluso esa formulación, sin embargo, plantea cuestiones difíciles en la accidentada frontera de la biología (¿qué condiciones permiten la emergencia de la inteligencia?) y de la filosofía (¿qué es la inteligencia?, ¿qué es la observación?, ¿qué es la predicción?).

Nuestras restricciones en el tamaño y la forma de la órbita de la Tierra aportan un ejemplo modesto, bastante directo y benigno del razonamiento antrópico. Nos encontraremos más tarde con ejemplos más intrépidos y polémicos.

Tal y como reconoció Maxwell, si los átomos y las moléculas funcionaran según los mismos principios que el Sistema Solar, el mundo sería muy diferente. Cada átomo sería distinto de cualquier otro, y cada átomo cambiaría con el tiempo. Ese mundo no tendría la química que conocemos, con sustancias definidas y reglas fijas.

No resulta obvio de inmediato qué es lo que hace que los sistemas atómicos se comporten de un modo tan diferente. En ambos casos tenemos un cuerpo central masivo que atrae a varios más pequeños. Las fuerzas que entran en juego, sean gravitatorias o eléctricas, son similares a rasgos generales: ambas decrecen con el cuadrado de la distancia. Pero hay tres factores que hacen muy diferente el resultado físico, produciendo átomos estereotípicos, pero sistemas solares individualizados:

1. Mientras que los planetas difieren entre sí (como las estrellas), todos los electrones tienen exactamente las mismas propiedades (como las tienen todos los núcleos de un elemento dado o, más exactamente, de un isótopo dado).
2. Los átomos obedecen las reglas de la mecánica cuántica.
3. Los átomos tienen hambre de energía.

El primer punto de esta explicación, desde luego, no hace más que llevarse la pregunta a otra parte. Estamos intentando explicar por qué los átomos son iguales entre sí, y empezamos diciendo que otras cosas, los electrones, ¡son iguales entre sí! Volveremos a eso más tarde.

Pero tener las mismas partes no garantiza de ningún modo el mismo resultado. Incluso si todos los planetas fueran idénticos, y todas las estrellas lo fueran también, seguiría habiendo muchos posibles diseños de un sistema solar, y todos estaría sujetos al cambio.

Hemos visto cómo la mecánica cuántica aporta un carácter discreto, y unos patrones fijos, a la descripción de objetos continuos que obedecen a ecuaciones dinámicas. Es la historia, recordará el lector, que se desarrolla en las Figuras 24, 25 y 26, así como en la Lámina CC.

Para redondear el caso, tenemos que entender por qué los electrones de los átomos suelen hallarse solo en uno de su infinita variedad de patrones. Aquí es donde entra nuestro tercer punto. El patrón de mínima energía —el denominado estado fundamental— es el que encontramos en general, porque los átomos tienen hambre de energía.

¿Por qué tienen los átomos hambre de energía? En último término, se debe a que el universo es grande, frío y está en expansión. Los átomos pueden pasar de un patrón a otro emitiendo luz y perdiendo energía, o absorbiendo luz y ganando energía. Si la emisión y la absorción estuvieran equilibradas, entraría en juego muchos patrones. Eso es lo que pasaría en un sistema caliente y cerrado. La luz emitida en cierto momento se absorbería después, y se establecería un equilibrio. Pero en un universo frío y en expansión, la luz emitida se escapa a los vastos espacios interestelares, y se lleva con ella una energía que nunca devuelve.

De esta forma encontramos que las ecuaciones dinámicas, que no pueden por sí mismas imponer ninguna estructura, lo hacen mediante el *jiu-jitsu* («arte amable»), enfocando el poder en otros principios. Guían los poderes restrictivos de la mecánica cuántica y la cosmología. La cosmología explica su pobreza energética, y la mecánica cuántica muestra cómo la pobreza energética impone una estructura.

Imagen e inspiración

Creo que la Lámina CC es una obra de arte extraordinaria. Utiliza trucos astutos de perspectiva y sombreado para dar la impresión de tridimensionalidad a lo que es, después de todo, una imagen bidimensional. También usa un diseño seccionado, y una elección con buen gusto de las superficies expuestas (esto es, superficies de igual probabilidad), para revelar la estructura intrincada del objeto.

Los átomos de hidrógeno tienen solo un electrón. Escalando un peldaño de complejidad, hasta el átomo de helio, tenemos dos electrones. Un átomo cuántico con dos electrones es un objeto mucho más difícil de visualizar, y que yo sepa nunca se ha hecho muy bien. El reto es que, para cada posible posición de un electrón, la función de onda del otro es un objeto tridimensional *diferente*. Así que, en realidad, el hogar natural de la función de onda total, para el sistema de dos electrones, es un espacio de $3 + 3 = 6$ dimensiones. No es un desafío menor presentar un objeto semejante de una forma que el cerebro humano encuentre comprensible. Las ideas que he mencionado sobre la expansión del espacio de la percepción del color pueden ser útiles aquí también.

Los artistas-científicos ambiciosos, en el espíritu de Brunelleschi y Leonardo, aceptarán este desafío como una *oportunidad* para su creatividad. Revelarán aspectos profundos de la realidad que serán hermosos al tiempo que abrirán nuestra mente. La Lámina CC es, espero, una señal de las cosas que están por venir.

Las imágenes valiosas de los átomos compartirán, con su mezcla regularidad y variación, la cualidad de los mandalas. Aportarán también una perspectiva formidable de la aseveración que ocupa el corazón de la espiritualidad mística: «tat tvam asi», tú eres eso.

Simetría I: el pasodoble de Einstein

Con sus dos teorías de la relatividad —especial y general— Albert Einstein (1879-1955) trajo un nuevo estilo de pensar sobre los principios fundamentales de la naturaleza. Para Einstein la belleza, en su forma concreta de *simetría*, adquiere una vida propia. La belleza se convierte en un principio creativo.

Trasfondo mítico

Al describir su enfoque de la ciencia, Einstein dijo algo que suena inequívocamente precientífico, y evoca a aquellos antiguos griegos a los que admiraba:

Lo que realmente me interesa es si Dios tuvo alguna opción al crear el mundo.

La insinuación de Einstein de que Dios —o un Artesano hacedor de mundos— podría no haber tenido opciones habría escandalizado a Newton o a Maxwell. Encaja muy bien, sin embargo, con la búsqueda pitagórica de una armonía universal, o con el concepto platónico del Ideal inmutable.

Si el Artesano no tenía elección: ¿por qué no la tenía? ¿Qué podría constreñir a un Artesano hacedor de mundos?

Una posibilidad es que el Artesano sea en realidad un artista. Entonces la restricción sería el deseo de *belleza*. A mí me gusta inferir (y así lo hago) que Einstein pensaba en el estilo de nuestra Pregunta —¿encarna el mundo ideas bellas?— y que puso su fe en la respuesta «¡sí!».

La belleza es un concepto vago. Pero también lo eran, ya puestos, conceptos como «fuerza» y «energía». Mediante el diálogo con la naturaleza, los científicos aprendieron a refinar el significado de «fuerza» y «energía», a

darles un uso coherente con importantes aspectos de la realidad.

Del mismo modo, estudiando la obra del Artesano, desarrollamos unos conceptos refinados de «simetría» y, al final, de «belleza»: conceptos que reflejan importantes aspectos de la realidad, al tiempo que permanecen fieles al espíritu de su uso en el lenguaje común.

Relatividad especial: Galileo y Maxwell

Si Einstein era una reencarnación de Pitágoras, había aprendido mucho en el ínterin (gracias a muchos ciclos de reencarnación). Einstein no abandonó, por supuesto, los descubrimientos de Newton, Maxwell y los demás héroes de la revolución científica, ni tampoco su respeto por la realidad observada y los hechos concretos. Richard Feynman llamó a Einstein «un gigante: tenía la cabeza en las nubes, pero los pies en el suelo».

En su teoría de la *relatividad especial*, Einstein reconcilió dos ideas de sus predecesores que parecían contradictorias.

- La observación de Galileo de que el movimiento total a velocidad constante deja inmutables las leyes de la naturaleza. Esta idea es fundamental para la astronomía copernicana, y está profundamente incorporada en la mecánica de Newton.
- La implicación que se deriva de las ecuaciones de Maxwell de que la velocidad de la luz es un resultado directo de las leyes básicas de la naturaleza, y no puede cambiar. Esta es una consecuencia inequívoca de la teoría electrodinámica de la luz de Maxwell, una teoría confirmada por el trabajo experimental de Hertz y muchos otros.

Hay una tensión entre estas dos ideas. La experiencia indica que la velocidad aparente de cualquier objeto cambiará si tú mismo estás en movimiento. Aquiles alcanza a la tortuga, e incluso la adelanta. ¿Por qué tendrían que ser diferentes los rayos de luz?

Einstein resolvió esa tensión. Analizando de manera crítica las operaciones implicadas en sincronizar los relojes en distintos lugares, y cómo ese proceso de sincronización cambia por el movimiento total a velocidad constante, Einstein percibió enseguida que el «tiempo» asignado a un suceso por un observador en movimiento es diferente del «tiempo» que le asigna un observador fijo, de una forma que depende de su posición. Al referirse a los sucesos que observan en común, el tiempo de un observador es una mezcla del espacio y el tiempo del otro, y viceversa. Esta «relatividad» del espacio y el tiempo es lo que era nuevo en la teoría especial de Einstein. Las dos conjeturas de la teoría ya estaban allí, ampliamente aceptadas, antes de su trabajo. Pero nadie se había tomado ambas lo bastante en serio para requerir y forzar su reconciliación.

Como las ecuaciones de Maxwell contienen la velocidad de la luz, la segunda conjetura de la relatividad especial —que la velocidad de la luz es invariante bajo transformaciones galileanas— se sigue directamente de la idea que motivó a Einstein, que era preservar tanto las ecuaciones de Maxwell como la simetría galileana. Pero es una conjetura mucho más débil.

De hecho, Einstein prosiguió dando la vuelta al argumento, al mostrar que el sistema completo de las cuatro ecuaciones de Maxwell se puede derivar de solo una de ellas, haciendo transformaciones galileanas para recuperar el caso general. (Poniendo una carga en movimiento, obtienes corrientes, y poniendo campos eléctricos en movimiento, obtienes campos magnéticos. Así que la ley que gobierna cómo las cargas eléctricas quietas generan campos eléctricos, después de las transformaciones de Galileo, da el caso general.) Ese truco profundo era un vistazo al futuro. *La simetría, en vez de la deducción a partir de leyes dadas, se convirtió en un principio primario, con vida propia*. Uno puede restringir las leyes requiriéndoles que tengan simetría.

Dos poemas sobre la luz

Retejiendo el arco iris

Hay una consecuencia física de la relatividad especial que me parece más bella que todas las demás. Pone juntos muchos de nuestros temas más profundos, y sin embargo apela directamente a la experiencia sensorial. Los primeros capítulos de nuestra reflexión, que relatan la física y la historia de la luz y el color, nos han preparado para disfrutarlo juntos, aquí y ahora.

Consideremos cómo un rayo puro de luz, con un color espectral definido, cambia si lo miramos desde una plataforma que se mueve a velocidad constante; en otras palabras, si hacemos una transformación galileana. Por supuesto, seguiremos viendo un rayo de luz. Y ese rayo sigue avanzando por el espacio a la misma velocidad que antes: la velocidad de la luz es invariante. Si empezamos con un rayo puro, con un color espectral definido, nos seguirá pareciendo un rayo puro, con un color espectral definido. Pero...

¡De un color *diferente*! Si nos movemos en la misma dirección que el rayo (alejándonos, por tanto, de su fuente), o si la fuente se está alejando de nosotros, su color se desplaza hacia el extremo rojo del espectro (o, si antes era rojo, se desplazará al infrarrojo). Si nos movemos en el sentido opuesto, el color se desplaza hacia el extremo azul del espectro (o hacia el ultravioleta). Cuanto más rápido nos movamos, más pronunciado será el efecto.

El primer efecto es bastante común en la cosmología, porque las galaxias distantes se están alejando de nosotros: o, como solemos decir, el universo se está expandiendo. En ese contexto, se conoce como desplazamiento al rojo. Fue precisamente por el desplazamiento al rojo observado de las líneas espectrales conocidas como se descubrió la expansión del universo.

Para nosotros, la gran conclusión es esta: *todos los colores se pueden obtener a partir de cualquiera de ellos, por el movimiento*, o, como decimos, haciendo transformaciones galileanas. Puesto que las transformaciones galileanas son simetrías de las leyes de la naturaleza, cualquier color es por completo equivalente a cualquier otro. Todos emergen como distintos aspectos de la misma cosa, vistos desde perspectivas diferentes pero igualmente válidas.

¡Aquí necesitamos una imagen! En la Lámina DD, puedes ver el patrón de ondas asociado a un rayo puro de luz —un color espectral— emitido por una fuente que se mueve hacia la derecha a siete décimos de la velocidad de la luz.

Si tú estás a la derecha, de modo que el rayo se está acercando a ti, percibirás su color como azul; si estás a la izquierda, de manera que el rayo se aleja, aparecerá rojo. En esta instantánea, la fuente está cerca del centro.

Newton pensó que había probado que cada color espectral era inherentemente diferente de cualquier otro, y que ninguna alquimia podría transmutar uno en otro. El trabajo experimental de Newton estableció que la luz de cada color espectral persiste en ese color pese a la reflexión, la refracción o muchos otros procesos transformativos.

¡Pero metió la pata! Solo con que Newton hubiera intentado correr entre sus prismas a unas cuantas decenas de miles de metros por segundo, se habría dado cuenta de su error. No es más que una broma, por supuesto. Es bastante común —aunque horroroso— ver que los divulgadores y los observadores de la ciencia dicen cosas de ese tipo sinceramente, como si cualquier cosa distinta a la última Verdadera Teoría del Todo fuera una basura. Es una versión en peso mosca del tipo de pensamiento que subyace en las ideologías intolerantes y totalitarias. El argumento real que quiero subrayar es justo el contrario: hasta qué punto eran casi correctas las teorías de Newton, y lo muy útiles que siguen siendo.

Aun así es hermoso descubrir que hay otro capítulo en esa historia, en el que descubrimos una unidad profunda debajo de la diversidad de las apariencias, y sujetándolas. Todos los colores son una misma cosa, vista en distintos estados de movimiento. Esa es respuesta brillantemente poética de la ciencia a la queja de Keats de que la ciencia «deseje el arco iris».

Reanimando el color

La esencia física del color, como la esencia física del tono musical, es una señal que varía en el tiempo.

La variación temporal de la luz es demasiado rápida para que nuestra sustancia pueda seguirla. Su frecuencia es demasiado alta. Y por tanto, para sacar lo mejor posible de una situación difícil, nuestro sistema sensorial

procesa la información y codifica solo una pequeña parte de ella como color percibido.

Ese código, al final, ¡conserva pocas trazas de su origen! Cuando percibimos un color, vemos un símbolo del cambio, no la propia cosa que cambia.

Pero podemos recuperar algo de la información subyacente, en concreto trayendo de vuelta la variación temporal, cambiada de escala para adecuarse a las habilidades humanas. Mediante este acto de restauración transformadora, expandiremos las puertas de la percepción.

Relatividad general: localidad, anamorfosis y fluidos permisivos

Con la relatividad especial, como hemos visto, Einstein elevó la simetría galileana, o invariancia, a la categoría de principio primario: un requisito que todas las leyes de la física deben obedecer. Las ecuaciones de Maxwell satisfacen ese requisito, tal y como están. Las leyes del movimiento de Newton no lo satisfacen, pero Einstein aportó una mecánica modificada que sí lo hace. Para los cuerpos que se mueven mucho más despacio que la velocidad de la luz, la versión de Einstein reproduce las respuestas exitosas de Newton.

La teoría de la gravedad de Newton, sin embargo, es mucho más difícil de adaptar. La teoría de Newton está construida alrededor del concepto de masa, pero en la relatividad especial la masa pierde su refugio seguro. En concreto, la masa no se conserva. (Si estos conceptos resultan extraños, consulta las entradas *Masa* y *Energía* en «Términos del arte».)

Así que, si pides a la gravedad que responda a la masa, como hace la teoría de Newton, le estás dando unas instrucciones ambiguas. Una teoría relativista de la gravedad requiere unos nuevos cimientos.

Al final, Einstein resolvió el problema, en su teoría general de la relatividad, mediante un concepto intensificado de simetría. Hizo a la simetría —en concreto, a la simetría galileana— *local*.

Podemos entender la simetría local (que es la que tenemos en la relatividad general) contrastándola con la simetría rígida (que es la que tenemos en la relatividad especial).

Según la simetría, o invariancia, galileana *rígida*, podemos cambiar el estado de movimiento del universo, añadiendo una velocidad total constante, sin cambiar las leyes de la física. Por otro lado, si cambiamos el movimiento *relativo* entre diferentes partes del universo, imponiendo velocidades que cambian en el espacio o en el tiempo, debemos esperar cambios en las leyes. Si mueves un imán cerca de la aguja de una brújula, ¡la aguja se mueve!

La simetría, o invariancia, galileana *local*, postula que una clase mucho más amplia de transformaciones deja las leyes sin cambiar. Dice, precisamente, que podemos elegir que la velocidad añadida sea diferente en diferentes tiempos y espacios. Eso debería sonar escandaloso, pues es exactamente lo que acabamos de decir que *no* funciona.

Pero hay una forma de hacer que funcione, extendiendo la teoría. Tras muchos intentos, en distintas ocasiones y a lo largo de varios años, de describir la idea esencial de una forma accesible, he descubierto una con la que estoy satisfecho. No por coincidencia, se construye sobre nuestros pensamientos anteriores, y trae ideas procedentes de las artes.

Hemos estado usando la perspectiva artística como nuestro prototipo de simetría. Puedes ver la misma escena desde distintos sitios, obteniendo así diferentes perspectivas. Las imágenes que la escena proyecta pueden diferir, y lo hacen de muchas maneras, pero todas representan la misma escena. Cambiar de perspectiva, sin cambiar de escena, es un ejemplo resplandeciente de simetría.

De manera similar, podemos ver el mundo desde una «perspectiva» diferente si le imprimimos una velocidad constante o, lo que viene a ser lo mismo, mirándolo desde una plataforma móvil. Cuando hacemos eso, muchas cosas parecerán diferentes, pero —según la relatividad especial— las mismas leyes de la física seguirán vigentes. Es ese sentido, seguirá siendo (una imagen de) el mismo mundo.

Consideremos ahora maneras más generales de ver la escena, además de cambiar la perspectiva. Esto nos lleva al territorio del arte anamórfico, del que es un hermoso ejemplo la Lámina EE. El arte anamórfico utiliza lentes,

espejos curvos y otros ingenios para generar imágenes que se reorganizan de maneras interesantes y ricas en formas. El abanico de imágenes que puede representar una escena dada es enormemente mayor, e incluye algunas apariencias muy distorsionadas.

Más «físicamente», podríamos considerar la posibilidad de ver el mundo a través de un material translúcido, pero que tuerza la luz: el agua, digamos. Podemos incluso imaginar que el agua sea más densa en unos sitios que en otros, de modo que varíe el grado en que tuerce la luz. (Es difícil hacer eso con el agua real, pero no importa.) En esta situación, las imágenes que tomamos en distintos sitios pueden estar distorsionadas, y parecer realmente muy diferentes. Puede que nos parezcan difíciles de interpretar.

Si no entendiéramos el efecto del agua, estaríamos tentados a pensar que las imágenes representan diferentes escenas. Pero si sabemos del agua, y reconocemos ese efecto, podemos contar muchas más posibles imágenes como representaciones válidas de nuestra escena. Podemos distribuir el agua de distintas formas, por ejemplo, para imitar el efecto de un espejo de feria. Incluso podríamos poner el agua en movimiento de modo que las imágenes cambien también con el tiempo. En breve: *imaginando un fluido que llena el espacio, y reconociendo sus posibles efectos, podemos considerar una amplia variedad de imágenes transformadas como representaciones de la misma escena, miradas a través de diferentes estados del fluido.*

De forma similar, mediante la introducción del tipo de material exactamente apropiado en el espacio-tiempo, Einstein fue capaz de permitir que las distorsiones de las leyes físicas, que son introducidas por transformaciones galileanas que varían en el espacio y en el tiempo, se lograran como modificaciones del nuevo material. Ese material se llama el *campo métrico* o, como yo prefiero decir, el *fluido métrico*. El sistema expandido, que contiene el mundo original más un nuevo material hipotético, obedece leyes que son las mismas incluso cuando hacemos cambios variables en la velocidad, aunque el estado del fluido métrico cambia. En otras palabras, *las ecuaciones del sistema expandido pueden sujetar nuestra enorme y «escandalosa» simetría local.*

Podríamos esperar que los sistemas de ecuaciones que soportan esa cantidad enorme de simetría fueran muy especiales, y difíciles de hallar. El nuevo material debe tener exactamente las propiedades adecuadas. ¡Unas ecuaciones con una simetría tan enorme son el análogo de los sólidos platónicos —o mejor, las esferas— en el mundo de las ecuaciones!

Cuando Einstein resolvió esas ecuaciones, habiendo enriquecido el mundo con un nuevo material, se dio cuenta de que había conseguido su largamente buscada teoría de la gravedad. Las ecuaciones revelan que el fluido métrico, que él había introducido para permitir la simetría galileana local, resulta curvado por la presencia de materia, y a su vez influye en cómo la materia se mueve. De modo que el fluido métrico cumple, esencialmente, la misma función para la gravedad que cumple el fluido electromagnético de Maxwell para el electromagnetismo. Llamamos a sus excitaciones mínimas, o cuantos, *gravitones*, análogos a los fotones del electromagnetismo.

En esta construcción, el papel de la simetría, como principio que gobierna el mundo, se ha elevado a un nuevo nivel. La simetría se ha vuelto creativa. La conjectura de la simetría local ha dictado la estructura detallada de una teoría de la gravedad compleja y fructífera, que describe con éxito la naturaleza. Para hacer funcionar a la simetría local, hay que introducir el fluido métrico, y sus consiguientes gravitones.

Debo añadir que este enfoque de la relatividad general, que pone el frente de la simetría local en el centro, es algo heterodoxo. Lo habitual es que se aduzcan otros conceptos, que motivan de otras formas la introducción del fluido métrico. Pero la simetría local es lo que resulta esencial, y el enfoque minimalista nos será de mucha utilidad cuando lleguemos a hacer teorías sobre otras fuerzas.

Al hablar de su teoría, Einstein usaba una terminología diferente. Parte de esa terminología contiene residuos de su período de «búsqueda en la oscuridad», y resulta ambigua o confusa, al menos para mí. Pero, en lo esencial, su *covarianza general* corresponde a nuestra *simetría galileana local*. Para el resumen en una sola frase de nuestra exposición, parece adecuado rendir homenaje a su elección:

Los gravitones son los avatares de la covarianza general.

Belleza cuántica II: exuberancia

El análisis de la materia la reduce a electrones y núcleos atómicos (y al final, como veremos un paso más adelante, la reduce a electrones, quarks y gluones). También es justo añadir los fotones a esta lista de ingredientes, puesto que son el material del fluido electromagnético. De ese conjunto irrisorio de ingredientes, siguiendo unas pocas reglas extrañas pero estrictas y altamente estructuradas, emergen los mundos infinitamente variados de la química, la biología y la vida diaria.

¿Cómo funciona todo esto?

Este capítulo es breve, pero importante para el progreso de nuestra Pregunta. Porque aquí sellaremos la conexión

Ideal → Real

entre la extraña música de la teoría cuántica y el mudo real de los materiales. En los siguientes capítulos refinaremos nuestro entendimiento de los cimientos de lo Ideal, al estilo de

... Ideal → Ideal → Ideal → Real

Pero el último eslabón, que vamos a forjar aquí, permanecerá firme y esencialmente inmutable.

El mundo de la química es vasto y fascinante. Pero nuestro objetivo no es hacer una enciclopedia. Para abordar nuestra Pregunta, basta con que forjemos ese último eslabón. Para que la tarea sea manejable y a la vez divertida, he decidido centrarme en lo que pudiera parecer una versión ridículamente limitada de la química, usando solo un elemento: el carbono. Como verás, esta esquina de la química con un solo elemento ya crea un país de las maravillas.

¿Qué quieren los electrones?

¿Qué quieren los electrones?

Esa pregunta tiene sentido, porque todos los electrones, a diferencia de toda la gente, tienen las mismas propiedades. Y sus «deseos» son fáciles de enumerar. En esencia son tres, y a los dos primeros ya nos los hemos encontrado en el capítulo anterior.

- Los electrones están sujetos a fuerzas eléctricas, que los atraen hacia los núcleos, cargados positivamente, pero les hacen repelerse entre sí.
- Los electrones están descritos por campos que llenan el espacio —sus funciones de onda— que prefieren variar fluida y suavemente. Se instalan en patrones de onda estacionarios específicos u «orbitales», que llegan a un arreglo óptimo entre la atracción de los núcleos y su natural espíritu viajero. Me gusta imaginar a los electrones explicándose a los núcleos así:

«Me pareces atractivo, pero necesito mi espacio».

- La tercera propiedad importante de los electrones tiene que ver con sus relaciones mutuas. No la vimos al tratar de los átomos de hidrógeno, porque cada átomo de hidrógeno tiene un solo electrón. Esta tercera propiedad es un poco más complicada que las otras dos. Se llama el principio de exclusión de Pauli, por Wolfgang Pauli, el físico austriaco que lo formuló en 1925. El principio de exclusión de Pauli es un efecto puramente mecanocuántico. Sin referirse a la descripción cuántica de la realidad física basada en las funciones de onda, ¡ni siquiera puede enunciarse!

Cuando Pauli lo propuso, el principio de exclusión no tenía ninguna base teórica. Llámalo inspiración siquieres, o di que fue una mera conjetura. Ambos puntos de vista son correctos. Como la visión de Bohr de los estados estacionarios y los saltos cuánticos —y ya puestos, las reglas pitagóricas de la armonía—, el principio de exclusión de Pauli vino de escuchar música (en el caso de Bohr y Pauli, la música del

espectro atómico) y de identificar en sus pautas de diseño unas reglas que las gobiernen. Hoy reconocemos el principio de exclusión de Pauli como un aspecto de la teoría cuántica de las partículas idénticas, con profundas raíces en la relatividad y la teoría cuántica de fluidos, pero empezó como una conjetura inspirada.

Para nuestro propósito presente, que es entender *cómo* surge la creatividad exuberante y espontánea de los electrones a partir de unas reglas simples, la formulación original de Pauli es todo lo que necesitamos. La regla número tres, en la forma cruda que usaremos, es esta: no más de dos electrones pueden estar en el mismo estado estacionario.

(¿Por qué no más de dos? ¡Parece extraño! Es una consecuencia del espín intrínseco del electrón. Dos electrones pueden estar en el mismo estado estacionario solo si están girando en sentidos opuestos. Una formulación más satisfactoria del principio de Pauli dice que no más de *un* electrón puede estar en el mismo estado estacionario, pero incluye el espín como parte de la definición del estado.)

¡Carbono!

Esas tres reglas se despliegan en los mundos de la ciencia de materiales, la química y los sustratos físicos de la biología, incluyendo la mayor parte de la herencia y el metabolismo. Para reducir esa abrumadora exuberancia a unas dimensiones manejables, he decidido centrarme en un rincón minúsculo: el mundo material del carbono puro. Como verás, incluso este rincón minúsculo es extraño, frondoso y variado. También nos transportará a varias fronteras importantes de la investigación.

La química basada en el carbono suele llamarse química orgánica, porque el carbono es un ingrediente principal de todas las proteínas, las grasas y los azúcares, que junto a los ácidos nucleicos forman el reparto protagonista de la biología. Pero esas moléculas biológicas contienen también otros elementos junto al carbono, y esos elementos son esenciales para su función.

Los compuestos puros de carbono no tienen un papel en la biología natural. Así que aquí estamos mirando a un capítulo especial del gran libro de la química orgánica: el capítulo dedicado a la química orgánica inorgánica.

Átomos de carbono, de uno en uno

Los compuestos de carbono se producen combinando átomos de carbono, así que empecemos con estos. El núcleo de carbono contiene seis protones, luego tiene seis unidades de carga eléctrica positiva, que atrae a seis electrones hasta que está neutralizada. Cuando esos electrones intentan *minimizar* su energía, nuestras tres reglas entran en juego. A los electrones les gustaría tener funciones de onda en los estados estacionarios o, como dicen los químicos, orbitales, con la energía *más baja* posible. Esos son los orbitales bonitos, redondos y compactos en la esquina superior izquierda de la Figura 26. El principio del señor Pauli, sin embargo, nos dice que solo podemos alojar dos electrones de esa manera.

Los otros cuatro deben hacer uso de otros tipos de orbitales espaciales. Si nos movemos un paso a la derecha de la figura, encontramos otro orbital redondo. Es menos compacto, de modo que se beneficia menos de la carga atractiva del núcleo central. Los electrones en ese orbital están unidos al núcleo de manera menos estable que los dos electrones «interiores»: un factor clave para lo que sigue. El segundo orbital redondo puede alojar otros dos electrones, así ya tenemos sitio para $2 + 2 = 4$ de los seis. Para alojar a los otros dos, tenemos que buscar un poco más allá. Moviéndonos otro paso a la derecha, hay otro tipo de orbital que no es redondo, sino más bien con forma de mancuerna. Esa forma puede orientarse en cualquier dirección, de modo que en realidad hay tres orbitales independientes de ese tipo. Así que, una vez que ponemos en juego esos orbitales, hay sitio de sobra para nuestros dos electrones remanentes.

Resulta que estos dos nuevos tipos de orbitales tienen casi la misma energía, así que los electrones pueden mezclarlos sin que ello suponga un coste energético prohibitivo. La distinción importante es entre los dos electrones interiores, que están unidos al núcleo de manera muy estrecha, y los

otros cuatro electrones, que están unidos con mucha más holgura. Cuando hay otros átomos cerca, esos cuatro electrones son el blanco para compartir. Ajustando solo un poco sus orbitales, esos cuatro electrones pueden *estirarse* para alcanzar a más de un núcleo, y beneficiarse de la atracción de los dos núcleos.

Átomos de carbono, en racimos

Cuando tenemos racimos de carbonos, hay dos formas especialmente bonitas y simétricas de compartir los electrones. Se muestran en la Figura 27.

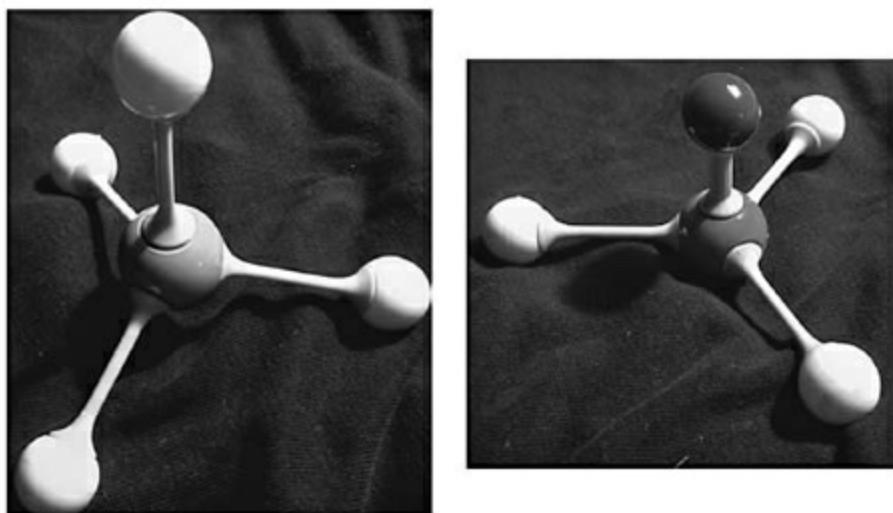


FIGURA 27. El carbono puro tiene dos patrones de enlace principales, ambos optimizados para la simetría.

A la izquierda tenemos la unidad de la estructura del diamante, que exhibe una simetría tridimensional perfecta. Los cuatro orbitales se extienden hacia los vértices de un tetraedro: el sólido platónico más simple, como recordarás.

A la derecha tenemos la unidad de la estructura del grafeno, que exhibe una simetría bidimensional perfecta. Los tres orbitales planos se extienden hacia los vértices de un triángulo equilátero: el polígono regular más simple. Las bolas blancas, en ambos casos, serán reemplazadas por otros átomos de

carbono con el mismo patrón de enlaces, mientras que las bolas negras contribuyen a una capa de electrones cuasilibres. (Estrictamente hablando, la capa de electrones tiene la mitad de su densidad encima, y la mitad debajo, del plano principal de carbono.) Fíjate en que, si cada orbital es tomado por un electrón de cada núcleo, satisfaremos a la perfección el principio del señor Pauli, con cada núcleo de carbono compartiendo cuatro de sus electrones en conjunto. En otras figuras de este capítulo, verás cómo estos elementos básicos se combinan para dar una brillante variedad de materiales de carbono puro.

No por coincidencia, resulta que esos dos patrones de enlace especialmente simétricos son los que conducen a una energía favorable (es decir, baja). Son el fundamento de la miríada de formas estables de combinar átomos de carbono que exploraremos ahora.

Diamante (3-D)

La estructura del diamante, al nivel atómico, es simétrica y armoniosa (Figura 28). Cada núcleo de carbono está en el centro de cuatro orbitales electrónicos. Los orbitales se estiran hasta cuatro núcleos de carbono vecinos, cuyas posiciones definen los vértices de un tetraedro regular. Esta organización es muy eficaz, porque los electrones consiguen evitarse entre sí a la vez que visitan a dos núcleos. Como los electrones se encuentran cómodos en esta configuración, se resisten a hacer cualquier cosa diferente. Es difícil hacer que se suelten. ¡De ahí que los diamantes sean difíciles de rayar! Los diamantes puros son transparentes, esencialmente por la misma razón: los fotones de la luz visible no pueden suministrar la energía suficiente para hacer que un electrón cambie de estado. (Las impurezas, por las que elementos distintos del carbono pueden colarse, o los defectos, por los que la estructura del cristal presenta fallos, pueden dar color a los diamantes. Hay un sistema complicado para corregir el color de los diamantes de lujo. Algunas formas de imperfección son mejores que otras, o que la perfección misma...)

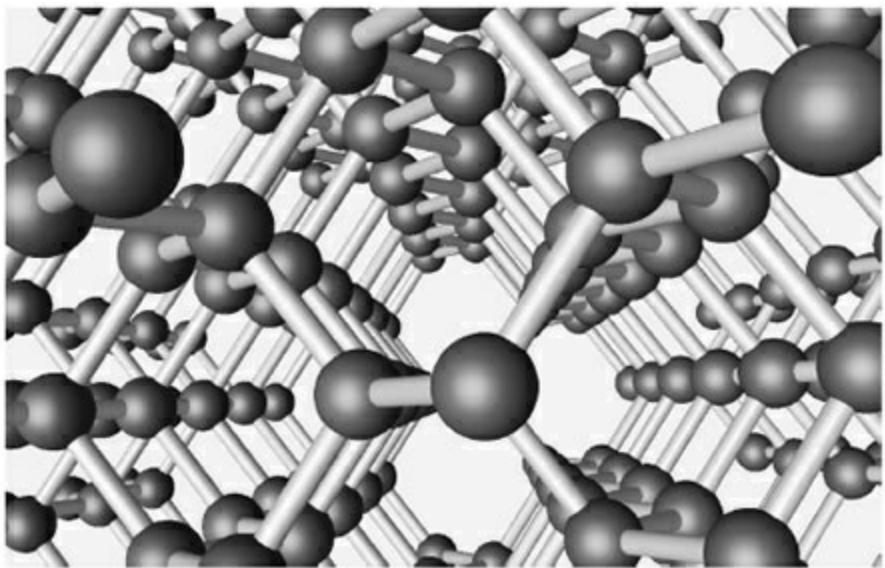


FIGURA 28. La estructura del diamante. Cada núcleo de carbono comparte electrones con otros cuatro situados en los vértices de un tetraedro circundante. Esta es una estructura que llena el espacio en tres dimensiones.

Grafeno (2-D) y grafito (2+1)

La forma más estable del carbono elemental, a temperatura ambiente y presión atmosférica, no es el diamante, sino el grafito. En contra de su difundida reputación, los diamantes no son para siempre: dado el tiempo suficiente, se transforman en grafito (pero no aguantes la respiración). El grafito es el material negro con el que pintan los lápices, y también se usa ampliamente como lubricante industrial. Al nivel atómico, el grafito es un material fuertemente estratificado: consiste en muchas capas de grafeno (Figura 29) que están débilmente unidas entre sí. La debilidad de la conexión entre capas facilita que las capas se deslicen una sobre otra, o se decapen. Eso explica la capacidad lubricante del grafito, y también que manche el papel. Decimos que el grafito es 2+1 dimensional, porque las hojas bidimensionales se pueden apilar de manera indefinida.

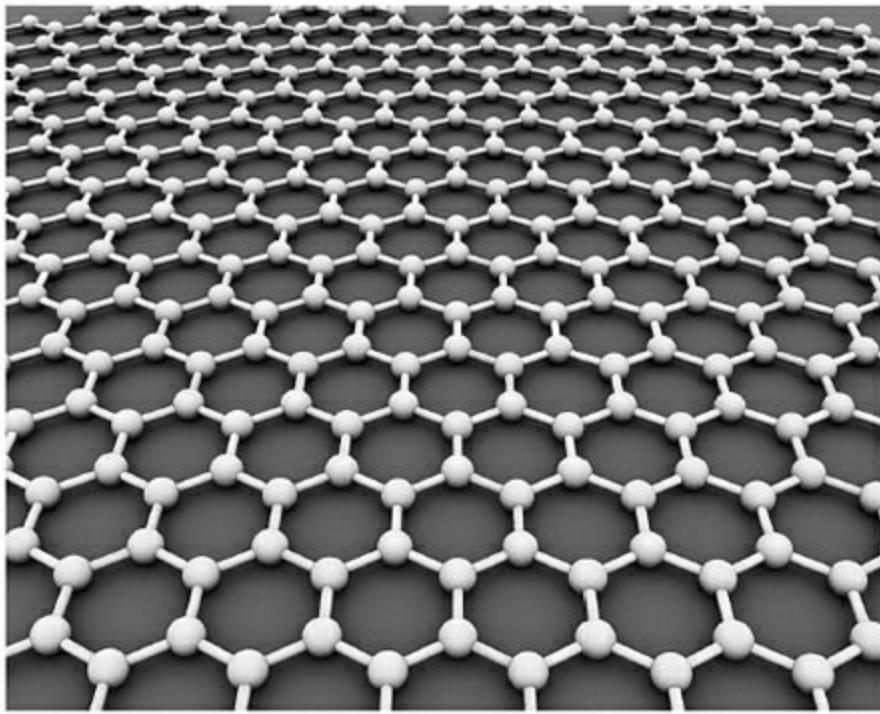


FIGURA 29. La estructura del grafeno. Cada núcleo de carbono comparte electrones con otros tres situados en los vértices de un triángulo equilátero. En este patrón de colmena, que se puede extender de manera indefinida, reconocemos una de las tres superficies platónicas infinitas.

El grafeno, la versión del grafito en una sola capa, es el material de este tipo más simple y glamoroso.

El grafeno fue estudiado teóricamente durante décadas antes de estar disponible en cualquier laboratorio. Como el grafeno es tan simple y regular, los teóricos cuánticos pudieron predecir sus propiedades con confianza, y en considerable detalle. Se esperaba que el grafeno fuera genial, si pudiera producirse. Pero ¿podía producirse?

El grafeno fue aislado por André Geim y Konstantin Novoselov en 2004. El método de descubrimiento fue un pedazo de ciencia del siglo XIX que de algún modo se escapó al siglo XXI. Empezaron con manchas de lápiz, que suelen contener varias capas de carbono y consisten en grafito. Entonces utilizaron cinta adhesiva para separar varias capas, y transfirieron los restos de la mancha a cubreobjetos para el microscopio. Las trazas de mancha formaban un terreno irregular, con zonas en que el carbono estaba ausente, zonas en que se había reducido a una capa —¡grafeno!—, otras con dos capas

de espesor, etcétera. Las diferentes capas muestran unos colores ligeramente diferentes bajo luz polarizada, de modo que Geim y Novoselov pudieron dirigirse a las zonas de grafeno y estudiar sus propiedades lo bastante bien para demostrar que eran, en efecto, trozos de grafeno. Geim y Novoselov compartieron el premio Nobel de Física en 2010 por su trabajo.

El grafeno tiene unas propiedades mecánicas y eléctricas únicas, que prometen muchas aplicaciones. Inspirada por la promesa del grafeno, ¡la gente ha encontrado algunas formas mucho más eficaces de hacerlo! Un estudio optimista, pero quizá no loco, predice que en los próximos años se desarrollará un mercado de cien mil millones de dólares alrededor del grafeno.

Aquí solo mencionaré un plato fuerte, que es fácil de entender y encaja muy bien con nuestro recorrido. Igual que ocurre con los electrones en un cristal de diamante, la eficaz organización de los electrones en el plano del grafeno es tan favorable que resulta difícil romperla. Por eso el grafeno resulta un material extremadamente fuerte y resistente. Al mismo tiempo, como tiene un espesor de una sola capa atómica, una hoja de grafeno es ligera y flexible. Al explicar su galardón de 2010, el comité Nobel mencionaba que una hamaca de grafeno de un metro cuadrado podría soportar a un gato, aunque solo pesa lo mismo que uno de los bigotes del gato. Hasta donde yo sé, nadie ha intentado hacer ese experimento todavía.

Nanotubos (1-D)

Podemos enrollar el grafeno bidimensional para hacer tubos unidimensionales, los llamados nanotubos. Esto se puede hacer de muchas maneras para obtener nanotubos de distintos radios y grados de inclinación (véase la Lámina FF). Los nanotubos que difieren solo un poco en geometría pueden tener unas propiedades físicas radicalmente diferentes. Es un triunfo de la teoría cuántica que esas propiedades tan delicadas puedan predecirse sin ambigüedad, mediante el puro cálculo, y que coincidan con las mediciones experimentales.

Buckyballs (0-D)

Por último, uno puede imaginar que cierra una hoja de grafeno sobre sí misma, para hacer una superficie finita. Hay muchas formas de hacerlo. En realidad, o se puede formar una superficie cerrada simple, donde cada vértice encuentre tres lados, utilizando solo hexágonos. ¡No existe ese sólido platónico! El que más se acerca es el dodecaedro, hecho de pentágonos. Y, lo que es más importante, cada vértice de un dodecaedro se conecta exactamente con otros tres, de modo que la unidad estructural básica de la Figura 27 (a la derecha) se puede usar. Los tres orbitales tienen que doblarse respecto a su configuración planar ideal. Aunque la molécula dodecaédrica C_{20} , hecha de 20 átomos de carbono, existe en la realidad, las formas más grandes, que incorporan además hexágonos, requieren menos distorsión y se forman de manera más fácil. La bonita molécula C_{60} , tipo «balón de fútbol», mostrada en la Figura 30, es particularmente estable y común.

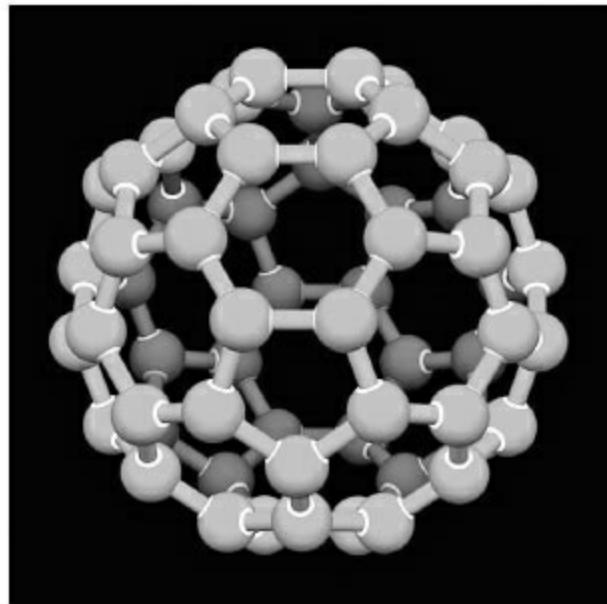


FIGURA 30. Estructura de la *buckyball*. Aquí los carbonos se han plegado por completo, construyendo un objeto finito. De lejos parece un punto: la dimensión se ha colapsado a cero.

Las bolas de carbono puro, de las que C_{60} es la más común, pero en absoluto el tipo mayoritario, se forman cuando el carbono se quema eléctricamente, como al caer un rayo. También se producen, en pequeñas cantidades, en el hollín común de una vela.

La Figura 30 muestra la estructura de la molécula C_{60} , una de las conocidas como buckminsterfulerenos, o *buckyballs*. Aquí el grafeno se ha enrollado dos veces, en sus dos dimensiones, para construir un objeto cero-dimensional (es decir, no le quedan direcciones que se extiendan indefinidamente). Como en el grafeno y en los nanotubos, la unidad básica enlaza un núcleo de carbono a tres vecinos. La *buckyball* incorpora un dodecaedro oculto: tiene doce pentágonos entremezclados regularmente entre sus veinte hexágonos, y, si encoges los hexágonos hasta que sean puntos, obtienes un dodecaedro. Hay variantes de *buckyball* con distinto número de hexágonos, pero siempre tienen doce pentágonos, por razones topológicas. El nombre rinde honores a Buckminster Fuller (1895-1983), un inventor y arquitecto cuyos «domos geodésicos» utilizan unas estructuras vagamente similares.

Es de justicia concluir nuestra breve visita a la exuberante química del carbono puro con la Figura 31, una fotografía de Harold Kroto (n. 1939), que compartió el premio Nobel de Química en 1996 por su trabajo sobre los buckminsterfulerenos, retratado entre modelos de sus criaturas.

La mente despierta encontrará placer no solo en la belleza de los diamantes, que deslumbra a los ojos, sino también en la belleza oculta e interior de los superficialmente apagados borrones del lápiz, y del hollín, y de las finas hojas donde se acurrucan los felinos.

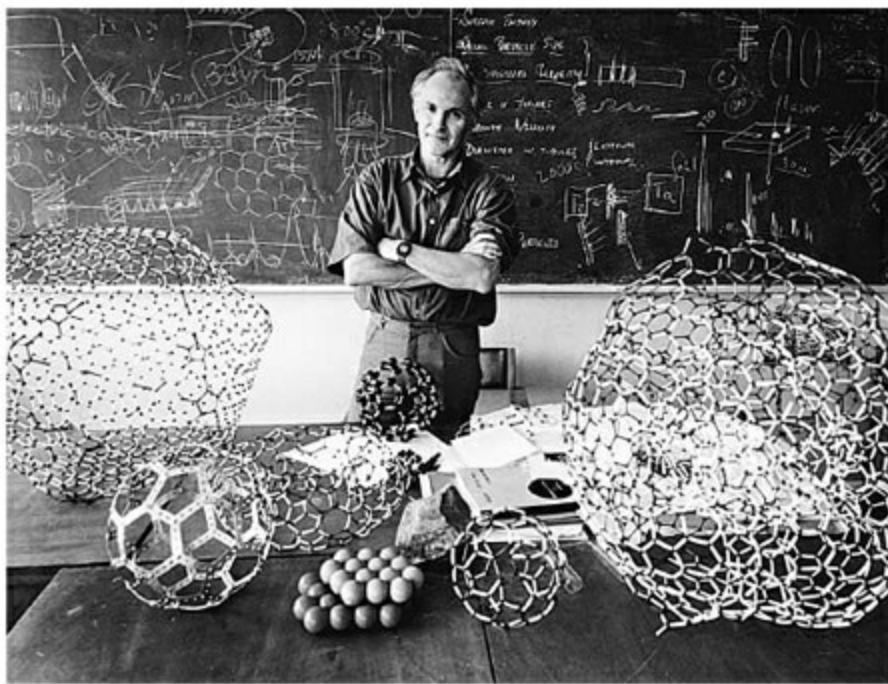


FIGURA 31. Harold Kroto en su elemento, con modelos de buckminsterfulerenos.

Simetría II: color local

Convergen ahora muchos aspectos de nuestra reflexión, y nos acercamos a una respuesta de nuestra Pregunta.

En nuestro primer interludio de simetría vimos cómo Einstein, haciendo local la simetría galileana, descubrió su teoría de la gravedad: la relatividad general.

En el siguiente capítulo, documentaremos cómo la simetría local conduce a teorías correctas de las tres principales fuerzas de la naturaleza: el electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil. Las nuevas simetrías implican hacer transformaciones entre propiedades (en concreto, «cargas de color») de las partículas. En las formas locales de las simetrías, dejamos que esas transformaciones sean diferentes, en diferentes lugares y tiempos.

Para invitar al viaje, imaginemos ahora su destino.

Anacromía

El arte anamórfico deforma la estructura espacial de las imágenes. Es una excelente representación del tipo de transformaciones del espacio-tiempo que la relatividad general acomoda como simetrías.

El tipo de transformaciones que acomodan las otras fuerzas vendrían mejor representadas por una forma artística que se cultiva menos, si es que existe en absoluto. El arte anamórfico deja intacta la estructura de color de sus imágenes. En el arte *anacrómico*, por el contrario, modulamos la estructura de color de las imágenes, mientras dejamos intacta su estructura espacial.

En este punto unas cuantas imágenes valen más que muchos miles de palabras.

La Lámina GG es una obra pionera de arte anacrómico. En ella vemos cuatro versiones de una foto de un mostrador callejero de dulces en Barcelona. Arriba a la izquierda tenemos la foto original mínimamente procesada. A su derecha vemos el resultado de una transformación rígida de los colores, en que cada píxel se ha transformado de la misma manera. (Para empollones: $V \rightarrow R$, $A \rightarrow V$, $R \rightarrow A$ en el esquema convencional rojo-verde-azul, o RVA.) En los dos paneles de abajo, se han aplicado unas transformaciones de color más complicadas, donde *la naturaleza de las transformaciones cambia de un lugar a otro*. Abajo a la izquierda, vemos el efecto de transformaciones relativamente suaves, mientras que abajo a la derecha vemos el efecto de otras más drásticas.

Una respuesta a nuestra Pregunta

Los lugares de culto encarnan la aspiración de sus arquitectos, y de las comunidades a las que representan, a la belleza ideal. Sus métodos expresivos de elección incluyen el color, la geometría y la simetría. Consideremos, en particular, la gloriosa Lámina HH. Aquí, la geometría local de las superficies y los patrones locales de color cambian a medida que nuestros ojos los exploran. Es una encarnación vibrante de la anamorfosis y la anacromía: los mismos temas que nuestro descubrimiento del diseño profundo de la naturaleza halla encarnados en su corazón.

¿Encarna el mundo ideas bellas? Ahí tenemos una respuesta delante de los ojos: sí.

El color y la geometría, la simetría, la anacromía y la anamorfosis, como fines en sí mismos, son solo una rama de la belleza artística. El mandamiento islámico contra el arte figurativo tuvo un importante papel en el protagonismo de estas formas de belleza, como también lo tuvo el requerimiento físico de la estabilidad estructural (necesitamos columnas para aguantar el peso de los techos, y arcos y cúpulas para distribuir la tensión). Las representaciones de rostros humanos, cuerpos, emociones, paisajes, escenas históricas y demás, cuando están permitidas, son materias artísticas mucho más comunes que estas bellezas austeras.

El mundo, en su diseño profundo, no encarna *todas* las formas de belleza, ni las que la gente sin una formación especial, o un gusto muy inusual, suele encontrar más atractivas. Pero el mundo, en su diseño profundo, sí que encarna *algunas* formas de belleza que han sido muy valoradas por méritos propios, y que han sido asociadas intuitivamente con lo divino.

Belleza cuántica III: la belleza del corazón de la naturaleza

Hasta ahora, nuestra reflexión sobre la realidad cuántica ha revelado que el mundo de la materia convencional, cuando se le entiende de forma apropiada, encarna conceptos de extraordinaria belleza. De hecho, la materia ordinaria está hecha de átomos que son, en un sentido frondoso y preciso, minúsculos instrumentos musicales. En su interacción con la luz, ejecutan una Música de las Esferas matemática que supera las visiones de Pitágoras, Platón y Kepler. En las moléculas y los materiales ordenados, esos instrumentos atómicos tocan juntos como grupos armoniosos y orquestas sincronizadas.

Tras haber hallado esas joyas del entendimiento, estamos inspirados para excavar más hondo, en la confianza de que no hemos agotado esta veta. Nuestros nuevos hallazgos nos aportan una respuesta gratificante, pero aún solo *parcial*, a nuestra gran Pregunta. Nos seducen a continuar, mientras nuestras respuestas plantean nuevas preguntas, como:

- *¿Qué* son los núcleos atómicos?
- *¿Por qué* hay electrones?
- *¿Por qué* hay fotones?

En los dos capítulos finales, abordaremos estas preguntas, y otras a las que estas nos conducen. Nuestras exploraciones nos llevarán a las fronteras de nuestro entendimiento actual, y luego unos cuantos grandes pasos más allá. Descubriremos nuevos conceptos y realidades que desarrollan los temas anteriores, pero también los trascienden. A medida que nos acercamos al núcleo de la cuestión, descubrimos nuevas bellezas, y nos formamos una

visión de cómo todas ellas podrían reunirse, en una síntesis poderosa. Desvelaremos, en un sentido real, la cosa tan hermosa que *es* el mundo físico, y después la cosa aún más hermosa que *podría ser*.

Este capítulo está dedicado al racimo de ideas que usamos actualmente para describir las cuatro fuerzas básicas de la naturaleza. Dos de esas fuerzas, la gravedad y el electromagnetismo, han tenido ya un papel prominente en nuestra reflexión. Otras dos, las llamadas fuerzas fuerte y débil, no fueron descubiertas hasta el siglo xx, cuando la física empezó a codearse con los núcleos atómicos.

Los núcleos atómicos son minúsculos y difíciles de estudiar. Entenderlos fue una indagación larga y ardua que ha dominado la investigación en física fundamental durante la mayor parte del siglo xx, y aún continúa. Durante un tiempo, las cosas se pusieron muy complicadas y liosas. Al final, sin embargo, ¡la naturaleza se manifestó! Hoy tenemos teorías de las fuerzas fuerte y débil que son dignas de situarse junto a la gravedad de Newton (y Einstein) y la electrodinámica de Maxwell.

Como veremos en este capítulo, los conceptos y ecuaciones que necesitamos para describir las fuerzas fuerte y débil son unas mejoras naturales y bellas de los conceptos y ecuaciones que surgen al describir la gravedad y el electromagnetismo. Y al revés, nuestra comprensión de las fuerzas fuerte y débil nos da una nueva perspectiva sobre las teorías anteriores, subrayando la esencia que todas ellas comparten. Esa esencia compartida apunta a una unidad subyacente y más profunda. En el próximo capítulo, veremos cómo esa unificación alcanza su madurez.

Acercándose al centro

Las teorías reinantes de las fuerzas fuerte, débil, electromagnética y gravitatoria suelen agruparse y llamarse *Modelo Estándar*. Como ya mencioné en la introducción, ese término prosaico lleva la modestia demasiado lejos. Para empezar, *Modelo Estándar* tiene un aire de sabiduría convencional, con fuertes connotaciones de pensamiento estrecho y falta de imaginación. Y, en segundo lugar, *Modelo Estándar* tiene el aire de «cuenta de la vieja»,

apuntando a alguna especie de construcción cruda y hecha a medida. Ninguno de esos aires e insinuaciones debería asociarse a uno de los grandes logros —*el gran logro, diría yo*— del pensamiento y el esfuerzo humanos. Así que yo prefiero llamarlo la Teoría Central.

La Teoría Central cumple el programa de análisis y síntesis de Newton. En ella, formulamos las leyes básicas como exposiciones precisas sobre las propiedades e interacciones de unos pocos bloques de construcción, y derivamos de ahí el comportamiento de los cuerpos más grandes. Generamos la materia tal y como la conocemos, en toda su riqueza, a partir de unos pocos ingredientes cuyas propiedades e interacciones describimos por completo y con precisión.

La Teoría Central suministra un fundamento seguro, como ley física, para todas las aplicaciones de la física a la química, la biología, la ciencia de materiales, la ingeniería en general, la astrofísica y los principales aspectos de la cosmología. Sus fundamentos se han puesto a prueba con una precisión de sobra adecuada para esas aplicaciones, y en condiciones más extremas.

La Teoría Central, como veremos, encarna ideas bellas. Pero esas ideas son extrañas y ocultas en profundidad. Lleva algún crecimiento imaginativo, y algo de paciente disposición, captar su belleza.

El reto de alcanzar un entendimiento honrado, por oposición al pensamiento crudo o iluso, es eterno. Una de las pocas historias que se atribuyen a Euclides —probablemente apócrifa— es la respuesta que dio a su patrón, el rey Ptolomeo I, cuando le preguntó si había una introducción a la geometría más fácil que la expuesta en *Elementos*. Se supone que Euclides respondió:

Señor, no hay un camino real a la geometría.

Pese a ello, espero haberte mostrado que hay cosas bellas de la geometría que *puedes* vislumbrar, mediante la imagen y la intuición, sin un estudio prolongado.

De modo similar, presentaré aquí unas imágenes y explicaciones que te permitirán vislumbrar hermosos aspectos de la Teoría Central. Y, no por coincidencia, ¡son los aspectos más centrales!

Los experimentos que, históricamente, sirvieron para establecer las ideas de la Teoría Central dieron sentido a pistas sobre el comportamiento de un enorme y desconcertante reparto de partículas inestables, descubiertas sobre todo en experimentos de aceleradores de partículas de alta energía. En las exposiciones convencionales de la Teoría Central, surgen muchas complicaciones de su apariencia superficial, materializada en un mundo de «partículas elementales» que luego resultan no ser tan elementales. En medio de esa complejidad, las ideas subyacentes quedan oscurecidas. Por fortuna, las ideas centrales de la Teoría Central son más simples que las evidencias que las establecen. Es importante que las evidencias existan, por supuesto. Pero lo más servicial para nuestra reflexión es centrarnos sobre todo en las ideas, más que en su demostración.

Tras estas generalidades, vamos a describir el contenido de este capítulo. Para facilitar la digestión, lo serviremos en cuatro platos.

En la primera parte vamos a explorar, mediante imágenes y metáforas, lo que yo considero el alma de la Teoría Central. Los conceptos fundamentales de *espacio de propiedad* y *simetría local* son muy adecuados para ese tratamiento. O lo que es lo mismo, son conceptos bellos.

Con eso, al nivel de los Ideales platónicos, el trabajo está prácticamente acabado. Las partes restantes aportan el tipo de conexiones que demanda nuestra Pregunta, es decir:

$$\text{Ideal} \leftrightarrow \text{Real}$$

En la segunda parte discutiremos la fuerza fuerte con bastante profundidad, y en la tercera parte la fuerza débil, de forma más selectiva. La historia completa de la fuerza débil, en particular, contiene muchas complicaciones que apenas tocaremos. (Según el entendimiento actual, francamente, ¡no parecen muy hermosas!) En la cuarta parte presentaré muy brevemente el reparto completo de personajes, y luego lo resumiré todo. En ese punto, tendremos una idea clara tanto de la belleza de la Teoría Central como de las deficiencias estéticas que le quedan, preparando la escena para las aventuras de nuestro capítulo final.

Parte 1: el alma de la Teoría Central

Espacios de propiedad

Los humanos somos, como ya hemos reflexionado, unas criaturas intensamente visuales. Una gran proporción de nuestro cerebro está dedicada al procesamiento visual, y somos muy buenos en eso. Somos unos geómetras con talento natural, adaptados para organizar nuestra percepción visual en términos de objetos que se mueven por el espacio.

De manera que, aunque es posible tratar las propiedades de las partículas y las fuerzas en términos puramente numéricos y algebraicos, sin intentar poner los conceptos en términos geométricos, resulta humanamente atractivo traer imaginería espacial y geometría. Hacerlo nos permite reconfigurar los módulos más poderosos de nuestro cerebro para nuevos propósitos, y jugar sin dificultad con los conceptos. En otras palabras, hace aflorar la belleza de esos conceptos.

Las ecuaciones esenciales de la Teoría Central, y las extensiones que consideraremos después, están bien adaptadas a la imaginería espacial. Tenemos que estar preparados, sin embargo, para ser flexibles, y para hacer unos cuantos ajustes a nuestras nociones cotidianas de la geometría espacial. La nueva idea clave es la de *espacio de propiedad*.

El personaje de Molière, monsieur Jourdain, se mostraba encantado de saber, por su profesor de filosofía, que había estado hablando en prosa:

M. Jourdain. Entonces, cuando digo: «Nicole, tráeme las zapatillas y ve a buscar mi gorro de dormir», ¿eso es prosa?

Profesor de filosofía. Sin la menor duda.

M. Jourdain. Bueno, qué te parece esto. ¡He estado hablando en prosa cuarenta años sin saberlo!

Del mismo modo, tú has estado percibiendo dimensiones extra, campos y espacios de propiedad* todos los días, durante años, y muy probablemente sin saberlo. Cada vez que miras una foto en color, tu cerebro está digiriendo un espacio de propiedad (color) tridimensional superpuesto al espacio ordinario.

Cuando ves una película o un programa de televisión en color, o interactúas con una pantalla de ordenador, estás procesando un espacio de propiedad tridimensional definido sobre el espacio-tiempo.

Expliquemos esa declaración audaz, aunque manifiestamente válida.

Para concretar, consideremos el ejemplo de una pantalla de ordenador. ¿Cómo podemos representar la información que presenta? O, en términos prácticos: si estamos programando un ordenador, ¿cómo le decimos al ordenador lo que debe hacer para dar vida a la pantalla?

Podemos representar los diferentes elementos de la imagen, o píxeles, por sus posiciones horizontales y verticales. Esto requiere dos números x , y . Para cada píxel, si queremos mantener una percepción general del color, debemos especificar —¡como nos enseñó Maxwell!— las intensidades de tres fuentes de color. Esas fuentes suelen elegirse como tres formas de rojo, verde y azul, y sus intensidades se denotan R , V , A . Así que, para decirle con precisión al ordenador lo que necesita representar, a un tiempo dado t , en cada posición de la pantalla, tenemos que especificar seis números t , x , y , R , V , A . Dos de esos números (x , y) dan la posición espacial, como hemos dicho, y los tres números t , x , y dan la posición en el espacio-tiempo. Los tres números restantes describen el color. Considerados simplemente como números, ¡se parecen mucho a los tres primeros! Y por tanto es lógico, y se muestra como inmensamente fructífero, declarar que esos tres números definen posiciones en un nuevo espacio, un *espacio de propiedad*, que se superpone al espacio-tiempo.

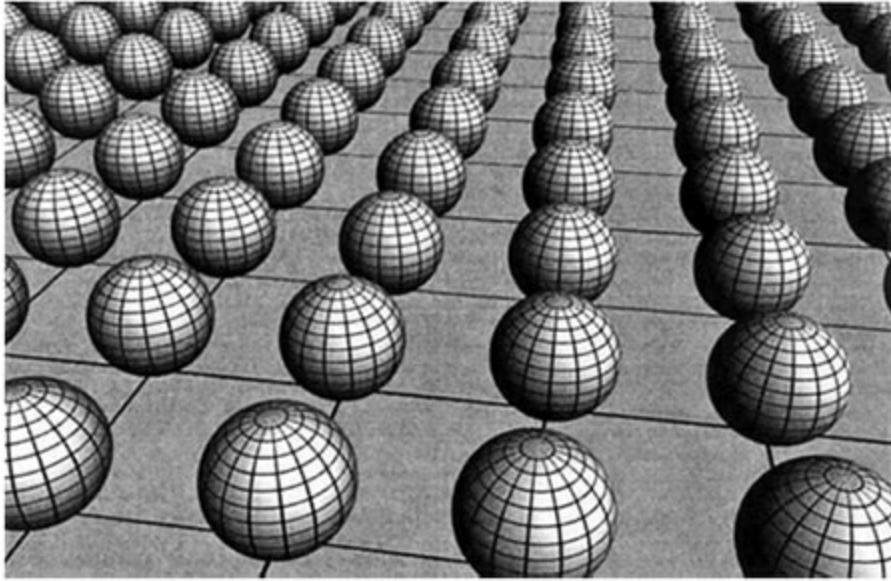


FIGURA 32. El concepto de dimensiones extra, representado de modo abstracto: en cada punto del espacio ordinario, hay un espacio adicional que encarna «dimensiones extra». Las dimensiones extra son aquí esferitas.

He aquí dos imágenes —una abstracta y otra tangible— que ilustran el concepto de espacio de propiedad (Figura 32 y Láminas II y JJ). En la primera figura representamos geométricamente una propiedad simple del espacio. Adosado a cada punto del espacio ordinario, flota un espacio adicional. Aquí, el espacio adicional abstracto tiene la forma de una esfera. Nuestro espacio de propiedad de color, descrito más arriba, se representa de un modo más natural como un cubo tridimensional, porque cada una de las posibles intensidades oscila, como una fracción de su valor máximo, entre cero y uno. Esto se muestra en la Lámina II. La Lámina JJ representa el espacio que muestreas cuando miras a una pantalla de ordenador (como acabamos de exponer). Como puedes ver, ¡es una materialización concreta y colorida de la Figura 32!

El color asignado a los píxeles se describe por una posición en un espacio de propiedad tridimensional R, V, A , como describimos antes. En la Lámina KK, jugamos con el espacio de propiedad del color y mostramos parte de su flexibilidad y fertilidad. Abajo se muestra una imagen fotográfica normal. Podemos cortar rebanadas de la misma materia prima proyectándola en subespacios de menos dimensiones del espacio de propiedad. Arriba a la izquierda, proyectamos solo en verde (V), reduciendo así el espacio de

propiedad del color a una dimensión. Arriba a la derecha, proyectamos en verde y rojo, omitiendo el azul, y reduciendo así el espacio de propiedad del color a dos dimensiones.

Hay paralelos asombrosos entre estos espacios de propiedad de diferente dimensionalidad y la infraestructura de nuestra Teoría Central. A ese hecho, que explicaré ahora, es al que aluden las etiquetas de la Lámina KK, «electromagnética», «débil» y «fuerte».

La electrodinámica, en el lenguaje de la teoría cuántica, describe cómo los fotones responden a la distribución de carga eléctrica en el espacio y el tiempo. En otras palabras, los fotones perciben —y reaccionan a— las posiciones y velocidades de las partículas cargadas eléctricamente. Así que los fotones «ven», en cada punto del espaciotiempo, un solo número que indica la cantidad de carga eléctrica en ese punto. Es decir, que los fotones ven en un espacio de propiedad unidimensional.

Como trataremos en detalle dentro de poco, la fuerza fuerte es una especie de electrodinámica dopada con anabolizantes. Las ecuaciones de nuestra teoría de la fuerza fuerte, la cromodinámica cuántica (QCD, por *quantum chromodynamics*), son similares a las ecuaciones de Maxwell de la electrodinámica, pero están basadas en un espacio de propiedad (fuerte) tridimensional. Y en QCD no tenemos solo un fotón, sino ocho partículas parecidas a fotones, los gluones, que responden de diversas formas a lo que ocurre en el espacio de propiedad fuerte. Por una espeluznante coincidencia, las *propiedades* a las que responden los gluones fueron bautizadas también como *colores*,⁸ aunque por supuesto no tienen nada que ver directamente con el color en el sentido habitual. Los colores fuertes, en realidad, son más bien análogos a la carga eléctrica. Pero nos estamos adelantando...

Yin y yang, cuatro veces

John Wheeler tenía el don de inventar frases llamativas para describir las ideas físicas. «Agujero negro» es un memorable wheelerismo, como lo es «masa sin masa», del que haremos uso más adelante. Wheeler tenía una forma

poética de describir la esencia de la teoría gravitatoria de Einstein, la relatividad general, que podemos desarrollar así:

La materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse.
El espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse.

Para nuestros propósitos posteriores, será importante explicar —¡y después corregir!— el pensamiento de que el espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse. Primero daremos alguna explicación sobre el «dice», y luego ajustaremos un poco lo de «materia» y lo de «espacio-tiempo».

¿Cómo instruye el espacio-tiempo a la materia para moverse, exactamente? Su instrucción, según la relatividad general, es muy simple: *¡Sigue tan recto como puedas!*

En una superficie curva, hay una noción de trayectoria lo más recta posible, o *geodésica*. Las geodésicas, como las líneas rectas de la geometría euclídea ordinaria, tienen la propiedad de que no hay ninguna trayectoria más corta que conecte dos de sus puntos. Los mismos conceptos matemáticos (curvatura y geodésicas) se aplican no solo a las superficies —que pueden considerarse, después de todo, espacios bidimensionales por derecho propio—, sino al espacio en conjunto, e incluso al espacio-tiempo. Y el genio de Einstein, en la relatividad general, fue moldear la gravedad de la forma que Wheeler poetizó: «caer» u «orbitar» no es más que la materia haciendo lo que puede para moverse recta (es decir, viajando por geodésicas) en un espacio-tiempo curvo.

La descripción de Wheeler es maravillosamente sugerente, pero está simplificada en exceso.

Después de todo, ¡la gravedad no es la única fuerza que anda por ahí! Para hacer precisa la poesía, y hacer aflorar su potencial completo, tenemos que hacerle un par de mejoras.

El mantra de la geometría

En el poema de Wheeler, «la materia» es un pelín *demasiado* poética. La materia puede tener muchas propiedades (carga eléctrica, por ejemplo), pero la curvatura del espacio-tiempo solo responde a la densidad total de energía y momento. Así que más bien deberíamos decir:

La energía-momento le dice al espacio-tiempo cómo curvarse.

Por otro lado, la gravedad no es la única fuerza que influye en cómo se mueve la materia. Esas fuerzas provocan desviaciones del trayecto más corto posible (la geodésica). Y entonces lo que tenemos que decir es:

El espacio-tiempo le dice a la energía-momento qué significa recto (en el espacio-tiempo).

Así que, reuniendo lo anterior:

La energía-momento le dice al espacio-tiempo cómo curvarse.

El espacio-tiempo le dice a la energía-momento qué significa recto (en el espacio-tiempo).

Y ahora veamos la Teoría Central del electromagnetismo:

La carga eléctrica le dice al espacio de propiedad electromagnético cómo curvarse.

El espacio de propiedad electromagnético le dice a la carga eléctrica qué significa recto (en el espacio de propiedad electromagnético).

Y de la fuerza débil:

La carga débil le dice al espacio de propiedad débil cómo curvarse.

El espacio de propiedad débil le dice a la carga débil lo que significa recto (en el espacio de propiedad débil).

Y de la fuerza fuerte:

La carga fuerte le dice al espacio de propiedad fuerte cómo curvarse.

El espacio de propiedad fuerte le dice a la carga fuerte lo que significa recto (en el espacio de propiedad fuerte).

En la Teoría Central completa, que incluye las cuatro fuerzas, la materia tiene cuatro clases de propiedades: energía-momento, carga eléctrica, carga débil y carga fuerte. Las partículas de materia se propagan por un espacio más complejo del que permitía Wheeler, que incluye los espacios de propiedad electromagnético, débil y fuerte superpuestos al espacio-tiempo ordinario. Pero la materia sigue, de acuerdo con la Teoría Central, el mismo principio yin, adaptado a este entorno más complejo:

¡Sigue tan recto como puedas!

Yin-yang

El milagro de la Teoría Central es que las cuatro fuerzas suenan como variaciones reconocibles del mismo tema. No creo que sea por completo fantasioso, y desde luego es bonito, ver en la dualidad

materia || espacio-tiempo

... un ejemplo de la complementariedad china

yin || yang

Yin es el principio pasivo, asociado con la tierra y el agua (la materia). El yin «hace lo que es natural» (*Oklahoma!*) o «sigue la fuerza» (*Star Wars*), siguiendo el camino de menor resistencia: la geodésica.

Yang es el principio vivificante, asociado con el cielo (espaciotiempo), la luz (el fluido electromagnético, ¡véase más abajo!) u otras fuerzas motrices.

El alma de la Teoría Central, desde esta perspectiva, es yin-yang cuatro veces.

Este libro incluye un rasgo distintivo muy especial, una imagen de un Taiji (yin-yang) original, aportada por un maestro contemporáneo de las artes chinas tradicionales, He Shuifa. Aparece como frontispicio del libro, y también en la Lámina A.

Taiji se ha traducido de varias formas, de las que «Polaridad Suprema» tal vez sea la más evocadora. Su símbolo contiene dos elementos que contrastan, el yin (oscuro) y el yang (claro), y se le suele llamar figura yinyang. Hay que resaltar que estos dos elementos forman un todo inseparable, y que cada uno contiene al otro y es contenido por el otro.

Nuestras descripciones más profundas de la realidad física, en la teoría cuántica y en las cuatro Teorías Centrales de las fuerzas (gravitación, electromagnetismo, fuerzas fuerte y débil), introducen conceptos que traen a la mente el yin y yang. Niels Bohr, uno de los influyentes fundadores de la teoría cuántica, veía fuertes paralelos entre su concepto de la complementariedad y la dualidad unificada del yinyang. Bohr diseñó un escudo de armas para sí mismo, donde el yinyang ocupa el centro (véase la Figura 42). Nuestras Teorías Centrales se basan en la interacción entre fluidos similares a la luz que llenan el espacio (yang) y sustancias (yin) a las que dirigen a la vez que responden.

El mantra del flujo

Un mapa del mundo no tiene por qué ser un globo. Podemos representar la geometría de una superficie curva, como la superficie de la Tierra, proyectando información sobre las distancias en una cuadrícula plana.

De manera más general, podemos representar la geometría de un espacio curvo, o del espacio-tiempo curvo, mapeando la información sobre las distancias sobre una cuadrícula plana. En cada punto de la cuadrícula, y en cada dirección que emana de ese punto, tendremos un número que nos dice cuán lejos llegarás si procedes a dar un paso en esa dirección. De esta forma, representamos la geometría de nuestro espacio asignando unos cuantos números a cada punto. Esta construcción define lo que se llama un *campo métrico* (o simplemente una *métrica*) en matemáticas.

En física, cuando consideramos la geometría del espacio-tiempo, es adecuado, en el espíritu de Faraday y Maxwell, hablar de un *fluido métrico*. Este es el concepto que, en la relatividad general de Einstein, reemplaza a las fuerzas gravitatorias de la teoría de Newton.

Tal y como indica el término «fluido», el fluido métrico, de modo muy parecido al fluido electromagnético de la teoría de Maxwell, adquiere vida propia. Por ejemplo, mantiene perturbaciones autosuficientes: las *ondas gravitatorias*, análogas a las ondas electromagnéticas con las que Maxwell explicó la luz y Hertz lanzó la radio.

Usando esos fluidos que codifican la geometría, obtenemos los mantras del flujo:

La energía-momento le dice al fluido métrico cómo fluir.
El fluido métrico le dice a la energía-momento cómo fluir.
La carga eléctrica le dice al fluido electromagnético cómo fluir.
El fluido electromagnético le dice a la carga eléctrica cómo fluir.
La carga débil le dice al fluido débil cómo fluir.
El fluido débil le dice a la carga débil cómo fluir.
La carga fuerte le dice al fluido fuerte cómo fluir.
El fluido fuerte le dice a la carga fuerte cómo fluir.

En cierto sentido, estos mantras del flujo son meras reformulaciones de los mantras de la geometría, pero nos proporcionan nuevas perspectivas atractivas:

- En esta formulación, el yin (materia) y el yang (fuerza) aparecen en pie de igualdad: cada uno instruye al otro. Esto apunta a que su dualidad aparente podría resolverse en una unidad más profunda. Veremos en el siguiente capítulo como esa idea extravagante se puede materializar, a través de la *supersimetría*.
- Este mantra del flujo, en el caso del electromagnetismo, está mucho más cerca en espíritu de las ideas originales de Faraday y Maxwell que nuestro anterior mantra «geométrico». El mantra geométrico, en cambio, está más cerca en espíritu de las ideas que condujeron a Einstein a su teoría de la gravedad, la relatividad general. Esta armonía de ideas es un gran obsequio. Es hermoso en sí mismo. Y, prefigurando de nuevo el próximo capítulo, insinúa una unidad más profunda entre las fuerzas.
- Y lo más esencial: una vez que la geometría —ya sea del espacio-tiempo o de los espacios de propiedad— está codificada como un fluido matemático, podemos imaginar fácilmente que el fluido fluye y adquiere

vida propia.

Avatares de la simetría local

Ahora hemos explicado, y refinado, la segunda línea del poema de Wheeler. En otras palabras, hemos discutido cómo las fuerzas dirigen a la materia, o cómo el yang dirige al yin. Para cerrar este círculo de ideas, tenemos que discutir los principios que gobierna la dirección contraria de la influencia.

En concreto, nuestro desafío es este: ¿cómo conseguimos las ecuaciones para las curvaturas del espacio-tiempo y de los espacios de propiedad? El principio rector central, la *simetría local*, es tan bello como profundo. Ya presentamos la idea antes, en «Simetría I», y ahora la vamos a repasar brevemente y a desarrollarla después.

Recuerda que, poco después de formular la teoría de la relatividad especial, en 1905, Einstein percibió que no se podía reconciliar con la teoría gravitatoria de Newton. Luchó con este desafío durante un decenio entero, en lo que llamó «años de búsqueda ansiosa en la oscuridad».

Einstein alcanzó la iluminación al descubrir las ecuaciones adecuadas para la curvatura del espacio-tiempo, completando así su nueva teoría de la gravedad, la relatividad general. Las descubrió mediante la exigencia de que encarnaran lo que llamó *covarianza general*, que es la versión en el espacio-tiempo de la simetría local.

Para entender la simetría local de la Teoría Central más a fondo, empecemos recordando la idea básica de simetría de las ecuaciones, que presentamos antes, al tratar las ecuaciones de Maxwell. Decimos que una ecuación (o un sistema de ecuaciones) tiene simetría si hay cambios que se pueden hacer en las cantidades que aparecen en la ecuación sin cambiar su contenido. Exigir simetría nos ofrece una forma de encontrar ecuaciones que son especiales, porque la mayoría de las ecuaciones, elegidas al azar, *no* son simétricas. Esto es también, en un sentido subjetivo, una forma de hallar ecuaciones especialmente *bellas*.

(Hay gente que encuentra discordante este uso de la palabra «simetría» para describir una propiedad de las ecuaciones, porque parece muy distante del significado cotidiano de esa palabra. Si tienes esa dificultad, tal vez prefieras tener en mente «invariancia» como suplemento o sustituto. Tras pensarlo bien, he decidido quedarme con «simetría» porque está embebida hasta el fondo en la literatura, y no sin cierta resonancia. Lo llames como lo llames, la gran idea sigue siendo Cambio sin Cambio.)

La simetría convencional —es decir, no local, o (como diremos aquí) *rígida*— de las leyes físicas implica típicamente cambiar el universo como un todo, de forma rígida. Así, por ejemplo, postulamos que el contenido de las leyes de la física no cambiará si cambiamos la posición de todo lo que aparece en ellas en la misma cantidad; digamos, si movemos las cosas un metro, en la misma dirección, en todas partes (y para todos los tiempos). Si lo piensas bien, te darás cuenta de que es una forma precisa (aunque quizá peculiar) de decir que las leyes no reconocen una posición especial en el espacio, o de forma más simple, que las leyes toman la misma forma en todas partes. Pero si movemos las posiciones de algunas cosas más que la de otras, cambiaremos sus posiciones relativas. Y eso, decididamente, cambia el contenido de las leyes de fuerza —como la ley de gravitación de Newton, y la ley similar de Coulomb para las fuerzas eléctricas— que dependen de las distancias relativas.

La simetría local recoge transformaciones que varían en el espacio y el tiempo. Es precisamente porque podemos elegir las transformaciones *localmente*, sin preocuparnos por el universo en su conjunto, por lo que usamos la palabra «local» al describir esta posibilidad. Consideremos de nuevo el tipo de transformaciones que acabamos de discutir en el párrafo anterior: simplemente mover las cosas de sitio. A primera vista, como hemos dicho, eso solo puede ser una simetría de las leyes de la física si imaginamos que movemos todo en la misma cantidad y en la misma dirección. Si cambiamos las distancias relativas, ¡cambiamos las leyes de fuerza! Sin embargo —y esto es el yoga de la simetría local—, si tenemos un fluido métrico, y *hacemos los ajustes adecuados en el fluido métrico al mismo tiempo que hacemos los movimientos*, entonces podemos mantener intactas las distancias relativas, ¡y las leyes de fuerza!

El arte anamórfico, como se muestra en la Lámina EE, aporta una maravillosa metáfora —o un modelo, diría yo— de la simetría local. Como hemos visto antes, la perspectiva/geometría proyectiva es el arte/ciencia del Cambio sin Cambio que te encuentras cuando miras el mismo objeto (no cambio) desde distintos puntos de vista (cambio). De esta manera, percibimos que muchas imágenes diferentes pueden representar el mismo objeto. Pero podemos obtener imágenes más complejas, todavía usando el mismo objeto subyacente, si introducimos la presencia de un medio distorsionante: espejos curvados, digamos, o lentes y prismas... o en general cualquier estructura que varía de un sitio a otro y tuerza la luz. *Introduciendo la presencia de medios, conseguimos un abanico mucho más amplio de imágenes que representan el mismo objeto.* La simetría local es la misma idea, pero aplicada a ecuaciones en vez de a objetos.

Al solicitar simetría local, hacemos fuertes exigencias a nuestras ecuaciones. Estamos pidiendo que unas versiones de esas ecuaciones que parecen muy distorsionadas tengan las mismas consecuencias que las originales. Para hacerlo posible, tenemos que asumir que el espaciotiempo (incluido cualquier espacio de propiedad al que sirva como soporte) está lleno de los fluidos apropiados. Según cómo quieras leer la situación, podrías decir que los fluidos son responsables de las distorsiones aparentes, o podrías decir que las compensan. (Son *responsables* de las distorsiones aparentes si lees del objeto a la percepción; *compensan* las distorsiones aparentes si lees de la percepción al objeto.) En cualquier caso, necesitamos esos fluidos que llenan el espacio-tiempo si queremos tener simetría local. Y para ser unos compensadores eficaces y versátiles, los fluidos tienen que tener unas propiedades muy particulares. En otras palabras, deben obedecer unas ecuaciones muy especiales.

De hecho, ¡fue justo demandando una versión local de la relatividad especial como Einstein consiguió las ecuaciones del campo métrico que forman el corazón de la relatividad general! Y fue demandando versiones locales de la rotación en espacios de propiedad como C. N. Yang y Robert Mills hallaron las ecuaciones que llevan su nombre y gobiernan los fluidos

débil y fuerte. Yang y Mills desarrollaron el trabajo de Hermann Weyl, que mostró que las ecuaciones *de Maxwell* para el fluido electromagnético podían derivarse de esa forma.

Cuando pasamos de los fluidos a sus partículas subatómicas asociadas, o cuantos, percibimos que la existencia de gravitones, fotones, bosones débiles y gluones de color —los cuantos de los fluidos métrico, electromagnético, débil y fuerte, respectivamente— y sus propiedades son *consecuencias inevitables y únicas de las diversas simetrías locales*. En la jerga de la literatura física, esas simetrías locales son:

- La covarianza general, para la versión local de la relatividad especial
- La simetría de gauge $U(1)$, para la versión local de la rotación en el espacio de propiedad de la carga eléctrica
- La simetría de gauge $SU(2)$, para la versión local de la rotación en el espacio de propiedad de la carga débil
- La simetría de gauge $SU(3)$, para la versión local de la rotación en el espacio de propiedad de la carga fuerte

El origen histórico del término «simetría de gauge» es muy interesante,⁹ y se trata en las notas finales.

Podemos resumir nuestra discusión de forma memorable, y con justicia, como sigue:

Los gravitones son los avatares de la covarianza general.

Los fotones son los avatares de la simetría de gauge 1.0.

Los bosones débiles son los avatares de la simetría gauge 2.0.

Los gluones de color son los avatares de la simetría gauge 3.0.

Celebremos este extraordinario cumplimiento de

Ideal ↔ Real

con una imagen digna de él (Lámina LL). Cuando se fotografía un objeto que contiene detalles simétricos con una lente de ojo de pez (o gran angular), la simetría de los diferentes detalles queda representada de diferentes formas, dependiendo de su posición. Esas imágenes pueden representar el espíritu de la simetría local en una forma visual adecuada y dotada de una extraña belleza.

Para acabar, cambiemos el foco, con la Figura 33, de los resultados de las teorías con simetría local al proceso de su creación. Se trata de un proceso en tres pasos. Tenemos que elegir los objetos que queremos describir (las sustancias), las maneras en que les permitiremos aparecer (las transformaciones) y los medios que las sostendrán (los fluidos). Este dibujo, que muestra la factura del arte anamórfico, es una puesta al día de las Láminas K y L. Nuestro Artesano moderno es un artesano riguroso, pero ahora sabemos que sus pensamientos son más imaginativos, sus herramientas más variadas —y su actitud más juguetona— que las del Artesano que concibió Blake.

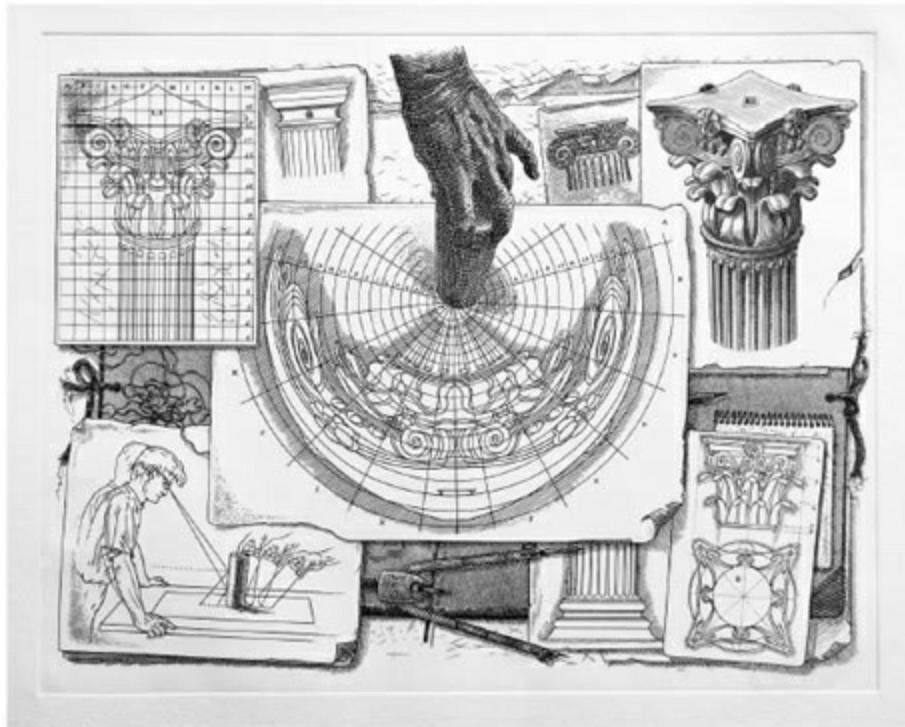


FIGURA 33. El proceso de creación del arte anamórfico.

Qué desde dónde

Cuando una partícula se mueve en un espacio de propiedad, diríamos en el lenguaje ordinario que se ha convertido en un tipo de partícula distinto. Por ejemplo, un quark «rojo» —es decir, un quark con una unidad de carga de color rojo— puede convertirse en un quark «azul». Pero ahora tenemos un modo distinto de ver la situación, que penetra más hondo. Desde esta nueva perspectiva, vemos que esas dos partículas —el quark rojo y el quark azul— son en realidad ¡la misma entidad, que ocupa diferentes posiciones! *Qué codifica dónde.*

Como la carga de color es a lo que responden específicamente los gluones de color, los gluones de color deciden lo que tienen que hacer «mirando» dónde están las partículas —o más en general, qué aspecto tiene la distribución de funciones de onda, o de campos— en el espacio de propiedad de color. Para esos gluones, lo importante es la posición y la posición: la posición en el espacio de propiedad, y también la posición en el espacio-tiempo. Y al revés, cuando registramos el comportamiento de los gluones de color, estamos recibiendo mensajes del espacio de carga de color. Los espacios de propiedad, introducidos inicialmente como una ayuda para la imaginación, evolucionan así hasta elementos tangibles de la realidad.

Parte 2: la fuerza fuerte, en concreto

Descubriendo el núcleo atómico

El descubrimiento clave que condujo a los modelos atómicos modernos y exitosos fue obra de Hans Geiger y Ernest Madsen en 1911. Trabajando en el laboratorio de Rutherford y siguiendo su propuesta, Geiger y Madsen estudiaron la desviación de las partículas alfa, emitidas durante la desintegración radiactiva del radio, por una fina lámina de oro. Vieron algunas desviaciones muy grandes. Rutherford dijo sobre este episodio:

Fue el suceso más increíble que me ha pasado en toda mi vida. Era casi tan increíble como si dispararas un obús de quince pulgadas a un trozo de papel higiénico y el obús rebotara y te diera a ti. Al pensarlo, me di cuenta de que esa dispersión hacia atrás debía resultar de una sola colisión, y al hacer los cálculos vi que era imposible obtener algo de ese orden de magnitud a menos que tuvieras un sistema en el que casi toda la masa del átomo estuviera concentrada en un núcleo diminuto. Fue entonces cuando tuve la idea de un átomo con un centro masivo diminuto, que llevaba una carga...

Rutherford propuso un modelo definido y extraordinariamente simple que explicaba las observaciones. Propuso que dentro de cada átomo hay un núcleo minúsculo que contiene toda su carga positiva y casi toda su masa. Eso explicaría la infrecuente pero poderosa dispersión hacia atrás: el núcleo no quiere moverse (porque es masivo) y es capaz de empujar hacia atrás (porque tiene la carga muy concentrada). Rutherford puso a prueba este modelo, y lo validó, explicando *cuantitativamente* las desviaciones de ángulo grande. El resto del átomo, según Rutherford, consiste en electrones, mucho más ligeros y cargados negativamente, que están dispersos de algún modo por un volumen mucho mayor.

Este fue un resultado histórico. Mostró que la tarea de entender la estructura atómica de la materia podía dividirse oportunamente en dos tareas. Una tarea —lo que ahora llamamos física atómica— es partir de un núcleo pesado y con carga positiva, y determinar después cómo se unen a él los electrones. Ya hemos tratado antes este dominio de la belleza cuántica.

La segunda tarea —lo que ahora llamamos física nuclear— es entender de qué están hechos esos corazones interiores de los átomos, y las leyes que los gobiernan.

En seguida quedó claro que las fuerzas eléctricas solas no podían explicar la física nuclear. De hecho, un modelo puramente eléctrico no puede bregar con la carga positiva concentrada de los núcleos atómicos. Si no viene compensada por otra fuerza distinta y más poderosa, la repulsión eléctrica haría estallar el núcleo. ¿Qué tal la gravedad? Actuando sobre esas masas tan escuetas, es por completo despreciable. Unas fuerzas nuevas, desconocidas para la física clásica, tenían que estar implicadas.

La física nuclear plantea dos desafíos, uno existencial y otro dinámico. El desafío existencial es identificar los ingredientes del núcleo, y el dinámico es entender las fuerzas que esos ingredientes ejercen entre sí. El censo de ingredientes se estableció en pocos años, y de manera bastante simple. Un ingrediente era más o menos obvio. El núcleo de hidrógeno es estable y (aparentemente) indivisible, y lleva una unidad (positiva) de carga eléctrica. Es el más ligero de todos los núcleos, y otros núcleos ligeros tienen masas que se aproximan a múltiplos enteros de su masa. Así que el *protón* —llamado así por Rutherford— es un ingrediente.

Un segundo ingrediente fue descubierto por James Chadwick en 1932. El neutrón es una partícula eléctricamente neutra y solo ligeramente más pesada que el protón. Su descubrimiento condujo a una imagen simple pero muy útil de los núcleos atómicos: que los núcleos son colecciones de protones y neutrones, enlazados entre sí.¹⁰ Con esa imagen, muchos hechos observados encajaron en su sitio. Por ejemplo, los núcleos de los diferentes elementos químicos difieren solo en el número de protones que contienen, porque ese número determina la carga eléctrica del núcleo, que controla su interacción con los electrones circundantes del átomo, que a su vez gobiernan su química. Distintos números de protones nucleares nos dan átomos de distintos elementos químicos. Con los neutrones como un segundo jugador, resolvemos el rompecabezas de los isótopos. Los átomos que presentan núcleos isotópicos tienen las mismas propiedades químicas, pero difieren en masa. Su núcleo contiene el mismo número de protones, pero distinto número de neutrones. Así, el simple modelo protón + neutrón de los núcleos atómicos explica tanto el censo de los elementos químicos como la existencia de isótopos.

El siguiente paso, pensó la gente, sería averiguar qué fuerzas actúan entre protones y neutrones, manteniéndolos juntos. Como hemos mencionado, se requieren nuevas fuerzas, porque el electromagnetismo tiende a hacer estallar el núcleo, y la gravedad es tan débil que cabe despreciarla.

Pero los experimentos para sondar las fuerzas nucleares condujeron pronto por caminos imprevistos. Casi todos los experimentos seguían la estrategia del experimento original de Geiger-Marsden. Para investigar, pongamos, la fuerza entre los protones, se disparan rayos de protones contra otros protones (es decir, contra un objetivo de hidrógeno) y se registra lo que

ocurre. Observando las desviaciones desde distintos ángulos, uno puede tratar de inferir la fuerza responsable. El análisis se enriquece utilizando rayos de protones de distinta energía, y con los protones girando en distintas direcciones. Los experimentos de este tipo revelaron pronto que las fuerzas entre los protones y los neutrones no obedecen a una ecuación simple. Dependían no solo de la distancia, sino también de la velocidad y el espín, de maneras complicadas.

De modo más profundo, los experimentos enseguida socavaron la esperanza —la esperanza de nuestra Pregunta— de que los protones y los neutrones fueran partículas simples, o de que alguna hermosa «fuerza», en el sentido tradicional de esa palabra, pudiera hacer justicia a la realidad de su interacción. Porque, cuando protones de alta energía se estrellan contra otros protones, el resultado típico no es una mera desviación de las dos partículas que chocan. En vez de eso, ¡emerge un torrente de partículas!

De hecho, los experimentos dirigidos a revelar una fuerza simple descubrieron en vez de eso un mundo inesperado de partículas. Los mesones π , ρ , κ , η , ρ , ω , κ^* , φ y los bariones Λ , Σ , Ξ , Δ , Ω , Σ^* , Ξ^* , Ω están entre las más ligeras y accesibles (hay docenas más). Estas partículas son sin excepción altamente inestables, con una vida inferior al microsegundo (y muy inferior en la mayoría de los casos). Su existencia y sus propiedades deben inferirse estudiando los productos de su desintegración, en los detectores de los aceleradores de partículas de alta energía, como los del Laboratorio Nacional de Brookhaven, el Fermilab y el CERN. Estas nuevas partículas se llaman, colectivamente, *hadrones*.

Como la clasificación de las mariposas o la paleontología equina, el censo del zoo hadrónico y las características de sus especímenes —masas, espines, vidas medias, patrones de desintegración— son fascinantes para los *connoisseurs*. Para avanzar en nuestra indagación de la belleza en lo fundamental, sin embargo, debemos pasar a asuntos más amplios. Para uso futuro, voy a resumir brevemente las dos lecciones más importantes que nos ofrece el zoo.

Los hadrones comprenden dos reinos, bariones y mesones. Los protones y los neutrones son el prototipo de barión. Todos los bariones tienen varias propiedades en común. Todos sienten unas poderosas fuerzas de corto alcance

cuento uno está en presencia de otro, o en presencia de mesones, y (para expertos) son todos fermiones. Los mesones también comparten propiedades. Todos sienten poderosas fuerzas de corto alcance cuando uno está en presencia de otro, o en presencia de bariones, y (para expertos) son todos bosones.

Los protones y los neutrones no son ni simples ni fundamentales. Es un paso útil analizar los núcleos atómicos en protones y electrones, pero ni protones ni neutrones son simples ni básicos: sus interacciones son complicadas, y solo son dos miembros de una familia mucho mayor de partículas similares. Para ponerlos en la perspectiva adecuada, y completar el análisis de la materia, se requiere una visión más amplia.

El modelo de quarks

El modelo de quarks fue inventado por Murray Gell-Mann y George Zweig en un brillante despliegue de imaginación y reconocimiento de patrones.

Según el modelo de quarks, los bariones son estados confinados de tres entidades más fundamentales: tres clases o «sabores» de quarks, *up*, *down* y *strange* (*u*, *d*, *s*, literalmente, arriba, abajo y extraño). (Para el propósito que nos ocupa, voy a diferir la consideración de los mucho más pesados e inestables quarks *c*, *b*, *t*.)

¿Cómo pueden solo tres sabores de quarks —*u*, *d*, *s*— generar cientos de bariones diferentes? La clave es que un trío determinado de quarks, pongamos *u*, *u*, *d*, puede existir en muchos estados de movimiento diferentes, de forma análoga a las órbitas cuantizadas de los electrones en los átomos, o a los estados estacionarios de la Figura 26, en «Belleza cuántica I». Estos distintos estados discretos tienen distintas energías, y por tanto —usando $m = E/c^2$ — distintas masas. Así que aparecen, operativamente, ¡como distintas partículas! De esta forma, hallamos que muchas partículas diferentes reflejan la misma estructura material subyacente, capturada en distintos estados de movimiento interno.

De modo similar, el modelo de quarks postula que los mesones son estados confinados de un quark y un antiquark. Un par dado de quark y antiquark, pongamos *u* \bar{d} , en diversos estados de movimiento, genera muchos

mesones distintos.

El modelo de quarks también ofrece una explicación convincente de la complejidad de las fuerzas hadrónicas. Incluso si los quarks individuales muestran interacciones simples, cuando chocan dos estados confinados que contienen tres quarks, o un quark y un antiquark, hay grandes oportunidades para el diálogo cruzado y las anulaciones. De hecho, esa es también la razón de que la química ordinaria, basada en las interacciones entre átomos, emerge en toda su complejidad y exuberancia a partir de unas fuerzas subyacentes que, entre electrones individuales, son extremadamente simples.

El modelo de quarks fue un paso de gigante para organizar el zoo de hadrones. Aporta una imagen de los hadrones análoga, en su poder explicativo, al modelo del átomo de Bohr. Pero el modelo de quarks también sufre las limitaciones del modelo de Bohr. Aunque correcto en espíritu, e históricamente importante, el modelo de quarks está lógicamente incompleto, y es solo semimatemático. También se enfrentaba a un gran problema, como trataremos a continuación.

El modelo de quarks ofrece una exitosa explicación *descriptiva* de muchas características de los protones, neutrones y sus parientes hadrones. Pero postulaba para los quarks unas propiedades muy extrañas. Quizá la más extravagante de ellas sea el confinamiento, como expone de manera cómica la caricatura de la Lámina MM, tomada de un póster que conmemoraba mi premio Nobel. Se supone que los quarks son los bloques de construcción de los protones, pero a pesar de grandes esfuerzos, no se detectó jamás ninguna partícula individual con las propiedades de los quarks (como tener una fracción $2/3$ o $-1/3$ de la carga eléctrica del protón). Así que los quarks en grupos de tres podían formar protones, donde las fuerzas entre ellos parecían modestas. Pero, por alguna razón, jamás pueden escapar: están confinados.

Para explicar este comportamiento, parece que necesitamos alguna fuerza tipo muelle, o banda de goma, entre los quarks que tira más fuerte a medida que el muelle o la banda de goma se estira a lo largo de una distancia creciente. Los muelles y las bandas de goma, por supuesto, son en sí mismos objetos físicos complicados, así que resulta impropio postularlos en una teoría fundamental. Hacerlo plantea la pregunta: ¿de qué está hecho el muelle?

Uno suele esperar que las fuerzas fundamentales se debiliten con la distancia, como hacen las fuerzas gravitatoria y electromagnética, de modo que el confinamiento planteaba un buen rompecabezas. Muchos físicos no lograban tomarse los quarks en serio por esa razón.

Abriéndose paso: la cromodinámica cuántica

Las ecuaciones de Maxwell de la electrodinámica, las de Newton (y luego Einstein) de la gravedad y las de Schrödinger (y luego Dirac) de la física atómica pusieron el listón muy alto en materia de belleza, precisión y exactitud. Ni las complicadas ecuaciones (tablas, en realidad) que resumen las fuerzas nucleares, ni las toscas ideas del modelo de quarks, cumplían esos criterios ni de lejos.

Y, sin embargo, las ecuaciones precisas y exactas para la fuerza nuclear fuerte estaban ahí fuera. Permanecieron desaprovechadas muchos años hasta que fuimos capaces de explotarlas. Son ecuaciones que desarrollan las ecuaciones de Maxwell, y consuman la visión que hemos esbozado en la primera parte de este capítulo.

Casi veinte años pasaron entre la formulación de las ecuaciones por Yang y Mills y la emergencia de la cromodinámica cuántica como su encarnación en la realidad. La historia es un ejemplo deslumbrante de

Ideal → Real

En el dominio de la interacción fuerte, no hay la menor duda de que la respuesta a nuestra Pregunta,

¿Encarna el mundo ideas bellas?

... es simplemente:

Sí.

Maxwell con anabolizantes

La cromodinámica cuántica (QCD, por *quantum chromodynamics*) utiliza ideas y ecuaciones que suponen una grandiosa generalización de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, expandidas para tener incluso más simetría. Me gusta decir que la QCD es como la QED (electrodinámica cuántica) con anabolizantes.

La QED se ocupa de una clase de carga: la carga eléctrica. La carga eléctrica puede venir en unidades positivas, como en los protones, o unidades negativas, como en los electrones, pero en ambos casos la cuantificamos usando un solo número (positivo o negativo). La QCD, en contraste, contiene tres clases de carga. Se llaman, por ninguna razón sólida, colores: digamos rojo, verde y azul, para ser concretos.

La QED presenta una partícula mediadora de fuerza, el fotón, que responde a la carga eléctrica. La QCD, en contraste, contiene *ocho* partículas mediadoras de fuerza, llamadas gluones de color. Dos de ellos, como el fotón, responden a la carga de color (¿Por qué no tres? Véase el siguiente párrafo.) Los otros seis median las *transformaciones* de un color en otro. Así que hay un gluon que transforma una unidad de carga roja en una unidad de carga verde, otro que transforma una unidad de carga verde en una unidad de carga azul, y así sucesivamente.

La *regla de blanqueado* es un hermoso rasgo de la QCD que es físicamente importante, bastante fácil de exponer y muy fácil de demostrar matemáticamente, aunque difícil de justificar de manera intuitiva (al menos yo no he encontrado una buena forma de hacerlo). Según la regla de blanqueado, el efecto neto de tener una unidad de carga roja, una unidad de carga verde y una unidad de carga azul en el mismo sitio es nada: se anulan. (Para expertos: estoy asumiendo que están en una configuración asimétrica.) Esto recuerda vagamente la manera en que los tres colores espectrales rojo, verde y azul pueden sumarse para dar blanco neutro —de ahí lo de «blanqueado»—, aunque desde luego la física es por completo distinta. Precisamente por la regla de blanqueado, da una combinación impotente de cargas, por lo que tenemos solo dos, y no tres, clases de gluones que responden a los colores.

Cada quark lleva una unidad de carga de color. El color de un quark es una propiedad independiente, que debemos especificar además de propiedades como la carga eléctrica o la masa, y que no es menos importante. A diferencia de la carga eléctrica o la masa, sin embargo, *el color de un quark no es un solo número, sino tres. Con más precisión, codifica su posición en un espacio de propiedad tridimensional*. La existencia de estas nuevas clases de carga es el corazón de la QCD. Es un hecho tan central, tan bello y tan importante para los avances posteriores que nos merecemos un repaso de su anclaje en la realidad.

La extraña realidad de los quarks y los gluones

Los quarks se «vieron» por primera vez en experimentos realizados por Jerome Friedman, Henry Kendall y Richard Taylor en el Acelerador Lineal de Stanford, a finales de los años sesenta. En esencia, tomaron instantáneas del interior de los protones. Usando fotones (virtuales) de muy alta energía, pudieron resolver unas distancias y unos tiempos muy pequeños.

¡Esas instantáneas resultaron muy reveladoras! Tres revelaciones, en concreto, destacan en retrospectiva:

Los protones contienen quarks: como las instantáneas se hicieron utilizando fotones, registraron la distribución de carga eléctrica dentro del protón. Mostraron que la carga eléctrica no es difusa, sino que está concentrada en estructuras muy pequeñas, parecidas a puntos. ¡El asombroso descubrimiento de Rutherford y Geiger-Marsden regresa!, pero ahora en el interior del protón, en lugar del interior del átomo. La cantidad de carga en esas estructuras parecidas a puntos, y otras propiedades, coincidían con las predicciones derivadas del modelo de quarks.

Dentro de los protones, los quarks están casi libres: la mayoría de las instantáneas muestran tres quarks, y nada más, y la posición de cada quark es casi independiente de la posición de los otros. Eso indica que, dentro del protón, la fuerza entre los quarks es lágida. Por otro lado, muchos otros experimentos habían indicado que los quarks nunca escapan de los protones como partículas individuales. Así que necesitamos una fuerza que sea

relativamente débil a distancias cortas, pero se vuelva poderosa a largas distancias. Esa paradoja central de la dinámica de la interacción fuerte, que ya hemos mencionado antes, se graba aquí con nitidez.

Un protón es mucho más que tres quarks: unas cuantas instantáneas capturaron trazas de pares quark-antiquark adicionales. Eso no es del todo sorprendente: como hay mucha energía de sobra dentro de los protones, y como los quarks tienen muy poca masa, fabricarlos es tan fácil como $m = E/c^2$, ¡con una m muy pequeña! Y aún más profundo es lo que *no* se vio en las instantáneas. Si sumas toda la energía del movimiento de los quarks, obtienes solo *la mitad* de lo que necesitas para explicar la masa total del protón. Como los fotones son ciegos a las partículas eléctricamente neutras, la interpretación obvia es que hay un importante componente eléctricamente neutro en los protones, además de los quarks eléctricamente cargados. Este problema de la «materia oscura» microcósmica fue la primera indicación de que un protón es mucho más que tres quarks. Como veremos enseguida, los gluones de color son el ingrediente perdido.

Experimentos posteriores a mayor energía revelaron un aspecto diferente, y gráficamente tangible, sobre la realidad de los quarks y los gluones. Para verlo, examina ahora la Lámina NN.

Para describir lo que emerge de las colisiones a ultra alta energía, ya sea de electrones con positrones (como en la Lámina NN) o de protones con protones (como en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN), lo más fácil es empezar fingiendo que hemos producido quarks, antiquarks y gluones —por más que esas partículas no «existan» (están confinadas)— y proceder desde ahí hacia lo que realmente observamos. (Esto quedará claro como el agua en un momento.)

El punto clave es que un quark, un antiquark o un gluon que se mueva muy deprisa se materializa, en el laboratorio, como un *chorro* de hadrones, todos moviéndose casi en la misma dirección. La energía y el momento totales de las partículas de un chorro suman la energía original del quark, antiquark o gluon que las ha generado, porque la energía y el momento se conservan. Así que, si estamos dispuestos a entornar los párpados y «dejarnos llevar por la corriente», o por el chorro —registrando su energía y momento a la vez que olvidamos que están divididos entre muchos hadrones—, alcanzamos a ver las

partículas fundamentales subyacentes. Esto ayuda mucho a interpretar los resultados, porque somos *mucho* mejores prediciendo la producción de quarks, antiquarks y gluones, que obedecen a ecuaciones simples, que prediciendo la de los hadrones, que son complicados.

Si vas a una conferencia sobre física de las altas energías en nuestro tiempo, escucharás a los experimentalistas hablar con rutinaria soltura de la producción de partículas que no existen (quarks, antiquarks o gluones) y de la medición de sus propiedades. Se ha convertido en el lenguaje convencional del campo. Lo que quieren decir, desde luego, es que han observado los chorros correspondientes. De esta manera, el Ideal matemático se vuelve gráficamente Real.

Pegamento de sí mismo

La luz pasa libremente a través de la luz. De no ser así, los mensajes visuales que recibimos del mundo estarían revueltos por la dispersión de los rayos, y serían mucho más complicados de interpretar. En la QED, este hecho básico tiene todo el sentido: los fotones responden a la carga eléctrica, pero ellos mismos son eléctricamente neutros.

La diferencia *cualitativa* más radical entre la QCD y la QED es que, a diferencia de los fotones, *los gluones de color interactúan entre sí*. Consideremos, por ejemplo, el gluon de color que transforma una unidad de carga roja en una unidad de carga azul. Vamos a llamarlo $\bar{R}B$. Cuando ese gluon es absorbido por otra cosa, la carga roja total de la cosa se reduce en una unidad, y su carga azul total asciende una unidad. Como esas cargas se conservan, concluimos que $\bar{R}B$, considerado como partícula, tiene menos una unidad de carga roja, y más una unidad de carga azul. Por tanto, *no* es neutra. Otros gluones que cambian o responden a la carga roja o azul interactuarán con $\bar{R}B$. Y lo mismo para los demás: los ocho gluones de color forman un complejo de partículas mutuamente interactivas.

Si pasamos de esos cuantos a los campos que generan, las interacciones tienen un efecto radical. ¡Las líneas de fuerza de los gluones se atraen entre sí! Los campos, en lugar de extender su influencia por el espacio de manera

regular, se concentran en tubos (observa la Lámina OO, y compárala con la Figura 20).

El carácter autopegajoso de los gluones de color es la clave para confinar a los quarks. Los tubos de flujo gluónico son «gomas elásticas» emergentes, ¡preparadas para la tarea de imponer el confinamiento! A medida que aumentas la separación entre una carga de color y su opuesta, la conexión entre ambas tiene que ser un tubo de flujo más largo cada vez. Cuesta una cantidad finita de energía, por unidad de separación extra, alimentar los nuevos campos. En consecuencia, hay una fuerza de resistencia. Y esa fuerza no se reduce para nada cuando tiras más y más. Eso no puede pasar, puesto que supondría una cantidad de energía infinita liberar por completo la carga de color. De ahí que esté confinada.

La autopegajosidad de los gluones es también una manera atractiva de presentar, y de visualizar, el concepto de libertad asintótica. Como la autopegajosidad enfoca los campos de color lejos de un quark, estos ejercen fuerzas más poderosas de lo que harían en otro caso, como un ejército que concentra su poderío. Y al revés, podemos empezar con fuerzas *más débiles* de lo que imaginábamos, en la fuente, para explicar una fuerza dada lejos de allí. Esta es la esencia de la libertad asintótica: *una fuerza endeble a corta distancia puede suscitar una fuerza poderosa a larga distancia*. Ese es exactamente el tipo de comportamiento que necesitamos, como recordarás, para explicar las instantáneas de los protones de Friedman-Kendall-Taylor.

También podemos interpretar la libertad asintótica en términos de cómo *exploramos* la fuerza. Las sondas de alta energía son sensibles al comportamiento de la fuerza a corta distancia. La cuasilibertad a *corta distancia* se proyecta como debilidad de las interacciones, y simplicidad de comportamiento, a *alta energía*.

La simplicidad emergente de la QCD a alta energía es un espléndido obsequio de la naturaleza a los físicos que persiguen un entendimiento fundamental. Nos da, de hecho, un chaparrón de obsequios.

Obsequios de entendimiento

El universo embrionario es comprensible. Muy al principio de su historia, cerca del Big Bang, el universo era verdaderamente un lugar de alta energía. Gracias a la libertad asintótica, podemos modelar su contenido con confianza.

Podemos leer el mensaje de las colisiones de alta energía. Como la fuerza dominante se hace más simple a alta energía, podemos calcular sus implicaciones con precisión. Eso nos permite interpretar limpiamente el resultado de las colisiones ultraviolentas entre protones, y escudriñarlas en busca de nuevos efectos. Por ejemplo, el Gran Colisionador de Hadrones se convirtió en una herramienta para el descubrimiento del bosón de Higgs, como describiremos más adelante en este capítulo. En el futuro próximo, averiguaremos si algunas teorías prometedoras y ambiciosas para la unificación de las fuerzas describen o no la realidad, como veremos en el capítulo siguiente.

Las distintas fuerzas empiezan a parecer no tan distintas. La impresionante similitud *matemática* entre las ecuaciones de la QCD y la QED se convierte en una similitud *física* entre sus consecuencias cuando consideramos el comportamiento a muy alta energía (o a muy corta distancia). La fuerza fuerte de la QCD se vuelve más simple, a la vez que menos poderosa, en tanto cuanto los quarks se comportan de forma muy parecida a los electrones, y los gluones se comportan casi como fotones. El efecto de los anabolizantes remite, como si dijéramos. Con las similitudes tanto matemáticas como físicas citadas, la posibilidad de una teoría unificada se vislumbra en la distancia. Las matemáticas basadas en la simetría de la QCD nos abren la puerta de la unificación, y la libertad asintótica nos empuja a cruzarla. Mientras desarrollamos esta idea, acogiendo en ella también a la fuerza débil y la gravedad, descubriremos que explica varias «coincidencias» de otro modo misteriosas. Vamos a explorar la unificación de todas las fuerzas, como la frontera actual de nuestra Pregunta, en el próximo capítulo.

¡Gracias, madre naturaleza, por estos obsequios!

Apalancamiento y el temblor del velo

Es muy difícil construir teorías de las partículas y sus interacciones que sean coherentes con los principios de la mecánica cuántica y a la vez con los de la relatividad especial. ¡Es una suerte! Significa que, si creemos en la mecánica cuántica y en la relatividad especial, ganamos un montón de apalancamiento. Las teorías disponibles son rígidas: no pueden cambiarse mucho sin volverse incoherentes. Eso las hace poderosas. Y no hay muchas. Eso nos permite explorarlas.

Dado ese apalancamiento, el tipo adecuado de hecho puede generar unas consecuencias enormes.

Resulta que la libertad asintótica es precisamente un hecho de ese tipo. El descubrimiento experimental de que la fuerza fuerte, actuando entre quarks cercanos, no es tan fuerte después de todo era muy difícil de reconciliar con otras cosas que sabemos. En la mayoría de las teorías que son coherentes con la mecánica cuántica y la relatividad especial, igual repele a igual, de manera que no ocurre la convergencia de las fuerzas. El comportamiento opuesto —que las fuerzas se intensifiquen a cortas distancias— es mucho más común. Así que, cuando David Gross y yo, y de modo independiente David Politzer, descubrimos que *es* posible, eso fue un momento de los que la cábala describe como el «temblor del velo del Templo», cuando se agita el sudario que esconde la palabra divina más allá del alcance de nuestros ojos.

Gross y yo proseguimos, basándonos en unos pocos datos más —siendo el más importante el hecho de que podamos enlazar tres quarks para hacer un barión, donde las cargas de color se anulan (¡la regla del blanqueado!)— para elegir la teoría que ahora llamamos cromodinámica cuántica (QCD, basada en la simetría local y en un espacio de propiedad tridimensional) como la única teoría posible de la fuerza fuerte. Incluso ahora, cuando releo nuestra declaración

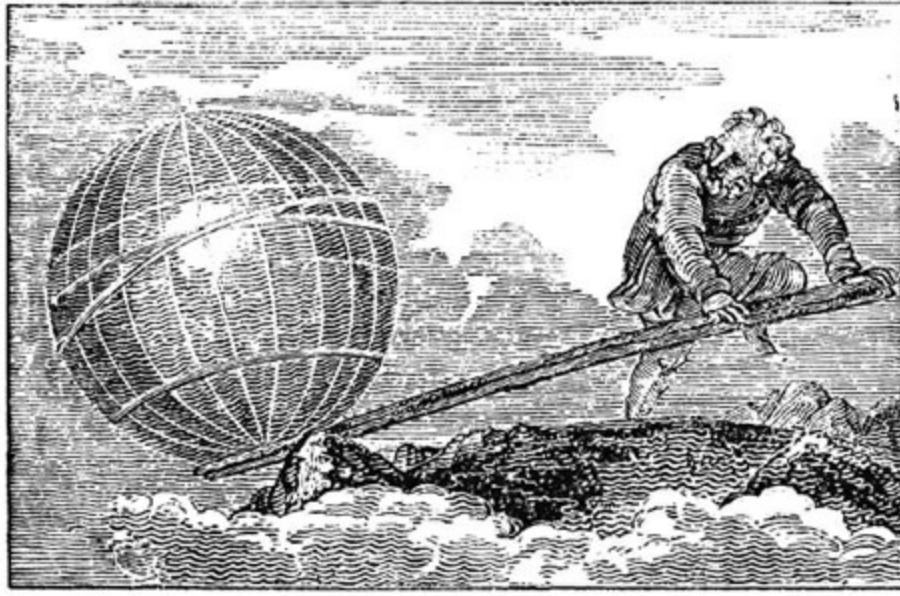


FIGURA 34. «Dadme un sitio para apoyarme y moveré la Tierra» (Arquímedes).

Por último, recordemos que las teorías propuestas parecen haber sido elegidas de forma única por la naturaleza, por lo que parecen indicar los resultados del SLAC y el enfoque del grupo de renormalización a la teoría cuántica de campos.

revivo la mezcla de emoción y ansiedad que sentí en aquel momento.

La QCD en sí misma era, históricamente, el primer obsequio de la libertad asintótica.

Un nuevo tipo de física

Durante las últimas décadas, ha resultado apropiado dividir la física en dos ramas: teoría y experimento. En principio, ambas buscan una mejor comprensión del mundo físico, pero utilizan distintas herramientas.

En años recientes, marcados por el crecimiento explosivo del poder de computación, una tercera rama ha emergido y medrado. Podríamos llamarla «experimentación numérica», o «simulación», o simplemente «resolver ecuaciones difíciles». Tiene elementos tanto de teoría como de experimento, pero difiere con nitidez de ambos. Esta nueva clase de física ha sido especialmente importante y eficaz en la QCD.

La QCD nos da unas ecuaciones perfectamente definidas que podemos enseñar a los ordenadores. Una vez hecho eso, obtenemos acceso a unos ayudantes extremadamente rápidos, incansables, honrados e implacablemente precisos a los que nada gusta más que calcular. Vamos a echar un vistazo rápido a dos puntos culminantes de lo que se ha conseguido con este enfoque. Ambos aportan una conclusión brillante a nuestra discusión de la fuerza fuerte.

En primer lugar, volvamos a la pregunta con la que empezamos: ¿qué son los núcleos atómicos? La esencia de esa pregunta, como hemos visto, yace en el caso más simple: ¿qué es un protón? Sabiendo, como sabemos, las ecuaciones que lo gobiernan, podemos computar un retrato detallado. De esta manera, descubrimos que nuestra sustancia más interior está dotada de belleza (Lámina PP) y sutileza (Lámina QQ).

Para terminar, como un clímax adecuado a nuestra reflexión de la QCD, vamos a documentar el origen de (casi toda) la masa. La Figura 35, de tan modesta apariencia, resume un logro científico monumental, y marca un hito para nuestra Pregunta.

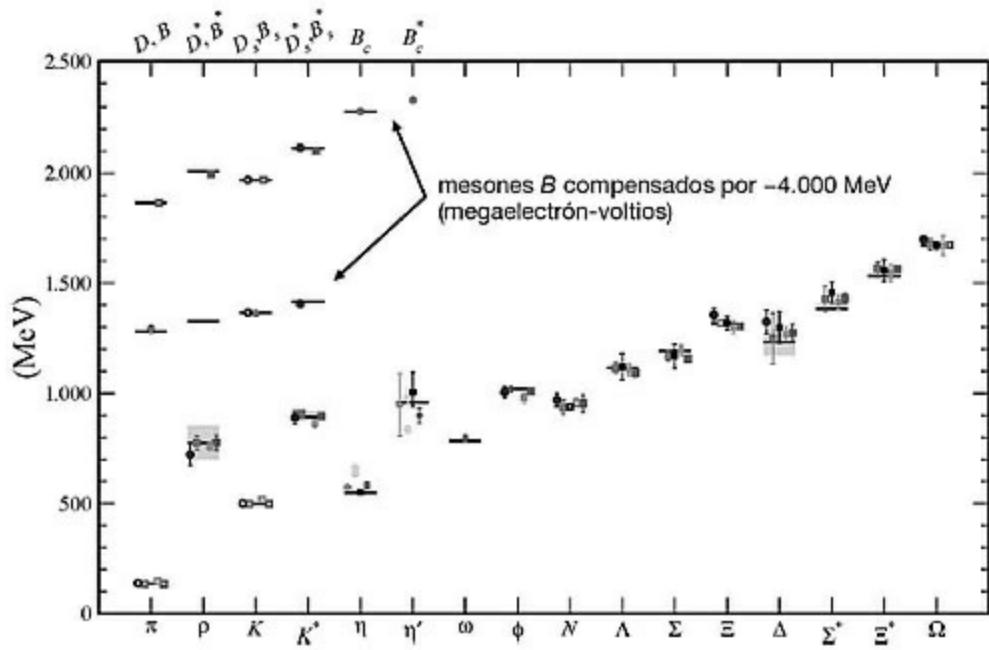


FIGURA 35. Cálculo exitoso de las masas de los hadrones, basado en la QCD: el origen de (casi toda) la masa.

En el eje horizontal, puedes ver los nombres de los mesones y los bariones. De nuevo, y aunque hay mucho que decir sobre estas partículas, y los detalles son fascinantes para los especialistas, para nuestro propósito actual basta con señalar que hay montones de hadrones, y que tienen nombres diferentes (que consisten en distintas letras griegas y latinas, con algún asterisco o prima adicional), y diferentes masas. Encima de cada nombre encuentras un segmento horizontal que indica el valor *medido experimentalmente* de la masa de esa partícula. (Algunas partículas tienen una vida muy corta, y eso dispersa su masa a lo largo de un intervalo notable. En esos casos, por ejemplo ρ , se ve un rectángulo gris alrededor del segmento central.) En la vecindad de cada segmento, una serie de puntos sombreados, atravesados por líneas verticales, indica los valores *calculados* de la masa de la partícula, extraídos directamente de las ecuaciones de la QCD en los trabajos de distintos grupos de investigación. Las líneas verticales reflejan un intervalo de incertidumbre en los cálculos, introducidas por limitaciones del tiempo de computación y otros factores. Los cálculos, tengo que mencionar, son extremadamente exigentes. Emplean unos algoritmos muy inteligentes, y corren en algunos de los sistemas de computación más poderosos del mundo, durante largos períodos.

Todos los resultados para las «secuencias principales» de los mesones π , ρ , K , K^* , η , η' , ω , φ y los bariones N , Λ , Σ , Ξ , Δ , Σ^* , Ξ^* , Ω son *outputs*, dados tres *inputs*: la masa media de los quarks *up* y *down* (o arriba y abajo), la masa del quark *strange* (o extraño) y la unidad de carga de color. Como puedes ver, el acuerdo entre las mediciones y los cálculos es extraordinario.

Quiero subrayar que de estos cálculos sale mucho más de lo que pones en ellos. Las ecuaciones de la QCD están constreñidas de manera muy ceñida por la simetría, y tienen pocas posibilidades de ajuste. Para determinar estos cálculos, solo tenemos que especificar tres *inputs*: la masa media de los quarks *up* y *down*, la masa del quark *strange* y la unidad de carga de color (una medida general de la fuerza de interacción). Así que, si algo no encaja, ¡no hay ningún sitio donde esconderse! Tenemos que encontrar, emergiendo de los cálculos, todos los hadrones que se observan, con las masas que se han observado para ellos. Y más importante aún, no tenemos que encontrar cosas que no se hayan observado: ¡en especial, quarks y gluones aislados!

La teoría emerge triunfal de esta prueba de fuego.

Entre las masas computadas está la masa de una partícula llamada N . No se trata simplemente de una masa más, porque « N » significa *nucleón*, es decir, un protón o un neutrón. (La diferencia entre las masas del protón y el neutrón es demasiado pequeña para hacerse visible a esta escala.) Esa masa, encontramos, depende muy poco de las masas de los quarks, que, en los casos relevantes, son minúsculas en comparación.

Por tanto: *casi toda la masa del nucleón, y por tanto casi toda la masa de la materia ordinaria del universo, surge de la pura energía*, de acuerdo con:

$$m = E/c^2$$

La masa del nucleón resulta de la energía cinética de los quarks confinados, y de la energía de campo de los campos de gluones que los confinan. Obtenemos así Masa sin Masa, emergiendo directamente de las ecuaciones puramente conceptuales, cimentadas en la simetría, de la QCD.

¿Encarna el mundo ideas bellas? Puedes apostar a que sí. Y tú también las encarnas.

Parte 3: la fuerza débil

La cromodinámica cuántica (QCD) gobierna la dinámica básica que construye a los protones, los neutrones y los otros hadrones a partir de quarks y gluones, y la fuerza que mantiene junto el núcleo, la llamada fuerza fuerte. La electrodinámica cuántica (QED) gobierna el mundo de la luz, los átomos y la química, como hemos visto.

Ninguna de estas dos grandes teorías, sin embargo, incorpora procesos por los que los protones se transforman en neutrones, o viceversa. Pero esas transformaciones ocurren. ¿Cómo podemos dar cuenta de ellas? Para explicar estos sucesos, los físicos tuvieron que definir otra fuerza, además de la gravedad, el electromagnetismo y la fuerza fuerte.

Esta nueva incorporación, esta cuarta fuerza, se llama fuerza débil. La fuerza débil completa nuestra imagen presente de la física: la Teoría Central.

La vida en la Tierra está alimentada por una fracción minúscula de la energía liberada por el Sol, capturada como luz solar. El Sol genera energía quemando protones para dar neutrones, lo que libera energía. La fuerza débil, en este sentido muy concreto, hace posible la vida.

Principios básicos de la fuerza débil

Una descripción completa de la fuerza débil requeriría introducir dos grandes repartos de personajes —una horda desconcertante de partículas y un largo cuadro de honor de descubridores— e incorporaría muchos detalles que resultan tangenciales a nuestros temas principales. Aquí me limitaré a una descripción breve y simplificada de dos puntos culminantes, seleccionados por su interés fundamental y para usarlos más tarde. Estamos avanzando hacia las imágenes-resumen RR y SS, y TT y UU, que aportan la plataforma para lazarnos a la unificación definitiva. Tal vez quieras consultar esas láminas, a medida que progresamos, para orientarte mejor.

Conversión de quarks: como los protones y los neutrones son, como hemos visto, unos compuestos complejos de los más básicos quarks y gluones, deberíamos seguir el rastro de las conversiones protón \leftrightarrow neutrón hasta su fuente más básica. La estructura profunda que subyace a estas conversiones es el proceso de quarks:

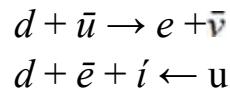
$$d \rightarrow u + e + \bar{\nu}$$

Como los neutrones se basan en tríadas de quarks *udd*, mientras que los protones se basan en *uud*, la transformación de quarks $d \rightarrow u$ permite a un neutrón transformarse en un protón. Esa transformación viene acompañada por la emisión de un electrón *e* y un antineutrino $\bar{\nu}$. De modo que nuestra interacción básica, de nivel quark, se materializa al nivel de los hadrones como

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$$

Esta desintegración lenta (tiempo de vida quince minutos) es el destino de los neutrones aislados (solo se estabilizan cuando están enlazados dentro de los núcleos).

Las reglas básicas de la mecánica cuántica nos dicen que también obtenemos procesos válidos si cambiamos cualquier partícula por su antipartícula y la llevamos al otro lado de la reacción, o si invertimos la dirección de la flecha de la reacción. Aplicando esas reglas a nuestro $d \rightarrow u + e + \bar{\nu}$, hallamos posibilidades como:



... y un sinfín de otras. Estas dan lugar a muchas formas diferentes de desintegración nuclear (radiactividad), desestabilizan otros hadrones e impulsan muchas transformaciones en cosmología y astrofísica (incluida la síntesis de todos los elementos químicos, a partir de una mezcla primordial de protones y neutrones). Para poner un ejemplo de las posibilidades: el primero de estos procesos, $d + \bar{u} \rightarrow e + \bar{\nu}$, conduce directamente a la desintegración de un mesón π^- (que se basa en un par quark-antiquark $d\bar{u}$) para dar un electrón y un antineutrino.

Quiralidad y violación de la paridad: un aspecto muy profundo de la fuerza débil, llamado violación de la paridad, fue descubierto teóricamente por T. D. Lee y C. N. Yang en 1956. Para describirlo, debemos introducir el concepto de *quiralidad* de las partículas. Se aplica a partículas que se están moviendo y a la vez girando.

Si un objeto rota alrededor de un eje, podemos asignar una dirección al eje de la manera siguiente: imagina que nuestro objeto giratorio es una patinadora sobre hielo. Si su rotación le empuja la mano derecha hacia el abdomen, elegimos la dirección de pies a cabeza; si le empuja la mano derecha hacia la espalda, elegimos la dirección de cabeza a pies.

Las partículas en las que estamos interesados tienen un pequeño espín intrínseco, o rotación intrínseca. Están siempre dando vueltas, como patinadoras incansables. Así que podemos aplicarles nuestra lógica, y derivar una dirección asociada con su giro. Si nuestra partícula se mueve en esa

dirección, decimos que la partícula es diestra. Si se mueve en la dirección opuesta, decimos que es zurda. La quiralidad de una partícula, en otras palabras, orienta su espín respecto a su velocidad.

Lo que propusieron Lee y Yang¹¹ es que los quarks, electrones y neutrinos zurdos (y los muones y leptones τ zurdos) participan en la interacción débil, como también participan los antiquarks, antielectrones (o positrones) y antineutrinos diestros (y los antimuones y leptones anti- τ diestros), pero que las partículas de quiralidad opuesta no lo hacen. Los experimentos confirmaron su hipótesis.

Otro anamorfo de color: de ?? a !

El aspecto transformativo de la fuerza débil, y varios otros de sus aspectos más específicos, indicaron a Sheldon Glashow, y a Abdus Salam y John Ward, que podría ser posible describir esa fuerza, también, como una encarnación de la simetría local.¹²

Podemos ver cómo funciona eso utilizando las ideas e imágenes que hemos desarrollado. Lo que queremos es que nuestro proceso débil básico —tomémoslo en la forma $u + e \rightarrow d + v$, para ser concretos— ocurra mediante movimientos en un espacio de propiedad. El espacio de propiedad debería tener (al menos) dos dimensiones, de modo que u y d puedan ser la misma entidad en distintas posiciones, y lo mismo para e y v . Entonces podremos ver nuestro proceso entero, que a primera vista implica cambios en la identidad de las partículas —su *qué*— como cambios de su posición: su *dónde*. ¡Esto es «qué a partir de dónde» en acción!

La teoría construida sobre la simetría local va más allá, al aportar el fluido que dirige el movimiento en el espacio de propiedad. La acción más elemental de ese fluido es lo que pasa cuando sus unidades más pequeñas, o cuantos, se crean y destruyen. De modo que nuestro proceso, al nivel cuántico más básico, puede ocurrir así:

u emite un bosón W^+ , se convierte en d ; e absorbe al bosón W^+ , se convierte en v .

O alternativamente así:

e emite un bosón W^- , se convierte en v ; u absorbe al bosón W^- , se convierte en d .

En el bosón débil W^+ , o «bosón W más», el superíndice indica su carga eléctrica. El bosón W^- es su antipartícula. Cuando se analiza en detalle la simetría local, se encuentra que hay un tercer bosón débil eléctricamente neutro, el bosón Z .

Al proponer esta teoría local, Glashow, Salam y Ward estaban siguiendo nuestro credo jesuita, «es más santo pedir perdón que permiso», por ignorar, estratégicamente, otro aspecto de la teoría de Yang-Mills. La simetría local de Yang-Mills requiere que W^+ , W^- y Z tengan *masa cero*. Las predicciones correspondientes de masa cero para los gravitones, los fotones y los gluones de color corresponden todas a la realidad, y representan un gran triunfo de la simetría local. Pero en la teoría de la fuerza débil esa predicción falla. Si los bosones débiles tuvieran masa cero, habrían sido fácilmente visibles en las colisiones de los aceleradores, o incluso en las reacciones químicas, como lo son los fotones. Esencialmente, ¡la fuerza débil no sería débil!

En suma, para la interacción débil, la simetría local parece ser un pelín demasiado buena para este mundo.

Para reconciliar los Ideal con lo Real, tenemos que introducir otra idea, ¡y es una belleza! La nueva idea es la ruptura *espontánea* de simetría, introducida en este contexto por Robert Brout y François Englert, y de forma independiente por Peter Higgs (y también Gerald Guralnik, Carl Hagen y Tom Kibble). Nos permite tener lo mejor de dos mundos. Más en concreto: podemos mantener las ecuaciones de la simetría local, con su preciosa explicación de la fuerza débil «qué a partir de dónde», a la vez que les permitimos tener masas distintas de cero, como se observa. Procederemos a contemplar en detalle su idea audaz y poderosa, tras un párrafo obligatorio de caricatura histórica que envuelva nuestra explicación propiamente dicha de la fuerza débil.

Fue Steven Weinberg quien sintetizó las dos líneas de pensamiento —la simetría y la ruptura de la simetría— para generar la teoría de la fuerza débil enteramente satisfactoria que aparece en la moderna Teoría Central. Pero no resultaba obvio en modo alguno, al principio, que esta teoría daría respuestas correctas, ni siquiera finitas, cuando las fluctuaciones cuánticas se tomaban en

cuenta. Gerard ‘t Hooft y Martinus Veltman demostraron que lo hace, y para comprobarlo introdujeron unos métodos de cálculo que hicieron la teoría más precisa y útil. Freeman Dyson había hecho antes un servicio similar a la QED, donde resulta mucho más fácil (aunque todavía difícil).

Fluido de Higgs, campo de Higgs, bosón de Higgs

En un planeta cubierto de agua de una galaxia muy, muy lejana, los peces han evolucionado hasta hacerse inteligentes: tan inteligentes que algunos de ellos se convierten en físicos, y empiezan a estudiar cómo se mueven las cosas. Al principio, los pisci-físicos derivarían unas leyes del movimiento muy complicadas, porque (como *nosotros* sabemos) el movimiento de los cuerpos por el agua es complicado. Pero un día una pez genio —Piscis Newton— propone que las leyes básicas del movimiento son mucho más simples y bellas: de hecho, son las leyes del movimiento de Newton. Ella sugiere que los movimientos observados parecen complicados debido a la influencia de un material —llámalo «agua»— que llena el mundo. Después de un montón de trabajo, los peces consiguen confirmar la teoría de Piscis Newton al aislar moléculas de agua.

Según el mecanismo de Higgs, nosotros somos como esos peces. Estamos inmersos en un océano cósmico, lo que complica las leyes observadas de la física.

Las ecuaciones para las partículas con masa cero, incluidas las ecuaciones de Maxwell, las ecuaciones de Yang-Mills y las ecuaciones de Einstein de la relatividad general, son especialmente hermosas. Como hemos visto, pueden soportar una cantidad enorme de simetría: la simetría local. Los fotones tienen masa cero, como los gluones de color de la cromodinámica cuántica y los gravitones de la gravedad. Para tener ecuaciones hermosas, y para tener uniformidad en nuestra descripción de la naturaleza, nos gustaría construir el mundo a partir del uso de bloques de construcción con masa cero.

Por desgracia, varias clases de partículas elementales se niegan a cooperar con nuestros deseos. En concreto, los bosones W y Z , que median las interacciones débiles, tiene unas masas sustanciales. (Esa es la razón por la

que las interacciones débiles sean de corto alcance, y de que actúen con languidez a bajas energías.) Sus masas son fastidiosas, porque en otros sentidos, como acabamos de ver, los bosones W y Z se parecen un montón a los fotones.

¿Hay una solución a esta dificultad? Consideremos que el comportamiento de los fotones puede verse afectado por las propiedades del material a través del que se mueven. Un ejemplo familiar es que la luz se ralentiza cuando atraviesa el vidrio o el agua. Ese fenómeno, por el que la luz se vuelve más perezosa de lo habitual, es análogo a grandes rasgos a que la luz adquiera inercia. Menos familiar, pero más profundo para nuestros propósitos, es el comportamiento de los fotones dentro de un superconductor. Las ecuaciones que describen a los fotones en un superconductor son *matemáticamente idénticas* a las ecuaciones para una partícula con masa. Dentro de un superconductor, los fotones se convierten, en efecto, en partículas de masa distinta de cero.

La esencia del mecanismo de Higgs es la idea de que el «espacio vacío» —es decir, el espacio carente de partículas y radiación— está, de hecho, lleno de un medio material que convierte en masivos a los bosones W y Z . Esta idea nos permite mantener las ecuaciones hermosas para las partículas sin masa, a la vez que observamos un respeto decoroso por la opinión de la realidad. Necesitamos un material que haga, para los bosones W y Z , lo que un superconductor hace para los fotones. En realidad, ese hipotético medio cósmico debe producir masas a una escala mucho mayor: las masas de W y Z en el espacio (no tan) vacío son unas 10^{16} veces mayores que las de los fotones en los superconductores.

Los físicos han estado recurriendo al mecanismo de Higgs durante muchos años, y al usarlo no han hecho más que acumular un éxito tras otro. Muchos aspectos de las interacciones de los bosones W y Z , aparte de sus masas, se predijeron con precisión utilizando las bellas ecuaciones de las partículas sin masa y la simetría de gauge con sus consecuencias modificadas por un material que llena el espacio. De esta forma, hemos construido un argumento convincente de la existencia de nuestro propio «océano cósmico». Pero, al final, ese argumento se apoyaba en evidencias circunstanciales. No había una respuesta clara a la pregunta obvia: ¿de qué está hecho?

Ninguna sustancia conocida podía ser el océano cósmico. Ninguna combinación de los quarks, leptones y gluones conocidos, ni de ninguna otra partícula conocida, tiene las propiedades adecuadas para formarlo. Se requiere algo nuevo.

En principio, el océano cósmico de Higgs podría haber sido una composición de varias sustancias, y las sustancias en sí mismas podrían ser complicadas. La literatura de la física de partículas teórica contiene cientos, si no miles, de propuestas de ese tipo. Pero, entre todas las posibilidades lógicas, hay un denominado modelo mínimo: el más simple y económico. En ese modelo mínimo, el material cósmico está hecho de un solo ingrediente. Aunque la terminología de esta materia es confusa y cambiante, aquí, cuando me refiero a la «partícula de Higgs», quiero decir la única partícula nueva que se introduce para completar el modelo mínimo.

Podemos inferir muchas cosas sobre la manera en que la partícula de Higgs interactúa con otras formas de materia. Después de todo, puesto que estamos embebidos en el océano cósmico, hemos estado observando las propiedades de las partículas de Higgs masivamente desde tiempos inmemoriales. De hecho, todas las propiedades de esa partícula se pueden predecir sin ambigüedades, una vez que conocemos su masa. Por ejemplo, tanto su espín como su carga eléctrica deben ser cero, puesto que tiene que parecer como un cuanto de «nada». Como sabíamos lo que estábamos buscando, era posible diseñar una estrategia inteligente para buscar la partícula de Higgs. El proceso clave, mediante el cual la partícula de Higgs se descubrió, se representa en la Figura 36.

El primer paso es producirla. El mecanismo dominante de producción es en verdad extraordinario. La materia ordinaria se acopla de manera muy tenue a la partícula de Higgs (H). (Esta es la razón de que los electrones y los protones puedan ser mucho más ligeros que W y Z : no sienten su resistencia.) El acoplamiento dominante, de hecho, ocurre por un proceso indirecto, «fusión de gluones», un proceso que yo mismo descubrí en 1976, durante un paseo memorable que describiré más abajo. Aparece en la parte inferior de la figura 36.

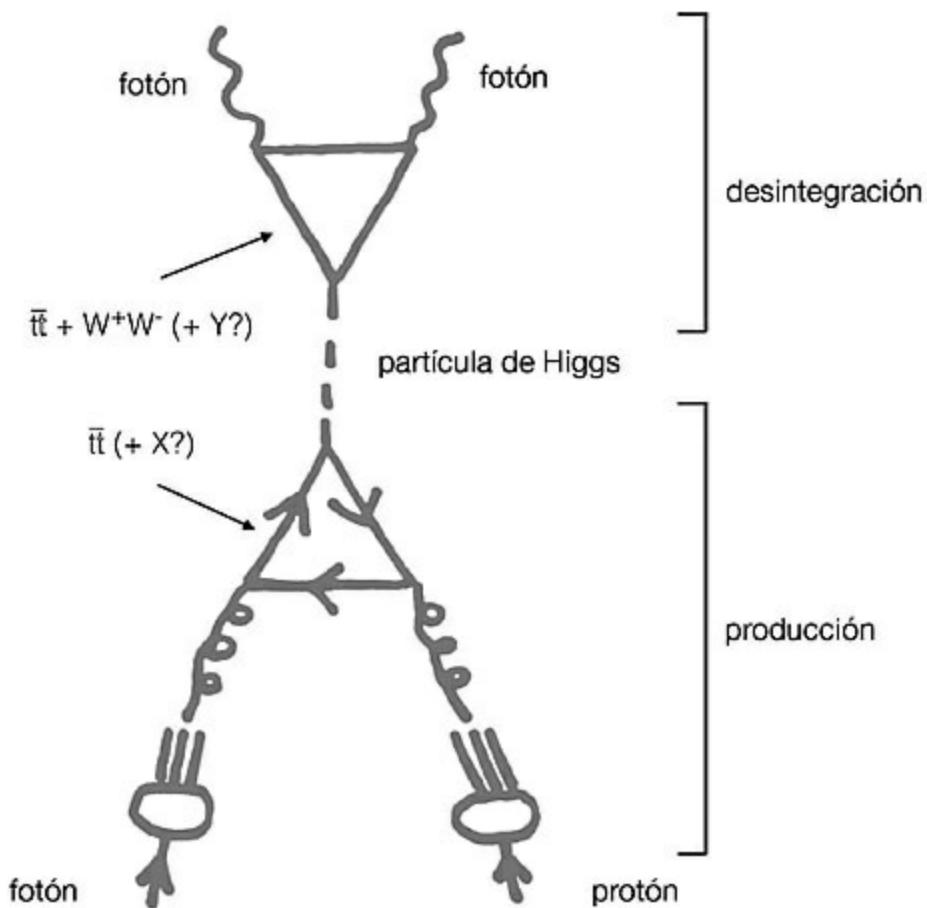


FIGURA 36. Este boceto representa el proceso mediante el que se accedió a la partícula de Higgs a través de gluones y fue observada experimentalmente. Se trata de una proeza que emplea simultáneamente muchos aspectos de la teoría central y principios profundos de la mecánica cuántica.

Los gluones no se acoplan a la partícula de Higgs directamente. El acoplamiento es un puro efecto cuántico. Es típico de la mecánica cuántica que ocurran fluctuaciones espontáneas, o «partículas virtuales». Lo habitual es que esas fluctuaciones nazcan y mueran sin ningún efecto discernible, aparte de su influencia en el comportamiento de las partículas reales de la vecindad. En el proceso de fusión de gluones más importante, los gluones inyectan energía a un par virtual que consiste en un quark top t y un quark antitop \bar{t} . El par de quark-antiquark t y \bar{t} se acopla de forma poderosa a la partícula de Higgs —esta es una de las principales causas de que sean pesados—, de modo que hay una probabilidad razonable de que generen esa partícula antes de extinguirse. La

manera más eficaz de obtener la partícula de Higgs a partir de una colisión de protones es que colisionen dos gluones, uno de cada protón. El resto de los protones se materializan como un ruido turbio que, por lo habitual, contiene docenas de partículas.

La desintegración de H en dos fotones, $H \rightarrow \gamma\gamma$, que se muestra en la mitad superior de la Figura 36, surge de una dinámica similar. Los fotones no se acoplan directamente a la partícula de Higgs, sino que se comunican con ella a través de pares virtuales $t\bar{t}$ y W^+W^- . Aunque esto es un modo de desintegración bastante raro, fue el principal modo para descubrir H , y la razón es que tiene dos grandes ventajas desde un ángulo experimental.

La primera es que la energía y el momento de los fotones de alta energía pueden medirse con gran precisión. Podemos combinarlas, de acuerdo con la cinemática de la relatividad especial, para determinar la «masa efectiva» de un par de fotones. Si los fotones de un par provienen de la desintegración de una partícula de masa M , su masa efectiva será M .

La segunda ventaja es que los pares de fotones energéticos son muy difíciles de producir en procesos ordinarios (no Higgs), de modo que el ruido de fondo es manejable.

Explotando las dos ventajas, los experimentalistas diseñaron su estrategia de búsqueda: mide la masa efectiva de muchos pares de fotones, y busca una intensificación de un valor concreto, respecto a los vecinos.

Y, resumiendo una larga historia, ¡funcionó!

Y hay una prima: como el ruido de fondo se puede calcular de manera fiable, la magnitud de la intensificación respecto al fondo nos da una medida de la tasa de producción de H , multiplicando por el porcentaje de ramificación en $\gamma\gamma$. Uno puede entonces comprobar si la intensificación medida coincide con las predicciones para el H mínimo. Esto es particularmente interesante, porque esas tasas abren una nueva ventana a lo desconocido. Para concretar: podría haber otras partículas pesadas, hasta ahora no observadas, ¡que contribuyeran al proceso en su forma virtual! De momento, las observaciones son coherentes con el modelo mínimo sin adornos, pero una mayor precisión no es solo factible, sino también muy deseable.

El atardecer encantado

Hasta las 10 de la noche o por ahí, aquel día (del verano de 1976) que resultaría el más productivo de mi carrera científica parecía cualquier cosa menos un día prometedor. Mi hija pequeñita, Amity, tenía una infección de oído, y había estado todo el día con fiebre, de mal humor y pidiendo atención. Betsy y yo, ambos padres inexpertos, recién llegados y solos en la aldea improvisada en el Fermilab, nos las apañábamos como podíamos. Cuando cayó la noche oscura del medio oeste, Amity cayó por fin en un sueño exhausto, y enseguida hizo lo mismo Betsy. Parecían dos ángeles de la paz.

El estado de alerta y la energía que me había infligido la necesidad de bregar con todas esas pequeñas crisis estaban aún conmigo, cuando las crisis en sí mismas ya habían pasado. Buscando una válvula de escape decidí, como suelo hacer, dar un paseo. La noche mostraba una claridad brillante, radiante el cielo, nítido y distante el horizonte, y hasta el suelo iluminado por la luna parecía etéreo. Con aquella imagen de dos ángeles de este mundo flotando aún en mi mente, y aquel espectáculo celeste a mi alrededor, sentí una euforia extraña. Era el momento del pensamiento profundo.

Durante los años precedentes, las teorías de las interacciones fuerte, débil y electromagnética basadas en la simetría local habían madurado de aventura audaz a sabiduría convencional. Repasando esa situación, se me ocurrió que, mientras que los diversos quarks, leptones, gluones y bosones débiles —no hablemos ya de los fotones— habían recibido mucha atención, y eran el foco de programas experimentales bien diseñados, la ruptura de simetría seguía relativamente inexplorada. Ni siquiera había una propuesta creíble para poner a prueba el modelo «mínimo», el más simple, que proponía una sola partícula de Higgs, como hemos descrito más arriba.

El problema básico es simple: a la partícula de Higgs, en ese modelo, le gusta acoplarse a partículas pesadas, pero las partículas de la materia estable, que podemos estudiar directamente o poner en nuestros aceleradores, son muy ligeras. Los gluones de color tienen masa cero, como los fotones, y los quarks *u* y *d*, como los electrones, tienen una masa despreciable.

Pero recientemente (respecto a 1976) había surgido un gran interés en los quarks más pesados. El quark *charmed* (encantado) *c* se había descubierto hacía poco, y había razones excelentes para sospechar de la existencia de otros dos quarks adicionales, aún más pesados. (Y existen en efecto. El quark *bottom* (fondo) *b* se descubrió no mucho después, en 1977, mientras que el quark *top* (cima) *t* hubo de esperar hasta 1995. Ya habían sido bautizados, y sus propiedades —con la única excepción de su masa— habían sido calculadas, incluso antes de su observación experimental.) De modo que resultaba natural considerar si esos quarks nuevos y más pesados podrían abrir un portal por el que acceder a la partícula de Higgs. Me di cuenta de inmediato de que sí podrían. Puedes usar los mismos trucos que la gente había usado para los quarks *charmed* para producir mesones basados en $\bar{b}b$ o $\bar{t}t$. Esos quarks pesados se acoplarían vigorosamente a las partículas de Higgs. Si las cosas iban bien —en esencia, si los quarks pesados tenían más de la mitad de la masa de la partícula de Higgs—, las partículas de Higgs se producirían en la desintegración de esos mesones. Esa fue mi primera percepción importante de la noche.

A continuación era importante considerar las desintegraciones competidoras, porque si estas dominaran convertirían toda la historia en una mera curiosidad académica. Una de las posibilidades más importantes a considerar era la desintegración en gluones de color. No pude hacer un cálculo mental preciso, aunque una estimación tosca me indicó que iría bien. (Fue bien.) Lo más importante es que eso me dejó pensando: si los quarks pesados pueden acoplarse a las partículas de Higgs y a los gluones, ¡ofrecen entonces una manera de conectar los gluones a las partículas de Higgs! Y en ese momento mi cerebro había incubado el proceso básico que puedes ver en la mitad inferior de la Figura 36. De nuevo, el cálculo exacto quedaba como deberes para casa, pero hice de cabeza unas estimaciones toscas y vi que los resultados eran alentadores. En concreto, me di cuenta de que, incluso si los quarks por descubrir eran *muy* pesados, todavía podrían contribuir; y que si fueran aún más pesados, contribuirían también. Se me hizo claro de inmediato que esta sería la manera dominante en que las partículas de Higgs se acoplarían a la materia estable. Ello abría una ventana prometedora a lo desconocido. Esa fue la segunda percepción importante de la noche.

En ese momento había llegado a las dependencias del laboratorio, y decidí darme la vuelta. Había tenido buena suerte pensado sobre el modelo mínimo de Higgs, así que quería sopesar cómo se aplicarían estas nuevas ideas a versiones más complicadas. Una posibilidad especialmente interesante es tener alguna simetría extra que pueda romperse de manera espontánea. Esto puede conducir a la existencia de nuevas partículas de masa cero: ¡una posibilidad espectacular! Esa fue mi tercera percepción importante de la noche.

Allí lejos en Princeton, donde había estado dando clase durante el año, había habido una excitación enorme sobre unas cosas llamadas *instantones*, que no intentaré explicar aquí. Los instantones rompen la simetría de formas particularmente interesantes, y pensé que sería divertido incorporarlos, de modo que tuviera algo de lo que hablar que mis colegas pudieran estar interesados en oír. Me di cuenta vagamente de que la partícula que de otro modo habría tenido masa cero, según mi tercera percepción, adquiriría más bien una pequeña masa, entre otras propiedades interesantes. Esa fue mi cuarta percepción importante de la noche, y con ella llegué a casa.

Esas cuatro percepciones han tenido destinos diversos. La primera cayó víctima de la mala suerte. El quark *b* no es lo bastante pesado en comparación con la partícula de Higgs, mientras que el quark *t* es tan pesado e inestable que sus mesones no sirven de nada.

La segunda es uno de los logros de los que estoy más orgulloso. Más de treinta años después, fue clave para el descubrimiento real de la partícula de Higgs, como se describe en la Figura 36 y alrededor de ella.

La tercera no ha dado frutos de momento, pero sigue siendo interesante. Al final llamé «familones» a las nuevas partículas de masa cero, y la gente sigue buscándolos.

La cuarta resultó ser la más interesante, y tal vez la más importante. Cuando volví al laboratorio el día siguiente y consulté la literatura relevante, descubrí un artículo muy interesante de Roberto Peccei y Helen Quinn. Habían explorado el tipo de modelo con el que yo había estado jugando, y habían señalado que podría resolver un problema muy importante, el denominado

problema θ . Lo esencial de esto es que hay un número — θ — que según la teoría central puede tomar cualquier valor entre $-\pi$ y π , pero que es muy, muy pequeño según las observaciones. Esto puede ser o bien una coincidencia, o bien una indicación de que la Teoría Central está incompleta. En el modelo de Peccei y Quinn, la «coincidencia» se explicaba como el residuo de una nueva simetría (espontáneamente rota). Peccei y Quinn no repararon, sin embargo, en que su modelo contenía una partícula ligera! Así que me puse a buscarle un nombre. Me había dado cuenta, varios años antes, de que había un detergente, Axión, cuyo nombre sonaba como el de una partícula. Decidí que, si tenía la ocasión, se lo pondría a una. Y ocurre que el problema θ , sobre la marcha, implica una corriente *axial*. Eso me daba una fisura por la que colarles el nombre a los atentos y conservadores editores del *Physical Review Letters*, y así lo hice. (Steven Weinberg también reparó en esta nueva partícula, de forma independiente. Él la había estado llamando «higglet». Acordamos, gracias a Dios, adoptar «axión».)

El axión ha sufrido una historia larga, tortuosa y todavía pendiente de resolución. Es un asunto al que he vuelto muchas veces, desarrollando la teoría de su producción en el universo joven, y sugiriendo la posible existencia de una radiación de fondo de axiones, análoga a la del famoso fondo de microondas. De acuerdo con este trabajo, el fondo de axiones sería difícil, pero no imposible, de observar. Un tenaz equipo de experimentalistas brillantes lo está buscando de forma decidida. Tal vez un día no muy lejano el axión merezca un libro para él solo, porque se ha convertido en un buen candidato para constituir la materia oscura del universo. O tal vez no exista en absoluto. El tiempo dirá.

Parte 4: resumiendo

El censo de fuerzas y entidades

Tenemos cuatro fuerzas fundamentales: gravedad, electromagnetismo y las fuerzas fuerte y débil. Todas se describen, teóricamente, utilizando la simetría local. La teoría de la gravedad, la relatividad general de Einstein, se basa en

la simetría local del espacio-tiempo, mientras que las teorías de las otras tres fuerzas se basan en la simetría local de los espacios de propiedad.

La relatividad general es una teoría sustanciosa, y nada fácil de dominar. Pero se basa en la interacción entre el espacio-tiempo ordinario y la energía-momento, que son conceptos universales que no requieren un censo detallado. No pretendemos ofender a nadie, por lo tanto, cuando reconocemos esa interacción en la sola palabra «gravedad».

Puesto que el comportamiento de la materia respecto a las otras tres fuerzas viene determinado por flujos en espacios de propiedad, necesitamos describir la geometría de los espacios de propiedad en que habita para explicar la materia. Haré esto en dos fases, representadas en las Láminas RR y SS, y en las Láminas TT y UU. En la primera fase he pasado por alto algunas complicaciones, que después he añadido en la segunda fase.

En las Láminas RR y SS, puedes ver que hay seis bloques distintos. Dentro de los bloques hay nombres de partículas: los quarks u y d en tres colores (por ejemplo, quarks u rojo, verde y azul), y los leptones e y ν (electrón y neutrino). Cada bloque codifica, de una manera que describiré en un momento, un posible espacio de propiedad para la materia. Así que estos bloques representan seis variedades distintas de materia que ocupan seis clases diferentes de espacios de propiedad. Algunos bloques contienen varias clases distintas de partículas; el mayor (bloque A) tiene seis. Desde nuestra perspectiva —y, más importante, desde la de las fuerzas— las diferentes partículas dentro de un bloque son en realidad una sola entidad, vista en distintas posiciones del espacio de propiedad. Nuestro censo contiene 16 clases distintas de partículas: ¡un número perturbadoramente grande de ingredientes fundamentales del mundo! Desde nuestra perspectiva más profunda, vemos que esas 16 partículas representan solo seis *entidades* distintas, que son bastantes menos (aunque aún demasiadas... lo haremos mejor en el siguiente capítulo).

En la dirección horizontal, representamos las tres dimensiones del espacio de carga fuerte (o espacio de «color»). Los bloques que tienen tres columnas (A , B y C) representan entidades que se pueden mover en un espacio de propiedad de carga fuerte tridimensional. En la dirección vertical, tenemos las dimensiones del espacio de carga débil. Los bloques que tienen dos filas

(A y D) representan entidades que se pueden mover en un espacio de propiedad de carga débil bidimensional. La entidad representada en el bloque A puede moverse en ambas direcciones de manera independiente, de modo que registra $3 \times 2 = 6$ dimensiones de propiedad.

Los números adosados a cada bloque representan la escala de su espacio de propiedad de carga eléctrica unidimensional.*

Por último, los superíndices L y R denotan, respectivamente, zurdo (*left-handed*) y diestro (*right handed*). Lee y Yang nos enseñaron que solo los quarks y leptones zurdos participan en la fuerza débil. En nuestro censo, esto se cifra en el hecho de que solo los bloques con superíndice L contienen dos filas. Cada partícula ocurre tanto en su forma zurda como en la diestra, dentro de distintos bloques.

El bloque F es particularmente interesante. Solo tiene una entrada: el neutrino diestro ν_R . Ni tiene carga fuerte, ni débil ni electromagnética, así que es invisible para todas las fuerzas no gravitatorias. ν_R no accede a ningún espacio de propiedad, y tiene que conformarse con viajar por el espacio-tiempo ordinario.

Así concluye la primera fase de nuestro censo.

Reconociendo familias

Para completar nuestro censo de la teoría central, tenemos que añadir dos ingredientes más, como se indica en las Láminas TT y UU (donde también menciono la gravedad).

Uno es el fluido de Higgs. En la versión mínima de la Teoría Central —que, como hemos visto, se ha mostrado adecuada hasta ahora— el fluido de Higgs siente la fuerza débil, pero no la fuerza fuerte. Por tanto ocupa un espacio de propiedad bidimesional, como se indica en las Láminas TT y UU.

El otro es una misteriosa triplicación del sector completo de la materia. Junto a los quarks y los leptones que hemos mencionado hasta ahora —la llamada primera familia—, hay una segunda y una tercera familias. Rellenan bloques con la misma forma exacta, pero con nuevas entradas, como aquí:

PRIMERA	SEGUNDA	TERCERA
u	c	t
d	s	b
e	μ	τ
ν_e	ν_μ	ν_τ

Así que además del quark *up* u tenemos los quarks *charm* y *top* c , t ; además del quark *down* d tenemos los quarks *strange* y *bottom* s , b ; además del electrón e tenemos los muones y leptones tau μ , τ ; y además del neutrino del electrón ν_e tenemos los neutrinos del muon y del tau ν_μ , ν_τ . (Ahora tenemos que añadir subíndices para distinguir los distintos neutrinos.)

La segunda y la tercera familias tienen un papel muy limitado en el mundo natural presente.

Pero existen, y su existencia plantea desafíos teóricos: desafíos pendientes hasta ahora. Por ejemplo, las masas de las partículas varían en un amplio intervalo, y no exhiben ningún patrón evidente. Sus desintegraciones débiles añaden muchas complicaciones adicionales, como la introducción de una docena de factores a la medida que han eludido el cálculo teórico. (Si alguna vez sientes la necesidad de desinflar a un físico que presume de su «Teoría del Todo», pregúntale por el ángulo de Cabibbo.)

En la nota 23 de las notas finales, explico algunos detalles más de estas complicaciones de las familias, y selecciono algunas referencias donde puedes aprender más. Para el resto de esta reflexión, nos centraremos en los aspectos de la realidad física en que la belleza es más importante.

El final del principio

Ya hemos analizado todos los aspectos de la Teoría Central: la electrodinámica de Maxwell, la QCD y (de manera más esquemática) la fuerza débil y la gravedad, y hemos inventariado las entidades sobre las que actúan.

La Teoría Central suministra una explicación matemática completa, y ahora puesta a prueba en el campo de batalla, de cómo las partículas subatómicas se combinan para hacer átomos, los átomos se combinan para hacer moléculas y las moléculas se combinan para hacer materiales, y de cómo todas esas cosas interactúan con la luz y la radiación. Sus ecuaciones son abarcadoras pero económicas; simétricas pero sazonadas con detalles interesantes; austeras pero dotadas de una extraña belleza. La Teoría Central aporta un cimiento seguro para la astrofísica, la ciencia de materiales, la química y la biología física.

Con esto, en un sentido poderoso, nuestra Pregunta ha sido respondida. El mundo, mientras hablamos del mundo de la química, la biología, la astrofísica, la ingeniería y la vida diaria, *sí* que encarna ideas bellas. La Teoría Central, que gobierna esos dominios, se enraíza profundamente en los conceptos de la simetría y la geometría, como hemos visto. Y hace su voluntad, en la teoría cuántica, mediante reglas similares a las de la música. La simetría determina en verdad la estructura. Una pura y perfecta Música de las Esferas anima en verdad el alma de la realidad. ¡Os saludamos, Platón y Pitágoras!

Y sin embargo tengo la sensación de que la respuesta que hemos alcanzado hasta ahora no nos transporta al final de nuestra indagación, sino solo al final del principio, por dos razones.

Primera, que hay cabos sueltos.

Como ya he mencionado, tenemos problemas de familia. Y los astrónomos, con sus descubrimientos de la materia oscura y la energía oscura, nos han echado encima un jarro bien grande del agua fría de la humildad. Nuestra brillante teoría solo cubre ¡el 4 % de la masa total del universo! (el peso no lo es todo, pero hombre...).

A mayor profundidad, nuestras respuestas tan maravillosas nos facultan para imaginar y abordar preguntas nuevas y más ambiciosas. Sobre todo esta: ¿surgen las distintas partes de la Teoría Central de una unidad más profunda? En lo que queda de nuestra reflexión, vamos a considerar esa cuestión, y (creo yo) vamos a darle una salida muy prometedora.

Y segunda, que hay puertas abiertas.

Cuando hemos llegado a entender, para todo propósito práctico, lo que *es* la materia, estamos en la posición de un niño que acaba de aprender las reglas del ajedrez, o de un aspirante a músico que acaba de aprender los sonidos que su instrumento es capaz de producir. Ese conocimiento básico es la preparación para la maestría, no la maestría en sí misma.

¿Podemos usar la imaginación y el cálculo, en vez de la prueba y el error, para diseñar los materiales del futuro? ¿Podemos sintonizar con los mensajes que el universo emite en forma de ondas gravitatorias, neutrinos o axiones? ¿Podemos entender la mente humana, molécula a molécula, y mejorarla de manera sistemática? ¿Podemos construir computadores cuánticos, y a través de ellos crear formas de inteligencia verdaderamente alienígenas? Plantear estas preguntas es descubrir, en la madurez de la edad dorada, la semilla de los nuevos tiempos.

Simetría III: Emmy Noether, tiempo, energía y cordura

La simetría, en general, es Cambio sin Cambio. Pero fue la asombrosa Emmy Noether (1882-1935) quien estableció una conexión íntima entre la simetría *matemática* de las leyes físicas y la existencia de cantidades *físicas* concretas que no cambia. « X no cambia con el tiempo» es una frase larga, y además negativa, así que mejor solemos decir « X se conserva». En ese lenguaje, el teorema de Noether dice que las simetrías de la ley física dan lugar a cantidades conservadas.

Así, en el trabajo de Emmy Noether, nuestra correspondencia visionaria

$$\text{Ideal} \leftrightarrow \text{Real}$$

se convierte en un teorema matemático.

Sin duda, un ejemplo concreto de un par noetheriano

$$\text{simetría} \Rightarrow \text{ley de conservación}$$

será bienvenido en este punto. Y aquí podemos descubrir una piedra preciosa. Se trata, creo, del resultado individual más profundo de toda la física.

En nuestro ejemplo, la simetría es lo que se denomina simetría de traslación temporal. Esa jerga puede parecer intimidante, pero su significado es simple: *las mismas leyes de la física que rigen hoy rigieron en el pasado y regirán en el futuro*.

La suposición de que las mismas leyes rigen siempre puede no sonar, de primeras, como una suposición de simetría, pero eso es lo que es. Porque dice que puedes *cambiar* el significado de «tiempo» que aparece en las leyes de la

física sumando o restando una constante, *sin cambiar* el contenido de las leyes. (En la jerga de las matemáticas y la física, el desplazamiento en una cantidad constante, ya sea en el espacio o en el tiempo, se llama «traslación»).

La simetría de traslación temporal es la sabiduría del Eclesiastés:

Lo que ha sido es lo que será
y lo que se ha hecho es lo que se hará
y nada nuevo hay bajo el sol.

Lo que Shakespeare lamentaba aquí

Si no hubiera nada nuevo, sino lo que ya
ha sido antes, cuán engatusado está nuestro seso
que, esforzándose por inventar, no hace sino soportar
el segundo lastre de un niño anterior

no es la misma cosa. La simetría de traslación temporal se aplica a las leyes que relacionan sucesos, no a los sucesos en sí mismos. Para expresarlo de manera formal: la simetría de traslación temporal es una propiedad de nuestras ecuaciones dinámicas, pero no dice nada de las condiciones iniciales.

Hacia el final de este interludio trataré de manera crítica la conjetura de la simetría de traslación temporal, pero ahora tomémosla al pie de la letra.

Tiempo y energía

Según el teorema de Noether, toda simetría de las leyes implica la conservación de alguna cantidad física. Para la simetría de traslación temporal, la cantidad conservada es... ¡la energía!

La energía, como concepto físico, tiene una historia estrañamente interesante. Quisiera repasar brevemente unos cuantos puntos culminantes de esa historia, en primer lugar porque es interesante, pero sobre todo aquí porque ello resalta la importancia de la percepción de Emmy Noether.

Una breve historia de la energía

Hoy sabemos que la energía hace rodar el mundo. Buscamos sus fuentes, la almacenamos, discutimos su precio, sopesamos las compensaciones implicadas en obtenerla de distintas formas, y así sucesivamente. La familiaridad con el concepto, sin embargo, no debería ocultarnos el carácter esencialmente extraño de la energía.

La idea de que la conservación de la energía es un principio fundamental no surgió hasta mediado el siglo XIX. E incluso entonces, *por qué* tendría que cumplirse eso era un completo misterio, hasta el descubrimiento de Noether. Ni siquiera hoy, como explicaré, creo que hayamos llegado al fondo del asunto.

En los forcejeos conceptuales que precedieron a la claridad de Newton, los científicos que intentaban comprender el movimiento hallaron una y otra vez, en distintas clases de problemas, que el *cuadrado* de la velocidad de un cuerpo saltaba aquí y allá como una medida especialmente útil del movimiento del cuerpo. Galileo, por ejemplo, halló que, para los cuerpos que se movían bajo la influencia de la gravedad cercana a la Tierra, como piedras lanzadas, balas de cañón o (cosa que midió con mucha atención) bolas que ruedan por un plano inclinado y péndulos, un cambio dado de altura da siempre un cambio fijo del cuadrado de la velocidad, con independencia de todo otro detalle.

En retrospectiva, entendemos ese extraño resultado como un ejemplo de conservación de la energía. Hay dos contribuciones a la energía total del cuerpo, la cinética y la potencial. La energía cinética (energía del movimiento) es proporcional al cuadrado de la velocidad del cuerpo, mientras que la energía potencial (energía de la posición) —para la gravedad cercana a la Tierra— es proporcional a su altura. La conservación de la energía dice que los cambios en la energía cinética deben compensarse con cambios en la energía potencial, que es otra forma de exponer el descubrimiento de Galileo.

Es crucial para nuestra historia mencionar que el resultado de Galileo no era una *observación* directa, sino una *idealización*. Lo demostró como un teorema, en un modelo matemático que desatendía la resistencia del aire, la fricción y otras complicaciones omnipresentes en la realidad. Usando bolas pesadas, en lugar de plumas, por ejemplo, y tomando otras precauciones,

Galileo pudo hacer experimentos en que el efecto de esas complicaciones es pequeño, y su modelo conservador de la energía es razonablemente preciso. Estrictamente hablando, sin embargo, la versión galileana de (lo que a su debido tiempo se convirtió en) la ley de conservación de la energía nunca es verdad exactamente en ningún sistema real, como él sabía muy bien. Para Galileo, no era más que un hecho curioso sobre un modelo idealizado.

En la mecánica clásica de Newton, la conservación de la energía se convirtió en un teorema más general. Pero seguía siendo una idealización, más que una descripción de la realidad. El teorema de conservación de la energía de Newton se aplica a sistemas de partículas que interactúan entre sí mediante fuerzas cuya magnitud depende solo de su distancia relativa. En ese marco, el teorema te dice qué *es* la energía: a saber, es la cantidad que aparece en el teorema y ¡permanece constante en el tiempo! De nuevo, encontramos que la energía total está compuesta de una pieza cinética y otra potencial. La energía cinética siempre toma la misma forma. La obtienes sumando, para cada partícula, su masa multiplicada por su velocidad al cuadrado, todo dividido por dos. La energía potencial es una función de las posiciones relativas, cuya forma precisa depende de la naturaleza de las fuerzas. Muy bien hasta ahí. Pero las fuerzas de fricción, en la mecánica newtoniana, arruinan la conservación de la energía. Aunque ese hecho no contradice el teorema de Newton, puesto que las fuerzas de fricción quedan fuera de las suposiciones del teorema —la fricción no se describe por fuerzas entre partículas dependientes de la distancia—, sí que limita las aplicaciones del teorema a la realidad.

Cuando añadimos la electrodinámica de Maxwell, las cosas se ponen más complicadas, pero la conclusión básica es similar. En el marco extendido aún podemos derivar, dadas ciertas suposiciones, un teorema matemático de conservación de la energía. Pero, en primer lugar, el significado de energía queda modificado. En concreto, debe incluirse una tercera forma de energía, además de la cinética y la potencial. Hay también una energía de campo, que —como su nombre indica— depende de la magnitud de los campos. Y es la energía total —cinética más potencial más de campo— lo que es constante.

Peor aún, incluso esta versión más complicada de la conservación de la energía solo es válida si ignoramos tanto la fricción como la resistencia eléctrica.

Recuerdo bien que, cuando yo estaba aprendiendo estas cosas, me sentía francamente escéptico y poco impresionado. Me daba la impresión de que la denominada «ley» de conservación de la energía era un parche chapucero. Cada vez que se descubría una nueva fuerza o efecto, violaba la «ley» existente, y uno tenía que inventar nuevos tipos de energía para taponar la fuga como bien pudiera. E incluso entonces podía aparecer nuevas fugas. Ni en la mecánica de Newton, ni en la electrodinámica de Maxwell, la conservación de la energía es un principio exacto y general. Parece ser más bien un resultado útil pero aproximado que se aplica solo en determinadas circunstancias. Como no tenía un fundamento conceptual profundo, hasta donde yo podía ver, y en cualquier caso era solo aproximada, no veía ninguna razón para esperar que la conservación de la energía fuera una guía fiable para la exploración de cualquier cosa esencialmente nueva.

La idea de que la conservación de la energía podía ser un principio fundamental, con una validez exacta, emergió de forma gradual en la segunda mitad del siglo XIX. Fue un descubrimiento inspirado por las necesidades de la tecnología.

Desde el amanecer de la historia, la gente había probado muchas técnicas para poner las cosas en movimiento, con la mente puesta en tareas útiles como transportar personas y bienes, asediar castillos, moler el grano y muchas otras aplicaciones. Durante la revolución industrial, las máquinas se hicieron centrales en la vida económica, y optimizar su utilización se convirtió en una cuestión capital, de modo que el problema de alimentarlas se estudió con intensidad, tanto de modo experimental como teórico. Pensar sobre la energía y sus transformaciones resultó ser el enfoque más fructífero. Quedó patente, en particular, que las (aparentes) violaciones prácticas de la conservación de la energía, debidas a efectos como la fricción y la resistencia eléctrica, siempre implican *pérdida* de energía. (Con la implicación práctica de que uno debería centrarse en el precio de la energía, en cualquiera de sus formas, y en minimizar las pérdidas.) Esa tendencia a perder energía, pero nunca a ganarla, explicaba el fracaso de los tecnólogos en diseñar máquinas autocontenidas y

autoalimentadas —las llamadas máquinas de movimiento perpetuo— y, más en general, por qué las máquinas necesitan una fuente de alimentación. Se observó también que la *pérdida* de energía viene siempre acompañada de la *producción* de calor. Varios científicos, con diversos grados de claridad, interpretaron esa situación de forma positiva. Propusieron que la conservación de la energía es realmente una verdad general, pero que hacer su seguimiento implica reconocer que el calor es otra forma más de energía. Inspirado por ese punto de vista, James Prescott Joule hizo una serie de experimentos exquisitos, usando cuerpos en caída para empujar ruedas de molino que a su vez calientan el agua, para demostrar el punto clave de modo cuantitativo: una cantidad dada de energía (del cuerpo en caída) produce una cantidad proporcional de calor.

Tras ese triunfo, el mundo científico aceptó la conservación de la energía como un principio de trabajo. La naturaleza había hablado, y había dicho con claridad que hay algo muy correcto en esa idea.

Pero, a falta de una justificación más profunda que la de que «funciona», la ley permaneció tan misteriosa como precaria. «Funciona» significa en realidad «ha funcionado hasta ahora». No se podía descartar que algún nuevo descubrimiento revelara fisuras. No sería la primera vez. La conservación de la *masa* era una piedra angular de la mecánica newtoniana, y sirvió muy bien en verdad como un principio de trabajo durante más de dos siglos, tanto en la mecánica celeste como en toda clase de aplicaciones a la ingeniería. La conservación de la masa fue puesta a prueba de manera rigurosa y puesta a trabajar por Antoine Lavoisier en los experimentos que marcaron el principio de la química cuantitativa moderna. En el siglo xx, sin embargo, la grave violación de la ley de la conservación de la masa es un tópico de la física extrema. En un colisionador de electrones y positrones de alta energía, la colisión de dos partículas muy ligeras (un electrón y un positrón) genera de forma rutinaria docenas de partículas cuya masa total suma muchos miles de veces la masa total de partida!

Dado que la energía parecía un batiburrillo de muchas clases de cosas diferentes —cinética (medida en el movimiento), potencial (medida en la posición), de campo (medida, en principio, en fuerzas sobre las cargas y las

corrientes), calorífica (medida en cambio de temperatura) y otras que no he mencionado—, parecía abierta a nuevas modificaciones, o tal vez incluso a excepciones.

Emmy Noether puso el concepto de energía bajo un foco nítido. Al fundamentar la conservación de la energía en la uniformidad de las leyes físicas en el tiempo, reveló su verdadera naturaleza y descifró su belleza oculta. Mediante su magia matemática, Emmy Noether convirtió una torpe rana en un principio hermoso.

La emergencia, a partir de la tecnología, del concepto moderno de conservación de la energía, culminando en la explicación por Noether de sus raíces en la simetría, es un ejemplo maravilloso de

Real → Ideal

¿Podría la conservación de la energía seguir el camino de la conservación de la masa? En ciencia, lo único sagrado es la realidad, y a la realidad le gusta producir sorpresas, estemos o no preparados para ellas. Pero el teorema de Noether pone el listón muy alto: si la conservación de la energía fallara, tendríamos que repensar o bien los conceptos básicos que utilizamos para formular las leyes de la física, o bien nuestras ideas sobre la uniformidad del tiempo, o ambas cosas. La mayoría de nosotros lee ese resultado como un aviso, que nos informa de que pensar sobre la violación de la conservación de la energía, en ausencia de un empujón de la naturaleza, es poco probable que resulte fructífero. ¿Por qué pedir prestado un problema?

Más lecciones de Noether

La uniformidad de las leyes físicas en el espacio, como su uniformidad en el tiempo, refleja un tipo de simetría llamada simetría de traslación espacial. Según el teorema de Noether, tendría que haber una cantidad conservada correspondiente. Y la hay: el *momento*. Las leyes físicas deberían parecer las mismas, también, cuando se las mira desde distintas orientaciones. Este es otro principio de simetría, llamado simetría rotacional. Según el teorema de

Noether, tendría que haber una cantidad conservada correspondiente, y de nuevo la hay: el *momento angular*. Como la conservación de la energía, estas grandes leyes de conservación tienen una historia larga y distinguida, habiéndose derivado en casos especiales, bajo unas suposiciones más restrictivas, pre-Noether. De hecho, una de las leyes de Kepler —la que dice que los planetas barren áreas iguales en tiempos iguales— refleja la conservación del momento angular, porque la velocidad de barrido es proporcional al momento angular. Pero el teorema de Noether, al conectarlas con simples aspectos cualitativos de la realidad física, ofrece una percepción profunda en el *porqué* de la existencia de esas leyes.

En las fronteras de la física moderna, como veremos pronto, el teorema de Noether se ha convertido en una herramienta esencial de descubrimiento. Mediante él, relacionamos la estética teórica de una posible simetría, y la pregunta

¿Son *bellas* mis ecuaciones?

... con la dura realidad de la medición física, y la pregunta

¿Son *verdaderas* mis ecuaciones?

Ha sido todo muy eficaz e inspirador. Y, sin embargo, tengo la sensación de que nos falta aún algo importante. Y no soy el único: nada menos que Niels Bohr, en la década de 1920,¹³ enfrentado con unos experimentos desconcertantes sobre la radiactividad, jugueteó brevemente con la idea de que la energía no se conserva. Lev Landau, otra figura reverenciada entre los físicos, propuso más tarde que las estrellas violan la conservación de la energía. (La fuente energética de las estrellas —la combustión nuclear— no se aclaró hasta mediado el siglo xx.)

Toda deducción descansa en suposiciones, y el teorema de Noether no es una excepción. De hecho, las suposiciones que incluye el teorema de Noether son bastante abstractas, técnicas y arduas de precisar. (Para los expertos: el teorema se demuestra para sistemas cuyas ecuaciones resultan de variar un lagrangiano. Hay buenas razones para admirar los sistemas que se pueden describir de ese modo, pero las razones son complicadas, y no está claro, al

menos para mí, por qué —o incluso si—son obligatorias.) Tengo la sensación de que un resultado tan importante, y tan fácil de enunciar, debería tener una explicación más directa e intuitiva. Si tuviera una, estaría encantado de compartirla aquí. De momento, todo lo que puedo decir es que ¡sigo buscándola!

Emmy Noether, en persona

El gran resultado de Emmy Noether en la física matemática, que acabamos de tratar aquí, fue una exhibición juvenil de poderío. El principal trabajo a lo largo de su vida fue la matemática pura. Su especialidad, de hecho, consistió en purificar las matemáticas. Hizo el álgebra mucho más abstracta y flexible, de manera que pudiera adaptar las construcciones recargadas, que habían inventado los matemáticos creativos, para su uso en geometría algebraica y teoría de números. Simplificando los cimientos, propuso formas creativas de construir sobre ellos. En busca de su pasión, tuvo que superar graves desafíos y prejuicios. David Hilbert quiso contratar a Emmy Noether como colega en la mejor Facultad de Matemáticas del mundo, en Gotinga. Hilbert escribió: «No veo que el sexo de la candidata sea un argumento contra ella... Después de todo somos una universidad, no un baño público». Pero su punto de vista no prevaleció. Emmy Noether aguantó por allí, durante un tiempo, como profesora invitada sin sueldo. Pero al ser no solo una mujer intelectual, sino encima judía, con el surgimiento del nazismo se vio forzada a abandonar Alemania. Hermann Weyl escribió después, como homenaje a su espíritu en aquellos tiempos duros:

Emmy Noether —su valor, su franqueza, su despreocupación por su propio destino, su espíritu conciliador— era, en medio de todo el odio y la vileza, la desesperanza y el dolor que nos rodeaban, un consuelo moral.

Otros también han dado testimonio de su carácter desinteresado, su generosidad y, por encima de todo, su devoción apasionada por las matemáticas. A menudo se olvidaba de sí misma, según su estudiante Olga Taussky, «gesticulando de forma salvaje» y sin darse cuenta de que su pelo

largo se había salido de las horquillas en total desarreglo. Al considerar el trabajo de Emmy Noether, y repasar su biografía, me viene a la cabeza la descripción que hizo Novalis de Spinoza como «el hombre embriagado de Dios». Emmy Noether era la mujer embriagada de matemáticas.

Esta fotografía de Emmy Noether a los veinte años parece capturar su espíritu.



FIGURA 37. Emmy Noether, matemática, y un ser noble.

Simetría, cordura y construcción de mundos

En su *Vida de Samuel Johnson*, Boswell narra el siguiente episodio:

Cuando habíamos salido de la iglesia, nos quedamos hablando un rato sobre el ingenioso sofisma del obispo Berkeley para demostrar que la materia no existe, y que todo lo que hay en el universo es un mero ideal. Yo señalé que, aunque estamos convencidos de que su doctrina no es cierta, es imposible refutarla. Nunca olvidaré la presteza con que Johnson respondió, dándole unas patadas tremendas a una gran piedra hasta que le hizo rebotar: «Lo refuto *así*».

Tomando como punto de partida al obispo Berkeley, David Hume produjo unos argumentos más sofisticados a favor del escepticismo radical. Hume no veía forma de justificar la conjetura de que el comportamiento físico es uniforme a través del tiempo. Pero, sin esa conjetura, ninguna predicción es segura: ni siquiera, por ejemplo, la predicción de que el Sol saldrá mañana. Y aun así, la uniformidad del comportamiento no es más que un salto irracional de fe, según Hume. Bertrand Russell sintetizó el análisis de Hume en un chiste memorable:

El hombre que ha alimentado al pollo todos los días de su vida, al fin un día le retuerce el cuello, lo que muestra que unos puntos de vista más refinados sobre la uniformidad de la naturaleza habrían resultado útiles para el pollo.

Y Russell proseguía:

Es por tanto importante descubrir si hay alguna respuesta a Hume en el marco de una filosofía que sea por completo o mayormente empírica. Si no la hay, no hay diferencia intelectual entre la cordura y la locura.

En esta sección, inspirada por Johnson, voy a aceptar el reto.

Para hacer que el mundo sea un lugar seguro para la cordura, volvamos a lo fundamental y consideremos qué significa justificar una creencia. Empezaremos por el famoso silogismo de Aristóteles, que estimuló el estudio de la lógica como una materia en sí misma. A primera vista, ese clásico:

Todos los humanos son mortales.

Sócrates es un humano.

Luego Sócrates es mortal.

da una impresión de profundidad y poderío lógico. Uno deduce una nueva conclusión, con certeza, a partir de hechos viejos.

Pensándolo un poco más, sin embargo, puede llegar a parecer vacío. Después de todo, solo tenemos derecho a enunciar que «todos los humanos son mortales» si ya sabemos que Sócrates —un humano concreto— es mortal. Así que el razonamiento parece ser profunda y totalmente circular.

Y, sin embargo, es difícil negar el sentimiento de que ahí hay algo útil y no trivial. El punto profundo, según creo, es que nos podemos sentir más seguros de la aserción *general* «todos los humanos son mortales», y de la identificación «Sócrates es humano», que de la proposición concreta «Sócrates es mortal», enunciada de modo independiente de la otra información.

La fuerza del enunciado «todos los humanos son mortales» no viene, desde luego, de tomar un censo completo de la humanidad, seguido de una verificación caso a caso de que todos y cada uno de los miembros de esa clase han muerto. Para empezar, ¡muchos de nosotros no hemos muerto! Más bien viene de un entendimiento general de lo que significa ser un humano, incluida en concreto la fragilidad de los cuerpos humanos, la fisiología del envejecimiento y demás. Un ser inmortal tendría que diferir de manera muy significativa de lo «humano», en el sentido de esa palabra aceptado generalmente, hasta el punto de que lo definiríamos como alguna otra cosa. Y Sócrates, aunque desde luego era una persona inusual, era hijo de padres humanos, ocupaba un cuerpo humano como cualquier otro, podía resultar herido en una batalla, maduró y envejeció en la escala de tiempo habitual para los humanos... En fin, Sócrates encaja con comodidad dentro de la clase «humano». De modo que el silogismo ya valía incluso antes de que Sócrates muriera. Cosa que, desde luego, acabó por hacer.

Por cierto, ¿no habría resultado más evocador, y verdaderamente inductivo, que Aristóteles hubiera usado *este* ejemplo?

Todos los humanos son mortales.
Aristóteles es un humano.
Luego Aristóteles es mortal.

Eso le habría humanizado, ¿no? También cuando estaba instruyendo a su famoso pupilo Alejandro Magno, Aristóteles podría haber usado

Todos los humanos son mortales.
Alejandro es un humano.
Luego Alejandro es mortal.

Esa versión podría haber cambiado el curso de la historia al persuadir a Alejandro Magno de cuidar un poco más de sí mismo. Lo más probable, sin embargo, es que hubieran despedido a Aristóteles, o algo peor.

Algún día, quizá no muy lejano, cuando la tecnología médica mejore y/o la inteligencia humana migre fuera de los cuerpos humanos tradicionales, tengamos que revisar la proposición «todos los humanos son mortales». Por ejemplo, el estatus de este silogismo resultaría dudoso:

Todos los humanos son mortales.
Ray Kurzweil es un humano.
Luego Ray Kurzweil es mortal.

Pero cuando llegue ese día feliz, si llega, la gente preferirá empezar el silogismo con «todos los humanos prístinos eran mortales», o algo de ese tipo, y proseguirán como antes, aunque incorporando ahora unas distinciones más precisas. En cualquier caso, la mortalidad de Sócrates, Aristóteles y Alejandro nunca estuvo muy en duda, ni siquiera mucho antes de que murieran, precisamente por la razón expresada en los silogismos, una vez que los entendemos bien.

El punto general, para nuestro propósito actual, es que unos fundamentos más amplios y firmes hacen más segura la inferencia. Los enunciados generales pueden resultar puentes útiles para los particulares, incluso cuando los últimos parecen afirmar estrictamente menos.

¿Y qué hay del pollo de Russell? El pollo piensa:

El Buen Granjero me alimenta cada día.
Mañana es otro día.
El Buen Granjero me alimentará mañana.

¡Se parece un montón a los silogismos anteriores! Pero los parecidos no lo son todo. Aunque este silogismo tiene la misma *forma* lógica, su *contenido* efectivo es muy diferente. Un pollo lo bastante inteligente se percataría de que el Buen Granjero no siempre le suministra la comida para pollos de la misma forma exacta, ni al mismo tiempo exacto cada día, y también de que el Buen Granjero hace muchas otras cosas. Un pollo lo bastante inteligente trataría de hacer una teoría que explicara esas otras acciones del Buen Granjero, y —si fuera una joven gallina particularmente perspicaz— se vería inducida a pensar en el Buen Granjero como en un agente egoísta con motivaciones. La joven gallina podría percatarse también de que el Buen Granjero y su familia comen productos biológicos, que los cultivos se cosechan, que los animales de la granja desaparecen de manera misteriosa de vez en cuando, y demás. Llegada a ese punto, la joven gallina empezaría a sospechar que está por llegar un Día del Juicio en que el Buen Granjero *no* se comportará como en la primera línea del silogismo. Mientras que «*todos los humanos son mortales*» resiste a un atento escrutinio, y forma parte de una visión del mundo abarcadora y coherente, «*el buen granjero me alimenta cada día*» no lo hace.

Para recoger el guante de Russell, responder a Hume y defender la cordura, tenemos que justificar nuestra conjetura de la uniformidad de la naturaleza. Podemos hacer la conjetura más segura, como acabamos de discutir, dotándola de unos fundamentos más amplios y firmes. Nuestra formulación de la uniformidad en el tiempo como un enunciado sobre la simetría de la ley física nos ayuda a hacerlo, de varias maneras. Podemos extraer de ello muchas consecuencias que no son en modo alguno obvias, pero que resultan ser rasgos verdaderos del mundo físico. La más simple: podemos repetir unas mediciones delicadas a distintos tiempos, y comprobar si los resultados concuerdan. Si miramos a estrellas y galaxias distantes, accedemos al pasado con más profundidad, porque la luz viaja a velocidad constante. Podemos comprobar que sus líneas espectrales pretéritas siguen el mismo patrón que las que observamos hoy. De esta manera, vemos que entonces operaban las mismas leyes de la física atómica que operan hoy. Y además, inspirados por Noether, ¡podemos comprobar la conservación de la energía!

Esto no es en absoluto embellecer algo que ya es perfecto, o rizar el rizo, porque la conservación de la energía se emplea bien a fondo al analizar las reacciones de partículas elementales, que sondean condiciones muy extremas.

Ahora que todas esas pruebas, y otras, se han realizado con gran cuidado y precisión, el argumento a favor de la cordura es fuerte.

Para redondear esta reflexión, debemos señalar dos uniformidades adicionales de la ley física, junto a la uniformidad en el tiempo, que son casi tan básicas en la construcción de mundos: la uniformidad en el espacio y la uniformidad de sustancia. La uniformidad en el espacio, que mencionamos antes, comparte con la uniformidad en el tiempo las pruebas experimentales y astronómicas. E, inspirados por Noether, podemos comprobarla de otra forma: ¡comprobando la conservación del momento! De nuevo, esto no es en absoluto rizar el rizo, porque la conservación del momento se emplea bien a fondo al analizar las reacciones de partículas elementales, que sondean unas condiciones muy extremas.

Por último está la *uniformidad de sustancia*: el hecho observado de que todos los electrones (por ejemplo) tienen exactamente las mismas propiedades. Esta suposición está implícita en todas las aplicaciones de la física atómica moderna, la electrónica y la química. Aunque se la suele dar por hecha, es todo lo contrario de obvia.

En la manufactura humana, el uso de partes intercambiables fue una innovación revolucionaria, y supuso un duro trabajo alcanzarla. Sin embargo, mucho antes de las innovaciones de Samuel Colt y Henry Ford, el Artesano de la naturaleza había anticipado las virtudes de las partes intercambiables. En la Teoría Central de hoy, el carácter intercambiable de los electrones es consecuencia del hecho de que todos los electrones (por ejemplo) son excitaciones mínimas —cuantos— de un fluido común que llena el mundo, y de que las propiedades de ese fluido son uniformes en el espacio y el tiempo. Así, en el marco de la teoría cuántica, la uniformidad de sustancia no requiere conjeturas adicionales. Se desprende de la uniformidad del espacio y el tiempo y, por tanto, como nos enseñó Emmy Noether, de la simetría.

Belleza cuántica IV: en la belleza confiamos

Una parábola dodecaédrica

El dodecaedro ya ha aparecido varias veces en nuestra exposición. Siendo uno de los cinco sólidos platónicos, encarna mucha simetría geométrica. Según el propio Platón, es la forma del universo como un todo. Hemos visto cómo Salvador Dalí utilizó un simbolismo dodecaédrico para expresar una conexión cósmica que de otro modo sería difícil de pintar en un lienzo. También hemos encontrado al dodecaedro acechando en cada forma de la variedad infinita de buckminsterfulerenos, donde sus doce pentágonos sirven de facilitadores, permitiendo a los hexágonos de grafeno cerrarse en una superficie finita.

Los dodecaedros también tienen un uso muy práctico, como calendarios de mesa. Se adecúan de forma elegante a ese uso, al tener doce caras, todas bonitas e iguales, de modo que puedes encajar un mes en cada una. Es fácil encontrar en Internet las instrucciones para hacer esos calendarios, utilizando diseños recortables de cartón o papel rígido.

El dodecaedro es una forma hermosa, y a estas alturas se ha convertido en un amigo cercano.

Ahora imaginemos que un duende juguetón quiere picar nuestro amor propio, o darnos la alegría de resolver un bonito rompecabezas. Él desconecta algunas partes del diseño y les quita las marcas, generando el enigma de la Figura 39.

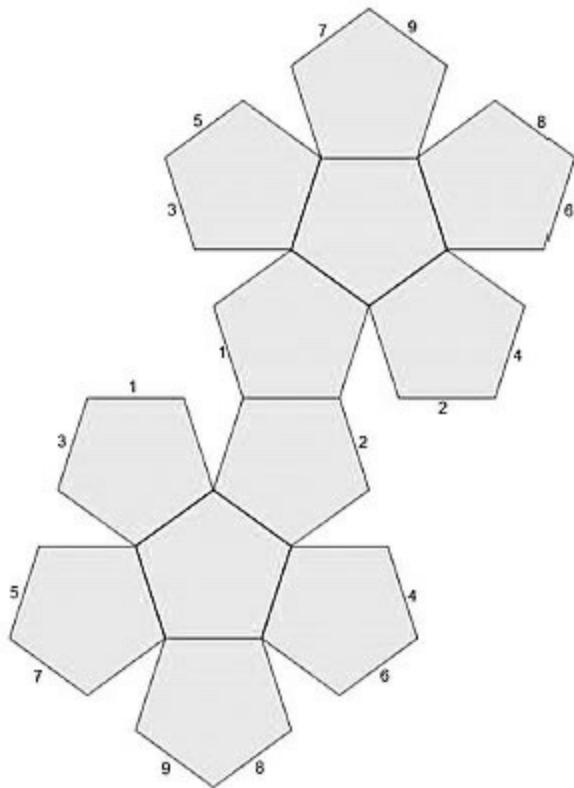


FIGURA 38. Este precioso diseño te permitirá construir un dodecaedro. Tienes que copiar el patrón en cartón o papel rígido, luego cortarlo por el borde exterior y plegarlo por las líneas sólidas interiores, de manera que los lados con el mismo número queden juntos.

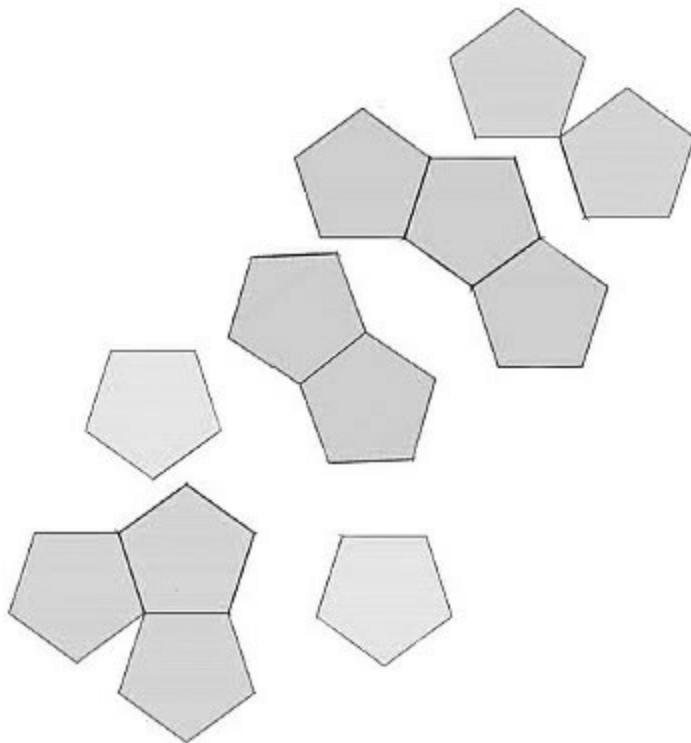


FIGURA 39. Con el patrón desmontado, la imagen se vuelve más difícil de interpretar, pero aún quedan pistas reveladoras de su origen. El alfabetismo dodecaédrico nos conducirá desde esta colección de piezas de vuelta a la Figura 38, y de ahí a nuestro dodecaedro platónico.

Ahora es más difícil interpretar lo que vemos. La mayoría de la gente, que tal vez no haya pensado mucho sobre los dodecaedros en tiempos recientes, no sabría qué hacer con este patrón parcial. Pero aquellos de nosotros que hemos reflexionado sobre la belleza y sus encarnaciones estamos preparados para el desafío. Doce pentágonos regulares idénticos, algunos pares que comparten lados, algunos tripletes listos para compartir un vértice... ¡eso dispara las alarmas! Reconocemos el potencial oculto de esos patrones, y estamos preparados para hacer algo bello con ellos.

Con ese triunfo en mente, volvamos ahora a nuestra Teoría Central. Describe un tesoro enorme de hechos —observaciones sólidas y cuantitativas sobre el mundo físico— usando un conjunto de ecuaciones muy compacto. Como hemos visto, es un fundamento más que adecuado para la química, todos los tipos de ingeniería, la biología (probablemente), la astrofísica y buena parte de la cosmología. También es elegante. Las ecuaciones de la Teoría

Central tienen profundas raíces en la simetría. Por esa razón, podemos reconstruir la teoría central entera a partir de unas cuantas instrucciones generales sobre los espacios de propiedad a los que pueden acceder distintas partículas, y sobre la simetría (local) que queremos que soporten esos espacios. Podemos especificar los datos necesarios en usar imágenes resumidas razonablemente simples, las Láminas TT y UU.

La Teoría Central es una maravillosa descripción de la naturaleza. Sería difícil exagerar su precisión, su poder o su belleza. Y aun así los *connoisseurs* de la belleza definitiva no estarán satisfechos. Precisamente *porque* está tan cerca de la última palabra de la naturaleza, tenemos que elevar la Teoría Central a los criterios estéticos más altos posibles. Cuando se la examina con ese espíritu crítico, la Teoría Central muestra imperfecciones.

- Contiene tres fuerzas matemáticamente similares: las fuerzas fuerte, débil y electromagnética. Todas son encarnaciones de un principio común: la simetría local de los espacios de propiedad. Y la gravedad es una cuarta fuerza. También se basa en la simetría local, aunque de un tipo diferente: simetría galileana local. La gravedad es también mucho más débil que las otras tres fuerzas. Sería más gratificante, y bello, tener una simetría maestra, y una fuerza global, que aportaran una descripción coherente de la naturaleza. Tres (o cuatro) es desde luego más que una, de modo que todavía no estamos ahí.
- Lo que es peor, incluso después de identificar las partículas que son «realmente» la misma entidad, solo que situada en distintos lugares del espacio, nos encontramos con seis entidades «fundamentales» sin relación entre sí. También seis es, definitivamente, más que una.
- También tenemos la triplicación de las familias, que parece gratuita.
- Y también tenemos el fluido de Higgs, que desempeña un papel único e importante en la teoría, pero aparece como otra parte móvil independiente. El fluido de Higgs se introdujo para parchear las cosas (y lo hace), no para embellecerlas (y no lo hace).

En suma: es un parche, sin duda, y un crítico duro podría llamarlo un follón.

¿Podría el Artesano, una vez que la Teoría Central estaba esbozada, haberla llamado un buen trabajo semanal y haberse detenido ahí?

Antes de rendirnos a ese pensamiento perturbador, volvamos a la lección del dodecaedro. En ese caso, vimos cómo la belleza —y en particular la simetría— indica una interpretación convincente de lo que de otro modo parecería un batiburrillo aleatorio. Entender las posibles simetrías de los objetos en el espacio nos llevó a percibir que solo hay un puñado de sólidos platónicos, y ese conocimiento nos permitió inferir un dodecaedro subyacente a partir de unas evidencias parciales y distorsionadas.

La Teoría Central se basa en unas formas de simetría más complicadas que las rotaciones del espacio tridimensional ordinario, y en unos objetos (espacios de propiedad) menos familiares que el dodecaedro. Pese a ello, podemos ensayar el mismo tipo de idea. ¿Puede que la simetría fragmentaria de la Teoría Central, y los objetos en apariencia cojos e inconexos sobre los que actúa, sean trozos de una simetría mayor que actúa sobre objetos más grandes cuyas conexiones se han ocultado a nuestra mirada?

Si encontramos una respuesta positiva a esa cuestión matemática, nos insinuará nuevas teorías físicas que puede trascender las imperfecciones de la Teoría Central. Yang y Mills nos mostraron, dada una simetría asumida y su acción en los espacios de propiedad, cómo construir una teoría correspondiente de fuerzas y partículas. En esa construcción, las simetrías vienen encarnadas por sus avatares, las partículas gauge (por ejemplo, gluones de color, bosones débiles, fotones), que median las fuerzas. Nuestra hipotética simetría mayor nos dará todas esas fuerzas, y más.

Gracias a los matemáticos de finales del siglo XIX y principios del siglo XX —Sophus Lie y sus sucesores— tenemos un inventario completo de las simetrías y espacios candidatos, de modo que podemos ver si alguno de ellos cumple los requisitos. Así como hay solo unos pocos sólidos platónicos, resulta que hay solo unas pocas simetrías mayores candidatas que pueden unificar las simetrías de la Teoría Central (como las rotaciones de un dodecaedro), e incluso menos posibilidades razonables para los espacios de propiedad que puedan vincular los de la Teoría Central (como las caras de un dodecaedro).

Cuando las posibilidades están tan limitadas, el éxito es incierto. Si la imagen coja e inconexa de la Figura 39 hubiera estado coja e inconexa de un modo diferente —digamos, con tres de los pentágonos rodeando un agujero triangular, o con trece pentágonos en total, o con pentágonos de diversos tamaños, o con una mezcla de pentágonos y cuadrados—, nuestro intento de explicarlo basándonos en la simetría oculta habría fallado. De modo similar, la estructura coja e inconexa de la Teoría Central tiene que estar coja e inconexa en exactamente la manera adecuada si va encajar en el patrón de una simetría mayor. Así que, si hallamos un patrón que encaje, es improbable que sea una coincidencia. ¡Es probable que signifique algo!

Es por tanto gratificante descubrir que una de las posibles simetrías de Lie, actuando sobre un hermoso espacio de propiedad, acomoda la realidad a la perfección. La simetría unificadora contiene las simetrías fuerte-débil-electromagnética de la Teoría Central. Puede actuar sobre un espacio de propiedad que tiene justo el tamaño y la forma adecuados para acomodar los quarks y leptones conocidos. Y, lo más importante, no contiene nada más. (Para expertos: la simetría se basa en el grupo de rotaciones en diez dimensiones, denotado $SO(10)$. El espacio de propiedad se basa en la representación espinorial de 16 dimensiones de ese grupo. Este patrón fue descubierto por Howard Georgi y Sheldon Glashow.)

Párate un momento ahora para echar un buen vistazo a las Láminas VV y WW, que documentan ese descubrimiento. El razonamiento que sigue, como una especie de pie de foto extendido, explica en detalle la interpretación de las láminas. Encontrarás, en esta argumentación, toda la información que necesitas para apreciar cómo las Láminas VV y WW codifican el contenido de las Láminas RR y SS, que resumen la Teoría Central. El hilo conductor de nuestra reflexión descansa solo en la amplia descripción en el texto principal. Los detalles más finos honran la nota 20 en las notas finales. Me dio la sensación de que era importante hacer accesibles a tu inspección los detalles de ese resultado maravilloso. Puedes decidir tú mismo a qué profundidad te comprometes con ellos.

Las partículas de la Teoría Central, dentro de ese esquema, habitan seis espacios de propiedad separados y de distinta forma, como describimos en el capítulo anterior. Alternativamente, podemos decir que forman seis entidades

distintas.

En nuestra teoría unificada, una simetría mayor conecta esos espacios de propiedad y convierte todas las partículas en una sola entidad, o multiplete. Esta unificación de la materia evoca la unificación que alcanzamos antes entre las piezas inconexas y cojas de nuestra figura misteriosa, cuando reconocimos que encajaban en un dodecaedro. Así como las caras de un dodecaedro están todas relacionadas mediante las rotaciones adecuadas, aquí todas las partículas están relacionadas entre sí por una simetría matemática; ¡y también mediante transformaciones físicas concretas!

Si miramos las Láminas VV y WW, arriba a la izquierda tenemos una tabla muy abstracta de signos + y -. Hay cinco columnas y 16 filas. Las distintas filas contienen todas las posibles distribuciones de cinco signos + y -, sujetas a la restricción de que el número total de + sea par. Arriba a la derecha empieza el proceso de desplegar ese patrón abstracto como una realidad física. Tiene la misma estructura, pero ahora las columnas se interpretan como representaciones de las distintas cargas de color fuertes y débiles (y pronto emergerá que las filas representan las partículas de sustancia). Las primeras tres columnas representan las tres cargas de color fuertes roja, verde y azul, por ese orden. Las últimas dos columnas representan las dos cargas de color débiles amarillo y morado. Traducimos nuestra tabla previa de signos + y - al nuevo formato poniendo circulitos sólidos del color apropiado donde hay signos +, y circulitos vacíos del color apropiado donde hay signos -.

Los círculos sólidos (derivados de los signos +) se interpretan como media unidad de carga. Así, un círculo sólido rojo representa media unidad de carga de color rojo, y así sucesivamente. (La brillantez de este factor $\frac{1}{2}$ será evidente en un momento.) Los círculos vacíos (derivados de los signos -) se interpretan como media unidad *negativa* de carga.

Justo entre esas dos láminas hay una fórmula matemática simple que define una cantidad Y como una simple combinación numérica de colores. Recuerda que, en el censo de sustancias de la Teoría Central, que se ve en las Láminas RR y SS, había unos números curiosos que reflejaban las cargas eléctricas. Esas curiosas cargas eran, en la Teoría Central, independientes de los colores fuerte y débil, y elegidas meramente para encajar los resultados

experimentales. En un momento vas a ver cómo esos patitos feos de la Teoría Central maduran como hermosos cisnes en nuestra teoría unificada. Por ahora, basta con que repares en que he puesto los valores de Y que obtenemos al aplicar la fórmula a cada fila, en una columna entre las dos tablas de arriba.

La tabla de abajo a la izquierda no es más que una copia de la de arriba a la derecha, y la he puesto ahí para facilitar la lectura. También he copiado la columna central de números.

La tabla de abajo a la derecha es una refundición de su vecina de la izquierda, tras utilizar las reglas de blanqueado fuerte y débil para simplificarla. Te voy a llevar de la mano por este proceso en la primera fila; las otras son similares. Según la regla de blanqueado fuerte, una mezcla igualitaria de cargas roja, verde y azul no tiene efecto en la fuerza fuerte. Así que podemos simplificar nuestra descripción de las cargas de color fuerte de la partícula de la primera fila, por lo que concierne a la fuerza fuerte, añadiendo media unidad de cada uno de los tres colores, rojo, verde y azul. Esa operación anula las preexistentes medias unidades negativas de verde y azul, al tiempo que promociona al rojo a una unidad completa. Y, en nuestra tabla de abajo a la derecha, dibujamos el resultado: un circulazo sólido rojo, y nada de verde ni azul. Pasando a las dos columnas de las cargas débiles, añadimos medias unidades tanto al amarillo como al morado, apelando a la regla de blanqueado débil, para obtener un circulazo sólido amarillo y nada de morado.

Y ahora se revela un milagro. La lista de partículas y propiedades a la que hemos llegado, sin más que desarrollar la tabla abstracta inicial (la de arriba a la izquierda), ¡coincide exactamente con nuestro censo de sustancias de la teoría central (Láminas RR y SS)! La primera fila, por ejemplo, coincide con la entrada superior izquierda de la entidad A. Los nombres convencionales de las partículas se presentan en la Lámina WW, en la última columna de abajo a la derecha de la página, y te ayudarán a guiar tu investigación. Es un ejercicio festivo, que recomiendo de forma encarecida, comprobar una a una las 16 filas. Antes de empezar, sin embargo, hay una última sutileza que debo mencionar. Las partículas *diestras* de la Teoría

Central se representan aquí mediante sus antipartículas *zurdas*. Así que, si ves un signo — antes del nombre, tienes que cambiar el signo de todas las cargas (incluida Y) y buscar la *diestra* que coincide con ella.

Hasta aquí nuestro «pie de foto extendido».

Resumiendo: tras examinar las entradas de nuestras láminas icónicas de unificación VV y WW , ¡hallamos una correspondencia perfecta con las partículas de sustancia de la Teoría Central, que se representan en su síntesis icónica, las Láminas RR y SS ! En estas habíamos estudiado el mundo —el mundo Real— y clasificado sus partículas. En las Láminas VV y WW , nuestro punto de partida ha sido muy diferente. Hemos empezado con un Ideal —un espacio de alta simetría, presentado como candidato a espacio de propiedad— y hemos derivado, de forma matemática, las propiedades de las partículas que contiene su teoría de simetría local (Yang-Mills). Siguiendo esos dos caminos tan diferentes, hemos llegado al mismo destino. El nuevo camino es una descripción más unificada y basada en principios más sólidos. Captura mucho de lo que sabemos del mundo de la Materia en una construcción de la Mente pura. Es un espléndido ejemplo de:

Real \leftrightarrow Ideal

La prueba de la realidad

Si es correcto, eso es...

Las matemáticas de la simetría han revelado una perspectiva tentadora. Han esbozado un camino que conduce desde unas ideas bellas hasta la Teoría Central que gobierna el mundo, y más allá. Es una visión que recuerda, por su inspiración estética y su audacia, a la teoría atómica de Platón, aunque incomparablemente más sofisticada y precisa.

Pero surgen dos pegas graves cuando intentamos desarrollar ese boceto grosero como un retrato de la realidad. Una es fácil de abordar. La otra supone un verdadero desafío. Nos seducirá para embarcarnos en una interesante aventura cuyo destino no está claro todavía.

Empecemos por la pega fácil. La teoría extendida contiene muchas más partículas gauge (de fuerza) que la Teoría Central, y por tanto muchas más fuerzas transformativas. Tenemos, en concreto, no solo los gluones de color que cambian una carga de color fuerte por otra, y bosones débiles que cambian una carga débil por otra, sino también *mutatrónes* que cambian una unidad de carga de color fuerte por una unidad de carga de color débil. (No hay un nombre convencional para estas partículas en la literatura, así que me he inventado uno; la broma es esta: los *mutatrónes* producen mutaciones.) Por ejemplo, hay un mutatrón que transforma una unidad de carga roja en una unidad de carga morada. Esa operación transforma la 1.^a fila de las Láminas VV y WW en la 15.^a, como puedes comprobar. Así, el contacto con ese mutatrón concreto cambiará un quark rojo por un antielectrón. Nada semejante se ha observado nunca. Si las mutaciones existen, ¿por qué no hemos visto sus efectos?

Por fortuna, este problema es muy similar a otro que ya encontramos, y resolvimos, en la teoría de la fuerza débil. Tal vez recuerdes que la simetría local prística predice que los bosones débiles, al igual que el fotón y los gluones de color, tienen masa cero. Pero, si la tuvieran, su influencia sería mucho más poderosa de lo que se observa en la realidad. Ese es el problema que resuelve el mecanismo de Higgs. Al llenar el espacio del material apropiado, los teóricos hicieron que los bosones débiles se hicieran pesados, y armonizaron lo Real con lo Ideal. Antes del descubrimiento real de la partícula de Higgs, muchos físicos se mostraban escépticos ante esa idea audaz,* pero ahora la naturaleza ha testificado a su favor de la forma más elocuente.

Una versión amplificada de la misma idea básica otorgaría unas masas enormes a los inoportunos mutatrónes de la teoría unificada, y así suprimiría todos sus inoportunos efectos. No tenemos más que llenar el mundo —o para decirlo con más humildad (y exactitud), reconocemos que el mundo *está* lleno— de un material que otorga masa (de manera selectiva), y seguimos adelante.

Vamos ahora con la pega difícil. Si queremos tener simetría entre las diversas fuerzas, esas fuerzas deben tener la misma magnitud; esto es una consecuencia inmediata de su presunta equivalencia. Pero ¡uy!, no la tienen. La

fuerza fuerte es en verdad más poderosa que las demás. Las tres fuerzas básicas *no* son iguales en magnitud de ninguna de las maneras (y la gravedad es, a primera vista, *desesperadamente* débil en comparación).

(Interludio importante aunque algo técnico: debería hacer una pausa para explicar cómo se hace esa comparación. La idea básica es la simplicidad misma. Todas nuestras fuerzas de la teoría gauge, basadas como están en ecuaciones de tipo Maxwell, actúan entre partículas cargadas. Para las fuerzas electromagnéticas lo relevante es la carga eléctrica, para la fuerza fuerte es la carga de color y, para la fuerza débil es la carga de color débil. Para cada una de nuestras fuerzas, hay una unidad, o cuarto, de carga. Así que, para comparar las fuerzas, no hay más que comparar cómo actúan entre unidades de carga. En la práctica es un poco más complicado, por dos razones. Primera: el efecto de la fuerza débil se suprime a distancias mayores de 10^{-16} centímetros, y el efecto de la fuerza fuerte se suprime a más de 10^{-14} centímetros, por razones interesantes pero complicadas que hemos tratado antes —el mecanismo de Higgs y el confinamiento, respectivamente—. Así que, para que la comparación sea justa, solo deberíamos comparar a distancias menores que eso. Segunda: no es factible, de hecho, manipular las partículas en el espacio con ese grado de precisión. Lo que hacen los experimentadores, en realidad, para acceder al comportamiento a pequeñas distancias es disparar partículas una contra otra, y estudiar la probabilidad de que resulten desviadas con unos ángulos, relativamente, grandes. Luego deshacemos el camino, desde las desviaciones hasta las fuerzas que las causan. Tal vez recuerdes que esta fue la estrategia que utilizaron Rutherford, Geiger y Madsen para explorar el interior del átomo, allá por 1912. El principio subyacente no ha cambiado, pero hoy, al estrellar unas partículas contra otras con una energía mucho mayor, podemos acceder a distancias más cortas. La comparación de las otras tres fuerzas con la gravedad es algo más delicada. Por un lado, por todo lo que sabemos no hay una unidad básica de carga para la gravedad: responde a la energía. Por otro lado, estamos usando sondas que tienen distinta energía, para comparar fuerzas a distintas distancias. De modo que, al evaluar el poder relativo de la gravedad a esas distancias, simplemente la sustituimos por la energía adecuada a esa distancia, y calculamos la fuerza gravitatoria que ejerce. Fin del interludio técnico.)

Reimaginando la libertad asintótica

Habiendo llegado hasta aquí, sin embargo, no deberíamos abandonar de manera tan fácil. Y en efecto, otra gran lección de la Teoría Central —la libertad asintótica— insinúa una solución. En el capítulo anterior vimos lo importante que era, para entender la fuerza fuerte, percibir que la magnitud de esa fuerza varía con la distancia, haciéndose más poderosa a largas distancias, y menos poderosa a cortas distancias. Esa variabilidad nos permitió reconciliar el confinamiento de los quarks, que apunta a una fuerza poderosa que se opone a las separaciones grandes, con su independencia, que apunta a una fuerza lánguida cuando la separación es corta.

La libertad asintótica mueve las cosas en la dirección correcta. Como la magnitud de la fuerza fuerte decrece a distancias cortas, la diferencia entre ella y las otras fuerzas se aminora.

¿Podrían llegar a ser todas iguales?

Para pasar de la esperanza a la visión, y luego de la visión al cálculo, será de ayuda reimaginar la libertad asintótica, utilizando imágenes y conceptos de validez general: más allá de la fuerza fuerte, e incluso más allá de la Teoría Central.

Concedámonos unos ojos más ágiles y entendidos.

La Lámina XX muestra lo que veríamos, mirando al «espacio vacío», si nuestros ojos pudieran resolver intervalos de tiempo tan pequeños como 10^{-24} segundos, y objetos o tamaños tan pequeños como 10^{-14} centímetros.

Esta imagen, para ser más exactos, es una instantánea de una típica distribución de la densidad de energía que surge de las fluctuaciones en las fuerzas de los campos de gluones. Las fluctuaciones de ese tipo burbujean de manera espontánea, por todo el espacio, a través del tiempo, como consecuencia de la mecánica cuántica. (A veces se las denomina partículas virtuales, o también movimiento de punto cero.) La actividad espontánea del fluido de gluones es responsable de la libertad asintótica, del confinamiento y de la mayor parte de nuestra masa, como hemos visto. Puesto que aparecen como componentes centrales en unos cálculos que se han confrontado con la realidad con gran precisión y de muchas formas, la existencia de estas fluctuaciones es tan cierta como lo pueda ser cualquier cosa en ciencia. En

esta imagen calculada, las concentraciones de energía más intensas se indican con los colores más «cálidos» —rojo y amarillo brillante—, mientras que a las regiones menos intensas se les asigna un amarillo menos intenso, verde y por último azul celeste. Las regiones en que la densidad de energía está por debajo de un umbral se dejan vacías de color, contra un fondo negro. La magnificación de esta imagen es de unas 10^{15} veces, de modo que la región que representa es tan pequeña, comparada con una persona, como la persona lo es comparada con el universo visible. Las fluctuaciones se reciclan en unos 10^{-24} segundos. Ese tiempo es mucho más pequeño, comparado con un segundo, que un segundo lo es comparado con el tiempo desde el Big Bang.

Puesto que la QCD (cromodinámica cuántica) se ha puesto a prueba con un rigor casi increíble, resulta tan cierto como lo pueda ser algo en ciencia que esta imagen representa con precisión algo que ha ocurrido, está ocurriendo y seguirá ocurriendo todo el tiempo, en todas partes.

¡Pero aún hay más! El campo gluónico no es el único fluido cuántico, ni mucho menos. Podemos calcular también que el fluido fotónico (es decir, electromagnético) fluctúa, como también lo hace los fluidos de bosones débiles. Y así lo hacen también los fluidos asociados con la creación y destrucción de las partículas de «sustancia»: los quarks y los leptones. El fluido de electrones fluctúa, el fluido de quarks up fluctúa, y así sucesivamente. Las consecuencias físicas de las fluctuaciones en esos otros fluidos tienden a ser menores que el efecto de las fluctuaciones en los fluidos de gluones, porque los gluones son numerosos (¡hay ocho!) e interactúan con vigor. Pero los principios generales de la teoría cuántica predicen fluctuaciones en todos los fluidos cuánticos, y hay evidencias aplastantes, obtenidas en mediciones de precisión, de que esas fluctuaciones ocurren. Para corregir nuestra visión, debemos tomarlas todas en cuenta.

Así como el agua distorsiona la forma en que los peces ven el mundo, también el medio del espacio —en concreto, la actividad de los fluidos cuánticos que lo llenan— distorsiona nuestra percepción de las distancias más cortas. Para percibir los principios fundamentales subyacentes, tenemos que

corregir esas distorsiones. Y esa es nuestra esperanza. Las diferentes fuerzas *parecen* desiguales en magnitud. Pero tal vez, una vez que corrijamos nuestra visión, se revelen iguales.

Un fallo por poco

He aquí lo que pasa cuando llevas a cabo ese programa (Figura 40). Como puedes ver, casi funciona: tres líneas que representan las magnitudes de las distintas fuerzas *casi* se encuentran en un punto. Pero no del todo.

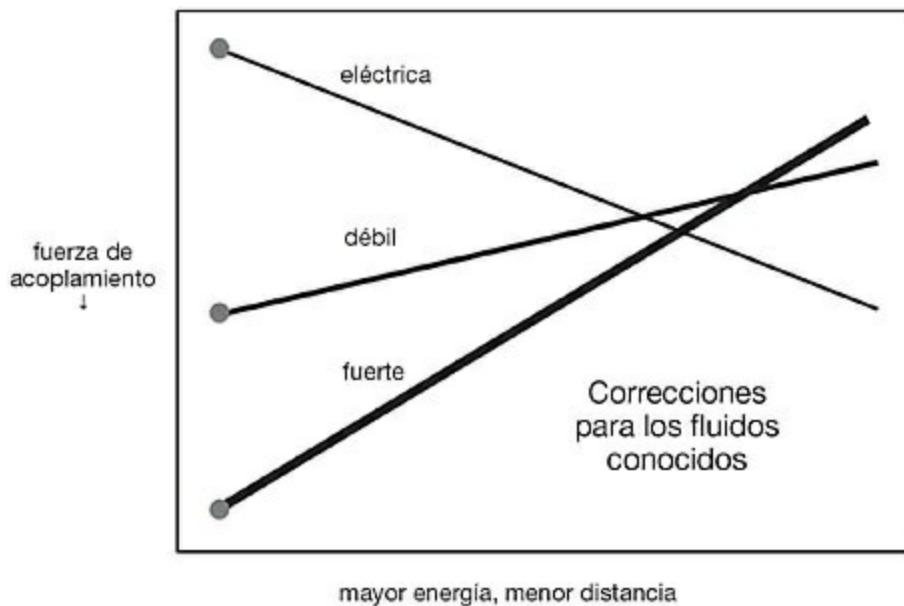


FIGURA 40. Una vez corregidos los efectos de los fluidos cuánticos conocidos, encontramos que la unificación es un fallo por poco.

Y ahora veamos un poco de información adicional sobre la Figura 40, para el caso de que te gustara entenderla con detalle técnico: para hacer el resultado tan simple como fuera posible —¡tres líneas rectas!— he tenido que tomar dos decisiones ligeramente peculiares, que se indican en los textos de los ejes. He hecho que la altura de los puntos represente las magnitudes inversas, de modo que, cuanto más poderosa la fuerza, más *abajo* aparece. (Esa opción de apariencia perversa tiene también otra importante ventaja, que aparecerá en la Figura 41.) En la dirección horizontal, he utilizado una escala

logarítmica. De este modo, cada paso hacia la derecha encoge la distancia e incrementa la energía que necesitamos para sondear esa distancia... ¡en un factor diez! Así nuestro cálculo, pese su modesta apariencia, nos lleva mucho más allá de donde los aceleradores actuales pueden. El grosor de las líneas indica sus incertidumbres experimentales y teóricas.

Lo que esperábamos hallar era que las magnitudes de las distintas fuerzas básicas se hicieran iguales al medirse a cortas distancias o sondearse a altas energías. Tomamos los valores que hemos medido a las distancias (o energías) que permiten los más poderosos aceleradores disponibles, y luego usamos teorías y cálculos para estimar lo que hallaríamos a distancias incluso más cortas (o a más altas energías). En esta figura, los puntos de base, que representan mediciones, aparecen a la izquierda, destacados por los circulitos grises. Las distancias más cortas, a las que «accedemos» mediante cálculos, se extienden hacia la derecha. Se ve que casi funciona —las tres líneas *casi* se encuentran en un punto—, pero no del todo.

En esta coyuntura, podemos buscar consuelo en las ideas de un famoso filósofo, Karl Popper. Popper nos enseñó que el objetivo de la ciencia es generar teorías falsables (o refutables). Y nosotros hemos generado una teoría que no es solo *falsable*, sino *falsa*. ¡Misión cumplida!

Pero pobre consuelo es ese. Hemos desarrollado una hermosa idea que parecía prometedora, y casi funciona. La belleza es preciosa. No debemos abandonar tan pronto.

Y ahora quisiera contarte la historia de cómo un par de amigos míos y yo mismo descubrimos una posible solución. Pero antes tengo que presentarte a otro amigo: SUSY.

Presentando a SUSY

La supersimetría, o SUSY para abreviar, es un nuevo tipo de simetría. Su existencia como posibilidad matemática fue una gran sorpresa para los físicos. Fue propuesta en su forma madura en 1974, por Julius Wess y Bruno Zumino.

La simetría, en general, es Cambio sin Cambio. Aplicada a sistemas de ecuaciones, es la idea de que podemos hacer transformaciones entre las cantidades que aparecen en las ecuaciones, sin cambiar las consecuencias de las ecuaciones. La supersimetría es un ejemplo concreto de ese concepto, que implica un tipo de transformación especialmente raro.

Ya hemos visto muchos ejemplos de simetría física. La simetría de traslación temporal implica transformar lo que significa tiempo, mediante la adición o sustracción de una constante. La simetría galileana, el concepto central de la relatividad especial, implica transformar el mundo —es decir, el espacio-tiempo— mediante la adición o sustracción de una velocidad constante, dándole así un «empujón».

La supersimetría extiende la relatividad especial para tener en cuenta un nuevo tipo de transformación. Es una versión cuántica de la transformación galileana del «empujón» que da velocidad. Las transformaciones galileanas cuánticas, como las transformaciones galileanas ordinarias, implican movimiento, pero es un movimiento hacia, o desde, extrañas dimensiones nuevas. Las nuevas dimensiones de la supersimetría son muy distintas de las dimensiones de la geometría ordinaria. Las llamamos dimensiones *cuánticas*.

Como exploramos antes, en nuestra reflexión de los espacios de propiedad, *qué* puede depender de *dónde*. La misma entidad, situada en distintas posiciones del espacio de propiedad, a menudo se manifiesta como varias partículas «diferentes». Nosotros —o, yendo más al grano, los gluones, bosones débiles y fotones— responden a esa entidad de distintas maneras, según dónde estén en el espacio de propiedad. Si te imaginas una partícula moviéndose por un espacio de propiedad, esa partícula se transforma durante el viaje de una clase de partícula en otra clase de partícula.

Las dimensiones cuánticas de la supersimetría son también como eso. Lo que es nuevo es la naturaleza radical de la transformación que ocurre cuando una partícula se mueve dentro de ellas.

La Teoría Central se divide en dos partes, que hemos llamado sustancia y fuerza (o, poéticamente, yin y yang). El sector «sustancia», compuesto de quarks y leptones, contiene unas partículas que tienen cierta persistencia y textura: unas propiedades que asociamos a la materia terrosa, y a la

sustancialidad. El concepto técnico preciso, que captura lo que todas esas partículas tienen en común, es que son *fermiones*, llamados así en honor de Enrico Fermi.

- Los fermiones vienen y se van en pares. Como resultado, si tienes uno, no puedes deshacerte de él por completo. Podría convertirse en otro tipo de fermión, o en tres, o en cinco, junto a cualquier número de no fermiones (es decir, bosones, como veremos), pero no se puede disipar en la nada, sin dejar ningún rastro.
- Los fermiones obedecen el principio de exclusión de Pauli. Dicho toscamente, esto significa que a dos fermiones del mismo tipo no les gusta hacer la misma cosa. Los electrones son fermiones, y el principio de exclusión para los electrones tiene un papel crucial en la estructura de la materia. Vimos esto cuando exploramos el mundo exuberante del carbono.

El sector «fuerza», compuesto de gluones de color, el fotón, los bosones débiles y, también, la partícula de Higgs y el gravitón, contiene partículas que tienden a ir y venir con facilidad —o, en la jerga, a ser emitidas y absorbidas—, y eso ocurre a menudo en haces. El concepto técnico preciso, que captura lo que todas esas partículas tienen en común, es que son *bosones* (llamados así en honor de Satyendra Bose):

- Los bosones se pueden crear o destruir de forma individual.
- Los bosones obedecen al «principio de inclusión» de Bose. Hablando toscamente, esto significa que dos bosones del mismo tipo están muy contentos de hacer la misma cosa. Los fotones son bosones, y el principio de inclusión para los fotones es lo que posibilita el láser. Cuando se les ofrece la oportunidad, una colección de fotones intentarán hacer todos lo mismo, generando un rayo estrecho de luz espectralmente pura.

El contraste entre partículas de sustancia y de fuerza —fermiones y bosones— es muy severo. Supuso una gran imaginación —y mucha audacia— concebir que podría superarse. Y aun así las dimensiones cuánticas consiguieron eso exactamente. Cuando una partícula de sustancia se mete en

una dimensión cuántica, se convierte en una partícula de fuerza; cuando una partícula de fuerza se mete en una dimensión cuántica, se convierte en una partícula de sustancia. Es una especie de magia matemática a la que no voy a poder hacer justicia aquí. Pero describiré brevemente la rareza central, que es bastante divertida.

Proyectamos las dimensiones ordinarias sobre números ordinarios, los llamados números «reales». Tomamos un punto de referencia, que suele llamarse origen, y marcamos cada punto con un número (real) que describe cuánto tienes que moverte para llegar allí desde el origen. Los números reales, en una palabra, son adecuados para medir distancias y para marcar magnitudes continuas. Satisfacen la regla de multiplicación

$$xy = yx$$

Las dimensiones cuánticas utilizan un tipo diferente de números, llamados números de Grassmann. Estos satisfacen una ley de multiplicación distinta,

$$xy = -yx$$

¡Ese pequeño signo menos supone una enorme diferencia! En particular, si hacemos $x = y$, obtenemos $x^2 = -x^2$, y por tanto concluimos que $x^2 = 0$. Esa extraña regla codifica, en la interpretación física de las dimensiones cuánticas, el principio de exclusión de Pauli: no puedes poner dos cosas en el mismo lugar (cuántico).

Tras esta preparación, estamos listos para conocer a SUSY. La supersimetría es la propuesta de que nuestro mundo tiene dimensiones cuánticas, y de que existen transformaciones que intercambian las dimensiones ordinarias con las cuánticas (cambio), sin cambiar las leyes de la física (sin cambio).

De ser correcta, la supersimetría será una nueva encarnación profunda de la belleza en el mundo. Puesto que las transformaciones de la supersimetría convierten las partículas de sustancia en partículas de fuerza, y viceversa, la supersimetría puede explicar, basándose en la simetría, por qué ninguna de

esas cosas puede existir sin la otra: ambas son la misma cosa, vista desde diferentes perspectivas. La supersimetría reconcilia los opuestos aparentes, en el espíritu del yin-yang.

Del «no es erróneo» al (tal vez) correcto

Savas Dimopoulos siempre está entusiasmado por algo. En la primavera de 1981, ese algo era la supersimetría. Savas estaba visitando el nuevo Instituto Kavli de Física Teórica en Santa Bárbara, al que yo me había unido hacía poco. Hicimos buenas migas de inmediato. Savas entraba en ebullición con nuevas ideas, y a mí me gustaba partirme la cabeza intentando tomarle en serio.

La supersimetría era (y es) una hermosa teoría matemática. El problema para aplicar la supersimetría es que es demasiado buena para este mundo. Predice nuevas partículas: montones de ellas. No hemos visto, hasta ahora, las partículas que predice. No vemos, por ejemplo, partículas con la misma carga y masa que los electrones, pero que sean bosones en vez de fermiones.

Pero la supersimetría demanda que esas partículas existan. Cuando un electrón se mete en una dimensión cuántica, se convierte justo en esa partícula.

Basándonos en la experiencia con otras formas de simetría, tenemos una posición de último recurso llamada ruptura espontánea de la simetría. El último recurso es suponer que las ecuaciones para el objeto de nuestro interés —que, en la física fundamental, es el mundo en su conjunto— tienen la simetría, pero que sus soluciones estables no la tienen.

Un imán ordinario es el ejemplo clásico de ese fenómeno. En las ecuaciones básicas que describen un trozo de calamita (piedra magnética), cualquier dirección es equivalente a cualquier otra. Pero la piedra forma un imán, y en un imán ya no es cierto que todas las direcciones sean equivalentes. Cada imán tiene una polaridad, y se puede usar para hacer la aguja de una brújula. ¿Cómo puede ser esa direccionalidad coherente con las ecuaciones no direccionales? El punto es que hay fuerzas que tienden a alinear *entre sí* los espines de los electrones del imán. En respuesta a esas fuerzas, todos los electrones tienen que elegir una dirección común en la que apuntar. Las fuerzas

—y las ecuaciones que las describen— quedarán igual de satisfechas con cualquier dirección elegida, pero *hay que hacer una elección*. Así que las soluciones estables de las ecuaciones tienen menos simetría que las ecuaciones mismas.

La ruptura espontánea de simetría es una estrategia para obtener lo mejor de dos mundos. Si tenemos éxito, podemos aplicar unas ecuaciones bellas (supersimétricas) para describir una realidad menos bella (asimétrica; ¿o deberíamos decir subsupersimétrica?).

En concreto, cuando un electrón se mete en la dimensión cuántica, su *masa* cambiará. Si la nueva partícula en que se convierte, el llamado selectrón, es lo bastante pesado, no supone una sorpresa que no lo hayamos observado. Será una partícula inestable que solo puede existir brevemente, tras generarse en un acelerador de (muy) alta energía.

En las fronteras de la ignorancia, las aplicaciones de la ruptura espontánea de simetría implican idear hipótesis creativas. Tienes que adivinar una simetría que no es visible en el mundo, ponerla en tus ecuaciones y mostrar que el mundo —o, de forma más realista, algún aspecto del mundo que estás intentando explicar— salta de sus soluciones estables.

¿Podemos usar ese recurso para la supersimetría? Construir modelos del mundo con una supersimetría rota espontáneamente que sean coherentes con todo lo que sabemos resulta difícil. Yo le di un intento breve cuando la supersimetría se desarrolló por primera vez, a mediados de los años setenta, pero después de que algunos enfoques simples me fallaran de manera miserable decidí abandonar. Savas es un constructor de modelos mucho más dotado por naturaleza, en dos aspectos cruciales: no insiste en la simplicidad y no abandona.

Fue una colaboración interesante, reminiscente de *La extraña pareja*. Cuando yo identificaba una dificultad concreta (llamémosla A) que no se abordaba en su modelo, él decía: «No es un problema real, estoy seguro de poder arreglarlo», y a la tarde siguiente volvía con un modelo más complicado que resolvía la dificultad A. Pero entonces nos poníamos a discutir la dificultad B, y él la resolvía con otro modelo complicado totalmente diferente.

Para resolver tanto A como B, tenías que juntar los dos modelos, y entonces surgían nuevos problemas. Enjabonar, aclarar, repetir. A no mucho tardar, las cosas se volvieron increíblemente complicadas.

Al final conseguimos parchearlo todo, utilizando el método del agotamiento. Cualquiera (incluidos nosotros dos) que revisara el modelo en busca de errores se quedaba agotado tratando de seguir las complicaciones antes de ser capaz de señalar una dificultad. Cuando intenté escribir ese trabajo para publicarlo, me hallé inhibido por cierto sentimiento de bochorno sobre la complejidad y arbitrariedad de lo que se nos había ocurrido.

Savas, como he dicho, disfruta con la complejidad. Para entonces ya estaba hablando con otro colega, Stuart Raby, acerca de la posibilidad de añadir la supersimetría a los modelos de unificación de fuerzas, que ya eran complicados de entrada, por otras razones.

Yo no estaba muy entusiasmado con este apilamiento de conjeturas. Para ser sincero, lo que yo quería mostrar era que eso no funcionaría, de modo que pudiera lavarme las manos de ese follón con la conciencia limpia. Mi plan era encontrar alguna consecuencia general definida que no dependiera de los detalles del parcheado. Se mostraría erróneo, y por tanto se acabó: buena eliminación de la mala basura.

Para orientarme y hacer un cálculo definido, propuse que empezáramos por hacer la cosa más tosca, que era ignorar el tema entero de la ruptura (espontánea) de simetría, que era la fuente de casi todas las complicaciones y de toda la incertidumbre. Eso nos permitió centrarnos en modelos bonitos, simples y simétricos, al precio de abandonar el realismo. Podíamos calcular si las fuerzas se juntaban en esos modelos. (Estábamos siguiendo, sin haberlo pensado, los pasos de Pitágoras y Platón. Y, por supuesto, haciendo caso del consejo del padre Malley.)

El resultado fue una gran sorpresa, al menos para mí. En esos primeros tiempos, las mediciones relevantes eran todavía muy groseras, y por tanto las líneas de la Figura 40 eran más gruesas, lo que indicaba una mayor incertidumbre. Las líneas gruesas sí que se solapaban. En otras palabras, parecía posible, dadas las incertidumbres, que las magnitudes de las distintas fuerzas se unificaran a distancias cortas. Eso era una pista tentadora, famosa entre los teóricos del sector. Lo que salió de nuestros cálculos, y me pareció

asombroso, era que los modelos supersimétricos, aunque contenían muchos más fluidos fluctuantes, ¡también funcionaban! Las respuestas diferían —según tuvieras o no en cuenta la supersimetría—, pero ambas eran coherentes con la información experimental existente.

Eso marcó un punto de inflexión. Dejamos a un lado los modelos complicados del tipo «no es erróneo» que intentaban encajar la realidad en detalle. En vez de eso, Savas, Stuart y yo escribimos un artículo corto que, a primera vista, era claramente poco realista (es decir, erróneo). Con la supersimetría intacta, lo que estábamos proponiendo era demasiado bueno para este mundo. Con todo, ofrecía un resultado tan directo y eficaz que hacía que la idea de unificar las unificaciones, reuniendo la *unificación de fuerzas*:

fuerte + débil + electromagnética

... con la *unificación supersimétrica*:

sustancia + fuerza

... pareciera (tal vez) correcta. Así que dejamos el problema de cómo se rompe la supersimetría para otro día.

A veces el paso más importante para comprender *algo* es darte cuenta de que no deberías preocuparte de *todo*. Suele ser mejor estar (tal vez) en lo cierto acerca de algo que «no ser erróneo» acerca de todo.

¿La joya de la corona?

La Figura 41 representa en un gráfico lo que reveló nuestro cálculo.

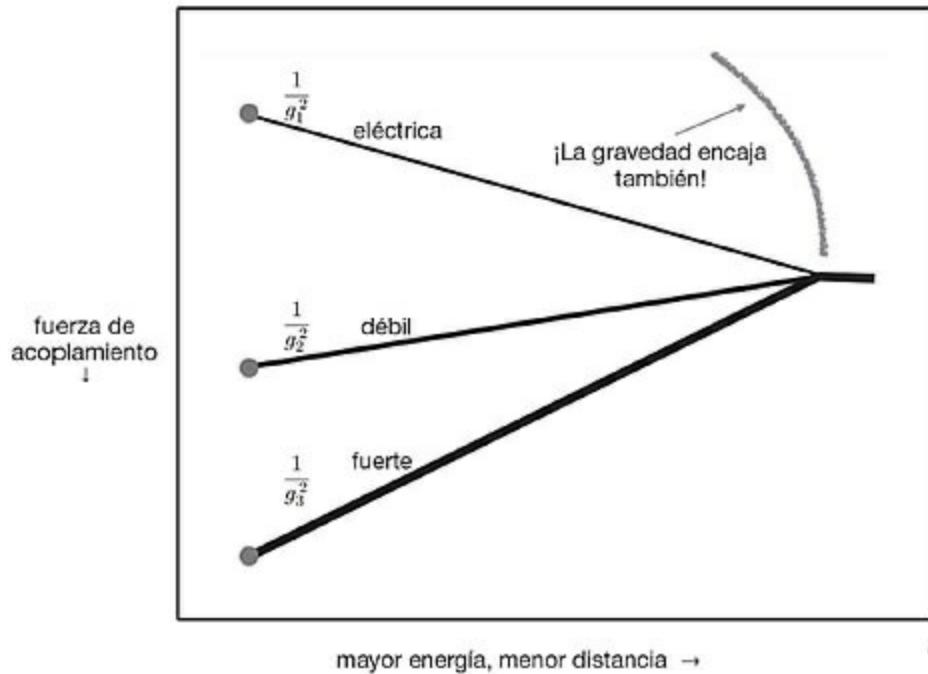


FIGURA 41. Tras añadir los efectos de los nuevos fluidos cuánticos que requiere la supersimetría, ocurre una unificación precisa.

La supersimetría introduce nuevas fuentes de actividad en el espacio: nuevos tipos de fluctuaciones cuánticas, o partículas virtuales. Tenemos que revisitar la Figura 40, para incluir también correcciones a sus distorsiones. Por supuesto, utilizaremos la mejor información experimental disponible de modo que nuestras líneas sean lo más finas posible.

Y, cuando hacemos eso, ¡funciona! Las magnitudes de las distintas fuerzas —fuerte, débil y electromagnética— se juntan con una precisión impresionante.

Y aún hay más. Hasta ahora hemos dejado la cuarta fuerza, la gravedad, fuera de nuestro tratamiento de la unificación. Ha sido una decisión estratégica. La unificación de las otras tres fuerzas supone un problema mucho más madurado y simple. Las fuerzas fuerte, débil y electromagnética se describen por unas teorías profundamente similares. Cada una es una encarnación de la simetría local de un espacio de propiedad. Y, aunque las magnitudes observadas de esas fuerzas difieren, como se indica por la distribución de los puntos en las Figuras 40 y 41, no están fuera de proporción de un modo desaforado. De hecho, difieren por menos de un factor diez.

La gravedad es diferente, en ambos aspectos. La teoría que la gobierna —la teoría de la relatividad general de Einstein— también es una encarnación de la simetría local, como hemos visto, pero la simetría (simetría local galileana) es de un tipo diferente. Aún más desalentadora es su *absurda* disparidad de magnitud. La gravedad, cuando actúa entre partículas elementales a energías accesibles, es mucho mucho *mucho* más débil que las otras fuerzas. Si cada «mucho» representara un factor diez, ¡necesitaríamos cuarenta «muchos»! Y así, en la Figura 41, no se ve ningún círculo que represente la fuerza observada de la gravedad. Porque ese círculo queda muy muy *muy* fuera del universo visible. Supone unos 27 factores de diez llegar desde el tamaño de nuestra figura hasta el tamaño del universo visible, y eso aún dejaría 13 sobrantes.

Pese a todo, podemos meter también a la gravedad en el juego. Y, si perseveramos, se nos recompensará.

La gravedad responde *directamente* a la energía, de modo que si la sondeamos (con la mente y el lápiz) a unas energías cada vez mayores, su fuerza aumenta en proporción. Ese crecimiento de magnitud directo es un efecto mucho más poderoso, cuantitativamente, que los cambios de magnitud de las otras fuerzas, debido a las fluctuaciones cuánticas. El arco de la Figura 41, que representa la inversa de la magnitud de la gravedad, se hunde hacia abajo. Vuelve a entrar en el universo visible, y está muy cerca de juntarse con las otras tres fuerzas, en el punto en que estas se reúnen también.

Al nivel del acoplamiento de magnitudes, entonces, conseguimos una unificación completa entre las cuatro fuerzas básicas

$$\text{fuerte} + \text{débil} + \text{electromagnética} + \text{gravedad}$$

Ese logro no representa en sí mismo una teoría completa de unificación. Por ejemplo, tal vez te hayas percatado de que, si continuamos extendiendo las líneas de la Figura 41 hacia la derecha, ¡las fuerzas se «desunificarían» de nuevo! Para las fuerzas fuerte, débil y electromagnética, podemos desarrollar la unificación. No podemos derivar una teoría totalmente única —no hay bastante información para eso—, pero las teorías posibles tienen mucho en común. En concreto, todas requieren partículas nuevas y muy pesadas, como

los mutatrónes que ya hemos mencionado. Las fluctuaciones asociadas a esas partículas, que no se incluyen en la Figura 41, hacen que los acoplamientos permanezcan una vez que se han encontrado. (No tienen mucho efecto antes de eso.) Cuando intentamos incluir la gravedad, las incertidumbres son mucho mayores. Uno de los grandes objetivos de la teoría de cuerdas es explicar cómo la gravedad se unifica con las otras fuerzas, pero ese objetivo se ha mostrado elusivo hasta la fecha.

Pese a sus limitaciones, esta unificación de fuerzas es un gran resultado. Emerge de la búsqueda de una respuesta a nuestra pregunta bella, y la corona. Confirma, con impresionante precisión y exactitud, que la belleza, en su forma específica de simetría profunda, está encarnada en el mundo.

¿O no?

Para satisfacer nuestra visión, hemos tenido que apelar a la supersimetría. Como hasta ahora no hay evidencias directas de la supersimetría, esa conjectura es cuestionable. (El éxito de nuestro cálculo es, para mí, ¡una fuerte evidencia *circunstancial!*)

Por suerte, podemos comprobarlo. Si las nuevas partículas que predice la supersimetría tienen que hacer la tarea que les hemos asignado, no pueden ser demasiado pesadas. Las grandes masas suprimen sus fluctuaciones cuánticas, y devolverían la Figura 41 al aspecto de la Figura 40. El Gran Colisionador de Hadrones debería estar pronto en condiciones de concentrar la suficiente energía para empezar a producir algunas de esas partículas. En los próximos cinco años. Apuesto por ello.

En la belleza confiamos

*En Dios confiamos: * los demás pagan en efectivo*

JEAN SHEPHERD (título de su libro)

En la belleza confiamos, cuando hacemos nuestras teorías, pero su «valor en efectivo» depende de otros factores. La verdad es muy deseable, pero no es el único criterio, ni siquiera el más importante. La mecánica de Newton (centrada en la conservación de la masa) y su teoría de los colores (centrada

en la conservación de los tipos espetrales), por ejemplo, no son verdad estrictamente, y sin embargo son unas teorías enormemente valiosas. La fertilidad —la capacidad de una teoría para predecir nuevos fenómenos y darnos poder sobre la naturaleza— es también una gran parte de la ecuación.

En el pasado, la confianza en la belleza ha rendido a menudo beneficios. La teoría newtoniana de la gravedad fue desafiada por la órbita de Urano, que no obedecía sus predicciones. Urbain Le Verrier, y también John Couch Adams, creyendo en la belleza de la teoría, se vieron forzados a proponer la existencia de un nuevo planeta, que no se había observado aún, cuya influencia podía ser la responsable de la anomalía. Sus cálculos dijeron a los astrónomos dónde mirar, y condujeron al descubrimiento de Neptuno. La gran síntesis de Maxwell, como hemos visto, predijo nuevos colores de la luz, invisibles para nuestros ojos y tampoco observados en la época. Confianto en la belleza de la teoría, Hertz produjo y observó las ondas de radio. En tiempos más recientes, Paul Dirac predijo, mediante una ecuación extraña y hermosa, la existencia de las antipartículas, que no se habían observado entonces, pero lo fueron poco después. La Teoría Central, anclada en la simetría, nos dio los gluones de color, las partículas W y Z , la partícula de Higgs, el quark *charmed* y las partículas de la tercera familia, todo ello como predicciones anteriores a su observación.

Pero también ha habido fallos. La teoría atómica de Platón y el modelo planetario de Kepler fueron hermosas teorías que, como descripciones de la naturaleza, fallaron estrepitosamente. Otro error fue la teoría atómica de Kelvin, que proponía nudos de actividad en el éter. (Los nudos vienen en diferentes formas, y no se desatan fácilmente, así que podía parecer que tenían las propiedades adecuadas para hacer átomos.) Estos «fallos» no dejaron de dar frutos: la teoría de Platón inspiró unas investigaciones más profundas de la geometría y la simetría, el modelo de Kepler le inspiró su gran carrera en la astronomía, y el modelo de Kelvin inspiró a Peter Tait a desarrollar la teoría de los nudos matemáticos, que sigue siendo hoy una materia vibrante. Pero, como teorías del mundo físico, son erróneas sin remedio.

El destino de la supersimetría no está decidido aún. Su descubrimiento, como hemos visto, podría recompensar nuestra confianza en la belleza como una guía hacia la realidad profunda. Hay buenas razones para pensar que el

descubrimiento puede ser inminente, y razones hermosas para esperarlo, pero eso no ha ocurrido de momento.

Veremos.

Una doble bendición

Según la historia del incrédulo Tomás, el apóstol Tomás era escéptico acerca de la resurrección de Cristo, y rehusaba creer en ello mientras no hubiera evidencias:

Mientras no vea en sus manos las heridas de los clavos, y ponga mi dedo en las heridas de los clavos, y le meta la mano en la llaga del costado, no he de creer.

Cuando Jesús se apareció a Tomás, le permitió examinar sus heridas, y Tomás creyó. Jesús dijo:

Tomás, porque Me has visto has creído: benditos sean los que no han visto, y aun así han creído.

Esta historia ha inspirado muchas obras de arte, incluida *La incredulidad de Santo Tomás* de Caravaggio (Lámina YY), que me parece evocadora. Para mí, el cuadro de Caravaggio transmite dos mensajes profundos que van más allá del texto evangélico. Se puede ver, en primer lugar, que Jesús no se resiste al examen inquisitivo de Tomás, sino que más bien lo acepta gustoso. Y se puede ver que Tomás está fascinado y emocionado al descubrir que la realidad corresponde a sus esperanzas más profundas. El incrédulo Tomás es un héroe, y un hombre feliz.

Los que creen sin ver son bendecidos con el gozo de la certeza. Pero la suya es una frágil certeza, y una alegría vacía.

Aquellos cuya fe no es pasiva, sino que se compromete con la realidad, recibirán una segunda bendición más gratificante por la armonía entre creencia y experiencia. Benditos sean los que creen lo que ven.¹⁴

¿Una bella respuesta?

No todas las ideas bellas sobre la realidad profunda son verdaderas. La visión de Platón de unos átomos idealmente geométricos y la visión de Kepler de un Sistema Solar geométrico son ejemplos que ya hemos tratado. El extraordinario *Hombre de Vitruvio* de Leonardo (Lámina ZZ) alude a otros ejemplos de un tipo diferente. Su dibujo insinúa que hay conexiones fundamentales entre la geometría y las proporciones humanas (ideales). Este concepto enlaza con unas tradiciones filosóficas y místicas aún más antiguas, y mucho más populares, que la corriente pitagórica que hemos seguido: la idea de que el cuerpo humano refleja la estructura del universo, y viceversa. Acaso por desgracia, ni los humanos ni nuestros cuerpos figuramos de manera prominente en la imagen del mundo que emerge de la investigación científica.

Tampoco todas las verdades de la realidad profunda resultan bellas. La Teoría Central tiene muchos cabos sueltos, y hay pocas perspectivas de atarlos todos. Incluso si mis sueños de axiones, supersimetría y unificación llegan a cumplirse, el lioso patrón (o la falta de él) de masas de los quarks y los leptones, y la conceptualmente opaca energía oscura, seguirán siendo problemáticos en el futuro que podemos prever.

No obstante, al concluir esta reflexión, espero que estés de acuerdo en que la única respuesta adecuada a su Pregunta

¿Encarna el mundo ideas bellas?

... es un sonoro

¡Sí!

Esa respuesta emerge, cada vez con más fuerza y claridad, de cada una de las páginas de este libro. Las esperanzas más osadas que tenían Pitágoras y Platón de encontrar pureza, orden y armonía conceptuales en el corazón de la creación han sido superadas de lejos por la realidad. Hay realmente una Música de las Esferas encarnada en los átomos y en el moderno Vacío, no sin relación con la música en el sentido ordinario, pero con una extrañeza y una abundancia añadidas de suyo. El Sistema Solar no encarna la visión original de Kepler, pero el propio Kepler descubrió la precisión de sus leyes dinámicas, y permitió así la belleza de la mecánica celeste newtoniana. Hay realmente mucho más en la luz de lo que incluso nuestro maravilloso sentido de la vista revela, y nuestra imaginación —¡y no solo nuestra imaginación!— abre nuevas Puertas de la Percepción. Las fuerzas básicas de la naturaleza encarnan simetría, y se materializan en sus avatares.

Ni tampoco las inspiraciones de Leonardo eran por completo erróneas, si las interpretamos con mayor amplitud. La conexión (cuerpo humano ↔ cosmos) ya no parece central, pero su familiar cercana

microcosmos ↔ macrocosmos

... está prosperando.

En esta reflexión hemos explorado sobre todo la parte izquierda de ese par, pero volvamos ahora la vista hacia fuera con la ayuda de la Lámina AAA. Es una imagen del cielo tal y como le aparecería a un observador cuyos ojos percibieran radiación de microondas en vez de luz. Por supuesto, para poner la información en una forma que los humanos podamos percibir, se ha hecho cierto procesamiento de la imagen. La intensidad de la radiación se codifica como color de la luz, donde el azul oscuro corresponde a la menor intensidad, el rojo brillante a la más alta, y con un abanico de colores que se interpola entre esos dos extremos. También —¡un «detalle» crucial!— se ha restado un promedio uniforme, y el contraste se ha intensificado unas diez mil veces. La imagen sin tratar sería una niebla amorfa; lo que ves es el patrón de las minúsculas desviaciones del promedio.

La principal interpretación de esta imagen traza unas conexiones maravillosas entre microcosmos y macrocosmos. El cielo de microondas es una instantánea de las condiciones del universo al principio de su historia, hace unos trece mil millones de años, y unos cien mil años después del Big Bang. La luz irradiada entonces está llegando aquí ahora, tras haber hecho un viaje muy largo. Y este es el mensaje que nos trae: hace trece mil millones de años el universo era casi perfectamente uniforme, pero no del todo. Contenía unas desviaciones de la uniformidad total que se miden en partes por 10.000.

Esas desviaciones de la uniformidad crecieron por inestabilidad gravitatoria (las zonas más densas atraen materia de las zonas menos densas circundantes, con lo que crece el contraste). Acabaron dando lugar a las galaxias, las estrellas y los planetas tal y como los conocemos hoy. Esto es una astrofísica bastante simple y directa, una vez que se tienen las semillas. Así que la gran pregunta es ahora: ¿cómo surgieron esas semillas por primera vez?

Necesitamos más evidencias para estar seguros, pero parece probable, por lo que sabemos hasta ahora, que nacieron como fluctuaciones cuánticas, similares a las que vemos en la Lámina XX. En las condiciones actuales, las fluctuaciones cuánticas solo son significativas a distancias muy pequeñas, pero un episodio de expansión muy muy rápida durante la historia inicial del universo, mediante un proceso conocido como inflación cósmica, puede estirarlas hasta proporciones universales.

De vuelta a la Tierra

Cuando estaba acabando este libro, me ocurrió una desgracia que me trajo de vuelta a la Tierra. Mi ordenador portátil, que para mí es un apéndice del cerebro, fue robado. Yo estaba destrozado.

Pero entonces ocurrió un milagro. Tenía todos los datos en una copia de seguridad, y en solo unos días ya tenía un nuevo portátil con todo restaurado: imágenes, palabras, cálculos, música y demás. Todo eso había sido codificado en números —ristras de ceros y unos— de un modo tan fidedigno que pudo

reaparecer sin apenas modificación. Se me ocurrió entonces que difícilmente se podía pedir una demostración más tangible, directa o impresionante de la verdad de la visión de Pitágoras:

Todas las Cosas son Número

Es una bella realidad, por la que di —y doy— las gracias.

La complementariedad como sabiduría

¿Me contradigo?

Muy bien, entonces, me contradigo,
soy grande, contengo multitudes.

WALT WHITMAN, *Hojas de hierba*¹⁵

Nuestra exploración de la naturaleza nos ha mostrado muchas perspectivas nuevas. No es fácil reconciliarlas con la experiencia cotidiana, ni entre sí. De su inmersión en el mundo cuántico, donde la contradicción y la verdad son vecinos cercanos, Niels Bohr extrajo la lección de la *complementariedad*: ninguna perspectiva única agota la realidad, y distintas perspectivas pueden ser valiosas, y sin embargo mutuamente incompatibles.



FIGURA 42. Blasón diseñado por Niels Bohr.

El signo del yin-yang es un símbolo adecuado de la complementariedad, y como tal fue adoptado por Niels Bohr. Sus dos aspectos son iguales, pero diferentes; cada uno contiene al otro y es contenido por él. Tal vez no fuera una coincidencia que Niels Bohr tuviera un matrimonio feliz.

Una vez reconocida, la complementariedad es una sabiduría que redescubrimos, y confirmamos, tanto en el mundo físico como en otros. Es una sabiduría que yo abrazo, y que te recomiendo. Consideremos algunos pares complementarios:

Reducción y abundancia

- Los bloques básicos de construcción de la naturaleza son pocos y profundamente simples, con sus propiedades especificadas por completo por ecuaciones de alta simetría.
- El mundo de los objetos es vasto, infinitamente diverso e inagotable.

Comprender los fundamentos con más profundidad no puede deshacer la riqueza de la experiencia. Puede iluminar la experiencia, y lo hace, y nos faculta para seguir enriqueciéndola.

Un mundo, y muchos

- Los cerebros individuales son los repositorios definitivos del pensamiento humano, y encajan sin dificultad en los cráneos individuales, en los cuerpos individuales, aquí en el planeta Tierra. La mayoría de la gente, la mayor parte del tiempo —cuando no están filosofando o haciendo astronomía— están ocupados en cosas que ocurren en una pequeña región de la superficie de la Tierra. Es aquí donde la historia humana —grandes guerras, gran arte y miles de millones de absorbentes vidas «ordinarias»— se representa.
- Vista incluso desde el espacio más vecino, la Tierra no es más que una mota minúscula de luz reflejada (Figura 43).

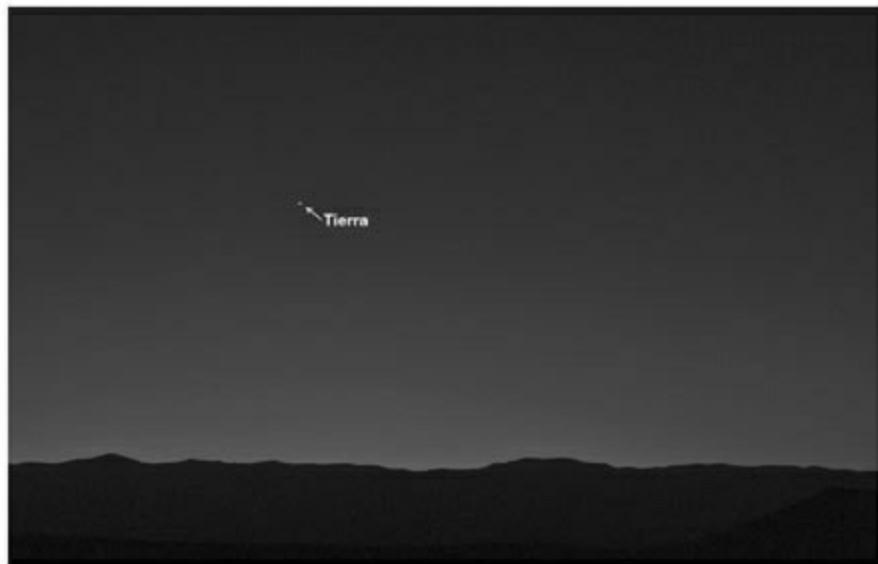


FIGURA 43. La Tierra, vista desde Marte.

Los avances recientes de la cosmología indican que la parte del universo que podemos observar actualmente, incluso con los instrumentos más poderosos, no es más que una pequeña parte de un multiverso cuyas partes más lejanas podrían parecer muy diferentes. Si esto se confirmara, amplificaría un tema que ya ha sonado antes de manera repetida: cada «mundo» experimentado por una persona es uno entre miles de millones de ellos (uno por persona, al menos); la Tierra es uno entre varios planetas de nuestro Sol; el Sol es uno de los miles de millones de estrellas de nuestra galaxia, la Vía Láctea; nuestra galaxia es una entre los miles de millones del universo visible.

La existencia de inmensidades circundantes no me disminuye a mí, ni a ti, ni a la humanidad como un todo. Puede ampliar nuestra imaginación, y lo hace.

Objeto y persona

- Soy, como tú, una colección de quarks, gluones, electrones y fotones.
- Soy, como tú, una persona pensante.

Predeterminado y libre

- Soy, como tú, un objeto material, sujeto a las leyes de la física.
- Soy, como tú, capaz de tomar decisiones. Soy, como tú, responsable de ellas.

Transitorio y eterno

- El mundo está en estado de flujo, y todo objeto en él está sujeto al cambio.
- Los conceptos viven fuera del tiempo y, como Todas las Cosas son Número, nos liberan de él.

En las fronteras de la física y la cosmología, esta complementariedad tiene un gran papel. En nuestros días hacemos una separación incómoda entre las leyes de la física y las condiciones iniciales, que está pidiendo ser superada. La visión del mundo de cualquier observador finito evoluciona, pero el espacio-tiempo en su conjunto, que es el escenario más natural para describir el mundo, no lo hace. La función de onda mecanocuántica de un sistema en su conjunto puede ser constante en el tiempo, mientras que sus partes, consideradas por separado, experimentan el cambio relativo. (Para los expertos: esto ocurre de forma rutinaria en las *eigenfunciones*, o autofunciones, de energía de los sistemas complejos.) Algo similar pudiera muy bien ser cierto del mundo en su conjunto. Cambio sin Cambio, el gran principio fructífero de la simetría, quedaría entonces encarnado por entero, tal y como, de forma paradójica, insistió Parménides:

Una historia, un camino, ahora
queda: eso es. Y en este hay signos
abundantes de que el ser no ha sido generado ni es destructible,
entero, de un tipo e inquebrantable, y completo.

Un par complementario final concluye nuestra reflexión:

Bello y no bello

- El mundo físico encarna belleza.
- El mundo físico es el hogar de la miseria, el sufrimiento y el conflicto.

En ningún aspecto debemos olvidar el otro.

Agradecimientos

La semilla de este proyecto se plantó en 2010, cuando acepté una invitación del Darwin College de Cambridge para dar una conferencia sobre la «Belleza cuántica». Me gustaría agradecer a Christopher Johnson y 3Play Media haber preparado una transcripción extremadamente útil de la conferencia, y a Zoe Leinhardt, Philip Dawid y, sobre todo, a Lauren Arrington por sus indicaciones y su ayuda para convertirlo en un capítulo de la colección Belleza.

Debo agradecer a John Brockman que haya nutrido ese brote al animarme a desarrollar y extender las ideas expuestas allí, y por llevarlo a la atención de Penguin Press.

Scott Moyers y Mally Anderson, de Penguin Press, han sido una gran ayuda desde el principio, aportando una sabia mezcla de entusiasmo, crítica constructiva y sugerencias creativas que me han inspirado a escribir más y a reescribir a veces. Mally ha supervisado el proyecto hasta sus fases finales con serenidad, nutriéndolo hasta su forma madura. Estoy muy agradecido a los diseñadores y el personal técnico de Penguin Press por su profesionalidad y su devoción al ideal de generar un producto bello.

Al Shapere hizo comentarios útiles de los borradores iniciales.

Mi esposa y compañera en la vida, Betsy Devine, ha leído todo y ha hecho muchas sugerencias para hacer el lenguaje más directo y contundente. También propuso y defendió «Términos del arte»; sin su contribución, esa sección no existiría de ninguna forma similar a la presente. Y me alivió durante los altibajos inevitables en una tarea tan enorme como este libro.

Agradezco a mi institución, el MIT (Massachusetts Institute of Technology), por el tipo de apoyo fiable que hace posible una aventura como esta, y a la Universidad Estatal de Arizona por su ayuda durante la fase final. Escribí una parte esencial del libro durante una visita a China, sobre todo en

una semana mágica en el lago del Oeste. La influencia de esa semana se puede sentir en muchos lugares del libro, empezando por el frontispicio. Mi agradecimiento a Vincent Liu, Wu Biao y Hongwei Xiong por organizar la visita.

Cronología

I: Física precuántica

- c. **525 a. C.** Pitágoras (570-495 a. C.) desarrolla leyes numéricas de la geometría y la armonía musical.
- c. **369 a. C.** El amigo de Platón (429-347 a. C.), Teeteto, desarrolla la teoría de los sólidos platónicos.
- c. **360 a. C.** El diálogo de Platón *Timeo* defiende su teoría atómica y sus especulaciones cosmológicas.
- c. **300 a. C.** Los *Elementos* de Euclides desarrollan la geometría como un sistema deductivo.
- c. **1400** Filippo Brunelleschi (1377-1446) desarrolla la geometría proyectiva como fundamento de la perspectiva artística.
- c. **1500** Leonardo da Vinci (1452-1519) presagia la fusión del arte, la ingeniería y la ciencia.
- 1543** Nicolás Copérnico (1473-1543) propone, en su *De revolutionibus*, el sistema heliocéntrico, basado en la estética matemática.
- 1596** El *Mysterium cosmographicum* de Johannes Kepler propone un modelo del Sistema Solar basado en los sólidos platónicos. Su trabajo posterior establece las leyes empíricas del movimiento planetario.
- 1610** El *Sidereus nuncius* («Mensajero de las estrellas») de Galileo Galilei (1564-1642) anuncia un sistema «minicopernicano» de lunas que orbitan sobre Júpiter, y establece que nuestra Luna tiene una naturaleza similar a la Tierra, basándose en observaciones con sus propios telescopios pioneros.
- 1666** Isaac Newton (1642-1727) desarrolla unas teorías que suponen enormes avances en el cálculo, la mecánica y la óptica.

- 1687** Los *Principia* de Newton resuelven las leyes de la gravedad celeste y terrestre de acuerdo con principios matemáticos.
- 1704** La *Óptica* de Newton recoge sus experimentos y conjeturas sobre la naturaleza de la luz.
- 1831** Michael Faraday descubre la inducción electromagnética.
- 1850-1860** Las publicaciones de James Clerk Maxwell (1831-1879) sobre la visión en color empiezan en **1855**. Sus artículos principales de electrodinámica son: «On Faraday's Lines of Force», **1855**; «On Physical Lines of Force», **1861**; «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field», **1864**.
- 1887** Heinrich Hertz (1857-1894) genera y detecta ondas electromagnéticas, lo que confirma la inducción de Maxwell y sienta los fundamentos teóricos de la radio y, en su momento, las otras telecomunicaciones.

II: Física cuántica, simetría y teoría central

- 1871** La tesis de Sophus Lie (1842-1899) introduce los conceptos de transformación continua y simetría, que después desarrolla y refina.
- 1899** Ernest Rutherford (1871-1937) identifica las desintegraciones nucleares con emisión de electrones («desintegración beta») como una forma de radiactividad, iniciando el estudio experimental de la fuerza débil.
- 1900** Max Planck (1858-1947) introduce la cuantización para el intercambio de energía entre la materia y la luz.
- 1905** Albert Einstein (1879-1955) introduce el concepto de que la luz existe en sí misma como unidades discretas (cuantos = fotones). Sus teorías de la relatividad especial y la relatividad general (**1915**) son unas teorías físicas poderosas basadas en postulados de simetría. Establecen el escenario para el trabajo posterior en simetría rígida (global) y anamórfica (local), respectivamente.
- 1913** Hans Geiger (1882-1945) y Ernest Marsden (1889-1970) usan, a propuesta de Ernest Rutherford, experimentos de dispersión para demostrar la existencia del núcleo atómico. Niels Bohr introduce su

eficaz modelo atómico, basado en ideas cuánticas.

- 1918** El teorema de Emmy Noether (1882-1935) establece la conexión entre la simetría continua y las leyes de conservación.
- 1924** Satyendra Bose (1894-1974) introduce el concepto de que los fotones son un ejemplo de lo que ahora llamamos bosones.
- 1925** Wolfgang Pauli (1900-1958) introduce el principio de exclusión. Enrico Fermi (1901-1954) y Paul Dirac (1902-1984) introducen el concepto de que los electrones son un ejemplo de lo que ahora llamamos fermiones. Werner Heisenberg (1901-1976) introduce la moderna teoría cuántica, embebiendo las ideas de Bohr en un marco matemáticamente coherente.
- 1926** Erwin Schrödinger (1887-1961) propone la ecuación de Schrödinger. Parece muy diferente de la propuesta más abstracta de Heisenberg, pero se muestra equivalente a ella.
- 1925-1930** Paul Dirac (1902-1984) propone la ecuación de Dirac para el electrón, y una versión cuantizada de las ecuaciones de Maxwell, en una serie de brillantes artículos. Su trabajo establece la electrodinámica cuántica (QED) como una fértil teoría física.
- 1928** Hermann Weyl (1885-1955) muestra que la versión cuántica de la teoría de Maxwell (electrodinámica cuántica o QED) es una encarnación de la simetría anamórfica.
- 1930** Wolfgang Pauli (1900-1958) postula la existencia de los neutrinos, nunca observados, para preservar la conservación de la energía y el momento en las desintegraciones débiles.
- 1931** Eugene Wigner (1902-1995) muestra el poder de la simetría rígida en la mecánica cuántica.
- 1932** Enrico Fermi (1901-1954) aplica los principios generales de la relatividad especial y la mecánica cuántica a las desintegraciones débiles, demostrando su validez en este nuevo dominio.
- 1947-1948** Unas mediciones de los efectos que se desvían de la teoría directa de Dirac —un desplazamiento de los niveles de energía del hidrógeno («desplazamiento de Lamb», observado por Willis Lamb,

1913-2008) y un momento magnético «anómalo» del electrón, observado por Polykarp Kush (1911-1913)— indican la importancia de incluir las fluctuaciones cuánticas.

- 1948** Richard Feynman (1918-1988), Julian Schwinger (1918-1994) y Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979) muestran que la electrodinámica cuántica de Dirac, cuando se resuelve con más precisión, incluye fluctuaciones cuánticas (partículas virtuales).
- 1950** Freeman Dyson (1923-) pone el trabajo precedente en un cimiento matemático firme, y demuestra su inconsistencia.
- 1954** C. N. Yang (1922-) y Robert Mills (1927-1999) combinan las ideas de Lie y Maxwell/Weyl para hallar unas ecuaciones que encarnan unas formas más complejas de simetría anamórfica. Estas ecuaciones de Yang-Mills están en el corazón de nuestras modernas Teorías Centrales.
- 1956** Frederick Reines (1918-1998) y Clyde Cowan (1919-1974) observan interacciones de neutrinos, estableciendo su realidad tangible. Tsung-Dao Lee (1926-) y C. N. Yang proponen que la fuerza débil hace una distinción fundamental entre izquierda y derecha («violación de la paridad»). La confirmación experimental llega poco después.
- 1957** John Bardeen (1908-1991), Leon Cooper (1930-) y J. R. Schrieffer (1931-) proponen la teoría BCS que marcó un hito en la superconductividad. Implícitas en este trabajo están unas ideas poderosas de ruptura espontánea de la simetría, incluido el mecanismo de Higgs.
- 1961** Sheldon Glashow (1932-) propone una teoría anamórfica con la mezcla de las fuerzas débil y electromagnética.
- 1961-1962** Yoichiro Nambu (1921-) y Giovanni Jona-Lasinio (1931-) introducen la ruptura espontánea de simetría en una teoría concreta de interacciones entre partículas fundamentales. Jeffrey Goldstone (1933-) simplifica y generaliza su concepto.
- 1963** Philip Anderson (1923-) sugiere que es importante para la física de partículas trabajar en ecuaciones de los fotones masivos que habían surgido en el trabajo de los hermanos Fritz (1900-1954) y Heinz London (1907-1970) en **1935** y de Lev Landau (1908-1968) y Vitaly Ginzburg (1916-2009) en **1950**.

- 1964** Robert Brout (1928-2011) y François Englert (1932-); Peter Higgs (1929-); y Gerald Guralnik (1936-2014), Carl Hagen (1935-) y Tom Kibble (1932-) hacen unos modelos teóricos concretos que reconcilan las partículas masivas con la simetría anamórfica. Murray Gell-Mann (1929-) y George Zweig (1937-) proponen la existencia de los quarks como los bloques de construcción primarios de los hadrones. Abdus Salam (1926-1996) y John Ward (1924-2000) clarifican la teoría electrodébil anamórfica.
- 1967** Steven Weinberg (1933-) incorpora la ruptura espontánea de simetría a la teoría anamórfica, definiendo así la Teoría Central madura de la fuerza electrodébil.
- 1970** Gerard't Hooft (1946-), junto con Martinus Veltman (1931-), pone el trabajo precedente en un cimiento matemático firme y demuestra su consistencia. Jerome Friedman (1930-), Henry Kendall (1926-1999) y Richard Taylor (1929-) toman instantáneas del interior del protón y hallan quarks casi libres junto a materia desconocida eléctricamente neutra.
- 1971** Sheldon Glashow, John Iliopoulos (1940-) y Luciano Maiani (1941-) añaden los quarks a la teoría electrodébil anamórfica y predicen la existencia del quark *charmed*.
- 1973** David Gross (1941-), Frank Wilczek (1951-) y David Politzer (1949-) establecen las teorías de libertad asintótica. Gross y Wilczek formulan una teoría precisa de la fuerza fuerte: la cromodinámica cuántica (QCD).
- 1974** El descubrimiento experimental de los mesones de quarks pesados aporta evidencias semicuantitativas de la libertad asintótica y de la QCD. Jogesh Pati (1937-) y Abdus Salam, y también Howard Georgi (1947-) y Sheldon Glashow, proponen la unificación de las Teorías Centrales. Howard Georgi, Helen Quinn (1943-) y Steven Weinberg investigan la fuerza relativa de las distintas fuerzas, utilizando la libertad asintótica. Julius Wess (1934-2007) y Bruno Zumino (1923-2014) formulan la supersimetría.
- 1977** Roberto Peccei (1942-) y Helen Quinn proponen una nueva simetría para resolver el «problema θ ». Wilczek descubre el acoplamiento dominante de la partícula de Higgs con la materia ordinaria, a través de gluones de color.

- 1978** Wilczek y Weinberg señalan que la simetría de Peccei-Quinn implica la existencia de una nueva y extraordinaria partícula ligera, el axión.
- 1981** Savas Dimopoulos (1952-), Stuart Raby (1947-) y Wilczek demuestran las ventajas cuantitativas de incluir la supersimetría en la unificación.
- 1983** Varios autores establecen a los axiones como candidatos a aportar la materia oscura astronómica. Carlo Rubbia (1934-) dirige un equipo experimental en el CERN que observa los bosones débiles (partículas W y Z), estableciendo la teoría electrodébil anamórfica.
- 1990** Los experimentos en el Gran Colisionador de Electrones y Positrones muestran claramente la estructura de los chorros de partículas, lo que suministra una evidencia cuantitativa poderosa de la libertad asintótica y la QCD.
- 2005** Desarrollando las ideas de Kenneth Wilson (1936-2013), Alexander Polyakov (1945-) y Michael Creutz (1944-), se utiliza un poder computacional masivo para tratar con la QCD, lo que permite el cálculo preciso de la masa de los hadrones, incluida la de los protones y neutrones.
- 2012** Descubrimiento de la partícula de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones.
- 2020** Mis apuestas por el descubrimiento de la supersimetría en el Gran Colisionador de Hadrones vencen en la medianoche del 31 de diciembre.

Términos del arte

Este suplemento contiene definiciones y comentarios breves sobre conceptos científicos que pueden resultarle poco familiares al lector general, y que se utilizan en este libro. En algunos casos (por ejemplo, energía, simetría) describen términos comunes que aquí usamos de manera especial; por lo general, con unos significados más restringidos y concretos que en el uso cotidiano. He intentado, hasta donde me ha sido posible, hacer que este suplemento sea una parte orgánica del todo, utilizando en los comentarios temas y ejemplos del texto principal. También encontrarás aquí unas cuantas ideas —algunas bien bellas— que estuve tentado de incluir en el texto, pero no vi forma de encajarlas sin brusquedades. En muchos casos he tenido que renunciar a la precisión y el rigor matemático en pos de la brevedad y el fácil acceso.

Una nota sobre la tipografía: la *cursiva* se usa para indicar el tema (palabra o frase) de cada entrada, para resaltar sus principales apariciones en la entrada y a veces por énfasis. La **negrita** se usa dentro de las entradas para señalar un uso significativo de los términos que vinculan a otras entradas.

Absorción

Decimos que una partícula es absorbida cuando termina su existencia independiente. Como la energía total se conserva, la energía de la partícula tiene que adoptar otra forma. Por ejemplo, cuando una partícula de luz (un fotón) golpea tu retina, puede ser absorbido por unas proteínas (rodopsinas) que cambian su forma en respuesta. Ese cambio de forma, a su vez, dispara señales eléctricas que nuestro cerebro interpreta como experiencia visual.

Acción a distancia

La *acción a distancia* es una característica de la teoría de la **gravedad** de Newton: los cuerpos ejercen fuerzas gravitatorias sobre otros cuerpos, incluso si están lejos, de forma instantánea a través del espacio vacío. Al propio Newton no le gustaba ese rasgo de su teoría, pero sus matemáticas le condujeron allí. El éxito de la teoría de Newton, basada en la acción a distancia, fue tan completo que la idea se asumió de forma tácita por los primeros investigadores de la electricidad y el magnetismo.

Faraday desarrolló una visión alternativa, en que las fuerzas eléctricas y magnéticas se transmiten como presiones por fluidos que llenan el espacio. Maxwell desarrolló las intuiciones de Faraday de manera matemática, y llegó así al concepto del electromagnetismo basado en fluidos (o campos) que utilizamos hoy.

La astrología postula una fuerte acción a distancia, pero no hay, por decir lo menos, evidencias rigurosas de su validez.

Aceleración

La velocidad es la tasa de cambio de posición con el tiempo —véase **Velocidad**— y *aceleración* es la tasa de cambio de velocidad con el tiempo. Uno de los grandes logros de Newton fue señalar que la aceleración de los cuerpos se relaciona con las fuerzas que actúan sobre ellos. (Anunció este descubrimiento, antes de revelarlo por entero, en un anagrama memorable, como se describe en «Newton III».) En los primeros libros de texto de la mecánica clásica, sueles encontrar la segunda ley del movimiento de Newton: la **fuerza** es igual a la **masa** por la aceleración. Sin más información sobre las fuerzas, desde luego, esa aserción está vacía. Debería interpretarse, en realidad, como ¡la promesa de que estudiar la aceleración será gratificante!

Newton aportó algunas afirmaciones generales sobre las fuerzas. Es de notar su primera ley del movimiento, que dice que los cuerpos «libres» tienen aceleración cero (es decir, que la velocidad de un cuerpo libre es constante). Esta ley lleva implícita la promesa de que los cuerpos que están muy lejos de todos los demás cuerpos son aproximadamente libres; o, en otras palabras, que las fuerzas decrecen con la distancia.

Newton también desarrolló una detallada teoría de un tipo de fuerza, la fuerza **gravitatoria**. Es interesante observar, en este contexto, que la fuerza gravitatoria sobre un cuerpo es proporcional a su masa, de modo que la aceleración gravitatoria *es independiente* de la masa del cuerpo! Ese principio fue puesto a prueba, para la gravedad de la Tierra, en el famoso experimento de Galileo en que arrojaba objetos desde la Torre Inclinada de Pisa. En la teoría gravitatoria de Einstein, la teoría general de la relatividad, la ley del movimiento se expresa directamente en términos de aceleración, sin una mención separada a la fuerza.

La aceleración, como la velocidad, es una cantidad **vectorial**.

Acelerador

Un *acelerador* de partículas es una máquina que genera haces de partículas en rápido movimiento y de alta energía.

Históricamente, y todavía hoy, los aceleradores se han usado para revelar procesos fundamentales de la naturaleza. Estudiando las colisiones de las partículas que se mueven más deprisa, nos asomamos a su comportamiento en unos extremos de alta energía, pequeña distancia y tiempo corto que son inaccesibles por otros medios.

Análisis

Cuando se usa en física, química y matemáticas, la palabra «análisis» suele referirse al proceso de estudiar las cosas mediante el estudio de sus partes. En este uso, «análisis holístico» es un oxímoron; y el psicoanálisis vuelve a ser otra cosa.

Dos ejemplos interesantes de análisis son la separación de la luz en colores espectrales y el análisis de las funciones estudiando su variación sobre pequeños intervalos, como en el **cálculo** (diferencial).¹⁶

Análisis y Síntesis

«Análisis y Síntesis» es la frase de Newton para la estrategia de alcanzar un entendimiento completo y poderoso de una clase de objetos por el entendimiento del comportamiento de sus partes más simples con precisión (análisis) y luego reconstruir de nuevo (síntesis). El propio Newton aplicó esta estrategia con gran éxito al estudio de la luz, el estudio del movimiento y el estudio de las **funciones** matemáticas.

Análisis y síntesis es una forma más elegante, apropiada e históricamente justificada de expresar lo que comúnmente se llama «reduccionismo», y debería preferirse siempre, fuera de la polémica.

Análogo

Si una cantidad puede variar suavemente o, como solemos decir, continuamente, decimos que es una cantidad *análoga*. Las cantidades son análogas por contraste con las cantidades **digitales**, que solo pueden tomar un rango discreto de valores y, por tanto, solo pueden variar de manera discontinua. En los fundamentos actuales de la física, la longitud y la duración del tiempo son cantidades análogas.

Una interpretación extrema del credo pitagórico Todas las Cosas son Número diría que todas las cantidades son, en un sentido fundamental, digitales. Pero la imposibilidad de expresar el lado y la diagonal de un cuadrado como múltiplos de la misma unidad, y las paradojas de Zenón sobre el movimiento, fueron los primeros avisos de que hay problemas con ese punto de vista.

Las cantidades digitales tienen grandes ventajas para la computación y la comunicación de información, porque permiten corregir pequeños errores. Por ejemplo, si sabes que el resultado válido de una computación solo puede ser 1 o 2, y tu versión aproximada de esa computación da 1,0023, puedes inferir que la respuesta correcta es 1, a menos que tu aproximación sea garrafal.

Si la unidad discreta es lo bastante pequeña, una cantidad digital puede dar una buena representación de otra que es intrínsecamente análoga. Por ejemplo, una foto digital puede consistir en unos puntos negros con un espaciado tan fino que, para el ojo humano, con su resolución imperfecta, parezca variar de manera continua, en unos matices de gris que dependen de la densidad de los puntos.

La descripción matemática de las cantidades análogas suele implicar a los **números reales**, mientras que las cantidades digitales más simples se describen por **números naturales**.

Ángulo de Cabibbo. Véase Familia.

Antimateria/Antipartícula

Paul Dirac propuso en 1928 una nueva ecuación, a la que hoy llamamos **ecuación de Dirac**, para el comportamiento de los electrones en la mecánica cuántica. Un resultado importante de ese trabajo fue la predicción de una partícula, el **positrón**, con la misma masa y espín que el **electrón**, pero con la carga opuesta. Este positrón, también llamado antielectrón, es la antipartícula del electrón. Trabajos posteriores revelaron que este fenómeno es un resultado mucho más general de la mecánica cuántica y la relatividad especial: para cada partícula, hay una *antipartícula* asociada, que tiene la misma masa y espín pero el valor opuesto de la carga eléctrica, y también de las cargas de color débil y fuerte, y de la quiralidad.

Los antielectrones, o positrones, se descubrieron experimentalmente en 1932. Los antiprotones se observaron en 1955. Sería una sorpresa tremenda descubrir una partícula que no tuviera su antipartícula. Los **fotones** son sus propias antipartículas. (Esto es posible porque son eléctricamente neutros, y tampoco llevan otras cargas.)

Una partícula, cuando se junta con su antipartícula, se puede aniquilar en forma de «pura energía»; lo que significa, en la práctica, cualquiera de una amplia variedad de grupos de partículas y sus antipartículas. Por ejemplo, cualquier partícula y su antipartícula pueden aniquilarse para dar dos fotones, o un par de neutrino y antineutrino, aunque estos no suelan ser los resultados más probables. El Gran Colisionador de Electrones y Positrones en el CERN, que fue el predecesor del **Gran Colisionador de Hadrones** y ocupó el mismo túnel gigante, estaba dedicado al estudio de la aniquilación de electrones y positrones acelerados para moverse deprisa en direcciones opuestas.

Aunque el término *antipartícula* tiene un significado científico preciso, el término *antimateria*, aunque útil en ocasiones, es un poco más problemático, o quizás debería decir provinciano. Para entender este uso, deberíamos empezar por la (igualmente problemática y provinciana) definición de «materia», de la que es imagen especular. En esa definición, declaramos que algunas de las partículas de las que estamos hechos, y que encontramos en la vida cotidiana —esto es, los quarks u y d y los electrones— son «materia». También incluimos en esta definición a sus familiares cercanos —por tanto, a todo tipo de **quarks**, y todo tipo de **leptones** (quarks u, d, c, s, t, b , y leptones $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$)— como materia, mientras que sus antipartículas se llaman antimateria. Los fotones no encajan de forma natural en ningún lado de esa clasificación, puesto que son sus propias antipartículas. Lo único que distingue la «materia», en este sentido, de la «antimateria» es que es más común, al menos en nuestra parte del universo. Si de repente cambiáramos todas las partículas del mundo por sus antipartículas (e hicieramos a la vez una transformación de **paridad**, intercambiando izquierda y derecha), ¡sería muy difícil ver la diferencia! creo que el término «antimateria» confunde más que ilumina, y he huido de él en este libro. Cuando hablo de la «materia», sin más calificación, me refiero a todas las formas de la materia, incluidos (por ejemplo) los antiquarks, los fotones y los **gluones**.

Antisimétrico

Decimos que una cantidad es *simétrica* bajo una transformación, o que exhibe **simetría**, cuando no cambia bajo la acción de la transformación. Decimos que es *antisimétrica* bajo una transformación cuando cambia de signo bajo la acción de la transformación. Esta noción se puede aplicar a cantidades numéricas, o a **vectores**, o a **funciones**, porque en todos estos casos tiene sentido hablar de cambio de signo.

Ejemplos: las **coordenadas** de los puntos en una línea son antisimétricas bajo la rotación de la línea por 180 grados alrededor de su origen. La **carga eléctrica** es antisimétrica bajo la transformación que convierte las partículas en sus antipartículas (véase **Antimateria**).

Una caracterización fundamental de los **fermiones** afirma que la **función de onda** mecanocuántica que describe un sistema de fermiones idénticos es antisimétrica bajo las transformaciones que intercambian cualesquier dos de ellos.

Antrópico (argumento, principio)

En líneas generales, los argumentos antrópicos toman la forma

El mundo debe ser como es, para que yo exista.

Antes de discutir los refinamientos más sofisticados, consideremos el *principio antrópico* en esa forma básica.

Es importante distinguir entre dos aspectos de este argumento antrópico básico: su verdad y su poder explicativo. (Véase una discusión [exposición] relacionada en **Consistencia**.) Según sea más o menos restringida la definición de «yo», puede haber un montón de verdad trivial en la aserción antrópica. Si «yo» quiere implicar una forma de vida basada en el carbono con fisiología humana que ha experimentado la vida como yo la he experimentado (lo que, entre otras cosas, incluye leer libros de ciencia que hacen aserciones sólidas y específicas sobre el mundo natural), pues bueno, en tal caso las leyes de la física tal y como las conocemos, por no hablar de muchas otras cosas sobre la Tierra, la historia de Europa, el color de ojos de mis hijos, etcétera, no podrían ser muy diferentes sin impedir la existencia de «yo». Así que el argumento antrópico básico, tomado literalmente, es verdad. Pero ese argumento verdadero tiene muy poco poder explicativo, esencialmente porque la existencia de «yo» es una suposición tan abarcadora —que incluye todo lo que he experimentado o experimentaré alguna vez— que ¡ya no queda nada que explicar!

Otras versiones más sofisticadas del argumento antrópico deben girar sobre definiciones de «yo» más laxas. Podemos requerir que el mundo, en sus leyes básicas y su historia, debe hacer posible la emergencia de algún tipo de observador inteligente o consciente, por ejemplo. De otro modo, nadie podría observarlo, ¡y entonces que le den! Pero es muy difícil definir lo que uno entiende por observadores inteligentes, y también lo es valorar, una vez que te has decidido por una definición, qué tipo de leyes y de historias dan lugar a observadores inteligentes. A mí me cuesta imaginar que unas ideas tan vagas y resbaladizas nos vayan a conducir a algún poder explicativo.

Hay que mencionar que la comprensión del mundo más profunda que hemos alcanzado, como en la **Teoría Central**, implica principios conceptuales como **relatividad, simetría local** y el marco de la **teoría cuántica**, que son abstractos en la forma y universales en el ámbito de la aplicación. ¡Esos principios no parecen en absoluto argumentos antrópicos! Es evidente que hay cosas que ocurren en el mundo que trascienden su deseo de producirme a «mí».

En general, los argumentos antrópicos, por su mera naturaleza, desplazan el foco de la discusión desde la explicación hacia la suposición. Puesto que ponen en riesgo el poder explicativo, lo mejor es evitarlos como una cuestión de principio. Pero en las circunstancias correctas, que son muy especiales, los argumentos con un aire antrópico pueden ser tanto válidos como útiles. Para unos ejemplos que pueden ser interesantes, véase **Energía oscura/Materia oscura**.

Armonía

Decimos que los tonos musicales están en *armonía*, o son armoniosos, cuando suenan bien juntos. Los orígenes de este fenómeno psicológico en la fisiología no están claros de momento; en el texto, hago un boceto preliminar de una teoría candidata. La noción musical

de armonía suele extenderse, tras los pasos de Pitágoras, a una concepción más general de «cosas que van bien juntas».

Axión

El axión es una partícula hipotética cuya existencia mejoraría la belleza de la **Teoría Central**. Los axiones son también, actualmente, unos excelentes candidatos para suministrar la **materia oscura** cosmológica.

La Teoría Central tiene muchas virtudes, pero también exhibe algunos defectos estéticos. Entre ellos está el siguiente:

Observamos, experimentalmente, que las leyes de la física son, en una aproximación muy buena (aunque no exactamente), **invariantes** bajo un cambio en la dirección del tiempo. Dicho llanamente: si tomas una película de cualquier experimento de física, y pones la película marcha atrás, las imágenes que ves siguen representando unos sucesos que obedecen las leyes básicas de la física. Por supuesto, si haces una película de la vida cotidiana, y la pones marcha atrás, lo que ves *no* parece como la vida cotidiana. Pero, en el mundo subatómico, donde las leyes básicas operan con más claridad, la distinción desaparece. Decimos, por tanto, que las leyes de la física son casi casi invariantes bajo la inversión de la dirección del tiempo o, alternativamente, que obedecen a la simetría de inversión temporal (T).

Esta propiedad de las leyes, que obedecen a la **simetría T** , es coherente con la Teoría Central, pero no viene forzada por ella. Hay una interacción entre **gluones** de color que es coherente con todos los principios generales conocidos, incluyendo la **teoría cuántica**, la **relatividad** y la **simetría local** —y, por tanto, según la Teoría Central, «possible»—, pero cuya existencia violaría la simetría T .

Es **coherente**, pero queda cojo, afirmar simplemente que esa interacción no ocurre. Una respuesta más digna, defendida por Roberto Peccei y Helen Quinn, es explicar esta «coincidencia» mediante una expansión de la Teoría Central para encajar simetrías adicionales. Haciendo esto de una forma adecuada, uno puede explicar la pequeñez de la violación T . (Se han propuesto otras posibles explicaciones, pero ninguna ha resistido la prueba del tiempo.) Esta expansión de la Teoría Central no está libre de consecuencias: como Steven Weinberg y yo señalamos, implica la existencia de una nueva partícula muy ligera con unas propiedades extraordinarias, el *axión*.

Los axiones no han sido aún detectados experimentalmente, pero esa no observación no es concluyente, porque la teoría predice que los axiones deberían interactuar de manera muy débil con la materia ordinaria, y hasta la fecha ningún experimento ha alcanzado la sensibilidad necesaria. Mientras escribo esto, varios grupos experimentales del mundo están trabajando con ahínco para hallar evidencias de los axiones, o para excluirlos de forma convincente.

Es posible calcular la producción de axiones durante el Big Bang. De esos cálculos emerge que el universo está impregnado por un gas de axiones, un gas que muy bien podría aportar la materia oscura cosmológica.

Barión. Véase **Hadrón**.

Boost (empujón)

En la literatura científica primaria, cada vez es más común referirse a la transformación que hacemos en un sistema, cuando imaginamos añadir o restar una velocidad constante al movimiento de cada una de sus partes, como un *boost* (empujón). Este término está inspirado, supongo, en la acción de los cohetes secundarios (*booster rockets*), que funcionan impariendo velocidad a su carga útil. En este libro me refiero a esas transformaciones como **transformaciones galileanas**, en homenaje a Galileo, que subrayó su importancia de forma memorable con su elegante experimento mental, en el que nos mete a bordo de un barco, en un camarote aislado (como se cita en el texto principal). Véase **Transformación galileana**.

Bosón/Fermión

Las partículas elementales se dividen en dos grades clases: bosones y fermiones.

En la **Teoría Central**, los **fotones**, los **bosones débiles**, los **gluones** de color, los **gravitones** y las **partículas de Higgs** son *bosones*. En el texto me suelo referir a ellos como **partículas de fuerza**. Los bosones pueden crearse o destruirse de forma individual.

Los bosones obedecen al principio de inclusión de Bose. A grandes rasgos, esto significa que dos bosones del mismo tipo están especialmente satisfechos de hacer la misma cosa. Los fotones son bosones, y el principio de inclusión para fotones es lo que hace posible el láser. Cuando tienen la oportunidad, una colección de fotones tratan de hacer todos lo mismo, generando un fino rayo de luz espectralmente pura.

En la Teoría Central, los **quarks** y los **leptones** son *fermiones*. En el texto me suelo referir a ellos como **partículas de sustancia**.

Los fermiones vienen y se van a pares. Como resultado, si tienes uno, no te puedes deshacer de él por completo. Puede convertirse en otra clase de fermión, o en tres, o cinco, junto a cualquier número de no fermiones (es decir, de bosones; véase arriba), pero no se puede disipar en la nada, sin dejar rastro. Los fermiones obedecen el **principio de exclusión** de Pauli. A grandes rasgos, esto significa que a dos fermiones del mismo tipo no

les gusta hacer lo mismo. Los **electrones** son fermiones, y el principio de exclusión para los electrones tiene un papel crucial en la estructura de la materia. Conduce, en «Belleza cuántica II», nuestra exploración del mundo exuberante del carbono.

Bosón débil

Parte de la belleza de los *bosones débiles* es que pueden definirse de varias maneras **complementarias**:

- Los bosones débiles son las partículas *W* y *Z* que se observan en los detectores de los **aceleradores**.
- Los bosones débiles son los **cuantos** del **fluído** de la fuerza débil, cuya respuesta al movimiento de las cargas débiles causa la **fuerza**.
- Los bosones débiles son la materialización de una **simetría local** particular, la simetría de las rotaciones en el **espacio de propiedad** de las cargas débiles. Esta es su definición más hermosa: muestra el parentesco de los bosones débiles con los **gluones** de color, los **fotones** y los **gravitones**. Todos son materializaciones de la **simetría local**. Esto nos recuerda nuestra Pregunta, y su respuesta en la Teoría Central. Descubrimos Real \leftrightarrow Ideal, puesto que los objetos y los sucesos de la realidad coinciden con los conceptos que introducimos para poner en práctica el arte anamórfico de la simetría local.

Buckminsterfulereno/Buckyball

Los *buckminsterfulerenos* son un tipo de moléculas de carbono puro.

Tienen la forma de superficies poliédricas cuasiesféricas, con cada **núcleo** de carbono extendiendo enlaces químicos a sus tres vecinos más próximos. Las caras del poliedro siempre incluyen doce pentágonos y un número variable (normalmente mayor) de hexágonos. El *buckminsterfulereno* C_{60} , que contiene 60 núcleos de carbono, es especialmente común. Las moléculas de C_{60} suelen llamarse *buckyballs*, para celebrar su asombroso parecido con balones de fútbol (microscópicos).

Véase también **Polígono**.

Cálculo

La palabra «cálculo» deriva de la palabra latina para «guijarro» o «piedra». Su uso moderno, en matemáticas, se remonta a la operación de contar, o llevar las cuentas, con piedras (como mucha gente hace, incluso hoy, usando un ábaco). Vemos ese origen reflejado en el término general «calcular», usado para muchos procedimientos y operaciones distintas para procesar información.

Las matemáticas reconocen varios tipos de cálculo (por ejemplo, cálculo proposicional, cálculo lambda, cálculo de variaciones). Pero un método concreto de procesar información matemática es tan importante, e hizo tal impacto en la mente de los científicos que, cuando la gente habla de cálculo, sin más calificativos, es el significado por defecto.

El cálculo, así entendido, es el método de **Análisis y Síntesis**, aplicado al estudio de los procesos que varían continuamente, o **funciones**. Las dos ramas del cálculo, el cálculo diferencial y el cálculo integral, reflejan ese método. El cálculo diferencial suministra conceptos y métodos para analizar el comportamiento a lo largo de intervalos muy pequeños, mientras que el cálculo integral suministra conceptos y métodos para sintetizar esa información local hasta un entendimiento global.

Una aplicación destacada del cálculo, que Newton tenía en mente mientras desarrollaba el asunto, es la descripción del movimiento. Uno introduce conceptos como **velocidad** y **aceleración** para caracterizar el movimiento a lo largo de intervalos de tiempo muy pequeños (cálculo diferencial) o, a la inversa, utiliza información sobre la velocidad y la aceleración para construir órbitas (cálculo integral). En la mecánica clásica, las leyes de **fuerza** dan información sobre la aceleración de un cuerpo. Un desafío importante de la física clásica es cómo usar esa información: para construir el movimiento de ese cuerpo, en respuesta a una aceleración conocida. Este es un problema del cálculo integral: desarrollar lo grande desde el conocimiento de lo pequeño.

Campo/Fluido

Para introducir el concepto de *campo*, es probable que lo mejor sea proceder mediante ejemplos.

- Para describir el tiempo (meteorológico), es útil considerar el valor de la temperatura en muchos puntos del espacio, a varios tiempos. La totalidad de esos valores define el campo de temperatura.
- Para describir el movimiento dentro de un volumen de agua, es útil considerar el valor de la **velocidad** del agua en muchos puntos del espacio, a varios tiempos. La totalidad de esos valores define el campo de velocidad.
- Para describir los fenómenos **eléctricos**, es útil considerar qué fuerzas se ejercerían sobre una partícula con **carga** eléctrica, en caso de que estuviera presente, en diferentes puntos del espacio, a tiempos diferentes. Esto nos lleva a definir, tras dividir

por la magnitud de la carga, el **campo eléctrico**.

En general, decimos que tenemos un «campo de tipo X » cuando tenemos valores de X en diferentes posiciones y tiempos. Dicho de otra forma, un campo de tipo X da una cantidad de tipo X como una **función** del espacio y el tiempo.

El término *fluido*, como se usa en este libro, se refiere a cualquiera de una variedad de cosas que llenan el espacio y exhiben actividad. Los ejemplos incluyen **fluido eléctrico**, **fluido magnético**, **fluido gluónico** y **fluido de Higgs**. Para más detalles sobre la sutil e importante distinción conceptual entre campo y fluido, véase especialmente la entrada **Campo eléctrico/Fluido eléctrico**.

Véase también **Medio**.

Campo de Higgs/Fluido de Higgs

El *fluido de Higgs* es una entidad activa y que llena el espacio, que aparece en las ecuaciones de la **Teoría Central**. El *campo de Higgs* es una medida de la influencia media que el fluido de Higgs ejerce sobre otras partículas. Véase **Campo/ Fluido**, **Campo eléctrico/Fluido eléctrico**, y también la extensa reflexión de «Belleza cuántica III», tercera parte.

Campo eléctrico/Fluido eléctrico

El valor del *campo eléctrico* en cualquier punto se define como la **fuerza** eléctrica que experimenta una partícula cargada situada en ese punto dividida por su **carga eléctrica**. La **fuerza** es una cantidad **vectorial**, así que el campo eléctrico es un **campo vectorial**.

Esa definición se usa mucho en biología molecular, química, ingeniería eléctrica y otras aplicaciones. Pero su aplicación a la física fundamental, donde las fluctuaciones cuánticas son importantes, se vuelve problemática, porque las fuerzas y las posiciones fluctúan. Se la puede rescatar como una noción *aproximada* haciendo unos cuantos promedios en el tiempo y el espacio.

En la física fundamental, un enfoque diferente, que puentea esos problemas, se ha revelado más útil. No insistimos en que los conceptos que usamos correspondan en todo momento a cantidades observables. Lo que sí queremos es que todas las cantidades observables aparezcan por alguna parte en las ecuaciones, pero podríamos hallar conveniente —y lo hallamos— ¡incluir otras cosas además! (Véase, en concreto, **Renormalización**.)

En ese espíritu, yo defino *fluido eléctrico* como la cosa activa que llena el espacio que aparece en las **ecuaciones de Maxwell**.

La necesidad de distinguir entre campo eléctrico y fluido eléctrico queda clara como el agua si consideramos cómo deberíamos interpretar la afirmación «el campo eléctrico se desvanece en el espacio intergaláctico». Esa afirmación tiene sentido (y es aproximadamente correcta), dada nuestra definición del campo eléctrico en términos de las fuerzas que genera, en promedio. Por otro lado, sería del todo erróneo decir que la entidad mecanocuántica que aparece en las ecuaciones de Maxwell, y que exhibe actividad espontánea, se desvanece donde sea. Así que la terminología habitual, que no distingue entre esos dos conceptos —la entidad en sí misma y su valor promedio— es errónea en un sentido fundamental. (Ese error no parece molestar mucho a la mayoría de los físicos, ¡pero a mí sí!) Resolvemos el problema llamando a la entidad en sí misma *fluído eléctrico*, y a su valor promediado *campo eléctrico*.

(Dicho lo cual, cuando no hay riesgo de confusión, uso a veces «campo eléctrico» tanto para la entidad como para su valor medio. Los malos hábitos son duros de pelar.) Véase también **Fluido cuántico**.

Carga de color/Carga de color fuerte/ Carga de color débil

Nuestras **Teorías Centrales** de las fuerzas fuerte y débil se apoyan en ideas que se originaron en la electrodinámica. En particular, presentan variantes de la carga eléctrica llamadas *cargas de color*. Las cargas, en todos los casos, son cantidades conservadas que controlan el comportamiento de partículas parecidas a fotones: **fotones** para la **carga eléctrica**, **gluones** de color para las *cargas de color fuerte*, **bosones débiles** para las *cargas de color débiles*.

Hay tres cargas de color fuertes. En el texto aparecen como roja, verde y azul. Ocho gluones de color responden a esas cargas, e inducen transformaciones entre ellas.

Hay dos cargas de color débiles. En el texto aparecen como amarilla y morada. No tengo que decir —pero lo diré de todos modos— que «color», en el contexto de la carga de color, es un concepto totalmente diferente de «color» en el contexto de la luz.

Carga eléctrica

En la física moderna, y sobre todo en nuestra **Teoría Central**, la *carga eléctrica* es una propiedad primaria de la materia, que no se puede explicar en términos de ninguna cosa más simple. La carga eléctrica es una cantidad discreta (es decir, **digital**) y **conservada** a la que responden los **campos electromagnéticos**.

La manifestación más simple de la carga eléctrica es su capacidad de generar **fuerzas**. Según la ley de Coulomb, dos partículas eléctricamente cargadas experimentan una fuerza eléctrica proporcional al producto de sus cargas eléctricas (e inversamente proporcional al cuadrado de su separación[distancia]). Cuando las cargas son del mismo signo, la fuerza

entre ellas es repulsiva, pero es atractiva cuando los signos son opuestos. Así, hay una fuerza eléctrica repulsiva entre dos **protones**, o entre dos **electrones**, pero una fuerza eléctrica atractiva entre un protón y un electrón.

La carga eléctrica viene en múltiplos enteros de la carga del protón. Los electrones tienen una carga igual a la del protón, con signo opuesto. (Teóricamente, los **quarks** tienen cargas que son fracciones de la carga del protón. Pero los quarks no aparecen como partículas individuales, sino solo dentro de los **hadrones**. La carga eléctrica de un hadrón es siempre un múltiplo entero de la carga del protón.)

Chorro (de partículas)

En los instantes posteriores a una colisión en los modernos aceleradores de alta energía, como el **Gran Colisionador de Hadrones**, es frecuente observar que emergen unos raudales de **hadrones** energéticos, que se mueven todos en la misma dirección. Esos raudales se llaman *chorros* (*jets*).

Los chorros tienen una interpretación extraordinaria, que deriva de la **cromodinámica cuántica (QCD)** y la **libertad asintótica**, de la manera siguiente. Podemos describir el «estallido» inicial de nuestra colisión, que implica a la **fuerza fuerte**, directamente en términos de **quarks**, antiquarks y **gluones**. Pero, mientras esas partículas emergen de la bola de fuego inicial, entran en equilibrio con la omnipresente actividad espontánea de los **fluidos cuánticos** de la QCD —sus **fluctuaciones cuánticas**, o **partículas virtuales**— y, en el proceso, producen enjambres de hadrones. Como la **energía** y el **momento** están **conservados**, los enjambres heredan esas propiedades de los quarks, antiquarks y gluones que los dispararon. Así un quark energético, digamos, producirá un enjambre de hadrones que se mueve, como un todo, en la dirección del momento lineal del quark, y compartiendo su energía: ¡un *chorro*! No es descabellado decir que, cuando vemos chorros, estamos asomándonos a la realidad de quarks, antiquarks y gluones, que no pueden existir como partículas libres. Véase **Confinamiento**.

Circulación

Los **campos vectoriales**, cualquiera que sea su naturaleza, pueden considerarse matemáticamente como una representación del flujo de un fluido ordinario como el aire o el agua. (El flujo imaginado tiene, en cada punto, una velocidad proporcional al valor del campo vectorial en ese punto.) En este modelo, la *circulación* del campo vectorial en un punto es una medida del movimiento angular del fluido. Así, por ejemplo, la circulación de la atmósfera es especialmente grande a lo largo de las curvas que circunscriben el centro de un tornado. Definamos esto con más precisión. Supongamos que nuestra curva forma el centro de un imaginario tubo cilíndrico estrecho, y calculemos la cantidad de aire que se

transporta por el tubo, por unidad de tiempo, dividido por el área de la sección del tubo. (El flujo de aire que entre o salga de nuestro tubo imaginario simplemente se ignora.) Entonces habremos calculado la circulación del flujo alrededor de la curva.

Explotando la analogía del flujo —es decir, considerando el campo eléctrico como un campo de velocidades—, podemos definir de modo similar la circulación del **campo eléctrico** alrededor de una curva, o del **campo magnético** alrededor de una curva. Esas cantidades aparecen como jugadores estrella en las **ecuaciones de Maxwell**. Véase **Ley de Ampère/Ley de Ampère-Maxwell** y **Ley de Faraday**.

Aquí me gustaría añadir una coda personal que combina la adoración del héroe con la estética. Los artículos pioneros de Faraday y Maxwell, en los que se presentaron los conceptos del electromagnetismo, están escritos mayormente en términos de definiciones verbales e imágenes mentales similares a las que he presentado aquí para *circulación*, y más abajo para **flujo**, más que en forma de ecuaciones matemáticas convencionales. Mantener en la mente con claridad esas imágenes complicadas, y hacer conexiones entre ellas, fue una asombrosa hazaña de imaginación visual que he encontrado inspirador y hermoso reimaginar (lo dejo así). Figurarse gráficamente las ecuaciones las lleva a un dominio de la experiencia que los humanos estamos bien preparados para disfrutar.

Color (de la luz)/Color espectral

Es importante, al pensar sobre la luz, distinguir entre el color físico y el color perceptual.

El *color espectral* es un concepto físico, independiente de la percepción humana. En principio, puede definirse y explorarse por completo usando herramientas físicas: lentes, prismas, placas fotográficas, etcétera. Podemos producir luz de cualquier color espectral puro pasando un rayo de luz blanca por un prisma y seleccionando una pequeña porción del «arco iris» emergente, como se discute (expone) en el texto principal. Ahora entendemos que los colores espectrales puros corresponden a **ondas electromagnéticas** que **oscilan** periódicamente con una **frecuencia** concreta. Los diferentes colores espirituales puros corresponden precisamente a diferentes frecuencias. Según la (comprobada) teoría de Maxwell, se pueden tener ondas electromagnéticas de cualquier posible frecuencia, de modo que los colores espirituales puros forman un continuo. El ojo humano solo es sensible a las ondas electromagnéticas dentro de un intervalo estrecho de frecuencias; pero suele ser natural hablar de la «luz» en un sentido más general que incluye a las ondas electromagnéticas en forma de ondas de radio, microondas, infrarrojo, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. El abanico completo de posibilidades constituye el **espectro electromagnético**.

Los colores espirituales son análogos a los **tonos puros** de la música. De hecho, los tonos puros también son oscilaciones —ondas de sonido, en este caso— con una frecuencia definida. La luz blanca, en esta analogía, corresponde a una cacofonía de **tonos**, lo que inspira el término «ruido blanco».

El concepto de *color perceptual* implica una mezcla de física y psicología. Nuestras experiencias más sustanciosas con el color, como en las bellas artes, son extremadamente complicadas, e implican unos procesos cerebrales de alto nivel que no se comprenden bien. Algunos hechos básicos sobre los primeros pasos de la visión están bien establecidos, sin embargo, y ya han destacado el gran hueco que existe entre el análisis de la luz que es posible, según principios físicos básicos, y el análisis que suministra nuestro sentido de la vista. Lo más profundo: mientras que los colores espectrales puros forman un continuo, y un análisis completo de la luz entrante describiría la intensidad de cada tipo, el ojo humano extrae solo tres promedios a lo largo de esas intensidades. para mucho más sobre estos asuntos, que son centrales para nuestra reflexión, ¡tendrías que consultar el texto principal!

Color espectral. Véase **Color (de la luz)** y **Espectro electromagnético**.

Complementario/ Complementariedad

Decimos que dos formas de considerar la misma cosa son *complementarias* cuando cada una es válida y coherente por sí misma, pero las dos no se pueden usar al mismo tiempo, porque cada una interfiere con la otra. Esta es una situación común en la **teoría cuántica**. Por ejemplo, uno puede optar por medir la posición de una partícula o, alternativamente, por medir su **momento**, pero no puedes hacer ambas simultáneamente, porque cada medición interfiere con la otra. Inspirado en parte por ejemplos como ese, pero también por su amplia experiencia de la vida, Niels Bohr indicó que es sabio aplicar el concepto de *complementariedad* de una forma mucho más general, como un método imaginativo para abordar problemas difíciles y reconciliar contradicciones aparentes. Este concepto amplio de la complementariedad, que me parece valioso y liberador, se explica mejor con ejemplos. Encontrarás varios en nuestro epílogo «*Una bella respuesta?*».

Condiciones iniciales

Las leyes básicas de la física, según las entendemos hoy, son **ecuaciones dinámicas**. Especifican, en otras palabras, cómo el estado del mundo en un tiempo se relaciona con su estado en otros tiempos. Sin embargo, no nos dicen qué estado deberíamos asumir como su punto de partida. Así que debemos aportar *condiciones iniciales* para arrancar nuestra descripción.

Confinamiento

Los ingredientes básicos de la **cromodinámica cuántica** (QCD), nuestra teoría de la **fuerza fuerte**, son los **quarks** y los **gluones**. Hay evidencias abrumadoras (descritas en parte en «Belleza cuántica III») de que esta teoría es correcta. Pero ni los quarks ni los gluones pueden observarse como partículas individuales. Solo se encuentran como constituyentes de objetos más complicados: los **hadrones**. Para describir esta situación, decimos que los quarks y los gluones están *confinados*. podemos imaginar que intentamos liberar (es decir, «des-confinar») un quark de un protón, ya sea de forma gradual, tirando del protón con dos pinzas, o bombardeando el protón con partículas energéticas, destrozándolo para obtener sus partes constituyentes. Todos esos intentos fallan de una forma interesante, casi diría *bella*.

Si intentamos hacerlo lentamente, hallamos que hay una **fuerza** irresistible que tira del quark hacia dentro.

Si lo hacemos bruscamente, obtenemos **chorros**. para más detalles, véase «Belleza cuántica III», sobre todo la segunda parte.

Consistencia/Contradicción

Decimos que un sistema compuesto de suposiciones y observaciones es *consistente* si no se le puede usar para derivar una contradicción. Decimos que tenemos una contradicción cuando una declaración y su negación son ambas verdaderas.

En las teorías puramente especulativas que no afirma nada sobre fenómenos físicos concretos, las observaciones no pueden conducir a contradicciones. Esa inmunidad frente a la contradicción hace consistentes a esas teorías, pero no las hace buenas. Newton expresó esa opinión de manera enérgica en sus *Principia*: cualquier cosa que no se deduzca de los fenómenos debe llamarse una hipótesis; y las hipótesis, sean metafísicas o físicas, o basadas en cualidades ocultas, o mecánicas, no tienen sitio en la filosofía experimental.

Para averiguar el valor de las teorías físicas, no debemos considerar solo su consistencia, sino también su poder y su economía. Para más detalles, véase **Refutable/Poderoso y Economía (de ideas)**.

Constante de Planck/Constante de Planck reducida

En 1900, Max Planck (1858-1947), mientras estudiaba de qué forma el **fluído electromagnético** alcanza el equilibrio con gases calientes, vio necesario asumir que la transferencia de energía entre la materia y la radiación electromagnética no ocurría en cantidades arbitrariamente pequeñas, sino solo en unidades **cuantizadas**. Se vio conducido, de hecho, a postular que la unidad de transferencia de energía es proporcional a la frecuencia de la luz. La constante de proporcionalidad que aparece en esa relación —la relación de **Planck-Einstein**— se conoce como *constante de Planck*.

Einstein propuso que la **relación de Planck-Einstein** se aplica al propio **fluido electromagnético**, y no solo a su intercambio de energía con los átomos. En su modelo atómico, Bohr propuso unas reglas para determinar los **estados estacionarios** de un electrón en el átomo de hidrógeno, en las que la constante de Planck tiene un papel central. El éxito de las reglas de Bohr para explicar el **espectro** del hidrógeno introdujo la constante de Planck en la descripción de la sustancia, y también de la luz.

En la moderna **teoría cuántica**, la constante de Planck se ha hecho **ubicua**. Un ejemplo importante es su aparición en la descripción del **espín** de una partícula. Muchos tipos de partículas, incluidos **electrones, protones, neutrinos y neutrones**, tienen «**espín $\frac{1}{2}$** ». Como se describe en la entrada **Espín**, eso significa que exhiben un movimiento rotatorio espontáneo. La constante de Planck aparece en la descripción **cuantitativa** de ese movimiento. El movimiento rotatorio supone, específicamente, una cantidad de momento angular igual a un medio de la *constante de Planck reducida*, que es simplemente la constante de Planck dividida por 2π .

Coordenada

Cuando usamos conjuntos de números para especificar los puntos de un espacio, llamamos *coordenadas* a esos números.

La introducción de coordenadas conecta conceptos del «cerebro izquierdo», sobre el cálculo y la cantidad, con conceptos del «cerebro derecho» sobre la forma. Aunque la psicología subyacente es oscura en el detalle, no hay duda de que el método de coordenadas ayuda a los distintos módulos de nuestro cerebro a comunicarse entre sí, y a unir sus fuerzas.

El ejemplo más simple y básico del uso de coordenadas es la descripción de una línea recta usando **números reales**. Para organizar esto necesitamos tres pasos:

- Elige un punto de la línea (cualquiera vale). Este punto se llamará el origen.
- Elige una longitud (metros, centímetros, pulgadas, pies, octavos de milla y años luz son opciones posibles). Esta longitud se llama la unidad de longitud.
- Elige una dirección en la línea (solo hay dos posibilidades). Esta dirección se llama la dirección positiva.

Y ahora, para determinar la coordenada de un punto P , medimos la distancia, en metros, entre P y el origen. Eso es un número real positivo. Si la dirección desde el origen hacia P es la dirección positiva, ese número es la coordenada de P . Si la dirección desde el origen hacia P es la contraria a la dirección positiva, el número con signo menos es la coordenada de P . La coordinada del propio origen es cero. De esta forma establecemos una correspondencia perfecta entre los números reales y los puntos de una línea: cada punto tiene una única coordenada en números reales, y cada número real es la coordenada de un

punto único. de forma similar, podemos especificar los puntos de un plano usando pares de números reales, o los puntos de un modelo del espacio tridimensional usando tripletes de números reales. Decimos que esos números son las *coordenadas* de los puntos. También podemos usar **números complejos** como coordenadas para describir un plano. De hecho, la representación $z = x + iy$ codifica dos números reales, x , y —y por tanto un punto en un plano— en el único número complejo z . Por supuesto, si solo tenemos parte de una línea, todavía podemos usar números reales para especificar sus puntos, pero no todos los números reales estarán representados, y lo mismo en los demás casos.

La experiencia con los mapas nos muestra cómo, mediante una **proyección** adecuada, podemos representar superficies curvadas en un plano (por ejemplo, en trozo plano de papel). De esta forma, podemos utilizar coordenadas para especificar puntos en superficies curvas.

La idea básica de las coordenadas admite muchas variaciones y generalizaciones:

- ¡Podemos usar más números! Aunque es difícil visualizar más de tres dimensiones, trabajar con conjuntos quíntuples, o mayores, no es mucho más difícil que trabajar con triples. De este modo, los espacios de alta dimensionalidad se ponen al alcance de nuestra comprensión intelectual. Véase **Dimensión**.
- ¡Podemos invertir el procedimiento! Las coordenadas se introducen para permitirnos describir objetos geométricos usando conjuntos de números reales. Por otro lado, en la percepción humana del color, hallamos que cualquier **color** percibido puede coincidir, de un modo esencialmente único, usando mezclas de tres colores básicos, digamos rojo, verde y azul. Las diferentes intensidades de rojo, verde y azul se describen con tres números reales positivos, y cada una de esas combinaciones de intensidades corresponde a un color percibido diferente. Podemos interpretar esos tripletes como las coordenadas de un **espacio de propiedad** tridimensional, el *espacio* de colores percibidos. Hay muchos ejemplos de este tipo general. Los espacios basados en **cargas de color** desempeñan un papel fundamental en nuestra **Teoría Central**.
- ¡Podemos definir lo que queremos decir con espacios curvos tridimensionales (o de más dimensiones)! De nuevo, estos conceptos son difíciles de visualizar directamente. Pero los procedimientos que utilizamos para representar distancias en mapas, donde representamos superficies en planos, se pueden expresar de forma algebraica, usando una **métrica**, y después se pueden generalizar con facilidad.
- ¡Podemos definir el espacio-tiempo, incluido el tiempo en pie de igualdad con el espacio! Para hacerlo, solo necesitamos tener en cuenta la *fecha* de un suceso, junto con el *lugar* en que ocurre, como una coordenada adicional. (Tiene gracia señalar que los números negativos hacen una disimulada aparición en las fechas a. C. (antes de Cristo.) El año 5 a. C. podría, y seguramente debería, llamarse año menos cinco, y escribirse -5). En la **relatividad general** combinamos esta idea con la anterior para definir el espacio-tiempo curvo.

- ¡Podemos utilizar distintos tipos de números! Las coordenadas basadas en números complejos se usan mucho en la teoría cuántica, y las coordenadas basadas en los **números de Grassman** nos han permitido formular la prometedora idea de la **supersimetría**.

Corriente

La corriente eléctrica es una medida del movimiento de la **carga eléctrica** de un sitio a otro. El caso más simple, idealizado, de una corriente eléctrica se asocia con un **electrón** en movimiento. Ahí tenemos una corriente eléctrica igual a la carga eléctrica del electrón multiplicada por su **velocidad** en la posición momentánea del electrón, e igual a cero en los demás sitios. Si la velocidad del electrón permanece constante, la corriente es constante en magnitud, pero su posición se mueve con el electrón.

En una situación en que tengamos muchos electrones junto con otras partículas eléctricamente cargadas, la corriente eléctrica total es la suma de las corrientes eléctricas debidas a cada partícula (la carga multiplicada por la velocidad, en todos los casos) por separado. El valor de esta corriente eléctrica fundamental, o «microscópica», está definida en cualquier punto del espacio y a cualquier tiempo. En otras palabras, la corriente eléctrica es un **campo vectorial**.

La magnitud de la corriente eléctrica microscópica, así definida, es estrictamente cero donde no hay partículas cargadas en movimiento, y varía de forma errática en el espacio y el tiempo. Suele ser conveniente, para las aplicaciones prácticas, promediar las cantidades a lo largo de regiones del espacio que contienen muchos electrones. De esta forma, definimos corrientes eléctricas promediadas, que varían suavemente en el espacio y el tiempo. En los tratamientos comunes de la corriente eléctrica en circuitos eléctricos, o en aparatos eléctricos, ese promediado se da por hecho. de modo similar, tenemos corrientes asociadas a la transferencia de otros tipos de carga, como las dos **cargas de color** débiles de la **fuerza débil**, o las tres cargas de color fuertes de la **fuerza fuerte**. También tenemos (sustituyendo en la definición «carga» por «masa») *corrientes de masa* asociadas a la transferencia de masa, *corrientes de energía* asociadas a la transferencia de energía, y otras. En el lenguaje ordinario, usamos a menudo la palabra «corriente» para describir los flujos de agua, y tenemos en mente una corriente de masa.

Corriente axial

Las corrientes axiales son una clase especial de corrientes que no cambian de signo bajo una transformación de **paridad** espacial. Así, las corrientes axiales definen **campos** de **vectores axiales**. Introduje este concepto más bien esotérico mientras buscaba una razón

para proponer el término «**axión**» que pudiera colar a los editores del *Physical Review Letters*.

Covariancia general

Este es el término original de Einstein para **simetría galileana local**, el principio fundacional de la **relatividad general**.

Cromodinámica cuántica (QCD)

La *cromodinámica cuántica*, o QCD en sus siglas inglesas, es nuestra **Teoría Central de la fuerza fuerte**.

La QCD introduce muchas ideas nuevas en la descripción de la naturaleza, entre ellas los **quarks**, la **carga de color**, los **gluones de color**, la **libertad asintótica**, el **confinamiento** y los **chorros**.

La QCD aporta, en su dominio, una respuesta clara y positiva a nuestra Pregunta inspiradora: ¿encarna el mundo ideas bellas? Porque la QCD encarna el principio espléndido de la **simetría local**, en el contexto excepcionalmente frondoso del **espacio de propiedad de la carga de color** fuerte.

Cualitativo/Cuantitativo

Decimos que un concepto, teoría, entendimiento o medición es *cuantitativo* cuando se expresa usando números. En otro caso, es *cualitativo*. Los «números» usados en una descripción cuantitativa pueden ser **números naturales**, **números reales**, **números complejos** u otros, según la aplicación.

También hablamos de conceptos, teorías, entendimientos o mediciones *semicuantitativos* cuando esas cosas se expresan usando números, pero sin precisión o consistencia completas. Así, por ejemplo, podemos encontrar que distintos profesionales, usando la misma teoría física semicuantitativa, derivan predicciones diferentes según cómo rellenen los detalles vagos de la teoría.

La palabra «cualitativo» se puede usar también por énfasis, de la manera siguiente. Al decir que una teoría o un fenómeno son *cualitativamente* nuevos, queremos decir que no son un mero desarrollo o intensificación de lo que había antes, sino algo fundamentalmente diferente, de manera que lo anterior y lo nuevo no se pueden comparar cuantitativamente. Por ejemplo, las **funciones de onda** de la **teoría cuántica** difieren cualitativamente de las **órbitas** de la física clásica, a las que desbanca.

Cuantización

Se usa en tres sentidos diferentes: un sentido general, un sentido especial estrechamente relacionado y un término de jerga.

General: cuando mapeamos o, como solemos decir, **proyectamos** una cantidad continua sobre una discreta, decimos que hemos *cuantizado* esa cantidad. En otras palabras, el proceso de cuantización convierte una cantidad **analógica** en una representación **digital** de ella. La cuantización, en este sentido, es una práctica muy común en la ingeniería moderna y el procesamiento de información, porque las cantidades digitales son más fáciles de comunicar, y de mantener precisas, que las cantidades analógicas. (Véase **Analógico** y **Digital** para más detalles.) Con algunas excepciones esotéricas, los ordenadores modernos funcionan exclusivamente con información digital, de forma que las lecturas de las señales analógicas, como las intensidades de la luz, se cuantizan antes de incorporarse. El acto de cuantizar algo se llama *cuantización*.

Un resultado importante de la mecánica cuántica es que *cuantiza*, en el sentido precedente, muchas cantidades que en la física clásica eran continuas. (¡Este es un acto de la naturaleza, o del Artesano, no de ningún ingeniero humano!) Ejemplos:

- La **energía** de una onda electromagnética. Véase **Fotón**.
- La **energía** de un átomo. Según la mecánica clásica, un electrón con carga negativa puede orbitar alrededor de un protón con carga positiva en muchas órbitas ligeramente diferentes, permitiendo una gama continua de energías. En la mecánica cuántica, las órbitas permitidas son diferentes de manera discreta, es decir, están *cuantizadas*, como lo están, por tanto, las energías permitidas. Véase **Estado estacionario**, **Espectros (atómicos, moleculares y otros)** y la extensa discusión (exposición), con imágenes, en «Belleza cuántica I».
- Las **partículas elementales** en general. Véase **Cuanto (unidad de materia)**.

Jerga: los físicos suelen llamar «cuantizar» un sistema físico al proceso de aplicar la mecánica cuántica a ese sistema. Este es un uso significativamente diferente de esa palabra, susceptible de causar confusión. Los profesionales pueden usarlo con seguridad cuando hablan entre ellos, pero en este libro lo he evitado.

Cuanto (unidad de materia)

Los objetos a los que solemos llamar **partículas elementales** se entienden, según nuestra **Teoría Central**, como perturbaciones de los **fluidos cuánticos**. Así, los **fotones** son perturbaciones del **flujo electromagnético**, los **electrones** son perturbaciones del **flujo electrónico**, los **gluones** son perturbaciones del **flujo gluónico**, las **partículas de Higgs** son perturbaciones del **flujo de Higgs**, y así sucesivamente. Si tratamos el

movimiento de esos fluidos de acuerdo con las reglas de la física clásica, hallamos que se permite una gradación continua de su energía. Pero, cuando los tratamos según las reglas de la **teoría cuántica**, hallamos que las perturbaciones permitidas vienen en unidades irreducibles: es decir, ¡la clase de cosa que reconocemos como partículas elementales!

Véase sobre todo **Fotón** para más detalles sobre el **cuanto de campo electromagnético**: el «cuanto de luz» original de Planck y Einstein.

Digital

Si una cantidad no puede variar suavemente, decimos que es una cantidad *digital*. Para más detalles sobre este concepto, véase la entrada **Analógico**.

Dimensión

De forma intuitiva, una *dimensión* es una posible dirección del movimiento. Así, decimos que una línea recta, o una curva, tiene una dimensión. Un plano, o una superficie, tiene dos dimensiones, porque requiere movimiento en dos direcciones independientes —digamos «horizontal» y «vertical», o «norte-sur» y «este-oeste», por ejemplo— para alcanzar cualquier punto desde cualquier otro. El espacio cotidiano, o un cuerpo sólido, tiene tres dimensiones.

Un concepto más flexible de «espacio», y de dimensión, surge con naturalidad de la introducción de coordenadas. En este punto tendrías que consultar la entrada **Coordenada** para una exposición de ese concepto. Las dimensiones de un espacio descrito por coordenadas es simplemente el número de coordenadas que requiere. Ese concepto, cuando se aplica a objetos geométricos simples y suaves, concuerda con la idea intuitiva anterior.

Los matemáticos han generalizado estos conceptos más o menos intuitivos de las dimensiones de muchas maneras. Dos generalizaciones notables son las **dimensiones complejas** y las dimensiones fraccionarias, o *fractales*. Las dimensiones complejas añaden más coordenadas, pero unas coordenadas que son **números complejos**. Las dimensiones fractales pueden surgir cuando uno considera objetos que contienen una estructura local extremadamente rica y están lejos de ser continuos: véase **Fractales**. En años recientes, los físicos han introducido, en conexión con la **supersimetría**, el concepto de **dimensiones cuánticas**. Las coordenadas de las dimensiones cuánticas son **números de Grassmann**.

Hay otro uso científico, muy diferente, de la palabra «dimensión». En ese uso, nos referimos a las unidades en que se mide una cantidad como a sus «dimensiones». Así, en este sentido, el área tiene dimensiones de longitud al cuadrado, mientras que la **velocidad** tiene dimensiones de longitud partido por tiempo, la **fuerza** tiene dimensiones de masa por longitud partido por el cuadrado del tiempo, y así sucesivamente. En este libro, para evitar posibles confusiones, he evitado utilizar «dimensión» en este sentido.

Dimensión compleja

Las **dimensiones** ordinarias («reales») se describen con naturalidad con números —**coordenadas**— que son **números reales**. Así, la posición de un punto en una pantalla de ordenador se especifica por dos coordenadas reales, que representan la posición vertical y la horizontal, mientras que un punto en el espacio ordinario se especifica por tres coordenadas. En muchos contextos físicos y matemáticos, es natural considerar espacios en que las coordenadas son **números complejos**. En ese caso decimos que tenemos un espacio complejo, y que el número requerido de coordenadas es el número de dimensiones complejas en ese espacio. Como un número complejo se puede especificar por dos números reales —en concreto, por la magnitud de sus partes real e imaginaria—, un espacio complejo se puede considerar también un espacio real (con estructura extra). Así considerado, tiene un número de dimensiones reales igual al doble de su número de dimensiones complejas.

Dimensión cuántica

Las *dimensiones cuánticas* son **dimensiones** cuyas coordenadas son **números de Grassmann**. Las dimensiones cuánticas son el alma de la **supersimetría**.

Economía (de ideas)

Decimos que una explicación, o más en general una teoría, es *económica* si asume poco y explica mucho.

Aunque no se refiere al intercambio de bienes y servicios, este concepto no está del todo desconectado de la economía propiamente dicha. Aquí diríamos que el uso inteligente de unos recursos limitados para crear productos valiosos es un uso económico de esos recursos, lo que es una idea similar. parece razonable, de modo intuitivo, preferir las explicaciones económicas a sus opuestas: las explicaciones que demandan muchas suposiciones para explicar una gama limitada de hechos u observaciones. Esta intuición viene apoyada por la estadística bayesiana, que nos asegura que la más económica entre dos explicaciones tiene más probabilidad de ser correcta, cuando ambas encajan los datos igual de bien.

Ecuación de Dirac

En 1928, Paul Dirac (1902-1984) propuso una **ecuación dinámica** que describía el comportamiento de los **electrones** en la **mecánica cuántica**, a la que hoy llamamos la *ecuación de Dirac*. La ecuación de Dirac mejora la previa ecuación del electrón de **Schrödinger** de un modo muy similar a como las ecuaciones de Einstein de la mecánica mejoran las de Newton. En ambos casos, las nuevas ecuaciones son consistentes con la teoría de la **relatividad especial**, mientras que las otras, más simples, a las que sustituyen, no lo son. (Y en ambos casos las nuevas ecuaciones reproducen las predicciones de las viejas, cuando describen el comportamiento de los cuerpos que se mueven mucho más despacio que la velocidad de la luz.)

La ecuación de Dirac tiene soluciones adicionales, además de las que representan a los electrones en distintos estados de movimiento (y espín). Estas soluciones describen partículas con la misma masa que el electrón, pero con carga eléctrica opuesta. Las nuevas partículas se llaman antielectrones, o **positrones**. Los positrones se descubrieron experimentalmente en 1932 por Carl Anderson, mediante el estudio de los **rayos cósmicos**. Véase también **Antimateria**.

La ecuación de Dirac, con las adaptaciones adecuadas (relativamente menores), describe no solo el comportamiento de los electrones, sino también el de otras partículas elementales con espín $\frac{1}{2}$, incluidos todos los **quarks** y **leptones**: en otras palabras, las **partículas de sustancia** del texto principal. Con otras modificaciones algo más significativas, también describe el comportamiento de los **hadrones** de espín $-\frac{1}{2}$, incluidos los **protones** y los **neutrones**.

Ecuación de Schrödinger

La *ecuación de Schrödinger* fue propuesta por Erwin Schrödinger (1887-1961) en 1925. Es una **ecuación dinámica** que determina cómo las **funciones de onda** de los electrones, o de otras partículas, cambian con el tiempo.

La ecuación de Schrödinger es aproximada, en dos sentidos importantes. Primero, se basa en una mecánica no relativista (newtoniana), en vez de en la mecánica relativista de Einstein. En 1928, Paul Dirac aportó otra ecuación para las funciones de onda del electrón que obedece los supuestos de la **relatividad especial** (véase **Ecuación de Dirac**). Segundo, no contiene los efectos de las **fluctuaciones cuánticas**, como los **fotones virtuales**, sobre los electrones. Pese a todo, la ecuación de Schrödinger es lo bastante precisa para la mayoría de las aplicaciones prácticas de la teoría cuántica en la química, la ciencia de materiales y la biología, y es la versión de la teoría cuántica que se suele adoptar al tratar esas materias.

Aunque hablamos de «la ecuación de Schrödinger», lo que aportó Schrödinger no es realmente una ecuación individual, sino más bien un procedimiento para formular las ecuaciones que describen las diferentes situaciones en que la mecánica cuántica se puede aplicar.

Una de las ecuaciones de Schrödinger más simples es la ecuación para un solo electrón sujeto a la atracción **eléctrica** de un solo **protón**. Esto da una descripción del átomo de hidrógeno. Aunque se formula en un universo de ideas distinto —un universo donde las funciones de onda que llenan el espacio sustituyen a las partículas que se mueven en órbitas—, los resultados que fluyen de la ecuación de Schrödinger, en este caso, reivindican en gran medida la intuición de Bohr sobre el significado del espectro del hidrógeno. Para un resumen, véase **Espectros**.

También podemos formular las ecuaciones de Schrödinger que gobiernan a varios electrones de forma simultánea. Tenemos que hacer esto, desde luego, si queremos explicar la influencia de unos electrones sobre otros. Como se explica en la entrada **Función de onda**, las funciones de onda que describen por entero el estado físico de varios electrones ocupan espacios de **dimensión** muy alta. La función de onda para dos electrones vive en un espacio hexadimensional, la función de onda para tres electrones vive en un espacio nonadimensional, y así sucesivamente. Las ecuaciones para estas funciones de onda se vuelven enseguida muy difíciles de resolver, incluso aproximadamente, e incluso utilizando los ordenadores más poderosos. Por eso la química sigue siendo una próspera empresa experimental, por más que, en principio, conozcamos las ecuaciones que la gobiernan, y por más que eso debiera permitirnos calcular los resultados de los experimentos químicos sin necesidad de realizarlos.

Ecuaciones de Maxwell

Las *ecuaciones de Maxwell* son un sistema de cuatro ecuaciones que expresan relaciones entre **campos eléctricos**, **campos magnéticos** y las distribuciones de **carga eléctrica** y **corriente eléctrica** en el espacio. Se exponen en extenso en el texto y las notas finales.

Véase también **Ley de Ampère/Ley de Ampère-Maxwell**, **Ley de Faraday** y **Ley de Gauss**, donde las cuatro ecuaciones de Maxwell se explican de forma individual.

Electricidad

La «electricidad» es un término vago usado para referirse a una amplia gama de fenómenos asociados a la influencia y el comportamiento de las **cargas eléctricas**.

Electrodinámica/Electromagnetismo

Estos dos términos se usan indistintamente para el cuerpo científico que se ocupa de la **electricidad**, el **magnetismo** y las relaciones entre ellos. desde el trabajo de Faraday y Maxwell, la gente se ha dado cuenta de que la electricidad y el magnetismo están

conectados de manera indisoluble. Los campos magnéticos que cambian con el tiempo generan campos eléctricos, según la **ley de Faraday**, y los campos eléctricos que cambian con el tiempo generan campos magnéticos, según la **ley de Maxwell** (véase **Término de Maxwell**). Las **ondas electromagnéticas**, que surgen de la interacción de esas dos leyes, contienen tanto campos eléctricos como magnéticos.

En la teoría de la **relatividad especial**, aprendemos que las **transformaciones galileanas** transforman los campos (y fluidos) eléctrico y magnético uno en el otro.

Electrodinámica cuántica (QED)

La electrodinámica cuántica, o QED en sus siglas inglesas, es nuestra **Teoría Central** del **electromagnetismo**.

La QED se basa en las **ecuaciones de Maxwell**, sin cambios en la forma, pero interpretadas según las reglas de la **teoría cuántica**. Así, las perturbaciones del **fluido electromagnético** vienen en unidades discretas, o **cuantos —fotones—**, y el fluido pasa a exhibir actividad espontánea: **fluctuaciones cuánticas**.

La QED aporta un fundamento firme y completo, como dijo Paul Dirac, para «toda la química y la mayoría de la física».

Electrón

Los electrones son constituyentes de la **materia normal**. Fueron identificados claramente por primera vez en 1897 por J. J. Thomson.

En la **Teoría Central**, los *electrones* son **partículas elementales**, y se definen por las ecuaciones que satisfacen.

En la materia normal, los electrones portan toda la **carga eléctrica** negativa. Aunque solo aportan una fracción muy pequeña de la masa de la materia normal, los electrones desempeñan un papel dominante en la química y en la estructura de los materiales. La manipulación controlada de los electrones —en otras palabras, la *electrónica*, definida a grandes rasgos— es el fundamento de gran parte de la moderna civilización tecnológica.

Elipse

Una *elipse* es una figura geométrica plana que parece un círculo estirado. Se suele definir así: toma dos puntos *A* y *B*, y una distancia *d* mayor que la distancia entre *A* y *B*. Una elipse es la colección de todos los puntos *P* con la propiedad de que la distancia entre *A* y *P*, más la distancia entre *B* y *P*, es igual a *d*. *A* y *B*, que no son parte de la elipse, se llaman sus puntos focales o focos.

Los círculos son casos especiales de elipses, que surgen cuando coinciden A y B . Cuando d es mucho mayor que la distancia entre A y B , la elipse será casi circular. A medida que mengua d y se hace solo un poco mayor que la distancia entre A y B , la elipse se va convirtiendo en un óvalo que circunscribe estrechamente el segmento que conecta A y B ; en el caso límite, cuando d se hace igual a la distancia entre A y B , la elipse degenera en ese segmento.

Las elipses se pueden definir de otras formas que parecen muy diferentes, pero que son matemáticamente equivalentes. Mi favorita es la siguiente, que tal vez sea la más simple de visualizar: dibuja un círculo en una lámina de goma, y estira la lámina de manera uniforme en cualquier dirección que elijas. El círculo se habrá deformado entonces como una elipse; todas las elipses se pueden obtener de esta forma.

Las elipses se estudiaron con una profundidad asombrosa, por los geómetras de la Grecia antigua, por su interés intrínseco, porque parecían hermosas. Muchos siglos después, Kepler descubrió, mediante el estudio meticuloso de las observaciones astronómicas de Tycho Brahe, que las órbitas de los planetas alrededor del Sol forman elipses, con el Sol en uno de sus focos. Aunque el propio Kepler se sintió decepcionado al principio por tener que abandonar la forma circular «perfecta» de las **órbitas**, esta encarnación de la geometría griega parece, en retrospectiva, un ejemplo casi milagroso del Ideal que se vuelve Real. Las leyes de Kepler del movimiento planetario condujeron a Newton a sus teorías de la mecánica y la gravedad. En el marco newtoniano, descubrimos que las órbitas de los planetas alrededor del Sol son solo aproximadamente elípticas, puesto que están distorsionadas por la influencia gravitatoria de otros planetas. La belleza definitiva, en este caso, reside en las propias **leyes dinámicas**, y no en sus soluciones. Para una exposición más extensa, véase «Newton III».

Energía/Energía cinética/Energía de masa/Energía del movimiento/Energía potencial/Energía de campo

La **energía** es, junto al **momento** y al **momento angular**, una de las grandes **cantidades conservadas** de la física clásica. Cada una de ellas ha evolucionado hasta convertirse en un pilar de la física moderna.

Las exposiciones prácticas de la energía introducen muchas categorías, como la energía eólica, la energía química, la energía calorífica y otras, que surgen al empaquetar las formas fundamentales de la energía de distintas formas. Pero, incluso cuando se expresa en términos fundamentales, la energía viene en diferentes formas. Aquí miraremos el concepto de energía desde el punto de vista de los fundamentos.

La energía total, que es la cantidad conservada, es una suma de varios términos: energía cinética, energía de masa, energía potencial y energía de campo. Esos términos distintos se refieren a unos aspectos de la realidad que parecen, a primera vista, muy diferentes. Gran

parte de la fuerza del concepto de energía, cuando se aplica, viene justo de su capacidad para describir, y relacionar, varios aspectos distintos de la realidad.

La energía cinética fue la primera forma de energía que se estudió, históricamente, y su importancia es la más fácil de captar de forma intuitiva. Cualitativamente, la energía cinética es movimiento. A menudo, al diseñar máquinas, queremos que las cosas se muevan. Como las cosas que se mueven tienen energía cinética, el objetivo principal de los ingenieros suele ser transformar en energía cinética otras formas de energía.

Cuantitativamente, en la mecánica newtoniana, la energía cinética de una partícula es igual a la mitad de su **masa** por el cuadrado de la magnitud de su **velocidad**. En la mecánica modificada de Einstein, para satisfacer la teoría de la **relatividad especial**, la *energía del movimiento* se vincula con una nueva forma de energía, la *energía de masa*, a la que vamos ahora.

En la mecánica newtoniana hay dos **leyes de conservación** separadas: la conservación de la masa y la conservación de la energía. La relatividad especial requiere una revisión radical del concepto de masa. Como parte de esa revisión, hay que abandonar la conservación de la masa. La conservación de la energía sigue en vigor, pero con una definición significativamente diferente de lo que es la energía. Aunque nunca la he visto presentada de esta forma, la lógica del concepto de *energía de masa* emerge con gran claridad, si lo consideramos como una forma de reconciliar los conceptos no relativista y relativista de la energía. Los próximos tres párrafos lo explican en detalle. para el momento y el momento angular, el paso de la definición newtoniana a la relativista es suave. Las expresiones relativistas para esas cantidades se hacen iguales a las expresiones newtonianas, aproximadamente, cuando las velocidades de todos los cuerpos implicados son muy inferiores a la velocidad de la luz. Para la energía, por el contrario, esa transición suave no es inmediata. Solo funciona si incluimos una nueva contribución a la definición newtoniana usual de la energía. Esta nueva contribución es la *energía de masa*.

La energía de masa de un cuerpo es igual a su masa por el cuadrado de la velocidad de la luz. Cuando simbolizamos, como es habitual, la velocidad de la luz por c , la fórmula correspondiente es tal vez la ecuación más famosa de la ciencia:

$$E_{\text{masa}} = mc^2$$

He adosado el subíndice «masa» aquí para enfatizar que esta es solo una forma de energía entre muchas. La energía de masa total, cuando tenemos varios cuerpos, es simplemente la suma de sus energías de masa separadas. Así, la energía de masa total es la masa total multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz. La energía newtoniana total «corregida» es la energía newtoniana clásica, cinética más potencial, que encontrarás definida en los libros de texto (¡y también más abajo!), más la energía de masa. Es esta energía newtoniana corregida, no la energía newtoniana clásica, la que emerge de forma suave de la mecánica relativista.

En la medida en que la masa total se conserva, las energías newtonianas corregida y clásica difieren en una cantidad constante (y ambas se conservan). La energía corregida tiene un funcionamiento más general, sin embargo. Cubre algunos casos, como las reacciones **nucleares**, donde la conservación de la masa *no* es una buena aproximación. En esos casos, la energía de masa al principio del proceso no es igual a la energía de masa al final. La energía total se conserva, de modo que la diferencia entre esas energías de masa debe aparecer de otras formas. Eso es lo que se quiere decir cuando se habla de la conversión de la masa en energía, o de la energía en masa. O, más bien, es lo que debería ser. El concepto ha sido una poderosa fuente de malentendidos y confusiones en la literatura de divulgación científica. Espero haber ayudado a aclararlo aquí. Para el trabajo de precisión, y en las aplicaciones en que hay varias partículas moviéndose a velocidades cercanas a la de la luz, hay que usar las fórmulas relativistas completas para la *energía del movimiento*, y separarla en energía de masa y energía cinética resulta artificial. En beneficio de los lectores que tienen algún dominio del álgebra, aquí está esa fórmula:

$$E_{\text{movimiento}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Cuando la magnitud de la velocidad es mucho menos que la velocidad de la luz, $v \ll c$, esto se hace aproximadamente igual a la suma de la energía de masa mc^2 y la energía cinética newtoniana $\frac{1}{2}mv^2$, como hemos descrito antes con palabras. A medida que la magnitud de la velocidad se acerca a la velocidad de la luz, la energía de movimiento crece sin límite.

La *energía potencial*, cualitativamente, es energía de posición, o de distancia. Por ejemplo, la energía potencial de una piedra cerca de la superficie de la Tierra puede acumularse levantando la piedra, o liberarse dejándola caer. Mientras la piedra cae tras soltarla, su velocidad, y por tanto su energía cinética, se incrementa. Para mantener la conservación de la energía, entonces, debemos tener una reducción de la energía potencial.

El concepto de energía se puede extender para cubrir casos mucho más generales. Cuando los cuerpos ejercen fuerzas uno sobre otro, la energía potencial asociada a su interacción es una función de su distancia. La energía potencial —energía de distancia— es un concepto natural dentro de las teorías basadas en la **acción a distancia**, como la teoría de la gravedad de Newton. Al igual que esas teorías, sigue siendo útil en muchas aplicaciones, para las que aporta una aproximación suficiente y amable con el usuario. Pero, en la física fundamental, desde la revolución iniciada por Faraday y Maxwell, los **campos** transmisores de fuerza sustituyen a la acción a distancia. La *energía de campo* sustituye a la energía potencial.

La energía de campo se acumula por todo el espacio donde quiera que haya campos que no se desvanezcan. La densidad de la energía de campo asociada a un campo eléctrico en un punto del espacio, por ejemplo, es proporcional al *cuadrado* de la magnitud del campo eléctrico en ese punto.

La posibilidad de sustituir el concepto de energía potencial *dependiente de la distancia* por el concepto de energía de campo *definida localmente* es profunda a la vez que muy bonita. Consideremos la energía potencial entre una partícula con carga (eléctrica) positiva y otra con carga negativa. Por el mismo tipo de razones que hemos expuesto respecto a una piedra cerca de la Tierra, hay una energía potencial asociada a la distancia entre esas partículas. En el modelo de Faraday-Maxwell, la misma cantidad de energía surge de una manera por entero diferente. Nuestras dos cargas generan campos eléctricos, y el campo eléctrico total es la suma de sus contribuciones. La densidad de energía asociada con ese campo eléctrico total es su cuadrado, y por tanto contiene no solo los cuadrados de cada campo por separado, sino también un término cruzado que refleja su presencia simultánea. (Si esta idea no te resulta familiar, vamos a repasarla un momento. El cuadrado de $1 + 1$ (que es $2 \times 2 = 4$) no es igual al cuadrado de 1 dos veces ($1^2 + 1^2$), que es 2. Hay una contribución extra, o término cruzado, pues las dos contribuciones independientes a la suma se encuentran en su cuadrado. Algebraicamente, más en general, tenemos que $(a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$, donde $2ab$ es el término cruzado. Los términos cruzados que aparecen en la densidad de energía de campo total dependerán de la geometría relativa de los dos campos de los que se compone, que a su vez depende de la distancia relativa entre las partículas. Cuando sumas la densidad de energía total, tomando contribuciones de todo el espacio, para obtener la *energía de campo* total, hallas que la contribución de esos términos cruzados coincide exactamente con la *energía potencial* de la teoría vieja, y puede reemplazarla.

En este ejemplo, la energía de campo no es más que una forma diferente —y más complicada!— de llegar a la misma respuesta que con la energía potencial. Pero, en una consideración completa de la física, las leyes fundamentales se formulan *localmente*, y conducen de manera natural a la energía de campo. La energía potencial es un concepto aproximado y *emergente* que resulta útil para algunos problemas, pero inadecuado para otros.

La **conservación** de la energía, y al final la energía en sí misma, se entiende mejor mediante el teorema general de Noether, que vincula las leyes de conservación a la **simetría**. En ese marco, la conservación de la energía refleja la simetría (es decir, la **invariancia**) de las leyes físicas bajo **traslación temporal**: es decir, bajo una transformación que adelanta (o retraza) todos los sucesos en un intervalo de tiempo común. En otras palabras, tenemos conservación de la energía cuando las leyes no dependen de un tiempo fijado, especificado externamente. En el mundo cuántico, la energía adopta características adicionales de gran sutileza y hermosura. Merece una mención especial la **relación de Planck-Einstein**, que relaciona la energía de los fotones con su **color**.

Cuando se combina con las ideas de Bohr, esta conexión nos permite descifrar el mensaje de los **espectros**. Los colores de la luz espectral de un átomo codifican las energías de sus **estados estacionarios**, produciendo así una audible Música de las Esferas.

Energía oscura/Materia oscura

La **Teoría Central** nos da un entendimiento detallado y profundo de, esencialmente, toda la materia que encontramos en la Tierra y su vecindad. Esta materia «normal» u «ordinaria» se compone de **quarks** *u* y *d*, **gluones** de color, **fotones** y **electrones**, junto a un flujo relativamente escaso de **neutrinos**. Las observaciones astronómicas revelan, sin embargo, que el universo en su conjunto contiene otros tipos de materia que, de hecho, aportan la mayoría de su masa total. La naturaleza de esta materia adicional se desconoce en detalle actualmente, pero podemos organizar los hechos conocidos de una manera simple y sugerente.

- La **materia normal** aporta cerca del 5 % de la masa total del universo. Se distribuye de una forma muy desigual en galaxias (que se componen a su vez de nubes de gas, estrellas y planetas) separadas por grandes regiones casi carentes de materia normal.
- La **materia oscura** aporta cerca del 27 % de la masa total del universo. También es grumosa, pero menos que la materia normal. Los astrónomos suelen decir que las galaxias están rodeadas de halos de materia oscura difusa, pero, en vista de su masa relativa, sería mejor decir que las galaxias son unas impurezas concentradas dentro de nubes de materia oscura. La materia oscura interactúa de forma muy débil con la materia ordinaria, incluida la luz. Así que no es oscura en el sentido convencional, sino más bien transparente.
- La **energía oscura** aporta cerca del 68 % de la masa total del universo. Se distribuye de forma homogénea, como si fuera una densidad de masa universal asociada al propio espacio. Hay evidencias de que esta densidad ha sido también constante en el tiempo, a lo largo de muchos miles de millones de años. Como la materia oscura, la energía oscura interactúa de forma muy débil con la materia ordinaria, y es transparente en vez de oscura.

La materia oscura y la energía oscura, y su distribución en el espacio, se infieren a partir de observaciones de la materia normal. En muchos contextos astrofísicos y cosmológicos, encontramos que podemos explicar el movimiento de la materia normal usando las leyes conocidas de la física (es decir, la Teoría Central) solo si asumimos que hay fuentes adicionales de masa además de la materia normal. En otras palabras, el movimiento que calculamos para la materia normal, bajo la influencia de su propia gravedad, no coincide con su movimiento observado.

Esta discrepancia podría, en principio, deberse a un fallo de la relatividad general, pero, a pesar de muchos intentos, no ha emergido una alternativa atractiva (incluso en las acepciones menos exigentes de «atractiva»). Por otro lado, las ideas para mejorar la Teoría Central han indicado, de manera por entero independiente, la existencia de nuevas formas de materia que podrían dar cuenta de la materia oscura. Tanto los **axiones** como las nuevas partículas sugeridas por las teorías de **supersimetría** podrían cumplir los requisitos: son lo bastante estables e interactúan débilmente con la materia normal. Más aún, se calcula que se produjeron durante el Big Bang en más o menos la abundancia requerida, y que se agregan en los patrones observados. Estas posibilidades están sujetas ahora mismo a una investigación experimental muy activa.

La energía oscura tiene las propiedades esperadas del «término cosmológico» de Einstein, y también de las densidades de energía asociadas con el **campo de Higgs**, la actividad espontánea de los **fluidos cuánticos** y varias otras fuentes más o menos verosímiles. Es posible que varios de estos efectos hagan contribuciones independientes a la energía oscura, con algunos sumando al total y otros restando de él. A diferencia de lo que ocurre con la materia oscura, las ideas teóricas existentes sobre la energía oscura son vagas y difíciles de **refutar**.

Merece la pena mencionar aquí que el problema moderno de la materia oscura/energía oscura tiene dos precedentes históricos extraordinarios. Investigaciones meticulosas sobre la **mecánica celeste**, basadas en la teoría de la **gravedad** de Newton, habían revelado a mediados del siglo XIX dos pequeñas discrepancias entre el cálculo y la observación. Una concernía al movimiento de Urano; la otra al movimiento de Mercurio. La dificultad con Urano se resolvió con una forma de «materia oscura». Urbain Le Verrier, y también John Couch Adams, propusieron que su aceleración discrepante venía causada por la fuerza gravitatoria ejercida por un planeta nuevo y desconocido cuya posición pudieron calcular. El planeta requerido —Neptuno— ¡se halló como estaba previsto! La dificultad con Mercurio se resolvió cuando la **relatividad general** de Einstein reemplazó a la teoría gravitatoria de Newton. La nueva teoría, propuesta por razones enteramente distintas y profundas, hace unas predicciones ligeramente diferentes para la **órbita** de Mercurio, y sus predicciones concuerdan con la observación.

Se han aplicado argumentos de sabor **antrópico** tanto al problema de la energía oscura como al de la materia oscura. La estructura de los argumentos es similar en ambos casos:

- La parte del universo que podemos observar actualmente es solo una porción de una estructura mayor, a veces llamada el *multiverso*. (Hay que señalar que, a medida que pasa el tiempo, la región del espacio accesible a la observación se expande, debido a la velocidad finita de la luz.)
- Las condiciones físicas en otras partes distantes del multiverso puede ser diferentes. En concreto, la densidad de la energía oscura, o de materia oscura, pueden variar.

- En las regiones en que la densidad de la energía oscura, o de la materia oscura, sea drásticamente diferente de lo que observamos en nuestro universo, la vida inteligente no puede emergir.
- Por tanto, los únicos valores de esas densidades que pueden ser observados está cerca de los que observamos.

Los pasos segundo y tercero son hoy polémicos, de modo que estas ideas siguen siendo especulativas. Pero, a medida que mejore nuestro conocimiento de las leyes fundamentales, y nuestra capacidad de comprobar sus consecuencias, resulta lógicamente posible que acaben siendo aceptadas de manera amplia. Si eso ocurriera, mi impresión es que esta línea de razonamiento sería convincente. En ese caso, habríamos descubierto que algunas características esenciales del mundo que observamos —esto es, las densidades de la energía oscura y/o la materia oscura— están determinadas no por principios abstractos de la **dinámica** o la **simetría**, sino por *selección*, al estilo de la biología.

Espacio de propiedad

En la percepción humana del color, hallamos que cualquier color percibido puede coincidir, de un modo esencialmente único, usando mezclas de tres colores básicos, por ejemplo, rojo, verde y azul. Las distintas **intensidades** de rojo, verde y azul se describen con tres **números reales** positivos, y cada una de esas combinaciones de intensidades corresponde a un color percibido diferente. Podemos interpretar esos tripletes como las **coordenadas** de un *espacio de propiedad* tridimensional, el *espacio* de colores percibidos.

Hay muchos ejemplos de un tipo similar, donde usamos números para codificar propiedades, y consideramos unos conjuntos de números como coordenadas, para definir un espacio de propiedad. Los espacios de propiedad basados en **cargas de color** tienen un papel central en nuestras **Teorías Centrales**.

Especro electromagnético. Véase **Color (de la luz)**.

Especros (atómicos, moleculares y otros)

Los átomos de una clase dada —por ejemplo, los átomos de hidrógeno— absorben algunos colores de la luz espectral de manera mucho más eficaz que otros. (Más en general, absorben las **ondas electromagnéticas** que tienen algunas frecuencias de forma mucho más eficaz que las que tienen otras. En esta entrada usaré el lenguaje menos general, pero más evocador, de los colores.) Los mismos átomos, cuando se calientan, emiten la mayoría de su radiación en esos mismos colores espectrales. El patrón de colores preferidos es

diferente para las diferentes clases de átomos, y forma una especie de huella dactilar mediante la cual podemos identificarlos. El patrón de los colores preferidos de un átomo se llama su *espectro*.

Un logro importante de la **teoría cuántica** ha sido aportar una forma de computar los espectros atómicos. La idea subyacente es un legado perdurable del modelo atómico de Bohr. Bohr postuló que los electrones de un átomo pueden adoptar solo un conjunto discreto de **estados estacionarios**. Los posibles valores de energía del electrón, por tanto, forman también un conjunto discreto. Cuando un átomo emite o absorbe un **fotón**, experimenta una transición entre dos estados estacionarios. Como la **energía** se conserva en este proceso, la energía del fotón está relacionada con la diferencia de energía entre esos dos estados estacionarios. Finalmente, para coronar la visión de Bohr: el color espectral de un fotón revela su energía. Así, el espectro de un átomo codifica las energías de sus posibles estados. (Para ser exactos sobre esta codificación: la **frecuencia** de la onda electromagnética de un color, multiplicada por la constante de Planck, es igual a su **energía**. Véase **Fotón/relación de Planck-Einstein**.)

En la moderna teoría cuántica, computamos los posibles estados estacionarios y sus energías resolviendo la ecuación de Schrödinger, pero la relación fundamental entre las posibles energías de un átomo y su espectro permanece justo como la imaginó Bohr. Véase **Ecuación de Schrödinger**.

He hablado de átomos, pero la misma lógica se aplica a las moléculas, a los materiales sólidos, a los **núcleos** e incluso a los **hadrones**. En los núcleos nos ocupamos de los **estados estacionarios** de los **nucleones**, y en los hadrones nos ocupamos de los estados estacionarios de los sistemas basados en **quarks** y **gluones**, pero en cada caso su espectro codifica secretos de su estructura. cuando la luz del Sol, o de otras estrellas, se analiza en sus colores espirituales, encontramos que algunos colores aparecen con una intensidad aumentada (las llamadas «líneas de emisión») y otros con intensidad reducida (las llamadas «líneas de absorción») comparados con la media. El patrón de líneas de emisión y absorción puede coincidir con los espectros, sean medidos o computados, de átomos, moléculas y **núcleos** conocidos. Revelan lo que hay en la atmósfera de las estrellas, y la presencia de regiones calientes o frías. Testifican, con gran detalle convincente, que la materia de todo el universo está hecha de las mismas sustancias, y sigue las mismas leyes.

El uso de la palabra «espectro» en la expresión «espectro electromagnético» parece, a primera vista, bastante diferente de su uso en «espectro de un átomo». Lo primero se refiere a la gama de todas las posibles formas de radiación electromagnética, mientras que lo segundo se refiere ya sea a los colores concretos (o **tonos puros**, o *frecuencias*) de la luz que el átomo es capaz de emitir. (Esto corresponde fielmente, como hemos explicado, a las posibles energías de sus estados estacionarios.) Desde una perspectiva más profunda, sin embargo, es bastante correcto decir que el **espectro electromagnético** es realmente el espectro *de* algo: a saber, ¡del **fluído electromagnético**! Porque el espectro electromagnético es la gama de posibles colores que el fluido electromagnético puede emitir.

Espín

En el inglés común, se dice que un objeto tiene *spin* (tiene efecto, aplicado a un balón), o está *spinning* (girando), si está rotando alrededor de algún eje. *Espín* también significa eso en el mundo cuántico, pero el concepto asume una nueva importancia, sobre todo por dos razones.

- ¡Muchas partículas nunca dejan de rotar! Para estas partículas, el movimiento rotatorio alrededor de su centro es un aspecto de la actividad espontánea que es tan característica del mundo cuántico. Los **electrones**, los **protones** y los **neutrones** tienen esa propiedad. Cuando se mide su **momento angular** de rotación, su magnitud resulta ser igual a la mitad de la **constante de Planck** reducida. Decimos que estas partículas tienen espín $\frac{1}{2}$, o que son partículas de espín $\frac{1}{2}$.
- Muchas partículas, incluyendo, especialmente, los electrones, actúan como minúsculos imanes. Al igual que la Tierra, generan **campos magnéticos** cuya estructura se alinea con la dirección de su espín. El campo magnético asociado con cualquier electrón individual es muy pequeño, pero, si muchos electrones tienen sus ejes de espín alineados en la misma dirección, sus campos se suman. El magnetismo de los «imanes» clásicos —barras de minerales de hierro, básicamente— surge de los campos alineados de los electrones giratorios que contienen.

Estado estacionario

Históricamente, el término «estado estacionario» surgió primero en el modelo atómico de Bohr. Cuando aplicamos la mecánica clásica y la electrodinámica al problema de un electrón con carga negativa enlazado a un protón con carga positiva, no encontramos una solución estable. El electrón caerá en espiral hacia el protón al tiempo que irradia **ondas electromagnéticas**. Para evitar esa catástrofe, Bohr introdujo una hipótesis radical, la hipótesis de los *estados estacionarios*, según la cual el electrón solo tiene permitido adoptar unas pocas de las órbitas permitidas clásicamente, que definen sus «estados» permitidos. Dentro de esos orbitales concretos, el electrón no irradia, sino que está «estacionario». Así que los **orbitales** permitidos definen estados estacionarios.

El modelo de Bohr ha sido desbanulado por la moderna mecánica cuántica, pero algunos elementos de su idea, incluido el concepto de estado estacionario, se pueden reconocer en la teoría moderna. En la moderna teoría cuántica, el estado de un electrón se describe por una **función de onda**. Esa función de onda, y su **nube de probabilidad** asociada, evoluciona en el tiempo según la fundamental **ecuación de Schrödinger**. Entre las soluciones a la ecuación de Schrödinger, hay algunas especiales cuyas nubes de probabilidad no cambian con el tiempo en absoluto. Esas soluciones tienen las propiedades, en la teoría cuántica, que Bohr postuló para los estados estacionarios en su modelo. Así que

decimos, en la teoría cuántica, que las funciones de onda cuyas nubes de probabilidad no cambian con el tiempo definen *estados estacionarios*. De nuevo aquí, para más información, incluidas unas imágenes que valen más que mil palabras, véase «Belleza cuántica I», y también **Espectros**.

Las funciones de onda especiales que definen a los estados estacionarios (es decir, las funciones de onda cuyas nubes de probabilidad no cambian con el tiempo) son extremadamente útiles cuando uno piensa en los problemas de la física atómica y la química. En honor a su origen en las órbitas permitidas de Bohr, se llaman orbitales.

La noción de estado estacionario es solo aproximada, porque hay procesos físicos por los que un electrón puede hacer una transición entre esos estados. En concreto, un electrón en un estado estacionario puede moverse a otro estado estacionario emitiendo o absorbiendo un **fotón**. Bohr no pudo, dentro de su modelo, suministrar una imagen detallada ni un mecanismo para ese cambio de órbita discontinuo, y se limitó a reconocerlo como un postulado adicional: la posibilidad de los **saltos cuánticos**.

En la moderna teoría cuántica, las transiciones entre estados estacionarios ocurren como consecuencia lógica de las ecuaciones. Físicamente, surgen debido a la interacción entre los electrones y el **fluído electromagnético**. Como esa interacción es bastante débil, comparada con las **fuerzas eléctricas** básicas que afectan a los electrones, solemos hacer bien en incluirla como una corrección, al tiempo que retenemos los estados estacionarios como punto de partida. En este tratamiento, hallamos que las transiciones no son verdaderas discontinuidades, sino que ocurren deprisa.

El proceso de emisión es particularmente interesante, desde un punto de vista conceptual. En él, el electrón genera energía electromagnética en forma de un fotón, donde inicialmente no había ninguno. Esto ocurre cuando el electrón se encuentra con la actividad espontánea del fluido electromagnético e, impariéndole parte de su propia energía, amplifica esa actividad. De esta forma, el electrón hace una transición a un estado de menor energía, un **fotón virtual** se vuelve un fotón real y se hace la Luz.

Familia

Las **partículas de sustancia** de la **Teoría Central** —es decir, los **quarks** y los **leptones**— presentan una peculiar triplicación. Decimos que forman tres *familias*. Cada familia presenta 16 partículas que siguen los mismos patrones de **cargas fuerte, débil y electromagnética**.

Alternativamente, usando el lenguaje geométrico de «Belleza cuántica III», podemos decir que cada una de las tres familias presenta seis entidades, que ocupan idénticos **espacios de propiedad** en todos los casos.

Las transiciones asociadas con la **fuerza débil** que transforman una unidad de **carga débil** amarilla en una unidad de carga débil morada cambiarán un quark *u* (zurdo) por un quark *d* (zurdo), como tratamos en el texto principal. Mencioné allí algunas

complicaciones, y aquí voy a ser más concreto. La complicación es que *las transiciones de color débil pueden venir acompañadas por transiciones de familia*. Así, además de $u \rightarrow d$, tenemos también $u \rightarrow s$ y $u \rightarrow b$. Para describir las probabilidades relativas de esas transiciones, necesitamos introducir números adicionales en la **Teoría Central**. El ángulo de Cabibbo, por ejemplo, da una medida de la probabilidad del segundo respecto al primero. Hay muchas transiciones adicionales entre quarks para considerar (por ejemplo, $c \rightarrow d$), y aún más cuando incluimos los leptones. Para describirlas todas, dentro de la Teoría Central, tenemos que introducir cerca de una docena de nuevos números. Los valores de estos «ángulos mezcladores» (*mixing angles*) se han medido experimentalmente, pero no hay ninguna teoría convincente que explique por qué tienen los valores que tienen.

Ya puestos, no hay ninguna teoría convincente que explique por qué la naturaleza se da el capricho de esa triplicación de familias en absoluto.¹⁷

Fermión. Véase **Bosón/Fermión**.

Fluctuación cuántica/Partícula virtual/Polarización del vacío/Movimiento de punto cero

En la teoría de los **fluidos cuánticos**, que es el fundamento de nuestro entendimiento más profundo de la naturaleza, pasamos a considerar las partículas que observamos de una nueva forma. Son perturbaciones mínimas, o **cuantos**, de los fluidos cuánticos. Así, los **fotones** son cuantos del **fluido electromagnético**, los **electrones** son cuantos del **fluido electrónico**, y así sucesivamente.

Estos fluidos son más, sin embargo, que las partículas que sostienen, al igual que el agua es más que las ondas que sostiene. En concreto, los fluidos tienen actividad espontánea: las *fluctuaciones cuánticas*. Como la actividad espontánea y las perturbaciones de un fluido cuántico que reconocemos como partículas está estrechamente relacionadas —¡son dos aspectos del mismo fluido!—, es habitual referirse a la actividad espontánea como compuesta de *partículas virtuales*. Estas partículas virtuales son un juego psicológico que nos hacemos a nosotros mismos, para representar la actividad en forma de objetos. Son imaginería.

La actividad espontánea de un fluido cuántico puede ser influida por la presencia de partículas, y viceversa. Así, las propiedades de las partículas se modifican por la retroalimentación desde los fluidos cuánticos: la presencia de una partícula afecta a la actividad del fluido, y esa actividad afecta de vuelta a la partícula. Este bucle de retroalimentación se llama *polarización del vacío*. Podemos formar una bonita y simple imagen de este efecto, usando el concepto de partículas virtuales. Las partículas virtuales forman un gas que llena el espacio, y las propiedades de cualquier partícula real se ven afectadas por los golpes que recibe de ese gas.

El *movimiento de punto cero* es aún otra forma de referirse a la actividad espontánea de los fluidos cuánticos. La frase «movimiento de punto cero» subraya que esto es una actividad, o un movimiento, que está presente incluso cuando todas las fuentes de energía han sido retiradas, y por tanto incluso en el cero absoluto de temperatura.

Las partículas, siendo perturbaciones dentro de unos fluidos que tienen actividad espontánea, heredan esa espontaneidad. También exhiben movimiento de punto cero. En experimentos diseñados para detectar efectos pequeños, como las ondas gravitatorias o el fondo cósmico de **axiones**, a través de su influencia en la **materia normal**, esto supone una complicación: una fuente de «ruido» de fondo cuando tu instrumento se agita y sacude. Este ruido cuántico, que surge de la física fundamental, no se puede eliminar enfriando el instrumento hasta bajas temperaturas, o aisladolo. Lo más que puedes hacer es entender a qué te estás enfrentando, y tratar de soslayarlo con un rodeo.

Los efectos de las fluctuaciones cuánticas en el comportamiento observado de las partículas —es decir, la *polarización del vacío*— son centrales para nuestro entendimiento del funcionamiento profundo de la naturaleza. La **libertad asintótica** es un aspecto de la polarización del vacío, y los aspectos cuantitativos de la **unificación** de las fuerzas dependen de ella. Gran parte de «Belleza cuántica III» y «Belleza cuántica IV» gira en torno a estas ideas.

Véase también **Renormalización/ Grupo de renormalización**.

Fluido cuántico/Campo cuántico

En la **teoría cuántica**, las propiedades de los **fluidos**, o **campos**, son significativamente diferentes de las propiedades de los medios que encontramos en la física clásica, precuántica. Las diferencias más reseñables:

- Los *fluidos cuánticos* exhiben actividad espontánea, incluso en ausencia de influencias, o «causas», externas. Véase **Fluctuación cuántica/Partícula virtual/Polarización del vacío/Movimiento de punto cero**.
- Las perturbaciones, o excitaciones, de los *fluidos cuánticos* no pueden ser arbitrariamente pequeñas, sino que vienen en unidades mínimas, o **cuantos**.

Los fluidos cuánticos son los ingredientes primarios con los que se construye nuestra **Teoría Central**.

Fluido electromagnético/Campo electromagnético

Como los fluidos eléctrico y magnético tienen una gran influencia el uno sobre el otro, es conveniente y apropiado tratarlos juntos como un todo unificado. El *fluido electromagnético* no es más que el fluido cuyos dos componentes son los fluidos eléctrico y magnético. El campo magnético en cualquier punto es su valor medio en ese punto.

Fluido electrónico

El *fluido electrónico* es un **fluido cuántico**, o **medio**, activo y que llena el mundo. Según la **teoría cuántica**, tal y como se usa en nuestra descripción del mundo basada en la **Teoría Central**, los **electrones** y sus **antipartículas** —los antielectrones o **positrones**— son perturbaciones del fluido electrónico. En esta descripción, son similares a las olas en el agua que, si nada las estorba, pueden abrazarse y moverse (o «propagarse», como decimos a veces) a lo largo de grandes tiempos y distancias.

Hay fluidos del mismo tipo asociados con todas las especies de partículas elementales. (En la literatura física, se suelen llamar «**campos cuánticos**».) Estos fluidos que llenan el espacio coexisten: la presencia de uno no desplaza a ninguno de los otros. Las **ecuaciones dinámicas** de la Teoría Central describen cómo unos influyen en los otros. como muchas de las ideas que usamos ahora para describir la materia, nuestra moderna comprensión de los electrones se apoya en conceptos que al principio surgieron en el estudio de la luz y el **electromagnetismo**. El fluido electrónico es profundamente similar al **fluido electromagnético**, y ahora vemos los electrones como perturbaciones mínimas en el fluido electrónico. Son sus **cuantos**, como lo son los **fotones** en el fluido electromagnético.

Fluido gluónico/Campo gluónico

El *fluido gluónico* es la entidad activa y que llena el espacio responsable de la **fuerza fuerte**. El *campo gluónico* en un punto es una medida de la influencia del fluido gluónico en ese punto, promediada sobre algún pequeño volumen de espacio e intervalo de tiempo que resulten apropiados.

Fluido. Véase **Campo/Fluido**.

Flujo

Los campos vectoriales, cualquiera que sea su verdadera naturaleza, se pueden considerar matemáticamente una representación del flujo de un fluido ordinario, como el aire o el agua. Ese flujo imaginado matemáticamente tiene, en todos los puntos, una velocidad proporcional al valor del campo vectorial real en ese punto. En este modelo, el *flujo* a través de una superficie es simplemente la velocidad con que el fluido está siendo transportado a través de la superficie. Esta definición de flujo tiene sentido tanto si la superficie tiene un límite como si no.

Así, si consideramos un río y dibujamos una superficie que reciba el agua de frente, habrá un flujo significativo a través de la superficie. Por el contrario, no habrá un flujo muy significativo a través de superficies que presenten perfiles pequeños al agua.

¡En este punto deberías consultar, si no lo has hecho ya, **Circulación!** Porque ahora voy a llenar una sutileza que nos queda, que implica la relación entre esos dos conceptos. Con eso, habrás visto todo lo que necesitas para una comprensión sencilla de lo que son las **ecuaciones de Maxwell**, enteramente en términos de conceptos geométricos e imágenes.

En dos de las ecuaciones de Maxwell, se nos pide considerar una superficie limitada por una curva, y comparar la circulación de una cosa alrededor de la curva con el flujo de otra cosa a través de la superficie. (En la **ley de Faraday**, relacionamos la circulación del campo eléctrico con el flujo del campo magnético; y en la **ley de Ampère-Maxwell**, relacionamos la circulación del campo magnético con los flujos de corriente eléctrica y campo eléctrico.) para calcular la circulación con el fin de usarla en estas ecuaciones, tenemos que tener claro en qué dirección giramos por la curva. Hay dos posibles opciones, y las respuestas que dan para la circulación difieren en signo. Para que las ecuaciones de Maxwell sean las mismas, tomemos la dirección que tomemos, tenemos que asegurarnos de que el signo del flujo a través de la superficie cambia también cuando cambiamos la dirección de su curva circundante (y por tanto el signo de la circulación). para este objetivo, usamos una simple *regla de la mano derecha*: si los dedos de la mano derecha siguen (al cerrar el puño) la dirección de la curva, consideramos el transporte de fluido, en la definición de flujo, como positivo si se mueve en la dirección del pulgar, y negativo si en la dirección opuesta. Si seguimos esta regla, cambiar la dirección de la curva cambiará el signo tanto de la circulación como del flujo, y así la relación entre circulación y flujo permanecerá igual.

En otras dos de las ecuaciones de Maxwell —las leyes de Gauss eléctrica y magnética — consideramos el flujo que sale de una superficie cerrada. En ese caso, consideramos el flujo positivo si transporta fluido de dentro afuera de la superficie, y negativo en el caso opuesto.

Fotón/Relación Planck-Einstein

Un *fotón* es una perturbación mínima del **fluido electromagnético**, clásicamente, según las **ecuaciones de Maxwell**, la **energía** de una **onda electromagnética** puede ser arbitrariamente pequeña. En la **teoría cuántica**, ese no es el caso. La energía viene en unidades discretas, o **cuantos**. Como estas unidades no pueden subdividirse más, tienen la clase de integridad que asociamos con las partículas, y en algunas circunstancias resulta práctico pensar así en ellas. En ese sentido, los fotones son partículas de luz.

(La descripción mecanocuántica de los fotones no se ajusta estrictamente a la idea clásica de una onda, ni tampoco a la idea clásica de una partícula. Esas ideas, tomadas de la experiencia cotidiana con cuerpos grandes, no tienen por qué constituir una descripción adecuada de lo que pasa en el poco familiar dominio de los cuerpos muy pequeños, y de hecho no lo son. Cualquiera de las dos imágenes puede ser útil, pero ninguna hace toda la justicia por sí misma a la realidad. Véase **Complementariedad**.) para los colores espectrales puros, hay una relación cuantitativa simple entre la unidad de energía —es decir, la energía de un solo fotón— y la **frecuencia** asociada a las **ondas electromagnéticas** de ese color. Fue propuesta teóricamente por Planck y Einstein a principios del siglo xx, y se llama *relación de Planck-Einstein*. La relación *Planck-Einstein* ha sobrevivido, desde entonces, sin modificaciones sustanciales. También fundamenta una importante aplicación que es central a nuestra exposición y nos ayuda a responder nuestra Pregunta.

Aquí está: la energía de un fotón es igual a la frecuencia de la luz que representa, multiplicada por la **constante de Planck**.

Y aquí vemos cómo usarla: cuando un átomo emite o absorbe un fotón, experimenta una transición entre dos estados estacionarios. Como la energía se conserva en ese proceso, la energía del fotón está relacionada con la diferencia de energía entre esos dos estados estacionarios. Así, el espectro de un átomo codifica las energías de sus posibles estados. para más detalles sobre esta conexión extraordinaria, véase **Espectros**.

Fracción de ramificación

Cuando una partícula puede desintegrarse de varias formas alternativas, decimos que tiene varios canales de desintegración, o ramas de desintegración. La probabilidad relativa con que ocurre una desintegración concreta se llama su *fracción de ramificación*. Así, si la partícula *A* se desintegra en *B + C* el 90 % de las veces, pero en *D + E* el 10 % de las veces, decimos que la fracción de ramificación de *A* en *B + C* es 0,90, mientras que su fracción de ramificación en *D + E* es 0,10.

Fractales

Los fractales son objetos geométricos que tienen estructura a todas las escalas. Así, cuando amplificas una complicada imagen fractal, para enfocar con el *zoom* sus detalles, ves que cada detalle es tan complicado como el todo original: de hecho, en muchos fractales, ¡la parte magnificada es *idéntica* al todo!

Los fractales vienen en muchos tamaños y formas. No hay una definición única y estricta que valga para todos los objetos que se han descrito como «fractales». Más bien hay un vasto zoo de ejemplos interesantes que encarnan este amplio concepto de una estructura interna inagotable. como las pequeñas partes de un fractal son tan complejas como el todo, el método de **Análisis y Síntesis**, y su materialización matemática clásica, el **cálculo**, pierden casi todo su poder. Unas ideas distintas, basadas en la recursión y la autosimilitud, entran en juego. (Y lo voy a dejar aquí. Aunque estas ideas son fascinantes, su vínculo con nuestros temas principales es muy flojo.)

Los fractales muy complejos pueden construirse siguiendo reglas simples repetidas en muchos pasos. El procedimiento está maravillosamente adaptado a la computación gráfica. Ha conducido a la producción de imágenes asombrosas, y ha abierto nuevas formas de arte visual.

Frecuencia

Si tenemos un proceso que se repite con el tiempo, su **período** es el tiempo entre repeticiones, y su *frecuencia* es el número uno partido por el período, o de forma equivalente la inversa del período. Así, un proceso de alta frecuencia es un proceso que se repite muy a menudo. Las frecuencias se miden en segundos inversos, una unidad también llamada hercio, en honor de Heinrich Hertz, el descubridor de la radiación **electromagnética**.

Ejemplos: si un proceso se repite cada dos segundos, su frecuencia es $\frac{1}{2}$ hercio. Si se repite dos veces por segundo —es decir, una vez cada medio segundo—, su frecuencia es 2 hercios. Los humanos jóvenes y saludables pueden oír vibraciones del aire, u ondas sonoras, si la frecuencia de las vibraciones queda entre 20 y 20.000 hercios. El ojo humano es sensible a las **ondas electromagnéticas** de frecuencia entre 4×10^{14} y 8×10^{14} hercios: ¡una velocidad de oscilación bastante rápida!

Frecuencia natural/Frecuencia resonante

Muchos objetos, sobre todo si son rígidos, prefieren vibrar en unos pocos patrones especiales. Esos se llaman sus *modos de vibración* naturales. En cada modo natural, el objeto pasa por un ciclo de cambios de forma que se repite a intervalos fijos de tiempo. Ese intervalo se llama el **período** del modo, y uno partido por el período se llama la **frecuencia**

del modo. Las frecuencias de los modos naturales de un cuerpo se llaman sus frecuencias naturales. Como las vibraciones de los cuerpos en el aire generan ondas sonoras, podemos oír las frecuencias naturales de los cuerpos como los **tonos puros** que emiten.

Ejemplos:

- Los diapasones se diseñan para tener solo una frecuencia natural audible.
- Los gongs suelen tener varias frecuencias naturales, como las tienen las campanas. Uno puede oír distintas combinaciones de tonos mientras el gong o la campana vibran, según dónde y cómo se los golpeó. Esto se debe a que distintos golpes, al establecer distintas **condiciones iniciales**, estimulan los modos naturales con distintas fuerzas relativas.

Las frecuencias naturales de un cuerpo se llaman también sus *frecuencias resonantes*.

Estos fenómenos de los instrumentos musicales y el sonido tienen paralelos cercanos en los átomos y la luz. Los modos naturales de un instrumento son análogos a los **estados estacionarios** de un átomo, y la paleta tonal de un instrumento musical es análoga al **espectro** de un átomo. Estos paralelos no son solo metafóricos, sino que se extienden a las ecuaciones que describen esos sistemas, que son muy similares. En el espectro de los átomos se exhibe una muy real y visual Música de las Esferas.

Fuerza

En física, y en nuestra exposición, el término *fuerza* se usa de dos formas distintas.

En la mecánica newtoniana, la fuerza es una medida de la influencia de un cuerpo sobre otro. La *fuerza* que un cuerpo proyecta es su capacidad para producir una aceleración en otros cuerpos. Véase **Aceleración**.

En otro uso común pero menos preciso, hablamos de *fuerzas* de la naturaleza para referirnos a los mecanismos por los que la naturaleza actúa. En nuestra **Teoría Central**, identificamos cuatro fuerzas básicas de la naturaleza: gravedad, electromagnetismo y las fuerzas fuerte y débil. También es común hablar aquí de *interacciones*, en vez de fuerzas (así, la interacción electromagnética, la interacción fuerte y demás). He optado por usar «fuerza» de forma consistente, porque es más contundente.

Fuerza débil

La *fuerza débil* es, junto con la **gravedad**, el **electromagnetismo** y la **fuerza fuerte**, uno de los cuatro mecanismos básicos por los que actúa la naturaleza.

La fuerza débil es responsable de una gran variedad de procesos transformativos, incluyendo algunas formas de radiactividad nuclear, la combustión del combustible nuclear dentro de las estrellas y la síntesis cosmológica y astrofísica de todos los elementos químicos (esto es, de sus núcleos), partiendo de protones y neutrones.

La fuerza débil también se llama interacción débil. Véase **Fuerza**. dentro de la Teoría Central, la *fuerza débil* se entiende como resultado de la respuesta de las partículas W y Z , los llamados **bosones débiles**, a la **carga de color** débil. Al igual que las otras fuerzas de la Teoría Central, la fuerza débil es una manifestación de la **simetría local**.

El **mecanismo de Higgs** fue propuesto para explicar aspectos de la fuerza débil: en concreto, la masa no nula de los bosones débiles. Esta línea de pensamiento condujo al descubrimiento de la **partícula de Higgs**. El éxito de estas ideas nos informa de la existencia de un **campo de Higgs** que impregna todo el espacio, y modifica el comportamiento de otras partículas de muchas formas.

El uso combinado de «fuerza» y «débil» es potencialmente ambiguo, porque «fuerza débil» podría interpretarse como una influencia que no es muy poderosa. Así, cuando estamos discutiendo contra los astrólogos, y hablando de la influencia de la gravedad de un planeta distante, o de una estrella distinta del Sol, o de las fortunas humanas, podríamos decir «es una fuerza tan débil que no puede importar». Para evitar la ambigüedad, en esos casos utilizo términos como «fuerza lánguida» o «interacción endeble», evitando así «fuerza débil» e «interacción débil».

Fuerza fuerte

La *fuerza fuerte* es, junto con la **gravedad**, el **electromagnetismo** y la **fuerza débil**, uno de los cuatro mecanismos básicos con los que actúa la naturaleza. La fuerza fuerte es la fuerza más poderosa de la naturaleza. Es la responsable de mantener unidos los núcleos atómicos, y gobierna casi todo lo que pasa en las colisiones estudiadas en los **aceleradores** de alta energía, como el **Gran Colisionador de Hadrones**. poco después del descubrimiento del **núcleo** atómico, a principios del siglo xx, los físicos percibieron que las fuerzas conocidas en la época, la **gravedad** y el **electromagnetismo**, no podían dar cuenta ni de sus propiedades más básicas, empezando por su capacidad de permanecer de una pieza. Esto estimuló décadas de investigación intensa en la física subnuclear, tanto experimental como teórica. El resultado maduro de ese trabajo es la **Teoría Central**, descrita en extenso en nuestra exposición principal. Dentro de la Teoría Central, la fuerza fuerte se entiende como una manifestación de la **cromodinámica cuántica (QCD)**.

El uso de «fuerza» y «fuerte» en combinación es potencialmente ambiguo, porque «fuerza fuerte» puede tomarse como una poderosa fuente de aceleración. Así, cuando hablamos de la influencia gravitatoria de una estrella de neutrones, o de un agujero negro, se

podría decir que la gravedad ejerce una fuerza fuerte sobre un planeta cercano. Para evitar la ambigüedad, en tales casos utilizo términos como «fuerza poderosa», o «interacción poderosa», evitando así «fuerza fuerte» e «interacción fuerte».

La fuerza fuerte se llama también interacción fuerte. Véase **Fuerza**.

Función

Cuando alguna cantidad varía con el tiempo, decimos que es una *función* del tiempo. Más en general, decimos que una cantidad y es una *función* de otra cantidad x cuando cada valor de x determina un valor de y . Escribimos $y(x)$ para el valor de y , determinado por x .

Ejemplos:

- La temperatura en Boston es una función del tiempo.
- La temperatura en la superficie de la Tierra, más en general, es una función de la posición en la superficie y del tiempo. Es, en otras palabras, una función del espacio-tiempo.

Véase también **Campo**.

Función de onda

En la mecánica clásica, las partículas ocupan, a cada tiempo, alguna posición definida del espacio. En la mecánica cuántica, la descripción de una partícula es muy diferente. Para describir un electrón, por ejemplo, en la **teoría cuántica**, tenemos que especificar la *función de onda* del electrón. La función de onda del electrón gobierna su **nube de probabilidad**, cuya densidad en una región del espacio indica la probabilidad relativa de encontrar el electrón ahí.

Voy a esbozar aquí una descripción más precisa de las funciones de onda del electrón. Para aprovechar bien esta descripción, necesitas una familiaridad siquiera pasajera con los **números complejos** y las matemáticas de la probabilidad. La conclusión de esta subentrada, señalada debajo con un asterisco (*), es un punto culminante que debes leer aun cuando decidas saltarte, o leer en diagonal, los párrafos que lo preceden.

La función de onda de un electrón asigna un número complejo a cada punto del espacio y a cada tiempo, y eso forma un **campo** de números complejos. El número complejo asignado a cada punto se llama el valor, o a veces la amplitud, de la función de onda en ese tiempo y lugar. La función de onda obedece a una ecuación (relativamente) simple, la **ecuación de Schrödinger**, pero no tiene en sí misma un significado físico muy directo.

Lo que sí tiene un significado físico directo es un campo de números reales positivos (o cero) que obtenemos de la función de onda elevando al cuadrado su magnitud. Esta operación matemática nos lleva de la función de onda del electrón a su nube de probabilidad asociada. La probabilidad de encontrar un electrón en una posición dada, a un tiempo dado, es proporcional al cuadrado de la magnitud del valor de la función de onda en ese lugar y tiempo.

Aunque se describe mediante una función que llena el espacio, no deberíamos pensar que el electrón es un objeto extendido. Cuando se observa un electrón, siempre se observa como un objeto entero, con toda su masa, su carga eléctrica y demás. La función de onda lleva información sobre la probabilidad de hallar la partícula entera, *no* sobre la distribución de las partes de una partícula.

La descripción mecanocuántica de dos o más partículas está también, naturalmente, basada en funciones de onda. E introduce un nuevo rasgo importante: el *entrelazamiento*. La novedad esencial surge ya para dos partículas y, para mantener la cosa tan concreta y simple como sea posible, me centraré en ese caso.

Para poner el entrelazamiento en contexto, empecemos por describir una conjetura sobre la descripción de dos partículas que podría parecer razonablemente correcta, pero es errónea. Se podría suponer que la función de onda de dos partículas tiene la forma de la función de onda de una partícula, multiplicada por la de la otra partícula. Partiendo de esa conjetura, y si tomamos el cuadrado para obtener la nube de probabilidad, hallamos que la probabilidad conjunta de encontrar la primera partícula en x al mismo tiempo que encontramos la segunda partícula en y es igual al *producto* de las probabilidades de encontrar la primera partícula en x y la segunda en y . En otras palabras, esas probabilidades son independientes. Eso no es un resultado aceptable, físicamente, porque debemos esperar que la posición de la primera partícula afecte a la posición de la segunda.

La descripción correcta emplea una función de onda que es un campo en un espacio **hexadimensional** cuyas **coordenadas** son las tres coordenadas que describen la posición de la primera partícula, seguidas de las tres coordenadas que describen la posición de la segunda partícula. Cuando elevamos al cuadrado este objeto para obtener la probabilidad conjunta, encontramos en general que las partículas ya no son independientes. Medir la posición de una de ellas afecta a la probabilidad sobre la posición en que encontraremos la otra. Decimos, por tanto, que están entrelazadas.

El entrelazamiento no es ni un fenómeno raro de la mecánica cuántica, ni una esquina inexplorada de esa teoría. Surge, por ejemplo, cuando computamos la función de onda para los dos electrones de un átomo de helio. El **espectro** del helio ha sido medido y computado con gran precisión, y hallamos que las funciones altamente entrelazadas de la mecánica cuántica dan unos resultados que encajan con la realidad.

* Es casi mágico, en el contexto de nuestra Pregunta, descubrir que el espacio hexadimensional, un hermoso producto de la imaginación creativa, se encarna en algo tan específico y concreto como un átomo de helio. El espectro de ese átomo, cuando aprendemos a leerlo, ¡nos manda tarjetas postales desde la sexta dimensión! *

Para una perspectiva adicional sobre las funciones de onda, véase en especial lo expuesto en **Teoría cuántica**.

(Comentario final, y advertencia: el término «función de onda» no es la más atinada de las elecciones para el concepto que representa. «Onda», en general, connota oscilaciones, y «función de onda» sugiere una función que oscila, o una función que describe oscilaciones en algún medio, pero las funciones de onda mecanocuánticas no necesitan oscilar, ni describen la oscilación de alguna otra cosa. Un nombre mejor sería «raíz cuadrada del campo de probabilidad del electrón», pero «función de onda» está enquistada a demasiada profundidad en nuestro lenguaje y literatura para plantearse cambiarla.)

Geodésica

En una superficie curva, puede no haber ninguna línea recta, pero las *geodésicas* son el sustituto más próximo. Una curva geodésica tiene la propiedad de aportar la trayectoria más corta entre cualquiera de sus dos puntos cercanos. Debemos restringirlo a los puntos «cercanos» porque, después de una excursión larga, una geodésica puede volverse hacia sus partes anteriores, y entonces puede haber trayectos más cortos que atajan el camino largo.

Ejemplo: las geodésicas de una esfera son sus *grandes círculos*, que se obtienen cortando la esfera con un plano que pase por su centro. Así, el ecuador es un gran círculo, y una geodésica, en la Tierra, como también lo son los meridianos (o líneas de longitud). Las rutas polares del transporte aéreo se aproximan a geodésicas para ahorrar combustible.

El concepto de geodésica, así definido, no se restringe a las superficies. Podemos hallar geodésicas en espacios curvos de más dimensiones, y —con una definición adecuada de distancia— en el espacio-tiempo.

Geometría proyectiva/Perspectiva

La *geometría proyectiva* es una rama de amplio espectro de las matemáticas, que tiene estrechos vínculos con el estudio artístico de la *perspectiva*. Su asunto principal es entender las relaciones entre las imágenes que recibimos de un objeto cuando lo vemos desde distintos lugares (en otras palabras, desde distintas perspectivas). ¿Qué tienen esas imágenes en común? ¿Cómo podemos utilizar la información de una de esas imágenes para construir otras? Este es el tipo de preguntas que aborda la geometría proyectiva. La geometría proyectiva nos ofrece una materialización atractiva de ideas profundas como la **transformación**, la **simetría**, la **invariancia**, la **relatividad** y la **complementariedad**, como se explica en el texto principal.

Gluon/Gluon de color

Los gluones son las unidades mínimas, o **cuantos**, del **fluido de gluones**.

Grafeno

El *grafeno* es una sustancia química hecha enteramente de carbono. En el grafeno, los átomos de carbono forman una hoja bidimensional, con los **núcleos** organizados en un patrón de colmena. El grafeno tiene unas extraordinarias propiedades mecánicas y eléctricas.

Gran Colisionador de Hadrones

El **Gran Colisionador de Hadrones**, o LHC (por *Large Hadron Collider*), es un proyecto que se alberga en el laboratorio del CERN cerca de Ginebra. El mayor objetivo del proyecto es sondar los procesos fundamentales a mayores energías y, por tanto, efectivamente a menores distancias y tiempos, de lo que nunca se había alcanzado antes.

Esto se lleva a cabo de la manera siguiente. Los **protones** se aceleran para adquirir una altísima **energía de movimiento**, y se organizan en dos haces estrechos. Los rayos se almacenan en un gigantesco anillo subterráneo, con una circunferencia de 27 kilómetros, por donde circulan en direcciones opuestas, con unos poderosos imanes que guía sus trayectorias. (El anillo debe ser grande, y los imanes poderosos, ¡porque es difícil desviar unos protones tan energéticos del movimiento en línea recta!) En unos pocos puntos de observación, se hace que los rayos se crucen. Los encuentros cercanos entre protones de alta energía que se mueven en direcciones opuestas resultan en «colisiones» que concentran una cantidad enorme de energía en un espacio muy pequeño, recreando unas condiciones extremas nunca vistas desde los primeros momentos del Big Bang. Unos «detectores» enormes y sofisticados —unos instrumentos que miden decenas de metros en las tres dimensiones y están llenos a reventar con el último grito de la tecnología electrónica— extraen información física de los residuos de esas colisiones, que entonces es analizada por grandes equipos de científicos muy preparados, ayudados por una red mundial de ordenadores poderosos.

El LHC es la contribución, más que digna, de nuestra civilización a las pirámides de Egipto, los acueductos romanos, la Gran Muralla China y las catedrales de Europa, todos formidables monumentos al esfuerzo colectivo y el logro tecnológico de los humanos.

En julio de 2012, los científicos que trabajaban en el LHC anunciaron el descubrimiento del bosón de Higgs. Para más detalles, véase «Belleza cuántica III», tercera parte. En operaciones futuras, a mayores energías, se pondrán a prueba ideas atractivas sobre la **unificación** de las fuerzas y la **supersimetría**, descritas en «Belleza cuántica IV».

Gravedad

Actuando sobre partículas elementales, la *gravedad* es, con mucho, la más débil de las cuatro fuerzas de la **Teoría Central**. Pero las otras tres **fuerzas** responden a **cargas** que puede tener uno u otro signo,¹⁸ y que tienden a anularse cuando se juntan muchas partículas. La gravedad, por el contrario, responde primariamente a la energía, y no se anula, sino que adquiere un poder intensificado cuando se juntan muchas partículas. En la **mecánica celeste**, la gravedad es la fuerza dominante. En casi todas las circunstancias, la gravedad conduce a la atracción entre cuerpos.¹⁹ La **energía oscura** es excepcional a este respecto. En las notas finales recomiendo dos referencias donde puedes encontrar información sobre este tema. Aquí me limitaré a señalar tres consecuencias para el presente, el futuro y el pasado del universo en su conjunto:

- En el presente, la gravedad de la **materia normal**, junto con la **materia oscura**, domina al efecto gravitatorio de la energía oscura en nuestra vecindad, hasta la escala de nuestra galaxia y un poco más allá. A escalas cosmológicas, sin embargo, la materia normal y la materia oscura se distribuyen de manera dispersa, mientras que la energía oscura, aunque mucho menos densa en nuestra vecindad, está en todas partes, y su efecto se acumula. Como resultado, la gravedad de la energía oscura, que es esencialmente repulsiva, domina la evolución del universo en su conjunto. La expansión del universo, de la que se podía haber esperado que se ralentizara por atracción gravitatoria, está en realidad acelerándose.
- La extrapolación directa de la cosmología presente al futuro lejano indica que, dentro de cientos de miles de millones de años, nuestra galaxia, tras haberse fusionado con Andrómeda y quizás con unas pocas galaxias enanas de la vecindad, formará una isla aislada, con el resto de la materia normal (y la oscura) del universo habiéndose alejado a tal distancia, y de forma tan rápida, que ya no será accesible a la observación, debido al carácter finito de la velocidad de la luz.

Por supuesto, esto es una extrapolación muy atrevida, si consideramos lo mucho que han cambiado las ideas cosmológicas de los científicos en unas escalas de tiempo mucho más cortas. ¡No han pasado ni *cien años* desde que se descubrió la expansión del universo!

- Durante la mayor parte de los trece mil millones de años, más o menos, que han pasado desde el Big Bang, la gravedad de la materia normal y la materia oscura ha dominado al efecto de la energía oscura, incluso a escalas cosmológicas. Solo en los últimos dos mil millones de años, más o menos, cuando esas formas de materia se han diluido por la expansión del universo, mientras que la densidad de la energía oscura ha permanecido constante, esta última ha llegado a dominar. Hay, sin embargo, buenas razones para sospechar que en la *muy temprana* historia del universo las cosas fueron diferentes, y que la energía oscura dominó, con su gravedad repulsiva conduciendo a un período de rápida *inflación* cosmológica.

La teoría de la gravedad de Newton fue un acontecimiento de los que hace época en la historia del pensamiento humano. Al aportar una explicación precisa de muchos aspectos del movimiento celeste, basada en unos pocos principios matemáticos expresados con exactitud, sentó unos nuevos criterios de precisión y ambición científicas. A principios del siglo xx, sin embargo, la teoría de Newton fue superada por la **relatividad general** de Einstein, que sigue hoy siendo fundamental.

Gravitón

Los gravitones son las unidades mínimas, o **cuantos**, de perturbación en el **fluido gravitacional**, también llamado el **fluido métrico**. Así, los gravitones son, a la **gravedad**, lo que los **fotones** son al **electromagnetismo**. La teoría predice que los gravitones individuales deben interactuar con la **materia normal** de un modo extremadamente débil, y hay pocas perspectivas de observarlos directamente como objetos individuales. Las ondas gravitatorias, que sí son potencialmente observables, se construyen con vastas cantidades de gravitones.

Grupo (de transformaciones)/Grupo continuo/Grupo de Lie

Suele resultar útil considerar las transformaciones que dejan igual, o **invariante**, alguna estructura en su conjunto, mientras mueve sus partes en general —en otras palabras, las **transformaciones de simetría**, o simplemente **simetrías**, de esa estructura— no solo de manera individual, sino como un colectivo. Esas colecciones de transformaciones de simetría se llaman *grupos* de transformaciones. Los grupos de transformaciones vienen en muchas variedades. Algunos permiten una variación continua, mientras que otros son, por ejemplo, discretos. (Véase **Simetría continua**.) Pero todos los grupos de trasformaciones comparten unos pocos rasgos importantes:

- Podemos combinar dos transformaciones de simetría, haciendo una y luego la otra. La operación combinada también deja invariante nuestra estructura, de modo que define una nueva operación de simetría.
- Para cada operación de simetría hay una transformación opuesta, o (como suele llamarse) *inversa*. Si la transformación original cambia x a x' , su inversa cambia x' a x .
- Si combinamos una transformación con su inversa (en cualquier orden), siguiendo nuestra primera regla, el resultado es la trivial *transformación de identidad*, que «cambia» todo x por sí mismo.

El matemático noruego Sophus Lie hizo, desde finales del siglo XIX, unos estudios profundos de los grupos de transformaciones que permiten variaciones suaves, y pueden estudiarse con los métodos del **cálculo**. Estos grupos de simetría suaves se llaman, en su honor, *grupos de Lie*. Los grupos de simetría de círculos, esferas y sus generalizaciones de más dimensiones, que consisten en todas las transformaciones que podemos obtener combinando repetidamente las rotaciones alrededor de todos los ejes posibles y por todos los ángulos posibles, son grupos de Lie.

Esos grupos de rotaciones, al igual que otros grupos de Lie, tienen muchas aplicaciones en la moderna física cuántica. Muy en particular, los grupos de simetría de los **espacios de propiedad** basados en distintos tipos de **carga**, que son la piedra angular de nuestras **Teorías Centrales** de las **fuerzas fuerte, débil y electromagnética** son grupos de Lie; como también lo son los mayores *grupos de simetría* que consideramos al intentar unificar esas teorías. Véase también **Simetría local**.

Hadrón

Debido a que están sujetos a la **fuerza fuerte**, los **quarks**, antiquarks y **gluones** se pueden combinar para formar una amplia variedad de objetos. *Hadrón* es el término genérico para ese tipo de objetos. Los **protones** y los **neutrinos** son ejemplos de hadrones, como lo son los **núcleos** atómicos. Todos los demás hadrones conocidos son muy inestables, con un tiempo de vida que oscila entre unos pocos nanosegundos (pocos $\times 10^{-9}$ segundos) y unos tiempos mucho menores aún.

La mayoría de los hadrones se pueden entender de una forma semicuantitativa en el marco del **modelo de quarks**. (Véase, en caso necesario, **Cuantitativo**.) Según el modelo de quarks, los hadrones se dividen en dos grandes clases: **bariones** y **mesones**. Los bariones (la clase que incluye a protones y neutrones) son estados confinados que contienen tres quarks, mientras que los mesones son estados confinados que contienen un quark y un antiquark. (También tenemos antibariones, basados en tres antiquarks; véase **Antimateria**.) En un modelo más preciso, basado en la **cromodinámica cuántica (QCD)**, esos dos planes corporales básicos deberían considerarse los esqueletos que se cubren de carne con gluones y pares de quark-antiquark adicionales.

Una predicción generalizada es que hay hadrones que quedan fuera por completo de los planes corporales del modelo de quarks, como las *glue balls* (bolas de pegamento, literalmente, o bolas de gluones), donde los gluones dominan sobre los quarks y antiquarks. Es un área de investigación en marcha.

Véase también **Cromodinámica cuántica (QCD)**, y la extensa exposición de «Belleza cuántica III», segunda parte.

Hipercarga

La **carga eléctrica** dentro de cada entidad de la **Teoría Central** se llama su *hipercarga*. (Estas *entidades* se definen en «Belleza cuántica III», cuarta parte.) Hay una relación complicada entre la **fuerza débil**, la **hipercarga** y el **electromagnetismo**²⁰ que he tratado por encima en el texto principal. Harían falta varias páginas de árida exposición para explicarla, y la explicación no arrojaría mucha luz sobre nuestros temas principales. En las notas finales indico dos referencias donde puedes encontrar más información sobre este tema, en la nota 20 de las notas finales.

Infinitesimal

Lingüísticamente, «infinitesimal» es una forma condensada de *infinitely small* (infinitamente pequeño).

En la física y las matemáticas actuales, definimos cantidades como la **velocidad** y la **aceleración** mediante procesos de límites. Así, para definir la velocidad de una partícula, consideramos su desplazamiento Δx durante un pequeño intervalo de tiempo Δt , tomamos la razón $\Delta x / \Delta t$ y consideramos su valor límite cuando Δt se hace más y más pequeño (es decir, cuando tiende a cero). El valor límite, por definición, es la velocidad.

En los primeros días del cálculo, los pioneros no tenían cimientos firmes ni definiciones claras. Se guiaron más bien por la intuición y la conjetura. A Leibniz, en particular, le gustaba la idea de que, en vez de tomar un límite, se podría considerar un cambio de tiempo «infinitamente pequeño» δt , y el correspondiente desplazamiento δx , y tomar la razón de esos *infinitesimales*. Sin embargo, ni Leibniz ni sus discípulos llegaron a precisar esa idea. Quedó dormida y esencialmente olvidada durante muchas décadas, hasta que los matemáticos del siglo xx mostraron que se podía hacer **rigurosa** de varias maneras.

La idea de los infinitesimales es similar en espíritu —¡aunque en la dirección opuesta! — a la idea que nos guía hacia los **puntos de fuga** de la **geometría proyectiva**. En ambos casos, reemplazamos *objetos* consumados por *procedimientos* de límites. Los infinitesimales aportan una nueva forma de encarnar el Ideal. Hasta ahora no han tenido ningún papel significativo para describir el mundo físico, pero son una idea bella, y merecen hacerlo.

Intensidad (de la luz)

La *intensidad* de la luz es un concepto preciso que corresponde a la cualidad percibida del brillo. La *intensidad* de un rayo de luz que incide en una superficie es la cantidad de energía que el rayo lleva a esa superficie, por unidad de tiempo y por unidad de área. Esta definición nos permite generalizar el concepto de intensidad a todas las zonas del **espectro electromagnético**, como las ondas de radio, infrarrojas, ultravioletas y rayos X.

Invariancia

Decimos que algo es *invariante* bajo una transformación cuando hacer la transformación no lo cambia.

Ejemplos:

- La distancia entre objetos es invariante si mueves todos los objetos en la misma dirección y en igual cantidad (invariancia de la distancia bajo **traslación**).
- La forma de un círculo es invariante si lo giras alrededor de su centro (invariancia del círculo bajo rotación).
- La velocidad con que un rayo de luz avanza es invariante si te mueves a cualquier velocidad constante. Por tanto, decimos que la velocidad de la luz es invariante bajo **transformaciones galileanas** o, de manera equivalente, tras recibir un **boost** (empujón), que cambia el punto de vista entre plataformas que se mueven a distintas velocidades.

El tercero de estos ejemplos describe la conjetura clave de la **relatividad especial** de Einstein.

Isótopo

Los núcleos que tienen el mismo número de protones, pero distinto número de neutrones, se denominan *isótopos*. Los núcleos que son isótopos tienen la misma cantidad de **carga eléctrica**, y muestran casi el mismo comportamiento químico, aunque difieren en masa de manera significativa.

Leptón

El **electrón** e y su **neutrino** νe , junto a sus familiares el muon μ y su neutrino $\nu \nu \mu$, y la partícula τ y su neutrino $\nu \tau$, se llaman, colectivamente, *leptones*. Sus antipartículas son *antileptones*.

Ley de Ampère /Ley de Ampère-Maxwell

La ley de Ampère se considera hoy parte de una de las **ecuaciones de Maxwell**, aunque precedió a estas en la historia. En su forma original, la ley de Ampère afirma que la **circulación del campo magnético** alrededor de una curva es igual al **flujo de corriente**

eléctrica a través de cualquier superficie limitada por la curva. Para clarificar esto, véase **Circulación, Flujo y Corriente**. También te puede ayudar la Lámina N.

Maxwell, movido por consideraciones de consistencia matemática y belleza, modificó la ley de Ampère añadiéndole un término extra. Según la ley completa de Ampère-Maxwell, la circulación del campo magnético alrededor de una curva es igual al flujo de corriente eléctrica a través de cualquier superficie limitada por la curva *más* la tasa de cambio del flujo eléctrico a través de esa superficie.

El nuevo término de Maxwell es una especie de reflejo espectral de la **ley de Faraday**. La ley de Faraday dice que los campos magnéticos cambiantes pueden producir campos eléctricos, mientras que el término de Maxwell dice que los campos eléctricos cambiantes pueden producir campos magnéticos.

Ley de conservación/Cantidad conservada

Decimos que una cantidad se *conserva*, o está conservada, si su valor no cambia con el tiempo. Una *ley de conservación* es una afirmación de que alguna cantidad está conservada. Muchas de nuestras percepciones más básicas sobre el mundo se pueden expresar como leyes de conservación. Emmy Noether demostró un importante teorema, que se describe en detalle en el texto, que establece una conexión estrecha entre las leyes de conservación y las afirmaciones de **simetría**, o de invariancia.

Ejemplos: conservación de la **energía**, conservación del **momento**, conservación del **momento angular** y conservación de la **carga eléctrica** son leyes de conservación; energía, momento, momento angular y carga eléctrica son cantidades conservadas.

La frase «conservación de la energía» merece un comentario especial, porque su uso científico difiere de su uso común. A menudo se nos comienza a conservar (ahorrar) energía, por ejemplo, apagando las luces por la noche, o bajando los termostatos, o caminando en vez de conducir. ¿Es que el mundo necesita nuestra ayuda para imponer sus leyes básicas? Lo destacable aquí es que, cuando se nos pide conservar (ahorrar) energía, lo que se nos está pidiendo en realidad es mantener la energía en formas que podamos utilizar después para hacer un trabajo útil, en vez de dejarla convertirse en formas que son inútiles (calor) o dañinas (reacciones químicas que liberan toxinas). El concepto de *energía libre* en termodinámica captura algo de esta distinción. La energía libre, que es el tipo de energía útil por lo general, no se conserva. Tiende a disminuir o, como solemos decir, disiparse a lo largo del tiempo.

Ley de Faraday

Esta ley afirma que la **circulación del campo eléctrico** alrededor de una curva es igual a la velocidad de cambio del **flujo del campo magnético**, con signo menos, a través de cualquier superficie limitada por la curva. La *ley de Faraday* se engloba como una de las **ecuaciones de Maxwell**.

Ley de Gauss

Hay de hecho dos leyes de Gauss, con una forma muy similar.

La ley de Gauss para el **campo eléctrico**, o ley de Gauss eléctrica, afirma que el **flujo de campo eléctrico** a través de cualquier superficie cerrada es igual a la cantidad de **carga eléctrica** que encierra la superficie.

La ley de Gauss para el **campo magnético**, o ley de Gauss magnética, afirma que el flujo de campo magnético a través de cualquier superficie cerrada es igual a cero. De modo alternativo, podemos decir que ese flujo es igual a la cantidad de carga magnética que contiene la superficie, y que no se puede encontrar carga magnética en la naturaleza.

Estas leyes de Gauss se engloban como dos de las **ecuaciones de Maxwell**.

Ley dinámica/Ecuación dinámica

Las leyes dinámicas son leyes que especifican cómo cambian las cantidades con el tiempo. Las leyes dinámicas se formulan en *ecuaciones dinámicas*.

Ejemplo: la segunda ley del movimiento de Newton especifica la **aceleración** de los cuerpos, que es el modo en que sus **velocidades** cambian con el tiempo.

Contraejemplo: las **leyes de conservación**, por el contrario, afirman que ciertas cantidades no cambian con el tiempo.

Las leyes básicas de nuestra **Teoría Central** son leyes dinámicas, pero implican leyes de conservación para unas pocas cantidades especiales.

Segundo contraejemplo: dentro de la Teoría Central, hay unos cuantos, así llamados, *parámetros libres*. Son cantidades que aparecen en las ecuaciones, y cuyos valores no están fijados por ningún principio general, sino tomados de los experimentos. Se asume de manera tácita que son constantes en el tiempo. Posible contra-contraejemplo: la idea central de la física de los **axiones** es que uno de esos parámetros, el llamado parámetro θ , obedece a una ecuación dinámica dentro de una teoría mayor. En esa teoría mayor, la «coincidencia» de que se observe que θ es muy pequeño se convierte en una consecuencia de resolver una *ecuación dinámica*. Más en general, cabría esperar que otros parámetros libres de la Teoría Central sea algún día determinados resolviendo ecuaciones dinámicas dentro de teorías más poderosas.

Véase también **Condiciones iniciales**.

Libertad asintótica

La **fuerza fuerte** entre dos quarks se modifica por la actividad espontánea incesante de los fluidos cuánticos que impregnan el espacio. La fuerza se debilita a medida que los quarks se acercan entre sí, y se fortalece a medida que se separan. Esto es la *libertad asintótica*.

La libertad asintótica tiene muchas implicaciones y aplicaciones que se describen a fondo en el texto.

Véase también **Confinamiento y Renormalización/Grupo de renormalización**.

Línea de fuerza

Bajo la influencia de una barra imantada, unas virutas de hierro esparcidas por una hoja de papel forman unas líneas curvas que se extienden de un polo del imán al otro, como se muestra en la Figura 20. Este bonito fenómeno, y otros de tipo similar, inspiraron la imaginación de Faraday. Se sintió movido a concebir que esas líneas tenían una existencia independiente, anterior, y que eran *reveladas*, en vez de *creadas*, por las virutas de hierro. Esas intuiciones le condujeron a nuevos descubrimientos experimentales. Fueron desarrolladas como ideas matemáticas formuladas con precisión por Maxwell. La física moderna, con sus **fluidos** que llenan el espacio, emergió de esas ideas. Reemplazaron a la **acción a distancia** como un modelo para el entendimiento fundamental.

Longitud de onda

Las ondas que se repiten o, como decimos, varían **periódicamente** en el espacio son especialmente importantes, primero porque ocurren de manera natural, y segundo porque aportan las unidades básicas con las que podemos construir unos movimientos ondulatorios más complejos, en el espíritu de **Análisis y Síntesis**. Los tonos puros musicales, entre las ondas de sonido, y los colores espectrales puros, entre las **ondas electromagnéticas**, son periódicas tanto en el espacio como en el tiempo. Véase **Tono/Tono puro**.

La distancia entre repeticiones, en una onda simple, se llama *longitud de onda*. Así que *longitud de onda* expresa el mismo concepto, para la variación en el espacio, que el **período** expresa para la variación en el tiempo. Ejemplos:

- Los tonos más graves que los humanos pueden escuchar tienen unas longitudes de onda de cerca de diez metros en el aire, mientras que los tonos más agudos que los humanos pueden escuchar tienen unas longitudes de onda de alrededor de un centímetro en el aire. No por casualidad, el tamaño de la mayoría de los instrumentos musicales está cerca de la mitad de ese intervalo, porque están hechos para iniciar unas ondas de

sonido que los humanos puedan escuchar. Los tubos de graves de los órganos de iglesia, por un lado, y de los flautines, por otro, exploran los límites de esa gama. ¡Los silbatos para perros van un paso más allá!

- Los colores espectrales que los humanos pueden ver tienen unas longitudes de onda entre unos 400 nanómetros (o 4×10^{-7} metros, o 0,4 micras) por el lado azul, y unos 700 nanómetros por el lado rojo. Estas pequeñas longitudes de onda son inadecuadas para los dispositivos mecánicos. Los «instrumentos musicales» de la luz son átomos y moléculas.

Por supuesto, es posible ampliar las puertas de la percepción, con ayuda de los artefactos adecuados.

Magnetismo/Campo magnético/Fluido magnético

«Magnetismo» es un término muy general, que se usa para una amplia gama de fenómenos asociados con las fuerzas que las **corrientes eléctricas** ejercen unas sobre otras, y para sus interacciones con unas pocas sustancias magnéticas especiales que ejercen fuerzas similares. Las sustancias magnéticas, que a menudo implican a los minerales de hierro, se usa para hacer los familiares «imanes» que se utilizan en las agujas de las brújulas, para sujetar notas en la puerta de la nevera y muchos otros propósitos.

La exposición técnica sobre la forma exacta en que se define el campo magnético,²¹ y las fuerzas que genera, sería parecida en líneas generales a nuestra exposición de **Campo eléctrico/Fluido eléctrico**, pero lo detalles son bastante más complicados y quisquillosos. En las notas finales propongo dos referencias accesibles, donde puedes encontrar más información sobre este tema, en la nota 21 de las notas finales.

Masa

El concepto científico de *masa* ha evolucionado con el tiempo, y la palabra se usa actualmente de varias formas estrechamente relacionadas, pero no del todo consistentes. Aquí describiré las tres más importantes.

1. El primer uso científico razonablemente preciso del concepto de *masa* ocurre en la mecánica newtoniana. La masa se toma allí como una propiedad primaria de la materia, que no se puede crear ni destruir, ni explicar en términos de ninguna cosa más simple. La masa mide la inercia de un cuerpo, o su resistencia a la **aceleración**. Un cuerpo con una gran masa tenderá a mantener una velocidad constante a menos que esté sujeto a grandes influencias externas (**fuerzas**). Este concepto de masa se hace cuantitativo en la segunda ley del movimiento de Newton, que dice que la aceleración de un cuerpo es igual a la fuerza que actúa sobre él, dividida por su masa. El concepto newtoniano de masa se sigue utilizando de

manera muy amplia, y se sigue llamando «masa», porque la mecánica de Newton, aunque no exacta, suele ser una aproximación adecuada, y es más fácil de usar que la más precisa mecánica relativista.

2. En la modificación de Einstein de la mecánica, para hacerla consistente con la relatividad especial, la masa es un concepto diferente. En la mecánica relativista, la masa es una propiedad de las partículas individuales, pero se puede crear o destruir cuando las partículas interactúan entre sí. La masa, en la teoría relativista, es una medida de la contribución de la **energía de masa** y gobierna su **energía de movimiento**. La masa es una propiedad de las partículas, pero no es una propiedad bien definida (**conservada**) del mundo en su conjunto. Cada una de las **partículas elementales** de nuestra **Teoría Central** tiene una masa definida, pero está muy lejos de la verdad que la suma de las masas de las partículas que entran en colisión sea igual a la suma de las masas de las partículas que salen de ella. En las colisiones entre **electrones** y **positrones** de alta energía, es común hallar que la masa total de las partículas salientes sea cientos de veces mayor que la masa total de las partículas entrantes.

No es la masa, sino la energía, lo que se conserva en la mecánica relativista. A mí me gusta resumir el estatus de masa y energía en la mecánica relativista en el epígrama:

Las partículas tienen masa, el mundo tiene energía.

3. En cosmología, hablamos de la fracción de la masa del universo que se debe a los diversos tipos de cosa: **materia normal** (5 %), **materia oscura** (27 %), **energía oscura** (68 %). Este es un uso desaliñado del término «masa». (La energía oscura, en particular, no tiene masa en ninguno de los sentidos más habituales, definidos más arriba). Pero está muy extendido tanto en la literatura científica como en la divulgativa, así que tenemos que cargar con el mochuelo. Lo que significa es lo siguiente: utilizando la **relatividad general**, podemos relacionar la velocidad con que la velocidad de expansión del universo cambia con el tiempo —hablando a trazos gruesos, su aceleración— con la densidad media de energía que contiene. Podemos dividir esa densidad media de energía por el cuadrado de la velocidad de la luz para obtener algo que se mide en unidades de densidad de masa. Los porcentajes citados arriba son las fracciones relativas de ese «algo» a que contribuyen las diversas *cosas*.

Como la masa no se conserva, de un modo fundamental, podemos esperar explicarla en términos de algo más simple. Hay, de hecho, una explicación extremadamente bella del *origen* de la mayoría de la masa de la **materia normal** que emerge de la **cromodinámica cuántica (QCD)**. Los importantes bloques de construcción de los **protones** —los **quarks up** y **down**, y los **gluones** de color— tienen unas masas mucho más pequeñas que la masa de un protón, de modo que la masa del protón debe venir de alguna otra fuente.

Un paso clave para entender el origen de la masa del protón es entender de forma adecuada lo que *es* un protón. ¿Qué es un protón? Desde la perspectiva de los fundamentos modernos, un protón es un *patrón de perturbación* estable y localizado de los **fluidos** de quarks y de gluones. Ese patrón se puede desplazar —la **simetría galileana** nos lo asegura —y, si miramos desde lejos (comparado con su tamaño), parecerá como una partícula. Hay

una **energía del campo** gluónico asociada con esa perturbación, y una **energía del movimiento** de los quarks confinados. Si llamamos ε a la energía de una perturbación estacionaria, entonces ε/c^2 será la masa de lo que interpretamos como una partícula: es decir, la masa de un protón. Y ese es, de forma abrumadoramente mayoritaria, el origen de *tu* masa. Es Masa sin Masa, que surge de la energía incorporada.

Materia normal

«Materia normal» es un término conveniente que uso para referirme al tipo de materia que está hecha de **quarks, gluones** de color, **electrones** y **fotones**. La materia normal es la forma dominante de materia en la Tierra y su vecindad inmediata. Es el tipo de materia de la que estamos hechos, y la que estudiamos en química, biología, ciencia de materiales, todas las formas de ingeniería y casi toda la astrofísica. La *materia normal* debe distinguirse de la **energía oscura** y la **materia oscura**.

Mecánica celeste

Originalmente, *mecánica celeste* significaba la aplicación de la mecánica clásica, junto con la teoría de la **gravedad** de Newton, a la descripción del movimiento de los cuerpos más importantes —en particular los planetas, sus lunas y los cometas— en el Sistema Solar. Hoy el término «mecánica celeste» tiene un sentido más amplio para describir la aplicación de la mecánica a los cuerpos astrofísicos, y también a los cohetes y los satélites artificiales. Como las leyes relevantes de la física tienen validez universal, la mecánica celeste es en realidad una rama especializada de la mecánica, más que una materia independiente.

Mecanismo de Higgs

Nos gustaría utilizar las bellas ecuaciones de la **simetría local** para describir la **fuerza débil**. Pero esas ecuaciones, aplicadas al espacio vacío, indican que los **cuantos del fluido** de la fuerza débil —los **bosones débiles**— son partículas con masa cero, como los **fotones**. En realidad, los bosones débiles tienen unas masas decenas de veces mayores que la masa del protón. El *mecanismo de Higgs* nos permite mantener las bellas ecuaciones y a la vez respetar la realidad. La idea central del mecanismo de Higgs es que el espacio está impregnado de un campo —el **campo de Higgs**— que modifica el comportamiento que las partículas exhibirían de otro modo.

Según el *mecanismo de Higgs*, vivimos dentro de un **superconductor** para las **corrientes** de carga débil.

Véase **Campo de Higgs/Fluido de Higgs, Partícula de Higgs/Bosón de Higgs**, y también la extensa exposición en «Belleza cuántica III», tercera parte.

Medio

Un *medio*, para nosotros, es algo que llena el espacio.

Por tanto, *medio* se puede usar de forma intercambiable con **fluido**. Marginalmente, «fluido» sugiere un material cuyas partes pueden cambiarse el sitio entre sí, como en los flujos de aire o agua, mientras que «medio» indica algo más tangible que puede vibrar, pero tiene integridad estructural, como el vidrio o la gelatina. Pero los medios, o fluidos, que según nuestra Teoría Central conforman las sustancias del mundo más básicas, como el **fluido gluónico** y el **fluido electrónico**, son tan diferentes del aire, el agua, el vidrio, la gelatina o cualquier otro fluido cotidiano que parece una tontería insistir en una de las dos metáforas exclusivamente.

Mesón. Véase **Hadrón**.

Métrica/Fluido métrico

Decimos que un espacio tiene una métrica cuando es posible decir cuál es la distancia entre dos puntos muy cercanos. La *métrica* en sí misma es la salsa secreta que convierte una colección de puntos en una estructura que tiene tamaño y forma.

Para arrancar, supongamos que sabemos cómo medir la distancia entre dos puntos vecinos en el espacio ordinario, digamos que usando unas reglas pequeñitas. Entonces también podemos medir distancias entre puntos cercanos en cualquier superficie razonablemente lisa (o *suave*), utilizando las mismas reglitas. La restricción a reglas pequeñas y a puntos cercanos es importante aquí porque, si tenemos una superficie curva y las reglas son largas y planas, esas reglas se adaptarán mal a la superficie en distancias largas, y no sabremos cómo ponerlas.

Ahora supongamos que representamos nuestra superficie utilizando un mapa ordinario, en un papel plano. No hay duda de que podemos hacer esto, y de muchas maneras, simplemente estableciendo una correspondencia entre los dos conjuntos de puntos: los puntos de la superficie y los puntos del mapa. Ponemos Praga aquí, Nueva Delhi allí y así, cuidando de poner los puntos que son vecinos en la realidad en lugares vecinos del mapa. Hay mucha libertad sobre la forma concreta de hacer esto, y en los atlas se pueden encontrar muchas representaciones distintas de la misma región.

En ausencia de más especificaciones, sin embargo, un mapa no nos dice lo lejos que los puntos que representa están en la realidad, o en la superficie de partida. La *métrica*, una adición al mapa, suministra esa información. Para ser un poco más preciso, la métrica es una **función** de las posiciones en el mapa: es decir, asigna una «cosa», o un valor, a cada punto del mapa. En cada punto, el valor de la métrica es un *gadget* que te dice, para cada dirección en la que puedas moverte desde ese punto, la escala que tienes que usar en las reglitas, de modo que la distancia que mides entre puntos cercanos del mapa sea la misma que la distancia entre los puntos de la superficie original que representan.

Ahora que hemos visto lo que supone convertir un plano (nuestro mapa) en una superficie con tamaño y forma, podemos ponernos creativos con la idea, y desarrollarla, o ensayar variaciones del tema. Para alcanzar el concepto de métrica que resulta más importante en la física, tenemos que hacer dos cosas.

Primero, vamos a cambiar el foco desde el problema de la medición de superficies que nos condujo a introducir el concepto de métrica, hasta el concepto de métrica en sí mismo. Así, a cualquier *gadget* que nos diga las escalas que debemos asignar a las pequeñas reglas, lo llamamos una métrica en nuestro mapa, tanto si el *gadget* proviene de una superficie como si no. (Al dar este paso, estamos siguiendo el camino con el que Bernhard Riemann [1826-1866] generalizó el trabajo de su profesor, Carl Gauss [1777-1855].) En otras palabras, dejamos que el concepto de métrica adquiera vida propia.

Segundo, añadimos algunas **dimensiones**. Nada nos impide añadir el mismo tipo de *gadget* de especificar escalas a los puntos de todo el espacio tridimensional, no solo a los puntos de un trozo de papel plano. Desarrollando este pensamiento, podemos usar el método de las **coordenadas** para representar el espacio tridimensional y el tiempo como un espacio-tiempo tetradimensional combinado, y pensar en añadir un *gadget* métrico a eso. De esta forma, hemos hallado un procedimiento muy flexible que puede representar —o definir, podríamos decir— lo que tendría que significar un espacio tridimensional curvado, o un espacio-tiempo curvado, en una forma «obviamente correcta» que generaliza lo que hacemos para las superficies, donde nuestra intuición está clara.

Hasta aquí por lo que respecta al concepto *matemático* de métrica. Es un *gadget* conceptual que llena el espacio (o el espacio-tiempo): un **campo** conceptual. Otros campos incluyen los **campos eléctricos**, los **campos magnéticos** y el **campo de velocidades** en un volumen de agua. En estos casos y muchos otros, hallamos que los campos son elementos importantes de la realidad. Bailan a la música de las **ecuaciones dinámicas**, influidos por la materia, y a su vez afectan al comportamiento de la materia. Podemos decir, con poca precisión pero mucha justicia, que tienen una existencia *física*. Einstein, en su teoría de la **relatividad general**, postuló que la *métrica del espacio-tiempo* es, como esos otros campos, una entidad física, con vida propia. Lo llamamos el *fluido métrico*, o también el **fluido gravitatorio**, en vista del papel que desempeña en la **relatividad general**.

Hay muchas variaciones y generalizaciones del concepto de «métrica», como lo hemos definido en esta entrada, que son útiles en diversas aplicaciones. Lo que tienen en común es que tratan con algún tipo de distancia. La versión descrita arriba es la que

actualmente es más útil en física, y la que figura en nuestra exposición. No todos los espacios tienen una noción obvia de distancia. O, de forma alternativa, un espacio puede indicar varias posibilidades diferentes para medir la distancia. En esos casos, o bien nos las podemos apañar sin una métrica, o podemos experimentar con distintas posibilidades **complementarias**. El espacio tridimensional de la percepción del color es un ejemplo interesante a este respecto.

¿Es posible definir, de una manera precisa y cuantitativa, la distancia entre los distintos colores percibidos? Varios grandes pensadores se han enfrentado a esa cuestión, incluido en particular Erwin Schrödinger (célebre por la **ecuación de Schrödinger**). Se les ocurrieron varias respuestas distintas. Cada una de esas respuestas es internamente consistente, pero hasta ahora ninguna ha mostrado una enorme utilidad, ni hay una claramente superior a las otras.

Microondas/Radiación de fondo de microondas

Las **ondas electromagnéticas** con **longitudes de onda** entre un milímetro y un metro, más o menos, se llaman *radiación de microondas*.

Al principio de su historia, la materia de nuestro universo estaba tan caliente y densa que los átomos no podían mantenerse unidos. El plasma de protones, **núcleos** de helio y **electrones** brillaba *al blanco vivo*, y el universo estaba repleto de luz. A medida que el universo se expandía y enfriaba, llegó un momento en que los átomos podían mantenerse juntos y, como resultado, de modo bastante repentino, el universo se hizo transparente a la luz y a otras formas de radiación electromagnética, como lo sigue siendo hoy. La luz ambiente siguió impregnando el universo, pero, como la expansión continuaba, resultó estirada hasta unas longitudes de onda más largas. Hoy, la mayor de esa luz se ha desplazado a la zona de microondas del **espectro electromagnético**. Se ha convertido en la *radiación de fondo de microondas*.

La radiación de fondo de microondas fue descubierta experimentalmente por Arno Penzias y Robert Wilson en 1964, y desde entonces siempre ha inspirado un intenso estudio. Dado su origen, la radiación de fondo de microondas nos da acceso a una información limpia sobre las condiciones del universo muy joven.

Modelo de quarks

El *modelo de quarks* es un modelo semicuantitativo de los **hadrones**. Históricamente, tuvo un papel importante en la organización de los hechos sobre la **fuerza fuerte**. Para más detalles sobre el modelo de quarks, véase «Belleza cuántica III», segunda parte.

Modelo Estándar. Véase Teoría Central.

Momento

El momento es, junto con la **energía** y el **momento angular**, una de las grandes cantidades **conservadas** de la física clásica. Cada una de ellas ha evolucionado como un pilar de la física moderna también.

El *momento* de un cuerpo es una medida de su tasa de movimiento. Cuantitativamente, es igual a su **masa** por su **velocidad**. (Esta es la versión no relativista, lo bastante precisa para velocidades pequeñas. La **relatividad espacial** conduce a una fórmula relacionada, pero más complicada.)

El *momento* tiene una dirección, además de una magnitud. Por tanto, es una cantidad **vectorial**.

El momento de un sistema de cuerpos es la suma de los momentos de los cuerpos por separado.

Hay una amplia variedad de circunstancias en que el momento se conserva. Este resultado se entiende mejor mediante el teorema general de Noether, que conecta las **leyes de conservación** con la **simetría**. En ese marco, la conservación del momento refleja la simetría (es decir, la invariancia) de las leyes físicas bajo **traslaciones espaciales**: esto es, bajo las transformaciones que mueven todo lo que hay en el sistema de interés mediante un desplazamiento común. En otras palabras, tenemos conservación del momento cuando las leyes que gobiernan nuestro sistema no dependen de ninguna posición fija especificada de modo externo.

En el mundo cuántico, el momento sigue siendo un concepto válido, y adquiere unas características adicionales de gran sutileza y hermosura.

Momento angular

El momento angular es, junto con la energía y el **momento** (esto es, el momento ordinario o lineal), una de las grandes cantidades conservadas de la física clásica. Cada una de ellas ha evolucionado como un pilar de la física moderna, también. El momento angular es de lejos la más complicada de definir y entender de esas cantidades, y no debes esperar captar sus complejidades sin un esfuerzo considerable. El comportamiento fascinante y a menudo contrario a la intuición de las peonzas y los giroscopios es consecuencia de su momento angular, por ejemplo. Por tanto, ¡nuestra exposición no se apoya con fuerza en este concepto!

El momento angular de un cuerpo es una medida de su movimiento angular alrededor de un centro especificado. De manera cuantitativa, es igual a dos veces la velocidad con que una línea trazada desde el centro hasta el cuerpo barre el área, multiplicado por la masa del

cuerpo. (Esta es la versión no relativista, adecuada para velocidades pequeñas. La **relatividad especial** conduce a una fórmula relacionada, pero más complicada.)

El momento angular tiene dirección además de magnitud. (Por tanto es una cantidad **vectorial**: un **vector axial**, de hecho.) Para definir la dirección, primero identificamos el eje de rotación momentáneo —es decir, la dirección perpendicular al incremento del área— y luego orientamos ese eje utilizando la regla de la mano derecha.

Véase **Quiralidad**.

El momento angular de un sistema de cuerpos es la suma de los momentos angulares de los cuerpos por separado. Hay una amplia variedad de circunstancias en que el momento angular se conserva. Este resultado se entiende mejor mediante el teorema general de Noether, que vincula las **leyes de conservación** con la simetría. En ese marco, la conservación del momento angular alrededor de un centro refleja la simetría (es decir, la invariancia) de las leyes físicas bajo las transformaciones que rotan el espacio alrededor de ese centro. En otras palabras, tenemos conservación del momento angular cuando las leyes no dependen de ninguna dirección fijada y especificada externamente.

La segunda ley de Kepler del movimiento planetario, según la cual una línea trazada entre un planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales, es un ejemplo de la conservación del momento angular.

En el mundo cuántico, el momento angular sigue siendo un concepto válido, y asume unos rasgos adicionales de gran sutileza y hermosura. Fueron las matemáticas de la teoría cuántica del momento angular las que más me atrajeron hacia la física cuando, siendo un estudiante, estaba sopesando distintas opciones de carrera. Si quieras profundizar en esto, puedes consultar las «Lecturas recomendadas». Aquí solo mencionaré que las partículas cuánticas exhiben a menudo una actividad giratoria irreducible, o **espín**, similar en espíritu a su movimiento de punto cero (véase **Fluctuación cuántica**), o a la actividad espontánea de los fluidos cuánticos.

Movimiento de punto cero. Véase **Fluctuación cuántica/Movimiento de punto cero**.

Multiverso. Véase **Universo/Universo visible/Multiverso**.

Mutatrón

En las teorías que unifican las fuerzas fuerte y débil, hay partículas que inducen transformaciones entre los colores fuertes y débiles. Nosotros (o, para ser más exactos, yo) llamamos a esas partículas hipotéticas *mutatrones*.

Nanotubo

Los nanotubos son una clase de moléculas hechas enteramente de carbono. Como su nombre indica, tienen forma de tubo, y se pueden extender indefinidamente en una dimensión. Los *nanotubos* vienen en muchos tamaños y formas, y tienen unas propiedades mecánicas y eléctricas extraordinarias. Por ejemplo, algunos tipos de nanotubos son extremadamente fuertes en su dirección larga. Las fibras hechas con esos nanotubos son muy ligeras, pero más fuertes que el acero. Para una exposición más extensa, e imágenes, véase «Belleza cuántica II».

Neutrino

Cada uno de los tres **leptones** con carga eléctrica —el electrón e , el muon μ , el tauon (o simplemente tau) τ —tiene un *neutrino* asociado. Los neutrinos, que se escriben ν_e , ν_μ , ν_τ , son partículas eléctricamente neutras. Los neutrinos zurdos llevan una unidad de **carga débil** amarilla, pero tienen **carga eléctrica** cero y no tienen **carga de color**. Por tanto, los neutrinos participan en la **fuerza débil**, pero no en las fuerzas **electromagnética** o **débil**. Como resultado, las interacciones de los neutrinos con la **materia normal** son extremadamente lánguidas. Una ilustración espectacular: cada segundo, unos sesenta y cinco mil millones de neutrinos, emitidos en el curso de las transiciones débiles que alimentan de energía a nuestro Sol, entran en tropel a través de cada centímetro cuadrado de la Tierra. Pese a ello, no sentimos en general ningún efecto de esos neutrinos, y se necesitan unos detectores muy complicados simplemente para detectar esa corriente.

Se puede calcular que los neutrinos se produjeron en número considerable en el Big Bang. El gas cosmológico resultante ha eludido hasta ahora la detección, por la sencilla razón de que los neutrinos interactúan de manera tan débil. En un tiempo, se pensó que los neutrinos eran un buen candidato para constituir la **materia oscura**, pero esta idea no ha sobrevivido, esencialmente porque ahora sabemos que son demasiado ligeros para ese propósito.

Se han descubierto muchos otros hechos interesantes sobre los neutrinos. En las notas finales indico dos referencias accesibles, donde puedes encontrar más información sobre este asunto.

Neutrón

Los neutrones, junto con los protones, son los bloques de construcción de los **núcleos** atómicos. Los *neutrones* tienen **carga eléctrica** cero, pero su masa es muy parecida a la de los protones. La mayor parte de la masa de la **materia normal** surge de la masa de sus

protones y neutrones constituyentes. En un tiempo se pensó que los neutrones eran **partículas elementales**, pero hoy sabemos que son objetos complicados, construidos a partir de **quarks y gluones** más elementales.

Nube de probabilidad

En la mecánica clásica las partículas ocupan, a cada tiempo, alguna posición definida en el espacio. En la mecánica cuántica, la descripción de una partícula es muy diferente. La partícula no ocupa una posición definida a cada tiempo; en vez de eso, se le asigna una *nube de probabilidad* que se extiende por todo el espacio. La forma de una nube de probabilidad puede cambiar con el tiempo, aunque no lo hace en algunos casos importantes. Véase **Estado estacionario**.

Como su nombre indica, podemos visualizar la nube de probabilidad como un objeto extendido, que tiene en cada punto alguna densidad no negativa, es decir, positiva o cero. La densidad de la nube de probabilidad en cada punto representa la probabilidad relativa de encontrar la partícula en ese punto. Así, es más probable encontrar la partícula allí donde la densidad de su nube de probabilidad es alta, y menos probable encontrarla donde la densidad de la nube es baja.

La mecánica cuántica no ofrece ecuaciones para las nubes de probabilidad directamente. En vez de eso, las nubes de probabilidad se calculan elevando al cuadrado las funciones de onda, que satisfacen la **ecuación de Schrödinger**.

Núcleo

Cada átomo tiene un minúsculo centro, o *núcleo*, que contiene toda su carga positiva y casi toda su masa. Como se describe en «Belleza cuántica III», el estudio de los núcleos atómicos reveló la existencia de dos nuevas fuerzas de la naturaleza, las fuerzas **fuerte** y **débil**, y condujo, en el curso del siglo xx, a nuestra maravillosa **Teoría Central**.

Nucleón

Nucleón se refiere a las partículas que construyen los núcleos atómicos. *Nucleón* significa simplemente «protón o neutrón».

Número atómico

El número atómico de un **núcleo** es el número de protones que contiene. El *número atómico* de un núcleo determina su **carga eléctrica**, y por tanto su influencia sobre los electrones, y en consecuencia su papel en la química de los átomos o moléculas en que aparece. Los núcleos que tienen el mismo número atómico pero distintos números de neutrones se llaman **isótopos** del mismo elemento químico.

Ejemplo: los núcleos de carbono 12 (C^{12}) contienen seis protones y seis neutrones, mientras que los núcleos de carbono 14 (C^{14}) contienen seis protones y ocho neutrones. Tienen básicamente la misma química —de ahí que ambos se llamen «carbono»—, pero distinta masa. Los núcleos de carbono 14 son inestables, y su desintegración se puede usar para datar muestras biológicas. (Cuando un organismo muere, deja de incorporar nuevo carbono, y por tanto la relación de carbono 14 a carbono 12 decrece gradualmente en el cadáver. En la atmósfera, el carbono 14 se renueva por las colisiones de rayos cósmicos.)

Número complejo

La unidad imaginaria, denotada i , es una cantidad que, multiplicada por sí misma, da el resultado -1 . Expresado como una ecuación: $i^2 = -1$. Los *números complejos* son números z que tienen la forma $z = x + iy$, donde x e y son **números reales**; x se llama la parte real de z ; y es su parte imaginaria.

Los números complejos se pueden sumar, restar, multiplicar y dividir, de modo muy similar a los números reales.

Los números complejos se introdujeron en las matemáticas para que las ecuaciones generales con sumas y potencias —las llamadas ecuaciones polinómicas— pudieran tener soluciones. Así, por ejemplo, la ecuación $z^2 = -4$ no tiene solución en números reales, pero se resuelve por $z = 2i$ (y por $z = -2i$). Se puede demostrar que los números complejos, como los hemos definido, son enteramente apropiados para esta tarea. (Este resultado, llamado teorema fundamental del álgebra, no es para nada evidente, y su demostración es uno de los puntos culminantes de las matemáticas.)

Como indica el término *imaginario* (y su contraste explícito con *real*), los matemáticos humanos tuvieron muchas dificultades para aceptar esta clase de números. Su «existencia» parecía sospechosa, de algún modo. Pero un puñado de almas aventureras tuvieron la sabiduría de seguir el consejo del padre Jim Malley —«es más santo pedir perdón que permiso»— y los usaron. La familiaridad, y el éxito continuado, llevaron finalmente a los números complejos a disfrutar de una gran estima. Las matemáticas del siglo XIX fueron en gran medida una exploración de las deslumbrantes perspectivas que el uso de los números complejos abre para el **cálculo** y la geometría.

En el siglo XX, el proceso de introducir nuevas clases de *objetos* partiendo del listado de *propiedades* deseables, y declarándolas plasmadas en ellos, que había tenido tanto éxito con los números complejos, se convirtió en un procedimiento operativo estándar. Emmy

Noether fue una de las fuerzas principales que dio impulso a este estilo de pensamiento. Si Platón hubiera conocido estos avances, se habría sentido reivindicado al ver que los matemáticos habían abrazado de lleno su filosofía, y descubierto la alegría de los Ideales.

(Una digresión indulgente, que debe leerse como poesía: de hecho, los *ideales*, llamados por ese nombre, son una clase importante de objeto matemático. La que tal vez sea la obra maestra de Emmy Noether en la matemática pura, comparable en profundidad y significación al teorema de conservación que celebramos en el texto principal, es el concepto de anillo noetheriano. ¿Qué es un anillo noetheriano? Es un anillo en el que cualquier cadena de *ideales* cada vez mayores llega a terminar. Fin de la digresión indulgente.)

Otra forma útil de representar un número complejo es escribirlo como $z = r \cos \theta + ir \sin \theta$, donde r es un número real positivo, o cero, y θ es un ángulo; r se llama la magnitud del número complejo, y θ se llama su fase. Así, tanto (x, y) como (r, θ) pueden servir como **coordenadas** para el número complejo.

En la **teoría cuántica**, los números complejos son **ubicuos**.

Los números complejos son los números de Dios.

Número de Grassmann

Son números que satisfacen la regla de multiplicación **antisimétrica**

$$xy = -yx$$

Los *números de Grassmann* aparecen, en la supersimetría, como las coordenadas de las dimensiones cuánticas.

Número natural

Los números 1, 2, 3... —los números que surgen de forma natural del acto de contar— se llaman *números naturales*. Son el tipo de números que más merecían la aprobación de Pitágoras. Los números naturales forman una serie discreta. Deben contrastarse con los **números reales**.

Número real

De manera intuitiva, los *números reales* son números que permiten una variación suave. Así como los **números naturales** surgen naturalmente en el acto de contar, los *números reales* surgen realmente en el acto de medir longitudes.

Las longitudes se pueden dividir muy finamente. Como no hay un límite *obvio* a ese proceso de división, los matemáticos asumen, como hipótesis de trabajo, que no hay límite. ¿Cómo se refleja en números esa hipótesis? Puesto que cada número sucesivo de una fracción decimal, según progresamos hacia la derecha, corresponde a una división más pequeña de la cantidad, se desprende que deberíamos permitir que los decimales continúen eternamente.

Newton estaba muy impresionado por los decimales infinitos, que en su tiempo eran una invención reciente. Fueron la inspiración directa de su trabajo sobre las series infinitas, y sobre el cálculo:

Me asombra que no se le haya ocurrido a nadie ... adaptar la doctrina establecida recientemente para los números decimales a las variables, sobre todo cuando el camino se abre entonces a las consecuencias más llamativas. Porque, dado que esta doctrina sobre las especies tiene la misma relación con el álgebra que la doctrina de los números decimales tiene con la aritmética común, sus operaciones de suma, resta, multiplicación, división y extracción de raíces puede aprenderse fácilmente de la última

En otras palabras, Newton consideraba que su innovación central era permitirse usar, en lugar de números concretos, la x indeterminada del álgebra en expansiones similares a los decimales. Los logros más profundos del genio parecen emerger a menudo, como aquí, de una simplicidad infantil y el espíritu de jugar.

«Decimales que continúan para siempre» es una excelente descripción de los números reales, y corresponde a la manera en que la mayoría de los matemáticos, y esencialmente todos los físicos, suelen pensar sobre ellos. Pero no es una definición **rigurosa**. El desafío, para hacer que la definición sea precisa, es capturar la idea directriz de algo que «sigue para siempre», utilizando sentencias que no sigan para siempre. En realidad, es muy difícil suministrar una definición rigurosa de los números reales. Solo se logró a finales del siglo XIX, aunque la gente llevaba ya cientos de años usando los números reales.

En la física moderna, debido al descubrimiento de los átomos y a la extrañeza de la **teoría cuántica**, la corrección de esa hipótesis de que no hay límite a la división de la longitud está lejos de ser evidente. Con todo, los números reales siguen aportando el material intelectual con el que se forjan las Teorías Centrales. ¿Por qué? Parece un profundo misterio, o al menos me lo parece a mí. Véase, a este respecto, **Infinitesimal**.

Onda de propagación. Véase **Onda estacionaria/Onda de propagación.**

Onda electromagnética

Cuando combinamos la **ley de Faraday**, por la que los campos magnéticos cambiantes generan campos eléctricos, con la **ley de Maxwell**, por la que los campos eléctricos cambiantes generan campos magnéticos, vemos la posibilidad de una actividad autosostenida en esos campos. La actividad autosostenida tiene la forma de **ondas transversales**, que se mueven por el espacio a la velocidad de la luz. Llamamos a esas ondas *ondas electromagnéticas*.

Maxwell descubrió la posibilidad de las ondas electromagnéticas y calculó su velocidad. Al hallar que coincidía con la velocidad de la luz, propuso que la luz consiste en ondas electromagnéticas. Esta sigue siendo, hasta hoy, nuestra descripción fundamental de la luz.

La luz visible corresponde a solo una pequeña franja del **espectro electromagnético**, que abarca a las ondas electromagnéticas de todas las posibles **longitudes de onda**. Hoy entendemos no solo la luz, sino también las ondas de radio, las **microondas**, la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma como ondas electromagnéticas que difieren en longitud de onda y **frecuencia**.

Onda estacionaria/Onda de propagación

Las oscilaciones ondulatorias en regiones confinadas del espacio se llaman *ondas estacionarias*. Así, las vibraciones de las cuerdas en los instrumentos musicales, o las de su caja de resonancia, son ondas estacionarias. Las ondas estacionarias se llaman a menudo vibraciones u oscilaciones.

Las ondas que no están confinadas a una región finita, sino que viajan por el espacio, se llaman *ondas de propagación*. En el lenguaje común, y también en la física, cuando hablamos de «ondas sonoras», solemos referirnos a ondas de propagación. Las vibraciones de la caja de resonancia de un piano de cola, que son ondas estacionarias, empujan el aire vecino de aquí para allá. El aire en movimiento ejerce fuerzas sobre su aire vecino, que a su vez ejerce fuerzas en su aire vecino, y así sucesivamente, lo que resulta en una perturbación que adquiere vida propia. Esto es una onda de propagación sonora que podemos detectar —es decir, escuchar— a grandes distancias.

La **función de onda** asociada a un electrón puede ser una onda estacionaria o una onda de propagación.

La función de onda de un electrón enlazado a un protón para hacer un átomo de hidrógeno neutro se considera una onda estacionaria aun cuando, estrictamente hablando, se extiende por todo el espacio. En realidad, la nube de probabilidad del electrón, que refleja la magnitud de la función de onda, disminuye muy deprisa cuando nos alejamos del protón, y nunca se hace significativa fuera de una región pequeña y fija cercana al protón. Eso es lo que queremos decir cuando afirmamos que el electrón está enlazado al protón. Así que, en la práctica, la función de onda está confinada en una región limitada del espacio, y debe considerarse una onda estacionaria.

La función de onda de un electrón individual, que se mueve libremente por el espacio, es una onda de propagación.

Véase también **Ecuación de Schrödinger**.

Onda transversal/Polarización de la luz

En nuestra exposición, las *ondas transversales* más importantes son las **ondas electromagnéticas**, incluida la luz como caso especial.

Cuando una onda electromagnética avanza por un espacio carente de materia ordinaria (véase **Vacio**), sus campos eléctrico y magnético —ambos cantidades **vectoriales**, con dirección— son perpendiculares a la dirección en que avanza la onda. Eso —nada más y nada menos— es lo que queremos decir cuando afirmamos que las ondas electromagnéticas son *transversales*. Así, en una onda transversal, la actividad que produce la onda es perpendicular a la dirección en que avanza la onda.

Las ondas sonoras, por el contrario, no son ondas transversales. Su actividad, la compresión y rarefacción del aire, ocurre en la misma dirección que el avance de la onda. Las ondas de este tipo se llaman ondas *longitudinales*.

Incluso las clases más simples de ondas de luz, las asociadas a los colores espectrales puros, tienen una propiedad adicional además de su color y dirección de avance. Esta propiedad se llama *polarización*. La posibilidad más simple es la polarización lineal. Si una onda luminosa se dirige hacia ti, y sus campos eléctricos apuntan siempre en la dirección que une tu cabeza a tus pies, decimos que la luz está linealmente polarizada en la dirección que une tu cabeza y tus pies. Hay soluciones de las ecuaciones de Maxwell que corresponden a la polarización lineal en cualquier dirección transversal, es decir, en cualquier dirección perpendicular a la dirección en que avanza la onda. Hay también otras posibilidades más complicadas, en que los campos eléctricos describen círculos a lo largo del tiempo, o elipses, en el plano perpendicular a la dirección de avance de la onda. Estas dan luz polarizada circular o elípticamente.

Los humanos no son sensibles a la polarización de la luz (con algunas excepciones sin importancia), aunque muchos otros animales sí lo son, sobre todo entre los insectos y los pájaros.

Órbita/Orbital

El concepto de *órbita* de un planeta que gira alrededor de nuestro Sol, o de un satélite artificial que gira alrededor de la Tierra, se entiende ampliamente, y no necesita ningún comentario especial aquí. Es, esencialmente, la secuencia de posiciones que el cuerpo ocupa a lo largo del tiempo, agrupadas en una curva.

Un *orbital*, en la física cuántica y la química, es la función de onda de un **estado estacionario**. Decimos que un **electrón** «ocupa un orbital» cuando el estado de ese electrón se describe por la **función de onda** asociada con ese orbital. El término «orbital» es un vestigio del modelo atómico de Bohr, en que los estados estacionarios se asociaban con órbitas clásicas seleccionadas.

Oscilación

Llamamos una *oscilación* a un proceso físico que pasa por muchos ciclos de comportamiento idéntico, repitiéndose a intervalos fijos de tiempo. Las vibraciones de una cuerda pulsada o de un diapasón golpeado, en música, son ejemplos de oscilaciones.

Paridad/Transformación de paridad/ Violación de la paridad/Quiralidad

Hay varios lugares en las matemáticas, y en la formulación de las leyes físicas, en que uno encuentra llamamientos a usar la mano derecha (o, mucho más raramente, la mano izquierda).

En la mayoría de los casos, estas «reglas de la mano derecha» son meras convenciones. La correspondiente regla de la mano izquierda se podría usar también, y eso implicaría simplemente cambiar el nombre de las cosas. Tomemos, por ejemplo, la forma en que asignamos una dirección en el espacio a la rotación alrededor de un eje. Si un objeto gira alrededor de un eje, podemos asignar una dirección al eje utilizando una regla de la mano derecha, como sigue. Imagina que nuestro objeto giratorio es una patinadora sobre hielo. El eje sobre el que ella gira es la línea recta que pasa entre su cabeza y sus pies. Esa línea escoge una orientación en el espacio y, por tanto, casi define una dirección, pero, para completar la definición, necesitamos un último paso: debemos decidir entre «arriba» o «abajo». La regla de la mano derecha habitual para romper esa ambigüedad²² es decir que, si la rotación lleva la mano derecha de la patinadora hacia su abdomen, elegimos «arriba» —es decir, la dirección de pies a cabeza—, mientras que si la rotación lleva su mano derecha hacia su espalda, elegimos «abajo». Está claro que, si intercambiamos derecha e izquierda y, al mismo tiempo, en la regla, intercambiamos arriba y abajo, la «regla de la mano izquierda» resultante sería por completo equivalente.

He aquí dos ejemplos más del uso de la regla:

- El movimiento de las manecillas de un reloj equivale a su rotación alrededor de un eje perpendicular al reloj. Si estás mirando el reloj de frente, aplicar la regla de la mano derecha a la rotación de las manecillas (en el sentido de las agujas del reloj) te da la dirección hacia abajo.

- Para apretar un tornillo estándar, tenemos que hacerlo rotar sobre su eje. Si estamos mirando el tornillo de frente, debemos girarlo en el sentido de las agujas del reloj para apretarlo. Esto funciona porque un buen tornillo estándar está labrado de modo que armonice con la regla de la mano derecha, y por eso lo llamamos «tornillo a derechas», o diestro. Los tornillos del otro tipo, los malos, son zurdos.

En todos estos casos, podríamos sustituir perfectamente derecha por izquierda, para describir las mismas situaciones exactas. Solo tenemos que intercambiar, en las definiciones, «en el sentido de las agujas del reloj» con «en el sentido contrario a las agujas del reloj», y «bueno» con «malo».

De forma similar, en los libros de texto de física encontrarás muchas reglas de la mano derecha que describen cómo calcular la dirección de los **campos magnéticos**, y de las **fuerzas** que los campos magnéticos generan. Pero, si cambiaras derecha por izquierda, y cambias al mismo tiempo la *definición* de la dirección del **campo magnético** por simple inversión, nada cambiaría en las leyes de la física.

Los físicos creían, hasta 1956, que todas las apariciones de derecha e izquierda en la física eran meras convenciones; es decir, acuerdos sobre la manera de definir las cosas, adoptados por conveniencia. Las convenciones pueden resultar muy útiles. Es muy importante, por ejemplo, poder decirles a los fabricantes de tornillos cómo deben labrar los surcos. Pero no son fundamentales. ¡Se podrían haber hecho unos acuerdos distintos!

Otra forma de presentar esta suposición, que la sitúa a la perfección en la corriente principal del pensamiento profundo sobre los principios fundamentales, es como una conjetura de **simetría**. Decimos que un conjunto de ecuaciones tiene simetría de *paridad*, o que es invariante bajo *transformaciones de paridad*, si puedes intercambiar derecha con izquierda, y hacer los cambios adecuados en las definiciones, sin cambiar el contenido de las ecuaciones.

(Un desarrollo ligeramente técnico, a la vez que un ejercicio divertido: «intercambiar izquierda por derecha» necesita aquí alguna explicación, porque izquierda y derecha son propiedades de los objetos [por ejemplo, de las manos] localizados en el espacio, y no podemos simplemente cambiar todas las manos izquierdas por manos derechas [y todos los tornillos zurdos por tornillos diestros, etcétera] sin hacer cambios en el propio espacio, ¡de modo que los objetos transformados puedan seguir encajando juntos! La forma más simple de hacer esto es elegir un punto O —un origen— como referencia, y transformar todos los demás puntos en sus antípodas respecto a O . Es decir, mueves todo punto P al punto diametralmente opuesto, según se ve desde O .)

Cuando hacemos nuestra transformación de paridad, reflejando los puntos a sus antípodas, es natural que los **vectores** cambien de dirección. Por ejemplo, es un buen ejercicio visualizar que el vector trazado entre los puntos A y B apunta en la dirección opuesta a la del vector trazado entre sus antípodas $-A$ y $-B$.

Veamos un ejercicio divertido con esa idea: usa el pulgar y los dos primeros dedos de la mano derecha para apuntar en tres direcciones perpendiculares; luego haz lo mismo con la izquierda, y orienta las dos manos de modo que cada par de dedos correspondientes apunte en direcciones opuestas. Con este ejercicio, estás encarnando una transformación de paridad: tus dedos indican direcciones, ¡e invirtiendo las tres direcciones intercambia las manos izquierda y derecha!

En 1956, Tsung-Dao (T. D.) Lee (1926-) y Chen-Ning (Frank) Yang (1922-), tras analizar algunos experimentos desconcertantes, propusieron que, aunque la mayoría de las apariciones de «manos» en la física, incluidas las reglas de la mano derecha que han confundido a generaciones de estudiantes de magnetismo, son meramente convencionales, la **fuerza débil** es distinta y hace realmente una distinción entre izquierda y derecha. En otras palabras, propusieron que la simetría de paridad no es estrictamente correcta. Alternativamente, para hacerlo bueno y breve, propusieron la *violación de la paridad*. Su propuesta pronto se confirmó experimentalmente, y ese descubrimiento condujo a un entendimiento mucho mejor de la fuerza débil.

Hoy reconocemos que la violación de la paridad es una característica clave de la fuerza débil, y una parte esencial de la formulación de su **Teoría Central**. La fuerza débil hace una gran distinción entre izquierda y derecha, ¡que no puede eliminarse cambiando la definición!

Para describir esta distinción con precisión, debemos introducir la *quiralidad* de una partícula. Cuando una partícula con **espín** se está también moviendo, hay dos direcciones asociadas con ella: la dirección asociada a su espín, que hemos definido más arriba, y la dirección de su velocidad. Al definir la dirección asociada con el espín, hemos usado una regla de la mano derecha. De acuerdo con esto, si la dirección del espín de una partícula, definida de esa forma, es la misma que la dirección de su velocidad, decimos que es una partícula diestra o «a derechas». Y, al contrario, si la dirección del espín de una partícula es la opuesta a la dirección de su velocidad, decimos que es una partícula zurda.

Con esa preparación, estamos listos para describir cómo la fuerza débil viola la paridad: los quarks zurdos y los leptones zurdos, y los antiquarks diestros y los antileptones diestros, participan en la fuerza débil, pero las partículas de quiralidad opuesta no lo hacen.

Por último, debo cumplir la promesa que hago en la entrada **vector axial** definiendo ese término. Hemos visto que los vectores asociados con moverse de una posición a otra cambian de dirección en respuesta a una transformación de paridad. Los vectores que se transforman de esa forma se llaman vectores naturales o vectores polares. ¡Pero no todos los vectores se comportan así! Los vectores cuya definición implica una regla de la mano derecha cambiarán de dirección dos veces cuando hacemos una transformación de paridad: una porque son vectores, y otra porque fueron definidos por la regla «equivocada», por lo que concierne al sistema transformado (¡ya que derecha ha cambiado a izquierda!). Los vectores cuya dirección *no* cambia cuando hacemos una transformación de paridad se llaman vectores antinaturales o vectores axiales. En física, el campo magnético es un campo de vectores axiales.

Partícula alfa

En los primeros tiempos del estudio experimental de la radiactividad, Ernest Rutherford dividió el material emitido en rayos alfa, beta y gamma. Se les distinguía por su capacidad para penetrar en la materia, su tendencia a desviarse bajo campos magnéticos y otras propiedades. La investigación posterior mostró que los rayos alfa consistían en núcleos de helio 4; esto es, que son combinaciones enlazadas de dos protones y dos neutrones. Llamamos a esos núcleos partículas alfa.

Partícula de fuerza

«Partícula de fuerza» es una frase informal que uso para referirme, de forma colectiva, a las partículas fundamentales de la **Teoría Central** que son **bosones**: el **fotón**, el **bosón débil**, el **gluon** de color, el **gravitón** y la **partícula de Higgs**. Mi intención es ser amable con el usuario y expresar una idea aproximada del papel de esas partículas en la naturaleza.

Partícula de gauge

Para materializar la **simetría local** (es decir, la simetría de gauge), hay que introducir unos **fluidos** apropiados con las propiedades hechas a la medida exacta para ajustar esa idea. En la **Teoría Central**, los **fluidos gravitatorio, fuerte, débil y electromagnético** se introducen por esa razón. Las unidades mínimas, o cuantos, de esos fluidos —**gravitones, gluones de color, bosones débiles y fotones**— se denominan, por tanto, *partículas de gauge*. El término es anodino, pero codifica un hecho profundo y hermoso: esas partículas, que median las fuerzas básicas de la naturaleza, son *encarnaciones de la simetría*.

Partícula de Higgs/Bosón de Higgs

Estos términos se usan de forma intercambiable para designar la unidad mínima, o **cuanto**, del **fluído de Higgs**.

Véase **Campo de Higgs/Fluido de Higgs**, y también la extensa exposición en «Belleza cuántica III», tercera parte.

Partícula de sustancia

Esta es otra forma de referirse, de manera colectiva, a los fermiones. En la **Teoría Central**, estos son los **quarks** y los **leptones**.

Si la **supersimetría** es una idea correcta, para cada partícula de sustancia hay una «pareja» **partícula de fuerza** relacionada con ella. La partícula de sustancia, moviéndose en una **dimensión cuántica**, se convierte en su partícula de fuerza emparejada.

Partícula elemental

Decimos que una partícula es *elemental* si obedece a ecuaciones simples. En la **Teoría Central**, los **quarks, leptones, fotones, bosones débiles, gluones de color, gravitones y partícula de Higgs** son partículas elementales.

En el pasado se pensó —o más bien se esperó— que los **protones** y los **neutrones** eran partículas elementales, pero la investigación posterior reveló que no obedecían a ecuaciones simples. De modo similar, los átomos y las moléculas no son partículas elementales. En todos estos casos, comprendemos ahora que esos objetos —protones, neutrones, átomos y moléculas— son estructuras compuestas, construidas con cosas más simples. Se construyen, de hecho, con unas pocas de las *partículas elementales* de la Teoría Central (a saber, los quarks *u* y *d*, los gluones de color, los **electrones** y los fotones).

Partícula virtual. Véase **Fluctuación cuántica/Partícula virtual/Polarización del vacío/Movimiento de punto cero.**

Partícula *W*

Una partícula masiva que tiene un papel central en la fuerza débil. Véase **Fuerza débil** y **Bosón débil**.

Partícula *Z*

Una partícula masiva que tiene un papel central en la **fuerza débil**. Véase **Bosón débil**.

Período (de oscilación). Véase **Frecuencia**.

Período/Periódico

Un proceso *periódico* es aquel que se repite. El término suele referirse a la repetición en el tiempo, aunque en la literatura científica también se usa a menudo para la repetición en el espacio. El *periodo* de un proceso que es periódico en el tiempo es la cantidad de tiempo que pasa entre repeticiones. Véase también **Frecuencia**.

Perspectiva. Véase **Geometría proyectiva/Perspectiva**.

Polarización (de la luz). Véase **Onda transversal/Polarización (de la luz)**.

Poliedro

Un *poliedro* es un sólido tridimensional con caras **poligonales** planas, lados rectos donde se juntan las caras y vértices agudos donde se juntan los lados.

Polígono/Polígono regular

Un *polígono* es una figura obtenida conectando una secuencia de puntos en un plano con segmentos de recta, de modo que formen una figura cerrada. Los triángulos y los rectángulos son ejemplos familiares de polígonos. Los puntos que caracterizan el polígono, en los que se juntan sus lados, se llaman vértices.

Un *polígono regular* es un polígono cuyos lados son todos iguales en longitud, y se juntan con ángulos iguales en sus vértices. Un triángulo equilátero es un polígono regular de tres lados, un cuadrado es un polígono regular de cuatro lados, y así sucesivamente.

Positrón

«Positrón» es lo mismo que antielectrón, la **antipartícula** de un **electrón**.

Presión

Este concepto surge cuando tratamos de fuerzas en el contexto de medios continuos (por oposición a partículas). Cada parte del continuo ejerce fuerzas sobre las partes vecinas, a través de las superficies que las separan. (Estas superficies se introducen como objetos mentales, y no hace falta que sean discontinuidades materiales.) La *presión* se define, en este contexto, como la fuerza por unidad de área.

Principio de exclusión/Principio de exclusión de Pauli

El *principio de exclusión de Pauli*, en su forma original, afirma que dos electrones no pueden compartir el mismo estado cuántico. Este principio se aplica a todos los **fermiones**: dos fermiones idénticos no pueden compartir el mismo estado cuántico. La renuencia de los electrones, o de los fermiones en general, a hacer la misma cosa resulta en una repulsión efectiva entre ellos. Esta repulsión es un efecto puramente mecanocuántico que suplementa a fuerzas más convencionales, como las fuerzas eléctricas.

El principio de exclusión es fundamental para entender los átomos, porque impide que los electrones de un átomo se apilen cerca del núcleo, pese a la poderosa atracción eléctrica de este. Los electrones exteriores, que están lejos del núcleo, están abiertos a las influencias de otros átomos cercanos. De esta forma, el principio de exclusión abre las puertas a la química.

Protón

Los *protones*, junto con los neutrones, son los bloques de construcción de los **núcleos** atómicos. Los protones tienen una **carga eléctrica** opuesta a los electrones, y una masa que los supera en unas dos mil veces. Casi toda la masa de la **materia normal** surge de la masa de los protones y neutrones que contiene. En un tiempo se pensó que los protones eran partículas fundamentales, pero hoy sabemos que son objetos complicados, construidos con quarks y gluones más elementales.

Proyección

Esta palabra se usa de manera muy flexible en las matemáticas y la física. No tiene una única definición técnica precisa, sino varias, en diversos subcampos. En todos los casos, una *proyección* es un mapeo de un espacio a otro, por el que la información sobre el primer espacio se presenta de una nueva forma. A menudo (pero no siempre) se pierde algo de información en el proceso. En este libro he usado la palabra «proyección» de manera informal, más que con precisión técnica, de varias formas estrechamente relacionadas:

- La proyección de sombras, en la metáfora de la caverna de Platón. Aquí las sombras producen versiones bidimensionales, y en blanco y negro, de los objetos que representan, y se pierde mucha información.
- La proyección por nuestros ojos, en la visión. Nuestras retinas reciben una versión bidimensional del mundo tridimensional. El enfocado por la lente del ojo permite producir imágenes que (en la visión perfecta) enfocan toda la luz que emerge de un

punto de un objeto sobre un área muy pequeña de la retina, preservando así una información espacial útil.

Como expusimos por extenso en «Maxwell II», hay mucha más información disponible en la **señal electromagnética** entrante, a la que llamamos luz, de la que nuestros ojos extraen. La visión humana realiza una **proyección** del espacio infinito-dimensional de las intensidades del color **espectral** sobre un espacio tridimensional de color *percibido*, y descarta la información sobre la **polarización**.

- Proyección geométrica: de las superficies platónicas sobre las esferas circunscritas, extendiendo las líneas del centro a la superficie; de los rayos de luz sobre el lienzo, en un cuadro geométricamente preciso (la ciencia, inspirada por el arte, de la **perspectiva**); y de las superficies, tales como trozos de terreno o la superficie entera de la Tierra, en hojas planas de papel, para hacer mapas.
- La proyección de **color**, en el **espacio de propiedad**. Aquí, por ejemplo, proyectamos el espacio de propiedad de color tridimensional cuyas coordenadas son las **intensidades** R , V , A de rojo, verde y azul sobre un espacio de propiedad bidimensional, sin más que dejar caer la coordenada A .

Punto cuántico

Los físicos están desarrollando técnicas refinadas para esculpir unas estructuras materiales muy pequeñas, con solo unos pocos átomos de lado. Estas estructuras se llaman *puntos cuánticos*. Los puntos cuánticos son, en realidad, moléculas hechas a medida.

Punto de fuga

Si estamos de pie sobre un plano, y vemos dos rectas paralelas en el plano que se alejan de nosotros, veremos que parecen converger al aproximarse al horizonte. Si imaginamos que estamos pintando lo que vemos, o si **proyectamos**, geométricamente, esas líneas sobre un lienzo, es natural añadir el punto límite, donde las líneas se unen, como un elemento de la imagen. Ese es el **punto de fuga**. Dibujamos, amplificamos y reflexionamos sobre las implicaciones de esa construcción en el texto principal.

Quark

El concepto de *quark* fue introducido por Murray Gell-Mann y por George Zweig, de forma independiente, en 1964. Introdujeron los ingredientes esenciales del **modelo de quarks**, que aportó un orden a la zoología de los **hadrones**. Una línea continua de desarrollo conecta su trabajo pionero con el concepto moderno de los quarks, que aparecen de manera prominente entre las **partículas de sustancia** de nuestra **Teoría Central**.

Quark *charmed*

El *quark charmed*, denotado «*c*», es un miembro de la segunda **familia de partículas de sustancia**. Los quarks *charmed* son altamente inestables, y tienen un papel muy pequeño en el mundo natural del presente. Los quarks *charmed* se descubrieron en 1974, y su investigación experimental contribuyó decisivamente a establecer la **Teoría Central**.

Quiralidad. Véase **Paridad**.

Rayo cósmico

Cuando hablamos de «ver» el cosmos —estrellas, nebulosas, galaxias y demás—, lo que solemos tener en mente es muestrear parte de la radiación electromagnética que esos objetos arrojan a la Tierra. Véase **Color (de la luz)**. En el lenguaje de la teoría cuántica, podemos decir que lo vemos mediante los **fotones**. Los fotones viajan libremente por las vastas regiones vacías del espacio, y sabemos cómo orquestarlos, usando lentes, para obtener imágenes de sus fuentes. Por «vacías» queremos decir aquí carentes de **materia normal**. Como la materia normal es, en esencia, el tipo de materia que perturba a los fotones, hay un elemento circular en la definición; pero se mantiene el punto de que esas regiones existen. Como tratamos en **Vacío**, un espacio que está «vacío» en este sentido contiene, sin embargo, **energía oscura**, a menudo **materia oscura**, uno o más **campos de Higgs**, y un bullir incessante de actividad cuántica espontánea (véase **Fluctuación cuántica**).

Además de fotones, los objetos celestiales emiten otras partículas: **electrones**, **positrones**, **protones** y una variedad de **núcleos** atómicos más pesados, en particular de hierro. Algunas de estas partículas tienen una energía enorme, mucho mayor de la que ha alcanzado el **Gran Colisionador de Hadrones**, por ejemplo, y algunas de ellas llegan a la Tierra. Esas otras partículas, y también los fotones más energéticos (los rayos gamma), son lo que llamamos *rayos cósmicos*. Los rayos cósmicos, que son partículas con carga eléctrica, siguen trayectorias curvas porque son desviados por los campos magnéticos de la galaxia. Eso hace difícil inferir su origen.

En la época pionera de la física de altas energías, antes del advenimiento de los poderosos **aceleradores** y colisionadores, los rayos cósmicos eran la mejor fuente disponible de partículas de alta energía. Varios descubrimientos fundamentales, entre ellos la existencia de los positrones, los muones (μ) y los piones (p), se hicieron estudiando los rayos cósmicos. Es posible que encuentros cercanos entre partículas de materia oscura causen su aniquilación en chorros energéticos, que podrían ser una fuente de rayos cósmicos interesantes. Varios experimentos están ahora en camino para explorar esa posibilidad.

Reducciónismo

Un término peyorativo para «Análisis y Síntesis». Véase **Análisis y Síntesis**.

Refutable/Poderoso

Cuando una proposición (o una teoría) puede compararse con observaciones empíricas, y ser así potencialmente rebatida, decimos que es *refutable*, o falsable. Sir Karl Popper (1902-1994) abogaba por la refutabilidad como criterio para distinguir la ciencia de otros esfuerzos humanos. Aunque resulta estimulante, yo no creo que el criterio de refutabilidad de Popper refleje apropiadamente la práctica científica, porque solemos estar más ocupados en fortalecer las buenas ideas que en podar las malas.

La refutabilidad resulta más apropiada como un criterio (parcial) sobre la *madurez* y la *fertilidad* de las teorías, por oposición a su estatus de ciencia o no ciencia. En este contexto, la *refutabilidad* debería considerarse junto con el *poder*. Las teorías que hacen muchas predicciones con éxito, pero también fallan de vez en cuando (por ejemplo, la meteorología práctica), o cuyas predicciones son en algunos casos inherentemente estadísticas, y por tanto no fácilmente refutables (por ejemplo, la **teoría cuántica**) pueden pese a todo tener un gran valor, y deben cualificarse como científicas bajo cualquier definición razonable de ese término.

No deberíamos considerar una teoría poderosa pero imperfecta como simplemente falsa, sino más bien —mientras no se pruebe lo contrario— como una plataforma prometedora para la mejora. La mecánica newtoniana (no relativista), el **electromagnetismo** clásico (no cuántico) y muchas teorías menores han sido refutadas, y pese a ello las veneramos por buenas razones:

- Siguen siendo útiles, debido a su poder predictivo y relativa simplicidad.
- Las teorías que las superaron se apoyan con fuerza en su estructura conceptual.
- Dentro de esas teorías posteriores, sobreviven como aproximaciones, válidas en casos restrictivos.

Véase también **Consistencia/Contradicción** y **Economía (de ideas)**.

Relación Planck-Einstein. Véase **Fotón.**

Relatividad

En física, la *relatividad* suele referirse a una o ambas de las teorías de Einstein que llevan esa palabra, es decir, las **teorías especial y general de la relatividad**. A cuál de ellas nos referimos debería estar claro por el contexto.

En nuestra exposición, hemos subrayado que ambas teorías de la relatividad son, en su esencia, afirmaciones de **simetría**, en nuestro sentido preciso. Esto es, son afirmaciones de que podemos hacer **transformaciones** de las cantidades que aparecen en las leyes de la física sin cambiar el contenido de esas leyes: Cambio sin Cambio. La palabra «relatividad» pone el acento en el aspecto del «cambio», pero deja sin expresar el aspecto del «sin cambio», es decir, la **invariancia**, el complemento de la relatividad. Esta rareza ha tenido el efecto desafortunado de conducir a algunos a inferir, e incluso a aseverar, ridiculeces como que «Einstein nos enseñó que todo es relativo». No lo hizo, y no lo es.

Relatividad especial

En su teoría de la *relatividad especial*, Einstein reconcilió dos ideas que parecen contradictorias.

- La observación de Galileo de que el movimiento total a **velocidad** constante deja inmutables las leyes de la naturaleza.
- La implicación de las ecuaciones de Maxwell de que la velocidad de la luz es una consecuencia de las leyes de la naturaleza, y no puede cambiar.

Hay una tensión entre esas dos ideas, ya que la experiencia con otros objetos indica que la velocidad con que los observas cambiará si te mueves a velocidad constante. Puedes alcanzarlos, o superarlos. ¿Por qué iban a ser diferentes los rayos de luz?

Einstein resolvió esa tensión analizando críticamente las operaciones implicadas en la sincronización de relojes en diferentes sitios, y cómo ese proceso de sincronización se modifica por el movimiento total a velocidad constante. De ese análisis emerge que el tiempo asignado a un suceso por un observador en movimiento es diferente del tiempo que le asigna un observador fijo, en una forma que depende de su posición. Al referirse a sucesos comunes, el tiempo de un observador es una mezcla del espacio y el tiempo del otro, y viceversa. Esta «relatividad» del espacio y el tiempo es la novedad esencial que la

relatividad especial de Einstein introdujo en la física. Los dos supuestos de la teoría ya estaban ahí antes de su trabajo, y se aceptaban ampliamente; pero nadie se había tomado en serio los dos a la vez, ni había forzado su reconciliación.

La relatividad especial no solo es importante por sí misma, sino también porque introdujo una nueva metaidea para adivinar y mejorar nuestras leyes de la física que se ha mostrado extremadamente fructífera y exitosa. Esta metaidea es lo que hemos llamado **simetría**, poéticamente definida como Cambio sin Cambio. Los dos postulados de la relatividad especial encajan muy bien en esa definición: el primero nos dice qué tipo de cambios considerar (a saber, las **transformaciones galileanas**) y el segundo nos dice lo que no cambia (a saber, la velocidad de la luz).

El tema de la simetría, o invariancia —Cambio sin Cambio— aparece muchas veces, con variaciones, en nuestra exposición. Al principio es tentativo y silencioso, pero destaca de forma cada vez más clara, y se intensifica, hasta que al final lo encontramos dominando nuestro entendimiento más profundo de la naturaleza.

Relatividad general

La *teoría general de la relatividad* es la teoría de la **gravedad** de Einstein.

John Wheeler describió la esencia de la relatividad general de esta forma:

La materia le dice al espacio-tiempo cómo curvarse.

El espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse.

El texto principal contiene una extensa explicación (¡y una crítica!) de ese resumen conceptual.

El «general» de «relatividad general» fue acuñado por Einstein para situar la nueva teoría respecto a su anterior **relatividad especial**. En nuestra exposición, expresamos esa relación en un lenguaje diferente y más sistemático, que se desarrolló al describir las otras fuerzas. La relatividad especial considera las **transformaciones galileanas**, y la relatividad general considera unas transformaciones más *generales*, que equivalen a permitir el uso de distintas transformaciones galileanas en diferentes lugares del espacio-tiempo. En nuestro lenguaje, la relatividad general se basa en la **simetría local**, mientras que la relatividad especial se basa en una simetría no local o, alternativamente (y mejor), **rígida**.

Renormalización/Grupo de renormalización

Los **fluidos cuánticos** son los ingredientes primarios de nuestra **Teoría Central**. Exhiben actividad espontánea, o **fluctuaciones cuánticas**, que de forma general se hacen cada vez más violentas a distancias cortas. Estas fluctuaciones incesantes impregnán el espacio y

modifican el comportamiento que la materia tendría en su ausencia. El cálculo de esas modificaciones se llama *renormalización*.

Cuando estudiamos las propiedades de las partículas más de cerca, accediendo a energías más altas o distancias más cortas o, como decimos, usando una resolución más fina, nos volvemos menos sensibles a los efectos de unas fluctuaciones cuánticas más graduales y suaves. Nos acercamos más a ver las partículas «desnudas». El *grupo de renormalización* es una técnica matemática para hacer conexiones cuantitativas entre las propiedades de una partícula cuando se ve a diferentes resoluciones.

La **libertad asintótica** en la fuerza fuerte, y el estudio cuantitativo de la unificación que se expone en «Belleza cuántica IV», son ejemplos de buena utilización del grupo de renormalización.

Representación espinorial

Los *espinores* son una especie de versión avanzada de los vectores. Aparecen en la descripción matemática del **espín** de un electrón, en la **ecuación de Dirac**, como el **espacio de propiedad** de las **partículas de sustancia** en el esquema de unificación $SO(10)$ (Georgi-Glashow) apuntado en «Belleza cuántica IV», y en varios otros temas en las fronteras de la física. Una descripción de las matemáticas de los espinores²³ queda mucho más allá del alcance de este libro, pero en las notas finales indico dos referencias fácilmente accesibles.

Rigor

Decimos que un argumento es *riguroso*, o que tiene *rigor*, cuando está formulado con precisión y a la vez resulta difícil de poner en duda. Decimos que un concepto es riguroso si su significado está formulado con precisión y, por tanto, es adecuado para usarlo en argumentos rigurosos.

El rigor no es en sí mismo un concepto riguroso, porque «difícil de poner en duda» es más bien borroso (¿cuánto de difícil?). Por ejemplo, hay evidencias abrumadoras, basadas en soluciones de la **cromodinámica cuántica** (QCD) usando ordenadores, de que la teoría predice el fenómeno del **confinamiento de quarks**, y predice correctamente el comportamiento de los **hadrones**. (En otras palabras: las computaciones predicen correctamente que las partículas que interactúan fuertemente existen, sus masas y sus demás propiedades; los quarks no están entre esas partículas.) Pero los matemáticos no consideran en general que esta conclusión sea rigurosa.

Ruptura espontánea de la simetría

Entre una materialización exacta de la **simetría** y su total ausencia, hay una posibilidad intermedia, la *ruptura espontánea de simetría*, que figura de manera prominente en nuestra descripción del mundo.

Decimos que ocurre una ruptura espontánea de un sistema de ecuaciones si:

- Las ecuaciones satisfacen la simetría, pero
- sus soluciones estables no lo hacen.

De esta forma, una falta observada de simetría se puede excusar a sí misma. La simetría está allí, en las ecuaciones, ¡pero las propias ecuaciones nos dicen que no la vamos a observar!

Ejemplo: en las ecuaciones básicas que describen un trozo de mineral imantado, cualquier dirección es equivalente a cualquier otra. Pero el trozo forma un imán, y en un imán ya no es verdad que todas las direcciones sean equivalentes. Cada imán tiene una polaridad y se puede usar como aguja de una brújula. La explicación de cómo se pierde (o se «rompe») la simetría de rotación es simple, pero profunda. Hay fuerzas que tienden a alinear el espín de los electrones con sus vecinos en el imán.

En respuesta a esas fuerzas, todos los electrones tienen que elegir una dirección común a la que apuntar. Las fuerzas —y las ecuaciones que las describen— estarán igual de satisfechas con cualquier elección de dirección, pero *hay que tomar una opción*. Así que las soluciones estables de las ecuaciones tienen menos simetría que las propias ecuaciones.

En nuestra **Teoría Central de la fuerza débil**, tenemos simetría de rotación entre las direcciones en el **espacio de color** débil que se rompe espontáneamente por la existencia de un **campo de Higgs** que llena el espacio. La idea básica es muy similar a lo que acabamos de considerar al exponer un imán común. Del mismo modo que las ecuaciones subyacentes para las fuerzas entre electrones estimulan al espín de los electrones vecinos a alinear sus direcciones, así también las ecuaciones subyacentes estimulan al campo de Higgs en puntos vecinos del espacio-tiempo a alinear sus direcciones en el **espacio de propiedad** débil. Una dirección común debe ser elegida, y de esa forma la simetría rotacional (en el espacio de propiedad débil) se rompe espontáneamente.

El éxito con que estas ideas han aportado una excelente explicación de la fuerza débil, y han predicho la existencia de la partícula de Higgs, nos anima a seguir explorando la posibilidad de que la simetría subyacente en nuestras ecuaciones del mundo sea mucho mayor que la simetría que vemos en el mundo, considerando unos **grupos de simetría** subyacentes todavía más grandes.

Sabor

Hay seis distintos tipos, o *sabores*, de **quarks**: *u* (*up*), *d* (*down*), *s* (*strange*), *c* (*charm*), *b* (*bottom*), *t* (*top*), en orden ascendente de masa. Todos habitan en el mismo **espacio de propiedad** de color tridimensional y (por tanto) todos se comportan del mismo modo, por lo que respecta a la **fuerza fuerte**. Los quarks *u*, *c* y *t* tienen una **carga eléctrica** igual a $2/3$ de la del protón, mientras que *d*, *s* y *b* tienen una carga eléctrica igual a $-1/3$ de la del protón. Respecto a la interacción débil, tienen unos comportamientos diferentes y algo complicados: véase **Familia**.

El significado profundo de esta proliferación de tipos de quarks, si es que tiene alguno, no está claro en el presente. Entre los quarks, solo *u* y *d* tienen un gran papel en el mundo natural de hoy, porque aparece de manera prominente dentro de los **protones y neutrones**.

Hay una proliferación paralela de leptones; también aquí la algunos hablan del *sabor* de los leptones.

Salto cuántico

Véase **Estado estacionario**, donde este concepto se expone en su contexto natural. Aquí solo reseñaré que los *saltos cuánticos* son en realidad unos saltos muy pequeños. Así que, si alguien presume de haber dado un «salto cuántico del pensamiento», y sabe de lo que está hablando, está presumiendo de algo muy modesto.

Simetría/Transformación de simetría/Grupo de simetría

En las matemáticas y las ciencias matemáticas, decimos que un objeto tiene *simetría* si hay transformaciones que hacen cambios en, o mueven, diferentes partes del objeto mientras dejan el objeto, en su conjunto, igual, o **invariante**. Esas transformaciones se llaman *transformaciones de simetría*.

Los conceptos de simetría y transformación de simetría se aplican también a los sistemas de ecuaciones. Decimos que un sistema de ecuaciones tiene simetría respecto a una transformación si la trasformación hace cambios en las cantidades que aparecen en las ecuaciones (típicamente intercambiándolas, o mezclándolas de maneras más complicadas) sin cambiar el significado del sistema total.

Ejemplo: la ecuación $x = y$ tiene simetría bajo la transformación que intercambia x e y , porque la ecuación transformada $y = x$ tiene exactamente el mismo significado que la original. La totalidad de las transformaciones que dejan el objeto invariante se llama su *grupo de simetría*.

Simetría continua

Si una estructura admite una gama continua de transformaciones que la dejan igual, o **invariante** —en otras palabras, si nuestra estructura admite una gama de *transformaciones de simetría*, decimos que tenemos una *simetría continua* de esa estructura, o que la estructura admite un *grupo continuo* de transformaciones de simetría.

Ejemplo: un círculo puede rotarse en cualquier ángulo alrededor de su centro, y sigue siendo el mismo círculo. Luego el círculo es invariante bajo una gama continua de rotaciones. Un triángulo equilátero, por otro lado, es invariante solo bajo rotaciones alrededor de su centro en múltiplos enteros de 120 grados. Un triángulo equilátero, por tanto, admite simetría discreta, pero no continua.

Véase también [Análogo](#) y [Digital](#).

Simetría de traslación espacial

La traslación espacial es la transformación que mueve la posición de los puntos en el espacio mediante un desplazamiento común. La *simetría de traslación temporal* es la hipótesis de que las leyes de la física permanecen inmutables o, como decimos, **invariantes** bajo esa transformación. La simetría de traslación temporal es una forma **rigurosa** de formular la idea de que las leyes de la física son las mismas en todas partes. La simetría de traslación temporal está estrechamente conectada, mediante el teorema de Emmy Noether, con la **conservación del momento**.

Simetría de traslación temporal

La traslación temporal es la transformación que mueve el tiempo de los sucesos a través de un intervalo común. La *simetría de traslación temporal* es la hipótesis de que las leyes de la física siguen igual o, como solemos decir, son *invariantes* bajo esa transformación. La simetría de traslación temporal es una forma **rigurosa** de formular la idea de que las leyes de la física son las mismas a lo largo de la historia. La simetría de traslación temporal está íntimamente conectada, mediante el teorema de Emmy Noether, con la *conservación de la energía*.

Simetría gauge

Es lo mismo que [simetría local](#).

Simetría local

Decimos que una simetría es *local* cuando permite que sus **transformaciones** se hagan independientemente en distintos lugares y tiempos.

La simetría local es, junto a la **teoría cuántica**, la base de las **Teorías Centrales** de las cuatro fuerzas que resumen nuestro conocimiento actual de las leyes básicas de la naturaleza. Es también, junto a la **supersimetría** (y en el marco de la teoría cuántica), el fundamento de un intento atractivo de unificar y mejorar la Teoría Central, como se describe en «Belleza cuántica IV».

La simetría local es a la convencional (es decir, a la **rígida**) lo que el arte anamórfico es a la perspectiva convencional.

La simetría local es uno de los principales focos de nuestra exposición, y predomina en sus capítulos tardíos.

Simetría rígida

Decimos que una simetría de una ley física es *rígida* si requiere que hagamos la misma transformación en todas las partes (y en todos los tiempos) del espacio-tiempo. En contraste, la **simetría local** permite transformaciones que varían a lo largo del espacio-tiempo.

Síntesis

El proceso de ensamblar ingredientes simples, o conceptos, para producir estructuras más complejas. Véase **Análisis y Síntesis**.

Sólido platónico/Superficie platónica

Un *sólido platónico* es un **poliedro** cuyas caras son todas copias del mismo **polígono** regular, y se encuentran del mismo modo en todos los vértices. Hay exactamente cinco sólidos platónicos distintos (finitos): tetraedro, octaedro, icosaedro, cubo y dodecaedro. Se describen en extenso en el texto.

La construcción matemática de esos sólidos, y la demostración de que son los únicos posibles, es el clímax de los *Elementos* de Euclides.

Las superficies de los sólidos platónicos son, en muchos sentidos, más fundamentales que los sólidos a los que rodean. Me refiero a ellas como *superficies platónicas*.

Los sólidos platónicos han suscitado la admiración de matemáticos, científicos y místicos durante muchos siglos.

Superconductividad/Superconductor

Una gran variedad de metales, y algunos otros materiales, exhiben un comportamiento cualitativamente nuevo cuando se enfrian hasta el cero absoluto de temperatura. Lo más espectacular es que su resistencia al flujo de carga eléctrica cae abruptamente a cero. Por esta razón, se dice que exhiben *superconductividad*, y que se vuelven *superconductores*.

La superconductividad se descubrió experimentalmente por Kamerlingh Onnes en 1911. Durante muchos años esquivó la explicación teórica. Un avance muy importante llegó en 1957, cuando John Bardeen, Leon Cooper y J. Robert Schrieffer propusieron lo que ahora llamamos la teoría BCS de la superconductividad. Su trabajo no solo explicó la emergencia de la superconductividad, sino que lo hizo usando unas ideas de gran belleza y poder que podían ser —y fueron— aplicadas a otros problemas. En particular, prefiguró la **ruptura espontánea de simetría** y el **mecanismo de Higgs**.

Dentro de los superconductores, los **fotones** se comportan como si tuvieran una **masa** no nula. Las ecuaciones que describen esta situación son esencialmente las mismas que las que usamos en la **Teoría Central** para dar una masa no nula a los **bosones débiles** en el mecanismo de Higgs. Pienso que es justo a la vez que poético decir que la gran lección que podemos extraer del descubrimiento de la **partícula de Higgs** es que vivimos dentro de un superconductor cósmico. (Pero su superconductividad es para el flujo de carga débil, por oposición a **carga eléctrica**.)

Supersimetría (SUSY)

La *supersimetría* es un tipo particular de **simetría**. Las transformaciones de supersimetría implican un desplazamiento, o *traslación*, en una **dimensión cuántica**. Cuando una **partícula de fuerza (bosón)** se mueve a una dimensión cuántica, se convierte en una **partícula de sustancia (fermión)**, y viceversa.

Si logramos convencernos de que fuerza y sustancia son lo mismo, solo que visto desde perspectivas distintas, habremos alcanzado un nuevo nivel de unidad y coherencia en nuestra comprensión fundamental de la naturaleza. Por ahora, sin embargo, las evidencias de la supersimetría, aunque impresionantes, son circunstanciales.

Tabla periódica

La *tabla periódica* de los elementos químicos es una informativa organización geométrica de la lista de los elementos químicos, en que las columnas contienen elementos con unas propiedades químicas similares. En cada columna, los números atómicos y las masas atómicas aumentan de arriba abajo; y, dentro de cada fila, los números y masas atómicas aumentan de izquierda a derecha. En la versión más directa de la tabla periódica, el

número atómico aumenta en uno con cada paso a la derecha, y también cuando saltamos del elemento más a la derecha de una fila al elemento más a la izquierda de la fila siguiente. (Hay muchas variantes. Una bastante común es poner las tierras raras y los actínidos en subtablas separadas.) La mecánica cuántica explica la estructura de la tabla periódica de manera teórica, como una aplicación de la **ecuación de Schrödinger**. Es un ejemplo glorioso de

Ideal → Real

En esa explicación, la teoría cuántica del **momento angular** y el **principio de exclusión de Pauli** desempeñan papeles protagonistas.

Teorema de Pitágoras

El *teorema de Pitágoras* fue un descubrimiento geométrico temprano e impresionante. El teorema de Pitágoras afirma que los cuadrados de las longitudes de los dos lados cortos de un triángulo rectángulo suman el cuadrado de la longitud de su lado más largo (la hipotenusa). Se expone por extenso, y con imágenes, en el texto principal.

Teoría Central

En este libro, la *Teoría Central* se refiere a las teorías dominantes de las **fuerzas fuerte, débil, electromagnética y gravitatoria**, que encarnan los principios de la **teoría cuántica** y la **simetría local** (incluida la **relatividad general**, la versión local de la **simetría galileana**).

La Teoría Central, o su subteoría que excluye la gravedad, suele llamarse Modelo Estándar. Por las razones que explico en el texto, creo que se necesita un nombre mejor.

(¿Cómo nos podemos ni siquiera plantear la exclusión de la gravedad de la definición de la Teoría Central? Suele decirse que hay un conflicto fundamental entre la mecánica cuántica y la relatividad general, y a veces se pretende que ese conflicto entraña una crisis paralizante de la física. Ambas afirmaciones son una exageración, y la segunda es definitivamente engañosa. Por ejemplo, los astrofísicos combinan a diario la relatividad general y la mecánica cuántica en su trabajo sin hallar ninguna dificultad grave.

Uno puede introducir la relatividad general en las ecuaciones de la Teoría Central de una forma única y convincente usando el mismo principio profundo —la simetría local— que usamos para obtener las otras fuerzas. Las reglas de la teoría cuántica siguen aplicándose.

La Teoría Central, así definida, no logra dar respuestas convincentes a los experimentos mentales sobre ciertos aspectos de la física de los agujeros negros, y sus ecuaciones se vuelven singulares e inutilizables cuando extrapolamos al origen del Big Bang cosmológico, de modo que no es una Teoría del Todo. Eso ya lo sabíamos, gracias a los problemas de la **familia**, la **energía oscura** y la **materia oscura**, entre otros. Pese a ello, es una teoría coherente, **refutable, poderosa y económica**. Es por completo apropiado incluir la relatividad general como parte de la Teoría Central, y eso es lo que he hecho.)

Teoría cuántica/Mecánica cuántica

Un gran descubrimiento de principios del siglo xx es que las leyes de la física que se usan para describir cuerpos grandes, epitomizadas por la mecánica newtoniana y la electrodinámica de Maxwell, son inadecuadas para describir los átomos y sus **núcleos**. Describir el comportamiento de la materia a escalas atómicas y subatómicas resultó requerir no meramente añadir algo a lo que se conocía antes, sino construir un marco radicalmente diferente en el que muchas ideas que se creían seguras tuvieron que abandonarse. El término general *teoría cuántica*, o *mecánica cuántica*, se refiere a ese nuevo marco. Estaba esencialmente establecida a finales de la década de 1930. Desde entonces, nuestras técnicas para bregar con los desafíos matemáticos que plantea la teoría cuántica han mejorado enormemente —véase **Renormalización**— y hemos conseguido, mediante nuestras **Teorías Centrales**, un entendimiento poderoso y detallado de las principales fuerzas de la naturaleza. Pero esos avances han ocurrido *dentro* del marco de la teoría cuántica.

Muchas teorías físicas pueden expresarse como una serie de afirmaciones razonablemente específicas sobre el mundo físico. La **relatividad especial**, por ejemplo, consiste esencialmente en la doble aseveración de la **simetría galileana** junto con la **invariancia** de la velocidad de la luz. Cada una de nuestras **Teorías Centrales** es una aseveración de **simetría local**, junto con los particulares sobre la forma en que las **transformaciones de simetría** actúan sobre el espacio-tiempo y la materia. La teoría cuántica, como se entiende hoy, no es como eso. La teoría cuántica no es una hipótesis específica, sino una red de ideas estrechamente interrelacionadas. No quiero insinuar que la teoría cuántica sea vaga: no lo es. Con raras excepciones, normalmente pasajeras, cuando nos enfrentamos a cualquier problema físico concreto, todos los practicantes competentes de la mecánica cuántica estarán de acuerdo en lo que significa abordar ese problema usando la teoría cuántica. Pero creo que pocos de ellos, si es que hay alguno, podrán decir precisamente qué suposiciones han hecho para llegar allí.

Aunque cualquier definición precisa resulta escurridiza, aquí es posible, e iluminador, resaltar unos pocos temas cualitativamente nuevos que la teoría cuántica nos trae a la descripción del mundo físico:

- En la descripción de la materia, los objetos fundamentales no son partículas que ocupan posiciones en el espacio, ni siquiera **campos** (como los **campos eléctricos**) que llenan todo el espacio con números o vectores, sino **funciones de onda**. Las funciones de onda asignan **números complejos** llamados **amplitudes** a las posibles configuraciones del objeto al que describen.

Así, la función de onda de una partícula individual asigna una amplitud a todas las posibles posiciones de la partícula: en otras palabras, a todos los puntos del espacio. La función de onda de un par de partículas asigna una amplitud a cada par de puntos del espacio o, alternativamente, a cada punto del espacio seis-dimensional de los pares de posiciones. La función de onda de un campo eléctrico es un objeto de vastedad mareante. Puesto que asigna una amplitud a todo posible valor del campo eléctrico en su conjunto, la función de onda del campo eléctrico ¡es una función de funciones (vectoriales)!

- Cualquier pregunta física válida sobre un sistema físico puede responderse consultando su función de onda. Pero la relación entre la pregunta y la respuesta no es directa. Tanto la manera en que las funciones de onda responden preguntas, como las respuestas que dan, tienen unas características sorprendentes, por no decir estrañafarias.

Para concretar, consideremos primero el contexto relativamente simple de una partícula individual. (Aquí recapitulamos parcialmente una exposición del texto principal.) Para plantear preguntas, debemos hacer experimentos específicos que sondeen la función de onda de distintas formas. Podemos hacer, por ejemplo, experimentos que miden la posición de la partícula, o experimentos que miden el **momento** de la partícula. Esos experimentos abordan las preguntas: ¿dónde está la partícula?, ¿cómo se mueve de rápido?

¿Cómo responde esas preguntas la función de onda? Primero hace algún procesamiento, y luego te da las probabilidades.

Para la pregunta de la posición, el procesamiento es bien simple. Tomamos el valor, o amplitud, de la función de onda —un número complejo, recuerda— y lo elevamos al cuadrado. Eso nos da, para cada posición posible, un número positivo, o cero. Ese número es la probabilidad de hallar la partícula en esa posición. (Estrictamente hablando, es la densidad de probabilidad, pero no multipliquemos las complicaciones.)

Para la pregunta sobre el momento, el procesamiento es mucho más complicado. Para averiguar la probabilidad de observar algún momento, tienes primero que hacer una media ponderada de la función de onda —la forma exacta de hacer la ponderación depende del momento en que estés interesado— y luego elevar al cuadrado ese promedio.

Tres puntos principales son:

- Obtienes probabilidades, no respuestas definidas.
- No obtienes acceso a la función de onda en sí misma, sino solo una ojeada furtiva a sus versiones procesadas.

- Responder distintas preguntas puede requerir procesar la función de onda de distintas formas.

Cada uno de esos puntos plantea grandes asuntos.

El primero plantea el asunto del *determinismo*. ¿Calcular probabilidades es realmente lo más que podemos hacer?

El segundo plantea la cuestión de los *mundos múltiples*. ¿Qué describe la función de onda completa, cuando no estamos mirando? ¿Representa realmente una expansión gigantesca de la realidad, o es solo una herramienta mental, nada más que un sueño?

El tercero plantea el tema de la *complementariedad*. Responder distintas preguntas puede requerir distintas formas de procesar la función de onda que son incompatibles entre sí. En ese caso es imposible, según la teoría cuántica, responder ambas preguntas al mismo tiempo. No puedes hacerlo, aun cuando cada pregunta por sí misma pueda ser perfectamente legítima y tener una respuesta informativa. Esta es precisamente la situación que surge para nuestra pregunta de la posición y nuestra pregunta del momento, donde se conoce como el principio de incertidumbre de Heisenberg: no puedes medir a la vez la posición y el momento de una partícula. Si alguien hallara la forma de hacer eso, experimentalmente, habría refutado la teoría cuántica, porque la teoría cuántica dice que no se puede hacer. Einstein intentó repetidamente concebir experimentos de ese tipo, pero nunca lo consiguió, y al final admitió su derrota.

Cada uno de estos asuntos es fascinante, y los dos primeros han recibido mucha atención. A mí, sin embargo, el tercero me parece especialmente bien fundamentado y lleno de significado. La complementariedad, como un aspecto de la realidad y una lección de sabiduría, arroja una sombra alargada sobre nuestra exposición.

Aunque he ilustrado estos asuntos para partículas individuales, todos persisten, a raudales, cuando planteamos preguntas sobre sistemas más complicados.

- Puesto que la función de onda nos da probabilidades, en vez de respuestas únicas, obtendremos respuestas diferentes si le hacemos la misma pregunta repetidamente a la misma función de onda. Esto tiene una relación estrecha con la idea intuitiva, a la que aprecio mucho y apelo con frecuencia, de que los objetos cuánticos exhiben actividad espontánea. Véase **Fluctuación cuántica**.
- Muchas cantidades que son continuas según la física clásica se vuelven discretas en la teoría cuántica. Véase **Fotón** y **Espectro**.
- Por último, pero de ningún modo menos importante: aunque la teoría cuántica conduce, en general, a respuestas probabilísticas, también hace muchas predicciones que están perfectamente definidas. Por ejemplo, la mecánica cuántica subyace a las teorías que predicen el espectro del hidrógeno, la fuerza y la conductividad eléctrica de los nanotubos y las masas y propiedades de los hadrones, todo con pasmosa

precisión. Estas son unas cantidades perfectamente definidas, no probabilidades. Sus elucidaciones son puntos culminantes en la historia reciente de nuestra Pregunta, como se expone en «Belleza cuántica I», «II» y «III».

Teoría Yang-Mills

En 1954, C. N. (Frank) Yang y Robert Mills descubrieron cómo construir una gran clase nueva de teorías en las que la **simetría rígida** de un **espacio de propiedad** se expande como **simetría local**. En su honor, las teorías de este tipo se suelen llamar *teorías Yang-Mills*. Nuestras **Teorías Centrales** de las **fuerzas fuerte** y **débil** incorporan esa construcción.

Al pasar de la **relatividad especial** a la **relatividad general**, en 1915, Einstein había extendido la **simetría galileana** de una forma rígida a una local. A grandes trazos, Yang y Mills nos enseñaron cómo hacer este tipo de expansión, de la simetría rígida a la simetría local, para una clase amplia de posibles **grupos de simetría** que actúa entre partículas.

En el texto principal, comparamos el paso de la simetría rígida a la simetría local con el paso de la perspectiva ordinaria, gobernada por la **geometría proyectiva**, a las posibilidades más libres del arte anamórfico.

Término de Maxwell/ Ley de Maxwell

Para reconciliar las inconsistencias entre las **leyes dinámicas** para los **campos eléctrico** y **magnético**, como se los conocía, Maxwell propuso que debía haber un efecto adicional. El nuevo efecto, al que he llamado *ley de Maxwell*, consiste en que los campos eléctricos que cambian con el tiempo inducen (es decir, «crean») campos magnéticos. Es una especie de doble de la **ley de Faraday**, que afirma que los campos magnéticos que cambian con el tiempo inducen campos eléctricos. La ley de Maxwell suplementa a otra manera de inducir campos magnéticos, mediante corrientes eléctricas (**ley de Ampère**). La ecuación completa, que resulta de añadir el nuevo *término de Maxwell* a la ley de Ampère, se conoce como **ley de Ampère-Maxwell**.

Tono/Tono puro

La expresión «tono puro», según se usa en este libro, significa una perturbación ondulatoria simple que es periódica tanto en el espacio como en el tiempo. (Aquí, «simple» tiene un sentido técnico definido²⁴ —el patrón ondulatorio es *sinusoidal*—, pero no voy a desarrollar esto aquí. En las notas finales indico dos referencias accesibles.)

Los ejemplos más importantes de tonos puros, para nosotros, tratan de las ondas de sonido y las **ondas electromagnéticas** (incluida, especialmente, la luz). En las ondas de sonido, lo que varía es la presión y la densidad del aire; en las ondas electromagnéticas, son los campos eléctricos y magnéticos.

Una percepción nueva, profunda y gratificante que surge del estudio científico de la naturaleza es que los *tonos puros*, definidos de la manera matemática/ física mencionada, corresponden a percepciones simples. Los tonos de audio puros son fáciles de producir por medios electrónicos, y te pueden resultar familiares si te has hecho pruebas de audición, o has oído dispositivos musicales electrónicos primitivos (como los que se incorporaban a veces en las tarjetas de felicitación, por ejemplo), o diapasones. Los tonos puros visuales son los colores espectrales de la luz que emergen en el arco iris, o de la luz solar dispersada por un prisma, como en los experimentos de Newton. Estas perspectivas complementarias —sensorial y conceptual— de los tonos puros ejemplifican a la perfección nuestra anhelada correspondencia

Real → Ideal

Los *tonos* generados por los tradicionales instrumentos musicales, cuando tocas una sola «nota», están lejos de ser puros. Los detalles varían de un instrumento a otro, pero en todos los casos la nota contiene muchos tonos puros que suenan simultáneamente, con diferentes fuerzas. El más poderoso es el tono puro que da nombre a la nota, pero la calidad (o timbre) del sonido musical, que es lo que distingue a los diversos instrumentos, es en gran parte una función de los llamados *armónicos* adicionales.

Estas cuestiones se exponen más a fondo en el texto principal. También tiene relación con ello la entrada **Espectros**.

Transformación galileana/Simetría galileana/Invariancia galileana

Una *transformación galileana* es el tipo de transformación que hacemos en un sistema cuando imaginamos añadir o restar una velocidad constante al movimiento de cada una de sus partes. Galileo, como se cita en el texto principal, describió un hermoso experimento mental que hace verosímil que las transformaciones galileanas dejen las leyes de la física inmutables, o **invariantes**: Si estás bajo cubierta en un camarote cerrado de un barco, con tiempo calmo, no puedes decir, partiendo de tu experiencia en el camarote, a qué velocidad se mueve el barco. La hipótesis de que las leyes de la física son invariantes bajo transformaciones galileanas, o que exhiben simetría galileana, es uno de los pilares de la **relatividad especial**. Véase también **Boost**.

Traslación

El desplazamiento de un sistema en una cantidad constante, ya sea en el espacio o en el tiempo. Véanse **Simetría de traslación espacial** y **Simetría de traslación temporal**.

Ubicuo

Generalizado, que está en todas partes.

Unificación

La *unificación* de ideas relacionadas en un todo coherente es un aspecto de la economía del pensamiento. Otro aspecto complementario de la unificación es la reconciliación de aparentes contrarios. Cuando los contrarios se reconcilian, los vemos como aspectos complementarios de una unidad subyacente.

Nuestra Pregunta plantea el desafío de unificar la belleza y la encarnación física, o lo Ideal y lo Real.

La unificación, tanto en su aspecto de combinar ideas relacionadas como en el de reconciliar contrarios aparentes, ha sido una de las principales características de muchos de los logros que han marcado un hito en la filosofía natural:

- El uso sistemático de **coordenadas**, que René Descartes (1596-1650) fue el primero en utilizar en su obra *La Géométrie* de 1637, unificó el álgebra y la geometría.
- La ley de gravedad universal de Newton, y sus leyes del movimiento, unificaron la astronomía celeste y la física terrestre. Las observaciones telescopicas de Galileo, que revelaron (entre otras cosas) el terreno montañoso de la Luna y el sistema de satélites de Júpiter, aportó unas imágenes poderosas a esa unificación.
- Las **ecuaciones de Maxwell** del **electromagnetismo** unificaron la descripción de la electricidad y el magnetismo. Las mismas ecuaciones aportaron también una explicación electromagnética de la luz, introduciendo todos los fenómenos de la óptica en esa unificación.
- La teoría de la **relatividad especial** de Einstein trajo unas **transformaciones de simetría** que mezclan el espacio y el tiempo, permitiéndonos ver esas dos cosas como aspectos de un espacio-tiempo unificado.
- El **flujo electromagnético** de Faraday y Maxwell, y el **flujo métrico** de Einstein, mediante la abolición del **vacío**, unificaron el espacio-tiempo y la materia.
- El concepto de **cuantos** de los **fluidos cuánticos**, tipificado por los fotones de la radiación electromagnética (la luz), unificaron la descripción de los aspectos particulado y ondulatorio del comportamiento físico.

En las fronteras actuales de la física, hay indicios tentadores de que pronto se podrán alcanzar nuevas unificaciones.

- Todas nuestras **Teorías Centrales** se basan en la **simetría local**, pero las transformaciones imaginadas en nuestras teorías de las fuerzas **fuerte**, **débil** y **electromagnética** actúan independientemente en **espacios de propiedad**, mientras que las transformaciones de nuestra teoría de la fuerza **gravitatoria** actúan en el espacio-tiempo. Buscamos una simetría local más abarcadora que sirva para todas.

Con la **supersimetría**, podríamos unificar **sustancia** y **fuerza**.

Estas son las ideas que salen a relucir en «Belleza cuántica IV».

Universo/Universo visible/Multiverso

La física moderna ha abierto unas posibilidades imaginativas para la cosmología que sobrepasan las expectativas del lenguaje común. Para hacerles justicia, por tanto, tenemos que refinar y a la vez extender el uso cotidiano de las palabras. En especial, el uso vago de «universo» para significar «todo» ha dejado de valer. Aunque tampoco la literatura científica es aún del todo consistente en estos asuntos, creo que es posible, y útil, distinguir tres conceptos que reflejan los usos científicos más recientes. Es probable que acaben emergiendo como usos estándar.

El *universo visible* consiste en todo lo que es accesible a la observación. Aquí surgen limitaciones fundamentales por la velocidad finita de la luz, que (según asumimos) es la velocidad limitante para la transmisión de información, y por el tiempo finito que ha pasado desde el Big Bang, que (según asumimos) es un suceso más allá del cual no podemos ver. Limitados por una velocidad finita y un tiempo finito, nos damos cuenta de que solo podemos acceder a una distancia finita, el llamado horizonte. Hay que fijarse en dos cosas:

- El horizonte crece con el paso del tiempo desde el Big Bang. Por tanto, el universo visible era menor en el pasado, y cabe suponer que será mayor en el futuro.
- Si descubrimos que la velocidad de la luz no es una limitación fundamental a la transmisión de información, o si aprendemos a ver más allá del Big Bang, tendremos que repensar lo que queremos decir por universo visible.

El universo visible que vemos hoy parece ser, en líneas generales, igual en todas partes. Los astrónomos han hallado el mismo tipo de estrellas, organizadas en el mismo tipo de galaxias, obedeciendo el mismo tipo de leyes físicas, por muy lejos y en cualquier dirección que hayan mirado. Si asumimos que este patrón continuará a medida que se

expande el horizonte, llegamos a lo que suele llamarse el «universo». El universo, en este sentido, es la extensión conservadora y lógica de nuestra experiencia pasada al futuro indefinido.

La física moderna ha hecho verosímil, sin embargo, que el mundo físico pueda existir de formas **cualitativamente** distintas, o fases, de una manera similar en espíritu a como el agua puede existir como hielo, agua líquida o vapor. En esas distintas fases, el espacio está impregnado por diferentes **campos** (o por los mismos campos con diferentes magnitudes). Véase **Vacío**. Dado que esos campos determinan en gran medida las propiedades de la materia que se mueve por ellos, estas diferentes fases, de hecho, ponen en práctica distintas leyes de la física. Si esas diversas regiones del espacio existen, el «universo», como lo hemos definido, no es toda la realidad. Llamamos a toda la realidad *multiverso*. La idea de que hay un multiverso, de modo que las leyes de la física que observamos son en parte un accidente del lugar donde resulta que estamos, figura de manera prominente en los **argumentos antrópicos**.

Vacío

La palabra «vacío» se entiende normalmente como «espacio carente de materia». Así, hablamos de «crear un vacío» bombeando el aire fuera de un recipiente, o de «tubos de vacío», o de «el vacío del espacio interestelar». Este uso se puede volver ambiguo, porque

- Lo que encuentras depende de cuánto estás dispuesto a buscar. El «vacío» del espacio interestelar, por ejemplo, está impregnado por la radiación de fondo de microondas, el tipo de radiación que nuestros ojos percibirían como luz estelar, rayos cósmicos, diversas corrientes de neutrinos, energía oscura y materia oscura. En la Tierra, los ingenieros pueden, con esfuerzo, excluir las primeras dos cosas de una región de espacio, y la mayor parte de la tercera, pero no las tres últimas. Por fortuna, la razón de que sea tan difícil es también la razón de que no importe a objetivos prácticos: las corrientes de neutrinos, la energía oscura y la materia oscura —¡y tal vez otras cosas de las que aún no sabemos nada!— interactúan muy débilmente con la **materia normal**.
- Lo que piensas que hay ahí depende de cuánto estés dispuesto a pensar. En nuestra Teoría Central, incluso el espacio idealmente «vacío» está impregnado de una variedad de **fluidos cuánticos** —el **fluído electromagnético**, el **fluído métrico**, el **fluído electrónico**, el **fluído de Higgs** y así sucesivamente—, así como los **campos** métrico y de Higgs.

Lo que la gente quiere decir cuando dice «vacío» suele quedar claro por el contexto, pero al pensar sobre los fundamentos hay que tener claro que la palabra «vacío» no significa de modo inequívoco una cosa definida. En especial, el concepto filosófico de *vacío* —el

espacio como una nada perfecta— es bastante diferente de cualquier entendimiento razonable del espacio físico en cualquier parte del mundo físico del presente.

En la moderna cosmología física, es importante tener en cuenta que los campos que llenan el espacio, tales como el **campo de Higgs**:

- Tienen efectos físicos profundos, tanto por alterar el comportamiento de la materia como por contribuir a la *energía oscura*.
- Están presentes en cualquier *vacío* físicamente definido (puesto que son penetrantes e inescapables).
- Pueden, en condiciones extremas, cambiar de magnitud.

Combinando esas tres observaciones, alcanzamos la percepción de que puede haber vacíos físicos significativamente diferentes cuyos campos generalizados difieren en magnitud. El comportamiento de la materia en esos diferentes vacíos puede ser drásticamente distinto, como lo puede ser la densidad de **materia oscura** y **energía oscura**.

Es sugerente, y bonito, resumir esta situación diciendo que el propio espacio es una especie de material que puede existir en distintas fases, como el agua puede existir como agua líquida, hielo o vapor. Véase **Universo/Universo visible/Multiverso**.

Vector/Campo vectorial

Los vectores pueden definirse de manera geométrica o algebraica.

Geométricamente, un vector es una cantidad que tiene magnitud y dirección. Ejemplos:

- Si tenemos dos puntos, digamos A y B , el desplazamiento en línea recta que lleva A a B es un vector. Su magnitud es la distancia entre A y B , y su dirección es la dirección de A a B .
- La **velocidad** de una partícula es un vector.
- El **campo eléctrico** en cualquier punto es un vector.

Algebraicamente, un vector no es más que una secuencia de números.

La conexión entre estas dos definiciones se hace introduciendo **coordenadas**. En los ejemplos de arriba, los vectores son vectores en el espacio tridimensional ordinario, y corresponde a tripletes de números reales. En la entrada **Coordenada** se mencionan algunas variaciones interesantes e importantes.

Cuando tenemos una cantidad vectorial asignada a cada punto del espacio, decimos que tenemos un *campo vectorial*. Ejemplos:

- Si tenemos un volumen de agua, sus distintas partes se moverán a distintas velocidades. Esas velocidades definen un campo vectorial.
- Los campos eléctricos y magnéticos son campos vectoriales.
- En cada punto de una pantalla de ordenador, las intensidades con que rojo, verde y azul se muestran en ese punto son una secuencia de tres números, y por tanto definen un vector. Así, en el plano de la pantalla del ordenador, tenemos un campo vectorial de colores.

Vector axial

Véase **Paridad**, donde este concepto aparece en su contexto natural.

Velocidad

De manera intuitiva, la *velocidad* se define como la tasa de cambio en la posición.

Así, para definir la velocidad de una partícula, consideramos su desplazamiento Δx durante un pequeño lapso de tiempo Δt , tomamos la razón $\Delta x/\Delta t$, y evaluamos su valor límite cuando el intervalo Δt se toma más y más pequeño. El valor límite, por definición, es la velocidad.

Véase **Infinitesimal**, donde se exponen algunos asuntos fundamentales sobre esta definición.

Lecturas recomendadas

Esta es una breve lista de recomendaciones para seguir explorando los principales temas que hemos abordado en nuestra reflexión. Hago recomendaciones en tres categorías: clásicos, teoría cuántica y avances modernos. Todos los títulos citados han significado mucho para mí.

Clásicos (precuánticos)

Nada puede sustituir la experiencia de la comunicación directa con los grandes pensadores en su mejor momento. Así, aunque el contenido técnico y científico de los trabajos citados aquí ha sido desbancado, no he tenido la menor duda en traerlos a tu atención. Parte de este material es de dominio público y se puede encontrar en Internet, una vez que sabes lo que estás buscando. Pero un libro bien editado es una tecnología atractiva y madura con ventajas de portabilidad, y con unas calidades táctiles y estéticas que tal vez quieras considerar como alternativa.

Platón, *The Collected Dialogues of Plato, Including the Letters*, editado por Edith Hamilton y Huntington Cairns, traducido al inglés por Lane Cooper (Princeton University Press). Véase en especial el *Timeo*.

Bertrand Russell, *The History of Western Philosophy* (Simon & Schuster). Véase en especial el libro 1 («Ancient Philosophy») y el libro 3, primera parte («From the Renaissance to Hume»).

Galileo Galilei, *The Starry Messenger* (Levenger).

Isaac Newton, *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (University of California Press). Esta obra maestra no debe intentar leerse sin una guía. Por fortuna, esta magnífica edición reciente

presenta una nueva traducción (del latín original al inglés) de I. Bernard Cohen y Anne Whitman, con una excelente introducción y guía de Cohen.

Isaac Newton, *Opticks* (Dover Publications). Este es un Newton mucho más accesible. Se trata de una edición muy especial y nada cara, que incluye un prólogo de Albert Einstein, una introducción de sir Edmund Whittaker, un prefacio de I. Bernard Cohen y una útil tabla de contenidos analítica de Duane Roller.

John Maynard Keynes, *Newton, the Man*. Este extraordinario ensayo corto, el homenaje de un genio a otro muy distinto, está disponible en www-history.mcs.st-and.ac.uk/Extras/Keynes_Newton.html

James Clerk Maxwell, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, editado por W. D. Niven (Dover Publications).

Albert Einstein, H. A. Lorentz, H. Weyl, y H. Minkowski, *The Principle of Relativity*, con notas de A. Sommerfeld (Dover Publications). ¡Una colección extraordinaria! Incluye los artículos seminales de Einstein sobre la relatividad especial y general, su nota breve sobre la conversión de la masa en energía, la conferencia de Minkowski que presenta el concepto moderno de espacio-tiempo y el intento pionero de Weyl de formular una teoría unificada de campo, donde apareció por primera vez el concepto de «invariancia de gauge». Estos artículos son trabajos de investigación, y el lector general no debe esperar entender todos los detalles matemáticos, pero muchos de ellos incluyen tratamientos conceptuales y pasajes que son memorables como literatura.

Algo de teoría cuántica

Aquí se hace más difícil acercarse a los trabajos originales sin un conocimiento previo de matemáticas y física. Pero el lector general puede disfrutar de las partes iniciales de los textos de los maestros, y de los artículos que presentan los descubrimientos.

P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (Oxford University Press). Las partes iniciales son conceptuales, y dan una impresión (correcta) de profundidad.

R. P. Feynman, R. Leighton y M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Addison-Wesley). El tercer volumen está dedicado a la teoría cuántica, y sus partes iniciales son conceptuales. El principio del volumen 1 examina la física en su conjunto (pre-Teoría Central), y luego ofrece una introducción conceptual a la mecánica; las partes iniciales del volumen 2 presentan una introducción conceptual al electromagnetismo. Todas muestran la combinación, típica de Feynman, de penetración conceptual y entusiasmo.

Henry A. Boorse (ed.), *The World of the Atom* (Basic Books). Una colección muy bien pensada de extractos de trabajos originales que se remontan a Lucrecio y llegan a la era pionera de la física de partículas, con comentarios útiles. Muestra cómo el análisis de la materia condujo a la gente a crear algo tan extraño y maravilloso como la teoría cuántica.

Avances modernos

La web de la Fundación Nobel, nobelprize.org, es un recurso muy frondoso. Contiene descripciones detalladas de los trabajos galardonados que se remontan a 1901, así como las conferencias de aceptación de los ganadores.

La web del Grupo de Datos de Partículas, pdg.lbl.gov, está destinada sobre todo a los profesionales, pero la sección «Reviews, Tables, Plots» («análisis, tablas, gráficos») contiene muchos análisis amplios de las fronteras de la física, cuyas secciones introductorias merece la pena estudiar. Lo más importante: husmear por esta web te dará una impresión de la imponente y detallada evidencia empírica de nuestra Teoría Central.

Las nuevas contribuciones a la física suelen aparecer primero en la web arXiv.org. Quizá te interese echarle un vistazo para ver qué aspecto tiene la física en construcción. Por supuesto, solo una pequeña fracción de estos trabajos sobrevivirá al paso del tiempo.

La «Stanford Encyclopedia of Philosophy», en plato.stanford.edu, tiene muchos artículos fascinantes y alucinantes.

Y, aunque trata sobre todo de matemática pura, el *Princeton Companion to Mathematics*, editado por Timothy Gowers (Princeton University Press), será de interés para cualquier lector que haya disfrutado de *Una pregunta bella*. Estoy editando ahora el *Princeton Companion to Physics*, cuya aparición está prevista para 2018.

Créditos de las ilustraciones

FIGURAS EN EL TEXTO

Mención especial: : Impreso con permiso de He Shuifa.

Figura 1: Cortesía del autor.

Figura 2: Cortesía del autor.

Figura 3: Grabado de Franchino Gaffurio, *Theorica Musice, Liber Primus* (Milán: Ioannes Petrus de Lomatio, 1492).

Figura 4: Alberto Durero, *Melancolía I*, grabado en placa de cobre.

Figura 5: Cortesía del autor.

Figura 6: Cortesía del autor.

Figura 7: © Museo Ashmoleano, Universidad de Oxford.

Figura 8: De Ernst Haeckel, *Kunstformen der Natur*, Lámina 1, Phaeodaria.

Figura 9: Modelo de la teoría del Sistema Solar de Johannes Kepler, exhibido en el Technisches Museum Wien (Viena), fotografía © Sam Wise, 2007.

Figura 10: Cortesía del autor.

Figura 11: www.vertice.ca.

Figura 12: Filippo Brunelleschi, demostración de perspectiva, 1425.

Figura 13: Abell 2218, Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, Contrato de la NASA NAS5-26555.

Figura 14: Diario de Isaac Newton, Biblioteca de la Universidad de Cambridge.

Figura 15: Sir Godfrey Kneller, retrato de Isaac Newton, óleo sobre lienzo, 1689.

Figura 16: Galileo Galilei, *Sidereus nuncius*, 1610.

Figura 17: Sir Isaac Newton, *Un tratado sobre el sistema del mundo*, 1731, p. 5.

Figura 18: Cortesía del autor.

Figura 19: Sir Isaac Newton, *Los principios matemáticos de la filosofía natural*, vol. 1, 1729.

Figura 20: Newton Henry Black y Harvey N. Davis, *Física práctica* (Nueva York: Macmillan, 1913), Figura 200, p. 242.

Figura 21: James Clerk Maxwell, *On physical lines of force*, *Philosophical Magazine*, vol. XXI, enero-febrero. Reimpreso en *The Scientific Papers of James Maxwell* (New York: Dover, 1890), vol. 1, pp. 451-513.

Figura 22: © Bjørn Christian Tørrissen, *Spiral Orb Webs Showing Some Colours in the Sunlight in a Gorge in Karijini National Park, Western Australia, Australia*, 2008.

Figura 23: James Clerk Maxwell con su peonza de color, 1855.

Figura 24: Cortesía del autor.

Figura 25: Hans Jenny, *Kymatic*, vol. 1, 1967.

Figura 27: Cortesía del autor.

Figura 28, arriba: © D&A Consulting, LLC. *Abajo:* A cargo del colaborador de Wikimedia Alexander AIUS, 2010.

Figura 30, arriba: Usuario de Wikimedia Benjabmm27, 2007. *Abajo:* Harold Kroto, © Anne-Katrin Purkiss, reimpreso con permiso de Harold Kroto.

Figura 33: Impreso con permiso de István Orosz.

Figura 34: *Mechanic's Magazine*, portada del vol. II (Londres: Knight & Lacey, 1824).

Figura 35: Andreas S. Kronfeld, *Twenty-first Century Lattice Gauge Theory: Results from the QCD Lagrangian*, *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science*, marzo de 2012. Reimpreso con permiso de Andreas Kronfeld.

Figura 36: Cortesía del autor.

Figura 37: Emmy Noether, 1902.

Figuras 38 y 39, arriba y abajo: Creado por Betsy Devine.

Figura 40: Cortesía del autor.

Figura 41: Cortesía del autor.

Figura 42: Wikimedia.

Figura 34: Imagen del *Mars Rover* de la NASA, NASA/JPL-Caltech/MSSS/TAMU.

LÁMINAS EN COLOR

- A: Impresa con permiso de He Shuifa.
- B: Detalle del Pitágoras de Raphael,
Scuola di Atene, fresco del Palacio
Apostólico, Ciudad del Vaticano, 1509-1511.
- C: Cortesía del autor.
- D: Imagen RASMOL de 1AYN PBD, por el doctor J.-Y. Sgro, UW-Madison,
EE. UU. RASMOL: Roger Sayle y E. James Milner-White. «RasMol:
Biomolecular Graphics for All» *Trends in Biochemical Sciences (TIBS)*,
septiembre de 1995, vol. 20, n.º 9, p. 374.
- E: Salvador Dalí, *El sacramento de la última cena*, imagen cortesía de la
National Gallery of Art, Washington, D.C.
- F: Camille Flammarion, *L'atmosphère: météorologie populaire*, 1888.
- G: Pietro Perugino, *Entrega de las llaves a San Pedro*, fresco de la Capilla
Sixtina, 1481-1482.
- H: Cortesía del autor.
- I: Fra Angelico, *La transfiguración*, fresco, c. 1437-1446.
- J: © Molecular Expressions.
- K: William Blake, *Newton*, lápiz, tinta y acuarela sobre papel, 1795.
- L: William Blake, *Europa, una profecía*, grabado coloreado a mano, 1794.
- M: «Ammonites galáctico Fénix» © Weed 2012.
- N: Cortesía del autor.
- O: Cortesía del autor.
- P: Imagen del espectro por la doctora Alana Edwards, Climate Science
Investigations Project de la NASA. Reproducido con permiso.
- Q: Cortesía del autor.
- R: R. Gopakumar, *El nacimiento del hijo de Dios*, pintura digital impresa en
lienzo, 2011. A través de Wikimedia Commons.
- S: William Blake, El casamiento del cielo y el infierno, página titular, 1790.
- T: Cortesía del autor.
- U: Cortesía del autor.

V: Claude Monet, *Grainstack (Atardecer)*, de la serie «Almiares», óleo sobre lienzo, 1891, colección de Juliana Cheney Edwards, Museo de Bellas Artes de Boston.

W: Cortesía del autor.

X: Fotografías de Jill Morton, reproducidas con permiso.

Y: Imagen creada por Michael Bok.

Z: Langosta mantis, por Jacopo Werther, 2010.

AA: Imagen creada por Michael Bok.

BB: Cortesía del autor.

CC: Cortesía del autor.

DD: A través de Wikimedia Commons.

EE: Impreso con permiso de István Orosz.

FF: A través de Wikimedia Commons. Creado por Michael Ströck, 2006.

GG: Fotografía de Betsy Devine; efectos del autor.

HH: Sala de oración de invierno, mezquita de Nasir Al-Mulk, Shiraz, Irán.

II: Cortesía del autor.

JJ: Cortesía del autor.

KK: Amity Wilczek fotografiada por Betsy Devine; efectos del autor.

LL: Fotografía de Mohammad Reza Domiri Ganji.

MM: Typoform, Real Academia Sueca de Ciencias.

NN: © Biblioteca de imágenes del CERN.

OO: © Derek Leinweber, usado con permiso.

PP: © Derek Leinweber, usado con permiso.

QQ: Cortesía del autor.

RR: Cortesía del autor.

SS: Cortesía del autor.

TT: Cortesía del autor.

UU: Cortesía del autor.

VV: Cortesía del autor.

WW: Cortesía del autor.

XX: © Derek Leinweber, usado con permiso.

YY: Caravaggio, *La incredulidad de Santo Tomás*, óleo sobre lienzo, 1601-1602.

ZZ: Leonardo da Vinci, *Hombre de Vitruvio*, tinta y aguada sobre papel, c. 1492.

AAA: A través de la NASA.

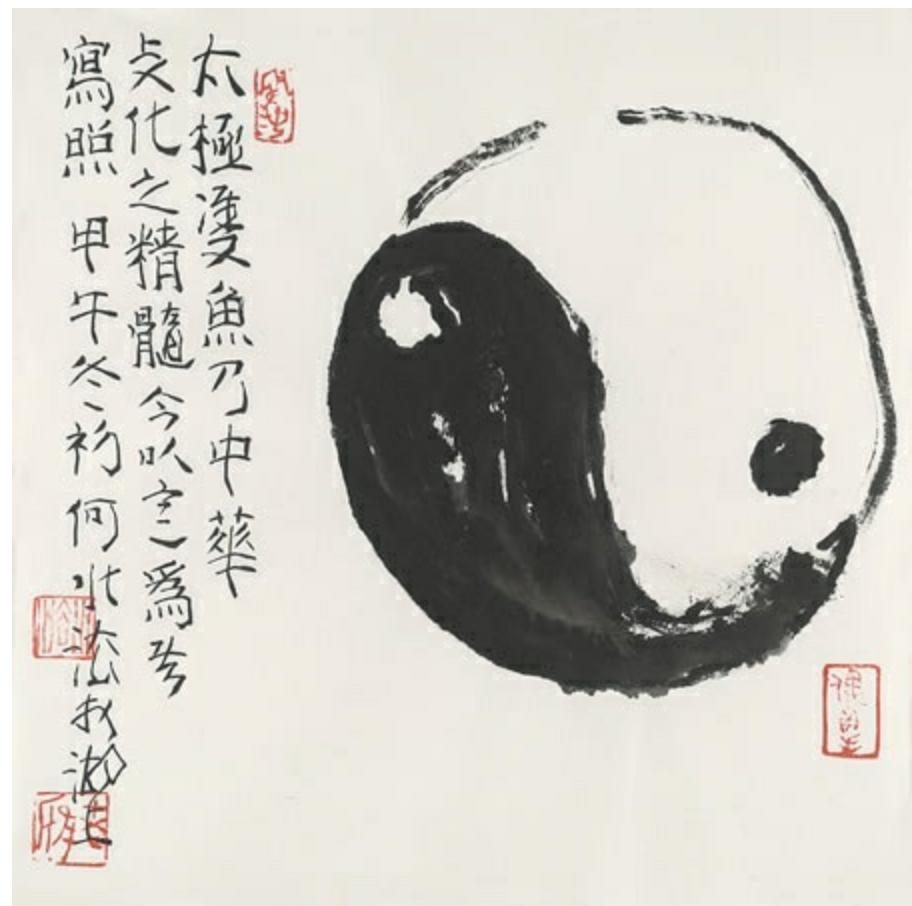


LÁMINA A. Figura Taiji por He Shuifa, que se usa también al inicio del epub.



LÁMINA B. Pitágoras trabajando, de *La escuela de Atenas* de Rafael.



LÁMINA C. «Así de simple»: el teorema de Pitágoras de un vistazo.

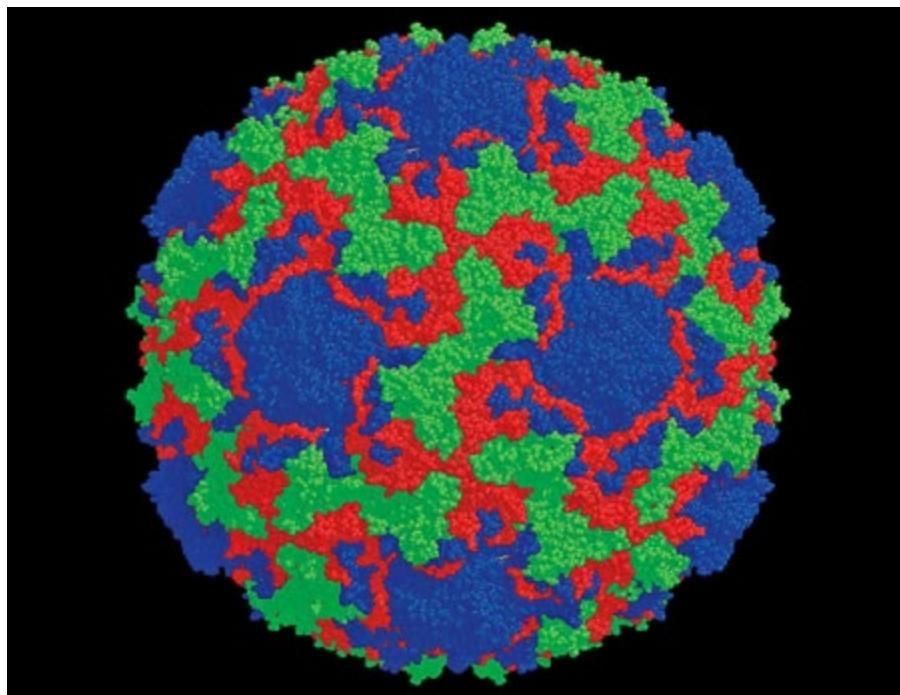


LÁMINA D. Un exoesqueleto típico de un virus, que exhibe la estructura de un dodecaedro... ¡y también la de un icosaedro!



LÁMINA E. En la *Última cena* de Dalí, el sacramento se desarrolla dentro de un dodecaedro.



LÁMINA F. Platón nos anima a mirar más allá de las apariencias si queremos descubrir la estructura profunda de la realidad.



LÁMINA G. *Entrega de las llaves a San Pedro*, de Perugino: la alegría de la perspectiva.

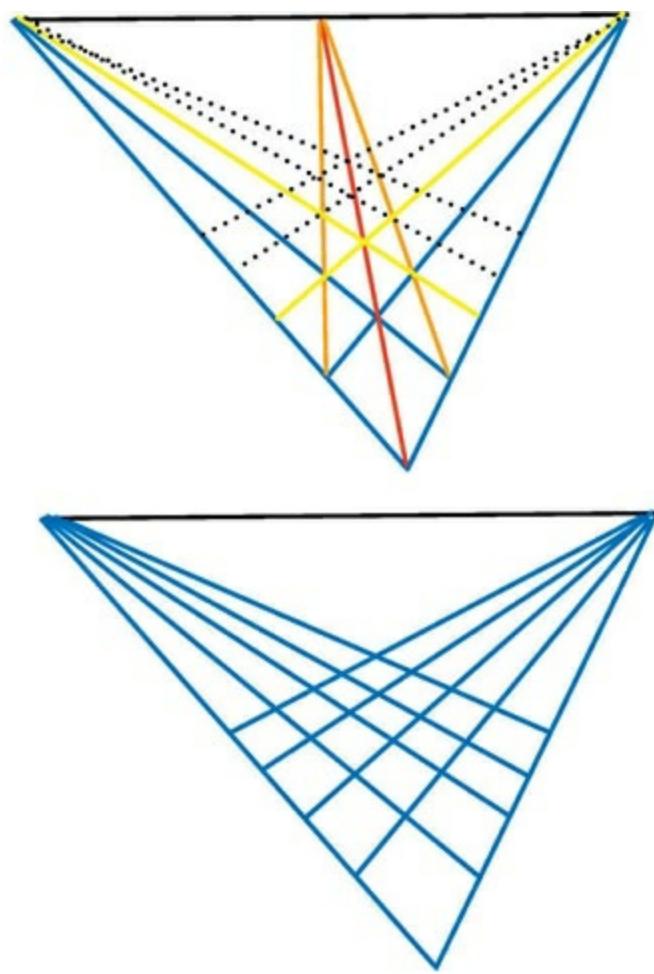


LÁMINA H. La hermosa construcción geométrica en el corazón del dibujo en perspectiva.



LÁMINA I. En la iconografía cristiana occidental, el blanco es un símbolo poderoso tanto de pureza como de poder. La *Transfiguración*, de Fra Angélico, es un ejemplo sublime.

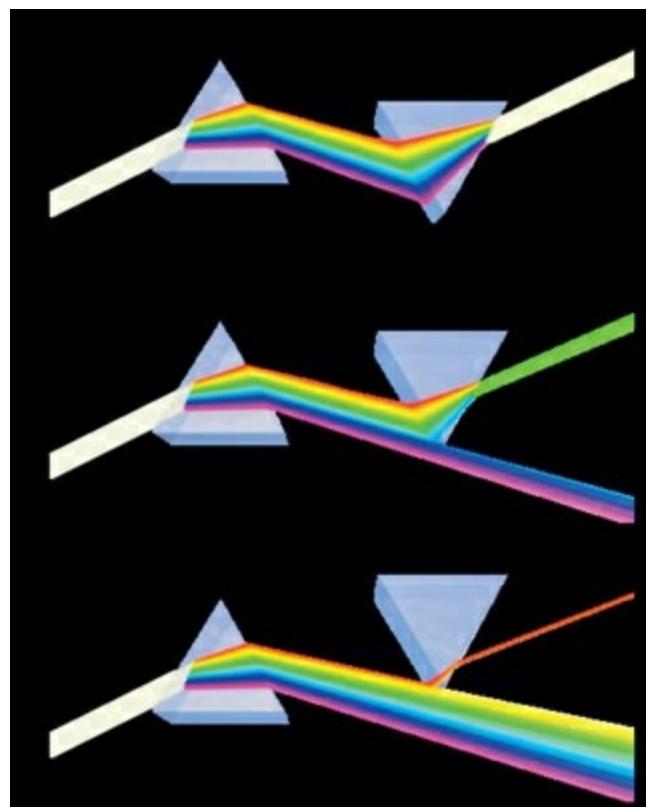


LÁMINA J. Los colores espectrales, que emergen cuando se analiza la luz blanca con un prisma, se pueden recomponer como luz blanca usando un segundo prisma.

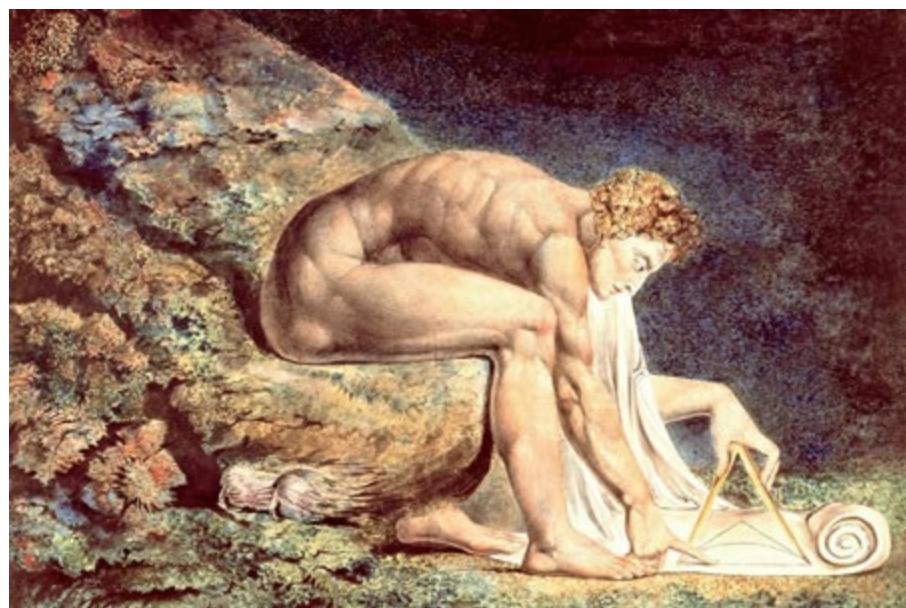


LÁMINA K. Representación por William Blake de Isaac Newton trabajando.

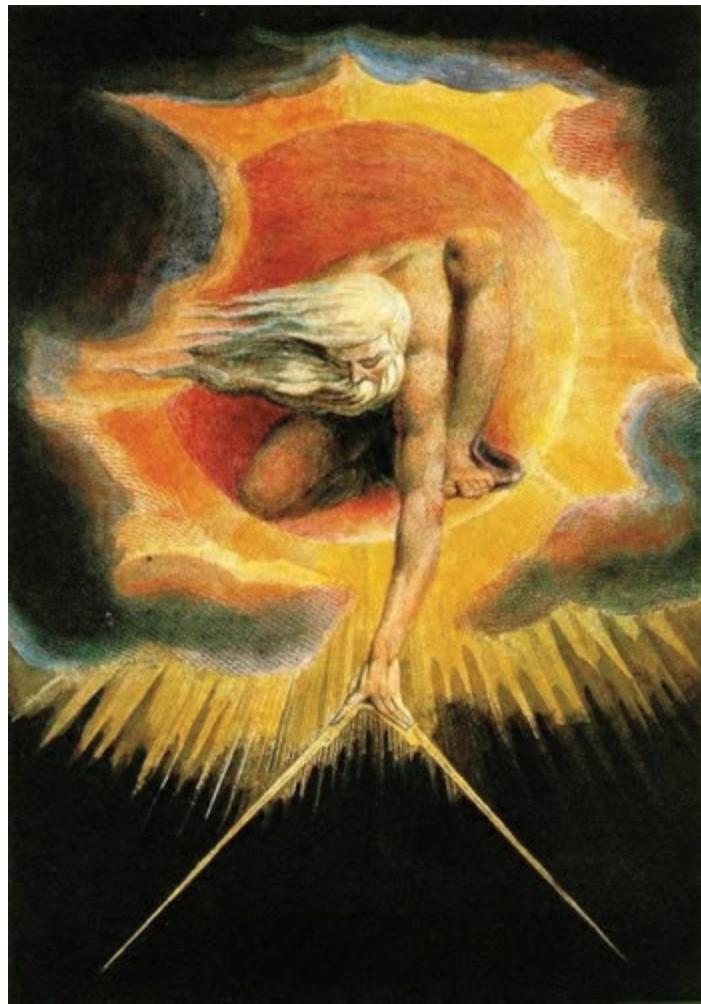


LÁMINA L. Representación por Blake de Urizen, creador y legislador.

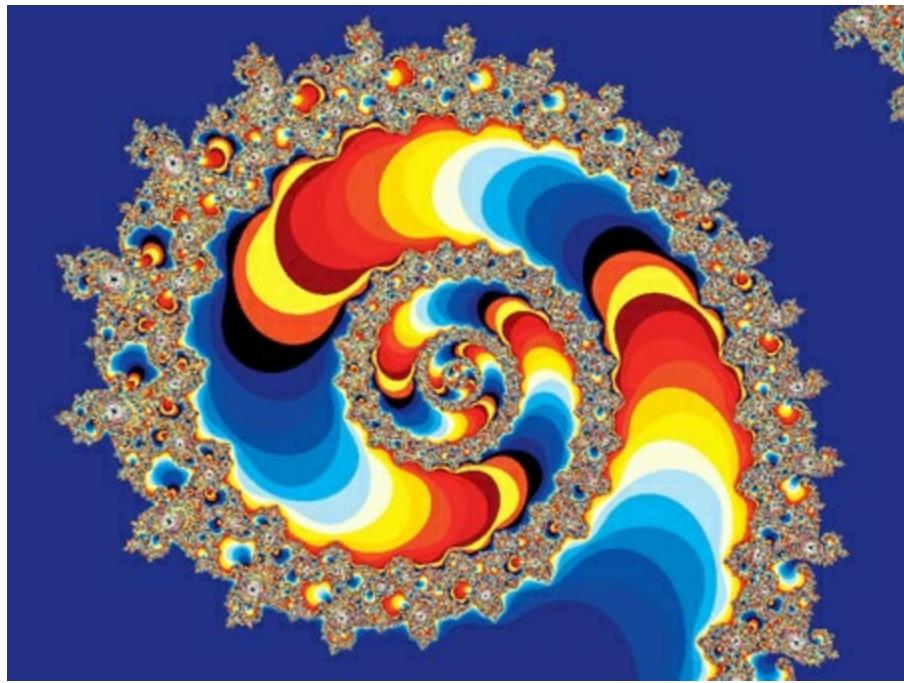


LÁMINA M. Los fractales regulares se construyen según reglas matemáticas simples y estrictas. Un corto programa de ordenador generó esta imagen intrincada.

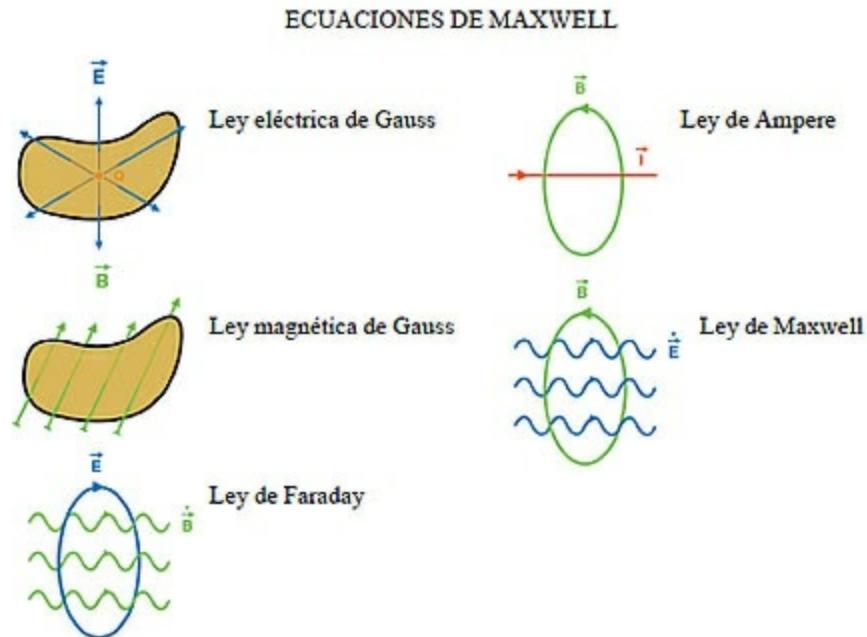


LÁMINA N. Las ecuaciones de Maxwell —la esencia de la electricidad, el magnetismo y la luz—, en imágenes.

LA CONTRADICCIÓN DE MAXWELL

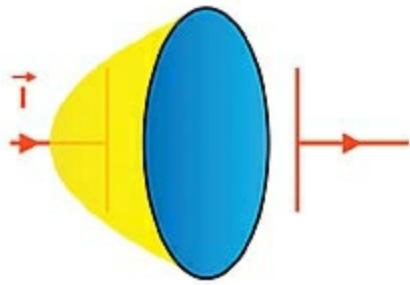


LÁMINA O. La contradicción que Maxwell halló y después arregló. ¿Pasa la corriente por el circuito o no?

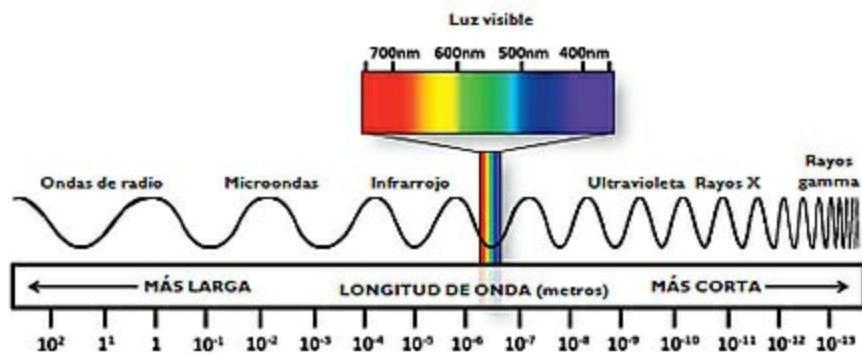


LÁMINA P. Las soluciones de las ecuaciones de Maxwell describen mucho más que la luz visible. En la tecnología moderna, explotamos muchos otros tipos de «luz».

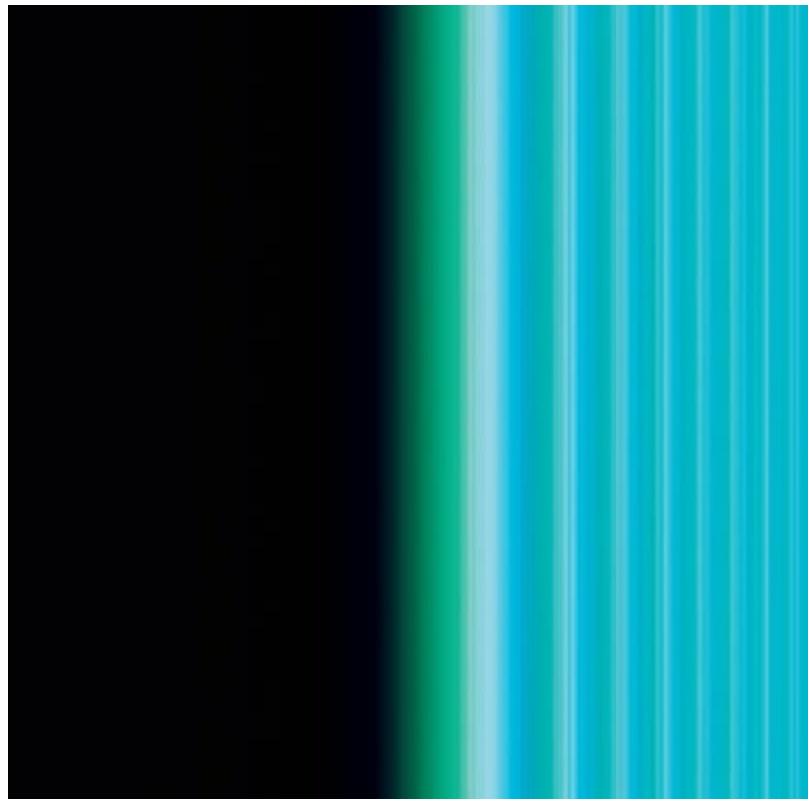


LÁMINA Q. La sombra proyectada por un estrecho filo, como por ejemplo el de una cuchilla de afeitar.

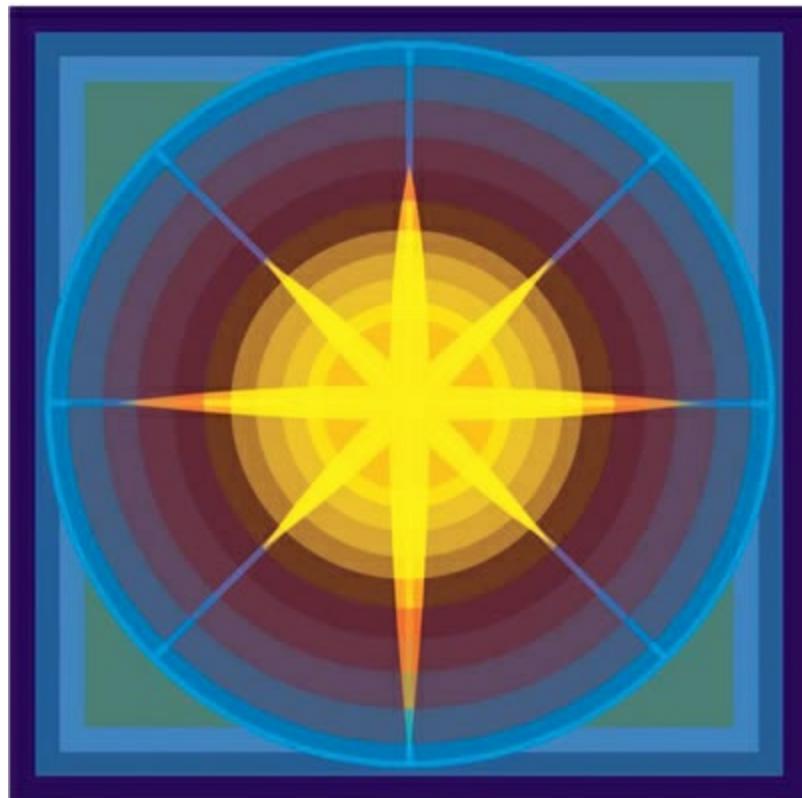


LÁMINA R. *El nacimiento del hijo de Dios*, una pintura digital de R. Gopakumar.



LÁMINA S. Portada del libro onírico multimedia *El casamiento de cielo e infierno*.

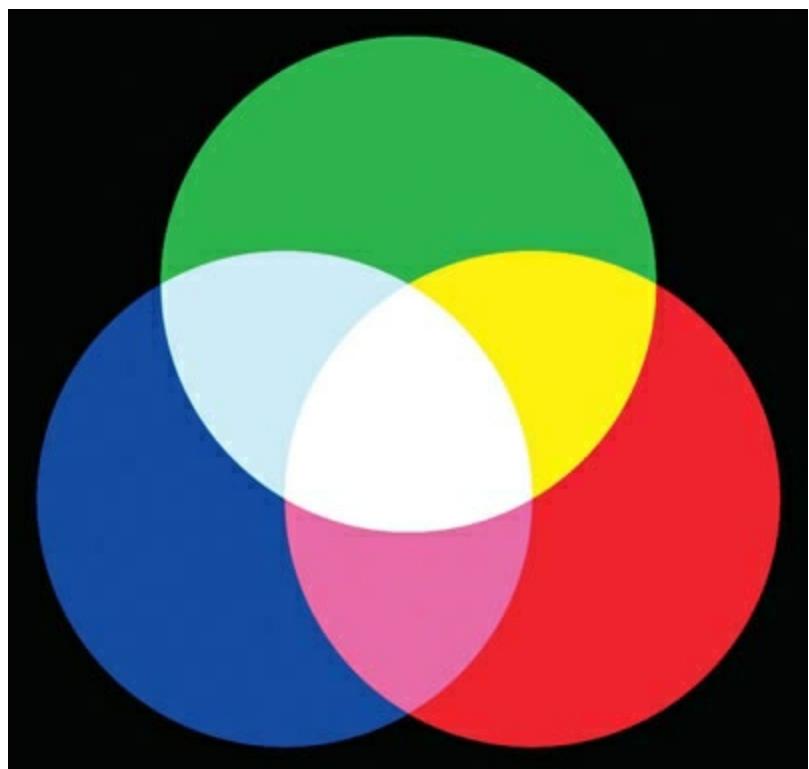


LÁMINA T. Combinando rayos de rojo, verde y azul espectrales, producimos diversos colores perceptuales, incluidos el amarillo y el blanco. El blanco perceptual producido de esta forma es muy diferente del blanco de la luz solar.



LÁMINA U. Cuando se monta este disco en un cartón rígido y se hace girar deprisa sobre su centro, genera una mezcla de rojo y verde en el disco interior, y solo amarillo en el disco exterior, y es fácil comparar un color con otro. Podemos ajustar el brillo total de cada disco incluyendo sectores negros, que no contribuyen ninguna luz reflejada.

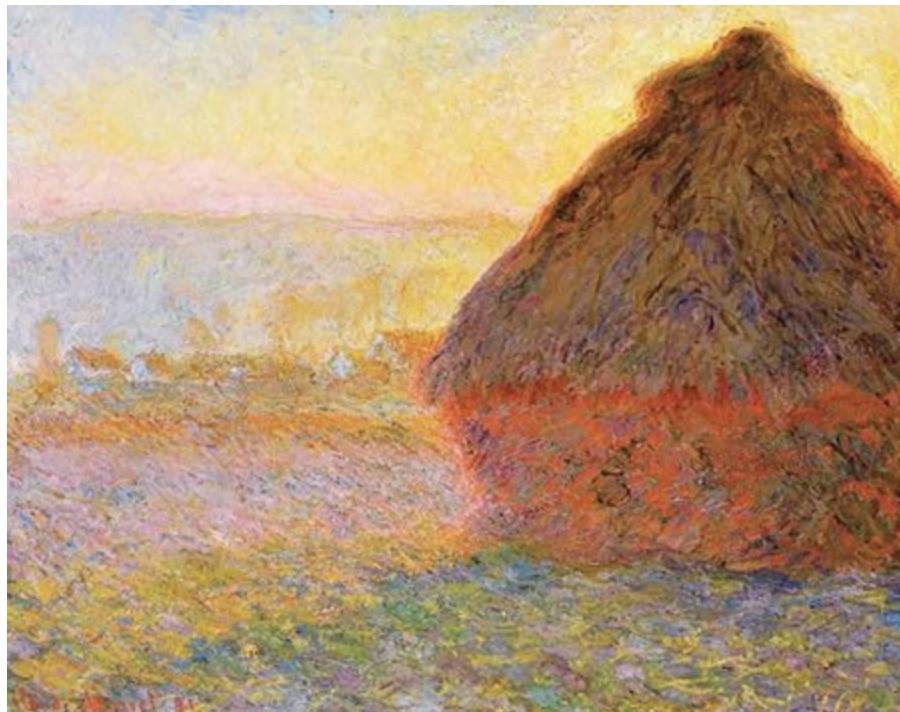


LÁMINA V. Los pintores impresionistas aprovecharon la posibilidad de crear un color perceptual dado a partir de diversas mezclas de otros. Aquí vemos *Almires* (atardecer) de Monet, de su serie de almires.

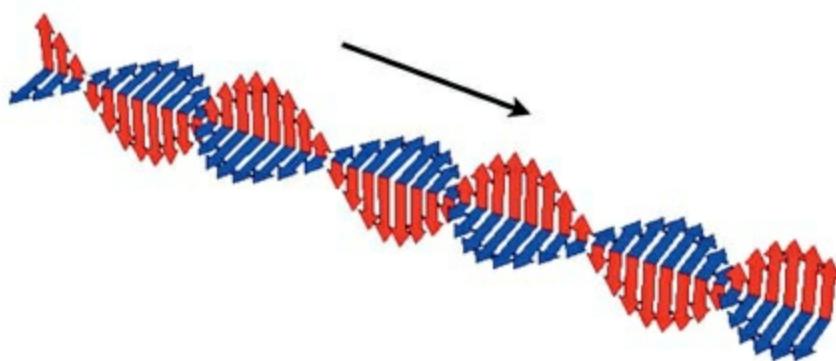


LÁMINA W. Una instantánea de la realidad electromagnética de la luz, según la (correcta) teoría de Maxwell. Los campos eléctricos se muestran como flechas rojas, los campos magnéticos como flechas azules. Al pasar el tiempo, este complejo de perturbaciones se mueve a lo largo de la línea que lo define, hacia el sureste... ¡a la velocidad de la luz!



Lo que tú ves



Lo que Fido ve

LÁMINA X. Con un poco de procesamiento de imagen sobre una imagen normal, para proyectarla de tres a dos dimensiones de color, podemos hacernos una idea aproximada de lo que se pierden los perros, y las personas daltónicas.

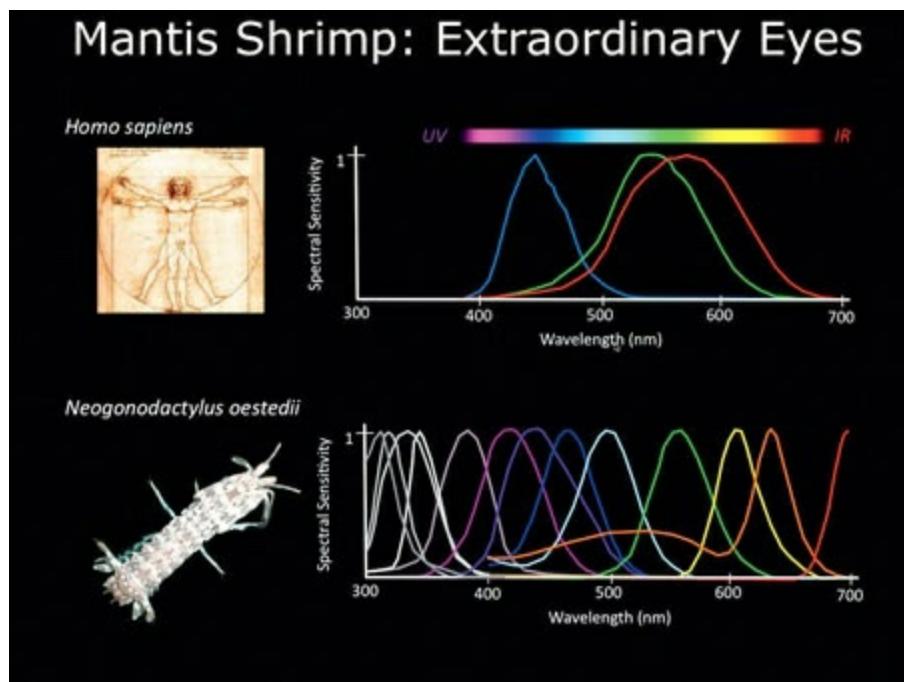


LÁMINA Y. El sistema visual humano se basa en tres receptores de color, mientras que la langosta mantis tiene muchos más. Esta representación de las respectivas curvas de sensibilidad espectral da una idea de los superiores recursos de color de la langosta mantis.



LÁMINA Z. La especie de langosta mantis más avanzada visualmente es también muy colorida, como se ve en esta foto. Por supuesto, la foto solo representa el aspecto de la langosta mantis para *nosotros*.

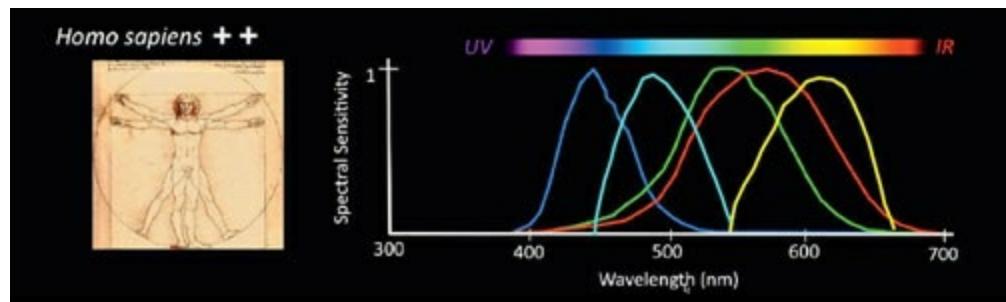


LÁMINA AA. Usando la modulación temporal podemos añadir nuevos canales receptivos, intensificando la percepción visual humana. Podemos, por ejemplo, añadir dos nuevos canales artificiales, haciendo el espacio de color pentadimensional.

R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										

LÁMINA BB. Una matriz periódica de cuatro receptores distintos, pequeños y muy apretados, puede obtener imágenes cuya estructura fina sostiene cuatro dimensiones de color. Una pantalla que se basara en la misma arquitectura, con al menos uno de los elementos explotando la modulación temporal, puede hacer esa información accesible a la visión humana.



LÁMINA CC. Los átomos físicos, cuando se describen matemáticamente, son objetos tridimensionales que pueden producir, para la estimulante mirada de un artista, unas imágenes de belleza excepcional. Aquí tenemos una vista cortada de la nube de electrones en un estado excitado particular del hidrógeno. (Para los expertos: el estado $[n, l, m] = [4, 2, 1]$. Las superficies son superficies de igual probabilidad; los colores representan las fases relativas.

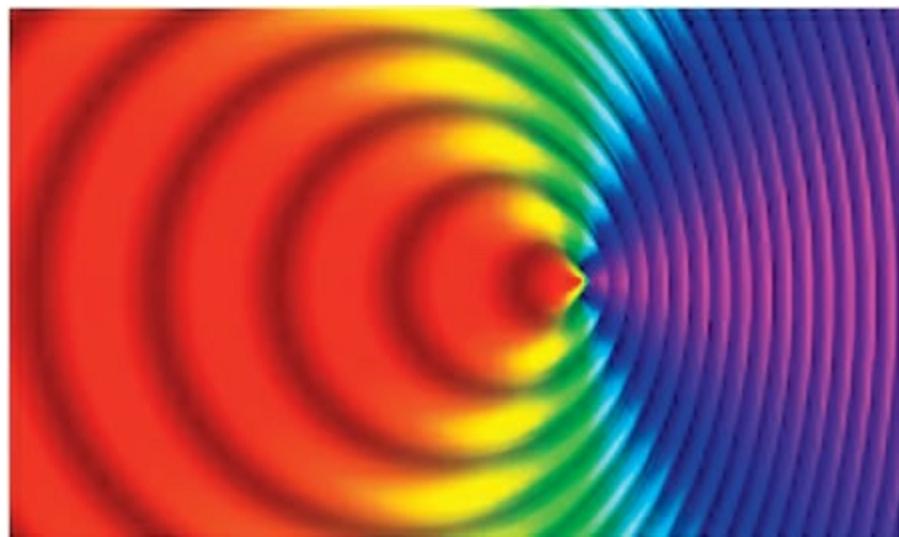


LÁMINA DD. Un rayo de luz parece tener diferentes colores para dos observadores en movimiento relativo. Aquí se representa un rayo de luz emitido por una fuente que se mueve hacia la derecha a $7/10$ de la velocidad de la luz. Si estás a la derecha, de manera que el rayo se mueve hacia ti, el color es azul; si estás a la izquierda, de modo que el rayo se aleja de ti, aparece rojo. La imagen muestra una instantánea del patrón de ondas, con la fuente cerca del centro.



LÁMINA EE. El arte anamórfico no solo soporta los cambios de perspectiva, sino también otros tipos de transformaciones más generales. La gama de imágenes que pueden representar una misma escena es vastamente mayor e incluye algunas apariencias muy distorsionadas.

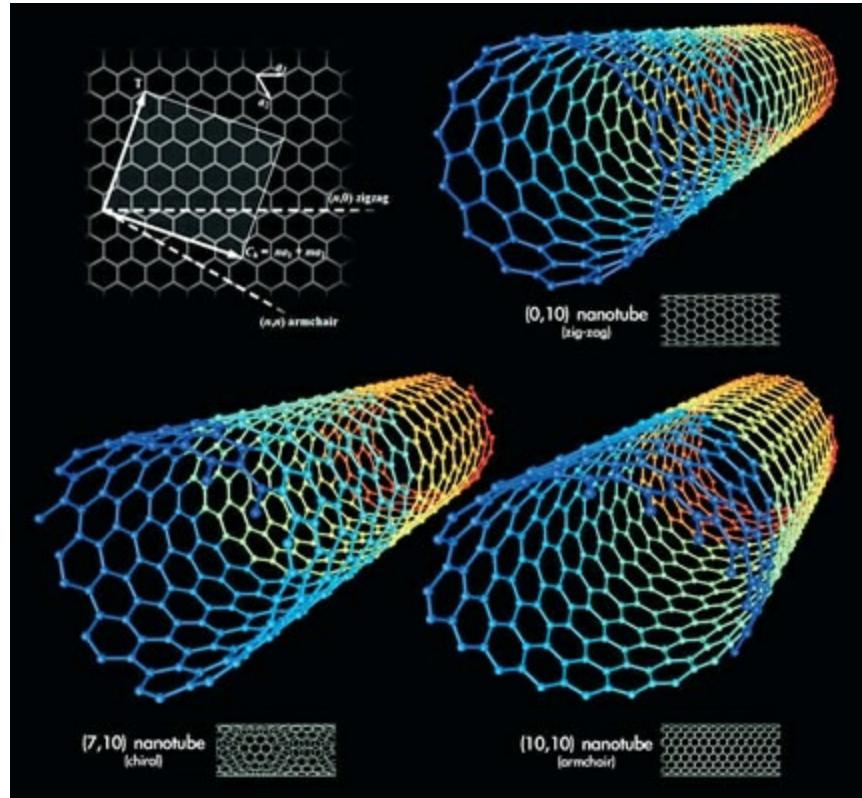


LÁMINA FF. Al enrollar una hoja de grafeno de distintas maneras, obtenemos una variedad de moléculas lineales, o unidimensionales, los nanotubos.



LÁMINA GG. Ilustrando las transformaciones en el espacio de color. Arriba a la izquierda, está la imagen original de un puesto de chuches en Barcelona. Arriba a la derecha, se le ha aplicado una transformación simple y rígida en el espacio de color. En los dos paneles de abajo, se le han aplicado dos transformaciones locales diferentes, una moderada, otra drástica.

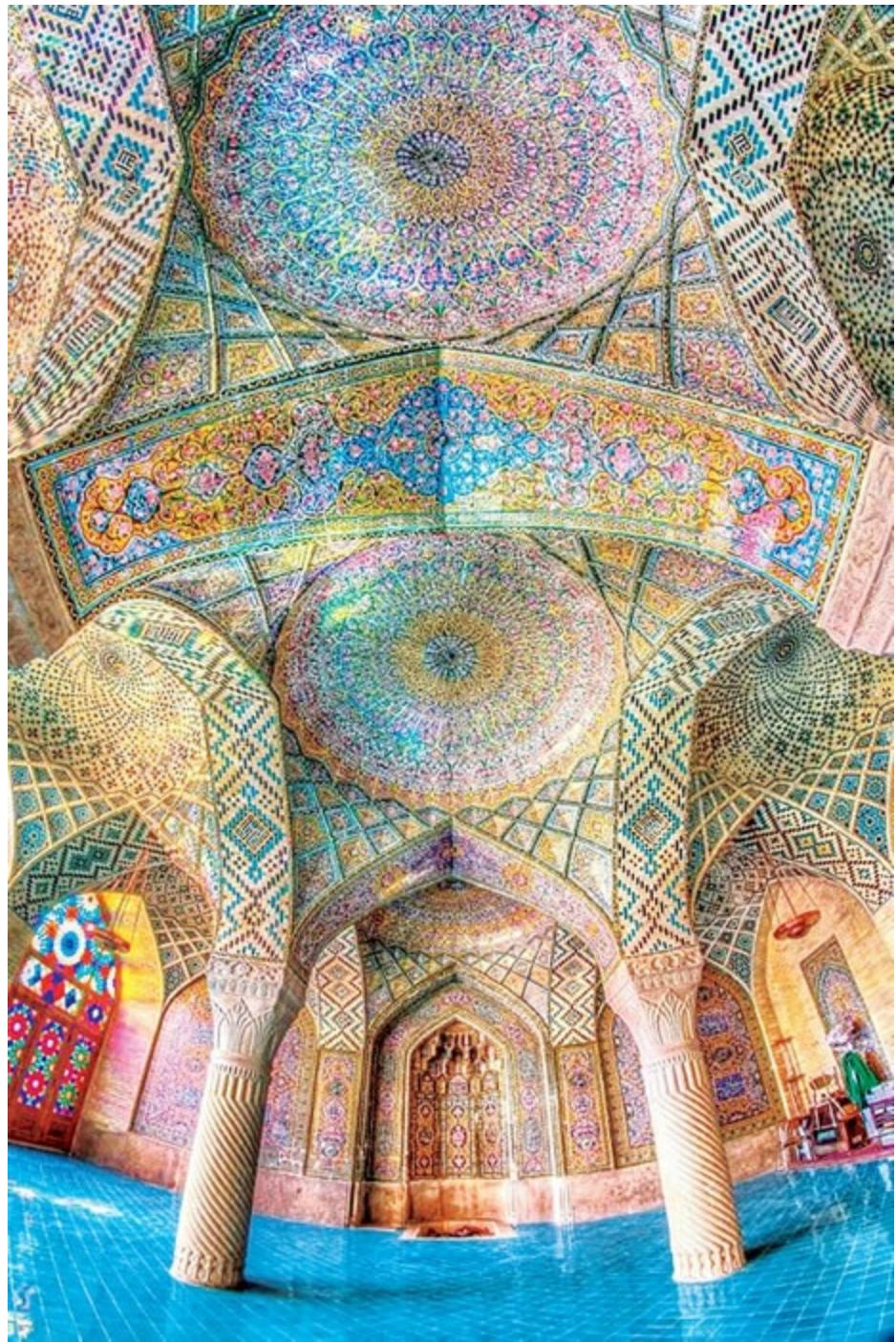
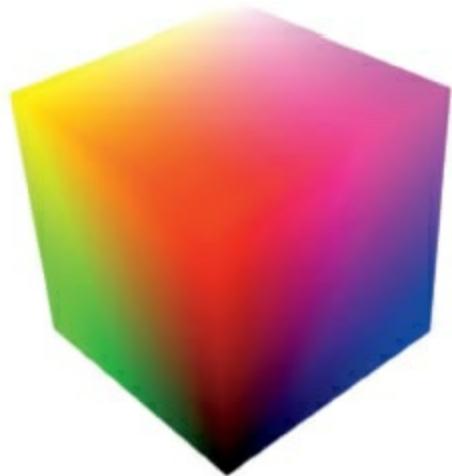


LÁMINA HH. Geometría, color, simetría, anamorfía y anacromía otorgan poder a una belleza espléndida.



LÁMINAS II, JJ. El cubo de color RVA representa las opciones que uno tiene, en cada punto, para colorear un elemento de la imagen (píxel). Mediante la visión en color, accedemos a tres dimensiones extra.



LÁMINA KK. El concepto de espacio de propiedad de color se ilustra aquí restringiendo una imagen a rodajas del color que corresponden a una arista y a una cara del cubo, antes de acceder al cubo entero. Las etiquetas (electromagnética, débil, fuerte) aluden al hecho de que nuestras Teorías Centrales utilizan espacios de propiedad de una, dos y tres dimensiones.

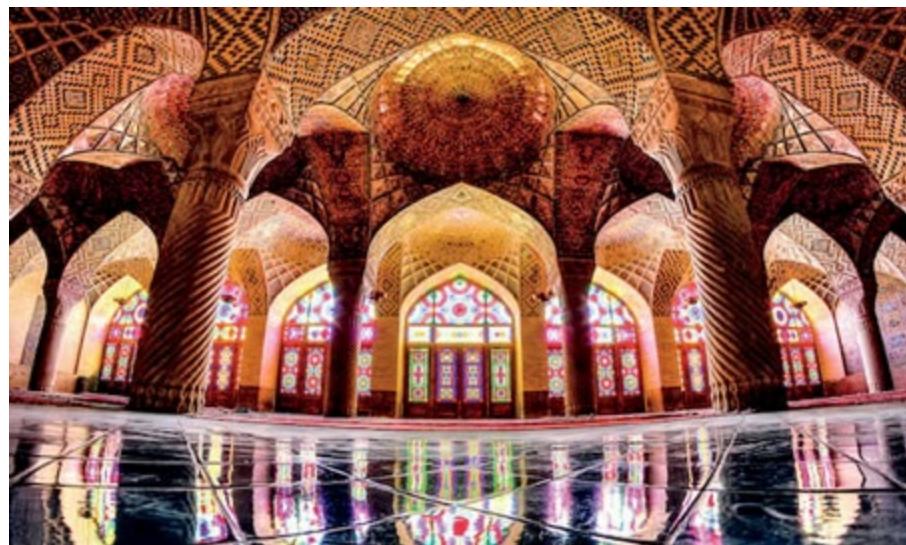


LÁMINA LL. El uso de una lente ojo de pez (gran-angular) añade un segundo nivel de anamorfía a este imponente interior de una mezquita moderna.



LÁMINA MM. Los quarks parecen requerir una fuerza tipo muelle, o goma elástica, que tira más fuerte cuanto más se estira el muelle (o goma elástica).



LÁMINA NN. Un electrón y un antielectrón (positrón), acelerados a alta energía y moviéndose en direcciones opuestas, se han aniquilado, y esta imagen representa las secuelas. Se pueden ver racimos de partículas que se mueven (muy deprisa) en tres direcciones distintas. Estos tres chorros son los avatares de un quark, un antiquark y un gluon de color.

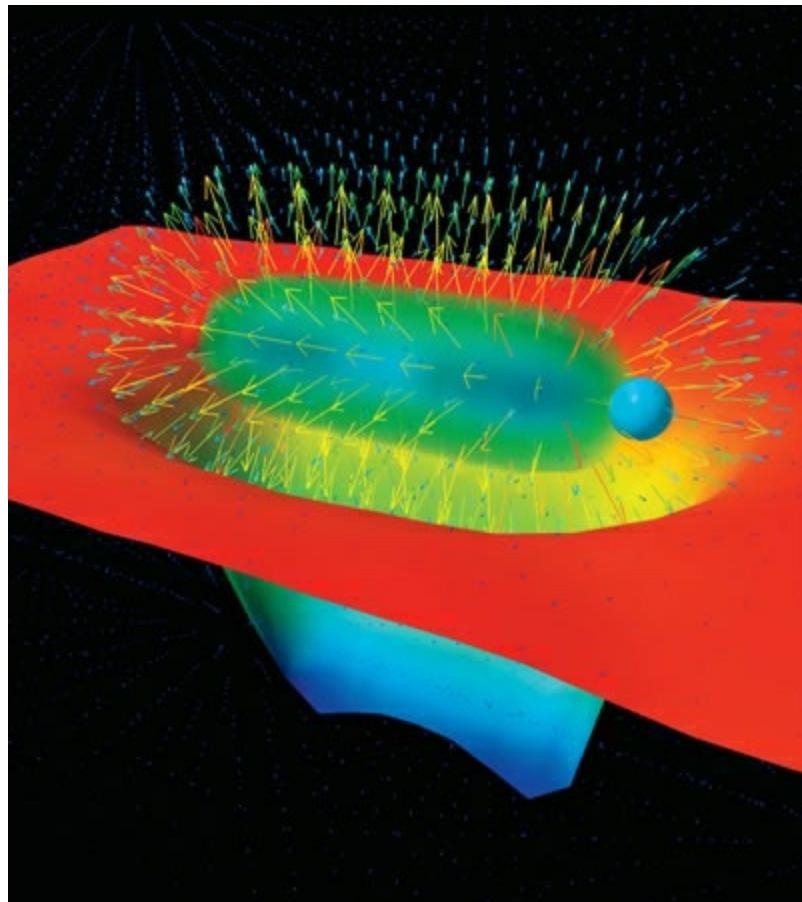


LÁMINA OO. Las «líneas de fuerza», en el sentido de Faraday, que conectan un quark y un antiquark forman un tubo estrecho. Ese tubo representa un flujo de campo eléctrico de color que fluye entre el quark fuente y el antiquark sumidero. Como los gluones que componen los campos eléctricos de color son autopegajosos, se reúnen en haces. Este fenómeno es la clave del confinamiento de los quarks.

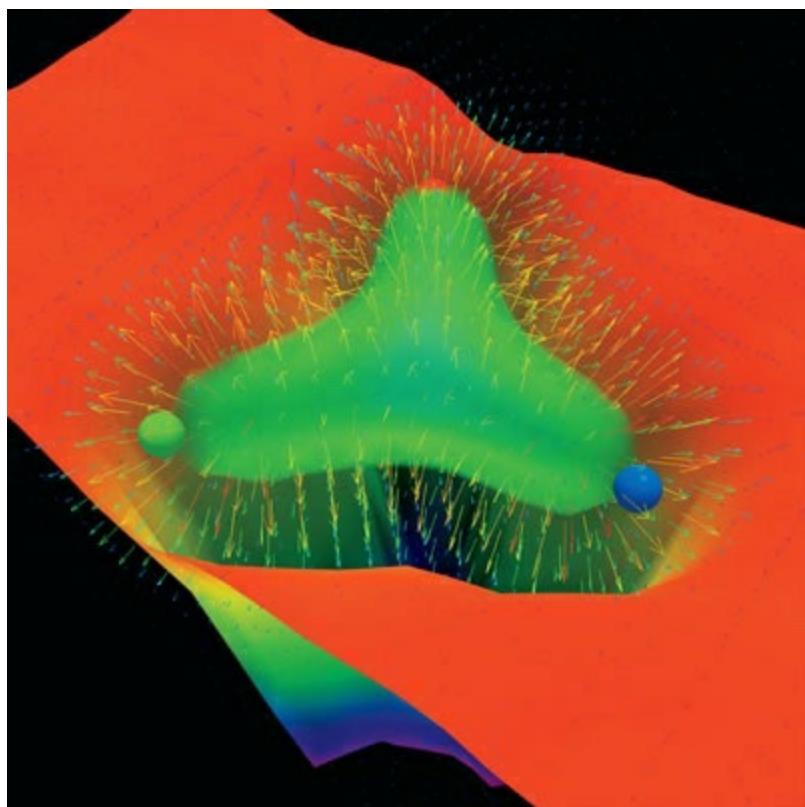
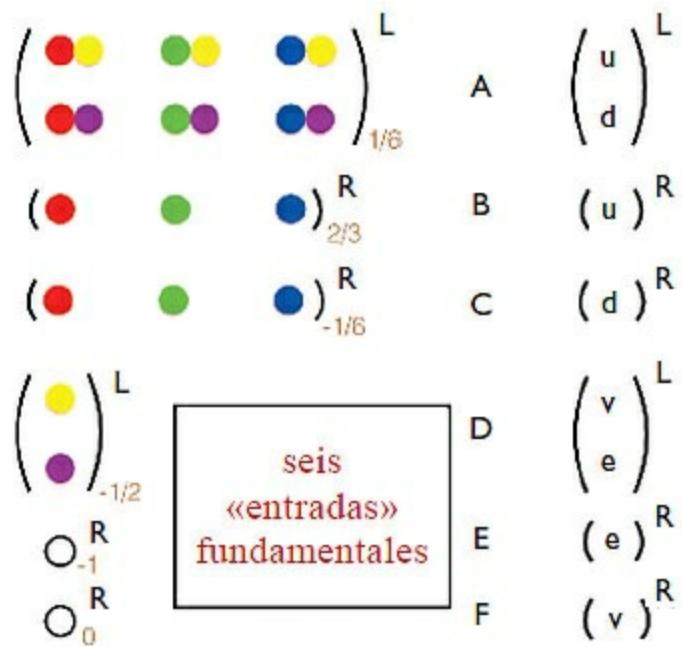


LÁMINA PP. Esta figura es una variante importante de la lámina OO. Aquí la distribución de flujo conecta tres quarks. Esta es la columna vertebral de los bariones, como los protones, que forman nuestra sustancia. Eso Eres Tú: *Tat Tvam Asi*



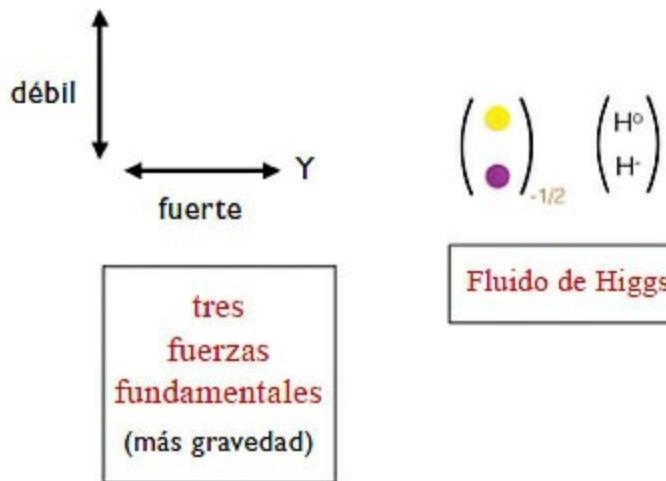
LÁMINA QQ. La posibilidad de que tres tubos de flujo puedan reunirse en una juntura es un rasgo especial de la cromodinámica cuántica de tres colores (QCD). La «regla de blanqueado» se explica en el texto. La distribución de flujo en la lámina MM, tomada del póster que conmemoraba mi premio Nobel, no es del todo correcta (véase la lámina PP). Pero esta, que aparece en mi diploma Nobel, ¡da en el clavo!



LÁMINAS RR, SS. Resumen de la Teoría Central, paso 1.

$(\text{red}, \text{yellow})$	$(\text{green}, \text{yellow})$	$(\text{blue}, \text{yellow})$	$\left(\begin{array}{c} \text{red} \\ \text{green} \\ \text{blue} \end{array} \right)_L$	A	$\left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right)_L$
(red)	(green)	(blue)	$\left(\begin{array}{c} \text{red} \\ \text{green} \\ \text{blue} \end{array} \right)_R^{2/3}$	B	$(u)_R^{2/3}$
(red)	(green)	(blue)	$\left(\begin{array}{c} \text{red} \\ \text{green} \\ \text{blue} \end{array} \right)_R^{-1/6}$	C	$(d)_R^{-1/6}$
$(\text{yellow}, \text{purple})$				D	$\left(\begin{array}{c} v \\ e \end{array} \right)_L$
(yellow)				E	$(e)_R$
(purple)				F	$(v)_R$

seis
«entidades»
fundamentales
(más dos)



LÁMINAS TT, UU. Resumen de la Teoría Central, paso 2.

+	-	-	+	-
-	+	-	+	-
-	-	+	+	-
+	-	-	-	+
-	+	-	-	+
-	-	+	-	+
-	+	+	-	-
+	-	+	-	-
+	+	-	-	-
-	+	+	+	+
+	-	+	+	+
+	+	-	+	+
+	+	+	+	-
+	+	+	-	+
-	-	-	+	+
-	-	-	-	-

1/6	●	○	○	●	●
1/6	○	●	○	●	○
1/6	○	○	●	●	○
1/6	●	○	○	●	●
1/6	○	●	○	●	●
1/6	○	○	●	●	●
-2/3	○	●	●	●	○
-2/3	●	○	●	●	○
-2/3	●	●	○	●	○
1/3	○	●	●	●	●
1/3	●	○	●	●	●
1/3	●	●	○	●	●
-1/2	●	●	●	●	○
-1/2	●	●	●	●	●
1	○	○	○	●	●
0	○	○	○	●	○

$$Y = -\frac{1}{3}(\text{Rojo} + \text{Verde} + \text{Azul}) + \frac{1}{2}(\text{Amarillo} + \text{Púrpura})$$

Una Entidad, Una Fuerza

LÁMINAS VV, WW. Asumiendo una mayor simetría, podemos asentar la apariencia de la Teoría Central, resumida en las láminas RR y SS, de manera muy considerable. Así alcanzamos este ícono soberbio de Real = Ideal, cuya interpretación se explica en el texto.

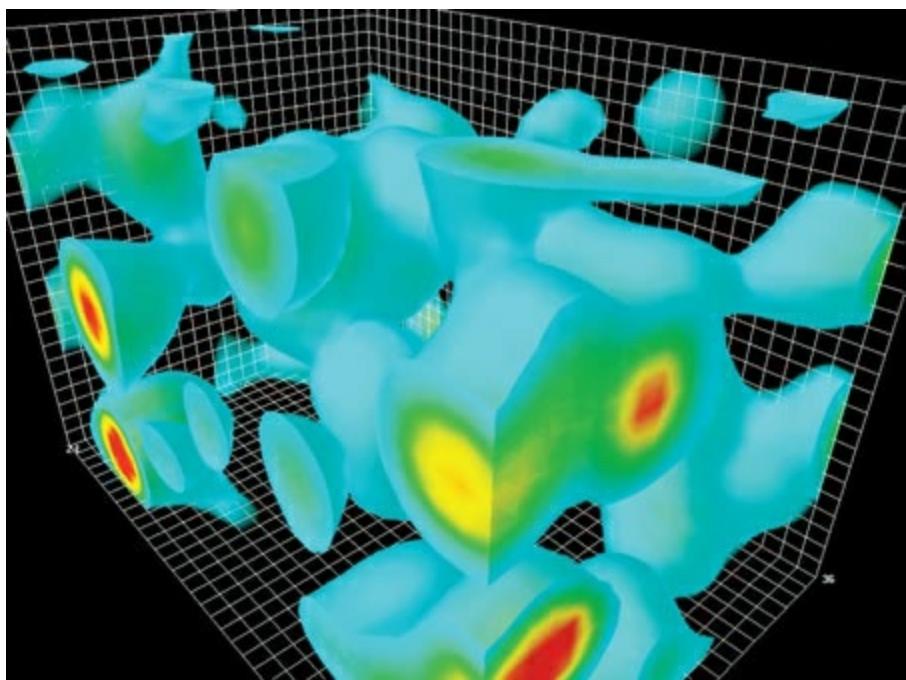


LÁMINA XX. Una imagen magnificada del espacio vacío, vista con una excelente resolución espacial y temporal.

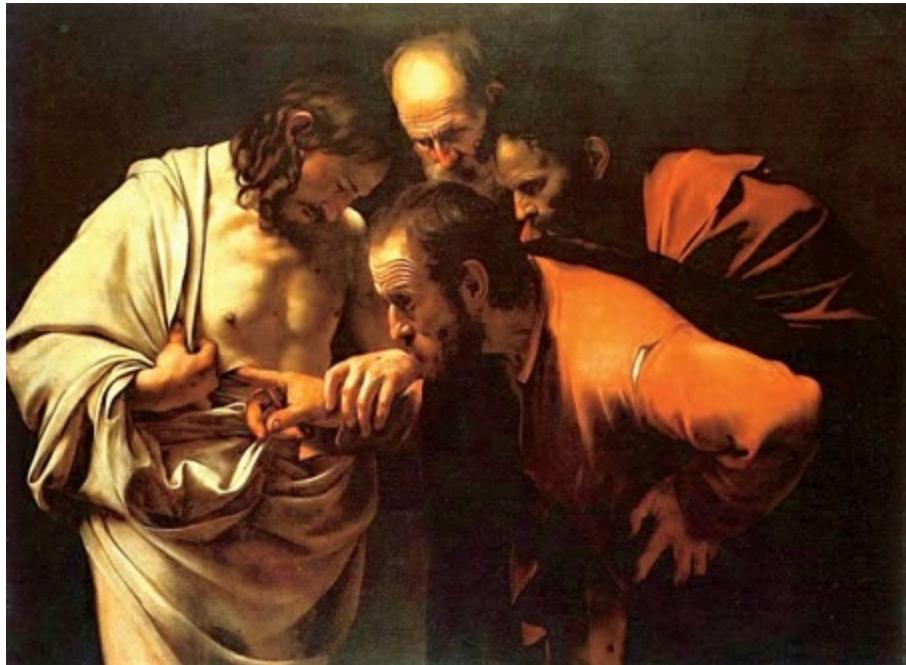


LÁMINA YY. *La incredulidad de Santo Tomás*, de Caravaggio. Tomás es un indagador embelesado, y se le anima al examen.

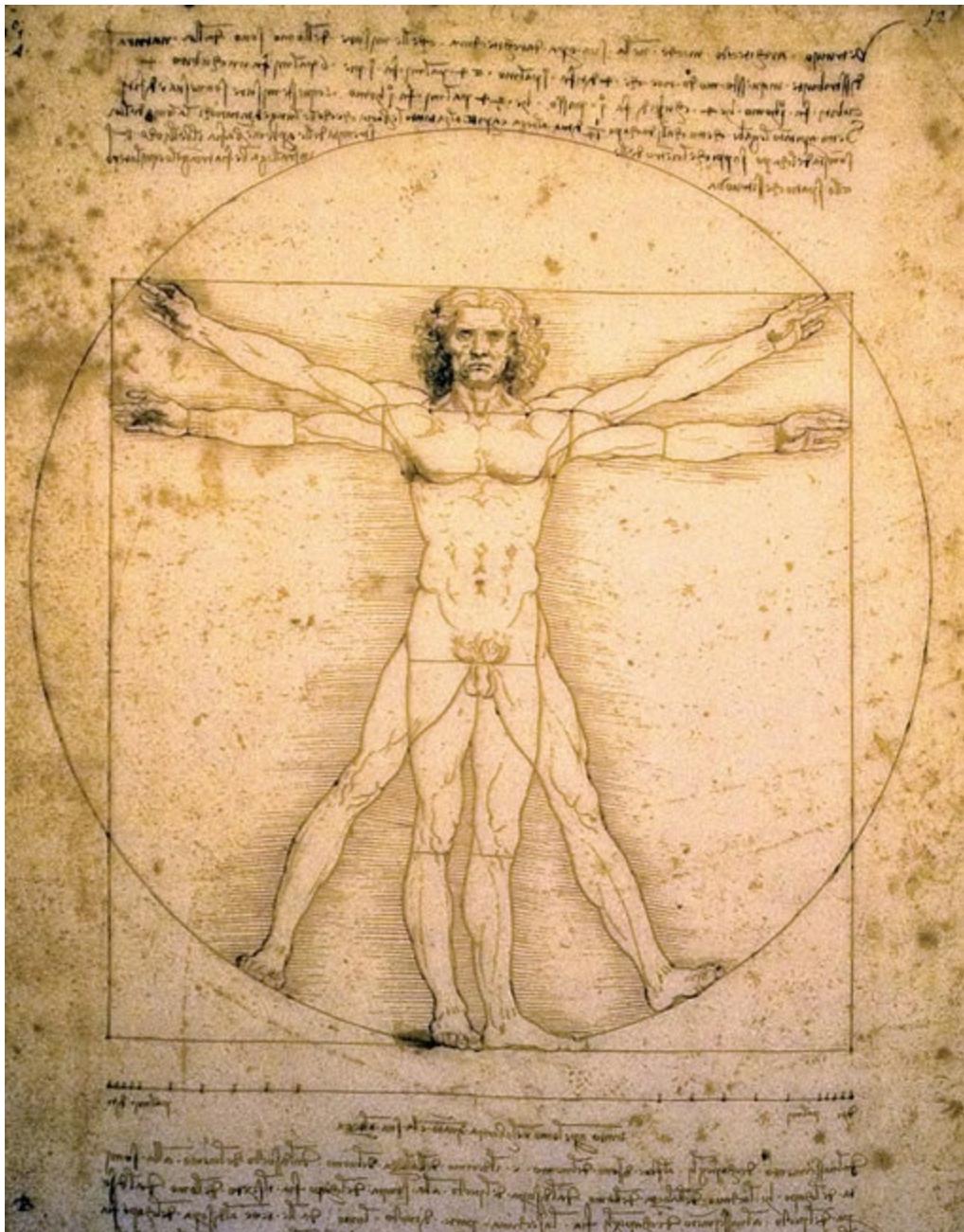


LÁMINA ZZ. El icónico *Hombre de Vitruvio* de Leonardo da Vinci, al igual que el modelo de Kepler del Sistema Solar, se inspiró en hermosas ideas sobre la realidad profunda que han resultado equivocadas (¿o no?).

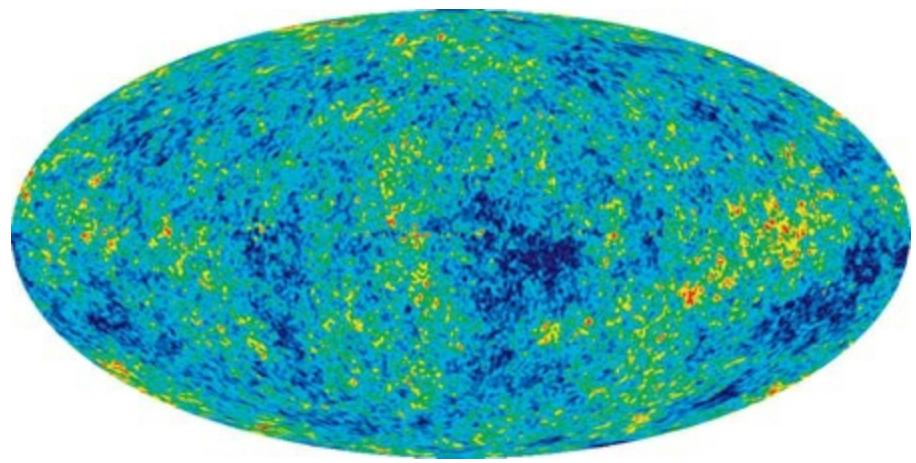


LÁMINA AAA. Una imagen altamente procesada del cielo de microondas, que revela las semillas de la estructura del universo.

Notas

1. ¿Por qué los tonos cuyas frecuencias están en fracciones de números enteros pequeños suenan bien juntos?: Hasta los hechos más básicos sobre la percepción musical plantean cuestiones fascinantes. Dos observaciones más simples me parecen especialmente relevantes para el rompecabezas que nos legó Pitágoras: *¿Por qué* los pares de tonos cuyas frecuencias son fracciones de números enteros pequeños son las que solemos percibir como armoniosos?

ABSTRACCIÓN

Cuando hablamos de una octava basada en el *do* central, por ejemplo, queremos decir que el *do* central y el siguiente *do*, que tiene el doble de frecuencia, están sonando a la vez. Para simplificar el fenómeno de la *fusión* hasta su esencia, supongamos que generamos unos tonos rigurosamente puros por medios electrónicos, y supongamos también que la intensidad de ambos es igual. Esas especificaciones todavía no nos dan una receta única para la forma de la onda total que el ordenador debe producir y que llega a nuestro oído. Porque las dos ondas sinusoidales no tienen por qué estar en sincronía: los picos de una pueden estar alineados o no con los picos de la otra. Decimos que hay una fase relativa entre los dos tonos. Las formas totales de las ondas, representadas en función del tiempo, pueden parecer muy diferentes, dependiendo del valor de esa fase relativa. ¡Pero no suenan distintas! He hecho este experimento, y otros muchos similares, sobre mí mismo. La respuesta de la membrana basilar separa los tonos espacialmente, pero su respuesta retiene la información sobre la fase relativa. (Al menos, esa es mi lectura de una literatura compleja. Los experimentos sobre estas estructuras del oído interno no son nada fáciles, y casi siempre se hacen *in vitro*.) Aun así, de alguna manera agregamos todas esas posibilidades, a un nivel bajo de procesamiento, reconocemos el resultado como una octava de *do*, y punto. Fusionamos las señales que representan una gama continua de propiedades físicas en una sola percepción, para producir una abstracción útil.

El mismo principio se aplica para las octavas basadas en otros tonos, y para otras combinaciones de dos notas, siempre que las frecuencias no sean demasiado cercanas. (Como caso límite, podemos hacer sonar juntos dos tonos con la *misma* frecuencia e intensidad, pero diferentes fases relativas: en vez de una octava, un unísono. Ahora,

cuento variamos la fase relativa, siempre obtenemos un tono combinado a la frecuencia unísona, pero con fase *e intensidad* variables. Los cambios de intensidad se perciben fácilmente.)

El proceso de fusión deliberada, o *abstracción*, tiene mucho sentido como una estrategia de procesamiento de información. En el mundo natural, y en el mundo de los instrumentos musicales simples (incluida la voz humana), las fuentes comunes generan a menudo octavas con unas fases relativas diferentes y esencialmente aleatorias, en diferentes ocasiones. Si esas formas de onda diferentes produjeran distintas sensaciones, nos veríamos lastrados con una información mayormente inútil, y tendríamos más dificultades para aprender, reconocer y apreciar el útil concepto de «octava». La evolución, cabe suponer, se complace en aligerar ese lastre.

De modo similar, la gente que no tiene oído perfecto —casi todo el mudo— fusiona una amplia gama de «octavas» físicamente distintas, basadas en diferentes tonos (pero véase la discusión sobre la *retención*, más abajo). De modo que suprime la información tanto sobre la fase como sobre la frecuencia absoluta, pero retienen la frecuencia relativa.

Dado que puede ser útil suprimir la información irrelevante para construir una abstracción útil, surge la cuestión de cómo conseguirlo. Este es un problema interesante de ingeniería inversa. A mí se me ocurren tres formas simples, y más o menos verosímiles biológicamente, en que podría ocurrir:

- Las células nerviosas (o pequeñas redes de células nerviosas) que responden a la oscilación en distintas zonas de la membrana basilar podrían estar acopladas mecánica, eléctrica o químicamente entre sí de tal forma que sus respuestas se sincronicen en fase. Este es el fenómeno que, en física e ingeniería, se llama *phase locking* (enganche de fase, o seguimiento de fase). Una leve variante de este concepto es que haya un tipo de célula nerviosa que reciba señales oscillatorias desde dos células nerviosas como las anteriores (o directamente desde las células ciliadas oscilantes del oído interno) y responda de forma independiente de su fase relativa.
- Podría haber bancos de varias células nerviosas que responden a las oscilaciones en cualquier punto de la membrana basilar con distintas compensaciones de fase. Después, cuando los dos bancos de *outputs* que corresponden a dos posiciones diferentes se combinan, siempre habría algunos que estuvieran sincronizados. Un nivel subsiguiente de células nerviosas, que reciben *input* de esos bancos, podría responder de manera más fuerte a esos pares sincrónicos.
- Podría haber *representantes estándar* para cada frecuencia: células nerviosas cuyo *output* se fija a un mecanismo temporal global. Después la fase relativa entre las representaciones estándar sería siempre la misma, sea cual sea la fase relativa de la señal entrante.

No he citado aquí la posibilidad simple pero drástica de, simplemente, codificar las posiciones en que la membrana basilar vibra con fuerza, sin resolver la estructura temporal de los picos y valles en absoluto. (Esto es análogo a lo que ocurre con las vibraciones electromagnéticas en la visión.) Esa codificación pierde la información de fase, ciertamente, pero me parece que va demasiado lejos. Nos deja perdidos para explicar el descubrimiento de Pitágoras, puesto que las fracciones de frecuencias ya no corresponderían a las regularidades de la señal codificada.

RETENCIÓN

Benjamin Franklin estaba muy interesado en la música. Perfeccionó la armónica de cristal, un instrumento etéreo para el que Mozart escribió una pieza preciosa (K. 356, disponible gratuitamente en varios sitios de Internet). En una carta a lord Kames (1765), Franklin hizo unos comentarios penetrantes sobre la música, incluido uno muy profundo:

Se acepta comúnmente, en verdad, que solo una sucesión agradable de sonidos se llama melodía, y solo la coexistencia de sonidos concordantes, armonía. Pero, puesto que la memoria es capaz de retener por algún tiempo una idea perfecta de las notas en una secuencia, y juzgar verdaderamente su concordancia o discordancia, puede surgir, y surge de ahí un sentido de la armonía entre los sonidos pasados y presentes, tan placentera como la de dos sonidos presentes.

El hecho de que podamos comparar las frecuencias de los tonos tocados a tiempos ligeramente distintos es una fuerte indicación de que hay redes neuronales que reproducen y retienen brevemente los patrones oscilatorios que han recibido. Esta posibilidad encaja bien, creo yo, con nuestra propuesta de la representación estándar, porque esas redes podrían encarnar las representaciones estándar. Hay que mencionar aquí que la percepción de las alturas relativas de las notas corresponde a la simple *comparación* de las representaciones estándar, que es una tarea distinta del *reconocimiento* de la nota absoluta.

También es digno de mención, en este círculo de ideas, que seamos capaces de mantener un tempo más o menos fijo durante largos lapsos de tiempo. Esto indica, de nuevo, la existencia de redes oscilatorias sintonizables en nuestro sistema nervioso, pero esta vez para unas frecuencias significativamente más lentas.

Yo no tengo oído perfecto, y eso me irrita. He intentado circunvalar mi abstracción auditiva de la altura relativa indiciéndome una especie de sinestesia artificial. Escribí un programa que tocaba, al azar, tonos específicos asociados a colores específicos. Después me sometí a prueba con un *input* o el otro, intentando predecir con qué

casaba. Tras muchas sesiones tediosas, conseguí alguna mejora modesta por encima de la adivinación al azar. Puede haber formas más eficaces de hacer esto, o puede que sea más fácil para la gente joven.

Determinar si estas ideas concretas sobre la armonía van por el buen camino requeriría un duro trabajo experimental. Pero sería maravilloso, después de dos milenios y medio, llegar por fin al fondo del gran descubrimiento de Pitágoras, y rendir honores de esta forma al mandamiento del oráculo de Delfos: «Conócete a ti mismo».

2. Parece natural preguntarse si podemos trascender la restricción que hemos descubierto (o que descubrió Euclides, más bien) que limita el número de sólidos platónicos a cinco, examinando las superficies platónicas de una manera más general. Recuerda que hemos acordado que no se pueden usar más de seis triángulos en un vértice, porque sus ángulos sumarían más de 360 grados, que es lo más que el espacio puede acomodar en un vértice. Con seis, obtenemos el plano como una superficie platónica.

Con tres, cuatro o cinco triángulos, obtenemos, proyectando desde el centro de nuestra superficie platónica sobre una esfera circunscrita, disecciones regulares de la esfera. Esto es posible porque los triángulos esféricos equiláteros presentan ángulos mayores de 60 grados, de modo que podemos rodear un vértice con menos de seis de ellos. Esta es otra forma de pensar sobre ambas clases de cuerpos platónicos: como disecciones regulares de planos, o de esferas.

Entonces nos vemos forzados a preguntarnos, más en concreto: ¿podemos imaginar un tipo distinto de superficie, donde los ángulos se hagan más pequeños? Así pues, podemos imaginar superficies platónicas con más de seis triángulos que se intersequen en un vértice.

Y sí que podemos, de hecho. Lo que necesitamos es una superficie que resulte de curvar el plano hacia fuera, en vez de curvarlo hacia dentro para hacer una esfera. La forma de una silla de montar puede valer. En una silla de montar, podemos imaginar disecciones uniformes basadas en vértices con siete triángulos, o incluso más (de hecho, un número arbitrario). Para ser más exactos, la figura matemática conocida como trocoide nos da la forma exacta de silla de montar que necesitamos para mantener todo simétrico, de modo que cada vértice y cada triángulo (u otra figura) parezca lo mismo.

Los geómetras antiguos sabían más de lo suficiente de geometría para llevar a cabo todas las construcciones necesarias. El desarrollo de esta línea de pensamiento podía haber conducido, alrededor del año 0 de nuestra era, a los conceptos decimonónicos de la geometría no euclídea, y al tipo de diseños gráficos que M. C. Escher popularizó en el siglo xx. Por desgracia, eso no ocurrió.

3. Hay polémica sobre si las piedras ashmoleanas, y otras emparentadas, son sólidos platónicos convincentes. Véase math.ucr.edu/home/baez/icosahedron

4. Hermann Weyl es uno de mis héroes. Crecí con sus libros, e incluso ahora vuelvo a ellos con frecuencia. Nunca le conocí en persona, porque yo era un niño muy pequeño cuando él murió. Pero el hermoso pasaje citado en el texto nos ha dado la oportunidad de colaborar, una oportunidad que aprovecho aquí. Siempre me ha parecido poético, así se me ocurrió: ¿por qué no dar el siguiente paso y convertirlo en un poema?

Aquí está ese poema. La primera línea es también el título.

El mundo simplemente es.

En mi conciencia
atadas a mi cerebro y a mi cuerpo
imágenes efímeras toman vida:
del mundo, solo muestras.
El mundo simplemente *es*.
No *ocurre*.

5. El sitio web maxwells-equations.com es una introducción abarcadora, de nivel elemental, a las ecuaciones de Maxwell, incluyendo un tutorial en vídeo. La entrada de la Wikipedia en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations es muy buena. Al consultar ese artículo, mi consejo es que empieces por la sección «Conceptual descriptions», que sigue en gran medida las mismas líneas que nuestro texto principal, y luego sigas con el resto. Hay también una peliculita maravillosamente clara sobre el patrón de campo de una onda electromagnética que se mueve por el espacio, que recomiendo fervientemente: en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations#mediaviewer/File:Electromagneticwave3D.gif

6. No es inverosímil, sin embargo, que el tetracromatismo sea común entre las madres e hijas de los hombres daltónicos. Si los hombres daltónicos llevan un receptor defectivo, de modo que sus receptores verdes y rojos sean muy similares —pero no idénticos, que se aloja en su cromosoma X, sus hijas lo recibirán también—. Junto a los receptores normales de sus madres, las hijas tendrán cuatro receptores distintos (aunque dos serán similares). Si esto es correcto, el tetracromatismo no será tremadamente raro, sino que sus consecuencias serán sutiles. Por razones similares, cabría esperar que las madres de los hombres daltónicos fueran tetracrómicas.

[7.](#) La naturaleza general de los argumentos antrópicos se trata de forma explícita en «Términos del arte». Tienen su propia entrada, y también aparecen de manera prominente en la entrada de la materia oscura y la energía oscura. He decidido no interrumpir el texto principal con ello.

8. La literatura contiene varias opciones distintas para los nombres de las tres cargas de color fuertes. Como cualquier otra elección, la que hago aquí (RVA) es básicamente arbitraria, pero enlaza a la perfección con nuestra discusión anterior de los colores espectrales y su mezcla, como verás.

He dejado un poco imprecisa la descripción de los espacios de propiedad de color, porque la descripción precisa es un poco más complicada, e implica números complejos. Así, el espacio de color fuerte es un espacio de propiedad con tres dimensiones complejas, y de modo similar para los espacios de propiedad de color débil y electromagnética. En cada caso, las transformaciones de simetría no cambian la distancia total desde el origen, de modo que los espacios de propiedad de lo que hemos llamado entidades (partículas relacionadas entre sí por transformaciones de simetría) son esferas de diversas dimensiones. En el caso de las interacciones fuertes, empezamos con tres dimensiones complejas, y por tanto el espacio de propiedad de una entidad de quark es una esfera con cinco dimensiones reales. Para la carga electromagnética, tenemos una dimensión compleja, dos dimensiones reales y, finalmente, una esfera de una dimensión, conocida también como un círculo. El radio de ese círculo es la magnitud de la carga eléctrica.

9. En 1919, Hermann Weyl, en su artículo «Eine neue Erweiterung der Relativitätstheorie» («Una nueva extensión de la teoría de la relatividad»), propuso una teoría brillante para explicar el origen del electromagnetismo. Aunque esa teoría, en su forma original, es incorrecta, introdujo unas ideas que han demostrado ser extremadamente fructíferas. De hecho, fue el primer intento de ir más allá de Einstein, y de apelar a la *simetría local* como un principio creativo fundamental para las interacciones no gravitatorias. Como hemos visto, esa estrategia —materializada con diferentes tácticas— conduce a nuestra Teoría Central.

El término «simetría gauge» es un vestigio de la teoría original de Weyl.

Como hemos expuesto, la idea esencial de la simetría local es el requisito de que muchas imágenes diferentes del mundo representen el mismo contenido físico. Si queremos que una amplia variedad de estructuras «distorsionadas» del espacio, el tiempo y la sustancia sean válidas —es decir, si queremos que el comportamiento que describe cada una de ellas sea físicamente posible—, debemos introducir un medio que permita o, podríamos decir, «cree» las distorsiones. (Véase la Lámina EE y la Figura 33 para un equivalente visual de esta idea.) La clase de medio que necesitamos está estrechamente conectada con la clase de distorsiones que elijamos llevar a la práctica.

En su teoría original, Weyl postuló una *simetría de escala local*. Es decir, postuló que se podía cambiar el tamaño de los objetos de manera independiente en cada punto del espacio... ¡y sin embargo obtener el mismo comportamiento! Para hacer viable esa idea escandalosa, tuvo que introducir un campo de conexión que hiciera de *calibre* (*gauge*). El campo de conexión de gauge (o de calibre) nos dice cuánto debemos ajustar nuestra escala de longitud, o *re-calibrar* nuestras reglas de medir, cuando nos movemos de un punto a otro. Weyl hizo el descubrimiento extraordinario de que este campo de conexión de gauge, para hacer su tarea de materializar la simetría de escala local, ¡debe satisfacer las ecuaciones de Maxwell! Deslumbrado por este aparente milagro, Weyl propuso identificar su campo de conexión matemático *ideal* con el campo electromagnético.

Por desgracia, aunque el campo de conexión de Weyl es un ingrediente necesario de la simetría de escala local, no es suficiente para asegurar esa simetría. Otras propiedades de la materia, como las dimensiones de un protón, nos dan unas escalas objetivas de longitud que no cambian cuando nos movemos de un punto a otro.

Ni Einstein ni otros dejaron de percibir las deficiencias de la teoría de Weyl. Pese a su brillo visionario, la teoría parecía destinada al olvido.

La situación cambió, sin embargo, con la emergencia de la teoría cuántica. En ese contexto, la carga eléctrica se asocia a un espacio de propiedad unidimensional, que vive encima del espacio-tiempo, como hemos tratado en el texto principal.

En 1929, Weyl aprovechó esa apertura, reviviendo su teoría de «gauge» en una forma modificada. En la nueva teoría, las transformaciones de la simetría local no son cambios dependientes del espacio-tiempo en la escala de longitud, sino rotaciones del espacio de propiedad eléctrica. Tras esa modificación, ¡conseguimos una teoría satisfactoria del electromagnetismo!

Décadas después se percibió que aplicar una simetría local (dependiente del espacio-tiempo) bajo rotaciones en otros espacios de propiedad mayores nos da también teorías satisfactorias de las interacciones fuerte y débil. En honor a la visión pionera de Weyl, los físicos llaman a todas las teorías de este tipo teorías de *gauge*.

10. Los neutrones aislados son inestables, pero, uniéndose con otros neutrones y con protones, los neutrones se vuelven estables dentro de los núcleos atómicos.

11. Como asunto histórico, su propuesta original no era tan específica, pero el trabajo posterior la refinó.

[12.](#) Para los expertos: la forma corriente x corriente de la interacción total, y la fuerza universal del acoplamiento, son características de los acoplamientos de las teorías gauge.

[13.](#) Estas propuestas de Bohr y de Landau se hicieron después del teorema de Noether. Tanto Bohr como Landau previeron unos cambios radicales de los fundamentos de la física que harían inaplicable el teorema de Noether. Pero tanto la teoría cuántica en general (no disponible para Bohr) como las Teorías Centrales (no disponibles para Landau) se construyen sobre los mismos principios que utilizó Noether para demostrar su teorema: a saber, los principios de la mecánica hamiltoniana. Como se menciona en el texto principal, sería muy deseable disponer de unos fundamentos más conceptuales y menos técnicos.

[14.](#) La unificación de las fuerzas y la unificación de fuerza y sustancia son unos programas teóricos que ya están muy avanzados. Como hemos visto, han alcanzado un poder explicativo significativo, y proponen unos efectos esencialmente nuevos que son accesibles mediante experimentos concretos y factibles: unas propuestas que se está sometiendo a prueba ahora mismo. Hay otras dos unificaciones en la física fundamental que yo creo que serían sumamente deseables, pero donde las ideas existentes están menos maduras.

Una es la unificación de nuestra descripción de la materia y de la información. La primera se basa, a muy grandes e imprecisos rasgos, en las ecuaciones que describen los flujos de energía y carga. Esas ecuaciones se obtienen, formalmente, manipulando una cantidad llamada acción. La acción tiene algunas conexiones interesantes con la entropía, y la entropía tiene unas conexiones estrechas con la información, de modo que la posibilidad de una teoría unificada es tentadora. Una teoría así podría muy bien aportar un entendimiento más conceptual del teorema de Noether, y reforzar sus fundamentos. La otra es la unificación de la dinámica con las condiciones iniciales, mencionadas varias veces en nuestra exposición principal.

En las fronteras de la física, pero importante en cualquier discusión sobre la unificación final, está lo que Francis Crick llamó la «hipótesis asombrosa»: que la conciencia, conocida también como Mente, es una propiedad emergente de la Materia. A medida que progresa la neurociencia molecular, sin encontrar líneas divisorias, y que los ordenadores reproducen cada vez más comportamientos que llamamos inteligencia en los humanos, esa hipótesis parece inevitable. Pero la clave concreta de su funcionamiento sigue resultando oscura, por decir lo menos.

[15.](#) Walt Whitman, en los famosos versos de *Hojas de hierba* que hemos recordado, anticipó la complementariedad. En el espíritu de esa sección de conclusiones, me gustaría seguir citándolos en esa dirección:

El mundo es grande: contiene multitudes.
Miro con ojos que lo abarcan todo
y te digo lo que veo.
¿Me contradigo?
Muy bien, me contradigo.
Si aún no estás deslumbrado:
mira de otra forma y maravíllate.

16. Matemáticamente, los movimientos periódicos más simples son aquellos en que una partícula se mueve a velocidad constante alrededor de un círculo. Si miramos a la altura de una partícula que se mueve de esa forma, obtenemos el movimiento periódico más simple que se puede tener en una línea. Se llama oscilación sinusoidal. En www.youtube.com/watch?v=mitioODQYgI puedes ver una presentación artística de una onda sinusoidal, con música de Bach.

En <http://www.mathopenref.com/trgsinewaves.html> puedes encontrar una presentación más directa que también contiene una animación de una importante manifestación física de este tipo de movimiento, que se muestra en las vibraciones de un muelle con un peso alrededor del equilibrio. Si despliegas este movimiento en el tiempo —es decir, si representas gráficamente la altura en función del tiempo—, obtienes la función *seno*. Las ondas sinusoidales aparecen en la descripción de las ondas sonoras asociadas con un tono puro y de las ondas luminosas asociadas a un color espectral puro. En un tono puro, la variación de la densidad y de la presión en el espacio (respecto al promedio) tiene la forma de una onda sinusoidal, como también la variación, en un punto fijo del espacio, de esas cantidades con el tiempo. De modo similar, en la luz de un color espectral puro, los campos eléctrico y magnético varían de forma sinusoidal.

Así, cuando nuestro oído resuelve un acorde entrante en sus tonos constituyentes, o cuando un prisma dispersa un rayo de luz entrante en los colores espectrales, están realizando una especie de análisis que es muy diferente, matemáticamente, del que se basa en el estudio cuidadoso del comportamiento en pequeños intervalos de tiempo y en construir después a partir de ello. En general, el análisis matemático de funciones como funciones sinusoidales de distintas longitudes de onda o frecuencias se llama análisis de Fourier, por el físico matemático francés Joseph Fourier (1768-1830). El análisis de Fourier, y su correspondiente síntesis, es una herramienta poderosa complementaria al análisis infinitesimal del cálculo.

[17](#). La distinción entre familias puede considerarse como otra propiedad, análoga a la carga de color fuerte o débil. Se puede definir un espacio de propiedad asociado a la propiedad de familia. De esta forma, las distintas familias se distinguirían por un conjunto adicional de colores, con la primera familia siendo (digamos) verde amarillento, otro lila y otro de color peonía. Anthony Zee y yo, entre otros, hemos especulado que este espacio de propiedad podría sostener también una simetría local. Pero, dado que no hay ningún indicio, en ningún experimento existente, del tipo de transformaciones que inducirían los bosones de gauge de esa hipotética simetría, cualquier «simetría de familia» de este tipo tendría que estar gravemente rota, y sus bosones de gauge tendrían que ser muy masivos.

18. Hay una pregunta interesante: por qué el universo es eléctricamente neutro a gran escala (si es que lo es). Si no lo fuera, las fuerzas eléctricas no se podrían anular con precisión, y serían ellas —en vez de la gravedad— las que dominarían la astronomía. También podemos plantear preguntas sobre el momento angular total. Si no fuera cero, el universo se dividiría en estructuras alineadas similares a vórtices. Cualquiera que sea la razón, lo cierto es que el universo parece estar equilibrado en carga y en momento angular. Por otro lado, es esencial para la emergencia de los humanos como seres físicos que el universo no esté equilibrado entre bariones y antibariones. Hay ideas verosímiles acerca de cómo podría haber surgido esa asimetría en las fases iniciales del Big Bang, partiendo de unas condiciones de máxima simetría, para después quedar *congelada*. Puedes encontrar una explicación de esto en frankwilczek.com/Wilczek_Easy_Pieces/052_Cosmic_Asymmetry_between_Matter_and_Antimatter.pdf

19. La posibilidad de lo que se conoce ahora como «energía oscura» fue anticipada por Einstein. Él percibió que el fluido métrico podría tener una densidad de energía característica, que es básicamente su «término cosmológico». Para que esa densidad sea invariante bajo transformaciones galileanas, debe ir acompañada por una presión de la misma magnitud, pero con signo opuesto. Así, una densidad positiva del fluido métrico se asocia a una presión negativa. En este caso, decimos que hay un término cosmológico positivo. Y, cerrando este círculo de lógica, la presión negativa estimula la expansión. Por tanto, una «energía oscura» positiva se asocia con una tendencia a la expansión. En ese sentido, genera una fuerza gravitacional repulsiva.

También es posible contemplar un término cosmológico negativo. Si la densidad de energía del fluido métrico es negativa, obtenemos una presión positiva y una tendencia hacia la contracción.

En años posteriores, los físicos se dieron cuenta de que no solo el fluido métrico, sino también los otros fluidos que impregnan nuestra descripción de la naturaleza podrían tener una densidad de energía finita, ya sea positiva o negativa. La simetría galileana asegura entonces que también ellos ejerzan una presión de signo opuesto. La «energía oscura» se refiere a la totalidad de esos efectos, mientras que el «término cosmológico» se refiere más en concreto al fluido métrico. Los físicos no saben cómo calcular la magnitud de estas densidades, ni siquiera si tiene sentido hablar de ellas como unas cantidades separadas. (Véase **Renormalización**.)

La literatura sobre estos tópicos es confusa y (por tanto) difícil de entender. Puedes encontrar más información en en.wikipedia.org/wiki/Cosmological_constant; en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy; y scholarpedia.org/article/Cosmological_constant. Las definiciones básicas y la descripción de las observaciones no son nada controvertidas, pero más allá de eso el terreno teórico se vuelve traicionero e inestable.

20. La posición del electromagnetismo en nuestra Teoría Central es un poco complicada, debido a que se vuelve asociada a la interacción débil. El problema es que los bosones de gauge que muestran una acción más simple en los espacios de propiedad difieren de los que tienen propiedades físicas simples. Los que son simples en un sentido fundamental suelen llamarse B y C . B responde a la diferencia entre las cargas débiles amarilla y morada, mientras que C responde a la hipercarga. La hipercarga tiene una estrecha relación con la carga eléctrica, pero no es idéntica a ella. El fotón y el bosón Z son, matemáticamente, combinaciones de B y C . El fotón, que tiene masa cero, nos da el electromagnetismo, mientras que el bosón Z, que pesa casi tanto como cien protones, se observó experimentalmente por primera vez en 1983, y tiene un papel muy limitado en el mudo natural.

La hipercarga de una entidad es la carga eléctrica *media* de las partículas que representa. (A veces se introduce un factor dos adicional, por razones históricas.) Como la interacción débil conecta las partículas dentro de una entidad, y puede cambiar de carga eléctrica, no podemos asignar una carga eléctrica definida a la entidad, y la hipercarga es el sustituto adecuado.

La teoría de casi todo, de Robert Oerter (Plume) es una buena presentación de las ideas de nuestras Teorías Centrales de las fuerzas fuerte y electrodébil para el lector general, y resulta complementaria a la nuestra.

El artículo arxiv.org/pdf/hep-ph/0001283v1.pdf, de S. F. Novaes está muy lejos de una lectura ligera, pero la segunda sección contiene las ecuaciones básicas expresadas de una forma tan simple como es posible para presentarlas, y la primera sección tiene una cronología útil y algún material introductorio.

[21.](#) La relación entre los campos magnéticos y las fuerzas que generan es complicada. La fuerza magnética sobre una partícula cargada en movimiento es proporcional a la magnitud del campo, la magnitud de la carga y la velocidad de la partícula. La dirección de la fuerza es perpendicular al plano formado por la velocidad y la dirección del campo vectorial magnético. Al final, la dirección de la fuerza viene dada por la regla de la mano derecha, como si estuviera rotando desde la dirección de la velocidad hacia la dirección del campo vectorial magnético. Esto se describe en en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_force. Puedes encontrar mucho más material sobre los campos magnéticos en el excelente artículo en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_field. *Principles of Electrodynamics* (Dover), del premio Nobel Melvin Schwartz, es un libro de texto moderno y claro.

[22.](#) La física de los neutrinos es un mundo en sí misma, dominado por experimentos heroicos en lugares exóticos. La web del experimento Ice-Cube —un experimento que implica insertar largas cadenas de fotodetectores en las profundidades del hielo antártico— contiene una exposición de amplio espectro sobre el campo, con una preciosa descripción de las técnicas experimentales, una cronología exhaustiva y una buena colección de vínculos a otras fuentes, en www.icecube.wisc.edu/info/neutrinos.

El artículo de la Wikipedia en en.wikipedia.org/wiki/Neutrino también es bueno, aunque menos autocontenido.

23. Los espinores aparecen en diversos lugares de la física y disciplinas aliadas.

Se pueden definir espinores de cualquier número de dimensiones, y sus propiedades más finas dependen de la dimensión de maneras interesantes.

En cierto modo, el uso más impresionante de los espinores —por ser tan básico y geométrico— es su aplicación en la computación gráfica. Los espinores aportan la forma más compacta y eficaz de tratar con las rotaciones en el espacio tridimensional. Si tienes que calcular muchas rotaciones en muy poco tiempo, por ejemplo para diseñar un juego interactivo, merece la pena usar espinores.

El uso más básico de ese tipo de spinor en física es para describir el grado de libertad de espín de los electrones y otras partículas de espín $\frac{1}{2}$. Otro tipo de spinor —el tipo adecuado para el espacio-tiempo de cuatro dimensiones— se da en la ecuación de Dirac para electrones relativistas. Aún otro tipo de spinor, asociado al espacio de diez dimensiones, se da en la entidad que representa la sustancia en el esquema de unificación $SO(10)$. Otros tipos de spinor aparecen en la teoría de corrección de errores para ordenadores cuánticos. Qué es lo que conecta —si es que hay algo— estos tres últimos usos de los espinores no está nada claro de momento. Puede que haya aquí otra oportunidad para los cazadores de unificaciones.

Aunque me encantaría que se demostrara que estoy equivocado en esto, me temo que entender el significado de los espinores con cierta profundidad, sin ayuda especializada ni álgebra, queda fuera del ámbito de la intuición humana. El artículo de la Wikipedia en.wikipedia.org/wiki/Spinor está muy bien hecho, pero no obra ese milagro. El gran matemático moderno Michael Atiyah dio una conferencia, «*¿Qué es un spinor?*», que puedes encontrar en YouTube en [youtube.com/watch?v=SBdW978Ii_E](https://www.youtube.com/watch?v=SBdW978Ii_E)

La conferencia alterna anécdotas divertidas y sabiduría general, por un lado, con unas matemáticas muy avanzadas por el otro.

Una cosa que revelan los espinores es que el acto de rotar 360 grados no es lo mismo que no rotar en absoluto, mientras que rotar el doble de eso —es decir, 720 grados— sí lo es. Esa distinción emerge también de un experimento que puedes hacer en casa, después de mirar esto: [youtube.com/watch?v=fTlbVLGBm3Q](https://www.youtube.com/watch?v=fTlbVLGBm3Q)

[24.](#) Dos referencias ya citadas antes, www.youtube.com/watch?v=mitio ODQYgI y <http://www.mathopenref.com/trgsinewaves.html>, vuelven a ser relevantes aquí. Y añadiré dos clásicos de la acústica escritos por maestros de la física: *On the Sensations of Tone*, de H. Helmholtz, y *The Theory of Sound*, de lord Rayleigh. Ambas están gratis (en inglés) en la red, y también en atractivas ediciones de Dover.

* Las láminas en color, denotadas por letras del alfabeto, aparecen en los encartados de este libro. Las figuras en blanco y negro, denotadas por números, aparecen a lo largo del texto.

* Hay una «t» extra: Newton no quería que esto fuera demasiado fácil.

* El juego de palabras se pierde en la traducción. En inglés, *bad name* significa tanto «mal nombre» como «mala reputación» (*N. del t.*)

* Abordaremos estas cosas en el siguiente capítulo.

* El chiste de la vaca esférica: la producción de leche de una granja es baja, así que el granjero escribe a la universidad local para pedir ayuda. Se reúne a un grupo de profesores encabezado por un físico teórico. Poco después el físico vuelve a la granja y le dice al granjero: «Tengo la solución, pero solo funciona para el caso de una vaca esférica en el vacío».

* Estos tres conceptos están relacionados de manera tan íntima que son básicamente intercambiables. Para más detalles, véase *Dimensión, Campo y Espacio de propiedad* en «Términos del arte».

* De modo más exacto, se trata del llamado espacio de propiedad de hipercarga. Para una discusión más matizada de este y varios otros tecnicismos, véase la nota 20 en las notas finales.

* He ganado varias apuestas aprovechando ese escepticismo desencaminado.

* «In God we trust» es el lema que aparece en los billetes de dólar. La frase completa de Shepherd puede verse en la pared de algunos *pubs* londinenses, al estilo de «Hoy no se fía, mañana sí». (*N. del t.*)

El mundo como obra de arte

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 éste 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: *A Beautiful Question. Finding Nature's Deep Design*

© Frank Wilczek, 2015

© de la traducción, Javier Sampedro, 2016

© del diseño de la portada, Compañía, 2016

© Editorial Planeta S. A., 2016

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

www.planetadelibros.com

Primera edición en libro electrónico (epub): mayo de 2016

ISBN: 978-84-9892-974-4 (epub)

Conversión a libro electrónico: Newcomlab, S. L. L.

www.newcomlab.com

DRAKONTOS

El mundo como obra de arte

En busca del
diseño profundo
de la naturaleza

Frank Wilczek

Premio Nobel de Física

CRÍTICA

