

La simetría en la física

Antonio Rincón



Revista Digital de ACTA

2013

Publicación patrocinada por



La simetría en la física

© 2013, **Antonio Rincón Córcoles**

© 2013,  ACTA

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Se autorizan los enlaces a este artículo.

ACTA no se hace responsable de las opiniones personales reflejadas en este artículo.

LA CASA DEL ESPEJO

“De una cosa estamos absolutamente seguros: el gato blanco no tuvo nada que ver en el desaguisado. Toda la culpa fue del gato negro”. Así comienza el delirante relato de *A través del espejo y lo que Alicia encontró allí*, una muestra genial de juego de contrarios con que Lewis Carroll quiso deleitar a su discípula predilecta y, de paso, a los millones de lectores que han gustado después de sumirse en sus páginas. Sí, porque el gatito negro distrajo a Alicia de sus cavilaciones cuando se obstinó en embrollar el ovillo que tanto esfuerzo había costado devanar. La niña, divagando con el minino, quiso castigarlo enfrentándolo a su imagen en el espejo que lucía en la habitación y se preguntó cómo sería el mundo al otro lado. Tanto le intrigaba que no se resistió a tocar el azogue con la mano y notó que “el vidrio empezaba a fundirse, como si fuera una brillante niebla plateada”.

Si en el País de las Maravillas una reina enloquecida rebanaba pescuezos y organizaba una disparatada procesión de naipes vivientes, en la Casa del Espejo en la que se adentra Alicia se libra una frenética partida de ajedrez con personajes desdoblados: la Reina Roja y la Reina Blanca, los gemelos suspicaces tan prestos a batirse en duelo como los dos jinetes sin norte, los mensajeros Haigha y Hatta, “el uno para ir y el otro para volver”, versiones decadentes de la Liebre de Marzo y el Sombrero Loco. Mientras Humpty Dumpty, el huevo humanizado, se encarama imprudentemente a lo alto del muro...

En la Casa del Espejo alienta un mundo de simetrías. Izquierda y derecha están invertidas, como sería de esperar en toda imagen reflejada. Para avanzar hay que retroceder y, como le explica a Alicia con paciencia la Reina Blanca antes de convertirse en oveja, el tiempo transcurre en una curiosa marcha atrás: “Ahí tienes al mensajero del Rey. Está encerrado ahora en la cárcel, cumpliendo su condena; pero el juicio no empezará hasta el próximo miércoles y por supuesto, el crimen se cometerá al final”.

El ajedrez, juego especular por excelencia, sirve de metáfora para todo el enredo. Alicia, un peón, llega a la octava casilla y se corona. Discute con la Reina Roja y la sacude hasta “comérsela”. El Rey Rojo, que hasta entonces ha permanecido inmóvil, dormitando en su escaque, se yergue sobresaltado y el mundo del espejo se disipa de pronto. La niña se descubre en su butaca con el gatito culpable entre las manos. ¡Menos mal, todo fue un sueño! ¿Pero quién sueña a quién?

Lewis Carroll era un hombre muy sagaz, un maestro de la lógica matemática. En su obra ironiza con astucia sobre la sociedad victoriana de su tiempo y despliega un mundo onírico rayano en el absurdo. Lo asombroso es que su desvarío anticipa una intuición profunda de la ciencia teórica de hoy: el mundo del espejo, con la izquierda y la derecha trastocadas y un tiempo que retrocede del futuro al ayer, es indistinguible de nuestro universo “real” siempre que en el tablero se intercambien piezas blancas por negras, las partículas elementales de la física por sus antipartículas hermanas.



Ilustración de John Tenniel para "A través del espejo"

DE CORTEJOS Y ABEJAS

¿Es la belleza una ventaja evolutiva? Las galas fastuosas de algunos animales así parecen proclamarlo. Los alces exhiben pesadas cornamentas; los elefantes, sus ebúrneos colmillos; los pavos, colas presuntuosas. En las tierras altas de Nueva Guinea, las aves del paraíso se extreman en el arte de la seducción. Ante hembras parduzcas y exigentes, los machos se ufanan con estudiado repertorio. A menudo, los gorjeos engolados, el vistoso abanico de sus plumas, las danzas y contorsiones cabriolescas, fallan en su propósito. La hembra, insatisfecha, se aleja en busca de un pretendiente aún más dotado.

Pese a todo, los machos no cejan en su empeño. Acaso las gruesas astas de los cérvidos entorpezcan la marcha en la espesura o los largos plumajes y penachos desestabilicen el vuelo. Mas solo un ejemplar perfectamente sano y poderoso derrocharía tanta energía en refinar su aspecto. ¿Qué mejor expresión de una fuerza merecedora de perpetuar la estirpe?

Los rasgos de la selección sexual intrigan a Darwin en sus estudios sobre la evolución. El naturalista inglés fue el primero en postular que las características sexuales secundarias podrían haberse desarrollado como respuesta a preferencias estéticas en el cortejo nupcial. Cierto que, en numerosas especies, las hembras tienden a escoger a machos dominantes porque ocupan los territorios deseables y les brindan, a ellas y a su prole, oportunidades mejores de sobrevivir. Pero esta modalidad de selección sexual coexiste en la naturaleza con otra de motivaciones menos inmediatas: sobre todo en las aves, muchas hembras eligen a los galanes más ricamente ornamentados sin que importe su predio. Las colas longilíneas, los colores sublimes, el despliegue efectista o un buche bien hinchado parecen pesar más para el apareamiento que la promesa de un nutrido granero. Posiblemente, sostienen los expertos, con sus números circenses los machos candidatos pugnan por demostrar lo excelso de su calidad genética.

Ahora bien, la belleza es un concepto elusivo, una idea a la que se aspira, un canon versátil en la cultura humana y poco objetivable en el entorno natural. En él subyacen múltiples facetas yuxtapuestas: la armonía en las formas, el contraste atinado, la fluencia rítmica, las simetrías internas. Estas últimas han atraído el interés de los científicos por la capacidad de analizarlas sistemáticamente. Es sabido que hojas, mariposas, peces o mamíferos presentan una clara simetría bilateral. Que los huevos de las ranas son cilindros casi perfectos, que las estrellas marinas lucen una compensada disposición radial de siete brazos. Las estructuras simétricas son abundantísimas entre los seres vivos: desde el letal virus del sida a las plantas con su filotaxis, las algas diatomeas o los grandes mamíferos, todos los organismos exploran desde distintos ángulos sus numerosas posibilidades.

Las simetrías aparecen también en las obras de ingeniería biológica: las abejas, obsesadas de las formas que prefieren siempre polinizar las flores mejor proporcionadas, basan la construcción de sus panales en el retículo hexagonal, un diseño óptimo para cubrir una superficie sin pérdida de eficiencia. Debe reconocerse que las simetrías vivientes no alcanzan la pulcritud geométrica de la materia inerte. La estructura cristalina del diamante o la "nieve sexángula", como dijera Kepler, son ejemplos supremos de esa perfección. Y aun así distan de la exactitud matemática, al menos, en una parte por millón. Las simetrías son tan ubicuas en la vida que llevan a preguntarse sobre su relevancia como motor evolutivo. Al fin y al cabo, "nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución", según el conocido adagio de Dobzhansky.

Tal vez, como se ha propugnado, la naturaleza ame la simetría. En ello no se esconde ningún propósito consciente. Aptitud y eficacia sustentan este comportamiento. Las pompas de jabón tienden a ser esféricas porque esta es la superficie mínima para alojar una máxima cantidad de aire en su interior. La química orgánica se basa en el carbono tetraédrico por su acusada estabilidad energética. La configuración anatómica especular de los grandes cuadrúpedos impulsa la habilidad motora y garantiza el equilibrio en la carrera. Los animales más simétricos suelen llegar antes a la fuente de alimento y potencian su éxito reproductor.

Pero el mundo natural huye también del extasio de lo estático. Desde el embrión indiferenciado surgen formaciones celulares asimétricas que perfilan los órganos y los tejidos en ciernes. Pequeñas irregularidades en las condiciones ambientales impulsan cambios notorios en las estructuras geológicas. La evolución de las especies se sostiene en azarosas mutaciones en la dotación genética. Mientras la armonía fomenta la estabilidad, tenues discontinuidades promueven la adaptación ante entornos variables en busca de un nuevo orden. La dinámica cósmica y el avance de la vida surgen así de una delicada combinación de equilibrio y de cambio, de simetrías profundas subyacentes y de roturas de dichas simetrías.



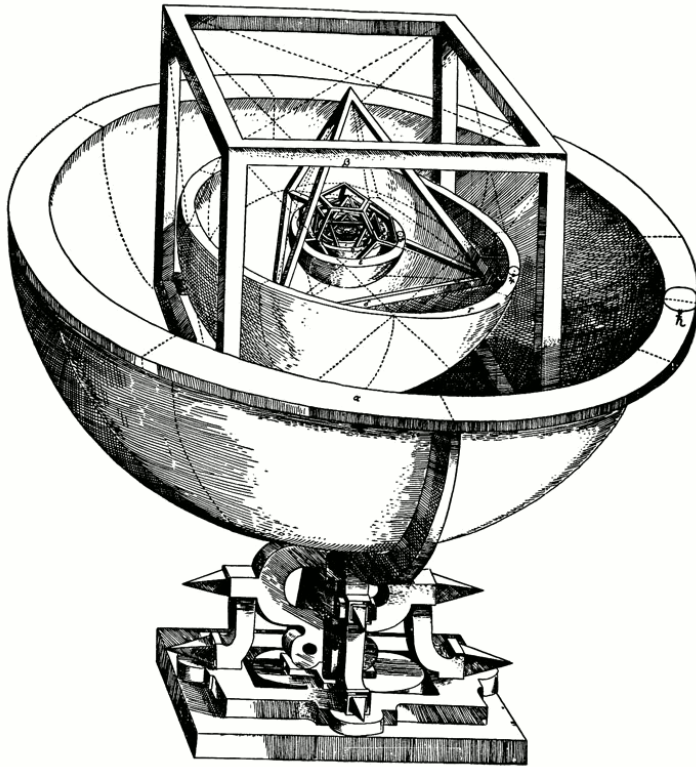
Las flores más simétricas son las preferidas de los insectos polinizadores. A la derecha, uno de los numerosos juegos de simetrías decorativas de los salones de la Alhambra de Granada.

LAS LEYES DE LA NATURALEZA

El concepto matemático de simetría es sencillo de aprehender intuitivamente. Si se toma un cuadrado y se gira 90 grados en torno a un eje que pasa por su centro y es perpendicular al plano que contiene a la figura, el resultado será otro cuadrado indistinguible del anterior. Para respetar la simetría en un rectángulo en condiciones semejantes es preciso rotarlo 180 grados alrededor de dicho eje. El giro de una esfera es perfectamente simétrico con referencia a cualquier línea que atravesase su centro. Estas clases de simetrías, axial y esférica, se amplían con la simetría especular, que se aprecia en nuestro rostro observado en un espejo o en la imagen de un monte sobre un estanque de aguas quietas.

Las matemáticas de la simetría pueden complicarse con múltiples combinaciones de desplazamientos, giros, reflejos y otras proezas geométricas. Los artífices de la Alhambra de Granada supieron extraer un máximo provecho artístico de estas posibilidades. La percepción de la simetría siempre se ha vinculado a la belleza y la armonía, a esa intuición de orden que concede reposo a la mente humana en su lucha permanente por descubrir en el cosmos pautas sensibles con las que interpretar el caótico entorno en el que se siente inmersa.

Los antiguos griegos ponderaron el equilibrio y asignaron a los objetos simétricos una virtud casi religiosa. En su *Timeo*, Platón escribió: "El fuego está formado por tetraedros; el aire, de octaedros; el agua, de icosaedros; la tierra de cubos; y como aún es posible una quinta forma, Dios ha utilizado esta, el dodecaedro pentagonal, para que sirva de límite al mundo". Estos cinco cuerpos, conocidos para la posteridad como sólidos perfectos o platónicos, son los únicos poliedros dotados de todas las simetrías que existen en el espacio.



*Johannes Kepler imaginó un Universo regido por una conjunción geométrica de los cinco sólidos platónicos: cubo, tetraedro, octaedro, icosaedro y dodecaedro. Así lo expresó en una de sus principales obras, *Mysterium Cosmographicum*, de la que procede esta imagen.*

La promesa de estabilidad y sosiego que emana de los mismos sedujo a Kepler y lo llevó, siglos más tarde, a proponer un universo regido por sus formas: asoció a cada sólido uno de los cinco planetas conocidos por entonces. Aquel enfoque místico se derrumbó con el descubrimiento de Urano, el sexto cuerpo errante de los cielos nocturnos, pero sirvió de inspiración para componer uno de los primeros modelos que explicaban científicamente los movimientos de los astros.

Otra modalidad en la colección es la llamada simetría de escala, según la cual al modificar el tamaño de cualquier zona de una forma geométrica un cierto número de veces, la figura seguirá pareciendo la misma. Esta idea, básica para la geometría fractal, se observa a menudo, con sus inevitables imperfecciones, en las estructuras cristalinas y el crecimiento de los seres vivos. La propiedad de autosimilitud es aquí una simetría relacionada con el transcurrir del tiempo, no con las coordenadas del espacio. Porque, en sentido extenso, la simetría debe entenderse como toda invariancia de un objeto o un sistema con respecto a sus transformaciones, movimientos o intercambios. Un cuerpo puede ser simétrico o no en virtud de su rotación, desplazamiento o reflejo especular. También lo son una ecuación matemática o una ley de la naturaleza si conservan su invariancia en ciertas condiciones o marcos de referencia. Esta idea ha alumbrado una línea fundamental del pensamiento de la física contemporánea.

La historia de las ciencias se distingue por el empeño continuo de aislar patrones en los fenómenos naturales, de destilar un orden desde el caos aparente que envuelve al ser humano. No solo Kepler con su modelo platónico del cosmos. También Isaac Newton, en su descripción de la mecánica del universo, se valió de analogías semejantes, sobre todo al enunciar su principio de equivalencia: la masa inercial de un objeto, aquella que explica la resistencia al cambio de su estado de movimiento o reposo, equivale a su masa gravitatoria, la que modula la atracción entre los cuerpos y determina los desplazamientos celestes.

Esta clase de equivalencias adquirió una importancia creciente en los planteamientos de las teorías científicas. Al comienzo como un recurso *dilettante* y más tarde como un asunto central de las mismas, se constató la existencia de una estrecha relación entre las simetrías de las leyes de la naturaleza y los principios de conservación de la física clásica.

En los textos canónicos de esta disciplina se plantean tres ámbitos de conservación de sustancial relevancia para describir los sistemas mecánicos. Uno de ellos es el principio de conservación de la energía, en virtud del cual en cualquier sistema físico aislado la cantidad total de energía permanece invariable. En expresión más coloquial, la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma. Ahora bien, la conservación de la energía se cumple porque el sistema en cuestión es invariante con respecto al tiempo; es decir, las leyes físicas que lo rigen son las mismas en un instante dado que un segundo, una hora, un milenio o un eón más tarde. Dicho sistema contiene una simetría temporal cuyas manifestaciones son la energía y el tiempo, imágenes duales e indisolubles de una misma esencia íntima.

Algo semejante sucede con los otros dos grandes principios de conservación de la mecánica clásica. El momento lineal, o cantidad de movimiento, definido como el producto de la masa por la velocidad de una partícula, se conserva en sentido global para un sistema cerrado no afectado por fuerzas exteriores ni por fenómenos de disipación (piénsese en las bolas de una mesa de billar ideal: en sus carambolas se transmiten unas a otras el ímpetu y la velocidad). Ello se debe a que la ley física que gobierna esta magnitud es invariante con respecto a las traslaciones en el espacio. Posición (traslación) y momento lineal forman otro par de magnitudes físicas conjugadas. Por su parte, la conservación del momento angular de un sistema explica, por ejemplo, por qué un patinador gira más deprisa cuando alinea los brazos sobre su cabeza como continuación del cuerpo que si los mantiene extendidos en cruz. Esta conservación tiene lugar en sistemas que son invariantes con respecto a la rotación en el espacio.

Un sistema físico aislado y cerrado en el que se cumplen los principios de conservación de la energía, la cantidad de movimiento y el momento angular posee tres simetrías inherentes respectivas: en el tiempo, para la traslación y para la rotación. Esta idea se plasmó en un célebre teorema enunciado por Emily Noether, una de las matemáticas más notables del siglo xx: "Cualquier simetría diferenciable en un sistema físico tiene una ley de conservación correspondiente". Las leyes de conservación emanan, pues, de las simetrías de los sistemas físicos. La asimilación de este concepto ocupó un lugar central en la génesis de la teoría de la relatividad propuesta por Albert Einstein y en el nacimiento y desarrollo de la formulación cuántica.

ANTIMATERIA EN EL ESPEJO

A principios del siglo xx, Einstein desmontó el "teatro de marionetas" construido por Newton en su teoría de la gravitación universal. Las fuerzas instantáneas que, a modo de hilos invisibles, determinaban los movimientos de todos los objetos grávidos en virtud de su posesión de una masa no nula fueron sustituidas por una idea mucho más refinada: los cuerpos masivos deforman la geometría del espacio-tiempo e inducen a otras masas cercanas a describir trayectorias de mínima energía distintas de la línea recta, como la órbita elíptica que sigue la Tierra alrededor del Sol.

El enfoque einsteiniano ilustra ejemplarmente el cambio conceptual en la expresión de las teorías contemporáneas: se aparta de la mera descripción matemática del fenómeno estudiado (ley de gravitación) para concentrarse en principios más profundos que subyacen a él (deformación del espacio-tiempo). Las teorías de la relatividad especial y general invirtieron una tendencia científica hasta entonces vigente: los principios de invariancia de las magnitudes (energía, momento angular y lineal) se deducían de las leyes del movimiento. Einstein obró en sentido contrario: estableció primero los principios de invariancia para deducir de ellos las leyes de la naturaleza. La depuración de este tipo de razonamiento alcanzó sus cimas más elevadas en las décadas siguientes.

El desarrollo de la mecánica cuántica marcó un nuevo punto de inflexión en esta historia. Inspiradas en sólidos procedimientos matemáticos, las elaboraciones mecanocuánticas aportaron una nueva perspectiva sobre la función de la simetría en las leyes naturales. Los principios de invariancia forman parte sustancial de la teoría cuántica y su investigación ha deparado algunos descubrimientos sorprendentes. En este contexto cobraron un impulso renovado las consideraciones sobre tres clases de simetrías, codificadas como T, P y C.

La T significa "tiempo" y alude al fenómeno de la inversión temporal. Se dice que un sistema actúa de acuerdo con dicha inversión (tiene simetría T) si los fenómenos que discurren en él hacia el pasado son tan plausibles como los que avanzan al futuro. La visión del mundo cotidiano contradice esta intuición: un jarrón hecho añicos al caer al piso no puede recomponerse con una simple inversión del tiempo. En términos macroscópicos y en sistemas complejos dominados por la termodinámica y la entropía, esta evolución es contraria al sentido común. Sin embargo, en la escala microscópica no resulta descabellada. En el mundo cuántico no se aprecia distinción entre pasado y futuro. La dirección del tiempo que observamos a escala humana es tan solo una consecuencia estadística de la acción conjunta de ininidad de partículas elementales.

Por su parte, la P se asocia a "paridad". Existe simetría P cuando un fenómeno no sufre alteración alguna al intercambiar derecha por izquierda. En principio, ningún experimento permite distinguir entre el mundo real y su imagen especular. Ambos son igualmente factibles y, de hecho, si los filmamos no conseguiremos distinguir cuál es el real y cuál el reflejado.

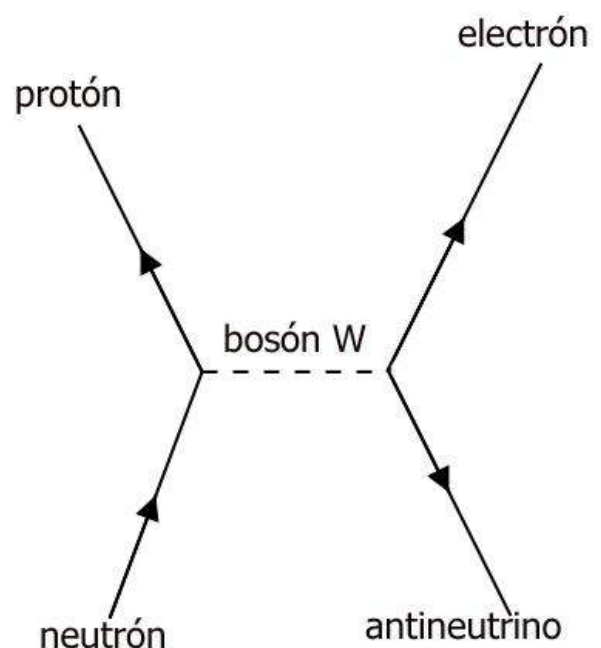
Finalmente, la C significa "conjugación de carga" y establece la relación simétrica entre una partícula y su antipartícula, por ejemplo, entre un electrón y un positrón, igual al anterior en todas sus propiedades salvo el signo de la carga eléctrica. En términos hipotéticos, si alguna galaxia distante estuviera constituida exclusivamente por partículas, átomos y moléculas de antimateria, sería indistinguible para nuestros telescopios: su interacción con los fotones de la luz no arrojaría ningún indicio sobre su singular naturaleza.

Hasta mediado el siglo xx se consideraba que estas simetrías regían rígidamente el comportamiento de las partículas a escala mecanocuántica. Se estableció asimismo, como un teorema general, que la combinación de las tres (CPT) es una simetría de carácter global que respetan todas las leyes físicas. En el contexto cuántico, un sistema de antimateria reflejado en un espejo que evolucione hacia el pasado admite las mismas leyes de la naturaleza que nuestro universo conocido.

Hoy se sostiene con fuerte solidez matemática que las leyes que gobiernan a escala cuántica los fenómenos de la gravedad, el electromagnetismo y la interacción fuerte, que mantiene unidos a los protones y los neutrones dentro de los núcleos atómicos, son invariantes por separado con respecto a la paridad, la inversión temporal y la conjugación de carga. Hasta la década de 1950 se pensaba otro tanto de la interacción débil. Entonces se descubrió que la manifestación arquetípica de esta interacción, la desintegración beta o transformación de un protón en un neutrón con emisión de un electrón y un antineutrino, viola la simetría de paridad.

Dicho de otro modo, la imagen en el espejo de la desintegración beta es inviable. Además, infringe la simetría de conjugación de carga: si se sustituyen las partículas por sus antipartículas (protón por antiprotón, electrón por positrón, antineutrino por neutrino), el fenómeno es asimismo inexistente en la naturaleza. Sin embargo, la combinación CP sí se respeta: la interacción débil permite la sustitución de partículas por sus antipartículas siempre y cuando se intercambie la izquierda por la derecha.

Las investigaciones posteriores depararon un nuevo sobresalto cuando, en 1964, se encontró un hecho desconcertante. A escala cuántica, el mesón K, una partícula elemental altamente inestable, no cumple la simetría combinada CP. A modo de compensación, para no infringir el teorema general de invariancia CPT es necesario que viole también la simetría T. Así pues, los mesones K se ven afectados por una flecha microscópica del tiempo que apunta en uno u otro sentido según dicte la rotura de sus simetrías.



En una desintegración beta, un neutrón se convierte en un protón con la emisión de un electrón y un antineutrino. El bosón W actúa como partícula intermediaria (interacción débil).

HACIA EL BOSÓN DE HIGGS

En un largo e intenso esfuerzo colectivo de varias décadas, la física de partículas ha desarrollado un modelo estándar que permite describir los fenómenos de la naturaleza a partir de una serie de bloques elementales e interacciones básicas en un mecano sumamente complejo. Las pruebas experimentales a que ha sido sometido se han resuelto con éxito indudable. Aun cuando mantiene algunos interrogantes abiertos, este modelo recibió en 2012 una inyección de optimismo con el anuncio en el CERN del hallazgo de una nueva partícula que muy bien pudiera ser el ansiado bosón de Higgs. Esta partícula es una especie de viga maestra sobre la que se sustenta todo el edificio.

El modelo estándar postula la existencia de dos grandes entidades básicas: las partículas elementales de materia-energía y las interacciones fundamentales que rigen su comportamiento. Las primeras reciben el nombre de fermiones. A las segundas se les asocian unas partículas mediadoras conocidas como bosones. Toda partícula elemental posee tres propiedades básicas: carga eléctrica, masa y espín, entendido como un momento de giro intrínseco. Son fermiones las seis clases de quarks y los leptones: electrón, muón, partícula tau y sus neutrinos correspondientes. Todos ellos se distinguen por tener un valor de espín semientero. Las partículas de materia, cada una con su correspondiente antipartícula, se distribuyen en tres grandes familias. El electrón, el muón, la partícula tau y sus neutrinos se denominan leptones, porque no sienten la interacción fuerte. Los quarks y las partículas compuestas que integran (como protones y neutrones) se llaman hadrones.

Familia	Partículas		Observaciones
1	Electrón	Quark arriba (<i>up</i>)	Componen la inmensa mayoría de la materia ordinaria, encerrada en los átomos (salvo los neutrinos).
	Neutrino electrónico	Quark abajo (<i>down</i>)	
2	Muón	Quark encanto (<i>charm</i>)	Presentes en los rayos cósmicos. El muón es idéntico al electrón, aunque con una masa unas 200 veces mayor.
	Neutrino muónico	Quark extraño (<i>strange</i>)	
3	Partícula tau	Quark cima (<i>top</i>)	Detectados en aceleradores de partículas. La partícula tau, muy semejante al muón, multiplica por 16 su masa.
	Neutrino tauónico	Quark fondo (<i>bottom</i>)	
	Leptones	Hadrones	

Por otra parte, se distinguen cuatro interacciones fundamentales: el electromagnetismo, que comprende los fenómenos eléctricos, magnéticos y luminosos; la interacción fuerte, que mantiene la cohesión de los núcleos atómicos; la interacción débil, responsable de fenómenos subatómicos como la desintegración beta, y la gravitación descrita por Einstein. Cada una de estas interacciones se asocia con un bosón o partícula mediadora: el fotón para el electromagnetismo, el gluón para la interacción fuerte, los bosones W y Z para la débil y el gravitón para la gravedad. Todos los bosones tienen un valor de espín entero.

Este esbozo esquemático despierta admiración ante la capacidad de síntesis de los físicos contemporáneos, pero desvela también un desarrollo pormenorizado prolijo y, a veces, desalentador. Las voces críticas, un tanto acalladas tras el exitoso resultado del CERN sobre el bosón de Higgs, acusan al modelo estándar de inelegante e incompleto. No puede obviarse, pese a sus méritos, que deja cuestiones sin resolver. Hasta hace poco, una de ellas, quizá la más llamativa, era la explicación del origen de la masa.

Einstein postuló que la masa no es sino energía inmensamente concentrada. La mecánica cuántica enseña que el valor de esta entidad, masa-energía, proviene mayoritariamente de los protones y los neutrones empaquetados en los núcleos atómicos. Los electrones que pululan en sus proximidades apenas contribuyen con un pequeño porcentaje, menor aún en las restantes partículas conocidas. Protones y neutrones son partículas compuestas por entes más pequeños llamados quarks. Ahora bien, las masas intrínsecas de los quarks, como la de los electrones, son de órdenes de magnitud comparativamente muy bajos en relación con la masa-energía de los núcleos atómicos. En realidad, la masa de los átomos, las moléculas y los objetos macroscópicos proviene en su mayor parte de la energía acumulada por el movimiento y las interacciones entre los quarks confinados en los núcleos.

Pese a ello no debe desdeñarse el valor de las masas intrínsecas: son indispensables como sostén del universo. La masa es una cualidad inherente a las partículas, sean de materia o mediadoras. En algunas, como los fotones y los gluones, tiene valor nulo. De hecho, los primeros teóricos del modelo estándar encontraron soluciones matemáticas muy refinadas que contaban con un ligero inconveniente: imponían una masa cero a todas las partículas, lo cual contradecía los resultados experimentales. La idea del bosón de Higgs, postulada en la década de 1960 por el inglés Peter Higgs, pero también por los belgas Robert Brout y François Englert, entre otros, permitía salvar la situación con un recurso ingenioso: el espacio debía estar ocupado por un campo ubicuo del que las partículas, en su interacción con él, recibían su masa propia. El campo de Higgs llevaría asociado, por los principios inalienables de la cuántica, un bosón mediador. Las demás partículas del modelo podían recorrer dicho campo cual palomas aladas, como el fotón, o como lerdos y enfangados reptiles, como el pesado tauón.

La hipótesis de Higgs recuerda vagamente a la idea del éter lumínico, que Einstein desmontara al presentar su teoría de la relatividad especial en 1905. Acaso este omnipresente campo de Higgs esté llamado a desaparecer también de los libros de texto cuando algún genio científico encuentre una explicación inspirada, tal vez, en un nuevo paradigma. Aún es pronto para saberlo. Lo cierto es que el bosón de Higgs y la parafernalia que lo acompaña han llegado a la ciencia para verter luz sobre un problema espinoso: la rotura de la simetría debida a la existencia de las masas.

MASA Y SIMETRÍA

Llegado este punto se impone una breve recapitulación. El modelo estándar ofrece una descripción satisfactoria de la composición de la materia-energía y de sus interacciones. En él subyace, como pieza esencial, el concepto de simetría. Las cantidades conservadas de las leyes de la física clásica, en particular la energía, la cantidad de movimiento y el momento angular, pueden entenderse como resultantes de simetrías espacio-temporales. En el contexto mecanocuántico se propone una nueva clase de simetría que explica fenómenos como la conjugación de carga, ajena al marco espacio-temporal. Esta modalidad recibe el nombre de simetría interna y se extiende, más allá de la carga eléctrica, a otras magnitudes propias de las partículas elementales como son el espín, el isospín o el color de los quarks. Las simetrías internas se entienden como transformaciones de los estados cuánticos que permanecen invariantes en determinadas condiciones. Se relacionan con campos físicos (por ejemplo, el electromagnético) que presentan conversiones invariantes en marcos internos no relacionados con el espacio-tiempo. Por ejemplo, de la simetría del campo electromagnético en un marco interno muy concreto se desprende la propiedad de la conservación de la carga eléctrica.

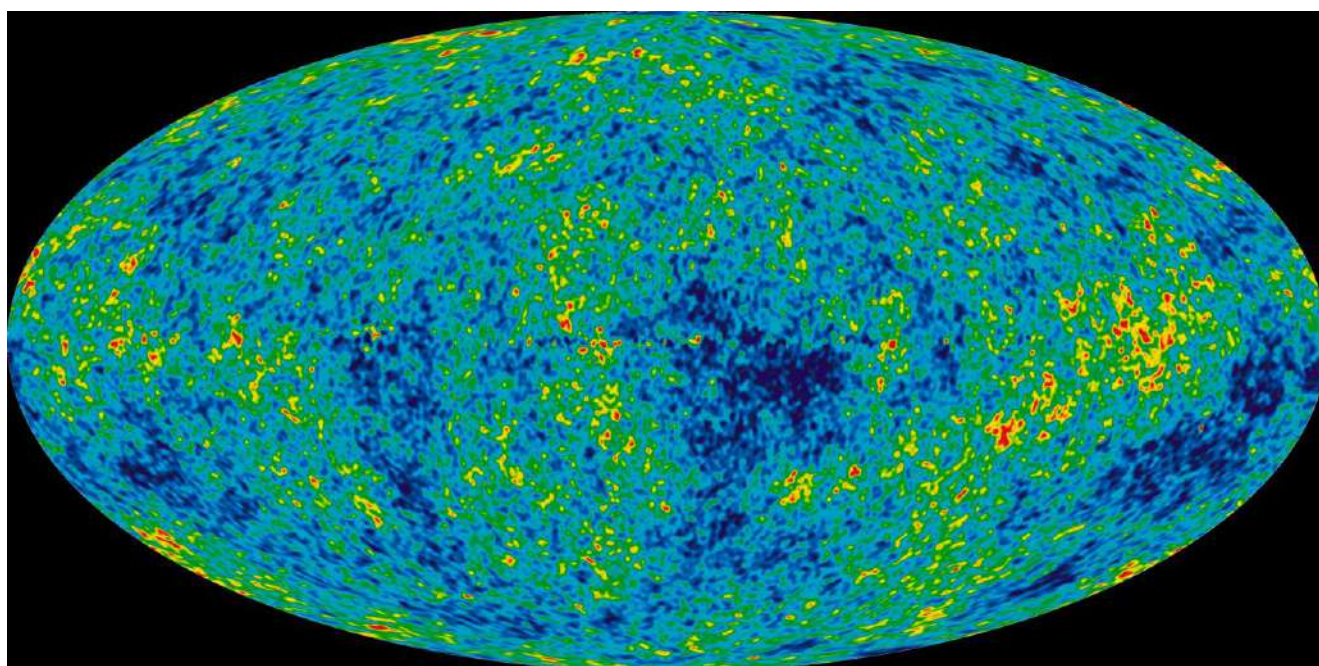
Las simetrías internas se dicen globales cuando la transformación asociada afecta por igual a todos los puntos sometidos al campo. Si esta influencia varía en cada punto, de manera que el campo actúa sobre él de manera diferenciada al resto, la simetría interna correspondiente se denomina local. Esta idea ha adquirido una importancia crítica en la explicación cuántica de la naturaleza.

No debe extrañar, a estas alturas, que el modelo estándar no se conforme con describir meramente las interacciones (electromagnética, fuerte, débil, gravitatoria) y sus partículas (bosones y fermiones). En línea con

la forma actual de razonar de los científicos, propone una causa primigenia que explica el surgimiento de estas interacciones relacionado precisamente con las simetrías internas locales. De algún modo, la "localidad" comporta una pérdida de simetría. Para restaurarla es preciso introducir un elemento nuevo, un campo multicomponente cuyas propiedades se corresponden con cada una de las interacciones fundamentales conocidas. De la existencia de una simetría interna local de determinadas características emana, por ejemplo, la interacción electromagnética con sus propiedades ya descritas y su partícula intrínseca, el fotón. La misma simetría explica el fenómeno observado de conservación de la carga eléctrica. El modelo estándar describe con perfección este vínculo y establece mecanismos similares para las interacciones fuerte y débil. Las simetrías locales engendran las interacciones básicas y son indispensables para la cohesión interna del discurso teórico.

La exposición matemática del modelo estándar se distingue por una gran hondura conceptual, pero pronto se comprendió que arrastraba un problema: en su formulación desnuda exige que las partículas elementales no tengan masa. Dicho de otro modo, la existencia de la masa intrínseca de las partículas parece destruir las simetrías locales de las que nacen las interacciones fundamentales. Ello llevó a introducir un elemento corrector en las fórmulas para reequilibrar la balanza, una idea que alumbró el concepto del campo de Higgs como un artilugio físico-matemático necesario para mantener la coherencia de las ecuaciones. La masa es el indicio de una simetría rota o, como prefieren decir algunos autores, camuflada. El mecanismo de Higgs, por el que las partículas elementales adquieren dicha masa, permite que esta ruptura tenga acomodo dentro del modelo y restaura el orden de la teoría. De ahí la extraordinaria importancia del hallazgo posible del bosón de Higgs en el CERN anunciado en 2012.

Especialmente interesante es el hecho de que los bosones W y Z, intermediarios de la interacción débil, tengan una masa intrínseca no nula. No sucede así con el fotón del electromagnetismo y con el gluón, cuyas interacciones con el campo de Higgs deparan sendas masas de valor cero. La masa no nula de los bosones W y Z se interpreta como la ruptura de una simetría de orden superior. Según propone la teoría, las interacciones electromagnética y débil tienen una sola procedencia, son ramas de un mismo tronco dividido en un momento concreto de la historia del universo: presuntamente estuvieron anteceditas por una forma unificada conocida como interacción electrodébil.



Las trazas del big bang en las profundidades cósmicas guardan el secreto de los primeros instantes del universo, cuando se rompió la simetría electrodébil y se desplegaron el electromagnetismo, los fotones y la luz. (Radiación cósmica de microondas según imagen recreada por el satélite WMAP. Por cortesía de nasaimages.org)

La ruptura de esa simetría primigenia se produjo en los instantes inmediatamente posteriores al *big bang*, la gran explosión primordial, cuando la temperatura descendió por debajo de un valor crítico de unos mil billones de grados. En ese punto se hizo energéticamente favorable que el campo de Higgs tomara un valor de vacío no nulo que lo hizo interactuar con el campo electrodébil ya presente. Como resultado, la simetría origen de la interacción electrodébil se quebró, pero solo en parte: los bosones W y Z adquirieron masa, pero no los fotones resultantes del cambio. El progresivo enfriamiento del universo ha afianzado la situación, como si se tratara de un vapor simétrico supercaliente que, en el curso de la historia cósmica, hubiera cristalizado en estructuras crecientemente estables incapaces de recuperar la simetría original.

El indudable éxito de las elucubraciones sobre las simetrías físicas anima a los científicos a plantearse nuevos retos en este recorrido. Una de las iniciativas más sobresalientes, al alcance quizá de los experimentos del CERN para los próximos años, sueña con un entramado aún mayor de correlaciones, una equivalencia entre los fermiones (partículas de materia) y los bosones (intermediarias de las interacciones fundamentales) a través de las partículas supersimétricas, unas entidades hipotéticas aún por descubrir. Su hallazgo supondría un paso mayúsculo hacia la comprensión profunda de las leyes de la naturaleza desde una óptica que los pioneros en los estudios sobre la simetría espacial hace 2.500 años nunca se hubieran aventurado a imaginar.