El principio y el fin del Universo

Cuarta parte: la simetría en la naturaleza

por Christine Allen y Miguel Angel Herrera

En el artículo anterior vimos que, de acuerdo con las teorías actuales, las únicas partículas realmente "elementales" son los quarks, los leptones y las partículas responsables de transmitir las cuatro fuerzas o interacciones. Los primeros, apropiadamente combinados, constituyen los bariones y los mesones; ejemplos de los segundos serían, entre otros, los electrones, los neutrinos y sus respectivas antipartículas; como ejemplos de las partículas que transmiten las fuerzas habíamos mencionado al fotón, al gravitón y a los gluones, responsables respectivamente de la interacción electromagnética, de la gravitatoria y de la fuerte. También repasamos algunas de las propiedades más importantes de las partículas, como lo son la masa, los distintos tipos de carga, el "color" y el espín. Con ello, estamos ya en condiciones de entender las teorías más modernas sobre las partículas elementales, cuyo principal objetivo es el de *unificar* las distintas fuerzas y partículas en un esquema teórico en el que se contemplen, todas ellas, como diferentes aspectos de un único fenómeno físico. Dado que la idea básica de estas teorías es la de *simetría*, comenzaremos por exponer el significado que el científico le asigna a este concepto.

El concepto de simetría

Todos tenemos una idea intuitiva, más o menos clara, de lo que significa la palabra *simetría*. Cualquier niño de primaria es capaz de distinguir entre una figura geométrica simétrica y otra que no lo sea. No sólo eso: las figuras simétricas suelen ser más atractivas a nuestros sentidos que las asimétricas, debilidad que, al parecer, compartimos con la misma Madre Naturaleza; desde los copos de nieve hasta las galaxias, pasando por los cristales y nuestros propios cuerpos, los objetos naturales presentan comúnmente simetrías más o menos evidentes. Por desgracia, la experiencia ha demostrado que la idea intuitiva de un término no basta para convertirlo en un concepto científicamente útil. Para ello es necesario sustituir la noción intuitiva por una definición rigurosa. Y aquí los diccionarios no nos serán de gran utilidad. De acuerdo con el diccionario *Larousse*, por ejemplo, *simetría* es la "proporción adecuada de las partes de un todo entre sí y con el todo mismo", lo que podrá ser absolutamente cierto, pero no permite al científico avanzar gran cosa. Por esta razón, se ha tenido que buscar una definición más adecuada. La que se suele usar fue propuesta por el matemático y físico Hermann Weyl, y en esencia dice que un objeto es simétrico si se le puede hacer "algo" de manera tal que una vez que se le ha hecho se ve igual que antes de que se le hiciera. Así, por ejemplo, si se toma un copo de nieve y se le hace girar 60 grados alrededor de un eje perpendicular al plano del copo, al final de la operación el copo se verá exactamente igual que antes de rotarlo, lo cual significa, de acuerdo con la definición de Weyl, que el copo es simétrico. Análogamente, nuestra cara es simétrica porque no cambia al ser reflejada por un espejo (excepto en pequeños detalles, desde luego, como un lunar en una mejilla, una nariz torcida, etcétera).

La definición científica de simetría es lo que se conoce como una definición "operacional", es decir, se basa en una *operación*. En los ejemplos anteriores la operación fue una rotación o una reflexión, que son operaciones *espaciales*; pero puede ocurrir que las operaciones adecuadas para revelar una cierta simetría no sean espaciales, sino de tipo más abstracto. Esto sucede, por ejemplo, en un célebre dibujo del artista holandés Maurits C. Escher, en el cual la operación que revela la simetría subyacente consiste en el intercambio

Galaxia NGC 4622 tipo Sb, en la constelación de *Centaurus*. Foto tomada en el Observatorio de Cerro Tololo, Chile. (*Association of Universities for Research in Astronomy*)

de demonios por ángeles simultáneamente con el del color negro por blanco. En la física suelen existir simetrías que sólo se ponen en evidencia mediante operaciones muy abstractas, que no podemos imaginar directamente en términos de conceptos accesibles a nuestros sentidos. Una vez aclarado este punto, podemos pasar a lo que nos interesa de momento, que son las simetrías de las leyes de la física.

¿Qué significa que una ley física sea simétrica? Si utilizamos la definición de Weyl es claro su significado: simplemente, que existe por lo menos una operación que, una vez aplicada a la ley en cuestión, la deja igual que antes de que la aplicáramos. Como dicen los físicos, la ley es *invariante* frente a la susodicha operación. El ejemplo más claro es la llamada "invariancia traslacional", que consiste en la invariancia de las leyes de la física al ir de un lugar a otro —esto es, al aplicarles una traslación— y que significa, en pocas palabras, que las leyes son las mismas en cualquier lugar del espacio (lo cual pone de manifiesto una simetría del espacio mismo). En este caso la operación —una traslación— es más o menos clara, intuitivamente hablando, porque es *espacial*. Un ejemplo más complicado son las fuerzas nucleares, esto es, las fuerzas que actúan entre nucleones. Estas fuerzas permanecen iguales si intercambiamos protones por neutrones y viceversa. La simetría entre protones y neutrones no se hizo evidente sino hasta hace relativamente poco tiempo, sin duda debido a que la operación de intercambiar protones por neutrones no tiene un significado intuitivo claro, puesto que no es ni espacial ni temporal.

En los dos ejemplos anteriores, las simetrías son fáciles de observar porque "están ahí", por así decirlo, y sólo tenemos que medirlas. Cuando esto ocurre, decimos que las simetrías son *manifiestas*, esto es, que son evidentes e inmediatamente detectables. Pero podría ocurrir —y ocurre, como veremos más adelante— que un conjunto de leyes simétricas diera lugar a un fenómeno que no percibiéramos como obviamente simétrico. Este fenómeno, desde luego, sólo sería asimétrico en apariencia, pues en el fondo, poseería ciertas simetrías no evidentes. En este caso decimos que la simetría está *oculta*, o en términos técnicos, que ha ocurrido una *ruptura espontánea de la simetría*. Según veremos más adelante, la ruptura espontánea de la simetría entre materia y antimateria tiene profundas consecuencias cosmológicas.

La violación de la ley de conservación de la paridad

La enorme importancia de la simetría en la física se debe —además de su indudable valor estético— a que a toda simetría exacta le corresponde lo que los físicos llaman una "ley de conservación". La simetría traslacional, por ejemplo, tiene como consecuencia la ley de conservación del impulso lineal; la simetría rotacional origina la conservación del momento angular. Una simetría que por muchos años se consideró "exacta" es la que se presenta frente a las reflexiones (simetría especular), de acuerdo con la cual los fenómenos físicos "vistos en un espejo" deberían ser igual de "reales" que vistos directamente. En otras palabras, debería ser imposible distinguir si una película de un experimento se ha tomado directamente o filmando en un espejo en el cual el experimento real ha sido reflejado; dicho de otro modo aún, no debería haber distinción alguna entre "derecha" e "izquierda". Si esto fuera cierto, sería imposible comuni-

Cúmulo globular de estrellas (NGC 6341) en la constelación de Hércules. Foto tomada en el Observatorio de Kitt Peak. (*Association of Universities for Research in Astronomy*)

carle a un ser de otro planeta qué es lo que entendemos por "derecha" y qué por "izquierda", pues no existiría ningún fenómeno físico que se desarrollara preferentemente "a la derecha", por ejemplo; y esto sería precisamente lo que necesitaríamos para comunicarle a nuestro interlocutor extraterrestre cuál dirección es la "derecha". La propiedad que se conserva debido a la simetría frente a las reflexiones recibe el nombre de *paridad*.

Hasta el año de 1957 las cosas habían marchado bien, y la paridad se conservaba en los experimentos efectuados; pero en ese año una física, Madame Chien-Shiung Wu, realizó un celebérrimo experimento en el que se demostró, sin lugar a dudas, que la paridad no siempre se conserva. El experimento consistió en observar los electrones emitidos durante el decaimiento radiactivo de una muestra de núcleos de cobalto 60, enfriados a una temperatura muy baja y rodeados por una espira de alambre a lo largo de la cual fluía una corriente eléctrica. Al hacer al experimento, Madame Wu encontró que se emitían más electrones en la dirección de la espira desde la cual la corriente eléctrica parece fluir en el sentido de las manecillas de un reloj que en la dirección opuesta. Ahora bien: si suponemos que las leyes de la física son invariantes frente a las reflexiones en un espejo, al realizar el experimento "imagen" debería de obtenerse el resultado "imagen"; esto supone que al invertir la dirección del movimiento de la corriente en la espira deberían de emitirse más electrones en la dirección desde la cual la corriente parece circular en dirección contraria a la de las manecillas del reloj. Y eso *no es lo que sucede*. Se siguen emitiendo más electrones en la dirección desde la cual la corriente fluye en el sentido de las manecillas del reloj. En consecuencia, podemos distinguir entre el experimento "real" y su imagen especular; la naturaleza prefiere, al menos en este caso, una dirección sobre la otra. En otras palabras, la izquierda y la derecha no son equivalentes; la paridad se viola. Mediante un experimento como el de Madame Wu podemos comunicarle a nuestro hipotético interlocutor extraterrestre lo que entendemos por "izquierda" y "derecha".

Entre las múltiples consecuencias de la violación de la simetría izquierda-derecha la más importante, en lo que a nuestros fines concierne, fue la de proporcionar una evidencia experimental para una teoría bastante extraña que por entonces intentaba desarrollar el joven físico paquistaní Abdus Salam, de la cual hablaremos a continuación.

Unificación

Como mencionamos en el primer artículo de esta serie, los intentos por unificar las leyes naturales datan por lo menos de la época de Pitágoras. Probablemente los logros más grandes en este campo antes de nuestro siglo sean el de Newton y el de Maxwell. El primero unificó la gravitación, al mostrar que las leyes que gobiernan la caída de los cuerpos en la Tierra y las que gobiernan el movimiento de los planetas alrededor del Sol son, en realidad, una sola. El segundo demostró que la electricidad y el magnetismo son meramente dos aspectos diferentes de un mismo fenómeno: el electromagnetismo.

Ya en nuestro siglo, se ha buscado asiduamente la unificación. Einstein, por ejemplo, intentó unificar las fuerzas conocidas entonces, esto es, la gravitación y el electromagnetismo (en su época todavía no se descubrían ni la interacción fuerte ni la débil), pero su prematuro intento no tuvo éxito. Para dar el siguiente paso en esta dirección era necesario

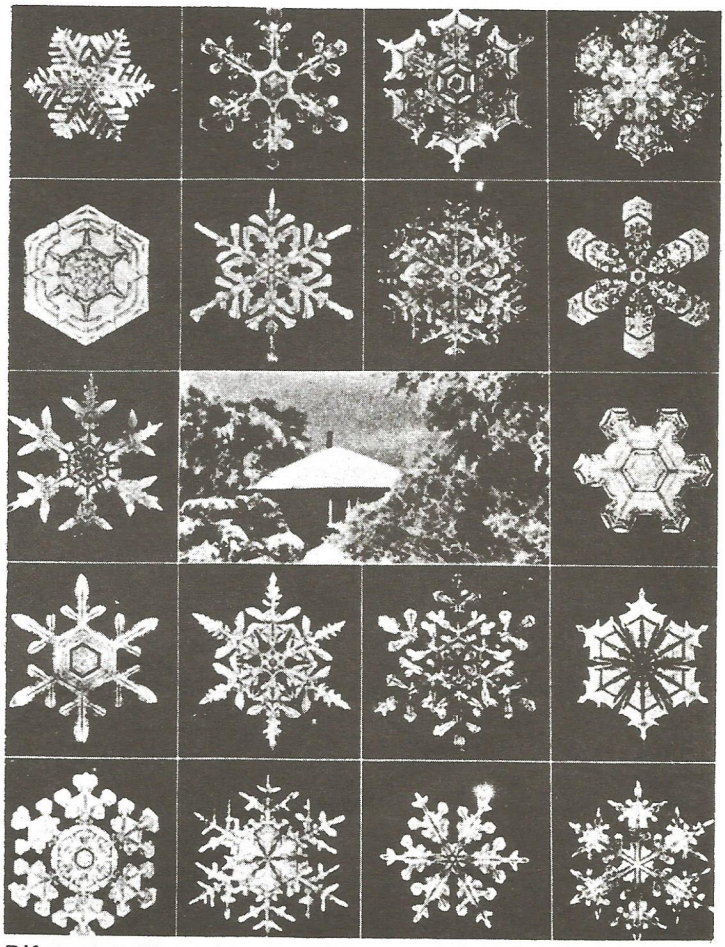
que se conocieran con cierta precisión las cuatro interacciones fundamentales (véase el número anterior de *Ciencia y Desarrollo*), lo cual no ocurrió sino hasta mediados del presente siglo. Para entonces ya se daba por hecho que las interacciones se deben al intercambio de partículas, y los físicos buscaban con ahínco las características de estas partículas. El fotón —el responsable de la interacción electromagnética— se conocía con relativa precisión pero, ¿qué partículas se intercambiaban en la interacción débil? ¿Qué propiedades tenían?

El primer paso para resolver el problema lo dieron, en 1956, dos físicos estadounidenses, Tsung Dao Lee y Chen Ning Yang, quienes demostraron teóricamente que ciertos problemas relacionados con la interacción débil podían resolverse si este tipo de interacción fuera capaz de discriminar entre electrones que "giran" hacia la izquierda y electrones que "giran" hacia la derecha (esto es, si se violara la paridad). De ser esto correcto, ciertos argumentos basados en la simetría suponían que las partículas intercambiadas —a las que, por cierto, se les dio el nombre de W^+ y W^- por sus cargas eléctricas— deberían tener espín 1. Como ya hemos mencionado, la violación de la paridad fue encontrada experimentalmente al poco tiempo por Madame Wu.

El siguiente paso lo dieron, en 1958, John Ward, Abdus Salam e, independientemente, Sheldon Glashow, quienes sugirieron que la fuerza débil y la fuerza electromagnética estaban conectadas de alguna manera, y demostraron (también por argumentos de simetría) que esta hipótesis requería de la existencia de *tres* partículas de intercambio: dos con carga eléctrica (las partículas W) y una neutra (hoy llamada Z^0). En otras palabras, la interacción débil y la electromagnética podían unificarse, pero esto suponía la existencia de una interacción que no se había detectado (la debida al intercambio de una Z^0) y, peor aún, que las dos partículas W, la Z^0 y el fotón tendrían que ser sólo diferentes aspectos de una única fuerza fundamental. Además, ¿cómo reconciliar esta conclusión con el hecho evidente de que la interacción electromagnética era completamente diferente a la débil? Sin ir más lejos, ¡una es de corto alcance y la otra es de alcance infinito! ¿Dónde queda, entonces, la simetría que obviamente deberían presentar las fuerzas débiles y las electromagnéticas? La solución a estos problemas, según veremos a continuación, es que la simetría no es manifiesta sino oculta; ha habido una ruptura de la simetría.

Rompimiento espontáneo de la simetría

Habíamos dicho que se habla de un "rompimiento espontáneo de la simetría" cuando en cierto sistema no se manifiesta de manera evidente la simetría de las leyes físicas que lo originaron. Las fuerzas eléctricas, por ejemplo, tienen simetría esférica o rotacional, ya que sólo dependen de la distancia entre las cargas, y no de que una de ellas esté "arriba", "abajo", "a la derecha" o "a la izquierda" de la otra. En cambio, cuando dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno se combinan para formar una molécula de agua, la molécula no resulta esféricamente simétrica; los átomos de hidrógeno quedan separados por un ángulo de 120 grados; la simetría se ha "roto". Otro ejemplo, más cercano al tipo de fenómenos que nos interesarán en adelante, es el de un imán. Los átomos de hierro (como la mayoría de los átomos) se comportan como pequeñísimos imanes. En un pedazo de hierro común y corriente no se aprecian estas propiedades magnéticas, porque los "mini-imanes" que los constituyen están orientados al azar, de manera que sus efectos magnéticos se anulan: por cada mini-imán que apunta en una dirección hay otro que apunta en la dirección opuesta. Pero si disminuimos la temperatura por debajo de un cierto valor —llamado "punto de Curie"—, los imanes atómicos se alinean espontáneamente en alguna dirección, y sumando sus efectos, convierten el pedazo de hierro en un imán. Las interacciones entre los imanes atómicos tienen simetría esférica; esto es, no tienden a alinearlos en alguna dirección preferencial, y por ello, no podemos predecir en qué dirección lo harán. Pero escogen alguna, totalmente al azar y, al hacerlo, provocan una *ruptura de la simetría*. En síntesis, una ruptura de la simetría se origina cuando aparece un *orden* en una situación que era simétrica. La ruptura, además, va acompañada por la aparición de una energía "extra" en el sistema; es el caso de la energía magnética del imán, que antes, aparentemente, no existía (en realidad, sí existía: era energía térmica). Por ello, si queremos regresar



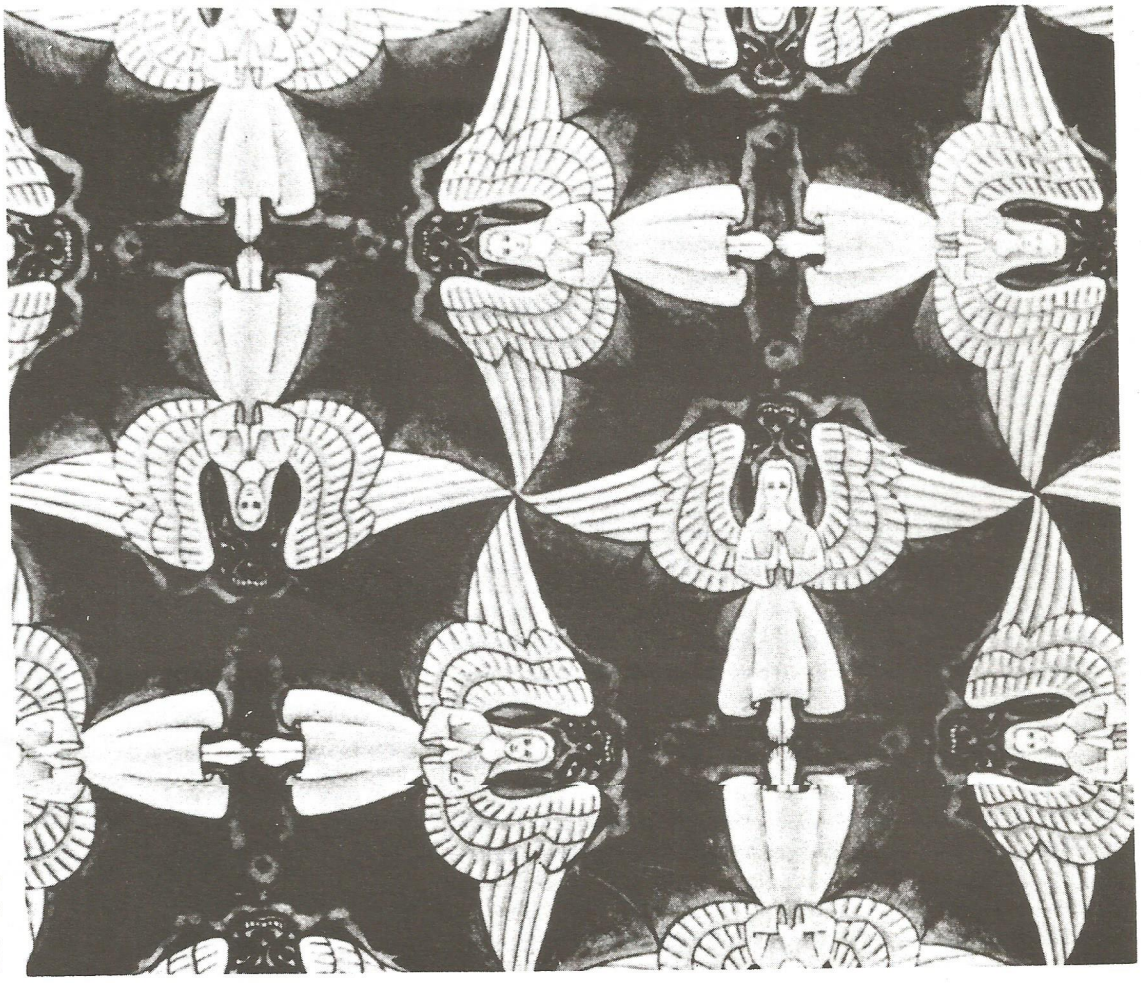
Diferentes simetrías exagonales que se observan en los cristales de los copos de nieve; al centro aparece un paisaje nevado. (SALVAT)

a la situación en que la simetría era manifiesta, hay que agregar energía (calentar el imán sobre su temperatura de Curie).

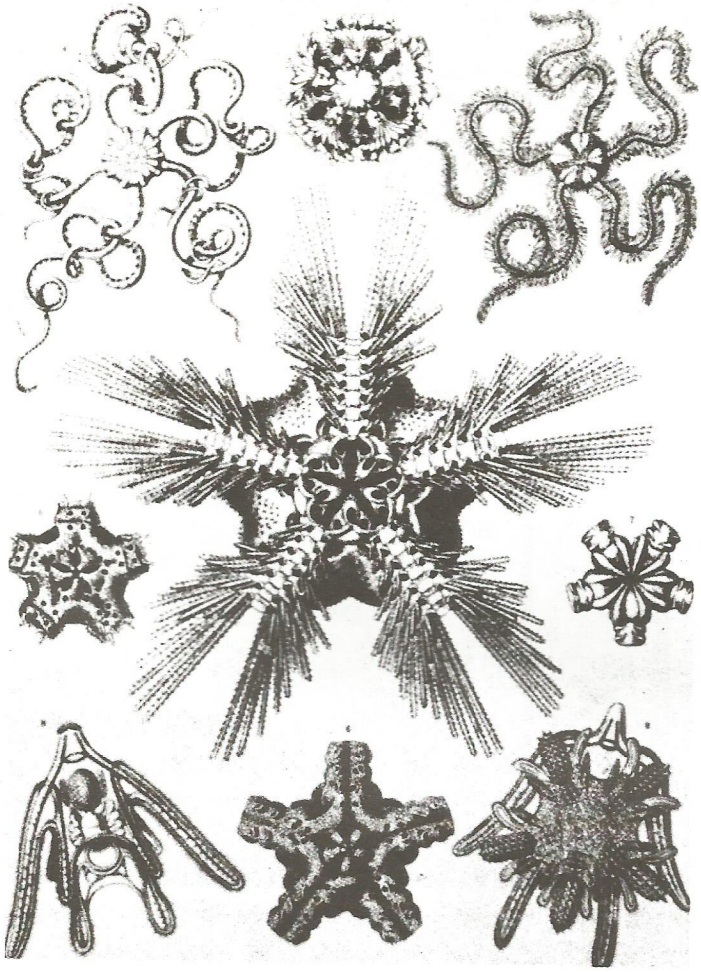
¿Qué tiene que ver todo esto con la unificación de la interacción electromagnética y la débil, esto es, con la llamada "unificación electro-débil"? Existe cierto tipo de simetría abstracta llamada "simetría de norma" (en inglés *gauge symmetry*). Aunque su definición técnica es muy complicada, podemos imaginarla, más o menos, como la expresión formal del hecho de que es posible redefinir el punto cero del potencial electromagnético sin alterar en absoluto las fuerzas electromagnéticas (ya que éstas dependen sólo de las *diferencias* de potencial) siempre y cuando hagamos algo más. Es importante notar que *no* podemos redefinir solamente el cero del potencial eléctrico; si lo hiciéramos, las leyes del electromagnetismo *sí* cambiarían. Para que no se alteren, debemos redefinir *también* el cero del potencial magnético, y hacerlo de una manera adecuada. En la mecánica cuántica, que es la rama de la física apropiada para tratar los sistemas subatómicos en general, las fuerzas se describen a través del intercambio de partículas; una consecuencia de imponer la simetría de norma es que si alteramos la descripción de las partículas debemos cambiar también la de las fuerzas, tal como si las partículas fueran el potencial eléctrico y las fuerzas el magnético.

Los físicos comenzaron a interesarse en las teorías de norma en la década de los años cincuenta, porque éstas tienen el atractivo de evitar definiciones arbitrarias de los potenciales; dicho de otra manera, en ellas sólo intervienen cantidades *medibles*, como las fuerzas. Además, estas teorías permiten construir esquemas capaces de unificar las diferentes interacciones, puesto que permiten el libre intercambio de unas partículas por otras (siempre y cuando se cambien también las transmisoras de las fuerzas entre ellas). La teorías de norma no gozaban de gran aceptación porque —al igual que en el caso de la unificación electro-débil de Salam— predecían la existencia de partículas de intercambio radicalmente diferentes entre sí, en contradicción con la supuesta unificación. Sin embargo, en 1967 Steven Weinberg y Abdus Salam, de manera independiente, publicaron sendos artículos revolucionarios en los que demostraron que las diferencias entre las partículas intercambiadas podrían ser sólo aparentes y deberse únicamente a una ruptura de la simetría. Es más, las masas de las partículas W (W^+ y W^-) y de la Z^0 provendrían, precisamente, del "exceso" de energía que aparece en toda ruptura de la simetría.

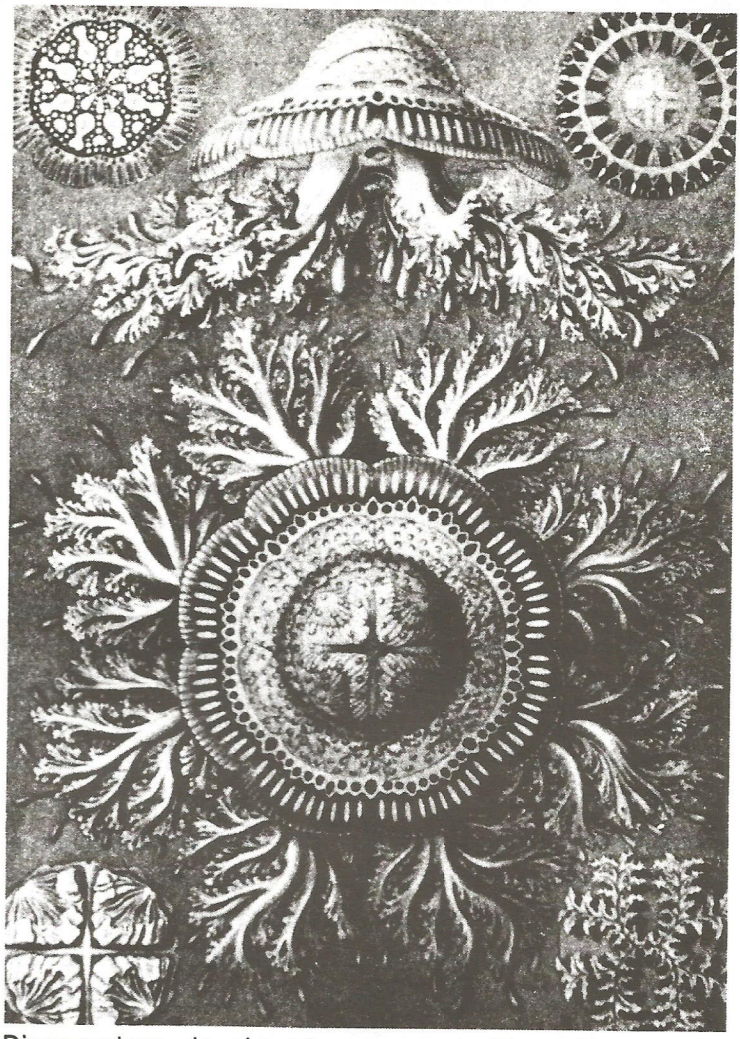
Aunque al principio los artículos de Weinberg y Salam tuvieron poca repercusión, ya cinco años después de su publicación los físicos experimentales buscaban con diligencia evidencias a favor o en contra de la teoría. Y en el año 1973, en dos laboratorios, el Fermilab y el CERN, se encontró la primera prueba a favor: se detectó (indirectamen-



Estudio de la división regular del plano con ángeles y diablos, M.C. Escher, 1941



La simetría aparece con frecuencia en los animales inferiores. Aquí se muestran varios equinodermos de la clase *Ophiodea*, cuyas larvas poseen simetría bilateral. (Ernst Haeckel, *Kuntsformen der Natur*, 1899)



Discomedusa de simetría octagonal. (Ernst Haeckel, *Kuntsformen der Natur*, 1899)

te) la partícula Z^0. Más recientemente, el 13 de enero de 1983, Carlo Rubbia anunció, en un congreso en Roma, la detección de la partícula W^-. La masa encontrada en los experimentos era de 81 $\pm$ 5 GeV, y la predicha por la teoría, de 82.1 $\pm$ 2.4 GeV. La dificultad principal a la que tuvieron que enfrentarse los experimentos era, precisamente, el altísimo valor de esta masa. Fue necesario esperar una década para que, con el advenimiento de grandes aceleradores capaces de generar enormes energías, fuera posible su detección. Con ello, la validez de la unificación electro-débil quedó establecida.

Teorías de la Gran Unificación (*GUTS*)

Obviamente, el siguiente paso fue buscar la unificación de la fuerza electro-débil y la fuerte. Aunque este problema sigue siendo de candente actualidad, mucho se ha avanzado y existen hoy día numerosas teorías que logran dicha unificación (entre las cuales, desafortunadamente, aún no es posible decidir). Sin embargo, todas ellas tienen algo en común: dado que al unificarse las fuerzas electro-débil y fuerte los bariones y los leptones pasan a ser meros aspectos diferentes de un solo ente fundamental, es posible, según las teorías, que un barión se convierta en una "cascada" de leptones (esto es, que no se conserve el número de bariones). En consecuencia, es de esperarse que el protón —que hasta ahora se había considerado como una partícula estable— decaiga en otras partículas, ninguna de las cuales sea un barión.

Y aquí volvemos, por un momento, a la cosmología. Si los bariones pueden decaer —y, por lo tanto, los antibariones también— es posible partir de un universo simétrico (con el mismo número de bariones y de antibariones) y llegar a uno en el que predominen los bariones (como en nuestro Universo). Con ello, el problema del predominio en el Universo de la materia sobre la antimateria (al cual nos referimos en el número 82 de *Ciencia y Desarrollo*) podría resolverse. Por esta razón, y para probar la validez de una u otra de las teorías de la Gran Unificación (en inglés, *Gran Unification Theories*, o *GUTS*), los físicos experimentales están intentando detectar el decaimiento del protón. Por desgracia, hasta la fecha no se ha encontrado ni un solo protón que decaiga; únicamente se ha logrado imponer un límite inferior a su vida media, que hasta el momento es de 10^{32} años. Pero de esto, y de otros aspectos igual de interesantes acerca de la profunda unión entre la física del micromundo y la historia del Universo en su conjunto, seguiremos hablando en el próximo artículo.