

La física del siglo XXI

¿De qué está hecho el mundo y lo que lo rodea?, ¿cuándo y cómo empezó el Universo?, ¿qué es lo más pequeño que existe? Durante miles de años, estas preguntas han estimulado la imaginación de muchas personas. Los antiguos griegos, por ejemplo, tenían el concepto de átomo como la unidad de materia más pequeña e indivisible. Pero es en los últimos dos siglos, y sobre todo en los pasados cien años, cuando los avances matemáticos, conceptuales y tecnológicos permitieron a los físicos explorar en forma más sistemática las respuestas a estas y otras preguntas, aunque todavía queda mucho por resolver.

La mecánica cuántica y la teoría de la relatividad revolucionaron la forma en que percibimos el mundo. El siglo pasado presenció adelantos sin precedentes en la física teórica. Uno de ellos es la teoría moderna de las partículas elementales, la cual describe los bloques fundamentales de la materia, las partículas más pequeñas e indivisibles, además cómo interactúan entre sí, cómo se mantienen unidas y cómo reaccionan ante las diferentes fuerzas. Este conjunto de conocimientos se encuentra representado en el modelo estándar de las partículas elementales, el cual usa el formalismo matemático que combina la mecánica cuántica con la relatividad, incluyendo creación y aniquilación de partículas, conocido como teoría del campo.

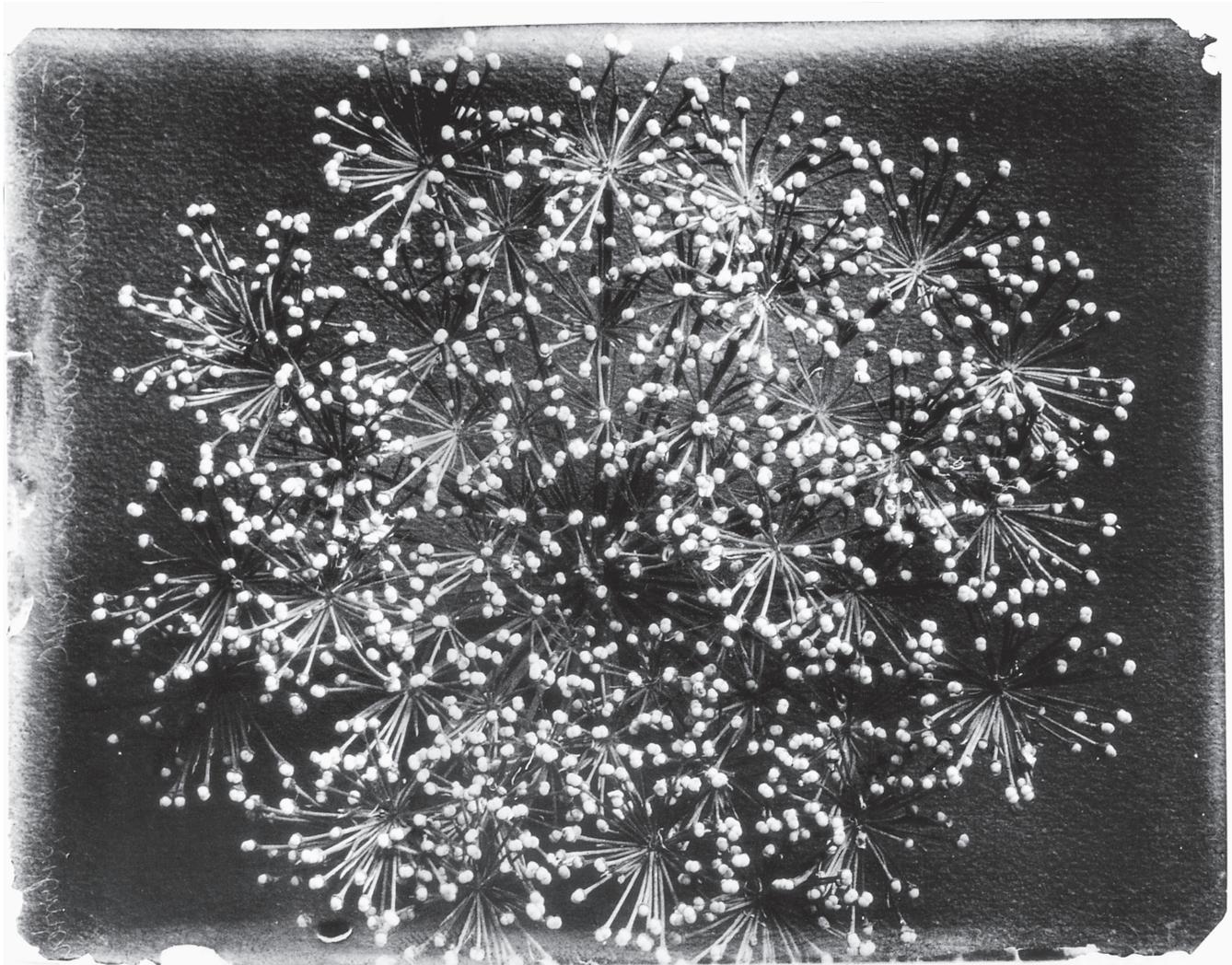
Resulta claro que si todo está compuesto de bloques fundamentales, las propiedades de éstos determinan la estructura del Universo en su conjunto. De ahí que exis-

ta una importante conexión entre la física de partículas elementales, la de astropartículas y la cosmología.

A partir de pocos elementos, seis quarks, seis leptones y las partículas que transmiten la fuerza entre ellos, el modelo estándar explica todas las partículas compuestas que conocemos y la forma en que interactúan. Sin embargo, dista mucho de ser una teoría completamente satisfactoria. En qué consiste y hasta dónde llega nuestro conocimiento sobre las partículas fundamentales son la base para entender por qué seguimos buscando mejores respuestas.

Los quarks y los leptones son las partículas más pequeñas de la materia. Los primeros se encuentran dentro del núcleo del átomo y tienen propiedades poco comunes. Por ejemplo, a diferencia de los protones y electrones, que tienen carga eléctrica $+1$ y -1 , los quarks tienen una carga fraccionaria, $\pm 2/3$ y $\pm 1/3$. Además poseen otro tipo de carga conocida como color y representada con los tres colores primarios. Casi toda la materia que nos rodea está compuesta de combinaciones de dos tipos de quarks, los *up* y los *down*. Los quarks nunca se encuentran aislados porque para uno es energéticamente más favorable juntarse con otro y formar otra partícula, que estar solo. A esta propiedad se le llama confinamiento. Los leptones, en cambio, se encuentran solos. Los hay cargados, como el electrón, o neutros, como los neutrinos.

Hasta aquí todo es razonablemente sencillo; sin embargo, existen más quarks y leptones —además de los *up*,



Myriam Mondragón

down, electrón y neutrino—, todos con los mismos números cuánticos y propiedades, pero con masas extremadamente diferentes. A cada grupo de quarks y leptones se le conoce como familia, y se distingue entre tres familias manifestando que los quarks y leptones vienen en tres diferentes sabores —aunque, al contrario del color, no se asignó un sabor particular, como dulce o amargo. El primer misterio sin resolver: sabemos, por observaciones cosmológicas y por los experimentos de partículas, que sólo hay tres generaciones de familias y que cuando se crean, las partículas más pesadas decaen inmediatamente a las más ligeras. Pero, ¿por qué, si al final todas las partículas decaen a la primera familia, aparecen dos generaciones más pesadas?, y también ¿por qué sólo hay

dos generaciones más pesadas y no más, por ejemplo, seis o incluso una cantidad infinita de ellas?

En el modelo estándar, las interacciones de una partícula son todas las fuerzas que la afectan —es decir, la manera en que la presencia de otras partículas la perturban—, sus decaimientos y aniquilaciones. En este caso, el meollo del asunto consiste en explicar cómo dos objetos pueden afectarse el uno al otro sin tener contacto. La razón es que las partículas de la materia intercambian otro tipo de partículas que son portadoras de fuerza. Es necesario señalar que una fuerza y una interacción no son exactamente lo mismo, pero por simplicidad muchas veces estos nombres se usan indistintamente.

Hay cuatro interacciones fundamentales: la gravedad,



la electromagnética, la fuerza fuerte y la débil. La gravedad y el electromagnetismo pertenecen a nuestra experiencia cotidiana. La fuerte y la débil actúan en el nivel atómico y subatómico, de manera que no las percibimos. El electromagnetismo es el responsable de que objetos con cargas iguales se repelen y con cargas opuestas se atraigan, su partícula mediadora es el fotón y, hasta donde sabemos, no tiene masa y viaja a la velocidad de la luz. La fuerza de gravedad afecta todos los objetos con masa, pero como la de las partículas fundamentales es tan pequeña los efectos gravitatorios son despreciables. En parte, esto es una suerte porque en el modelo estándar no puede explicarse satisfactoriamente la gravedad. Además, no se ha encontrado el gravitón, que sería su partícula mediadora. Hasta ahora no hay una teoría completa y matemáticamente coherente sobre la gravedad cuántica.

La fuerza fuerte es la que perciben los quarks, como su nombre lo indica es muy intensa y eso hace que se mantengan unidos y formen otras partículas. Sus mediadores son los gluones —de *glue*, pegamento en inglés— que, como los propios quarks, poseen carga de color. A la teoría que describe estas complejas interacciones se le conoce como cromodinámica cuántica. La cuarta y última interacción, la fuerza débil, tiene que ver con el decaimiento de las partículas. Es decir, con la aparición de nuevas partículas de menor masa a partir de otras que pierden energía cinética. Usa tres partículas mediadoras, W^+ , W^- y Z . Los W^\pm tienen carga eléctrica y el Z es neutro. Al contrario del fotón que no tiene masa, los W y el Z son muy masivos. Sin embargo, desde hace algunos años sabemos que en realidad la fuerza electromagnética y la débil son dos aspectos de una misma interacción: la fuerza electrodébil.

Finalmente, así como la interacción débil explica cómo surgen partículas con menor masa, también es necesario explicar qué clase de interacción provoca que las partículas adquieran masa. Un intento por aclarar ese fenómeno es el mecanismo de Higgs, pero supone la existencia de una partícula llamada bosón de Higgs, que hasta ahora no se ha encontrado.

El mecanismo de Higgs

Una analogía muy citada para describir cómo funciona el mecanismo de Higgs es la siguiente: imaginemos que estamos en un cuarto donde hay una fiesta con mucha gente; de pronto, llega una persona famosa, que en nuestro

caso sería la partícula que incrementará su masa. En el momento que entra por la puerta, la gente se aglomera a su alrededor y conforme se mueve atrae más gente. Esto aumentará su resistencia al movimiento, lo que a su vez es indicio de que adquirió masa.

El equivalente del cuarto lleno de gente sería el campo de Higgs y, como el campo electromagnético, se supone que llena el Universo. De hecho, así como un electrón que se mueve a través de una red cristalina de átomos cargados positivamente puede aumentar su masa hasta cuarenta veces, se supondría que una partícula moviéndose por el campo de Higgs lo perturbaría, como lo hace el famoso en la fiesta, y de esta manera adquiriría masa. Sin embargo, como se señaló, el bosón de Higgs es la única partícula del modelo estándar que todavía no se ha encontrado. Suponemos que es una partícula fundamental como las otras, pero realmente no conocemos su naturaleza. Buena parte de los futuros experimentos estarán dedicados a buscar esta partícula, sus propiedades e interacciones. También aquí surgen preguntas interesantes, ¿existe realmente una partícula como el Higgs o es únicamente un recurso matemático y en realidad el mecanismo por el cual adquieren masa las partículas es otro?

Para fines prácticos, el modelo estándar funciona muy bien suponiendo la existencia de esa partícula. Sin embargo, podría ser que el Higgs resultara un condensado de dos fermiones y no una partícula fundamental o bien que hubiera más de uno. Su naturaleza podría revelar interacciones fuertes hasta ahora insospechadas. Por esto, la búsqueda del bosón de Higgs es uno de los aspectos más estimulantes de la actual física de partículas.

Además de todas las partículas mencionadas, por cada una existe su respectiva antipartícula. Las últimas tienen la misma masa que las primeras, pero con todos los números cuánticos opuestos; por ejemplo, carga eléctrica opuesta y carga de color opuesta. Sabemos que sólo observamos cinco por ciento de toda la materia que existe en el Universo, el restante noventa y cinco por ciento es otra forma de materia cuyas propiedades desconocemos —es decir, no es ni materia, ni antimateria—, llamada materia oscura. Además, cabe señalar que el cinco por ciento que observamos es materia, pero no vemos regiones hechas de antimateria. Otra vez surgen preguntas, ¿por qué el cinco por ciento de la materia observable está hecho de materia y no de antimateria?, ¿qué es exactamente la materia oscura?

Por otro lado, por problemas de consistencia de la teoría del campo, sabemos que el modelo estándar probablemente sólo es válido hasta cierto rango de energía. De igual forma que la descripción adecuada para la dinámica a velocidades comparables a la de la luz es la relatividad y para fenómenos a velocidades muy pequeñas comparadas con la de la luz es la dinámica de Newton, pensamos que el modelo estándar sólo es válido hasta cierto punto, después del cual, hay una física que, por lo pronto, no conocemos o una descripción matemática diferente; aunque lo más probablemente es que sea una combinación de ambas.

Las matemáticas son el lenguaje de la física, por eso conceptos como los de elegancia y simplicidad han sido una poderosa guía en nuestra descripción de la naturaleza. Las ecuaciones deben emanar de lo que las haga atractivas, distinguidas y que, igual que en la moda, lleven al deseo de imitarlas. En física, esto significa que si un determinado fenómeno es descrito de manera simple y elegante es probable que esa descripción pueda aplicarse en otras áreas de la física con similar éxito. El mecanismo de Higgs es un buen ejemplo de ello.

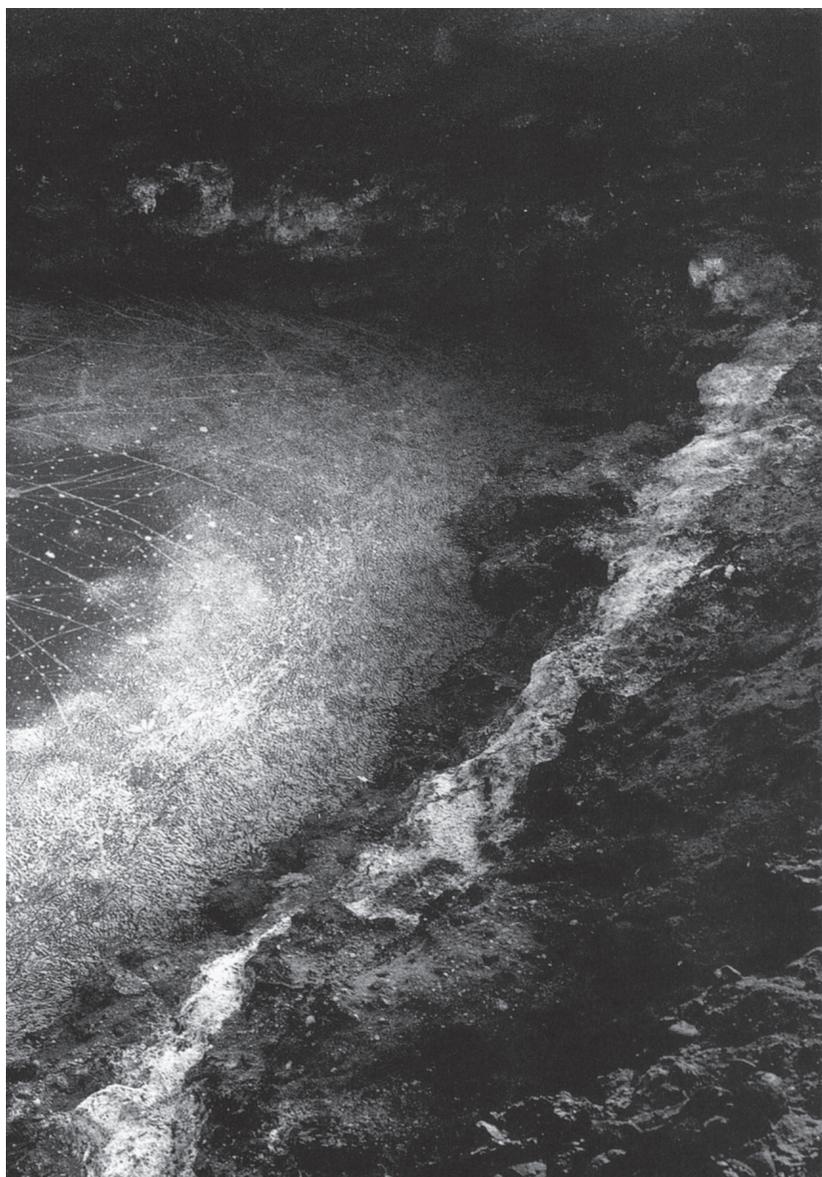
Simetría y unificación

Un concepto muy apreciado es el de simetría, por el cual se entiende que una propiedad de las partículas permanece igual cuando sufre un cambio o transformación. Una simetría puede ser algo sencillo, como una rotación, o más complicado, como cambiar de signo la carga de la partícula y hacerle una inversión en el espacio —combinación llamada conjugación de carga y paridad. Ligado al de simetría, otro concepto que prueba ser notablemente útil, eficaz y elegante, es el de unificación, por el cual entendemos que dos fenómenos que se creían no relacionados y se describían de distintas maneras, en realidad pueden describirse de la misma forma y son dos aspectos del mismo fenómeno. Las unificaciones en la física llevaron a descripciones más simples, pero también trajeron sorpresas. La primera fue la de las electricidades, hecha por Faraday. Después el electromagnetismo por Maxwell. La unificación de la fuerza débil y el electromagnetismo en la fuerza electrodébil tuvo como consecuencia la incorporación de una nueva partícula al modelo estándar, el bosón de Higgs. Einstein también siguió la idea de unificación, pero en este caso la de la gravedad y el electromagnetismo, simplemente notando que ambas tienen la pro-



iedad de que la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia. Sin embargo, esta no se ha encontrado en la naturaleza. Con el descubrimiento de las fuerzas débil y fuerte quedó claro que la unificación de las interacciones fundamentales se llevaría a cabo en forma más complicada. La de la fuerza electromagnética con la débil resultó en la teoría electrodébil. El siguiente paso sería unificar ésta con la fuerte y eventualmente con la gravedad.

Recientemente se han desarrollado diversas ideas para tratar de explicar algunos de los misterios sobre la estructura de la materia. Sin embargo, no es una tarea sencilla por la exigencia de que debe ser matemáticamente con-



sistente, no contradecir los datos experimentales y, por lo tanto, encajar en el modelo estándar y ser compatible con lo que sabemos de astropartículas y cosmología. Es como armar un rompecabezas gigante y complicado, pero que cuando se termine, nos mostrará una imagen tanto de las partículas fundamentales como del cosmos.

Teorías de gran unificación

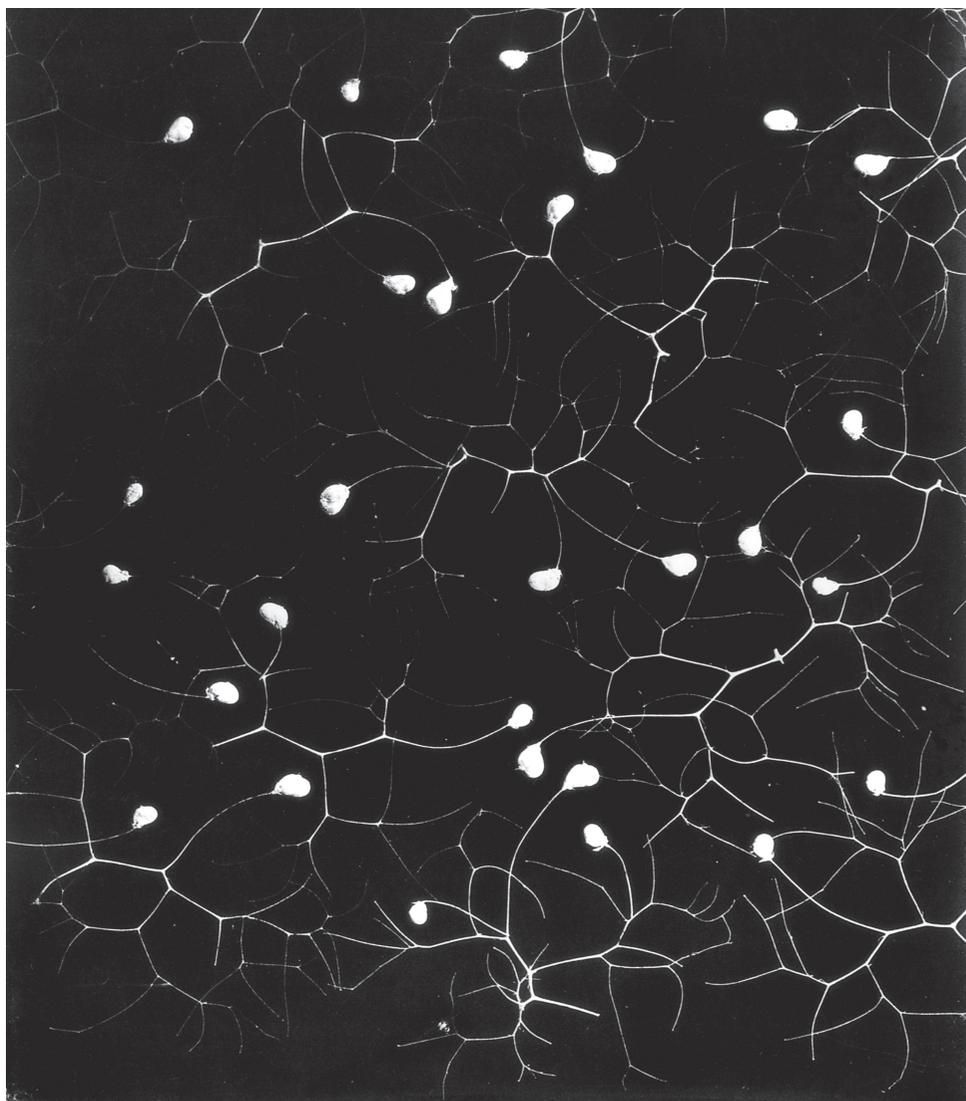
Los intentos por continuar con la idea de la unificación originaron las teorías de gran unificación o GUT —por sus siglas en inglés. En éstas todas las interacciones fun-

damentales, excepto la gravedad, se unifican a energías muy altas. Las constantes de acoplamiento de las tres fuerzas, que miden con qué intensidad se acoplan a los campos, se vuelven de la misma intensidad a energías muy altas. De manera que existiría una sola fuerza fundamental —la unificada. Esto significa que a estas energías hay una mayor simetría, donde todos los acoplamientos y las masas serían del mismo orden de magnitud, lo que permitiría explicar algunas de nuestras preguntas, como la carga fraccionaria de los quarks, el número de generaciones o los cocientes de masas entre las partículas.

Por otro lado, ya señalamos que las partículas se separan por sus diferentes propiedades —carga eléctrica, carga de color, sabor, entre otras—; una fundamental es el espín, que en el mundo macroscópico sería algo así como la rotación de la partícula sobre su propio eje —lo que se conoce como momento angular—, en el microscópico decimos que el espín es el momento angular intrínseco de la partícula, y mide 0, $1/2$, 1, $3/2$, etcétera. Los fermiones tienen espín semi-entero y dos iguales no pueden ocupar simultáneamente el mismo estado. Los bosones tienen espín entero y, a diferencia de los primeros, pueden agruparse en un mismo estado. Por lo tanto, tienen propiedades estadísticas muy diferentes. A la simetría entre los bosones y fermiones se le conoce como supersimetría (SUSY).

La supersimetría dice que por cada bosón o fermión fundamental existe un supercompañero supersimétrico con la estadística opuesta. Es decir, a todos los fermiones les corresponde un bosón y a los bosones un fermión.

La idea de unificar bosones y fermiones no sólo es muy atractiva, sino que además, desde el punto de vista matemático, resulta en una teoría mejor comportada, que resolvería algunos de los problemas de consistencia matemática del modelo estándar. Sin embargo, en los actuales experimentos no se observa esta clase de simetría, los bosones y fermiones fundamentales no están relacionados entre sí. Esto significa que o bien la supersimetría no existe o si existe debe manifestarse a energías más altas de las que tenemos en los laboratorios —se dice que a energías bajas la simetría está rota. Por esto, si uno construye una teoría supersimétrica como una extensión del modelo estándar, los supercompañeros de las partículas elementales que observamos tendrían que tener masas muy grandes. Este es otro de los temas fundamentales que se habrán de explorar en futuros aceleradores. Una notable consecuencia de la



supersimetría es que la materia oscura sea uno de estos compañeros supersimétricos.

Las dos simetrías mencionadas tienen ventajas y belleza, pero la combinación sale aún mejor. Al extrapolar a energías altas los valores de las constantes de acoplamiento en teorías con supersimetría resulta que éstas convergen de manera más clara que en las teorías GUT sin supersimetría. Esto significa que a energías muy altas —o en distancias muy pequeñas— sólo habría una interacción fundamental además de la gravedad. Este resultado, combinado con las ventajas que por separado presentan las teorías GUT y la supersimetría, hace que las teorías supersimétricas de gran unificación sean muy populares.

Cabe señalar que los intentos por unificar las cuatro

fuerzas fundamentales siempre presentan problemas en el caso de la gravedad. Si tratamos la teoría de la relatividad general con la misma descripción matemática que las otras teorías, surgen inconsistencias manifestadas en cantidades infinitas que no se pueden desaparecer —regularizar. Así, la teoría resultante no tiene sentido. Sin embargo, cuando la supersimetría, que es una simetría global —que se transforma uniformemente a través del espacio-tiempo—, la volvemos local; es decir, cuando hacemos que sus transformaciones varíen en el espacio-tiempo, aparece una partícula con las propiedades del gravitón. De manera que al tratarla como una simetría local, la supersimetría se conecta con la relatividad general y la gravedad queda automáticamente incluida. Más aún, estas teorías parecen estar libres de algunas de las mencionadas cantidades infinitas. Esto se debe al efecto de los supercompañeros predichos por la supersimetría. Sin embargo, todavía sería necesario encontrar el gravitón, la partícula que media la gravedad y que, en contraste con las otras partículas mediadoras de la fuerza, tiene espín 2. ¿Será que realmente existe?

Por otro lado, como suponemos que la gravedad es válida en distancias extremadamente pequeñas, en

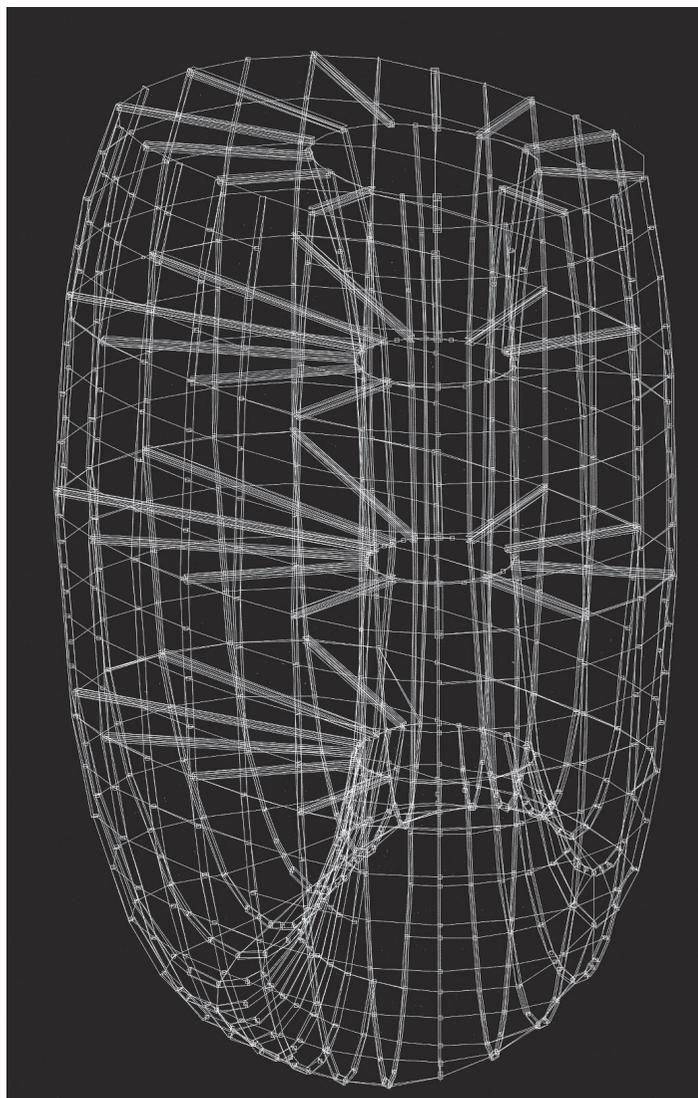
tonces una descripción microscópica de la gravedad implica hablar de la curvatura del espacio-tiempo en esas distancias, con métodos cuánticos; es decir, probabilidades. Inmediatamente surgen varias preguntas, ¿es la relatividad general una teoría válida en distancias pequeñísimas?, ¿es realmente posible una descripción cuántica de la gravedad?, y si es así, ¿son las matemáticas que estamos usando las adecuadas? Formulado de otra manera, ¿cuál es la descripción correcta del espacio-tiempo en distancias arbitrariamente pequeñas? Ya sabemos por la relatividad general que una masa grande deforma el espacio-tiempo, en distancias pequeñísimas, ¿cuál es el efecto de la masa en el espacio-tiempo y viceversa?

Teoría de cuerdas

En paralelo al esfuerzo de unificación, creció el interés en continuar con la descripción geométrica del espacio-tiempo. La idea es que tanto las partículas como sus masas pueden describirse geoméricamente.

A principios del siglo xx, Theodor Kaluza intentó unificar la teoría general de la relatividad con el electromagnetismo introduciendo una quinta dimensión en sus cálculos. Así logró describir las dos con el mismo formalismo. Sin embargo, parecía sólo un truco matemático, porque no observa ninguna dimensión espacial, además de las que conocemos. Años después, Oscar Klein propuso que esta quinta dimensión podría estar enrollada en sí misma como un pequeño cilindro o un popote. Entonces desde lejos sólo se ve una línea, pero si se es del tamaño de esta dimensión —una hormiga, por ejemplo— podría desplazarse a lo largo del popote o alrededor del mismo. En esta quinta dimensión, la gravedad se comporta exactamente como el electromagnetismo en las cuatro dimensiones que conocemos. A las teorías del campo que contienen esta clase de dimensiones extra se les conoce como teorías de Kaluza-Klein.

Una idea que combina todas estas posibilidades es que las partículas en distancias muy pequeñas sean bidimensionales; es decir, cuerditas. Una cuerda además de desplazarse, como lo hace un punto, también puede vibrar y son precisamente estas vibraciones las que percibimos como partículas. Diferentes modos de vibración corresponderían a diferentes partículas. Por tanto, sólo habría un componente fundamental, la cuerda y sus distintos modos de vibración. Una propiedad sorprendente de esta descripción, que condujo a muchos teóricos al estudio de las teorías de cuerdas, es que una de estas vibraciones correspondería al gravitón. Es decir, la gravedad aparece naturalmente unificada con las otras interacciones fundamentales. Para ser más precisos, resulta en algo que coincide con la relatividad general para distancias en las que ésta es una descripción adecuada, pero para distancias más pequeñas —las de las cuerdas— resulta en una teoría que no tendría los problemas que aparecen en una unificación tradicional. Esto parecería el fin de nuestra búsqueda si no fuera por varios detalles, la teoría debe ser matemáticamente coherente y si trata de las partículas y sus interacciones, debe describirlas. Por consistencia matemática, las teorías de cuerdas deben incluir la supersimetría. Además, ¡las cuerdas deben



existir —en su versión más sencilla— en seis dimensiones espaciales más de las que conocemos! Éstas se encuentran enrolladas en sí mismas —como en las teorías de Kaluza-Klein— razón por la cual no las vemos.

Además, en teoría de cuerdas aparecen unos objetos llamados branas. El nombre deriva de la generalización de una membrana en más dimensiones. Una cero-brana sería una partícula, uno-brana una cuerda, dos-brana una superficie y así sucesivamente. Se les conoce como D-branas o D_p -branas, donde el prefijo p denota la dimensión. Las cuerdas cerradas pueden moverse libremente, pero las abiertas tienen sus extremos fijos a una D-brana. Cuando una cuerda cerrada se acerca a una D-brana puede abrirse y pegarse a ella. Como el gravitón corres-

pondería en la descripción de cuerdas a la vibración de una cuerda cerrada y las partículas fundamentales a las vibraciones de cuerdas abiertas, la gravedad podría desplazarse entre las branas —espacio conocido como bulto o bulk—, pero las otras interacciones estarían condenadas a vivir sobre la brana. Una propuesta es que nuestro Universo es una D3-brana en un espacio de más dimensiones, pero no podemos observarlas por no poder despegarnos de ella. Sólo la gravedad podría escapar de la brana. Recientemente, existe mucho interés en esta área de la física teórica y las matemáticas por la conexión que provee entre la geometría diferencial y algebraica, descripciones de la mecánica cuántica de hoyos negros y posibles nuevas teorías cosmológicas. Las matemáticas de las dimensiones extra en estas teorías se pueden trasladar a la física de cuatro dimensiones en forma determinada por los tipos de D-branas y por cómo se envuelven en la geometría interna del espacio, de manera que aparecen como partículas en cuatro dimensiones.

Los últimos adelantos en teoría de cuerdas indican que sólo hay cinco consistentes matemáticamente. Todas tienen diez dimensiones —una espacial y nueve temporales— y son supersimétricas. Más aún, todas son equivalentes entre sí y a una teoría de supergravedad en once dimensiones.

La cosa se complica cuando queremos hacer contacto con las partículas e interacciones que observamos. Conforme vamos a energías más bajas, o distancias más grandes, deberíamos pasar suavemente de la teoría de cuerdas al modelo estándar, quizás transitando por una teoría de gran unificación, una teoría de Kaluza-Klein o alguna combinación. Sin embargo, son innumerables las

formas que pueden tomar las dimensiones compactas y, además, en las teorías de cuerdas aparecen muchas más partículas de las que observamos. Por esto, no existe ni con mucho un sólo camino, ni siquiera una sola clase de caminos, para llegar a la descripción de bajas energías. No obstante, los desarrollos matemáticos de las teorías de cuerdas y branas son impresionantes y, en algunos casos, ya se han aplicado con éxito en otras ramas de la física, como en el caso de ciertos aspectos de dinámica de membranas en biofísica.

A pesar de los espectaculares avances en la física y las matemáticas en el último siglo, la verdadera naturaleza del espacio-tiempo, de las partículas elementales y de las fuerzas fundamentales todavía nos elude. En buena medida, debido a la falta de información experimental que proporcione una guía y probablemente a que todavía se necesitan más desarrollos matemáticos. Sin embargo, los experimentos en los aceleradores futuros están diseñados precisamente para tratar de contestar o dar luz a muchas de estas preguntas. Por otro lado, las observaciones cosmológicas, aunque lejos de tener la precisión de un experimento controlado en el laboratorio, se han perfeccionado y son más precisas en los años recientes. Los observatorios de rayos cósmicos también suministrarán información sobre partículas ultraenergéticas y sus posibles conexiones con algunas de las extensiones del modelo estándar y cosmología. Las matemáticas seguirán desarrollándose para describir estas observaciones. Pero, como siempre, la última palabra será de la naturaleza, que a pesar de la gran imaginación en todas las ideas que se han descrito, seguramente volverá a sorprendernos. ❀



Myriam Mondragón
Instituto de Física,
Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Greene, B. 2001. *El universo elegante: supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final*. Planeta.
Penrose, R. 2004. *The road to reality: a complete guide to the laws of the Universe*. Jonathan Cape.

IMÁGENES

Pp. 25, 30 y 32: Karl Blossfeldt. *Sin título; sin título y Cucubita*. P. 26: Aaron Siskind. *El viñedo de Marta*, 1992. Pp. 28 y 29: Wynn Bullock. *Tide pool*, 1957. P. 31: Masaki Endoh y Masahiro Ikeda. *Elipse natural*, 2001-2002.