

¿QUE ES LA TEORIA M?

Por Carmen Núñez

M es el nombre de la teoría que pretende explicar todo el universo, desde las partículas elementales y los átomos hasta las galaxias y el big bang. ¿Por qué M, un título tan breve para un objetivo tan ambicioso? Hay varias acepciones posibles, según las preferencias del físico que lo justifica. La M de madre refleja la intención de ser el origen de todas las explicaciones o de contener las leyes primordiales de la física. La M de magia, misterio o milagro refiere, en cambio, al asombro que despiertan sus propiedades y su aparente capacidad de unificar todas las interacciones o fuerzas fundamentales de la naturaleza, una meta perseguida durante mucho tiempo y considerada quizás inalcanzable. La más modesta M de membrana ilustra ciertas características técnicas de la teoría.

¿En qué sentido pretende M explicar todo?

La física busca verdades universales sobre la naturaleza. Cuando estas verdades se encuentran, se trata de explicarlas apelando a principios más profundos, a verdades más fundamentales a partir de las cuales se puedan deducir las anteriores. Estas certezas más esenciales, a su vez, se tratan de entender recurriendo a razones todavía más básicas. Y así sucesivamente. Siguiendo las cadenas de explicación, desde la vida cotidiana hasta el mundo microscópico, varias de las preguntas más antiguas—¿Por qué el cielo es azul? ¿Por qué el agua es líquida y se evapora al hervir?—se han respondido en términos de las propiedades de los átomos y de la luz. Estas propiedades, por su parte, se deducen de sus componentes, las partículas elementales, cuyas propias peculiaridades se pueden deducir a partir de estructuras más simples. El punto inicial de todas las explicaciones es lo que se entiende por la teoría madre. Este reduccionismo o búsqueda de principios cada vez más elementales, más básicos, se ha dado en la física históricamente a través de unificaciones de teorías. La tendencia a la descripción unificada de fenómenos considerados previamente independientes, la búsqueda de principios aglutinadores, permitió a lo largo del desarrollo de la disciplina explicar más hechos que los contenidos originalmente en las partes que se intentaba amalgamar y se convirtió en la guía orientadora de la evolución de esta ciencia.

La idea de encontrar un principio fundamental a partir del cual derivar las leyes del universo no es reciente. La humanidad ha buscado desde épocas muy remotas comprender las diversas manifestaciones de la naturaleza como diferentes aspectos de un mismo fenómeno (o conjunto de fenómenos). En Occidente, el origen de estas ideas se remonta a los presocráticos, quienes buscaban las explicaciones de todos los fenómenos naturales en términos de algún elemento fundamental: agua, aire, tierra o fuego. La primera teoría madre, elaborada por Leucipo y Demócrito en el siglo V a.C., postulaba que los constituyentes últimos e indivisibles de la materia eran los átomos. Esos átomos eran muy diferentes de los que conocemos hoy, pero hay una diferencia más importante entre aquellas teorías antiguas y la ciencia moderna: la actual

exigencia de verificación experimental. Una explicación científica moderna debe contener una comprensión **cuantitativa** de los fenómenos. ¿Cuánto progresamos en el conocimiento de la naturaleza si aceptamos que el agua o los átomos son los constituyentes fundamentales de la materia, si no podemos calcular propiedades como la densidad, la resistencia o la conductividad eléctrica? Y por lo tanto, sin la capacidad de hacer predicciones experimentales, nunca podríamos comprobar si la explicación presocrática o la de Demócrito es la acertada.

En la actualidad, los cuatro siglos de desarrollo de la física han permitido acumular gran cantidad de información y reducir drásticamente el número de principios fundamentales. Hoy sabemos que todos los fenómenos naturales, por más variados y diferentes que parezcan, se pueden explicar en términos de cuatro interacciones o fuerzas fundamentales: la gravitatoria, la electromagnética y las subatómicas fuerte y débil. Pero a pesar de haber logrado restringir tan abruptamente la complejidad del problema, todavía no se ha encontrado la teoría original, la que unifica estas cuatro interacciones fundamentales. Sólo hay algunos indicios que guían la búsqueda. Estas son las pistas que trata de organizar la teoría M y que nosotros intentaremos describir en este artículo. Como el tema es muy técnico, introducimos algunos conceptos e ideas que resultan necesarios a través de una breve historia de la física. Este recorrido histórico, con especial atención a las unificaciones logradas, nos ayudará a explicar por qué la búsqueda de la teoría madre se realiza en el contexto de la física de altas energías. En la segunda parte describimos la teoría M, indicando sus logros y debilidades y resumiendo la manera en que resuelve los problemas que presentan teorías previas.

Las cuatro interacciones fundamentales

- *Gravitación*

La mecánica clásica, cuyos principios básicos fueron establecidos por Newton en el siglo XVII, marca el comienzo de la ciencia moderna y representa el primer paso en la búsqueda de la teoría madre. La mecánica newtoniana unificó las leyes que rigen el movimiento de los cuerpos celestes y de los terrestres, las leyes de la dinámica y de la gravitación universal.

No es casual que la gravedad inicie el camino, ya que es la más familiar de todas las fuerzas. Es la única interacción **universal**, pues actúa entre todas las partículas sin excepción. Newton concebía a la gravedad como una *acción a distancia*, una fuerza de atracción instantánea entre partículas masivas representada matemáticamente mediante la fórmula $F \propto m \times m' / r^2$. Es decir, una partícula de masa m atrae a otra de masa m' con una fuerza (F) proporcional (\propto) al producto de las masas y que disminuye como el cuadrado de la distancia que las separa (r^2). El origen de esta fuerza, su **fuentes**, es la masa de las partículas y su rango de acción es muy grande, llegando a alcanzar distancias enormes (planetarias, estelares, galácticas, intergalácticas y hasta cosmológicas).

La concepción moderna postula en cambio que la gravedad es geometría. La teoría de Relatividad General considera a la gravedad como un campo de distorsión geométrica o una curvatura. Einstein modificó las nociones de espacio y de tiempo absoluto de Newton, para resolver una paradoja: la velocidad de propagación de las ondas de luz es independiente del movimiento del observador. En la teoría de Relatividad Especial (1905), introdujo el concepto de **espacio-tiempo**, según el cual el tiempo es una dimensión más, que debe considerarse en un pie de igualdad con las espaciales. Y en la Relatividad General (1915) trató de encajar la gravedad en esta nueva visión del espacio y el tiempo. Tenía para ello algunos indicios, como el notable descubrimiento de Galileo sobre el movimiento de cuerpos pequeños debido a la gravedad, que resulta ser independiente de la naturaleza de los cuerpos. Esto le sugirió que la gravedad podría ser una propiedad del propio espacio-tiempo. En lugar de la imagen newtoniana de la gravitación como una atracción entre todos los cuerpos masivos, la Relatividad General describe la gravitación como un efecto de la curvatura del espacio-tiempo producida por la materia y la energía.

El concepto de **campo**, muy importante en la descripción de todas las fuerzas, se basa en la noción de que toda partícula es la fuente de una onda tal que cualquier otra partícula que se encuentre dentro de su rango de acción experimenta una fuerza proporcional a la intensidad del campo en esa posición. Todas las partículas originan un campo gravitatorio. Así por ejemplo, el Sol curva el espacio-tiempo a su alrededor y la órbita terrestre es consecuencia de este efecto geométrico. Podríamos imaginar el espacio-tiempo como una gran sábana extendida. Cualquier objeto que se deposite sobre la sábana la deformará, creando un campo que modifica el movimiento de cualquier otro objeto sobre ella.

¿Por qué la Relatividad General reemplazó a la teoría de Newton? Inicialmente, resolvió un antiguo conflicto de la mecánica clásica: la precesión del perihelio de Mercurio. Además predijo nuevos fenómenos que fueron observados con posterioridad. Por ejemplo la curvatura en la trayectoria de los rayos de luz producida por el Sol, predicha por la teoría en 1915, fue medida por primera vez en 1919. Desde entonces se han acumulado más pruebas y hoy podemos afirmar que esta teoría describe satisfactoriamente el campo gravitatorio a distancias grandes comparadas con los tamaños atómicos, en el sentido de que ha superado exitosamente todos los tests experimentales a que ha sido sometida.

Es interesante comparar en más detalle estas dos teorías. La física de Newton explica virtualmente todos los movimientos observados en el sistema solar, pero al costo de introducir algunas suposiciones arbitrarias. Por ejemplo, en la mecánica clásica no hay nada que obligue a postular la ley del cuadrado inverso ($F \propto r^{-2}$). Newton desarrolló esta idea para explicar hechos conocidos, como la ley de Kepler que relaciona el tamaño de las órbitas planetarias y el tiempo que les lleva a los planetas recorrerlas. Si se reemplazara el 2 por un 3 o un 5.8 nada cambiaría en el marco conceptual de la teoría (aunque por supuesto las observaciones no podrían explicarse). En la Relatividad General, en cambio, no hay tanta arbitrariedad. Para cuerpos en movimiento lento en campos gravitacionales

débiles, para los cuales se puede hablar de una fuerza newtoniana, la teoría de Einstein requiere que esta fuerza vaya como $1/r^2$. No es posible modificar la teoría para obtener otra cosa que no sea la ley del cuadrado inverso sin violar alguno de los principios básicos. También la proporcionalidad entre la fuerza de gravedad sobre objetos pequeños y su masa es muy arbitraria en la teoría de Newton. Esta fuerza podría haber dependido de la composición química, el tamaño o la forma del objeto, sin afectar la base conceptual de la mecánica clásica. En Relatividad General, el efecto que la gravedad ejerce sobre cualquier objeto debe ser proporcional a su masa e independiente de cualquier otra propiedad. Si no fuera así no se podría interpretar la gravitación como un efecto geométrico de la curvatura del espacio-tiempo. La teoría de Einstein se reduce a la de Newton cuando los campos son débiles. Pero es más rígida.

- *Electromagnetismo*

Las siguientes fuerzas estudiadas cronológicamente fueron la electricidad y el magnetismo. Si bien estos fenómenos eran conocidos desde la antigüedad, recién en el siglo XIX fueron concebidos en el marco de una teoría común. Así como la masa es la fuente de la interacción gravitatoria, la **carga eléctrica** es la **fuentes** de estas fuerzas, y por eso no es ésta una interacción universal, sino que sólo actúa entre partículas cargadas. Su intensidad es enorme comparada con la gravitatoria (la fuerza gravitatoria entre un electrón y un protón, por ejemplo, es unas 10^{40} veces más débil que la fuerza eléctrica entre ellos), pero como las cargas son positivas y negativas, y las cargas iguales se repelen mientras que las distintas se atraen, hay una tendencia a la cancelación, y por eso la gravedad domina el universo a grandes escalas.

El electromagnetismo fue formulado por Maxwell al descubrir, alrededor de 1850, que la electricidad y el magnetismo son en realidad aspectos distintos de un único campo. Un cuerpo cargado crea un campo electromagnético que ejerce fuerzas eléctrica y magnética sobre otros cuerpos cargados. Un imán ejerce una fuerza sobre otro porque ambos son fuente de un campo electromagnético. Maxwell calculó que la velocidad de propagación de este campo es la de la luz y propuso entonces que la luz es un fenómeno electromagnético. Como las cargas pueden oscilar con cualquier frecuencia, concluyó también que la luz visible forma sólo una pequeña parte de todo el espectro de radiación electromagnética. Hoy sabemos que éste incluye además ondas de radio, luz ultravioleta, infrarroja, rayos X y γ , etc.

Una propiedad importante del electromagnetismo, que reaparecerá en la teoría M, es la **simetría de dualidad**. Si en las ecuaciones de Maxwell se intercambia el campo eléctrico E por el magnético B y simultáneamente se intercambian las cargas eléctrica e y magnética g, las ecuaciones no se modifican. Es decir, nada cambia en la teoría si se hace la transformación de dualidad: $E \leftrightarrow B$ y $e \leftrightarrow g$. En esta teoría el producto $e \times g$ es constante, entonces e pequeña corresponde a g grande. Y esta es la propiedad interesante. Supongamos que

tenemos una ecuación matemática que depende de g^2 y que no se puede resolver exactamente. El truco usual es aproximar la solución con un desarrollo perturbativo: $g^2 + g^4 + g^6 + \dots$. Siempre que g sea menor que 1, cada término del desarrollo en serie es menor que el anterior, y el valor total converge a una única cifra. Pero si g es mayor que 1, entonces la serie se hace más y más grande, y la aproximación no sirve. Aquí es donde se hace evidente la importancia de la dualidad. Si g es grande, mayor que 1, entonces e es menor que 1, y la serie $e^2 + e^4 + e^6 + \dots$ da un valor razonable. Esto significa que usando perturbación en e se pueden resolver problemas en la región no perturbativa de g y viceversa.

Dimensiones extra

Con el electromagnetismo se alcanzó una sensación de plenitud. Se pensaba que sólo había que calcular más precisamente, aproximar con más cifras decimales, pero que no había más principios ni leyes por descubrir. La gravedad y el electromagnetismo son efectivamente las fuerzas más familiares y con estas leyes podían explicarse todos los fenómenos cotidianos. No casualmente, la primera teoría unificadora del siglo XX involucró la Relatividad General y el electromagnetismo. Se hizo en el marco de una idea que actualmente se retoma en la teoría M: suponer que el número de dimensiones del espacio-tiempo es mayor que cuatro. Poco después de que Einstein publicara su teoría, Kaluza intuyó que las interacciones gravitatoria y electromagnética podrían tener un origen común y propuso unificarlas agregando una dimensión espacial. Imaginó que en cinco dimensiones sólo hay gravedad, no hay electromagnetismo. El resultado fue muy interesante: reducida a cuatro dimensiones, la Relatividad General reproduce las ecuaciones gravitatorias y además otro conjunto de ecuaciones que resultan ser precisamente las del campo electromagnético. Así, la gravedad en cinco dimensiones se divide en gravedad y electromagnetismo en cuatro dimensiones.

Pero ¿por qué no percibimos la quinta dimensión? Los cálculos de Klein, en 1926, indicaron que ésta es muy pequeña y está enrollada. Como al mirar un caño de lejos: parece ser una línea, pero si nos acercamos vemos que en realidad se extiende en otra dimensión. Este proceso de enrollar dimensiones se conoce como **compactificación** (figura 1).



Figura 1: La quinta dimensión compactificada

Con el descubrimiento de las interacciones fuertes y débiles la teoría de Kaluza-Klein perdió mucho de su atractivo: una teoría unificada debería contener cuatro fuerzas, no sólo dos. Las cinco dimensiones eran insuficientes.

- *Fuerzas subatómicas*

A fines del siglo XIX las leyes de la mecánica clásica y el electromagnetismo parecían explicar todos los fenómenos conocidos. Pero en 1895 se descubrieron los rayos X, en 1896 la radiactividad, Thompson observó el electrón en 1897, y esto indicó que había nuevas cosas por descubrir. Aparecieron también algunos problemas teóricos en el electromagnetismo de Maxwell. Un objeto caliente emite radiación electromagnética con una intensidad bien definida para cada frecuencia. La suma de las energías de la radiación en todas las frecuencias era infinita, un resultado absurdo. Max Planck observó entonces que si la energía, en lugar de tener una distribución continua, se emitía en paquetes discretos o **cuantos**, la suma sería finita y postuló que la radiación electromagnética existe en cuantos de energía.

En la teoría cuántica, un campo no sólo está asociado a ondas sino también a partículas; por ejemplo, el campo electromagnético está asociado al fotón. Así surgió la idea de la dualidad onda-partícula y de la Mecánica Cuántica. En este marco se sucedieron varios avances importantes. En 1911 Rutherford presentó su modelo atómico, semejante al sistema solar: pequeños núcleos de protones y neutrones rodeados de nubes de electrones; en 1913 Bohr explicó el espectro del átomo más sencillo, el hidrógeno. La materia, a nivel microscópico o atómico y nuclear, se modeló en términos de partículas, identificadas por sus propiedades como la masa, carga, momento angular intrínseco o espín, etc. Todas ellas son de naturaleza cuántica, en el sentido de que sólo pueden tomar ciertos valores discretos. La noción de que los átomos, moléculas y núcleos poseen niveles discretos de energía es uno de los conceptos básicos de la Mecánica Cuántica.

Con esta nueva concepción de la materia fue posible calcular las propiedades, no sólo de los átomos individuales y sus interacciones con la radiación, sino también de átomos combinados en moléculas. Se hizo evidente que las reacciones químicas se deben a interacciones eléctricas de los electrones y núcleos atómicos.

Otro ingrediente de esta teoría es el resultado de Dirac de 1928 según el cual para cada tipo de partícula cargada (el electrón, por ejemplo) debe haber otra especie con igual masa pero carga opuesta: la antimateria. Cuatro años más tarde la predicción de Dirac fue confirmada cuando se observó la antipartícula del electrón: el positrón.

La teoría cuántica de los electrones y los fotones, la electrodinámica cuántica (QED), se usó en los años '20 y principios de los '30 para calcular varios fenómenos (colisiones de fotones con electrones, de un electrón con otro, la aniquilación o producción de un electrón y un positrón, etc.) y produjo resultados coincidentes con los experimentos. Pero pronto apareció un nuevo problema: la energía del electrón resultaba infinita. Y aparecieron otros infinitos en los cálculos de las propiedades físicas de las partículas. Estos problemas de consistencia interna indicaron que la QED era sólo una aproximación a la teoría completa,

válida únicamente para procesos que involucraran fotones, electrones y positrones de energía suficientemente baja.

La solución al problema de los infinitos apareció a fines de los '40 y fue consecuencia de otra unificación: la Mecánica Cuántica con la Relatividad Especial. Los principios que sustentan estas dos teorías son casi incompatibles entre sí y pueden coexistir sólo en un tipo muy limitado de teorías. En la mecánica cuántica no relativista era posible imaginar cualquier tipo de fuerzas entre los electrones y los núcleos atómicos, pero esto no es posible en una teoría relativista. Las fuerzas entre partículas sólo pueden aparecer por intercambio de otras partículas, las mensajeras de las interacciones. Una representación intuitiva de la interacción electromagnética cuántica es que los electrones intercambian fotones y así se origina la fuerza electromagnética entre ellos.

Las ecuaciones de esta nueva teoría se aplican a campos y las partículas aparecen como manifestaciones de esos campos. Hay un campo para cada especie de partícula elemental. Hay un campo eléctrico cuyos cuantos son los electrones, un campo electromagnético cuyos cuantos son los fotones.

Los electrones libres y en los átomos están siempre emitiendo y reabsorbiendo fotones que afectan su masa y su carga y las hacen infinitas. Para poder explicar las propiedades observadas, la carga y masa que aparecen en las ecuaciones de la teoría cuántica de campos, llamadas desnudas, deben ser infinitas. La energía total del átomo es entonces la suma de dos términos, ambos infinitos: la energía desnuda, que es infinita porque depende de la masa y carga desnudas, y la energía de las emisiones y reabsorciones de fotones, que también es infinita porque recibe contribuciones de fotones de energía ilimitada. Esto sugirió la posibilidad de que estos dos infinitos se cancelaran, dejando un resultado finito. Y los cálculos efectivamente confirmaron la sospecha.

Estos cálculos eran terriblemente complicados, pero Feynman desarrolló un formalismo que permitió simplificarlos notablemente. Los diagramas de Feynman (figura 2) pueden pensarse como la historia real de partículas puntuales que se propagan en el espacio y a lo largo del tiempo, y que se unen y se separan en los puntos de interacción. Las líneas representan trayectorias de partículas y los vértices corresponden a las interacciones. Los infinitos o **divergencias** se originan en estos vértices. Son molestos pero pueden eliminarse en la QED, y las propiedades físicas resultan bien definidas y finitas. Este proceso de sustracción de infinitos se denomina **renormalización**.

Se usaron estas técnicas para hacer varios cálculos, y los resultados mostraban una coincidencia espectacular con el experimento. Por ejemplo, el electrón tiene un pequeño campo magnético, originalmente calculado en 1928 por Dirac. Los cálculos modernos del corrimiento en la intensidad del campo magnético del electrón, causado por emisiones y reabsorciones de fotones y otros efectos similares, dan por resultado que éste aumenta un factor **1.00115965214** (con un error o incertidumbre de 3 en el último dígito) respecto de la predicción de Dirac, que había ignorado estos efectos. En un experimento reciente, el factor que se midió fue **1.001159652188** (con un error de 4 en el último dígito). ¡Esta

coincidencia numérica entre teoría y experimento es quizás la más impresionante de toda la ciencia!

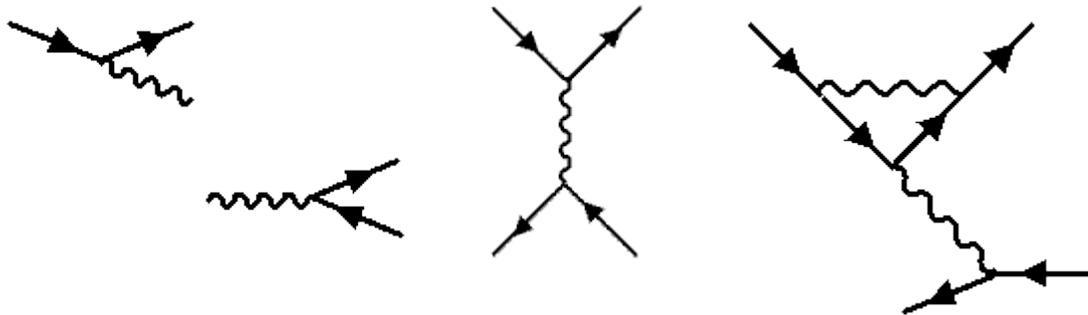


Figura 2: Diagramas de Feynman

Con semejante éxito no es sorprendente que la QED se convirtiera en la teoría aceptada de los fotones y electrones. Sin embargo, aunque los infinitos se cancelan cuando se los trata adecuadamente, el hecho de que aparezcan divergencias produce cierta desconfianza. Dirac se refería a la renormalización como el proceso de barrer los infinitos debajo de la alfombra. El requerimiento de una teoría finita es parecido a otros juicios estéticos que se realizan a menudo en física teórica. Encontrar teorías que no tengan infinitos parece ser un camino apropiado para avanzar en la búsqueda de la teoría madre.

- *Fuerza débil*

El siguiente gran progreso realizado por la teoría cuántica de campos fue la unificación del electromagnetismo con la fuerza nuclear débil. Esta fuerza, mucho más débil que la electromagnética pero mucho más intensa que la gravitatoria, se manifiesta especialmente en la transmutación de partículas. Fue postulada inicialmente para explicar el decaimiento beta, un tipo de radiactividad de ciertos núcleos atómicos inestables, en el cual un neutrón se convierte en un protón, un electrón y un antineutrino, mediante un cambio de **sabor** de un quark. El sabor es el equivalente de la masa o carga en las otras fuerzas.

La fuerza nuclear débil no es tan evidente en nuestra vida cotidiana como las magnéticas, eléctricas o gravitatorias, pero juega un rol decisivo en las cadenas de reacciones nucleares que generan energía y producen los elementos químicos en los núcleos de las estrellas. Esto es algo que ninguna otra fuerza puede explicar. Ni la fuerza nuclear fuerte que mantiene los protones y neutrones juntos en el núcleo ni la fuerza electromagnética que trata de separar los protones pueden cambiar las identidades de estas partículas, y la fuerza gravitatoria tampoco puede hacer algo así. Entonces la observación de neutrones que se

convierten en protones y viceversa fue la evidencia de un nuevo tipo de fuerza en la naturaleza.

A fines de los años '50 las interacciones débiles se explicaban en el contexto de la teoría cuántica de campos, pero aunque la teoría funcionaba bien para el decaimiento beta, al ser aplicada a otros procesos más exóticos aparecían nuevamente infinitos (por ejemplo al calcular la probabilidad de colisión de un neutrino con un antineutrino). Los experimentos no podían hacerse porque las energías necesarias superaban las que podían alcanzarse en el laboratorio, pero obviamente los resultados infinitos no podían coincidir con ningún resultado experimental. Estas divergencias ya habían aparecido en QED y se habían curado con la renormalización. En cambio, la teoría de Fermi que describía las interacciones débiles no era renormalizable. Otra dificultad con esta teoría era que tenía muchos elementos arbitrarios. Las ecuaciones de la interacción débil se habían inferido básicamente de los experimentos, pero podrían haber sido muy diferentes, aun sin violar ningún principio físico conocido.

La solución de estas cuestiones condujo a una nueva unificación. Así como la fuerza electromagnética entre partículas cargadas se debe al intercambio de fotones, una fuerza débil no podía actuar instantáneamente. Weinberg y Salam propusieron la existencia de otras partículas, los gluones W y Z, nuevas mensajeras que se introducían en la teoría como los fotones. Esto no sólo convirtió a la teoría en renormalizable, sino que permitió explicar, además de las interacciones débiles, las electromagnéticas. La nueva teoría unificada se llamó **electrodébil**. Su verificación experimental llegó mucho después: en 1983 se descubrieron las partículas W y en 1984 la Z, cuyas propiedades habían sido predichas correctamente en 1968. Nuevamente una unificación resolvía problemas y permitía explicar más fenómenos que los contenidos en la teoría previa.

- *Fuerza fuerte*

¿Por qué no se separan los protones y no se desintegra el núcleo atómico debido a la fuerza de repulsión eléctrica? Esto se debe a la fuerza nuclear fuerte, una interacción que se extingue más allá de 10^{-13} cm, y cuya fuente es el **color**, que en este caso es de tres tipos: rojo, verde y azul. La fuerza fuerte actúa también entre otras partículas pesadas llamadas hadrones, que proliferaban por los años '60. Para reducir el enorme zoológico de estas partículas, y continuando con la tradición de explicar estructuras complicadas en términos de constituyentes más simples, Gell-Mann y Zweig propusieron elementos más fundamentales, llamados quarks. Los quarks se aplicaron a una gran variedad de problemas físicos relacionados con las propiedades de los neutrones, protones, mesones, etc. y la teoría funcionaba bastante bien. Pero todos los intentos experimentales de extraerlos de las partículas que supuestamente los contenían, fracasaron. La tarea parecía imposible. Desde que Thompson sacó los electrones de los átomos siempre había sido posible separar cualquier sistema compuesto, una molécula en átomos o un núcleo en protones y neutrones. Pero parece imposible aislar los

quarks. Esta característica fue incorporada en la teoría moderna de las interacciones fuertes, la cromodinámica cuántica, que prohíbe a los quarks quedar libres, mediante un proceso denominado confinamiento.

- *Gran Unificación*

Las interacciones electrodébil y fuerte se describen actualmente con una teoría cuántica de campos basada en una gran cantidad de partículas, organizadas en una estructura de **simetría** llamada grupo. De la inmensa cantidad de estructuras posibles, los datos experimentales han permitido seleccionar una, que se conoce como el Modelo Estándar. Las partículas del Modelo Estándar se dividen en dos clases con funciones muy diferentes, de acuerdo a su espín: los **bosones**, de espín entero (medido en unidades cuánticas), son los mensajeros de las fuerzas y los **fermiones**, de espín semientero, constituyen la materia. Una combinación de teoría y experimento conduce a tres grupos de simetría, correspondientes a las tres fuerzas que describe: **SU(3)×SU(2)×U(1)**. Este modelo matemático explica toda la física de partículas que se ha observado hasta el presente. Sus predicciones han sido confirmadas con asombrosa precisión.

El Modelo Estándar y la Relatividad General han superado todas las pruebas a que han sido sometidos. Los físicos experimentales y astrónomos han reportado cada vez mejor coincidencia entre sus resultados y observaciones y las predicciones de estas teorías. Con ellas, las fuerzas fundamentales de la naturaleza se explican, entonces, satisfactoriamente. Todas las cadenas de preguntas sobre fuerzas y materia conducen al Modelo Estándar de las partículas elementales y la Relatividad General.

Sin embargo, éstas claramente no pueden ser la teoría madre. Por un lado, aunque las interacciones nucleares fuertes están incluidas en el Modelo Estándar, aparecen como algo bastante diferente de la fuerza electrodébil, no como parte de una descripción unificada. Además, este modelo contiene muchas características que no son dictadas por principios fundamentales, sino que deben ser tomadas del experimento. Estos rasgos aparentemente arbitrarios incluyen el menú de partículas y simetrías, varias constantes e incluso los propios principios que lo sustentan. Por otro lado, no contiene a la gravedad, que se describe con una teoría muy diferente, la Relatividad General. Esta funciona bien clásicamente, cuando puede ser probada experimentalmente, pero pierde su validez a energías altas. Los efectos cuánticos de la gravedad se hacen relevantes a la energía de Planck (10^{19} GeV) ¹, una energía tan grande que nos coloca frente a un nuevo problema: no podemos suponer que podrá alcanzarse experimentalmente. Tampoco se entiende teóricamente la física a esas energías, ya que hay obstáculos matemáticos muy fuertes para describir la gravitación cuántica en el mismo lenguaje que las otras fuerzas. Se pueden aplicar las ecuaciones de la teoría cuántica de campos a la

¹ El electronvolt, abreviado eV, es una unidad de energía. Utilizando la equivalencia entre masa y energía, es útil expresar la masa de las partículas elementales en esta unidad: la masa del electrón es $m_e=0.511$ MeV, y del protón $m_p=938$ MeV. El megaelectronvolt y gigaelectronvolt, MeV y GeV, son múltiplos del eV, $1 \text{ MeV}=10^6 \text{ eV}$, $1 \text{ GeV}=10^9 \text{ eV}$.

Relatividad General, pero el resultado es una teoría no renormalizable. Aparecen otros problemas: los agujeros negros, objetos predichos por la relatividad clásica, parecen desafiar los postulados básicos de la mecánica cuántica. Los dos pilares fundamentales de la física del siglo XX, la Relatividad General y la Mecánica Cuántica resultan incompatibles en el contexto de las teorías de partículas. Estos son los problemas que intenta resolver la teoría M, y para ello hubo que postular nuevos principios, desarrollar nuevas ideas.

Para finalizar esta introducción histórica, veamos en un ejemplo sencillo de qué manera comprender las fuerzas fundamentales que hemos descripto permite entender la naturaleza y hasta dónde se puede llegar con el Modelo Estándar y la Relatividad General. Consideremos para ello algunas cadenas de preguntas sobre un pedazo de tiza blanca ².

Sobre un pedazo de tiza

¿Por qué la tiza es blanca?

Todos sabemos que los colores del arco iris se asocian con luz de determinada longitud de onda, el rojo con las más largas, el violeta y el azul con las más cortas. La luz blanca es una mezcla de diferentes longitudes de onda. Cuando la luz choca contra un objeto opaco como la tiza sólo una parte se refleja; el resto es absorbido. Una sustancia es de determinado color porque absorbe ondas de ciertas longitudes: vemos el color que refleja. La tiza absorbe en el infrarrojo y el ultravioleta, que son rangos del espectro invisibles, y refleja todos los otros, los visibles. Por eso es blanca.

¿Pero por qué la tiza absorbe las longitudes de onda invisibles y refleja todas las visibles?

La respuesta tiene que ver con las energías de los átomos y de la luz. Los fotones de la luz no tienen masa o carga pero tienen cierta energía, que es inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz. Los estados de un átomo son discretos, no se pueden cambiar excepto en ciertas cantidades definidas. Normalmente un átomo está en su estado de mínima energía; cuando absorbe luz salta a un estado de mayor energía y cuando emite salta a un estado de energía menor. Entonces sólo absorbe o emite fotones de esas energías particulares. La tiza es blanca porque las moléculas que la componen no tienen un estado al que puedan saltar absorbiendo fotones de cualquier color de luz visible.

Pero ¿por qué los átomos y moléculas tienen estados discretos con energía definida? ¿Por qué la luz tiene fotones de energía definida?

Estas preguntas se respondieron con la Mecánica Cuántica. Las partículas de un átomo sólo pueden tener cargas, masas y energías en ciertos valores discretos. Los fotones también, por su naturaleza cuántica, sólo pueden existir con determinadas energías. Las moléculas de carbonato de calcio que forman la tiza no tienen electrones que puedan cambiar su energía absorbiendo luz visible.

² El ejemplo se tomó de la referencia [1]

¿Y por qué las ecuaciones de la Mecánica Cuántica que gobiernan a las partículas en los átomos son así? ¿Por qué la materia consiste de átomos, electrones y núcleos? ¿Por qué hay algo como la luz?

Las respuestas nos remontan al Modelo Estándar y para eso fue necesaria la reconciliación de la Mecánica Cuántica con la Relatividad Especial en 1940. ¿Por qué hay un neutrón y un protón, uno neutro y otro cargado de masas casi iguales y mucho más masivos que el electrón?

Los quarks más livianos se llaman u (up) y d (down) y tienen cargas $2/3$ y $-1/3$ en unidades en que la carga del electrón es -1 . Los protones consisten de dos u y un d y entonces tienen carga $2/3+2/3-1/3=1$. Los neutrones consisten de un u y dos d, entonces su carga es $2/3-1/3-1/3=0$. Las masas de los neutrones y protones son casi iguales porque se originan en fuerzas fuertes que mantienen a los quarks unidos y estas fuerzas son iguales para un u y un d. El electrón es más liviano porque no siente estas fuerzas fuertes. Todos los quarks y electrones son paquetes de energía de varios campos, y sus propiedades se siguen de las propiedades de estos campos.

¿Pero por qué el mundo consiste sólo de estos campos, los quarks, electrones, fotones? ¿Por qué tienen las propiedades que les atribuye el Modelo Estándar? ¿Por qué la naturaleza parece comportarse de acuerdo a esta teoría?

Estas preguntas todavía no tienen respuesta. Son algunos de los interrogantes que intenta responder la teoría M.

Vayamos ahora en otra dirección: ¿Por qué hay suficiente calcio, carbono y oxígeno aquí en la tierra para formar la tiza? Estos elementos existen en todo el universo, fueron creados en las estrellas. Según el modelo del big bang, que describe la evolución del universo desde la gran explosión hasta nuestros días, la materia se formó en los primeros minutos en una proporción de $3/4$ partes de hidrógeno y $1/4$ de helio y otros pocos elementos livianos. Este es el material crudo del que se formaron los elementos más pesados en las estrellas. Los cálculos de reacciones nucleares en las estrellas muestran que los elementos más abundantes son aquellos cuyos núcleos están más ligados, y éstos incluyen el carbono, oxígeno y calcio. Las estrellas mandan este material al medio interestelar mediante explosiones de supernovas y vientos estelares. Y en este medio, rico en constituyentes de tiza, se forman las estrellas de segunda generación, como el Sol y sus planetas. Por eso hay tiza en la tierra.

Hay una teoría bastante aceptable de la evolución estelar. Sabemos que las estrellas se agrupan en galaxias y las galaxias en cúmulos y supercúmulos. Entendemos cómo y cuándo se formaron los elementos, cómo era el universo cuando tenía unos pocos segundos de vida. Pero este escenario depende de que haya habido un big bang hace 12 a 15 mil millones de años, según se deduce de la Relatividad General y el Modelo Estándar. Y todavía no sabemos si realmente lo hubo ni por qué.

En definitiva ¿por qué rigen los principios de la relatividad y la mecánica cuántica? Estas son otras incógnitas que pretende resolver la teoría M. Pero para

poder presentar el modo en que intenta responderlas, todavía necesitamos introducir algunas otras ideas previas.

El concepto que dominó las unificaciones que desembocaron en el Modelo Estándar es que las fuerzas intrínsecas de las tres interacciones (débil, fuerte y electromagnética) se funden en una sola a alguna energía muy alta y evidencian sus diferentes identidades a energías menores. Esta propuesta explota una propiedad de las teorías cuánticas de campos: su manifestación física depende de la escala de energía de las partículas involucradas. A energías grandes, una teoría parece describir un conjunto de partículas con ciertas simetrías, mientras que a energías más bajas éstas pueden cambiar drásticamente. En particular, las simetrías presentes a energías altas pueden estar rotas a energías menores. La energía predicha para esta gran unificación es muy alta (10^{16} GeV) comparada con la escala de unificación electrodébil (unos cientos de GeV), y esto nos enfrenta a un nuevo problema: si las fuerzas se unifican a una escala de energía (o equivalentemente de masa) tan alta, hay que explicar por qué las partículas conocidas son tan livianas. Esta observación puede parecer poco importante al neófito, pero los especialistas consideran que una jerarquía poco natural de escalas de energía es un signo de inconsistencias teóricas graves.

Una posible solución se obtuvo apelando a una nueva idea: la **supersimetría**. Esta postula que para cada bosón hay un fermión y viceversa, con la misma masa. Para cada partícula de espín entero hay otra de espín semientero. La supersimetría vincula estos dos tipos de partículas de un modo fundamental, avanzando un paso más en la tradición reduccionista. Lamentablemente esta simetría no se observa en la naturaleza. Las compañeras supersimétricas de las partículas conocidas no han sido detectadas todavía. Pero podría suceder que la naturaleza fuera supersimétrica a escalas de energía altas y que esta simetría estuviera rota a las escalas que podemos alcanzar en los aceleradores de partículas. Esta idea es muy atractiva porque la supersimetría debería verificarse en el rango de energías en que operará la nueva generación de aceleradores y esta propuesta, que no tiene ningún sustento experimental, podría entonces ser corroborada (o no) en un futuro cercano.

Combinando la supersimetría con la gran unificación se logra que la ruptura de la simetría de gran unificación suceda a muy altas energías pero la ruptura de la supersimetría ocurra a energías considerablemente menores. Si así fuera la supersimetría resolvería el problema de las jerarquías: en teorías unificadas supersimétricas es natural que algunas partículas sean livianas, aunque la escala natural de energía sea muy alta. Estas propuestas resultan muy prometedoras, pero todavía la gravedad queda fuera de la gran amalgama.

La teoría de cuerdas

A fines de la década del '60 las propiedades de las partículas hadrónicas no podían explicarse en el contexto de la teoría cuántica de campos. Buscando una expresión matemática que describiera los resultados experimentales, se descubrió

accidentalmente que aquella que mejor reproducía los datos, no correspondía a la interacción de partículas puntuales, sino de objetos extendidos en una dimensión. Este fue el origen de la teoría de cuerdas.

Este descubrimiento representa una importante ruptura con las teorías previas que, invariablemente, modelaban la materia en términos de partículas elementales puntuales. El tamaño de las cuerdas es muy pequeño (10^{-33} cm), pero lo importante es que no son puntuales, tienen una dimensión. Pueden ser abiertas y con extremos, o cerradas formando un lazo (figura 3). A diferencia de las cuerdas ordinarias (por ejemplo las de saltar a la soga –abiertas– o las gomitas para atarse el cabello –cerradas), que están compuestas de partículas, como protones, neutrones y electrones, estas cuerdas fundamentales son ellas mismas los elementos de los que están hechos los protones, neutrones y todas las

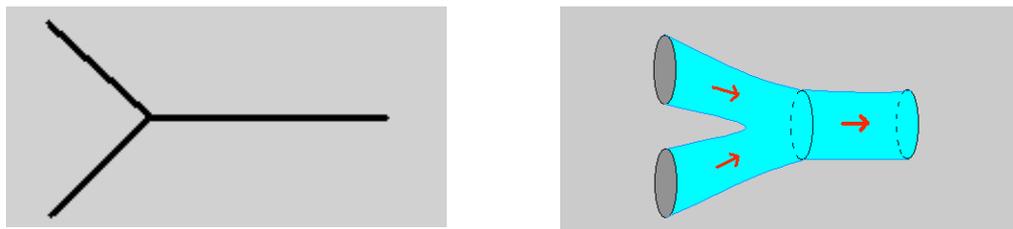


partículas.

Figura 3: *cuerda abierta* *cuerda cerrada*

Así como las cuerdas de los instrumentos musicales vibran y producen diferentes sonidos, las cuerdas fundamentales pueden estar en cualquier estado posible de infinitos modos de vibración. Los distintos armónicos de una cuerda de violín son esenciales para la riqueza musical. En el caso de las cuerdas fundamentales, todos estos modos se comportan como partículas de distintas masas, correspondientes a las frecuencias de oscilación de la cuerda. Entonces, una única especie de cuerda producirá montones de excitaciones de partículas: el electrón, el protón, el fotón, el gravitón (la partícula del campo gravitatorio), etc. Surge así un nuevo cimiento en la cadena de explicaciones: cuerdas → partículas → átomos → moléculas.

La diferencia crucial con las teorías de partículas es que la propia naturaleza de las cuerdas, el hecho de que sean extendidas y no puntuales, cura las divergencias que plagan las teorías cuánticas de campos. Mientras en el caso de las partículas hay un punto bien definido en el que ocurre la interacción, los vértices de los diagramas de Feynman donde se originan las divergencias, cuando una cuerda se separa en dos, o dos cuerdas se unen en una, no hay una noción bien definida de cuándo y dónde esto sucede (figura 4).



La interacción se suaviza al considerar objetos de una dimensión. Y esta diferencia tiene muchas consecuencias. En primer lugar, en la teoría de cuerdas el electrón ya no es puntual, sino una pequeña cuerda vibrante. La dimensión extra de la cuerda permite darle sentido al campo gravitatorio del electrón. Y lo mismo sucede con todas las partículas elementales, que en esta teoría son pequeñas cuerdas oscilantes. La teoría cuántica de cuerdas es finita: no aparecen en esta teoría magnitudes físicas divergentes como en las teorías de campos de partículas puntuales.

El entusiasmo de los físicos con estas teorías creció cuando se mostró que a bajas energías, donde las cuerdas se pueden considerar puntuales, la teoría reproducía la Relatividad General. En efecto, la teoría de cuerdas predice que a bajas energías los modos de vibración que corresponden a las partículas de la gravedad, los gravitones, interactúan de acuerdo a las leyes de la Relatividad General. Y no es posible que lo hagan de otro modo sin violar algún postulado básico de la teoría. De la misma manera en que la Relatividad General se reduce a la teoría de Newton para campos débiles, la teoría de cuerdas se reduce a la Relatividad General para bajas energías. Pero la teoría de Einstein podría modificarse, introduciendo pequeñas correcciones que no arruinen su consistencia ni sus exitosas verificaciones experimentales. Por el contrario, la teoría de cuerdas no puede cambiar, es más rígida, no tiene parámetros libres para ajustar. Las correcciones que predice quedan determinadas por la consistencia matemática, así como la ley del cuadrado inverso es arbitraria en la teoría de Newton, pero queda determinada al deducirla de la Relatividad General. Como además la teoría de cuerdas es una teoría cuántica finita, se considera que es la primera, y quizás la única posible, teoría cuántica consistente de la gravedad.

Aunque se podría pensar en muchas teorías de cuerdas, así como hay incontables teorías de partículas puntuales, resulta que sólo cinco tipos pasan el test de consistencia matemática ¿Cómo logran las matemáticas restringir tan fuertemente la teoría? Como las partículas, las cuerdas deben ser relativistas, es decir deben estar sujetas a las leyes de la relatividad. Y también, al igual que en el caso de las partículas, hay que desarrollar una mecánica cuántica de cuerdas. La consistencia de la teoría cuántica de cuerdas relativistas es posible sólo en unos pocos modelos.

Las matemáticas que describen cuerdas relativistas son bastante elementales al nivel de la teoría clásica. Pero al intentar aplicar a la teoría los postulados de la Mecánica Cuántica, a fines de los `70, se descubrió que el número de dimensiones del espacio tiempo debía ser 26. Es decir, las cuerdas cuánticas relativistas sólo pueden existir en un mundo de 25 dimensiones espaciales además del tiempo. Por primera vez una teoría predice el número de dimensiones del espacio-tiempo. Las teorías anteriores, basadas en partículas puntuales, **postulan** las tres dimensiones espaciales que se manifiestan cotidianamente. En la teoría de cuerdas la dimensionalidad del espacio-tiempo es

una **predicción**, una consecuencia de la consistencia matemática. Pero lo absurdo del resultado, el excesivo número de 26 dimensiones, empañaba la satisfacción.

El entusiasmo se moderaba también porque la teoría tiene otra característica desagradable: entre todos los modos de vibración que aparecen hay uno que corresponde a una partícula cuya masa al cuadrado es negativa. Es decir, la masa no es un número real sino imaginario. Estas partículas se llaman taquiones y son objetos indeseables en las teorías cuánticas porque conducen a resultados ilógicos e inexplicables. Además, estas cuerdas que viven en 26 dimensiones sólo tienen grados de libertad bosónicos, no incluyen fermiones, y entonces no pueden explicar la materia que conocemos.

Todos estos problemas se solucionaron agregando supersimetría a la teoría, es decir incorporando compañeros fermiónicos para cada bosón. Así se encontraron otras formulaciones que no contienen taquiones y no requieren tantas dimensiones para el espacio-tiempo. Estas son las cinco teorías de supercuerdas, que viven en 10 dimensiones espacio-temporales. En ellas, el objeto fundamental es una cuerda con grados de libertad adicionales, modos fermiónicos agregados de manera supersimétrica. Resulta que sólo hay cinco teorías consistentes de supercuerdas, que se distinguen porque contienen cuerdas cerradas y abiertas (Tipo I) o sólo cuerdas cerradas (Tipo IIA, IIB, heterótica $SO(32)$ y heterótica $E_8 \times E_8$). Las siglas $SO(32)$ y $E_8 \times E_8$ indican el grupo de simetrías, las letras A y B se refieren al tipo de supersimetría y los números I y II la cantidad de supersimetrías.

Todas estas teorías se reducen a la Relatividad General a bajas energías y una de ellas se parece notablemente al Modelo Estándar de las partículas elementales. Pero no tienen ninguno de los problemas que presentan las teorías de partículas, son finitas y no tienen anomalías (otras enfermedades típicas de las teorías cuánticas de campos). Comenzó así, con estos resultados, lo que se llamó la Primera Revolución de la teoría de cuerdas en 1984.

A pesar de estos logros impresionantes, a principios de los '90 el entusiasmo decayó, principalmente porque la teoría no podía responder una pregunta esencial. ¿Por qué nuestro universo es sólo una de las muchas soluciones de la teoría de cuerdas? Cualquier análisis de viabilidad u obtención de predicciones experimentales requiere comprender cómo se relaciona la física en las 3 dimensiones espaciales con el mundo en las 9 que predice la teoría. Para poder extraer conclusiones realistas es necesario suponer que 6 de ellas son invisibles. El mecanismo era conocido: la compactificación introducida por Kaluza y Klein para unificar la gravedad y el electromagnetismo. Las predicciones experimentales dependerán de cómo sean las dimensiones extra, de cómo se realice esta compactificación. Las propiedades físicas, las masas y cargas de las partículas de materia y radiación, serán diferentes para distintas compactificaciones. Y aquí está uno de los problemas más importantes que debe resolver la teoría de cuerdas: existen muchas, demasiadas posibilidades de realizar esta transición de 9 a 3 dimensiones. Y muchas de ellas son consistentes con la fenomenología observada experimentalmente.

La dimensión del espacio-tiempo es variable en la teoría de cuerdas, en el sentido de que hay que entender y resolver las ecuaciones de la teoría para determinarla. Esto representa un avance muy importante para una teoría fundamental. Si los cálculos indicaran que es 4, se podría explicar uno de los misterios más profundos de la naturaleza: ¿por qué nuestro universo tiene 4 dimensiones? Pero las ecuaciones eran muy complicadas y no podían resolverse. La teoría no permitía elegir entre distintas posibilidades de otra manera que no fuera el contraste con el experimento, seleccionando la versión que ajustara mejor a la naturaleza. No había un criterio, un principio, que condujera a nuestro universo. Esto llevó a pensar que en realidad todavía no existía una buena formulación de la teoría. En particular, como los cálculos podían hacerse sólo de manera aproximada, perturbativa, se pensaba que una formulación exacta eliminaría muchas de estas soluciones. La esperanza era que eliminara todas excepto una: la que corresponde a la naturaleza.

En el año '94 comenzaron a descubrirse nuevas propiedades y relaciones entre las cinco teorías de supercuerdas que reavivaron el interés y permitieron suponer la existencia de una única teoría, la teoría M, que reemplazó a la anterior teoría de cuerdas. Las cinco supercuerdas parecen ser muy diferentes cuando se describen perturbativamente, cuando sus interacciones son débiles. La gran revelación de las simetrías de dualidad que se descubrieron entonces es que son simplemente distintas manifestaciones de una sola teoría, aproximaciones a la teoría M, válidas en ciertas condiciones particulares. Esta es otra mejora sustancial respecto de las teorías de partículas, que son tantas. La unicidad es un requisito indispensable que debe poseer la teoría primordial y la verificación experimental de sus predicciones se transforma así en un test decisivo para la viabilidad de la teoría. Tan importante fue el descubrimiento de estas simetrías de dualidad y de la teoría M, que 1994 se considera el año de la Segunda Revolución de las Cuerdas.

¿Cómo logran esta unificación las simetrías de dualidad? Dos teorías se consideran duales cuando describen la misma física. Las dualidades son difíciles de aceptar a primera vista. Por ejemplo, según la **dualidad T**, las distancias muy cortas son equivalentes a las muy largas y según la **dualidad S**, las interacciones muy débiles son equivalentes a las muy fuertes. Estas propiedades contrastan con nuestra experiencia cotidiana, pero no se puede descartar que la naturaleza las posea. Este tipo de predicciones cualitativas podrían ser relevantes para explicar el universo primitivo y el big-bang y, con suerte, podrían permitir encontrar alguna verificación cosmológica de la teoría.

La dualidad T relaciona una teoría con una dimensión compactificada en un círculo de radio R con otra teoría compactificada en un círculo de radio $1/R$. Entonces, cuando la primera teoría tiene una dimensión muy pequeña, la otra tiene una dimensión muy grande, pero ambas describen la misma física. Las teorías Tipo IIA y IIB están relacionadas por dualidad T, y también lo están las teorías heteróticas $SO(32)$ y $E_8 \times E_8$.

De acuerdo a la dualidad S, los estados de vibración de una cuerda que corresponden a partículas muy livianas, se relacionan con otros correspondientes a partículas muy pesadas en la teoría dual y viceversa. Esta simetría vincula las teorías Tipo I y Heterótica SO(32). La teoría IIB es autodual S: todos los estados livianos tienen su correspondiente pesado y viceversa. La dualidad S se puede representar matemáticamente como $g \leftrightarrow 1/g$, de manera similar a la que encontramos en el electromagnetismo, $e \leftrightarrow g$. Esta nueva relación, aunque parece más simple, resulta ser extremadamente poderosa. Significa que una teoría de cuerdas caracterizada con g y definida para g grande, que es usualmente imposible de describir usando la matemática que conocemos, es equivalente a otra teoría de cuerdas para g pequeño, que se describe fácilmente usando teoría de perturbaciones. Entonces dos teorías de cuerdas que parecen diferentes, son en realidad duales entre sí. En la región no perturbativa de la teoría de cuerdas hay otra teoría de cuerdas que puede describirse perturbativamente. Este es el modo en que se prueba la equivalencia de las cinco teorías.

La dualidad S permitió descubrir también que las supercuerdas no son sólo una teoría de cuerdas. Poseen objetos de mayores dimensiones, llamados **p-branas**, tan fundamentales como las cuerdas, las cuales se transforman ahora en 1-branas. Las partículas puntuales son 0-branas, los objetos de 2 dimensiones son membranas o 2-branas, etc. La teoría de cuerdas ha evolucionado hacia una teoría más general, la teoría M, donde conviven objetos de distintas dimensiones. ¿Cómo aparecen estos nuevos objetos?

Lo que distingue a las cuerdas de las p-branas es que la teoría cuántica de campos que describen objetos de una dimensión son renormalizables, mientras que para $p > 1$, estas teorías son no renormalizables. Esta característica coloca a las cuerdas en una posición privilegiada. Como dijimos, las cuerdas pueden ser cerradas o abiertas. Las cuerdas abiertas tienen dos puntos especiales: los extremos. Estos puntos pueden moverse libremente o pueden estar restringidos a ciertas condiciones. Las superficies sobre las cuales están obligados a moverse los extremos de las cuerdas abiertas son las **Dp-branas**. Por ejemplo, si estos puntos sólo pueden moverse en dos dimensiones, estas superficies son las D-membranas o D2-branas (figura 5); si los puntos están libres, las D9-branas llenan todo el espacio. Las D-branas son en realidad objetos dinámicos que, al igual que las cuerdas, vibran y pueden moverse en el espacio-tiempo.

Otra sorpresa que revelaron las simetrías de dualidad es que la teoría M tiene una dimensión adicional, es decir que el espacio-tiempo es de 11 dimensiones. En el límite de bajas energías, la teoría M se reduce a una teoría de gravedad supersimétrica, la supergravedad en 11 dimensiones.

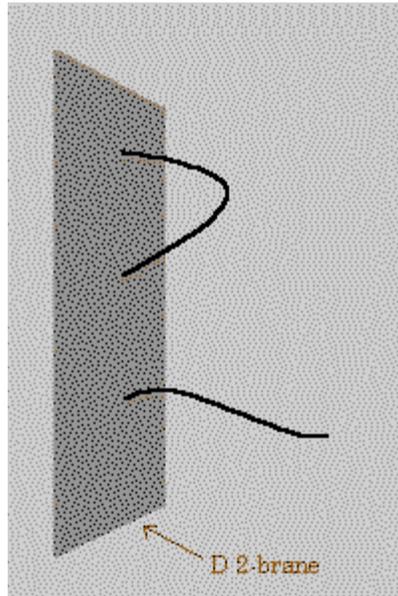


Figura 5: Cuerdas con extremos fijos sobre una D2-brana

Para estudiar las cuerdas se usaban aproximaciones perturbativas, que tienen grandes limitaciones. Las simetrías de dualidad ofrecen una ventana a la física no perturbativa, exacta. Estudiando estos efectos no perturbativos se llega a la conclusión de que sólo hay una teoría cuántica, M. En esta teoría conviven objetos de distintas dimensiones en un pie de igualdad, las D-branas. La elaboración de M está en plena ebullición y nuevas propiedades se están descubriendo permanentemente. La idea que existe entre los físicos es que no se conocen todavía los principios fundamentales que sustentan las ecuaciones. La situación actual suele resumirse con la figura 6 que especifica las teorías que describen distintas regiones de los parámetros que caracterizan a la teoría M.

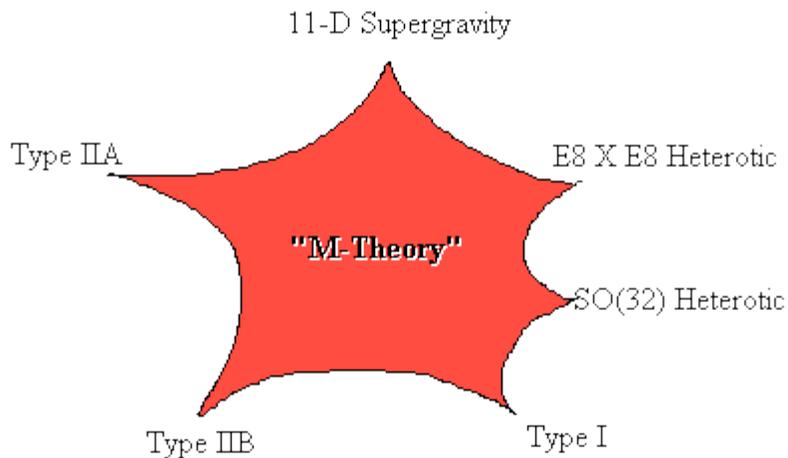


Figura 6

Conclusión

Los últimos años han visto el desarrollo de un marco radicalmente nuevo para una teoría unificada de todas las interacciones, una teoría cuántica de la gravedad y las otras fuerzas: la teoría M. Esta teoría es la primera con condiciones para convertirse en la teoría madre.

Según M, el Modelo Estándar y la Relatividad General son aproximaciones a energías bajas, también llamadas teorías efectivas, de una teoría fundamental que no es una teoría de partículas solamente, sino también de cuerdas y D-branas. Esta ruptura drástica con las ideas que dominaron la física hasta la década de 1980, marca el comienzo de una nueva era postmoderna en física.

Una diferencia fundamental que distingue a la teoría M de cualquier teoría previa es que los principios no se ponen a dedo; son consecuencia matemática del modo particular de satisfacer las reglas de la mecánica cuántica. No hay ningún parámetro libre en la teoría M; no hay nada que se pueda ajustar. Todos los elementos de la teoría quedan determinados por la consistencia matemática. M predice que el espacio-tiempo tiene 11 dimensiones y es supersimétrico. Como el gravitón parece ser una característica inevitable de M, se puede decir que esta teoría explica por qué existe la gravedad.

Hasta ahora sólo hay una formulación muy elegante, pero para ser verdaderamente exitosa la teoría debe tener una única solución a partir de la cual podamos saber qué tipos de partículas existen a bajas energías, sus masas, las intensidades de sus interacciones y probabilidades de todo tipo de procesos. Sólo realizando estos cálculos y comparándolos con el experimento podremos saber si M es correcta. Todavía no hay un test decisivo de la teoría, no hay predicciones cuantitativas. Pero es la única candidata para ser la teoría madre. Se puede pensar en M como la instancia inicial de un programa que contiene la primera teoría matemáticamente satisfactoria de la gravedad cuántica unificada con las otras fuerzas fundamentales de la naturaleza.

Un incentivo para recorrer el duro camino de comprender la teoría M, de embarcarse en esta nueva "aventura del pensamiento", es que, si realmente constituye una explicación cuantitativa de todas las partículas e interacciones de la naturaleza, representará uno de los mayores éxitos científicos de la historia de la humanidad.

Pero no todos los físicos comparten este optimismo. Algunos piensan, filosófica y científicamente, que estos esfuerzos están dirigidos en la dirección equivocada. Entre ellos, Richard Feynman dijo, refiriéndose a la teoría de cuerdas: "...creo que todo esto es un disparate."

Bibliografía

1. S. Weinberg, *"Dreams of a Final Theory"*
2. P.C.W. Davies y J. Brown, *"Superstrings: a theory of everything"*

3. B. Greene, *"The elegant universe: superstrings, hidden dimensions and the quest for the ultimate theory"*
4. M. Kaku, *"Hyperspace: A scientific odyssey through parallel universe, time warps and the tenth dimension"*
5. Varios artículos de divulgación pueden encontrarse en <http://feynman.physics.lsa.umich.edu/strings2000/mtheory.html>