

DE NEWTON A WITTEN: LA EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO ACERCA DE LA GRAVEDAD



CAYETANO JOSÉ PRIETO MOZO

Ingeniero

EMPRESARIOS AGRUPADOS INTERNACIONAL



ROQUE LUIS PÉREZAGUA LÓPEZ

Ingeniero

EMPRESARIOS AGRUPADOS INTERNACIONAL

¿Qué es un cambio de paradigma? Cuando un conjunto de leyes físicas utilizadas para describir un aspecto de la realidad sufre una revisión tal que implica un nuevo planteamiento de las mismas, se dice que estamos ante un cambio de paradigma. No sucede cuando el planteamiento de dichas leyes no implica un cambio fundamental en las mismas, sino cuando el planteamiento resulta completamente novedoso y no tiene ninguna relación con el anterior. Esto es lo que sucedió con el desarrollo de la teoría de la relatividad especial y, posteriormente, la relatividad general llevado a cabo por Albert Einstein a principios del siglo pasado. Su planteamiento en cuanto a la descripción de la realidad, así como las ecuaciones que desarrolló, supusieron un cambio fundamental respecto a las teorías existentes hasta el momento, basadas en las leyes de Isaac Newton sobre la gravedad. Algunos de los cambios que propuso este nuevo paradigma consistían en entender el espacio tiempo como algo íntimamente ligado, pasando a ser el tiempo una dimensión más, y dejando a la velocidad de la luz como único aspecto invariable para cualquier observa-

dor, así como la descripción de los efectos de la materia en su entorno, no en términos de fuerza, sino como una deformación del tejido espacio temporal. De esta forma, los objetos en movimiento por el espacio no sometidos a una aceleración siempre seguirían trayectorias rectas de forma que sus órbitas en torno a objetos más masivos se producirían no por el efecto de una fuerza sino debido a la deformación del espacio tiempo.

Este nuevo paradigma, ¿tiene algún efecto que nosotros podamos constatar en nuestra vida cotidiana? Para responder a esta pregunta, recurriremos a las fuerzas de marea, que son las causantes, en último término, de la destrucción de cualquier objeto que cayera en el interior de un agujero negro en tanto en cuanto ese objeto se acercara a la singularidad que reside en el interior de dicho agujero. Esas mismas fuerzas de marea son la causa de que el nivel del agua en nuestras costas suba y baje cada día, debido a la deformación del tejido espacio temporal que la Luna (y, en menor medida, el Sol) ejerce sobre nuestro planeta.

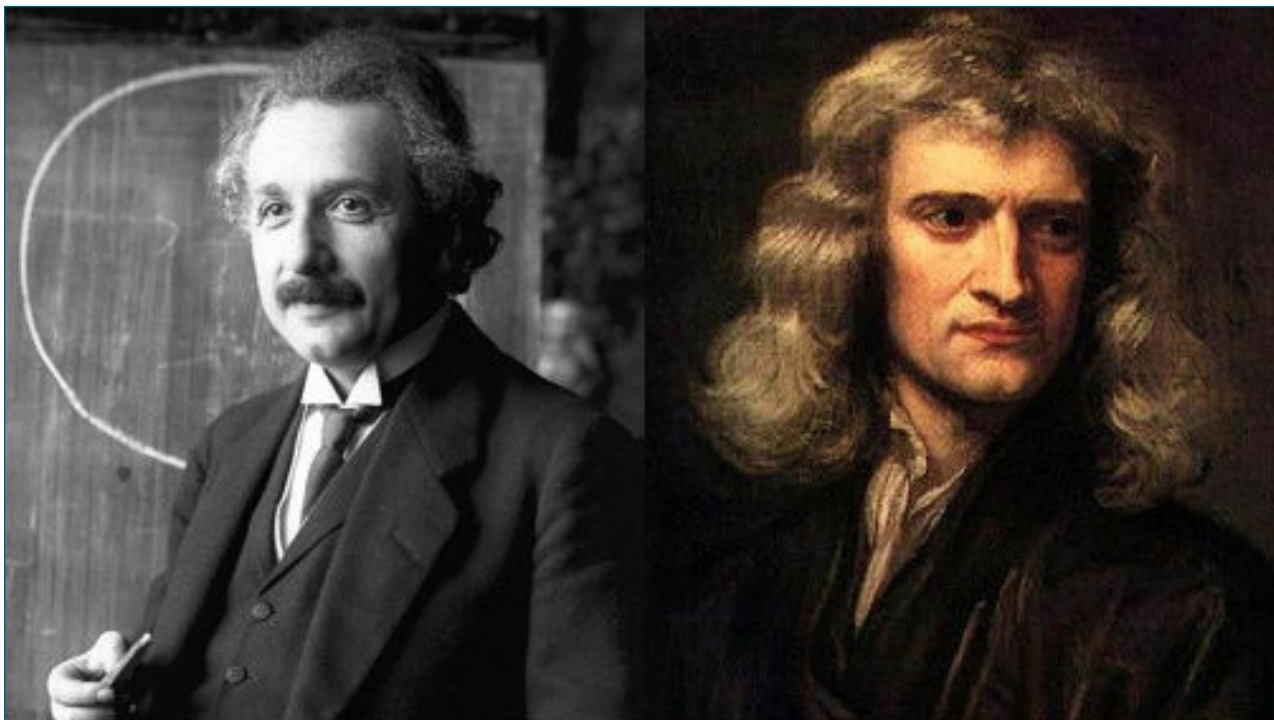


Figura 1. Albert Einstein y Sir Isaac Newton.

LA GRAVEDAD ES UN PROBLEMA GRAVE

Una de las consecuencias del efecto de la gravedad en las estrellas es que, a partir de cierta cantidad de masa (2.6 la masa de nuestro Sol) y en el momento en el que el combustible de las reacciones de fusión que se dan en su interior empieza a agotarse, esta fuerza de gravedad produce un efecto de implosión que, en último término, daría lugar a un agujero negro en cuyo interior se podría generar una singularidad espacio temporal en el punto en el que la estrella acaba colapsando.

Esta singularidad es especialmente compleja por dos motivos. Por una parte, se trataría de un punto de densidad infinita, lo que implicaría una curvatura espaciotemporal también infinita que daría lugar a que el tiempo se detuviera. Por otra parte, por encontrarse más allá del horizonte de sucesos (1), resulta ser un fenómeno que nunca podremos observar desde fuera, lo que viene en denominarse la hipótesis de la censura cósmica. Incluso en el caso hipotético de que enviáramos instrumentos para su observación, las señales de dichos instrumentos nunca podrían escapar del efecto gravitatorio del agujero negro por lo que nunca podríamos llegar a recibirlas.

Entonces, ¿qué interés tiene tratar de especular sobre la naturaleza de dicha singularidad? La respuesta principal es que se cree que para que se pueda producir esta singularidad, tendríamos que ser capaces de describir un entorno compatible con la teoría de la relatividad general y la mecánica cuántica (lo que vendría a ser una gravedad cuántica), con lo que podríamos aunar dos teorías actualmente distanciadas, la relatividad general, que trata del comportamiento del universo a gran escala, y la mecánica cuántica, que nos informa del comportamiento de la materia cuando traspasamos el Rubicón de las unidades de Planck, es decir, en-

tramos en un mundo mucho más allá de lo microscópico.

Por otra parte, también resulta interesante cómo el efecto extremo que podría experimentar un observador que se aproximara a dicha singularidad también dé lugar a efectos cotidianos que podemos observar en nuestro día a día. Este efecto se denomina fuerza de marea y consiste en la deformación que cualquier cuerpo másico genera sobre su entorno en el sentido de estirar en sentido longitudinal y comprimir en sentido transversal.

De esta forma, para un hipotético explorador de un agujero negro, suponiendo un tipo de agujero negro un poco simplificado, sin rotación ni carga eléctrica (con lo que el efecto de la gravedad de marea tendría una dirección constante) y con un tamaño considerable (de cientos o miles de veces la masa de nuestro Sol, de forma que el efecto de las fuerzas de marea fuera mucho más progresivo), el viaje hacia la singularidad tendría varias fases que no implicarían su inmediata destrucción. En primer lugar, por el hecho de tratarse de un agujero negro grande, el viaje podría durar varias horas (según el reloj del propio explorador); pasaría cierto tiempo hasta empezar a notar efectos gravitatorios realmente relevantes. Es de destacar que el viaje, inexorablemente, siempre tendrá solo billete de ida, ya que por más energía que el explorador invirtiera en intentar escapar de la atracción del agujero negro, nunca sería capaz de vencerla, puesto que el horizonte de sucesos se aleja de él a la velocidad de la luz. En cualquier caso, ese viaje sería bastante apacible hasta llegar a los últimos instantes. En ellos, inicialmente, empezaría a notar una fuerza que estiraría sus pies y su cabeza y comprimiría los lados de su cuerpo. Esta fuerza, debida a los efectos de marea, haría que finalmente, no solo su cuerpo sino cualquier partícula que formara parte de él, sufriera un efecto de espaguetización de manera que la distancia entre su cabeza y sus pies tendería a hacerse infinita.



Figura 2. Fuerzas de marea de la Luna sobre la Tierra.

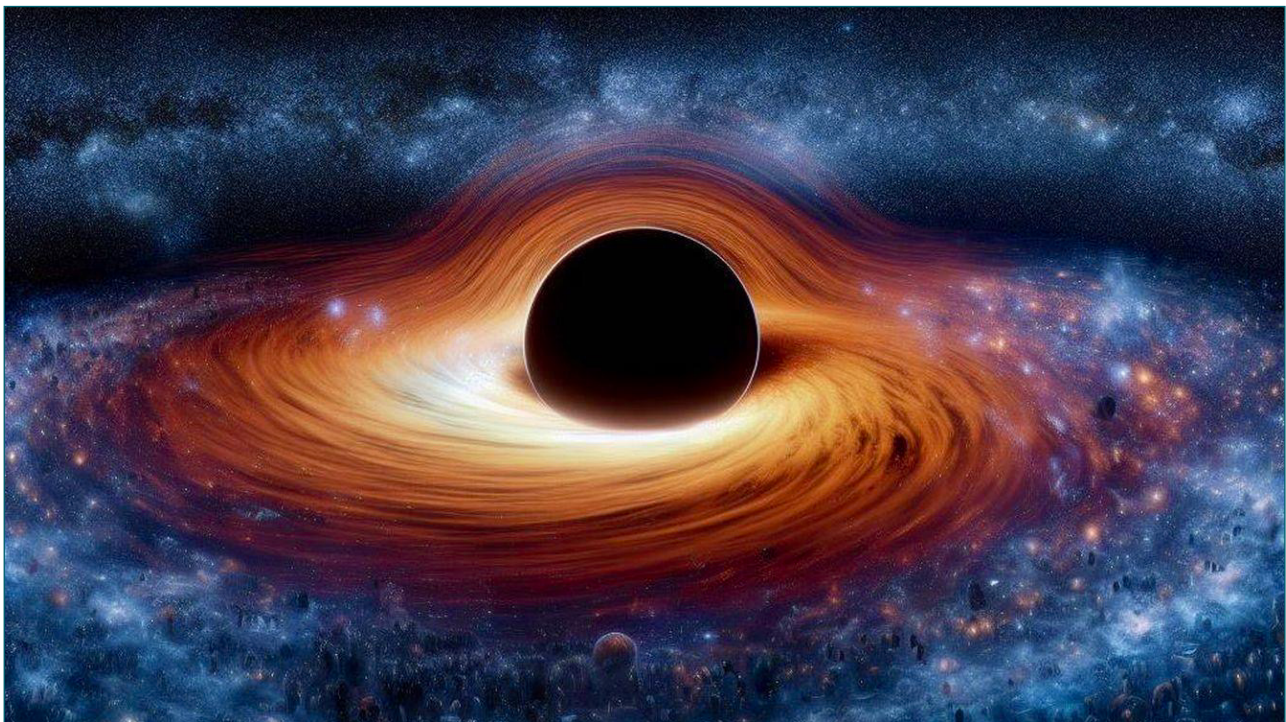


Figura 3. Ilustración de un agujero negro.

Y esto con el tiempo haciéndose cada vez más lento, visto desde el exterior, de manera que los momentos finales de este proceso parecerían pararse en una agonía eterna.

Este efecto tan terrible para el explorador, o para cualquier objeto que rebasara el horizonte de sucesos de un agujero negro, es el mismo que gobierna las mareas que observamos a diario en nuestras costas. La deformación del tejido

espacio temporal generada por la Luna hace que la Tierra (y, en concreto, el agua de su superficie) tienda a estirarse en la dirección de la Luna (dando lugar a las mareas altas) y a comprimirse, lateralmente, en dirección perpendicular (dando lugar a las mareas bajas). Es decir, el mismo efecto que hace que todos los días nuestras costas pierdan o ganen unos metros de playa, tiene su origen en el mismo efecto que causa uno de los mayores misterios de nuestro



Figura 4. Cayendo en un agujero negro.

universo, un misterio que, además, por su propia naturaleza, parece bastante improbable que podamos ser capaces de descifrar en algún momento. Este efecto que produce la Luna, y en menor medida el Sol, sobre las aguas de nuestro planeta, llevado a las últimas consecuencias en la cercanía de una singularidad, obliga a reformular las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein, pero, lamentablemente hay un problema matemático y es la aparición de infinitos en sus ecuaciones (densidad infinita, momento infinito, curvatura infinita, etc.). Las ecuaciones de Einstein empiezan a perder su sentido. Para ello hay que reformularlas para eludir esos infinitos, o cuando menos, a cancelar unos con otros.

A pesar de los monstruosos efectos de la gravedad en un agujero negro, siempre ha llamado la atención del mundo científico que, de las cuatro fuerzas elementales, el electromagnetismo, la fuerza nuclear fuerte y débil y la gravedad, sea esta, con mucho, la más débil de todas. Pareciera que la naturaleza escondida de la gravedad fuera distinta a la de las otras tres, que ya se han conseguido unificar. ¿Qué hace a la gravedad tan distinta de las otras fuerzas? ¿Qué la hace tan esquivia?

En 1919, cuatro años después de que Albert Einstein publicara su teoría de la relatividad general, Theodor Kaluza intentó unificar la gravedad y el electromagnetismo en una sola fuerza elemental mediante la adición de una dimensión espacial extra a la relatividad general, integrando así la gravedad con la relatividad general y el electromagnetismo con las ecuaciones de Maxwell. Kaluza no publicó su trabajo hasta 1921, aunque anteriormente había enviado un

borrador a Albert Einstein. Inicialmente, Einstein se mostró entusiasmado, pero luego se volvió escéptico. Finalmente, en 1921, reconsideró su postura y alentó a Kaluza a publicar su investigación. En la teoría de las cinco dimensiones de Kaluza, la gravedad y el electromagnetismo se consideran la misma fuerza.

Sin embargo, la teoría presentaba dos importantes limitaciones en su forma inicial. En primer lugar, Kaluza no pudo explicar la naturaleza de esta quinta dimensión, lo que hacía que su teoría tuviera sentido matemáticamente pero no físicamente. En segundo lugar, su teoría trataba a los cuerpos siguiendo la mecánica clásica, ignorando los efectos de la mecánica cuántica. En 1926, Oskar Klein abordó estos problemas, revisando las formulaciones y dando lugar a lo que se conoce como la Teoría de Kaluza-Klein. Este fue el inicio de la teoría de cuerdas. No obstante, dicha teoría quedó relegada al olvido hasta que fue redescubierta muchos años después en un intento por fusionar la relatividad general con la mecánica cuántica.

UN NUEVO CAMBIO DE PARADIGMA

El problema de la unificación de la mecánica cuántica y la relatividad general

Uno de los desafíos más fundamentales en la física moderna es la búsqueda de una teoría que unifique la mecánica cuántica y la relatividad general. Estas dos teorías son los pilares de nuestra comprensión del universo, pero describen realidades profundamente diferentes que, hasta ahora, no han podido reconciliarse en un solo

marco teórico. La mecánica cuántica gobierna el comportamiento de las partículas subatómicas, mientras que la relatividad general de Einstein describe la gravedad y la estructura del espacio-tiempo a escalas cósmicas. A pesar del éxito de ambas en sus respectivos dominios, cuando se intentan aplicar simultáneamente, surgen serios problemas conceptuales y matemáticos. Sin embargo, la aparición de la teoría M, propuesta por Edward Witten en 1995, ofrece una posible solución para esta unificación. A través de un marco en once dimensiones y la introducción de nuevas entidades como las branas, la teoría M podría ser la clave para resolver uno de los misterios más profundos de la física.

Para entender el problema de la unificación, primero debemos considerar las diferencias fundamentales entre la mecánica cuántica y la relatividad general.

La mecánica cuántica es la teoría que describe el comportamiento de las partículas a escalas microscópicas. En este marco, las partículas subatómicas no se comportan como objetos sólidos y predecibles, sino como entidades que pueden existir en varios estados a la vez, gobernadas por funciones de onda que solo nos permiten calcular probabilidades de los resultados de mediciones. El principio de incertidumbre de Heisenberg postula que es imposible conocer con precisión tanto la posición como el momento de una partícula al mismo tiempo. Además, en el mundo cuántico, los fenómenos como la superposición y el entrelazamiento cuántico desafían nuestras nociones clásicas de causalidad y realidad objetiva.

Por otro lado, la relatividad general de Einstein describe el espacio-tiempo como una entidad dinámica que se curva en presencia de masa y energía, lo que percibimos como

la fuerza de la gravedad. Es una teoría determinista y continua que funciona de manera excepcional para describir fenómenos a grandes escalas, como el movimiento de los planetas, la formación de estrellas y galaxias, e incluso la expansión del universo. En la relatividad general, el espacio y el tiempo están intrínsecamente entrelazados en lo que se conoce como el espacio-tiempo cuatridimensional.

El problema surge cuando intentamos combinar estas dos teorías para describir fenómenos que involucran tanto la gravedad como las escalas cuánticas. Un ejemplo claro de esto son los agujeros negros y el Big Bang, situaciones donde la gravedad es extremadamente fuerte y las dimensiones espaciales alcanzan tamaños cuánticos. En estos casos, las ecuaciones de la relatividad general predicen singularidades, regiones donde la curvatura del espacio-tiempo se vuelve infinita y las leyes físicas dejan de tener sentido. Por otro lado, la mecánica cuántica predice una naturaleza no determinista en estos extremos, pero carece de una descripción coherente de la gravedad.

Cuando se intentan aplicar las herramientas de la teoría cuántica de campos (que describe las otras fuerzas fundamentales) a la gravedad, los cálculos generan infinitos incontrolables. A pesar de que se han desarrollado métodos en la física cuántica para lidiar con estas infinitudes mediante una técnica llamada renormalización, esta técnica falla al tratar con la gravedad, indicando que la gravedad no puede ser descrita por los métodos cuánticos convencionales. Además, en la mecánica cuántica, el espacio-tiempo es un fondo fijo donde ocurren los fenómenos cuánticos, mientras que, en la relatividad general, el espacio-tiempo es dinámico, lo que genera una profunda contradicción conceptual entre ambas teorías.

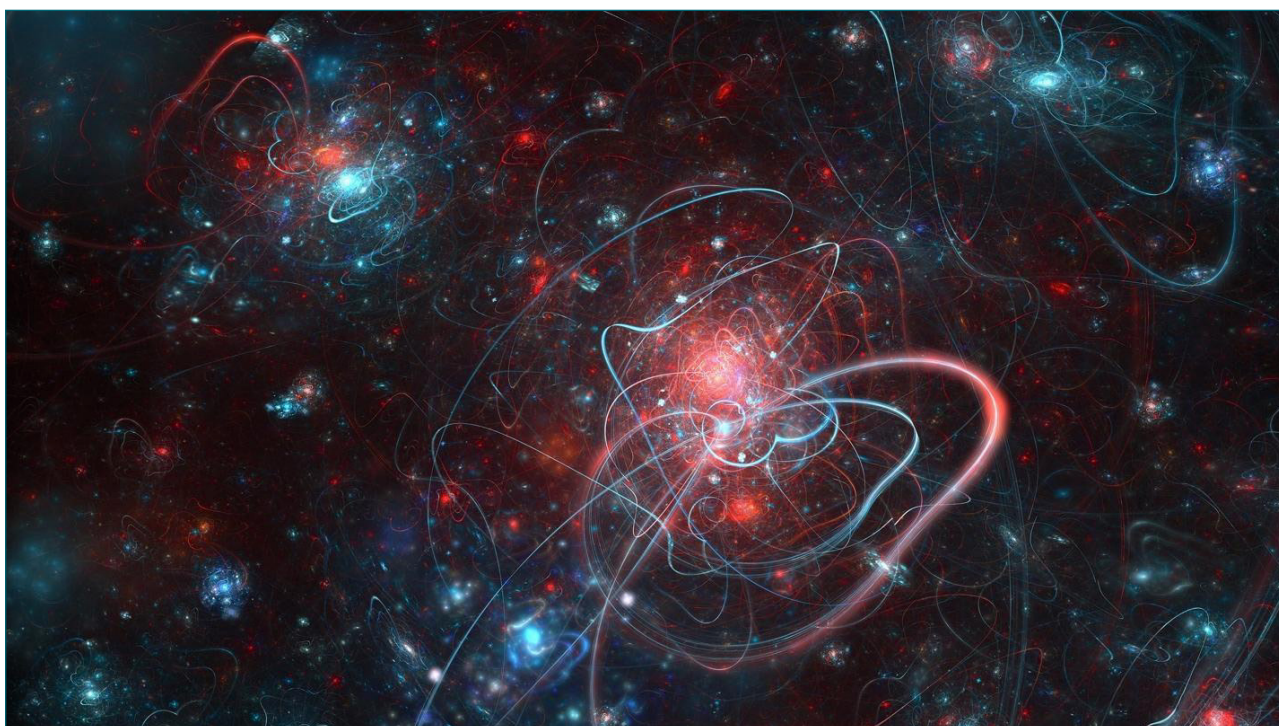


Figura 5. Ilustración de supercuerdas vibrando.

En medio de esta incompatibilidad, surgió una idea revolucionaria: la teoría de cuerdas, que propone que las partículas fundamentales no son puntos, sino cuerdas unidimensionales que vibran en diferentes modos, dando lugar a las diversas partículas elementales. Esta teoría logró unificar en un solo marco las interacciones cuánticas y gravitacionales, aunque solo en diez dimensiones. Sin embargo, el problema de la multiplicidad de versiones de la teoría de cuerdas y la falta de un marco completo llevó al físico Edward Witten a proponer en 1995 una nueva versión más fundamental: la teoría M.

Antes de la propuesta de Witten, había cinco teorías de cuerdas diferentes, cada una con propiedades matemáticas únicas, pero que todas requerían un espacio-tiempo de diez dimensiones. Estas cinco teorías parecían ser independientes entre sí, pero Witten propuso que, en realidad, eran manifestaciones diferentes de una teoría más profunda y unificadora que vive en once dimensiones: la teoría M.

Witten argumentó que, bajo ciertas condiciones, las cinco teorías de cuerdas se pueden entender como límites o aproximaciones de esta teoría unificada en once dimensiones. Las cinco teorías de cuerdas se conectan a través de relaciones llamadas dualidades, que permiten traducir una teoría en términos de otra. Estas dualidades incluyen la dualidad T, que relaciona teorías en diferentes radios de compactificación, y la dualidad S, que conecta teorías en diferentes regímenes de acoplamiento fuerte o débil. Dicho de otra manera, es como poner un maniquí en el

centro de una tienda y contemplar el reflejo en cinco espejos puestos alrededor; cada uno da una imagen verdadera pero parcial, y todas ellas son ciertas. La genialidad de Witten fue añadir una nueva dimensión sobre la que elevarse y contemplar el maniquí en su totalidad.

Una de las características más notables de la teoría M es que extiende el número de dimensiones del espacio-tiempo a once, una más que las teorías de cuerdas anteriores. En esta dimensión adicional, surgen nuevos objetos llamados branas. Las branas son versiones más complejas de las cuerdas:

Las 1-branas son cuerdas.

Las 2-branas son superficies bidimensionales, o membranas.

Las p -branas son objetos de p dimensiones.

De las once dimensiones, solamente cuatro serían visibles a nuestros sentidos (alto, ancho, largo y tiempo), las siete restantes estarían ocultas y enrolladas sobre sí mismas con un radio de curvatura equivalente a la longitud de Planck (la menor longitud que se puede medir con una regla, que es $1.6 \cdot 10^{-35} \text{m}$).

Estas branas podrían ofrecer una descripción más rica del espacio-tiempo, sugiriendo que, a escalas cuánticas, el espacio-tiempo es mucho más complejo de lo que la relatividad general describe. La teoría M incluye no solo cuerdas, sino también membranas y objetos más grandes que interactúan en el espacio-tiempo de once dimensiones.

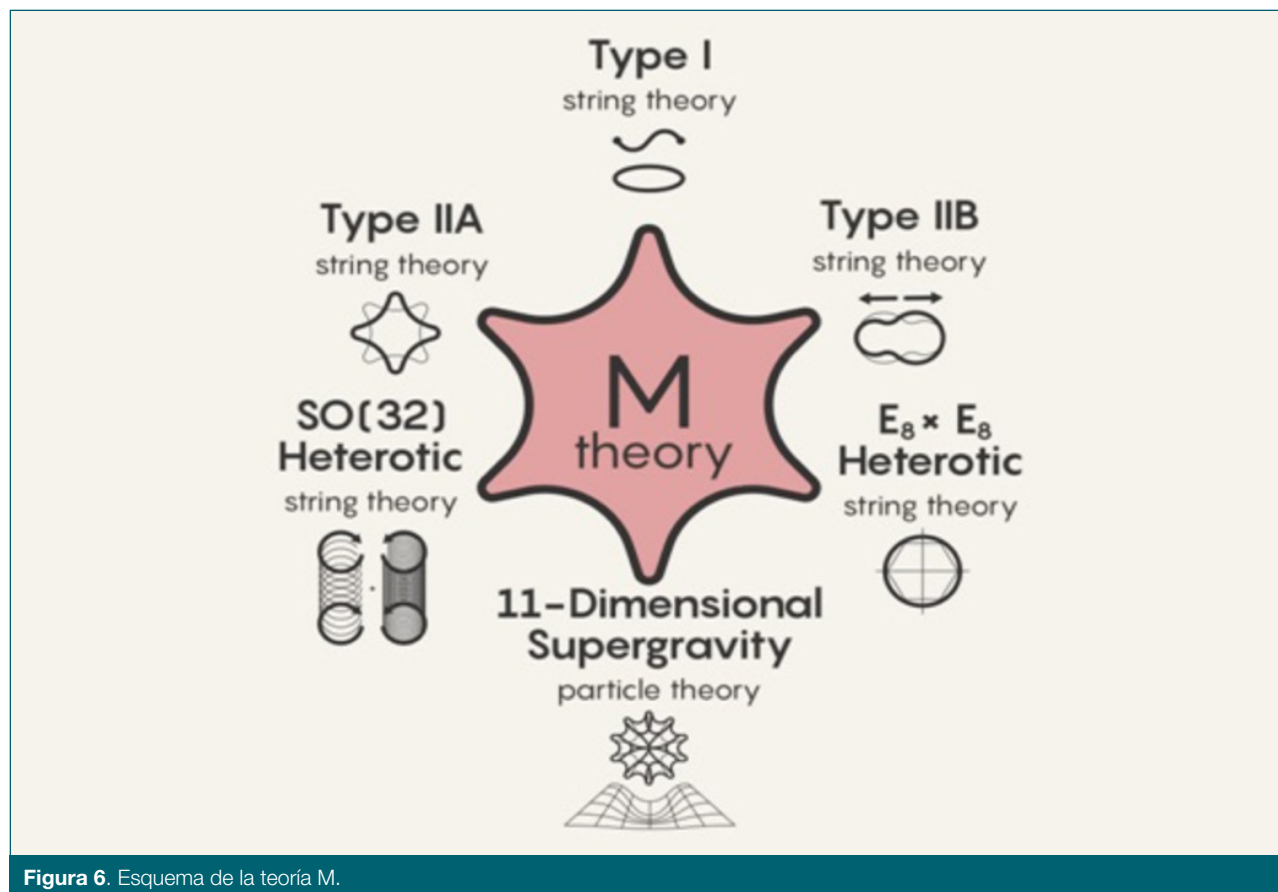


Figura 6. Esquema de la teoría M.

Uno de los aspectos atractivos de la teoría M es que, en su límite clásico, reproduce la supergravedad en once dimensiones, una teoría que combina la relatividad general con la supersimetría. La supersimetría es una simetría hipotética que postula una correspondencia entre las partículas de materia (fermiones) y las partículas portadoras de fuerza (bosones). La supergravedad en once dimensiones es la única teoría de gravedad supersimétrica consistente en dimensiones superiores a diez, lo que hace que la teoría M sea una extensión natural.

EL CHIM-PUM

La unificación de la mecánica cuántica y la relatividad general es uno de los grandes retos de la física teórica moderna. Las diferencias conceptuales y matemáticas entre estas dos teorías han generado desafíos insuperables en su combinación en un solo marco. Sin embargo, la teoría M de Edward Witten ofrece una perspectiva prometedora. Al postular un universo de once dimensiones, en el que cuerdas y branas interactúan en un espacio-tiempo más rico y complejo, la teoría M podría ser la clave para desarrollar una teoría del todo que unifique todas las fuerzas fundamentales de la naturaleza, incluida la gravedad. Aunque aún está incompleta, la teoría M es uno de los avances más significativos hacia la comprensión definitiva del universo.

La evolución de la humanidad bien puede contemplarse bajo el prisma de la adopción de nuevos paradigmas científicos, el progreso en la física ha sido marcado por estos saltos de comprensión. El paso de la física clásica de Newton a la relatividad de Einstein fue un hito en el que

nuestras ideas sobre el espacio, el tiempo y la gravedad se transformaron radicalmente. Hoy nos encontramos en la cúspide de otro cambio paradigmático, en el que las ideas de Einstein podrían ser superadas por la teoría M de Witten. Esta nueva visión no solo promete resolver la encrucijada entre la mecánica cuántica y la relatividad general, sino que también abre la puerta a un entendimiento más profundo y unificado del universo. La evolución humana siempre ha estado impulsada por nuestra capacidad de expandir los límites del conocimiento, y quizás, con la teoría M, estamos al borde de un nuevo despertar científico que redefine lo que entendemos por realidad. Confiamos en nuestra capacidad para alcanzar ese nuevo despertar científico, que nos acercaría al conocimiento del cuándo, el cómo y el porqué del universo, venciendo, como especie inteligente que somos, cualquier tentación de retroceso que pudiera acecharnos.

NOTAS

- [1] Superficie esférica negra que rodea a la singularidad y que, una vez atravesada, para volver a escaparse se debería tener una velocidad mayor que la de la luz.
- [2] El Big Bang es la teoría científica que describe el origen y la evolución temprana del universo. Según esta teoría, el universo comenzó hace aproximadamente 13.8 mil millones de años a partir de un estado extremadamente caliente y denso. Este evento inicial, conocido como el Big Bang, marcó el comienzo del tiempo y el espacio tal como los conocemos. ■