

El universo de las supercuerdas

por
Saúl Ramos

Este es un capítulo separado que integra el libro

Fronteras de la Física en el Siglo XXI

Octavio Miramontes y Karen Volke (Editores)

CopIt-arXives, 2013

México, D.F.

ISBN: 978-1-938128-03-5

©CopIt-arXives

<http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/TS0011ES/TS0011ES.html>

Índice general

Saúl Ramos-Sánchez	El universo de las supercuerdas	1
1.	Gestación de revoluciones científicas	1
2.	El despertar de las supercuerdas	2
3.	Más que sólo cuerdas	7
4.	Nuestro universo hecho de cuerdas	11
5.	Dualidad holográfica	13
6.	Las supercuerdas en México y su futuro	16
7.	Referencias	18

El universo de las supercuerdas

Saúl Ramos-Sánchez, Instituto de Física, UNAM, México

1. Gestación de revoluciones científicas

A finales del siglo XIX, la física parecía completa. Casi todos los fenómenos físicos eran descritos por la gravitación Newtoniana, el electromagnetismo y la termodinámica. En la descripción del universo, sólo un par de “detallitos” rompían la perfección de la física: el efecto fotoeléctrico, la longevidad del sol y lo escurridizo del éter, entre otros. Fueron precisamente esas preguntas abiertas las que condujeron finalmente a la violenta irrupción de la relatividad de Einstein y de la mecánica cuántica, teorías que rompieron con todos los esquemas conocidos y establecieron las reglas de una nueva forma de ver y entender lo que nos rodea en términos de geometría y probabilidad.

Tras poco más de cien años, la historia hoy parece condenada a repetirse: podemos entender casi por completo la estructura fundamental de todo lo conocido mediante el modelo cosmológico de la Gran Explosión (o *Big Bang*) y el Modelo Estándar de partículas elementales. El modelo de la Gran Explosión proporciona herramientas para entender la evolución del universo macroscópico desde hace casi 14 mil millones de años hasta la época actual y propone que el inicio de los tiempos pudo haber sido una explosión de enorme intensidad¹.

Por otra parte, el Modelo Estándar² nos permite entender la estructura de la materia en términos de diminutas manifestaciones puntuales de energía llamadas quarks y leptones, y las fuerzas entre ellos (la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte responsable de la cohesión del núcleo atómico, y la fuerza nuclear débil responsable del decaimiento radiactivo) en términos de simetrías de la teoría, que exigen, por ejemplo, que los fotones sean los encargados de mediar las interacciones electromagnéticas y que los gluones medien las interacciones nucleares fuertes. Estos quarks y leptones se mezclan para construir todo lo que nos rodea, desde un virus hasta las galaxias. Pese al enorme éxito de estas teorías, aún nos faltan herramientas para comprender algunos de los misterios de la naturaleza. Por ejemplo, la observación de que nuestro universo se expande cada vez más

¹Véase el capítulo de Vladimir Avila “Un universo en evolución”, en este mismo libro.

²Véase el capítulo de Myriam Mondragón “Física de altas energías”, en este mismo libro.

rápido³, el dominio de la materia sobre la antimateria, y el origen de la estructura del Modelo Estándar, son algunas de las cuestiones que tienden a emular hoy las interrogantes que dieron origen al nacimiento de la mecánica cuántica.

Como hace un siglo, para responder las anteriores y otras preguntas se han propuesto complicados eventos en la historia del universo y nuevas “sustancias” que se antojan casi tan escurridizas como el éter. Entre las propuestas, se encuentra el campo de Higgs concebido en 1964 para explicar la masa de las partículas elementales, y la materia y la energía oscuras⁴. Aunque gracias a los recientes resultados experimentales⁵ existe amplio consenso en la comunidad científica de que el campo de Higgs existe, la materia y energía oscuras siguen escapando a todas las pruebas experimentales y podrían mostrarse más complicadas de lo que creemos.

Otro reto muy importante para la física contemporánea es comprender cómo funciona la fuerza de gravedad, descrita por la teoría de la relatividad, en el reino de lo pequeño, en donde gobierna la mecánica cuántica. Se conjetura que la unión de estas dos magnificentes teorías describiría el universo temprano por completo, incluyendo la historia temprana del cosmos, el nacimiento de las partículas elementales que conocemos y de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Hay un problema: lograr esta hazaña sugiere la necesidad de un tipo de física completamente diferente a la contenida en las teorías existentes, necesita una transformación abrupta de los conceptos físicos, tal vez de las dimensiones del cambio gestado por los padres de la relatividad y la mecánica cuántica. Algunos opinan que tal transformación ya existe y que lleva por nombre *la teoría de supercuerdas*.

2. El despertar de las supercuerdas

La teoría de supercuerdas (o sencillamente teoría de cuerdas) es *per se* una revolución conceptual cuyo origen es precisamente uno de los misterios de la física subatómica. En los 1960s se desconocía el origen de las interacciones fuertes entre los hadrones, partículas compuestas de quarks (tales como protones y neutrones). En esos años, los trabajos de G. Veneziano, Y. Nambu, H. Nielsen y L. Susskind indicaban que los hadrones se comportaban como manifestaciones de minúsculos filamentos vibrantes. Si las cuerdas fueran lo suficientemente pequeñas, podrían aparecer como partículas puntuales en los experimentos. Hoy sabemos que la teoría que describe perfectamente la física de los hadrones es la cromodinámica cuántica⁶, pero la formulación de la física de partículas en términos

³S. Perlmutter, A. Riess y B. P. Schmidt recibieron el premio Nobel de Física 2011 por esta observación.

⁴Se les llama *oscuras* porque no interactúan con la radiación electromagnética, es decir, no emiten, ni absorben, ni reflejan luz.

⁵El 4 de julio del 2012, científicos del CERN (siglas históricas de la hoy llamada *Organización Europea para la Investigación Nuclear*) reportaron haber detectado una partícula muy similar a la partícula de Higgs. Aún se debe verificar el espín y otras propiedades de la partícula antes de afirmar que se trata del bosón de Higgs predicho por el Modelo Estándar o de alguna otra partícula con propiedades parecidas.

⁶Véase el capítulo de Genaro Toledo “La materia y sus nuevas estructuras”, en este mismo libro.

de cuerditas vibrantes preparaba una sorpresa.

La hipótesis esencial de la teoría de cuerdas es que, así como distintos tonos surgen de las vibraciones de una cuerda de guitarra, distintas vibraciones de minúsculas cuerdas idénticas se manifiestan a escalas mayores que el tamaño de las cuerdas como distintas partículas elementales, como se sugiere en la figura 1. Aceptando esta idea, todas las propiedades de las partículas, tales como masa, carga y espín, resultan determinadas por las vibraciones de las cuerdas. Las partículas son pues los tonos en la sinfonía de las cuerdas.

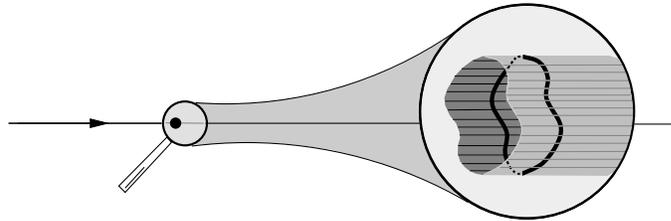


Figura 1: Partículas contra cuerdas. A escalas muy pequeñas, la visión clásica de partícula puntual podría ser reemplazada por la de una cuerda. La línea que describe la trayectoria de la partícula es reemplazada por una superficie (cilíndrica, en la figura) para la cuerda.

Hacia 1974 J. Scherk y J.H. Schwarz [1] demostraron que en el formalismo cuántico de la teoría de cuerdas uno de los modos de vibración produce un *gravitón*, la partícula conjeturada como posible mensajero cuántico de las interacciones gravitacionales, es decir, la partícula responsable de que dos cuerpos con masa se atraigan. Un gravitón es una partícula sin masa y con espín dos, que se rige bajo las reglas de la relatividad general contenidas en la llamada acción de Einstein-Hilbert. Lo que demostraron Scherk y Schwarz fue que las vibraciones de las cuerdas producen una partícula con todas las propiedades mencionadas. En otras palabras, de la teoría de cuerdas surge naturalmente una forma cuántica de la gravedad de Einstein.

De acuerdo a M. Planck, el padre de la mecánica cuántica, la escala a la que los efectos cuánticos de la gravedad deberían ser perceptibles es la escala de Planck $\ell_P = \sqrt{\hbar G/c^3} \approx 10^{-35}$ m (\hbar es la constante reducida de Planck, G es la constante de gravitación universal, y c es la velocidad de la luz en el vacío). Consecuentemente, las cuerdas deben tener ese tamaño, suficientemente pequeñas como para semejar puntos desde la perspectiva de cualquiera de nuestros aparatos de medición.⁷

Muy pronto se encontró que, para que todas las componentes cuánticas de la teoría de cuerdas fueran congruentes⁸, se necesitan dos ingredientes adicionales: *supersimetría*

⁷La escala de Planck como escala de las interacciones gravitacionales es válida sólo en un espacio tres dimensional, como el que percibimos cotidianamente. Esta escala puede ser aumentada considerablemente si existen dimensiones adicionales y éstas son grandes.

⁸Un problema habitual al cuantizar las teorías de campos es que las simetrías (locales) clásicas de la teoría son violadas por efectos cuánticos. Esta *anomalía*, como se le llama en las teorías cuánticas, representa

y seis dimensiones espaciales adicionales [2, 3].

La supersimetría es una simetría que exige que cada bosón (partícula con espín entero) esté acompañado de un fermión (partícula con espín semientero) que, salvo por el espín, compartan propiedades idénticas⁹. Curiosamente, distintas vibraciones de una sola cuerda pueden interpretarse como una partícula con espín s y otra con espín $s - 1/2$ y con la misma masa y carga. Por ejemplo, de una misma cuerda vibrante aparecen el gravitón con espín dos y el gravitino con espín $3/2$; los llamados bosones de norma o mediadores de interacciones de norma de espín uno están acompañados de los norminos con espín $1/2$. La supersimetría ha sido ampliamente explorada [4] y ha mostrado ser útil en la física de partículas para resolver varios problemas, entre ellos, el llamado *problema de jerarquía*. Es decir, es capaz de explicar por qué la masa de la partícula de Higgs es cercana a la masa de todas las otras partículas fundamentales, y no gigantesca, como podría ser. Por otra parte, las dimensiones adicionales pueden ser concebidas como dimensiones parecidas a las que nos son familiares, pero que escapan a nuestras percepciones tal vez de la forma en la que una tercera dimensión escaparía a la percepción de seres confinados a vivir en una hoja de papel bidimensional, como en la novela *Planilandia* [5]. De la predicción de estas dimensiones extra se debe destacar que la teoría de cuerdas es el único formalismo conocido capaz de predecir la dimensionalidad de nuestro espacio-tiempo.¹⁰

Fue en los 1980s cuando finalmente todos los ingredientes mencionados fueron organizados en lo que hoy llamamos la teoría de cuerdas. La sorpresa final fue que, incidentalmente, las cuerdas cuánticas se rigen naturalmente por ciertas simetrías de norma, en las que pueden fácilmente encontrar su origen las simetrías de norma atadas a las tres fuerzas fundamentales que afectan a las partículas elementales en el Modelo Estándar. Este resultado catapultó a la teoría de cuerdas como la única posibilidad conocida de entender todas las fuerzas fundamentales de la naturaleza (la gravedad y las fuerzas del Modelo Estándar) desde un único esquema cuántico; la teoría de cuerdas se convirtió en candidata a ser *la* teoría de unificación que muchos científicos, incluyendo a Einstein, buscaron. Tal vez por este motivo y por el hecho de que el movimiento de las cuerdas está completamente caracterizado por un solo parámetro (la tensión de la cuerda), los más ambiciosos le dieron el apodo de *la teoría de todo*.

Tal vez el aspecto más relevante de las supercuerdas es un tanto técnico: debido a su naturaleza extendida, no presentan las típicas complicaciones de las partículas puntuales cuando se considera la gravedad. En particular, se sabe que el cálculo de la magnitud de las interacciones puntuales entre gravitones y otras partículas elementales siempre conduce a cantidades infinitas (conocidas como *divergencias ultravioleta*) inmensurables y, por tanto, inadmisibles en una teoría física. Las interacciones entre cuerdas son diferentes.

una inconsistencia inadmisibile.

⁹Véase el capítulo de Myriam Mondragón "Física de altas energías", en este mismo libro.

¹⁰Esta predicción puede interpretarse también como un defecto, pues el número de dimensiones predichas es diez (nueve espaciales y una temporal) y no cuatro (tres espaciales y una temporal), o sea, no coincide con el observado.

Como son objetos extendidos, la interacción de las cuerdas no ocurre en un solo punto del espacio-tiempo. La única variable que interviene en estas interacciones es la *constante de acoplamiento* g_s que es finita y, como la carga eléctrica en las interacciones electromagnéticas, determina la fuerza con la que las cuerdas pueden abrazarse. Como consecuencia de la interacción no puntual, la magnitud de las interacciones resulta ser una cantidad perfectamente finita y medible.

Los más críticos de la teoría de cuerdas de inmediato notaron que el apodo de “teoría de todo” no era apropiado, pues para poder aspirar a ser una teoría física *de algo* tiene al menos un reto importante que vencer. La teoría de cuerdas debe explicar la evidente discrepancia entre las cuatro dimensiones espacio-temporales que nos son familiares y las diez dimensiones de la teoría de cuerdas.

T. Kaluza y O. Klein concibieron en los 1920s un mecanismo para resolver el problema: la *compactificación* de las dimensiones adicionales [6, 7]. Compactificar consiste en dos pasos: considerar *i)* que las dimensiones a compactificar no se extienden hasta el infinito (como las que nos son familiares), sino que forman un espacio *compacto*¹¹, tal como una esfera o un toro; y *ii)* que el espacio compacto es suficientemente pequeño como para evadir a los instrumentos de medición actuales. En la figura 2 se ilustra este proceso. Una de las dimensiones de un espacio bidimensional, como una hoja de papel, es compactificada en una circunferencia S^1 . En un paso posterior, el radio R de la circunferencia es reducido hasta que el espacio bidimensional aparenta ser unidimensional. Pese a su apariencia, el espacio sigue siendo bidimensional, pero, debido al tamaño de la segunda dimensión, las mediciones físicas darían resultados unidimensionales si fueran realizadas con instrumentos que no pueden apreciar longitudes tan pequeñas como el radio de la dimensión compactificada.

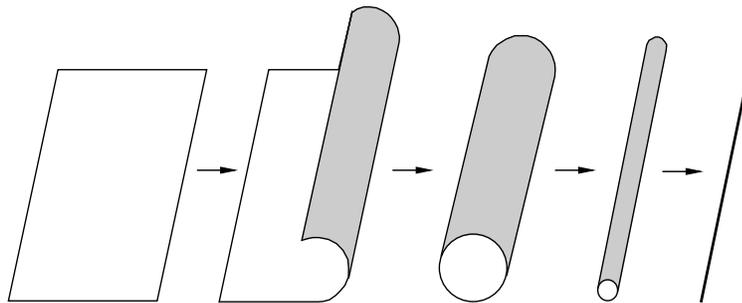


Figura 2: Compactificación de una dimensión en un universo bidimensional. La dimensión horizontal envuelve una circunferencia cuyo radio es reducido a un tamaño imperceptible. El resultado es un universo unidimensional

¹¹Un espacio compacto se puede entender como un espacio (topológico) compuesto de un número finito de “pedacitos” o “parches” del espacio. Se recomienda [8] como una introducción a topología.

El método de compactificación de Kaluza y Klein predice una forma de demostrar que existe una dimensión compactificada. Una vez compactificada alguna dimensión, cada partícula del universo resultante está acompañada de una infinidad de réplicas de ésta, cuya diferencia es sólo que las masas de las réplicas son diferentes múltiplos enteros de $m_{KK} = \hbar/Rc$. Es decir, de acuerdo a Kaluza y Klein, la masa de las copias pesadas crece a medida que el tamaño R de la dimensión compacta disminuye. De hecho, si el tamaño fuera del orden de la escala de Planck, $R \approx \ell_P$, la masa de los “gemelos” pesados de las partículas elementales sería un múltiplo de $m_P \approx 10^{19} \text{ GeV}/c^2 \approx 22 \mu\text{g}$, i.e. 10^{17} veces más grande que la masa de la partícula elemental más pesada que conocemos, el quark top. Una forma de entender la aparición de estas partículas masivas es reconociendo que, en un universo con más dimensiones todas las partículas también pueden moverse en esas dimensiones. Sin embargo, desde nuestra perspectiva cuatro-dimensional la energía cinética debida al movimiento extra-dimensional se traduce en una energía intrínseca cuatro-dimensional mayor. En otras palabras, como nosotros no podemos apreciar el movimiento de las partículas en dimensiones compactas, la energía de las partículas almacenada en esas dimensiones se traduce en masa cuatro-dimensional. Búsquedas actuales de estas partículas en el LHC no han encontrado indicios de estas partículas con masas por debajo de algunos TeV/c^2 [9].

A pesar de sus propiedades prometedoras, en la formulación original de la teoría de cuerdas, los distintos tipos de cuerdas posibles destruyen una característica esencial de una teoría fundamental: su capacidad de proveer una explicación unificada de todos los fenómenos físicos observados. Algunas cuerdas son abiertas, otras, cerradas; algunas tienen una orientación definida, otras no; algunas tienen una sola supersimetría, otras tienen dos. Y todas estas cuerdas no pueden convivir armoniosamente en una sola teoría. Se concluyó que la teoría de cuerdas debe dividirse en cinco variedades distintas. Las versiones resultantes de la teoría de cuerdas (cada una con sus propias ecuaciones de movimiento) recibieron el nombre de teorías I, IIA, IIB, heterótica O y heterótica E. Esta aparente decepción fue tomada con optimismo por muchos, pues, después de todo, la teoría de cuerdas sólo tiene cinco manifestaciones mientras que es posible formular una infinidad de teorías cuánticas de campos o de soluciones a las ecuaciones de Einstein, entre las que *sólo una* corresponde a la descripción de nuestro universo. En la teoría de cuerdas, la búsqueda de soluciones parecía mucho más restringida. La tarea consistía aparentemente en descubrir cuál de las cinco versiones de la teoría podría describir la naturaleza. Pero la teoría de cuerdas guardaba (y quizá guarda) aún varios secretos: como veremos más tarde, el descubrimiento en 1995 de que la teoría de cuerdas admite otros objetos además de cuerdas y, sobre todo, de que las cinco versiones de la teoría de cuerdas son distintos rostros de una teoría más fundamental revivió la idea de la teoría de cuerdas como una teoría madre de toda la física y proveyó nuevas herramientas para describir nuestro universo.

3. Más que sólo cuerdas

Un problema serio de la teoría de cuerdas original, con sus cinco distintas versiones, es que la dinámica de las cuerdas en las diez dimensiones espacio-temporales sólo se puede describir en el límite de *acoplamiento débil*, es decir, cuando la constante que determina la probabilidad de interacción entre las cuerdas, g_s , es mucho menor que la unidad. Ilustremos el origen de este conflicto empleando la serie de Taylor de una función $f = f(g_s)$. Cuando $g_s \ll 1$, la aproximación $f(g_s) \approx f(0) + g_s f'(0)$ es suficiente para tener una buena idea del valor de f . A medida que el valor de g_s crece, esta aproximación se vuelve menos precisa hasta que, para $g_s \gg 1$, $f(g_s) \approx f(0) + g_s f'(0)$ arroja un resultado inútil. De hecho, para valores suficientemente grandes de g_s , sólo la serie de Taylor completa puede proporcionar un resultado confiable y, por lo tanto, el uso de la expansión es inválido.

Al calcular la magnitud de las interacciones entre las cuerdas, se emplea justamente una expansión (funcional) sobre la constante de acoplamiento¹². Generalmente, el cálculo de cada uno de los términos de la expansión es tan complejo, que sólo se conocen los términos de menor orden. Cuando el acoplamiento es débil, es decir, cuando las cuerdas casi no interactúan, estos primeros términos determinan con suficiente precisión la magnitud de las interacciones. Sin embargo, en el límite de *acoplamiento fuerte* $g_s \gtrsim 1$, cuando las cuerdas interactúan mucho, el resultado carece de significado. Este problema (la pérdida de calculabilidad en el límite de acoplamiento fuerte) existe también, por ejemplo, en la cromodinámica cuántica, en donde aún no ha sido resuelto del todo, aunque sofisticados cálculos numéricos producen resultados medianamente precisos.¹³ En la teoría de cuerdas, este obstáculo motivó una gran revolución.

La revolución nació de un concepto que no había sido explotado en la teoría de cuerdas: *dualidad* o equivalencia entre dos teorías aparentemente diferentes. Para ilustrar este concepto, imaginemos que dos personas observan independientemente el mismo objeto y que una indica que se trata de un círculo mientras que la otra ve un rectángulo. Esta paradoja se resuelve cuando ambos descubren que el objeto de estudio es un cilindro y que sus observaciones corresponden a distintas apreciaciones de éste. Este ejemplo hace evidente que dos fenómenos aparentemente muy diferentes pueden ser aspectos de un único fenómeno. Otra ilustración útil y que refleja el trabajo científico inherente al descubrimiento de las dualidades es imaginar que alguien encuentra dos libros en lugares distantes escritos en distintos idiomas antiguos y desconocidos. No obstante, al comenzar a descifrarlos, se descubre que es posible establecer un diccionario entre ambos idiomas y que, pese a las diferencias aparentes de ambos libros, se trata de versiones en idiomas distintos de un mismo relato. En este segundo caso, es preciso resaltar la naturaleza abs-

¹²La misma técnica se emplea para determinar la magnitud de las interacciones entre partículas en una teoría cuántica de campos.

¹³La técnica numérica empleada es QCD en la red (*lattice QCD*). Sin embargo, hay indicios de que la teoría de cuerdas, mediante la *dualidad holográfica* que discutiremos más tarde, podrá resolver este conflicto.

tracta del origen común de dos objetos de estudio aparentemente diferentes, y cómo el establecer el “diccionario” entre ellos ayuda a comprender dicho origen.

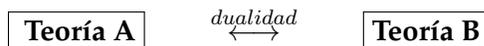
En los ejemplos anteriores, notamos que existe una entidad *fundamental*, el cilindro o el relato, que origina dos versiones bastante distintas de ella. Esta idea puede llevarse al ámbito de las teorías. Supongamos que existen dos teorías aparentemente muy diferentes, llamémoslas A y B. Es concebible que ambas teorías sean el resultado de aplicar diferentes operaciones, a las que llamaremos *observaciones*, sobre una teoría “madre” más fundamental:



En este escenario, las teorías A y B son duales entre sí y duales también a la teoría fundamental.

Las observaciones de algunos contemporáneos de Newton y de los padres del electromagnetismo y de la mecánica cuántica establecieron el ejemplo quizá más conocido de este concepto: la dualidad onda-partícula. Esta dualidad no sólo resolvió la paradoja que existía entre las descripciones ondulatoria y corpuscular de la luz, sino que reveló que todas las partículas que conocemos manifiestan dos características diferentes dependiendo de nuestra perspectiva, como el cilindro del párrafo anterior. Aún más, que estas dos manifestaciones de la luz (y de todas las partículas conocidas) sean duales muestra que tienen un origen fundamental común, el cual se entendió poco más tarde y al que se le llama hoy *campo cuántico*.

Existe otro tipo más elegante de dualidad en el que dos teorías están vinculadas de manera directa, a pesar de ser muy distintas a primera vista:



Para ilustrarla, podemos usar nuevamente la analogía con un libro escrito en dos idiomas muy diferentes, conectados a través de un diccionario adecuado. Hay casos (como este) en el que la existencia de una dualidad sugiere la existencia de una entidad fundamental que origina la dualidad, pero no siempre sucede. Por ejemplo, la *dualidad holográfica* que discutiremos más tarde vincula dos teorías completamente diferentes sin que (hasta ahora) se haya descubierto una tercera teoría que permita entender el origen de la dualidad.

En la teoría de cuerdas, se encontró que hay dos dualidades capaces de vincular las cinco distintas versiones de la teoría de cuerdas: las llamadas dualidad T y dualidad S. La dualidad T [10] relaciona dos versiones de la teoría de cuerdas cuando el resultado en una de ellas de compactificar una dimensión en un círculo de radio R coincide con el de hacer lo mismo en un círculo de radio $1/R$ en la segunda de ellas. Por otra parte, la dualidad S [11] relaciona dos teorías, en las que la física es la misma cuando en una de ellas la constante de acoplamiento entre las cuerdas es g_s y en la otra $1/g_s$. La dualidad S permite conocer el límite de acoplamiento fuerte $g_s \gg 1$ de una teoría mediante el

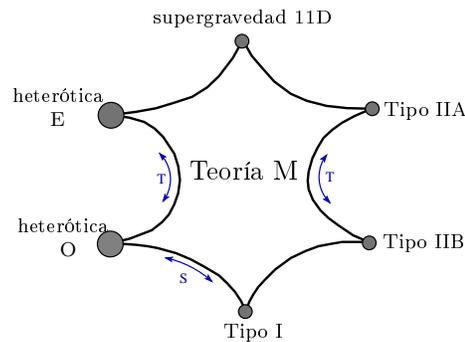


Figura 3: Las teorías de supercuerdas y sus conexiones. Las dualidades S y T relacionan algunos de los tipos de cuerdas, pero sólo la teoría M captura la esencia de todas las versiones de la teoría de cuerdas.

límite de acoplamiento débil $g_s \ll 1$ de la otra, proveyendo una solución al problema de incalculabilidad de las cuerdas en su límite de acoplamiento fuerte.

Como se ilustra en la figura 3, usando las dualidades resulta que las cuerdas heteróticas son T-duales al igual que las cuerdas tipo II. Además, la cuerda heterótica O es S-dual a la cuerda tipo I. Esto reduce el número de tipos de cuerdas independientes a dos. Lo más inesperado y sorprendente fue que estas dos categorías de cuerdas (la izquierda y la derecha, en la figura) pudieran ser relacionadas mediante la compactificación de una de las dimensiones de una teoría 11-dimensional cuyo límite de bajas energías es descrito por la teoría conocida como supergravedad, como E. Witten anunció en 1995 [12, 13]. En su trabajo, Witten mostró que, al hacer crecer el acoplamiento g_s en la teoría de cuerdas IIA en diez dimensiones (nueve espaciales y una temporal), las cuerdas se transforman en membranas incrustadas en un espacio 11-dimensional. De forma similar, las cuerdas 10-dimensionales de la teoría heterótica E “crecen” para convertirse en superficies en 11-dimensiones a medida que g_s aumenta. Pese a lo inverosímil de estas afirmaciones, los cálculos presentados en 1995 convencieron a toda la comunidad científica.

Para Witten, ese descubrimiento fue sólo la punta del iceberg. Él mostró que las cinco versiones de la teoría de cuerdas son distintas manifestaciones de una nueva teoría 11-dimensional más fundamental, a la que llamó *teoría M* (quizá por **m**isterio, **m**adre, **m**embrana, **m**atriz o alguna otra idea). Cada uno de los tipos de cuerdas captura una parte distinta de la teoría M. En nuestra ilustración del concepto de dualidad a través del cilindro, la teoría M se podría comparar con un objeto amorfo y las teorías de cuerdas con las descripciones parciales o proyecciones de cada una de las caras del objeto. Así, encontramos que todas las versiones de la teoría de cuerdas son duales entre ellas y duales a la teoría M. Una comprensión completa de la teoría M permitiría, entre otras cosas, entender la naturaleza desde un punto de vista unificado, en caso de comprobarse que describe correctamente nuestro universo. Desafortunadamente, esta posibilidad es frenada actual-

mente por el limitado conocimiento que se tiene de la teoría M, pero en el que se avanza continuamente.

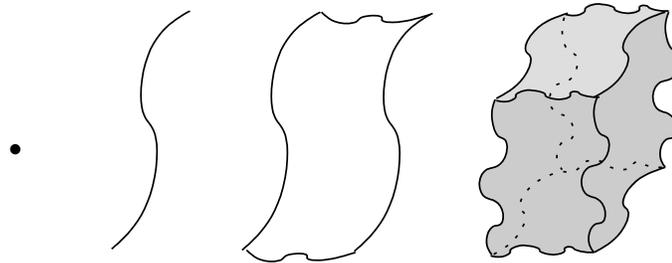


Figura 4: Cuatro Dp -branas. Una brana cero dimensional ($p = 0$) semeja a una partícula puntual; una D1-brana parece una cuerda abierta; una D2-brana es una membrana; y una D3-brana es un subespacio con volumen.

También por esos años, J. Polchinski demostró que, bajo la dualidad T, algunas cuerdas prefieren vivir confinadas en objetos extendidos que rellenan p dimensiones espaciales y que fueron bautizados Dp -branas como generalización de la idea de una membrana bidimensional [14, 15]. Esto indicó que la comprensión entonces dominante de la teoría de cuerdas era incompleta. Además de las cuerdas unidimensionales, la teoría de cuerdas admite estas otras estructuras dinámicas que pueden cubrir las nueve dimensiones espaciales de la teoría de cuerdas o sólo un subespacio. Como se muestra en la figura 4, las D0-branas son objetos puntuales, es decir, partículas, mientras que las D1-branas pueden interpretarse como cuerdas y las D3-branas son “cajas” con volumen. Ante este descubrimiento, se notó que una posibilidad viable es que el universo que conocemos sea una D3-brana que vive en un espacio más grande en donde otras D3-branas como la nuestra también podrían existir, o bien, que se trata de la intersección tridimensional de dos o más Dp -branas con $p > 3$. Esta representa una alternativa a las compactificaciones tradicionales, en las que todas las dimensiones extra son diminutas (probablemente del tamaño de la escala de Planck $\ell_P \approx 10^{-35}$ m). En un escenario con Dp -branas, el espacio adicional puede ser tan grande como 0.1mm.

Un resultado que apoya esta propuesta es que la simple presencia de las Dp -branas dota al subespacio p -dimensional de nuevas simetrías de norma. Los bosones de norma (parecidos a los fotones) resultan ser las distintas vibraciones de las cuerdas que están confinadas al subespacio de las Dp -branas, y las partículas que componen la materia observada podrían surgir de las cuerdas que viven en intersecciones de varias branas. Estas observaciones condujeron a la conclusión de que alguna compactificación de una variedad de la teoría de cuerdas con un arreglo de branas podría reproducir el Modelo Estándar de partículas elementales y la cosmología moderna. Una vez identificado el modelo de cuerdas adecuado, no sería tan complicado desvelar los mecanismos de la gran teoría madre, la teoría M, que conducen a la física conocida y sus secretos.

4. Nuestro universo hecho de cuerdas

En la opinión de muchos expertos, la teoría M y su hija, la teoría de cuerdas (y branas), representan el camino más prometedor para explicar el origen de toda la física conocida. De ser correcta esta postura, nuestro universo debería entenderse mediante una combinación adecuada de las herramientas disponibles: cuerdas, branas, gravedad cuántica, dimensiones adicionales, supersimetría, simetrías de norma, dualidades y compactificaciones. El problema es que existe un número grande (aunque no infinito) de espacios sobre los que se puede compactificar la teoría de cuerdas y de arreglos de branas que permiten llegar a modelos que describen algún universo 4-dimensional con cierto parecido con el nuestro¹⁴. En la cuerda tipo IIB, se ha estimado el número de posibles modelos en 10^{500} . Esto conduce al famoso problema del paisaje (o *landscape*): ¿cómo encontrar *nuestro* universo entre todos esos posibles universos descritos por la teoría de cuerdas? Aunque se trata de un problema complejo, la situación es un tanto mejor que en otras teorías, como la teoría cuántica de campos. En esa teoría, existe un número infinito de posibles modelos, pero (al nivel actual de precisión experimental) sólo el Modelo Estándar de partículas corresponde a la naturaleza; en la teoría de cuerdas, el número de posibilidades está acotado. Es importante anotar que, en este contexto, al referirnos a *la* teoría de cuerdas o *la* teoría cuántica de campos, las consideramos como lenguajes genéricos, cuyos elementos pueden ser combinados para concebir modelos que describen un cierto tipo de física, así como los elementos de un idioma (palabras, gramática, etc.) pueden combinarse para crear una novela.

El propósito de muchos “cuerderos” es identificar alguna combinación precisa de los elementos de la teoría que reproduzca las características de nuestro universo y que dé solución a los problemas de la física moderna. Esta área de estudio es conocida como *fenomenología de cuerdas* (para un revisión exhaustiva y moderna de esta área, se recomienda ref. [16]).

Para llegar a modelos que puedan ser verificados experimentalmente, la fenomenología de cuerdas debe primero resolver las diferencias entre las cuerdas y la física conocida ilustradas en la tabla 1. Del lado izquierdo se muestran algunas propiedades de la teoría de cuerdas: espacio-tiempo 10-dimensional, supersimetría, un sólo tipo de interacción (interacción de cuerdas) dotado con muchos bosones de norma, una constante de acoplamiento, cuerdas como elementos fundamentales en lugar de partículas, y gravedad cuántica. A la derecha, a manera de comparación, se enumeran algunos aspectos de la física conocida: espacio-tiempo 4-dimensional sin supersimetría o, en el mejor de los casos, con supersimetría rota, simetrías de norma para las tres interacciones fundamentales del Modelo Estándar de partículas, cada una con su constante de acoplamiento que determina la probabilidad de interacción entre partículas, los objetos elementales son campos cuyas perturbaciones son partículas, incluye la materia observable (quarks, leptones y bosones

¹⁴Típicamente, este último requerimiento se traduce en que el modelo contenga supersimetría a energías como las alcanzadas por el LHC.

Teoría de cuerdas	+ Fenomenología =	Nuestro universo
10 dimensiones	compactificación de 6 dim.	4 dimensiones
supersimetría	ruptura de supersimetría	sin supersimetría
muchos ($\gg 12$) bosones de norma	ruptura de simetrías de norma	12 bosones de norma
1 fuerza fundamental		3 fuerzas fundamentales
cuerdas		campos de norma +quarks +leptones
gravedad cuántica	campos adicionales producto de compactificación	gravedad de Einstein universo con inflación +materia oscura+...

Tabla 1: La fenomenología de cuerdas pretende vincular la física conocida a bajas energías con la teoría de cuerdas. La física de bajas energías se considera un límite *efectivo* de una teoría más *fundamental*, así como el electromagnetismo clásico es considerado el límite macroscópico (de más bajas energías) de la electrodinámica cuántica.

de norma), pero ignora efectos cuánticos gravitacionales. En esta transición, se considera que la física de nuestro universo emerge como límite de menor energía o de “grandes” tamaños de la teoría de cuerdas. Este límite es llamado *teoría efectiva*.

En la segunda columna de la tabla 1 planteamos los métodos que sigue la fenomenología de cuerdas para conciliar ambas teorías. Primero, como hemos descrito antes, se acepta que las seis dimensiones adicionales son compactas y suficientemente pequeñas. Como las teorías de cuerdas son supersimétricas de manera intrínseca, deshacerse consistentemente de la supersimetría mientras se resuelve el mencionado problema de jerarquía requiere que los modelos de cuerdas sean capaces de romper la supersimetría (en esencia, basta con que puedan establecer una pequeña diferencia entre las masas de los bosones y los fermiones de la teoría). Dado que la teoría de cuerdas da origen a grupos de norma muy grandes, la tarea es concebir una compactificación con elementos tales que permitan que, a partir de estas simetrías grandes, surjan las tres simetrías de norma (más pequeñas) del Modelo Estándar, con sus respectivos bosones de norma (un fotón, tres mediadores de las interacciones débiles y ocho mediadores de interacciones fuertes). Estos elementos requieren la inclusión de Dp -branas en algunos casos o la imposición de espacios compactos con ciertas simetrías geométricas que restrinjan a los campos permitidos tras la compactificación.

Al compactificar las teorías de cuerdas, se llega a una teoría (efectiva) de campos en la que las distintas perturbaciones de las cuerdas 10-dimensionales aparecen como diferentes partículas 4-dimensionales. Entre estas, se encuentran algunos elementos exóticos: las partículas masivas de Kaluza-Klein y los campos llamados *módulos*, que determinan el tamaño y forma de las dimensiones adicionales. Mientras que las primeras podrían ser

detectadas pronto en el LHC, los segundos dan lugar a partículas que podrían ser responsables de la inflación cosmológica y de la materia oscura, y, por tanto, interactuar muy poco con la materia que conocemos, haciendo su detección muy complicada. Sin embargo, algunas de las partículas que emergen de los módulos podrían ser problemáticas, pues su masa podría ser tan pequeña que conduciría a efectos que contradicen las observaciones cosmológicas. Entonces, una de las tareas de la fenomenología de cuerdas es concebir espacios muy particulares para compactificar y arreglos de branas que estén libres de este tipo de problemas.

Como decíamos antes, el número de compactificaciones con o sin branas que conducen a universos parecidos al nuestro es grande, entonces un paso esencial en la fenomenología de cuerdas consiste en identificar principios que guíen la búsqueda del modelo adecuado. Frecuentemente los problemas de las teorías experimentalmente validadas son una guía muy útil para identificar los elementos que describen la naturaleza. Un ejemplo histórico de esto es cómo la *catástrofe ultravioleta* y lo extraño del efecto fotoeléctrico dieron lugar a la concepción de la mecánica cuántica. En el Modelo Estándar de partículas, el problema de jerarquía mencionado antes, la ausencia de una explicación de la estructura que parecen formar las masas de las partículas del Modelo Estándar, así como otros conflictos más técnicos, son ejemplos de los problemas que la teoría de cuerdas usa como guía. La guía ha sido exitosa, pero aún quedan varios retos importantes antes de que la fenomenología de cuerdas sea capaz de hacer que la teoría de cuerdas sea una teoría experimentalmente verificable.

5. Dualidad holográfica

El ambicioso propósito de la teoría de cuerdas de describir toda la física observada tiene aún muchos obstáculos y nadie sabe con toda certeza si será posible alcanzarlo. Pero ¿qué pasaría si un día llegamos a entender que todos los esfuerzos en esta dirección están condenados al fracaso? Como veremos a continuación, aún ante este escenario, el estudio de la teoría de cuerdas nos ha conducido a observaciones y resultados que justifican los años invertidos en él.

En una visión quizá más moderna de la teoría de cuerdas, se exploran otras alternativas tal vez menos ambiciosas que la de encontrar una teoría de todo. En esta visión, las cuerdas se emplean como una fuente de herramientas matemáticas que ayuden a resolver problemas de la física actual. El máximo exponente de esta visión es posiblemente la *dualidad holográfica* o correspondencia norma/gravedad o AdS/CFT, o dualidad de Maldacena [17]. Esta dualidad ha conseguido proveer estimaciones de la entropía, viscosidad y conductividad del *plasma de quarks y gluones* que se sabe debió haber formado parte del universo temprano (instantes después de la gran explosión) y que puede ser observado en laboratorios internacionales como el LHC o RHIC. Además, la dualidad holográfica ha mostrado que puede tener muchas aplicaciones en materia condensada, ofreciendo algo

<p>Teoría de campos con interacciones fuertes</p> <p>Partículas Sin gravedad Espacio-tiempo plano Con interacciones fuertes (débiles) 4 dimensiones</p>	<p>= [Maldacena]</p>	<p>Teoría de cuerdas compactificada</p> <p>Cuerdas Con gravedad Espacio-tiempo curvo Con interacciones débiles (fuertes) 10 dimensiones</p>
--	--------------------------	--

Tabla 2: Un resumen [19] de la equivalencia propuesta por Maldacena. A pesar de lo absurdamente distintas de las teorías, la correspondencia ha sido confirmada en miles de trabajos científicos.

de intuición con respecto a e.g. superconductividad, superfluidez, metales extraños y fluidez de Hall [18]. Se recomienda [19] como una discusión introductoria y [20] como una revisión más detallada para entender esta dualidad.

La dualidad holográfica, sugerida en 1997 por J. Maldacena [17], muestra que existe una equivalencia entre dos teorías muy diferentes: una teoría de cuerdas con gravedad cuántica definida en un espacio 10-dimensional y una teoría de campos 4-dimensional. La cualidad *holográfica* de la dualidad proviene justamente de que la información de la teoría de cuerdas es capturada en una teoría con menos dimensiones, como sucede en los hologramas bidimensionales. Representa así un éxito del principio holográfico, propuesto por G. 't Hooft y refinado por L. Susskind [21], que establece que, en una teoría de gravedad, la descripción de la física contenida en el volumen de un cierto espacio está codificada en una teoría no gravitacional definida en la frontera de ese espacio. La tabla 2 permite apreciar lo casi inverosímil de la propuesta de Maldacena: las características de las teorías relacionadas por la dualidad holográfica son tan distintas, que difícilmente uno se puede imaginar descripciones más opuestas. Y, sin embargo, son equivalentes.

Entendamos mejor las teorías relacionadas por esta dualidad mediante un ejemplo particular. En su modelo original, Maldacena propuso que la física contenida en la frontera al infinito de la compactificación de la teoría de cuerdas tipo IIB en un espacio con geometría $AdS^5 \times S^5$ corresponde a la misma que encontramos en una teoría conforme supersimétrica 4-dimensional super Yang-Mills con el máximo de supersimetría posible (abreviado *MSYM*). El espacio-tiempo de anti-De Sitter AdS^5 y la esfera S^5 son las variedades 5-dimensionales más simples después del espacio plano o de Minkowski. Mientras que la curvatura de AdS^5 es negativa (como la de la silla de montar), en S^5 es positiva. La teoría de cuerdas IIB así compactificada conduce a cuerdas dinámicas cuyas vibraciones son interpretadas como los gravitones (fluctuaciones cuánticas de la métrica) en el espacio tiempo de anti-De Sitter. La teoría de *MSYM* corresponde a una teoría de norma conforme (es decir, que no cambia al aplicarle transformaciones de escala) dotada sólo de bosones de norma y de sus compañeros supersimétricos. Si se elige la simetría de norma como $SU(N)$, la teoría resultante de *MSYM* semeja en algunos aspectos (y para ciertos

propósitos) a la cromodinámica cuántica sin quarks (sólo con gluones). Lo fascinante de la dualidad holográfica es que los cálculos demuestran que el régimen de acoplamiento débil en la teoría gravitacional (cuerdas IIB) equivale al régimen de interacciones fuertes en la teoría de norma (MSYM), y viceversa. De esta forma, cálculos entre partículas que interactúan fuertemente (cuando no tenemos control de la teoría) como en la cromodinámica cuántica se pueden realizar fácilmente en la teoría de cuerdas en el límite de acoplamiento débil, ¡que es el único sobre el que tenemos control! Igualmente, podríamos conocer el comportamiento de la teoría de cuerdas cuando las cuerdas interactúan fuertemente (por encontrarse en un espacio altamente curvado), mediante cálculos en la teoría de campos con interacciones débiles.

Claramente, la propuesta de Maldacena no consideraba nuestro universo, pues, por una parte, la cromodinámica cuántica difiere de MSYM en que contiene quarks y no tiene supersimetría, y por otra parte, nosotros no habitamos un espacio 5-dimensional tipo anti-De Sitter. Sin embargo, ambos escenarios son un buen inicio. Tras la propuesta de Maldacena, muchos científicos han encontrado los mecanismos para e.g. añadir los quarks y las interacciones adecuadas de la cromodinámica cuántica, y suprimir la supersimetría en la teoría de campos. Los resultados han probado ser bastante exitosos cuando la mezcla de quarks y gluones es tan densa que sólo se percibe un fluido de ellos, el famoso plasma de quarks y gluones. Es difícil medir las propiedades de este fluido, pero las pocas mediciones obtenidas han sido sorprendentemente cercanas a los resultados predichos mediante la aplicación de la dualidad.

La dualidad holográfica es considerada aún una conjetura, pues no existe prueba matemática rigurosa que demuestre la equivalencia planteada. Pero el hecho de que haya sido sometida a miles de intentos de mostrarla incorrecta y en todos ellos haya salido victoriosa, y que haya aportado resultados que no difieren mucho de su contraparte experimental, permite afirmar sin duda que estamos ante el despertar de una nueva forma de apreciar y hacer la física.

La dualidad holográfica es una revolución en sí misma, quizá incluso mayor que el descubrimiento de las dualidades que condujeron a la teoría M, por su cercanía con la física observable. La propuesta de Maldacena nos indica que las teorías de norma están íntimamente vinculadas con teorías de gravedad; y nos sugiere que es posible vincular marcos teóricos sin gravedad con otros que sí la incluyan, de tal forma que la existencia o inexistencia de ésta depende del lenguaje adoptado en cada marco. Más relevante para nuestra discusión es que la dualidad revela que la teoría de cuerdas, si bien podría resultar ser una teoría menos ambiciosa de lo que se sospechaba, no está desconectada de la física que describe lo que nos rodea.

6. Las supercuerdas en México y su futuro

El gran reto de la teoría de cuerdas es establecerse como una teoría experimentalmente verificable. Como hemos visto, la teoría de cuerdas ofrece al menos dos mecanismos para lograr este objetivo: *i*) la fenomenología de cuerdas, y *ii*) la dualidad holográfica. Ambos han logrado un progreso importante en los últimos años.

Del lado de la fenomenología, recientemente hemos encontrado cientos de modelos a partir de diferentes variedades de la teoría de cuerdas [22–24], capaces de reproducir muchos aspectos de la física observable, tales como las simetrías y la materia descrita en el Modelo Estándar de partículas, incluyendo sectores responsables de la existencia de la materia oscura e inflación, y propuestas de solución a algunos problemas técnicos de la física moderna, tal como el problema de jerarquía. Pese a este éxito, los retos a enfrentar ahora no son pequeños. Llevar los modelos obtenidos de su estatus actual al estatus de teorías verificables requiere analizar con sumo detalle cada una de las mediciones en física de partículas elementales y contrastarla con los resultados de los modelos obtenidos.

Estos retos son enfrentados en México por el grupo de Oscar Loaiza-Brito, del campus León de la Universidad de Guanajuato, y por mi grupo en el Instituto de Física de la UNAM. En estos grupos se busca primeramente desarrollar las técnicas matemáticas y numéricas para el cálculo de cantidades medibles, tales como las masas de las partículas elementales, incluyendo las recientes mediciones de la masa del que podría ser el bosón de Higgs. En estos cálculos, el tamaño y forma de las dimensiones compactas, que no son fijados *a priori* por la teoría de cuerdas, juegan un papel irremplazable, por lo que una de las tareas iniciales es identificar los mecanismos que la teoría ofrece para fijar estos parámetros de la teoría. Una vez identificados los mecanismos y las técnicas que permiten calcular cantidades medibles en modelos prometedores, el siguiente paso es contrastar los resultados con los datos obtenidos sobre e.g. la masa del Higgs, el momento magnético del muón, la posible existencia de fuerzas y partículas adicionales en la naturaleza, y la posibilidad de un perfil no Gaussiano de las fluctuaciones de la radiación cósmica de fondo, entre otros fenómenos.

Es preciso mencionar que, a pesar de contar con muchos modelos prometedores, no es obvio que el modelo que se busca desde hace décadas se encuentre entre los modelos identificados. Por esta razón y porque sabemos que la teoría de cuerdas y la teoría M se encuentran aún en desarrollo, es imprescindible que, simultáneamente con esta búsqueda, los grupos se dediquen a la investigación de otros aspectos de la teoría de cuerdas que permitan una comprensión más profunda de los mecanismos que estas teorías ofrecen para llegar a modelos fenomenológicamente exitosos.

En el caso más pesimista, la teoría de cuerdas no podrá jamás proporcionar un modelo capaz de convertirse en la teoría fundamental tan anhelada por muchos. Incluso en este escenario catastrófico, los hallazgos actuales indican que la teoría de cuerdas puede proporcionar herramientas útiles para describir la física de nuestro universo. Esta es la postura en algunos escenarios conjeturados en los que e.g. la existencia de dimensiones

adicionales puede explicar distintos aspectos de la física observable [25].

Por otra parte, el descubrimiento la dualidad holográfica es considerada por muchos como la mayor contribución de la teoría de cuerdas a la física, pues ha tendido puentes en áreas de esta ciencia que se consideraban completamente desconectadas. En México hay un equipo de trabajo muy sólido que ha contribuido de manera sobresaliente durante la última década a este éxito. Este equipo está compuesto por Alberto Güijosa y Antonio García, del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM, Elena Cáceres, de la Universidad de Colima, Mariano Chernicoff, actualmente en una estancia en la Universidad de Cambridge, y Leonardo Patiño, de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Para ellos, el propósito esencial de sus trabajos parece remontarse al origen de las dualidades en la teoría de cuerdas y de la teoría misma: la descripción integral de sistemas cuánticos con acoplamiento fuerte. En la búsqueda de esta comprensión, se han explorado diversas propiedades de versiones idealizadas de plasmas de quarks y gluones, tales como la pérdida de energía, el apantallamiento y la emisión de fotones, así como la radiación y efectos térmicos en el vacío.

Por otra parte, ante lo sorprendente de la dualidad holográfica, resulta imprescindible dotarla de solidez no sólo “empírica” o circunstancial, sino dilucidar su origen para poder lograr establecer su infalibilidad teórica. Una de las aplicaciones de una comprensión completa de la dualidad sería, en el sentido inverso al habitual, proporcionar información que nos ayude a comprender mejor de qué están hechas las cuerdas y cómo funciona la gravedad cuántica, a través de cálculos realizados en teorías de campos (sin gravedad). Esta línea de investigación no cuenta actualmente con tantos triunfos como su contraparte (generalmente, los cálculos se realizan en la teoría de cuerdas con la finalidad de entender mejor las teorías de campos). Sin embargo, los grupos mexicanos muestran creciente interés en esta dirección y es previsible cierto progreso en esta área a mediano plazo.

En México, la investigación de la teoría de cuerdas es joven, pero avanza con un ritmo creciente por la incursión de cada vez más científicos entusiastas y muy activos. Los recientes avances en fenomenología de cuerdas y en diversos aspectos de la dualidad holográfica hacen suponer un crecimiento de la actividad en estas dos áreas en México que contribuirá a la resolución de las ambiciosas preguntas que se plantean estas disciplinas. Estamos convencidos de que la teoría de cuerdas aún guarda muchos secretos más allá de las preguntas y problemas aquí expuestos y estamos convencidos también de que estamos preparados para allanar el camino de la teoría de cuerdas hacia una teoría capaz de arrojar resultados en acuerdo con los datos experimentales.

Como hemos visto, la teoría de cuerdas ha mostrado ser una revolución conceptual desde sus orígenes y podría ya estar mostrando signos de ser un ingrediente de la física observable. En este escenario, nuestro país no puede ceder a la tentación de abstenerse de participar en lo que podría ser el inicio de una nueva era para la física. No podemos ser sólo observadores de la primera revolución científica de nuestro siglo.

Agradecimientos

Es un placer agradecer a Alberto Güijosa por múltiples discusiones. Este trabajo ha sido parcialmente apoyado por el proyecto CONACyT 151234 y el proyecto DGAPA-PAPIIT IB101012.

7. Referencias

- [1] J. Scherk and J. H. Schwarz, "Dual Models for Nonhadrons," *Nucl. Phys.*, vol. B81, pp. 118–144, 1974.
- [2] F. Gliozzi, J. Scherk, and D. I. Olive, "Supersymmetry, Supergravity Theories and the Dual Spinor Model," *Nucl. Phys.*, vol. B122, pp. 253–290, 1977.
- [3] L. Brink, J. H. Schwarz, and J. Scherk, "Supersymmetric Yang-Mills Theories," *Nucl. Phys.*, vol. B121, p. 77, 1977.
- [4] S. Weinberg, *The quantum theory of fields. Vol. 3: Supersymmetry*. Cambridge University Press, 2000.
- [5] E. Abbott Abbott, *Flatland: A Romance of Many Dimensions*. Seely & Co., 1884.
- [6] T. Kaluza, "On the problem of unity in physics," *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin*, vol. K1, p. 966, 1921.
- [7] O. Klein, "Quantum theory and five dimensional theory of relativity," *Z. Phys.*, vol. 37, p. 895, 1926.
- [8] J. Dugundji, *Topology*. Boston: Allyn and Bacon, 1966.
- [9] S. Rappoccio, "CMS collaboration. Measurement of the top pair invariant mass distribution at 7 TeV and search for new physics," *arXiv:1110.1055, hep-ex*, 2011.
- [10] E. Witten, "Reflections on the fate of space-time," *Phys. Today*, vol. 49N4, pp. 24–30, 1996.
- [11] A. Font, L. E. Ibáñez, D. Lüst, and F. Quevedo, "Strong - weak coupling duality and nonperturbative effects in string theory," *Phys.Lett.*, vol. B249, pp. 35–43, 1990.
- [12] J. H. Schwarz, "The power of M theory," *Phys.Lett.*, vol. B367, pp. 97–103, 1996.
- [13] P. Townsend, "Four lectures on M theory," 1996.
- [14] J. Polchinski, "Dirichlet Branes and Ramond-Ramond charges," *Phys.Rev.Lett.*, vol. 75, pp. 4724–4727, 1995. [Online]: <http://arxiv.org/abs/hep-th/9510017>

- [15] —, “Tasi lectures on D-branes,” *arXiv:9611050, hep-th*, 1996.
- [16] L. E. Ibáñez and A. M. Uranga, *String theory and particle physics: An introduction to string phenomenology*. Cambridge University Press, 2012.
- [17] J. M. Maldacena, “The Large N limit of superconformal field theories and supergravity,” *Adv.Theor.Math.Phys.*, vol. 2, pp. 231–252, 1998.
- [18] S. A. Hartnoll, “Lectures on holographic methods for condensed matter physics,” *Class.Quant.Grav.*, vol. 26, p. 224002, 2009.
- [19] A. Güijosa, “La correspondencia holográfica: una aplicación útil de la teoría de cuerdas,” *Boletín de la SMF*, vol. 26, pp. 85–99, 2012.
- [20] O. Aharony, S. S. Gubser, J. M. Maldacena, H. Ooguri, and Y. Oz, “Large N field theories, string theory and gravity,” *Phys.Rept.*, vol. 323, pp. 183–386, 2000.
- [21] L. Susskind, “The World as a hologram,” *J.Math.Phys.*, vol. 36, pp. 6377–6396, 1995.
- [22] S. Ramos-Sánchez, “Towards Low Energy Physics from the Heterotic String,” *Fortsch.Phys.*, vol. 10, pp. 907–1036, 2009.
- [23] L. B. Anderson, J. Gray, A. Lukas, and E. Palti, “Two Hundred Heterotic Standard Models on Smooth Calabi-Yau Threefolds,” *Phys.Rev.*, vol. D84, p. 106005, 2011.
- [24] F. Gmeiner and G. Honecker, “Millions of Standard Models on Z-prime(6)?” *JHEP*, vol. 0807, p. 052, 2008.
- [25] L. Randall and R. Sundrum, “A Large mass hierarchy from a small extra dimension,” *Phys.Rev.Lett.*, vol. 83, pp. 3370–3373, 1999.