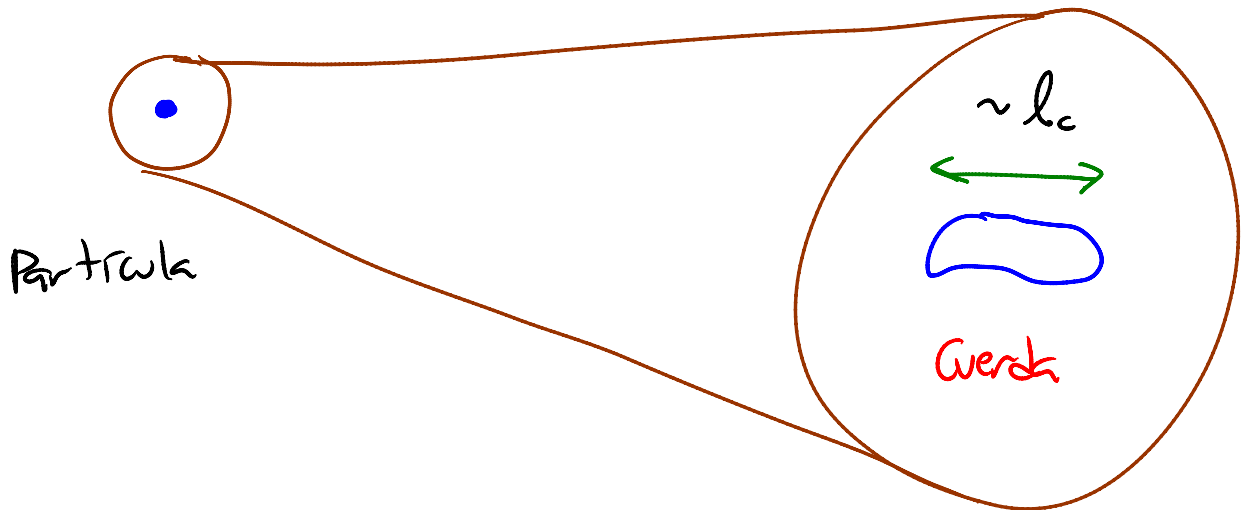


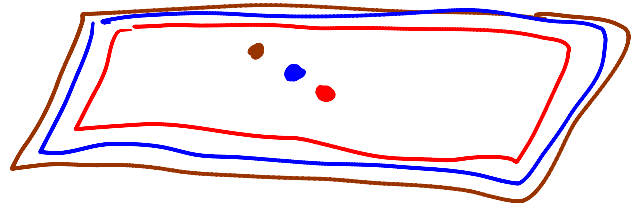
como 'ligas' infinitesimalmente delgadas, que tienen una cierta longitud característica l_c (en inglés, l_s):



Semejante objeto podría, además de moverse como un todo, oscilar en un número infinito de maneras distintas (análogas a las distintas notas de una cuerda de violín). En una descripción cuántica, cada uno de estos modos de vibración resulta tener las propiedades básicas de un tipo específico de partícula (masa, espín, carga). Así que, a partir de lo que en realidad es 1 solo tipo de cuerda, ¡obtenemos lo que parecen ser un número infinito de partículas!

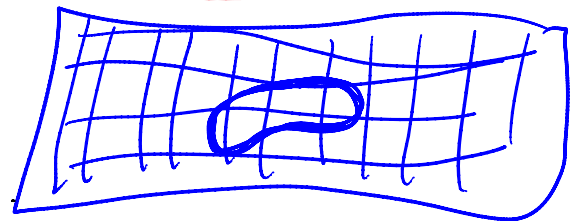
Es importante resaltar que, así como entendemos que las partículas de cada tipo son pequeñas 'onditas' en una 'gelatina' determinada (el campo asociado), las cuerdas representan igualmente pequeñas fluctuaciones de una especie de 'gelatina' mucho más complicada, que es básicamente lo que llamamos el "campo de cuerdas".

En esencia, la propuesta de la teoría de cuerdas es entonces



reemplazar el espaciotiempo y a los campos usuales (p.ej., los del Modelo Estándar)

por un solo 'multicampo'



('multigelatina') con excitaciones unidimensionales.

¿Qué ganamos con esta sencilla pero rara modificación?

I) Virtudes de la Teoría de Cuerdas

- 1) Predicción (o, en realidad, 'retrodicción') de la existencia de la gravedad: al intentar describir consistentemente

a una cuerda cuántica relativista,
(Mecánica cuántica usual) \uparrow \uparrow (Relatividad especial usual)

se encuentra automáticamente que uno de sus modos de oscilación tiene masa cero, espín 2, y participa en precisamente los procesos básicos que dan lugar a la Relatividad General. Es decir la teoría de cuerdas necesariamente incluye a un gravitón, una 'onda' en la métrica.

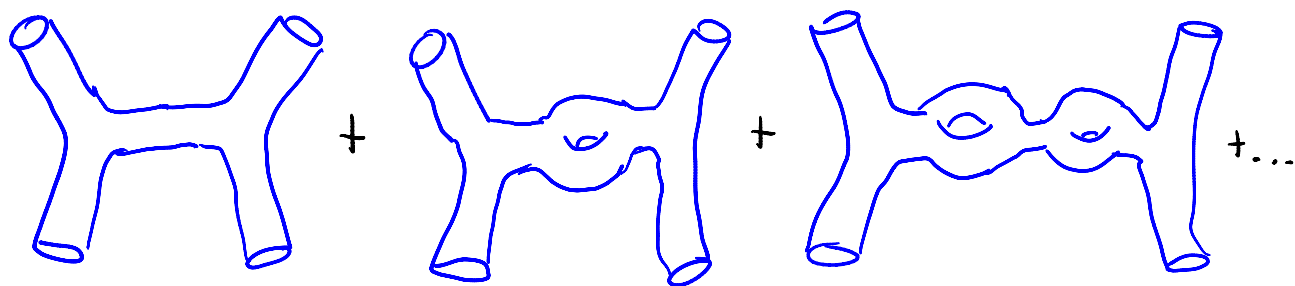
Esto explica por qué afirmamos que el propio espaciotiempo es parte del 'campo de cuerdas'.

2) Descripción consistente de la gravedad cuántica

(desarrollada por particularistas): resuelve el problema de la no renormalizabilidad de la gravedad a través de la existencia de nueva física — la idea novedosa es que, a la escala energética $M_c \equiv 1/l_c$, nos damos cuenta de que el gravitón no es en realidad una partícula, sino apenas un modo de vibración de una cuerda.

En este sentido, se han realizado avances en los 2 niveles requeridos:

i) A nivel perturbativo, la teoría de cuerdas resuelve por completo el problema de cuantizar la gravedad. Existe expansión perturbativa sensata en 'diagramas de Feynman',



(que podría describir, p.ej., a 2 electrones interactuando a través del intercambio de gravitones). El parámetro adimensional que controla la expansión (y \therefore codifica la propensión de las cuerdas a 'dividirse' en 2) se conoce como la **constante de acoplamiento de cuerdas**, g_c (o en inglés, g_s). Por supuesto, la expansión perturbativa es útil solo si $g_c \ll 1$. Y, al igual que en campos, la expansión perturbativa no converge, lo cual indica que existen efectos no perturbativos.

ii) A nivel no perturbativo, en la última década se han realizado avances importantes. A pesar de que NO tenemos todavía la última palabra, se han encontrado indicios que sugieren que la teoría de cuerdas podría en verdad resolver por completo el problema de la gravedad cuántica:

- A través de diversas 'dualidades' (\equiv equivalencias entre teorías aparentemente distintas), hemos podido entender algunas propiedades de la teoría fuertemente acoplada, $g_c \gg 1$.
- Hemos logrado entender algunas propiedades microscópicas (entropía, probabilidad de absorción, radiación de Hawking) de ciertas clases de agujeros negros — los objetos paradigmáticos de la Relatividad General.
- Tenemos propuestas para una definición no perturbativa de la teoría, que parecen indicar que la noción usual de espacio tiempo es solo una aproximación válida a 'bajas' energías.

A pesar de estos indicios, no tenemos aún una descripción completa y manifiestamente independiente del fondo (en el sentido más amplio).

Existen por supuesto propuestas alternativas para cuantizar la gravedad. En este tema, la principal competencia de las cuerdas es la teoría conocida como Gravedad Cuántica de Lazos (desarrollada por relativistas). Su objetivo es cuantizar solo a la relatividad general en 3+1 dimensiones, de manera no perturbativa. Su principal logro ha sido desarrollar un formalismo manifiestamente 'independiente del fondo', donde la geometría del espaciotiempo está cuantizada (de tal manera que las áreas y los volúmenes solo pueden tomar ciertos valores discretos). Se han conseguido también avances en la descripción microscópica de los agujeros negros. A la fecha, la principal limitación de esta propuesta es que no ha sido todavía capaz de describir estados donde el espaciotiempo esté solo levemente

curvado, como sucede a nuestro alrededor. Vale la pena también tener en mente que, si bien entendemos perfectamente que a 'bajas' energías ($E \ll M_p$) es una buena aproximación describir a las interacciones del Modelo Estándar despreciando a la gravedad, no resulta obvio que exista algún límite en el cual sea útil cuantizar solamente a la gravedad, sin tomar en cuenta a las otras interacciones...

3) Al cuantizar a las cuerdas, se encuentran modos de oscilación que tienen masa cero, espín 1 y las propiedades necesarias para poder describir a las partículas mensajeras de las interacciones del Modelo Estándar. En este contexto, es posible obtener de manera natural algunas propuestas de teorías de Gran Unificación (GUTs).

4) Se pueden obtener también estados de vibración de la cuerda con masa cero y espín $\frac{1}{2}$, es decir, fermiones como los bloques básicos de materia en el Modelo Estándar.

Existe también manera de obtener ingredientes del tipo de el (o los) Higgs, así que la teoría de cuerdas pudiera QUÍZAS reproducir todos los ingredientes del Modelo Estándar, ¡¡a partir de **1 solo componente básico** !!

5) La teoría de cuerdas incorpora naturalmente la existencia de la supersimetría, y ¡¡ una posible solución al problema de jerarquías, un fuerte candidato para la materia oscura, etc. (Pero, No predice necesariamente que la escala de supersimetría $M_{SUSY} \sim 1-10 \text{ TeV}$.)

6) La teoría de cuerdas 'predice' la existencia de 6 (ó 7) dimensiones adicionales. Para esconderlas, debemos postular que son muy pequeñas (como en el "mundo manguez" propuesto por Kaluza y Klein) o que vivimos en un "mundo brana" (idea que de hecho emergió de la teoría de cuerdas de manera natural).

Lo interesante es que, aún después de esconderlas, las dimensiones extra pudieran influenciar indirectamente la física que conocemos. P.ej., la existencia de 3 generaciones,

podría deberse a la 'forma' (topología) de las dimensiones adicionales.

7) La teoría de cuerdas no tiene ningún parámetro adimensional libre. En particular, la constante de acoplamiento de cuerdas, g_c , resulta estar determinada por el valor de fondo de un campo escalar, el "dilaton" $\varphi(t, \vec{x})$ (que como todo lo demás es parte de la 'multijetes' que llamamos "campo de cuerdas"), a través de $g_c = e^\varphi$.

(Como ya mencionamos, existe 1 solo parámetro dimensional, la longitud de cuerdas l_c , pero esto simplemente representa una elección de unidades básicas.)

Quizás sería posible entonces que la teoría de cuerdas predijera el valor de los ~ 25 parámetros libres del Modelo Estándar (aunque, a la fecha, esto no parece muy probable).

8) Con el paso de los años se fueron descubriendo distintas teorías de cuerdas (IIA, IIB, I, Heterótica $SO(32)$ ó $E_8 \times E_8, \dots$)

pero en 94-95 se entendió que, sorprendentemente, todas ellas son en realidad parte de una teoría única, que tiene el nombre provisional de "Teoría M" (por magia, misterio, membrana, madre, matriz, ...).

Con esto terminamos nuestra enumeración de las propiedades atractivas de las cuerdas. Por supuesto, la teoría presenta también, al menos en su estado actual, algunas limitaciones...

II) Problemas Abiertos de la Teoría de Cuerdas

- 1) No tenemos aún una definición no perturbativa (es decir, completa) de la teoría que sea general (e, idealmente, manejable). Los avances que nos llevaron a descubrir el hecho de que la teoría es única también nos enseñaron con claridad que las cuerdas no son en realidad los grados de libertad fundamentales! Después de más de 25 años de estudiarla intensamente,

nuestro objetivo central sigue siendo responder a la pregunta ¿qué es la teoría de cuerdas? y más concretamente ¿de qué están hechas las cuerdas??

A la fecha, la avenida más prometedora para responder esta pregunta es la llamada correspondencia holográfica (o 'norma/gravedad' o 'AdS/CFT'), la cual establece una muy sorprendente equivalencia entre teorías cuánticas CON y SIN gravedad, y borra la frontera entre las teorías de cuerdas y las teorías de campos (no dice que las primeras son, esencialmente, versiones drásticamente resucitadas de las segundas).

- 2) ¿Cómo podemos obtener una descripción manifiestamente 'independiente del fondo', donde el espaciotiempo sea un concepto 'emergente'? Nuevamente, nuestra mejor apuesta a la fecha es la correspondencia norma/gravedad.
- 3) Al menos a nivel perturbativo, existe un enorme número de soluciones a las ecs. de mov. de cuerdas, que determinan

los 'valores de fondo' de los diversos campos (incluyendo a la métrica). Al igual que en la Relatividad General, cada solución representaría un posible universo. ¿Cuántas y cuáles de las soluciones aproximadas que tenemos corresponden a soluciones exactas? ¿1? ¿300? ¿ 10^{500} ?

4) Quisiéramos encontrar al menos 1 solución que a 'bajas' energías ($E \ll M_c$) reproduzca exactamente al Modelo Estándar (+ pequeñas correcciones), para hacer contacto definitivo con la física que conocemos.

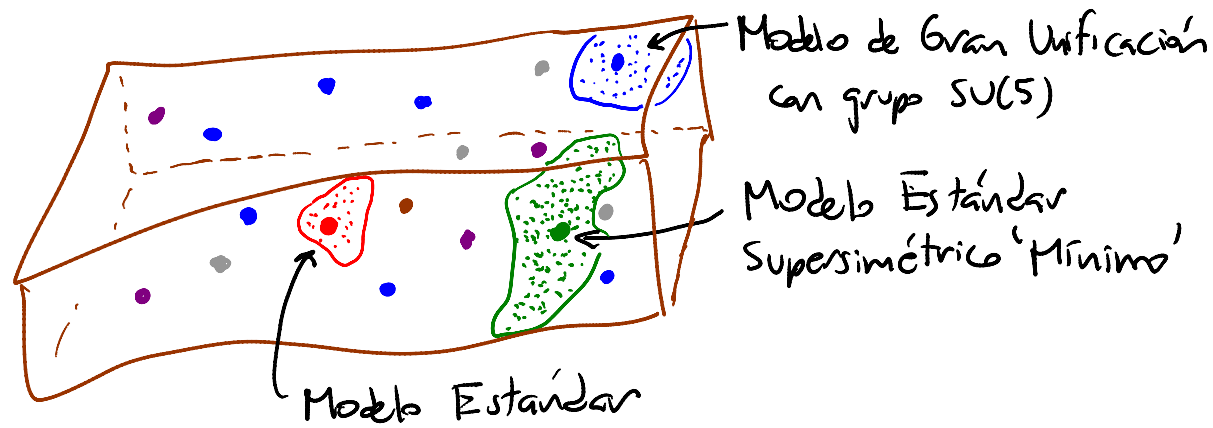
A pesar de que se conocen muchas soluciones con estructuras muy parecidas al Modelo Estándar (incluyendo, p.ej., el grupo de norma $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ y 3 generaciones de fermiones quirales), no se tiene aún ninguna que esté en total acuerdo con la lista completa de ingredientes y el valor de los ~ 25 parámetros requeridos.

5) Nos falta conocer el mecanismo de ruptura de la supersimetría (existen varias propuestas).

- 6) Nos falta entender mejor a las dimensiones adicionales.
¿Por qué 4 visibles + 6 (o 7) ocultas? ¿Existe algún mecanismo que fije su forma y tamaño?
- 7) NO hay todavía predicciones experimentales definitivas. Esto se debe en parte a que, como hemos dicho, la teoría está todavía en etapa de desarrollo. Pero, en lo que respecta a la falta de predicciones, hace falta aclarar un frecuente malentendido...

Para ello, recordemos que al definir una teoría de partículas/campos, se tiene una gran (aunque no total) arbitrariedad: hace falta elegir a mano la dimensión del espaciotiempo, el tipo y número de campos que se incluyen, las simetrías, los valores de masas, constantes de acoplamiento, etc.

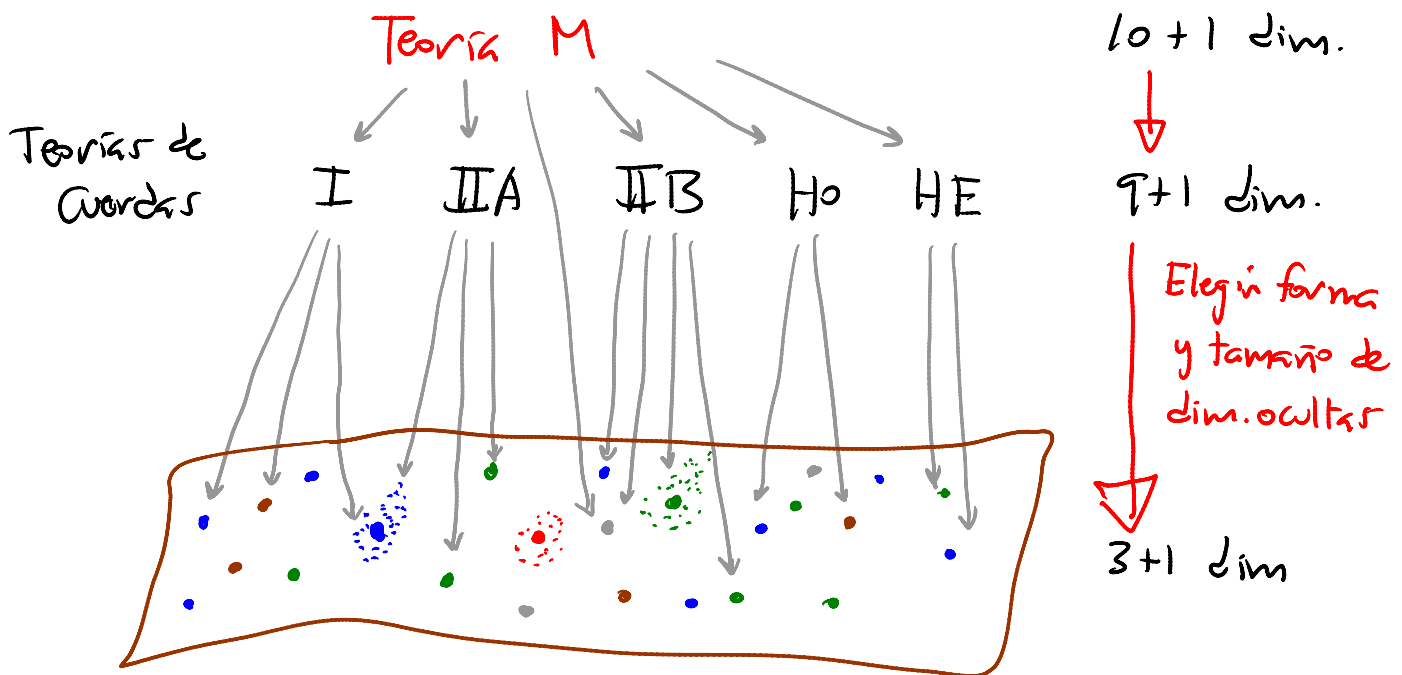
El conjunto de todas las teorías de partículas/campos posibles es entonces un espacio de dimensión infinita:



Es solo después de elegir un punto específico en este espacio (lo cual requiere en particular seleccionar valores específicos de los diversos parámetros de la teoría en cuestión) que podemos hacer predicciones detalladas capaces de ser comparadas con datos experimentales. Algunas veces es posible también hacer predicciones más genéricas que aplican a toda una clase de teorías. Y existe solo un número muy limitado de propiedades genéricas que aplican incluso a todas las teorías de particular posibles: la existencia de antipartículas, la conexión espín-estadística y la 'invariancia CPT.'

Ahora, ¿cómo se compara la situación en cuerdas?
En ese caso la teoría es única, pero tiene muchas soluciones.
Para intentar hacer contacto con la física que observamos,

debemos escoger a mano aquellas soluciones en las cuales las dimensiones adicionales están escondidas de algún modo. El punto a resaltar es que, después de hacer una elección específica, obtenemos un modelo que, a 'bajas' energías, coincide con una cierta teoría de partículas específica:



De esta manera, podemos sin duda seguir haciendo física tal como la hemos hecho hasta ahora: una vez que hemos elegido a mano todo lo que hay que elegir, tenemos un modelo concreto de nuestro universo, que si hace predicciones específicas, y puede por tanto ser validado o refutado por los datos experimentales. Lo que NO tenemos (por ahora)

son predicciones completamente genéricas. Pero el punto que estamos enfatizando es que, por lo menos al nivel de conocimiento actual, querer refutar/confirmar experimentalmente la teoría de cuerdas completa es análogo a querer descartar/validar todas las teorías de partículas (campos) juntas. Solo será posible si eventualmente obtenemos predicciones verdaderamente genéricas, o si encontramos que en realidad existen solo unas pocas soluciones exactas.

A nivel de la física en $3+1$ dim. y a 'bajas' energías, la 'fenomenología' de cuerdas es esencialmente un subconjunto de la 'fenomenología' de particular. En este contexto, la teoría de cuerdas debe ser entendida simplemente como un nuevo lenguaje teórico, análogo al lenguaje general de la teoría de campos (en lugar de a un ejemplo específico como el Modelo Estándar), que resulta útil para construir modelos unificados de la estructura microscópica de nuestro universo, incluyendo a la gravedad, a partir

de un conjunto sencillo de principios (no de resultados!)

Resumiendo todo lo dicho hasta aquí: en su vertiente 'fenomenológica', la teoría de cuerdas es a la fecha nuestro más prometedor candidato para obtener lo que arrogantemente se llama una

"teoría de todo".

Pero es importante señalar que, independientemente de si eventualmente logra o no alcanzar esta ambiciosa meta, en el transcurso de los años ha desarrollado ya una vertiente 'teórica' de enorme utilidad, constituyéndose en un conjunto de herramientas que han hecho ya contacto con un buen número de ideas y problemas importantes de la física teórica moderna (teorías de norma, acoplamiento fuerte, supersimetría, gran unificación, agujeros negros, mundos brana, no conmutatividad, N grande, cosmología...) e incluso matemáticas.

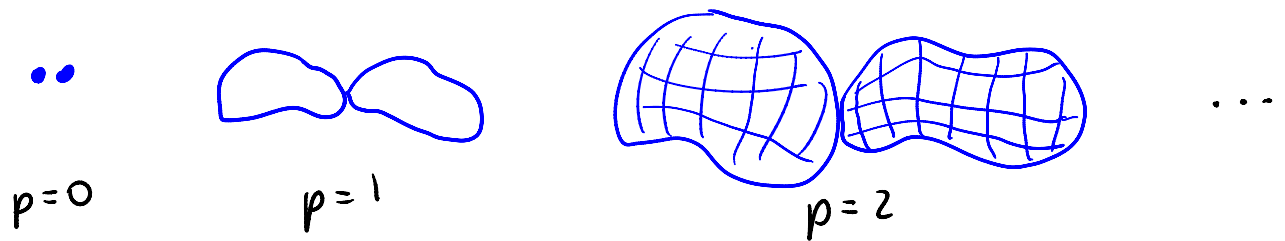
Estos 'logros teóricos' son a mi juicio la principal razón por la cual la teoría de cuerdas ha sido intensamente

estudiada durante más de 25 años.

(Y lo que es más, una en particular de estas herramientas, la ya mencionada correspondencia holográfica, parece capaz de ayudarnos a entender a al menos primas de QCD en el régimen de acoplamiento fuerte, o a teorías de campo similares a algunos sistemas de materia condensada.)

Por último, podemos plantearnos una pregunta que resulta bastante natural: si estamos dispuestos a considerar que los objetos básicos pudieran no ser 0-dimensionales (partículas), sino 1-dimensionales (cuerdas), ¿por qué no contemplar también la posibilidad de que fueran en realidad 2-dimensionales ('membranas'), o más en general, p -dimensionales ('p-branas')?

Entre mayor sea el valor de p , más "blandas" serán las interacciones, en el sentido de que el punto donde un objeto básico hace contacto con otro es cada vez de menor importancia en comparación con el objeto en su conjunto:



Pero por otro lado, a mayor p el objeto básico tendrá más grados de libertad intrínsecos, de tal forma que los casos $p \geq 2$ resultan muy difíciles de cuantizar.

En este sentido las cuerdas ($p=1$) son el caso óptimo.

A pesar de ello, sabemos desde hace casi 2 décadas que

• la teoría "de cuerdas" (o Teoría M) incluye p-branas con $p=0,1,\dots,9$ que están todas emparentadas entre sí a través de 'dualidades'.

• las "cuerdas" son membranas enrolladas en x^{10} ; las "Dp-branas" se describen con cuerdas...

¿Teoría de Branas?!

En este curso nos enfocaremos en la descripción de la teoría de cuerdas (mayormente bosónica) en la aproximación perturbativa. En el camino, nos toparemos con los objetos no perturbativos conocidos como D-branas. Las dualidades, otras branas y la Teoría M tendrán que esperar al siguiente semestre.

1. Cuerdas Básicas I

* Partículas Puntuales

Para describir a una partícula relativista libre a nivel cuántico, existen 2 caminos distintos:

① Cuantizar un campo (lo que, por razones históricas, se hace a veces como "segunda cuantización")

Los grados de libertad básicos (en el ejemplo de espín 0)

son $\varphi(x) \equiv \varphi(x^\mu) \equiv \varphi(t, \vec{x})$

↪ tiempo y espacio entran en el mismo pie

y su dinámica se describe

en la acción (de Klein-Gordon)

$$S[\varphi] = \int d^D x \left(-\frac{1}{2} (\partial_\mu \varphi)^2 - \frac{1}{2} m^2 \varphi^2 \right)$$

↪ con patines (serif):
convención para
la acción en el
espaciotiempo $\int d^D x$

$\equiv \eta^{\mu\nu} \partial_\mu \varphi \partial_\nu \varphi$ en fondo plano

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \text{diag}(-1, +1, \dots, +1)$$

En las pp. 5-16, hemos visto cómo, al cuantizar este campo canónicamente $(\varphi, \pi \rightarrow \hat{\varphi}, \hat{\pi})$, se obtienen estados con un número arbitrario de partículas, y es