

está en realidad "vacío", puesto que contiene partículas virtuales que constantemente aparecen y desaparecen, además de posibles campos escalares que tengan un valor de fondo $\neq 0$ (posibilidad que en el contexto de cosmología se conoce como "quintaesencia"), así que no es en absoluto misterioso que la densidad de energía del vacío sea $\rho_\Lambda \neq 0$ (ni que la presión sea negativa).

Pero lo que sí es desconcertante es que el valor de esta energía sea tan extraordinariamente pequeña:

$$ii \quad \rho_\Lambda \sim (10^{12} \text{ eV})^4 = 10^{-124} E_p^4 \quad !!$$

↖ energía de Planck

4) ¿Cómo obtener una descripción cuántica de la gravedad?

El Modelo Estándar No incluye a la gravedad, porque es, con mucho, **la fuerza más débil de todas**, y su efecto sobre los experimentos de partículas realizados hasta ahora es completamente despreciable. Pero la gravedad claramente existe, así que quisiéramos entenderla.

A nivel macroscópico, la gravedad se describe a través de la Relatividad General, en términos de un campo $g_{\mu\nu}(\vec{x}, t)$ (simétrico en los índices $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$) conocido como métrica, que codifica la geometría del espaciotiempo (tanto su posible curvatura como su 'estructura causal').

A nivel microscópico, existen serios problemas para su descripción. Su enumeración depende, hasta cierto punto, de la perspectiva que uno adopte:

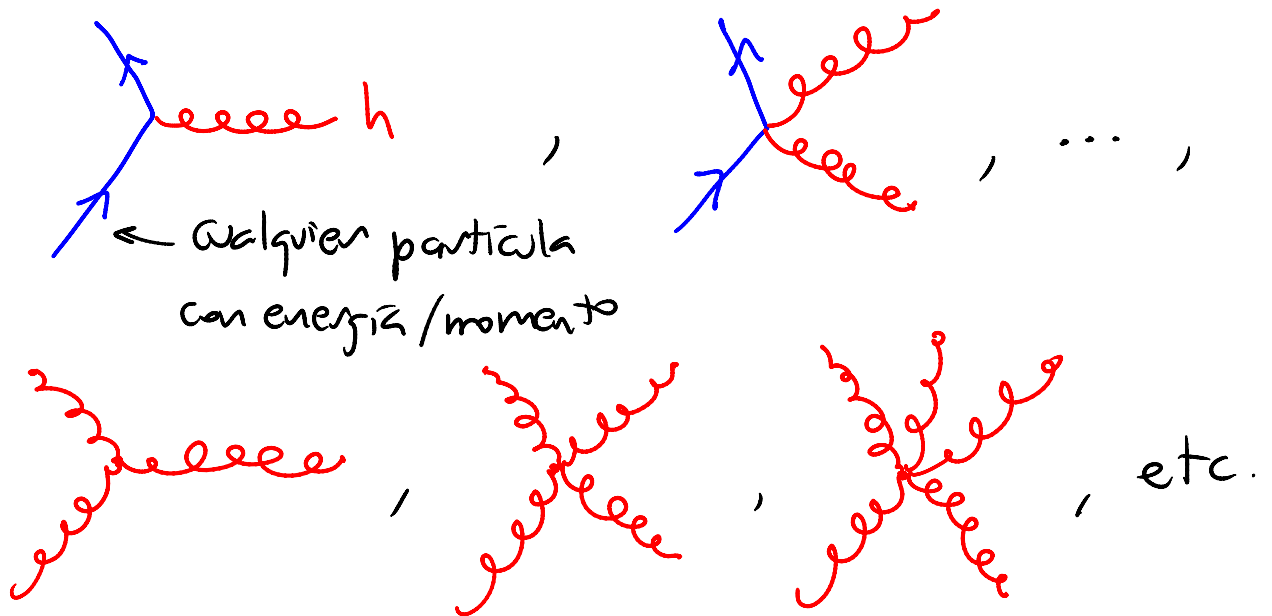
i) Para un particularo, $g_{\mu\nu}(\vec{x}, t)$ es de entrada simplemente un campo más. Conviene separarlo en

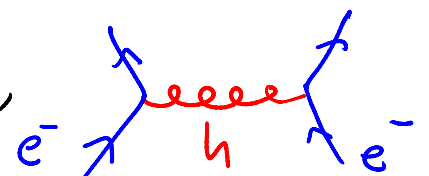
$$g_{\mu\nu}(\vec{x}, t) = \underbrace{\bar{g}_{\mu\nu}}_{\text{Valor de fondo}} + \underbrace{h_{\mu\nu}(\vec{x}, t)}_{\text{Fluctuaciones}}$$

(pej., $\bar{g}_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1, 1, 1 \end{pmatrix}$ corresponde al espaciotiempo plano.)

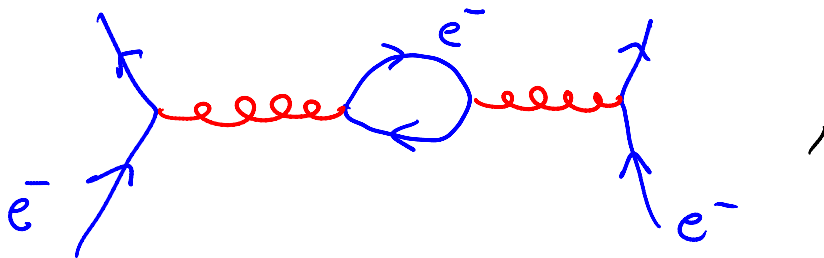
Fluctuaciones: partículas con $m=0, s=2$ conocidas como gravitones.

A partir de las ecs. de mov. de la Relatividad General, deduciríamos entonces que los procesos básicos de interacción son



Con ellos podemos construir, pej., , que (a bajas energías) reproduce correctamente el potencial gravitacional Newtoniano, y nos indica \therefore que la constante de acoplamiento gravitacional es $\propto \sqrt{G_N}$. Pero, a diferencia de las constantes de acoplamiento del Modelo Estándar (g_1, g_2, g_3), que en unidades donde $\hbar = c = 1$ son adimensionales, en estas mismas unidades G_N tiene dimensión $[G_N] = (\text{masa})^{-2} = (\text{longitud})^2$, por lo que

la verdadera constante de acoplamiento adimensional debe ser $g_N \equiv G_N E^2$ energía característica del proceso, o lo que es lo mismo, $g_N \equiv (E/E_p)^2$. Esto explica por qué la gravedad es despreciable ($g_N \ll 1$) cuando $E \ll E_p \sim 10^{19}$ GeV. Pero indica también que $g_N(E)$ crece con la energía (mucho más rápidamente que $\alpha_f(E)$), lo cual causa dificultades serias al considerar procesos más complicados como



porque las partículas virtuales en los 'lazos' de estos diagramas pueden tener energías arbitrariamente altas. Esto último ocurre también en QED y QCD, pero para la gravitación existe una diferencia muy importante, que tiene que ver con el proceso de 'renormalización'. Recordemos que este concepto se refiere al paso de reescribir las cantidades físicas

en términos de los valores de masas, cargas, etc. que incluyen la contribución de las partículas virtuales (que llamamos valores "renormalizados"), en lugar de los correspondientes valores "desnudos". Además de estar bien motivado físicamente, este cambio de variables es importante porque, en cualquier teoría de campo que uno suponga 'fundamental' (es decir, válida a distancias arbitrariamente pequeñas), el cálculo perturbativo de casi cualquier cantidad física recibe contribuciones infinitas por las partículas infinitamente energéticas (o lo que es lo mismo, interacciones que sucedan a distancia cero) en diagramas con lazos, pero estos infinitos claramente deben desaparecer de alguna manera si la teoría es físicamente sensata. Y en teorías como QED o QCD, justamente es posible ajustar a mano el valor desnudo de un número finito de parámetros ($e_{\text{desnudo}}, m_{\text{desnudo}}, \dots \rightarrow \infty \text{ ó } 0$) para obtener predicciones

finitas (en términos de $e_{\text{física}}$, $m_{\text{física}}$, ..., parámetros con valores finitos que deben determinarse experimentalmente). Cuando esto sucede, decimos que la teoría en cuestión es renormalizable.

Pero la relatividad general es (perturbativamente) no renormalizable: al calcular una cantidad física, en cada orden de la expansión perturbativa aparecen nuevos tipos de infinitos, que para ser absorbidos requerirían ajustar un número infinito de parámetros de nudos, lo cual tendría como consecuencia que solo es posible hacer predicciones después de hacer un número infinito de mediciones para determinar los correspondientes valores físicos de estos parámetros (que son básicamente constantes de acoplamiento para interacciones cada vez más complicadas). ¡Claramente esta no es una situación muy feliz que digamos! La no renormalizabilidad de la relatividad general nos indica una de las cosas:

a) La relatividad general no es una teoría fundamental, sino "efectiva", es decir, solo es válida hasta una cierta escala energética E_{valida} (supondremos que $E_{\text{valida}} \sim E_p$), por encima de la cual hay nuevos efectos físicos. En este caso, debemos buscar una nueva teoría que difiera de la relatividad general a distancias pequeñas y resuelva el problema de los infinitos.

b) La relatividad general si es una teoría fundamental bien definida, y el que obtengamos resultados insensatos al analizarla perturbativamente (a través de diagramas de Feynman) simplemente muestra que este método es inútil. En este caso, debemos encontrar un nuevo método (no perturbativo) que nos permita extraer física sensata a partir de la misma teoría.

Como mencionaremos más adelante, ambas posibilidades están siendo exploradas...

En cualquier caso, el tema no perturbativo nos recuerda que la descripción microscópica de la gravedad tiene también implicaciones más profundas:

ii) Para un relativista, la gravedad no es solo una interacción más, sino una manifestación de la curvatura del espaciotiempo, y la 'métrica' $g_{\mu\nu}(\vec{x}, t)$ no debe ser entendida como un campo más, sino como una estructura que define al propio espaciotiempo — el 'escenario' dinámico donde se propagan todos los otros campos. La noción de partículas que se desplazan sobre un espaciotiempo (fondo) fijo es solo una aproximación, y debemos aspirar a obtener una descripción independiente del fondo. El objetivo central debe ser cuantizar al propio espaciotiempo, pero...
¿qué demonios es un espaciotiempo cuántico??

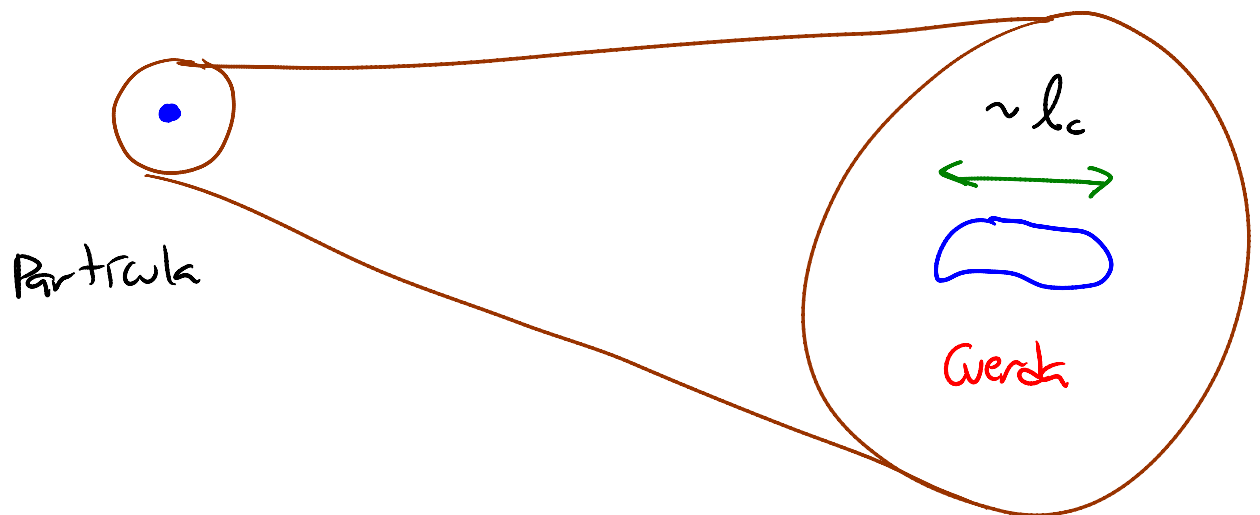
En particular, el espaciotiempo como noción clásica debe ser un concepto derivado de la teoría — en esencia, ¡necesitamos entender de qué están "hechos" el espacio y el tiempo!

Todo esto requiere en algún momento un análisis no perturbativo.

Vale la pena resaltar que, con base en esta discusión, la construcción de una teoría cuántica de la gravedad es importante no solo para entender situaciones extremas donde la gravedad es relevante a distancias muy pequeñas (como agujeros negros o la gran explosión), ¡sino también para comprender la estructura de cada cm^3 de espacio a nuestro alrededor! L8: 08/09

Aquí terminamos por fin con nuestra lista de limitaciones por las cuales es necesario ir más allá del Modelo Estándar. La Teoría de Cuerdas es uno de los caminos más prometedores para lograrlo. Su propuesta central es sorprendentemente sencilla: postular que los ingredientes básicos no son partículas (objetos puntuales sin tamaño alguno), sino cuerdas (objetos extendidos en una dimensión, que podemos visualizar

como 'ligas' infinitesimalmente delgadas, que tienen una cierta longitud característica l_c :



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!

¿Qué ganamos con esta sencilla pero rara modificación?

I) Virtudes de la Teoría de Cuerdas

1) Predicción (o, en realidad, 'retro-dicción') de la existencia de la gravedad: al intentar describir consistentemente a una cuerda cuántica relativista,
 (Mecánica cuántica usual) \nearrow \nwarrow (Relatividad especial) usual)

se encuentra automáticamente que uno de sus modos de oscilación tiene $m=0, s=2, q=0, \dots$ 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, la partícula mensajera de la gravedad!

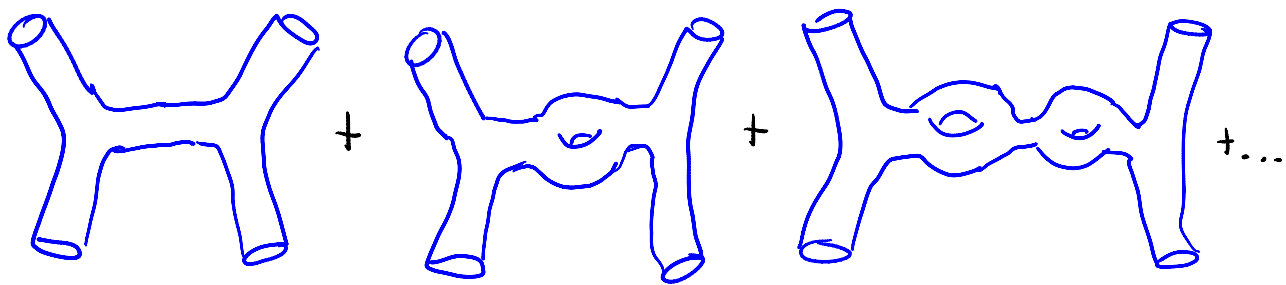
2) Descripción consistente de la gravedad cuántica

(desarrollada por particulares): 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 $E_c \equiv \hbar c / l_c$, 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 una expansión perturbativa en 'diagramas de Feynman',



(que podría describir, p.ej., a 2 electrones interactuando a través del intercambio de gravitones), e incluso antes de renormalizar, ¡ningún diagrama tiene infinitos debido a altas energías !! Maximalmente, la razón es que el tamaño finito de la cuerda no permite explorar distancias arbitrariamente pequeñas. 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 . Por supuesto, la expansión perturbativa es útil solo si $g_c \ll 1$.

A energías $E \ll E_c$ (\leftrightarrow distancias $l \gg l_c$), los cálculos perturbativos reproducen perfectamente la relatividad general, y permiten deducir que

$$E_p \sim g_c^{-\frac{2}{D-2}} E_c \quad (\leftrightarrow l_p \sim g_c^{\frac{2}{D-2}} l_c, \text{ es decir, } G_N \sim g_c^2 l_c^{D-2}),$$

donde D es la dimensión del espaciotiempo.

Esto nos indica que, por su estrecha conexión con la interacción gravitacional, las cuerdas deben ser esencialmente tan pequeñas como la longitud de

Planck, $10^{-18} \text{ m} \lesssim l_c \lesssim 10^{-35} \text{ m}$, lo cual significa

"Mundo Brana" \uparrow \leftarrow "Mundo Manguera"

que su detección directa podría estar a la vuelta de la esquina (en LHC) ... o miles de años en el futuro.

Cuando $E \gtrsim E_c$ ($\leftrightarrow l \lesssim l_c$), la teoría de cuerdas predice correcciones específicas a la relatividad general, que son consecuencia de la naturaleza extendida de la cuerda y son precisamente lo que permite que, a diferencia de la relatividad general, la teoría de cuerdas sí tenga una expansión perturbativa sensata.

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 espaciotiempo 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 ($E \ll E_p$) 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...

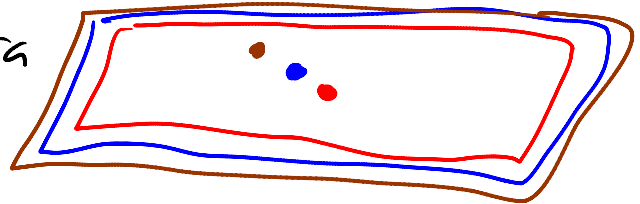
3) Al cuantizar a las ondas, se encuentran modos de oscilación que tienen $m=0$, $s=1$ y las propiedades necesarias para poder describir a las partículas mensajeras de las interacciones del Modelo Estándar. En este contexto, es posible obtener de manera natural algunas propuestas de teorías de gran unificación.

4) Se pueden obtener también estados de vibración de la cuerda con $m=0$, $s=1/2$, es decir, fermiones como los ladrillos básicos de la 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 QUIZÁS reproducir todos los ingredientes del Modelo Estándar, ¡¡a partir de **1 solo componente básico** !!

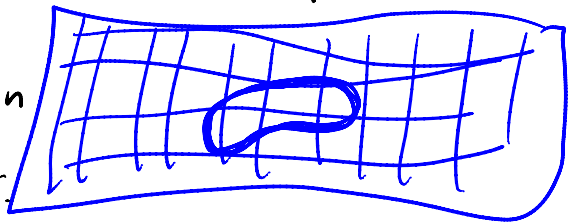
Es importante resaltar que, así como entendemos que las partículas de cada tipo son pequeñas 'onditas' en una 'jalea' determinada (el campo asociado), las cuerdas representan igualmente pequeñas fluctuaciones de una especie de 'jalea' más complicada (el "campo de cuerdas").

En esencia, la propuesta de la teoría de cuerdas



es entonces reemplazar al espaciotiempo + 'jaleas' del M.E.

por una sola 'multijalea' con excitaciones unidimensionales.



5) La teoría de cuerdas incorpora naturalmente la existencia de la supersimetría (y \therefore una posible solución al problema de jerarquía, un fuerte candidato para la materia oscura, etc.)

6) La teoría de cuerdas predice la existencia de 6 dimensiones adicionales. Para esconderlas, debemos postular que son muy pequeñas (como en el "mundo mancuera" 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 podrían influenciar indirectamente la física que conocemos. P.ej., la existencia de 3 generaciones, podrían 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" $\varphi(\vec{x}, t)$ (que como todo lo demás es parte de la 'multicuerda' 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 será posible entonces que la teoría de cuerdas predijera el valor de los ~ 20 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, ...).

L9: 13/09

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 20 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 'norma/gravedad' u 'holográfica' o 'AdS/CFT', la cual establece una muy sorprendente equivalencia entre teorías cuánticas CON y SIN gravedad:

Teoría de Normas
no Abelianas
(A_μ es matriz $N \times N$)
en d dim

(p.ej., super-Yang-Mills
 $N=4$ en Minkowski
con $d=3+1$)

Partículas

SIN gravedad

CON "fuerza fuerte"

espaciotiempo plano

menos dimensiones

acoplamiento fuerte
débil

==
==
Maldacena

Teoría de Cuerdas
(y... con gravedad)
en $D > d$ dim

(p.ej., Cuerdas IIB en
anti-de Sitter $(4+1)$ -dim
 \times esfera 5-dim,
i.e., $D=9+1$)

VS.

Cuerdas

VS.

CON gravedad

VS.

SIN "fuerza fuerte"

VS.

espaciotiempo curvo

VS.

más dimensiones

VS.

acoplamiento débil
fuerte

ii) Además de sorprendente, esta equivalencia ha resultado
ya extremadamente ÚTIL para entender a teorías de
normas fuertemente acopladas y a cuerdas/gravedad !!

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.