



# Átame

Una introducción divulgativa a la teoría de cuerdas



# Comentario personal

Teoría de cuerdas no es un tema ideal para una charla divulgativa

# Comentario personal

Teoría de cuerdas no es un tema ideal para una charla divulgativa

- muy técnico en seguida

# Comentario personal

Teoría de cuerdas no es un tema ideal para una charla divulgativa

- muy técnico en seguida
- muy amplio: teoría de todo

# Comentario personal

Teoría de cuerdas no es un tema ideal para una charla divulgativa

- muy técnico en seguida
- muy amplio: teoría de todo
- sólo es una teoría, no sabemos si es verdad

# Comentario personal

Teoría de cuerdas no es un tema ideal para una charla divulgativa

- muy técnico en seguida
- muy amplio: teoría de todo
- sólo es una teoría, no sabemos si es verdad
- asociaciones y expectativas difíciles de cumplir



# Comentario personal

## Teoría de cuerdas no es un tema ideal para una charla divulgativa

- muy técnico en seguida
- muy amplio: teoría de todo
- sólo es una teoría, no sabemos si es verdad
- asociaciones y expectativas difíciles de cumplir

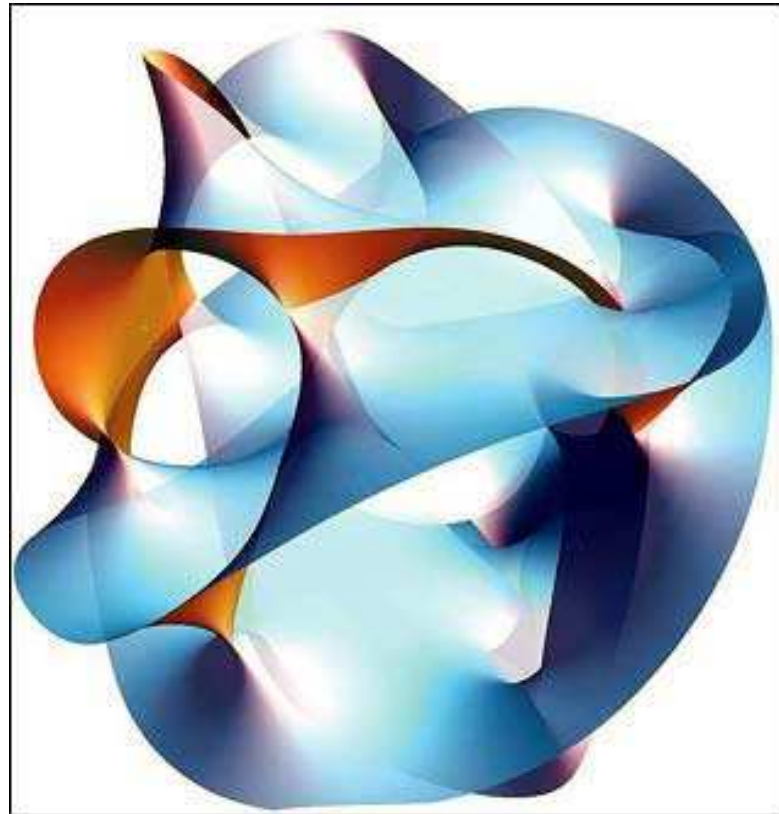


- tiene un grave problema relaciones públicas / sociológico



Por lo tanto...

Una buena introducción a teoría de cuerdas es complicado de hacer:



Pero ...





# Átame

Una introducción **honest**a a la teoría de cuerdas



# Plan de la charla

1. Hacia la gravedad cuántica?

## Plan de la charla

1. Hacia la gravedad cuántica?
2. Teoría de cuerdas

## Plan de la charla

1. Hacia la gravedad cuántica?
2. Teoría de cuerdas
3. Cuerdas y  $p$ -branas

## Plan de la charla

1. Hacia la gravedad cuántica?
2. Teoría de cuerdas
3. Cuerdas y  $p$ -branas
4. La conjetura AdS/CFT

## Plan de la charla

1. Hacia la gravedad cuántica?
2. Teoría de cuerdas
3. Cuerdas y  $p$ -branas
4. La conjetura AdS/CFT
5. Conclusiones

# 1. Hacia la gravedad cuántica

# Revoluciones físicas de 1900 - 1930:

Mecánica cuántica: descripción del mundo (sub)atómico

$$(v \ll c, G_N = 0)$$

Relatividad especial: formulación covariante de mecánica newtoniana

$$(\hbar = G_N = 0)$$

Relatividad general: gravedad como teoría de campos

$$(\hbar = 0)$$



## Revoluciones físicas de 1900 - 1930:

Mecánica cuántica: descripción del mundo (sub)atómico

$$(v \ll c, G_N = 0)$$

Relatividad especial: formulación covariante de mecánica newtoniana

$$(\hbar = G_N = 0)$$

Relatividad general: gravedad como teoría de campos

$$(\hbar = 0)$$

## Unificando teorías (1930 - 1980)

Mecánica cuántica + relatividad especial  $\longrightarrow$  Teoría cuántica de campos

Modelo standar, física nuclear, física de plasma, estado sólido, ...

## Revoluciones físicas de 1900 - 1930:

Mecánica cuántica: descripción del mundo (sub)atómico

$$(v \ll c, G_N = 0)$$

Relatividad especial: formulación covariante de mecánica newtoniana

$$(\hbar = G_N = 0)$$

Relatividad general: gravedad como teoría de campos

$$(\hbar = 0)$$

## Unificando teorías (1930 - 1980)

Mecánica cuántica + relatividad especial  $\longrightarrow$  Teoría cuántica de campos

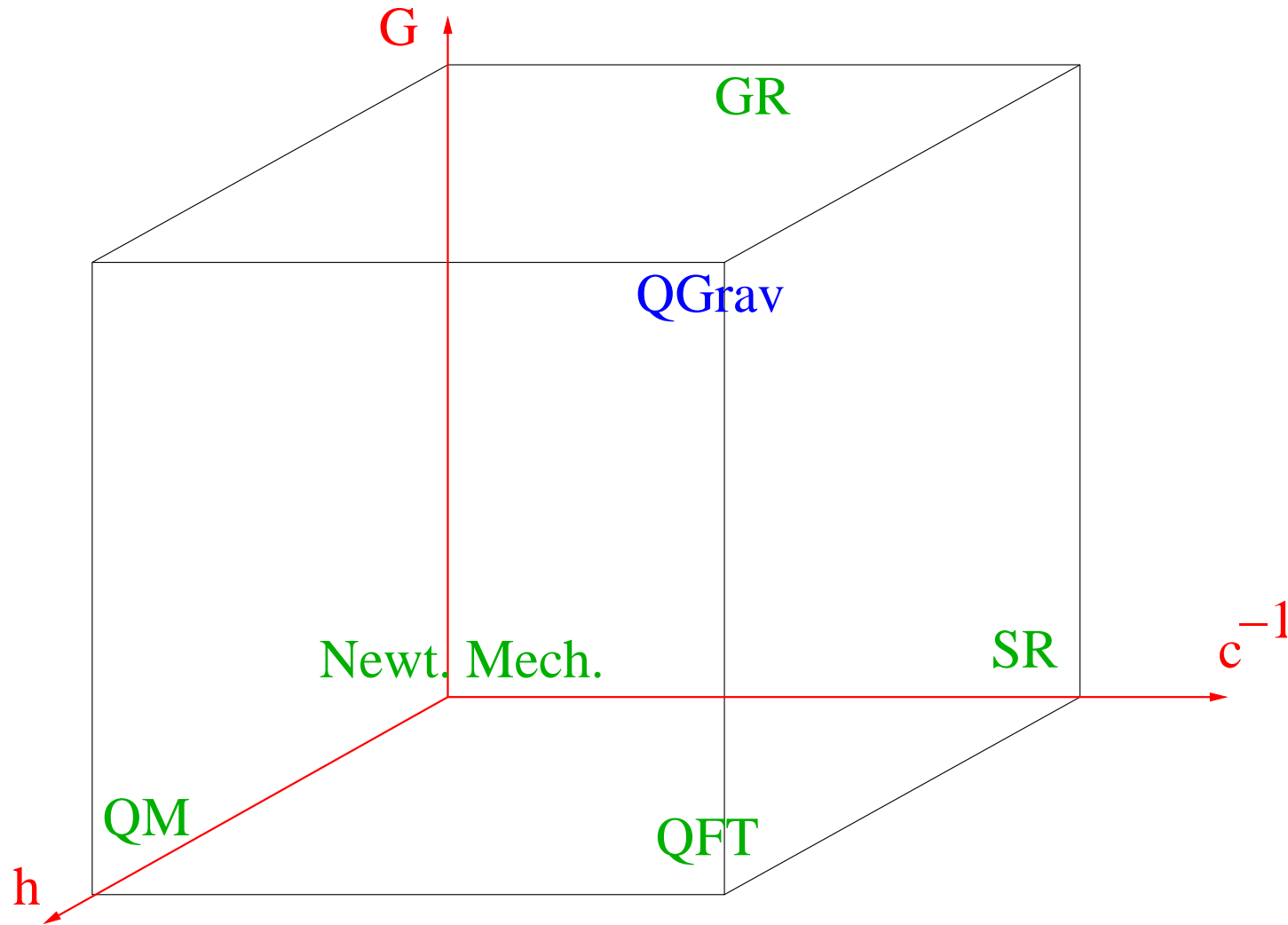
Modelo standar, física nuclear, física de plasma, estado sólido, ...

Teoría cuántica de campos + Relatividad general:  $\longrightarrow$  Gravedad cuántica

**Problema:** Relatividad general: no renormalizable

$\longrightarrow$  impide cuantización

# Cubo de Bronstein: expansión de teorías en $c^{-1}$ , $G$ y $\hbar$



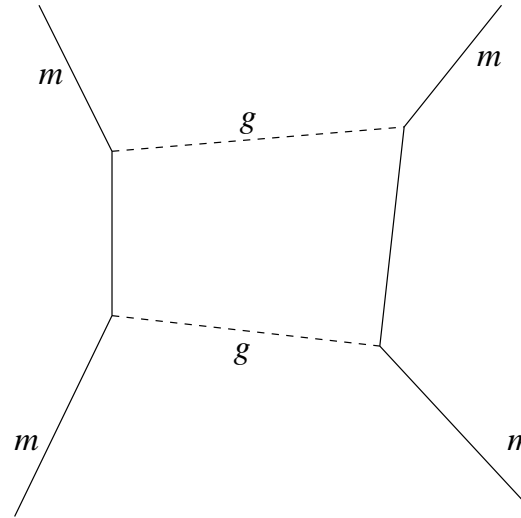
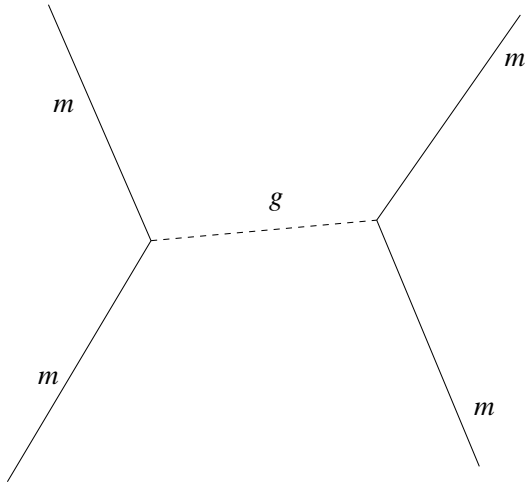
# ¿Cuál es el problema?

En unidades  $c = \hbar = 1$ :  $[G_N] = L^2$

# ¿Cuál es el problema?

En unidades  $c = \hbar = 1$ :

$$[G_N] = L^2$$



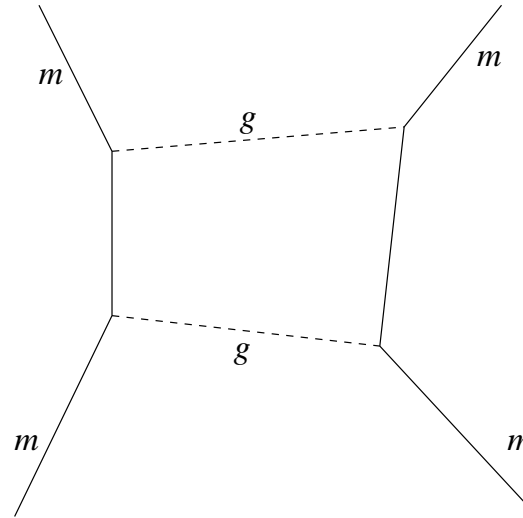
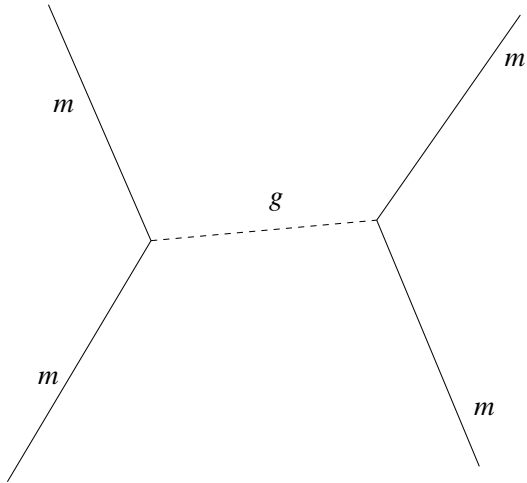
Constante de acoplo efectivo (a-dimensional):

$$\alpha_g = G_N E^2 \quad \Longrightarrow \quad \text{acoplos arbitrariamente grandes para } E \longrightarrow \infty$$

# ¿Cuál es el problema?

En unidades  $c = \hbar = 1$ :

$$[G_N] = L^2$$



Constante de acoplo efectivo (a-dimensional):

$$\alpha_g = G_N E^2 \quad \Longrightarrow \quad \text{acoplos arbitrariamente grandes para } E \longrightarrow \infty$$

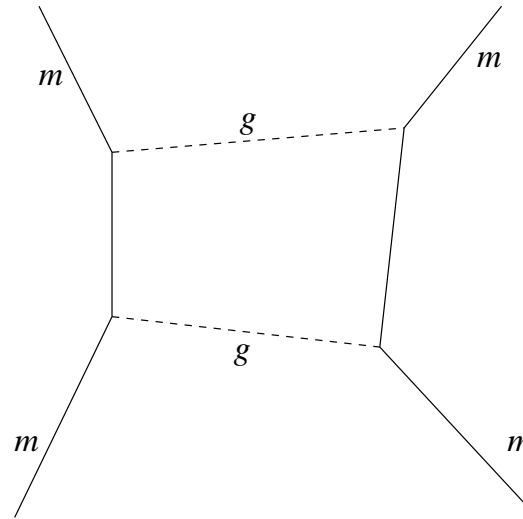
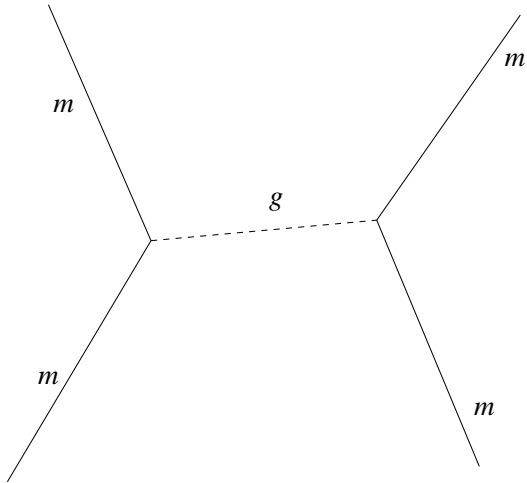
Contribución por loop:

$$G_N \int_0^\infty E dE \quad \Longrightarrow \quad \text{cuadráticamente divergente}$$

# ¿Cuál es el problema?

En unidades  $c = \hbar = 1$ :

$$[G_N] = L^2$$



Constante de acoplo efectivo (a-dimensional):

$$\alpha_g = G_N E^2 \quad \Longrightarrow \quad \text{acoplos arbitrariamente grandes para } E \longrightarrow \infty$$

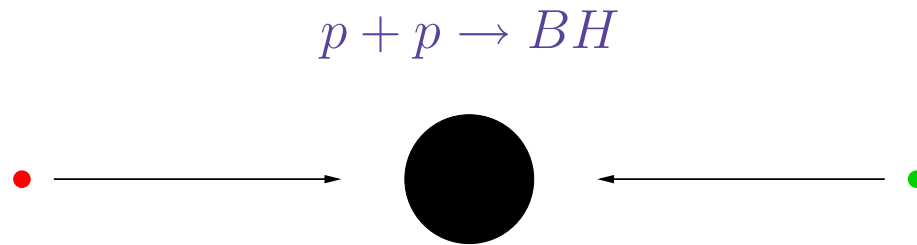
Contribución por loop:

$$G_N \int_0^\infty E dE \quad \Longrightarrow \quad \text{cuadráticamente divergente}$$

Teoría no válida para  $E$  arbitrariamente alto: Nueva física a  $\ell_{Pl} \sim \sqrt{G_N}$  ?

# Más indicaciones de nueva física

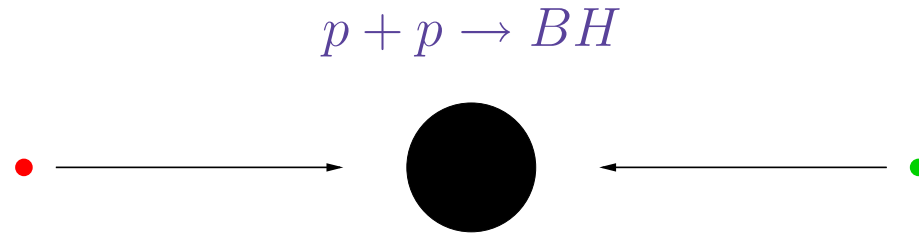
- **Escala de longitud mínima explorable:** procesos de colisiones forman agujeros negros e impiden explorar escalas  $\leq R_s$



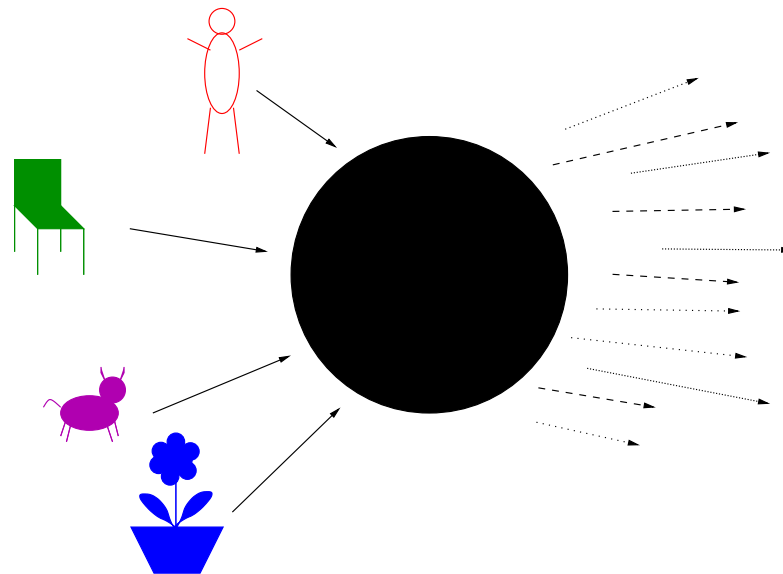


# Más indicaciones de nueva física

- **Escala de longitud mínima explorable:** procesos de colisiones forman agujeros negros e impiden explorar escalas  $\leq R_s$



- **Entropía de agujeros negros:** ¿Dónde está la información de lo que formó el agujero negro? ¿Viola la radiación de Hawking unitaridad?



- Materia oscura, energía oscura y la energía del vacío:

$$\Lambda_{\star} \sim 10^{-47} \text{GeV}^4 \sim 10^{-120} M_{Pl}^4 \sim 10^{-120} \Lambda_0$$

→ ¿Por qué la energía del punto cero no contribuye?

- Materia oscura, energía oscura y la energía del vacío:

$$\Lambda_{\star} \sim 10^{-47} \text{GeV}^4 \sim 10^{-120} M_{Pl}^4 \sim 10^{-120} \Lambda_0$$

—→ ¿Por qué la energía del punto cero no contribuye?

$$\Omega_{\Lambda_{\star}} = 0,72; \quad \Omega_{DM} = 0,24; \quad \Omega_m = 0,04$$

—→ ¿De qué consisten  $\Omega_{\Lambda_{\star}}$  y  $\Omega_{DM}$ ?

- **Materia oscura, energía oscura y la energía del vacío:**

$$\Lambda_{\star} \sim 10^{-47} \text{GeV}^4 \sim 10^{-120} M_{Pl}^4 \sim 10^{-120} \Lambda_0$$

—→ ¿Por qué la energía del punto cero no contribuye?

$$\Omega_{\Lambda_{\star}} = 0,72; \quad \Omega_{DM} = 0,24; \quad \Omega_m = 0,04$$

—→ ¿De qué consisten  $\Omega_{\Lambda_{\star}}$  y  $\Omega_{DM}$ ?

- **Problema de jerarquía:** ¿Por qué la gravedad es tan débil?, comparada con la escala electrodébil

$$M_{Pl} \sim 10^{19} \text{GeV} \quad \longleftrightarrow \quad M_{ew} \sim 100 \text{GeV}$$

- **Materia oscura, energía oscura y la energía del vacío:**

$$\Lambda_{\star} \sim 10^{-47} \text{GeV}^4 \sim 10^{-120} M_{Pl}^4 \sim 10^{-120} \Lambda_0$$

—→ ¿Por qué la energía del punto cero no contribuye?

$$\Omega_{\Lambda_{\star}} = 0,72; \quad \Omega_{DM} = 0,24; \quad \Omega_m = 0,04$$

—→ ¿De qué consisten  $\Omega_{\Lambda_{\star}}$  y  $\Omega_{DM}$ ?

- **Problema de jerarquía:** ¿Por qué la gravedad es tan débil?, comparada con la escala electrodébil

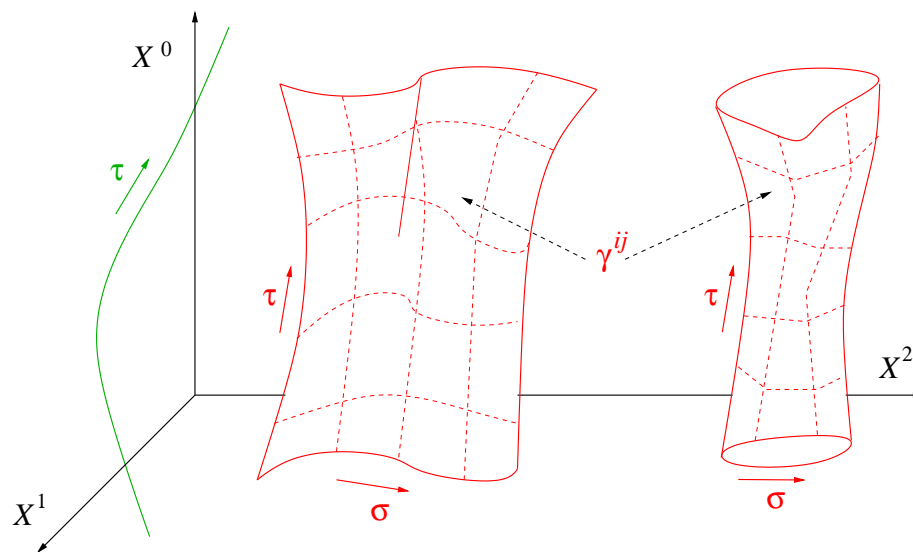
$$M_{Pl} \sim 10^{19} \text{GeV} \quad \longleftrightarrow \quad M_{ew} \sim 100 \text{GeV}$$

Gravedad cuántica debería resolver estos problemas

## 2. Teoría de cuerdas

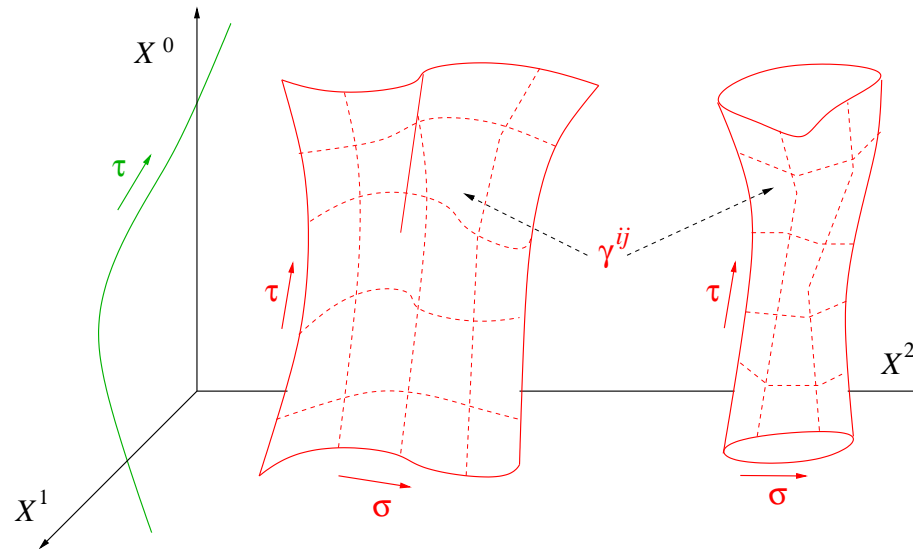
# Cinemática de cuerdas

Idea básica: Materia consiste de objetos unidimensionales:



# Cinemática de cuerdas

Idea básica: Materia consiste de objetos unidimensionales:



Acción de Polyakov:

[Polyakov, 1981]

$$S = -\frac{T}{2} \int d^2\sigma \sqrt{\gamma} \gamma^{ij} \partial_i X^\mu \partial_j X^\nu \eta_{\mu\nu} \quad i \in \{\sigma, \tau\}$$

- con
- $\sigma$  y  $\tau$  parametrización de la superficie de universo
  - $X^\mu = X^\mu(\sigma, \tau)$  coordenadas de embeber en  $\mathbb{R}^{1, N-1}$
  - $\gamma^{ij}$  métrica (auxiliar) 2-dim en la superficie de universo



- Acción de Polyakov invariante bajo  $\gamma_{ij} \rightarrow \tilde{\gamma}_{ij} = \Omega(\tau, \sigma)\gamma_{ij}$ 
  - sólo para acción 2-dim:  $\sqrt{|\tilde{\gamma}|} \tilde{\gamma}^{ij} = \sqrt{|\gamma|} \gamma^{ij}$ : cuerdas son especiales!
  - invariancia conforma: álgebra de dimensión infinita

- Acción de Polyakov invariante bajo  $\gamma_{ij} \rightarrow \tilde{\gamma}_{ij} = \Omega(\tau, \sigma)\gamma_{ij}$ 
  - sólo para acción 2-dim:  $\sqrt{|\tilde{\gamma}|} \tilde{\gamma}^{ij} = \sqrt{|\gamma|} \gamma^{ij}$ : cuerdas son especiales!
  - invariancia conforma: álgebra de dimensión infinita
- Ecuación de movimiento:  $(\partial_\tau^2 - \partial_\sigma^2)X^\mu = 0$

Solución:  $X^\mu(\tau, \sigma) = X_+^\mu(\tau + \sigma) + X_-^\mu(\tau - \sigma)$

con

$$X_-^\mu(\tau - \sigma) \sim \sum_n a_n^\mu e^{-in(\tau - \sigma)},$$

$$X_+^\mu(\tau + \sigma) \sim \sum_n \tilde{a}_n^\mu e^{-in(\tau + \sigma)}$$

- Acción de Polyakov invariante bajo  $\gamma_{ij} \rightarrow \tilde{\gamma}_{ij} = \Omega(\tau, \sigma)\gamma_{ij}$   
 —→ sólo para acción 2-dim:  $\sqrt{|\tilde{\gamma}|} \tilde{\gamma}^{ij} = \sqrt{|\gamma|} \gamma^{ij}$ : cuerdas son especiales!  
 —→ invariancia conforma: álgebra de dimensión infinita
- Ecuación de movimiento:  $(\partial_\tau^2 - \partial_\sigma^2)X^\mu = 0$

Solución:  $X^\mu(\tau, \sigma) = X_+^\mu(\tau + \sigma) + X_-^\mu(\tau - \sigma)$

con

$$X_-^\mu(\tau - \sigma) \sim \sum_n a_n^\mu e^{-in(\tau - \sigma)},$$

$$X_+^\mu(\tau + \sigma) \sim \sum_n \tilde{a}_n^\mu e^{-in(\tau + \sigma)}$$

—→ Espectro consiste de una serie infinita de oscilaciones, que corresponde con las partículas conocidas ( $m \sim 0$ ) y mucho más ( $m \sim nM_{Pl}$ )

- Cuerda abierta, sector sin masa: bosones de gauge
- Cuerda cerrada, sector sin masa: gravitón [Yonega, 1973] [Scherk, Schwarz, 1974]

—→ **Teoría de gravedad!!!**

# Comentarios generales

- gravitón  $\iff \ell_s = 10^{-35}m$  (núcleo:  $10^{-16}m$ )
  - escala de cuerdas  $\sim M_{Pl} \sim 10^{19} GeV$  (LHC:  $14 \cdot 10^3 GeV$ )
  - fuera de alcance de verificación experimental: **Problema!**

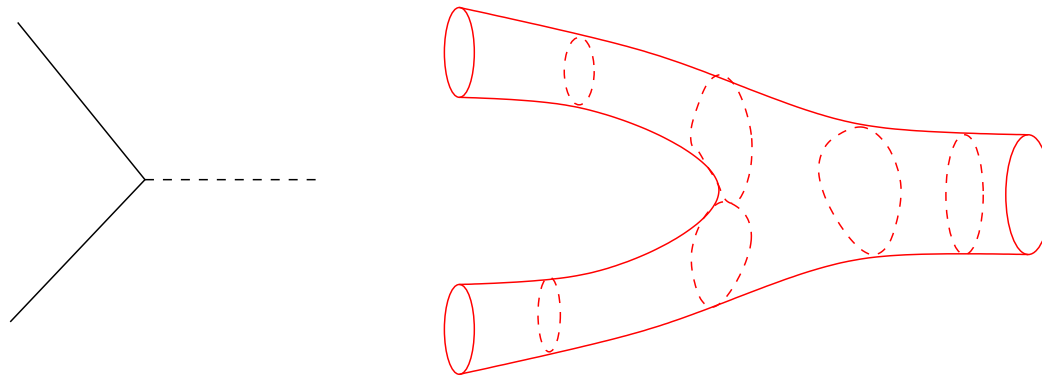
# Comentarios generales

- gravitón  $\iff \ell_s = 10^{-35}m$  (núcleo:  $10^{-16}m$ )
    - escala de cuerdas  $\sim M_{Pl} \sim 10^{19} GeV$  (LHC:  $14 \cdot 10^3 GeV$ )
    - fuera de alcance de verificación experimental: **Problema!**
- (NB: Condensado de Bose-Einstein: 1925  $\leftrightarrow$  1995)  
(NB: Ondas gravitacionales: 1917  $\leftrightarrow$  ? )

# Comentarios generales

- gravitón  $\iff \ell_s = 10^{-35} m$  (núcleo:  $10^{-16} m$ )  
→ escala de cuerdas  $\sim M_{Pl} \sim 10^{19} GeV$  (LHC:  $14 \cdot 10^3 GeV$ )  
→ fuera de alcance de verificación experimental: **Problema!**  
(NB: Condensado de Bose-Einstein: 1925  $\leftrightarrow$  1995)  
(NB: Ondas gravitacionales: 1917  $\leftrightarrow$  ? )

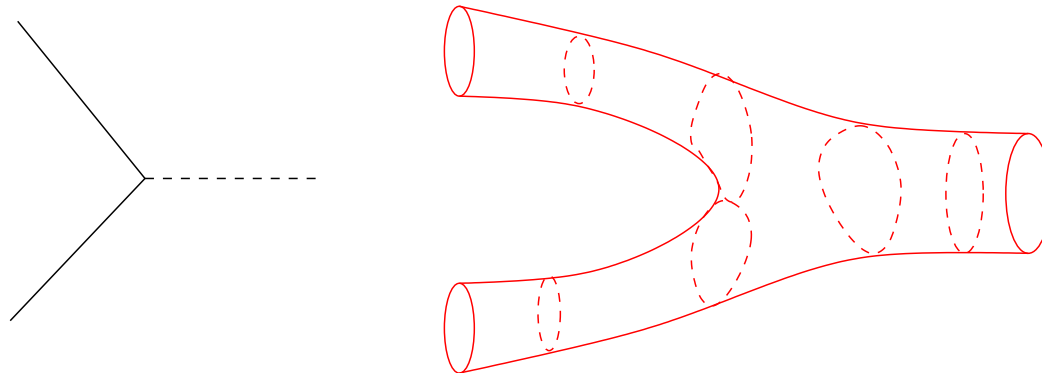
- Amplitudes de dispersión son UV finitas! **Gravedad es renormalizable!**



# Comentarios generales

- gravitón  $\iff \ell_s = 10^{-35}m$  (núcleo:  $10^{-16}m$ )  
→ escala de cuerdas  $\sim M_{Pl} \sim 10^{19} GeV$  (LHC:  $14 \cdot 10^3 GeV$ )  
→ fuera de alcance de verificación experimental: **Problema!**  
(NB: Condensado de Bose-Einstein: 1925  $\leftrightarrow$  1995)  
(NB: Ondas gravitacionales: 1917  $\leftrightarrow$  ? )

- Amplitudes de dispersión son UV finitas! **Gravedad es renormalizable!**



- $\nexists$  taquiones  $\iff$  supersymmetry  
→ extra grados de libertad fermiónicos



[Gliozzi, Scherk, Olive, 1976]

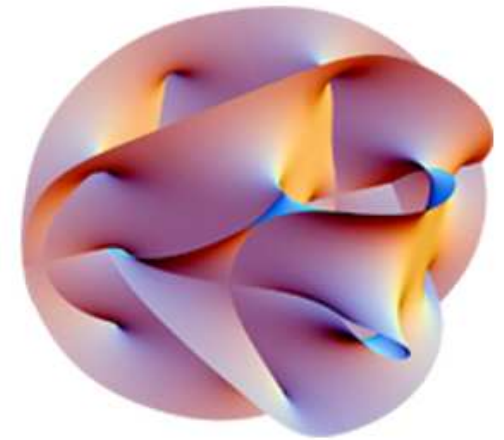
- Consistencia: espacio es 10-dimensional (9+1)

—→ **reducción dimensional** (Kaluza-Klein)

—→ geometría muy especial

[Kaluza,1921] [Klein, 1926]

[Cremmer, Julia, Scherk, 1978]





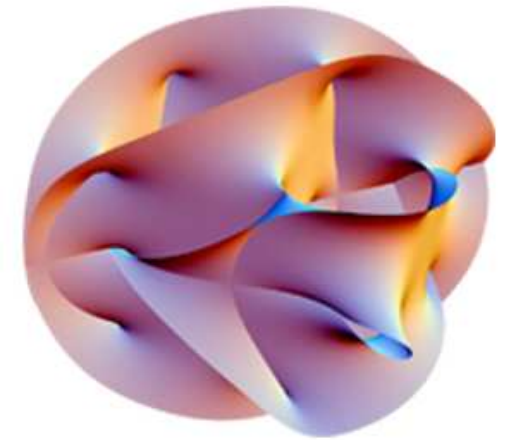
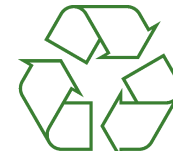
- Consistencia: espacio es 10-dimensional (9+1)

→ **reducción dimensional** (Kaluza-Klein)

→ geometría muy especial

[Kaluza,1921] [Klein, 1926]

[Cremmer, Julia, Scherk, 1978]

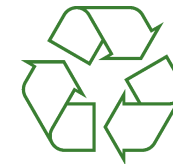


- **A bajas energías** (a escalas  $L \gg \gg \ell_s$ ):

teoría de cuerdas → teoría de campos,

con gravedad dinámica y supersimetría local

⇒ **Supergravedad**



$$S = \frac{1}{2\kappa} \int d^{10}x \sqrt{|g|} \left[ R + \frac{1}{2}(\partial\phi)^2 + \frac{1}{12}e^\phi H_{\mu\nu\rho}H^{\mu\nu\rho} + \dots \right]$$

[Callen, Friedman, Martinec, Perry, 1985]

# Revoluciones de cuerdas

Primera Revolución de cuerdas (1984 - 1985):

∃! 5 teorías de cuerdas consistentes: Tipo I, Tipo IIA, Tipo IIB,  
Heterótica  $SO(32)$ , Heterótica  $E_8 \times E_8$

[Green & Schwarz, 1985] [Gross, Harvey, Martinec & Rohm, 1985]

- viven en 9+1 dimensiones
- libre de anomalías (serie perturbativa bien definida)
- se distinguen por contenido de campos y cantidad de SUSY

# Revoluciones de cuerdas

Primera Revolución de cuerdas (1984 - 1985):

∃! 5 teorías de cuerdas consistentes: Tipo I, Tipo IIA, Tipo IIB,  
Heterótica  $SO(32)$ , Heterótica  $E_8 \times E_8$

[Green & Schwarz, 1985] [Gross, Harvey, Martinec & Rohm, 1985]

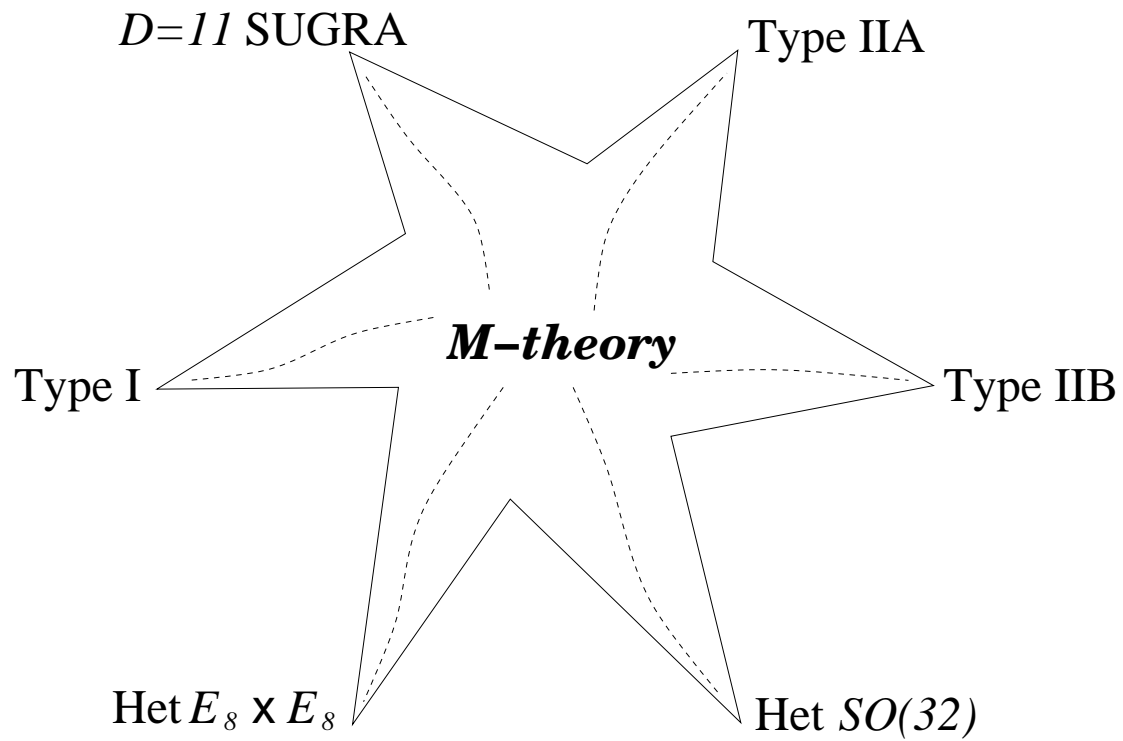
- viven en 9+1 dimensiones
- libre de anomalías (serie perturbativa bien definida)
- se distinguen por contenido de campos y cantidad de SUSY

Segunda Revolución de cuerdas (1994 - 1997):

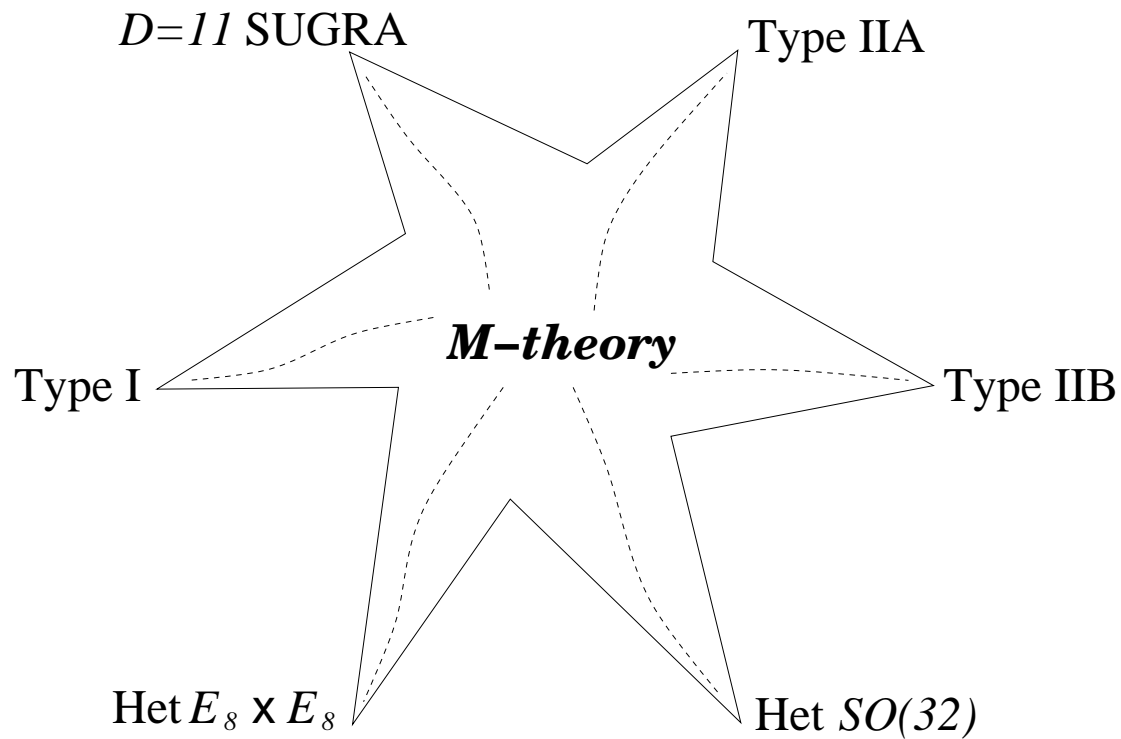
Las 5 teorías de cuerdas están relacionadas a través de dualidades

Las 5 teorías y  $D = 11$  SUGRA son límites diferentes de una teoría central,  
aún desconocida (llamado M-theory)

[Witten, Townsend, Polchinsky, Sen, ...]



[Witten, 1997]



[Witten, 1997]

*M* = Membrana?

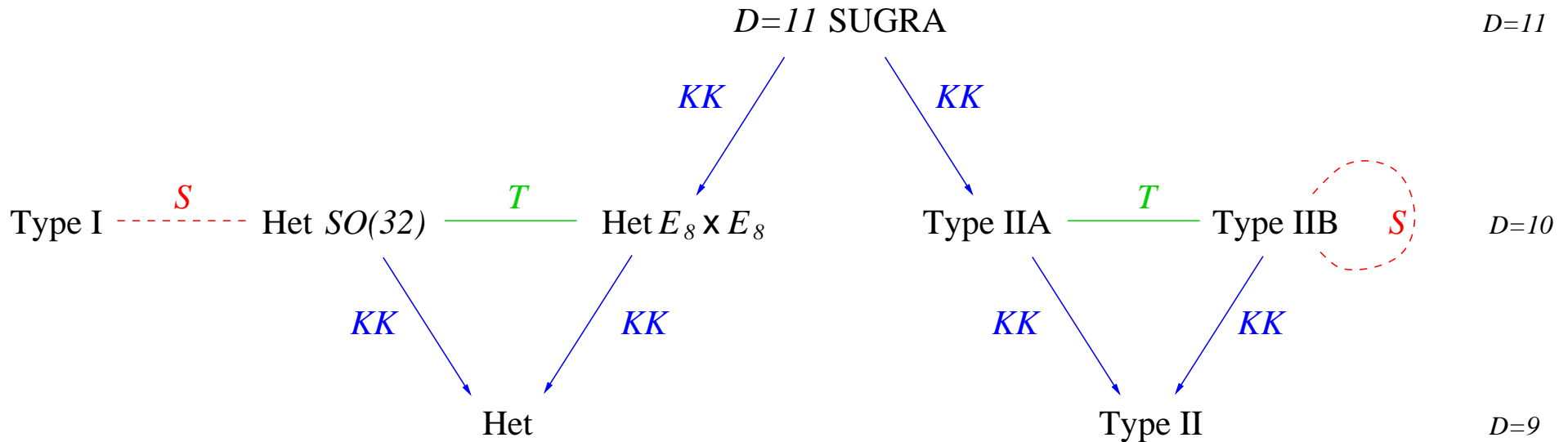
Matrix?

Madre?

Maastricht?

(W)<sup>-1</sup>itten?

Estas dualidades se ven también a nivel de supergravedad



Reducción dimensional: Compactificación Kaluza-Klein

**T-dualidad:** Simetrías del espectro de cuerdas moviéndose en espacios duales  
Relaciones entre campos de (diferentes) supergravedad(es)

**S-dualidad:** Simetría entre régimen de acoplo debil y fuerte  
→ más allá que teoría de perturbaciones

# 3. Cuerdas y $p$ -branas

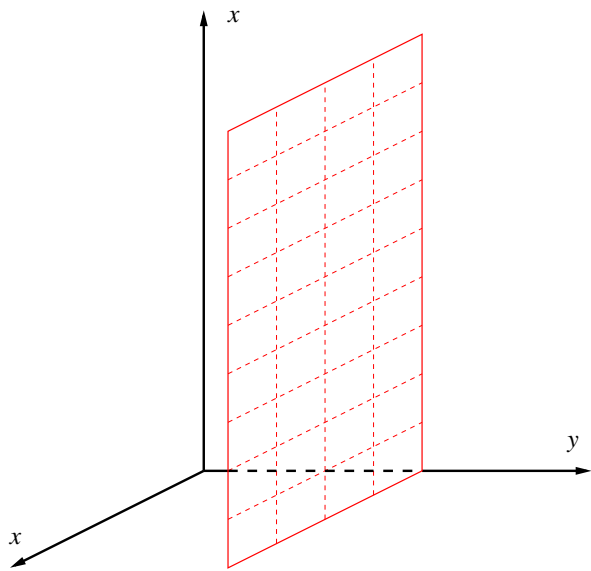
# $p$ -branas: generalidades

$p$ -branas son objetos fundamentales de teoría de cuerdas  
objetos solitónicos en supergravedad

$$S = \int d^D x \sqrt{|g|} \left[ R + \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi + e^{a\phi} F_{\mu_1 \dots \mu_{p+2}} F^{\mu_1 \dots \mu_{p+2}} \right]$$

$$ds^2 = H^\alpha(y) \eta_{mn} dx^m dx^n - H^\beta(y) \delta_{ij} dy^i dy^j$$

$$e^{-2\phi} = H^\gamma(y), \quad F_{m_1 \dots m_{p+1} i} = \epsilon_{m_1 \dots m_{p+1} i} \partial_i H^{-1}(y)$$



- Objetos planos extendidos en  $p$  direcciones
- Carga eléctrica y/o magnética bajo  $F_{\mu_1 \dots \mu_p}$
- Preservan una parte (1/2) de supersimetría
- Generalización de electrón en teoría de Maxwell, o agujero negro en Relatividad General



# Diferentes $p$ -branas

Cuerda fundamental (F1): cuerda cósmica, objeto fundamental con  $M \sim g$

[Dabholkar, Gibbons, Harvey, Ruiz Ruiz, 1990]

# Diferentes $p$ -branas

Cuerda fundamental (F1): cuerda cósmica, objeto fundamental con  $M \sim g$

[Dabholkar, Gibbons, Harvey, Ruiz Ruiz, 1990]

NS5-brana: objeto solitónico (cfr monopolo de Dirac)

con carga magnética y  $M \sim \frac{1}{g^2}$

[Callan, Harvey, Strominger, 1990]

# Diferentes $p$ -branas

Cuerda fundamental (F1): cuerda cósmica, objeto fundamental con  $M \sim g$

[Dabholkar, Gibbons, Harvey, Ruiz Ruiz, 1990]

NS5-brana: objeto solitónico (cfr monopolo de Dirac)

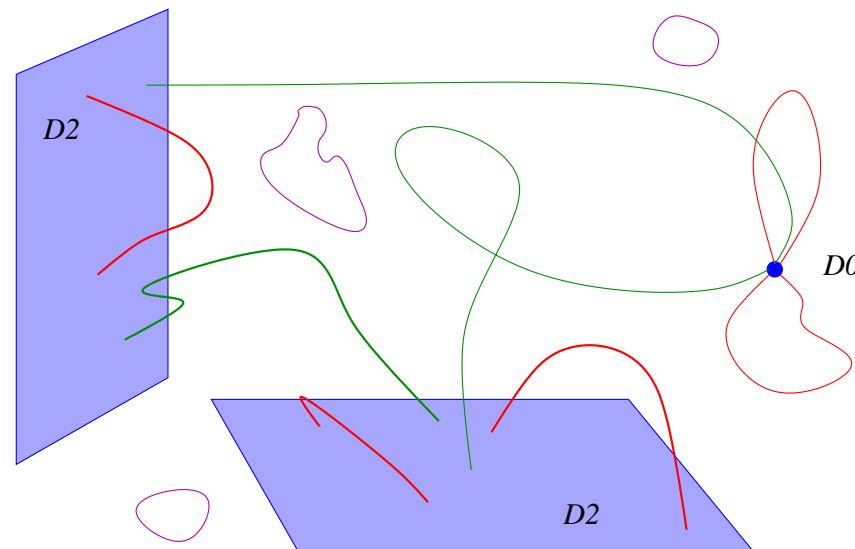
con carga magnética y  $M \sim \frac{1}{g^2}$

[Callan, Harvey, Strominger, 1990]

D-branas: condiciones de contorno tipo Dirichlet para cuerdas abiertas

con  $p$  arbitraria y  $M \sim \frac{1}{g}$

[Polchinski, 1995]



# Diferentes $p$ -branas

Cuerda fundamental (F1): cuerda cósmica, objeto fundamental con  $M \sim g$

[Dabholkar, Gibbons, Harvey, Ruiz Ruiz, 1990]

NS5-brana: objeto solitónico (cfr monopolo de Dirac)

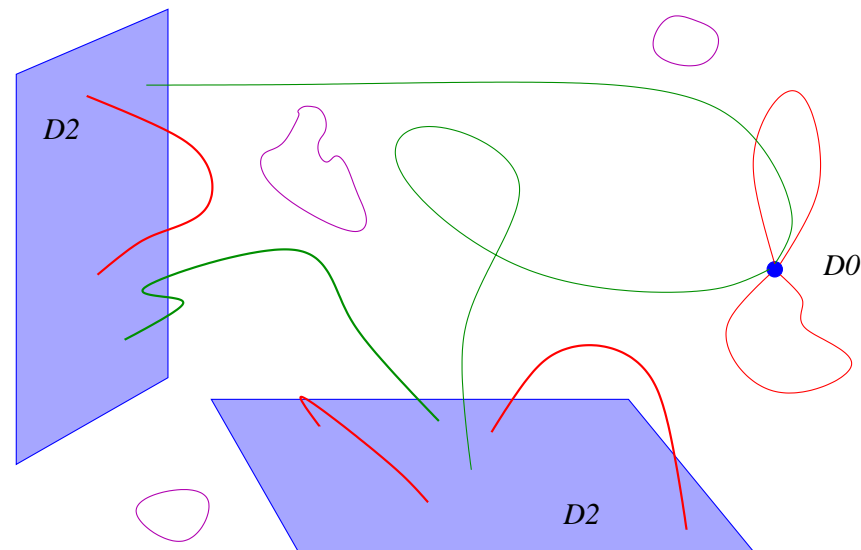
con carga magnética y  $M \sim \frac{1}{g^2}$

[Callan, Harvey, Strominger, 1990]

D-branas: condiciones de contorno tipo Dirichlet para cuerdas abiertas

con  $p$  arbitraria y  $M \sim \frac{1}{g}$

[Polchinski, 1995]

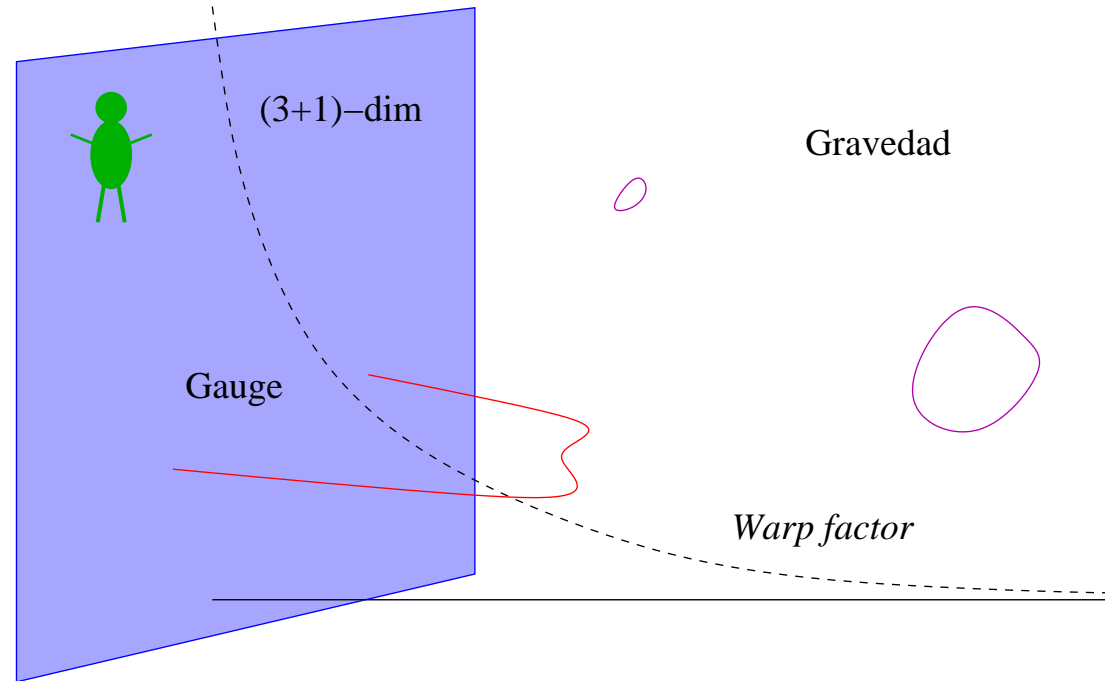


Dualidades  $\longrightarrow$   $p$ -brane democracy: todas las branes igual de fundamentales

[Townsend, 1995]

# Spin-off: string-inspired models

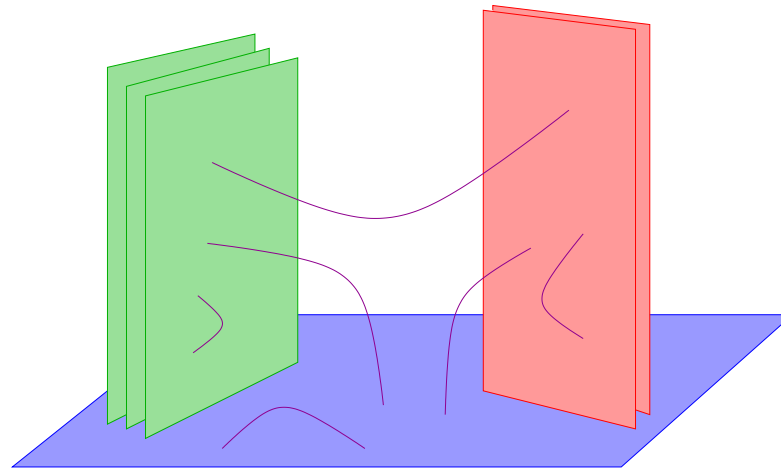
- **Braneworlds:** alternativa a reducción dimensional; solución al problema de jerarquía



[Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali, 1998][Randall, Sundrum, 1999]

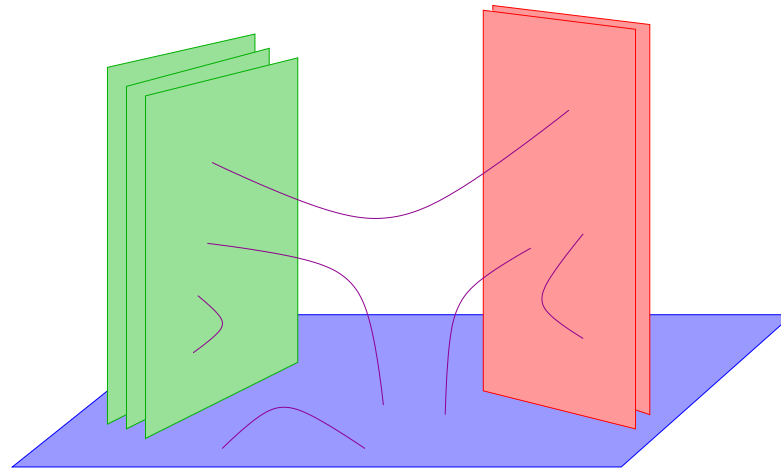
- **String fenomenología: Modelo Standard a base de branas intersectantes**

[Cremades, Ibañez, Marchesano, 2002]



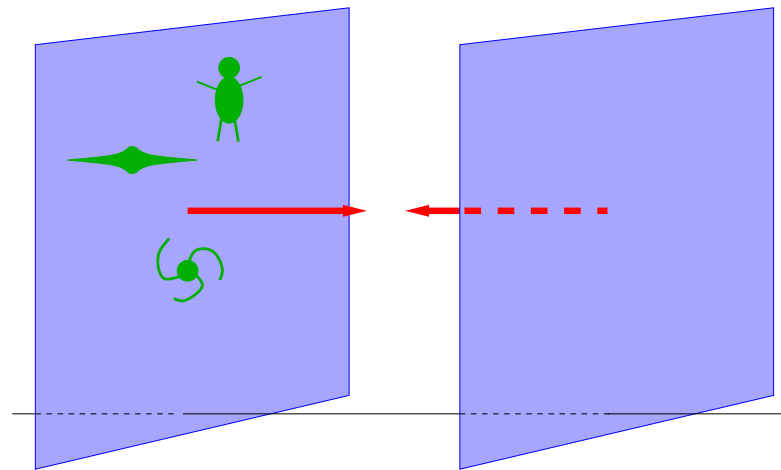
- **String fenomenología: Modelo Standard a base de branas intersectantes**

[Cremades, Ibañez, Marchesano, 2002]



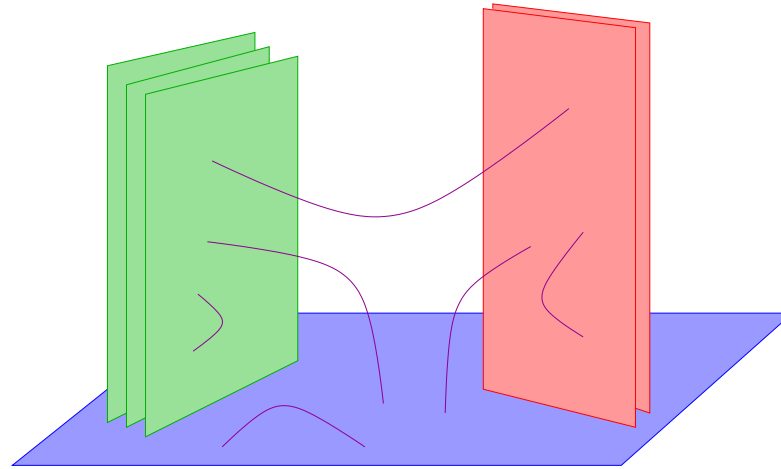
- **Universo ecpirótico: universo es resultado de choque de 2 branas**

[Steinhart, Turok, 2002]



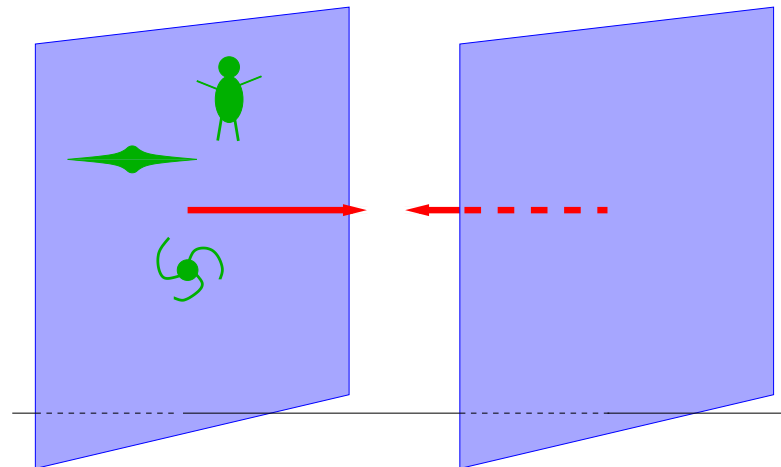
- **String fenomenología: Modelo Standard a base de branas intersectantes**

[Cremades, Ibañez, Marchesano, 2002]



- **Universo ecpirótico: universo es resultado de choque de 2 branas**

[Steinhart, Turok, 2002]



■ ...



# Entropía de agujeros negros (extremos)

Agujero negro:

$$S = k_B A / 4\ell_{Pl} \longleftrightarrow S = -k_B \ln \Omega$$

con  $\Omega =$  número de micro-estados

# Entropía de agujeros negros (extremos)

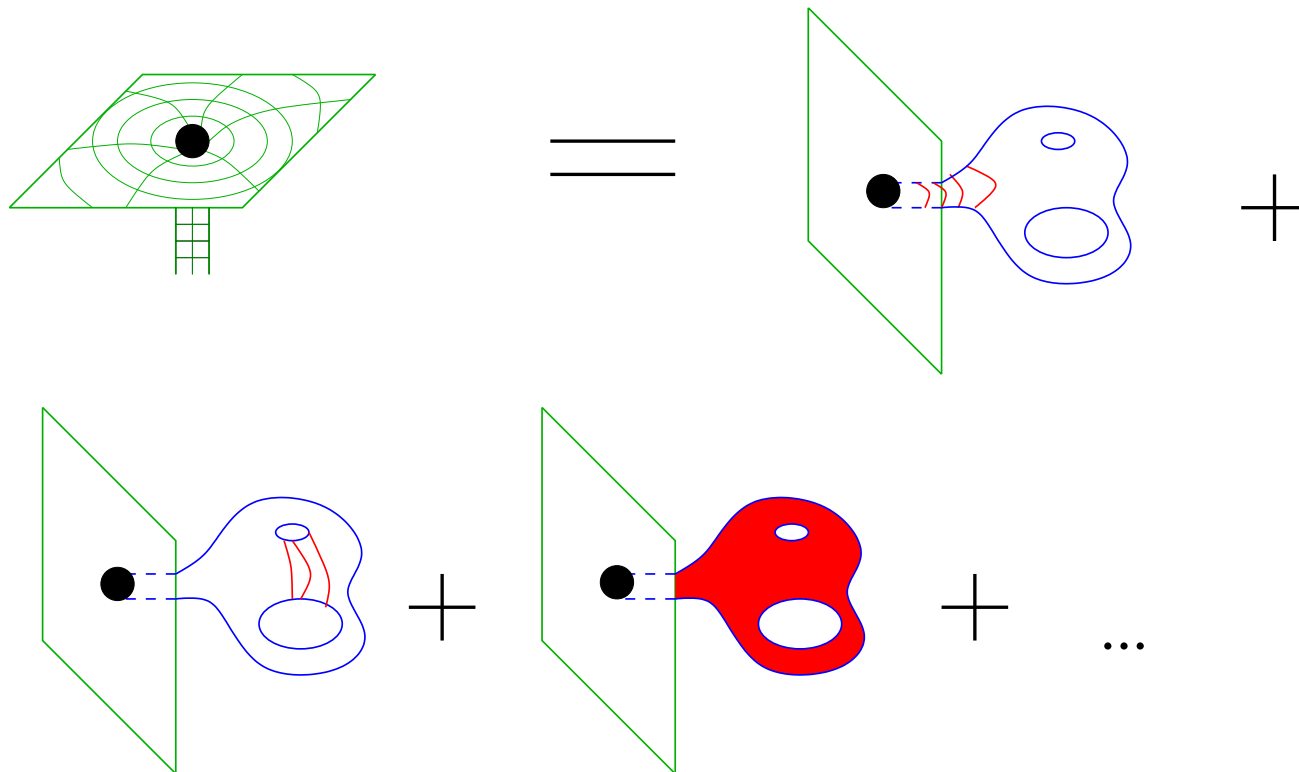
Agujero negro:

$$S = k_B A / 4\ell_{Pl} \longleftrightarrow S = -k_B \ln \Omega$$

con  $\Omega =$  número de micro-estados

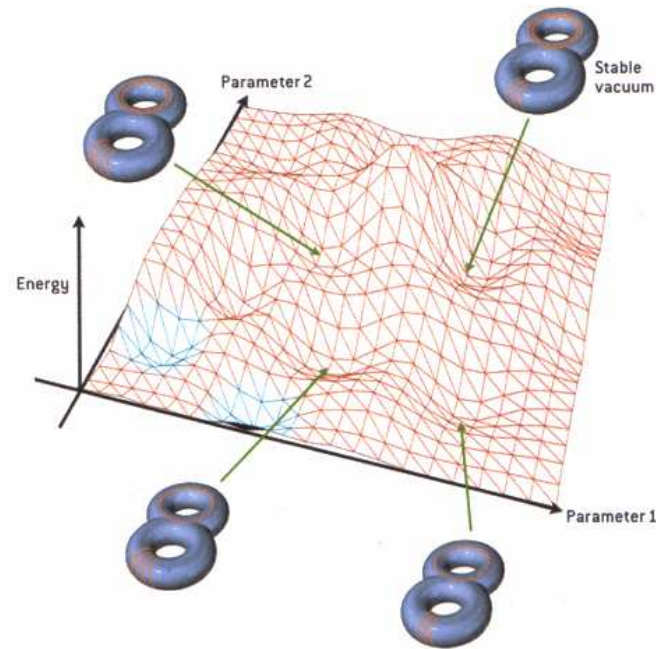
Agujeros negros extremales en D=5: micro-estados =  $p$ -branas enroscadas

[Strominger, Vafa, 1996]



# El landscape: ¿Cuál es el vacío de teoría de cuerdas?

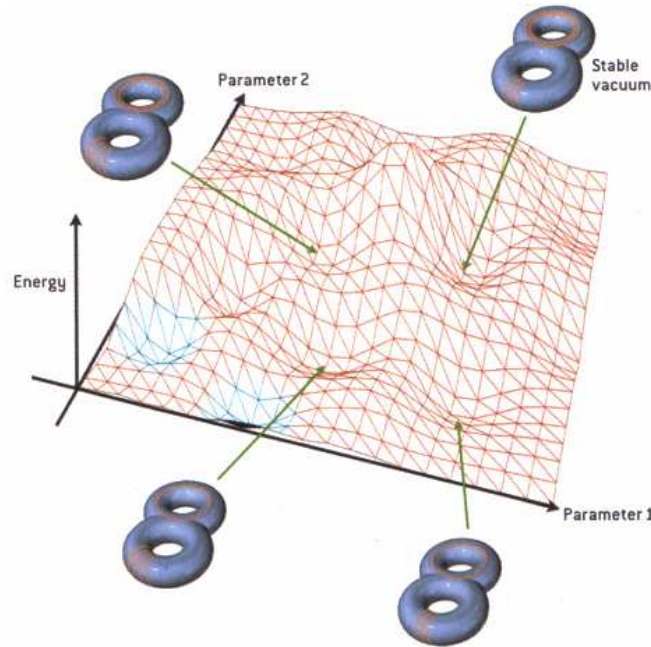
- Compactificaciones:  $Mink_4 \times T^6?$      $Mink_4 \times CY_3?$      $Mink_4 \times CY'_3?$
- Branas enrolladas:



"The Landscape" (Picture from *Scientific American*)

# El landscape: ¿Cuál es el vacío de teoría de cuerdas?

- Compactificaciones:  $Mink_4 \times T^6?$      $Mink_4 \times CY_3?$      $Mink_4 \times CY'_3?$
- Branas enrolladas:



"The Landscape" (Picture from *Scientific American*)

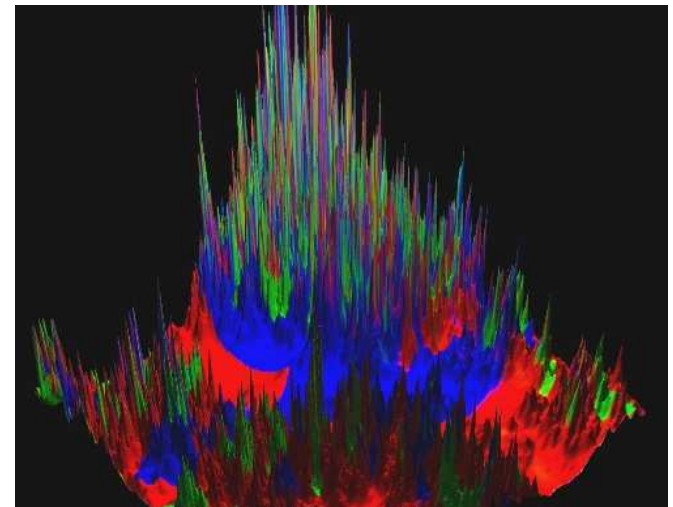
→  $\sim 10^{500}$  vacios: **Landscape!**

Problema enorme de predictibilidad [Douglas, 2003]

Mecanismo de selección de vacío

↔ Aproximación estadística

↔ Principio antrópico



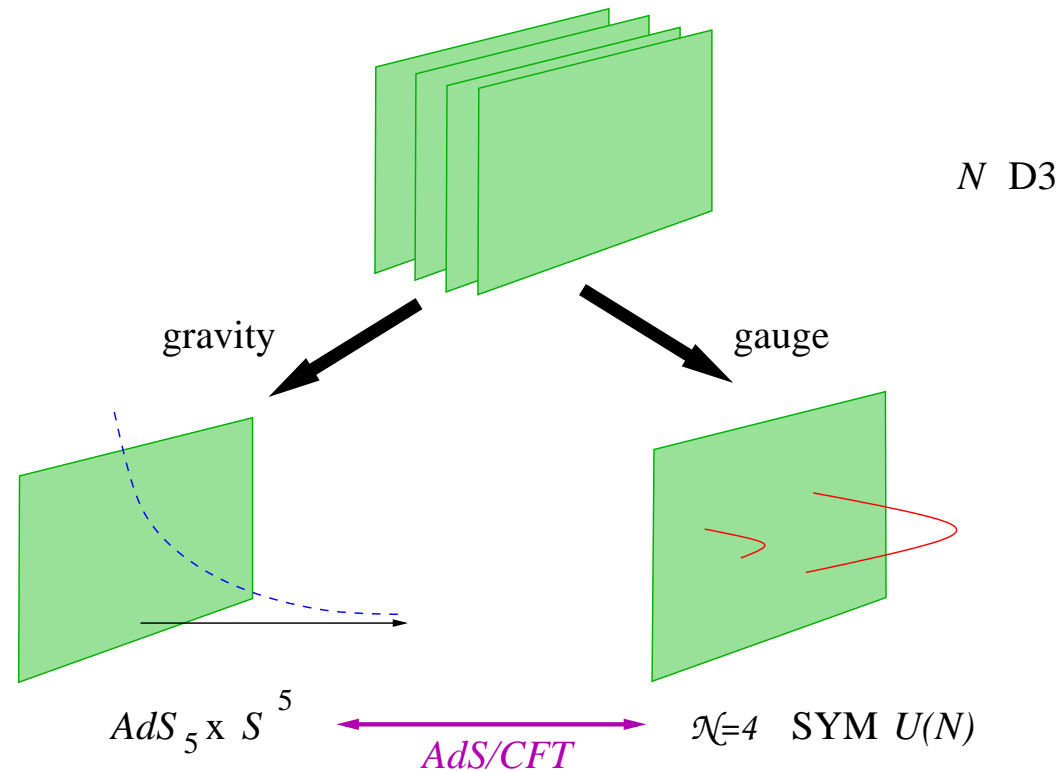
## 4. La conjetura AdS/CFT

# La Conjetura AdS/CFT

[Maldacena, 1997]

Ejemplo concreto de dualidad entre teoría gauge y gravedad (holografía)

Límite muy cerca de  $N$  D3-branas:



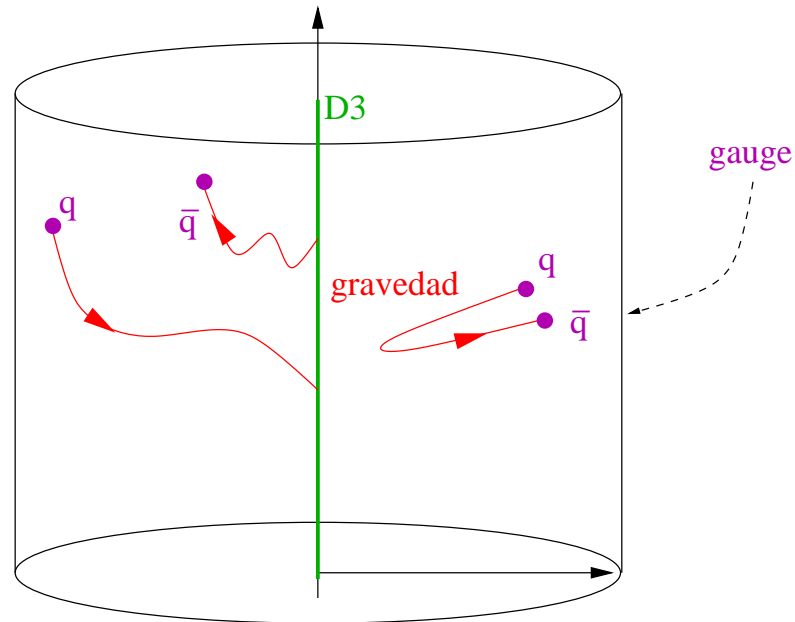
$AdS_5 \times S^5$ : limite cerca del horizonte de  $N$  D3-branes

$\mathcal{N} = 4$   $SU(N)$  Super Yang-Mills: Teoría gauge en la D3-brana

Type IIB Supergravedad (cuerdas) on  $AdS_5 \times S^5$

$\sim \mathcal{N} = 4$  Super Yang-Mills con grupo gauge  $SU(N)$

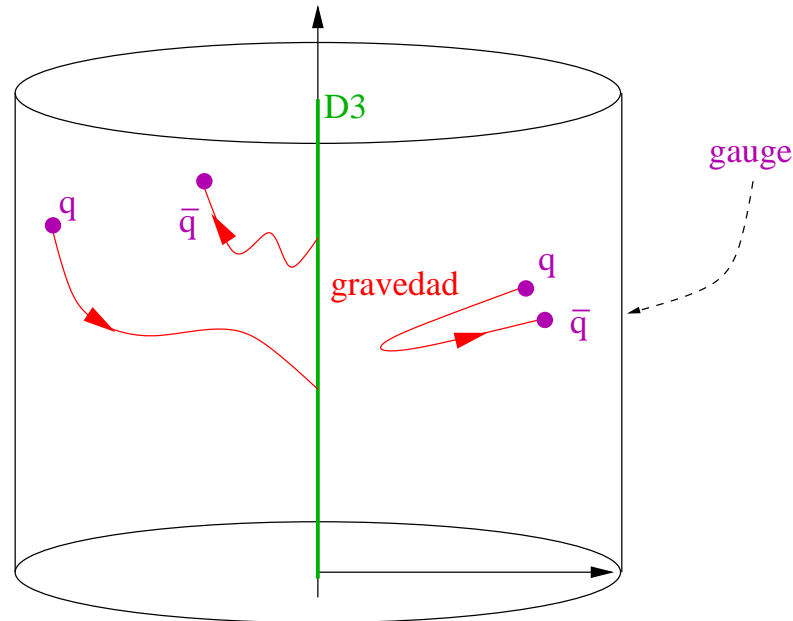
→ teoría gauge 4-dim capta holográficamente gravedad 10-dim



# Type IIB Supergravedad (cuerdas) on $AdS_5 \times S^5$

$\sim \mathcal{N} = 4$  Super Yang-Mills con grupo gauge  $SU(N)$

→ teoría gauge 4-dim capta holográficamente gravedad 10-dim



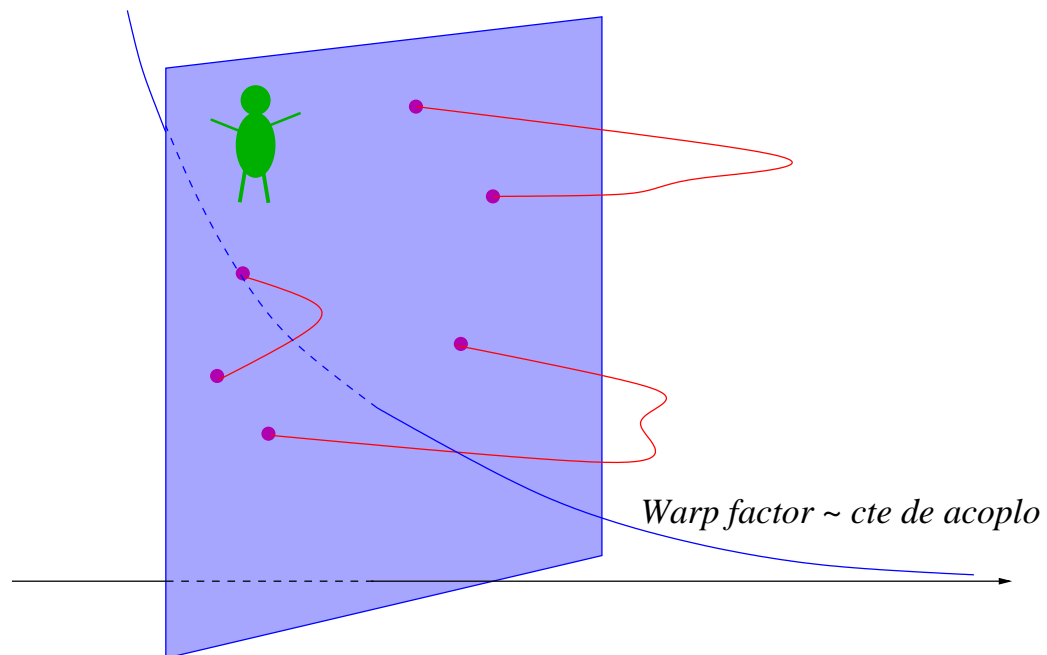
→ Diccionario entre teoría gauge 4-dim y gravedad 10-dim:

- $N$ : radio de  $AdS \sim$  rango del grupo gauge  $SU(N)$
- Constantes de acoplo:  $g_{YM}^2 N = (L/\ell_s)^4$
- Quark en SYM  $\sim$  cuerda colgando desde la frontera hasta el horizonte



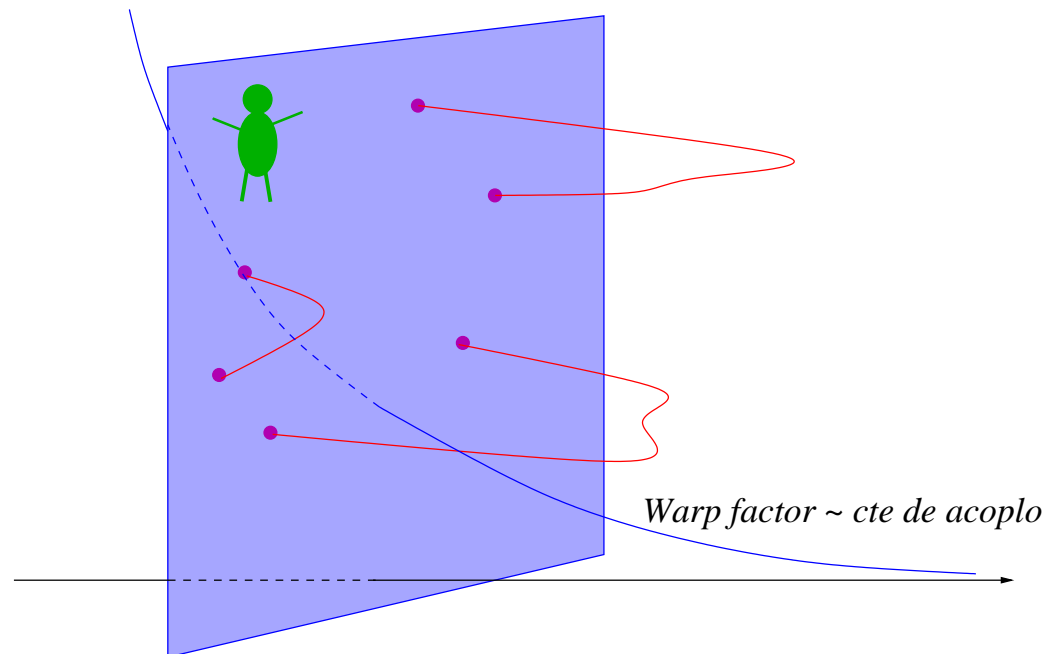
# Spin-off

- QCD holográfico: intentar resolver QCD a través de AdS/CFT



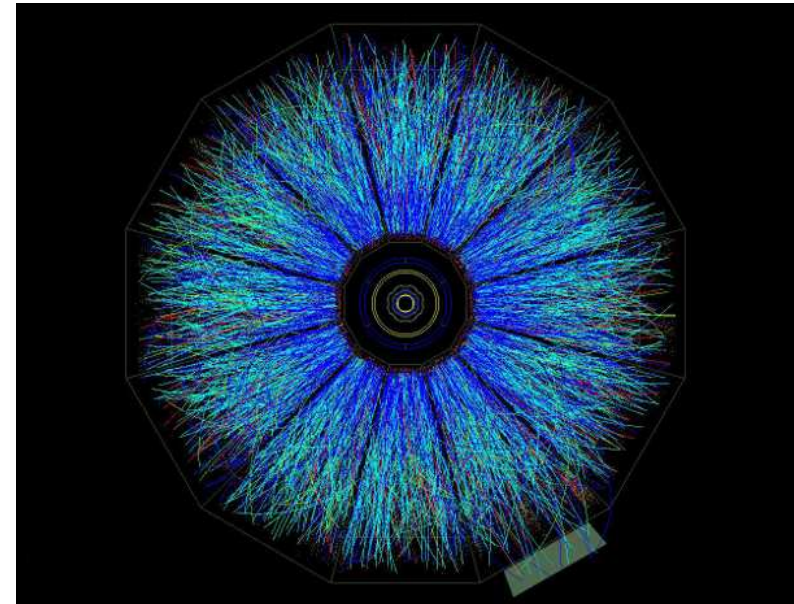
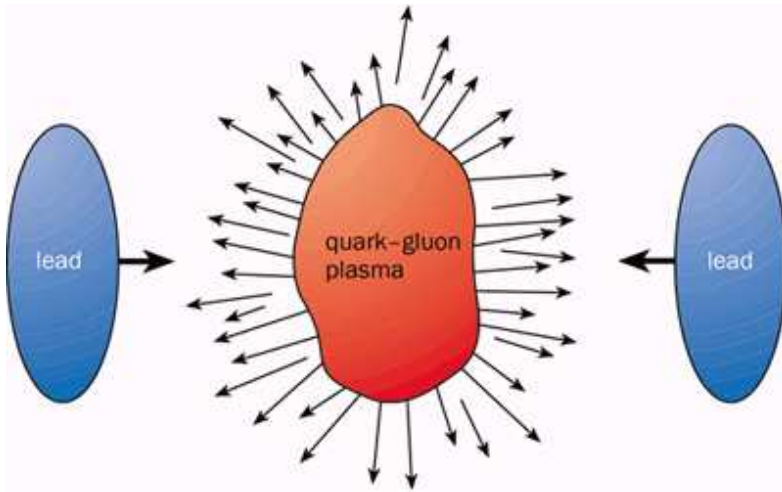
# Spin-off

- QCD holográfico: intentar resolver QCD a través de AdS/CFT

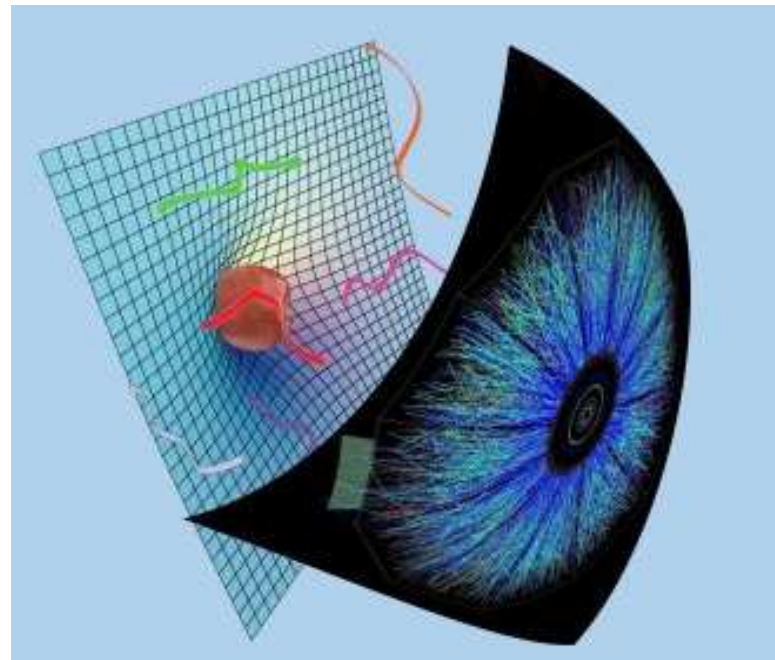
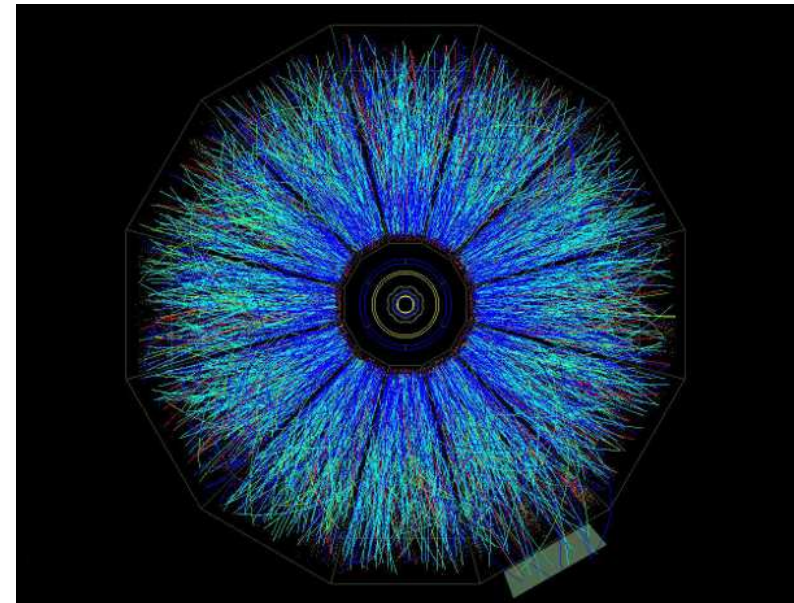
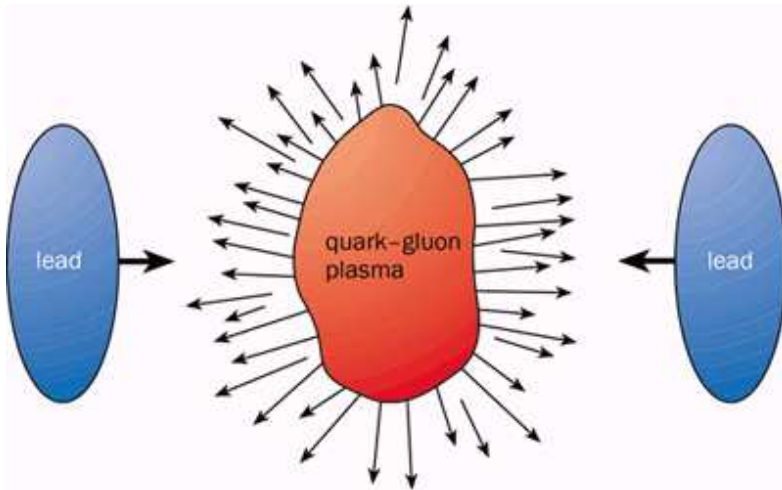


- Estado sólido y holografía: intentar describir fenómenos fuertemente acoplados (superconductividad, quantum Hall effect, ...)

- Física del plasma de quarks y gluones fuertemente acoplados: RHIC



- Física del plasma de quarks y gluones fuertemente acoplados: RHIC

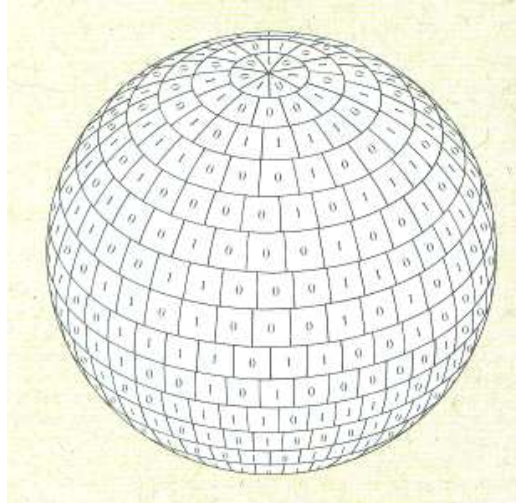


# Más ejemplos de holografía

- Agujero negro:

$$S = k_B A / 4\ell_{Pl} \longleftrightarrow S = -k_B \ln \Omega$$

[Bekenstein, 1973] [Hawking 1974]

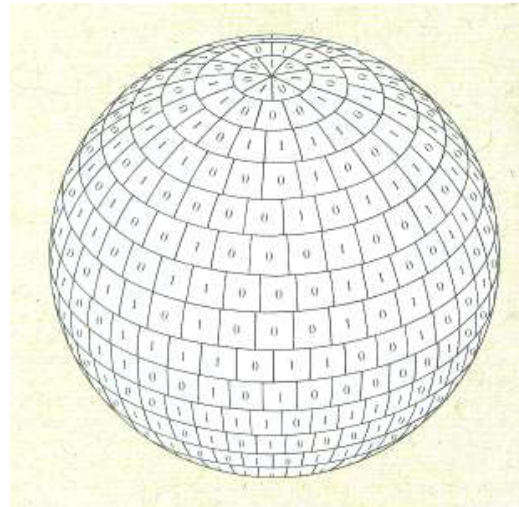


# Más ejemplos de holografía

- Agujero negro:

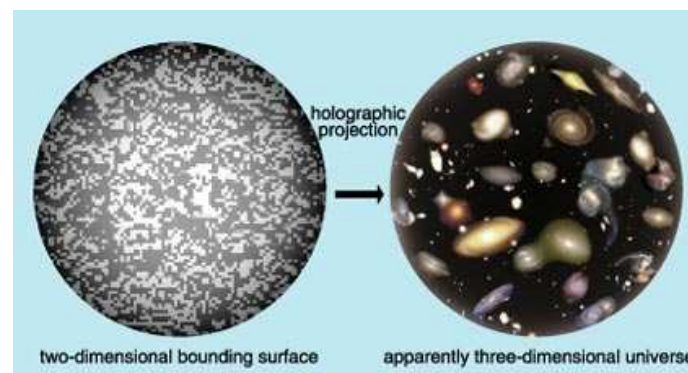
$$S = k_B A / 4\ell_{Pl} \longleftrightarrow S = -k_B \ln \Omega$$

[Bekenstein, 1973] [Hawking 1974]



- General: grados de libertad de un sistema gravitacional en un volumen  $V$  está codificados en una teoría gauge en la frontera  $\partial V$

[’t Hooft, 1993]



# 5. Conclusiones

...



# Logros

- Teoría renormalizable de gravedad cuántica

# Logros

- Teoría renormalizable de gravedad cuántica
- Cálculo de entropía de agujeros negros **extremos**

# Logros

- Teoría renormalizable de gravedad cuántica
- Cálculo de entropía de agujeros negros **extremos**
- AdS/CFT como ejemplo concreto de holografía:  
—→ Gauge/gravity duals: física de plasmas, estado sólido, ...

# Logros

- Teoría renormalizable de gravedad cuántica
- Cálculo de entropía de agujeros negros **extremos**
- AdS/CFT como ejemplo concreto de holografía:  
→ Gauge/gravity duals: física de plasmas, estado sólido, ...
- Matemáticas impresionantes

# Logros

- Teoría renormalizable de gravedad cuántica
- Cálculo de entropía de agujeros negros **extremos**
- AdS/CFT como ejemplo concreto de holografía:  
→ Gauge/gravity duals: física de plasmas, estado sólido, ...
- Matemáticas impresionantes
- ...?

# Logros

- Teoría renormalizable de gravedad cuántica
- Cálculo de entropía de agujeros negros **extremos**
- AdS/CFT como ejemplo concreto de holografía:  
—→ Gauge/gravity duals: física de plasmas, estado sólido, ...
- Matemáticas impresionantes
- ...?

—→ Teoría de cuerdas se ha convertido en un frame work  
(Cfr Teoría cuántica de campos)

# Problemas

- No sabemos mucho más sobre **gravedad cuántica**  
→ Sólo **descripción perturbativa** alrededor de (algunos) espacios fijos

# Problemas

- No sabemos mucho más sobre **gravedad cuántica**  
→ Sólo **descripción perturbativa** alrededor de (algunos) espacios fijos
- Sólo **primera cuantización**, nadie sabe String Field Theory



# Problemas

- No sabemos mucho más sobre **gravedad cuántica**  
—→ Sólo **descripción perturbativa** alrededor de (algunos) espacios fijos
- Sólo **primera cuantización**, nadie sabe String Field Theory
- **Zoo de cosas raras** existe de verdad?  
—→ **supersimetría, branas, dimensiones extras, holografía, ...**

# Problemas

- No sabemos mucho más sobre **gravedad cuántica**  
—→ Sólo **descripción perturbativa** alrededor de (algunos) espacios fijos
- Sólo **primera cuantización**, nadie sabe String Field Theory
- **Zoo de cosas raras** existe de verdad?  
—→ **supersimetría, branas, dimensiones extras, holografía, ...**
- **Predictibilidad:**
  - **experimental:**  $10^{16} \text{ TeV} \leftrightarrow 14 \text{ TeV}$
  - **landscape:**  $10^{500}$  vacíos: everything is possible!

# Problemas

- No sabemos mucho más sobre **gravedad cuántica**  
→ Sólo **descripción perturbativa** alrededor de (algunos) espacios fijos
- Sólo **primera cuantización**, nadie sabe String Field Theory
- **Zoo de cosas raras** existe de verdad?  
→ supersimetría, branas, dimensiones extras, holografía, ...
- **Predictibilidad:**
  - **experimental:**  $10^{16} \text{ TeV} \leftrightarrow 14 \text{ TeV}$
  - **landscape:**  $10^{500}$  vacíos: everything is possible!
- **Problema sociológico!**

Si queréis un buen resumen de teoría de cuerdas:



Gracias!