

Simetrías en Física

Materia optativa Licenciatura en Física

Segundo cuatrimestre 2015

Correlativas: Teórica I y II, Estructura IV

Clases Teóricas: Lunes y Jueves 15 a 17hs

Clases Prácticas: Lunes y Jueves 17 a 20

Supercuerdas y Teoría M: doctorado (5 puntos)

¿Por qué simetrías y cuerdas?

- ◆ Simetría es el criterio fundamental para construir teorías en física. Teoría de cuerdas ~ paradigma de aplicación de este criterio → Simetrías globales y locales, internas y externas, discretas y continuas, dualidades
- ◆ TC es ciencia especulativa. No hay evidencia experimental ni esperanzas de verificación empírica en futuro cercano
- ◆ TC está en construcción y varios aspectos no se entienden
- ◆ Abundan los problemas no resueltos



Entonces...



¿Por qué estudiar teoría de cuerdas?

PROGRAMA DEL CURSO

1. CUERDAS BOSONICAS LIBRES
2. TEORIAS DE CAMPOS CONFORMES EN 2 DIMENSIONES
3. ASPECTOS GLOBALES DE LA TEORIA PERTURBATIVA DE CUERDAS Y SUPERFICIES DE RIEMANN
4. AMPLITUDES DE SCATTERING Y ACCION EFECTIVA DE BAJAS ENERGIAS
5. COMPACTIFICACION
6. SUPERSIMETRIA → JORGE RUSSO (Noviembre)
7. SUPERSIMETRÍA EN LA HOJA DE MUNDO
8. SUPERSIMETRIA EN EL ESPACIO TIEMPO
9. D-BRANAS Y T-DUALIDAD
10. OTRAS DUALIDADES EN TEORIAS DE CUERDAS

BIBLIOGRAFIA

- ◆ ***String Theory***, Volumen I y II, J. Polchinski, Ed. Cambridge Univ. Press (1998)
- ◆ ***Superstring Theory***, Volumen I y II, M. Green, J. Schwarz y E. Witten, Ed. Cambridge Univ. Press (1987)
- ◆ ***Lectures on String theory***, D. Lust y S. Theisen, Springer-Verlag (1989)
- ◆ ***Modern Lectures on String theory***, R. Blumenhagen, D. Lust y S. Theisen, Cambridge Univ. Press (2014)
- ◆ ***A first course in String Theory***, B. Zwiebach, Cambridge Univ. Press (2004)
- ◆ ***Supersymmetric gauge field theory and string theory***, D. Bailin y A. Love, Ed. Institute of Physics Publishing (1994)
- ◆ ***Supersymmetry and Supergravity***, J. Wess y J. Bagger, Princeton Series in Physics (1983)
- ◆ ***Conformal Field Theory***, P. Di Francesco, P. Mathieu, D. Senechal, Ed. Springer (1997)
- ◆ ***Applied Conformal Field Theory***, P. Ginsparg, Les Houches (1988)
- ◆ ***String Theory and Particle Physics***, An introduction to string phenomenology, L. Ibañez, A. Uranga, Cambridge Univ. Press (2013)
- ◆ ***String Theory and the Scientific Method***, Richard Dawid, Cambridge Univ. Press (2015)

TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

- ◆ A fines de los '40 se mostró que la QFT es el marco adecuado para la unificación de la Mecánica Cuántica y el Electromagnetismo.
- ◆ A principios de los '70 se pudieron describir las interacciones débiles y fuertes con la QFT.
- ◆ La teoría completa, el modelo $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ o **Modelo Estándar** (ME), fue confirmada repetidamente en los años sucesivos.

Física de altas energías contemporánea

- ◆ Se basa en dos desarrollos fundamentales:
 1. **Experimentalmente**: deep inelastic scattering
 2. **Teóricamente**: simetrías internas

Deep inelastic scattering

- ◆ Conceptualmente se basa en:

1. **Relatividad Especial** (RE): equivalencia m y $E \Rightarrow$ partículas pueden transformarse en radiación y viceversa, según principio de conservación E
2. **Mecánica cuántica** (MC): partículas pueden decaer en otras conservando E y números cuánticos. Probabilidad del proceso depende de ctes. acoplamiento (miden la intensidad de la interacción)

Restricciones

- ◆ $\Delta E=0 \Rightarrow$ masa de partículas producidas limitada por la E total de colisión
- ◆ MC: $E \propto 1/\lambda \Rightarrow$ Colisión con cierta E corresponde a testear cierta escala de distancias
- ◆ Testear escalas de **E más grandes** corresponde a explorar escalas de **distancia más chicas**

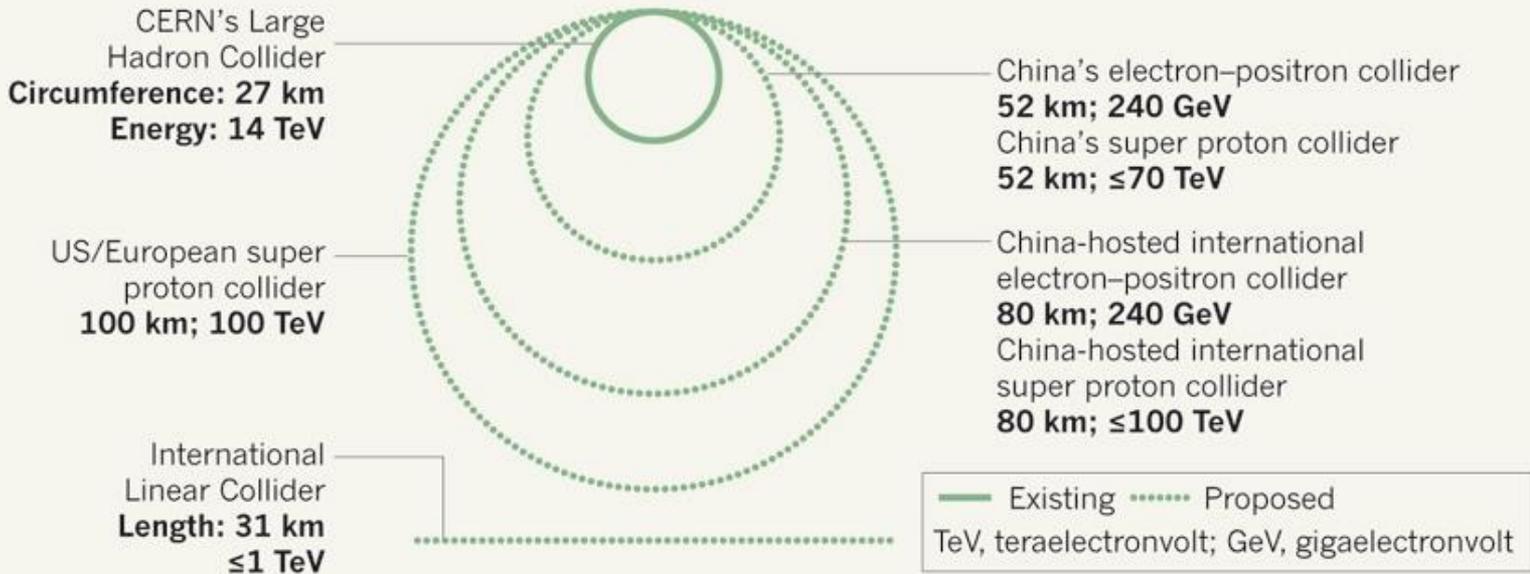
Física experimental

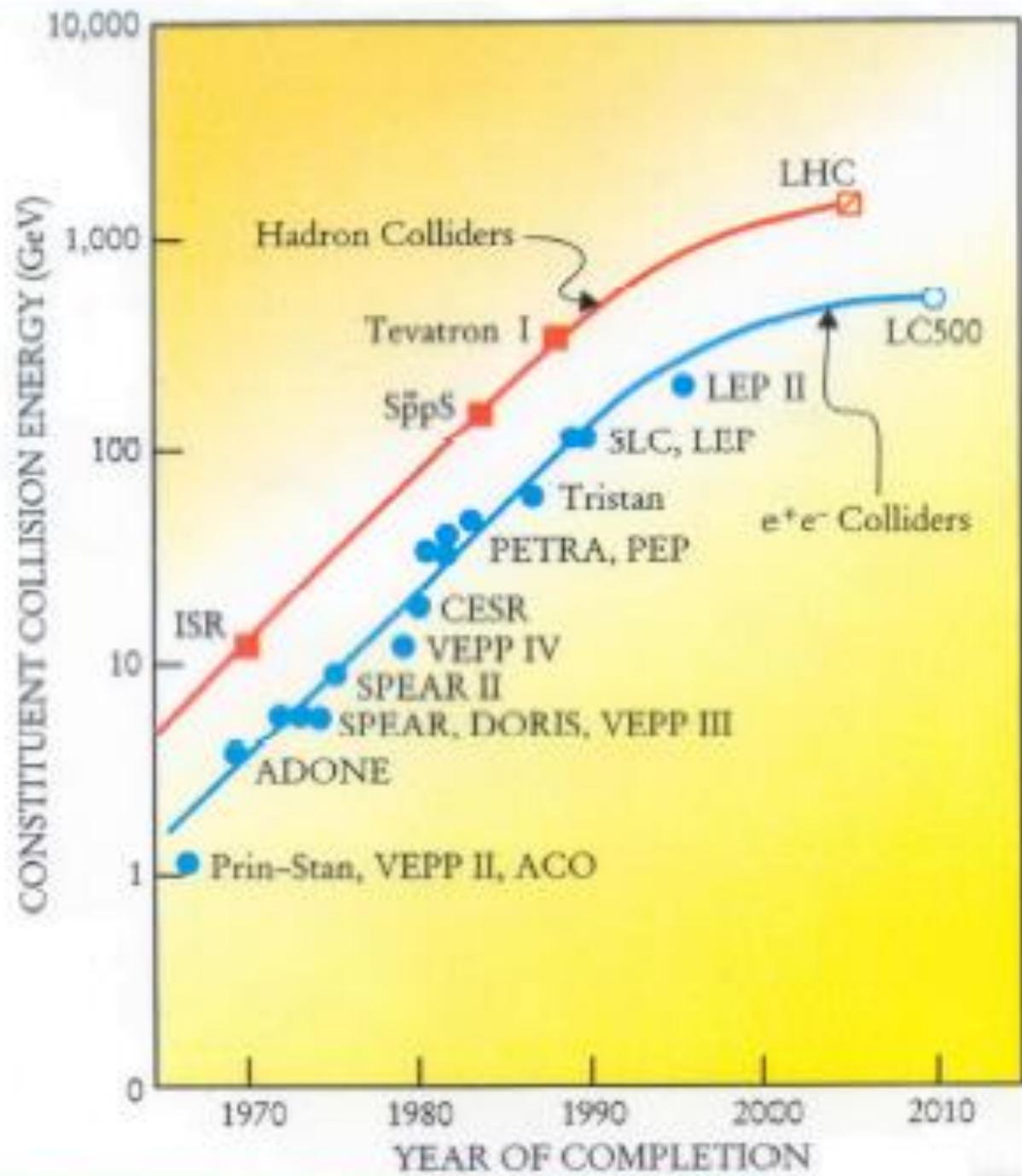
- ◆ Construir aceleradores con $> E$ de colisión para buscar partículas con $> m_0$
- ◆ Tubo acelerador:
 - 24cm en 1931
 - 5 m en 1942
 - 72 m en 1953
 - 600 m en 1959
 - 3 km en 1966 (SLAC)
 - 27 km de circunferencia en 1989 (LEP)
- ◆ Construir **LHC** llevó 16 años y 8000 físicos (trabajando en experimento y análisis datos). Empezó a correr en 2008
- ◆ Próximo en EEUU y EU planeado para 2035
- ◆ China (52km) \rightarrow 2028 (U\$3000 millones)

Posibles aceleradores futuros

COLLISION COURSE

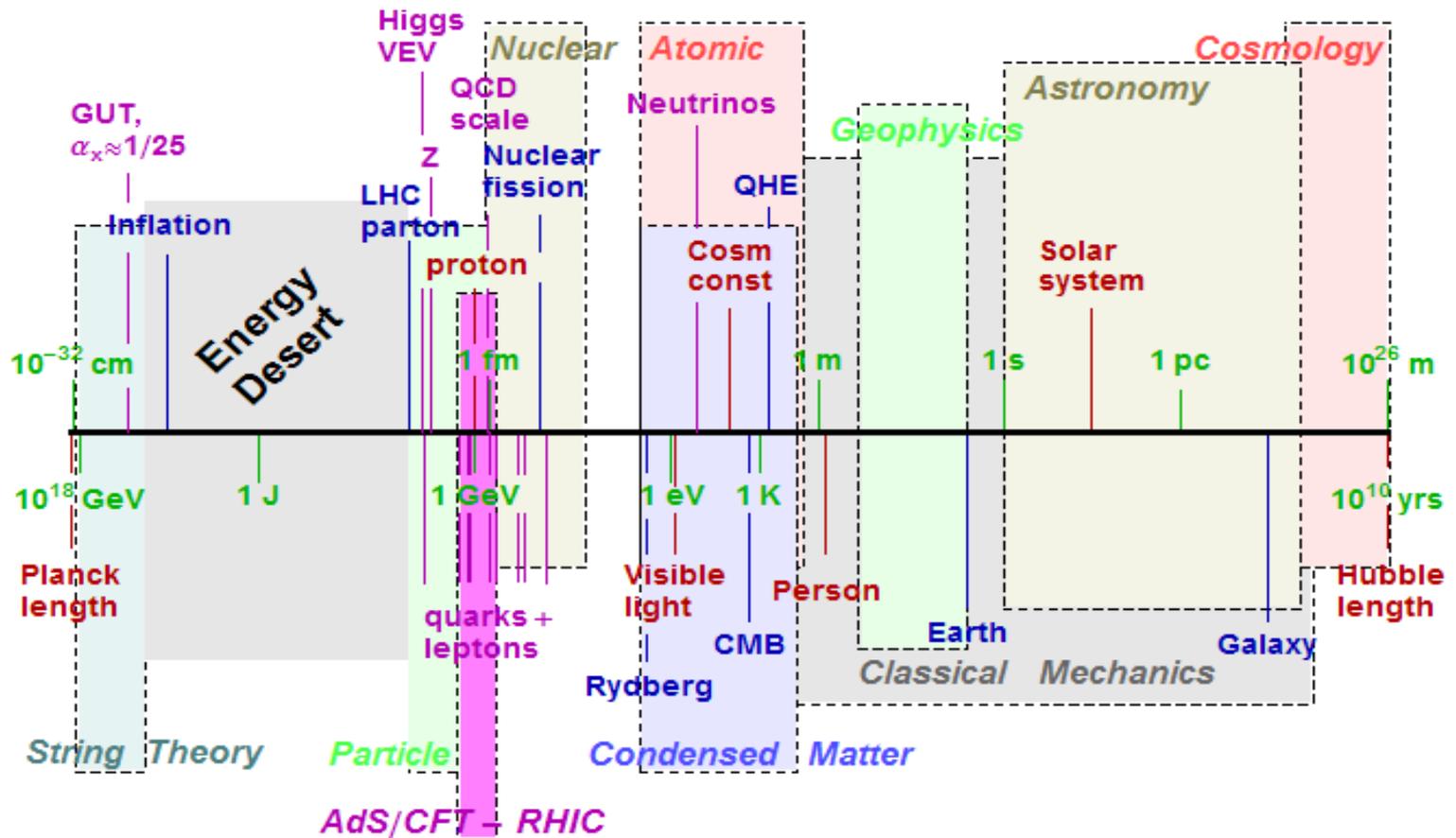
Particle physicists around the world are designing colliders that are much larger in size than the Large Hadron Collider at CERN, Europe's particle-physics laboratory.





Escalas de energía

$m_{\text{Higgs}} \sim 125 \text{ GeV}$



Simetrías de gauge

- ◆ Conceptualmente, HEP se basa en ME (desarrollado a fines de los '60 – ppios '70)
- ◆ Problemas en intentos desarrollo teoría de interacciones débiles y fuertes en los '60: Renormalizabilidad QFT: técnicas Feynman, 1950 y Schwinger, 1951
 - ☺ interacción electromagnética
 - ☹ Interacciones débiles y fuertes
- **Teoría de campos de gauge** fue el concepto crucial del ME

Teoría de campos de gauge

- ◆ Relaciona una simetría interna (transformaciones no ocurren en espacio-tiempo / externas) con la existencia de partículas de spin 1: **bosones de gauge**
- ◆ **Teoría de gauge abeliana:** es el tipo más simple, con solo un bosón de gauge
- ◆ **Teoría de gauge no-abeliana:** grupos de simetría de gauge más grandes y más bosones de gauge
- ◆ Ya en los '50 se sospechaba que la renormalizabilidad de la QED se podría explicar por ser teoría gauge abeliana: fotón

Interacciones débiles y fuertes

- ◆ Yang y Mills (1954) sugirieron que la interacción fuerte podría basarse en intercambio de bosones vectoriales → generalización de QED
- ◆ Glashow (1961), Salam y Ward (1964) unificaron interacciones **débiles y electromagnéticas** usando idea de YM
- ◆ Han y Nambu (1965) usaron esa idea para describir las interacciones **fuertes**

Problemas y soluciones

- ◆ Simetría de gauge \Rightarrow
 - 1) bosones vectoriales deben ser no-masivos
 - 2) los fermiones conectados por simetría de gauge deben tener =masa.
- ◆ Condiciones incompatibles con datos empíricos de las interacciones débiles
- ◆ Solución: **Ruptura espontánea de simetría**
(Goldstone, 1961; Nambu y Jona-Lasinio, 1964)
- ◆ Conjeturaron nueva partícula escalar: bosón de Higgs. Su efecto es que el estado fundamental de la teoría rompe la simetría de gauge aunque el Lagrangiano sigue teniéndola.

ME e interacciones débiles

- ◆ m_{Higgs} determina escala E de la ruptura espontánea de la simetría electrodébil → **escala electrodébil**
- ◆ Weinberg (1967) integró todo esto en el **ME**
- ◆ 't Hooft (1971) y 't Hooft y Veltman (1972) probaron **renormalizabilidad** de la teoría de gauge no abeliana
- ◆ ME se estableció como candidato más promisorio para describir las interacciones electrodébiles

Hadrones?

- ◆ Otros problemas en los '60: características sorprendentes de nucleones y otros fermiones pesados: hadrones
- ◆ Se encontraba número creciente de hadrones de distintos tipos (que se suponían elementales) en los aceleradores.
- ◆ Gell-Mann (1964) : cargas y masas de hadrones podían interpretarse como estados ligados de 2 o 3 constituyentes
→ **quarks**
- ◆ Feynmann (1969): propiedad curiosa del scattering de nucleones a energías medias (Bjorken) se podría entender si sus constituyentes se comportaban como partículas libres a esas energías

Quarks?

- ◆ ¿Por qué no se observaban aislados?
- ◆ Si la fuerza que los unía era tan grande, ¿por qué se comportaban como si fueran libres cuando estaban cerca?
- ◆ Politzer (1973) y Gross y Wilczek (1973) mostraron que en **teoría de gauge no-abeliana**, los acoplamientos son débiles a distancias cortas: **libertad asintótica** y exponencialmente fuertes cuando se alejan: **confinamiento**
- ◆ La teoría de gauge se transformó en candidato convincente para describir también las **interacciones fuertes**

Modelo Estándar

- ◆ Simetría de gauge en ME resolvió varios problemas de HEP:
 - Renormalizabilidad de interacciones débiles y fuertes
 - Libertad asintótica de los quarks bajo interacciones fuertes
 - Permitted distintas masas de partículas de materia
 - Estados ligados de quarks explicaron gran número de fermiones encontrados en los '50 y '60
- ◆ Además las teorías de gauge permitieron un nuevo nivel de predicciones empíricas: antes no se podía predecir qué tipo de objetos elementales existían, había que determinarlo experimentalmente.

Consistencia y predicciones del ME

- ◆ En los '50 y '60 se descubrieron muchas partículas en los aceleradores. Pero ninguna de ellas podía ser derivada a partir de principios físicos.
- ◆ La teoría de gauge permitió derivar el espectro de partículas a partir de la estructura de la **simetría de gauge**
- ◆ **La estructura teórica era necesaria por motivos de consistencia.** La predicción de partículas es un ejemplo de la potencia de los argumentos de consistencia en HEP.

Predicciones del ME

- ◆ Más partículas hadrónicas que se entendieron en términos de estados ligados de quarks
- ◆ Nuevas partículas elementales y relaciones entre acoplamientos, basados en requerimientos de la estructura de gauge:
 1. Bosones de gauge de interacciones débiles: W y Z
 2. Bosones de gauge de interacciones fuertes: gluones
 3. Nuevos tipos de quarks y leptones por motivos de simetría y para explicar la violación de CP observada (Kobayashi -Maskawa, 1973)
 4. Bosón de Higgs, responsable de ruptura espontánea de simetría
- ◆ Todas estas partículas podían observarse en aceleradores pero ninguna había sido descubierta antes de 1974

Detección de partículas predichas por ME

1. Quarks charm y tauon en 1974
 2. Quark bottom en 1977
 3. Gluones en 1979
 4. Bosón W en 1983
 5. Bosón Z en 1984
 6. Quark top en 1994
 7. Bosón de Higgs en 2012 (LHC)
- ◆ Entre los '70 y '80 hubo gran dinámica a nivel **experimental** (se construyeron aceleradores más potentes) y **teórico**. Juntos empujaron el desarrollo

Confirmación experimental

- ◆ Junto con la **Relatividad General**, el **ME** es consistente con todos los experimentos realizados en los aceleradores de partículas, hasta una escala de $\sim 1 \text{ TeV}$ ($10^3 \text{ GeV} = 10^{12} \text{ eV}$)
- ◆ También pasa varios tests indirectos que prueban distancias menores: tests de precisión de QED, búsquedas de decaimiento de mesones raros, límites en masas de neutrinos, búsquedas de decaimiento del protón.
- ◆ En todos ellos podría haber aparecido nueva física...

Nuevos conceptos

- ◆ La falta de evidencia empírica más allá del ME no detuvo la construcción de teoría en HEP.
- ◆ Desde los '70 una serie de nuevos conceptos modificó nuestra comprensión de la microfísica teórica
- ◆ Los nuevos conceptos se desarrollaron por razones teóricas y para dar una explicación más convincente de los datos
- ◆ Ninguno de ellos se basa en incompatibilidades de los datos empíricos con las predicciones del ME

Modelo Estándar + Relatividad General

- ◆ Estructura relativamente simple.
- ◆ Hay cuatro interacciones basadas en principios de invariancia local :

GRAVITACION:

mediada por gravitón de espín 2

ELECTRODEBILES y FUERTES:

mediadas por los bosones de gauge

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ de espín 1

Componentes del ME

- ◆ **12 mensajeros** de fuerza: 8 gluones, W^+ , W^- , Z_0 , fotón
- ◆ Leptones (ν_e , e^-) (ν_μ , μ^-) (ν_τ , τ^-) + sus antipartículas = **12 leptones**
- ◆ Quarks (u,d) (c,s) (t,b) c/u con 3 colores = **18 partículas**
Incluyendo antipartículas = **36 quarks**
- ◆ Leptones + quarks = **48 partículas de materia**
- ◆ Bosón de Higgs de espín 0

- ◆ Dinámica gobernada por \mathcal{L} que depende de unos 20 parámetros libres (acoplamientos de gauge y de Yukawa)

Esta teoría no es completa

- ◆ A pesar de gran cantidad de partículas que describe, el ME es razonablemente elegante y muy poderoso. Pero a pesar de sus impresionantes éxitos, la teoría es
- ◆ **Demasiado arbitraria:**
 - ¿Por qué existe este patrón particular de campos de gauge y multipletes?
 - ¿Qué es lo que determina los parámetros en L?
- ◆ **Gravedad + Cuántica** \Longrightarrow **QFT no renormalizable** (indicio de nueva física a energías $\sim M_p = 1.2 \times 10^{19}$ GeV).
- ◆ Incluso a nivel clásico, la teoría no funciona en las **singularidades de la RG.**
- ◆ **Poco natural**

Problema de la naturalidad

- ◆ Los sistemas físicos a menudo contienen parámetros chicos, que se consideran naturales si el sistema desarrolla una nueva simetría cuando el parámetro es cero.
- ◆ E.g., simetría quiral explica las pequeñas masas de fermiones ($m \sim 0,5 \text{ MeV}$) comparadas con cualquier escala de HE, como M_{GUT} o M_{Planck} (10^{19} GeV)
- ◆ El ME contiene varios parámetros restringidos experimentalmente a ser muy chicos, y para los cuales no existe simetría conocida dentro del ME, \Rightarrow deben ser **tuneados no-naturalmente**.

Problema de las jerarquías

- ◆ $M_p = 2.17 \cdot 10^{-5} \text{ g} \sim 10^{19} m_{\text{protón}}$
- ◆ Si la teoría fundamental de la naturaleza se basa en las constantes fundamentales G_N , c y \hbar , ¿por qué las masas de las partículas elementales son tanto menores que la masa obvia que se puede construir con ellas?

Problema de la constante cosmológica

- ◆ En QFT, energía de vacío no es física y se puede fijar a voluntad
- ◆ Pero al acoplarse a gravedad, el tensor $T_{\mu\nu}$ gravita y también $\langle T_{\mu\nu} \rangle = -V_0 g_{\mu\nu}$. Esto introduce una cte cosmológica $\Lambda = V_0$ en las ecuaciones de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R = 8\pi G_N \langle T_{\mu\nu} \rangle = -8\pi G_N V_0 g_{\mu\nu}$$

- ◆ En el ME hay muchas contribuciones físicas a la energía de vacío e.g. el potencial escalar de Higgs tiene $V_0 \neq 0$, condensados de QCD, etc. También hay correcciones de loop a V_0 que divergen y predicen $\Lambda \cong (M_{\text{cutoff}})^4$

Problema de la constante cosmológica

- ◆ La escala de cut-off podría ser del $O(M_{\text{Planck}}) \Rightarrow$

$$\Lambda \cong (M_{\text{Planck}})^4 \cong 10^{112} (\text{eV})^4$$

- ◆ Las mediciones cosmológicas de corrimientos al rojo de supernovas y el satélite WMAP indican densidad de energía oscura que corresponde una densidad de E de vacío de

$$\Lambda \cong (10^{-3} \text{ eV})^4$$

alrededor de 124 órdenes de magnitud menor! que lo esperado para $M_{\text{cutoff}} = M_{\text{planck}}$

- ◆ Y 60 órdenes de magnitud si M_{cutoff} baja hasta la escala EW.

Problema de la constante cosmológica

- ◆ Se podría introducir una constante cosmológica desnuda Λ_0 y ajustar la Λ total para reproducir el valor observado.
- ◆ Pero esto oculta un enorme fine-tuning de grandes y diferentes contribuciones a muy distintas escalas, que constituye el **problema de la constante cosmológica**.
- ◆ Una cuestión relacionada es el **problema de coincidencia**, i.e. explicar densidades similares de energía oscura y de materia en la actualidad

Problema de la coincidencia

- ◆ Esta coincidencia es particularmente sorprendente pues la densidad de energía de vacío no se diluye en el tiempo, pero la densidad de materia si. Entonces la energía oscura se hizo dinámicamente importante solo recientemente.
- ◆ La búsqueda de mecanismos para explicar o evitar este fine-tuning es uno de los desafíos más difíciles en física teórica.
- ◆ Una posible explicación, que atrajo mucha atención recientemente, es la propuesta de S.Weinberg en 1987 de usar consideraciones antrópicas para explicar la pequeñez de la constante cosmológica.

Divergencias

- ◆ El problema de las divergencias a cortas distancias ha sido un tema importante recurrente en QFT.
- ◆ Resolver el tema de las divergencias fue decisivo en el camino que llevó de la teoría de Fermi de las interacciones débiles a la teoría de Weinberg-Salam.
- ◆ Divergencias en gravedad cuántica...

Gravedad cuántica

- ◆ Contiene muchos enigmas, técnicos y conceptuales:
 - ¿Cómo es el ET a escalas de distancia muy chicas?
 - ¿Cómo se puede entender la física si la estructura causal fluctúa cuánticamente?
 - El big bang, ¿es verdaderamente el comienzo del tiempo?
 - Las singularidades que aparecen en los agujeros negros, ¿realmente significan el fin del tiempo?
 - ¿Cuál es el origen microscópico de la entropía de los agujeros negros y qué nos dice?
 - ¿Cómo se resuelve la paradoja de la información?

La acción de Einstein-Hilbert

- ◆
$$S = \frac{1}{16\pi G_N} \int d^4x \sqrt{-g} R$$

$$8\pi G_N = \frac{\hbar c}{M_{Pl}^2}$$

$$M_P = G_N^{-1/2} = 1.22 \times 10^{19} \text{ GeV}$$

Define la escala de energía

A veces se usa la masa de Planck reducida sin el factor 8π

Sistema planckiano de unidades

- ◆ Como hay tres unidades básicas: **longitud, tiempo y masa**, podemos encontrar nuevas unidades / las tres constantes fundamentales G_N , c y \hbar sean 1 en esas unidades.

- ◆ $G_N = 1 \frac{L_P^3}{M_P T_P^2};$ $c = 1 \frac{L_P}{T_P};$ $\hbar = 1 \frac{M_P L_P^2}{T_P};$

$$T_P = G_N^\alpha c^\beta \hbar^\gamma$$

Unidades naturales o de Planck : $c = \hbar = 1$

Tabla 2: Unidades de Planck básicas

Nombre	Dimensión	Expresión	Equivalencia aproximada en el <u>Sistema Internacional</u>
<u>Longitud de Planck</u>	<u>Longitud</u> (L)	$l_P = c t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	$1.616\ 252(81) \times 10^{-35} \text{ m}$
<u>Masa de Planck</u>	<u>Masa</u> (M)	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	$2.176\ 44(11) \times 10^{-8} \text{ kg}$
<u>Tiempo de Planck</u>	<u>Tiempo</u> (T)	$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	$5.391\ 24(27) \times 10^{-44} \text{ s}$
Las unidades se hacen dependientes:	$[C] = L/T$ $C=1 \Rightarrow L=T$	$[h] = ML^2/T$ $[h] = ML \Rightarrow$ $L=1/M$	
Se pueden escribir	todas las unidades en	términos de	masa o de longitud

Acoplamiento en QG es $1/M_{Pl}$

- ◆ Considerar pequeñas perturbaciones alrededor del espacio plano de Minkowski

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \frac{1}{M_{Pl}} h_{\mu\nu}$$

El factor $1/M_{Pl}$ asegura que al expandir la acción el término cinético para h está normalizado (no tiene factores de M_{Pl}) \Rightarrow

$$S = \int d^4x \left[(\partial h)^2 + \frac{1}{M_{Pl}} h(\partial h)^2 + \frac{1}{M_{Pl}^2} (h)^2(\partial h)^2 + \dots \right]$$

Interacciones están suprimidas por potencias de M_{Pl} \rightarrow
Correcciones cuánticas son relevantes a $E \approx M_{Pl}$

Expansión en E/M_{Pl}

- ⇒ La gravedad es débil a bajas E , pero interacciones gravitatorias se hacen fuertes a $E \sim M_{Pl}$
- ⇒ En lenguaje del grupo renormalización, estos acoplamientos se llaman **irrelevantes**
- La escala de Planck es muy grande comparada con la medida en LHC: $M_{EW} \sim 10^3 \text{ GeV}$
 $M_{EW}/M_P \sim 10^{-15}$

QG no afecta nuestra vida diaria

¿Qué significa renormalizable?

- ◆ Es una cuestión técnica para discutir en QFT, pero podemos ganar intuición del electromagnetismo clásico

- ◆ La energía total del electrón es

$$E_T \sim m_0 + \int d^3x |\vec{E}|^2 \sim m_0 + 4\pi \int r^2 dr \frac{e^2}{r^4}$$

- ◆ La integral diverge en $r=0$. Se puede poner un cutoff Λ y tomar el límite $\Lambda \rightarrow 0$: $E_T \sim m_0 + C \frac{e^2}{\Lambda}$
- ◆ La masa física es la suma de m_0 (masa desnuda) y la energía

Renormalización en gravedad cuántica

- ◆ El proceso de absorber divergencias en masas o acoplamientos (cargas, etc) se llama renormalización
- ◆ El problema en QG es que se necesita un número infinito de parámetros para renormalizar la teoría
- ◆ Para cada parámetro a renormalizar se necesita una medición

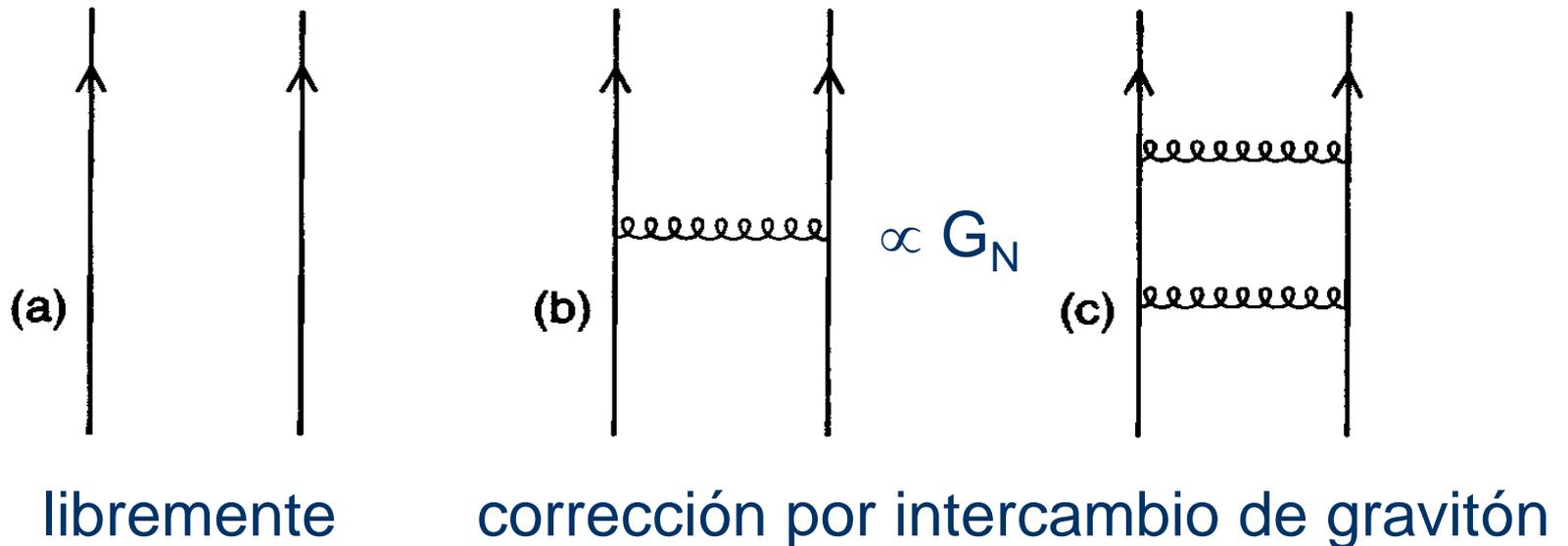
La gravedad no es renormalizable

- ◆ No-renormalizable significa que las divergencias que aparecen en la expansión en diagramas de Feynman no se pueden absorber con un número finito de contratérminos.
- ◆ La matriz S a un loop en la gravedad de Einstein es finita.
- ◆ La primera divergencia aparece a dos loops y requiere un contratérmino de la forma

$$\frac{1}{D-4} \int d^4x \sqrt{g} R_{\mu\nu\rho\sigma} R^{\mu\nu\kappa\lambda} R_{\kappa\lambda}{}^{\rho\sigma}$$

Acoplamiento de gravedad a materia

Análisis dimensional



$$\frac{(b)}{(a)} \propto \frac{G_N E^2}{hc^5} \sim \left(\frac{E}{M_P} \right)^2$$

Consecuencias de $\left(\frac{E}{M_P}\right)^2$

- ◆ En la corrección de dos gravitones (c) hay una suma sobre estados intermedios. Para estados intermedios de energía E' , análisis dimensional \Rightarrow diverge para energías muy grandes

$$G_N^2 \int dE' E'^3 = \frac{1}{M_P^4} \int dE' E'^3$$

- ◆ Las teorías no renormalizables son comunes en física y son útiles como teorías efectivas \rightarrow válidas hasta cierta escala

No renormalizabilidad

- ◆ En espacio posición esta divergencia viene del límite en que todos los vértices de gravitón coinciden.
- ◆ La divergencia empeora con cada gravitón adicional.
- ◆ La teoría es **no renormalizable**.

Faltan grados de libertad

- ◆ Las teorías no-renormalizables no pueden describir la física en la escala del cut-off o más allá.
- ◆ Les faltan los dof ultravioleta que determinan el comportamiento a altas E .
- ◆ En el caso de la fuerza débil, los nuevos dof son los bosones W y Z
- ◆ No sabemos cuáles son los dof necesarios para completar la gravedad.

Singularidades

- ◆ En relatividad general se habla de geometría y no de perturbaciones alrededor del espacio plano
- ◆ La RG clásica no es confiable cuando la curvatura del ET se aproxima a la escala de Planck y se hace singular
- ◆ Una teoría cuántica de gravedad debería resolver estas singularidades.
- ◆ Hay dos situaciones en RG: el big bang y en el centro de un agujero negro

Singularidades y divergencias

- ◆ La cuestión de las singularidades \sim equivalente al scattering de altas E. Prueban la naturaleza ultravioleta de la gravedad
- ◆ La geometría ET es una colección coherente de gravitones, así como los campos magnético y eléctrico en un laser son una colección de fotones
- ◆ La estructura del espacio-tiempo a distancias cortas está gobernada por gravitones de gran momento.
- ◆ Entender las singularidades del ET y el scattering de altas E son dos caras de la misma moneda.

¿Qué se busca?

- ◆ Son estos problemas, más que alguna evidencia experimental positiva, los que guían los intentos de encontrar una teoría más satisfactoria.
- ◆ Se busca un **principio** que
 - a) unifique los campos del ME en una estructura más simple y
 - b) resuelva los problemas de divergencias y falta de naturalidad.

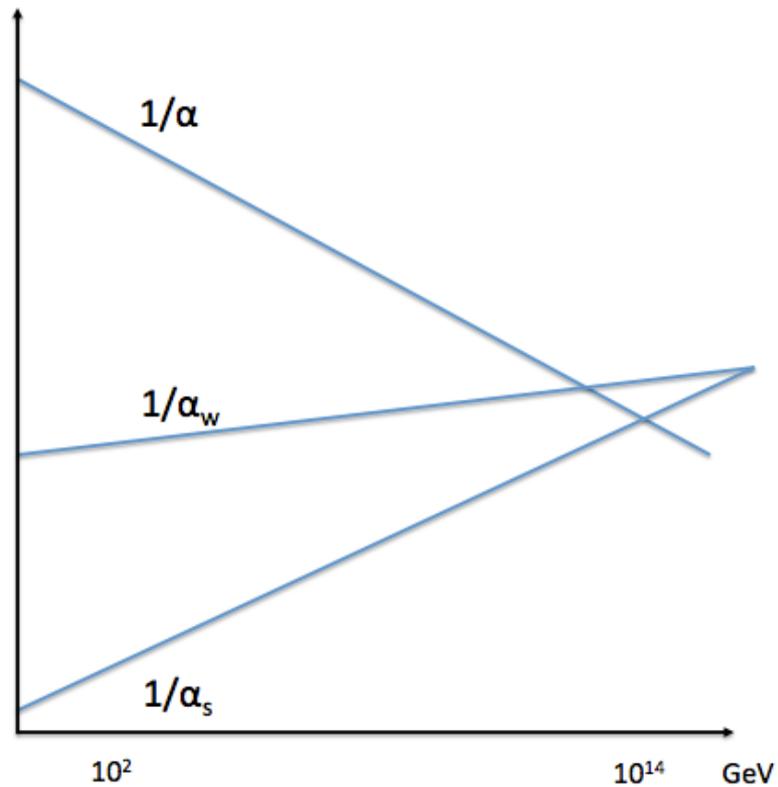
Algunas ideas promisorias...

- ◆ **GRAN UNIFICACION: (Georgi y Glashow, 1974)**
 - ✓ Combina las 3 interacciones de gauge en una ($SU(5)$, $SO(10)$ o E_6) y los 5 multipletes de c/generación en 2 o 1
 - ✓ Predice 1 de los parámetros libres (el ángulo de mezcla débil) y quizás otro (el cociente bottom-tau)
 - ✓ C/interacción se caracteriza por una cte. de acoplamiento que determina la fuerza de la interacción. Son muy distintas a las energías que se alcanzan en los aceleradores.

Running de los acoplamientos de gauge

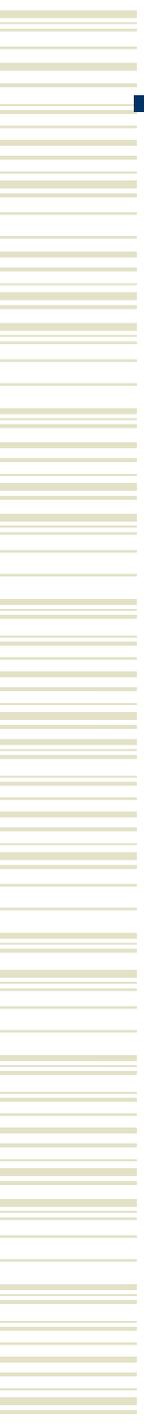
- ◆ Debido a correcciones cuánticas, los acoplamientos de gauge dependen de E a la que se miden (running del acoplamiento: responsable confinamiento y libertad asintótica)
- ◆ Pero tienen \approx mismo valor a escala GUT (10^{12} veces $> E$ alcanzada en aceleradores) \Rightarrow existencia de estructura GUT
- ◆ A la escala GUT y mayor, todas interacciones se pueden describir un único grupo de Lie. Por debajo, esa simetría debe estar espontáneamente rota.

Running of gauge couplings: parece coincidencia en ME, pero GUTs lo explican



Verificación experimental?

- ◆ GUT \Rightarrow muchas nuevas partículas de gauge y de materia, debido a grandes representaciones de los grupos GUT
- ◆ Masas $O(\text{escala GUT}) \Rightarrow$ demasiado pesadas para ver en los aceleradores \Rightarrow no se puede esperar verificación experimental directa
- ◆ Evidencia empírica indirecta: decaimiento del protón (ME predice que el protón es absolutamente estable)
- ◆ Pero confirmación requiere observar otras partículas GUTs.
- ◆ No decaimiento protón restringe GUTs: SU(5) mínimo no va

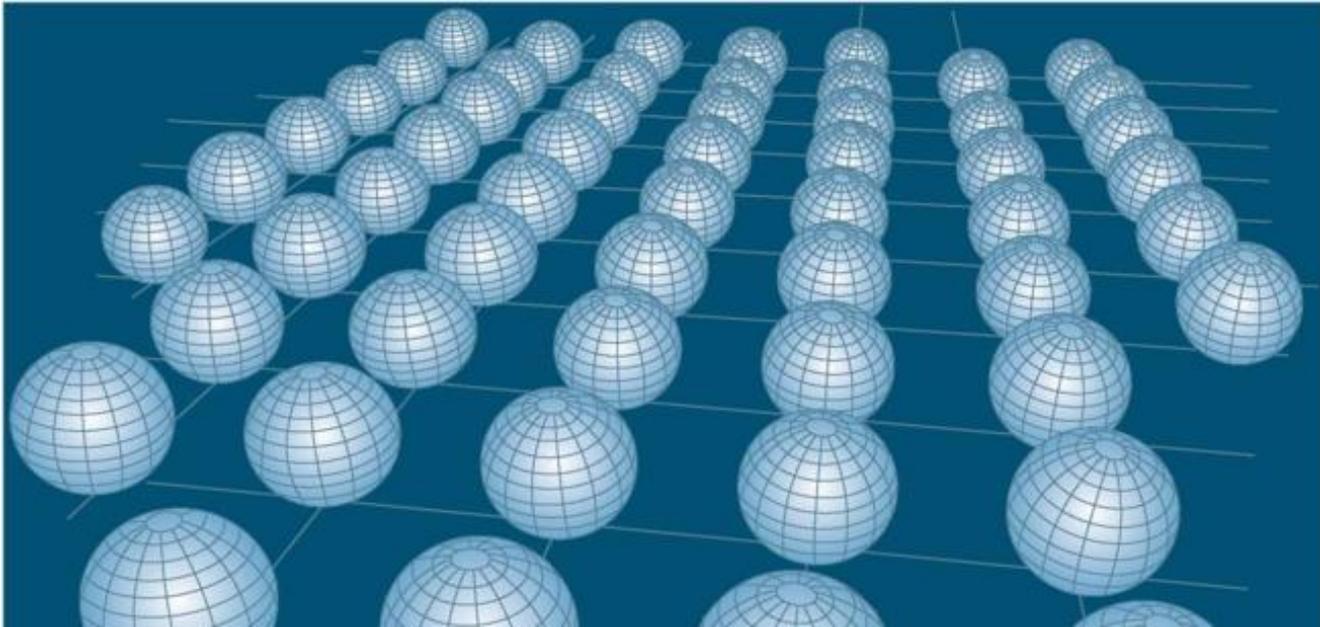


GUTs no resuelven varios problemas

- ◆ No contienen interacción gravitatoria
- ◆ No explican existencia de 3 generaciones y \therefore no explican estructura de masas de fermiones
- ◆ No resuelven el problema de la **naturalidad** o fine-tuning

Dimensiones extra

- ✓ Las dimensiones adicionales estarían tan curvadas que serían indetectables a las energías actuales.
- ✓ La geometría del espacio-tiempo es dinámica en RG, así que esta es una posibilidad lógica \Rightarrow cosmología



Ventajas de las dimensiones extra

- ✓ Un único campo en mayores dimensiones se convierte en muchos campos en 4D (que difieren en su polarización y dependencia en dimensiones pequeñas.)
- ✓ Abre la posibilidad de unificar las interacciones de gauge y la gravedad: mecanismo de Kaluza-Klein

$$G_{MN} = \left[\begin{array}{c|c} g_{\mu\nu} & A_{\mu} \\ \hline A_{\nu} & \phi \end{array} \right]$$

$$M, N = 0, \dots, 4$$

$$G_{MN} \text{ es } 5 \times 5$$

$$\mu, \nu = 0, \dots, 3$$

- ✓ Da un mecanismo natural para producir generaciones, copias repetidas de los mismos multipletes fermiónicos (ec. Dirac en $d > 4$)

Dimensiones extra

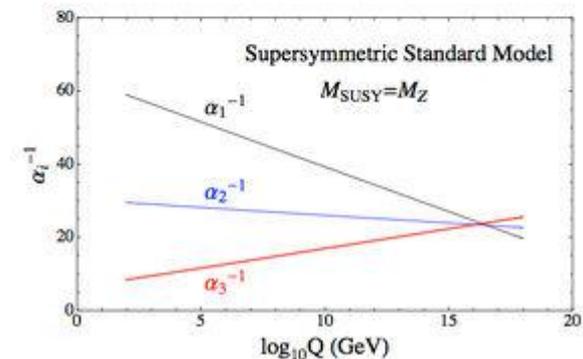
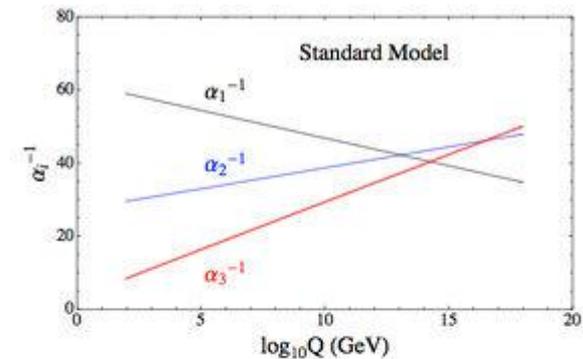
- ◆ Si son del tamaño de $l_p \sim 10^{-33}$ cm quizás no puedan detectarse nunca (sólo se llegó a 10^{-18} cm en aceleradores)
- ◆ Pero la teoría permite dimensiones extra $\sim 0,1$ mm, y podrían no haber sido detectadas.

Supersimetría

- ◆ Nueva simetría que podría confirmarse en LHC.
- ◆ Relaciona campos de diferentes espines y estadísticas e implica la existencia de muchas partículas nuevas.
- ◆ Wess y Zumino (1974, primer modelo 4D): c/partícula tiene un compañero susy. Como no se observaron \Rightarrow espontáneamente rota a alguna escala de $E > E_{\text{obs}}$
- ◆ Es un mecanismo muy eficiente en los problemas de divergencias y naturalidad.

Susy

- ◆ Escala ruptura susy podría ser muy grande, cerca GUT o más.
- ◆ Pero hay dos argumentos que sugieren que está cerca de E_{EW}
 1. Los acoplamientos de gauge coinciden mucho mejor
 2. Gran diferencia entre escalas GUT o Planck y escala ruptura simetría EW:
susy puede explicar esa diferencia por pequeños factores con implicancias exponenciales si no está rota



El principio antrópico

- ◆ Suponer que la Naturaleza pudo elegir entre distintos valores de Λ en distintos universos
- ◆ Los universos con $\Lambda \sim (M_{\text{Planck}})^4$ tienen expansión muy acelerada como para desarrollar formación de estructura por acreción gravitatoria \Rightarrow No tienen galaxias, ni suficiente complejidad para permitir el desarrollo de observadores vivientes que puedan medir Λ .
- ◆ Weinberg: La expectativa correcta sobre el valor de Λ es que tendría el mayor valor posible compatible con la existencia de observadores (nosotros) para medirla.

El principio antrópico → inflación eterna

- ◆ Es interesante que esta cota superior es bastante cercana al valor observado.
- ◆ El argumento y la predicción del valor de Λ fueron propuestos por Weinberg mucho antes de tener evidencia observacional de la energía de vacío (E_v) .
- ◆ Una posible realización dinámica de regiones múltiples del universo es el multiverso de la **inflación eterna**: grandes fluctuaciones cuánticas durante inflación pueden cambiar localmente el valor de la E_v en algunas regiones.
- ◆ Estas se expanden en universos burbuja que pueden albergar nuevos procesos de nucleación de burbujas. Esta auto-replicación eterna del universo lleva a múltiples universos burbuja y dan distintos valores de la E_v

El principio antrópico

- ◆ Las consideraciones antropicas son controvertidas. Implican que algunos parámetros “fundamentales”, e.g. Λ , son ambientales. Tienen origen **histórico y no fundamental**.
- ◆ Esto no es nuevo. E.g. el sistema solar: se creía que el número de planetas y sus órbitas obedecían principios fundamentales, e.g. el intento de Kepler de relacionar los planetas a los sólidos platónicos.
- ◆ Hoy se entienden como una solución particular de la mecánica celeste (entre muchos posibles sistemas planetarios) y la distancia Sol-Tierra podría ser determinada por el principio antrópico.
- ◆ En TC, veremos que hay gran número de soluciones con rango muy grande de posibles valores para la energía de vacío.

Todavía falta algo...

- ◆ Cada una de estas ideas tiene propiedades atractivas y es consistente con los tests del ME
- ◆ Es posible que todas ellas aparezcan como elementos de una teoría más completa de la física fundamental.
- ◆ Pero todavía falta algo...
- ◆ Aplicando estas ideas, ya sea por separado o juntas, no ha llevado a teorías sustancialmente más simples o menos arbitrarias que el ME

Posibles soluciones a divergencias

- 1) La divergencia se debe a la expansión en potencias de la interacción y **desaparece en la teoría exacta**.
- 2) La extrapolación de la teoría a energías arbitrariamente altas es incorrecta. La **teoría se modifica a $>E$** , de manera que la interacción se desparra en el espacio-tiempo y suaviza la divergencia

Razones para concentrarse en 2)

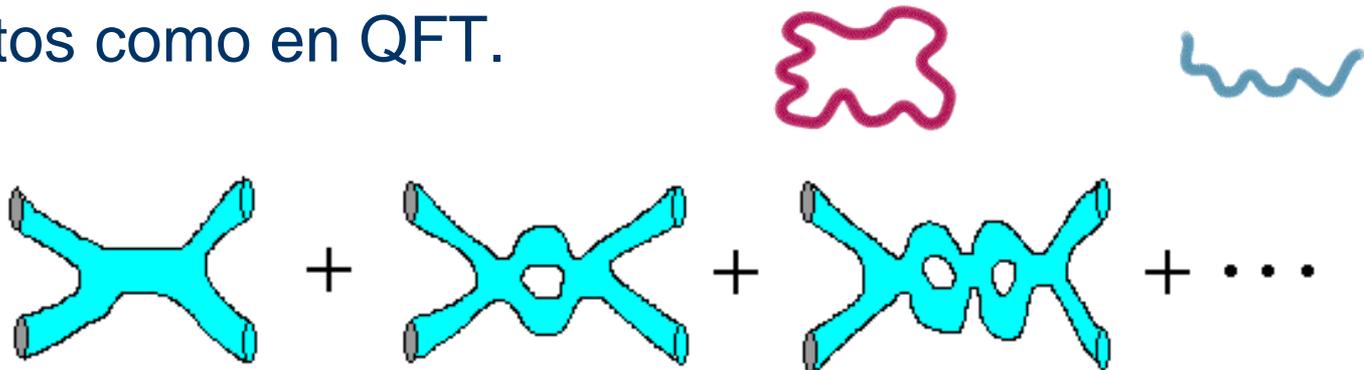
- ◆ Histórica: el mismo tipo de problema de divergencias en la teoría de Fermi de las interacciones débiles fue indicio de nueva física; la interacción de contacto entre los fermiones se resolvió con el intercambio de un bosón de gauge.
- ◆ Se necesita una teoría más completa para explicar los patrones del ME y se supone que la misma nueva física resolverá el problema de la divergencia en gravedad cuántica.

Problemas en el marco de QFT

- ◆ En QFT no es fácil desparramar las interacciones preservando la consistencia de la teoría.
- ◆ La invariancia de Lorentz es una buena aproximación \Rightarrow si se desparrama la interacción en el espacio, también se desparrama en el tiempo \Rightarrow se pierde **causalidad** o **unitariedad**.
- ◆ La invariancia de Lorentz está inmersa en una simetría local: la **invariancia general de coordenadas** \Rightarrow difícil desparramar la interacción sin producir inconsistencias.

La teoría de cuerdas

- ◆ Actualmente hay una única solución conocida para desparramar la interacción gravitatoria y eliminar las divergencias, sin arruinar la consistencia de la teoría: la teoría de cuerdas.
- ◆ El gravitón y todas las otras partículas elementales son objetos unidimensionales, cuerdas, en lugar de puntos como en QFT.



Resultados sorprendentes

- ◆ ¿Qué se encuentra siguiendo esta idea?
- ◆ La teoría de cuerdas contiene las ideas previas que explicaban los patrones en el ME (GUT, dimensiones extra, susy), en una estructura más elegante y unificada que en QFT.
- ◆ Una teoría cuántica relativista de objetos unidimensionales consistente contiene:

Propiedades

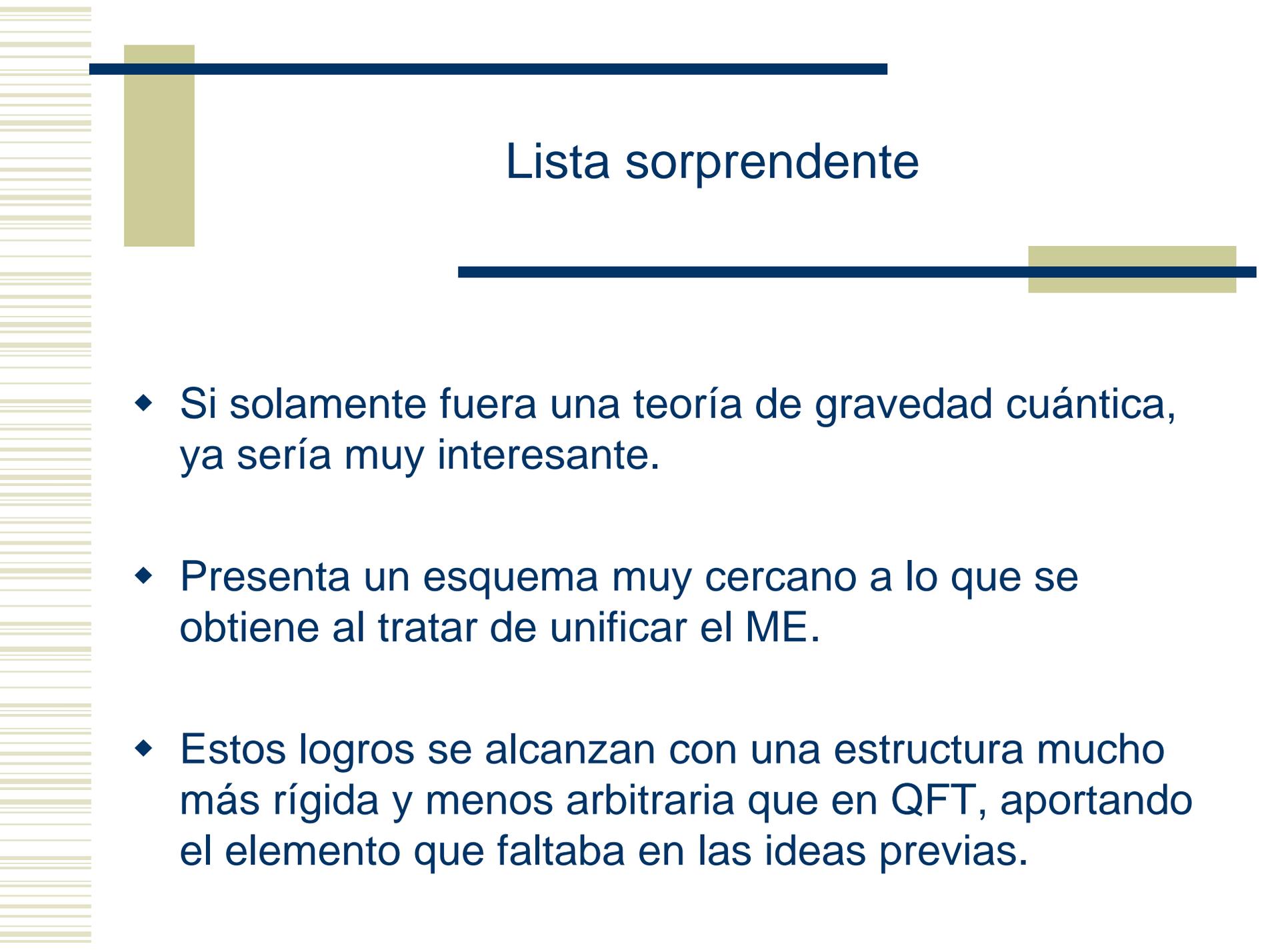
- ◆ **Gravedad:** Toda teoría de cuerdas consistente contiene un estado no masivo de espín 2, cuyas interacciones a bajas energías se reducen a la RG.
- ◆ **Teoría consistente de gravedad cuántica:** en contraste con todas las QFT de gravedad conocidas.
- ◆ **Gran unificación:** grupos de gauge suficientemente grandes para incluir el ME. Algunas teorías de cuerdas producen los mismos grupos de gauge y representaciones fermiónicas que aparecen en la unificación del ME.

Más propiedades

- ◆ *Dimensiones extra:* Consistencia requiere 10D Las ecuaciones tienen soluciones con 4D planas y 6 curvas pequeñas, con física 4D parecida al ME. Si $l_s \sim 10^{-18} \text{cm}$ y nuestro espacio 3D es membrana
- ◆ *Supersimetría:* Las teorías de cuerdas consistentes requieren supersimetría espacio-tiempo.
- ◆ *Acoplamientos de gauge quirales:* Las interacciones de gauge en la naturaleza son de paridad asimétrica (quirales). Esto fue un obstáculo para varias ideas previas

Más propiedades

- ◆ **No hay parámetros libres:** La teoría de cuerdas no tiene constantes adimensionales ajustables.
- ◆ **Unicidad:** No sólo no hay parámetros continuos. No hay libertad análoga a la elección de grupos de gauge y representaciones en QFT: hay una única teoría de cuerdas.



Lista sorprendente

- ◆ Si solamente fuera una teoría de gravedad cuántica, ya sería muy interesante.
- ◆ Presenta un esquema muy cercano a lo que se obtiene al tratar de unificar el ME.
- ◆ Estos logros se alcanzan con una estructura mucho más rígida y menos arbitraria que en QFT, aportando el elemento que faltaba en las ideas previas.

Además...

- ◆ Tiene conexiones con muchas áreas de la matemática y otras de la física (materia condensada, fluidos) y ha llevado a relaciones nuevas e inesperadas entre ellas.
- ◆ Tiene conexiones con descubrimientos recientes en QFT supersimétricas.
- ◆ Ha comenzado a considerar y ha resuelto algunas de las preguntas más profundas de la gravedad cuántica, como la mecánica cuántica de los agujeros negros.

¿Por qué esto funciona?

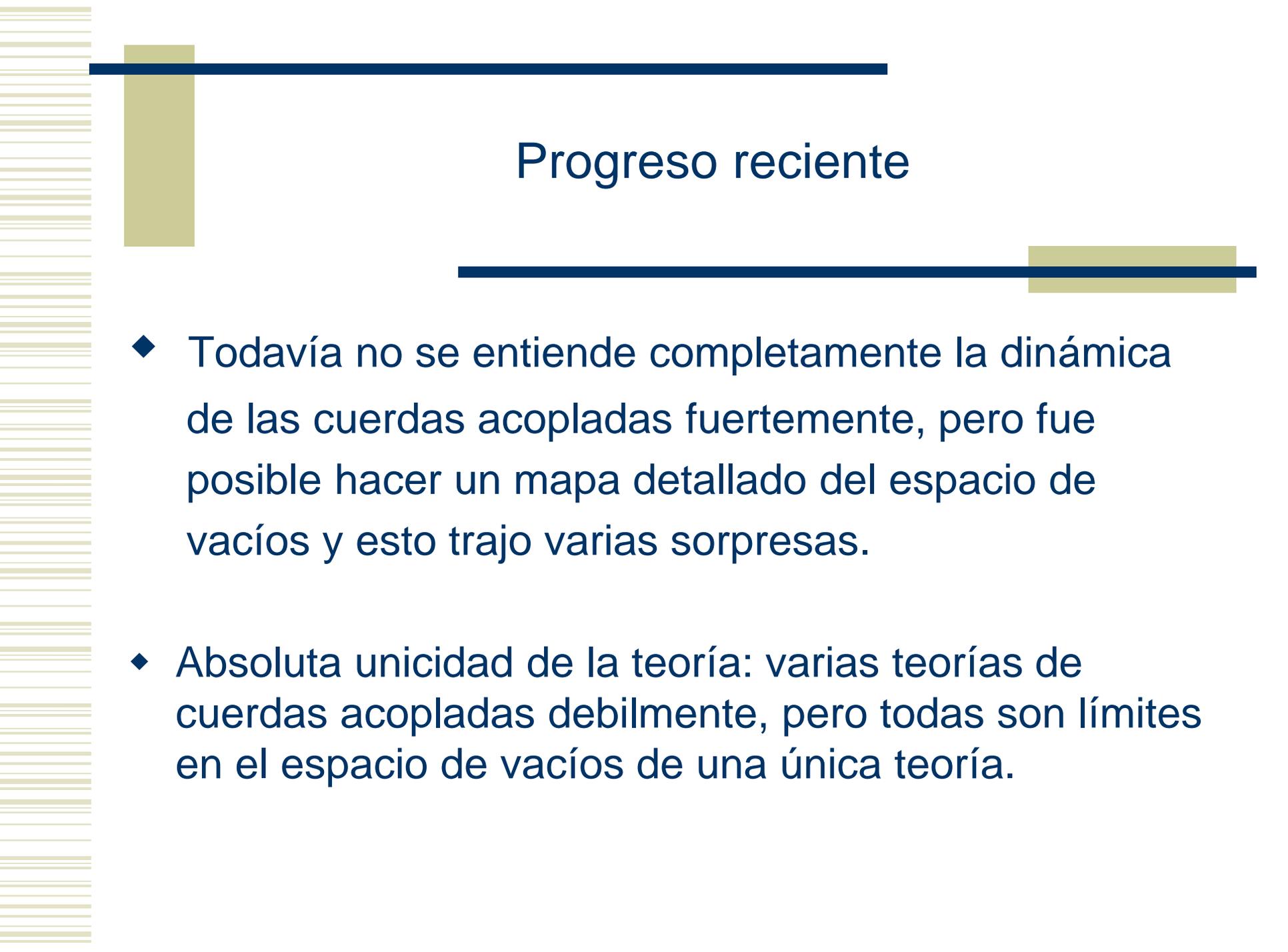
- ◆ No es obvio *a priori*, pero a medida que se desarrolla la teoría es más evidente que podría ser la solución.
- ◆ La consistencia matemática resulta un principio muy restrictivo.
- ◆ Es una suerte porque la unificación de la gravedad con las otras interacciones ocurre a energías tan altas, M_P , que los tests experimentales son muy difíciles e indirectos.

Pero...

- ◆ La teoría de cuerdas se parece mucho al mundo real a grandes rasgos, pero no hay todavía un test decisivo.
- ◆ Problema principal: hay una única teoría pero un número enorme de soluciones clásicas (aun restringiéndose a soluciones con 4D grandes planas).
- ◆ Efectos cuánticos reducen mucho el número de soluciones estables, pero todavía no se entiende completamente la dinámica.
- ◆ No hay todavía un vacío que reproduzca en detalle el ME

¿QUE ES LA TEORIA DE CUERDAS?

- ◆ Hasta hace unos pocos años \Rightarrow teoría perturbativa. Pocas cuerdas interactuando debilmente.
- ◆ No se sabía ni siquiera cómo definir la teoría a acoplamiento fuerte.
- ◆ Los grados de libertad a acoplamiento débil (cuerdas) podrían no ser el modo más simple o completo de entender la teoría \rightarrow D-branas



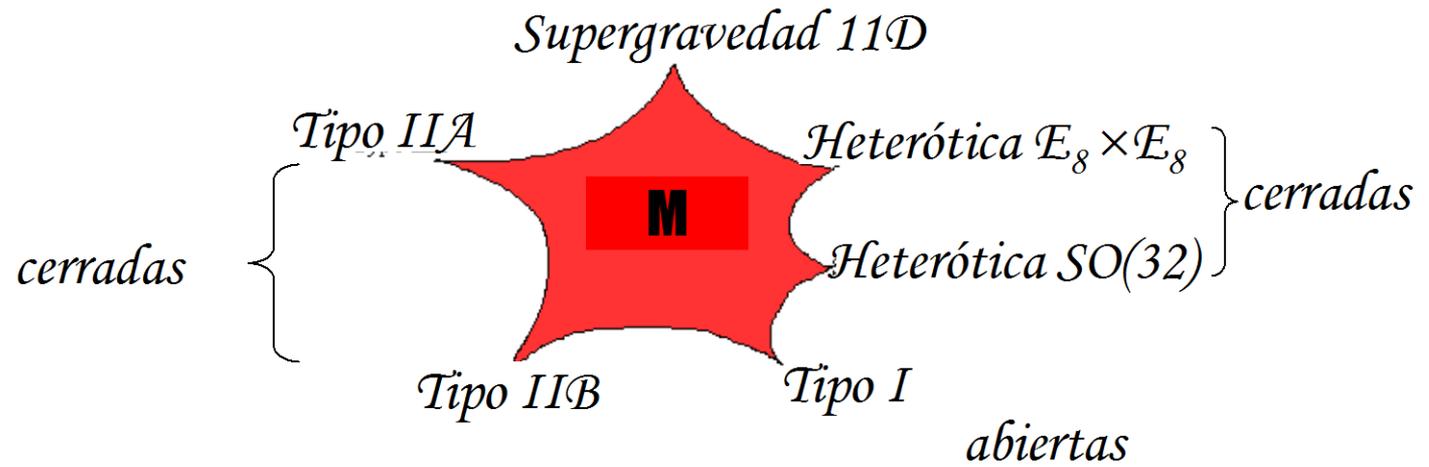
Progreso reciente

- ◆ Todavía no se entiende completamente la dinámica de las cuerdas acopladas fuertemente, pero fue posible hacer un mapa detallado del espacio de vacíos y esto trajo varias sorpresas.
- ◆ Absoluta unicidad de la teoría: varias teorías de cuerdas acopladas debilmente, pero todas son límites en el espacio de vacíos de una única teoría.

La teoría M

1995

SIMETRIAS DE DUALIDAD



Un poco de historia

- ◆ Problemas con hadrones en los 70's → amplitud de Veneziano reproducía resonancias observadas
- ◆ Pero QCD...
- ◆ Green-Schwarz (1984): cancelación anomalías en SYM + sugra N=1 → primera revolución de cuerdas
- ◆ Polchinski (1995): D-branas → segunda revolución: efectos no perturbativos → entropía agujeros negros

Nuevas ideas: AdS/CFT

J. Maldacena (1997), formuló una conjetura sorprendente:

- ◆ La teoría de cuerdas es holográfica.
- ◆ Existe una teoría cuántica de la gravedad (Teoría de Cuerdas tipo IIB en un espacio anti de Sitter – **AdS**) que es equivalente a una teoría cuántica de partículas (una teoría de campos (super)conforme -**CFT**).

La conjetura de Maldacena

- ◆ Cálculos de física de partículas, intratables por su complejidad matemática, pueden ser traducidos en cálculos simples dentro de la descripción gravitatoria. Y viceversa.

DUALIDAD



- ◆ La Conjetura de Maldacena (o Correspondencia AdS/CFT), aún no ha podido ser demostrada formalmente.

Evidencias

- ◆ Cálculos de estados quirales → ??
- ◆ Cálculo de propiedades de plasma de quarks y gluones: estado de la materia unos pocos μ segundos después del big bang, producido en acelerador de iones pesados, RHIC, de Brookhaven, que no pueden ser calculadas por otros medios, dan resultados compatibles con las mediciones experimentales.



THE END
