

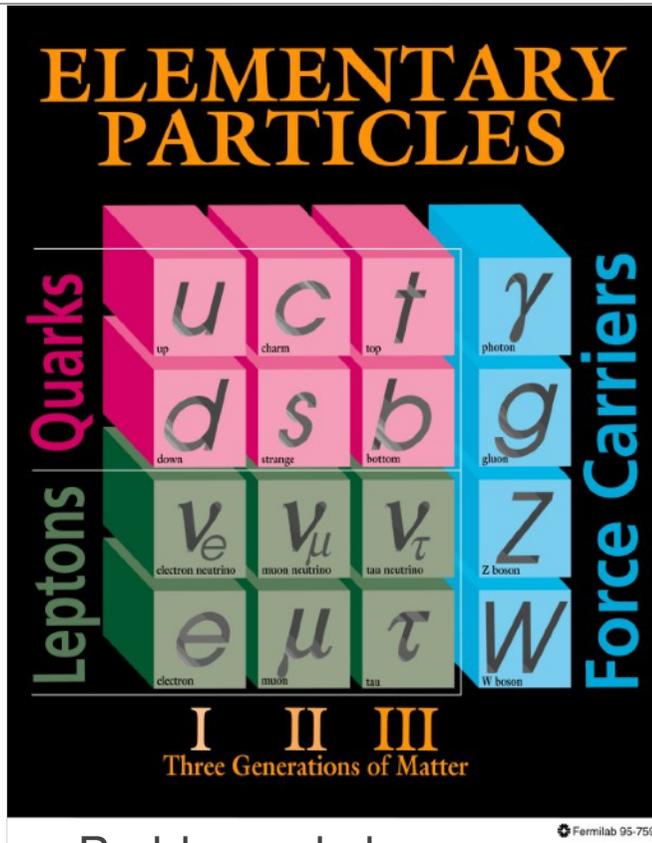
# Teoría de cuerdas y física de partículas

fernando marchesano



Instituto de  
Física  
Teórica  
UAM-CSIC

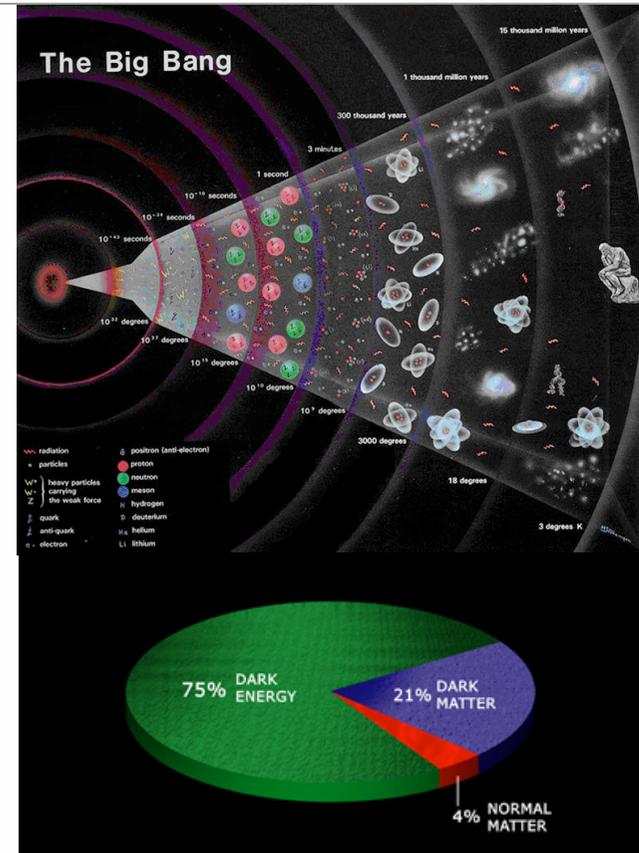
# Los Modelos Estándares en Altas Energías



Problema de la Jerarquía, Unificación, Neutrinos, Masas de los fermiones, ...

⇒ ¿Supersimetría?

...



Planitud, Horizonte, Anisotropías, Materia y Energía Oscura

⇒ ¿Inflación?

...

# ¿Existe un modelo más fundamental?

---

- ~ La relación entre ambos modelos apunta a un **modelo más fundamental**, que abarque a ambos e incorpore la **gravedad cuántica**

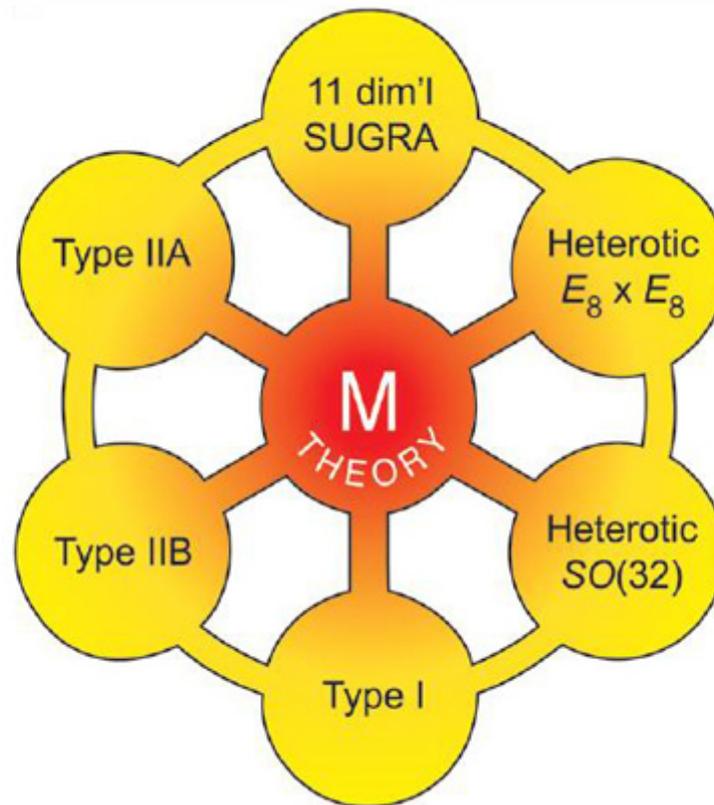
¿Podría ser un modelo de cuerdas?

- ~ **No hay** muchos **más candidatos**, así que olvidarnos de la teoría de cuerdas es un lujo difícil de permitirnos...
- ~ Sin embargo **no fácil responder esta pregunta**:
  - 🔊 La teoría de cuerdas es única en 10d/11d
  - 🔊 Pero **pierde unicidad** al bajar a **3+1 dimensiones**...

# La búsqueda del Modelo Estándar

---

~ Recordemos cómo quedó la cosa **a mediados de los 90:**



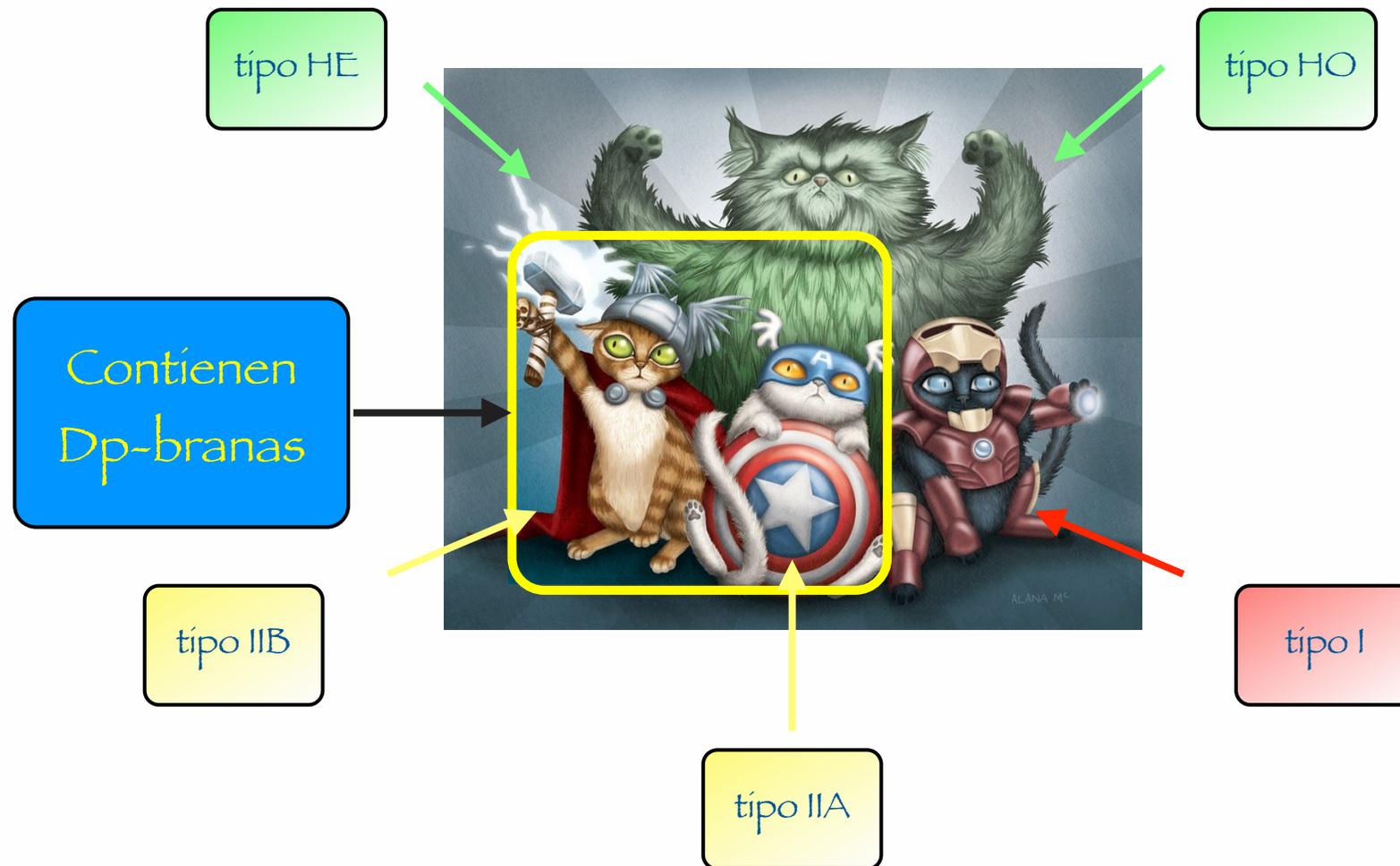
# La búsqueda del Modelo Estándar

~ Recordemos cómo quedó la cosa **a mediados de los 90**:



# La búsqueda del Modelo Estándar

~ Recordemos cómo quedó la cosa **a mediados de los 90**:



# ¿Qué son las D-branas?

- ~ Las **Dp-branas** son **objetos extensos** de  $p$  dimensiones espaciales que aparecen en las **teorías tipo II** (y tipo I)
- ~ Tenemos que:
  - 📌 **Tipo IIA:  $p$  es par** ( $p = 0, 2, 4, 6, 8$ )
  - 📌 **Tipo IIB:  $p$  es impar** ( $p = 1, 3, 5, 7, 9$ )



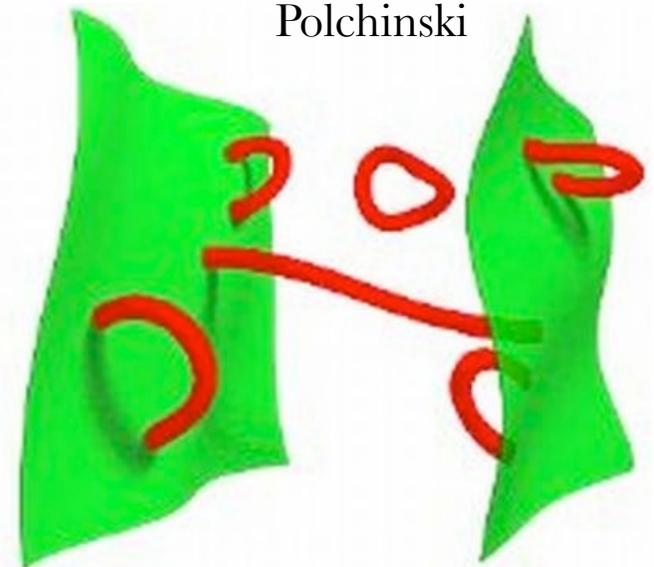
Polchinski

# ¿Qué son las D-branas?

- ~ Las **Dp-branas** son **objetos extensos** de  $p$  dimensiones espaciales que aparecen en las **teorías tipo II** (y tipo I)
- ~ Tenemos que:
  - 📌 **Tipo IIA:  $p$  es par** ( $p = 0, 2, 4, 6, 8$ )
  - 📌 **Tipo IIB:  $p$  es impar** ( $p = 1, 3, 5, 7, 9$ )
- ~ Desde el punto de vista de las cuerdas, se describen como **hiperplanos** donde están confinados los **extremos de las cuerdas abiertas**



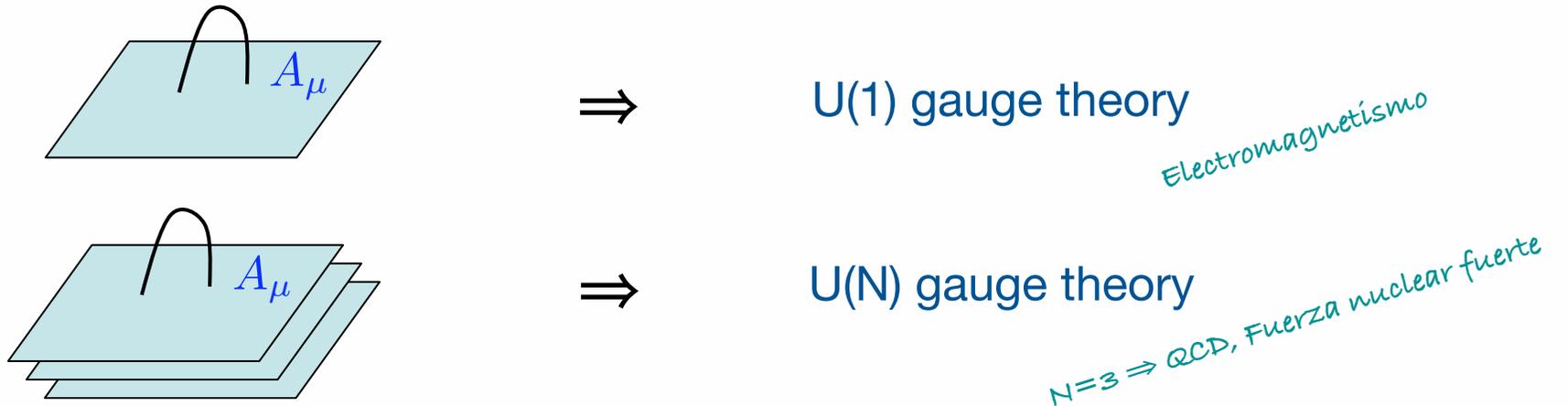
Polchinski



# ¿Qué son las D-branas?

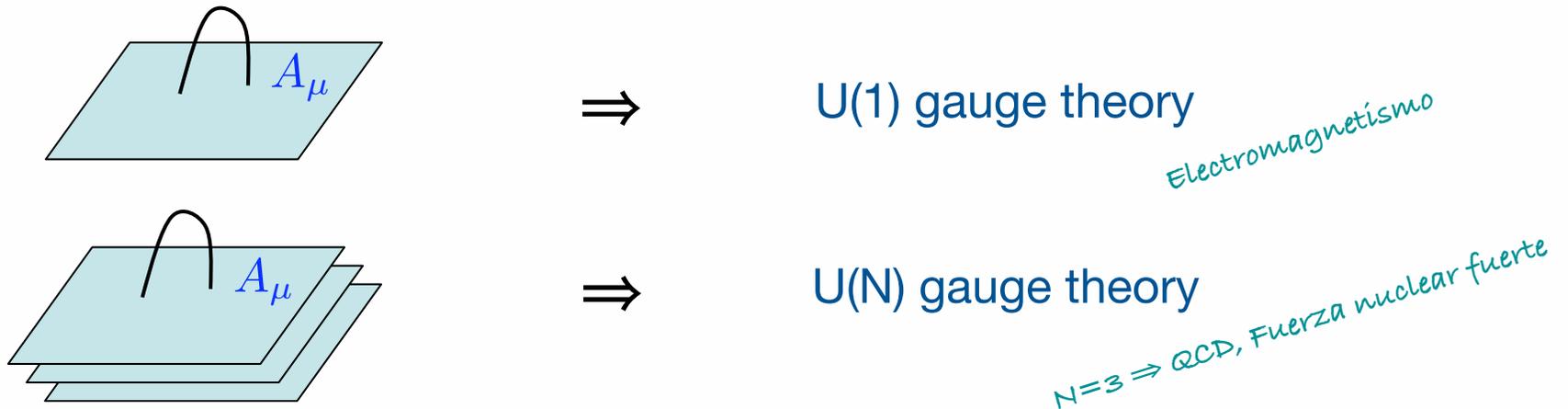
---

- ~ Esta descripción de las D-branas permite entender una de sus **propiedades más importantes**:

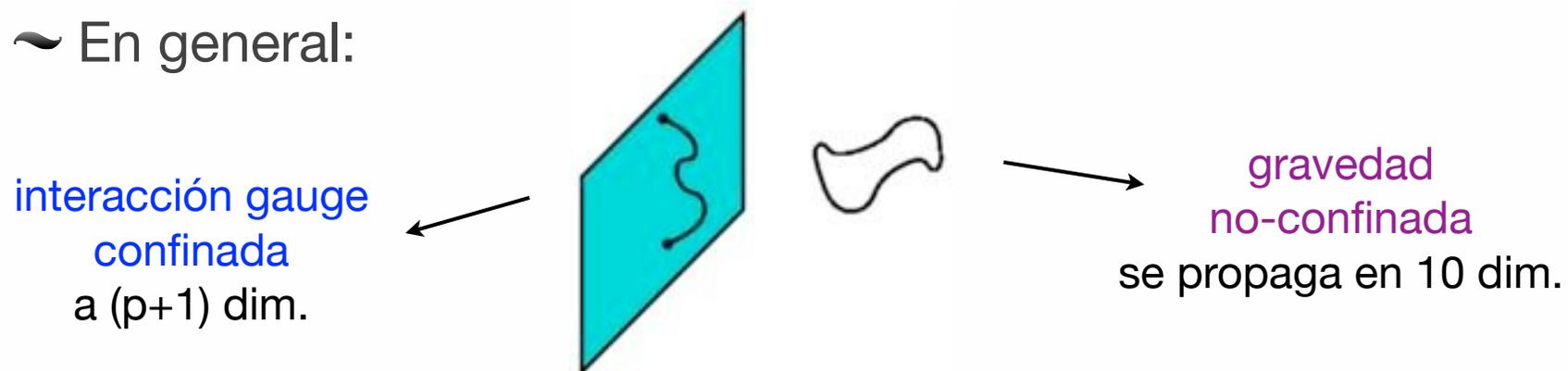


# ¿Qué son las D-branas?

- ~ Esta descripción de las D-branas permite entender una de sus **propiedades más importantes**:



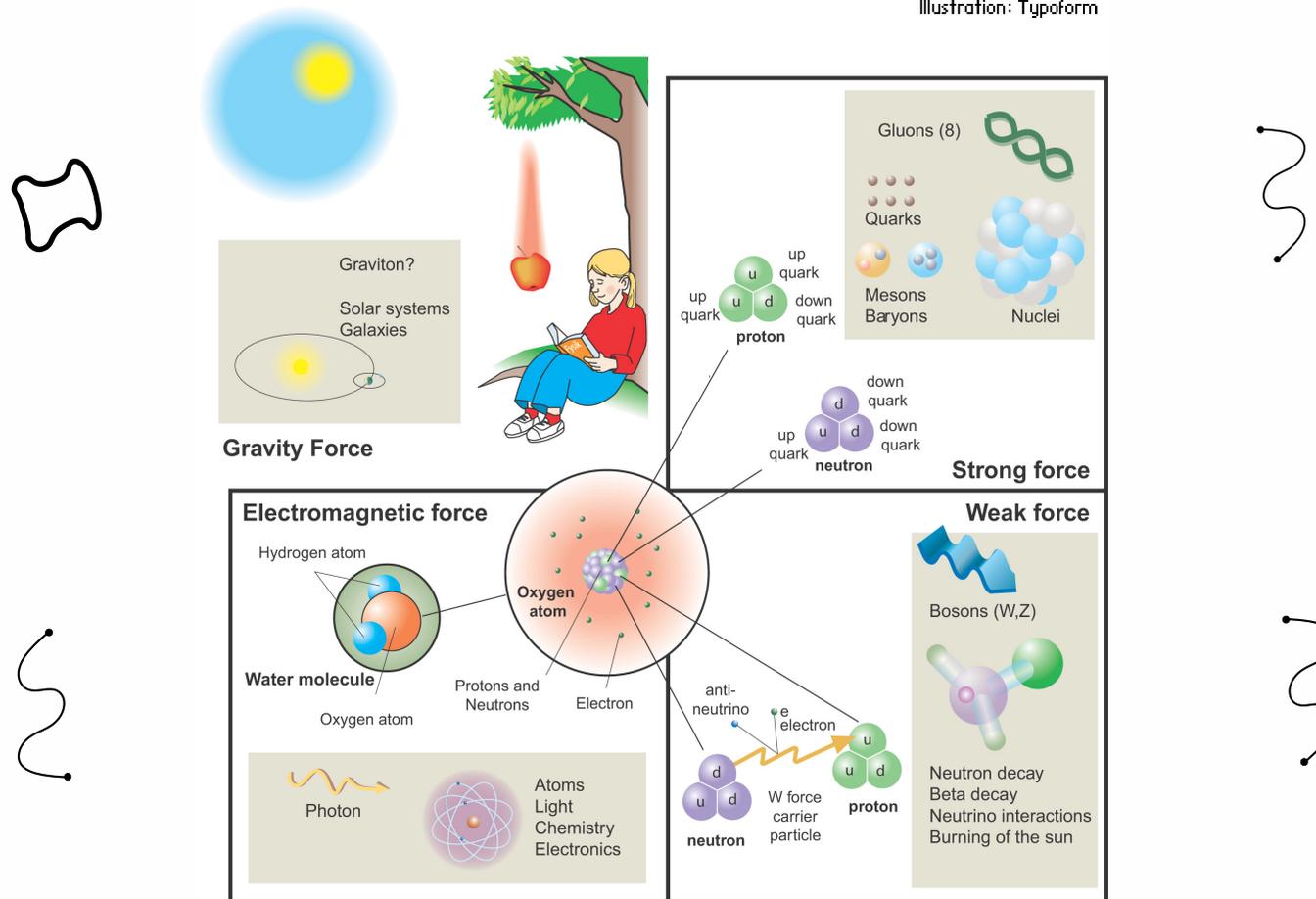
- ~ En general:



# D-branas y nuestro universo

~ Desde este punto de vista está claro **por qué la gravedad es tan distinta** del resto de las interacciones

Illustration: Typoform



# Mundos brana

- ~ A partir de esta observación se pensó que, si bien existen 10 dim, **nuestro universo** puede estar **confinado** en sólo 4 (en **una 3-brana**)

## Brane Theory

It expands superstring theory to include vibrating membranes, or branes, which may have many dimensions.

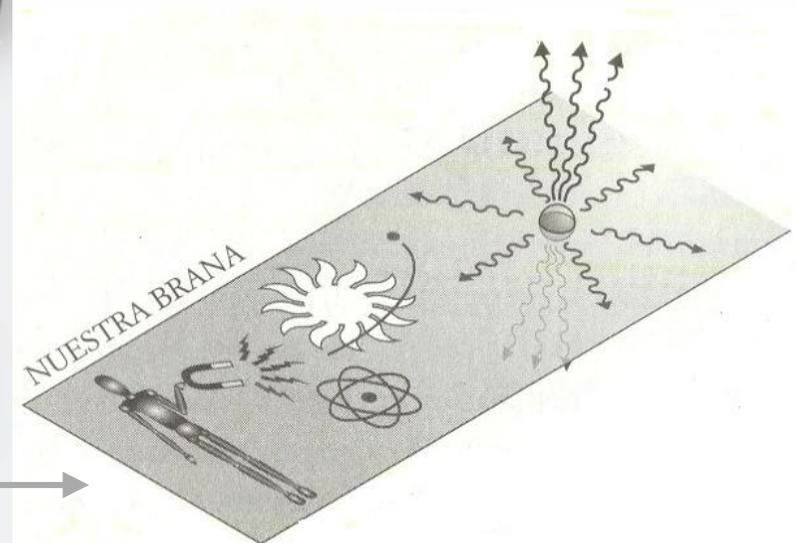
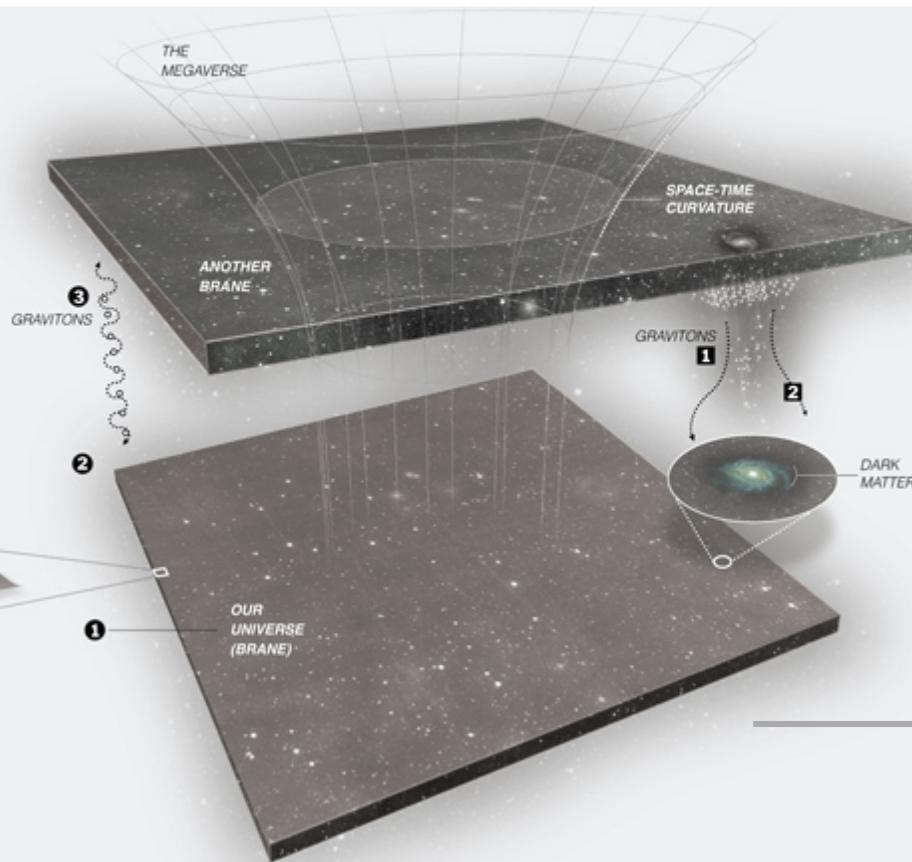
**1** Our universe can be thought of as a three-dimensional brane floating inside a four-dimensional megaverse.

**2** Most strings that compose our universe are attached to the brane's surface, and so most particles that exist on our brane are confined to its three-dimensional space.



**3** However, the particles that convey gravity, gravitons, are not tightly confined to any particular brane, and some of them roam across to other branes in the megaverse.

Sources: "Q is for Quantum," by John Gribbin; "The Ideas of Particle Physics," by J.E. Dodd



# Mundos brana

- ~ A partir de esta observación se pensó que, si bien existen 10 dim, **nuestro universo** puede estar **confinado** en sólo 4 (en **una 3-brana**)  $\Rightarrow$  **sólo la gravedad** ve 10 dimensiones

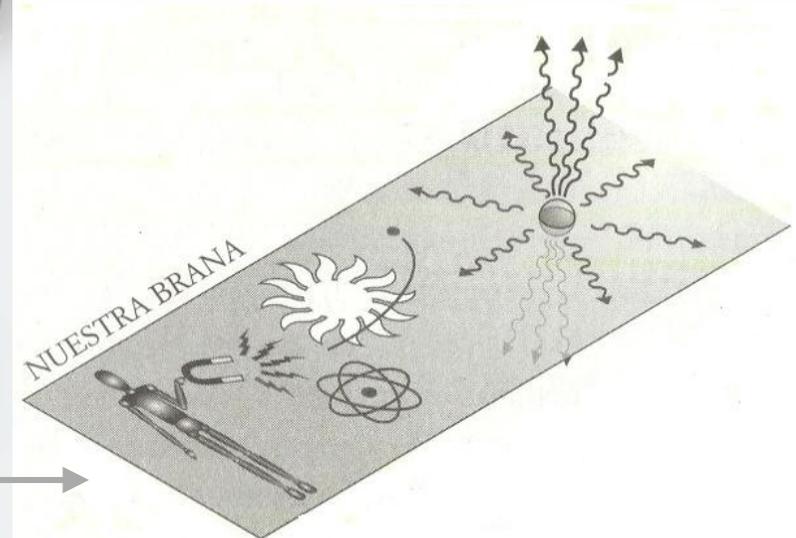
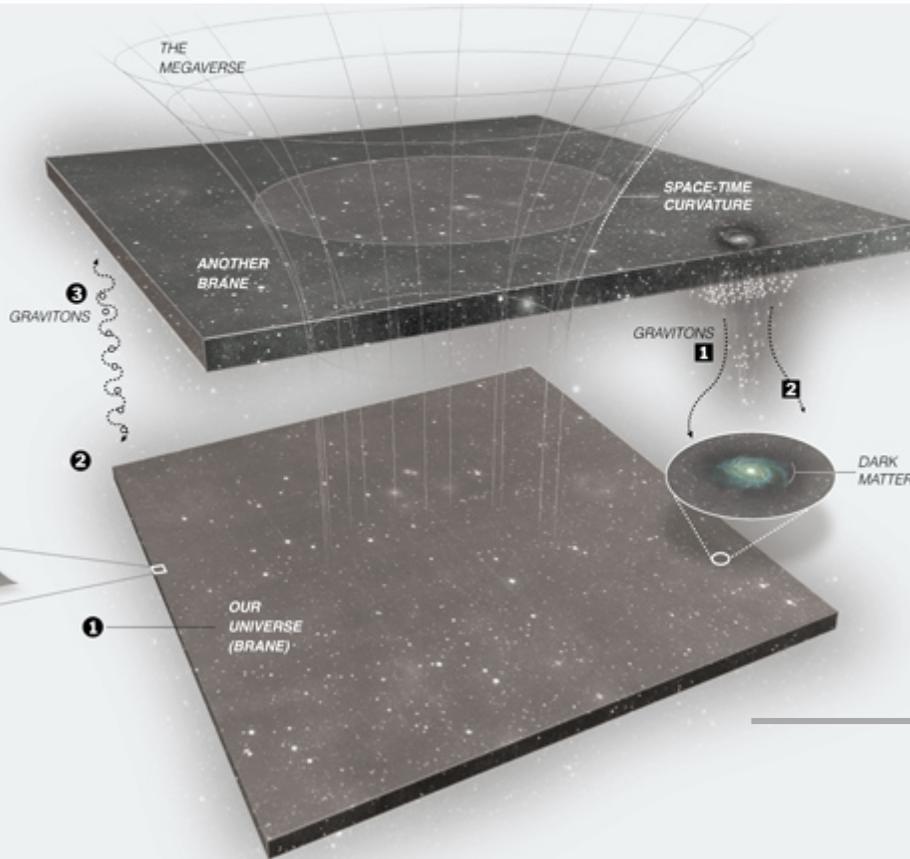
## Brane Theory

It expands superstring theory to include vibrating membranes, or branes, which may have many dimensions.

**1** Our universe can be thought of as a three-dimensional brane floating inside a four-dimensional megaverse.

**2** Most strings that compose our universe are attached to the brane's surface, and so most particles that exist on our brane are confined to its three-dimensional space.

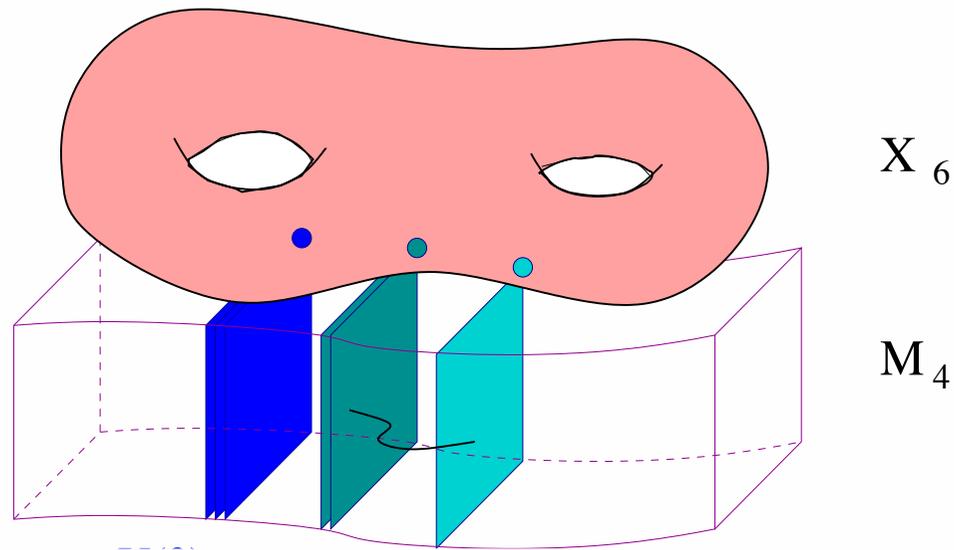
**3** However, the particles that convey gravity, gravitons, are not tightly confined to any particular brane, and some of them roam across to other branes in the megaverse.



# Mundos brana

---

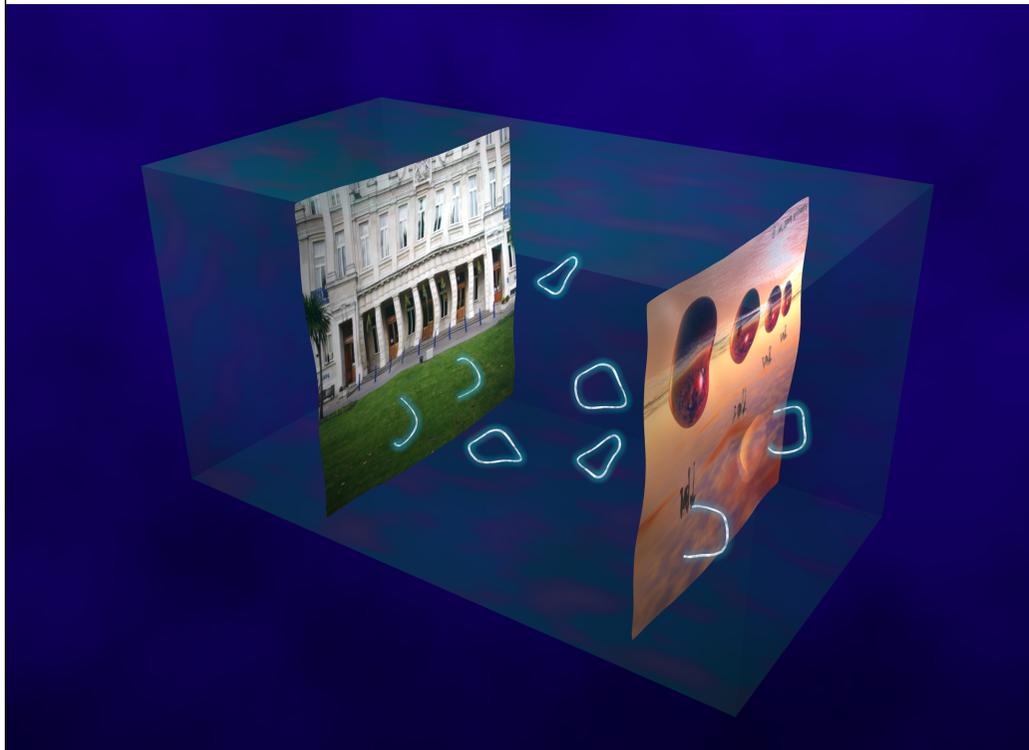
- ~ A partir de esta observación se pensó que, si bien existen 10 dim, **nuestro universo** puede estar **confinado** en sólo 4 (en **una 3-brana**)  $\Rightarrow$  **sólo la gravedad ve 10 dimensiones**



# Mundos brana

---

- ~ A partir de esta observación se pensó que, si bien existen 10 dim, **nuestro universo** puede estar **confinado** en sólo 4 (en **una 3-brana**)  $\Rightarrow$  **sólo la gravedad ve 10 dimensiones**
- ~ Surgió la idea de los mundos brana:



- 📌 **Cada brana contiene un “universo”** donde las leyes de la física pueden ser algo distintas
- 📌 **Lo único** que es **común** a estos universos **es la gravedad**, y lo único que los conecta entre sí
- 📌 Además **la gravedad** es más débil que el resto de las fuerzas porque **está más “diluida”** ...

# Dimensiones extra (otra vez)

---

- ~ Este último punto dio lugar a un **nuevo tipo de propuesta**
- ~ Desde siempre la **gravedad** había sido distinta:
  - 📌 Se lleva **mal** con la **mecánica cuántica**
  - 📌 Es mucho **más débil** que las otras interacciones

# Dimensiones extra (otra vez)

---

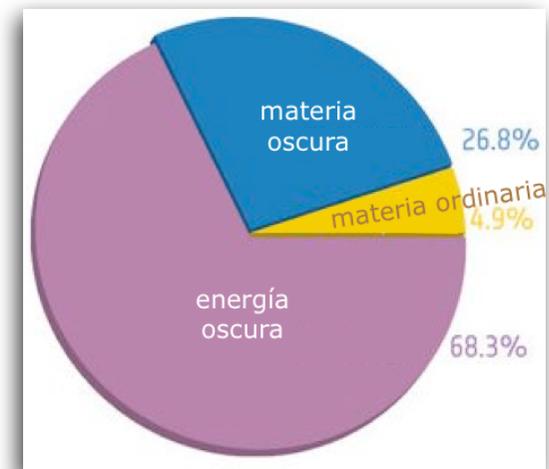
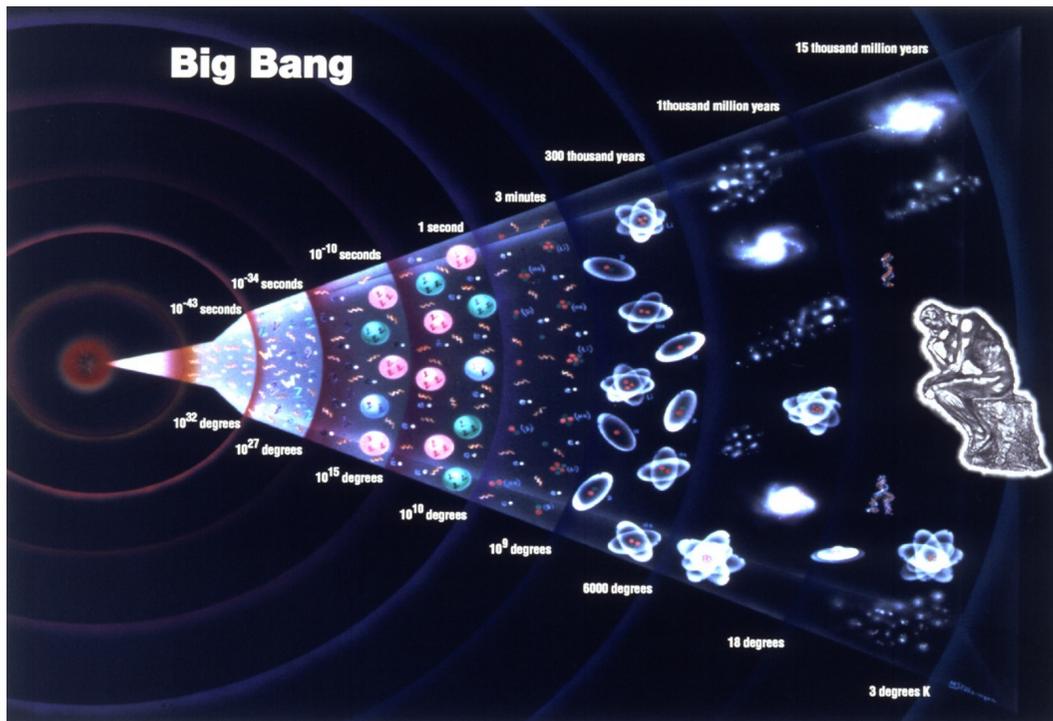
- ~ Este último punto dio lugar a un **nuevo tipo de propuesta**
- ~ Desde siempre la **gravedad** había sido distinta:
  - 📌 Se lleva **mal** con la **mecánica cuántica**
  - 📌 Es mucho **más débil** que las otras interacciones
- ~ En los **mundos brana**, sin embargo, la gravedad no tiene que ser tan débil: **únicamente** la percibimos débil porque está **más diluida** que las otras fuerzas
- ~ Para ello las **dimensiones extras** tendrían que ser lo suficientemente **grandes**. Se llegó a estimar que podrían ser como un círculo de **hasta 0.1 mm de radio!!**

Arkani-Hamed,  
Dimopoulos, Dvali  
(1998)



# D-branas y el Cosmos

- ~ Las **D-branas** también aportan nuevas ideas sobre el origen de nuestro universo

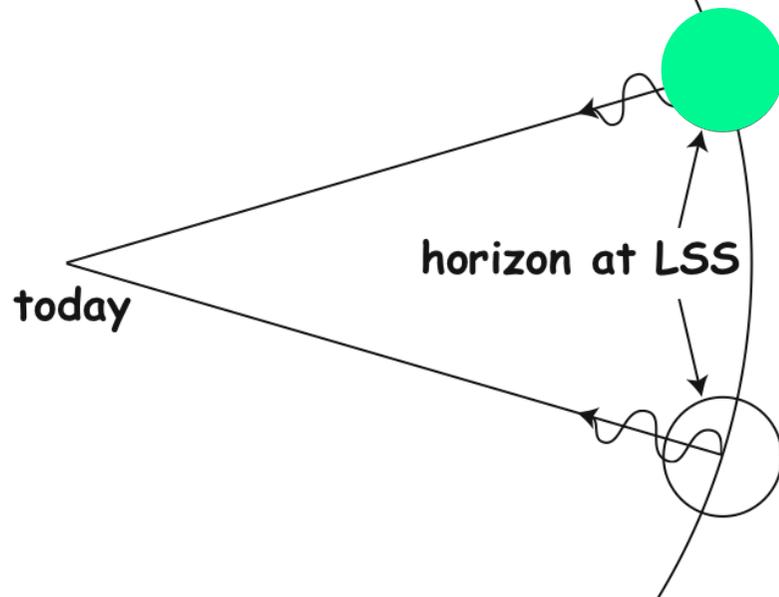


# Inflación

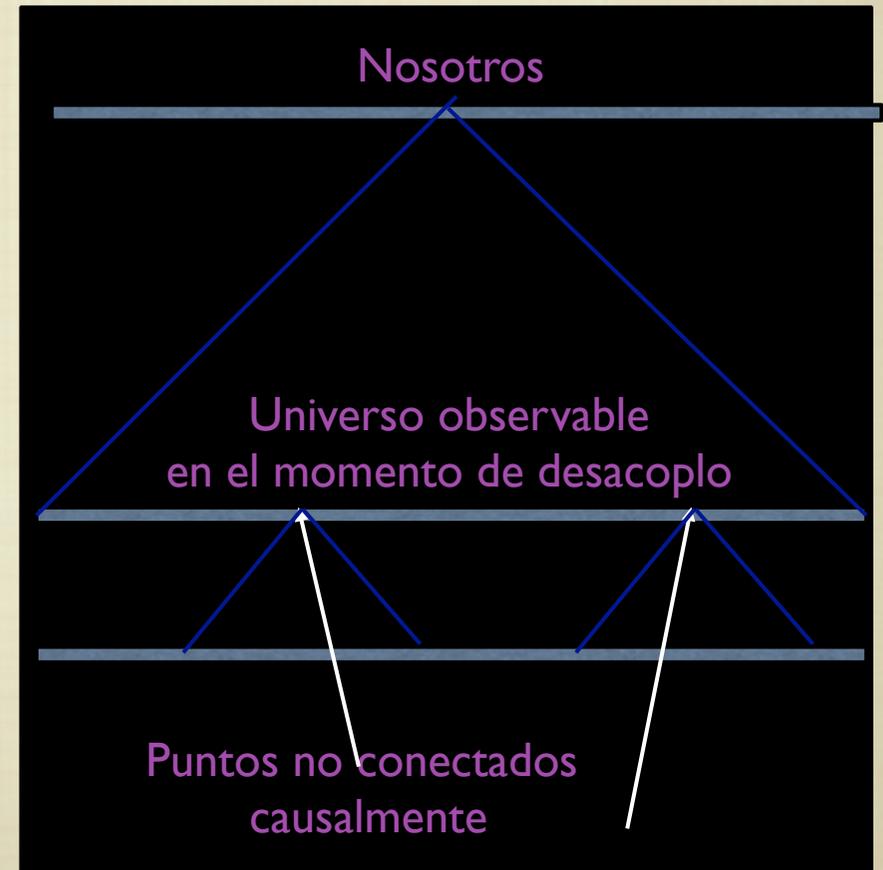
## ¿Cómo fueron los primeros instantes del Universo? Inflación

- ¿Por qué el Universo es tan plano ( $\Omega=1$  con gran precisión)
- **Problema del horizonte:** ¿Por qué el Universo es tan homogéneo (p.ej. CMB), incluso en regiones que no han estado conectadas causalmente?

Tamaño de una región conectada causalmente, para  $t = 300,000$  años



$$\text{Ángulo} \sim \frac{10^3 \times 3 \cdot 10^5}{14 \cdot 10^9} \text{ rad} \sim 1^\circ$$



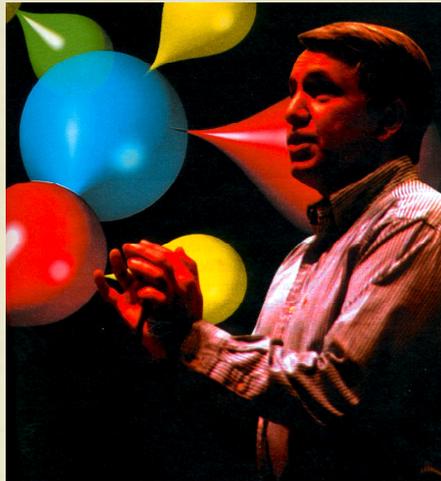
# Gravitación y Cosmología

**Inflación:** Guth, Linde, 1980

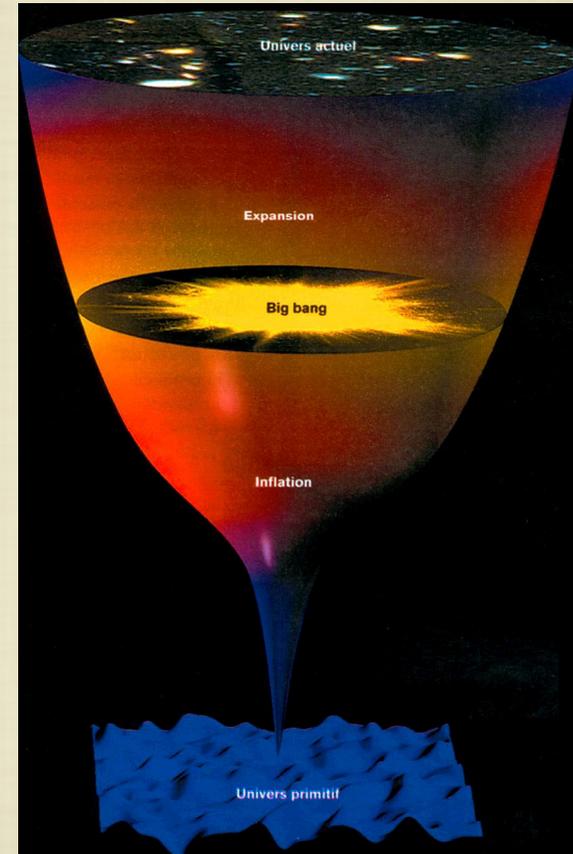
El Universo tuvo una fase de expansión superluminal, inducida por un campo denominado "inflatón"



**Alan Guth**



**Andrei Linde**



Explica un Universo plano y conectado causalmente

Además predice correctamente el espectro de fluctuaciones del CMB

**¿Quién es el inflatón y cuál es su física?**

# D-branas e Inflación

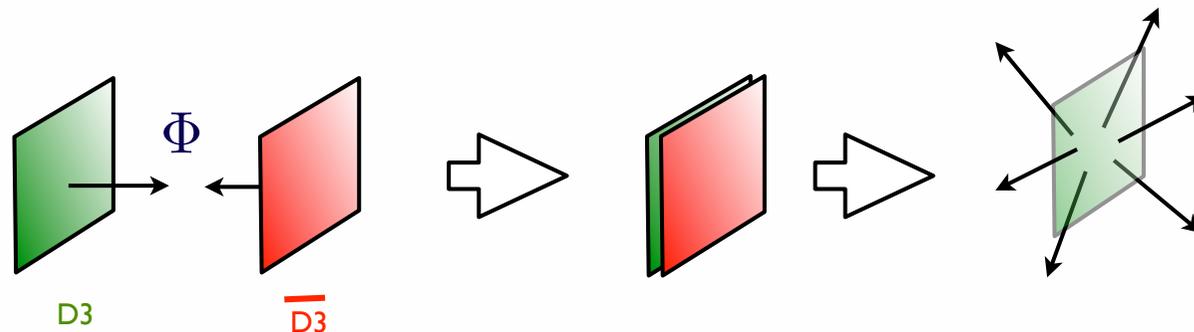
~ En particular sugieren **modelos** intuitivos de **inflación**

📌 Se considera una compactificación con una **D3-brana** y una **anti-D3-brana** (el anti-objeto de la D3-brana)

📌 Como tienen carga opuesta se **atraen entre si** y crean una **aceleración**

📌 **El inflatón es la distancia** entre las dos branas

📌 Cuando se juntan, **se aniquilan** y termina la inflación. **Se libera** un montón de **energía** que se transforma en partículas del Modelo Estándar

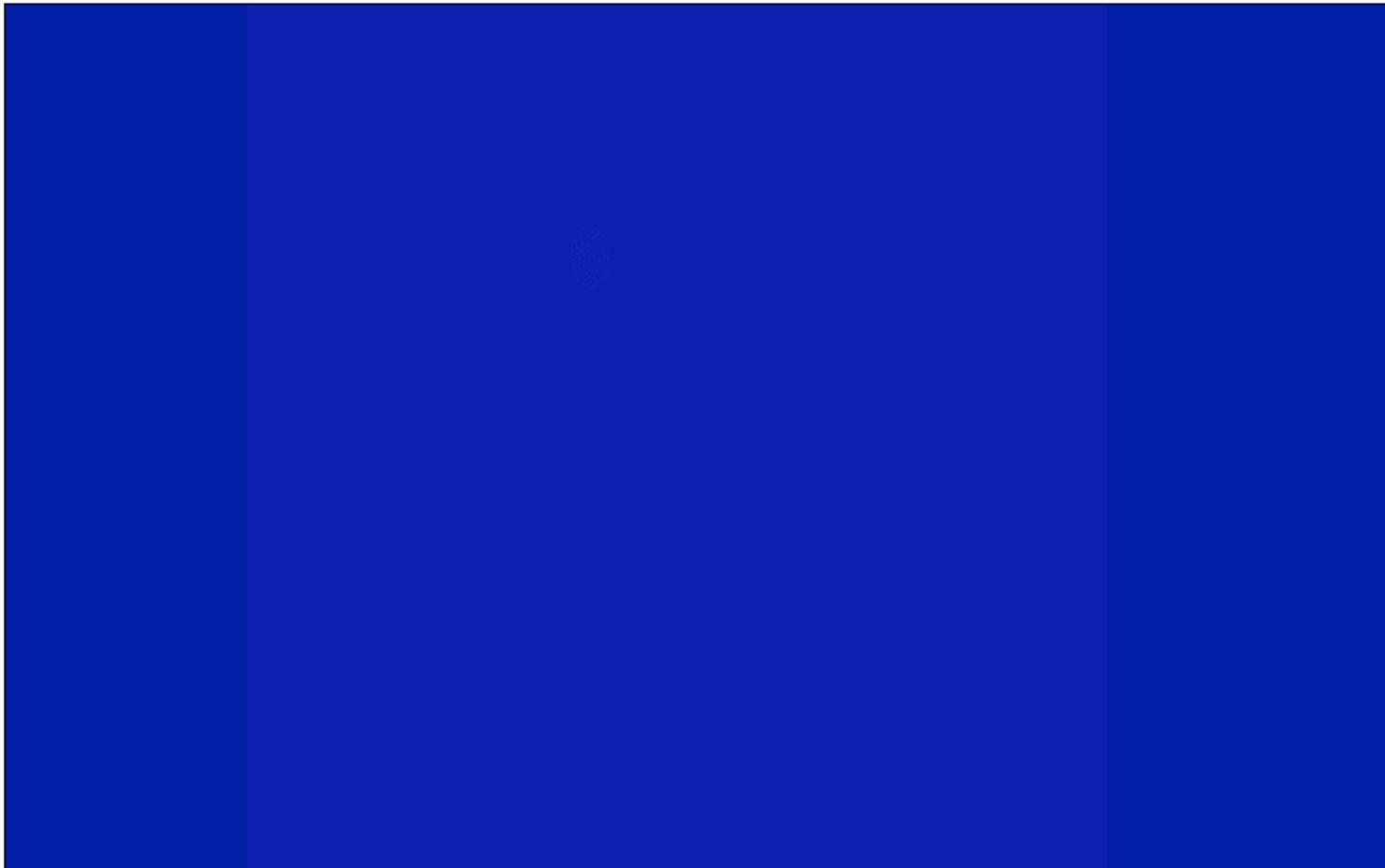


Tye  
(1998)  
Dvali



# D-branas e Inflación

~ En particular sugieren **modelos** intuitivos de **inflación**



Tye  
(1998)  
Dvali



# Nuevas ideas inspiradas por las cuerdas

---

~ Después de haberse descubierto en el contexto de las teorías de cuerdas, las propuestas

 Mundos brana

 Dimensiones extra grandes

 Inflación de branas

se han llegado a formular independientemente de la teoría de cuerdas y se han considerado sus consecuencias en experimentos como el

LHC

# Nuevas ideas inspiradas por las cuerdas

---

~ Después de haberse descubierto en el contexto de las teorías de cuerdas, las propuestas

 Mundos brana

 Dimensiones extra grandes

 Inflación de branas

se han llegado a formular independientemente de la teoría de cuerdas y se han considerado sus consecuencias en experimentos como el

LHC

~ Otros ejemplos son:

 Supersimetría

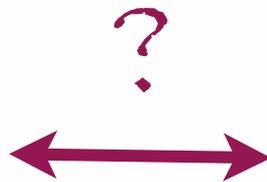
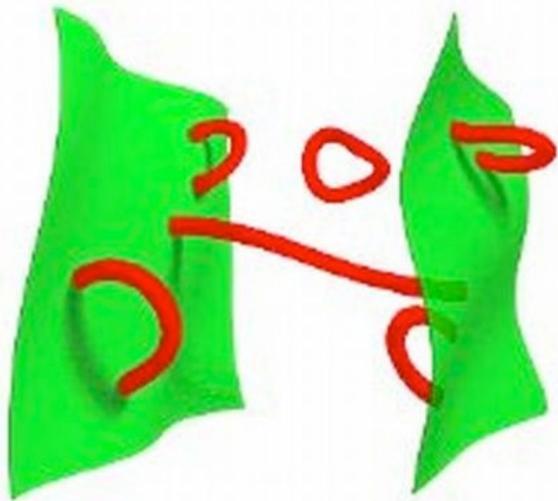
 Modelos Randall-Sundrum (geometría deformada)

# Nuevas ideas inspiradas por las cuerdas

---

- ~ La **teoría de cuerdas** ha resultado ser una **herramienta** única **para generar nuevas ideas**, así como para enfocar problemas de Gravitación y Física de partículas desde una nueva perspectiva
- ~ Las **D-branas** son particularmente útiles a la hora de generar nuevas ideas, porque **traducen** las preguntas y problemas de la física de partículas **en preguntas geométricas**
- ~ A pesar de que estas ideas se formulen y estudien de manera independiente, la **teoría de cuerdas** sigue siendo la **única manera de unificar el Modelo Estándar de Partículas y la Relatividad General**

# D-branas y Física de Partículas



**ELEMENTARY PARTICLES**

Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	$g$ gluon
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z$ Z boson
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$W$ W boson

I II III  
Three Generations of Matter

Force Carriers

Formlab 95-759

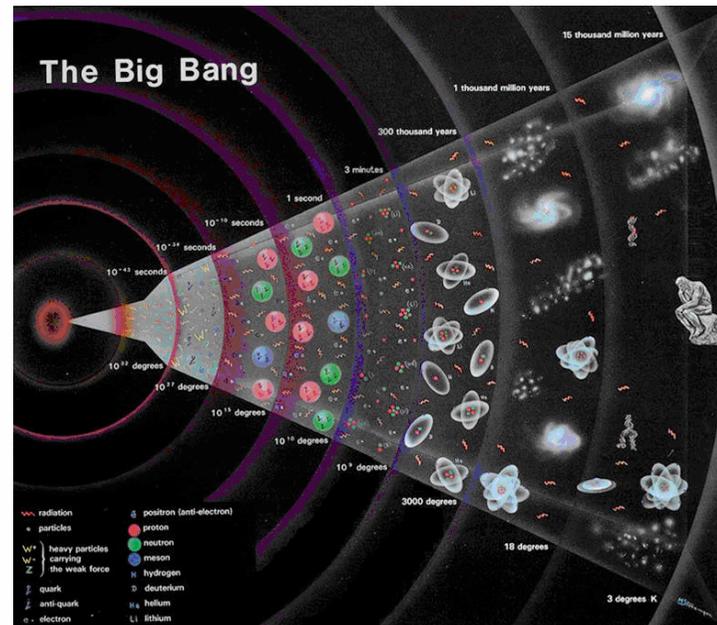
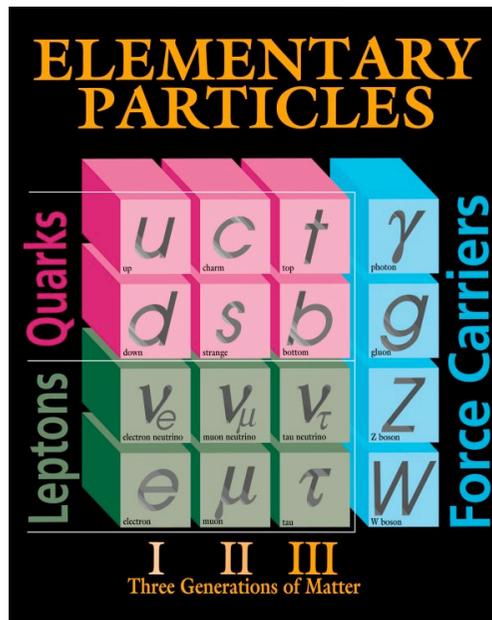
# Fenomenología de Cuerdas

~ La **fenomenología de cuerdas** es el campo de la teoría de cuerdas que **intenta reproducir**

🔊 El **Modelo Estándar de Partículas**

🔊 El **Modelo Estándar Cosmológico ( $\Lambda$ CDM)**

mediante un modelo basado en la teoría de cuerdas



# Fenomenología de Cuerdas

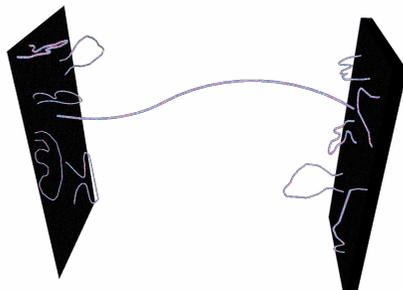
~ La **fenomenología de cuerdas** es el campo de la teoría de cuerdas que **intenta reproducir**

📌 El **Modelo Estándar de Partículas**

📌 El **Modelo Estándar Cosmológico** ( $\Lambda$ CDM)

mediante un modelo basado en la teoría de cuerdas

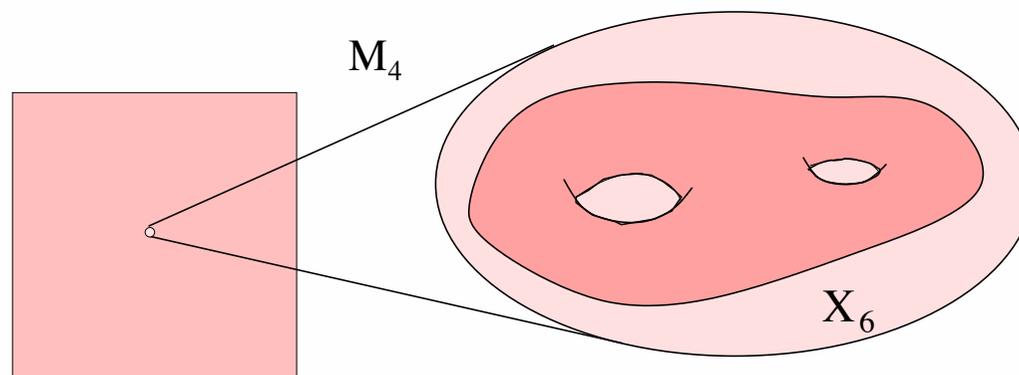
~ En lo sucesivo nos vamos a centrar en ver cómo se consigue esto a partir de las **teorías tipo II**, y en particular el papel central que juegan las **D-branas** y la **geometría**



# De Cuerdas a Partículas

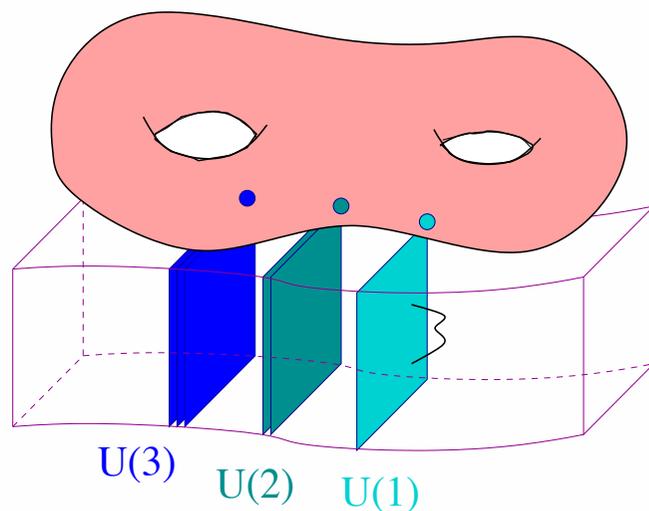
---

- ~ Las teorías tipo II poseen **10 dimensiones**
- ~ Las **cuerdas cerradas**, es decir la gravedad, se propagan por **todas estas 10 dimensiones**
- ~ Para recuperar el universo que observamos usamos la **idea de Kaluza y Klein** y suponemos que **seis** de las dimensiones son **muy pequeñas**

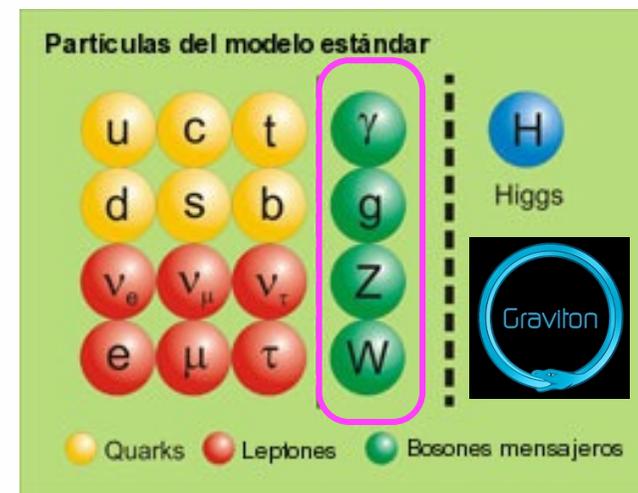


# De Cuerdas a Partículas

- ~ Las teorías tipo II poseen **10 dimensiones**
- ~ **Ejemplo** más sencillo: **3 + 2 + 1 D3-branas**
  - ➔ Teoría gauge  **$U(3) \times U(2) \times U(1)$**  en 4d
- ~ Este modelo reproduce, a bajas energías, todas las **interacciones observables** (partículas de interacción)

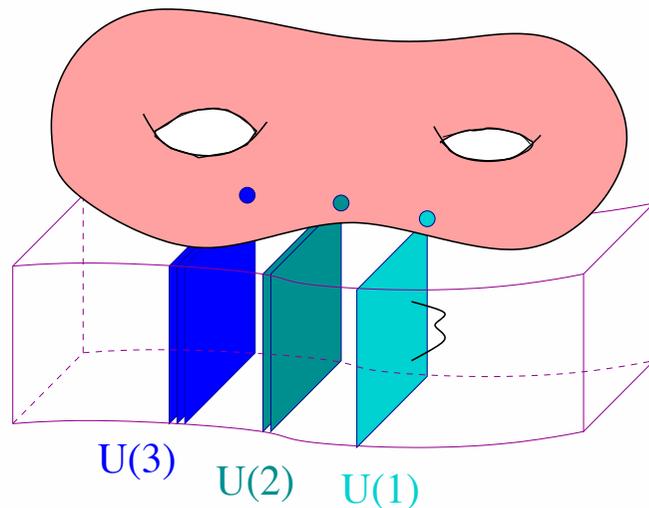


$X_6$   
→  
 $M_4$



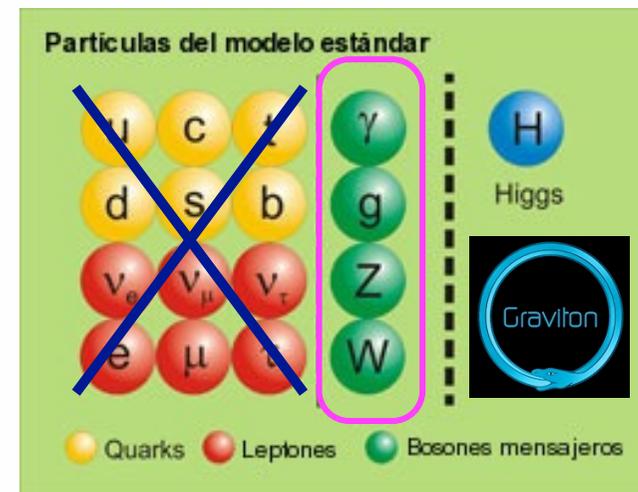
# De Cuerdas a Partículas

- ~ Las teorías tipo II poseen **10 dimensiones**
- ~ **Ejemplo** más sencillo: **3 + 2 + 1 D3-branas**
- ~ Este modelo reproduce, a bajas energías, todas las **interacciones observables** (partículas de interacción)
- ~ Sin embargo **no reproduce** las partículas de **materia**, más precisamente no aparecen los **quarks y leptones** del Modelo Estándar



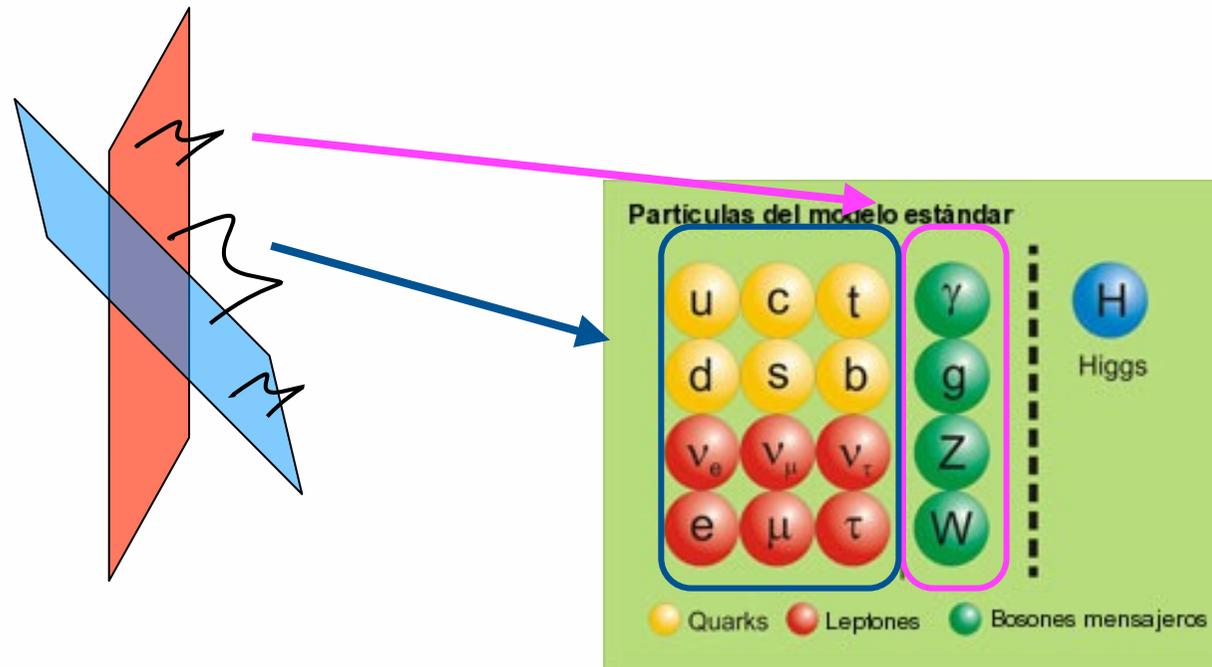
$X_6$   
 $M_4$

→



# De Cuerdas a Partículas

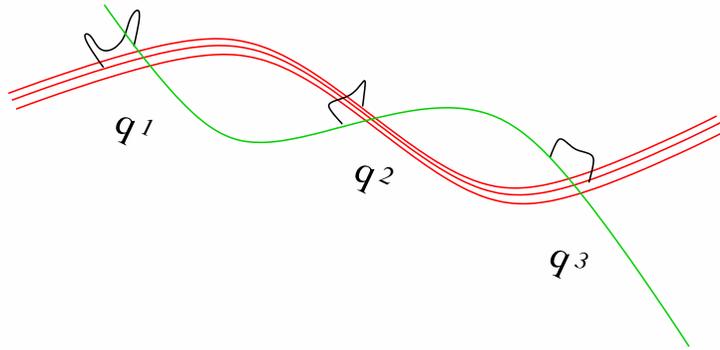
- ~ Para conseguir las **partículas de materia** es necesario considerar dos **D-branas** intersecándose



# De Cuerdas a Partículas

---

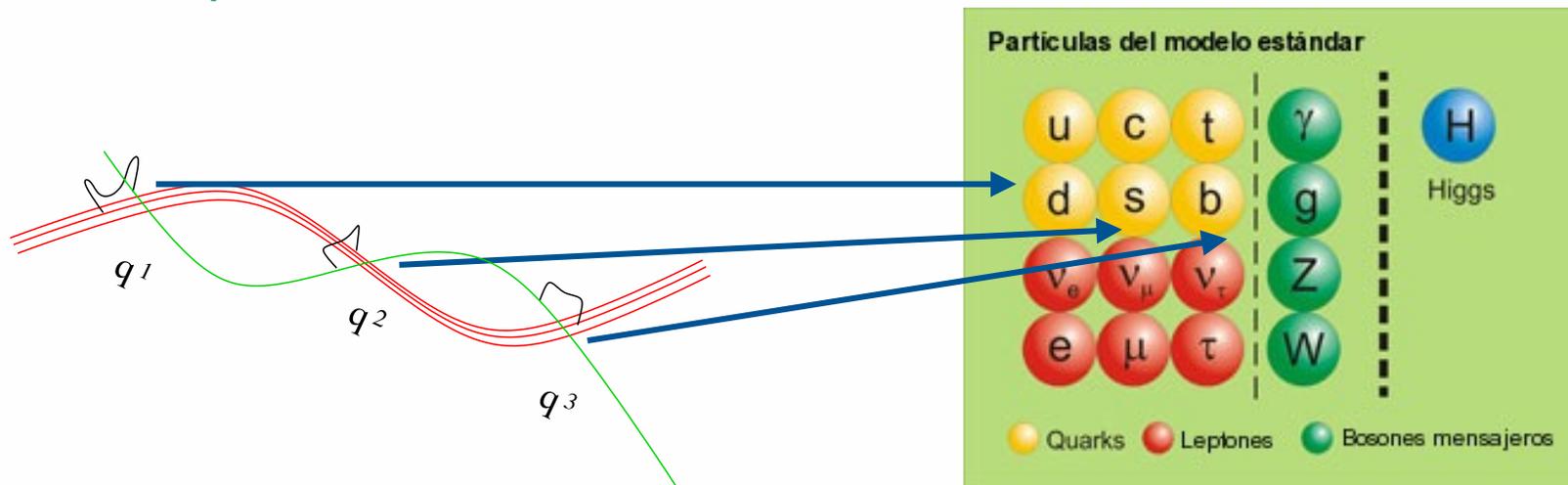
- ~ Cuando dos branas se **intersecan varias veces** dan lugar a **varias copias** de esta materia



- ~ Esto no ocurre en espacio plano pero si cuando las D-branas enrollan **espacios compactos**

# De Cuerdas a Partículas

- ~ Cuando dos branas se **intersecan varias veces** dan lugar a **varias copias** de esta materia

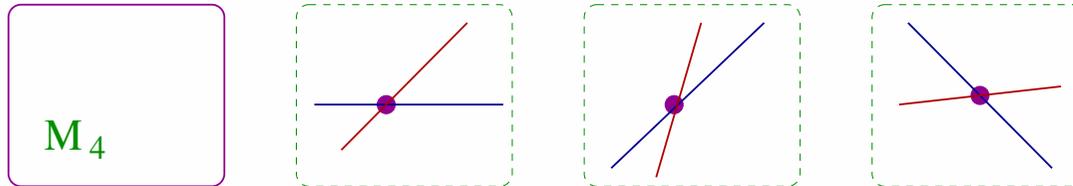


- ~ Esto no ocurre en espacio plano pero si cuando las D-branas enrollan **espacios compactos**

# De Cuerdas a Partículas

---

- ~ Dos **D6-branas** en 10 dimensiones **se intersecan en 4 dim**  
⇒ tenemos una partícula de materia en 4 dim

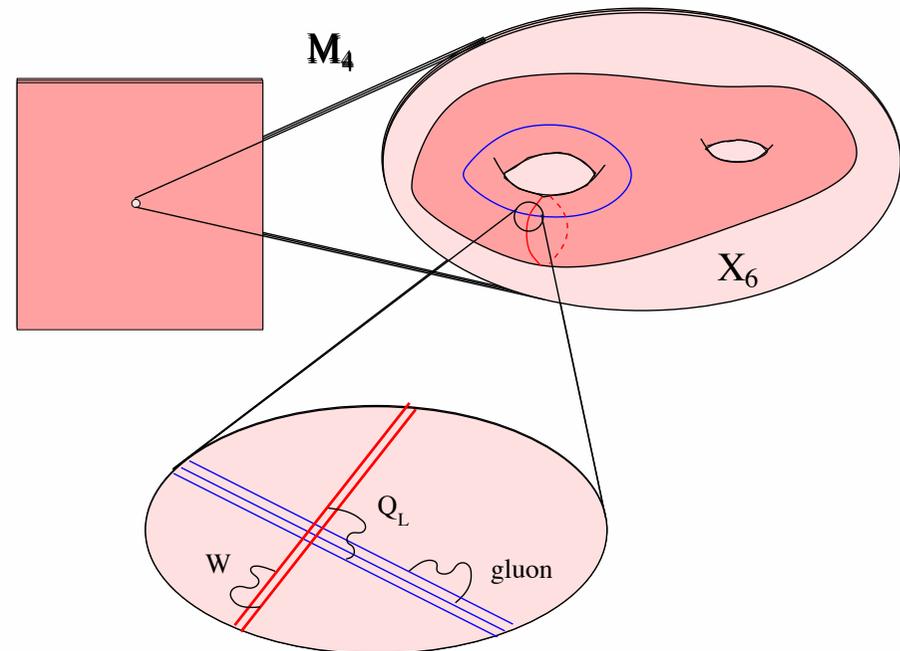


- ~ **Idea:** vamos a intentar construir el **Modelo Estándar** de Partículas a partir de **D6-branas** intersecándose

# De Cuerdas a Partículas

~ **Idea:** vamos a intentar construir el **Modelo Estándar** de Partículas a partir de **D6-branas** intersecándose

- 📌 La **gravedad** vive en 10 dimensiones
- 📌 Las **partículas de interacción** viven en 7 dimensiones, tres de las cuales son pequeñas
- 📌 Las **partículas de materia** viven en 4 dimensiones

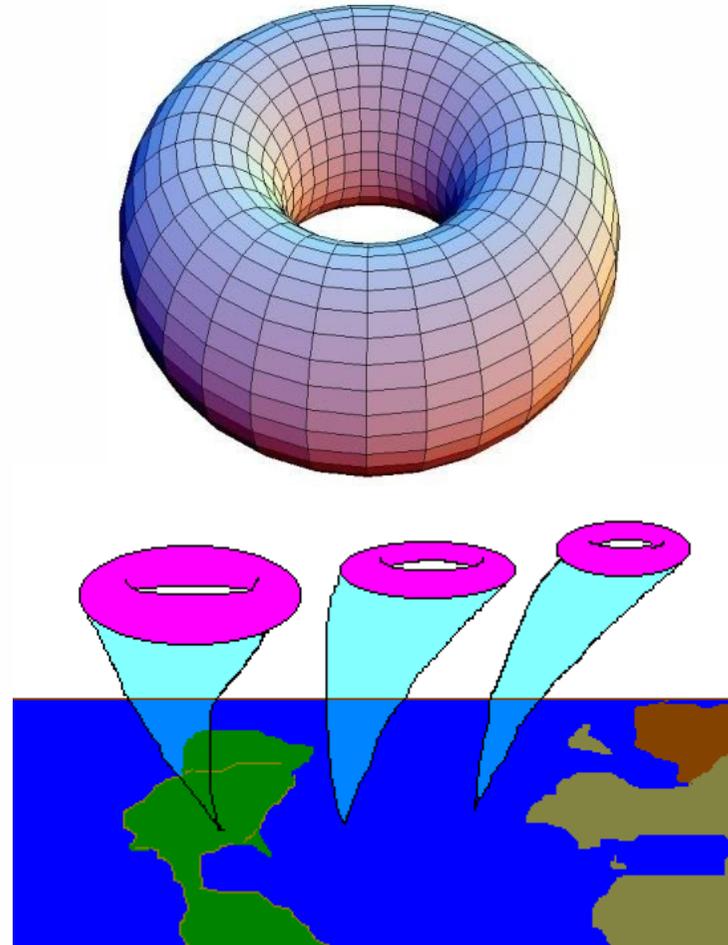


# Un ejemplo sencillo

---

- ~ Veamos un ejemplo de este tipo de construcciones
- ~ Para simplificar, supongamos que tenemos **2 dimensiones extra** en lugar de 6

📌 La teoría nos pide que estas dos dimensiones extra sean un producto de dos círculos.



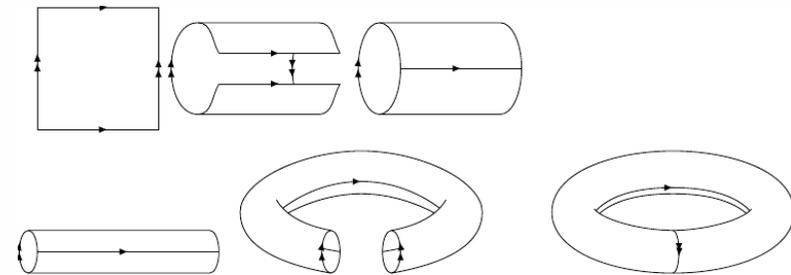
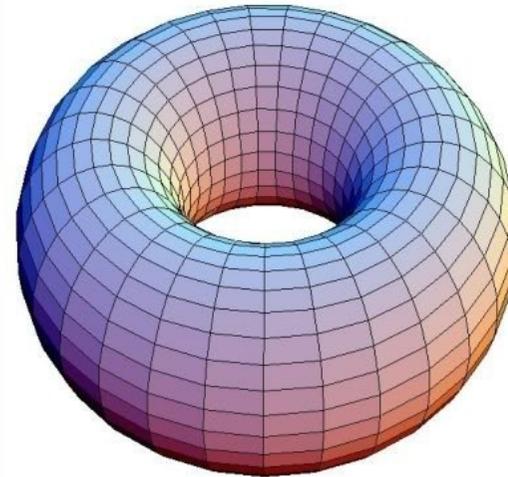
# Un ejemplo sencillo

- ~ Veamos un ejemplo de este tipo de construcciones
- ~ Para simplificar, supongamos que tenemos 2 dimensiones extra en lugar de 6

• La teoría nos pide que estas dos dimensiones extra sean un producto de dos círculos.

• Esta variedad se suele llamar toro y se simboliza por  $T^2$

• Matemáticamente se construye identificando puntos del plano bajo traslaciones por dos vectores fijos o pegando los lados de un rectángulo



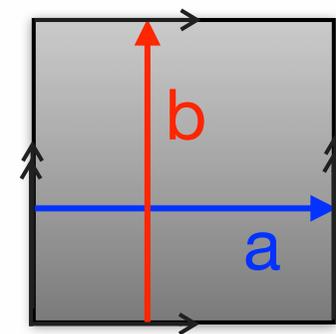
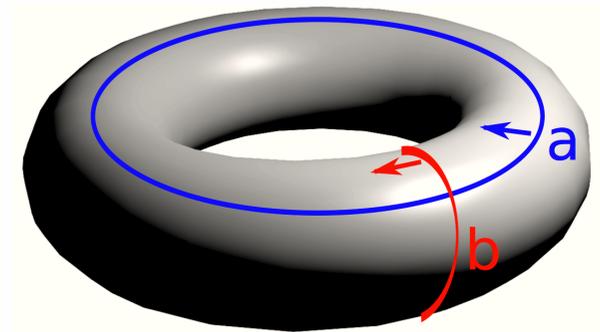
# Un ejemplo sencillo

~ Con dos dimensiones extra necesitamos **D4-branas**

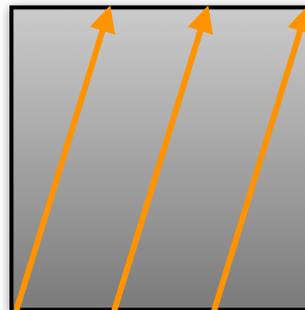
📌 Las D4-branas tienen **una dimensión extra** enrollada en el  $T^2$

📌 Hay **dos maneras básicas de enrollar** esta dimensión en un toro: a lo largo de cada uno de los círculos

📌 La manera más general de enrollar esta dimensión extra es dar  **$n$  vueltas** en el **círculo  $a$**  y  **$m$  vueltas** en el  **$b$**



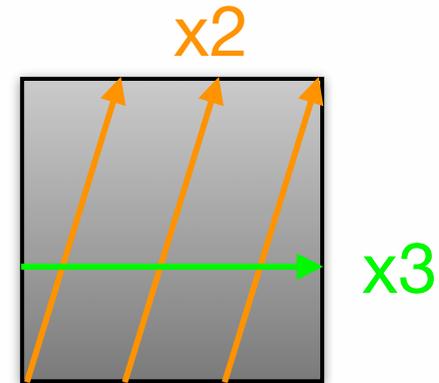
$$(n,m) = (1,3)$$



# Un ejemplo sencillo

~ Veamos cómo se **intersecan** las D-branas

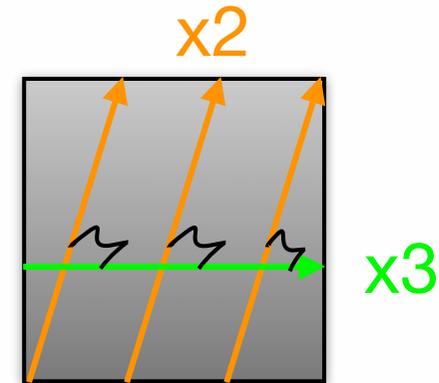
- Consideremos dos conjuntos de D4-branas
- 3 D4-branas en  $(n_1, m_1) = (1, 0)$
- 2 D4-branas en  $(n_2, m_2) = (1, 3)$
- El número de veces que **intersecan** es **3** → **triplicación de materia**



# Un ejemplo sencillo

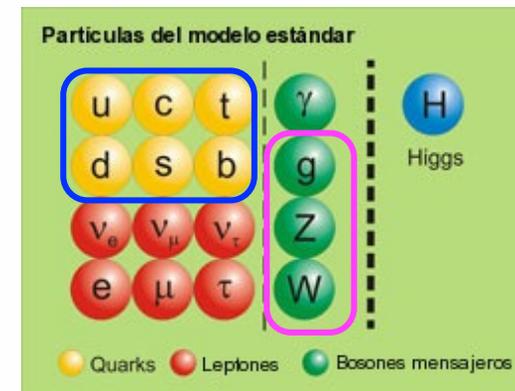
~ Veamos cómo se intersecan las D-branas

- Consideremos dos conjuntos de D4-branas
- 3 D4-branas en  $(n_1, m_1) = (1, 0)$
- 2 D4-branas en  $(n_2, m_2) = (1, 3)$
- El número de veces que **intersecan** es **3** → **triplicación de materia**
- Las partículas que salen de esta configuración son:



Interacción  $U(3) \times U(2)$

3 pares de Quarks  
(parte levógira)



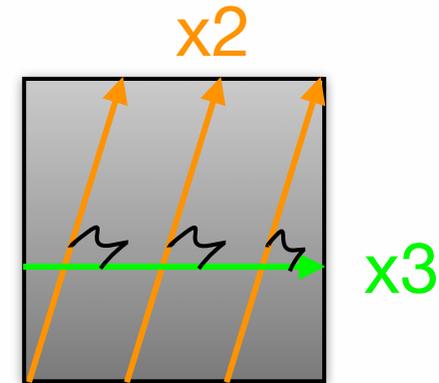
# Un ejemplo sencillo

~ Veamos cómo se intersecan las D-branas

- Consideremos dos conjuntos de D4-branas
- 3 D4-branas en  $(n_1, m_1) = (1, 0)$
- 2 D4-branas en  $(n_2, m_2) = (1, 3)$
- El número de veces que **intersecan** es **3** → **triplicación de materia**
- En general el número de intersección es:

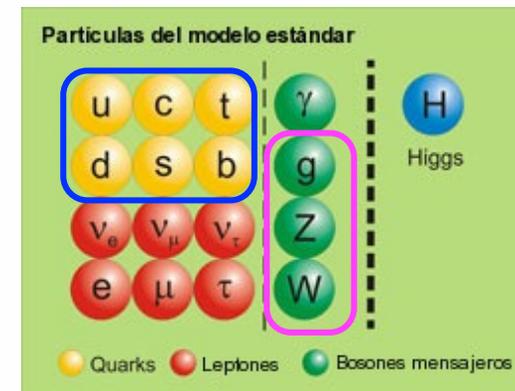
$$I_{12} = n_1 m_2 - n_2 m_1$$

y hay que añadir **más branas con el número de intersección adecuado** para recuperar todas las partículas del Modelo Estándar



Interacción  $U(3) \times U(2)$

3 pares de Quarks  
(parte levógira)



# Un ejemplo sencillo

---

- ~ Sin embargo hay que tener cuidado con ciertas **condiciones de consistencia** que impone la teoría
- ~ Estas condiciones son importantes para asegurarse que la construcción tiene sentido
- ~ En este caso se traducen en que

$$\sum_a N_a n_a = 0$$

$$\sum_a N_a m_a = 0$$

# Un ejemplo sencillo

---

- ~ Sin embargo hay que tener cuidado con ciertas **condiciones de consistencia** que impone la teoría
- ~ Estas condiciones son importantes para asegurarse que la construcción tiene sentido

~ En este caso se traducen en que  $\sum_a N_a n_a = 0$

$$\sum_a N_a m_a = 0$$

~ En **nuestro ejemplo**:

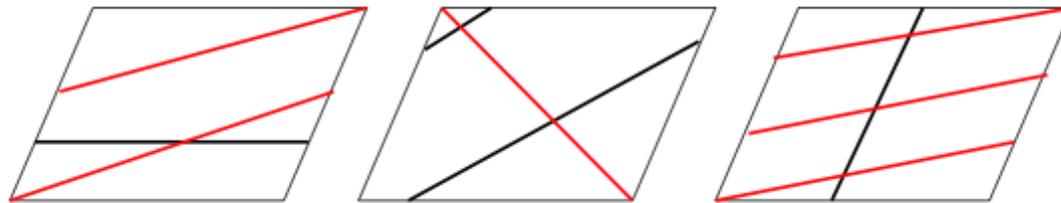
$$3(1,0)+2(1,3)+1(-1,-3)+1(-2,-3)=0$$

...luego añadiendo un par de branas más satisfacemos esta condición. Esto es importante para que la teoría de partículas no tenga **anomalías**. Este tipo de condiciones son habituales en las construcciones de cuerdas.

# Ejemplos más completos

---

- ~ Este ejemplo captura los **elementos básicos** de las construcciones más realistas. Recordemos que en realidad tenemos
  - 📌 **6 dimensiones extra**
  - 📌 **D6-branas** con 3 dimensiones extra
- ~ Podemos conseguir esto haciendo un producto cartesiano del anterior modelo

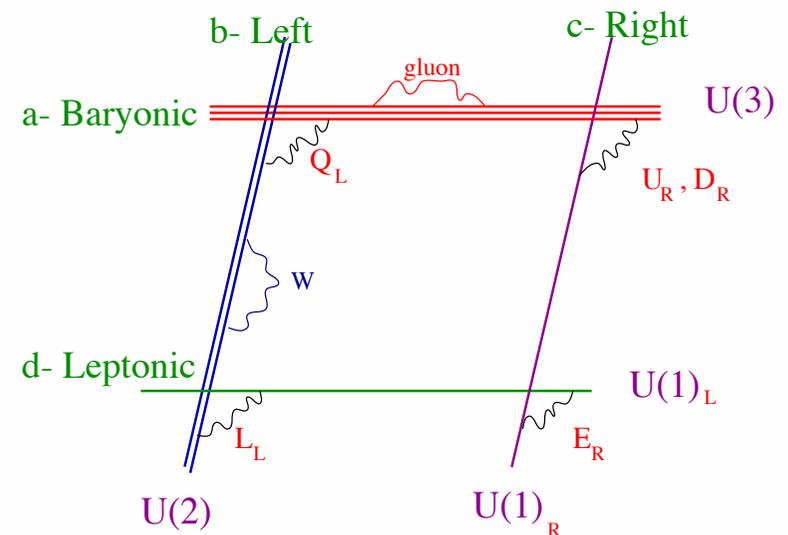


$$\text{Numero de intersección} = 1 \times 2 \times 3 = 6$$

# Ejemplos más completos

- En la práctica es posible conseguir modelos con **cuatro grupos de D6-branas** y los números de intersección adecuados

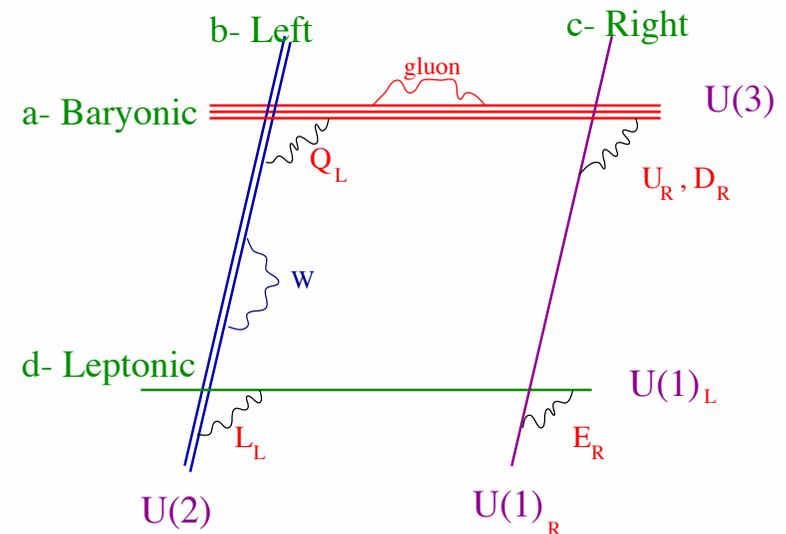
# D-branas	Grupo Gauge	Nombre
$N_a = 3$	$SU(3) \times U(1)_a$	Brana Bariónica
$N_b = 2$	$SU(2) \times U(1)_b$	Brana Left
$N_c = 1$	$U(1)_c$	Brana Right
$N_d = 1$	$U(1)_d$	Brana Leptónica



# Ejemplos más completos

- En la práctica es posible conseguir modelos con **cuatro grupos de D6-branas** y los números de intersección adecuados

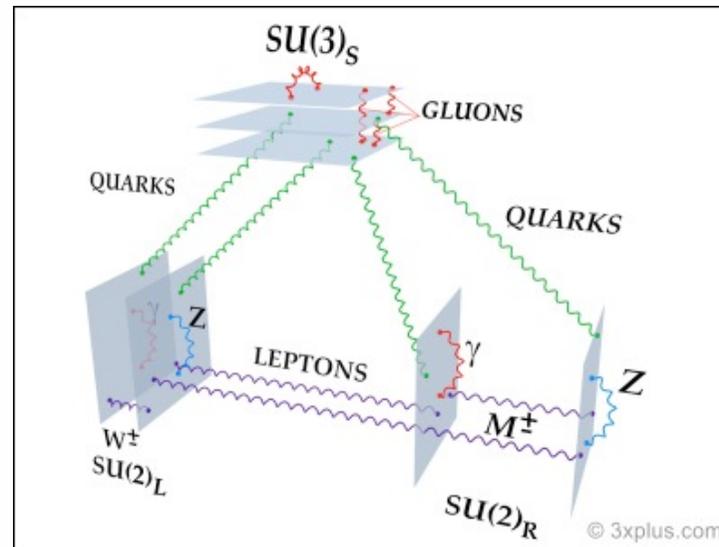
# D-branas	Grupo Gauge	Nombre
$N_a = 3$	$SU(3) \times U(1)_a$	Brana Bariónica
$N_b = 2$	$SU(2) \times U(1)_b$	Brana Left
$N_c = 1$	$U(1)_c$	Brana Right
$N_d = 1$	$U(1)_d$	Brana Leptónica



- El grupo de interacción gauge es  $SU(3) \times SU(2) \times U(1) \times [U(1)^3]$  así que sobran tres fotones
- En realidad estos fotones tienen masa (**bosones  $Z'$** ) y podrían ser detectables en el LHC...

# Ejemplos más completos

- ~ En la práctica es posible conseguir modelos con **cuatro grupos de D6-branas** y los números de intersección adecuados



- ~ Un aspecto atractivo de estos modelos es que tener **tres familias** se traduce a una **propiedad geométrica** ( $I = 3$ )
- ~ Lo mismo ocurre con otras cantidades importantes...

# Los acoplos del Modelo Estándar

---

- ~ Una cantidad importante son las **constantes de acoplo** de las interacciones del Modelo Estándar

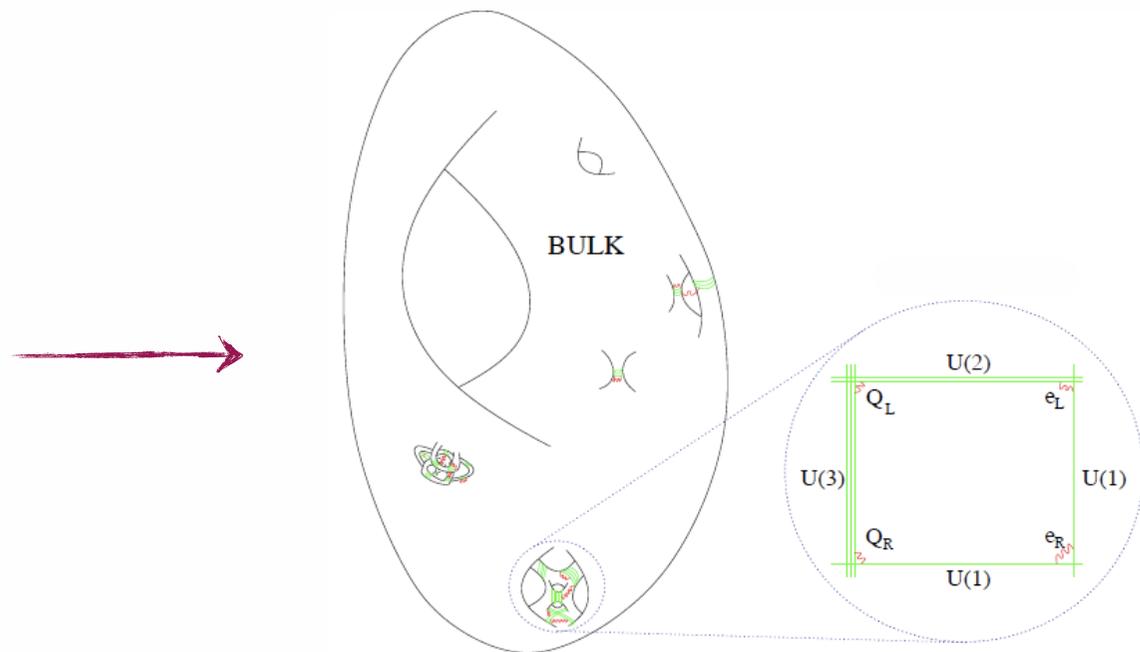
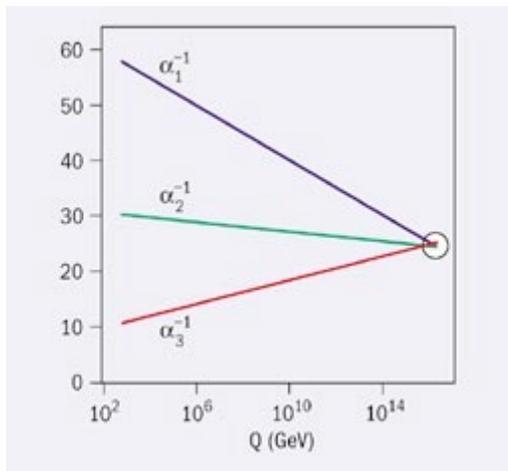
$$\alpha_i^{-1} = \frac{1}{g_s} \text{Vol}(D6_i)$$

# Los acoplos del Modelo Estándar

- ~ Una cantidad importante son las **constantes de acoplo** de las interacciones del Modelo Estándar

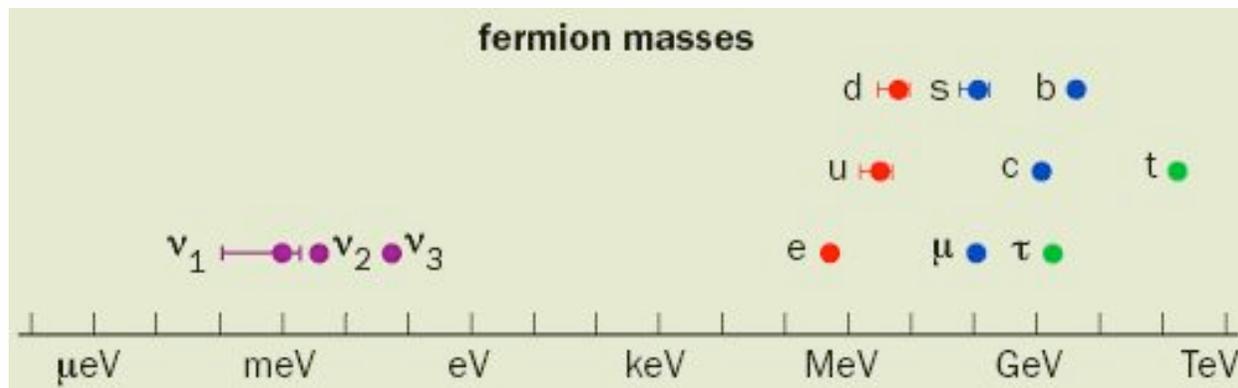
$$\alpha_i^{-1} = \frac{1}{g_s} \text{Vol}(D6_i)$$

luego si los volúmenes de las D6-branas son parecidos tendremos **unificación** de los valores de los acoplos



# Los acoplos al bosón de Higgs

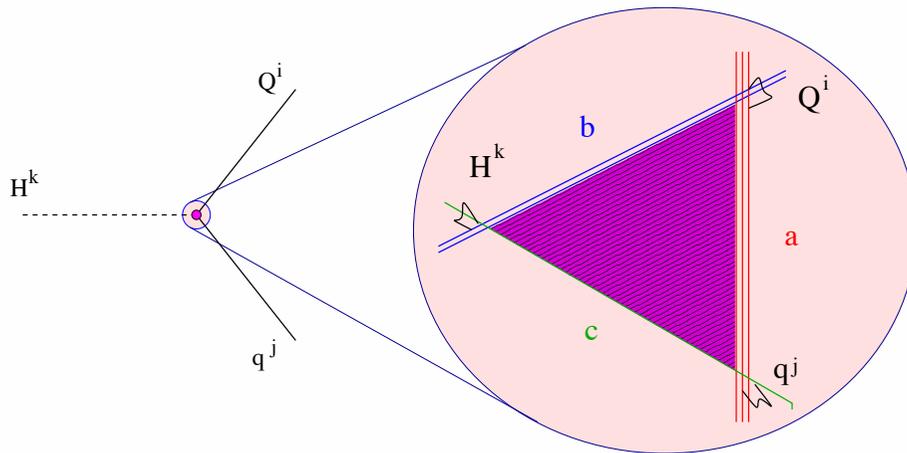
- ~ Otra cantidad crucial del Modelo Estándar es el **acoplo** de quarks y leptones al **bosón de Higgs** (acoplos de **Yukawa**)
- ~ A mayor el acoplo mayor la **masa de la partícula**, y se sabe que estas masas son muy distintas unas de otras



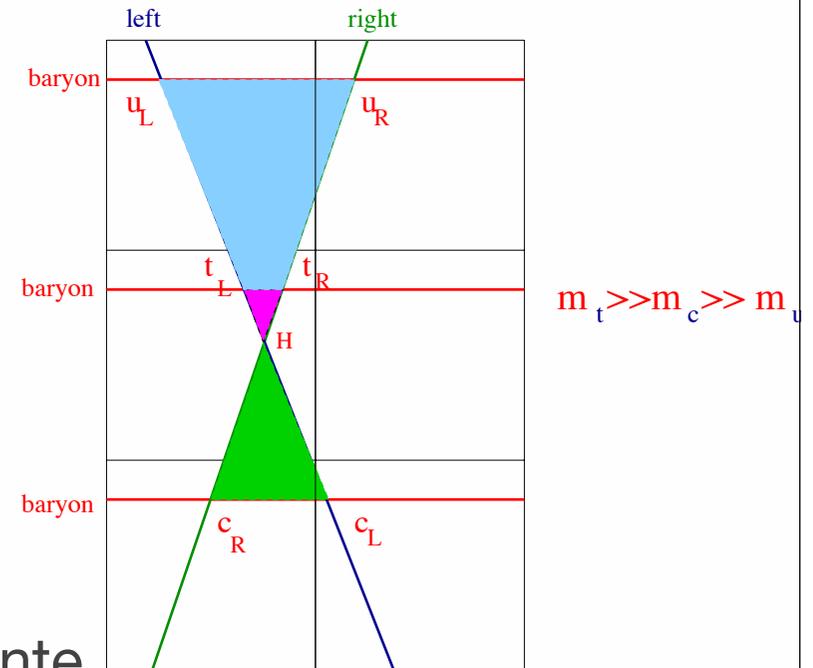
# Los acoplos al bosón de Higgs

- ~ Otra cantidad crucial del Modelo Estándar es el **acoplo** de quarks y leptones al **bosón de Higgs** (acoplos de **Yukawa**)
- ~ A mayor el acoplo mayor la **masa de la partícula**, y se sabe que estas masas son muy distintas unas de otras

~ Tenemos que  $Y_{ijk} = e^{-Area_{ijk}}$



luego se generan **jerarquías** naturalmente



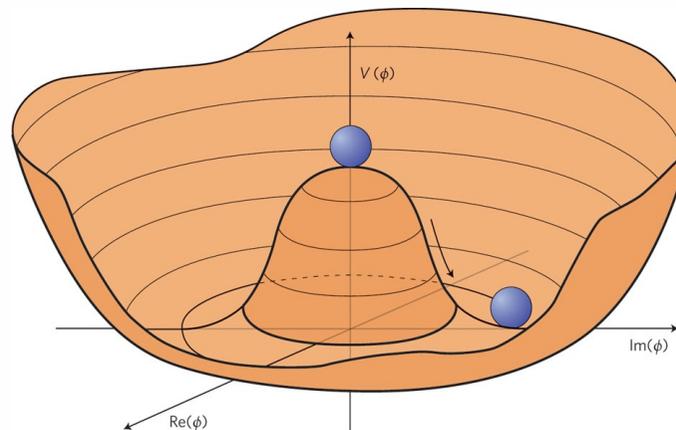
# El mecanismo de Higgs

---

- ~ Un proceso crucial del Modelo Estándar es el de la **ruptura de la simetría Electrodébil** mediante el mecanismo de Brout-Englert-Higgs

$$SU(2) \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$$

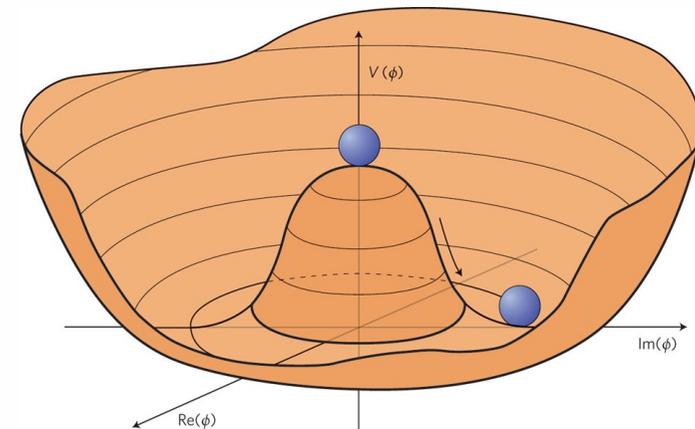
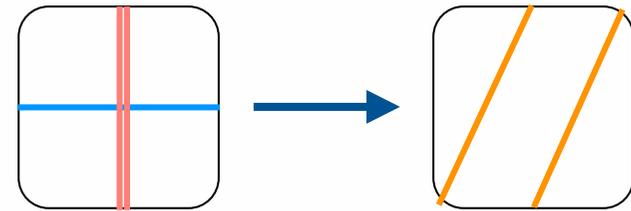
partículas sin masa  $\rightarrow$  partículas masivas



# El mecanismo de Higgs

~ Un proceso crucial del Modelo Estándar es el de la **ruptura de la simetría Electrodébil** mediante el mecanismo de Brout-Englert-Higgs

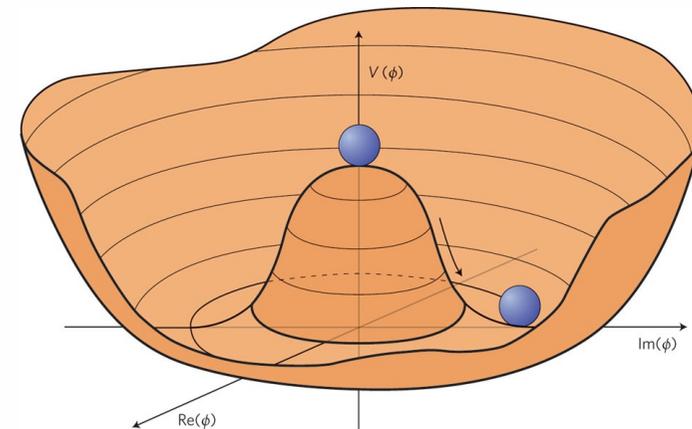
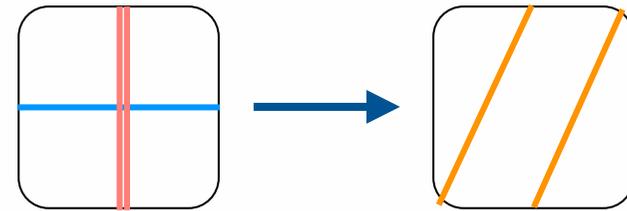
- 📌 En estos modelos esto ocurre cuando dos **D-branas se recombinan** en una tercera
- 📌 Esto ocurre dinámicamente al minimizar la energía



# El mecanismo de Higgs

~ Un proceso crucial del Modelo Estándar es el de la **ruptura de la simetría Electrodébil** mediante el mecanismo de Brout-Englert-Higgs

- 📌 En estos modelos esto ocurre cuando dos **D-branas se recombinan** en una tercera
- 📌 Esto ocurre dinámicamente al minimizar la energía
- 📌 Los números de intersección cambian tras la recombinación, porque muchas partículas se vuelven masivas



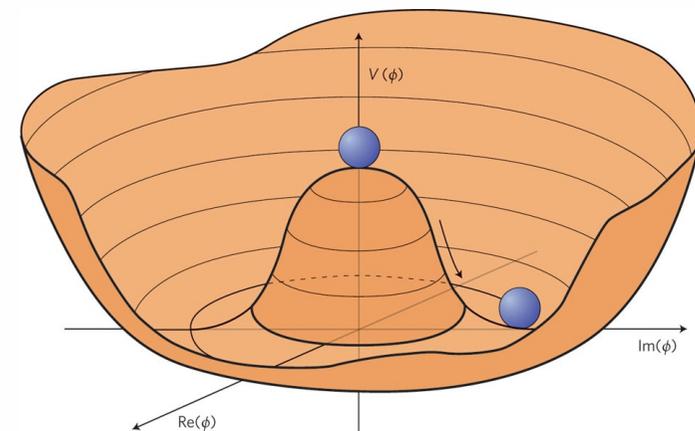
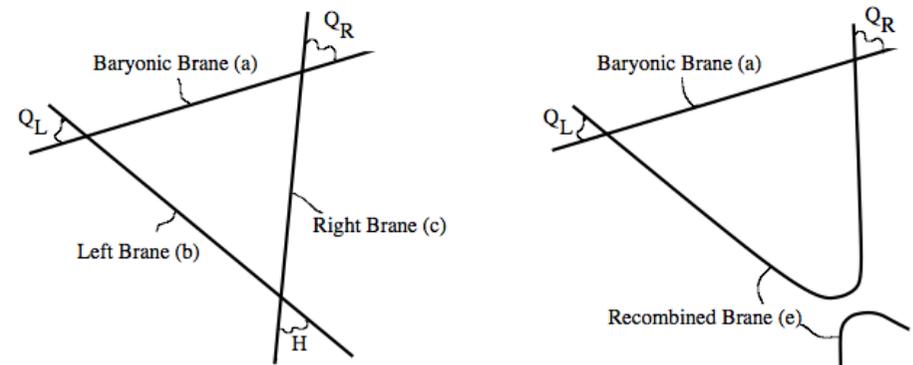
# El mecanismo de Higgs

~ Un proceso crucial del Modelo Estándar es el de la **ruptura de la simetría Electrodébil** mediante el mecanismo de Brout-Englert-Higgs

📌 En estos modelos esto ocurre cuando dos **D-branas se recombinan** en una tercera

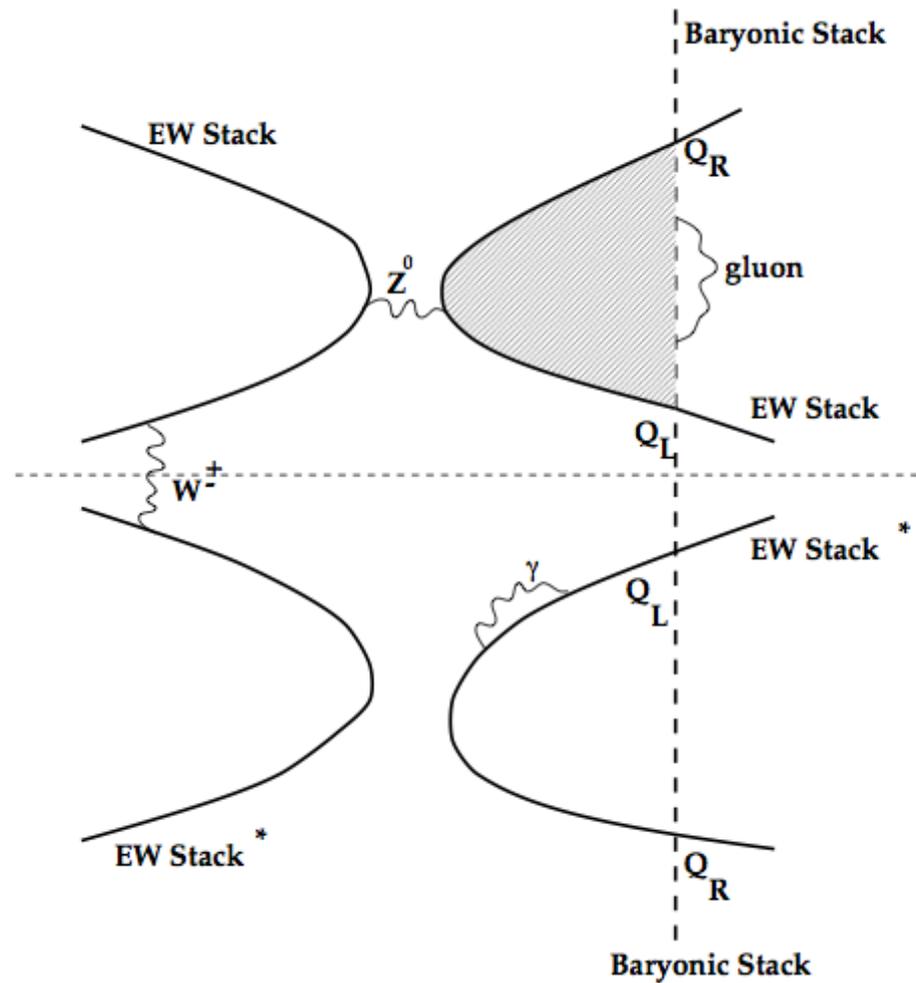
📌 Esto ocurre dinámicamente al minimizar la energía

📌 Conexión matemática con el teorema del ángulo



# El mecanismo de Higgs

---



# Conclusiones

---

- ~ La **fenomenología de cuerdas** es la línea de investigación cuyo cometido es reproducir el Modelo Estándar de Partículas y el de Cosmología a partir de la teoría de cuerdas/teoría M
- ~ A través de la investigación que se ha hecho en este campo han surgido **numerosas ideas y propuestas** para entender mejor estos modelos y la física más allá de ellos
  -  Mundos brana
  -  Dimensiones extra grandes
  -  Inflación de branas
  -  Supersimetría

# Conclusiones

---

- ~ La **fenomenología de cuerdas** es la línea de investigación cuyo cometido es reproducir el Modelo Estándar de Partículas y el de Cosmología a partir de la teoría de cuerdas/teoría M
- ~ A través de la investigación que se ha hecho en este campo han surgido **numerosas ideas y propuestas** para entender mejor estos modelos y la física más allá de ellos
- ~ Las **D-branas** son particularmente útiles en este sentido, pues traducen muchos problemas del Modelo Estándar en **preguntas geométricas**
- ~ Un caso claro es el de **D-branas intersecándose**, con las cuales se puede conseguir modelos de partículas muy cercanos al Modelo Estándar