

Teoría de cuerdas

fernando marchesano



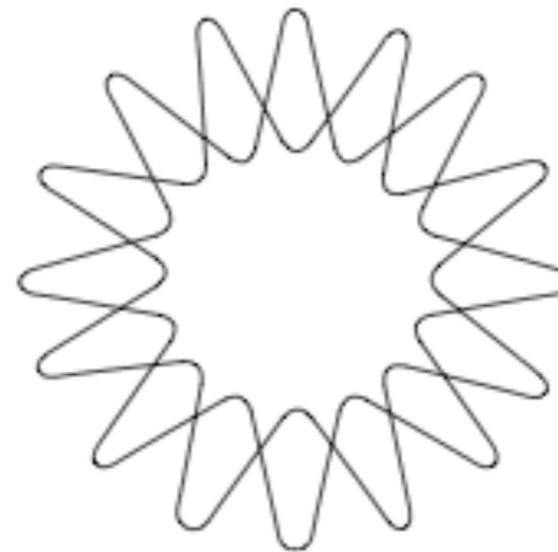
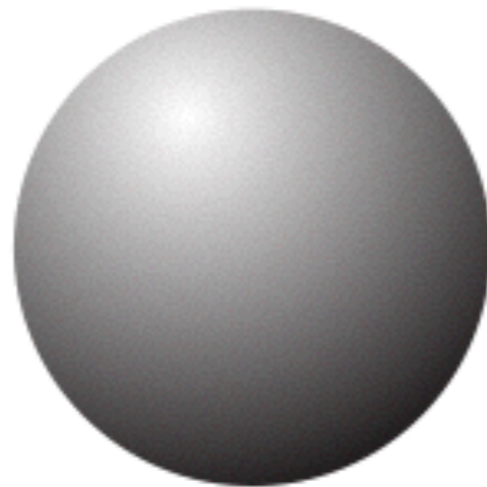
Instituto de
Física
Teórica
UAM-CSIC

Qué es la Teoría de Cuerdas?

Postulado Básico



Lo que entendemos por **partículas elementales** (quarks, electrones, neutrinos, fotones, bosón de Higgs...) **no son** cosas **puntuales sino** que son **cuerdas** vibrando



zoom



or

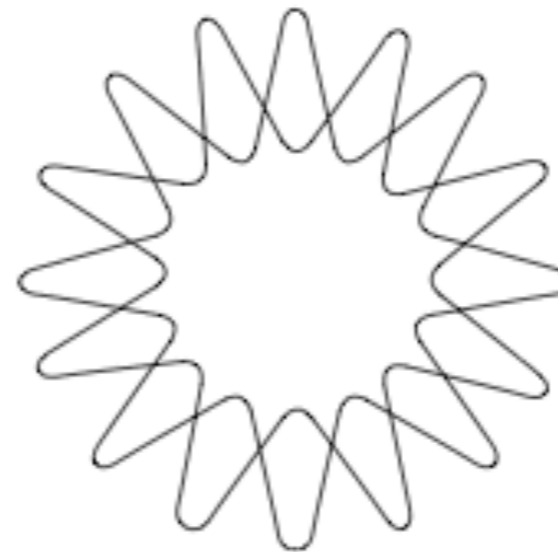


Qué es la Teoría de Cuerdas?

Postulado Básico



Lo que entendemos por **partículas elementales** (quarks, electrones, neutrinos, fotones, bosón de Higgs...) **no son** cosas **puntuales sino** que son **cuerdas** vibrando



zoom



or



Esto ya nos ha pasado antes...

Periodic Table of the Elements

Carbon

6 protons
6 neutrons
6 electrons

atomic number atomic weight

14 28.09

Si Silicon

symbol

Black = Solid
Blue = Liquid
Red = gas
white = Synthetically prepared most stable isotope

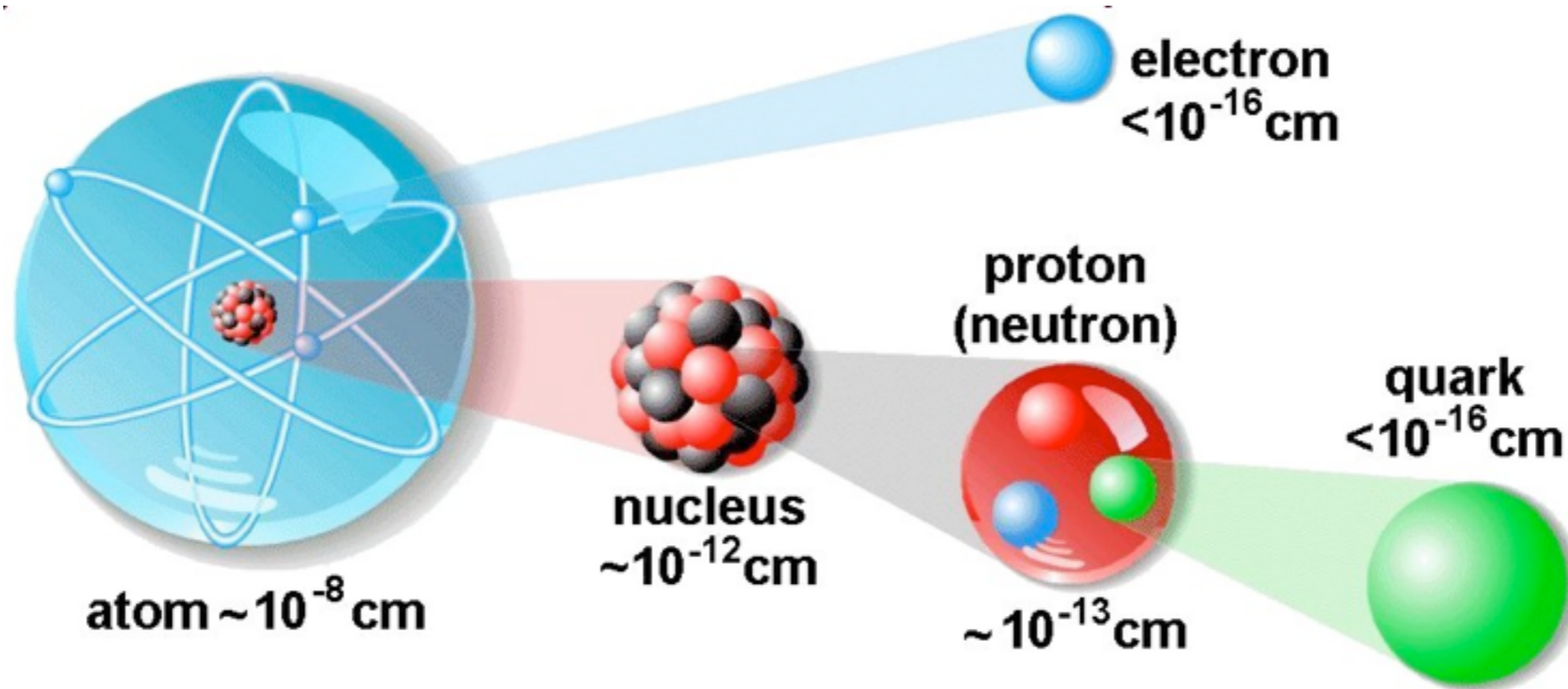
- transitional metals
- other metals
- nonmetals
- noble gases

1	H																	He																			
3	Li	4	Be																	Ne																	
11	Na	12	Mg																	Ar																	
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr		
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe		
55	Cs	56	Ba	57	La	58	Hf	59	Ta	60	W	61	Re	62	Os	63	Ir	64	Pt	65	Au	66	Hg	67	Tl	68	Pb	69	Bi	70	Po	71	At	72	Rn		
87	Fr	88	Ra	89	Ac	90	Rf	91	Ha	92	Sg	93	Bh	94	Hs	95	Mt	100	(101)	102	(103)	104	(105)	106	(107)	108	(109)	110	(111)	112	(113)	114	(115)	116	(117)	118	(119)
58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu										
90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr										

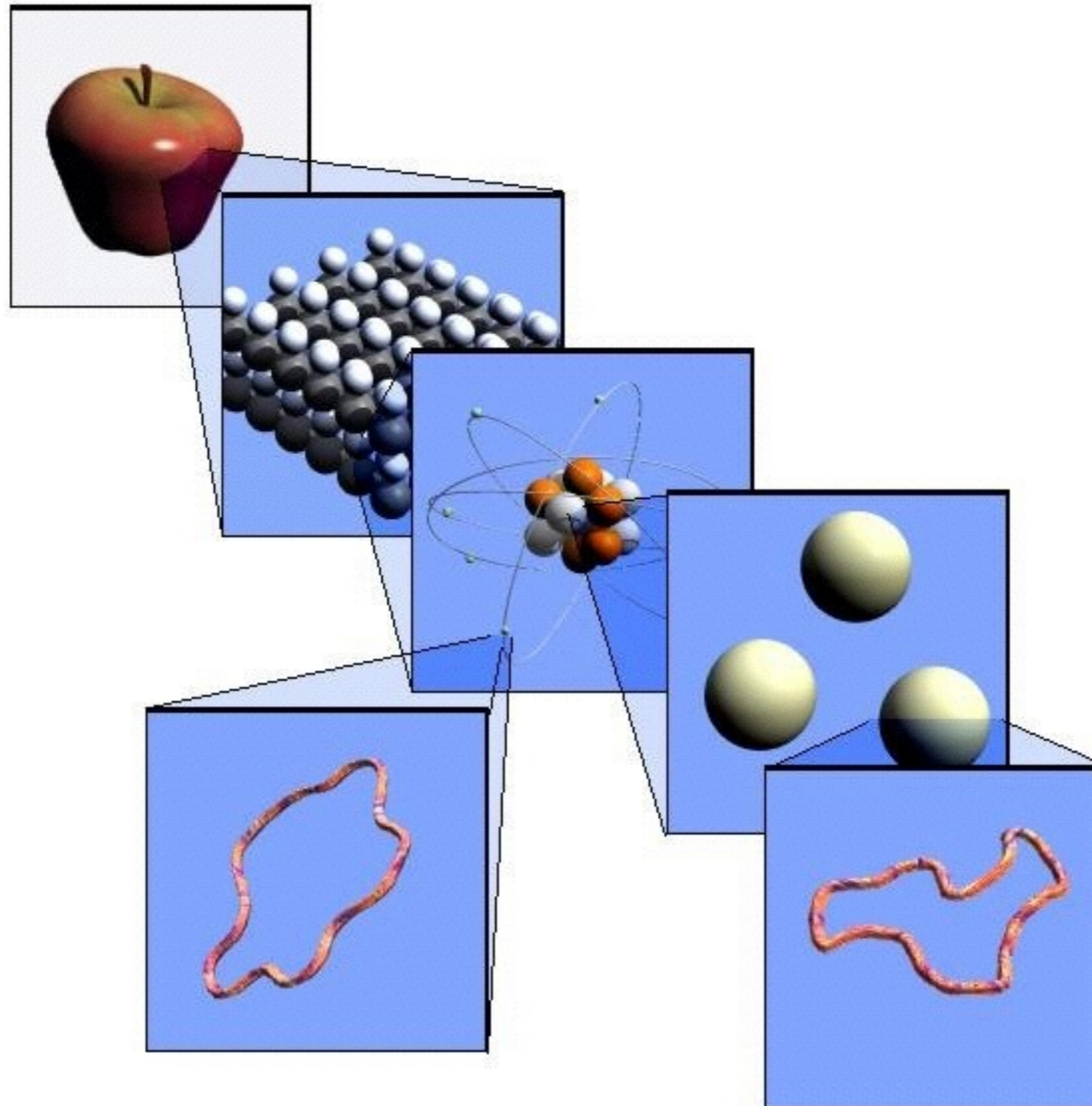
Lanthanide series

Actinide series

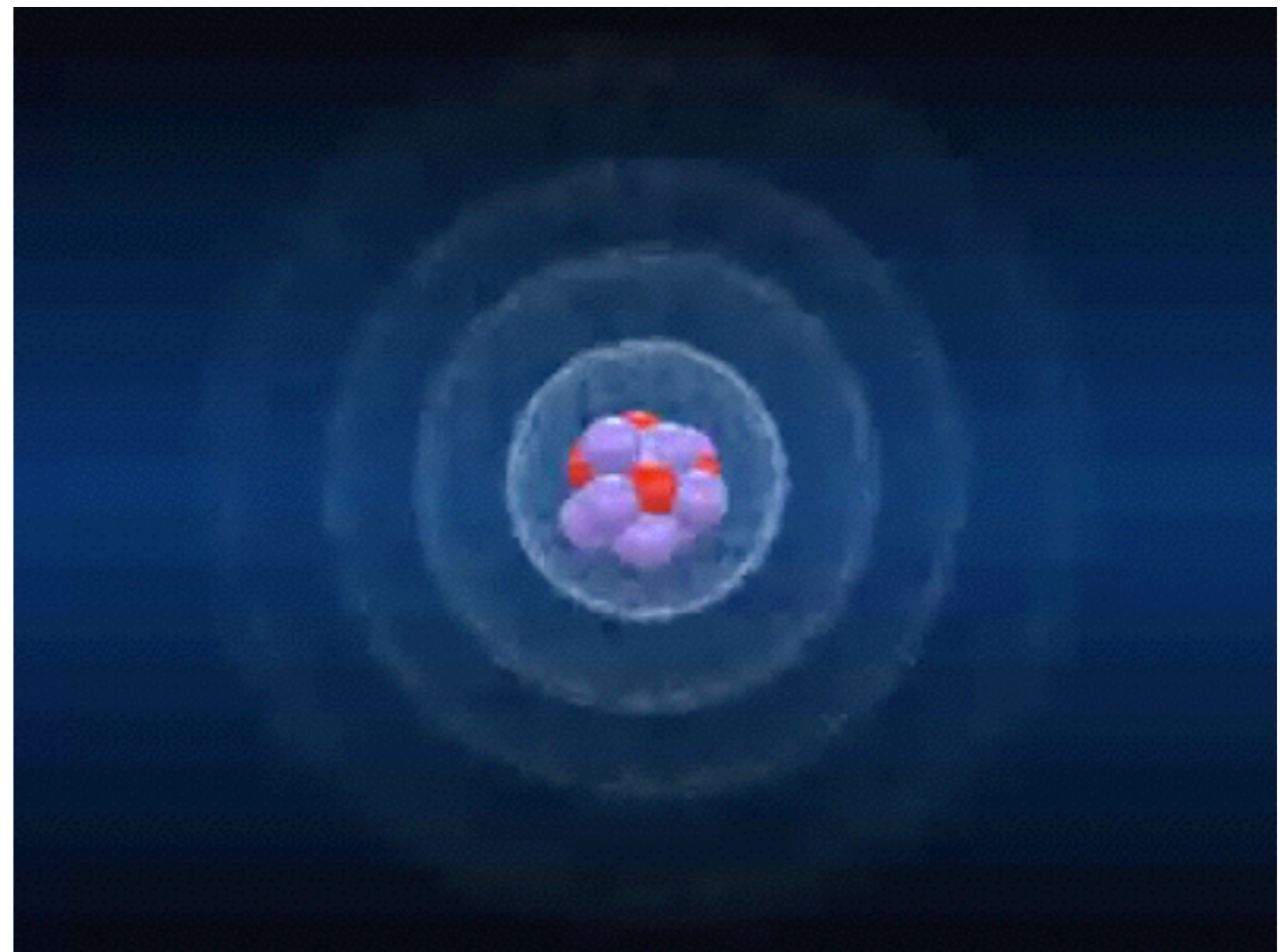
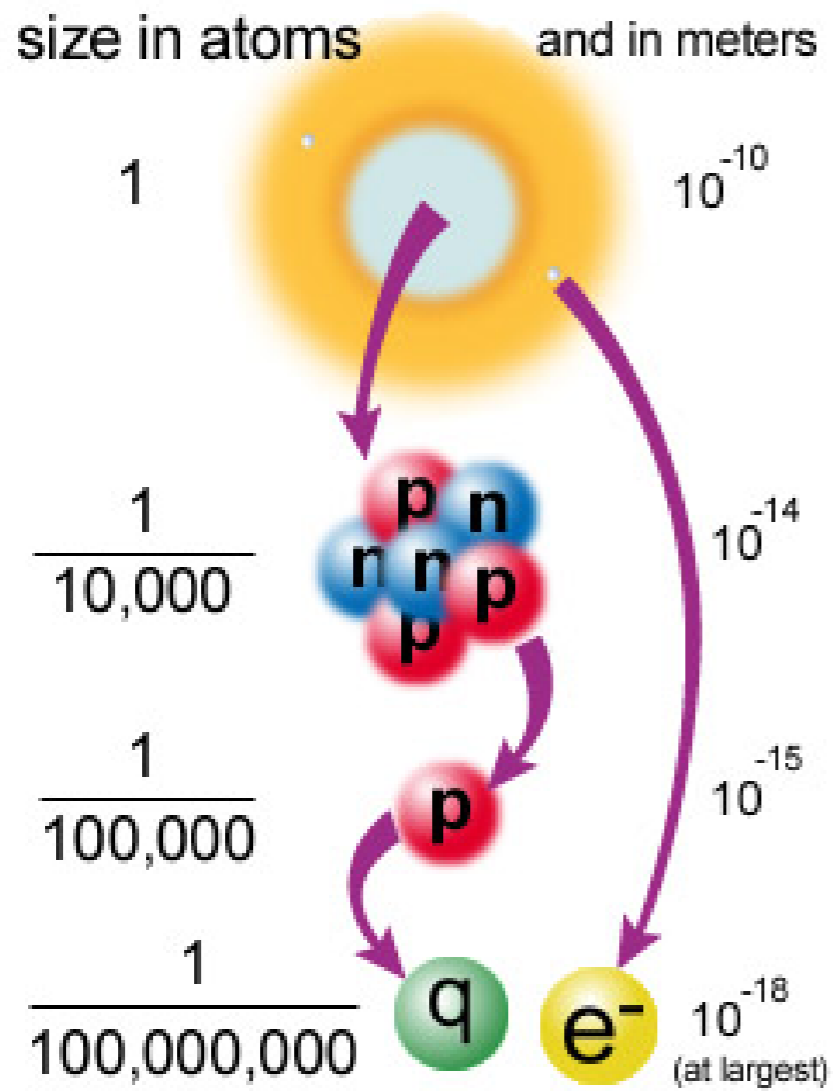
Esto ya nos ha pasado antes...



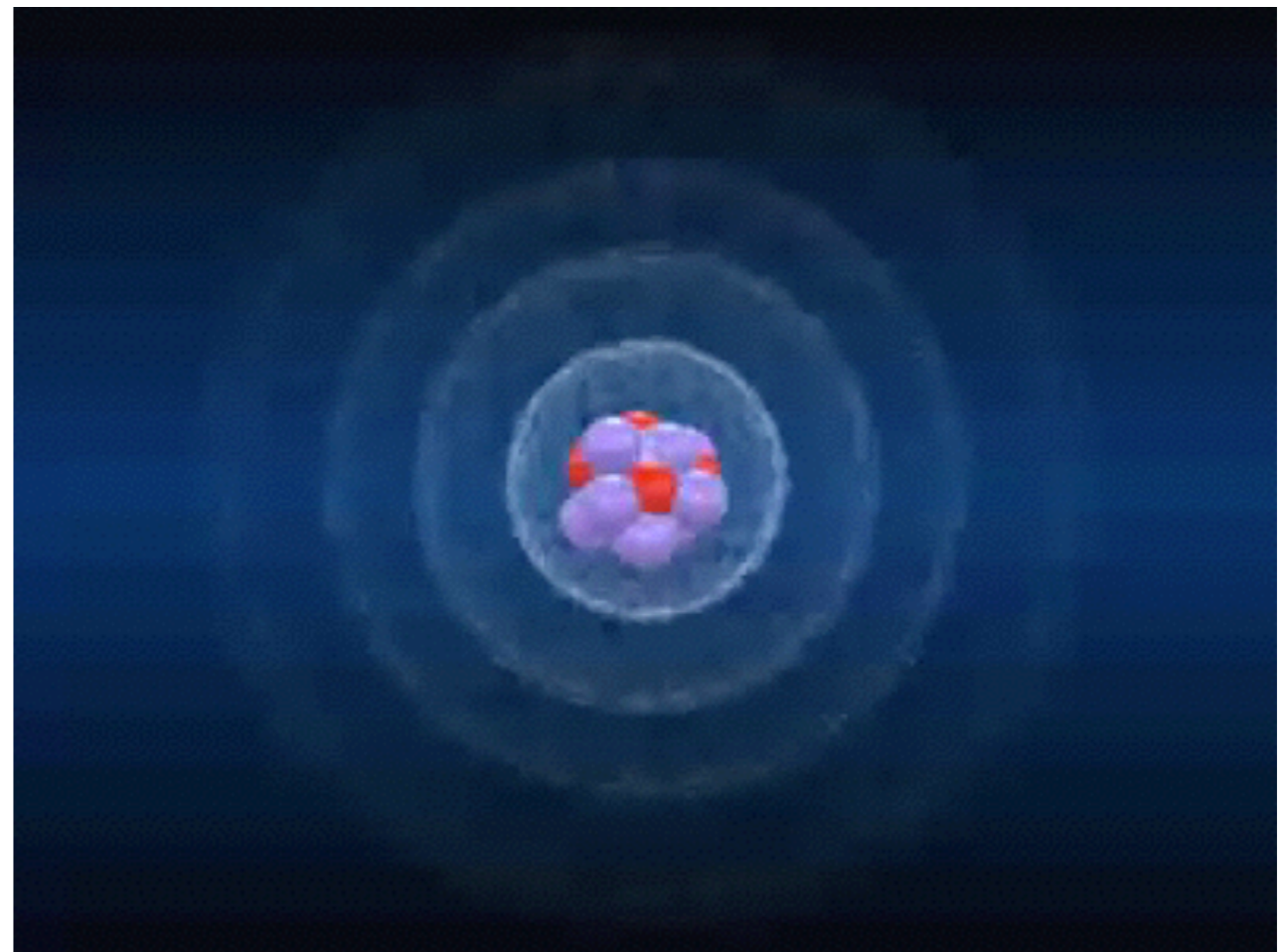
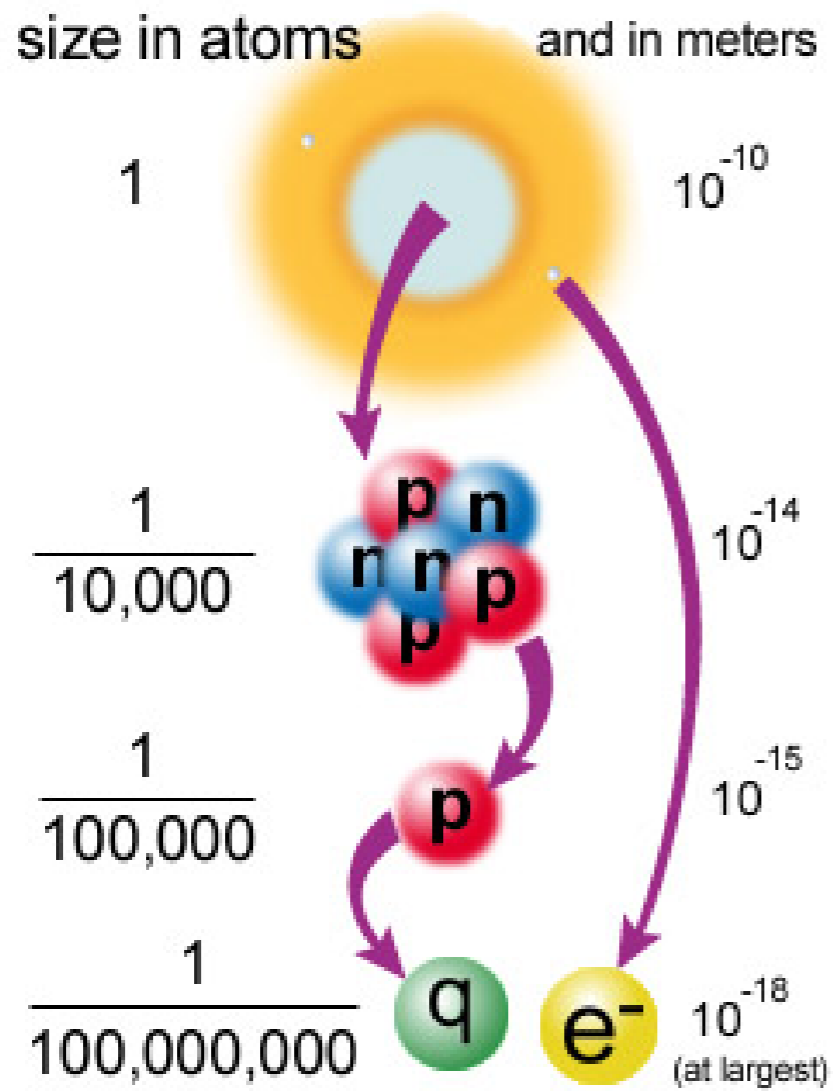
Y si luego viniesen las cuerdas?



Y si luego viniesen las cuerdas?



Y si luego viniesen las cuerdas?

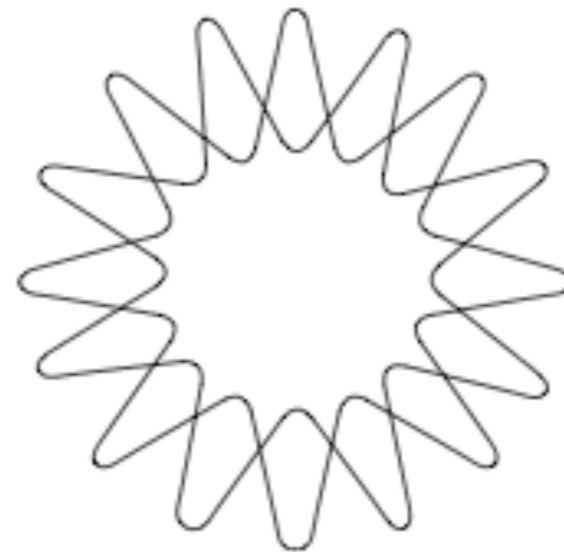
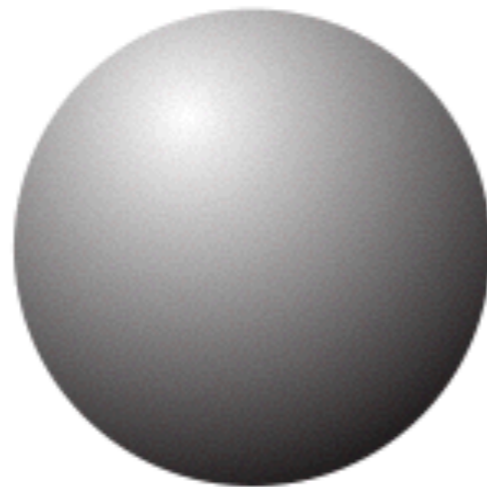


Qué es la Teoría de Cuerdas?

Postulado Básico



Lo que entendemos por **partículas elementales** (quarks, electrones, neutrinos, fotones, bosón de Higgs...) **no son** cosas **puntuales sino** que son **cuerdas** vibrando



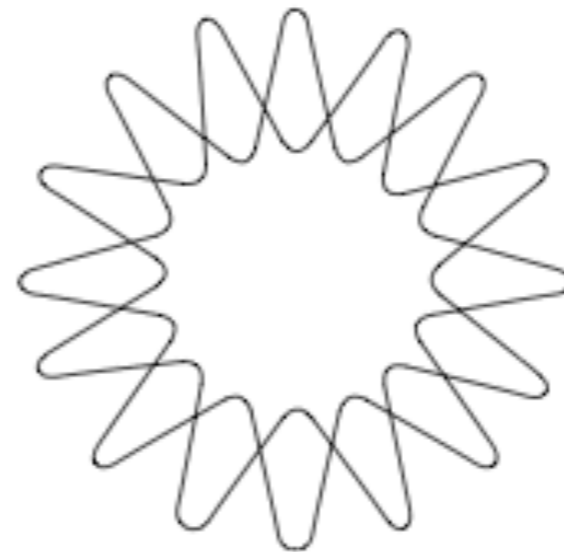
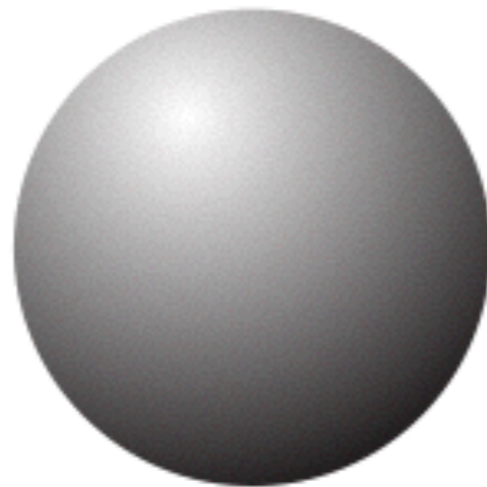
depende de **cómo vibre** la cuerda nos parece ver **una partícula u otra...**

Qué es la Teoría de Cuerdas?

Postulado Básico



Lo que entendemos por **partículas elementales** (quarks, electrones, neutrinos, fotones, bosón de Higgs...) **no son** cosas **puntuales sino** que son **cuerdas** vibrando



depende de **cómo vibre** la cuerda nos parece ver **una partícula u otra...**

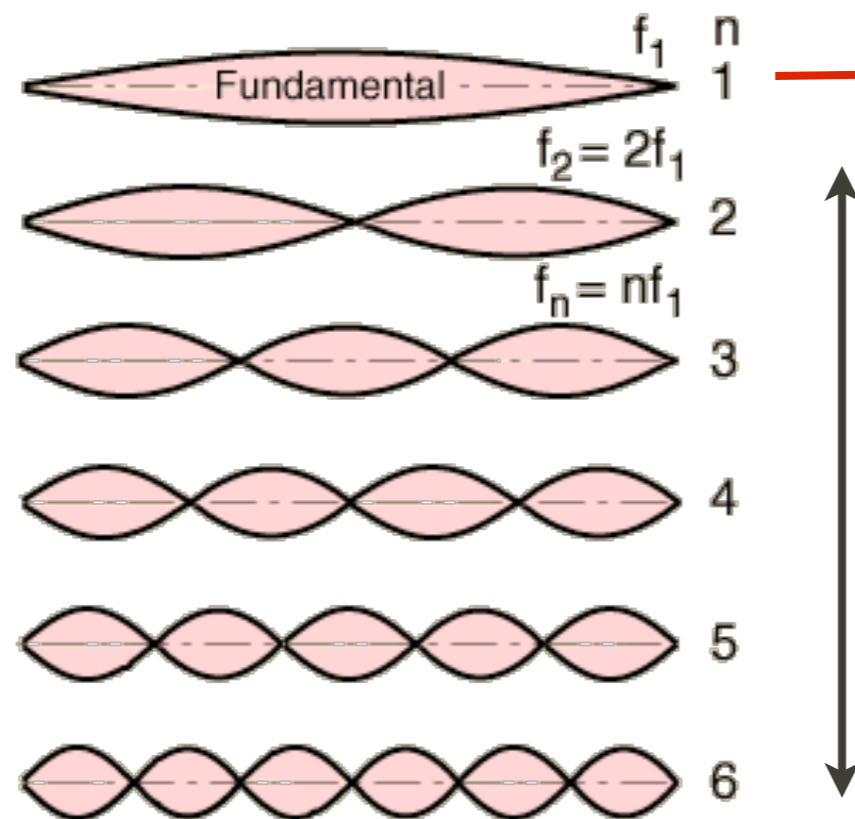
Consecuencias

- ~ Todo está hecho del **mismo material**: la cuerda
- ~ Hay dos tipos de cuerdas: **abiertas y cerradas**



Consecuencias

- ~ Las **frecuencias** de vibración **más altas** cuestan más energía y corresponden a **partículas más masivas**
- ~ Las partículas del **Modelo Estándar** deben corresponder a **vibraciones muy ligeras** (sin masa)



quarks, leptones etc.

Excitaciones,
muy masivas

Consecuencias

- ~ Las **frecuencias** de vibración **más altas** cuestan más energía y corresponden a **partículas más masivas**
- ~ Las partículas del **Modelo Estándar** deben corresponder a **vibraciones muy ligeras** (sin masa)



Cuerda Cerrada

Gravitón



Cuerda Abierta

Bosón Gauge

Consecuencias

- ~ Las **frecuencias** de vibración **más altas** cuestan más energía y corresponden a **partículas más masivas**
- ~ Las partículas del **Modelo Estándar** deben corresponder a **vibraciones muy ligeras** (sin masa)



Cuerda Cerrada

Gravitón



Cuerda Abierta

Bosón Gauge

Consecuencias

~ Las **interacción** de las cuerdas es sencilla



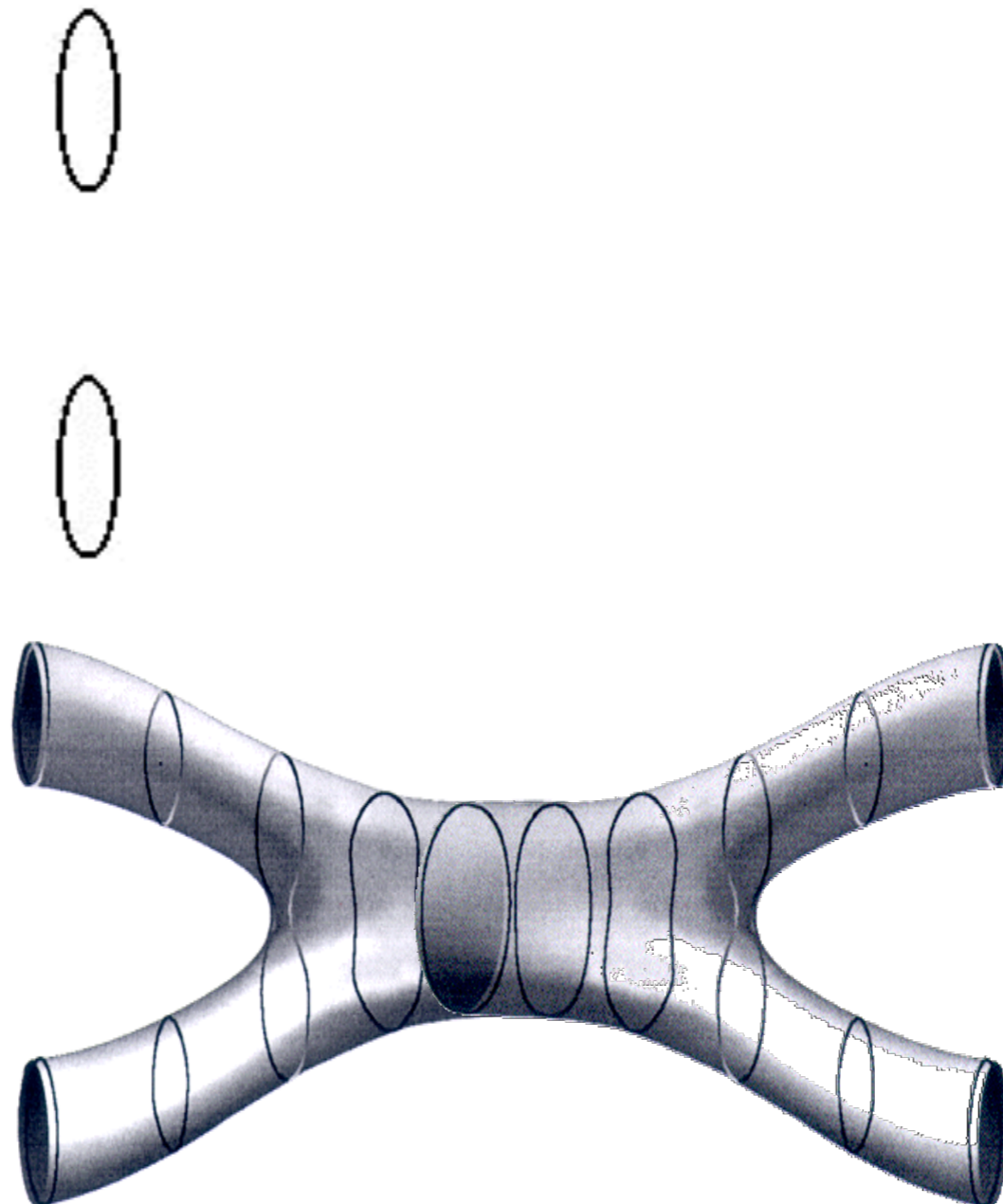
Consecuencias

~ Las **interacción** de las cuerdas es sencilla



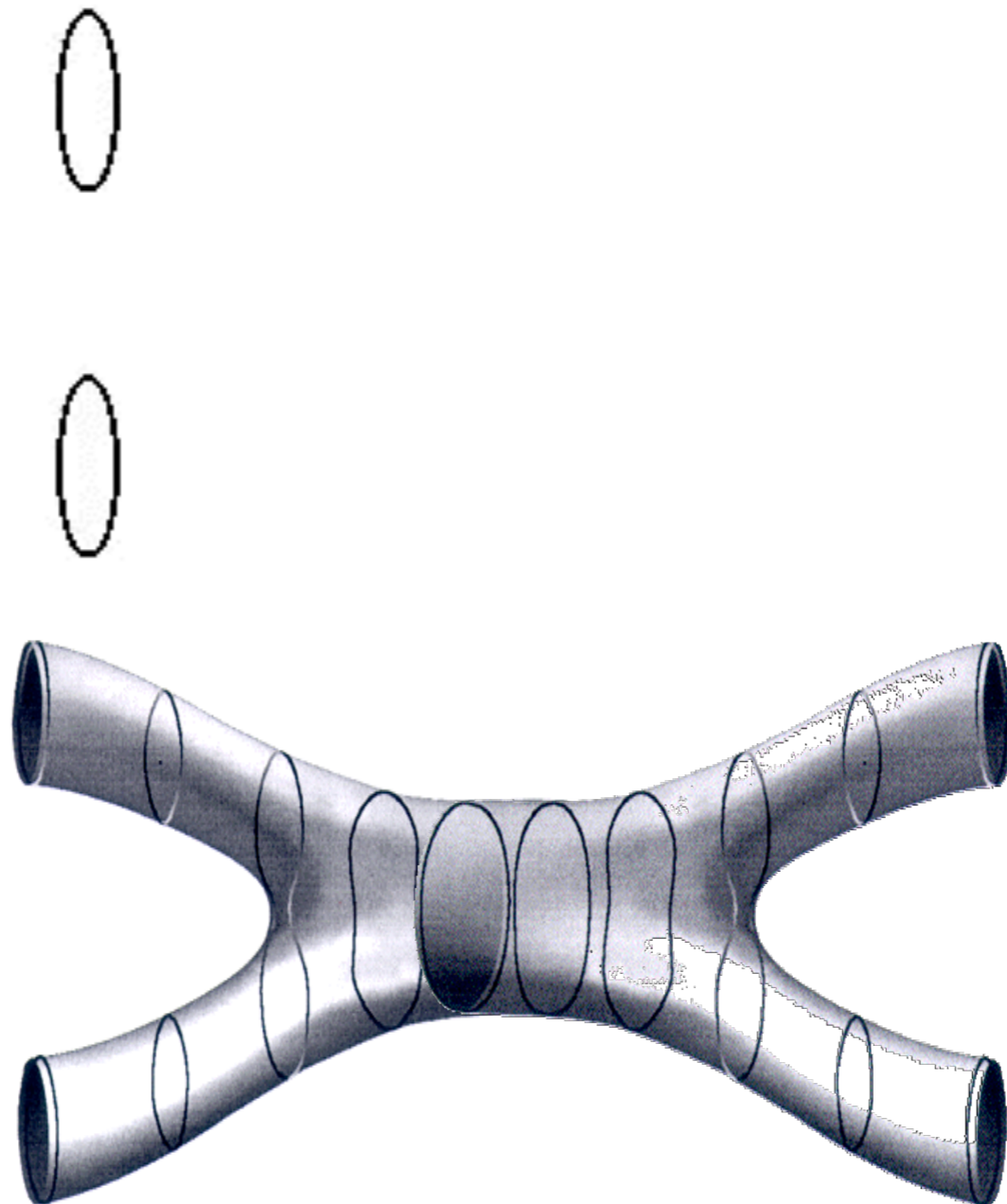
Consecuencias

- ~ Las **interacción** de las cuerdas es sencilla



Consecuencias

- ~ Las **interacción** de las cuerdas es sencilla

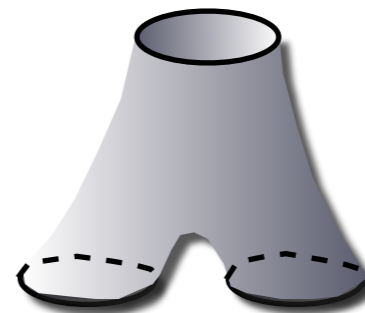
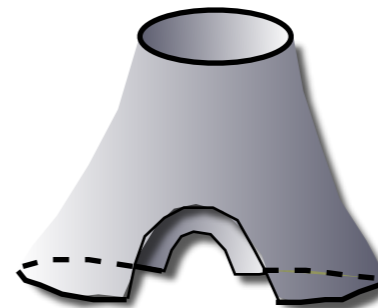
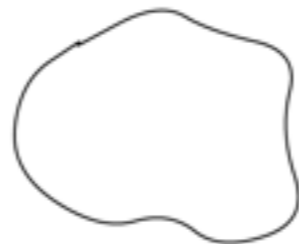
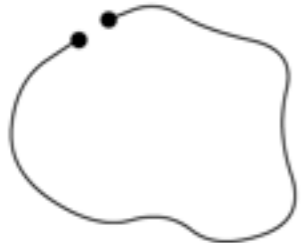
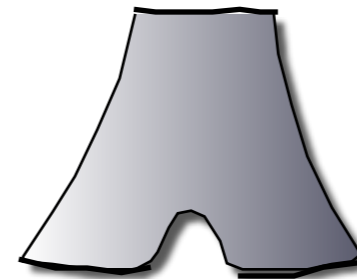


Consecuencias

~ Las **interacción** de las cuerdas es sencilla

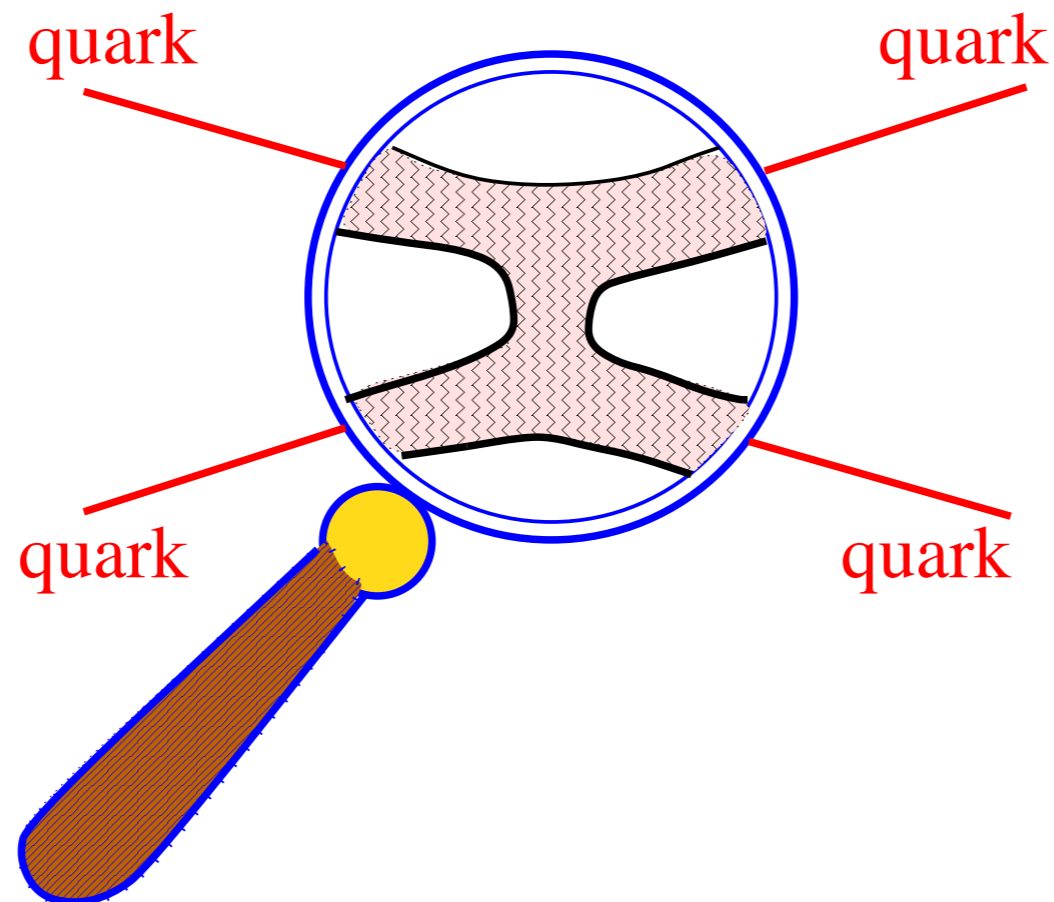
• Sólo hay un tipo

• Cuerdas abiertas producen cuerdas cerradas

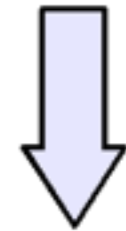
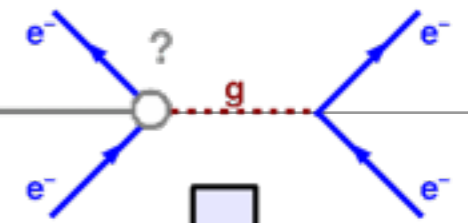


Consecuencias

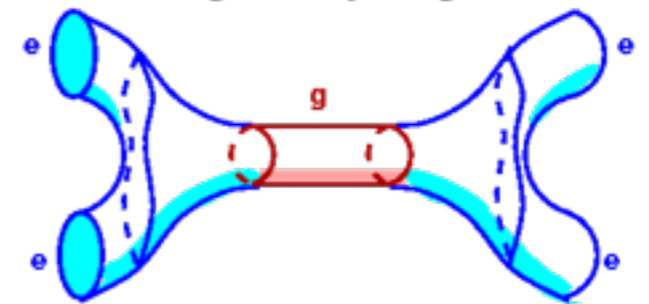
- Las **interacción** de las cuerdas es sencilla
 - Sólo hay un tipo
 - Cuerdas abiertas producen cuerdas cerradas
 - Corresponden a diagramas de partículas



Normal Feynman Diagram



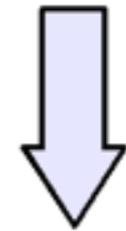
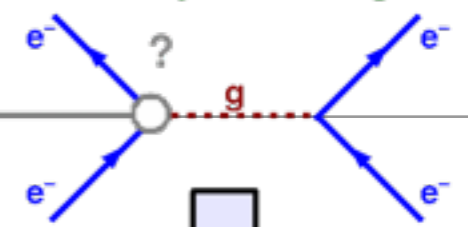
String Theory Diagram



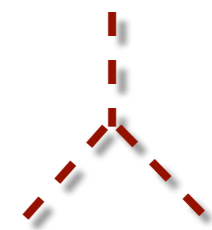
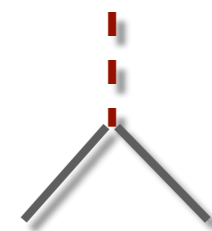
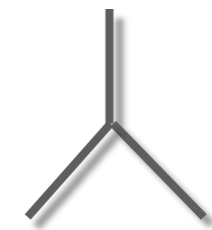
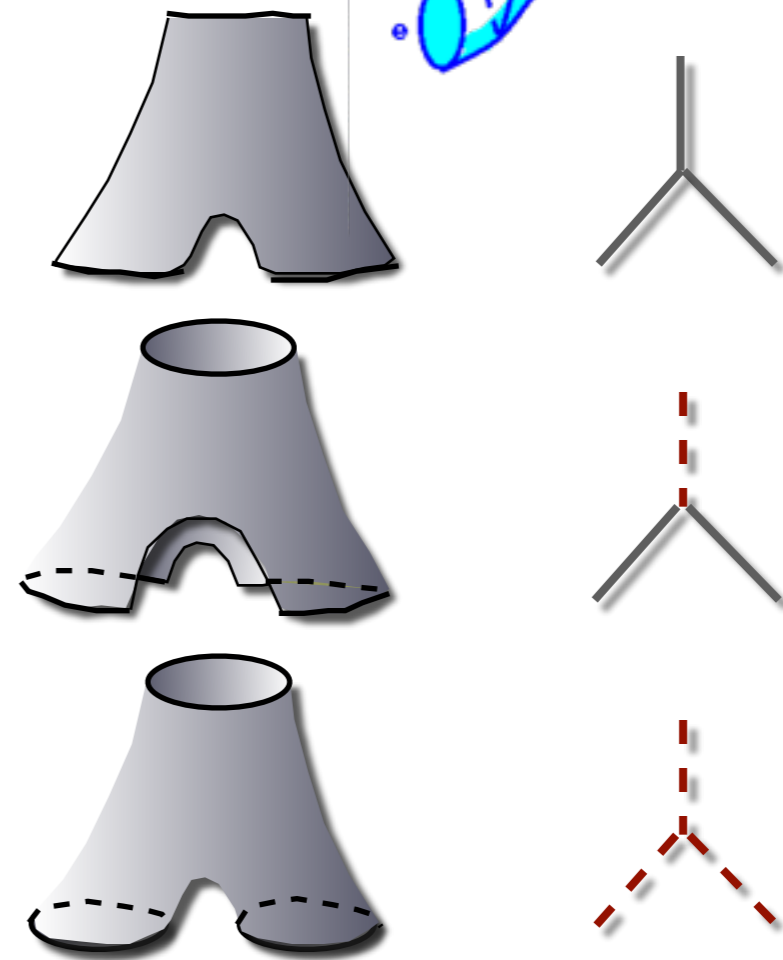
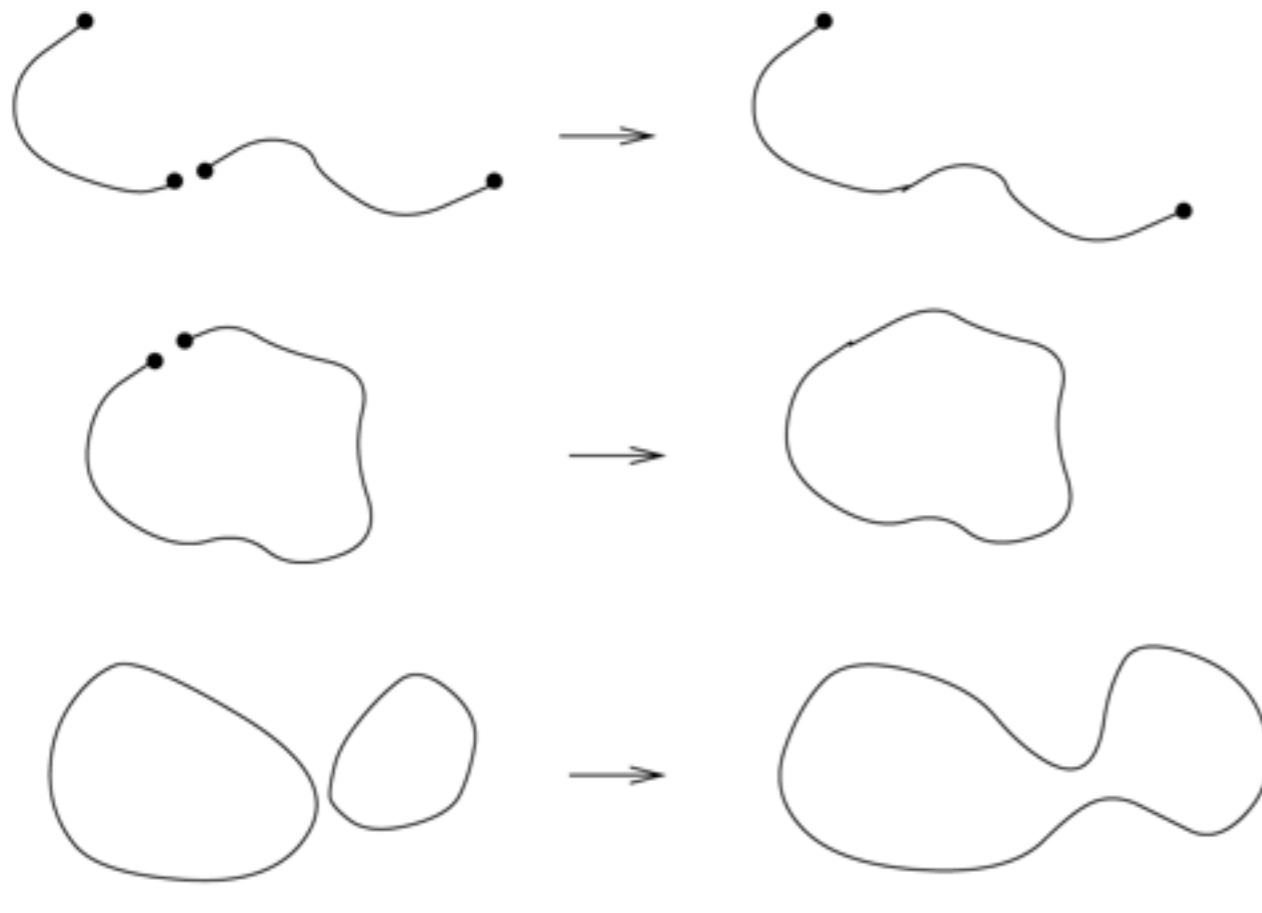
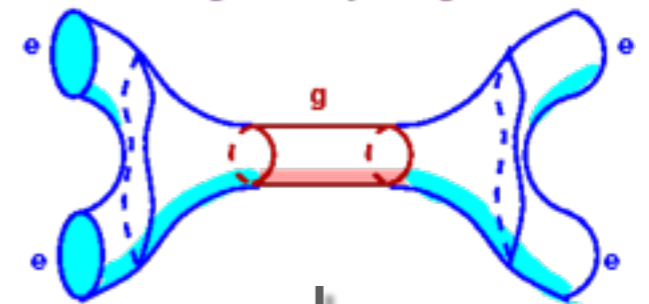
Consecuencias

- Las **interacción** de las cuerdas es sencilla
 - Sólo hay un tipo
 - Cuerdas abiertas producen cuerdas cerradas
 - Corresponden a diagramas de partículas

Normal Feynman Diagram



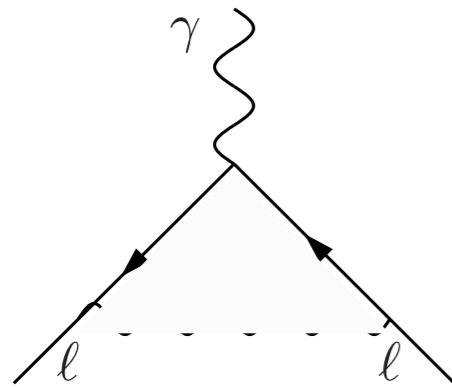
String Theory Diagram



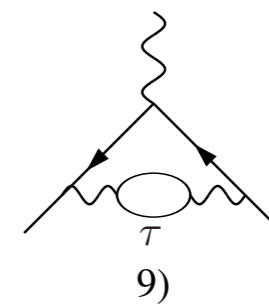
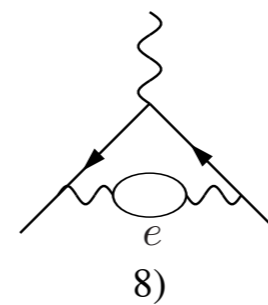
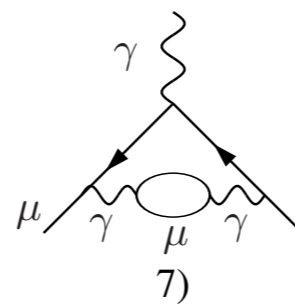
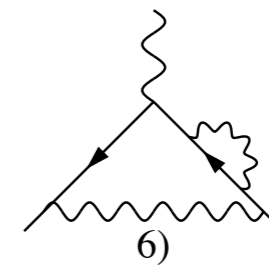
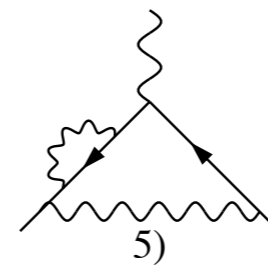
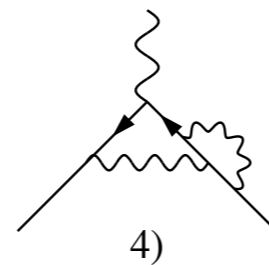
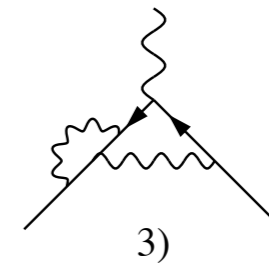
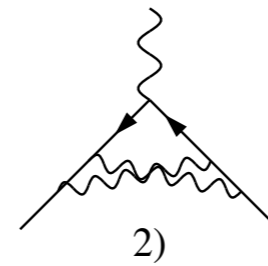
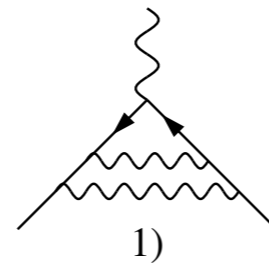
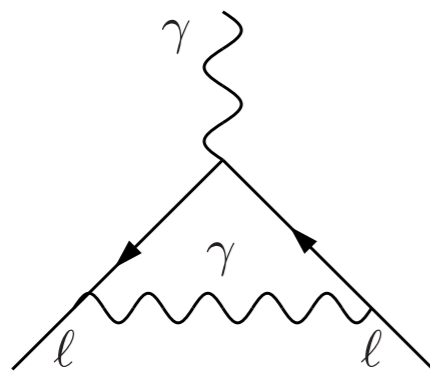
Consecuencias

~ Las **interacción** de las cuerdas es sencilla

📍 Hay una **expansión** como para las partículas

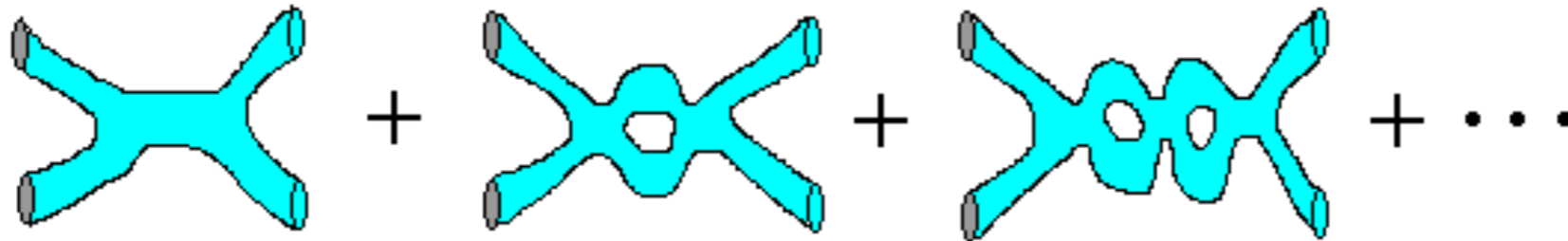


+



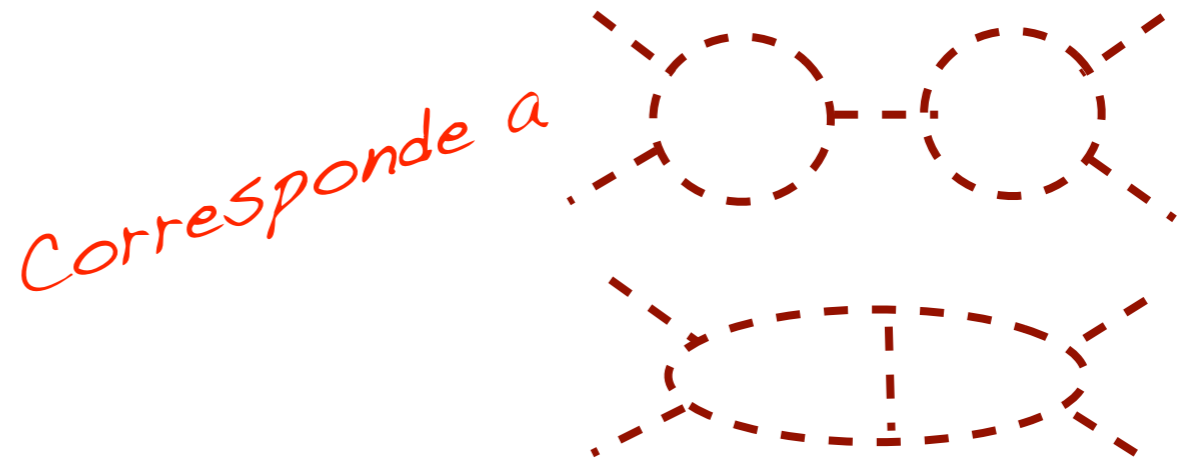
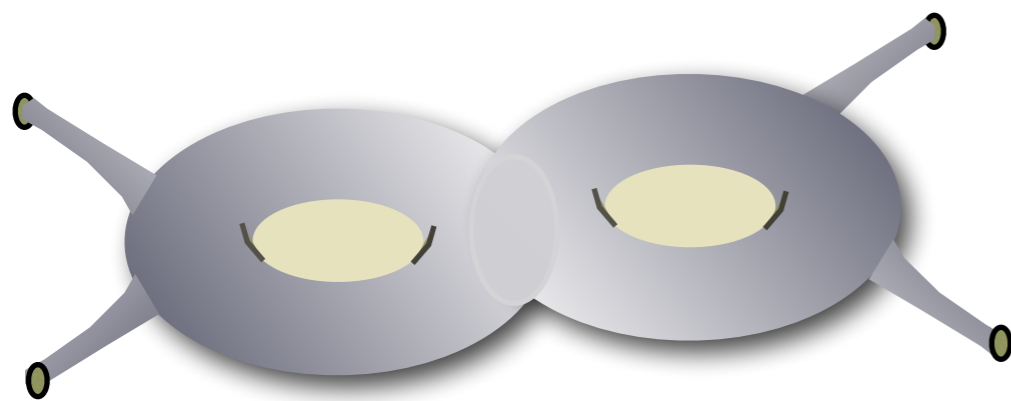
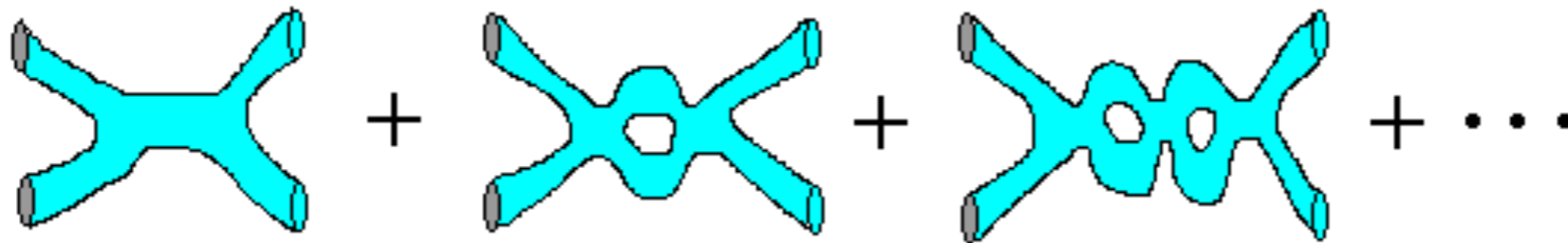
Consecuencias

- ~ Las **interacción** de las cuerdas es sencilla
- Hay una **expansión** como para las partículas



Consecuencias

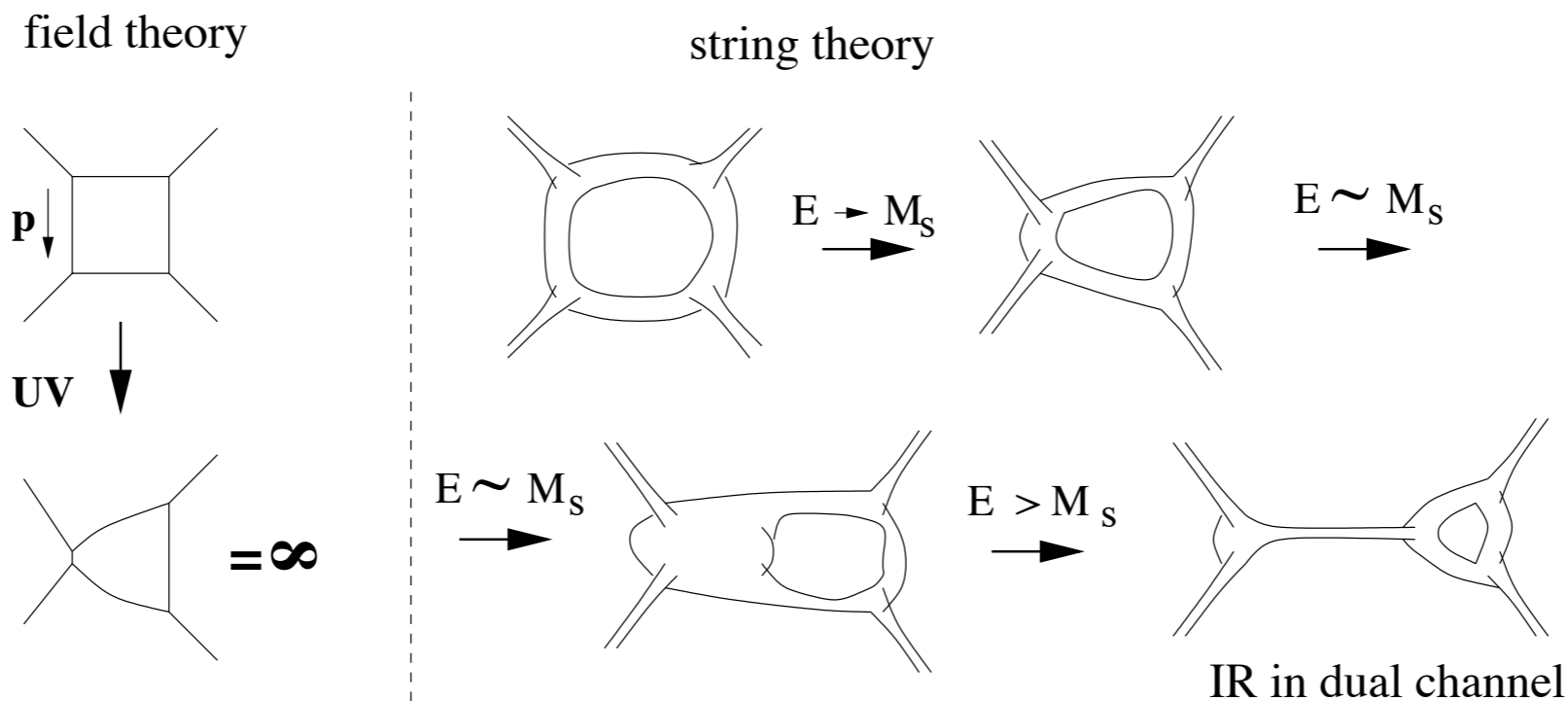
- ~ Las **interacción** de las cuerdas es sencilla
- Hay una **expansión** como para las partículas
- Hay **menos diagramas** de cuerdas que de partículas



...

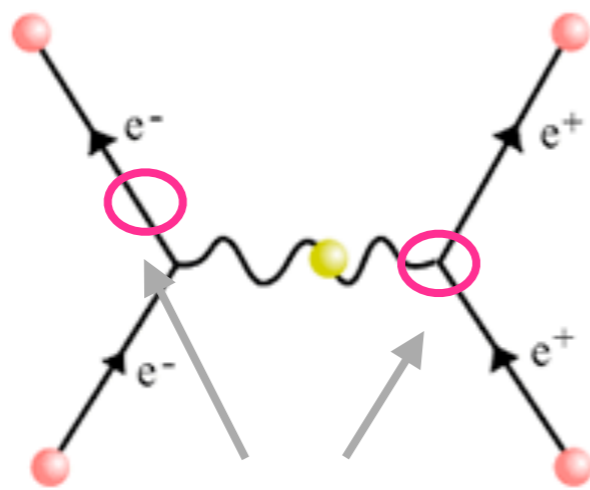
Consecuencias

- ~ Las **interacción** de las cuerdas es sencilla
- Hay una **expansión** como para las partículas
- Hay **menos diagramas** de cuerdas que de partículas
- Estos diagramas no contienen **infinitos**

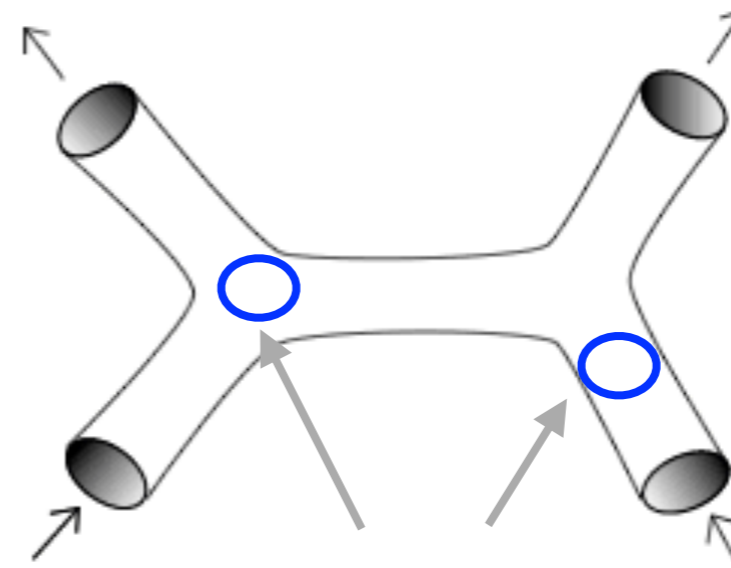


Consecuencias

~ Propiedad crucial: **simetría conforme**



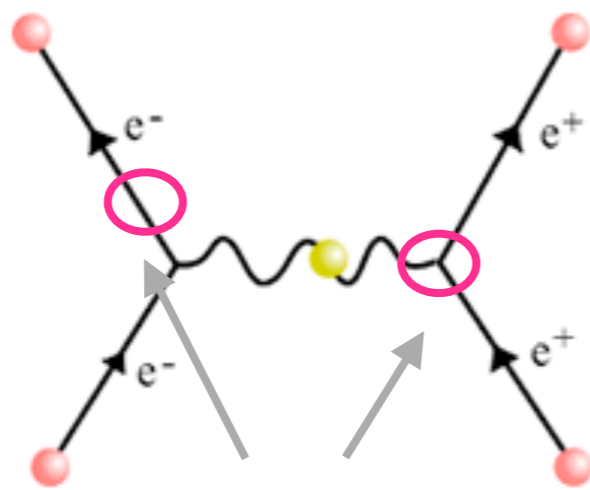
distinto



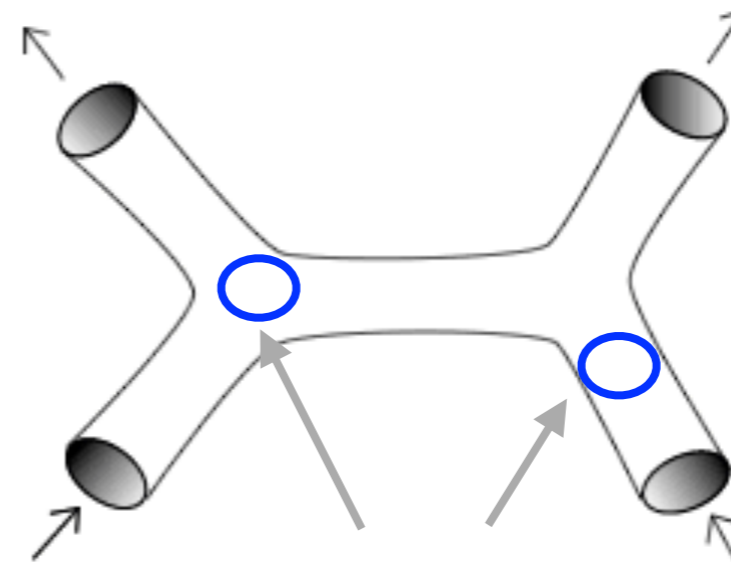
idéntico

Consecuencias

~ Propiedad crucial: **simetría conforme**



distinto

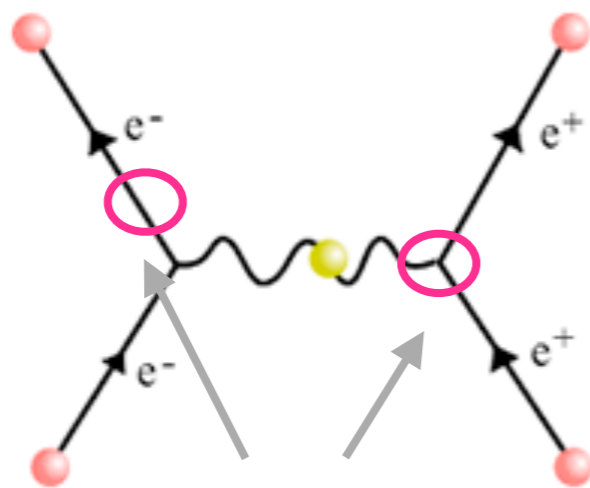


idéntico

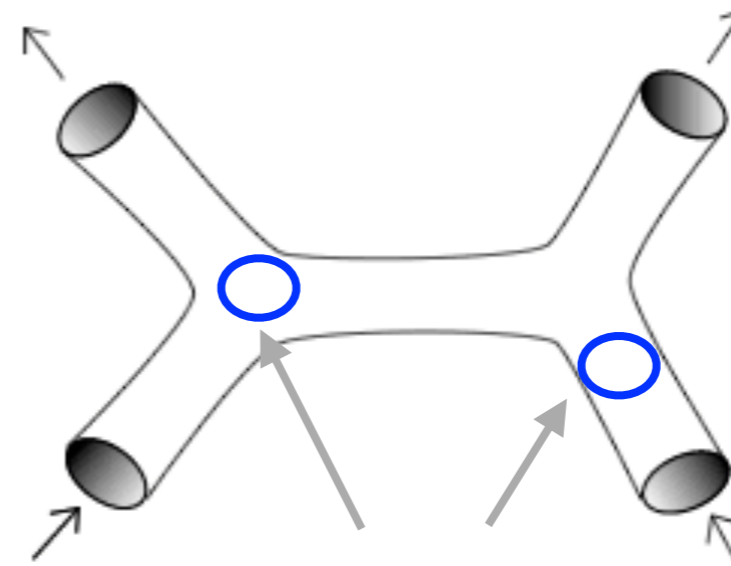
Pero esta simetría puede ser rota por
efectos cuánticos!! → **anomalía**

Consecuencias

~ Propiedad crucial: **simetría conforme**



distinto



idéntico

Pero esta simetría puede ser rota por efectos cuánticos!! → **anomalía**

Condición para que no se rompa:

Las cuerdas viven en
25+1 dimensiones!!

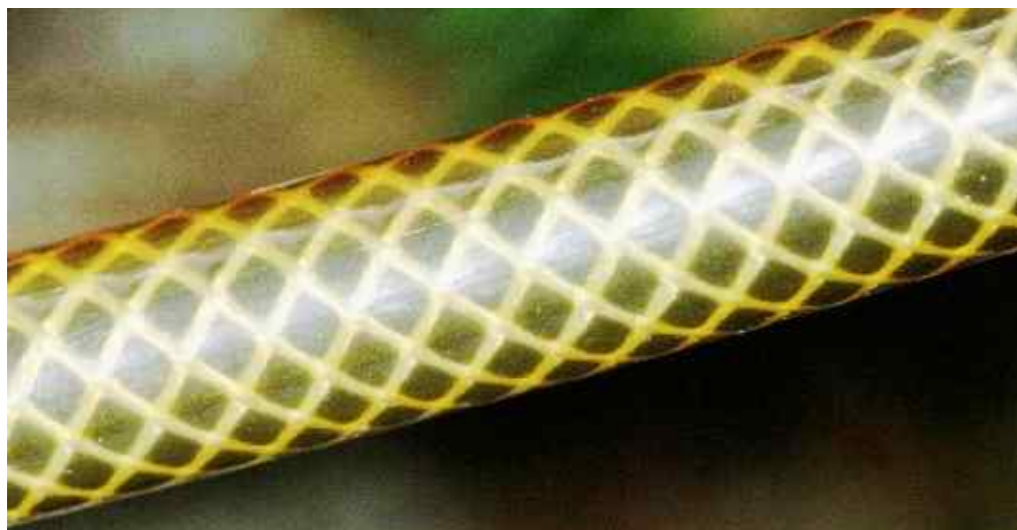
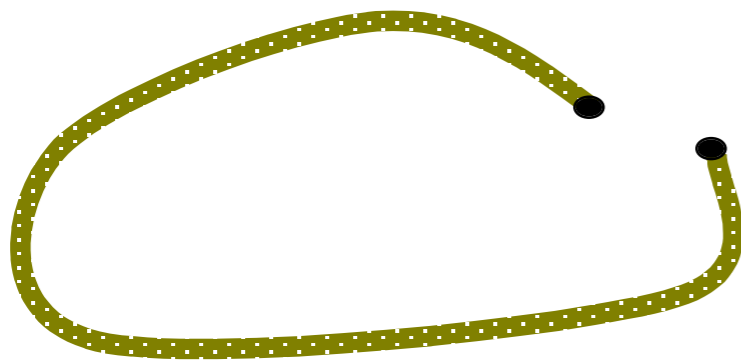
Dimensiones extra

- ~ Nosotros vemos **3+1 dimensiones**
- ~ Cómo podría una teoría con **25+1 dimensiones** describir la naturaleza?

Dimensiones extra

Theodor Kaluza (1919)
Oscar Klein (1926)

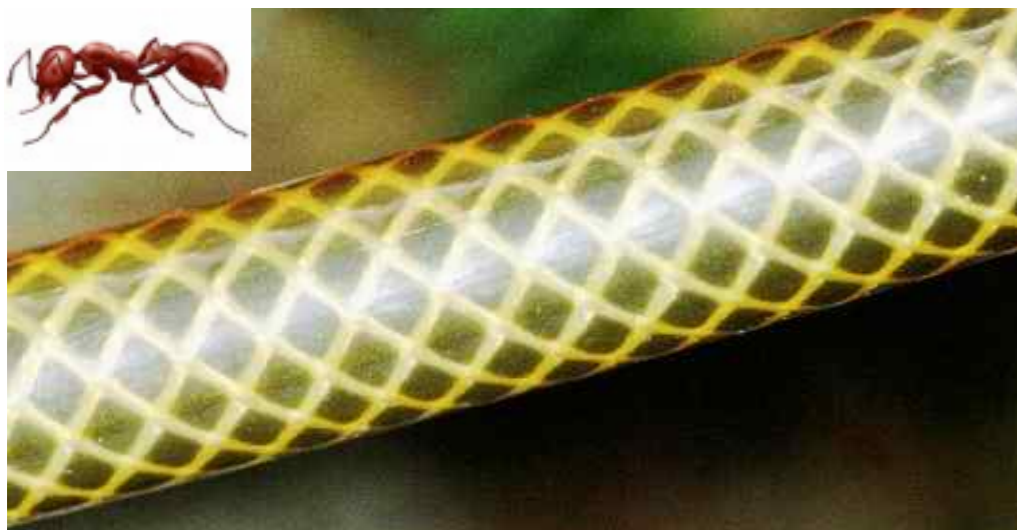
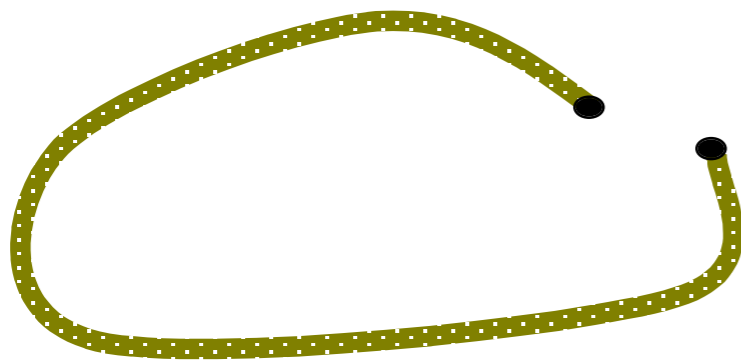
- ~ Nosotros vemos **3+1 dimensiones**
- ~ Cómo podría una teoría con **25+1 dimensiones** describir la naturaleza?



Dimensiones extra

Theodor Kaluza (1919)
Oscar Klein (1926)

- ~ Nosotros vemos **3+1 dimensiones**
- ~ Cómo podría una teoría con **25+1 dimensiones** describir la naturaleza?



Las cuerdas también dan problemas!!

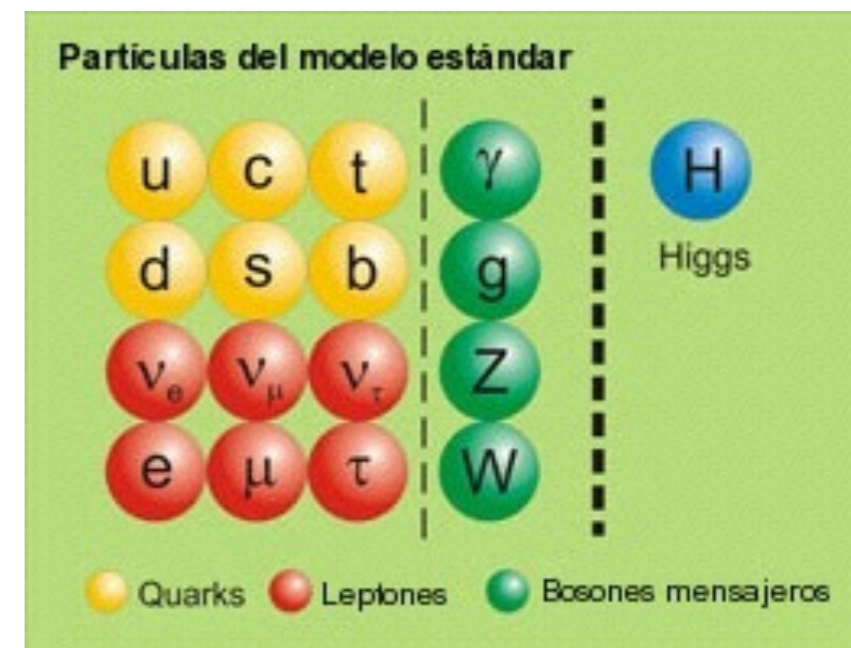
- ~ Al analizar esta teoría de cuerdas se descubrió que tenía **elementos** mucho más **problemáticos** que las dimensiones extra:



Las cuerdas también dan problemas!!

~ Al analizar esta teoría de cuerdas se descubrió que tenía **elementos** mucho más **problemáticos** que las dimensiones extra:

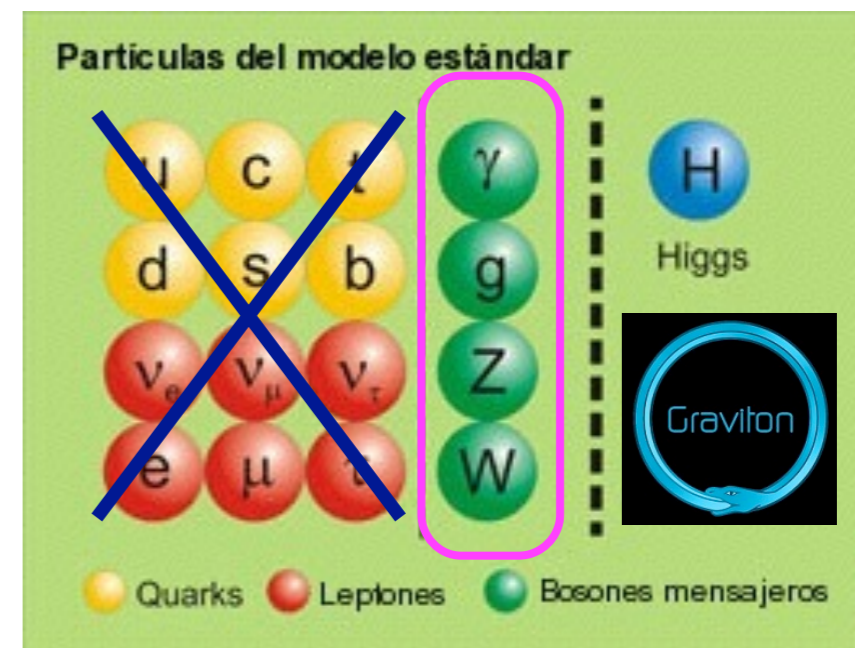
🔗 No contienen **fermiones**, sólo bosones



Las cuerdas también dan problemas!!

~ Al analizar esta teoría de cuerdas se descubrió que tenía **elementos** mucho más **problemáticos** que las dimensiones extra:

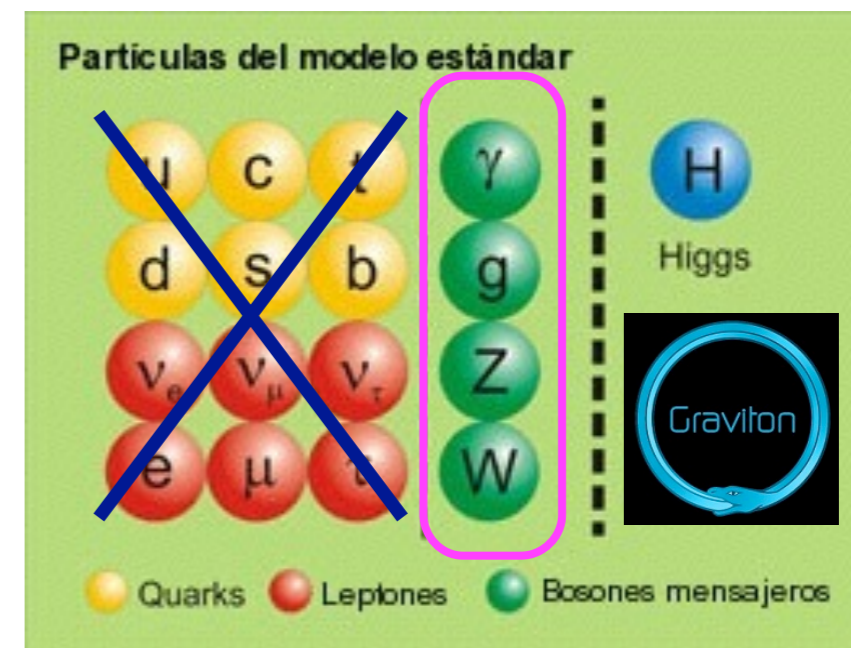
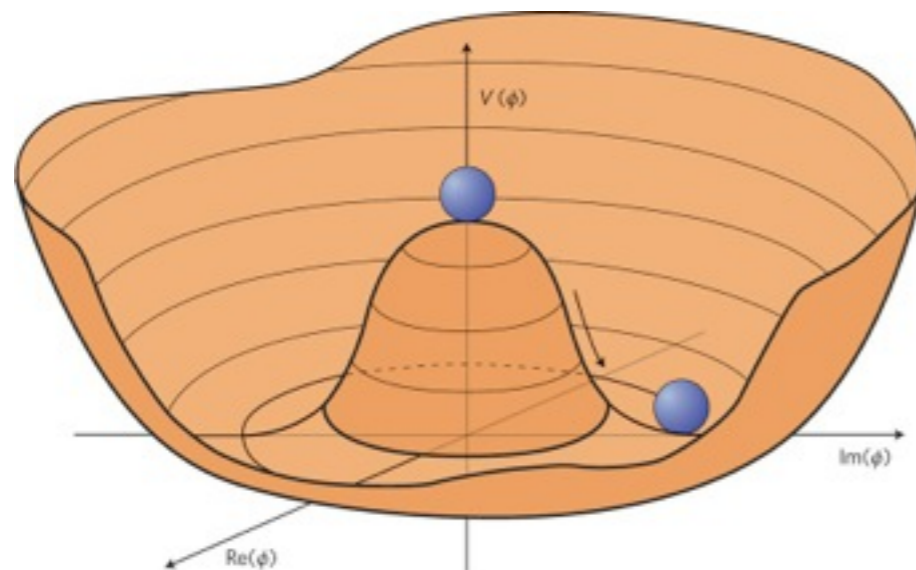
🔍 No contienen **fermiones**, sólo bosones



Las cuerdas también dan problemas!!

~ Al analizar esta teoría de cuerdas se descubrió que tenía **elementos** mucho más **problemáticos** que las dimensiones extra:

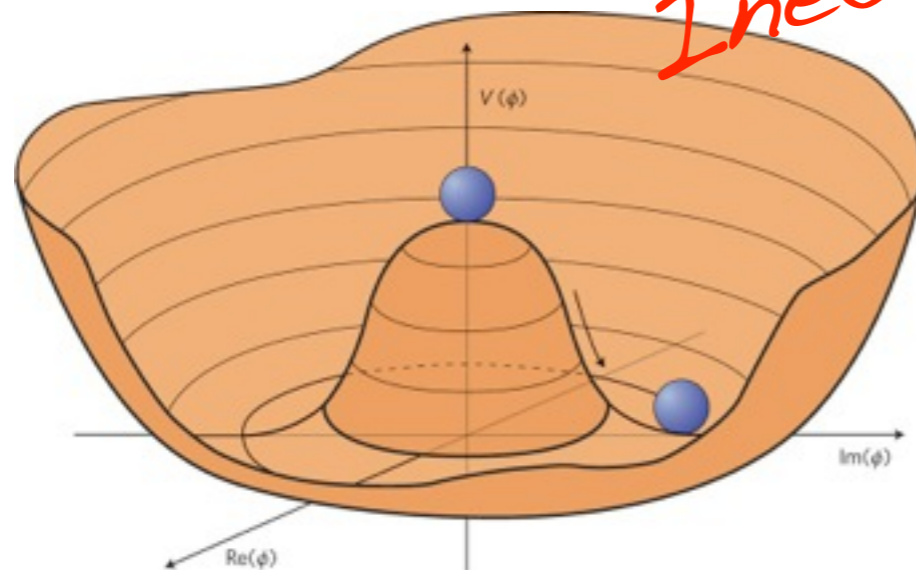
- No contienen **fermiones**, sólo bosones
- Contiene un **taquión!**



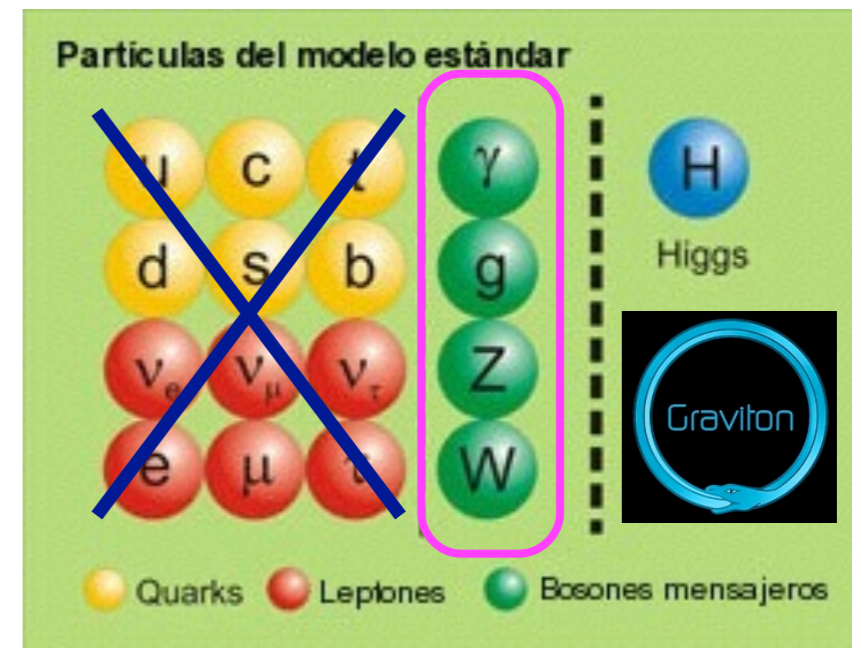
Las cuerdas también dan problemas!!

~ Al analizar esta teoría de cuerdas se descubrió que tenía **elementos** mucho más **problemáticos** que las dimensiones extra:

- No contienen **fermiones**, sólo bosones
- Contiene un **taquión!**



Inestabilidad!



Llegan las supercuerdas al rescate!!

- ~ Es posible formular otro tipo de **teoría de cuerdas más abstracta**, que también contiene **oscilaciones fermiónicas** \Rightarrow las **super-cuerdas**



Llegan las supercuerdas al rescate!!

- ~ Es posible formular otro tipo de **teoría de cuerdas más abstracta**, que también contiene **oscilaciones fermiónicas** \Rightarrow las **super-cuerdas**

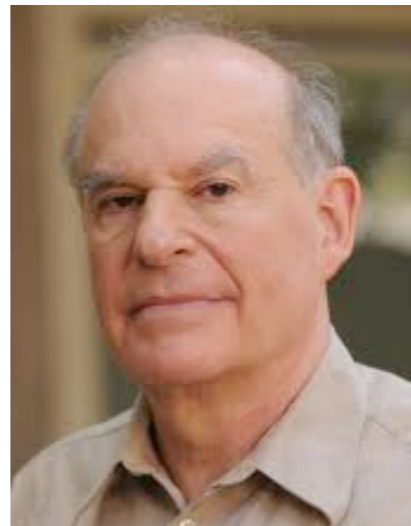
(1970-1971)



Ramond



Neveu



Schwarz



Llegan las supercuerdas al rescate!!

- Es posible formular otro tipo de teoría de cuerdas más abstracta, que también contiene oscilaciones fermiónicas \Rightarrow las **super-cuerdas**

(1970-1971) \rightarrow (1976)

- Desaparece el taquión
- Aparecen fermiones

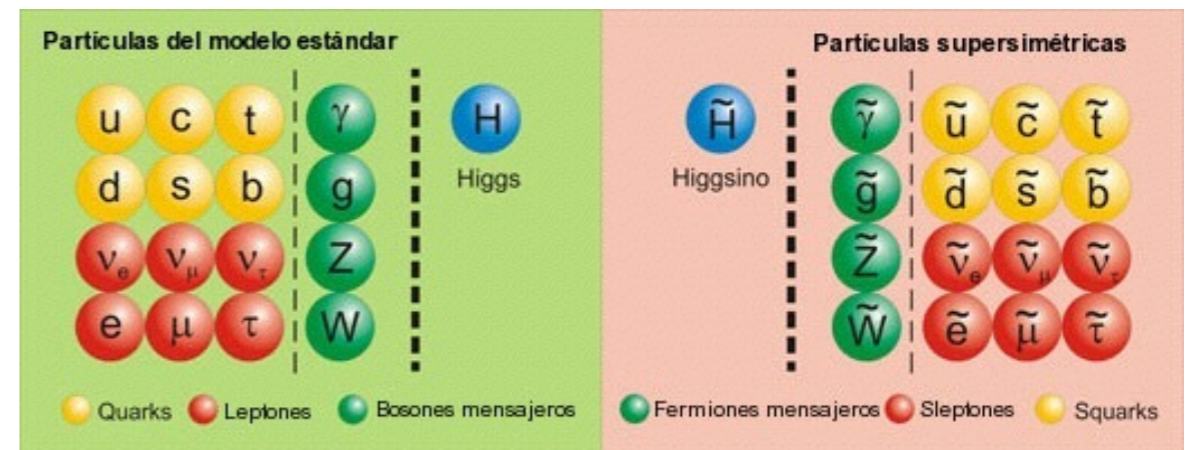


Llegan las supercuerdas al rescate!!

- Es posible formular otro tipo de **teoría de cuerdas más abstracta**, que también contiene **oscilaciones fermiónicas** \Rightarrow las **super-cuerdas**

(1970-1971) \rightarrow (1976) \rightarrow (1981)

- Desaparece el taquión
- Aparecen fermiones
- Espectro supersimétrico



Llegan las supercuerdas al rescate!!

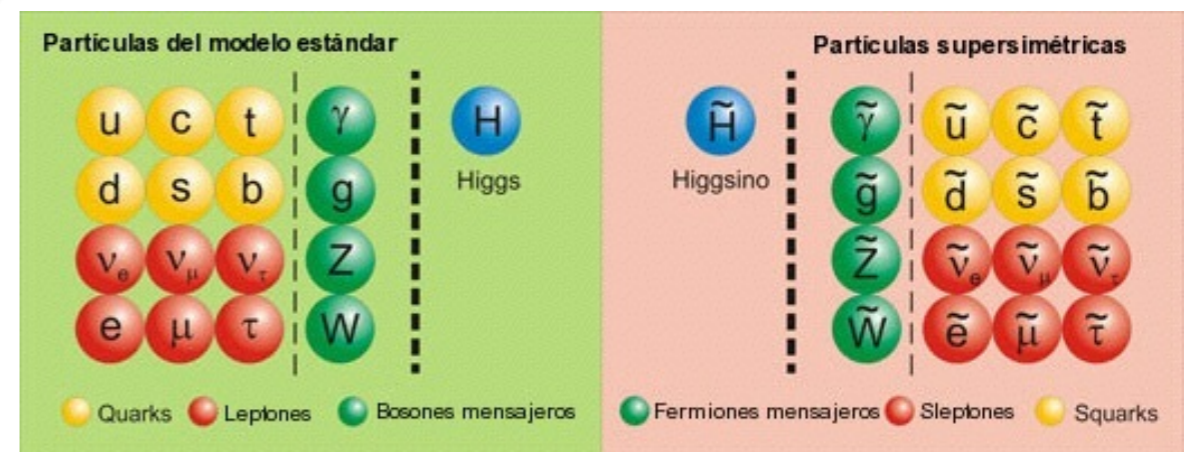
- Es posible formular otro tipo de **teoría de cuerdas más abstracta**, que también contiene **oscilaciones fermiónicas** \Rightarrow las **super-cuerdas**

(1970-1971) \rightarrow (1976) \rightarrow (1981)

- Desaparece el taquión
- Aparecen fermiones
- Espectro supersimétrico



Las super-cuerdas viven en 9+1 dimensiones



Llegan las supercuerdas al rescate!!

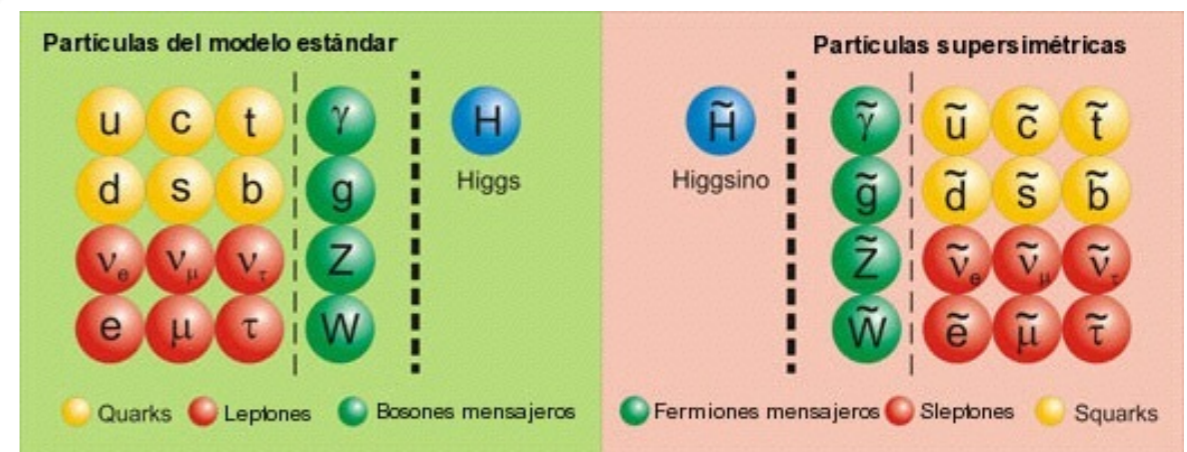
~ Es posible formular otro tipo de teoría de cuerdas más abstracta, que también contiene oscilaciones fermiónicas \Rightarrow las **super-cuerdas**

(1970-1971)

- 🔊 Desaparece el taquión
- 🔊 Aparecen fermiones
- 🔊 Espectro supersimétrico



Las super-cuerdas viven en 9+1 dimensiones



Nos hemos quitado 16 de un plumazo....



Resumen



Cinco ideas clave de la teoría de cuerdas



Resumen



Cinco ideas clave de la teoría de cuerdas



Resumen



Cinco ideas clave de la teoría de cuerdas



- ~ Nuestro universo está hecho de **cuerdas**

Resumen



Cinco ideas clave de la teoría de cuerdas

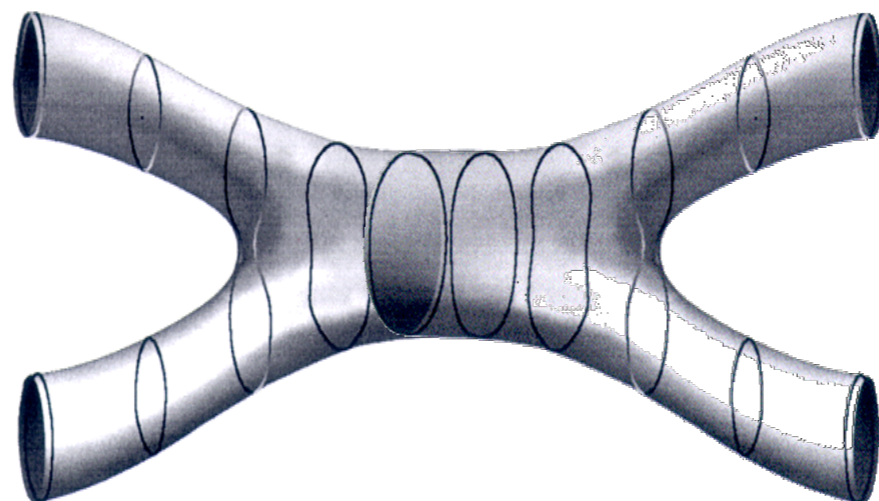


- ~ Nuestro universo está hecho de **cuerdas**
- ~ Teoría de cuerdas reconcilia la Mecánica **Cuántica** y la **Relatividad** General

Resumen

Cinco ideas clave de la teoría de cuerdas

- ~ Nuestro universo está hecho de **cuerdas**
- ~ Teoría de cuerdas reconcilia la Mecánica **Cuántica** y la **Relatividad** General
- ~ Permite **unificar** todas las fuerzas fundamentales del universo en sólo una



Resumen



Cinco ideas clave de la teoría de cuerdas



- ~ Nuestro universo está hecho de **cuerdas**
- ~ Teoría de cuerdas reconcilia la Mecánica **Cuántica** y la **Relatividad** General
- ~ Permite **unificar** todas las fuerzas fundamentales del universo en sólo una
- ~ Está basada en la **supersimetría**

Resumen

Cinco ideas clave de la teoría de cuerdas

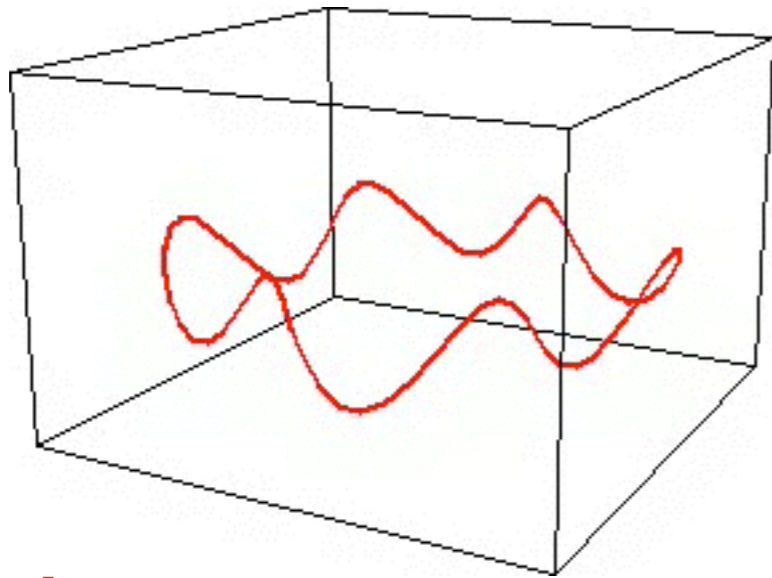
- ~ Nuestro universo está hecho de **cuerdas**
- ~ Teoría de cuerdas reconcilia la Mecánica **Cuántica** y la **Relatividad** General
- ~ Permite **unificar** todas las fuerzas fundamentales del universo en sólo una
- ~ Está basada en la **supersimetría**
- ~ Predice la existencia de seis **dimensiones extra**



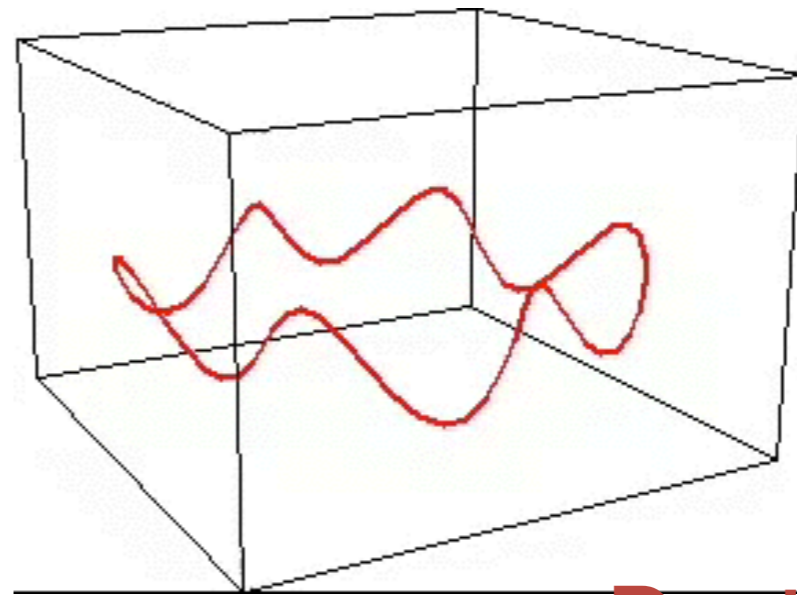
*La primera revolución
de las cuerdas*

Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una cuerda cerrada tiene **dos tipos de oscilaciones**



Levógiras

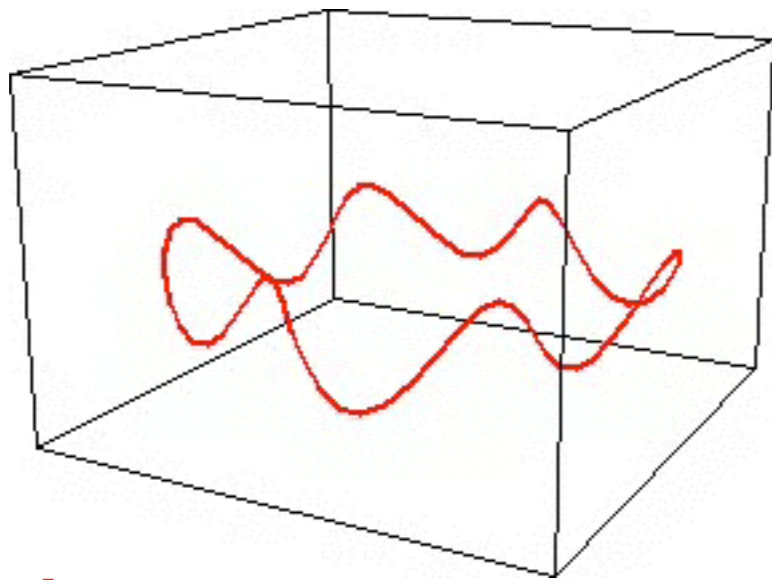


Dextrógiras

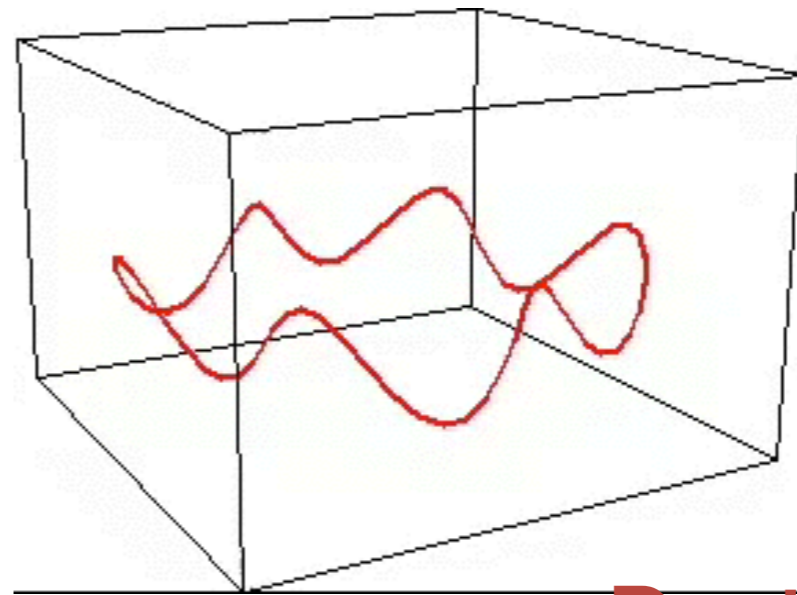


Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una cuerda cerrada tiene **dos tipos de oscilaciones**



Levógiras

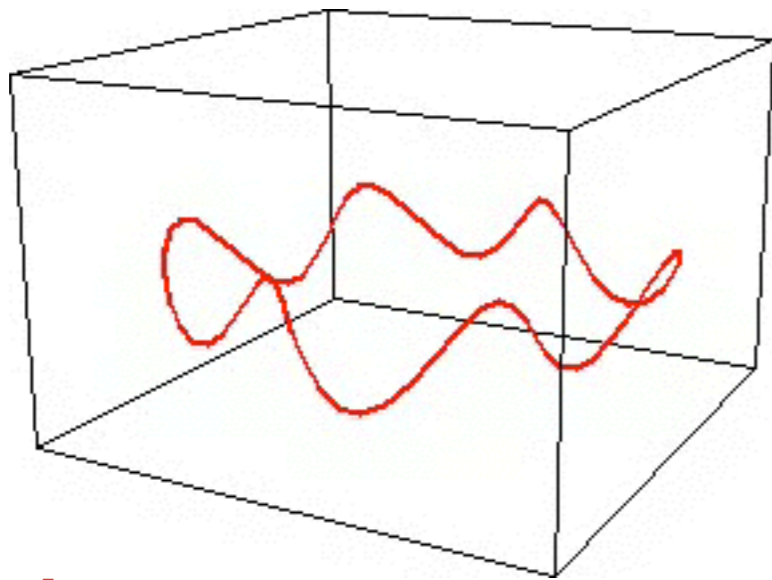


Dextrógiras

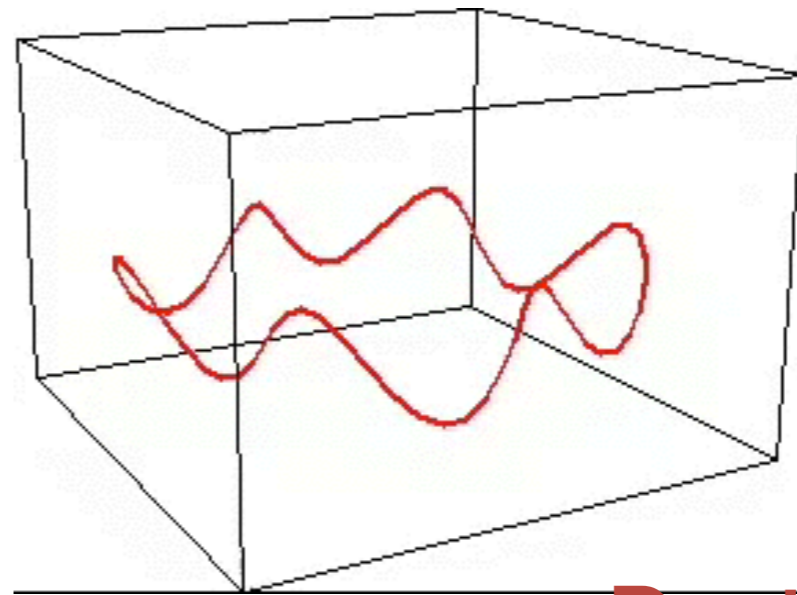


Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una cuerda cerrada tiene **dos tipos de oscilaciones**



Levógiras

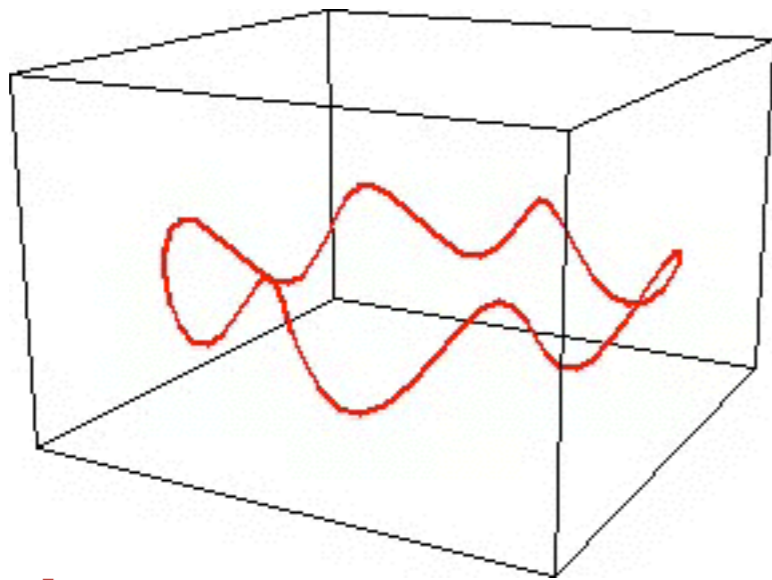


Dextrógiras

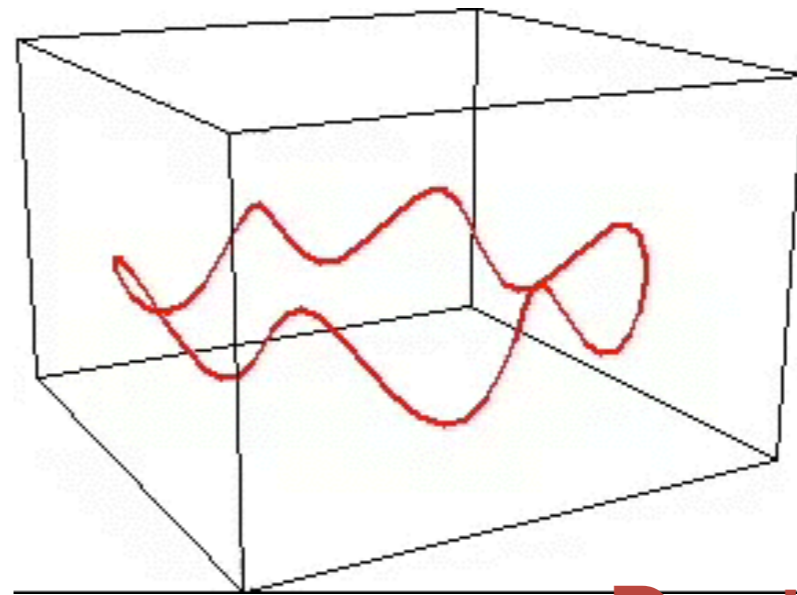
- ~ Además hay dos tipos de **oscilaciones fermiónicas**: ψ_c & ψ_s

Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una cuerda cerrada tiene **dos tipos de oscilaciones**



Levógiras

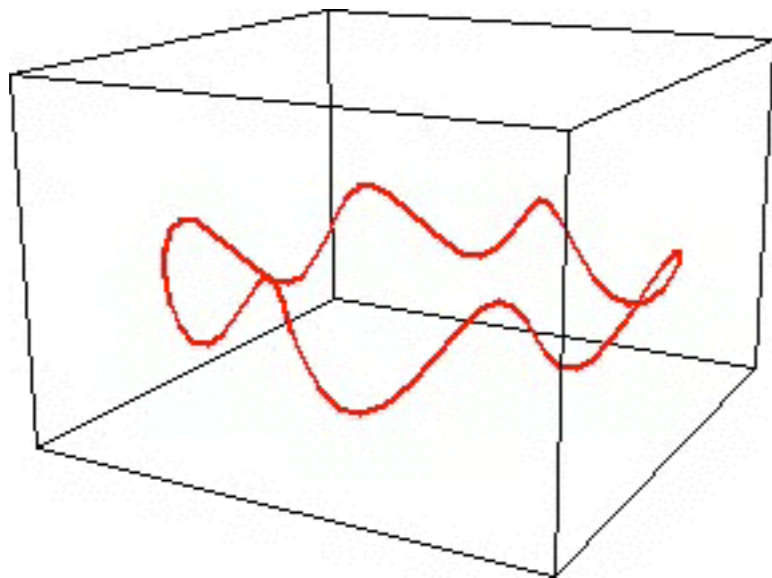


Dextrógiras

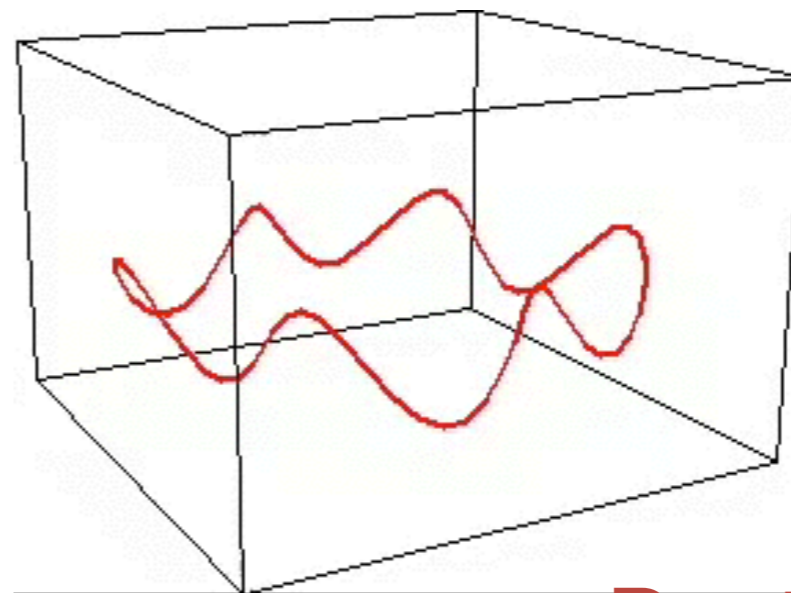
- ~ Además hay dos tipos de **oscilaciones fermiónicas**: ψ_c & ψ_s

Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una cuerda cerrada tiene **dos tipos de oscilaciones**



Levógiras

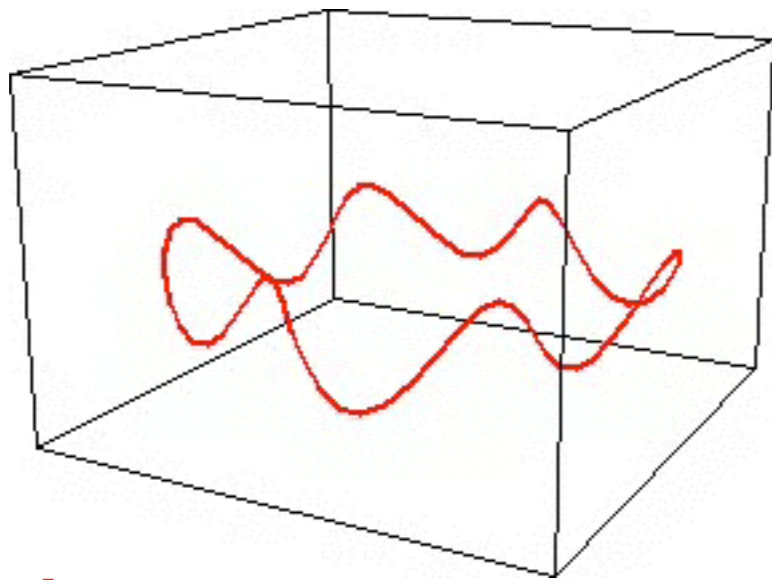


Dextrógiras

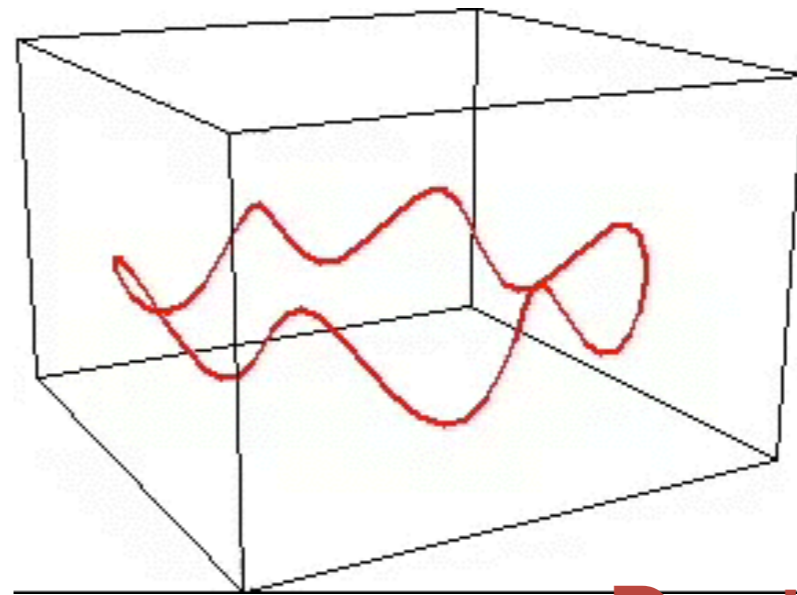
- ~ Además hay dos tipos de **oscilaciones fermiónicas**: ψ_c & ψ_s
- ~ Por lo tanto hay **varias teorías** de supercuerdas posibles...

Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una cuerda cerrada tiene **dos tipos de oscilaciones**



Levógiras



Dextrógiras

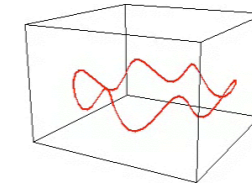
- ~ Además hay dos tipos de **oscilaciones fermiónicas**: ψ_c & ψ_s
- ~ Por lo tanto hay **varias teorías** de supercuerdas posibles...

Cómo son las supercuerdas?

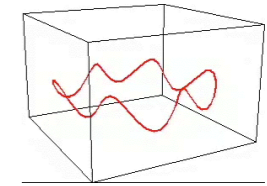
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

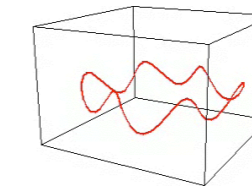


ψ_c

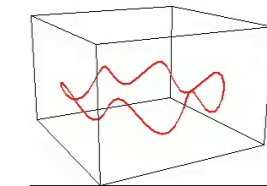
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



ψ_s



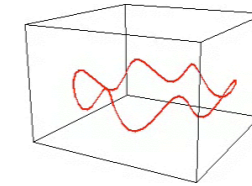
ψ_s

Cómo son las supercuerdas?

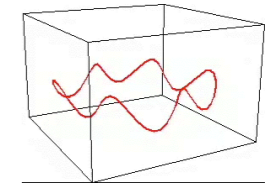
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

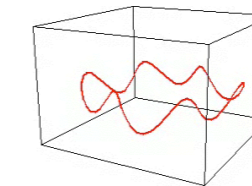


ψ_c

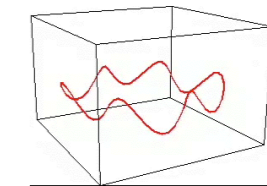
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



ψ_s



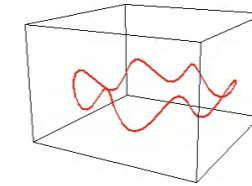
ψ_s

Cómo son las supercuerdas?

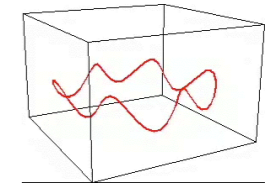
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

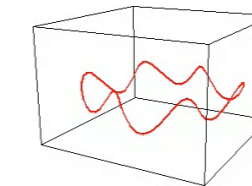


ψ_c

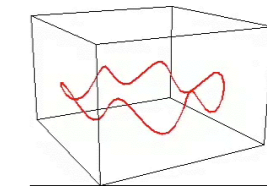
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

Cuerdas abiertas y cerradas

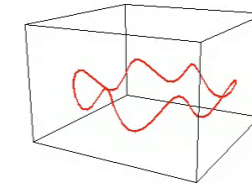


Cómo son las supercuerdas?

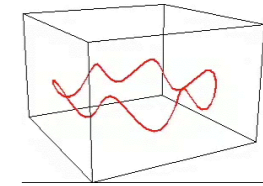
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

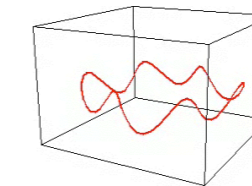


ψ_c

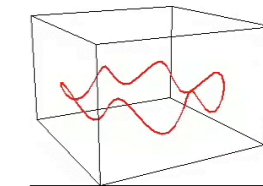
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

Cuerdas abiertas y cerradas

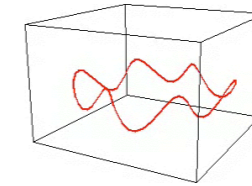


Cómo son las supercuerdas?

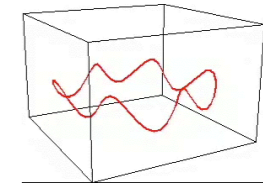
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

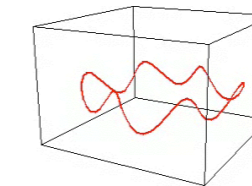


ψ_c

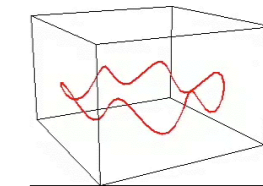
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

Cuerdas abiertas y cerradas (no orientables)

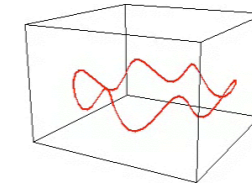


Cómo son las supercuerdas?

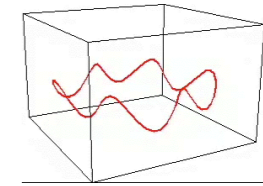
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

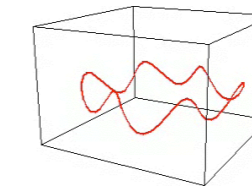


ψ_c

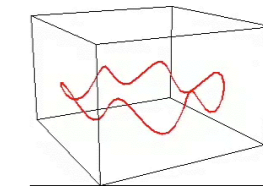
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

Cuerdas abiertas y cerradas (no orientables)

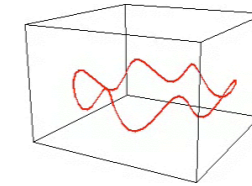


Cómo son las supercuerdas?

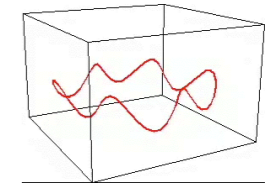
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

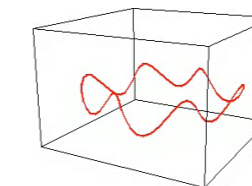


ψ_c

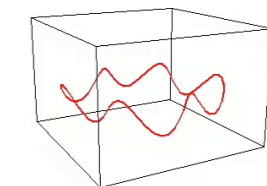
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



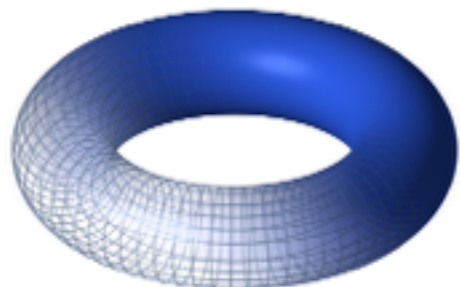
ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

Cuerdas abiertas y cerradas (no orientables)

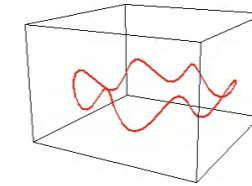


Cómo son las supercuerdas?

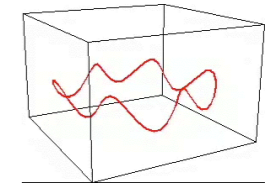
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

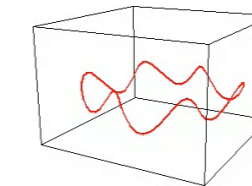


ψ_c

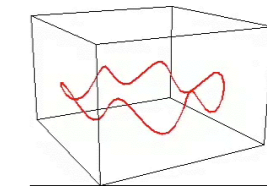
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



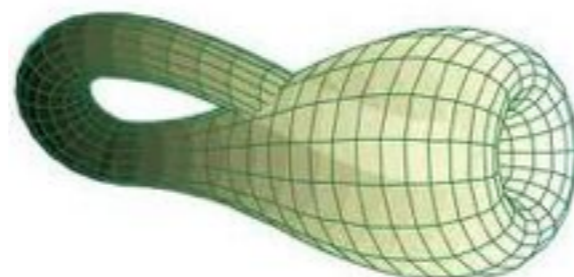
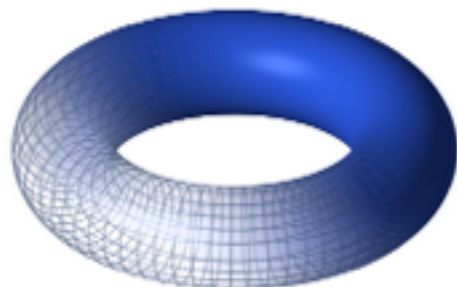
ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

Cuerdas abiertas y cerradas (no orientables)

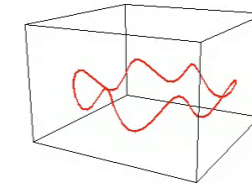


Cómo son las supercuerdas?

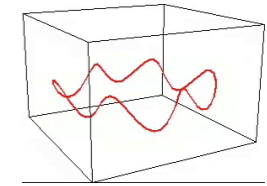
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

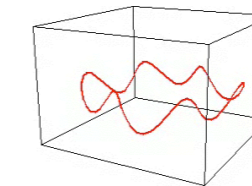


ψ_c

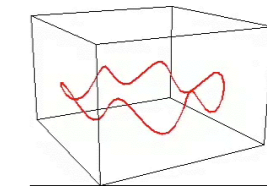
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



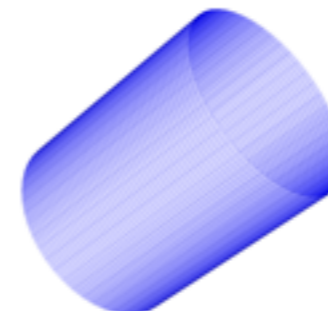
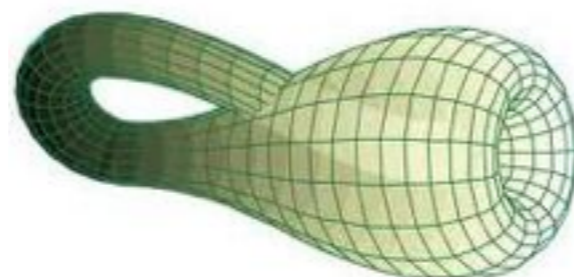
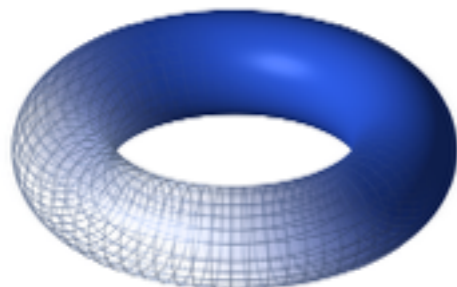
ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

Cuerdas abiertas y cerradas (no orientables)

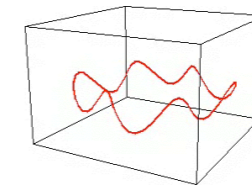


Cómo son las supercuerdas?

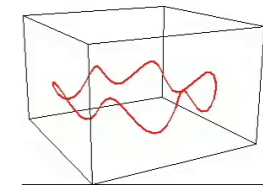
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

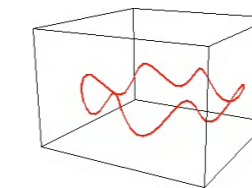


ψ_c

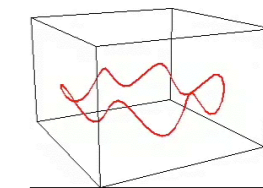
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



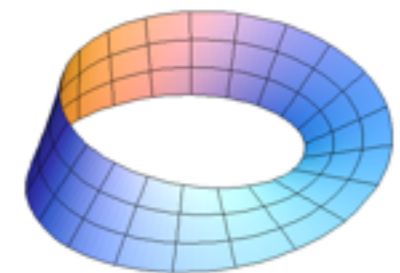
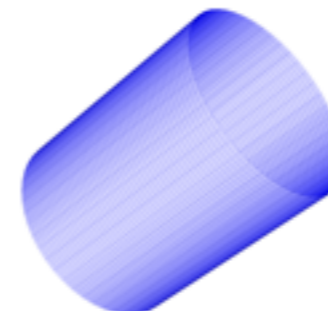
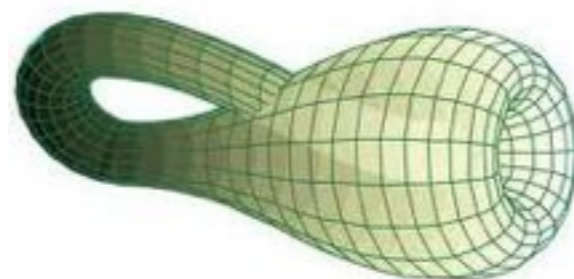
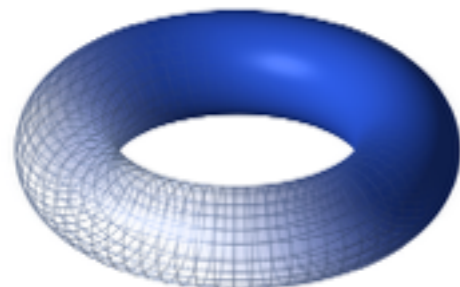
ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

Cuerdas abiertas y cerradas (no orientables)

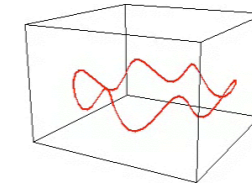


Cómo son las supercuerdas?

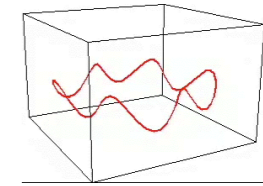
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

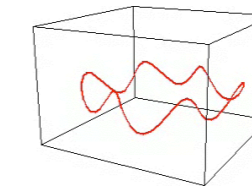


ψ_c

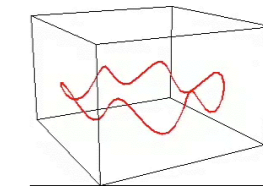
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

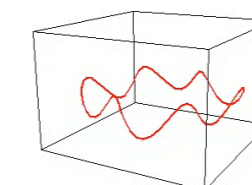
Cuerdas abiertas y cerradas (no orientables)



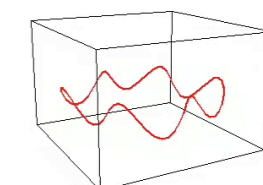
~ Teorías Heteróticas: (1985)

Cuerdas cerradas

Un modo es fermiónico y el otro sólo bosónico



ψ_s



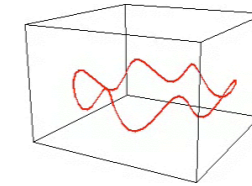
X

Cómo son las supercuerdas?

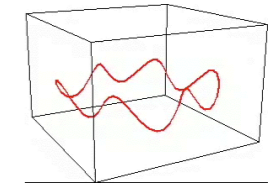
~ Teoría tipo IIA:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son distintos



ψ_s

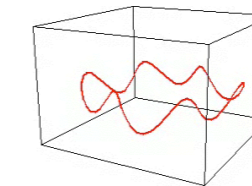


ψ_c

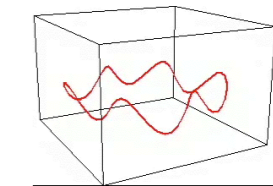
~ Teoría tipo IIB:

Cuerdas cerradas

Los modos Lev. y Dex. son iguales



ψ_s



ψ_s

~ Teoría tipo I:

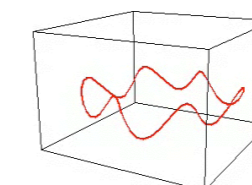
Cuerdas abiertas y cerradas (no orientables)



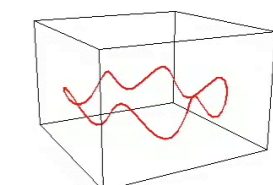
~ Teorías Heteróticas: (1985)

Cuerdas cerradas

Un modo es fermiónico y el otro sólo bosónico



ψ_s



X

Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una manera más útil de entender las supercuerdas es ver a que **teoría de partículas** se parece cada una



Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una manera más útil de entender las supercuerdas es ver a que **teoría de partículas** se parece cada una (nos quedamos con las cuerdas más ligeras y las interpretamos como partículas)



Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una manera más útil de entender las supercuerdas es ver a que **teoría de partículas** se parece cada una (nos quedamos con las cuerdas más ligeras y las interpretamos como partículas)

Teorías tipo II:

- **9+1** dimensiones
- (Super) **Gravedad**
- SUSY **N=2** : el Gravitón tiene dos compañeros supersimétricos (gravitinos)

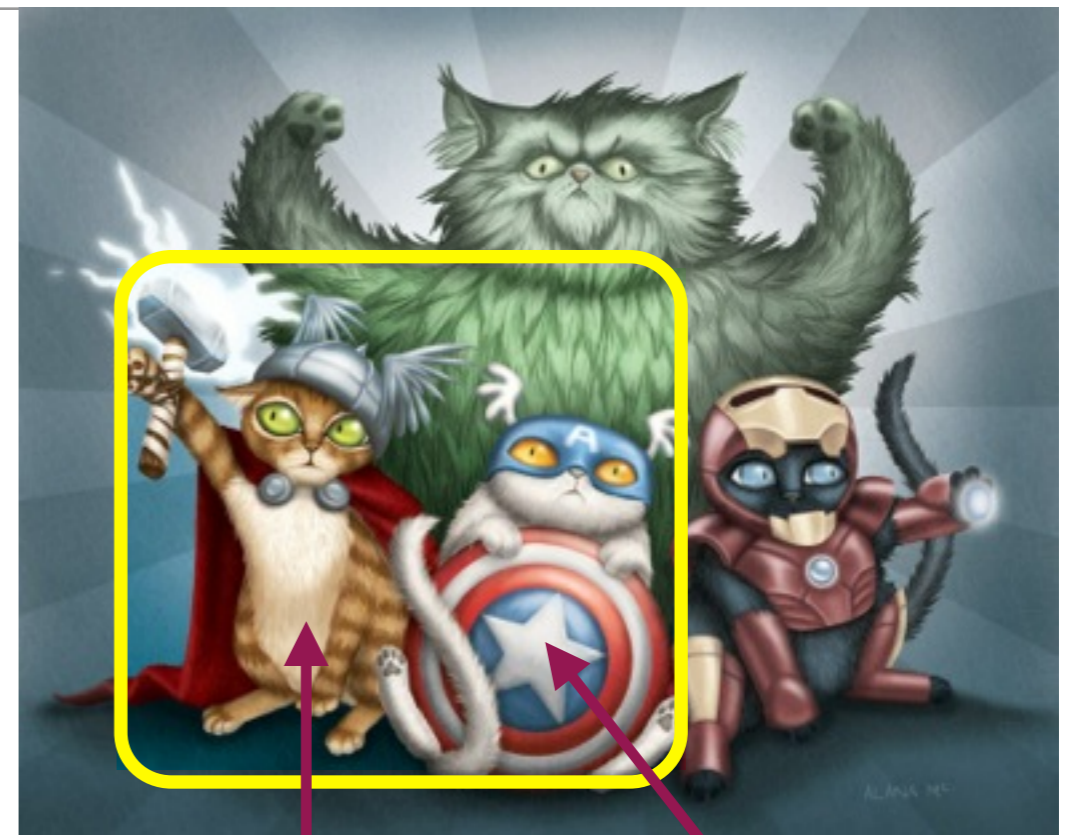


Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una manera más útil de entender las supercuerdas es ver a que **teoría de partículas** se parece cada una (nos quedamos con las cuerdas más ligeras y las interpretamos como partículas)

Teorías tipo II:

- 9+1 dimensiones
- (Super) Gravedad
- SUSY $N=2$: el Gravitón tiene dos compañeros supersimétricos (gravitinos)



Tipo IIB:

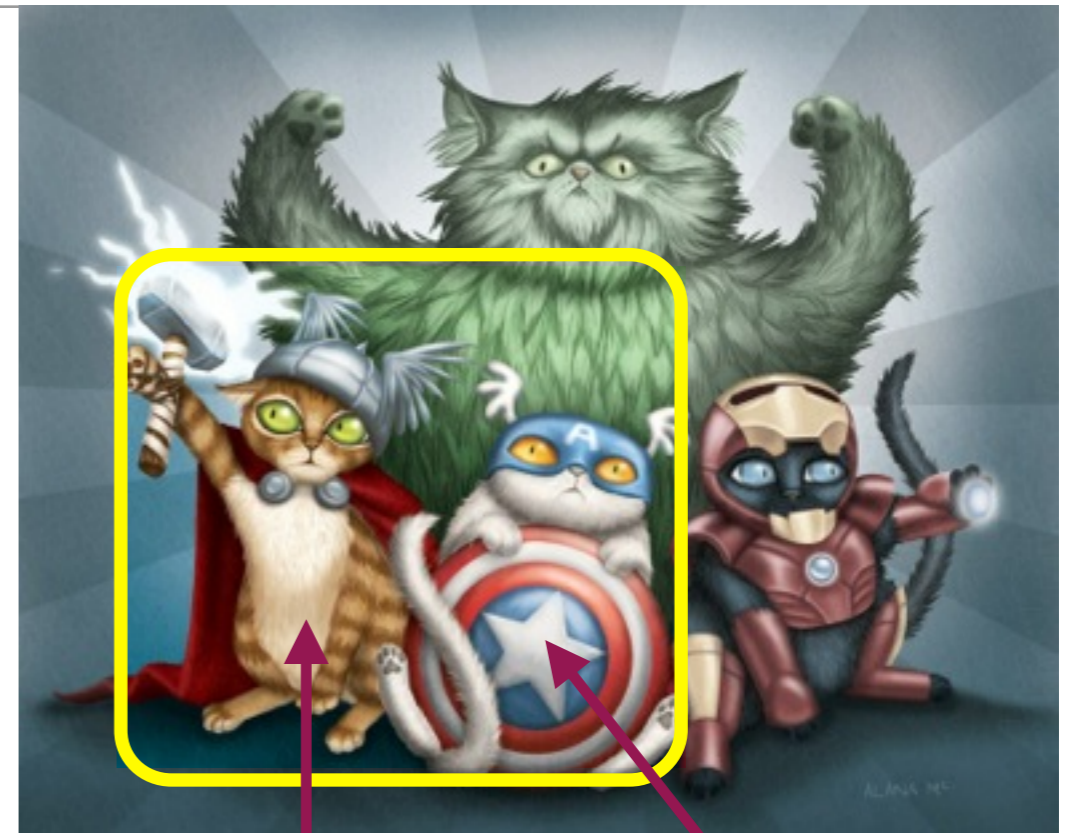
Tipo IIA:

Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una manera más útil de entender las supercuerdas es ver a que **teoría de partículas** se parece cada una (nos quedamos con las cuerdas más ligeras y las interpretamos como partículas)

Teorías tipo II:

- **9+1** dimensiones
- (Super) **Gravedad**
- SUSY **N=2** : el Gravitón tiene dos compañeros supersimétricos (gravitinos)



Tipo IIB:

Tipo IIA:

Ambos gravitinos son iguales (misma quiralidad)

Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una manera más útil de entender las supercuerdas es ver a que **teoría de partículas** se parece cada una (nos quedamos con las cuerdas más ligeras y las interpretamos como partículas)

Teorías tipo II:

- **9+1** dimensiones
- (Super) **Gravedad**
- SUSY **N=2** : el Gravitón tiene dos compañeros supersimétricos (gravitinos)



Tipo IIB:

Ambos gravitinos son iguales
(misma quiralidad)

Tipo IIA:

Los gravitinos son distintos
(quiralidad opuesta)

Cómo son las supercuerdas?

- ~ Una manera más útil de entender las supercuerdas es ver a que **teoría de partículas** se parece cada una (nos quedamos con las cuerdas más ligeras y las interpretamos como partículas)

Teoría tipo I:

- 9+1 dimensiones
- (Super) Gravedad
- SUSY $N=1$: el Gravitón tiene un compañero supersimétrico (gravitino)



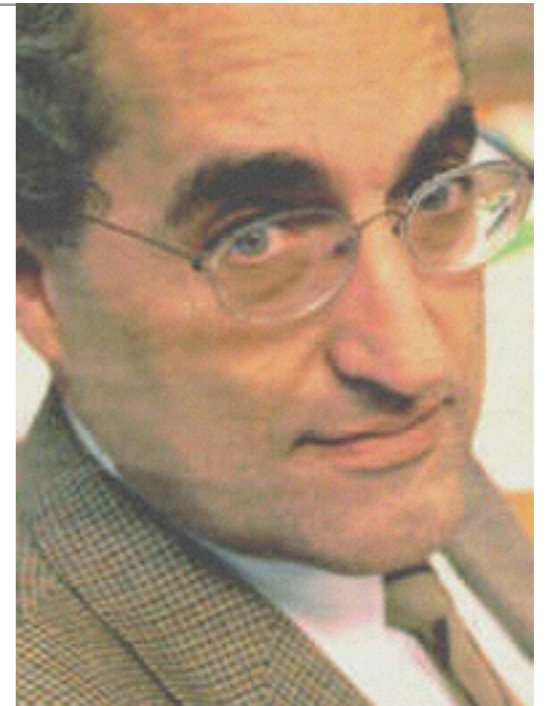
Tipo I:

- Contiene **interacciones gauge** como el **Modelo Estándar !!**
Grupo gauge: $SO(N)$

Un momento...

~ Los **fermiones** y la **gravedad** no se llevan bien

(Los fermiones producen anomalías en las teorías con gravedad)



Witten

Un momento...

~ Los **fermiones** y la **gravedad** no se llevan bien

(Los fermiones producen anomalías en las teorías con gravedad)

~ Tipo IIA:

El efecto de los dos gravitinos se cancela entre sí y *no hay problema*

~ Tipo IIB:

El efecto de los dos *gravitinos* se suma entre sí y *crean problemas*



Witten

Un momento...

~ Los **fermiones** y la **gravedad** no se llevan bien

(Los fermiones producen anomalías en las teorías con gravedad)

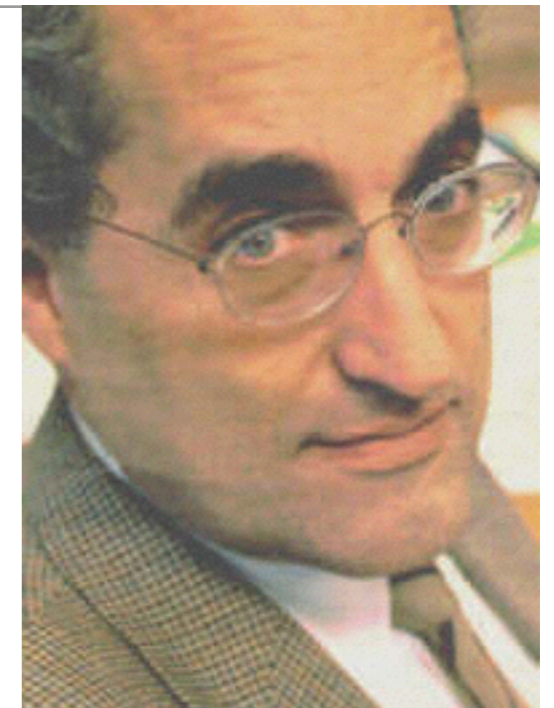
~ Tipo IIA:

El efecto de los dos gravitinos se cancela entre sí y *no hay problema*

~ Tipo IIB:

El efecto de los dos gravitinos se suma entre sí y ~~crean problemas~~

En una teoría de cuerdas estos problemas se resuelven (1984)



Witten

Álvarez-Gaumé



Un momento...

- ~ Los **fermiones** y la **gravedad** no se llevan bien

(Los fermiones producen anomalías en las teorías con gravedad)

- ~ Tipo IIA:

El efecto de los dos gravitinos se cancela entre sí y *no hay problema*



- ~ Tipo IIB:

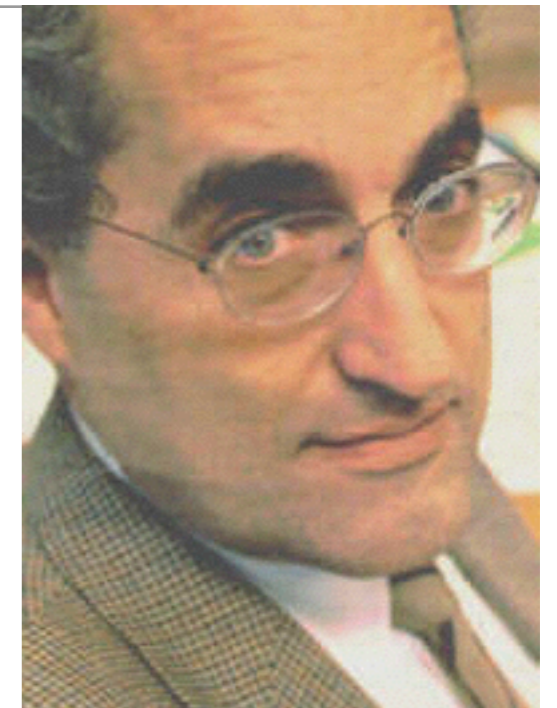
El efecto de los dos gravitinos se suma entre sí y ~~crean problemas~~

En una teoría de cuerdas estos problemas se resuelven (1984)



- ~ Tipo I:

Tiene **anomalías extras** que aparecen en el sector gauge y que son **insalvables**



Witten
Álvarez-Gaumé



Un momento...

~ Los **fermiones** y la **gravedad** no se llevan bien

(Los fermiones producen anomalías en las teorías con gravedad)

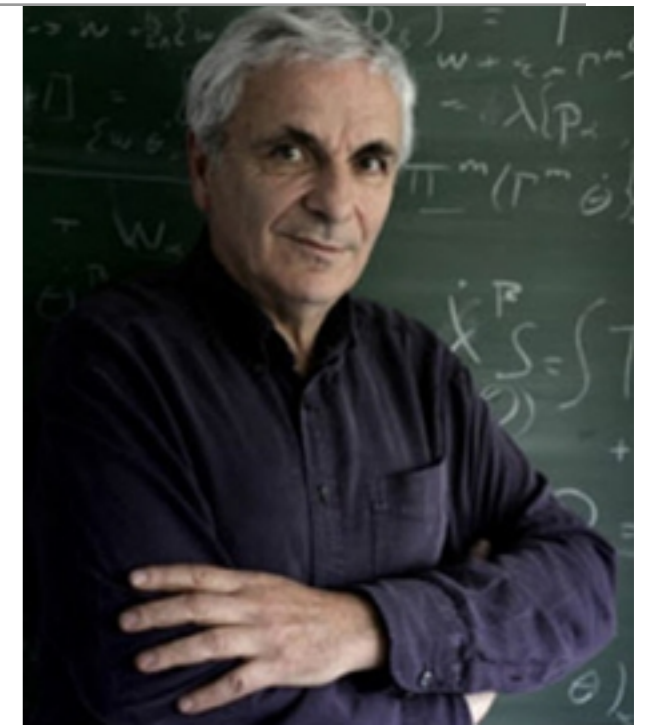
~ Tipo IIA: 🤗

~ Tipo IIB: 🤗

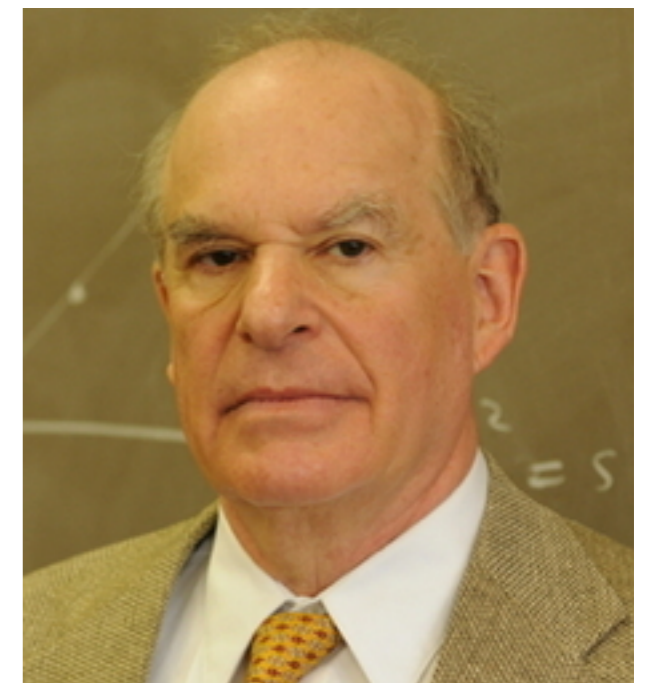
~ Tipo I:

Los problemas desaparecen para el grupo gauge $SO(32)$!!

(1984)



Green
Schwarz



La primera revolución

~ Este último resultado **convenció a mucha gente** de que la teoría de cuerdas era muy importante de estudiar, puesto que la **teoría tipo I unificaba**

 **Mecánica cuántica**

 **Gravedad**

 **Interacciones gauge**

por primera vez en la historia de la física teórica!!

La primera revolución

~ Este último resultado **convenció a mucha gente** de que la teoría de cuerdas era muy importante de estudiar, puesto que la **teoría tipo I unificaba**

🔊 **Mecánica cuántica**

🔊 **Gravedad**

🔊 **Interacciones gauge**

por primera vez en la historia de la física teórica!!

Teoría de cuerdas pasó a considerarse como la "Teoría del todo"

Stephen W.
Hawking

La teoría del todo

El origen y el destino del universo

DEBOLSILLO

El universo
elegante



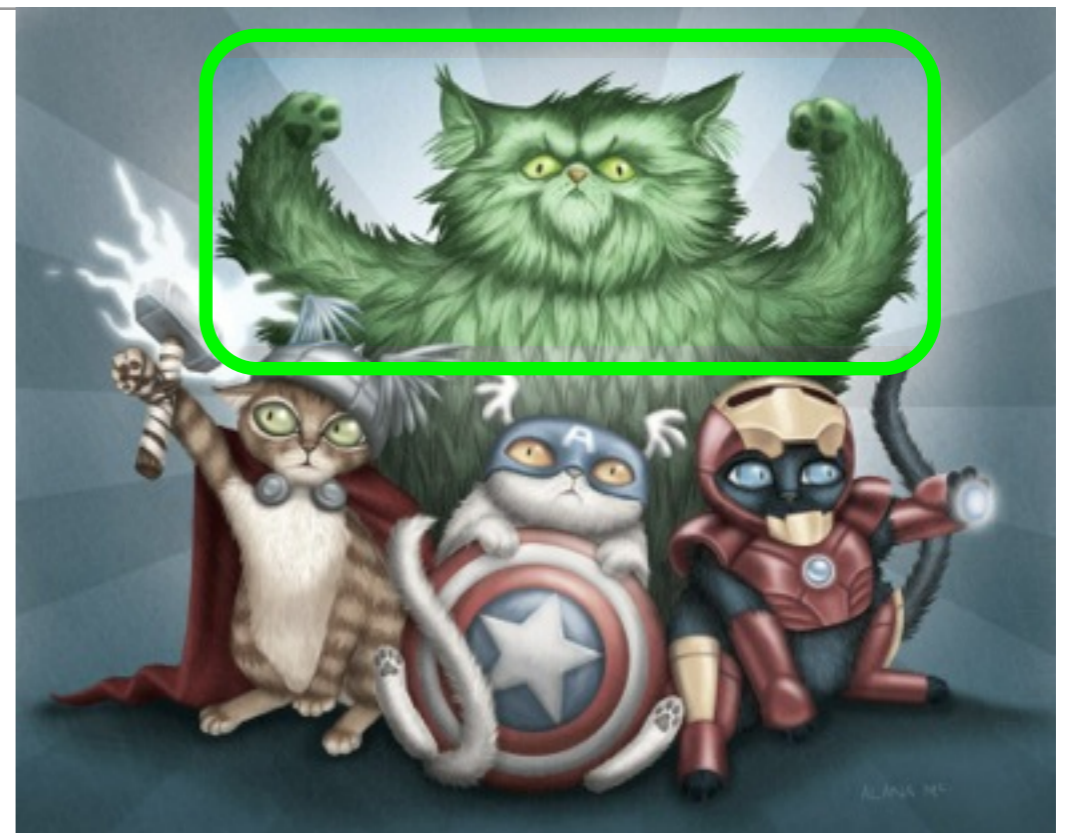
Supercuerdas, dimensiones escondidas y la búsqueda de la teoría definitiva

Pero hay más...

- ~ Al poco tiempo se construyeron las **teorías heteróticas**, que también contenían interacciones gauge

Teorías heteróticas:

- **9+1** dimensiones
- (Super) **Gravedad**
- SUSY **N=1** : el Gravitón tiene un compañero supersimétrico (gravitinos)
- Contiene **interacciones gauge**



Pero hay más...

- ~ Al poco tiempo se construyeron las **teorías heteróticas**, que también contenían interacciones gauge

Teorías heteróticas:

- 9+1 dimensiones
- (Super) Gravedad 
- SUSY $N=1$: el Gravitón tiene un compañero supersimétrico (gravitinos)
- Contiene **interacciones gauge**



Tipo HO:

Tipo HE:

Pero hay más...

- ~ Al poco tiempo se construyeron las **teorías heteróticas**, que también contenían interacciones gauge

Teorías heteróticas:

- 9+1 dimensiones
- (Super) **Gravedad** 
- SUSY **N=1** : el Gravitón tiene un compañero supersimétrico (gravitinos)
- Contiene **interacciones gauge**



Tipo HO:

Tipo HE:

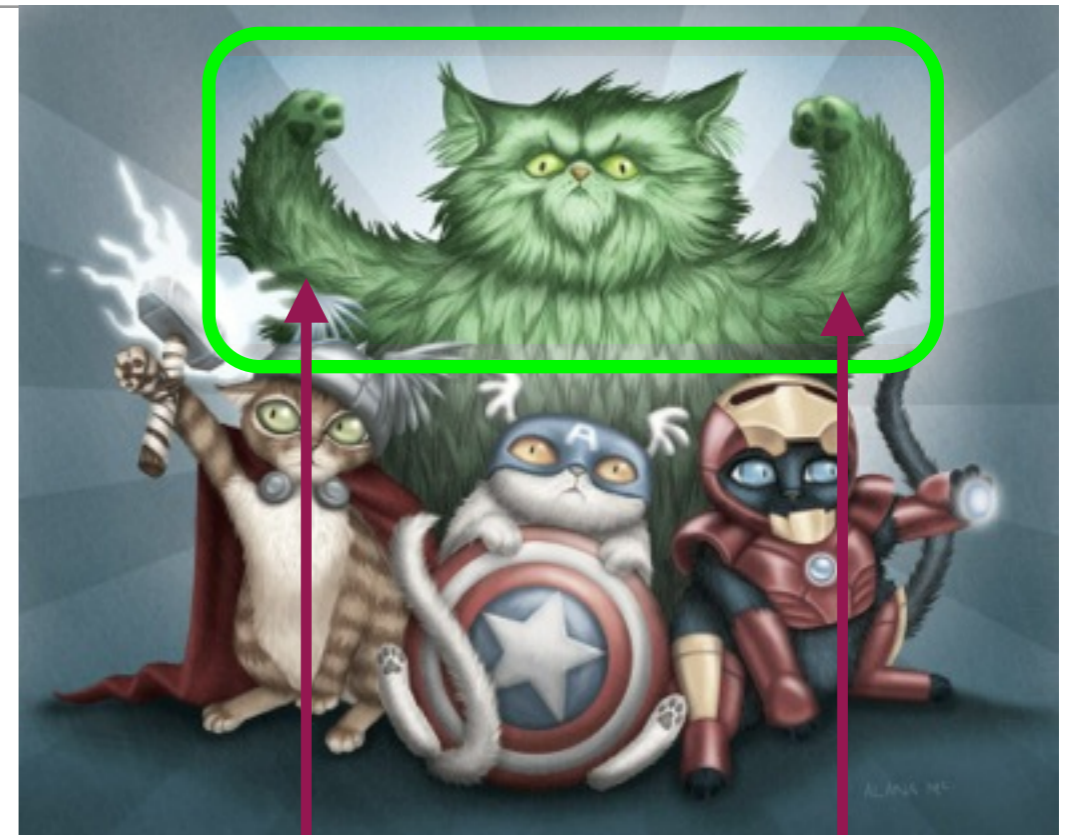
Grupo gauge
SO(32)

Pero hay más...

- ~ Al poco tiempo se construyeron las teorías heteróticas, que también contenían interacciones gauge

Teorías heteróticas:

- 9+1 dimensiones
- (Super) Gravedad 
- SUSY $N=1$: el Gravitón tiene un compañero supersimétrico (gravitinos)
- Contiene interacciones gauge



Tipo HO:

Grupo gauge
 $SO(32)$

Tipo HE:

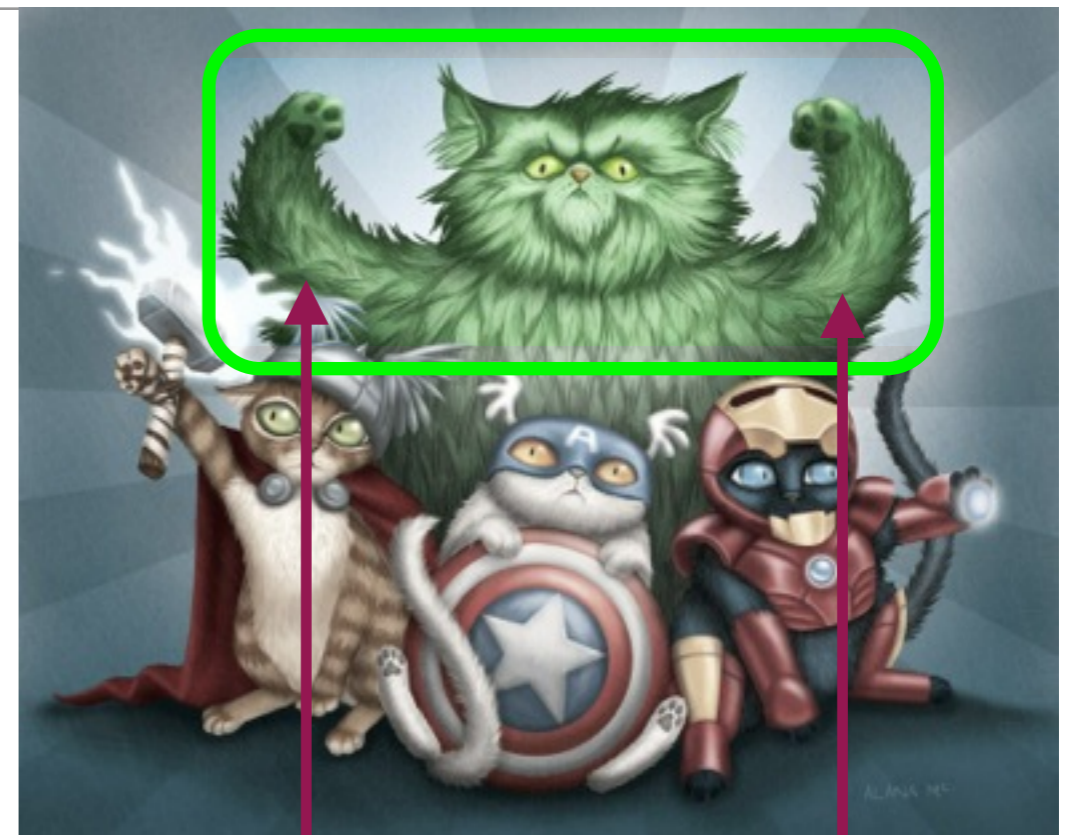
Grupo gauge
 $E_8 \times E_8$

Pero hay más...

- Al poco tiempo se construyeron las **teorías heteróticas**, que también contenían interacciones gauge

Teorías heteróticas:

- 9+1 dimensiones
- (Super) **Gravedad**
- SUSY **N=1** : el Gravitón tiene un compañero supersimétrico (gravitinos)
- Contiene **interacciones gauge**



Tipo HO:

Grupo gauge
SO(32)

Tipo HE:

Grupo gauge
E₈xE₈

Para ambos funciona el mecanismo de Green-Schwarz

Resumen: la familia de supercuerdas

tipo HE
N=1 $E_8 \times E_8$

tipo HO
N=1 $SO(32)$



tipo IIB
N=2 quiral

tipo I
N=1 $SO(32)$

tipo IIA
N=2 no-quiral

Resumen: la familia de supercuerdas

tipo HE
N=1 $E_8 \times E_8$

tipo HO
N=1 $SO(32)$



Y qué hacemos con las 10 dimensiones???

tipo IIB
N=2 quiral

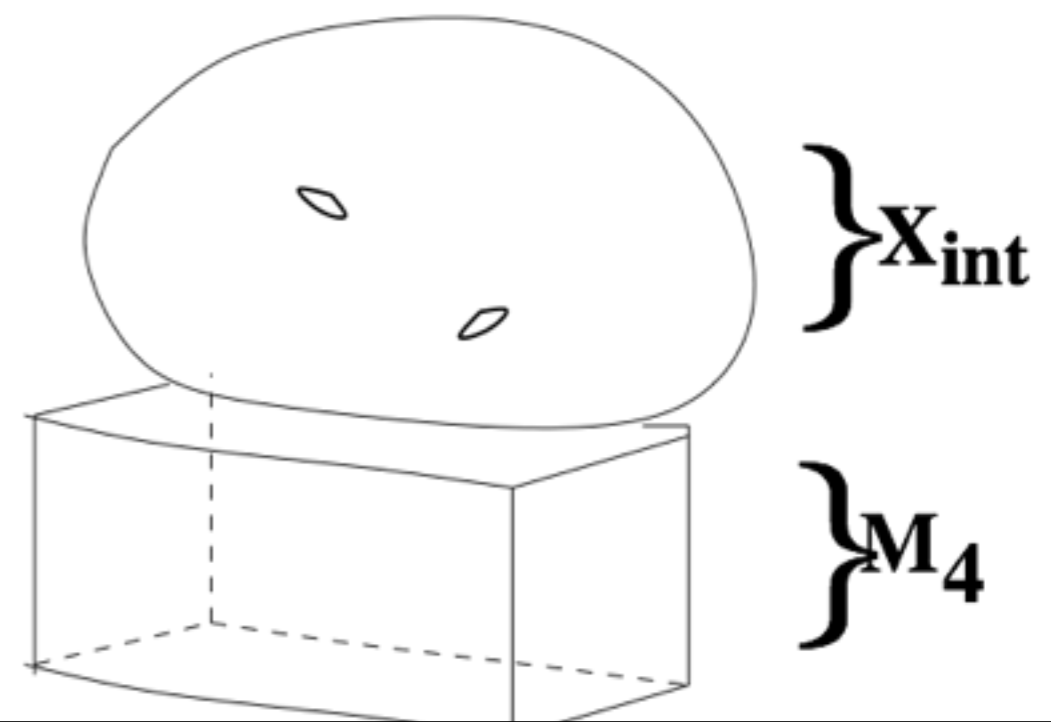
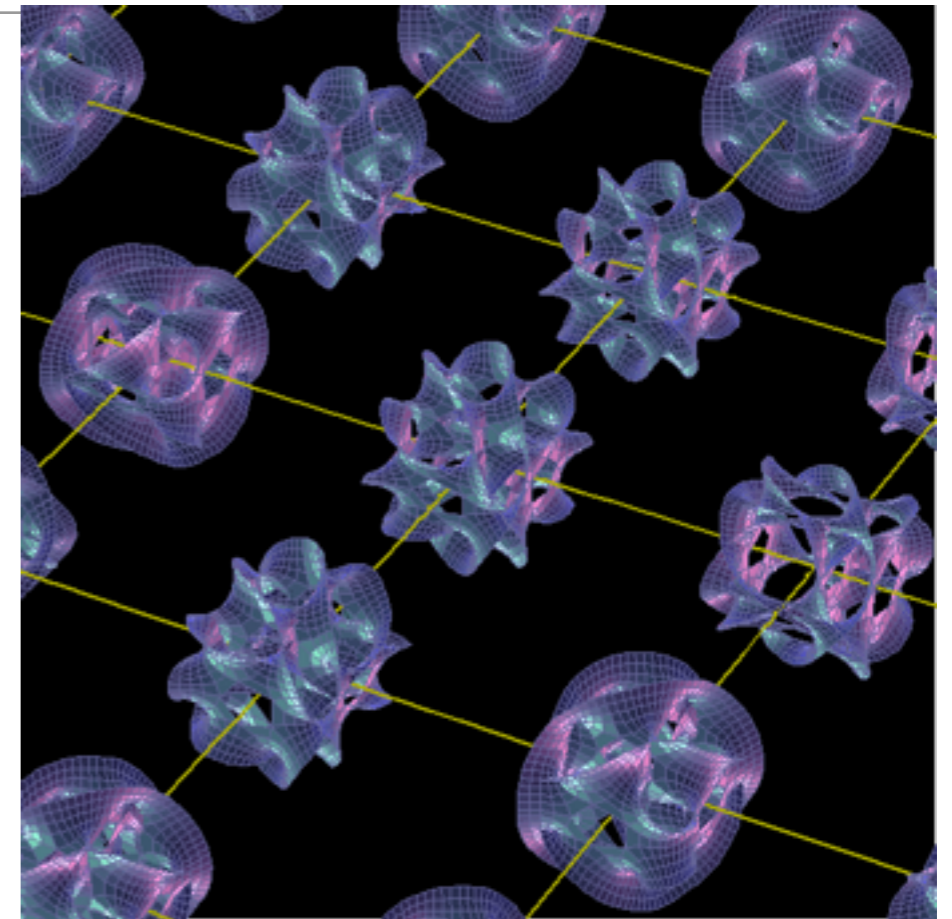
tipo I
N=1 $SO(32)$

tipo IIA
N=2 no-quiral



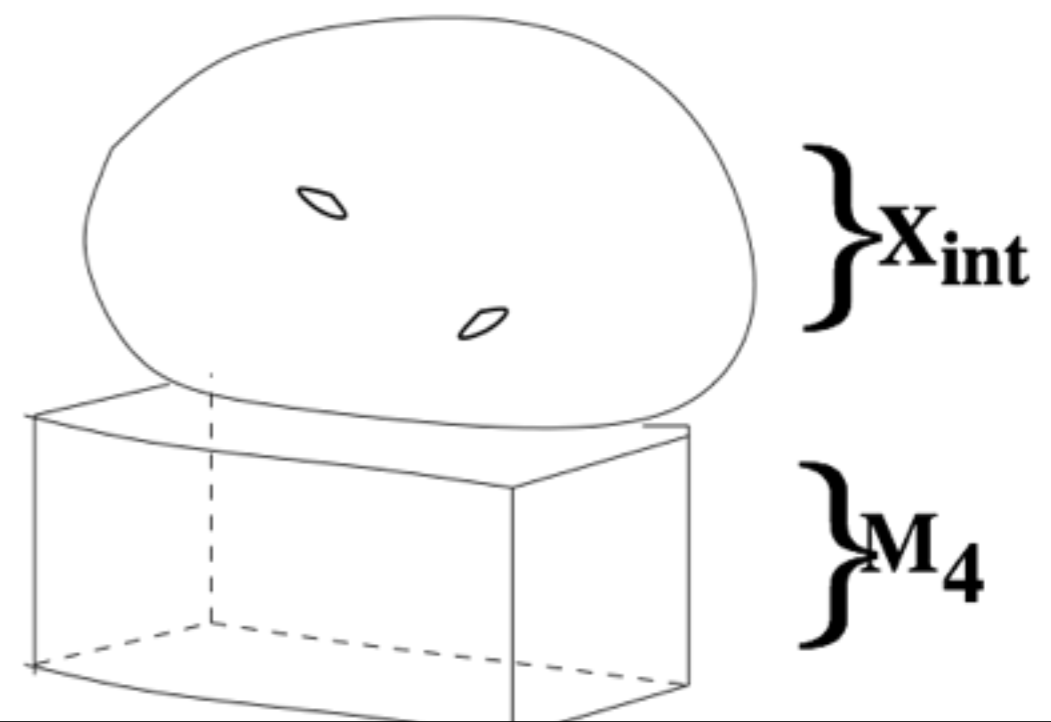
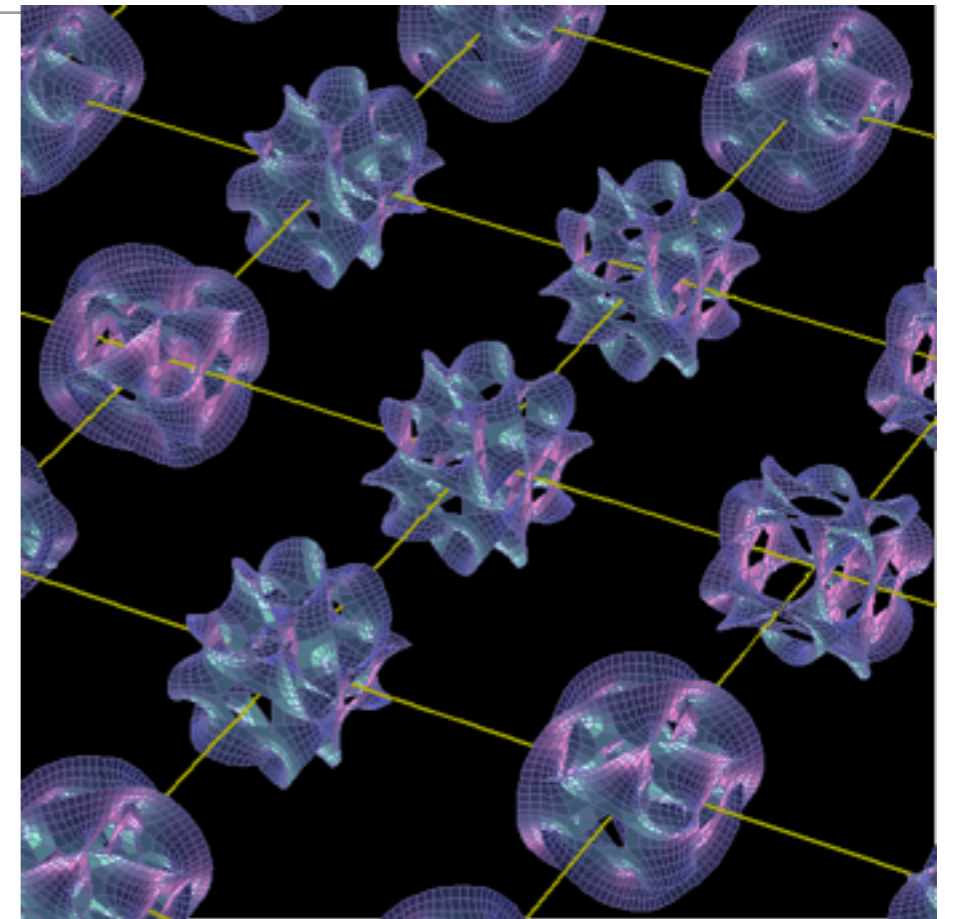
Kaluza-Klein & Calabi-Yau

- ~ De nuevo usamos la **idea de K&K**
- ~ En cada punto del espacio que observamos hay en realidad **seis dimensiones extra diminutas**, acurrucadas en una variedad compacta
- ~ Al ser tan pequeñas, **sólo podemos observar estas dimensiones** haciendo experimentos **a energías muy altas**
- ~ **No cualquier variedad vale:** tiene que resolver las ecuaciones de (super)gravedad



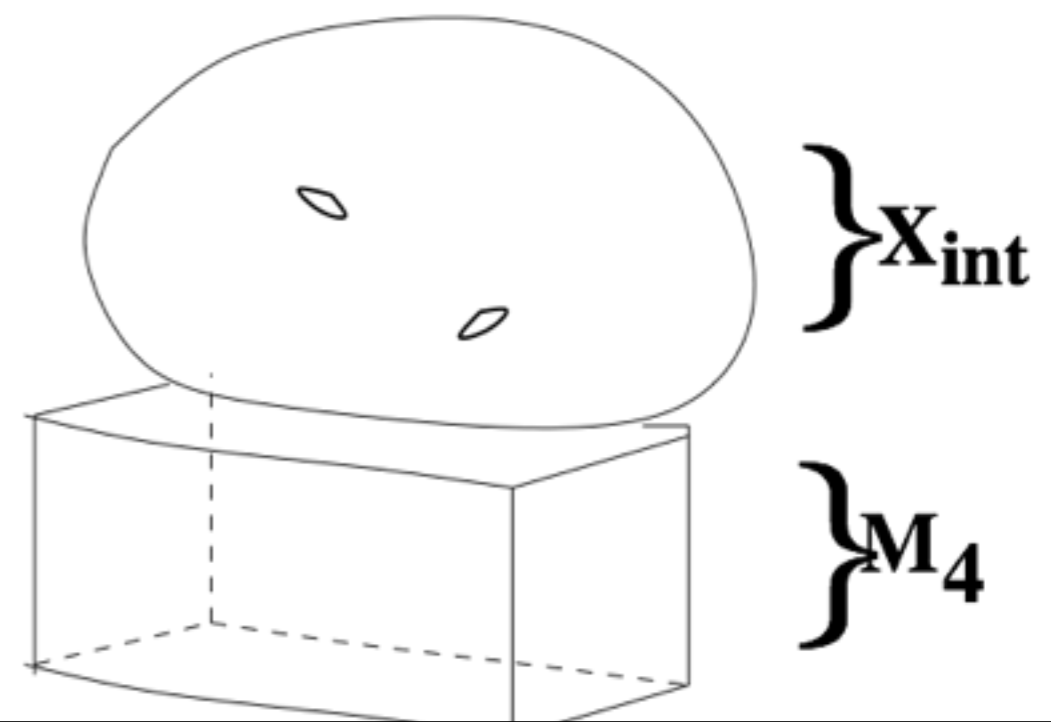
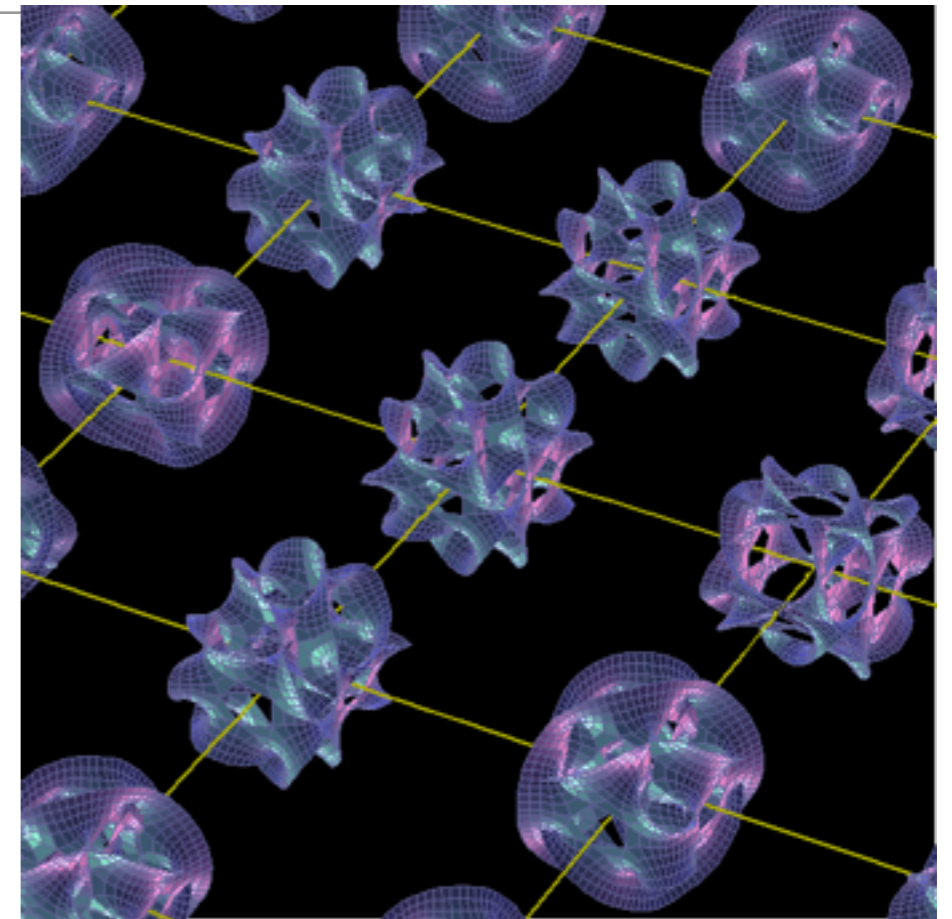
Kaluza-Klein & Calabi-Yau

- ~ De nuevo usamos la **idea de K&K**
- ~ En cada punto del espacio que observamos hay en realidad **seis dimensiones extra diminutas**, acurrucadas en una variedad compacta
- ~ Al ser tan pequeñas, **sólo podemos observar estas dimensiones** haciendo experimentos **a energías muy altas**
- ~ **No cualquier variedad vale:** tiene que resolver las ecuaciones de (super)gravedad



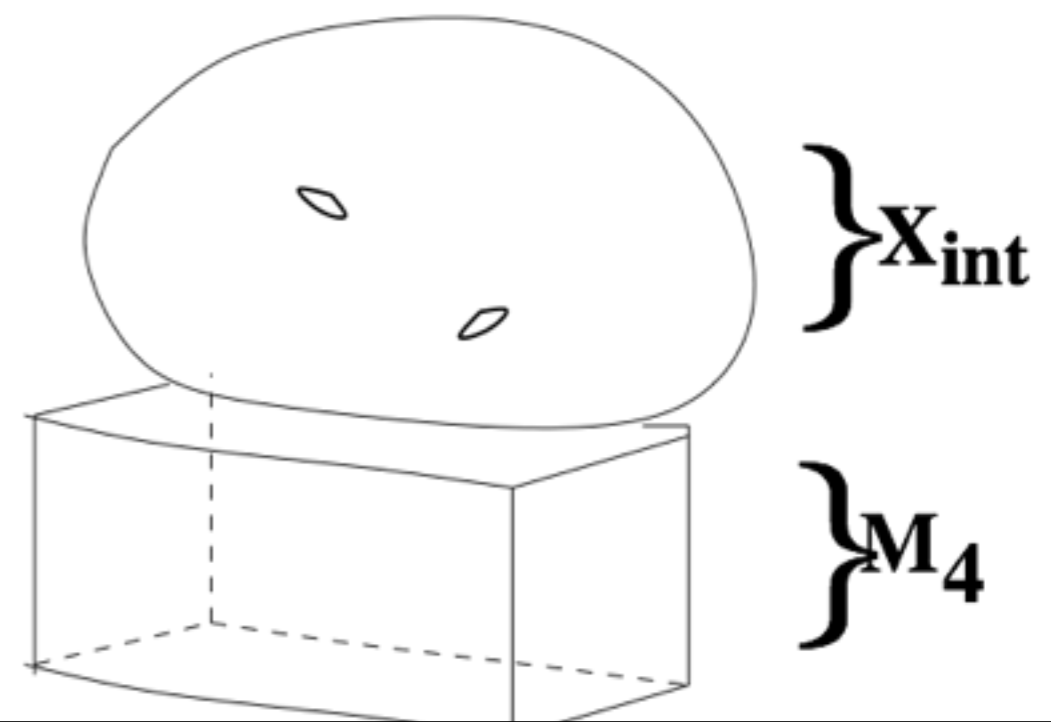
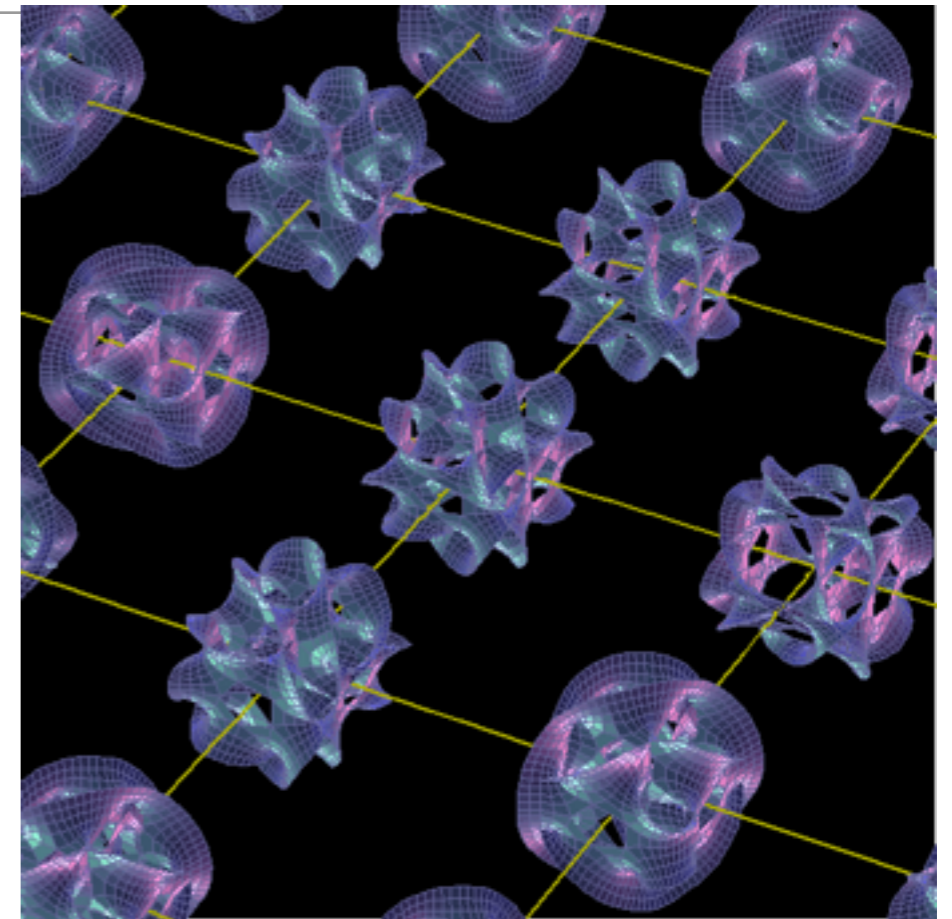
Kaluza-Klein & Calabi-Yau

- ~ De nuevo usamos la **idea de K&K**
- ~ Unas variedades que resuelven todas las ecuaciones son conocidas como **variedades “Calabi-Yau”**
- ~ Tienen la propiedad de que no rompen la **supersimetría** de la teoría de cuerdas, con lo cual a bajas energías tenemos
 - **Gravedad** en 4 dim
 - **Interacciones gauge** en 4 dim
 - **Supersimetría** en 4 dim



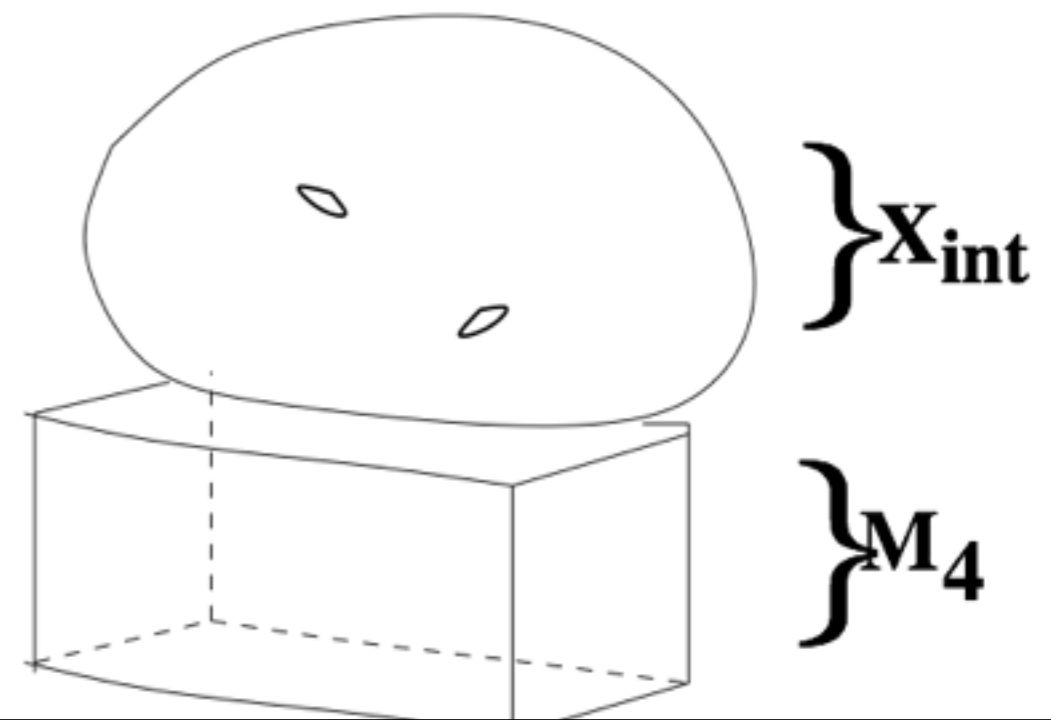
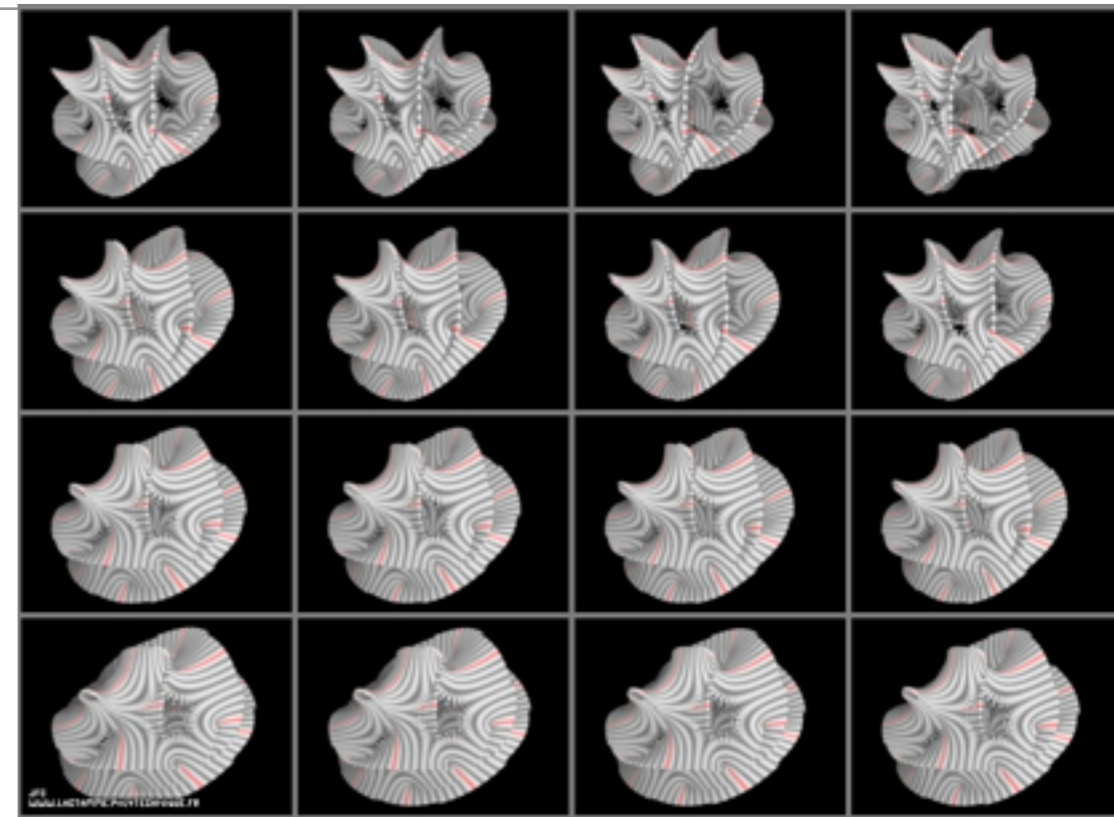
Kaluza-Klein & Calabi-Yau

- ~ De nuevo usamos la **idea de K&K**
- ~ Unas variedades que resuelven todas las ecuaciones son conocidas como **variedades “Calabi-Yau”**
- ~ Tienen la propiedad de que no rompen la **supersimetría** de la teoría de cuerdas, con lo cual a bajas energías tenemos
 - **Gravedad** en 4 dim
 - **Interacciones gauge** en 4 dim
 - **Supersimetría** en 4 dim



Pero qué Calabi-Yau?

- ~ Hay **muchas variedades Calabi-Yau** (muchas soluciones al problema)
- ~ **Para cada CY** distinto tendremos una teoría distinta en 4 dimensiones
 - **distinto contenido de partículas**
 - **distintos parámetros**



Pero qué Calabi-Yau?

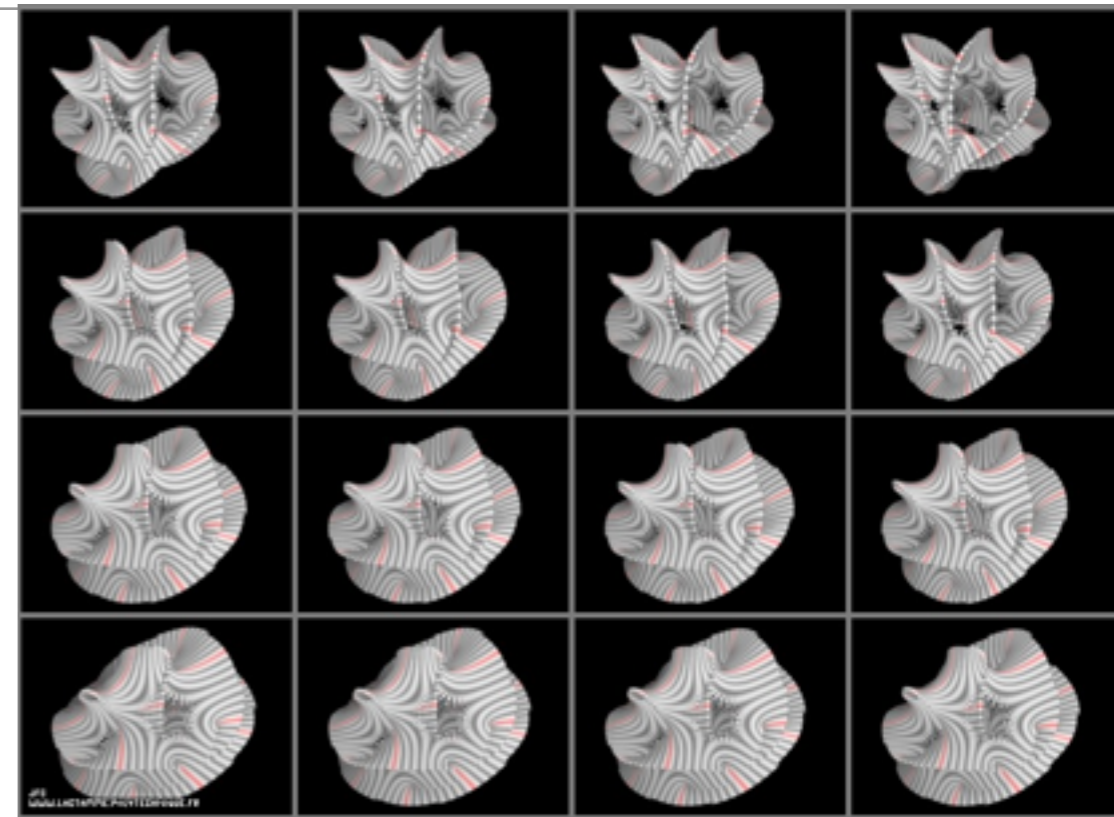
~ Hay **muchas variedades Calabi-Yau** (muchas soluciones al problema)

~ **Para cada CY** distinto tendremos una teoría distinta en 4 dimensiones

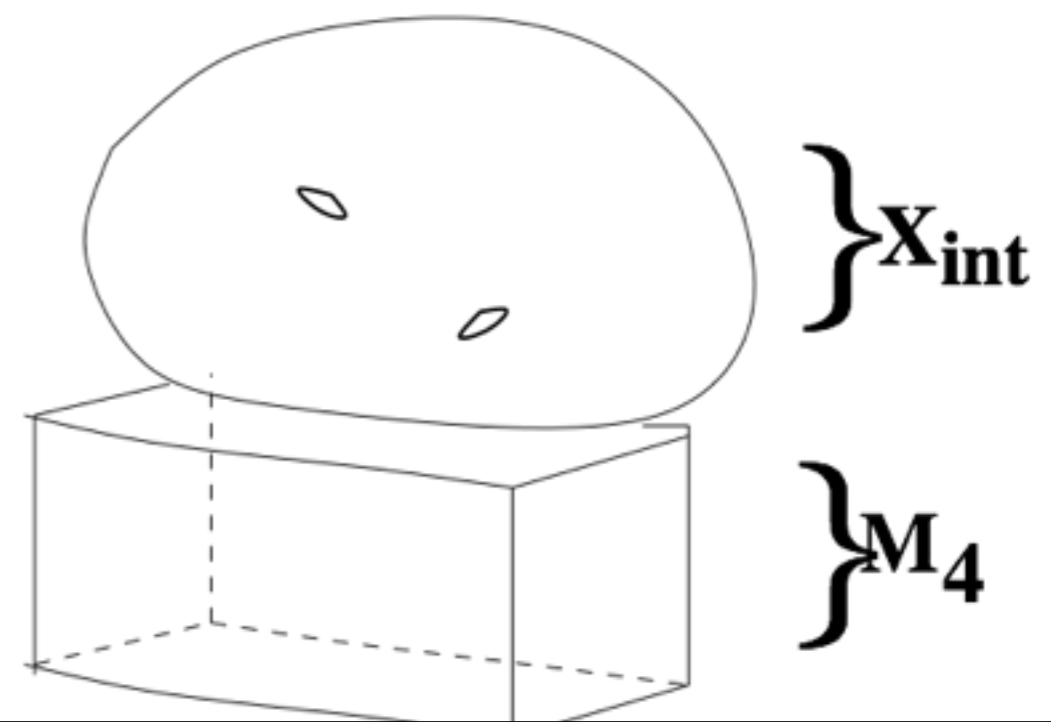
• **distinto contenido de partículas**

• **distintos parámetros**

~ **El reto** consiste en **encontrar un CY** tal que se obtenga el **Modelo Estándar** de Partículas (o su versión SUSY)



Partículas del modelo estándar					Partículas supersimétricas				
u	c	t	γ	H	\tilde{H}	$\tilde{\gamma}$	\tilde{u}	\tilde{c}	\tilde{t}
d	s	b	g	Higgs	Higgsino	\tilde{g}	\tilde{d}	\tilde{s}	\tilde{b}
ν_e	ν_μ	ν_τ	Z			\tilde{Z}	$\tilde{\nu}_e$	$\tilde{\nu}_\mu$	$\tilde{\nu}_\tau$
e	μ	τ	W			\tilde{W}	\tilde{e}	$\tilde{\mu}$	$\tilde{\tau}$
Quarks	Leptones	Bosones mensajeros			Fermiones mensajeros	Sleptones	Squarks		



La búsqueda del Modelo Estándar

La búsqueda del Modelo Estándar

- ~ Durante la primera revolución de las cuerdas las grandes protagonistas fueron las **cuerdas heteróticas**



La búsqueda del Modelo Estándar

- ~ Durante la primera revolución de las cuerdas las grandes protagonistas fueron las **cuerdas heteróticas**
- ~ La gran pregunta era **encontrar el Calabi-Yau** que diese lugar al **Modelo Estándar** de Partículas, y por lo tanto a una teoría que unificase todas las interacciones



La búsqueda del Modelo Estándar

- ~ Durante la primera revolución de las cuerdas las grandes protagonistas fueron las **cuerdas heteróticas**
- ~ La gran pregunta era **encontrar el Calabi-Yau** que diese lugar al **Modelo Estándar** de Partículas, y por lo tanto a una teoría que unificase todas las interacciones
- ~ Muchos físicos teóricos empezaron a pensar en este problema, **olvidándose de las otras teorías** de cuerdas



La búsqueda del Modelo Estándar

- ~ Durante la primera revolución de las cuerdas las grandes protagonistas fueron las **cuerdas heteróticas**
- ~ La gran pregunta era **encontrar el Calabi-Yau** que diese lugar al **Modelo Estándar** de Partículas, y por lo tanto a una teoría que unificase todas las interacciones
- ~ Muchos físicos teóricos empezaron a pensar en este problema, **olvidándose de las otras teorías** de cuerdas
- ~ Sin embargo, **había un motivo muy profundo** de por qué estaban ahí...





*La segunda revolución
de las cuerdas*

Las cinco supercuerdas

tipo HE
N=1 $E_8 \times E_8$

tipo HO
N=1 $SO(32)$



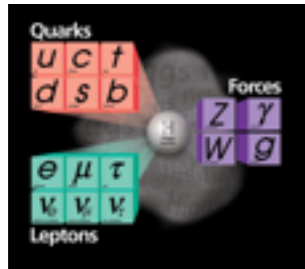
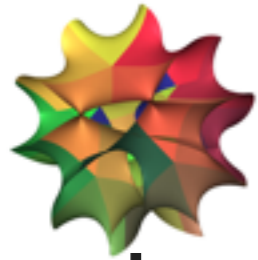
tipo IIB
N=2 quiral

tipo I
N=1 $SO(32)$

tipo IIA
N=2 no-quiral

Las cinco supercuerdas

tipo HE
 $N=1 E_8 \times E_8$



tipo IIB
 $N=2$ quiral



tipo IIA
 $N=2$ no-quiral

tipo HO
 $N=1 SO(32)$

tipo I
 $N=1 SO(32)$

Las cinco supercuerdas

- ~ Las **otras teorías** (sobre todo las tipo II) **parecen menos importantes** a la hora de construir la teoría de unificación

Las cinco supercuerdas y dualidad

- ~ Las **otras teorías** (sobre todo las tipo II) parecen **menos importantes** a la hora de construir la teoría de unificación
- ~ Sin embargo, en seguida se vio que las cinco supercuerdas **no eran tan distintas** unas de otras
- ~ El concepto básico que las relaciona es el de **dualidad**, algo bien conocido en teorías de campos

Las cinco supercuerdas y dualidad

- ~ Las **otras teorías** (sobre todo las tipo II) parecen **menos importantes** a la hora de construir la teoría de unificación
- ~ Sin embargo, en seguida se vio que las cinco supercuerdas **no eran tan distintas** unas de otras
- ~ El concepto básico que las relaciona es el de **dualidad**, algo bien conocido en teorías de campos



DUALITY

Las cinco supercuerdas y dualidad

- ~ Las **otras teorías** (sobre todo las tipo II) parecen **menos importantes** a la hora de construir la teoría de unificación
- ~ Sin embargo, en seguida se vio que las cinco supercuerdas **no eran tan distintas** unas de otras
- ~ El concepto básico que las relaciona es el de **dualidad**, algo bien conocido en teorías de campos
- ~ Decimos que **dos teorías son duales** cuando describen la **misma física** a pesar de parecer **muy distintas**
- ~ Dos teorías duales son **en realidad la misma**, sólo que están relacionadas por una **redefinición** de campos y acoplos (un cambio de variables)

La T-dualidad

- ~ Consideremos la **cuera bosónica** en un círculo
- ~ Hay **dos tipos** de cuerdas
 - Cuerdas **enrolladas** en el círculo
 - Cuerdas **trasladándose** en el círculo



La T-dualidad

- ~ Consideremos la **cuera bosónica** en un círculo
- ~ Hay **dos tipos** de cuerdas
 - Cuerdas **enrolladas** en el círculo: $E \sim n R$
 - Cuerdas **trasladándose** en el círculo: $E \sim m / R$

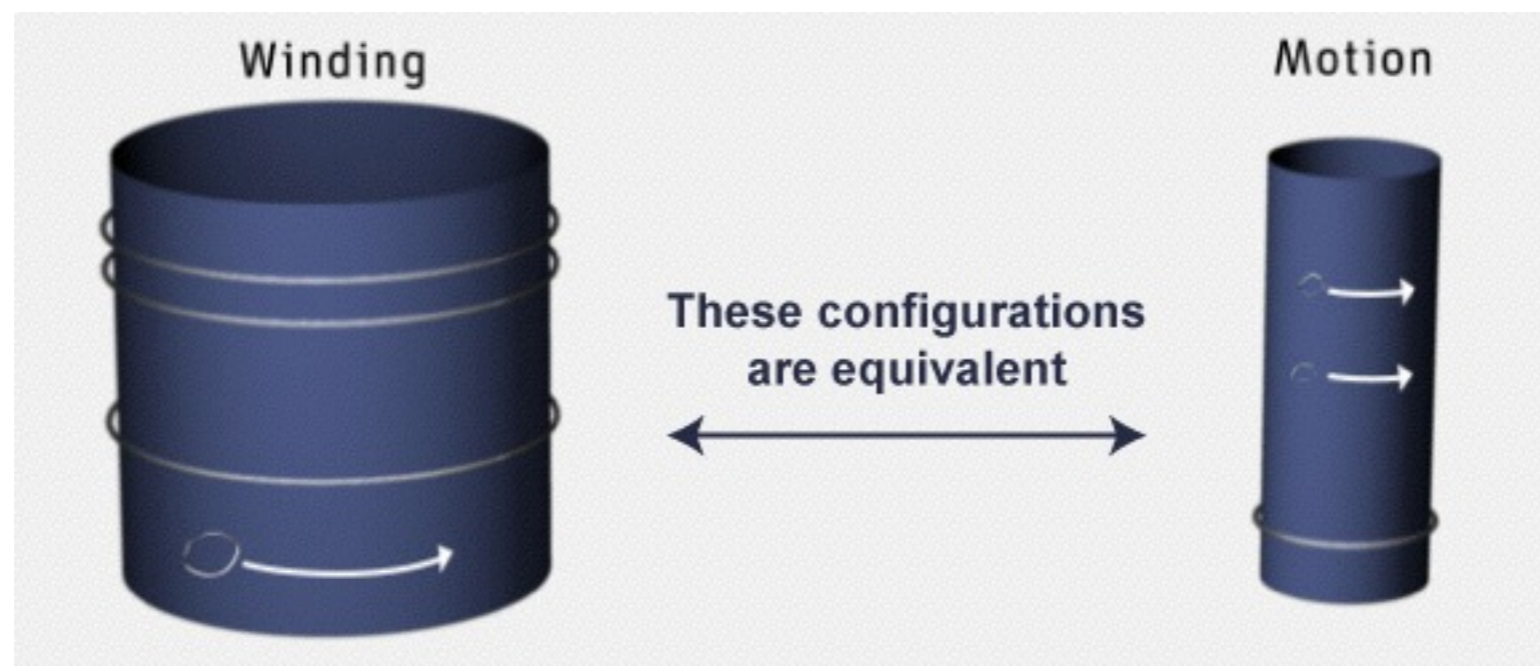


La T-dualidad

- ~ Consideremos la **cuerda bosónica** en un círculo
- ~ Hay **dos tipos** de cuerdas
 - Cuerdas **enrolladas** en el círculo: $E \sim n R$
 - Cuerdas **trasladándose** en el círculo: $E \sim m / R$
- ~ En realidad **la teoría queda igual si intercambiamos**



$$R \leftrightarrow 1/R \quad \text{y} \quad n \leftrightarrow m$$

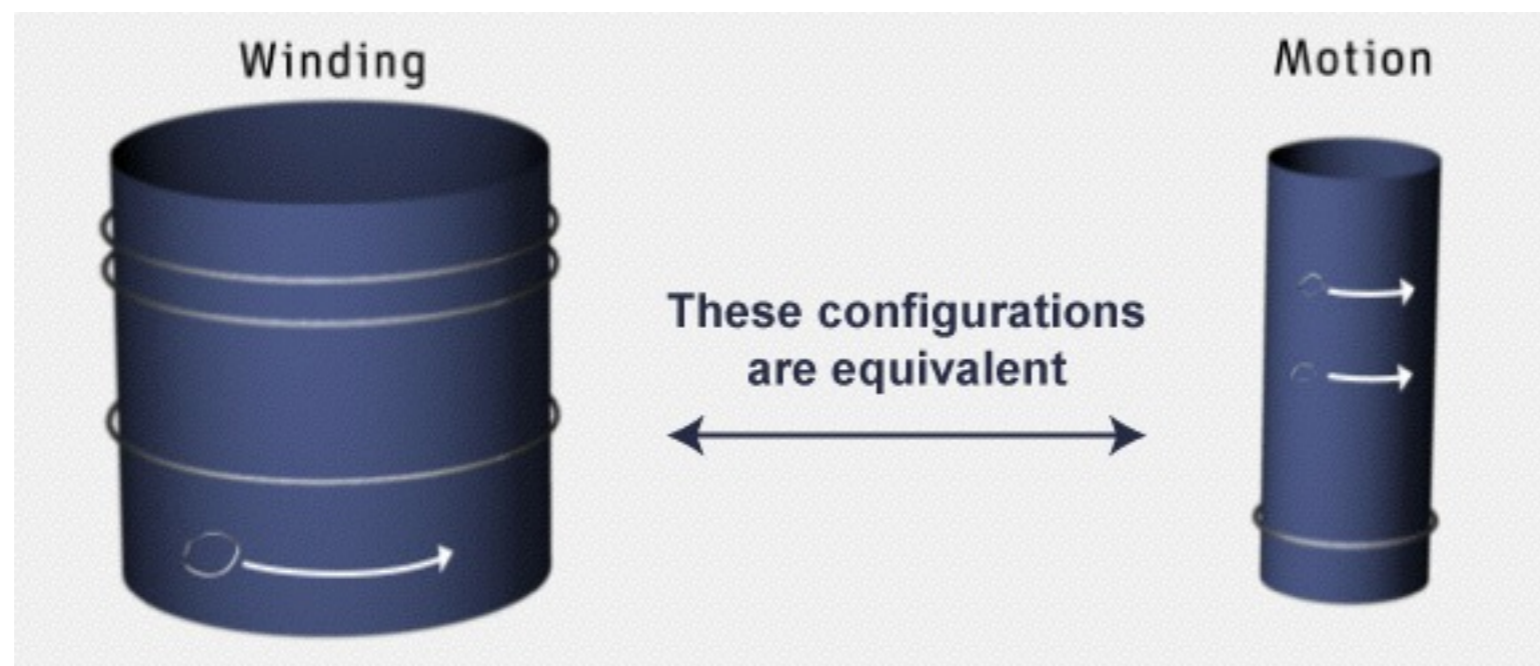


La T-dualidad

- ~ Consideremos la **cuerda bosónica** en un círculo
- ~ Hay **dos tipos** de cuerdas
 - Cuerdas **enrolladas** en el círculo: $E \sim n R$
 - Cuerdas **trasladándose** en el círculo: $E \sim m / R$
- ~ En realidad **la teoría queda igual si intercambiamos**



$$R \leftrightarrow 1/R \quad \text{y} \quad n \leftrightarrow m$$



No hay radios pequeños!!

Las cinco supercuerdas y dualidad

tipo HE
N=1 $E_8 \times E_8$

tipo HO
N=1 $SO(32)$



tipo IIB
N=2 quiral

tipo I
N=1 $SO(32)$

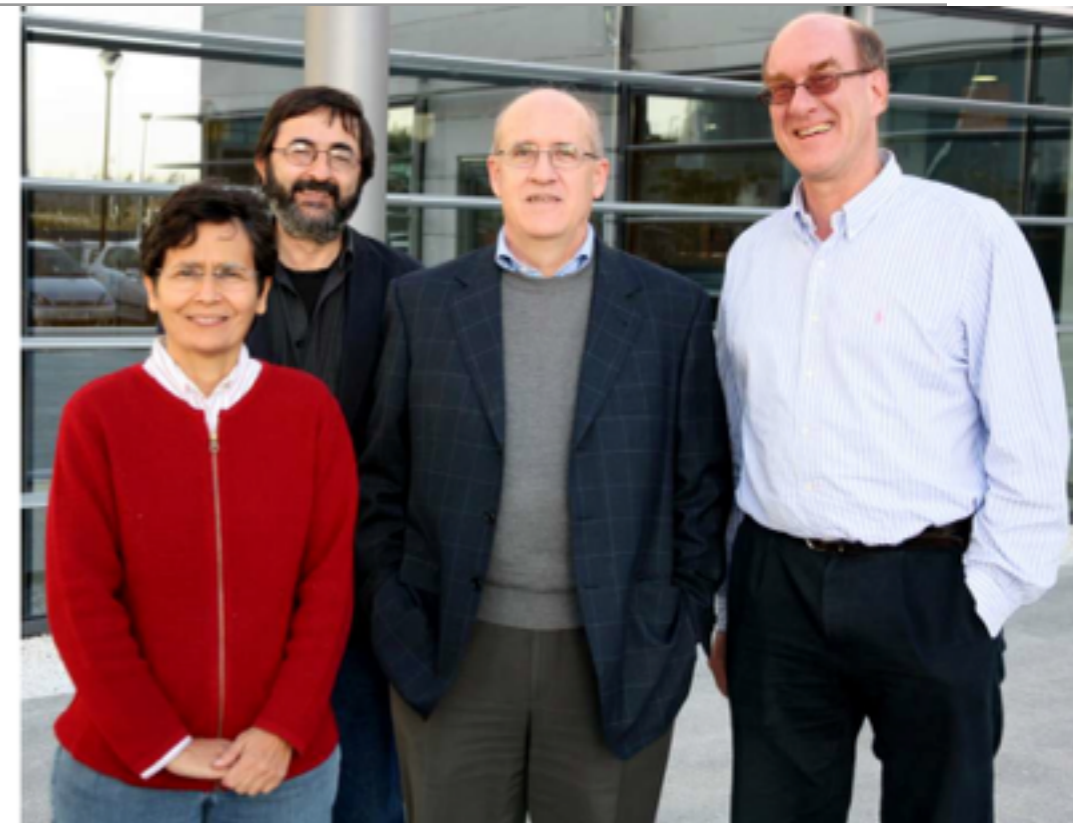
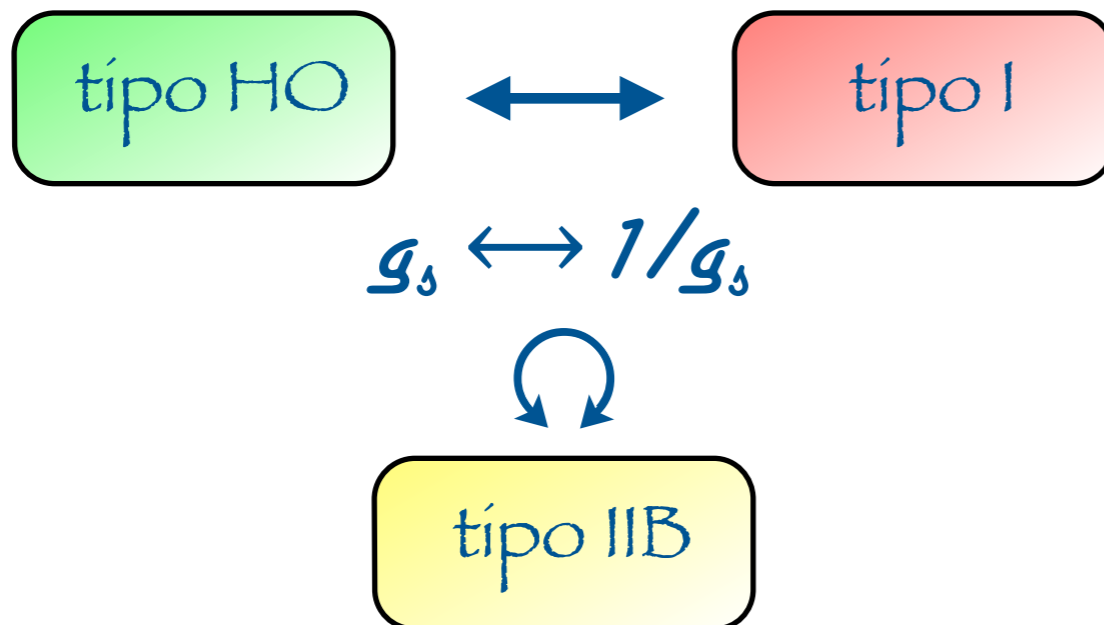
tipo IIA
N=2 no-quiral

La S-dualidad

- ~ La **S-dualidad** es mucho más difícil de detectar, pues **relaciona** una teoría con **acoplo g** con otra de **acoplo $1/g$**
- ~ Recordemos que **$g \ll 1$** es necesario para aplicar **teoría de perturbaciones**, diagramas de Feynman...
(es decir, para hacer cálculos)

La S-dualidad

- ~ La **S-dualidad** es mucho más difícil de detectar, pues **relaciona** una teoría con **acoplo g** con otra de **acoplo $1/g$**
- ~ Recordemos que **$g \ll 1$** es necesario para aplicar **teoría de perturbaciones**, diagramas de Feynman... (es decir, para hacer cálculos)
- ~ Las supercuerdas se relacionan como

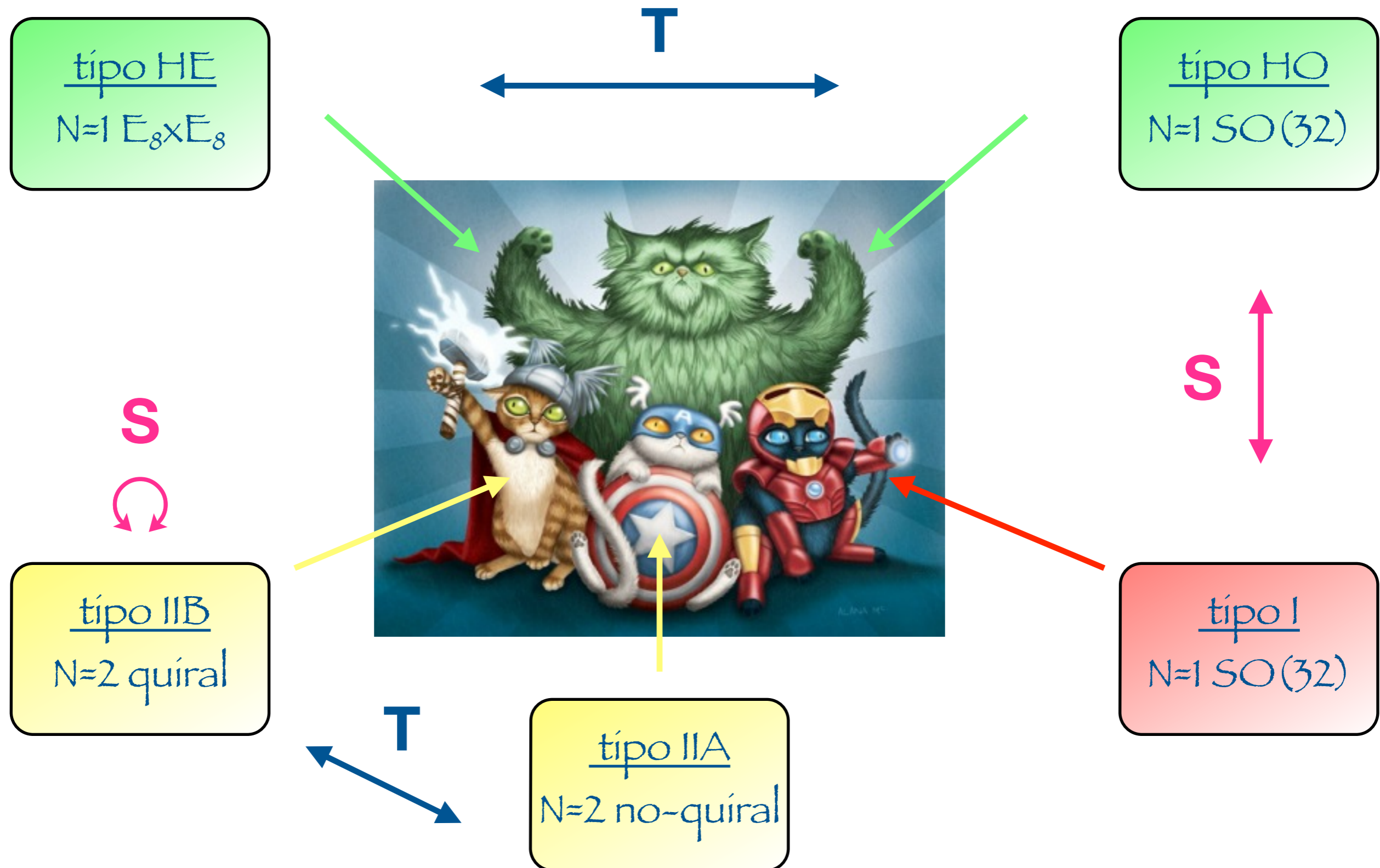


Font Quevedo Ibáñez Lüst



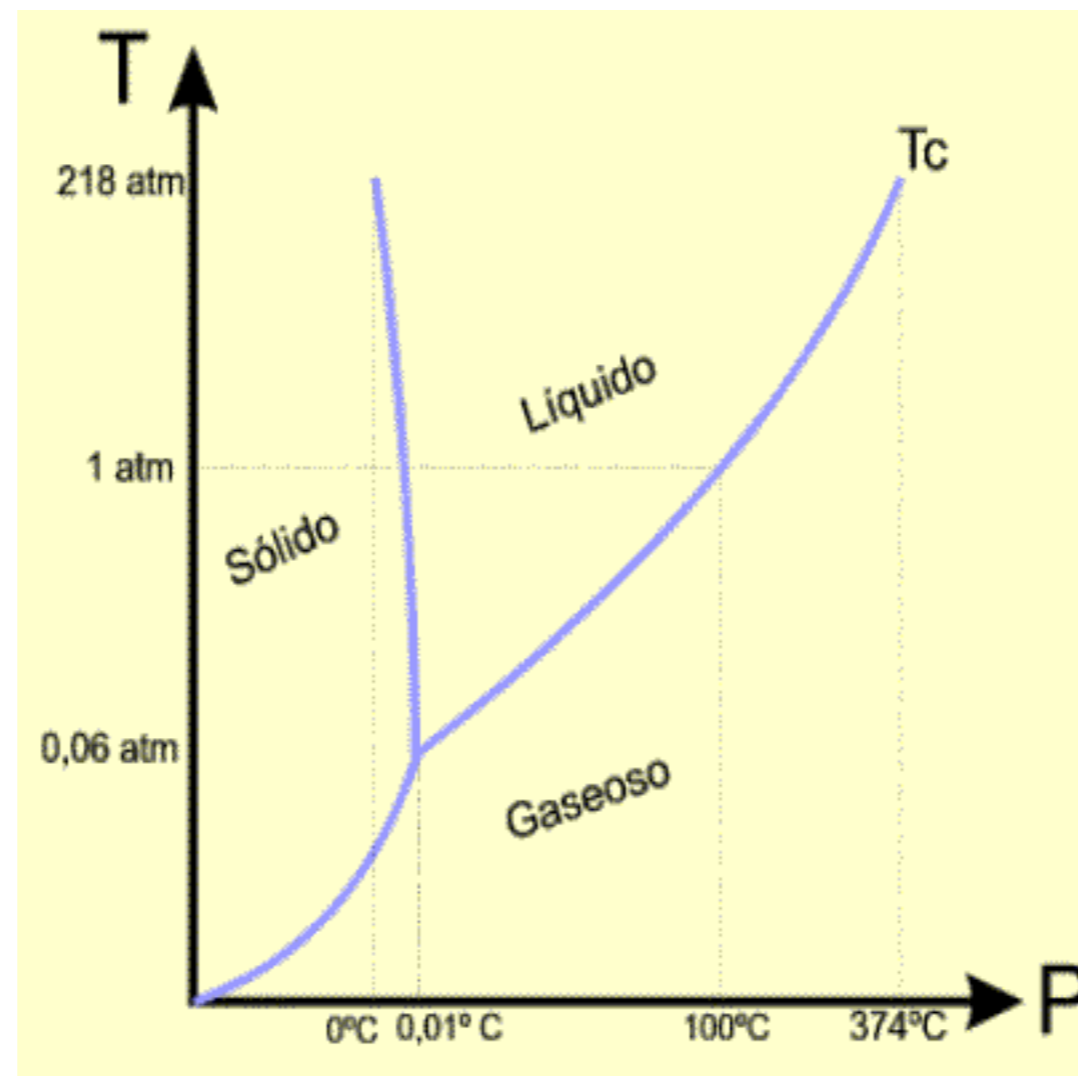
Sen

Las cinco supercuerdas y dualidad



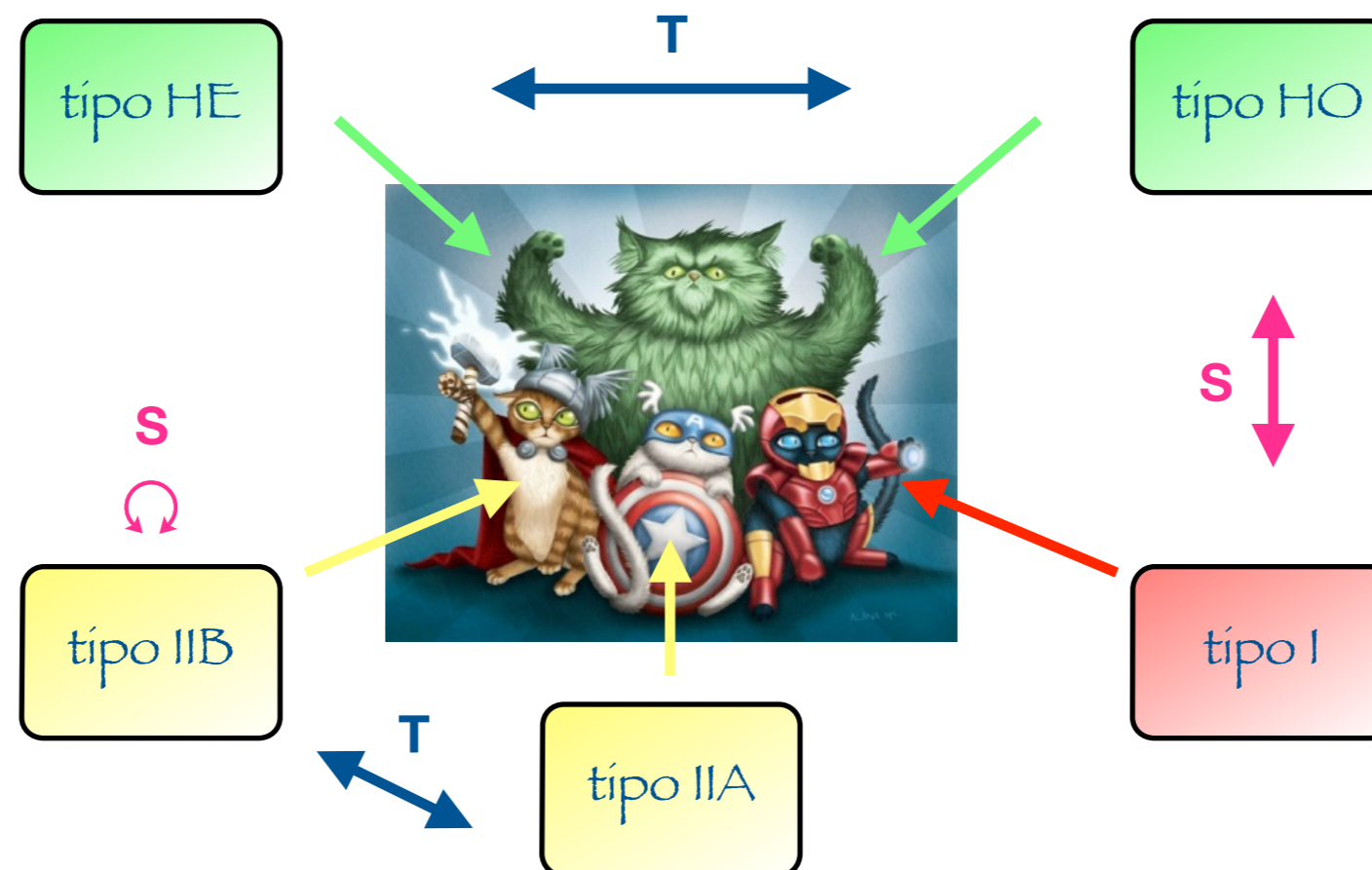
Las cinco supercuerdas y dualidad

- ~ Poco a poco se iba viendo que **las cinco teorías** no eran tan distintas, sino que algunas eran **la misma teoría vista de maneras diferentes** (fases de una misma teoría)



Las cinco supercuerdas y dualidad

- ~ Poco a poco se iba viendo que **las cinco teorías** no eran tan distintas, sino que algunas eran **la misma teoría vista de maneras diferentes** (fases de una misma teoría)
- ~ Sin embargo, las **tipo II y el resto** de las teorías seguían pareciendo **bastante distintas...**



Llega la teoría M

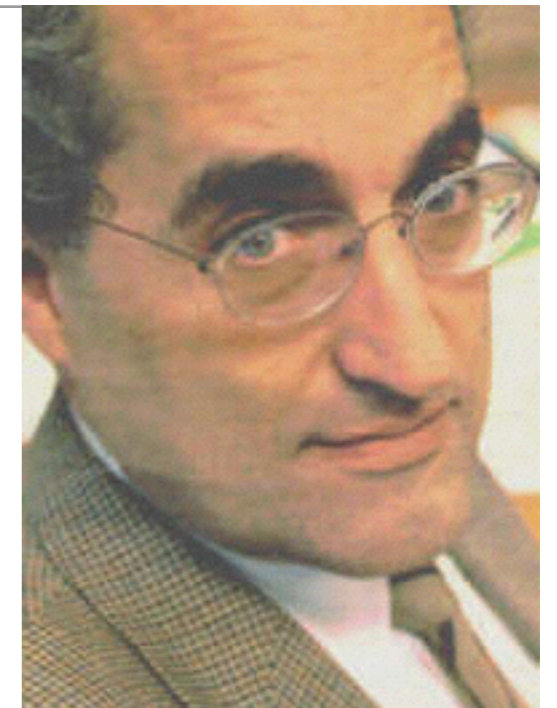
- ~ En las teorías I, IIB y HO sabemos qué pasa cuando aumentamos el acoplo g_s : hacemos una transición a otra teoría de cuerdas
- ~ Qué ocurre si aumentamos g_s para la tipo IIA?



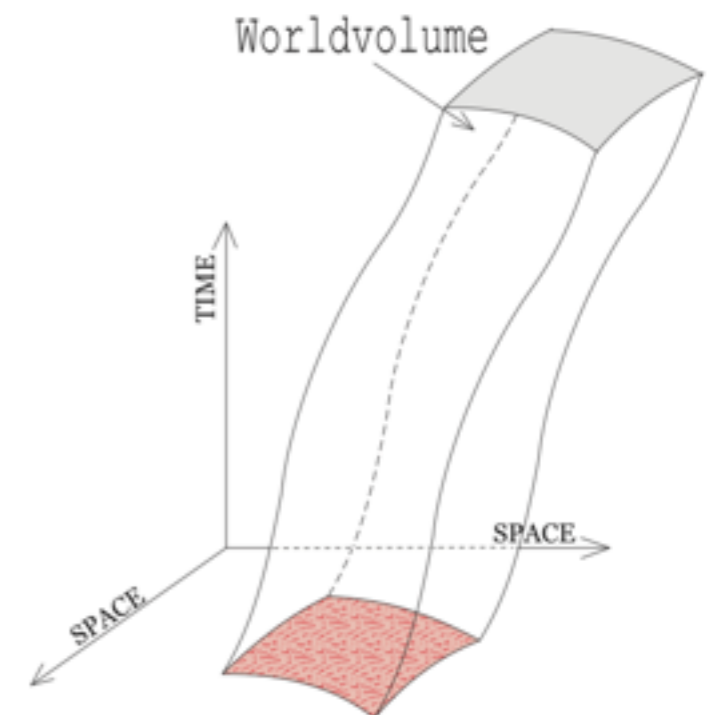
Witten (1995)

Llega la teoría M

- ~ En las teorías I, IIB y HO sabemos qué pasa cuando aumentamos el acoplo g_s : hacemos una transición a otra teoría de cuerdas
- ~ Qué ocurre si aumentamos g_s para la tipo IIA?
- ~ Aparece una nueva teoría: **la teoría M**
 - Vive en **11 dimensiones**
 - Sus objetos fundamentales son **membranas**
 - Está relacionada con la supergravedad en 11 dimensiones, que es **única**



Witten (1995)



Llega la teoría M

~ La **teoría M** en un **círculo de radio R** se convierte en la **tipo IIA** con **acoplo $g_s=R$**



M2

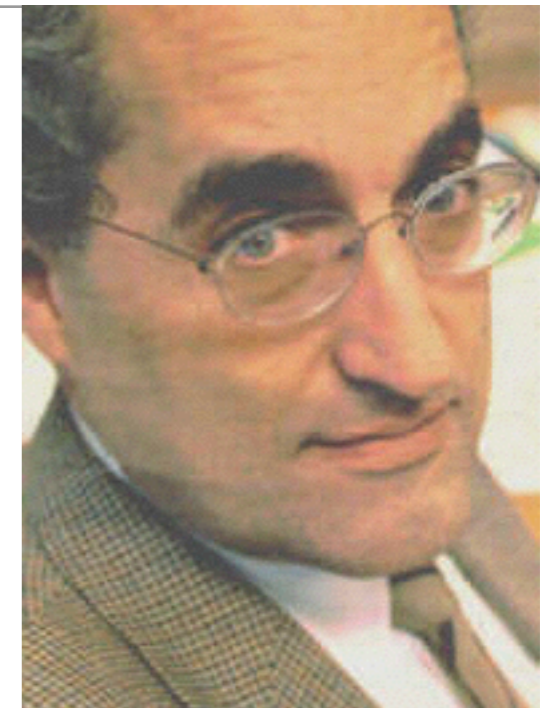
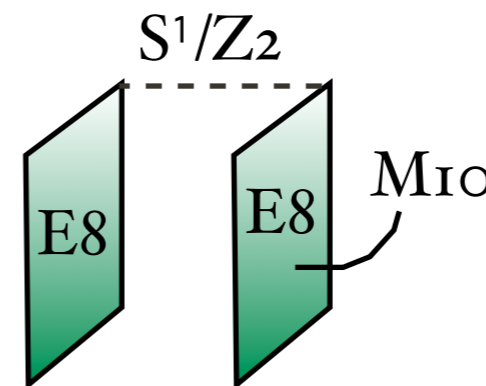
• Las **membranas** enrolladas en el círculo se convierten en las **cuerdas** de la tipo IIA



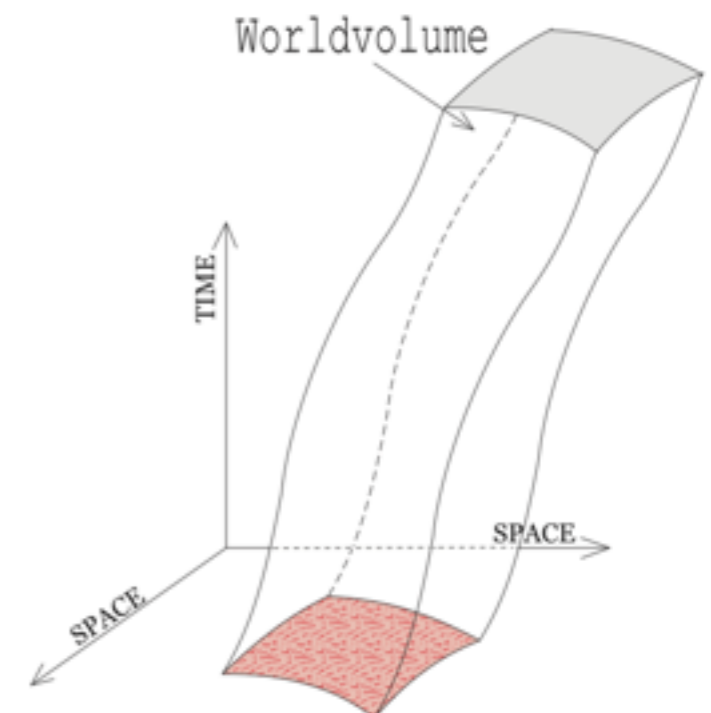
F1

~ La **teoría M** en un **intervalo de longitud R** se convierte en la **tipo HE** con **acoplo $g_s=R$**

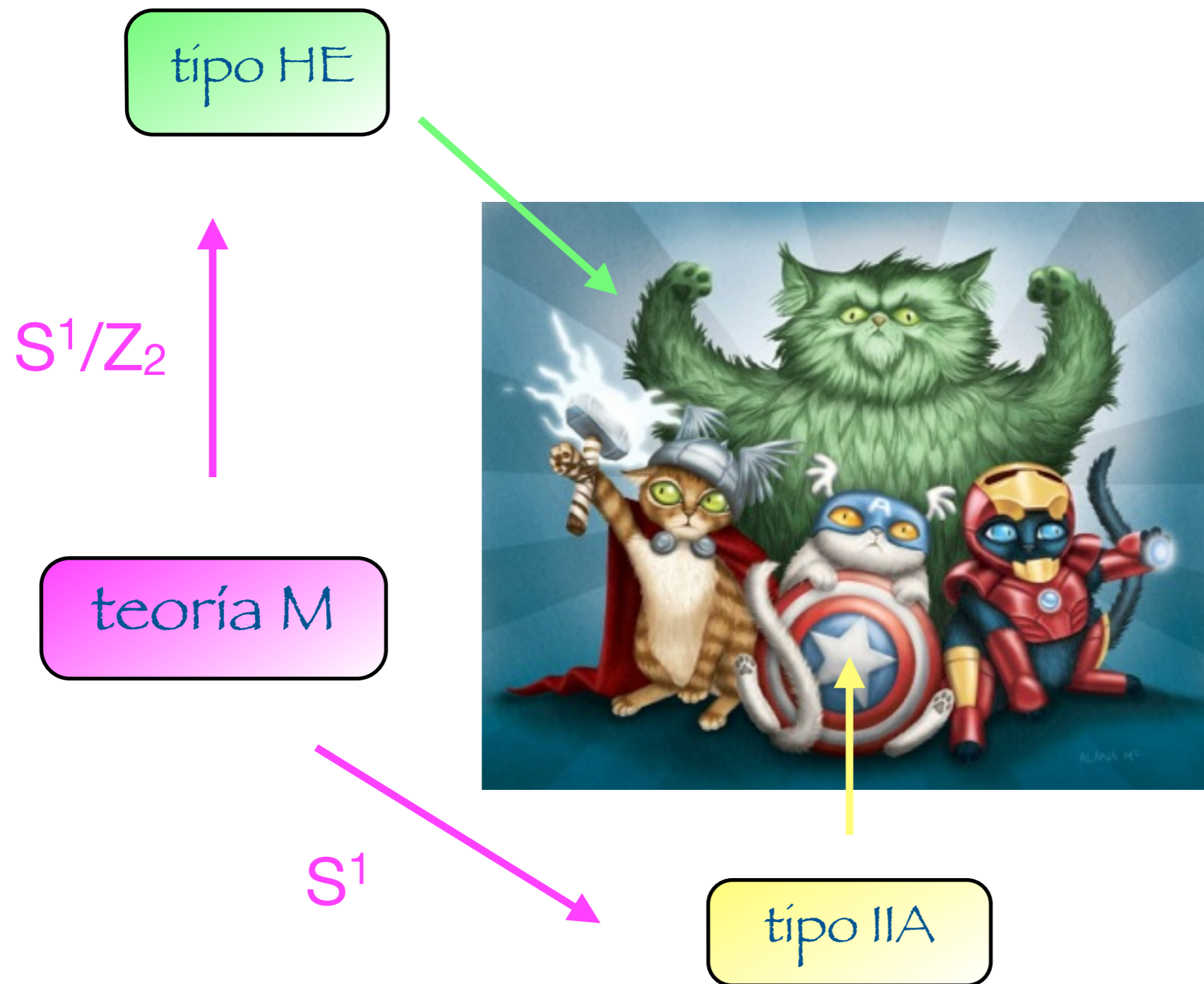
• Cada **grupo E_8** vive en un **extremo** del intervalo



Witten (1995)

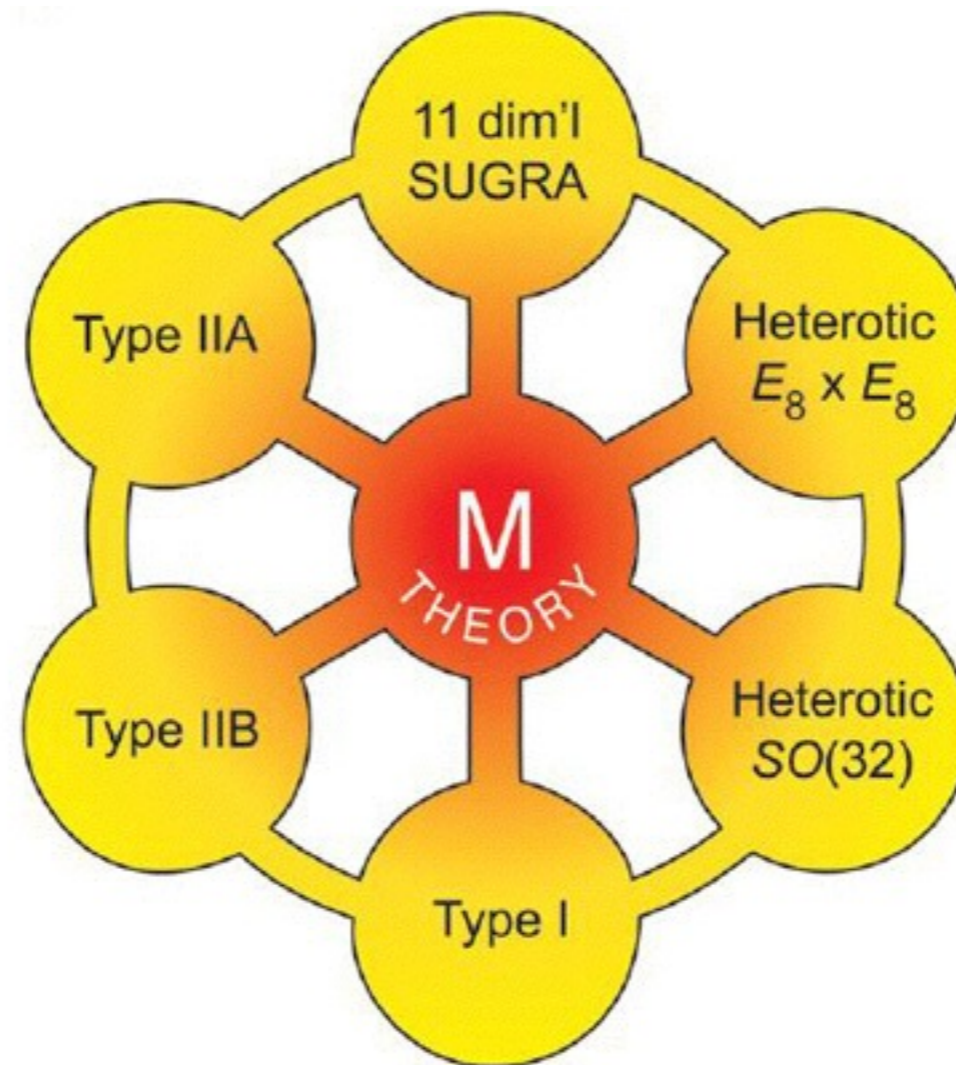


Llega la teoría M



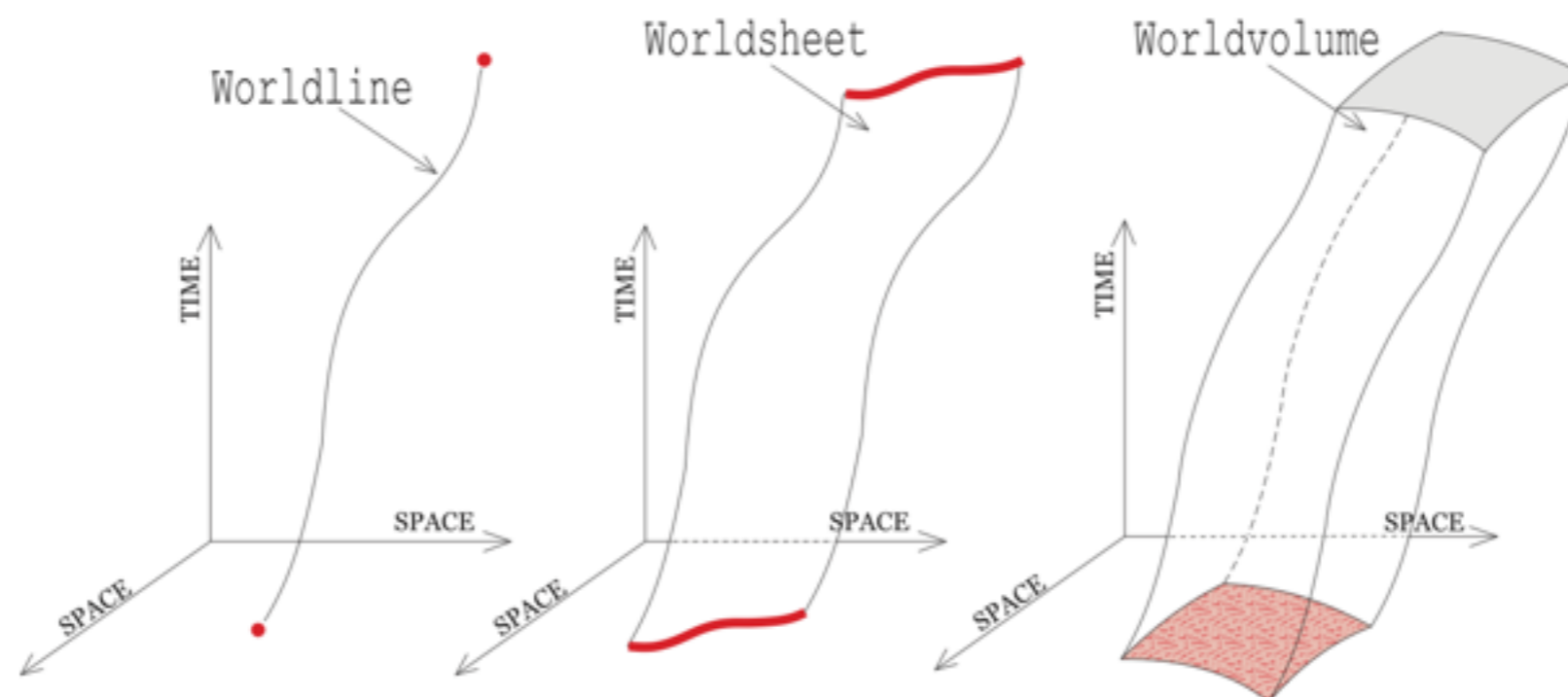
La segunda revolución

- Las teorías de cuerdas no son distintas, sino casos especiales de una teoría única y más profunda, llamada teoría M, que aún no sabemos formular bien



La segunda revolución

- ~ Las **teorías de cuerdas** no son distintas, sino **casos especiales de una teoría única** y más profunda, llamada **teoría M**, que aún no sabemos formular bien
- ~ Los **objetos** fundamentales de la teoría M son **membranas**
- ~ La **segunda revolución** de las cuerdas consistió en darse cuenta de que en realidad **no era una teoría de cuerdas!!!**

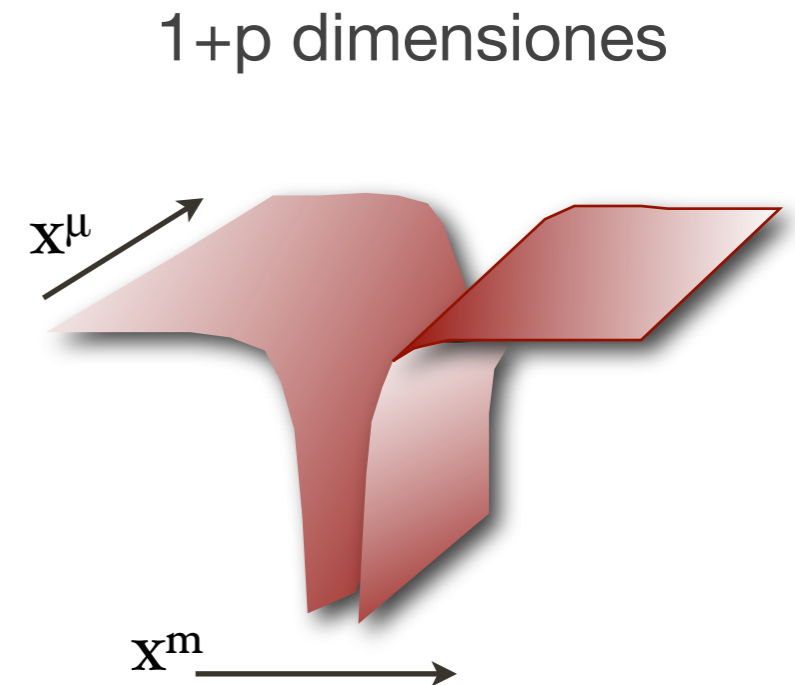


Cuerdas y p-branas

- ~ Las teorías tipo I y II contienen muchos objetos extensos además de las cuerdas: las p-branas

tipo IIA

tipo IIB



Cuerdas y p-branas

- Las teorías tipo I y II contienen muchos objetos extensos además de las cuerdas: las p-branas

tipo IIA

0-brana

2-brana

4-brana

6-brana

8-brana

tipo IIB

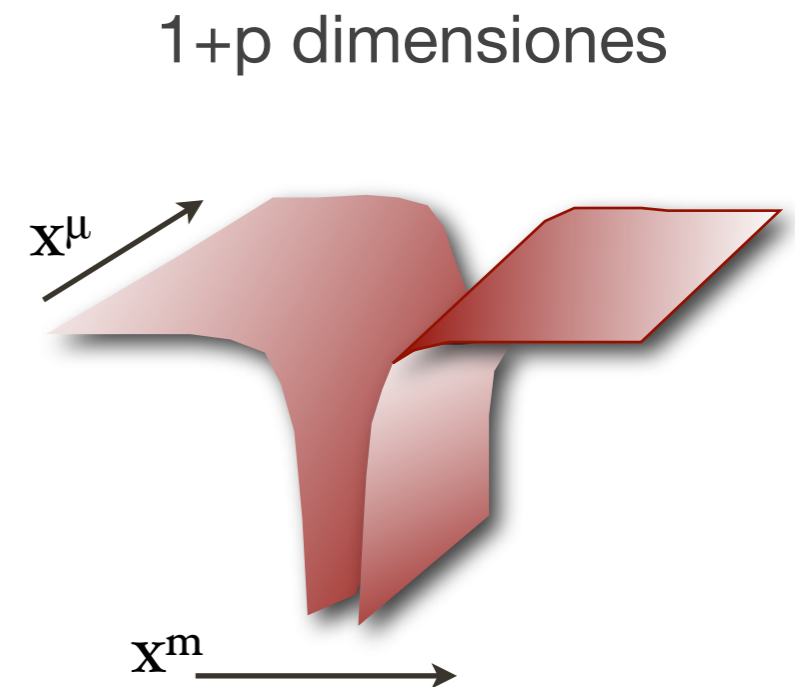
1-brana

3-brana

5-brana

7-brana

9-brana



Cuerdas y p-branas

- ~ Las teorías tipo I y II contienen muchos objetos extensos además de las cuerdas: las p-branas

tipo IIA

0-brana

2-brana

4-brana

6-brana

8-brana

tipo IIB

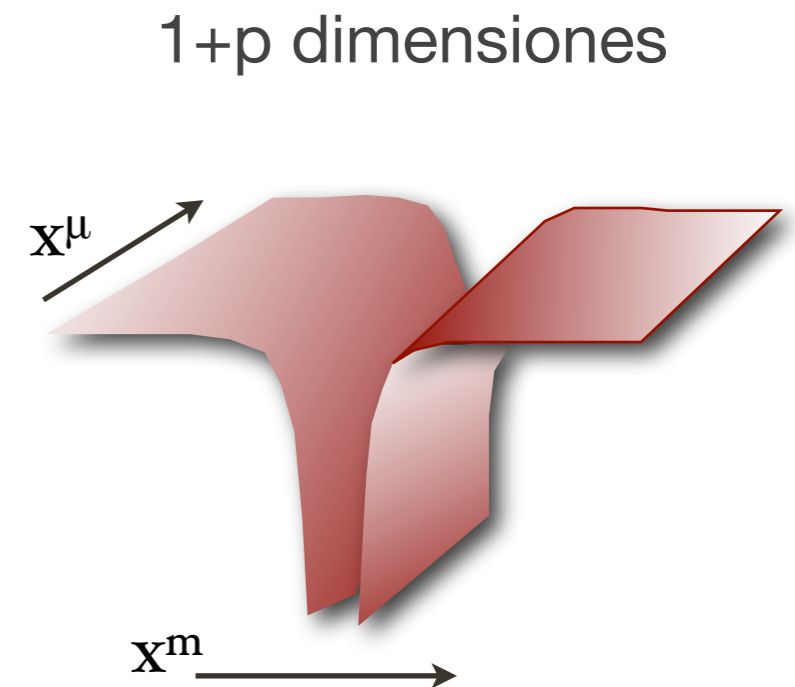
1-brana

3-brana

5-brana

7-brana

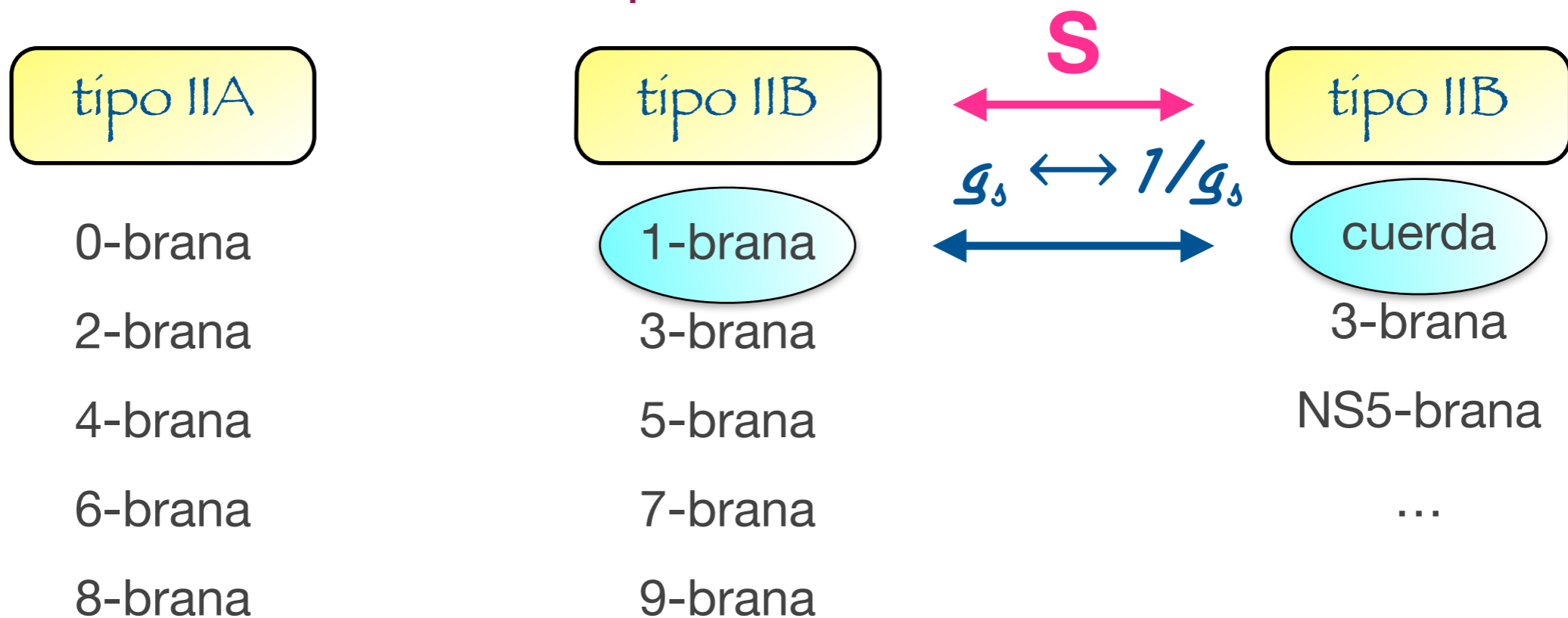
9-brana



- ~ Para acoplo g_s pequeño, las p-branas son muy pesadas y no se propagan
- ~ Para g_s grande son tan importantes como las cuerdas

Cuerdas y p-branas

- ~ Las teorías tipo I y II contienen muchos objetos extensos además de las cuerdas: las p-branas



- ~ Para acoplo g_s pequeño, las p-branas son muy pesadas y no se propagan
- ~ Para g_s grande son tan importantes como las cuerdas

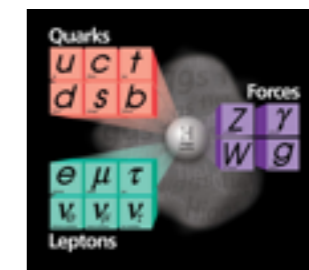
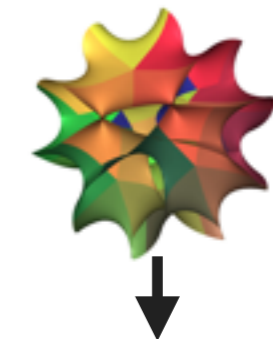
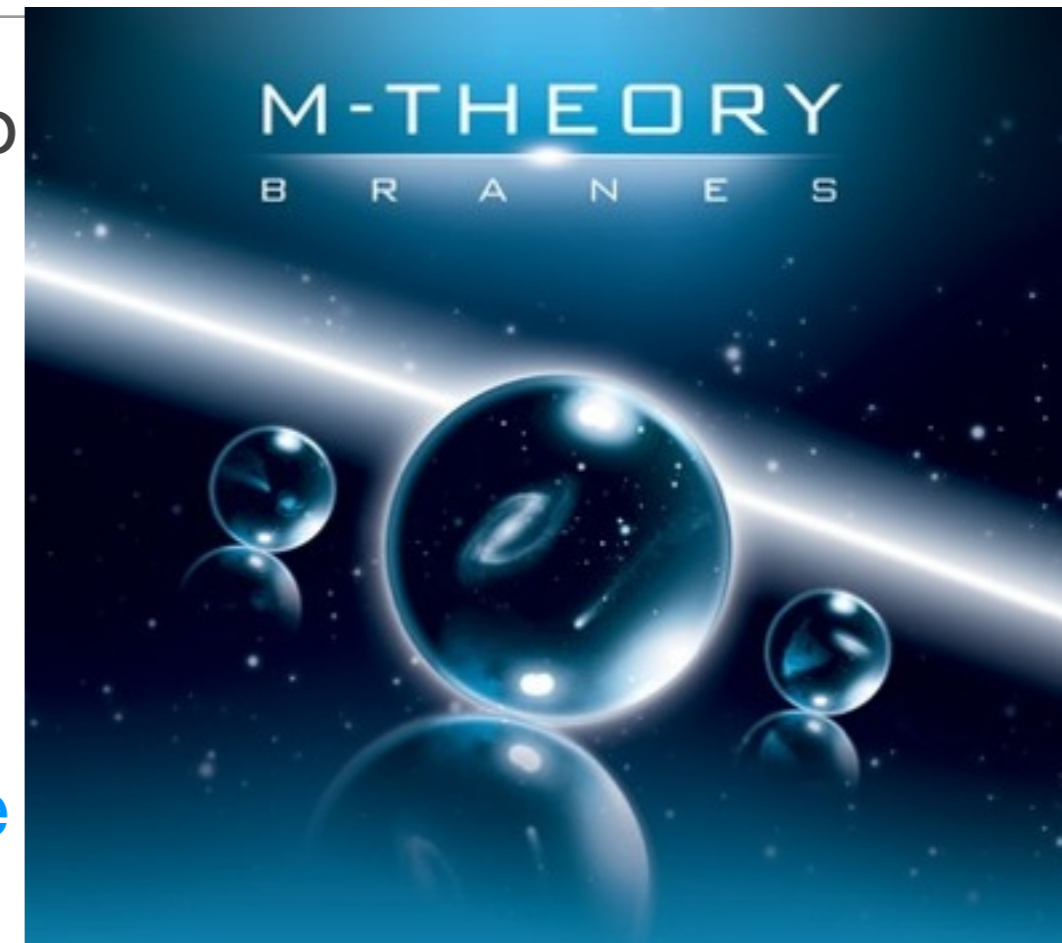
La segunda revolución

- ~ Las **segunda revolución** fue un proceso de **democratización** en el que
 - 🎤 Ninguna **teoría de cuerdas** es mejor que otra: eran todas una descripción distinta de la **misma teoría M**
 - 🎤 Ningún objeto extenso es mejor que otro: **cuerdas y branas** son **igualmente relevantes** para definir la teoría



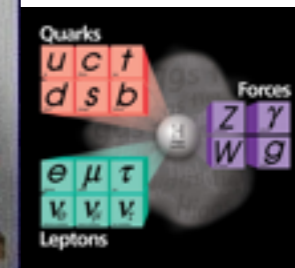
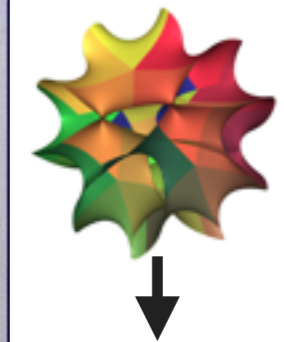
La segunda revolución

- ~ Las **segunda revolución** fue un proceso de **democratización** en el que
 - 🎤 Ninguna **teoría de cuerdas** es mejor que otra: eran todas una descripción distinta de la **misma teoría M**
 - 🎤 Ningún objeto extenso es mejor que otro: **cuerdas y branas** son **igualmente relevantes** para definir la teoría
 - 🎤 Como consecuencia, debería ser **posible** formular una teoría de **unificación a partir de cualquiera** de las cinco supercuerdas



La segunda revolución

- ~ Las **segunda revolución** fue un proceso de **democratización** en el que
 - 🎤 Ninguna **teoría de cuerdas** es mejor que otra: eran todas una descripción distinta de la **misma teoría M**
 - 🎤 Ningún objeto extenso es mejor que otro: **cuerdas y branas** son **igualmente relevantes** para definir la teoría
 - 🎤 Como consecuencia, debería ser **posible** formular una teoría de **unificación a partir de cualquiera** de las cinco supercuerdas



La segunda revolución

- ~ Las **teorías tipo II** en realidad también tienen **interacciones gauge**
- ~ Estas interacciones gauge viven **dentro de sus p-branas**



Polchinski

(1995)

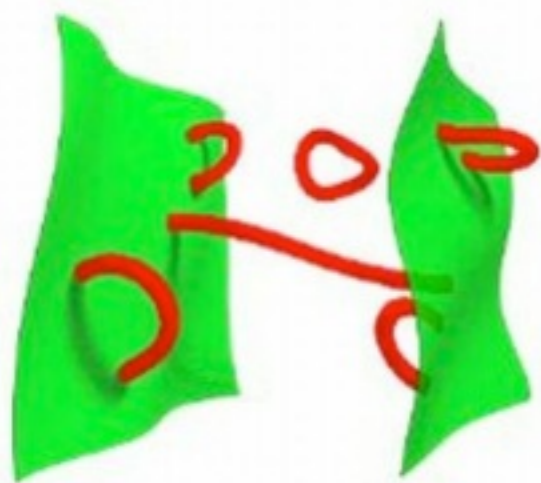
La segunda revolución

- ~ Las **teorías tipo II** en realidad también tienen **interacciones gauge**
- ~ Estas interacciones gauge viven **dentro de sus p-branas**
- ~ Es posible construir modelos que unifiquen **todas las interacciones** si incluimos estas p-branas



Polchinski

(1995)



ELEMENTARY PARTICLES				
Quarks	u	c	t	γ
	d	s	b	g
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
	e	μ	τ	W
	I	II	III	
	Three Generations of Matter			

La segunda revolución

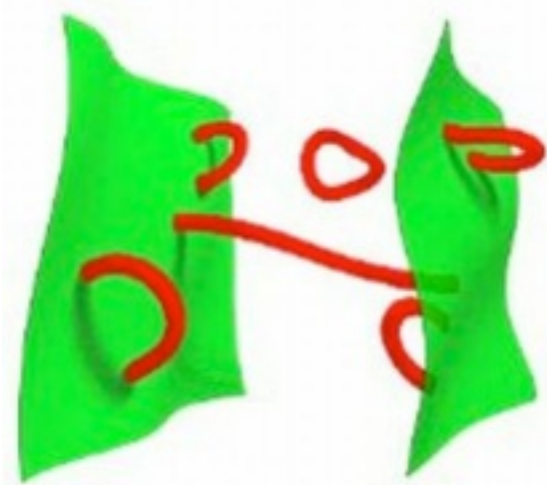
- ~ Las **teorías tipo II** en realidad también tienen **interacciones gauge**
- ~ Estas interacciones gauge viven **dentro de sus p-branas**
- ~ Es posible construir modelos que unifiquen **todas las interacciones** si incluimos estas p-branas



Polchinski

(1995)

Lo veremos el próximo día



ELEMENTARY PARTICLES				
Leptons	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z Z boson
	e electron	μ muon	τ tau	W W boson
	I	II	III	
	Three Generations of Matter			

Conclusiones

- ~ La teoría de cuerdas postula que el **universo** está hecho de **objetos extensos** como las **cuerdas**
- ~ Es capaz de incluir en la misma teoría consistente la mecánica **cuántica**, las interacciones **gauge** y la **gravitación**

Conclusiones

- ~ La teoría de cuerdas postula que el **universo** está hecho de **objetos extensos** como las **cuerdas**
- ~ Es capaz de incluir en la misma teoría consistente la mecánica **cuántica**, las interacciones **gauge** y la **gravitación**
- ~ Aunque en un principio parece que hay **varias** teorías de **cuerdas**, en realidad son todas manifestaciones de una **única teoría: la teoría M**
- ~ En esta teoría las **cuerdas ya no son especiales** sino que las p-branas son igual de importantes
- ~ Entender las propiedades de las **p-branas** fue lo que marcó el desarrollo de la teoría de cuerdas desde 1995