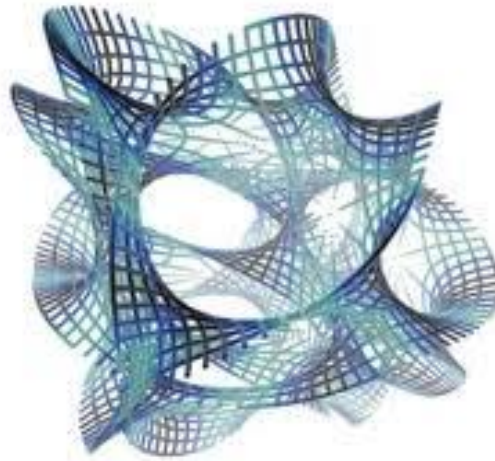




Particelle, stringhe e altri oggetti ...

Marialuisa Frau – Dipartimento di Fisica Teorica

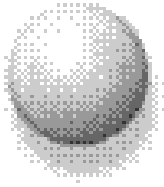


Fin dall'antichità l'uomo si è chiesto:

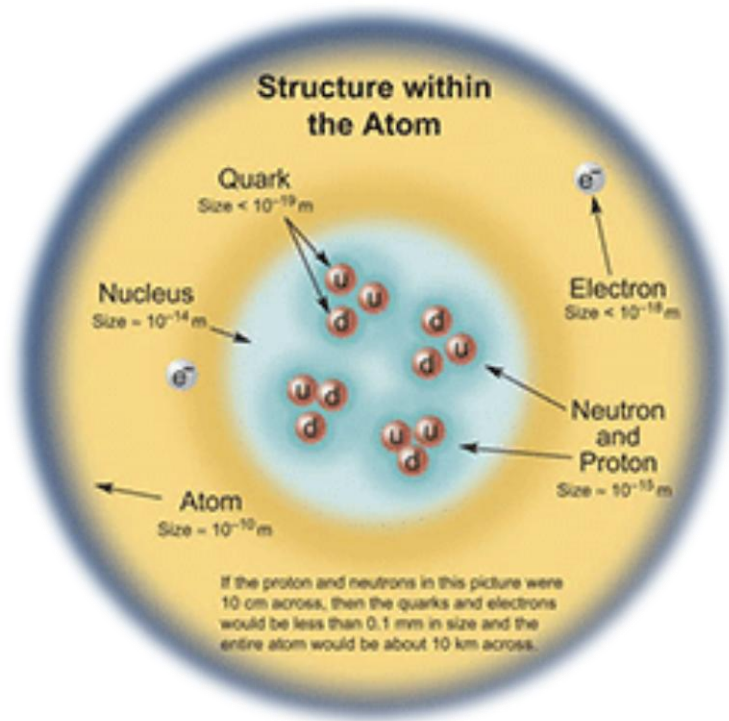
- ▶ Quali sono i costituenti fondamentali della materia?
- ▶ Come questi costituenti si legano in forme di materia stabile?

La risposta a queste domande dipende sia dal tempo che dalla scala di energia!





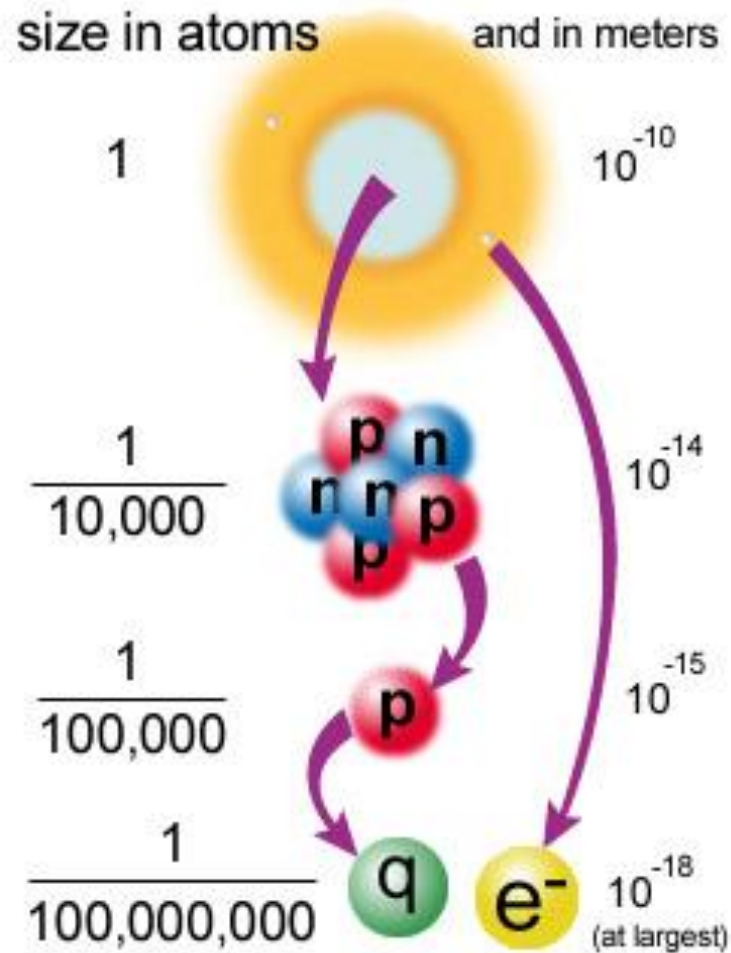
Nel 1900 si pensava che
l'atomo fosse fondamentale



Oggi si sa che l'atomo è
in realtà un aggregato di
costituenti più elementari



Le dimensioni in gioco:



Esistono vari tipi di quark e elettroni:

3 generazioni della materia

THE STANDARD MODEL			
Fermions			
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	e electron	μ muon	τ tau

Cosa tiene insieme questi costituenti?

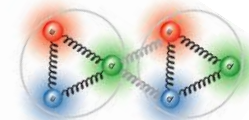
Come interagiscono fra loro?

- ▶ Le particelle interagiscono attraverso 4 forze fondamentali:

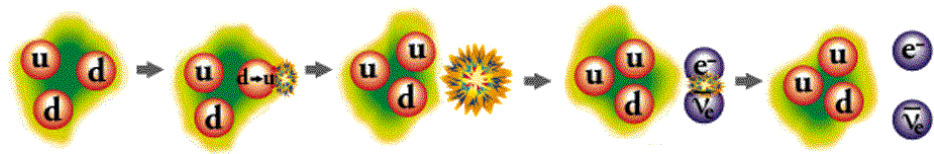
1. Elettromagnetismo (QED)



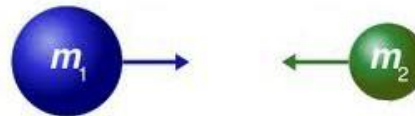
2. Interazione nucleare forte (QCD)



3. Interazione nucleare debole

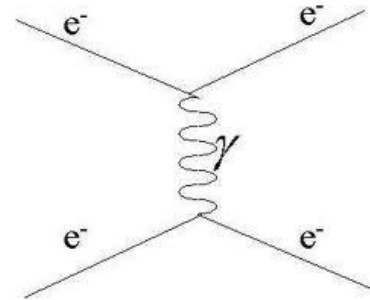


4. Gravità

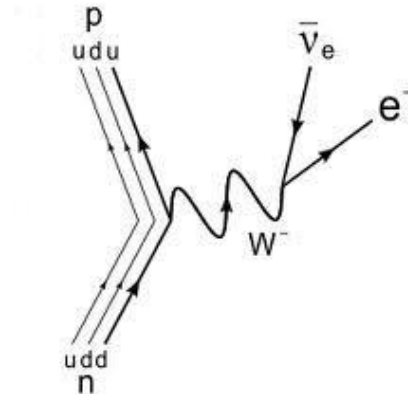


Le interazioni sono dovute allo scambio di mediatori bosonici :

1. Fotoni

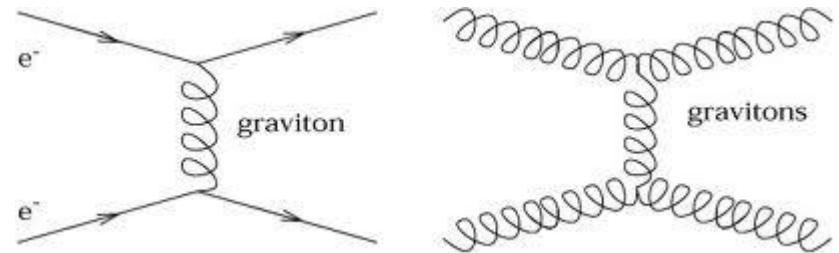


2. Gluoni

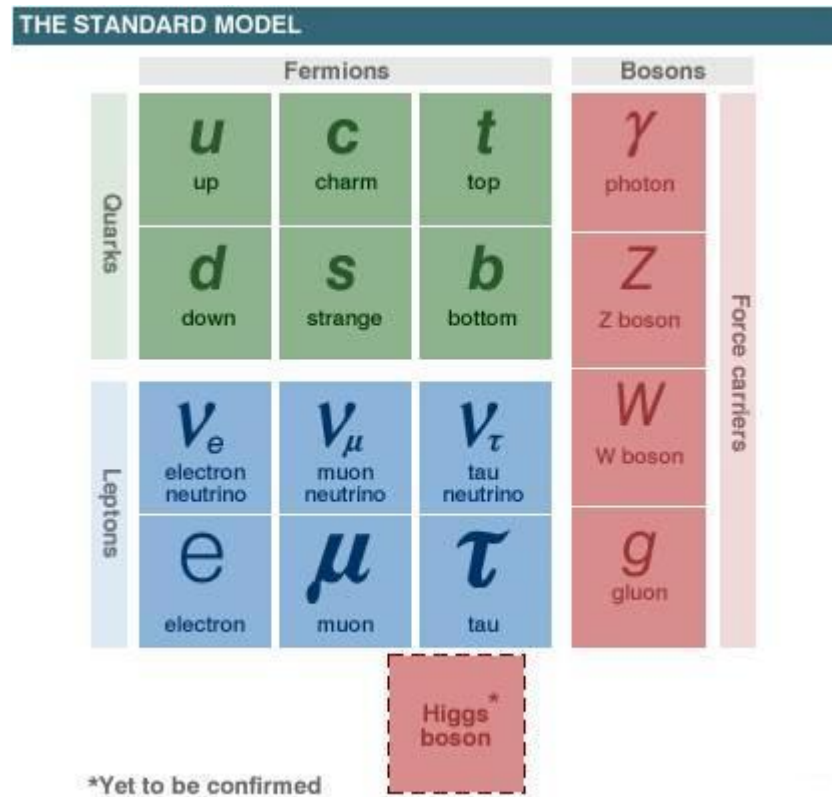


3. Bosoni W e Z

4. Gravitoni

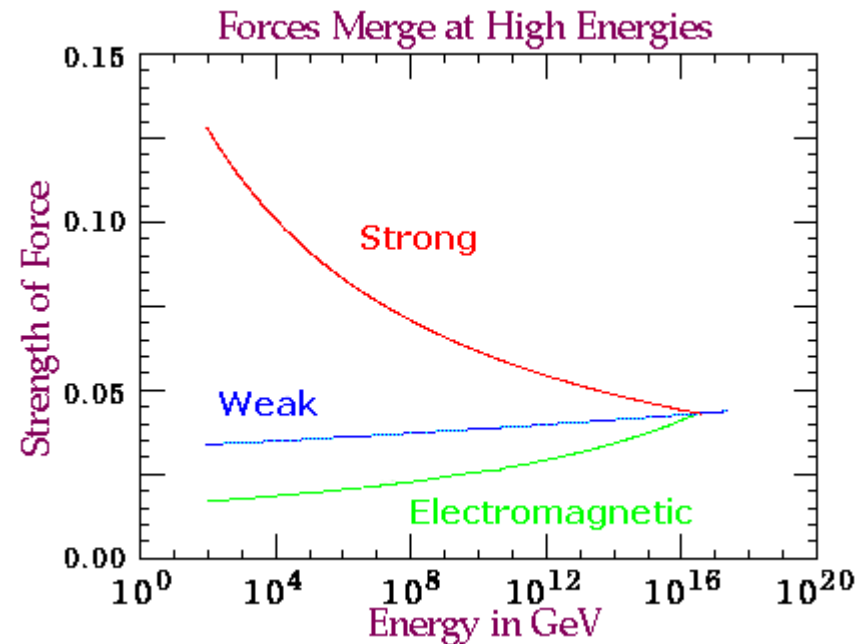


Tutti i mediatori (tranne i gravitoni) sono stati osservati.
Il quadro complessivo dei costituenti elementari è dunque:



Modello Standard

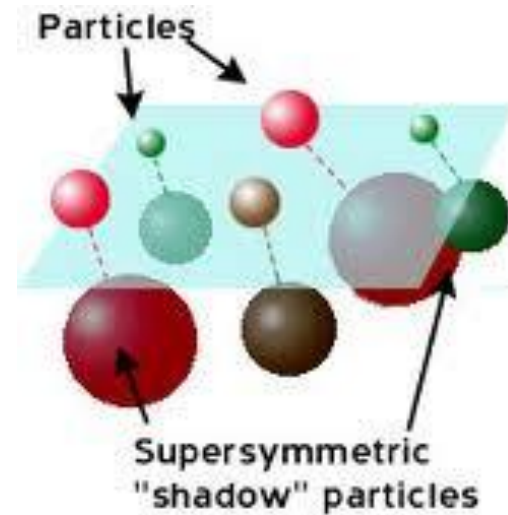
- ▶ Le interazioni elettromagnetiche, deboli e forti possono essere descritte in modo unificato a livello quantistico
- ▶ Teoria di gauge
 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
- ▶ Ottimo accordo fra teoria e dati sperimentali
- ▶ Non include la forza di gravità!



Oltre il Modello Standard

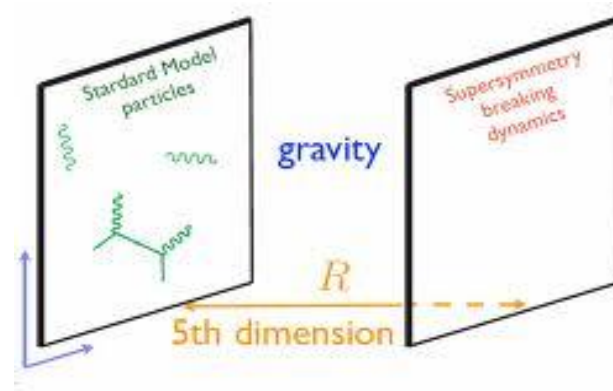
► Supersimmetria

(invarianza per scambio di Bosoni e Fermioni)



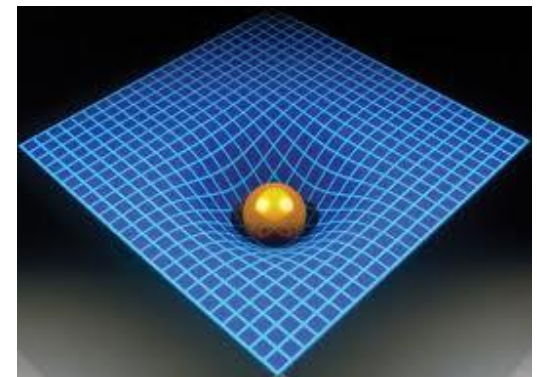
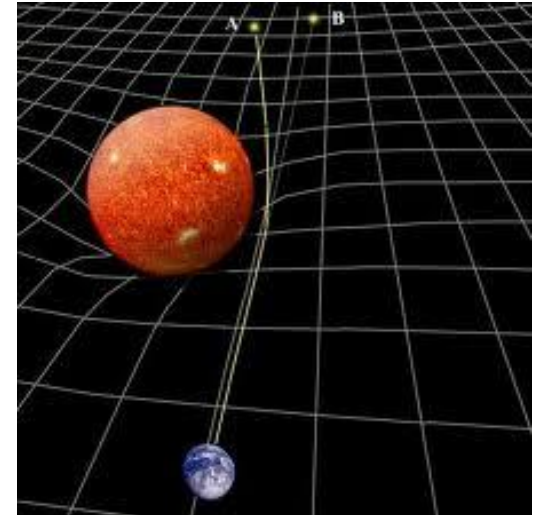
► Dimensioni Extra

(esistenza di ulteriori dimensioni rispetto a quelle dello spazio-tempo)



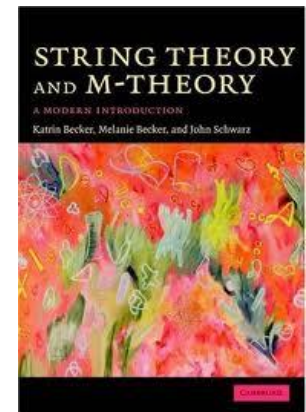
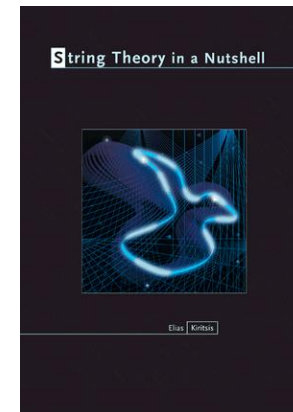
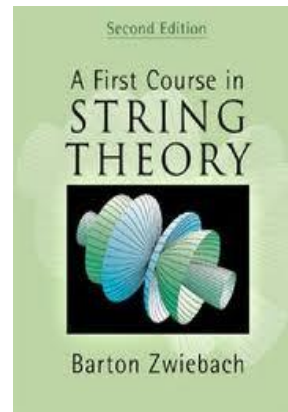
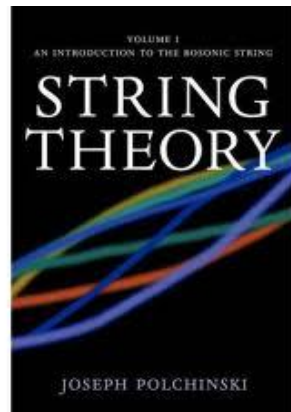
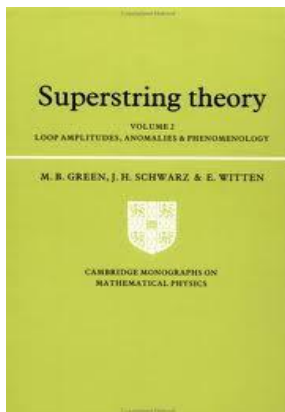
Teoria quantistica della gravità?

- ▶ Il Modello Standard non descrive la forza di gravità
- ▶ A livello classico la gravità è descritta dalla teoria della **Relatività Generale**
- ▶ La quantizzazione della Relatività Generale è problematica e non esiste un modo ovvio per unificarla con il Modello Standard nell'ambito della teoria dei campi

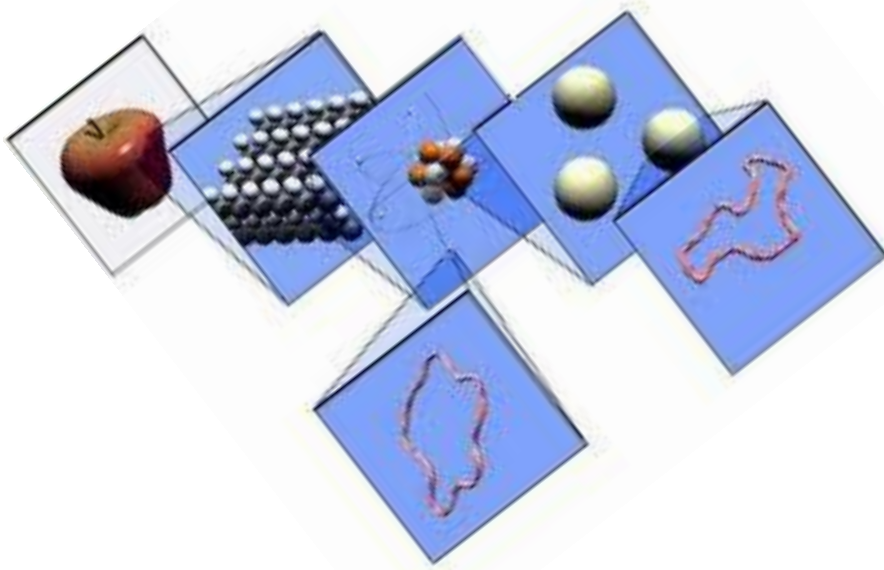


- ▶ Oggi esiste una proposta convincente per una teoria quantistica unificata di tutte le interazioni fondamentali:

LA TEORIA DELLE STRINGHE



- ▶ Se guardiamo in profondità nella materia, troviamo ...



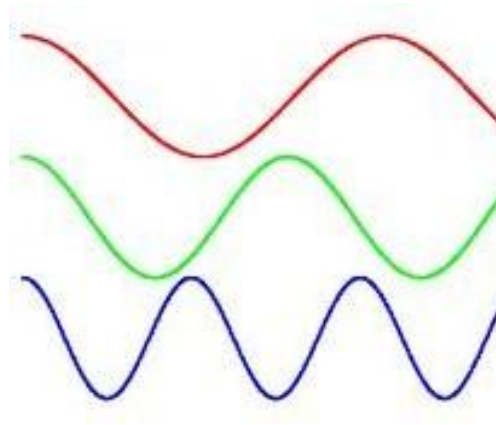
... le **STRINGHE** !

- ▶ I costituenti ultimi della materia sarebbero oggetti unidimensionali, detti stringhe, con una lunghezza caratteristica dell'ordine di 10^{-33} cm.



Particelle elementari dalle stringhe

- ▶ Nella teoria delle stringhe le particelle elementari (costituenti della materia e mediatori delle forze) corrispondono alle armoniche di una corda vibrante.



Particella A

Particella B

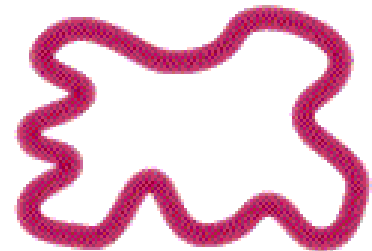
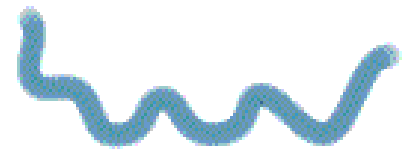
Particella C

- ▶ La massa e lo spin delle particelle crescono al crescere della frequenza della armonica.



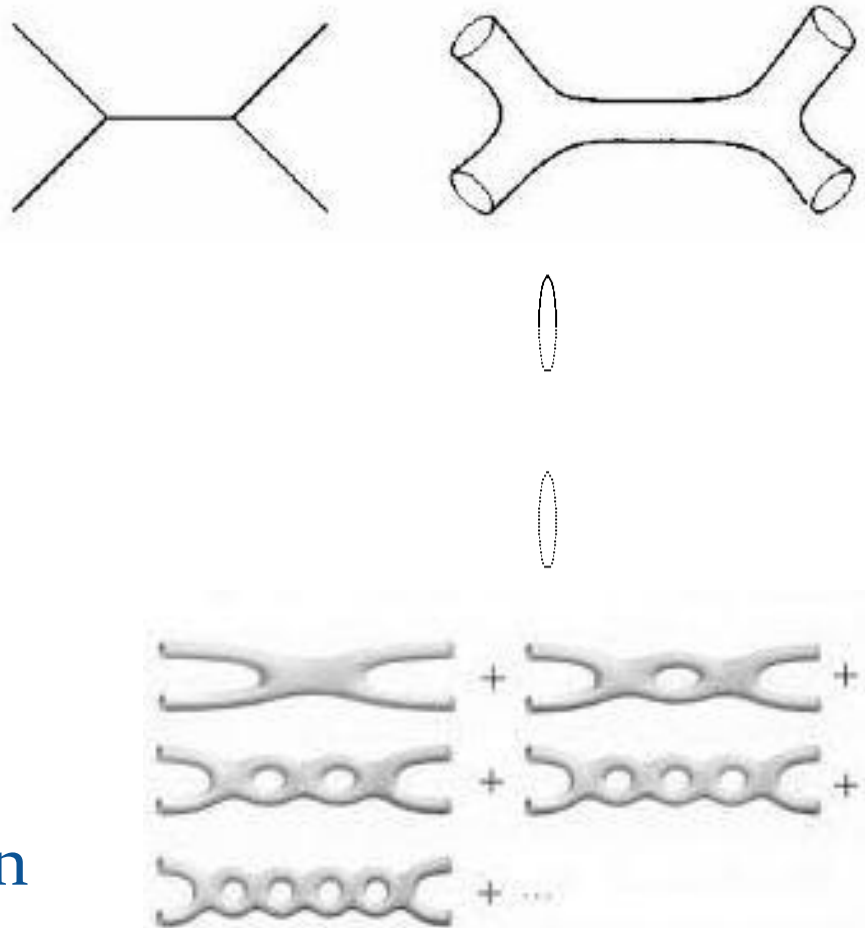
Stringhe aperte e stringhe chiuse

- ▶ Tra le diverse eccitazioni della stringa ci sono:
 - le particelle del Modello Standard
→ **Stringhe aperte**
 - il gravitone (spin 2)
→ **Stringhe chiuse**



Come interagiscono le stringhe?

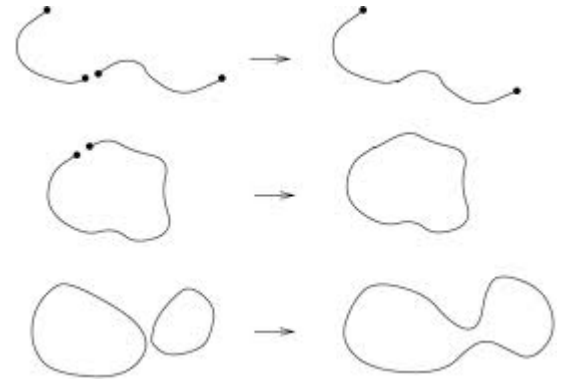
- ▶ Le interazioni fra stringhe sono descritte da diagrammi che generalizzano quelli delle particelle puntiformi
- ▶ Matematicamente i diagrammi di stringa sono descritti da superfici di Riemann con buchi e manici



Teoria Unificata: Perché?

- ▶ Nei modelli di stringa consistenti ci sono sia stringhe aperte che stringhe chiuse

→ **gluoni e gravitoni sono sullo stesso piano**



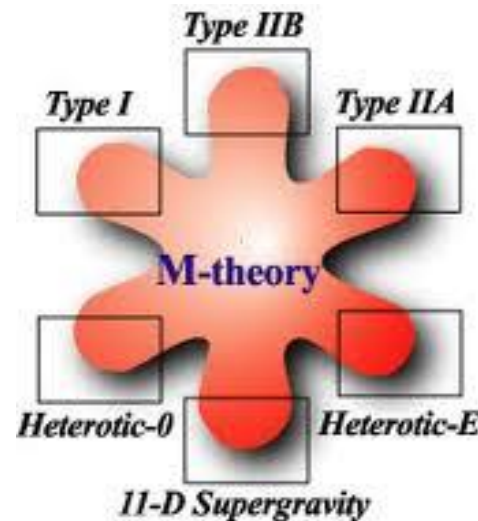
- ▶ L'esistenza di una lunghezza caratteristica permette di controllare le fluttuazioni gravitazionali su piccola scala e permette di formulare una **teoria quantistica della gravità**.



Una teoria di stringa ... o molte ?

- ▶ La consistenza matematica della teoria pone vincoli molto rigidi → solo **5 modelli di stringa possibili**, tutti supersimmetrici

Superstringhe:

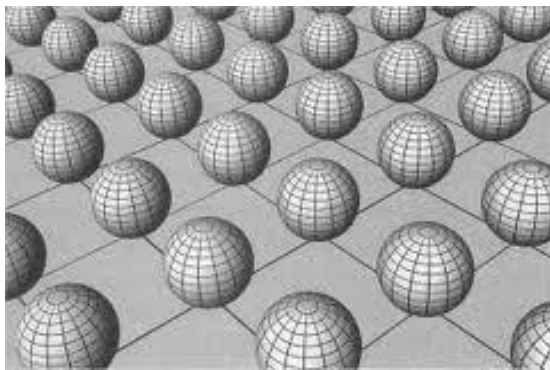


- ▶ Apparentemente modelli indipendenti, in realtà connessi da trasformazioni di dualità → unica teoria detta “**M-theory**”

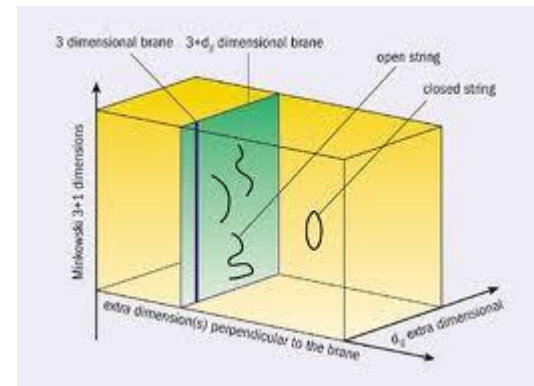
Spazio-tempo

- ▶ Tutte le 5 teorie di superstringa sono consistenti in **10 dimensioni!**
- ▶ Ma l'universo che conosciamo ha 4 dimensioni ...
Soluzione:

1. Compattificazione

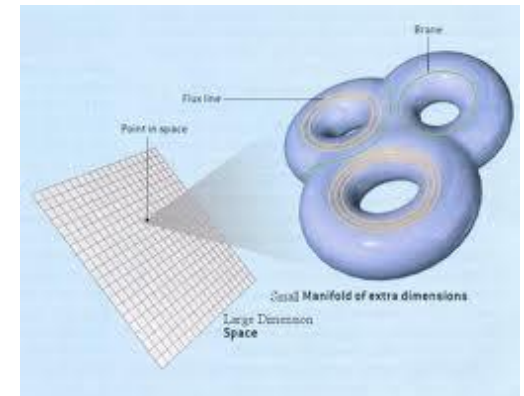
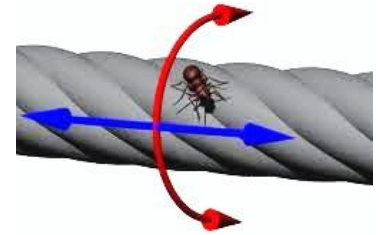


2. Brane-worlds



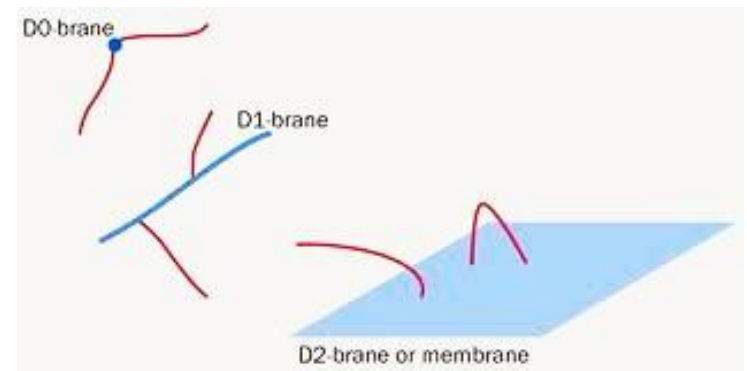
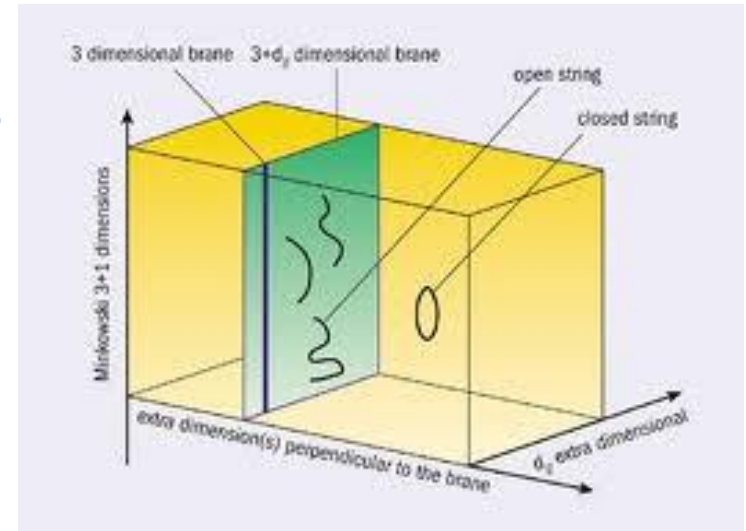
Compattificazione

- ▶ Si può passare da 10 a 4 dimensioni supponendo che le 6 dimensioni extra siano “piccole” ($\sim 10^{-33}$ cm) e compatte
- ▶ La struttura dello spazio interno influenza la fisica delle 4 dimensioni
- ▶ Le compactificazioni più usate coinvolgono le varietà di Calabi-Yau come spazio interno.
- ▶ Molti spazi di CY $\rightarrow$ molti modelli in 4 dimensioni



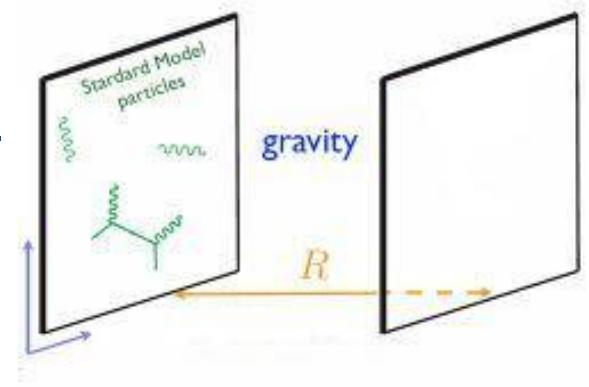
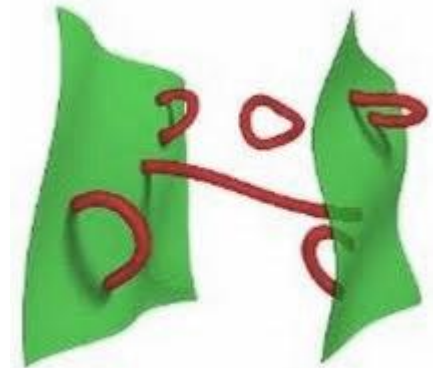
Brane-worlds

- ▶ Le 4 dimensioni in cui viviamo sono un sotto-spazio dell'intero universo
- ▶ La teoria delle superstringhe prevede l'esistenza di oggetti estesi di varia dimensionalità: le “D-brane”
- ▶ La teoria delle stringhe non è solo una teoria di stringhe!



Brane-worlds

- ▶ Le stringhe aperte terminano sulle D-brane, quindi le particelle del modello standard vivono sul world-volume di una D3-brana
- ▶ Le stringhe chiuse invece si propagano anche nelle dimensioni trasverse; quindi la gravità vede tutte le dimensioni
- ▶ Anche dimensioni trasverse sub-millimetriche sono compatibili con i dati sperimentali

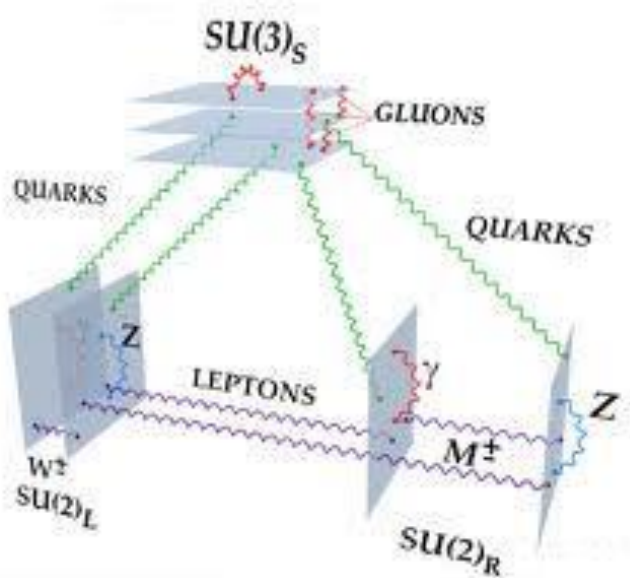


Modello Standard dalle Superstringhe?

- ▶ La teoria di gauge

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

può essere realizzata con 3 insiemi di D3-brane



- ▶ I **mediatori** delle forze corrispondono alle stringhe aperte su ciascun insieme di brane
- ▶ La **materia** carica corrisponde alle stringhe aperte appese tra 2 diversi insieme

Verifiche sperimentali?

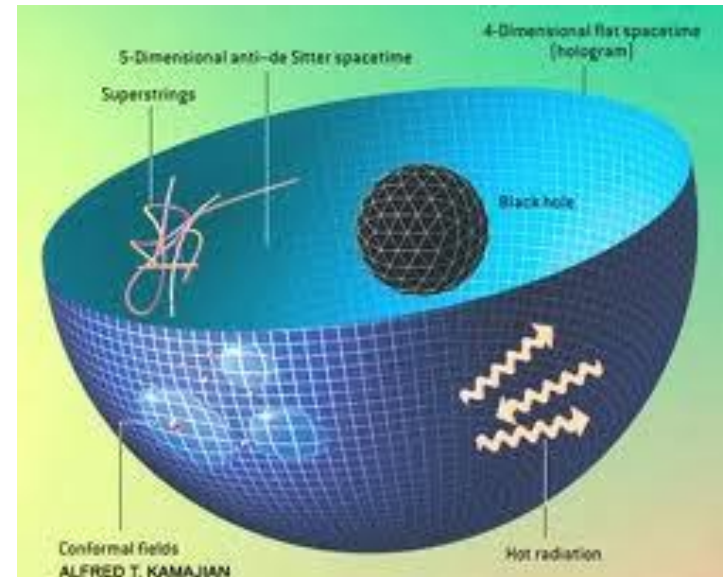
- ▶ Esperimenti “table-top” per verificare la legge di Newton a piccole distanze



- ▶ LHC:
 - Supersimmetria ?
 - Energia mancante?
 - Dimensioni extra?
 - Eccitazioni di stringa?

Corrispondenza gauge/gravità

- ▶ Le D-brane permettono di stabilire un collegamento quantitativo fra teorie di gauge sul world-volume e teorie di gravità in tutto lo spazio (→ **olografia**)
- ▶ Corrispondenza AdS/CFT:
la gravità in $AdS_5 \times S^5$
determina la dinamica dei
quark che vivono sul bordo
4d di AdS_5



Le Stringhe a Torino

► Uni To:

- C. Angelantonj
- M. Billò
- A. Ceresole (INFN)
- M. Frau
- P. Frè (in congedo)
- I. Pesando
- S. Sciuto
- A. Cotrone + L. Borsten (post-docs)



► Uni Pmn:

- P. Aschieri
- L. Castellani
- P. Grassi
- A. Lerda
- L. Sommovigo (post-doc)



► Poli To:

- L. Andrianopoli
- R. D'Auria
- M. Trigiante

