



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 16

# La Teoria delle Stringhe

# Cosa sono le stringhe?

La teoria delle stringhe è uno scenario teorico che "vorrebbe" unificare meccanica quantistica e relatività.

Si fonda su un'ipotesi di base: materia, energia, spazio e tempo, sono in realtà manifestazioni diverse di un'unica entità primordiale: nota come stringa o anche p-brane.

# Non è poi una cosa così strana...

Quando pensiamo a delle particelle elementari spesso pensiamo a dei punti senza dimensioni.

Una stringa è un'entità analoga mono-dimensionale. Una membrana è un'entità bi-dimensionale ed è possibile estrapolare il concetto a qualunque numero di dimensioni desiderato (o opportuno).

# L'atomo nel 1900...

- Gli atomi interagiscono attraverso reazioni chimiche
- Più di 100 atomi conosciuti (H, He, Fe ...)
- La struttura interna non era conosciuta, ma si sapeva di una carica elettrica interna



Niels Bohr 1885 - 1962

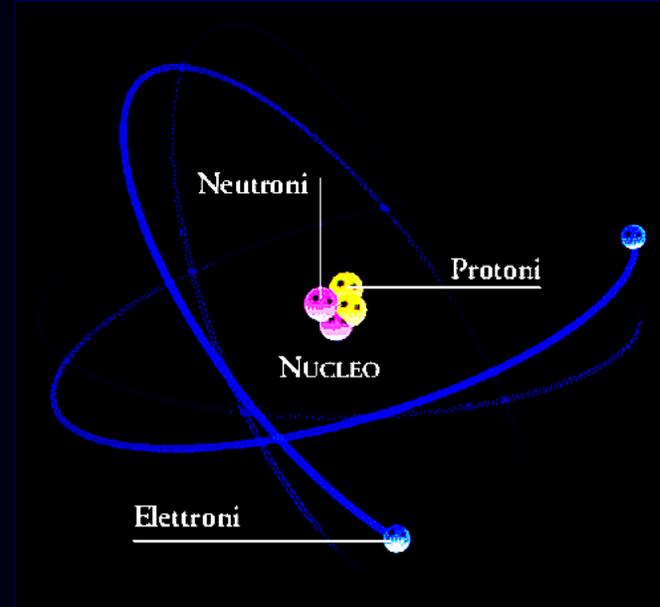


# Modello per l'atomo

- Con gli esperimenti si riesce a “spaccare” gli atomi
- Particelle leggere a carica negativa (elettroni) intorno ad un nucleo positivo e pesante
- L'atomo è praticamente vuoto!

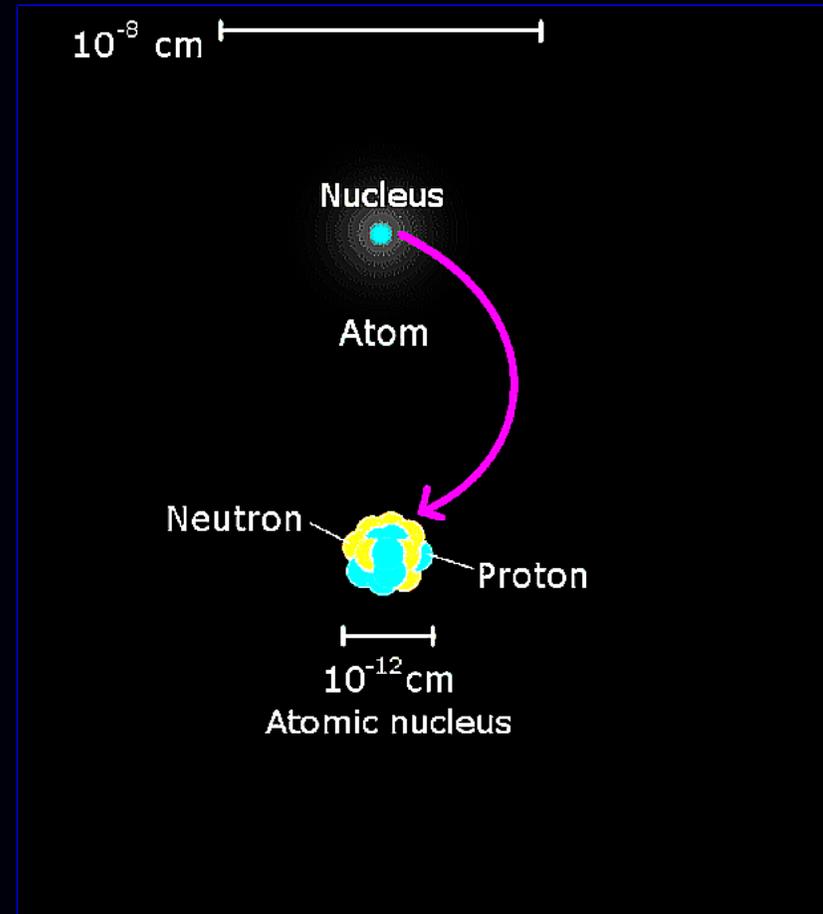


E. Rutherford 1871 - 1937



# Il nucleo

- Il nucleo è piccolo e denso. Per un po' si pensò che fosse puntiforme.
- Ma vi erano tanti nuclei diversi quanti erano gli atomi.
- Tutti i nuclei sono fatti di **protoni carichi e neutroni neutri**.

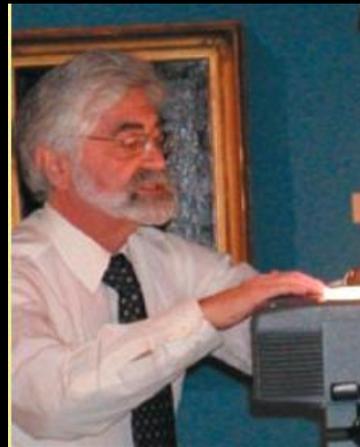


# Quarks

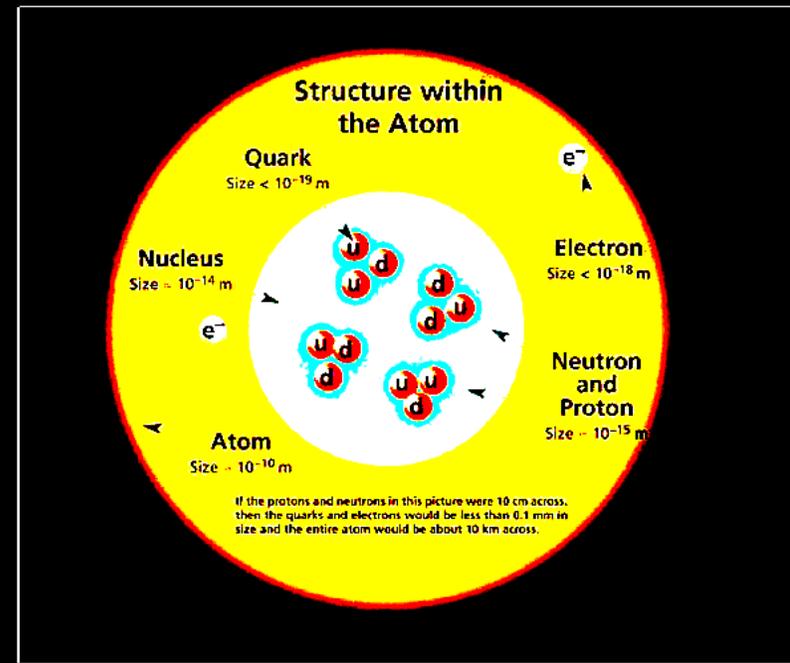
- In realtà anche protoni e neutroni non sono unità fondamentali.
- Sono composti da particelle più piccole dette quarks.
- Per il momento questi quarks sembrano essere puntiformi.



M. Gell-Man 1929-

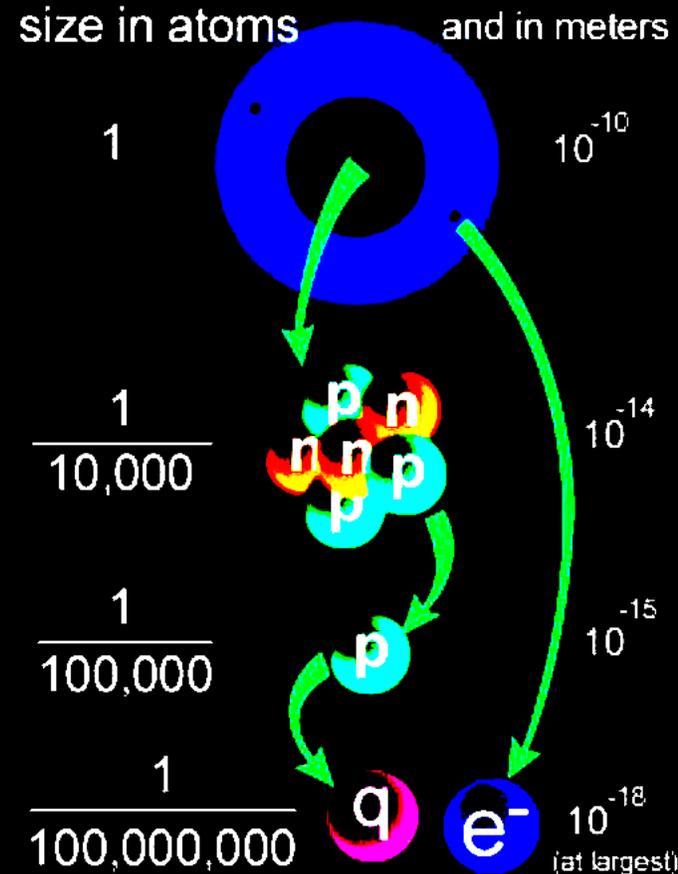


G. Zweig 1937-



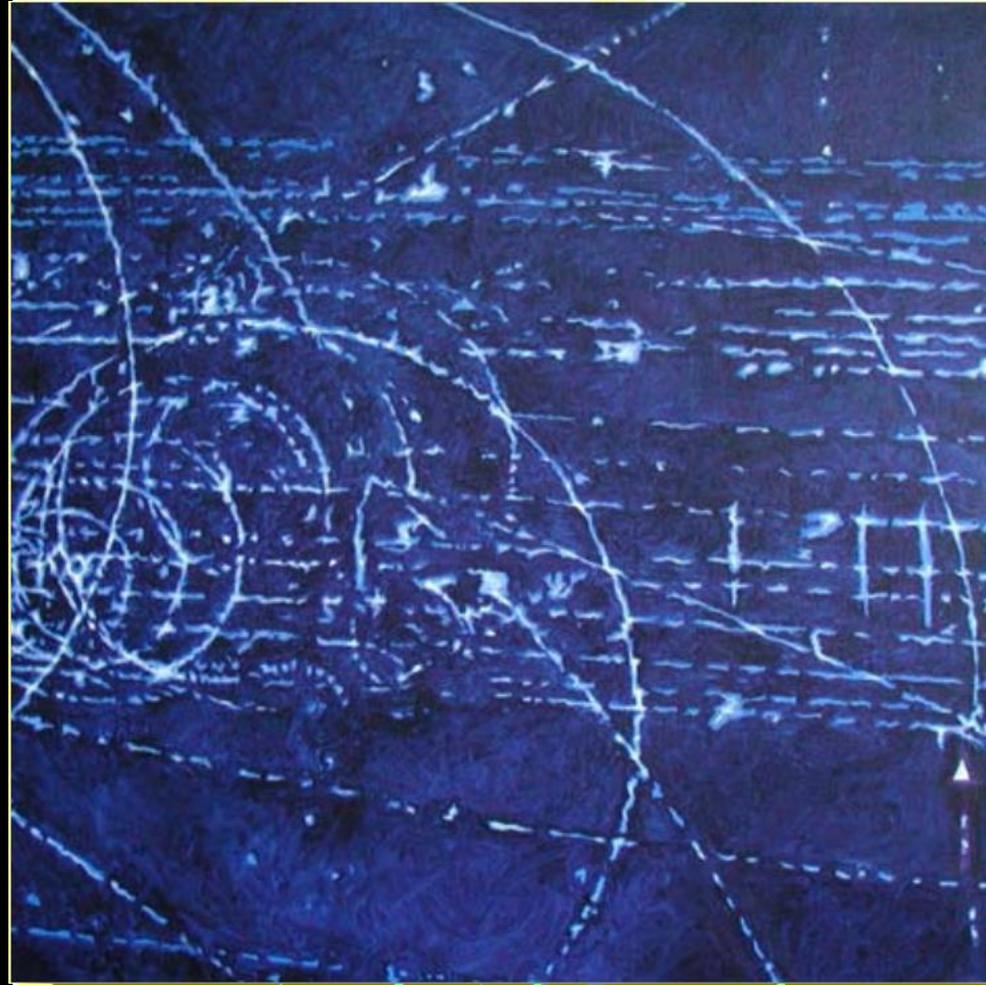
# Dimensioni (sub)-atomiche

- Il nucleo è 10,000 volte più piccolo dell'atomo
- Il protone ed il neutrone sono 10 volte più piccoli del nucleo
- Non ci sono evidenze che i quarks abbiano dimensione.



# Nuove Particelle

- Collisioni di elettroni e nuclei nei raggi cosmici e negli acceleratori di particelle a partire dagli anni '30 hanno portato alla scoperta di un gran numero di particelle subatomiche.
- In alcuni casi furono “predette”, ma in molti altri furono autentiche sorprese.
- All'inizio, in molti casi, si pensò potessero essere particelle fondamentali (essenzialmente non più divisibili).



# E' uno zoo molto ben fornito...

## ELEMENTARY PARTICLES

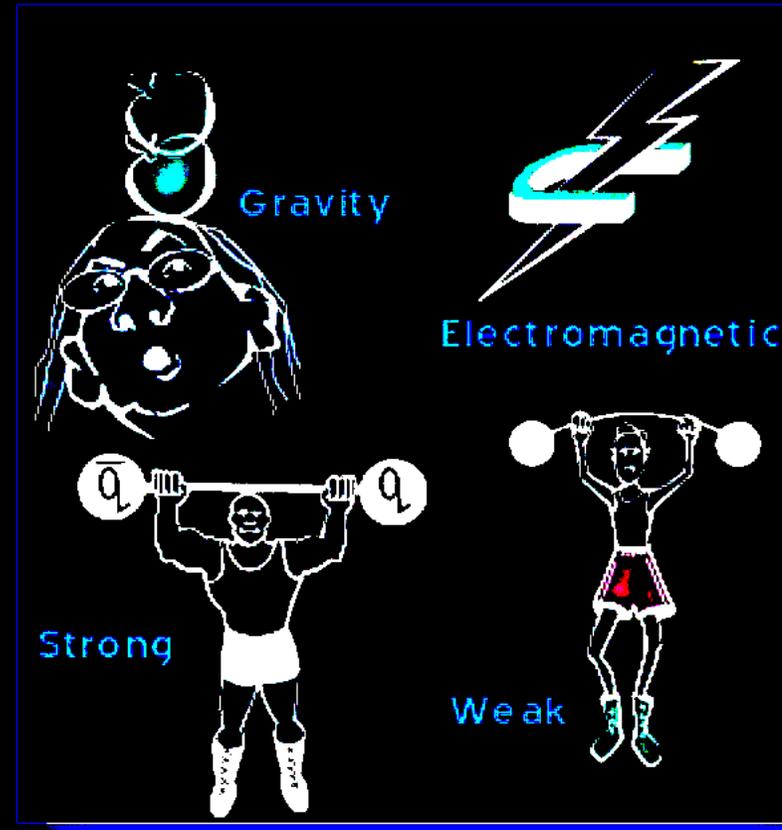
	CONTEXT	MASS	CHARGE	SPIN	STRENGTH	RANGE	OBSERVED?	S PARTICLE
<b>BOSONS (forces)</b>								
GRAVITON	gravity	0	0	2	$10^{-38}$	infinite	no	gravitino
PHOTON	electromagnetism	0	0	1	$10^{-2}$	infinite	yes	photino
GLUON	strong force	0	0	1	1	$10^{-13}$	indirectly	gluino
<b>WEAK GAUGE BOSONS</b>								
W <sup>+</sup>	weak force	80,000	1	1	$10^{-13}$	$10^{-16}$	yes	W+ wino
W <sup>-</sup>	weak force	80,000	-1	1	$10^{-13}$	$10^{-16}$	yes	W- wino
Z <sup>0</sup>	weak force	91,000	0	1	$10^{-13}$	$10^{-16}$	yes	zino
HIGGS BOSON	weak force	>78,000	0	0	[ ? ]	[ ? ]	no	Higgsino
<b>FERMIONS (matter)</b>								
<i>LEPTONS, FAMILY 1:</i>								
ELECTRON	radioactive decay	0.51	-1	1/2	n/a	n/a	yes	selectron
ELECTRON NEUTRINO	atomic structure	0?	0	1/2	n/a	n/a	yes	electron sneutrino
<i>QUARKS, FAMILY 1:</i>								
UP	atomic nuclei	5	2/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	up squark
DOWN	atomic nuclei	9	-1/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	down squark
<i>LEPTONS, FAMILY 2:</i>								
MUON		106	-1	1/2	n/a	n/a	yes	muon slepton
MUON NEUTRINO		~0	0	1/2	n/a	n/a	yes	muon sneutrino
<i>QUARKS, FAMILY 2:</i>								
CHARM		1,400	2/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	charm squark
STRANGE		170	-1/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	strange squark
<i>LEPTONS, FAMILY 3:</i>								
TAU		1,784	-1	1/2	n/a	n/a	yes	tau slepton
TAU NEUTRINO		>35	0	1/2	n/a	n/a	yes	tau sneutrino
<i>QUARKS, FAMILY 3:</i>								
TOP		174,000	2/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	top squark
BOTTOM		4,400	-1/3	1/2	n/a	n/a	indirectly	bottom squark

# Ma cosa è quindi “fondamentale”?

- I fisici hanno trovato centinaia di nuove particelle.
- E, per la maggior parte, non sono fondamentali.
- C'è una teoria, detta **Modello Standard**, che sembra spiegare bene quello che osserviamo in natura.
- Questo modello include 6 quarks, 6 leptoni e 13 particelle che trasportano le forze tra quarks e leptoni.
- Per non parlare dell'anti-materia.

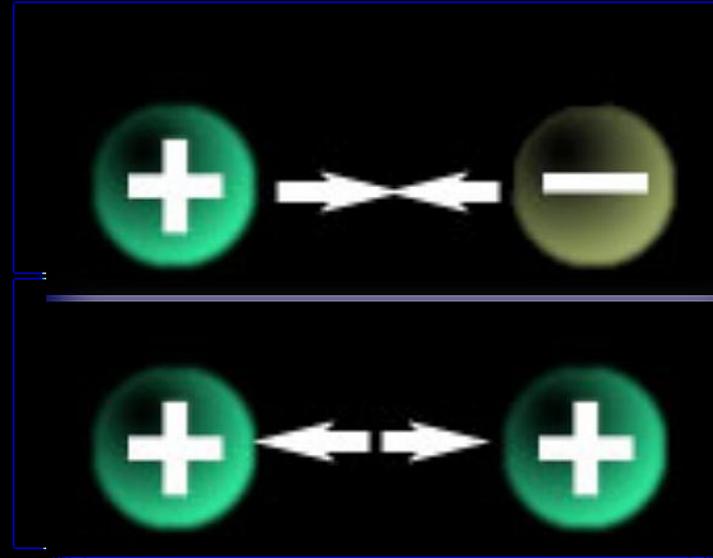
# Quattro Forze

- Ci sono 4 interazioni fondamentali in natura.
- Tutte le forze possono essere attribuite a queste interazioni.
- La gravità è attrattiva, le altre possono essere repulsive.
- Le interazioni sono anche responsabili dei decadimenti.

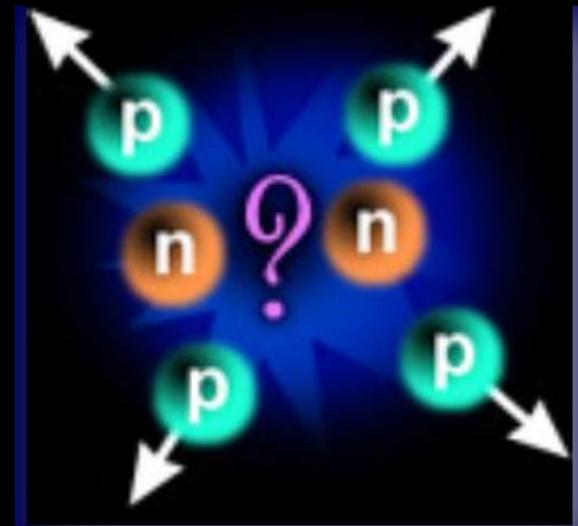


# Elettromagnetismo

- Le forze elettromagnetiche fanno sì che cariche opposte si attraggano e cariche uguali si respingano.
- Il portatore della forza è il fotone ( $\gamma$ ).
- Il fotone è senza massa e si propaga alla velocità della luce.

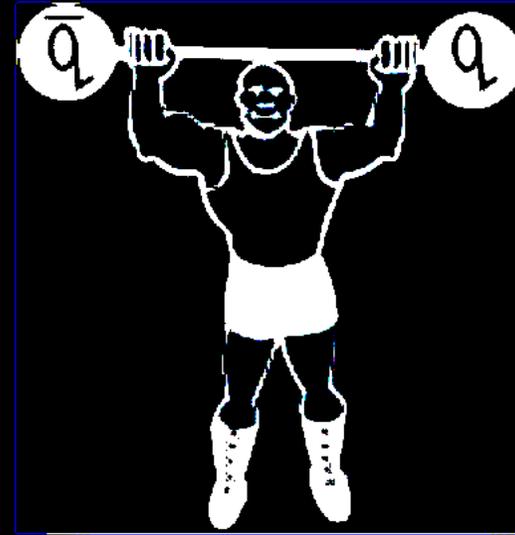


- Un nucleo pesante contiene molti protoni, tutti con carica positiva
- Questi si respingono
- Perché allora il nucleo non esplode?

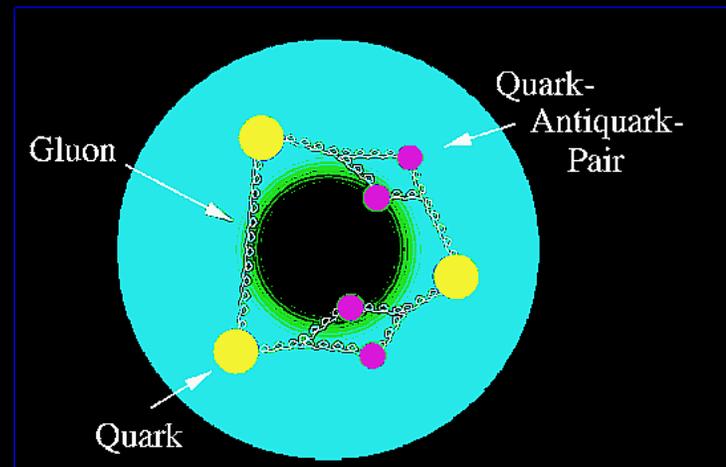


# Forza Forte

- In aggiunta alla carica elettrica, i quarks portano anche un nuovo tipo di carica, detta “carica di colore”.
- La forza tra le particelle che hanno carica di colore è detta forza forte.



- La forza forte tiene insieme i quarks a formare gli adroni. I portatori della forza forte sono i gluoni: ci sono 8 diversi gluoni.
- La forza forte agisce solo su corte distanze.



# Forza debole

- Le interazioni deboli sono responsabili del decadimento dei quarks e dei leptoni pesanti in quarks e leptoni più leggeri.
- Esempio: il neutrone decade in protone+elettrone+neutrino.
- Questo spiega perché tutta la materia è composta dai leptoni e quarks più leggeri.

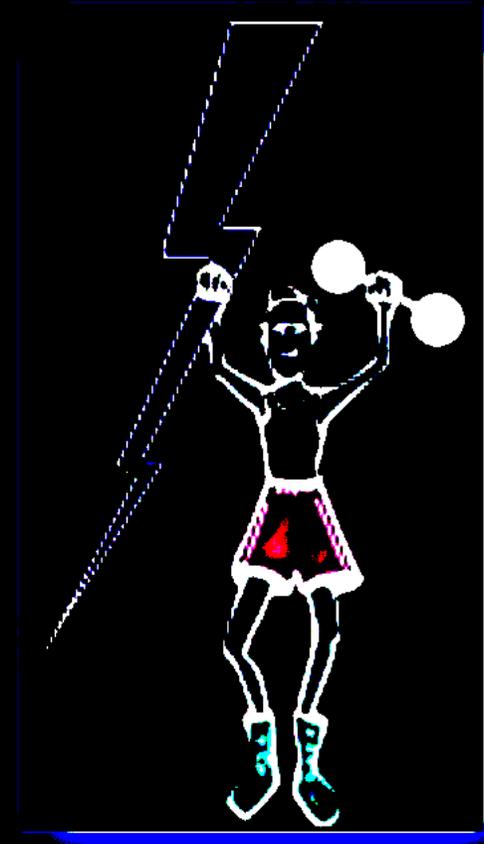


# Forza elettrodebole

- Nel Modello Standard la forza elettromagnetica e quella debole sono state unificate in una unica forza elettro-debole.
- A distanza molto piccole ( $\sim 10^{-18}$  m), le interazioni deboli ed elettromagnetiche hanno la stessa intensità.
- I portatori della forza sono, bozoni, W e Z.

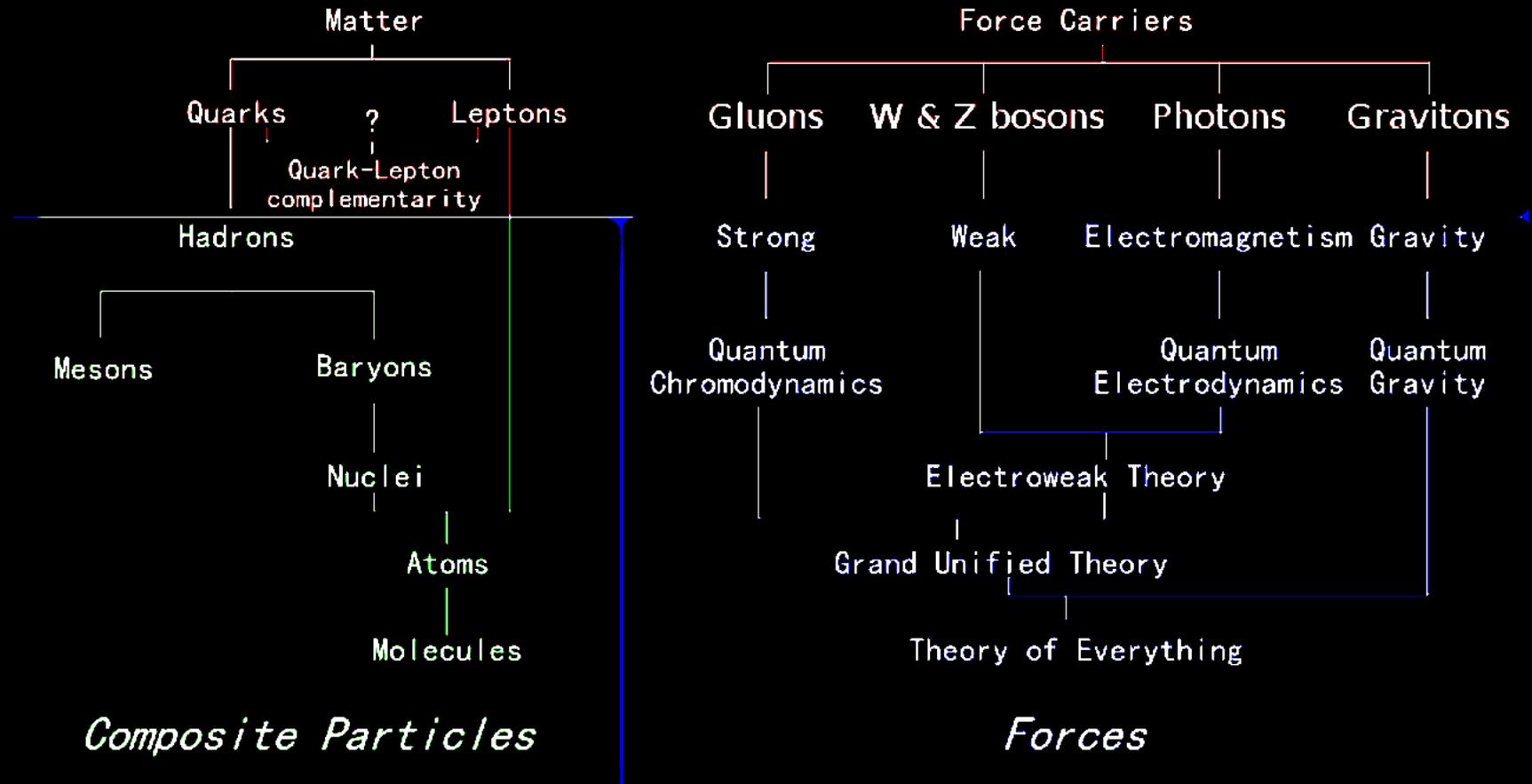


C. Rubbia 1934-



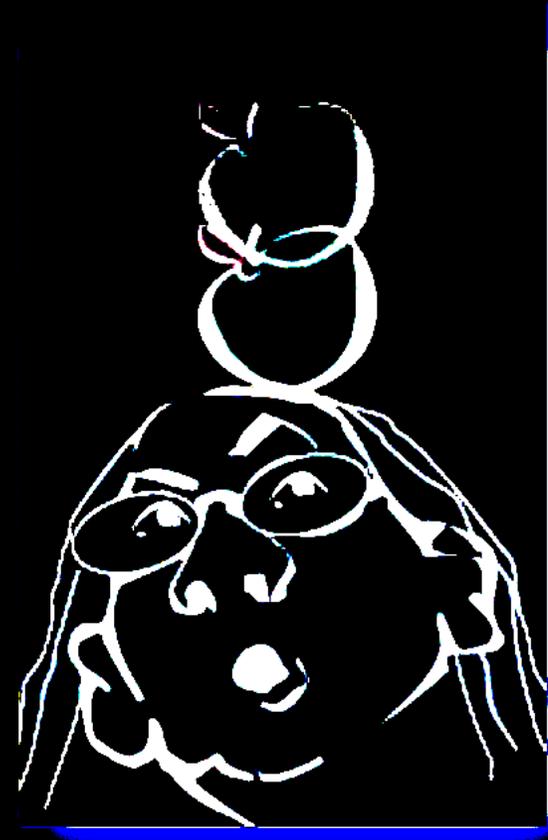
# Riassunto delle interazioni

## *Elementary Particles*



# E la gravità?

- La gravità è molto debole.
- É importante a distanze macroscopiche.
- Il portatore della forza gravitazionale, il gravitone, è predetto dalla teoria ma non è mai stato osservato.



- Ma quanto debole è la gravità?

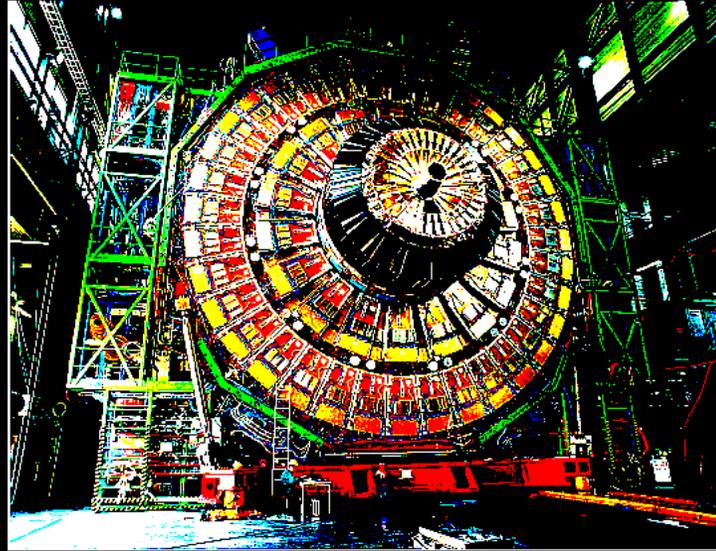
$$F_{\text{EM}} = \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad F_{\text{gravity}} = G_N \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Per due protoni,

$$F_{\text{gravity}} \sim 10^{-36} F_{\text{EM}}$$

- È convinzione generale che ci manca qualche ingrediente importante. Perché la gravità è così debole?
- O magari, in realtà, non lo è...

# Cosa si può dire sulle masse?



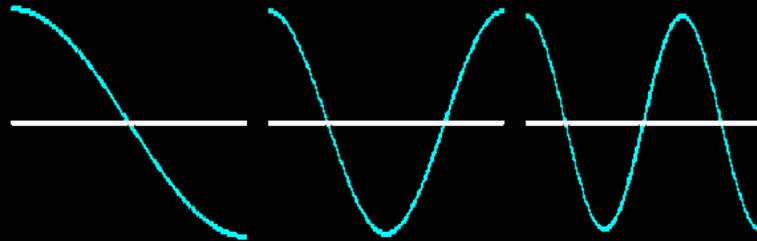
- Il Modello Standard non può spiegare perché una particella ha una certa massa.
- I fisici hanno teorizzato l'esistenza di un nuovo campo, detto di Higgs, che interagisce con le altre particelle per dare loro la massa.
- Il bosone di Higgs è stato probabilmente osservato sperimentalmente

# string theory

- La fisica di oggi ha teorie per la meccanica quantistica, per la relatività e per la gravità, ma queste teorie sono separate.
- La teoria delle stringhe potrebbe suggerire un modo per superare questa difficoltà.
- Va detto che al momento più che una teoria scientifica è un modello matematico. Elegante, affascinante, ma ancora al di là della verificabilità sperimentale.

# Nella teoria delle stringhe le particelle sono stringhe!

Vibrazioni diverse →  
Particelle diverse

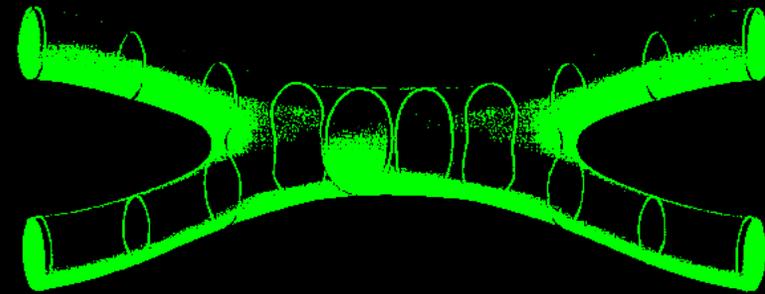


up  
quark

down  
quark

electron

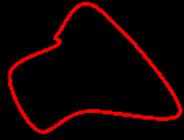
Combinazione di stringhe →  
Interazione di particelle



Le stringhe potrebbero permettere di realizzare l'unificazione delle forze.

Sono però inosservabili... con dimensioni tipiche di  $10^{-33}$  cm

## Differenti vibrazioni $\Rightarrow$ Differenti particelle



elettrone

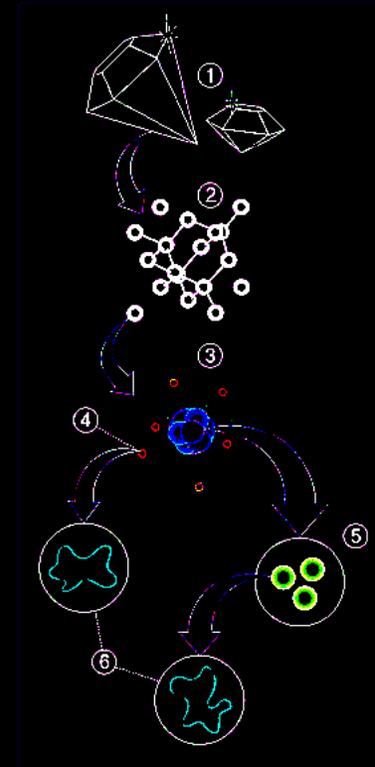


fotone



gravitone

- Le stringhe sembrano particelle quando non sono viste abbastanza da vicino.
- *Tutti* i tipi di particelle sono legati a diversi modi di vibrazione delle stringhe.
- Chiaramente il modo di propagarsi e di interagire di una stringa non è certo quello di una particella classica.



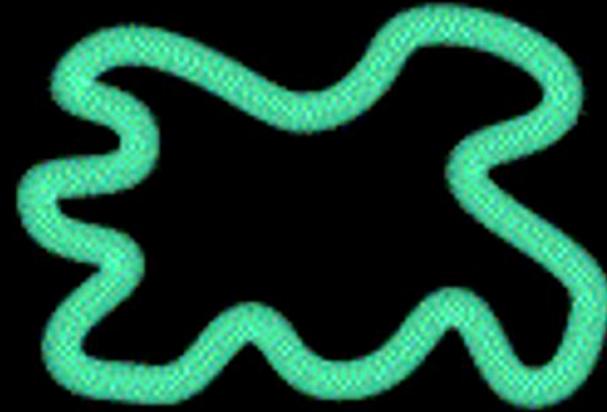
Se guardiamo a fondo dentro la materia troviamo delle.....



**I costituenti ultimi della  
materia sono delle  
minuscole cordicelle, dette  
STRINGHE**



**Stringa aperta**



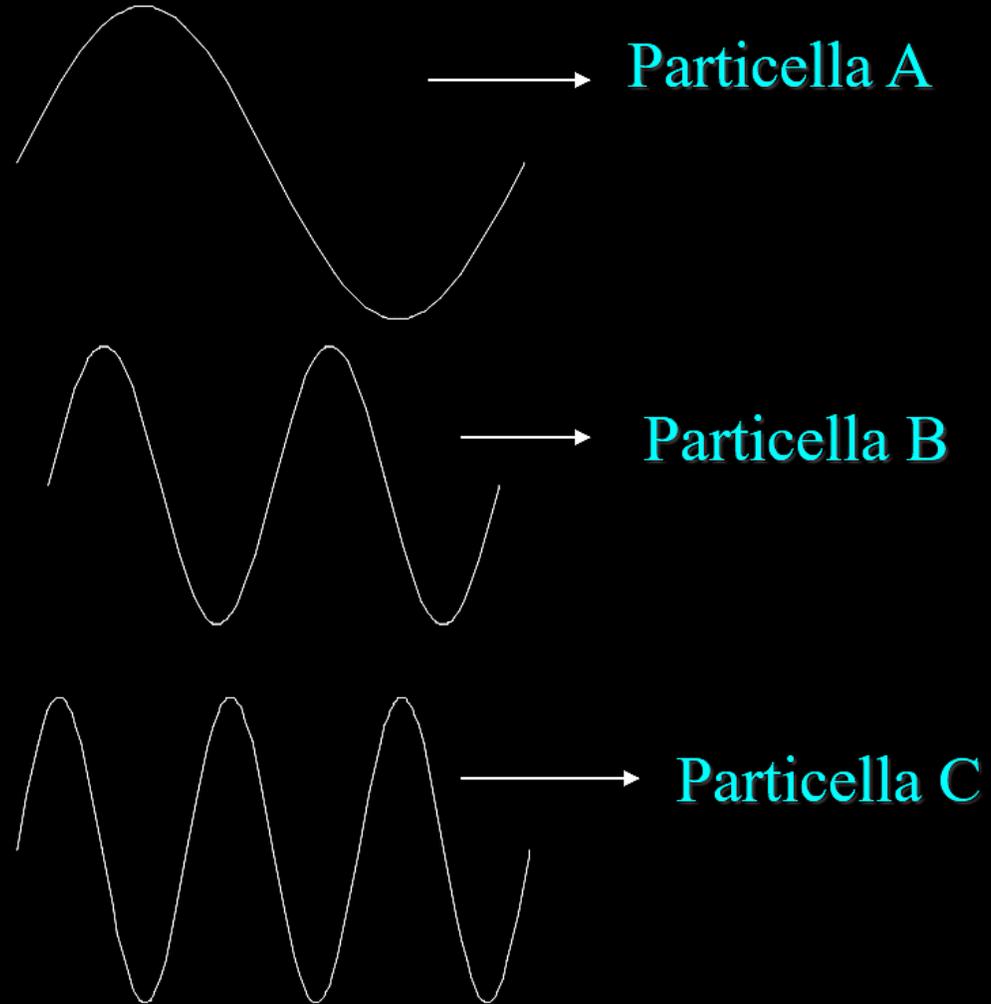
**Stringa chiusa**

**Lunghezza caratteristica  $10^{-33}$  cm**

# Le Particelle sono le note di un violino



Le particelle fanno un concerto

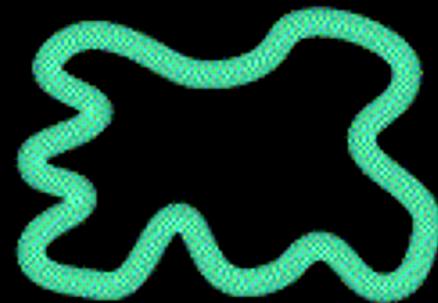


# Tra le varie “note” emesse dalla stringa ci sono:

- le particelle del modello standard



- il gravitone (mediatore della gravità)



# Ma è una vera teoria?

- L'argomento non è affatto banale.
- In senso tecnico, una teoria è scientifica se è possibile condurre esperimenti i cui risultati possono falsificare la teoria stessa.
- Siamo ancora molto lontani da questa situazione, ma ci sono delle richieste della teoria delle stringhe che possono però (forse) avere delle conseguenze osservabili.

•Di che si tratta?



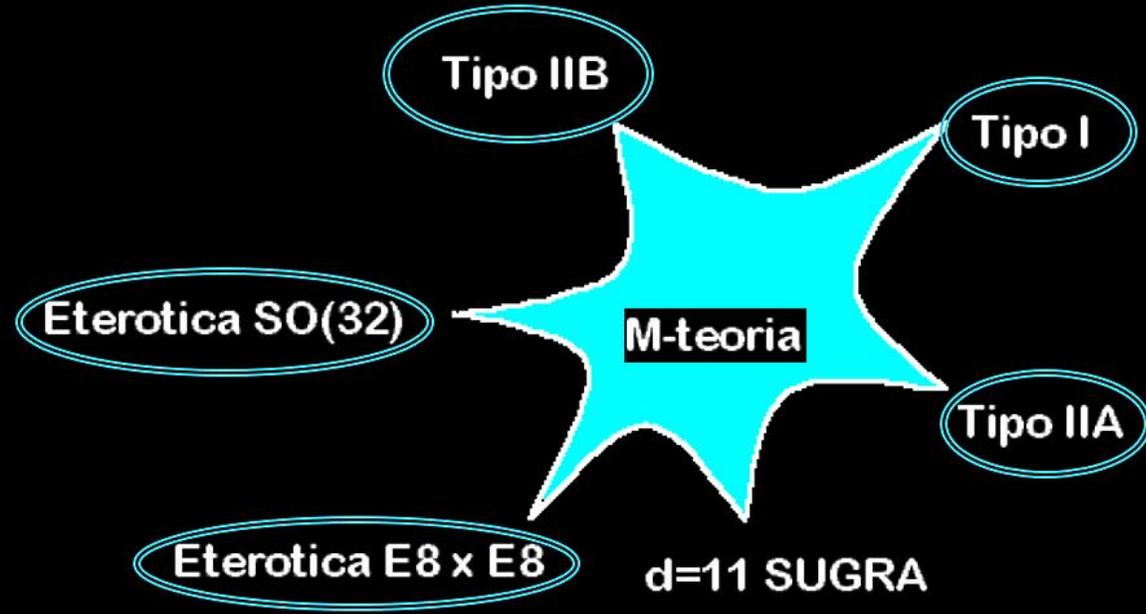
mumble,  
mumble

# **Consistenza $\Rightarrow$ restrizioni**

**(1984)**

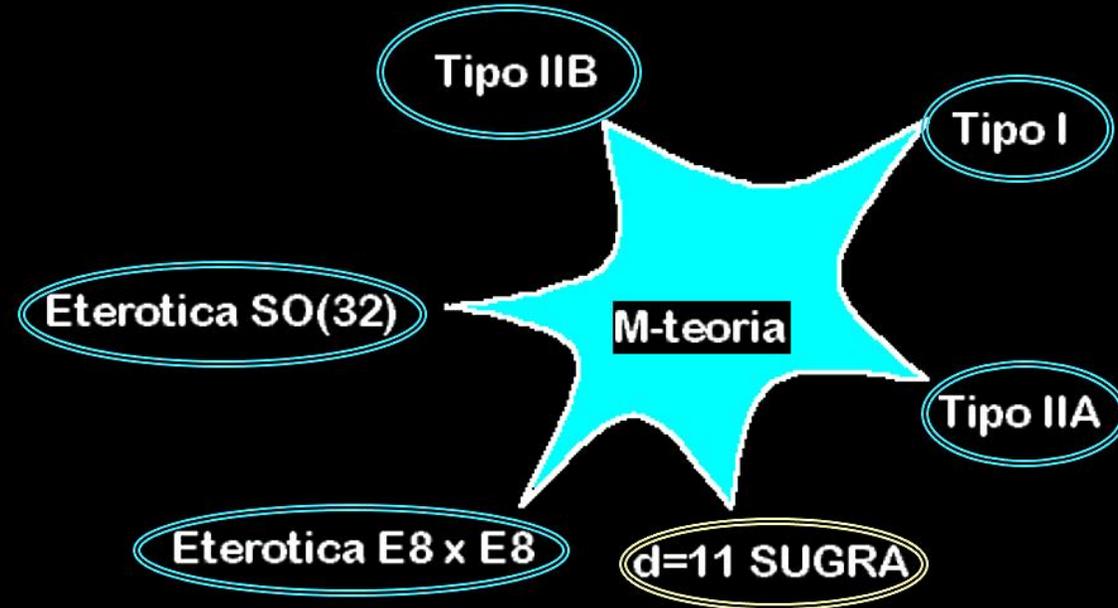
- **Solo 5 teorie di superstringa sono consistenti**

# Consistenza $\Rightarrow$ restrizioni



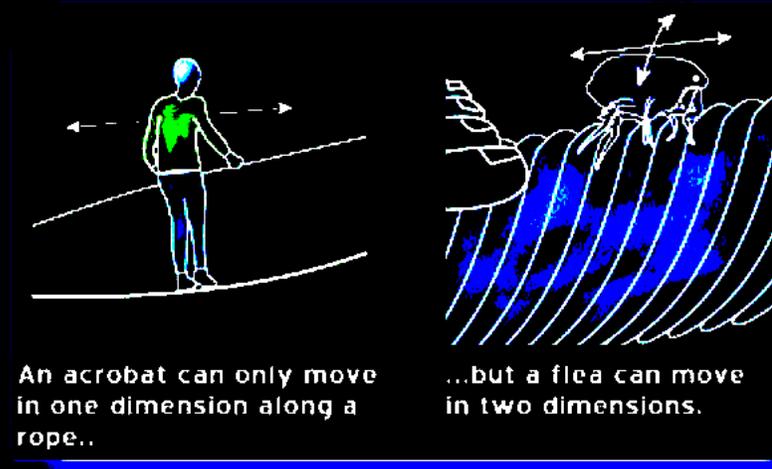
- Tutte richiedono uno spazio-tempo a **10 dimensioni** !

# Consistenza $\Rightarrow$ restrizioni



E sono collegate alla teoria di supergravità in  $D=11$  che è la teoria efficace di una misteriosa M teoria unificante tutte le stringhe

# Extra Dimensioni

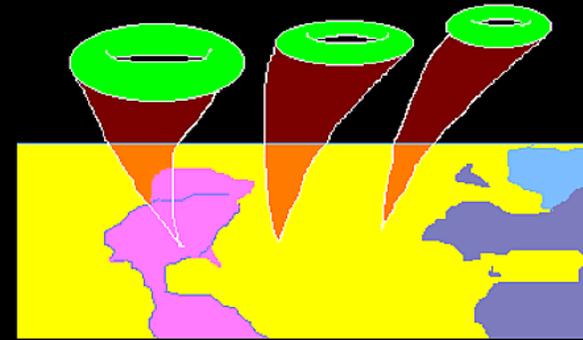


- La Teoria delle stringhe richiede più di 3 dimensioni.
- Queste extra dimensioni possono essere così piccole che non le possiamo vedere.
- Gli esperimenti adesso cercano evidenze per queste extra dimensioni.

**Ma l' universo ha 4 dimensioni!**

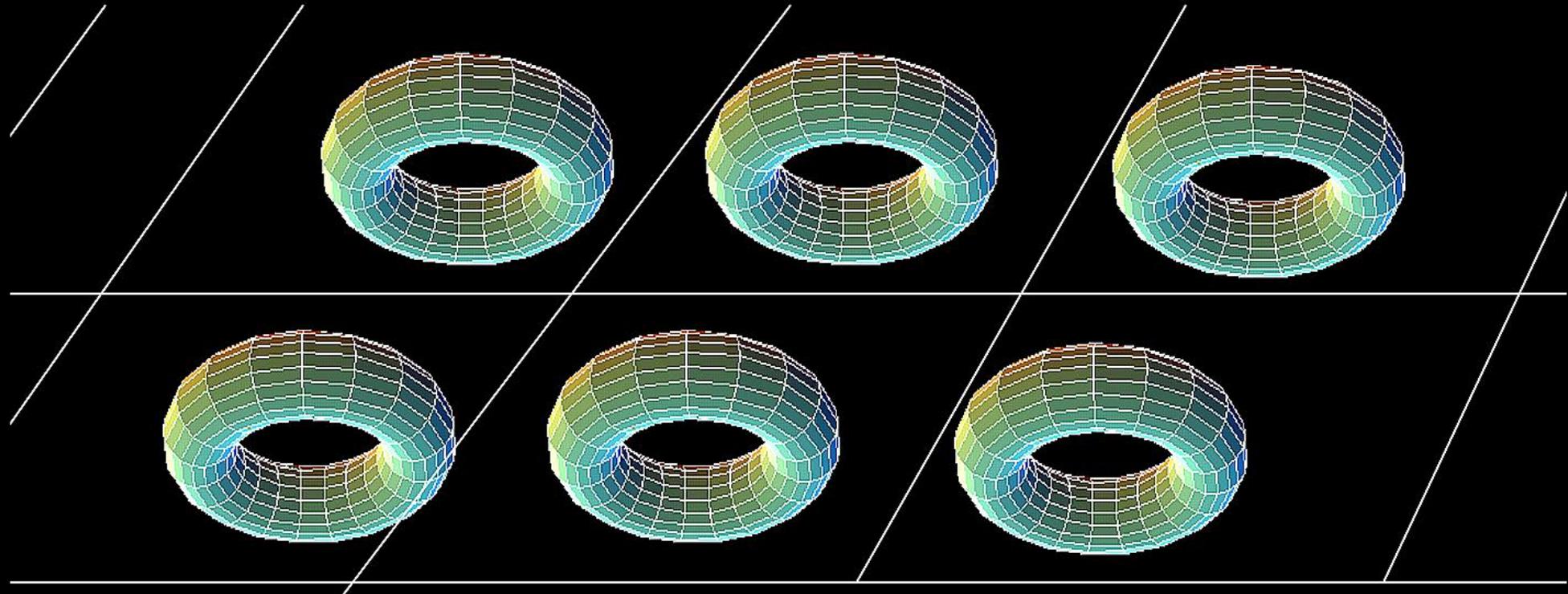
**COMPATTIFICAZIONE**  $10 \Rightarrow 4$

se 6 dimensioni sono  
“piccole” ed arrotolate



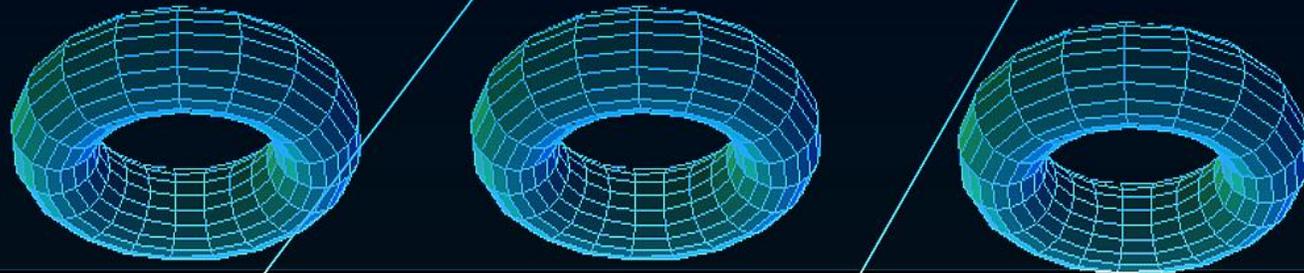
Allora otteniamo delle teorie  
quadrimensionali il cui spettro di particelle  
e di campi é determinato dalla geometria  
delle dimensioni arrotolate

Abbiamo pure imparato.....  
che la Teoria della Stringa oltre  
alle dimensioni extra.....



Abbiamo pure imparato.....  
che la Teoria della Stringa oltre  
alle dimensioni extra.....

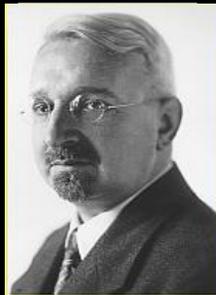
implica anche  
l'esistenza di



Di fatto l'idea di base, ripresa dal lavoro di due matematici, Kaluza & Klein, è che se ci fossero dimensioni "arrotolate" noi ce ne accorgeremmo solo a dimensioni comparabili a quelle "dell'arrotolamento"...

Ammetto che suoni a dir poco ambigua l'espressione precedente.

Tuttavia, come esempio, ricordiamo che nel 1918 Kaluza mostrò che se il nostro universo avesse 4 dimensioni spaziali, una delle quali a noi non è percettibile, le equazioni di Maxwell, ovvero l'elettromagnetismo, diventano una necessità della relatività generale di Einstein.



T. Kaluza 1885-1945



O. Klein 1894-1977

La teoria di Kaluza in effetti si dimostrò non sostenibile... ma in un certo senso la via era aperta!

Sempre più scienziati si trovarono a provare a descrivere le loro equazioni in spazi N-dimensionali.

La versione “auto-consistente” più semplice richiede 26 dimensioni, delle quali 22 “arrotolate”.

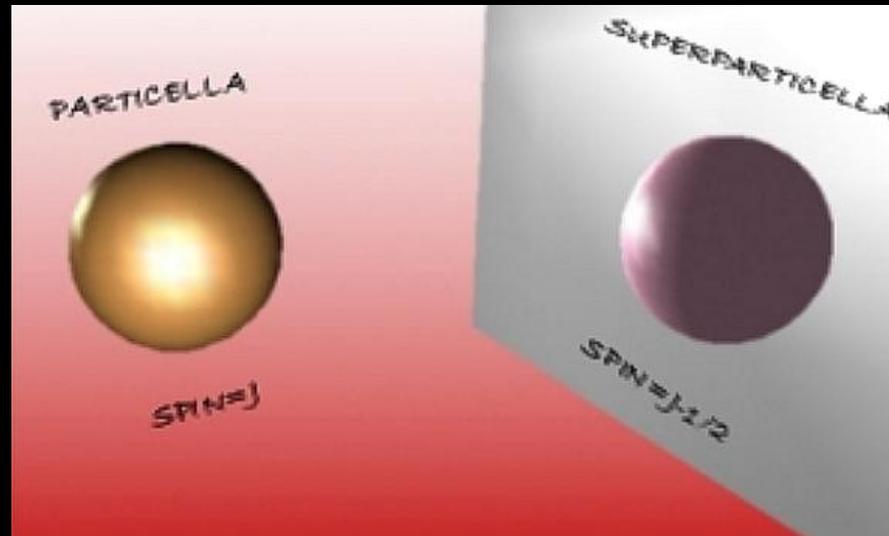




Tuttavia oltre ai successi (matematici) la teoria a 26 dimensioni presenta una rilevante quantità di problemi.

Ad esempio non riesce a descrivere i fermioni, ma solo i bosoni.

E prevede necessariamente particelle tachioniche...



Un grande passo avanti si è ottenuto con lo sviluppo delle teorie super-simmetriche (SUSY). Introducendo il concetto di “superstringa”.

E si ripete però un problema già presente in scala minore con le teorie delle stringhe originali.

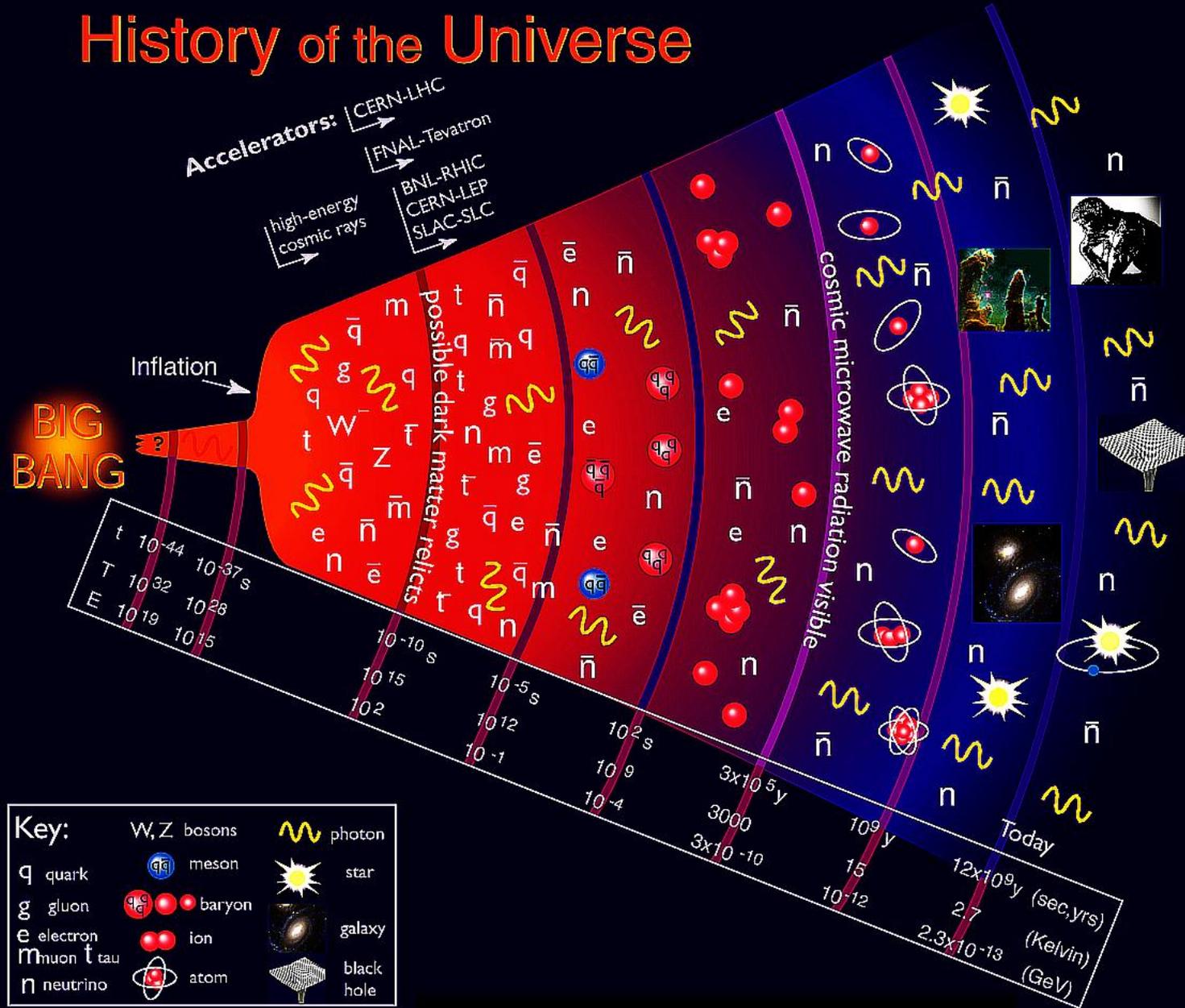
Dati determinati principi ci sono diverse famiglie di teorie che li soddisfano, e non abbiamo idea di come metterle a verifica.

Al momento l'approccio più promettente è quello della cosiddetta "M-teoria" (teoria delle matrici?).

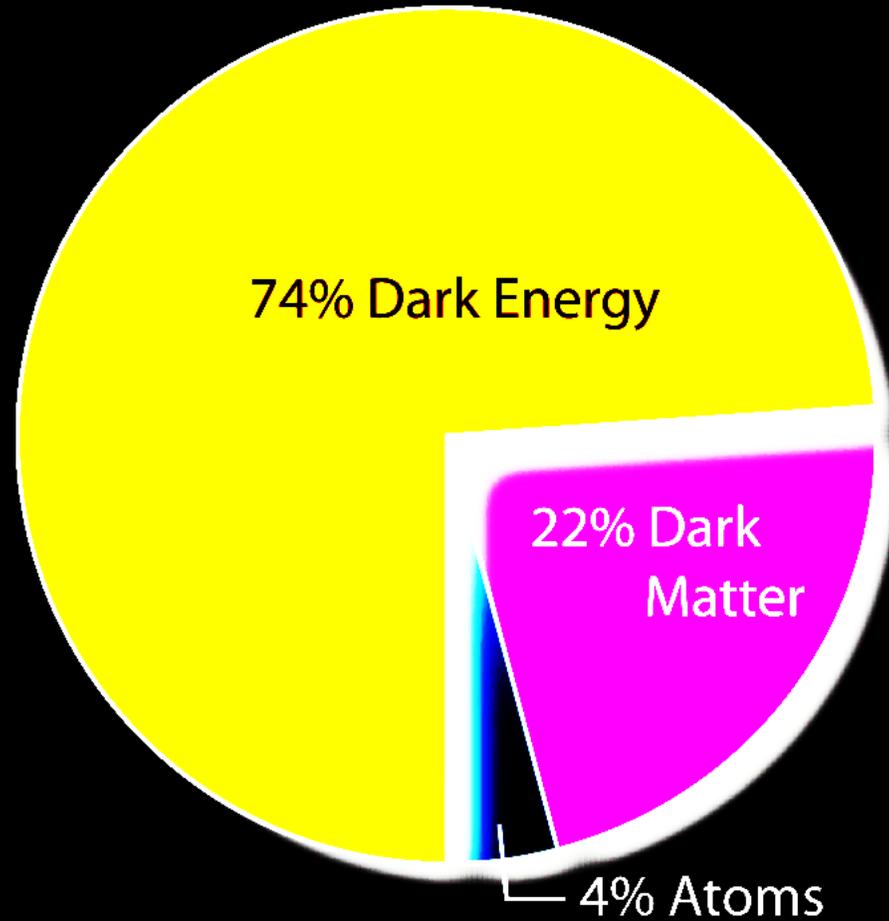
Un'elegante ed estremamente complesso costrutto che unifica tutte le forze in natura e che prevede la possibilità di entità alquanto più complesse delle stringhe: le p-brane. Dove p è fra 0 e 9.

0-brana: particella, 1-brana-stringa, p-brane...

# History of the Universe



Misure moderne hanno portato a dedurre che l'universo è composto da varie componenti:

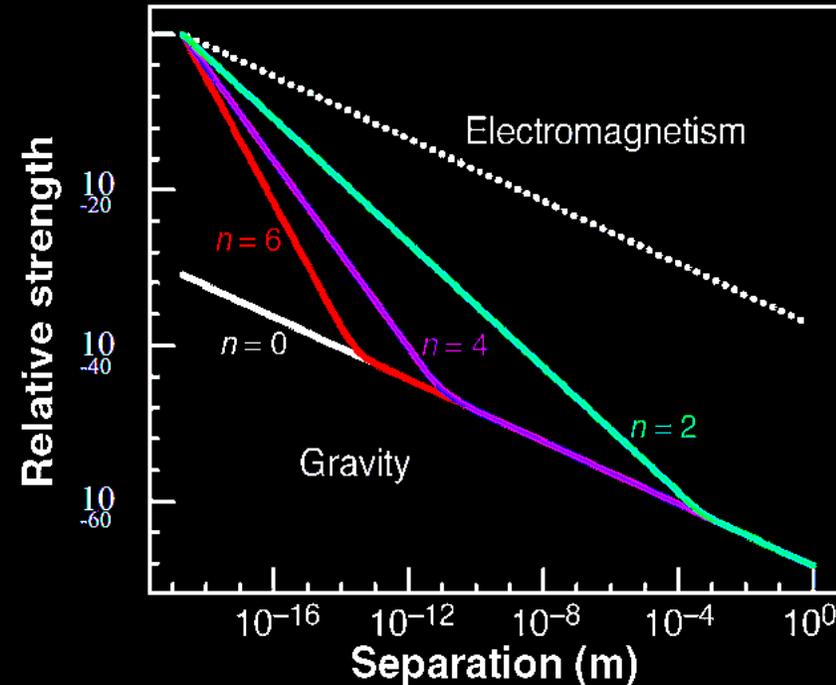


•Ora, si può dimostrare che la forza di gravità decresce con il quadrato della distanza, la ben nota legge di Newton, proprio perché noi la misuriamo in uno spazio a 2+1(=3) dimensioni.

•Se vivessimo in uno spazio a N dimensioni, la forza di gravità decrescerebbe con una potenza N-1 della distanza:

$$\bullet F_{\text{grav}} \propto 1/r^{N-1}$$

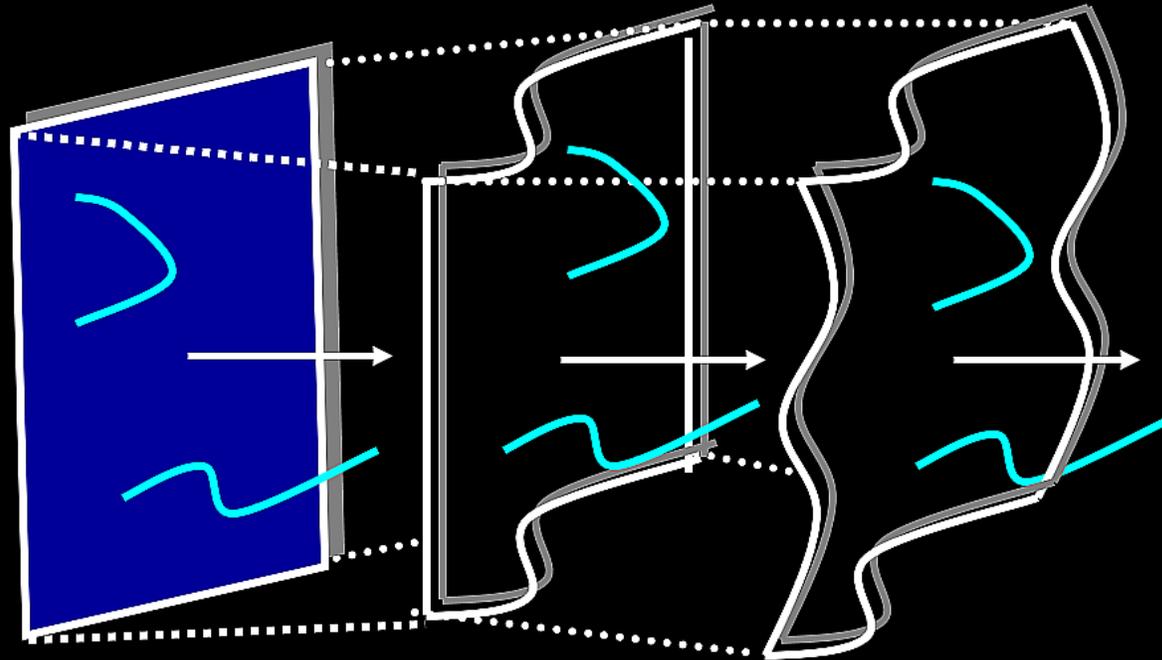
È possibile che la forza di gravità ci appaia così debole perché in realtà il nostro spazio è multi-dimensionale?



# p-brane

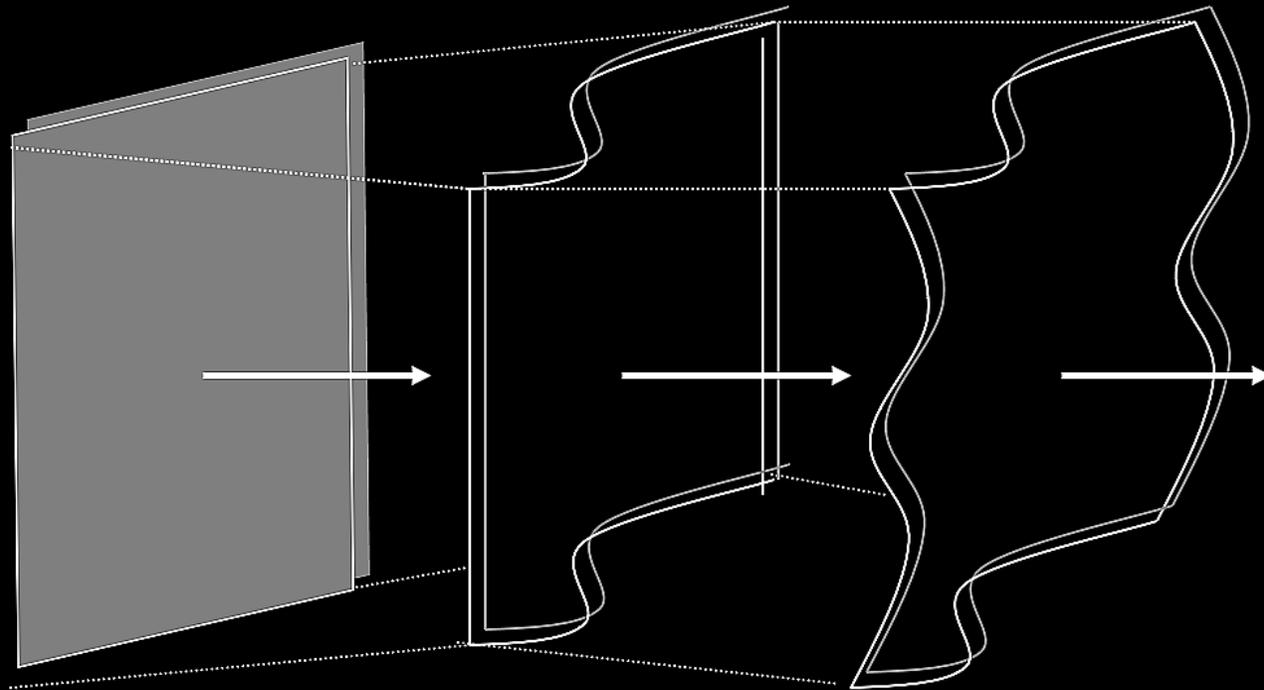
oggetti estesi p-dimensionali

(1990-95)



Le  $D_p$ -brane sono definite come le superfici a cui si attaccano gli estremi delle stringhe aperte.

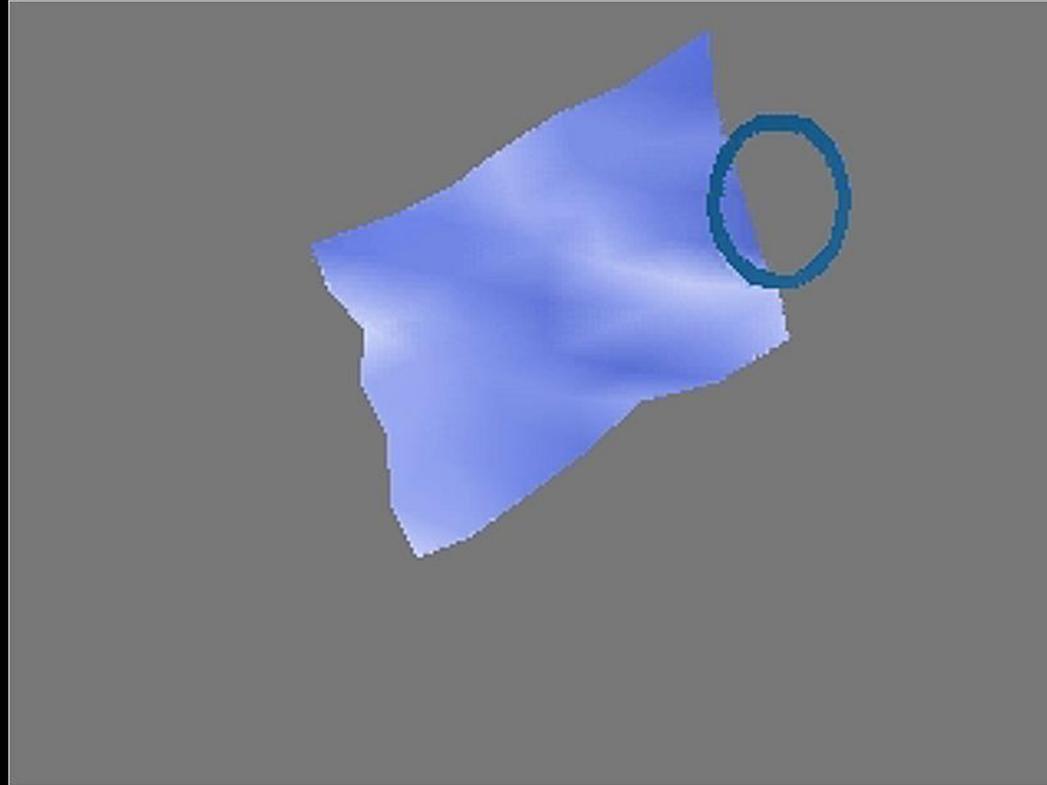
La Teoria delle Stringhe contiene oggetti  
estesi di tutte le dimensioni  $0 \leq p \leq 9$



Le **p-brane** si  
muovono nello  
spazio a 10  
dimensioni e  
descrivono  
delle superfici  
di mondo **p+1**  
dimensionali

**Ad esempio una 2-brana evolve nel tempo e spazza  
una 3-superficie**

La Teoria delle Stringhe contiene oggetti estesi di tutte le dimensioni  $0 \leq p \leq 9$



Le **p-brane** si muovono nello spazio a 10 dimensioni e descrivono delle superfici di mondo **p+1** dimensionali

**Alternativamente possiamo considerare le  $D_p$  brane come bordi dello spazio tempo a 10 dimensioni che assorbono (od emettono) stringhe chiuse**

# La Teoria delle Stringhe unifica tutte le interazioni con la gravità e quantizza la Relatività Generale

- Vediamo dunque le sue applicazioni alla Cosmologia in cui l'interazione dominante è quella gravitazionale
- Si tratta di studiare le possibili soluzioni della teoria efficace (= supergravità) che dipendono solo dalla coordinata temporale (= t)
- Qui c'è un interessantissimo interplay con la Teoria dei Gruppi
- Come sempre, la Teoria delle Stringhe incorpora tutte le strutture matematiche più profonde e le realizza in maniera essenziale.
- Le algebre di Lie eccezionali (serie E) sono naturalmente realizzate dalla Stringa come dualità e le soluzioni cosmologiche hanno una curiosa interpretazione come biliardi...! Il tavolo da biliardo è la sottoalgebra di Cartan....

Ad oggi (2025) la Teoria delle  
Stringhe non ha avuto alcuna  
dimostrazione sperimentale