

Il mondo e le dimensioni

Gianfranco Pradisi



Universita' di Roma "Tor Vergata"
INFN Sezione di Roma "Tor Vergata"



Caffe' Scienza
Assaggi Science Bookshop

Roma, 14 febbraio 2012



Galileo

Il libro dell'Universo

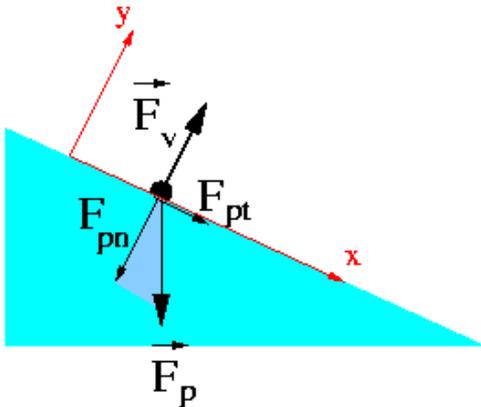
"ci sta aperto innanzi a gli occhi [...], ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua **matematica**, e i caratteri son **triangoli, cerchi ed altre figure geometriche**, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro **laberinto...**"

La fisica: atto di umiltà'...

Il metodo scientifico galileiano

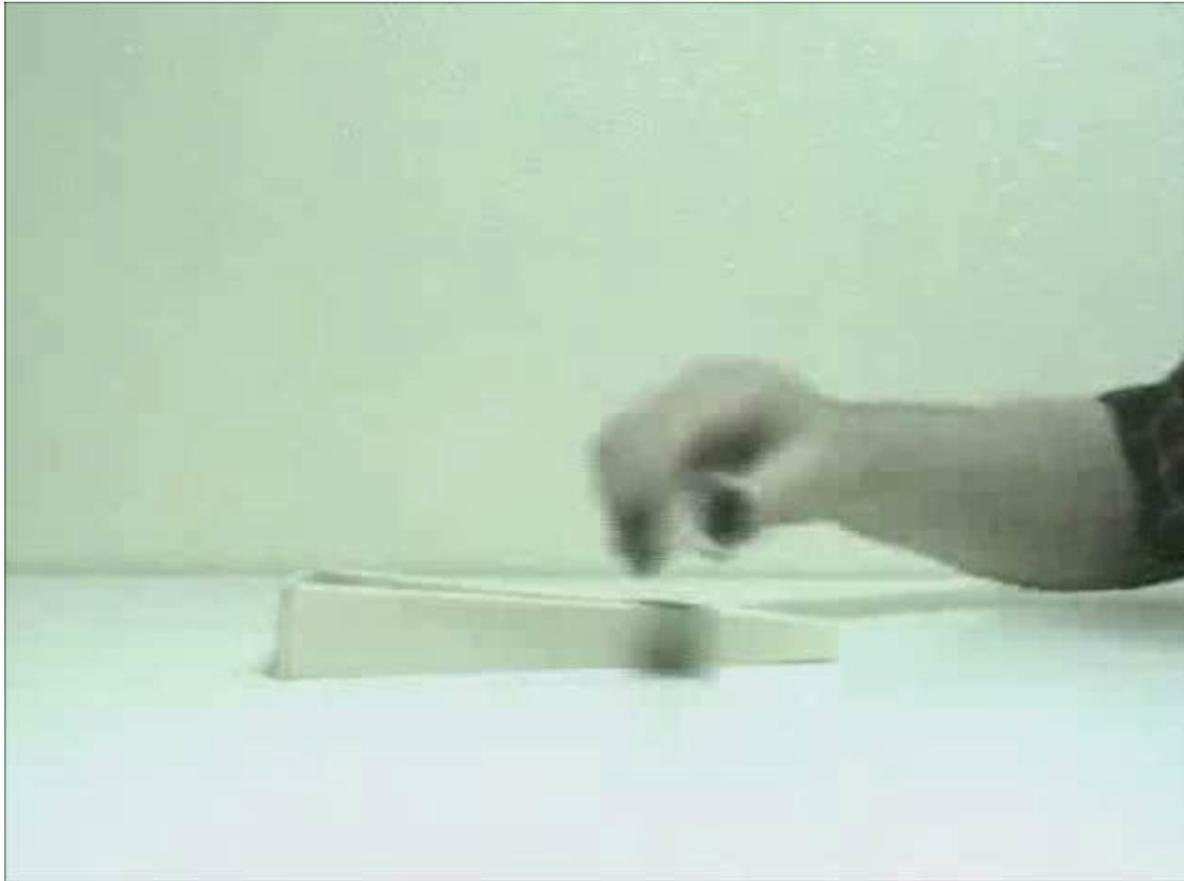


Collezionare dati da **esperimenti** in cui le quantità fisiche siano controllate e formulare **modelli** che ne diano conto.



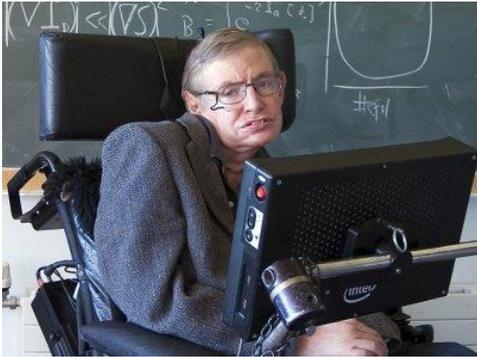
Un **modello** predice nuovi fenomeni e va bene finché non viene contraddetto. Nel qual caso va eliminato o modificato opportunamente.

Il modello spiega e poi predice.



...ma oggi c'e' un cambio di prospettiva: modelli in attesa di dati sperimentali

...o l'esplorazione della "mente di Dio"?



Steven Hawking

"...se però perverremo a scoprire una **teoria completa**, essa dovrebbe essere col tempo comprensibile a tutti nei suoi principi generali, e non solo a pochi scienziati. Noi tutti – filosofi, scienziati e gente comune – dovremmo allora essere in grado di partecipare alla discussione del problema del **perché noi e l'universo esistiamo**. Se riusciremo a trovare la risposta a questa domanda, decreteremo il trionfo definitivo della ragione umana: giacché allora conosceremo la **mente di Dio**."

...o l'esplorazione della "mente di Dio"?

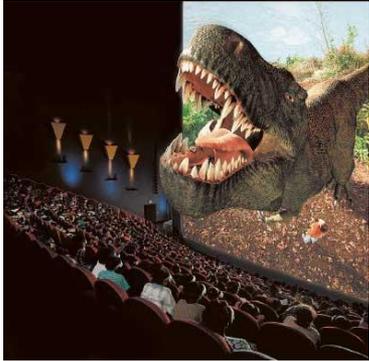


- Fino a che punto la Natura e' veramente "matematizzabile"?
- Ambizione: puo' tutta la fisica essere "spiegata" (in linea di principio) utilizzando pochi oggetti fondamentali ("elementari") e poche leggi fondamentali (al limite una sola!!!)?
- Ci sono indicazioni (speculazioni teoriche) che inducono a pensare che ad energie e densita' molto elevate (quindi ad esempio in situazioni proprie dell'Universo Primordiale) possa esistere un'unica forma di materia ed un'unica forza fondamentale.
- Sfida o illusione? La ricerca di una "Teoria del Tutto" potrebbe essere la meta. Ma bisogna essere **MOLTO MOLTO CAUTI!!!**

Cosa ha a che fare tutto questo con le Dimensioni?

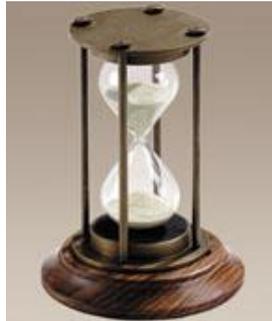
Il senso comune: la percezione dello spazio (e del tempo)

Lo Spazio



e' tridimensionale

Il tempo



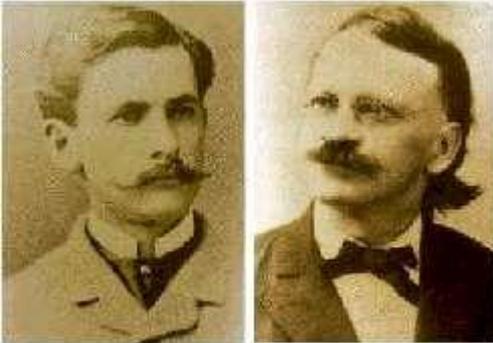
e' "assoluto" e rigido: scorre (in una direzione)
e' lo stesso per tutti in ogni luogo

E' veramente cosi'?



G. Pradisi - Dimensioni

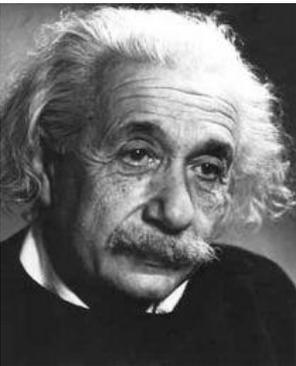
NO!!! Relativita' e tempo



A.A. Michelson
1852 - 1931

E.W. Morley
1838 - 1923

Esperienza di Michelson-Morley
(1887)



Teoria della Relativita' Speciale
(1905)

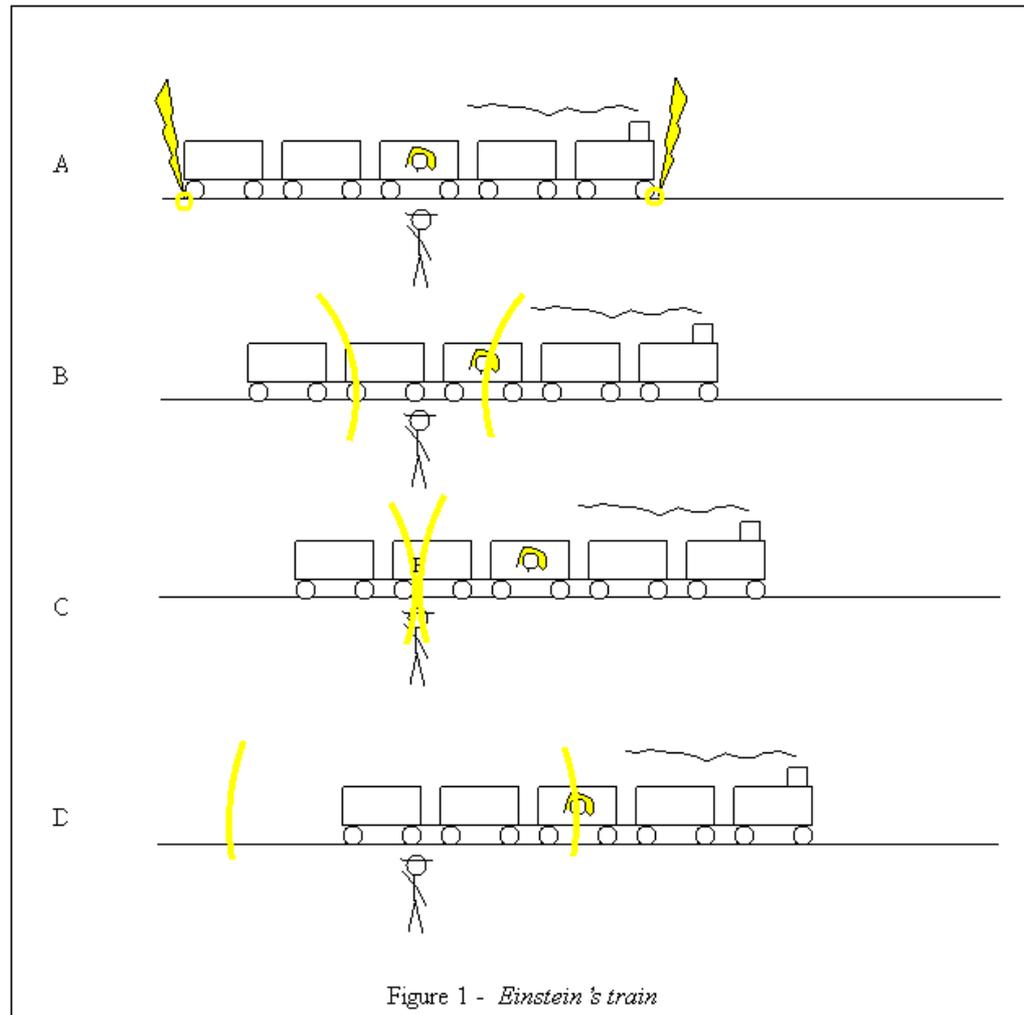
La velocita' della luce e' costante ed e' una barriera insuperabile. ($c=300000$ km/s)
La luce NON si sposta a velocita' diverse a seconda del punto di vista



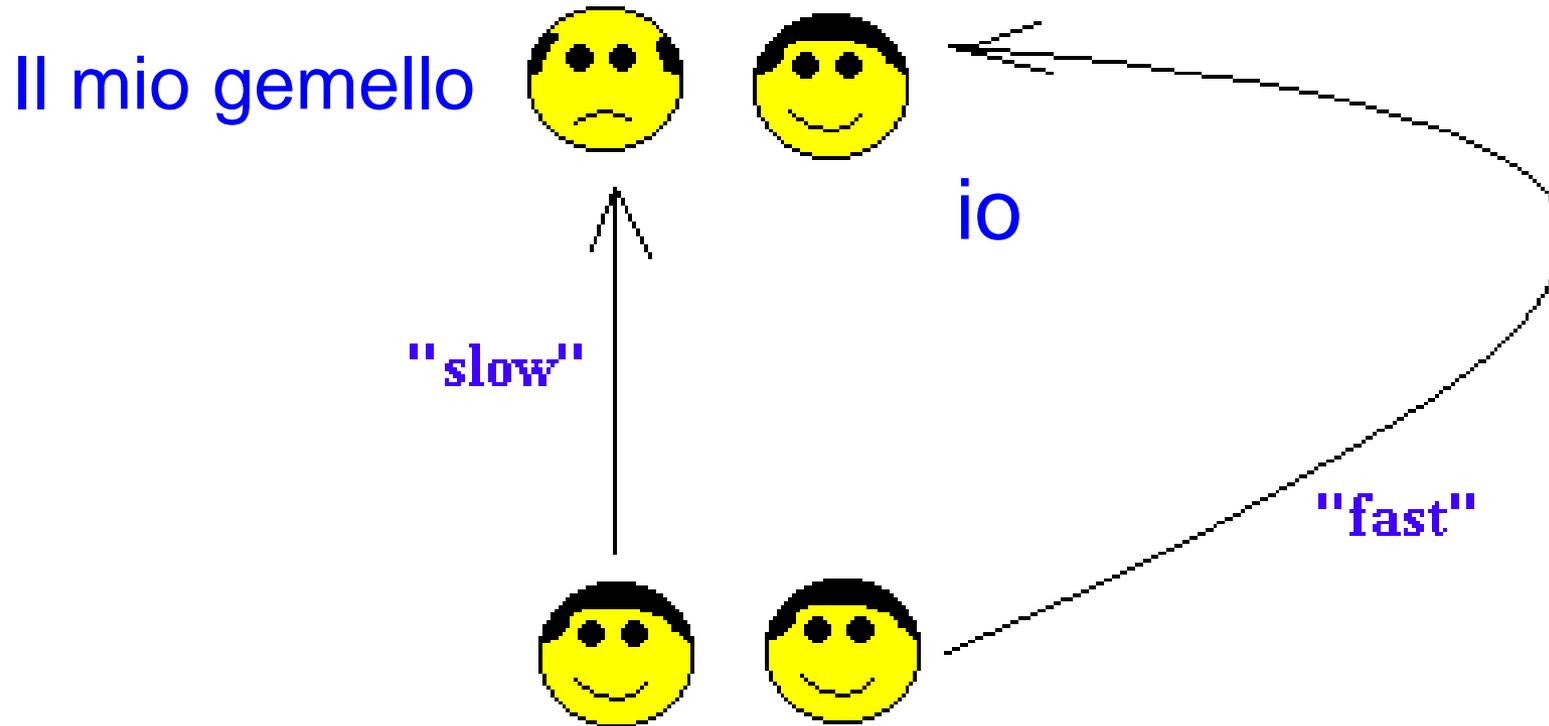
Conseguenze

Il tempo e' relativo: ogni evento va specificato nello spazio e nel tempo.
Ogni osservatore percepisce il tempo in modo diverso

Relativita' della simultaneita'



Paradosso dei gemelli





Lo spazio-tempo di Minkowski



1907

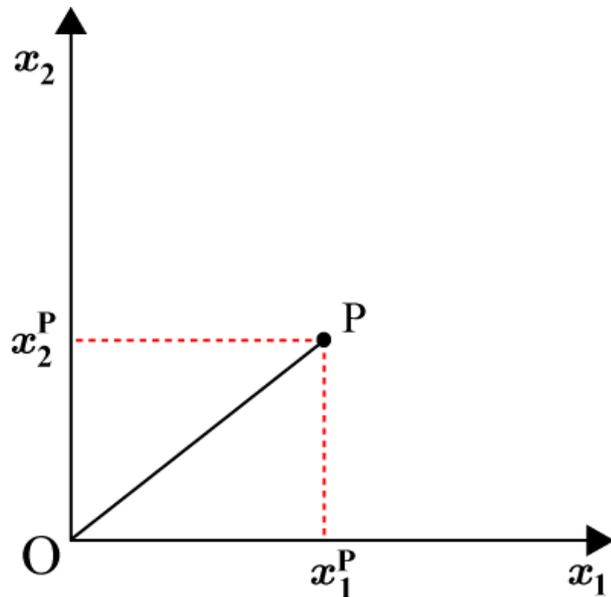
"I concetti di spazio e di tempo che desidero esporvi traggono origine dal terreno della fisica sperimentale, e in ciò risiede la loro forza. Sono radicali. D'ora in avanti lo spazio singolarmente inteso, ed il tempo singolarmente inteso, sono destinati a svanire in nient'altro che ombre, e solo una connessione dei due potrà preservare una realtà indipendente."

Lo spazio-tempo di Minkowski



Il tempo e' una quarta dimensione (per la precisione $ct=x_0$).
Una dimensione "strana"

Spazio Euclideo 2-dimensionale



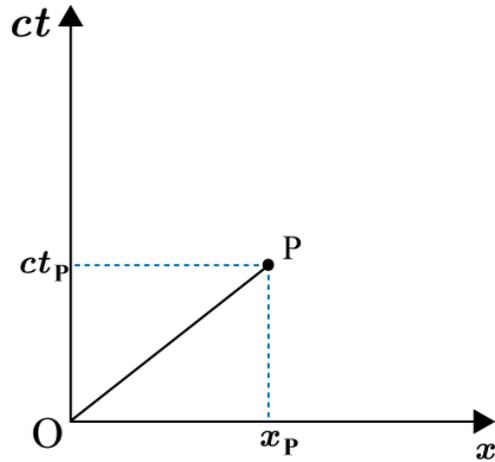
$$\overline{OP} = d(O, P) = \sqrt{(x_1^P)^2 + (x_2^P)^2}$$

$$d^2(O, P) = \ell^2 = \sum_{i,j=1}^2 \delta_{ij} x_i^P x_j^P$$

$$\delta = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Metrica euclidea

Lo spazio-tempo di Minkowski



$$\overline{OP} = \sqrt{(x_1^P)^2 + (x_2^P)^2}$$

$$\overline{OP} = d(O, P) = \sqrt{(ct^P)^2 - (x^P)^2}$$

↙ ↘
Segno opposto

$$s^2 = \sum_{i,j=0}^1 \eta_{ij} y_i^P y_j^P \quad \begin{cases} y_0^P = ct_P \\ y_1^P = x_P \end{cases}$$

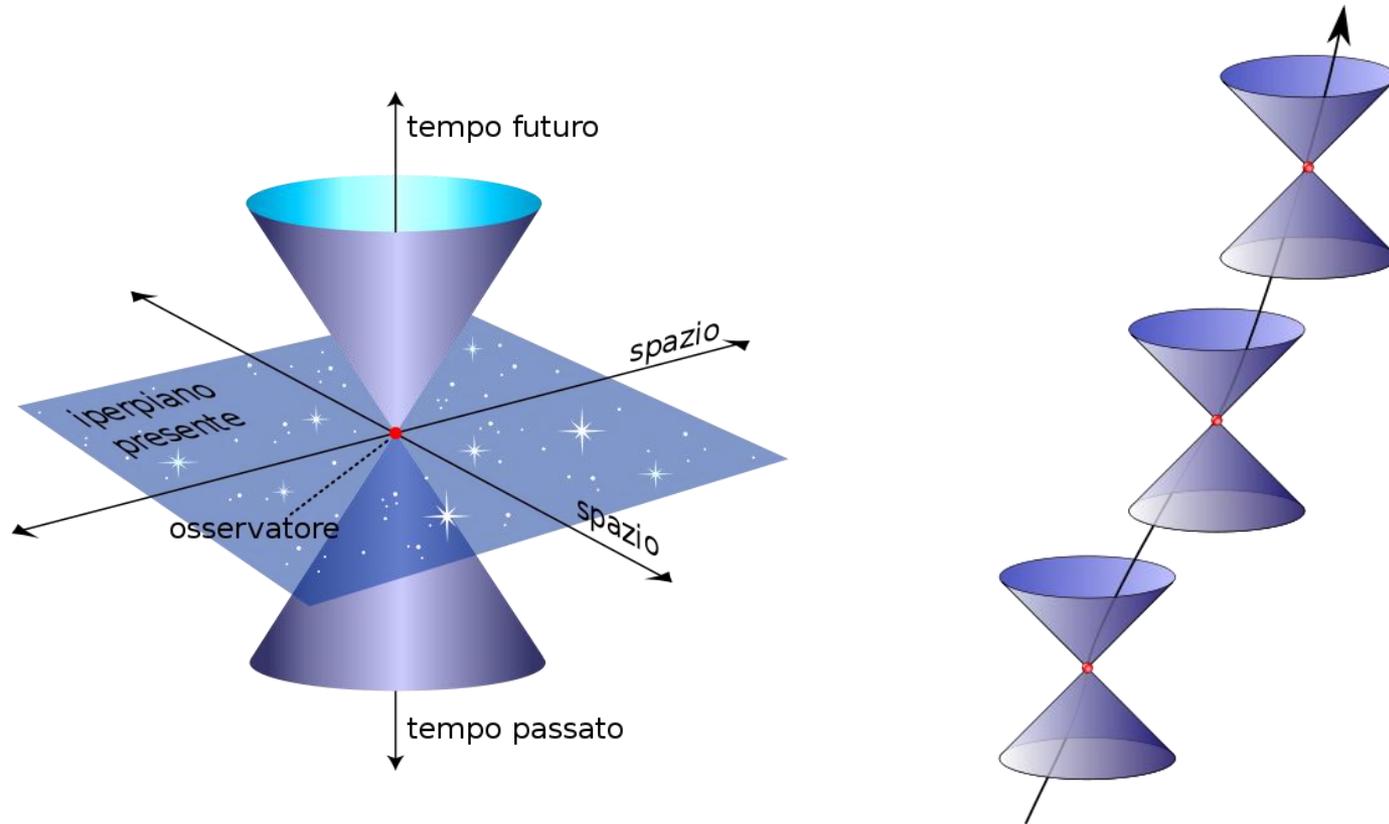
$$\eta = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

**Metrica di Minkowski
(pseudo-euclidea)**

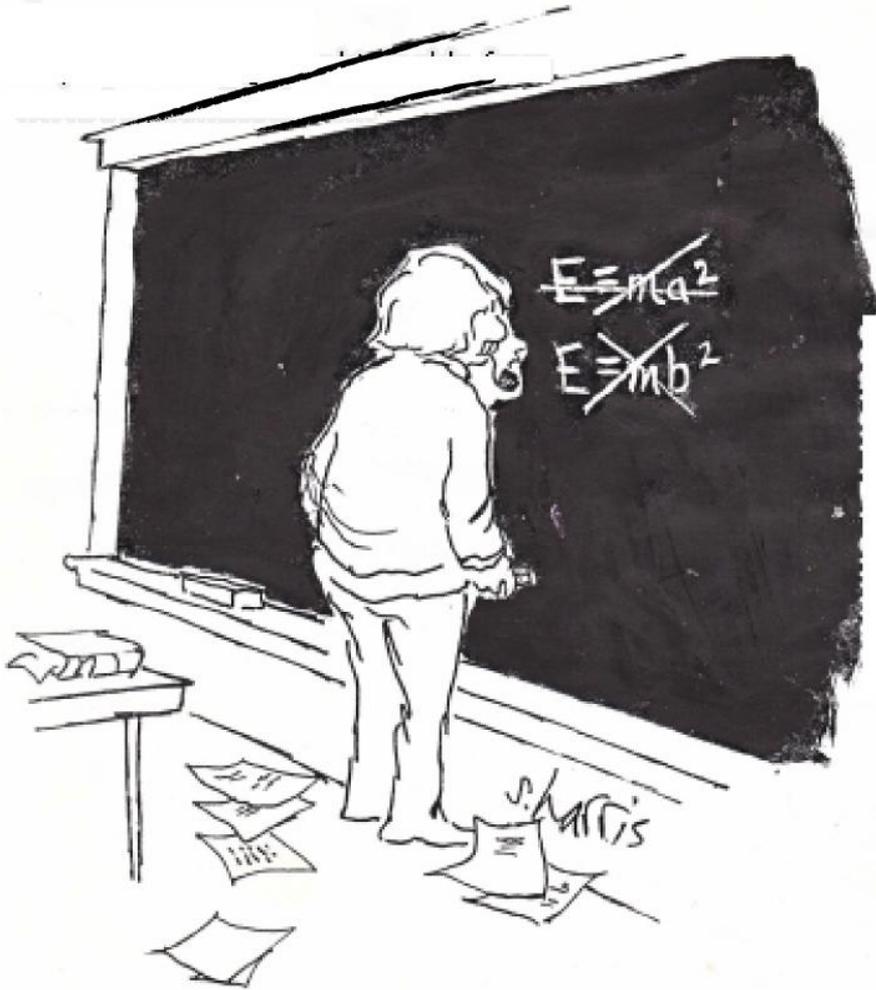
$$(y_2 = ict_P)$$

$$\eta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

La struttura causale dello spazio-tempo

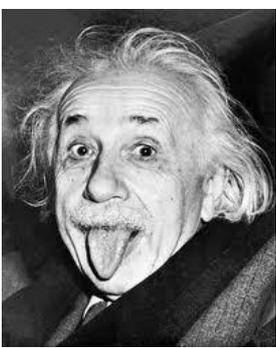


Altre conseguenze



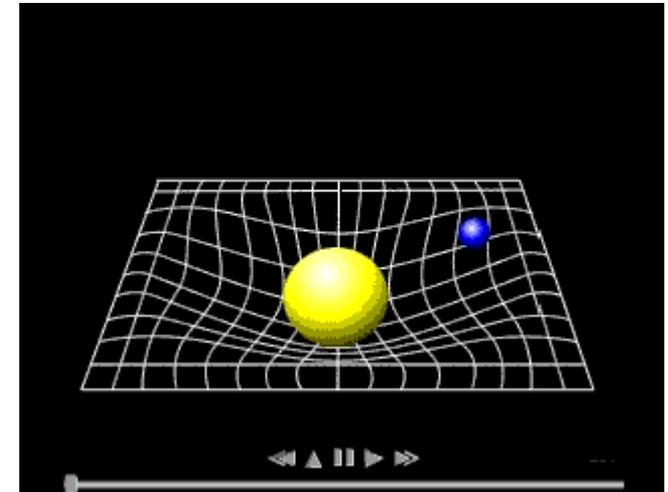
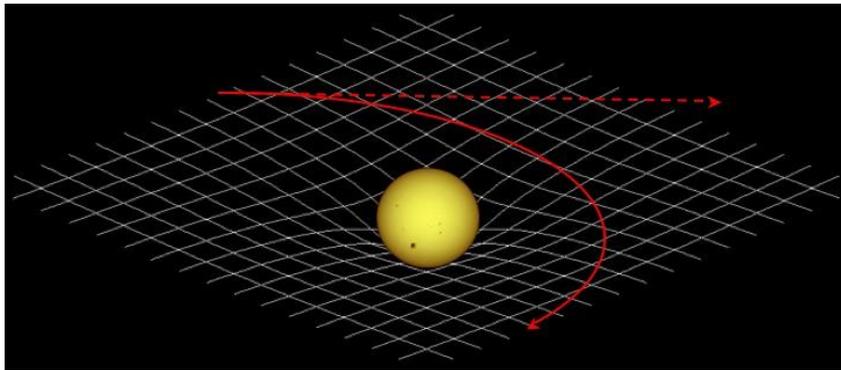
$$E = mc^2$$

Le particelle **massive** non possono viaggiare a **c**
Le particelle a **m=0** sono costrette a viaggiare a **c**



Relativita' Generale

La gravità Newtoniana agisce “istantaneamente”. Incompatibile con le innovazioni di Einstein. La fisica non puo' dipendere dal riferimento.



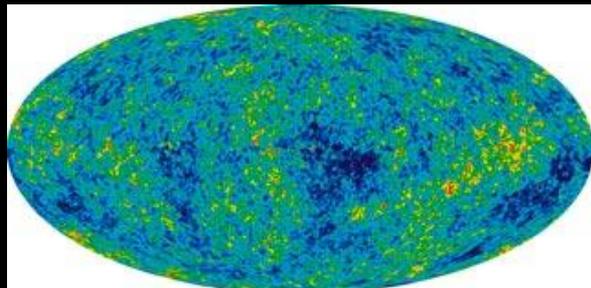
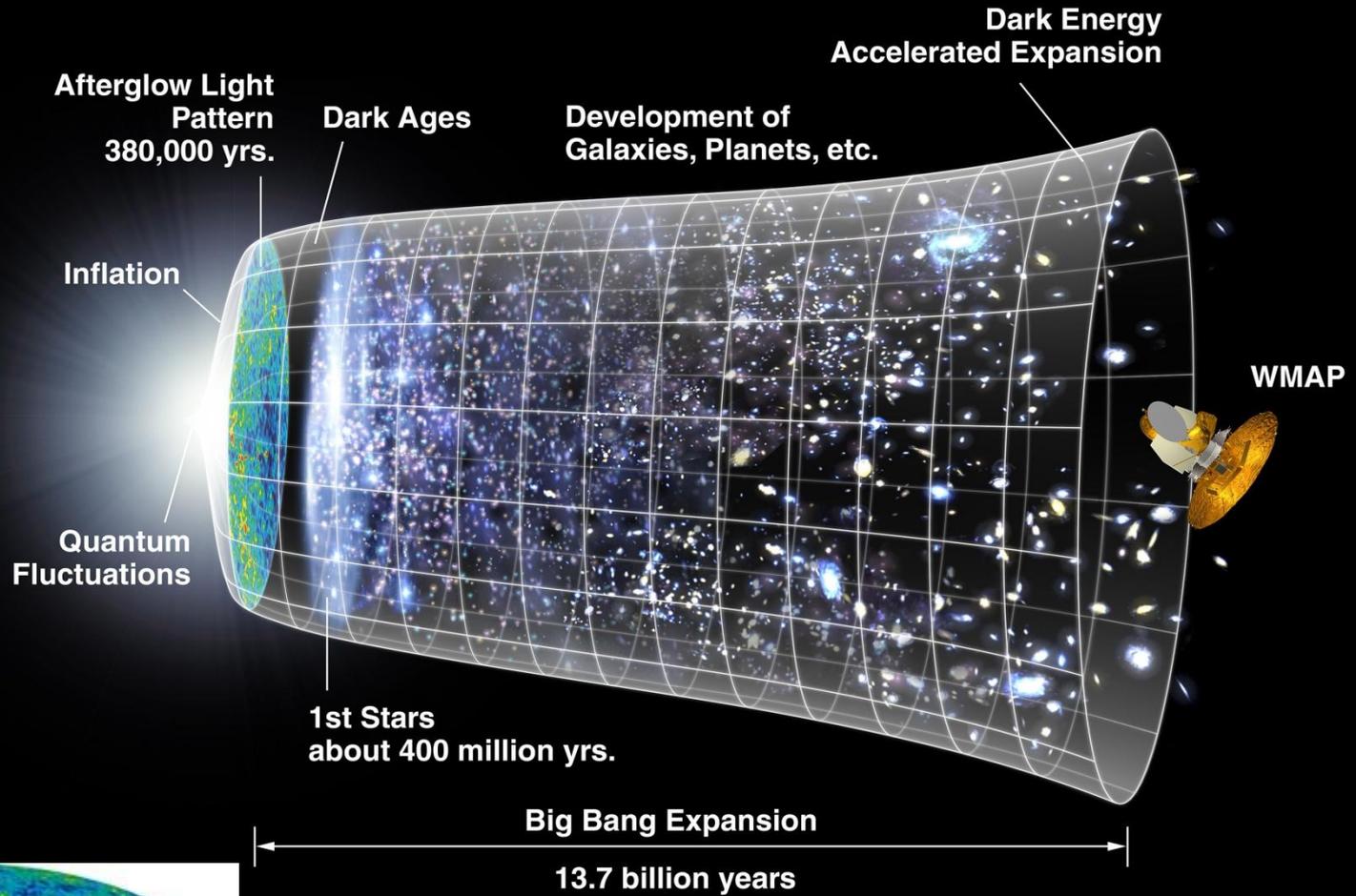
$$\eta_{ij} \rightarrow g_{ij}$$

Equivalenza tra accelerazione e gravita'. La materia distorce la geometria dello spazio-tempo, che e' descritto da una varietà Pseudo-riemanniana quadridimensionale.

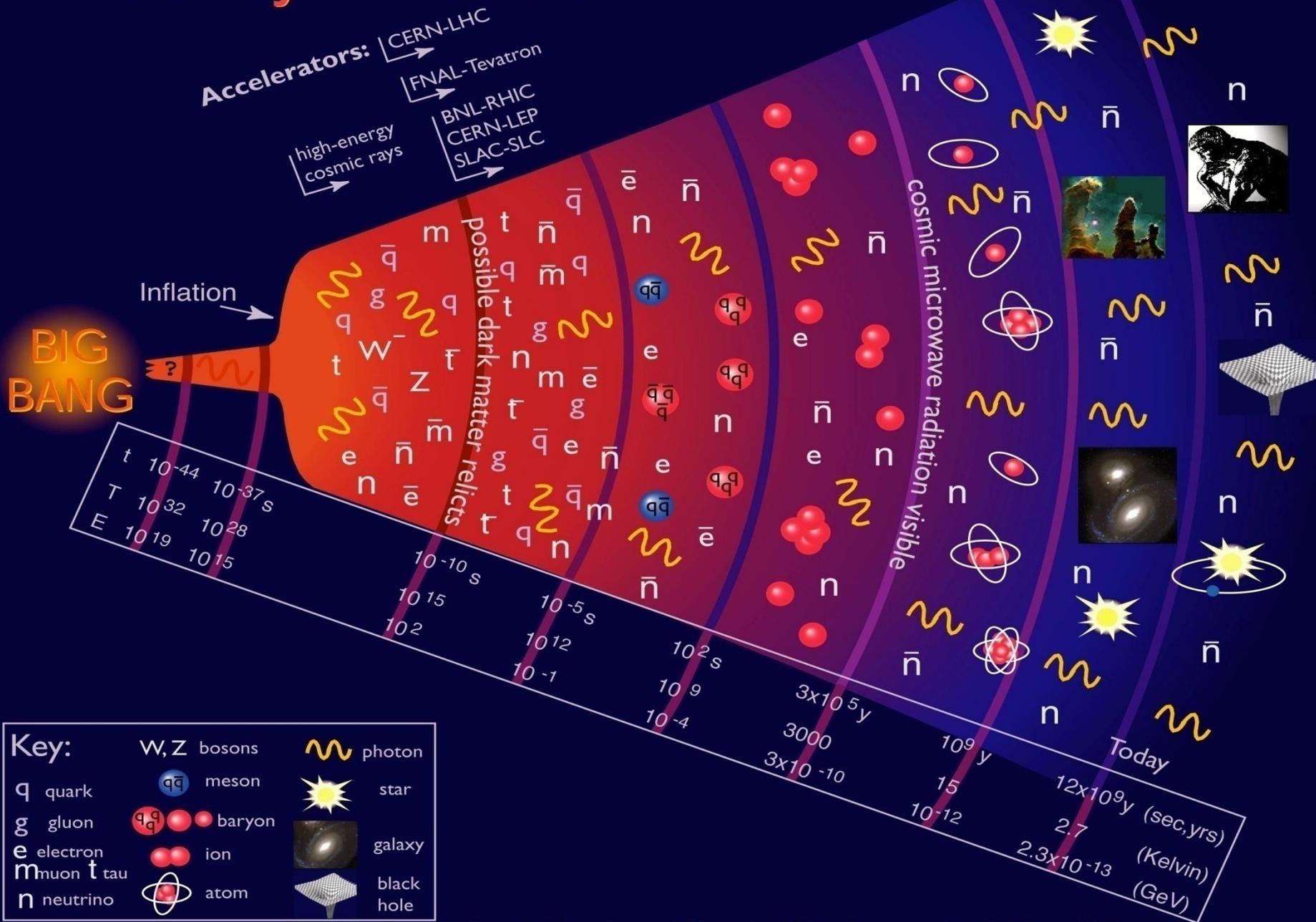
Le traiettorie “curvilinee” dei punti materiali per effetto della gravita' sono in realta' dovute alla distorsione dello spazio-tempo.

La gravità e' trasmessa da un campo che si propaga alla velocità della luce.

L'universo ed il "modello Standard cosmologico"



History of the Universe



Interazioni fondamentali: il Modello Standard delle particelle



Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm weak force

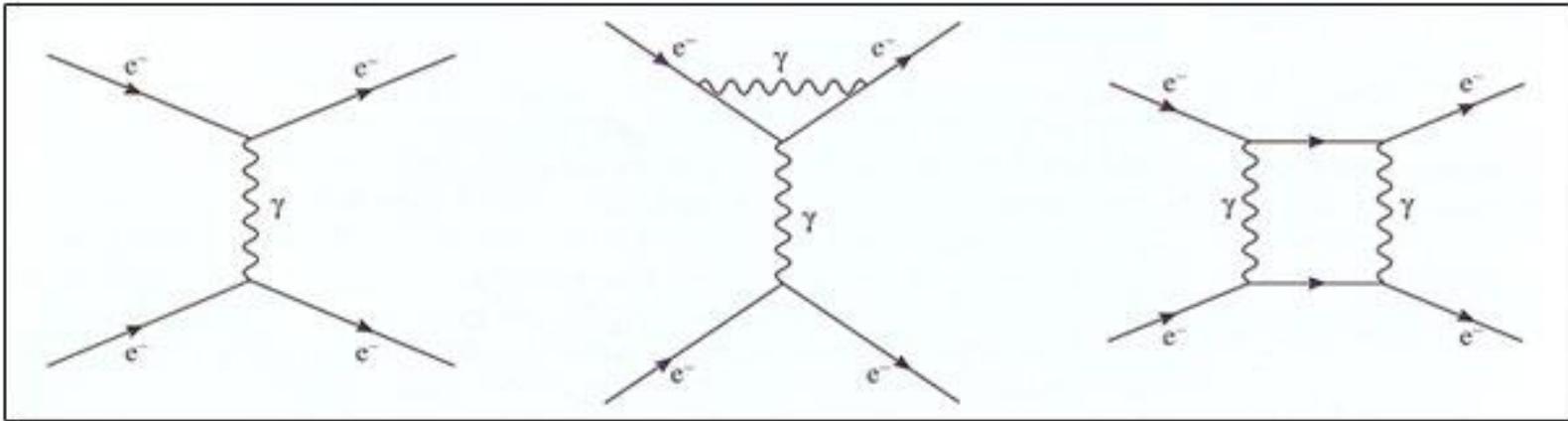
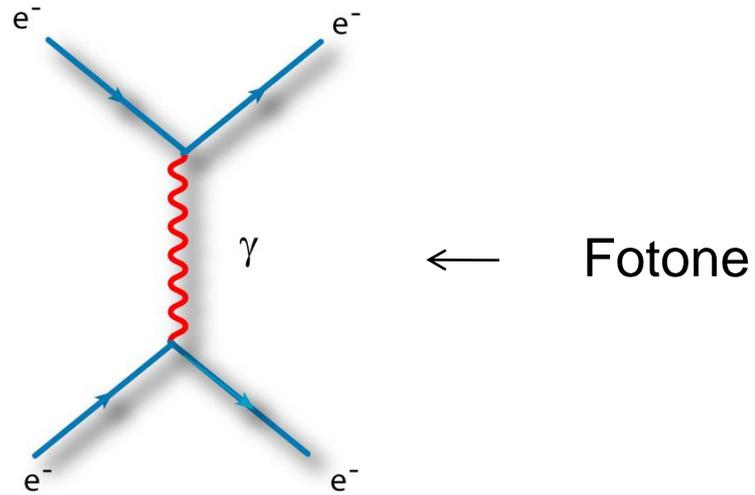
Bosons (Forces) (+Higgs)

Meccanica Quantistica + Relativita' speciale: Teoria Quantistica dei campi
 Principio: Simmetrie di gauge. Interazioni: elettromagnetica,debole,forte.

Principio di indeterminazione: una nuova costante \hbar $\left([\hbar] = \left[\frac{ML^2}{T} \right] \right)$

Funziona bene a scale microscopiche

Descrizione matematica: Grafici di Feynman



G. Pradisi - Dimensioni

E la gravita'?

$$\frac{e^2}{4\pi\hbar c} \sim \frac{1}{137}$$

$$\frac{G_N M^2}{4\pi\hbar c} \sim 4.6 \cdot 10^{-40}$$

M = massa protone
~ 1 GeV

Quanto=gravitone (spin 2). Trascurabile nella fisica delle particelle.

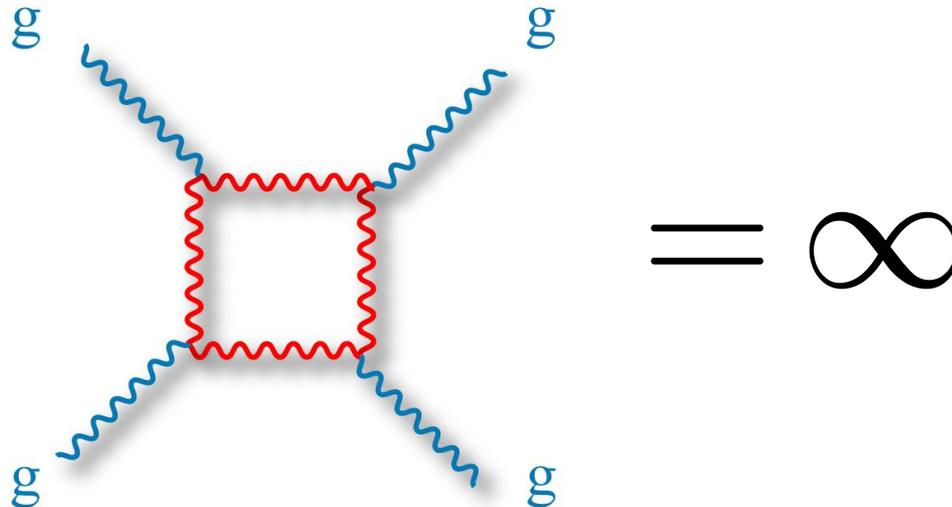
Diviene dello stesso ordine se $(M^2 c^4 = E^2)$

$$\frac{G_N E^2}{4\pi\hbar c^5} \sim 1$$

ovvero

$$E \sim E_{Planck} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G_N}} = 10^{19} GeV$$

PURTROPPO...

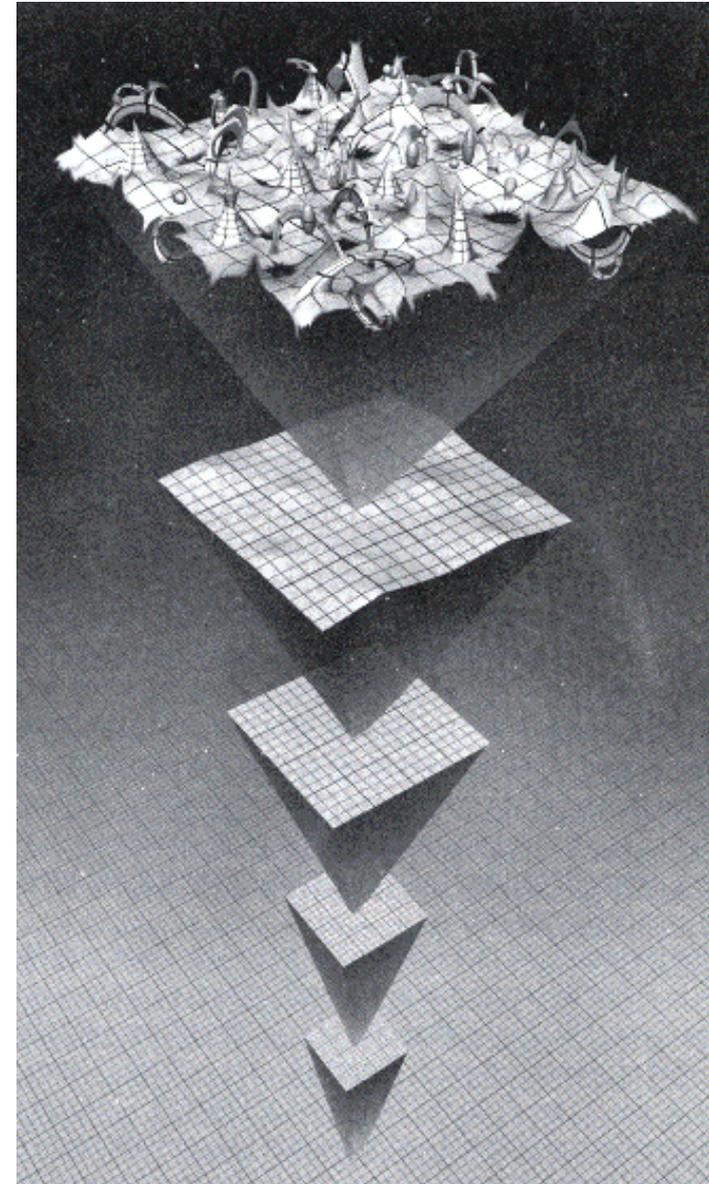
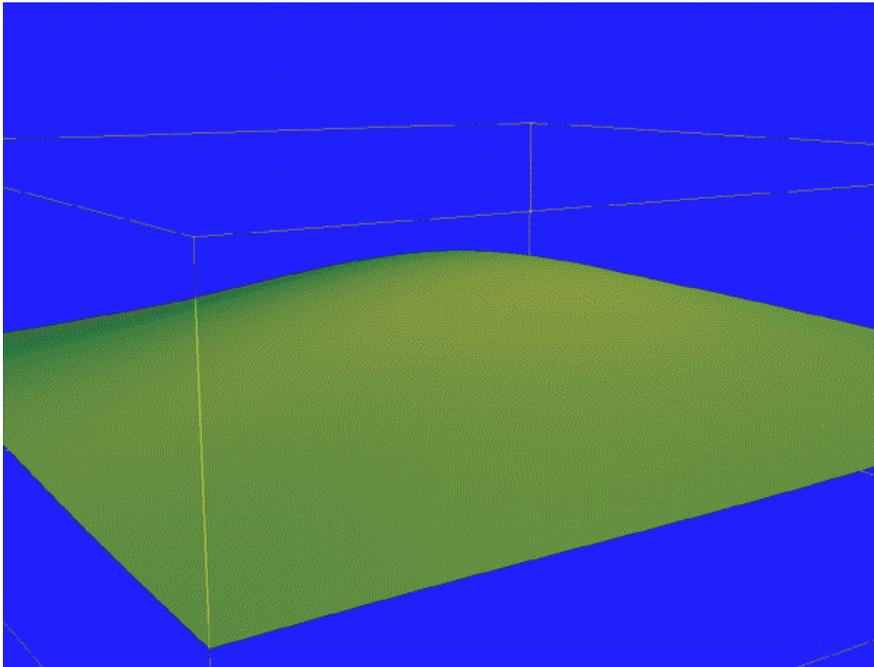


Conflitto!!!

- RG:
- funziona bene su larga scala
 - deterministica
 - geometrica

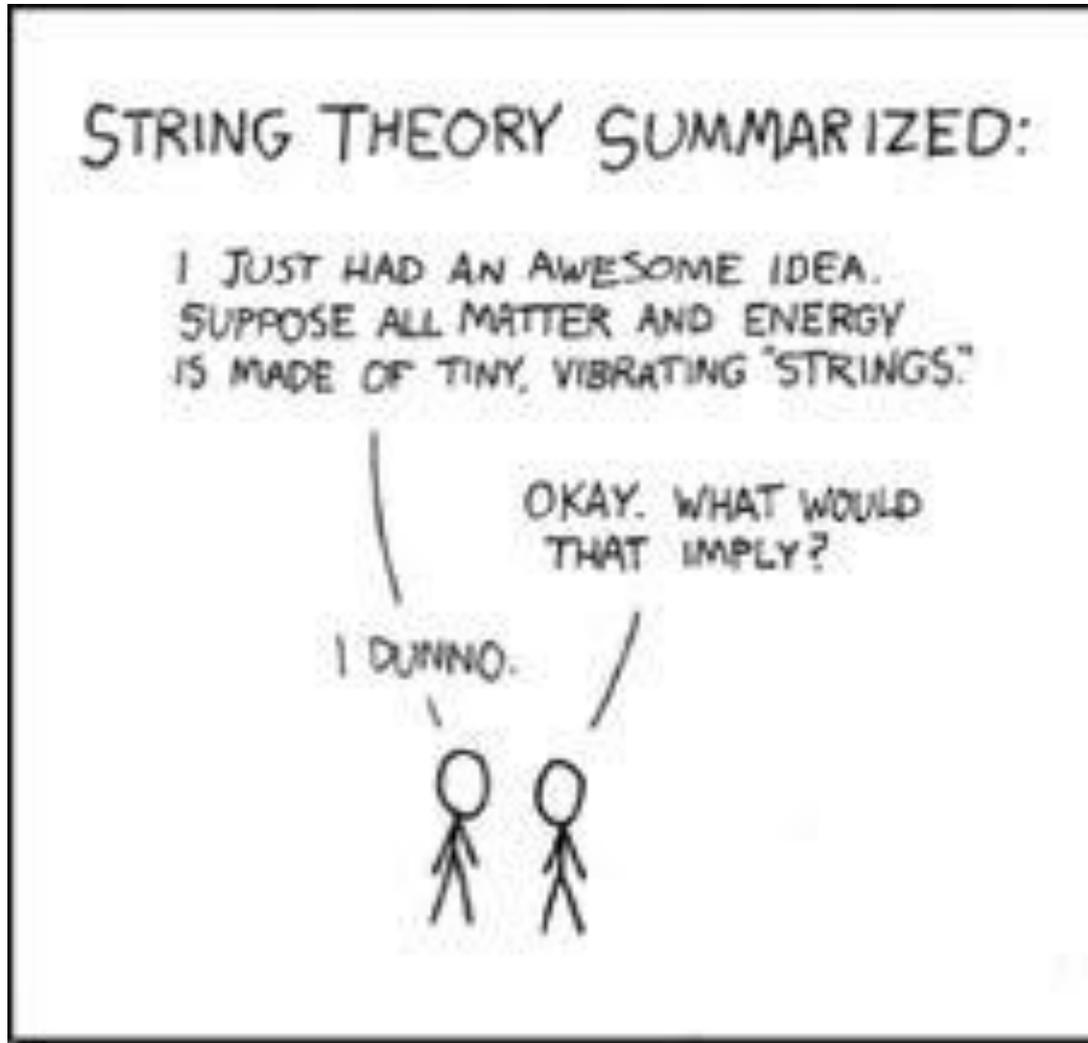
- MQ:
- funziona bene su piccola scala
 - probabilistica (principio d'indeterminazione)

Fluttuazioni Quantistiche

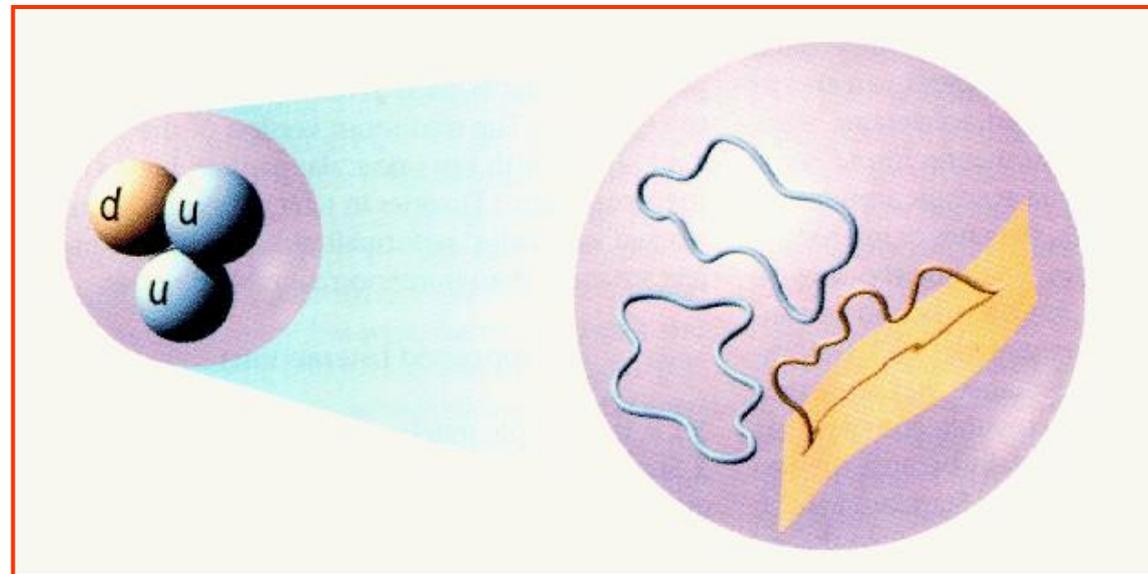
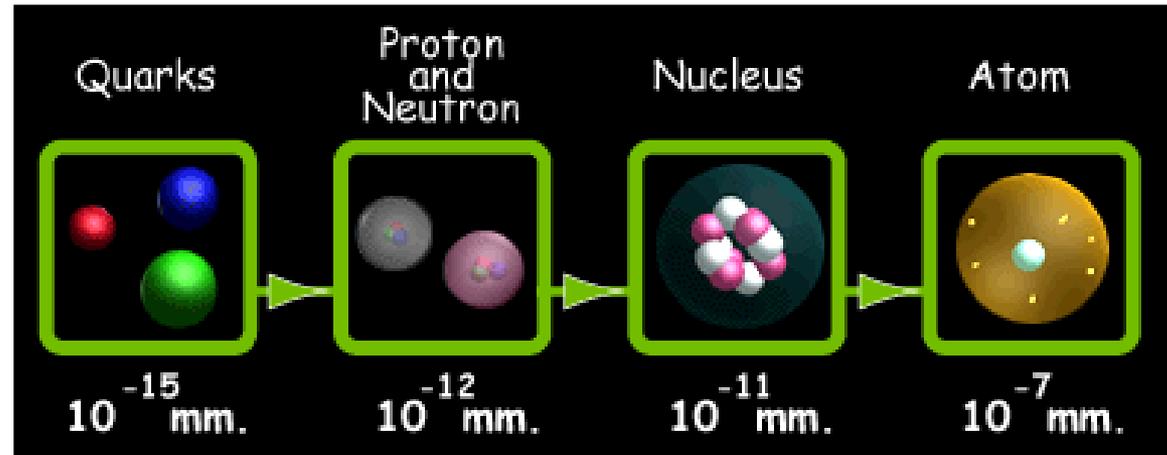
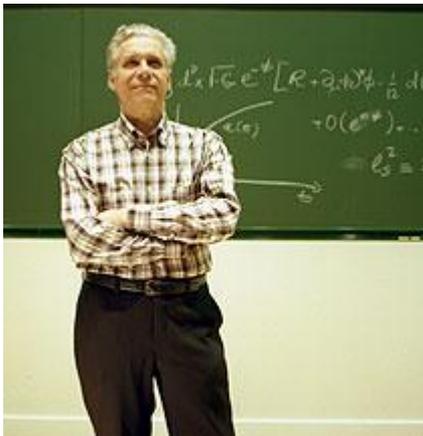


Ripensare i costituenti fondamentali: Le Teorie di Stringhe

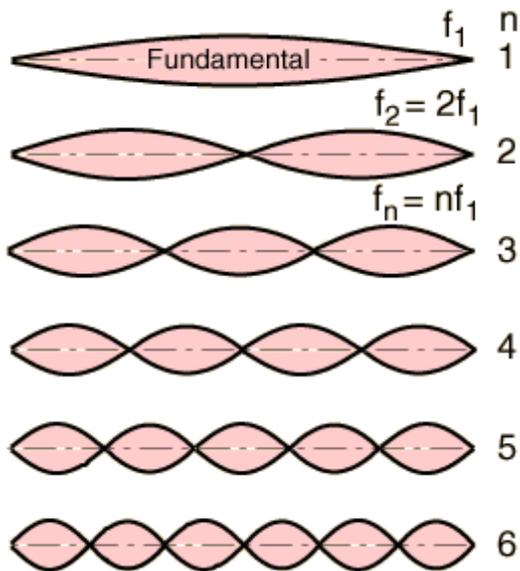
Conciliano RG e MQ (QFT)



L'ipotesi



Stringhe in una trasparenza

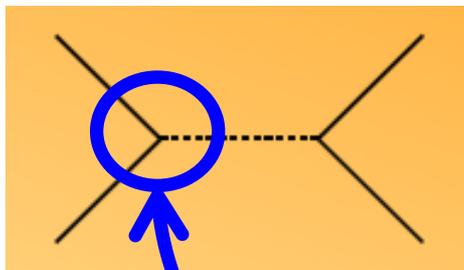


Diversi modi di vibrazione = diverse particelle

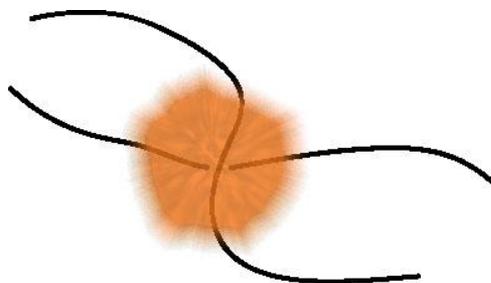
Gravitone (non osservato) sempre presente

QM= massa nulla (massa=tensione)

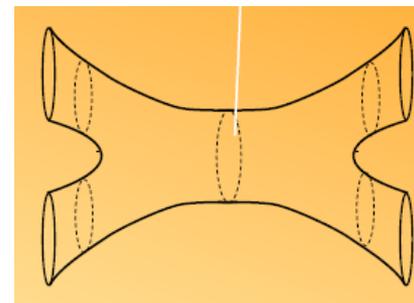
Scala di stringa ?



particelle



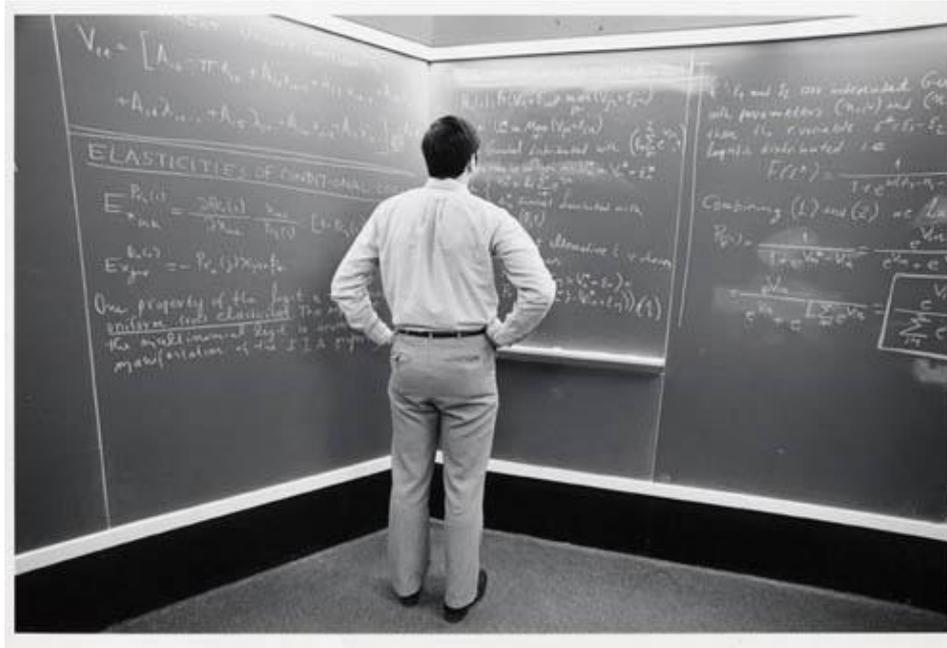
stringhe



G. Pradisi - Dimensioni

$$\frac{G_N E^2}{4\pi \hbar c^5} \cdot \frac{\hbar c}{E^2 l_s^2} \sim \frac{G_N \hbar}{c^3 l_s^2}$$

MA...



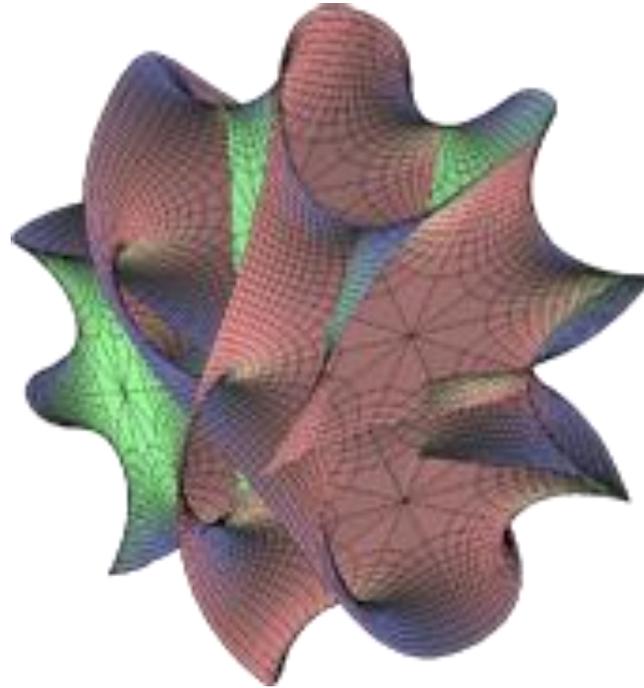
La consistenza matematica richiede uno spazio-tempo con $d=9+1$

6 dimensioni aggiuntive...

FINE PRIMA PARTE

6 DIMENSIONI EXTRA

Forma: Varieta' di Calabi-Yau

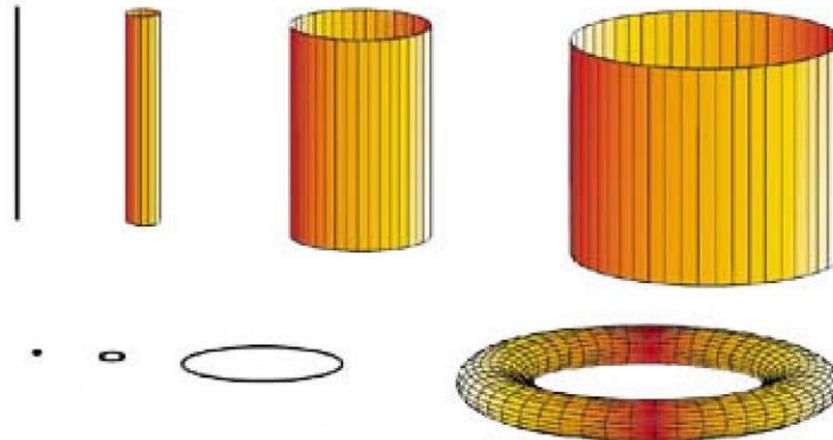


Le proprieta' **fisiche** delle particelle dipendono dai parametri geometrici delle varieta' interne compatte

DOVE SONO LE DIMENSIONI EXTRA?



L'idea di Kaluza e Klein (1919)



distanza

Kaluza Klein



Alcune manifestazioni della fisica in 4 dimensioni possono derivare da oggetti in dimensione piu' alta

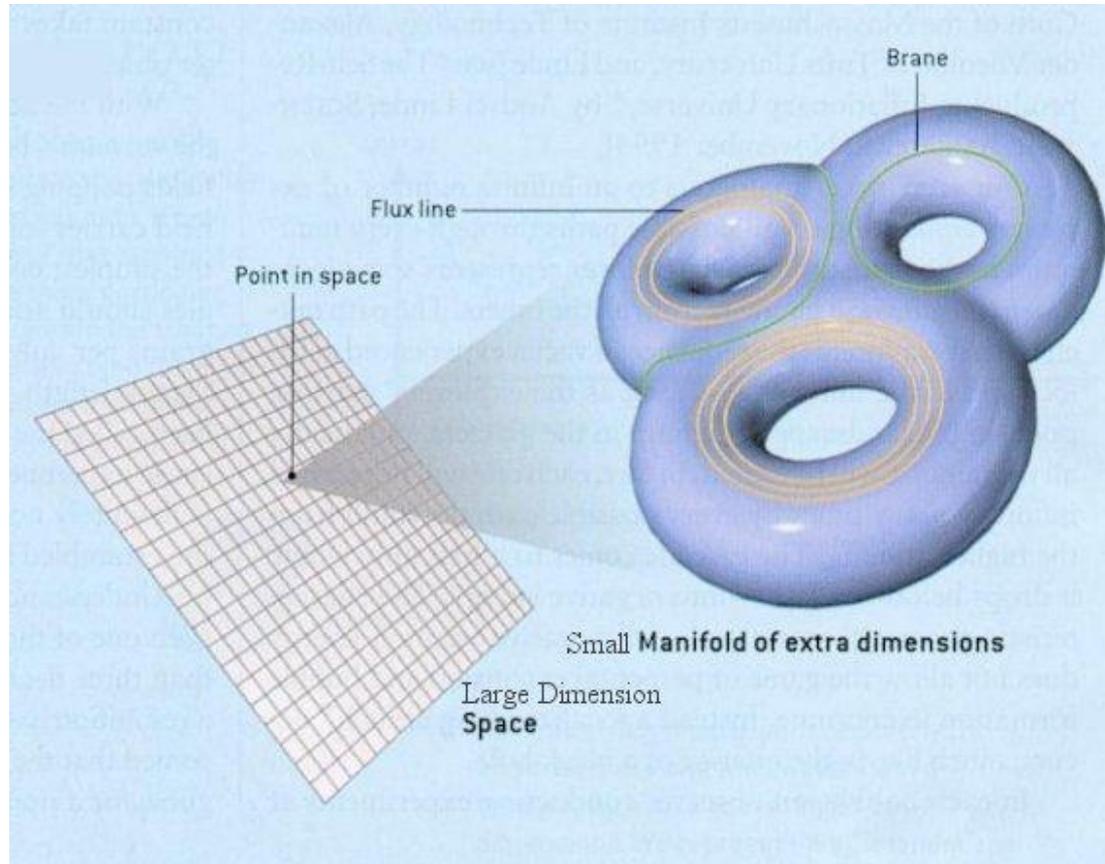
$$g_{MN} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} & g_{15} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} & g_{25} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} & g_{35} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} & g_{45} \\ g_{51} & g_{52} & g_{53} & g_{54} & g_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} & A_1 \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} & A_2 \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} & A_3 \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} & A_4 \\ \hline A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & \varphi \end{pmatrix}$$

$$g_{i5} = g_{5i} = A_i$$

$$g_{55} = \varphi \quad (\text{Scalare di KK})$$

(Campo elettromagnetico)

Dimensioni extra



- Quanto sono grandi?
- Si possono vedere? Come?

Dimensione delle dimensioni

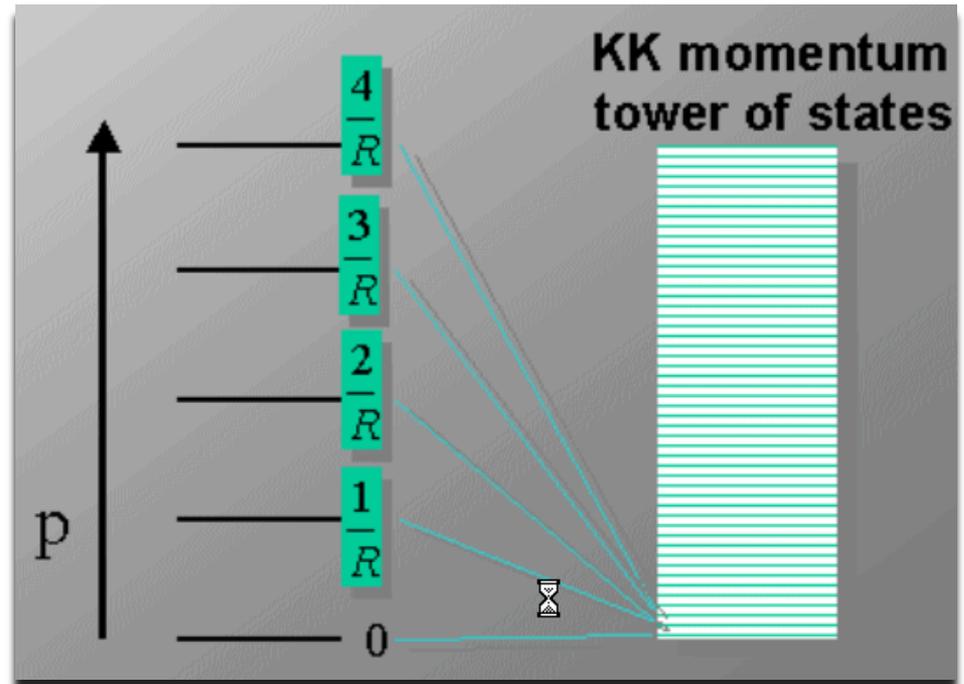
Scala naturale: stati di Kaluza-Klein della stringa

$$p = \frac{n}{R}$$

$$m^2 = m_0^2 + \frac{n^2}{R^2}$$

$$\frac{1}{R} \sim M_{planck} \sim 10^{19} GeV$$

$$R \sim L_{planck} \sim 10^{-33} cm$$



$$\frac{Stringa}{Quark} \sim \frac{Atomo}{Terra}$$

Stringa

G. Pradisi - Dimensioni

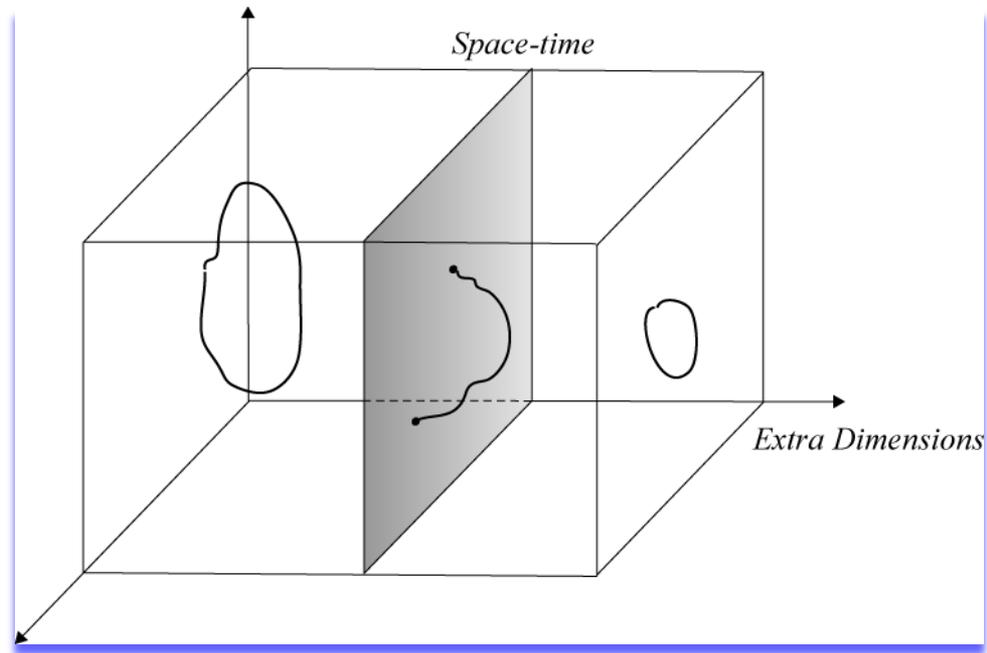
Come cercarle?

- Deviazioni di leggi valide in $d=4$ (ex. Legge di Newton)
- Nuovi fenomeni a $d=4$
(ex. Nuove particelle prodotte o presenti come stati intermedi)

**Si puo' abbassare la scala di Planck?
Scenario naturale: Stringhe di Tipo I (Orientifolds)**



Un esempio: brane world scenario



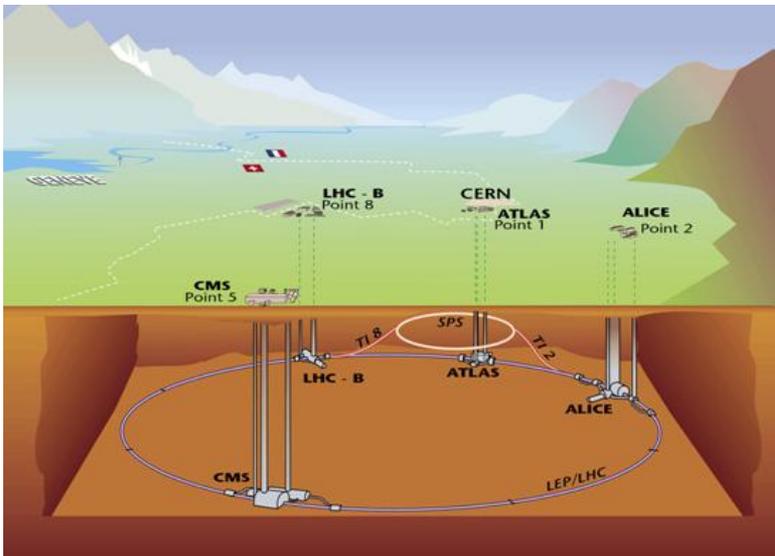
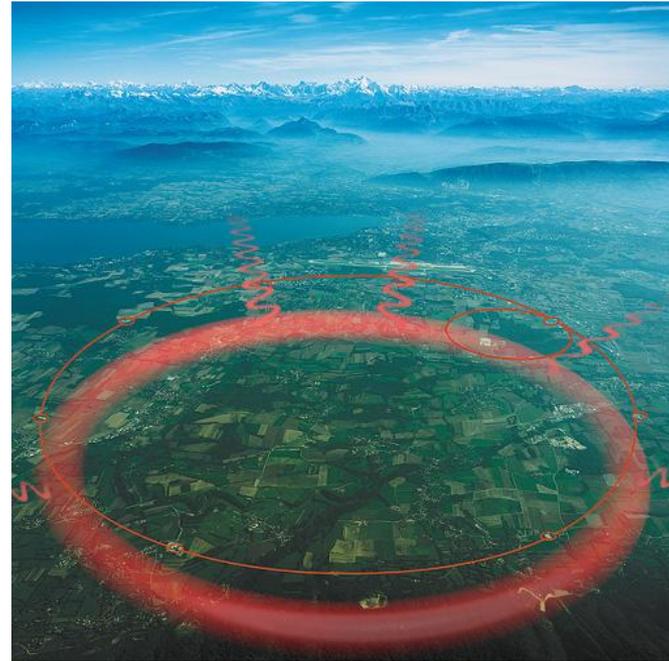
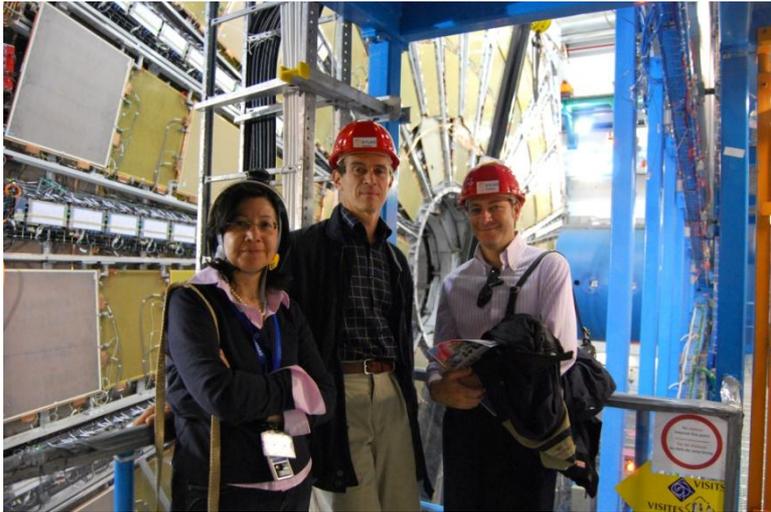
La gravita' e' l'unica forza che "sente" le extra-dimensioni (diluizione)

Dimensioni extra compatibili con la legge di Newton in

$d=4$: $L \sim \text{mm}$ $M_{\text{stringa}} \sim \text{TeV}$

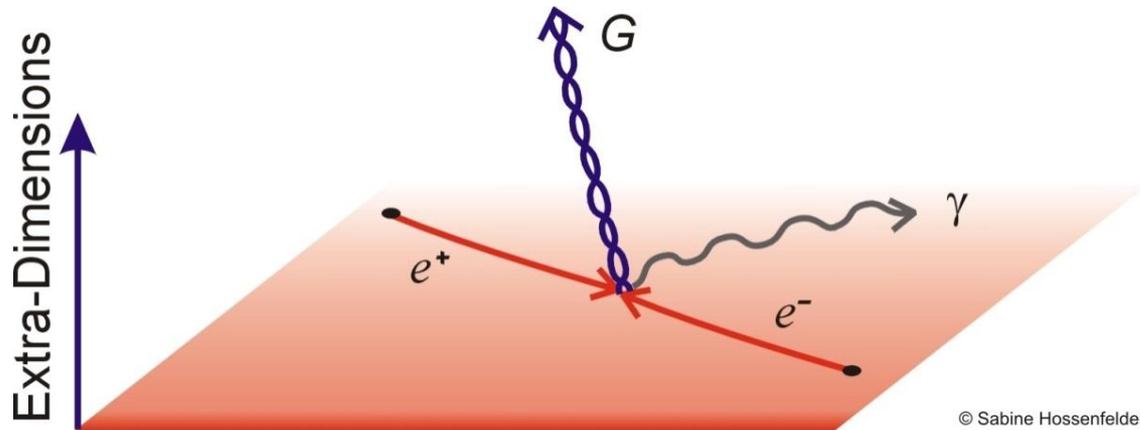
G. Pradisi - Dimensioni

Verso LHC e oltre...



Forse si possono vedere ad LHC!!!

Verso LHC (e oltre...)



© Sabine Hossenfelder