

# *Tentativi di Unificazione delle Interazioni Fondamentali*

*Augusto SAGNOTTI  
Scuola Normale Superiore, Pisa*

*San Miniato, 3 settembre 2006*

# Premessa

- *La Fisica (in linea di principio) e' un'impresa UMILE:*

*"Collezionare dati, analizzarli, e costruire teorie per dar conto delle loro regolarita'"*

- *MA:*
  - *Nel corso degli ultimi 4 secoli si e' andati oltre, e una parte dei fisici si sono dedicati a studiare la Natura ad un livello piu' profondo. L'idea che essi perseguono e' scoprire la "Teoria delle Interazioni Fondamentali"*

- *COME E' POTUTO AVVENIRE QUESTO CAMBIAMENTO?*
- *COSA SONO LE INTERAZIONI FONDAMENTALI?*
- *COME SI PUO' GIUNGERE ALLA LORO "TEORIA"?*

# Le origini

*Possiamo associarle con Galileo, riconosciuto come colui che ha stabilito le "regole del gioco"*

- *esperimenti per accumulare dati e cercare regolarita'*
- *dalle regolarita' costruire una "teoria" che ne da' conto*
- *verificare la "teoria" tentando di predire nuovi fenomeni:*
  - *se funziona ,va bene (fino a quando non verra' contraddetta)*
  - *se non funziona, va modificata (come, naturalmente, e' un'arte!)*

**Seconda legge di Newton :**

$$ma = \mathcal{F}$$

- **deterministica:** *predice il moto dei corpi*
- **(tempo assoluto)**

**Cosa e' una forza  $\mathcal{F}$ ?**

*"Cio' che causa un'accelerazione":  
(gravita', elettricita', forze elastiche, attrito, ....)*



# Forze

- *Forze "fenomenologiche": sufficienti per costruire dispositivi*
- *MA: quale e' l'origine della forza ? [importante anche per nuovi dispositivi !]*
- *Come trattare il problema, data la complessita' della Natura?*

*Alcune forze sono "migliori" (piu' fondamentali) di altre*

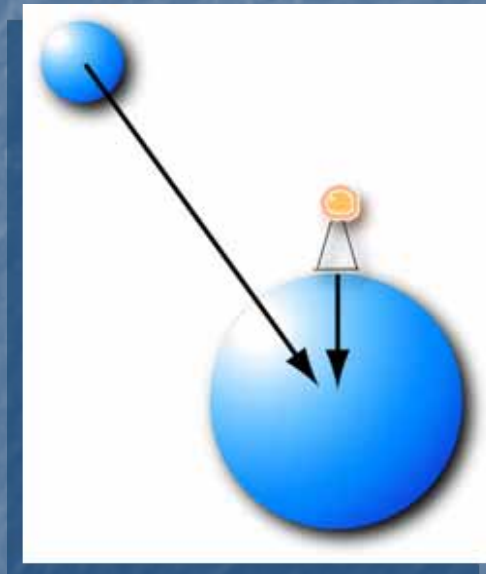
*ESEMPIO: caduta libera*

*Non esattamente :*

$$m\mathbf{a} = m\mathbf{g} = \gamma\mathbf{v}$$


# Alcune forze "migliori" di altre

- **IDEA:** l' "attrito" **NON E'** una forza fondamentale, la gravita' **SI**



$$|\mathbf{a}_{uomo}| = \frac{G_N M_T}{R_T^2}$$
$$|\mathbf{a}_{luna}| = \frac{G_N M_T}{R_{TL}^2}$$
$$|\mathbf{a}_{luna}| \sim \frac{1}{3600} |\mathbf{a}_{uomo}|$$

*Newton fu in grado di dar luogo ad una rivoluzione da questo:*

**UNIFICAZIONE DI GRAVITA' TERRESTRE E CELESTE**

# *Elettricità' e Magnetismo*

*Fenomeni che appaiono piu' complessi :*

## *1. Elettricità':*

- a) Materiali strofinati possono "dare la scossa" (le cariche si attraggono o si respingono in ragione dei loro segni)*
- b) Correnti elettriche*

## *2. Magnetismo:*

- a) Magneti permanenti*
- b) Correnti elettriche si attraggono o si respingono*

## *3. Induzione Elettromagnetica*

*TEORIA di MAXWELL: ELETTROMAGNETISMO*

$$(\mathbf{E}, \mathbf{B}) \rightarrow \begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{cases}$$

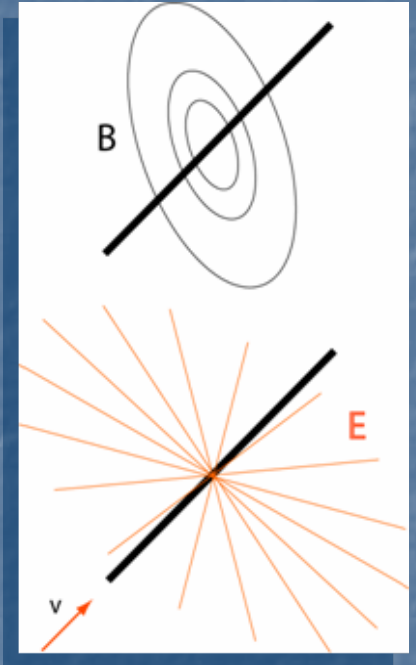


# Relativita' Speciale

- **E** e **B**: due aspetti dello stesso fenomeno:
  1. carica in moto attratta da corrente
  2. carica in quiete attratta da eccesso di carica

- Galileo (e Newton) :
$$x' = x - vt$$
$$t' = t$$

- Einstein: per MAXWELL si deve avere (con una velocita' limite,  $c$ !)



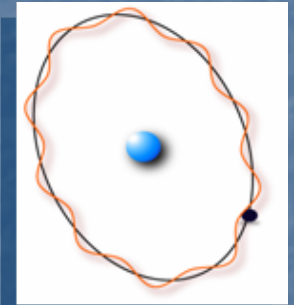
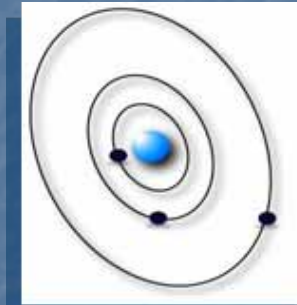
$$x' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (x - vt)$$
$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left( t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

**Unificazione di spazio e tempo !**

# Meccanica Quantistica

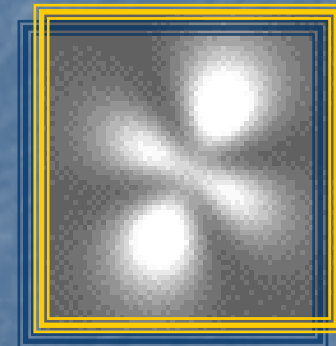
- *La teoria "classica" non spiega molti fenomeni :*

- *colore dei metalli caldi*
- *calori specifici dei solidi*
- *interazioni di luce ed elettroni*
- *stabilita' degli atomi*



- *Rimedio drastico: **MECCANICA QUANTISTICA***

$$P \sim |\psi|^2$$



- ***NO determinismo** (nella misura) : funzioni d'onda*
- ***natura duale** (onda-particella) per materia e radiazione*

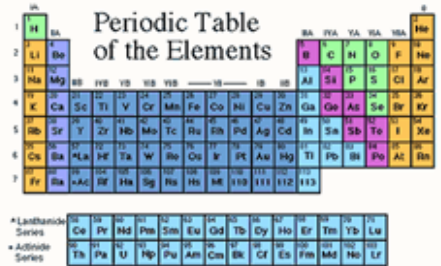
$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$



# Atomi e Nuclei

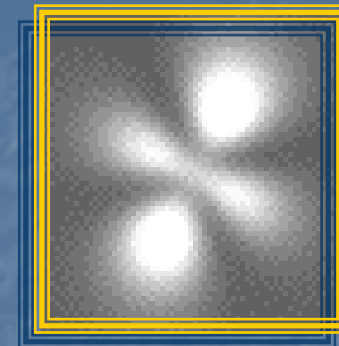
## Atomi :

- Elettroni, protoni (e neutroni)*
- "Tenuti insieme" da forze elettriche*
- "Orbite" stabili per onde stazionarie*
- Comprensione semi-quantitativa !*
- Tavola di Mendeleev*



Periodic Table of the Elements

\*Lanthanide Series  
\*Actinide Series

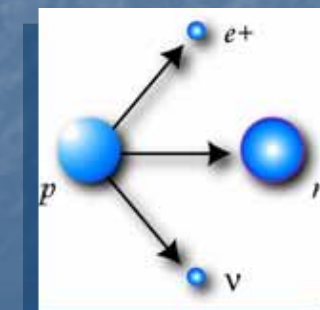
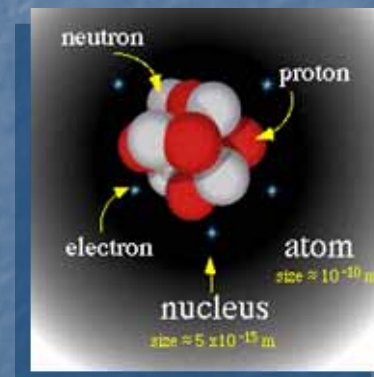


## Nuclei :

- Sistemi relativistici complicati*
- Comprensione qualitativa !*
- Nuovi tipi di (anti) particelle: (anti)neutrini*
- Nuove forze (corto raggio) :*

*Forte: tiene insieme i nuclei*

*Debole: puo' trasformarli (sole!)*

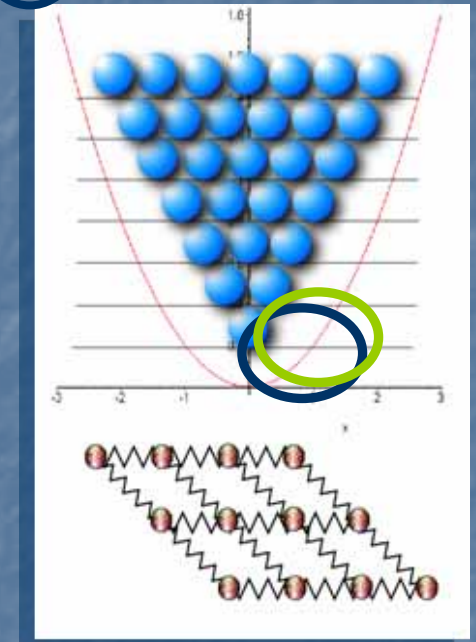


*M.Q + Relativita' → "forze" trasformano particelle*

# Particelle

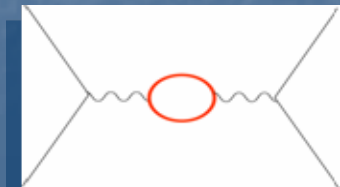
- **Nuclei:**
  - quali PARTICELLE contengono (o emettono)?
- **Particelle:**
  - anche anti-particelle
  - due tipi di particelle IDENTICHE:
    - a) **bosoni** (spin intero)
    - b) **fermioni** (spin semi-intero)
- **BASE:** M.Q + Relativita' Speciale

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$



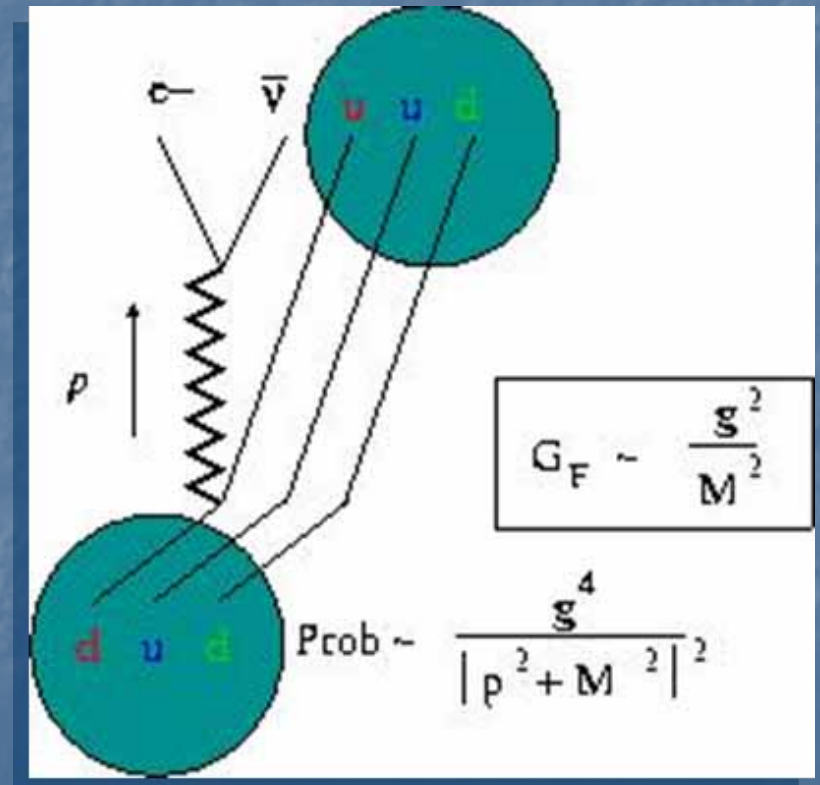
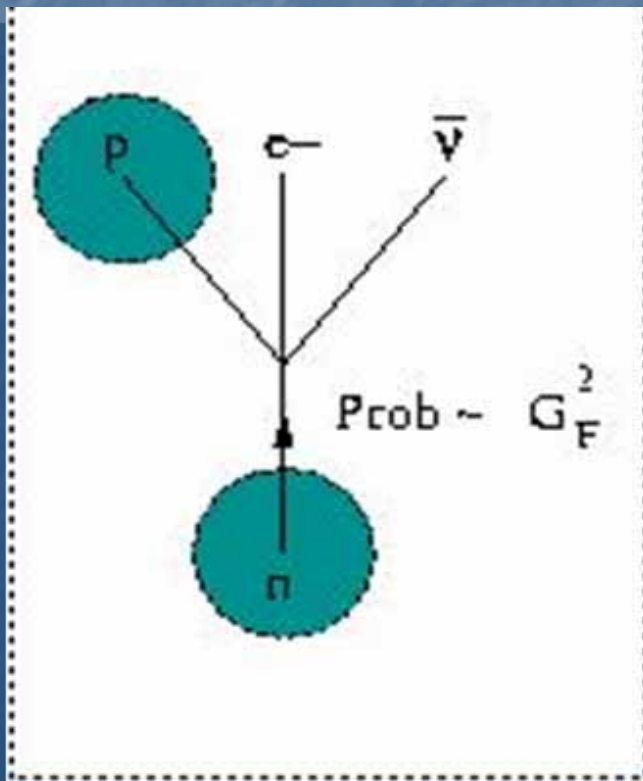
Particelle: "quanti" di campi d'onda

"Forze" → scambi di particelle



# Interazioni tra particelle

- *Particelle e interazioni: a volte in via indiretta!*  
(e.g. bosoni intermedi  $W$  e  $Z$ )



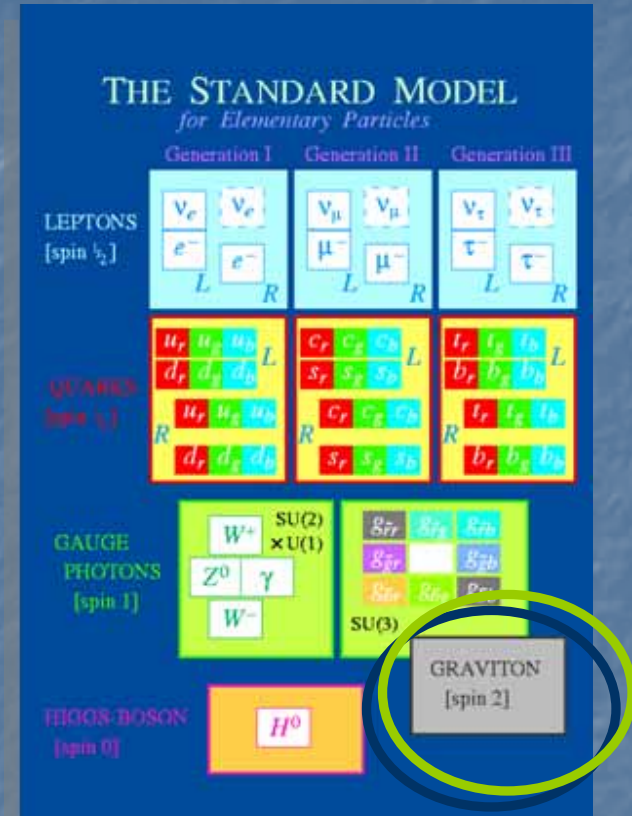
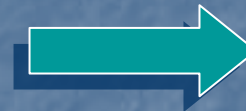


# Il Modello Standard

*Basato su: Meccanica Quantistica e Relativita' Speciale*

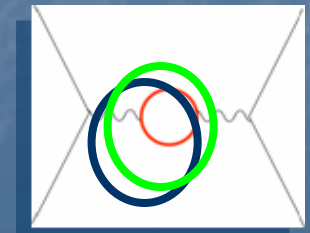
*Grande sintesi di quanto sappiamo su :*

- *particelle elementari*
  - *Interazioni Elettromagnetiche:*
    - *mediate dal fotone ( $\gamma$ )*
  - *Interazioni Deboli:*
    - *mediate dai bosoni ( $W^+, W^-, Z^0$ )*
  - *Interazioni Forti:*
    - *mediate da 8 gluoni ( $g$ )*



*Forze deboli e forti: corto "range" per sottili effetti del vuoto !*

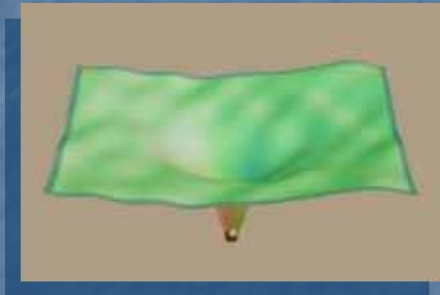
**GRAVITA' : inconsistente !**



# Relativita' Generale

Se la gravita' e' combinata con la Relativita' Speciale, lo spazio (e il tempo) si curvano come gomma sotto l'influenza della materia  $\rightarrow$  *Equazioni di Einstein*

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G_N T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$



- Comportamento delle stelle e, in linea di principio, dell'intero *universo*
- Corpi molto densi (*buchi neri*) possono bloccare materia e radiazione

$$e^2 \rightarrow G_N m^2 \rightarrow G_N \frac{E^2}{c^4}$$

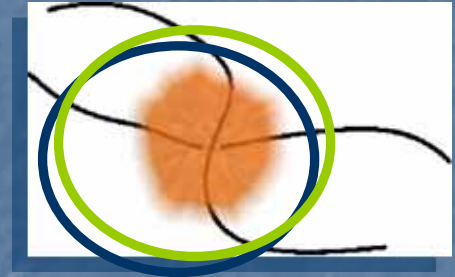
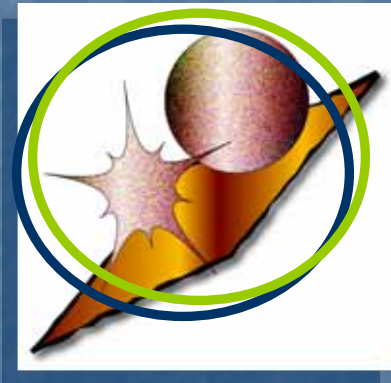


*Conflitto con la MECCANICA QUANTISTICA !*

# Oltre le Particelle: Stringhe?

- **PARTICELLE:** gravitano "TROPPO INTENSAMENTE"
- **STRINGHE:** disperdono la regione di interazione
- **GRAVITA':** inevitabile con le stringhe!
- **PARTICELLE:** "toni" della stringa

$$e^2 \rightarrow G_N m^2 \rightarrow G_N \frac{E^2}{c^4}$$



- **SORPRESA:** Stringhe richiedono "extra dimensioni"!  
(la cui "forma" determina le nostre leggi fisiche)
- **QUANTE?** 10 dimensioni [con una ipotesi, la "supersimmetria"]



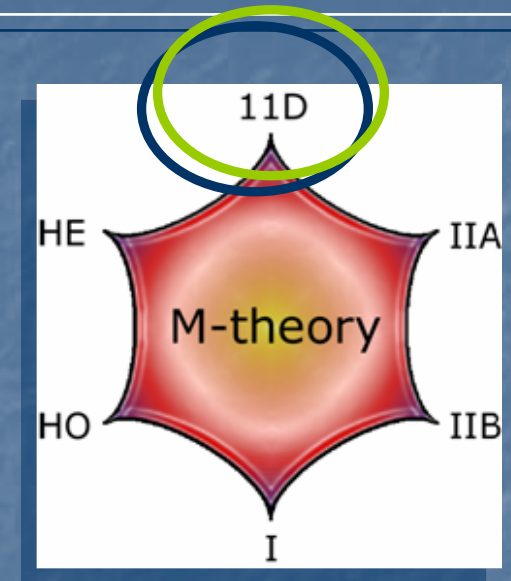
**QUANTI TIPI DI TEORIE? 5!**  
**MA...**



# Oltre le stringhe: M Teoria

Forte evidenza che :

- *TUTTE* le stringhe sono *EQUIVALENTI*
- *TUTTE* equivalenti ad una teoria in  $D=11$



!!!!!!

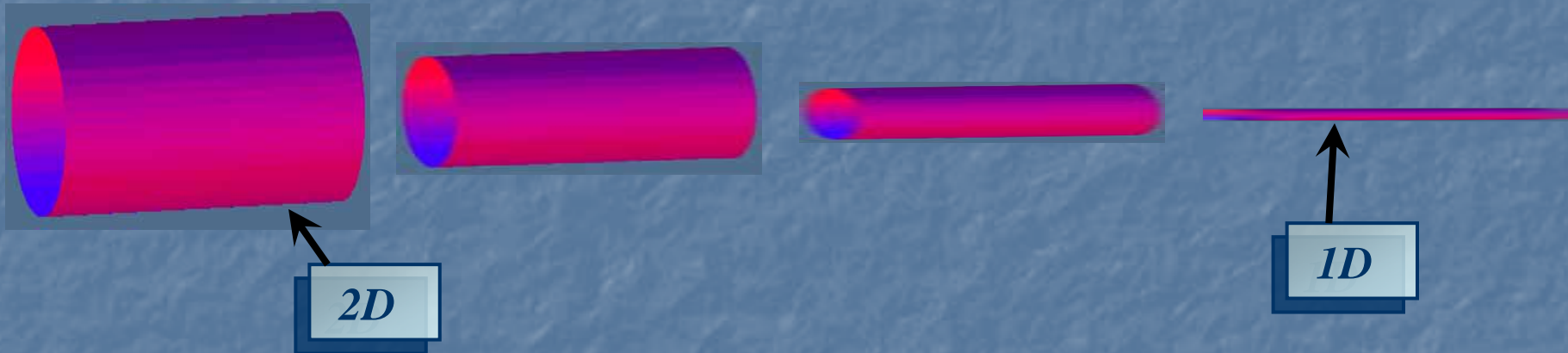
Trascurando l' "attrito" i fisici sono giunti a 10 e 11 dimensioni !

- *Apparentemente un'unica teoria delle interazioni fondamentali*
- *[MOLTO COMPLESSA : mancano strumenti matematici per studiarla direttamente]*
- *INTRINSICAMENTE basata sulla MECCANICA QUANTISTICA*

*Predire "tutto"? No, non conosciamo la "forma" delle extra dimensioni !*

# Extra Dimensioni

- *Lo spazio-tempo che conosciamo ha 4 dimensioni ( $D=4$ , 3 + "tempo"). Come è possibile avere in realta'  $D=10$  o  $11$  ?*
- *Guardiamo un cilindro prima da vicino, poi sempre più da lontano.*

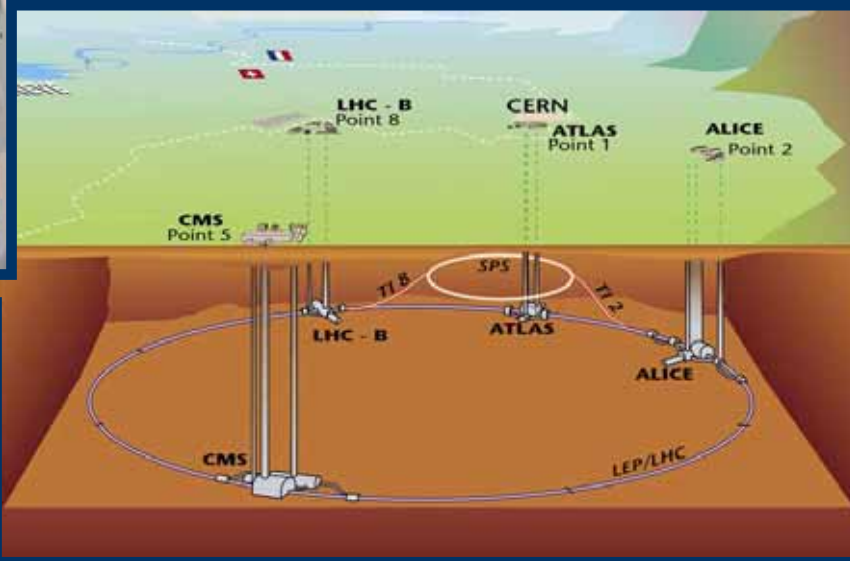
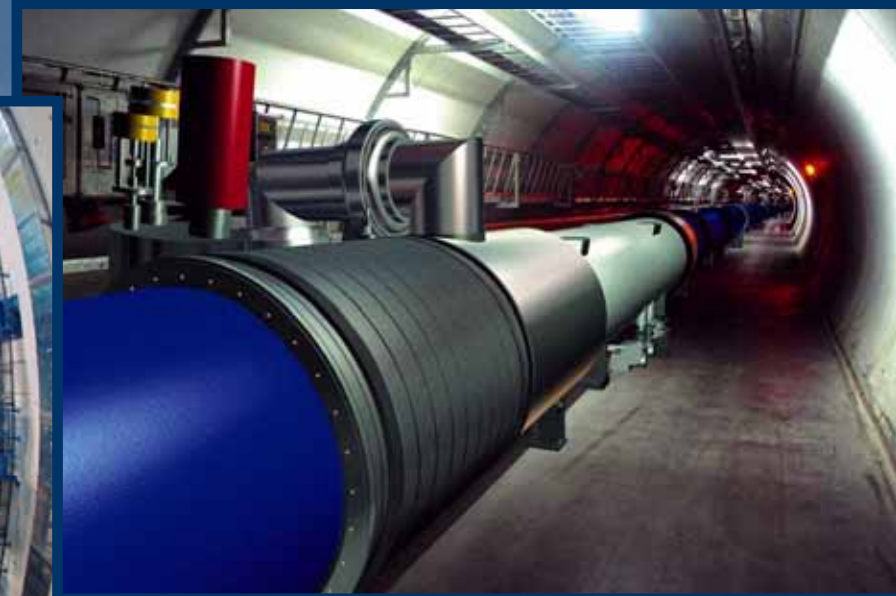


- *6 o 7 dimensioni molto piccole sarebbero invisibili anche alle particelle (le loro onde non potrebbero penetrarvi!)*

? **Quale forma, e perché ?** ?



# LHC - CERN 2008



*Il sistema criogenico piú grande del mondo (1.8 K).  
27 Km di magneti. 100 m sotto terra.  
7 milioni di MeV (7000 volte  $mc^2$  per il protone!).*

*800 milioni di collisioni/sec.*



# Bibliografia

- A. Sagnotti, *"Musica per superstringhe, da "Il Sole 24 Ore", suppl. dom.*
- A. Sagnotti, *"Teoria delle Stringhe"*, contributo a *"Enciclopedia della Scienza"*, vol IX (Ist. Enciclopedia Italiana), disponibili su:  
<http://www.sns.it/it/scienze/menunews/docentiscienze/sagnotti/bibliografia/>
- S. Weinberg, *"The Quantum Theory of Fields"* (3 vols) (Cambridge Univ. Press)
- B. Zwiebach, *"A First Course in String Theory"* (Cambridge Univ. Press)