

L'Infinito, l'Elettrone e la Stringa



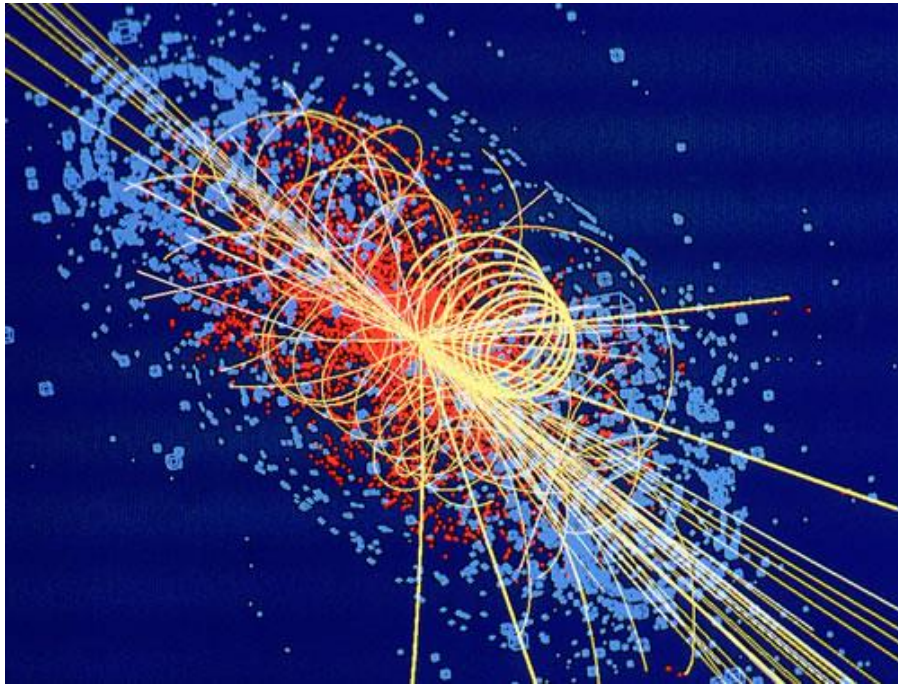
Michele Cicoli
Bologna Univ., INFN and ICTP
Pesaro, 4 Maggio 2018



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Ricerca personale

Fisica Teorica



Particelle elementari



Cosmologia

Esperienza personale

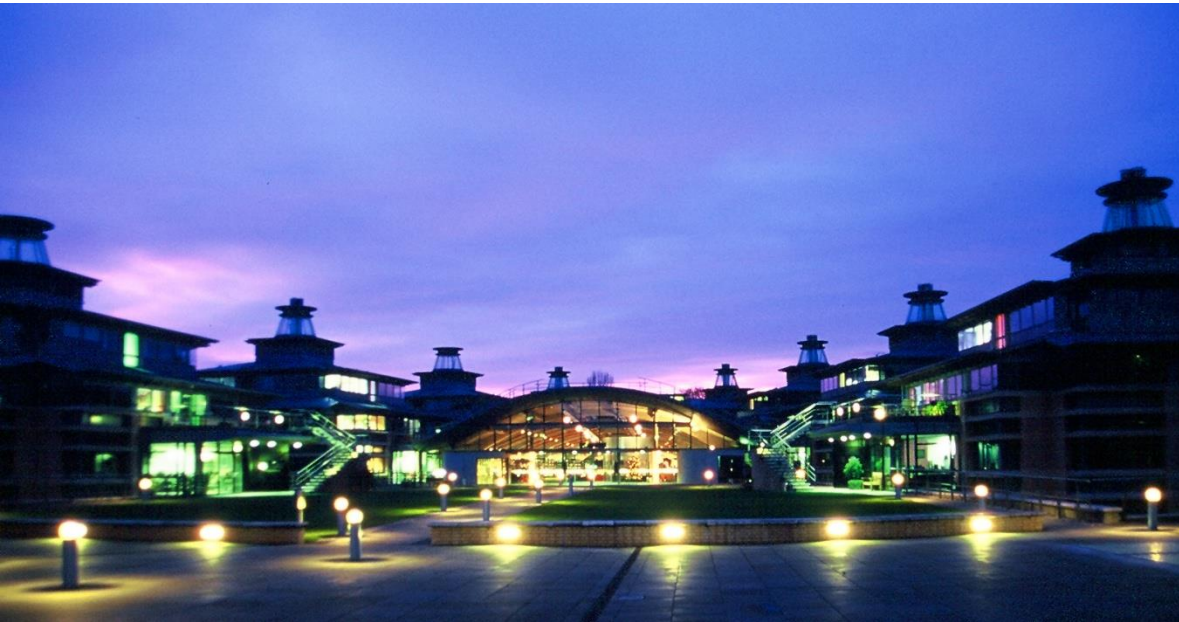
Liceo Classico a Fano

Università: Fisica a Bologna



Specializzazione
in Fisica Teorica

Master + Dottorato di Ricerca



DAMTP (Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics)

University of Cambridge



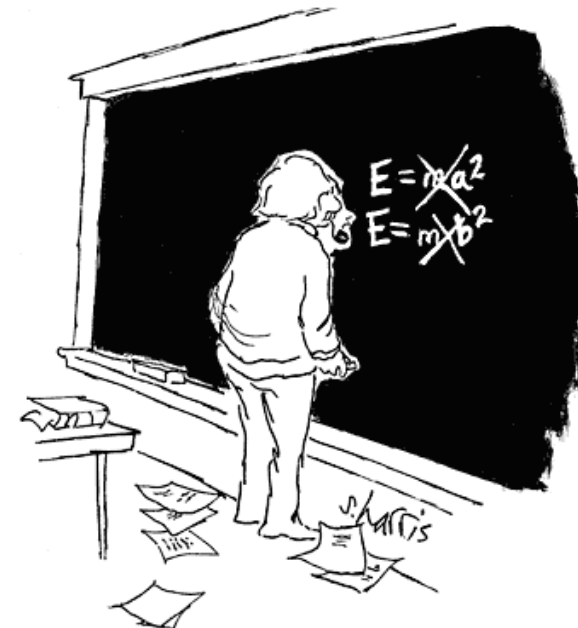


St John's College



Cos'è il dottorato di ricerca?

- Concorso di **ammissione**
- Borsa di studio
- **Ufficio** nel dipartimento
- **Supervisore** personale
- Stretto rapporto con il supervisore
- Interazione con altri studenti di dottorato e ricercatori
- Partecipazione alla vita del dipartimento
- Seminari
- Scuole internazionali di dottorato e **conferenze**
- Insegnamento
- Tenere i primi **seminari**
- Scrivere i primi **articoli** scientifici
- Prime scoperte!



PostDottorato 1

DESY (Deutsches Elektron-Synchrotron), Amburgo



PostDottorato 2

ICTP (International Centre for Theoretical Physics), Trieste



La chiusura di un ciclo

Ritorno a Bologna tramite il Rientro dei Cervelli

Ricercatore → Professore associato



Dipartimento di
Fisica e Astronomia

Gruppo di Fisica
Teorica

Ricerca in Fisica Teorica

- Enigmi sperimentali
- Problemi teorici: **inconsistenza** matematica o fisica della teoria
- Problemi di **Fine-tuning**, cioè **sintonizzazione fine**
- Principi estetici: **bellezza** della teoria nello spiegare più fenomeni naturali con meno ingredienti, **semplificazione** ed **unificazione**
- Elaborare teorie nuove, estendere o migliorare teorie già note
- Tali teorie devono risolvere i problemi, spiegare quello già noto e produrre **predizioni sperimentali**
- **Testare** tali predizioni sperimentali

Il giorno tipico del fisico teorico

- Studio personale della letteratura



- **Discussione** delle idee



- Utilizzo di computer o carta e penna



- Produzione di **articoli scientifici**
- Comunicazione delle scoperte in **conferenze internazionali**
- Necessità di **collaborazioni** tra fisici di tutto il mondo
- Unica **comunità scientifica** unita nella ricerca delle leggi fondamentali che governano il cosmo a prescindere da razza, lingua, religione, credo politico, etc
- Insegnamento, supervisione di studenti, amministrazione universitaria...



I Protagonisti

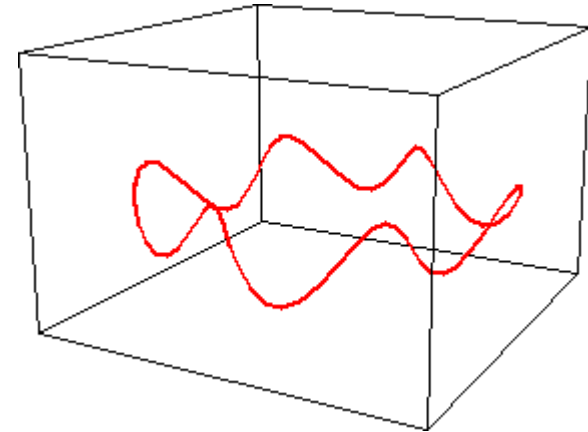
Infinito



Elettrone

Yeeeeeeehaaaaaaa!! 

Stringa



La Protagonista



$$\sum_{n=1}^{\infty} n \rightarrow -\frac{1}{12}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} n = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + \dots \rightarrow -\frac{1}{12}$$

Ma siamo proprio sicuri?

Dimostrazione

$$C = 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots$$



$$1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad \dots \rightarrow \frac{1}{2}$$

$$B = 1 - 2 + 3 - 4 + 5 - 6 + \dots$$

$$\begin{aligned} B + B &= 1 - 2 + 3 - 4 + 5 - 6 + \dots \\ &\quad + 1 - 2 + 3 - 4 + 5 - 6 + \dots \end{aligned}$$



$$1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots = C \rightarrow \frac{1}{2}$$

$$\longrightarrow B \rightarrow \frac{1}{4}$$

Dimostrazione

$$C = 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots \rightarrow \frac{1}{2}$$

$$B = 1 - 2 + 3 - 4 + 5 - 6 + \dots \rightarrow \frac{1}{4}$$

$$A = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + \dots \rightarrow ?$$

$$\begin{array}{r} A - B = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + \dots \\ \quad -1 + 2 - 3 + 4 - 5 + 6 + \dots \end{array}$$



$$0 \quad 4 \quad 0 \quad 8 \quad 0 \quad 12 \quad \dots$$

$$= 4(1 + 2 + 3 + \dots) = 4A$$

$$\longrightarrow 3A = -B \quad A = -\frac{B}{3} \rightarrow -\frac{1}{12}$$



Che senso ha?

$$\sum_{n=1}^{\infty} n = A \rightarrow -\frac{1}{12}$$

Ma la somma di una serie infinita di interi **positivi** crescenti **non** dovrebbe convergere ad un valore:

- 1) **negativo**
- 2) **frazionario**
- 3) **finito**

Controintuitivo!

→ **Rifacciamo le cose in modo diverso**

Somme parziali

$$\sum_{n=1}^{\infty} n = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + \dots$$

$$1 + 2 = 3 = \frac{1}{2} 2 (2 + 1)$$

$$1 + 2 + 3 = 6 = \frac{1}{2} 3 (3 + 1)$$

$$1 + 2 + 3 + 4 = 10 = \frac{1}{2} 4 (4 + 1)$$

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \dots + N = \frac{1}{2} N (N + 1)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} n = \sum_{n=1}^{N \rightarrow \infty} n = \frac{1}{2} N (N + 1) \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \infty$$

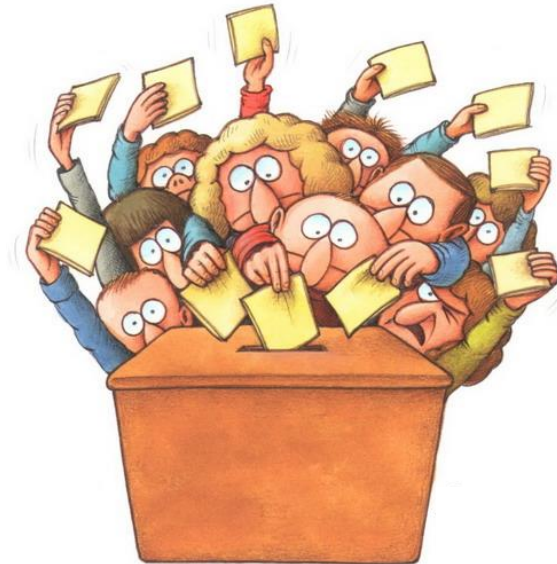


Quindi?

$$\sum_{n=1}^{\infty} n = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 \dots < \begin{matrix} \frac{1}{12} \\ \infty \end{matrix}$$

Qual è il risultato **giusto**?

Votiamo!

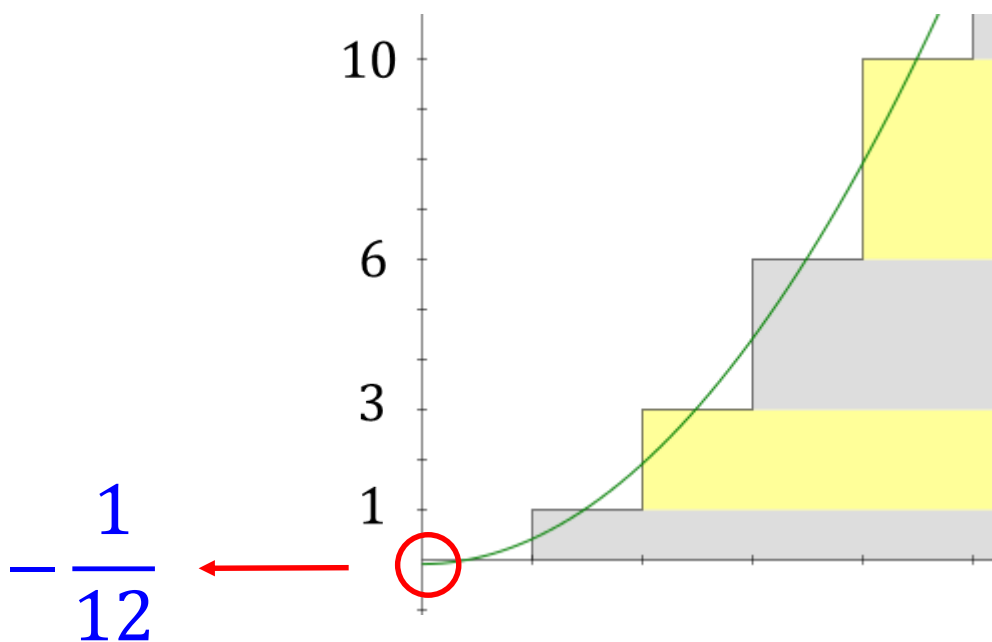


Risposta

Sono giusti **entrambi** ma con un significato **diverso**

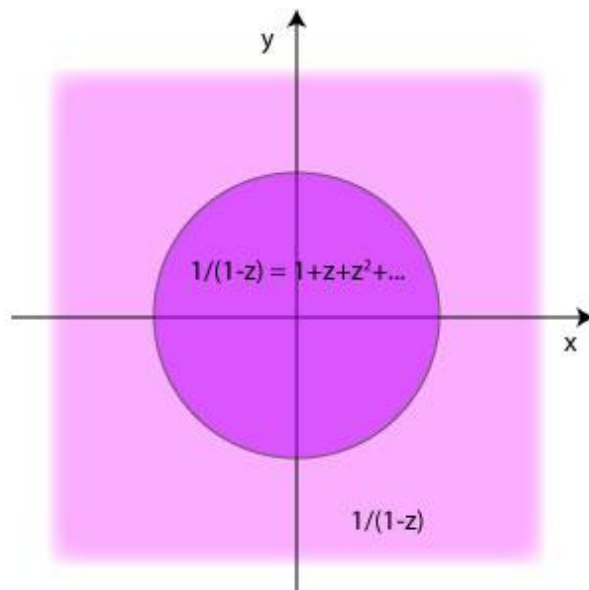
$$\sum_{n=1}^{\infty} n = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 \dots \rightarrow \infty - \frac{1}{12}$$

$-\frac{1}{12}$ è la parte **finita** del risultato!



Continuazione analitica

$$\sum_{n=0}^{\infty} z^n = 1 + z^2 + z^3 + \dots = \frac{1}{1-z} \quad \text{solo se } |z| < 1$$



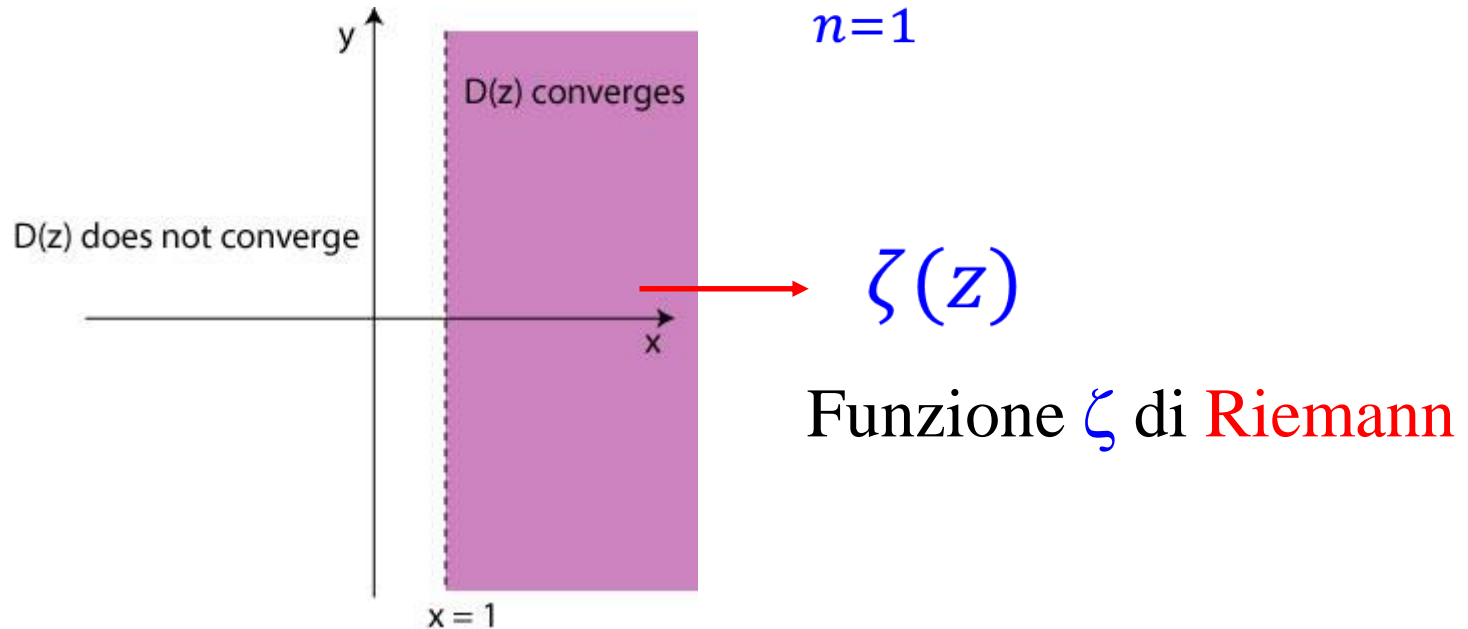
Fuori dal disco **viola** la serie **non** dà un risultato **finito**!

→ Trucchetto matematico: **continuazione analitica**

Assegno comunque un valore finito alla serie definendo che vale quanto la funzione $1/(1-z)$

Zeta di Riemann

$$D(z) = 1 + \frac{1}{2^z} + \frac{1}{3^z} + \frac{1}{4^z} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^z} \quad \text{Serie di Dirichlet}$$



Fuori dalla zona **viola** la serie **non** dà un risultato **finito**!

→ **Continuazione analitica**: definisco $D(z) \rightarrow \zeta(z)$

$$D(-1) = 1 + 2 + 3 + 4 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} n \rightarrow \zeta(-1) = -\frac{1}{12}$$

Spiegazione alternativa

$$\sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\varepsilon n} \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \sum_{n=1}^{\infty} n$$

Numero di **Nepero**:
 $e = 2,718\dots$

→

$$\sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\varepsilon n} = \frac{1}{\varepsilon^2} - \frac{1}{12} + O(\varepsilon)$$

↓ ↓ ↓

$$\infty \quad - \frac{1}{12} \quad 0$$

Ma tutto ciò è solo un **trucchetto matematico**?

No!



Le particelle e l'infinito

Espressioni simili a $1 + 2 + 3 + \dots \rightarrow \infty - 1/12$
emergono sempre nel calcolo delle proprietà delle
particelle elementari

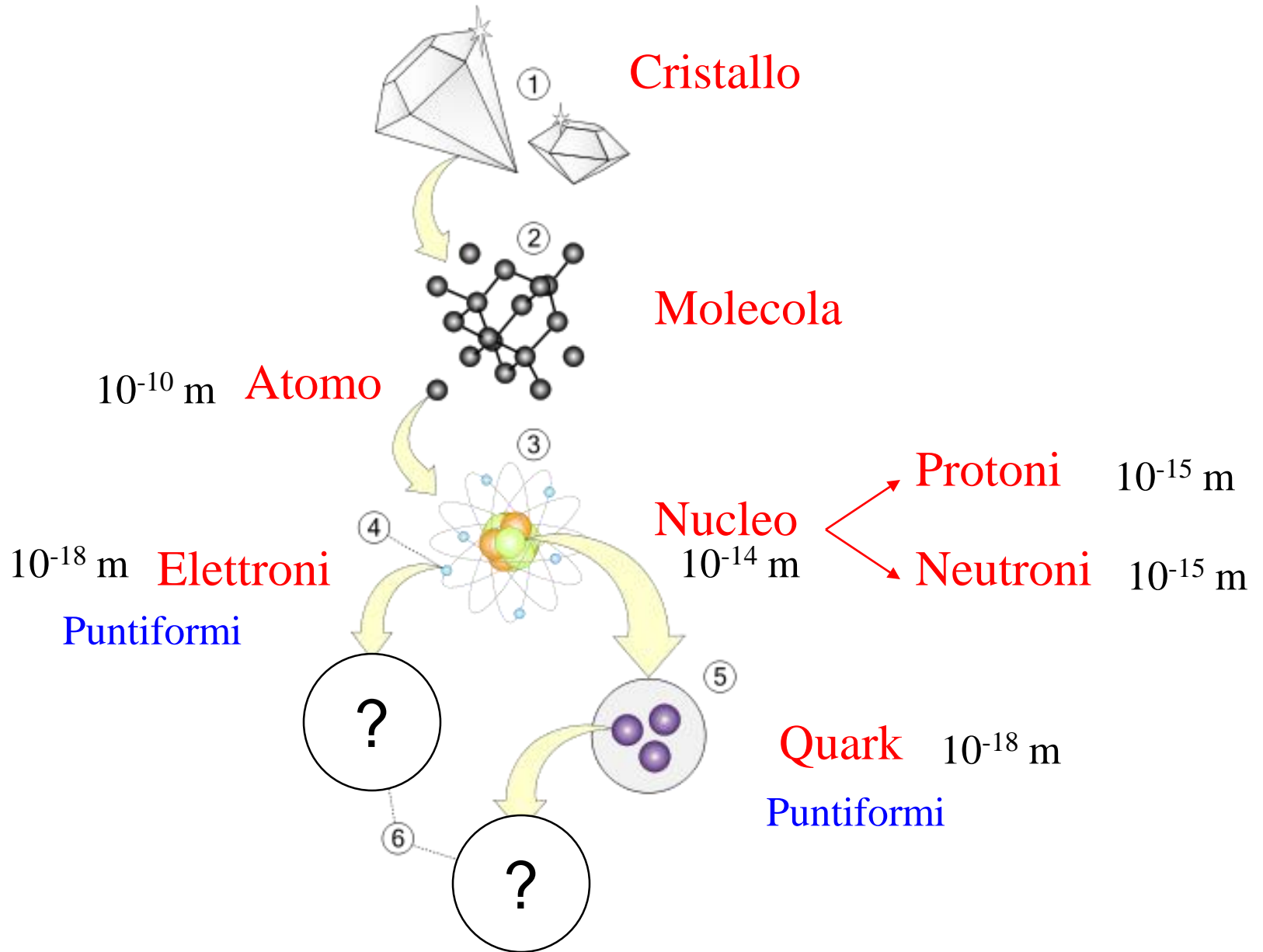
→ risultato **infinito**

Ma le misure sperimentali danno risultati **finiti!**



Dove è andato
l'**infinito**?

Particelle elementari



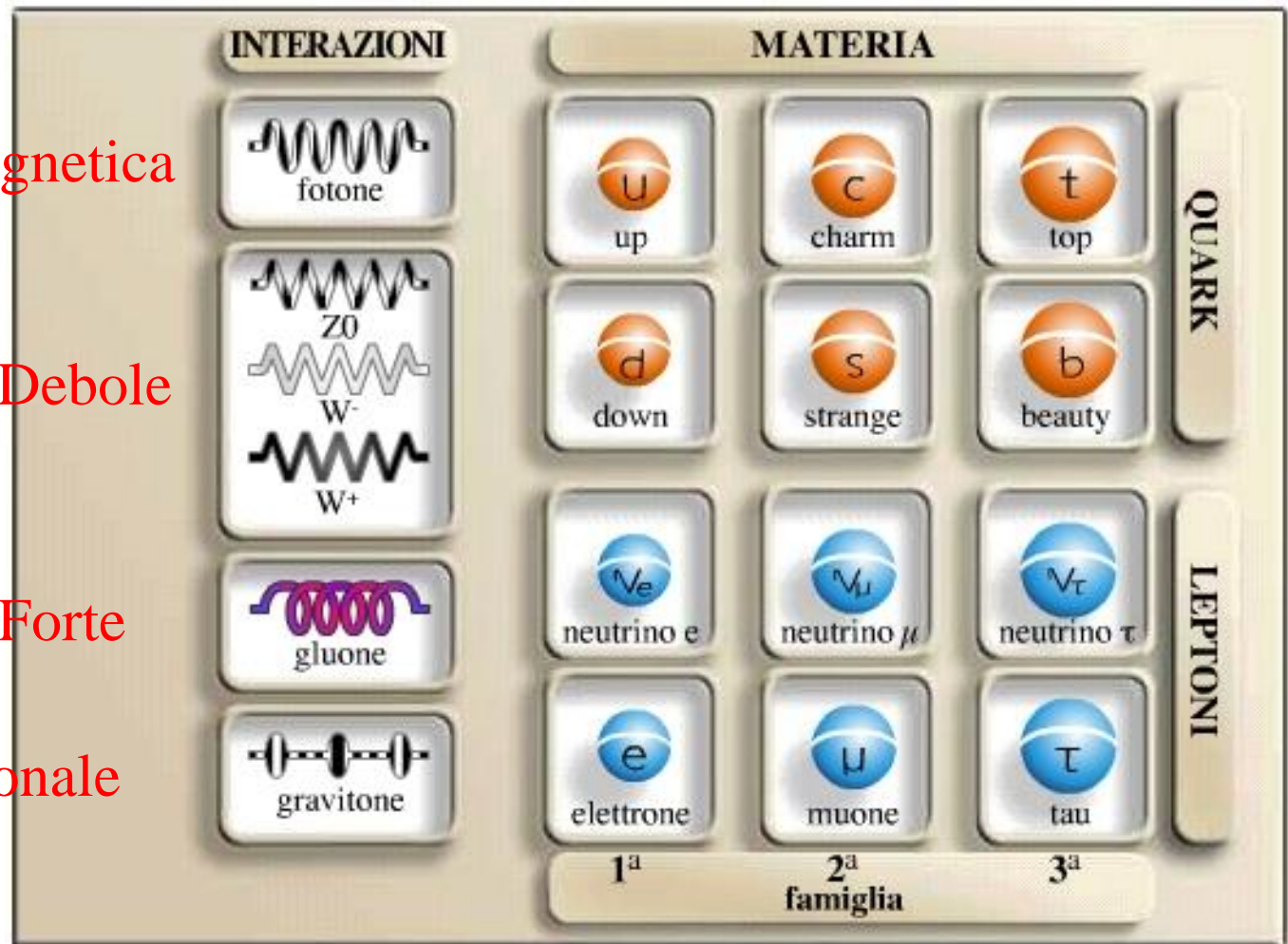
Interazioni fondamentali

Forza Elettromagnetica

Forza Nucleare Debole

Forza Nucleare Forte

Forza Gravitazionale



+ Antimateria e Higgs \Rightarrow O(65) particelle elementari!

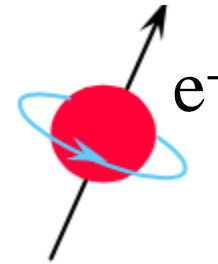
↑
Origine della massa!!

L'elettrone esatto

Teoria più precisa di tutte: **elettrodinamica quantistica**

→ Interazione di **elettroni** e **fotoni** con effetti di **meccanica quantistica** e **relatività speciale**

Momento magnetico dell'elettrone



Misura **sperimentale**: 1.001159652181

Predizione **teorica**: 1.001159652182

Predizione teorica meglio verificata sperimentalmente in tutta la storia!

L'**infinito** sembra scomparire dai calcoli!

Dove è andato a finire?

Entra in gioco la fisica quantistica



Principio di Indeterminazione

- 1) Più precisamente si determina la **posizione**, meno accuratamente si conosce l'**energia** e viceversa

$$\Delta x \Delta E \sim 1$$

- 2) Più precisamente si determina il **tempo**, meno accuratamente si conosce l'**energia** e viceversa

$$\Delta t \Delta E \sim 1$$

Magie quantistiche

Principio di indeterminazione \longrightarrow fluttuazioni in **energia**

$$\Delta E \sim \frac{1}{\Delta x}$$

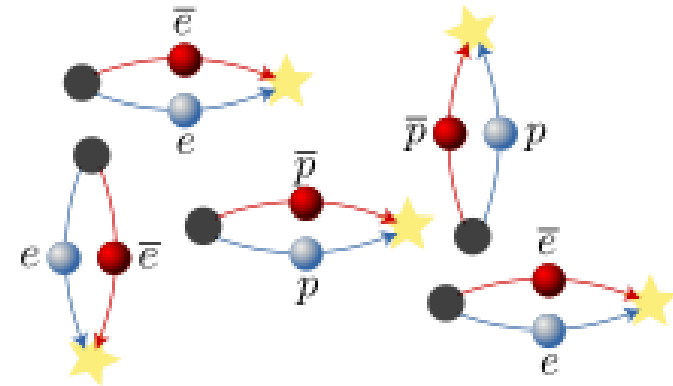
Vivono per un **tempo**

$$\Delta t \sim \frac{1}{\Delta E} \sim \Delta x$$

Relatività speciale:

$$E = m$$

Quantum vacuum



\longrightarrow Produzione di coppie **particella-antiparticella** che dopo un tempo Δt annichilano nel **vuoto**

Carica elettrica

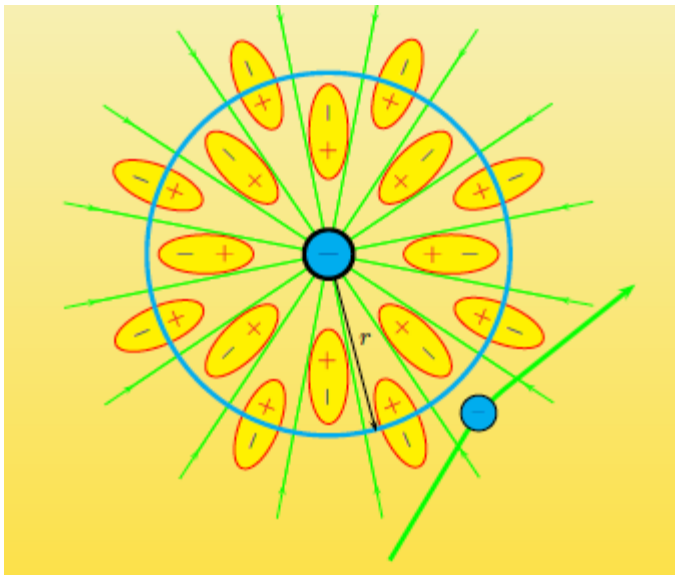
Mi avvicino all'**elettrone** per vedere la sua **carica elettrica**

→ enormi fluttuazioni in **energia**

$$\Delta E \sim \frac{1}{\Delta x} \xrightarrow{\Delta x \rightarrow 0} \infty$$

→ produzione di coppie **particella-antiparticella**

→ **schermatura** della carica elettrica!



carica elettrica **infinita** in assenza di interazioni ma **mai** osservabile!

schermatura rende la carica elettrica osservata **finita**!

→ rimozione di ∞ dalle equazioni!

Rinormalizzazione

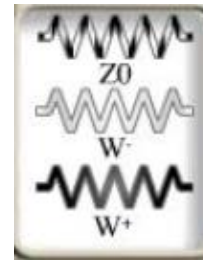
L'**infinito** va a finire dentro quantità non osservabili

$$\sum_{n=1}^{\infty} n \rightarrow \cancel{\infty} - \frac{1}{12}$$

La parte **finita** produce predizioni perfette!

Ma **rinormalizzazione** funziona solo per 3 interazioni:

EM, nucleare **forte** e **debole**



Rimozione degli infiniti per la gravità **non** funziona!

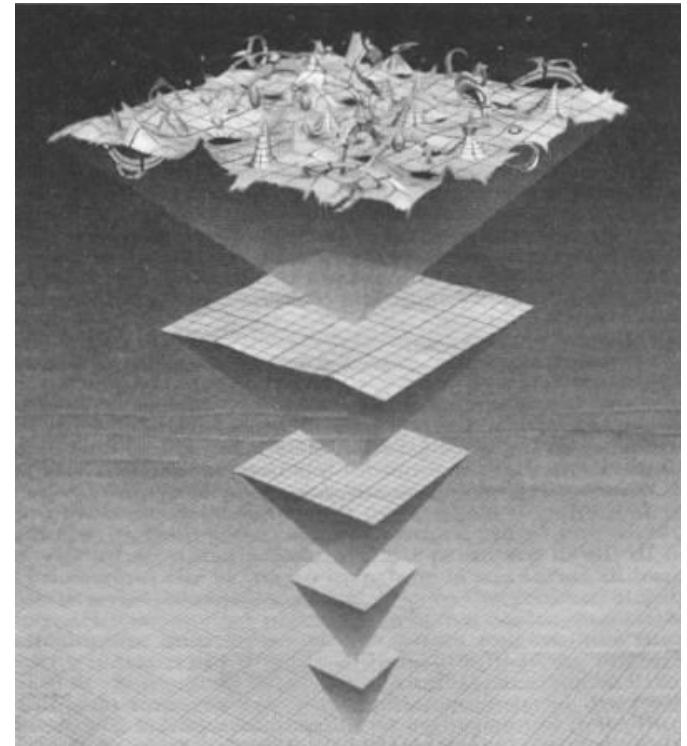
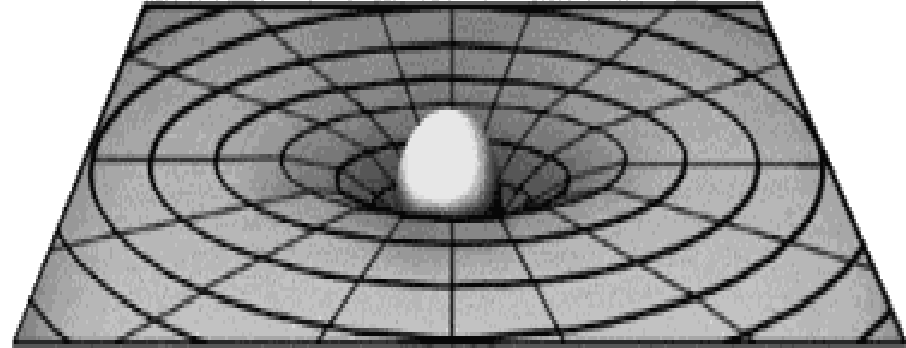
Tensione tra **meccanica quantistica**
e **relatività generale**



?

Relatività Generale

- Gravità = **curvatura** dello spaziotempo
- **Principio di Equivalenza**: osservatori in caduta libera non vedono **localmente** alcun campo gravitazionale
- Sono equivalenti ad osservatori inerziali
- Lo spaziotempo è localmente **piatto**
- Difficile conflitto con il **Principio di Indeterminazione!**



Necessaria una teoria di gravità quantistica!

- Ma la Gravità è molto debole
- Si possono ancora capire molte cose

Es.: Modello Standard della fisica delle particelle!

- Ma la Gravità diventa intensa ad alte energie dell'ordine $M_p \sim 10^{18}$ GeV o piccole distanze $\ell_p \sim 1/M_p \sim 10^{-35}$ m

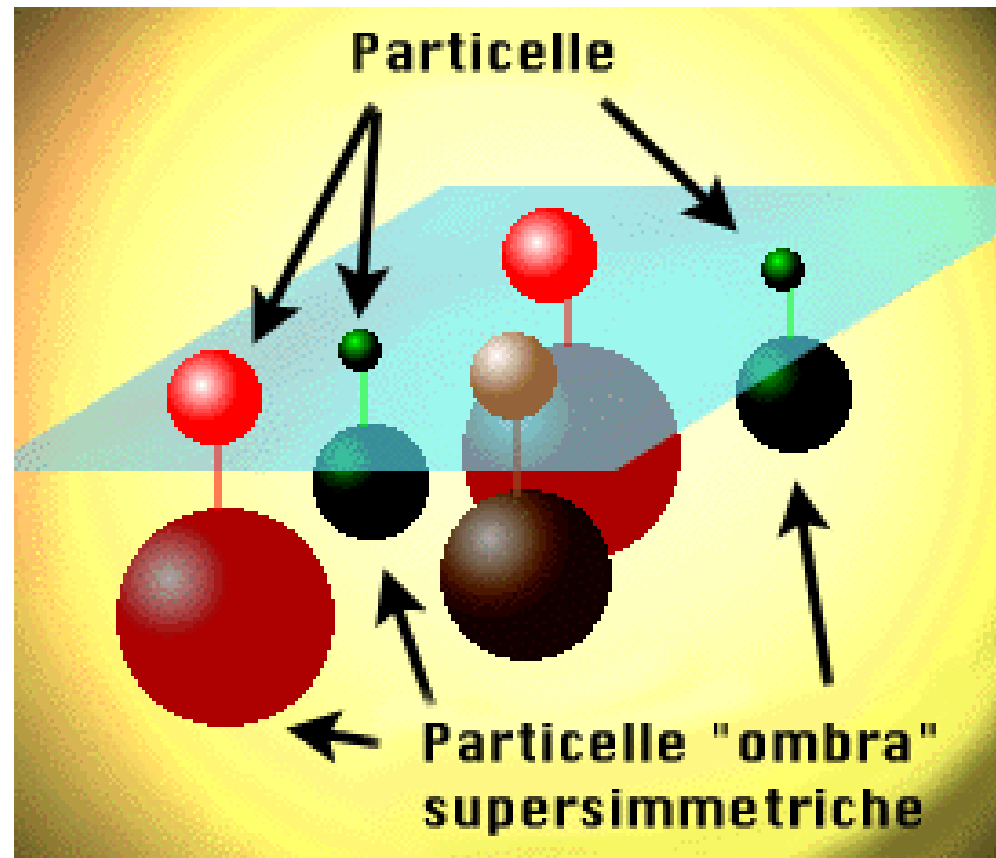
La Gravità quantistica non può essere trascurata!

Modello Standard

- Teoria **quantistica** (piccole distanze) e **relativistica** (alte energie) delle particelle elementari e delle loro interazioni
- Funziona molto bene: più accurata teoria mai formulata!
- Bosone di Higgs **scoperto** al CERN nel 2012!
- Ma ci sono alcuni **seri problemi**:
 - 1) Teoria predice un **bosone di Higgs** troppo massivo
 - 2) Nessuna **unificazione** delle forze
 - 3) Nessuna particella può essere la **materia oscura** (circa 25% dell'energia del nostro Universo!)
 - 4) Tanti **parametri** senza spiegazione
 - 5) Non contiene la **Gravità quantistica**

Supersimmetria

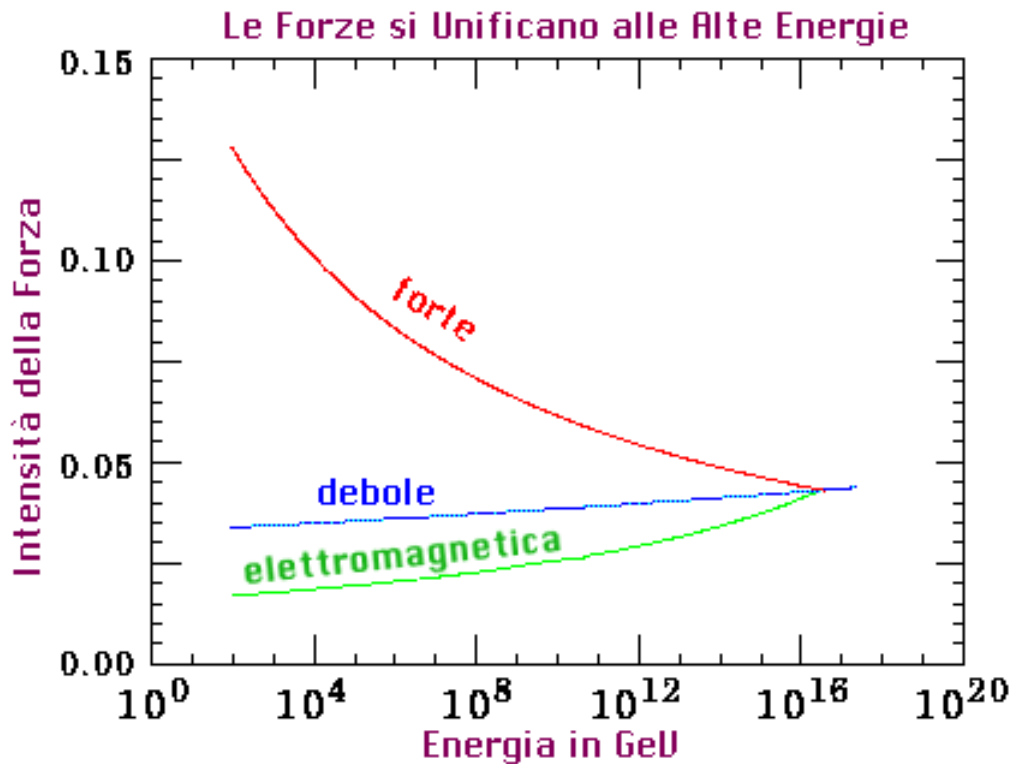
- Ogni particella nota ha un partner supersimmetrico con proprietà simili ma **spin** e **massa** diverse
- Il numero di particelle elementari è raddoppiato! dell'ordine di 130!
- Molti più parametri senza spiegazione!



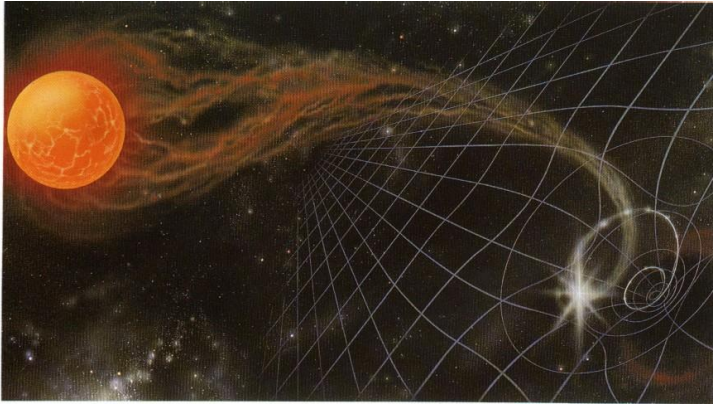
Sempre senza contenere la Gravità quantistica!

Vantaggi provenienti dalla Supersimmetria

- 1) Teoria predice un bosone di Higgs con la **corretta massa**
- 2) Contiene un ottimo candidato di **materia oscura**
- 3) Predice l'**unificazione** delle 3 forze non-gravitazionali



Problema più importante



- Buchi neri?

- Big Bang?

- Energia oscura?

- Unificazione di tutte le forze?

- TOE: Theory of Everything?



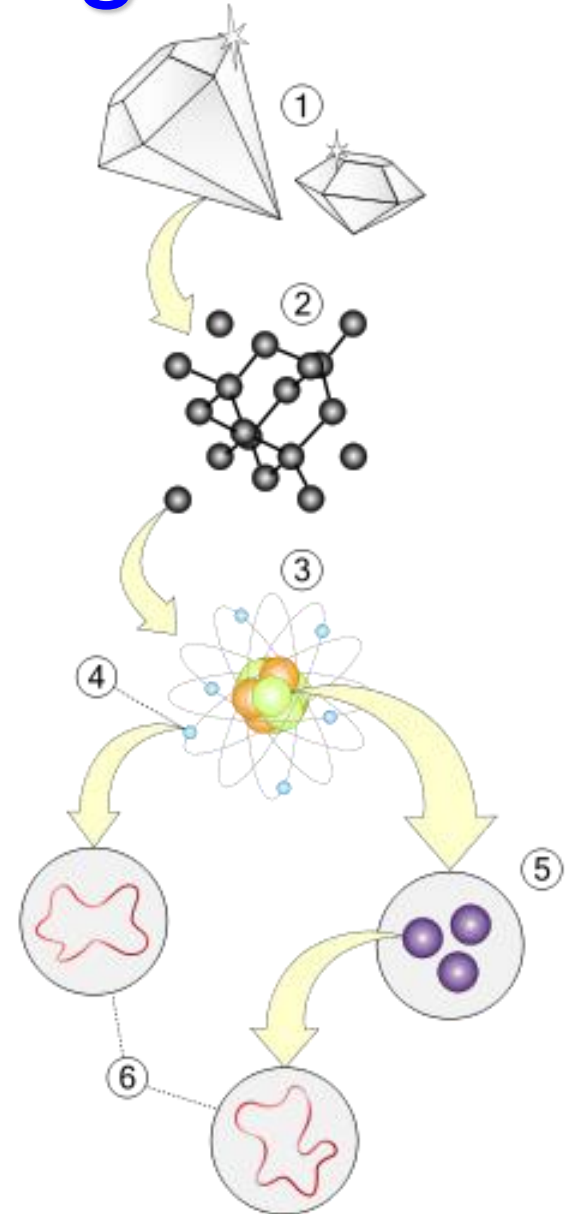
La risposta richiede una teoria di **gravità quantistica!**

Teoria delle Stringhe

Cambio di punto di vista:

sostituire particelle puntiformi con
oggetti unidimensionali!

- 1) Tutte le particelle sono diversi modi di vibrazione della **stessa** stringa
- 2) **Unificazione** di materia ed interazioni!
- 3) Include la **gravità quantistica**!
- 4) C'è **un solo** parametro, la lunghezza di stringa, da cui tutto può essere derivato!
- 5) A basse energie contiene la **relatività generale**, la **supersimmetria** e le teorie delle particelle!



TOE!

Dimensioni Extra

La teoria delle stringhe permette di predire il numero di **dimensioni** dello **spaziotempo** tramite

$$\sum_{n=1}^{\infty} n \rightarrow -\frac{1}{12}$$

Risultato: **9** dimensioni spaziali ed **1** tempo

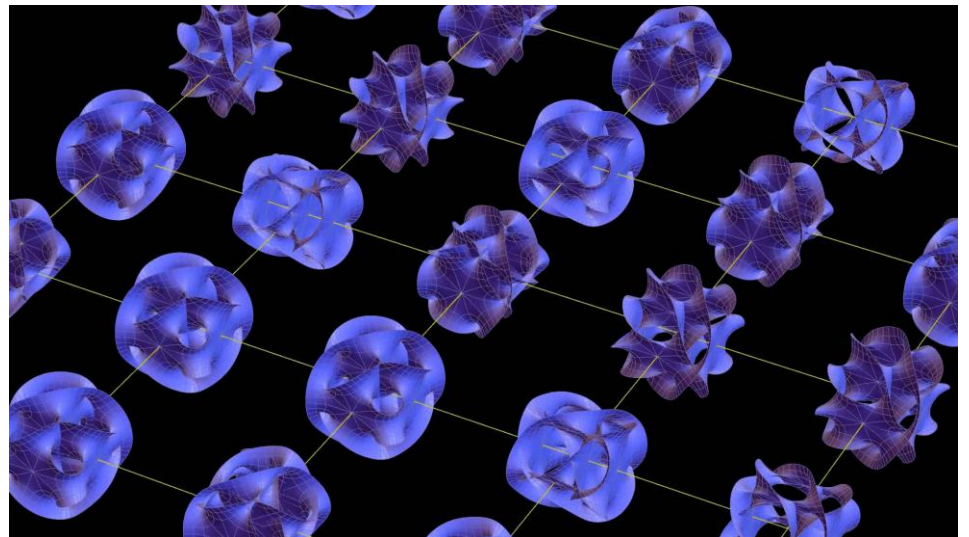
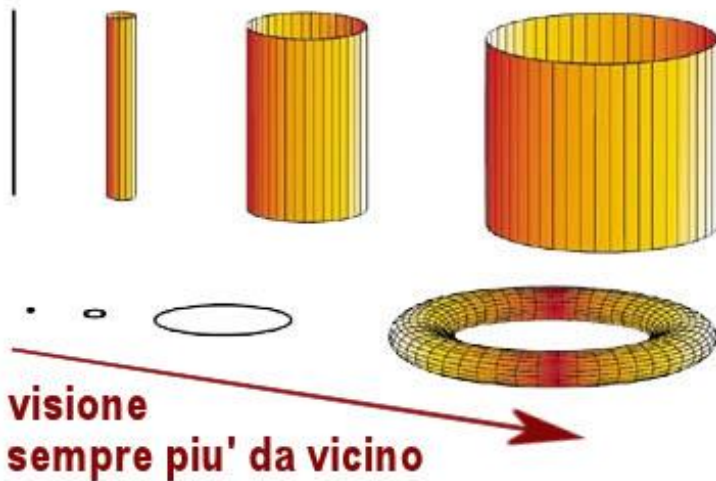


Ma il numero osservato di dimensioni è **3** spaziali ed **1** tempo

Dimensioni Extra Piccole

Universo: $10D = 4D$ grandi + $6D$ molto piccole

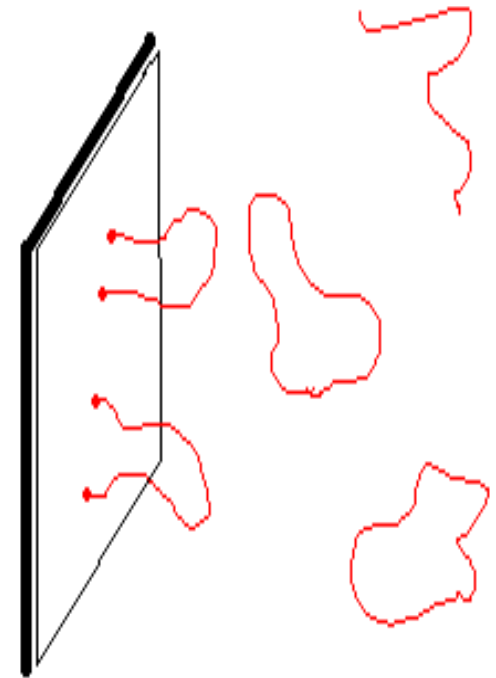
$$d < 10^{-18} \text{ m}$$



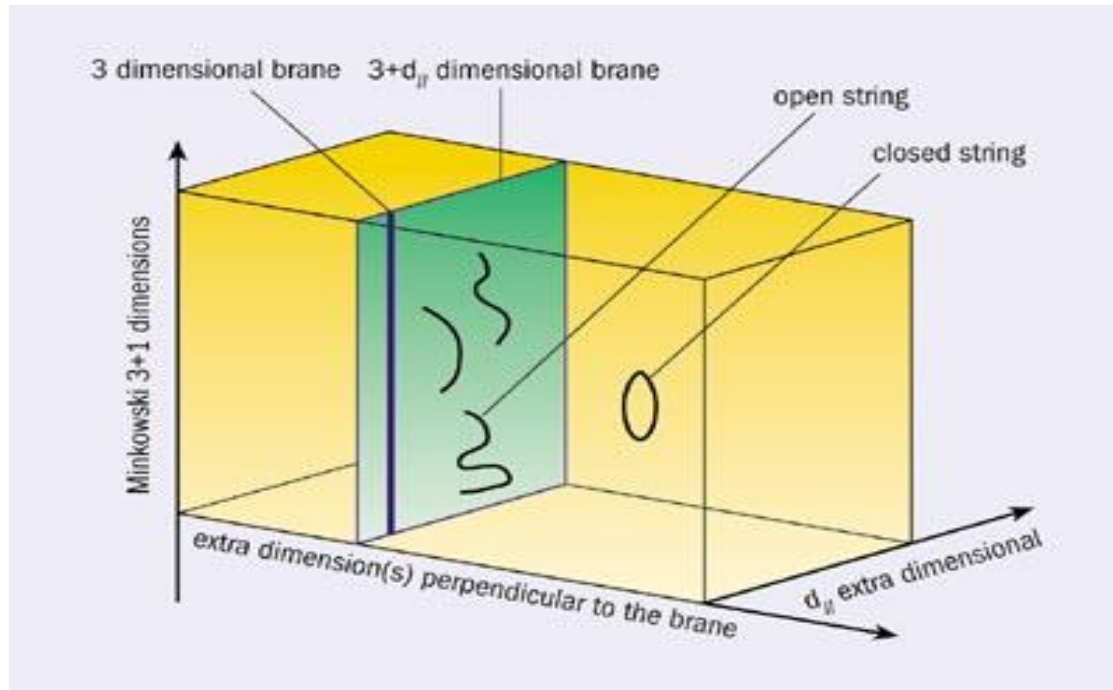
Brane

Punti finali di stringhe aperte attaccati a superfici dette **Brane**

- vincolate a muoversi sulla brana
- dimensioni extra **grandi**



Dimensioni Extra Grandi

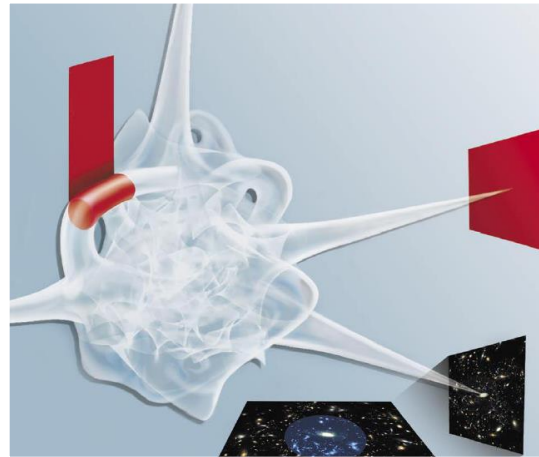


- Stringhe **aperte** intrappolate sulle brane
- Stringhe **chiuse** libere di muoversi nelle dimensioni extra
- **Tutte** le particelle e le interazioni fondamentali (eccetto la gravità) confinate sulle brane
- Dimensioni extra **grandi** rilevabili tramite modifiche della gravità a distanze del **micron**
- Le stringhe potrebbero essere presto trovate all'LHC alla scala del **TeV!**

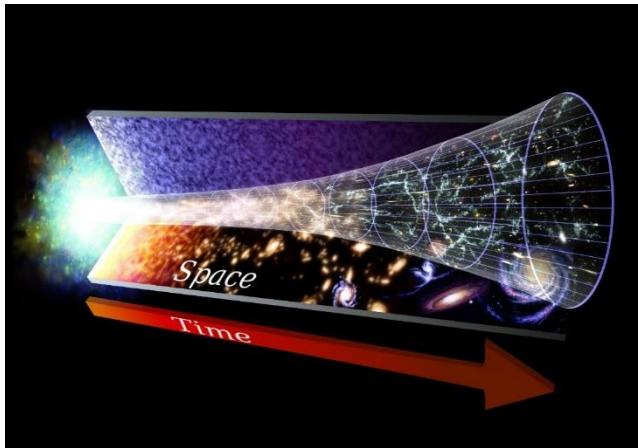
Predizioni indirette

Dimensioni Extra **piccole** → **non** è possibile vedere le stringhe ad LHC
→ **Predizioni indirette** per la fisica in 4D:

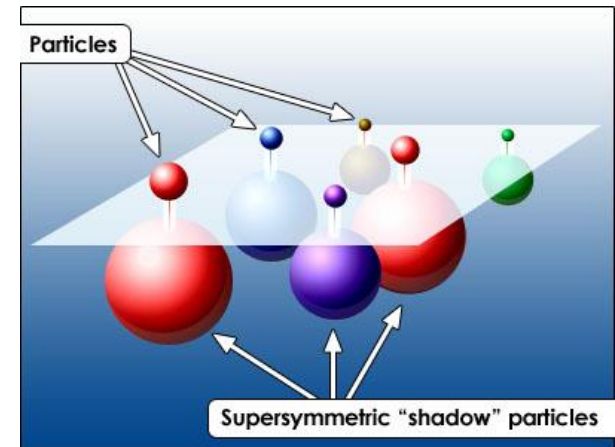
1) Riprodurre il **Modello Standard**



2) Spiegare l'**Inflazione Cosmica**



3) Derivare la massa delle particelle **supersimmetriche**



iv) Predire la natura della **materia oscura** (assioni?)

Molte cose ancora da capire!

- Abbiamo bisogno del vostro aiuto!
- Non è necessario essere dei geni!
- Vi deve piacere viaggiare
- Enorme **passione!**