

Breve viaggio nella Fisica Teorica: dal Modello Standard alla Teoria delle Stringhe



Michele Cicoli

Dipartimento di Fisica, Università di Bologna

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Bologna

International Centre for Theoretical Physics, Trieste

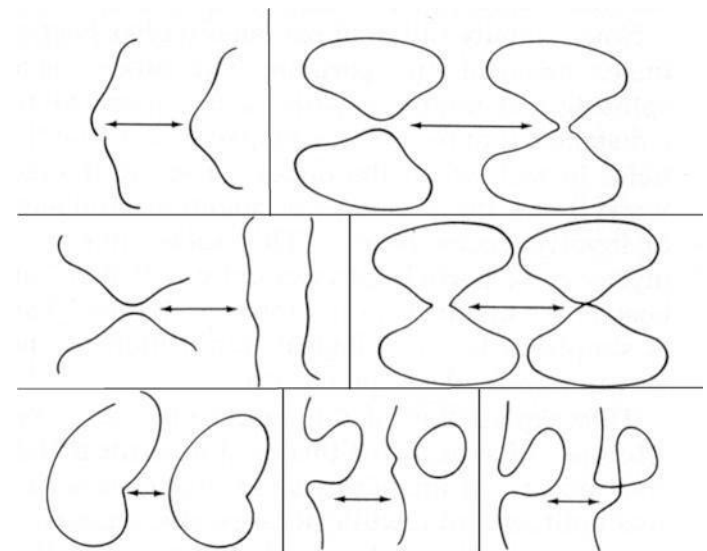
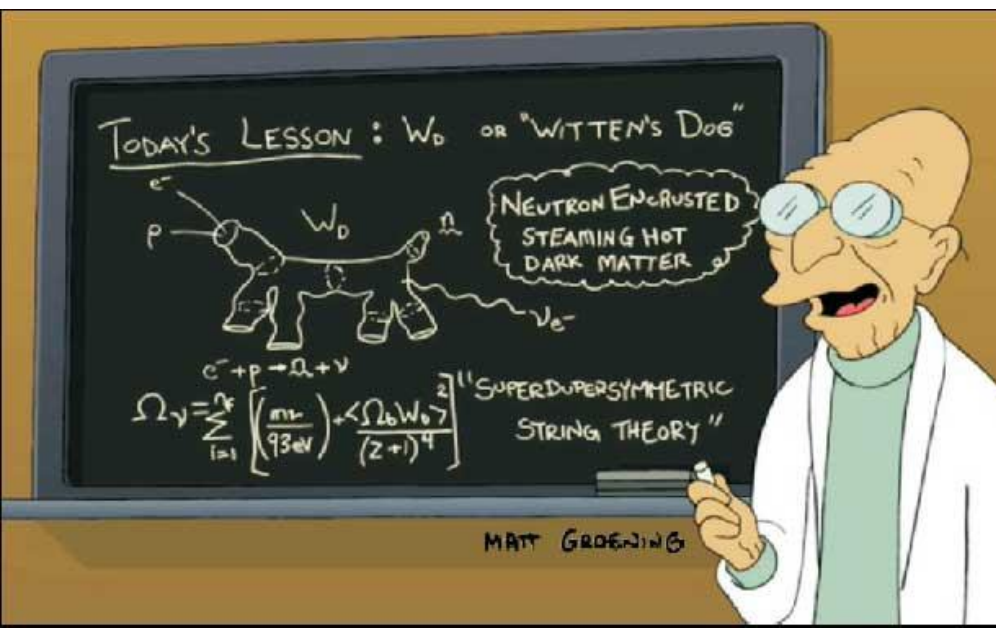
Pesaro, 30 Aprile 2014



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



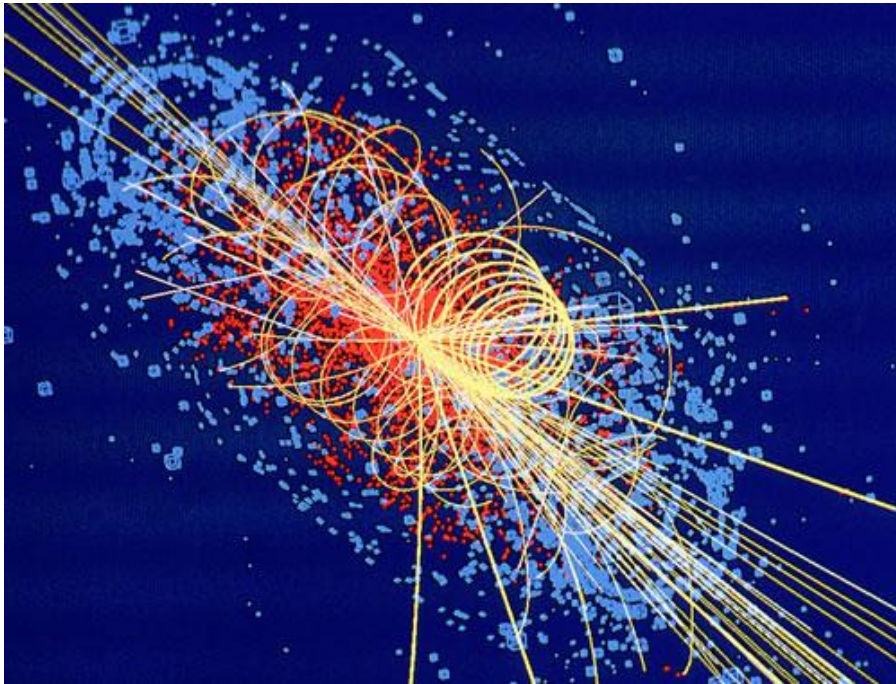
The Abdus Salam
International Centre
for Theoretical Physics



String Interactions

Ricerca personale

Fisica Teorica



Particelle elementari



Cosmologia

Esperienza personale

Liceo Classico a Fano

Università: Fisica a Bologna



Specializzazione
in Fisica Teorica

Fisica teorica: la nascita di un amore....



Master + Dottorato di Ricerca



DAMTP (Department of
Applied Mathematics and
Theoretical Physics)

Cambridge





St John's College

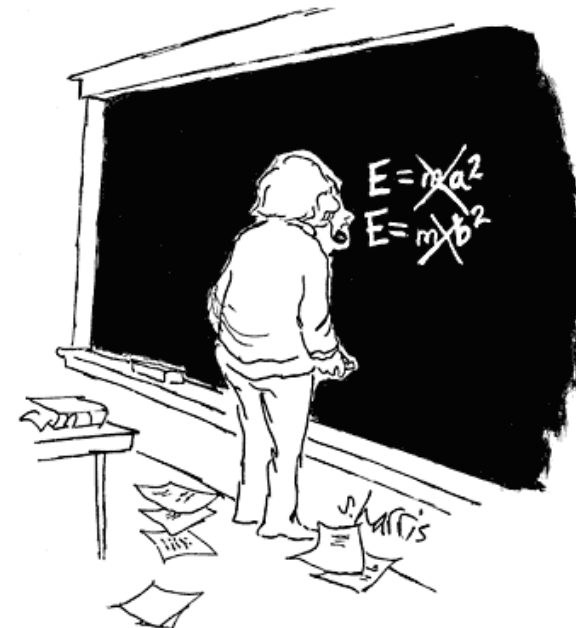


Fisica teorica: il consolidamento di un amore....



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!



Fisica teorica: il frutto di un amore....



PostDottorato 1

DESY (Deutsches Elektron-Synchrotron), Amburgo



Fisica teorica: il secondo frutto di un amore....



PostDottorato 2

ICTP (International Centre for Theoretical Physics), Trieste



La chiusura di un ciclo

Ritorno a Bologna come Ricercatore

Dipartimento di Fisica e Astronomia



Gruppo di Fisica
Teorica

Fare ricerca in Fisica Teorica

- Enigmi sperimentali
- Problemi teorici: incosistenza 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 ma essere in grado di spiegare quello già noto e soprattutto produrre delle predizioni sperimentali
- Verificare o meglio falsificare tali predizioni sperimentali

Il giorno tipico del fisico teorico

- Studio personale della letteratura



- Discussione delle idee



- Utilizzo di computer o semplice 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, vero gruppo di ricerca globale dove si uniscono le forze



Due pilastri della fisica del 20esimo secolo



- **Relatività Speciale**: contesto per descrivere la fisica di oggetti che si muovono con velocità prossime a quella della luce
- **Relatività Generale**: approccio geometrico per trattare la Gravità in accordo con la Relatività Speciale

- **Meccanica quantistica**:
contesto per studiare la fisica
a distanza microscopiche



Queste teorie sono pressochè inconsistenti l'una con l'altra!

Relatività Speciale

- La prima rivoluzione compiuta nella fisica del 20esimo secolo:
 - 1) Relatività della Simultaneità
 - 2) Dilatazione dei Tempi
 - 3) Contrazione delle Lunghezze
 - 4) $E = mc^2$
 - 5) Velocità della luce come velocità limite



....e poi entra in gioco la Fisica Quantistica

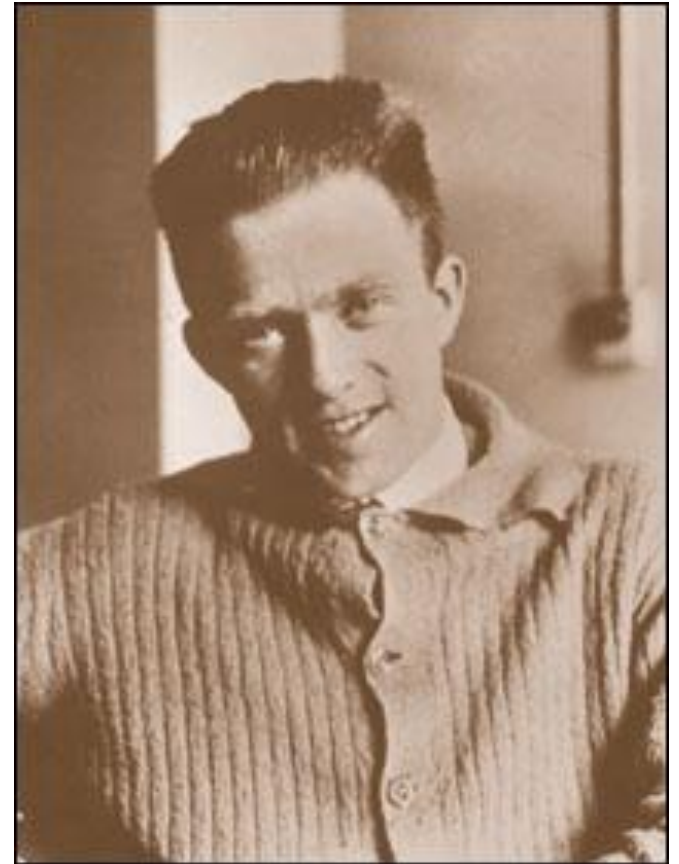


Principio di Indeterminazione

*Più precisamente si determina
la posizione, meno
accuratamente si conosce
l'impulso nello stesso istante
e viceversa*

Werner Heisenberg, 1927

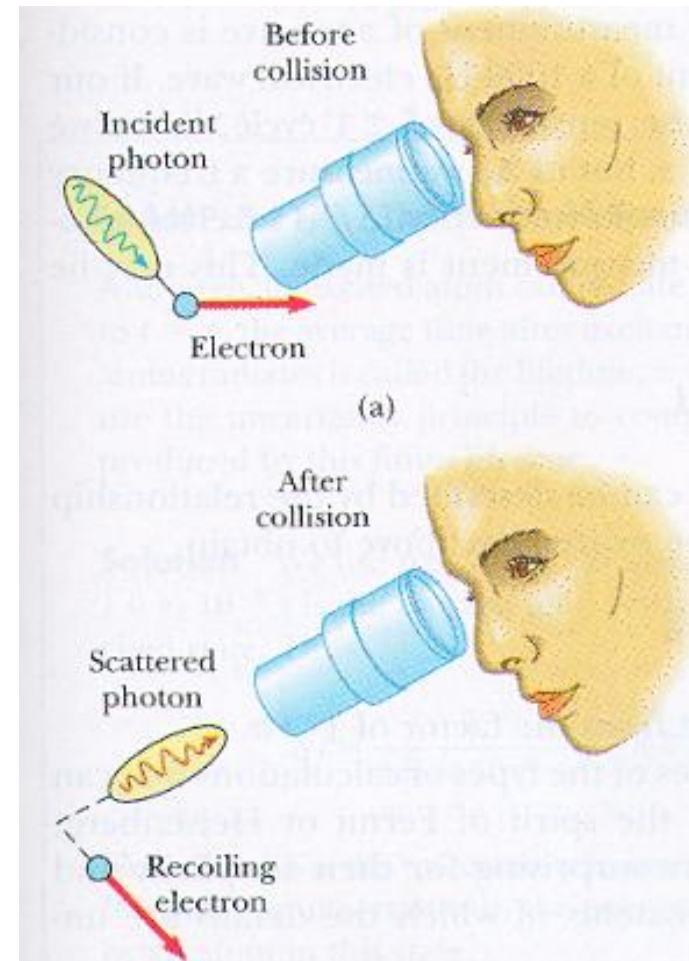
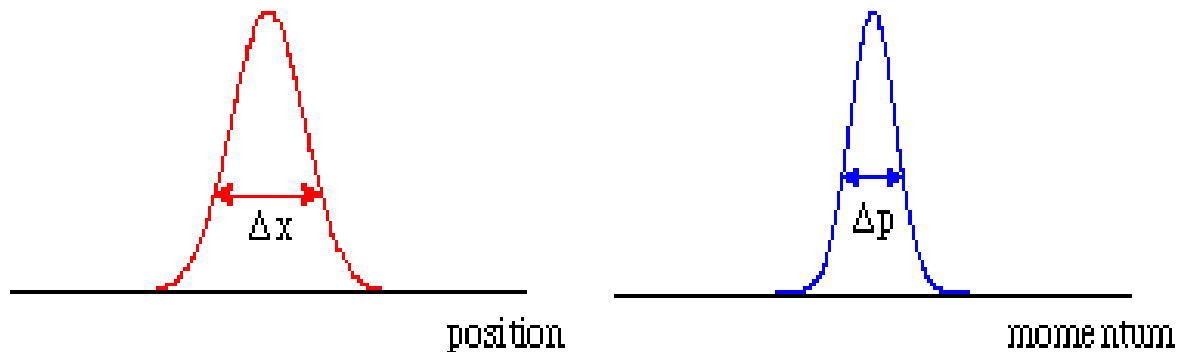
$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$



Una posizione precisa disordina l'impulso

- In Meccanica Quantistica non è possibile specificare precisamente la posizione e l'impulso (velocità) di una particella allo stesso istante di tempo

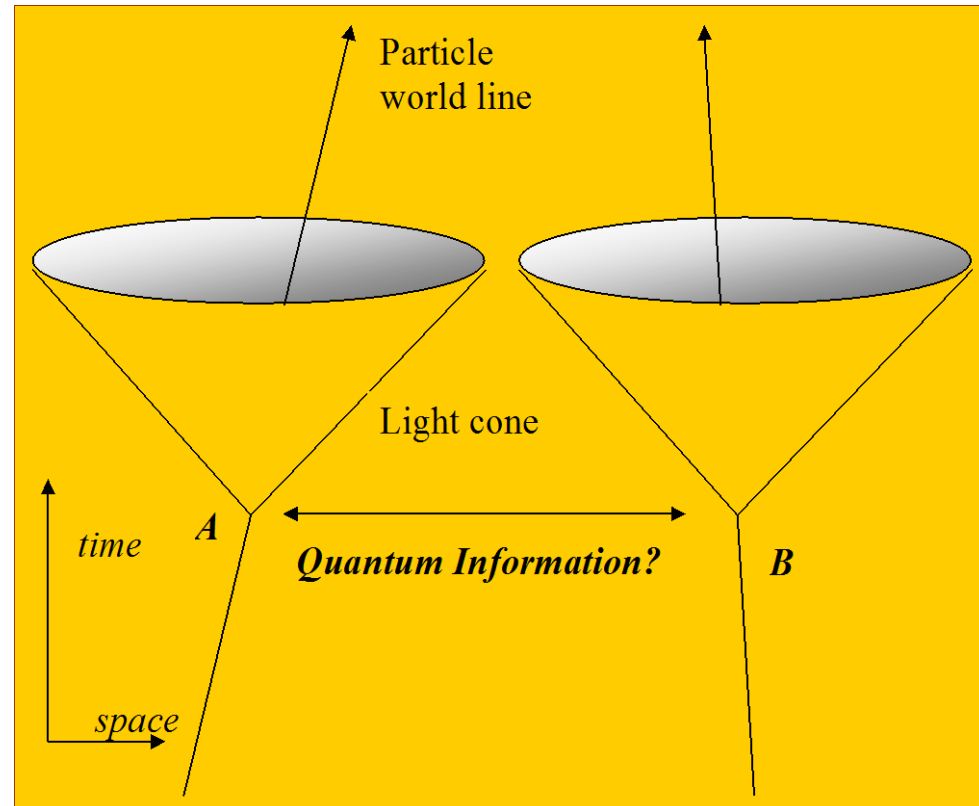
Una particella non *ha* realmente nè una posizione nè un impulso allo stesso istante.



Onda di probabilità!

Apparente inconsistenza....

- Se si conoscono precisamente le posizioni **A** e **B** di due particelle, allora si muovono con una velocità che è arbitrariamente indeterminata
In particolare c'è una probabilità non nulla che potrebbero essere superluminari!
- Come può un evento in **A** evitare di influenzare acausalmente eventi in **B** in un mondo quantistico?



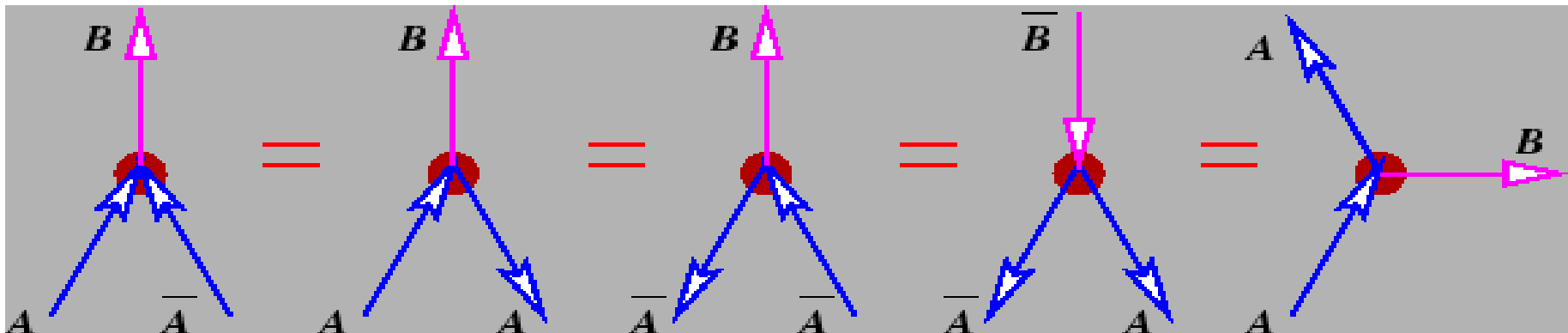
Consistenza recuperata!

- In Natura la consistenza è recuperata assicurandosi che osservatori che sono in disaccordo sull'ordine degli eventi A e B dissentano anche sul fatto che le “influenze” passino da A a B o nella direzione opposta.

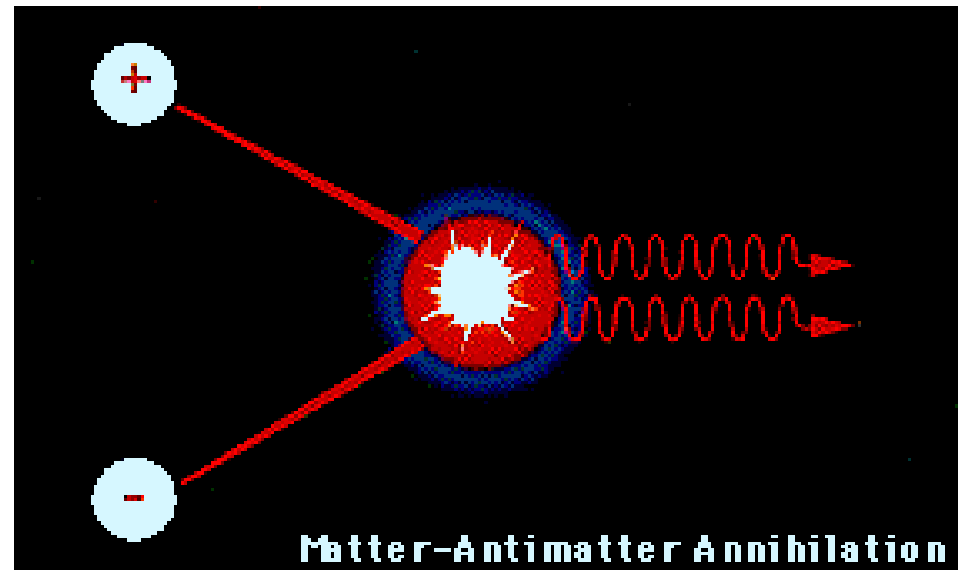
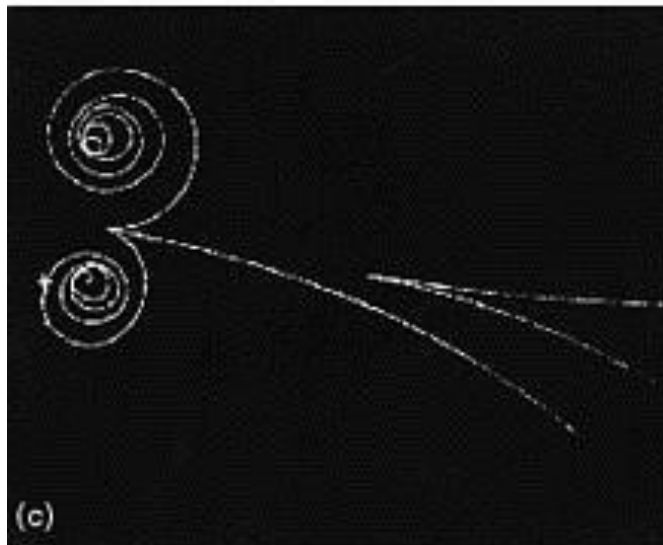
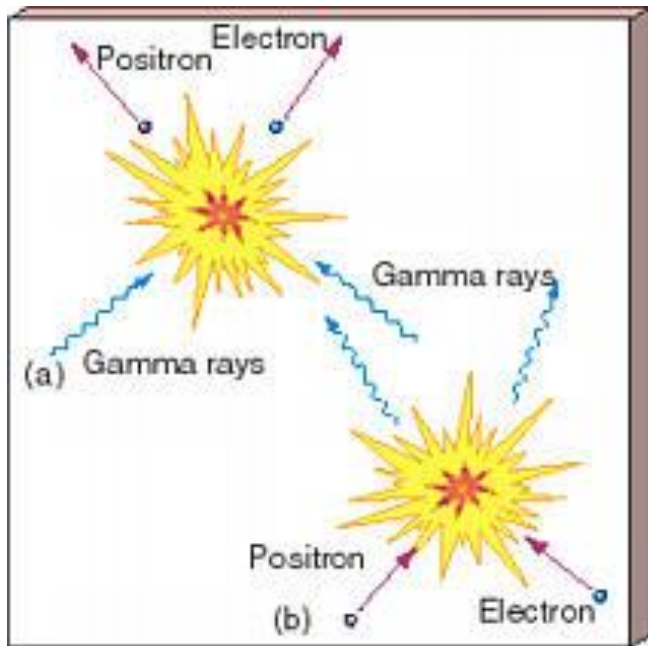
Ciò può funzionare soltanto se ogni particella ha una anti-particella con massa e intensità di interazioni identiche ma con carica opposta



Richard Feynman

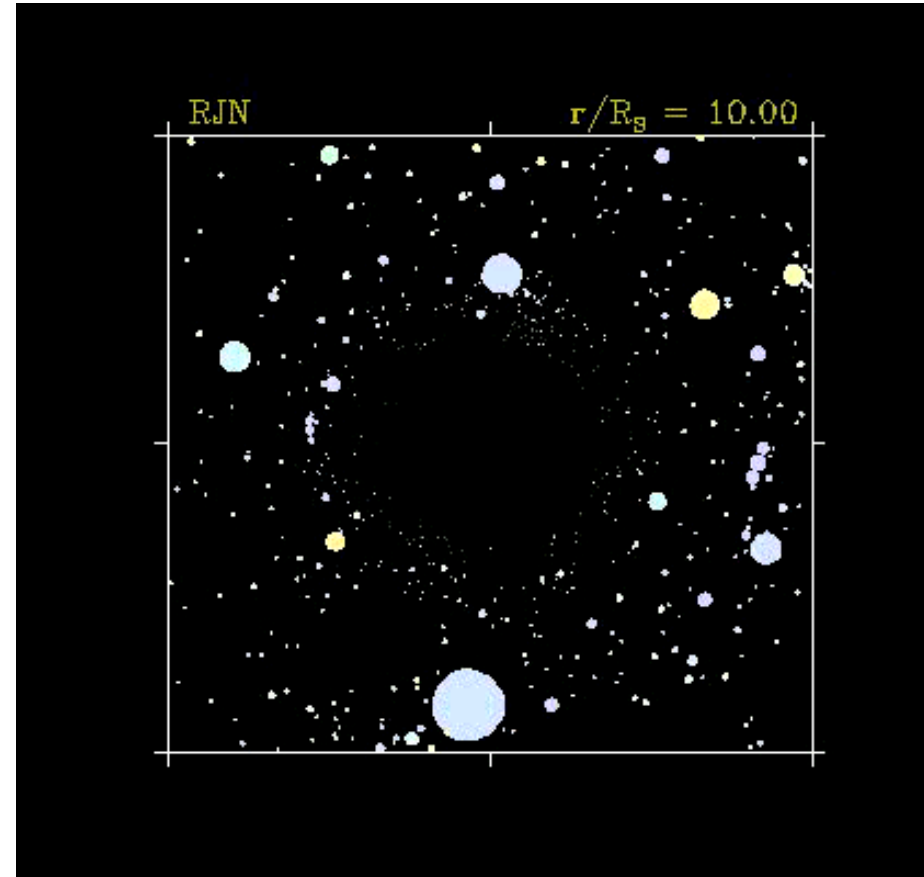


Le Antiparticelle esistono!



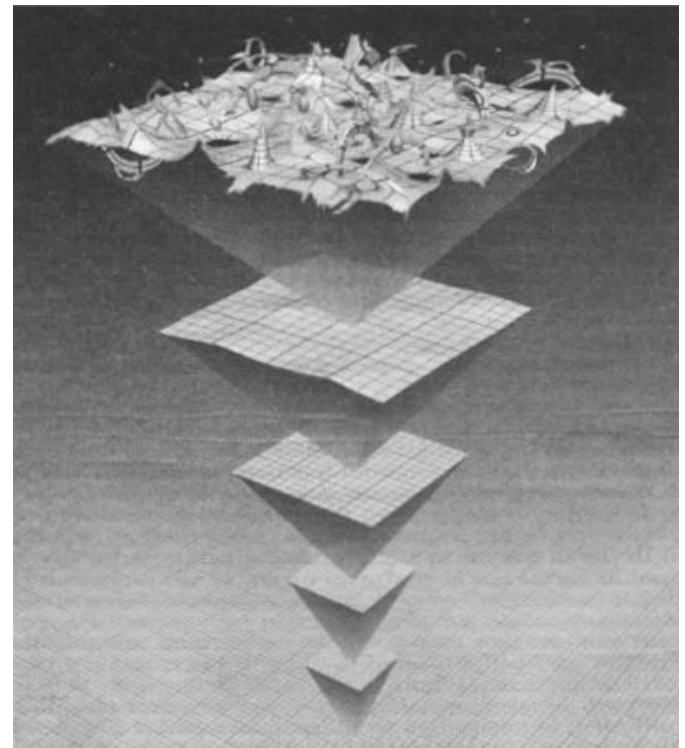
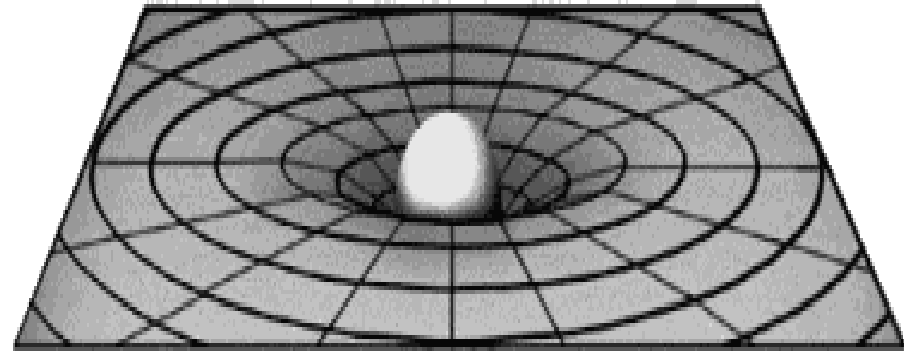
Einstein all'appello: Relatività Generale

- In Relatività Generale, la gravità è attribuita alla curvatura dello spaziotempo
 - 1) Rallentamento di orologi in moto in campi gravitazionali
 - 2) Curvatura della luce da parte di campi gravitazionali
 - 3) Predice l'esistenza di Buchi Neri
 - 4) Predice un Universo in espansione



Relatività Generale

- Principio di Equivalenza:
Osservatori in caduta libera in un campo gravitazionale annullano localmente l'azione del campo (se la loro massa è trascurabile)
 - ⇒ Sono equivalenti ad osservatori inerziali
 - ⇒ Lo spaziotempo è localmente “piatto”
- Un altro, più complicato, conflitto con il Principio di Indeterminazione!



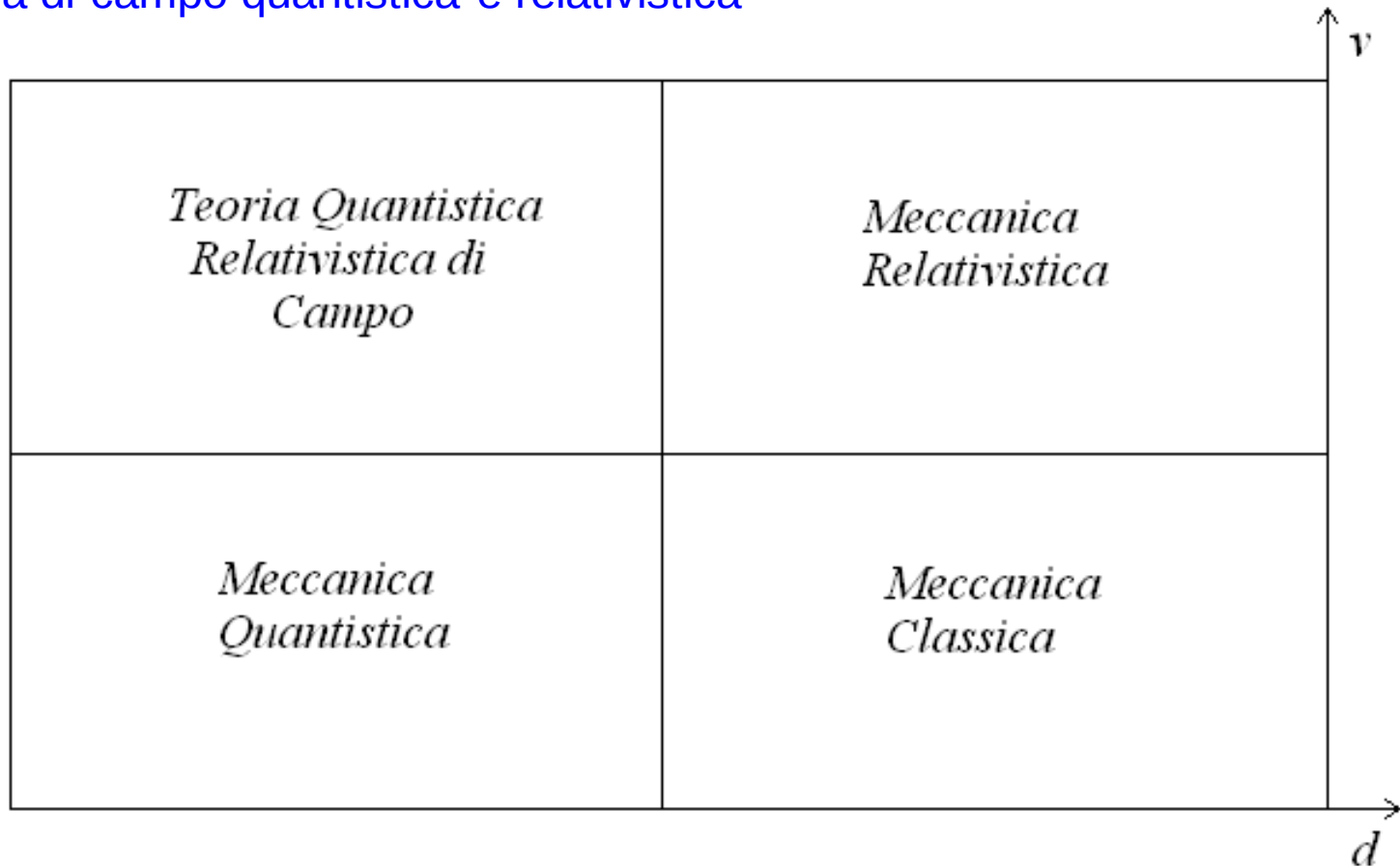
Meccanica Quantistica + Relativita' Ristretta = TQRC

Vuoto quantistico: Fluttuazioni di energia

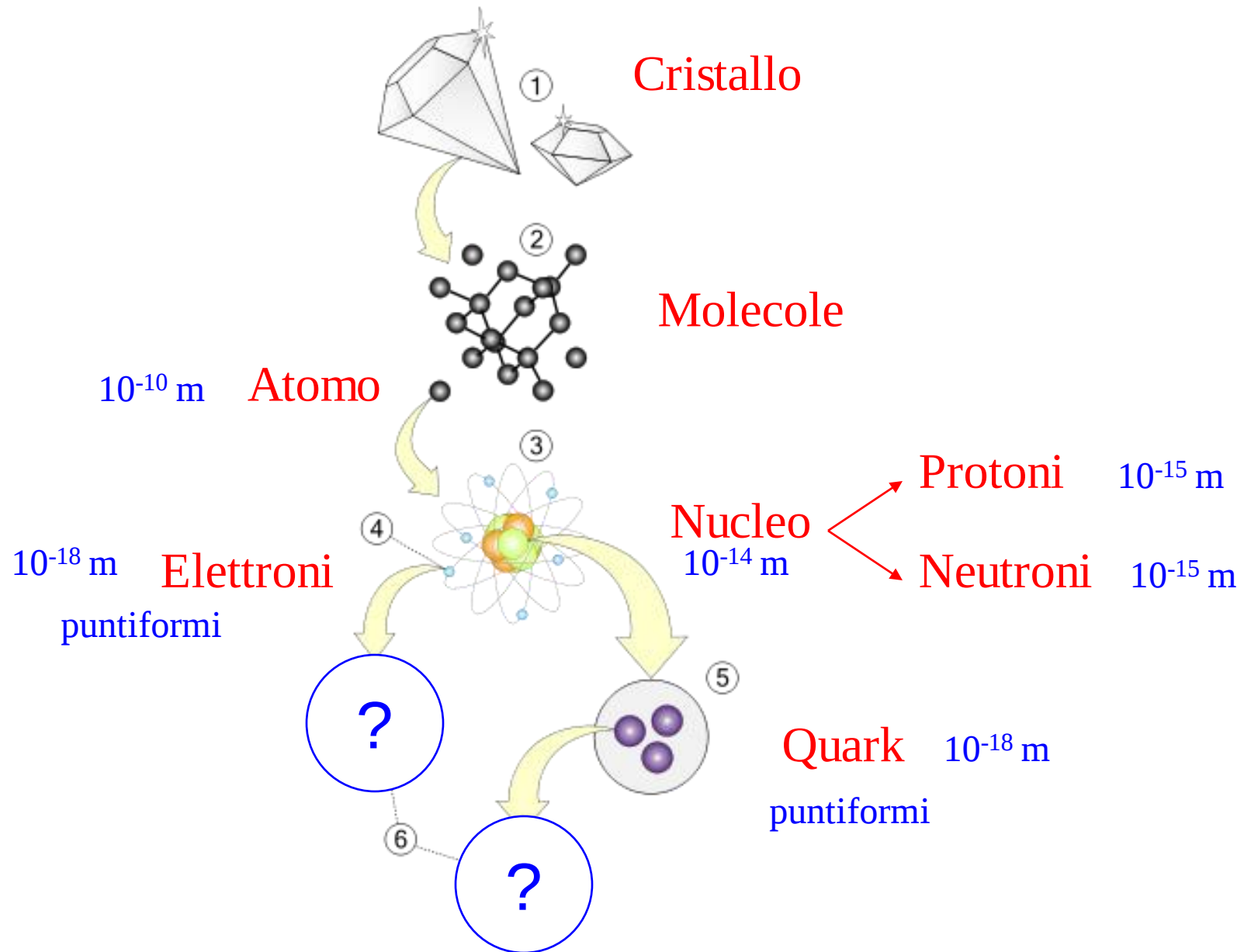
→ creazione di coppie di particelle e antiparticelle

→ necessità di una teoria a molte particelle

→ teoria di campo quantistica e relativistica



Fisica Subnucleare



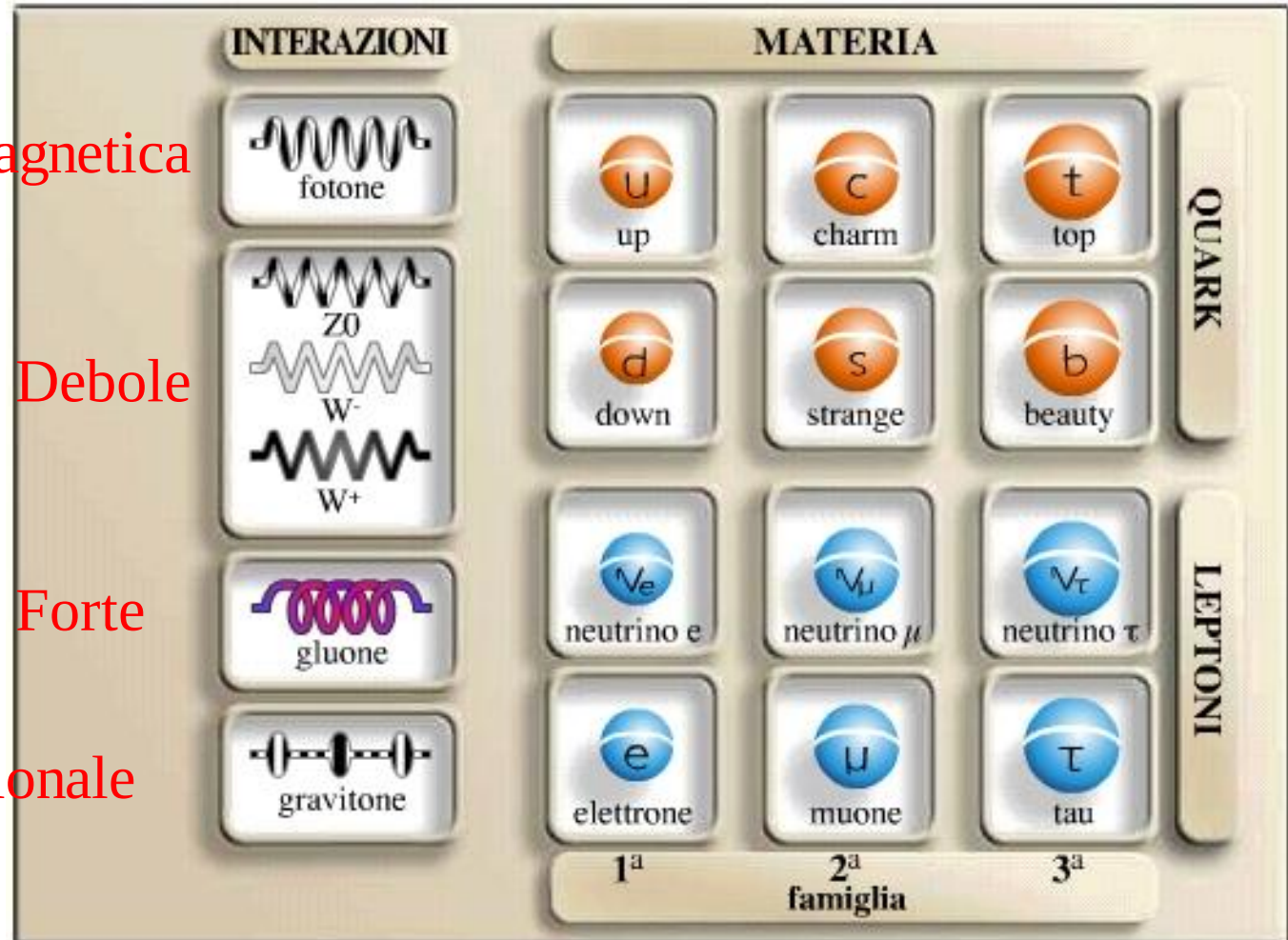
Particelle Elementari + Interazioni Fondamentali

Forza Elettromagnetica

Forza Nucleare Debole

Forza Nucleare Forte

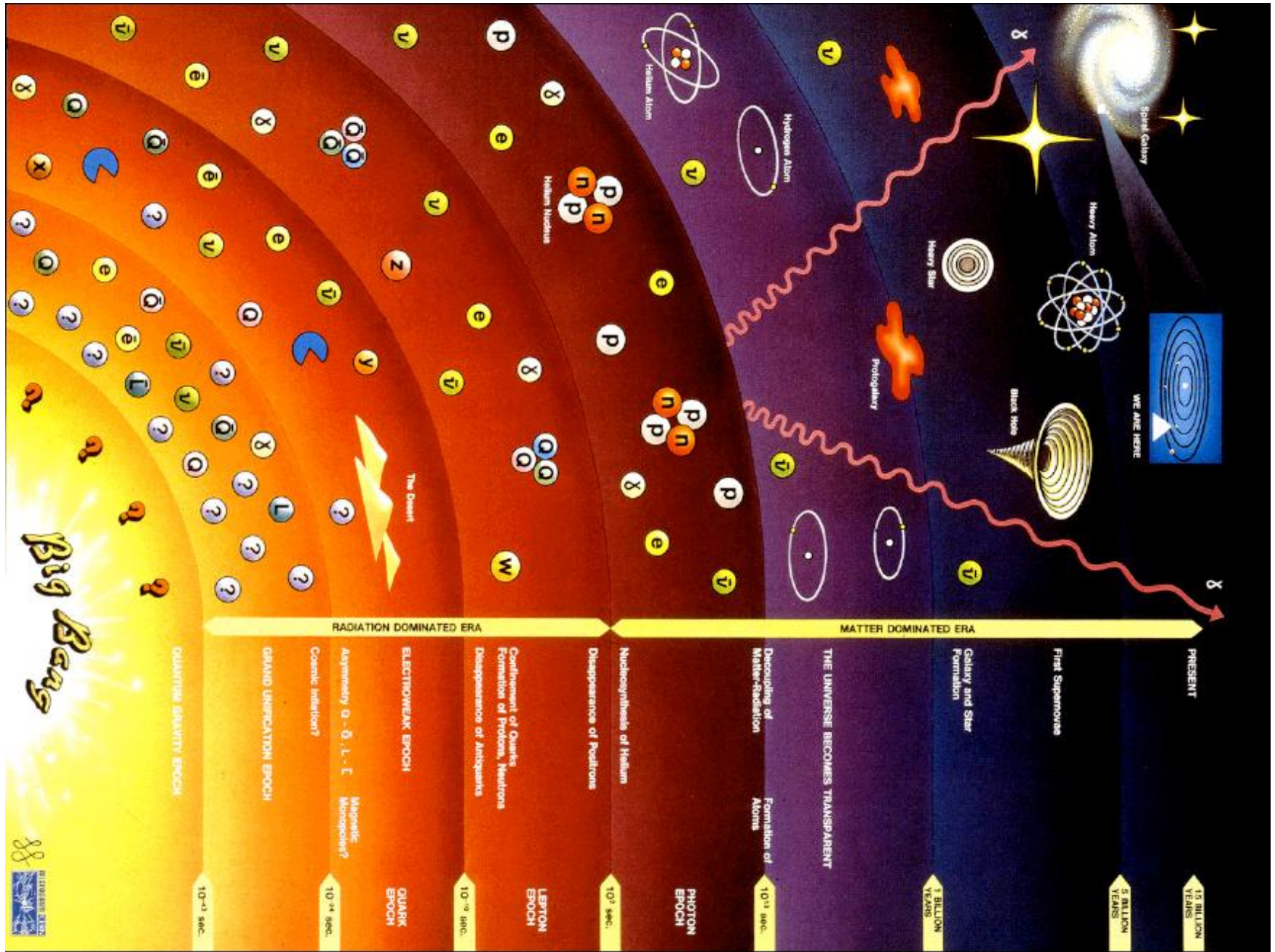
Forza Gravitazionale



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

↑
Origine della massa!!

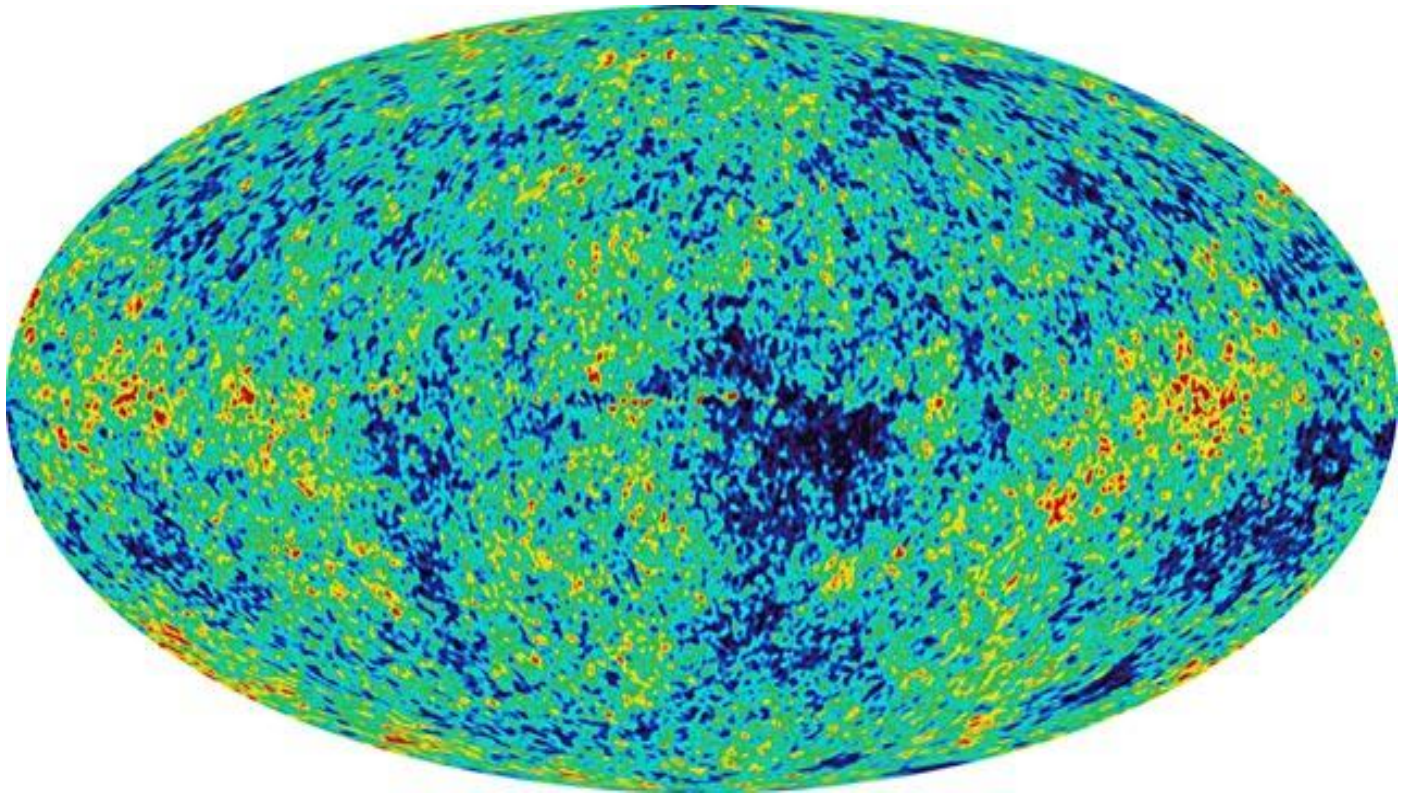
Storia dell'Universo



La Radiazione Cosmica

- L'universo è piatto, omogeneo ed isotropo: Perché?

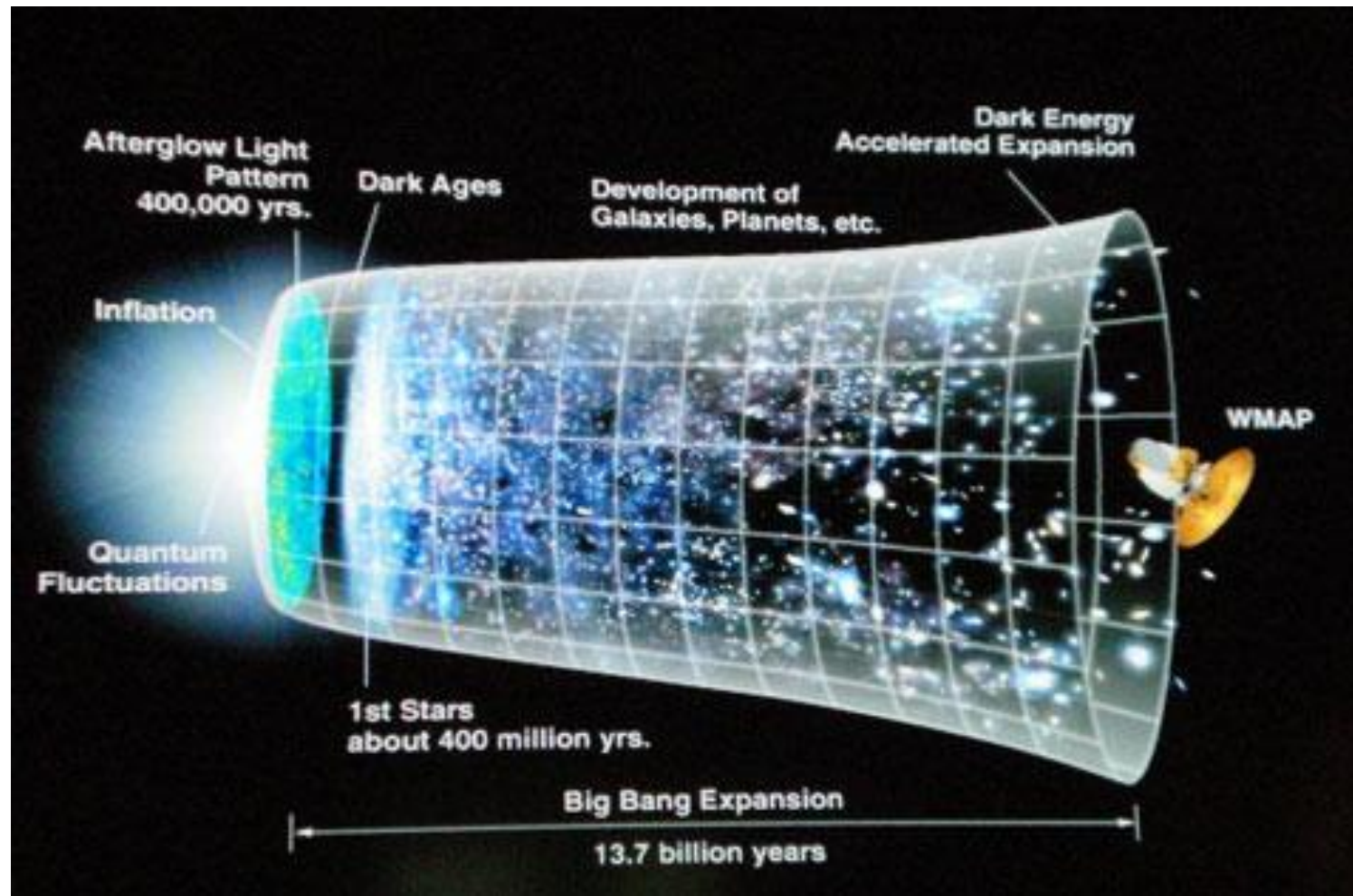
MA piccole disomogeneità a livello dello 0.001% che sono all'origine delle strutture a larga (galassie, stelle, pianeti)



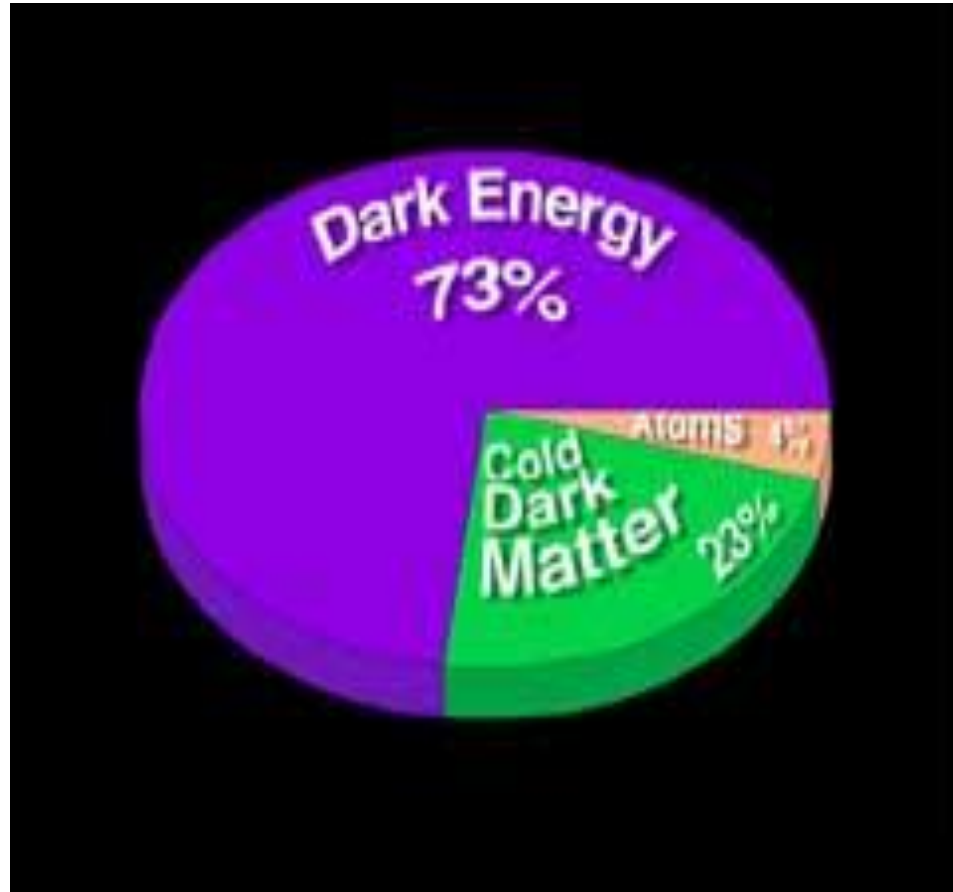
Che cosa ha causato le piccole disomogeneità?

Inflazione Cosmologica

Fase iniziale di espansione esponenziale!!



Contenuto di Energia dell'Universo



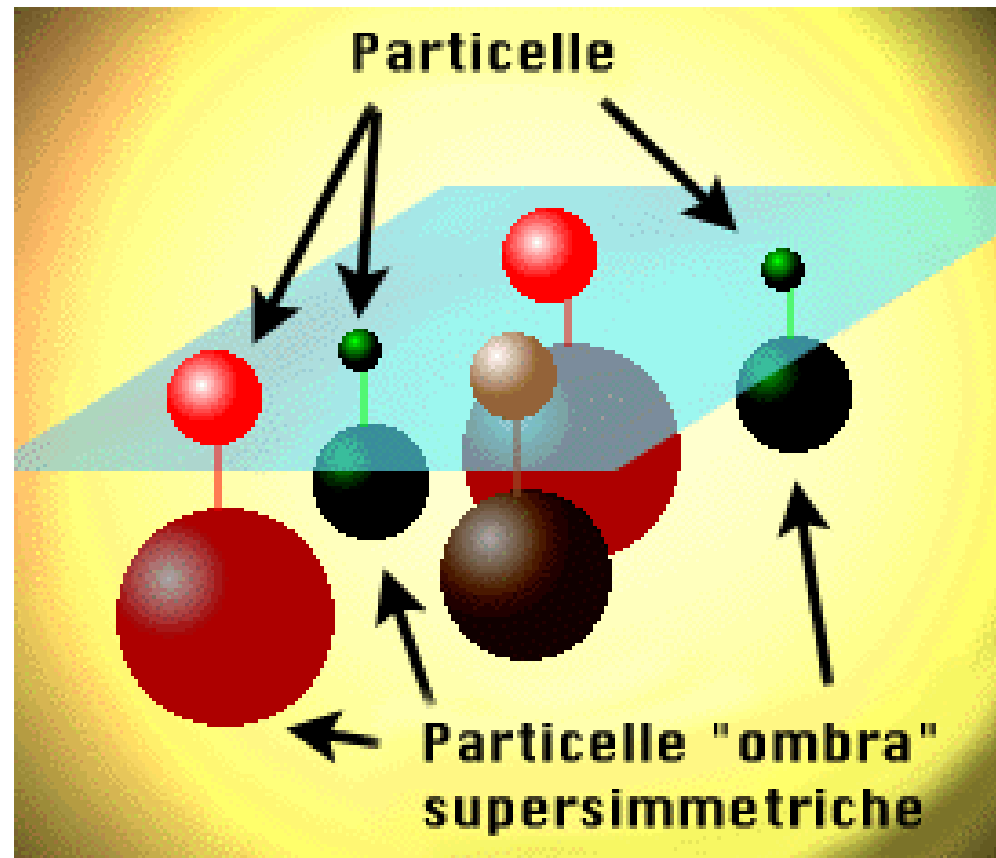
Capiamo solo il 4% del nostro Universo!!!

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 appena scoperto al CERN!
- MA ci sono alcuni seri problemi:
 - 1) Teoria predice un bosone di Higgs troppo massivo
 - 2) Non c'è alcuna unificazione delle forze
 - 3) Non contiene nessuna particella che possa essere la materia oscura
 - 4) Tanti parametri senza spiegazione
 - 5) Non contiene la Gravità

Supersimmetria

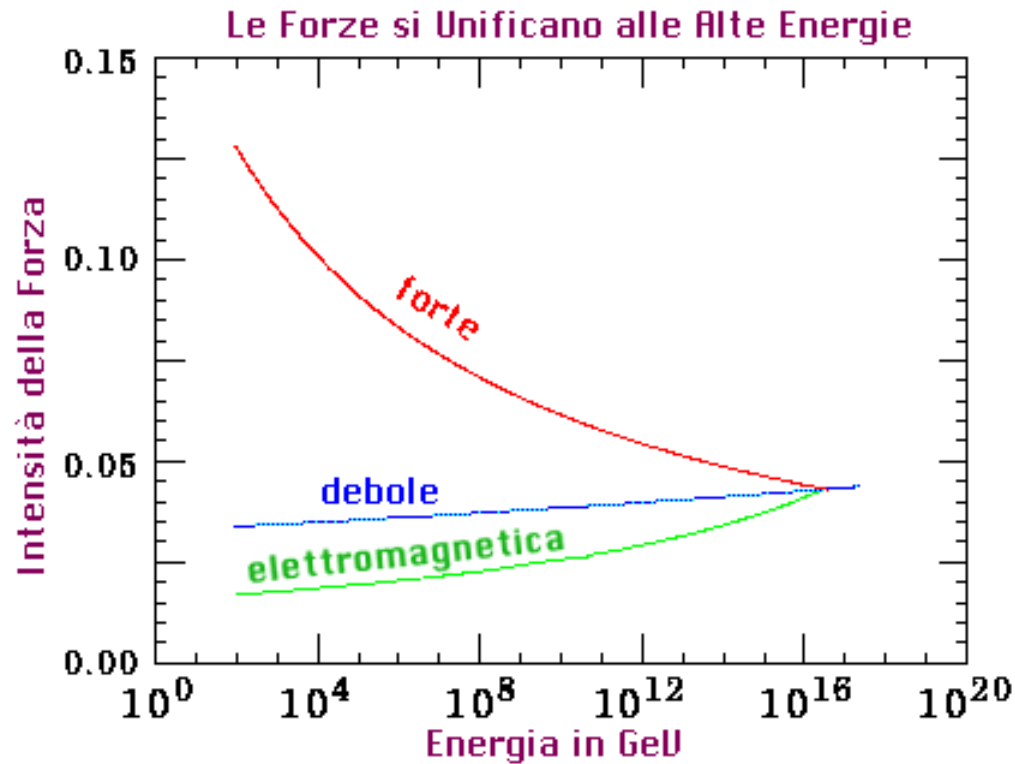
- Ogni particella nota ha un partner supersimmetrico con proprietà simili ma spin e massa diverse
- Il numero di particelle elementari è raddoppiato! dell'ordine di 130!
- Molti più parametri senza spiegazione!



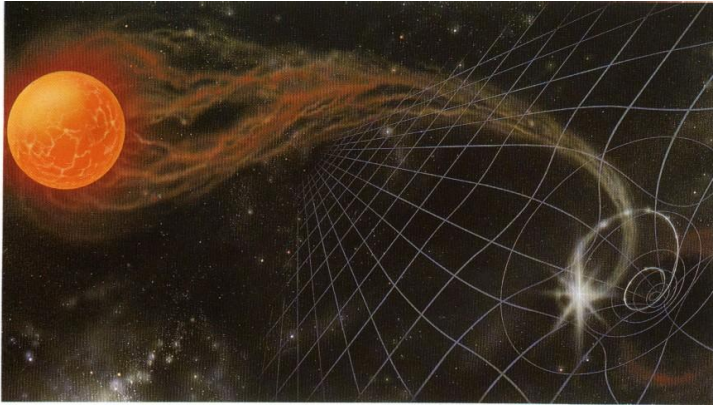
Sempre senza contenere la Gravità!

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: e la Gravità?



- Buchi neri?

- Big Bang?



- Energia oscura?

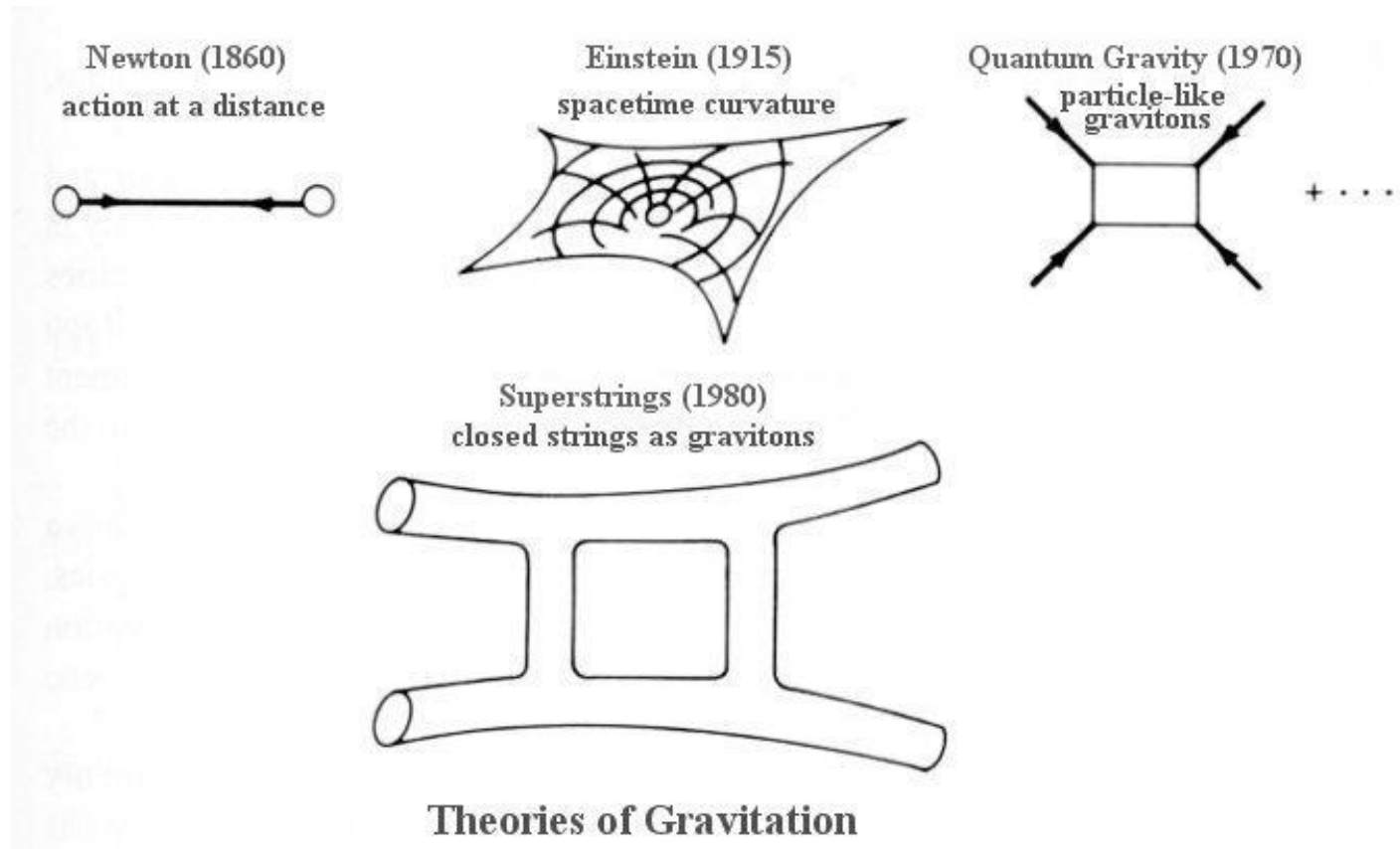
- Unificazione di tutte le forze?

- Teoria fondamentale alla base del nostro Universo?

La risposta a queste domande richiede una teoria di gravità quantistica!!

Stringhe!

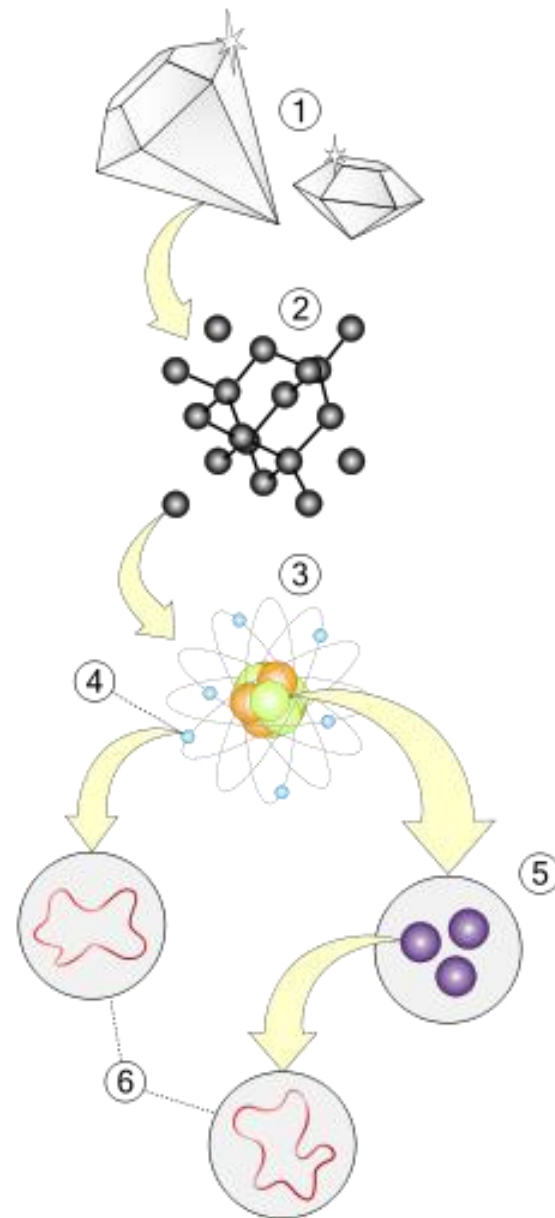
- Necessità di cambiare totalmente visione
- Sostituire particelle puntiformi con oggetti unidimensionali



Teoria delle Stringhe: l'idea

Necessità di cambiare totalmente
visione: sostituire particelle puntiformi
con oggetti unidimensionali!!

- 1) TUTTI i tipi di particelle sono semplicemente diversi modi di oscillazione della stessa stringa
- 2) Unificazione di materia e forze!!
- 3) Contiene la gravità quantistica!
- 4) Esiste solo un parametro da cui si deriva tutto!
- 5) Contiene le teorie già note!



Teoria del TUTTO!

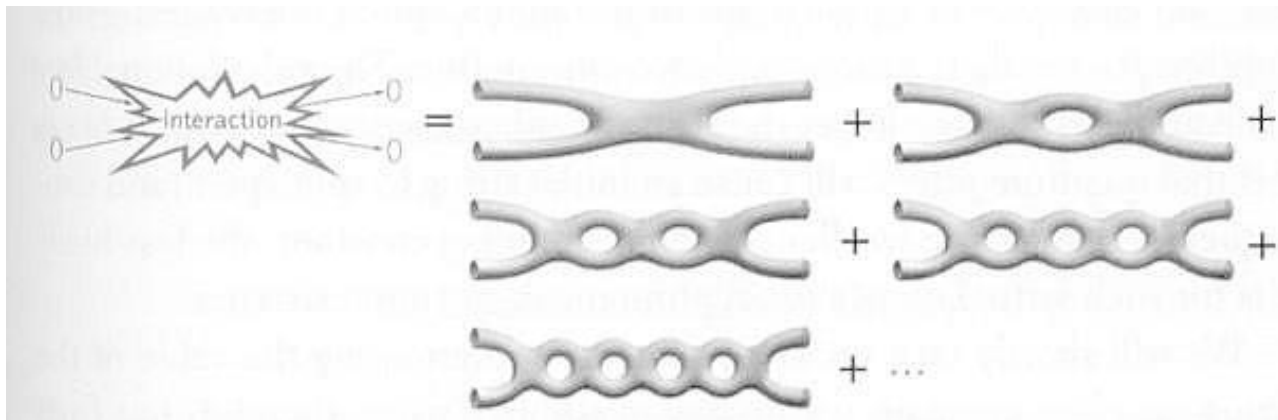
Interazioni di Stringa

- *Tutte* le interazioni consistono della divisione e del ricongiungimento di queste stringhe elementari

E' l'*unica* nota sensata descrizione delle interazioni gravitazionali a distanze ultramicroscopiche!

A grandi distanze la teoria si riduce alla Relatività Generale più altre interazioni a basse energie.

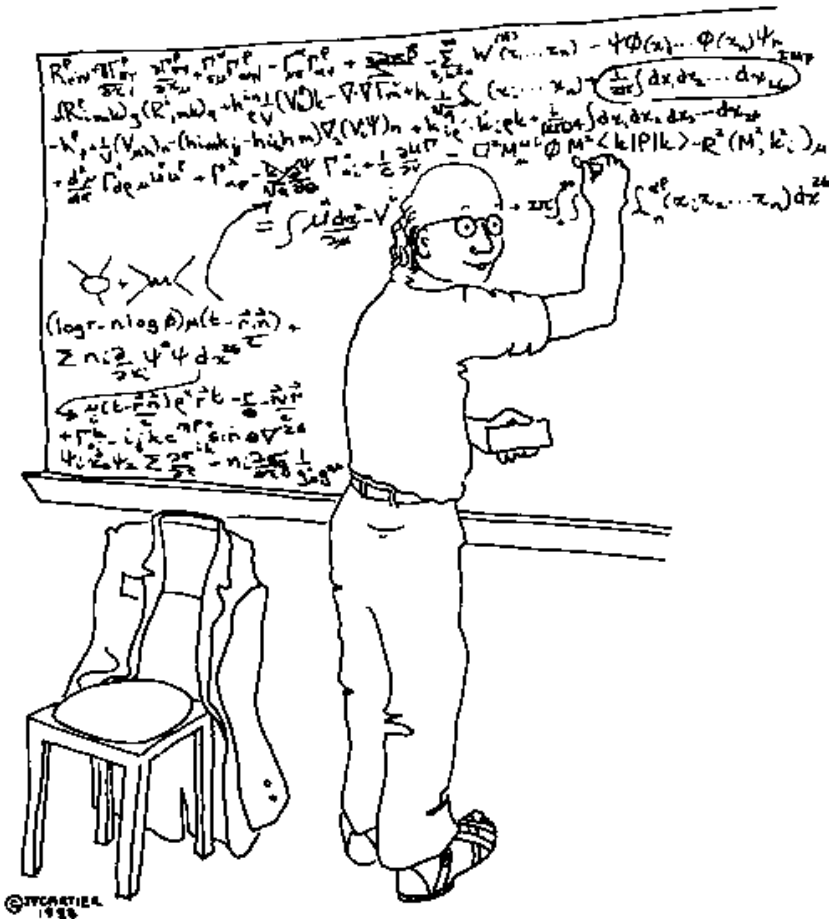
Nessun parametro: la lunghezza della stringa fissa le unità



The net influence each incoming string has on the other comes from adding together the influences involving diagrams with ever more loops.

Dimensioni Extra

- La teoria delle Stringhe predice che il nostro Universo abbia 9 dimensioni spaziali e 1 temporale.



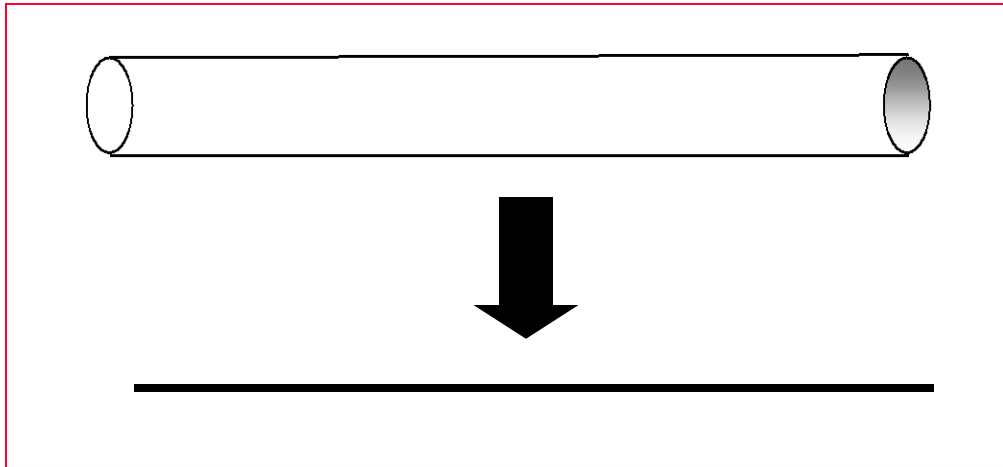
- *Aggiornamento Sperimentale:* il numero osservato di dimensioni (grandi) è 3 spaziali e 1 temporale

"At this point we notice that this equation is beautifully simplified if we assume that space-time has 92 dimensions."

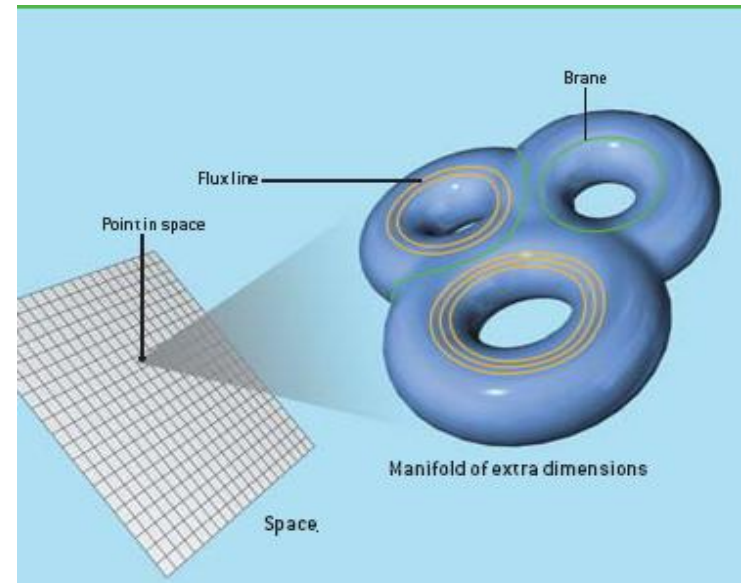
Soluzione

Nostro Universo: 10D = 4D grandi + 6D estremamente piccole

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

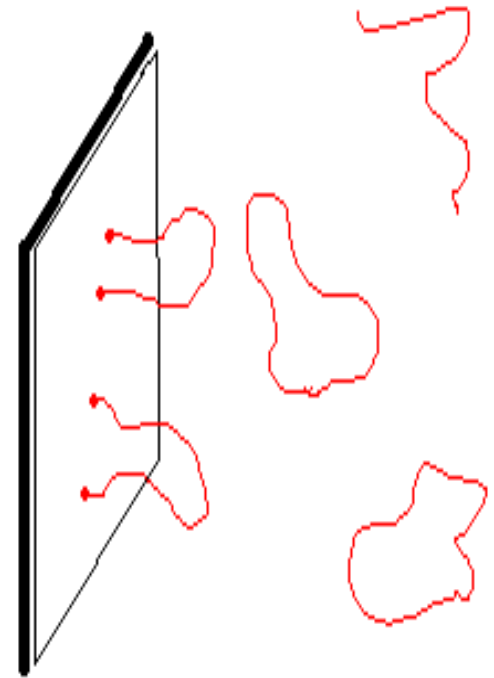


Importantissimo *predire* la
grandezza di tutte le
dimensioni!

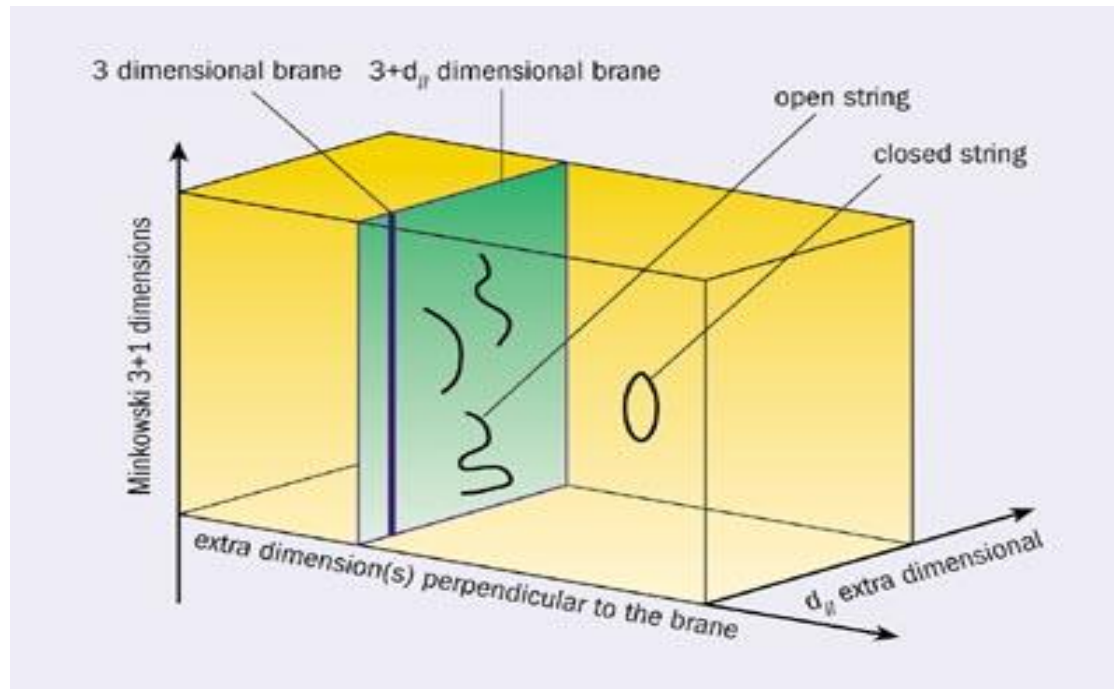


D-Brane

- La teoria delle Stringhe è più ampia di quanto si credesse
 - 1) Normalmente, i punti finali di stringhe aperte si muovono liberamente alla velocità della luce.
 - 2) Possono anche esistere stringhe i cui punti finali sono ancorati su superfici.
- Tali superfici sono interpretate come grandi oggetti massivi, chiamati *D-brane*, nello spaziotempo

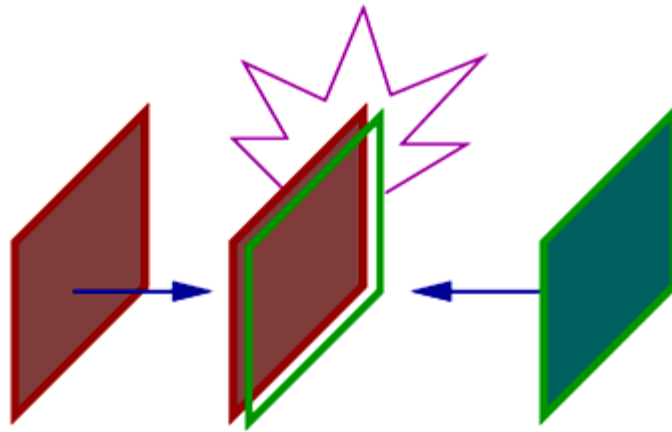


Universo Brana



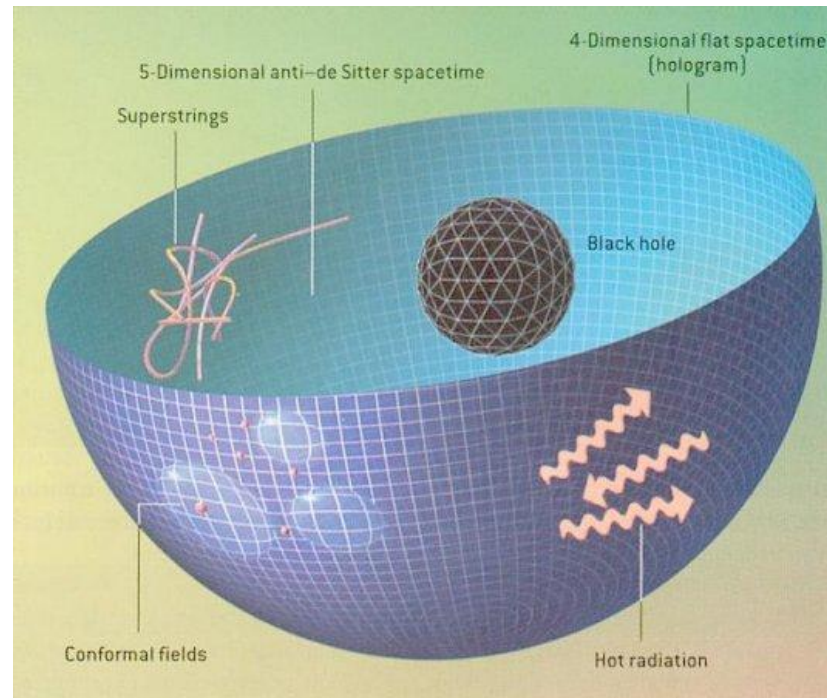
- Alcuni stati sono intrappolati sulle brane e altri sono liberi di muoversi attraverso tutte le dimensioni dello spaziotempo
- Tutte le note particelle ed interazioni fondamentali (eccetto la gravità) sono confinate sulla brana
- Dimensioni extra GRANDI!! Rilevabili tramite modifiche della gravità!!
- Universi paralleli?
- Effetti delle stringhe rilevabili presto tramite gli esperimenti!!

Il Big-Bang?



Collisione tra Universi paralleli come spiegazione!!

Dualità tra particelle e stringhe



Certe teorie delle particelle elementari possono essere viste come particolari teorie di stringa e viceversa!

Un nuovo concetto di spazio-tempo?

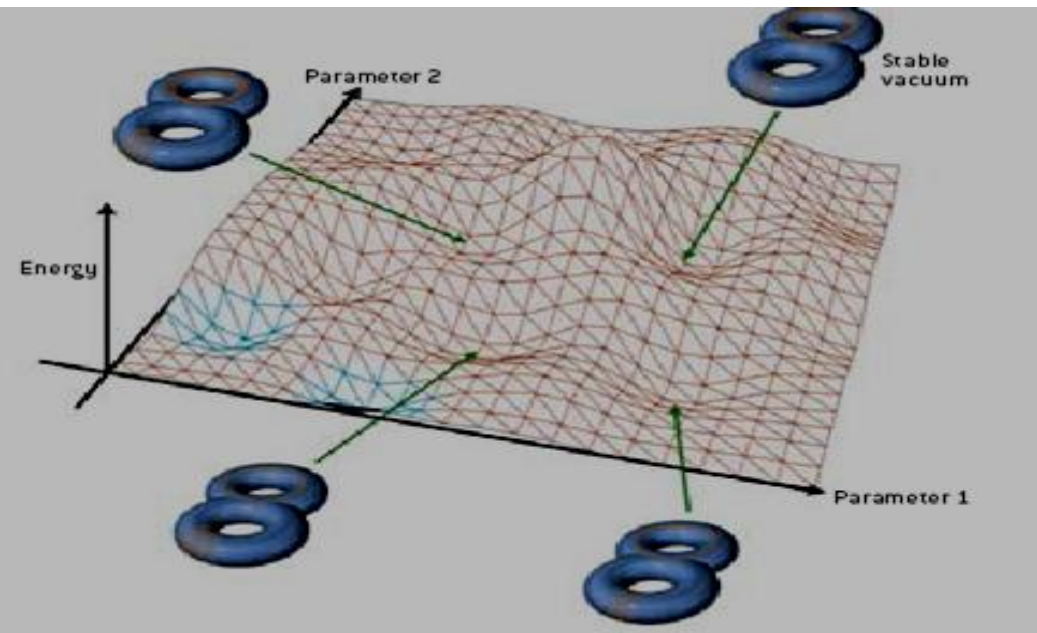
- In alcune circostanze la fisica a distanze più piccole della scala di stringa è ***identica*** alla fisica a distanze più grandi della scala di stringa

Ciò suggerisce che le nozioni di distanza potrebbero essere solo approssimate, valendo solo per distanze $R \gg \ell_s$

$$R \Leftrightarrow \ell_s^2 / R$$

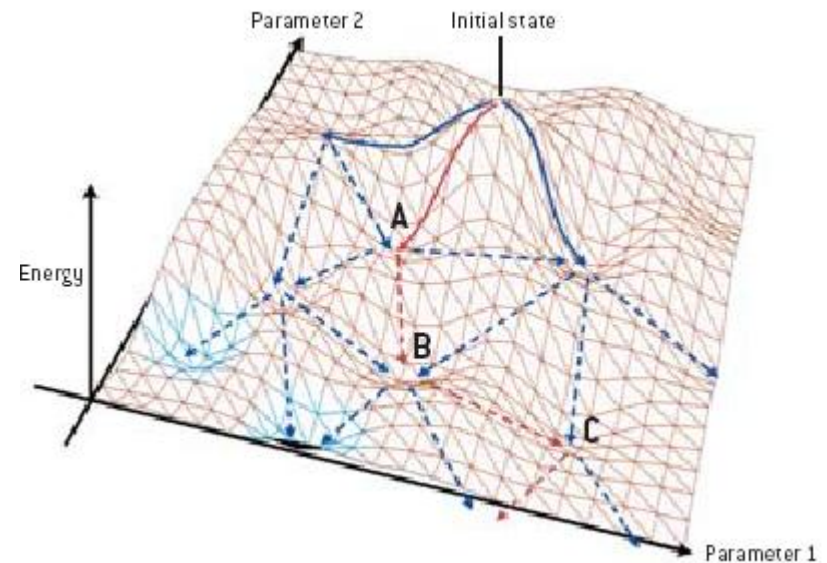
- Possibilità di evitare la *singularità iniziale* della teoria del Big Bang
- In una propria formulazione della teoria spazio e tempo non dovrebbero essere assunti, ma dovrebbero emergere nel limite di grandi distanze

Spazio delle Soluzioni

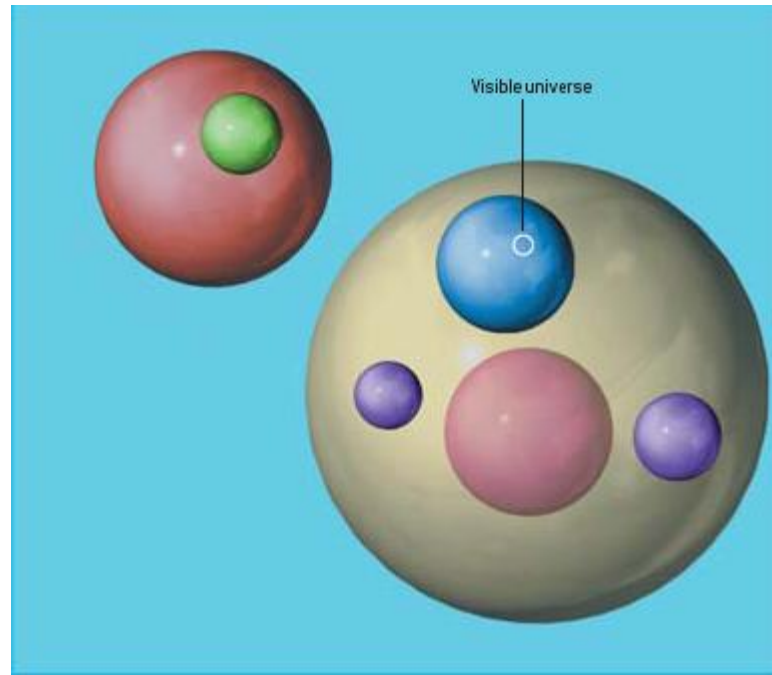
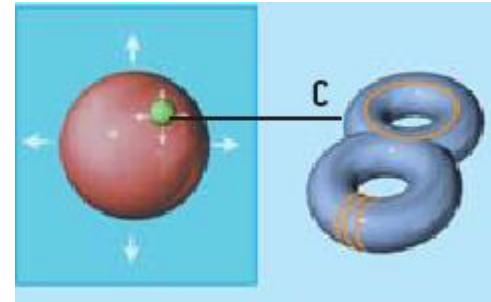
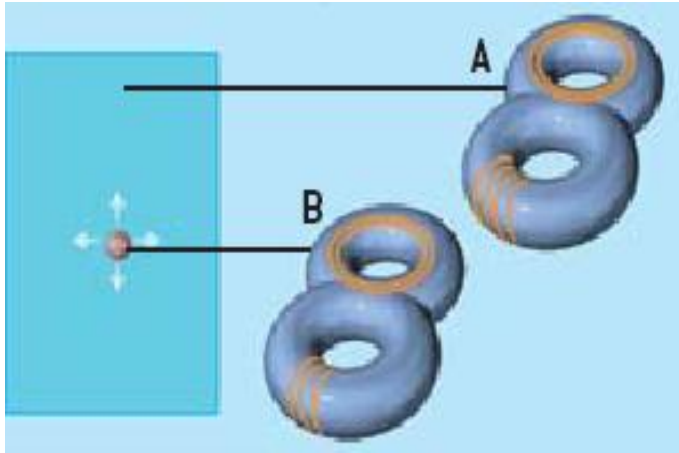


← Soluzioni classiche

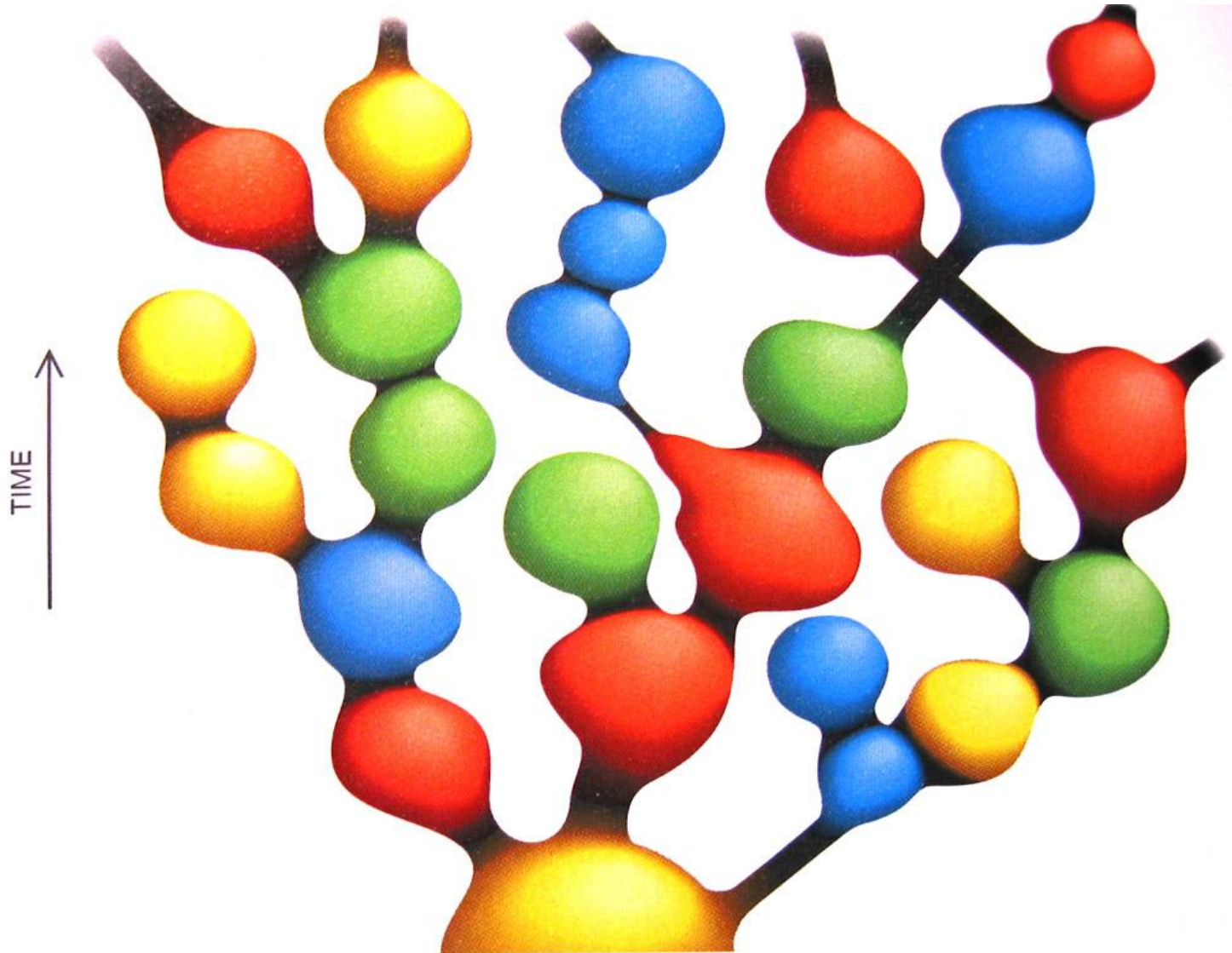
Decadimento quantico
(effetto tunnel) →



Multiverso



Universi che si riproducono



Principio Antropico

- Tante configurazioni diverse

 $\sim 10^{100}$ soluzioni !!!

- Ogni soluzione = Un Universo

- BP (Bousso, Polchinski) molti valori di Λ

- Principio antropico 'risolve' il problema della costante cosmologica: $\Lambda G^2 \sim 10^{-120}$

- E' una soluzione ?

- Altre 'predizioni' ?

- Statistica ...

Riassumendo

- La teoria delle Stringhe è la sola nota teoria dove Gravità e Meccanica Quantistica coesistono ad alte energie

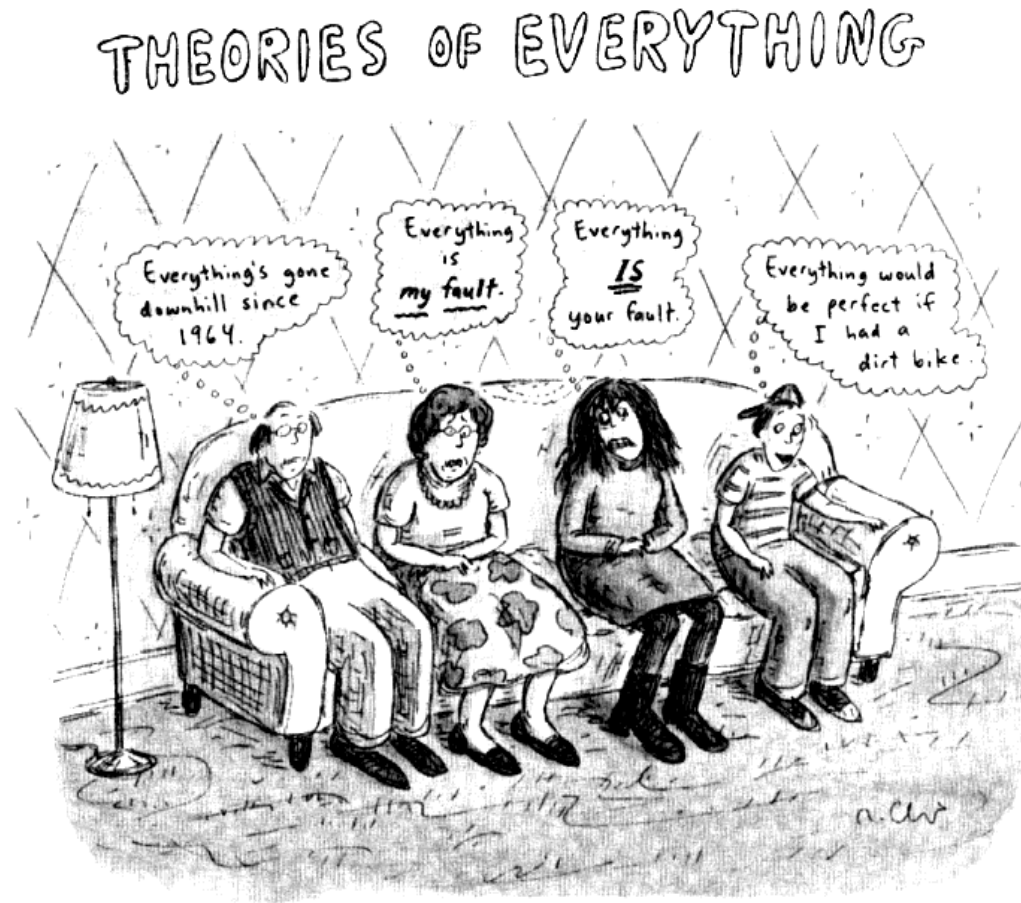
Maggiore lezione del XX secolo: Relatività e Meccanica Quantistica sono pressochè inconsistenti e pertanto insieme impongono condizioni di autoconsistenza molto forti

- La scoperta delle brane ha radicali implicazioni per ciò che la teoria delle stringhe vuol dire.
 - 1) La teoria delle stringhe (o teoria M) è unica
 - 2) Le stringhe potrebbero essere molto più grandi di quanto pensato
 - 3) Potremmo tutti essere confinati su una *Brana*
 - 4) Test sperimentali sono più vicini di quanto si pensasse

Una Teoria del Tutto?

- Per la prima volta nella storia del pensiero umano abbiamo un candidato che potrebbe essere una ‘Theory of Everything’

- 1) Appare includere consistentemente la gravità fino a distanze arbitrariamente piccole.
- 2) Appare essere strettamente vincolata dalla consistenza ad essere unica
- 3) Deve mettersi in contatto con gli esperimenti, ma non c'è un limite di tempo nel progredire!

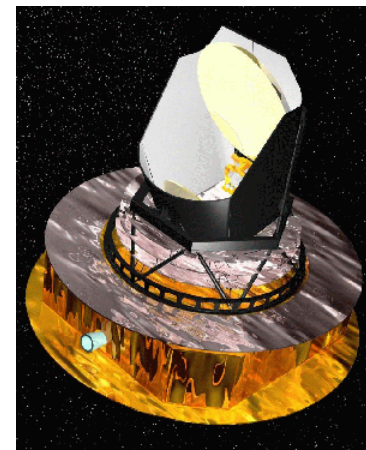
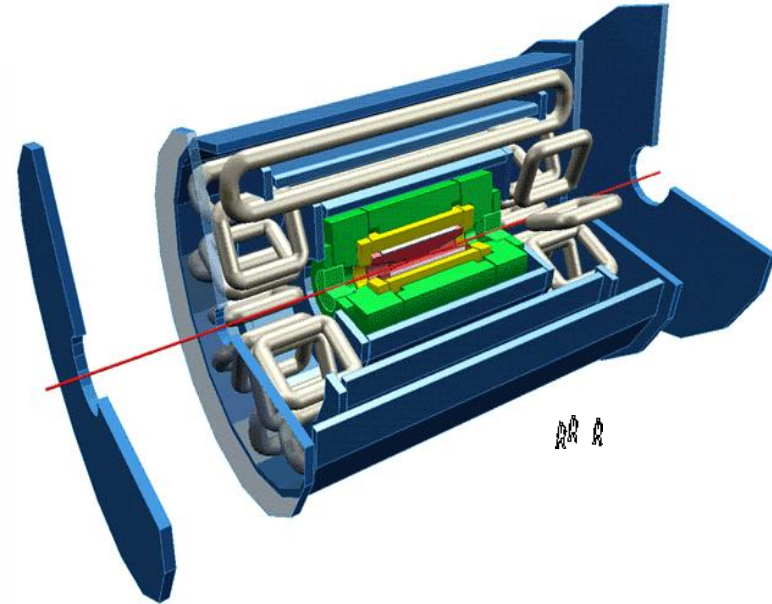
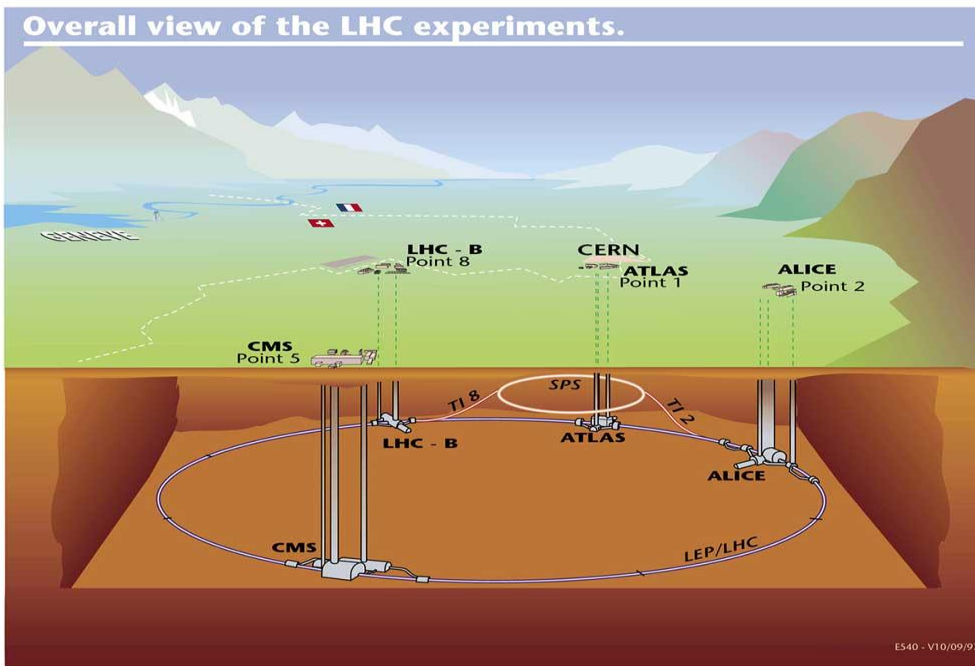


Obiettivi per la Teoria delle Stringhe

- Riprodurre il Modello Standard e tutti i suoi parametri
- Riprodurre l'Inflazione Cosmica
- Capire i buchi neri
- Capire il Big-bang
- Capire l'energia oscura
- Spiegare le “gerarchie”: scale di energia caratteristiche della fisica fondamentale
- Determinare la forma e la grandezza delle dimensioni extra
- Capire le dualità particelle-stringhe e sfruttare le loro predizioni
- Scoprire il cuore matematico della teoria: la teoria “M”
- Trovare una predizione sperimentale!

Dati sperimentali in arrivo!!

- **Particelle elementari:** acceleratore “LHC” del CERN di Ginevra: collisioni protone-protone ad altissime energie: scoperta del bosone di Higgs! Nuove collisioni nel 2015!



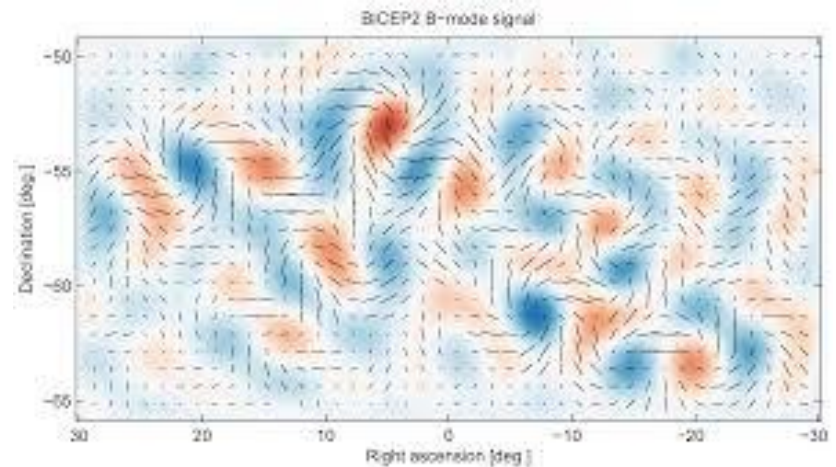
- **Cosmologia:** Satellite “Planck” lanciato dall’agenzia spaziale europea nel maggio 2009!

Che si spera da LHC?

- Higgs → missione compiuta!
- Supersimmetria
- Nuove dimensioni (0.01 mm?)
- Buchi neri (?)
- Insperato !

Recente scoperta!

- **Cosmologia**: esperimento “BICEP” al Polo Sud: scoperta di onde gravitazionali primordiali prodotte dall’inflazione!



- **Implicazione**: Scala di energia dell’inflazione uguale alla scala di unificazione delle tre forze non-gravitazionali!

Molte cose da capire ancora!

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