Il Modello Standard e oltre

Riccardo Torre

INFN Genova & CERN

6 Dicembre 2017

Dipartimento di Fisica - Università di Genova

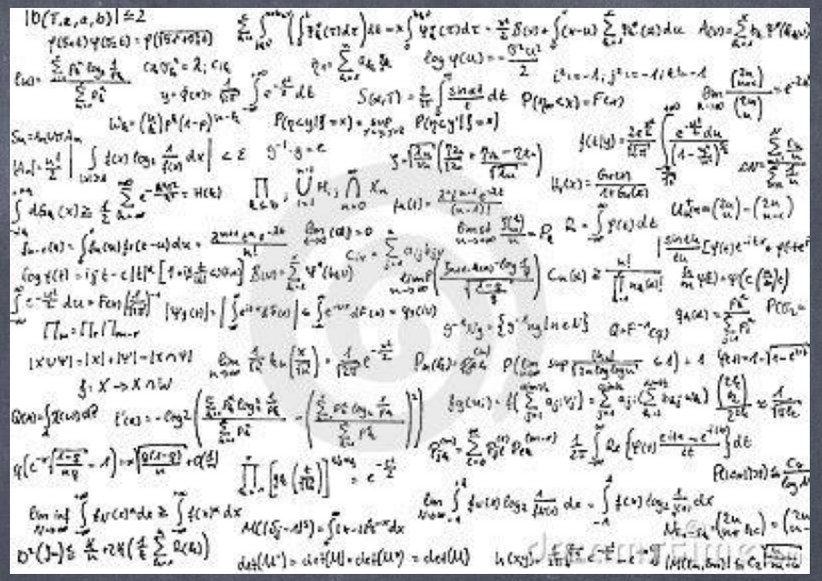
Presentazione (CV)

- 2001-2005 Laurea Triennale, Università di Genova (relatore Prof. C.M. Becchi)
- 2005-2007 Laurea Specialistica, Università di Genova (relatore Prof. G. Ridolfi)
- 2008-2011 Dottorato di Ricerca, Università di Pisa (relatore Prof. R. Barbieri)
- 2010-2011 CERN, Zurich University and EPFL Lausanne (Switzerland)
- 2011-2012 Postdoc, Universidad Autonoma de Madrid (Spain)
- 2012-2015 Postdoc, Università di Padova (SISSA Trieste e Università di Padova)
- 2015-2017 Postdoc, EPFL, Lausanne (Switzerland)
- 2017 Ricercatore di terzo livello, INFN Sezione di Genova (tempo indeterminato)
- 2017-2019 Fellow presso il CERN di Ginevra in congedo dall'INFN

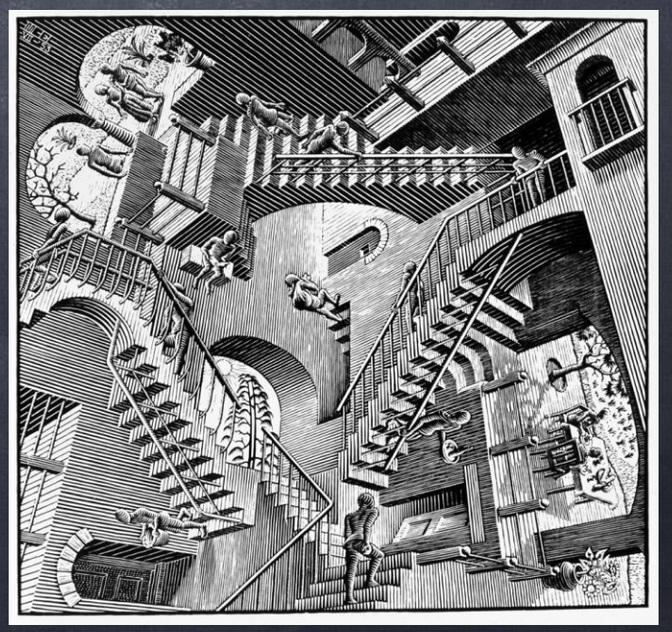
Informazioni più dettagliate su di me si trovano alla mia pagina web personale:
http://rtorre.web.cern.ch/rtorre/Riccardotorre/index.html

Prerequisiti

- un po' di fisica



- molta curiosità



- tantissima fantasia

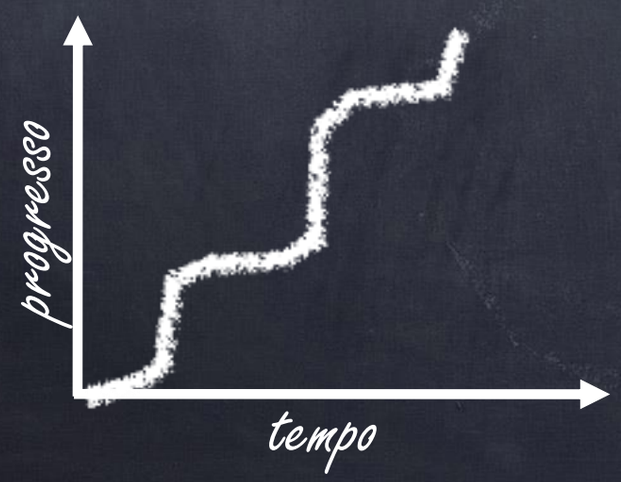
La fisica riduzionista

La fisica riduzionista

La fisica riduzionista affronta i quesiti chiave su ciò che ci circonda cercando di scomporlo in parti sempre più piccole e di spiegare le proprietà dei tasselli fondamentali

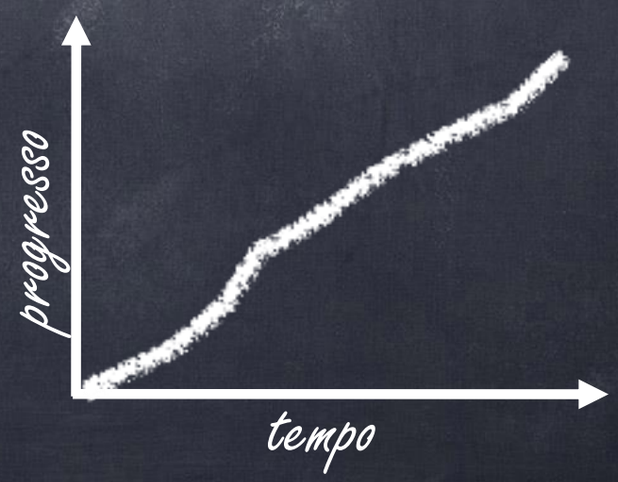
Fisica riduzionista

Formulazione e verifica (falsificazione) di teorie in grado di descrivere le leggi fondamentali della natura



Fisica applicata

Applicazione delle leggi fondamentali formulate dalla fisica riduzionista a sistemi complessi (reali)



Sempre più piccolo...

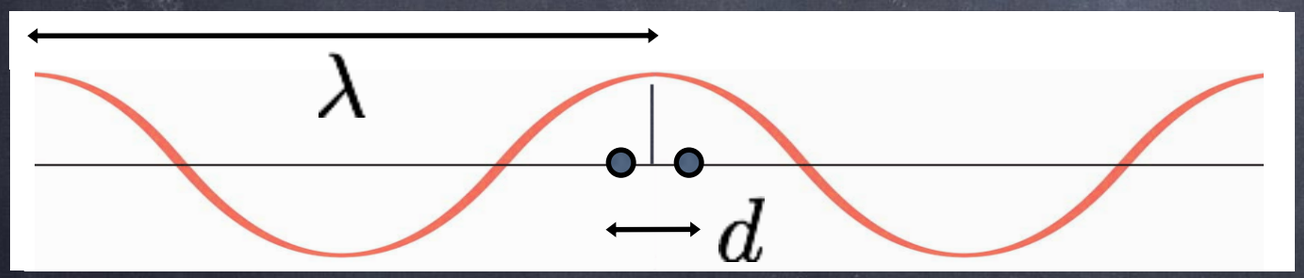
Per "misurare" accuratamente un sistema ci vuole un "metro" che abbia la giusta sensibilità

Esempio della barca: le onde che fanno oscillare la barchetta di un pescatore e quelle che fanno oscillare una nave da crociera hanno lunghezza molto diversa

Un altro esempio sono le onde elettromagnetiche

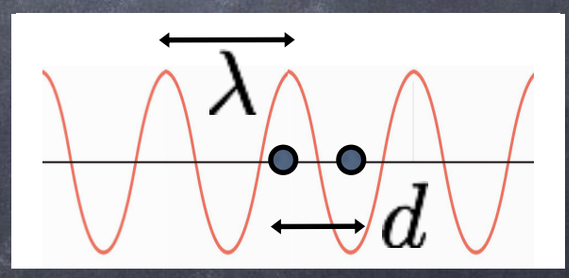
$\lambda \gg d$

i due punti sembrano coincidere



$\lambda \approx d$

i due punti vengono distinti (risolti)



La luce visibile si ferma a $\lambda > 400\,nm$. Anche col miglior microscopio, non potremo mai "vedere" $d < 400\ nm = 4 \cdot 10^{-5}\ cm$

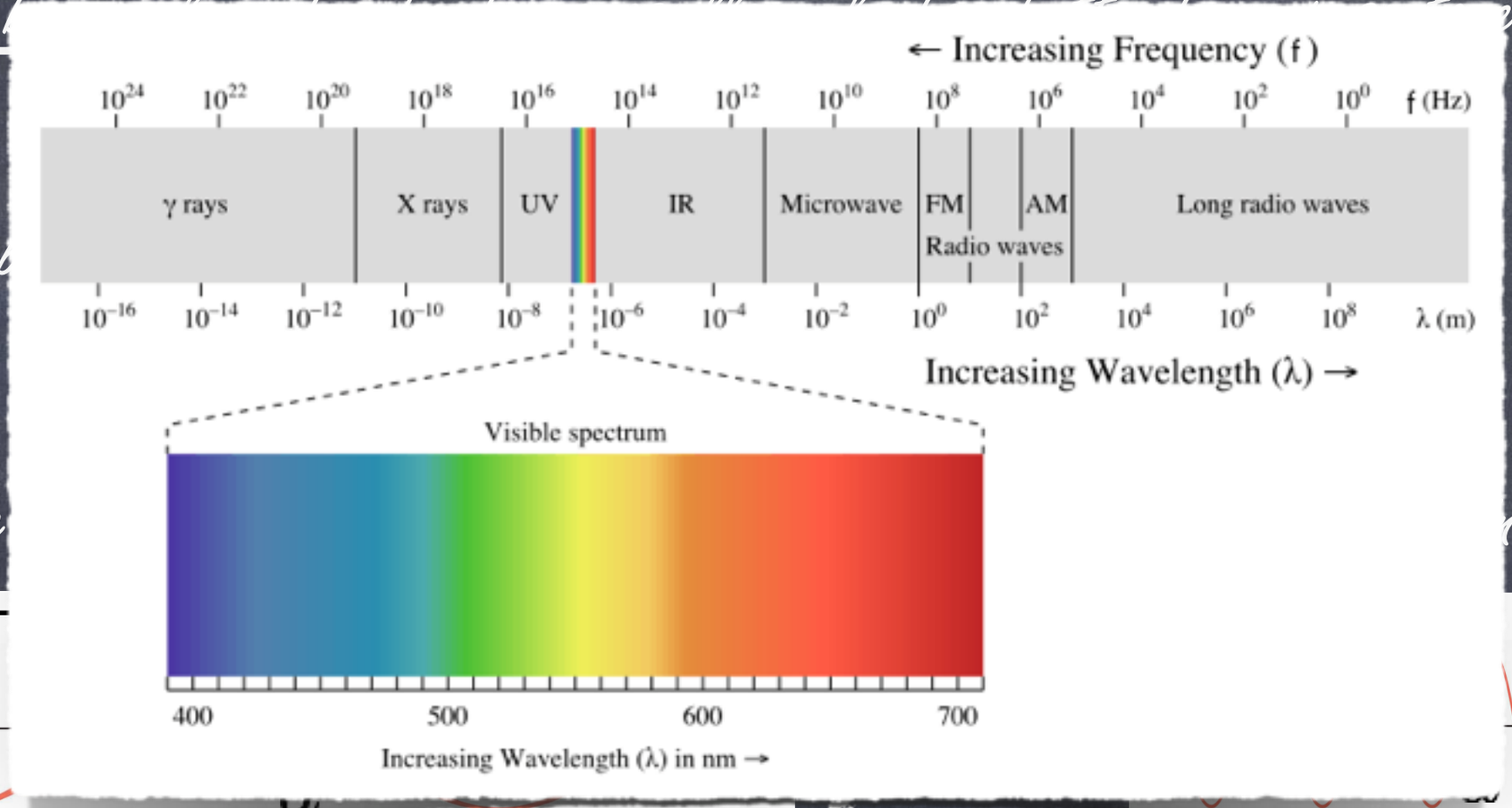
Servono "onde" con lunghezza molto molto più piccola...

Sempre più piccolo...

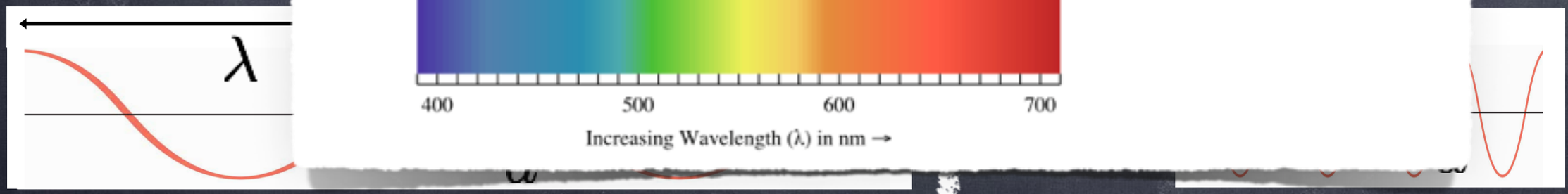
Per "misurare" accuratamente un sistema ci vuole un "metro" che abbia la giusta sensibilità

Esempio della [illegible] e quelle che fanno oscillare

Un altro esemp[illegible]



i due [illegible] nti (risolti)



La luce visibile si ferma a $\lambda > 400\,nm$. Anche col miglior microscopio, non potremo mai "vedere" $d < 400\,nm = 4 \cdot 10^{-5}\,cm$

Servono "onde" con lunghezza molto molto più piccola...

Piccole distanze e ...

Meccanica Quantistica (MQ):

Le particelle sono onde e viceversa (es. le onde e.m. sono composte da fotoni)

onda di lunghezza λ

relazione di De Broglie ⇕ $p = \frac{h}{\lambda} = m \cdot v$

particella con impulso p

h è detta costante di Planck

$$h = 6.62606957(29) \cdot 10^{-34} J \cdot s$$

e ha dimensioni

$$[h] = [M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-1} = [E] \cdot [T]$$

Quindi MQ + RS ci dicono che $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$

Relatività Speciale (RS):

A riposo la massa è energia, a grande impulso l'impulso è energia

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

relazione di Einstein

nel limite $p \ll mc$: $E = mc^2$

nel limite $p \gg mc$: $E = pc$

c è la velocità della luce

$$c = 299792458\, m \cdot s^{-1}$$

Nota: $\hbar = h/2\pi$ e c sono così importanti che i fisici delle particelle lavorano in un sistema di unità di misura (dette Unità Naturali) definito da $\hbar = c = 1$

e dunque per testare piccole lunghezze ci vogliono grandi energie

... grandi energie

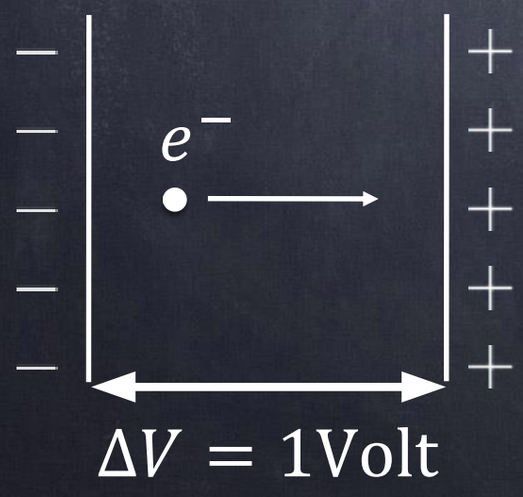
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$$

Ma quanta energia ci serve?

$$h \cdot c = 2 \cdot 10^{-25} J \cdot m$$

Pochissima! Con un Joule possiamo testare lunghezze 18 ordini di grandezza più piccole della luce visibile!

Tuttavia le nostre equazioni si riferiscono ad una singola particella ed è molto difficile dare così tanta energia a una singola particella (il Joule è un'unità di misura adatta per sistemi macroscopici, non per una singola particella)



L'energia di un elettrone in un campo elettrico

$$\Delta E = 1.6 \cdot 10^{-19} J \equiv 1eV$$

L' "elettronvolt" (eV) è l'unità di misura più appropriata per l'energia di una particella

$$h \cdot c = 1.2 \cdot 10^{-6} eV \cdot m$$

Bisogna essere ambiziosi per fare meglio della luce visibile!

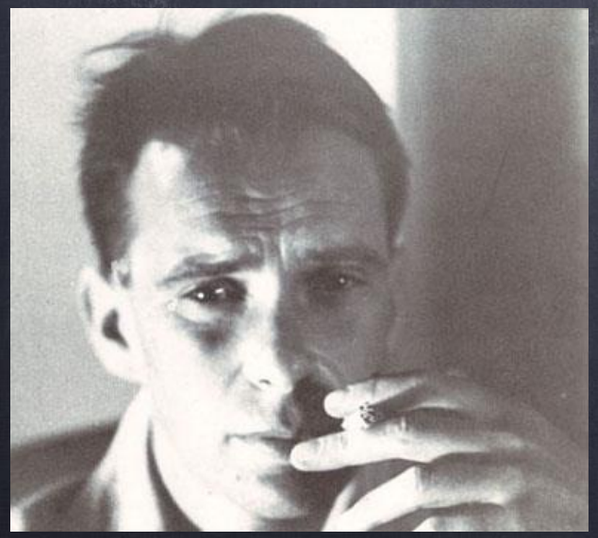
"Microscopi" sempre più grandi

Grandi idee ...

Il metodo che i fisici delle particelle utilizzano per studiare le proprietà delle particelle è quello di farle collidere fra di loro a energie molto grandi

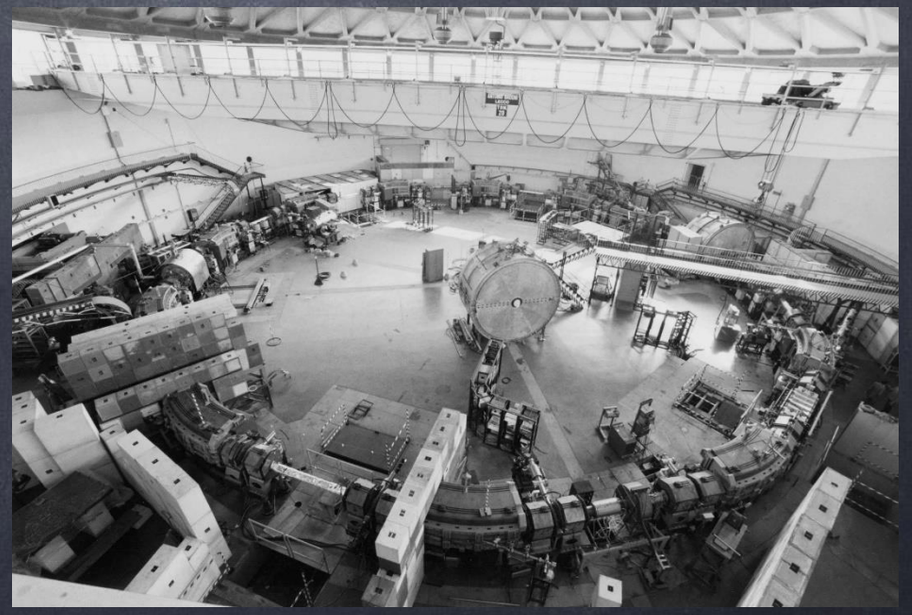
Fino agli anni '60 si usava accelerare un fascio di particelle per poi farlo collidere su un bersaglio fisso, tuttavia questa tecnica limita molto l'energia nel centro di massa delle particelle che collidono e il numero di collisioni per unità di tempo (luminosità)

Fu negli anni 60-70 che grazie alle idee pionieristiche di Bruno Touschek e agli investimeni dell'INFN nei laboratori di Frascati si iniziarono a costruire collisionatori circolari in cui due fasci vengono accelerati in direzione opposte e fatti collidere in un punto preciso



Bruno Touschek

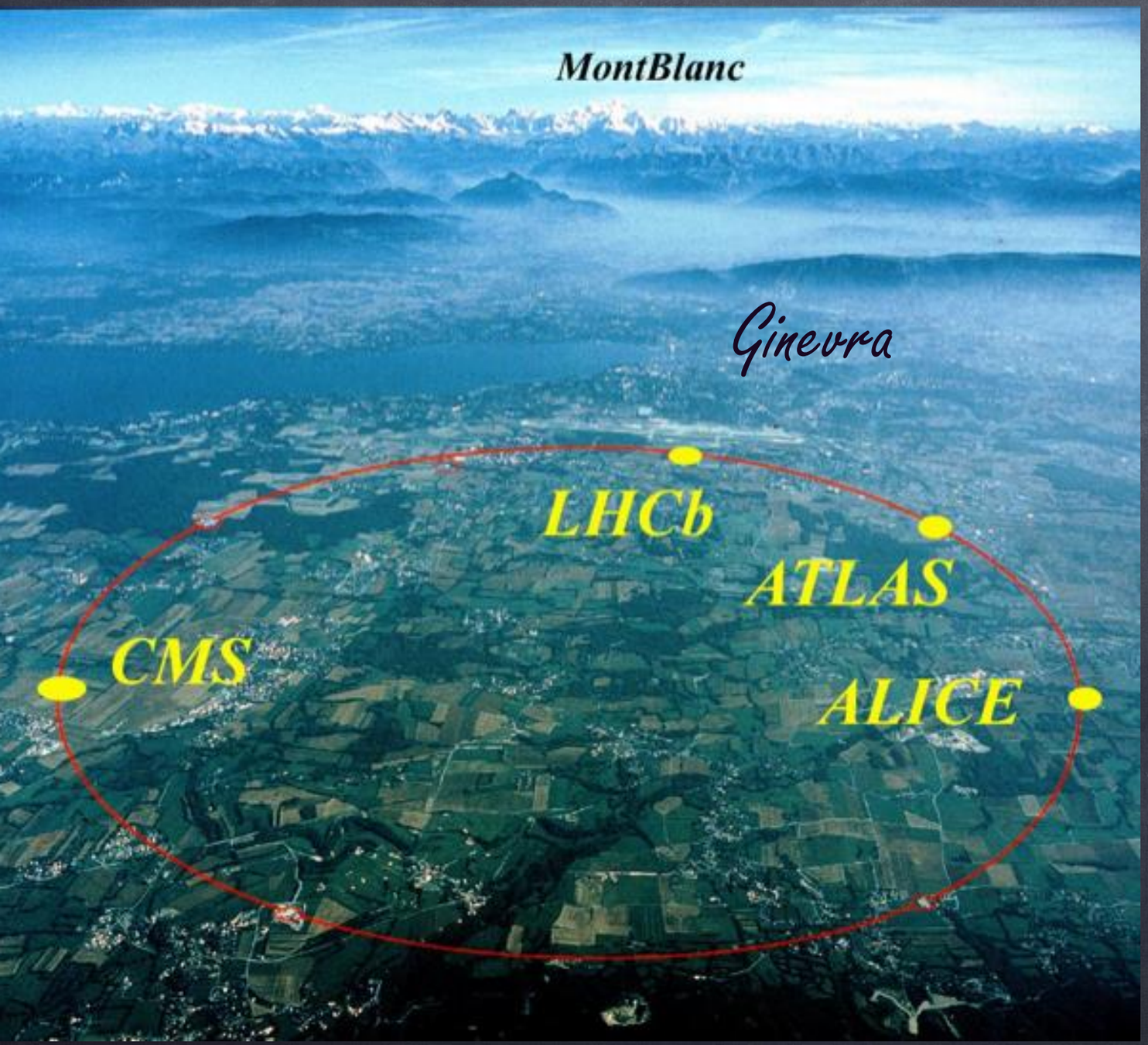
ADA, LNF Frascati, 1961



ADONE, LNF Frascati, 1967

... e grande ambizione

Da allora per oltre 50 anni fisici e ingegneri hanno sviluppato acceleratori sempre più potenti, e quindi, sempre più grandi



Negli acceleratori circolari le particelle vengono accelerate per milioni e milioni di giri e quindi per distanze enormi

Il LHC (Large Hadron Collider) al CERN di Ginevra accelera due fasci di protoni

$$L = 27 \text{ km}$$

$$h \approx -100 \text{ m}$$

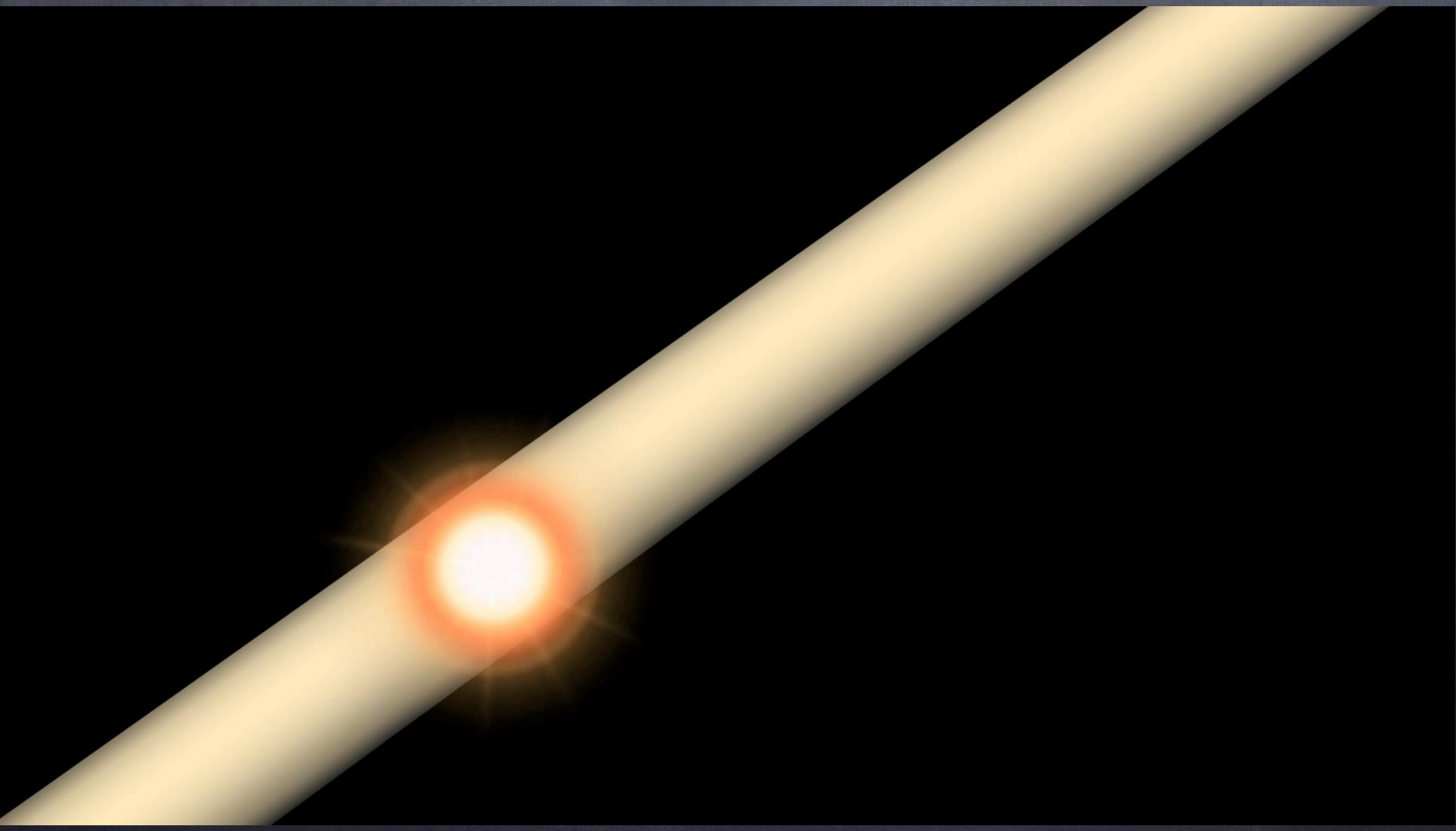
$$E = 13 \text{ TeV}$$

$$B \gtrsim 8 \text{ Tesla}$$

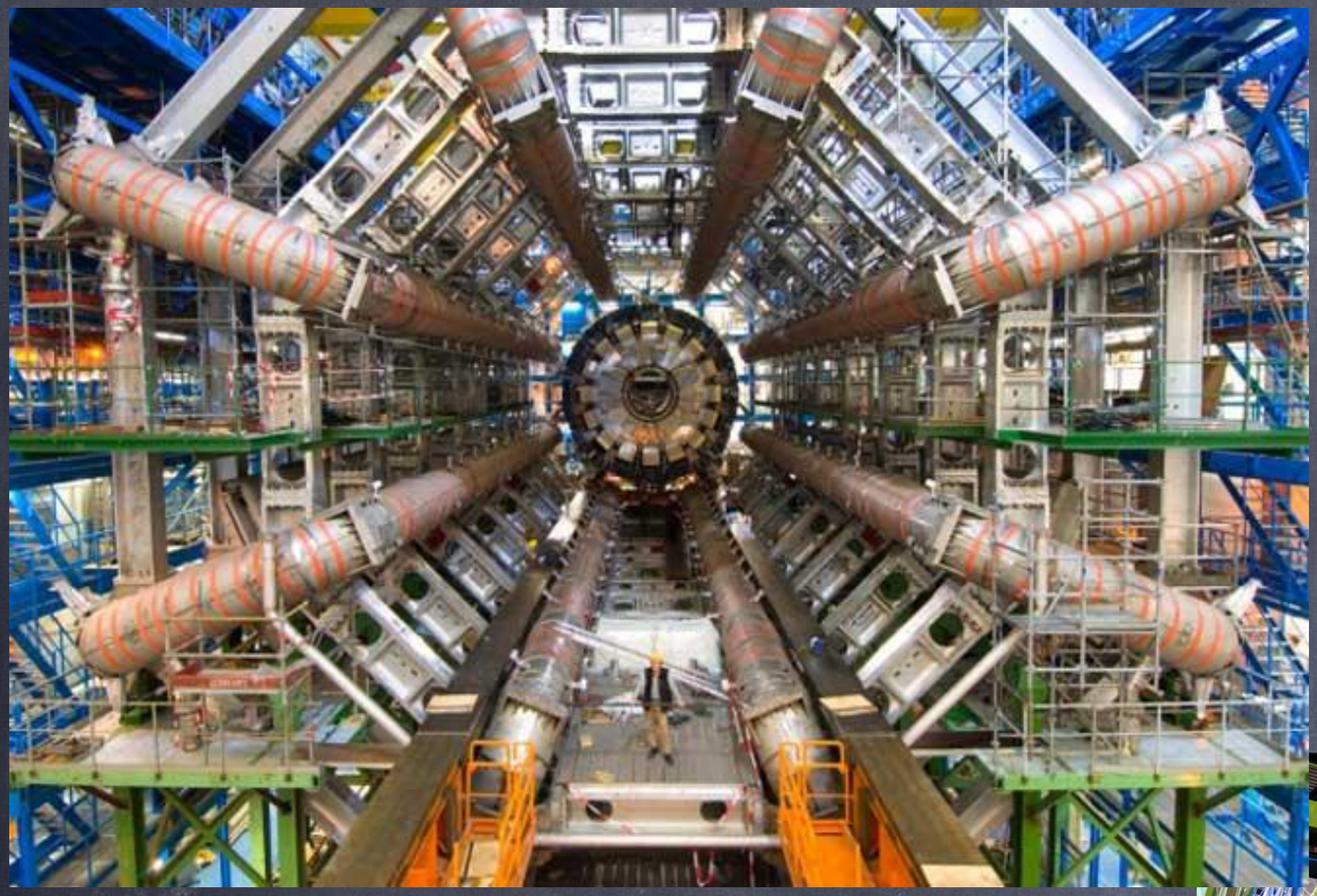
$$T = -271^{\circ}\text{C}$$

$$W = 180 \text{ MW}$$

Un viaggio dentro il LHC



Rivelatori

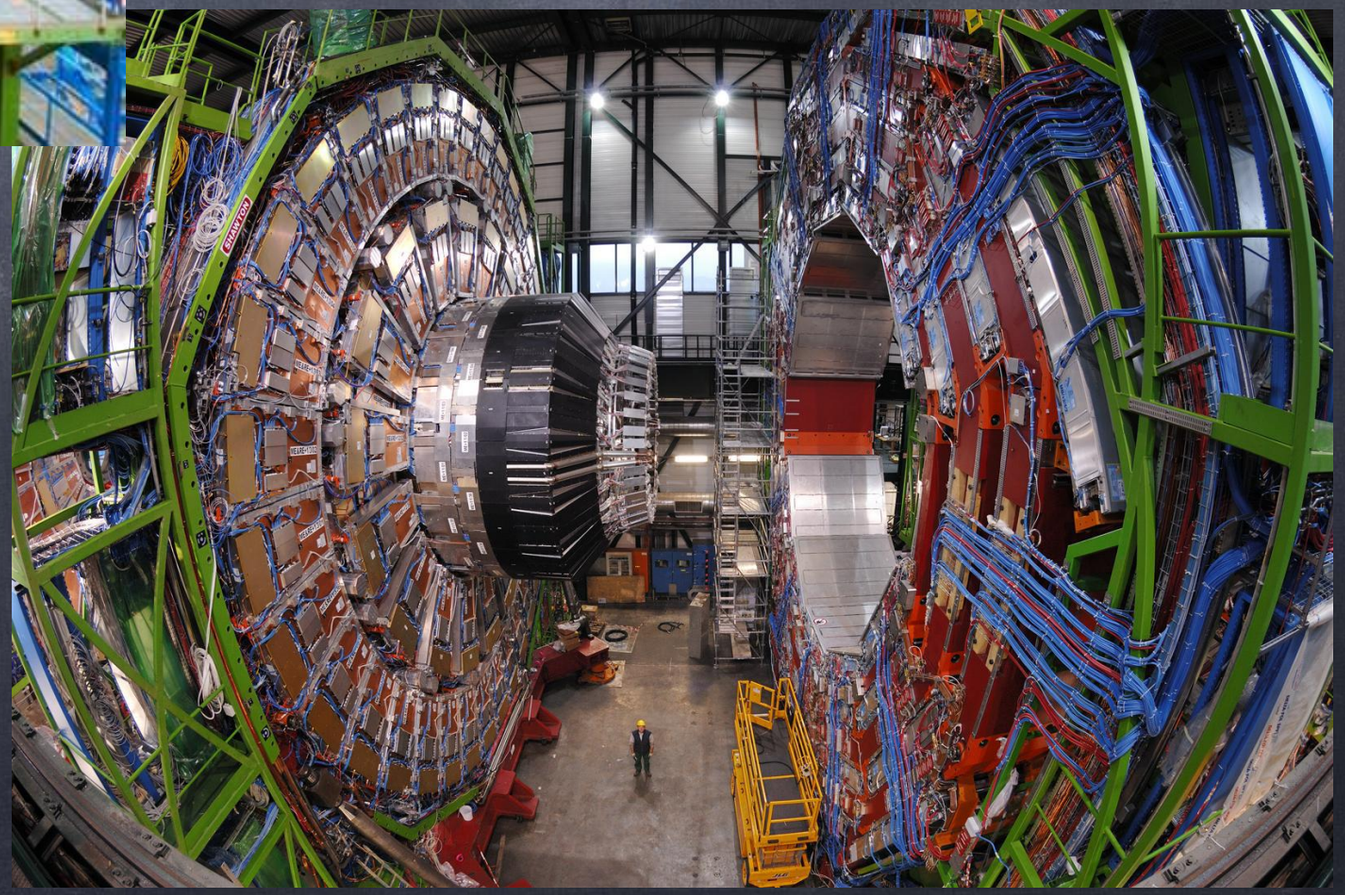


ATLAS

Alti come palazzi e costruiti con tutte le più avanzate tecnologie disponibili (circa 3000 km di cavi!)

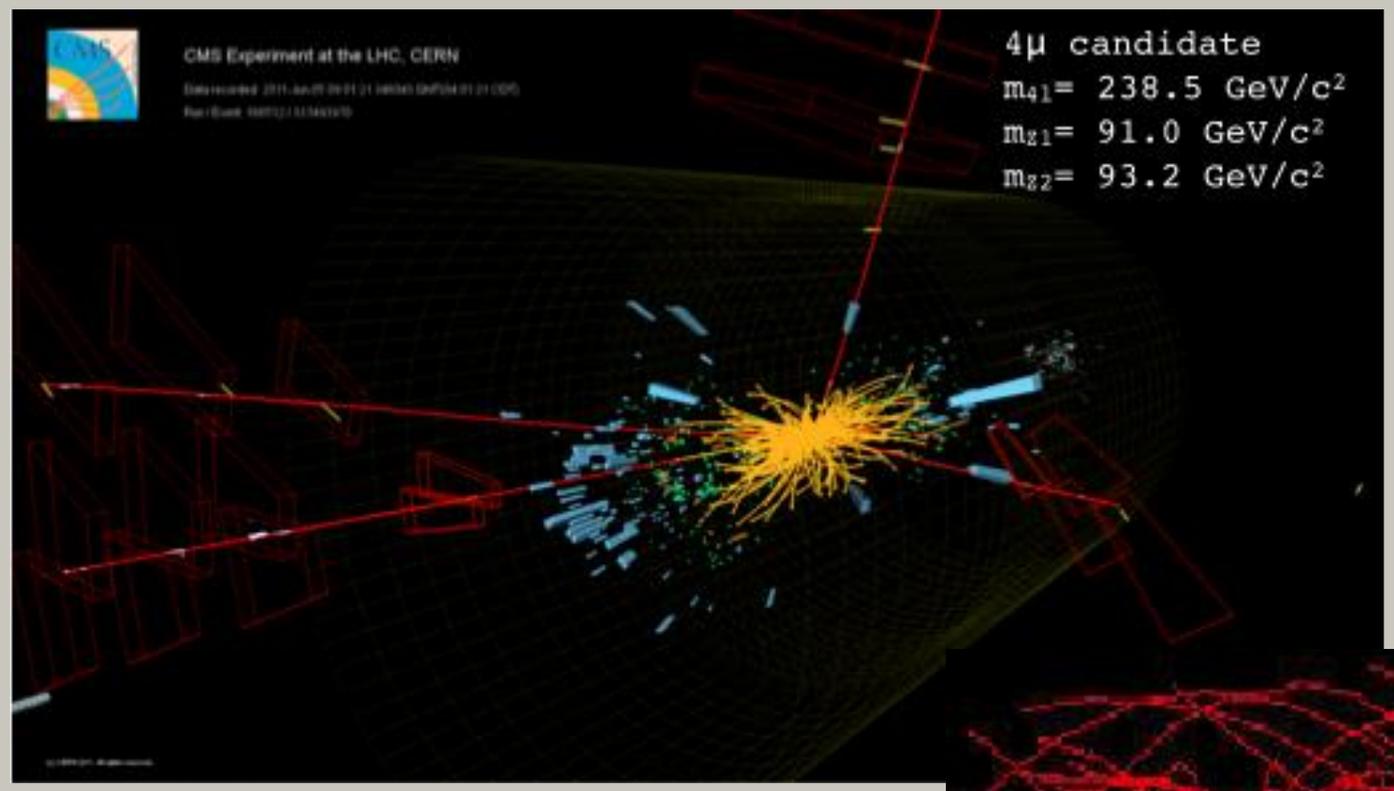
Progettati e realizzati da fisici e ingegneri per essere sensibili al maggior numero di segnali possibili (general purpose detectors)

CMS



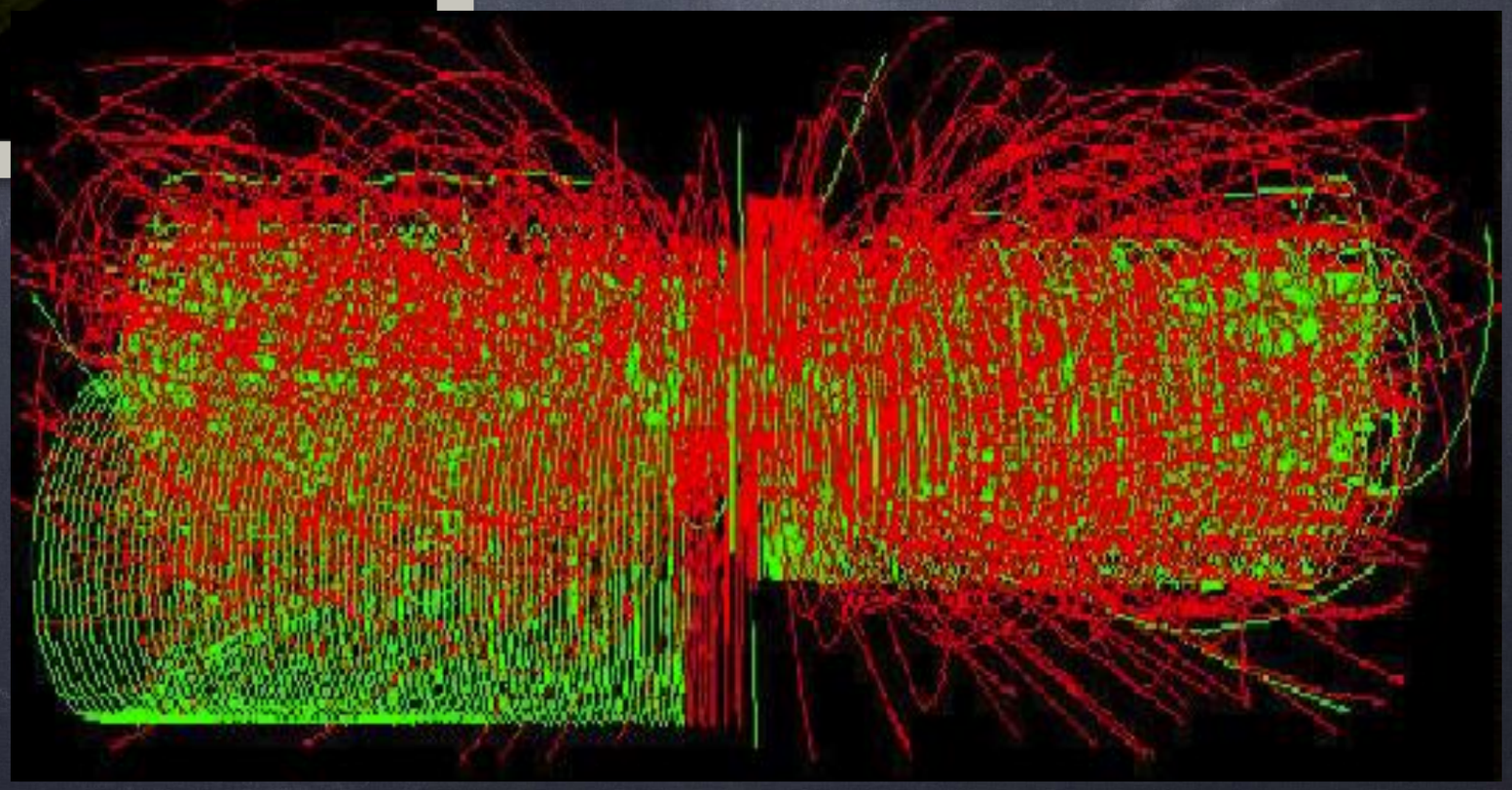
Rivelatori

Bosone di Higgs che "decade" in 4 leptoni μ



Eventi molto rari richiedono l'attesa di molti anni per acquisire sufficiente statistica

I processi interessanti vanno estratti da un "fondo" gigantesco (il rapporto segnale/rumore può essere diversi ordini di grandezza!)

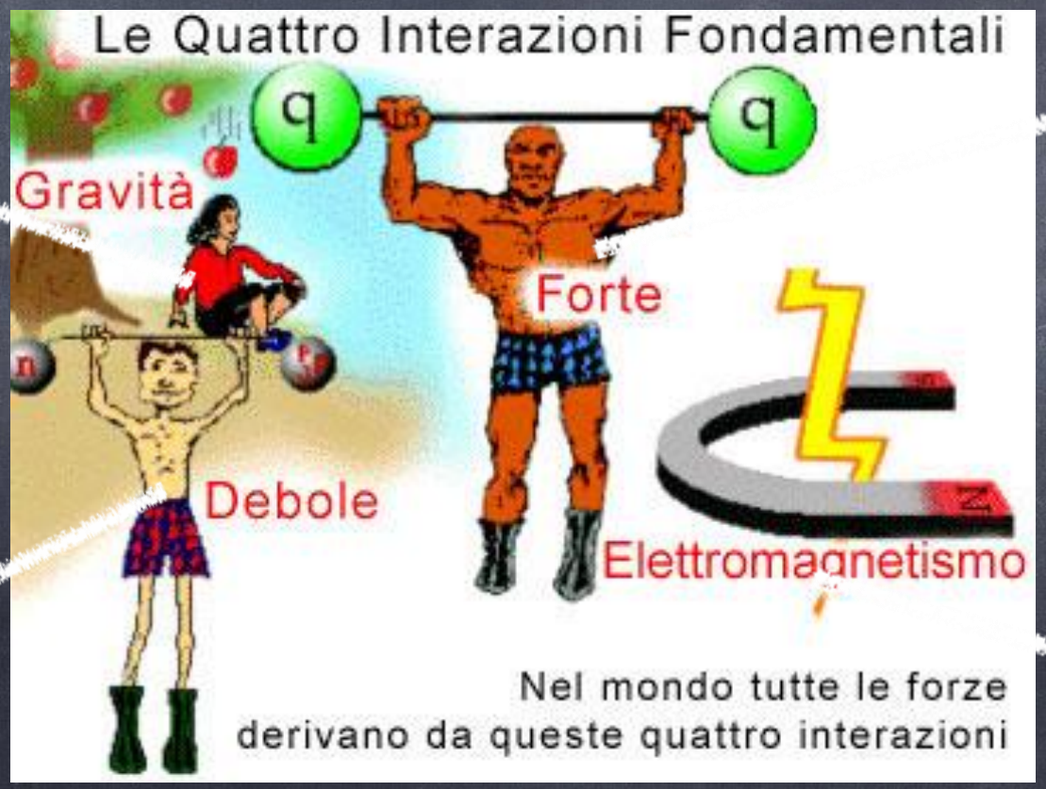


Le interazioni fondamentali

Una forza della natura

Le teorie formulate (e confermate dagli esperimenti) fino ad oggi ci permettono di identificare 4 diverse interazioni fondamentali (forze) responsabili di tutti i fenomeni conosciuti

Raggio di interazione infinito
Mediatore = gravitone
(osservato indirettamente)



Questa forza cresce con la distanza e "confina" le particelle
Mediatore = gluone
(osservato indirettamente)

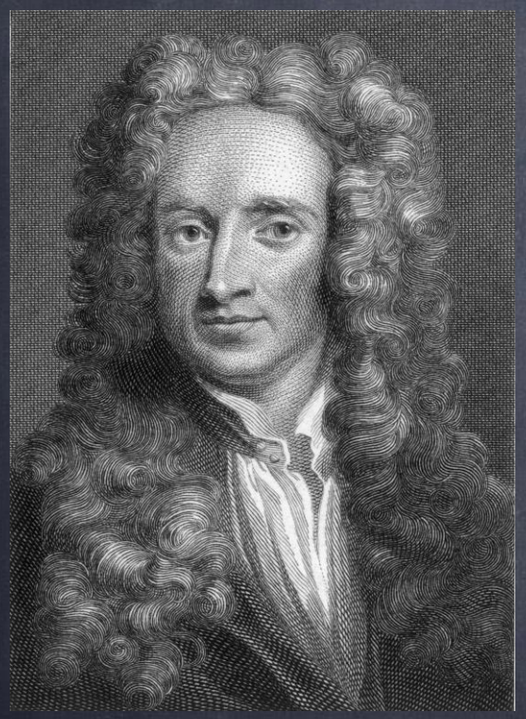
Raggio di interazione finito
Mediatori = bosoni W e Z
(osservati e valsi il premio Nobel a Carlo Rubbia)

Raggio di interazione infinito
Mediatore = fotone

La gravità

La teoria della gravità possiede diverse descrizioni in funzione della precisione di cui si necessita

La gravità di Newton



Newton formulò la prima teoria della gravità (1687)

La gravità di Newton è quella che ancora oggi si studia a scuola ed è sufficiente a spiegare la gran parte dei fenomeni che osserviamo

$$F = G_N \frac{m \cdot M}{r^2}$$

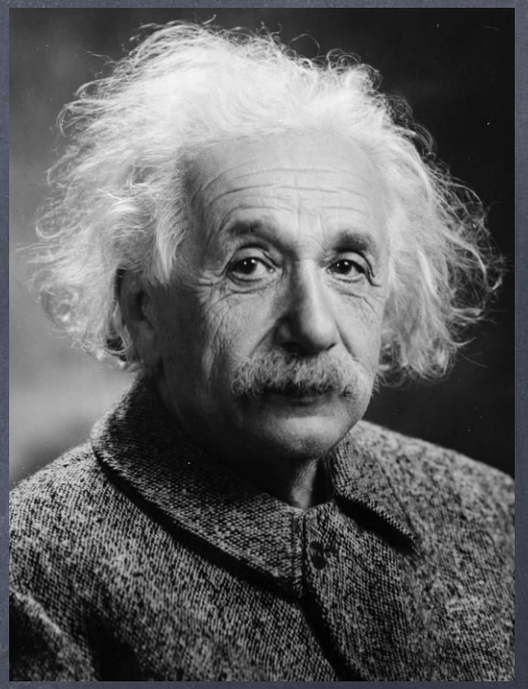
La teoria della gravitazione universale di Newton permise per esempio di spiegare in maniera unificata le leggi di Keplero sul moto dei pianeti, formulate diversi anni prima (1608-1609-1619) su base osservativa ed empirica

La gravità

La teoria della gravità possiede diverse descrizioni in funzione della precisione di cui si necessita

La gravità di Einstein

Nel 1905 Einstein formulò la Teoria della Relatività Speciale che si può definire un raffinamento della gravità newtoniana utile a descrivere sistemi con velocità prossime a quella della luce



Nel 1915 Einstein formulò la Teoria della Relatività Generale, una teoria completamente nuova che descrive qualsiasi fenomeno gravitazionale osservato (es. la deviazione della luce da parte dei pianeti, la precessione delle orbite dei pianeti, etc)

La Teoria della Relatività Generale fu accolta con difficoltà dalla comunità scientifica solo dopo le misure di Eddington (1919)

Oggi la RG ha ricevuto una enorme quantità di conferme sperimentali fra cui recentemente (2015) la scoperta delle onde gravitazionali!

Nota: La gravità è l'unica forza che ad oggi non si è riuscita ad unificare in una teoria quantistica (completa) di tutte le forze

La gravità

La teoria della gravità possiede diverse descrizioni in funzione della precisione di cui si necessita

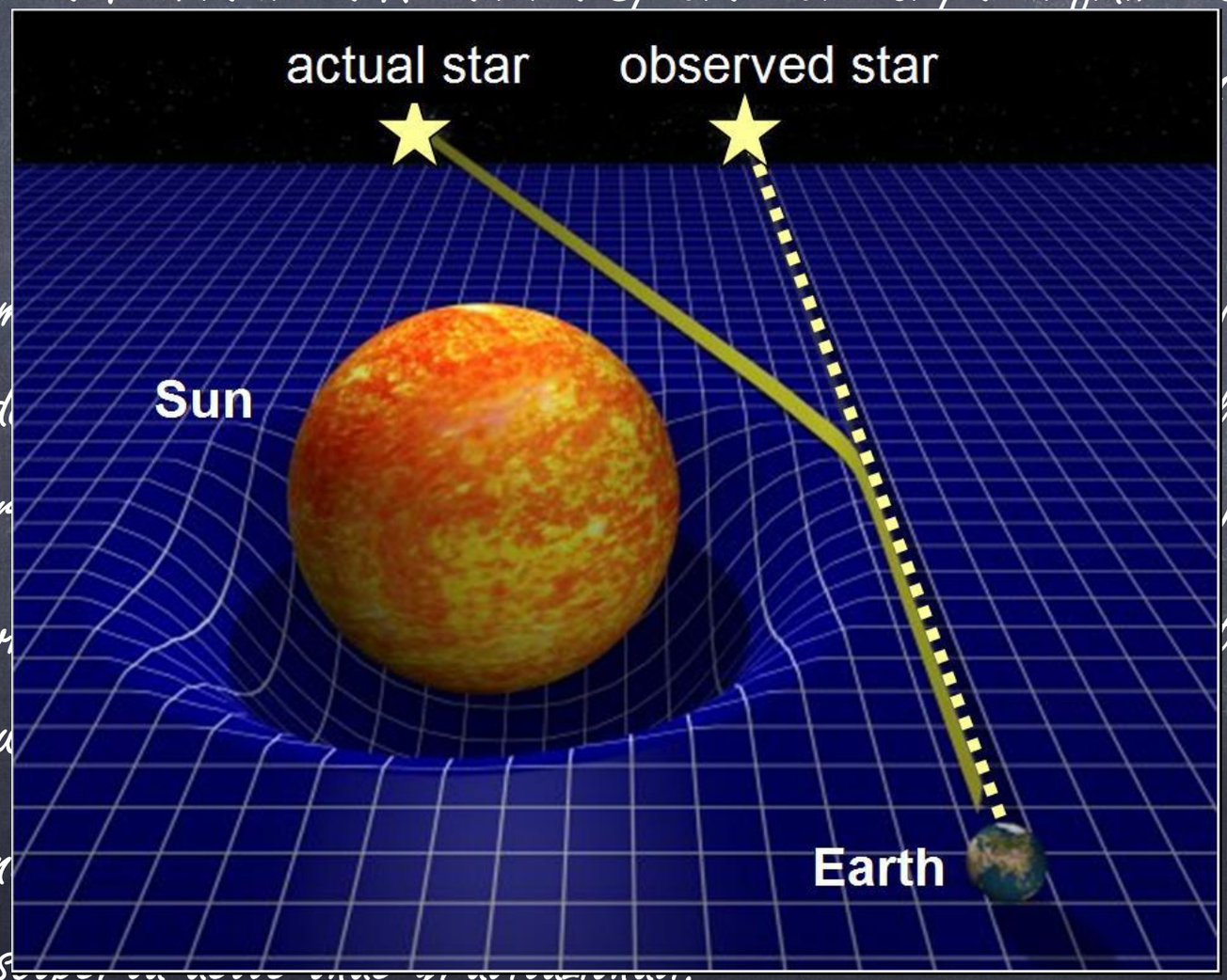
La gravità di Einstein

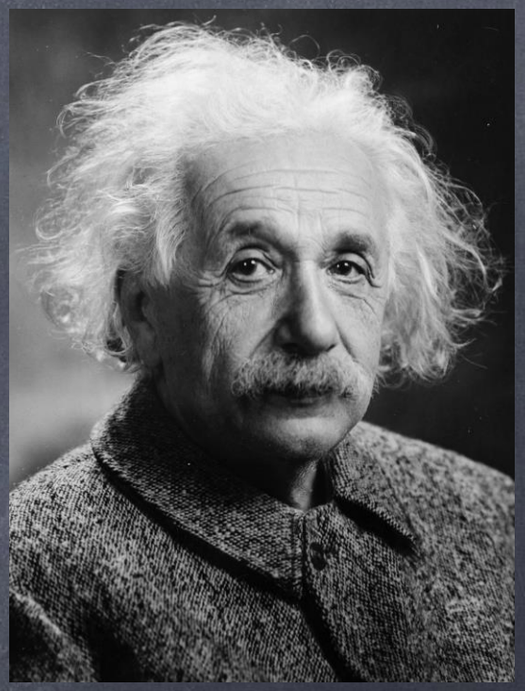
Nel 1905 Einstein formulò la Teoria della Relatività Speciale che si può definire un raffinamento della gravità [illegible] a quella della luce

Nel 1915 Einstein form[illegible] completamente nuova che d[illegible] deviazione della luce da par[illegible]

La Teoria della Relativ[illegible] scientifica solo dopo le misu[illegible]

Oggi la RG ha ricevuto un[illegible] recentemente (2015) la sco[illegible]

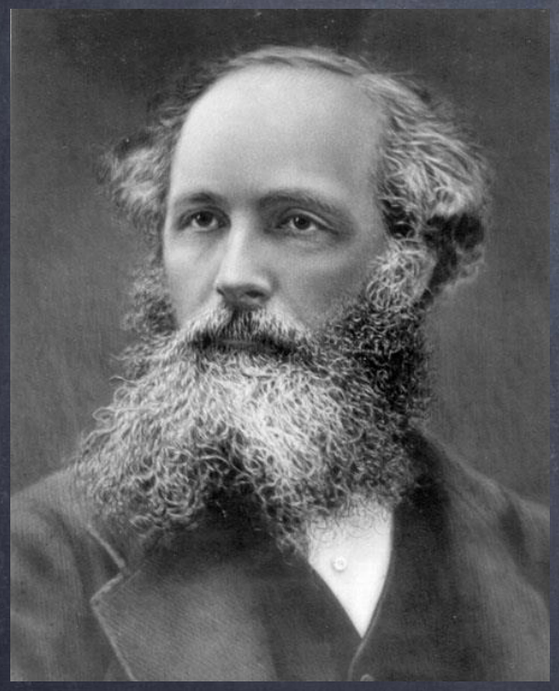




Nota: La gravità è l'unica forza che ad oggi non si è riuscita ad unificare in una teoria quantistica (completa) di tutte le forze

L'elettromagnetismo

La teoria completa dell'elettromagnetismo (che unifica i fenomeni dell'elettricità e del magnetismo a lungo ritenuti indipendenti) fu formulata da Maxwell nel 1865



Formulazione classica		Formulazione relativistica
$\nabla \cdot E = \rho$		
$\nabla \times B = j + \frac{\partial E}{\partial t}$	$\Longrightarrow$	$\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu$
$\nabla \cdot B = 0$		
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\Longrightarrow$	$\partial_\mu \tilde{F}^{\mu\nu} = 0$

L'elettromagnetismo è alla base di tutte le teorie quantistiche dei campi ed ha aperto la strada, con i progressi della fisica del primo '900, alla formulazione di teorie analoghe per la forza forte e la forza debole, poi unificate nel Modello Standard

L'elettrodinamica

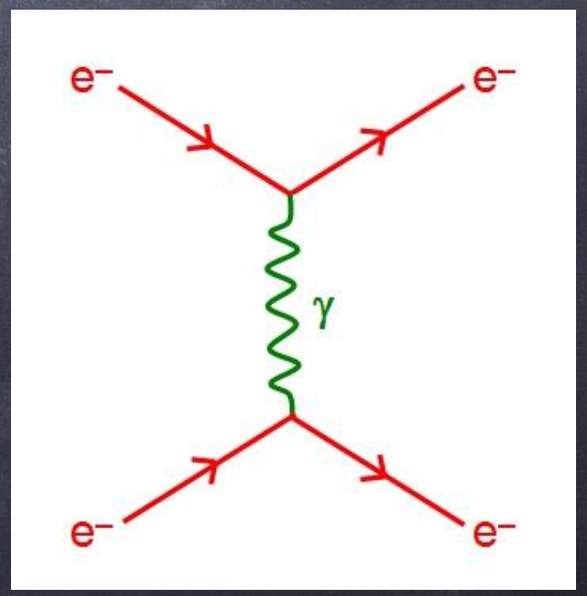
La teoria quantistica dell'elettromagnetismo (elettrodinamica quantistica) è stata formulate da Feynman, Swinger and Tomonaga verso la fine degli anni '40

Sin-Itiro Tomonaga

Julian Schwinger

Richard P. Feynman

Feynman ha introdotto per primo una notazione grafica basata su diagrammi (diagrammi di Feynman) tuttora usata per tutti i calcoli in teoria quantistica dei campi

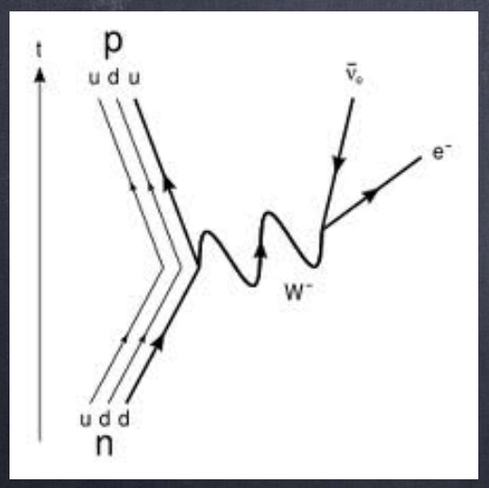


Le interazioni deboli

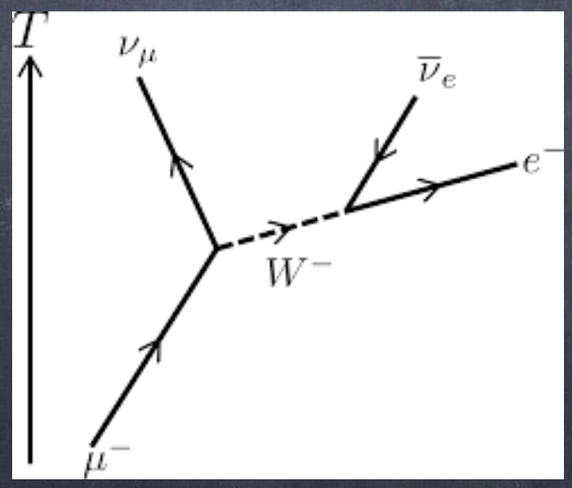
Le interazione deboli sono responsabili della radioattività beta, fenomeno che non possiede un'interpretazione "classica", bensì è intrinsecamente quantistico

Una prima teoria "effettiva" delle interazioni deboli fu formulata da Enrico Fermi nel 1933

$$\mathcal{L}_F = G_F/\sqrt{2}\cos\theta_C\,(\bar{p}\gamma_\mu(1+\alpha\gamma^5)n)(\bar{e}\gamma^\mu(1-\gamma^5)\nu)$$



decadimento del neutrone



decadimento del muone

Negli anni '60 venne dimostrato che le interazioni deboli e quelle elettromagnetiche sono in realtà due manifestazioni della stessa forza unificata detta elettrodebole

Le interazioni elettrodeboli

Le interazione deboli sono responsabili della radioattività beta, fenomeno che non possiede un'interpretazione "classica", bensì è intrinsecamente quantistico

La teoria elettrodebole, che unifica elettromagnetismo e interazione deboli è stata formulata nella sua forma attuale da Glashow, Weinberg e Salam tra la fine degli anni '50 e l'inizio degli anni '60

La teoria venne confermata prima nel 1973 con la scoperta delle correnti neuter (Gargamelle) e poi nel 1983 con la scoperta delle particelle Z e W

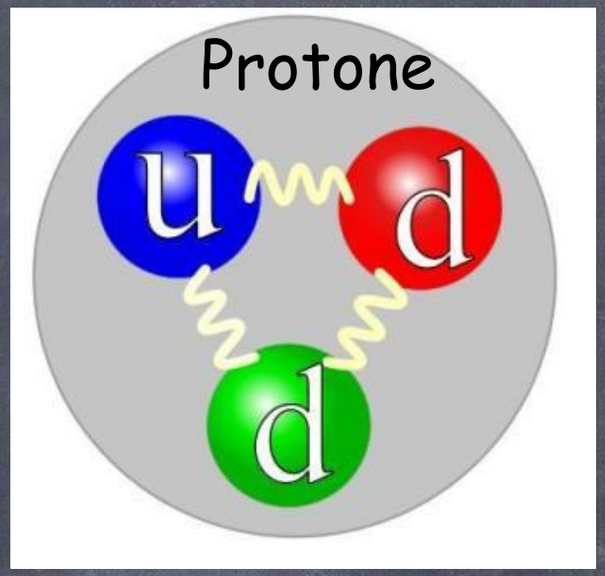
Le interazioni forti

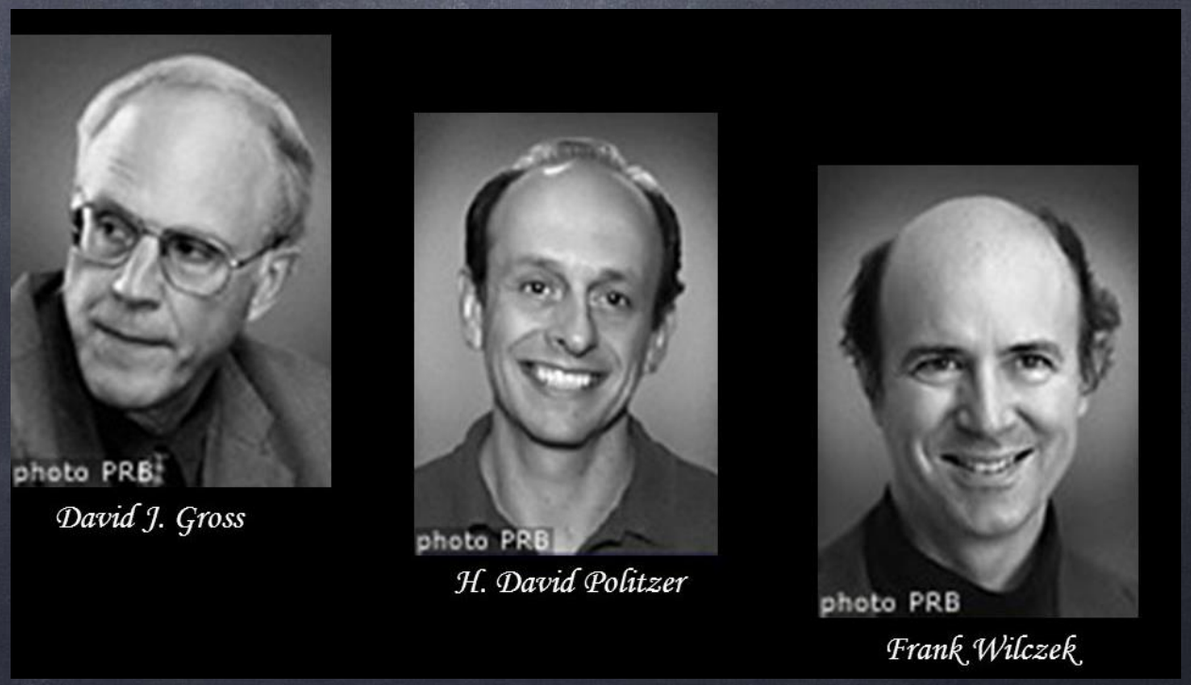
Le interazione forti sono responsabili per la formazione di protoni, neutroni e nuclei atomici e come la forza debole non possiede un analogo classico

L'interazioni forti sono state scoperte e teorizzate intorno agli anni '60 e '70

La teoria che le descrive si chiama cromodinamica quantistica (teoria quantistica del colore) ed è ispirata all'elettrodinamica quantistica

Le interazioni forti, insieme a quelle elettrodeboli sono parte del Modello Standard





La teoria quantistica dei campi

Campi, quanti e simmetrie

La Teoria Quantistica dei Campi combina quattro fondamenti della fisica moderna:

1. La teoria dei campi classici (utilizzata per esempio in elettromagnetismo o in meccanica dei fluidi)

   ex. equazioni di Maxwell $\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu$

2. La teoria della relatività ristretta e il suo concetto di spazio-tempo quadridimensionale

   ex. relazione massa, energia, impulso $E = c^2\sqrt{m^2 + p^2/c^2}$

3. La meccanica quantistica e la sua "interpretazione probabilistica del moto"

   ex. principio di indeterminazione $\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$

4. Il concetto di simmetria

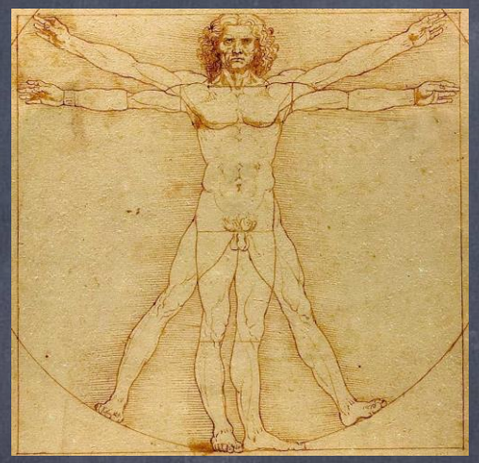
   ex. una sfera risulta identica comunque la si guardi $\Longrightarrow$ simmetria per rotazioni

Simmetrie ...

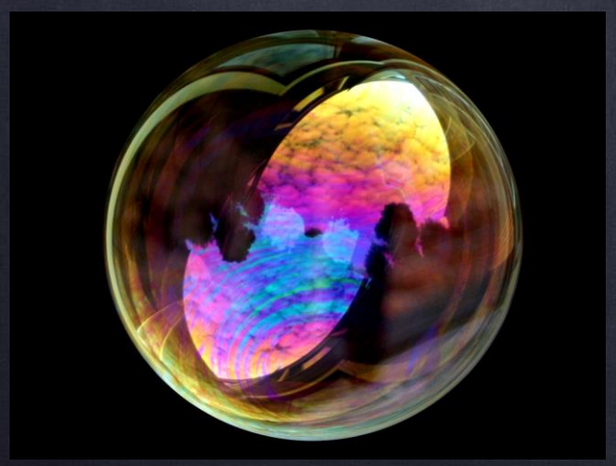
In fisica si parla di simmetria quando un sistema è invariante rispetto a certe trasformazioni

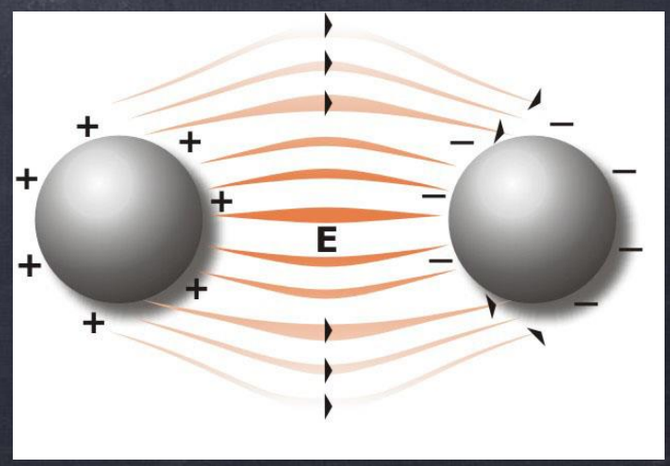
I fisici credono che la natura tenda ad essere simmetrica

Simmetrie Discrete



Simmetrie Continue



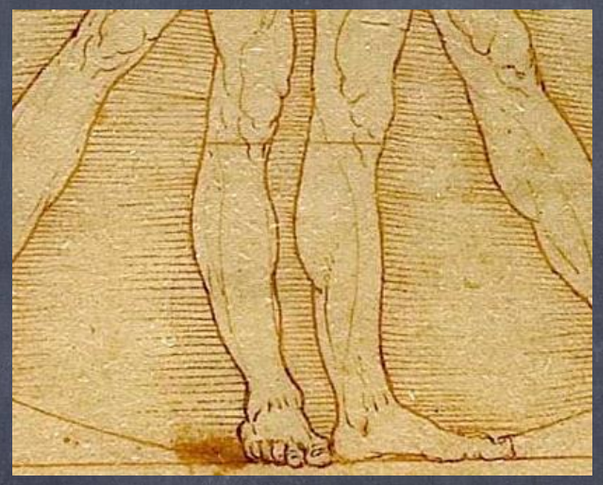


... infrante

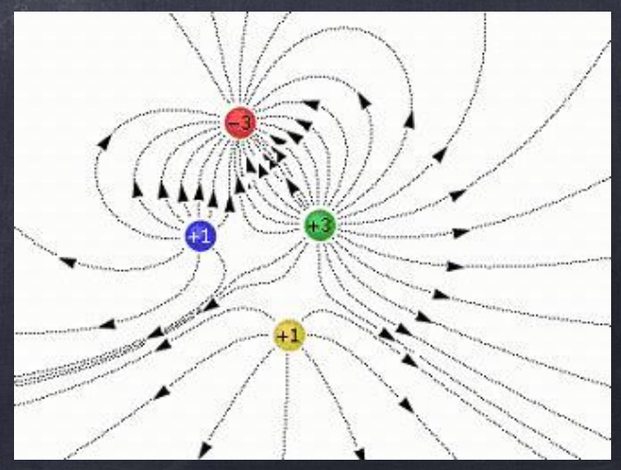
... o almeno quasi simmetrica

L'approccio dei fisici teorici è assumere una certa simmetria per poi vedere cosa succede se questa è debolmente "rotta"

Simmetrie Discrete



Simmetrie Continue



Il Modello Standard

Particelle elementari

Il Modello Standard si serve della Teoria Quantistica dei Campi per descrivere le proprietà e le interazione delle particelle elementari

Particelle di "Materia"

Quark: Up e Down formano protoni e neutroni, mentre gli altri formano particelle più "esotiche"

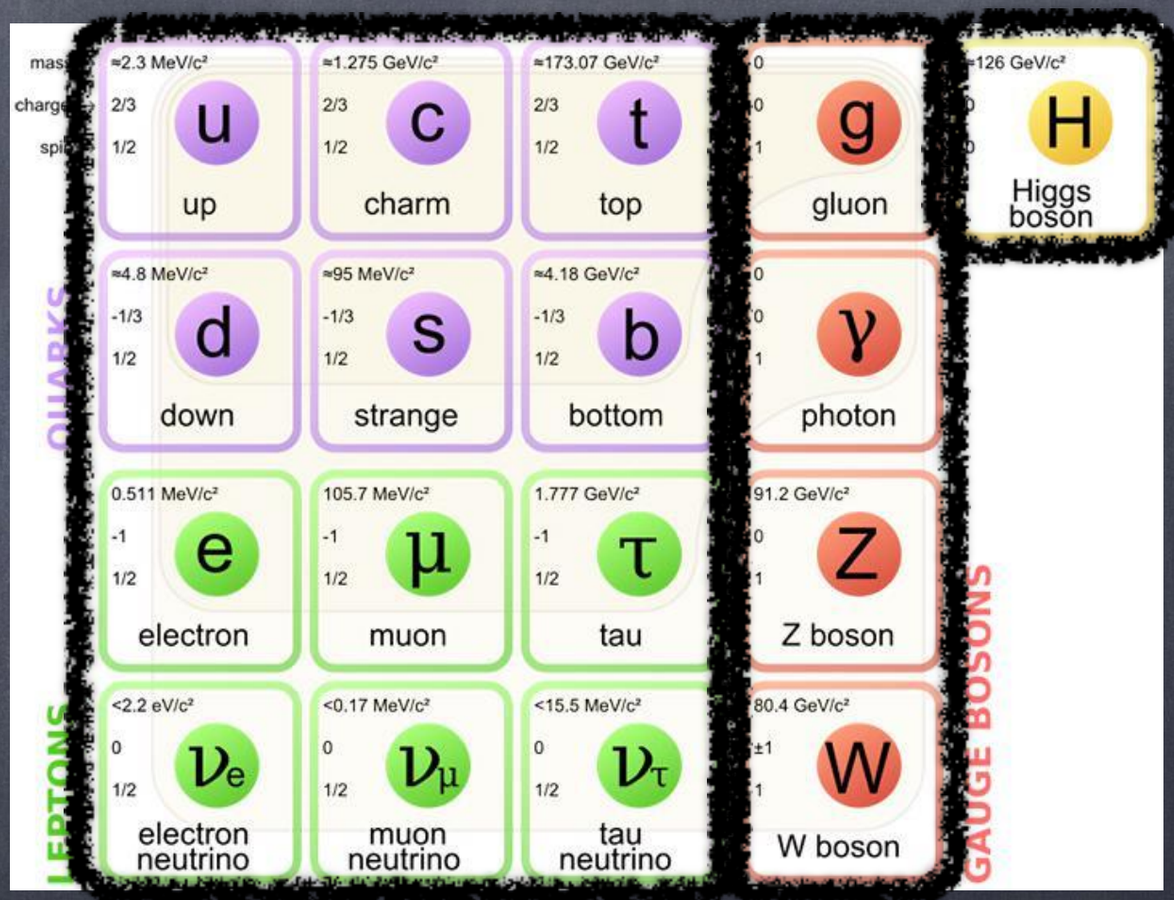
Leptoni: l'elettrone si trova negli atomi, il muone nei raggi cosmici, mentre gli altri non sono presenti nella materia ordinaria

"Mediatori" delle forze

Fotone: Interazione elettromagnetica

Borsoni W e Z: Interazione debole

Gluoni: Interazione forte



Bosone di Higgs

Da la massa a tutte le particelle elementari (eccetto fotone, gluoni e forse neutrini)

Simmetrie infrante

La teoria elettrodebole unifica le interazioni deboli ed elettromagnetiche.

Ma allora perché ci appaiono così diverse?

In effetti la simmetria elettrodebole è rotta in natura

I fisici chiamano questa rottura "spontanea"

Il sistema è simmetrico, ma lo stato "fondamentale" no

⟺

In funzione della distanza da cui osserviamo il sistema (che quantisticamente è l'inverso della sua energia) può apparirci simmetrico o non simmetrico

Il Meccanismo di Higgs

Il più semplice meccanismo che permette di descrivere questa rottura spontanea nel Modello Standard è il meccanismo di Higgs (1964)

Il bosone di Higgs è la particella che spiegherebbe questa rottura della simmetria ed è responsabile della massa delle particelle elementari

La massa del bosone di Higgs non è una predizione del Modello Standard

Nel 2012 il bosone di Higgs è stato scoperto al CERN di Ginevra grazie all'acceleratore LHC ed agli esperimenti ATLAS e CMS (m=125 GeV)

E ora?

Tutto funziona ma...

Il Modello Standard è stato testato per oltre 40 anni e con grande precisione ed ogni sua predizione è sempre stata verificata

Tuttavia ci sono molti fenomeni che il Modello Standard non spiega ed anche alcuni problemi teorici ancora aperti come ad esempio:

- l'origine della massa del bosone di Higgs
- le masse dei neutrini
- la materia oscura
- la grande unificazione delle forze
- perché una separazione così grande tra le diverse forze?
- perché una separazione così grande tra le masse delle particelle elementari?
- l'asimmetria fra materia e antimateria
- la conservazione di CP nelle interazione forti
- il meccanismo del confinamento
- l'energia oscura
- e la gravità?
- l'omogeneità e isotropia dell'universo osservato
- ...

... non è finita qui!

Per tutti questi motivi i fisici teorici cercano di estendere il Modello Standard e immergerlo in teorie più complete (e complicate) e i fisici sperimentali di testare le nuove teorie con esperimenti sempre più complessi

Teoria: esempi

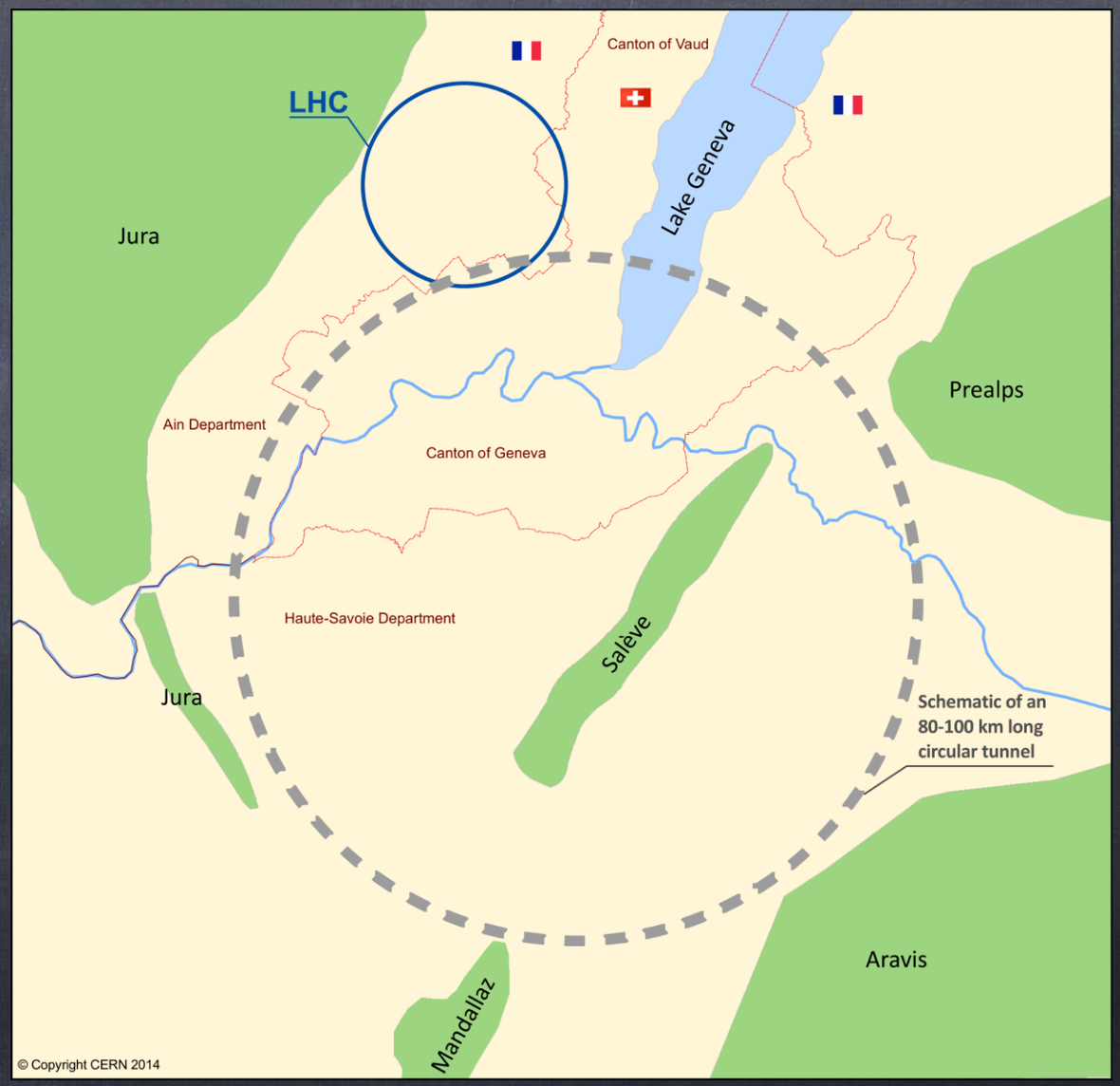
- Supersimmetria
- Higgs composto
- Dimensioni extra
- Assioni
- Multiverso
- Teoria delle Stringhe

... non è finita qui!

Per tutti questi motivi i fisici teorici cercano di estendere il Modello Standard e immergerlo in teorie più complete (e complicate) e i fisici sperimentali di testare le nuove teorie con esperimenti sempre più complessi

Esperimenti

Mentre fanno esperimenti con il LHC, i fisici delle particelle stanno già pensando agli acceleratori del futuro!

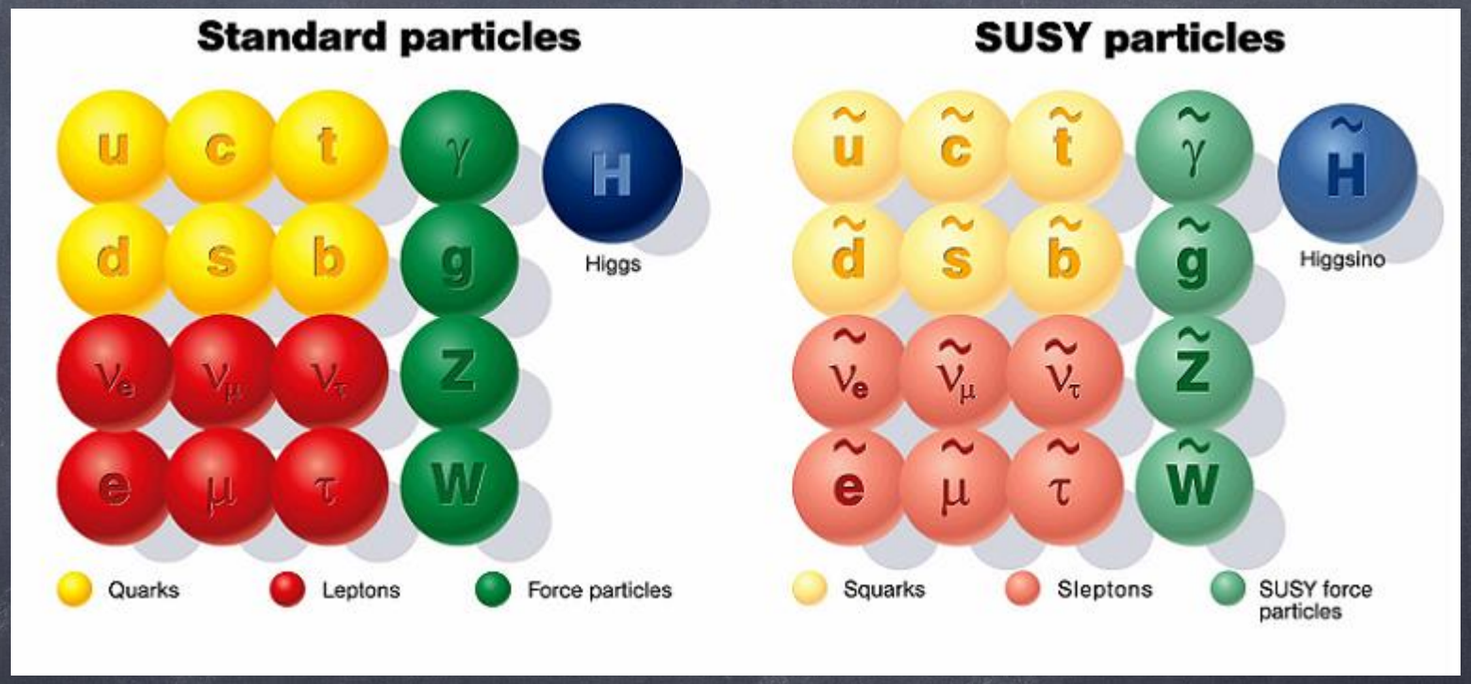


Oltre il Modello Standard

Tutte le estensioni del Modello Standard prevedono l'esistenza di nuove particelle, e alcune addirittura di nuovi universi!

Esempi

- *Supersimmetria*



Oltre il Modello Standard

Tutte le estensioni del Modello Standard prevedono l'esistenza di nuove particelle, e alcune addirittura di altri universi!

Esempi

- *Supersimmetria*
- *Higgs composto*

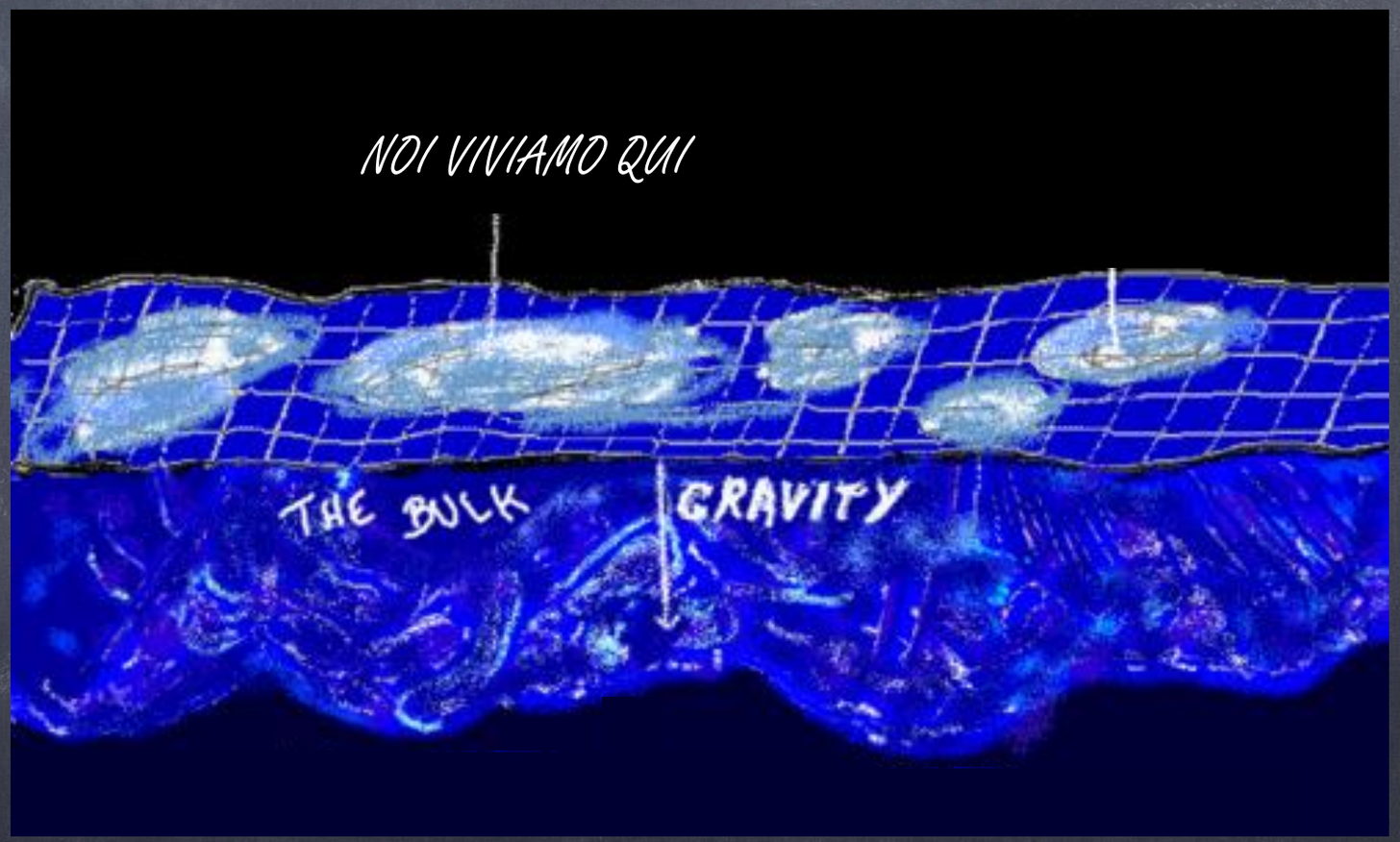
$$\sim \frac{1}{\mathrm{TeV}} = 10^{-18}\,\mathrm{m}$$

Oltre il Modello Standard

Tutte le estensioni del Modello Standard prevedono l'esistenza di nuove particelle, e alcune addirittura di altri universi!

Esempi

- *Supersimmetria*
- *Higgs composto*
- *Extra dimensioni*

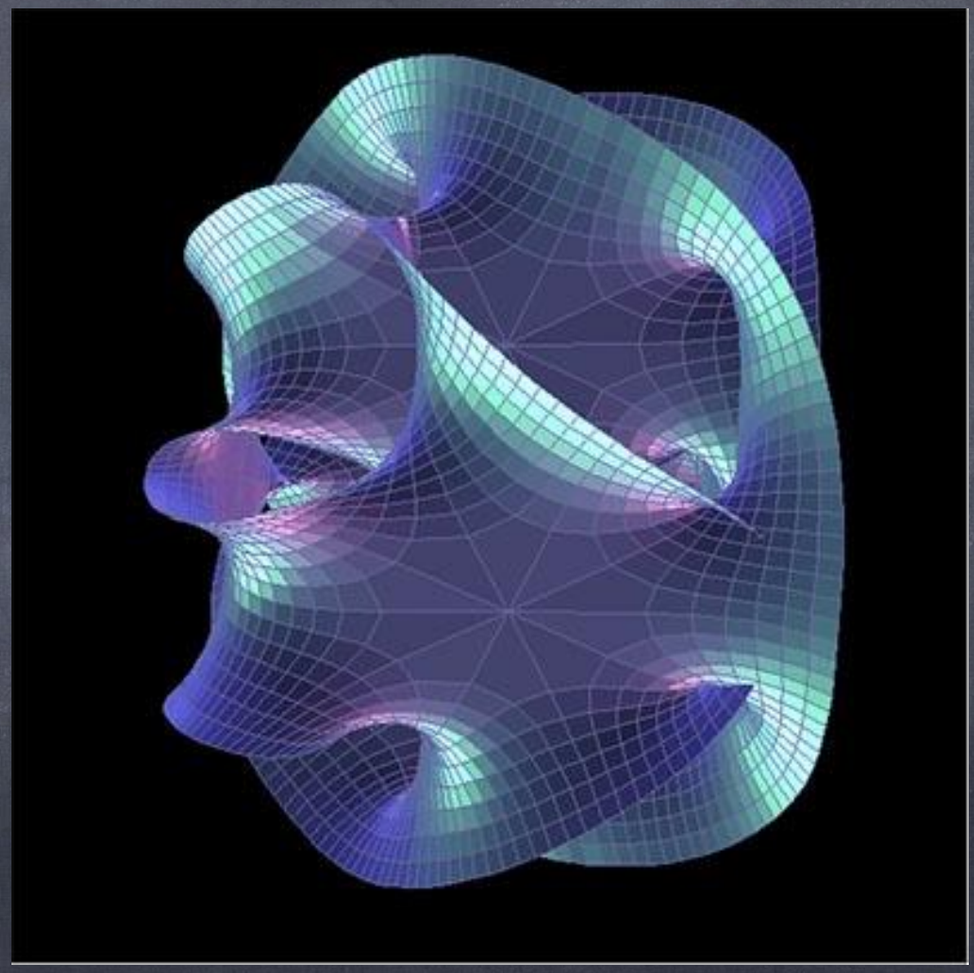


Oltre il Modello Standard

Tutte le estensioni del Modello Standard prevedono l'esistenza di nuove particelle, e alcune addirittura di altri universi!

Esempi

- *Supersimmetria*
- *Higgs composto*
- *Extra dimensioni*
- *Teoria delle Stringhe*



Conclusioni

- Il progresso scientifico nell'ultimo secolo ha portato ad una comprensione profonda dei costituenti fondamentali del nostro universo

- In questo contesto il Modello Standard costituisce uno dei più grandi successi della fisica moderna (sia teorica, sia sperimentale)

- Tuttavia siamo ancora lontani dall'avere una teoria in grado di descrivere ogni fenomeno osservato

- La strada verso una "teoria del tutto" è ancora quasi completamente inesplorata

... e il meglio deve ancora venire!

Grazie