

La fisica teorica delle particelle elementari

Riccardo Torre

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)

Sezione di Genova

riccardo.torre@ge.infn.it

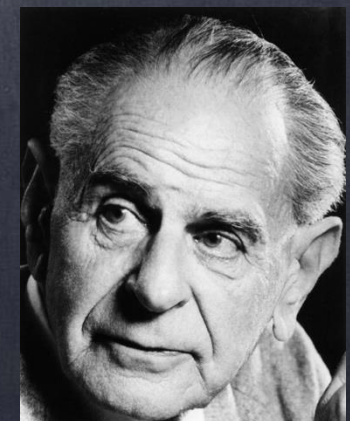
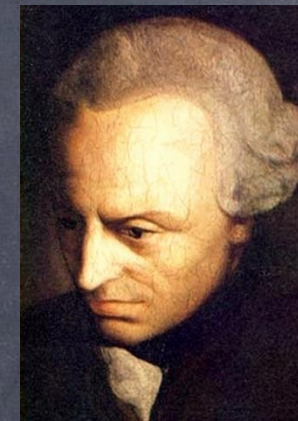
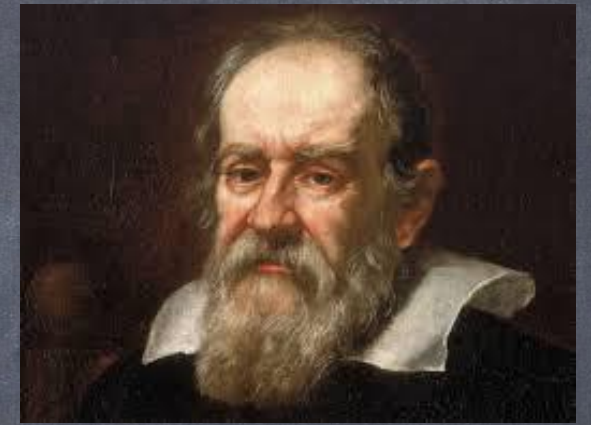
19 Marzo 2025

Masterclass 2025

Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Genova

Il metodo scientifico

- Si deve a Galileo (1564-1642) l'introduzione del "metodo scientifico" basato su sperimentazione e analisi rigorosa dei risultati in termini di ipotesi (teorie)
- Molti scienziati e filosofi hanno contribuito a raffinare la definizione di "metodo scientifico"
- È a Karl Popper che si deve una definizione del metodo più adatta alla scienza moderna (falsificabilità contrapposta alla verificabilità)

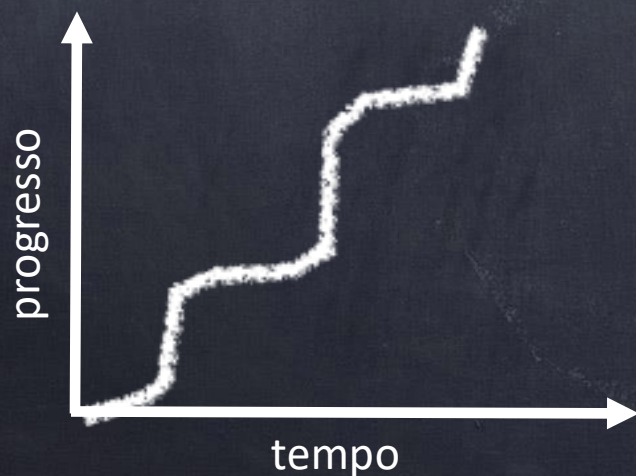


La fisica riduzionista

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

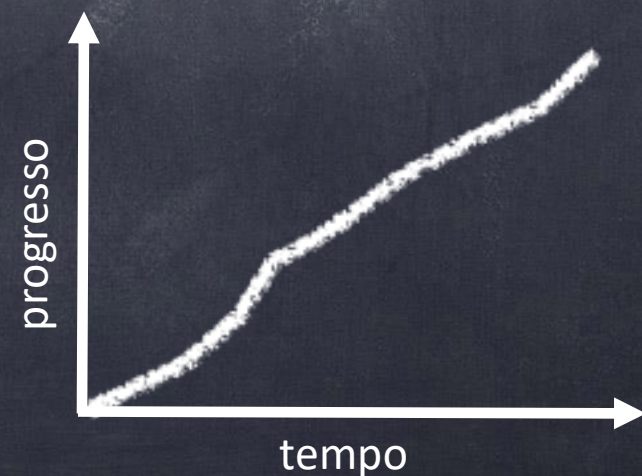
Fisica riduzionista

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...

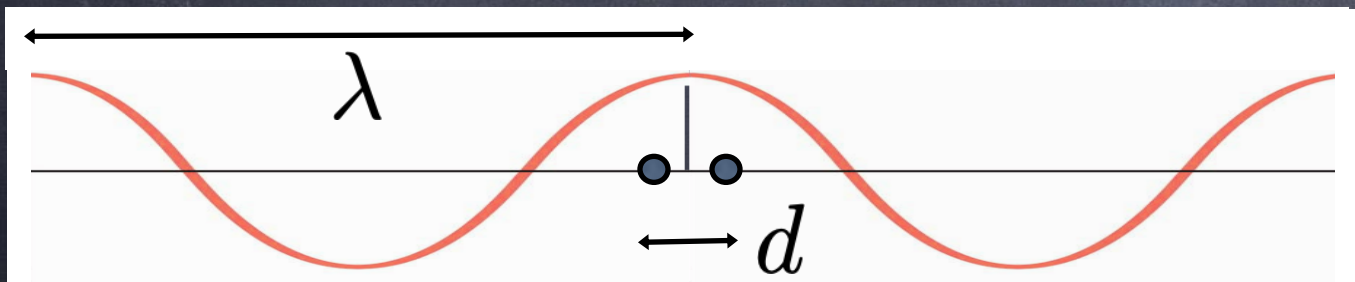
Per "misurare" accuratamente un sistema ci vuole un "metro" che abbia la giusta sensibilità

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

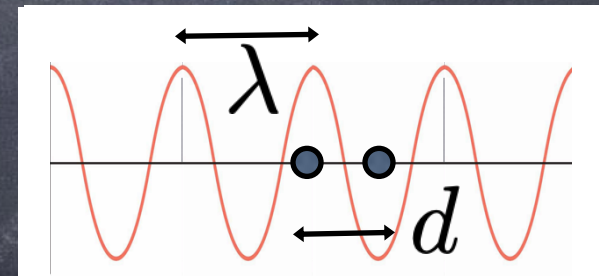
$$\lambda \gg d$$

i due punti sembrano coincidere



$$\lambda \sim d$$

i due punti vengono "risolti"



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

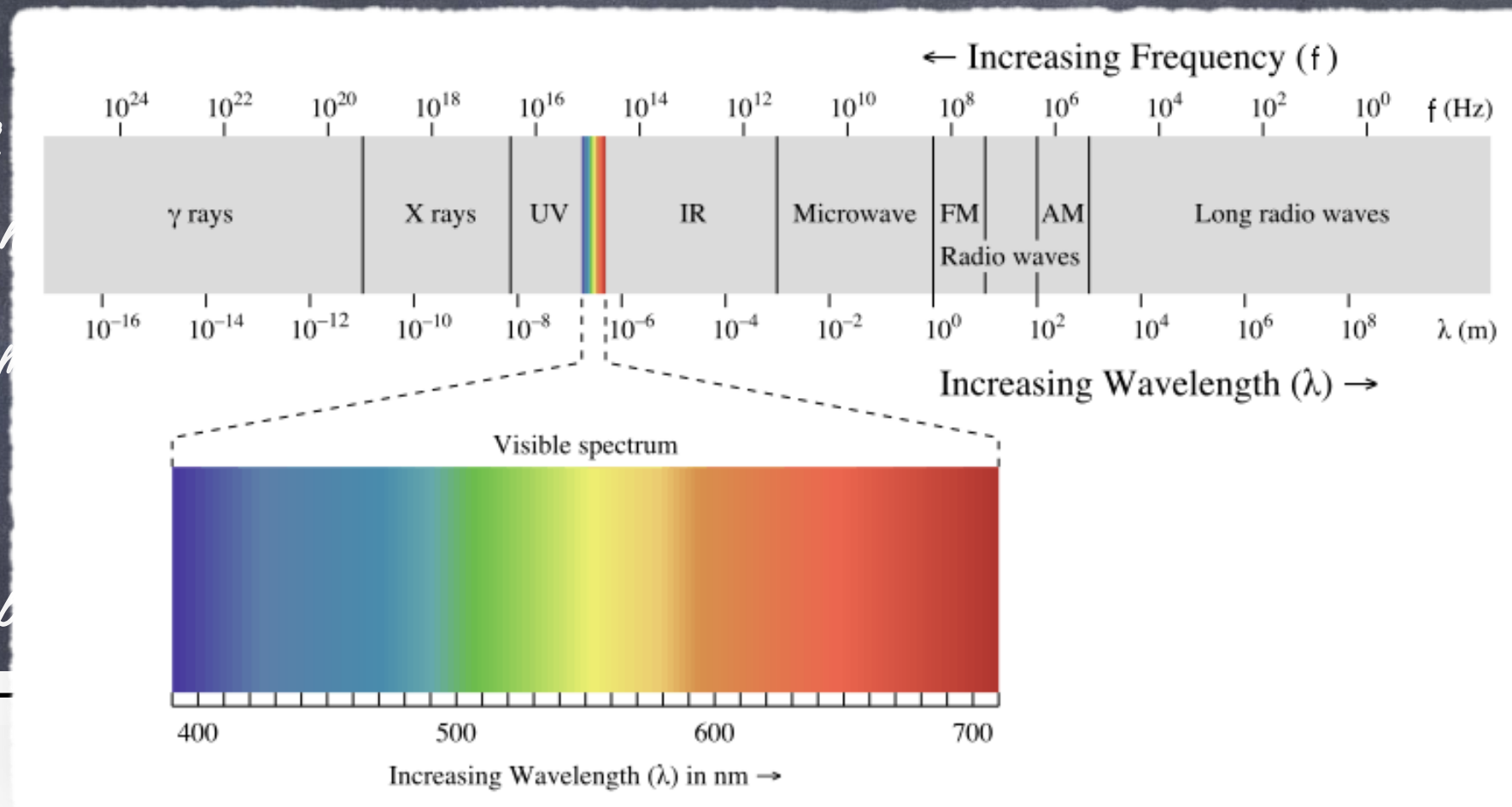
Servono onde con lunghezza molto molto più piccola...

Sempre più piccolo...

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

Esempio della
quelle che fanno

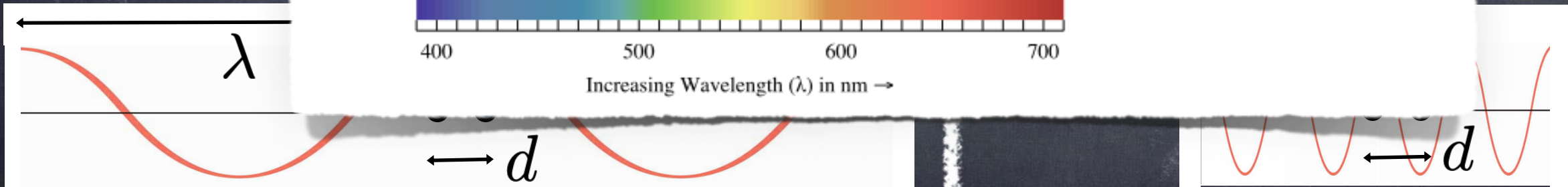
Un altro esempio



atore e
ersa

i due p

"risolti"



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

Servono onde con lunghezza molto molto più piccola...

Piccole distanze e ...

Meccanica Quantistica (MQ):

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

onda di lunghezza λ

relazione di
De Broglie $\Updownarrow$ $p = \frac{h}{\lambda}$

particella con impulso (massa per velocità)

$$p = m \cdot v$$

h è detta costante di Planck

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

ed 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

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

$$\swarrow$$
$$E = mc^2$$

nel limite

$$p \ll mc$$

$$\searrow$$
$$E = cp$$

nel limite

$$p \gg mc$$

c è la velocità della luce

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

Nota: h e c sono così importanti che i fisici delle particelle lavorano in un sistema di unità di misura (dette Unità Naturali)

definito da

$$c = \frac{h}{2\pi} = \hbar = 1$$

e dunque per piccole lunghezze ci vogliono grandi energie

... grandi energie

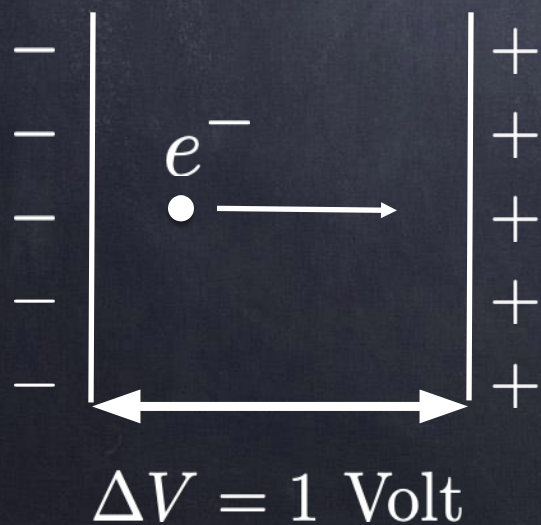
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$$

Ma quanta energia ci serve?

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

Pochissima! Con un Joule facciamo 18 ordini di grandezza meglio 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 non è l'unità di misura adatta all'energia di una singola particella)



L'energia di un elettrone in un campo elettrico

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

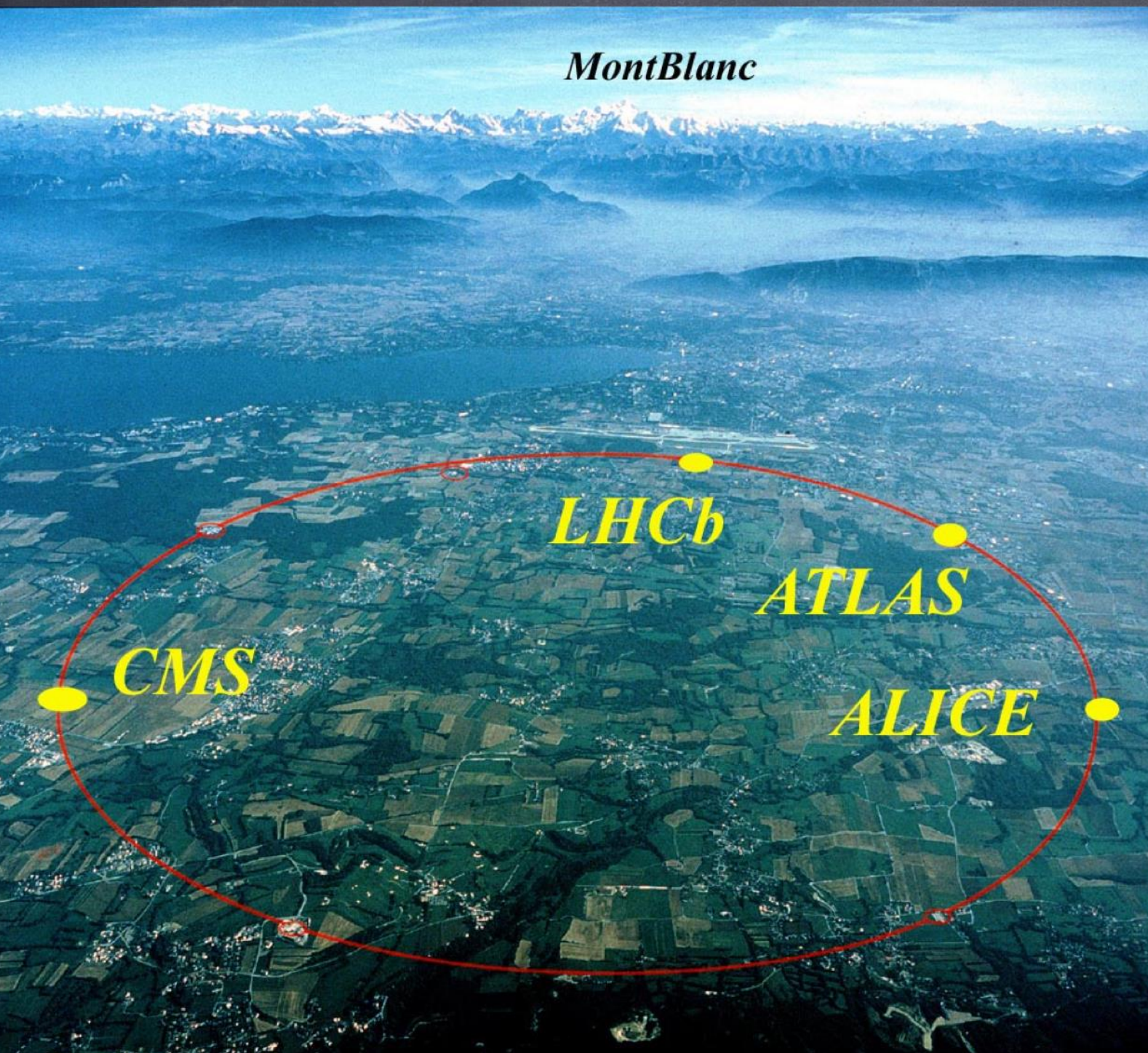
L' "elettronvolt" (eV) è l'unità di misura più appropriata per l'energia di una particella

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

Bisogna essere ambiziosi per fare meglio della luce visibile!

Grandi idee e grande ambizione

Negli ultimi 50-60 anni l'uomo ha sviluppato acceleratori sempre più potenti, e quindi, sempre più grandi



Per dare maggiore energia alle particelle si possono sfruttare acceleratori circolari in cui le particelle vengono accelerate per milioni e milioni di giri e quindi per distanze enormi

LHC (Large Hadron Collider)

Accelera protoni

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

$$E = 13 \text{ TeV} = 1.3 \cdot 10^{13} \text{ eV}$$

$$B = 8.3 \text{ T}$$

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

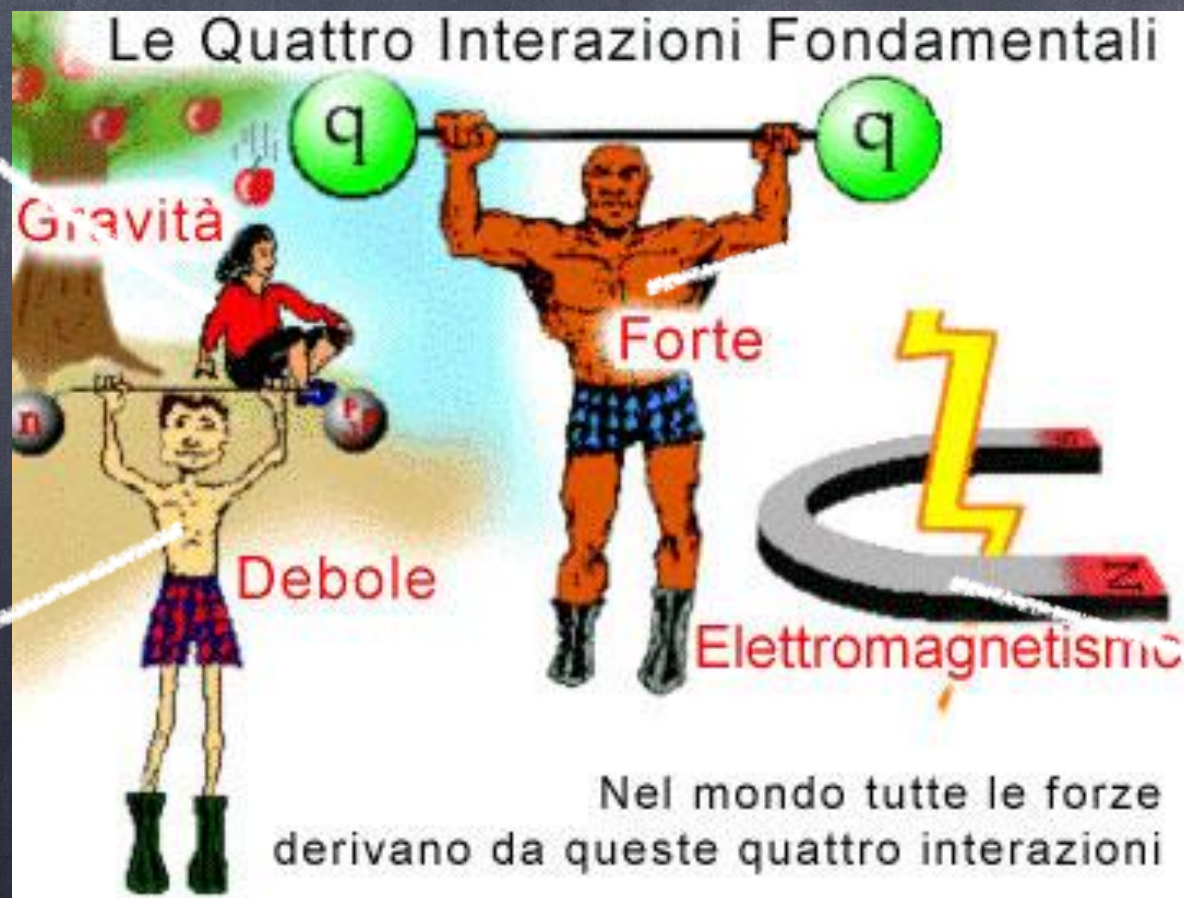
$$W = 180 \text{ MW}$$

Le interazioni fondamentali

Una forza della natura

Le teorie formulate (e confermate dagli esperimenti) fino ad oggi ci permettono di identificare 4 diverse forze responsabili di tutte le interazioni conosciute

Raggio di interazione infinito
Mediatore = gravitone (non osservato)



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

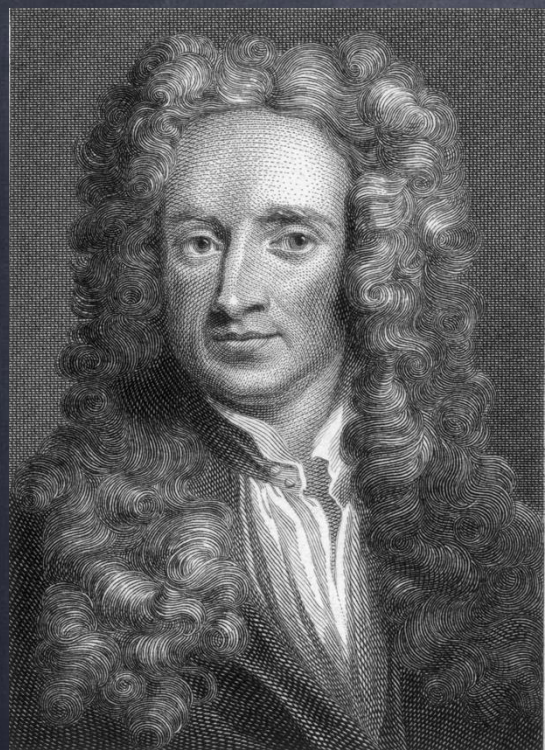
Raggio di interazione finito
Mediatori = bosoni W e Z (osservati e valse il Nobel a Carlo Rubbia)

Raggio di interazione infinito
Mediatore = fotone

La gravità

La teoria della gravità possiede diverse descrizioni in funzione della precisione di cui si necessita e del sistema che si vuole studiare

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

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

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 e empirica

La gravità

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

La gravità di Einstein

$$E = mc^2$$

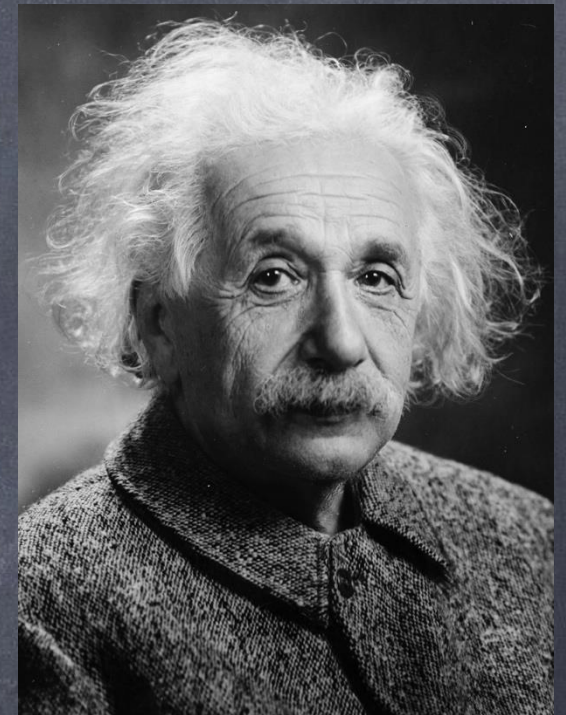
Nel 1905 Einstein formulò la Teoria della Relatività Speciale che si può definire un raffinamento della gravità newtoniana utile a descrivere sistemi con velocità vicine a quella della luce

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} \text{ (pianeti)}$$

Nel 1915 Einstein formulò la Teoria della Relatività Generale, una teoria completamente nuova che descrive qualsiasi fenomeno gravitazionale osservato (ex. la deviazione della luce da parte dei

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

Oggi la RG è alla base per esempio del funzionamento del GPS

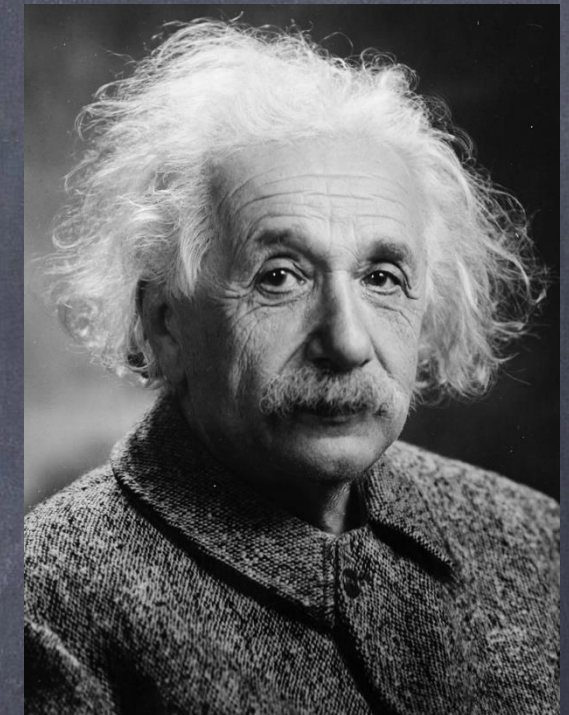
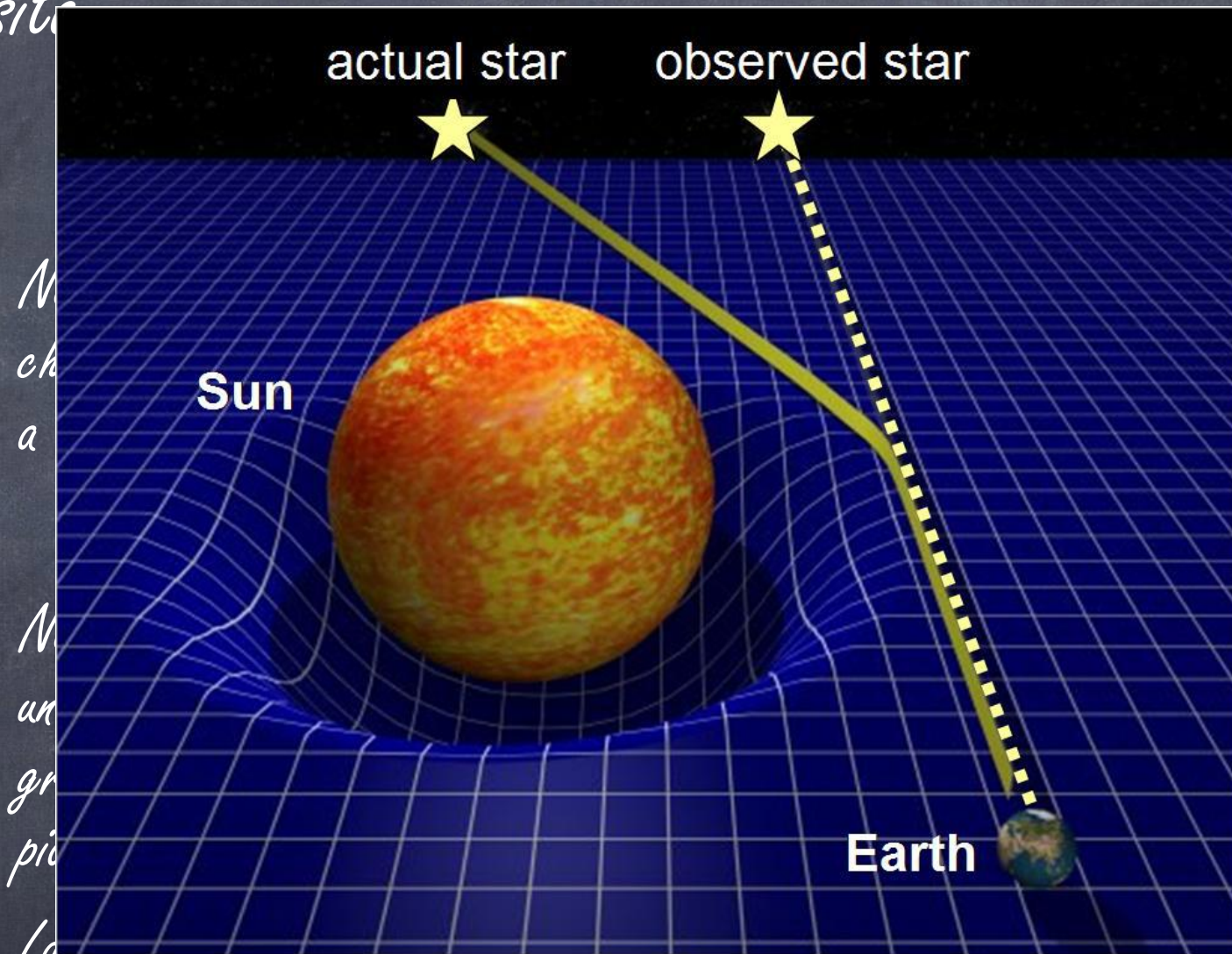


Nota: La gravità è l'unica forza che ad oggi non si è riuscita ad unificare in una teoria quantistica consistente di tutte le forze

La gravità

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

$$E = mc^2$$



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

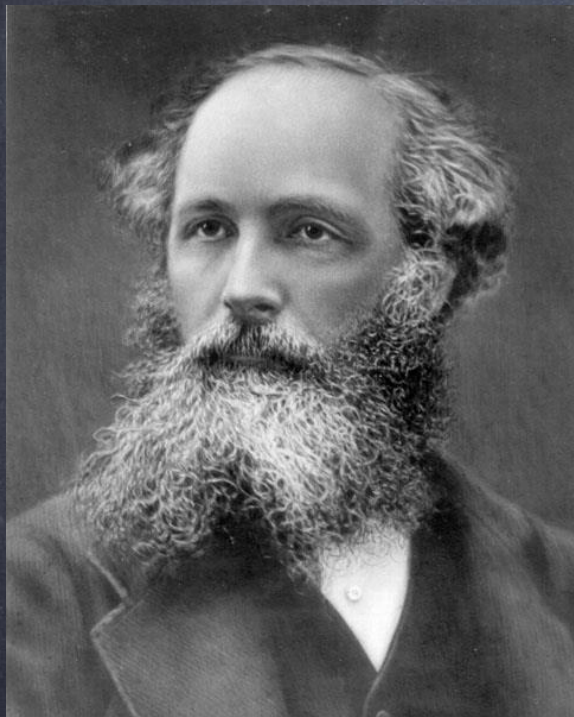
La teoria della relatività generale fu accolta con diffidenza dalla comunità scientifica solo dopo le misure di Eddington (1919)

Oggi la RG è alla base per esempio del funzionamento del GPS

Nota: La gravità è l'unica forza che ad oggi non si è riuscita ad unificare in una teoria quantistica consistente 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



prima di Einstein

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{J}}{\epsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

dopo Einstein

$$\implies \partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu$$

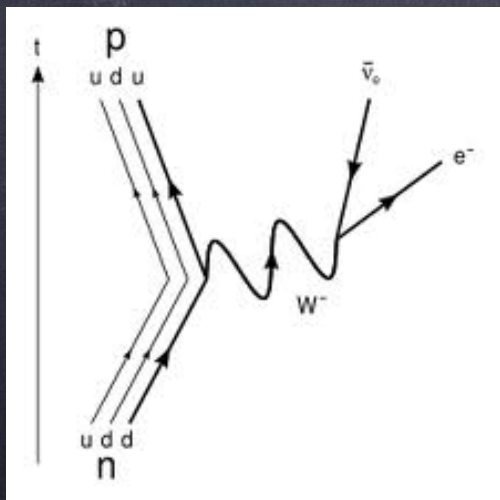
L'elettromagnetismo è alla base di tutte le teorie quantistiche dei campi ed ha aperto la strada, con i progressi della fisica del primo '900, alla formulazione di teorie analoghe per le interazioni forti e deboli, poi unificate nel Modello Standard

Le interazioni deboli

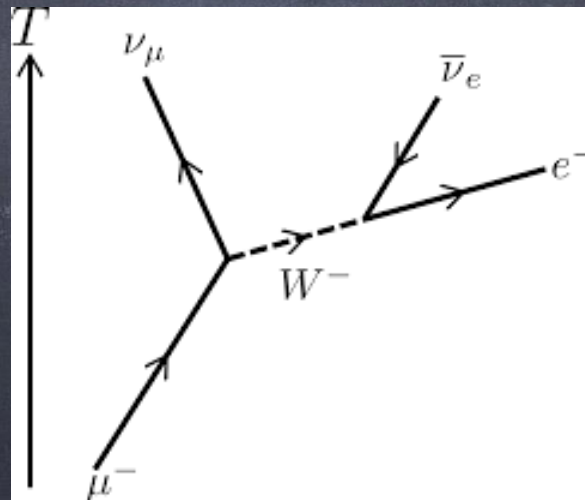
La forza debole è responsabile della radioattività beta, fenomeno che non possiede un'interpretazione "classica", bensì è intrinsecamente quantistico. Più in generale, le interazioni deboli sono responsabili dell'"instabilità" di alcune particelle

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

$$\mathcal{L}_F = G_F / \sqrt{2} \cos \theta_C (\bar{p} \gamma^\mu (1 + \alpha \gamma_5) n) (\bar{e} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \nu)$$



neutron decay



muon decay



Negli anni '60 viene mostrato come le interazioni deboli e quelle elettromagnetiche siano in realtà due manifestazioni della stessa forza unificata detta elettrodebole

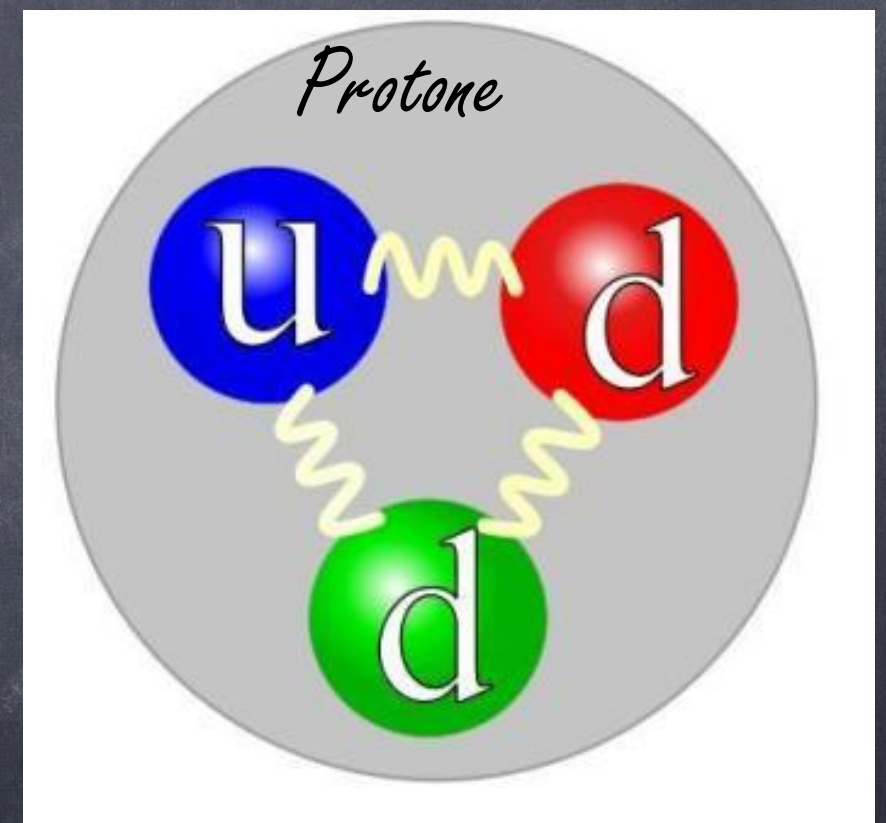
La forza forte

La forza forte è responsabile 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 (teoria quantistica dell'elettromagnetismo)

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



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"

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



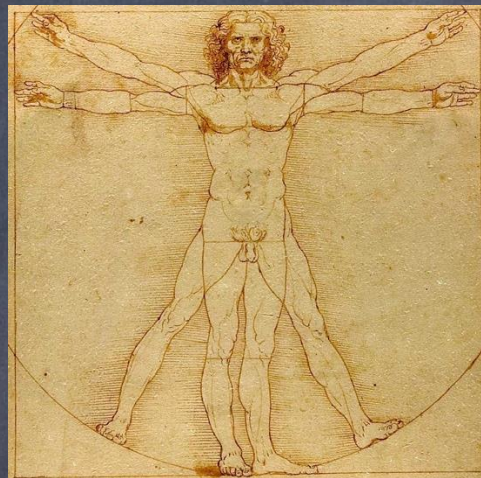
simmetria per rotazioni

Simmetrie ...

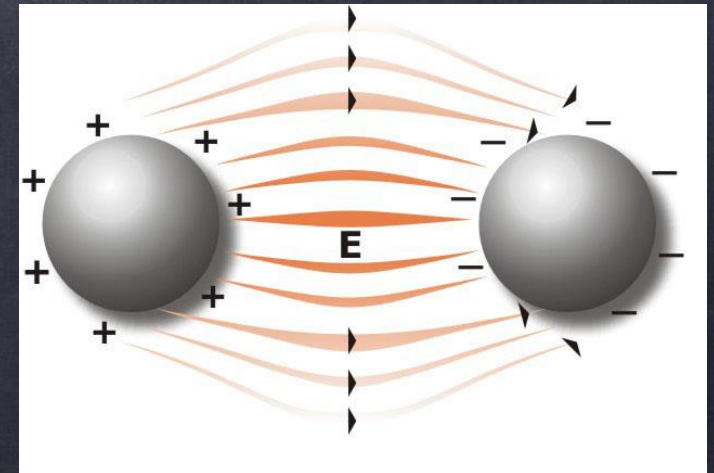
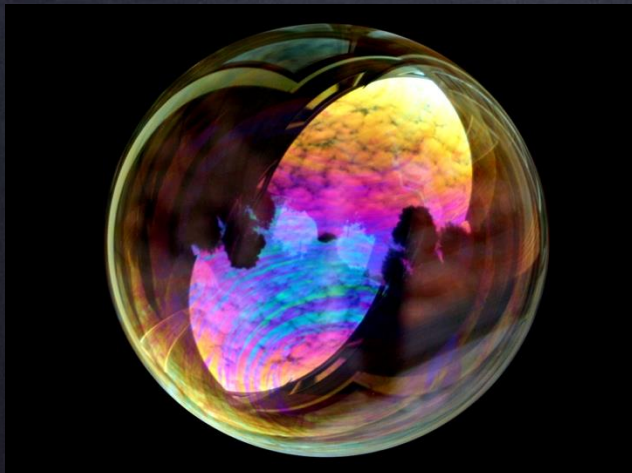
In fisica si parla di simmetria quando un sistema è "invariante" rispetto a certe trasformazioni

I fisici credono che la natura tenda ad essere simmetrica

Simmetrie Discrete



Simmetrie Continue

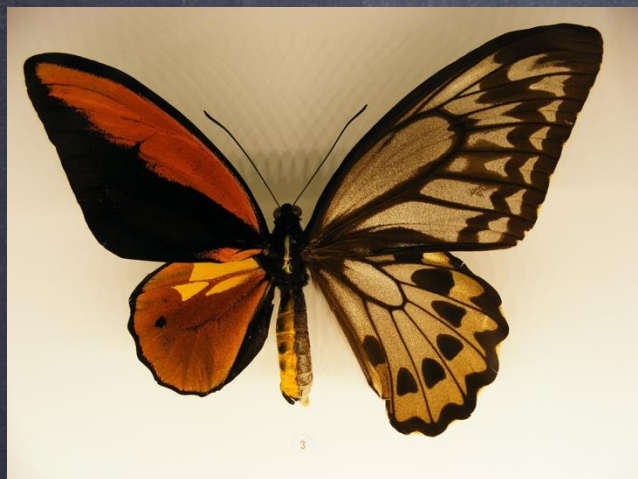


... infrante

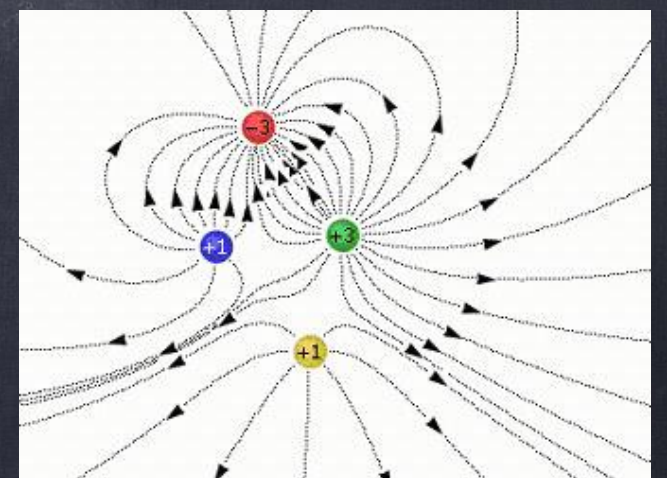
... o almeno quasi simmetrica

Un buon punto di partenza 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 tutti i fenomeni di interazione tra le particelle elementari

Le particelle elementari ad oggi conosciute sono:

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS

Particelle elementari

Il Modello Standard si serve della Teoria Quantistica dei Campi per descrivere tutti i fenomeni di interazione tra le 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

massa	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
carica	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					GAUGE BOSONS

"Mediatori" delle forze

Fotone: Interazione elettromagnetica

Bosoni W e Z: Interazione debole

Gluoni: Interazione forte

Bosone di Higgs

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

Simmetrie infrante

Il Modello Standard unifica le interazioni deboli ed elettromagnetiche. Ma allora perché ci appaiono così diverse?

Rottura "esplicita"



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

Rottura "spontanea"



In effetti la simmetria elettrodebole è rotta in natura

I fisici chiamano questa rottura "spontanea"

Per i fisici: il sistema è simmetrico, ma lo stato "fondamentale" no

In parole povere: le leggi che governano il sistema continuano ad essere simmetriche, ma lo stato attuale del sistema non è simmetrico

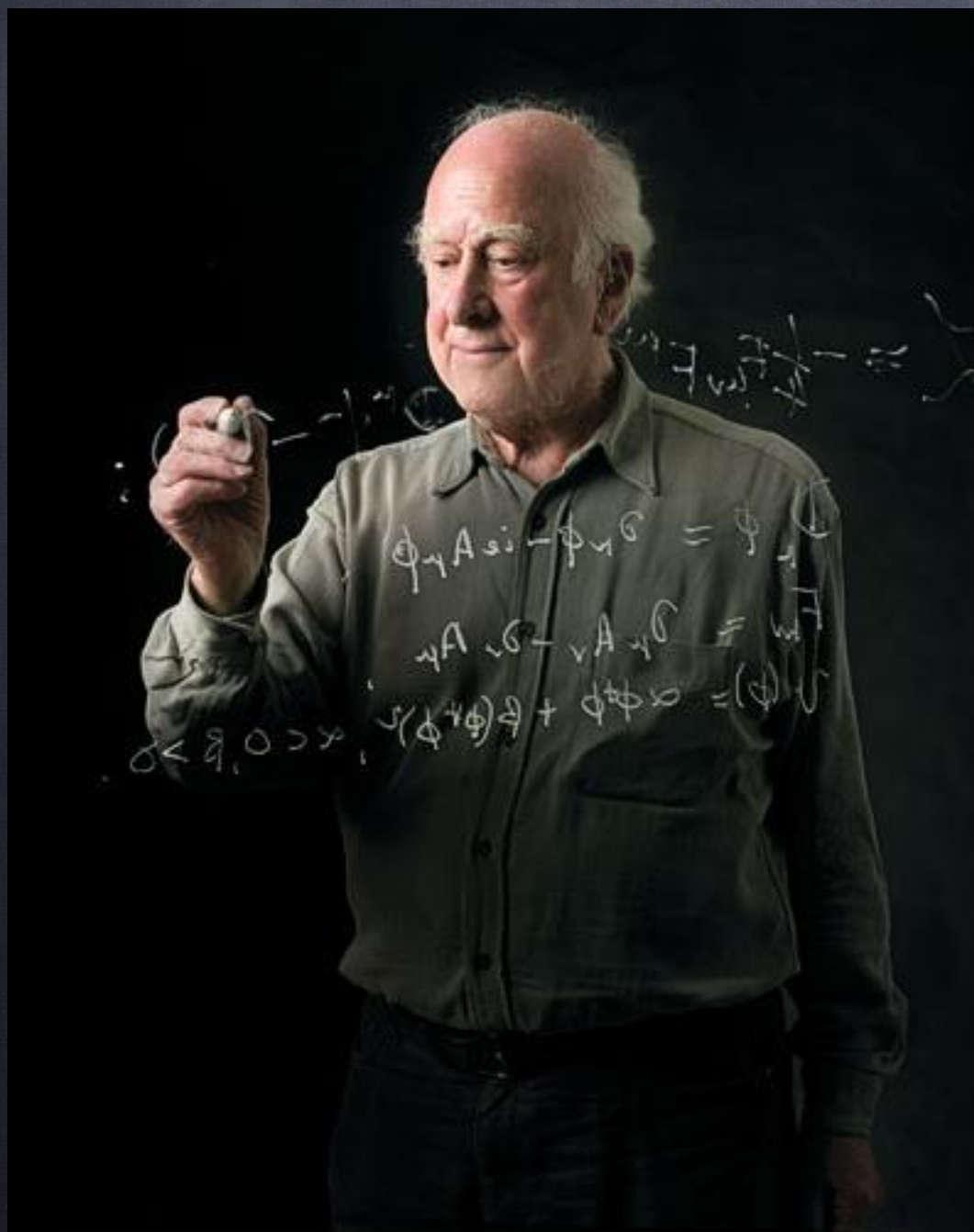
Il Modello di Higgs

Il più semplice meccanismo che permette di descrivere la rottura della simmetria elettrodebole che avviene nel Modello Standard è il meccanismo di Higgs (1964)

Il bosone di Higgs è la particella che permette di spiegare questa apparente "asimmetria" della materia e quindi le masse di tutte le particelle elementari

La massa del bosone di Higgs non è una predizione del Modello Standard (anche se può essere stimata a partire dagli altri parametri) e l'unico modo di determinarla è misurarla sperimentalmente

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



2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert Peter W. Higgs



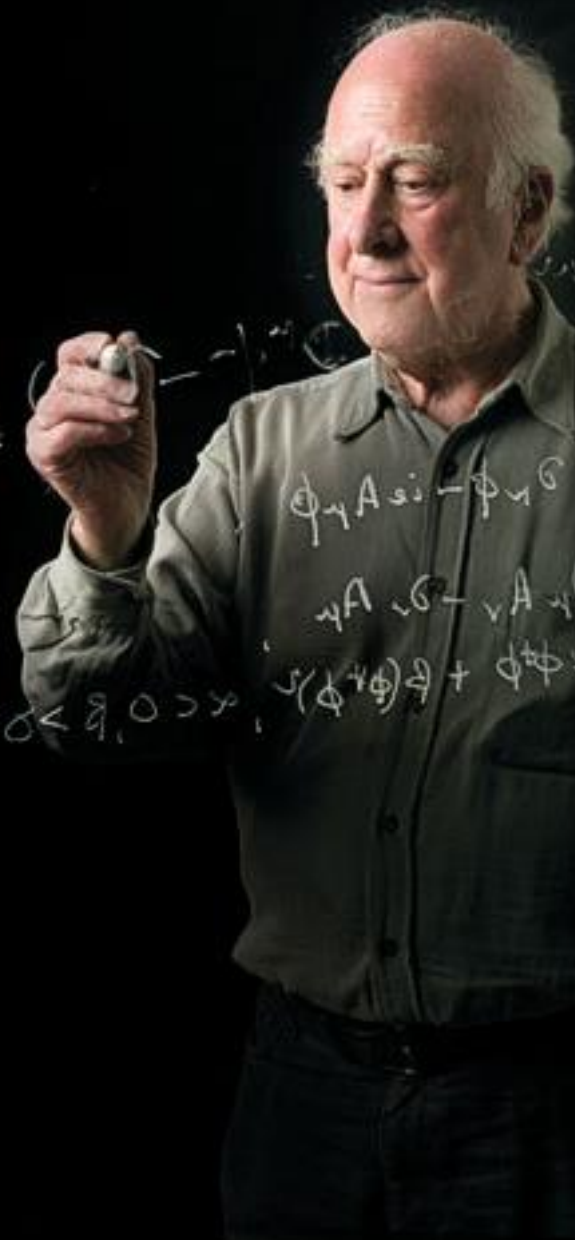
© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom.

Il bosone di Higgs è la "particella che permette di dare la "simmetria" della materia e delle particelle elementari

non è una predizione del modello Standard, ma può essere stimata a posteriori e l'unico modo di verificarla sperimentalmente

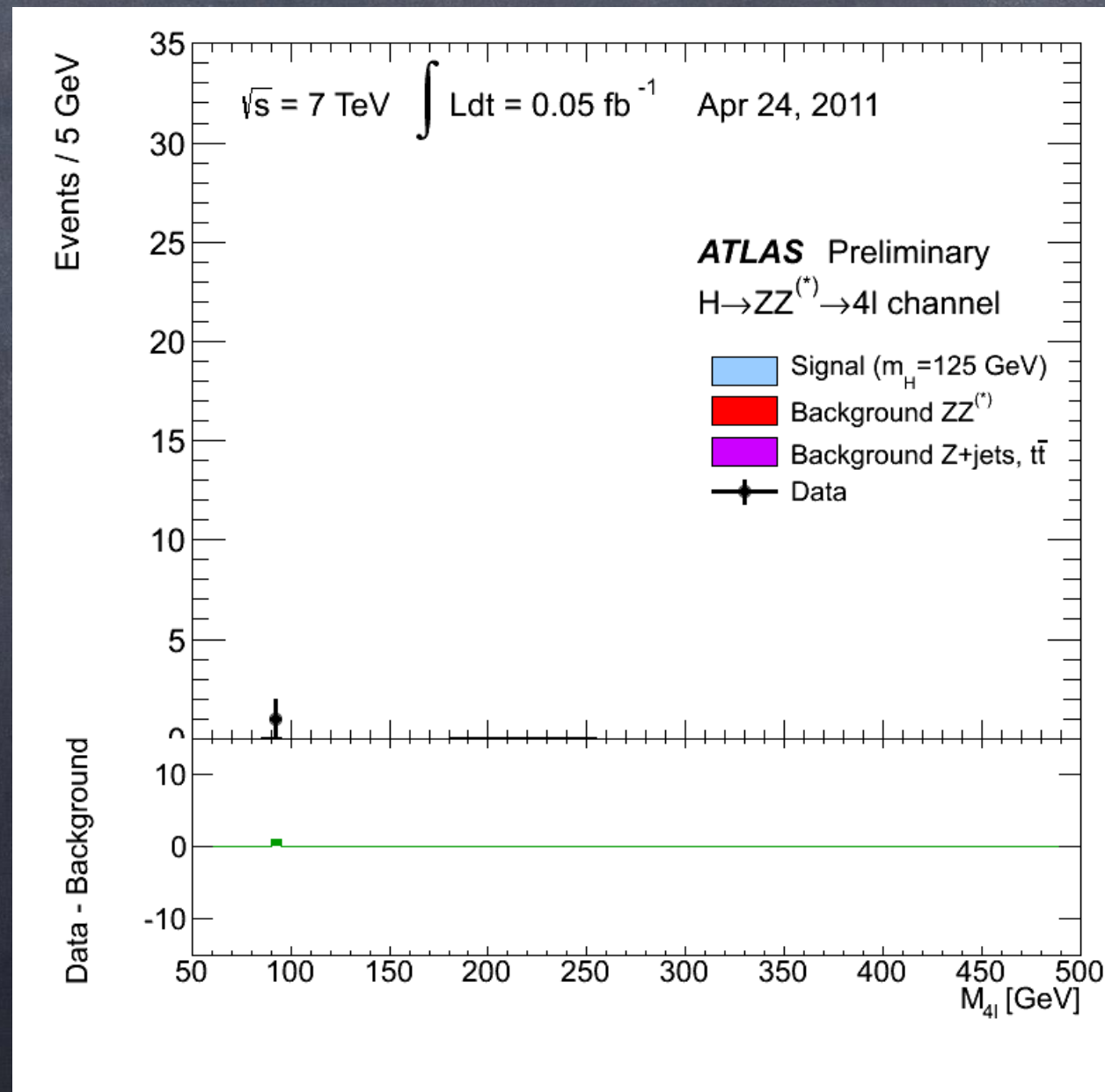
è stato scoperto al CERN con l'acceleratore LHC ed agli esperimenti ATLAS e CMS ($m=125 \text{ GeV}$)

esperimenti ATLAS e CMS ($m=125 \text{ GeV}$)



La scoperta in diretta

Sono necessari anni per accumulare la statistica (ossia un numero sufficiente di osservazioni) necessaria a studiare fenomeni rari come la produzione del bosone di Higgs, persino in acceleratori potenti e sofisticati come il Large Hadron Collider



E ora?

Tutto funziona ma...

Il Modello Standard è uno dei più grandi traguardi raggiunti dall'umanità in termini di comprensione della Natura, nonché la teoria scientifica più completa e meglio verificata costruita fino ad oggi

È stato testato per molti anni e con grande precisione ed ogni sua predizione è sempre stata verificata

Tuttavia ci sono molti problemi teorici e fenomenologici ancora aperti come ad esempio:

- 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?
- che ne è della gravità?
- l'energia oscura
- ...

... non è finita qui!

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

Teoria

Estensioni del MS prevedono per esempio:

- Supersimmetria
- Higgs composto
- Extra dimensioni
- Multi-verso
- Teoria delle Stringhe



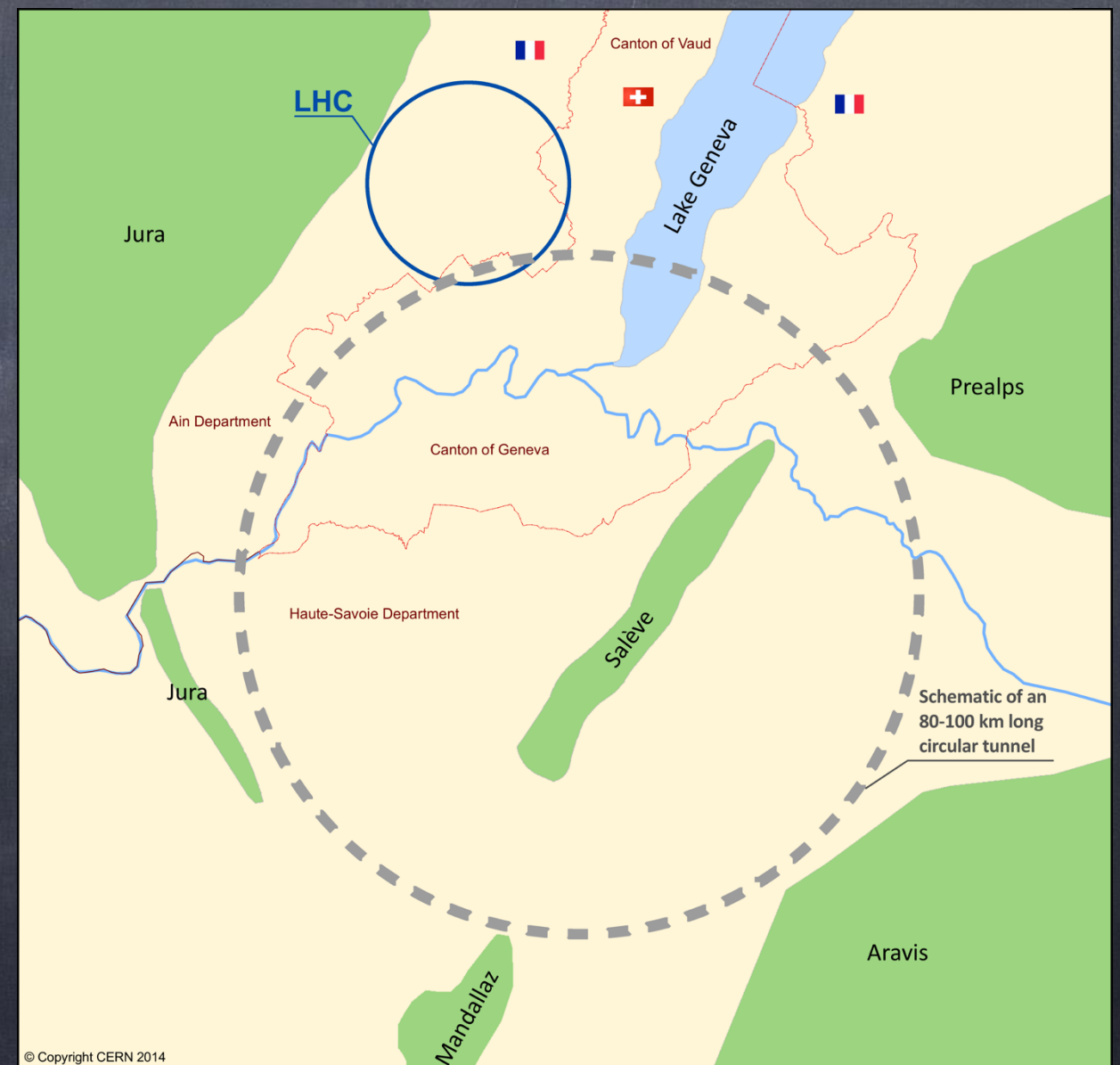
... non è finita qui!

Per tutti questi motivi i fisici teorici cercano di estendere il Modello Standard a 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!

FCC: 100Km e 100TeV!



...E IL MEGLIO DEVE ANCORA

VENIRE!

GRAZIE