

La fisica teorica delle particelle elementari

Simone Marzani

*Dipartimento di Fisica, Università di Genova &
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Genova*

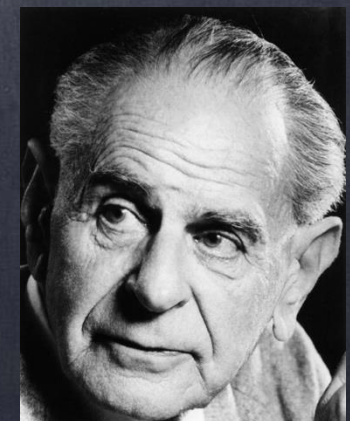
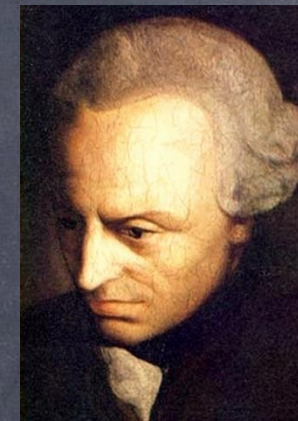
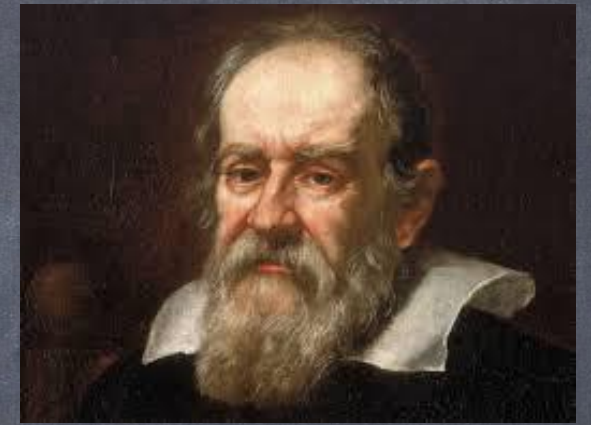
Marzo 2025

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)

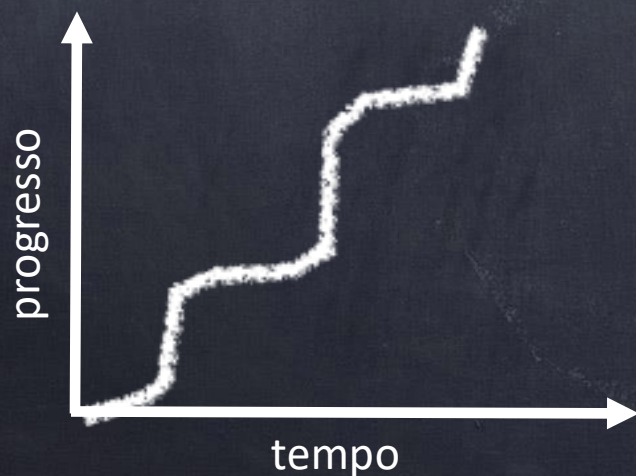


La fisica riduzionista

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

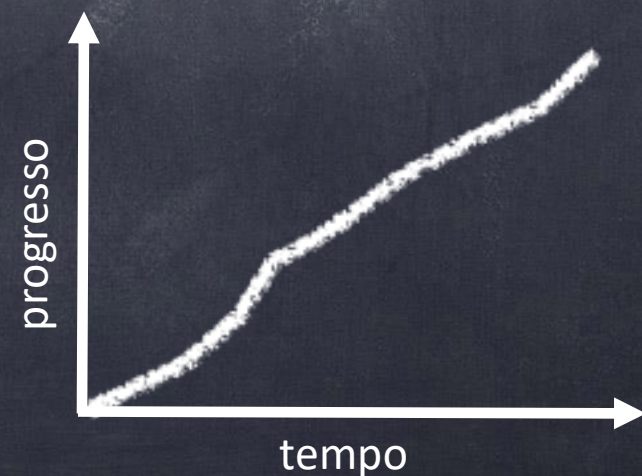
Fisica riduzionista

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)

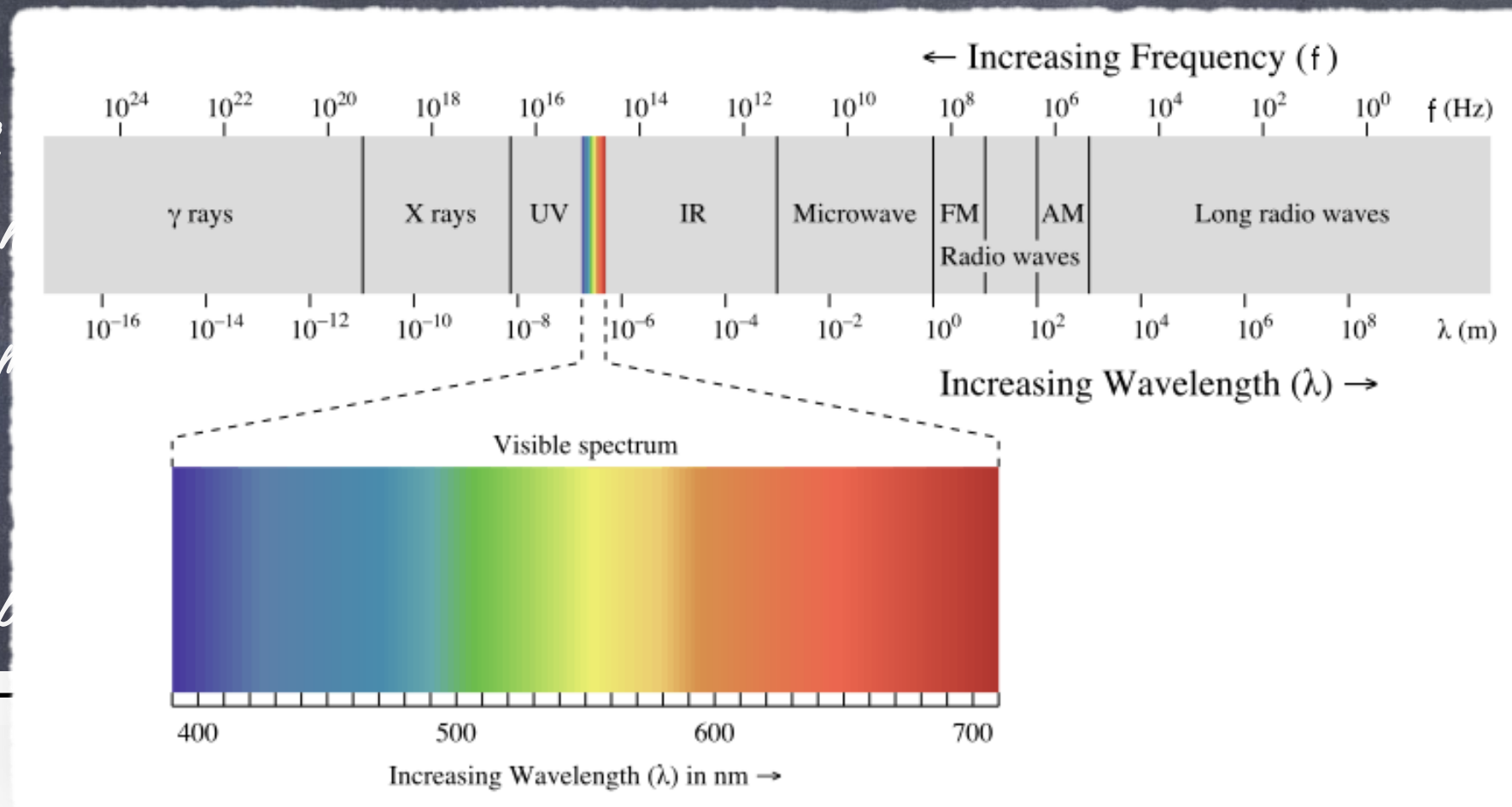


Sempre più piccolo...

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

Esempio della
quelle che fanno

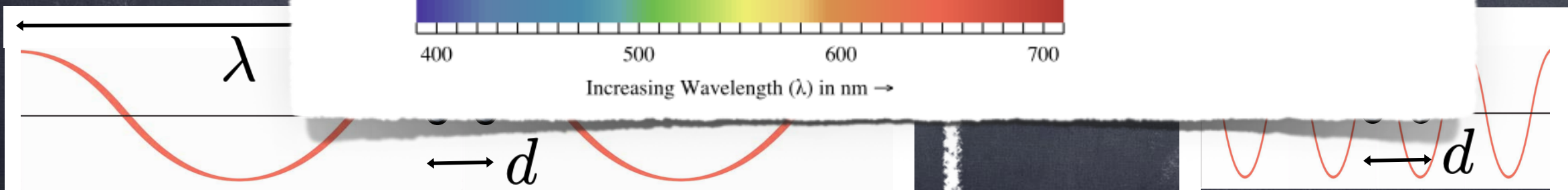
Un altro esempio



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 grandi energie

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)

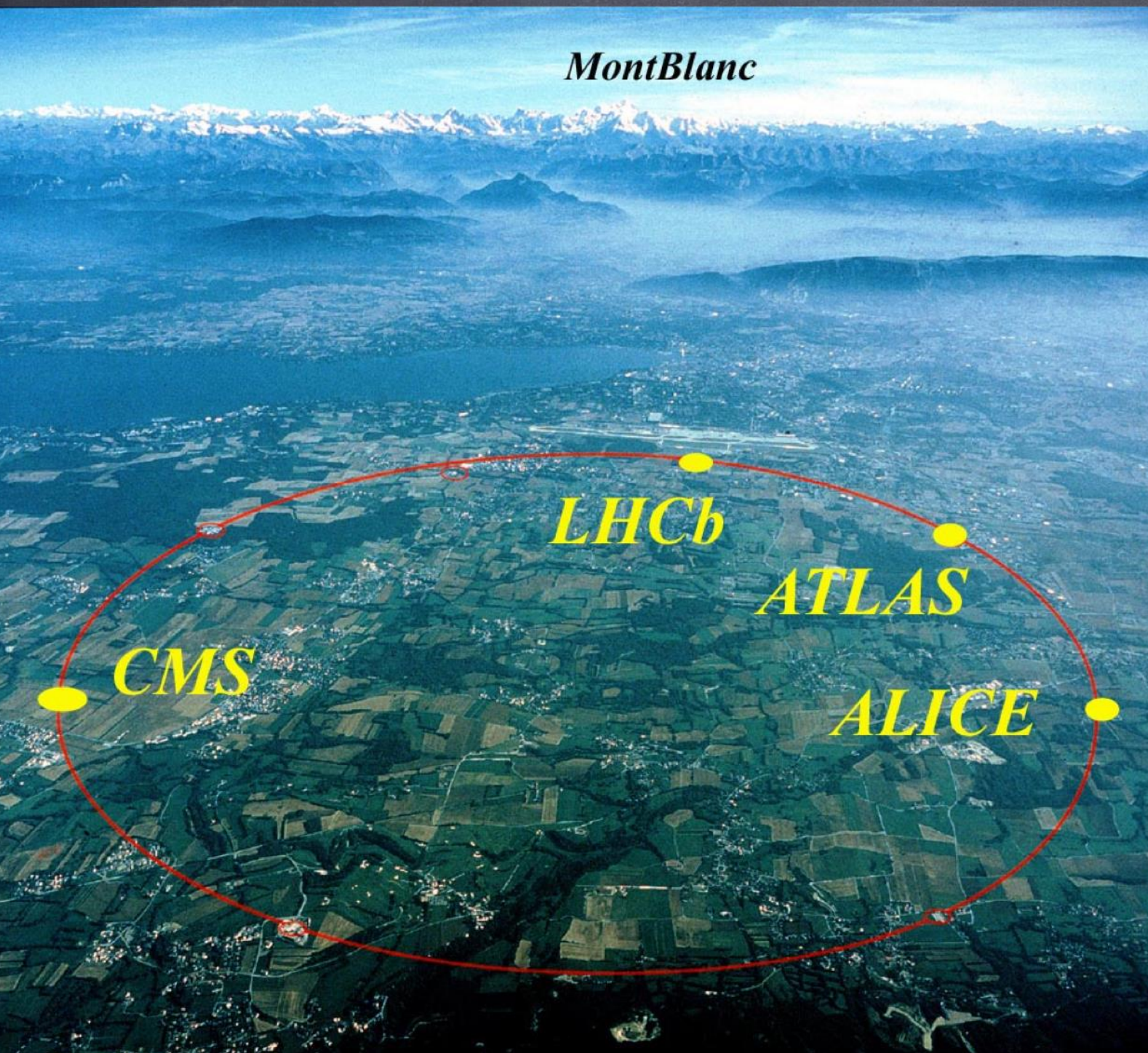
definito da

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

e dunque per piccole lunghezze ci vogliono grandi energie

Grandi 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

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

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

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

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

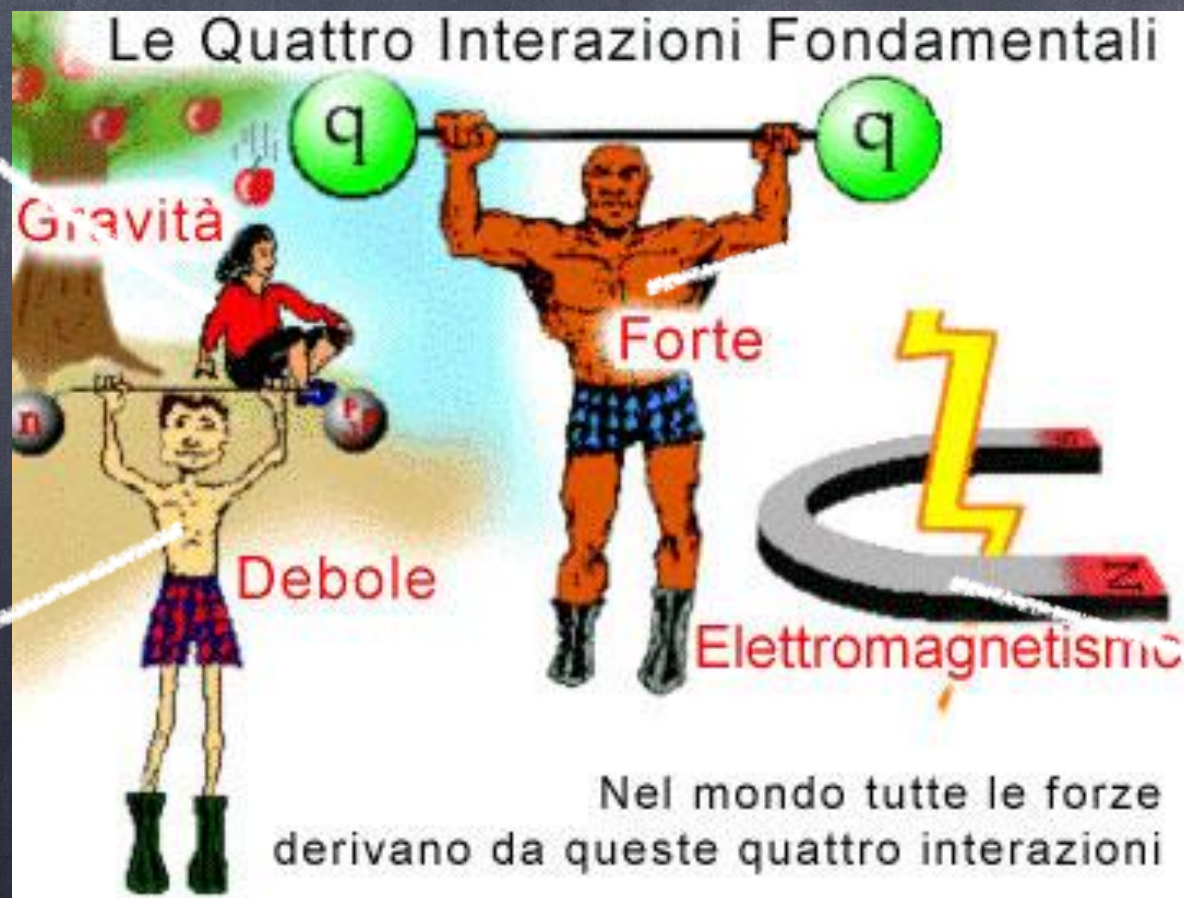
$$W = 180 \text{ MW}$$

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)

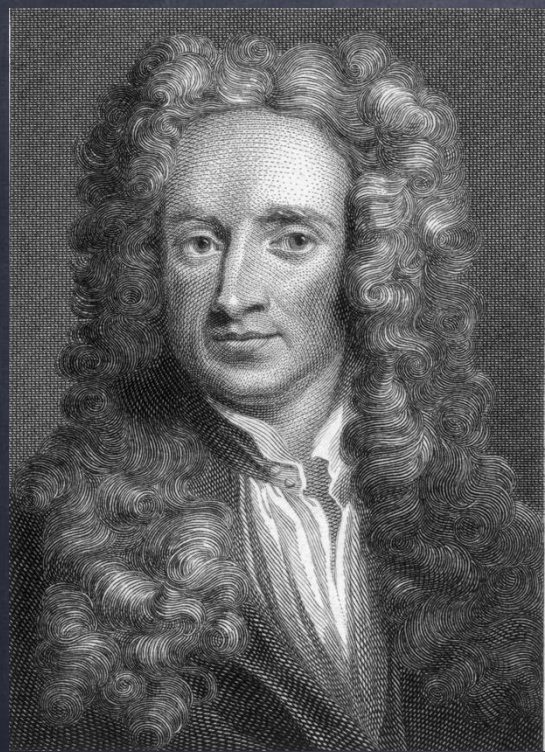
Raggio di interazione finito
Mediatori = bosoni W e Z (osservati e valse il Nobel a Carlo Rubbia)

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

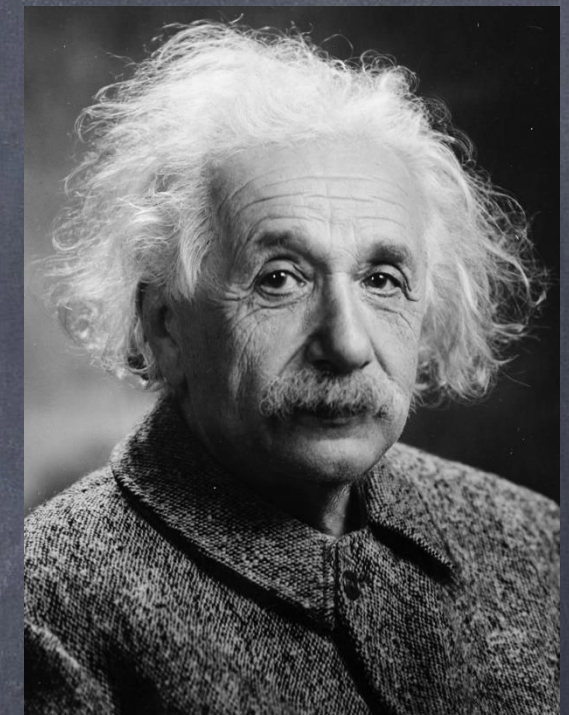
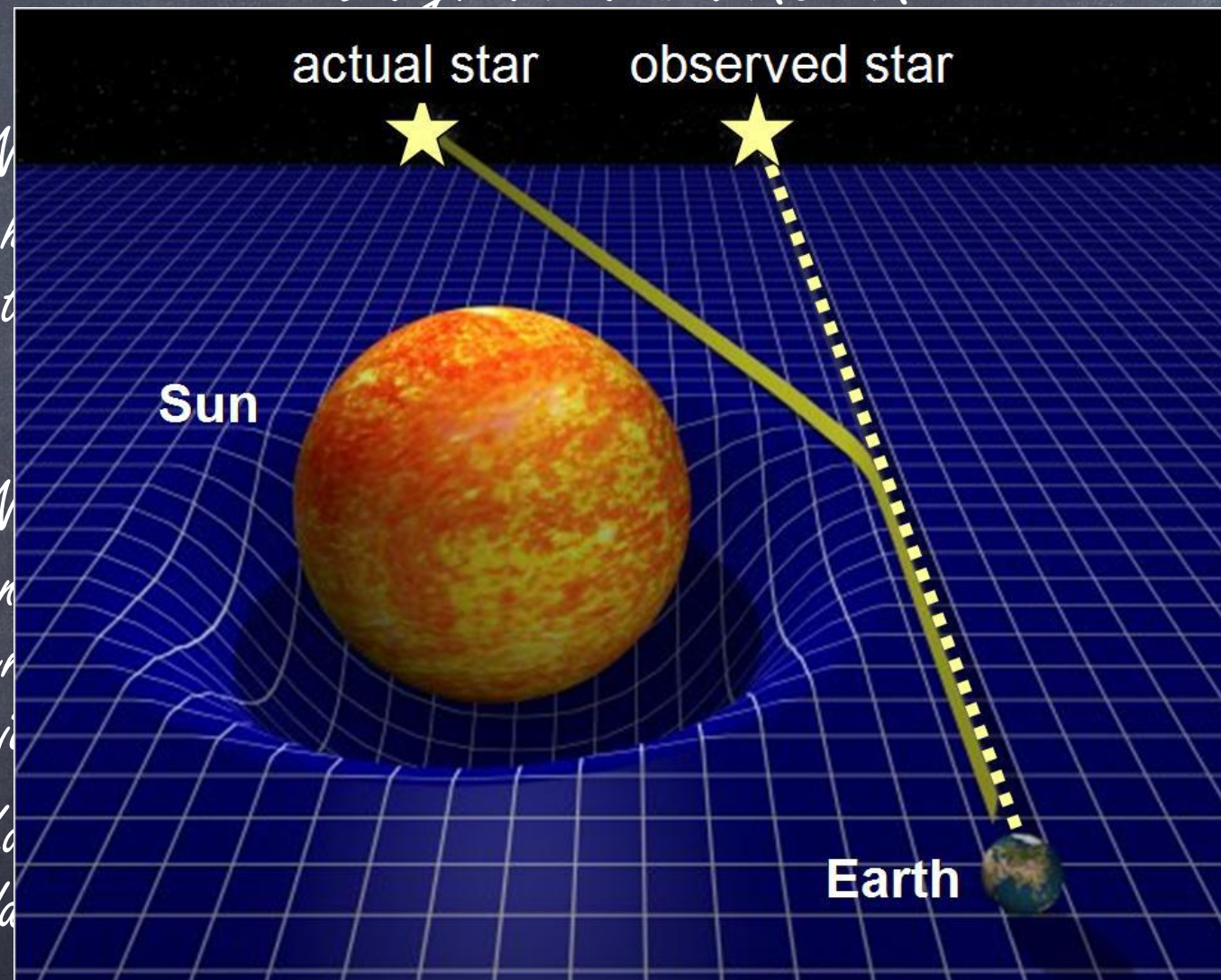
$$F = G \frac{m \cdot M}{r^2}$$

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



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

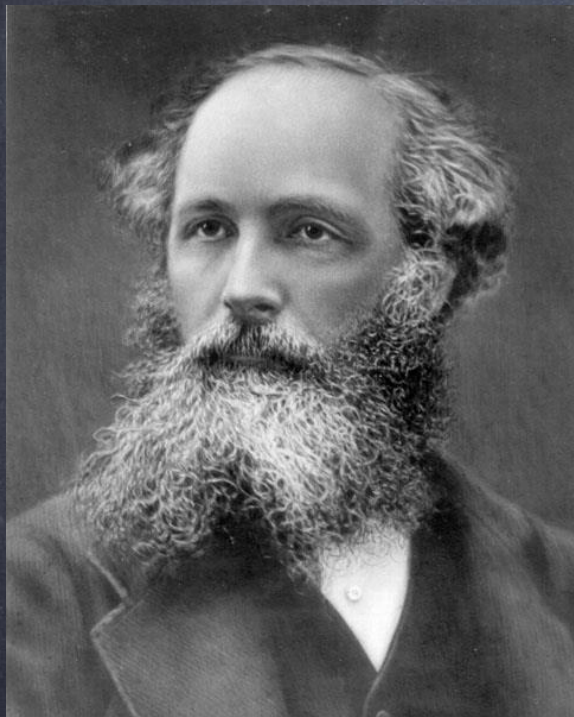
Nota: La gravità è l'unica forza che ad oggi non si è riuscita ad unificare in una teoria quantistica consistente di tutte le forze

$$E = mc^2$$

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

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

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

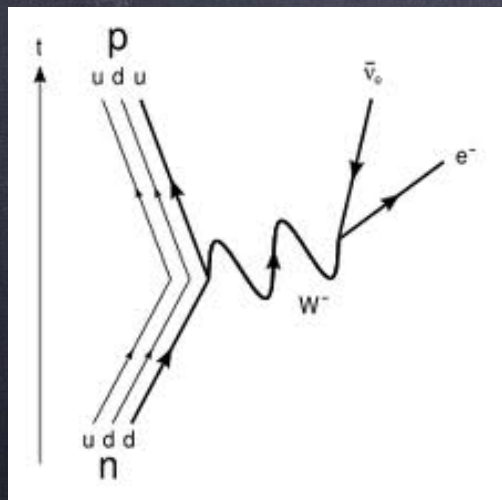
L'elettromagnetismo è alla base di tutte le teorie quantistiche dei campi ed ha aperto la strada, con i progressi della fisica del primo '900, alla formulazione di teorie analoghe per le interazioni forti e deboli, poi unificate nel Modello Standard

Le interazioni deboli

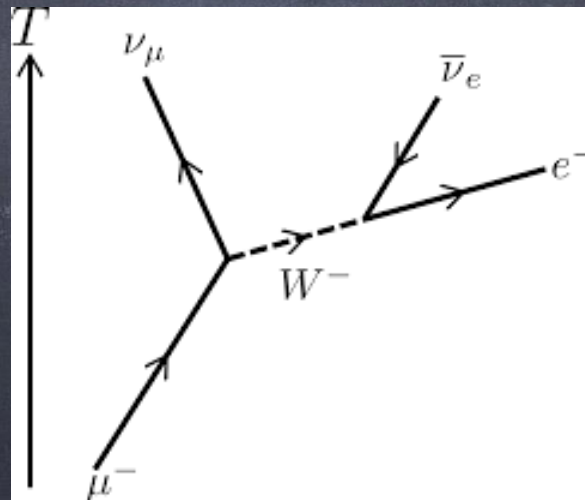
La forza debole è responsabile della radioattività beta, fenomeno che non possiede un'interpretazione "classica", bensì è intrinsecamente quantistico. Più in generale, le interazioni deboli sono responsabili dell'"instabilità" di alcune particelle

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

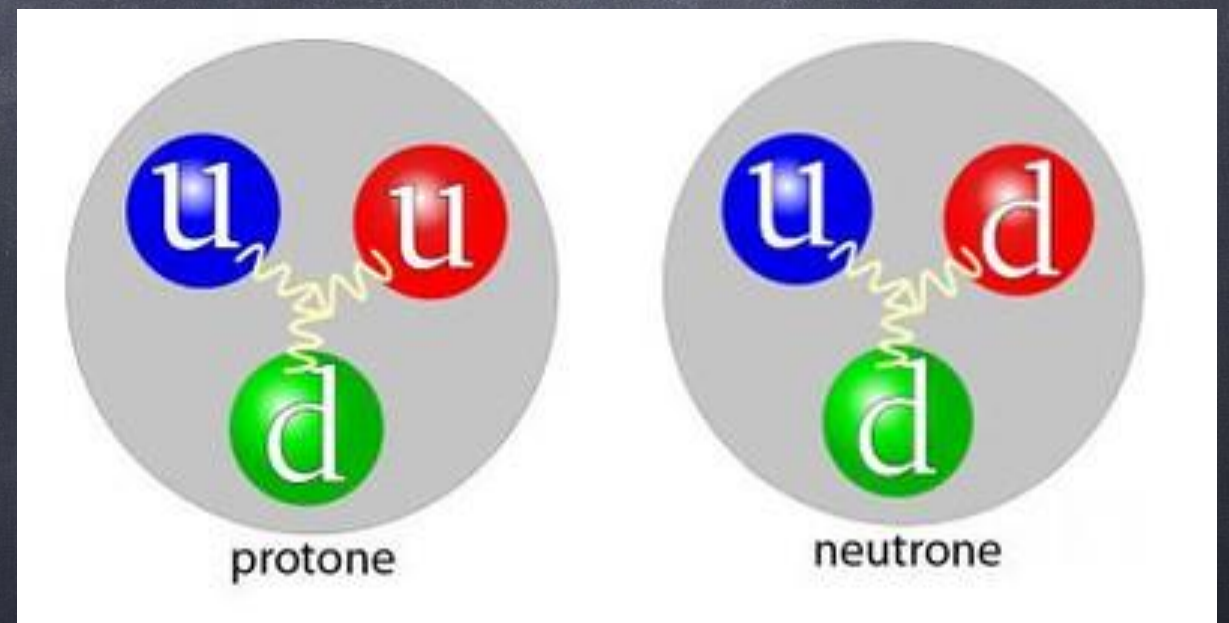
La forza forte

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



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
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	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)

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert Peter W. Higgs



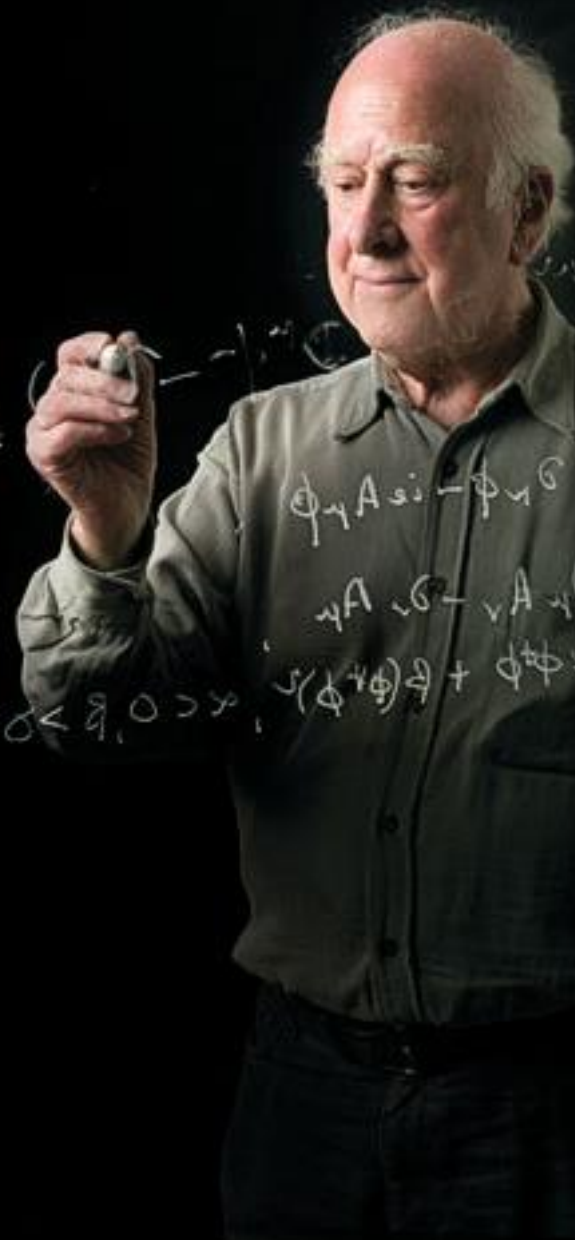
© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom.

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

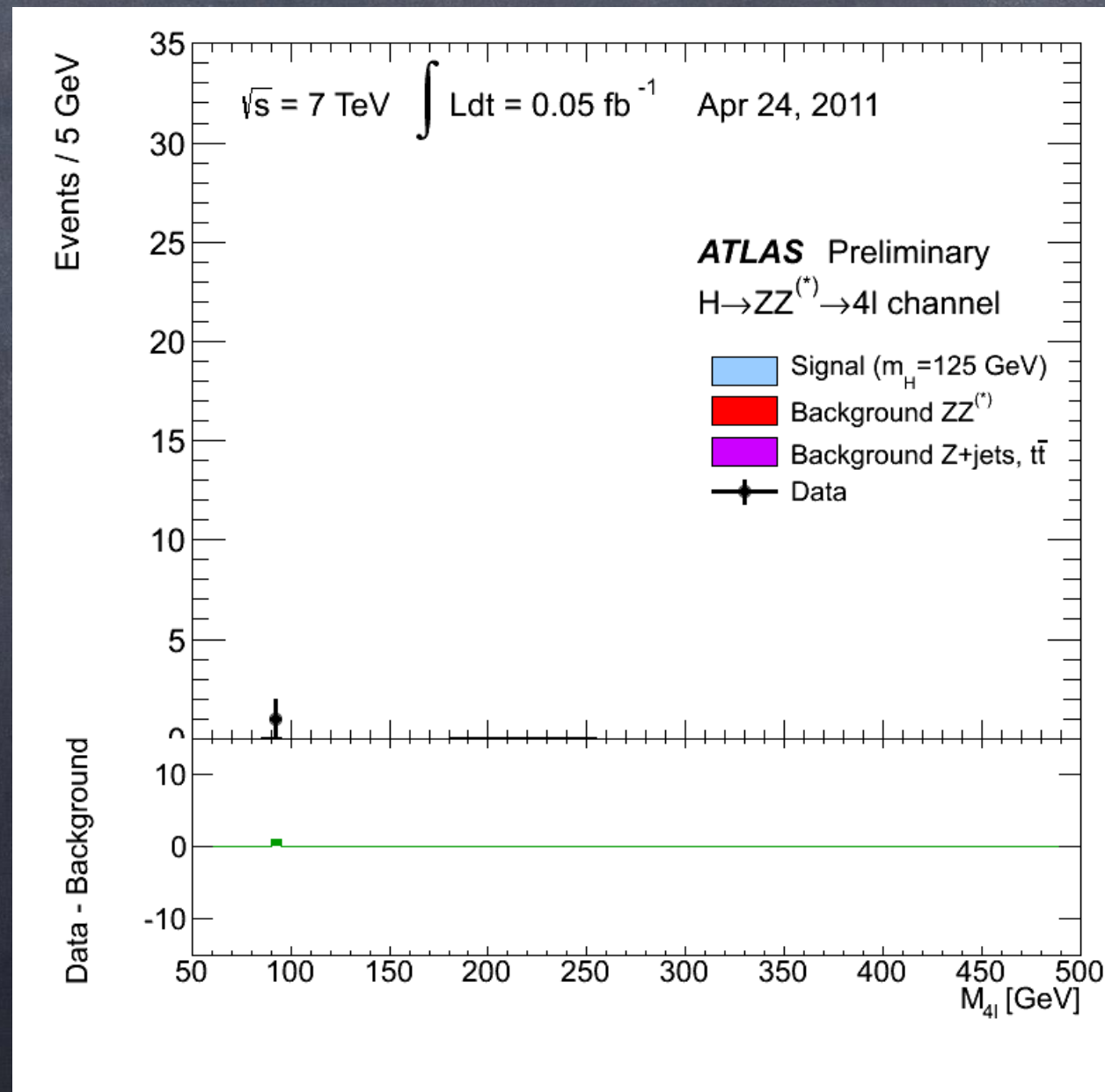
è stato scoperto al CERN con l'acceleratore LHC ed agli esperimenti ATLAS e CMS ($m=125 \text{ GeV}$)

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



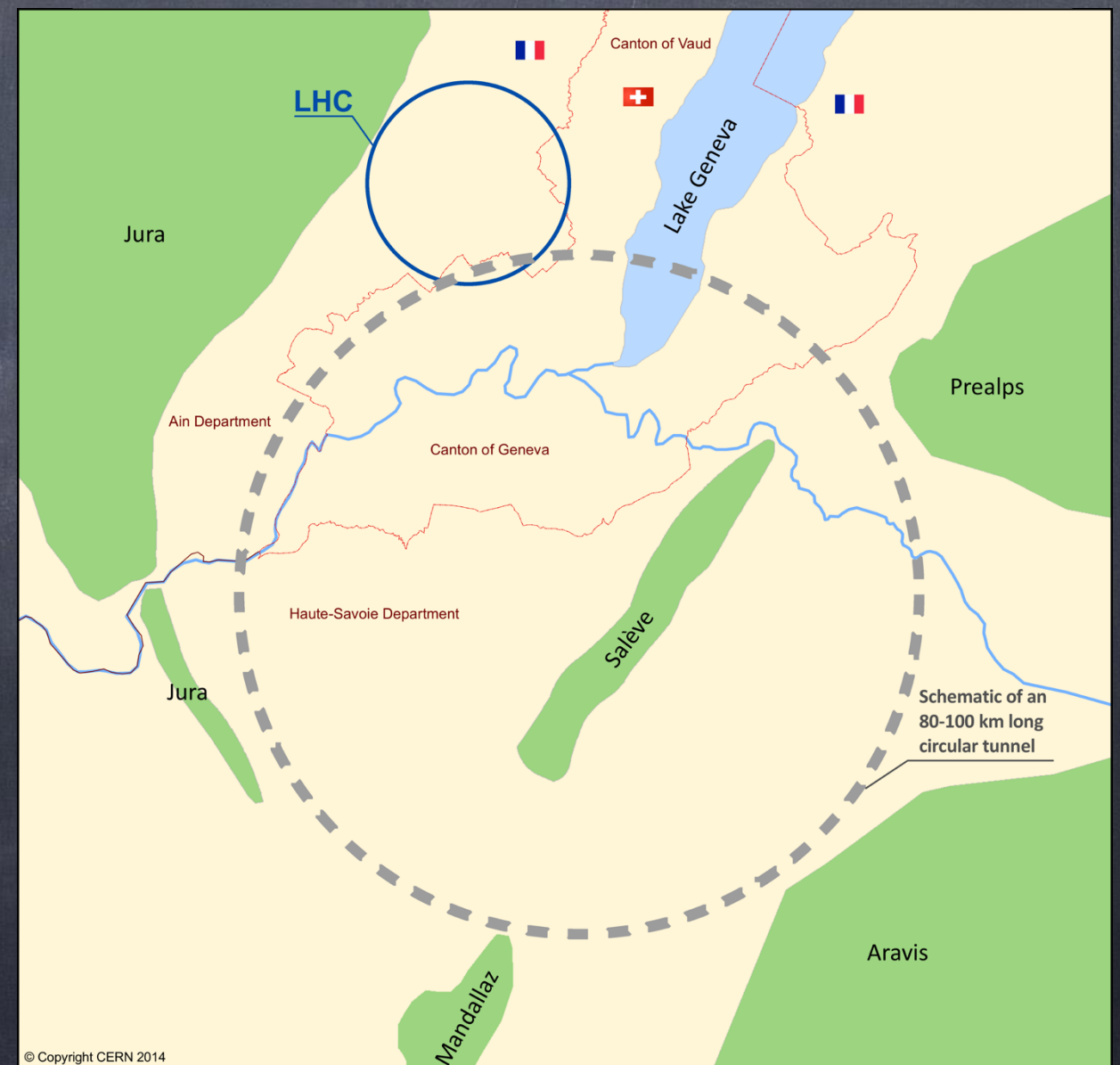
... non è finita qui!

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