

Il Modello Standard delle Particelle Elementari

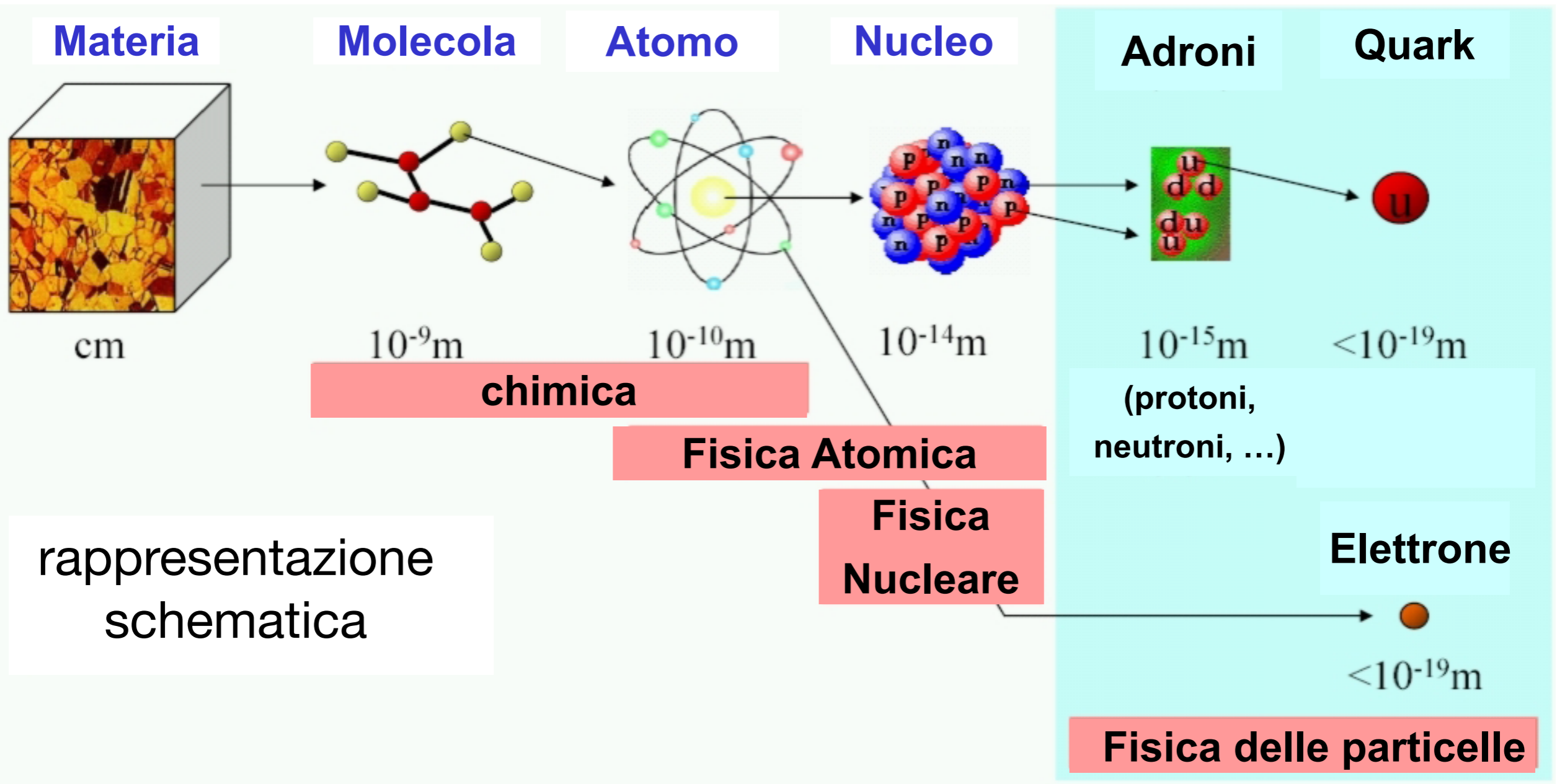
Prof. Biagio Di Micco
Università degli Studi di Roma Tre



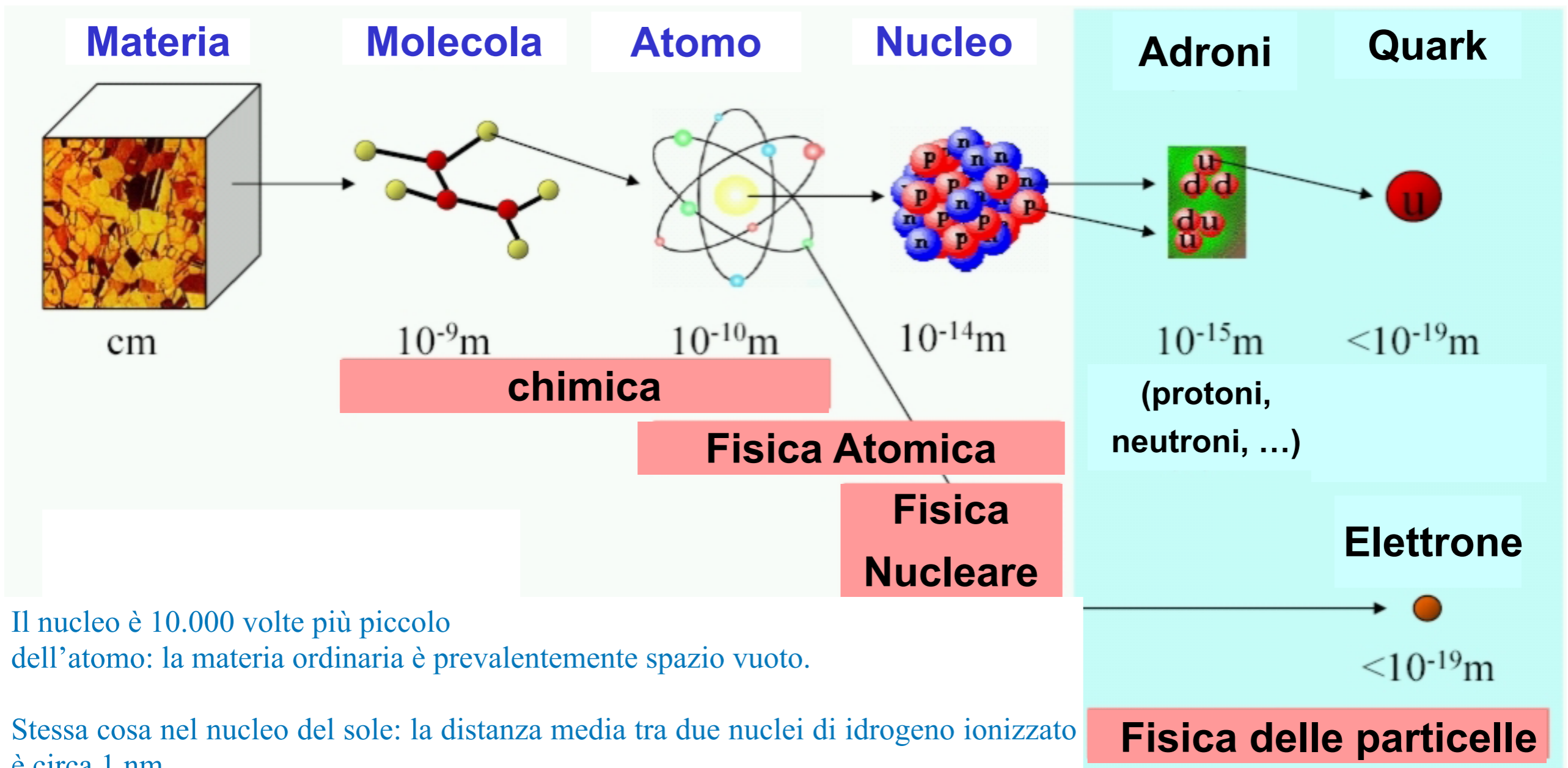
Sommario

- ★ i costituenti elementari della materia
- ★ le tre famiglie di costituenti
- ★ quattro (cinque...) forze fondamentali: mediatori
- ★ interazioni protone - protone
- ★ decadimenti
- ★ il bosone di Higgs

La materia



La materia

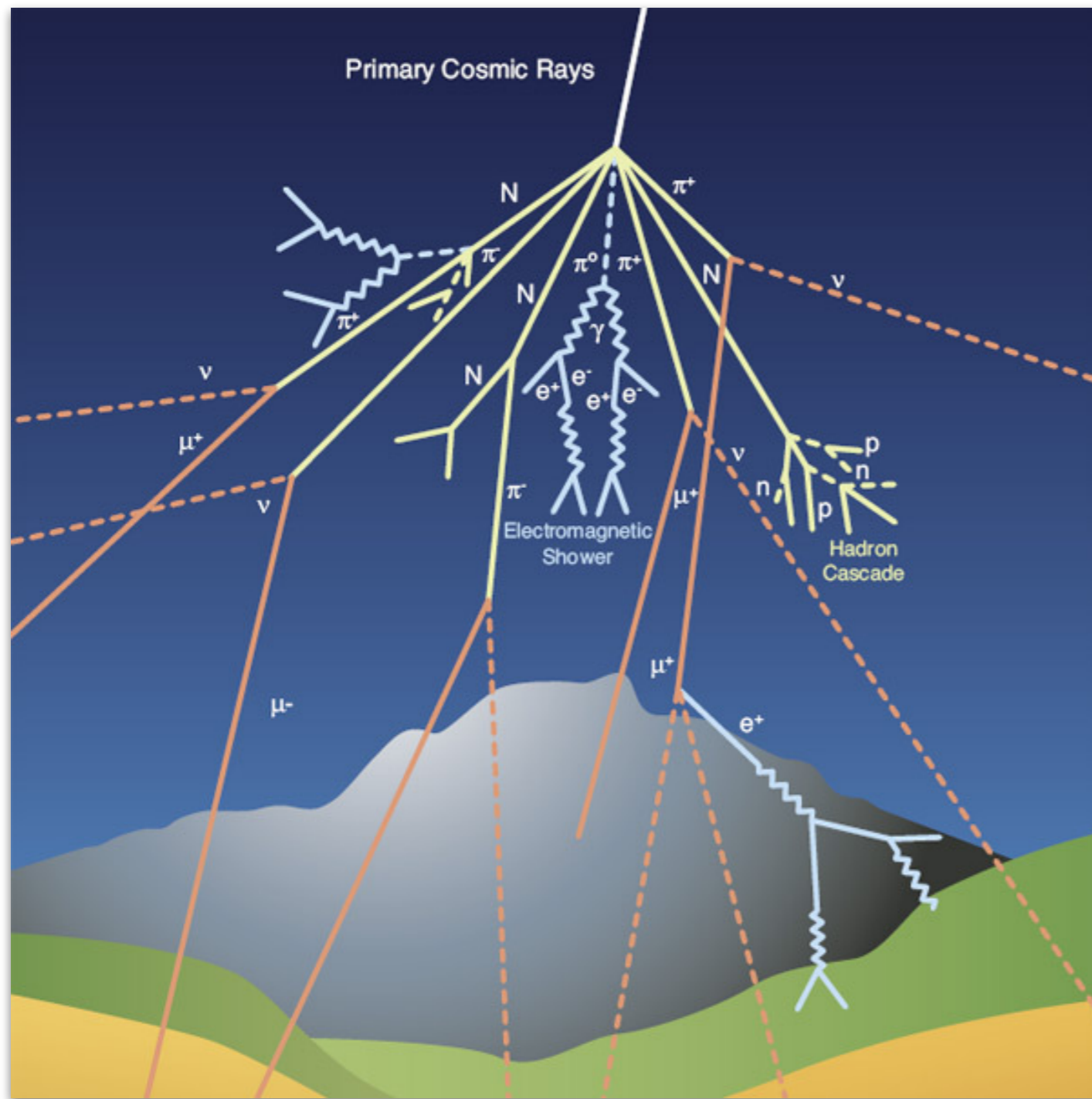


Il nucleo è 10.000 volte più piccolo dell'atomo: la materia ordinaria è prevalentemente spazio vuoto.

Stessa cosa nel nucleo del sole: la distanza media tra due nuclei di idrogeno ionizzato è circa 1 nm

Esistono stelle formate esclusivamente da neutroni, stelle di neutroni, con distanze tipiche del raggio nucleare (densità elevatissime: una regione di una stella di neutroni che ha la stessa massa della terra ha un raggio di circa 2 km)

Il muone



★ la terra è bombardata da protoni, elettroni e nuclei di vario tipo provenienti dall'attività solare e da esplosioni stellari (raggi cosmici primari);

★ queste particelle interagiscono con gli strati alti dell'atmosfera e producono fiotti di particelle più leggere;

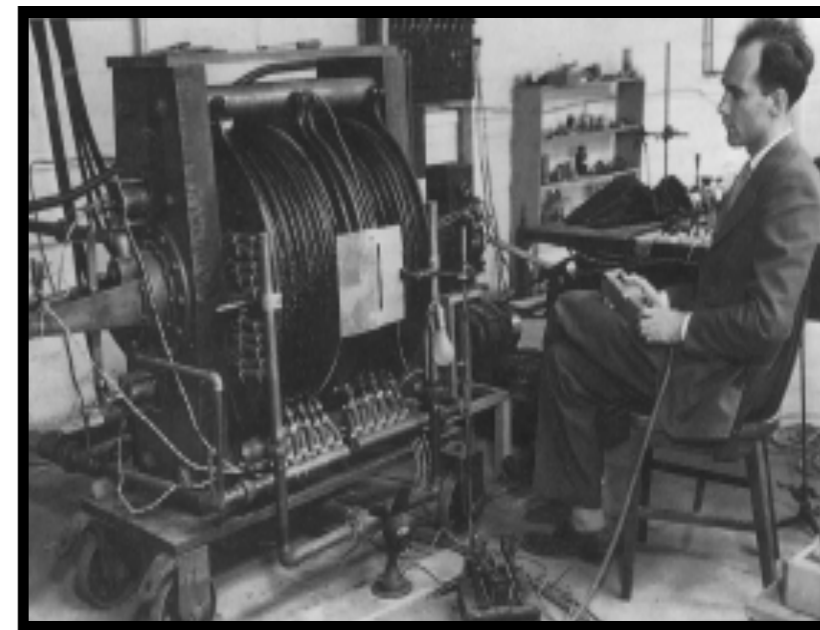
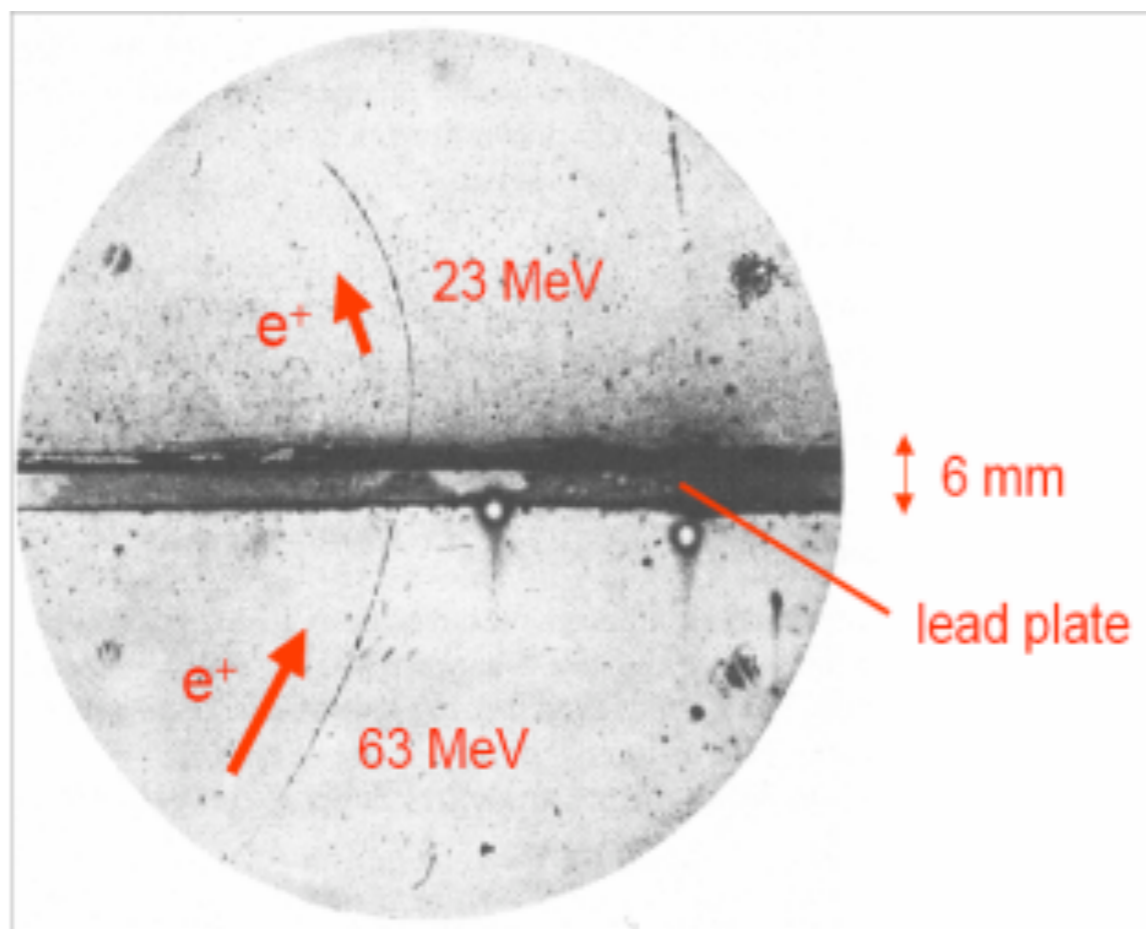
★ studiando questi raggi cosmici Anderson e Neddermeyer (1936) trovarono una particella 200 volte più pesante dell'elettrone: il muone.

Da allora numerosi esperimenti, sia con i raggi cosmici che con acceleratori, hanno trovato centinaia di nuove particelle-.

L'antimateria

Paul Dirac predisse l'esistenza del positrone (antiparticella dell'elettrone) nel 1928.

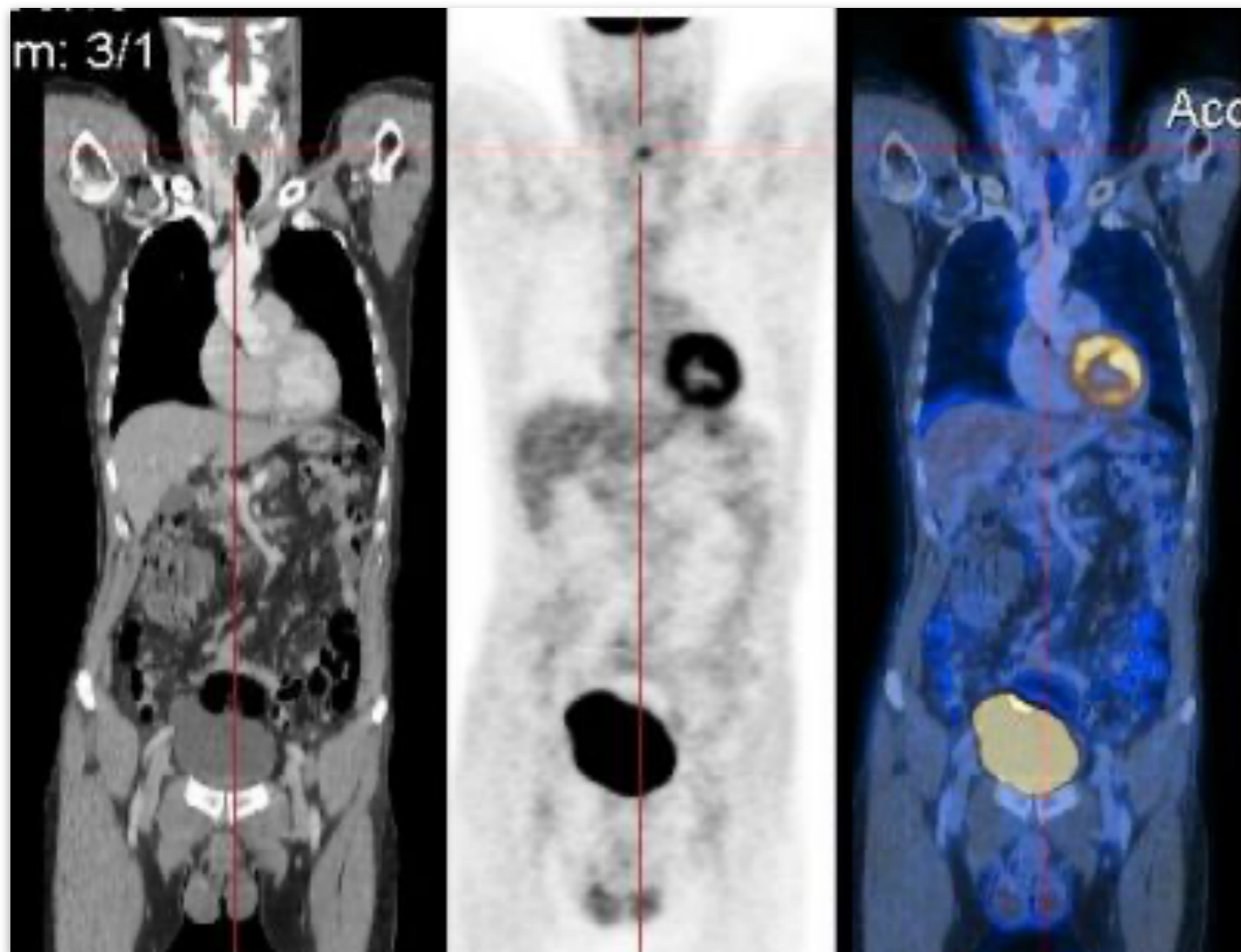
Il positrone e' stato scoperto da Anderson nel 1932.



La traccia di un positrone osservata da Anderson mentre curva in un campo magnetico.

Utilizzando collisori di particelle, macchine in cui due particelle vengono fatte collidere riproducendo in laboratorio ciò che si osserva nei raggi cosmici), si è visto che tutte le particelle cariche hanno un partner di carica opposta e stessa massa: le antiparticelle.

L'antimateria a servizio della medicina



radiografia ai raggi X

PET

Combinazione delle
due immagini

- ★ si creano delle sostanze radioattive che emettono positroni, ad esempio glucosio con emettitori di positroni;
- ★ le sostanze vengono assorbite dai tessuti in modo non uniforme: ad esempio zone tumorali tendono ad assorbire maggiormente gli zuccheri, quindi le sostanze radioattive si concentrano in quelle zone;
- ★ i positroni emessi incontrano gli elettroni ordinari e annichilano in coppie di fotoni (luce)

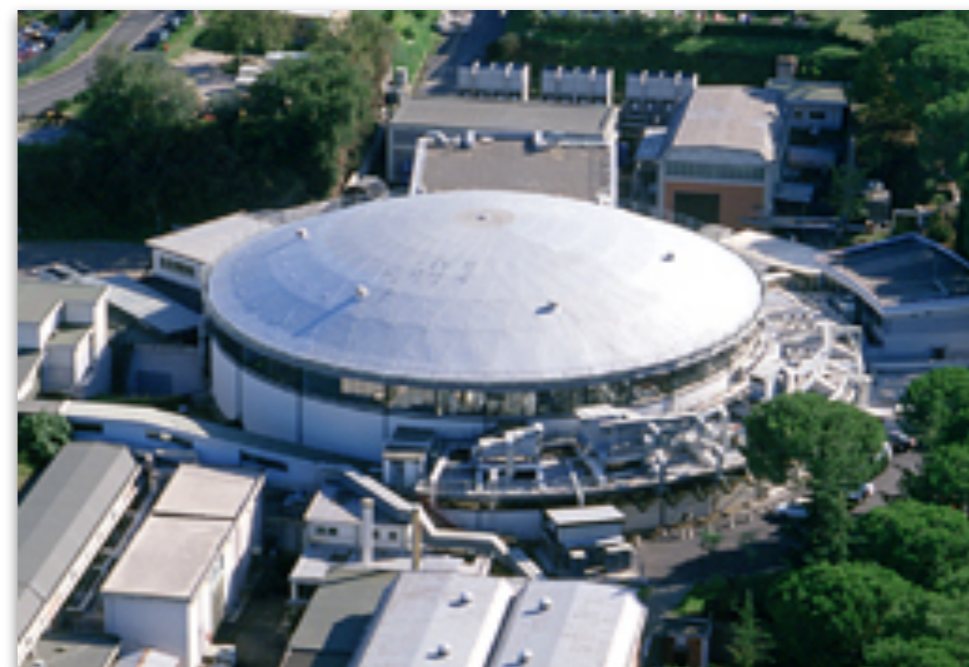


Grazie ai collisori è possibile produrre tante particelle, e studiarle



DAFNE - Frascati (RM) - Italia - $e^+ e^-$

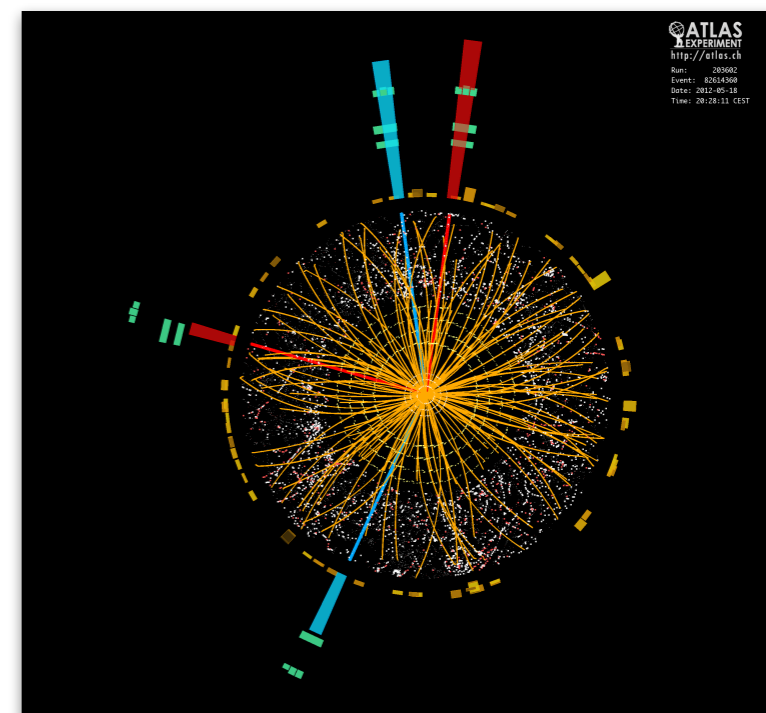
LHC - Ginevra - Francia/Svizzera - $p p$



Fermilab - Chicago - USA - $p \bar{p}$



tracce di particelle
prodotte in interazioni
 $p p$ in ATLAS

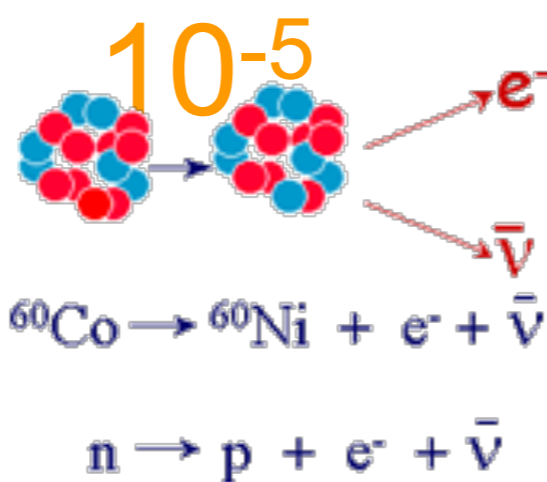


Forze ed interazioni

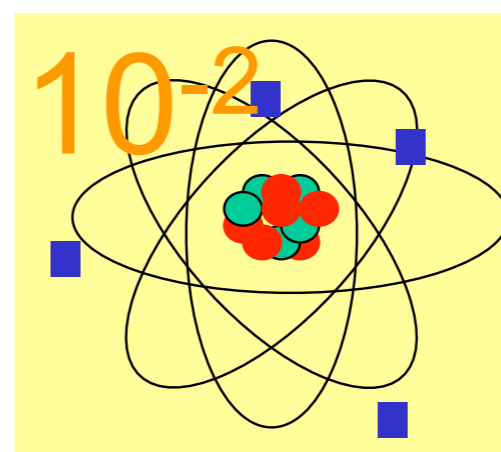
Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali
Responsabili:
della coesione della materia
del suo decadimento



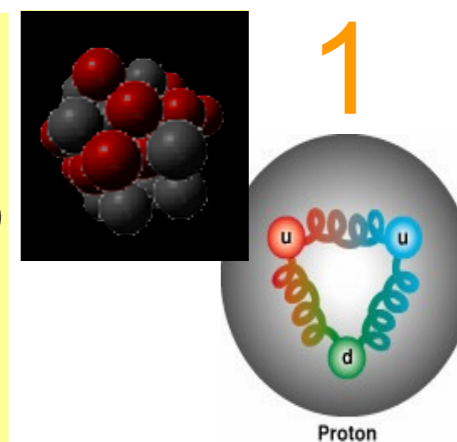
Forza gravitazionale



Forza debole



Forza elettromagnetica

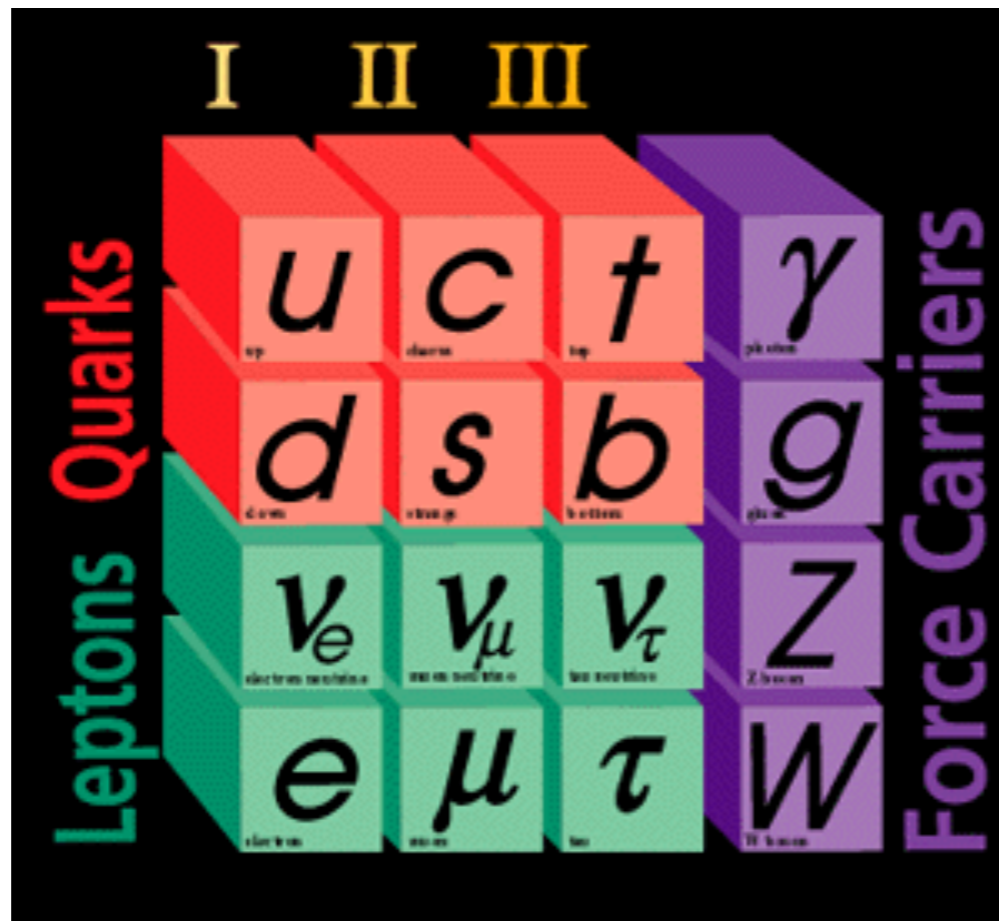


Forza forte (o di colore)



Sono i bosoni (spin intero), i "quanti" del campo di interazione.
Es: Il fotone e' il quanto del campo di interazione elettromagnetica

Il Modello Standard delle Interazioni Fondamentali



Le forze sono mediate dallo scambio di bosoni (spin 1)

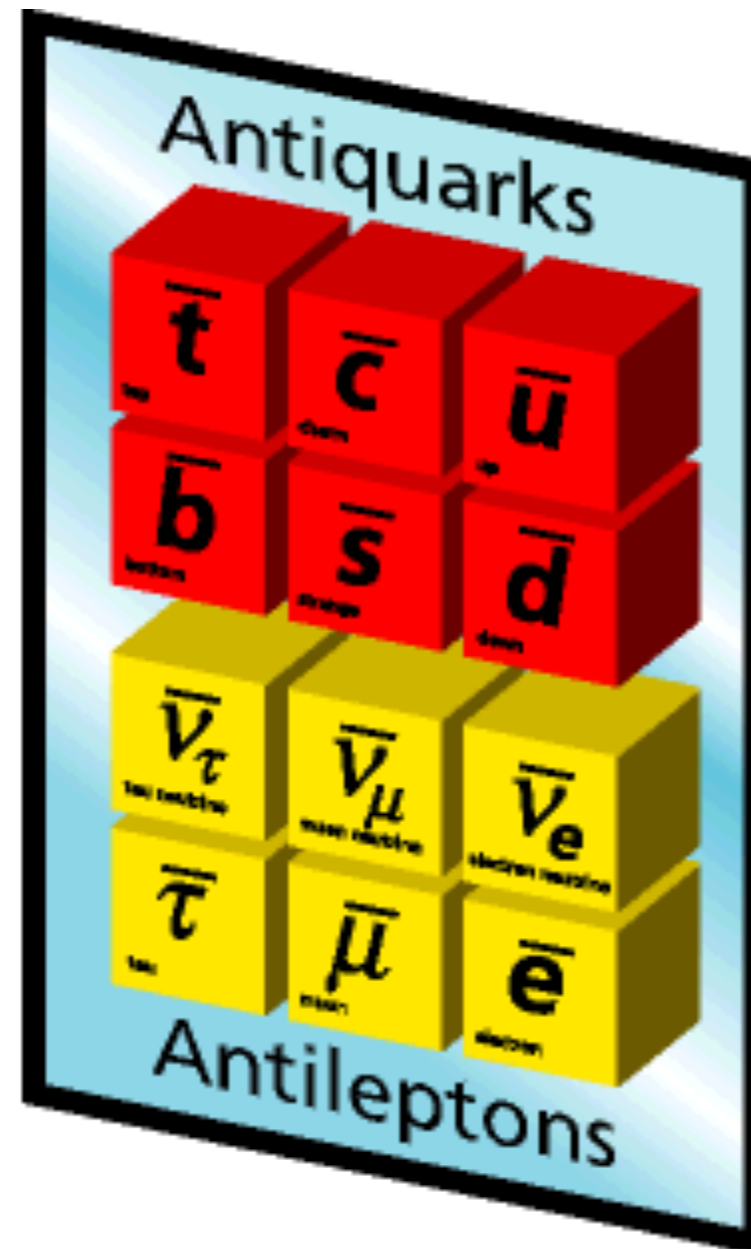
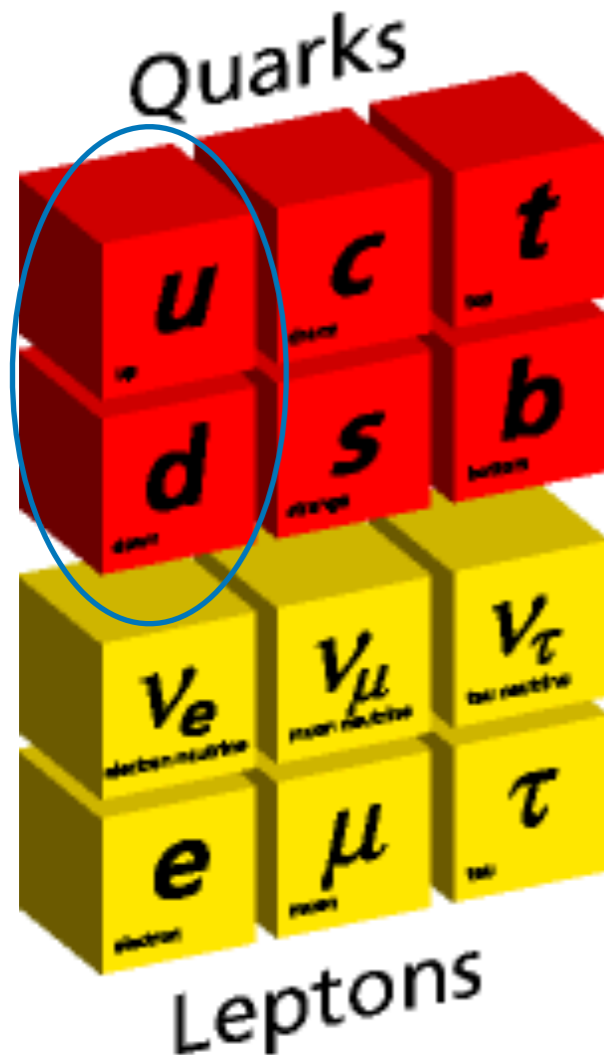
La materia è composta da particelle di spin 1/2 (fermioni) divisi in **leptoni** e **quark** a seconda delle forze cui sono soggetti. I quark non possono esistere come particelle libere ma possono solo formare particelle più pesanti (protone, neutrone, ...)
Leptoni e quark si dividono in 3 famiglie di massa crescente.

I costituenti elementari della materia

p, n sono costituiti da 3 quarks

p: uud

n: ddu



- ★ la materia ordinaria è costituita da quarks: nei nuclei, ed elettroni;
- ★ esistono però tre repliche delle particelle, di massa sempre più grande;
- ★ inoltre per ogni particella esiste una sua anti-particella di carica opposta.

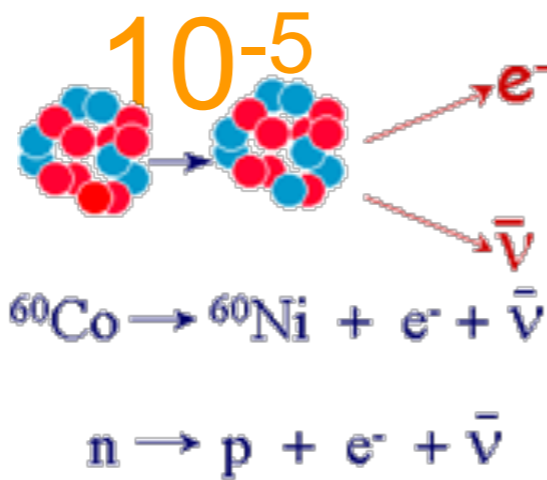
Forze ed interazioni

Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali
 Responsabili:
 della coesione della materia
 del suo decadimento



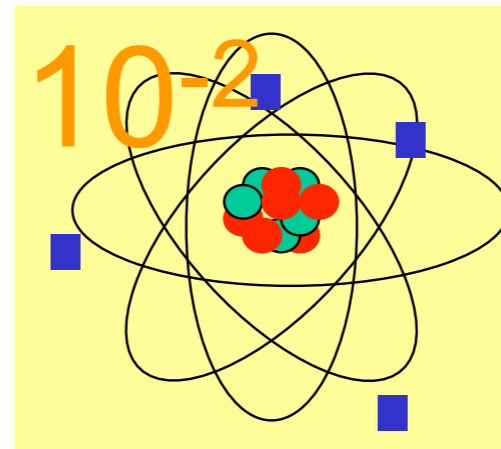
Forza gravitazionale

forse ? ↕



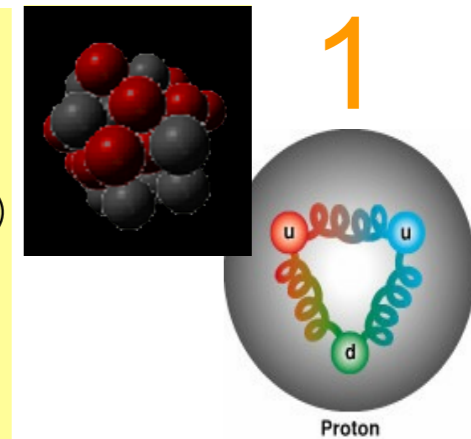
Forza debole

↕



Forza elettromagnetica

↕

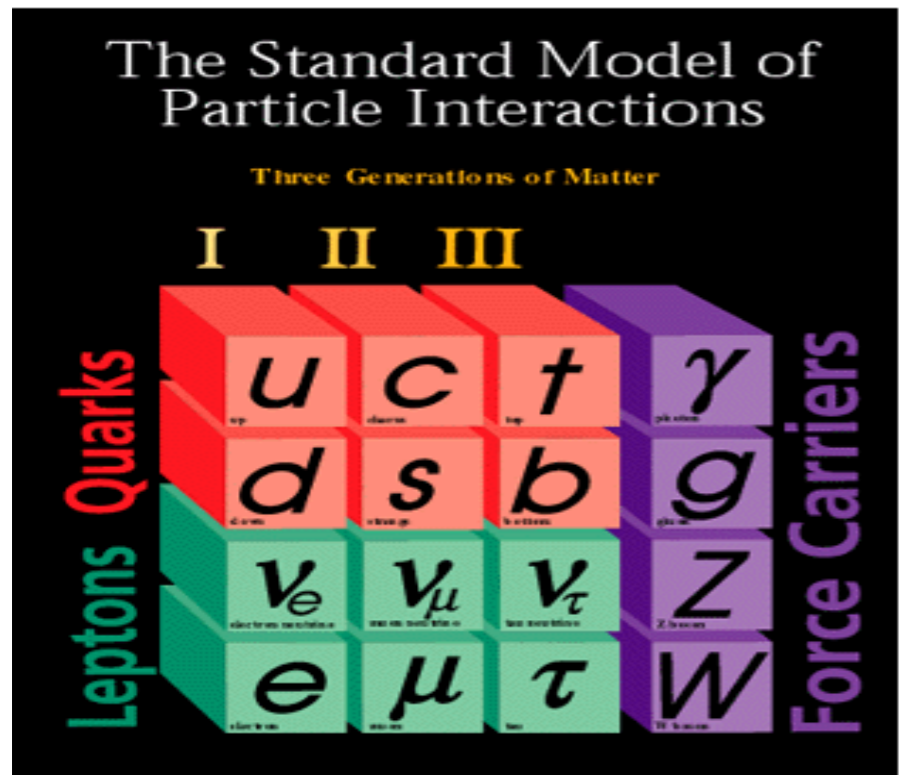


Forza forte (o di colore)

↕

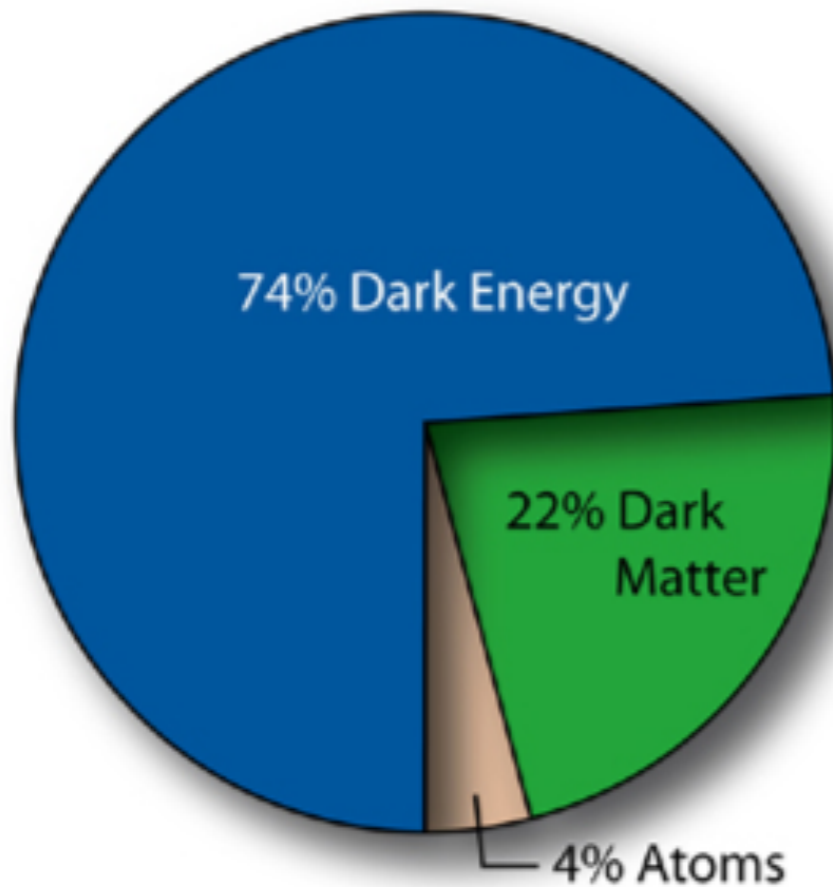
Mediatore	gravitone (G)	W⁻ W⁺ Z⁰	Fotone (γ)	Gluone (g)
Particelle coinvolte	tutte	Leptoni e quarks	Particelle cariche	Quark e gluoni

Problemi col modello standard...



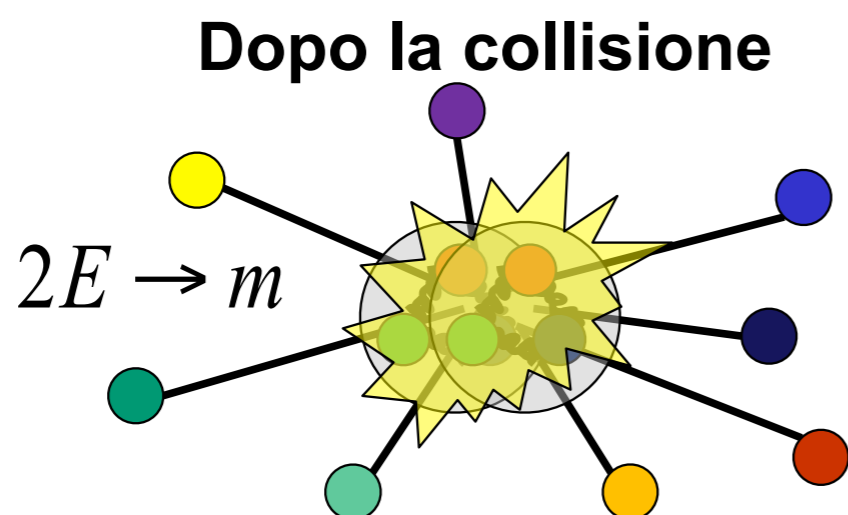
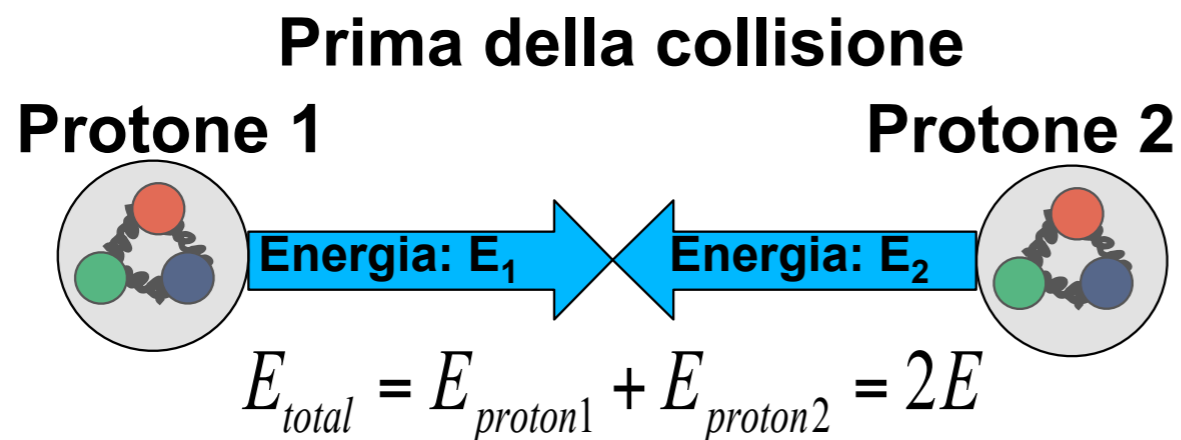
✗ Descrive con successo le nostre osservazioni

✗ Ma deve necessariamente essere esteso!



- Per spiegare l'eccesso di materia sull'antimateria
- Per spiegare da cosa sia fatta l'energia del nostro universo:
 - ✓ la materia nota ne rappresenta solo il 4%
 - ✓ cos'è il restante **96%**?
- Per fornire un meccanismo che genera l'inflazione cosmica

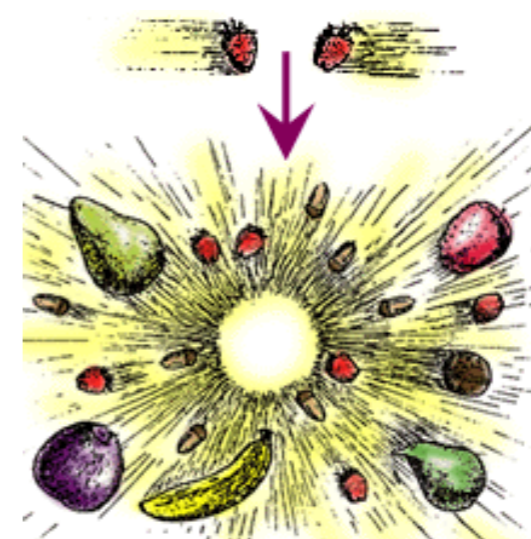
Produrre nuove particelle con gli acceleratori



...con l'energia disponibile vengono create nuove particelle (note o sconosciute)

Dalla famosa relazione di Einstein

$$E = mc^2$$



... maggiore e' l'energia, maggiore la probabilita' di produrre nuove particelle "pesanti"

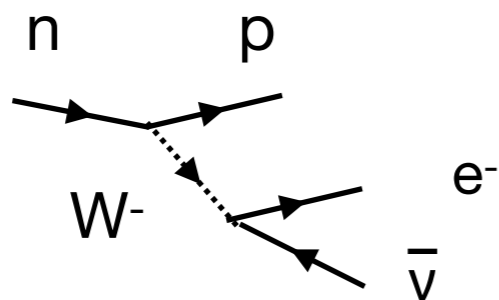
Decadimenti delle particelle

★ ad eccezione dei neutrini, elettroni e positroni, protoni e anti-protoni, tutte le particelle elementari decadono;

★ decadimento del neutrone:

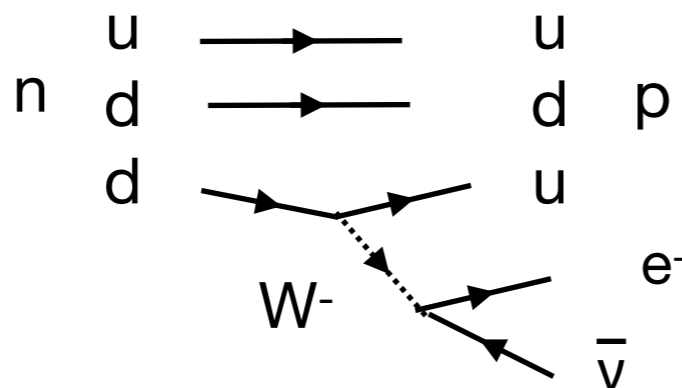
$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$ decadimento beta, responsabile della radioattività ambientale, tempo di decadimento medio 15 min

★ il decadimento del neutrone è mediato da un bosone W



il bosone W si accoppia sia ai quarks che ai leptoni, pertanto può decadere in coppie quark - anti-quark o leptone - anti-leptone

★ in termini di quarks



$W^{-(+)} \rightarrow$	Br
$e^{-(+)}\nu^{(-)}$	11%
$\mu^{-(+)}\nu^{(-)}$	11%
$\tau^{-(+)}\nu^{(-)}$	11%
$q\bar{q}$	67%

Il bosone di Higgs

- ★ in una teoria senza bosone di Higgs alcuni processi non sono calcolabili: ad esempio $W^+W^- \rightarrow W^+W^-$ (si ottengono probabilità di interazione infinite) ;
- ★ altri processi possono essere calcolati, ma non con precisione arbitrariamente elevata. Effettuando calcoli più accurati, di nuovo compaiono degli infiniti che ne impediscono il calcolo.

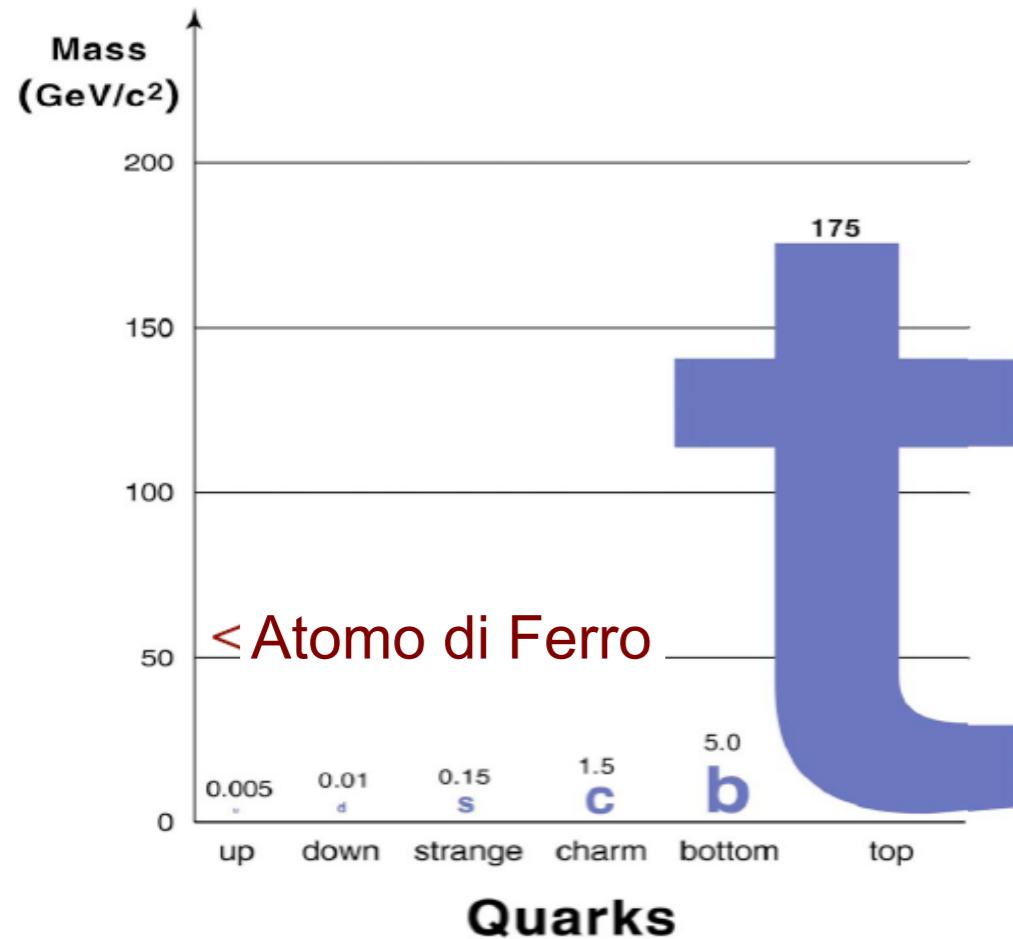
- ★ se le masse delle particelle sono tutte messe a zero, i problemi non compaiono: la teoria si dice rinormalizzabile;

- ★ nel 1964 e negli anni successivi, Francois Englert, Peter Higgs e Robert Brout (e Gerard 't Hooft) mostrarono che con l'introduzione di una nuova particella, il bosone di Higgs, è possibile risolvere questo tipo di problemi

- ★ il bosone di Higgs deve interagire di più con le particelle più pesanti

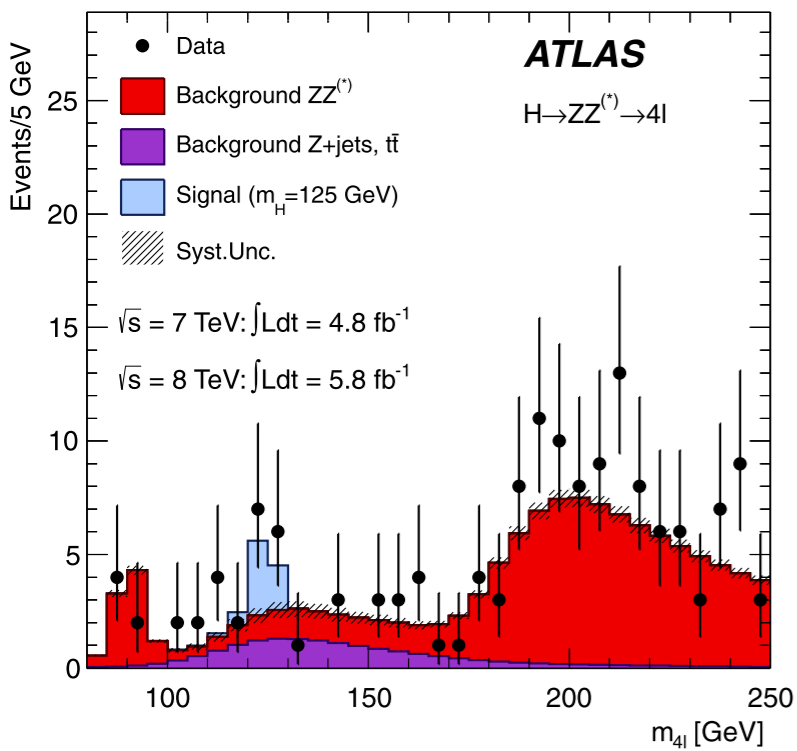


L'interazione del bosone di Higgs

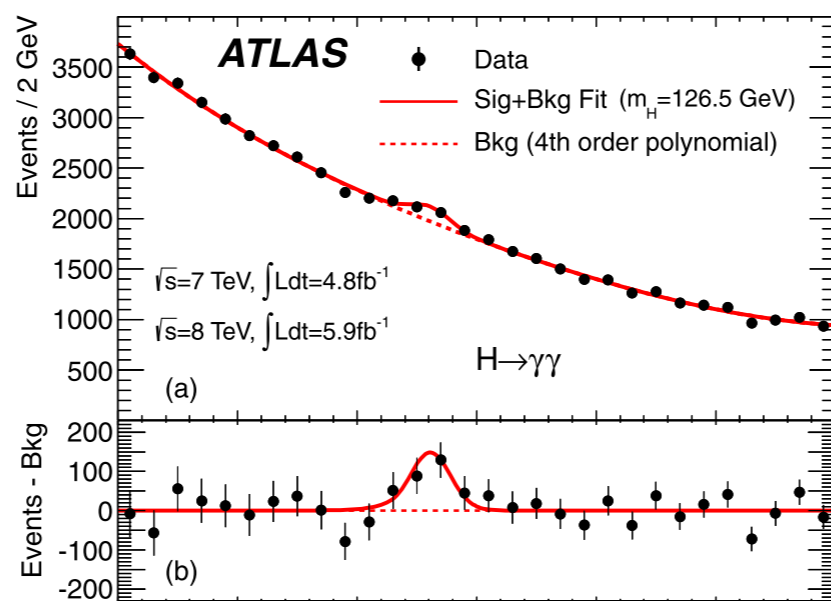


Il campo di Higgs permea lo spazio vuoto, le particelle che si propagano interagiscono continuamente con il campo di Higgs e questa interazione gli fornisce massa

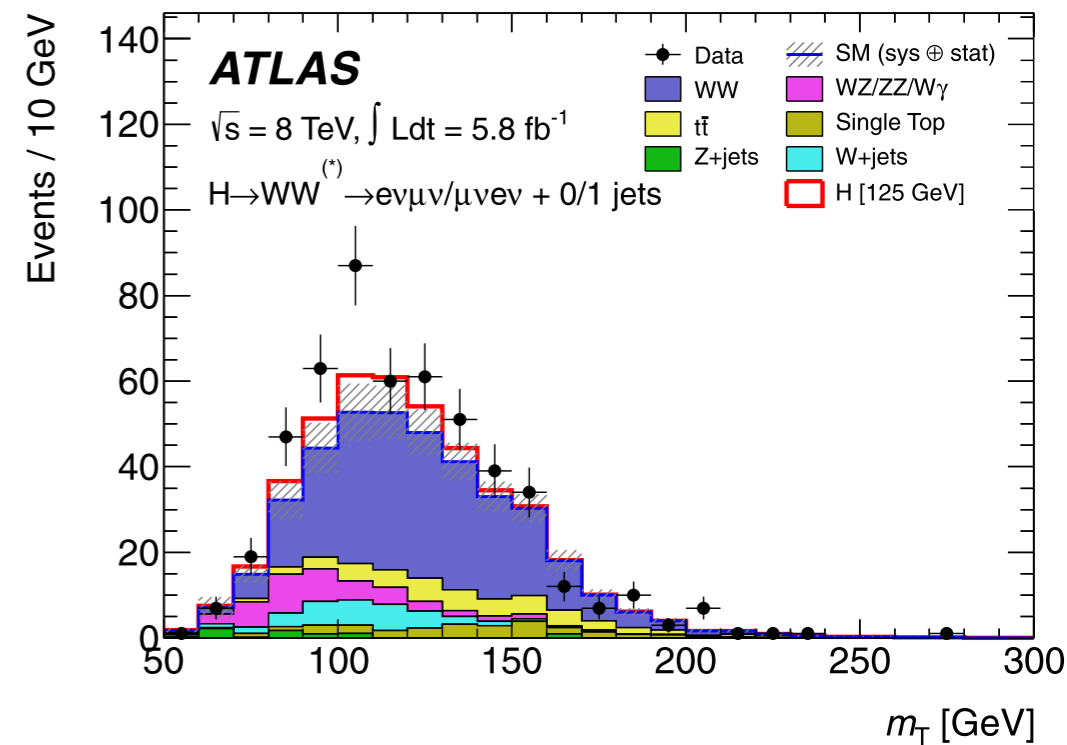
Osservazione del bosone di Higgs



★ $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



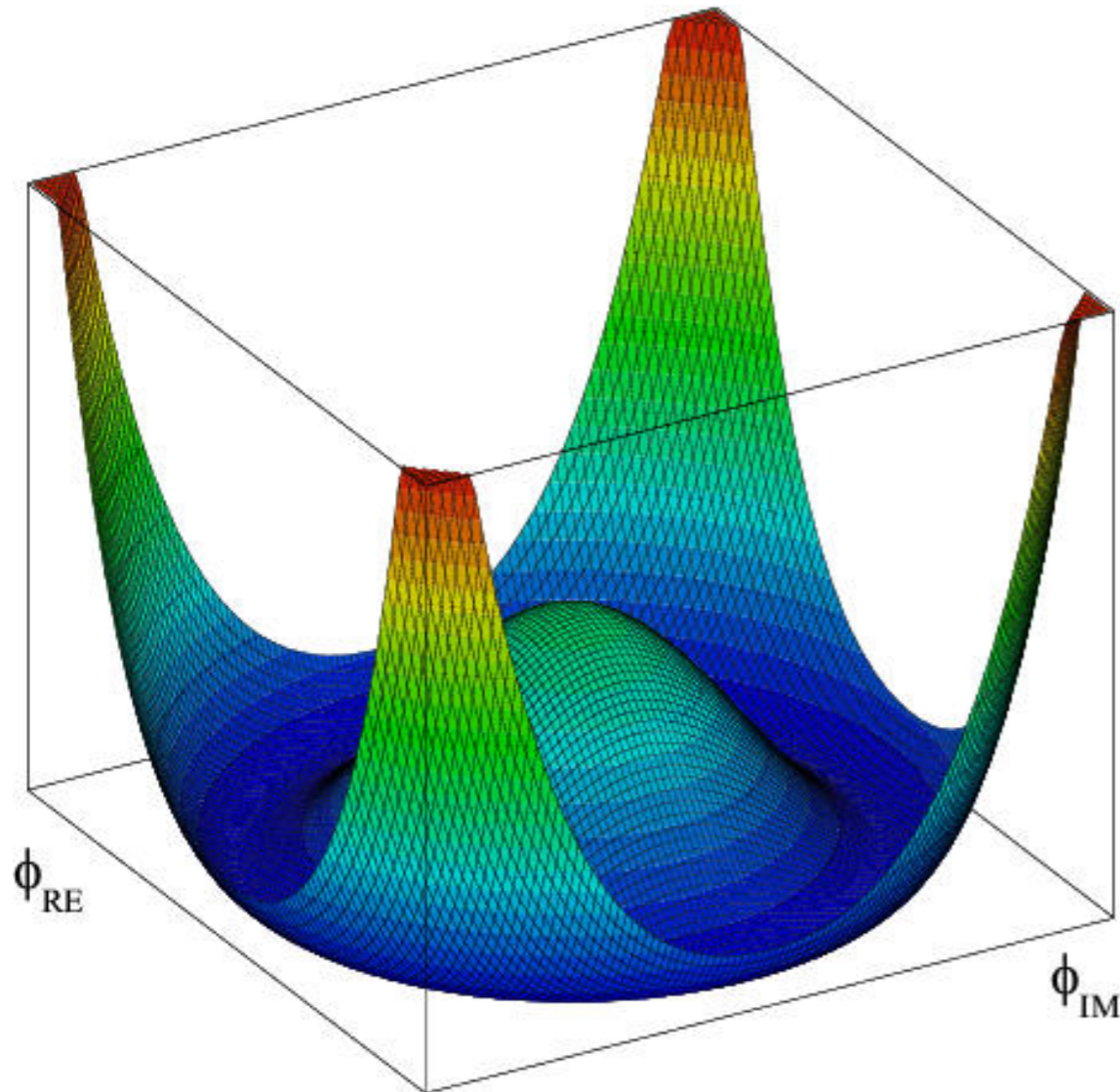
★ $H \rightarrow \gamma\gamma$



★ $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l^+\nu l^-\bar{\nu}$

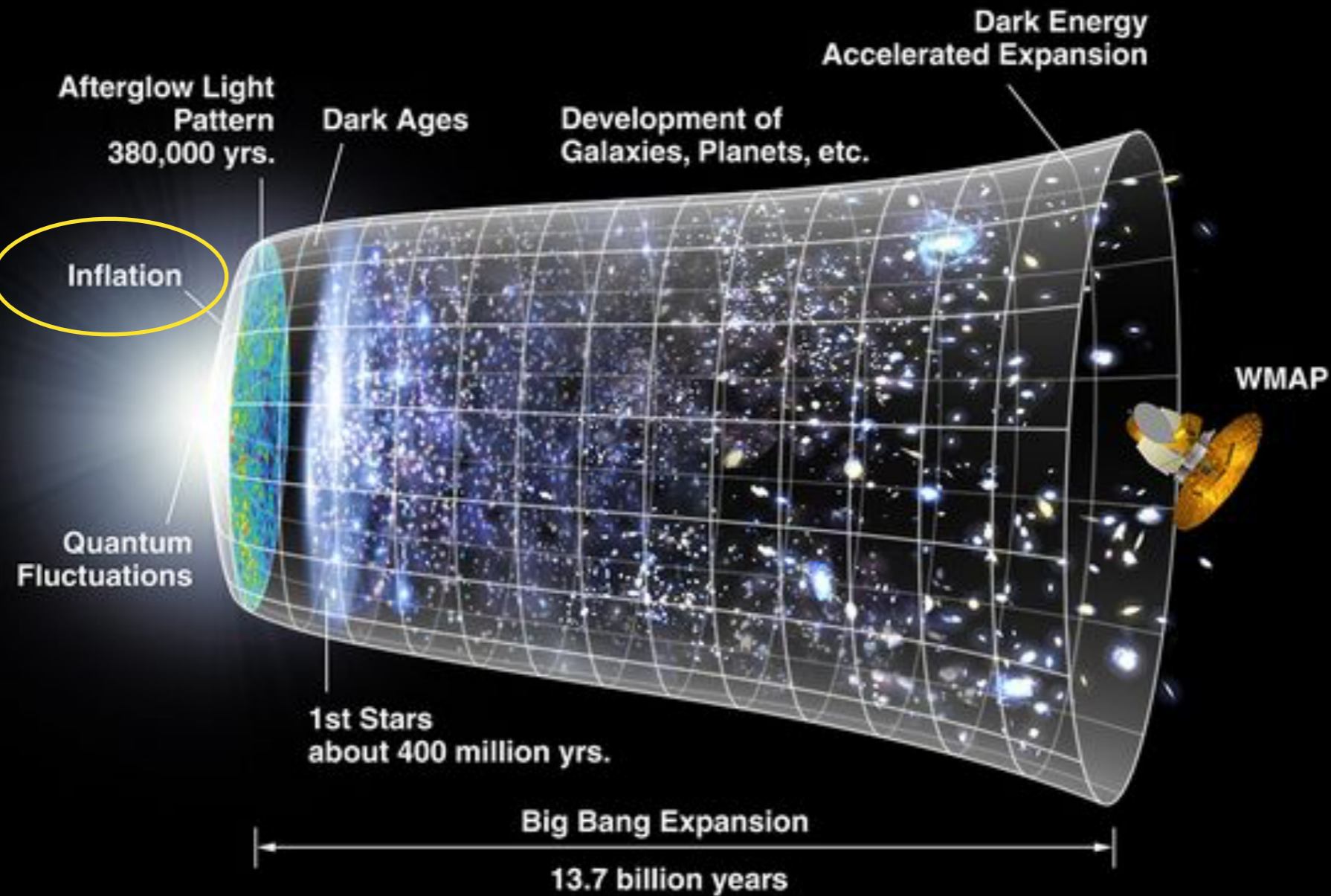


L'energia del bosone di Higgs



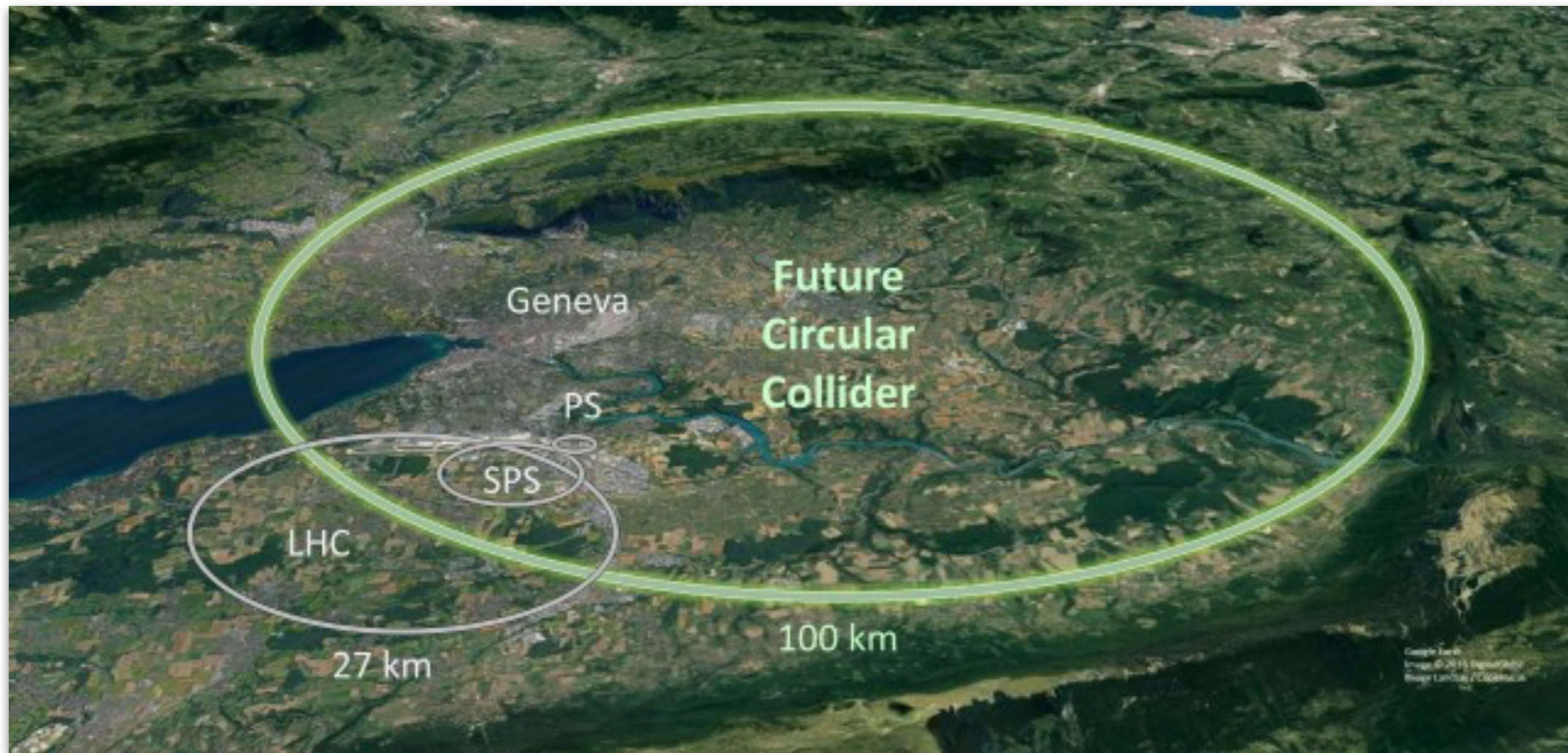
- ★ nel Modello Standard il campo di Higgs è l'unico ad avere un'energia intrinseca associata;
- ★ questa energia potrebbe essere stata rilasciata nei primi istanti di formazione dell'universo, ed essere responsabile della formazione di tutta la materia conosciuta;
- ★ oggi il campo di Higgs si trova al minimo di energia, e il valore residuo di questa energia contribuisce all'accelerazione dell'universo;
- ★ non è ancora chiaro se il bosone di Higgs, e la sua energia, da soli possono spiegare l'espansione dell'universo, ma hanno sicuramente un ruolo fondamentale nel processo
- ★ Studiare il potenziale di Higgs è la nuova frontiera della fisica delle particelle

where the Higgs boson energy plays a role $10^{-36} - 10^{-33}$ s after the Big Bang



NASA/WMAP Science Team

Il Future Circular Collider



Il potenziale di Higgs può essere studiato producendo un gran numero di bosoni di Higgs: $e^+e^- \rightarrow ZH$

oppure producendo un gran numero di coppie di bosoni di Higgs: $pp \rightarrow HH$

**In entrambi i casi serve un nuovo acceleratore, di 100 km di lunghezza,
che è al momento sotto studio sia in Europa che in Cina**