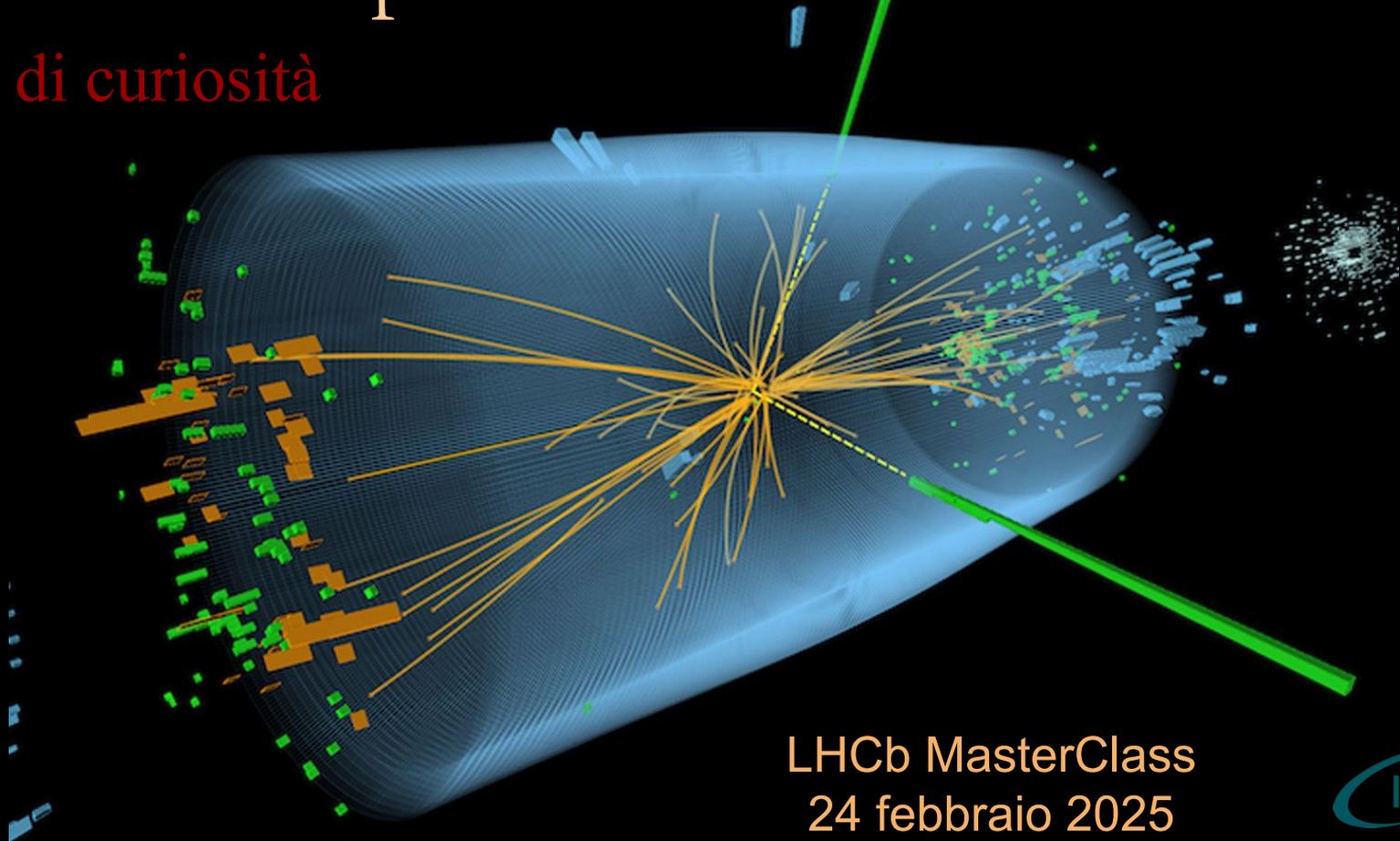


La fisica delle particelle elementari

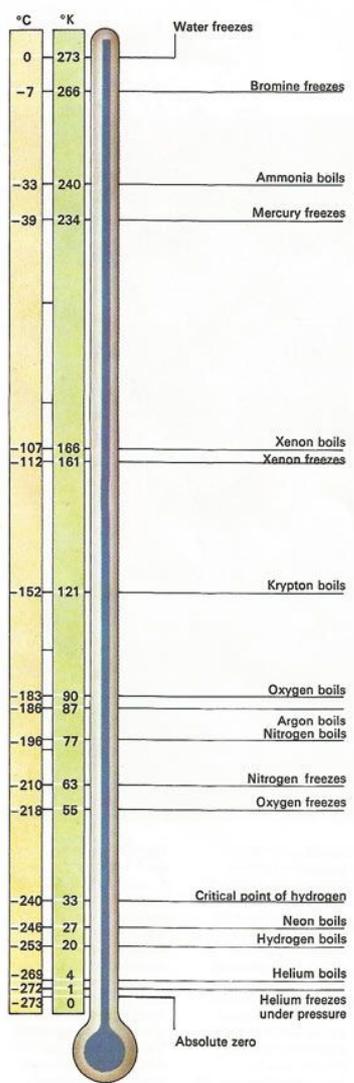
Storie di curiosità



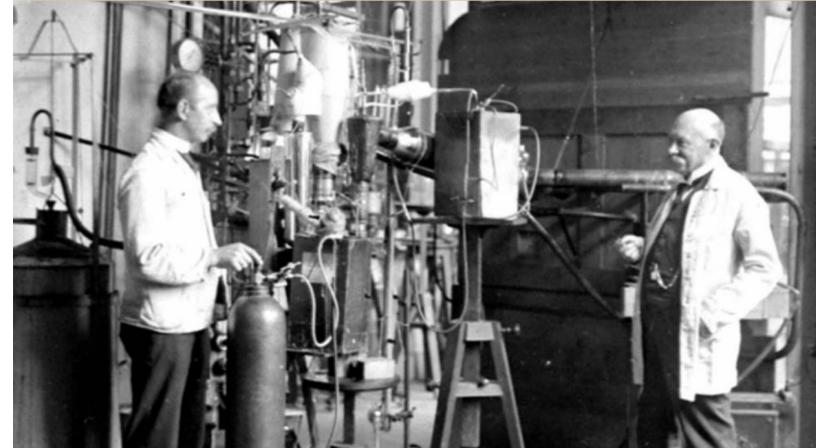
LHCb MasterClass
24 febbraio 2025



Cercando il freddo più freddo



- ❑ Nel **1911** il fisico olandese **Heike Kamerlingh Onnes** riesce per primo a liquefare l'elio, ad una temperatura di -271 C (1,9 gradi dallo **zero assoluto**)
- ❑ Raggiunta questa temperatura, si mise a misurare le proprietà fisiche di vari metalli, in particolare la conducibilità elettrica
- ❑ Ma.. perché lo faceva? Cosa si aspettava di trovare?



Gli atomi

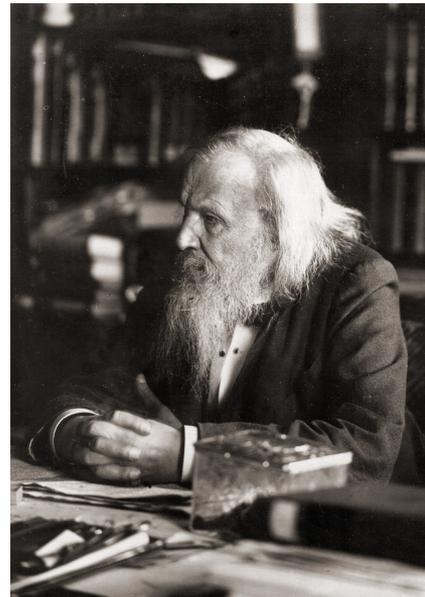
ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

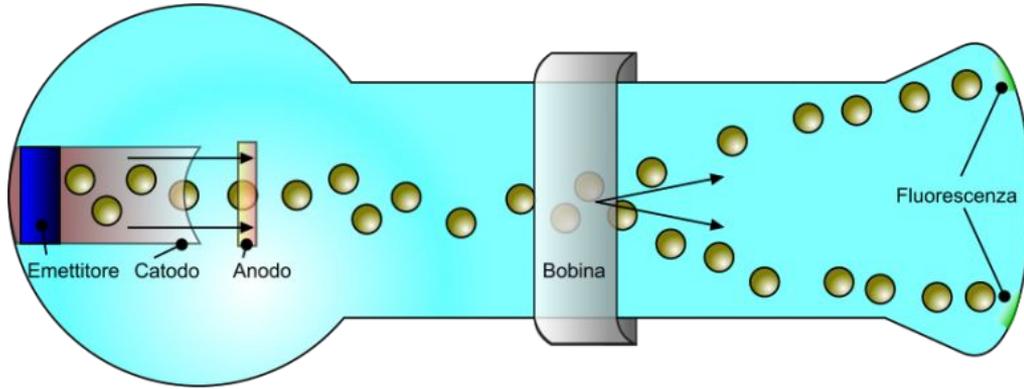
| | | | | | |
|----------|--------------|------------|-------------|-----------|-----------|
| | Ti = 50 | Zr = 90 | ? = 180. | | |
| | V = 51 | Nb = 94 | Ta = 182. | | |
| | Cr = 52 | Mo = 96 | W = 186. | | |
| | Mn = 55 | Rh = 104,4 | Pt = 197,1. | | |
| | Fe = 56 | Rn = 104,4 | Ir = 198. | | |
| | Ni = Co = 59 | Pl = 106,6 | O = 199. | | |
| H = 1 | Cu = 63,4 | Ag = 108 | Hg = 200. | | |
| Be = 9,1 | Mg = 24 | Zn = 65,2 | Cd = 112 | | |
| B = 11 | Al = 27,1 | ? = 68 | Ur = 116 | Lu = 197? | |
| C = 12 | Si = 28 | ? = 70 | Sn = 118 | | |
| N = 14 | P = 31 | As = 75 | Sb = 122 | Bi = 210? | |
| O = 16 | S = 32 | Se = 79,4 | Te = 128? | | |
| F = 19 | Cl = 35,5 | Br = 80 | I = 127 | | |
| Li = 7 | Na = 23 | K = 39 | Rb = 85,4 | Cs = 133 | Tl = 204. |
| | | Ca = 40 | Sr = 87,6 | Ba = 137 | Pb = 207. |
| | | ? = 45 | Ce = 92 | | |
| | | ?Er = 56 | La = 94 | | |
| | | ?Yt = 60 | Di = 95 | | |
| | | ?In = 75,6 | Th = 118? | | |

Д. Менделѣевъ

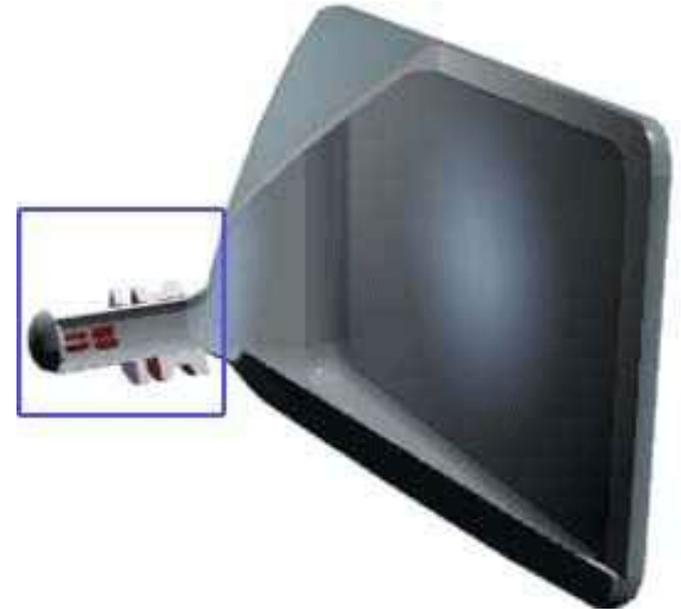
- All'epoca non era possibile prevedere il comportamento della materia a quelle temperature, perché non si sapeva quasi nulla dei suoi costituenti fondamentali
- Sin dall'antichità (Democrito) era nota l'idea di **atomo**, confermata dalla chimica nel XIX secolo: nel **1869** il chimico russo **Dmitrij Ivanovič Mendeleev** pubblica la celebre tavola periodica degli elementi
- Una forte indicazione che tutti gli elementi sono fatti degli stessi "mattoni" elementari



La prima particella elementare: l'elettrone

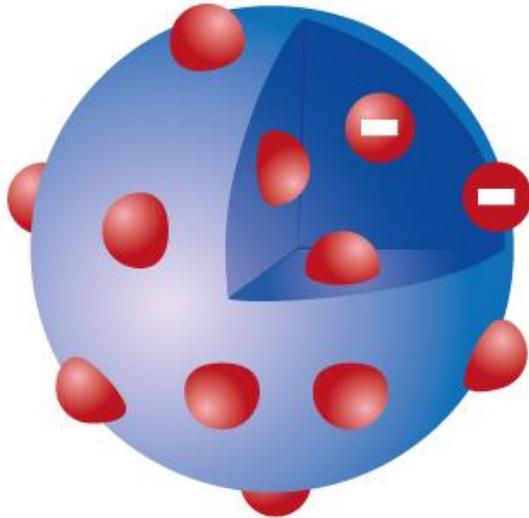


- Gli studi sui “raggi catodici” di fine ottocento mostrano che questi raggi sono costituiti da particelle di carica negativa estratti dalla materia. Nel **1911** si misura la carica elementare dell'elettrone (esperimento di **Millikan**) e la sua massa



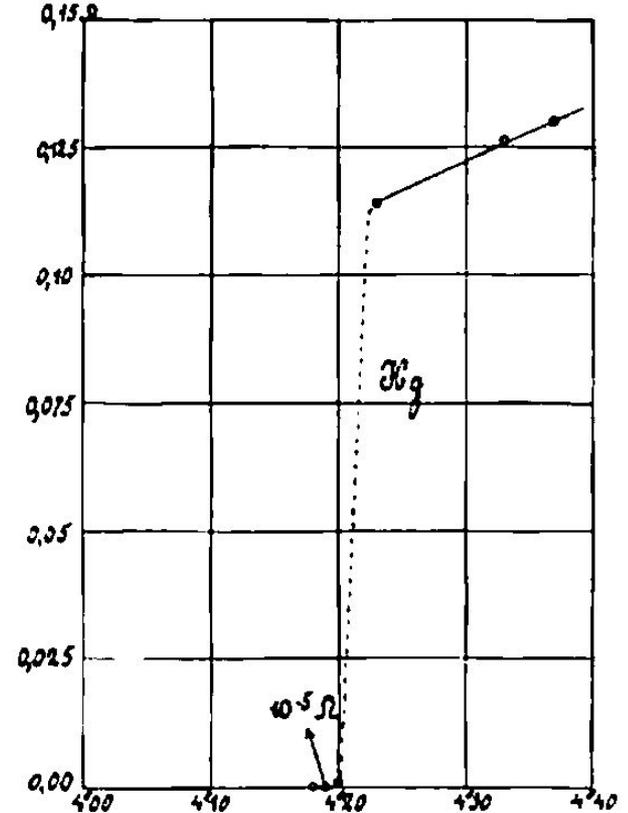
Un primo modello di atomo

- ❑ All'epoca non si conosceva una particella elementare di carica positiva e non era chiaro come gli elettroni potessero essere contenuti negli atomi
- ❑ Modello atomico di Thomson, detto anche “plum pudding” (1896): gli elettroni sono immersi in una “pasta” di carica positiva

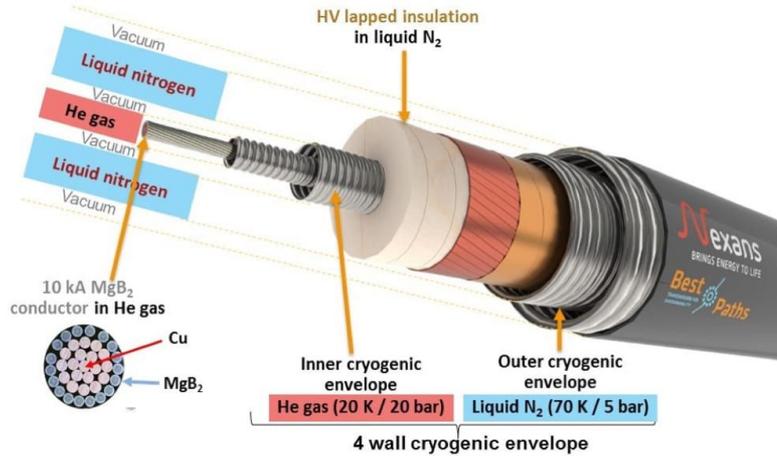


Cosa trovò Kamerlingh Onnes?

- ❑ Sorpresa: a temperature vicine alla 0 assoluto i metalli diventano **superconduttori**
- ❑ le correnti elettriche si mantengono senza bisogno di generatore (non c'è nessuna resistenza che trasforma in calore l'energia elettrica)
- ❑ servirono 40 anni di sviluppo della fisica fondamentale per trovare una spiegazione del fenomeno...

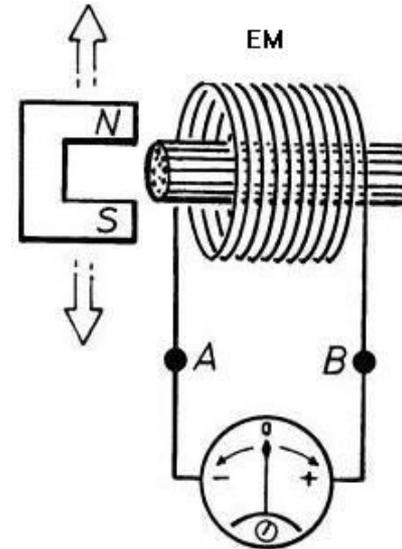


Applicazioni della superconduttività



- ❑ **Elettrodotti superconduttivi?**
Non ancora in pratica... ma ci si sta provando...

- ❑ **Magneti superconduttori**
permettono di raggiungere campi magnetici di intensità record, con ridotto consumo di energia elettrica
- ❑ e molto altro... (computer quantistici..)



Risonanza Magnetica Nucleare

Magnete
superconduttore



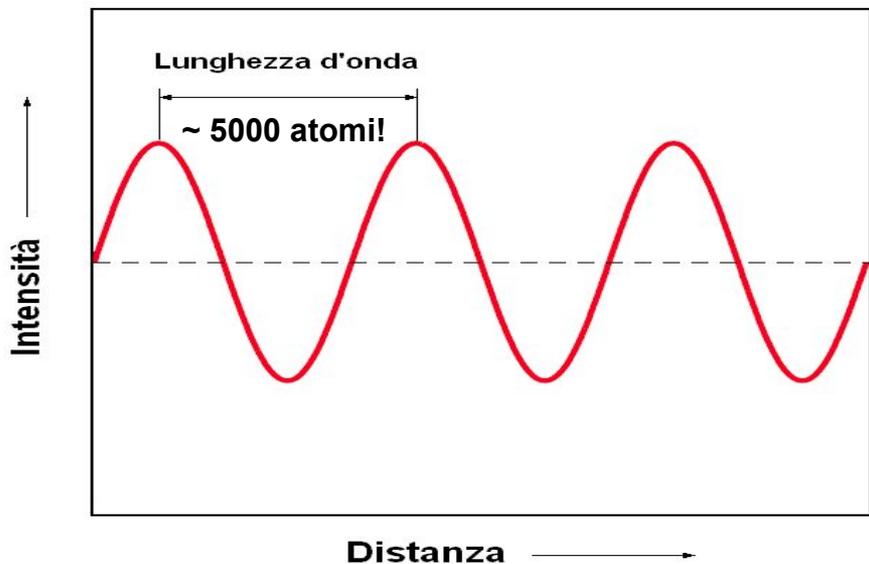
“Osservare” l’infinitamente piccolo

- ❑ Come esplorare le distanze atomiche e sub-atomiche? Possiamo usare un microscopio?



- ❑ Serve una sonda più “piccola” degli oggetti che vogliamo osservare
- ❑ Con un microscopio ottico possiamo ingrandire le immagini e osservare dettagli fino a frazioni di micron (milionesimi di metro)
- ❑ Il limite fisico è la dimensione della “sonda”, ovvero della luce

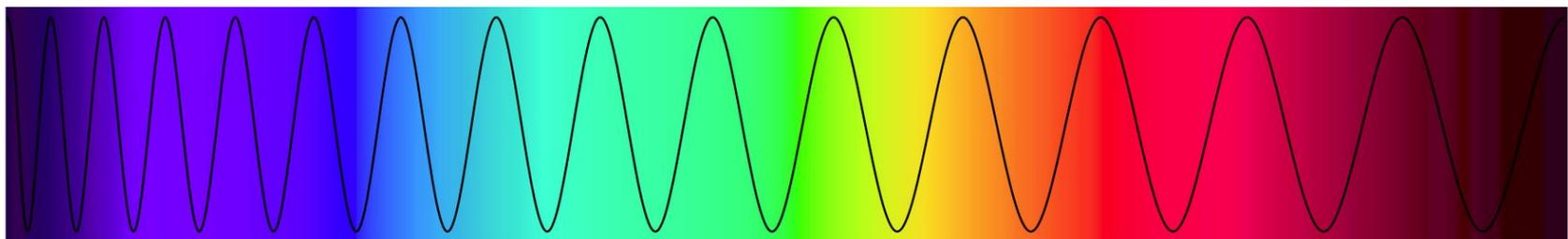
Quanto è “grande” la luce?



- ❑ la luce è composta di onde con lunghezza d'onda fra 400 e 700 nm

**1 nm (nanometro) = 10^{-9} m = 1 miliardesimo di metro
= 10 volte la dimensione dell'atomo**

il limite alla risoluzione di un microscopio ottico è $\lambda/(2 NA)$
dove NA è l'apertura numerica (tipicamente >1)



400nm

700nm

Onde e quanti

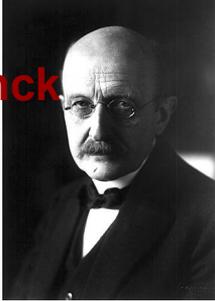
velocità della luce

lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{c h}{E}$$

costante di Planck (1900)

Energia del quanto



- ❑ la luce è fatta di **quanti** : i **fotoni**
- ❑ anche la posizione di particelle di materia, come gli elettroni, è descritta da onde, con una relazione analoga (dualità onda-particella)



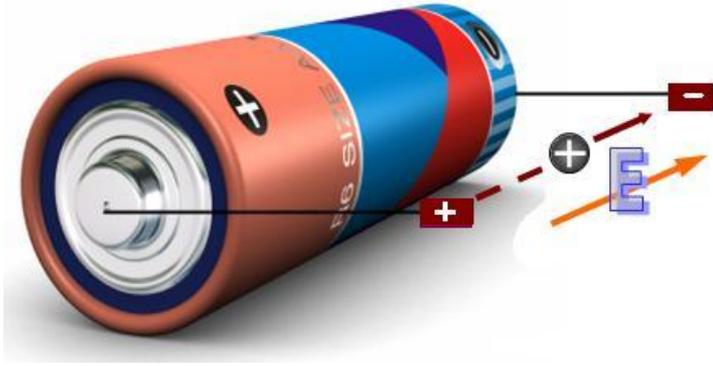
lunghezza d'onda di De Broglie (1924)

$$\lambda = h / p$$

dove p è l'impulso della particella

- ❑ **per diminuire la dimensione della “sonda”, dobbiamo aumentare l'energia!**

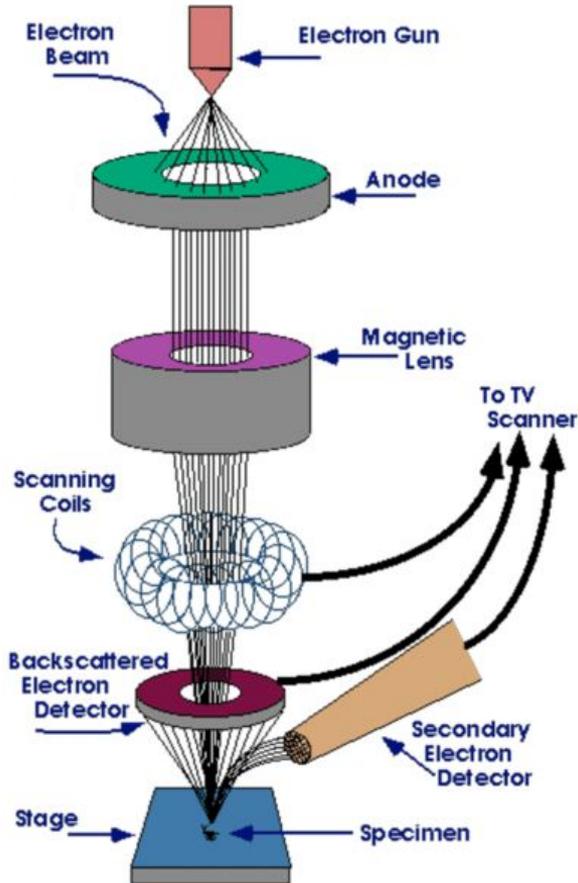
Unità di energia: l'electron-Volt



- un elettrone accelerato da 1 Volt acquista un'energia di 1 eV (electron-Volt)
- Usando la formula di Planck, possiamo convertire le lunghezze in energia

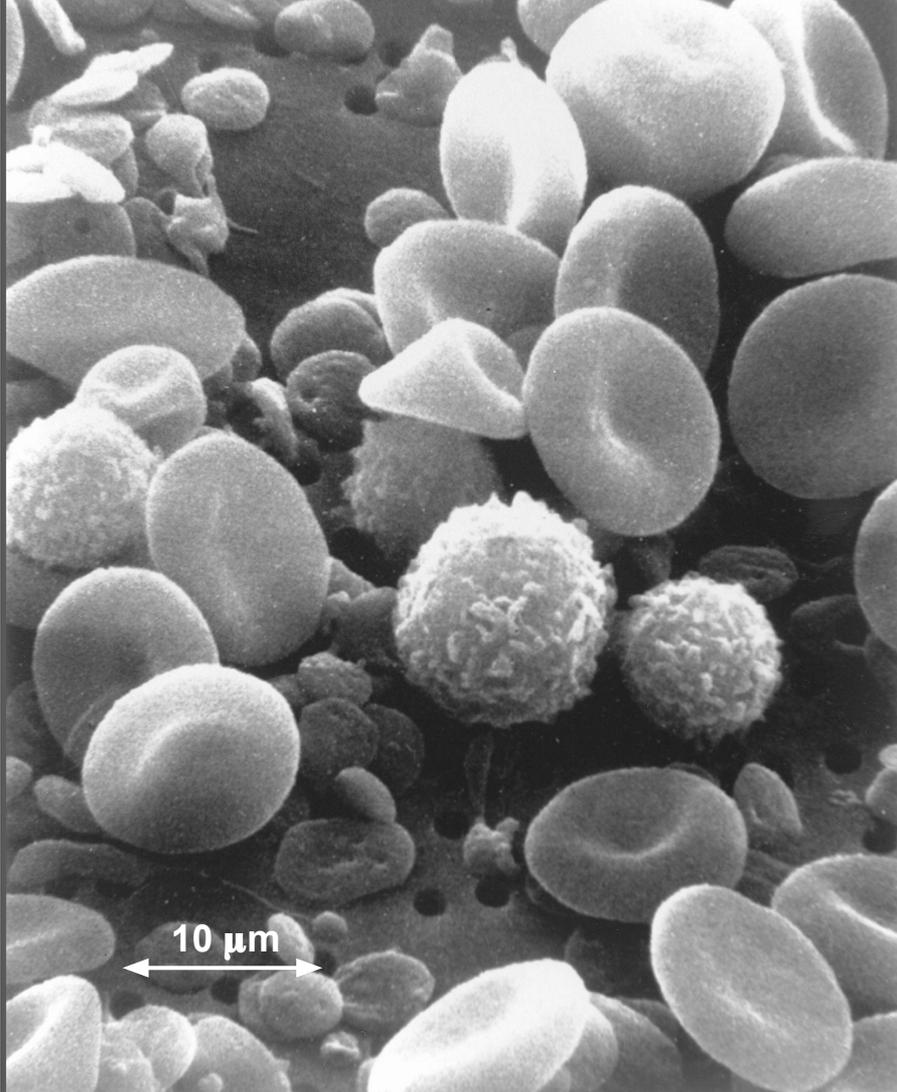
| | Lunghezza | Energia |
|---------------|-----------|-----------|
| Luce visibile | 500 nm | 2,5 eV |
| Atomo | 0,1 nm | 12 400 eV |

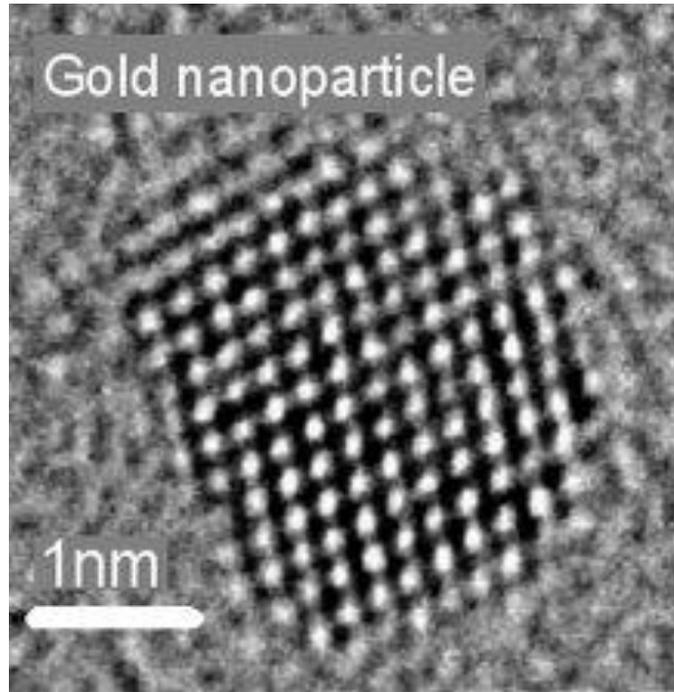
Il microscopio elettronico



- Utilizza elettroni come sonda, accelerati fino a 10 000 eV... le dimensioni dell'atomo!





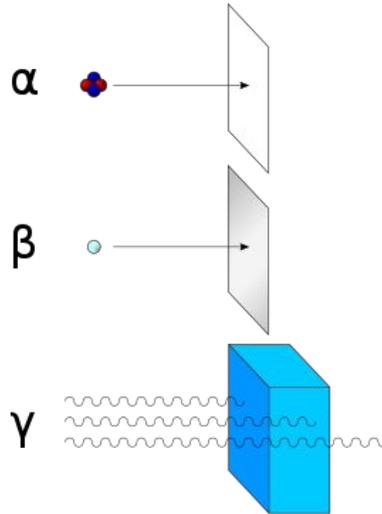


Ma come possiamo esplorare la struttura interna dell'atomo?
Serve una sonda con energia di milioni di eV !

Un acceleratore naturale: la radioattività



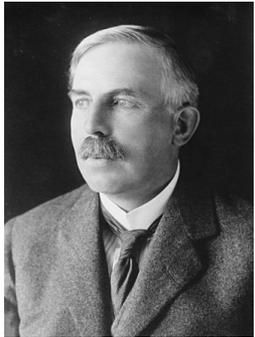
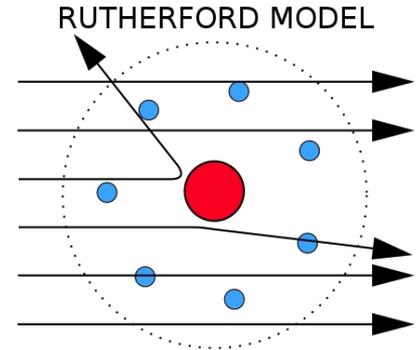
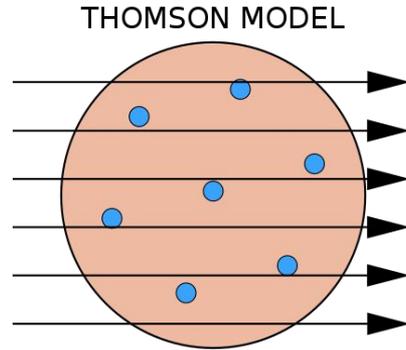
- Nel **1896** la fisica polacco-francese **Marie Skłodowska-Curie** scopre con Becquerel le radiazioni emesse da alcune sostanze e conia il termine **radioattività**



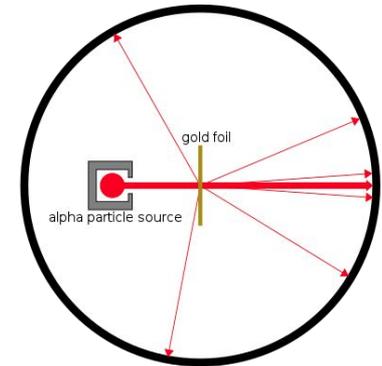
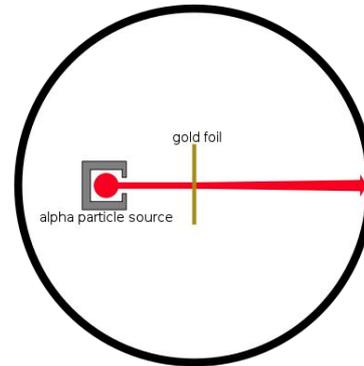
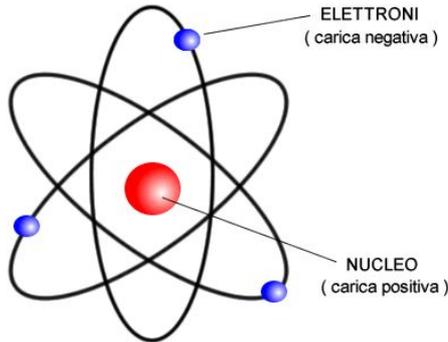
α e β sono particelle cariche con energia fino a **qualche MeV** (milioni di eV)

L'interno dell'atomo

- Gli esperimenti condotti con particelle alfa dimostrano che la carica positiva e la massa degli atomi è concentrata in un **nucleo** di dimensioni molto più piccole



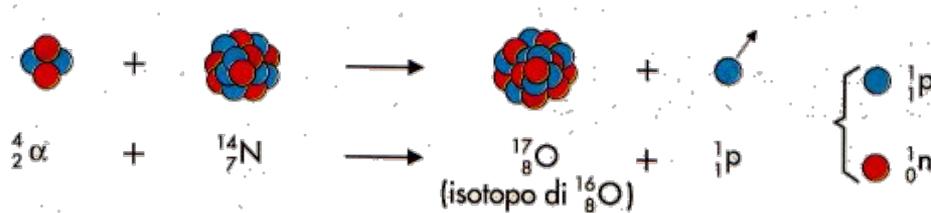
- Modello atomico di **Rutherford (1913)**



observed result

I costituenti del nucleo

- ❑ Negli anni successivi, esperimenti simili consentono di individuare i due costituenti fondamentali di tutti i nuclei atomici:
 - i **protoni (1919)** con carica elettrica positiva (uguale, segno a parte, a quella dell'elettrone)
 - i **neutroni (1932)** privi di carica elettrica
- ❑ Con la scoperta del nucleo e dei suoi costituenti inizia l'era della fisica nucleare: si osservano interazioni in cui i nuclei si trasformano, avverando il sogno degli alchimisti



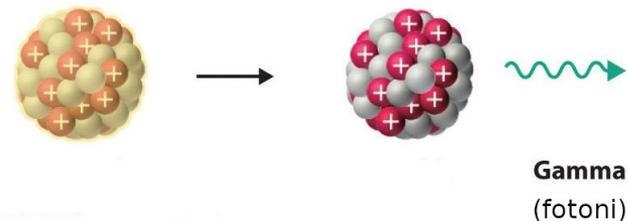
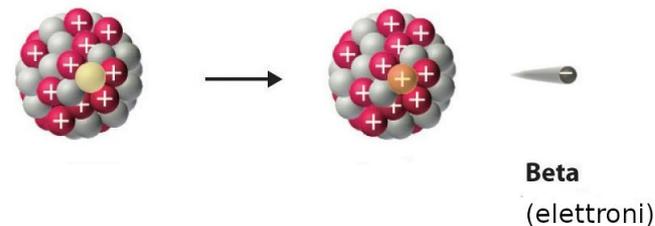
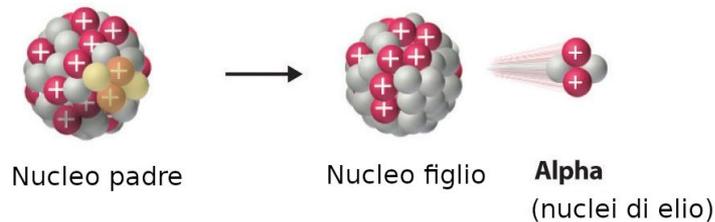
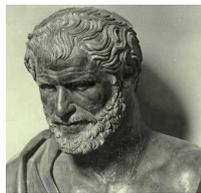
I decadimenti radioattivi

□ Si capisce che anche la radioattività è dovuta a trasformazioni spontanee dei nuclei atomici

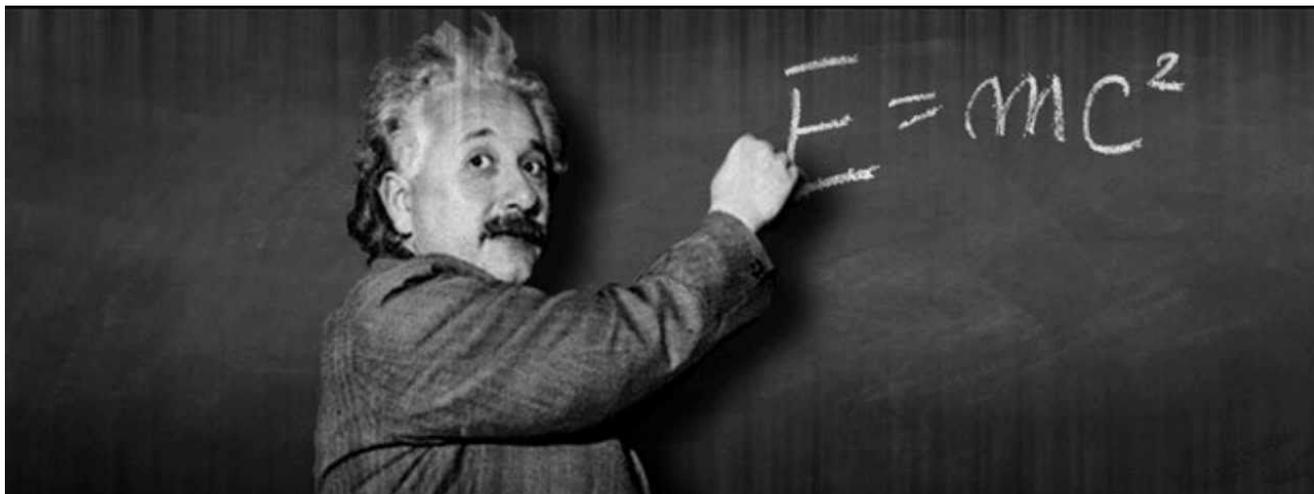
□ Ma da dove arriva l'energia delle particelle radioattive, se il nucleo di partenza è fermo?

“Nulla è creato dal nulla
né si distrugge nel nulla”

Democrito



Tutto si trasforma!



- ❑ La massa è una forma di energia
- ❑ Nei decadimenti radioattivi, parte della massa del nucleo iniziale si trasforma in energia cinetica delle particelle prodotte!
- ❑ Anche le masse possono essere misurate in unità di energia:

$$\text{Massa(elettrone)} \times c^2 = 0,5 \text{ milioni di eV}$$

$$\text{Massa(protone)} \times c^2 = 938 \text{ milioni di eV}$$

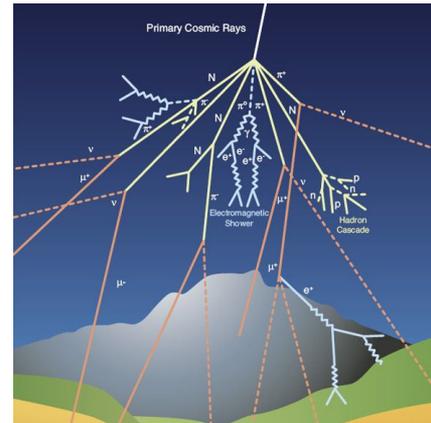
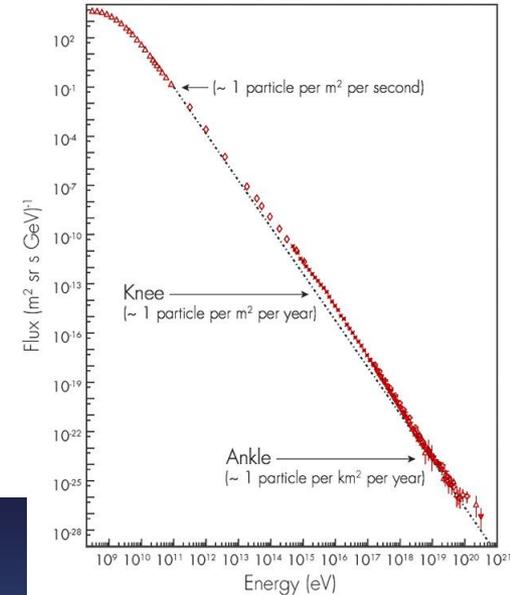
Acceleratori cosmici



- Nel **1913**, grazie a esperimenti su palloni aerostatici, si scopre che particelle ionizzanti di alta energia arrivano sulla terra dallo spazio: i **raggi cosmici**

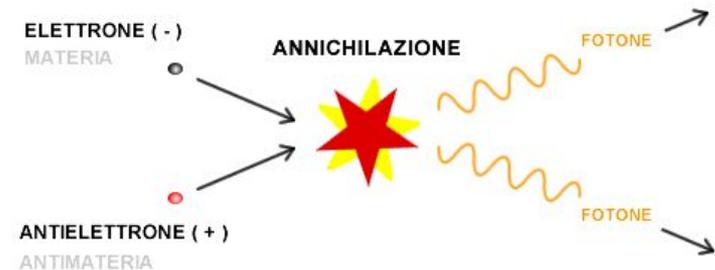
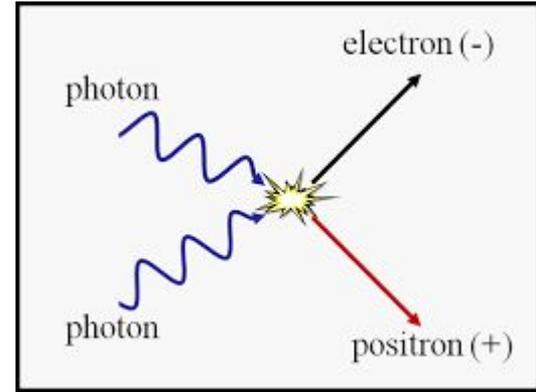
- sono composti in gran parte da nuclei atomici accelerati nel cosmo, con uno spettro di energia molto esteso. Interagendo con l'atmosfera, producono sciame di particelle subatomiche

FLUXES OF COSMIC RAYS

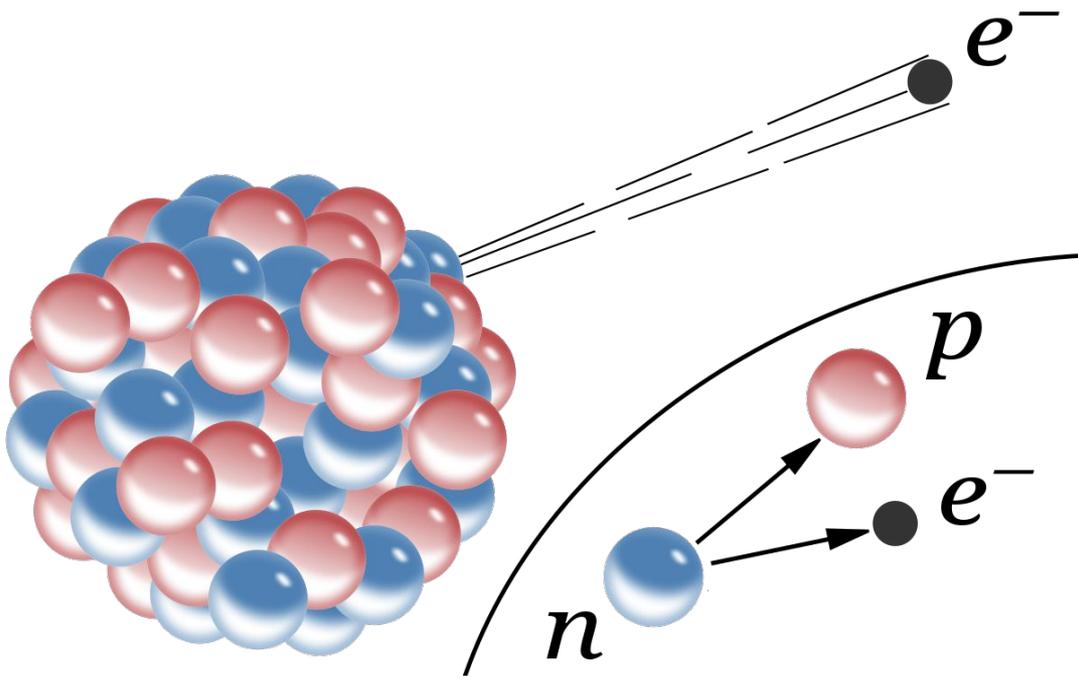


L'antimateria

- ❑ Viceversa, si può **creare la massa** da pura energia cinetica
- ❑ poiché anche la carica elettrica e le altre proprietà delle particelle non possono nascere dal nulla, ogni particella è creata in coppia con la sua **antiparticella**
- ❑ L'esistenza dell'**antimateria** fu predetta da Paul Dirac nel **1928** e confermata quattro anni dopo con la scoperta dell'antielettrone, il **positrone**, grazie ai raggi cosmici
- ❑ Quando positrone ed elettrone si incontrano, si ha l'annichilazione della loro massa

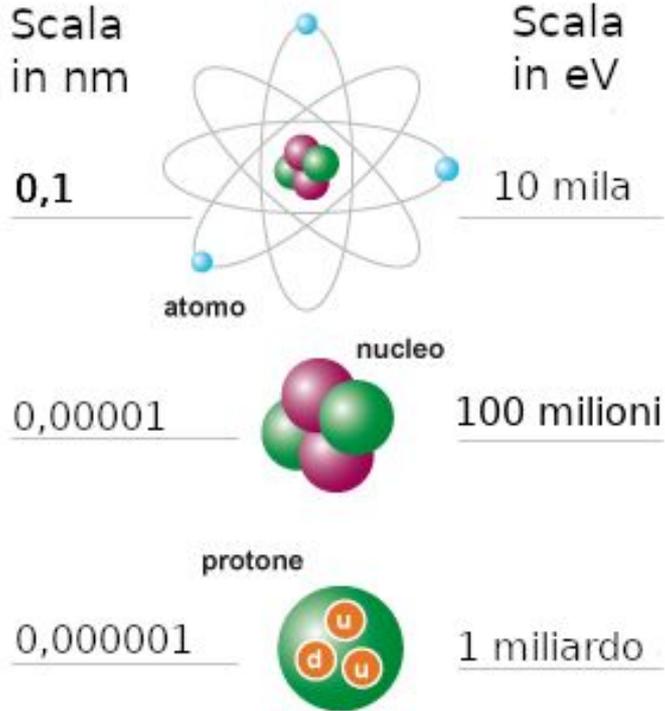


Il neutrino

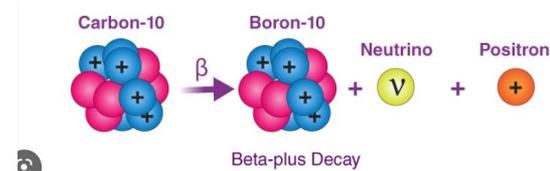
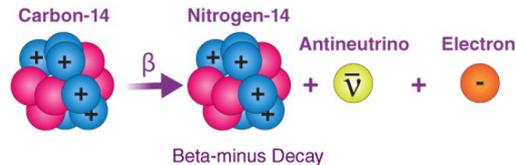


- ❑ Nel decadimento beta un neutrone del nucleo si trasforma in protone, emettendo un elettrone
- ❑ Ma l'energia finale osservata è più bassa di quella iniziale
- ❑ Nel **1930** Wolfgang Pauli ipotizza che venga emessa una particella "invisibile" di carica neutra, il **neutrino**
- ❑ La sua esistenza sarà confermata sperimentalmente solo nel **1956**

Particelle e interazioni



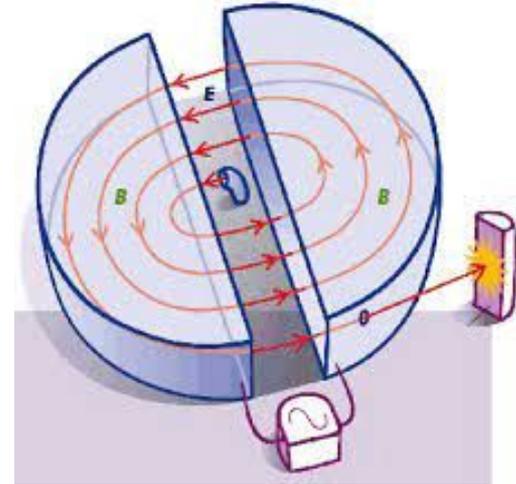
- Tutti gli atomi sono costituiti dalle stesse tre particelle elementari:
 - protoni e neutroni, confinati nei nuclei atomici dalle **forze nucleari forti** (molto più intense delle forze repulsive elettrostatiche fra i protoni)
 - elettroni, che “orbitano” attorno ai nuclei, legati dalla **forza elettromagnetica**
 - le **forze nucleari deboli** che permettono i decadimenti beta



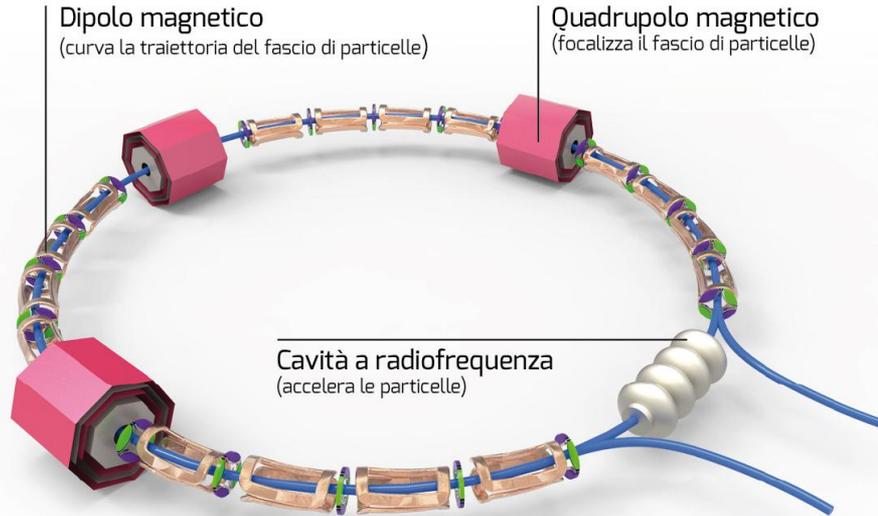
Gli acceleratori artificiali

- Dagli anni 1940 si sviluppa rapidamente l'arte di accelerare le particelle a energie sempre più elevate:
 - per raggiungere dimensioni sempre più piccole
 - per produrre particelle di massa sempre più elevata

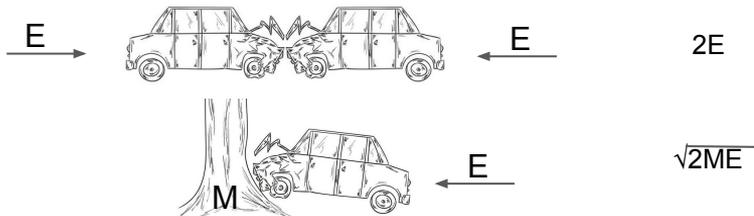
- Nell'**acceleratore circolare** la particella viene fatta ruotare tramite un campo magnetico e fatta passare molte volte nella regione di accelerazione



Collisionatori



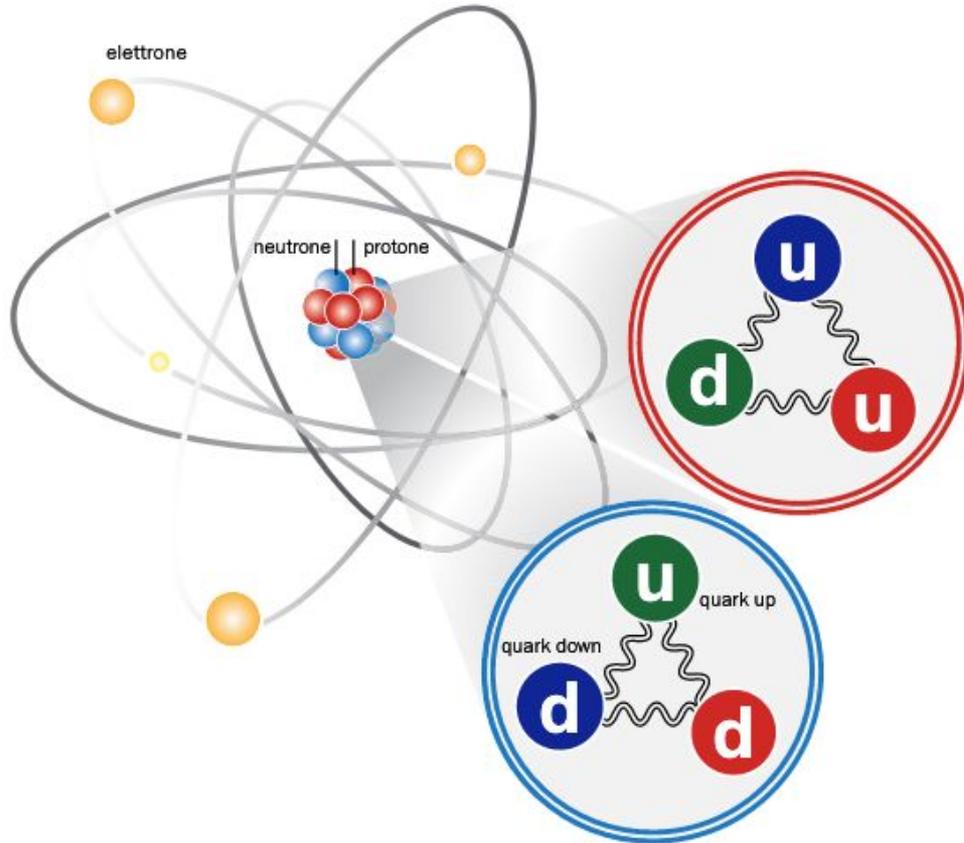
Energia nella collisione



Il primo collisionatore elettrone-positrone (ADA), realizzato a Frascati nel 1961.

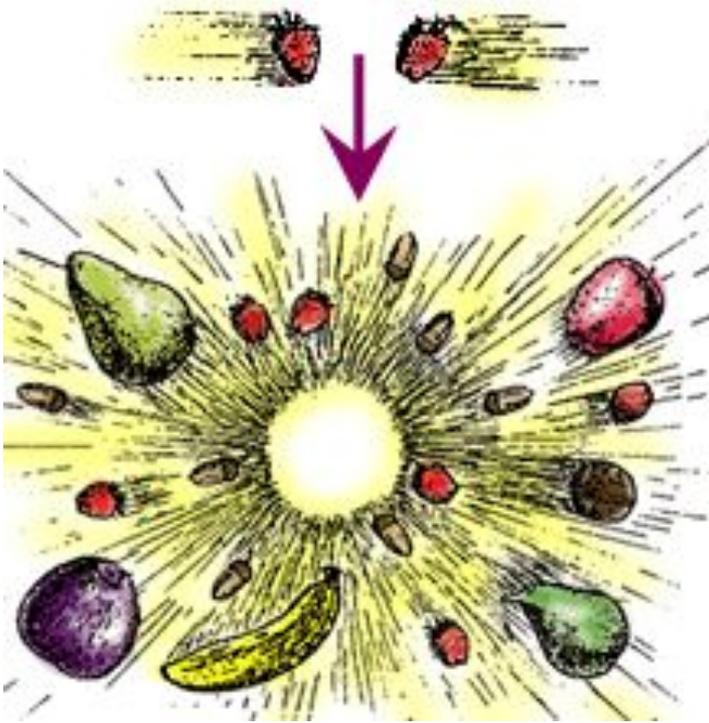
La sua evoluzione, ADONE (1967) accelerava e^- ed e^+ fino a 1,5 GeV

I quarks

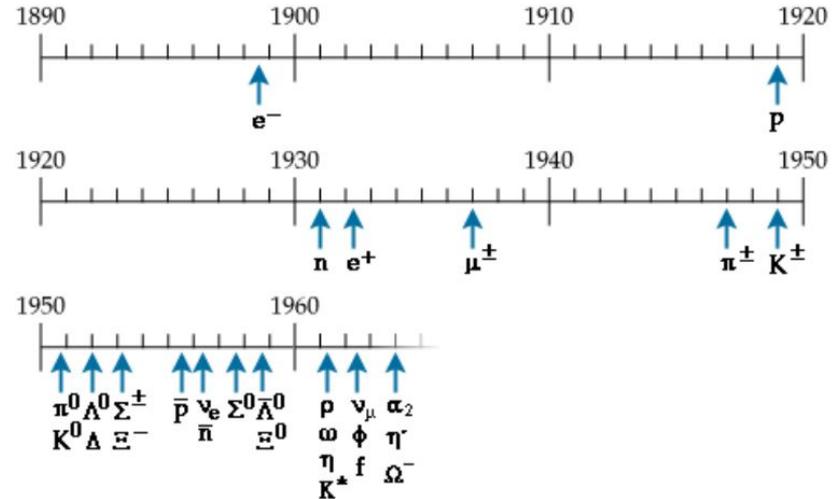


- Grazie agli acceleratori artificiali, negli anni '60 si supera l'energia di **1 GeV (1 miliardo di eV)**, scoprendo che quella è la dimensione del protone!
 - Al suo interno protoni e neutroni contengono particelle più piccole, i **quark**:
 - quark up (u), carica $+\frac{2}{3} e$
 - quark down (d), carica $-\frac{1}{3} e$
- che interagiscono tramite **gluoni**

Lo zoo delle particelle



- ❑ Con le energie disponibili, nelle collisioni si materializzano nuove particelle sconosciute di massa sempre maggiore
- ❑ Negli anni '60 i fisici si ritrovano con centinaia di particelle da capire e classificare



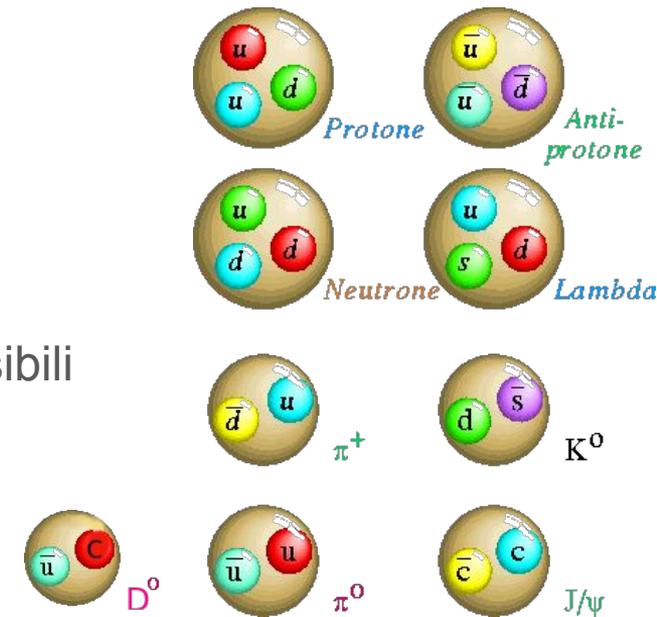
Quarks e “adroni”

- La proliferazione delle particelle si spiega con l'esistenza di 6 tipi di quark: oltre ai quark **u** e **d** si scopre un altro quark “leggero” (massa ~ MeV): il quark “strano” **s** e poi tre quark “pesanti” (massa > GeV): charm (**c**) bottom (**b**) top (**t**)

| | | | |
|----------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
| mass → | ≈2.3 MeV/c ² | ≈1.275 GeV/c ² | ≈173.07 GeV/c ² |
| charge → | 2/3 | 2/3 | 2/3 |
| spin → | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| | u up | c charm | t top |
| | d down | s strange | b bottom |
| | ≈4.8 MeV/c ² | ≈95 MeV/c ² | ≈4.18 GeV/c ² |
| | -1/3 | -1/3 | -1/3 |
| | 1/2 | 1/2 | 1/2 |

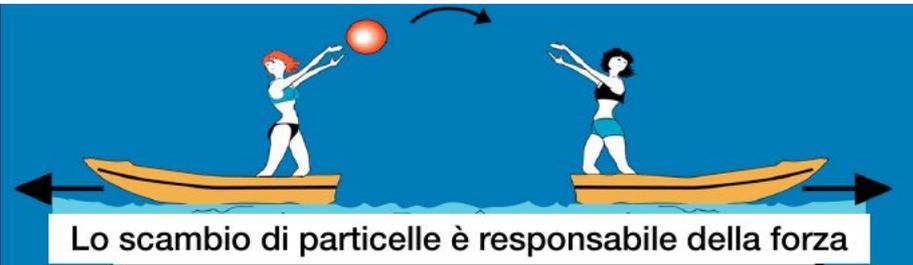
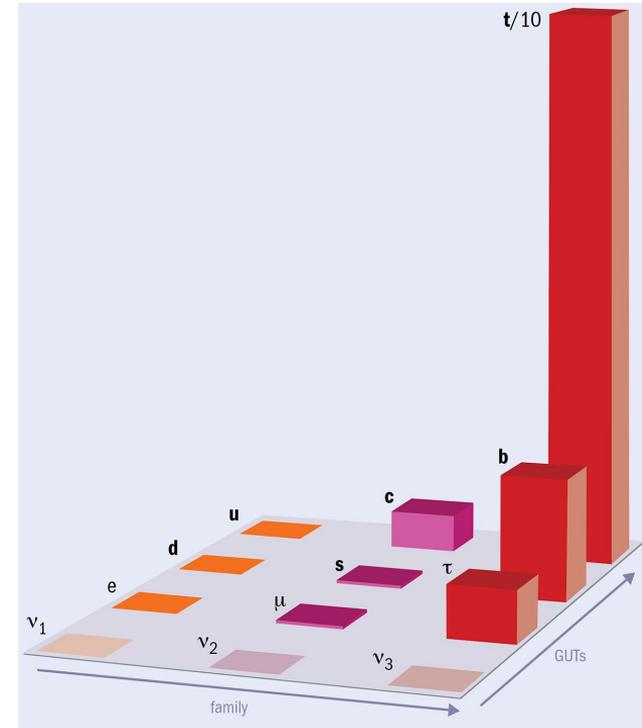
- I quarks non possono esistere isolati, ma si possono combinare in **adroni** tramite tutte le combinazioni possibili del tipo

qqq **barioni**
 qq̄ **mesoni**



Le tre famiglie

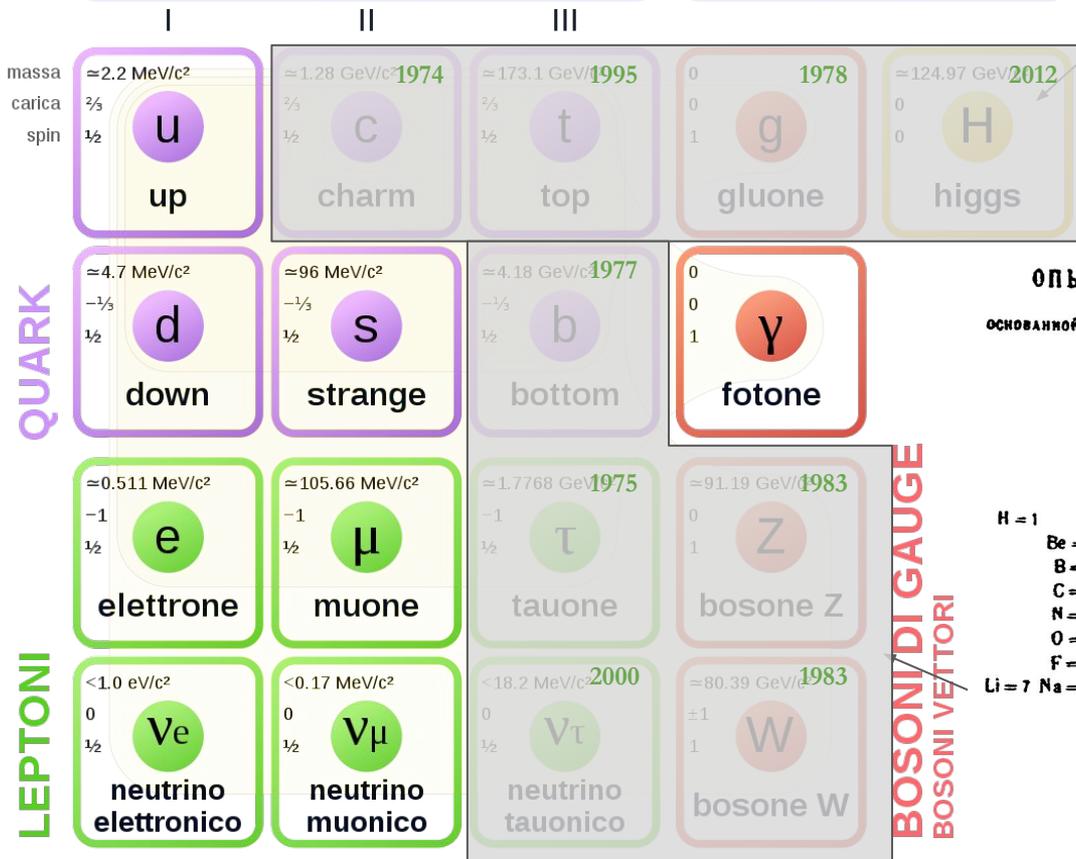
- ❑ Negli anni '60 la fisica teorica riuscì a classificare tutti gli stati osservati e le loro interazioni creando una sorta di “tavola periodica” delle particelle
- ❑ Tutti gli stati osservati si spiegano con tre famiglie di particelle elementari:
 - ❑ la prima famiglia spiega la materia ordinaria (quarks u e d, elettroni)
 - ❑ ma ce ne sono altre due con caratteristiche simili ma massa più elevata



- ❑ Le interazioni sono viste come uno scambio di mediatori, i **bosoni**. I fotoni sono i mediatori delle forze elettromagnetiche

Modello Standard delle Particelle Elementari

tre generazioni della materia (fermioni) mediatori delle forze / interazioni (bosoni)



Il **bosone di Higgs** fu ipotizzato negli anni '60 per spiegare la massa delle particelle elementari. Sono serviti quasi 50 anni di sforzi sperimentali per

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВЪСЪ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВЪ.

| | | | |
|--------|----------|----------|-----------|
| | Ti=50 | Zr=90 | ?=180. |
| | V=51 | Nb=94 | Ta=182. |
| | Cr=52 | Mo=96 | W=186. |
| | Mn=55 | Rh=104,4 | Pt=197,4. |
| | Fe=56 | Rn=104,4 | Ir=198. |
| | Ni=Co=59 | Pl=106,5 | O=199. |
| H=1 | Cu=63,4 | Ag=108 | Hg=200. |
| Be=9,4 | Mg=24 | Zn=65,2 | Cd=112 |
| B=11 | Al=27,1 | ?=68 | Ur=116 |
| C=12 | Si=28 | ?=70 | Sn=118 |
| N=14 | P=31 | As=75 | Sb=122 |
| O=16 | S=32 | Se=79,4 | Te=128? |
| F=19 | Cl=35,5 | Br=80 | I=127 |
| Li=7 | Na=23 | K=39 | Rb=85,4 |
| | | | Cs=133 |
| | | | Tl=204. |
| | | | Ba=137 |
| | | | Pb=207. |
| | | | La=94 |
| | | | ?Er=56 |
| | | | ?Yt=60 |
| | | | Di=95 |
| | | | ?In=75,5 |
| | | | Th=118? |

BOSONI DI GAUGE
BOSONI VETTORI

QUARK

LEPTONI



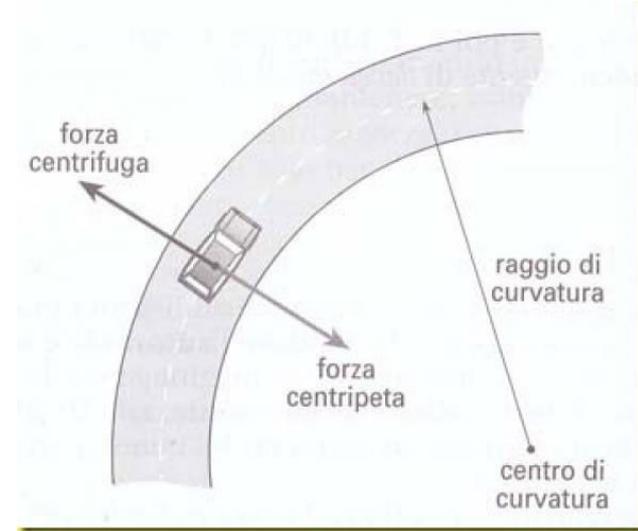
i padri del Modello Standard :

Sheldon Glashow,
Abdus Salam,
Steven Weinberg

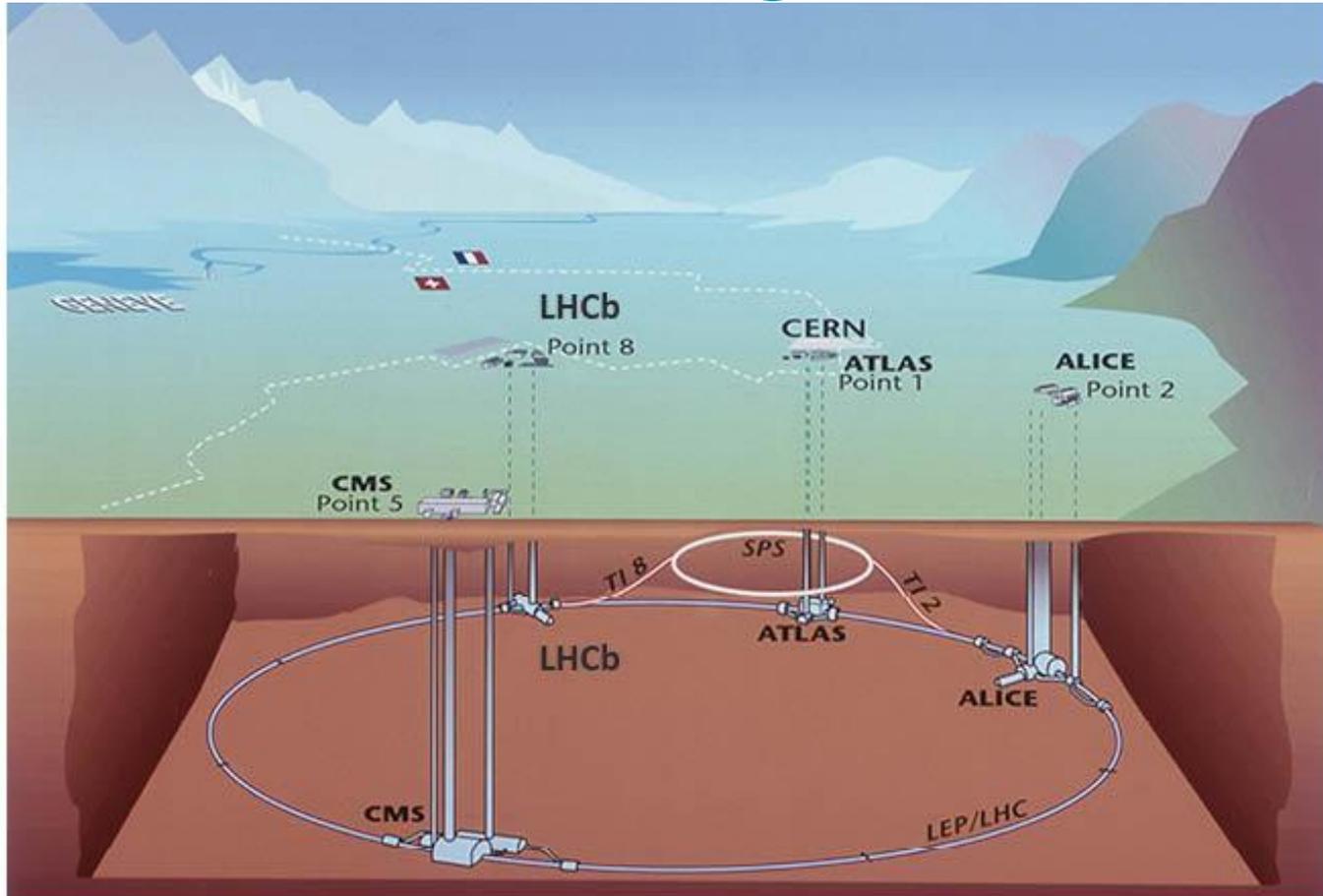
(Nobel 1979)

Lo stato dell'arte

- ❑ Il “microscopio”, ovvero l'acceleratore, attualmente più potente è un collisionatore circolare: l' **LHC (Large Hadron Collider)** presso il CERN di Ginevra, in funzione dal 2008
- ❑ All'aumentare dell'energia, serve una forza sempre maggiore per far curvare le particelle.
Due modi per spingersi al limite:
 - ❑ aumentare il campo magnetico e/o
 - ❑ fare un anello più grande (aumentare il raggio di curvatura)



LHC (Large Hadron Collider)



Anello di **27 Km**
~100 m sottoterra
alla frontiera fra
Francia e Svizzera.

Quattro esperimenti in
cui avvengono le
collisioni fra i fasci di
protoni (o nuclei
pesanti)
ad un ritmo di 40
milioni al secondo

Large Hadron Collider



La macchina

- ❑ L'anello ospita oltre 1200 magneti **superconduttori** mantenuti alla temperatura dell'elio liquido (1.9 K)



- ❑ Si raggiunge un'energia dei protoni di **7000 GeV**
- ❑ La potenza media è circa **250 MW** (magneti "caldi" consumerebbero almeno 5 volte di più)

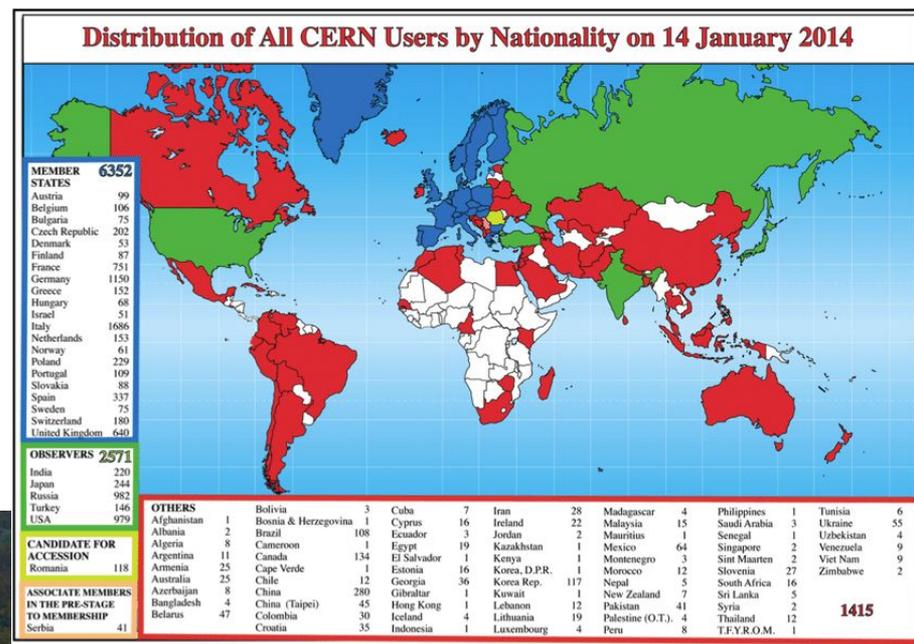
LHC è un "attoscopio"

1 attometro (am) = 10^{-18} m = un millesimo della dimensione del protone

il CERN

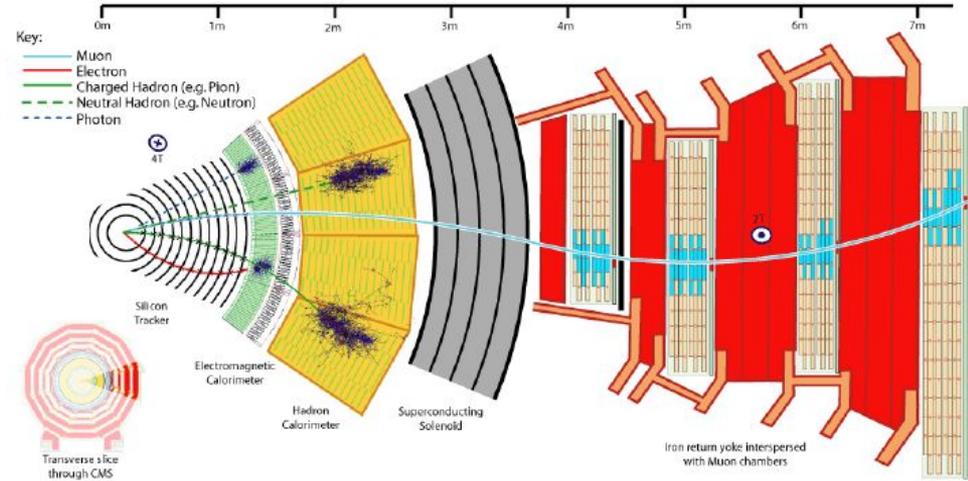
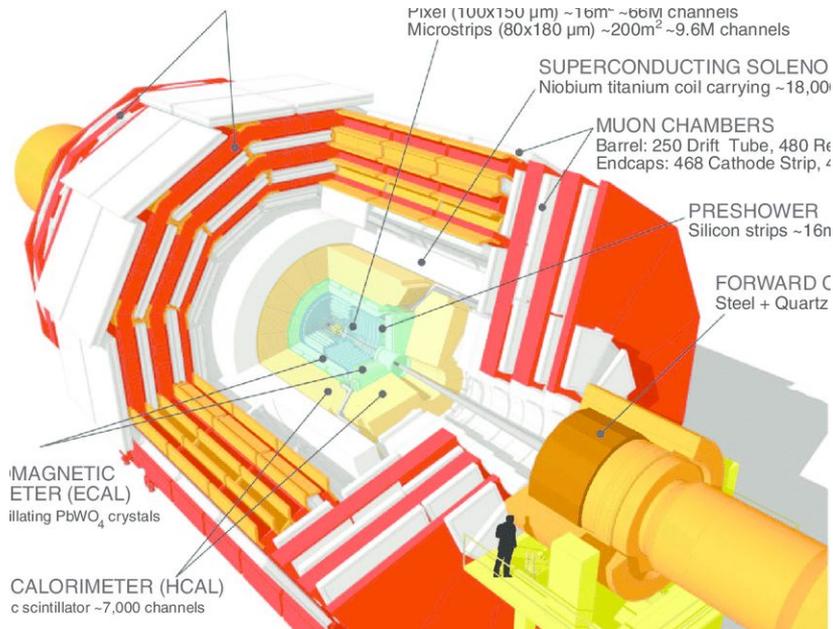
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

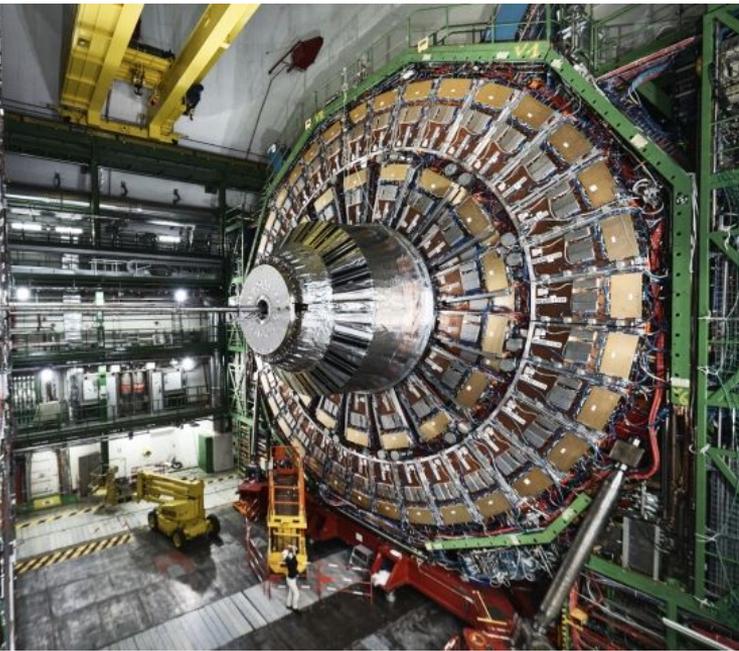
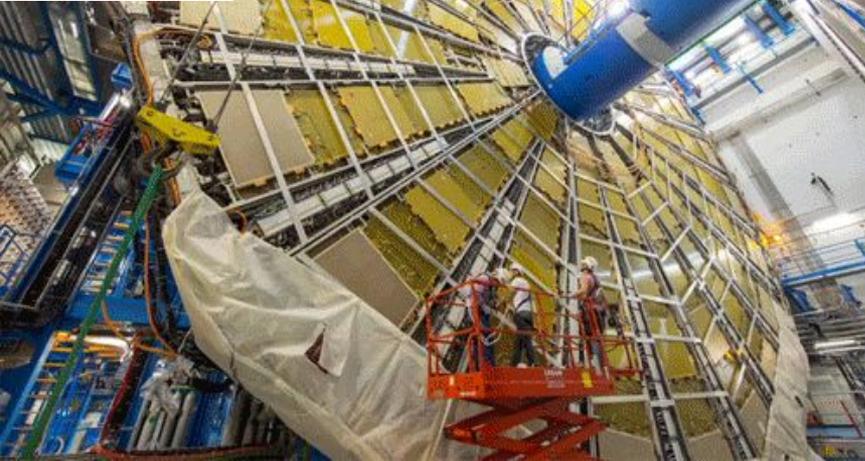
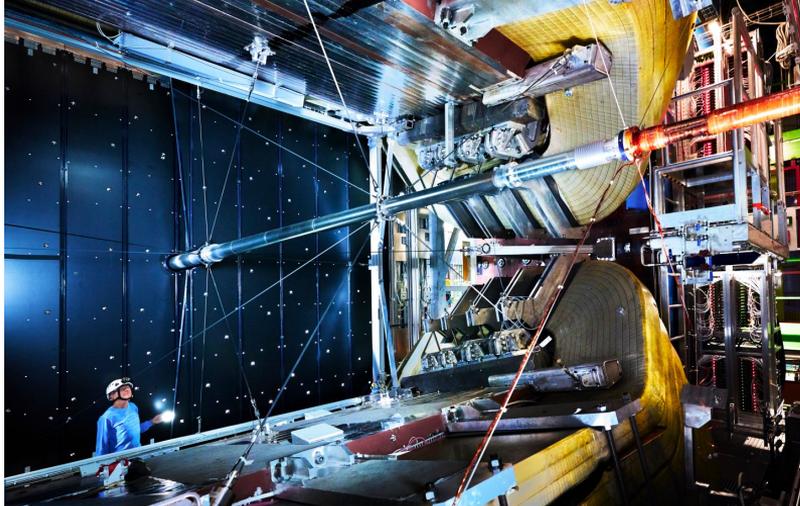
- fondato nel 1954
- Dedicato alla ricerca **fondamentale e pubblica**
- Ma la ricerca in ambito tecnologico ha portato a importanti applicazioni ad altri campi: fisica medica (PET, adroterapia), ambiente, beni culturali; ed a inventare nuovi strumenti, come il **world wide web** e i **touch screen capacitivi**



I rivelatori

- Da ciascuna collisione fra i fasci si materializzano centinaia di particelle
- I rivelatori sono costruiti attorno ai punti di collisione con una struttura a cipolla: ogni strato ha una funzione specifica



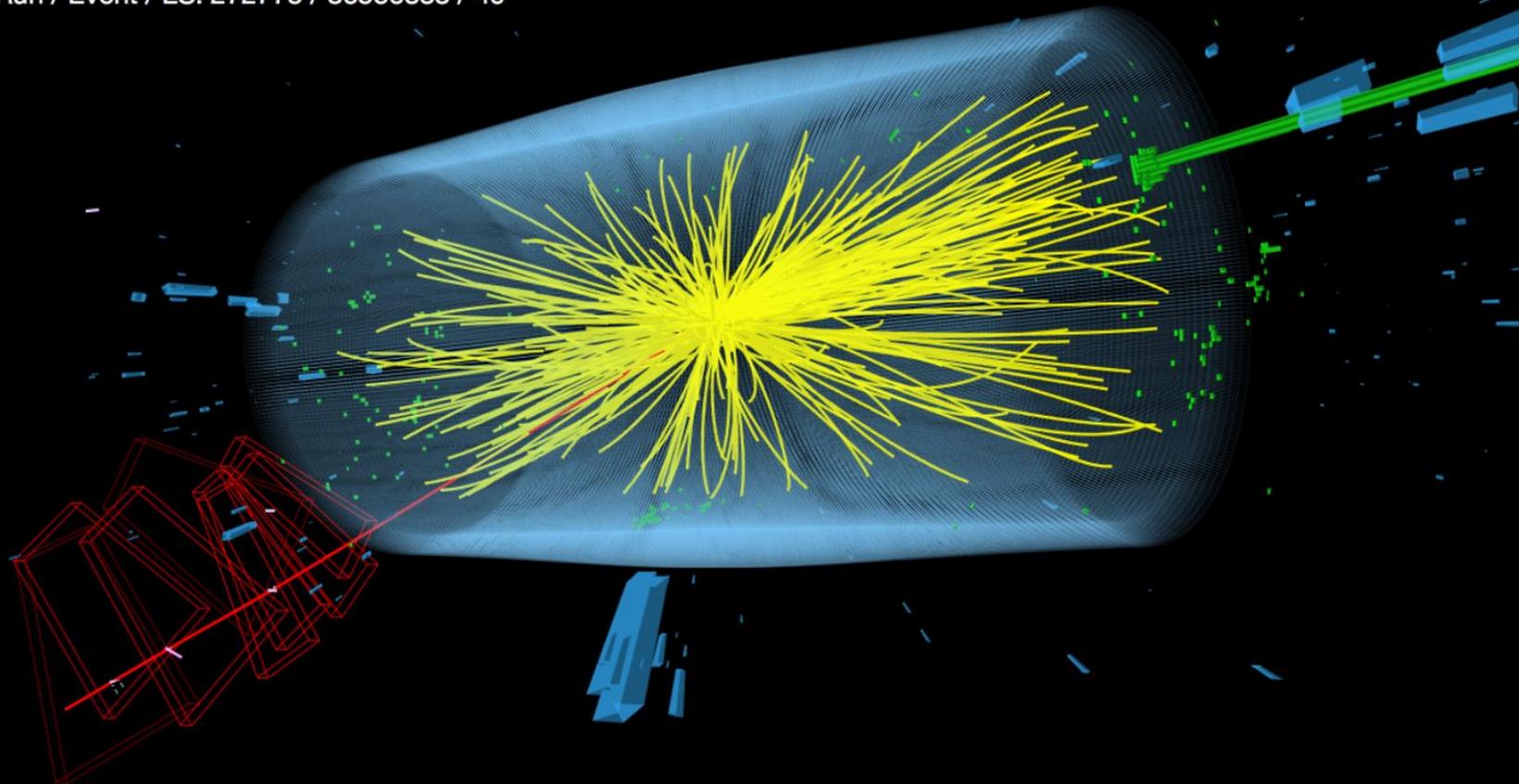




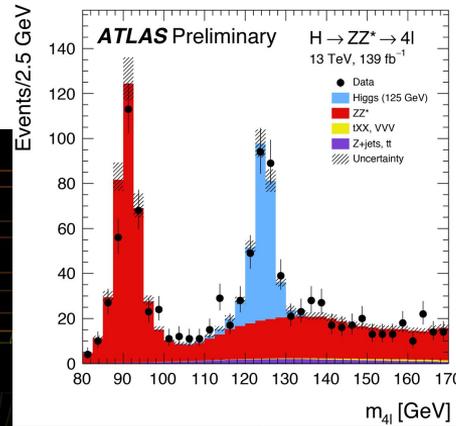
CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2016-May-07 02:15:29.192000 GMT

Run / Event / LS: 272775 / 36556333 / 49



La scoperta del Bosone di Higgs



- Ultimo tassello mancante del Modello Standard
- Necessario per spiegare la massa di tutte le altre particelle!
- Annunciata nel **2012**



Fabiola Gianotti
(attuale direttrice
del CERN)

Peter Higgs

E poi? ...

“È sapiente solo chi sa di non sapere, non chi s'illude di sapere e ignora così perfino la sua stessa ignoranza.”

Socrate

Il Modello Standard è stato un grande successo, ma gli interrogativi aperti sono ancora molti:

- ❑ Si ritiene che circa l'95% dell'energia e della materia dell'Universo sia di natura sconosciuta (**materia oscura, energia oscura**)
- ❑ Quali sono i mediatori della forza di gravità?
- ❑ Perché l'Universo è fatto di materia e non di antimateria?
- ❑ Gli elettroni e i quarks hanno una struttura interna?
- ❑ ...

