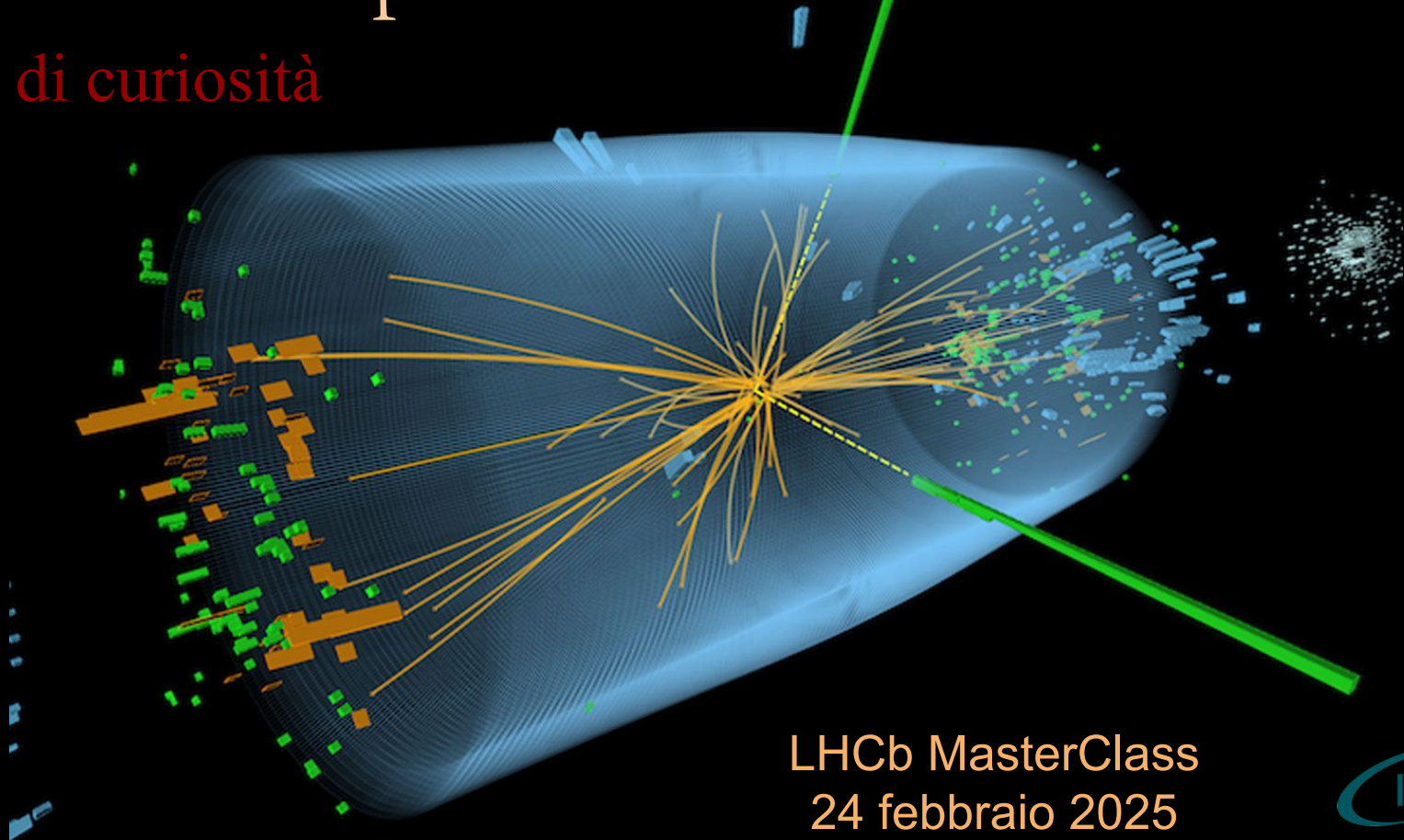


La fisica delle particelle elementari

Storie di curiosità

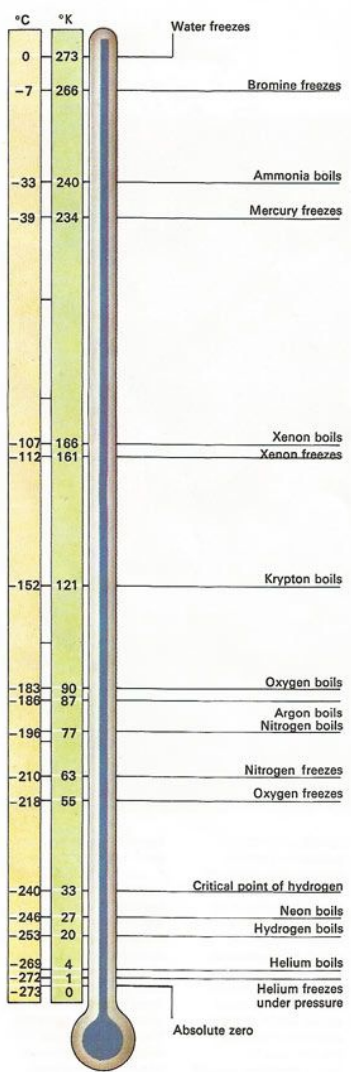
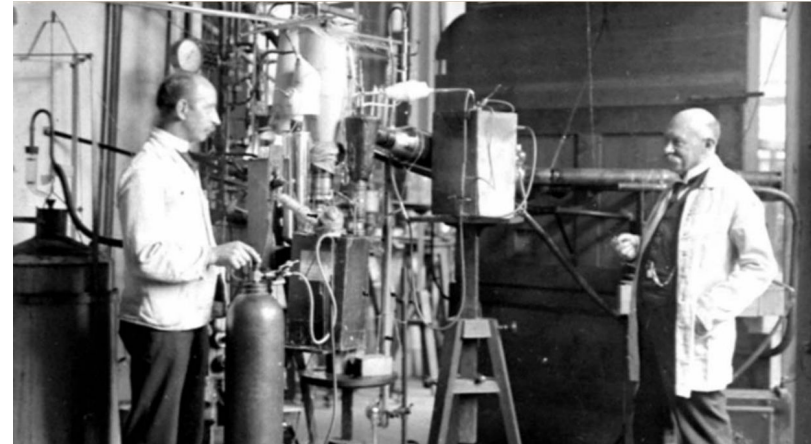


LHCb MasterClass
24 febbraio 2025



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

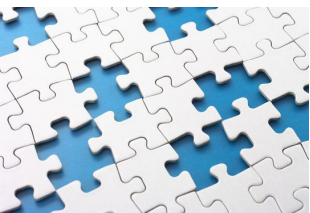
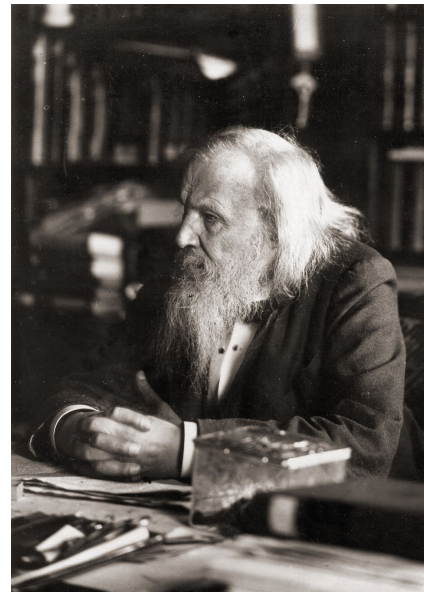
ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

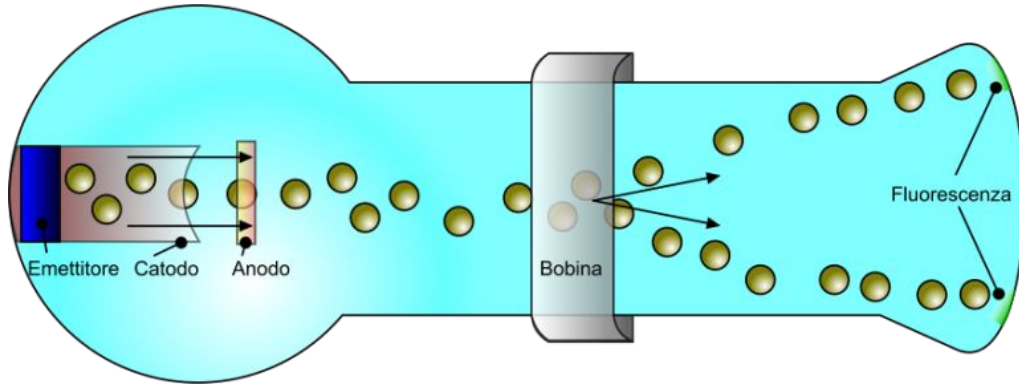
	Ti=50	Zr=90	?=180.		
	V=51	Nb=94	Ta=182.		
	Cr=52	Mo=96	W=186.		
	Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,1.		
	Fe=56	Rn=104,4	Ir=198.		
	Ni=Co=59	Pi=106,6	O=199.		
H=1	Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.		
Be=9,1	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112		
B=11	Al=27,1	?=68	Ur=116	Lu=197?	
C=12	Si=28	?=70	Sn=118		
N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?	
O=16	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

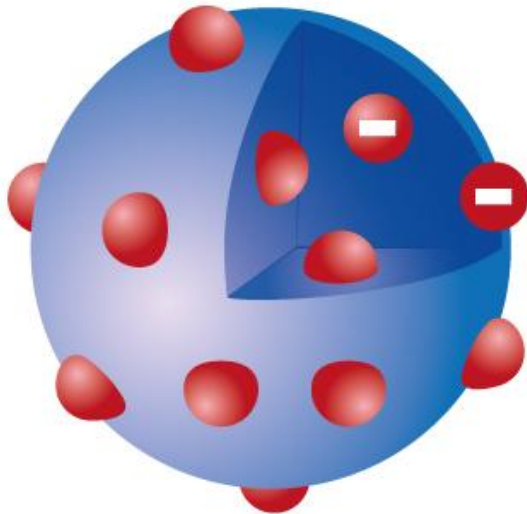


- Gli studi sui “raggi catodici” di fine ottocento mostrano che questi raggi sono costituiti da particelle di carica negativa estratti dalla materia. Nel **1911** si misura la carica elementare dell'elettrone (esperimento di **Millikan**) e la sua massa



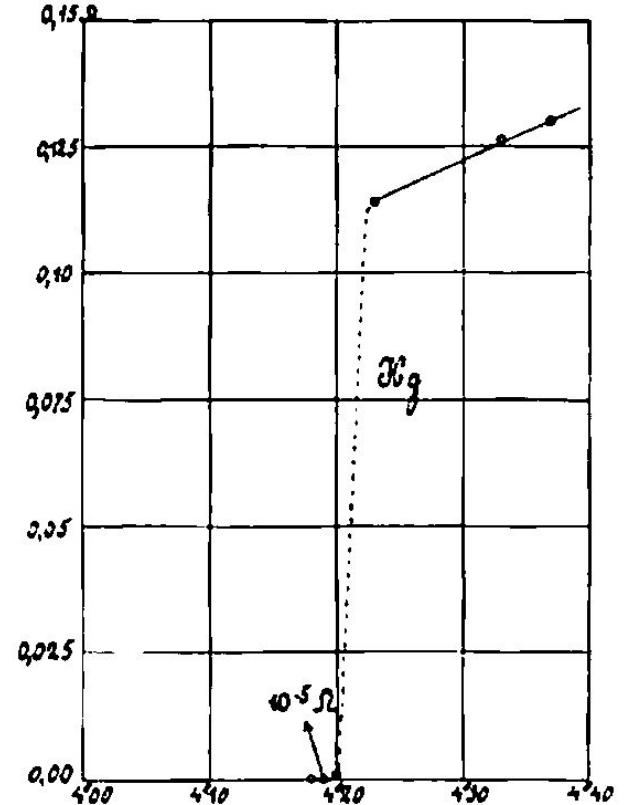
Un primo modello di atomo

- ❑ 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

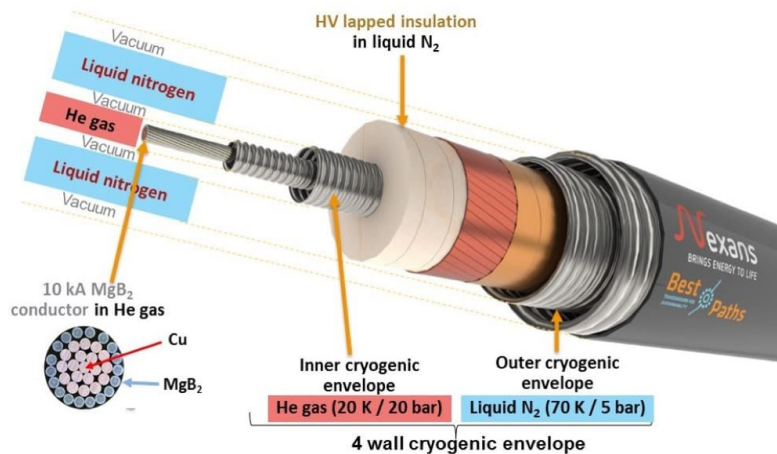


Cosa trovò Kamerlingh Onnes?

- ❑ 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...

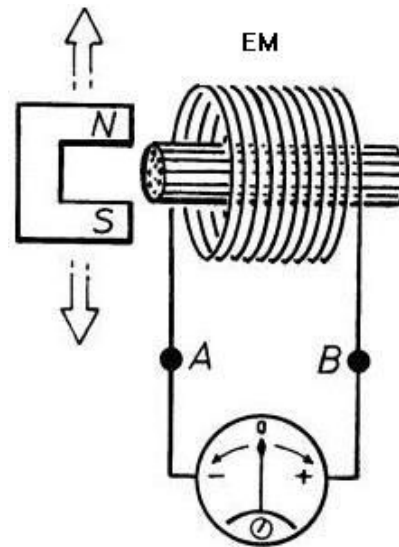


Applicazioni della superconduttività



- ❑ **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



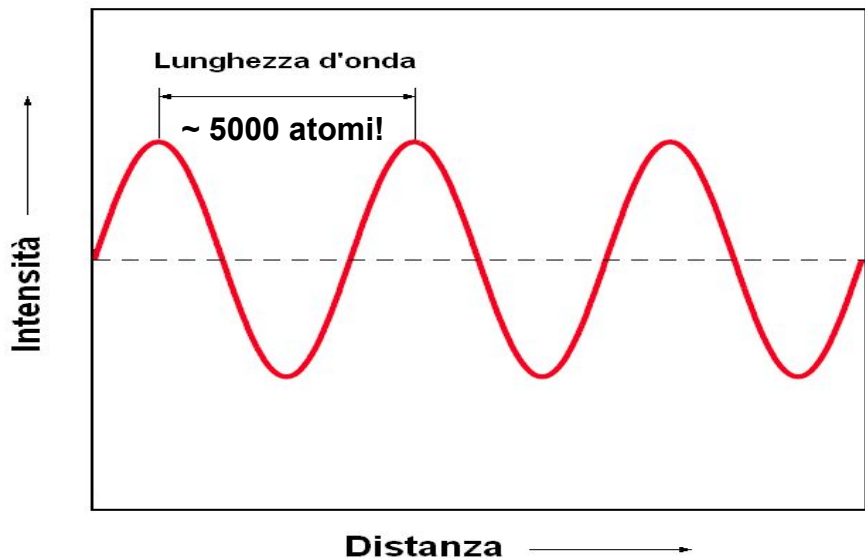
“Osservare” l’infinitamente piccolo

- ❑ 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

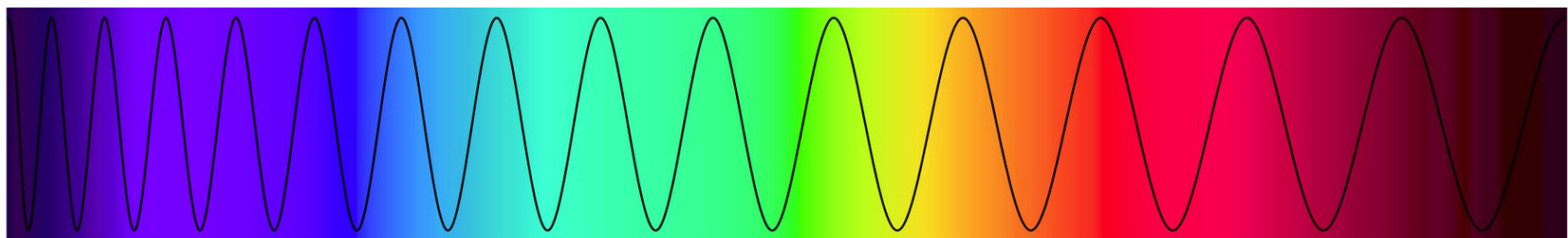
Quanto è “grande” la luce?



- ❑ 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

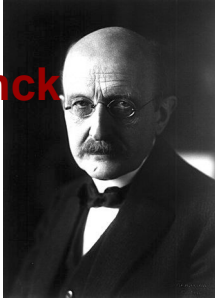
velocità della luce

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)



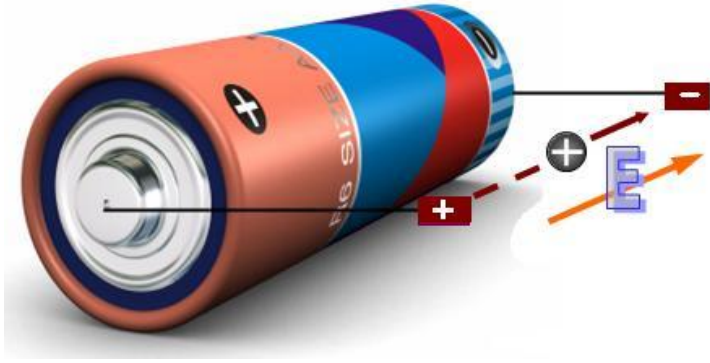
lunghezza d'onda di De Broglie (1924)

$$\lambda = h / p$$

dove p è l'impulso della particella

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

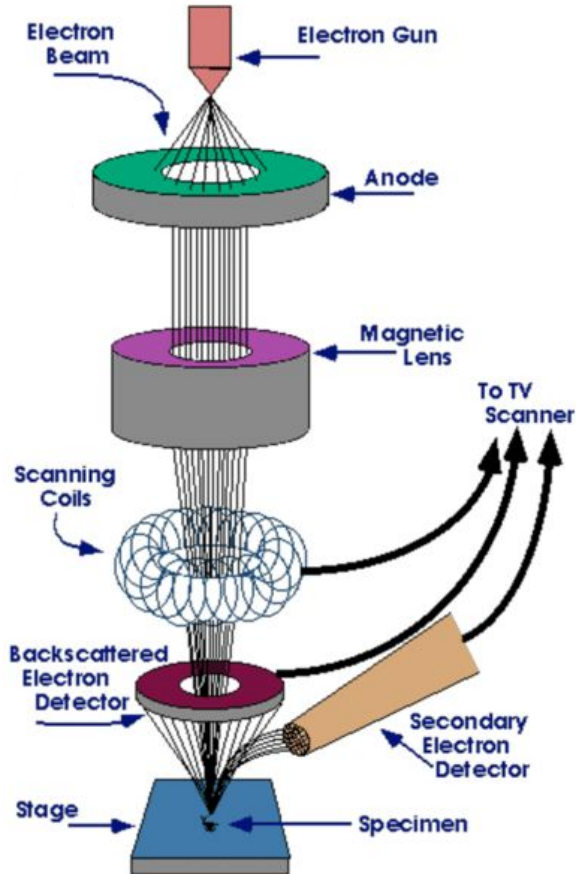
Unità di energia: l'electron-Volt



- 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

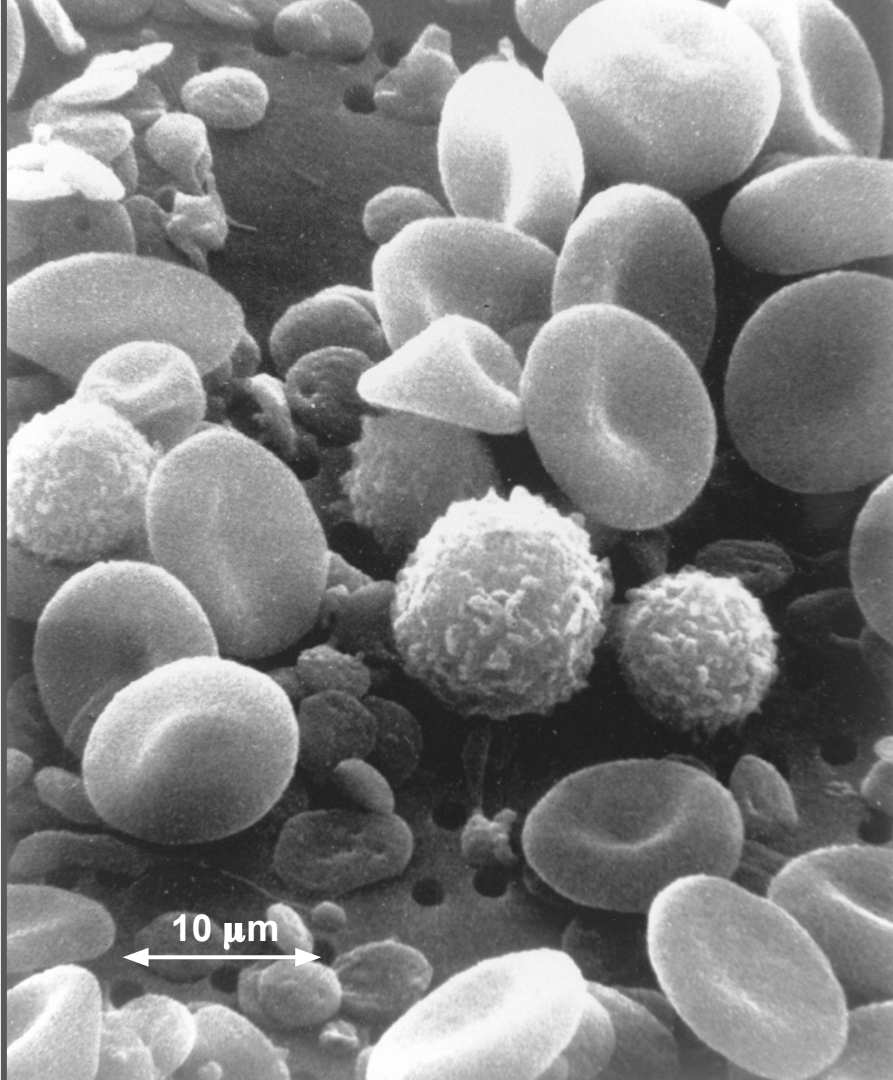
	Lunghezza	Energia
Luce visibile	500 nm	2,5 eV
Atomo	0,1 nm	12 400 eV

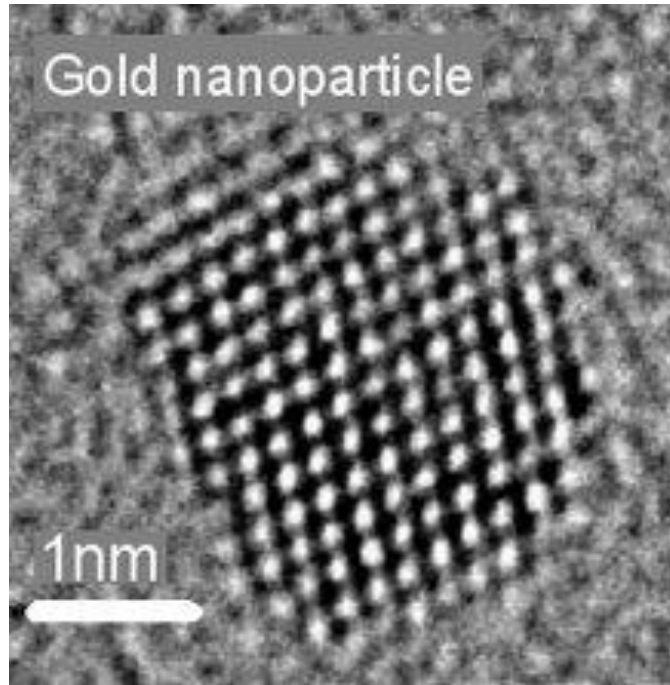
Il microscopio elettronico



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





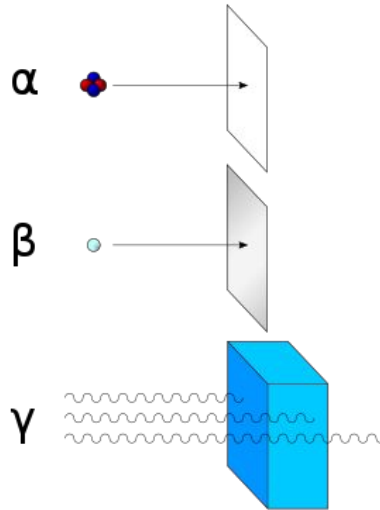


Ma come possiamo esplorare la struttura interna dell'atomo?
Serve una sonda con energia di milioni di eV !

Un acceleratore naturale: la radioattività



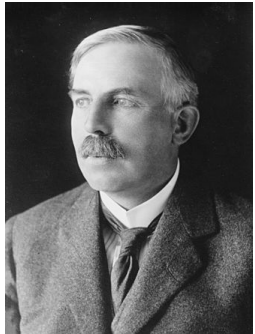
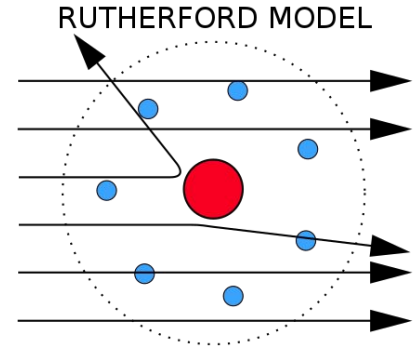
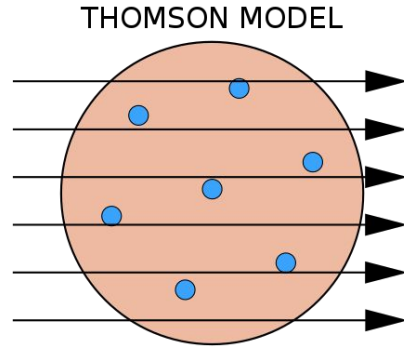
- Nel **1896** la fisica polacco-francese **Marie Skłodowska-Curie** scopre con Becquerel le radiazioni emesse da alcune sostanze e conia il termine **radioattività**



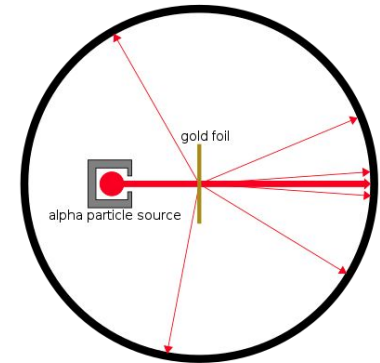
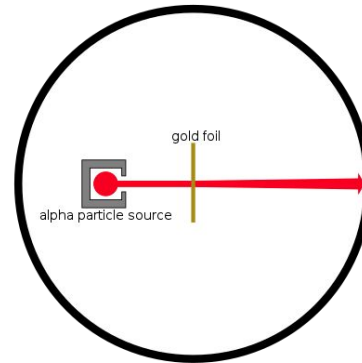
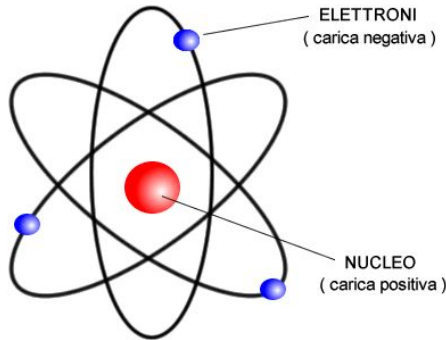
α e β sono particelle cariche con energia fino a **qualche MeV** (milioni di eV)

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



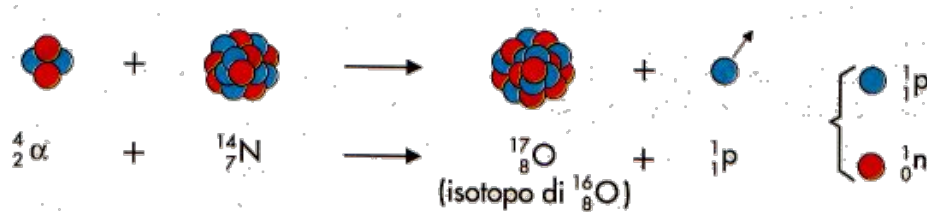
- Modello atomico di **Rutherford (1913)**



observed result

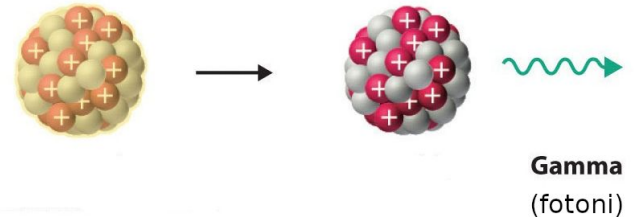
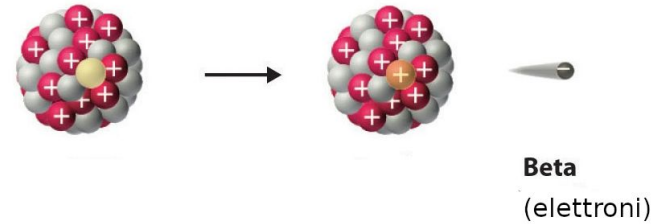
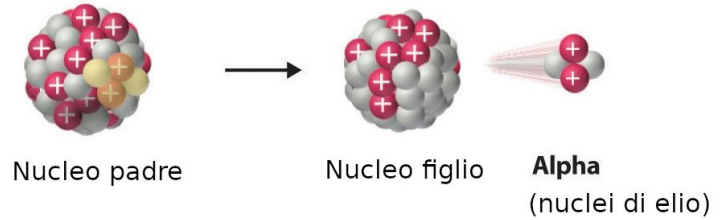
I costituenti del nucleo

- ❑ 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



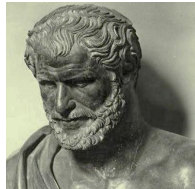
I decadimenti radioattivi

- 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?

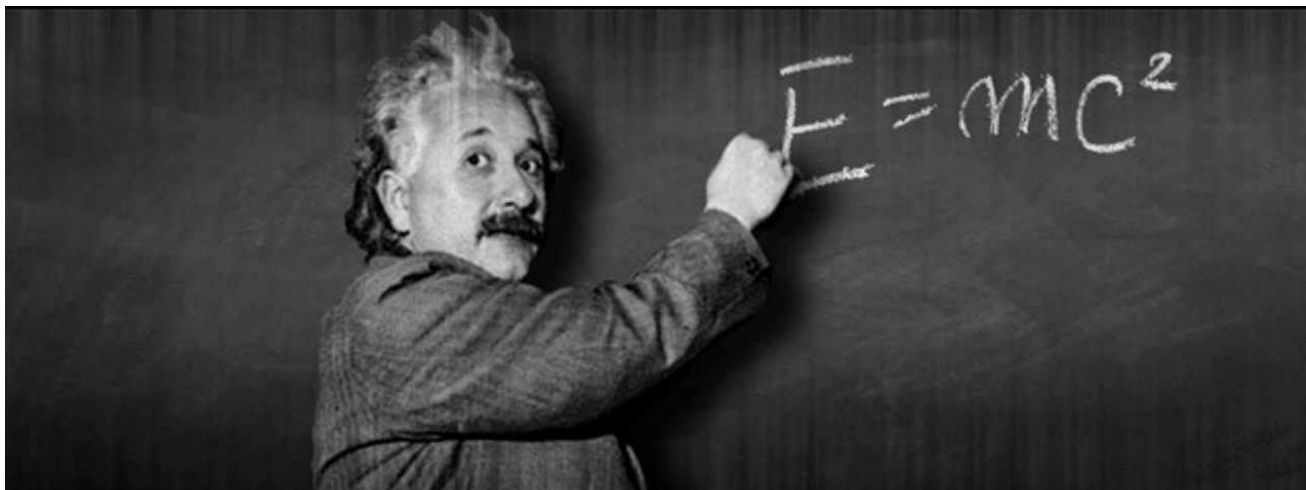


“Nulla è creato dal nulla
né si distrugge nel nulla”

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:

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

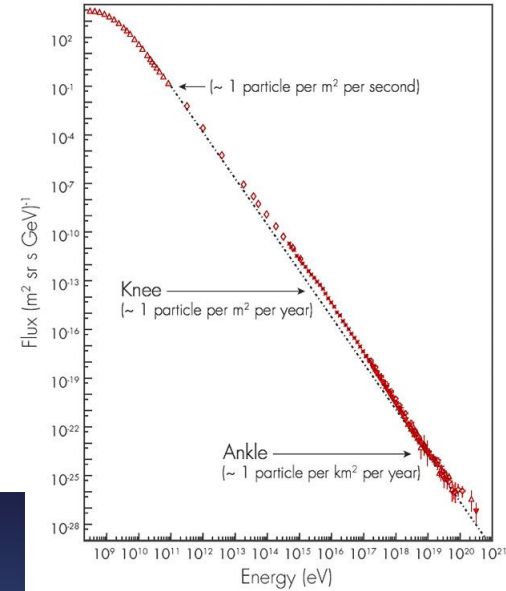
$$\text{Massa(protone)} \times c^2 = 938 \text{ milioni di eV}$$

Acceleratori cosmici

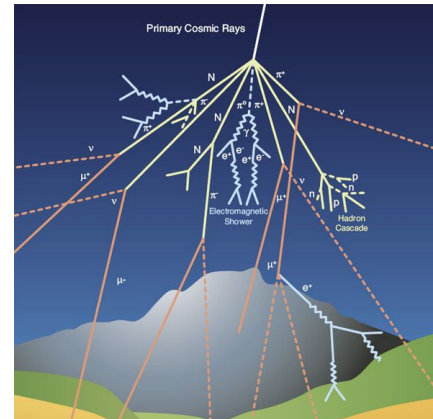


- Nel **1913**, grazie a esperimenti su palloni aerostatici, si scopre che particelle ionizzanti di alta energia arrivano sulla terra dallo spazio: i **raggi cosmici**

FLUXES OF COSMIC RAYS

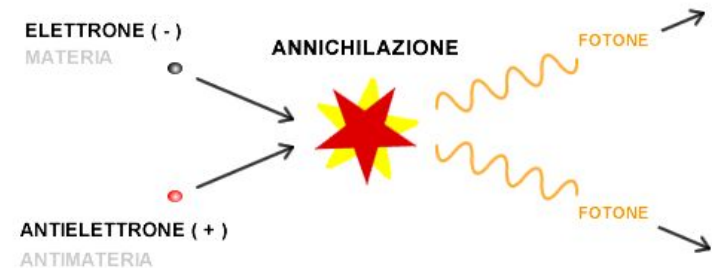
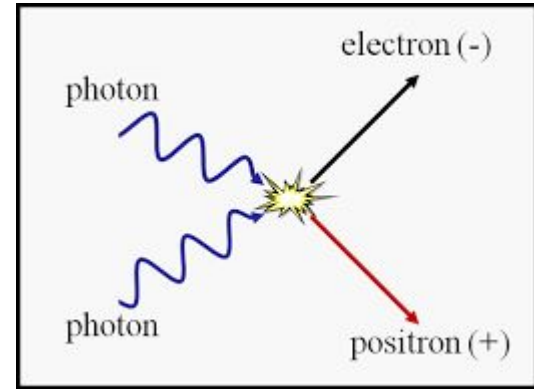


- sono composti in gran parte da nuclei atomici accelerati nel cosmo, con uno spettro di energia molto esteso. Interagendo con l'atmosfera, producono sciami di particelle subatomiche

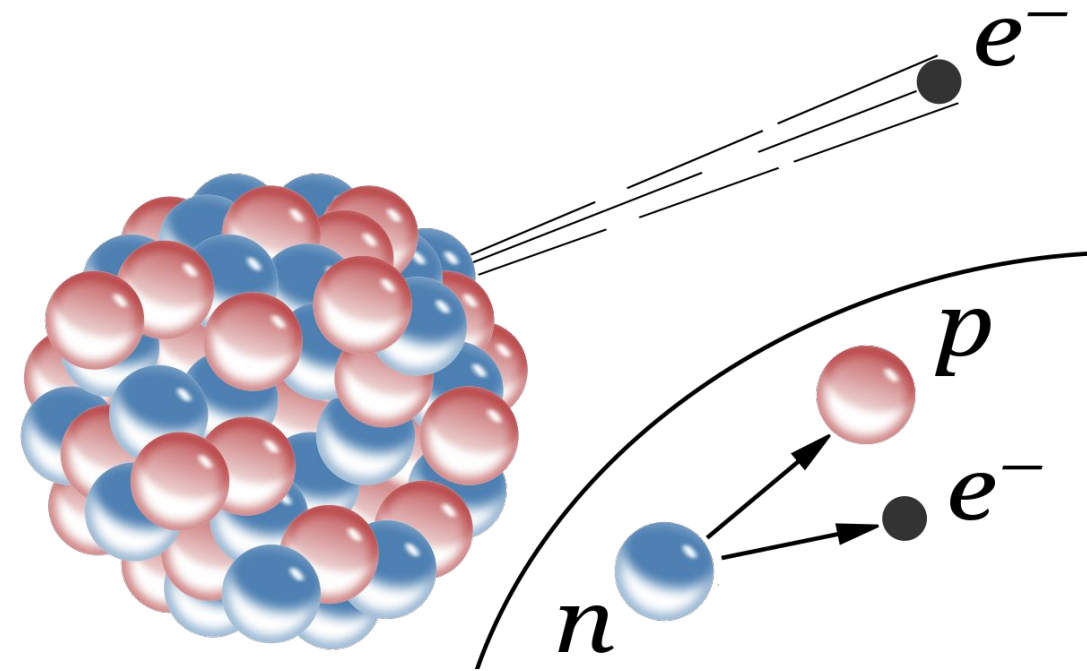


L'antimateria

- ❑ 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

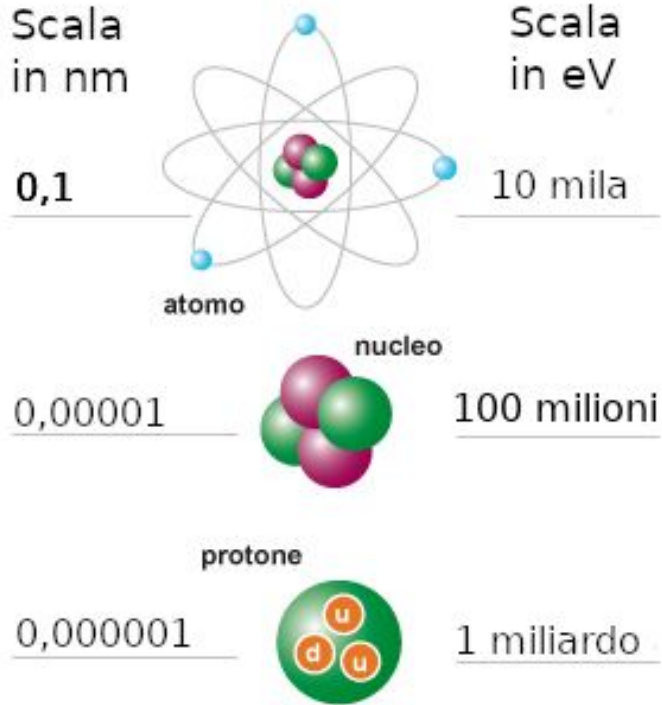


Il neutrino

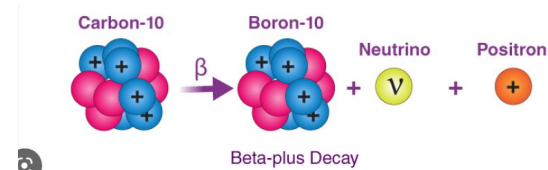
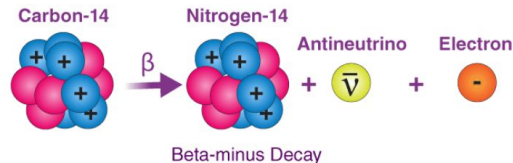


- ❑ Nel decadimento beta un neutrone del nucleo si trasforma in protone, emettendo un elettrone
- ❑ Ma l'energia finale osservata è più bassa di quella iniziale
- ❑ Nel **1930** Wolfgang Pauli ipotizza che venga emessa una particella "invisibile" di carica neutra, il **neutrino**
- ❑ La sua esistenza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

Particelle e interazioni



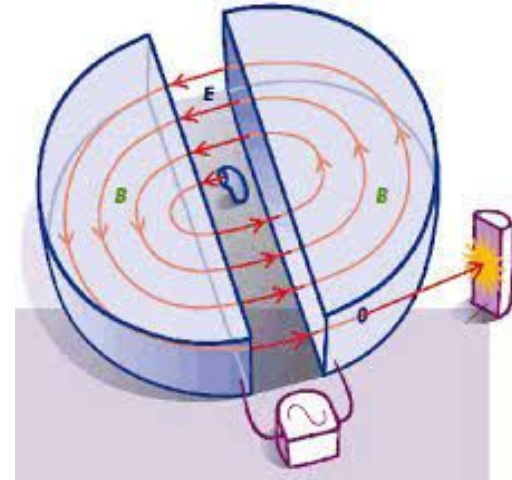
- Tutti gli atomi sono costituiti dalle stesse tre particelle elementari:
 - protoni e neutroni, confinati nei nuclei atomici dalle **forze nucleari forti** (molto più intense delle forze repulsive elettrostatiche fra i protoni)
 - elettroni, che “orbitano” attorno ai nuclei, legati dalla **forza elettromagnetica**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



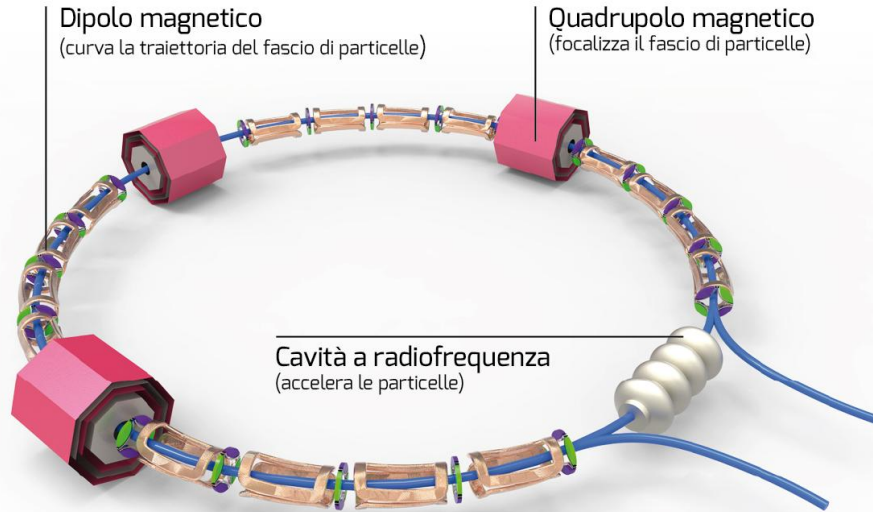
Gli acceleratori artificiali

- 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

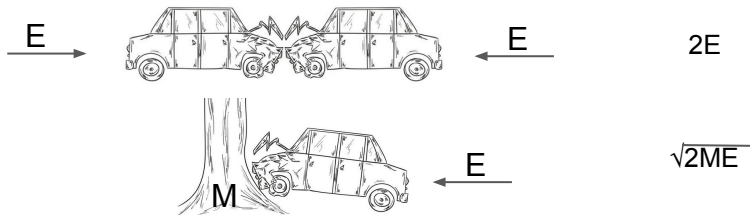
- Nell'**acceleratore circolare** la particella viene fatta ruotare tramite un campo magnetico e fatta passare molte volte nella regione di accelerazione



Collisionatori



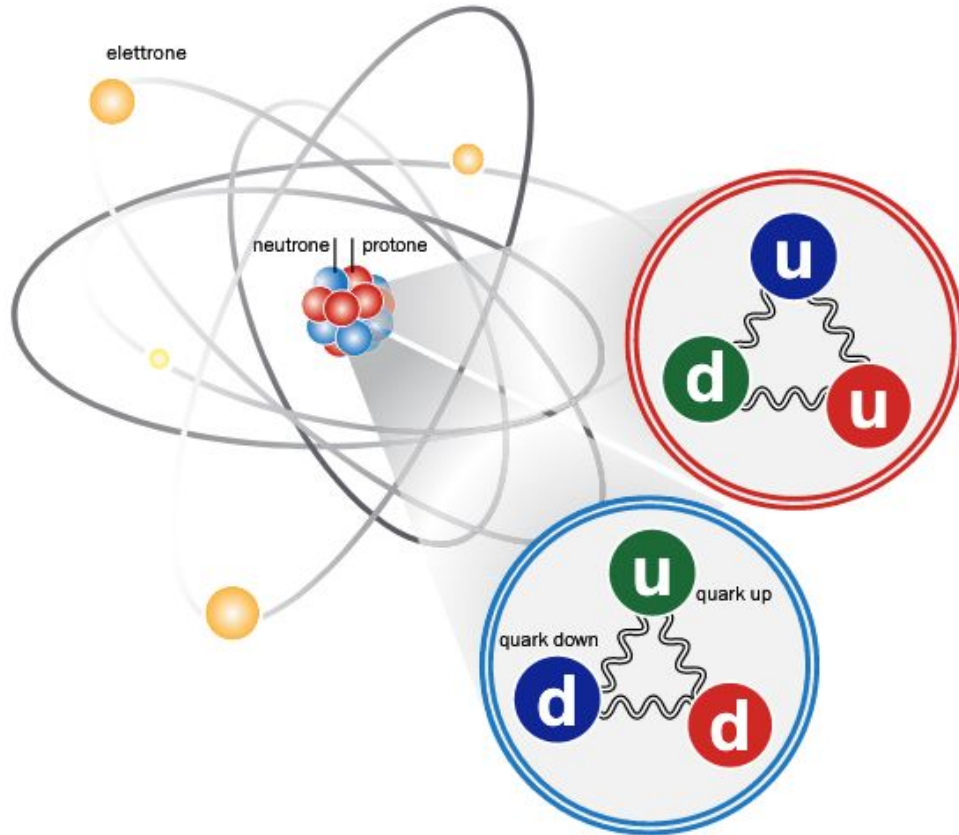
Energia nella collisione



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

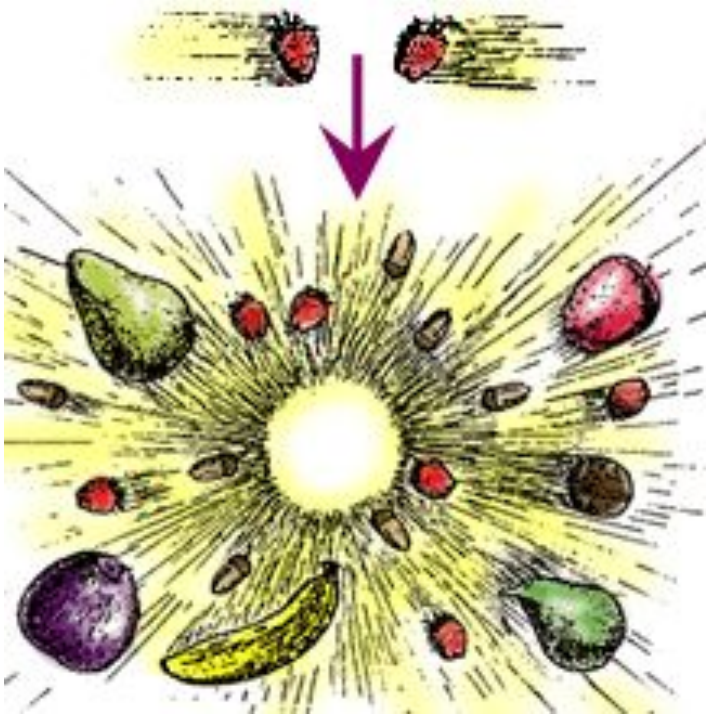
La sua evoluzione, ADONE (1967) accelerava e^- ed e^+ fino a 1,5 GeV

I quarks

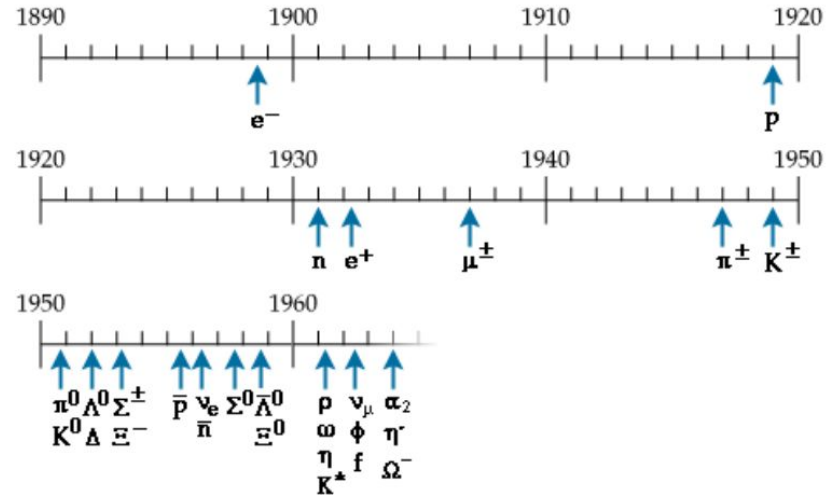


- Grazie agli acceleratori artificiali, negli anni '60 si supera l'energia di **1 GeV (1 miliardo di eV)**, scoprendo che quella è la dimensione del protone!
 - Al suo interno protoni e neutroni contengono particelle più piccole, i **quark**:
 - quark up (u), carica $+\frac{2}{3} e$
 - quark down (d),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



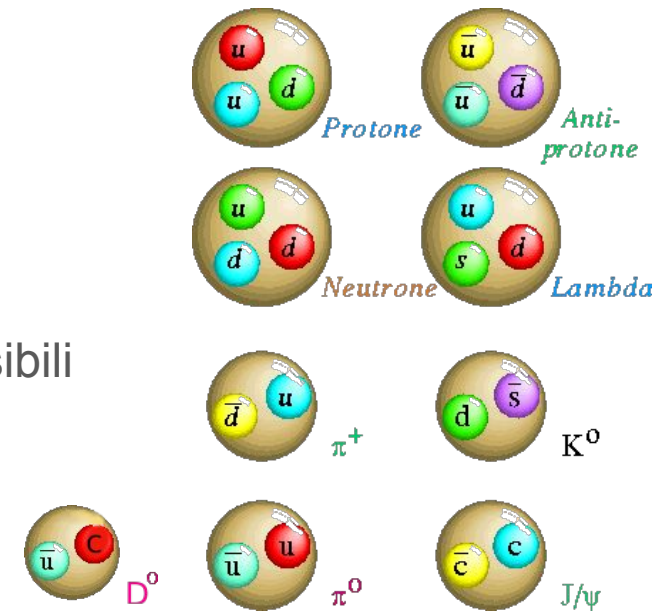
Quarks e “adroni”

- 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

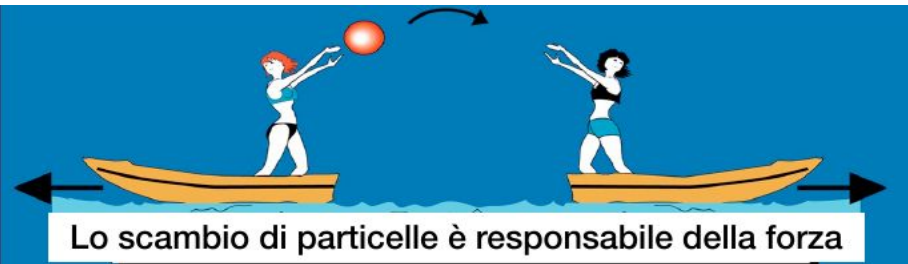
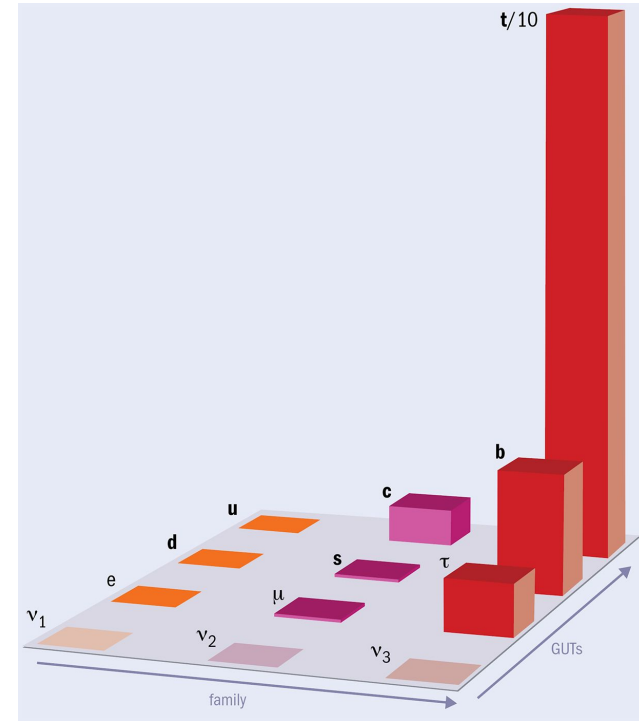
- I quarks non possono esistere isolati, ma si possono combinare in **adroni** tramite tutte le combinazioni possibili del tipo

qqq **barioni**
 qq̄ **mesoni**



Le tre famiglie

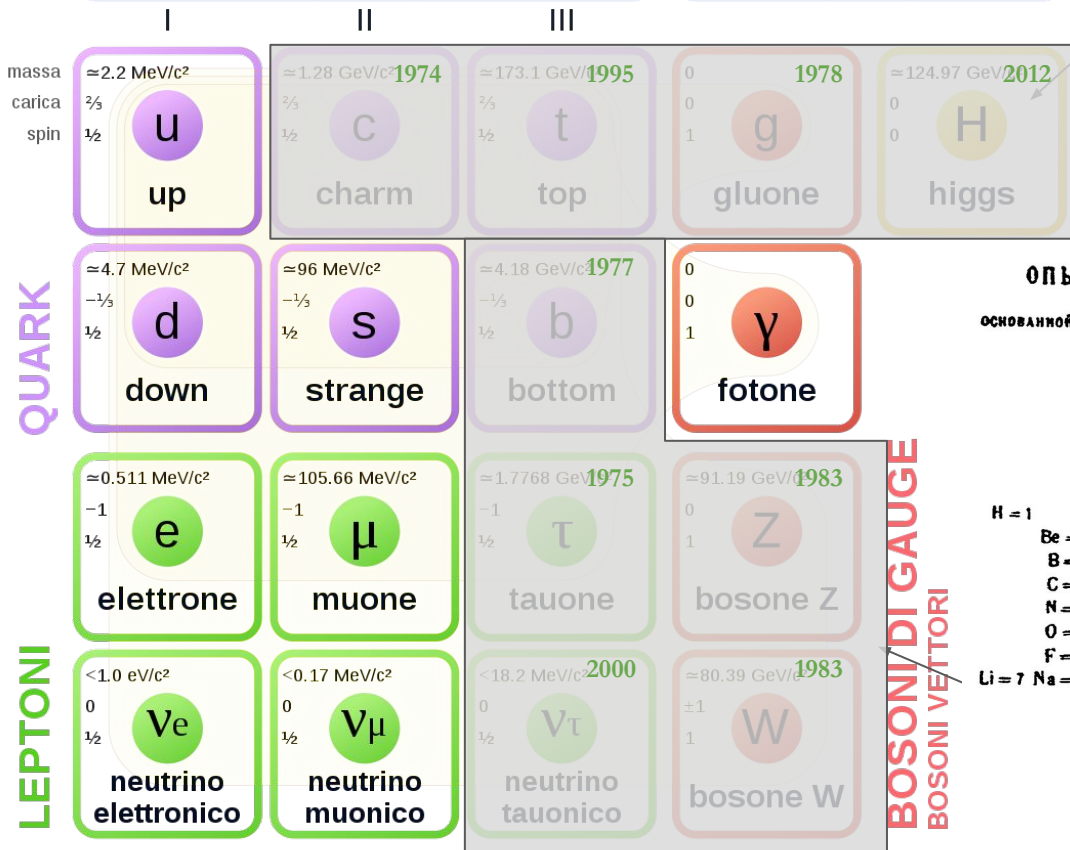
- ❑ Negli anni '60 la fisica teorica riuscì a classificare tutti gli stati osservati e le loro interazioni creando una sorta di “tavola periodica” delle particelle
- ❑ Tutti gli stati osservati si spiegano con tre famiglie di particelle elementari:
 - ❑ la prima famiglia spiega la materia ordinaria (quarks 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.
	Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.
H=1	Be=9,4	Mg=24	Zn=65,2
	B=11	Al=27,1	?=68
	C=12	Si=28	?=70
	N=14	P=31	As=75
	O=16	S=32	Se=79,4
	F=19	Cl=35,5	Br=80
	Li=7	Na=23	K=39
			Rb=85,4
			Cs=133
			Ba=137
			Pb=207.
			La=94
			Di=95
			Th=118?

BOSONI DI GAUGE
BOSONI VETTORI



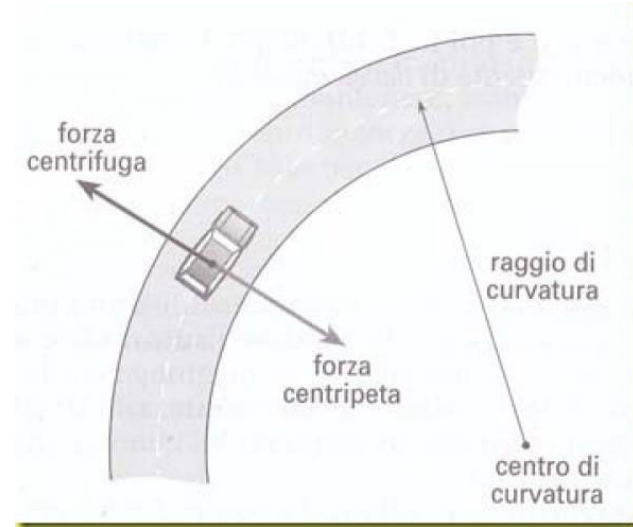
i padri del Modello Standard :

Sheldon Glashow,
Abdus Salam,
Steven Weinberg

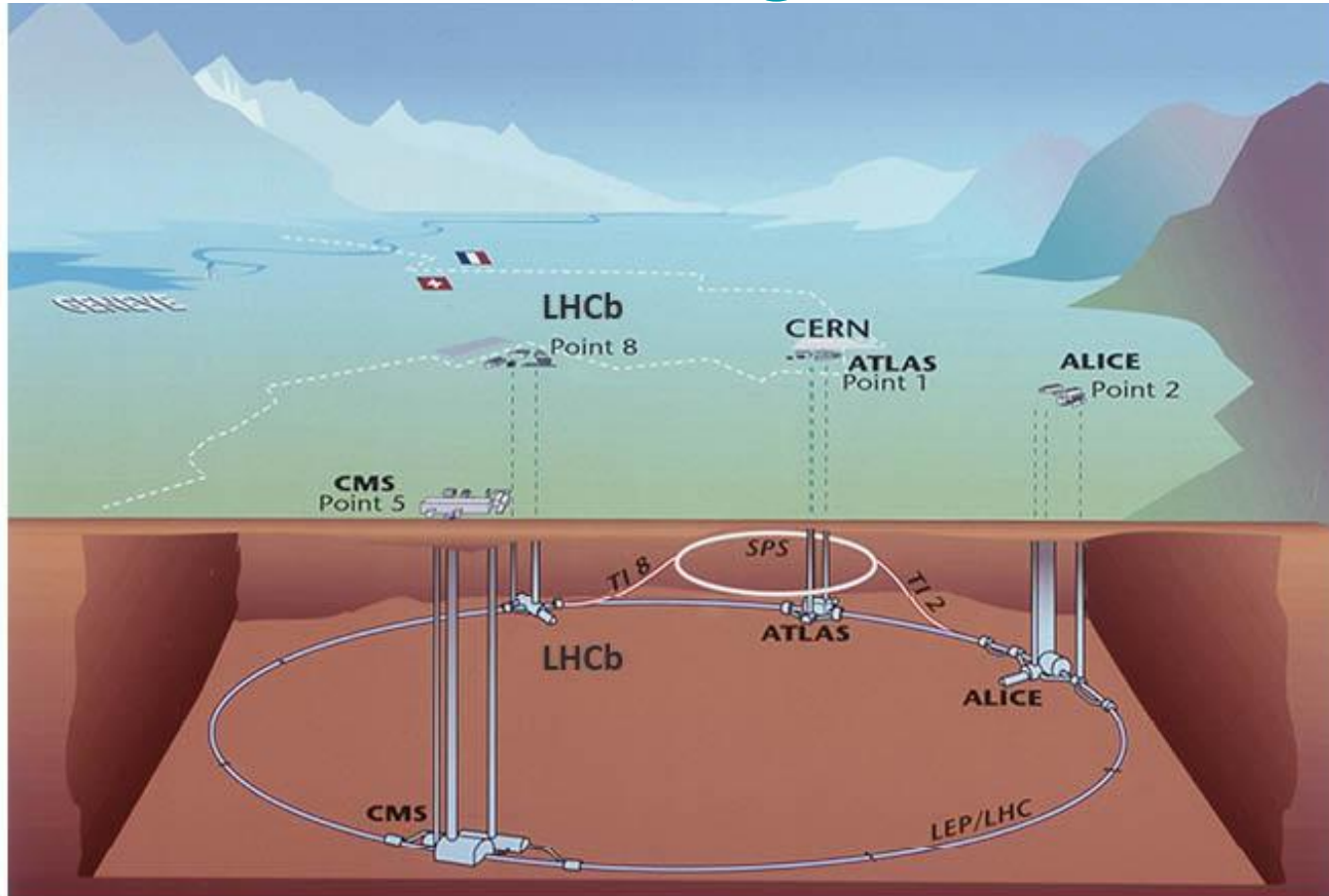
(Nobel 1979)

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.

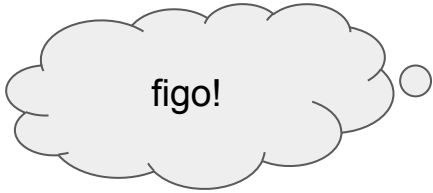
Quattro esperimenti in
cui avvengono le
collisioni fra i fasci di
protoni (o nuclei
pesanti)
ad un ritmo di 40
milioni al secondo

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)

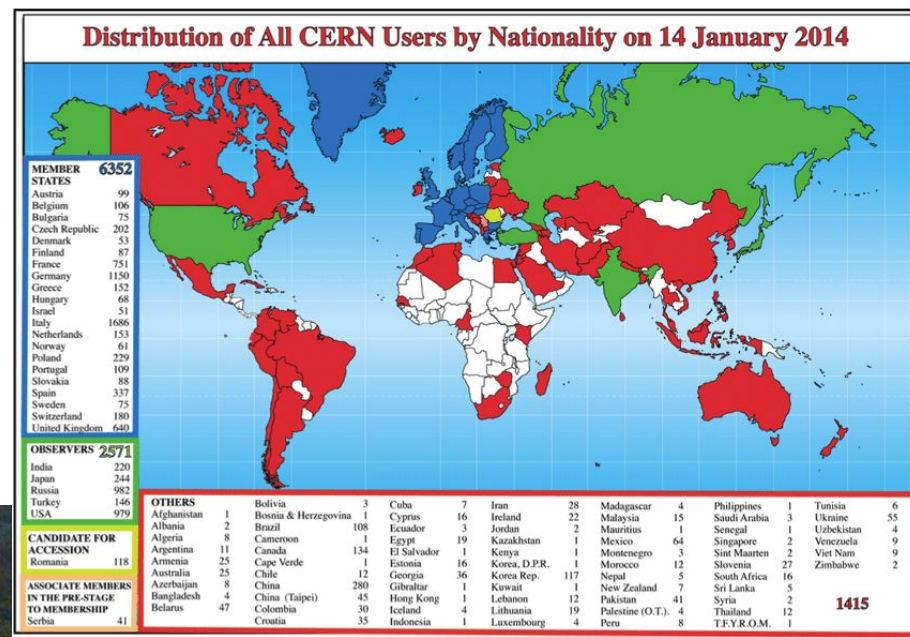
LHC è un "attoscopio"

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

il CERN

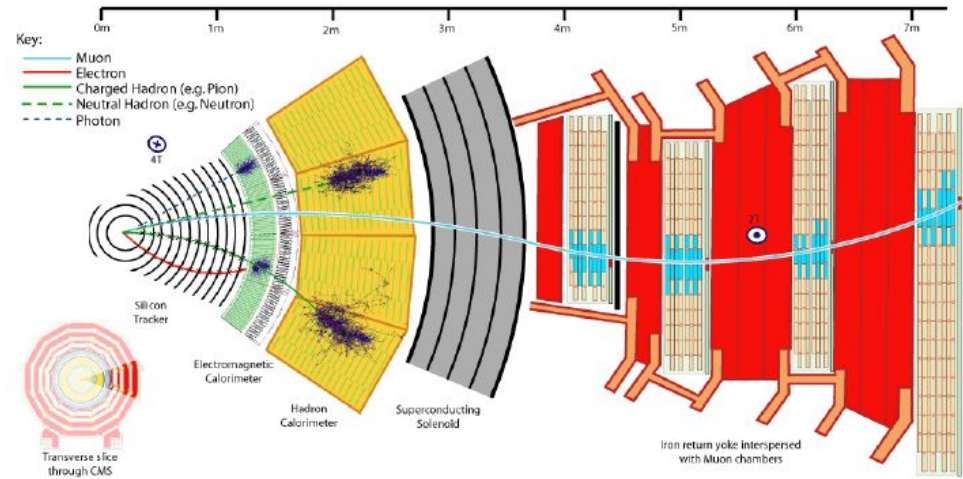
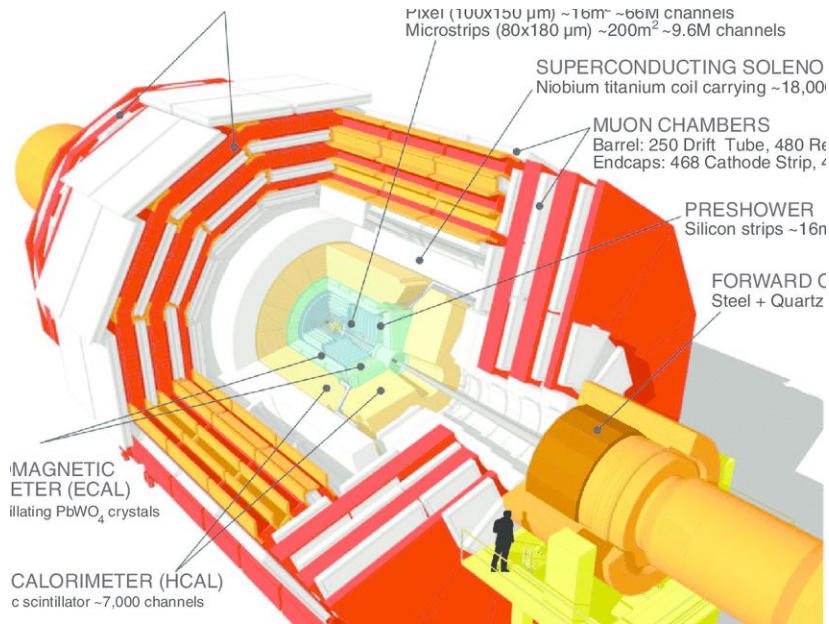
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

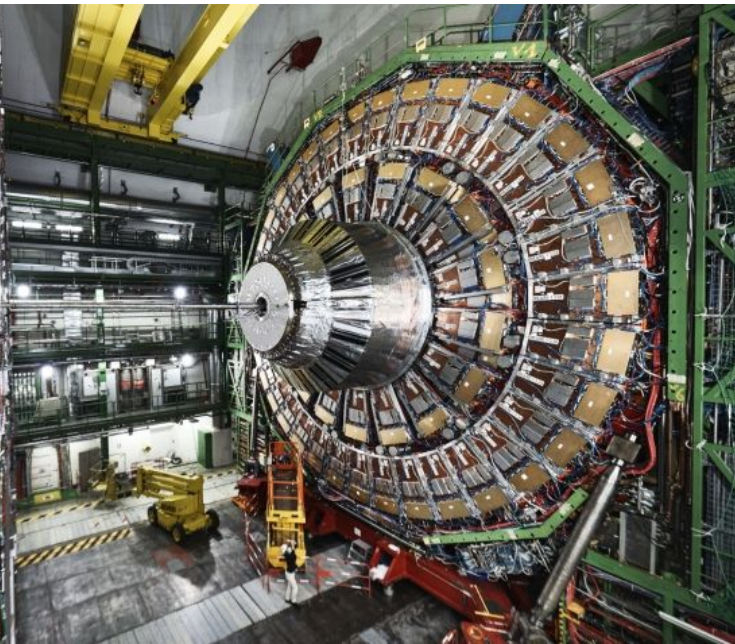
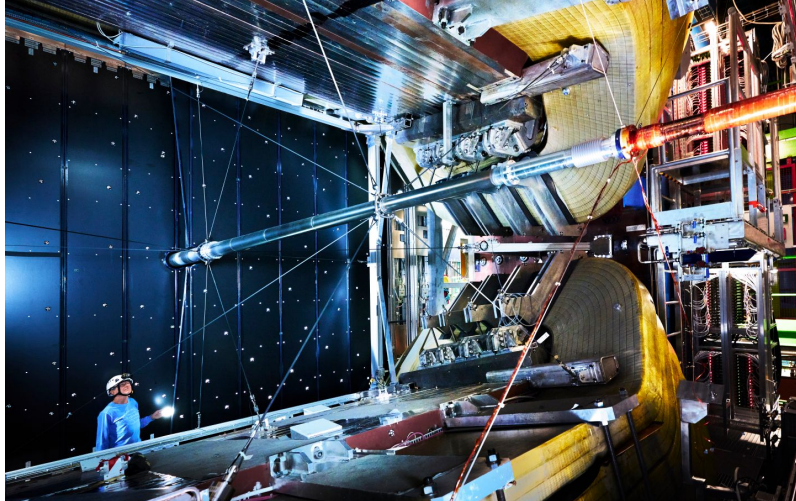
- fondato nel 1954
- Dedicato alla ricerca **fondamentale e pubblica**
- Ma la ricerca in ambito tecnologico ha portato a importanti applicazioni ad altri campi: fisica medica (PET, adroterapia), ambiente, beni culturali; ed a inventare nuovi strumenti, come il **world wide web** e i **touch screen capacitivi**



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



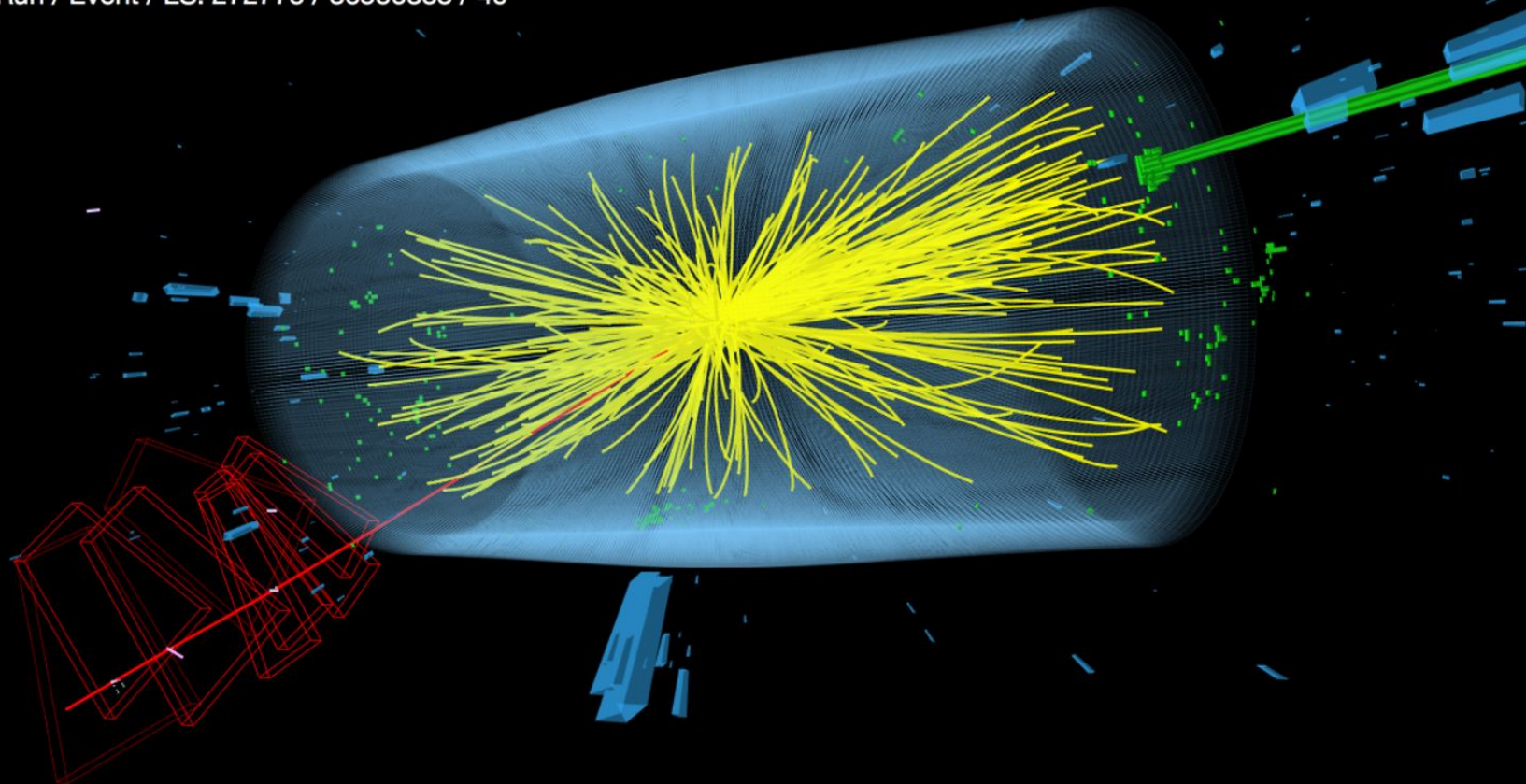




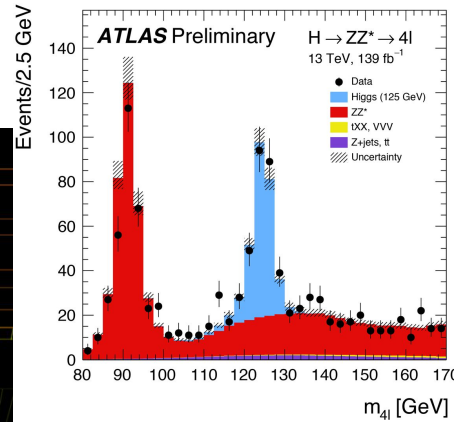
CMS Experiment at the LHC, CERN

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?
- ❑ ...

