

Dalle particelle elementari al Big Bang: Il Large Hadron Collider del CERN e l'esperimento ALICE

Pietro Antonioli
Francesca Ercolessi
Nicola Rubini
Giovanni Malfattore
Sofia Tomassini



Masterclass 2025 Bologna



ALICE



*Dipartimento
di Fisica*



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Proveremo a rispondere a 4 domande:

1. Perché servono le **particelle per studiare la materia**?
2. A cosa servono e come funzionano gli **acceleratori di particelle**?
3. **Come funziona LHC** e cosa studiano i 4 rivelatori di LHC?
4. In che senso con LHC “**ricreiamo le condizioni del Big Bang**”?

Il tutto facendo un po' di storia della fisica delle particelle elementari, ricordando qualche richiamo di fisica di base ...

Capire cosa c'è all'interno della materia

Per capire cosa c'è all'interno della materia ci servono proiettili piccoli ed energetici:

- Materiali che emettono radiazioni, sia naturalmente sia per eccitazione (calore, passaggio corrente elettrica...) → particelle alfa, elettroni, fotoni

Sostanze radioattive

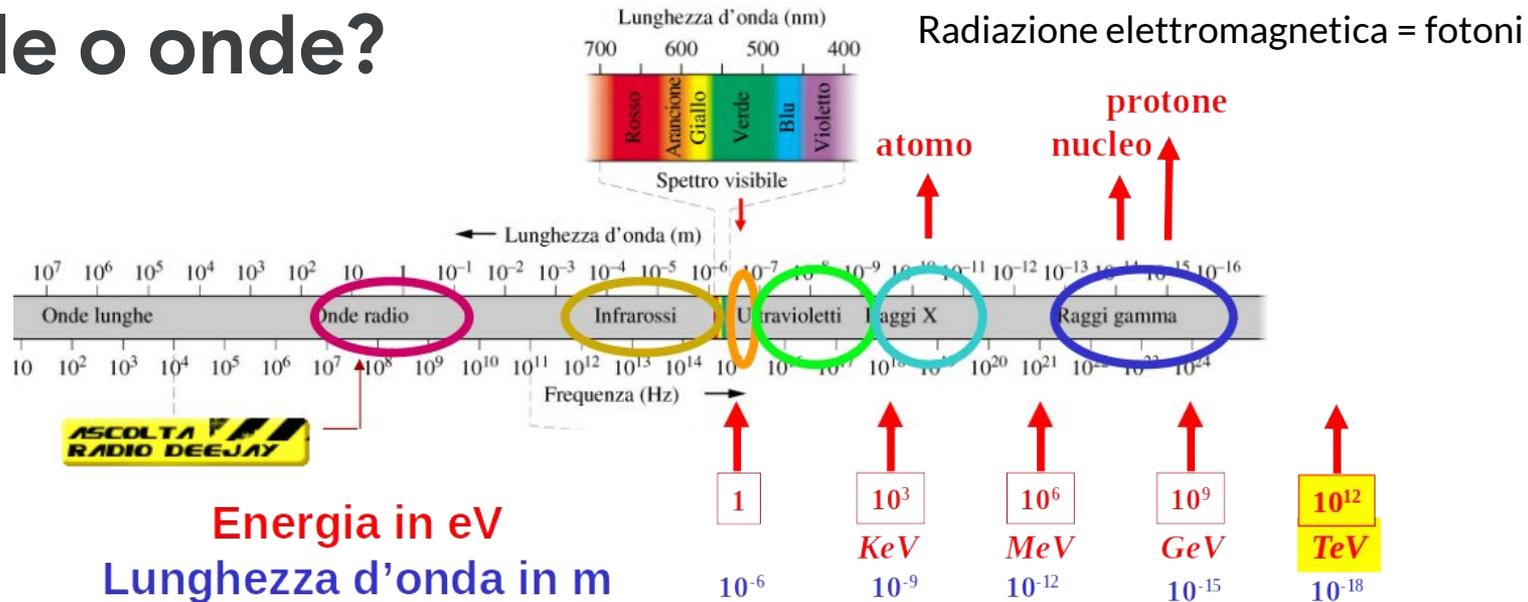
- Particelle accelerate nello spazio

Raggi cosmici

- Particelle accelerate artificialmente

Acceleratori di particelle

Particelle o onde?



eV= energia accumulata da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt

Meccanica quantistica: **dualismo onda-corpuscolo**

$E_\gamma = h \cdot f$ la radiazione e.m. trasporta quantità' discreta di energia

$\lambda = h/p$ le particelle hanno una lunghezza d'onda inversamente proporzionale al loro impulso

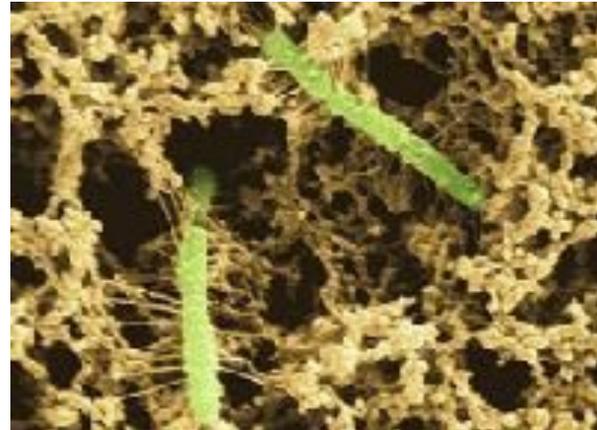
Capire cosa c'è all'interno della materia

Maggiore impulso ($\vec{p} = m \cdot \vec{v}$) delle particelle proiettile \rightarrow maggiore risoluzione spaziale (λ minore)

Microscopio elettronico usa un fascio di elettroni e permette di raggiungere risoluzioni ~ 1000 volte migliori dei microscopi ottici



Microscopio ottico (luce visibile)



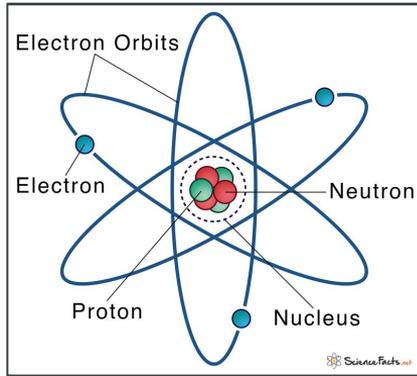
Microscopio elettronico (elettroni accelerati)

*un batterio ($\sim 10^{-6}$ m), *Lactobacillus delbrueckii*,*

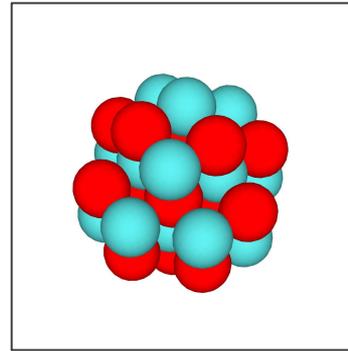
Proiettili quanto piccoli?



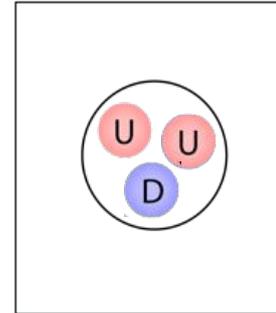
Pallina da tennis
~ 3.2 cm
~ 57 g



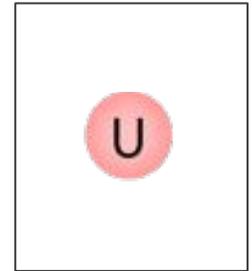
Atomo
~ 10^{-8} cm



Nucleo atomico
~ 10^{-12} cm



Protone
~ 10^{-13} cm
~ 10^{-24} g



Quark
~ 10^{-16} cm

Proiettili quanto energetici?

John Isner detiene record ATP dal 23/05/2016 (Coppa Davis US-Australia) del servizio più veloce al mondo:
253 km/h (71.1 m/s)

$$\text{Energia cinetica} = \frac{1}{2} mv^2$$

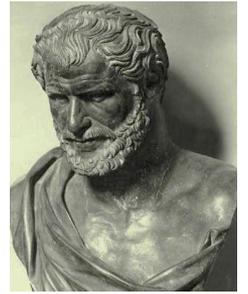
Isner ha impresso un' energia di 134 Joule alla pallina

I protoni più energetici visti nei raggi cosmici hanno una energia simile (100 J)



Le singole **particelle** elementari che usiamo attualmente **negli acceleratori hanno un'energia “piccola”** (< 0.000001 J) rispetto alla nostra esperienza quotidiana **ma enormemente concentrata**

Di cosa è fatta la materia?



- **400 A.C. Democrito**

Atomi: porzioni infinitesimali ed indivisibili della materia

- **XIX secolo : Mendeleev et al.**

Catalogati quasi 100 elementi diversi!

- **1897: J.J. Thomson**

Scoperta dell'elettrone da misure con tubi catodici

Tavola periodica degli elementi

A periodic table of elements with different colors for different groups: yellow for alkali and alkaline earth metals, cyan for transition metals, light blue for main group elements, and purple for noble gases. The lanthanide and actinide series are shown in a separate block at the bottom.

Atomo di Thomson a panettone = carica positiva distribuita uniformemente con elettroni all'interno



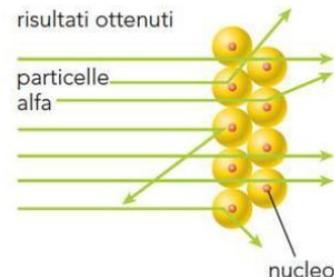
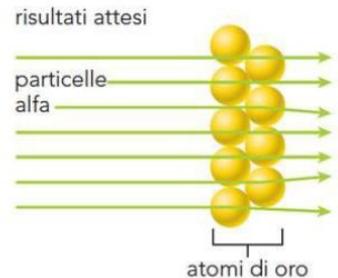
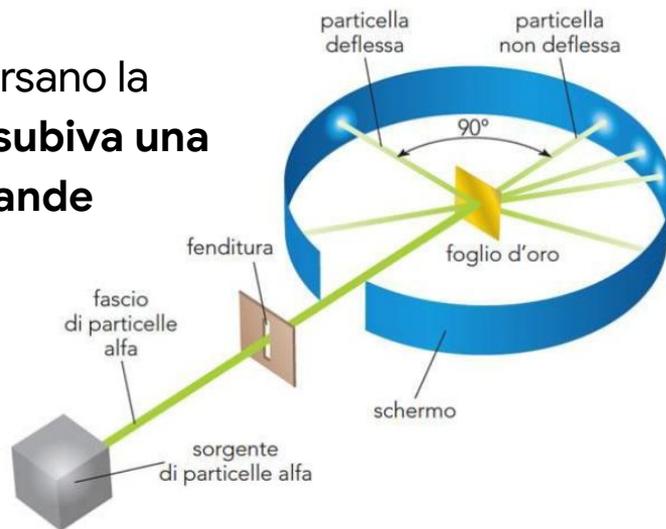
Esperimento di Rutherford

1911: Rutherford utilizza un fascio di particelle alfa (atomi di elio privati di 2 elettroni) contro un bersaglio d'oro

Quasi tutte le particelle (99%) attraversano la lamina senza essere deviate ma l'**1% subiva una deviazione con un angolo molto grande**

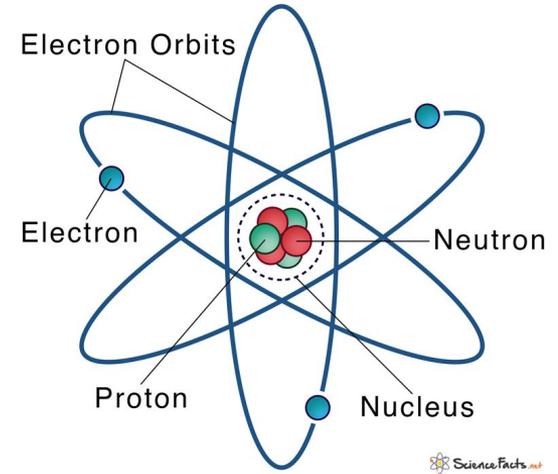
In contrasto con modello atomico di Thomson

Nocciolo duro... il nucleo!



Evoluzione del concetto di atomo

- **1913: Niels Bohr**
Atomo = micro-sistema planetario con protone al centro ed elettrone che gira intorno
- **1932: J. Chadwick**
Scoperta del neutrone da misure di emissione da Be.



elettrone (0.5 MeV), **protone** (938.3 MeV), **neutrone** (939.6 MeV) spiegano la tavola periodica degli elementi chimici di Mendeleev, ma non risolvono tutti i problemi !

“Tutta la materia formata da 3 particelle elementari”

Antimateria e neutrino

1927 : P.A.M. Dirac

prevede esistenza positrone (e^+), antiparticella dell'elettrone!

1930: W. Pauli

Da decadimento β dei nuclei prevede esistenza del neutrino ν :
(spiegato da Fermi nella teoria delle interazioni deboli ed
osservato nel 1956 da Cowan-Reines)



β^- decay



Raggi cosmici

I raggi cosmici sono una sorgente naturale di particelle di altissima energia. A terra arrivano sciame di particelle prodotte dagli urti dei primari (elettroni, protoni, nuclei, gamma) con i nuclei dell'atmosfera.



- **1935 : H. Yukawa**

Forza attrattive nucleare legate alla esistenza di una particella massiva chiamata pione (massa ~ 100 MeV).

- **1937:** osservata particella ~ 100 MeV, ma... non è il pione previsto da Yukawa!

- **1945: Conversi , Pancini , Piccioni**

... interagisce poco! Scoperta del muone nei raggi cosmici!

- **1947: Lattes, Occhialini, Powell et al.**

Osservazione del pione tramite raggi cosmici



Camere a nebbia



Aria soprassatura di vapore acqueo
Le particelle lasciano una traccia “condensando” il gas

Ma impossibilità di controllare le energie e ... quanta pazienza !

Accelerare le particelle

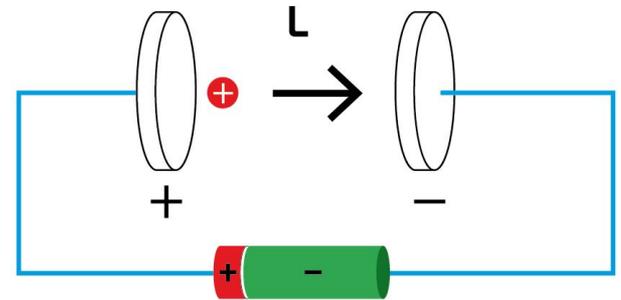
Partiamo da elettroni e protoni:

- **Elettroni** prodotti da riscaldamento di filamenti
- **Protoni** prodotti da ionizzazione dell'idrogeno tramite forti campi elettrici

Accelerazione avviene tramite campo elettrico
(proporzionale alla differenza di potenziale ΔV)

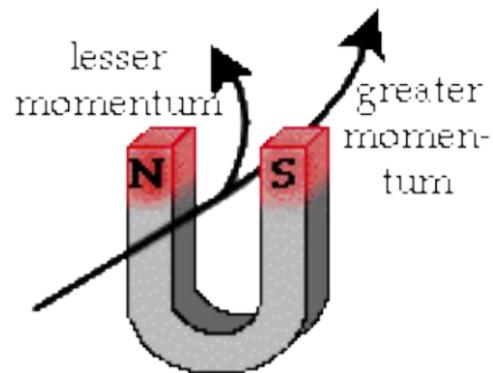
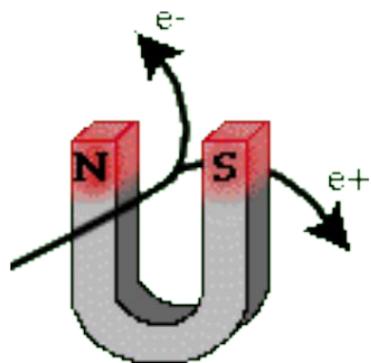
$$m \cdot a = F \propto q \cdot \Delta V$$

$$a \propto q/m \cdot \Delta V$$



Curvare le particelle

Il campo elettrico ci permette di accelerare la particella, con il campo magnetico riusciamo a **curvarne la traiettoria**

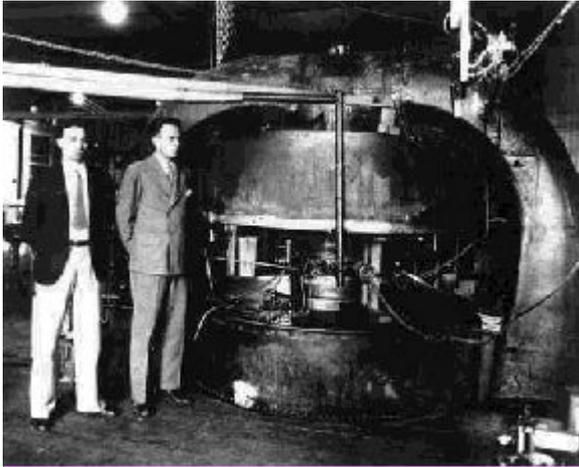


Più è alto il momento (massa x velocità) della particella e più deve essere grande il campo magnetico per avere la stessa curvatura!

Le dimensioni degli acceleratori aumentano con l'energia

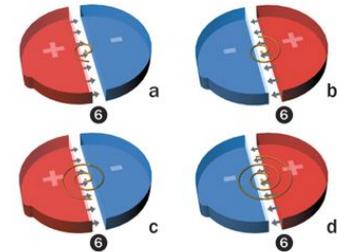
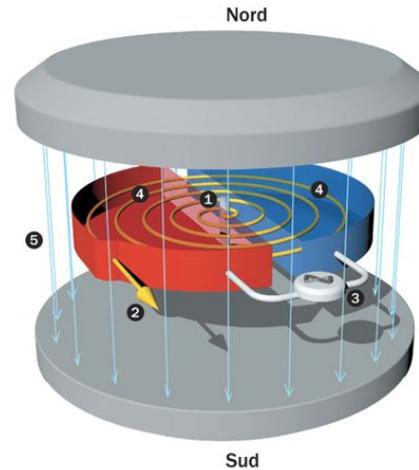
Acceleratore con campi magnetici

Idea: curvare le particelle su una traiettoria circolare, facendole ripassare molte volte nello stesso sistema accelerante



Il Ciclotrone di E. Lawrence (1931)

protoni fino a 20 MeV (α da elementi radioattivi ~ di qualche MeV)

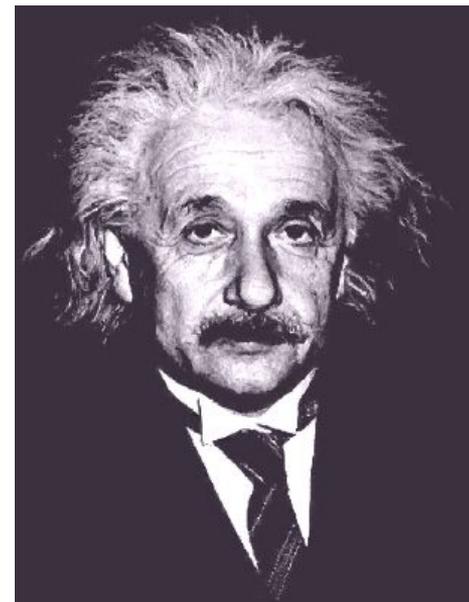


1. sorgente di ioni positivi
2. fascio di ioni positivi
3. generatore di tensione a radiofrequenza
4. elettrodi a forma di D ("dee's")
5. campo magnetico
6. campo elettrico

Una parentesi teorica

Una delle predizioni più importanti della Teoria della Relatività Ristretta (1905) è racchiusa nella famosa relazione fra Energia e Materia

$$E = mc^2$$



Energia e Materia sono due aspetti diversi di una stessa cosa!
La materia si può trasformare in energia e viceversa $m = E/c^2$

Se si è in grado di concentrare molta energia, come per es. nell'urto violento fra due particelle, dopo l'urto possono apparire "pezzetti di materia" (particelle) che non esistevano prima dell'urto

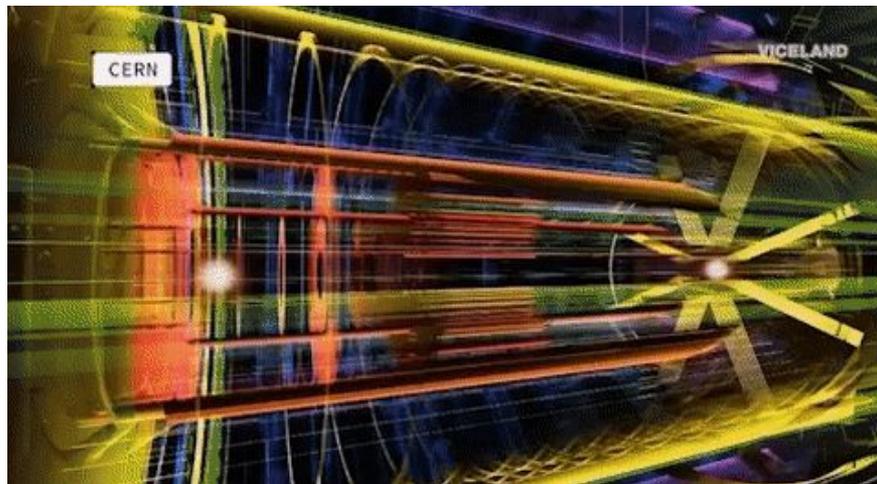
La materia NON compare dal nulla, ha origine da una trasformazione dell'energia.
L'energia NON sparisce nel nulla, si materializza.

Cosa avviene in un urto tra particelle

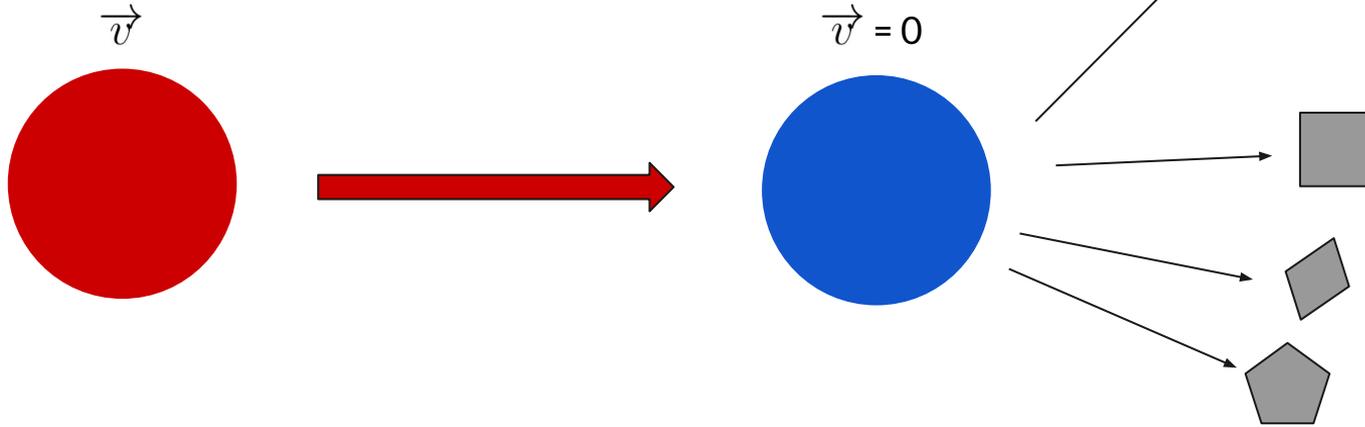
Due protoni vengono fatti urtare fra loro ad alta energia (accelerati da un acceleratore)

Nell'urto, **una parte dell'energia cinetica dei protoni si trasforma in materia** (e antimateria)

Lo studio dei prodotti della collisione ci dà informazioni per capire cosa è avvenuto (interazione) e se sono state eventualmente **prodotte nuove particelle**.

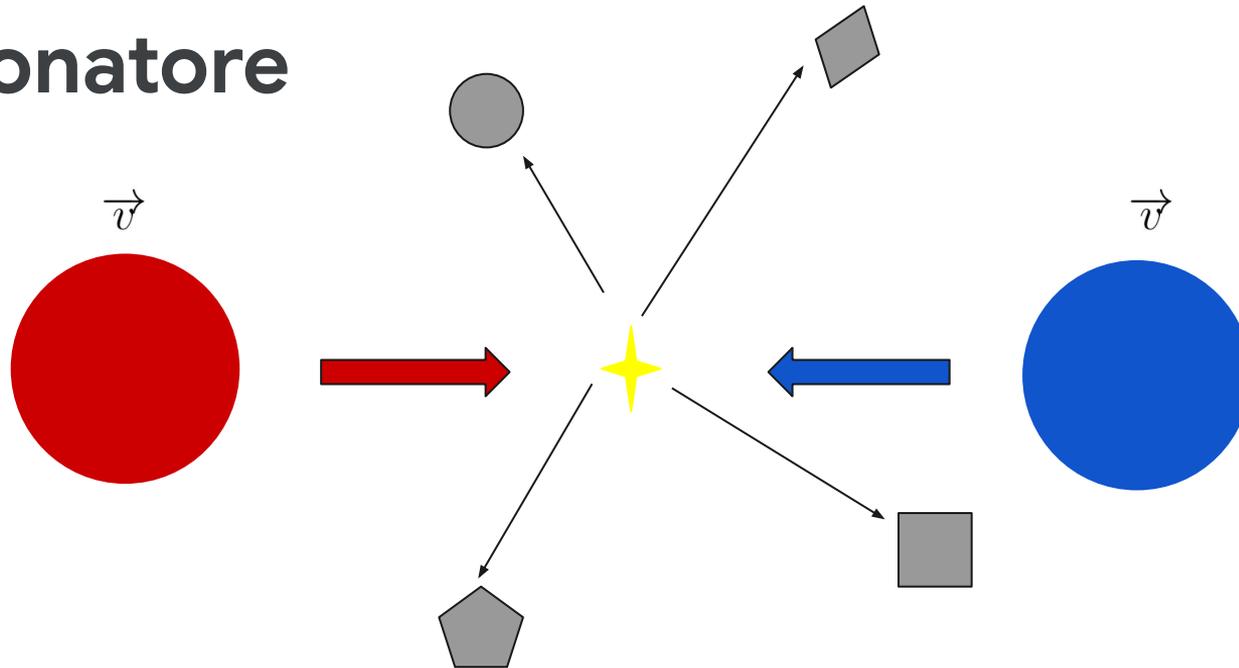


Bersaglio fisso



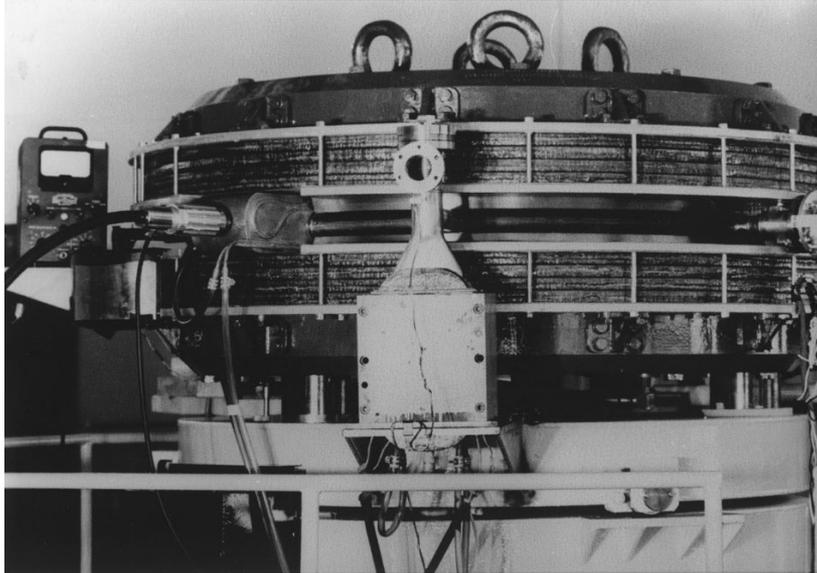
Energia + 0
Energia del centro di massa = $\sqrt{2 \cdot m \cdot \text{Energia}}$

Collisionatore

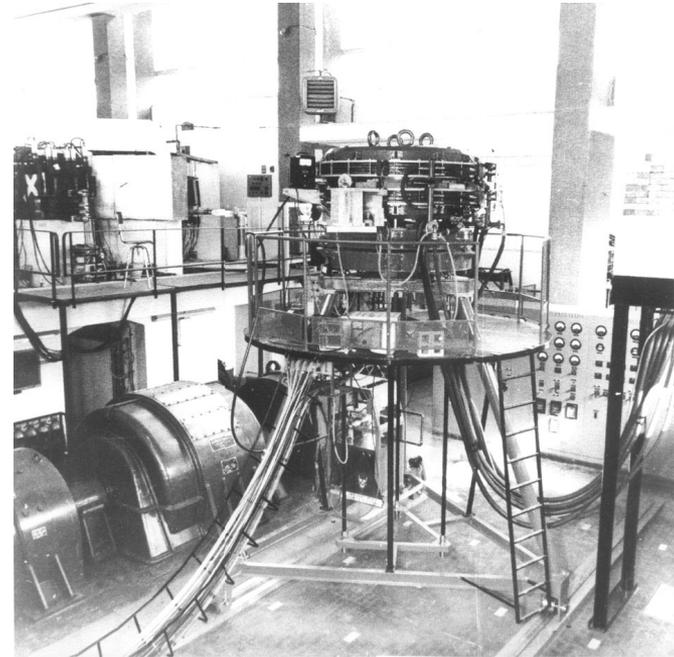


Energia + Energia
Energia del centro di massa = $2 \cdot$ Energia

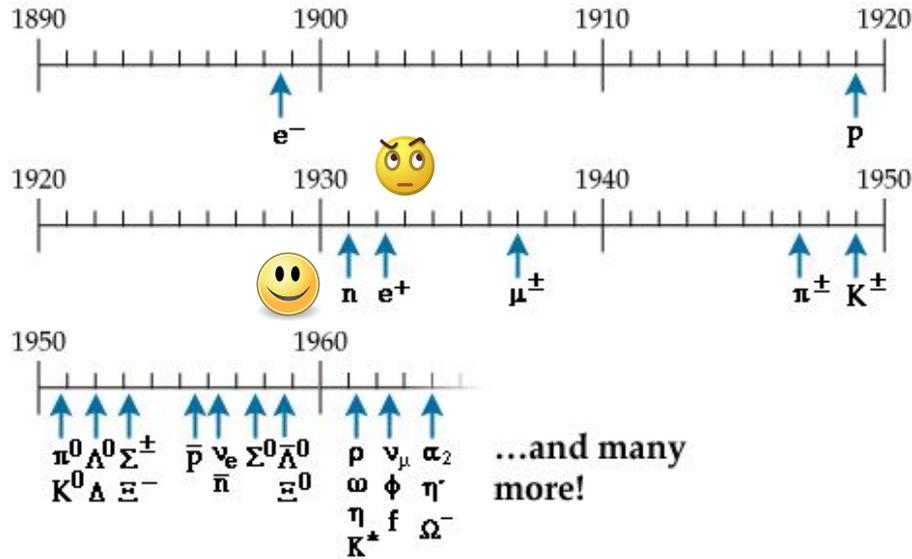
Il primo Collisionatore



ADA
Il primo Collisionatore al mondo!
(INFN - Frascati 1965)



Scoperta di nuove particelle



Con l'avvento degli acceleratori in breve tempo il numero delle particelle scoperte esplose!

Possibile che siano tutte elementari?

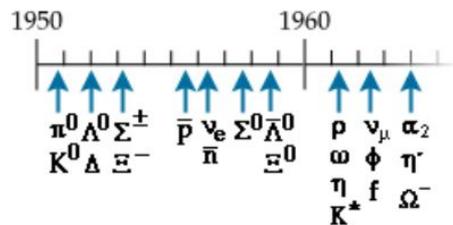
Verso il Modello Standard

Mendeleev (1869)

Tavola periodica degli elementi

The image shows Mendeleev's periodic table of elements, color-coded by groups. The groups are labeled with Roman numerals I through VIII. The elements are arranged in rows and columns, with their symbols and names. The table is divided into several blocks: s-block (groups I and II), p-block (groups III to VIII), d-block (transition metals), and f-block (lanthanides and actinides).

→ e, p, n

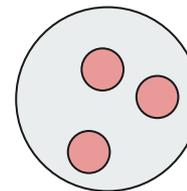


Gell-Mann
Zweig (1963)

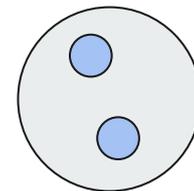
→ u, d, s

Osservazioni compatibili con
stati formati da 2/3 quark

I quark non esistono liberi, ma sono
confinati nei **barioni** o **mesoni**



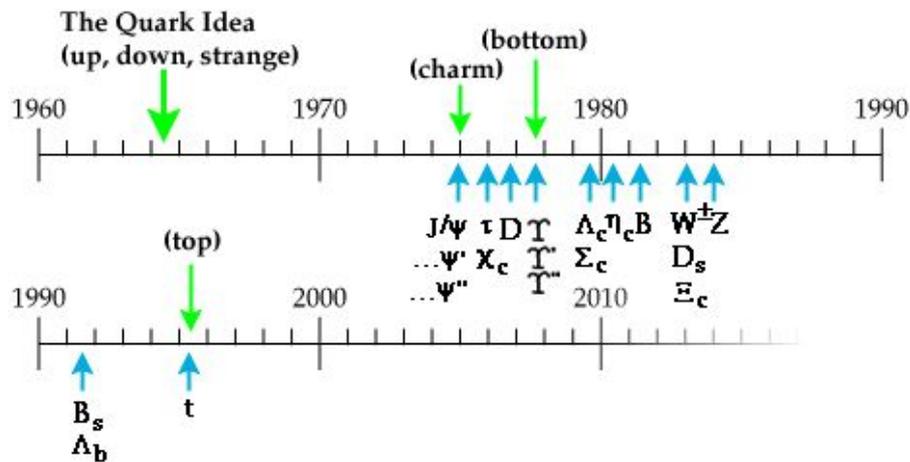
BARIONI



MESONI

Verso il Modello Standard

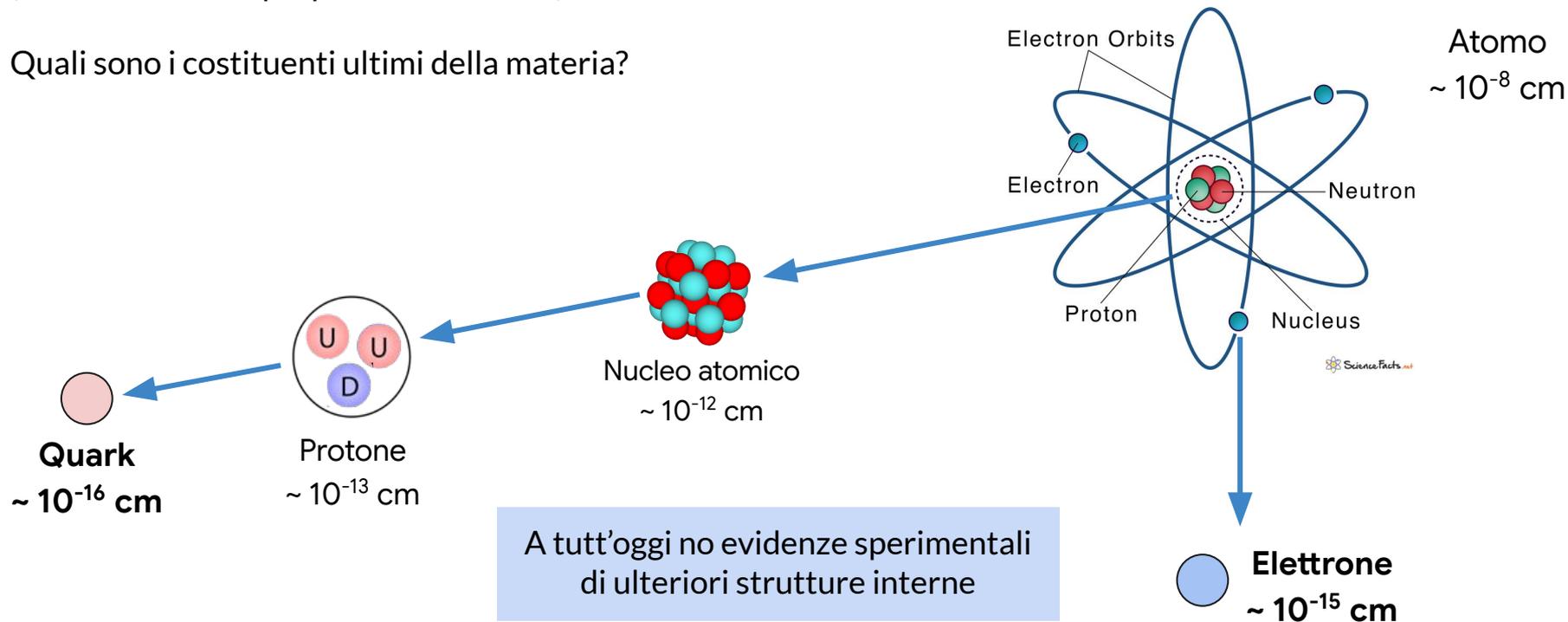
- Anni '70 Glashow, Weinberg, Salam: teoria elettrodebole – quadro unificato per le interazioni elettromagnetica e debole, esistono equivalenti pesanti del fotone! Bosoni **W** e **Z**
- 1982 CERN (Rubbia): al CERN scoperta dei bosoni **W** e **Z** in un collider p-p ~300 GeV per fascio
- 1975-1995 : scoperta dei quark pesanti (c, b, t) e del terzo leptone (τ)



Verso il Modello Standard

Che cosa abbiamo capito da Democrito (2400 anni fa) passando per Mendeleev (153 anni fa) e Thomson (modello a muffin proposto 118 anni fa), fino al Modello Standard?

Quali sono i costituenti ultimi della materia?



Modello Standard

Descrive tre delle quattro **interazioni fondamentali**:

1. Forte
2. Elettromagnetica
3. Debole

e tutte le **particelle elementari**!

La materia che più comunemente conosciamo è fatta di atomi fatti di **protoni**, **neutroni** e **elettroni**, quindi quark u, d e elettroni

Particella prevista dal modello per dare 'massa' alle altre particelle osservata a LHC nel 2012!

Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

QUARKS (I, II, III)

LEPTONS (e, μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ)

GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (g, γ , Z, W)

SCALAR BOSONS (H)

E noi esseri umani di cosa siamo fatti?

Un protone ($q=1$) $+2/3$ $+2/3$ $-1/3$
  

Un neutrone ($q=0$) $+2/3$ $-1/3$ $-1/3$
  

Un elettrone ($q=-1$)  -1

Siamo fatti in maggioranza di quark u!

Elemento	Percentuale di massa ^[2]
Ossigeno	65
Carbonio	18
Idrogeno	10
Azoto	3
Calcio	1.5
Fosforo	1.2
Potassio	0.2

VIA	
ossigeno	9
16	19

Siamo fatti in maggioranza di quark u!

Z	%	protoni	neutroni	elettroni	quark u	quark d
O	65	8	8	8	16+8	8+16
C	18	6	6	6	12+6	6+12
H	10	1	0	1	2	1
Totale	93	638	628	638	1904	1894

Modello Standard

Per "comporre" però tutte le particelle scoperte abbiamo bisogno anche di altre due "famiglie" di quark e leptoni

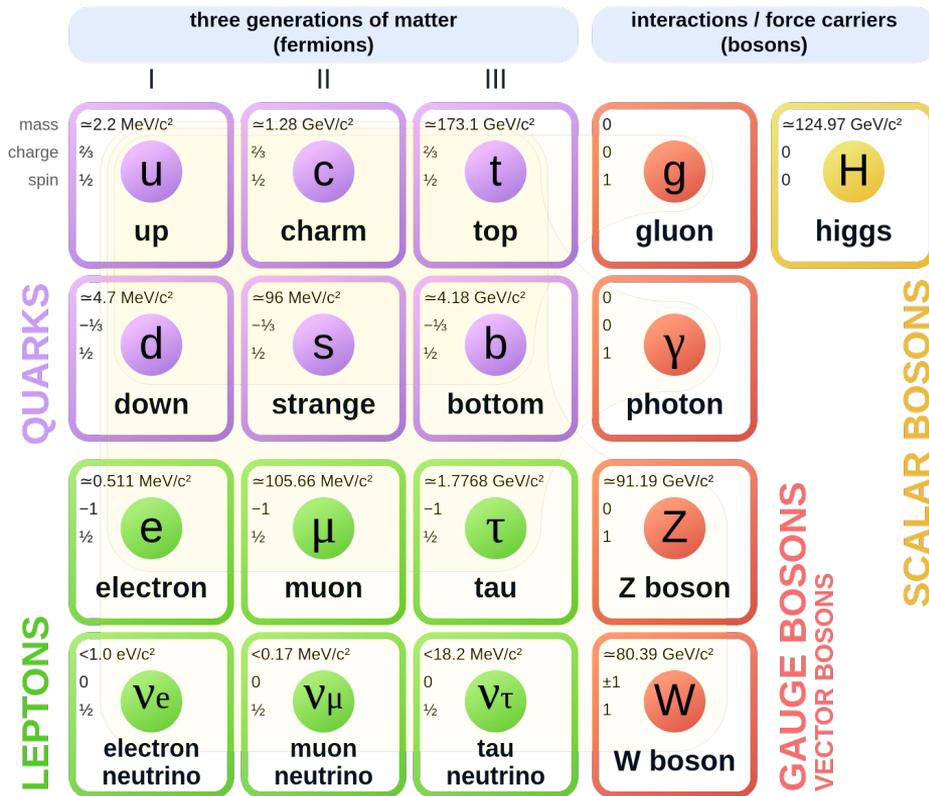
i 6 quark si chiamano:

- Up
- Down
- Strange ("strano")
- Charm ("fascino")
- Bottom
- Top

i 3 leptoni:

- Elettrone
- Muone
- Tauone
- (e ognuno ha un "suo" neutrino)

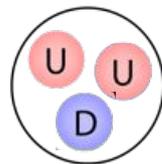
Standard Model of Elementary Particles



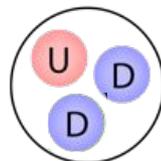
Barioni e mesoni

Ci sono tanti barioni non solo il protone e il neutrone!

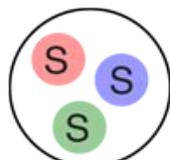
I barioni con il quark **S** sono detti “strani”



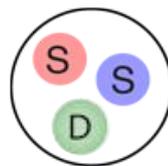
Proton



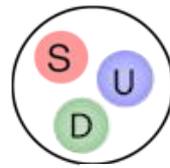
Neutron



Ω^-



Ξ^-

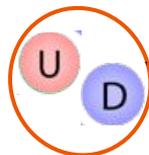


Λ

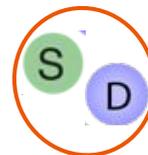
Ci sono anche tanti mesoni!

I più semplici sono composti dai quark up e down

Anche i mesoni contenenti quark **S** sono detti strani!



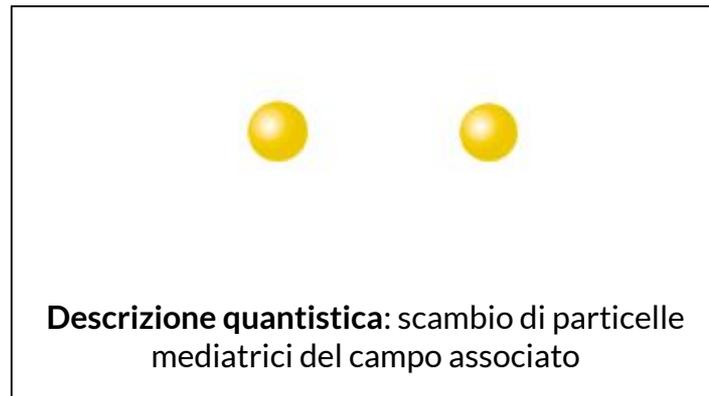
π



K^0

Interazioni tra particelle

Le Forze, o interazioni, fra i costituenti elementari (quark e leptoni) vengono descritte nella fisica moderna come l'effetto prodotto dallo scambio di particelle "virtuali", i bosoni vettori intermedi



Lo scambio di Energia-Impulso fra i costituenti genera una interazione
La sorgente della Forza è la "carica", il mediatore è il bosone vettore intermedio

| elettrica
"carica" | di colore
| debole

fotone
8 gluoni distinti
W+ W- Z0

QED (Quantum Electro Dynamics)
QCD (Quantum Chromo Dynamics)
QFD (Quantum Flavour Dynamics)

Oltre il modello standard?

Il Modello Standard e' stato sottoposto negli ultimi 30 anni a test sempre più stringenti! Per il momento se l'è sempre cavata bene... (= è capace di predire ciò che osserviamo)

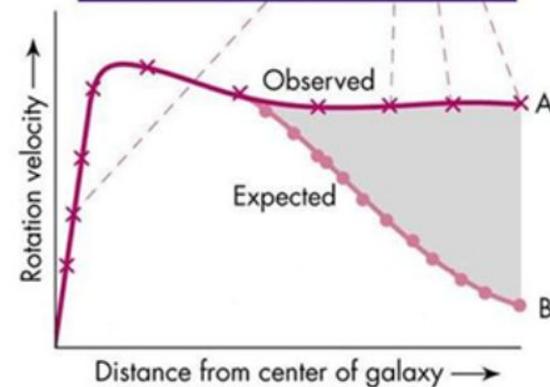
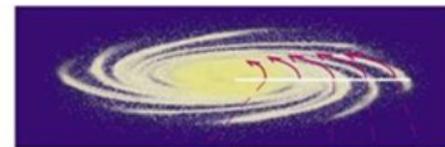
Nonostante questo una serie di domande aspettano ancora risposta (per esempio):

- Come integrare la teoria della gravità (Einstein) con il Modello Standard (4 forze, solo tre nel modello standard)?
- Perché proprio 3 famiglie e perché con masse così diverse?
- Simmetria leptoni-quark segno di una sottostruttura ulteriore ?
- Perché le tre forze hanno forze relative così diverse fra loro?
- Perché nell'Universo c'è 'solo' materia (e non metà materia e antimateria?)
- e ... davvero questo è tutto quello che c'è nell'Universo?

Materia oscura

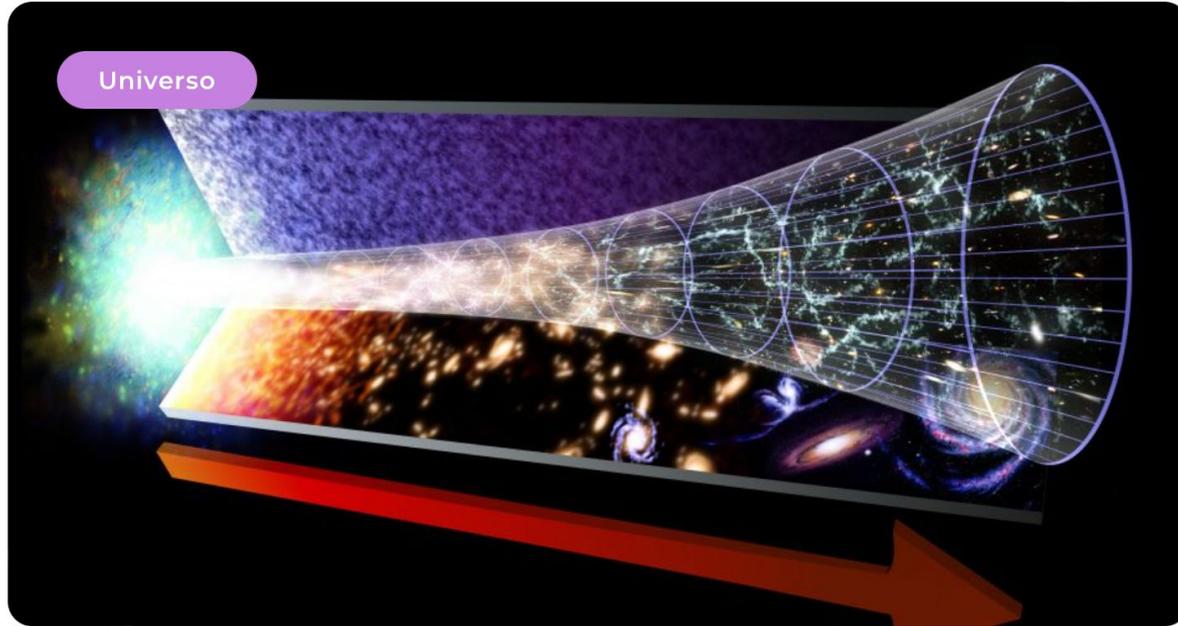
Se la materia fosse solo quella visibile, i bracci delle galassie ruoterebbero a velocità minore!

C'è dell'altra materia/massa che non sappiamo di cosa è fatta!

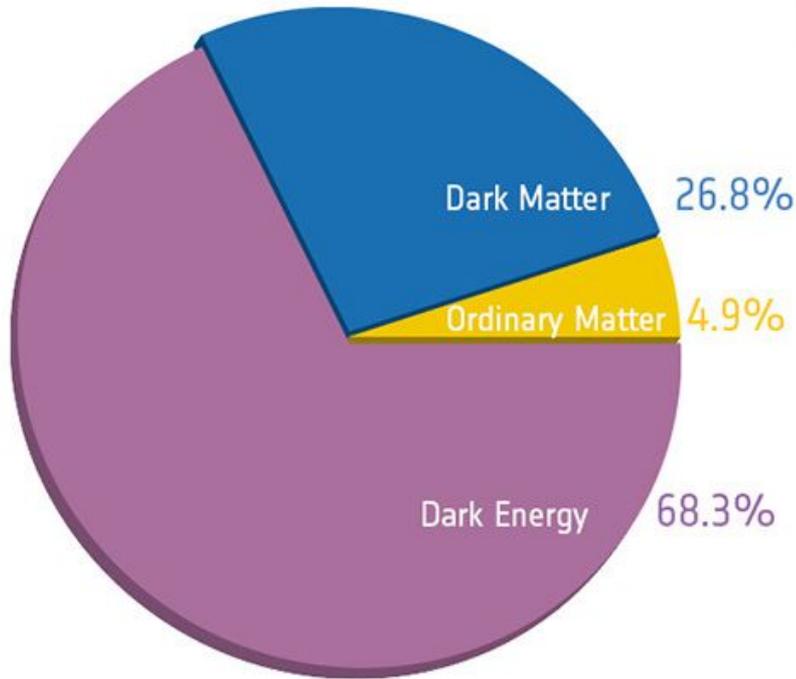


Energia oscura

La velocità con cui l'Universo si sta espandendo sta crescendo. Ci vuole una "spinta", una energia oscura che sostenga questo processo!



Materia/Energia oscura



Sommario

- Abbiamo capito perché con le particelle scrutiamo l'interno della materia
- Abbiamo capito che gli acceleratori permettono di 'fabbricare' fasci di particelle
- Abbiamo capito di cosa è fatta la materia (quark e leptoni) e le forze fondamentali che agiscono tra di loro

Il Modello Standard descrive bene tutto ciò ma non spiega tutto...



Per andare oltre il Modello Standard ci vuole LHC!

CERN

C Conseil
E Européen
pour la
R Recherche
N Nucléaire

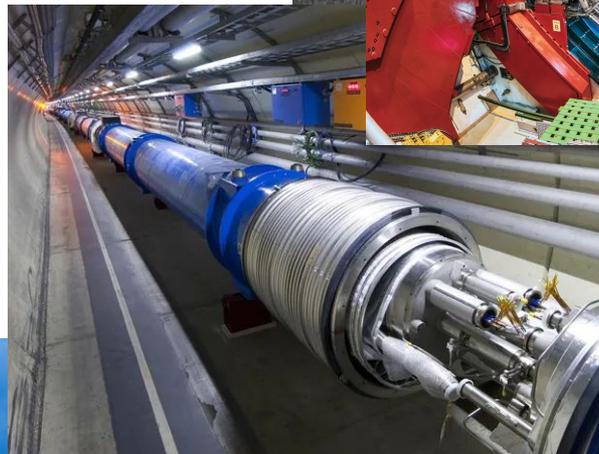
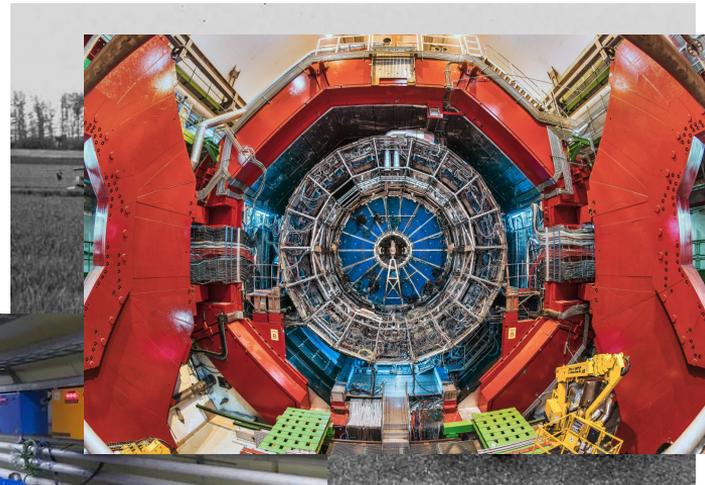
European
Organization for
Nuclear
Research



CERN

C Conseil
E Européen
R pour la
R Recherche
N Nucléaire

European
Organization for
Nuclear
Research

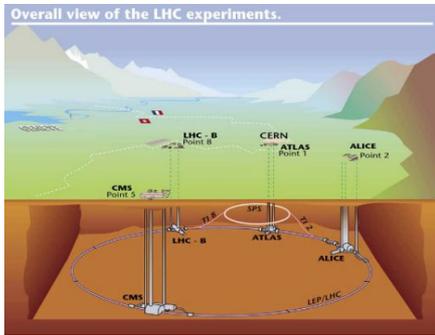


2023



LHC: Large Hadron Collider

Il *Large Hadron Collider* (LHC) è un acceleratore di adroni che si estende per circa 27 km



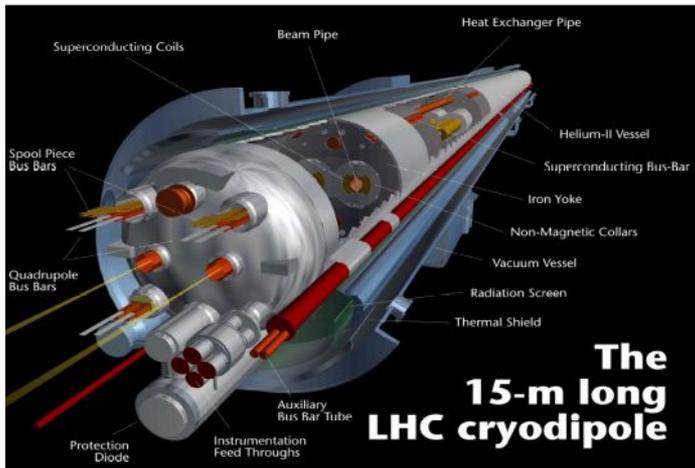
100 m

- ATLAS
- CMS
- LHCb
- **ALICE**



Il tunnel

1232 magneti dipolari superconduttori



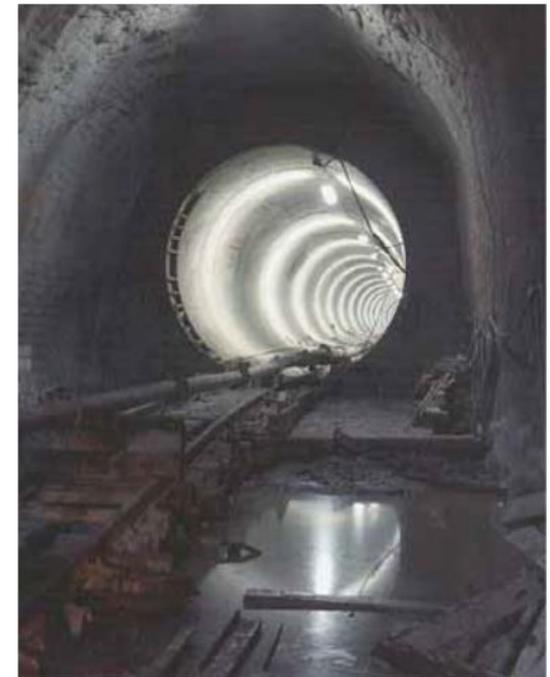
$B = 8.3 \text{ Tesla}$

$\text{Temp.} = 1.9 \text{ }^\circ\text{K}$
 $= -271.3 \text{ }^\circ\text{C}$

$\text{Peso} = 35 \text{ Ton.}$



Scavo del tunnel di LEP
usato anche per LHC



LHC è il più esteso frigorifero mai costruito dall'uomo!

Il tunnel



Curiosità

- Quanta energia c'è in un fascio di LHC ?

Energia del protone = 7 TeV = 11.2×10^{-7} Joules / protone
 1.1×10^{11} protoni in un bunch $\rightarrow 1.2 \times 10^5$ Joules / bunch
2808 bunches $\rightarrow \sim 3.4 \times 10^8$ Joules = 340 MJ

Corrisponde all'energia cinetica posseduta da un treno ad alta velocità (treno da 400 ton.) alla velocità di 150 Km / h

- quando LHC è acceso consuma energia elettrica come tutta Ginevra!



Curiosità

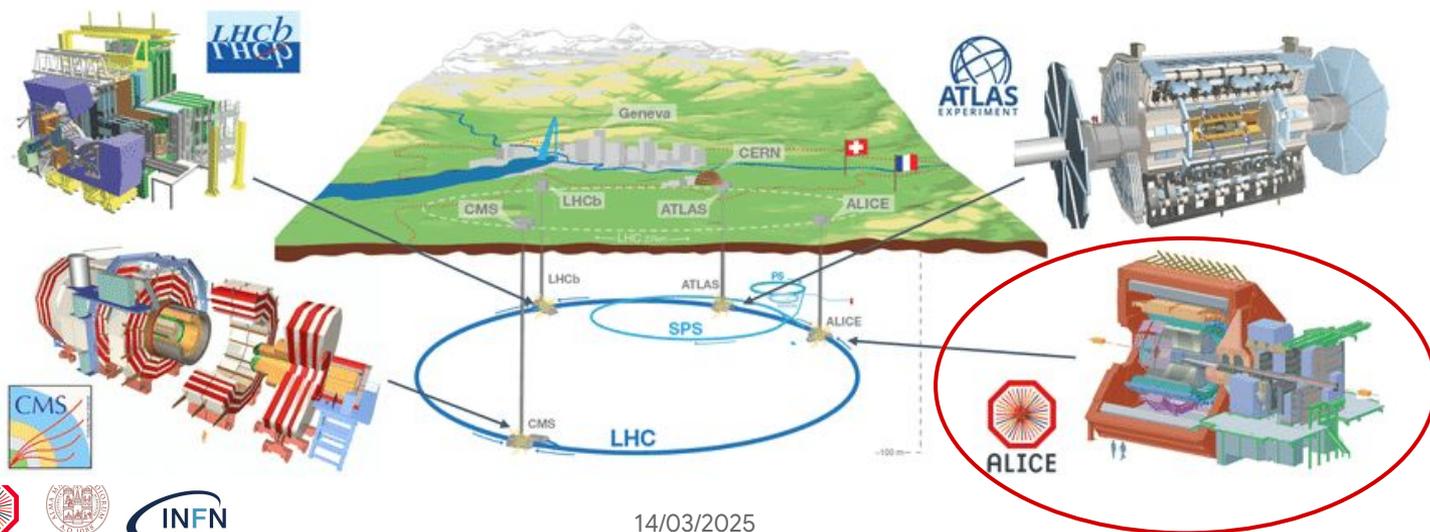
- Un protone accelerato in LHC che gira per dieci ore senza scontrarsi mai quanta distanza percorre?
Un protone di energia 7 TeV raggiunge quasi la velocità della luce: 300000 km/s
 $10 \text{ ore} = 3600 \times 10 = 36000 \text{ s}$
 $300000 \times 36000 = 10.8 \text{ miliardi di km}$

distanza Terra - Plutone
varia tra 4.2 e 7.5 miliardi di km!
Eris è a circa 10.2 miliardi di km!

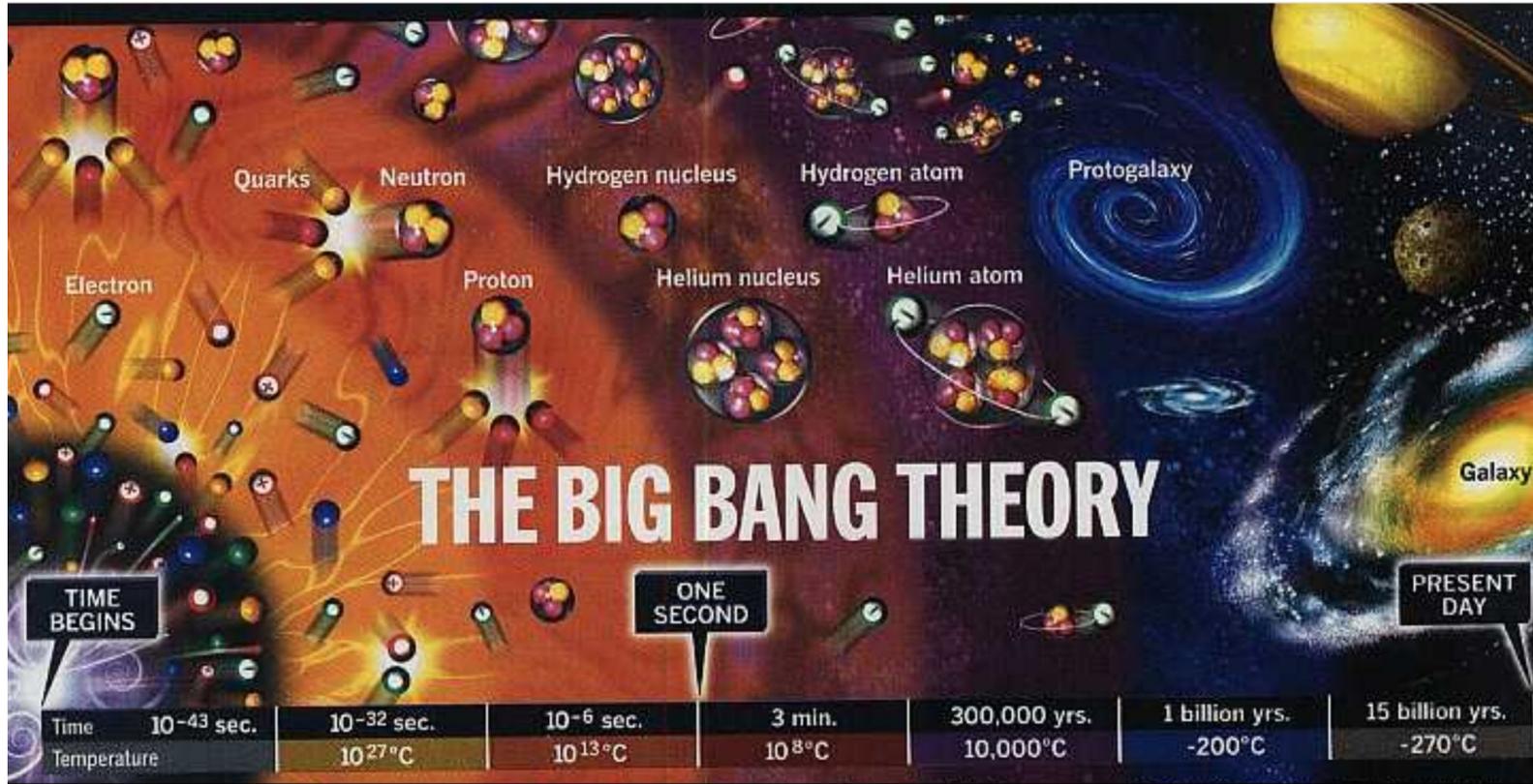


Cosa studiano i 4 esperimenti di LHC?

- ATLAS/CMS: ricerca/studio bosone di Higgs e in generale studio processi e particelle previste da estensioni modello standard (supersimmetrie in particolare)
- LHCb: processi rari alla base dell'asimmetria tra materia e antimateria osservata nell'Universo
- **ALICE**: studio urti nucleo-nucleo (alta densità di energia). Stato materia dove i quark possono essere 'liberi'... (e non intrappolati dentro barioni e mesoni)



Riprodurre il Big Bang



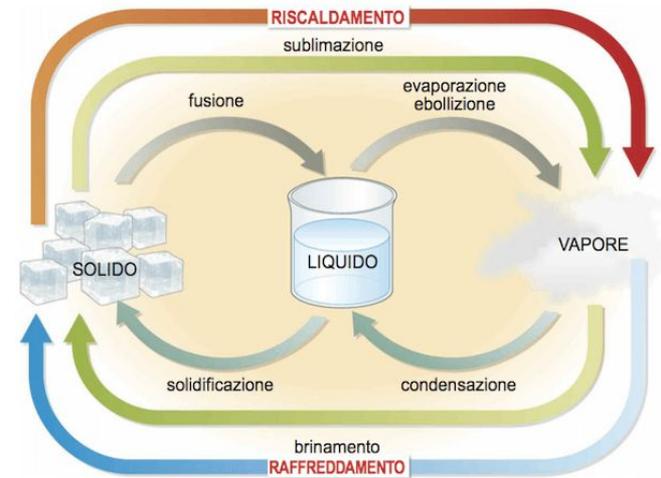
“Little” Bang

A LHC durante la collisione e per istanti brevissimi si raggiungono quindi temperature di **migliaia di miliardi di gradi** (quelle che c'erano alcuni microsecondi DOPO il Big Bang)

Il Sole ha una temperatura superficiale di 5700 gradi e di 15 milioni di gradi nel nucleo

Questo stato della materia si raffredda immediatamente: noi studiamo indirettamente che è “successo qualcosa”: si parla di **transizione di fase** della materia.

Tutti noi siamo familiari con le transizioni fase!
Pensiamo all'acqua!



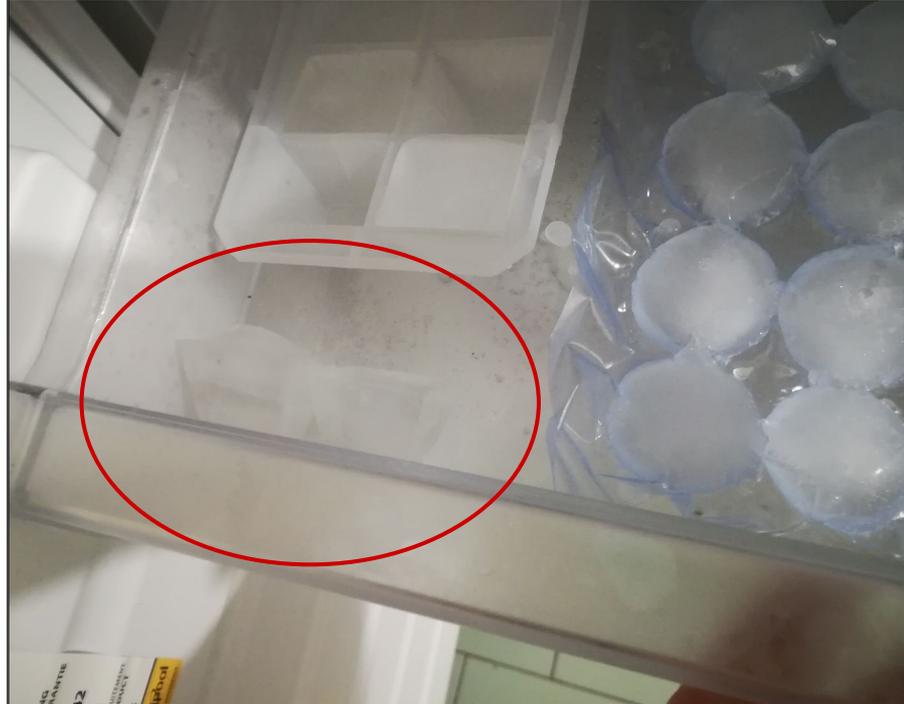
Osservazione indiretta

Se torno a casa dopo le vacanze e il microonde lampeggia (c'è stato un black out), come faccio a decidere se devo buttare la carne nel freezer?

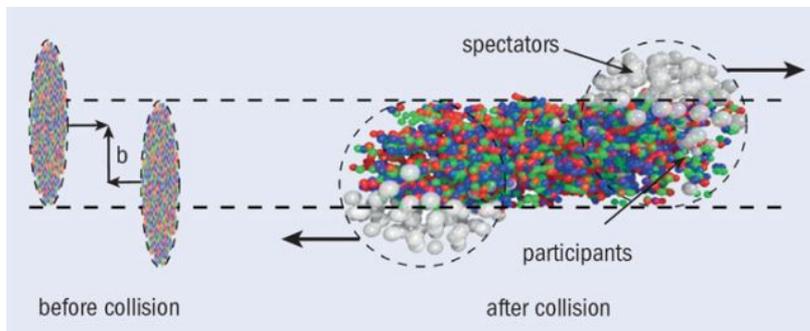


Osservazione indiretta

Se torno a casa dopo le vacanze e il microonde lampeggia (c'è stato un black out), come faccio a decidere se devo buttare la carne nel freezer?

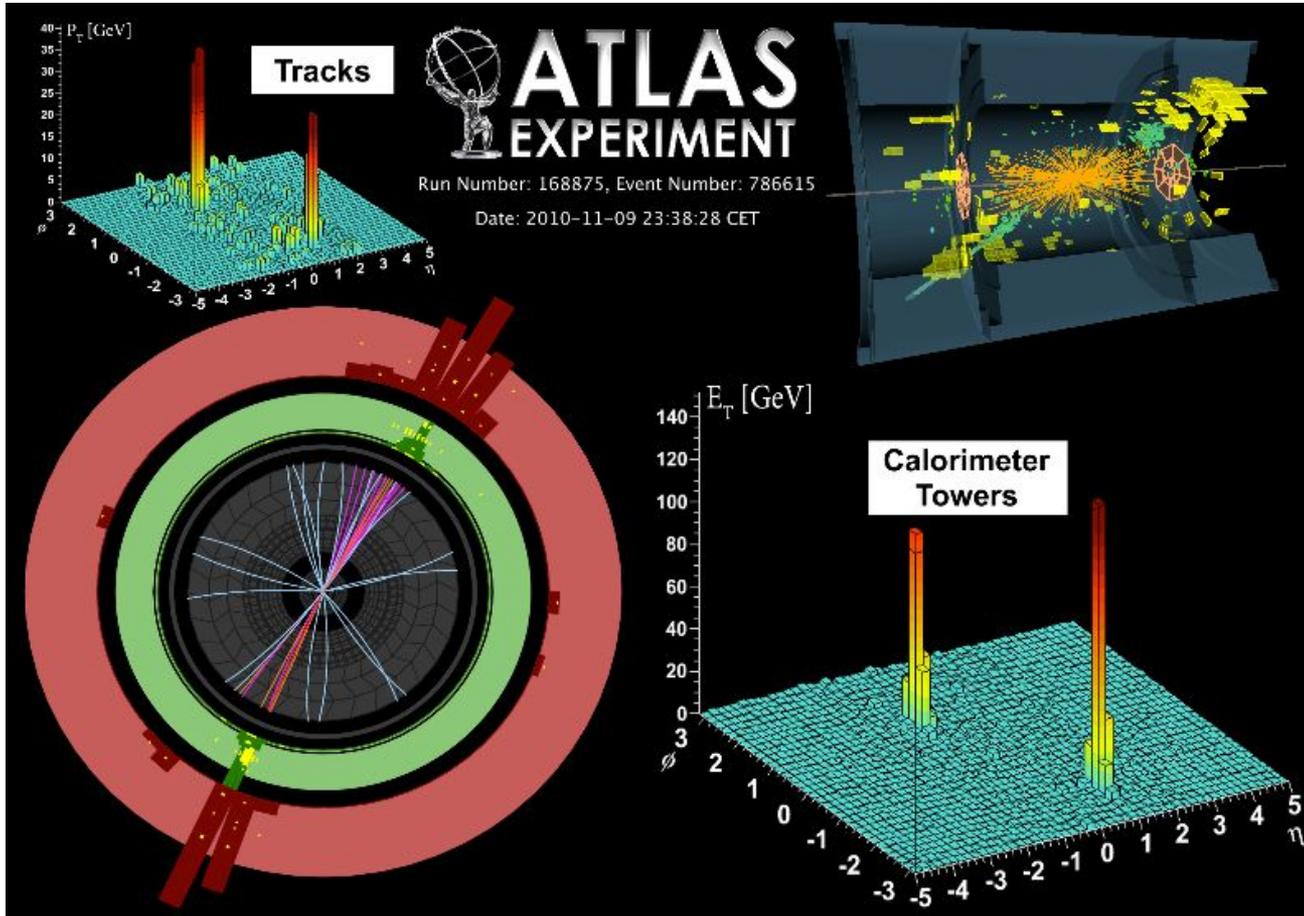


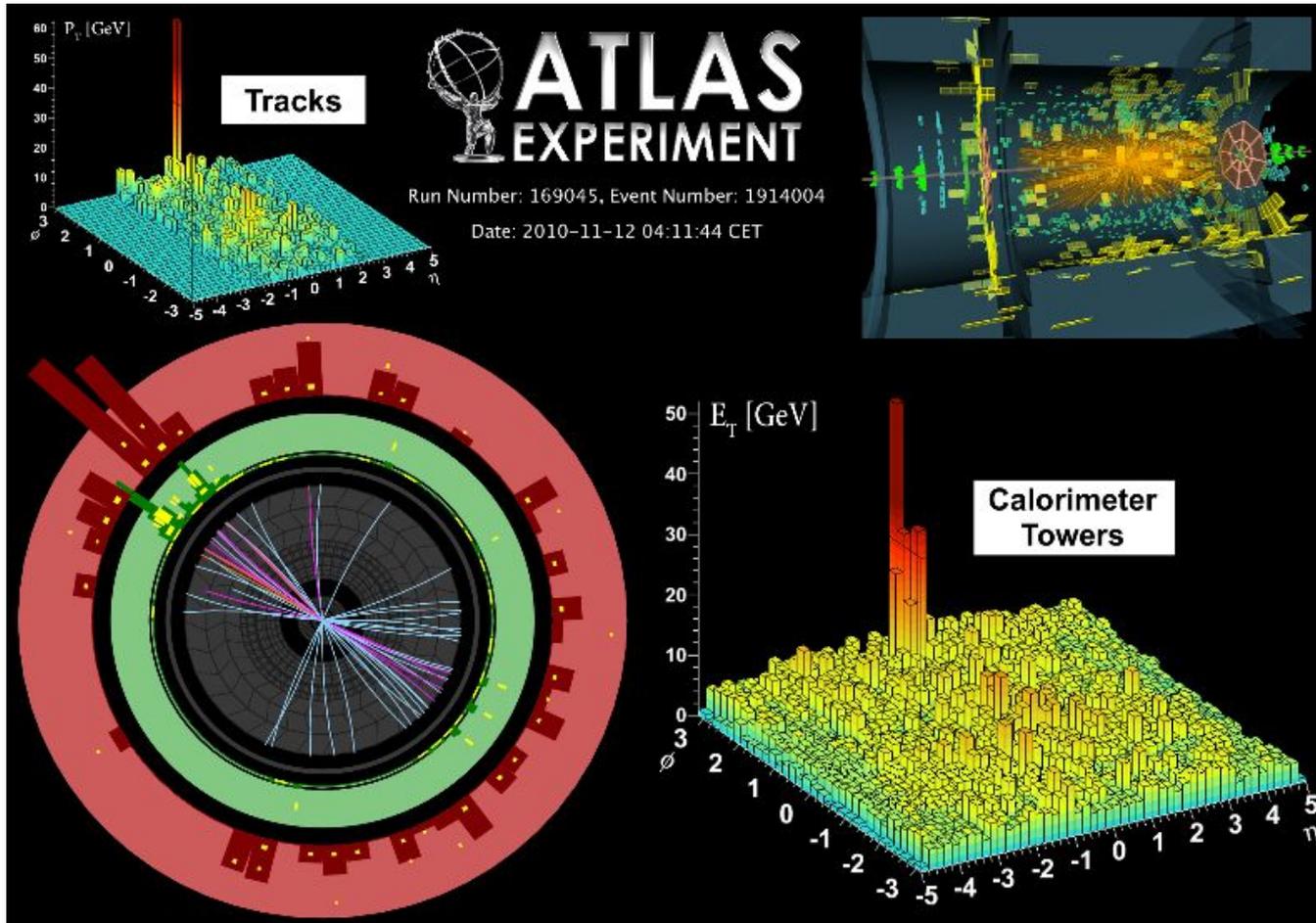
Caratteristiche della collisione: centralità



Alcuni esempi

1. Jet quenching: perdite di energia nel plasma "eventi sbilanciati"
2. Aumento di stranezza: per l'alta energia oltre al quark u e d, si creano anche tanti quark s si formano più particelle "strane" (= con anche il quark s)





Aumento di stranezza

Aumentando densità di energia (il numero di nucleoni coinvolti, la centralità) nella "zuppa" di quark e gluoni si formano più coppie di quark s e \bar{s}

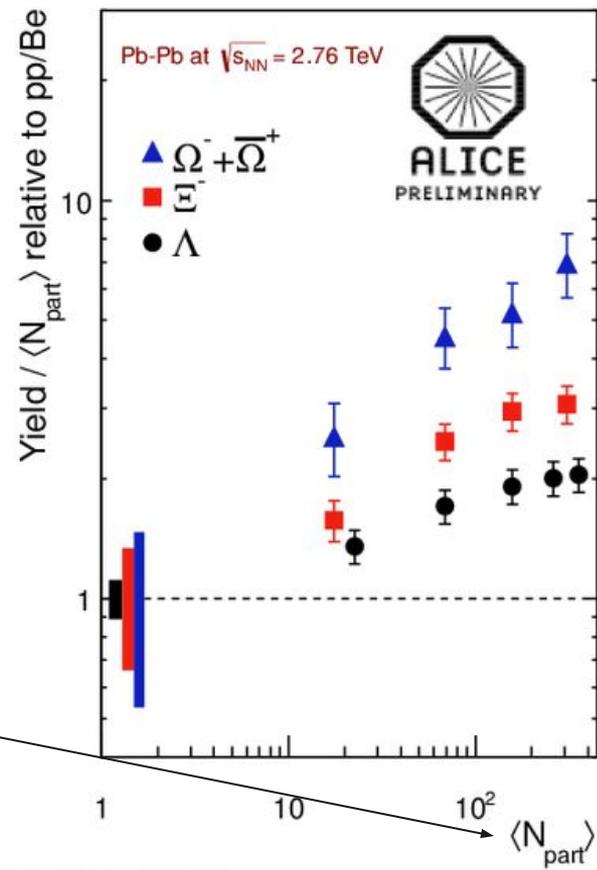
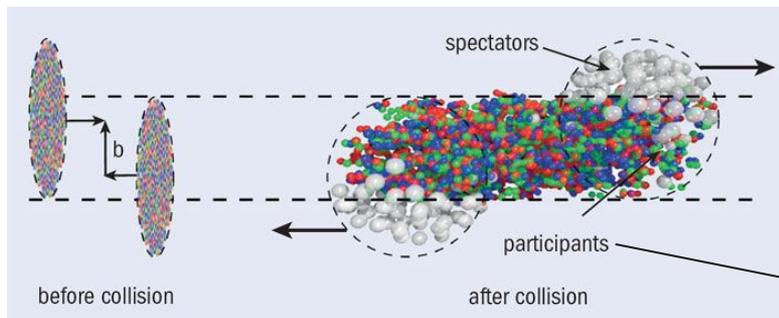
Il quark s "pesa" un po' di più che i quark u e d , ma l'energia necessaria per crearli è minore nel plasma e ci sono vari meccanismi di produzione per creare quark s

Che succede alla produzione di particelle come K (us o ds) e Λ (uds) che possiamo osservare nell'evento?

mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name→	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom

Aumento di stranezza

La produzioni di barioni e mesoni “strani” rispetto alle collisioni tra protoni (no plasma) è maggiore e cresce all’aumentare della centralità della collisione!



ALI-PREL-43104

Sommario finale

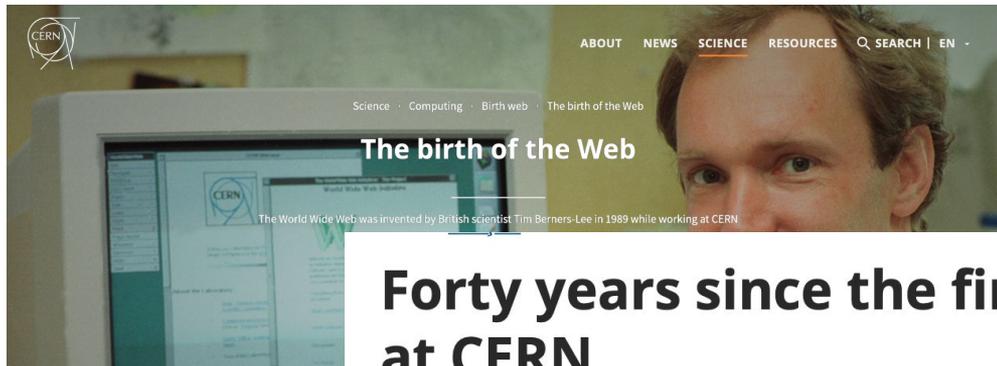
- Perché servono le particelle per studiare la materia?
- A cosa servono e come funzionano gli acceleratori di particelle?
- Come è fatto LHC e cosa studiano i 4 rivelatori di LHC?
- In che senso con LHC “ricreiamo le condizioni del Big Bang”?
- Come si capisce ad ALICE se il "quark-gluon plasma" si è formato? Chi sono i nostri cubetti di ghiaccio sciolti?

Oggi nell'esercizio vedremo come misurare l'aumento di stranezza a ALICE!

Perché studiamo queste cose?

Almeno 3 esempi:

1. dalla ricerca al CERN nate molte applicazioni importanti!



Forty years since the first PET image at CERN

Marilena Streit-Bianchi reminisces about her role in the first PET (positron-emission tomography) image taken at CERN

21 DECEMBER, 2017 | By [Iva Raynova](#)

On a successful afternoon in early summer 1977, the Laboratory of CERN radiobiologist Marilena Bianchi was

7. CERN engineers developed touchscreen and tracker ball tech in the 70s

Sector: Computing



Source: CERN

Perché studiamo queste cose?

Almeno 3 esempi:

1. dalla ricerca al CERN nate molte applicazioni importanti!
2. la ricerca di base svolta al CERN richiede investimenti importanti che si traducono in scommesse per molte industrie in tutto il mondo e in Europa in particolare

NOVEMBER 15, 2016 | PUBLICATIONS, ARTICLES | BY MG

Forecasting the socio-economic impact of the Large Hadron Collider...

...A cost-benefit analysis to 2025 and beyond. Massimo Florio, Stefano Forte and Emanuela Sirtori. Technological Forecasting and Social Change, Volume 112, 38-53

"In this paper we develop a [cost-benefit analysis](#) of a major



Perché studiamo queste cose?

Almeno 3 esempi:

1. dalla ricerca al CERN nate molte applicazioni importanti!
2. la ricerca di base svolta al CERN richiede investimenti e scommesse per molte industrie in tutto il mondo e
3. questa è scienza pura: studiamo le interazioni delle particelle elementari per la gioia di capire la Natura

