

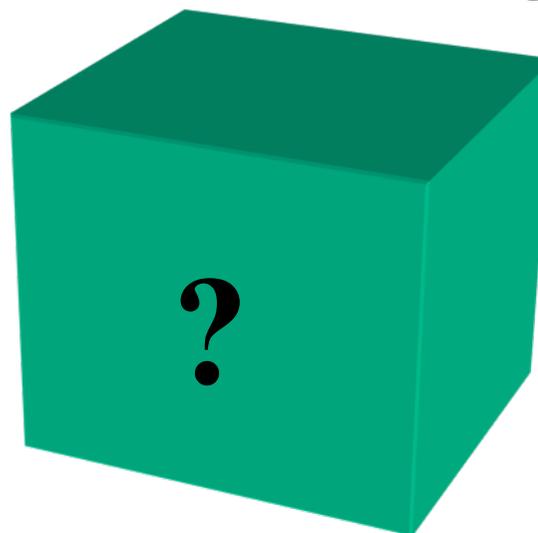
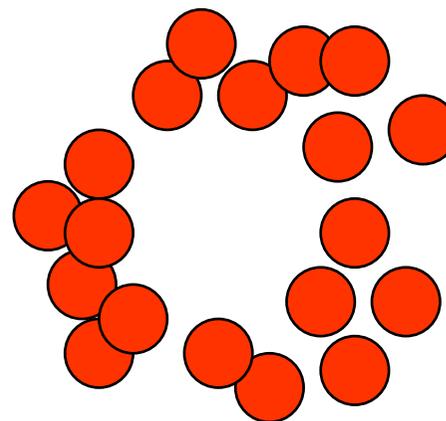
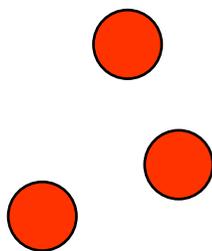
# Dalle particelle elementari al Big Bang: Il Large Hadron Collider del CERN e l'esperimento ALICE



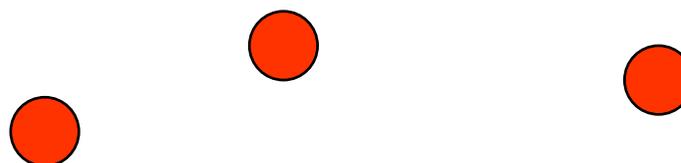
## Proveremo a rispondere a 4 domande “principali”:

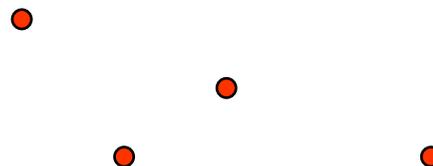
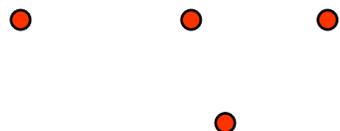
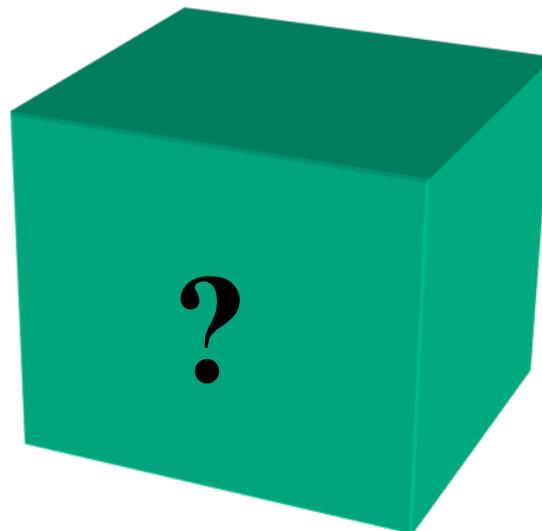
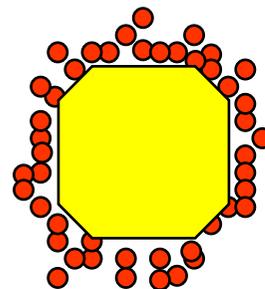
- ✓ Perché servono le particelle per studiare la materia?
- ✓ A cosa servono e come funzionano gli acceleratori di particelle?
- ✓ Come funziona LHC e cosa studiano i 4 rivelatori di LHC?
- ✓ In che senso con LHC “ricreiamo le condizioni del Big Bang”?  
(la fisica di ALICE...)

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



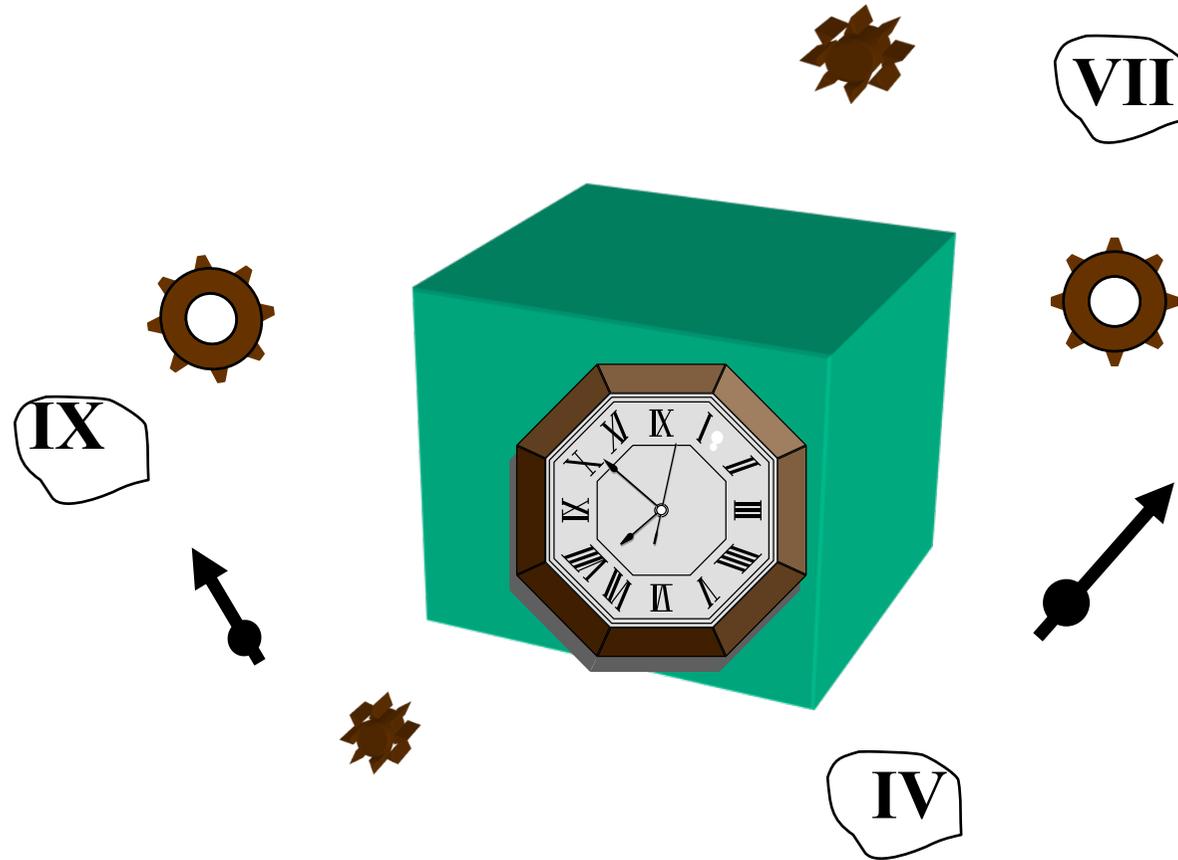
**C'è qualcosa !**





**C'è qualcosa  
ottagonale !**

E se usiamo proiettili piccoli e molto energetici?



**“All’interno” c’era un orologio ottagonale !**

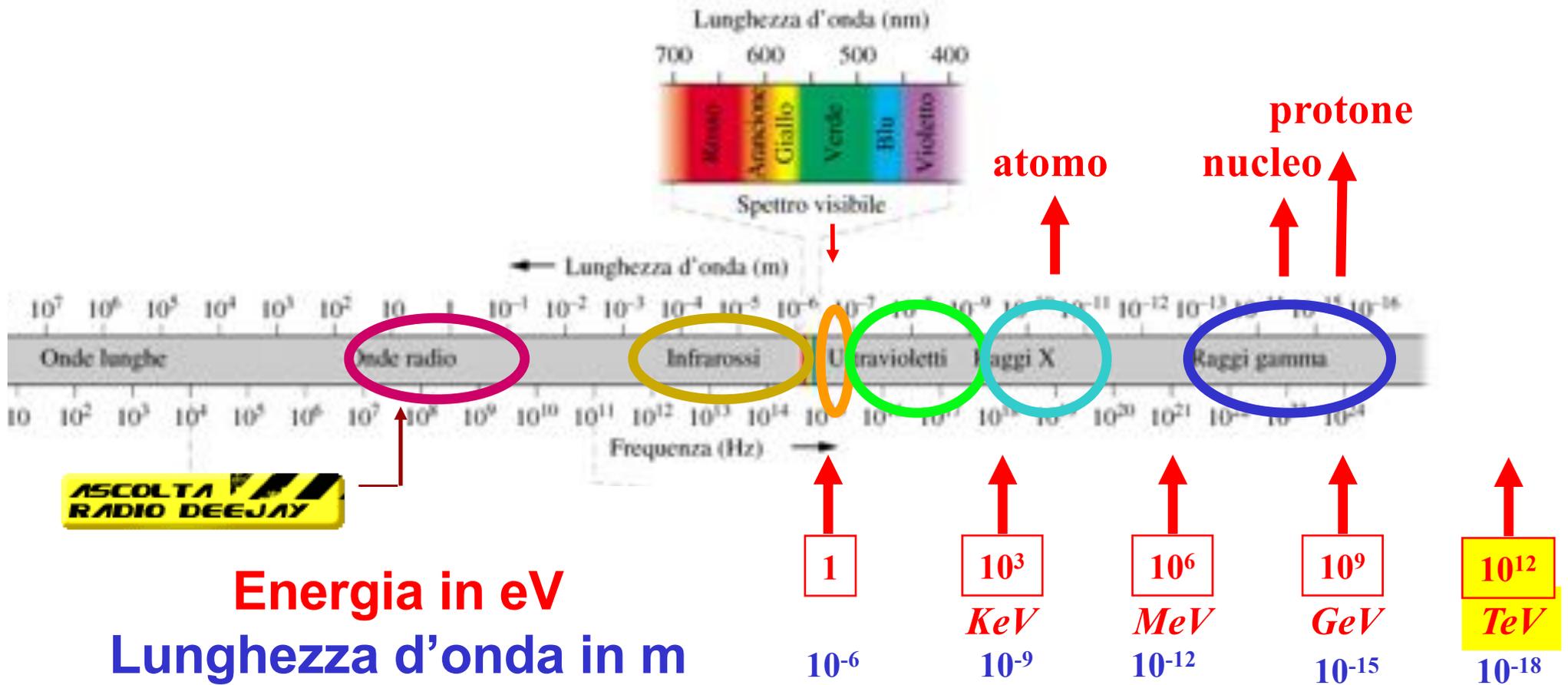
# Per capire cosa c'è all'interno della materia abbiamo bisogno di proiettili piccoli ed energetici

- Materiali che emettono radiazioni, sia naturalmente sia per eccitazione ( calore, passaggio corrente elettrica) : particelle alfa,  $\beta$  (elettroni),  $\gamma$  (fotoni)
- Particelle accelerate nello spazio
- Particelle accelerate artificialmente

**Sostanze radiattive**

**Raggi cosmici**

**Acceleratori**



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 quantita' discreta di energia

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

maggiore impulso (massa x velocità) delle particelle proiettile



maggiore risoluzione spaziale ( $\lambda$  minore)

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

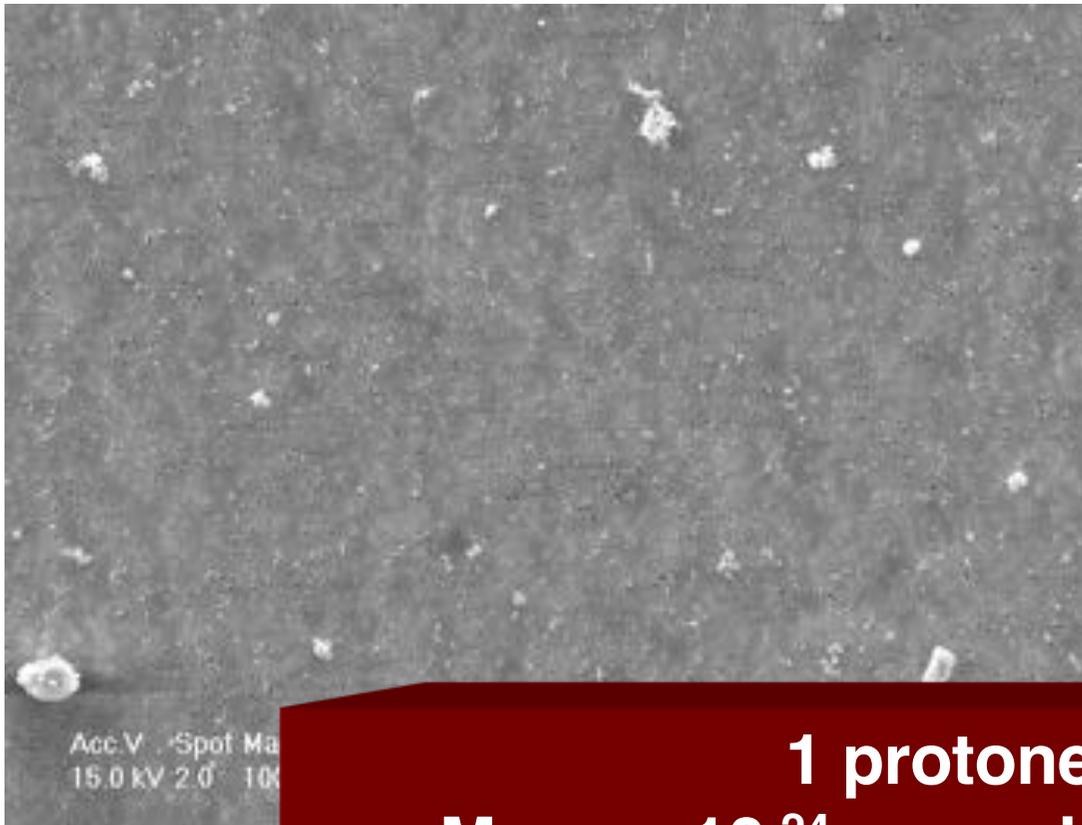


un batterio ( $\sim 10^{-6}$  m), *Lactobacillus delbrueckii*, al microscopio elettronico

# Proiettili quanto piccoli?



**Palla da tennis:** peso medio 57 g, raggio: 3.2 cm



**Polveri atmosferiche:**  
PM10: raggio < 0.0010 cm

**1 protone:**  
Massa:  $10^{-24}$  g raggio  $10^{-13}$  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)**



Energia cinetica:  $\frac{1}{2} mv^2$ .

Isner ha impresso una energia di 134 Joule a una pallina da tennis.

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

Le particelle elementari che usiamo attualmente agli acceleratori per sondare la materia hanno un'energia "piccola" (meno di un milionesimo di J) rispetto alla nostra esperienza quotidiana (quando lanciamo la pallina per servire occorrono già 0.5 J!), ma enormemente concentrata.

# I costituenti elementari della materia

≈ 400 AC Democrito

Atomi: porzioni infinitesimali ed indivisibili della materia

**XIX secolo : Mendeleev et al.**

Catalogati quasi 100 elementi diversi!

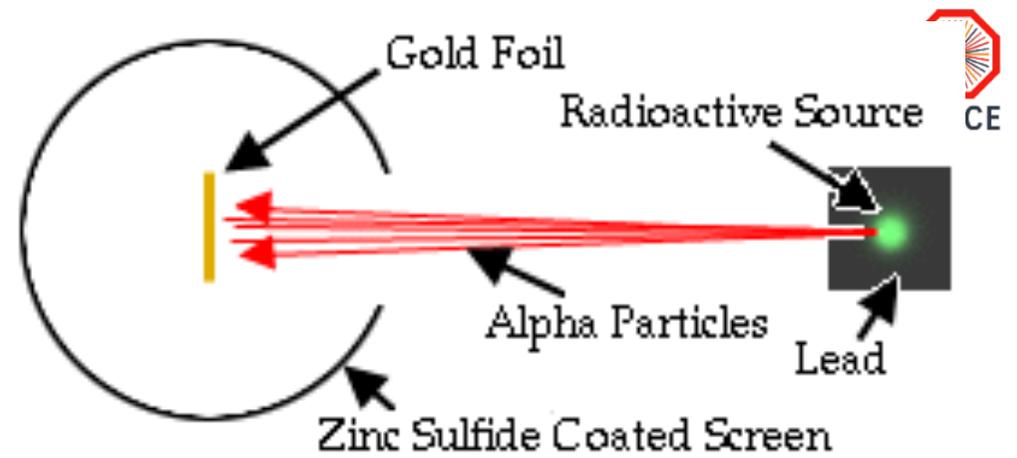
**1897 : J.J. Thomson**

Scoperta dell'*elettrone* da misure con tubi catodici.

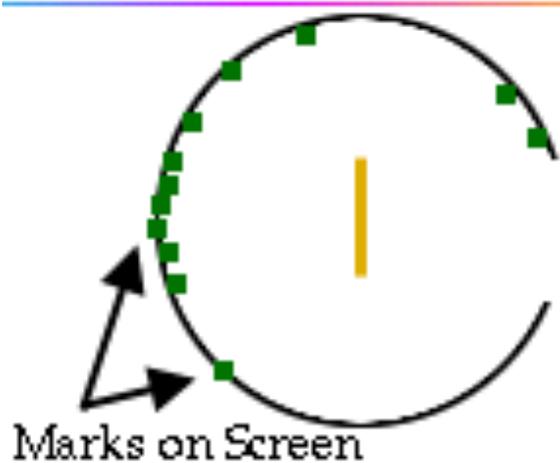
**Atomo di Thomson a panettone/muffin al mirtillo = carica positiva distribuita uniformemente con elettroni all'interno**



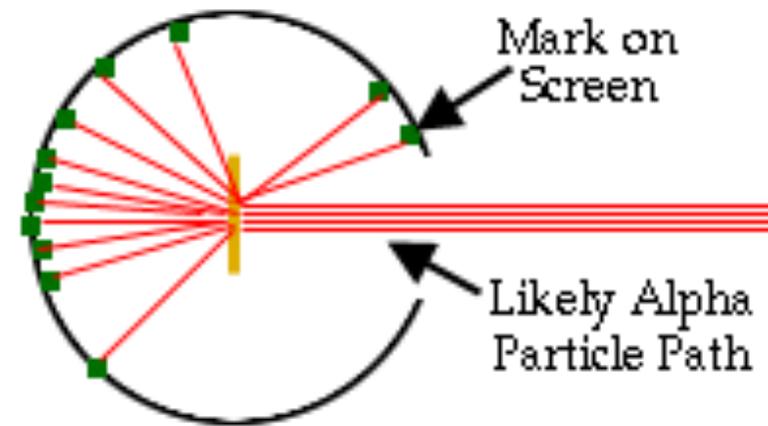
**Proiettili da sorgenti radioattive:  
L'esperimento di Rutherford (1911-1913)**



The Result

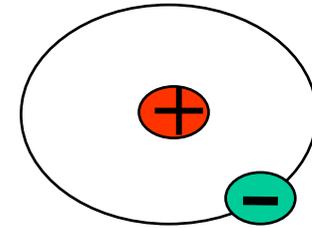


Extrapolation of Result:



## 1913 : N. Bohr

Atomo = micro-sistema planetario  
con *protone* al centro ed *elettrone* che gira  
intorno.



## 1932: J. Chadwick

Scoperta del *neutrone* da misure  $\alpha$ -Be.

e (0.5 MeV), p (938.3 MeV), n (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

### 1927 : P.A.M. Dirac

prevede esistenza *positrone* ( $e^+$ )  
(osservato nel 1932 da C. Anderson  
nei raggi cosmici)



### 1930: W. Pauli

Da decadimento  $\beta$  dei nuclei prevede esistenza *neutrino* :  
 $n \rightarrow p$  e  $\nu$  (spiegato da Fermi nella teoria delle  
interazioni deboli ed osservato nel 1956  
da Cowan-Reines )



## Stabilita' del nucleo

### 1935 : H. Yukawa

Forza attrattive nucleare legate alla esistenza  
di una particella massiva chiamata *pione*  
(massa  $\sim 100$  MeV).



**1937:** Osservata particella  $\sim 100$  MeV, ma...

non era il pione ma come ci si accorse in seguito una nuova particella assolutamente inattesa  
“chi l’ha ordinato questo?” (I.J. Rabi)

**1945: Conversi , Pancini , Piccioni**

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

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

Osservazione del *pione* tramite raggi cosmici



M. Conversi

I **raggi cosmici** (scoperti nel 1912) 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.

# Passaggio da sostanze radioattive all'uso di raggi cosmici

## Camere a nebbia



Aria sop  
Le partic

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

il gas

# Particelle elementari come proiettili per gli esperimenti di Alta Energia

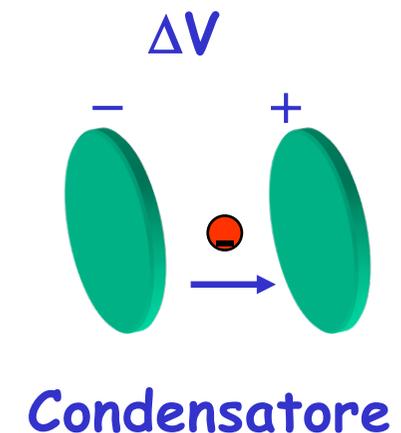
Partiamo da elettroni e protoni:

- **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  $\Delta V$ )

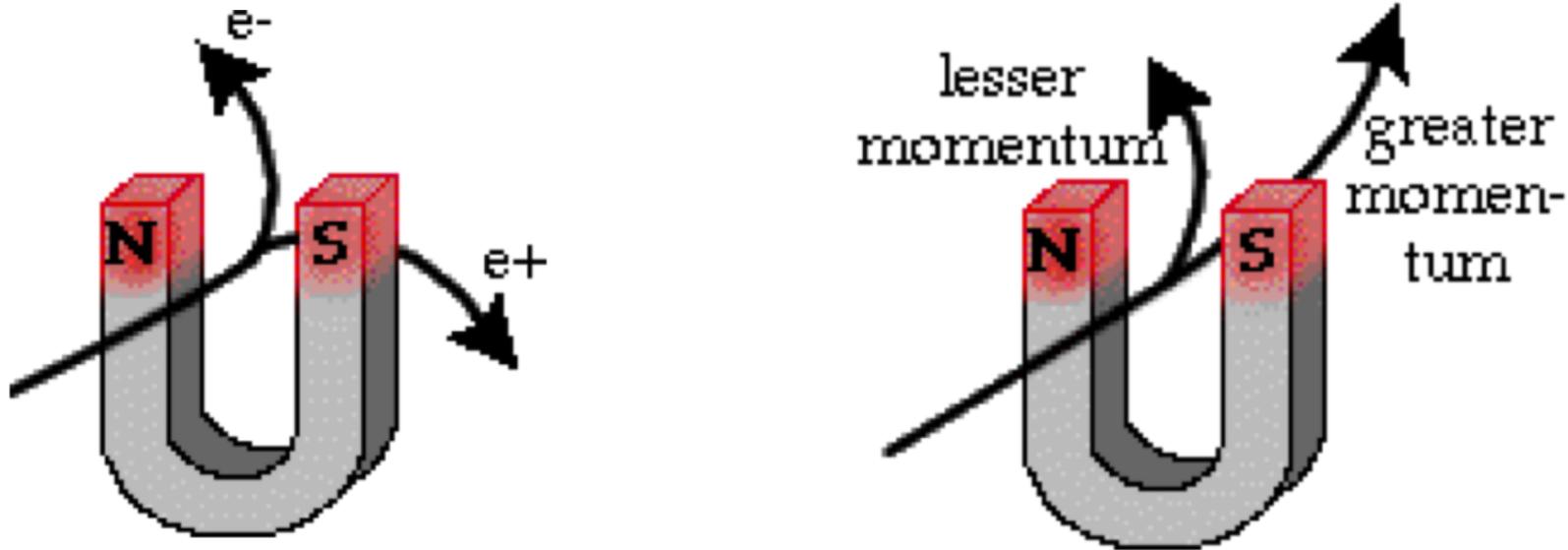
$$m a = F \propto q \Delta V$$

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



# Campo elettrico e campo magnetico

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

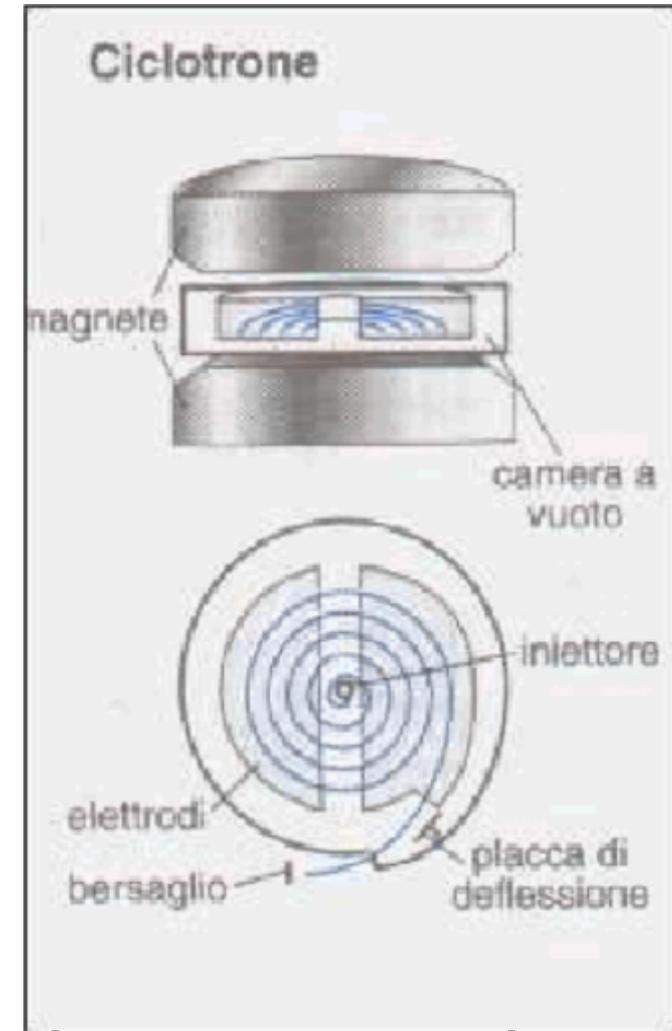
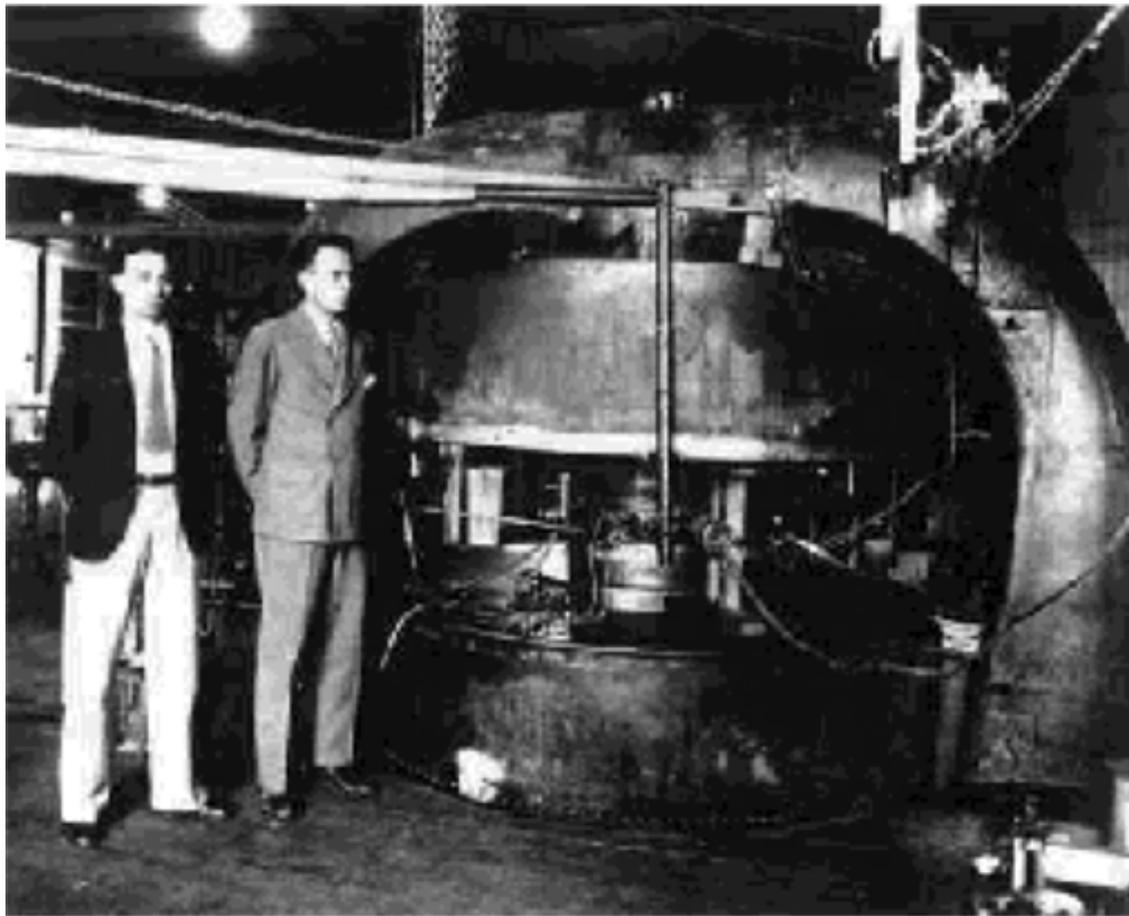


Più è alto il momento (massa x velocità) della particella e più deve essere grande il campo magnetico per avere la stessa curvatura

**Le dimensioni degli acceleratori aumentano con l'energia**

# Il primo acceleratore con campi magnetici: Il Ciclotrone di E. Lawrence ( 1931)

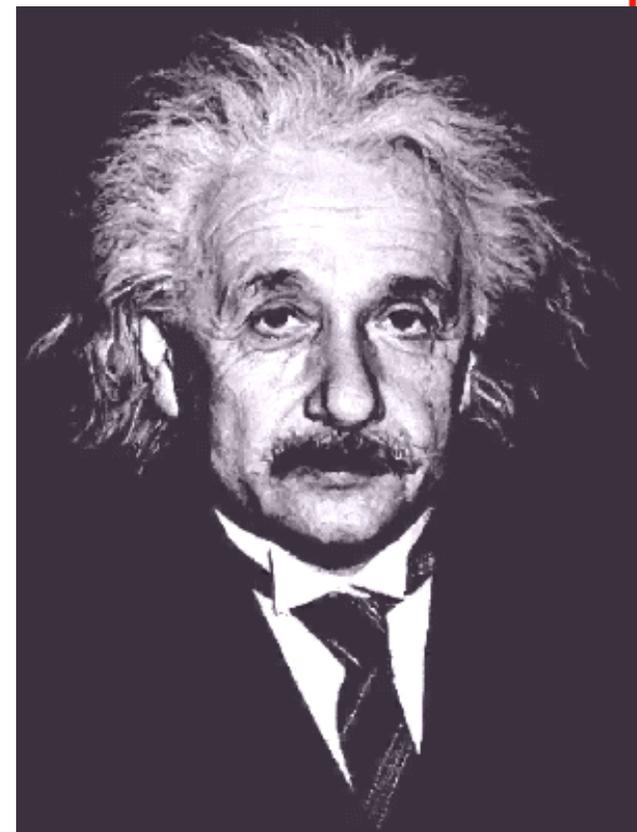
p fino a 20 MeV ( $\alpha$  da elementi radioattivi ~ di qualche MeV)



Uso combinato di campo elettrico e magnetico

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

$$E = m c^2$$



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

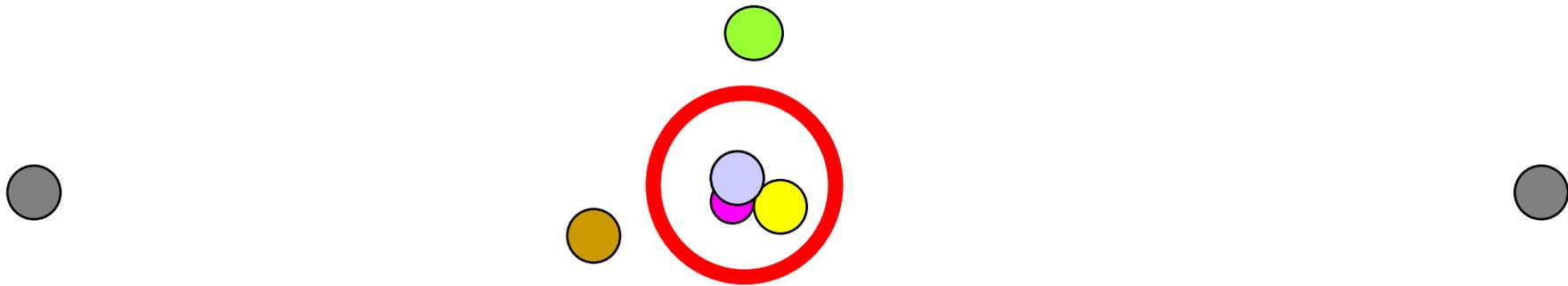
Se si è in grado di concentrare molta energia, come per es. nell’urto violento fra due particelle, dopo l’urto possono apparire “pezzetti di materia” (particelle) che non esistevano prima dell’urto.

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 ?

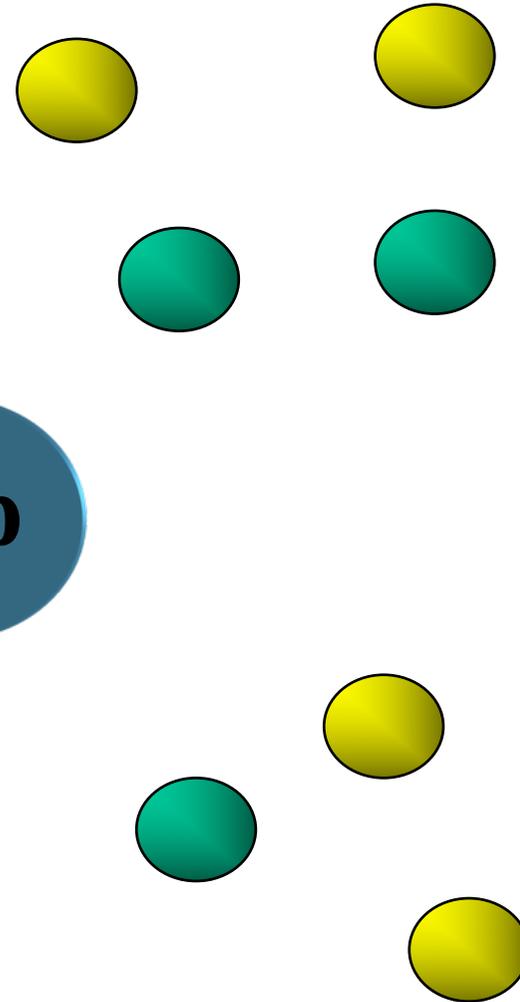
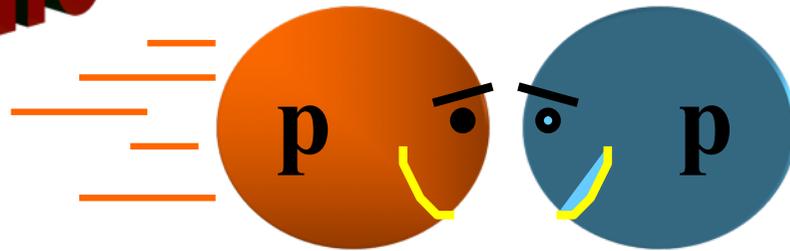
Due protoni vengono fatti urtare fra loro ad alta energia (accelerati da un acceleratore)



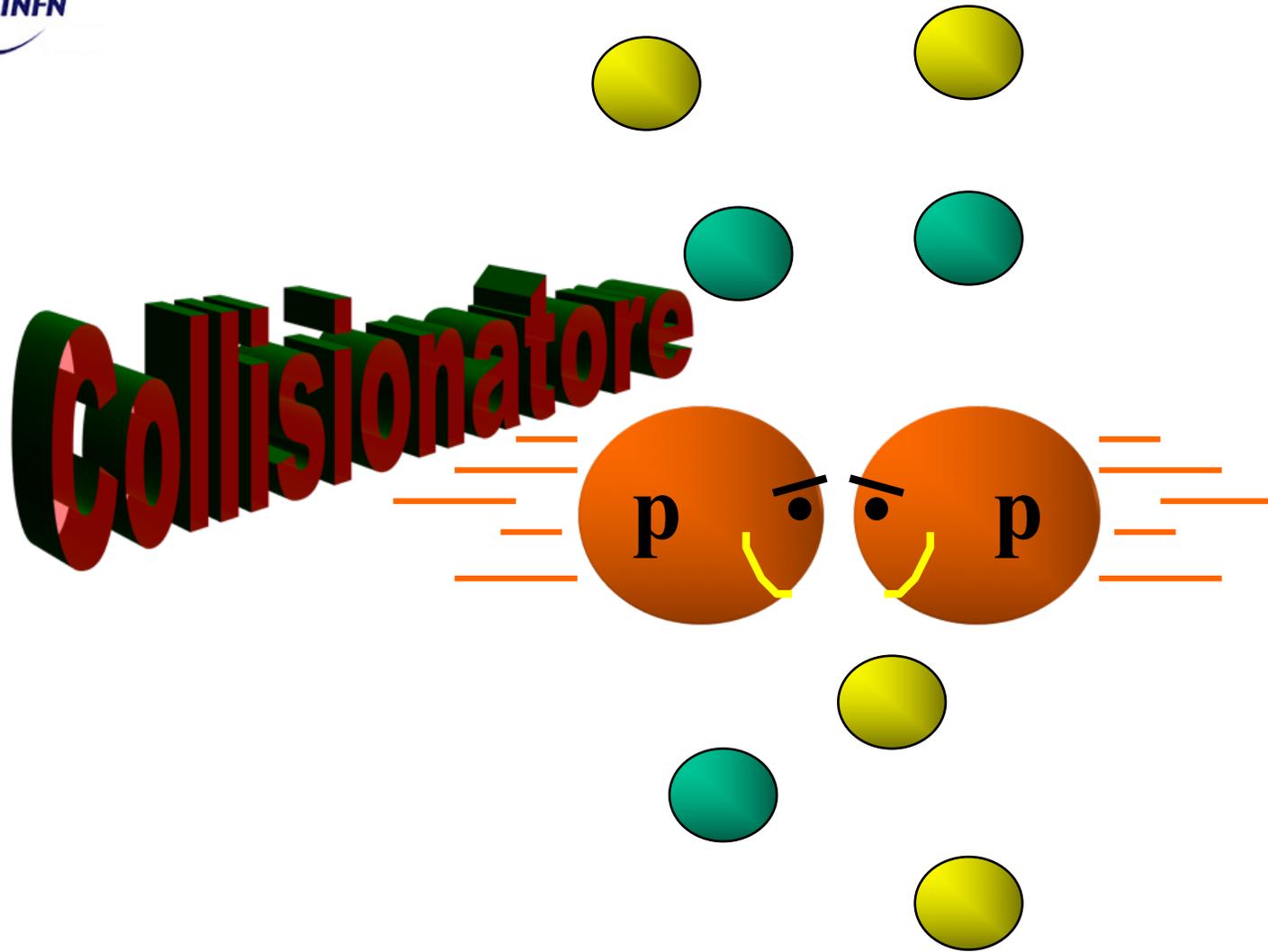
Nell'urto, una parte dell'energia cinetica dei protoni si trasforma in materia (e antimateria)

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

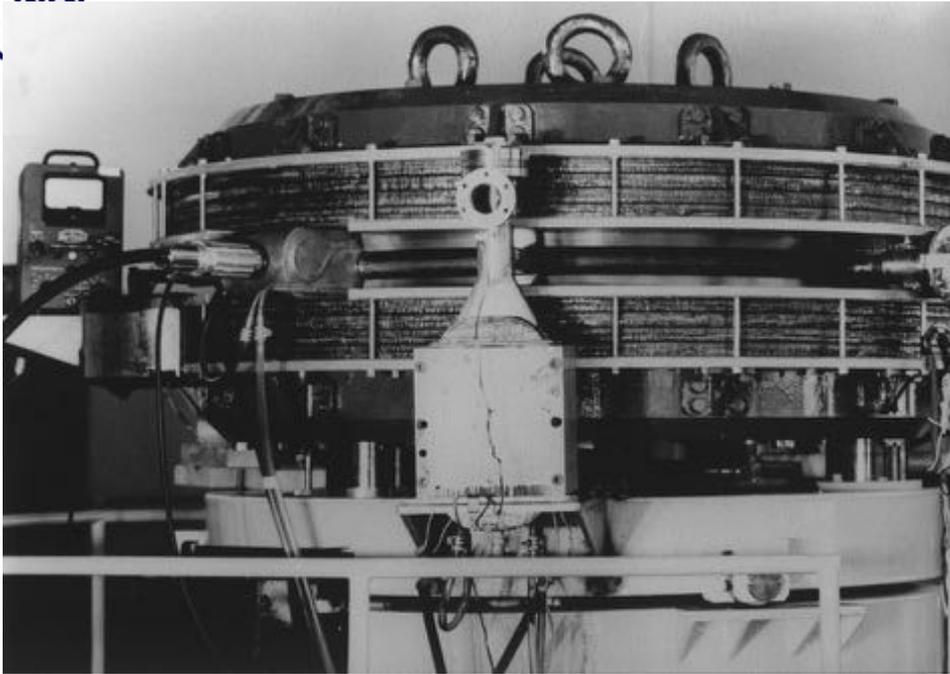
**Bersaglio fisso**



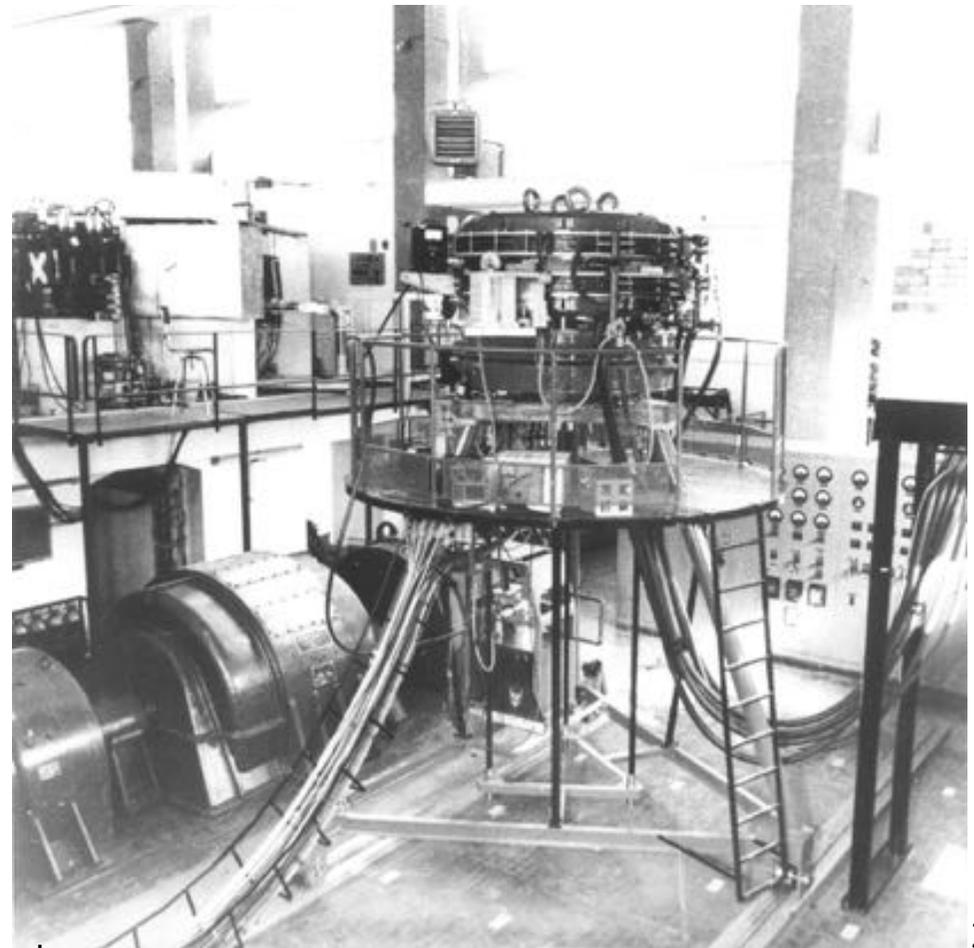
**Energia+0**  
**Energia centro di massa =  $\sqrt{2m \cdot \text{Energia}}$**



**Energia+Energia  
e.c.m.= 2•Energia**



**ADA**  
**Il primo Collisionatore al mondo**  
**(INFN – Frascati ≈1965)**

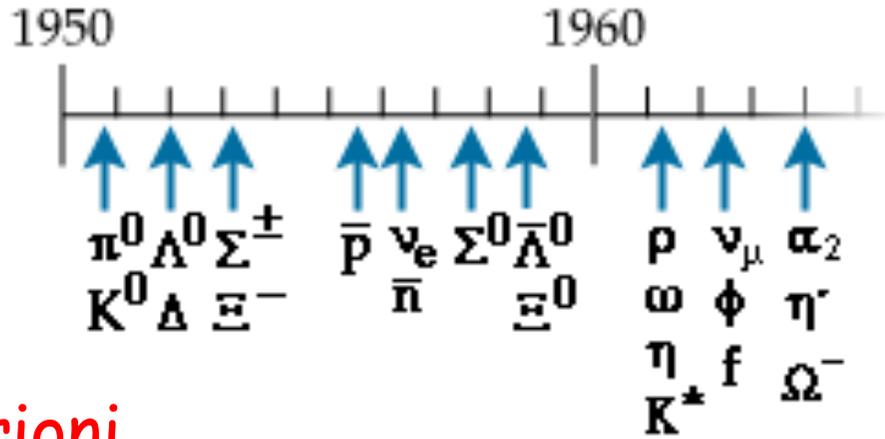




# Tavola di Mendeleev (1869)

H																	He									
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne									
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar									
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
Cs	Ba											Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra											Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub						
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu										
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr										

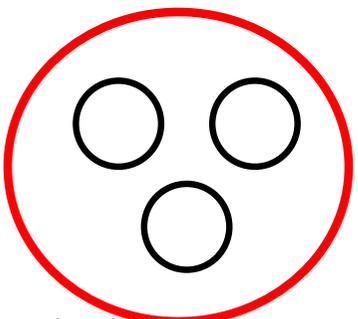
→ e, p, n



Gell-Mann, Zweig (1963)  
→ u, d, s

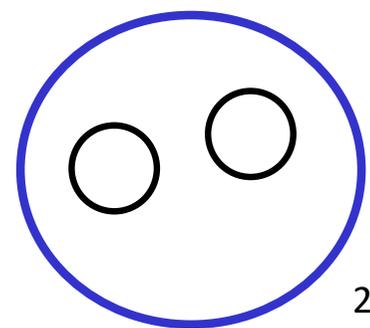
Osservazioni compatibili con stati formati da 2 o 3 "quark"

## Barioni



I quark non esistono 'liberi'. Sono **confinati** nei barioni o mesoni

## Mesoni



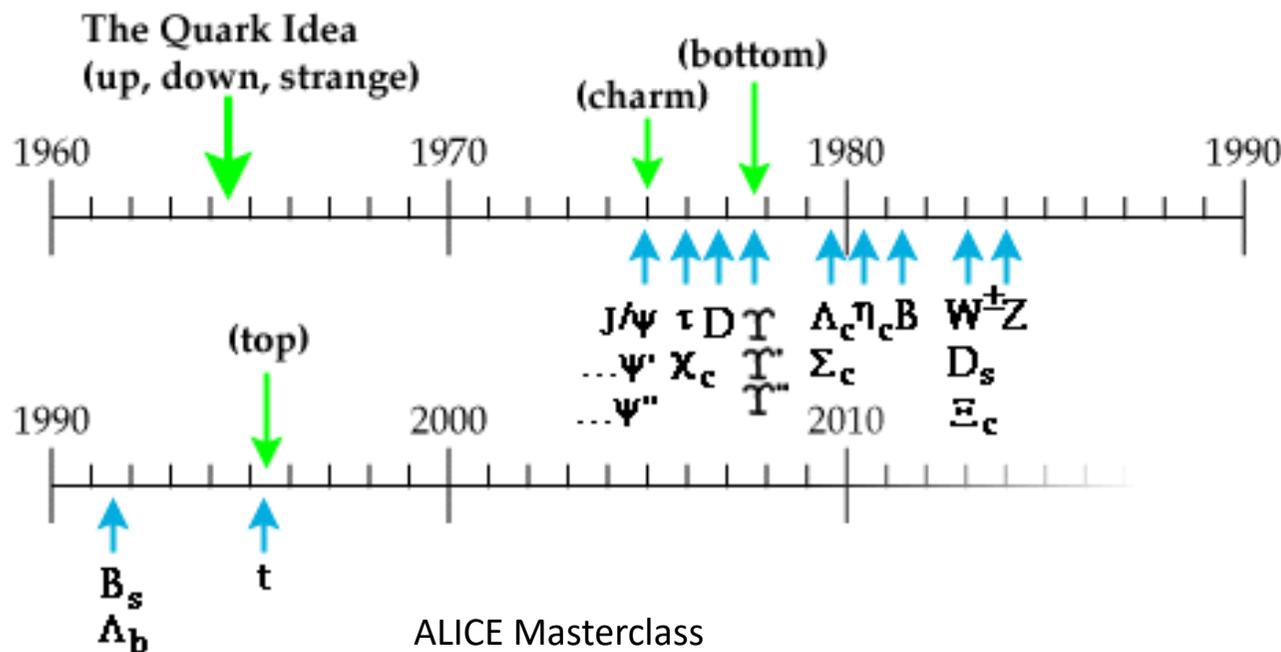
# Acceleratori di energia sempre crescente, nascita ed affermazione del Modello Standard

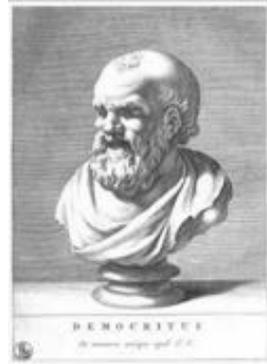
Anni '70 Glashow, Weinberg, Salam: teoria elettrodebole – quadro unificato per le interazioni e.m. e debole, previsione di equivalenti pesanti del fotone:  $W^\pm$  e  $Z^0$

1982 CERN (Rubbia): scoperta delle particelle  $W^\pm$  e  $Z^0$  in un collider (al CERN) p-p ~300 GeV per fascio



1975-1995 : scoperta dei quark pesanti (c,b,t) e del terzo leptone ( $\tau$ )



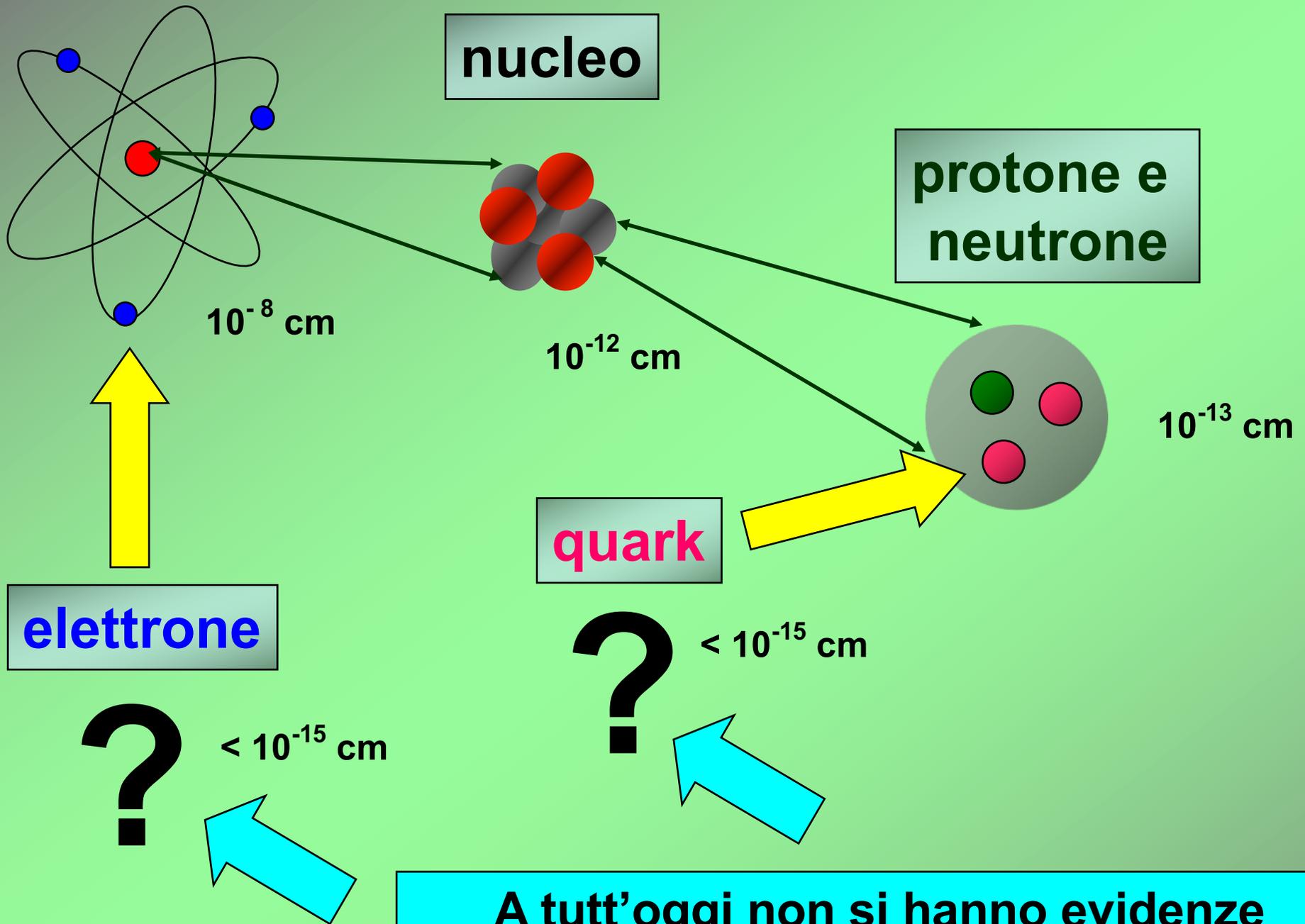


## Sommario:

Che cosa abbiamo capito da Democrito (2400 anni fa) passando per Mendeleev (Tavola degli elementi chimici: 141 anni fa) e Thomson (modello a muffin proposto 106 anni fa), fino al **modello standard?**



Glashow, Salam e Weinberg  
Premio Nobel 1979



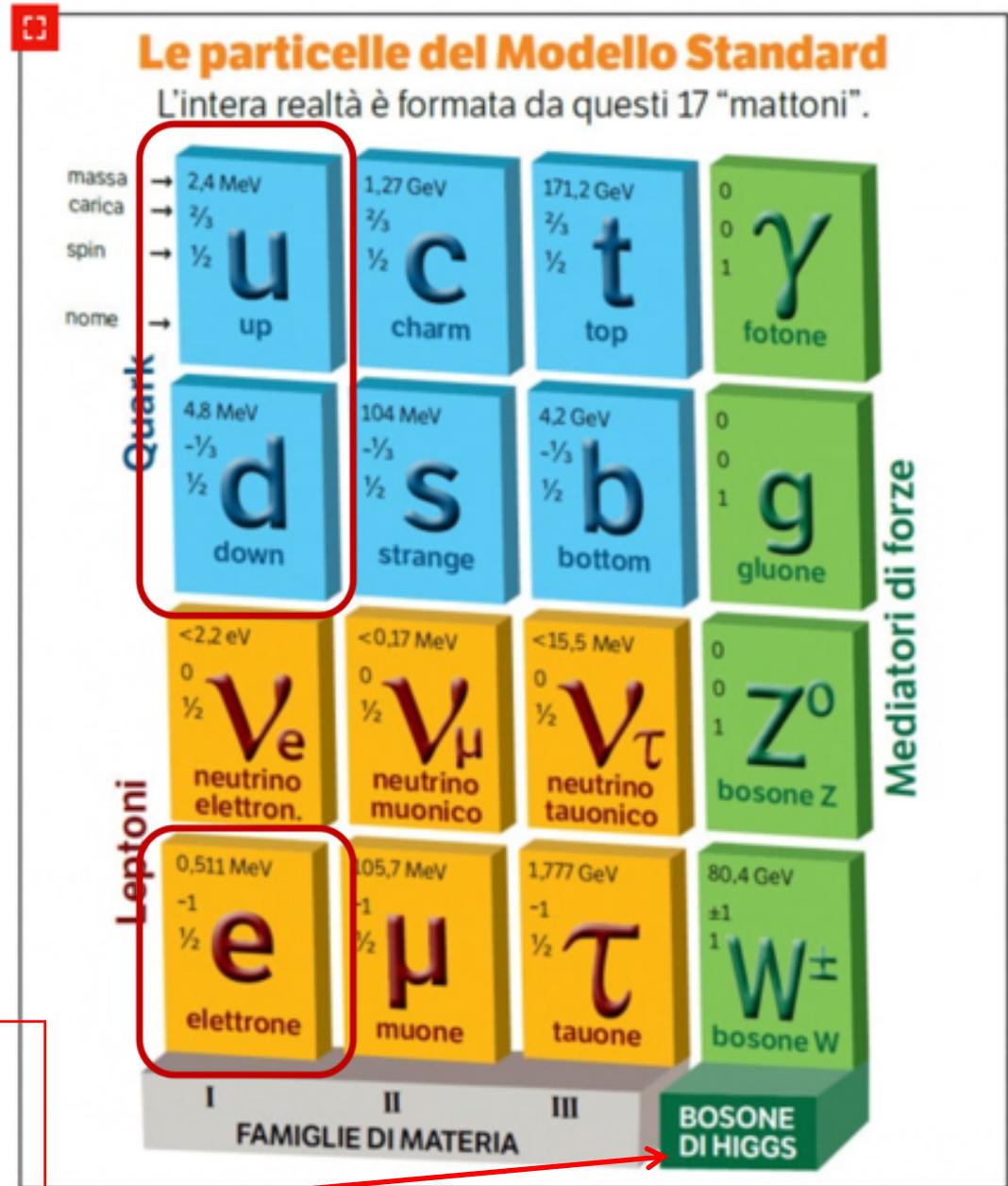
**A tutt'oggi non si hanno evidenze sperimentali di ulteriori strutture interne.**

# MODELLO STANDARD

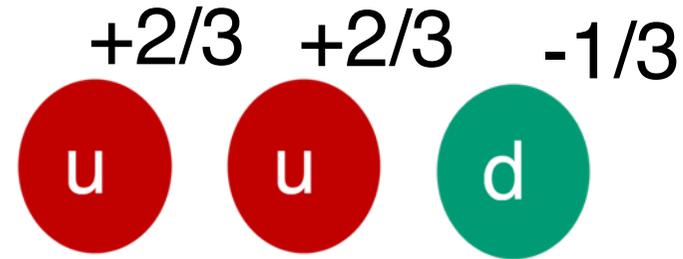
1970-1980-1990

Il nostro mondo è fatto di **quarks** e **leptoni** legati dalle **forze** elettromagnetica, debole e forte.

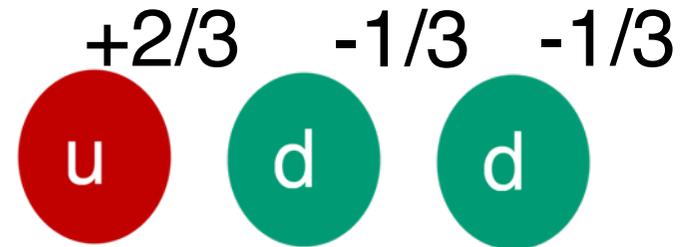
Particella prevista dal modello per dare 'massa' alle altre particelle osservata a LHC nel 2012!



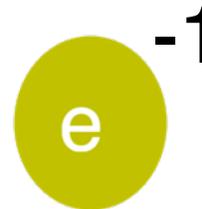
Un protone ( $q=1$ )



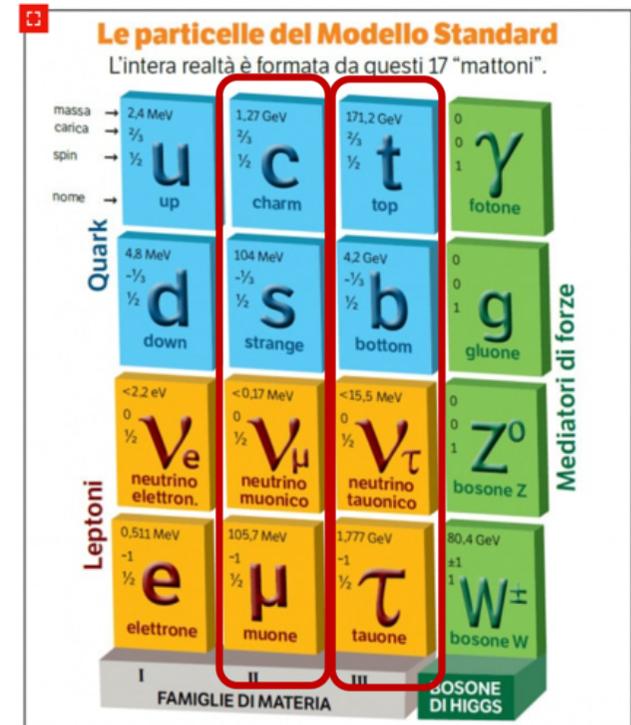
Un neutrone ( $q=0$ )



Un elettrone ( $q=-1$ )

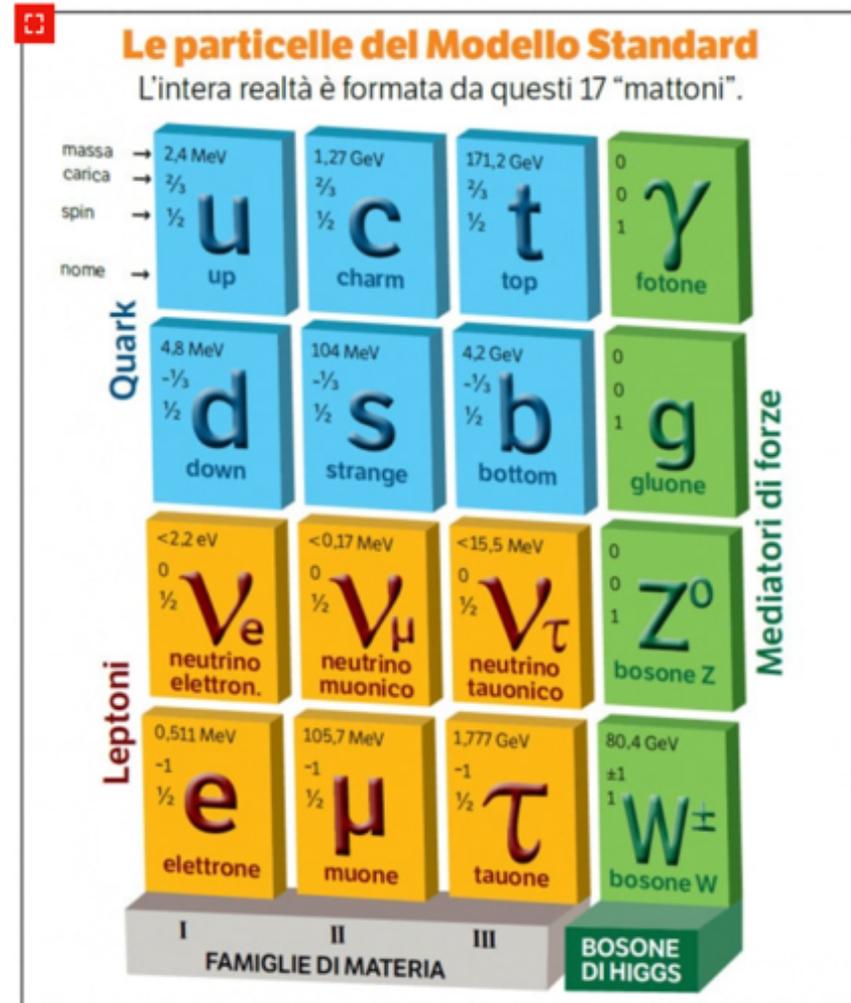


Per "comporre" però tutte le particelle viste abbiamo bisogno anche di altre due "famiglie" di quark e leptoni

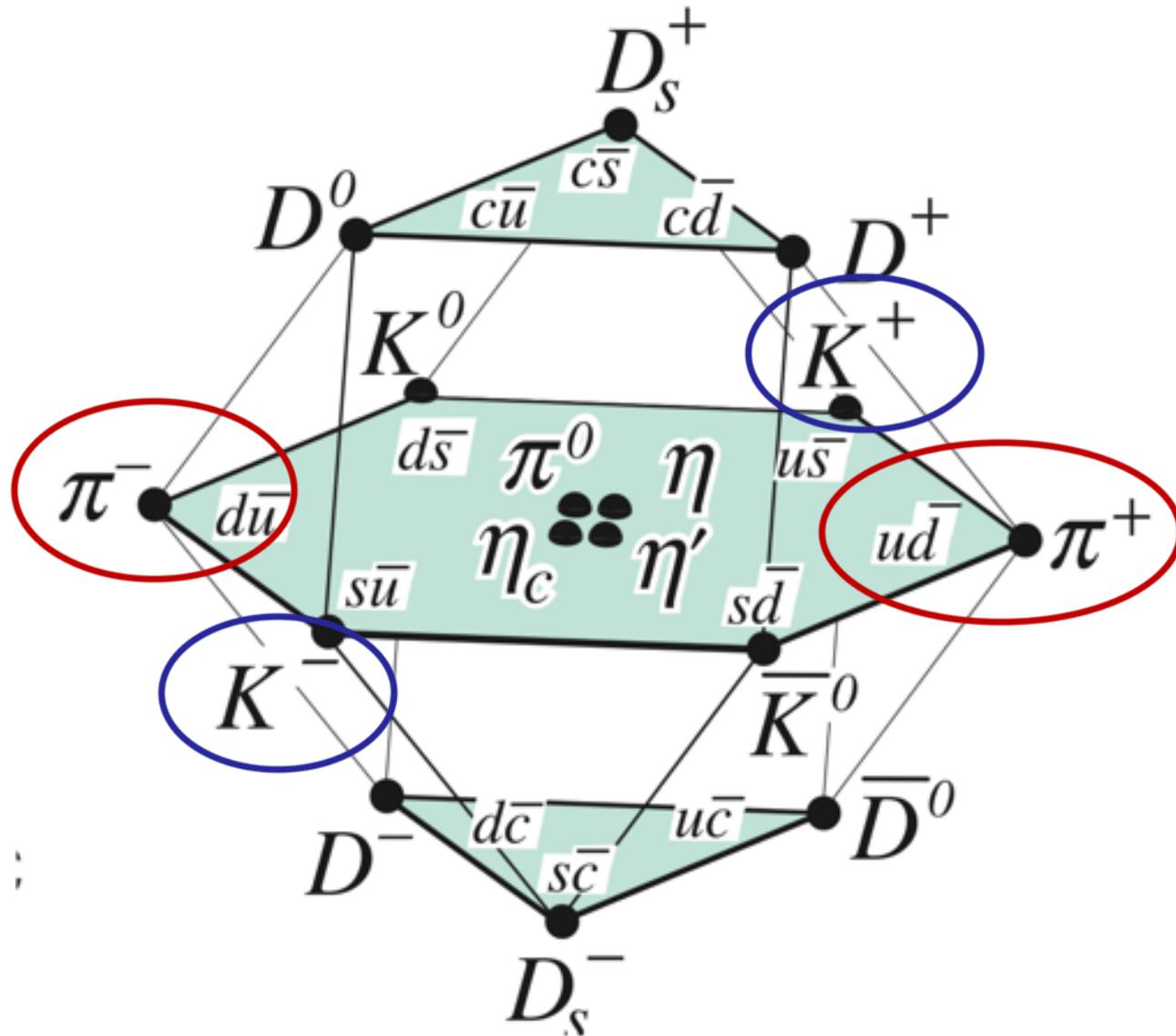


I 6 quark si chiamano:  
 Up, down,  
 Strange ("strano")  
 Charm ("fascino")  
 Bottom  
 Top

I 3 leptoni:  
 Elettrone  
 Muone  
 Tauone  
 (e ognuno ha un "suo" neutrino)





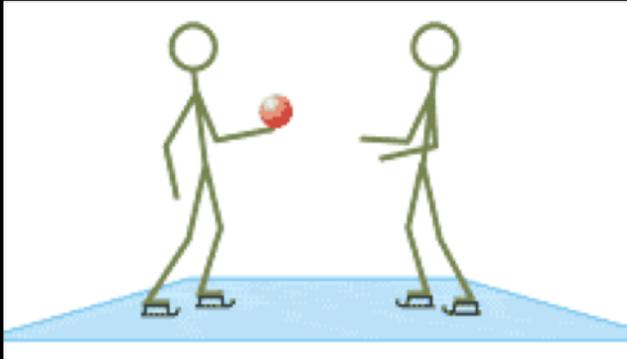


Ci sono tanti **mesoni**.

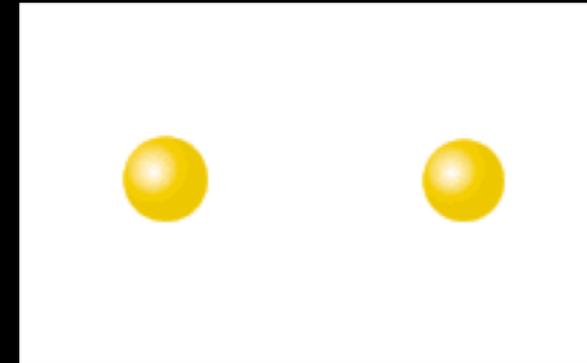
I più semplici sono fatti di quark u e d: i **pioni**.

Mesoni con il quark "s" sono detti "**strani**" (i "**kappa**")

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.



Modellino meccanico :  
pattinatori che si lanciano una palla



Descrizione quantistica :  
scambio di particelle mediatrici  
del campo associato

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		fotone		QED (Quantum Electro Dynamics)
"carica"		di colore		8 gluoni distinti		QCD (Quantum Chromo Dynamics)
		debole		$W^+ W^- Z^0$		QFD (Quantum Flavour Dynamics)

# Oltre il Modello Standard?

Il Modello Standard e' stato sottoposto negli ultimi 30 anni a test sempre piu' 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?
- ✓ perché masse così diverse tra le varie famiglie?
- ✓ 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?)
- ✓ ....

## Sommario (n. 1)

- 1) Abbiamo capito perché con le particelle scrutiamo l'interno della materia
- 2) Abbiamo capito che gli acceleratori permettono di 'fabbricare' fasci di particelle
- 3) 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!

# Come è fatto il più grande acceleratore (LHC)?



Lago Lemano

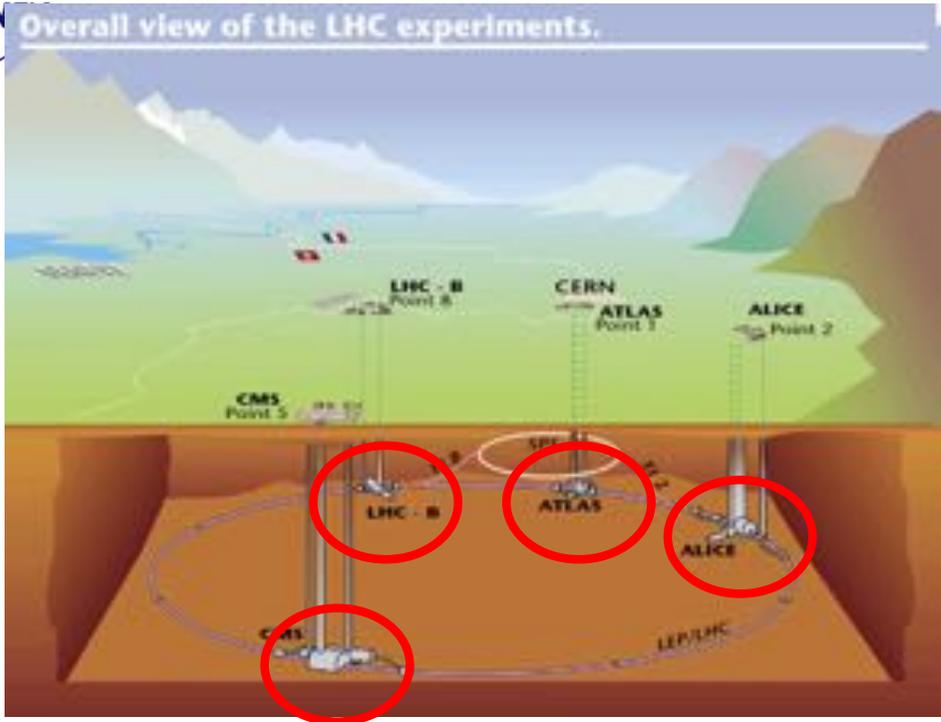
Aeroporto di Ginevra

**LHC ( 27 Km )**  
**Ex LEP tunnel**

**SPS ( 7 Km )**

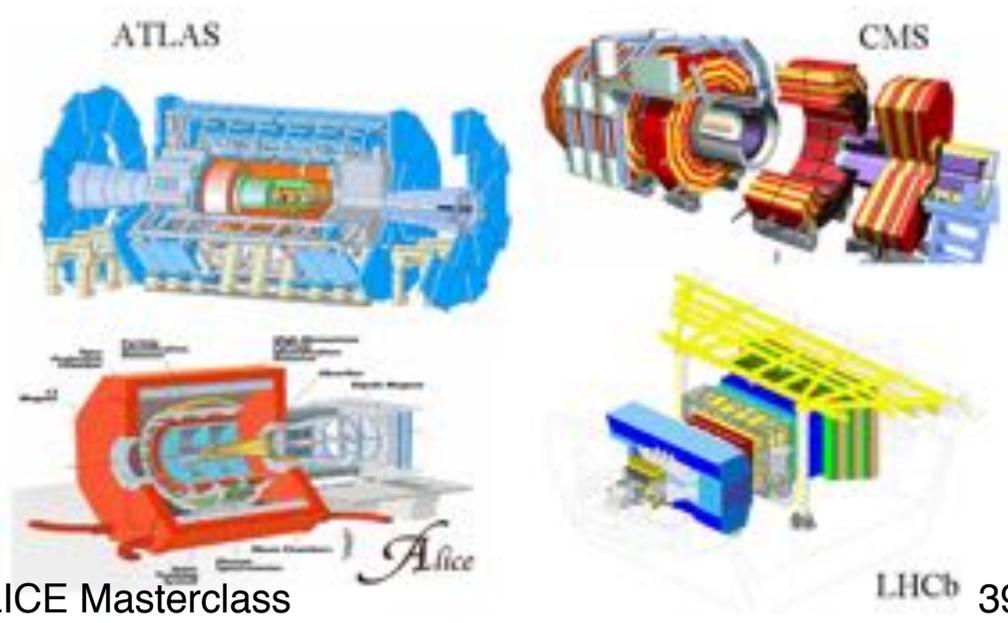
**CERN**  
Sito di Prevezin

**CERN**  
Sito di Meyrin



Il tunnel e' a  
circa 100 m di  
profondità

Le collisioni  
avvengono in 4  
esperimenti





## Scavo del tunnel di LEP usato anche per LHC

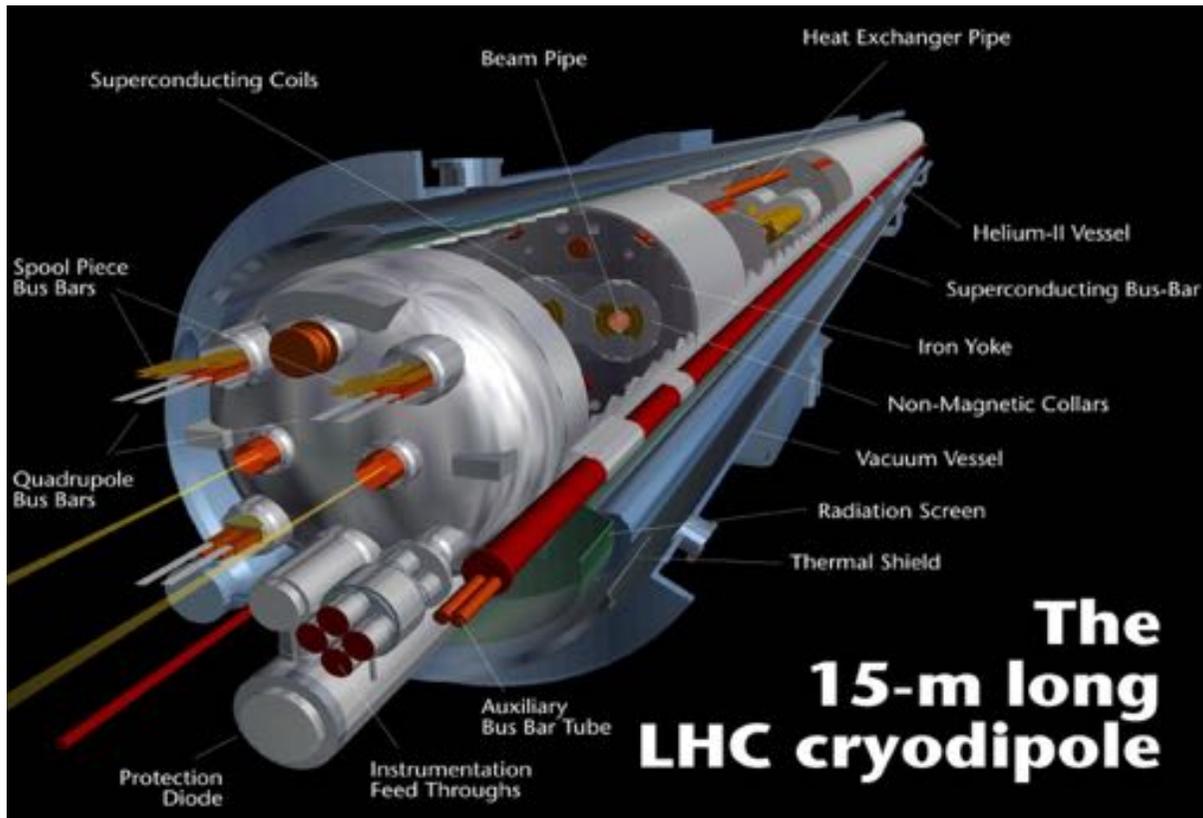


# 1232 magneti dipolari **superconduttori**

**B = 8.3 Tesla**

**Temp. = 1.9 °K**  
**= - 271.3 °C**

**Peso = 35 Ton.**



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



# Curiosità: quanta energia c'è in un fascio di LHC ?

Energia del protone = 7 TeV =  $11.2 \times 10^{-7}$  Joules / protone

$1.1 \times 10^{11}$  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**



(3 miliardi di volte l'energia della pallina da tennis lanciata da Isner....)

17/03/2020

ALICE Masterclass



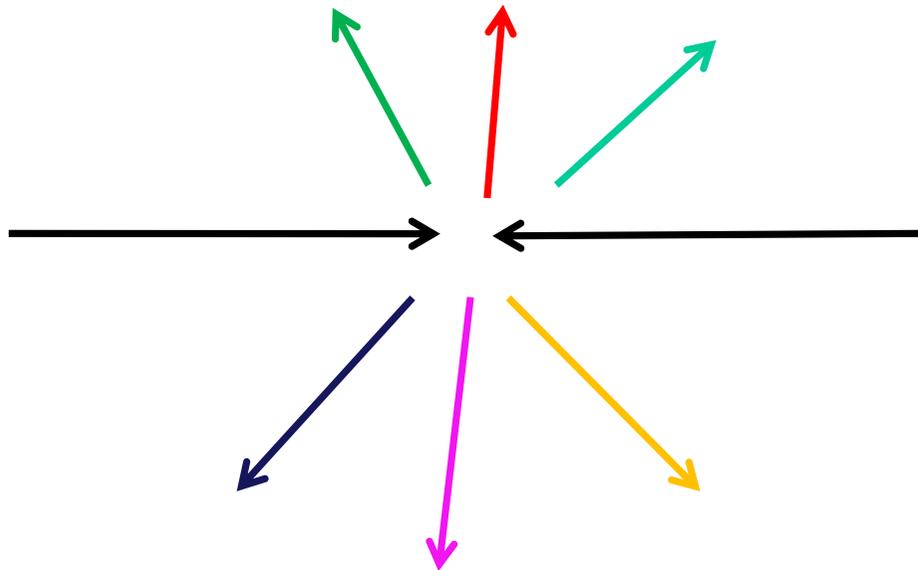
## Sommario n. 2:

- Ok questo è LHC, abbiamo i nostri proiettili per il nostro "microscopio"



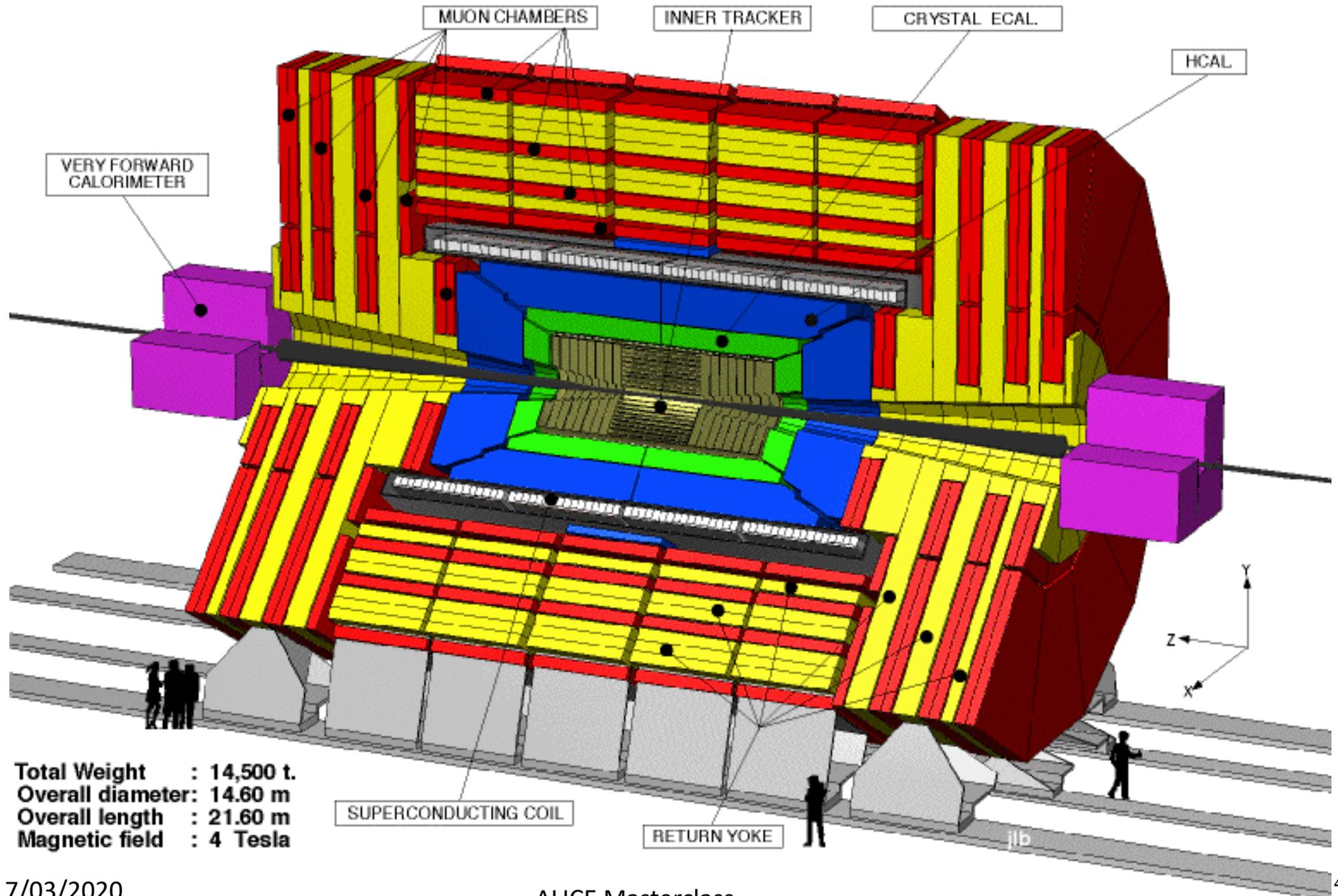
Ma come funzionano gli esperimenti di LHC e cosa studiano in particolare?

Idealmente, per ogni interazione fra particelle prodotte in un acceleratore, vorremmo disporre di un apparato in grado di:



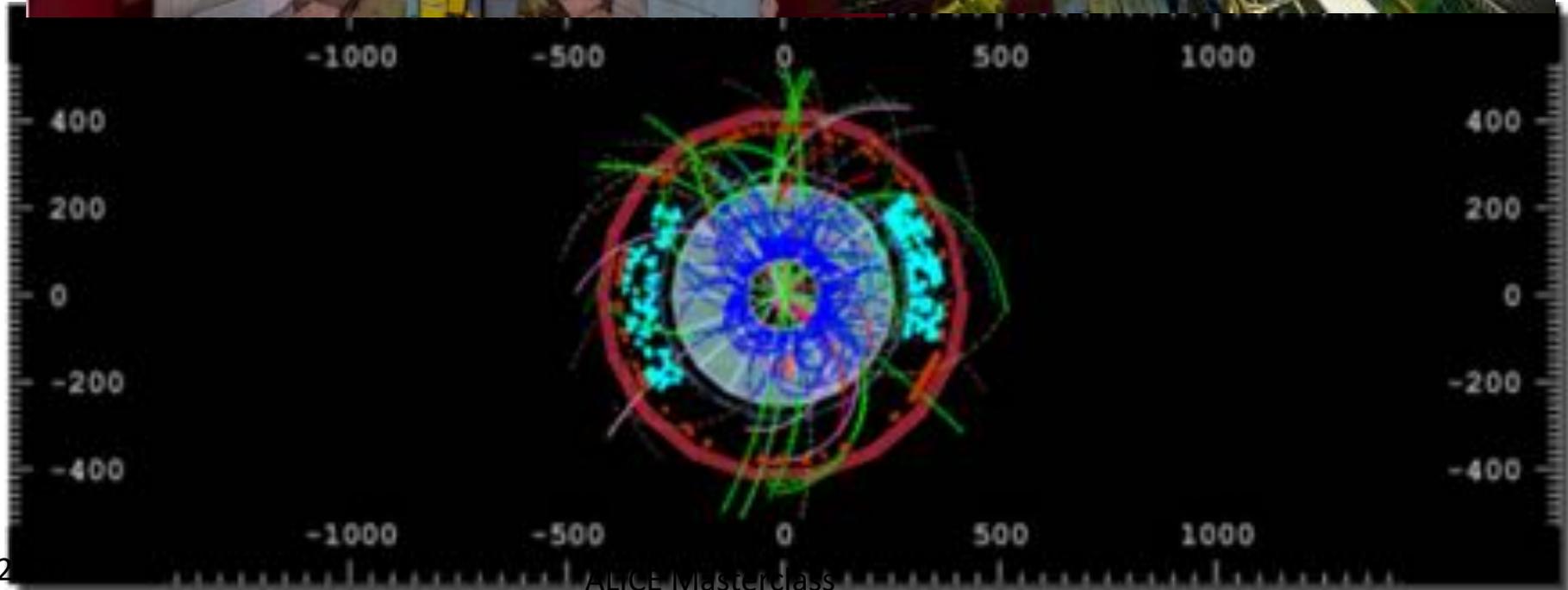
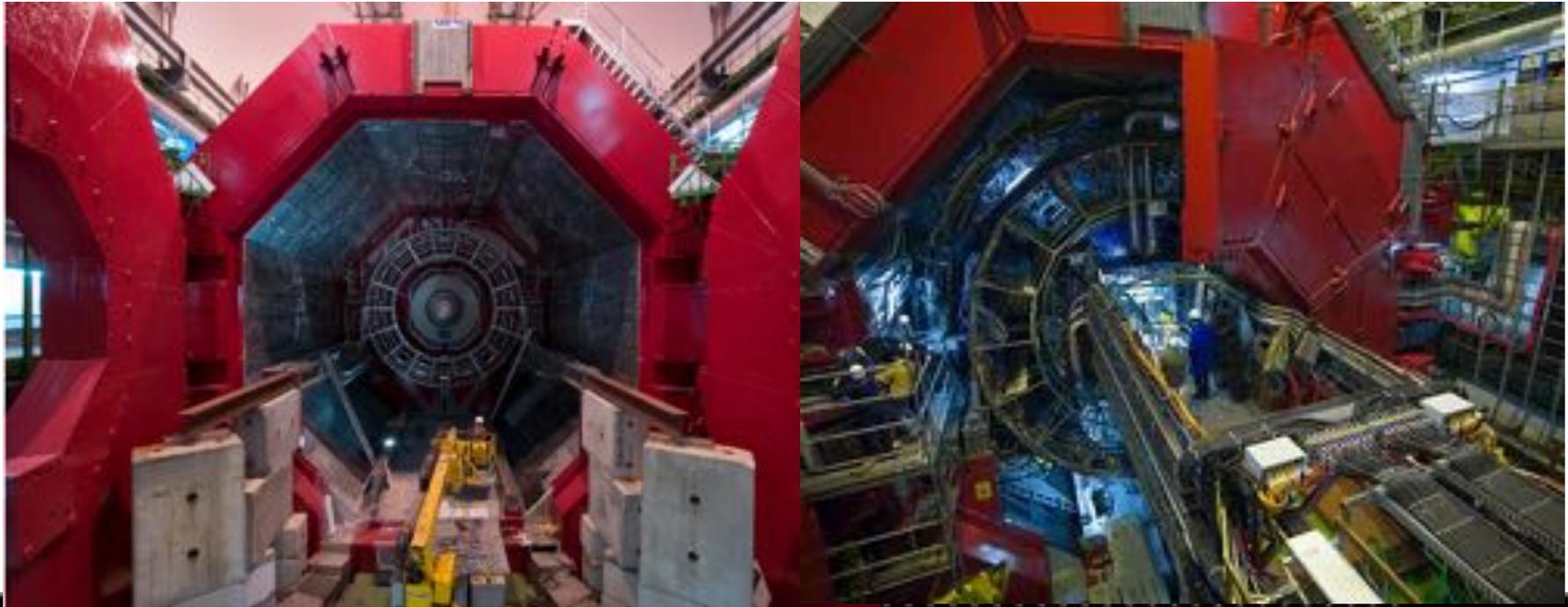
- Misurare l'energia e la direzione di tutte le particelle prodotte
- Identificare tutte le particelle prodotte
- Misurare se sono state prodotte nel vertice di interazione o altrove (tracciamento)

A LHC vengono prodotte migliaia di particelle per evento: struttura a “guscio” dei rivelatori per diversi tipi di particelle. Differenze tra rivelatori a seconda del tipo di fisica a cui si è maggiormente interessati

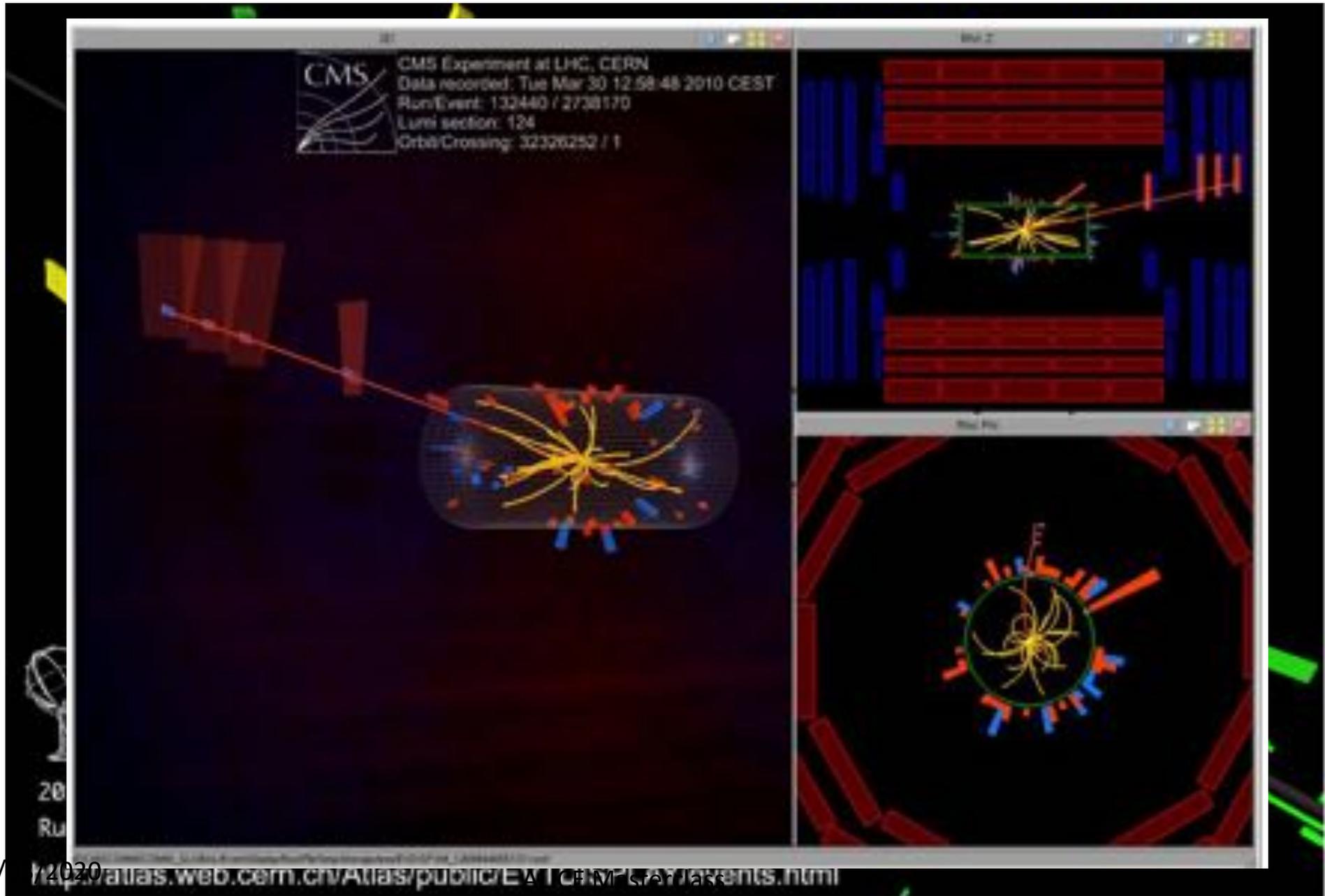




# ALICE in costruzione e ... al lavoro!



# No dettagli sui rivelatori vediamo all'opera!



## Cosa studiano i 4 rivelatori?

**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)

## Sommario n. 3:

Abbiamo capito le energie di LHC e che gli esperimenti studiano diverse cose.... 'oltre il Modello Standard'

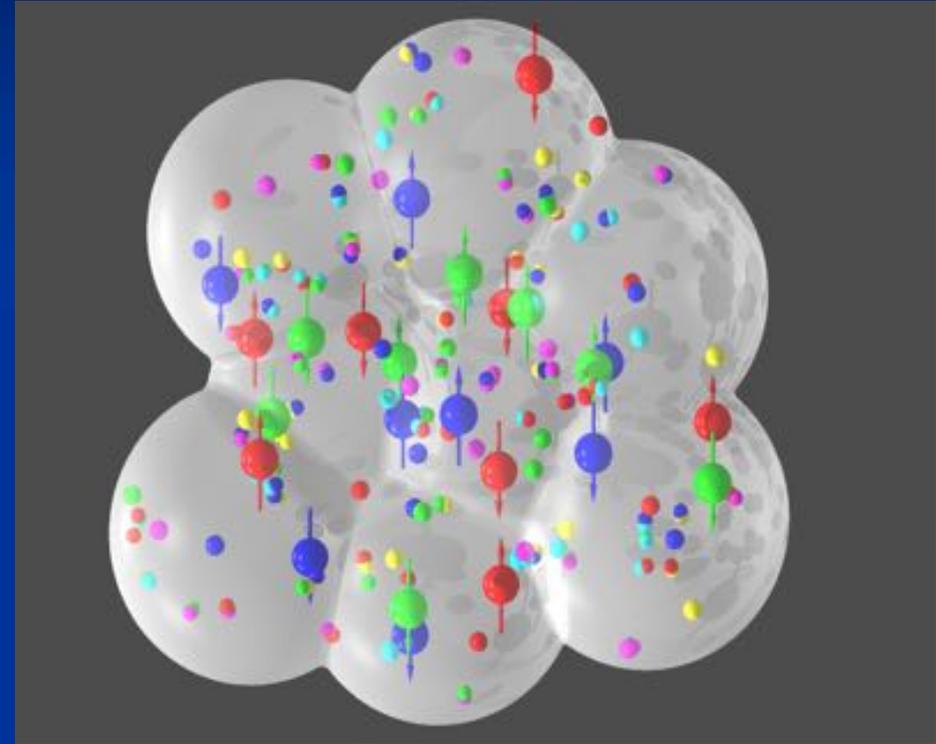
Ma in che senso a LHC riproduciamo il Big Bang?  
E cosa studia ALICE in particolare?



# Transizioni di fase “all’interno” dei protoni e neutroni dei nuclei

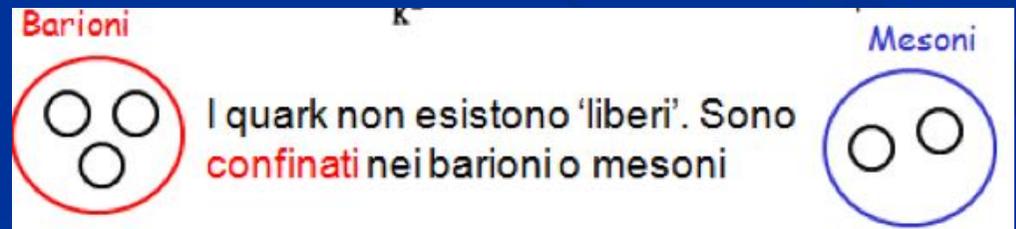
## Materia nucleare normale:

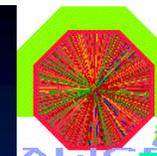
- I nucleoni (protoni e neutroni) non si sovrappongono e contengono separatamente i quark (i tre principali detti di ‘valenza’ e molti altri di più bassa energia insieme ai gluoni)



## Materia nucleare estremamente densa

- Estrema compressione o elevata temperatura portano a una sovrapposizione tra gli adroni: quark e gluoni si muovono finalmente liberamente!





# Urto ioni pesanti: un processo



Due nuclei si avvicinano ad una velocità prossima a quella della luce (secondo la teoria della relatività di Einstein appaiono come dischi assottigliati).

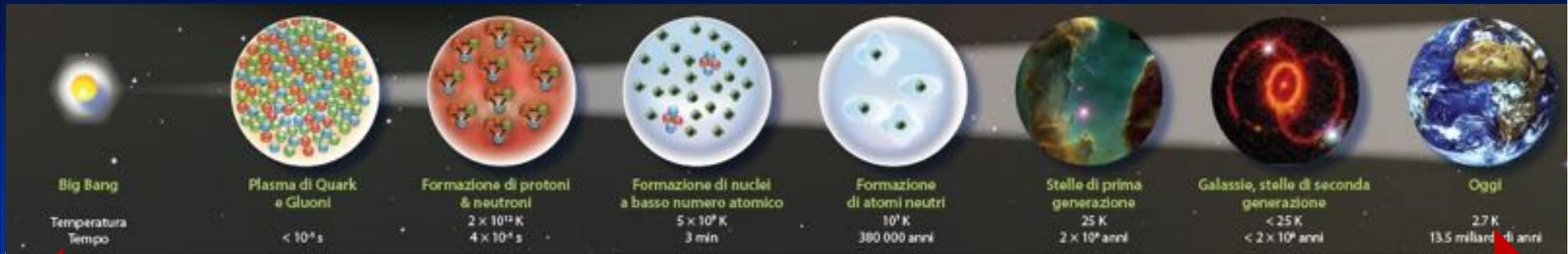
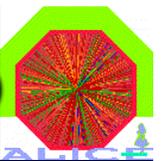
I nuclei si scontrano. La temperatura estrema generata nella collisione permette di rilasciare i quark (qui colorati in rosso, blu e verde) e i gluoni.

I quark e i gluoni cominciano a urtare fra loro, dando origine ad un sistema in equilibrio termico: il Plasma di Quark e Gluoni.

Il plasma si espande e si raffredda fino alla temperatura ( $\sim 2 \times 10^{12}$  gradi) alla quale i quark e i gluoni si ricombinano a formare materia ordinaria, in un tempo dell'ordine di  $10^{-23}$  secondi dall'inizio della collisione.

Le migliaia di particelle create nella collisione si muovono verso i sistemi di rivelazione. (Simulazione: H. Weber, UrQMD, Francoforte).

# Urto ioni pesanti: un viaggio nel tempo



Tempo



“A LHC ricreiamo le condizioni pochi istanti dopo il Big Bang”....



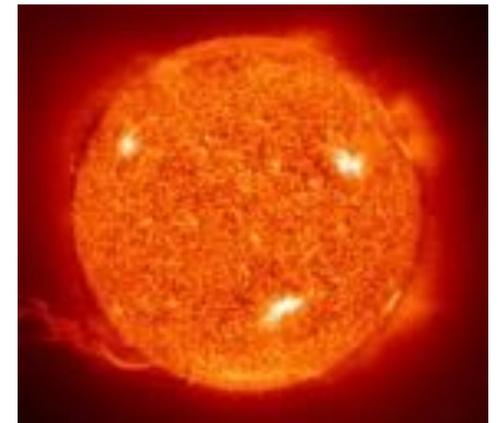
## Alcuni chiarimenti:

- 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 dura **pochissimo** (si raffredda immediatamente): noi studiamo indirettamente che è "successo qualcosa"

- si parla di **transizione di fase** della materia. Tutti noi siamo

famigliari con le transizioni fase! Pensiamo all'**acqua!**



# Osservazione indiretta di una transizione di fase

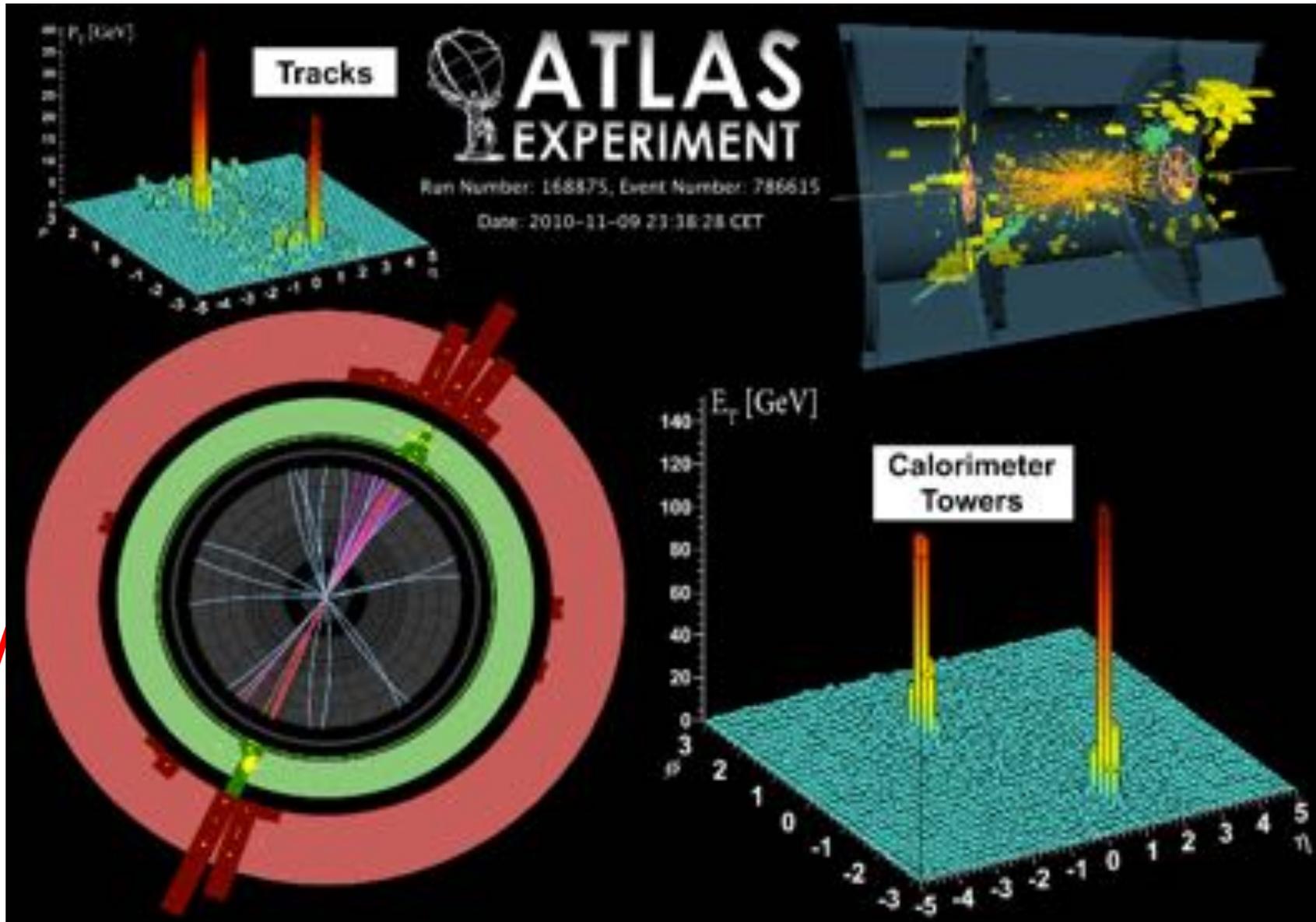
Se torno a casa dopo le vacanze e la lampadina lampeggia (out), come faccio a sapere se devo buttarla nel freezer?



17/03/2020

## 3 esempi di "cubetti di ghiaccio fusi"

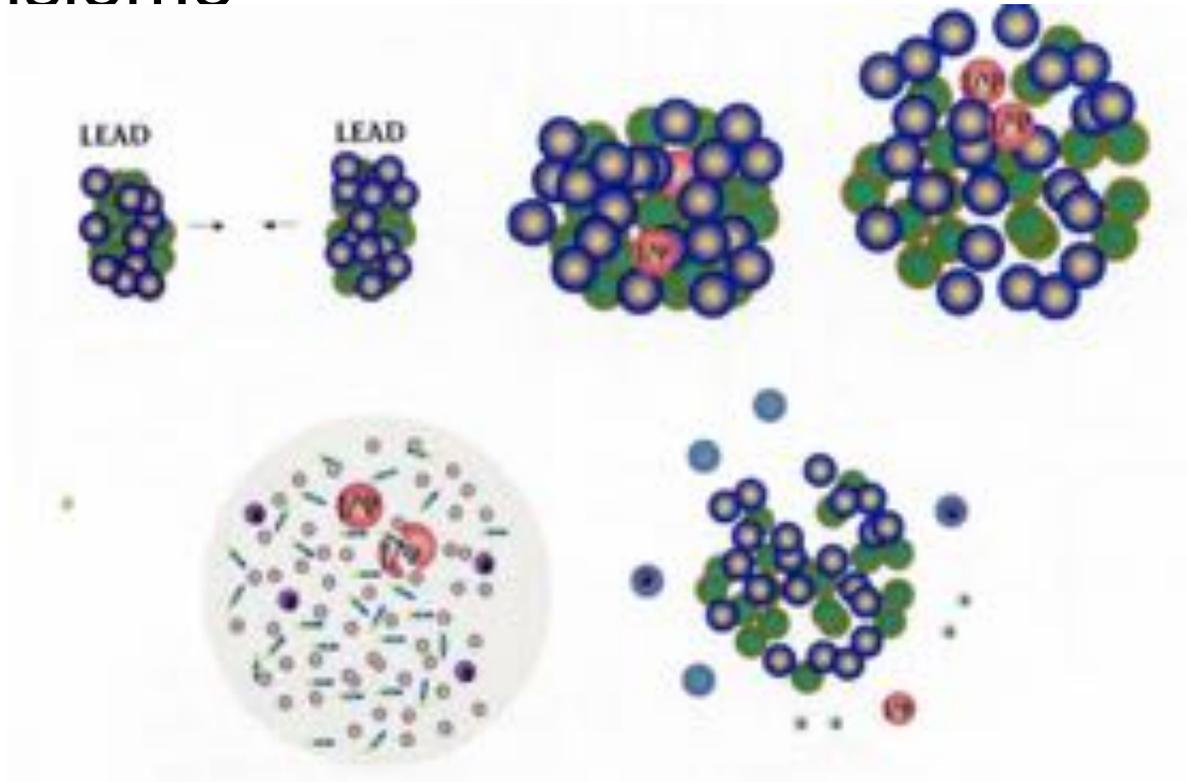
- **Jet quenching:** perdite di energia nel plasma  
→ "eventi sbilanciati"
- **Soppressione di particelle  $J/\Psi$ :** l'alta temperatura "fonde" delle particelle che vediamo in altre collisioni
- **Aumento di stranezza:** per l'alta energia oltre al quark u e d, si creano anche tanti quark s → si formano più particelle "strane" (= con anche il quark s)

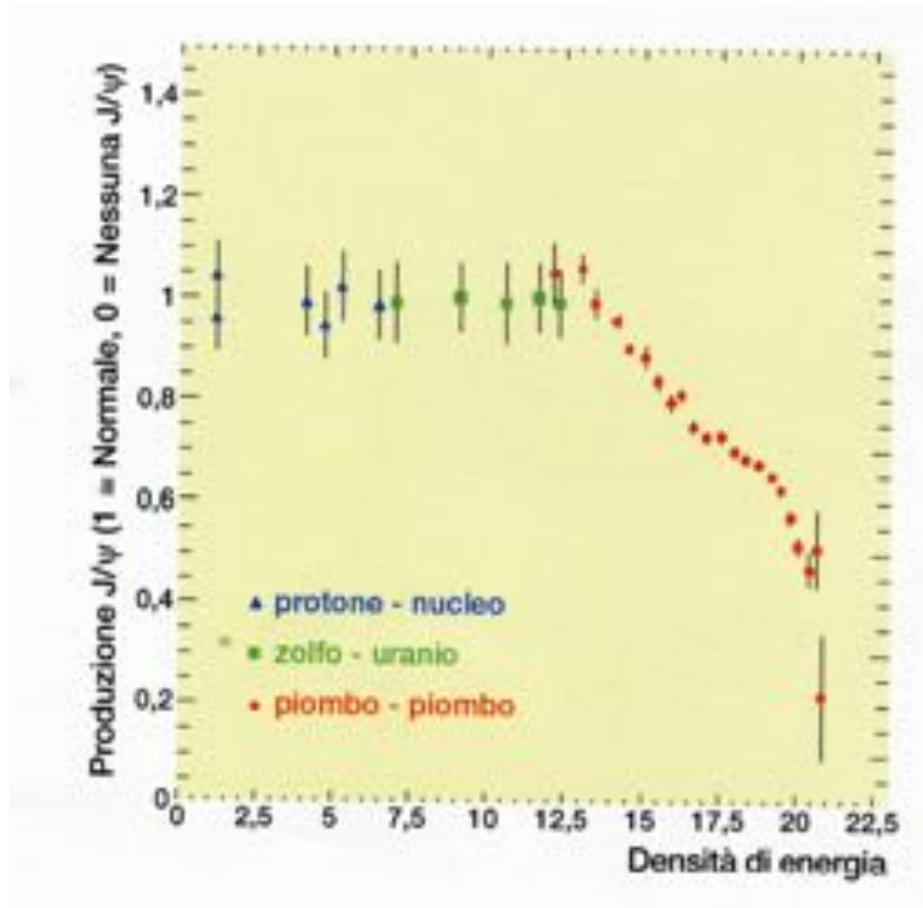


Evento fortemente asimmetrico: l'altro jet si e' 'fuso' nel nuovo stato di materia

La particella  $J/\Psi$  è fatta di 2 quark: c e anti-c

In collisioni p-p si forma e poi viene rivelata. In collisioni Pb-Pb lo scambio di energia con i quark e gluoni intorno non permette ai due quark di "stare insieme"



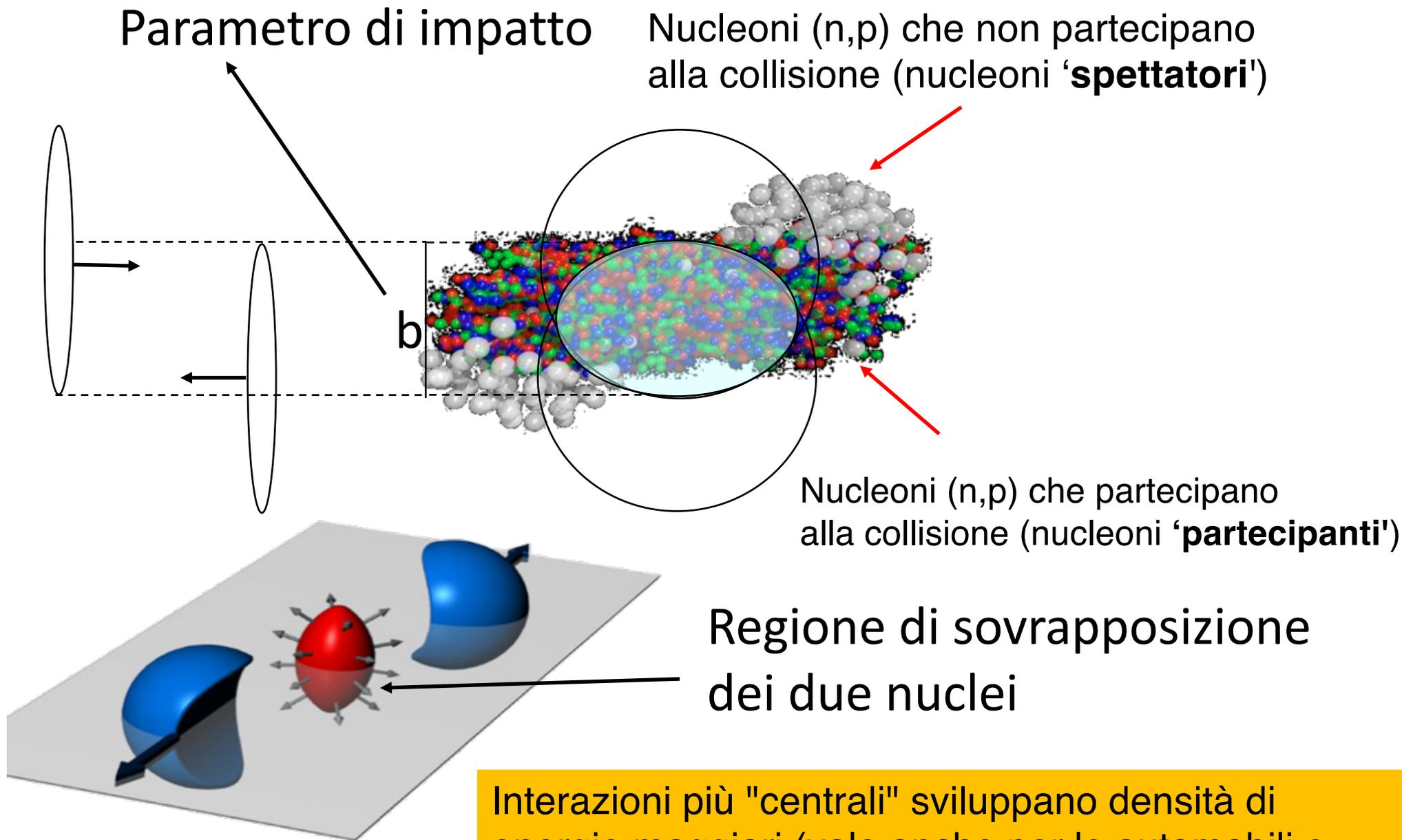


Facendo collidere ioni via via più pesanti sviluppando via più energia vediamo meno  $J/\psi$ !

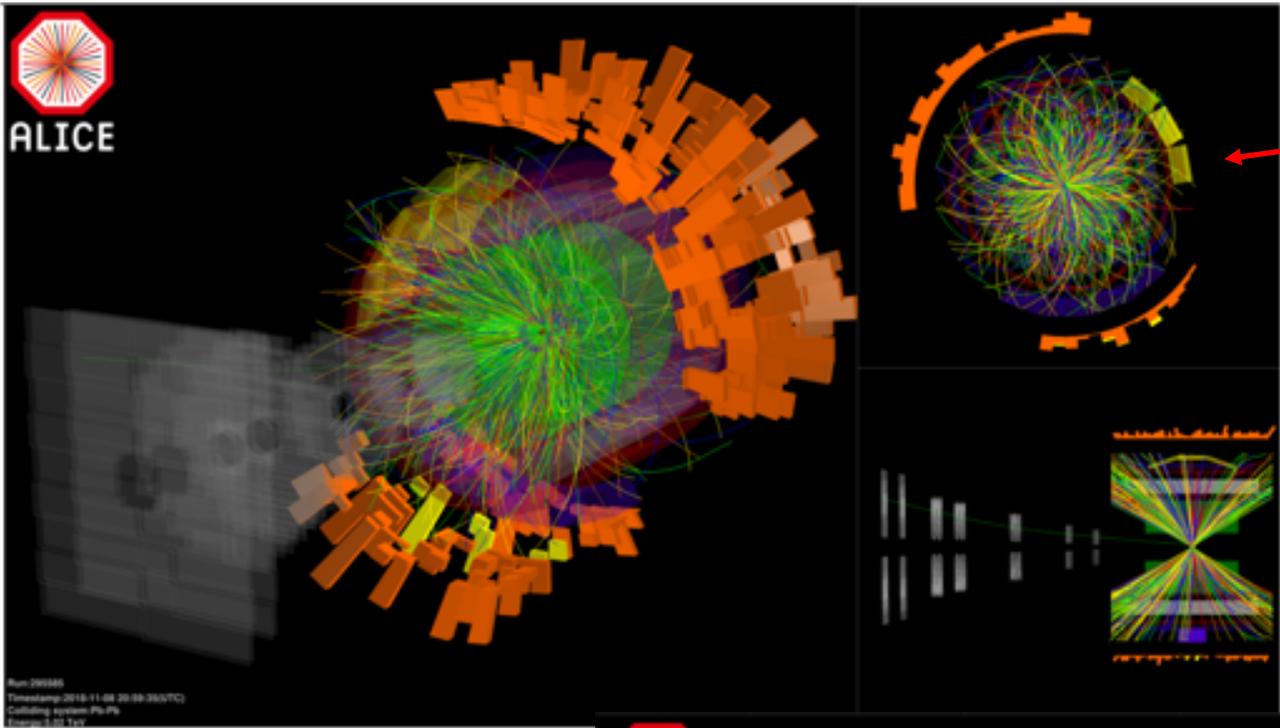
# Intermezzo: la centralita' della collisione



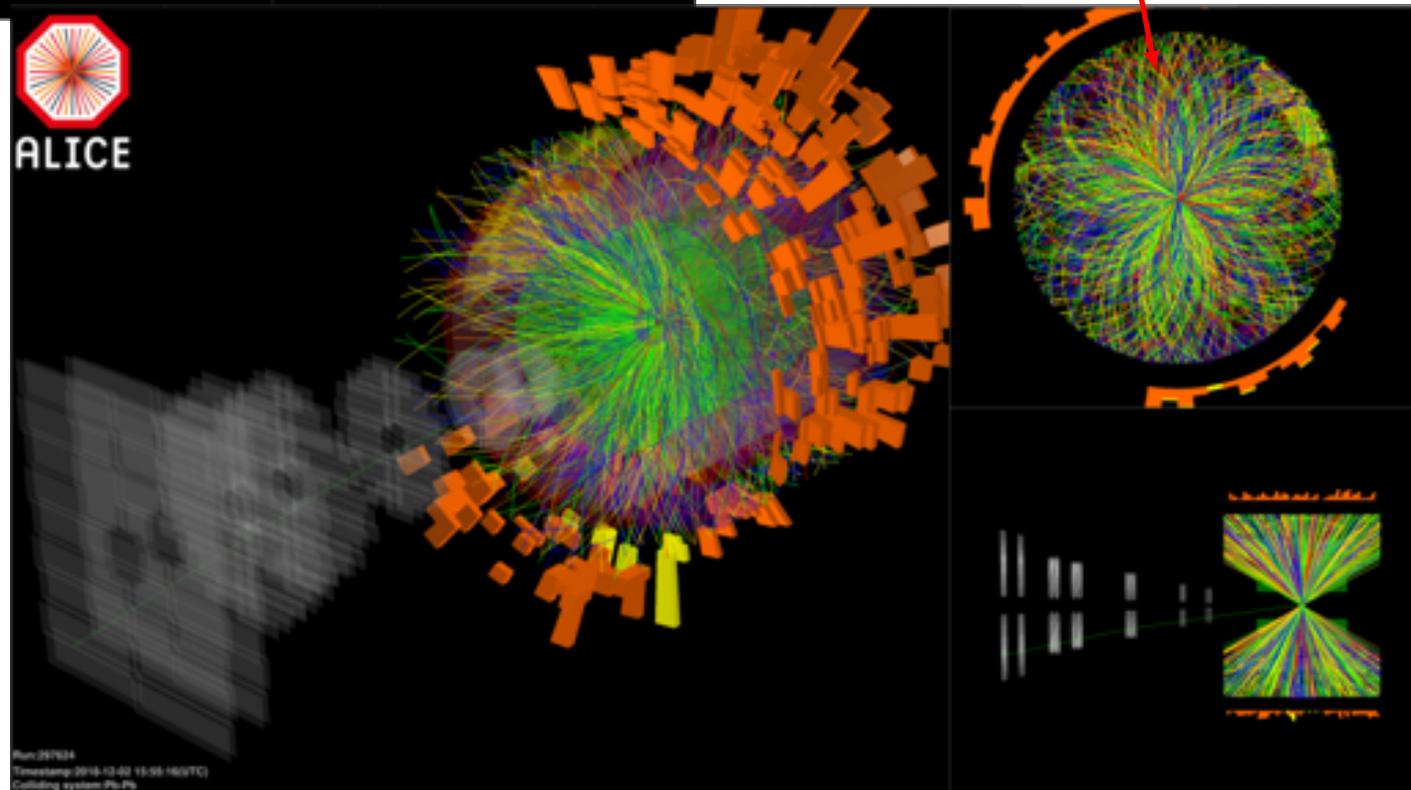
# Intermezzo: la centralita' della collisione



Interazioni più "centrali" sviluppano densità di energie maggiori (vale anche per le automobili e ovviamente conta anche la velocità!)



In questi due eventi il numero di particelle è diverso, la "centralità" è diversa



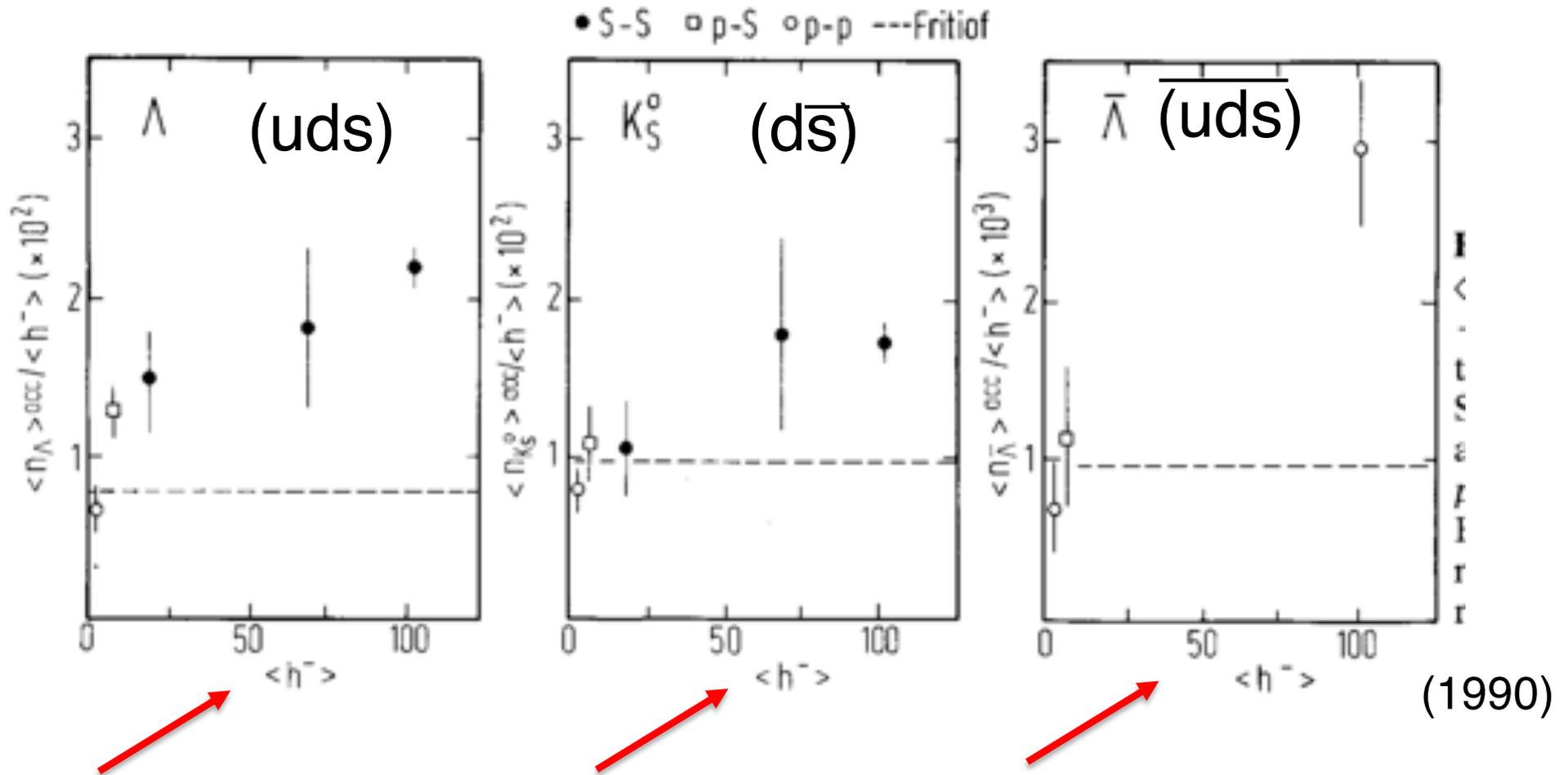
17/03/2021

# Aumento "stranezza"

- Aumentando densità di energia (il numero partecipanti, ioni sempre più pesanti, la centralità) nella "zuppa" di quark e gluoni si formano più coppie di quark s e anti-s (il quark s "pesa" un po' di più che i quark u e d, ma quark e gluoni della "zuppa" hanno energia via via più elevate)
- Che succede alla produzione di particelle come K (us o ds) e  $\Lambda$  (uds) che possiamo osservare nell'evento?

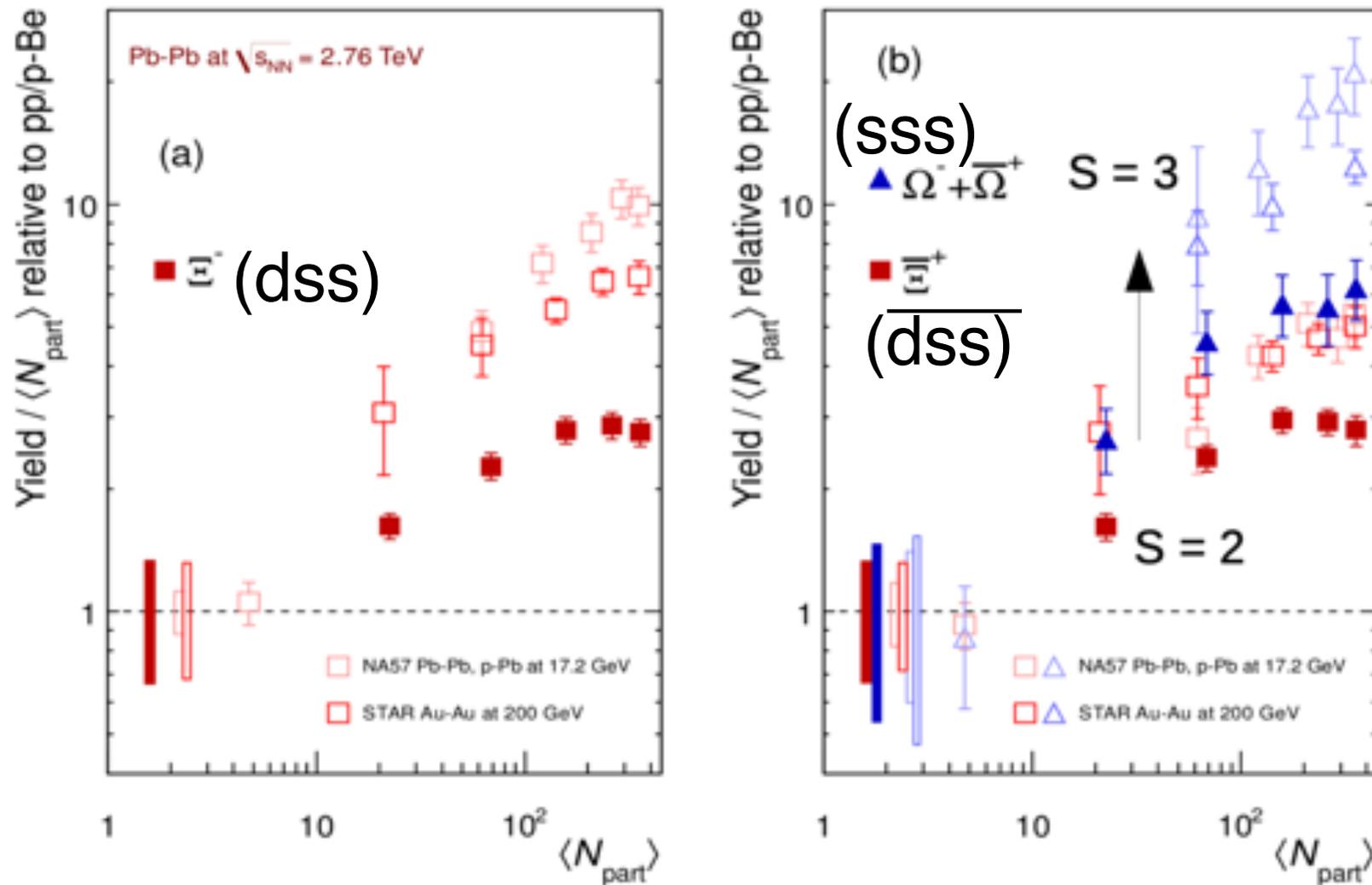
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name→	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom

# Passando da collisioni pp a S-S la "stranezza" aumenta



Numero particelle cariche nell'evento  
(e' una indicazione del numero di partecipanti)

# Anche altre particelle crescono con centralità



Aumento misurato in 3 acceleratori: SPS, RHIC e **LHC**

## L'ultimo sommario....è un controllo....

- ✓ 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!**