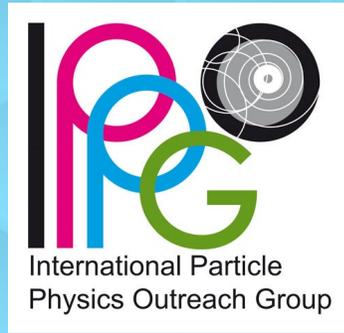




ALICE



International Particle
Physics Outreach Group



Un viaggio verso il Big Bang

ALICE: a journey to discovery



ALICE International Masterclass 2025

THE BIG THEORY

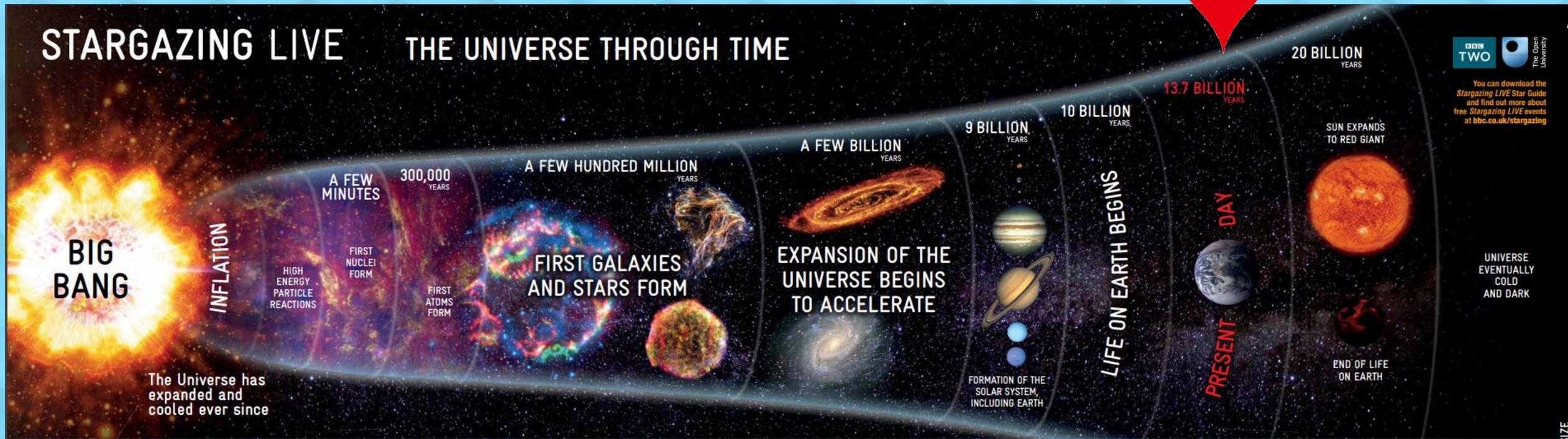


THE BIG BANG THEORY



STARGAZING LIVE

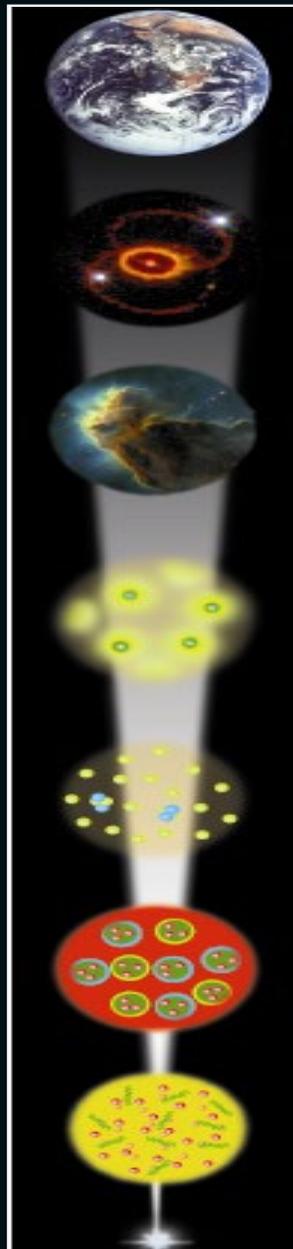
THE UNIVERSE THROUGH TIME



Il Big Bang è un modello cosmologico basato sulla relatività generale secondo cui l'universo iniziò a espandersi, circa 13,7 miliardi di anni fa, a velocità elevatissima a partire da condizioni di temperatura e densità estreme e questo processo continua tuttora (Legge di Hubble o relazione red shift-distanza)

14 × 10⁹ y
> 3 × 10⁸ y
4 × 10⁵ y
3 min
10⁻⁴ s
10⁻⁶ s

time



temperature

3 K
50 K - 3 K
4,000 K
10⁹ K
10¹² K
> 10¹² K

Today

Star formation.
Nuclei with A > 8 formation

Neutral atoms formation

Low mass nuclei d, He, Li

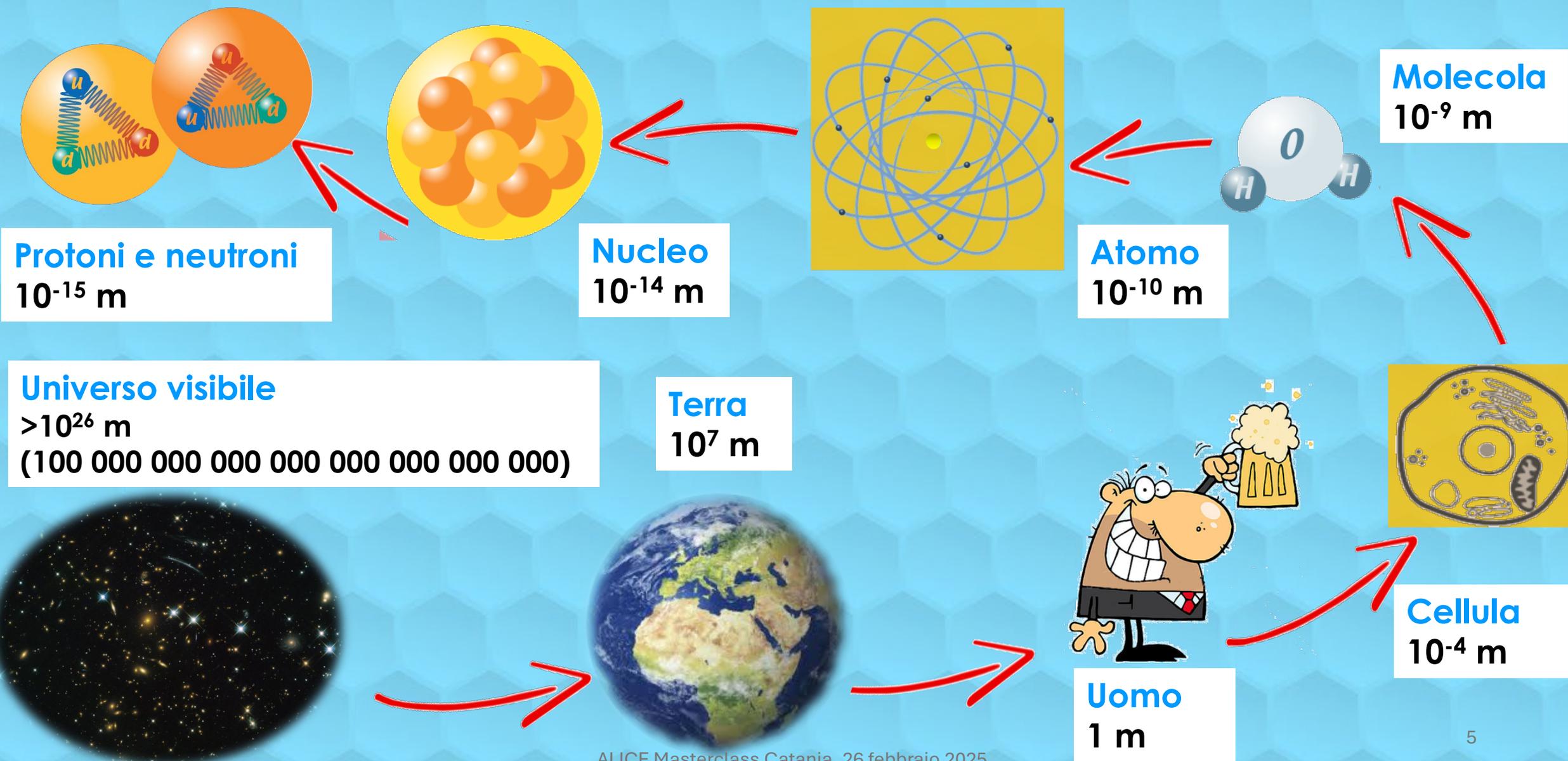
Protons & Neutrons

Quark gluon plasma

Free quarks, leptoni

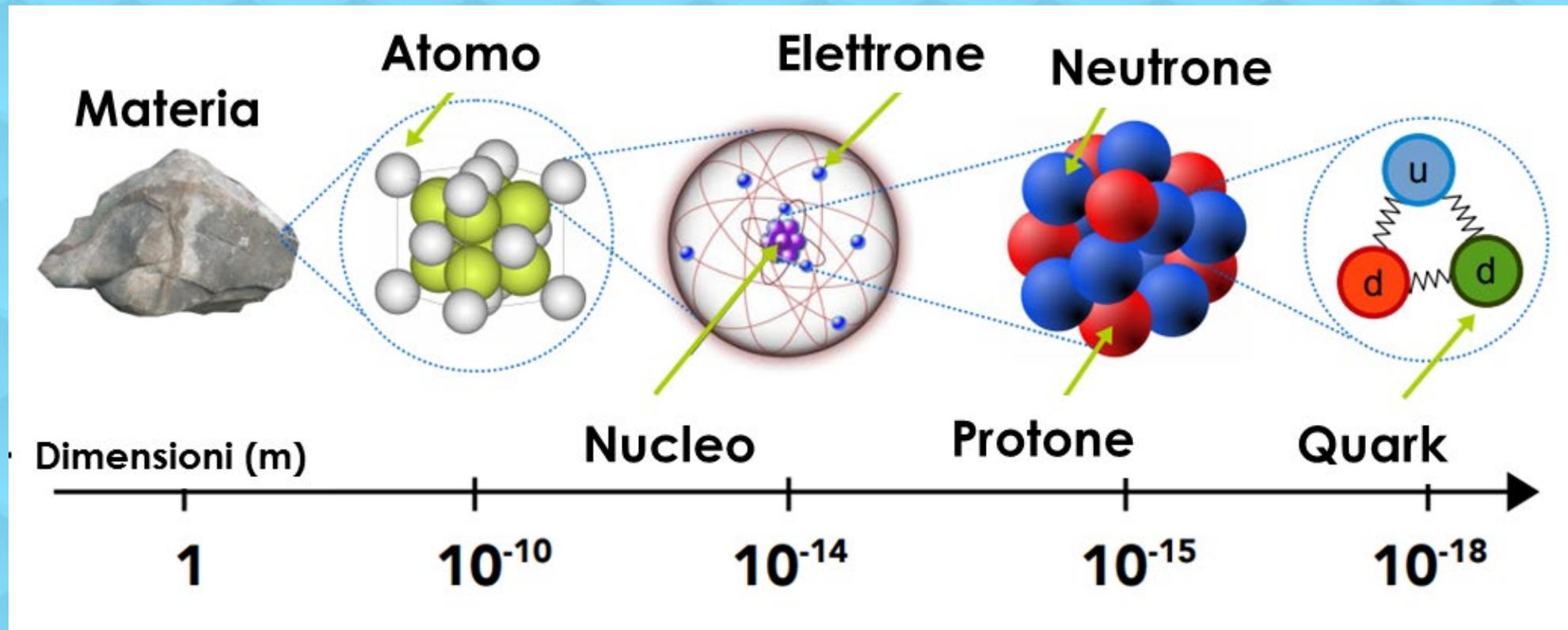
Big Bang

LA MATERIA OGGI



I COSTITUENTI ELEMENTARI DELLA MATERIA

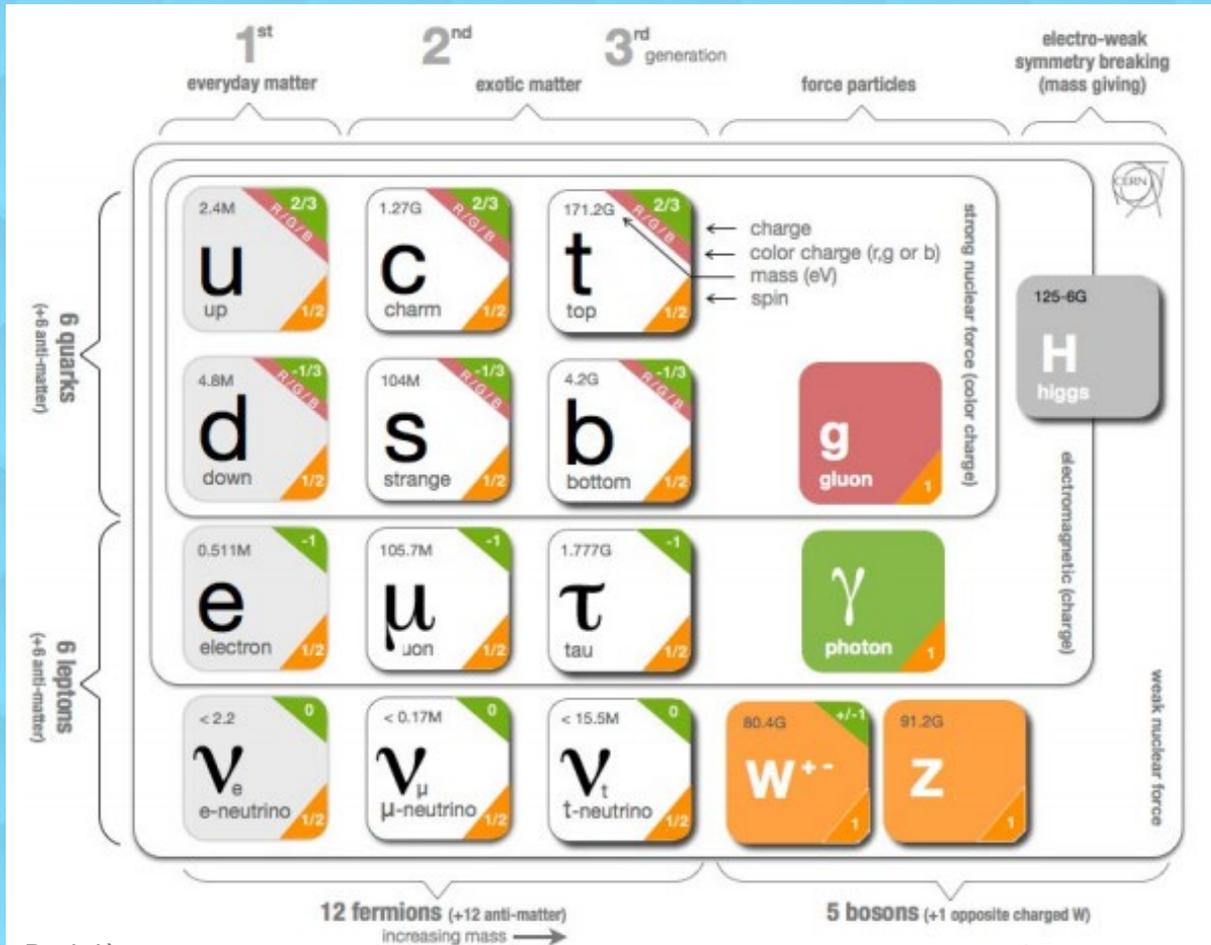
ἄτομος : indivisibile



Elettroni e quark sono **PARTICELLE ELEMENTARI**, senza struttura interna

IL MODELLO STANDARD

Il Modello Standard è ad oggi la teoria che descrive efficacemente centinaia di particelle e interazioni complesse attraverso "poche" particelle elementari e interazioni fondamentali



Tutte queste particelle sono state osservate prima dell'avvento dell'acceleratore LHC, tranne una: il **BOSONE di HIGGS**



IL BOSONE DI HIGGS

Il bosone di Higgs è un bosone elementare associato al campo di Higgs, che svolge un ruolo fondamentale nel Modello Standard conferendo la massa alle particelle elementari.

Più forte una particella interagisce con il campo di Higgs, più la particella è massiva

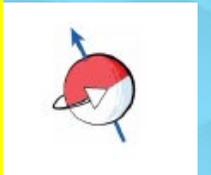
QUARKS

6 tipi di quark divisi in 3 famiglie

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	u up	c charm	t top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	d down	s strange	b bottom

QUARKS

- Proprietà**
- Spin (momento angolare intrinseco) = $\frac{1}{2}$
 - Carica elettrica frazionaria ($2/3, -1/3$)
 - Non esistono come particelle libere



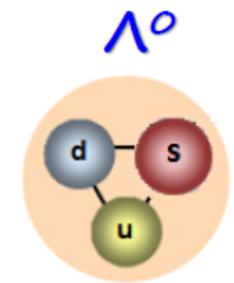
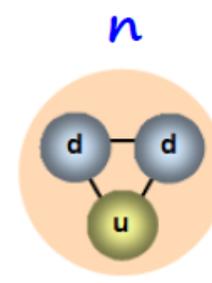
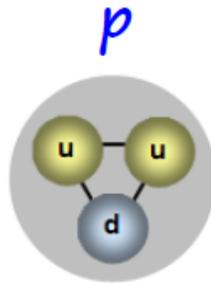
ADRONI

Il Modello Standard prevede che i quark si combinino formando stati legati (particelle) chiamate **adroni**

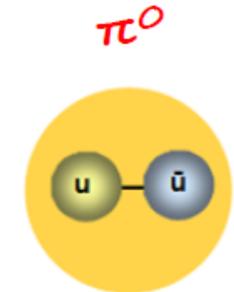
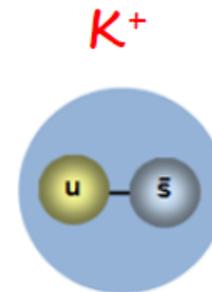
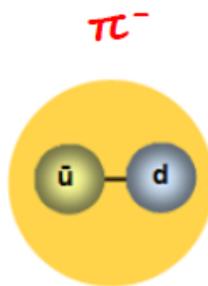
I quark hanno una carica frazionaria ($-1/3$ o $2/3$). Essi si combinano per formare una particella con carica unitaria

I quark hanno una "proprietà" chiamata "carica di colore" (rosso, verde, blu). I quark si combinano per formare una particella con "carica di colore" uguale a zero.

□ **BARIONI** → particelle formate da 3 quarks



□ **MESONI** → particelle formate da un quark e un anti-quark



LEPTONI

Particelle elementari molto più leggere dei quark.
Esistono 6 leptoni divisi in 3 famiglie

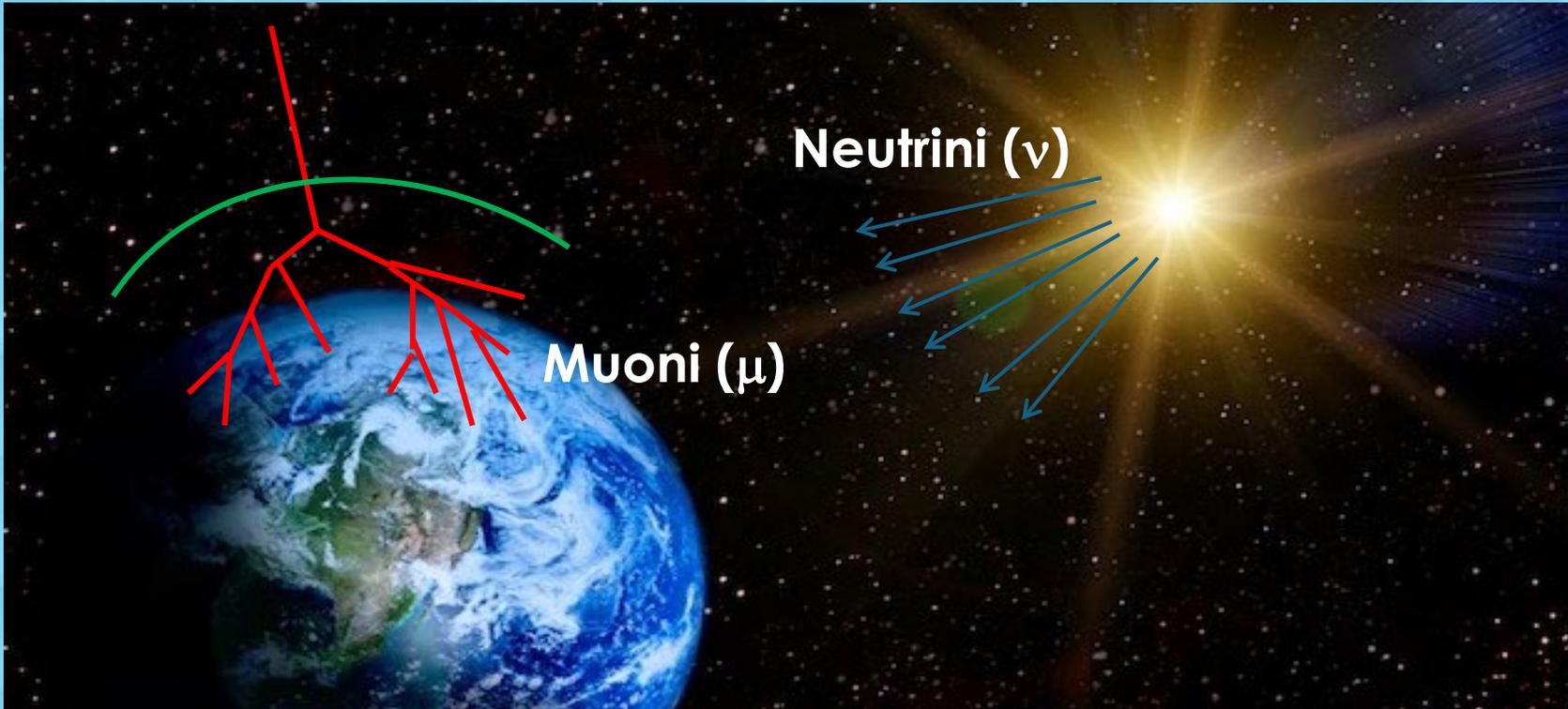
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino

Proprietà

- Spin (momento angolare intrinseco) = $\frac{1}{2}$
- Elettrone, mu, tau con carica elettrica negativa
- Neutrini con carica elettrica nulla



I LEPTONI SONO TRA NOI



Neutrini e muoni ci attraversano continuamente

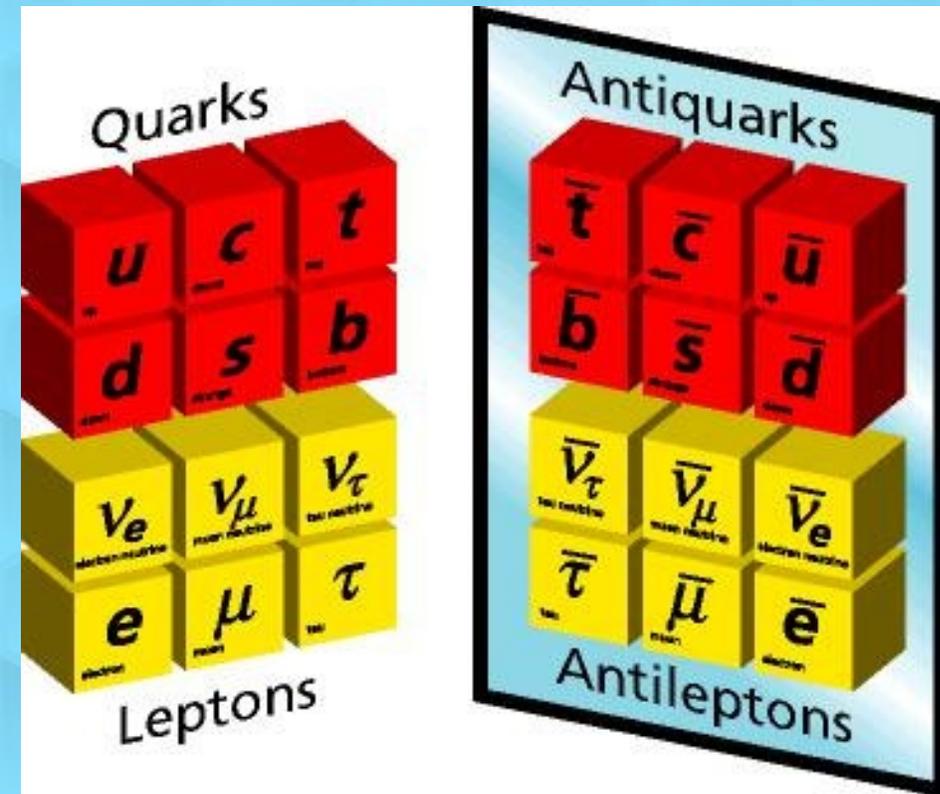
Neutrini: 100 miliardi al secondo al cm^2

Muoni: 100 al secondo al m^2

Che cos'è l'antimateria?

Particelle e antiparticelle hanno:

- Stessa massa
- Carica (non solo elettrica) di segno opposto



Particelle di **materia e antimateria** sono sempre create in coppia, in accordo con $E = mc^2$

Applicate su scala cosmica queste leggi prevederebbero un Universo costituito da uguali quantità di materia e di antimateria.
Ma ...l'Universo appare costituito solo di materia!

La Grande Annichilazione

10 000 000 001

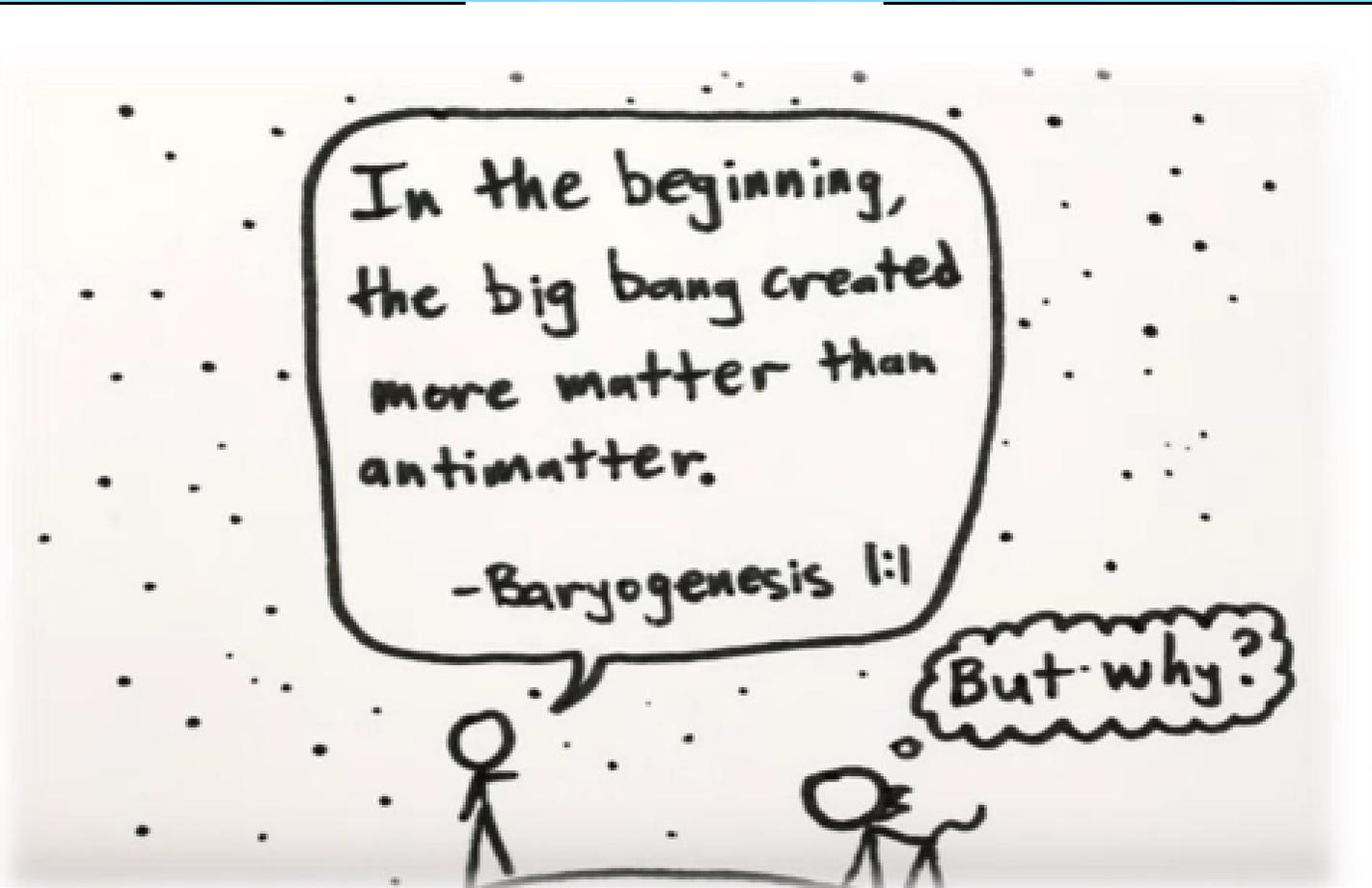
MATERIA

1

10 000 000 000

ANTIMATERIA

0



In the beginning,
the big bang created
more matter than
antimatter.

-Baryogenesis lol

But why?

LE 4 INTERAZIONI FONDAMENTALI

Esperienza diretta nella vita quotidiana

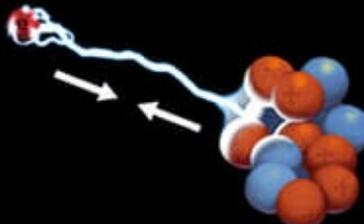
Moto dei
pianeti

10^{-38}

 Gravità



 Elettro
Magnetismo



Elettricità, onde
e.m., telefonini...

1

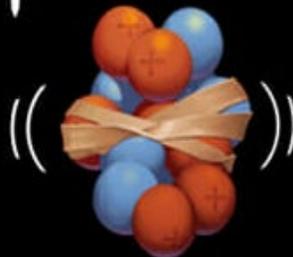
Funziona
mento del
Sole e
delle
stelle...

10^{-12}

 Debole



Forte



Legame dei quark

100

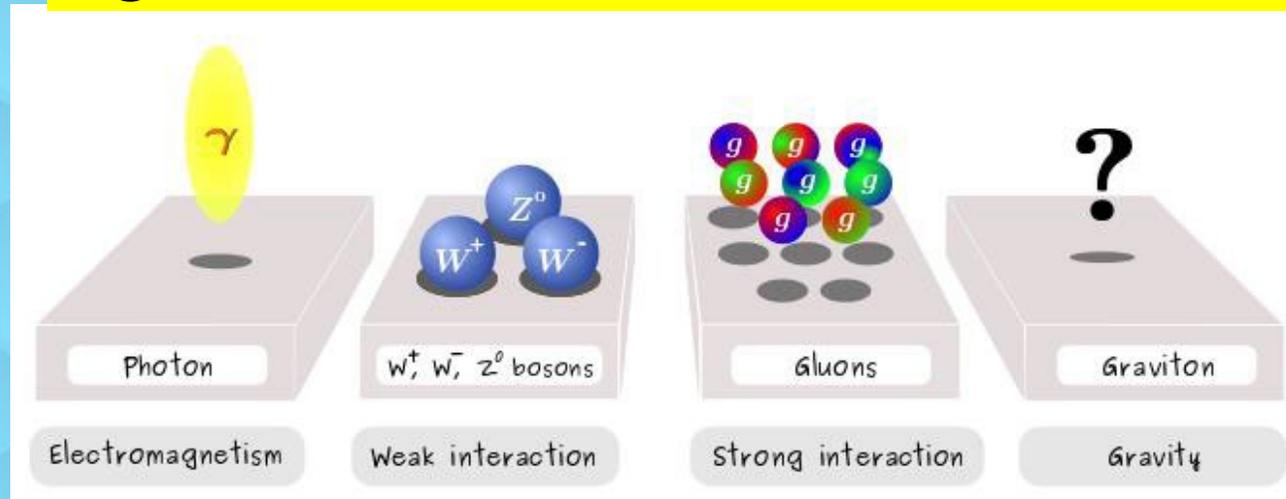
Confinare nel mondo subatomico

INTERAZIONI E MEDIATORI



Le interazioni avvengono per lo scambio di mediatori tra le particelle coinvolte: i bosoni

Ogni interazione ha il suo mediatore



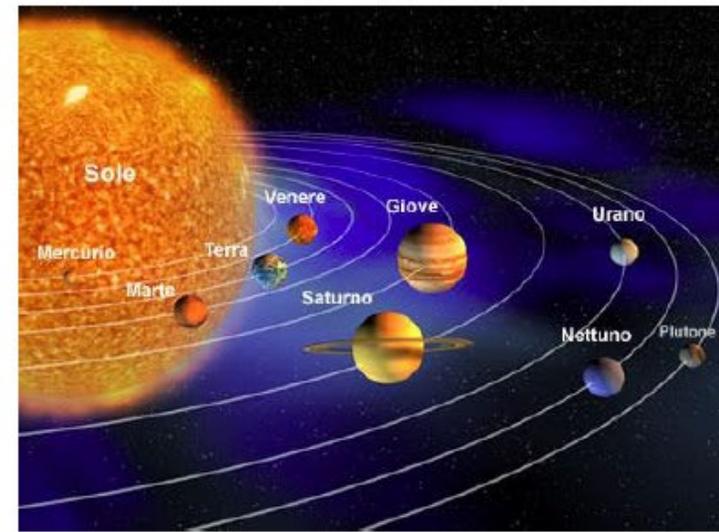
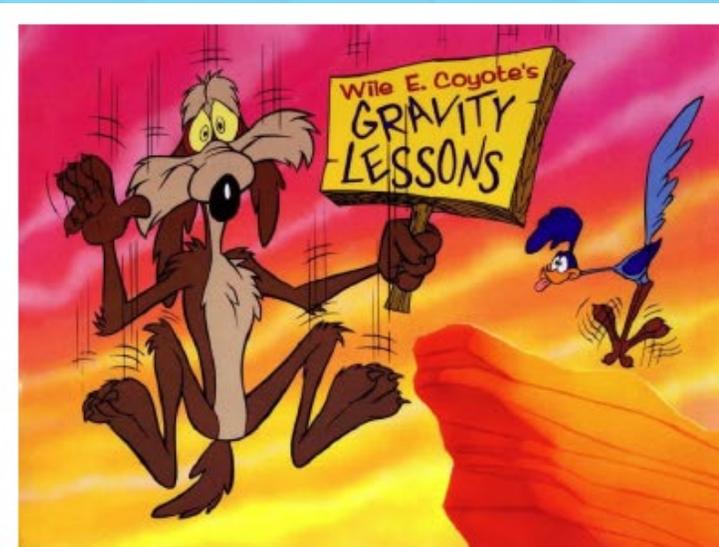
L'INTERAZIONE GRAVITAZIONALE

Si esercita fra tutte le particelle dotate di massa:
quark e leptoni carichi

Il gravitone (non ancora scoperto) è il mediatore della
forza gravitazionale

10^{38} volte più debole dell'interazione elettromagnetica

Trascurabile su scala atomica o subatomica
Resta esclusa dal Modello Standard



L'INTERAZIONE DEBOLE

mass	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Si esercita tra quark e leptoni

E' la sola interazione a cui è sensibile il neutrino

i bosoni Z e W sono i mediatori della forza debole

- Massa ~ 100 volta m_{protone}
- Scoperti al CERN (1983) -> Nobel (1984) a C. Rubbia e S. Van der Meer

10^{14} volte più debole dell'interazione forte

Viola alcune "simmetrie fondamentali"

- Processi visti allo specchio si comportano in modo diverso
- Particelle e antiparticelle si comportano in modo diverso!



L'INTERAZIONE ELETTROMAGNETICA

Si esercita tra tutte le particelle cariche: quark e leptoni carichi

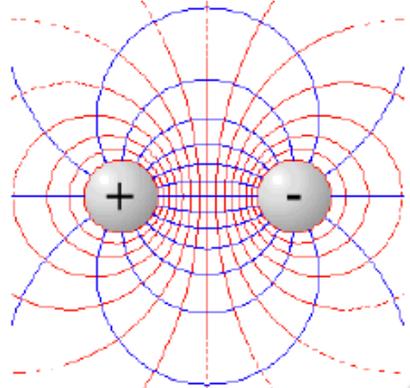
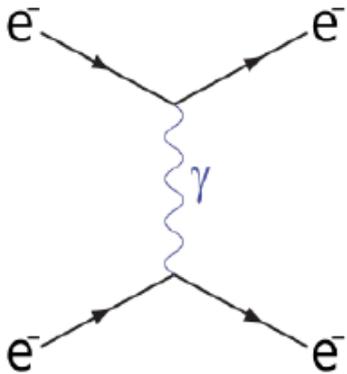
Il fotone è il mediatore della forza elettromagnetica

100 volte più debole dell'interazione forte

Compresa a fondo con l'unificazione dei fenomeni elettrici e magnetici, responsabile di numerosi fenomeni su scala atomica e sub-atomica

L'elettrodinamica quantistica (QED) è la teoria quantistica dei fenomeni elettromagnetici. Permette di fare predizioni estremamente accurate

mass	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	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	



L'INTERAZIONE FORTE

	mass	charge	spin
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$
	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$
	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$
	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$
	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$
GAUGE BOSONS	0	0	1
	0	0	1
	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	0	1
	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1

up, charm, top, gluon, Higgs boson, down, strange, bottom, photon, electron, muon, tau, Z boson, electron neutrino, muon neutrino, tau neutrino, W boson

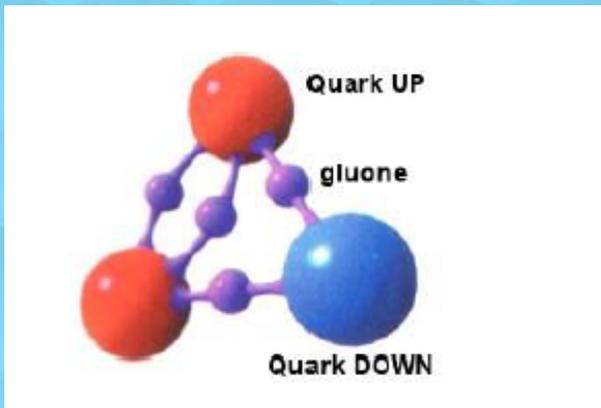
E' l'interazione più forte

Agisce tra i quark, in quanto dotati di carica "di colore" (rosso, verde, blu)

Mediata dagli 8 gluoni: particelle di massa nulla dotate di "colore" da cui il nome di Cromodinamica Quantistica per la teoria che li descrive

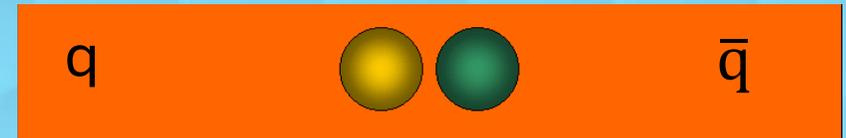
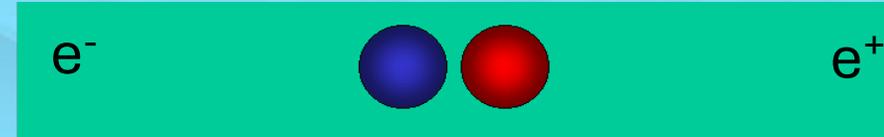
Tiene legati

- I quark dentro gli adroni
- I nucleoni dentro i nuclei (interazione residua)



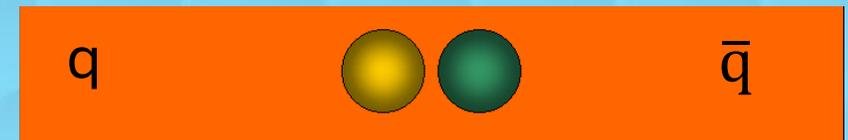
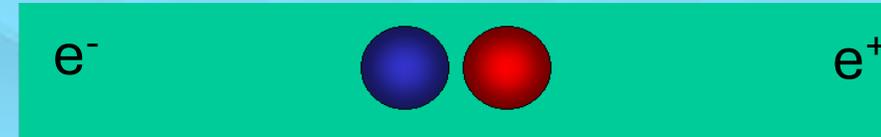
L'INTERAZIONE FORTE

	agisce su	particella mediatrice	tipo di interazione	intensità forza
interazione elettromagnetica	carica elettrica ⊕ ⊖	fotone (carica elettrica nulla)	attrattiva (cariche di segno opposto) o repulsiva (cariche stesso segno)	aumenta al diminuire della distanza tra le cariche, è nulla per grandi distanze
interazione forte	carica di colore rosso verde blu e anti-colori	gluone (possiede carica di colore)	attrattiva	nulla per piccole distanze tra le cariche di colore, aumenta incrementando la distanza



L'INTERAZIONE FORTE

	agisce su	particella mediatrice	tipo di interazione	intensità forza
interazione elettromagnetica	carica elettrica ⊕ ⊖	fotone (carica elettrica nulla)	attrattiva (cariche di segno opposto) o repulsiva (cariche stesso segno)	aumenta al diminuire della distanza tra le cariche, è nulla per grandi distanze
interazione forte	carica di colore rosso verde blu e anti-colori	gluone (possiede carica di colore)	attrattiva	nulla per piccole distanze tra le cariche di colore, aumenta incrementando la distanza



L'interazione forte aumenta al crescere della distanza tra i quark



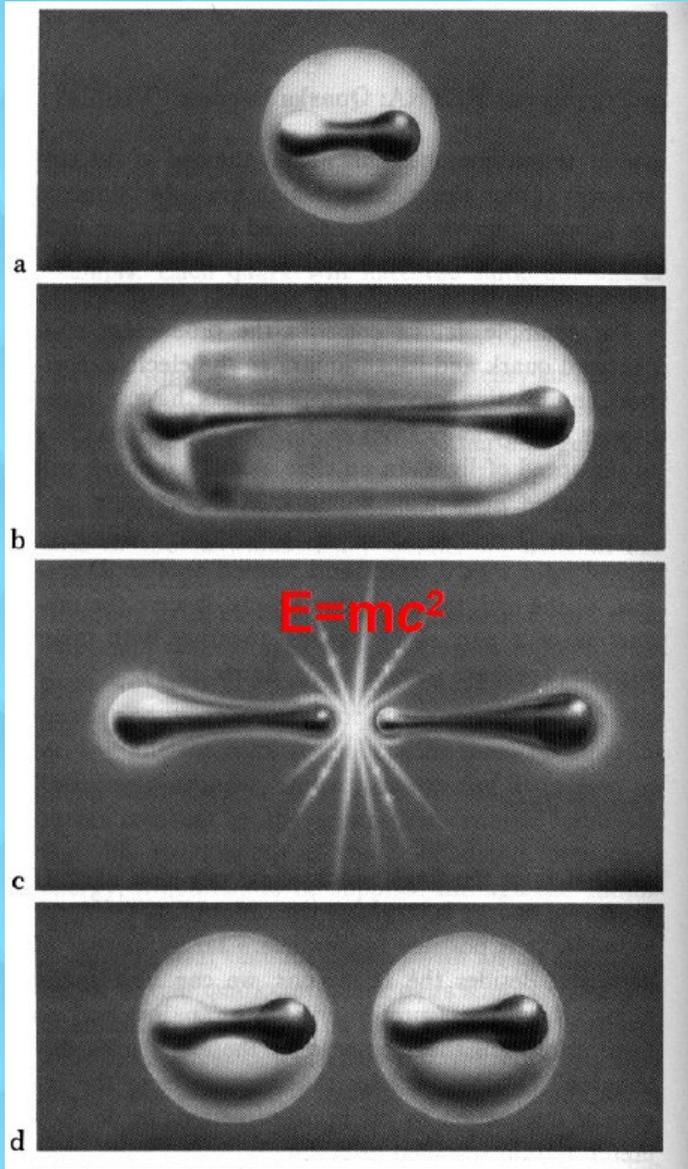
CONFINAMENTO

L'interazione forte è pressoché nulla quando i quark si trovano molto vicini



LIBERTA' ASINTOTICA

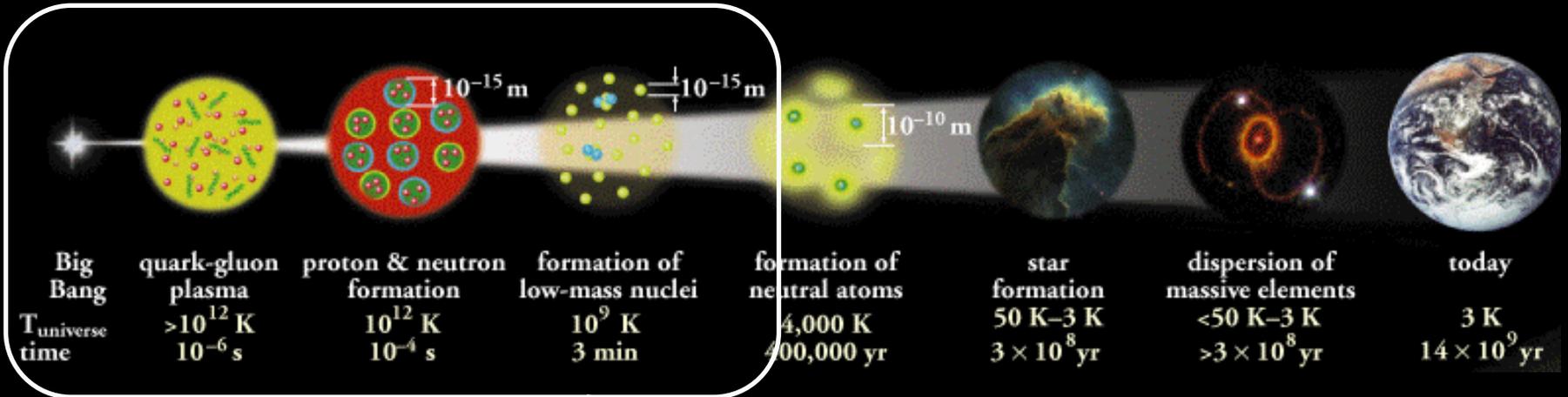
CONFINAMENTO: un mistero della natura



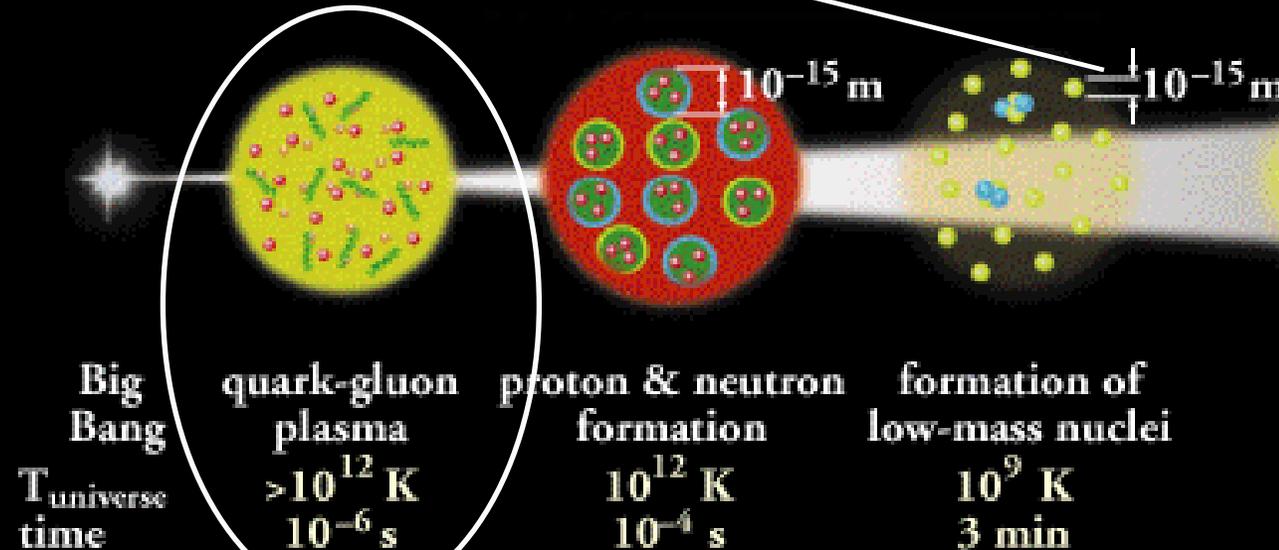
[illustration from [Fritzsch](#)]

- I quark dentro gli adroni sono legati dall'interazione forte.
- La forza di colore cresce al crescere della distanza fra i quark.
- Quando l'energia viene fornita ai quark, il tubo di gluoni si allunga fino a che è raggiunto un punto dove esso si spezza e forma una nuova coppia quark-antiquark, cioè sono formati due nuovi adroni.
- Un quark libero non è mai stato osservato. In generale non è possibile osservare una particella con carica di colore.

Storia dell'Universo



All'inizio
L'UNIVERSO
era...una zuppa
di quark e
gluoni



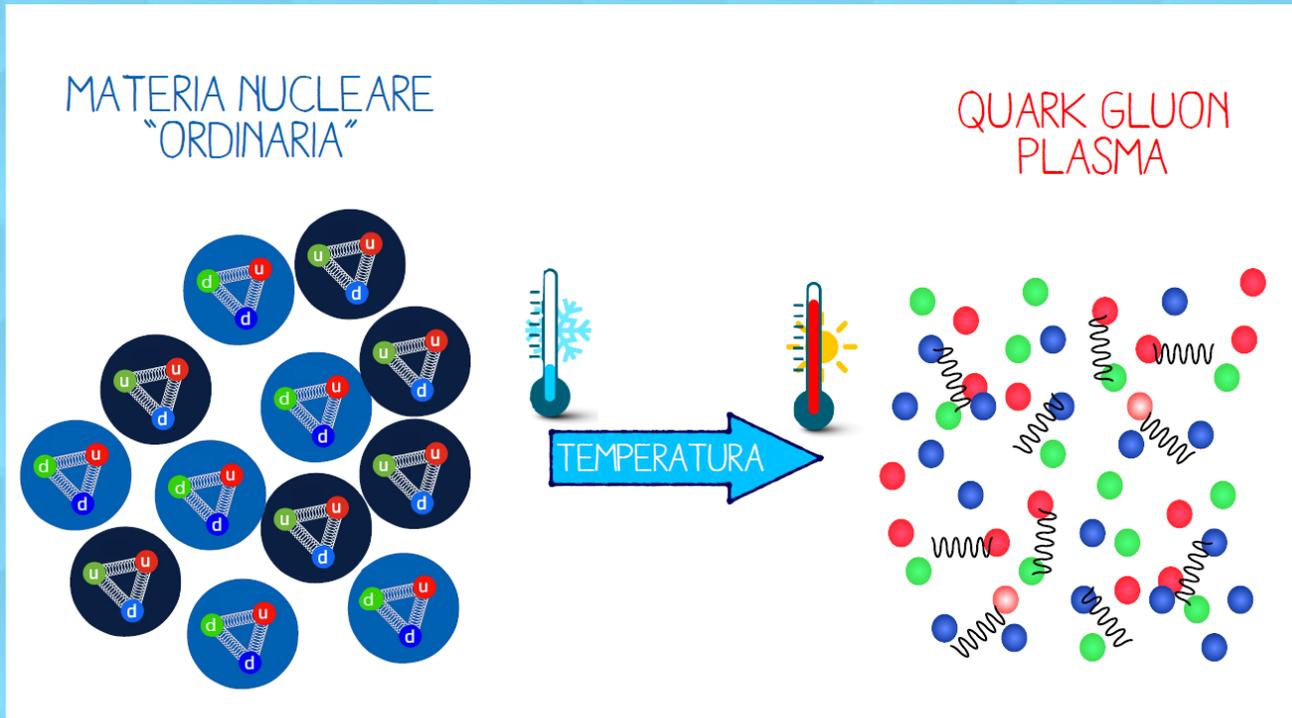
“I QUARK SONO NATI LIBERI
E ORA SONO IN CATENE”

COME/DOVE SI POSSONO OSSERVARE QUARK E GLUONI
LIBERI COME NELL'UNIVERSO PRIMORDIALE?

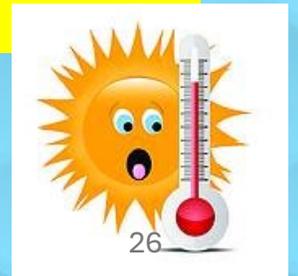
La «zuppa» primordiale: il Quark Gluon Plasma

Come facciamo a studiare il QGP?

Possiamo cercare di **ricrearlo**, o quantomeno di riprodurne una sua approssimazione

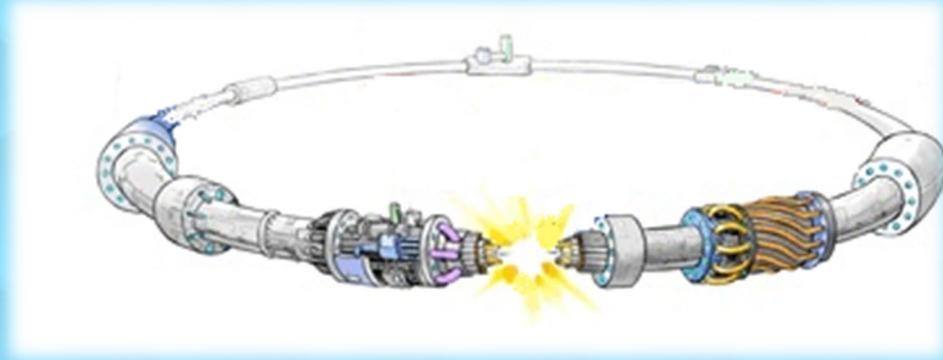


Per formare il Quark Gluon Plasma dobbiamo concentrare in un piccolo volume una grande energia (grande densità di energia) e sostanzialmente riscaldare la materia ordinaria a $T > 10^{12}$ K (1000 miliardi K) circa 100,000 più grande della temperatura del centro del Sole ($15 \cdot 10^6$ K)



TORNIAMO INDIETRO NEL TEMPO

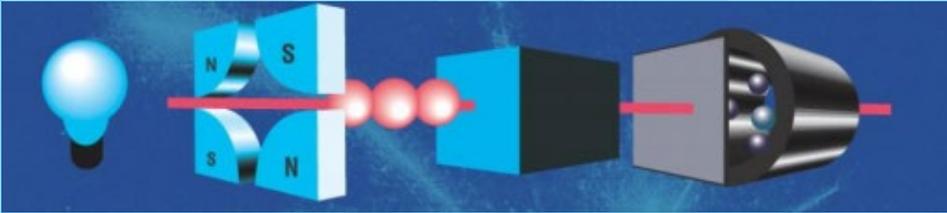
Usiamo gli acceleratori di particelle!



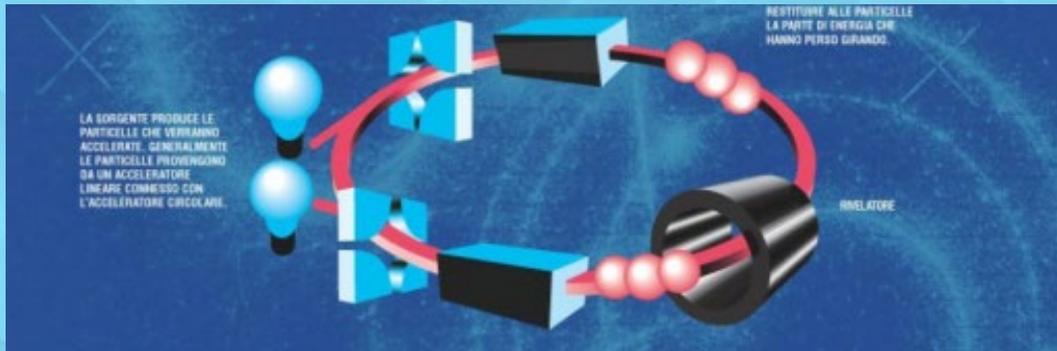
- Scegliamo nuclei pesanti (molti neutroni e protoni → molti quark e gluoni)
- Acceleriamo a velocità relativistiche
- Facciamoli collidere
- Creiamo una zona calda e densa nella quale riproduciamo i valori di temperatura necessari per formare il QGP

GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

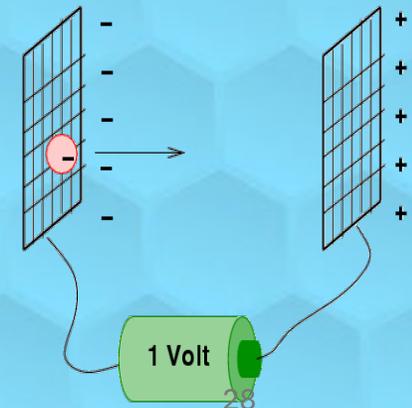
È una macchina utilizzata per produrre fasci di ioni o particelle subatomiche (elettroni, protoni, etc.) che abbiano una determinata energia e siano ben localizzate nello spazio



Utilizzano **CAMPI ELETTRICI** per accelerare le particelle e **CAMPI MAGNETICI** per deflettere le loro traiettorie



L'energia dei fasci si misura in Electron Volt (eV)



elettronVolt

Una carica elettrica Q che viene accelerata da una differenza di potenziale V acquista una energia $E = Q \cdot V$

1 eV è l'energia cinetica acquistata da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt

elettronVolt

1 eV rappresenta un'energia molto piccola

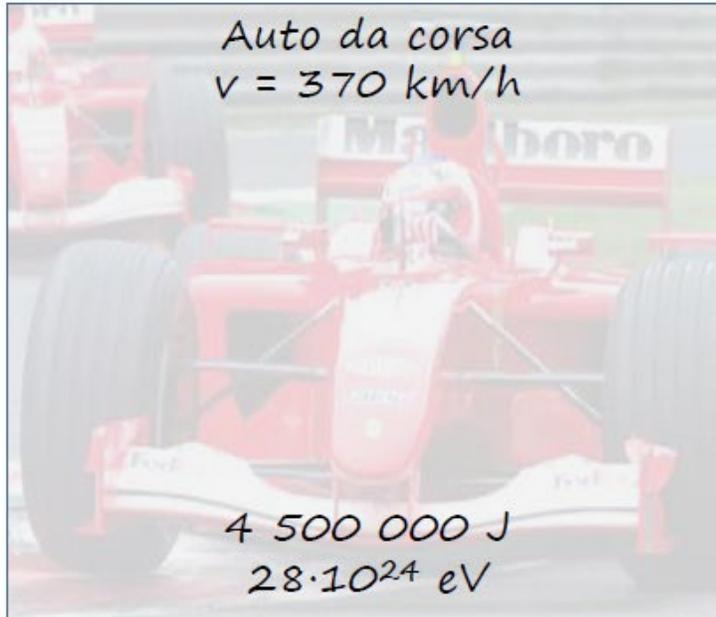
$$1 \text{ eV} = (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1\text{V}) = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Lampadina da 100 W
accesa per 1 ora



360 000 J
 $2.24 \cdot 10^{24}$ eV

Auto da corsa
 $v = 370 \text{ km/h}$



4 500 000 J
 $28 \cdot 10^{24}$ eV

Caldaia 12 600 kcal
in funzione per 1 h



52 000 000 J
 $324 \cdot 10^{24}$ eV

Multipli elettronVolt

$$10^{12} \text{ eV} = \text{TeV}$$

$$10^9 \text{ eV} = \text{GeV}$$

$$10^6 \text{ eV} = \text{MeV}$$

$$10^3 \text{ eV} = \text{keV}$$

Come funziona un acceleratore?

2° principio di Newton: l'accelerazione è conseguenza di una forza

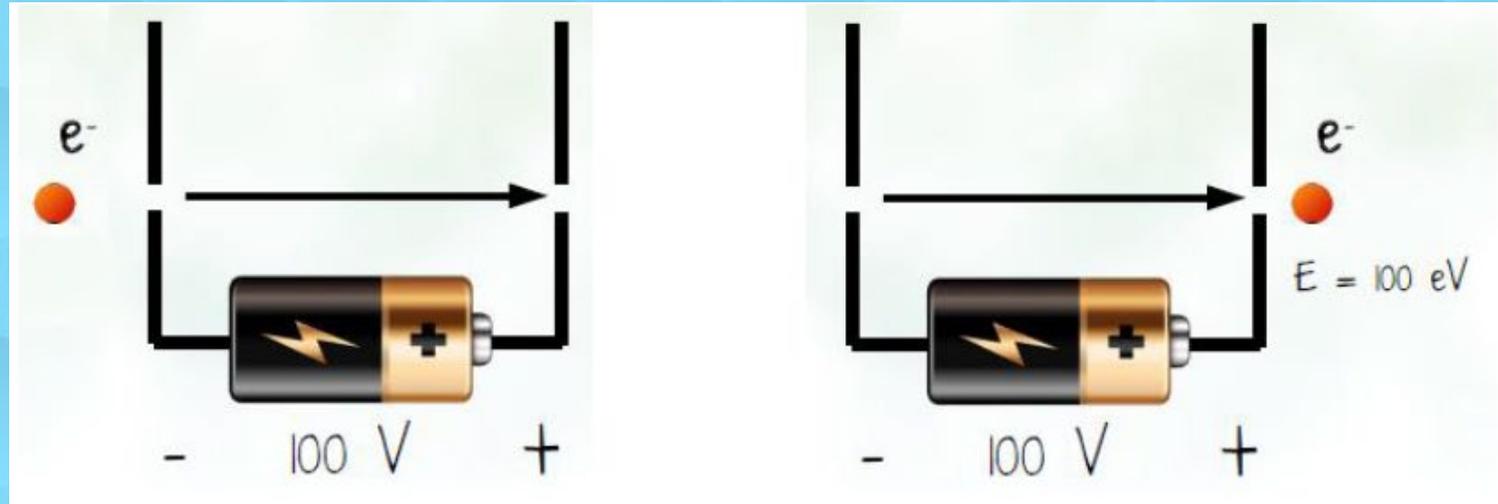
$$F = m \cdot a$$

Energia cinetica (= di movimento) di una particella $E = \frac{1}{2} mv^2$

"accelerare" una particella = darle energia

Come possiamo dare energia a una particella?

I nuclei atomici e molte particelle subnucleari posseggono una carica elettrica -> possiamo accelerarle facendole passare attraverso un campo elettrico!



Moto delle particelle in un acceleratore

La forza di Lorentz descrive il moto di una particella in un acceleratore

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Accelerazione

Curvatura e
foccheggiamento

\vec{p} = impulso

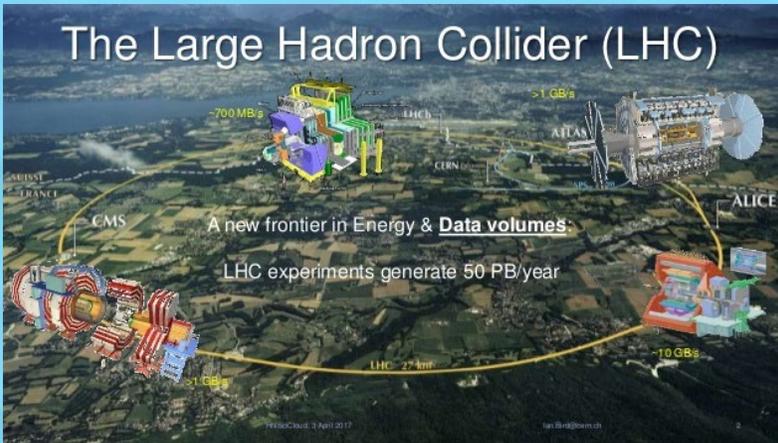
q = carica

\vec{E} = campo elettrico

\vec{B} = campo magnetico



LHC: LARGE HADRON COLLIDER



DOVE?

Al CERN, alla frontiera fra Svizzera e Francia a 100 m di profondità in un tunnel di 27 km di lunghezza.

Che cos'è?

È il più grande e potente acceleratore del mondo:

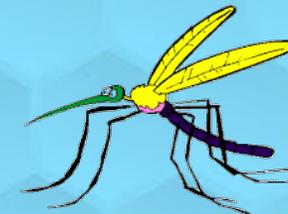
Fasci: protoni e nuclei (Pb/Xe/O)

Energie di collisione: fino a 14 TeV per protoni e 5.5 ATeV per i nuclei

Energie in gioco

$$E_{\text{fascio}} = 7 \text{ TeV} \rightarrow E = mc^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$
$$\rightarrow v = 0.999\,999\,99 \text{ c}$$

1 TeV è l'energia di una zanzara in volo!
Ma a LHC concentriamo questa energia in uno spazio che è milioni di milioni di volte più piccolo del corpo di una zanzara!

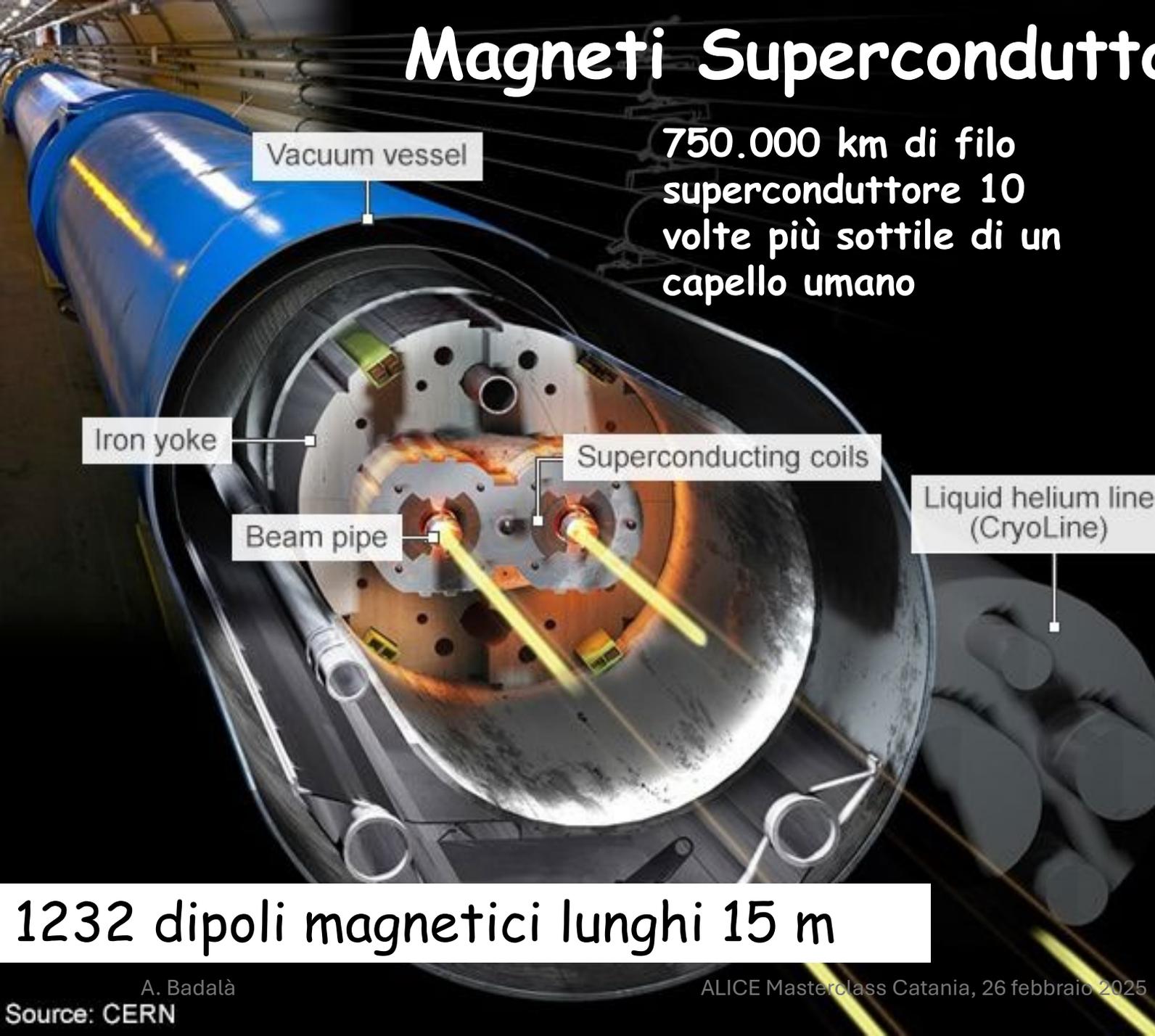


Il Large Hadron Collider

A long, brightly lit tunnel with a curved ceiling and floor. The tunnel is filled with complex machinery, including large blue and silver cylindrical components in the foreground. Two workers wearing blue hard hats and safety gear are visible in the distance, one riding a bicycle and the other pushing a yellow cart with a bright light. The perspective is from the center of the tunnel, looking down its length.

Dentro l'acceleratore, viaggiano in verso opposto due fasci di particelle di alta energia a velocità prossime a quella della luce. In un secondo un protone percorre 11,000 volte i 27 Km dell'anello. I fasci viaggiano in direzioni opposte in tubi separati. Questi sono tenuti a un altissimo vuoto (10^{-13} - 10^{-15} atm), pari al vuoto interstellare

Magneti Superconduttori LHC

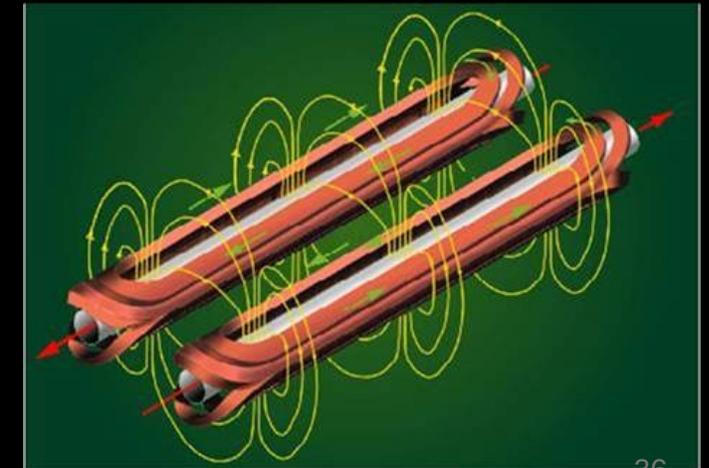


750.000 km di filo
superconduttore 10
volte più sottile di un
capello umano

Dentro le bobine
superconduttrici ($R \sim 0$) fluisce
una corrente di 11850 A



$B = 8.33 \text{ T} \sim$
200,000 il campo
magnetico terrestre



1232 dipoli magnetici lunghi 15 m

LHC è il più grande sistema criogenico al mondo!

**$T = 1.9 \text{ K} = -271.3^\circ \text{ C} !$
Più freddo dello spazio cosmico ($T = 2.7 \text{ K}$)**



120 tonnellate di Elio per raffreddare il tutto

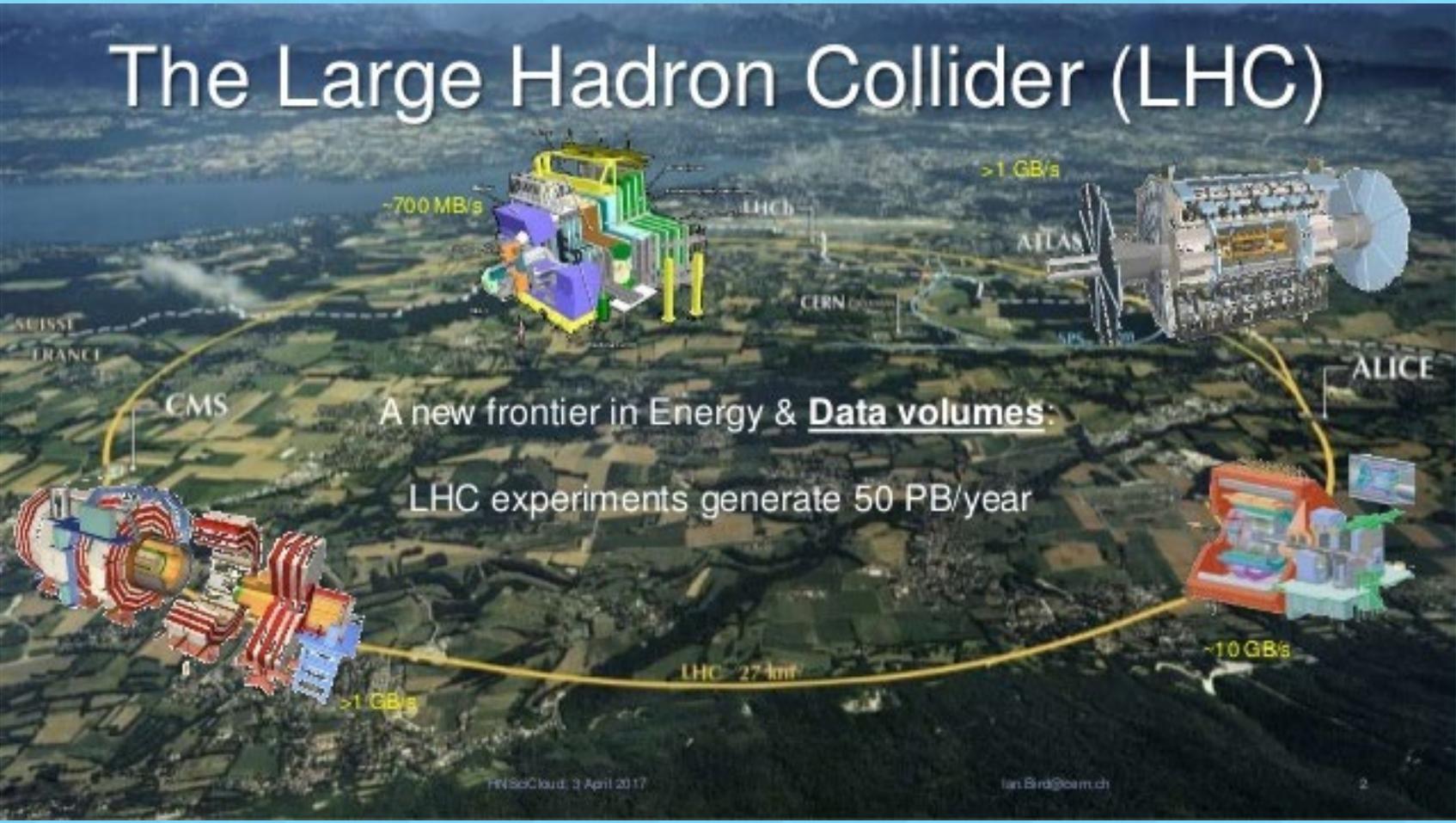


~100 milioni di Gb di dati da LHC in 3 anni = 1000 anni di DVD



ESPERIMENTI A LHC

The Large Hadron Collider (LHC)



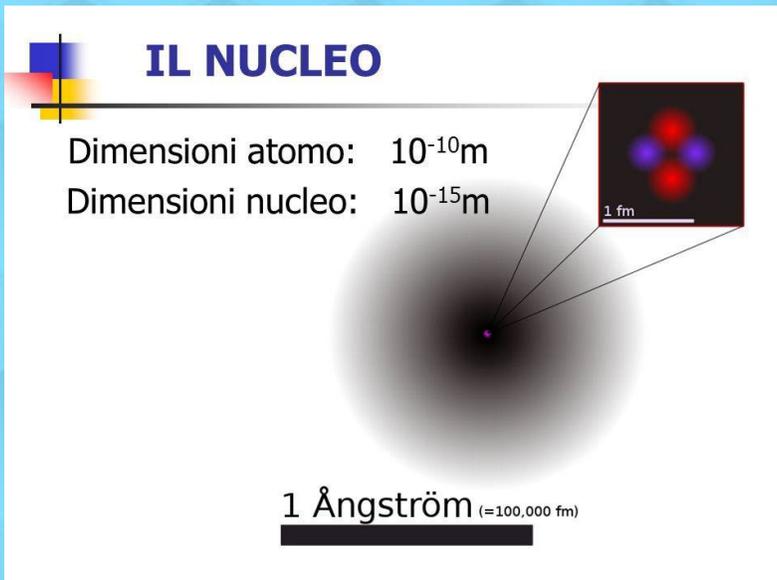
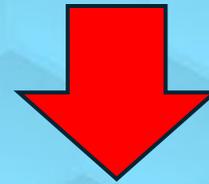
4 punti di interazione dove sono posizionati giganteschi apparati sperimentali per studiare le collisioni:

- ALICE
- ATLAS
- CMS
- LHCb

UN MINI-BIG BANG AL CERN

Ingredienti "necessari":

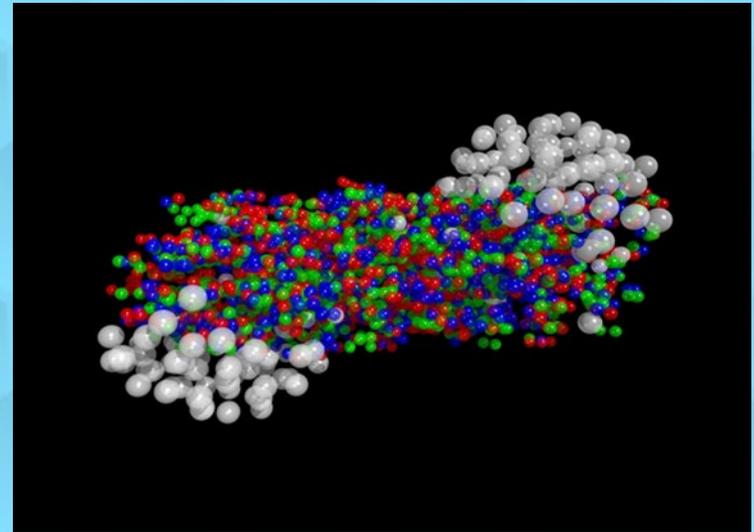
- **temperatura altissima** → generata attraverso la collisione di nuclei atomici accelerati fino a $v \sim c$ si fanno collidere ad energie elevatissime
- **piccolissima regione di spazio** → l'energia della collisione è concentrata in un volume delle dimensioni di un nucleo atomico



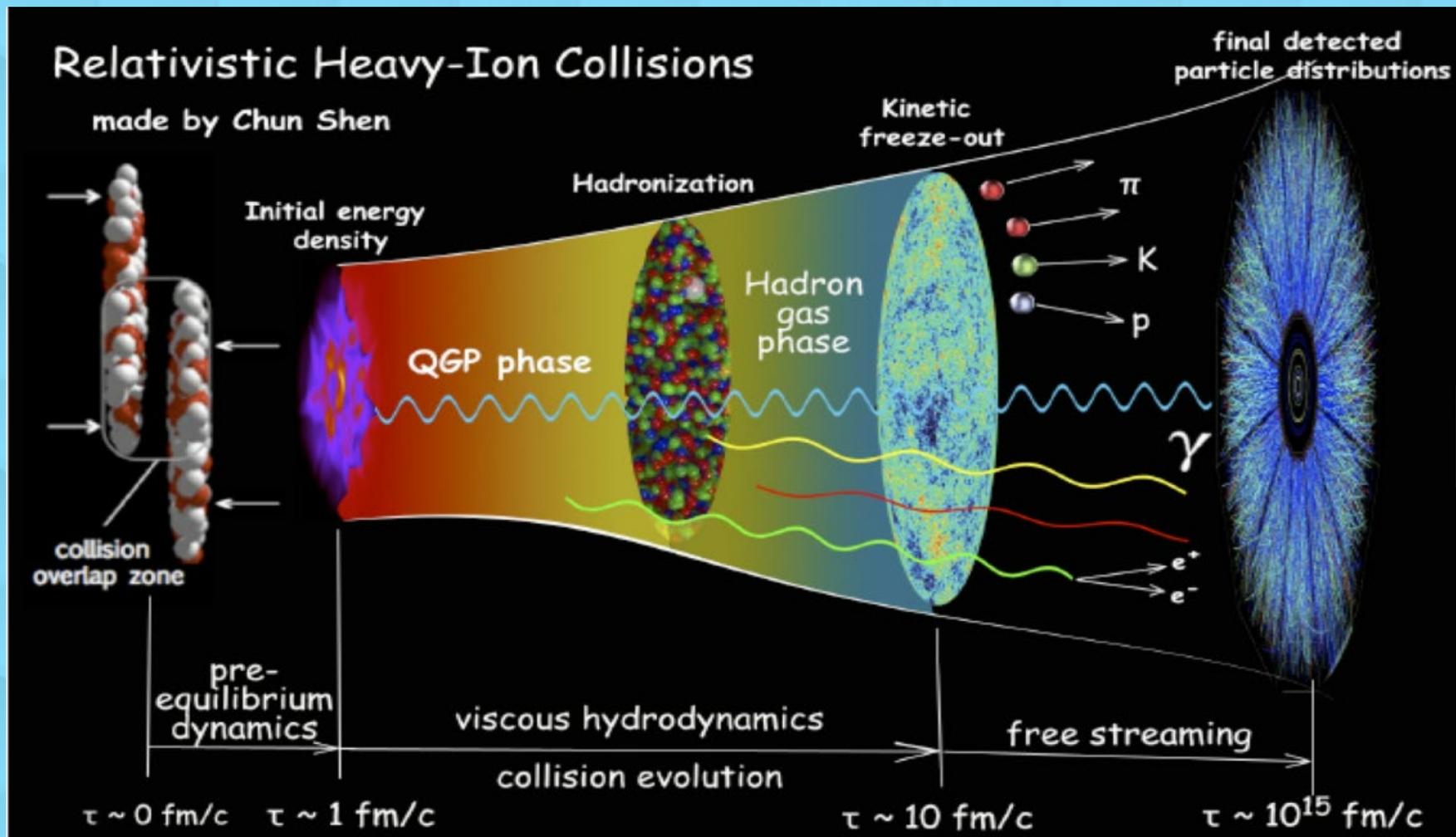
densità di energia simile a quella dell'universo pochi 10^{-6} s dopo il Big-Bang

UN MINI-BIG BANG AL CERN

Si crea una zona calda e densa con temperature $100,000 \times T_{\text{SOLE}}$

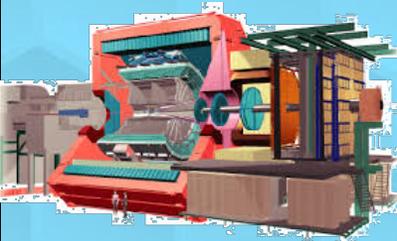


Ricreare il QGP in laboratorio



COLLISIONI

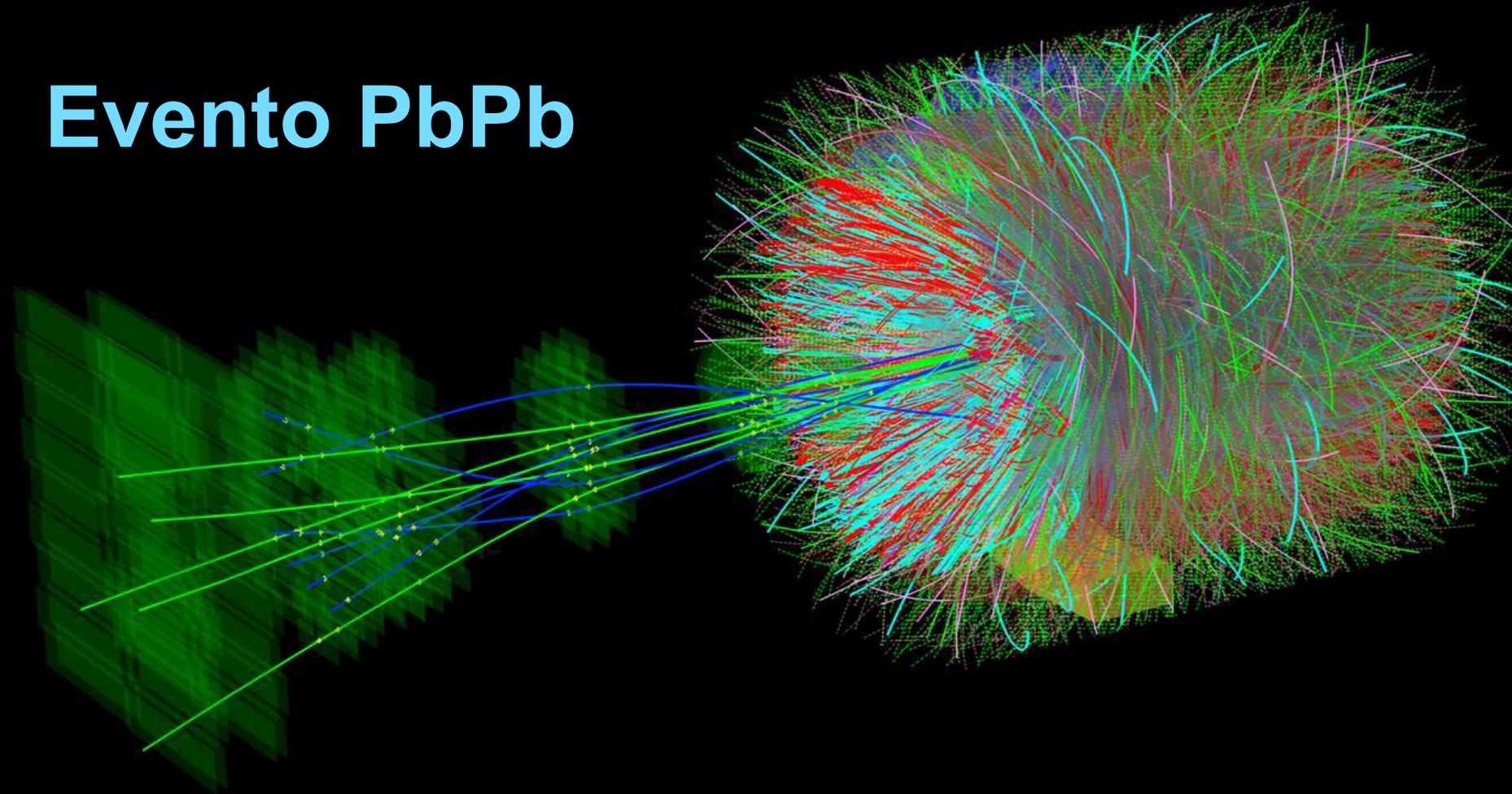
RIVELAZIONE



Mini Bang a LHC

Evento PbPb

Il tracciatore centrale di ALICE (ITS+TPC) è un tracciatore di altissima qualità. Progettato per tracciare le migliaia di particelle cariche che vengono prodotte in ogni collisione Pb-Pb.



Cosa cerchiamo?

Nel rivelare i prodotti dell'interazione degli ioni piombo, cerchiamo effetti previsti dai modelli teorici che ipotizzano il QGP

...cioè...

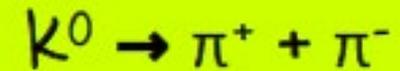
le «firme» del QGP!

- La soppressione degli stati $c\bar{c}$ e $b\bar{b}$ (quarkonia)
- **Aumento della stranezza**
- Presenza di open charm e beauty
- Soppressione della correlazione back-to-back
- Soppressione ad alto p_T
- Produzione di fotoni e leptoni diretti

Le particelle strane

Le particelle strane sono particelle che contengono almeno un quark *strano* (il quark *s*). Hanno quindi un numero quantico detto *stranezza*, che misura il numero di quark strani.

Il mesone ($q\bar{q}$) strano più leggero è la K^0 ($\bar{d}s$)



Il barione ($3q$) strano più leggero è la Λ^0 (uds)

Le particelle strane

Le particelle strane sono particelle che contengono almeno un quark *strano* (il quark *s*). Hanno quindi un numero quantico detto *stranezza*, che misura il numero di quark strani.

Il mesone ($q\bar{q}$) strano più leggero è la K^0 ($\bar{d}s$)



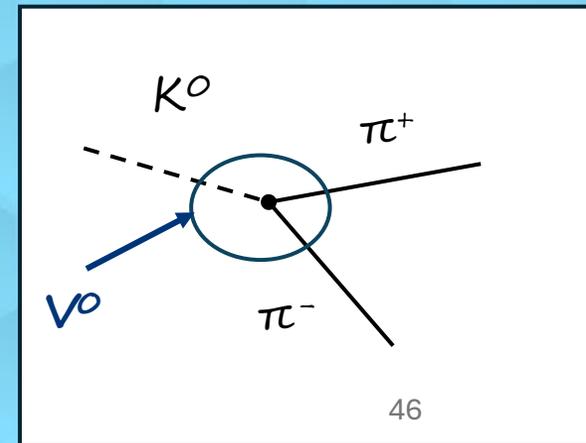
$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$



Il barione ($3q$) strano più leggero è la Λ^0 (uds)

In questi decadimenti, la *stranezza non si conserva*: i prodotti di decadimenti non contengono il quark *s*, ma solo quark *u* e *d*. Questi tipi di decadimenti sono detti «deboli»: sono processi «lenti» ($10^{-8} - 10^{-10}$ s) → le particelle possono viaggiare qualche cm dal vertice di produzione prima di decadere. Il vertice di decadimento è chiamato V^0



Massa

MESONI

BARIONI

Particella	Massa (MeV/c ²)
π^\pm	139,6
K^0	497.6
p	938.3
Λ	1115.7
Ξ^-	1321.7
Ω^-	1672.45

Numero di partecipanti e parametro d'urto

Gli ioni Pb sono oggetti estesi (con tanti nucleoni) → quando collidono possono più o meno sovrapporsi

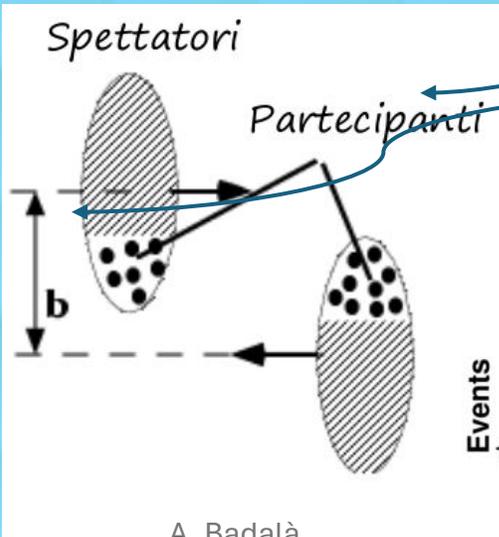
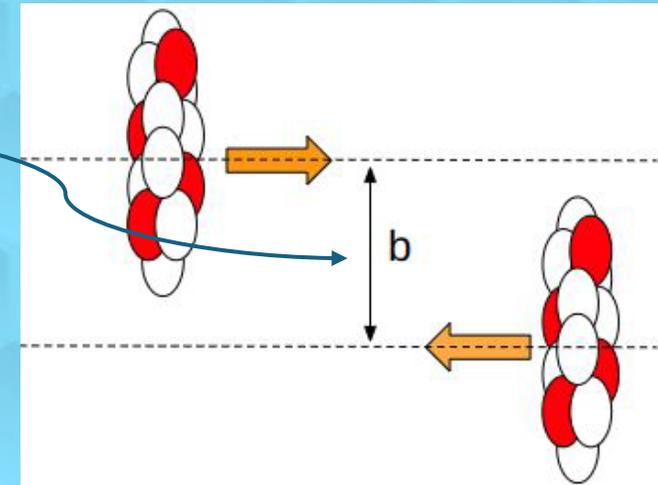
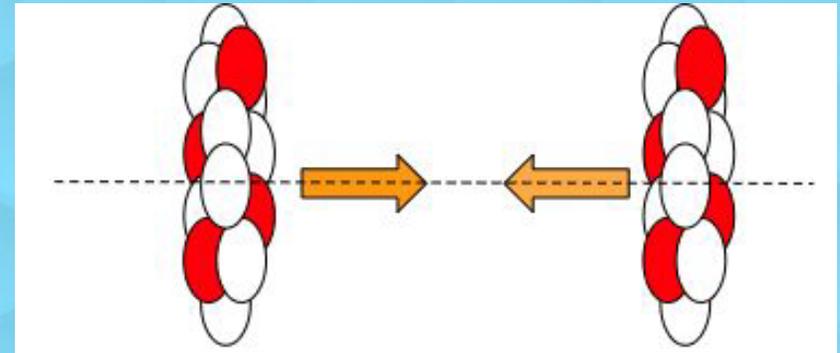


grado di sovrapposizione è legato alla centralità della collisione

nucleoni che interagiscono

Parametro di impatto:
determina la centralità

b piccolo → collisione centrale
→ tanti nucleoni partecipanti
 b grande → collisione periferica
→ pochi nucleoni partecipanti



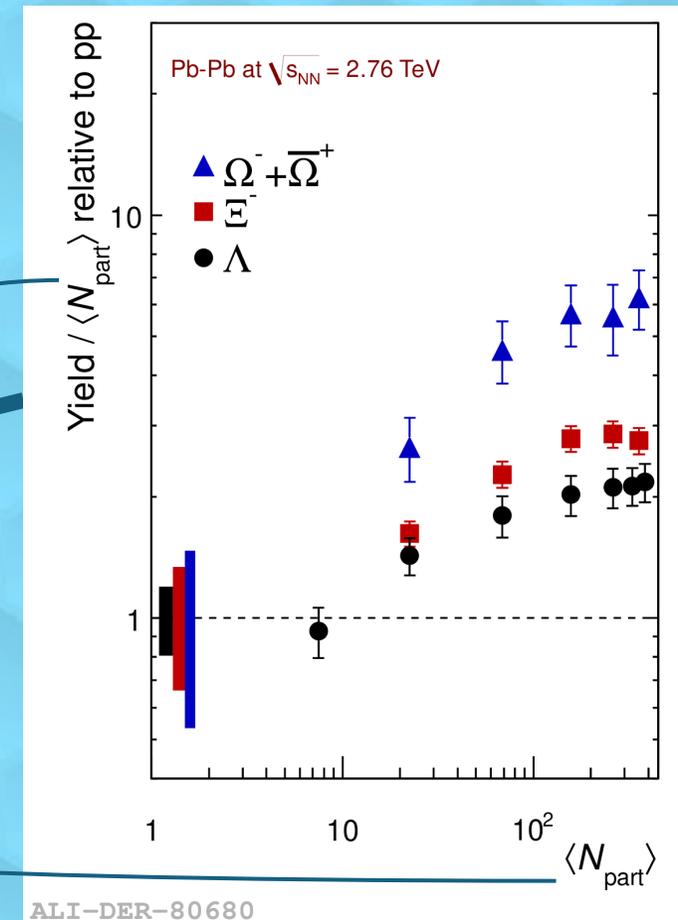
Le particelle strane. Perché si studiano?

L'aumento di stranezza in collisioni Pb-Pb rispetto a collisioni pp è stata una delle prime "firme" della produzione del QGP in collisioni Pb-Pb

$$\frac{\text{Nm. } (K, \Lambda, \Xi, \Omega) \text{ per ogni collisione Pb - Pb}}{\text{Nm. di nucleoni partecipanti}} \div \frac{\text{Nm. } (K, \Lambda, \Xi, \Omega) \text{ per ogni collisione pp}}{2}$$

Yield = Numero medio di particelle prodotte in una collisione

N_{part} = numero medio di nucleoni che partecipano ad una collisione



Le particelle strane. Cosa abbiamo osservato?

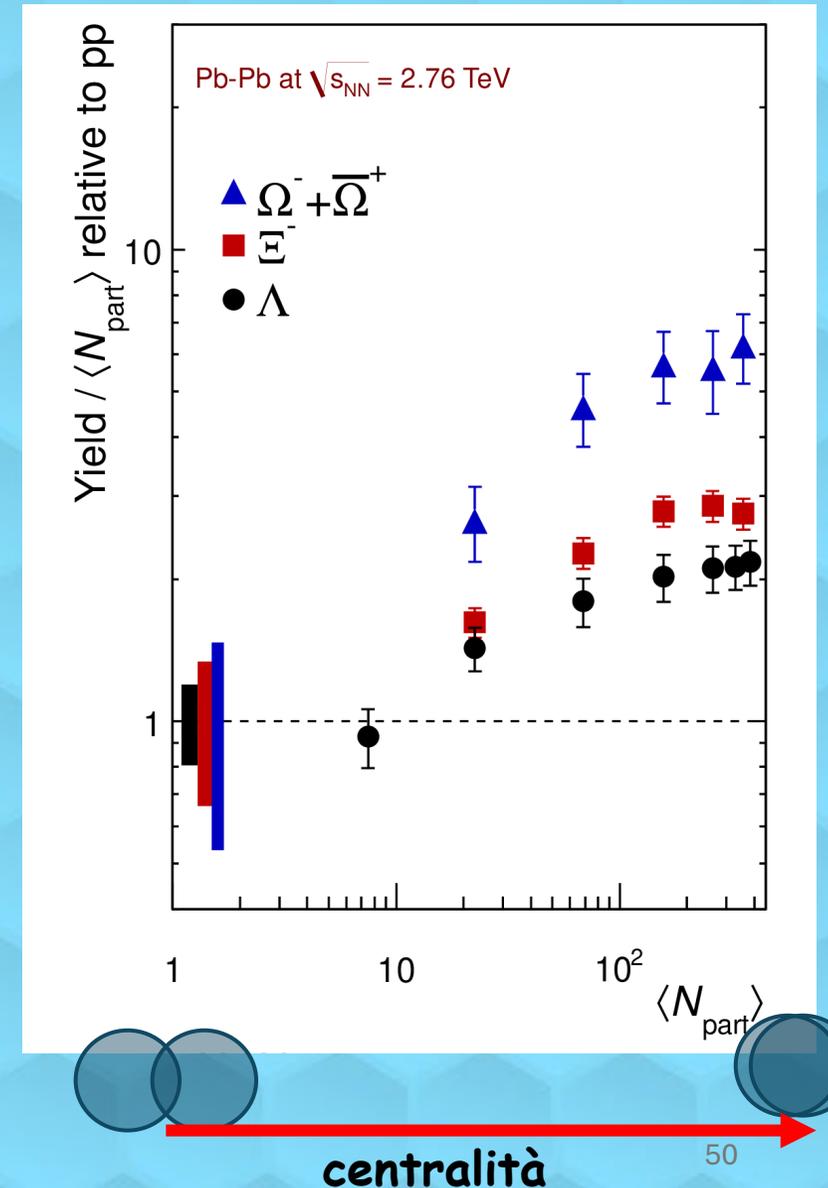
Tutti i rapporti sono maggiori di 1

$$\rightarrow \text{Yield}_{\text{Pb-Pb}} / \langle N_{\text{part}} \rangle > \text{Yield}_{\text{pp}} / 2$$

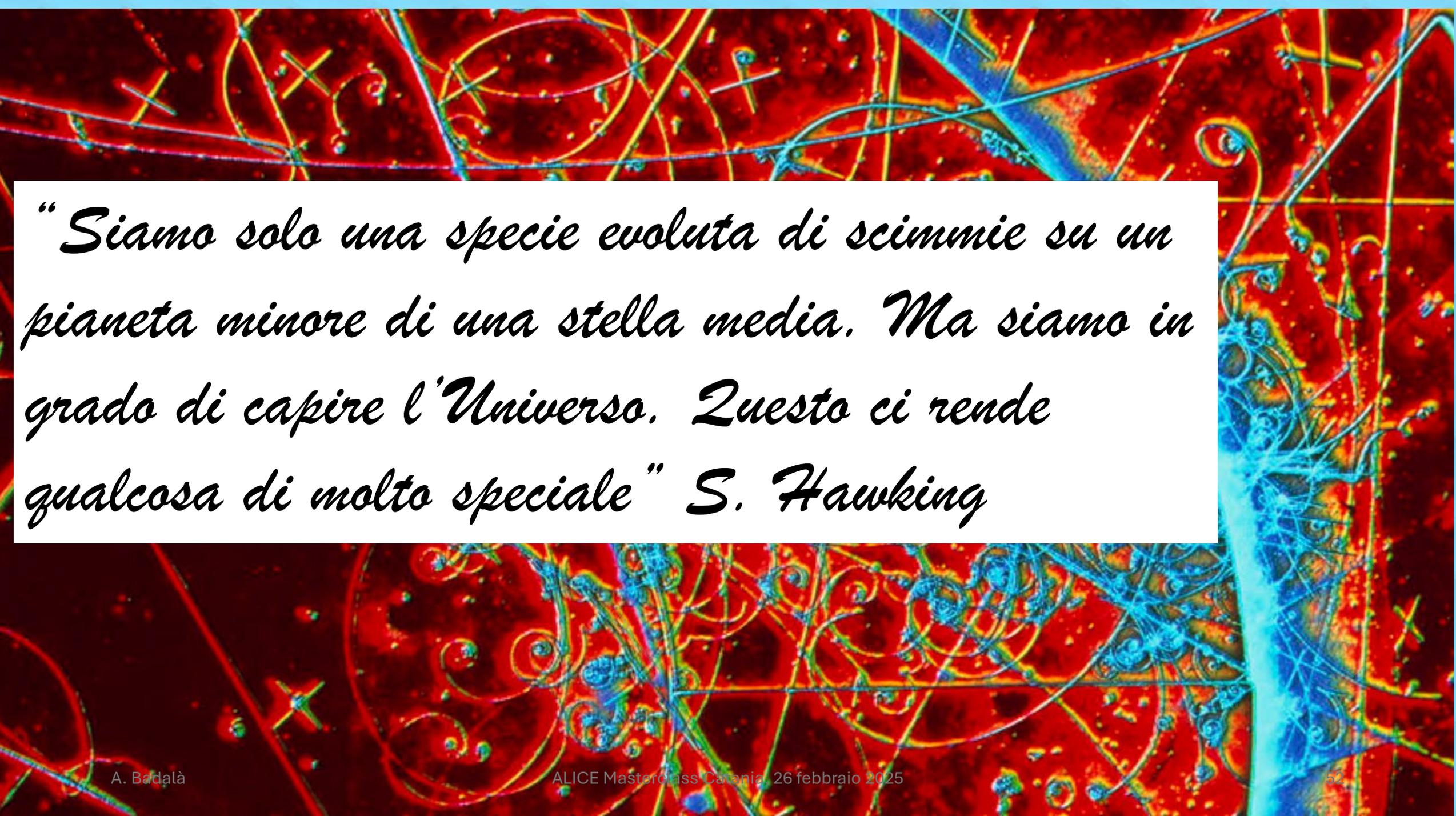
\rightarrow I rapporti crescono con N_{part}

Λ : 1 quark s
 Ξ : 2 quark s
 Ω : 3 quark s

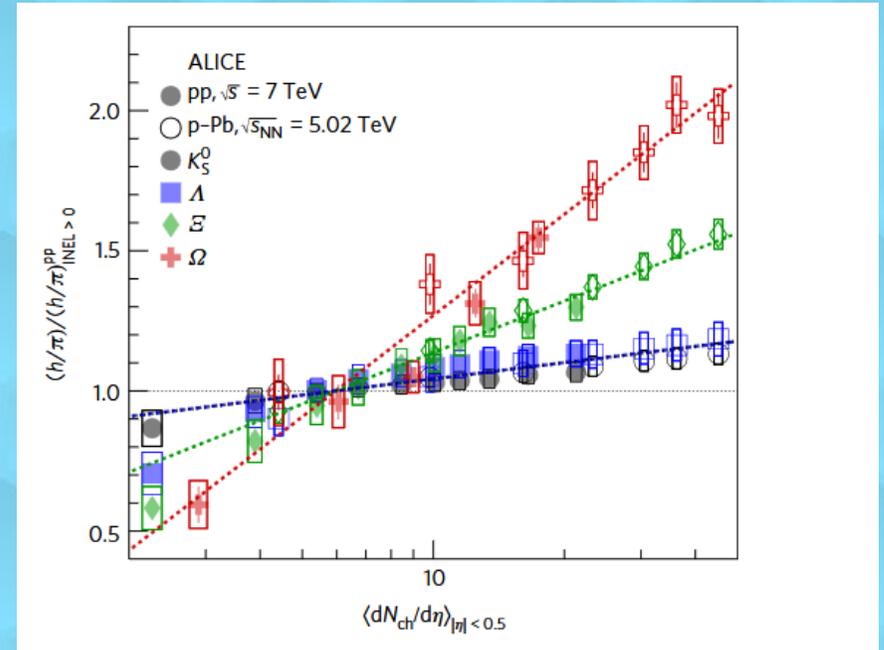
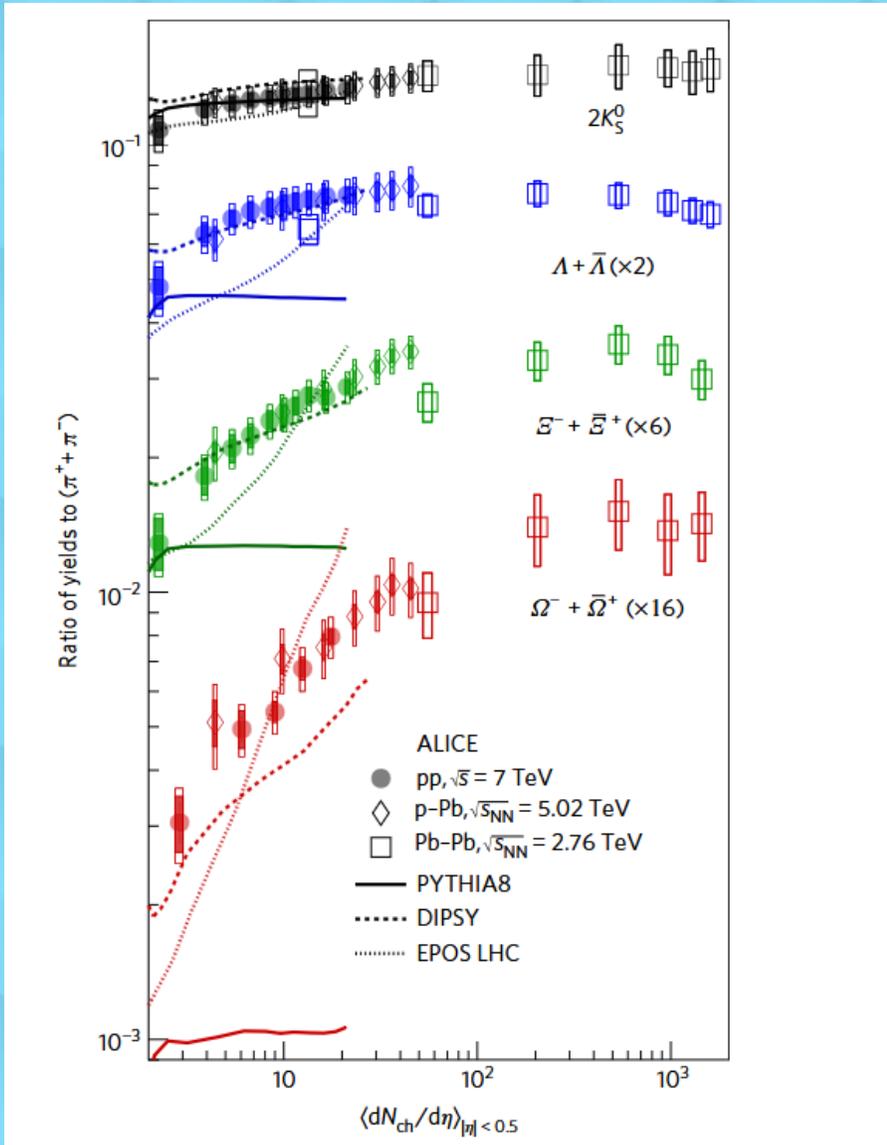
l'aumento è
proporzionale al numero
di quark "s" contenuti
nella particella



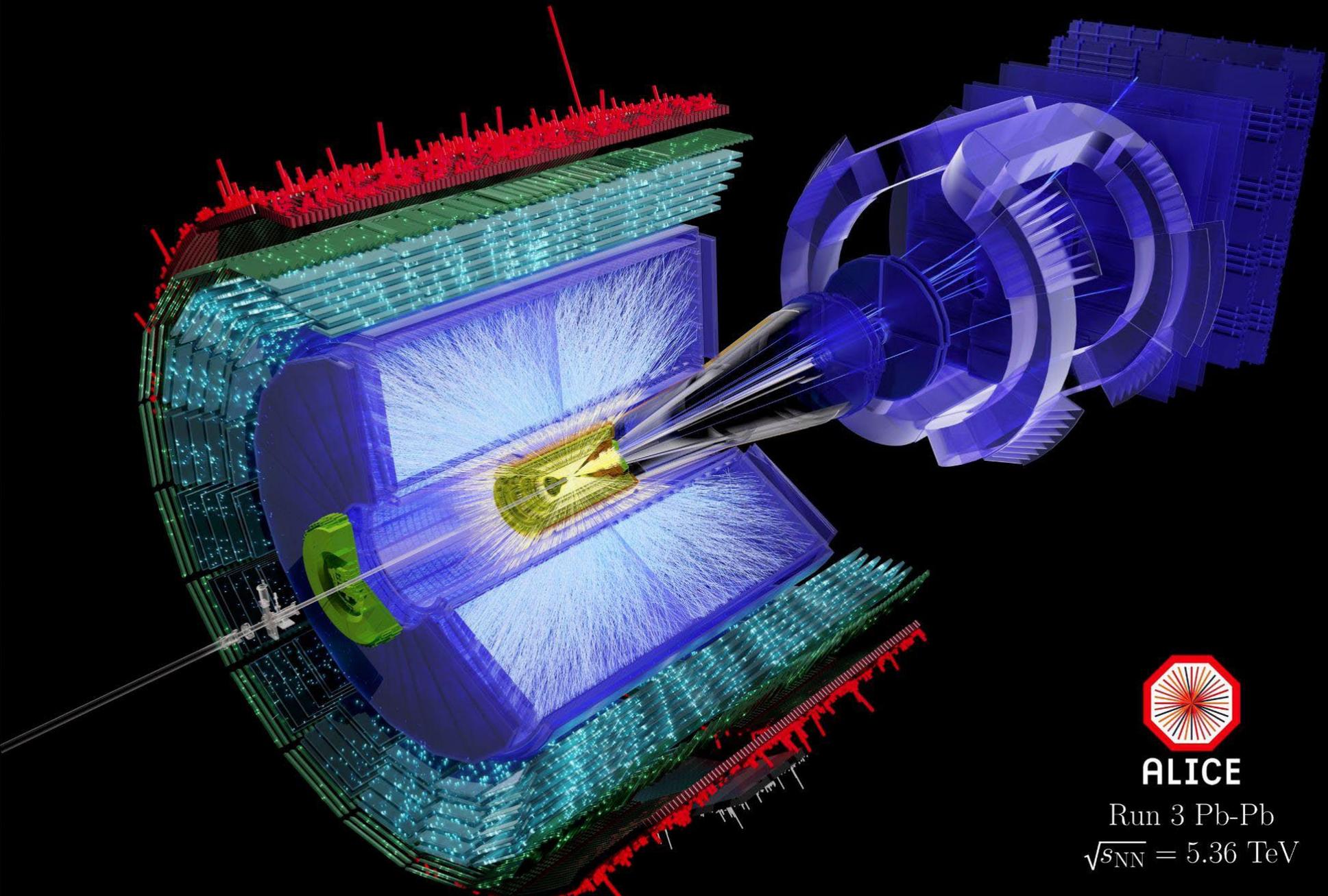
Oggi misurerete l'innalzamento della produzione delle particelle strane in eventi Pb-Pb utilizzando dati dell'esperimento ALICE



“Siamo solo una specie evoluta di scimmie su un pianeta minore di una stella media. Ma siamo in grado di capire l'Universo. Questo ci rende qualcosa di molto speciale” S. Hawking



ALICE Collaboration, NATURE PHYSICS |
VOL 13 | JUNE 2017 | 535



ALICE

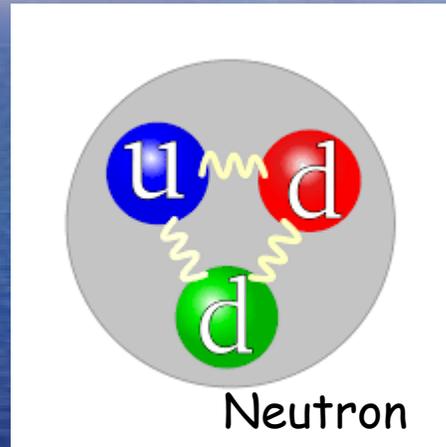
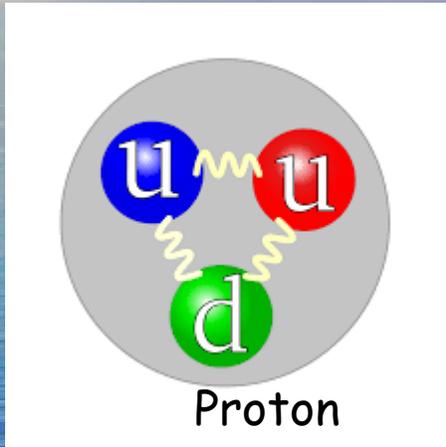
Run 3 Pb-Pb
 $\sqrt{s_{NN}} = 5.36 \text{ TeV}$

Hadron composition: sea quarks and gluons

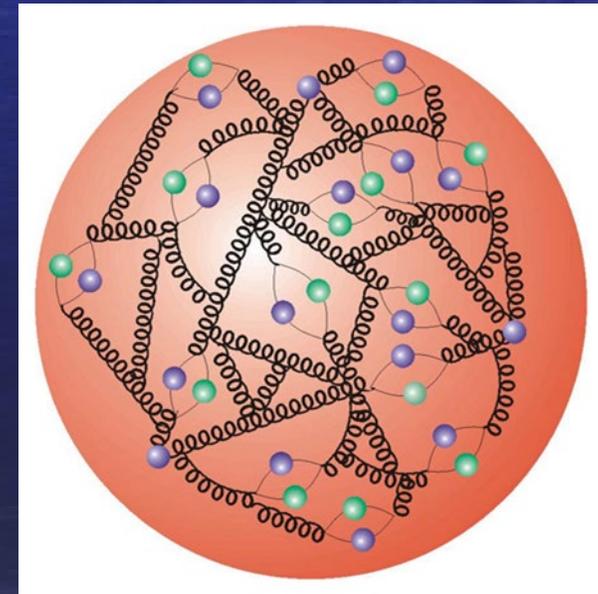
Quark model picture



Protons and Neutrons made by 3 quarks



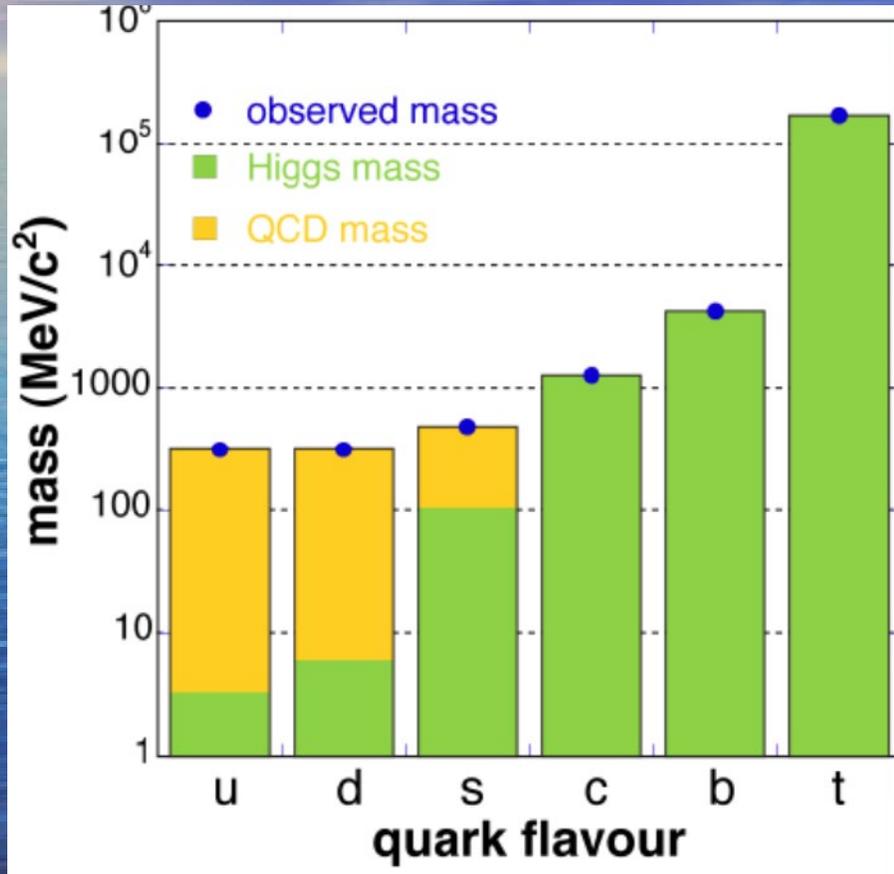
Real picture



Protons and Neutrons are made by 3 'valence' quarks + a 'sea' of gluons and pairs quark-antiquark which are continuously destroyed (annihilation) and re-created

Where does mass come from?

Technically: hadron mass originate from chiral symmetry breaking



Mass proton = 938 MeV ~
10 × current mass valence quarks

The Higgs field gives mass to elementary particles, but most of our mass comes from somewhere else. It is due to the quark confinement.

Proton mass (QCD mass) is originated from the interaction of the 3 valence quarks with the color field.

Each quark has then a 'constituent mass' of about 300 MeV

Quarks u and d from the interaction with the Higgs field get their 'current mass' (Higgs mass) about 2-3 MeV