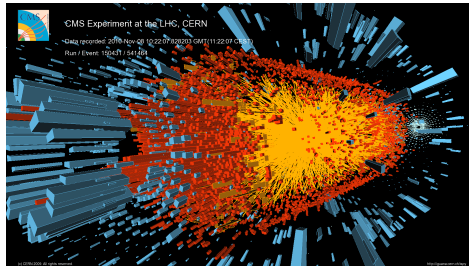


# Il più grande spettacolo dopo il Big Bang

**Andrea Beraudo**

INFN – Sezione di Torino

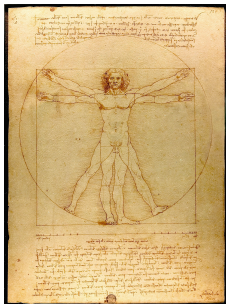
*Un viaggio nell'infinitamente piccolo  
alla scoperta dell'Universo primordiale*



# Un viaggio tra le potenze di 10...

La vita coinvolge corpi di dimensioni diversissime, dell'ordine di

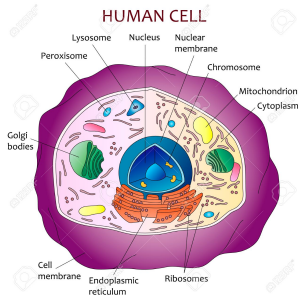
- Uomo: 1 m;



# Un viaggio tra le potenze di 10...

La vita coinvolge corpi di dimensioni diversissime, dell'ordine di

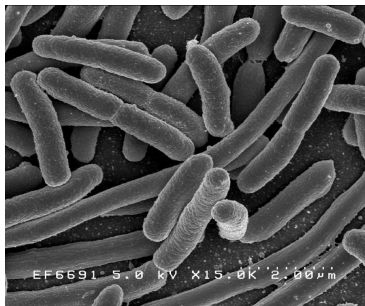
- Uomo: 1 m;
- Cellula umana:  $10\ \mu\text{m} = 10^{-5}\ \text{m}$ ;



# Un viaggio tra le potenze di 10...

La vita coinvolge corpi di dimensioni diversissime, dell'ordine di

- Uomo: 1 m;
- Cellula umana:  $10\ \mu\text{m}=10^{-5}\ \text{m}$ ;
- Batteri:  $1\ \mu\text{m}=10^{-6}\ \text{m}$



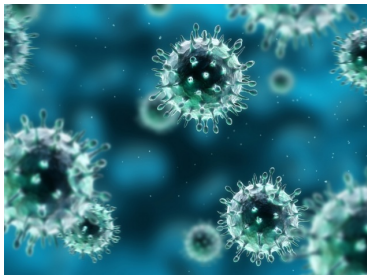
# Un viaggio tra le potenze di 10...

La vita coinvolge corpi di dimensioni diversissime, dell'ordine di

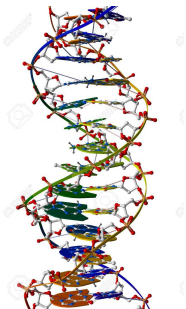
- Uomo: 1 m;
- Cellula umana:  $10\ \mu\text{m}=10^{-5}\ \text{m}$ ;
- Batteri:  $1\ \mu\text{m}=10^{-6}\ \text{m}$

Qui finiscono le cose a noi accessibili attraverso la *luce visibile*, ma la realtà continua:

- Virus:  $\lesssim 0.1\ \mu\text{m}=10^{-7}\ \text{m}$



# Un viaggio tra le potenze di 10...



La vita coinvolge corpi di dimensioni diversissime, dell'ordine di

- Uomo: 1 m;
- Cellula umana:  $10\ \mu\text{m}=10^{-5}\ \text{m}$ ;
- Batteri:  $1\ \mu\text{m}=10^{-6}\ \text{m}$

Qui finiscono le cose a noi accessibili attraverso la *luce visibile*, ma la realtà continua:

- Virus:  $\lesssim 0.1\ \mu\text{m}=10^{-7}\ \text{m}$
- Doppia elica di DNA:  $R \approx 1\ \text{nm}=10^{-9}\ \text{m}$

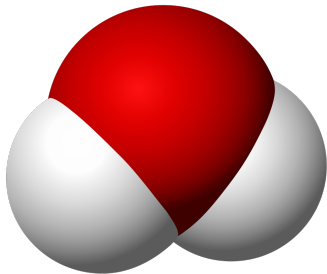
# Un viaggio tra le potenze di 10...

La vita coinvolge corpi di dimensioni diversissime, dell'ordine di

- Uomo: 1 m;
- Cellula umana:  $10\ \mu\text{m}=10^{-5}\ \text{m}$ ;
- Batteri:  $1\ \mu\text{m}=10^{-6}\ \text{m}$

Qui finiscono le cose a noi accessibili attraverso la *luce visibile*, ma la realtà continua:

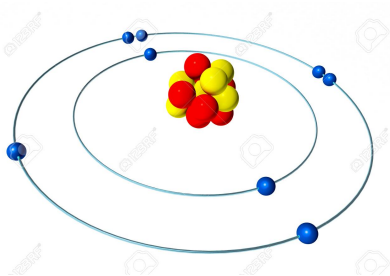
- Virus:  $\lesssim 0.1\ \mu\text{m}=10^{-7}\ \text{m}$
- Doppia elica di DNA:  $R \approx 1\ \text{nm}=10^{-9}\ \text{m}$
- Molecola d'acqua:  $0.3\ \text{nm}=3 \cdot 10^{-10}\ \text{m}$



# Un viaggio tra le potenze di 10...

La vita coinvolge corpi di dimensioni diversissime, dell'ordine di

- Uomo: 1 m;
- Cellula umana:  $10\ \mu\text{m}=10^{-5}\ \text{m}$ ;
- Batteri:  $1\ \mu\text{m}=10^{-6}\ \text{m}$



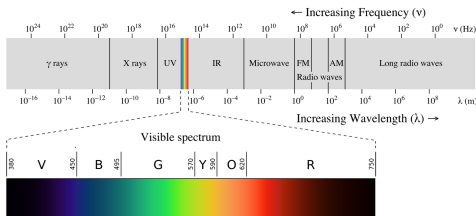
Qui finiscono le cose a noi accessibili attraverso la *luce visibile*, ma la realtà continua:

- Virus:  $\lesssim 0.1\ \mu\text{m}=10^{-7}\ \text{m}$
- Doppia elica di DNA:  $R \approx 1\ \text{nm}=10^{-9}\ \text{m}$
- Molecola d'acqua:  $0.3\ \text{nm}=3 \cdot 10^{-10}\ \text{m}$
- Atomo d'ossigeno:  $0.1\ \text{nm}=10^{-10}\ \text{m}$



# I nostri occhi sull'infinitamente piccolo

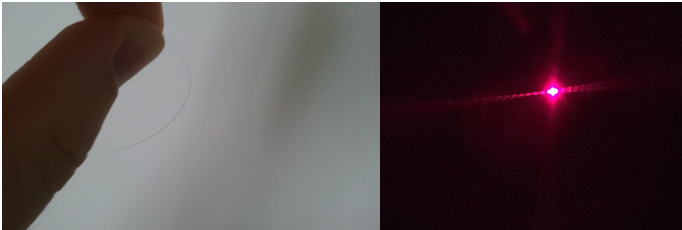
Prima di proseguire il nostro viaggio alla scoperta dei costituenti ancora più piccoli della materia è utile fermarsi a pensare al modo con cui siamo in grado di “visualizzarli”



- La luce visibile ha una lunghezza d'onda compresa tra 400 e 700 nm (= *miliardesimi* di metro). Sfruttando con strumenti opportuni come i *microscopi ottici* la luce visibile è possibile visualizzare corpi fino a queste dimensioni (ad esempio un batterio), ma NON più piccoli.
- Per visualizzare dettagli più piccoli è necessario utilizzare radiazioni di lunghezza d'onda più corta, come ad esempio i raggi X.

# I nostri occhi sull'infinitamente piccolo

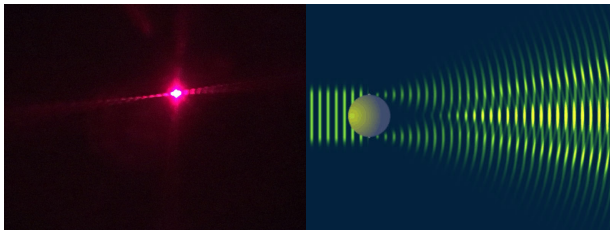
Il metodo tradizionalmente usato in fisica per “vedere” indirettamente un corpo molto piccolo è quello di **inviargli contro della “luce”** (di lunghezza d'onda opportuna) e **osservare come si distribuisce la radiazione in uscita**.



Per misurare un capello è sufficiente la luce visibile di un laser: dalla distanza tra massimi/minimi della *figura di diffrazione* è possibile ricavare lo spessore del capello!

# I nostri occhi sull'infinitamente piccolo

Il metodo tradizionalmente usato in fisica per “vedere” indirettamente un corpo molto piccolo è quello di **inviargli contro della “luce”** (di lunghezza d'onda opportuna) e **osservare come si distribuisce la radiazione in uscita**.



Per misurare un capello è sufficiente la luce visibile di un laser: dalla distanza tra massimi/minimi della *figura di diffrazione* è possibile ricavare lo spessore del capello!

# I nostri occhi sull'infinitamente piccolo

Il metodo tradizionalmente usato in fisica per “vedere” indirettamente un corpo molto piccolo è quello di **inviargli contro della “luce”** (di lunghezza d'onda opportuna) e **osservare come si distribuisce la radiazione in uscita.**



Per misurare un capello è sufficiente la luce visibile di un laser: dalla distanza tra massimi/minimi della *figura di diffrazione* è possibile ricavare lo spessore del capello! Per visualizzare il **DNA** (cristallizzato!) è necessario osservare la **diffrazione dei raggi X** (nella foto: la prima immagine della doppia elica del DNA del 1952 nel laboratorio di **Rosalind Franklin** al King's College, la cui storia meriterebbe di essere raccontata...)

# Gli occhi del ragionamento

Prima di proseguire nell'esame degli atomi e delle strutture ancora più piccole che li compongono (elettroni, nuclei, protoni...) è utile soffermarsi su come, pur non potendo vederli, si sia giunti – **coniugando osservazioni sperimentali e ragionamento** – non solo a **ipotizzare la loro esistenza, ma anche a contarli, pesarli e a predire le loro proprietà**. Questo, a parte l'interesse storico, è un esercizio molto utile, in quanto un approccio simile è stato successivamente adottato nel proporre modelli (rivelatisi a posteriori corretti!) della struttura della materia a scale ancora più piccole, *subatomiche* (per quanto la cosa possa apparire un ossimoro, in quanto atomo in greco vuol dire *indivisibile*).

# Gli occhi del ragionamento

Prima di proseguire nell'esame degli atomi e delle strutture ancora più piccole che li compongono (elettroni, nuclei, protoni...) è utile soffermarsi su come, pur non potendo vederli, si sia giunti – **coniugando osservazioni sperimentali e ragionamento** – non solo a **ipotizzare la loro esistenza, ma anche a contarli, pesarli e a predire le loro proprietà**. Questo, a parte l'interesse storico, è un esercizio molto utile, in quanto un approccio simile è stato successivamente adottato nel proporre modelli (rivelatisi a posteriori corretti!) della struttura della materia a scale ancora più piccole, *subatomiche* (per quanto la cosa possa apparire un ossimoro, in quanto atomo in greco vuol dire *indivisibile*).

Quali sono stati i ragionamenti che hanno condotto ad assumere la necessità di una **descrizione della materia in termini di mattoncini "elementari"** chiamati atomi?

# I rapporti tra le particelle

Il chimico **Gay-Lussac** (1808) osservò che mescolando 2 litri di idrogeno gassoso con 1 litro di ossigeno gassoso si ottengono 2 litri di vapore acqueo: non 3 e nemmeno 2.56893..! Estendendo l'osservazione ad altre reazioni chimiche si notò come **i rapporti tra i volumi dei reagenti sono sempre esprimibili come rapporti tra numeri interi piccoli** (2:1 nel caso della produzione di acqua da idrogeno e ossigeno).

# I rapporti tra le particelle

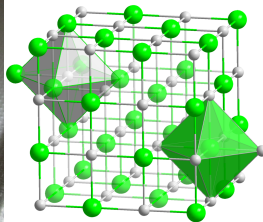
Il chimico **Gay-Lussac** (1808) osservò che mescolando 2 litri di idrogeno gassoso con 1 litro di ossigeno gassoso si ottengono 2 litri di vapore acqueo: non 3 e nemmeno 2.56893..! Estendendo l'osservazione ad altre reazioni chimiche si notò come **i rapporti tra i volumi dei reagenti sono sempre esprimibili come rapporti tra numeri interi piccoli** (2:1 nel caso della produzione di acqua da idrogeno e ossigeno).

La spiegazione fu data da **Amedeo Avogadro**: **volumi uguali di gas diversi contengono lo stesso numero di "particelle"** (molecole biatomiche nel caso di idrogeno  $H_2$  e ossigeno  $O_2$  gassosi). Pertanto **le osservazioni vengono spiegate in modo naturale immaginando la materia come composta da mattoncini elementari** (le molecole, a loro volta formate da atomi). Il rapporto 2:1 tra i volumi dei reagenti nella produzione di acqua è quindi conseguenza del fatto che la molecola di acqua  $H_2O$  è formata da due atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno.



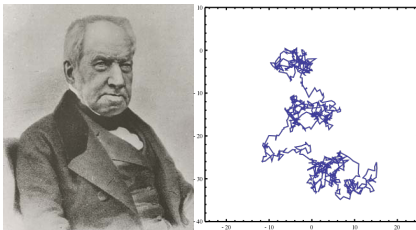
# I cristalli

Versate del sale da cucina in un piccolo recipiente d'acqua fino a ottenere una soluzione satura. Lasciate evaporare molto lentamente l'acqua, ad esempio coprendo il contenitore con una pellicola forata. Quando l'acqua sarà evaporata potrete osservare dei cristalli di cloruro di sodio ( $\text{NaCl}$ )



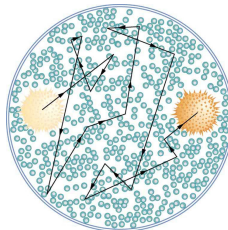
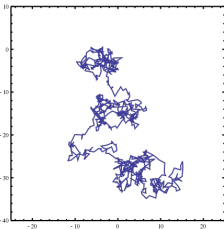
Risulta difficile giustificare la **forma estremamente regolare dei cristalli** senza assumere che questa venga dall'**accostare secondo uno schema preciso dei mattoncini elementari**. Un cristallo nasce dal replicare un numero enorme di volte lungo le tre direzioni spaziali una singola cella elementare, con gli atomi ai suoi vertici

# Il moto Browniano



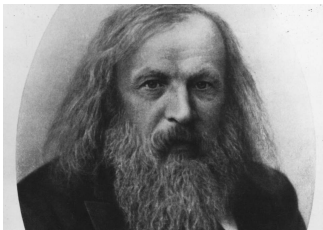
Nel 1827 il botanico **Robert Brown** osservando al microscopio dei **grani di polline sospesi in acqua** notò che il loro **moto** era estremamente **irregolare**, un po' come quello del pulviscolo illuminato dalla luce che filtra da una persiana.

# Il moto Browniano

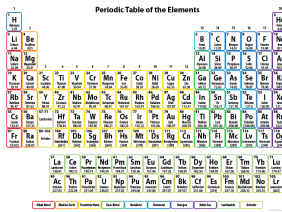


Nel 1827 il botanico **Robert Brown** osservando al microscopio dei **grani di polline sospesi in acqua** notò che il loro **moto** era estremamente **irregolare**, un po' come quello del pulviscolo illuminato dalla luce che filtra da una persiana. A inizio novecento **Einstein** e **Langevin** diedero la **corretta interpretazione del fenomeno**, che segnò il **trionfo della teoria atomica della materia**. Supponiamo di scattare fotografie del grano di polline a intervalli di tempo fissati, ad esempio ogni decimo di secondo (è poi quello che fa la retina): **in ogni intervallo di tempo il grano di polline si sarà scontrato con un numero diverso di molecole d'acqua** (ora 1000, ora 500, ora 1300) e **ogni tanto questi urti saranno stati più violenti, ogni tanto più "morbidi"**, da cui il suo moto irregolare.

# La tavola periodica degli elementi



Periodic Table of the Elements

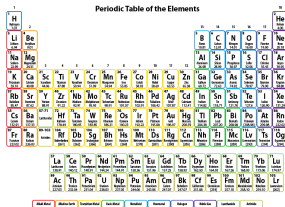
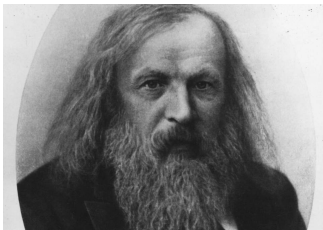


1	2											18	19	20																					
H	He											Ne	Ar	Kr	Xe	Rn																			
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar																				
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr										
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
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	
Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																			

Alkali Metals | Alkaline Earths | Transition Metals | Lanthanides | Actinides

Una pietra miliare nella comprensione della natura si ebbe nel **1869**, quando il chimico russo **Mendeleev** pubblicò la sua *tavola periodica degli elementi*. In questa tabella i vari elementi sono raggruppati secondo uno schema regolare di righe e colonne, in ordine crescente di massa da sinistra a destra e dall'alto in basso. Così facendo si trova che **elementi appartenenti a una stessa colonna risultano avere proprietà chimiche simili**. La tabella risultava avere caselle vuote e questo portò Mendeleev a **predire l'esistenza di elementi** corrispondenti ad esse, come nel caso del Gallio, predicandone anche le proprietà: peso atomico, densità, punto di fusione, formule di ossido  $Ga_2O_3$  e cloruro  $Ga_2Cl_6$ ...

# La tavola periodica degli elementi



Periodic Table of the Elements

The image shows a standard periodic table of elements, color-coded by groups. The elements are arranged in rows and columns, with their symbols and names. The table is titled "Periodic Table of the Elements".

- Quello di Mendeleev è stato forse il **primo esempio di predizione dell'esistenza di una "particella"** (per quanto non "elementare") ancora non scoperta sperimentalmente, **solo sulla base di un criterio di coerenza con una costruzione matematica** (una tabella con delle caselle ancora da riempire). La stessa cosa, a scale di lunghezza enormemente più piccole, diventerà il pane quotidiano della fisica delle particelle a partire dagli anni '60 del XX secolo;
- Quello che **manca** ancora a Mendeleev era **una spiegazione microscopica del perchè la sua tavola periodica funzionasse**. Per questo sarebbe stata necessaria una conoscenza della struttura dell'atomo, in particolare dei suoi elettroni, e delle leggi della meccanica quantistica.

# Come sono fatti gli atomi?

Abbiamo visto come a inizio novecento tutta una serie di osservazioni supportasse una descrizione della materia in termini di mattoncini fondamentali chiamati atomi. Ma **come sono fatti gli atomi**? Le uniche cose che si sapevano erano che

- Erano degli **oggetti elettricamente neutri**, altrimenti la loro interazione sarebbe stata enorme, mentre in prima approssimazione possiamo descrivere un gas come un sistema di particelle non interagenti;
- **L'atomo più leggero, quello di idrogeno, era circa 2000 volte più pesante dell'elettrone** – scoperto da Thomson a fine ottocento e “pesato” da Millikan nel 1913 – che è invece elettricamente carico (per convenzione gli si attribuisce un'unità di carica negativa:  $Q=-1$ )

# Come sono fatti gli atomi?

Abbiamo visto come a inizio novecento tutta una serie di osservazioni supportasse una descrizione della materia in termini di mattoncini fondamentali chiamati atomi. Ma **come sono fatti gli atomi**? Le uniche cose che si sapevano erano che

- Erano degli **oggetti elettricamente neutri**, altrimenti la loro interazione sarebbe stata enorme, mentre in prima approssimazione possiamo descrivere un gas come un sistema di particelle non interagenti;
- **L'atomo più leggero, quello di idrogeno, era circa 2000 volte più pesante dell'elettrone** – scoperto da Thomson a fine ottocento e “pesato” da Millikan nel 1913 – che è invece elettricamente carico (per convenzione gli si attribuisce un'unità di carica negativa:  $Q=-1$ )

Siccome gli elettroni normalmente non se ne vanno in giro indisturbati, venne naturale pensare che essi stiano legati in strutture in cui sono combinati con cariche positive di segno opposto formando un oggetto elettricamente neutro: l'atomo.

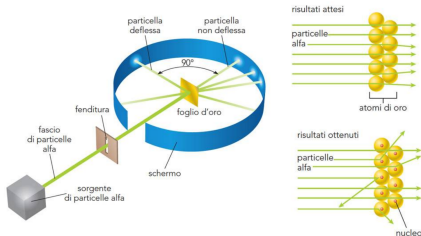
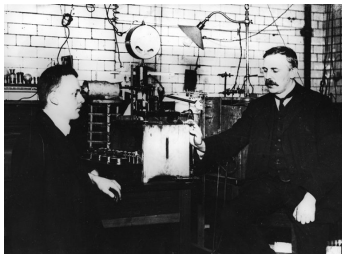
# Il modello atomico di Thomson: il panettone coi canditi



Nacque così il **modello atomico di Thomson** (J.J. Thomson, scopritore dell'elettrone, la *prima particella elementare a venire rivelata!*) : l'atomo veniva essenzialmente descritto come un **panettone**, con **l'uvetta e i canditi** a rappresentare gli **elettroni** e **l'impasto** a rappresentare una distribuzione omogenea di **carica positiva**, di cui si ignorava la natura. Tale modello tuttavia non si rivelerà in grado di spiegare i dati sperimentali!



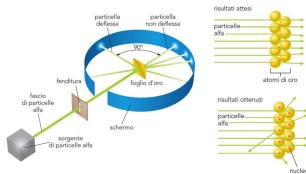
# La svolta: l'esperimento di Rutherford



La svolta nella comprensione della struttura dell'atomo venne con l'**esperimento di Rutherford**, che **bombardò con delle particelle alfa** (delle particelle molto massive ed energetiche con carica elettrica  $Q=+2$  emesse da una sorgente radioattiva) un bersaglio costituito da una **sottile lamina d'oro**.

- In base al **modello di Thomson** ci si aspettava che tutte le particelle attraversassero la lamina subendo al più minime deviazioni: se elettroni e cariche positive fossero uniformemente distribuiti all'interno dell'atomo in media le particelle alfa sentirebbero un campo elettrico nullo;
- Le **misure** mostrarono invece che **alcune particelle** (poche) **subivano grosse deviazioni**, alcune (pochissime) **rimbalzavano addirittura indietro**.

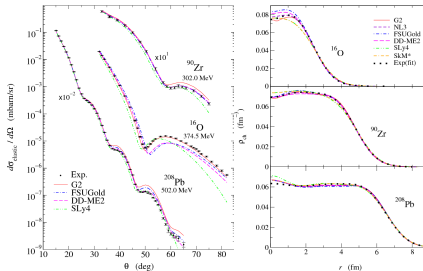
# La svolta: l'esperimento di Rutherford



Come interpretare i risultati dell'esperimento? Rutherford (1911) ipotizzò che praticamente tutta la massa dell'atomo fosse contenuta in un nucleo centrale (ricordiamo che  $m_e \approx m_H/2000!$ ) carico positivamente ( $Q=+Z$ ) e che, come in un **sistema solare in miniatura**, intorno al nucleo a grande distanza ruotassero  $Z$  elettroni, in modo da dar luogo ad un corpo elettricamente neutro.

- **La maggior parte della massa deve essere contenuta nel nucleo:** solo un oggetto molto pesante (sicuramente non l'elettrone) è in grado di far rinculare significativamente la particella alfa;
- **Il nucleo deve essere elettricamente carico** (di segno opposto a elettroni): altrimenti non genererebbe un campo elettrico in grado di deviare la particella alfa;
- **Il nucleo deve occupare un volume molto piccolo:** sono pochissime le particelle deviate a grandi angoli.

# Quanto è grande un nucleo?



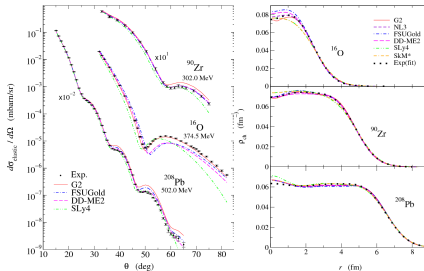
Per rispondere a questa domanda è necessario studiare gli **urti elastici** (cioè senza perdita di energia e produzione di nuove particelle) **di elettroni con il nucleo** in questione (si parla di *scattering elastico elettrone-nucleo*).

# Quanto è grande un nucleo?



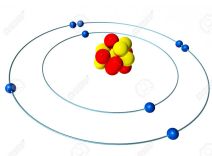
Per rispondere a questa domanda è necessario studiare gli **urti elastici** (cioè senza perdita di energia e produzione di nuove particelle) **di elettroni con il nucleo** in questione (si parla di *scattering elastico elettrone-nucleo*). Come dalla distribuzione della luce diffusa da un capello è possibile ricavare il suo spessore,

# Quanto è grande un nucleo?



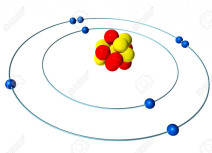
Per rispondere a questa domanda è necessario studiare gli **urti elastici** (cioè senza perdita di energia e produzione di nuove particelle) **di elettroni con il nucleo** in questione (si parla di *scattering elastico elettrone-nucleo*). Come dalla distribuzione della luce diffusa da un capello è possibile ricavare il suo spessore, così dalla **distribuzione angolare degli elettroni diffusi da un nucleo è possibile ricavare informazione sulla distribuzione di carica elettrica al suo interno**. Come si vede, per i nuclei più pesanti si possono avere raggi dell'ordine di **6 fm**, cioè  **$6 \cdot 10^{-15}$  m: 6 milionesimi di miliardesimo di metro!!!**

# Un nucleo è un oggetto elementare?



Già Rutherford nel 1911 si domandava se si dovesse considerare la diffusione della particelle  $\alpha$  dai nuclei atomici come dovuta al campo elettrico di una **carica centrale puntiforme  $Z|e|$**  o a quello di  **$Z$  cariche elementari  $|e|$**  distribuite in un volumetto piccolissimo ma finito.

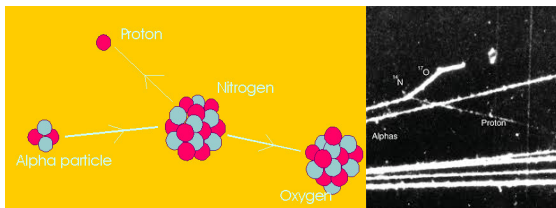
# Un nucleo è un oggetto elementare?



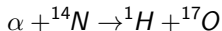
Già Rutherford nel 1911 si domandava se si dovesse considerare la diffusione della particelle  $\alpha$  dai nuclei atomici come dovuta al campo elettrico di una **carica centrale puntiforme  $Z|e|$**  o a quello di  **$Z$  cariche elementari  $|e|$**  distribuite in un volumetto piccolissimo ma finito. Oggi sappiamo infatti che **i nuclei non sono oggetti elementari**. Questo si può capire da varie considerazioni:

- Prima di tutto, per quanto piccoli, hanno delle **dimensioni finite**, misurabili, quindi devono pur “essere fatti di qualcosa”;
- Esistono in natura un centinaio di elementi chimici diversi e non è molto soddisfacente spiegare la loro struttura attraverso un altro centinaio di oggetti elementari (i diversi nuclei atomici): “**Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem**”, se lo fai non stai in realtà facendo delle predizioni;
- **Divenne presto possibile estrarre dai nuclei delle particelle più piccole**, interpretate quindi come i loro costituenti elementari!

# I mattoncini dei nuclei: protoni e neutroni



Nel 1919 Rutherford, studiando l'interazione delle particelle  $\alpha$  con l'aria (essenzialmente composta da azoto) scoprì che le radiazioni erano in grado di estrarre nuclei di idrogeno dall'azoto, attraverso la reazione



Ipotizzò quindi che i nuclei di idrogeno, battezzati protoni, fossero i costituenti elementari dei nuclei. Il *protone* ha carica elettrica  $Q=+1$  ed è circa 2000 volte più pesante di un elettrone. Nel 1932 Chadwick scoprì il *neutrone*, privo di carica elettrica e con circa la stessa massa del protone. Il nucleo di un atomo con  $Z$  elettroni è costituito da  $Z$  protoni e da  $N$  neutroni ( $Z=N=8$  nel caso dell'ossigeno).

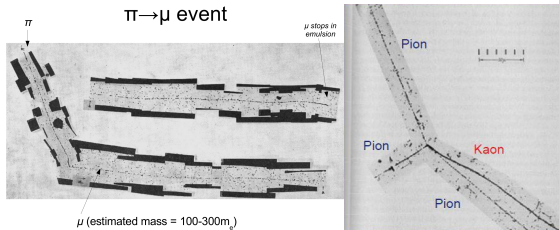


# E questi chi li ha ordinati?

Protoni, neutroni ed elettroni sono **sufficienti per spiegare** tutte le proprietà della materia ordinaria, **tutta la chimica e tutta la biologia**. Si pensava quindi di essere giunti ai mattoni fondamentali della materia.

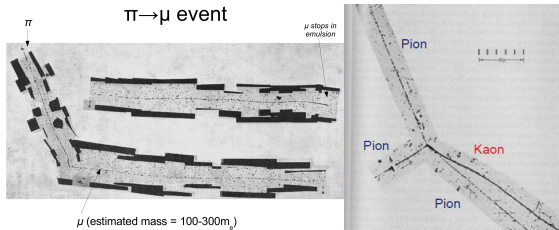
# E questi chi li ha ordinati?

Protoni, neutroni ed elettroni sono **sufficienti per spiegare** tutte le proprietà della materia ordinaria, **tutta la chimica e tutta la biologia**. Si pensava quindi di essere giunti ai mattoni fondamentali della materia. Ben presto però, in particolare attraverso l'osservazione con **emulsioni fotografiche** e **camere a nebbia** dei *raggi cosmici* provenienti dallo spazio **sempre nuove particelle vennero scoperte** (muoni, pioni, kaoni...)



# E questi chi li ha ordinati?

Protoni, neutroni ed elettroni sono **sufficienti per spiegare** tutte le proprietà della materia ordinaria, **tutta la chimica e tutta la biologia**. Si pensava quindi di essere giunti ai mattoni fondamentali della materia. Ben presto però, in particolare attraverso l'osservazione con **emulsioni fotografiche** e **camere a nebbia** dei *raggi cosmici* provenienti dallo spazio **sempre nuove particelle vennero scoperte** (muoni, pioni, kaoni...)



Se il pione poteva essere interpretato come la particella scambiata da protoni e neutroni nei nuclei e responsabile del loro legame, le altre – il muone (un elettrone 200 volte più pesante) e il kaone (una particella *strana*, dalla vita media insolitamente lunga) – parevano solo **un'inutile complicazione, di cui si sarebbe fatto volentieri a meno**.

# Uno zoo di particelle

Protoni e neutroni sono particelle elementari? Un indizio che non lo siano viene di nuovo dalla loro dimensione finita: dagli urti elastici elettrone-**protone** si osserva che questo ha un **raggio** dell'ordine di 1 fm, cioè  $10^{-15}$  m. Ma c'è un'altra ragione più profonda.

# Uno zoo di particelle

Protoni e neutroni sono particelle elementari? Un indizio che non lo siano viene di nuovo dalla loro dimensione finita: dagli urti elastici elettrone-protone si osserva che questo ha un raggio dell'ordine di 1 fm, cioè  $10^{-15}$  m. Ma c'è un'altra ragione più profonda. Come abbiamo visto, negli anni successivi vennero scoperte sempre più particelle *soggette alle interazioni nucleari forti*

- Nel 1947 venne scoperto il **pione**, 7-8 volte più leggero di un protone;
- Nel 1947 venne scoperto il **kaone**, 2 volte più leggero di un protone;
- Vennero scoperte sempre nuove particelle, sia più leggere (**mesoni**  $\rho, K^*$  ...) sia più pesanti (**barioni**  $\Lambda, \Delta, \Xi$  ...) del protone

# Uno zoo di particelle

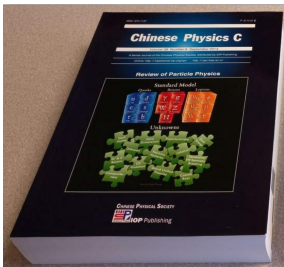
Protoni e neutroni sono particelle elementari? Un indizio che non lo siano viene di nuovo dalla loro dimensione finita: dagli urti elastici elettrone-protone si osserva che questo ha un raggio dell'ordine di 1 fm, cioè  $10^{-15}$  m. Ma c'è un'altra ragione più profonda. Come abbiamo visto, negli anni successivi vennero scoperte sempre più particelle *soggette alle interazioni nucleari forti*

- Nel 1947 venne scoperto il **pione**, 7-8 volte più leggero di un protone;
- Nel 1947 venne scoperto il **kaone**, 2 volte più leggero di un protone;
- Vennero scoperte sempre nuove particelle, sia più leggere (**mesoni**  $\rho, K^*$  ...) sia più pesanti (**barioni**  $\Lambda, \Delta, \Xi$  ...) del protone

Queste particelle, chiamate **adroni**, iniziavano ad essere decisamente troppe.

**Enrico Fermi**, scoraggiato da questa moltiplicazione di particelle da classificare, disse "Se l'avessi saputo avrei fatto il botanico". Oggi la lista di tutti gli adroni conosciuti (con relative proprietà) occupa un volume spesso come un elenco del telefono: il **Particle Data Group**. Chiaramente non si può pensare di avere un elenco del telefono di particelle elementari! È naturale pensare che ci siano *pochi costituenti fondamentali che, combinandosi in modo diverso, diano origine a tutto questo zoo di particelle*, un po' come poche decine di atomi sono in grado di dar conto di tutte le molecole presenti in natura.

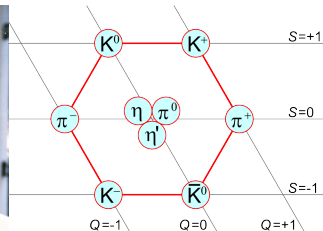
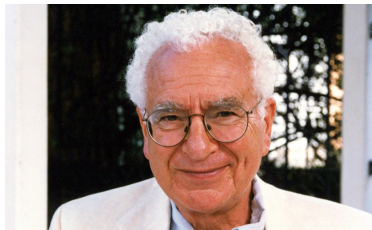
# Mettere ordine in questo zoo



Il PDG, il libro che contiene tutte le particelle finora scoperte, è una sorta di grosso elenco del telefono aggiornato ogni anno. Come nell'elenco del telefono le informazioni su centinaia di migliaia di abbonati sono scritte attraverso pochi caratteri fondamentali (dieci numeri e una ventina di lettere), così i fisici – con un **approccio riduzionista** tipico di *una parte* della scienza – **puntano a descrivere le migliaia di particelle** che continuano ad essere scoperte **in termini di pochi mattoni fondamentali**, le cui varie combinazioni rendono conto della complessità osservata. ▶

# La via dell'ottetto

Tra il 1961 e il '64 il fisico **Murray Gell-Mann** ipotizzò che tutti gli adroni fino ad allora conosciuti e *quelli ancora da scoprire* risultassero dalla **combinazione di 3 mattoni fondamentali**: i **quark** up, down e strange (+ le loro *antiparticelle*)



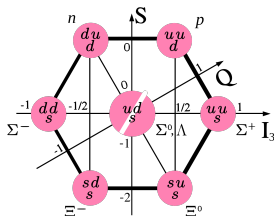
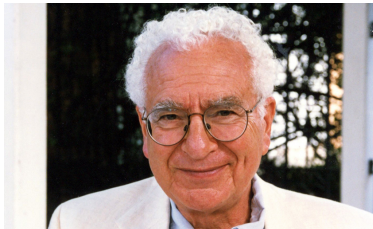
Queste idee furono espone nell'articolo "The eighfold way" (via dell'ottetto):

- Le particelle più leggere (i **mesoni**) nascono dalla combinazione di un **quark** con un **antiquark**, dando luogo a un **ottetto** di particelle;



# La via dell'ottetto

Tra il 1961 e il '64 il fisico **Murray Gell-Mann** ipotizzò che tutti gli adroni fino ad allora conosciuti e *quelli ancora da scoprire* risultassero dalla **combinazione di 3 mattoni fondamentali**: i **quark** up, down e strange (+ le loro *antiparticelle*)

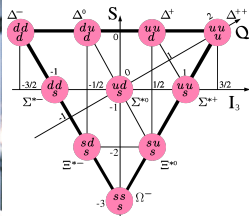
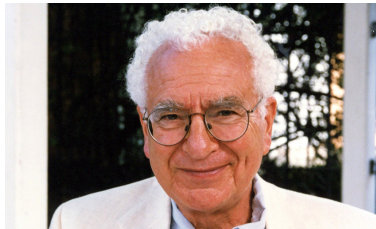


Queste idee furono espone nell'articolo "The eighfold way" (via dell'ottetto):

- Le particelle più leggere (i **mesoni**) nascono dalla combinazione di un **quark** con un **antiquark**, dando luogo a un **ottetto** di particelle;
- Le particelle più pesanti (i **barioni**) nascono dalla combinazione di **tre quark**, dando luogo a un **ottetto** e a un **decupletto** di particelle.

# La via dell'ottetto

Tra il 1961 e il '64 il fisico **Murray Gell-Mann** ipotizzò che tutti gli adroni fino ad allora conosciuti e *quelli ancora da scoprire* risultassero dalla **combinazione di 3 mattoni fondamentali**: i **quark** up, down e strange (+ le loro *antiparticelle*)



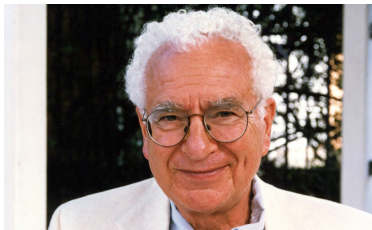
Queste idee furono espone nell'articolo "The eighfold way" (via dell'ottetto):

- Le particelle più leggere (i **mesoni**) nascono dalla combinazione di un **quark** con un **antiquark**, dando luogo a un **ottetto** di particelle;
- Le particelle più pesanti (i **barioni**) nascono dalla combinazione di **tre quark**, dando luogo a un **ottetto** e a un **decupletto** di particelle.

La classificazione consentì di predire l'esistenza e le proprietà del **barione Ω<sup>-</sup>**, prima che fosse scoperto: vi ricorda niente la cosa?

# La via dell'ottetto

Tra il 1961 e il '64 il fisico **Murray Gell-Mann** ipotizzò che tutti gli adroni fino ad allora conosciuti e *quelli ancora da scoprire* risultassero dalla **combinazione di 3 mattoni fondamentali**: i **quark** up, down e strange (+ le loro *antiparticelle*)

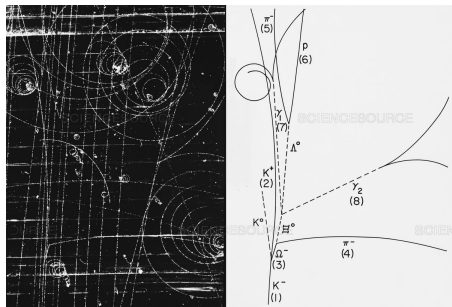


Queste idee furono espone nell'articolo "The eighfold way" (via dell'ottetto):

- Le particelle più leggere (i **mesoni**) nascono dalla combinazione di un **quark** con un **antiquark**, dando luogo a un **ottetto** di particelle;
- Le particelle più pesanti (i **barioni**) nascono dalla combinazione di **tre quark**, dando luogo a un **ottetto** e a un **decupletto** di particelle.

La classificazione consentì di predire l'esistenza e le proprietà del **barione  $\Omega^-$** , prima che fosse scoperto: vi ricorda niente la cosa? La predizione del Gallio!!!

# La scoperta del barione $\Omega^-$



Il primo **barione  $\Omega^-$**  fu osservato nel 1964 al Brookhaven National Laboratory, un centro di ricerca vicino a New York, analizzando i fotogrammi di una **camera a bolle** (rivelatore in cui le particelle cariche provocano la ionizzazione di atomi intorno a cui di formano delle bolle). Nel modello a quark di Gell-Mann viene interpretato come una **particella composta da tre quark  $s$**  (strani), ognuno con carica elettrica  $Q = -1/3$  dando quindi origine a un barione con carica  $Q = -1$ .

# Le particelle neutre: il barione $\Lambda$



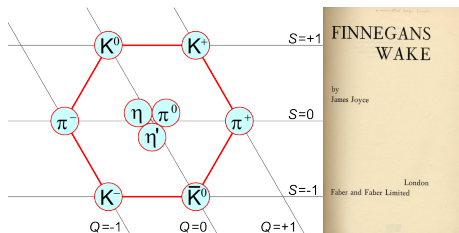
Le particelle prive di carica elettrica non lasciano direttamente una traccia in un rivelatore; possiamo però rivelare le **particelle cariche in cui decadono, che paiono avere origine da un vertice secondario**. Un esempio è il **barione  $\Lambda$** , che a livello di quark è uno stato (**uds**) con carica elettrica  $Q=2/3-1/3-1/3=0$  ed è rivelato attraverso la misura dei suoi prodotti di decadimento  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$  elettricamente carichi.

# I 6 sapori dei quark

three generations of matter (fermions)			
	I	II	III
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom

Col passare degli anni il quadro si arricchì. Effettuando esperimenti ad energie sempre più alte (l'equazione di Einstein  $E = mc^2$  ci dice che la massa è una forma di energia!) fu possibile produrre particelle sempre più pesanti e fu così che vennero scoperte tre nuove specie (dette *sapori*) di quark: il **charm** (1974) pesante come 1.5 protoni, il **bottom** (1977) pesante come 4.5 protoni e il **top** (1995) pesante come 180 protoni.

# Quark e letteratura



Il termine quark fu scelto da Gell-Mann ispirandosi a una frase senza senso contenuta nel romanzo **"Finnegans Wake"** di James Joyce: *"Three quarks for Muster Mark!// Sure he hasn't got much of a bark// And sure any he has it's all beside the mark"*.

La parola *quark* non ha in realtà alcun significato (come forse l'intero libro di Joyce...un unico flusso di coscienza). Il termine fu coniato da Joyce (una contrazione di *question mark?*) solo per esigenze di assonanza.

I quark citati erano in numero di tre e questo si sposava bene col modello fisico e fu la ragione della scelta.

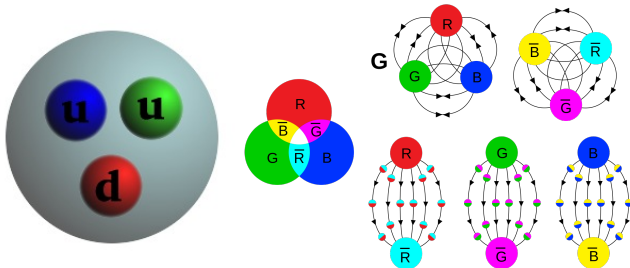
# La CromoDinamica Quantistica

Perché gli adroni sono fatti da 3 quark o da un quark e un antiquark? La cosa ha a che fare con una loro particolare carica, detta di **colore**.



# La CromoDinamica Quantistica

Perché gli adroni sono fatti da 3 quark o da un quark e un antiquark? La cosa ha a che fare con una loro particolare carica, detta di **colore**.

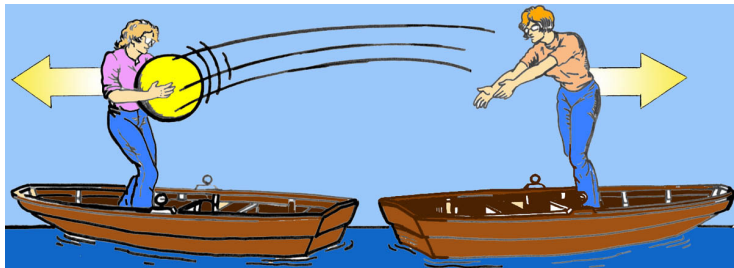


Pensiamo all'elettromagnetismo: un protone (carica elettrica  $Q=+1$ ) tende a combinarsi con un elettrone ( $Q=-1$ ) per formare un atomo di idrogeno neutro ( $Q=0$ ). La stessa cosa avviene con i quark, che devono combinare i loro colori (**R**, **B**, **G**) per dar luogo a un oggetto "bianco". Ciò è possibile in almeno due modi, descritti dalla **CromoDinamica Quantistica**:

- **Barioni**: combinando 3 quark di colori diversi ( $\sim$  mescolanza additiva)
- **Mesoni**: combinando un quark con un antiquark di colore opposto (Ciano, Magenta e Giallo, i colori delle stampanti con mescolanza sottrattiva!)

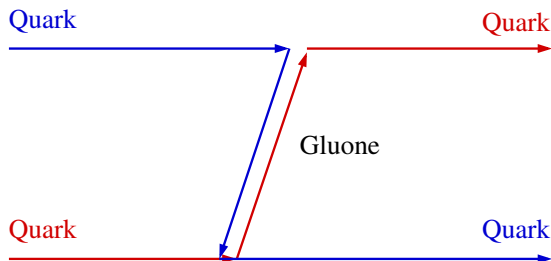
# Come interagiscono i quark?

Per rispondere a questa domanda dobbiamo spiegare qual è la moderna visione dell'interazione tra particelle che emerge dal coniugare la meccanica quantistica con la relatività. **Due particelle interagiscono scambiandosi un'altra particella** che funge da **messaggero dell'interazione**. In questo modo possono interagire anche senza venire fisicamente a contatto, un po' come **due persone in barca che si lanciano da una certa distanza un oggetto** che provoca il loro rinculo.



Si potrebbe pensare che questa descrizione possa giustificare solo un'interazione repulsiva, ma possiamo immaginare un oggetto lanciato così velocemente da fare tutto il giro della Terra, dando luogo a un'attrazione tra le due barche.

# Come interagiscono i quark?



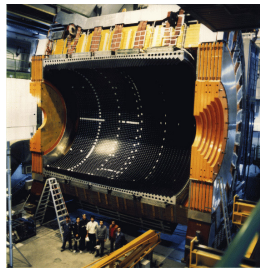
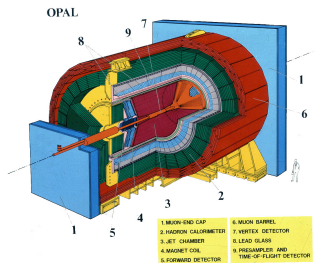
I quark interagiscono scambiandosi reciprocamente il loro colore. Ad esempio un quark rosso cede il suo colore a un quark blu e viceversa. L'oggetto che trasporta il colore scambiato è detto *gluone* (dall'Inglese *glue*=colla, poiché lo scambio di gluoni è responsabile del fatto che i quark stiano assieme all'interno di protoni e neutroni). I gluoni possono avere  $8=3 \times 3 - 1$  colori diversi (3 sono i colori dei quark e il -1 viene dal richiedere che la particella trasporti colore). L'interazione può essere attrattiva o repulsiva a seconda di come si combinano i colori dei quark (e antiquark)

# Come possiamo vedere indirettamente quark e gluoni?

Nessuno ha mai visto *direttamente* un quark o un gluone isolati. In una collisione dopo pochissimo tempo i quark, antiquark e gluoni prodotti si ricombinano in adroni. Gli adroni misurati non sono tuttavia emessi uniformemente in tutte le direzioni, ma tendono a raggrupparsi in strutture molto collimate – chiamate *jet* – che ci consentono di ricostruire l'informazione (l'energia e la direzione) sul quark o il gluone loro genitori

# Come possiamo vedere indirettamente quark e gluoni?

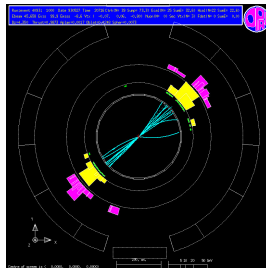
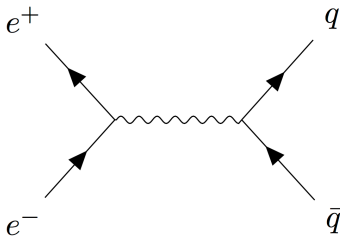
Nessuno ha mai visto *direttamente* un quark o un gluone isolati. In una collisione dopo pochissimo tempo i quark, antiquark e gluoni prodotti si ricombinano in adroni. Gli adroni misurati non sono tuttavia emessi uniformemente in tutte le direzioni, ma tendono a raggrupparsi in strutture molto collimate – chiamate *jet* – che ci consentono di ricostruire l'informazione (l'energia e la direzione) sul quark o il gluone loro genitori



Vediamo eventi ottenuti al LEP in reazioni  $e^+e^- \rightarrow$  adroni contententi

# Come possiamo vedere indirettamente quark e gluoni?

Nessuno ha mai visto *direttamente* un quark o un gluone isolati. In una collisione dopo pochissimo tempo i quark, antiquark e gluoni prodotti si ricombinano in adroni. Gli **adroni misurati** non sono tuttavia emessi uniformemente in tutte le direzioni, ma **tendono a raggrupparsi in strutture molto collimate** – chiamate **jet** – che ci consentono di ricostruire l'informazione (l'energia e la direzione) sul quark o il gluone loro genitori

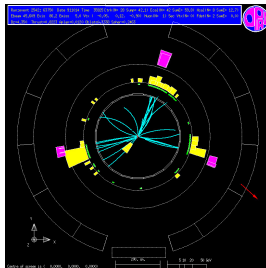
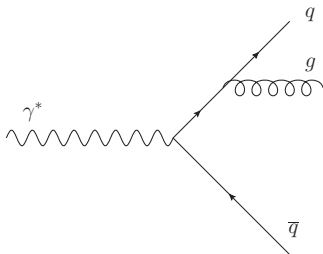


Vediamo eventi ottenuti al LEP in reazioni  $e^+e^- \rightarrow$  **adroni** contententi

- **2 jet** da una **coppia  $q\bar{q}$**

# Come possiamo vedere indirettamente quark e gluoni?

Nessuno ha mai visto *direttamente* un quark o un gluone isolati. In una collisione dopo pochissimo tempo i quark, antiquark e gluoni prodotti si ricombinano in adroni. Gli **adroni misurati** non sono tuttavia emessi uniformemente in tutte le direzioni, ma **tendono a raggrupparsi in strutture molto collimate** – chiamate **jet** – che ci consentono di ricostruire l'informazione (l'energia e la direzione) sul quark o il gluone loro genitori

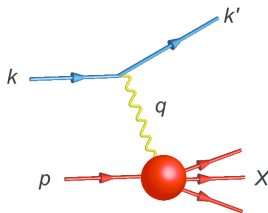
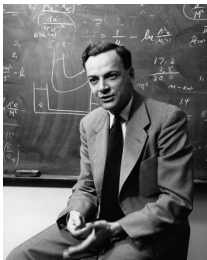


Vediamo eventi ottenuti al LEP in reazioni  $e^+e^- \rightarrow$  **adroni** contententi

- **2 jet** da una **coppia  $q\bar{q}$**
- **3 jet** da una **coppia  $q\bar{q}$**  che ha irradiato un **gluone**

# Come possiamo vedere un quark in un protone?

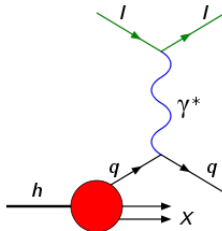
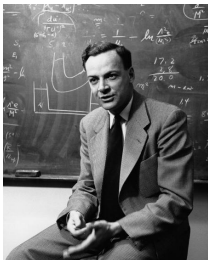
Gli esperimenti che hanno consentito di osservare la struttura a quark dei protoni sono stati gli **urti profondamenti inelastici** (**Deep Inelastic Scattering**) in cui un **elettrone** di alta energia interagisce con un **protone** attraverso lo **scambio di un fotone** (il mediatore dell'interazione elettromagnetica). Gli urti sono detti inelastici in quanto durante la collisione il protone si rompe e vengono prodotte nuove particelle.





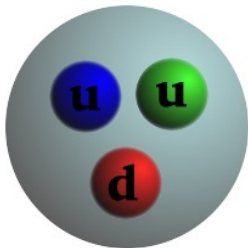
# Come possiamo vedere un quark in un protone?

Gli esperimenti che hanno consentito di osservare la struttura a quark dei protoni sono stati gli **urti profondamenti inelastici** (**Deep Inelastic Scattering**) in cui un **elettrone** di alta energia interagisce con un **protone** attraverso lo **scambio di un fotone** (il mediatore dell'interazione elettromagnetica). Gli urti sono detti inelastici in quanto durante la collisione il protone si rompe e vengono prodotte nuove particelle.



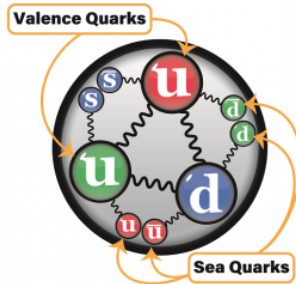
I dati sperimentali vengono spiegati **come se il fotone scambiato interagisse con un singolo quark** del protone. A dare la corretta interpretazione delle misure fu **Richard Feynman** (inventore anche dei diagrammi disegnati): **i quark di Gell-Mann non erano solo un artificio matematico, ma qualcosa che si “vedeva”**

# Come appare un protone negli esperimenti di DIS?



- Un **protone** esplorato da radiazione elettromagnetica di grande lunghezza d'onda appare come composto da **tre quark**: 2 up e 1 down;
- Per quanto ne sappiamo un **quark**, a differenza delle altre incontrate finora (elettrone a parte), è una **particella elementare**;

# Come appare un protone negli esperimenti di DIS?



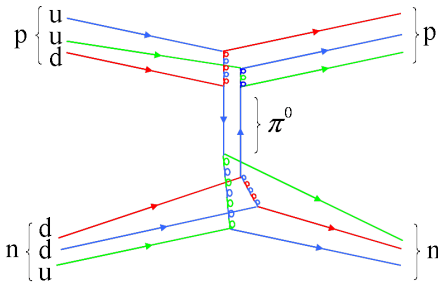
- Un **protone** esplorato da radiazione elettromagnetica di grande lunghezza d'onda appare come composto da **tre quark**: 2 up e 1 down;
- Per quanto ne sappiamo un **quark**, a differenza delle altre incontrate finora (elettrone a parte), è una **particella elementare**;
- Tuttavia **la struttura di un protone appare sempre più complicata man mano che viene esplorato con radiazione di lunghezza d'onda più piccola**: i quark *di valenza* possono emettere e riassorbire gluoni, che a loro volta possono emettere e riassorbire coppie quark-antiquark...

# Come quark e gluoni tengono insieme i nuclei

Come fanno i nuclei a stare insieme, se sono formati da tanti **protoni** vicini che **tenderebbero a respingersi, perché tutti con carica elettrica positiva?**

# Come quark e gluoni tengono insieme i nuclei

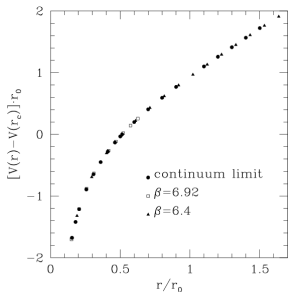
Come fanno i nuclei a stare insieme, se sono formati da tanti **protoni** vicini che **tenderebbero a respingersi, perché tutti con carica elettrica positiva**? Esiste un'interazione molto più forte di quella elettromagnetica, detta appunto **interazione nucleare forte**, che nasce dalla Cromodinamica Quantistica.



Protoni e neutroni si attraggono attraverso lo **scambio di** particelle massive dette **mesoni**, **composti da un quark e da un antiquark**. Un esempio di mesone è il **pione**. Il fatto che queste particelle siano massive fa sì che l'interazione sia a corto raggio: due persone riescono a scambiarsi una palla medica solo se molto vicine, se molto distanti non interagiscono!

# Perché non abbiamo mai visto un quark isolato?

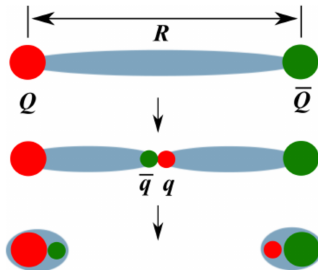
Questo dipende da una **caratteristica peculiare delle interazioni forti**, che può essere messa in evidenza con simulazioni numeriche della teoria effettuate su potenti supercomputer: il **confinamento**.



La figura mostra il risultato di una simulazione sull'energia necessaria per separare di una distanza  $r$  un quark da un antiquark. Questa energia cresce linearmente con la separazione: per isolare un quark dal suo compagno sarebbe necessario spendere una quantità di energia infinita. Si dice che **i quark sono "confinati" a stare in oggetti neutri (bianchi) dal punto di vista del colore.**

# Perché non abbiamo mai visto un quark isolato?

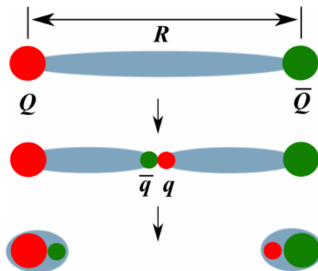
Questo dipende da una **caratteristica peculiare delle interazioni forti**, che può essere messa in evidenza con simulazioni numeriche della teoria effettuate su supercomputer: il **confinamento**.



Quello che succede in realtà in natura è che, oltre una certa separazione, **diventa energeticamente più conveniente eccitare una seconda coppia quark-antiquark dal vuoto**: a partire da un mesone quark-antiquark aumentando la separazione non **ottengo** un quark e un antiquark isolati, ma **due nuovi mesoni!** **Parrebbe non esserci speranza di creare un sistema di quark isolati...**

# Perché non abbiamo mai visto un quark isolato?

Questo dipende da una **caratteristica peculiare delle interazioni forti**, che può essere messa in evidenza con simulazioni numeriche della teoria effettuate su supercomputer: il **confinamento**.



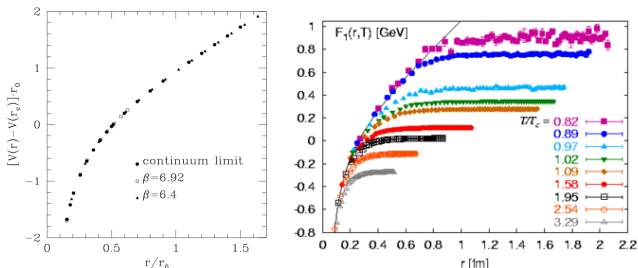
Quello che succede in realtà in natura è che, oltre una certa separazione, **diventa energeticamente più conveniente eccitare una seconda coppia quark-antiquark dal vuoto**: a partire da un mesone quark-antiquark aumentando la separazione non **ottengo** un quark e un antiquark isolati, ma **due nuovi mesoni!** **Parrebbe non esserci speranza di creare un sistema di quark isolati...**

È un po' come provare a separare i poli Nord e Sud di una calamita spezzandola: ottengo due calamite più piccole, ognuna con un Nord e un Sud!



# Come si comportano i quark quando fa molto caldo?

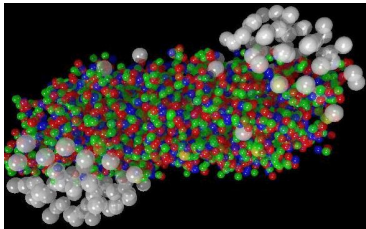
Un sistema di particelle soggette alle interazioni forti cambia rapidamente natura (si parla di *crossover*) a una temperatura intorno ai  $150 \text{ MeV} = 150 \cdot 10^6 \text{ eV}$ . 1 eV equivale a circa  $10000 = 10^4$  gradi Kelvin. Pertanto stiamo parlando di una temperatura intorno a  $1.5 \cdot 10^2 \cdot 10^6 \cdot 10^4 = 1.5 \cdot 10^{12}$  gradi Kelvin: **1500 miliardi di gradi Kelvin**. Teniamo conto che all'interno del sole le temperature sono intorno ai 15 milioni di gradi: 100mila volte più basse.



Scaldando a sufficienza il sistema l'energia di una coppia quark-antiquark non cresce più linearmente con la separazione, ma tende a un valore asintotico: **i quark non sono più confinati!** A questo punto sorgono due domande: come scaldare così tanto il sistema e qual è la spiegazione del suo comportamento

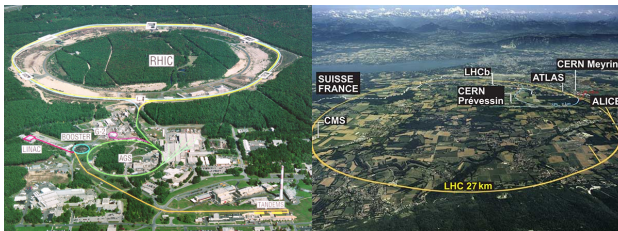
# Le collisioni di nuclei pesanti

Come scaldare la materia a temperature così alte da liberare per alcune frazioni di secondo i quark e i gluoni normalmente contenuti in protoni e neutroni? Lo strumento trovato dai fisici sono le **collisioni di nuclei ad altissima energia**



Ricordiamo la formula di Einstein che ci dà l'energia associata alla **massa di una particella a riposo**  $E = mc^2$ . L'energia associata alla massa a riposo di un **protone** è di circa **1 GeV=10<sup>9</sup> eV** (1 miliardo di eV). All'LHC al CERN vengono fatti urtare nuclei di piombo accelerati ad energie di **2.5 TeV=2.5 · 10<sup>12</sup> eV per nucleone**. Tenuto conto che un nucleo di piombo ha 208 nucleoni, anche usandone una piccola parte, si ha **abbastanza energia per produrre decine di migliaia di nuove particelle!**

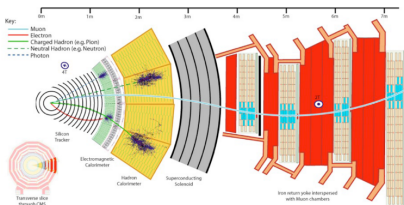
# Dove si effettuano questi esperimenti



I due luoghi in cui attualmente si svolgono questi esperimenti sono

- il **Relativistic Heavy-Ion Collider** (RHIC) presso il **Brookhaven National Laboratory**, a Long Island vicino a New York, dove vengono fatti collidere nuclei di oro, rame e deuterio fino ad **energie di 100 GeV** per nucleone;
- il **Large Hadron Collider** (LHC) presso il **CERN** di Ginevra, dove vengono fatti collidere nuclei di piombo e xenon fino ad **energie di 2500 GeV** per nucleone.

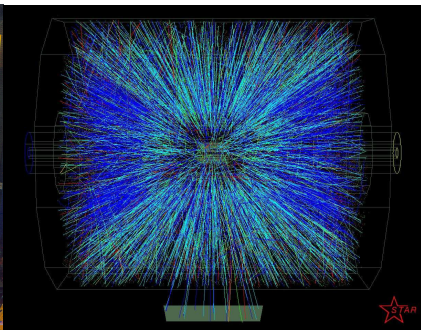
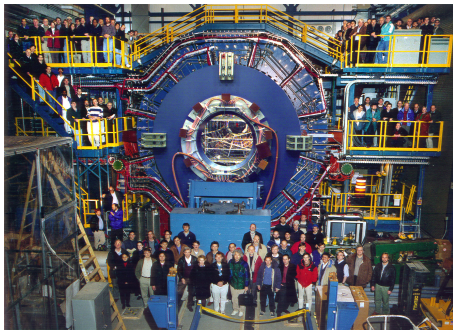
# Come si rivelano le particelle prodotte nelle collisioni?



I rivelatori consentono di scattare delle “fotografie” delle particelle prodotte

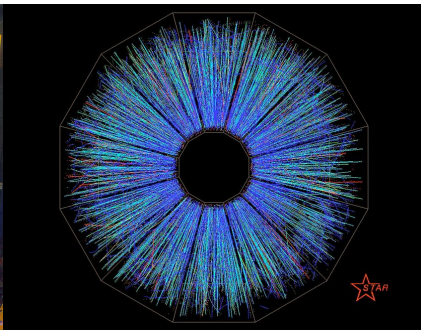
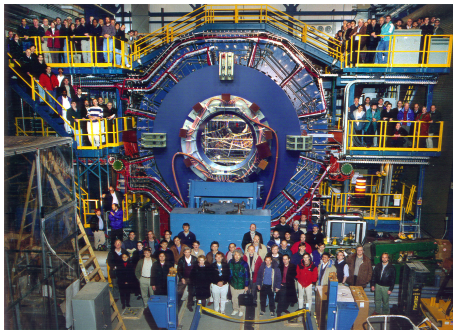
- All'interno abbiamo i **tracciatori**: strati di piastrelline in silicio che producono un segnale al passaggio di una particella **elettricamente carica**. Unendo i punti si ricava la **traiettoria della particella**, la sua curvatura, la sua **quantità di moto** (massa per velocità). Dall'ampiezza del segnale si riesce anche ad **identificare** la particella (pione, kaone, protone...);
- Più esterni abbiamo i **calorimetri**, in cui le particelle producono uno sciame di particelle secondarie fino ad arrestarsi completamente. Dalla profondità raggiunta si ricava l'**energia**. Consentono di misurare anche le **particelle neutre** (fotoni e neutroni);
- Infine i **rivelatori di muoni**, degli “elettroni pesanti” molto penetranti

# Cosa vedono gli esperimenti?



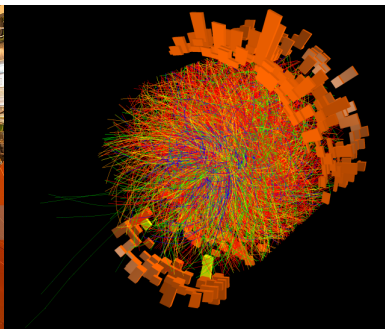
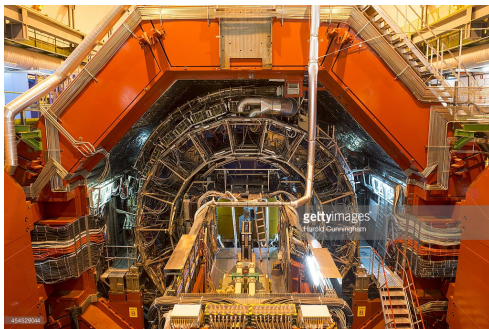
La **collaborazione STAR** di fronte al suo rivelatore montato lungo l'acceleratore RHIC e, a destra, una ricostruzione delle **tracce** lasciate nel rivelatore (in particolare nella Time-Projection Chamber) dalle particelle prodotte (quasi tutte pioni) durante una collisione tra due **nuclei di oro**.

# Cosa vedono gli esperimenti?



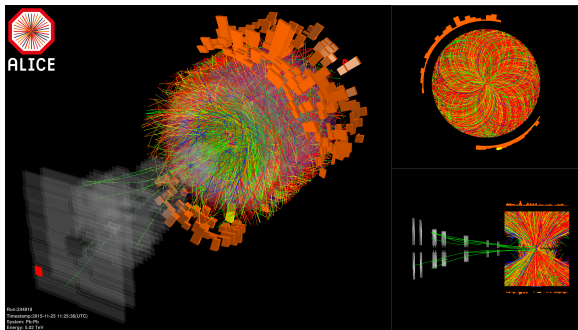
La **collaborazione STAR** di fronte al suo rivelatore montato lungo l'acceleratore RHIC e, a destra, una ricostruzione delle **tracce** lasciate nel rivelatore (in particolare nella Time-Projection Chamber) dalle particelle prodotte (quasi tutte pioni) durante una collisione tra due **nuclei di oro**.

# Cosa vedono gli esperimenti?



L'esperimento **ALICE** montato lungo l'acceleratore LHC e una ricostruzione delle **tracce** e dell'**energia depositata nei calorimetri** dalle particelle prodotte in una collisione tra due **nuclei di piombo**. In avanti si vedono anche i segnali ricostruiti dai rivelatori di **muoni**.

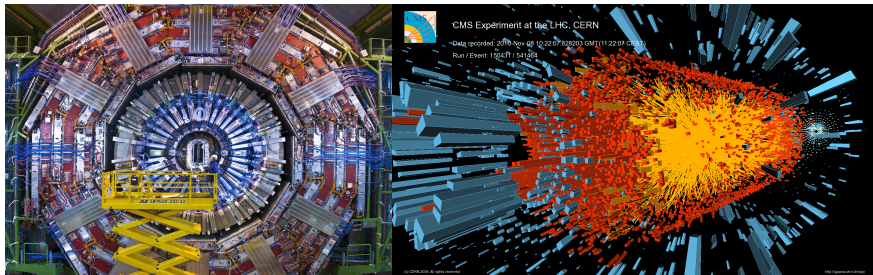
# Cosa vedono gli esperimenti?



L'esperimento **ALICE** montato lungo l'acceleratore LHC e una ricostruzione delle **tracce** e dell'**energia depositata nei calorimetri** dalle particelle prodotte in una collisione tra due **nuclei di piombo**. In avanti si vedono anche i segnali ricostruiti dai rivelatori di **muoni**.



# Cosa vedono gli esperimenti?



L'esperimento **CMS** montato lungo l'acceleratore LHC e una ricostruzione delle **tracce** e dell'**energia depositata nei calorimetri** dalle particelle prodotte in una collisione tra due **nuclei di piombo**

Com'è possibile vincere il confinamento? ovvero, quando la folla ostacola l'attrazione...



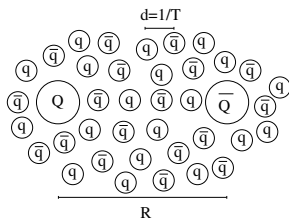
- Probabilmente Brad Pitt è ancora adesso molto attratto da Jennifer Aniston;

# Com'è possibile vincere il confinamento? ovvero, quando la folla ostacola l'attrazione...



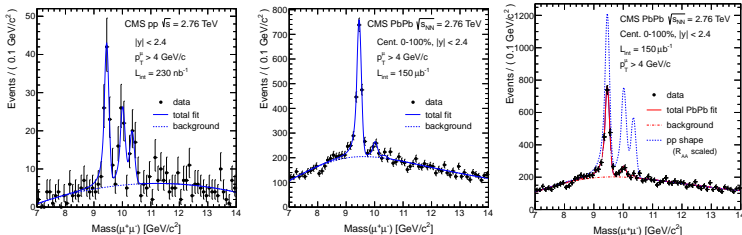
- Probabilmente Brad Pitt è ancora adesso molto attratto da Jennifer Aniston;
- Se però i due si trovano **ai lati opposti di una discoteca affollata non avvertono questa attrazione**, non perché non si piacciono e non avrebbero voglia di ballare abbracciati, ma perché **la folla frapposta impedisce all'una di accorgersi della presenza dell'altro**. Più Brad e Jennifer partono distanti più la folla costituisce un ostacolo insormontabile al loro notarsi e decidere di ricostituire una coppia

# Qual è l'equivalente della discoteca affollata?



Durante le collisioni due nuclei a velocità vicine a quelle della luce ( $v \approx 0.999999...c$ ) urtandosi riescono a produrre un sistema con una **temperatura** molto alta dell'ordine, misurata in eV ( $1 \text{ eV} \approx 10^4 \text{ K}$ ), di  $400 \text{ MeV} = 400 \cdot 10^6 \text{ eV}$ . Tale temperatura è così elevata da consentire la **produzione termica** ( $T \gg m$ ) di tanti **gluoni** e **coppie quark-antiquark** (**plasma di quark e gluoni**): i gluoni sono privi di massa e quark up e down hanno una massa  $m_u \approx m_d \approx 5 \text{ MeV}$ , un centinaio di volte più piccola della temperatura. La distanza media tra le particelle è di ordine  $1/T$ . Per  $T$  molto grande l'interazione attrattive  $Q\bar{Q}$  è **schermata** dalle molte particelle cariche fraposte.

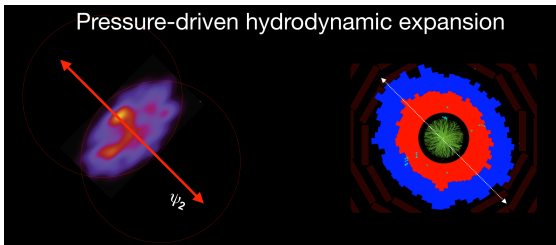
# Abbiamo evidenza del deconfinamento?



Esiste un analogo a Brad e Jennifer nel Quark-Gluon Plasma? Per fortuna sì e si chiama **quarkonio**. Non tutti i **quark** hanno la stessa massa, **alcuni sono molto più pesanti degli altri**: il quark **charm** ha massa  $M_c \approx 1300$  MeV, il **beauty** ha massa  $M_b \approx 4800$  MeV, contro i 5 MeV di up e down. Esistono una serie di stati legati (delle sorte di “molecole”)  $c\bar{c}$  e  $b\bar{b}$ , chiamati quarkonia, che vengono normalmente prodotti in collisioni protone-protone e osservati attraverso i loro prodotti di decadimento. **Ripetendo la misura in collisioni nucleo-nucleo si osserva una soppressione di molti di questi stati legati**. In figura gli spettacolari **risultati per il bottomonio ottenuti da CMS**.

# Un piccolo Big-Bang in laboratorio

Da come si distribuisce l'energia depositata nei rivelatori di particelle dai prodotti della collisione – in particolare dalla sua distribuzione angolare – è possibile farci un'idea di ciò che succede in seguito all'urto di due nuclei che viaggiano a velocità vicine a quelle della luce.

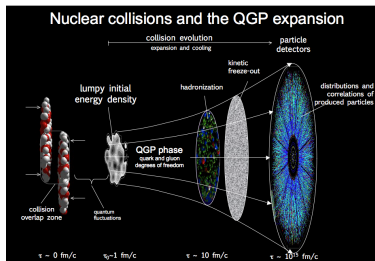


Come si vede, nei singoli eventi, l'energia depositata non è distribuita simmetricamente nel piano trasverso, ma tende a dar luogo ad una geometria ellittica, con molta energia depositata lungo un asse e poca lungo quello perpendicolare. L'interpretazione è che, in seguito alla collisione, ci sia un'esplosione (un "Little-Bang"), con una forte accelerazione della materia prodotta lungo la direzione in cui la differenza di pressione è maggiore.

# Quanto vive il QGP prodotto in laboratorio?

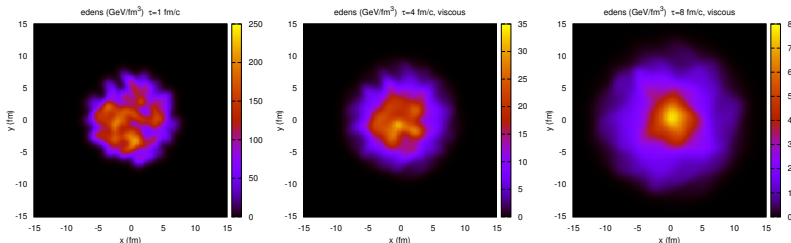
Prima di rispondere alla domanda è bene costruirci le unità di misura adatte, che ci consentano di lavorare con numeri non troppo piccoli. In fisica nucleare è conveniente misurare le lunghezze in fm (Fermi):  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ . Siccome una costante fondamentale della Natura è la velocità della luce  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , un modo naturale di misurare i tempi è in  $\text{fm}/c$ , ovvero **quanto tempo impiega la luce a percorrere un fm**. Si ha:

$$1 \text{ fm}/c = 10^{-15} \text{ m} / (3 \cdot 10^8 \text{ m/s}) = 0,333 \cdot 10^{-23} \text{ s},$$



Il Quark-Gluon Plasma prodotto in laboratorio, **prima di raffreddarsi e convertirsi in un gas di adroni, vive per una decina di fm/c**. Come facciamo a ricavare questa informazione?

# I calcoli di idrodinamica



Lo strumento che viene utilizzato sono i calcoli di idrodinamica. La **materia prodotta nelle collisioni nucleari pare comportarsi come un fluido**, la cui evoluzione è descritta dall'**equazione di Eulero**:

**accelerazione = - differenza di pressione per unità di lunghezza,**

che vuol dire che **il fluido tende a muoversi collettivamente da una zona di alta pressione a una zona di bassa pressione** (come le masse d'aria dell'atmosfera!).

La soluzione delle equazioni idrodinamiche ci consente di descrivere la distribuzione angolare e in energia delle particelle prodotte e di ricavare quindi informazioni sul sistema: temperatura, tempo di vita, **viscosità**...

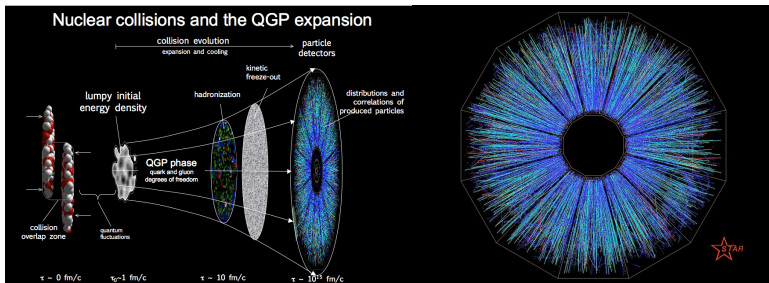


# Il fluido “più perfetto” dell’universo



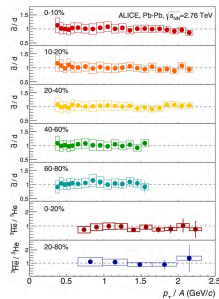
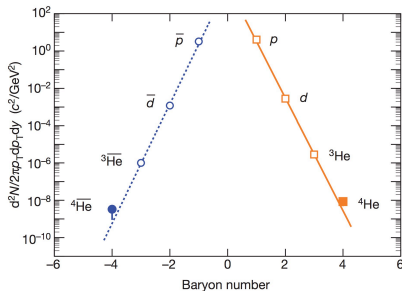
Il fatto che le equazioni dell'idrodinamica fossero in grado di riprodurre i dati sperimentali fu inizialmente una sorpresa: un sistema può essere descritto dall'idrodinamica quando il libero cammino medio dei suoi costituenti ( $\lambda_{\text{mfp}}$ ) è molto minore delle dimensioni del sistema ( $L$ ):  $\lambda_{\text{mfp}} \ll L$ . Siccome nelle collisioni nucleari  $L \approx 10$  fm, non ci si aspettava che l'idrodinamica descrivesse l'evoluzione del sistema! La seconda sorpresa fu che il valore bassissimo della viscosità di tale fluido (cioè dell'attrito con cui scorre), molto minore di quella dell'acqua del rubinetto, che lo rende il fluido “più perfetto” in natura.

# Dai quark e gluoni agli adroni...

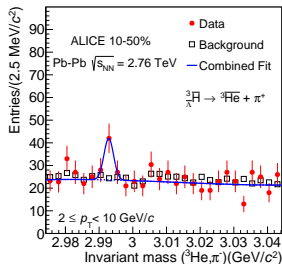
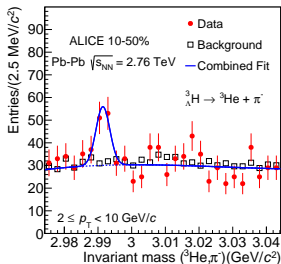


Il sistema prodotto si espande e si raffredda. In una decina di fm/c la temperatura è scesa abbastanza fino un valore critico intorno ai 150 MeV (1500 miliardi di gradi Kelvin!). A questa temperatura quark e gluoni sono nuovamente costretti a essere “confinati” all’interno di adroni (pioni, kaoni, protoni,  $\Lambda$ ,  $\Omega^-$  ...), che dopo alcuni fm/c cessano anche di urtarsi elasticamente e possono raggiungere i rivelatori: queste sono le particelle che si misurano!

# ...ai nuclei

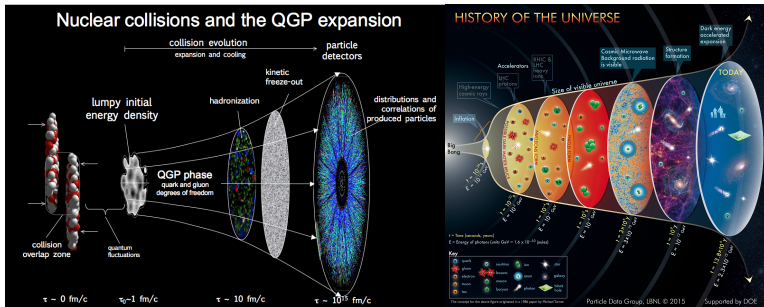


Nelle collisioni non vengono prodotti solo semplici adroni, ma anche **nuclei** (e **antinuclei!**) **leggeri**: **deuterio** (1 protone + 1 neutroni),  **${}^3\text{He}$**  (2 protoni + 1 neutrone),  **${}^4\text{He}$**  (2 protoni + 2 neutroni). Nelle collisioni di ioni pesanti si ha quindi **nucleosintesi** e **produzione di antimateria**. **Materia e antimateria sono prodotte in ugual quantità** e, a causa della rapida espansione del sistema, non hanno tempo di annichilarsi!



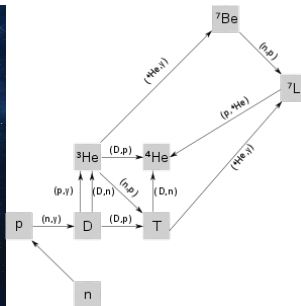
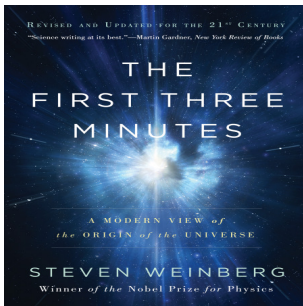
Nelle collisioni non vengono prodotti solo semplici adroni, ma anche nuclei (e antinuclei!) leggeri: deuterio (1 protone + 1 neutroni),  ${}^3\text{He}$  (2 protoni + 1 neutrone),  ${}^4\text{He}$  (2 protoni + 2 neutroni). Nelle collisioni di ioni pesanti si ha quindi nucleosintesi e produzione di antimateria. Materia e antimateria sono prodotte in ugual quantità e, a causa della rapida espansione del sistema, non hanno tempo di annichilarsi! Viene prodotta anche della materia strana: nuclei – detti ipernuclei – in cui un protone è sostituito da un barione  $\Lambda$  (e.g.  ${}^3\Lambda\text{H}$ )

# Un viaggio indietro nel tempo...



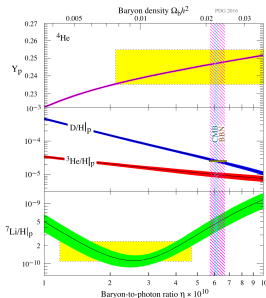
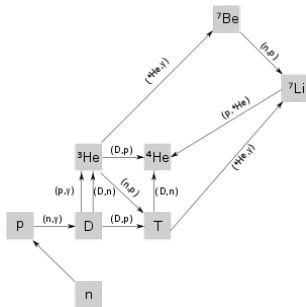
Le **collisioni nucleari** a RHIC ed LHC, in cui vengono raggiunte temperature superiori ai 1500 miliardi di gradi (150 MeV), **consentono di effettuare un viaggio indietro nel tempo di 13.8 miliardi di anni**, ai primissimi istanti dopo il Big Bang in cui l'universo era molto più piccolo, denso e caldo di oggi. Circa  **$10^{-6}$  s dopo il Big Bang** (confrontare con i  $10^{-23}$  s delle collisioni nucleari!) la temperatura era così alta da rendere **l'universo una zuppa di quark, antiquark e gluoni** (e tutte le particelle più leggere di 150 MeV: elettroni, fotoni e neutrini)

# ...fino ai primi 3 minuti dell'universo



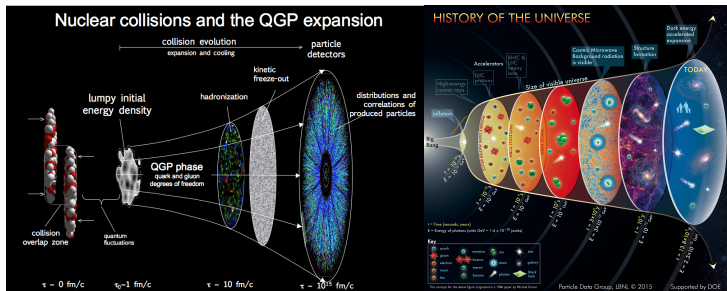
Durante i **primi 3 minuti** (titolo di un celeberrimo libro del premio Nobel Steven Weinberg) di vita dell'universo avviene la **nucleosintesi** dei primi nuclei (**d**,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$ ). In particolare l'**elio-4** formato durante il Big Bang rappresenta il **25% della massa dell'universo**. Per produrre **nuclei più pesanti** occorre attendere almeno **200 milioni di anni** con la formazione delle **prime stelle**, l'esplosione di supernovae ed eventi ancora più catastrofici.

# ...fino ai primi 3 minuti dell'universo



Durante i **primi 3 minuti** (titolo di un celeberrimo libro del premio Nobel Steven Weinberg) di vita dell'universo avviene la **nucleosintesi** dei primi nuclei (**d**,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ). In particolare l'**elio-4** formato durante il Big Bang rappresenta il **25% della massa dell'universo**. Per produrre **nuclei più pesanti** occorre attendere almeno **200 milioni di anni** con la formazione delle **prime stelle**, l'esplosione di supernovae ed eventi ancora più catastrofici.

# Piccoli Bang vs Big Bang

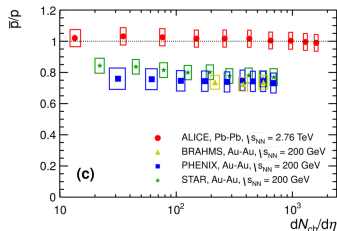
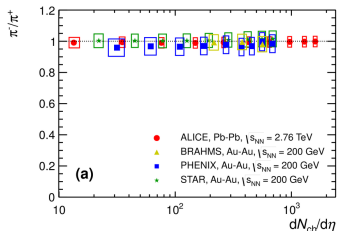


Che differenza c'è tra il **Little-Bang** prodotto in laboratorio e il **Big-Bang** che ha dato **origine all'universo**? Ve ne sono parecchie:

- Il Big-Bang è avvenuto **una volta sola**, mentre i Little-Bang possono essere prodotti **miliardi di volte** in laboratorio;
- A muovere l'espansione dell'**universo** secondo le equazioni del **campo gravitazionale** è la sua densità di energia. Nel caso delle **collisioni nucleari** la gravità **non gioca alcun ruolo**, il motore è la **differenza di pressione**;
- Il QGP prodotto nelle collisioni nucleari ha una **vita molto più breve** ( $10^{-22}$ s vs  $10^{-6}$ s) e un'**espansione molto più violenta** (con conseguenze!).

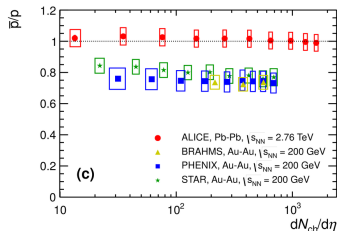
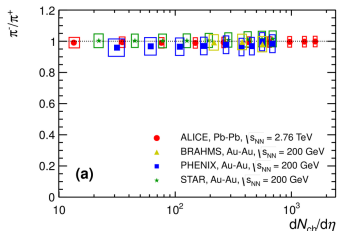


# Piccoli Bang vs Big Bang: materia vs antimateria



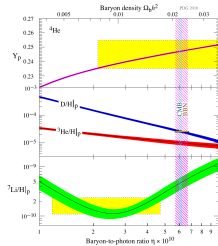
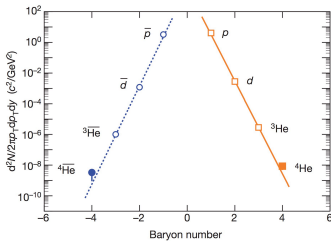
Nelle collisioni nucleari di alta energia, dall'adronizzazione del plasma di quark e gluoni, **produco la stessa quantità di particelle ed antiparticelle** (fatto salvo un piccolo eccesso di protoni dai nuclei collidenti). **Perché allora l'universo ci appare composto praticamente solo di materia?**

# Piccoli Bang vs Big Bang: materia vs antimateria



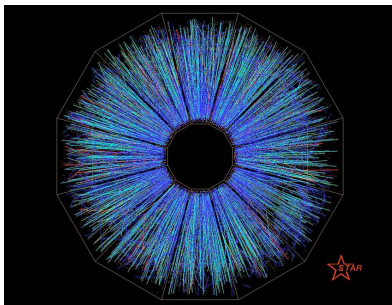
Nelle collisioni nucleari di alta energia, dall'adronizzazione del plasma di quark e gluoni, **produco la stessa quantità di particelle ed antiparticelle** (fatto salvo un piccolo eccesso di protoni dai nuclei collidenti). **Perché allora l'universo ci appare composto praticamente solo di materia?** Questo dipende dall'espansione molto più lenta dell'universo: particelle ed antiparticelle hanno avuto modo di interagire a lungo. Il risultato delle varie reazioni è stata l'**annichilazione della materia con l'antimateria** dando origine a un'enorme quantità di fotoni. È sopravvissuto solo il **piccolissimo eccesso di materia frutto di una fluttuazione iniziale** ed è questo che **ha dato origine a galassie, stelle, pianeti...vita.**

# Piccoli Bang vs Big Bang: la nucleosintesi



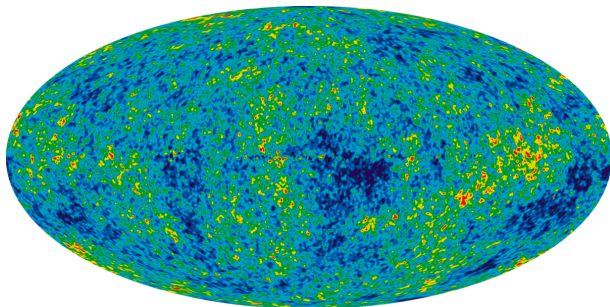
Nella **nucleosintesi primordiale** viene **prodotto quasi esclusivamente  ${}^4\text{He}$** , mentre nelle **collisioni nucleari** viene **prodotto molto più deuterio ed  ${}^3\text{He}$** . Ciò è dovuto all'espansione molto più rapida del sistema nel secondo caso. Questo fa sì che le particelle che interagiscono elettromagneticamente si disaccoppino dal sistema e non influenzino la sua evoluzione. L'espansione dell'universo è al contrario molto più lenta. In particolare è presente una quantità enorme di fotoni (e.g. dall'annichilazione materia-antimateria), circa **un miliardo di fotoni per ogni protone**, e **ce ne sarà sempre qualcuno di energia sufficiente a dissociare il deuterio** (il nucleo meno legato, con 2.2 MeV di energia di legame).

# La radiazione cosmica di fondo (CMB)



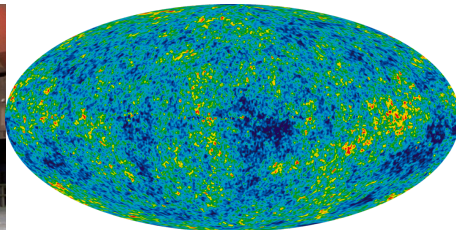
Queste sono le tracce lasciate dalla particelle che emergono dalla collisione di due nuclei pesanti. Quali sono le analoghe **tracce lasciate dal Big Bang**?

# La radiazione cosmica di fondo (CMB)



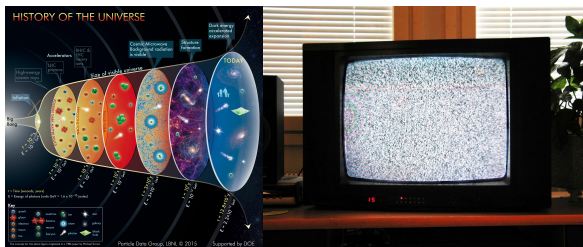
Queste sono le tracce lasciate dalla particelle che emergono dalla collisione di due nuclei pesanti. Quali sono le analoghe **tracce lasciate dal Big Bang**? Le tracce sono rappresentate dalla **radiazione cosmica di fondo**, un fondo di microonde che ci arriva dallo spazio da tutte le direzioni. La mappa, prodotta dal satellite WMAP, mostra le **piccolissime fluttuazioni della sua temperatura** (vedremo cosa vuol dire...), dell'ordine di **una parte su 100mila**.

# La radiazione cosmica di fondo (CMB)



L'universo nei suoi primissimi istanti era caldissimo e incandescente, come il metallo di un altoforno. Tuttavia **l'universo non era trasparente alla luce**, poiché i fotoni (le "particelle di luce") erano continuamente emessi e riassorbiti da protoni ed elettroni. Quando la **temperatura** scese intorno ai **3000 K** **protoni ed elettroni si combinarono in atomi neutri** di idrogeno e **i fotoni smisero quindi di interagire con la materia**, propagandosi in linea retta e consentendo di ricostruire le immagini: l'universo divenne trasparente! Questo successe circa **380mila anni dopo il Big Bang**, quando le **dimensioni** dell'universo erano **1000 volte più piccole di oggi** e la **luce** emessa dalla materia calda era **rossastra**.

# La radiazione cosmica di fondo (CMB)



Da quando la luce si è disaccoppiata dalla materia sono passati altri 13.8 miliardi di anni. Durante questo tempo **l'universo si è espanso** e quella che era luce visibile ha visto di conseguenza stiracchiarsi la sua **lunghezza d'onda**, che ora **si trova nella regione delle microonde (Cosmic Microwave Background)**, **non più visibili** dal nostro occhio, ma **captabili** ad esempio **da un'antenna televisiva**: parte del segnale che appare sugli schermi dei vecchi televisori analogici non sintonizzati su alcun canale non è altro che **la luce emessa dall'universo 380mila anni dopo il Big Bang!** Oggi questa radiazione corrisponde all'emissione termica di un corpo a una temperatura  **$T \approx 2.73 \text{ K}$**