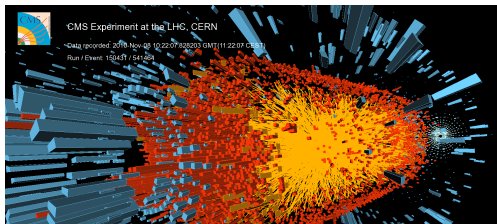


# “Dio non gioca a dadi” ...ma forse a LEGO sì

Andrea Beraudo - INFN Torino

Art&Science across Italy

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



Andrea Beraudo - INFN Torino

“Dio non gioca a dadi” ...ma forse a LEGO sì

# Cosa sono le particelle elementari?



**Fabio Gargano** è con **Annalisa Mastroserio.**

...

12 dicembre 2020 · 🌐

- Papà cosa studia mamma?
- Eh... Mamma studia le particelle elementari
- Ah quindi anche le particelle vanno a scuola?
- No si chiamano elementari perché sono piccole come voi che andate a scuola elementare
- Allora se sono piccole si devono chiamare particelle dell'infanzia



91

Commenti: 17



Mi piace

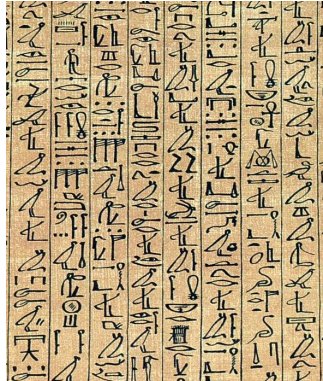


Commenta

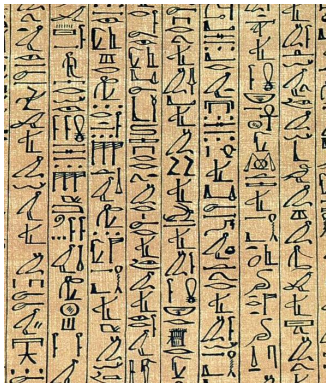


Condividi

# Alla ricerca dei mattoni fondamentali

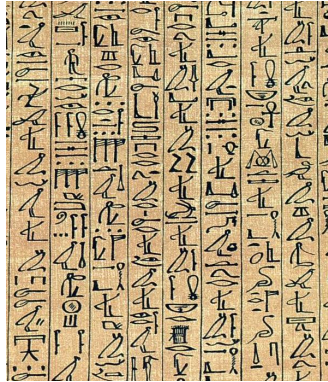


# Alla ricerca dei mattoni fondamentali



Pensate alla grande conquista del passaggio da geroglifici e ideogrammi a una scrittura alfabetica: 150mila parole espresse attraverso la combinazione di appena una ventina di simboli!

# Alla ricerca dei mattoni fondamentali



Pensate alla grande conquista del passaggio da geroglifici e ideogrammi a una scrittura alfabetica: 150mila parole espresse attraverso la combinazione di appena una ventina di simboli! La fisica delle particelle cerca di fare lo stesso, andando alla ricerca dei mattoni fondamentali con cui è scritto il libro l'Universo.

# Le lettere della Natura



# Le lettere della Natura



Gli antichi greci, a partire da Empedocle di Agrigento, avevano provato a ricondurre tutta la complessità dell'Universo a **4 elementi**: acqua, aria, fuoco e terra.

# Le lettere della Natura



Gli antichi greci, a partire da Empedocle di Agrigento, avevano provato a ricondurre tutta la complessità dell'Universo a **4 elementi**: acqua, aria, fuoco e terra.

Sappiamo oggi che non sono loro i mattoni fondamentali, tuttavia potremmo vederli come gli stati di aggregazione della materia.

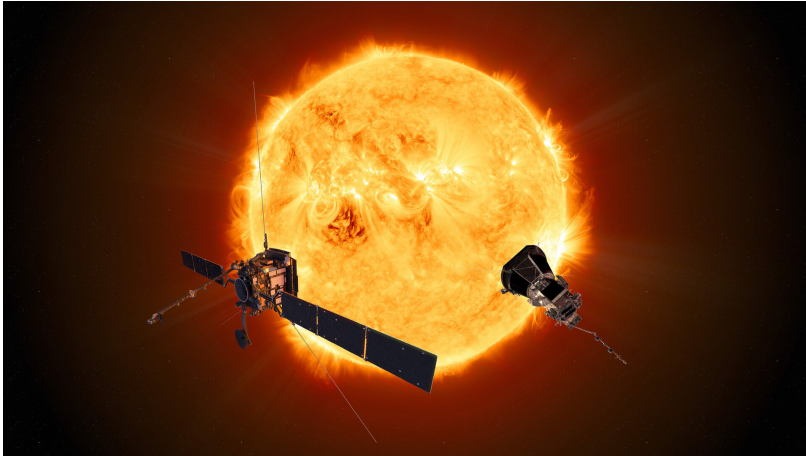
# Le lettere della Natura



Gli antichi greci, a partire da Empedocle di Agrigento, avevano provato a ricondurre tutta la complessità dell'Universo a **4 elementi**: acqua, aria, fuoco e terra.

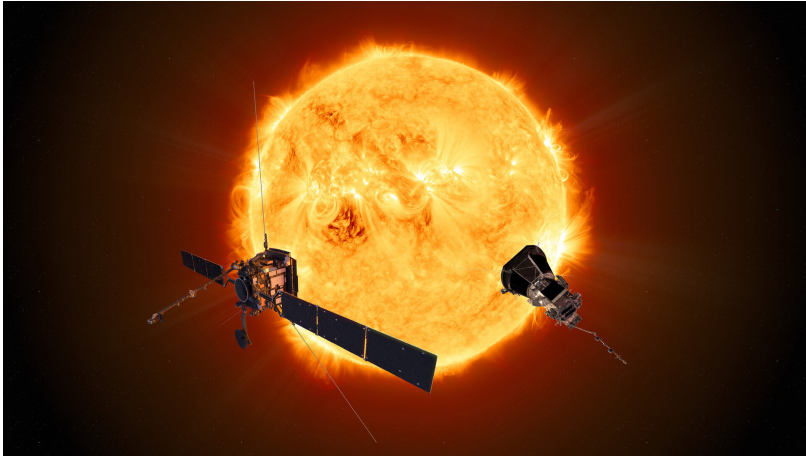
Sappiamo oggi che non sono loro i mattoni fondamentali, tuttavia potremmo vederli come gli stati di aggregazione della materia. **A cosa può corrispondere il fuoco?**

# Il plasma: lo stato più diffuso nell'universo



Le stelle contengono **la maggior parte della massa visibile dell'universo** sotto forma di plasma.

# Il plasma: lo stato più diffuso nell'universo



Le stelle contengono **la maggior parte della massa visibile dell'universo** sotto forma di plasma.  
Il nostro sole è studiato da sonde come **SOHO** e **Parker Solar Probe**.

# I 4 elementi nell'arte



Giorgio Vasari, Sala degli Elementi (Firenze, Palazzo Vecchio)

# I 4 elementi nell'arte



Giorgio Vasari, Sala degli Elementi (Firenze, Palazzo Vecchio)

# I 4 elementi nell'arte



Giorgio Vasari, Sala degli Elementi (Firenze, Palazzo Vecchio)

# I 4 elementi nell'arte

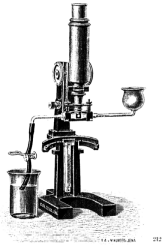


Giorgio Vasari, Sala degli Elementi (Firenze, Palazzo Vecchio)

# Jean Baptiste Perrin: il moto Browniano e la struttura granulare della materia (1908)

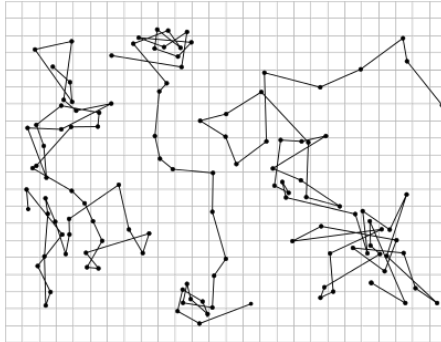
## Ultramikroskopie für Kolloide

Nach SIEDENTOPF und ZSIGMONDY.



2. Ausgabe 1907.

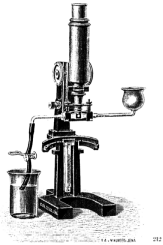
Telegraphenadresse: ZEISSWERK JENA.



# Jean Baptiste Perrin: il moto Browniano e la struttura granulare della materia (1908)

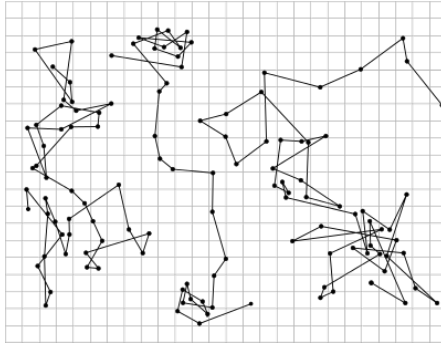
## Ultramikroskopie für Kolloide

Nach SIEDENTOPF und ZSIGMONDY.



2. Ausgabe 1907.

Telegraphenadresse: ZEISSWERK JENA.



Il primo apparato sperimentale: un microscopio, un foglio e una matita!

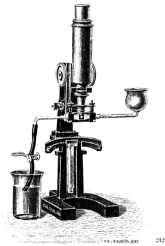
Il risultato: dal moto irregolare (*moto Browniano*) di migliaia di sferette di resina in acqua

**Perrin** ricava la **prova sperimentale dell'esistenza di atomi e molecole come oggetti fisici**

# Jean Baptiste Perrin: il moto Browniano e la struttura granulare della materia (1908)

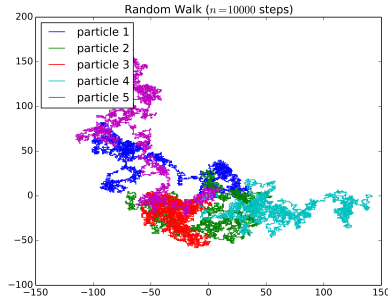
## Ultramikroskopie für Kolloide

Nach SIEDENTOPF und ZSIGMONDY.



2. Ausgabe 1907.

Telegraphenadresse: ZEISSWERK JENA.

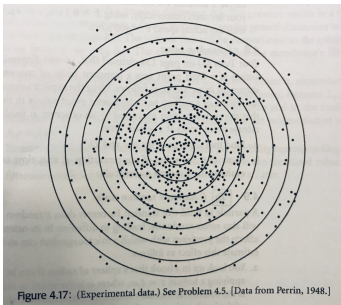


Il primo apparato sperimentale: un microscopio, un foglio e una matita!

Il risultato: dal moto irregolare (*moto Browniano*) di migliaia di sferette di resina in acqua

Perrin ricava la prova sperimentale dell'esistenza di atomi e molecole come oggetti fisici

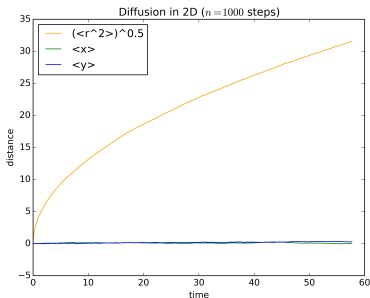
# Gli occhi del microscopio e quelli della teoria



Le particelle seguono la legge di diffusione

$$\langle x^2 \rangle \underset{t \rightarrow \infty}{\sim} 2Dt$$

# Gli occhi del microscopio e quelli della teoria



Le particelle seguono la legge di diffusione

$$\langle x^2 \rangle \underset{t \rightarrow \infty}{\sim} 2Dt$$

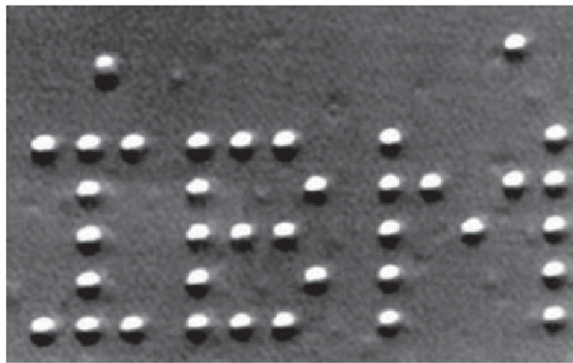
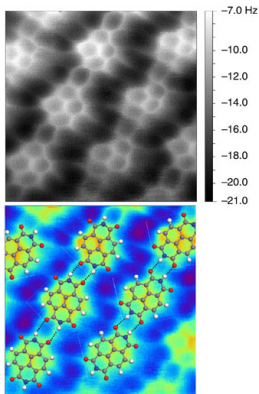
$$\mathcal{N}_A = \frac{RT}{6\pi a \eta D}$$

Atomi e molecole sono troppo piccoli ( $\bar{r} \approx 10^{-10}$  m) per essere visibili al microscopio, ma il loro effetto su sferette di resina lo è! Perrin, sfruttando la teoria del moto Browniano di Einstein e Langevin, riuscì così a contarli, ottenendo la stima del numero di Avogadro

$$\mathcal{N}_A \approx 5.5 - 7.2 \cdot 10^{23}$$

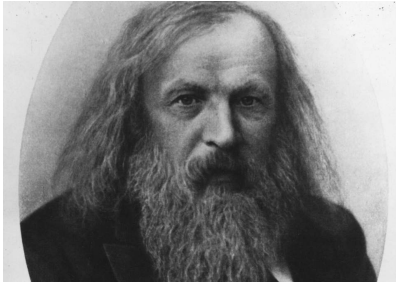
Non male, visti gli strumenti utilizzati!

# Vedere gli atomi oggi



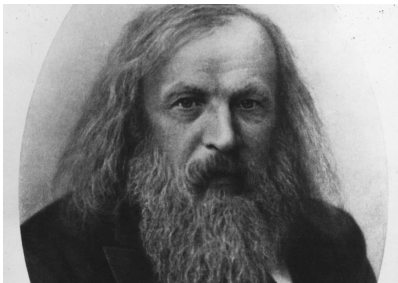
Oggi grazie ai **microscopi a effetto tunnel** e ai **microscopi a forza atomica** siamo in grado di “vedere” direttamente gli **atomi e i loro legami agli interni delle molecole** e anche di manipolarli (**laboratori IBM**)

## Un passo indietro: la tavola periodica degli elementi (1869)

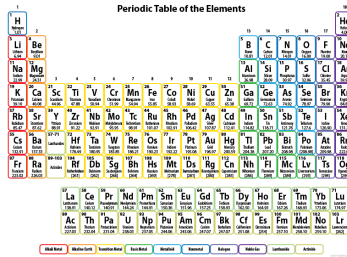
[illegible]

Mendeleev dispone gli elementi in ordine di peso atomico crescente, mettendo **sulla stessa colonna elementi con proprietà chimiche simili**

# Un passo indietro: la tavola periodica degli elementi (1869)



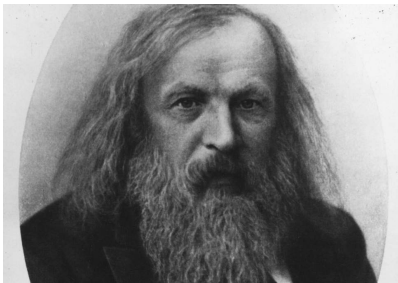
Periodic Table of the Elements



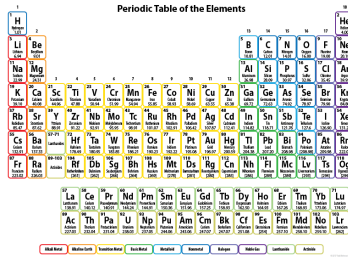
Mendeleev dispone gli elementi in ordine di peso atomico crescente, mettendo **sulla stessa colonna elementi con proprietà chimiche simili**

- Numerosi **buchi**, che Mendeleev interpreta come **elementi ancora da scoprire** e di cui predice le proprietà (Gallio, Germanio, Scandio...): il modello è predittivo;

# Un passo indietro: la tavola periodica degli elementi (1869)



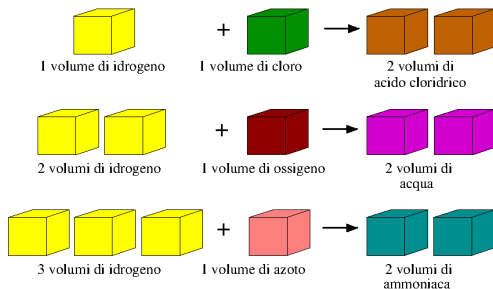
Periodic Table of the Elements



Mendeleev dispone gli elementi in ordine di peso atomico crescente, mettendo **sulla stessa colonna elementi con proprietà chimiche simili**

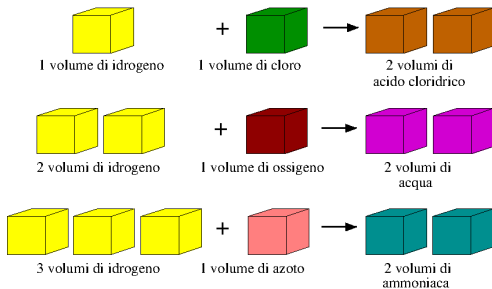
- Numerosi **buchi**, che Mendeleev interpreta come **elementi ancora da scoprire** e di cui predice le proprietà (Gallio, Germanio, Scandio...): il modello è predittivo;
- Mancava un **accordo generale sul concetti di atomo e molecola**, **mancava una teoria fondamentale** delle loro interazioni, **ma la tavola funzionava!**

# Un cammino non sempre lineare...



“Volumi di gas si combinano in rapporti di numeri interi piccoli” (Gay Lussac). Un po' vaga come legge...Perché non gli stessi? Quando un numero è piccolo? Perché i volumi?

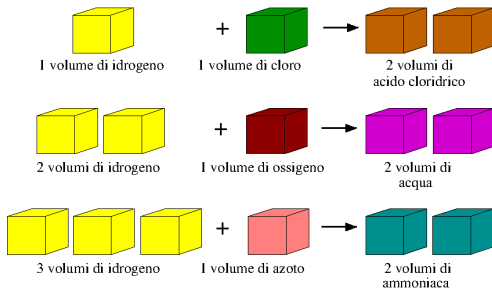
# Un cammino non sempre lineare...



“Volumi di gas si combinano in rapporti di numeri interi piccoli” (Gay Lussac). Un po' vaga come legge...Perché non gli stessi? Quando un numero è piccolo? Perché i volumi?

- **Avogadro:** Volumi di gas uguali contengono lo stesso numero di *particelle*. Cosa sono queste particelle? Molecole integranti, costituenti, elementari...(???)

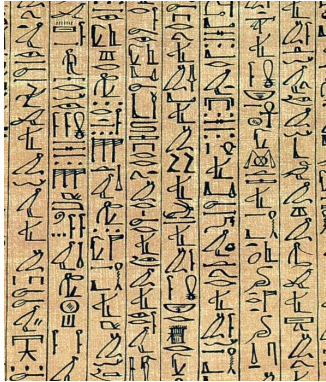
# Un cammino non sempre lineare...



“Volumi di gas si combinano in rapporti di numeri interi piccoli” (Gay Lussac). Un po' vaga come legge...Perché non gli stessi? Quando un numero è piccolo? Perché i volumi?

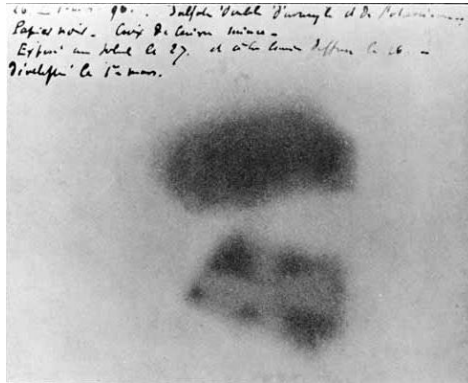
- **Avogadro:** Volumi di gas uguali contengono lo stesso numero di *particelle*. Cosa sono queste particelle? Molecole integranti, costituenti, elementari...(???)
- **Cannizzaro:** “Le varie quantità dello stesso elemento contenute in diverse molecole sono tutte multiple intere di una medesima quantità, la quale, entrando sempre intera, deve a ragione chiamarsi atomo”. Concetto accettato per alzata di mano (!!!)

# La ricerca della semplicità



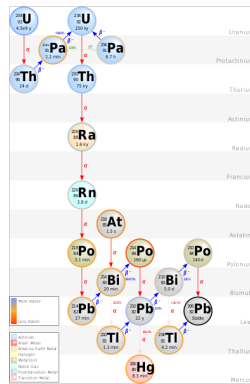
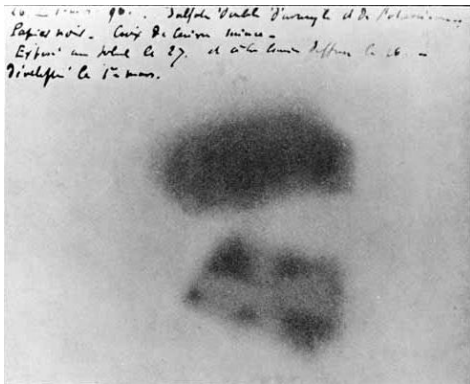
Circa 100 atomi diversi...**troppi per essere i mattoni fondamentali?**

# Un nuovo strumento per indagare l'infinitamente piccolo



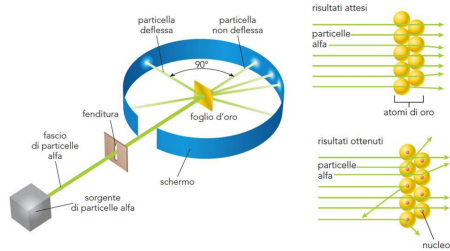
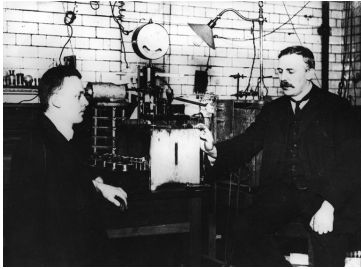
Scoperta della **radioattività naturale** (Becquerel, 1896):

# Un nuovo strumento per indagare l'infinitamente piccolo



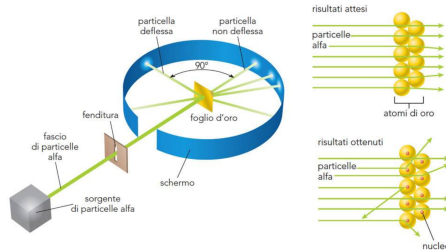
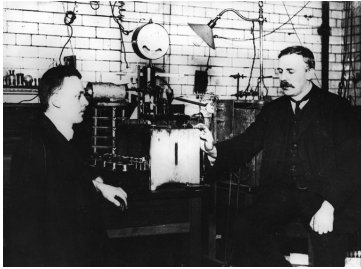
Scoperta della **radioattività naturale** (Becquerel, 1896): non tutti gli atomi sono stabili, alcuni decadono in specie più stabili emettendo particelle (**raggi alfa** e beta) che interagiscono con la materia: **possono essere utilizzate per studiarne la struttura!**

# Rutherford 1913, ovvero come è fatto un atomo



Alcune particelle (poche) subivano grosse deviazioni, alcune (pochissime) rimbalzavano addirittura indietro ([link](#))

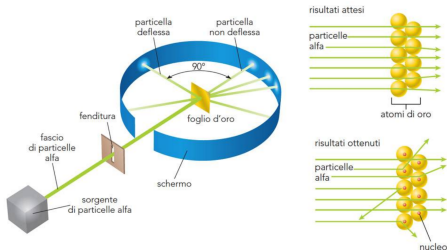
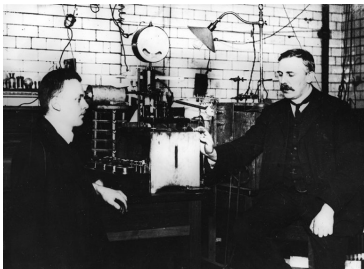
# Rutherford 1913, ovvero come è fatto un atomo



Alcune particelle (poche) subivano grosse deviazioni, alcune (pochissime) rimbalzavano addirittura indietro ([link](#))

- La maggior parte della massa deve essere contenuta nel nucleo: solo un oggetto molto pesante è in grado di far rinculare significativamente la particella alfa;
- Il nucleo deve occupare un volume molto piccolo: sono pochissime le particelle deviate a grandi angoli.

# Rutherford 1913, ovvero come è fatto un atomo



Alcune particelle (poche) subivano grosse deviazioni, alcune (pochissime) rimbalzavano addirittura indietro ([link](#))

- La maggior parte della massa deve essere contenuta nel nucleo: solo un oggetto molto pesante è in grado di far rinculare significativamente la particella alfa;
- Il nucleo deve occupare un volume molto piccolo: sono pochissime le particelle deviate a grandi angoli.

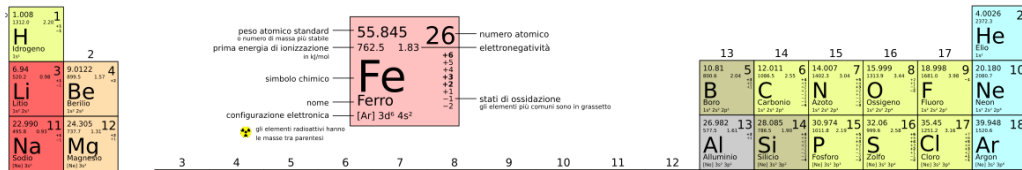
Un sistema solare in miniatura!

## I pesi atomici: numeri casuali?

Diagramma della tavola periodica con l'elemento Ferro (Fe) evidenziato in rosso. La tavola mostra gli elementi da idrogeno (H) a argon (Ar). L'elemento Ferro (Fe) è al centro, con i suoi dati: peso atomico standard 55.845, numero atomico 26, simbolo chimico Fe, nome Ferro, configurazione elettronica [Ar] 3d<sup>6</sup> 4s<sup>2</sup>. A destra di Fe sono indicati i suoi valori: prima energia di ionizzazione (762.5 kJ/mol), elettronegatività (1.83), stati di ossidazione (+6, +5, +4, +3, +2, +1, 0, -1, -2) e il fatto che gli elementi più comuni sono in grassetto.

10 dei primi 18 elementi hanno 0 come prima cifra significativa dopo la virgola. Quale sarebbe la probabilità che questo si verifichi se le masse atomiche fossero quantità casuali non correlate?

# I pesi atomici: numeri casuali?



10 dei primi 18 elementi hanno 0 come prima cifra significativa dopo la virgola. Quale sarebbe la probabilità che questo si verifichi se le masse atomiche fossero quantità casuali non correlate? La risposta è data da una distribuzione binomiale

$$P(n, N; p) = \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n}$$

Per  $p = 1/10$ ,  $n = 10$ ,  $N = 18$  si ottiene probabilità

$$P(10, 18; 0.1) = 0.00000188363842 = 1.88363842 \cdot 10^{-6}.$$

# I pesi atomici: numeri casuali?

The diagram illustrates the periodic table and a detailed view of the Iron (Fe) element box. The periodic table shows elements from Hydrogen (H) to Argon (Ar). The detailed view of the Iron (Fe) box includes the following data:

- peso atomico standard**: 55.845
- numero atomico**: 26
- prima energia di ionizzazione**: 762.5
- elettronegatività**: 1.83
- simbolo chimico**: Fe
- nome**: Ferro
- configurazione elettronica**: [Ar] 3d<sup>6</sup> 4s<sup>2</sup>
- stati di ossidazione**: +6, +5, +4, +3, +2, +1, -1, -2
- gli elementi radioattivi hanno le masse tra parentesi**: (indicated by a yellow radiation symbol)

10 dei primi 18 elementi hanno 0 come prima cifra significativa dopo la virgola. Quale sarebbe la probabilità che questo si verifichi se le masse atomiche fossero quantità casuali non correlate? La risposta è data da una distribuzione binomiale

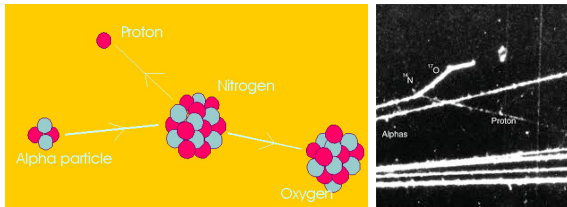
$$P(n, N; p) = \binom{N}{n} p^n (1 - p)^{N-n}$$

Per  $p = 1/10$ ,  $n = 10$ ,  $N = 18$  si ottiene probabilità

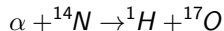
$$P(10, 18; 0.1) = 0.00000188363842 = 1.88363842 \cdot 10^{-6}.$$

Quale potrebbe essere una spiegazione più naturale?

# I mattoncini dei nuclei: protoni e neutroni

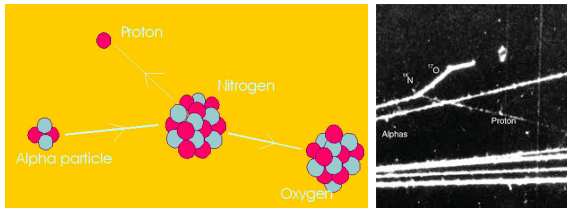


Nel 1919 Rutherford, studiando l'interazione delle particelle  $\alpha$  con l'aria scoprì che le radiazioni erano in grado di estrarre nuclei di idrogeno dall'azoto, attraverso la reazione

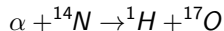


Ipotizzò quindi che i nuclei di idrogeno, battezzati protoni, fossero i costituenti elementari dei nuclei. Il *protone* ha carica elettrica  $Q=+1$  ed è circa 2000 volte più pesante di un elettrone. Nel 1932 Chadwick scoprì il *neutrone*, privo di carica elettrica e con circa la stessa massa del protone.

# I mattoncini dei nuclei: protoni e neutroni



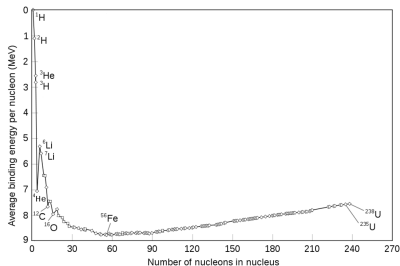
Nel 1919 Rutherford, studiando l'interazione delle particelle  $\alpha$  con l'aria scoprì che le radiazioni erano in grado di **estrarre nuclei di idrogeno dall'azoto**, attraverso la reazione



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.

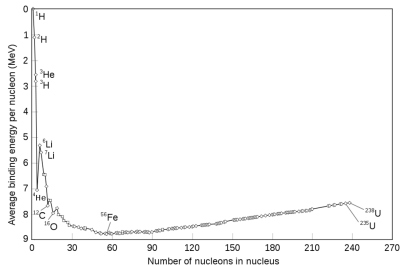
Aria, acqua...  $\rightarrow \sim 100$  atomi  $\rightarrow$  **elettroni, protoni e neutroni**

# Come stanno insieme protoni e neutroni?



- La stabilità di un nucleo nasce dal *delicato equilibrio* di forze attrattive nucleari tra  $Z$  protoni e  $N$  neutroni, repulsione elettrostatica tra protoni (stessa carica!), difficoltà a mettere particelle quantistiche *identiche* in un piccolo volume, *loro tendenza a formare coppie* e tensione superficiale di questa goccia di materia;

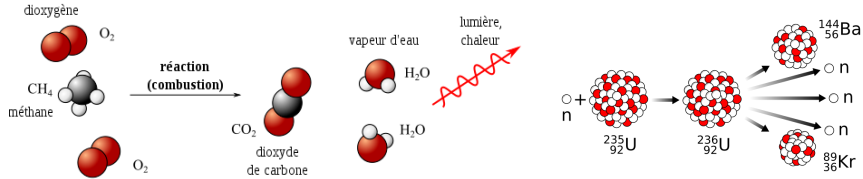
# Come stanno insieme protoni e neutroni?



- La stabilità di un nucleo nasce dal *delicato equilibrio* di forze attrattive nucleari tra  $Z$  protoni e  $N$  neutroni, repulsione elettrostatica tra protoni (stessa carica!), difficoltà a mettere particelle quantistiche *identiche* in un piccolo volume, *loro tendenza a formare coppie* e tensione superficiale di questa goccia di materia;
- Un nucleo è legato perché *parte della massa di protoni e neutroni isolati diventa energia di legame* (un nucleo è più leggero della somma dei suoi costituenti):

$$(M_{\text{nucleo}} - Z \cdot M_p - N \cdot M_n)c^2 = -|E|_{\text{legame}} < 0$$

# Reazioni chimiche vs reazioni nucleari

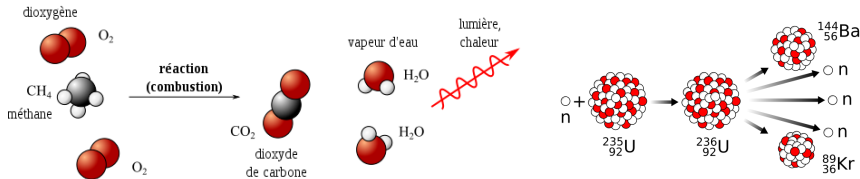


L'energia liberata in una generica reazione la si ottiene dalla formula di Einstein

$$E = (M_{\text{reagenti}} - M_{\text{prodotti}})c^2$$

- **Combustione** di *una* molecola di metano:  $E \approx 9 \text{ eV}$
- **Fissione** di *un* nucleo di uranio:  $E \approx 200 \text{ MeV}$

# Reazioni chimiche vs reazioni nucleari



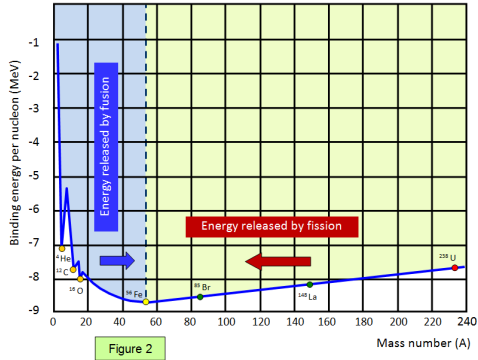
L'energia liberata in una generica reazione la si ottiene dalla formula di Einstein

$$E = (M_{\text{reagenti}} - M_{\text{prodotti}})c^2$$

- **Combustione** di *una* molecola di metano:  $E \approx 9 \text{ eV}$
- **Fissione** di *un* nucleo di uranio:  $E \approx 200 \text{ MeV}$

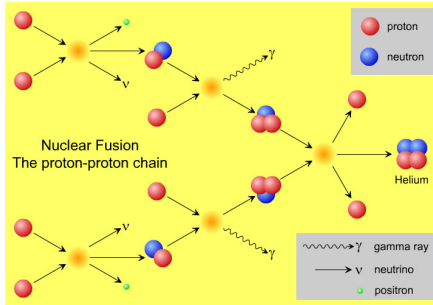
20 milioni di volte più energia per una singola reazione: minor consumo di risorse, minor produzione di rifiuti, minore occupazione di suolo, zero produzione diretta di CO<sub>2</sub>... Un contributo da tener presente nel percorso verso la decarbonizzazione

# Fusione vs fissione



I nuclei con la minima energia per nucleone sono ferro e nichel. È pertanto possibile liberare energia attraverso:

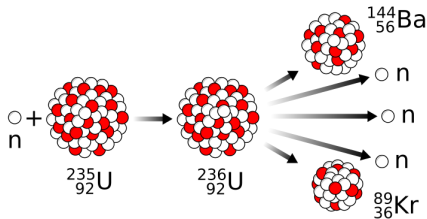
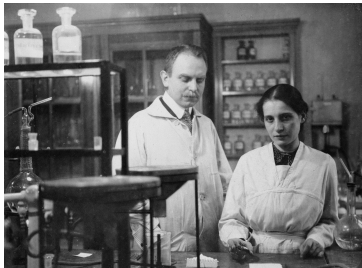
# Fusione vs fissione



I nuclei con la minima energia per nucleone sono ferro e nichel. È pertanto possibile liberare energia attraverso:

- **Fusione di due nuclei leggeri:** compresa nel 1938 (Hans Bethe, produzione di energia nelle stelle), nessuna applicazione ancora disponibile;

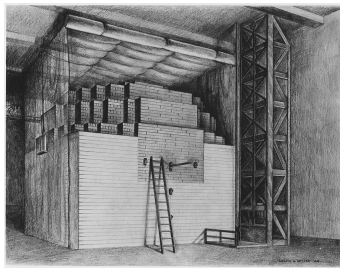
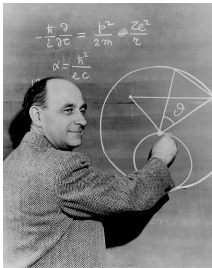
# Fusione vs fissione



I nuclei con la minima energia per nucleone sono ferro e nichel. È pertanto possibile liberare energia attraverso:

- **Fusione di due nuclei leggeri:** compresa nel 1938 (Hans Bethe, produzione di energia nelle stelle), nessuna applicazione ancora disponibile;
- **Fissione di un nucleo pesante:** compresa nel 1938 (Lise Meitner), prima pila nucleare nel 1942 (Enrico Fermi, Chicago).

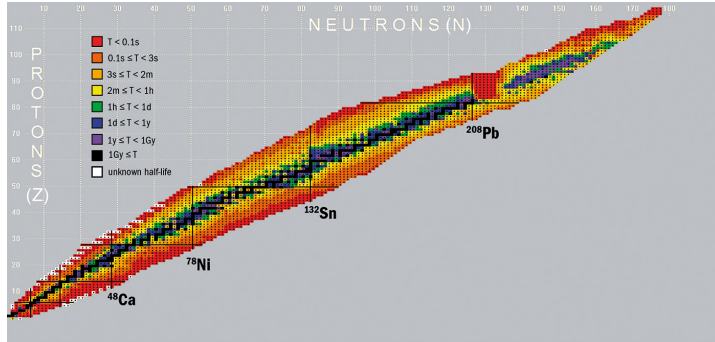
# Fusione vs fissione



I nuclei con la minima energia per nucleone sono ferro e nichel. È pertanto possibile liberare energia attraverso:

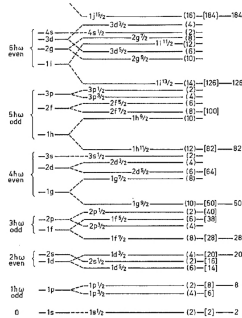
- **Fusione di due nuclei leggeri:** compresa nel 1938 (Hans Bethe, produzione di energia nelle stelle), nessuna applicazione ancora disponibile;
- **Fissione di un nucleo pesante:** compresa nel 1938 (Lise Meitner), prima pila nucleare nel 1942 (Enrico Fermi, Chicago).

# Stabilità nucleare e radioattività

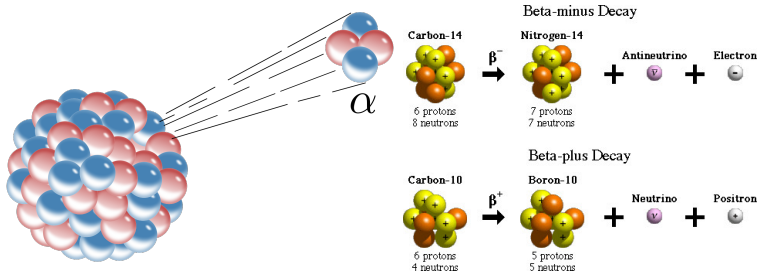


- Solo una piccola parte dei nuclei in natura sono stabili. Gli altri decadono su scale di tempo diversissime in nuclei più stabili e leggeri;

# Stabilità nucleare e radioattività



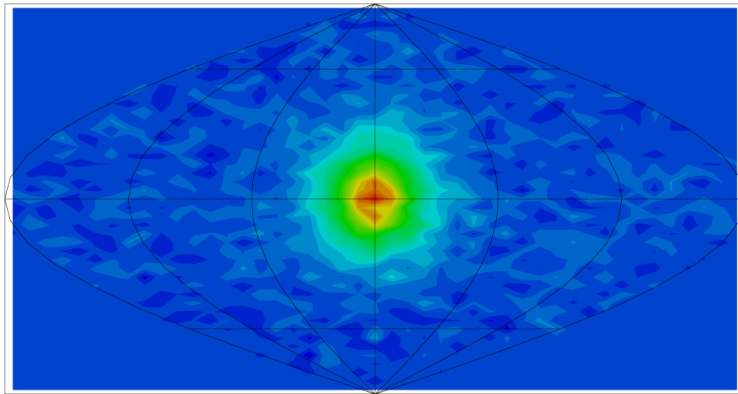
# Stabilità nucleare e radioattività



- Solo una piccola parte dei nuclei in natura sono stabili. Gli altri decadono **su scale di tempo diversissime** in nuclei più stabili e leggeri;
- **La meccanica quantistica all'opera**: come per gli atomi (gas nobili), anche per i nuclei esistono **numeri magici** di protoni e/o neutroni (**8,20,28,50,82,126**) corrispondenti a **sistemi particolarmente stabili** (M. Goeppert-Mayer, nuclear shell model)!
- Nei decadimenti vengono emesse particelle ( $\alpha$ ,  $e^-/e^+$ ,  $\gamma$ ), potenzialmente dannose per la salute *se inalate* o non adeguatamente schermate

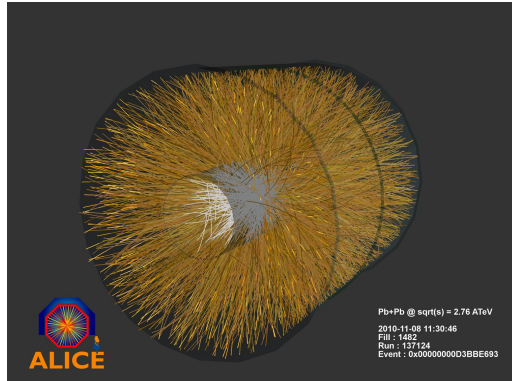
# I neutrini: un canale per vedere l'interno del sole

La rivelazione dei neutrini solari, emessi nei decadimenti  $\beta$  durante le reazioni di fusione, ci consente di scattare una **fotografia del nucleo del sole**, dove  $T \approx 15 \cdot 10^6$  K!



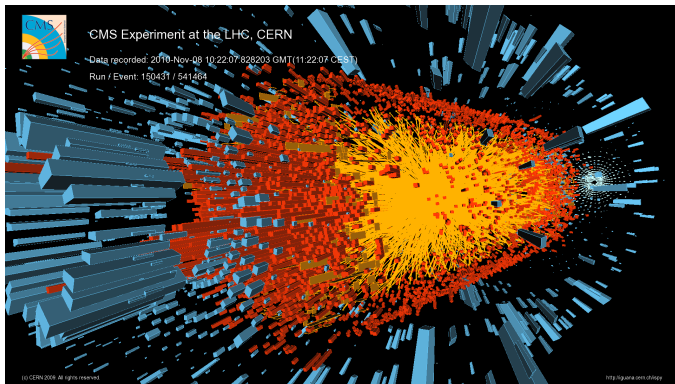
Quella di sopra è un'immagine del sole ricostruita attraverso i neutrini rivelati dall'esperimento **Super-Kamiokande**, collocato in una **miniera giapponese a 1000 m di profondità**

# È possibile spaccare protoni e neutroni?



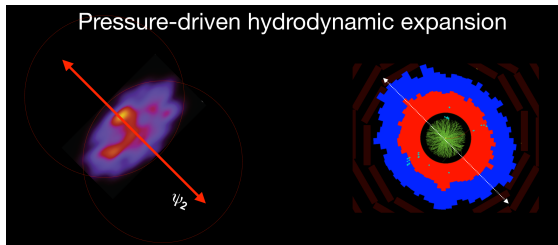
I fisici provano a farlo facendo scontrare nuclei pesanti (Pb, Au...) a velocità vicine a quelle della luce, producendo per brevissimi istanti ( $10^{-23} - 10^{-22}$  s) una zuppa caldissima dei costituenti ancora più elementari della materia

# È possibile spaccare protoni e neutroni?



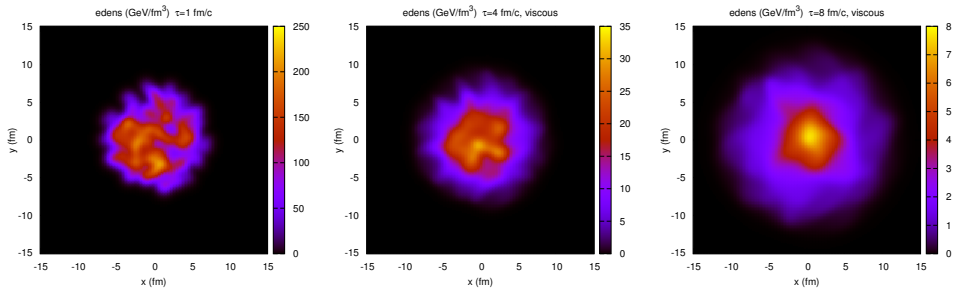
I fisici provano a farlo facendo scontrare nuclei pesanti (Pb, Au...) a velocità vicine a quelle della luce, producendo per brevissimi istanti ( $10^{-23} - 10^{-22}$  s) una zuppa caldissima dei costituenti ancora più elementari della materia

# Un piccolo Big-Bang in laboratorio



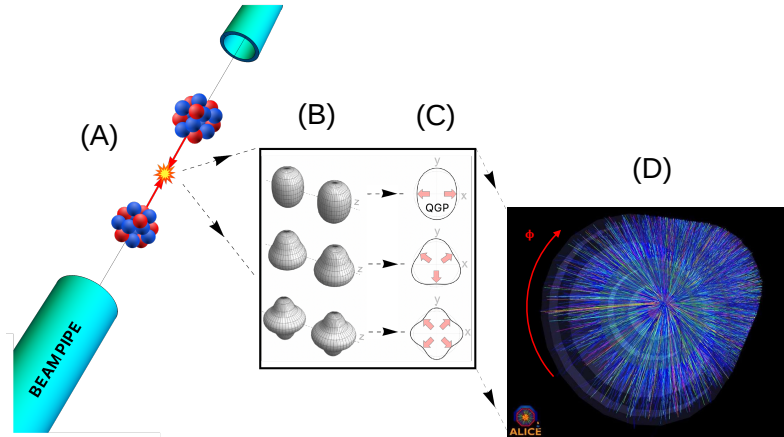
Come si vede, nei singoli eventi, l'energia depositata nei rivelatori non è distribuita simmetricamente, ma tende a dar luogo ad una geometria ellittica, con molta energia depositata lungo un asse e poca lungo quello perpendicolare. L'interpretazione è che, in seguito alla collisione, ci sia un'esplosione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

# Un piccolo Big-Bang in laboratorio



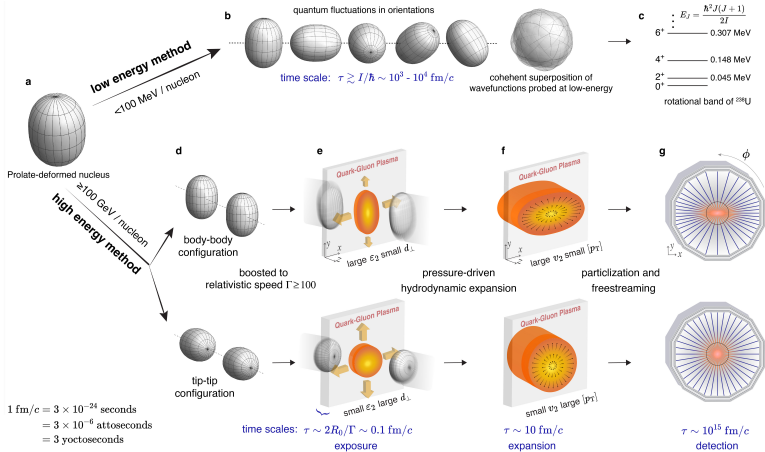
Come si vede, nei singoli eventi, l'energia depositata nei rivelatori non è distribuita simmetricamente, ma tende a dar luogo ad una geometria ellittica, con molta energia depositata lungo un asse e poca lungo quello perpendicolare. L'interpretazione è che, in seguito alla collisione, ci sia un'esplosione (un "Little-Bang") con una forte accelerazione della materia prodotta lungo la direzione in cui la differenza di pressione è maggiore. Collisioni più centrali sono caratterizzate da asimmetrie ancora più complesse dovute alla struttura granulare dei nuclei o alla loro forma

# Che forma ha un nucleo?



Un nucleo si comporta come una goccia di liquido. Non necessariamente questa goccia ha una forma sferica. Facendoli collidere è possibile studiare la loro deformazione

# Che forma ha un nucleo?



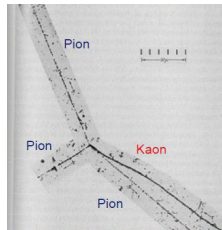
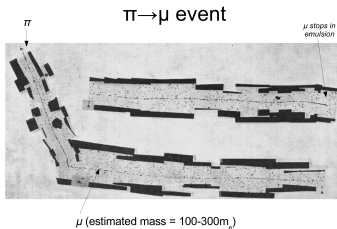
Un nucleo si comporta come una goccia di liquido. Non necessariamente questa goccia ha una forma sferica. Facendoli collidere è possibile studiare la loro deformazione.

# 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

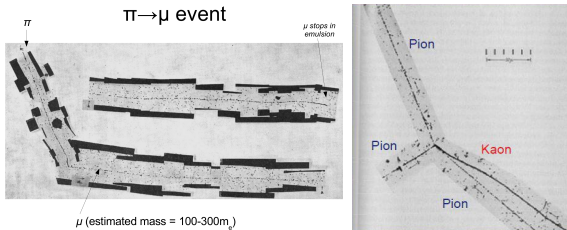
# E questi chi li ha ordinati?

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, ma **dallo spazio arrivarono le sorprese...**



# 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, ma **dallo spazio arrivarono le sorprese...**



L'osservazione dei raggi cosmici portò alla scoperta di **nuove particelle**: il **positrone** (1932), il **muone** (1936), il **pione** (1947), il **kaone** (1949)... una complicazione di cui si sarebbe fatto volentieri a meno. Qua però passo la palla ai colleghi

**"Who ordered that?" (I.I. Rabi)**