INTERNATIONAL MASTERCLASSES

hands on particle physics

Introduzione alla Fisica delle Particelle

Prof. Maria Agnese Ciocci

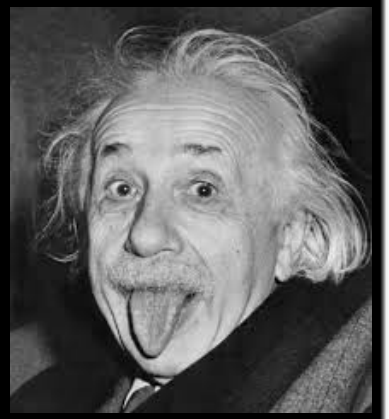
Università di Pisa & INFN

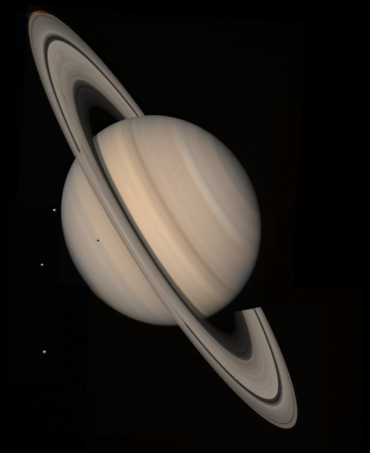
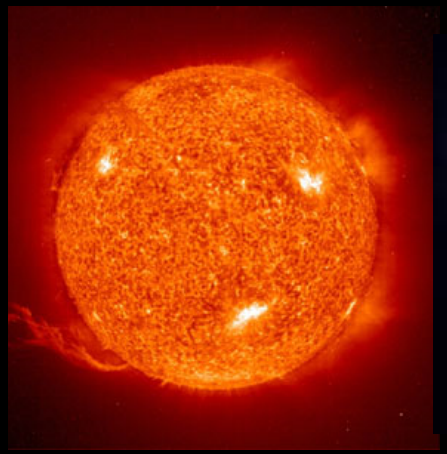
Pisa 12 Febbraio 2021

Breve storia della ricerca dei costituenti elementari della materia

Di che cosa è fatto il mondo?
Cosa tiene il mondo insieme?
Da dove viene l'universo?

Di che cosa è fatto il mondo?

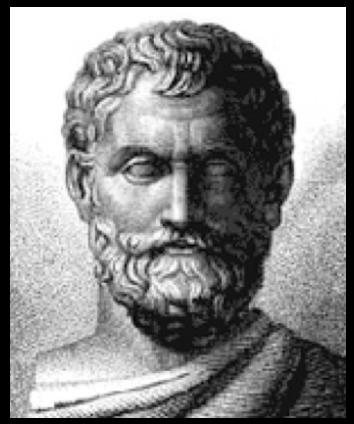


Chi sono i costituenti elementari?

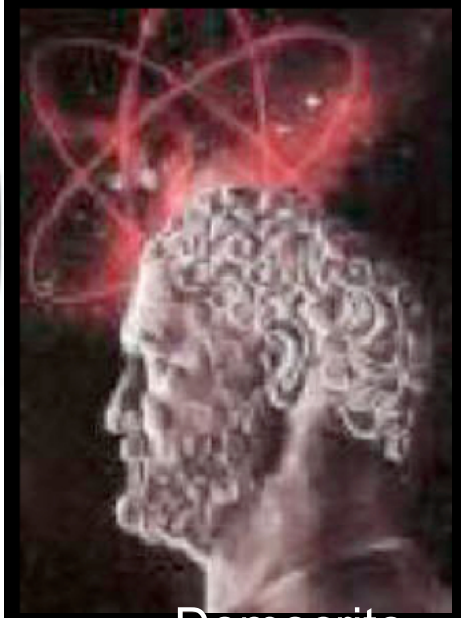
una storia vecchia quanto la memoria dell'uomo!
per più di 2000 anni l'uomo è stato affascinato
dalla struttura ultima della materia

Empedocle
(490-430 AC)

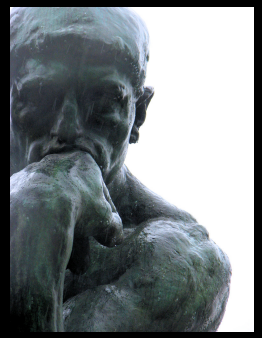


Quattro elementi fondamentali

L'atomo è il costituente ultimo della materia.

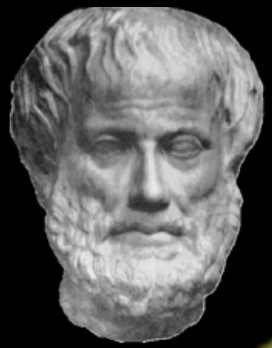


Democrito
(460-370 AC)

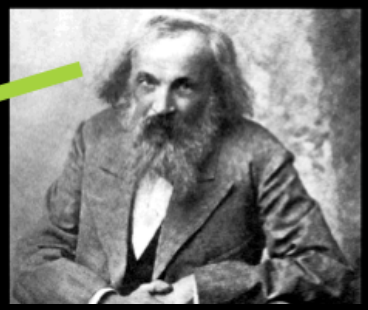


”Esiste il colore, la dolcezza, l’amarezza, ma in realtà ci sono gli atomi e lo spazio."
-Democrito (400 AC)

Aristotele
(384-322 AC)



Dalton 1803



Mendeleev 1869

1894 – 1897: Scoperta dell'elettrone

Studio dei "raggi catodici": corrente elettrica nei tubi a bassa pressione ("glow discharge")

Misura della massa dell'elettrone: $m_e \approx M_H/1836$

→ Gli atomi non sono "elementari"

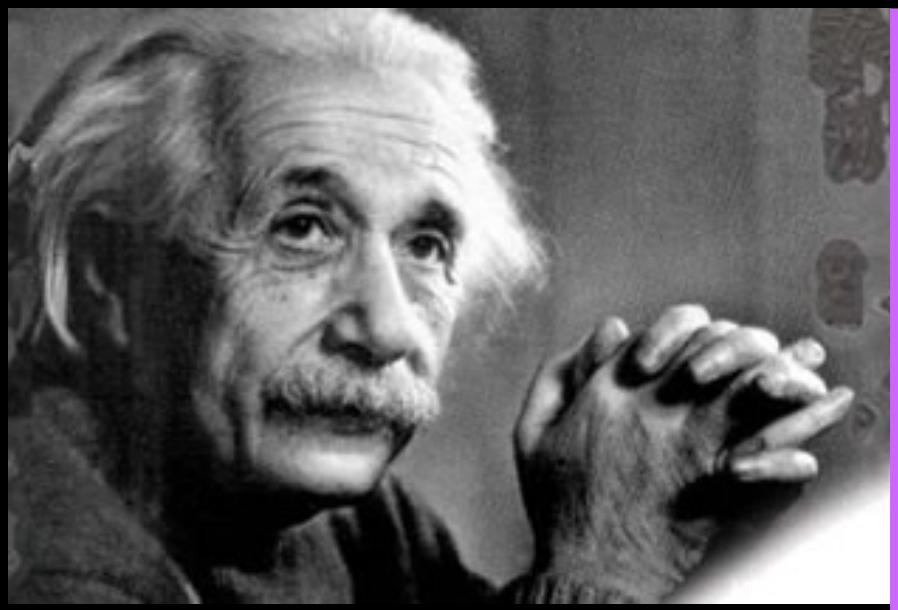
J.J. Thomson
1895

Un concetto fondamentale: Equivalenza Massa-Energia

Esempi di trasformazione di
massa → Energia

Fissione nucleare

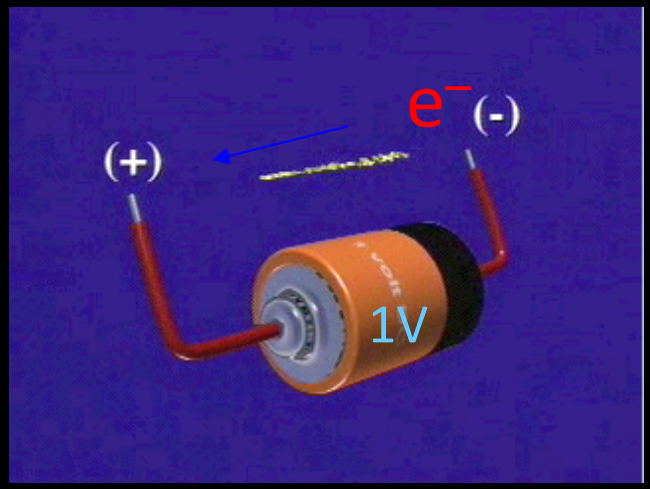
Fusione nucleare



$$E = m\,c^2$$

ElettronVolt (eV)

1 eV corrisponde all'energia acquistata da un e^- accelerato da una d.d.p. di 1V



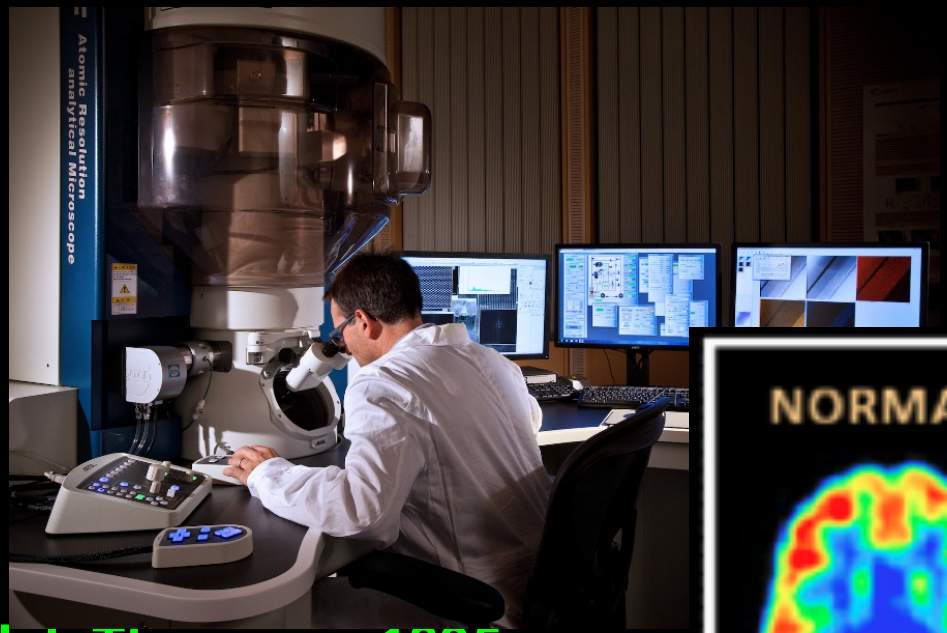
1 KeV=10^3 eV - 1 MeV=10^6 eV
1 GeV=10^9 eV - 1 TeV=10^{12} eV

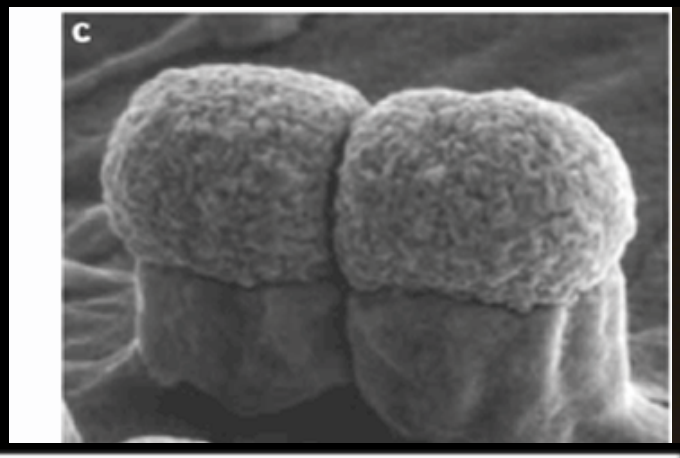
Ma quanta energia è 1 eV? 1 eV = 1.6 10^{-19} J
Ma quanta massa è 1 eV/c^2? 1 eV/c^2 = 1.8 10^{-36} kg

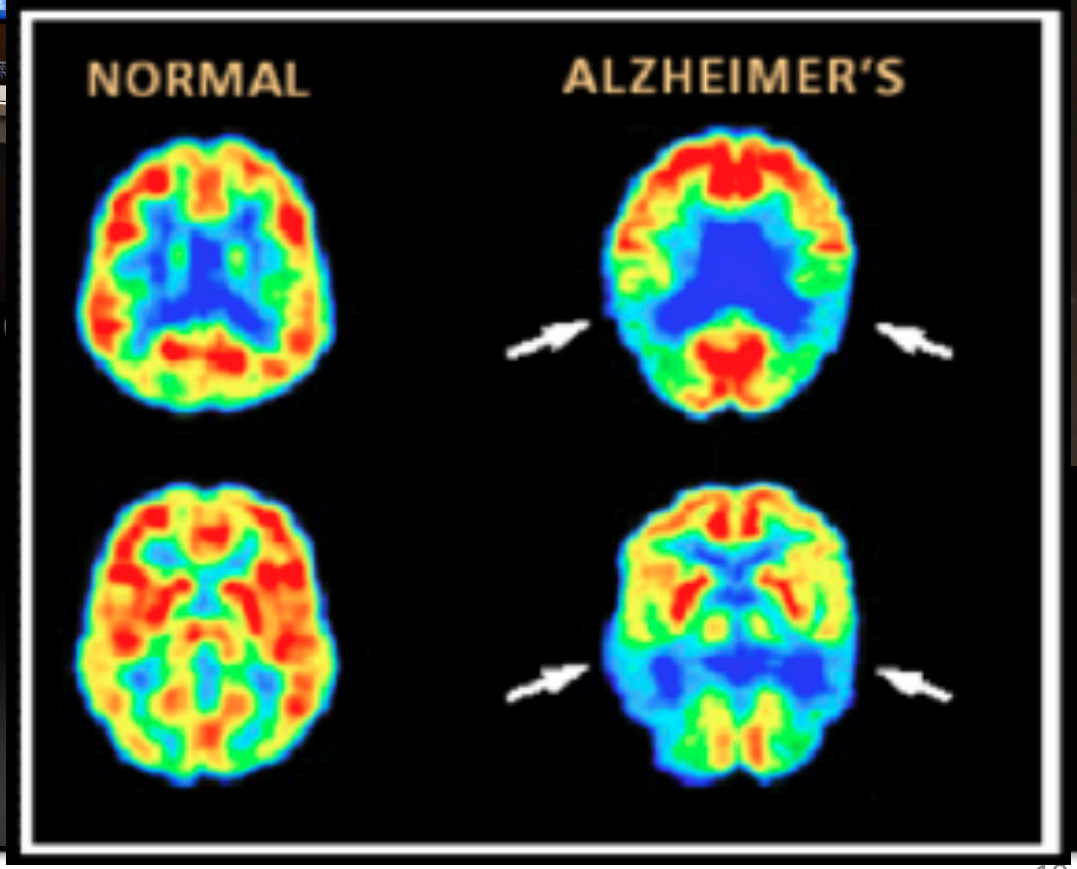
La massa di un protone è ~ 1 GeV = 10^9 eV~1.8 10^{-24} kg
La massa di un elettrone è ~2000 volte più piccola ~ 0.5 MeV

L'energia dei protoni nel LHC al Cern è ~7 TeV!

L'elettrone è stato scoperto!





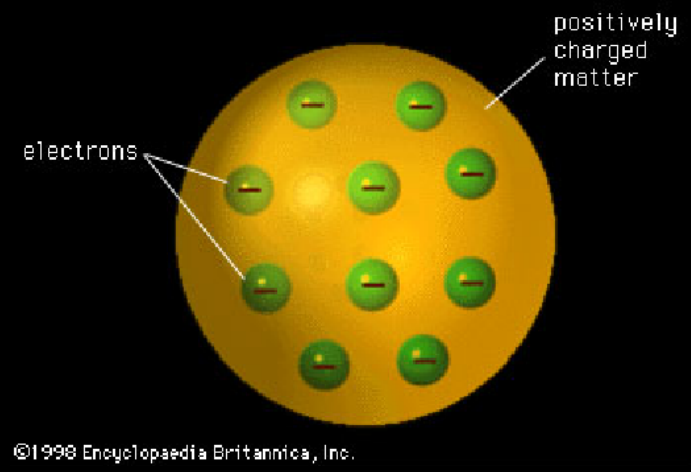


J.J. Thomson, 1895

"Could anything at first sight seem more impractical than a body which is so small that its mass is an insignificant fraction of the mass of an atom of hydrogen?"

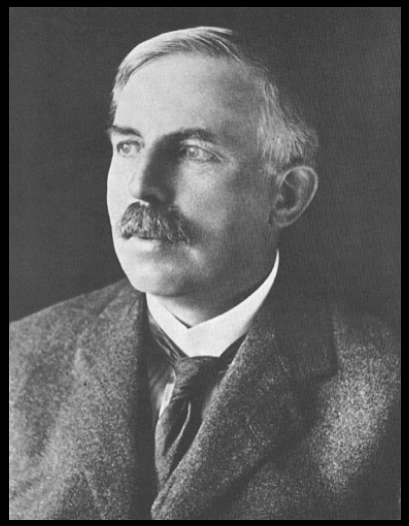
Di che cosa sono fatti gli atomi?

“Panettone”

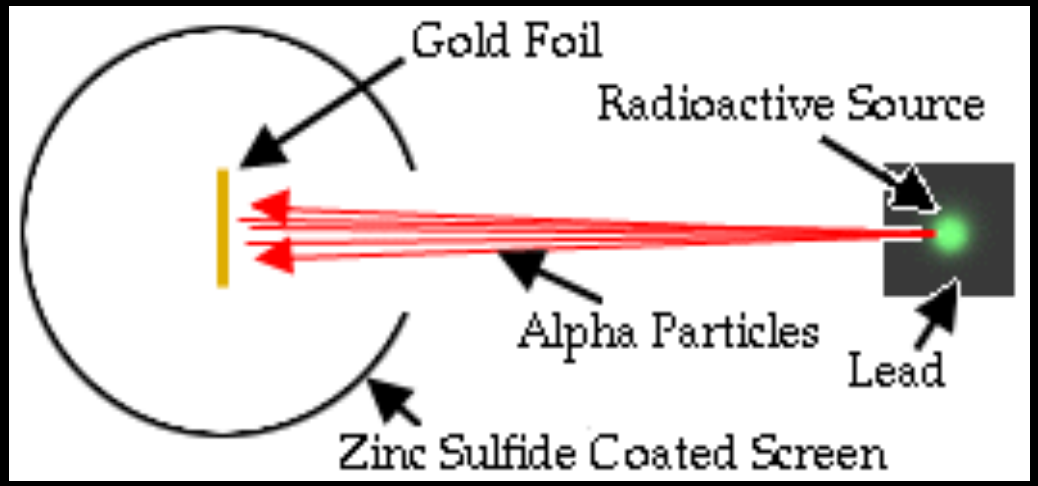


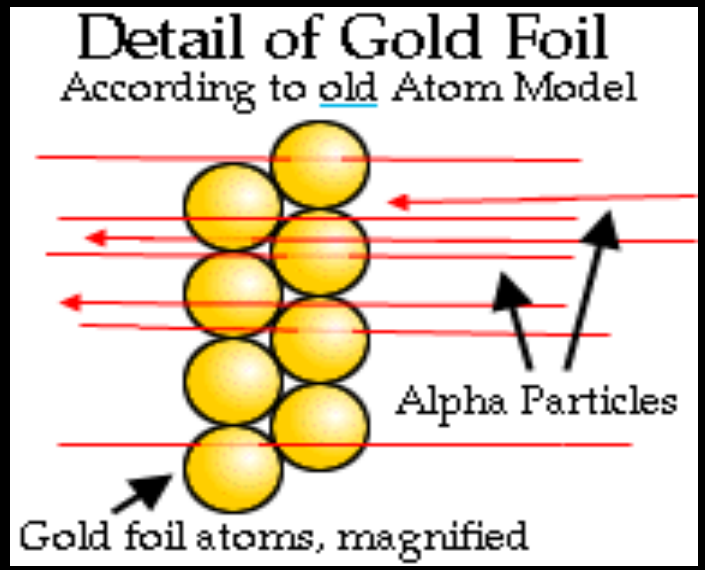
Modello di Thomson dell’atomo

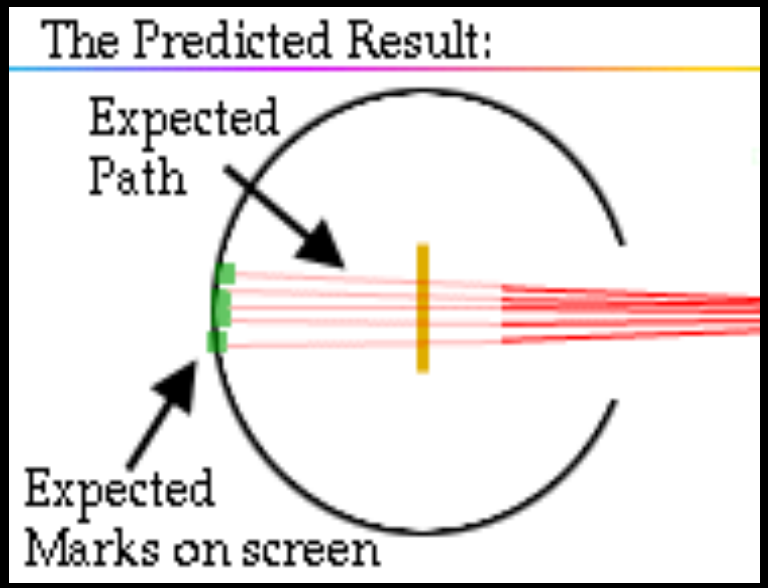
Esperimento di Rutherford 1905

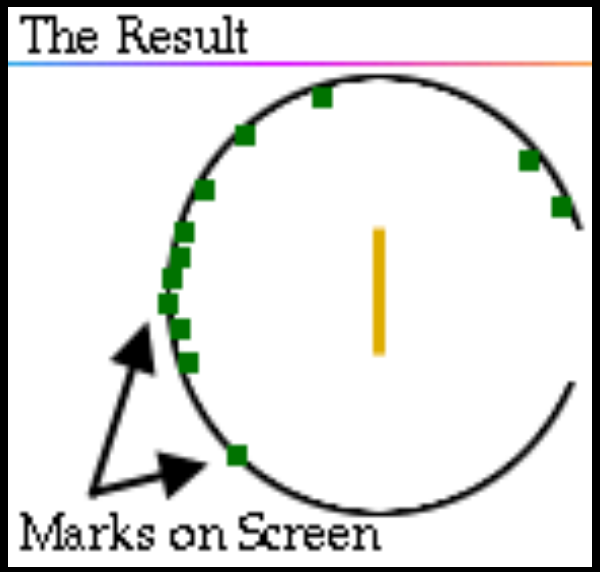


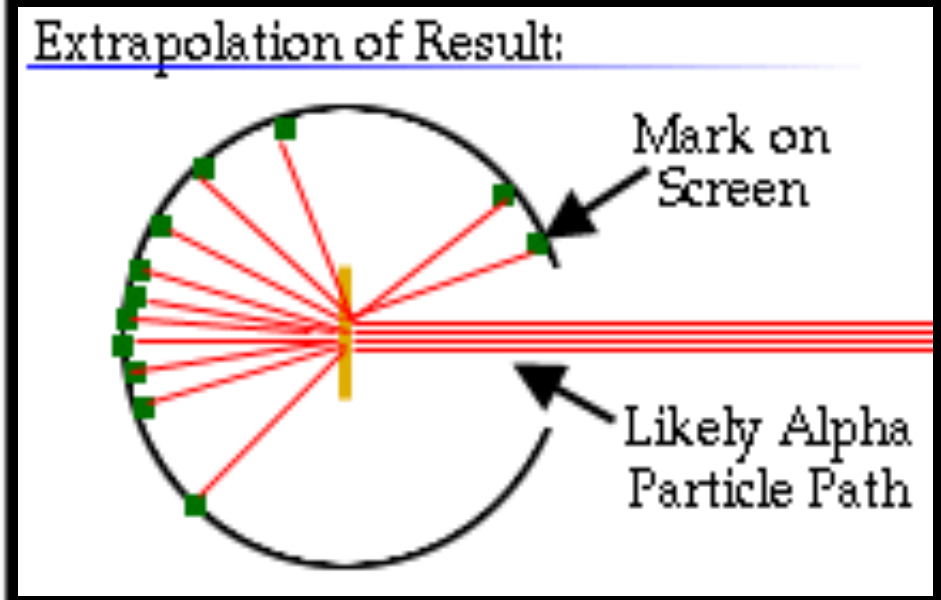
Rutherford Experiment:
Nuclear Atom

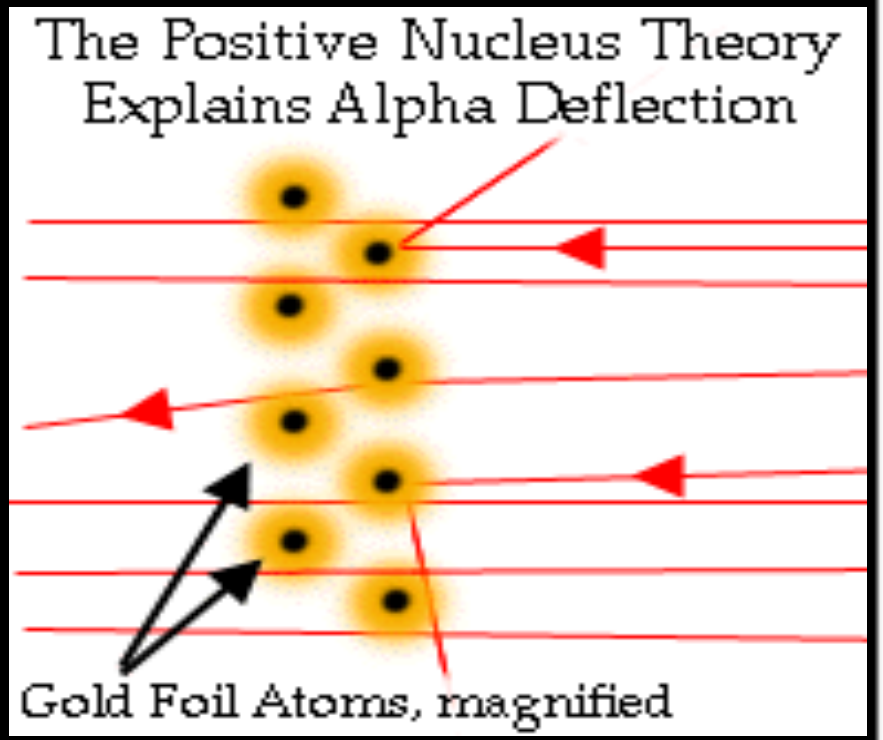

Gold Foil
Radioactive Source
Alpha Particles
Lead
Zinc Sulfide Coated Screen


Detail of Gold Foil
According to old Atom Model
Alpha Particles
Gold foil atoms, magnified

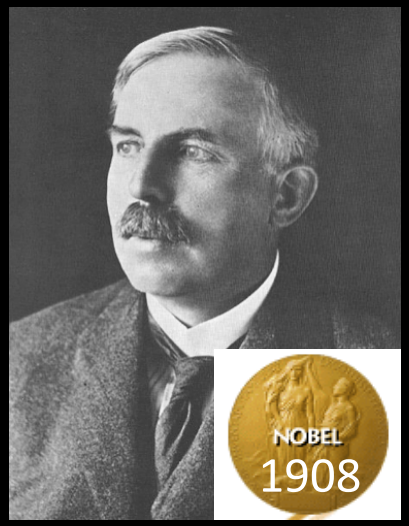

The Predicted Result:
Expected Path
Expected Marks on screen


The Result
Marks on Screen


Extrapolation of Result:
Mark on Screen
Likely Alpha Particle Path

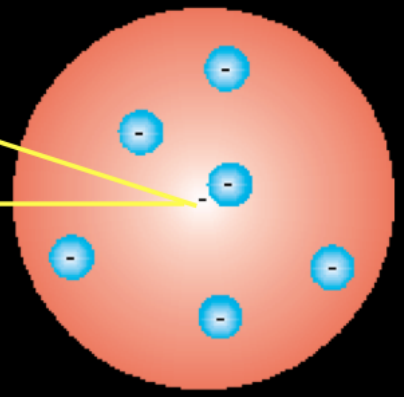

The Positive Nucleus Theory Explains Alpha Deflection
Gold Foil Atoms, magnified

Esperimento di Rutherford 1905



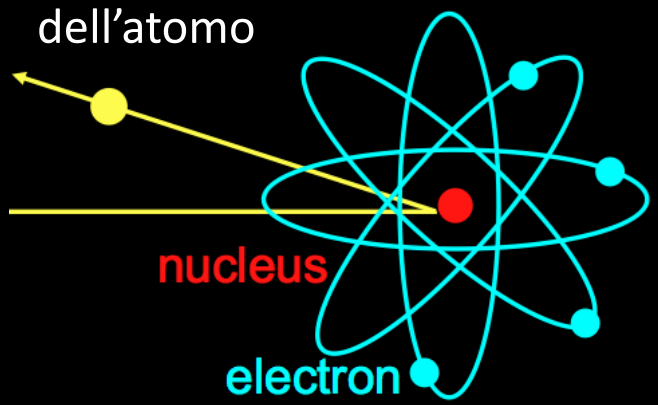
Osserva

Particelle α



Porta a un nuovo modello dell'atomo

Particelle α



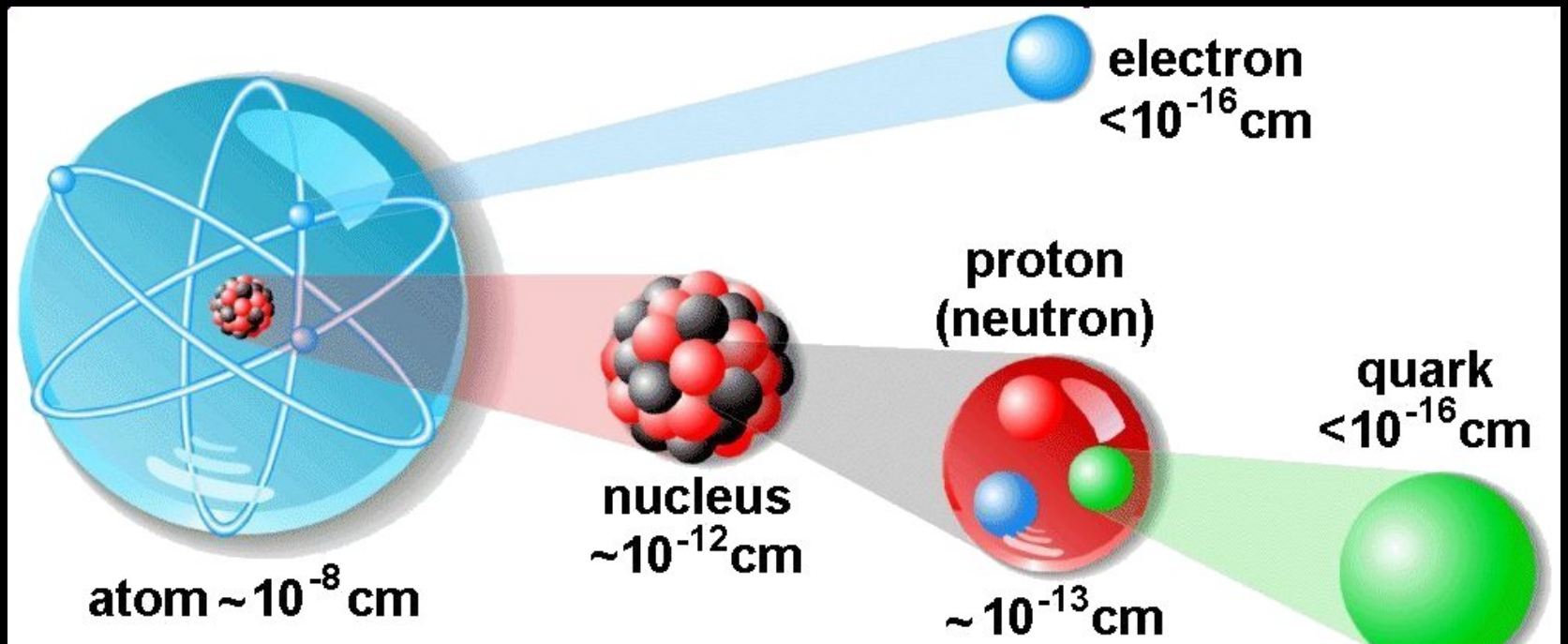
Misura il Raggio Nucleare
$\approx 10^{-13}$ cm $\approx 10^{-5}$ x raggio atomico

Dimensioni
Nucleo/Atomo =Mosca/Cattedrale

Primo esperimento di Fisica delle Particelle!

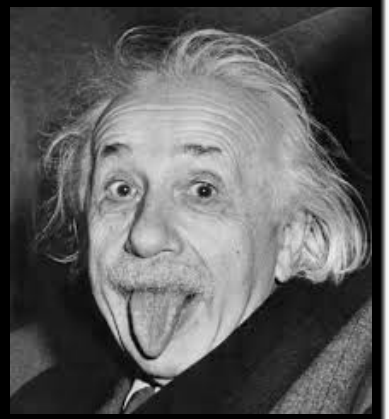
Le particelle elementari ?

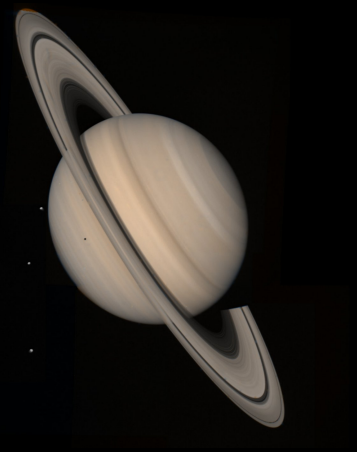
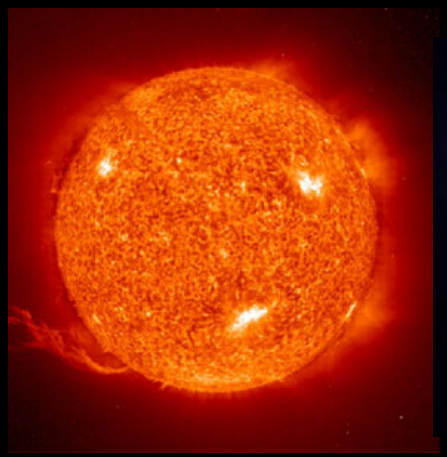
~100 anni fa ~70 anni fa ~50 anni fa presente



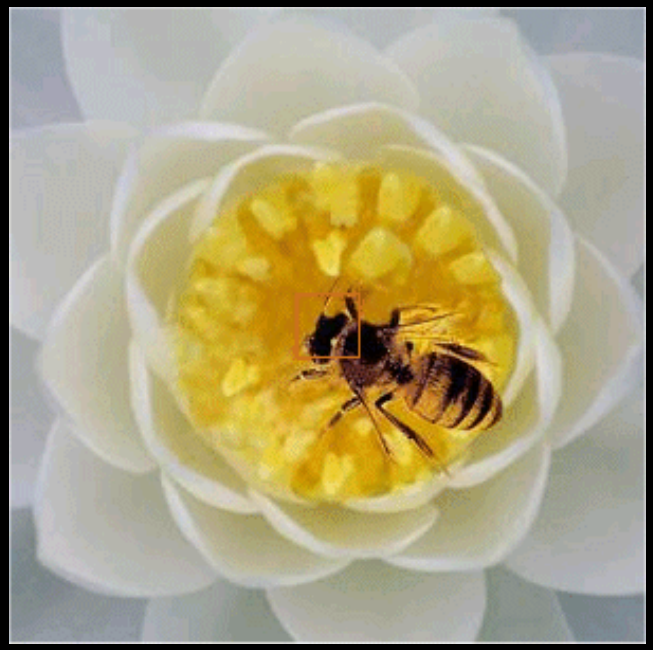
$\frac{1}{1.000.000}$ dello spessore di un capello

Di che cosa è fatto il mondo?



Dagli atomi agli elettroni al nucleo e protone e neutrone …
cosa c'è di più piccolo?

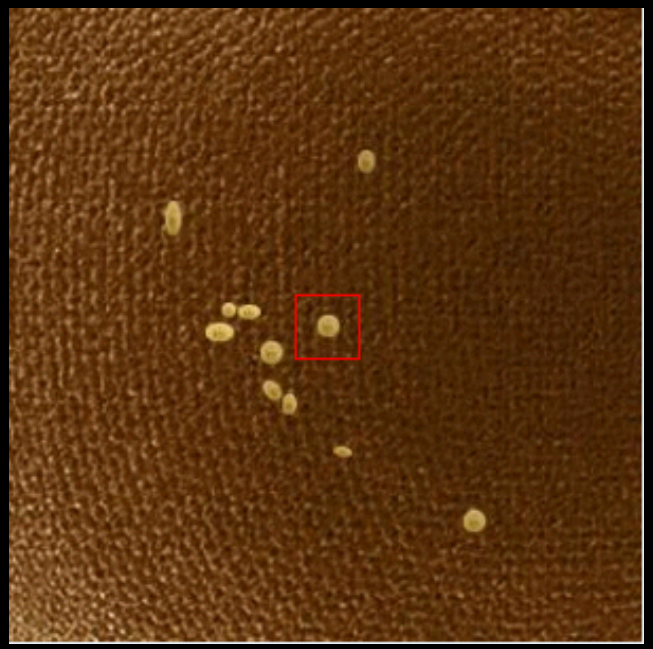


10 cm

Vediamolo a una scala 10 volte più piccola

10 mm

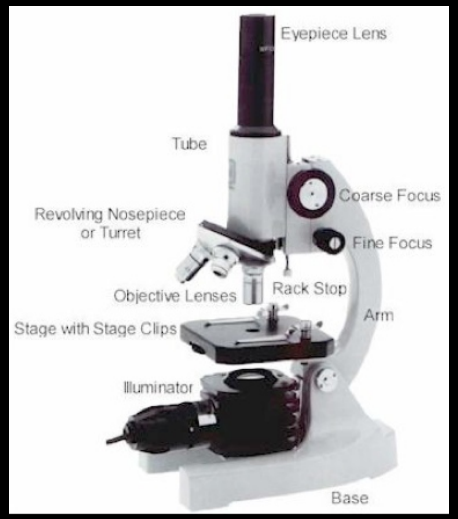
Ancora 10 volte più piccolo

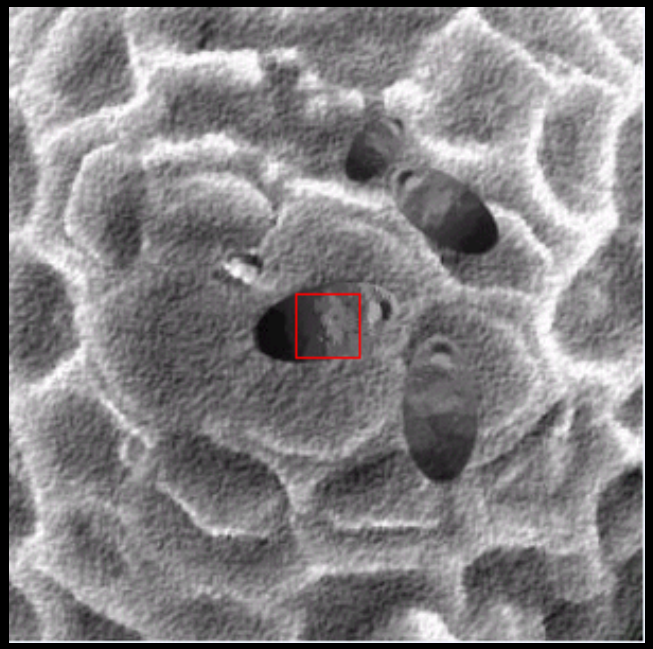


occhio dell' ape
e polline

1 mm

Ancora 100 volte più piccolo

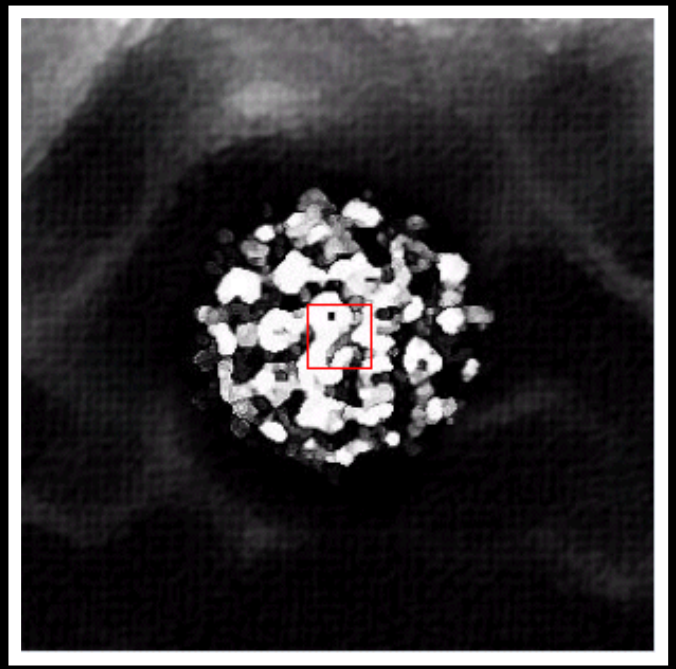




batterio

0,01 mm

Ancora 100 volte più piccolo

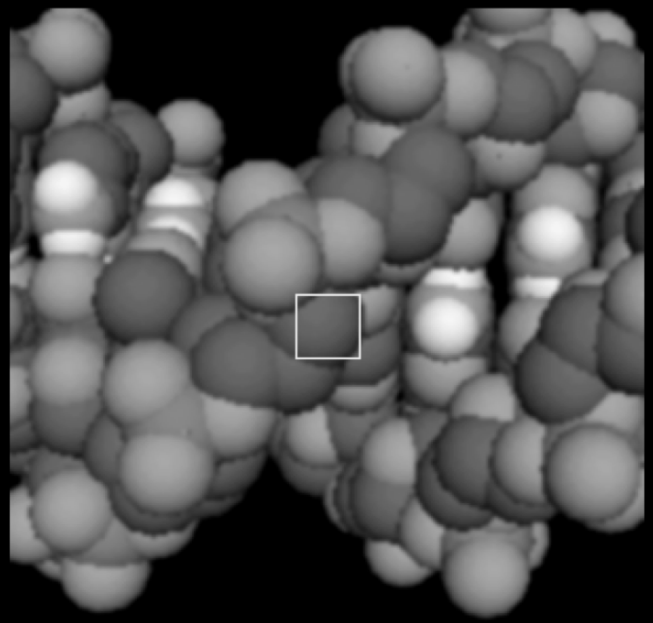


virus

0.0001 mm

Ancora 100 volte più piccolo

X Ray machine

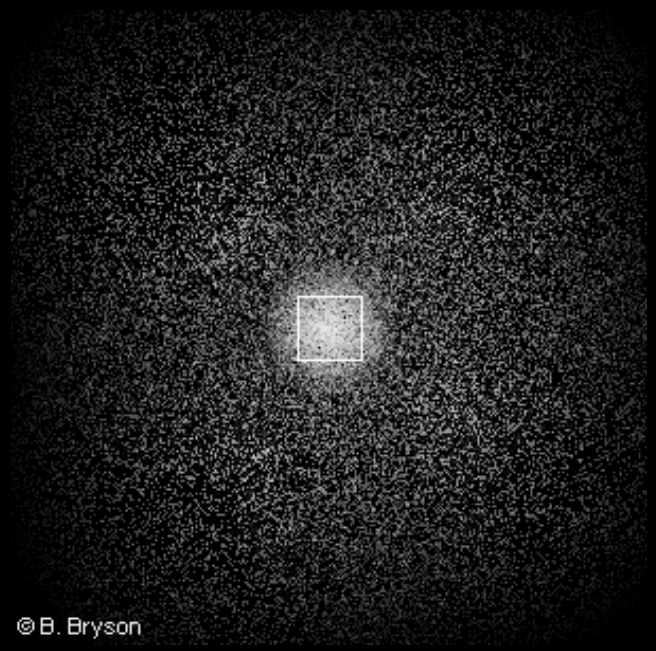


Atomi nel DNA

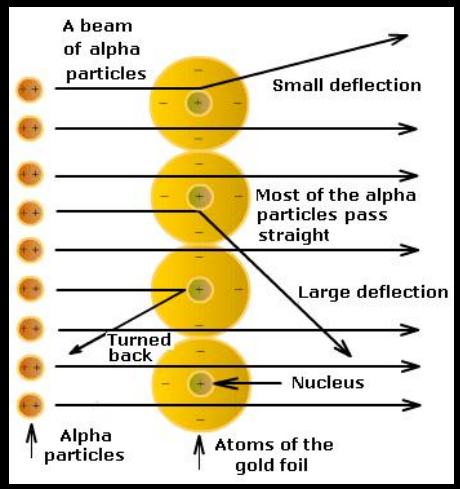
0.000001 mm

Ancora 100 volte più piccolo

Per vedere il nucleo è stato necessario usare particelle emesse da una sorgente con energia elevata 7 MeV: la nascita degli acceleratori di particelle



nucleo



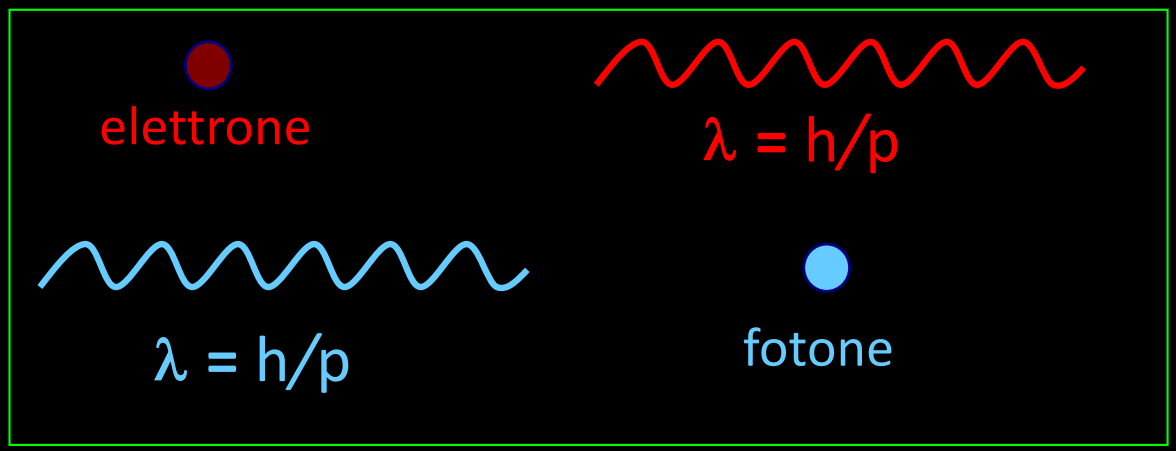
← 0,000000001mm →

Rutherford ha scoperto il nucleo usando un fascio di particelle alpha

Per vedere un particolare con luce visibile la lunghezza d'onda deve essere ≤ alle dimensioni del particolare

λ=0.0004 mm: particolari visibili con luce visibile fino a dimensioni 0.0004 mm

La meccanica quantistica ci dice che le particelle si comportano come un' onda e viceversa.



Tanto più la lunghezza d' onda è piccola / ovvero tanto più l' impulso e quindi l'energia è grande,tanto più piccole sono le dimensioni che possiamo esplorare/vedere

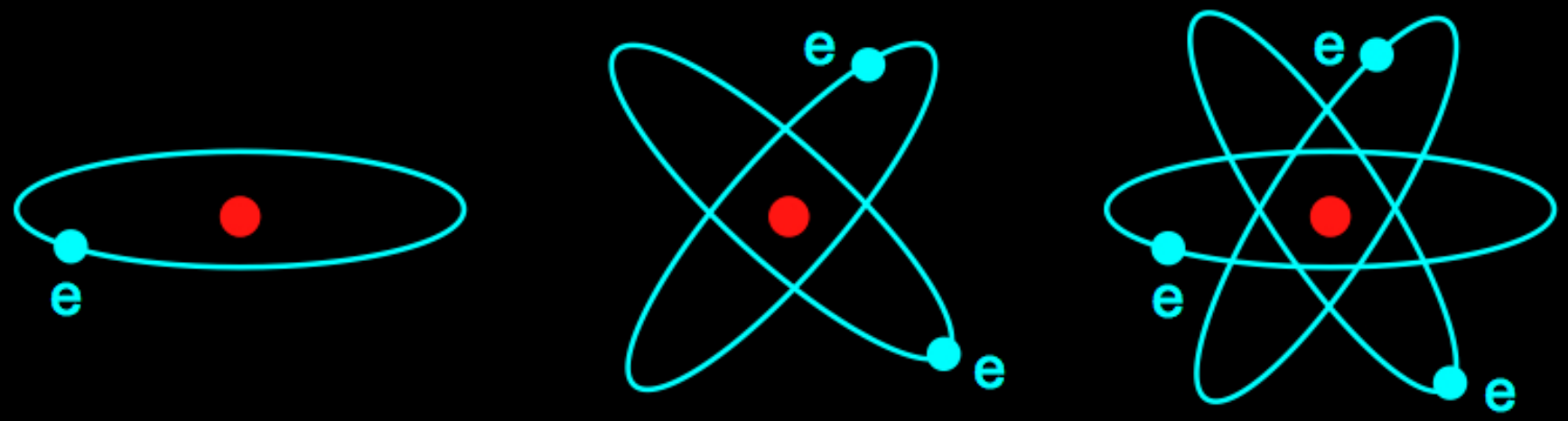
Rutherford fu veramente fortunato, la lunghezza d'onda per le particelle α di 7 MeV da lui usate corrispondeva a $\lambda=10^{-13}$ cm!

Per andare oltre (10^{-13}-10^{-16} cm) dobbiamo accelerare oltre le particelle

25

Una volta che abbiamo intravisto la mosca nella cattedrale, abbiamo bisogno di sapere di più, per prenderla, esaminarla, sezionarla!

Di che cosa è fatto il nucleo?

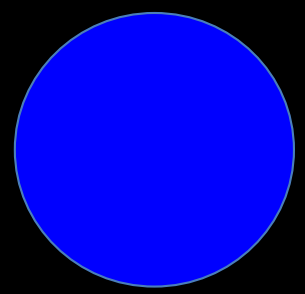


Una singola particella fondamentale ?- molte?

Questi (questo) costituenti sono a loro volta non elementari?

Cosa abbiamo imparato?
Gli Acceleratori possono essere usati come potentissimi Microscopi

Essi producono fasci di particelle di alta energia che ci permettono di vedere cose più piccole!

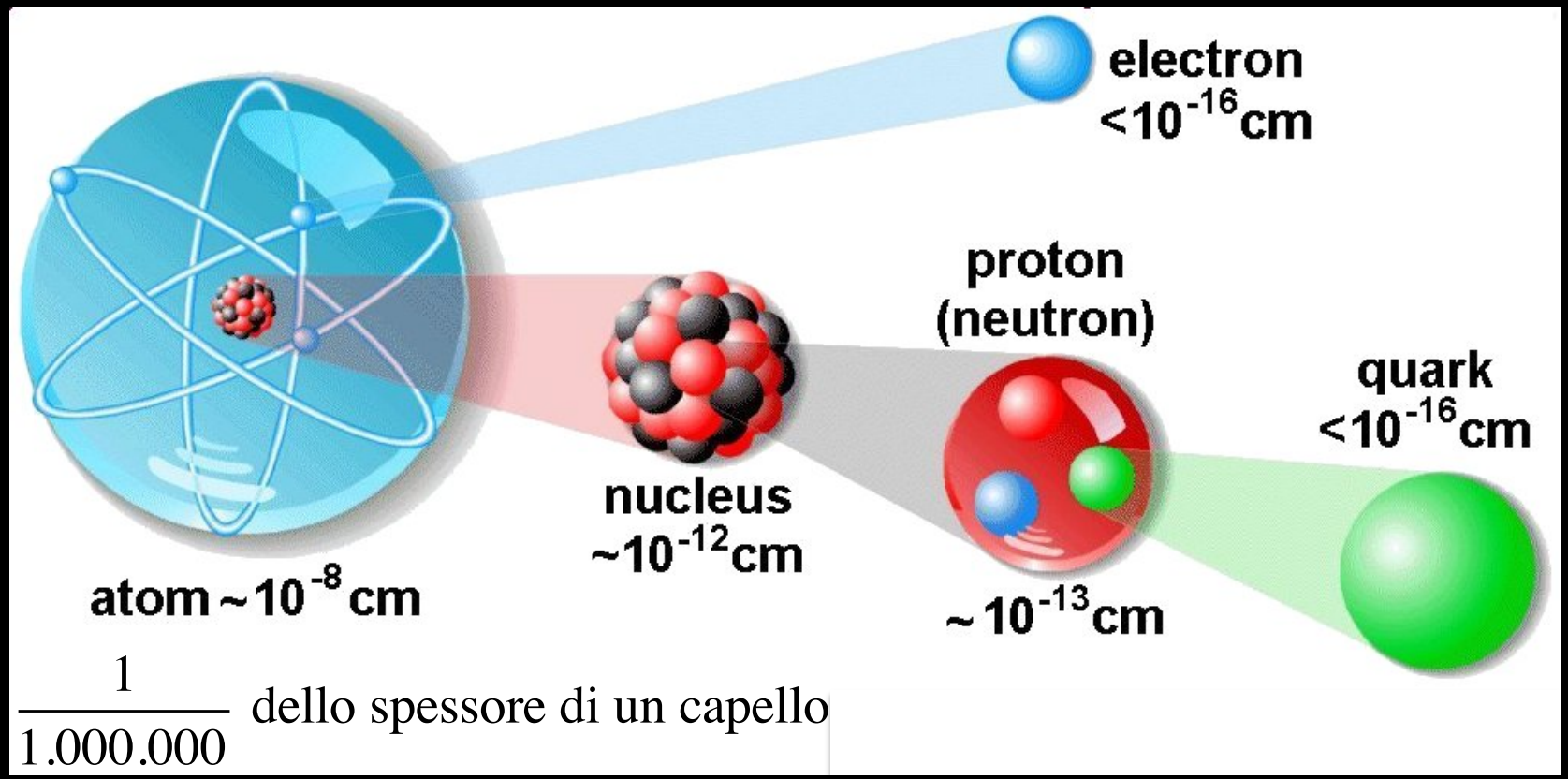


Visibile con un fascio
di bassa energia
(bassa risoluzione)

Visibile con un fascio
di alta energia
(alta risoluzione)

Le particelle elementari, come interagiscono?

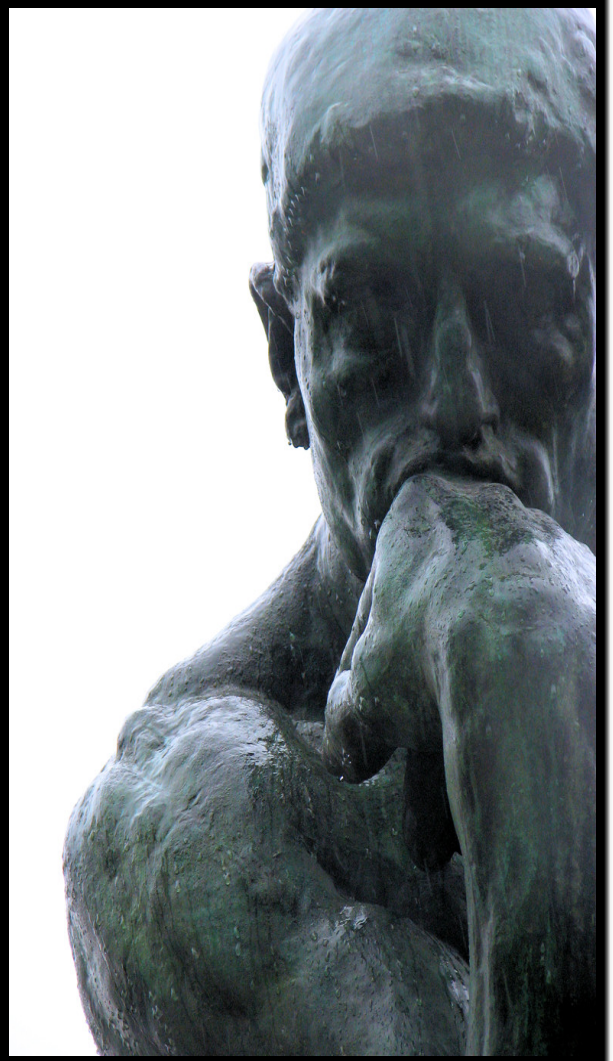
~100 anni fa ~70 anni fa ~50 anni fa presente



Fisica delle Particelle “elementari”

È un nome moderno per centinaia di anni di duri sforzi per comprendere le leggi fondamentali della natura:

Astronomia, termodinamica, chimica, fisica atomica… molte aree della scienza hanno avuto un ruolo fondamentale



Il suo scopo è rispondere alle seguenti domande

1. Quali sono i costituenti elementari della materia ?

2. Quali sono le forze che controllano il loro comportamento a livello elementare? Come interagiscono?

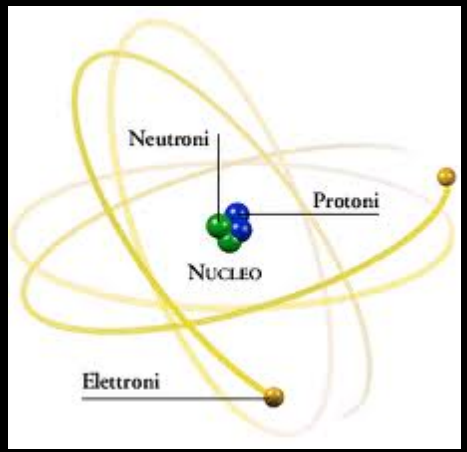
Di che cosa è fatta ogni cosa a livello elementare?

Esempio

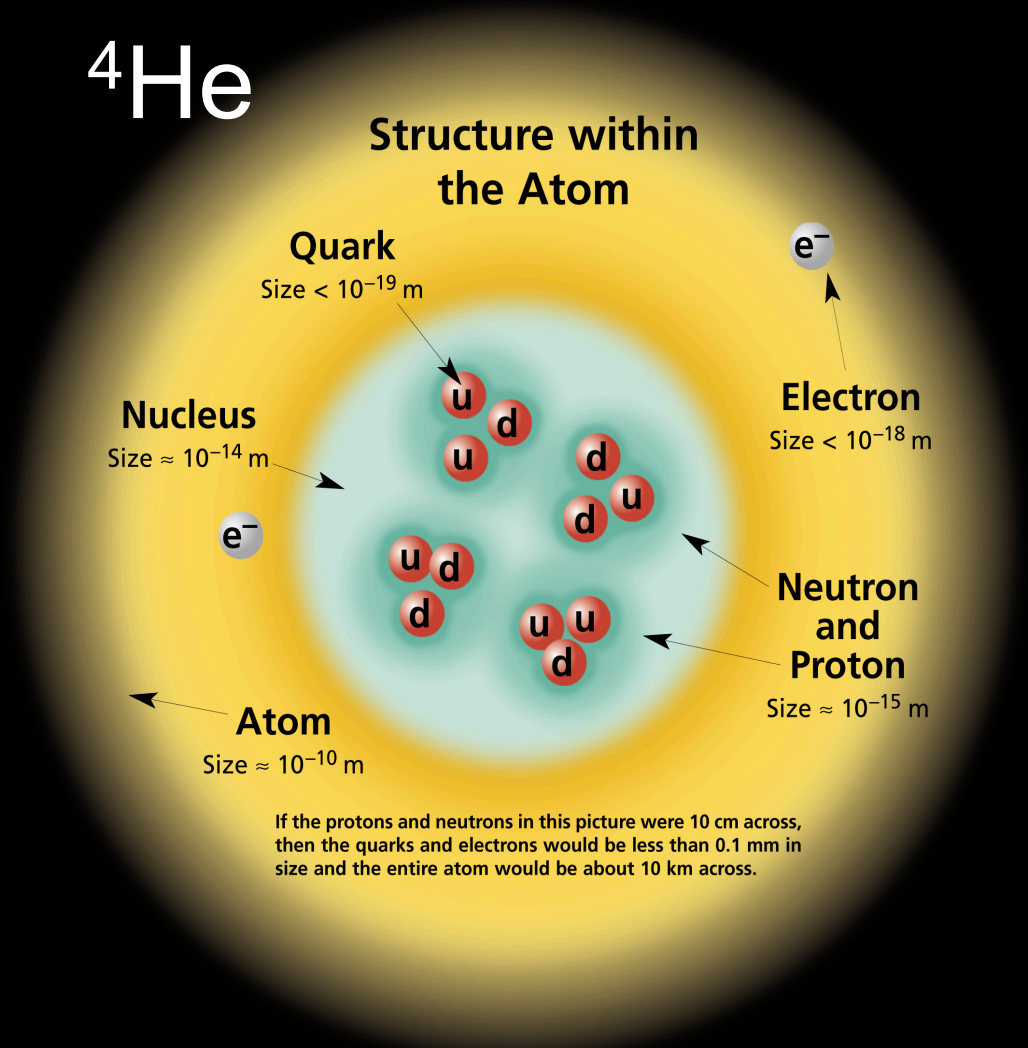
atomo di Elio 4 formato da:

2 protoni
2 neutroni } **nucleo**

2 elettroni **orbitanti**

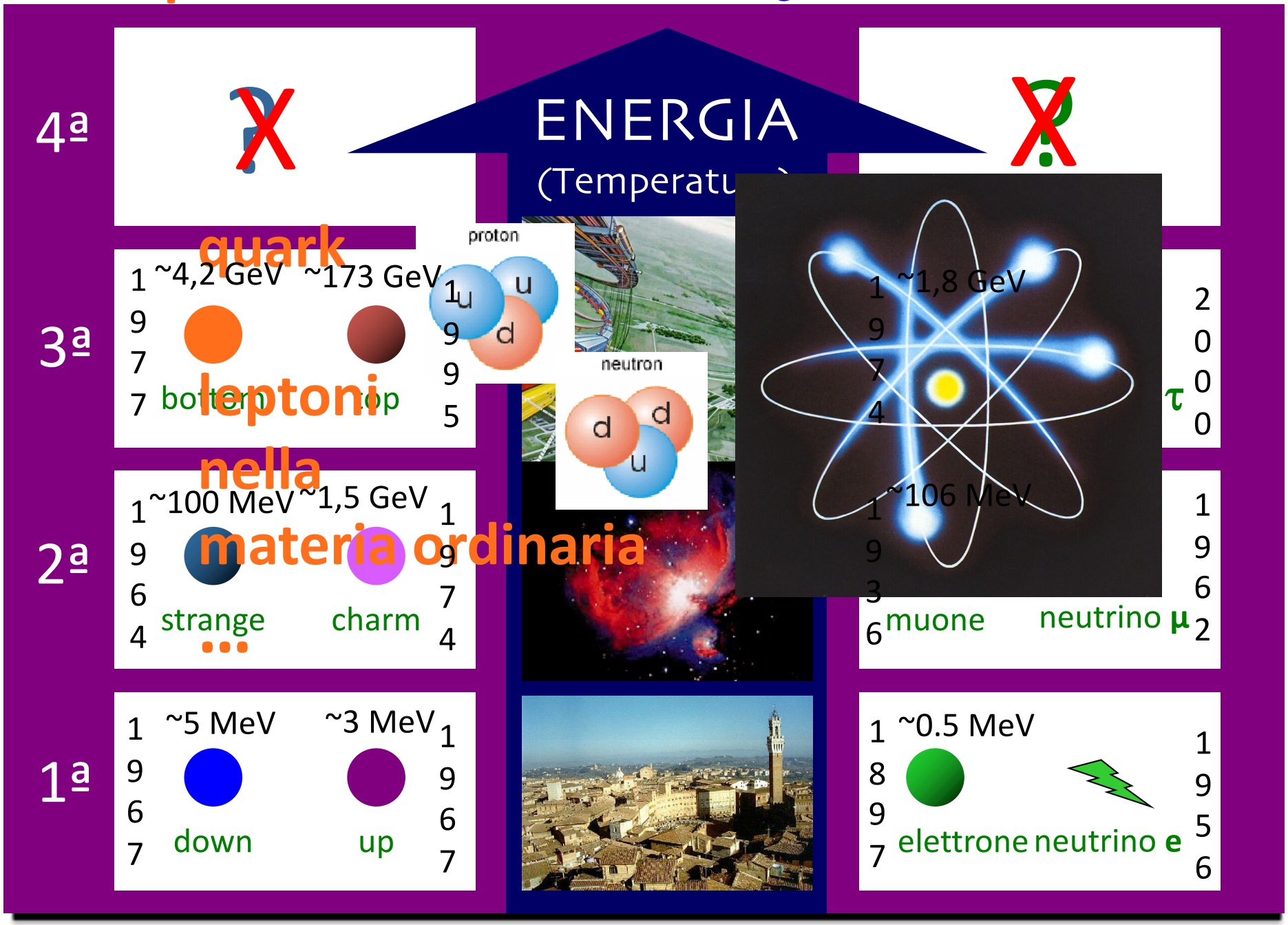


^{4}He



visto secondo la struttura a quark

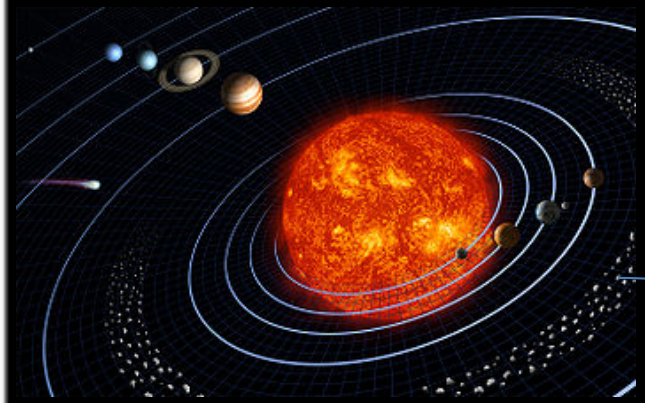
famiglia **quark** Di che cosa è fatta ogni cosa? **leptoni**



- Tutta la materia ordinaria è composta dalle particelle di prima generazione
  - I quark up e down compongono protoni e neutroni all'interno dei nuclei degli atomi, e gli elettroni sono in orbita intorno ai nuclei

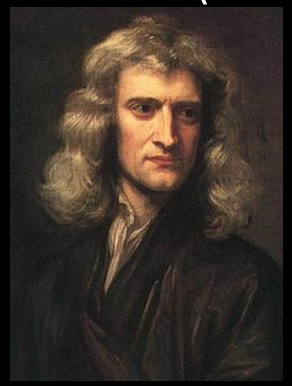
- Tutte le particelle di seconda e terza generazione sono instabili e decadono in particelle di prima generazione (leptoni e particelle formate da quarks di prima generazione)

Cosa tiene ogni cosa insieme?– (I) Gravità

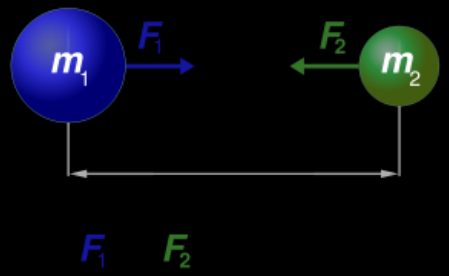


Gravitazione celeste

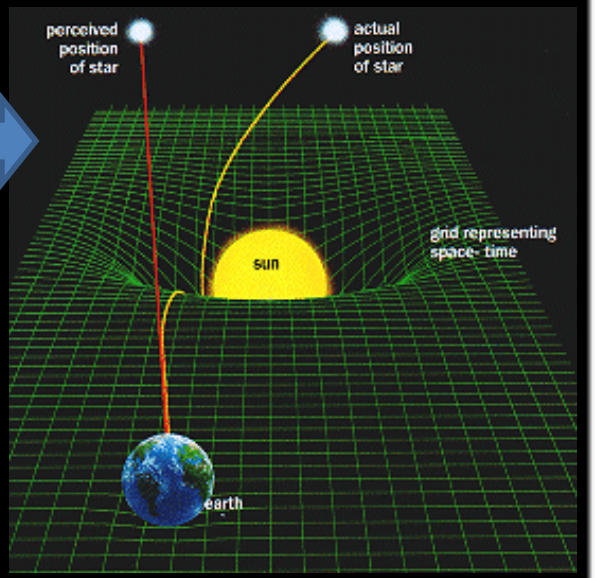
Isac Newton (1642 - 1727)



Gravitazione terrestre



Legge di Newton della gravitazione universale



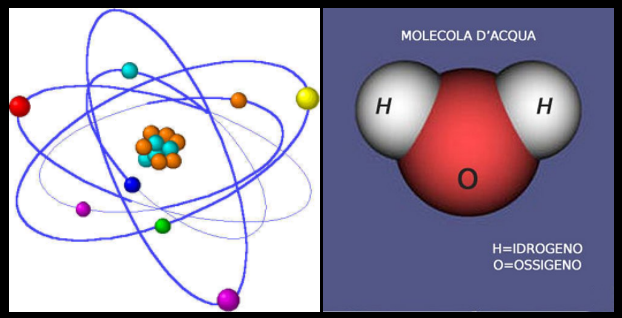
Teoria generale della relatività

Gravitone

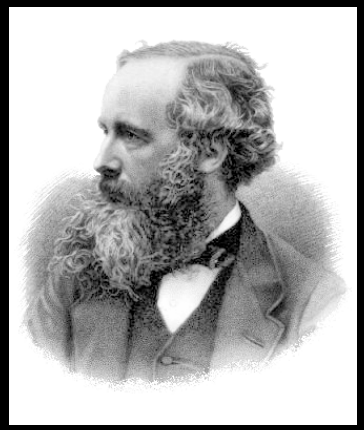
33

Cosa tiene ogni cosa insieme? – (II) Elettromagnetismo

Elettricità



Chimica



Maxwell (1831 - 1879)

La forza Elettromagnetica

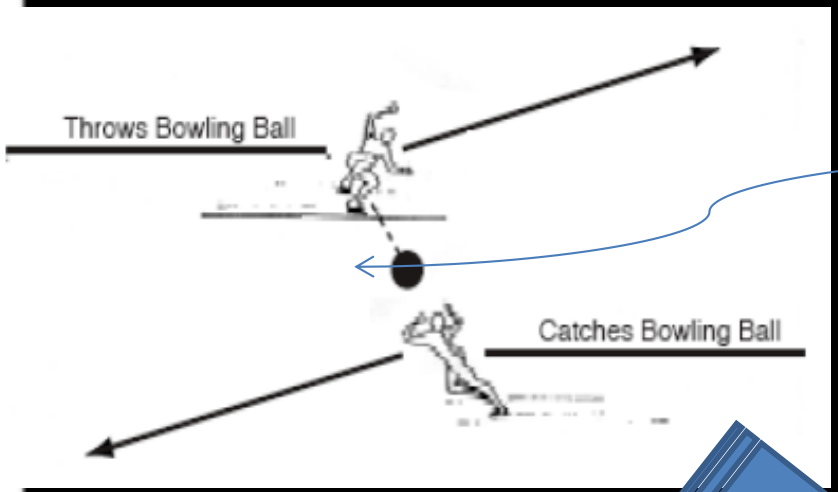
- ne risentono tutte le particelle cariche

Magnetismo

Fotone

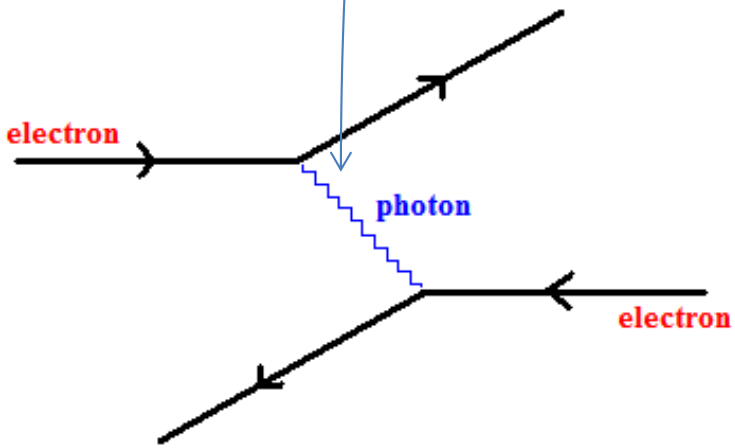
Luce

Forze, interazioni e mediatori di forza



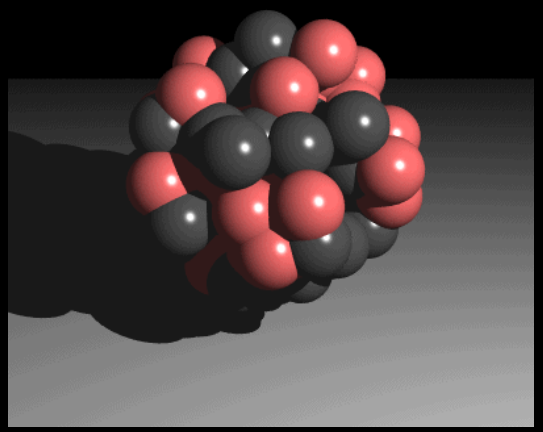
particella mediatrice di forza

Richard Feynman

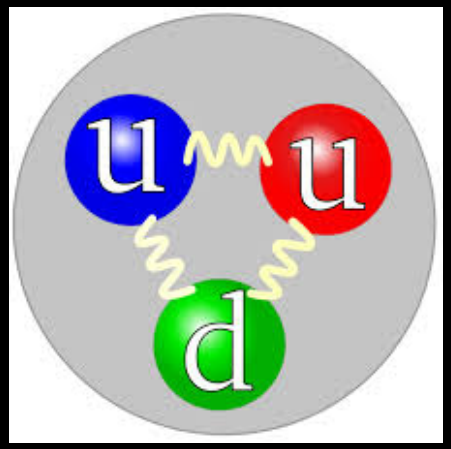


Un diagramma di Feynman per due elettroni che si respingono

Cosa tiene ogni cosa insieme?– (III) Forza Nucleare Forte



Gluone



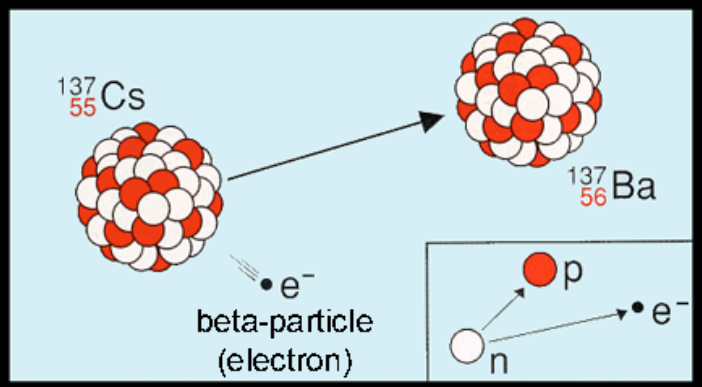
Lega i protoni e i neutroni nei nuclei atomici

Lega I quark nel protone e in altre particelle composte da quark (adroni)

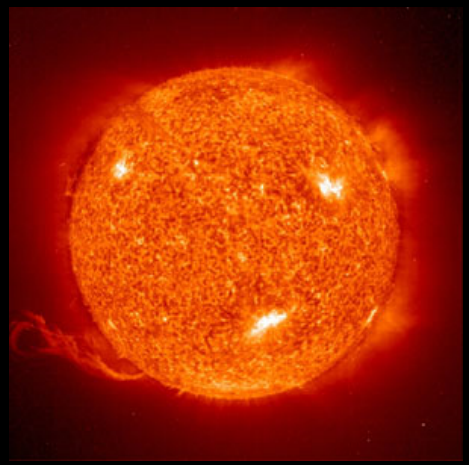
La forza nucleare Forte

- I quark e i gluoni interagiscono per questa forza
- **Forza a corto range**

Cosa tiene ogni cosa insieme?– (IV) Forza Nucleare Debole



Spiega il decadimento beta nucleare



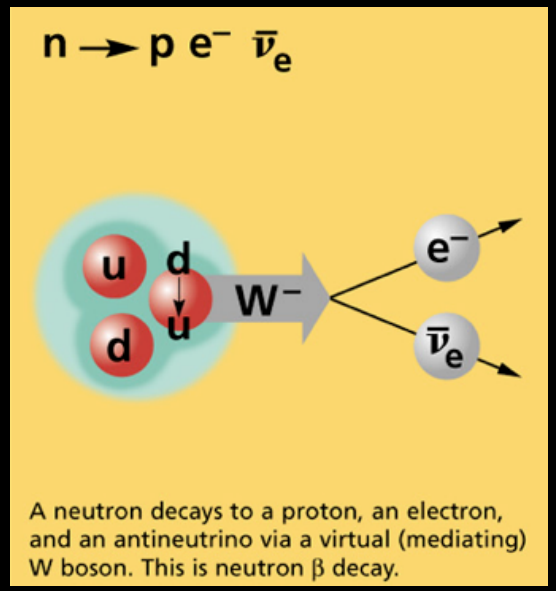
...che accende il sole e le altre stelle

Enrico Fermi (1901 - 1954)

L a Forza Nucleare Debole

- Tutte le particelle risentono di questa forza
- **Forza a cortissimo range**

W+ ,W-, Z

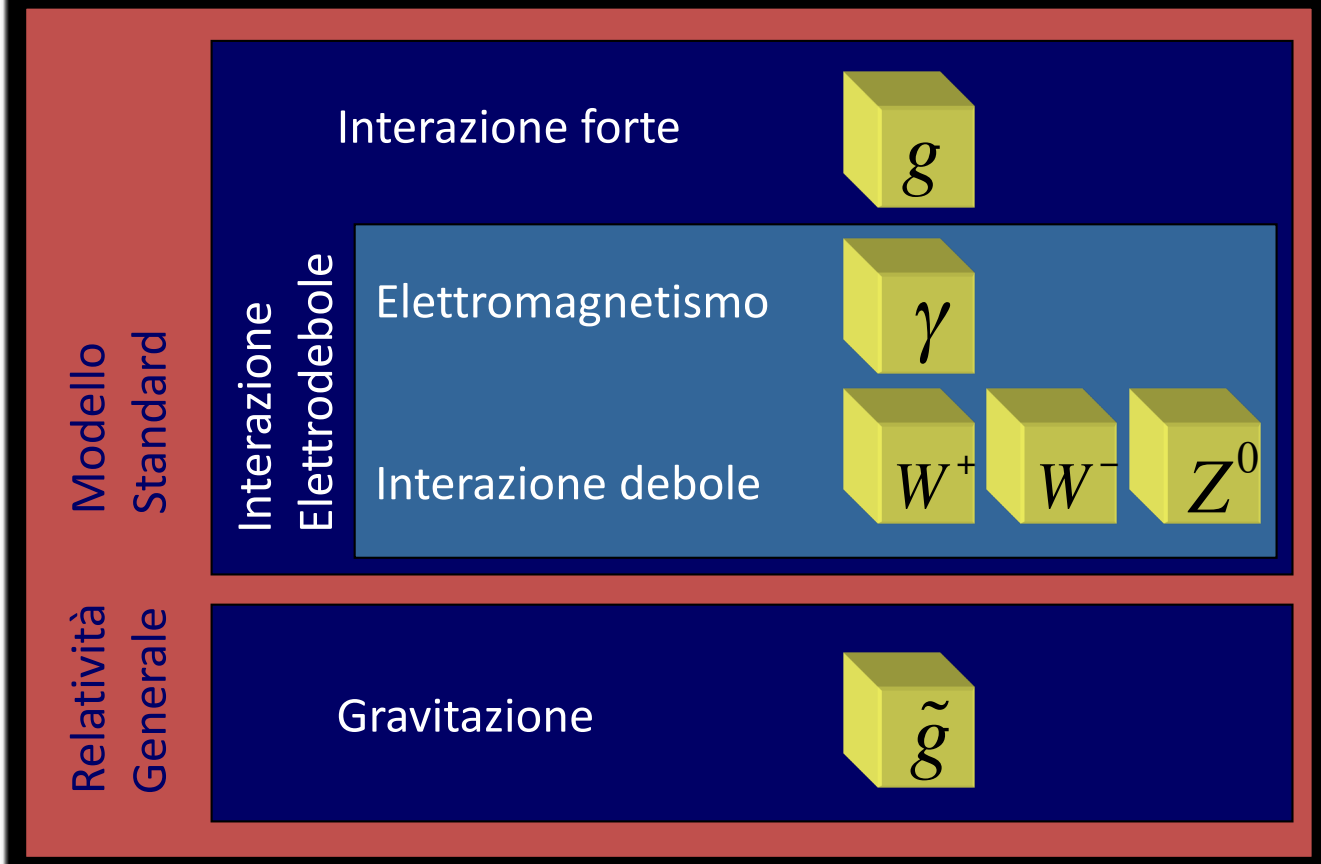


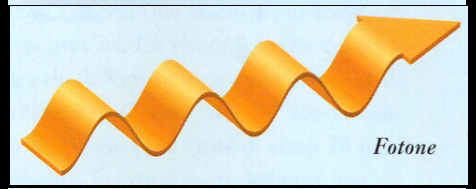
A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β decay.

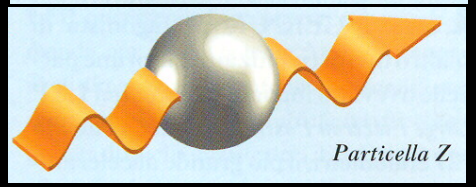
37

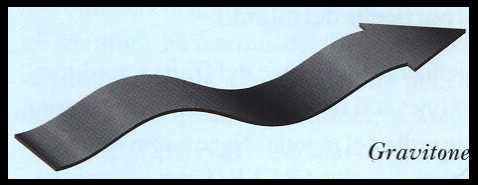
…ancora sulle FORZE

Interazione	Intensità	Distanza (m)	Mediatore	Massa(GeV)	Spin
forte	1	10^{-15}	gluoni(8)	0	1
elettromagnetica	1/100	∞	fotone	0	1
debole	1/100000	10^{-18}	$W^{\pm}$, Z^0	≈ 80,80,91	1
gravitazionale	$1/10^{38}$	∞	gravitone	?	2



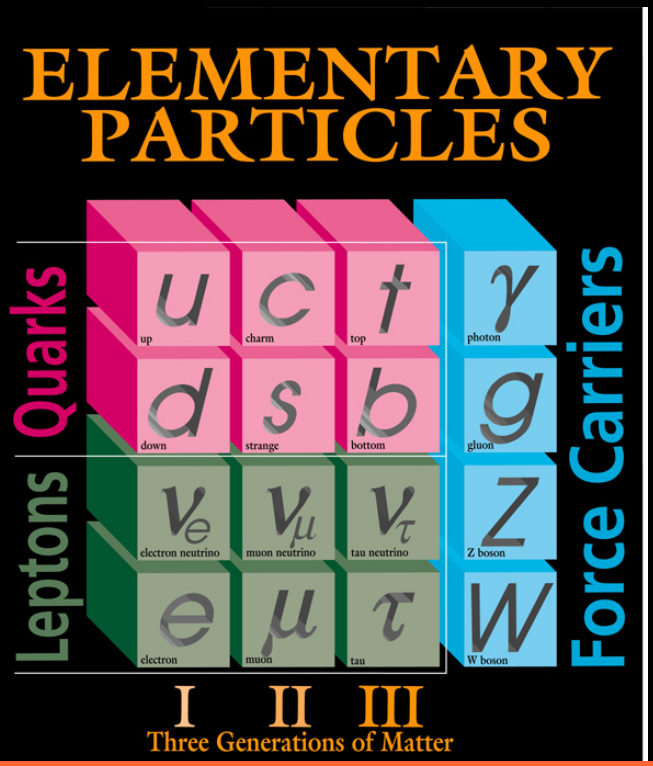


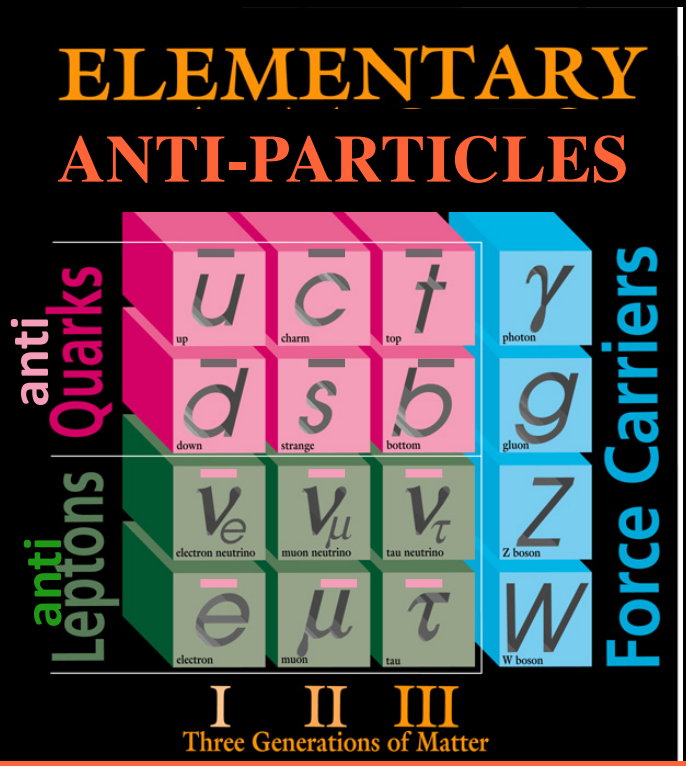




Il Modello standard

La nuova tabella periodica degli elementi…





Si suppone che tutte le forze interagenti tra materia e materia, materia e anti-materia, anti-materia e anti-materia siano della stessa forma.

Modello Standard

Standard Model of

FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0
e electron	0.000511	–1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	–1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	–1

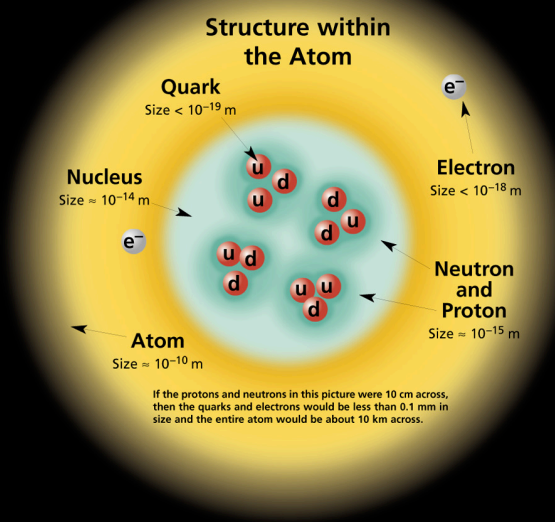
Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	–1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	–1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	–1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of ħ, which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58\times10^{-25}$ GeV s $= 1.05\times10^{-34}$ J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c^2 (remember $E = mc^2$), where 1 GeV = 10^9 eV = 1.60×10^{-10} joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c^2 = 1.67×10^{-27} kg.



BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	–1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and ***W*** and ***Z*** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq.

Residual Strong Interaction
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic (Electroweak)	Strong: Fundamental	Strong: Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
Strength relative to electromag for two u quarks at: 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$
Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

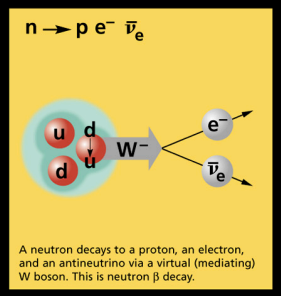
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	–1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	–1	1.672	3/2

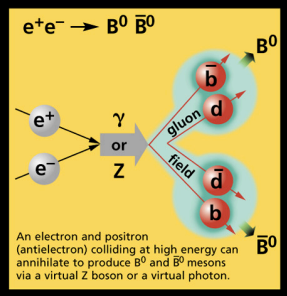
Mesons $q\bar{q}$
Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

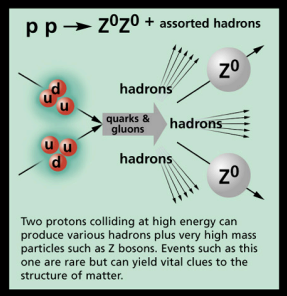
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	–1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2 .980	0

Matter and Antimatter
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or – charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0, γ, and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are ***not*** exact and have ***no*** meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.







The Particle Adventure
Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at
http://ParticleAdventure.org

This chart has been made possible by the generous support of:
U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

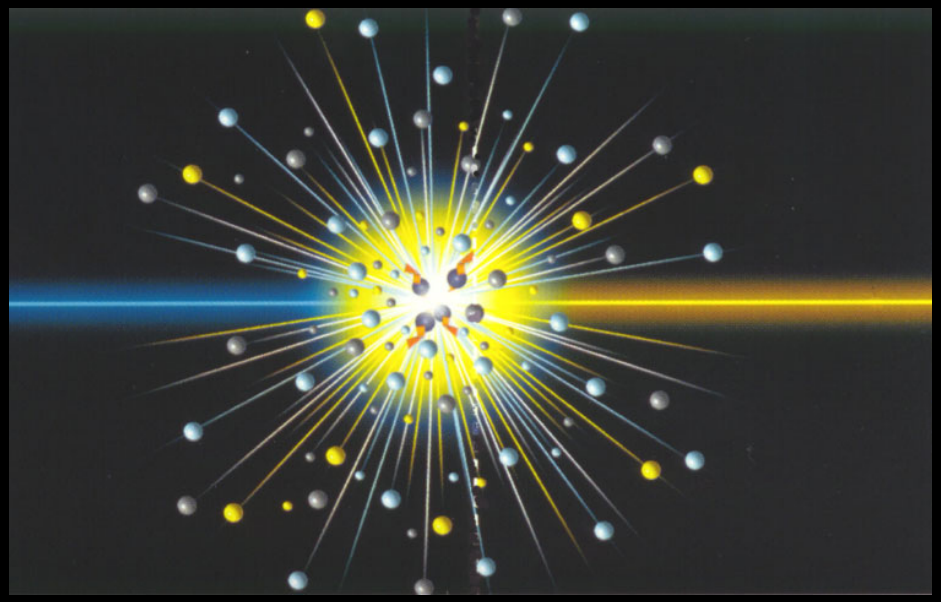
http://CPEPweb.org

http://www.cpepphysics.org

(1) Ma come siamo arrivati a forze e costituenti elementari?

- Acceleriamo particelle portandole ad altissime energie per poi farle scontrare
  - per studiare cosa succede durante l'interazione a $< 10^{-13}$ cm
  - per produrre nuove particelle grazie a **$E=mc^2$**

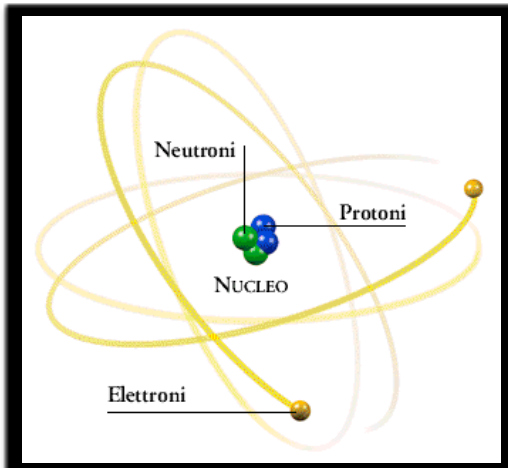
$$E=mc^2$$



Studiando le particelle prodotte **(quante sono, quali sono, le loro caratteristiche etc.)** **possiamo capire cosa è successo al momento dell'urto e risalire ai processi fondamentali che regolano la natura**

41

(2) Ma come siamo arrivati a forze e costituenti elementari?

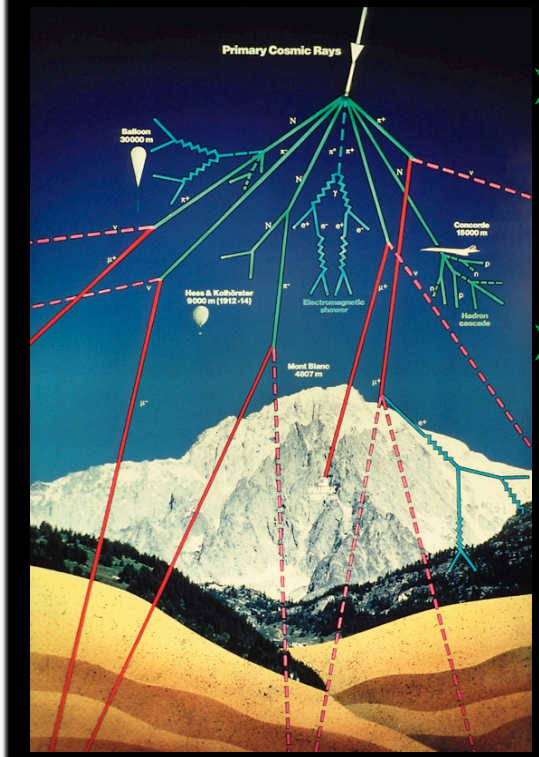


1932 comprensione dell'atomo

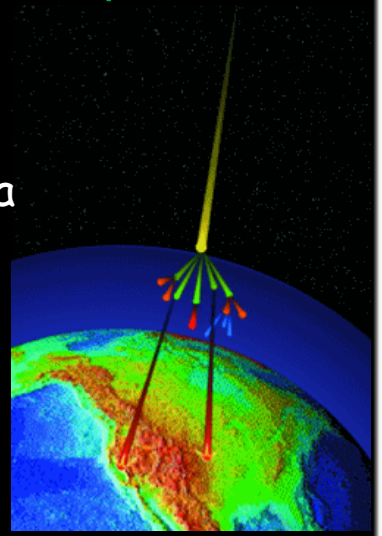
- Nucleo + elettroni in orbitali
- Nucleo costituito da n e p

Nello stesso periodo

- scoperta dei raggi cosmici e di altri tipi di particelle, muoni, pioni, e+



- Da dove arrivano i raggi cosmici?
  - In parte da supernovae, buchi neri, stelle di neutroni nella nostra galassia
  - In parte da sorgenti extragalattiche
- Non "raggi" ma particelle!
  - Possono viaggiare per enormi distanze nello spazio interstellare
  - Nell'impatto con l'atmosfera, danno origine a particelle secondarie, che possono a loro volta decadere in altre

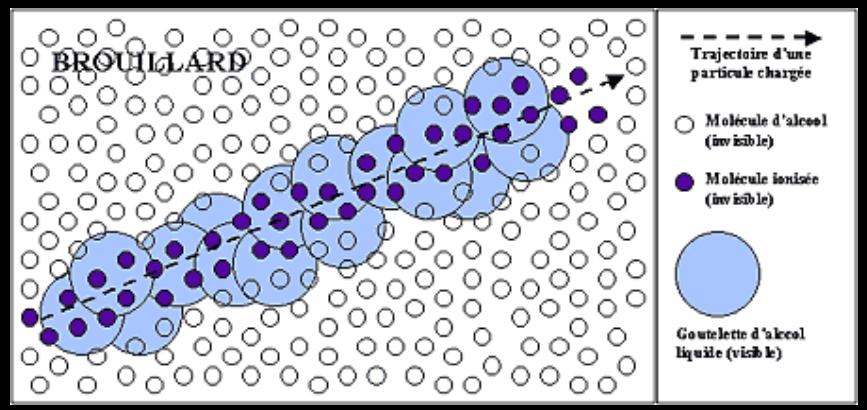


Rappresentano una parte della radioattivita' naturale

(3) Ma come siamo arrivati a forze e costituenti elementari?

- Positrone o anti-elettrone
  - Postulato da P.A. M. Dirac nel 1928
  - Osservato per la prima volta da Carl Anderson nel 1932 utilizzando una camera a nebbia per osservare le particelle prodotte dai raggi cosmici nell'impatto con l'atmosfera terrestre

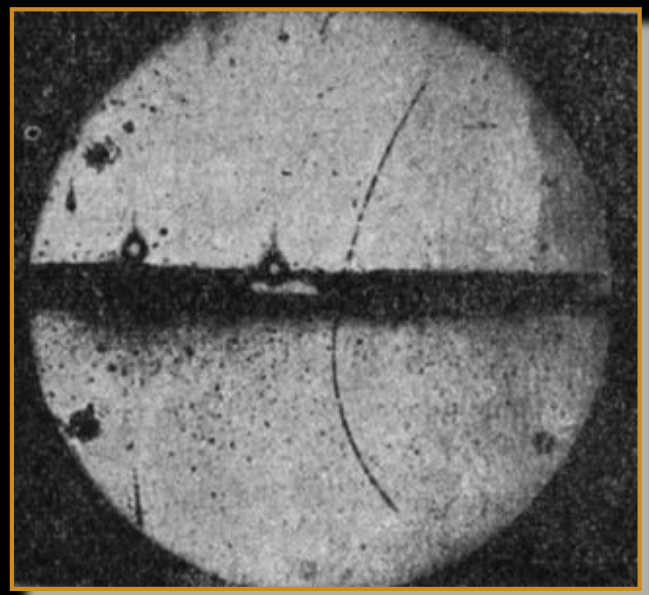
L'apparato sperimentale di C. Anderson



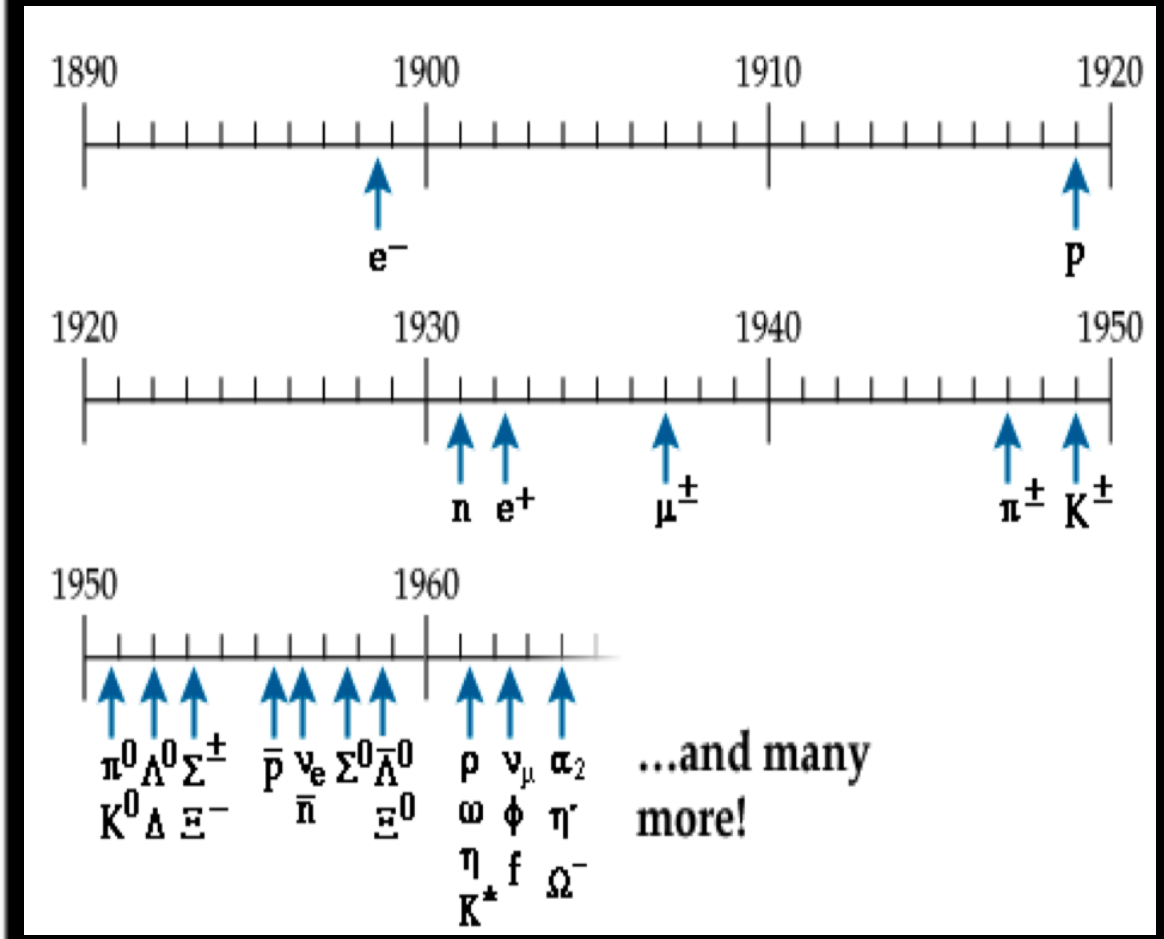
La camera a nebbia permette di visualizzare le traiettorie delle particelle cariche

Il primo positrone osservato

- Questa singola foto valse ad Anderson il premio Nobel nel 1936



(4) Ma come siamo arrivati a forze e costituenti elementari?

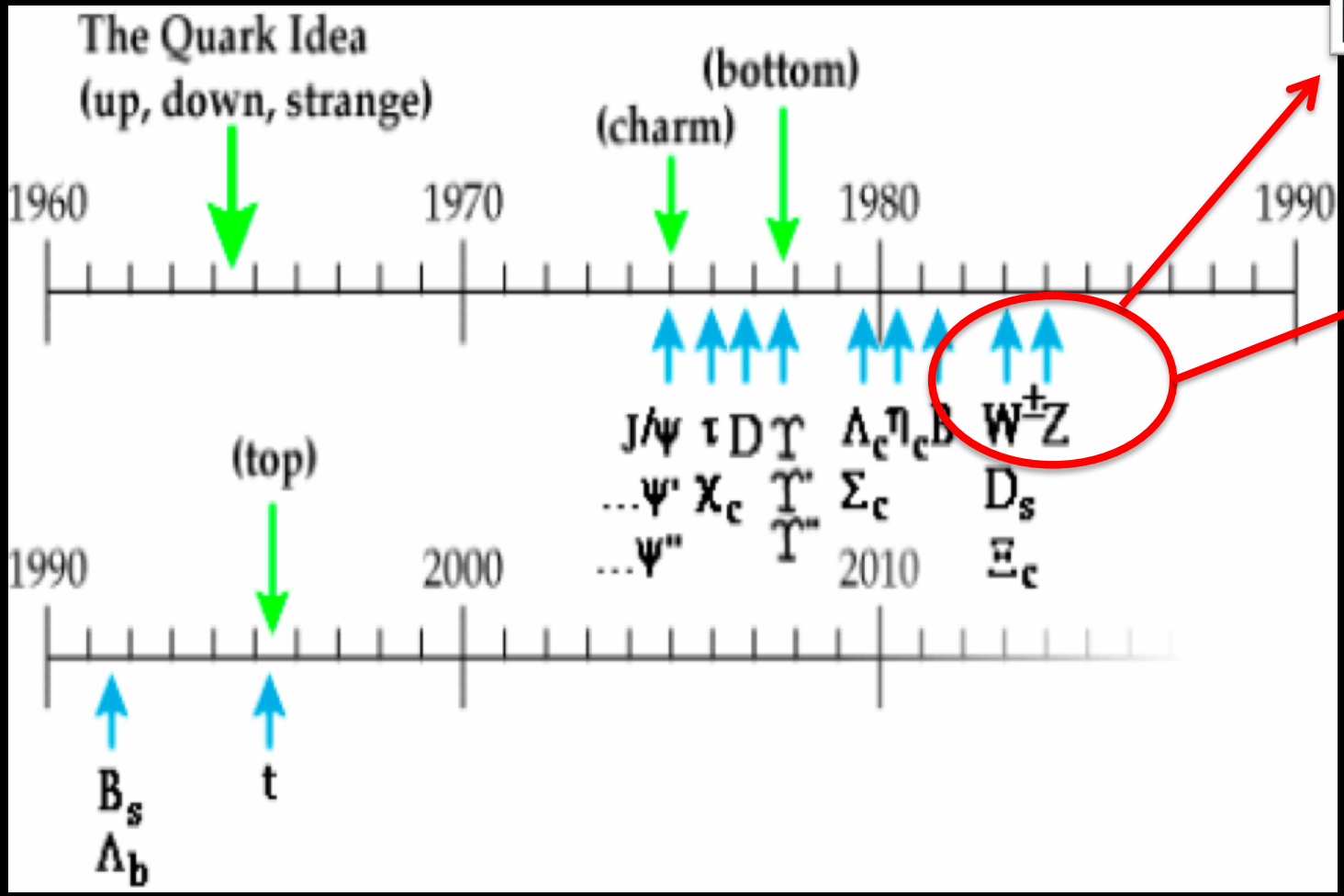


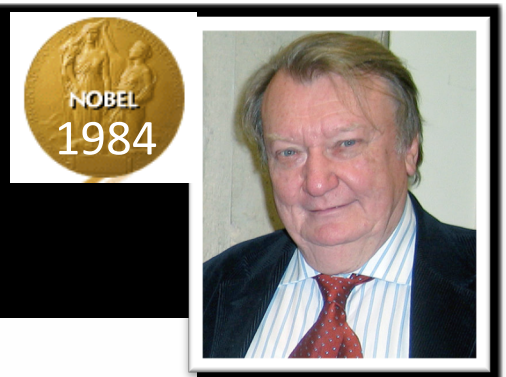
Primi esperimenti con acceleratori

- bersagli di materiale vengono bombardati alla Ruterford
- Dalle collisioni nascono nuove particelle
- I rivelatori usati negli esperimenti misurano la massa e altre proprietà

La nascita degli acceleratori rivelò ai fisici uno zoo di particelle, non solo, alcune particelle avevano vita più corta di altre e "morivano" decadendo in altre particelle … nel 1960 si conoscevano circa un centinaio di particelle a cui mancava una spiegazione

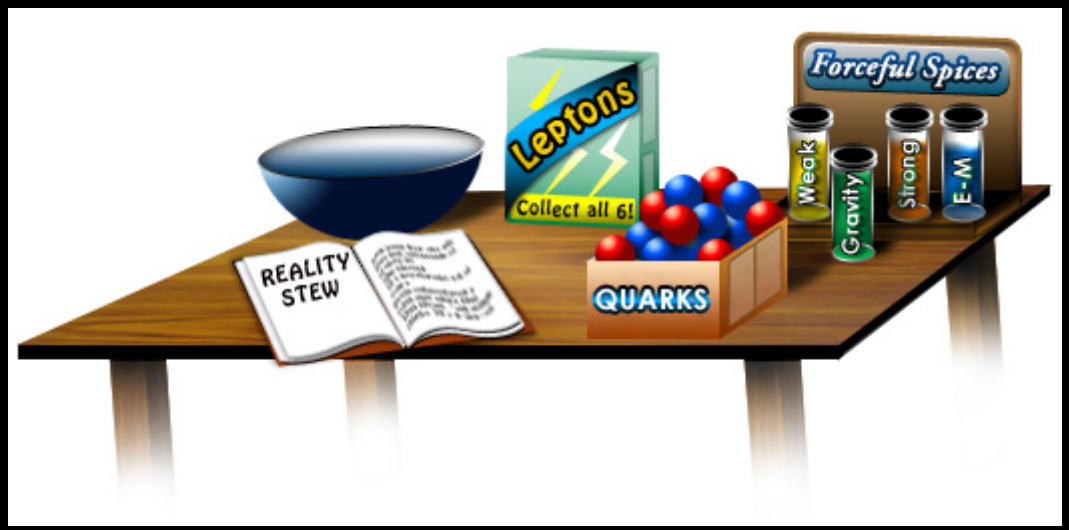
(5) Ma come siamo arrivati a forze e costituenti elementari?

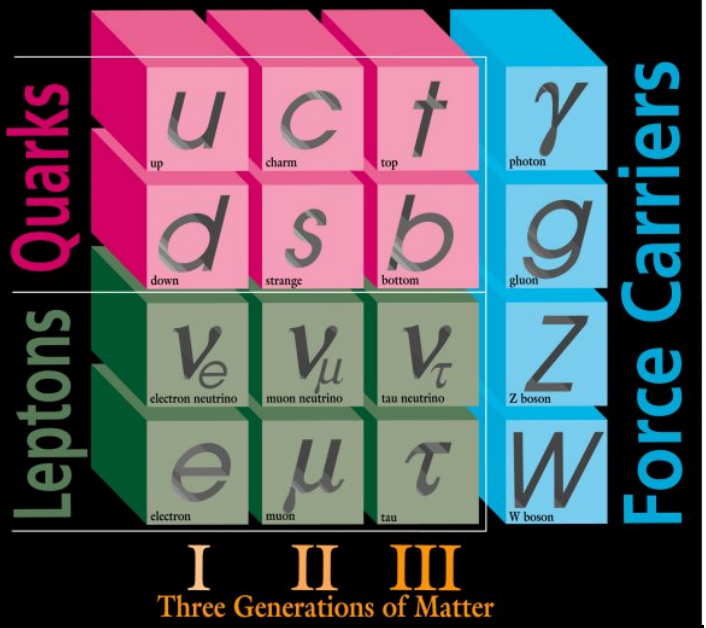




Il Modello Standard delle particelle

- Negli anni Sessanta, grazie agli esperimenti di fisica delle alte energie, i teorici erano riusciti a formulare un modello, il cosiddetto Modello Standard, che spiegava nel dettaglio tutti i fenomeni osservati … o quasi!





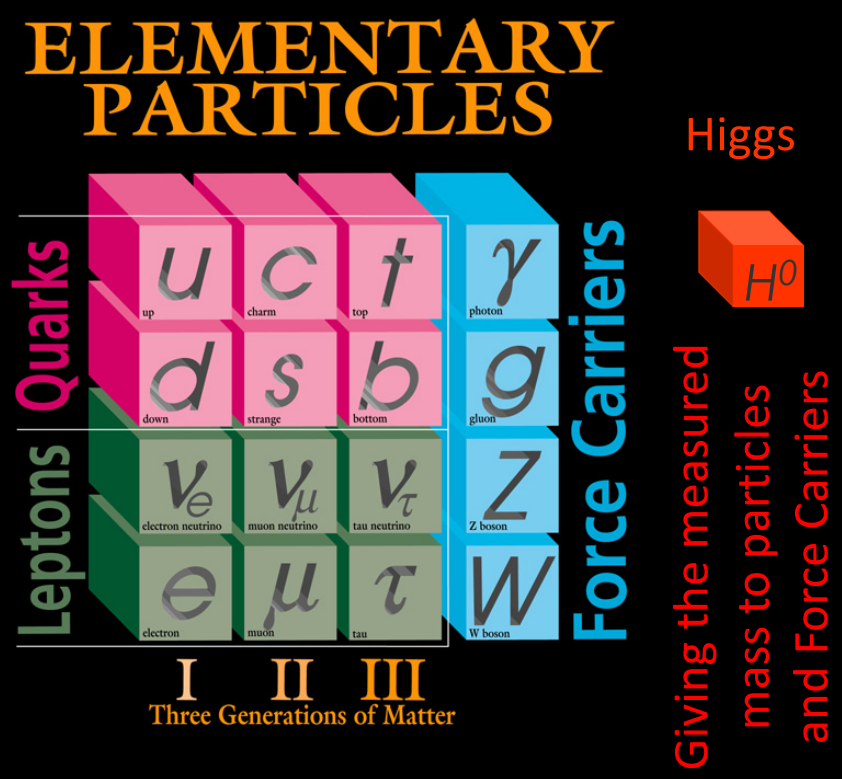
Costituenti e mediatori senza massa?

- **Il problema è che secondo questo modello tutti i costituenti e i** mediatori di forza dovevano essere senza massa!
- **In realtà come abbiamo visto alcuni costituenti elementari** e W e la Z hanno massa quindi il Modello Standard è incompleto o addirittura sbagliato!
- **Nel 1964 P.** Higgs e, indipendentemente, F. Englert e R. Brout ipotizzano l'esistenza di un meccanismo, all'interno del Modello Standard, che permette ai costituenti e ai mediatori di avere massa.

Modello Standard + Higgs

- **se questa intuizione è vera** deve esistere una particella con particolari caratteristiche, detto bosone di Higgs

- **In decenni di esperimenti le previsioni del Modello Standard sono state testate con estrema precisione, ma rimaneva il mistero se il bosone di Higgs fosse reale o se fosse soltanto una teoria**



Eleganza della matematica!

$$\mathcal{L}_{GWS} = \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial\mu - m_f)\Psi_f - eQ_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) +$$

$$-\frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}^i_L \gamma^\mu b^i_L W^+_\mu + \bar{b}^i_L \gamma^\mu a^i_L W^-_\mu) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I^3_f - 2s^2_w Q_f - I^3_f \gamma_5) \Psi_f Z_\mu +$$

$$-\frac{1}{4}|\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W^-_\mu W^+_\nu - W^+_\mu W^-_\nu)|^2 - \frac{1}{2}|\partial_\mu W^+_\nu - \partial_\nu W^+_\mu +$$

$$-ie(W^+_\mu A_\nu - W^+_\nu A_\mu) + ig' c_w (W^+_\mu Z_\nu - W^+_\nu Z_\mu|^2 +$$

$$-\frac{1}{4}|\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W^-_\mu W^+_\nu - W^+_\mu W^-_\nu)|^2 +$$

$$-\frac{1}{2} M^2_\eta \eta^2 - \frac{g M^2_\eta}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M^2_\eta}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W^+_\mu + \frac{g}{2} \eta W^+_\mu|^2 +$$

$$+\frac{1}{2}|\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta$$

July 4th , 2012

July 3rd, 18:00h

July 4th, 07:00h

July 3rd, 22:00h

Il premio Nobel

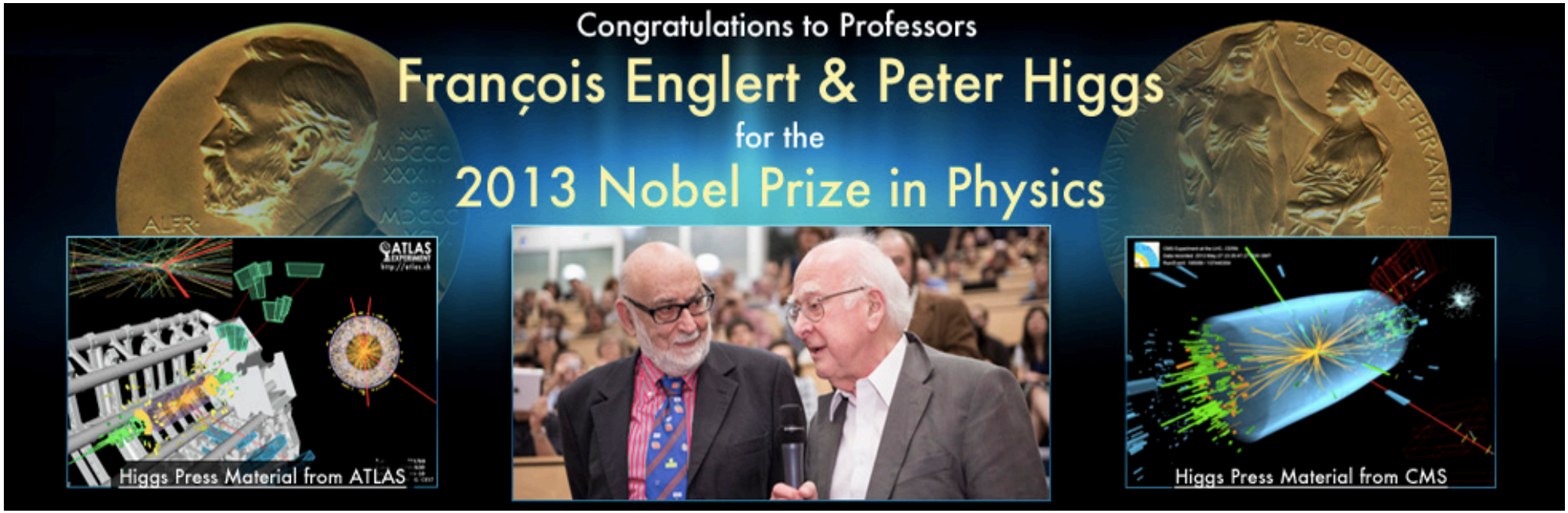
The Nobel Prize in Physics 2013

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2013 to

François Englert
Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

Peter W. Higgs
University of Edinburgh, UK

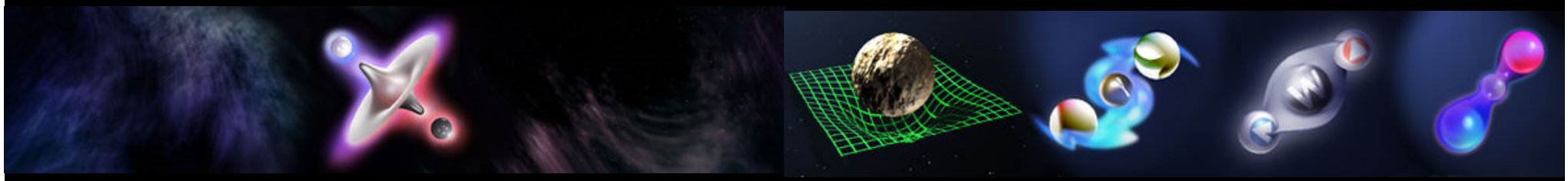
"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"



51

Torniamo un attimo indietro...

- La materia ordinaria è composta di particelle di prima generazione
- Dove troviamo le particelle di seconda e terza generazione? E dove andiamo a cercarne altre?
  - Immediatamente dopo il Big Bang
  - Raggi cosmici
  - Colliders
- Se la materia di generazioni alte decade velocemente, viene osservata di rado, e non è un componente della materia stabile attorno a noi, perchè esiste allora?

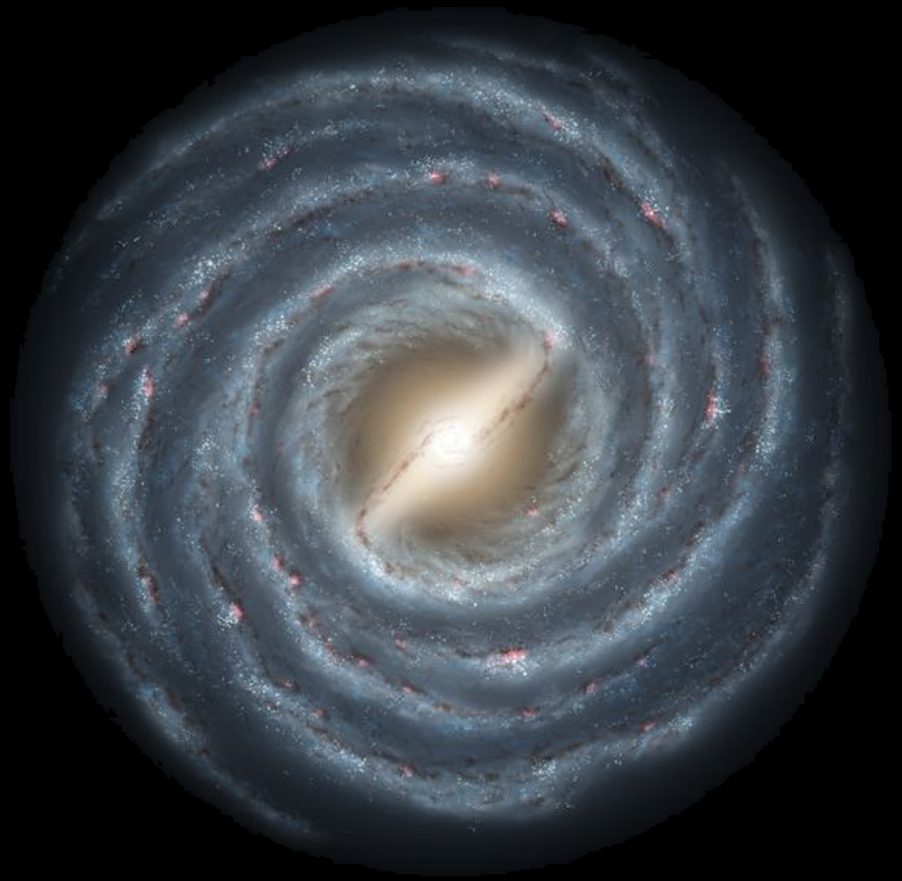


- Perchè esistono le generazioni di materia? Perchè tre?
  - Se non capiamo questo, non possiamo escludere che ci siano altri quarks e leptoni che non abbiamo ancora scoperto..
  - O forse i quarks ed i leptoni non sono particelle fondamentali…

La teoria del Big Bang

Quasi **14 miliardi di anni fa**, immediatamente dopo il Big Bang, l'Universo era in rapida espansione e composto di particelle complesse.

Durante l'espansione, l'Universo si è raffreddato e le particelle sono decadute in altre particelle fondamentali, che poi hanno gradualmente dato origine all'Universo che conosciamo oggi.

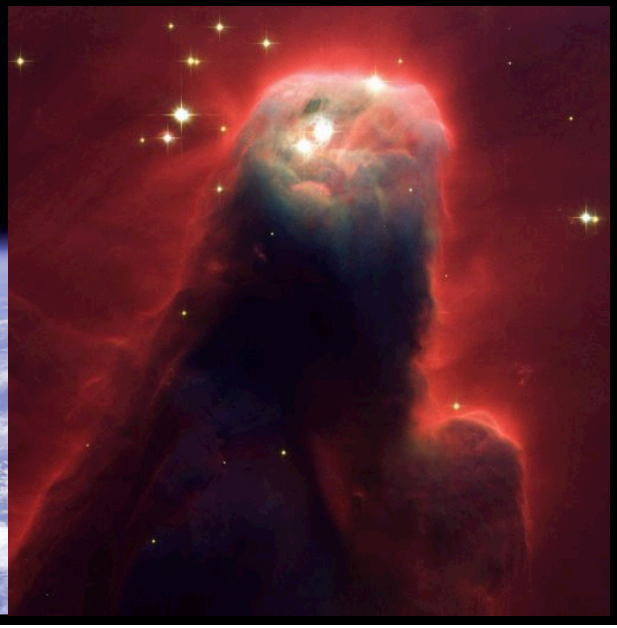


- Elettroni e protoni non decadono
  - O quanto meno, hanno una vita molto più lunga di quella dell'Universo
- All'epoca del Big Bang, esistevano anche tutte le altre particelle di seconda e terza generazione
  - E forse anche altre che stiamo ancora cercando di osservare…

Uno sguardo a ritroso?

- Servirebbe una macchina del tempo!
  - Un telescopio è proprio questo
    - La luce viaggia a 300 000 km/s, ma le distanze nello spazio sono enormi

      ad es. la luce che ci arriva da una stella situata all'estremo opposto della nostra galassia è stata emessa 100 mila anni fa!
  - Più guardiamo lontano, e più stiamo in effetti guardando indietro nel tempo



possiamo fare molto di più!

Perché?

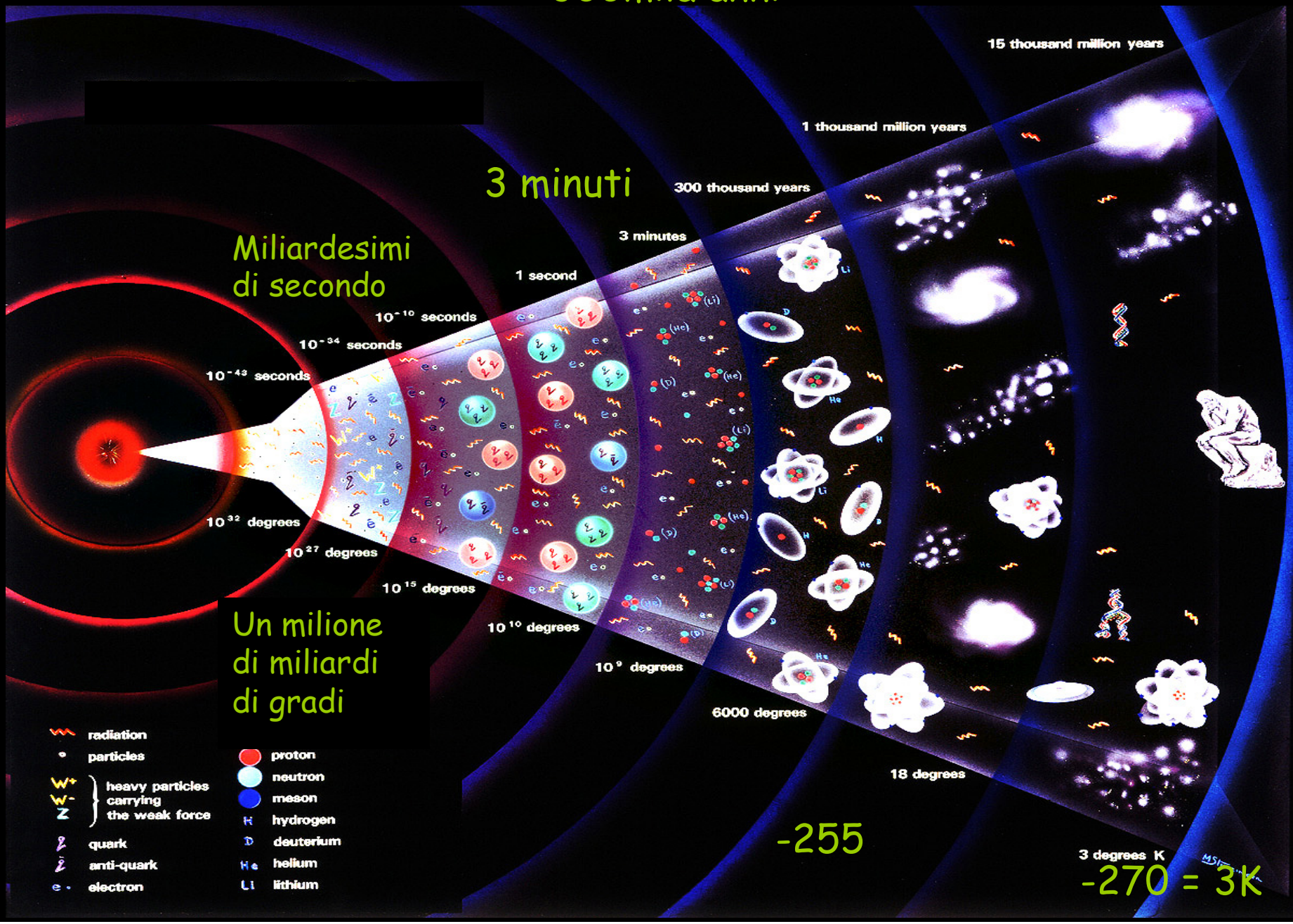
Dal Big Bang al mondo di oggi

15 miliardi di anni

300mila anni

3 minuti

Miliardesimi di secondo



Un milione di miliardi di gradi

-255

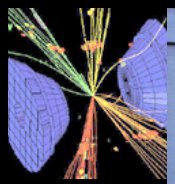
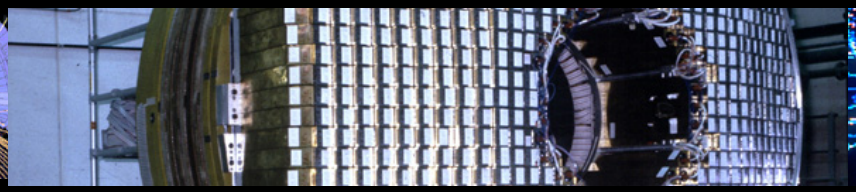
-270 = 3K

Possiamo mandare l'orologio indietro!

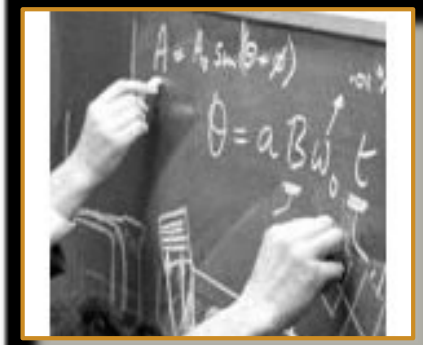
Dobbiamo riprodurre i primi 400 mila anni dopo il Big Bang

- Al CERN studiamo le reazioni fondamentali avvenute fra un centesimo di miliardesimo di secondo e 3 minuti dopo il Big Bang

- Per fare questo usiamo i microscopi più avanzati al mondo, gli acceleratori di particelle:
  - In essi vengono fatti collidere frontalmente fasci di particelle ad energie sufficienti a ricreare quello che avveniva immediatamente dopo il Big Bang
  - Una volta prodotte le particelle fondamentali, possiamo studiarne il comportamento per capire perchè l'Universo è come lo conosciamo.

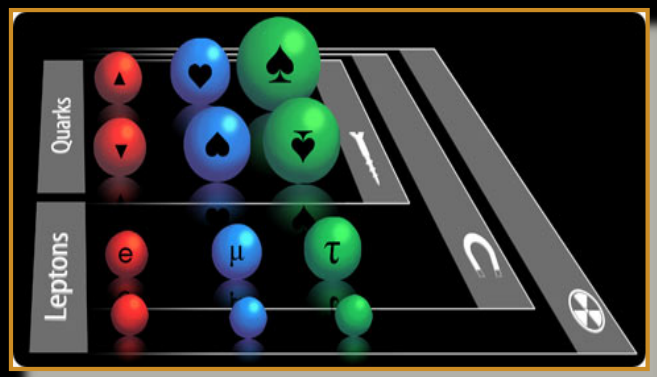
Non sappiamo ancora tutto!...



Il Modello Standard: la nostra teoria delle particelle

- Una descrizione matematica delle 12 particelle fondamentali (e antiparticelle) e di tre forze
  - La gravità non è ancora inclusa
- Non abbiamo ancora trovato un risultato sperimentale in disaccordo con il Modello Standard, nonostante tutti gli sforzi...

Cosa resta da scoprire e capire?



- Il piccolo imbarazzo della Scienza...
  - Di cosa è composto il 96% dell'Universo?
- Il favoritismo della Natura...
  - Perchè viviamo in un mondo di materia?
- I segreti del Big Bang...
  - Com'era fatta la materia nei primi secondi della vita dell'Universo?
- Perchè ci sono esattamente 12 particelle fondamentali? E sono davvero fondamentali o sono composte da altre?
- Completare il lavoro di Newton...
  - Cos'è la massa? Perche' le particelle hanno massa tanto differente fra loro?

Come si misura la massa di una particella instabile?

La quantità di moto $\vec{p}$ e l'energia E di una particella di massa m che si muove con una velocità v prossima a c sono date da:

$$\vec{p} = m\gamma v$$

$$E = m\gamma c^2$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

da queste relazioni otteniamo

$$m = \frac{\sqrt{E^2 - p^2c^2}}{c^2}$$

massa invariante

Se abbiamo una particella di cui è nota la massa e ne misuriamo l'impulso conosciamo la sua energia:

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

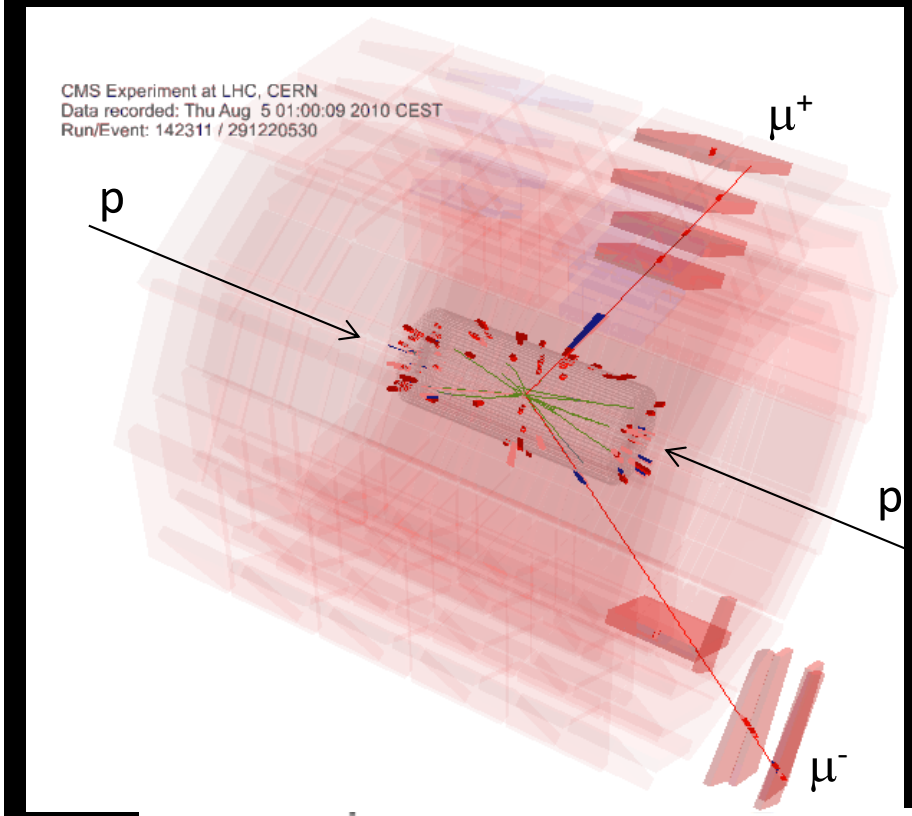
Nel caso in cui vogliamo misurare la massa m di una particella che decade ad esempio in due particelle di massa m_1 e m_2 note ed impulsi $\vec{p}_1$ e $\vec{p}_2$ misurati entrambi da un rivelatore

$$E = E_1 + E_2 \qquad \vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

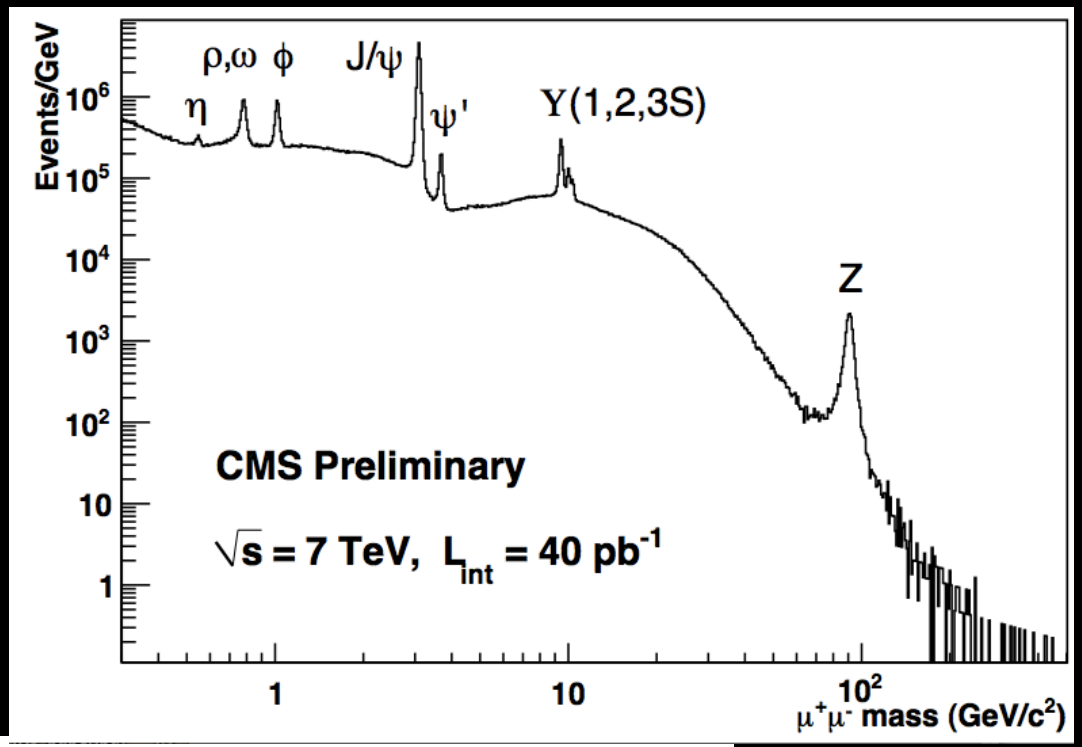
$$m = \frac{\sqrt{E^2 - p^2c^2}}{c^2}$$

Un esempio utile per il prossimo seminario

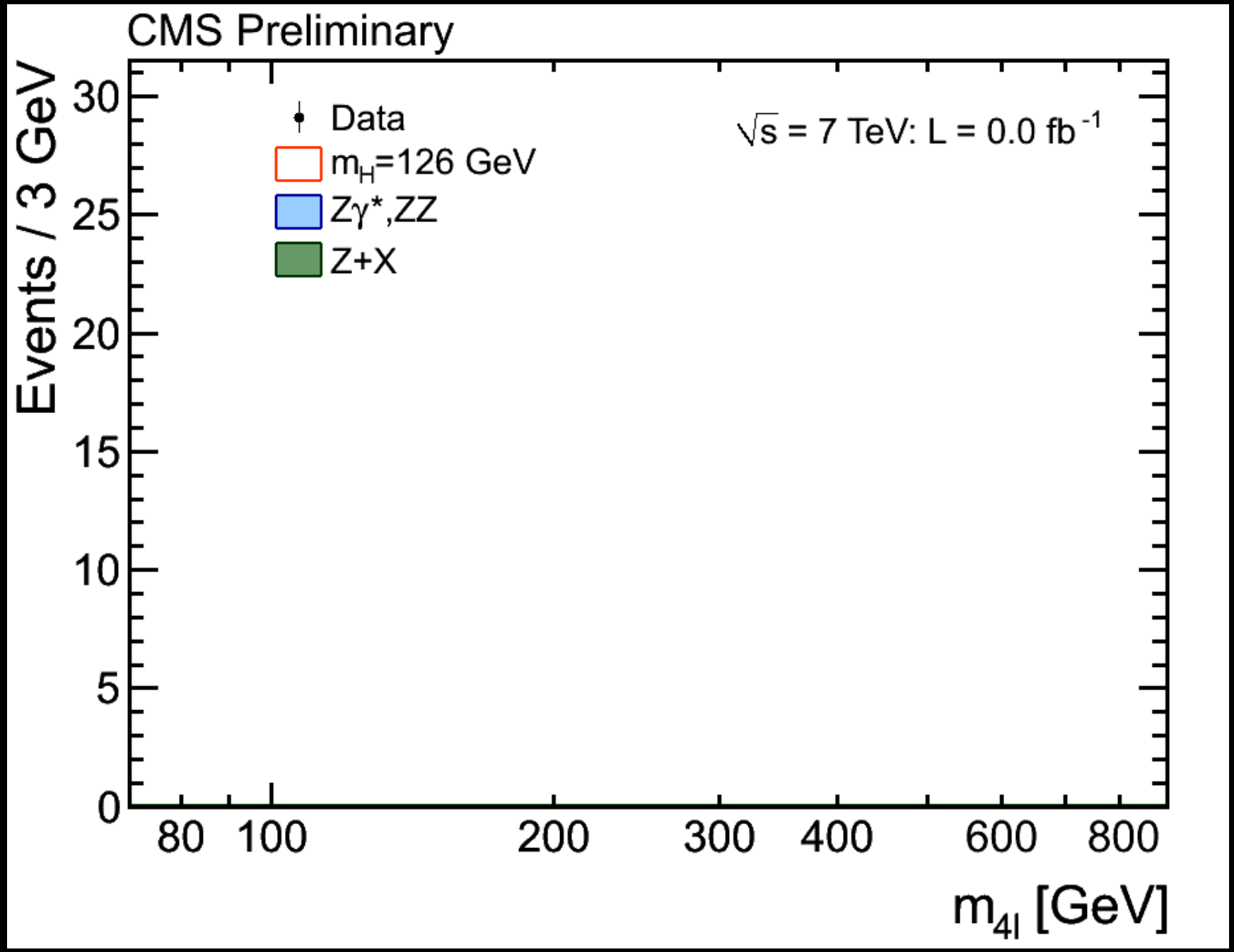
- Le particelle "interessanti" decadono istantaneamente
  - Dobbiamo cercare i loro prodotti di decadimento
  - Spesso in un fondo ("background") di eventi simili prodotti per es. da processi già noti



Esempio: **risonanze nello spettro $\mu^+\mu^-$** in collisioni pp



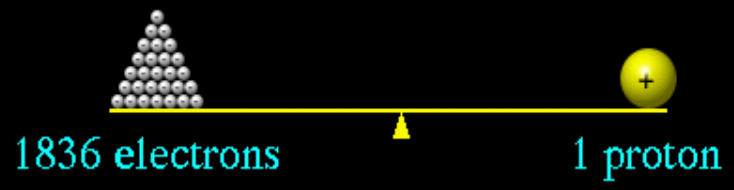
$$m^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2\cos\theta$$


CMS Preliminary
Data
m_H=126 GeV
Zγ*,ZZ
Z+X
$\sqrt{s}$ = 7 TeV: L = 0.0 fb^{-1}
Events / 3 GeV
0
5
10
15
20
25
30
80
100
200
300
400
600
800
m_{4l} [GeV]

"Knowledge is power: arm yourself!"

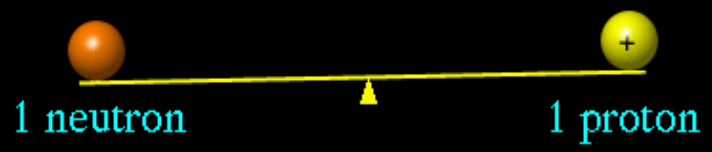
GRAZIE!

Quanto sono piccoli questi costituenti fondamentali?



Se un elettrone avesse una massa di una monetina da 5 centesimi di euro, un protone avrebbe una massa di circa 4 litri di latte!

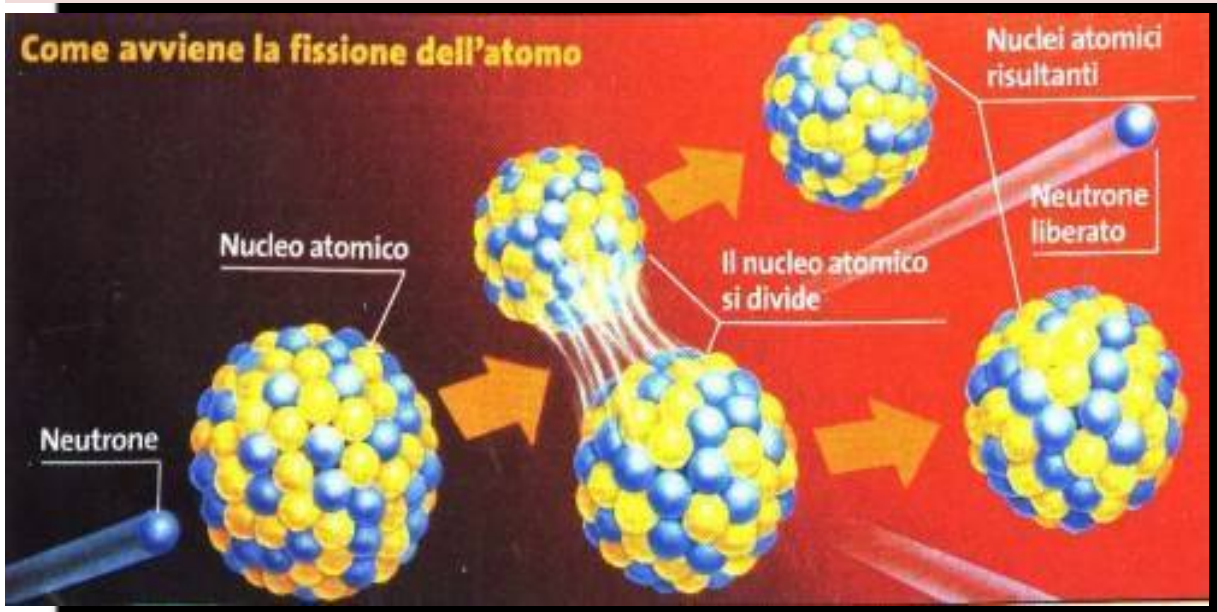
(1932) Neutroni e protoni hanno circa la stessa massa



- Possiamo allineare 100 000 atomi sulla larghezza di un capello
  - E la proporzione fra il nucleo e gli elettroni è la stessa di una biglia posta al centro di un campo di calcio ~ 10^5

La fissione nucleare

I nuclei pesanti (Z>92), se bombardati ad es. con neutroni, tendono a spezzarsi in due nuclei di massa circa metà di quella di partenza, emettendo inoltre altri neutroni, che possono provocare una reazione a catena.



Nella fissione viene emessa energia: circa 200 MeV (contro i 20 eV delle reazioni chimiche)

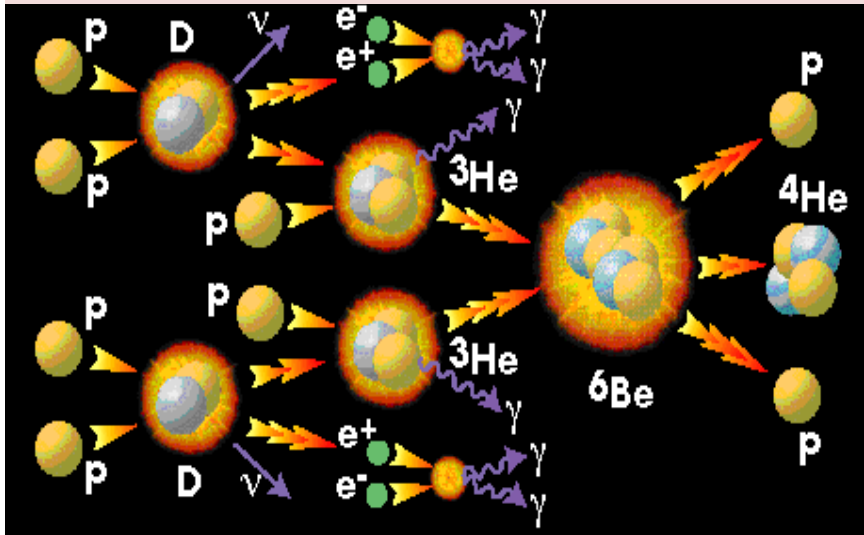
1g di fissioni (^{235}U) → 30000 kWh di energia = consumo familiare di 5 anni!!!

$$n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U^{*} \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3n$$

$$\rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{94}_{38}Sr + 2n$$

La fusione nucleare

I nuclei leggeri (Z<15), in condizioni particolari (es. altissime temperature) in cui riescono ad avvicinarsi l' un l' altro a piccolissime distanze, possono fondersi a due a due in nuclei più pesanti.



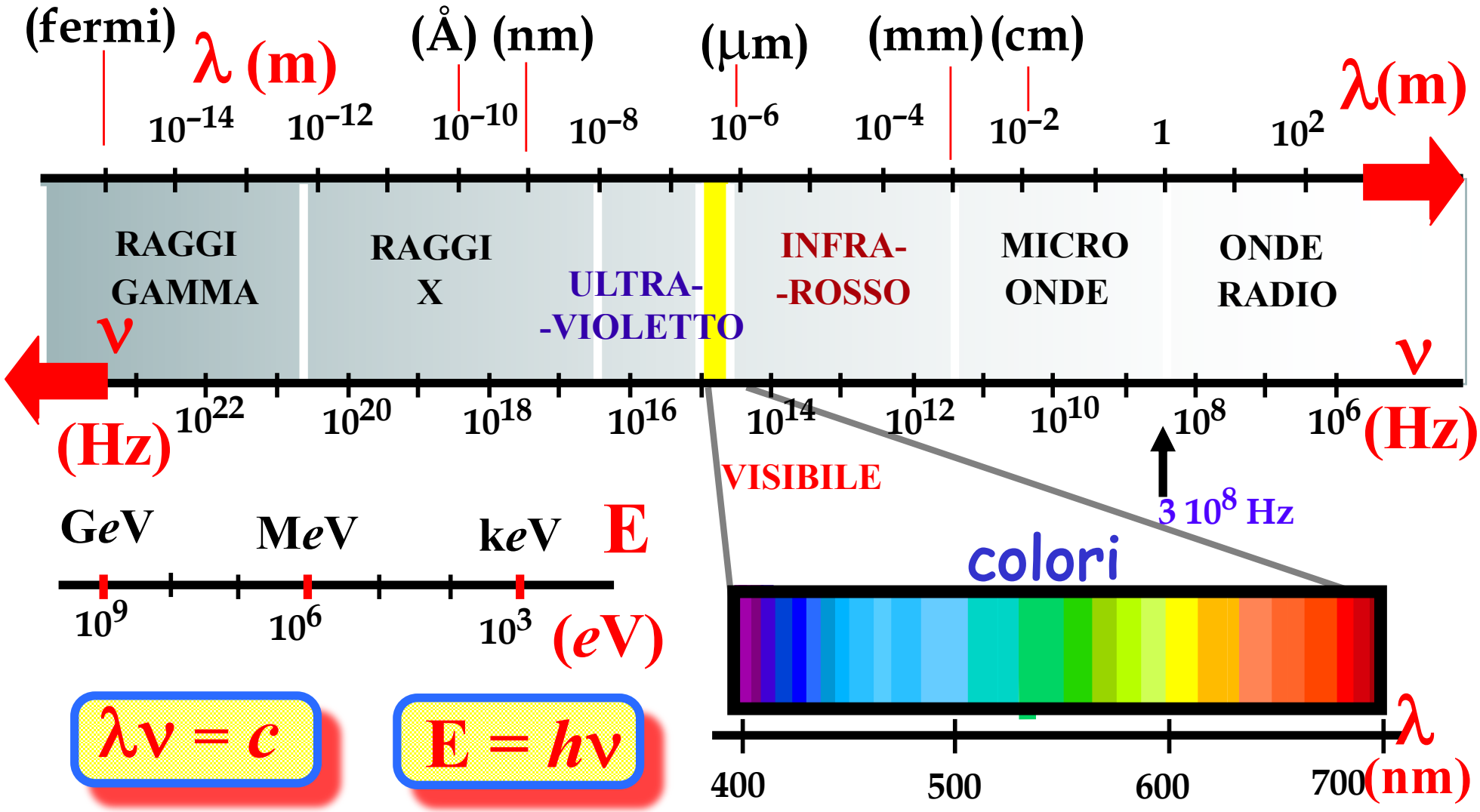
Nella fusione viene emessa energia:alcuni MeV (contro i 20 eV delle reazioni chimiche)

Nel Sole, a ogni secondo, 564.500 kg di idrogeno si convertono in 560.000 kg di elio;

$$p + p \rightarrow D + e^{+} + \nu_e$$

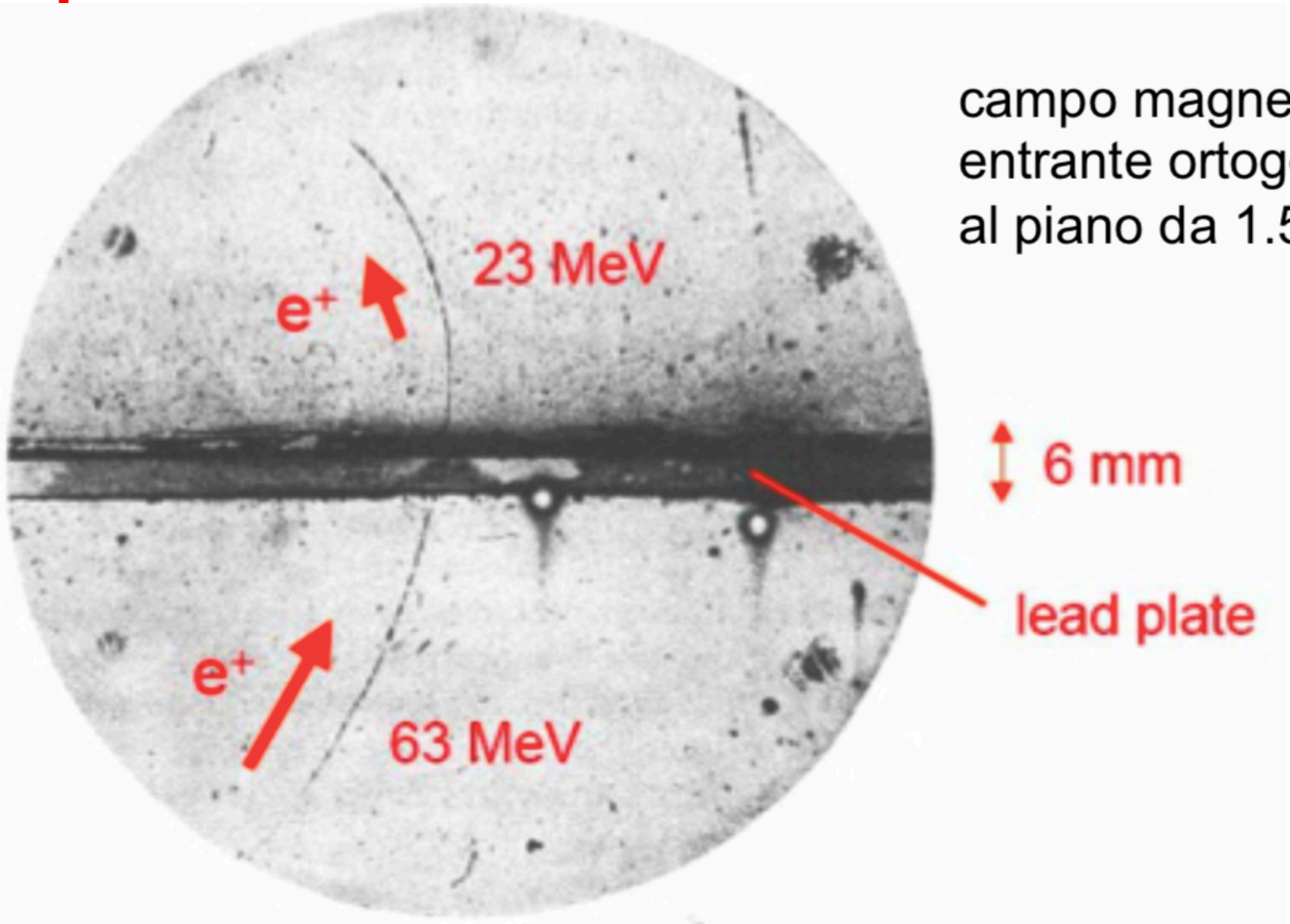
$$D + p \rightarrow {}^{3}He + \gamma$$

Spettro elettromagnetico



$$\lambda\nu = c$$

$$E = h\nu$$



campo magnetico
entrante ortogonale
al piano da 1.5 Tesla