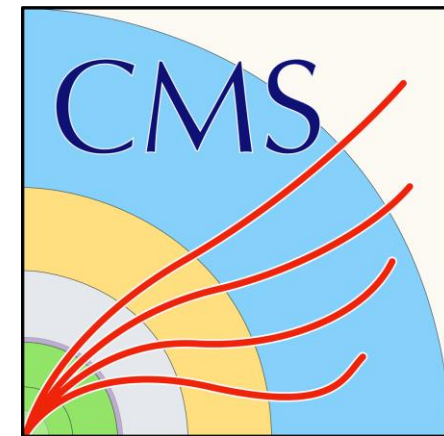
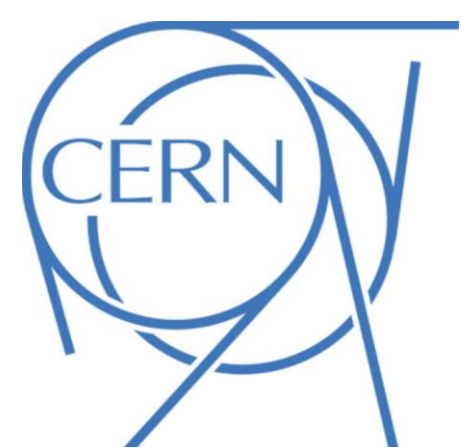




Introduzione alla Fisica delle Particelle

25/02/2025

A. Lapertosa

Uni
ct

FISICA E ASTRONOMIA
"ETTORE MAJORANA"

INFN
CATANIA

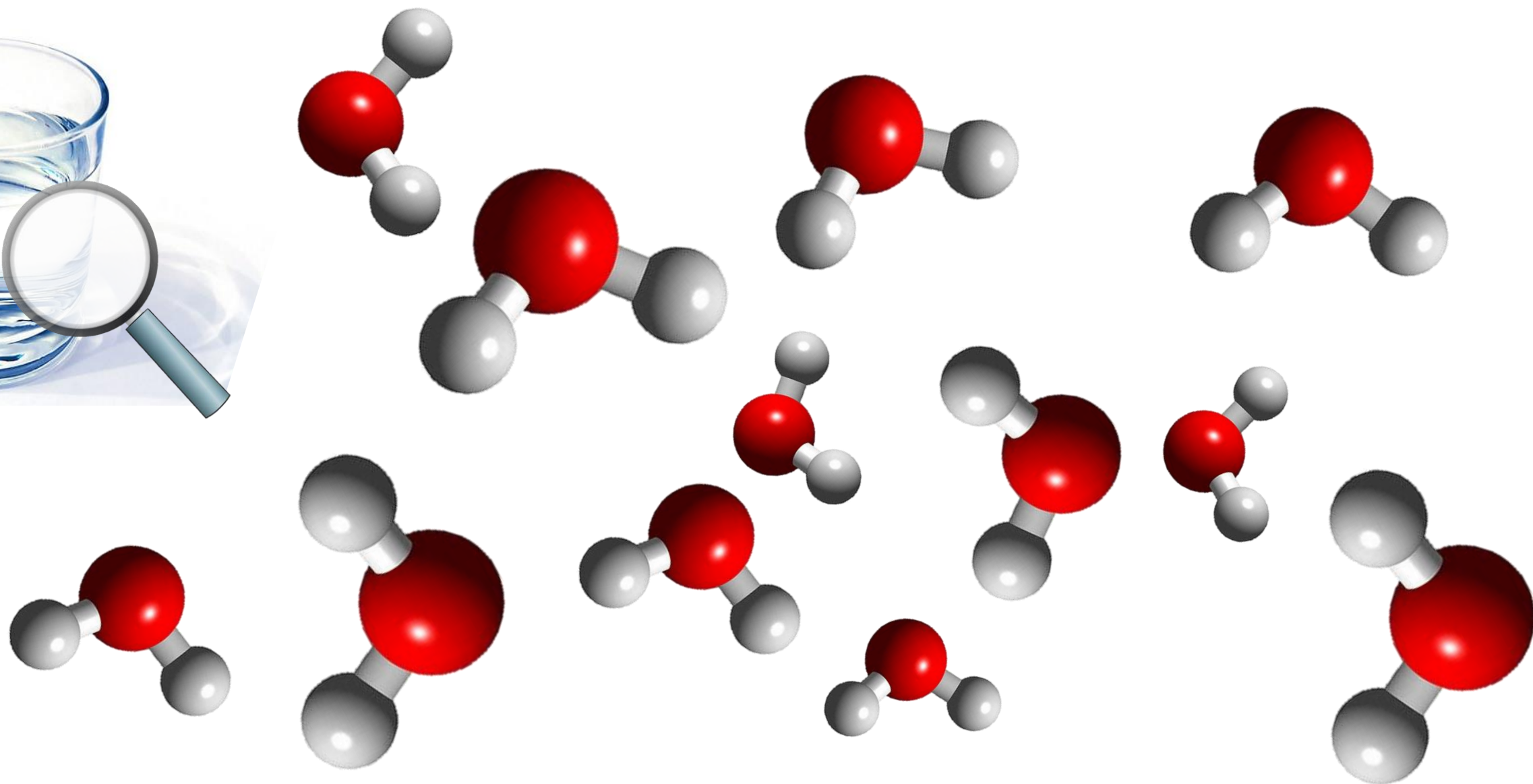
La Materia



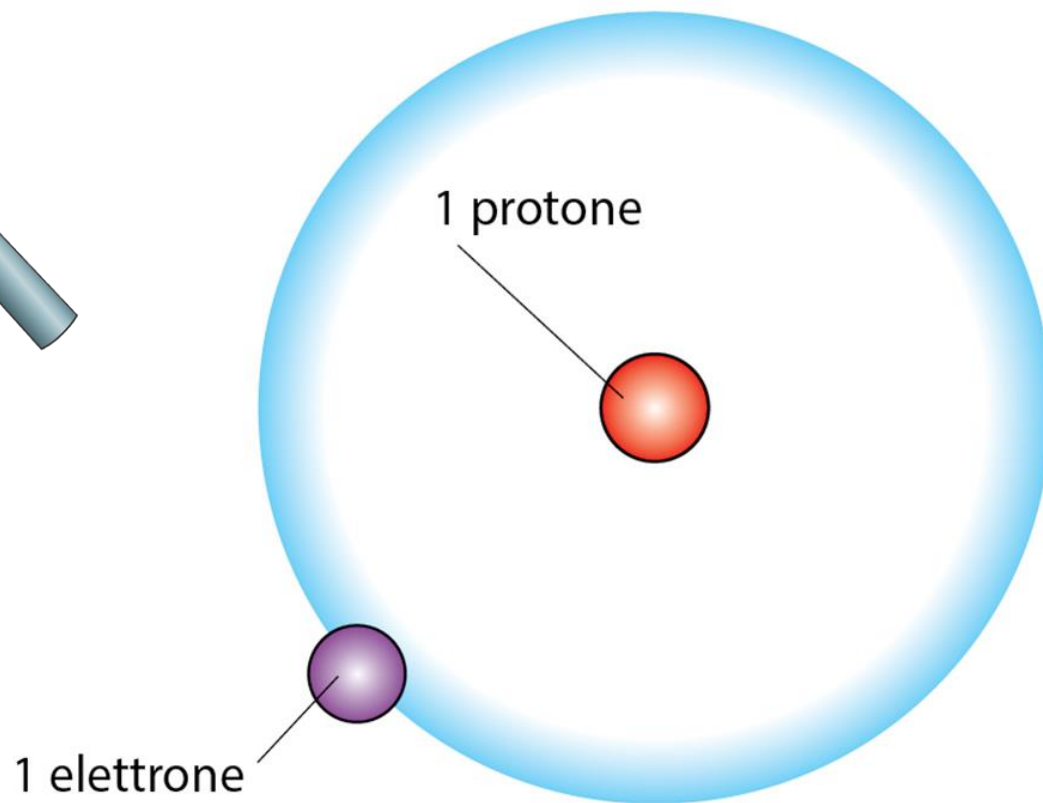
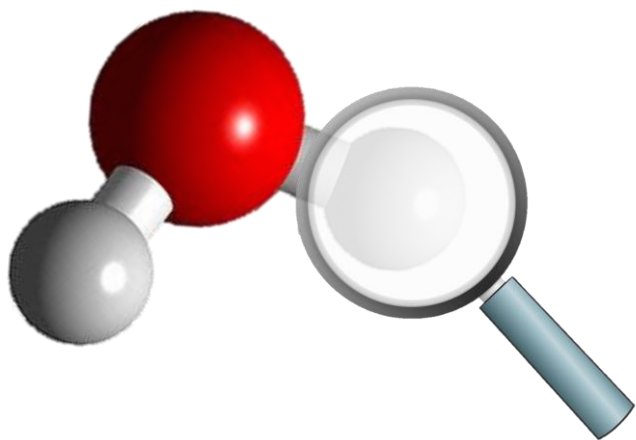
L'acqua

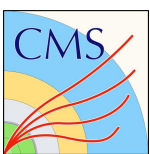


Le molecole



L'atomo

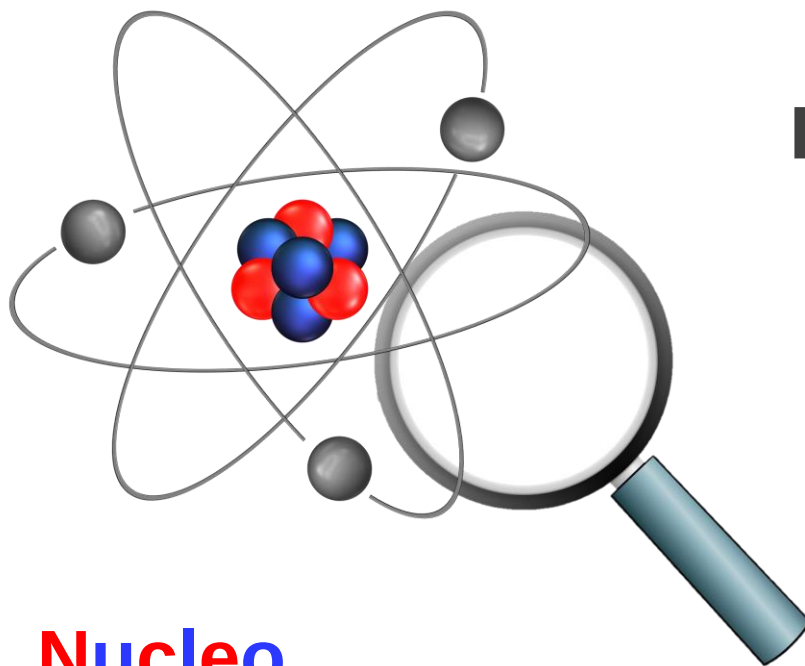




Chimica: Tavola Periodica degli Elementi

Gruppo																						18							
Periodo		1											13	14	15	16	17	18											
1		1.008 1312.0 1s ¹ H Idrogeno																4.0026 2372.3 1s ² He Elio											
2		6.94 520.2 1s ² 2s ¹ Li Litio	9.0122 899.5 1s ² 2s ² Be Berillio											10.81 800.6 1s ² 2s ² 2p ¹ B Boro	12.011 1086.5 1s ² 2s ² 2p ² C Carbonio	14.007 1402.3 1s ² 2s ² 2p ³ N Azoto	15.999 1313.9 1s ² 2s ² 2p ⁴ O Ossigeno	18.998 1681.0 1s ² 2s ² 2p ⁵ F Fluoro	20.180 2080.7 1s ² 2s ² 2p ⁶ Ne Neon										
3		22.990 495.8 [Ne] 3s ¹ Na Sodio	24.305 737.7 [Ne] 3s ² Mg Magnesio											26.982 577.5 [Ne] 3s ² 3p ¹ Al Alluminio	28.085 786.5 [Ne] 3s ² 3p ² Si Silicio	30.974 1011.8 [Ne] 3s ² 3p ³ P Fosforo	32.06 999.6 [Ne] 3s ² 3p ⁴ S Zolfo	35.45 1251.2 [Ne] 3s ² 3p ⁵ Cl Cloro	39.948 1520.6 [Ne] 3s ² 3p ⁶ Ar Argon										
4		39.098 418.8 [Ar] 4s ¹ K Potassio	40.078 589.8 [Ar] 4s ² Ca Calcio	44.956 633.1 [Ar] 3d ¹ 4s ² Sc Scandio	47.867 658.8 [Ar] 3d ² 4s ² Ti Titanio	50.942 650.9 [Ar] 3d ³ 4s ² V Vanadio	51.996 652.9 [Ar] 3d ⁴ 4s ¹ Cr Cromo	54.938 717.3 [Ar] 3d ⁵ 4s ² Mn Manganese	55.845 762.5 [Ar] 3d ⁶ 4s ² Fe Ferro	58.933 760.4 [Ar] 3d ⁷ 4s ² Co Cobalto	58.693 737.1 [Ar] 3d ⁸ 4s ² Ni Nichelio	63.546 745.5 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹ Cu Rame	65.38 906.4 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² Zn Zinco	69.723 578.8 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹ Ga Gallio	72.630 762.0 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ² Ge Germanio	74.922 947.0 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³ As Arsenico	78.971 941.0 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴ Se Selenio	79.904 1139.9 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵ Br Bromo	83.798 1350.8 [Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶ Kr Kriptone										
5		85.468 403.0 [Kr] 5s ¹ Rb Rubidio	87.62 549.5 [Kr] 5s ² Sr Stronzio	88.906 600.0 [Kr] 4d ¹ 5s ² Y Ittrio	91.224 640.1 [Kr] 4d ² 5s ² Zr Zirconio	92.906 652.1 [Kr] 4d ³ 5s ¹ Nb Niobio	95.95 684.3 [Kr] 4d ⁴ 5s ¹ Mo Molibdeno	(98) 702.0 [Kr] 4d ⁵ 5s ² Tc Tecnecio	101.07 710.2 [Kr] 4d ⁶ 5s ¹ Ru Rutenio	102.91 719.7 [Kr] 4d ⁷ 5s ¹ Rh Rodio	106.42 804.4 [Kr] 4d ⁸ 5s ¹ Pd Palladio	107.87 731.0 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ¹ Ag Argento	112.41 867.8 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² Cd Cadmio	114.82 558.3 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹ In Indio	118.71 706.6 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ² Sn Stagno	121.76 834.0 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ³ Sb Antimonio	127.60 869.3 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴ Te Tellurio	126.90 1008.4 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵ I Iodio	131.29 1170.4 [Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶ Xe Xenone										
6		132.91 375.7 [Xe] 6s ¹ Cs Cesio	137.33 502.9 [Xe] 6s ² Ba Bario	147.91 523.5 [Xe] 4f ¹ 5d ¹ 6s ² Lu Lutezio	178.49 640.1 [Xe] 4f ² 5d ² 6s ² Hf Afrio	180.95 761.0 [Xe] 4f ³ 5d ¹ 6s ² Ta Tantalio	183.84 770.0 [Xe] 4f ⁴ 5d ² 6s ² W Tungsteno	186.21 760.0 [Xe] 4f ⁴ 5d ³ 6s ² Re Renio	190.23 840.0 [Xe] 4f ⁵ 5d ³ 6s ² Os Osmio	192.22 880.0 [Xe] 4f ⁶ 5d ⁴ 6s ² Ir Iridio	195.08 870.0 [Xe] 4f ⁶ 5d ⁵ 6s ¹ Pt Platino	196.97 890.1 [Xe] 4f ⁸ 5d ¹⁰ 6s ¹ Au Oro	200.59 1007.1 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² Hg Mercurio	204.38 589.4 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ¹ Tl Tallio	207.2 715.6 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ² Pb Piombo	208.98 703.0 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³ Bi Bismuto	(210) 812.1 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴ Po Polonio	(210) 890.0 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵ At Astatio	(220) 1037.0 [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶ Rn Radon										
7		(223) 380.0 [Rn] 7s ¹ Fr Francio	(226) 470.0 [Rn] 7s ² Ra Radio	(262) 470.0 [Rn] 5f ¹⁴ 7s ² 7p ¹ Lr Laurenzio	(261) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ² Rf Rutherfordio	(262) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ² 7s ² Db Dubnio	(266) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ³ 7s ² Sg Seabergio	(264) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s ² Bh Bohrio	(277) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁵ 7s ² Hs Hassio	(268) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁶ 7s ² Mt Meitnerio	(271) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁷ 7s ² Ds Darmstadtio	(272) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ⁸ 7s ² Rg Roentgenio	(285) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² Cn Copernicio	(284) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ¹ Nh Nihonio	(289) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ² Fl Flerovio	(288) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ³ Mc Moscovio	(292) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁴ Lv Livermorio	(294) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁵ Ts Tennessio	(294) 580.0 [Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶ Og Oganesson										
		* **																											
		138.91 538.1 [Xe] 5d ¹ 6s ² La Lantanio	140.12 534.4 [Xe] 4f ¹ 5d ¹ 6s ² Ce Cerio	140.91 527.0 [Xe] 4f ² 6s ² Pr Praseodimio	144.24 533.1 [Xe] 4f ³ 6s ² Nd Neodimio	(145) 540.0 [Xe] 4f ⁴ 6s ² Pm Promezio	150.36 544.5 [Xe] 4f ⁵ 6s ² Sm Samario	151.96 547.1 [Xe] 4f ⁶ 6s ² Eu Europio	157.25 593.4 [Xe] 4f ⁷ 6s ² Gd Gadolinio	158.93 565.8 [Xe] 4f ⁷ 6s ² Tb Terbio	162.50 573.0 [Xe] 4f ⁹ 6s ² Dy Disprosio	164.93 581.0 [Xe] 4f ¹⁰ 6s ² Ho Olmio	167.25 589.3 [Xe] 4f ¹¹ 6s ² Er Erbio	168.93 596.7 [Xe] 4f ¹² 6s ² Tm Tulio	173.05 603.4 [Xe] 4f ¹³ 6s ² Yb Itterbio	(227) 499.0 [Rn] 6d ¹ 7s ² Ac Attinio	232.04 587.0 [Rn] 6d ² 7s ² Th Torio	231.04 587.0 [Rn] 5f ¹ 6d ¹ 7s ² Pa Protoattinio	238.03 587.0 [Rn] 5f ² 6d ¹ 7s ² U Uranio	(237) 604.5 [Rn] 5f ³ 6d ¹ 7s ² Np Nettunio	(244) 604.5 [Rn] 5f ⁴ 6d ¹ 7s ² Pu Plutonio	(243) 601.0 [Rn] 5f ⁵ 7s ² Am Americio	(247) 601.0 [Rn] 5f ⁶ 6d ¹ 7s ² Cm Curio	(247) 601.0 [Rn] 5f ⁷ 7s ² Bk Berkelio	(251) 608.0 [Rn] 5f ⁸ 7s ² Cf Californio	(252) 619.0 [Rn] 5f ⁹ 7s ² Es Einsteinio	(257) 627.0 [Rn] 5f ¹⁰ 7s ² Fm Fermio	(258) 642.0 [Rn] 5f ¹¹ 7s ² Md Mendelevio	(259) 642.0 [Rn] 5f ¹² 7s ² No Nobelio

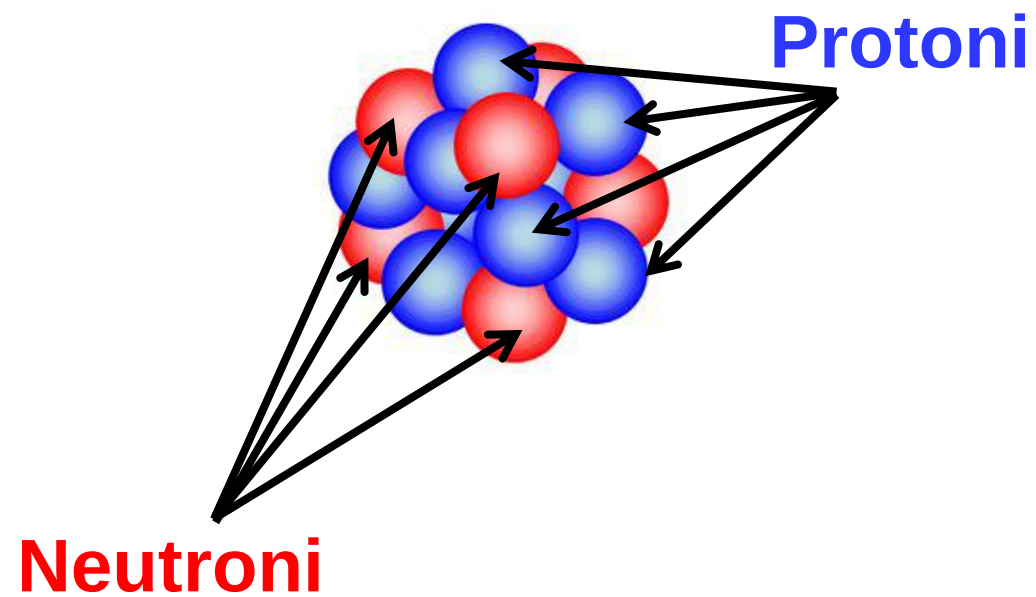
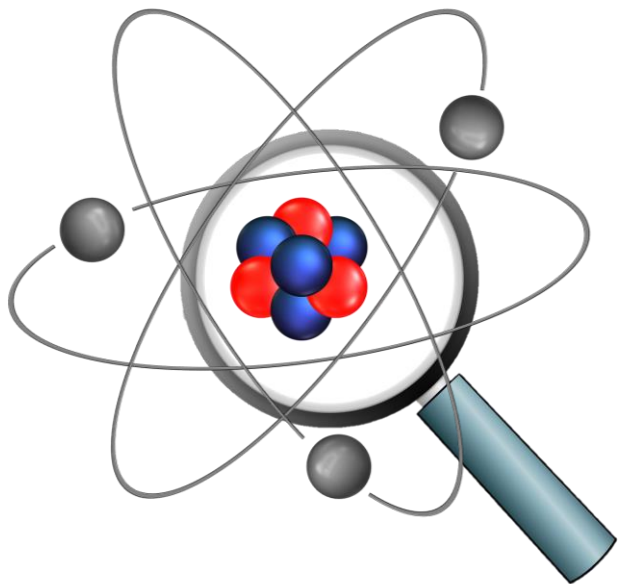
L'atomo



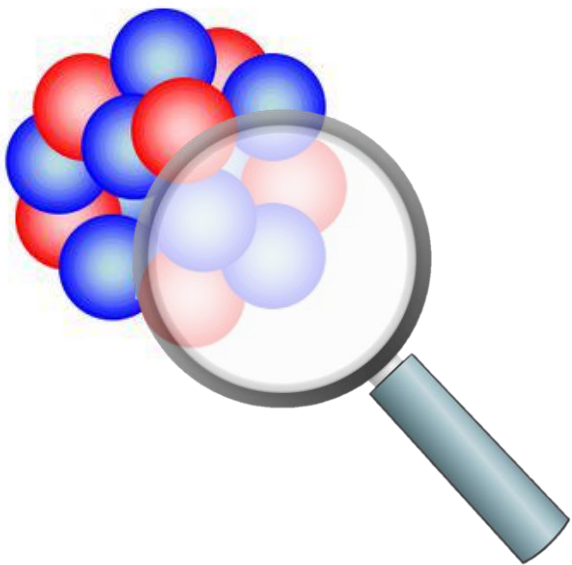
Elettroni

Nucleo

Il nucleo

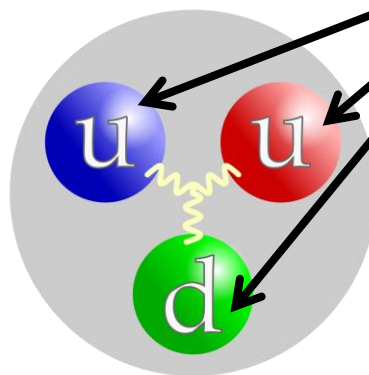


Il protone



Protone

Quark





Quark Up, Quark Down, Elettrone

Quark

u
up

d
down

e
elettrone

Le cariche elettriche

Quark

u
up

$$+ \frac{2}{3}$$

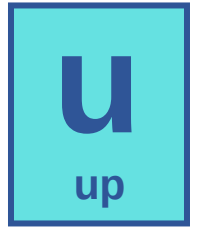
d
down

$$- \frac{1}{3}$$

e
elettrone

$$- 1$$

Esercizio: il protone e il neutrone

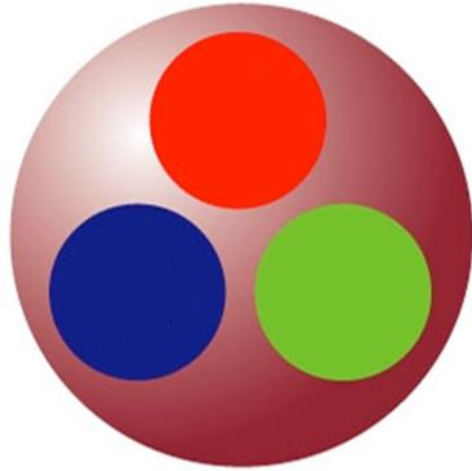


$$+ \frac{2}{3}$$

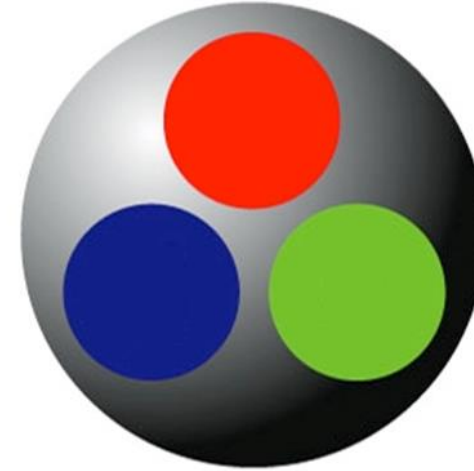


$$- \frac{1}{3}$$

Protone



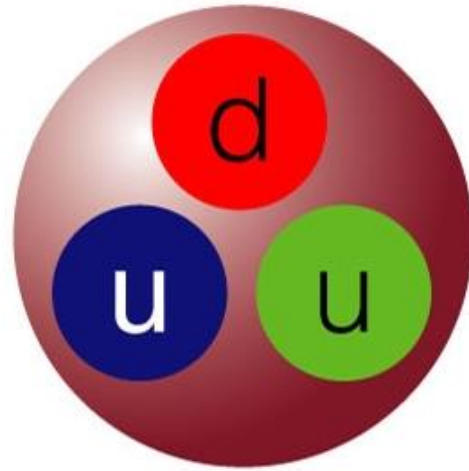
Neutrone



Protone (uud) ... Neutrone (ddu)

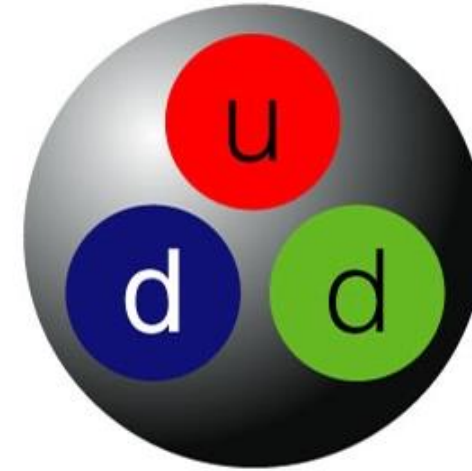
u up	$+$	$\frac{2}{3}$
d down	$-$	$\frac{1}{3}$

Protone



$$+ \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

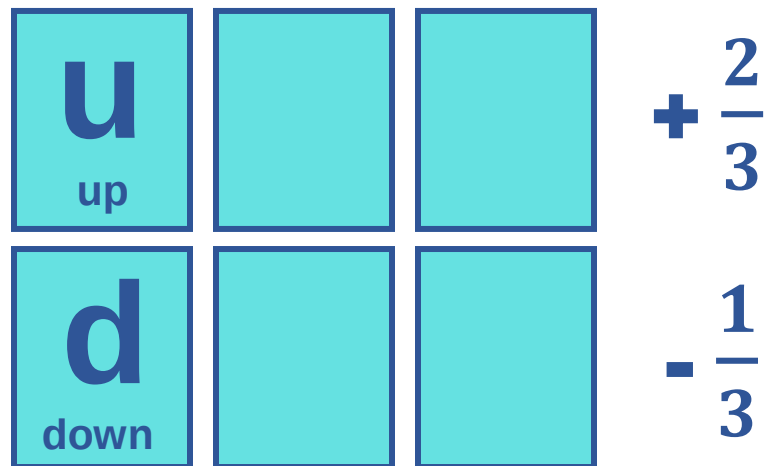
Neutrone



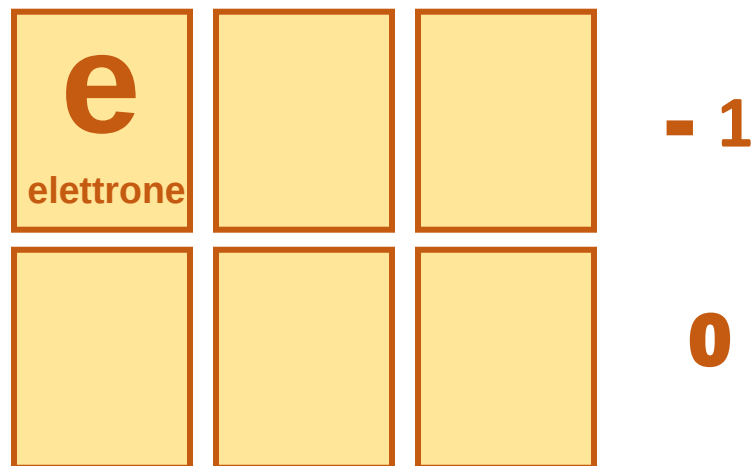
$$+ \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

Quark e Leptoni

Quark



Leptoni



Esistono altre particelle?

Qualcuno ha
detto **neutrino**?

...neutrini...

SICILY

MALTA

Uni
ct

FISICA E ASTRONOMIA
"ETTORE MAJORANA"

nature

COSMIC CATCHER

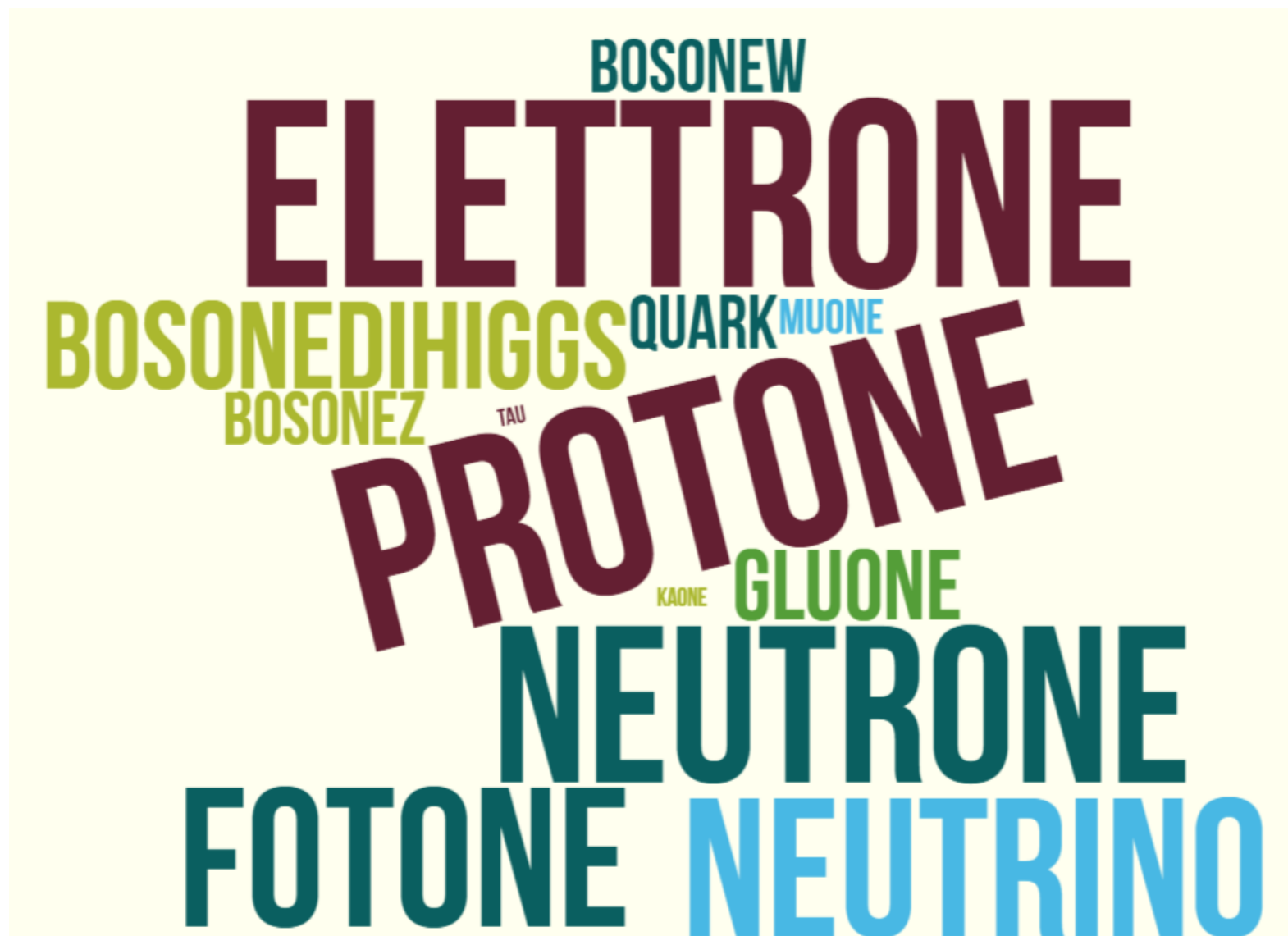
Deep-sea telescope detects neutrino with highest energy ever recorded

KM3NeT

INFN
CATANIA

INFN
LNS

...particelle...



La Materia

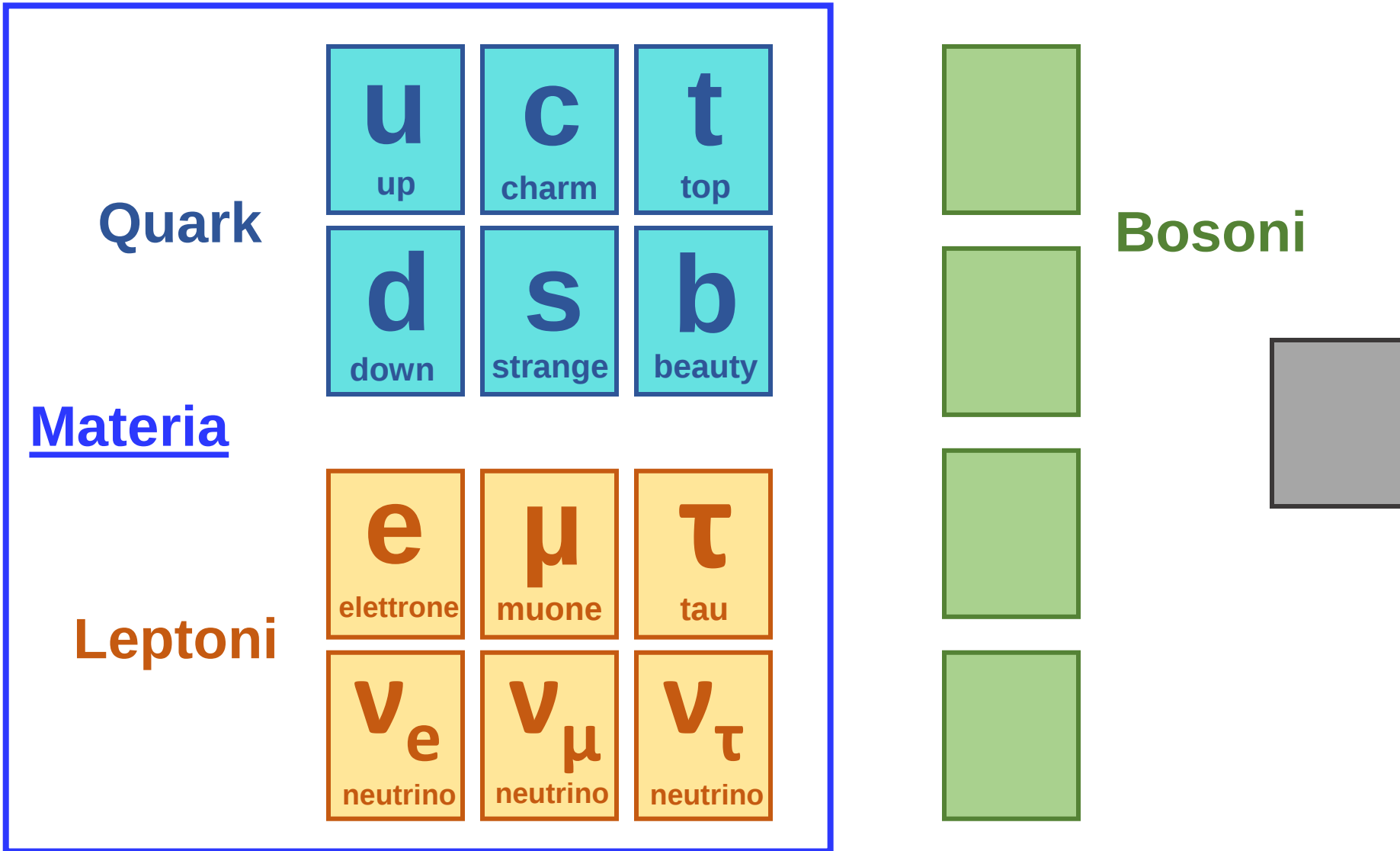
Quark

u up	c charm	t top
d down	s strange	b beauty

Leptoni

e elettrone	μ muone	τ tau
ν_e neutrino	ν_μ neutrino	ν_τ neutrino

Fisica: Modello Standard



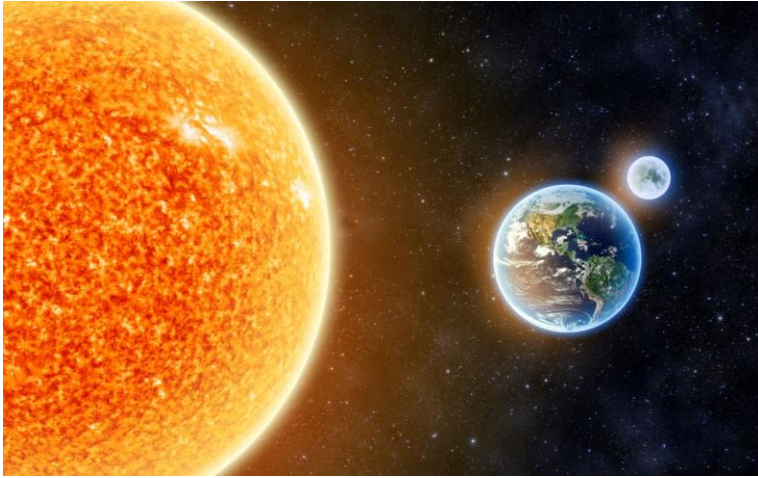
Interazioni?

...

Campi!

Interazioni: Gravitazionale & Elett.-Magn.

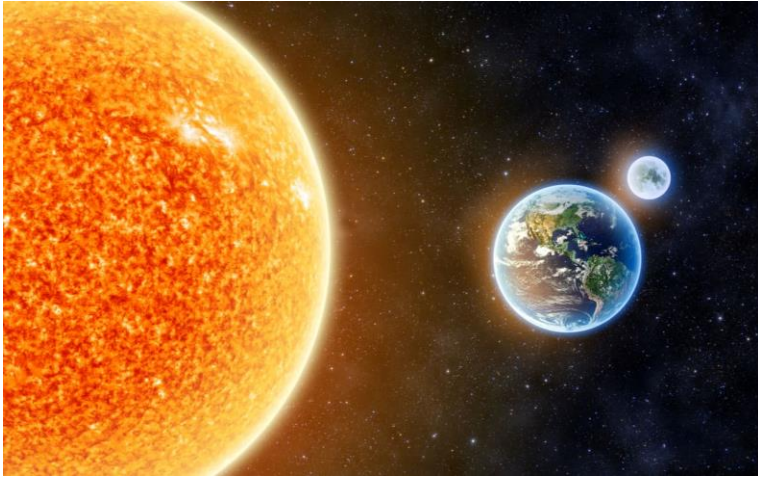
- Interazione Gravitazionale



$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Interazioni: Gravitazionale & Elett.-Magn.

- Interazione Gravitazionale



$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

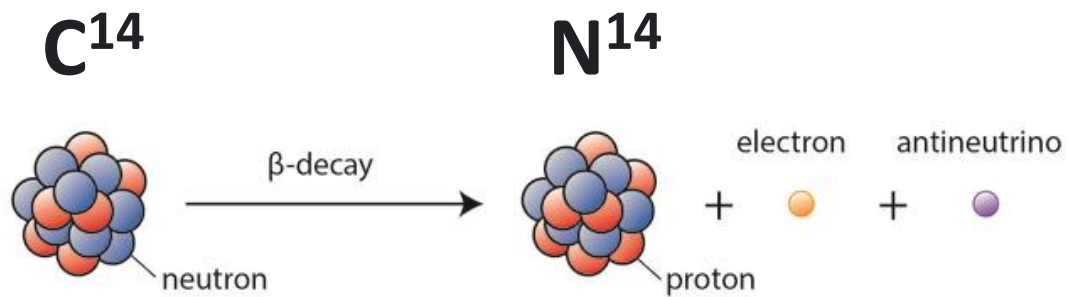
- Interazione Elettro-Magnetica



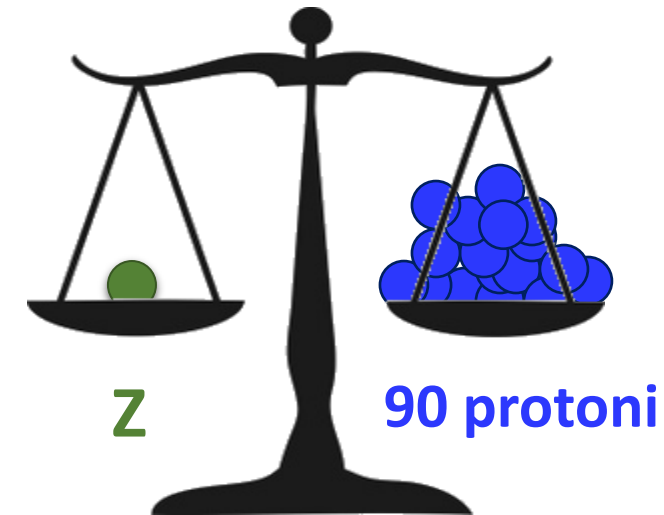
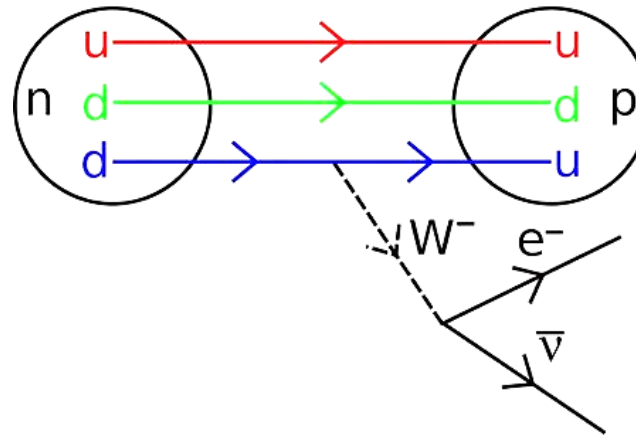
$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Interazioni: Nucleare Debole e Forte

- Interazione Nucleare Debole

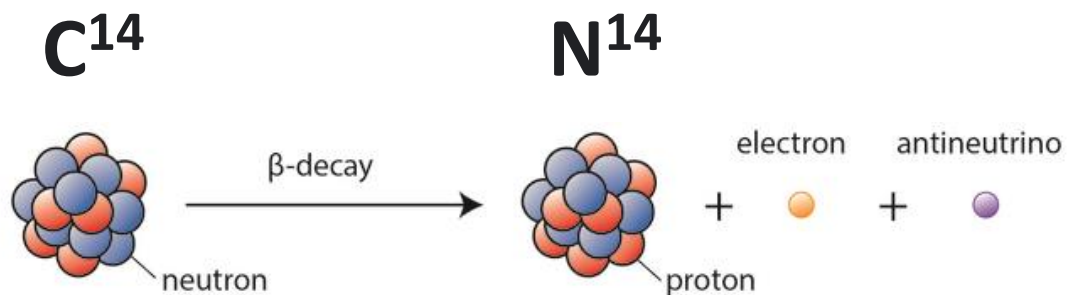


$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

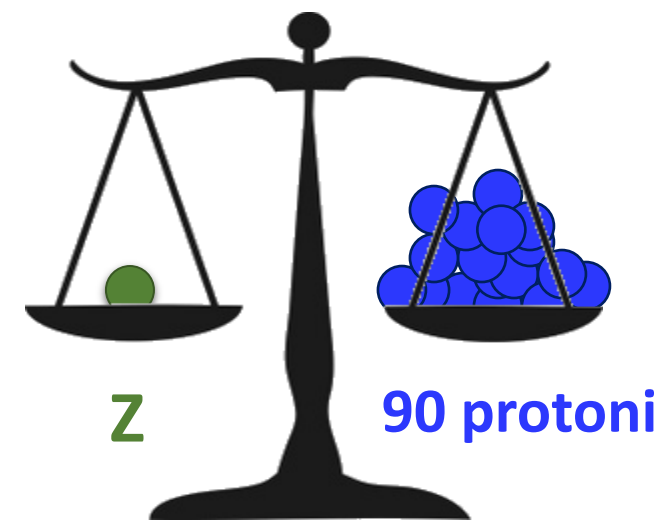
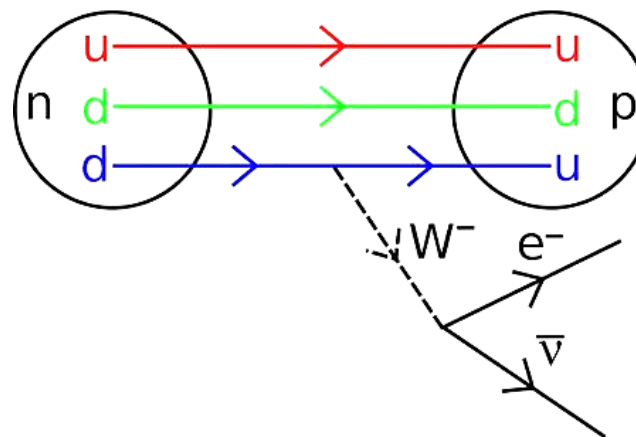


Interazioni: Nucleare Debole e Forte

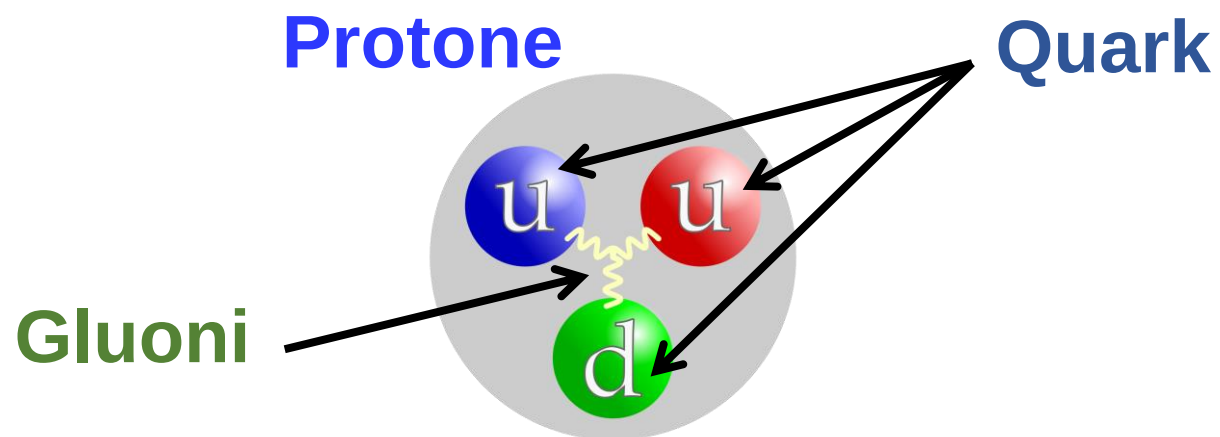
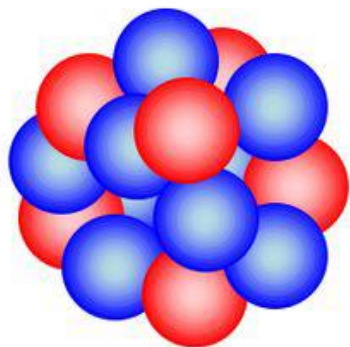
• Interazione Nucleare Debole



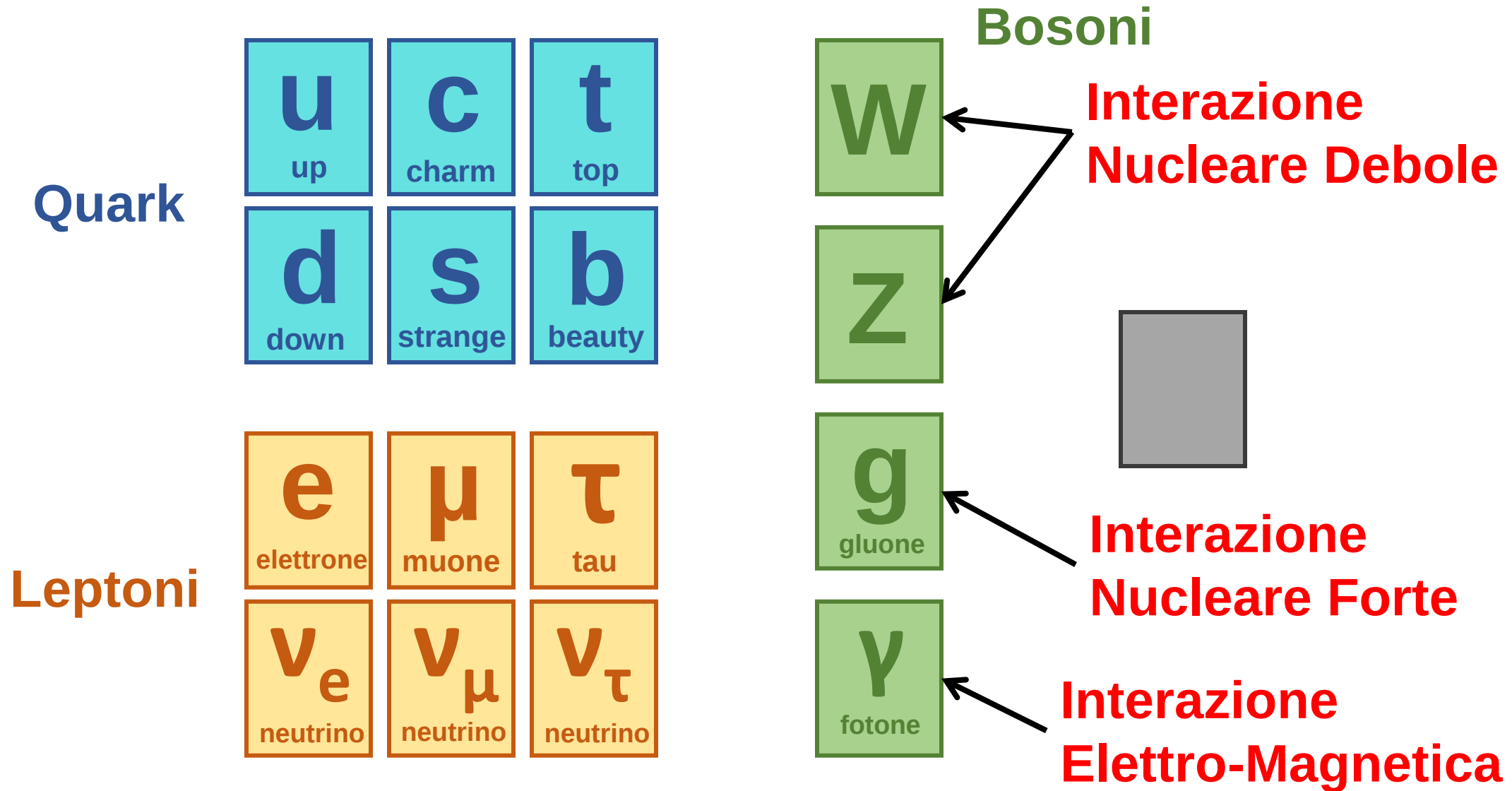
$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$



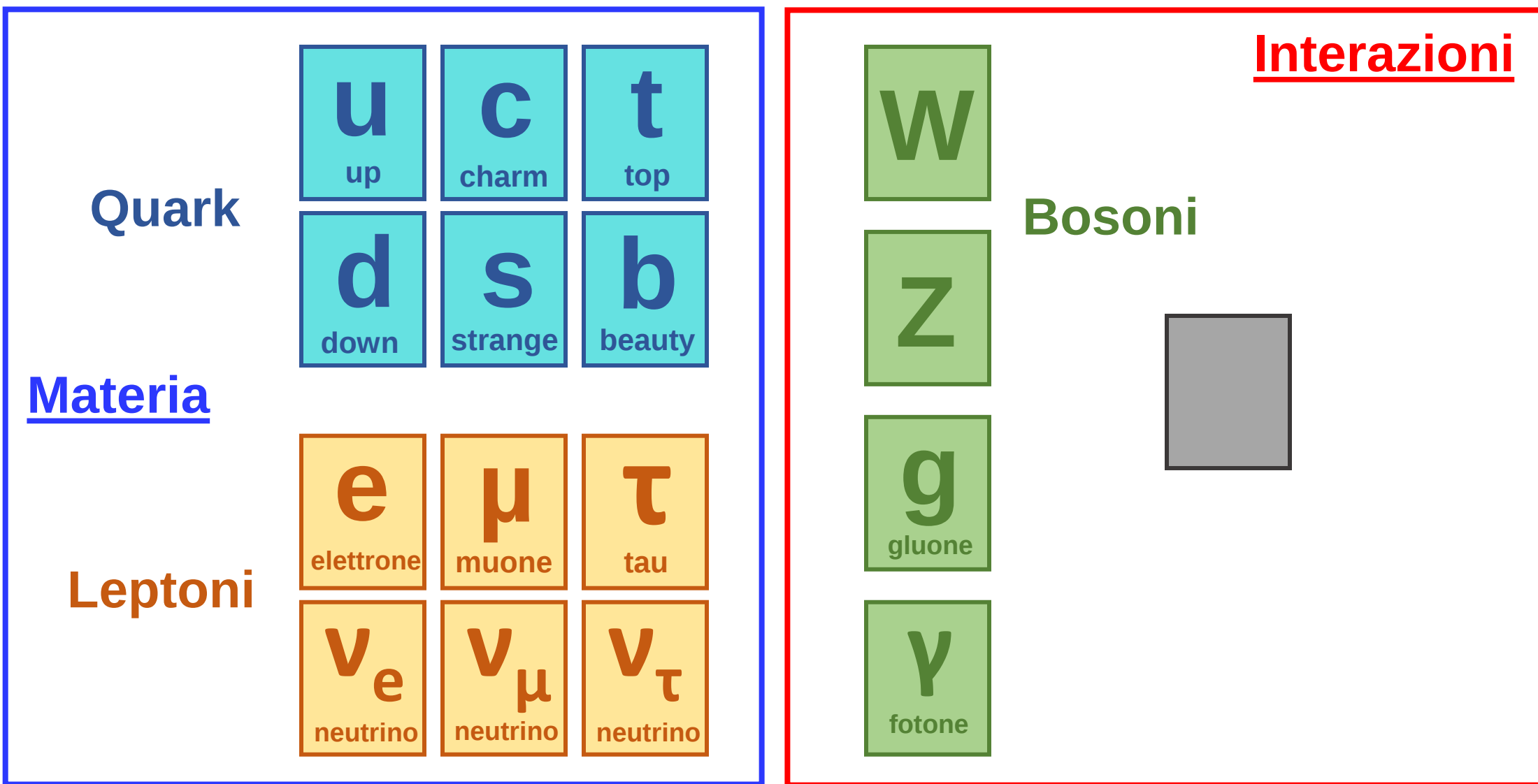
• Interazione Nucleare Forte



Fisica: Modello Standard



Materia e Interazioni



Materia ... e ... Anti-Materia

Quark

u up	c charm	t top
d down	s strange	b beauty

Leptoni

e elettrone	μ muone	τ tau
ν_e neutrino	ν_μ neutrino	ν_τ neutrino

Anti
Quark

ū up	c̄ charm	t̄ top
d̄ down	s̄ strange	b̄ beauty

Anti
Leptoni

e⁺ positrone	μ⁺ muone	τ⁺ tau
ν̄_e neutrino	ν̄_μ neutrino	ν̄_τ neutrino

Elettrone



-



Eletttrone

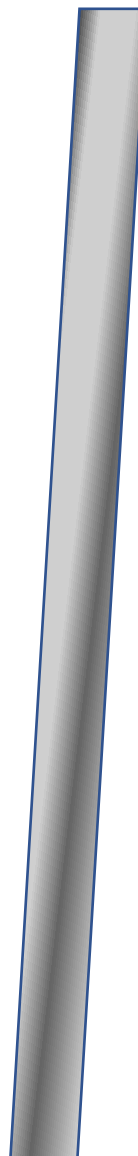


-



+

Anti-Eletttrone



Eletttrone



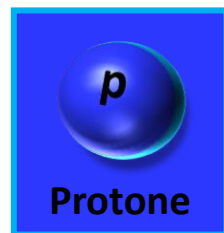
-



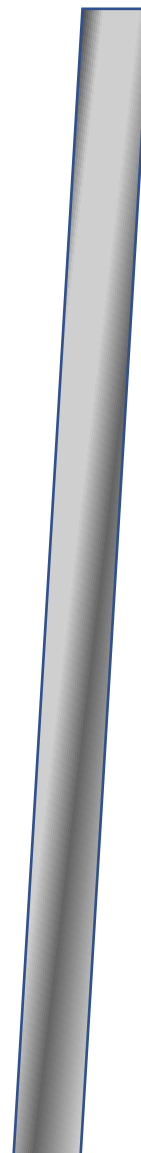
+

Anti-Eletttrone

Protone



+



Eletttrone



-



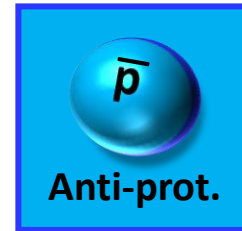
+

Anti-Eletttrone

Protone

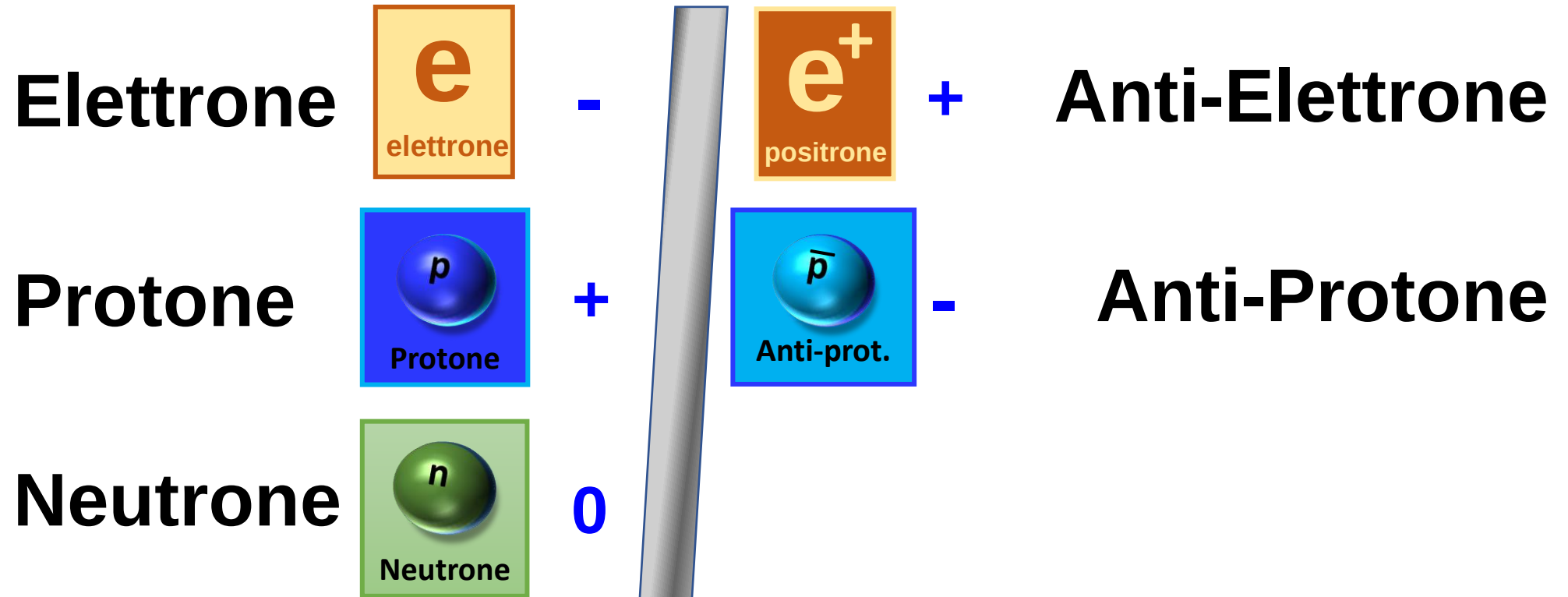


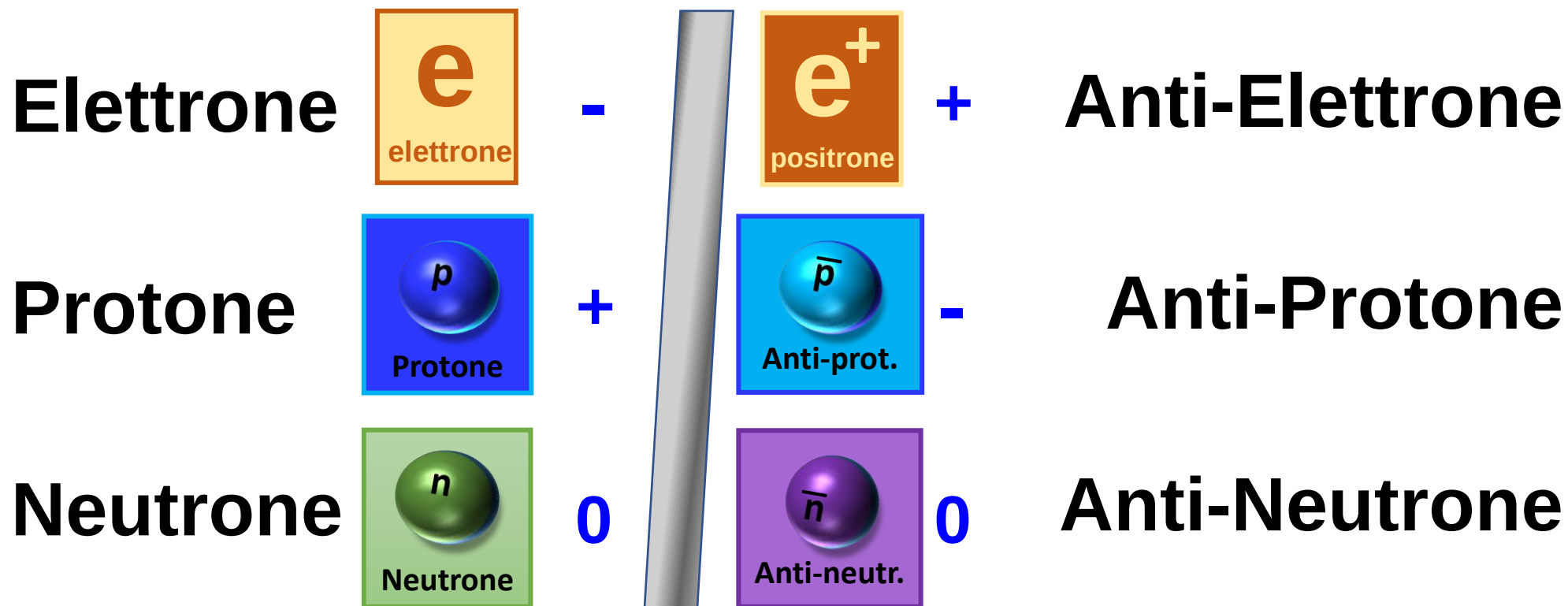
+

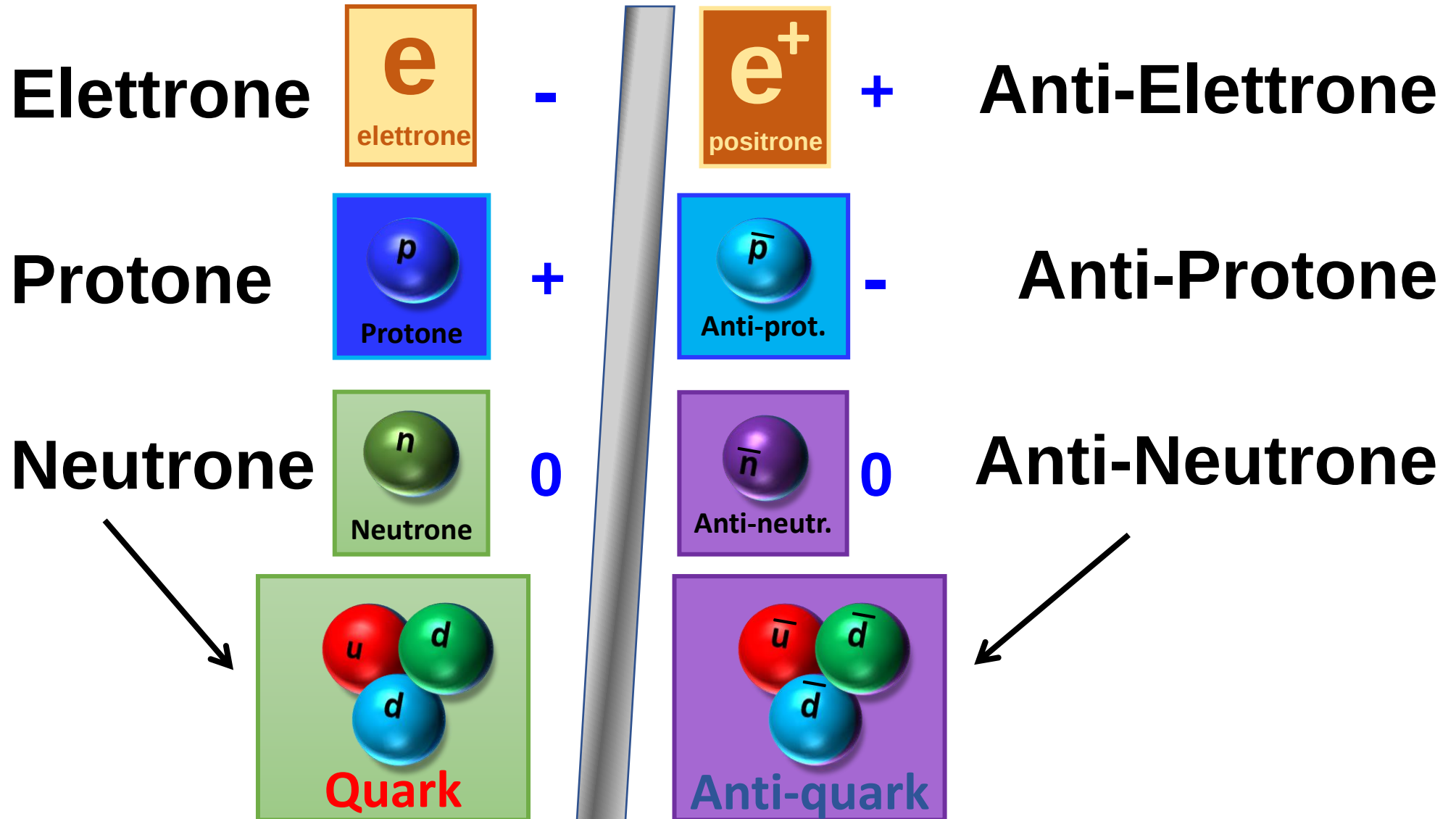


-

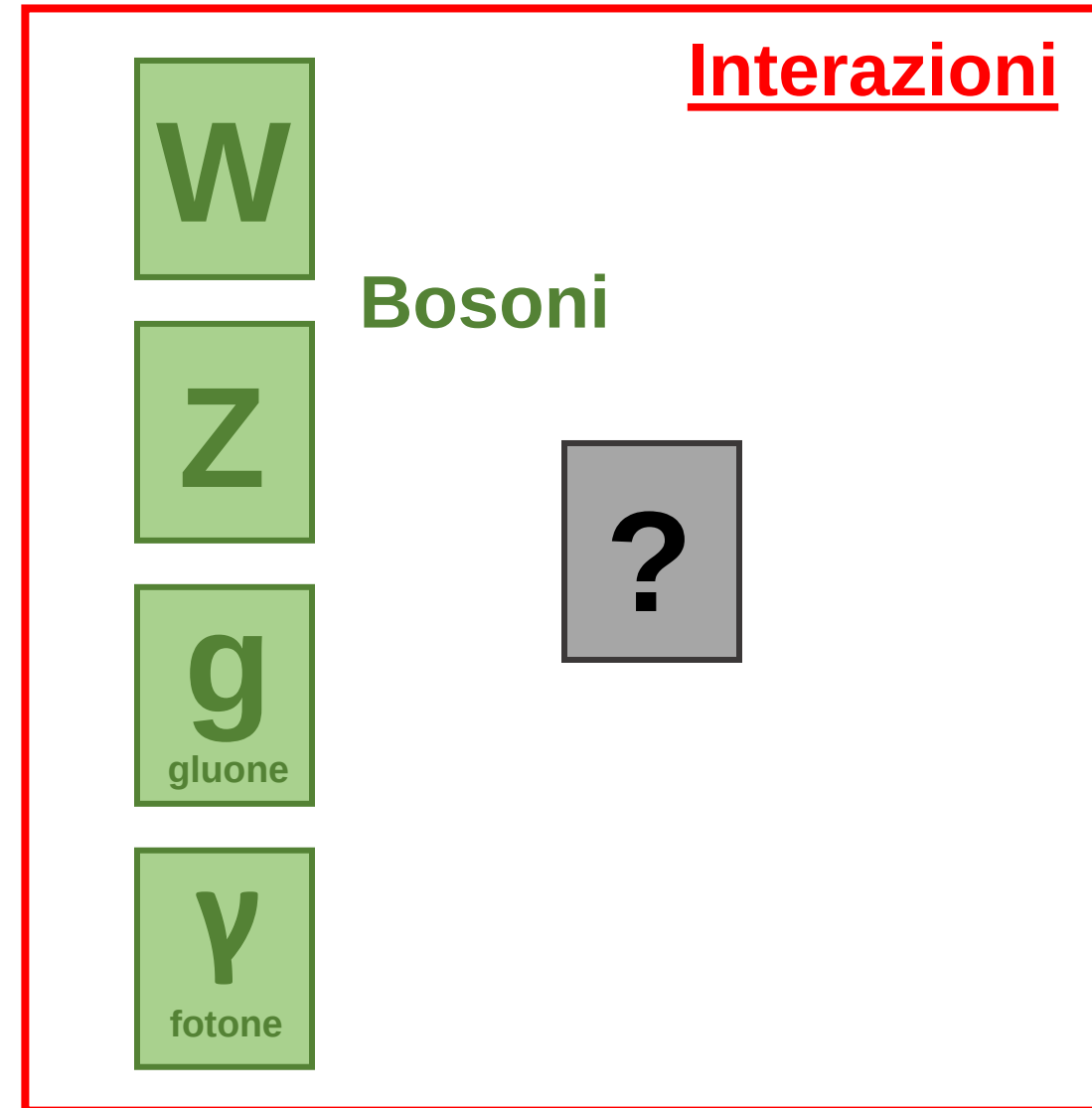
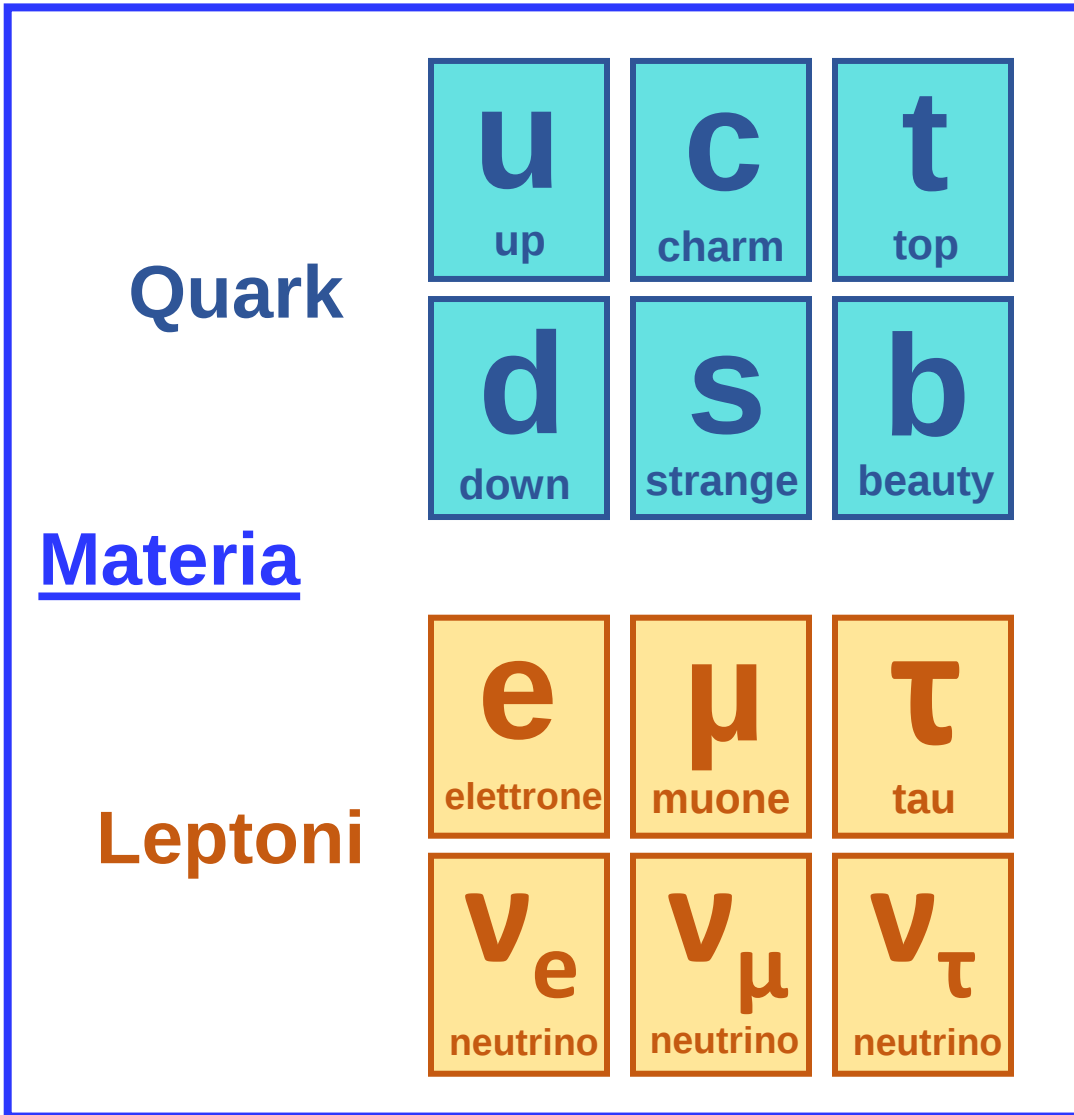
Anti-Protone







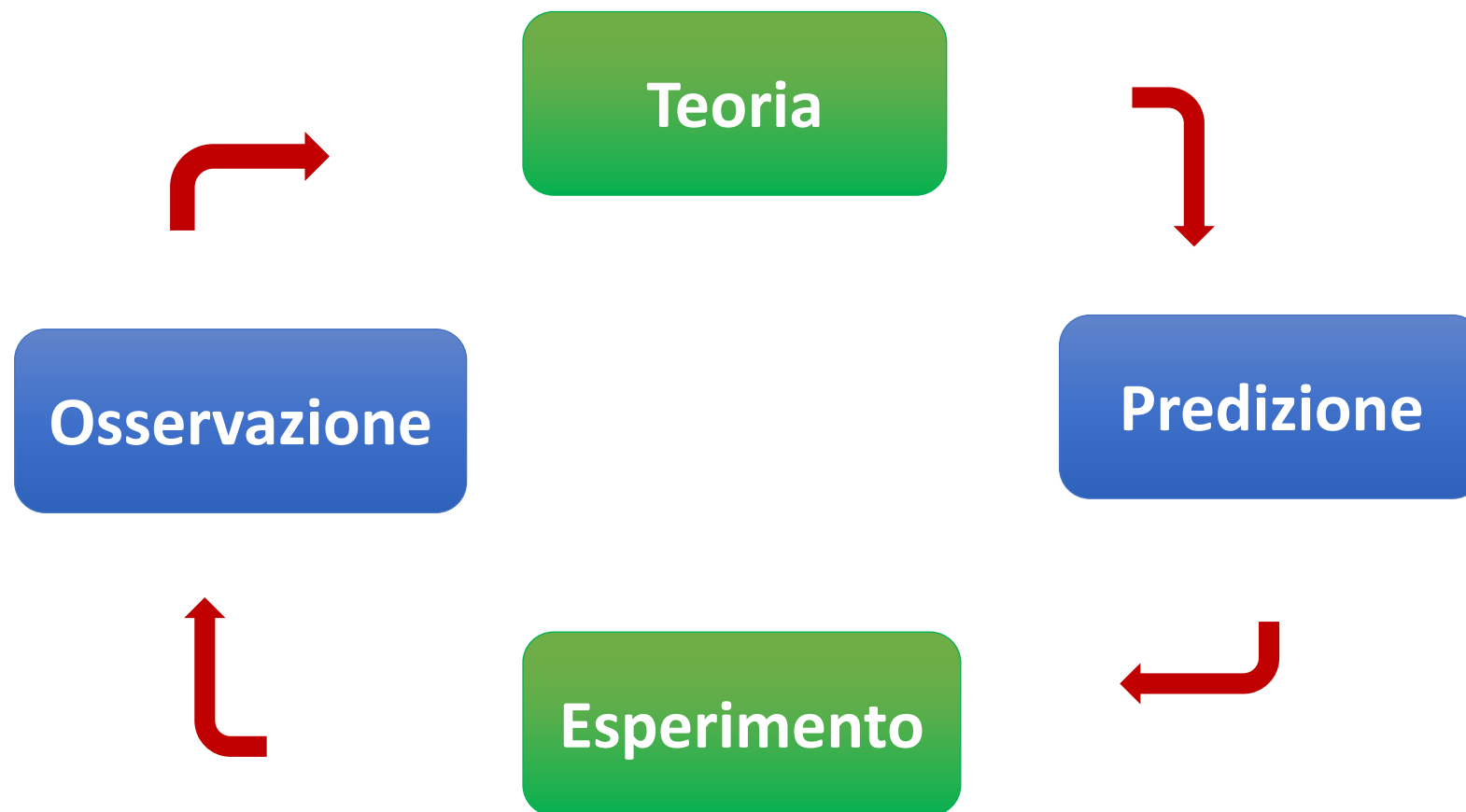
Fisica: Modello Standard



La Fisica delle Particelle

- Cerchiamo:
 - le **particelle elementari** ovvero i componenti fondamentali della materia
 - le **forze fondamentali** ovvero le interazioni tra le particelle elementari
- Come lo facciamo:
 - Con le nostre **osservazioni** costruiamo **modelli (teorie)** che cercano di descrivere tutto quello che ci circonda... la materia che osserviamo con i nostri occhi, l'universo attuale ...fino ai primissimi istanti dopo il Big Bang!
 - Realizziamo **esperimenti** per verificare le **predizioni** delle nostre teorie, nella speranza di trovare conferma o qualcosa di inaspettato e nuovo!

Metodo Scientifico



La ricerca di una nuova teoria

- A metà del 1800 i fisici iniziano a collegare i fenomeni elettrici a quelli magnetici
 - 1865 Maxwell: equazioni del campo elettro-magnetico
 - Interazione elettro-magnetica!
 - Campo elettro-magnetico!
 - Onde elettro-magnetiche!
- Negli anni '60, i fisici avevano:
 - Una valida teoria che descriveva l'interazione elettromagnetica
 - Un modello dell'interazione nucleare debole
- Inoltre, avevano anche identificato profonde somiglianze tra queste 2 interazioni
- Tuttavia, unificare queste 2 teorie avrebbe implicato che le particelle fossero prive di massa
 - Osservazione: In realtà le particelle reali hanno massa!



La teoria: meccanismo Brout-Englert-Higgs

- Nel 1964, alcuni teorici propongono una soluzione a questo rompicapo:
 - Robert **Brout** e Francois **Eglert** (a Bruxelles)
 - Peter **Higgs** (a Edimburgo)
- Modello chiamato “meccanismo **Brout-Englert-Higgs**” (BEH):
 - Riesce a dare una massa alle particelle elementari
 - Conserva la struttura delle interazioni originali
 - Effettua delle previsioni significative
- Previsioni (1964):
 - Interazione elettromagnetica è mediata dai fotoni (privi di massa): verificato!
 - Interazione debole è mediata da particelle pesanti: **bosoni W e Z, scoperti al CERN (1983)**
 - Un nuovo campo con un ulteriore bosone: **bosone Higgs, scoperto al CERN (2012)**
- La scoperta del Bosone di Higgs è una delle scoperte più significative degli ultimi anni!
 - Realizzata grazie all'**acceleratore Large Hadron Collider** e agli **esperimenti ATLAS e CMS**

Fisica delle particelle: Modello Standard

Quark

u up	c charm	t top
d down	s strange	b beauty

Leptoni

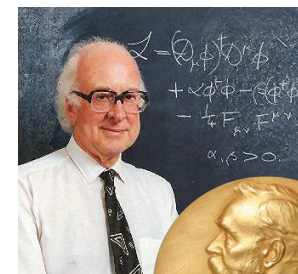
e elettrone	μ muone	τ tau
ν_e neutrino	ν_μ neutrino	ν_τ neutrino

Bosoni

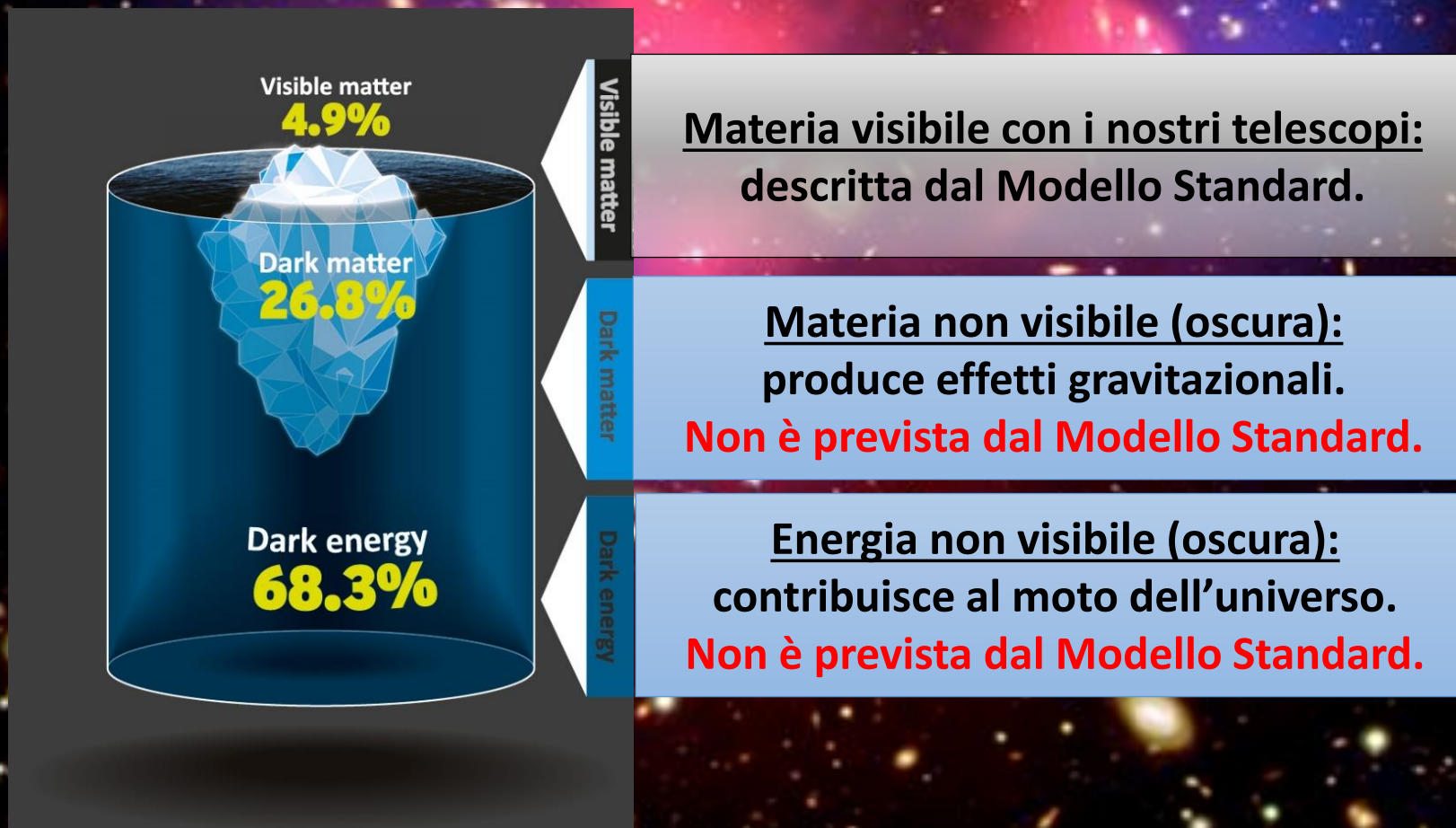
W
Z
g gluone
γ fotone



Higgs



Tutto qui? C'è altro da scoprire?



CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

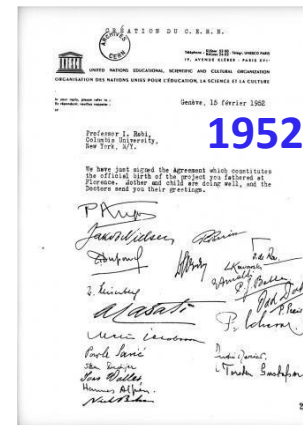
- Alla fine della seconda guerra mondiale, gli scienziati europei erano per lo più emigrati negli Stati Uniti d'America
- 1949, conferenza dell'ONU: Luis De Broglie, francese, raccomandò la creazione di un istituto di ricerca europeo
- 1950, conferenza dell'UNESCO: Isidor Rabi, europeo emigrato, incoraggiò la creazione dell'istituto europeo
- 1951, nelle successive riunioni, viene fondato il Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (C.E.R.N.)



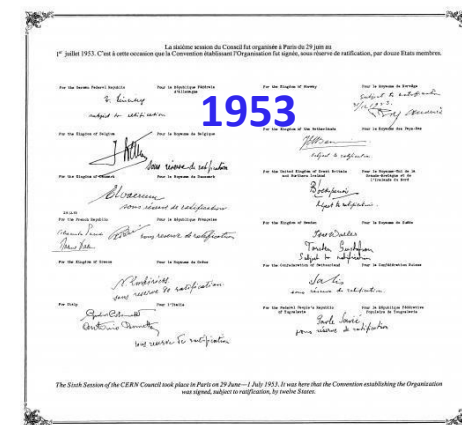
1940-45



1951



1952



1953

Sur le terrain du futur institut nucléaire



1953



1954

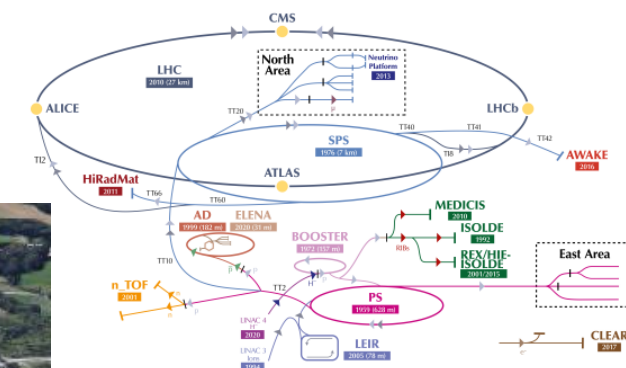
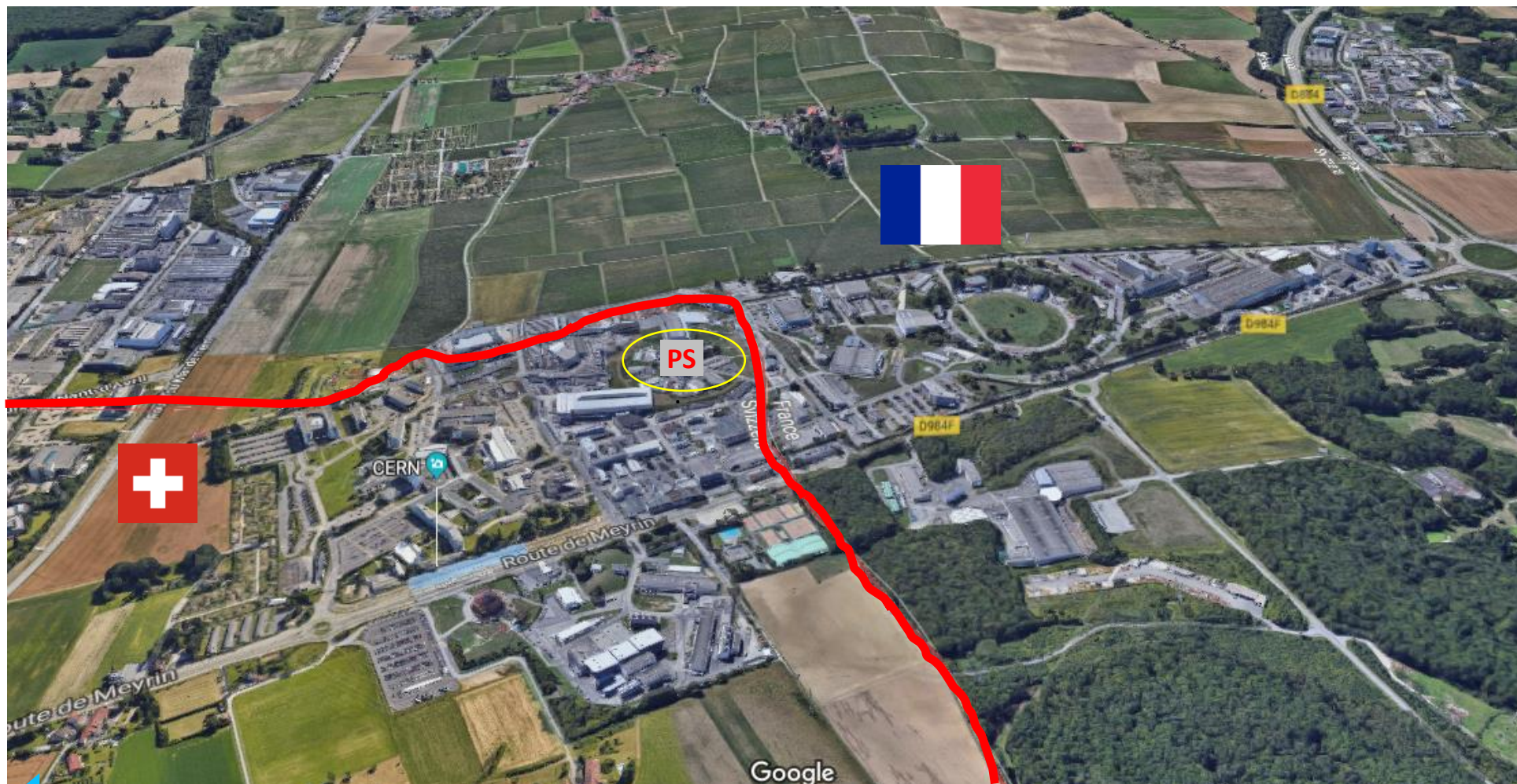


1957

Il resto
è
storia...

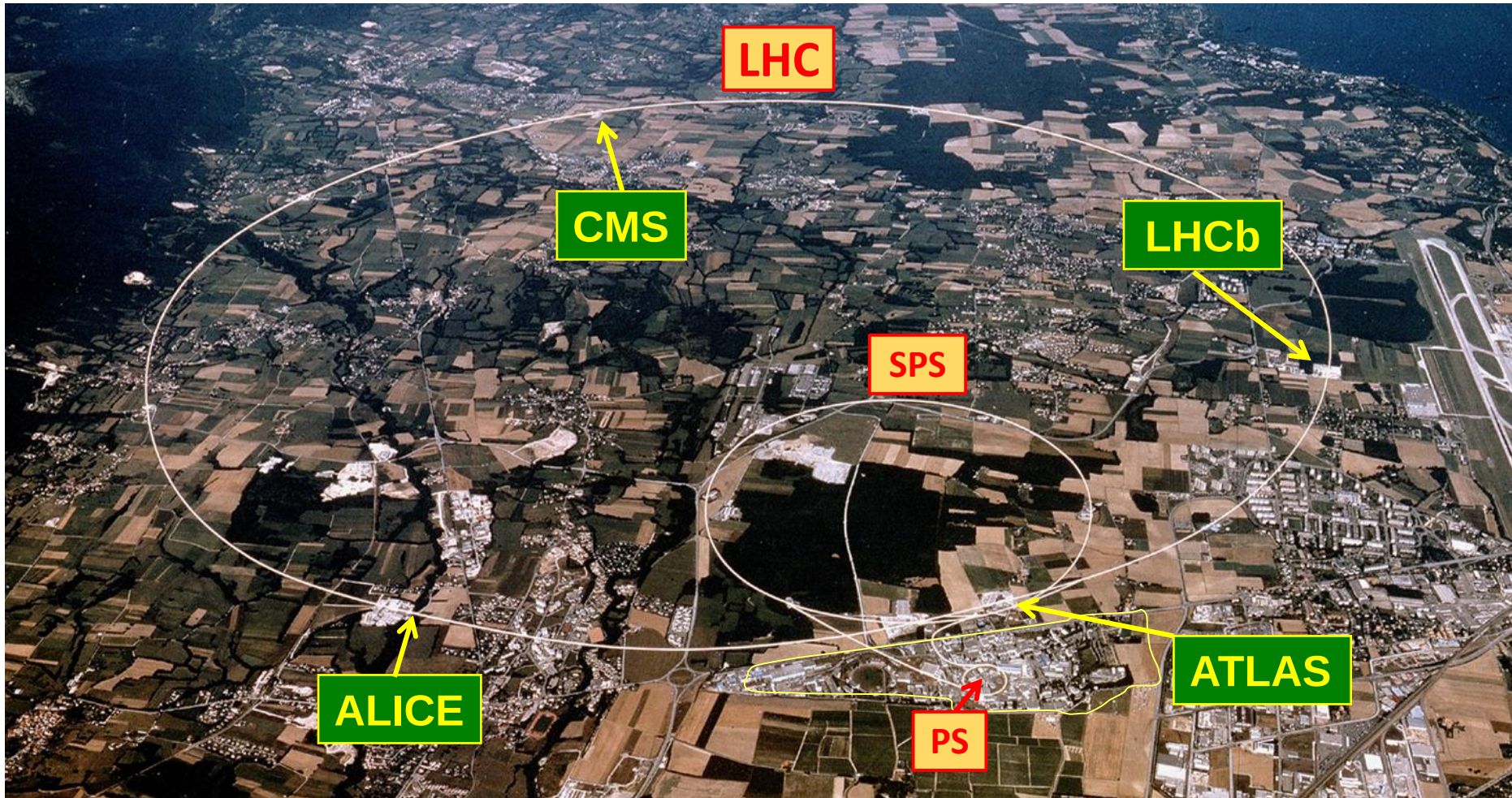
CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

- Direttore Generale: Fabiola Gianotti 
- Ricercatori associati: 15'000
 - 15% italiani: nazione con più persone
- 160 ettari (due campus principali)
- 700 edifici
- 54 km di strade ... 65 km di tunnel



LHC: Large Hadron Collider

- **Large:** il più grande acceleratore di particelle: 27 km di circonferenza
- **Hadron:** accelerazione di adroni, ovvero principalmente protoni, ma anche nuclei (Pb, a volte O, Xe, ...)
- **Collider:** le collisioni a energia più alta: protone-protone @ 13.6 TeV, Pb-Pb @ 5.36 TeV

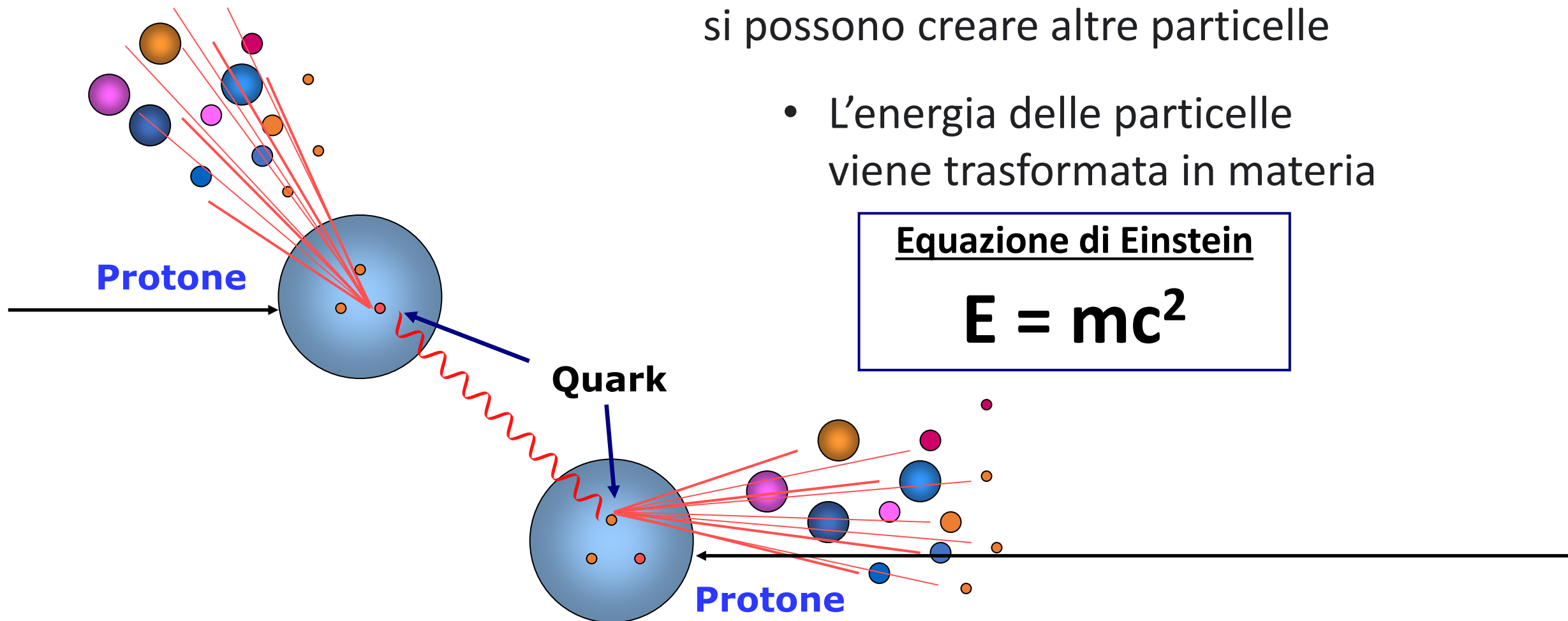


L'acceleratore



Urti tra particelle

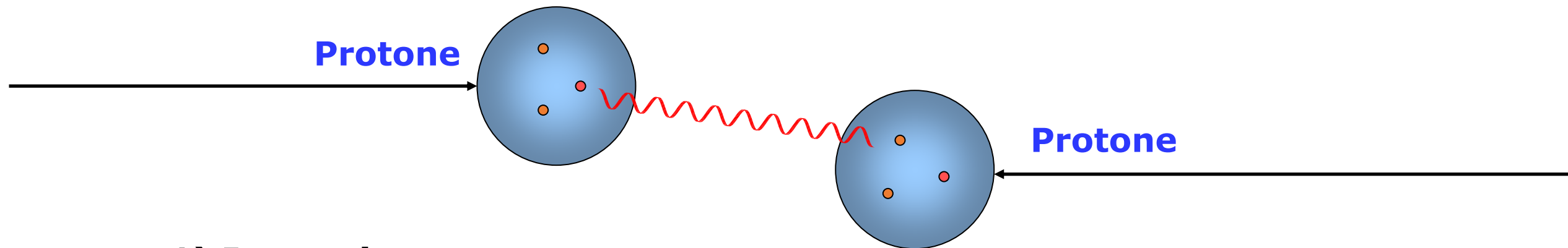
- Attraverso gli urti tra le particelle si possono creare altre particelle
- L'energia delle particelle viene trasformata in materia



Equazione di Einstein

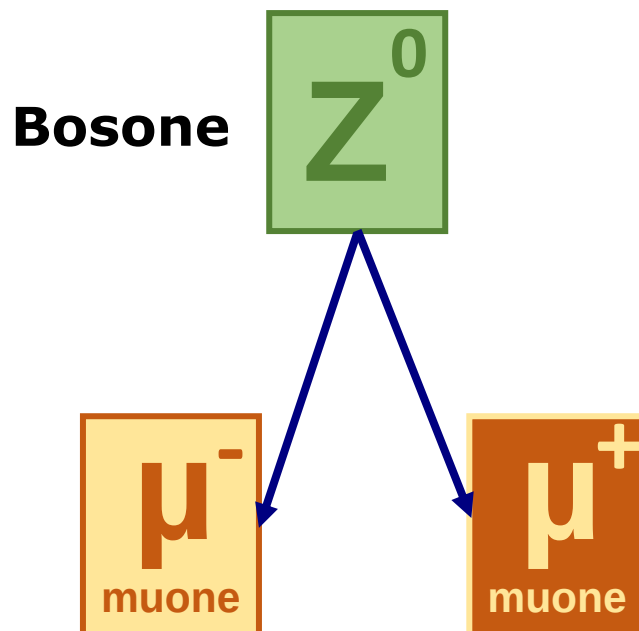
$$E = mc^2$$

Dai protoni ai bosoni: interaz. & decadim.

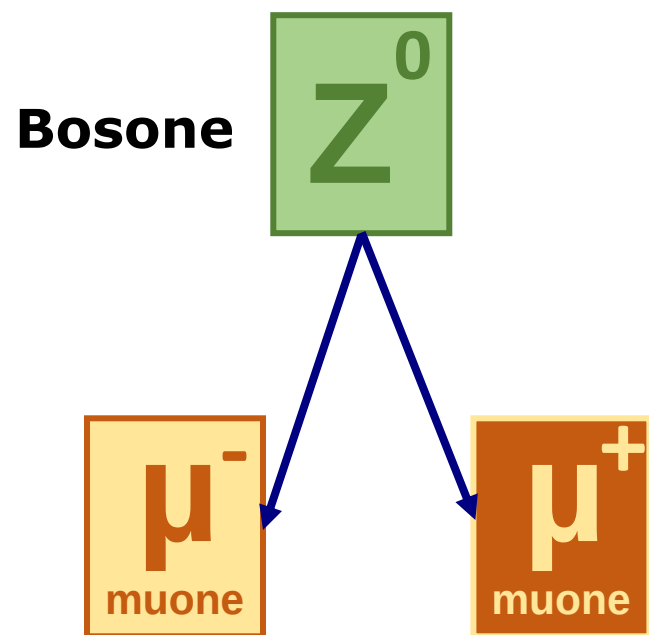


1) Interazione

2) Decadimento



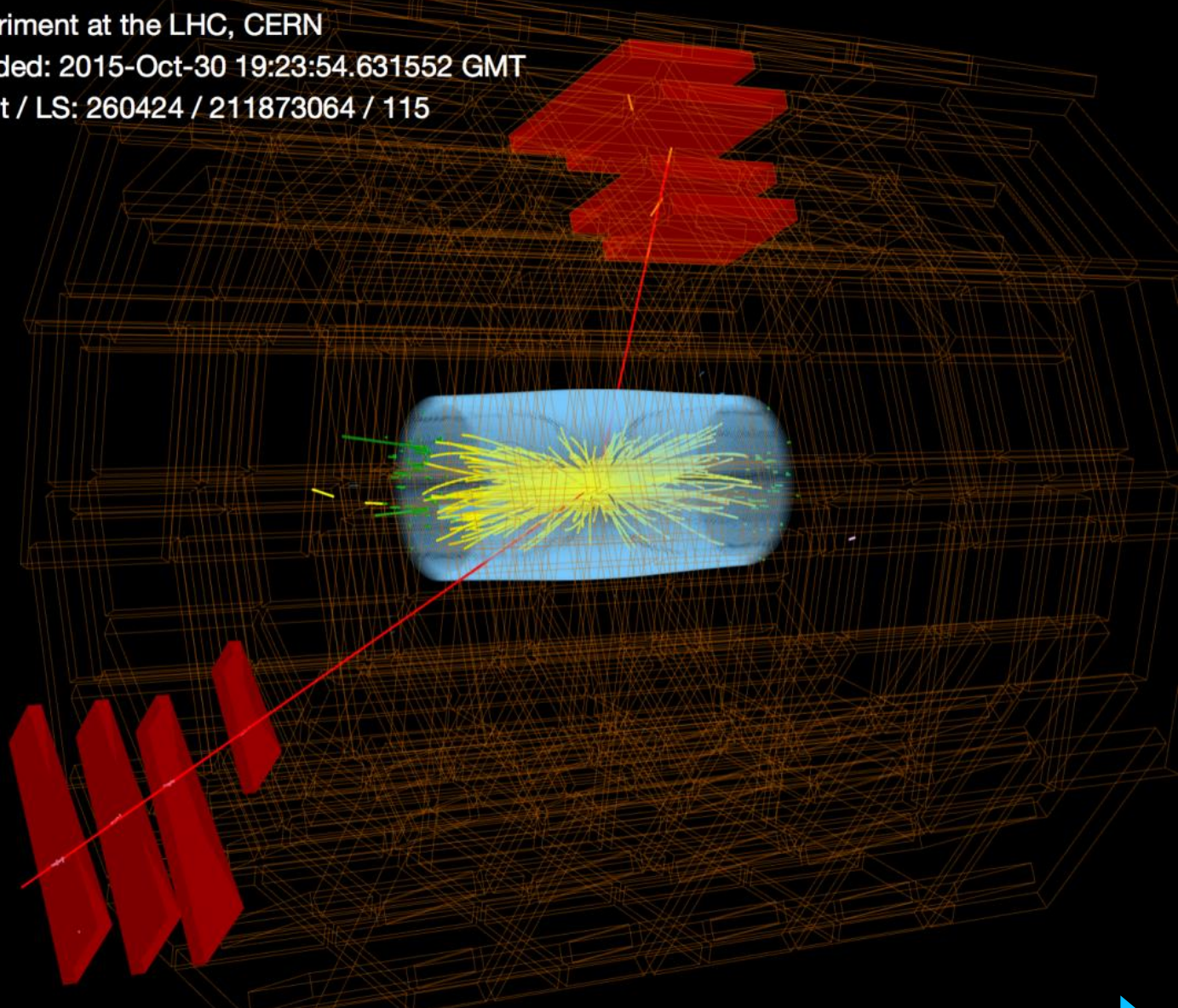
Decadimento $Z \rightarrow \mu \mu$



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2015-Oct-30 19:23:54.631552 GMT

Run / Event / LS: 260424 / 211873064 / 115



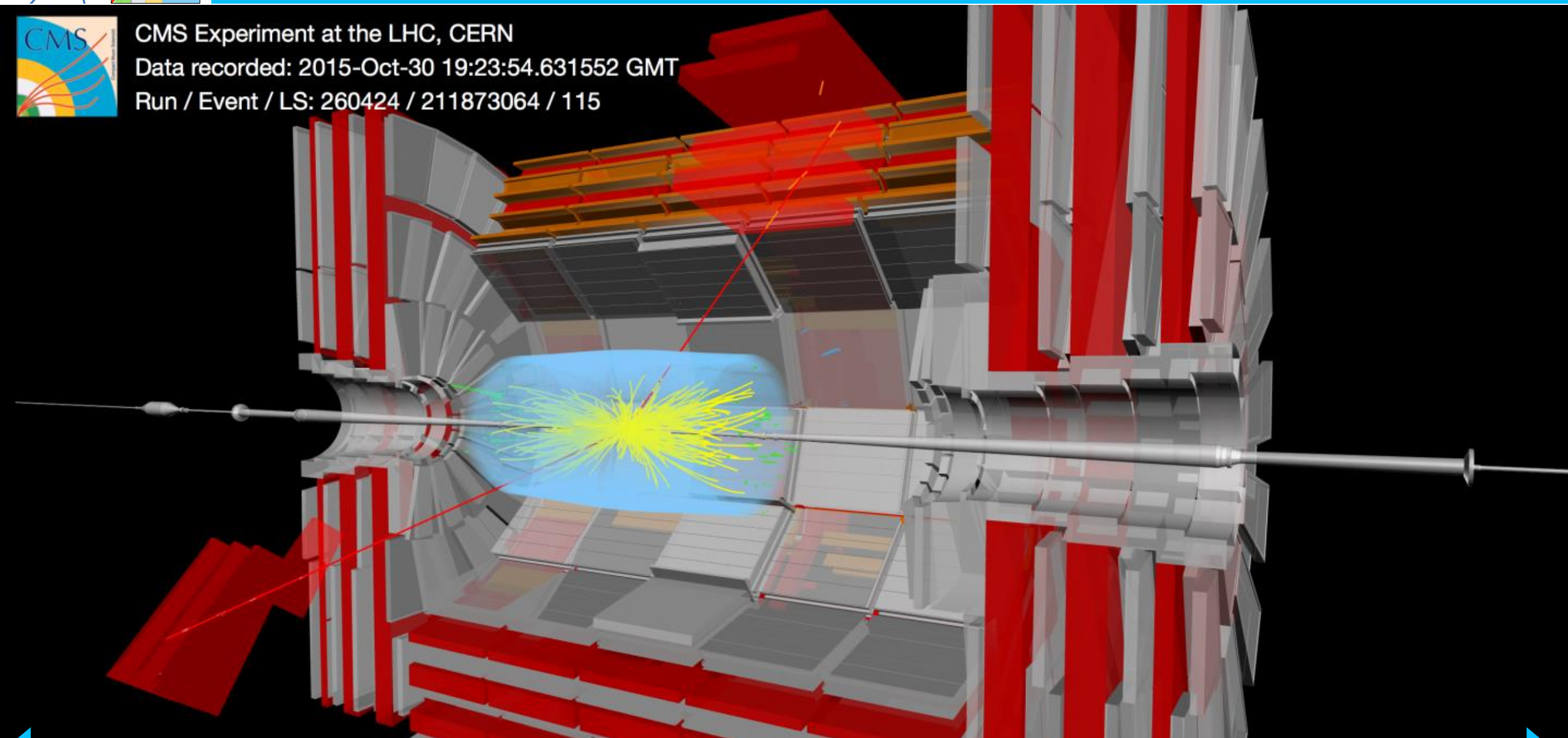
L'esperimento CMS



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2015-Oct-30 19:23:54.631552 GMT

Run / Event / LS: 260424 / 211873064 / 115





Backup

Le collisioni

- I parametri chiave di un acceleratore (collisore) sono:
 - **Energia massima**
 - **Quantità di collisioni (Luminosità)**
- **Maggiore Energia** consente di produrre particelle di massa maggiore
- **Maggiore Luminosità** consente di generare processi molto rari in tempi ragionevoli

Massa protone = 1 GeV

6.8 TeV

Punto di interazione

6.8 TeV

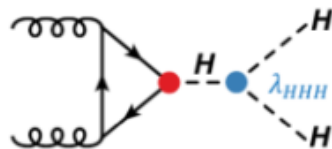
13.6 TeV

2500 Pacchetti

- 100 miliardi di protoni
- 20 cm lunghezza
- 50 μm diametro

LHC → HL-LHC: High-Luminosity-LHC

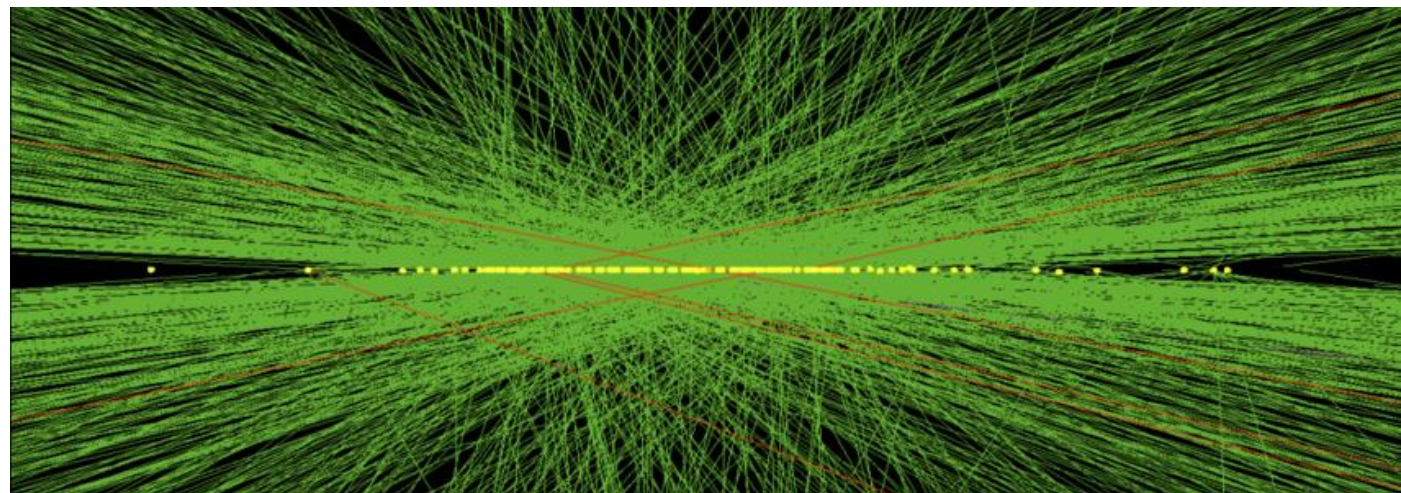
- Alcuni eventi sono rari
- Più collisioni = più eventi rari
 - 2024: circa 50 collisioni ogni 25 ns
 - 2 miliardi di collisioni al secondo
 - 1 bosone di Higgs ogni ora
 - 1 anno: 10'000 Higgs
- Ci sono eventi ancora più rari
- Molto interessante studiarli!
- Necessario aumentare luminosità
 - 50 → 200 collisioni ogni 25 ns
 - Estremamente più complesso!
 - Aggiornare/cambiare rivelatori
 - Migliorare algoritmi



78 collisioni ricostruite in CMS

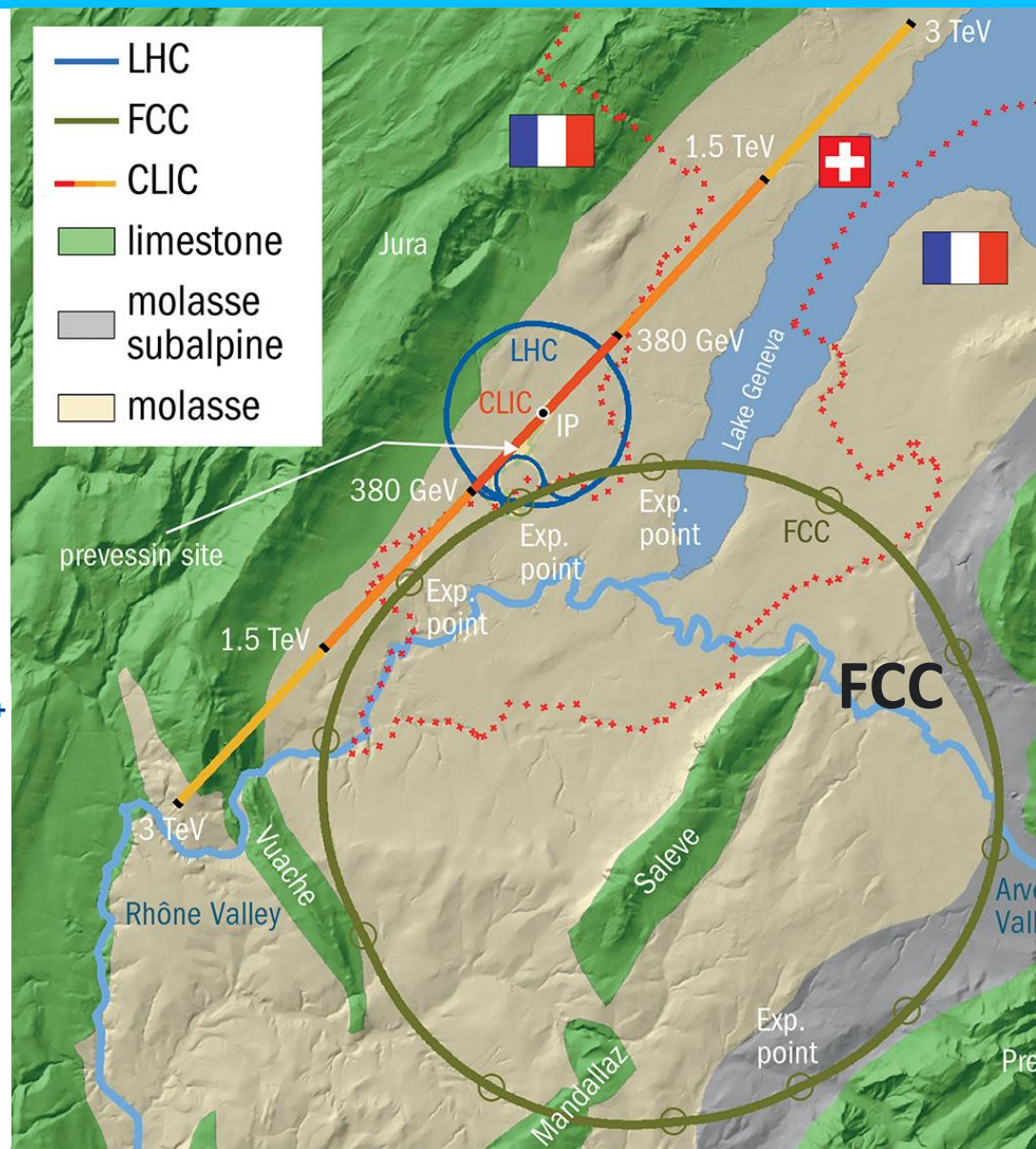
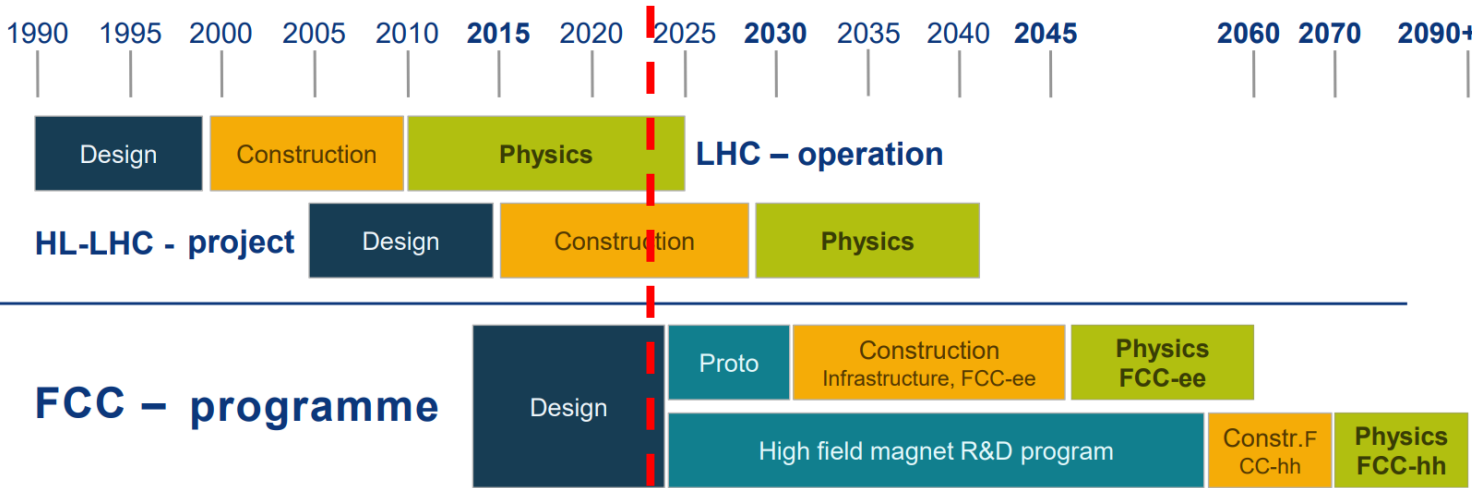


140 collisioni (simulazione)



FCC: Future Circular Collider (forse)

- LHC finirà le operazioni nel 2025 → poi?
 - 2010-25: LHC
 - 2028-40: HL-LHC → poi?
- Progetto principale: FCC
 - Prevede la costruzione di un nuovo tunnel (5 Mld €)
 - 91 km circonferenza (40 comuni: 30 FRA + 10 CH)
 - 200 m sotto terra (8 caverne, 2 o 4 esperimenti)
 - 2035-45: Costruzione (tunnel, acceleratore, rivelatori)
 - 2045-60: FCC-ee (collisioni elettrone-elettrone)
 - 2070-XX: FCC-hh (collisioni protone-protone)



Decadimento $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu \mu\mu$

