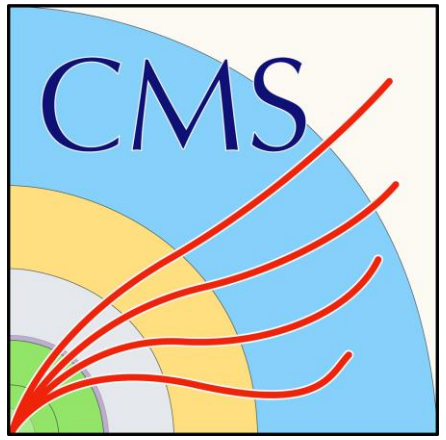


Introduzione alla Fisica delle Particelle

01/03/2024

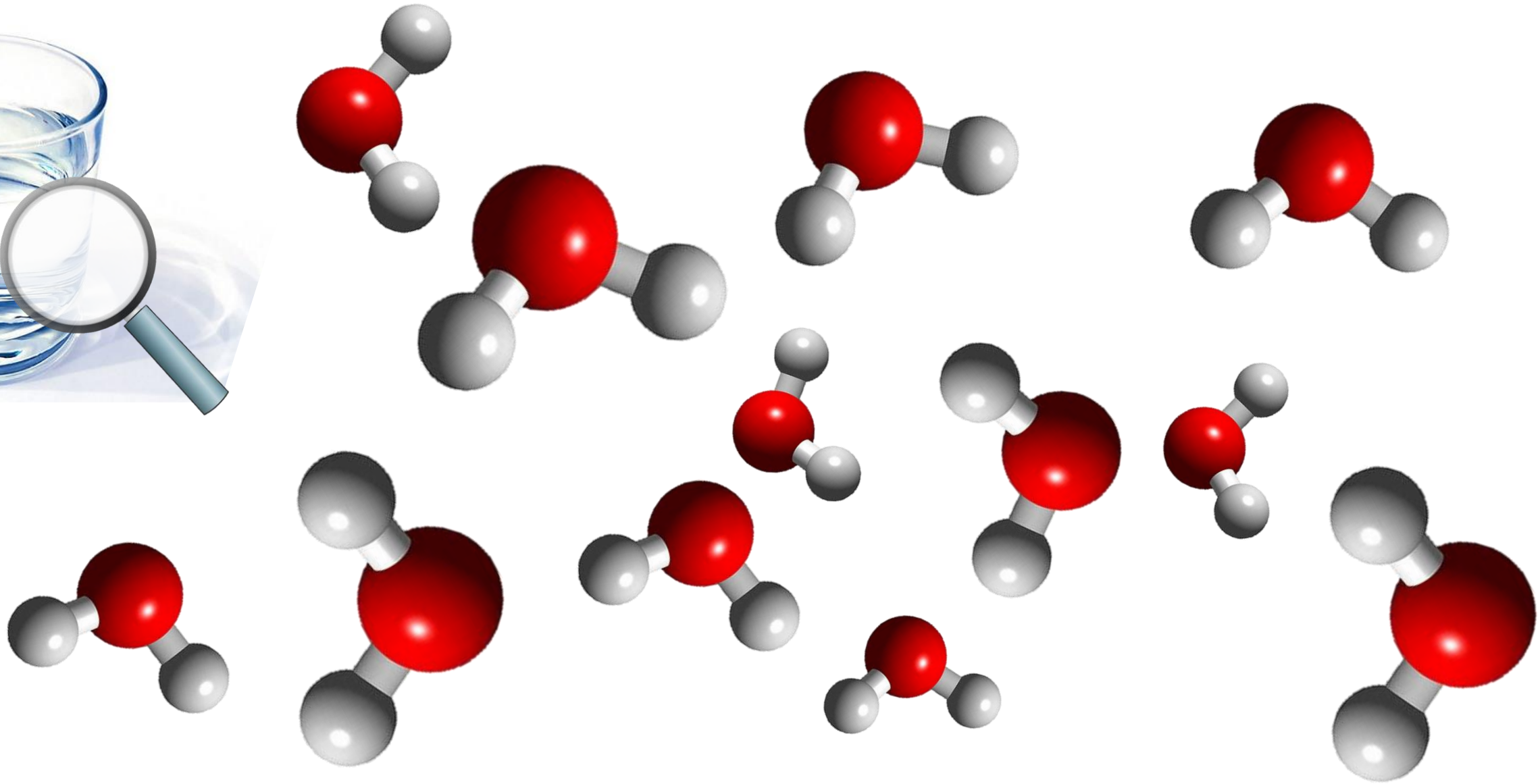
A. Lapertosa

FISICA E ASTRONOMIA
"ETTORE MAJORANA"

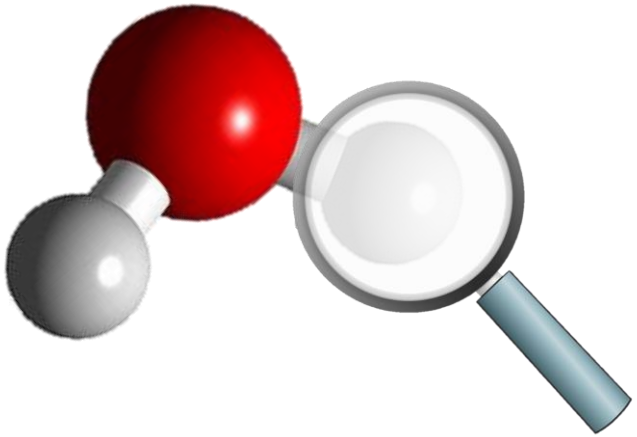
La Materia

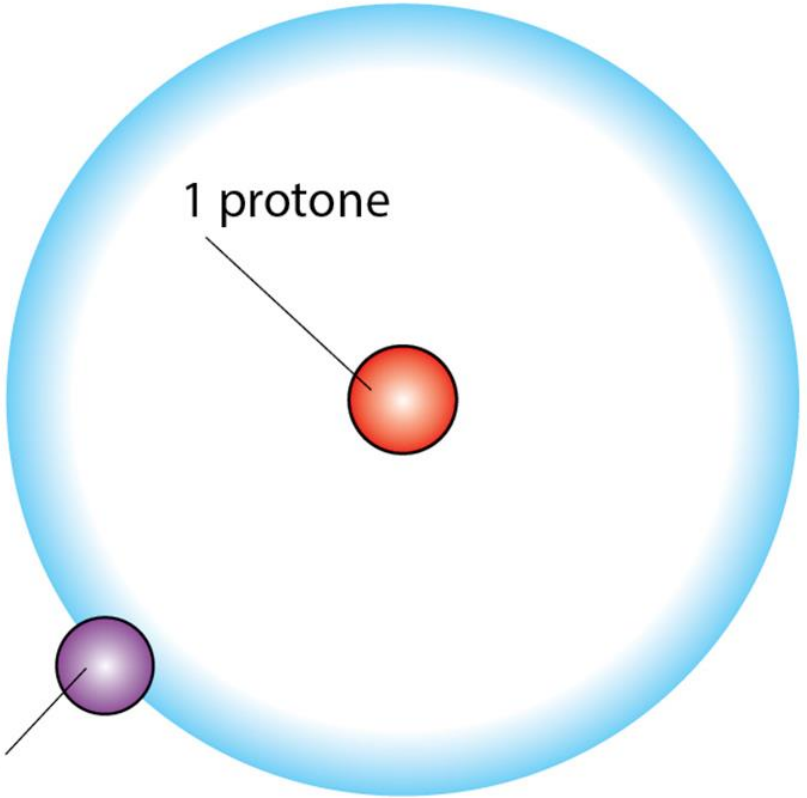
L’acqua

Le molecole



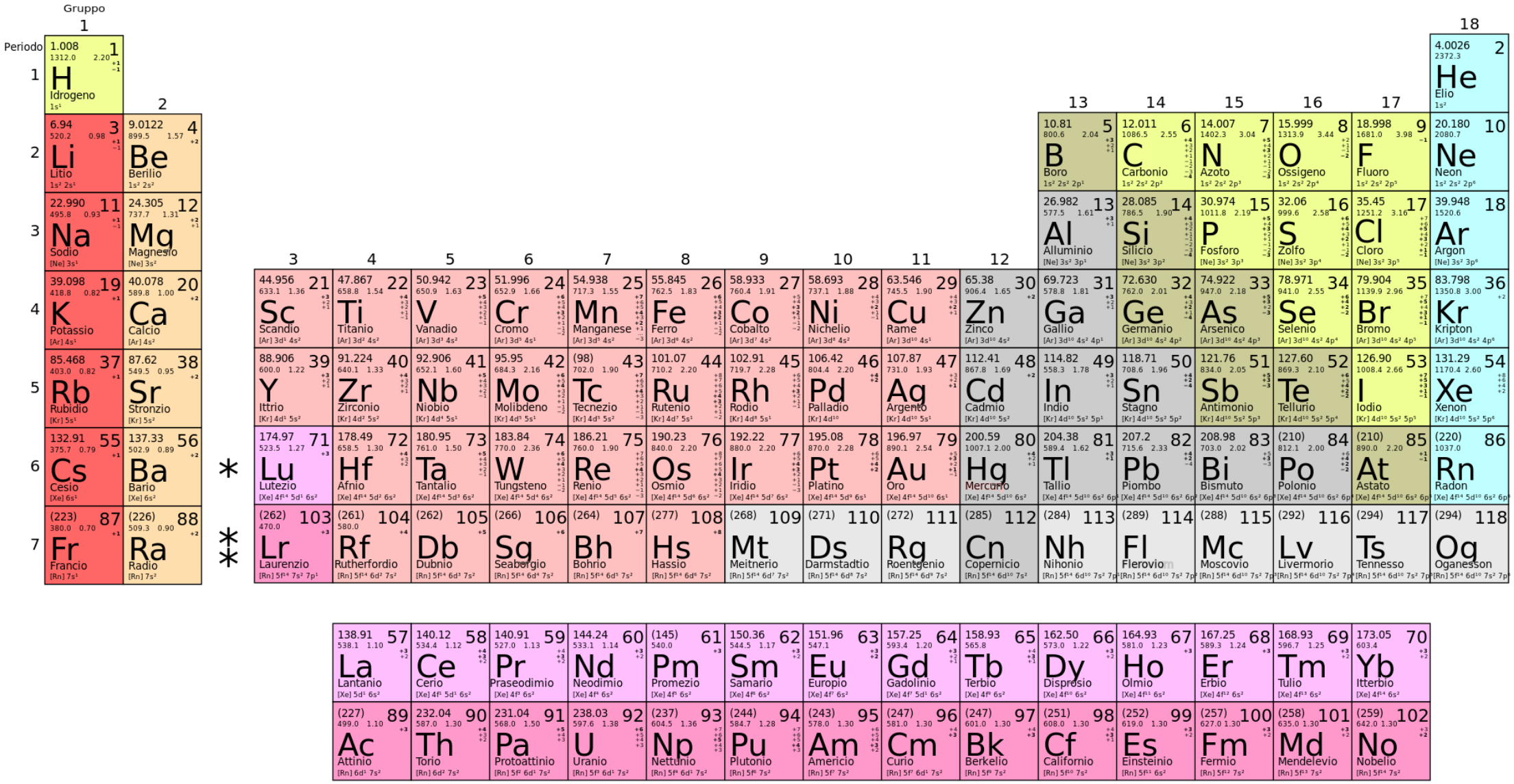
L’atomo



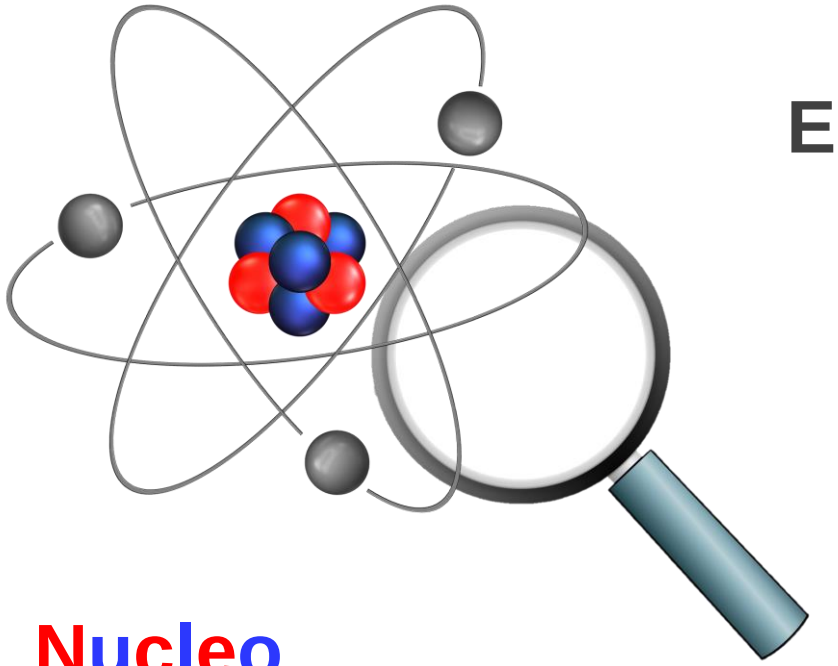


Chimica: Tavola Periodica degli Elementi

- Testo



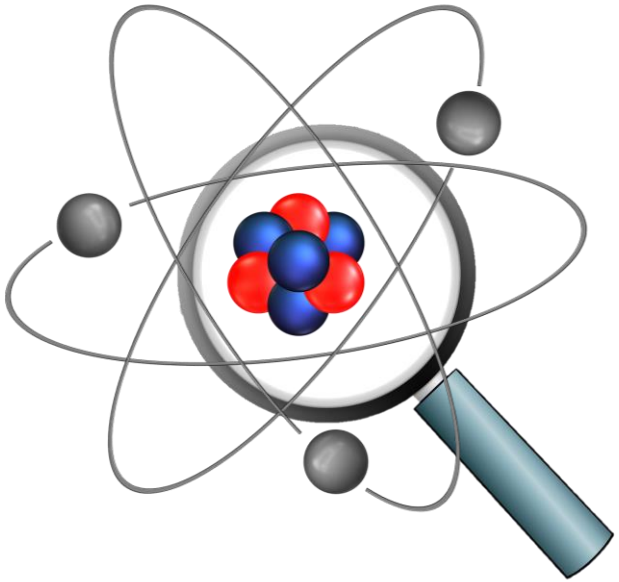
L’atomo

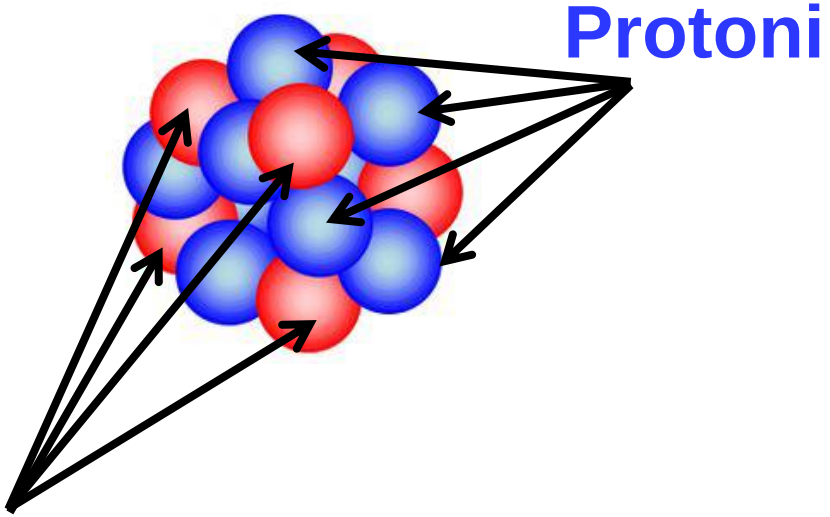


Elettroni

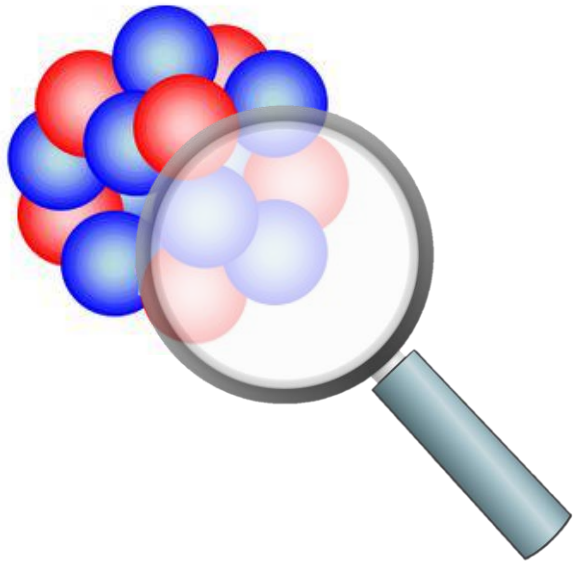
Nucleo

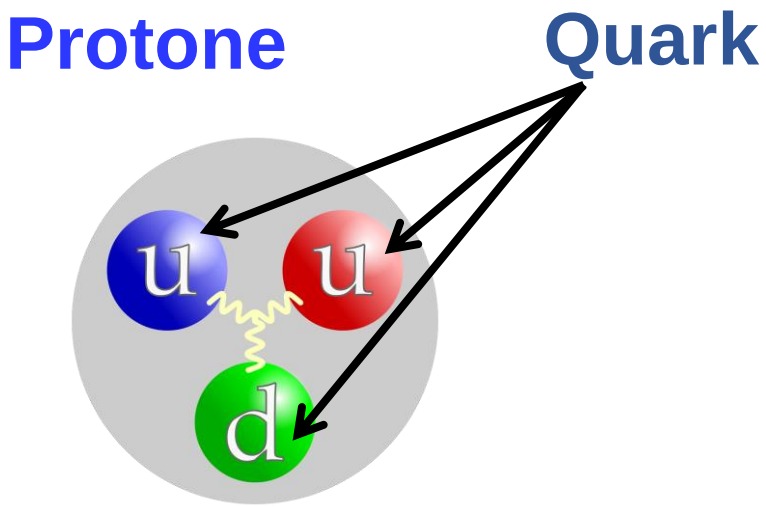
Il nucleo





Il protone





Quark Up, Quark Down, Elettrone

Quark

Le cariche elettriche

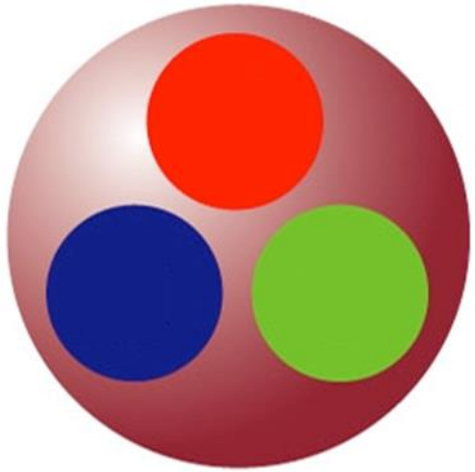
Quark

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

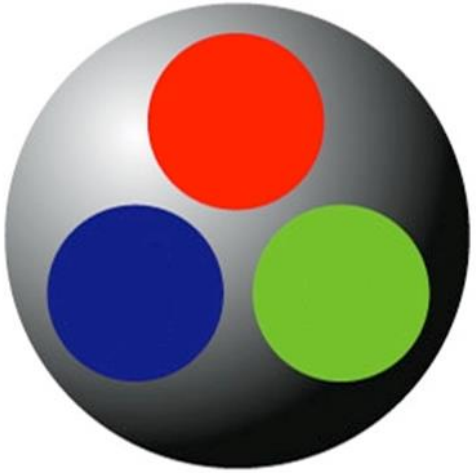
Esercizio: il protone e il neutrone

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

Protone



Neutrone

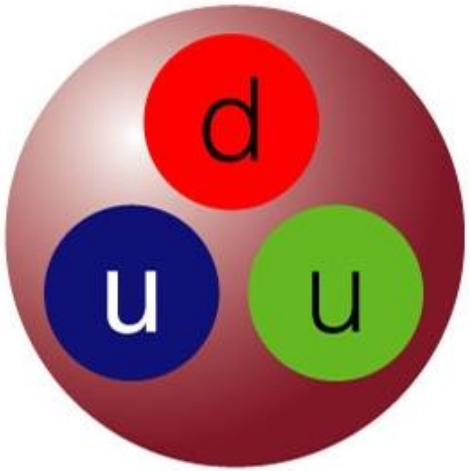


Protone (uud) … Neutrone (ddu)

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

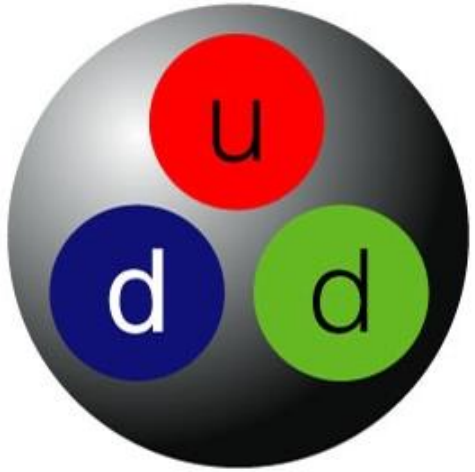
d down $-\frac{1}{3}$

Protone



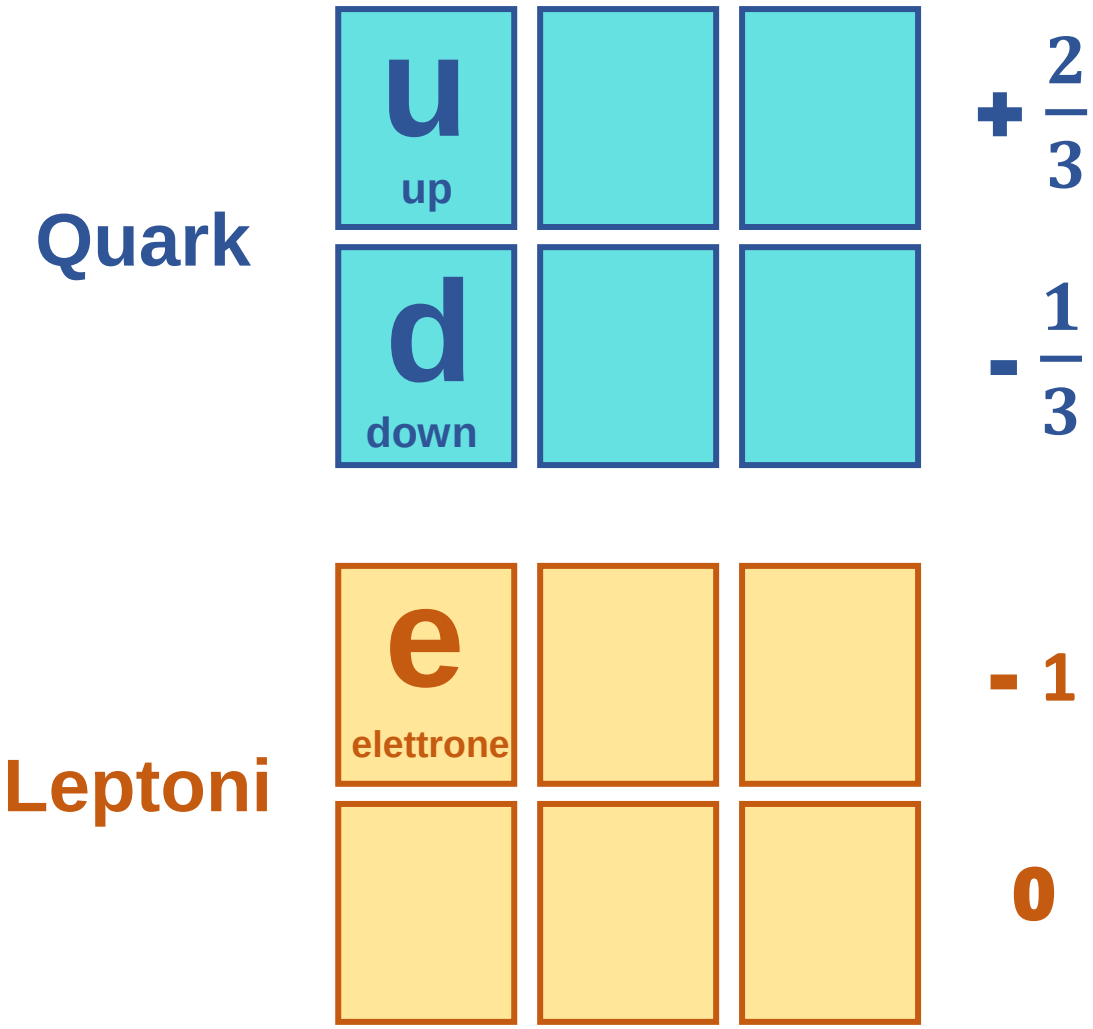
$+2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$

Neutrone

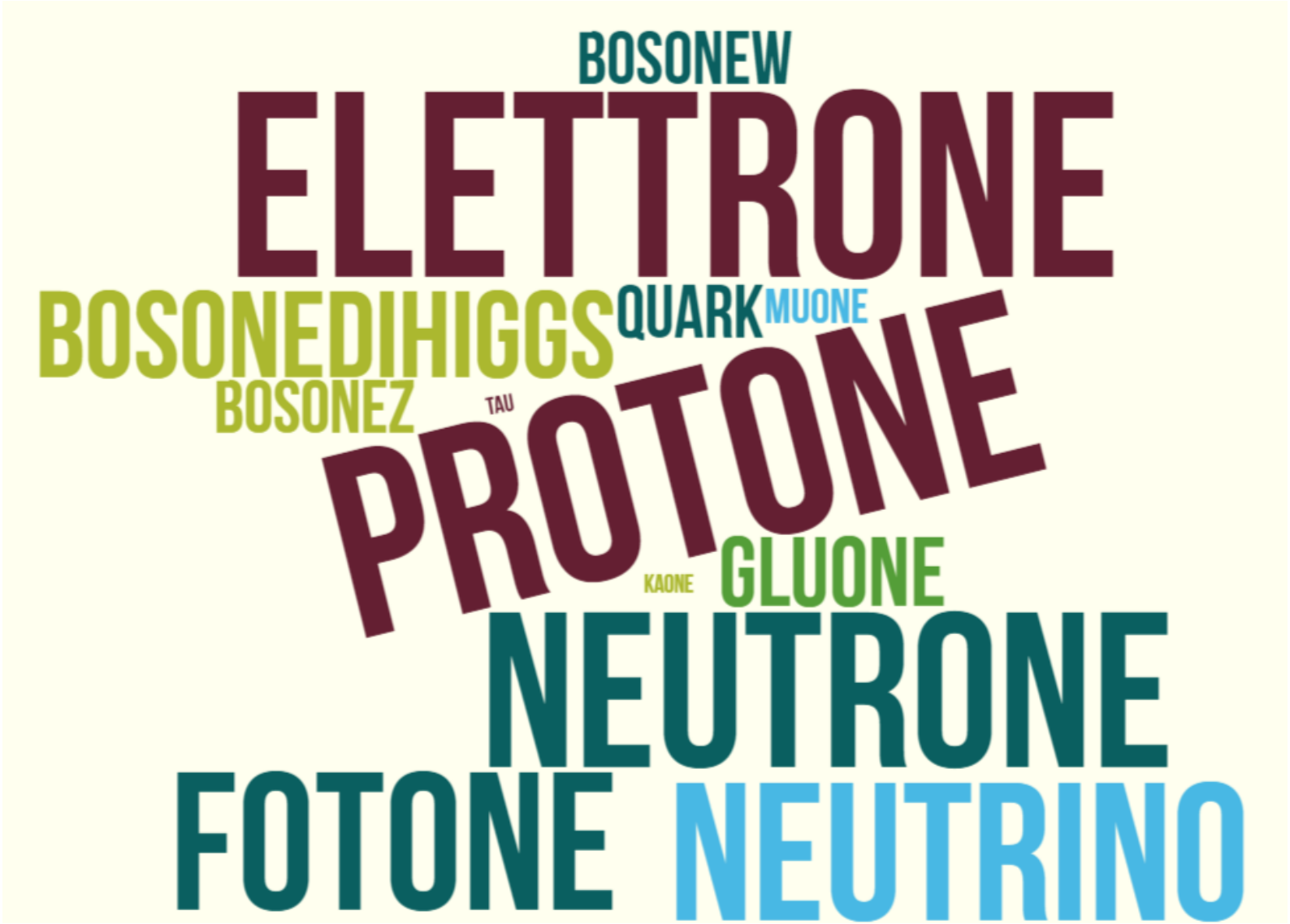


$+2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

Quark e Leptoni



...particelle...


BOSONEW
ELETTRONE
BOSONEDIHIGGS
QUARK
MUONE
BOSONEZ
TAU
PROTONE
KAONE
GLUONE
NEUTRONE
FOTONE
NEUTRINO

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

Materia

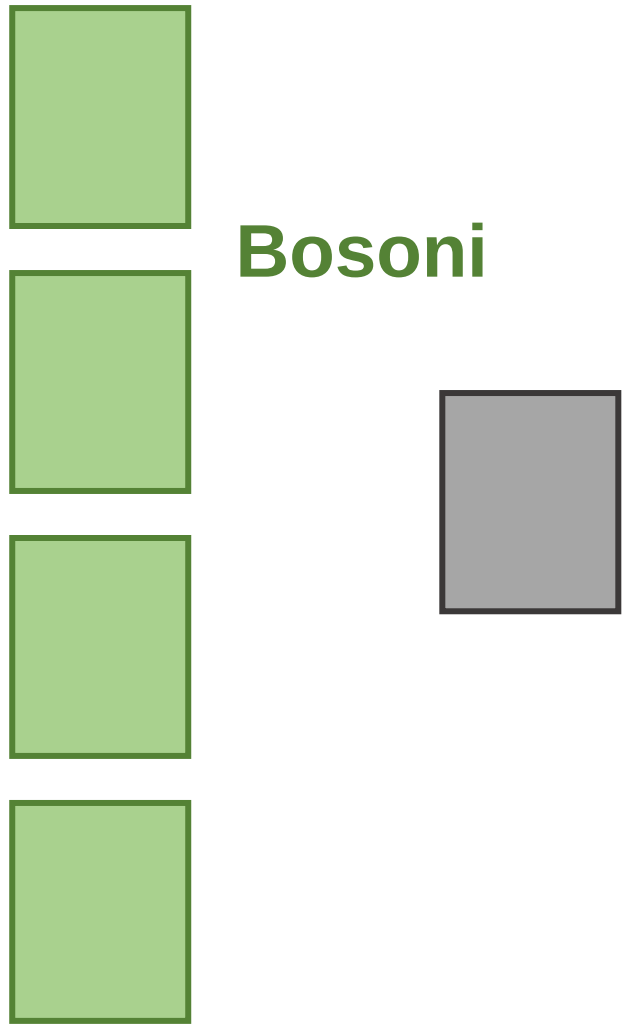
Quark

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

Leptoni

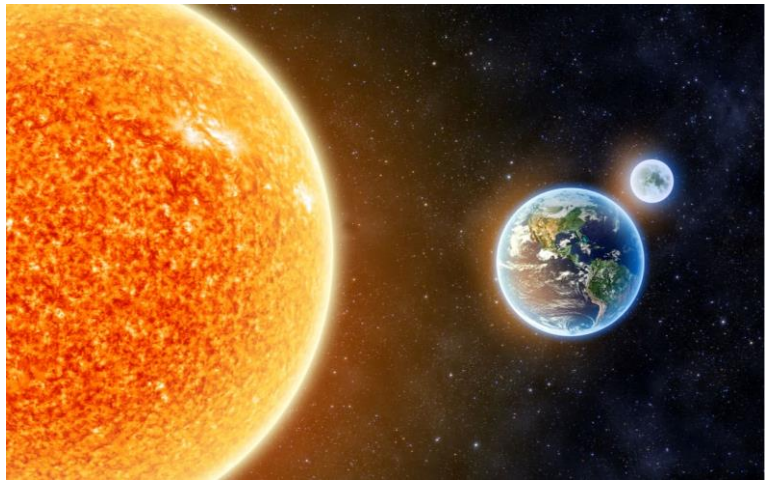
e elettrone	μ muone	τ tau
ν_e neutrino	ν_μ neutrino	ν_τ neutrino

Bosoni



Interazioni: Gravitazionale & Elettr.-Magn.

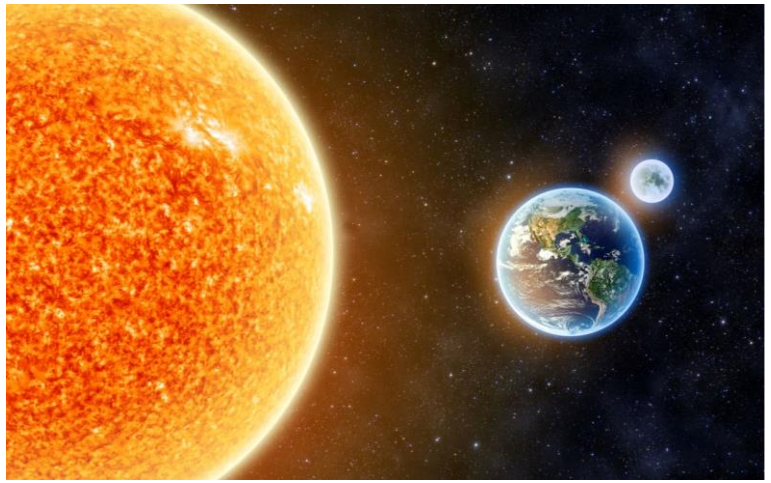
- **Interazione Gravitazionale**



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

Interazioni: Gravitazionale & Elettr.-Magn.

- **Interazione Gravitazionale**



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

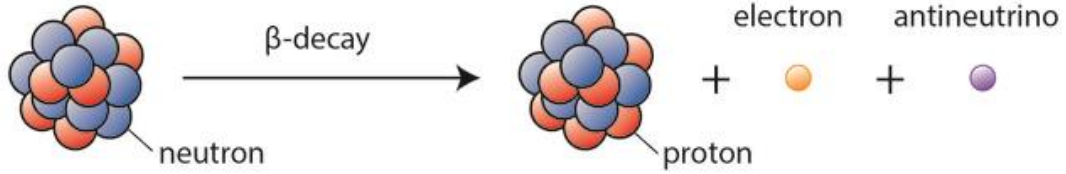
- **Interazione Elettro-Magnetica**

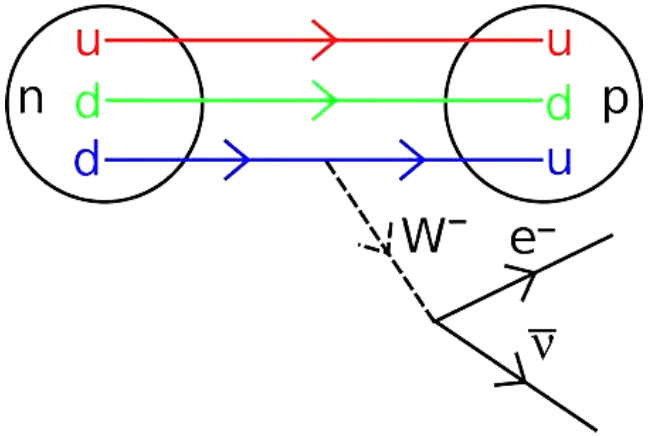
$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

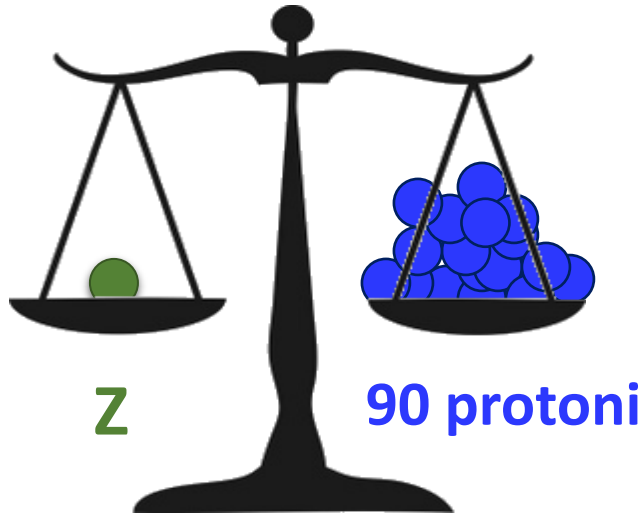
Interazioni: Nucleare Debole e Forte

- **Interazione Nucleare Debole**

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



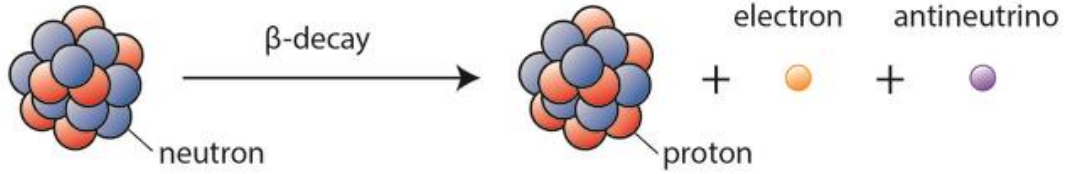


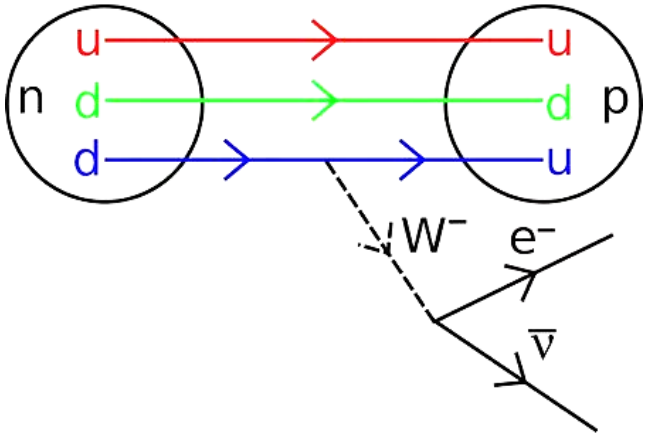


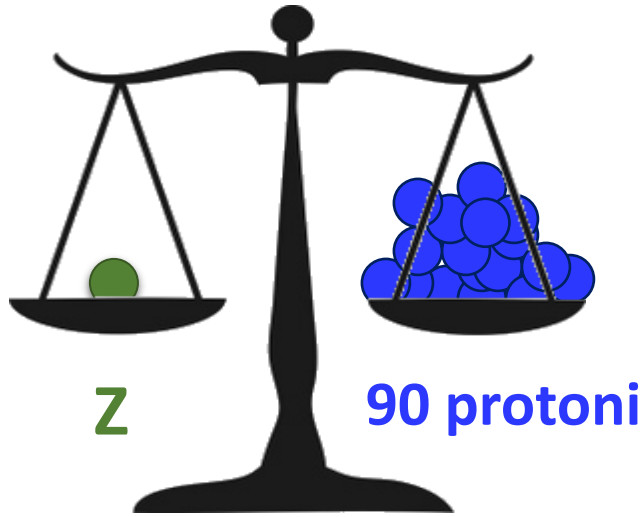
Interazioni: Nucleare Debole e Forte

- **Interazione Nucleare Debole**

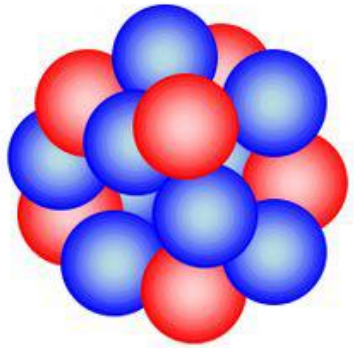
$$n^0 + \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

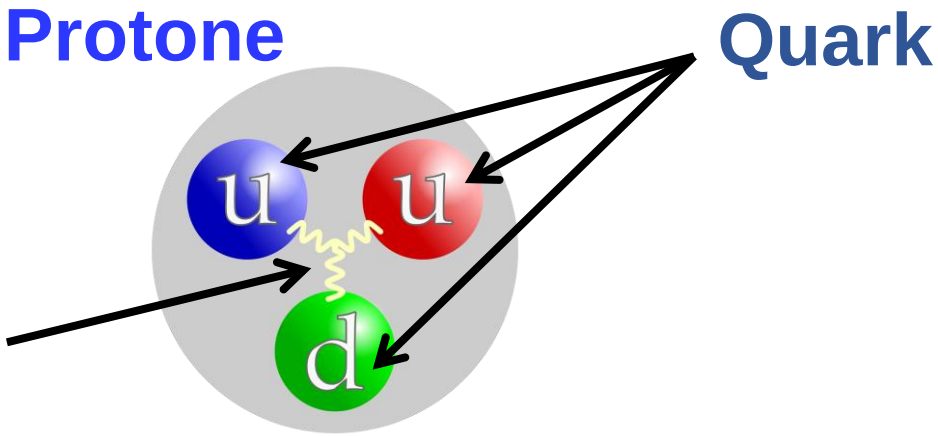






- **Interazione Nucleare Forte**





Fisica: Modello Standard

Quark

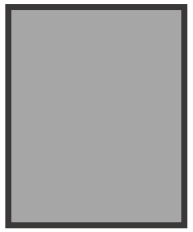
u up	c charm	t top
d down	s strange	b beauty

Leptoni

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

Bosoni

- W, Z → Interazione Nucleare Debole
- g gluone → Interazione Nucleare Forte
- γ fotone → Interazione Elettro-Magnetica



Materia e Interazioni

Materia

Quark

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

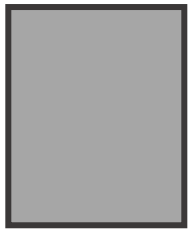
Leptoni

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

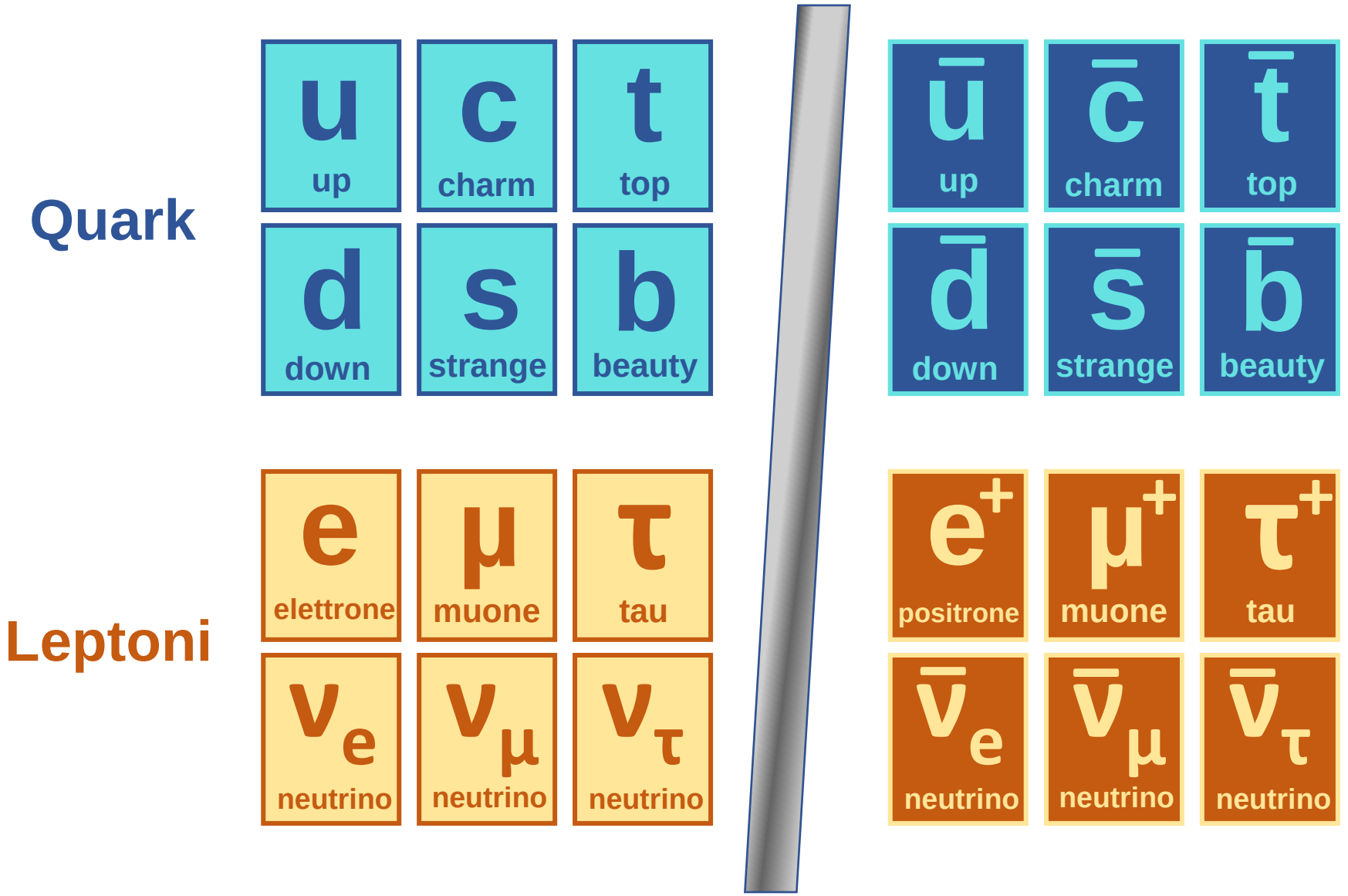
Interazioni

Bosoni

W	
Z	
g gluone	
γ fotone	

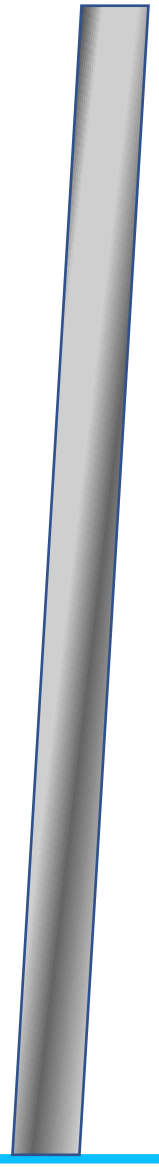


Materia … e … Anti-Materia



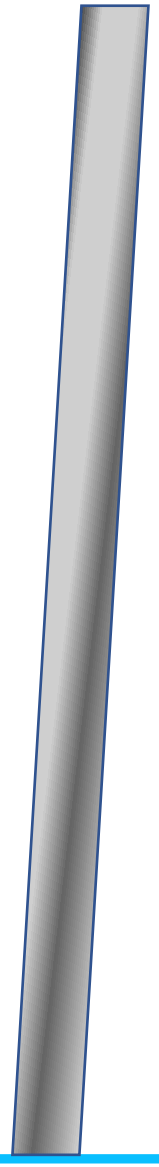
Materia / Anti-Materia

Elettrone e elettrone -



Materia / Anti-Materia

Elettrone e elettrone **-**

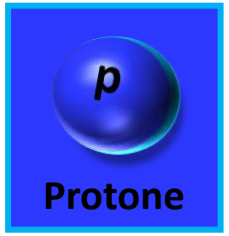


+ e^+ positrone **Anti-Elettrone**

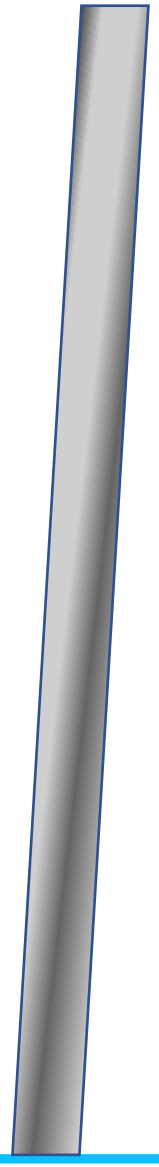
Materia / Anti-Materia

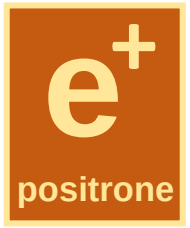
Elettrone 

-

Protone 

+





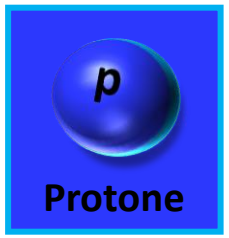
+ **Anti-Elettrone**

Materia / Anti-Materia

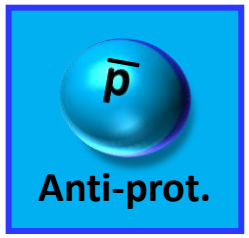
Elettrone 

-

+ **Anti-Elettrone**

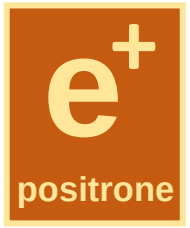
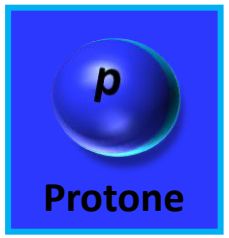
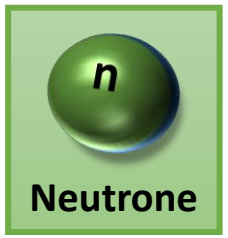
Protone 

+

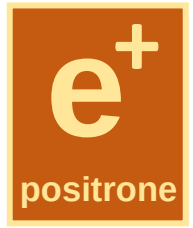
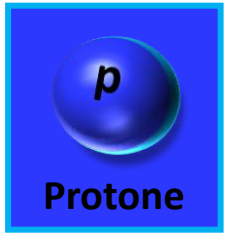
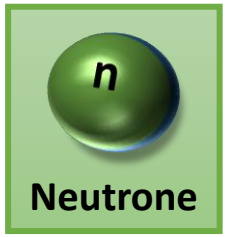


- **Anti-Protone**

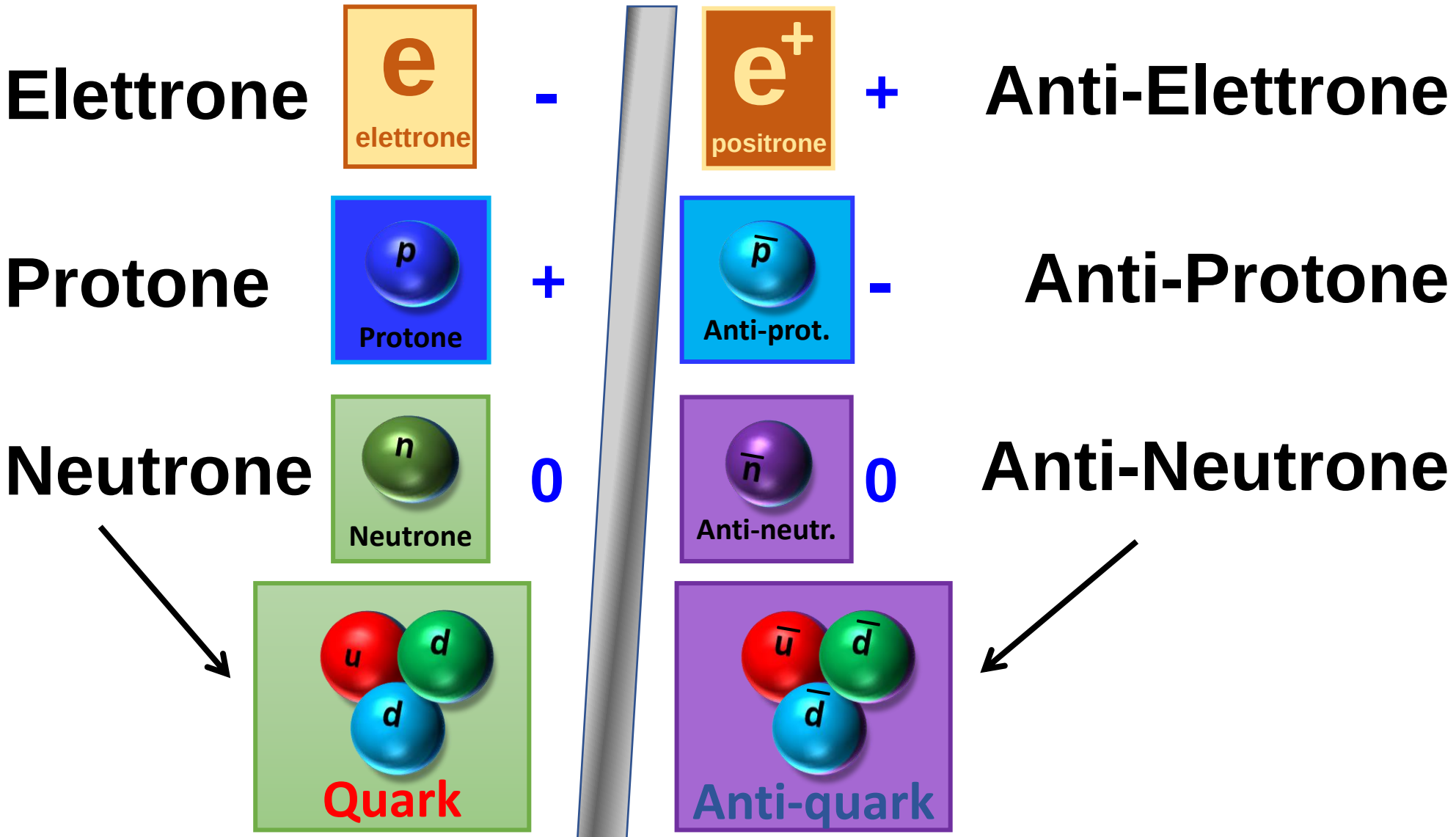
Materia / Anti-Materia

Elettrone		-		+	**Anti-Elettrone**
Protone		+		-	**Anti-Protone**
Neutrone		0			

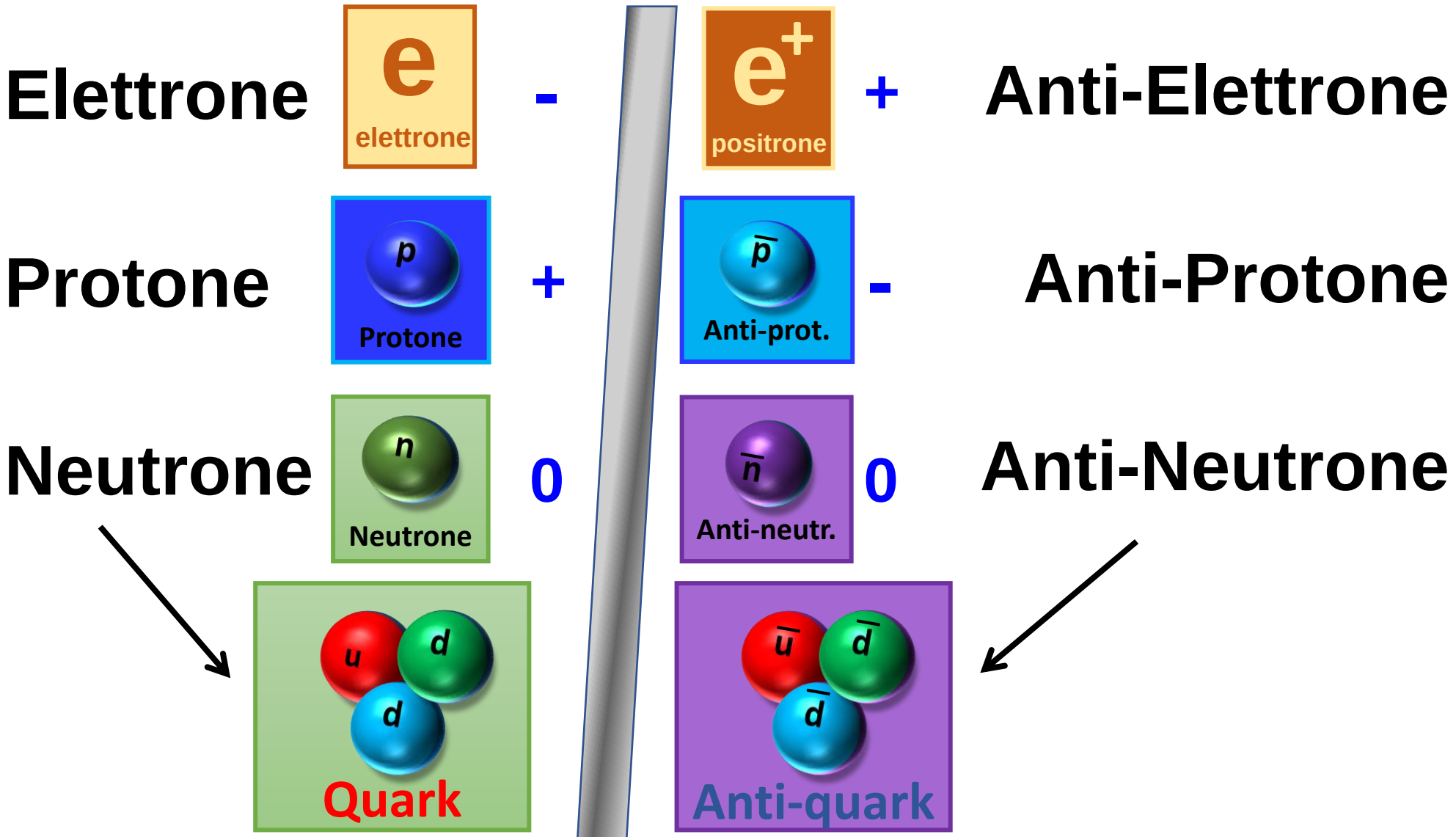
Materia / Anti-Materia

Elettrone		-		+	Anti-Elettrone
Protone		+		-	Anti-Protone
Neutrone		0		0	Anti-Neutrone

Materia / Anti-Materia



Materia / Anti-Materia



Fisica: Modello Standard

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

Interazioni

Bosoni

- W
- Z
- g gluone
- γ fotone

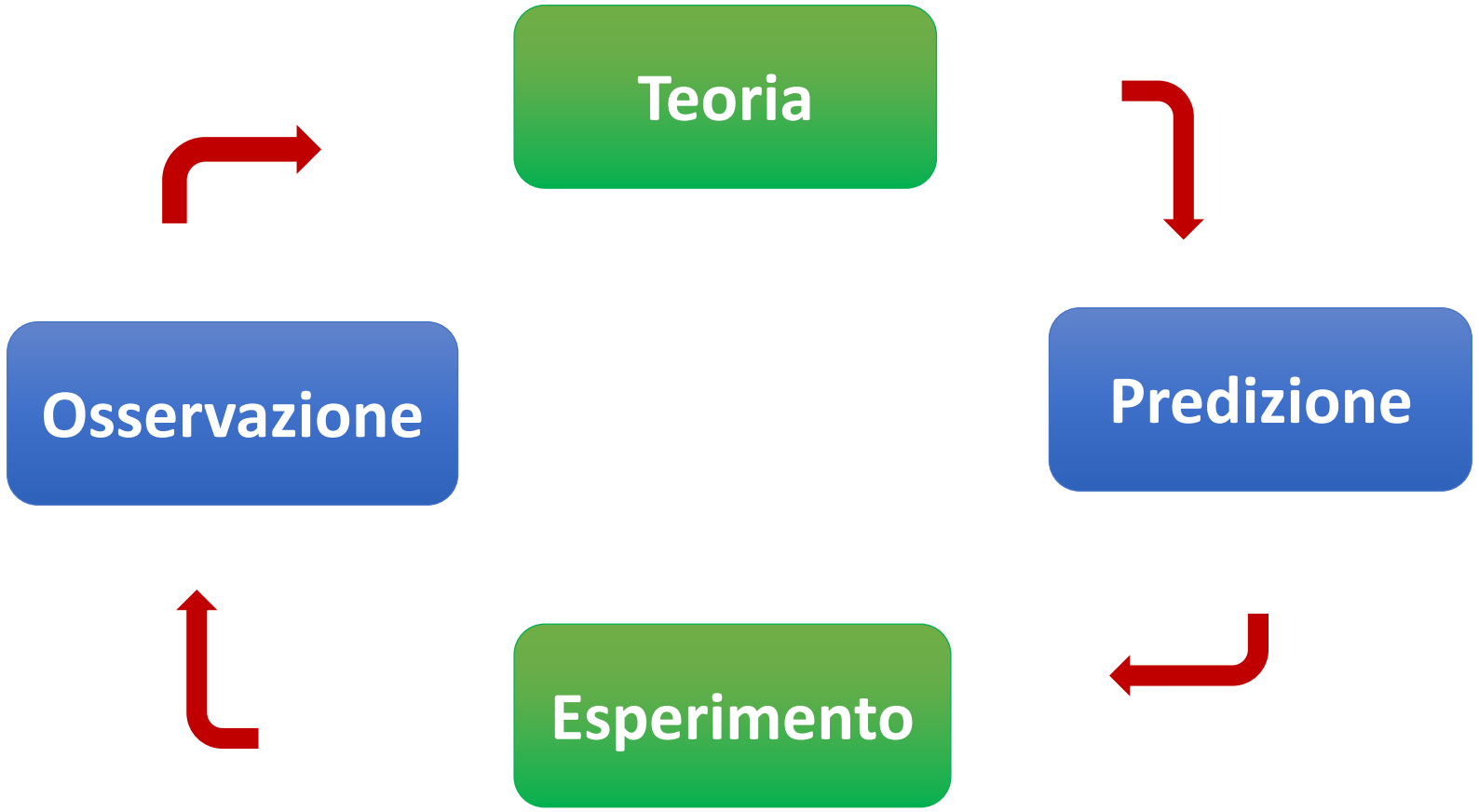
?

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 particele 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

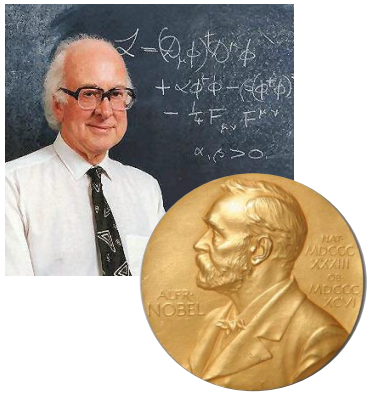
Z

g gluone

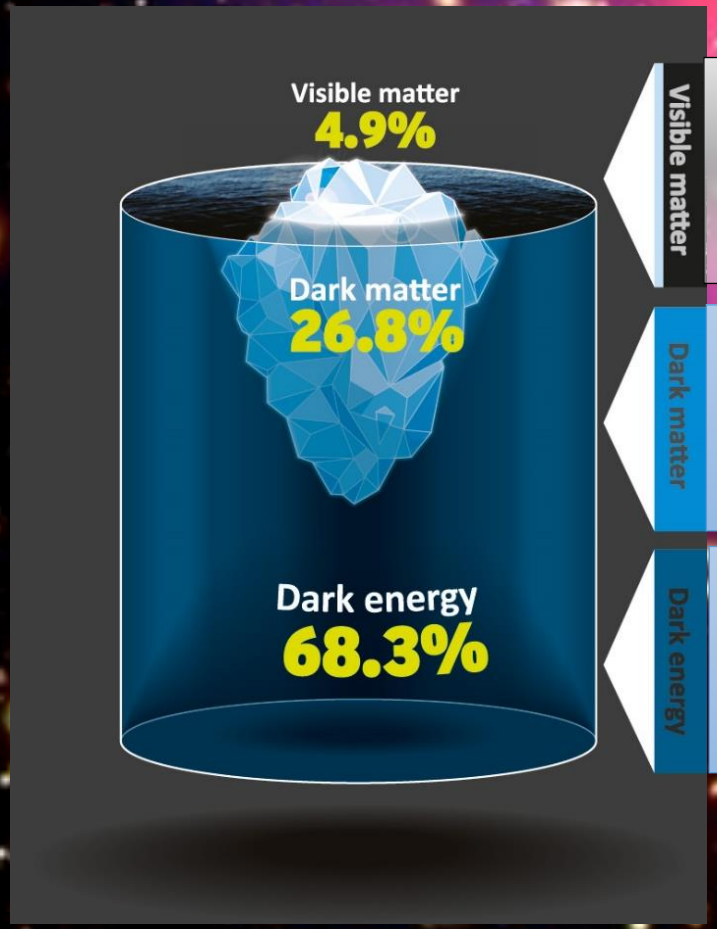
γ fotone

H Higgs

Higgs



Tutto qui? C'è altro da scoprire?



Visible matter

Materia visibile con i nostri telescopi:
descritta dal Modello Standard.

Dark matter

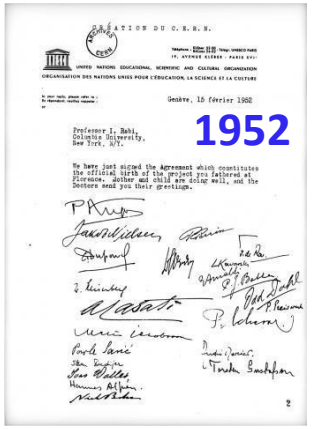
Materia non visibile (oscura):
produce effetti gravitazionali.
Non è prevista dal Modello Standard.

Dark energy

Energia non visibile (oscura):
contribuisce al moto dell'universo.
Non è prevista dal Modello Standard.

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.)

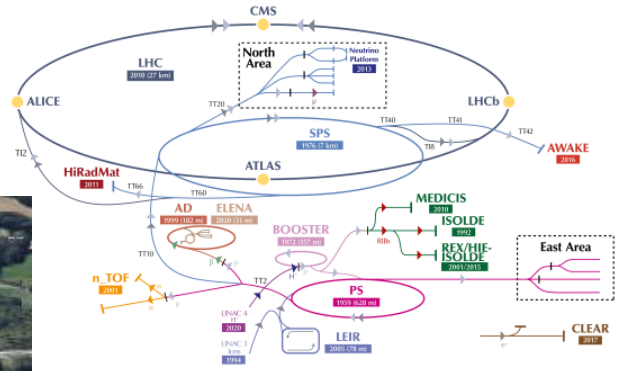


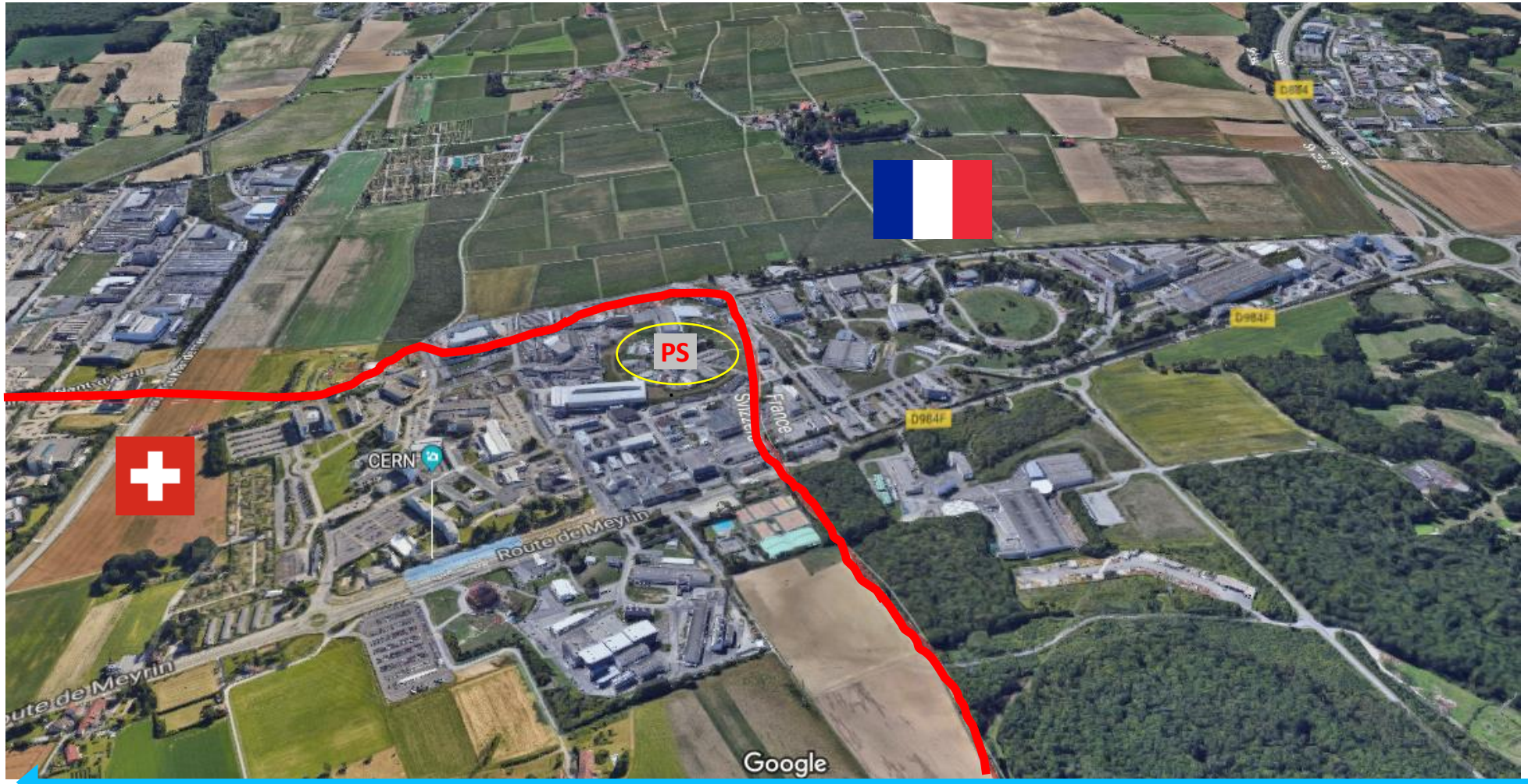
Il resto è storia…

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



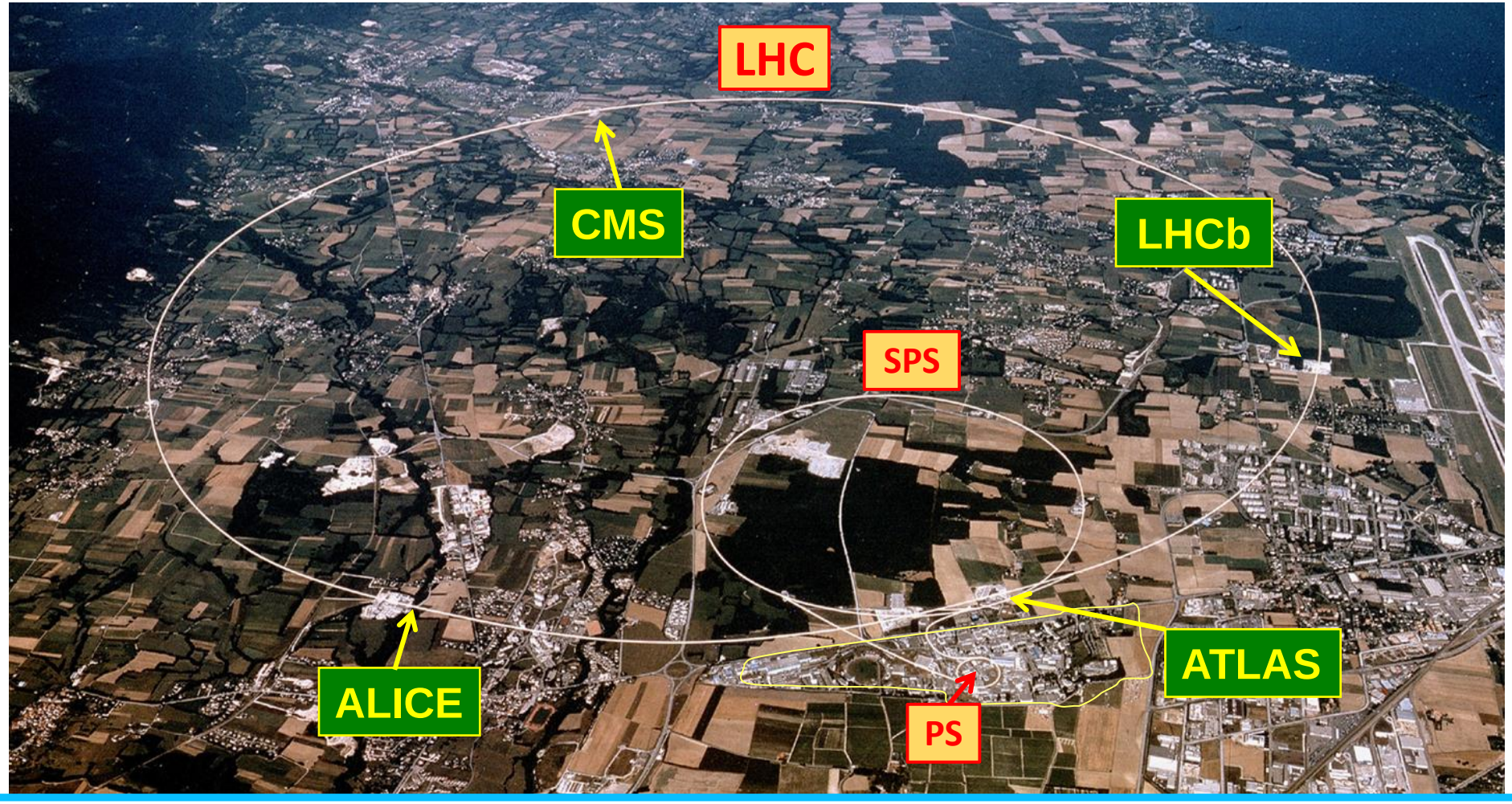


1954-2024

ANNI CERN

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



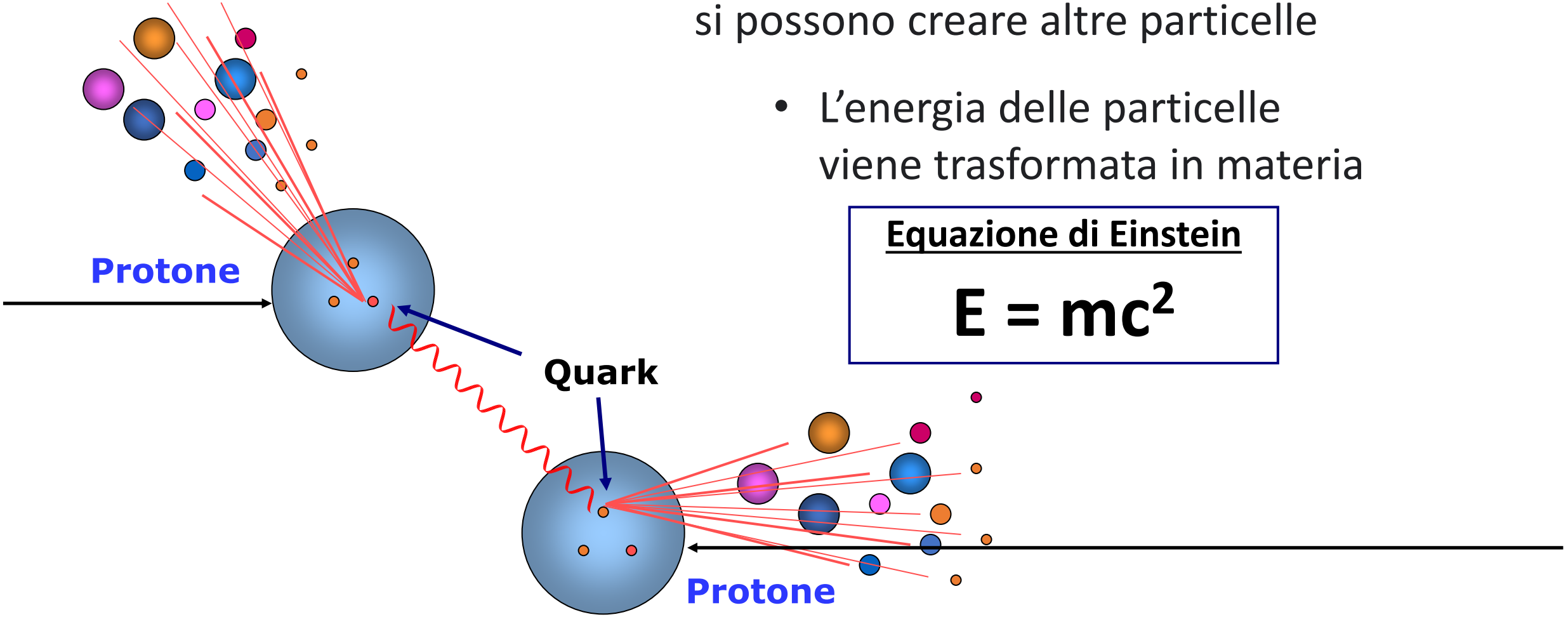
L’acceleratore

Urti tra particelle

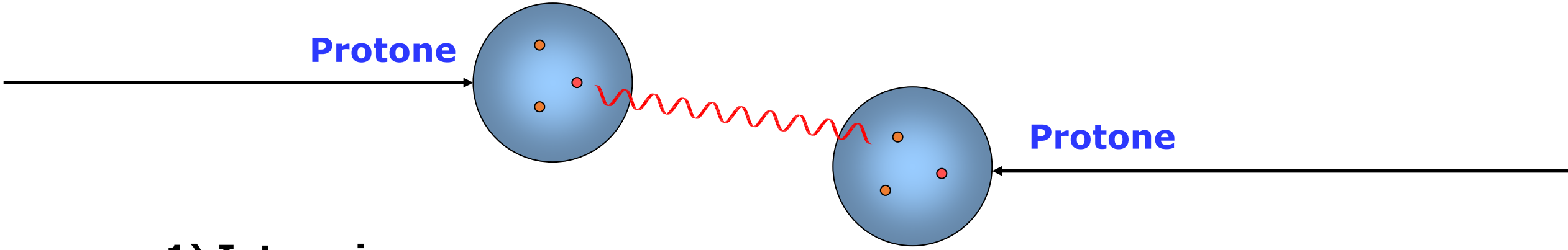
- Attraverso gli urti tra le particelle si possono creare altre particelle
  - L'energia delle particelle viene trasformata in materia

Equazione di Einstein

$$E = mc^2$$



Dai protoni ai bosoni: interaz. & decadim.



1) Interazione

Bosone Z^0

2) Decadimento

μ^- muone

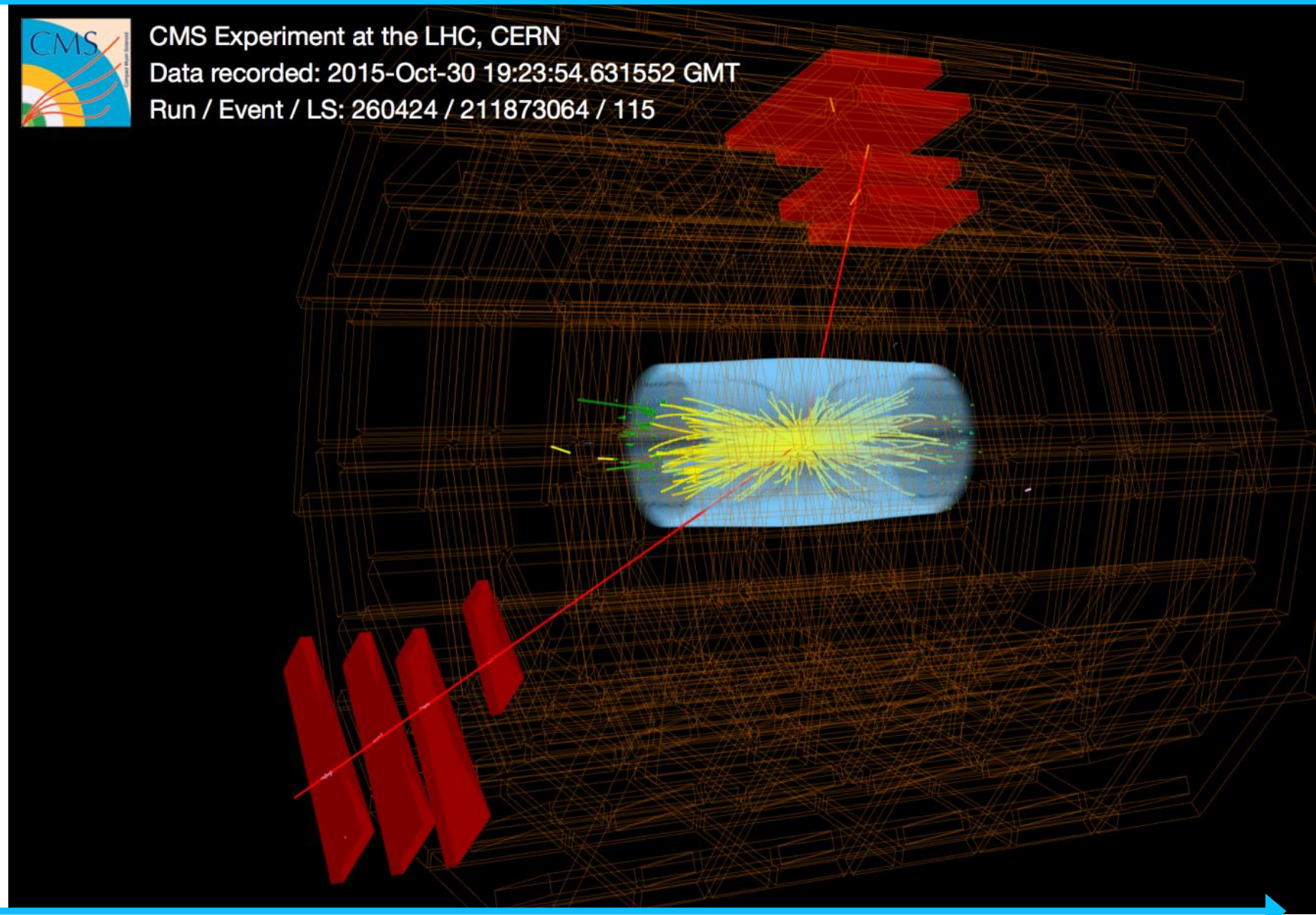
μ^+ muone

Decadimento Z → μ μ

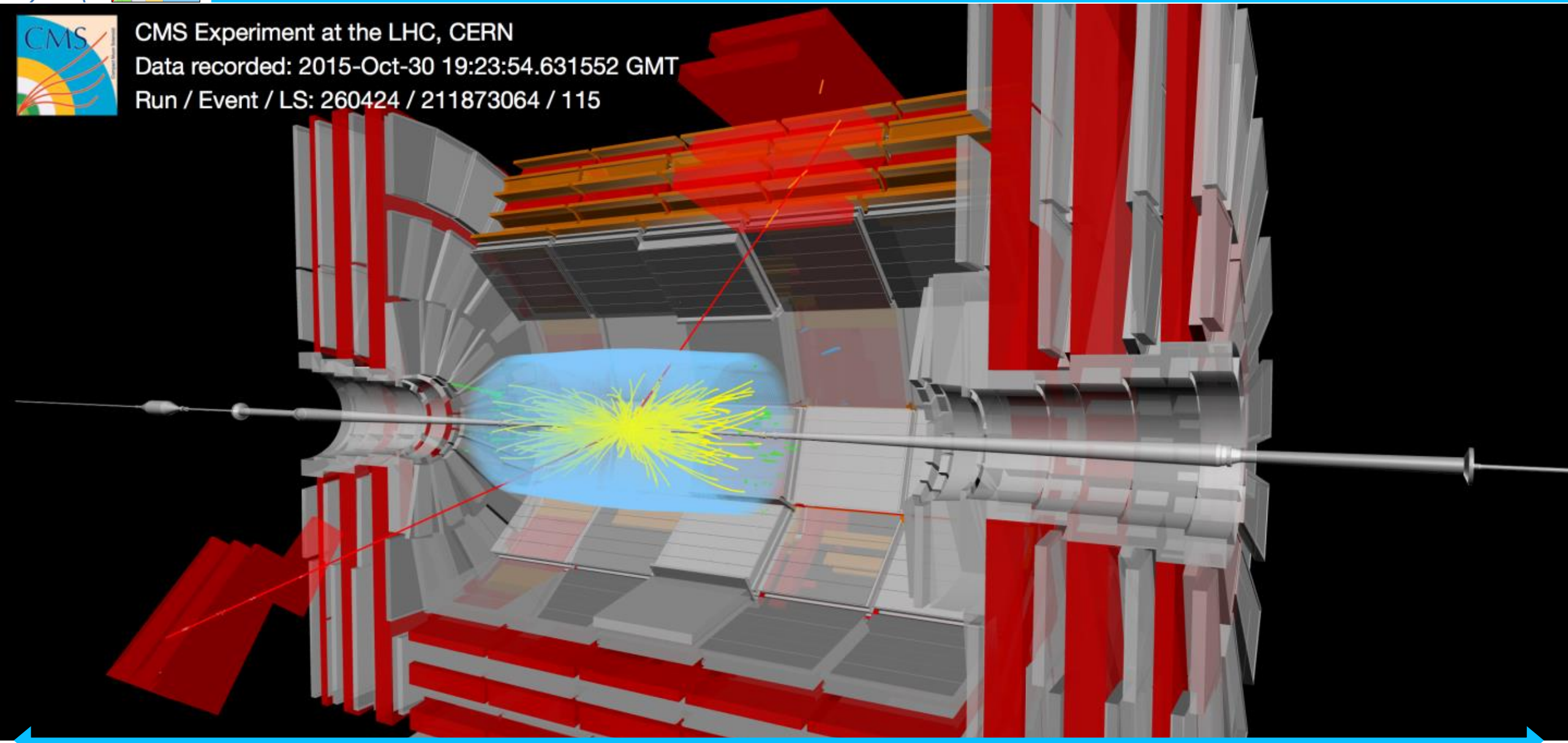
Bosone Z^0

μ^- muone

μ^+ muone



L’esperimento CMS

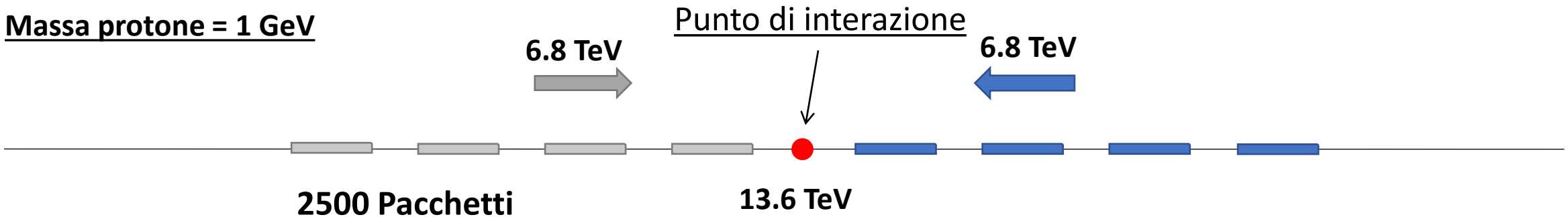


Backup

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

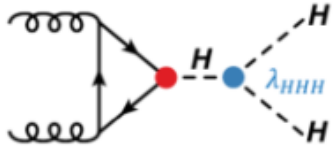


2500 Pacchetti
- 100 miliardi di protoni
- 20 cm lunghezza
- 50 µm diametro

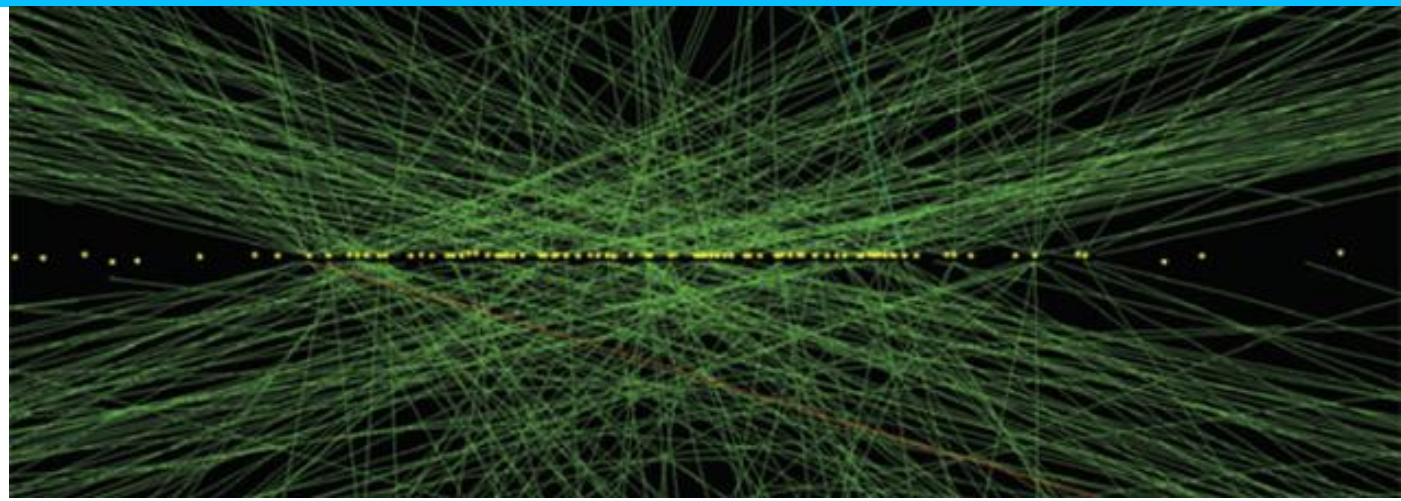
LHC → HL-LHC: High-Luminosity-LHC

- 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!



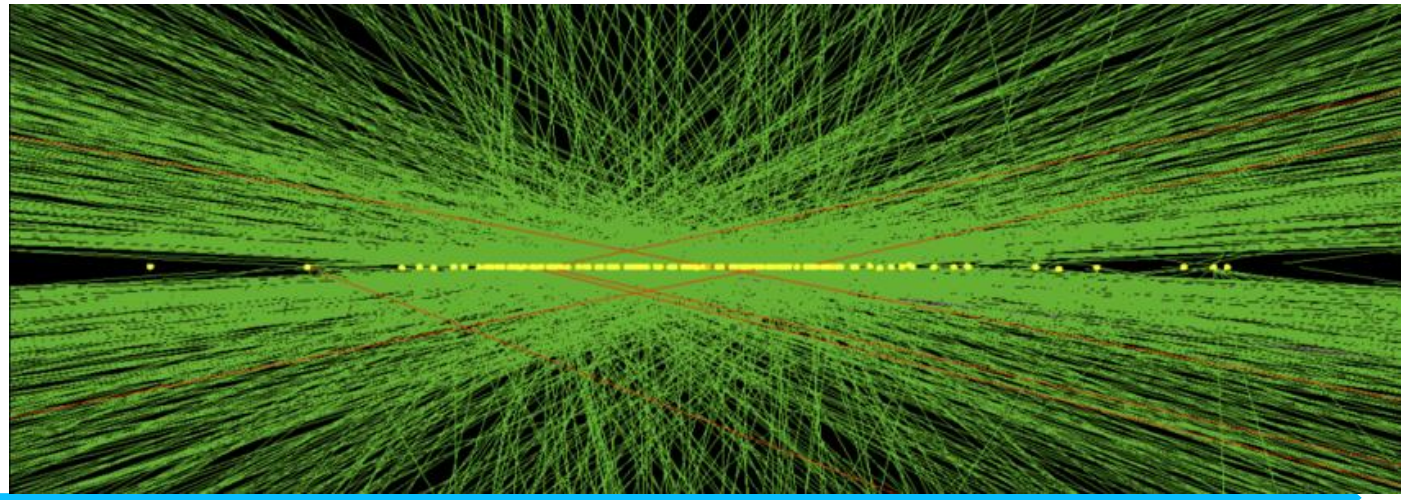
- Necessario aumentare luminosità
  - 50 → 200 collisioni ogni 25 ns
  - Estremamente più complesso!
    - Aggiornare/cambiare rivelatori
    - Migliorare algoritmi



78 collisioni ricostruite in CMS

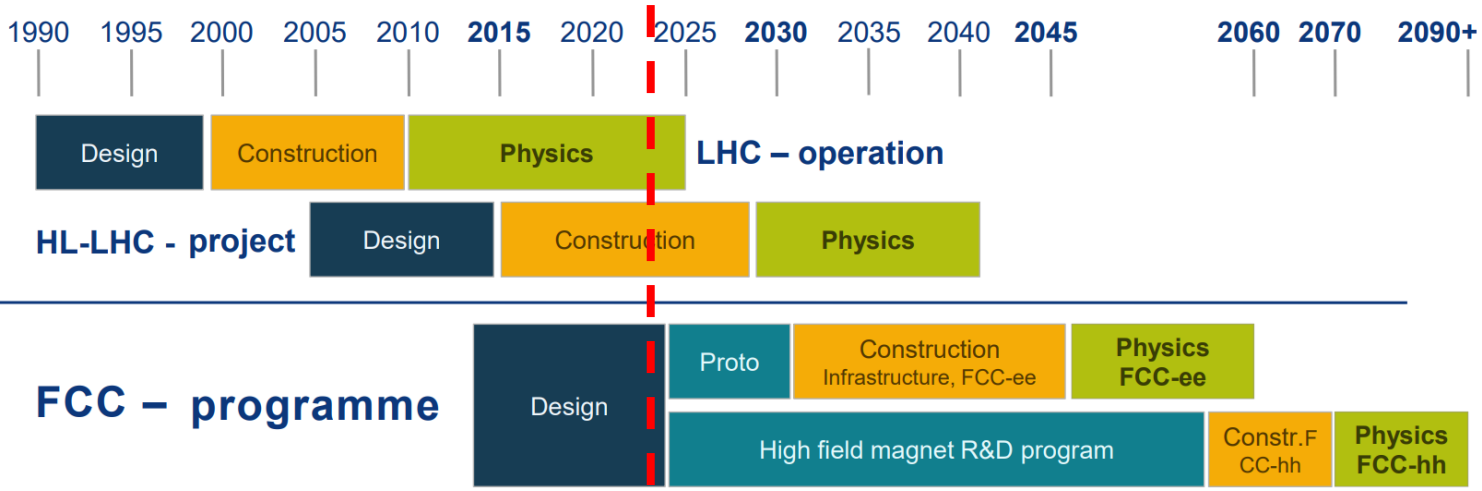
10 cm

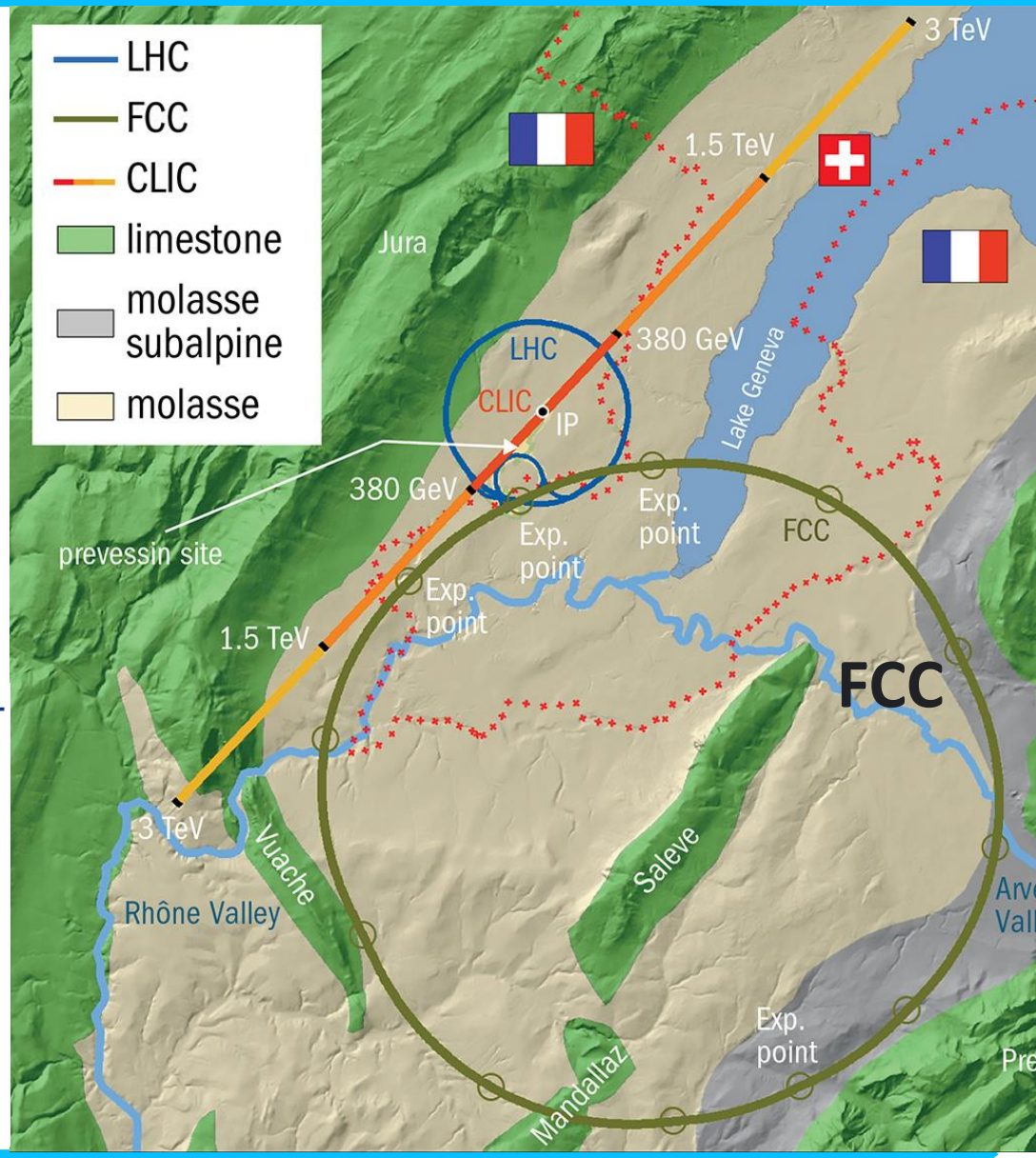
140 collisioni (simulazione)



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 → ZZ → μμ μμ