

LA FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

masterclass dell'esperimento

Compact Muon Solenoid - CMS

al Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra

Dipartimento Interateneo di Fisica «Michelangelo Merlin»

31 marzo 2026



Pietro Colangelo
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Bari

«il metodo galileiano»

Galileo Galilei: La Scienza Nuova

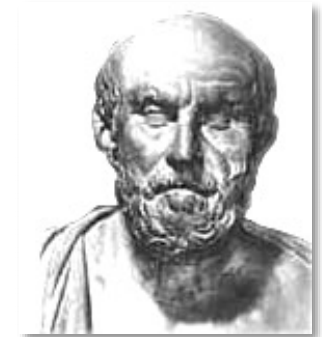


1. i fenomeni devono essere ricondotti a pochi principi generali
2. «il libro della natura è scritto in caratteri matematici»
3. l'esperimento («la sensata esperienza») è il fondamento e la guida nella elaborazione di una teoria scientifica

veniamo da lontano ("nani sulle spalle di giganti" Bernardo di Chartres)

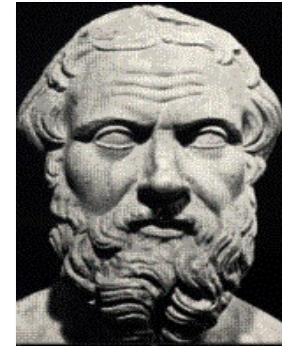
Empedocle (Akragas-Agrigento, V secolo a.C.)

4 sostanze (radici) eternamente uguali, origine di ogni cosa
fuoco - aria - terra - acqua



Democrito (Abdera, 460 a.C.)

atomi (materia) – vuoto (assenza di materia)



John Dalton (Eaglesfield, 1766 – Manchester, 1844)

elenco (con i pesi atomici)
di un insieme di elementi

A diagram titled "ELEMENTS" showing a list of elements with their atomic symbols and weights. The elements are arranged in two columns. The first column contains Hydrogen, Azote, Carbon, Oxygen, Phosphorus, Sulphur, Magnesia, Lime, Soda, and Potash. The second column contains Strontian, Barytes, Iron, Zinc, Copper, Lead, Silver, Gold, Platina, and Mercury. Each element is represented by a unique symbol and its atomic weight is listed to the right.

Dmitrij Ivanovic Mendeleev (Tobol'sk 1834 – San Pietroburgo 1907)



elementi organizzati in base al numero atomico

(numero di protoni nel nucleo)

caselle vuote nella tavola:
predizione di elementi
non ancora osservati

Reihen	Gruppe I. R ² O	Gruppe II. R ² O	Gruppe III. R ² O ³	Gruppe IV. RH ⁴ RO ²	Gruppe V. RH ⁵ R ² O ⁵	Gruppe VI. RH ⁶ RO ³	Gruppe VII. RH ⁷ R ² O ⁷	Gruppe VIII. RO ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	
9								
10			?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184		Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12				Th=231	—	U=240		

Tavola Periodica degli Elementi

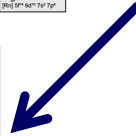
Elemento: Ferro (Fe)

- numero atomico: 26
- peso atomico standard: 55.845
- prima energia di ionizzazione: 762.5 kJ/mol
- simbolo chimico: Fe
- nome: Ferro
- configurazione elettronica: [Ar] 3d⁶ 4s²
- stati di ossidazione: +2, +3

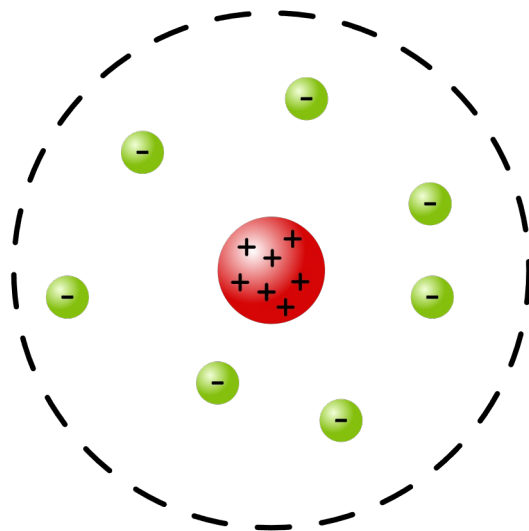
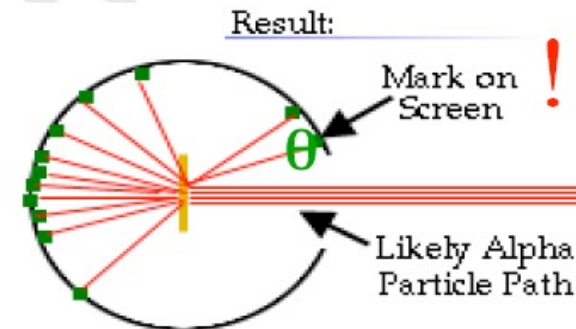
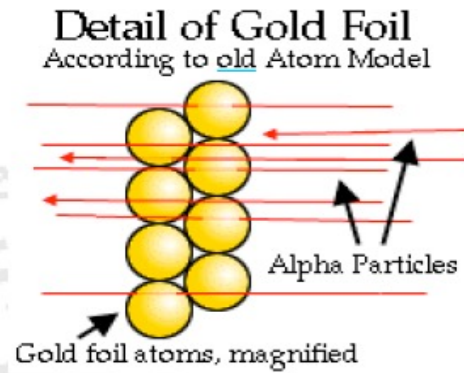
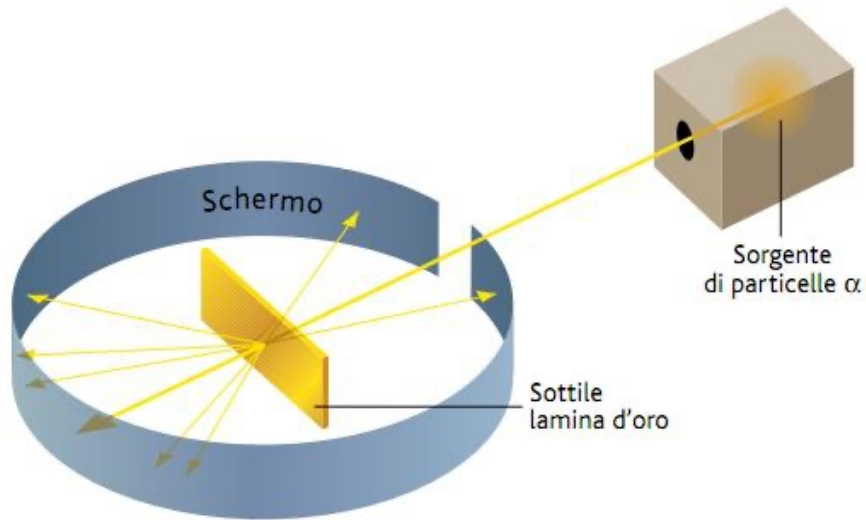
Legenda:

- metalli alcalini
- metalli alcalino terrosi
- lantanoidi
- metalli di transizione
- proprietà sconosciute
- metalli di post-transizione
- metalloidi
- non metalli reattivi
- gas nobili
- attinoidi

4 nuovi elementi scoperti negli ultimi anni



gli atomi hanno una struttura



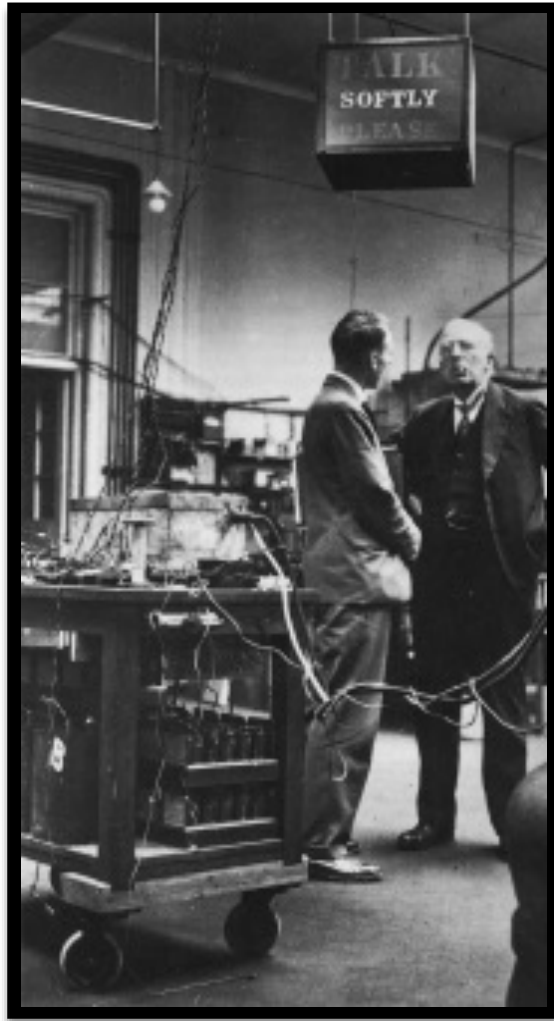
conclusione:

**l'atomo ha un nucleo
con carica elettrica positiva
e dimensione $<10 \text{ Fm}$**

[1 Fm = 10^{-15} m]

gli atomi hanno una struttura

Ernest Rutherford (Brightwater, 1871 – Cambridge, 1937)



esperimenti basati su collisioni
diventano metodo per lo studio
dei componenti fondamentali della materia

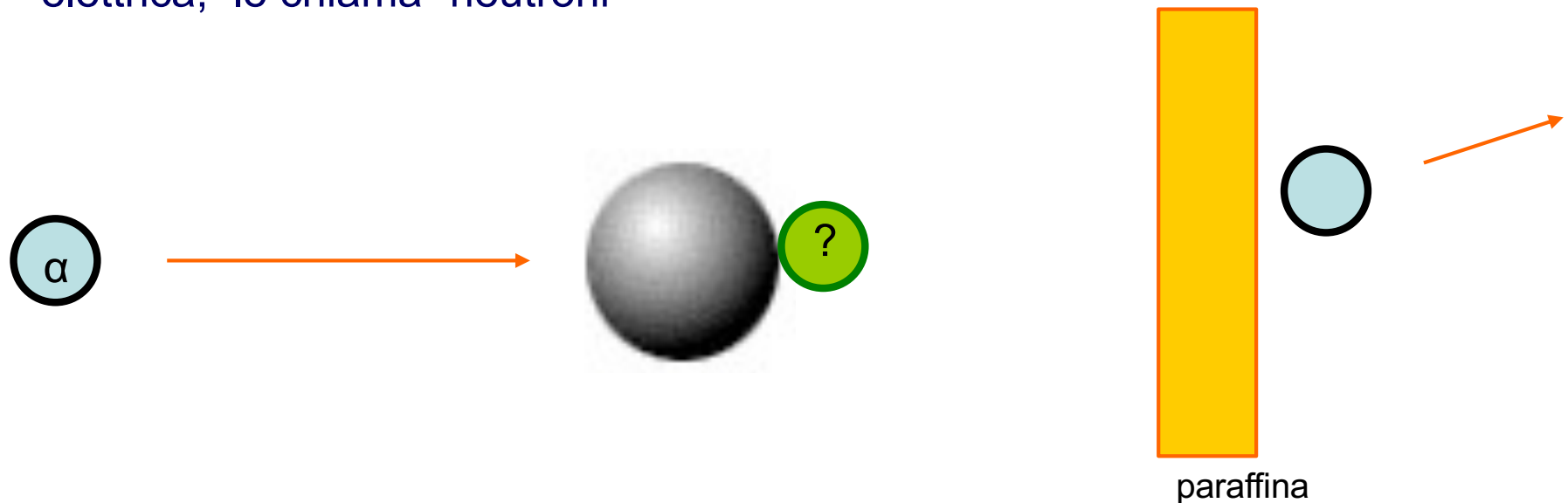
neutrone James Chadwick (1932)

1930 - **Bothe e Becker** bombardano il berillio con particelle alfa:

scoprono che dal berillio esce una radiazione neutra molto penetrante

- **Frédéric Joliot e Irène Curie** dimostrano che escono particelle neutre in grado di espellere i protoni dalla paraffina

1932 - **Chadwick** le identifica come particelle simili ai protoni ma senza carica elettrica, le chiama "neutroni"

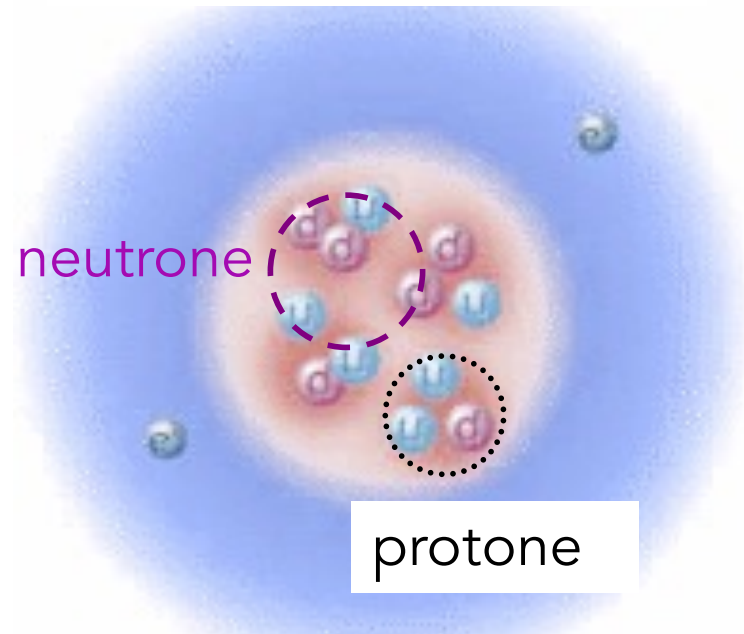


i nuclei sono formati da protoni e neutroni

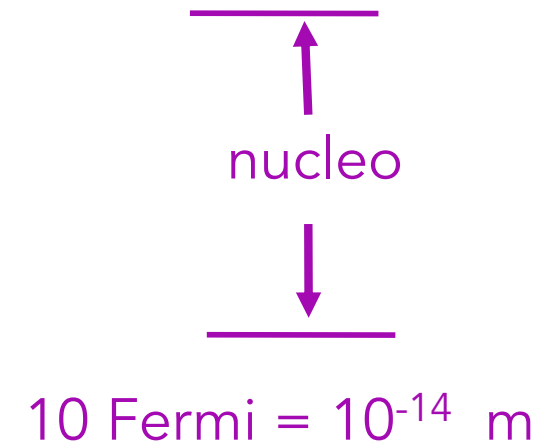
gli atomi hanno una struttura

atomo:

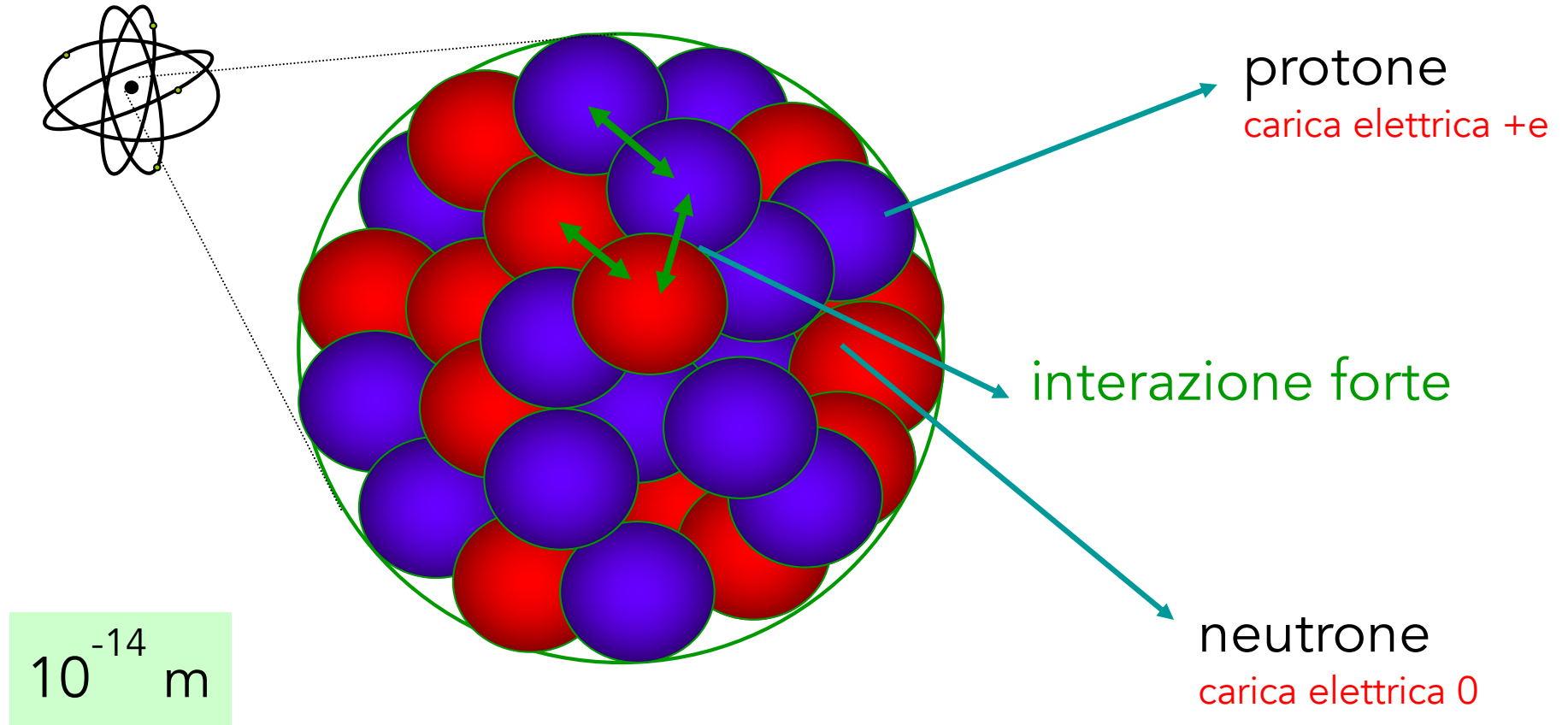
1 Angstrom = 10^{-10} m



1 Fermi = 10^{-15} m



i nuclei hanno una struttura



l'interazione nucleare «forte» tiene insieme i neutroni e i protoni nel nucleo

si scopre l'antimateria

predizione dell'esistenza del positrone

meccanica quantistica + relatività (Paul A.M. Dirac 1928)

- massa del positrone = massa dell'elettrone
- carica elettrica del positrone = $+e$ (opposta all'elettrone)

«il libro della natura è scritto in caratteri matematici»

<https://lamediateca.infn.it/mediateca/view.php?v=227>

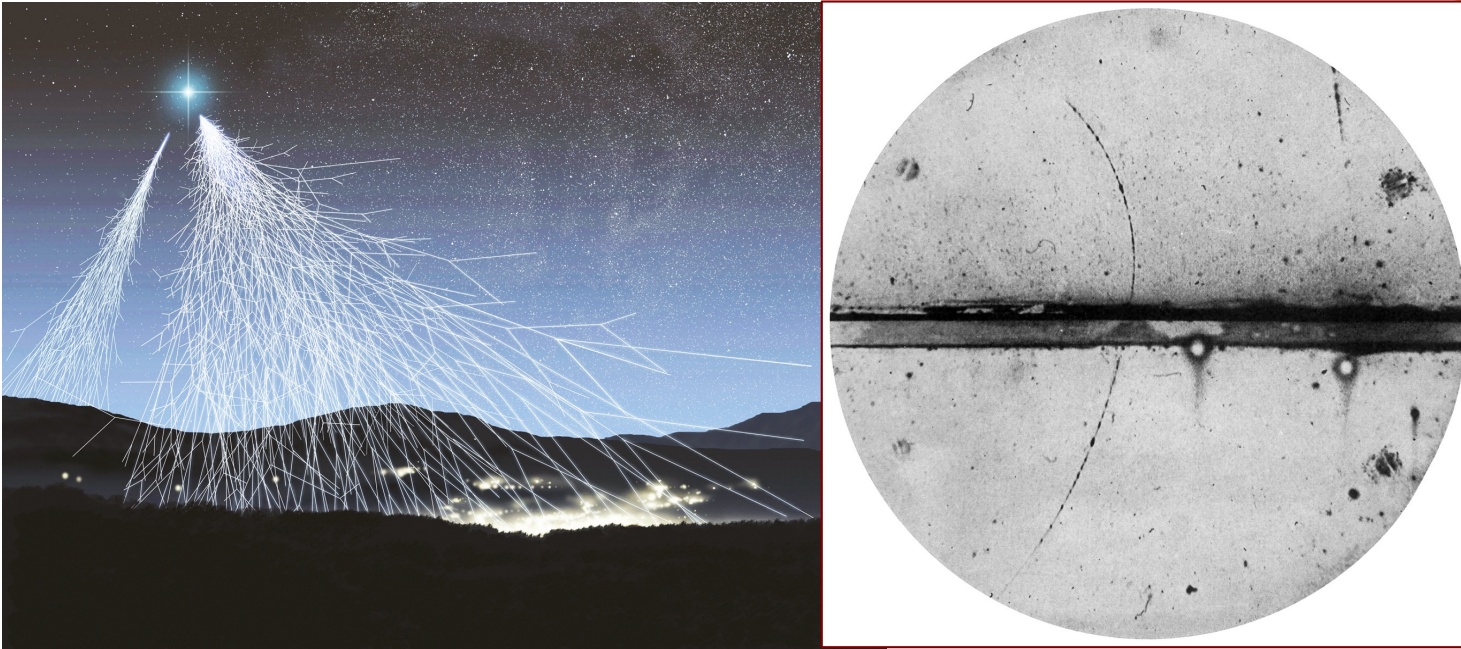


si scopre l'antimateria

predizione dell'esistenza del positrone

meccanica quantistica + relatività (Paul A.M. Dirac 1928)

- massa del positrone = massa dell'elettrone
- carica elettrica del positrone = $+e$ (opposta all'elettrone)

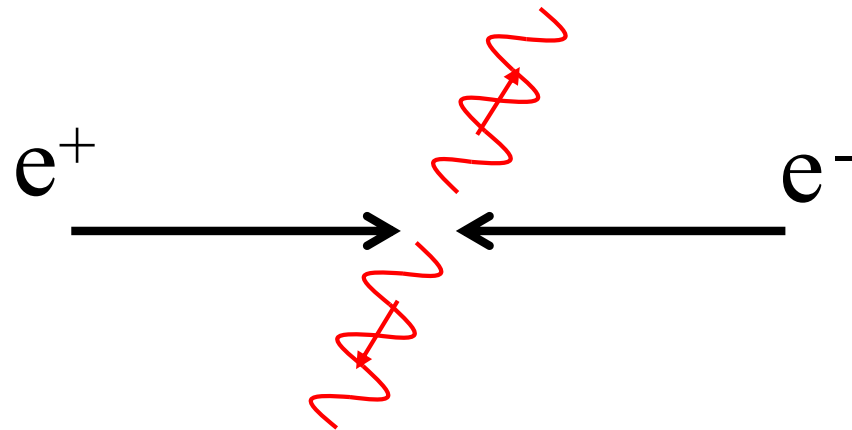


Carl Anderson 1932

Patrick Blackett
Giuseppe Occhialini

osservazione del positrone (elettrone positivo o antielettrone) nei raggi cosmici

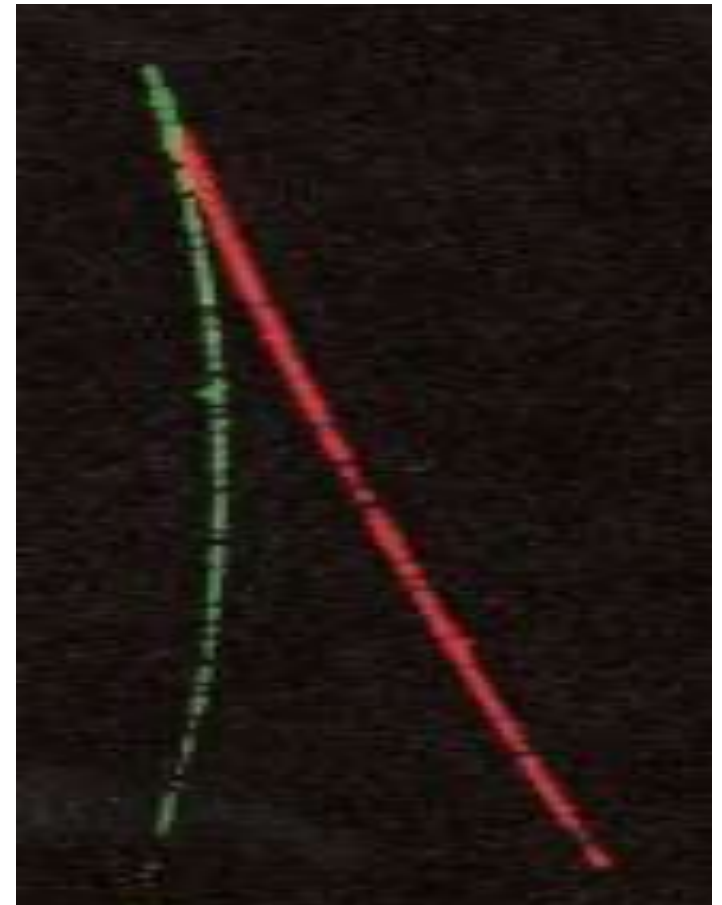
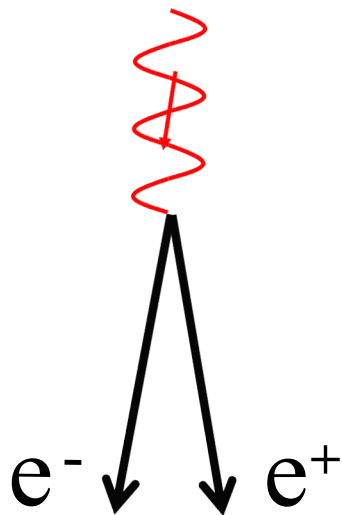
come si evidenzia l' antimateria?



quando una particella e un'antiparticella interagiscono si annichilano producendo energia (luce)

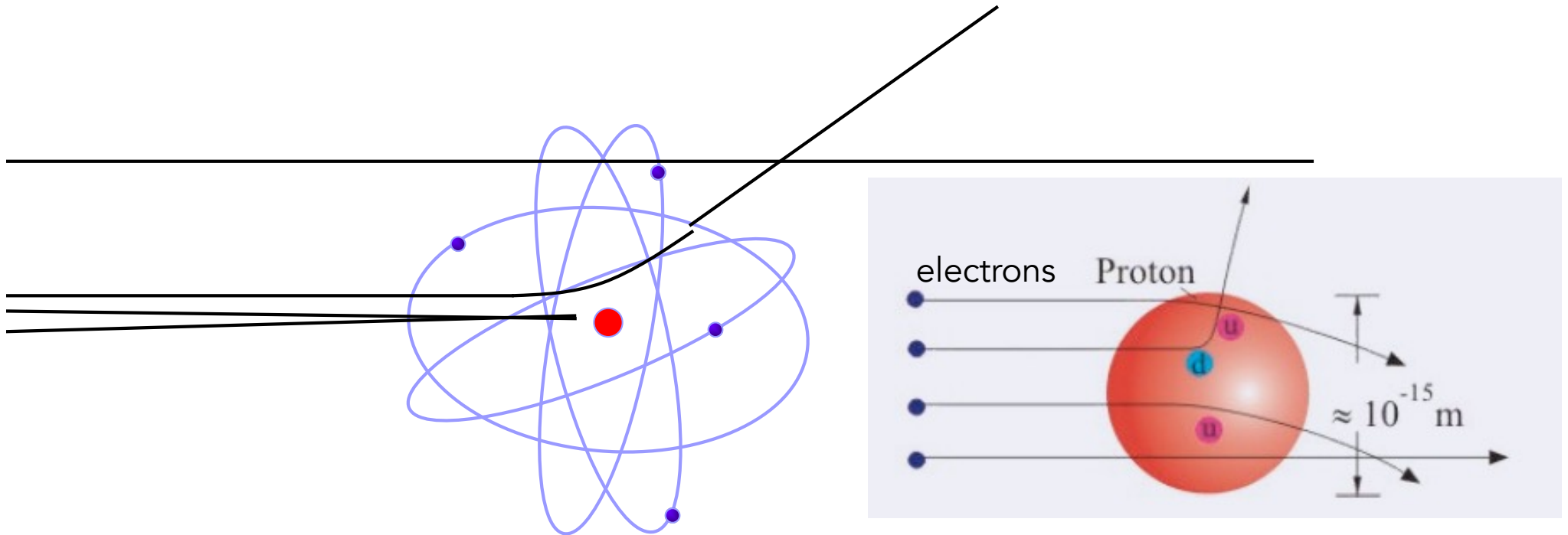
$$E = mc^2$$

processo inverso: un fotone (quanto di luce) può produrre una coppia elettrone – positrone (antielettrone)



anche protoni e neutroni hanno una struttura

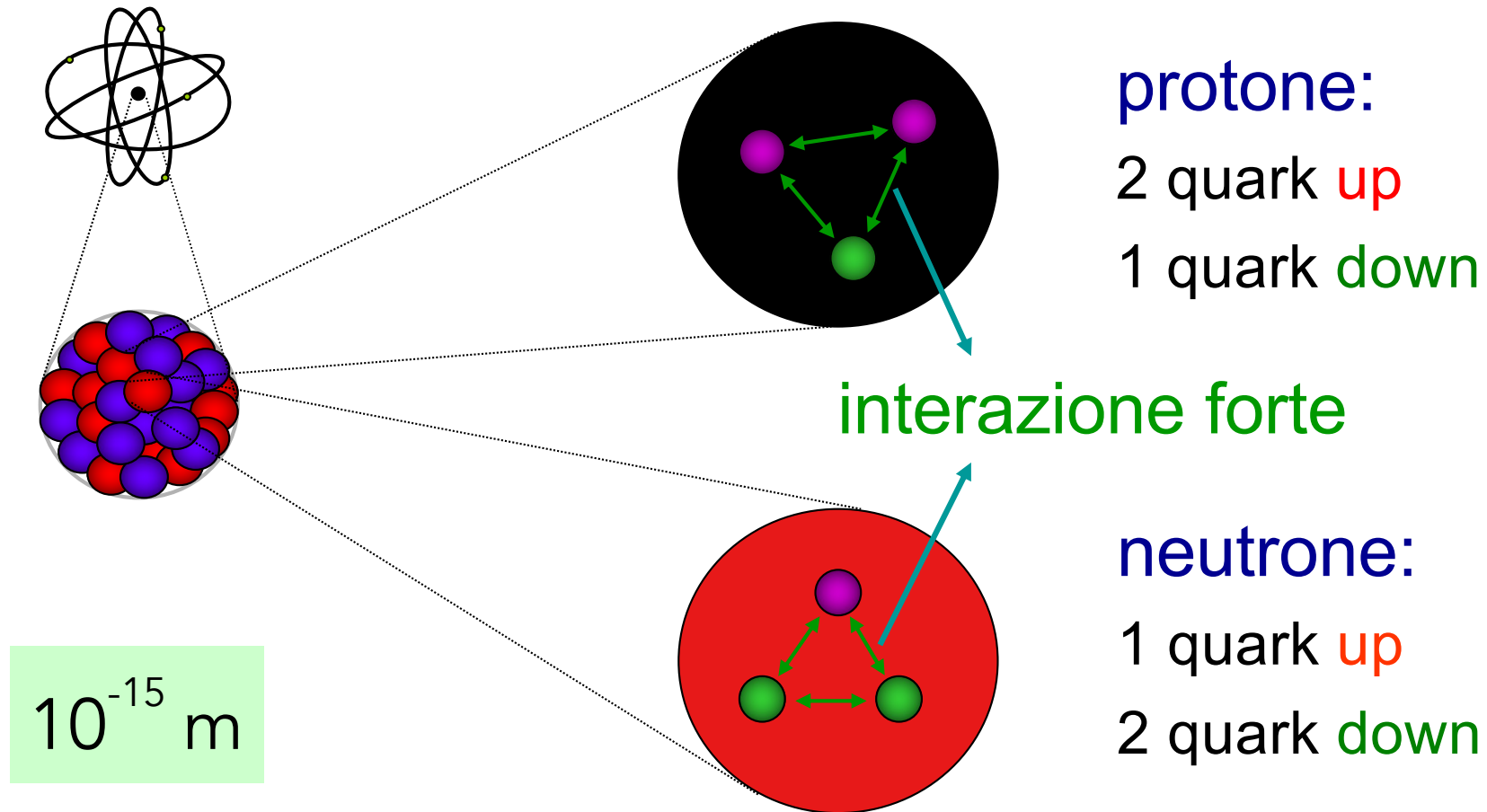
stesso metodo dell'esperimento di Rutherford



la struttura dei protoni e neutroni è stata scoperta usando gli elettroni come proiettili (1970)

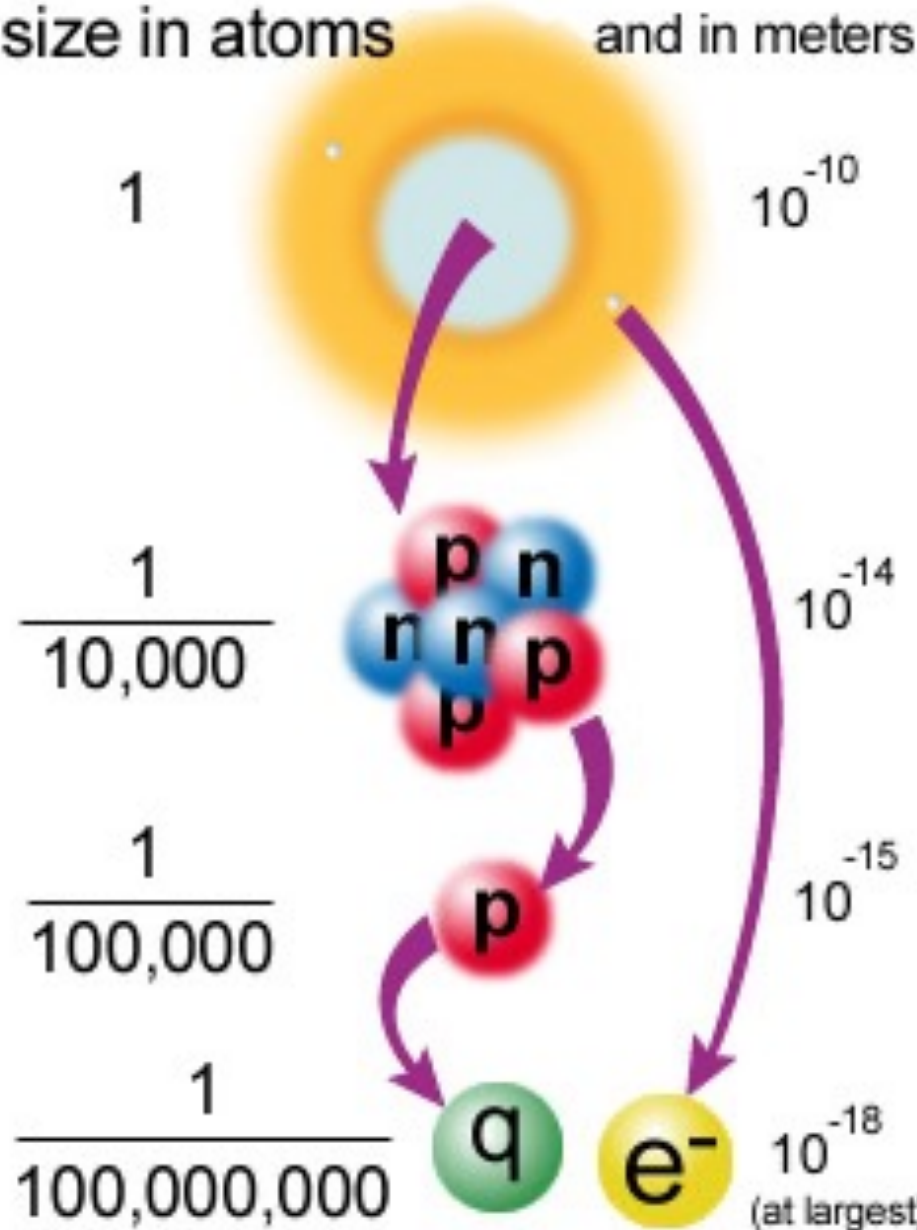
i componenti si chiamano “quark”

struttura dei protoni e dei neutroni

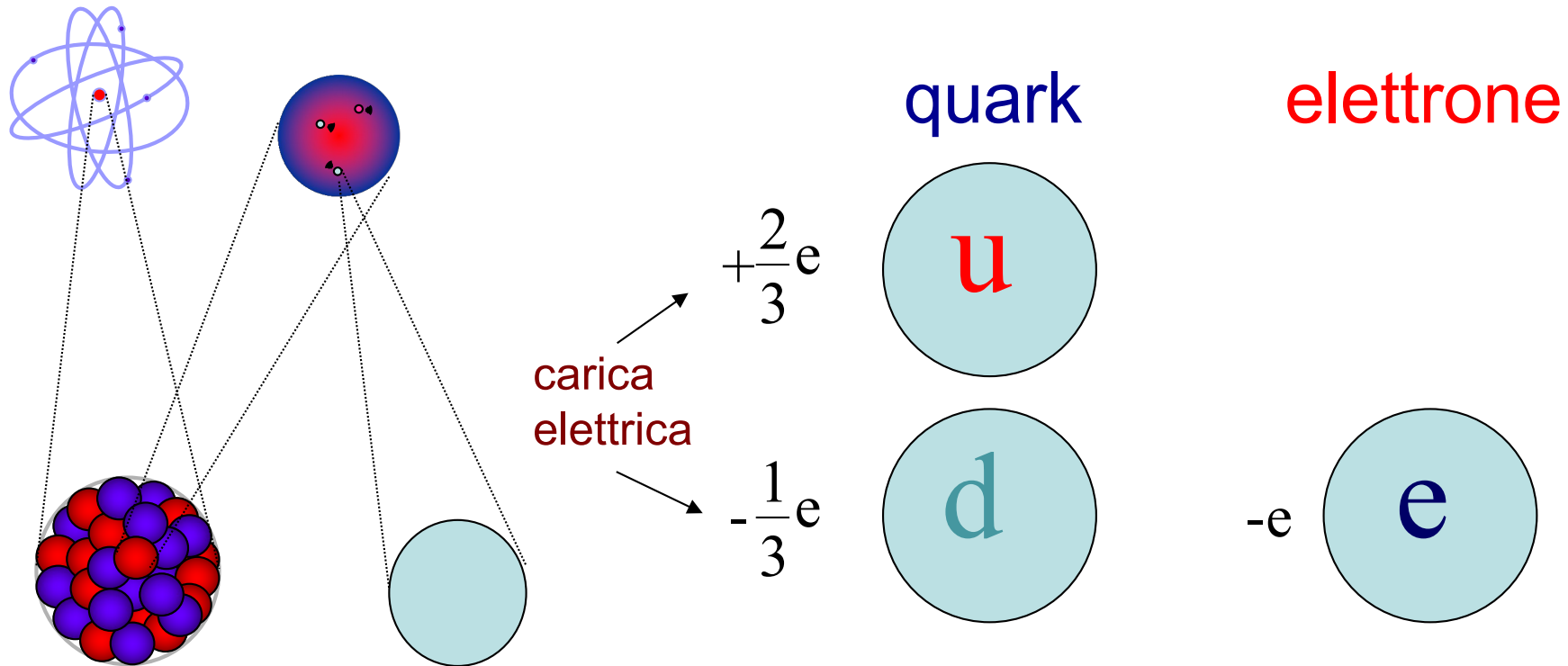


adroni = particelle composte da quark
protoni, neutroni,...

notate le scale di lunghezza



costituenti della materia

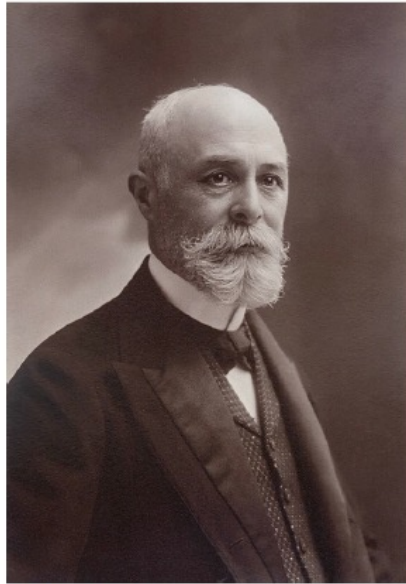
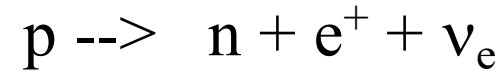
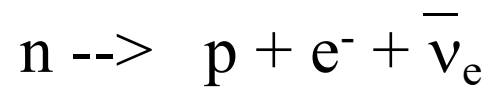
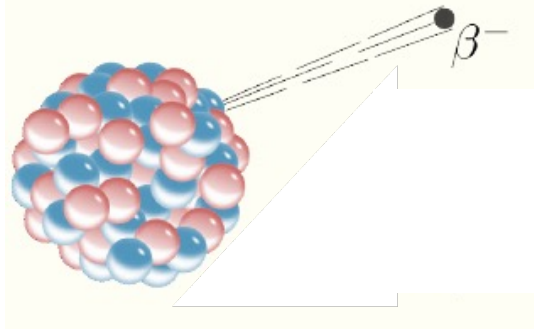


protoni contengono uud \rightarrow carica = $+e$

neutroni contengono udd \rightarrow carica = 0

interazioni "forti": tengono insieme i quark nel protone e neutrone

la radioattività

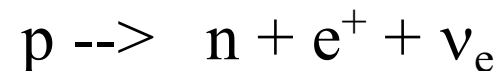
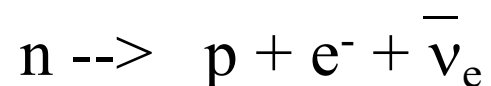
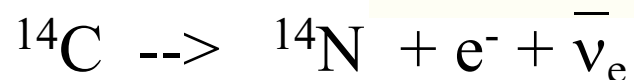
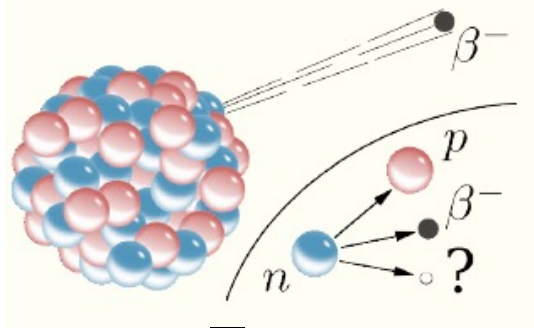


Henry Becquerel
premio Nobel
per la fisica 1903



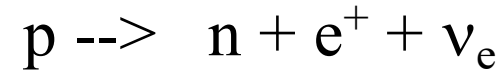
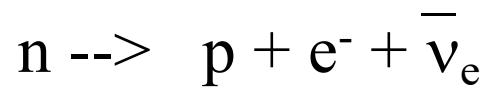
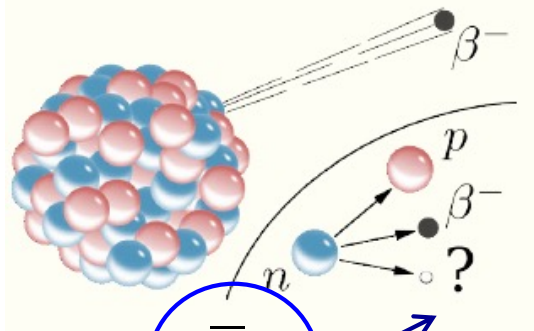
Marie Curie
premio Nobel
- per la fisica 1903
- per la chimica 1911

la radioattività



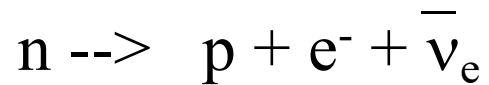
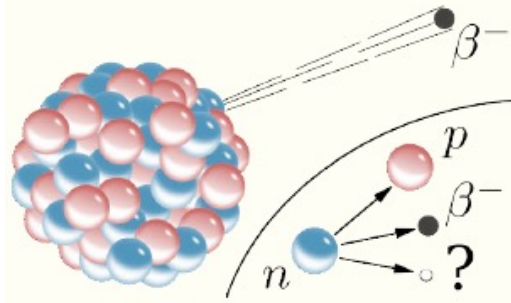
- i quark possono trasformarsi (decadere) in altri quark
- le interazioni coinvolte si chiamano «**deboli**»

la radioattività



- i quark possono trasformarsi (decadere) in altri quark
- le interazioni coinvolte si chiamano «**deboli**»
- esistono particelle di massa piccolissima e prive di carica elettrica (neutrini)

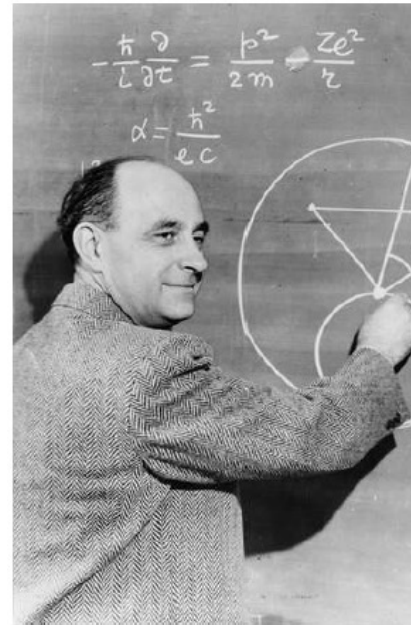
la radioattività



- i quark possono trasformarsi (decadere) in altri quark
- le interazioni coinvolte si chiamano «deboli»
- esistono particelle di massa piccolissima e prive di carica elettrica (neutrini)
- possono essere prodotti elettroni positivi (antielettroni = positroni)



Wolfgang Pauli



Enrico Fermi

la radioattività

un nucleo atomico instabile si trasforma (**decade**) spontaneamente, rilasciando energia sotto forma di diversi tipi di radiazione

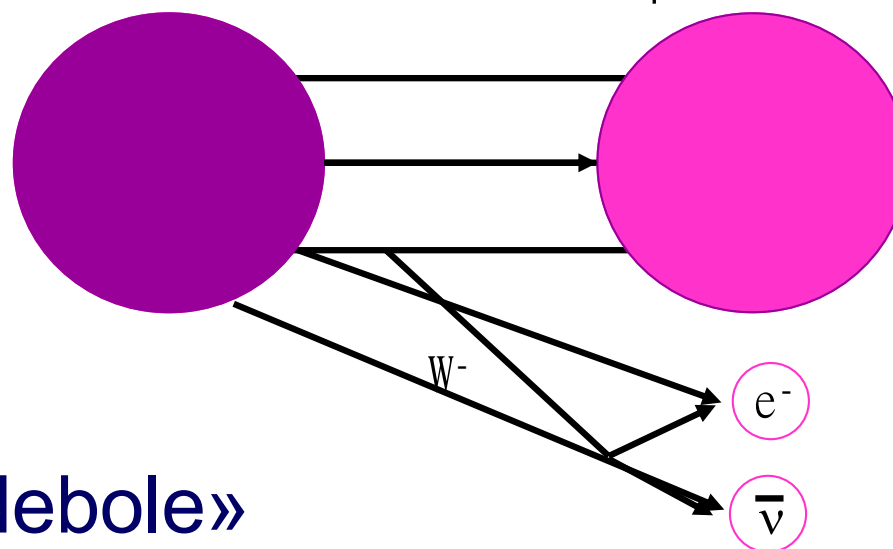


27 protoni
33 neutroni

28 protoni
32 neutroni

neutrone

protone



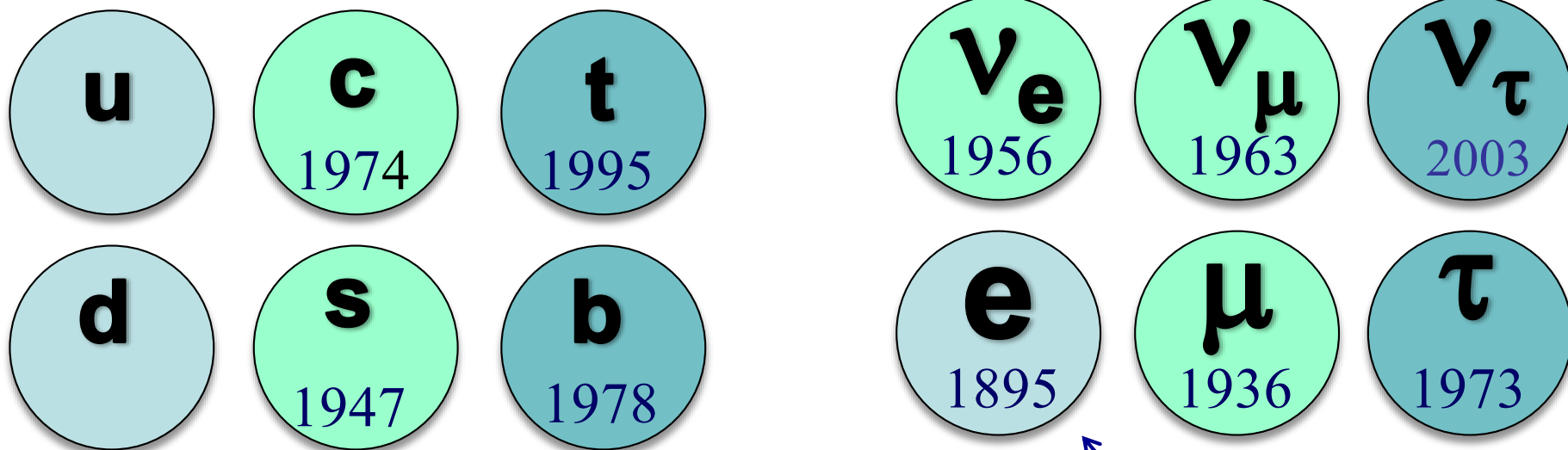
interazione «debole»

responsabile del fatto che i quark o leptoni decadono in particelle di massa minore

31 marzo 2026: quello che conosciamo

sei quark

sei leptoni



$$m_{\text{top}} \sim 170000 m_{\text{up}}$$

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
The Generations of Matter			

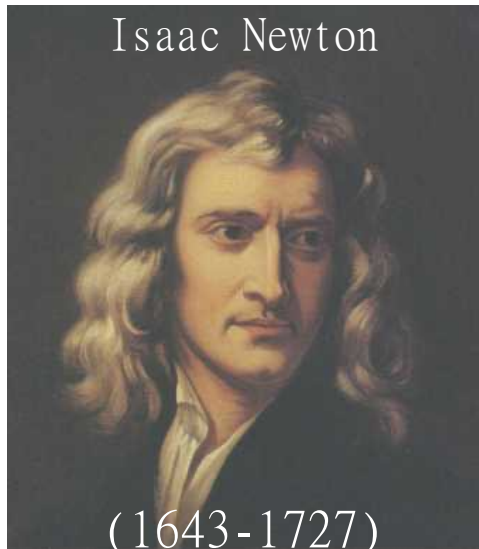
solo le masse sono diverse

$$m_{\mu} \sim 200 m_e$$

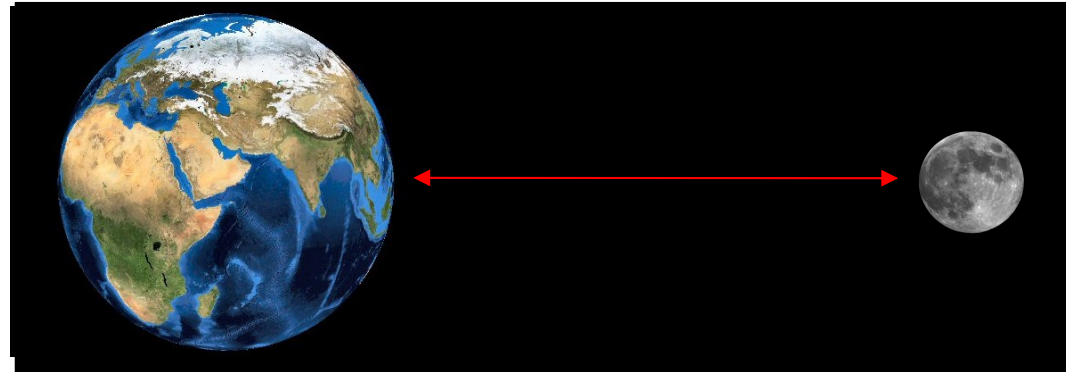
$$m_{\tau} \sim 3000 m_e$$

tavola periodica del 2026

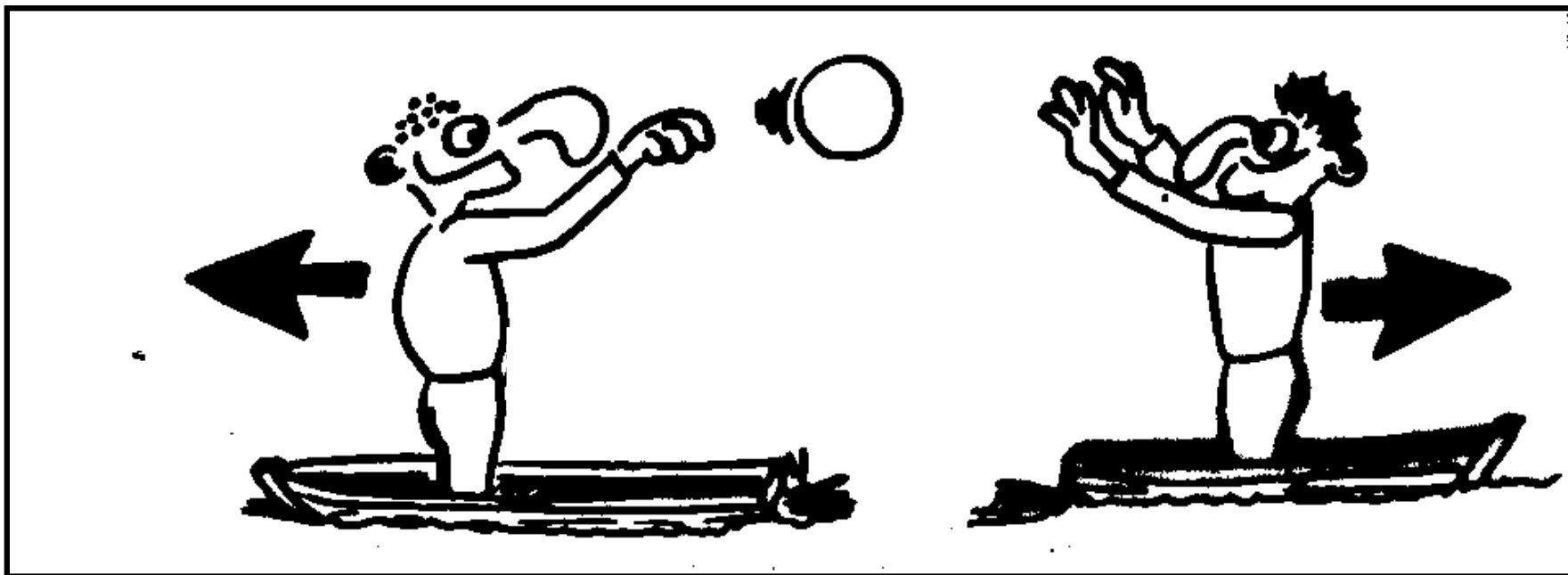
le interazioni



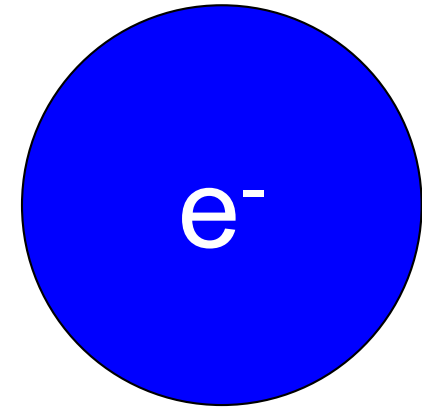
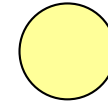
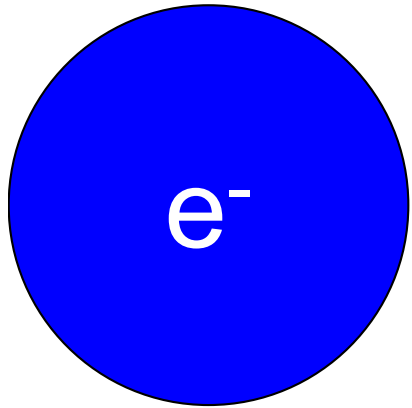
descrizione antica:
azione istantanea a distanza



descrizione moderna: scambio di particelle

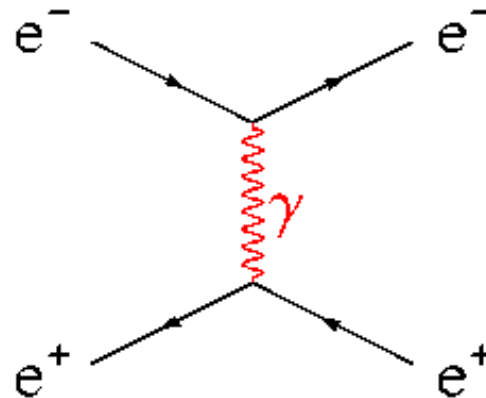


interazione elettromagnetica

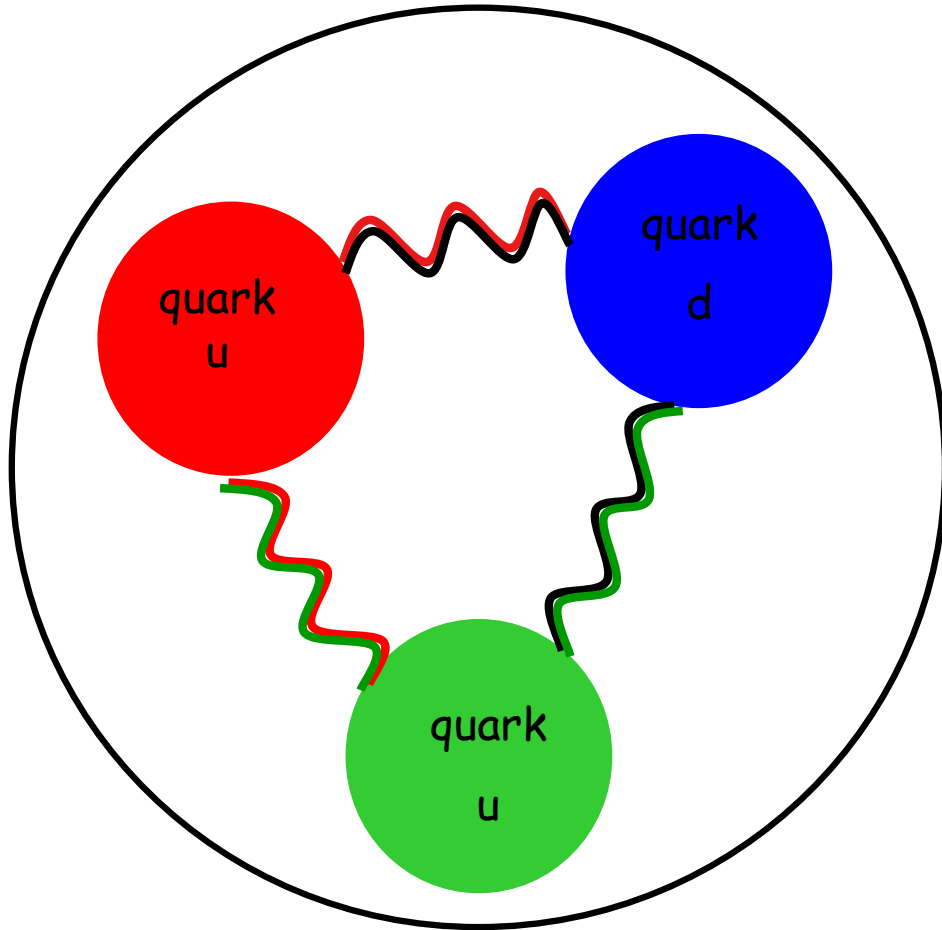


mediatore: « fotone »

massa = 0



interazione « forte »



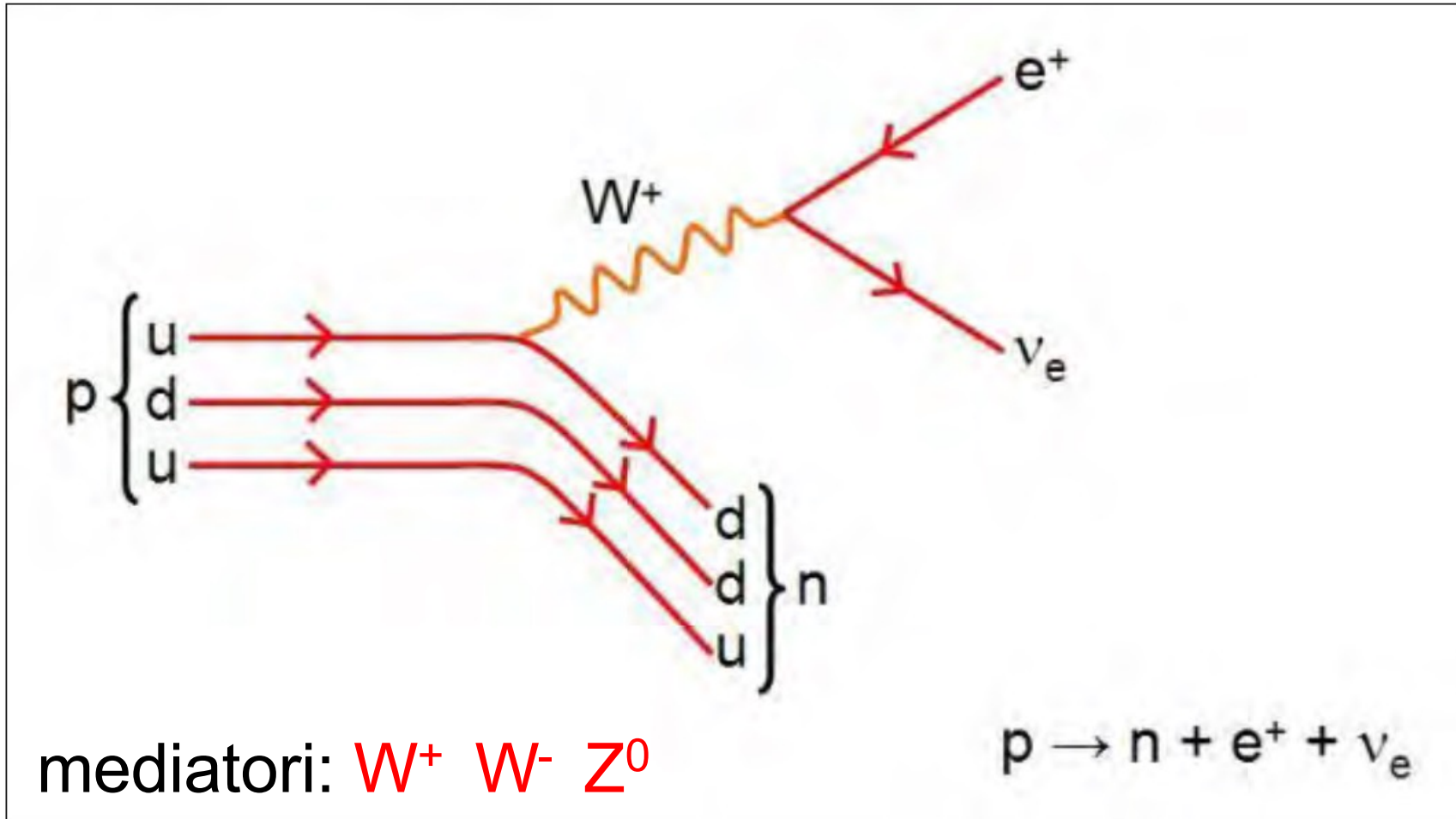
oltre alla carica elettrica, i quark hanno un "colore": "blu" "verde" "rosso" il protone è "incolore"

mediatori: « gluoni »

massa = 0

i gluoni tengono insieme i quark dentro il protone

interazione « debole »



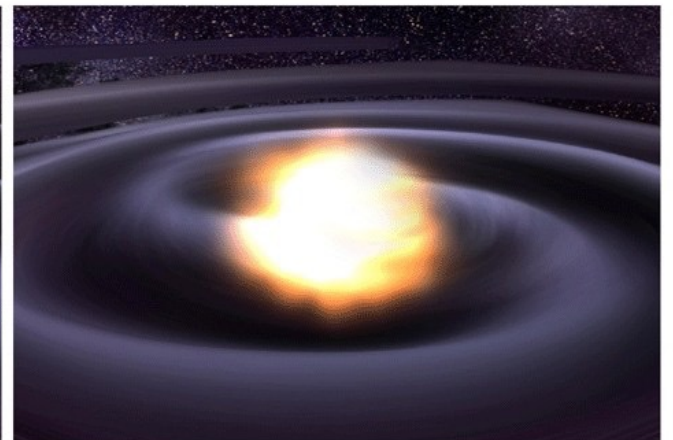
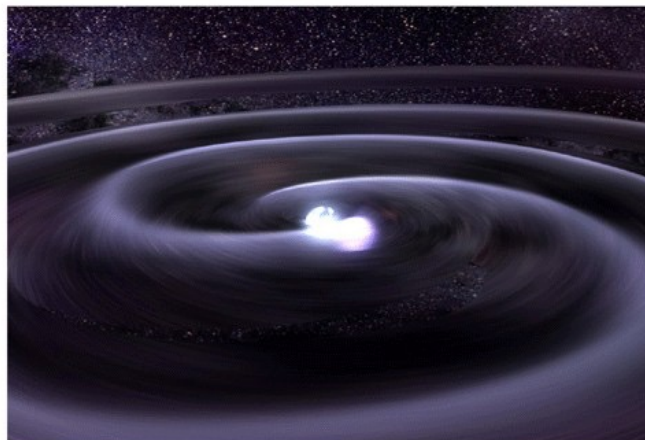
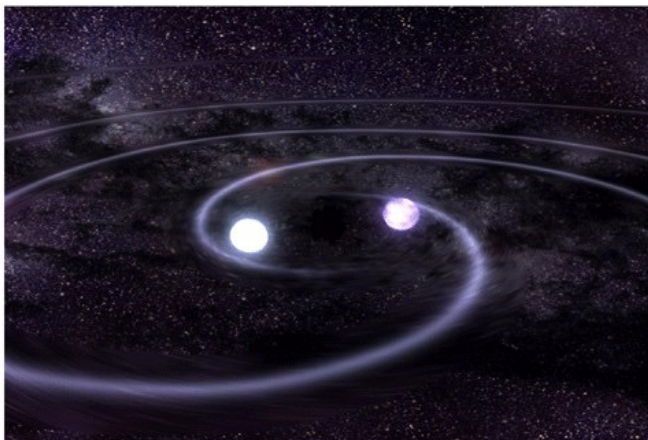
massa circa 90 volte la massa del protone

esiste una quarta interazione: **la gravità**

- caduta dei gravi
- moto dei pianeti
- moto delle galassie
- evoluzione dell'universo
- coalescenza di stelle di neutroni
- onde gravitazionali

ipotizzate nel 1916

osservate nel 2015



non sappiamo ancora come la gravità sia coinvolta nella fisica delle particelle elementari

il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2026

3rd generation

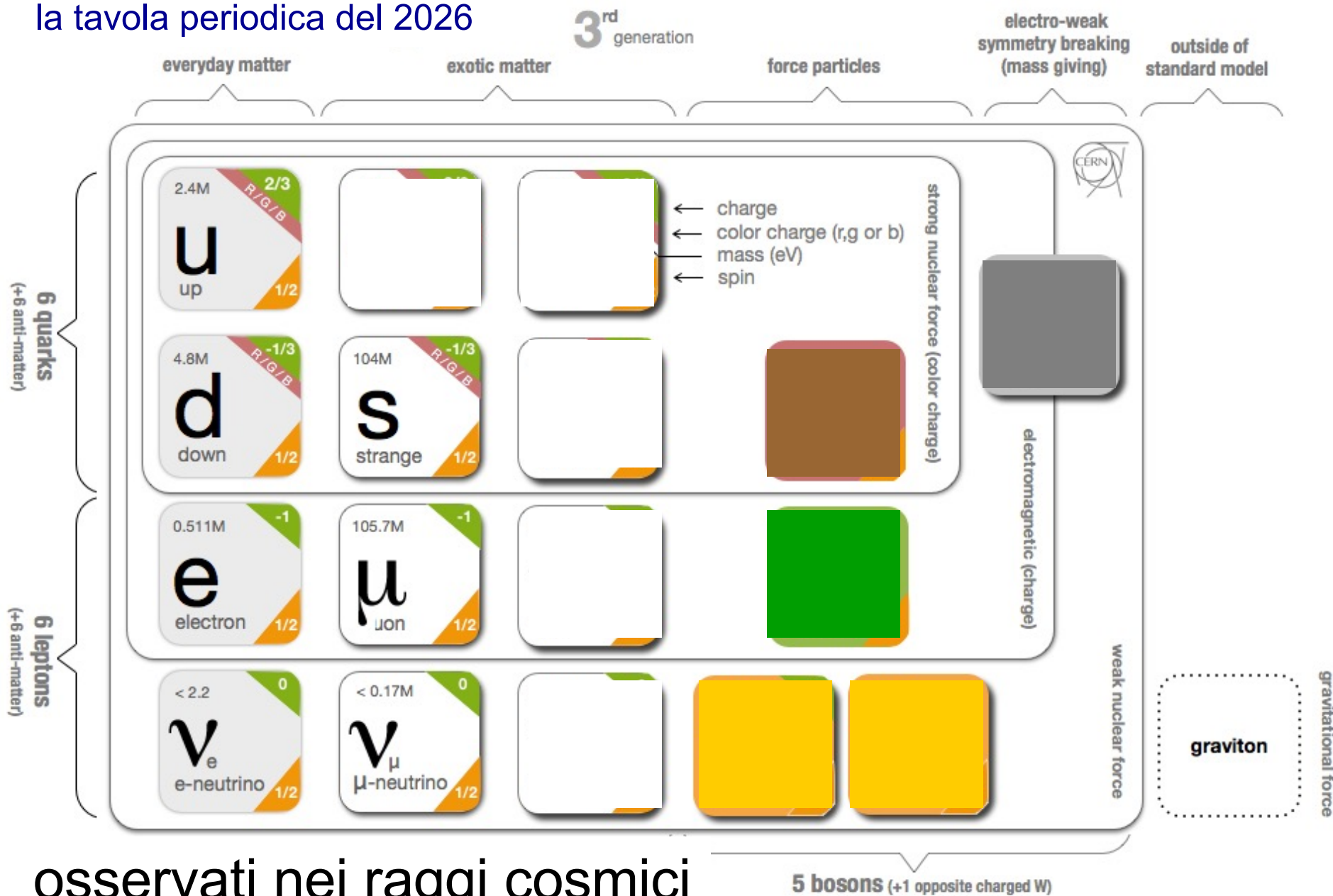
electro-weak symmetry breaking (mass giving)

outside of standard model



il Modello Standard **sommario**

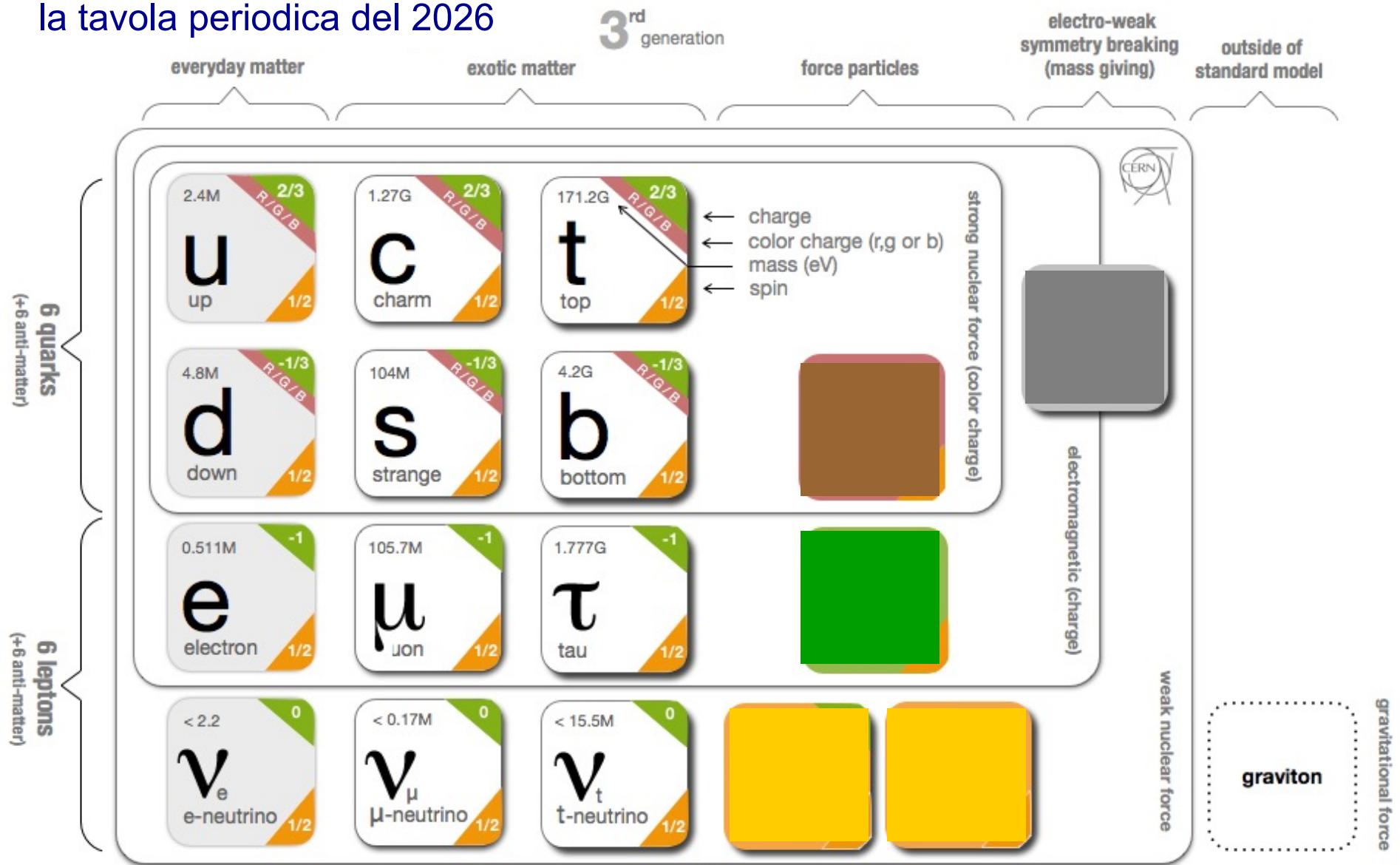
la tavola periodica del 2026



osservati nei raggi cosmici

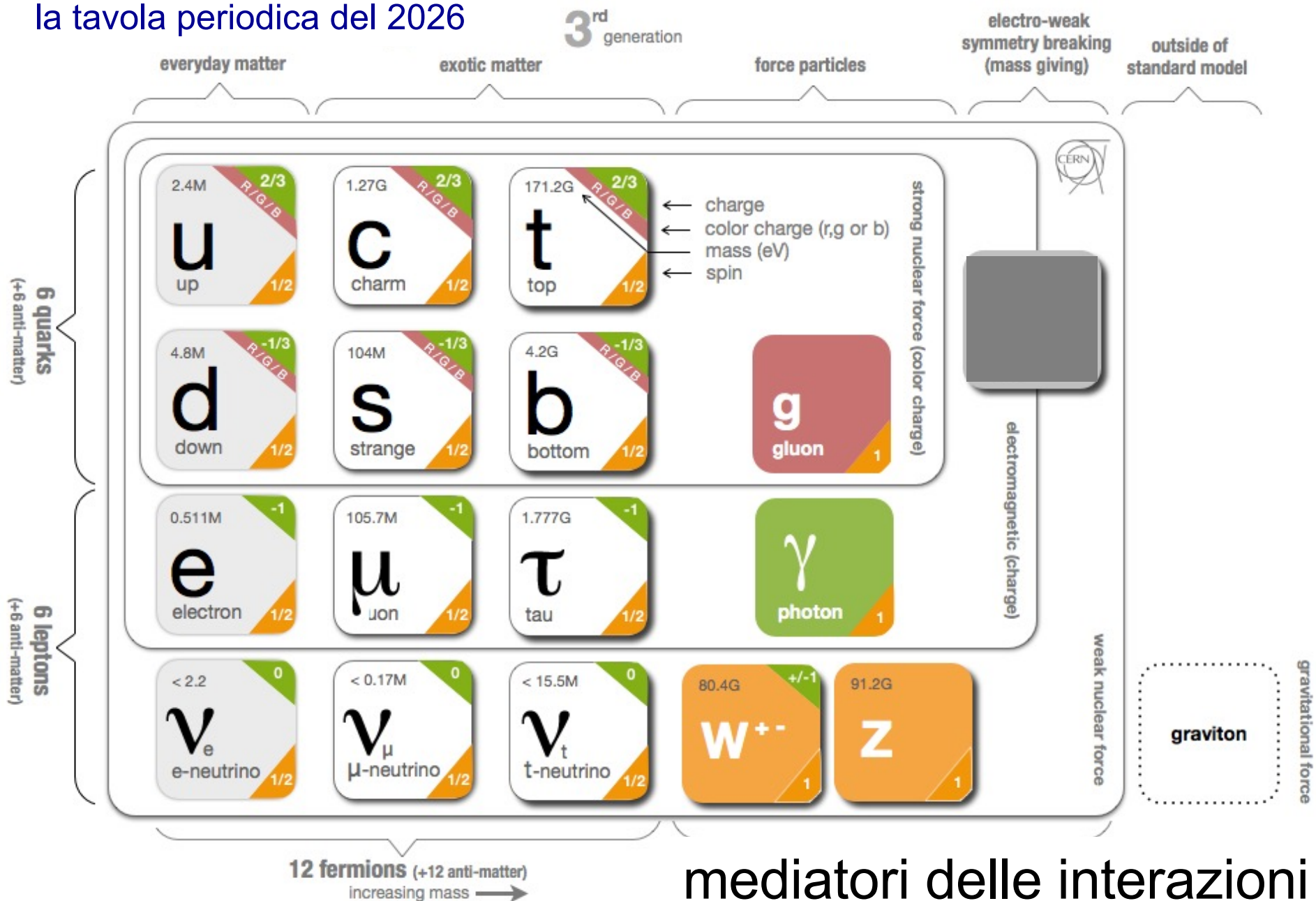
il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2026



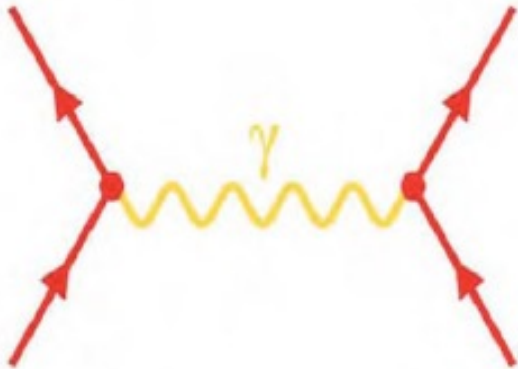
il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2026

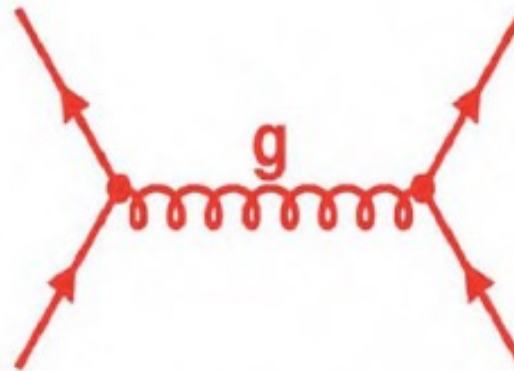


Mediatori delle interazioni

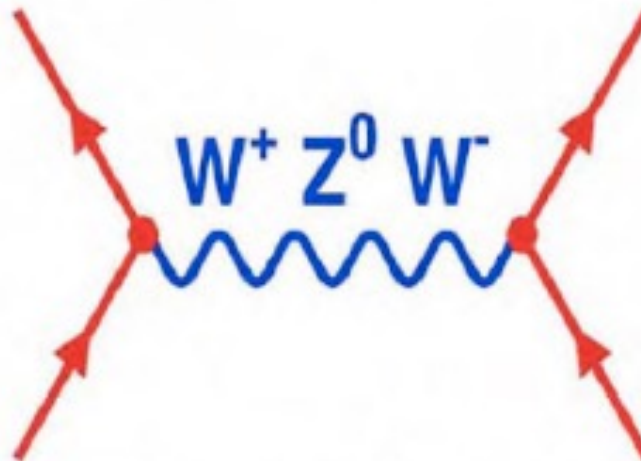
fotoni: mediatori delle interazioni elettromagnetiche



gluoni: mediatori delle interazioni "forti"



tre mediatori delle interazioni "deboli" W^{\pm} , Z^0

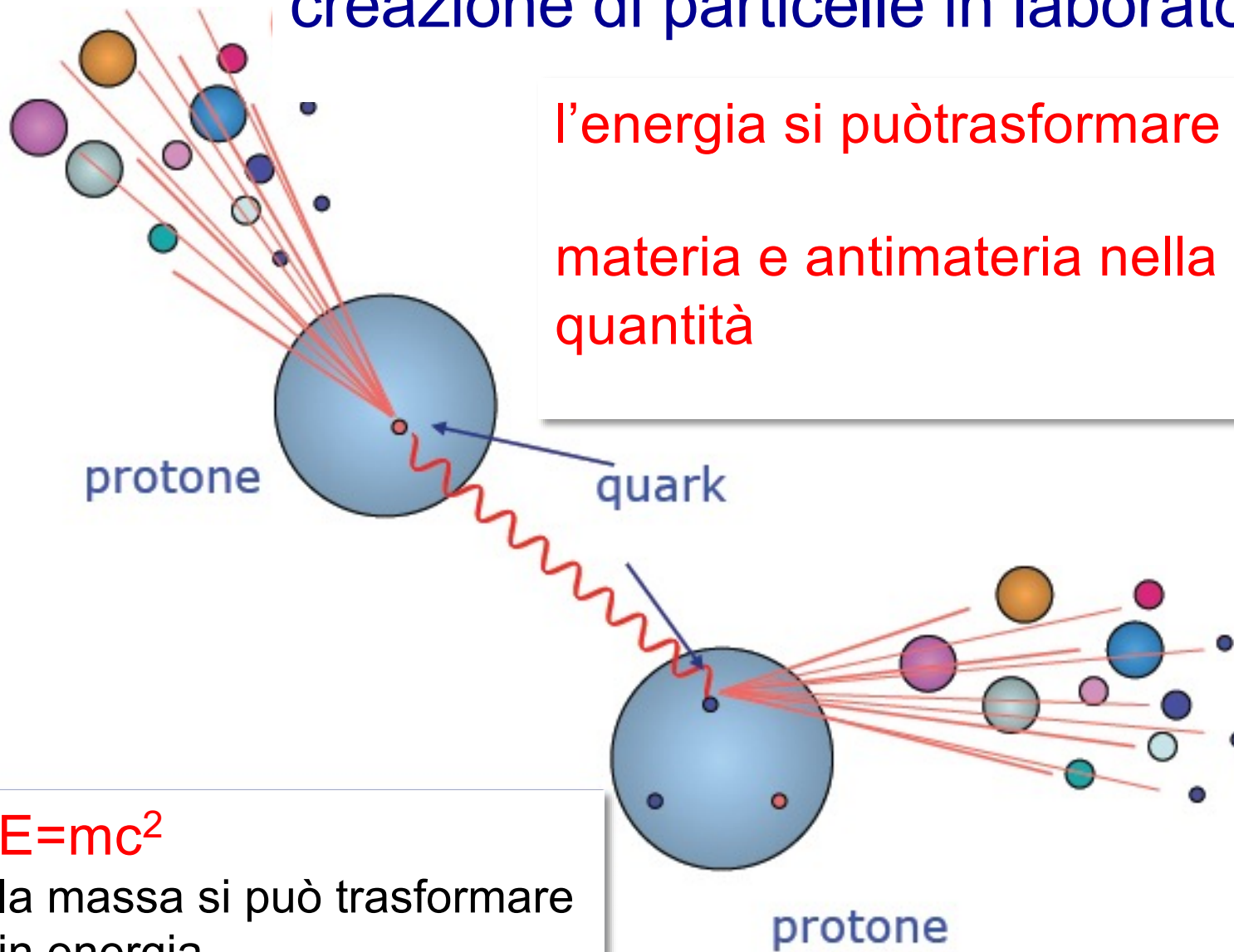


← processi importanti nello studio di oggi



creazione di particelle in laboratorio

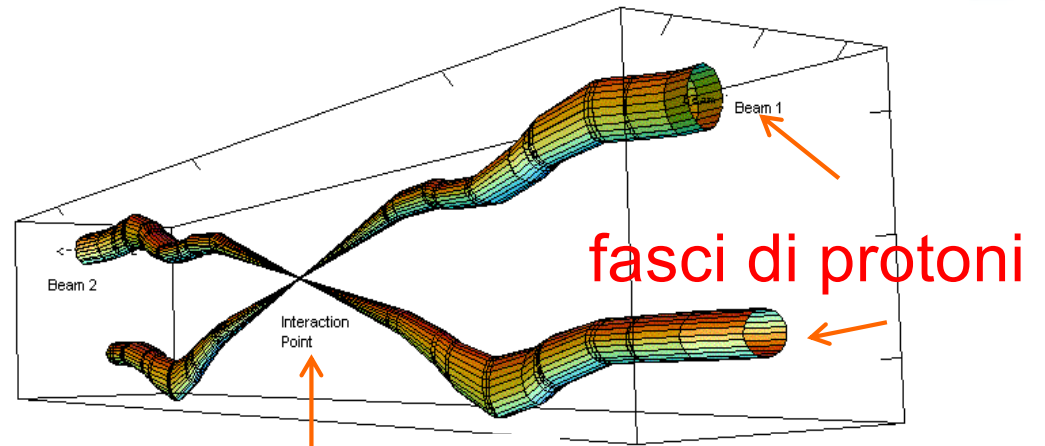
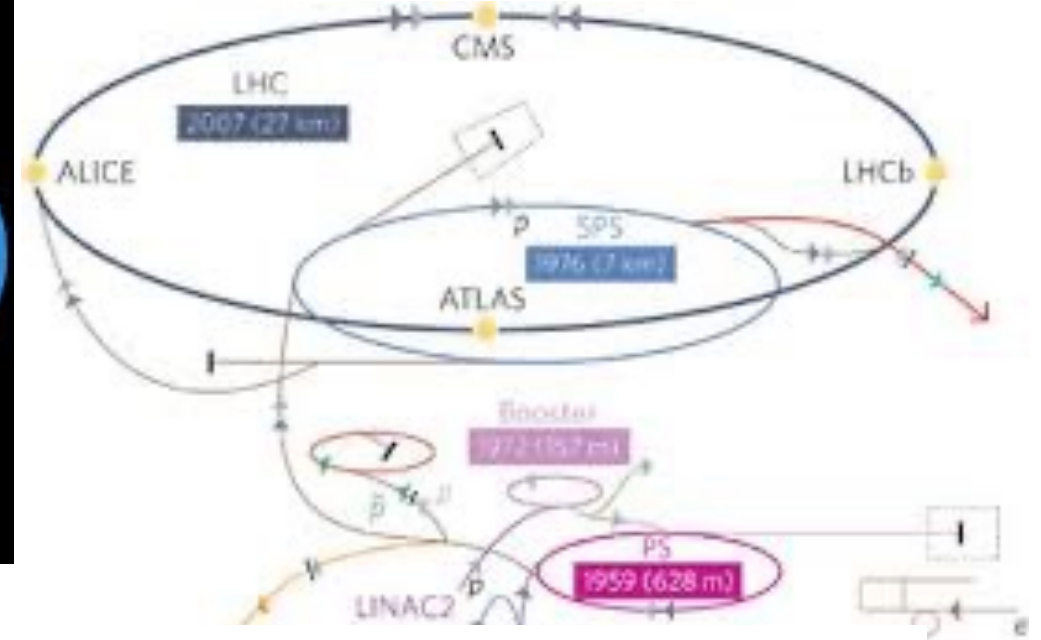
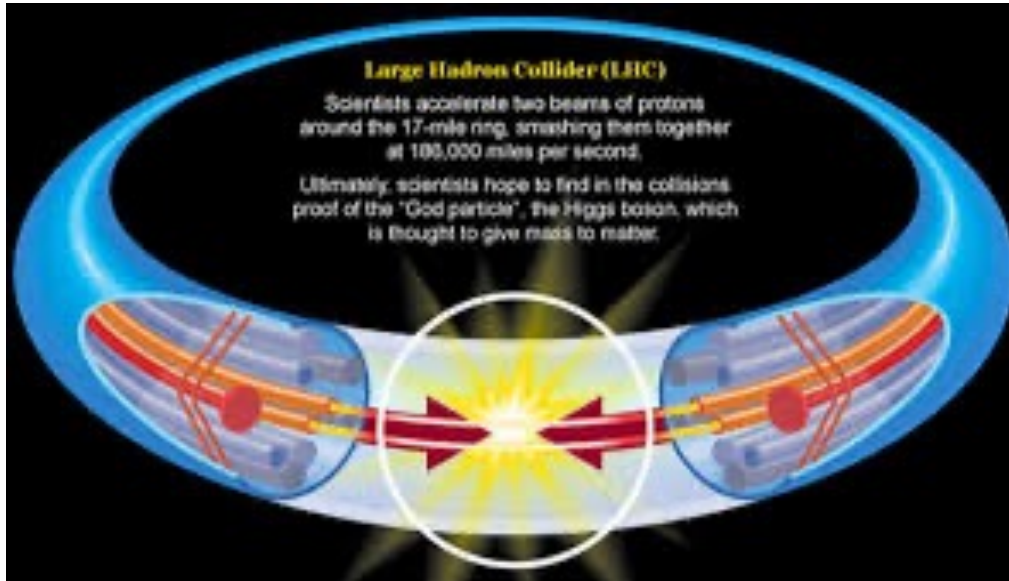
l'energia si può trasformare in materia
materia e antimateria nella stessa
quantità



$$E=mc^2$$

la massa si può trasformare
in energia
e viceversa

al Large Hadron Collider (LHC) del CERN queste particelle possono essere prodotte



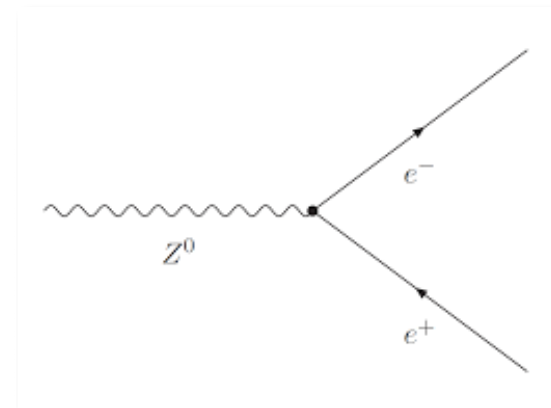
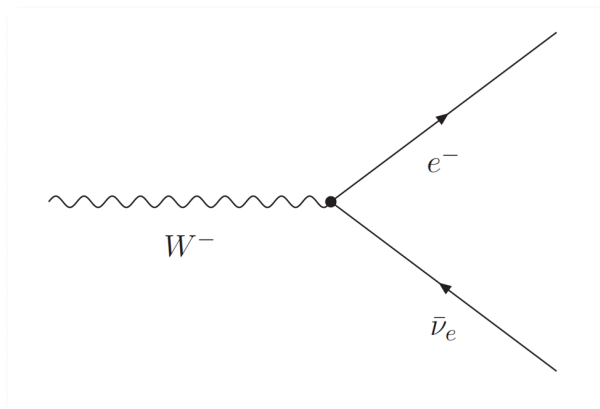
punto di collisione

al Large Hadron Collider (LHC) del CERN queste particelle possono essere prodotte

ad ogni singola collisione vengono prodotti

- quark e antiquark
- leptoni (elettroni, muoni, tauoni) con le loro antiparticelle
- neutrini e le loro antiparticelle
- mediatori delle interazioni (gluoni, W, Z)
- altro?

queste particelle a loro volta decadono

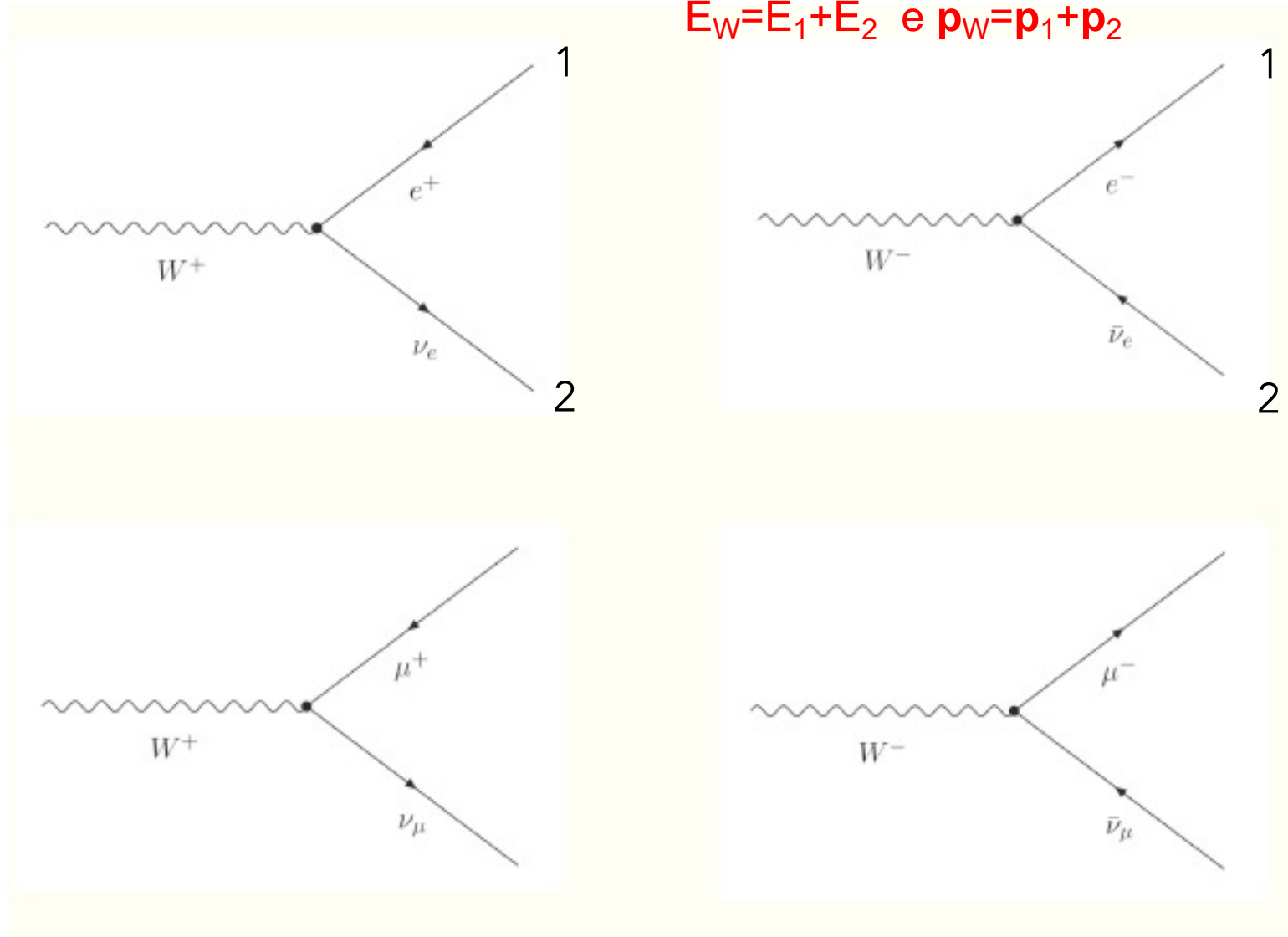


decadimenti dei W^+ e W^-

ogni particella è caratterizzata da massa m , quantità di moto \mathbf{p} e energia E con la relazione $E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$

nel decadimento $W \rightarrow 1+2$

$$E_W = E_1 + E_2 \quad \text{e} \quad \mathbf{p}_W = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$$

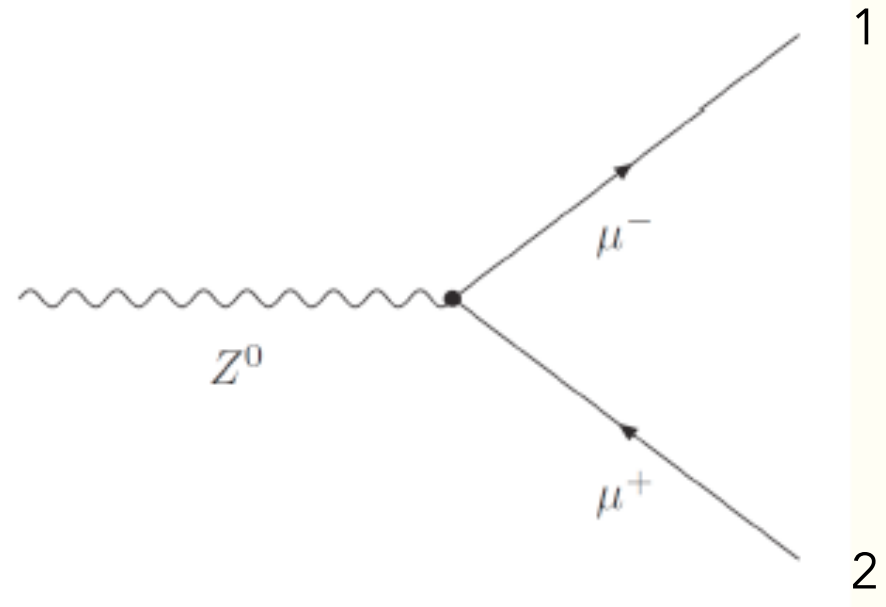
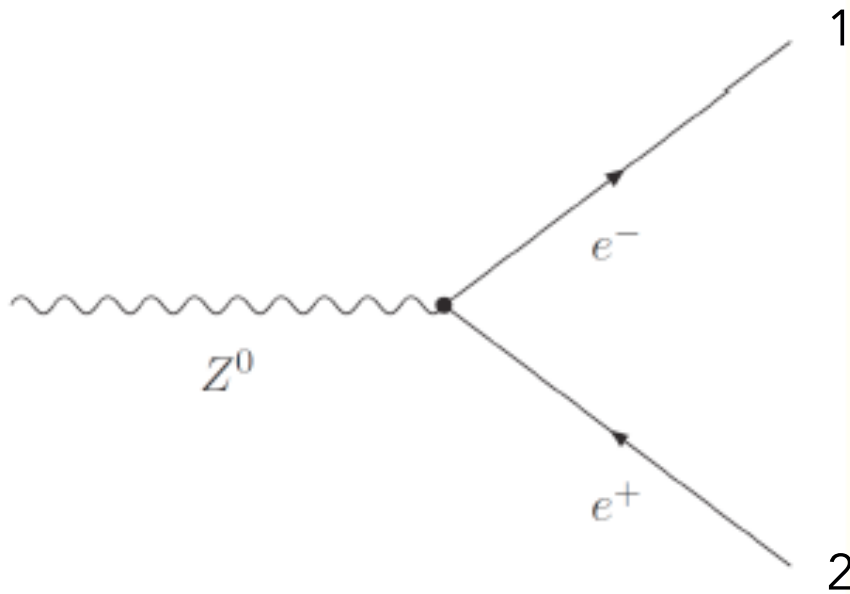


decadimenti della Z^0

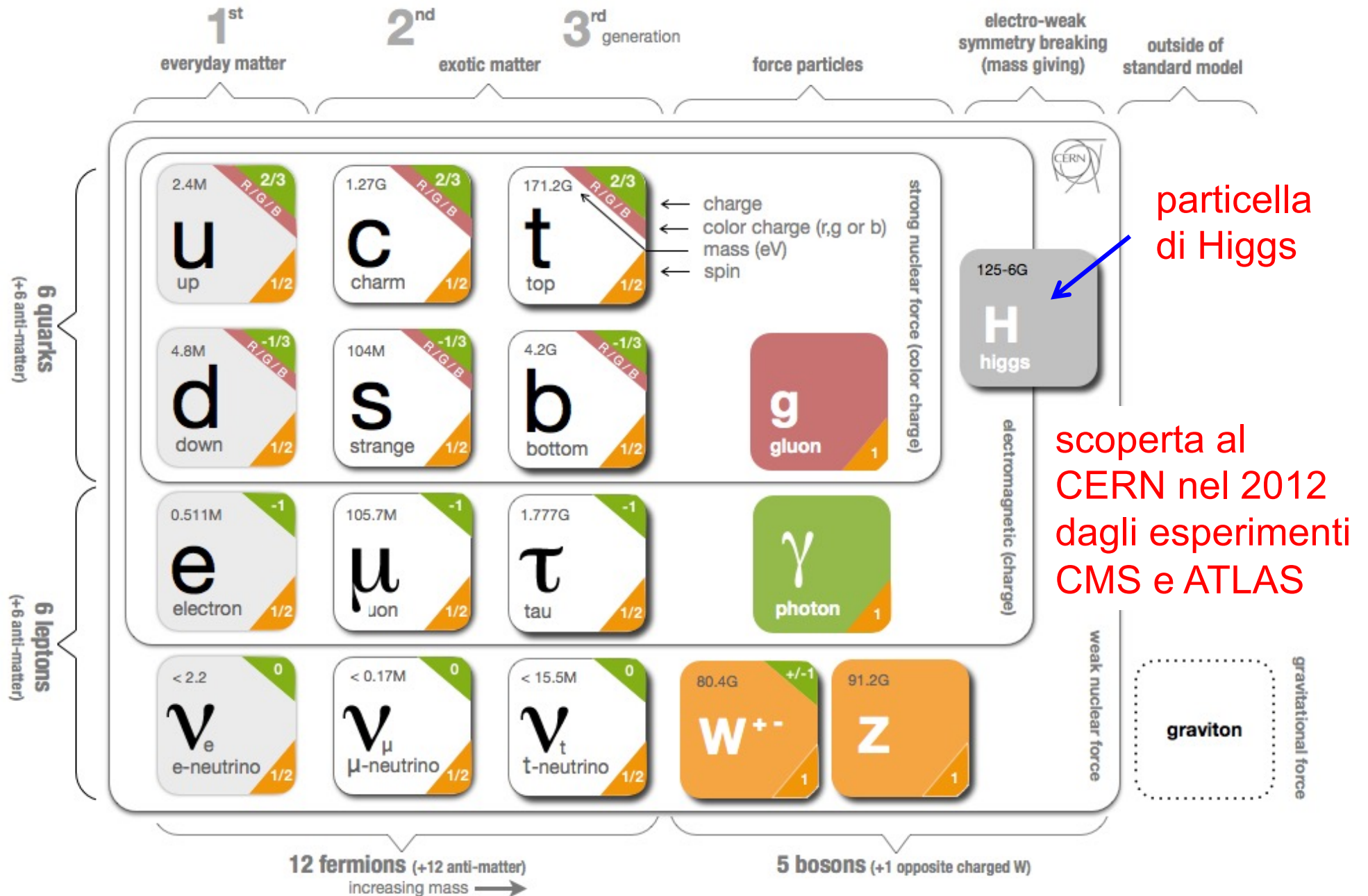
ogni particella è caratterizzata da massa m , quantità di moto \mathbf{p} e energia E con la relazione $E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$

nel decadimento $Z \rightarrow 1+2$

$$E_Z = E_1 + E_2 \quad \text{e} \quad \mathbf{p}_Z = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$$



il Modello Standard **sommario**



Come funziona il campo di Higgs

Alla ricerca della particella che dà la massa alla materia

Il campo **permea tutto l'universo**.
Le particelle che lo attraversano
avvertono ognuna
una resistenza diversa.
Questa **resistenza** è quella
che chiamiamo **massa**

CAMPO DI HIGGS

Particelle di massa
piccolissima o zero
(fotoni, elettroni, ecc.)

Particelle
di massa media
(muoni, ecc.)

Particelle
di grande massa
(quark top, ecc.)

Per spiegare come mai
la materia abbia massa,
il fisico Peter Higgs
nel 1960 ha ipotizzato
l'esistenza del bosone
di Higgs.

Il bosone di Higgs
è la particella che dà
la massa a tutte le altre.
Ciò avviene quando queste
interagiscono col campo
prodotto dall'Higgs.

Lo studio delle
proprietà della
particella di Higgs
è uno degli scopi
degli esperimenti
al CERN

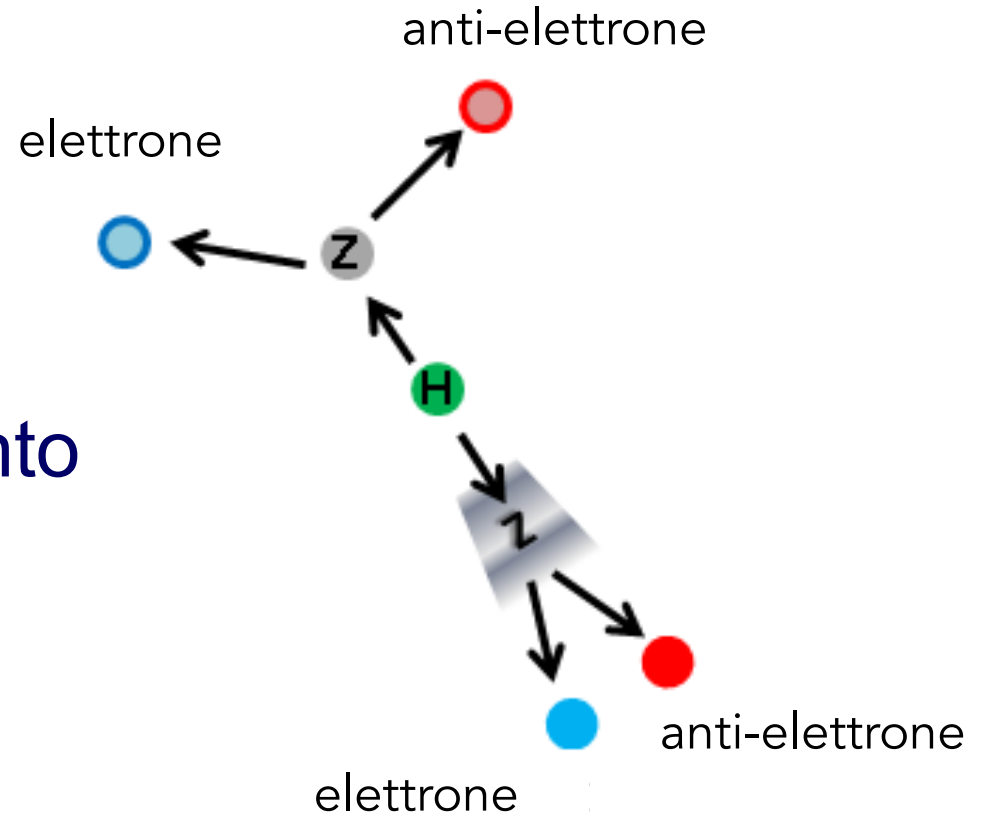
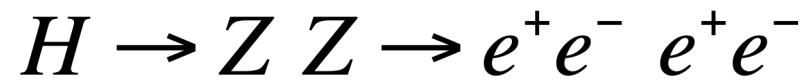


Fonte: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

centimetri.it

la particella di Higgs è l'ultima scoperta (2012)

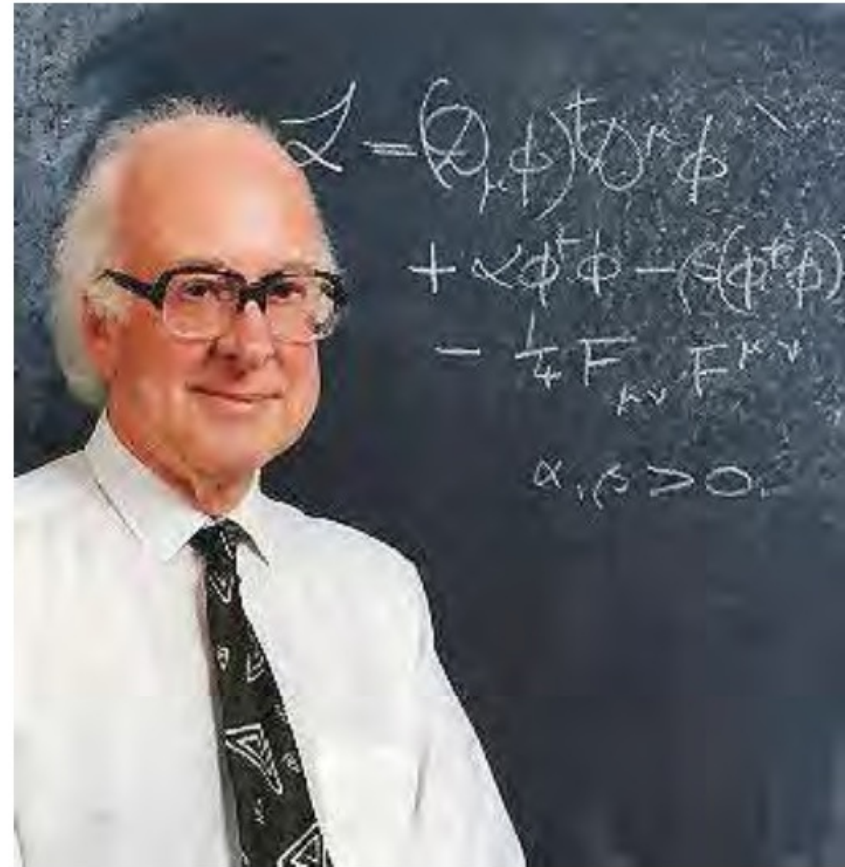
un possibile decadimento





Carlo Rubbia
scoperta delle particelle
 $W^+ W^- Z^0$

premio Nobel 1984



Peter Higgs
(con Francois Englert e Robert Brout
e altri)

ipotesi della particella H

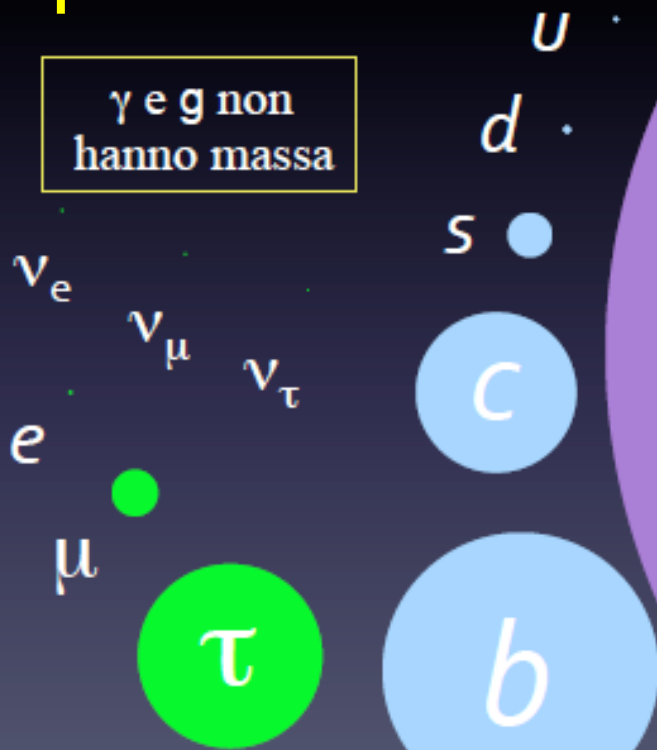
premio Nobel 2013

Il Modello Standard non spiega tutto

le particelle hanno una massa enormemente diversa fra loro

perchè?

γ e g non hanno massa



$$m(\square) \sim 200 m(e)$$

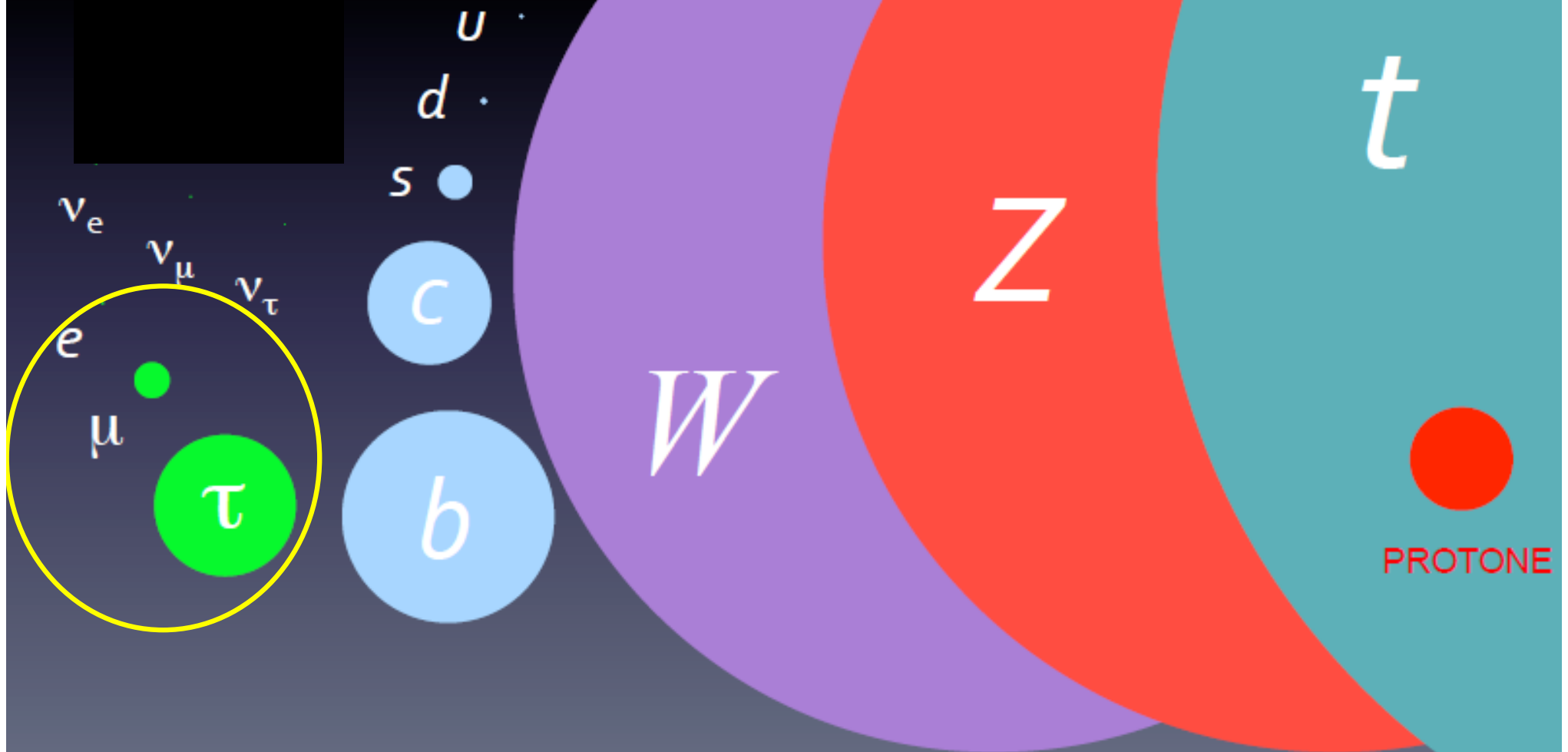
$$m(\tau) \sim 3000 m(e)$$

$$m(t) \sim 170000 m(u)$$

t

PROTONE

Il Modello Standard non spiega tutto
ci sono tre famiglie di quark e leptoni
perchè? ce ne sono altre?

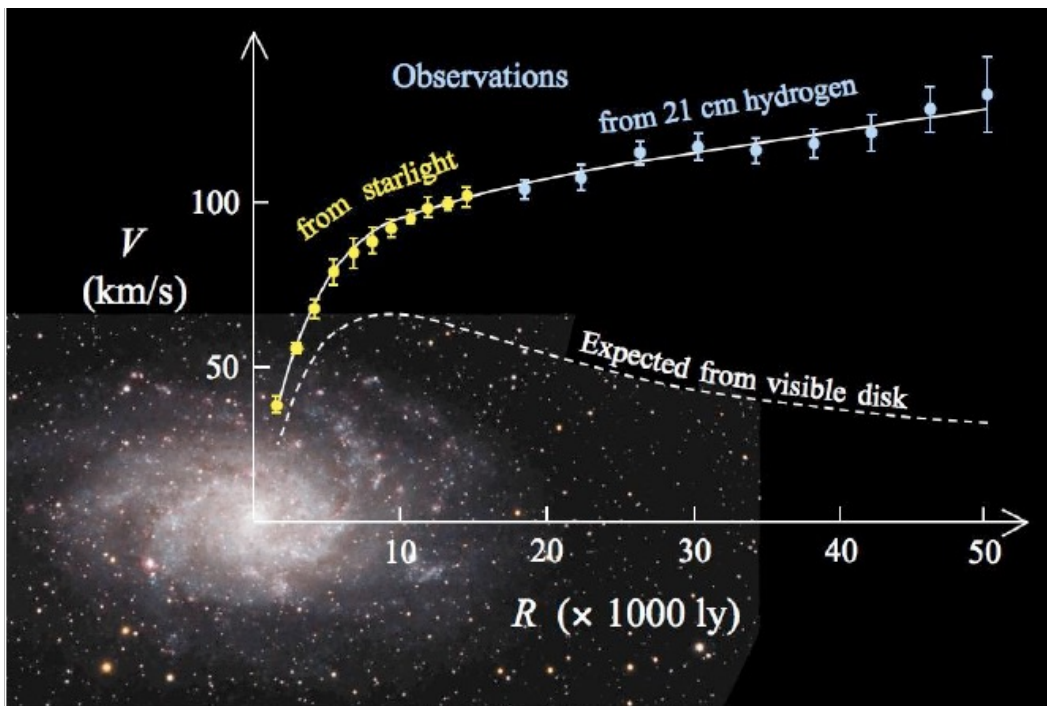


Il Modello Standard non spiega tutto

In origine, materia e antimateria sono state prodotte insieme e in egual misura

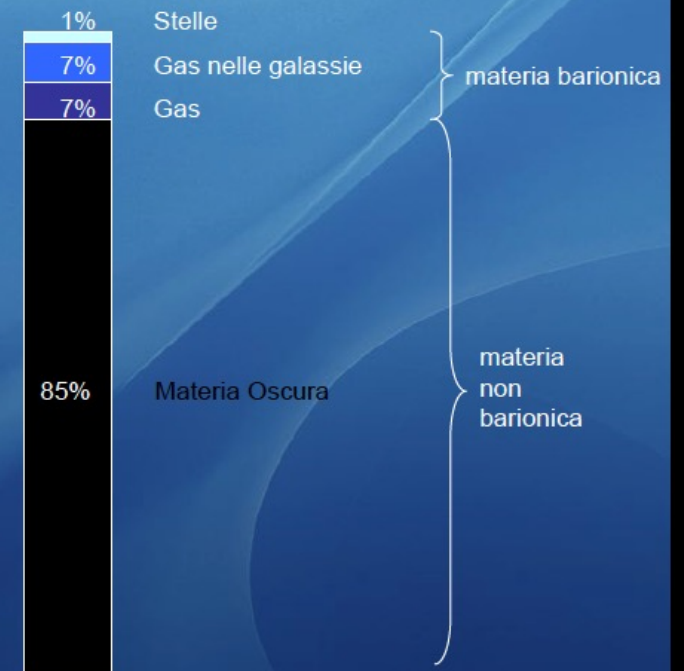
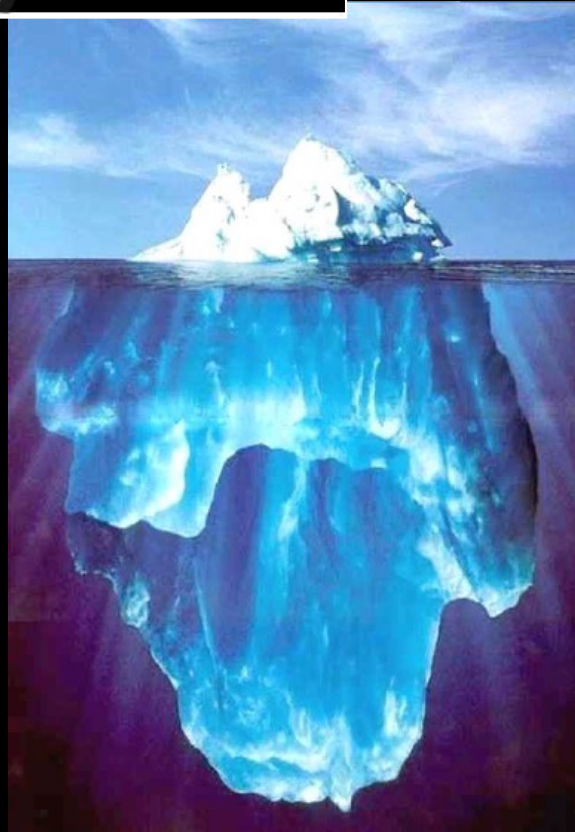
dov'è finita l'antimateria nell'universo?



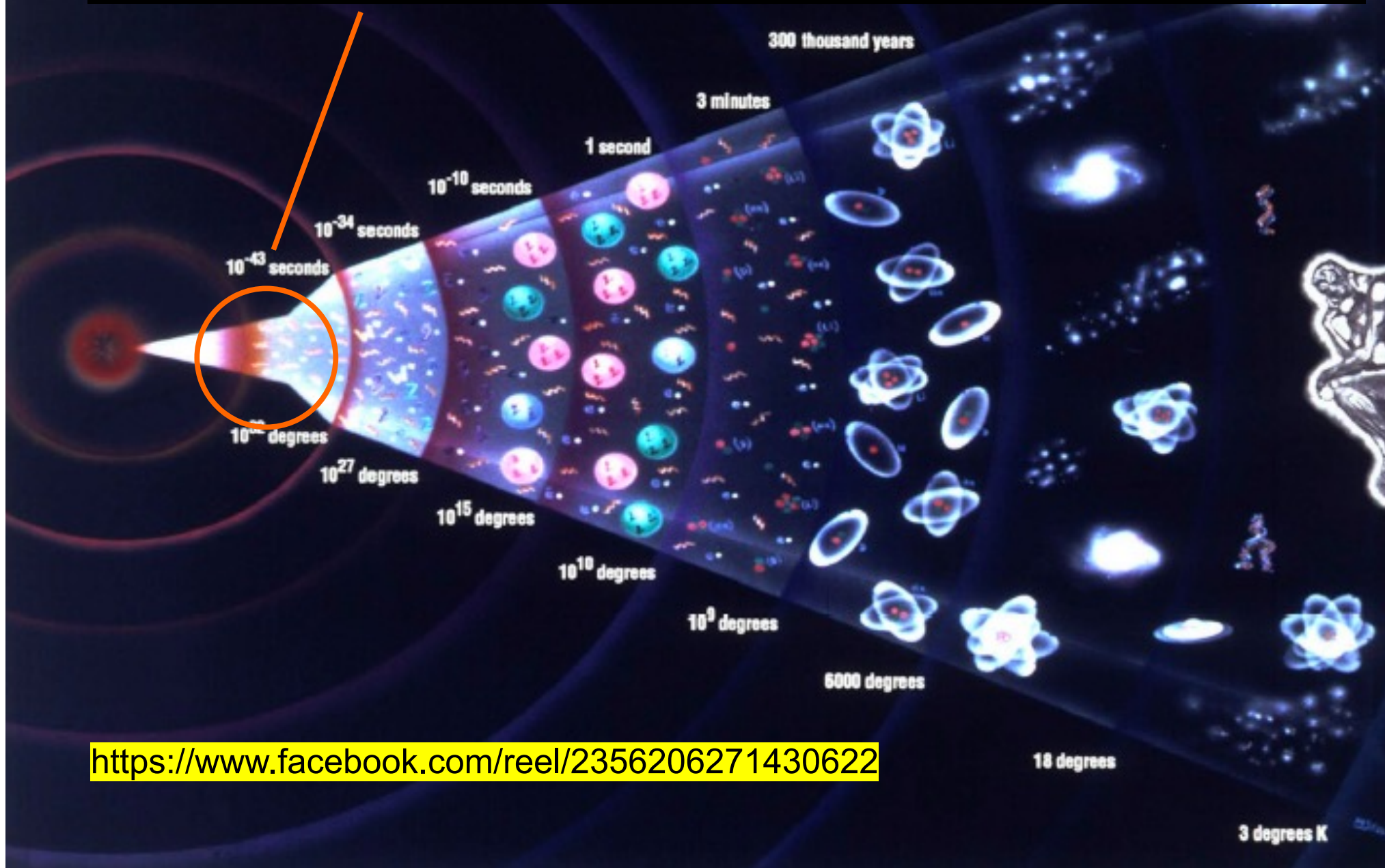


l'universo è composto di forme di materia e energia di cui non sappiamo nulla

di che si tratta?



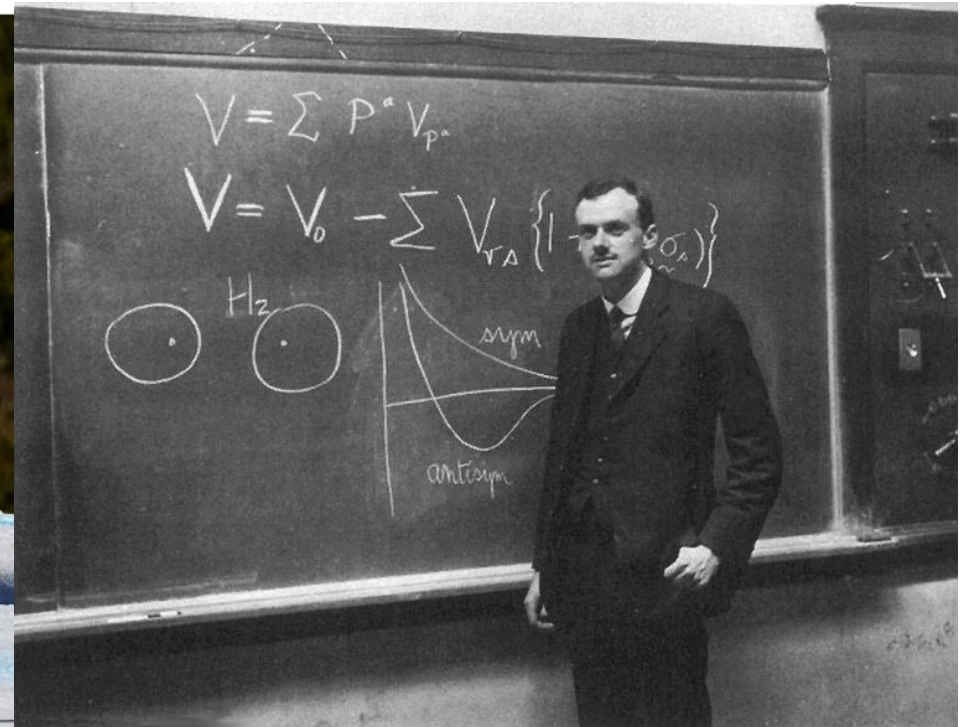
come si è evoluto l'universo
come era nei suoi primi istanti di esistenza?



<https://www.facebook.com/reel/2356206271430622>

sono alcune delle domande che caratterizzano la fisica dei nostri giorni

le risposte possono essere trovate con il contributo di singoli campioni



sono alcune delle domande che caratterizzano la fisica dei nostri giorni

le risposte possono essere trovate con il contributo di singoli campioni e con il lavoro di squadra



sono alcune delle domande che caratterizzano la fisica dei nostri giorni

le risposte possono essere trovate con il contributo di singoli campioni e con il lavoro di squadra

