

La fisica delle particelle elementari

masterclass dell'esperimento ALICE
(A Large Ion Collider Experiment)
al Large Hadron Collider (LHC)
del CERN di Ginevra

Bari, Dipartimento di Fisica

14 marzo 2025

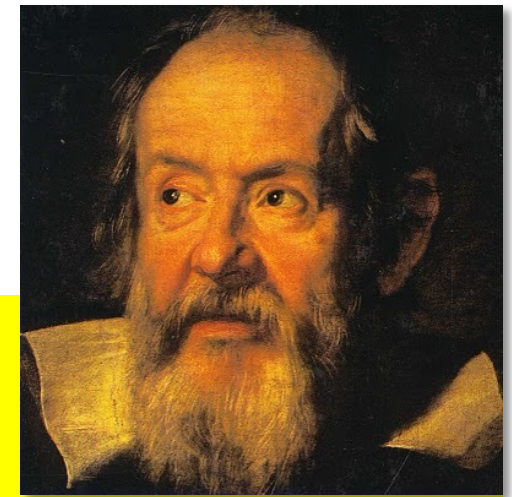


Pietro Colangelo
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Bari

«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

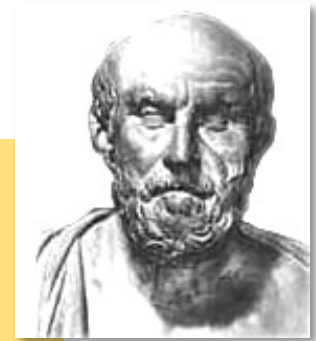


i progressi nella conoscenza avvengono quando si identificano gli aspetti fondamentali nella enorme varietà dei fenomeni osservati

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

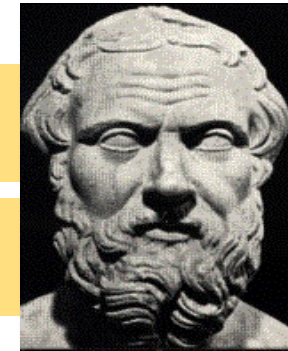
Empedocle (Akragas-Agrigento, V secolo a.C.)

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



Democrito (Abdera, 460 a.C.) (ripreso da Tito Lucrezio Caro)

atomi (materia) – vuoto (assenza di materia)



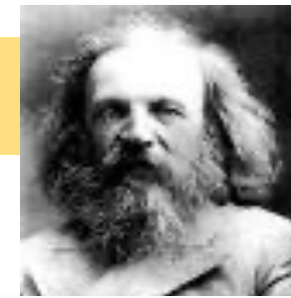
John Dalton (Eaglesfield, 1766 – Manchester, 1844)

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

A diagram titled "ELEMENTS" showing a list of elements with their atomic weights and symbols. The elements are arranged in two columns. Each element is represented by a unique symbol and a corresponding atomic weight.

Element	Symbol	Atomic Weight
Hydrogen	H	1
Air	A	5
Carbon	C	5
Oxygen	O	7
Phosphorus	P	9
Sulphur	S	16
Magnesia	M	28
Lime	L	28
Soda	S	28
Potash	P	40
Strontian	S	88
Barytes	B	68
Iron	I	56
Zinc	Z	56
Copper	C	56
Lead	L	90
Silver	S	190
Gold	G	190
Platina	P	190
Mercury	M	167

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



elementi classificati in base al numero atomico

(numero di protoni nel nucleo)

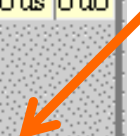
predizione di atomi

non ancora osservati

Reihen	Gruppe I. R ² O	Gruppe II. RO	Gruppe III. R ² O ³	Gruppe IV. RH ⁴ RO ²	Gruppe V. RH ³ R ² O ⁵	Gruppe VI. RH ² RO ³	Gruppe VII. RH 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		

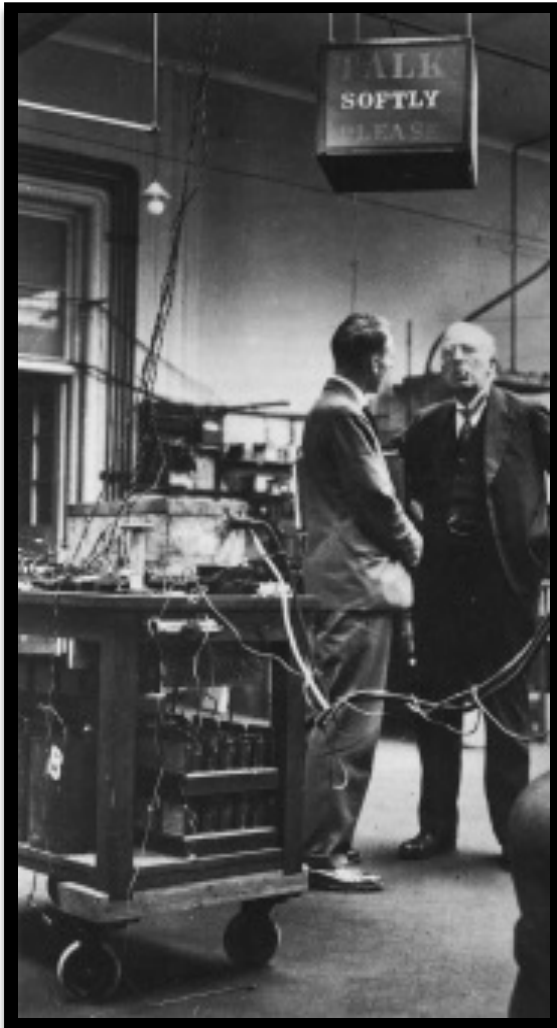
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period																			
1	H																		He
2	Li	Be											B	C	N	O	F		Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl		Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br		Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I		Xe
6	Cs	Ba	*	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	**	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
*Lanthanides	*		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70			
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb			
**Actinides	**		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102			
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No			

4 nuovi elementi scoperti negli ultimi anni



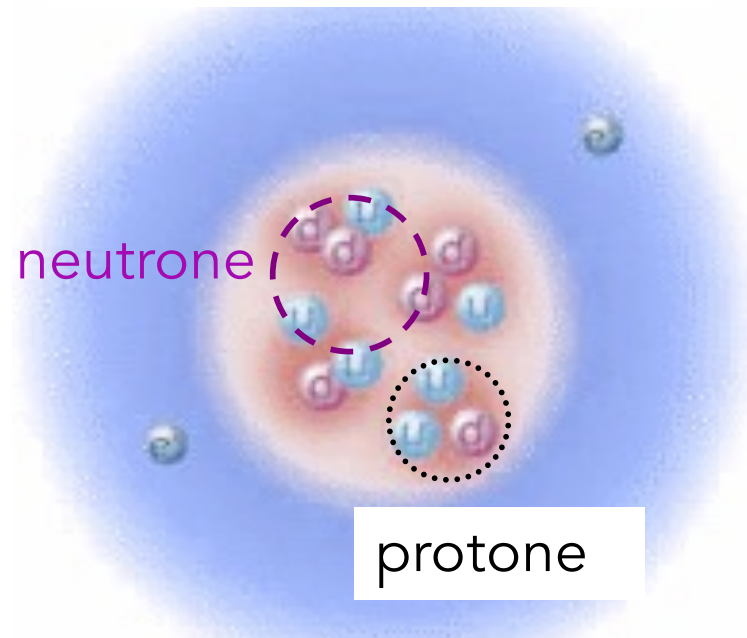
Ernest Rutherford (Brightwater, 1871 – Cambridge, 1937)

gli atomi hanno una struttura

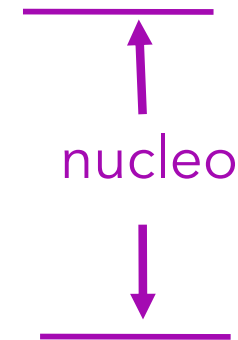


atomo:

1 Angstrom = 10^{-10} m



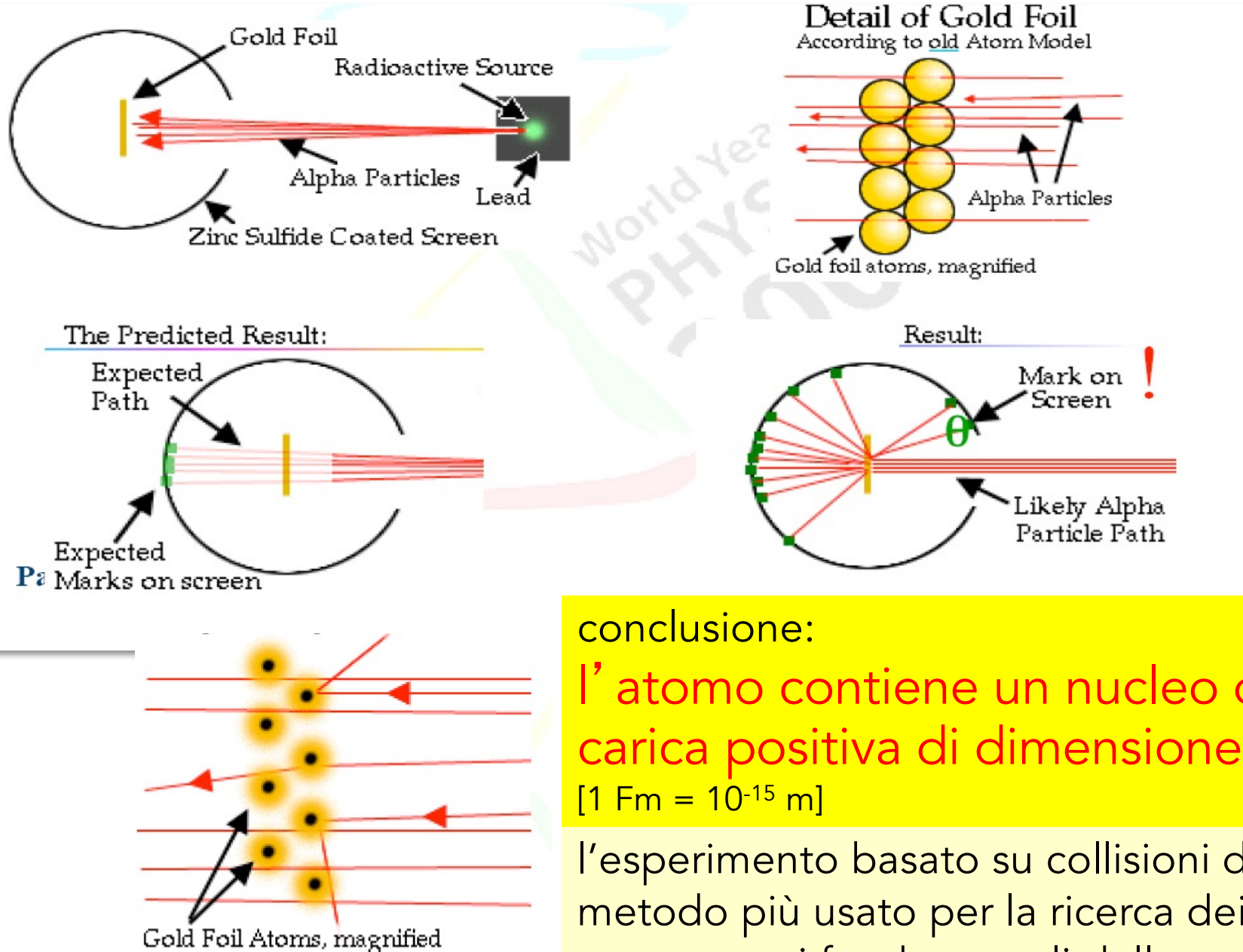
1 Fermi = 10^{-15} m



10 Fermi = 10^{-14} m

gli atomi hanno una struttura

Rutherford



conclusione:

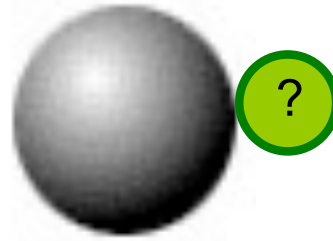
l'atomo contiene un nucleo di carica positiva di dimensione $< 10 \text{ Fm}$
[$1 \text{ Fm} = 10^{-15} \text{ m}$]

l'esperimento basato su collisioni diventa il metodo più usato per la ricerca dei componenti fondamentali della materia

neutrone James Chadwick (1932)

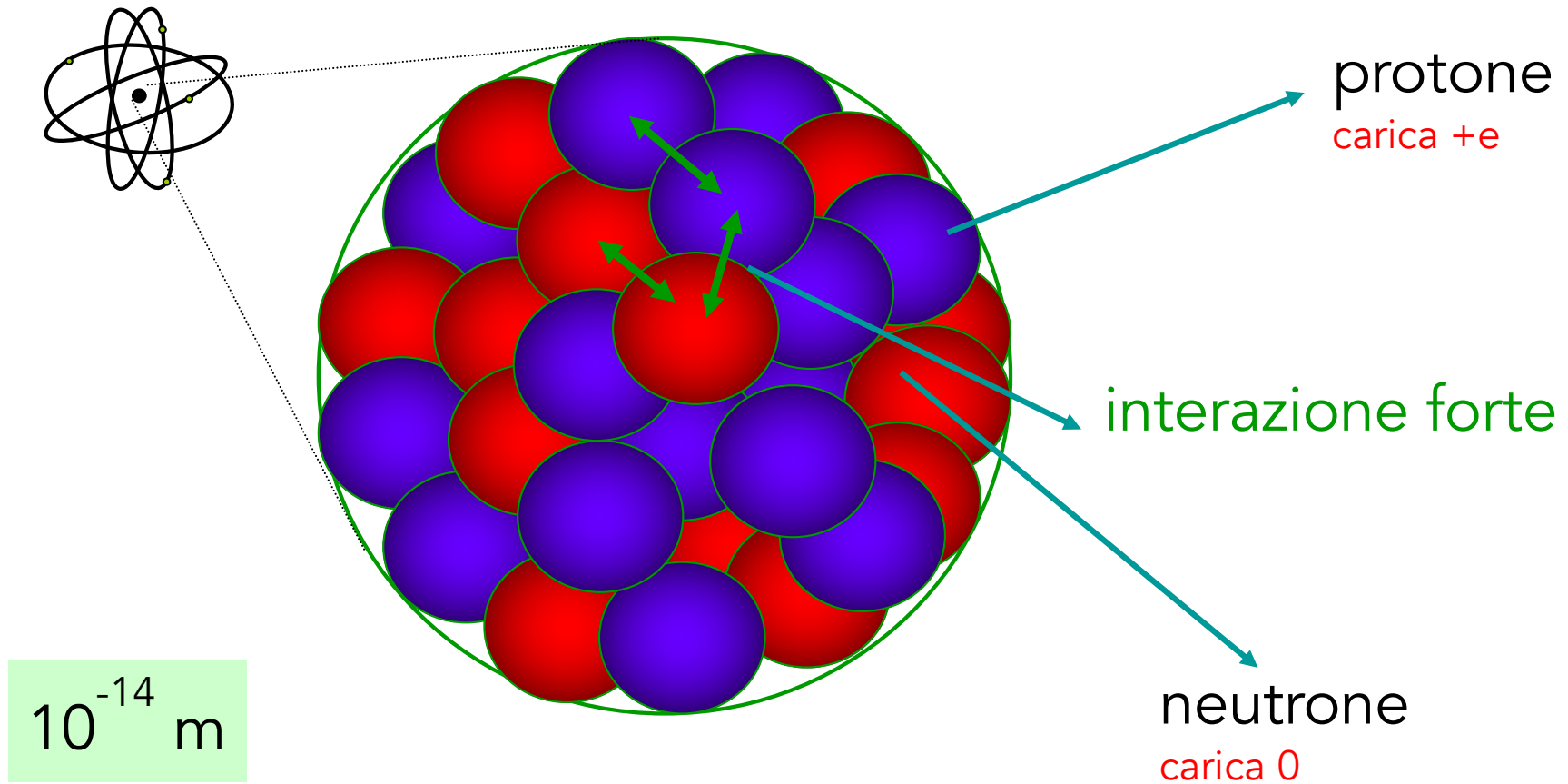
1930 - **Bothe e Becker** bombardano il berillio con particelle alfa: scoprono che dal berillio esce una radiazione neutra molto penetrante. **Frédéric Joliot e Irène Curie** dimostrano che escono delle particelle neutre in grado di espellere i protoni dalla paraffina

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



i nuclei sono formati da protoni e neutroni

i nuclei hanno una struttura



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

contemporaneamente si scopre l'antimateria

(meccanica quantistica + relatività)

predizione dell'esistenza del positrone (Paul Dirac 1928)

massa del positrone = massa dell'elettrone

carica del positrone = $+e$ (opposta all'elettrone)

«il libro della natura è scritto in caratteri
matematici»

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



contemporaneamente si scopre l'antimateria

(meccanica quantistica + relatività)

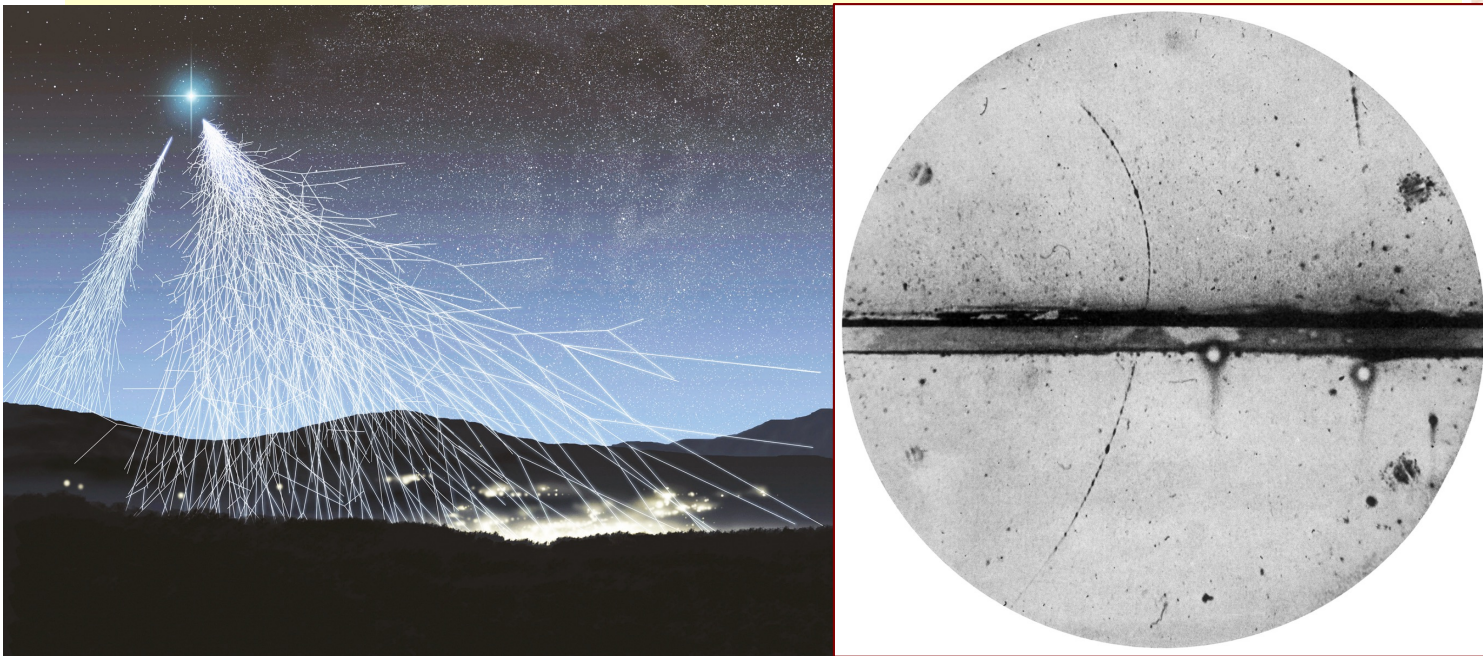
predizione dell'esistenza del positrone (Paul Dirac 1928)

massa del positrone = massa dell'elettrone

carica del positrone = $+e$ (opposta all'elettrone)

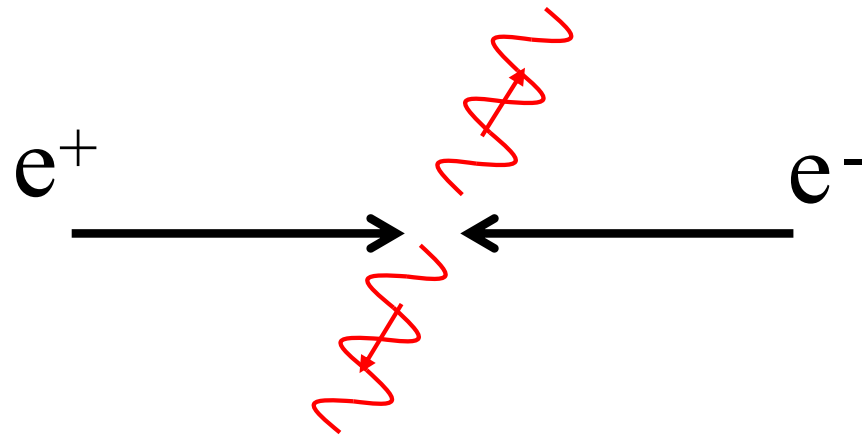


Anderson 1932



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

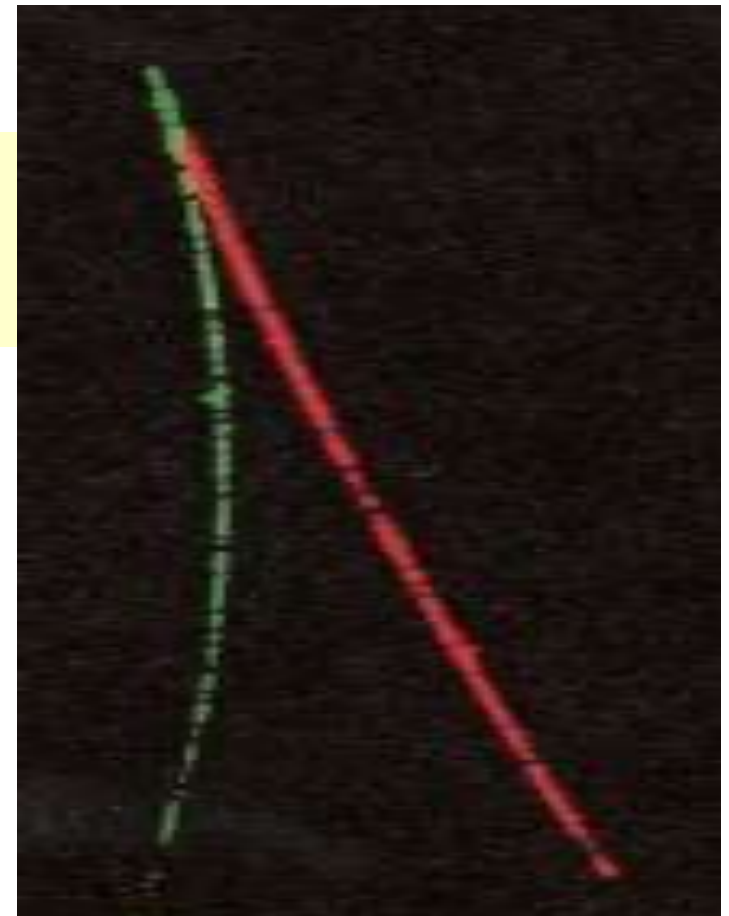
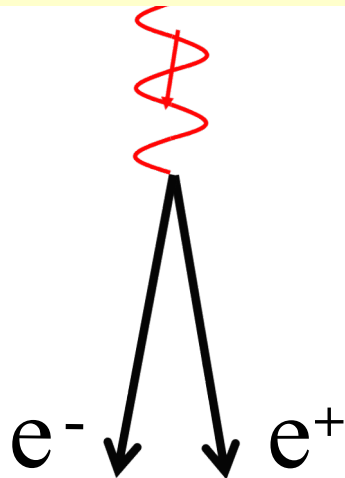
come si evidenzia l' antimateria?



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

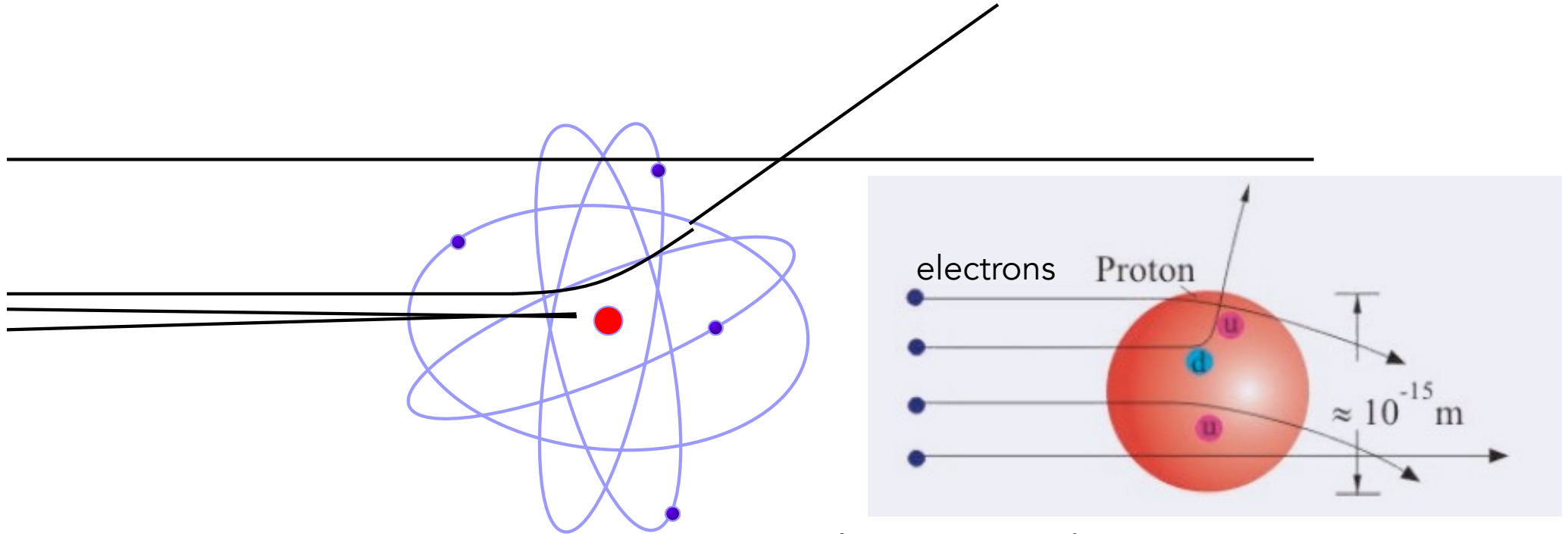
$$E = mc^2$$

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



anche protoni e neutroni hanno una struttura

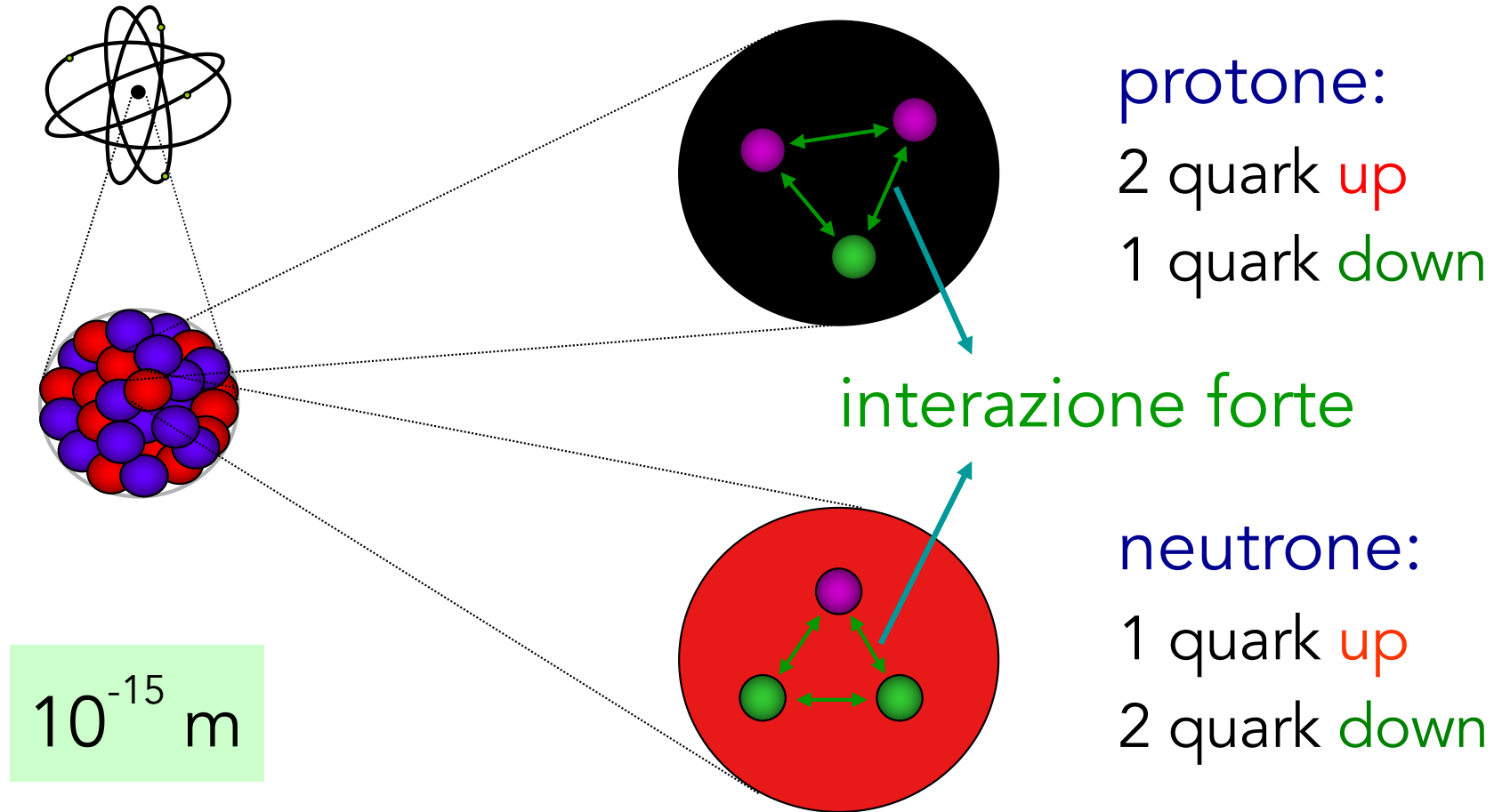
stesso metodo dell'esperimento di Rutherford



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

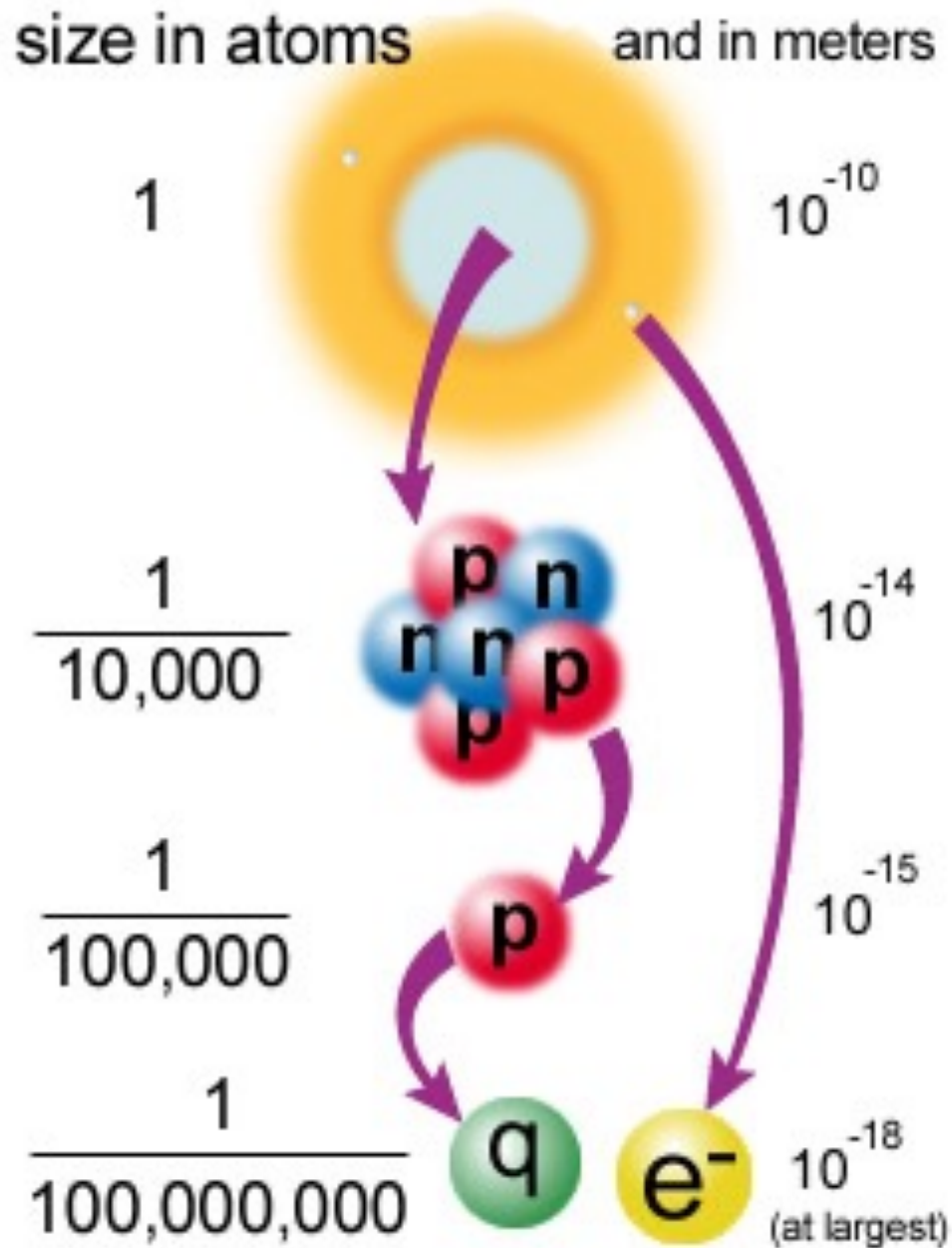
i componenti si chiamano "quark"

struttura dei protoni e dei neutroni

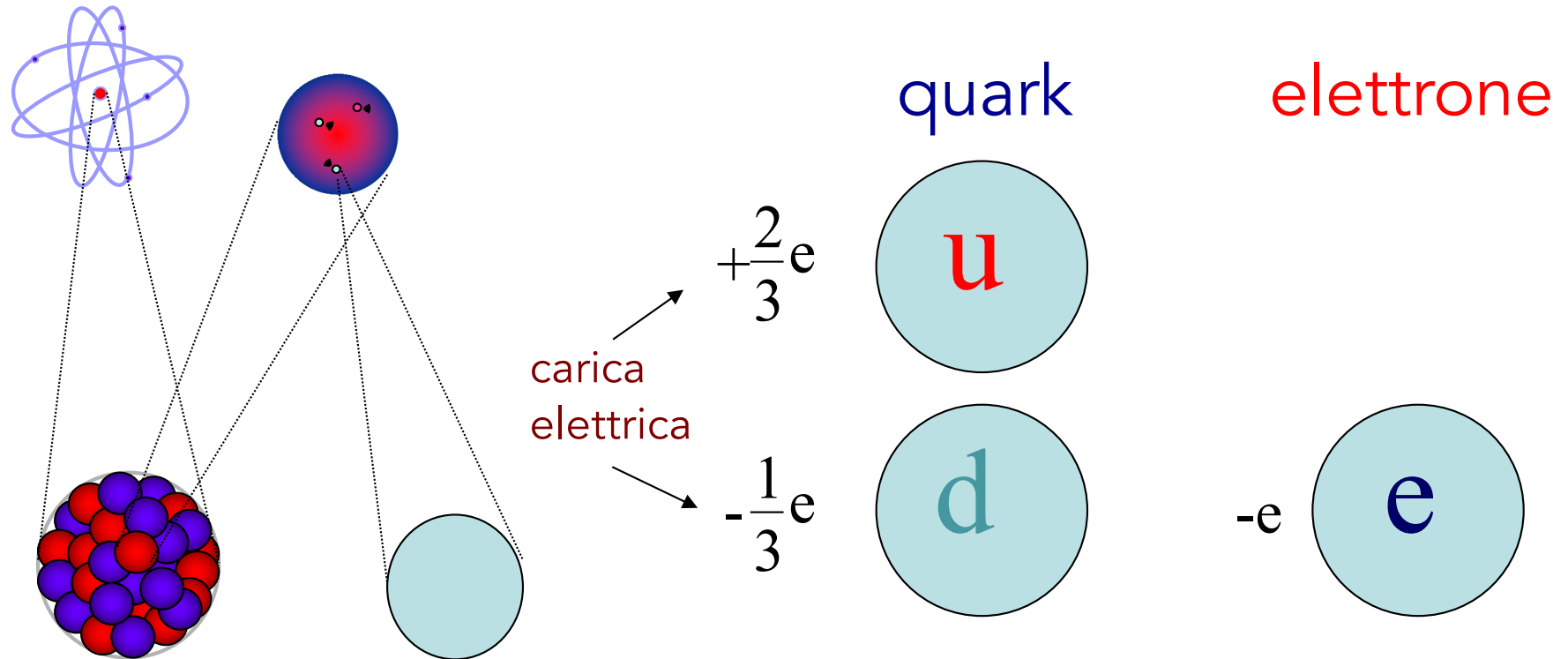


adroni = particelle composte da quark
protoni, neutroni,...

notate le scale
di lunghezza



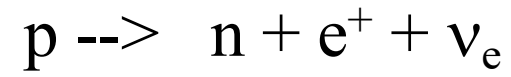
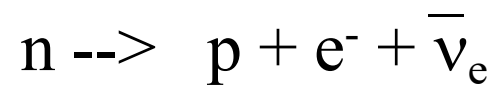
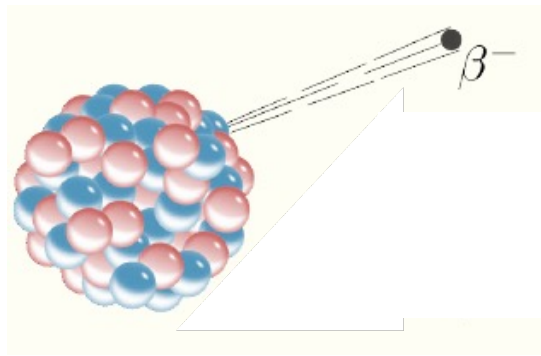
costituenti della materia



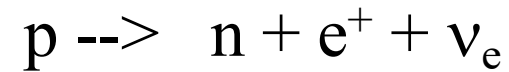
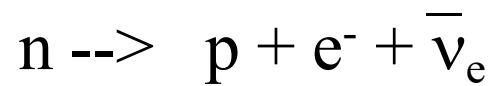
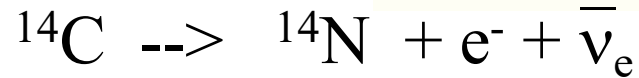
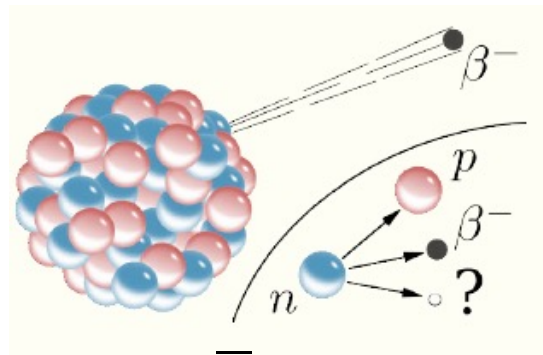
protoni contengono uud \rightarrow carica = $+e$
neutroni contengono udd \rightarrow carica = 0

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

la radioattività

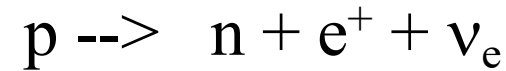
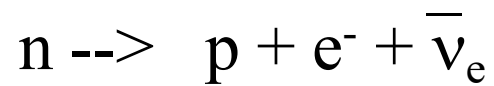
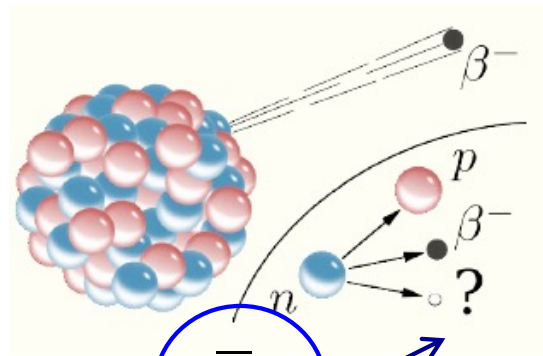


la radioattività



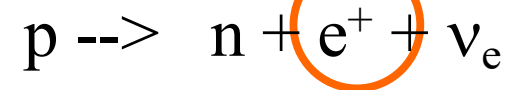
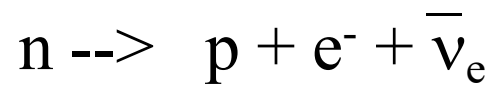
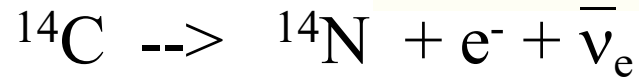
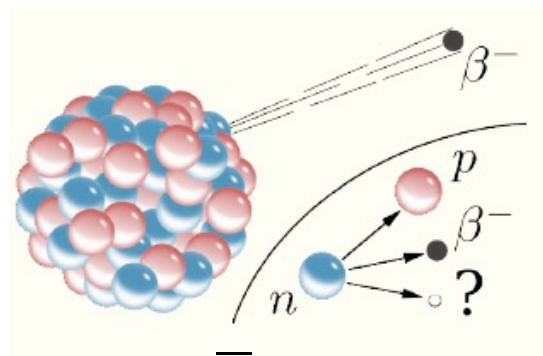
- i quark possono trasformarsi (decadere) in altri quark
- le interazioni coinvolte si chiamano «**deboli**»

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)

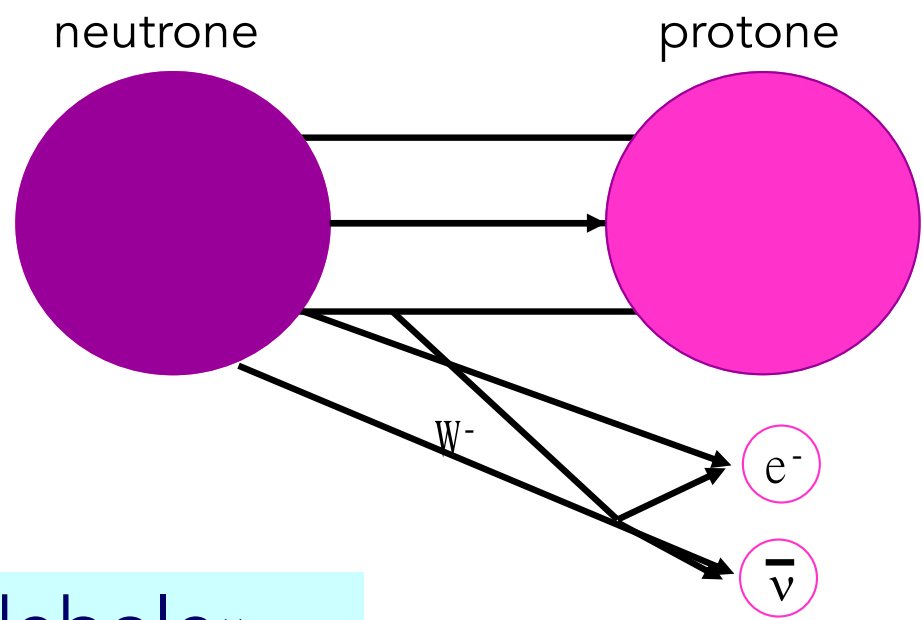
la radioattività

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



27 protoni
33 neutroni

28 protoni
32 neutroni

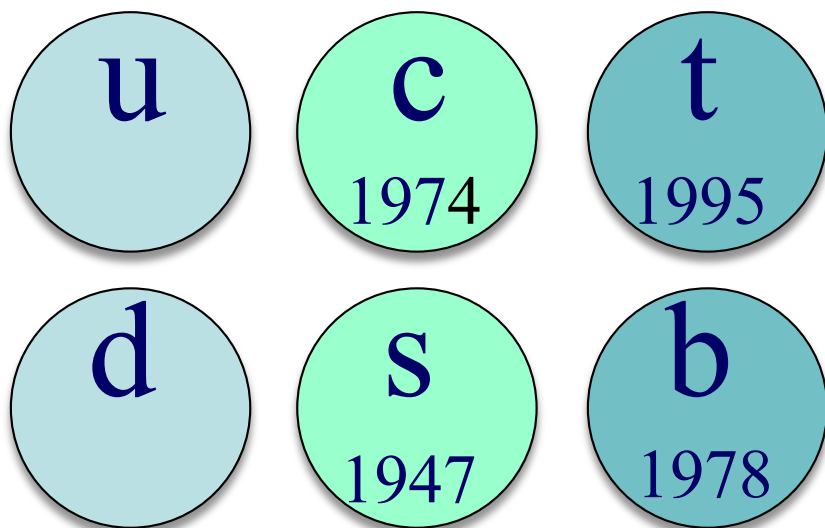


interazione «debole»

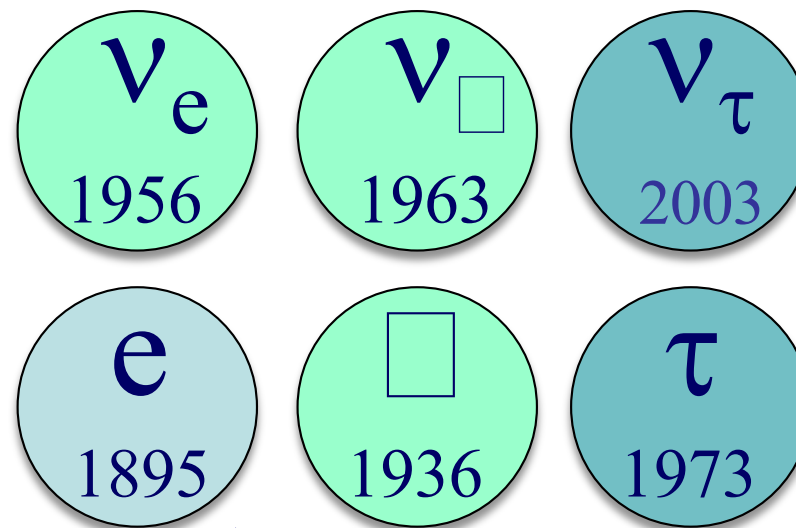
responsabile del fatto che i quark o leptoni decadono in particelle di massa minore

26 febbraio 2024: 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			

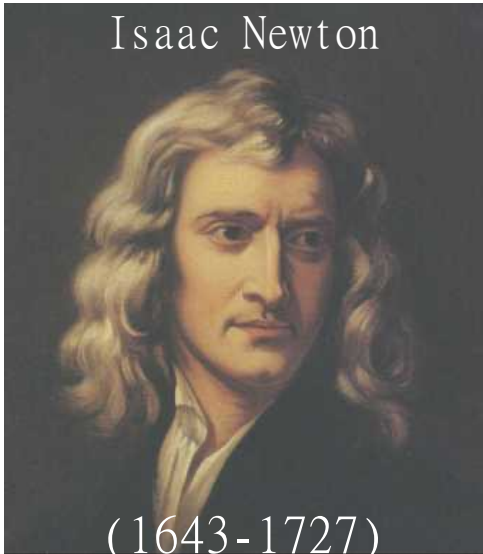
solo le masse sono diverse

$m(\square) \sim 200 m(e)$
 $m(\tau) \sim 3000 m(e)$

tavola periodica del 2024

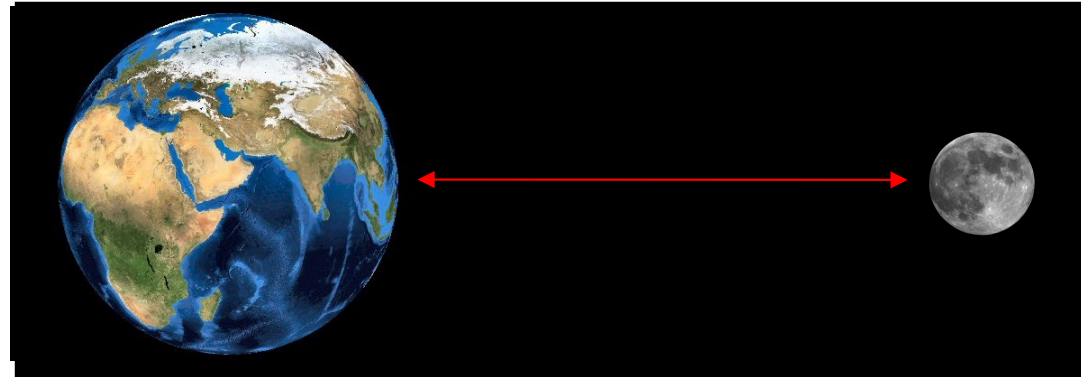
le interazioni

Isaac Newton

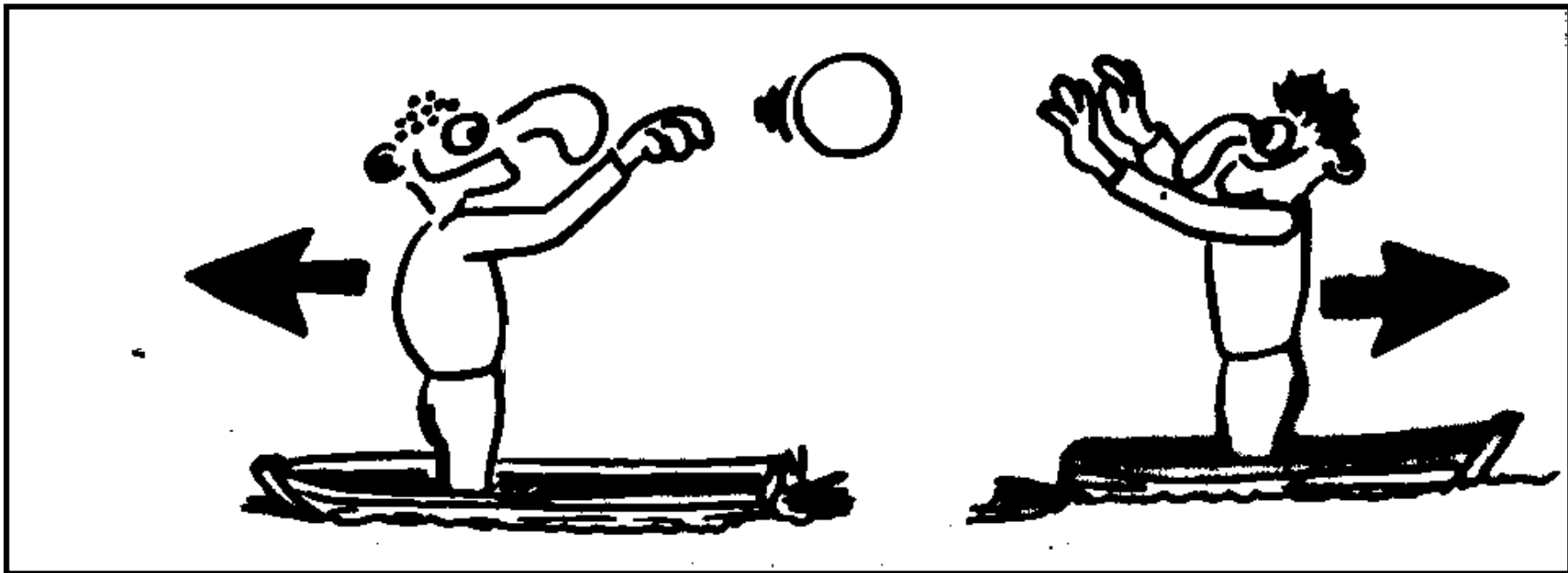


(1643-1727)

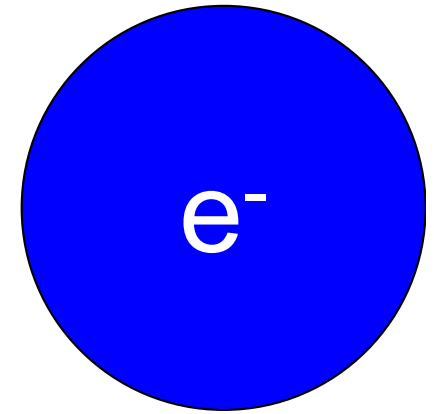
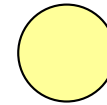
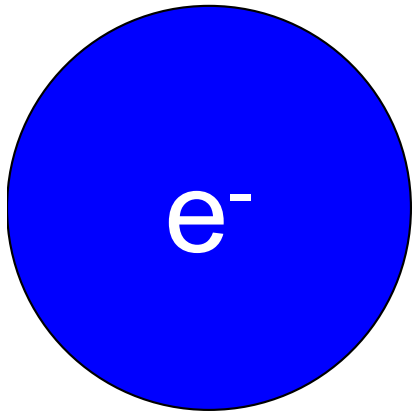
descrizione antica:
azione istantanea a distanza



descrizione moderna: scambio di particelle

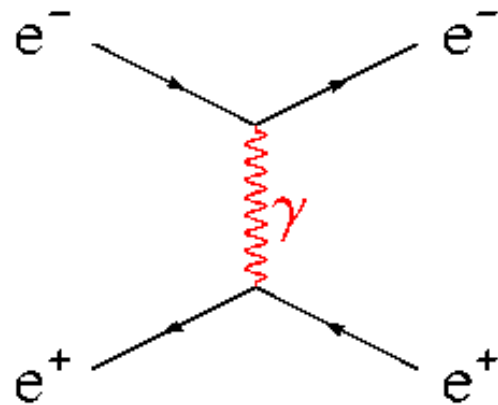


interazione elettromagnetica

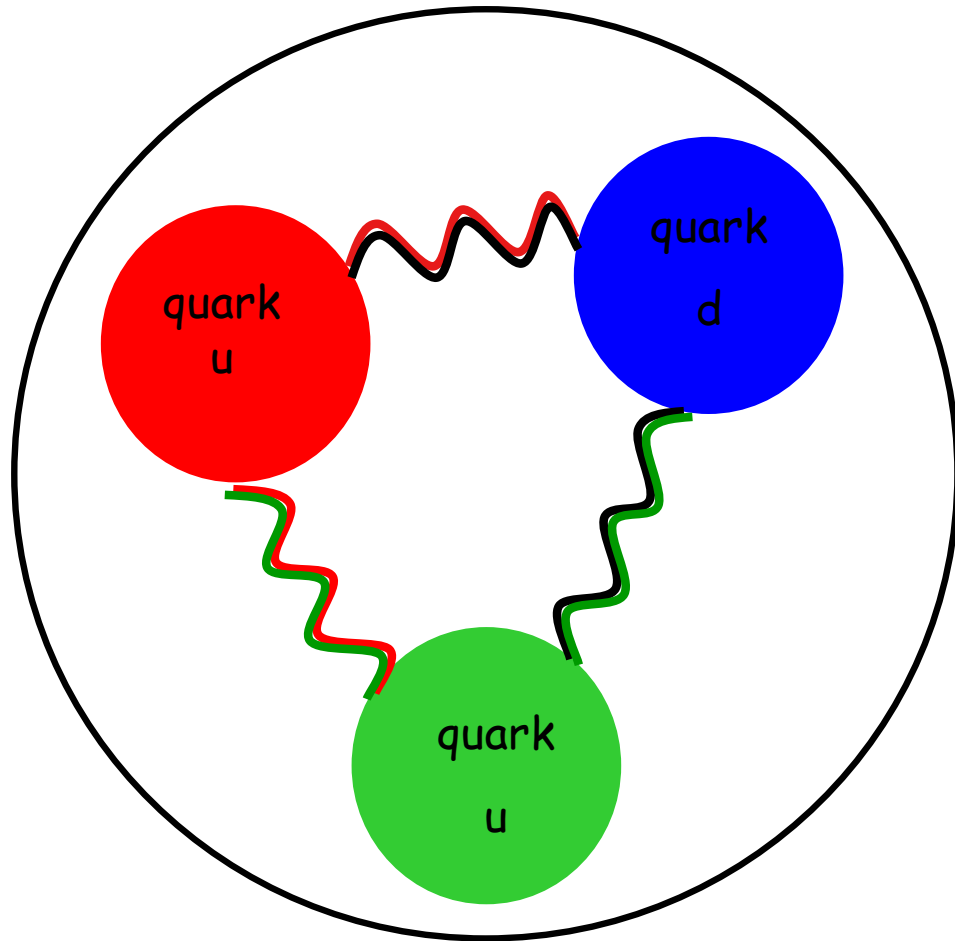


mediatore
« fotone »

massa = 0



interazione « forte »



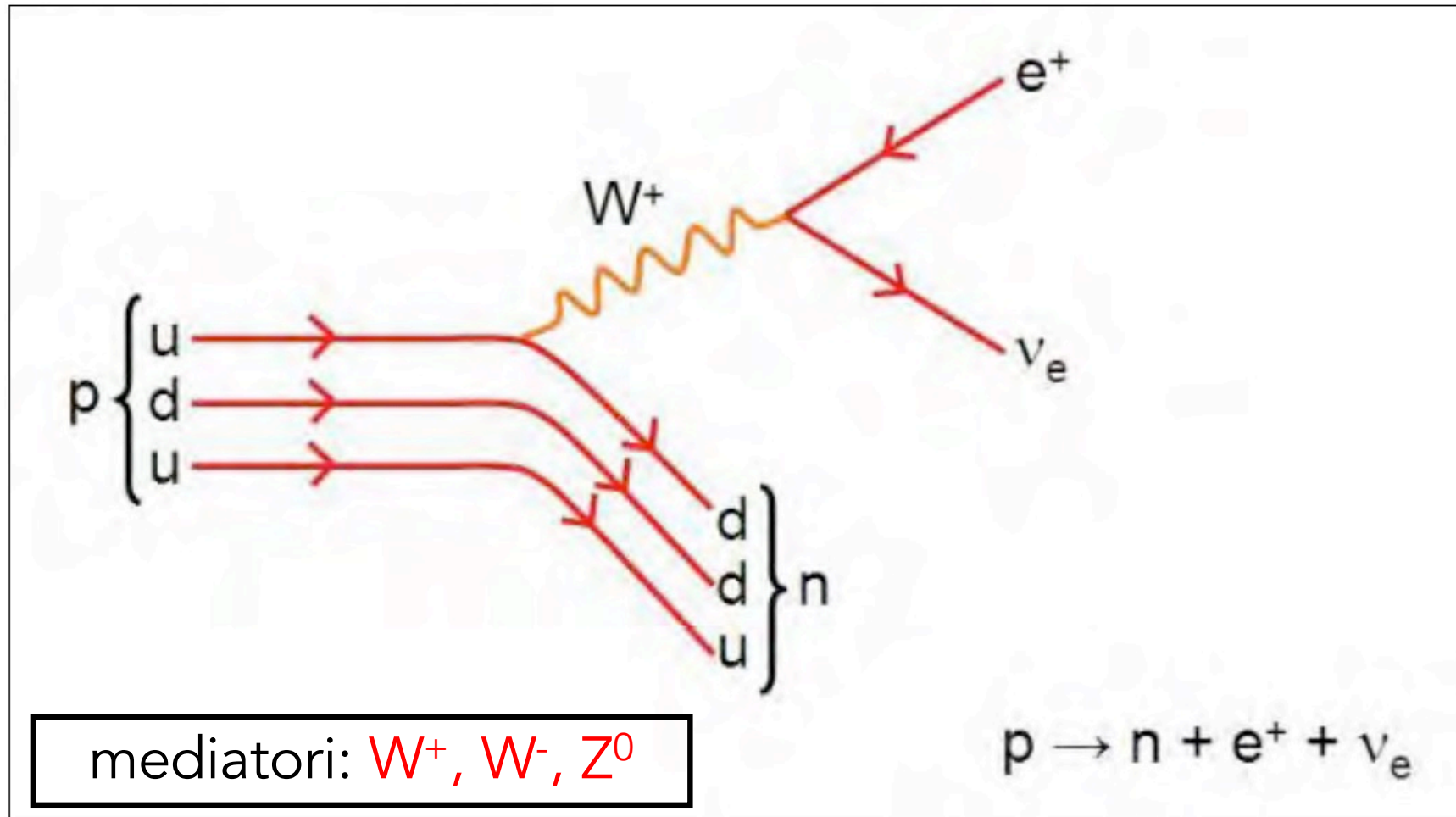
oltre alla carica elettrica, i quark portano un
"colore"
"blu" "verde" "rosso"
il protone è "incolore"

mediatori
« gluoni »

massa = 0

i gluoni tengono insieme
i quark dentro il protone

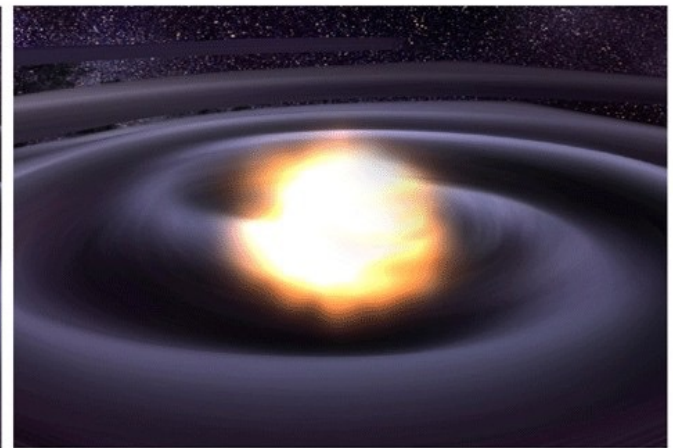
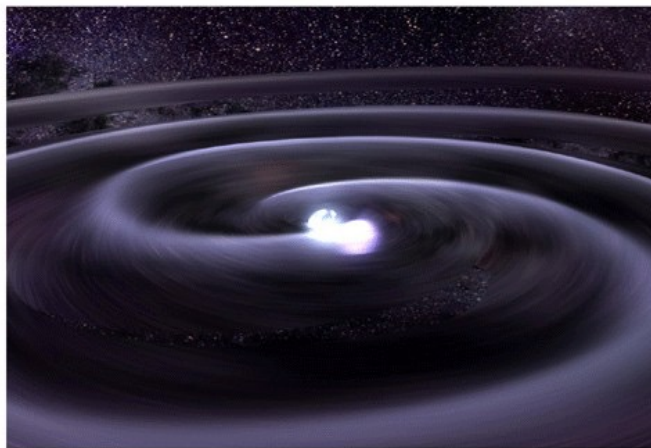
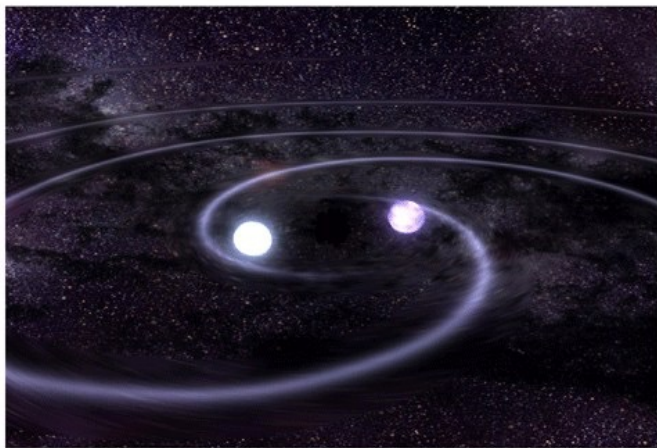
interazione « debole »



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**

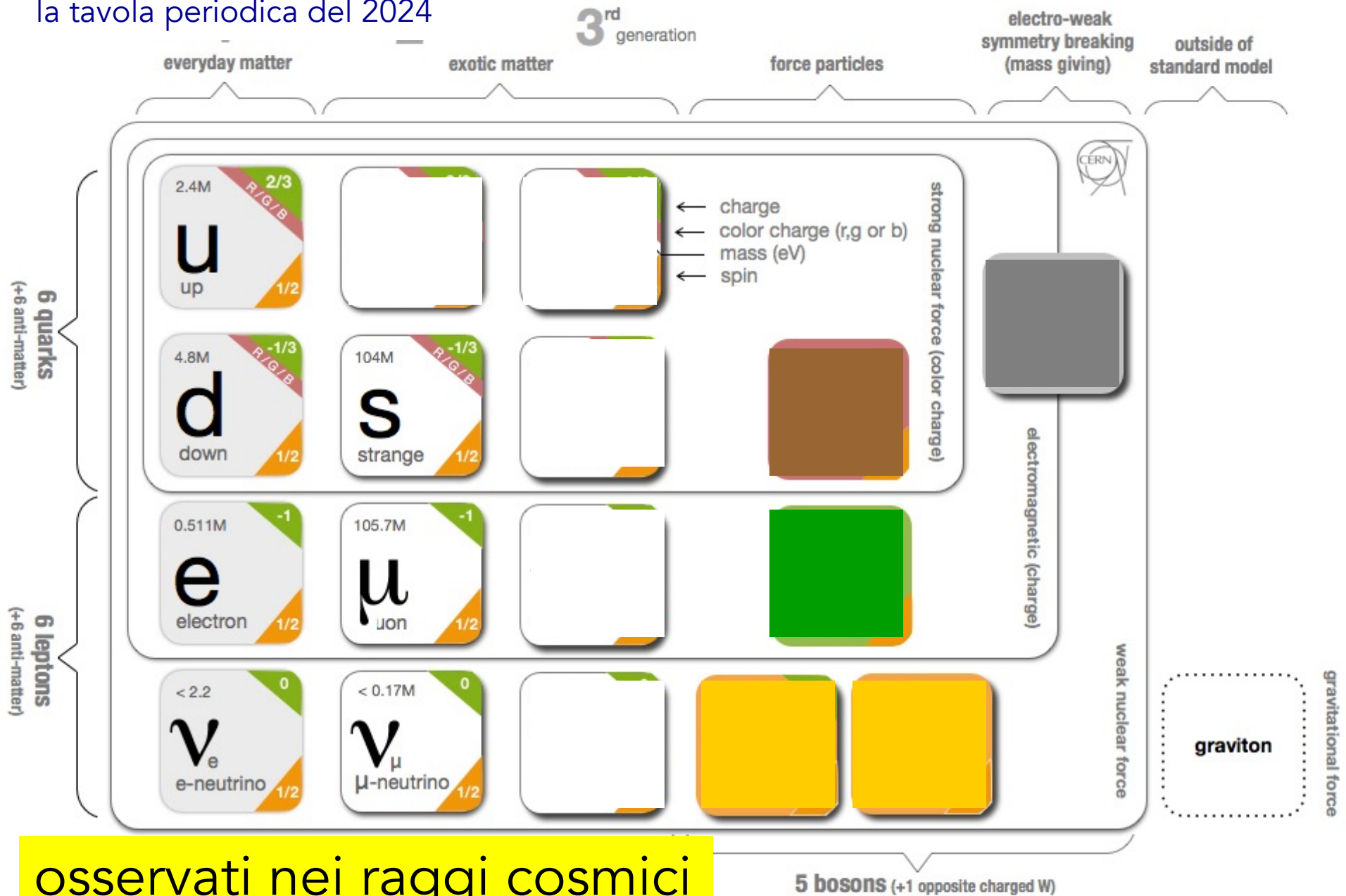
la tavola periodica del 2024

3rd generation



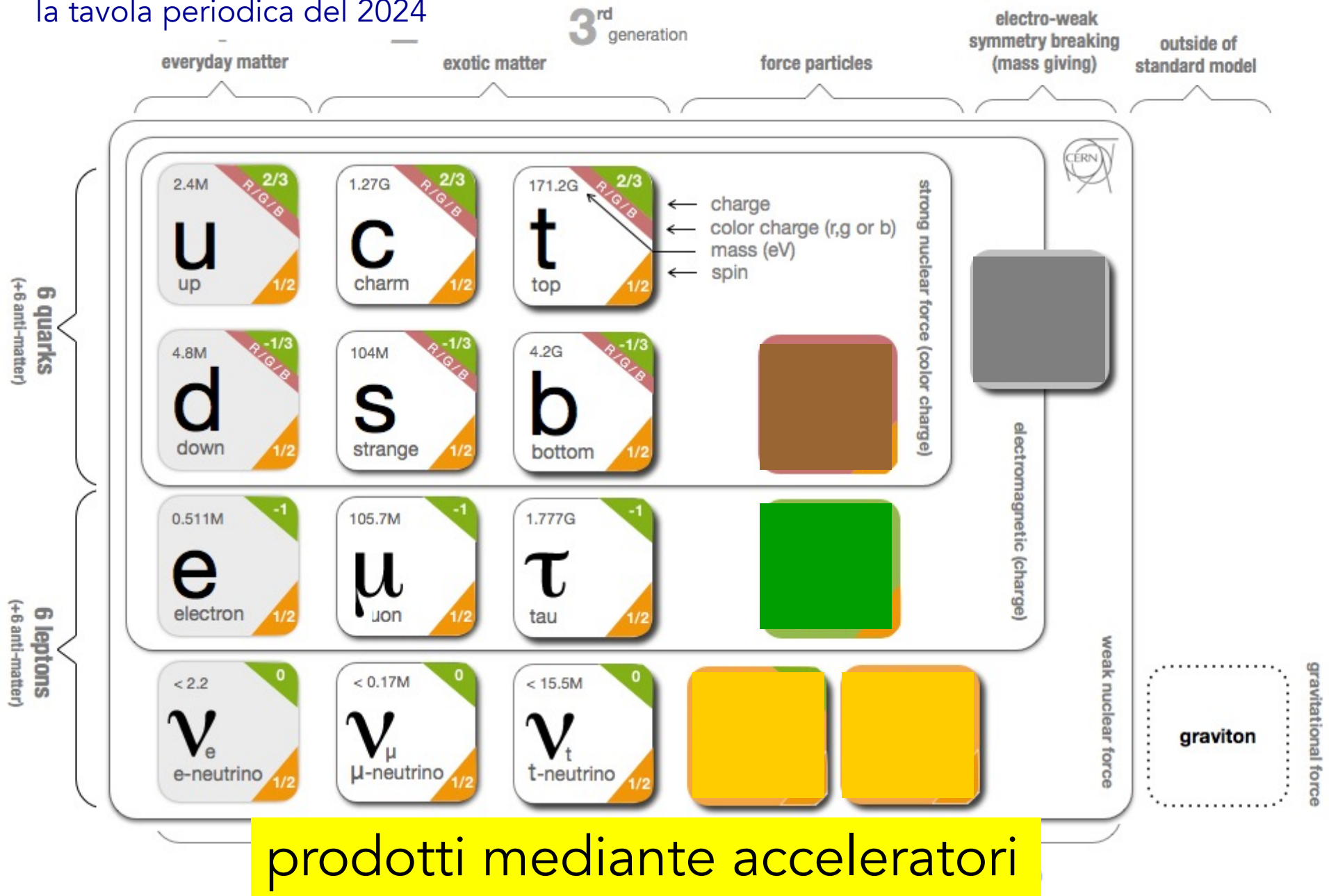
il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2024



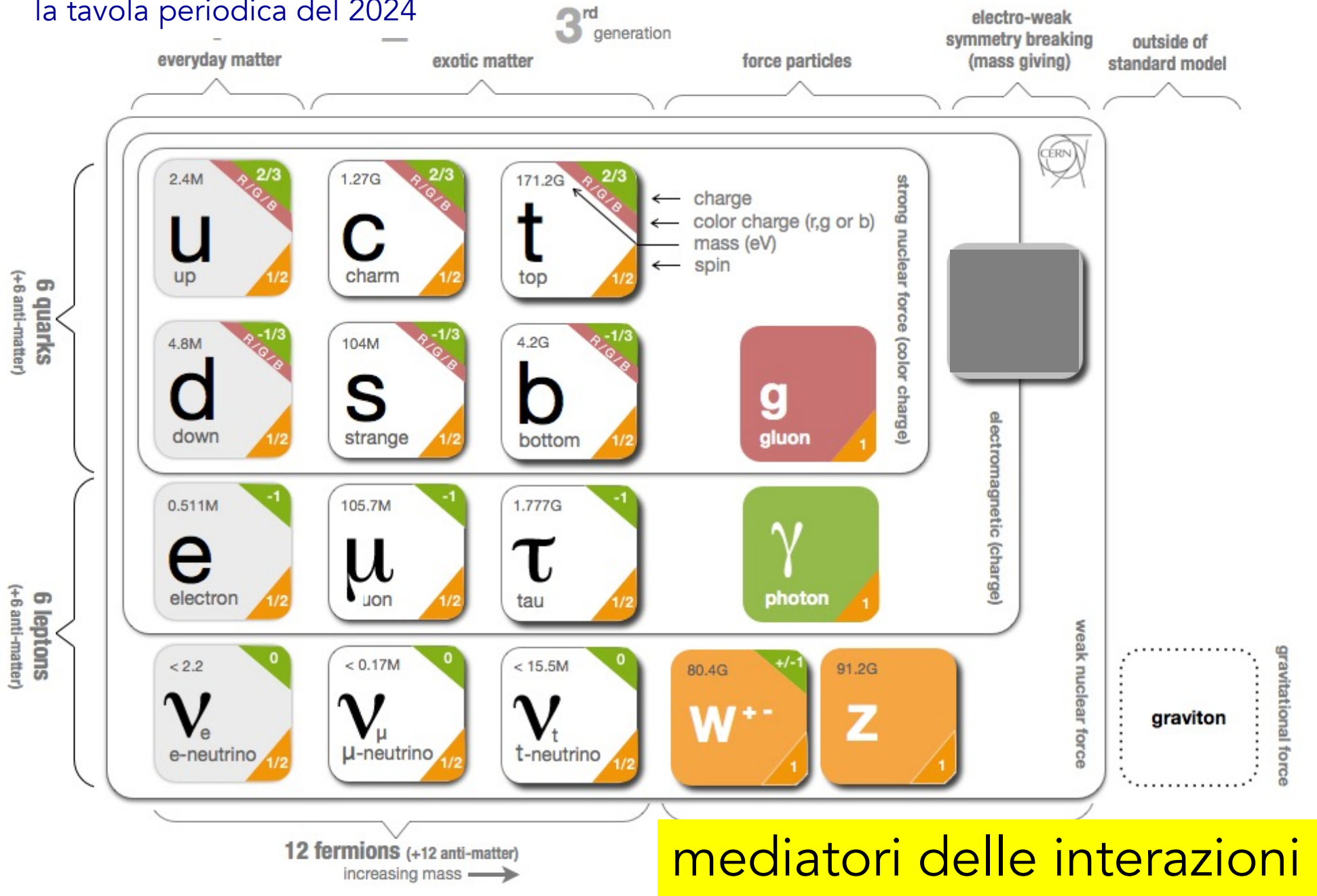
il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2024



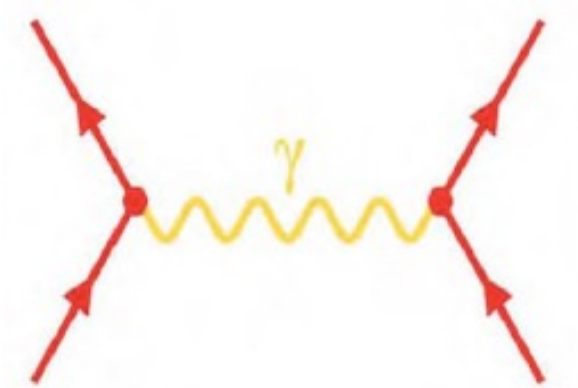
il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2024

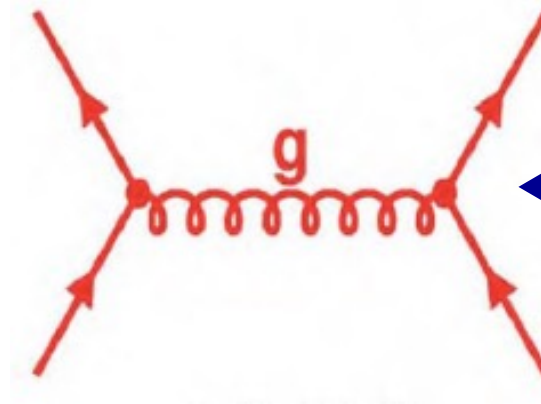


mediatori delle interazioni

fotoni: mediatori delle interazioni elettromagnetiche

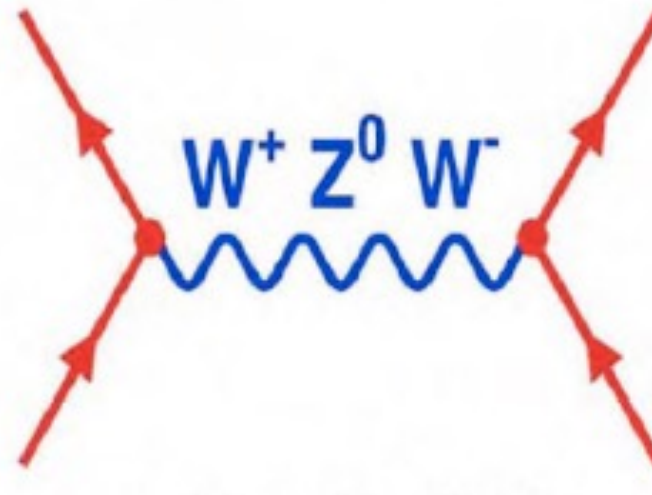


gluoni: mediatori delle interazioni "forti"



processi importanti nello studio di oggi

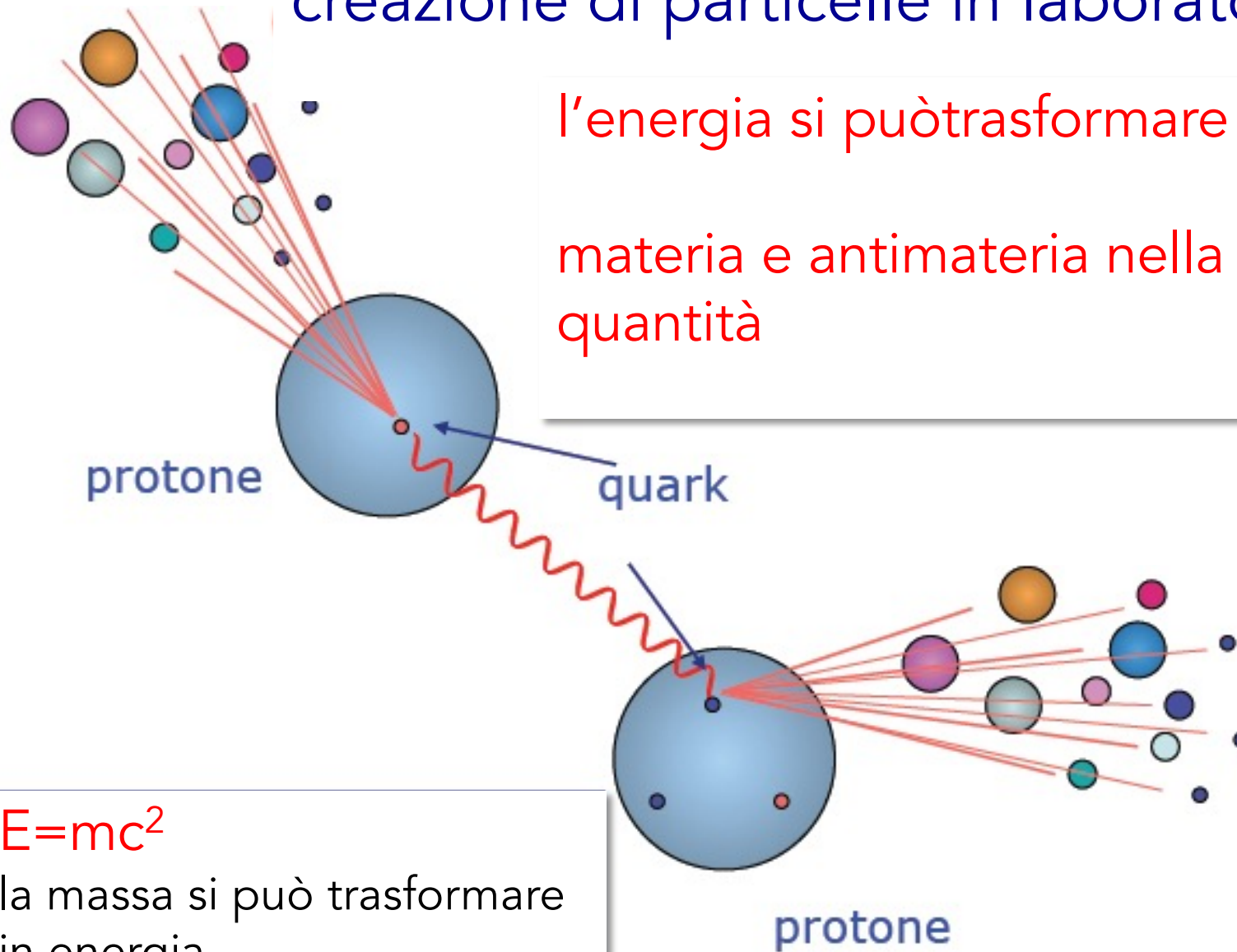
tre mediatori delle interazioni "deboli" **W^\pm , Z^0**





creazione di particelle in laboratorio

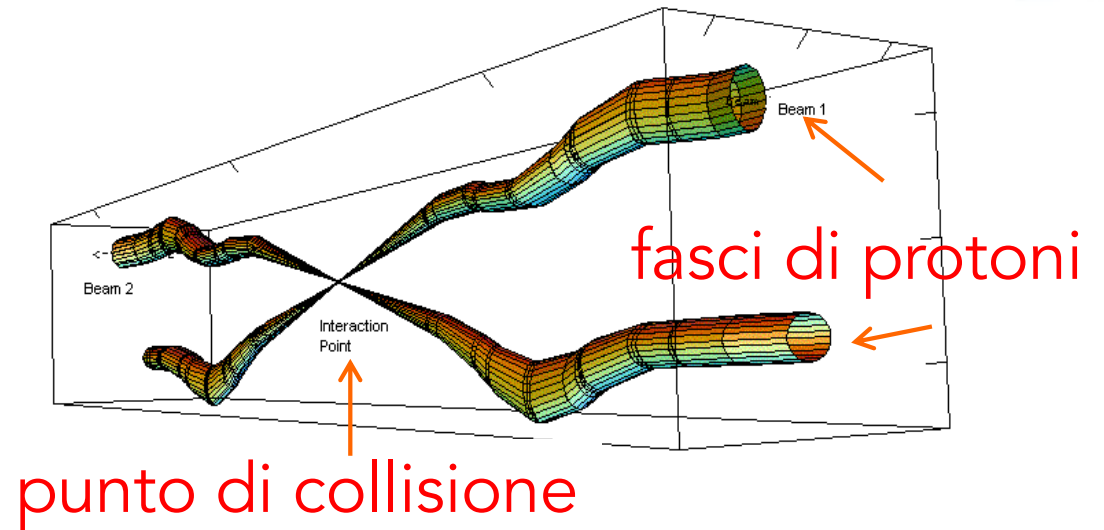
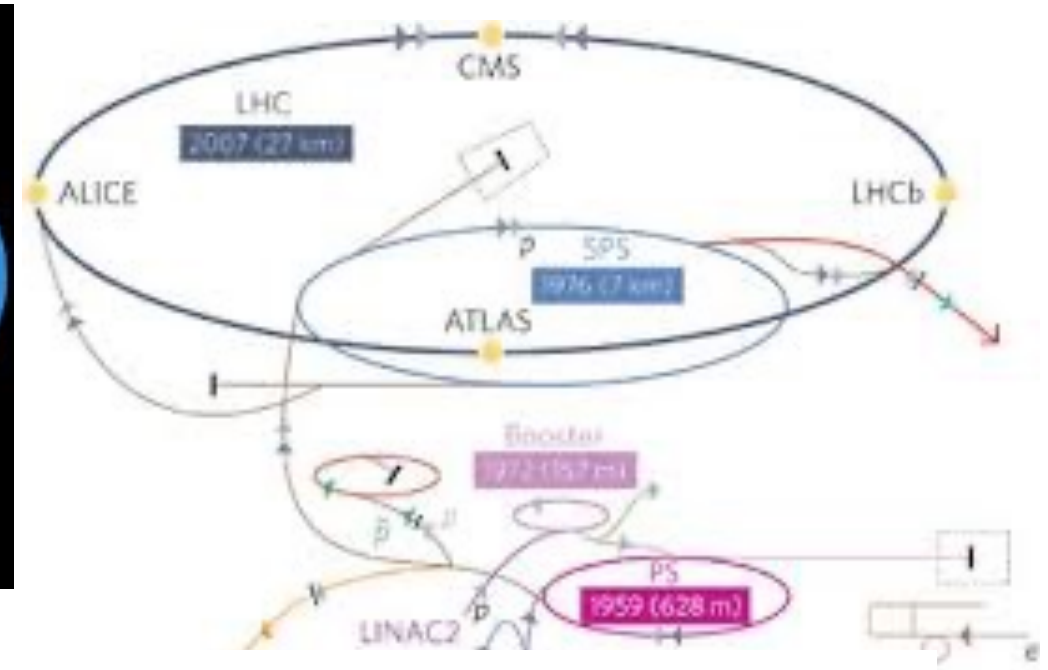
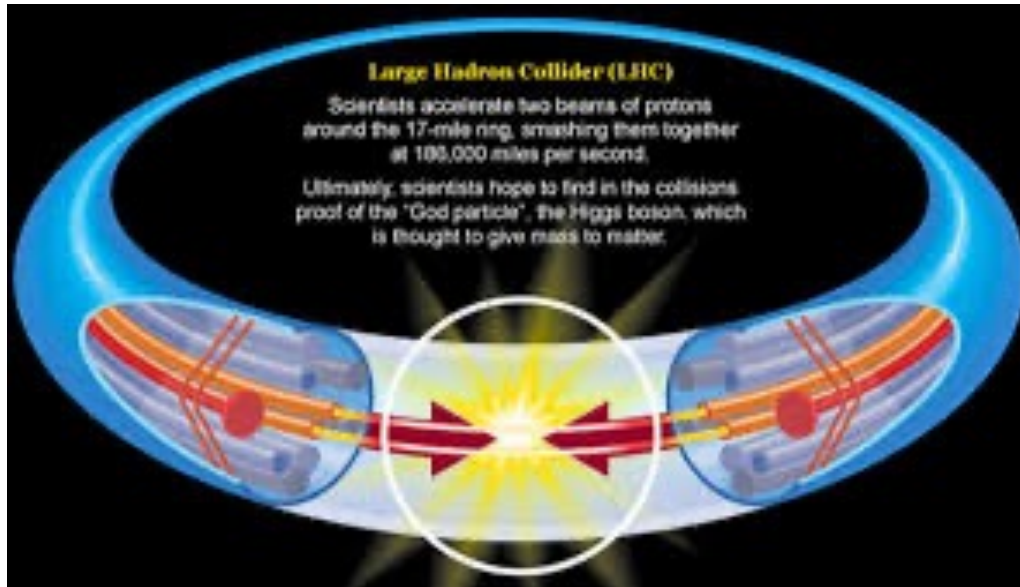
l'energia si può trasformare in materia
materia e antimateria nella stessa
quantità



$$E=mc^2$$

la massa si può trasformare
in energia
e viceversa

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

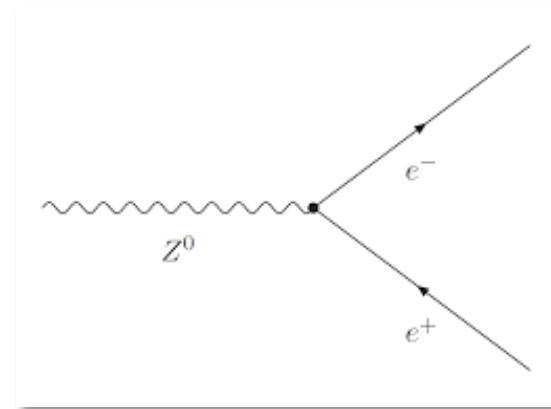
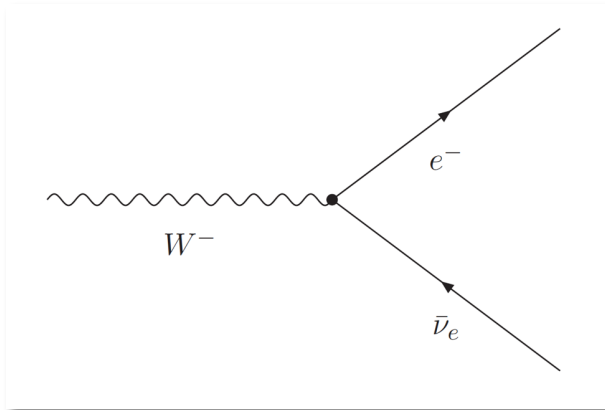


al Large Hadron Collider (LHC) del CERN queste particelle possono essere prodotte

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?

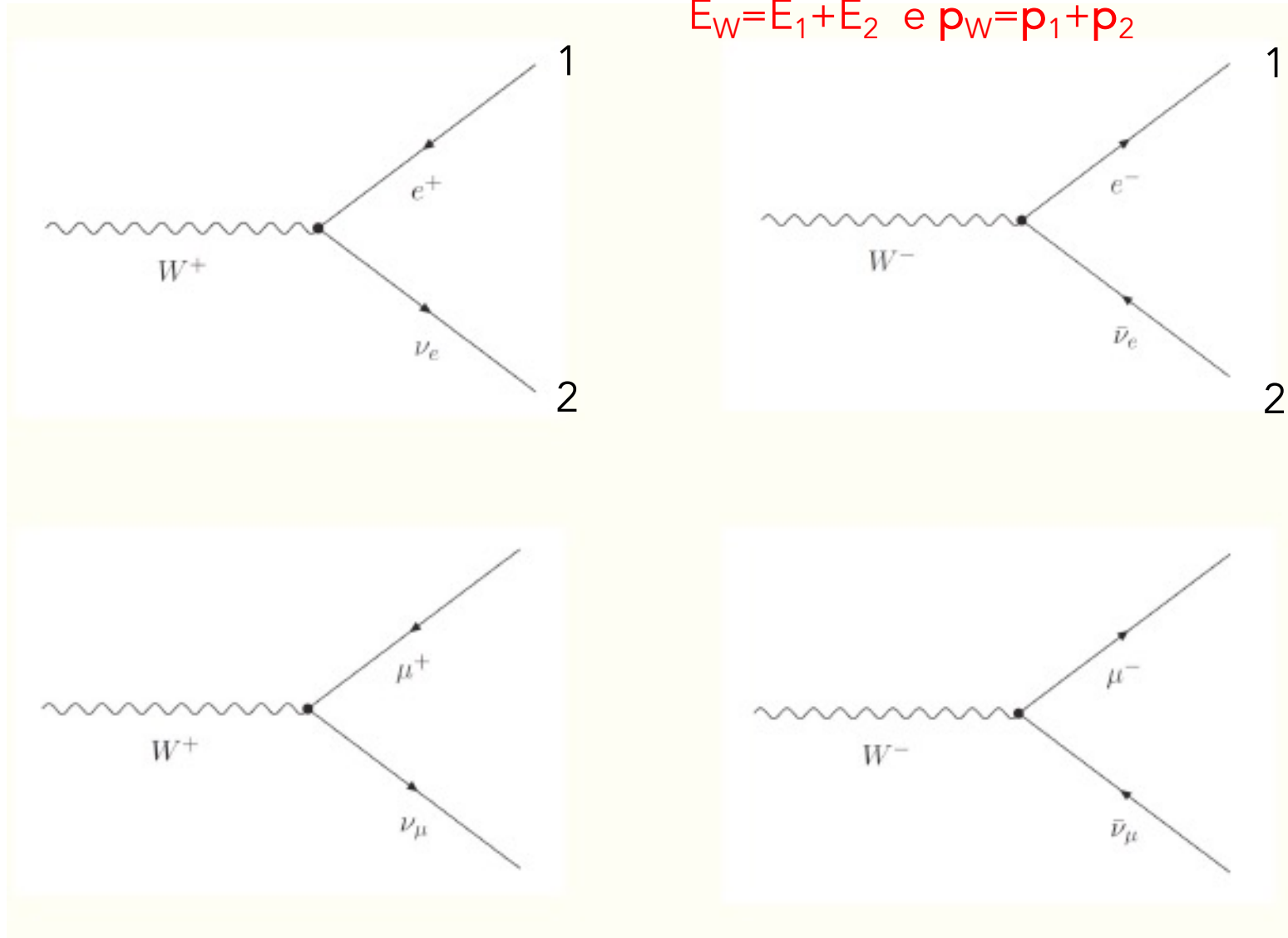
queste particelle a loro volta decadono



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 $W \rightarrow 1+2$
 $E_W = E_1 + E_2$ e $\mathbf{p}_W = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$

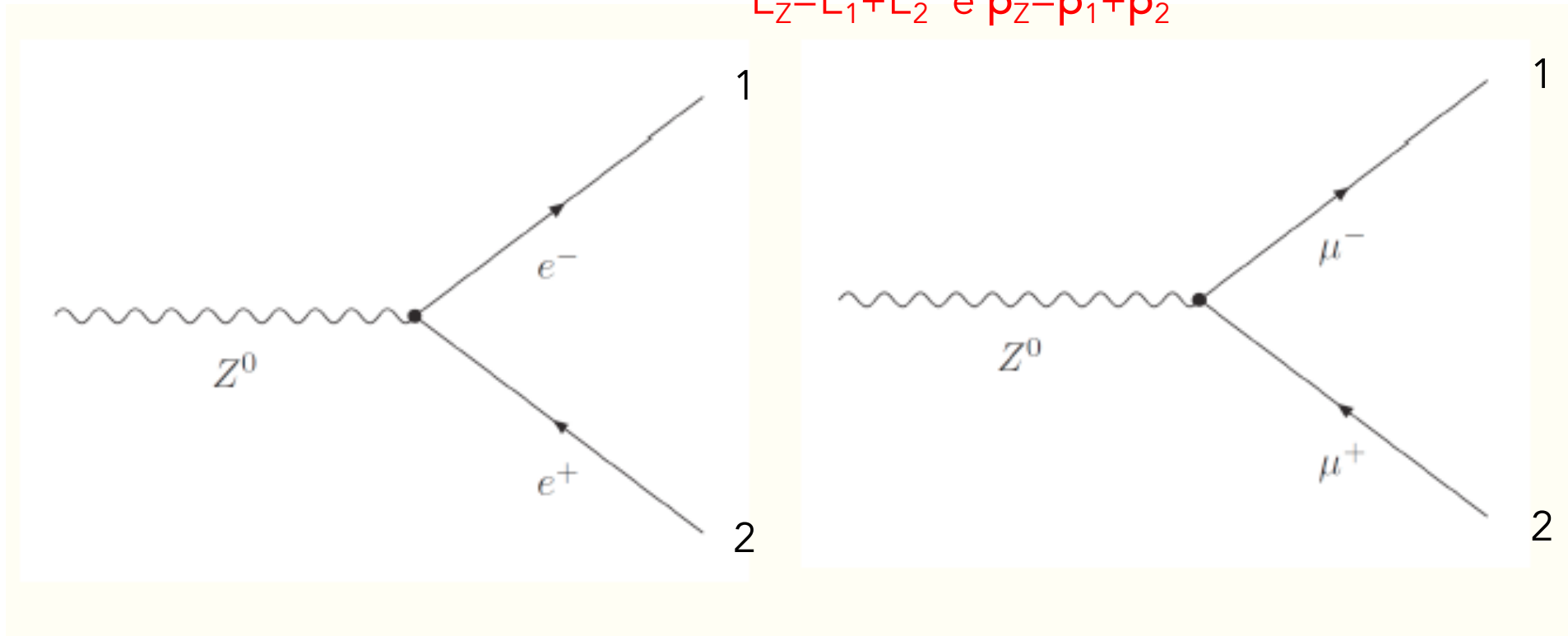


decadimenti della Z^0

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

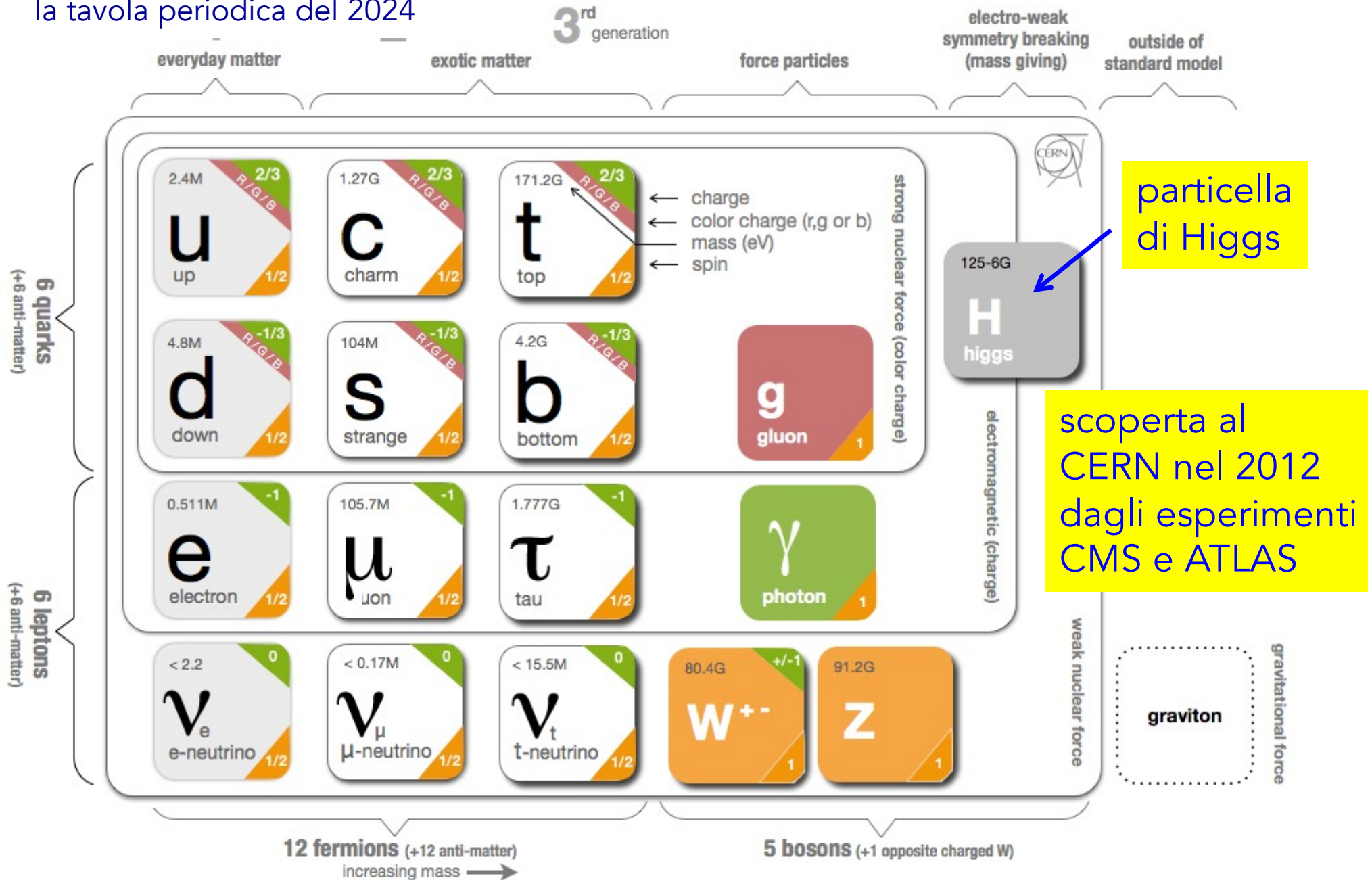
nel decadimento $Z \rightarrow 1+2$

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



il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2024



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**



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.

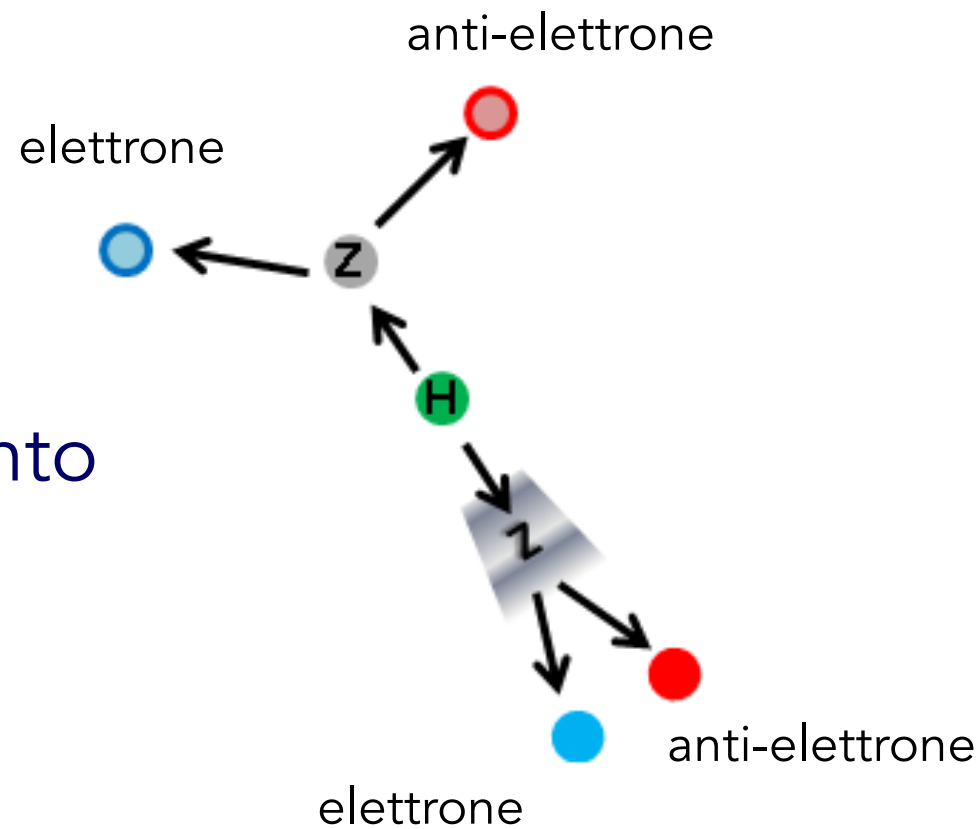
Lo studio delle
proprietà della
particella di Higgs
è ora uno degli
scopi degli
esperimenti
CMS e ATLAS
al CERN

Fonte: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

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

un possibile decadimento

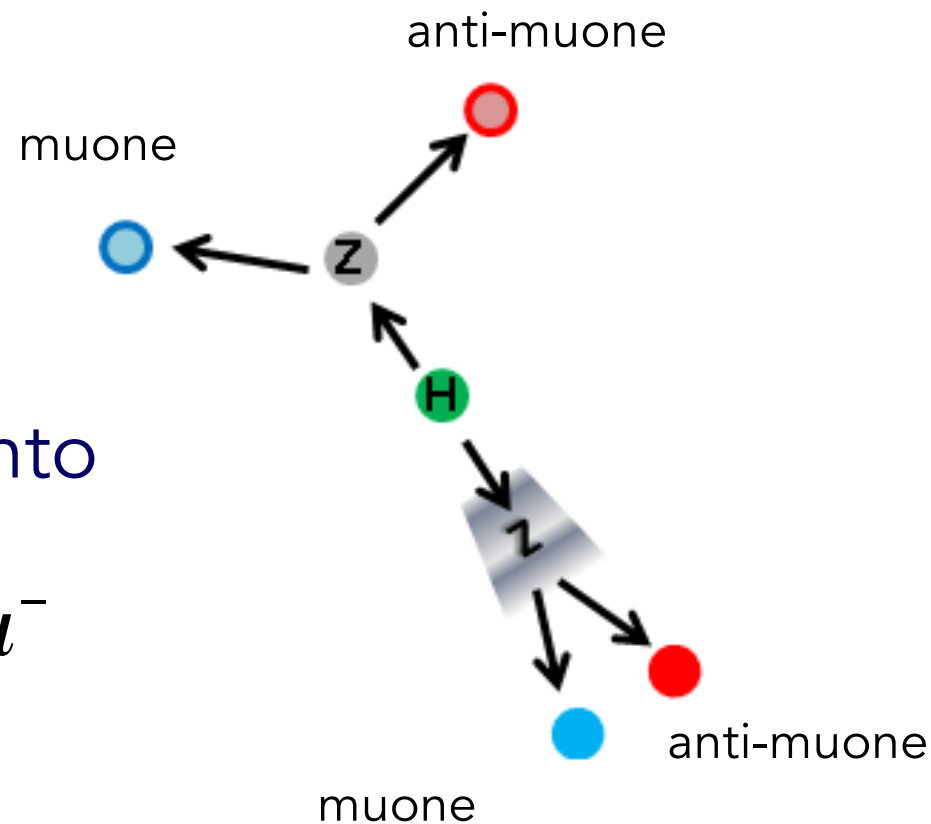
$$H \rightarrow Z Z \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$$



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

un possibile decadimento

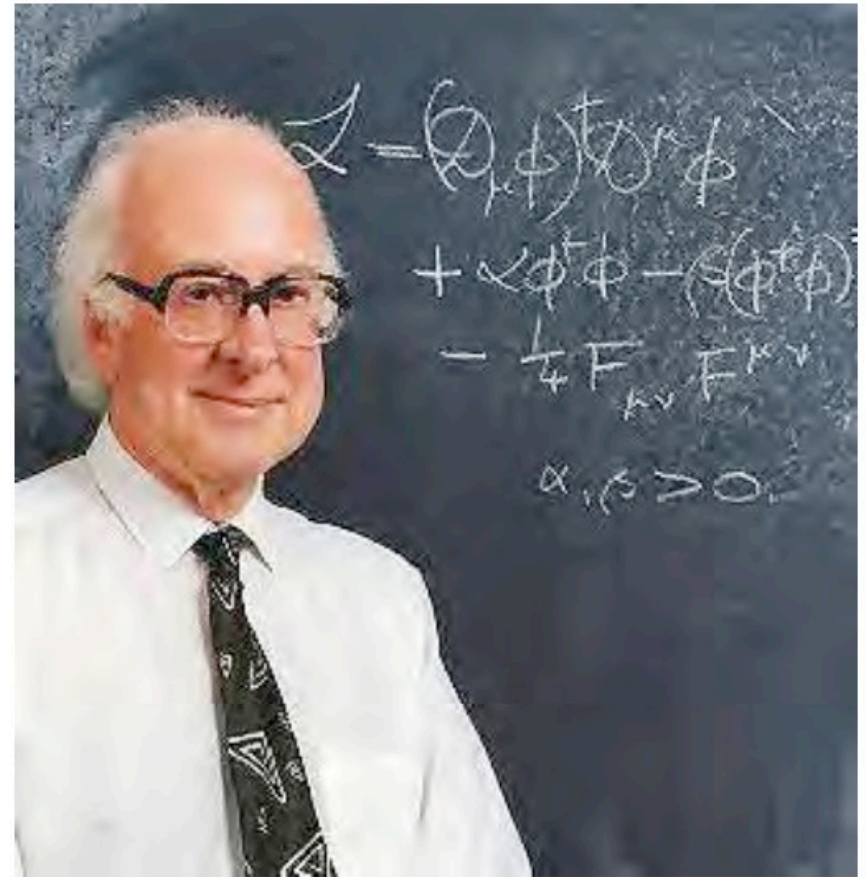
$$H \rightarrow Z Z \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$





Carlo Rubbia
scoperta delle particelle W e Z

premio Nobel 1984

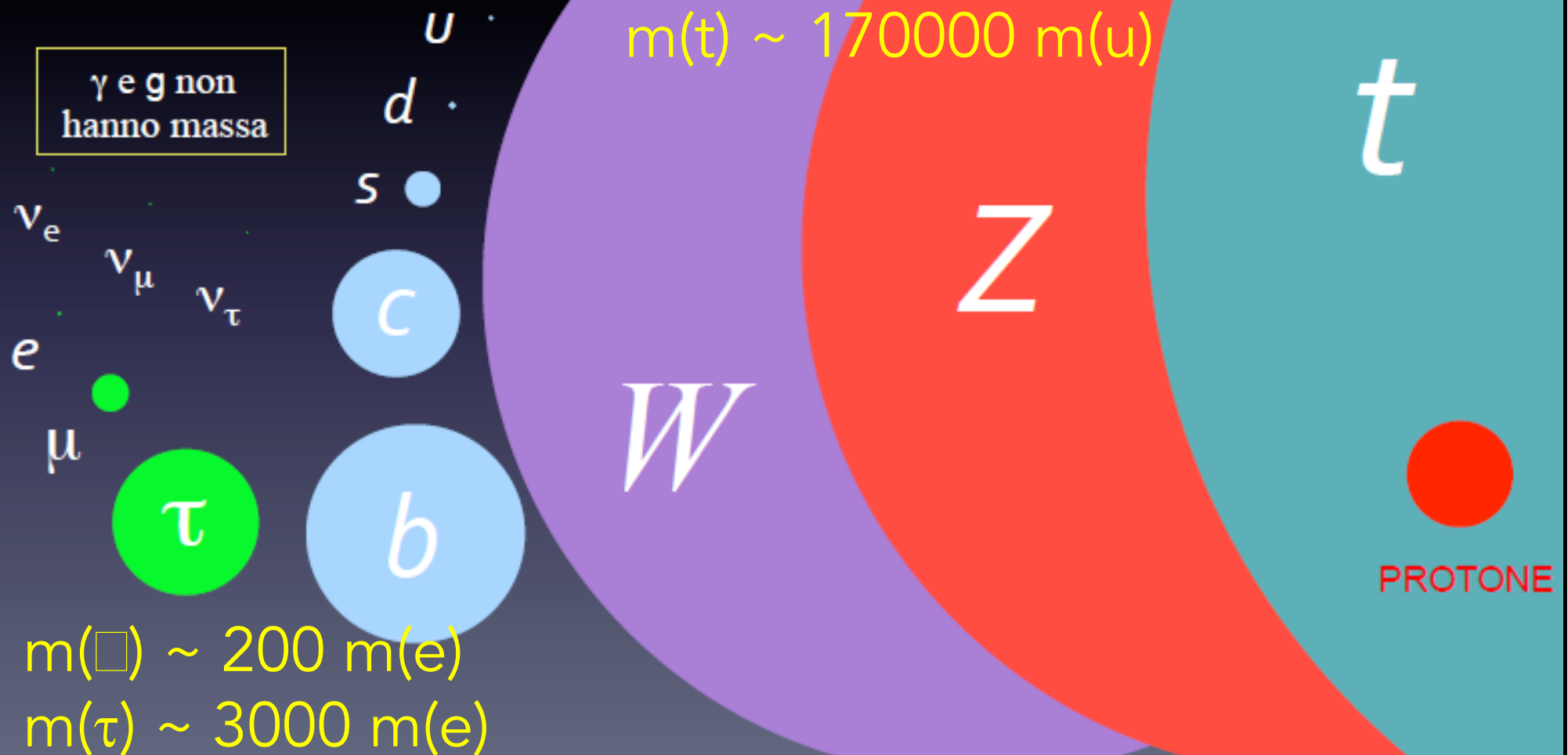


Peter Higgs
ipotesi della particella H

premio Nobel 2013

Il Modello Standard non spiega tutto

le particelle hanno una massa enormemente diversa fra loro
perchè?

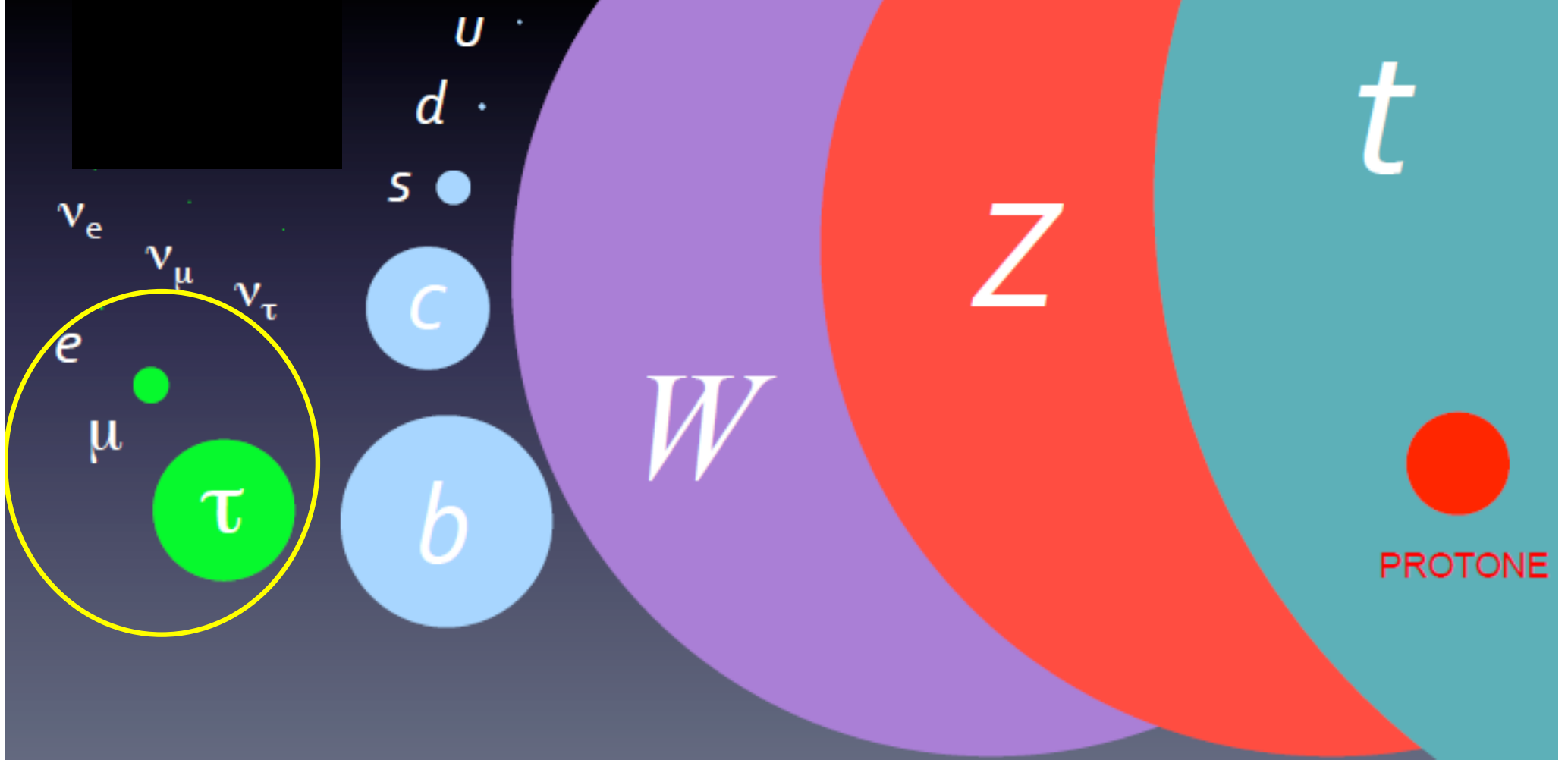


Il Modello Standard non spiega tutto

ci sono tre famiglie di quark e leptoni

perchè?

ce ne sono altre?



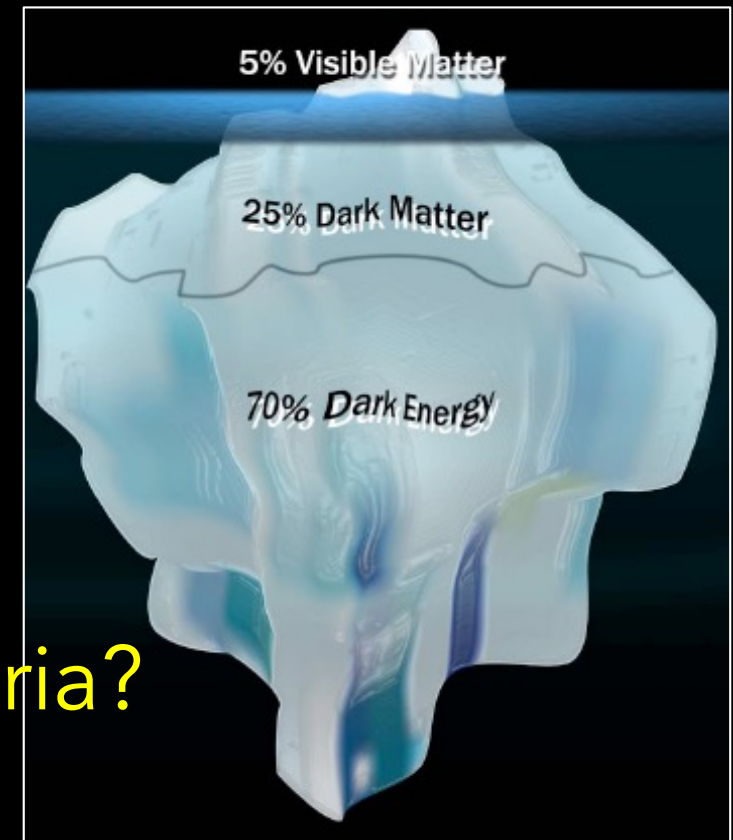
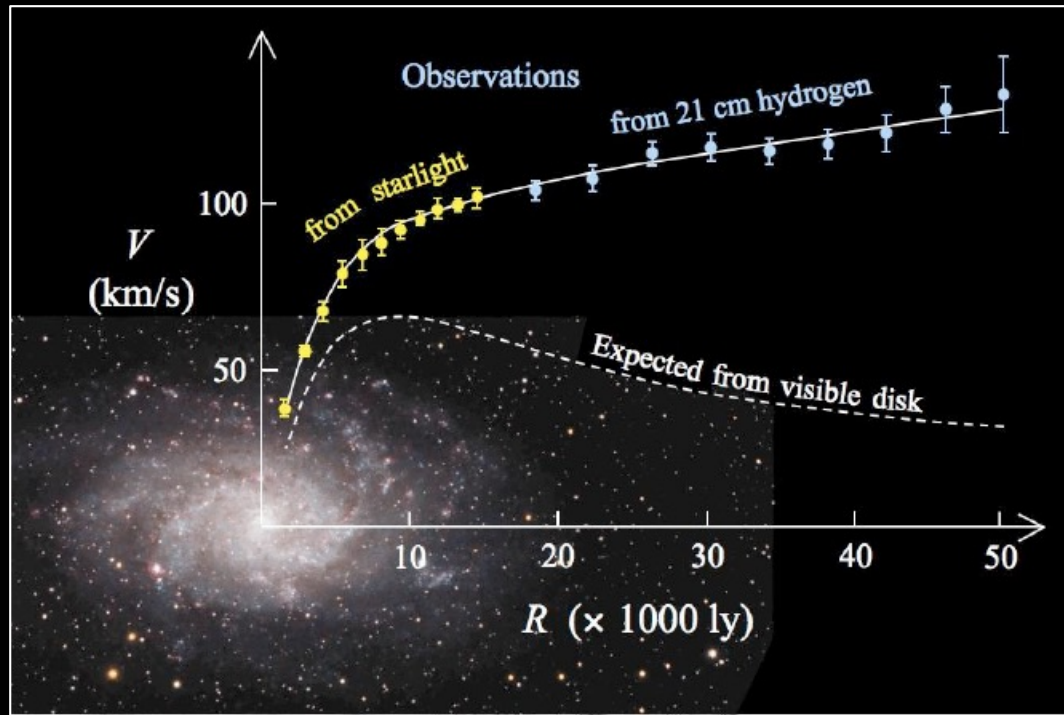
Il Modello Standard non spiega tutto

In origine, materia e antimateria sono state prodotte insieme

dov'è finita l'antimateria nell'universo?

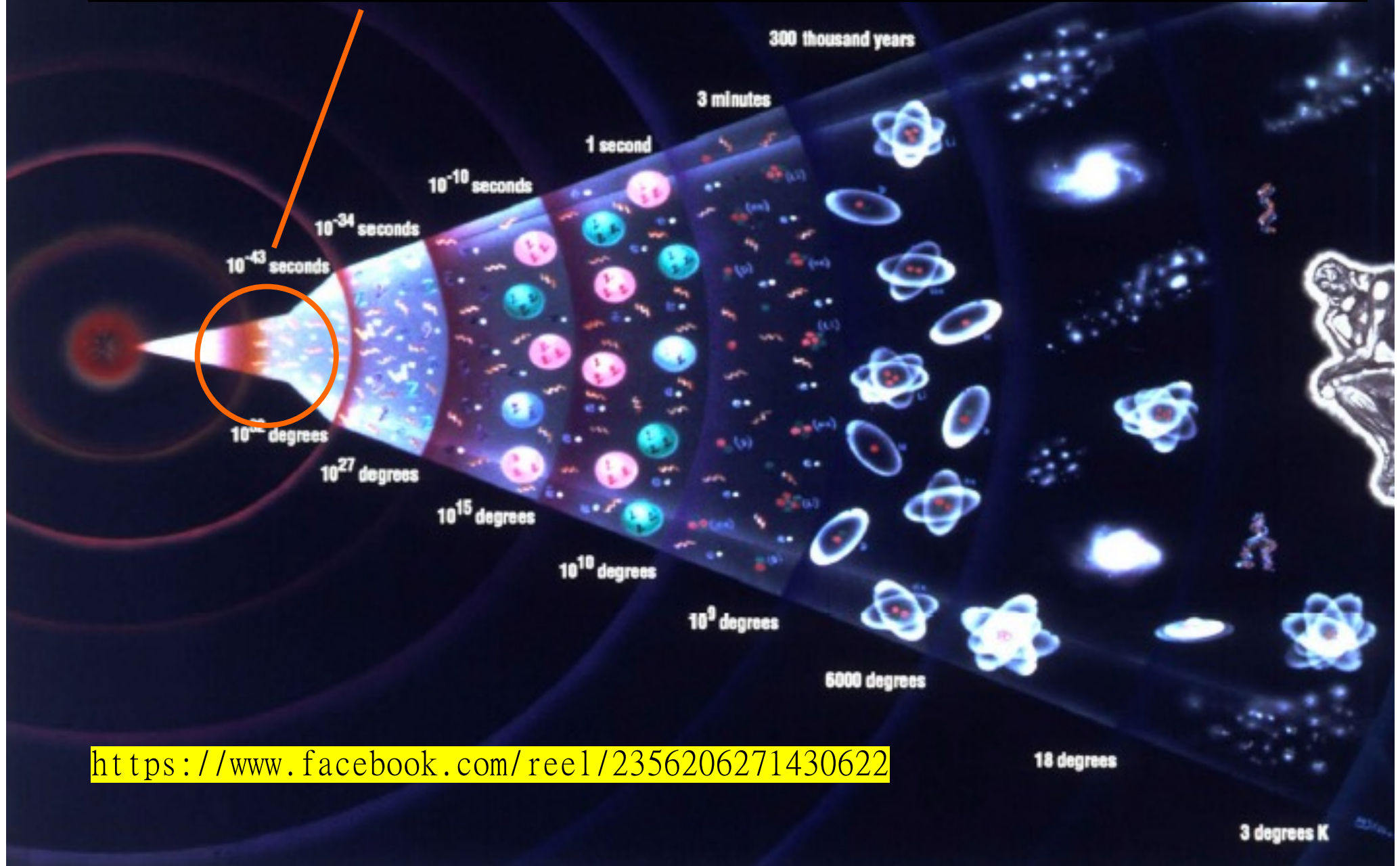


l'universo è composto di altra materia ed energia, di cui non sappiamo nulla



esiste un nuovo tipo di materia?

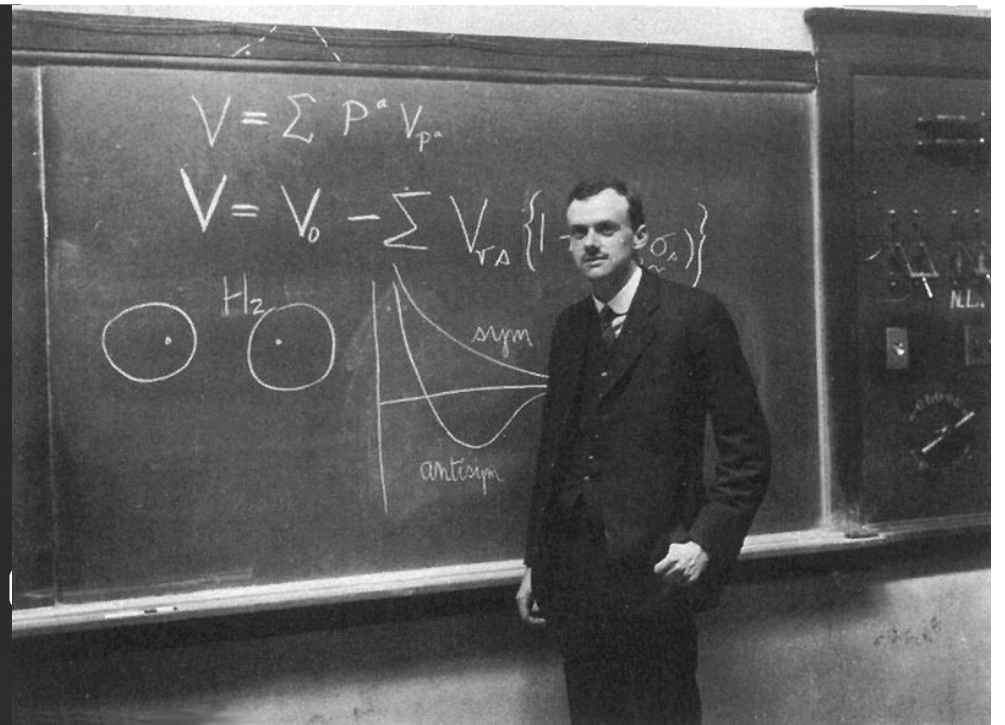
come si è evoluto l'universo, come era nei suoi primi istanti di esistenza?



<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

