

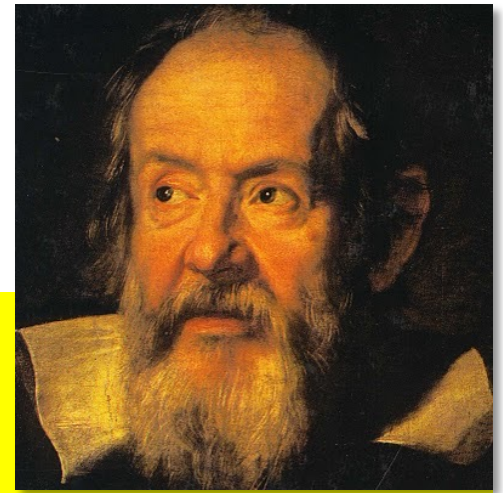
# La fisica delle particelle elementari

masterclass dell'esperimento CMS  
(Compact Muon Solenoid)  
al Large Hadron Collider (LHC)  
del CERN di Ginevra

Bari, Dipartimento di Fisica  
26 febbraio 2024



Pietro Colangelo  
INFN – Sezione di Bari



## «il metodo galileiano»

*Galileo Galilei: La Scienza Nuova*

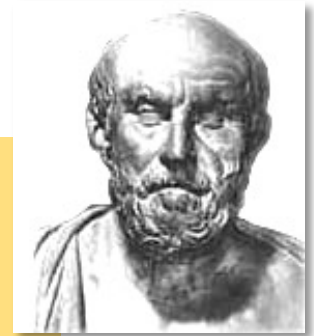
1. i fenomeni devono essere ricondotti a pochi principi generali
2. «il libro della natura è scritto in caratteri matematici»
3. l'esperimento («la sensata esperienza») è il fondamento e la guida nella elaborazione di una teoria scientifica

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)

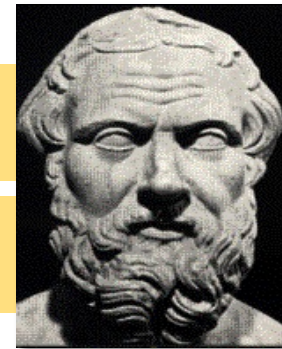
Empedocle (Akragas-Agrigento, V secolo a.C.)

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)



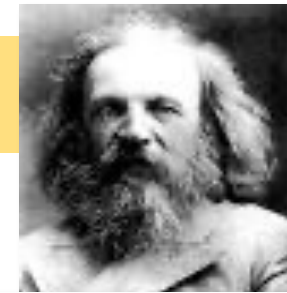
John Dalton (Eaglesfield, 1766 – Manchester, 1844)

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



ELEMENTS	
Hydrogen 1	Strontian 86
Azote 5	Barytes 68
Carbon 4	Iron 56
Oxygen 7	Zinc 66
Phosphorus 9	Copper 64
Sulphur 16	Lead 207
Magnesia 28	Silver 197
Lime 28	Gold 197
Soda 28	Platina 197
Potash 56	Mercury 197

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



elementi classificati in base al numero atomico

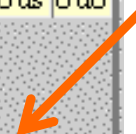
(numero di protoni nel nucleo)

predizione di atomi  
non ancora osservati

Reihen	Gruppe I. R <sup>2</sup> O	Gruppe II. RO	Gruppe III. R <sup>2</sup> O <sup>3</sup>	Gruppe IV. RH <sup>4</sup> RO <sup>2</sup>	Gruppe V. RH <sup>3</sup> R <sup>2</sup> O <sup>5</sup>	Gruppe VI. RH <sup>2</sup> RO <sup>3</sup>	Gruppe VII. RH R <sup>2</sup> O <sup>7</sup>	Gruppe VIII. RO <sup>4</sup>
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	(—)	(—)

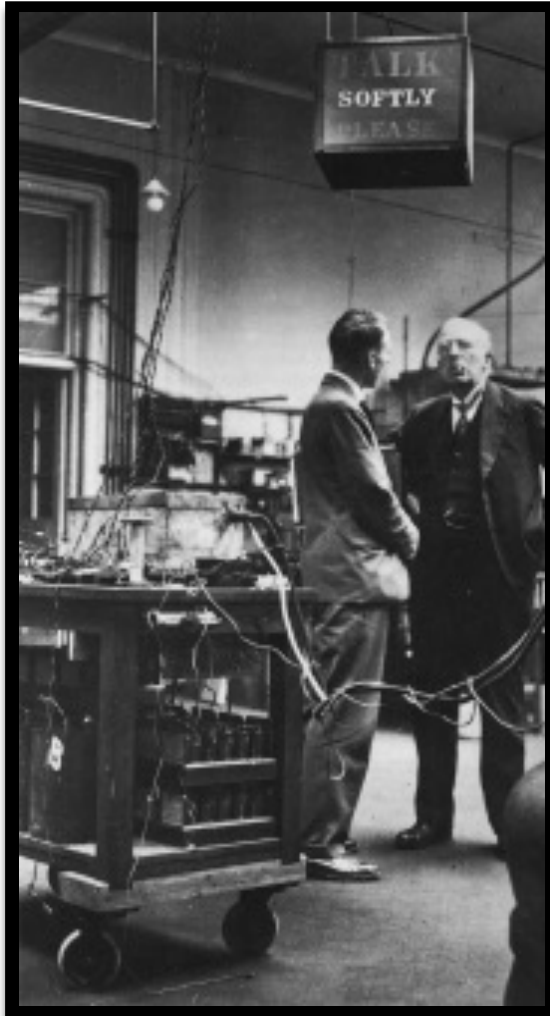
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period																			
1	H																	He	
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	*	Lu	Hf	Ta	W	Re	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			
**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



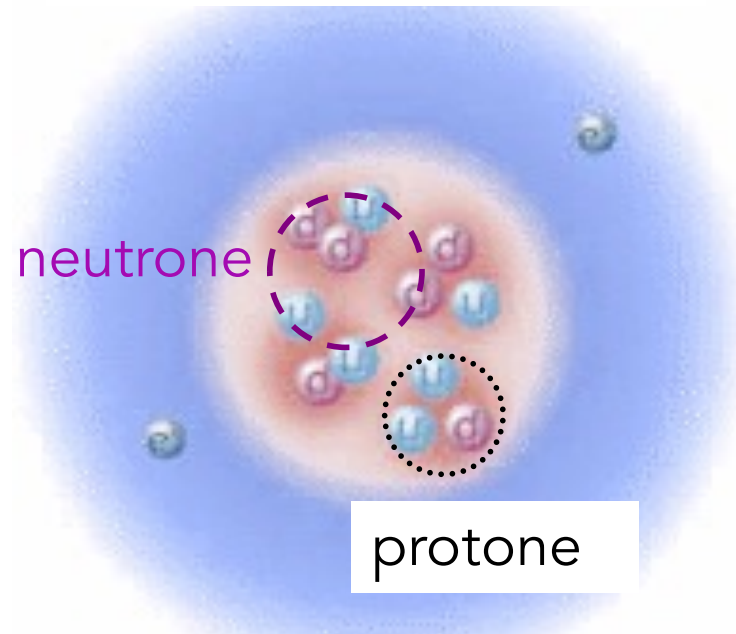
Ernest Rutherford (Brightwater, 1871 – Cambridge, 1937)

gli atomi hanno una struttura

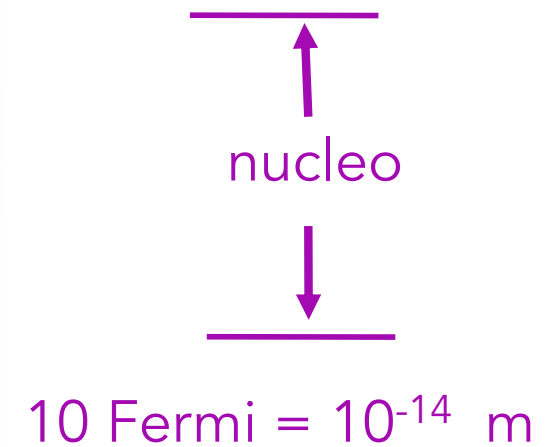


atomo:

1 Angstrom =  $10^{-10}$  m

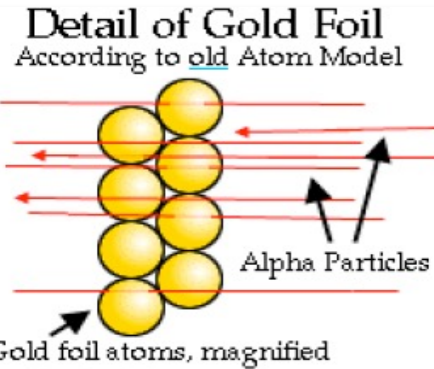
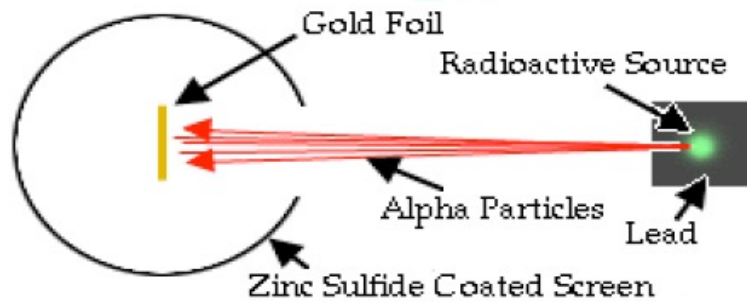


1 Fermi =  $10^{-15}$  m

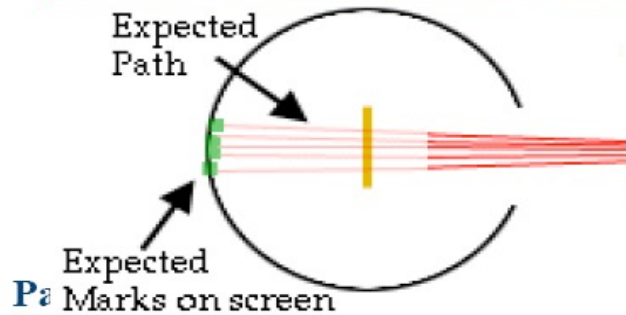


# gli atomi hanno una struttura

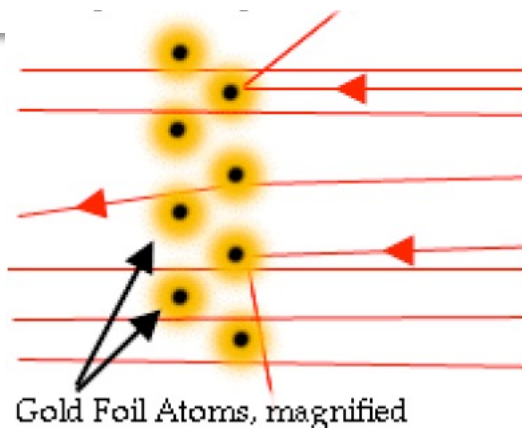
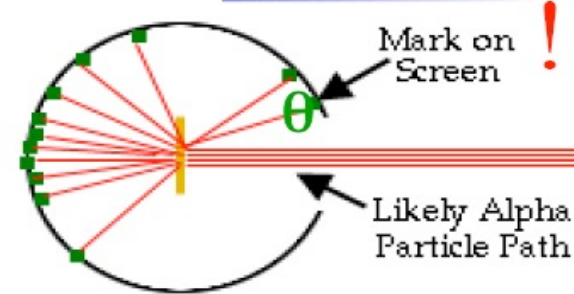
Rutherford



The Predicted Result:



Result:



conclusione:

l'atomo contiene un nucleo di carica positiva di dimensione  $< 10 \text{ Fm}$   
[1 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)

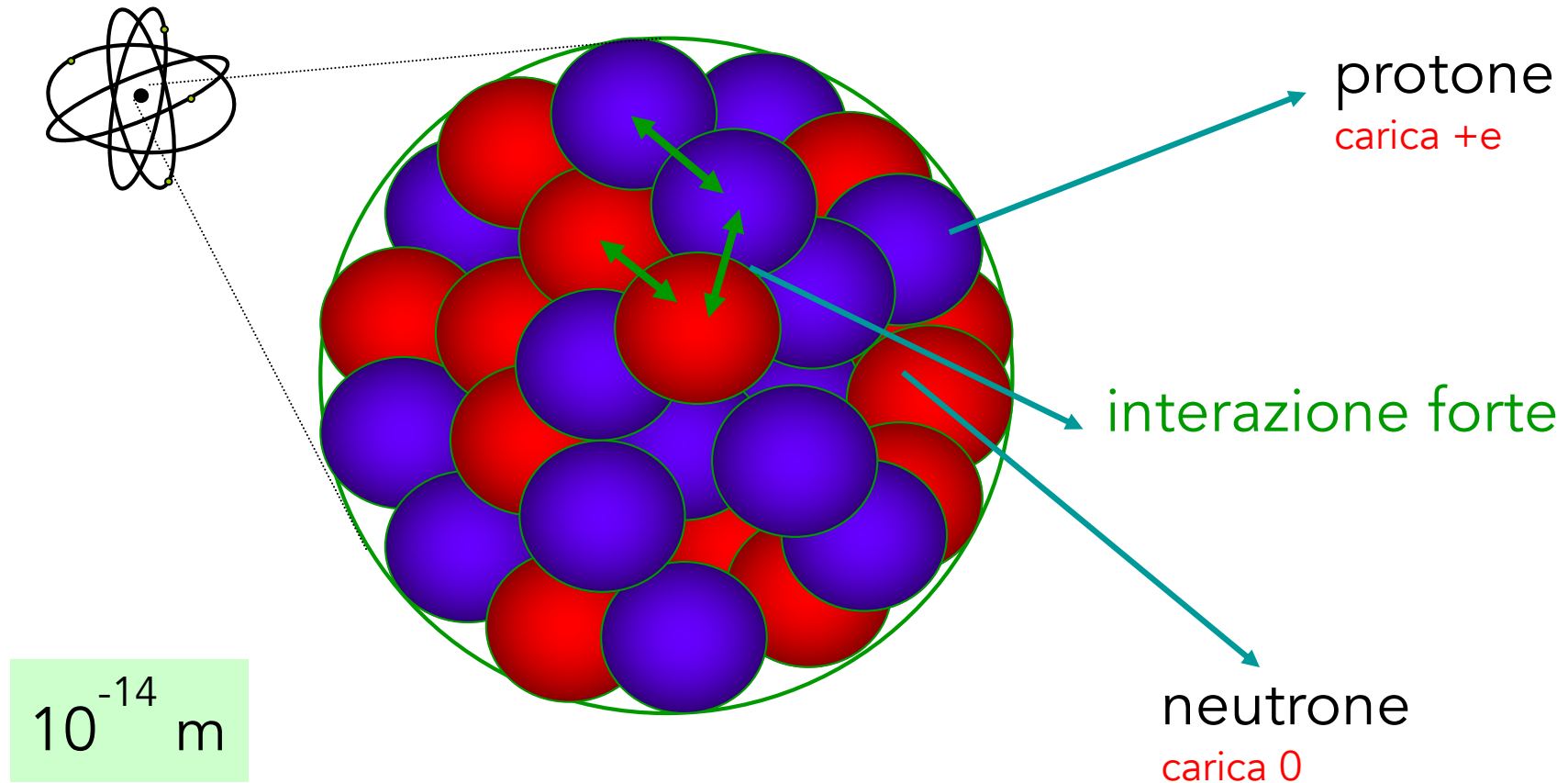
1930 - **Bothe e Becker** bombardano il berillio con particelle alfa: scoprono che dal berillio esce una radiazione neutra molto penetrante. **Frédéric Joliot e Irène Curie** dimostrano che escono delle particelle neutre in grado di espellere i protoni dalla paraffina

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»



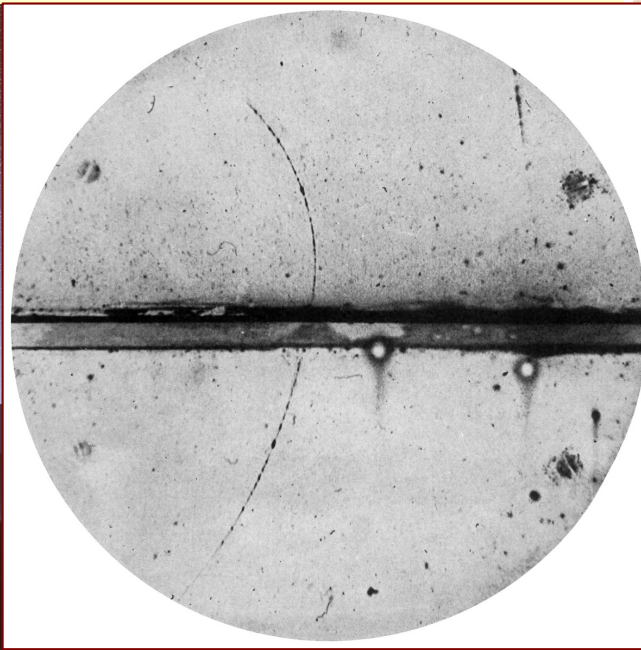
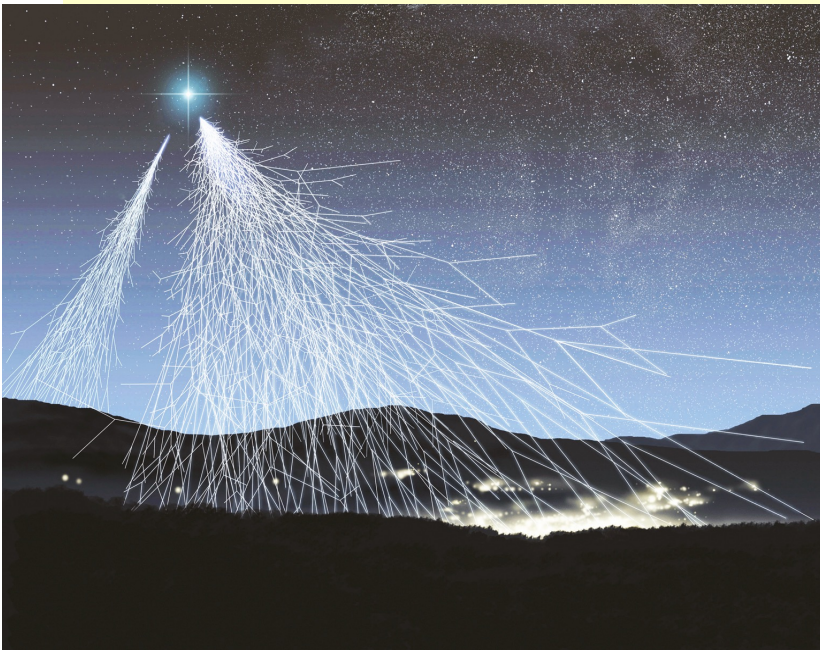
# contemporaneamente si scopre l'antimateria

(meccanica quantistica + relatività)

predizione dell'esistenza del positrone (Paul Dirac 1928)

massa del positrone = massa dell'elettrone

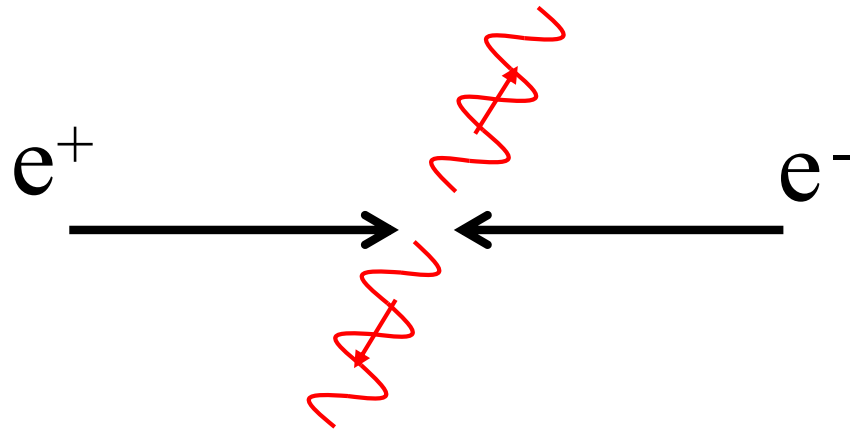
carica del positrone =  $+e$  (opposta all'elettrone)



Anderson 1932

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

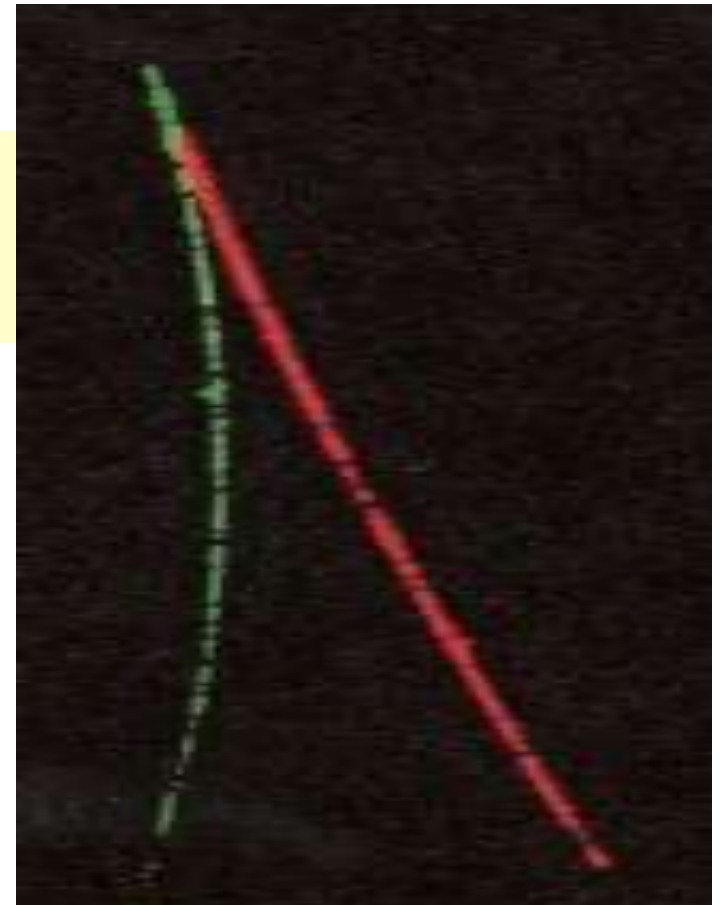
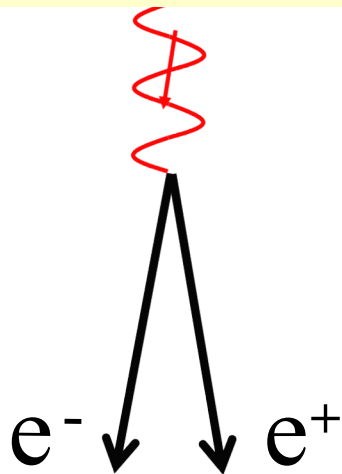
## come si evidenzia l' antimateria?



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

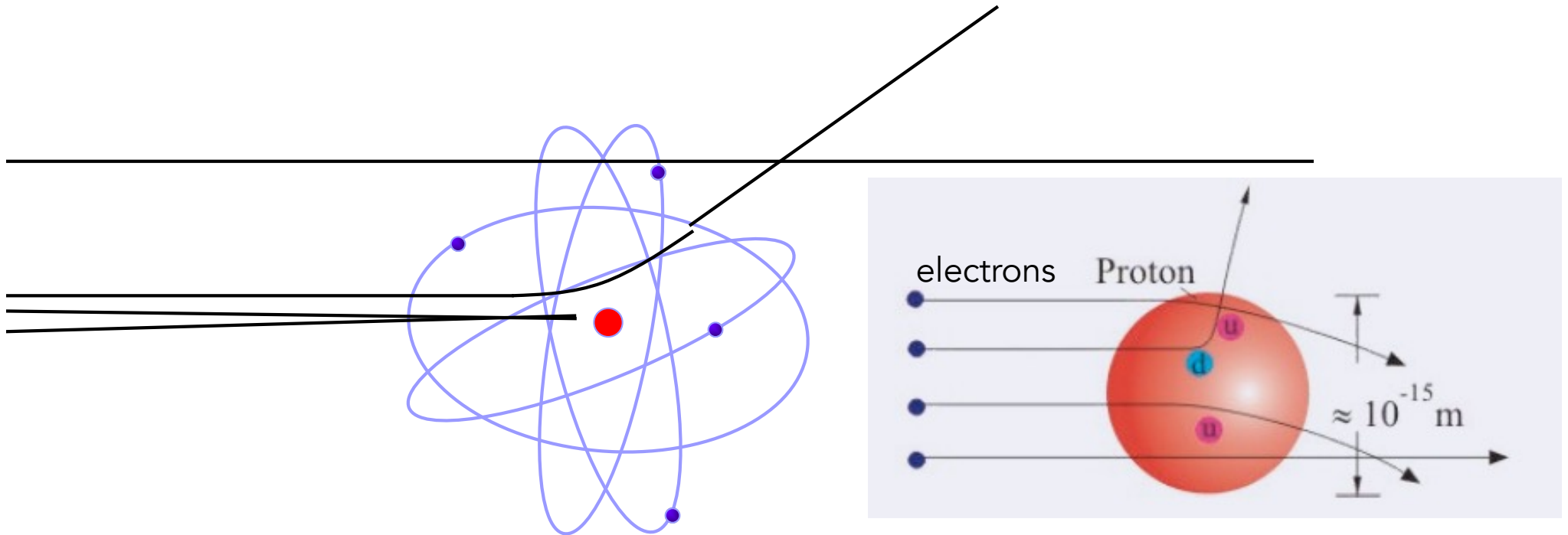
$$E = mc^2$$

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



anche protoni e neutroni hanno una struttura

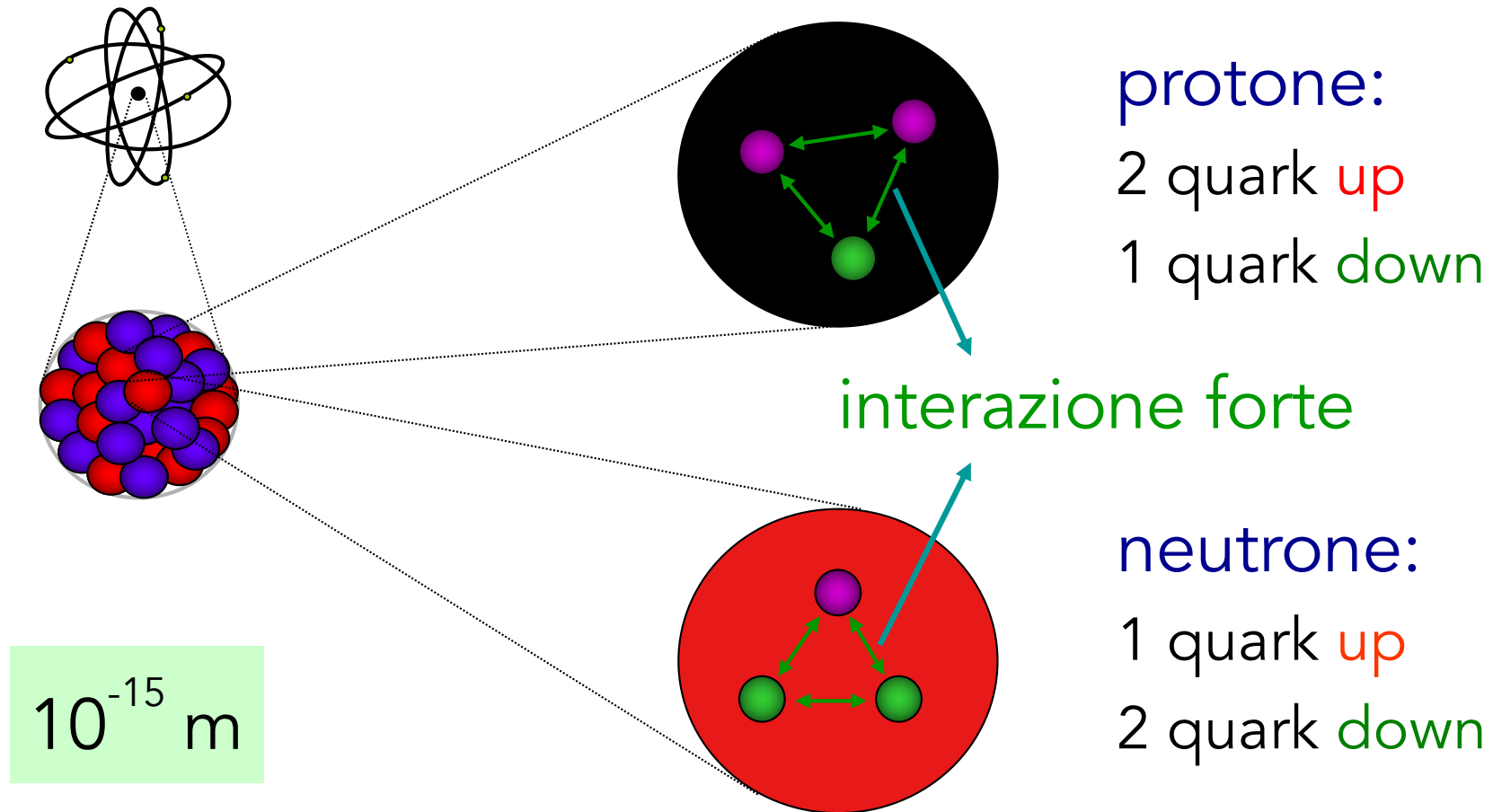
stesso metodo dell'esperimento di Rutherford



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

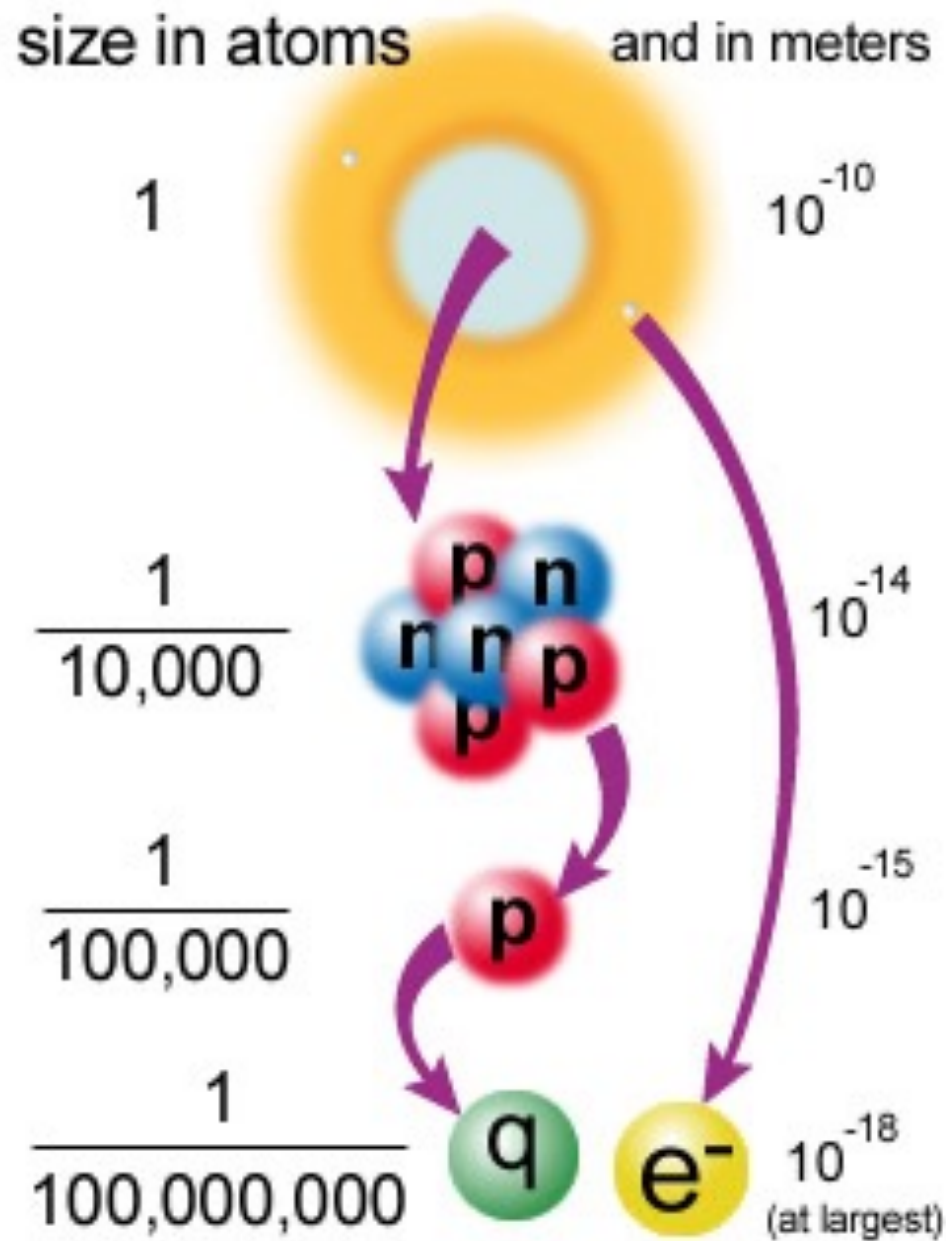
i componenti si chiamano "quark"

# struttura dei protoni e dei neutroni

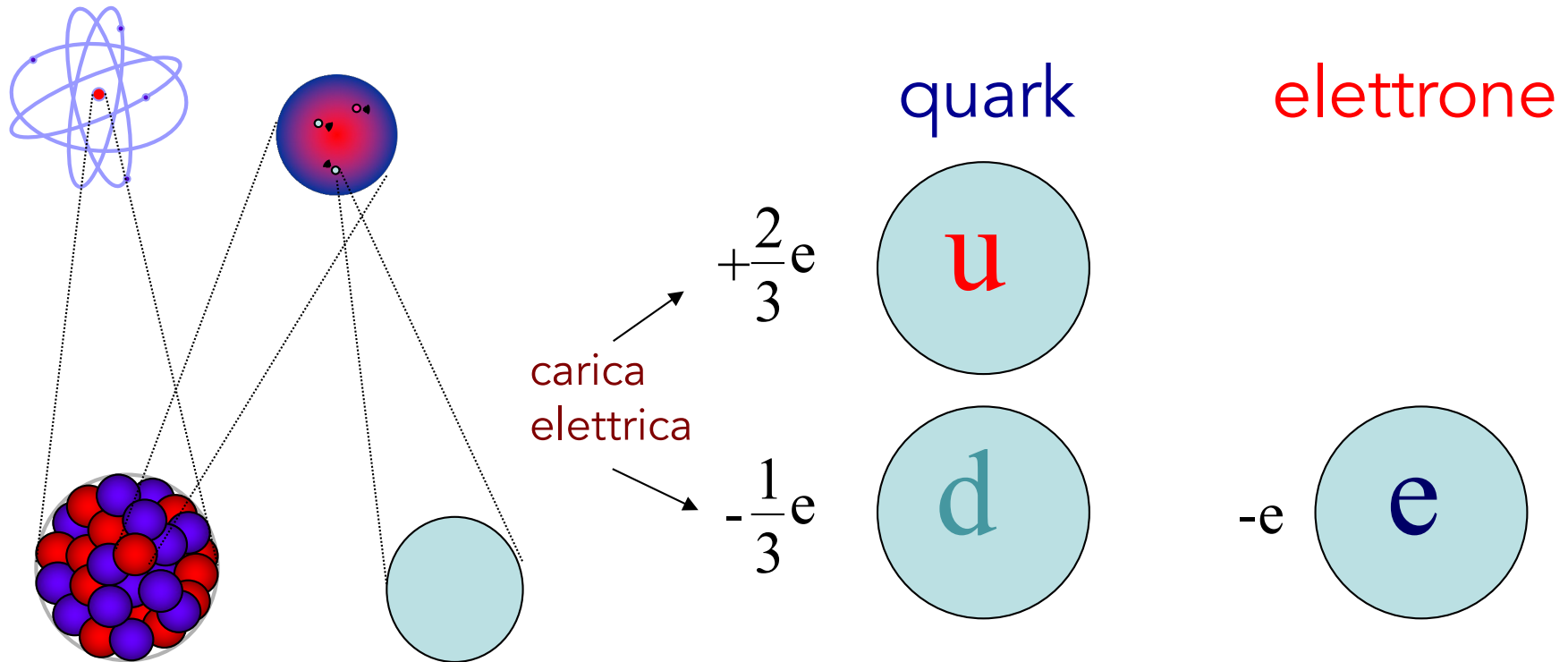


adroni = particelle composte da quark  
protoni, neutroni,...

notate le scale  
di lunghezza



# costituenti della materia

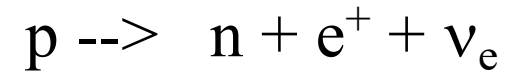
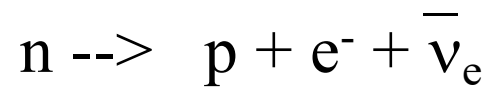
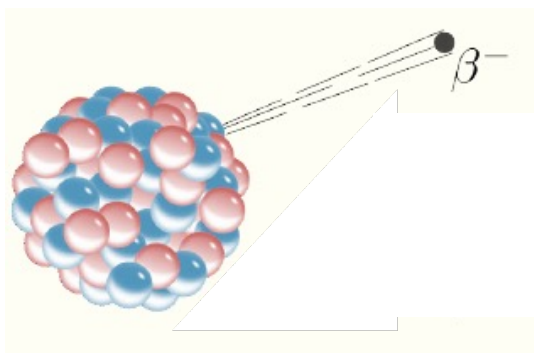


protoni contengono uud  $\rightarrow$  carica =  $+e$   
neutroni contengono udd  $\rightarrow$  carica =  $0$

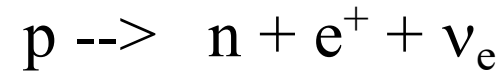
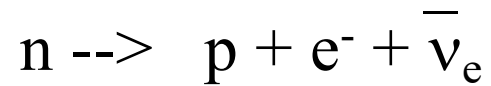
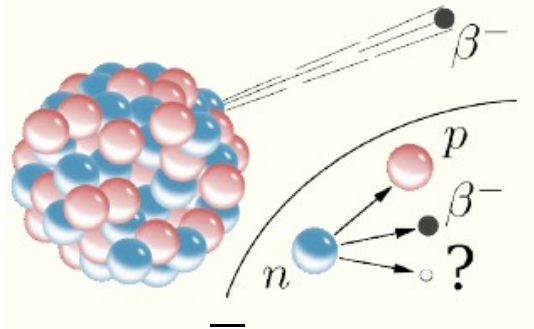
interazioni "forti": tengono insieme i quark  
nel protone e neutrone



la radioattività

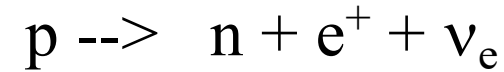
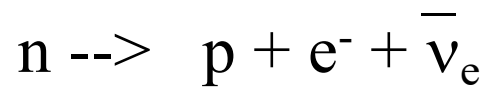
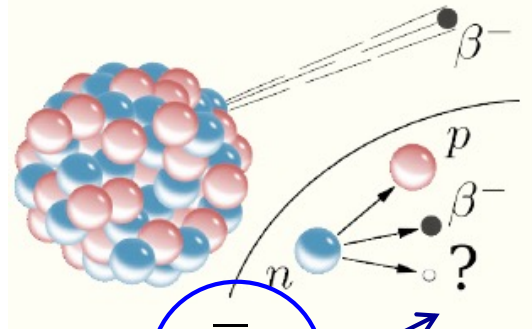


la radioattività



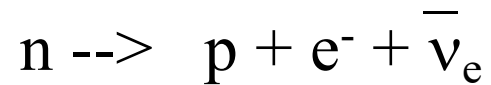
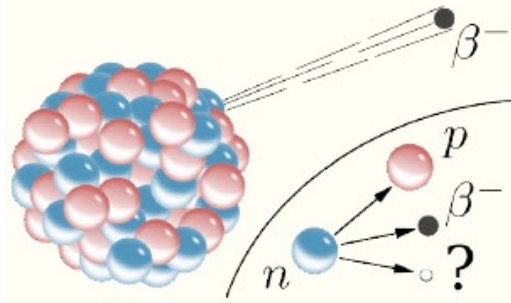
- i quark possono trasformarsi (decadere) in altri quark
- le interazioni coinvolte si chiamano «deboli»

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

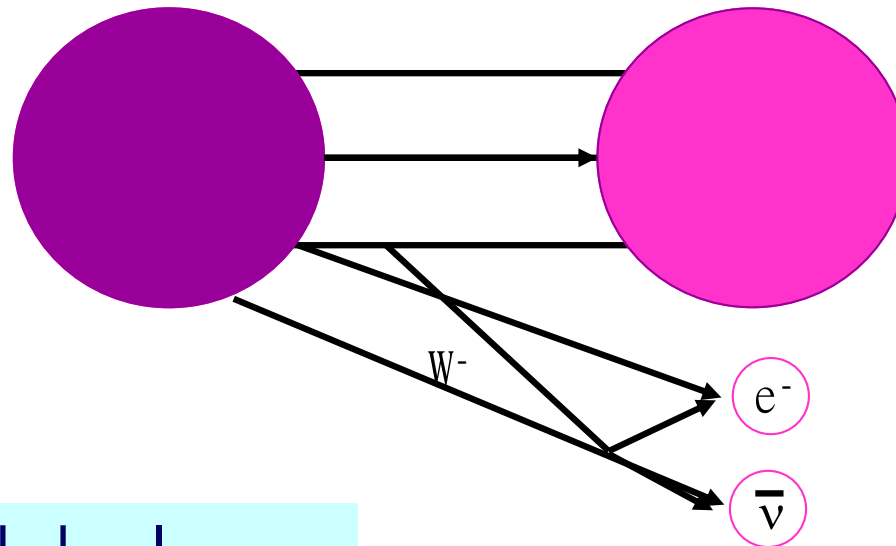


27 protoni  
33 neutroni

28 protoni  
32 neutroni

neutrone

protone



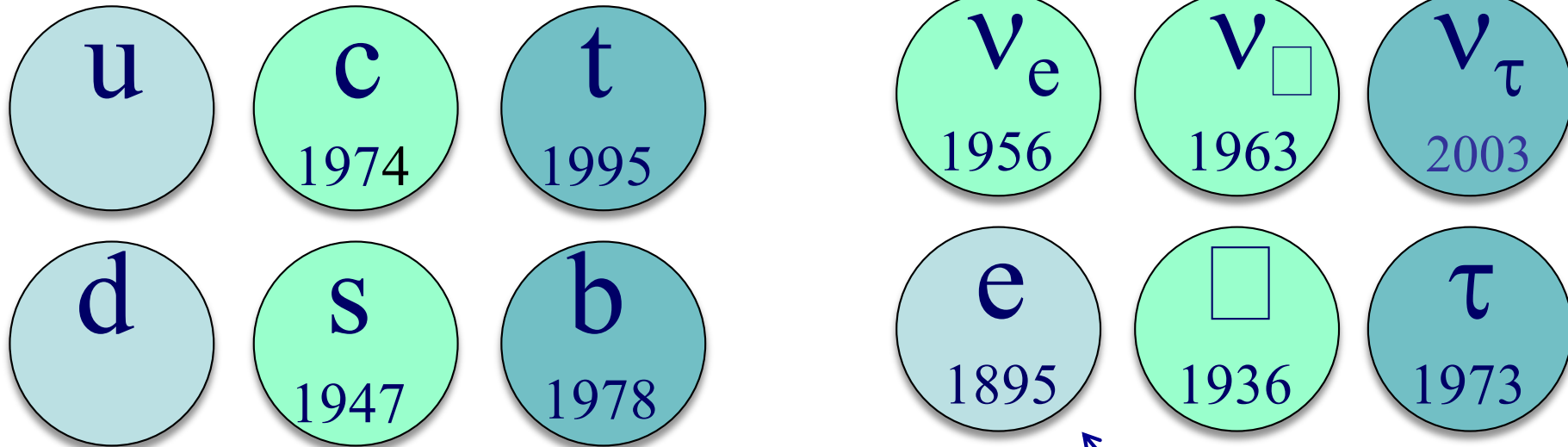
interazione «debole»

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	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	<i>e</i> electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
I    II    III			
The Generations of Matter			

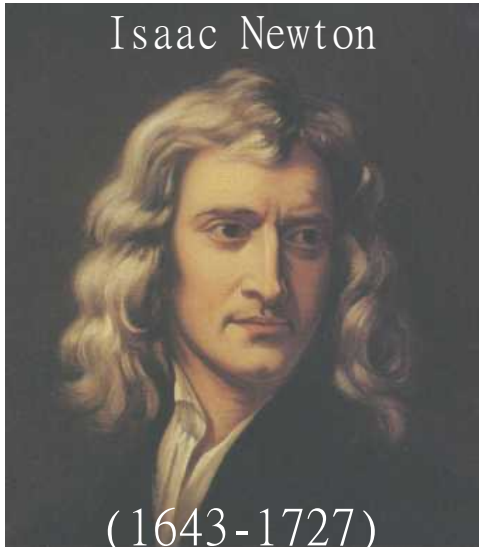
solo le masse sono diverse

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

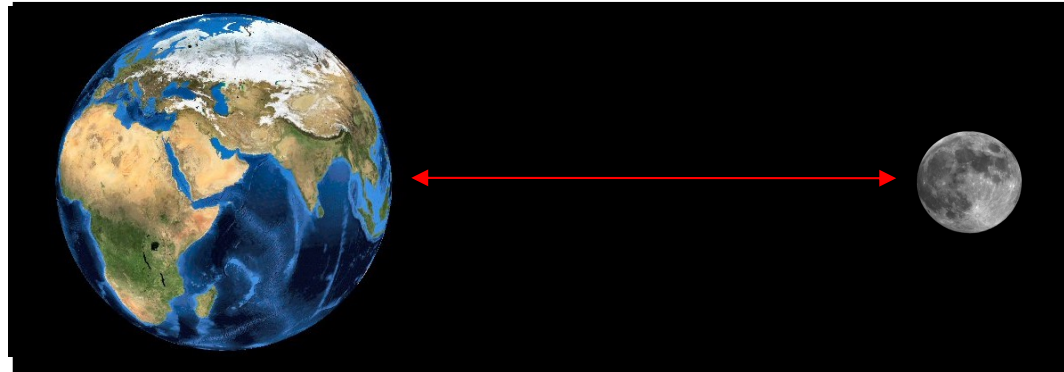
tavola periodica del 2024

# le interazioni

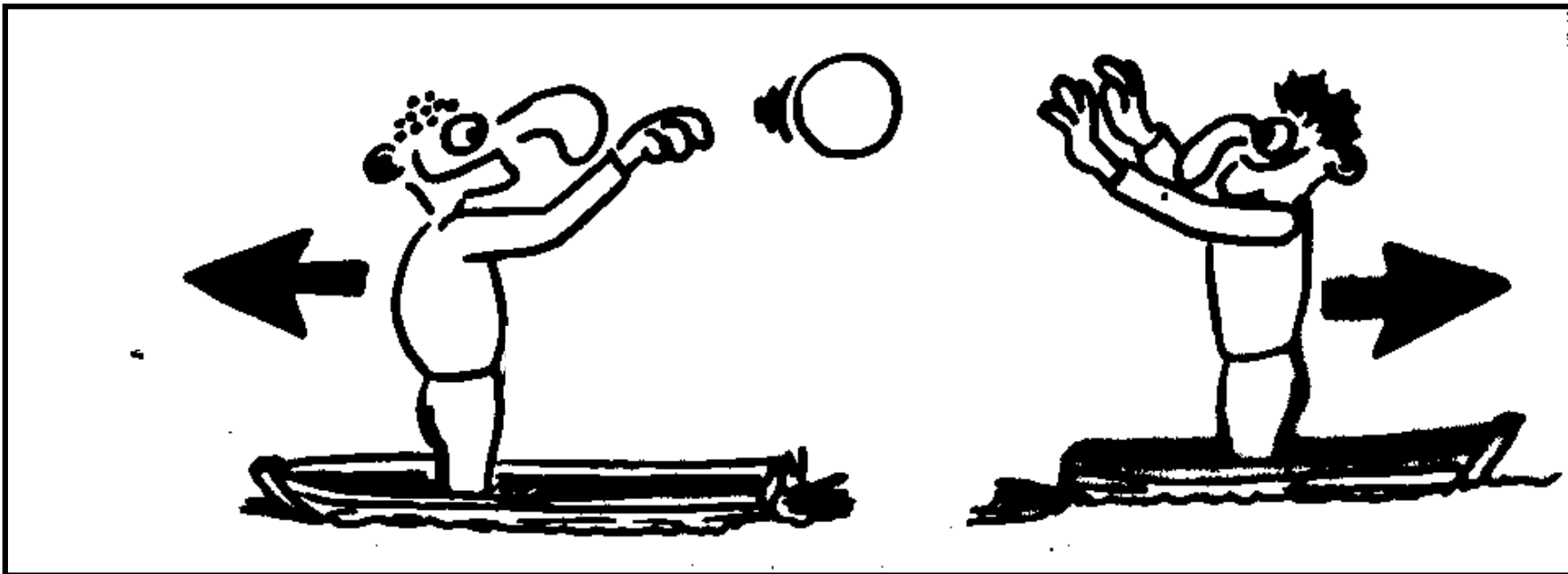
Isaac Newton



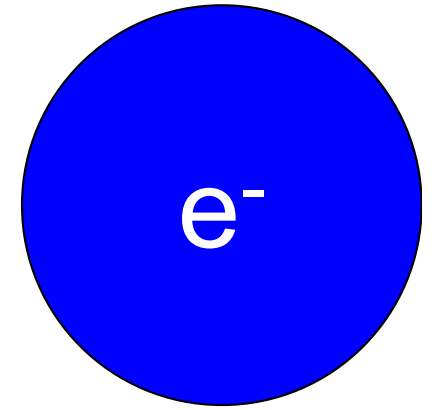
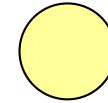
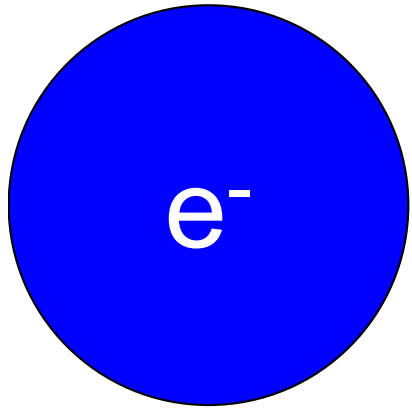
descrizione antica:  
azione istantanea a distanza



descrizione moderna: scambio di particelle

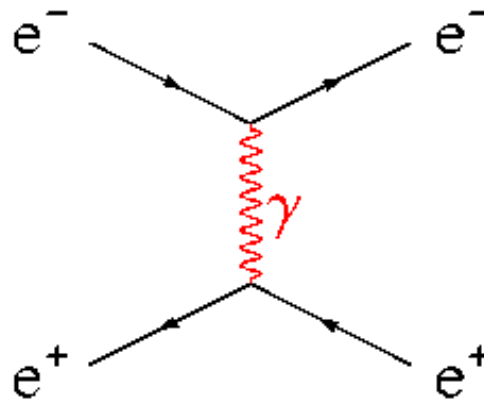


# interazione elettromagnetica



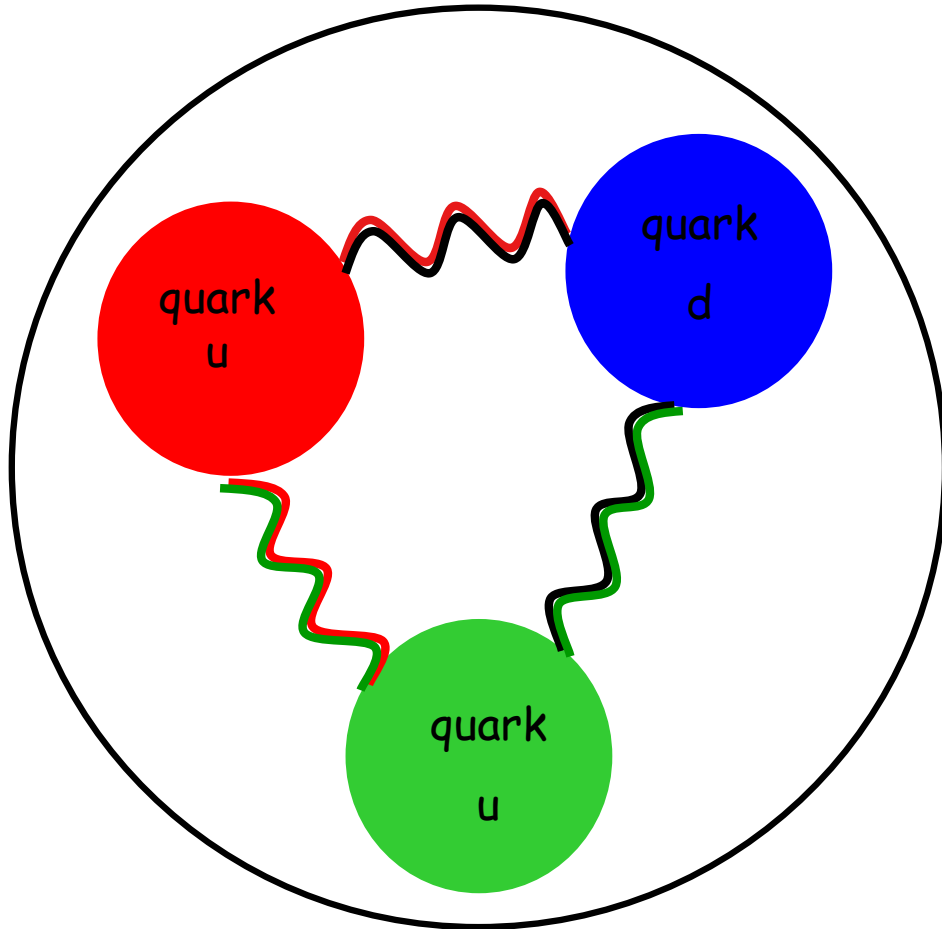
mediatore  
« fotone »

massa = 0





# interazione « forte »



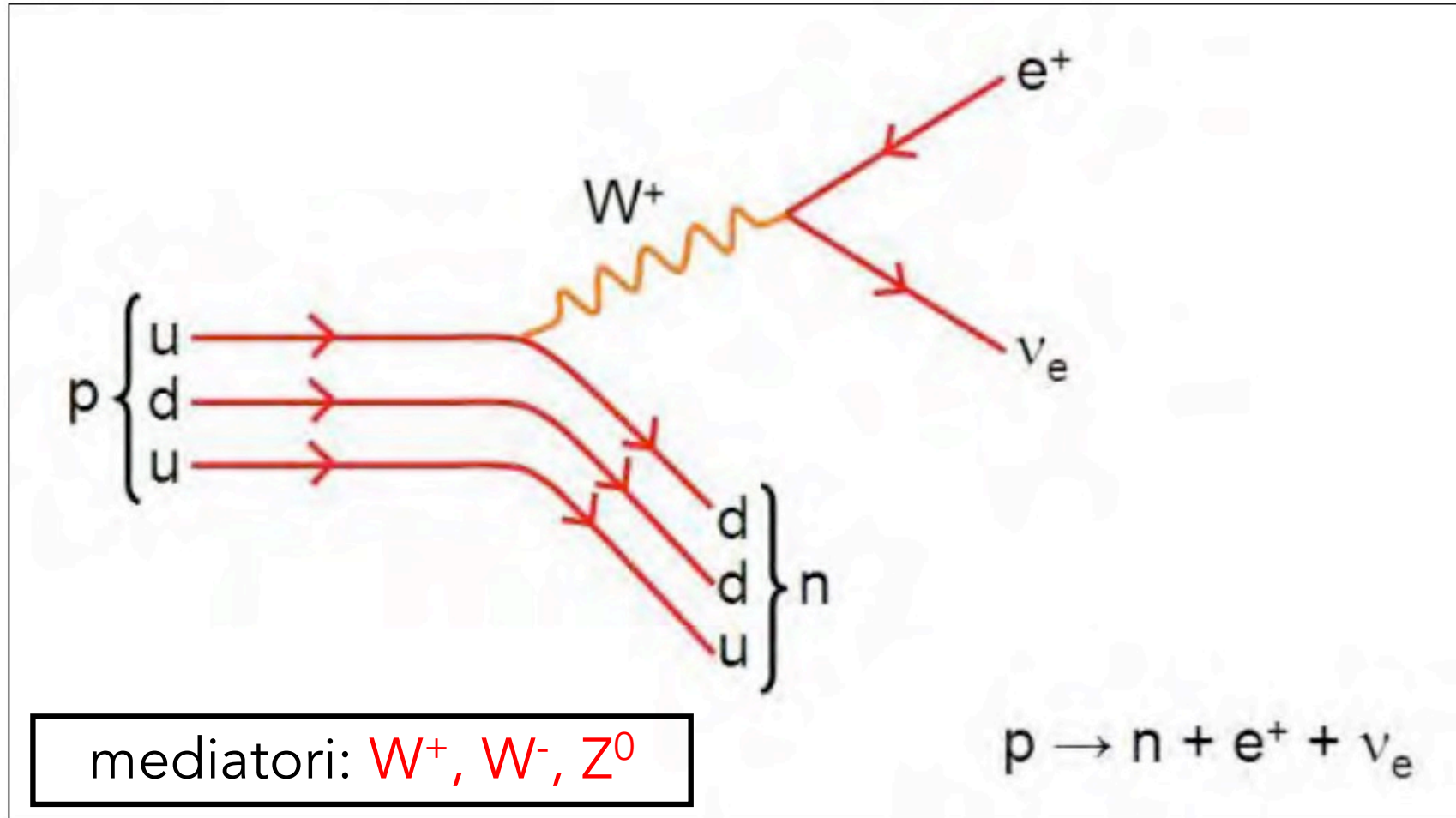
oltre alla carica elettrica, i quark portano un  
"colore"  
"blu" "verde" "rosso"  
il protone è "incolore"

mediatori  
« gluoni »

massa = 0

i gluoni tengono insieme  
i quark dentro il protone

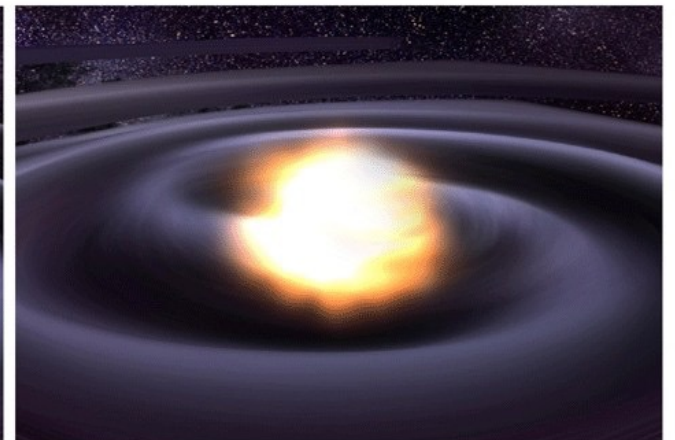
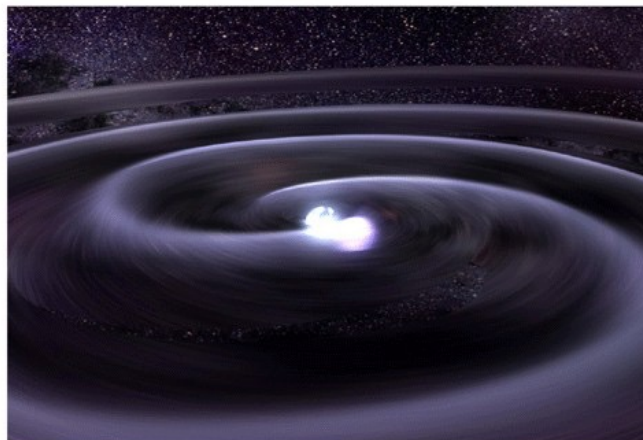
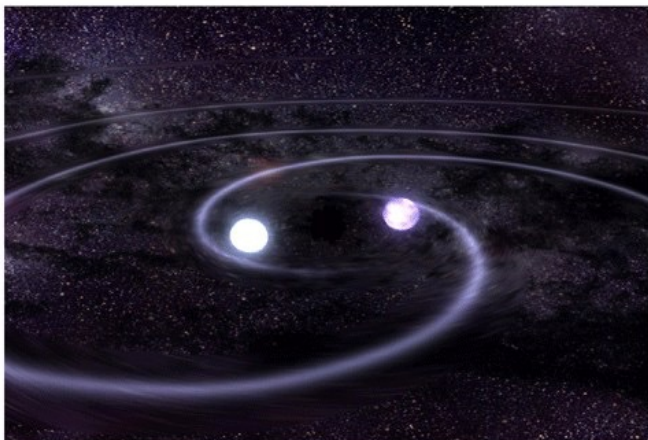
# interazione « debole »



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

3<sup>rd</sup> generation

electro-weak symmetry breaking (mass giving)

outside of standard model

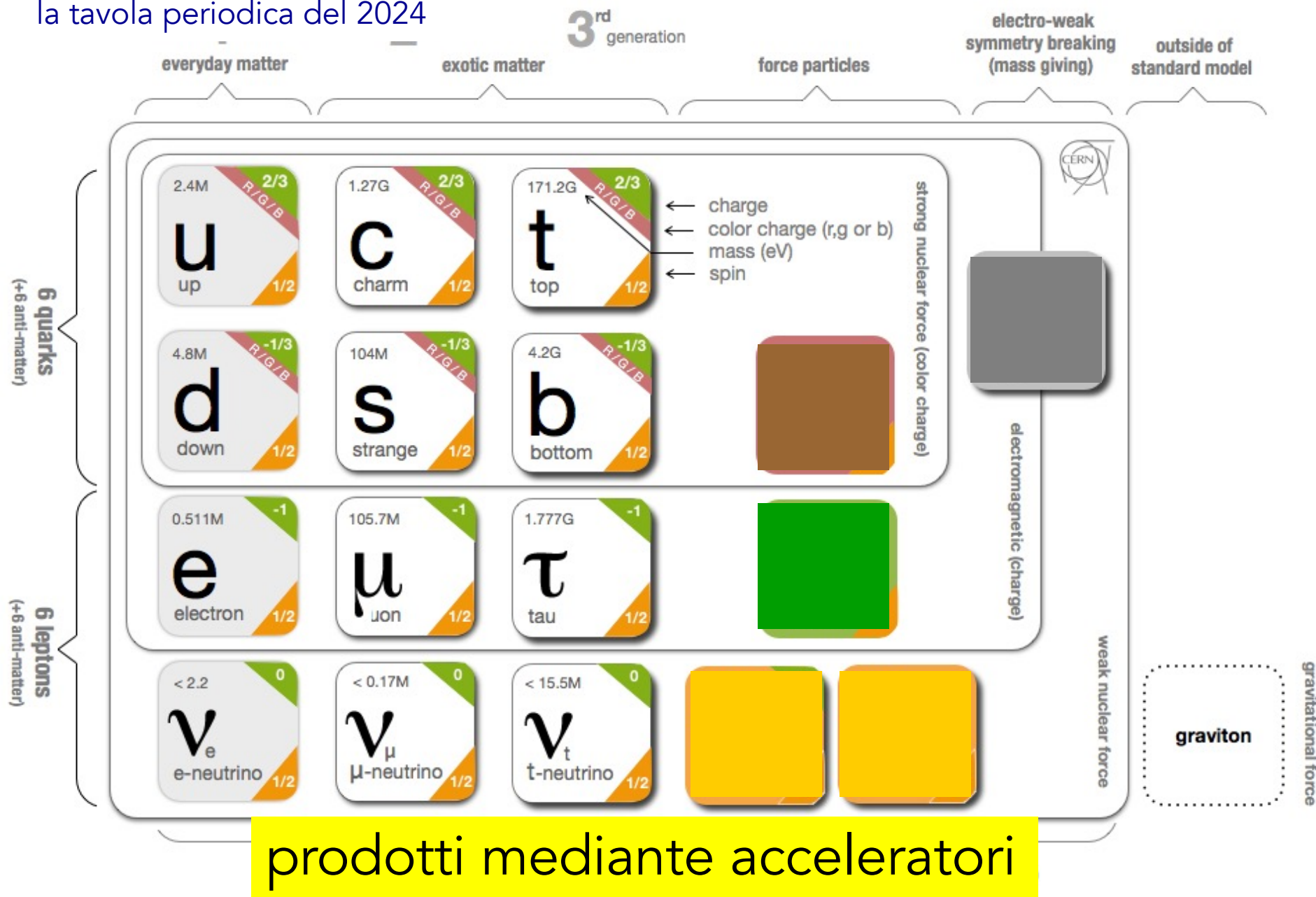


materia di cui siamo fatti



# il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2024



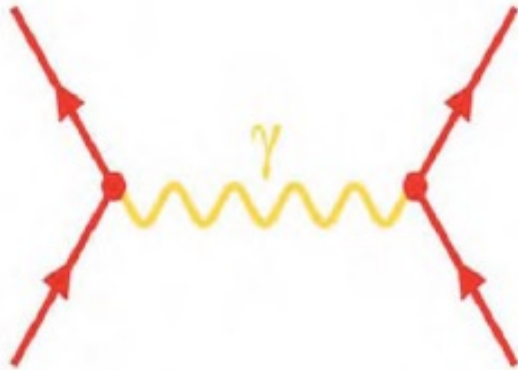
# il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2024

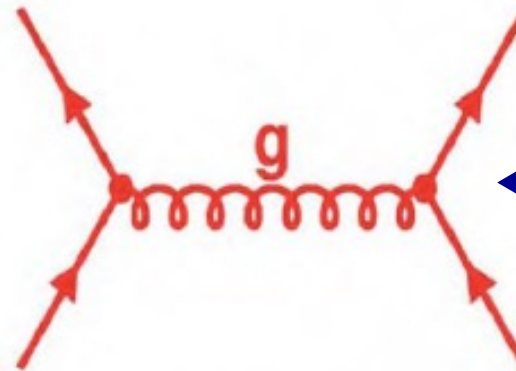


## mediatori delle interazioni

**fotoni:** mediatori delle interazioni elettromagnetiche

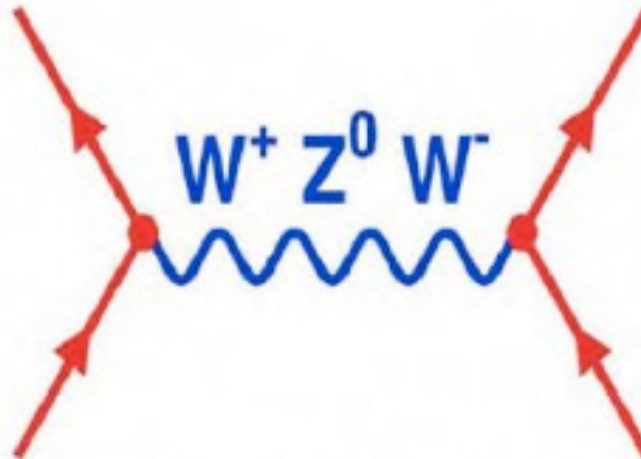


**gluoni:** mediatori delle interazioni "forti"



processi importanti nello studio di oggi

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

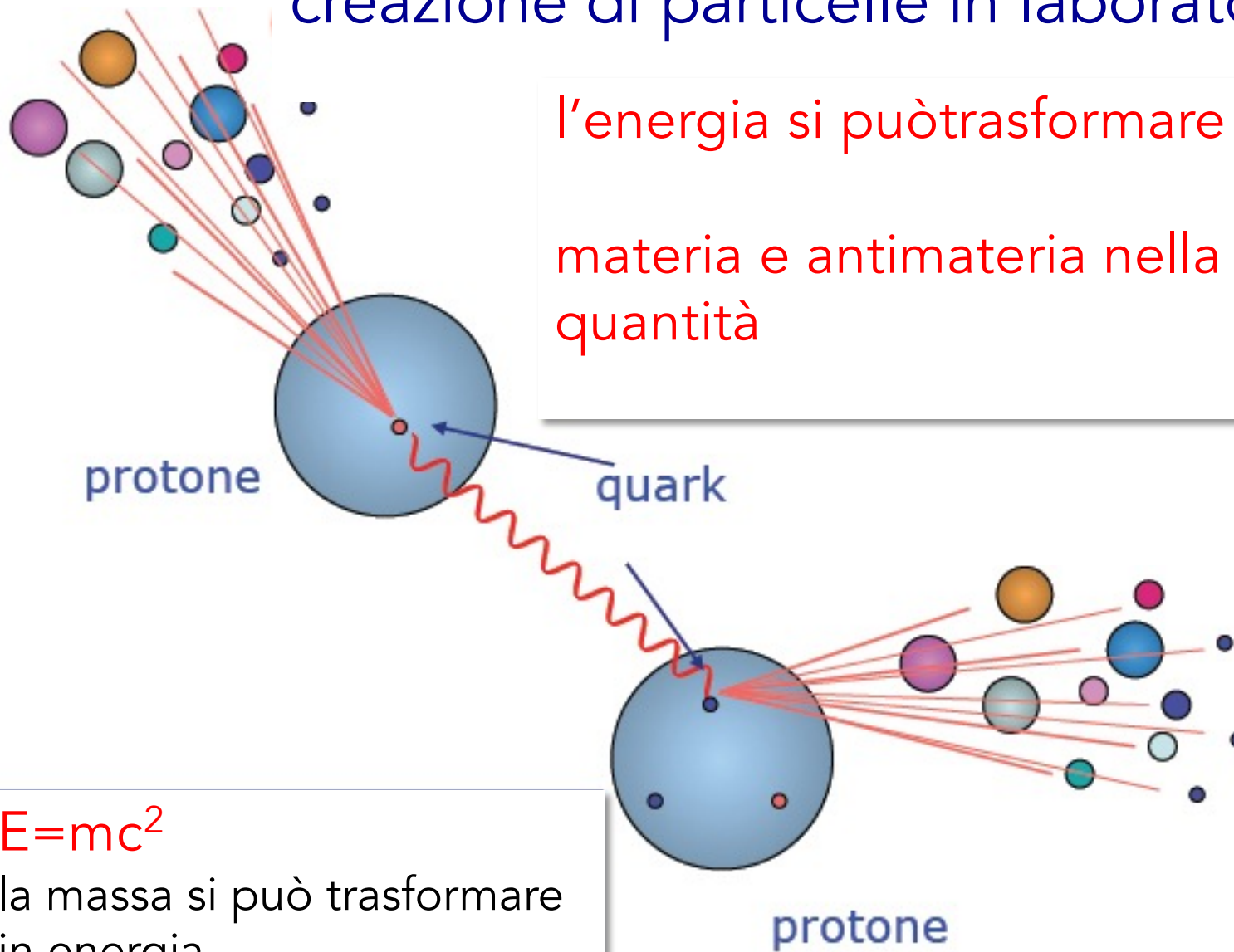






# creazione di particelle in laboratorio

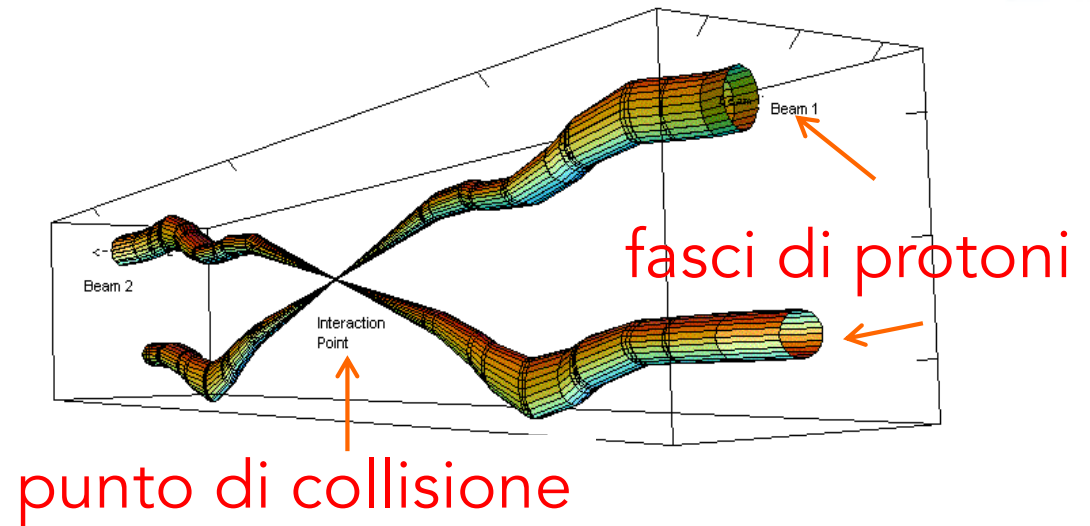
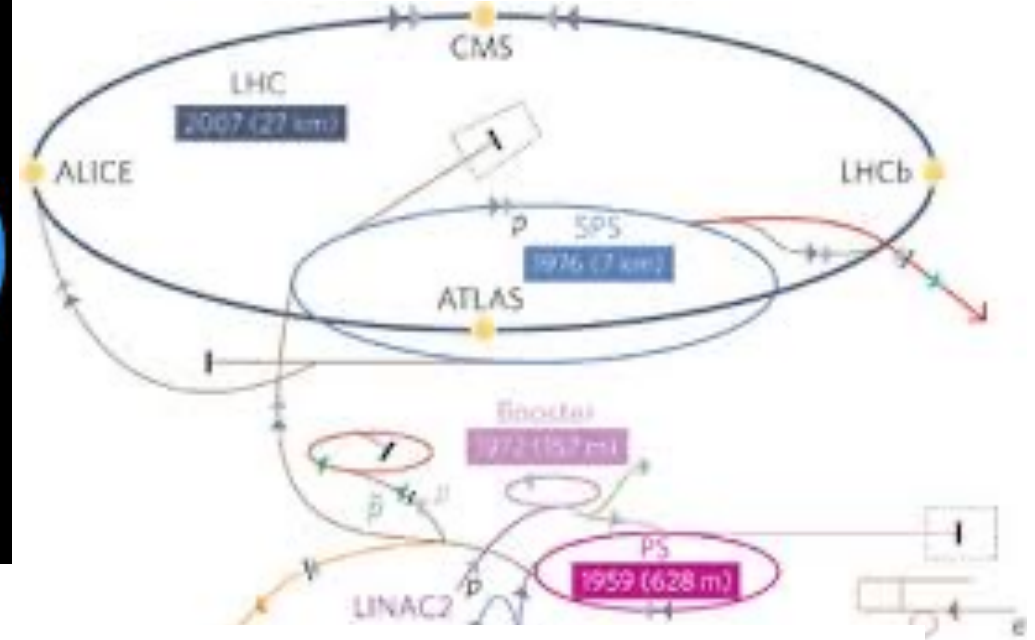
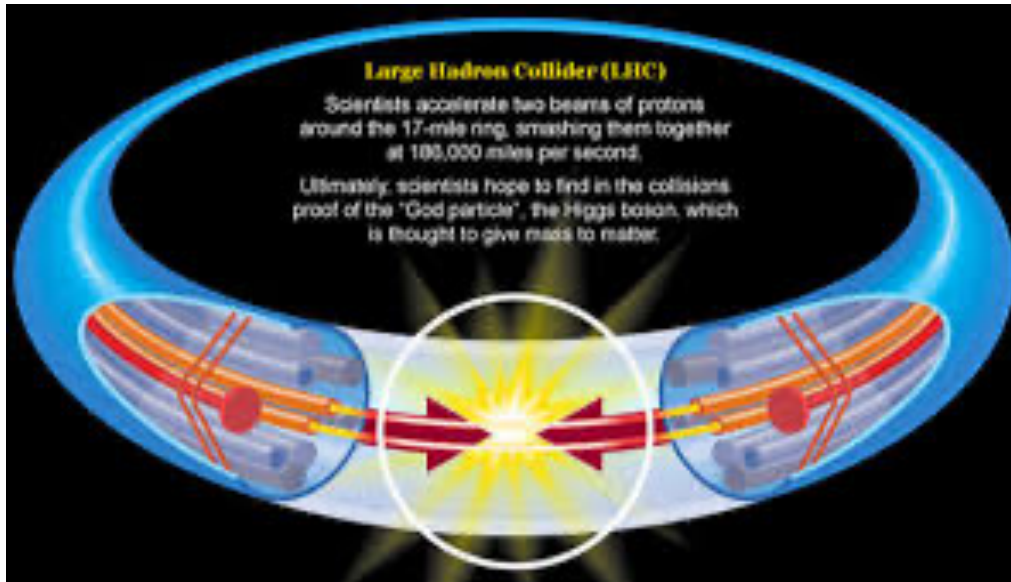
l'energia si può trasformare in materia  
materia e antimateria nella stessa  
quantità



$$E=mc^2$$

la massa si può trasformare  
in energia  
e viceversa

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

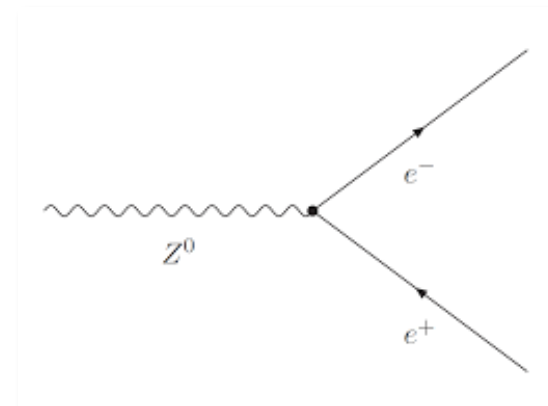
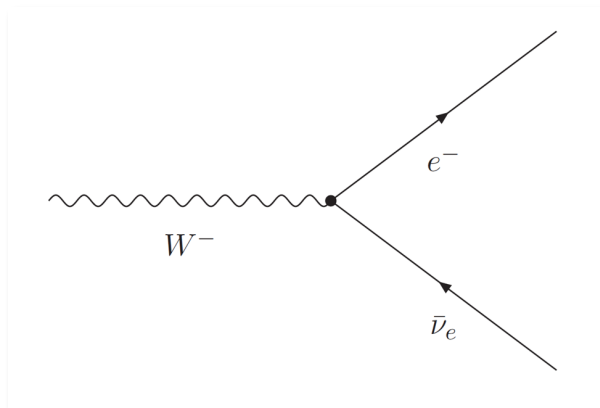


al Large Hadron Collider (LHC) del CERN queste particelle possono essere prodotte

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

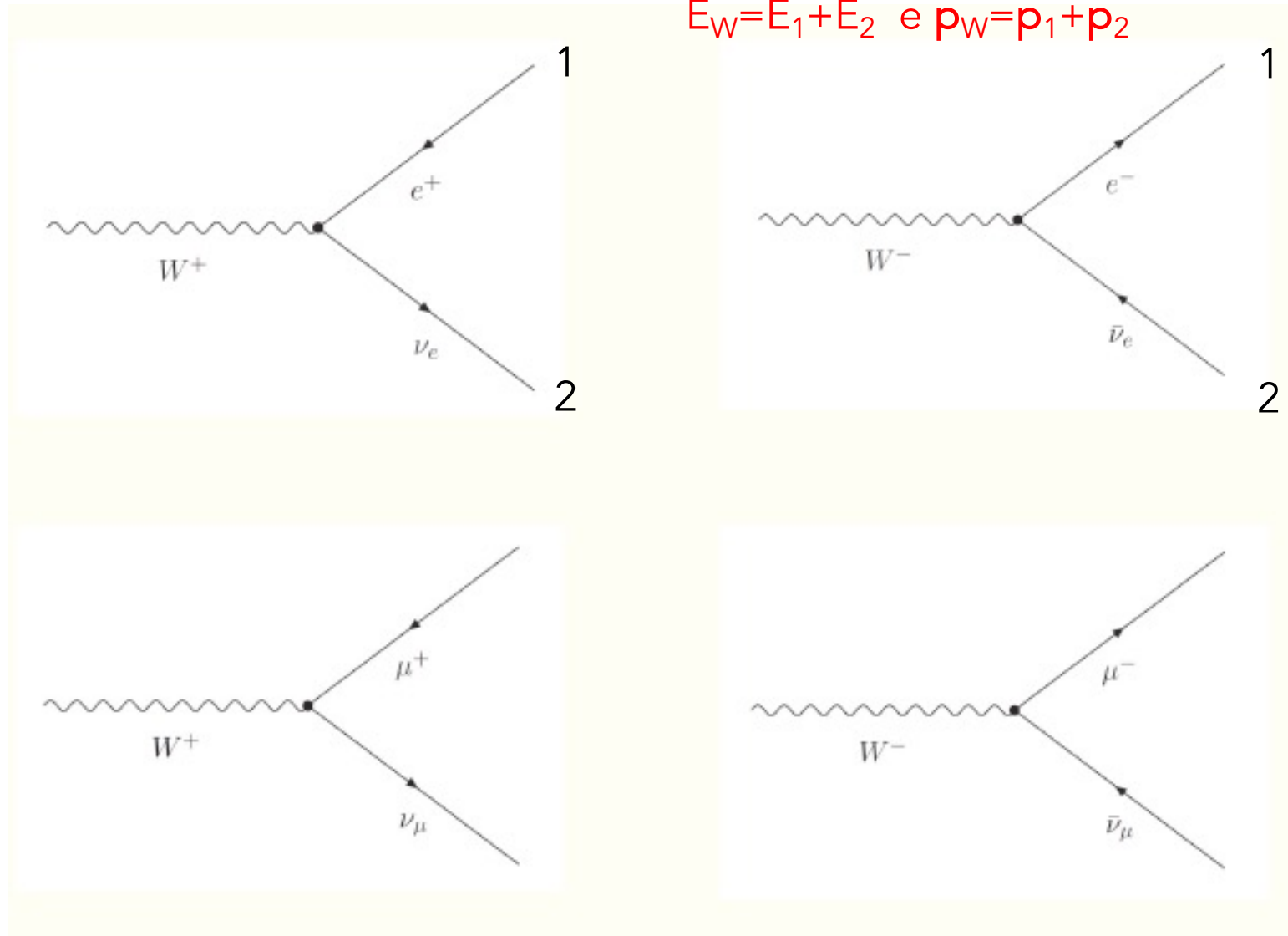


## decadimenti dei $W^+$ e $W^-$

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  $W^- \rightarrow 1+2$

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

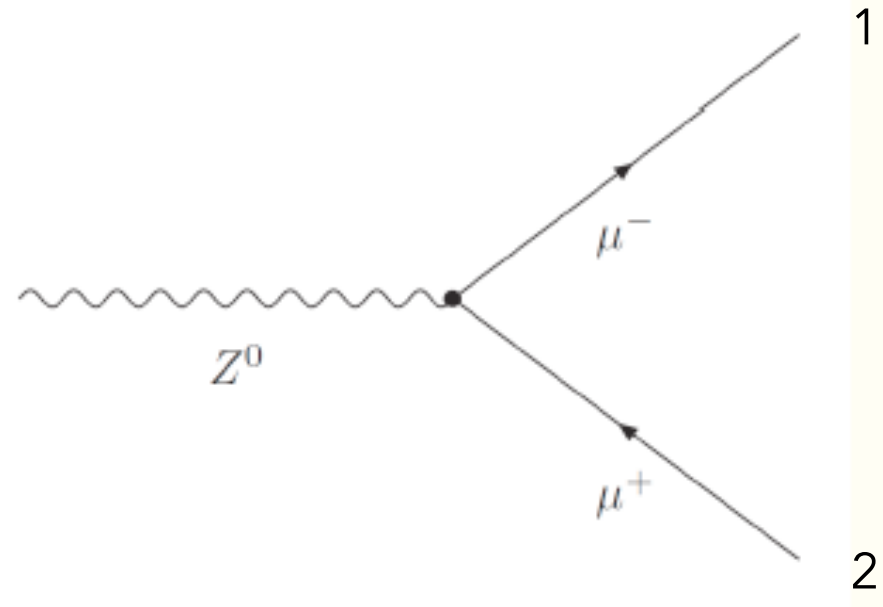
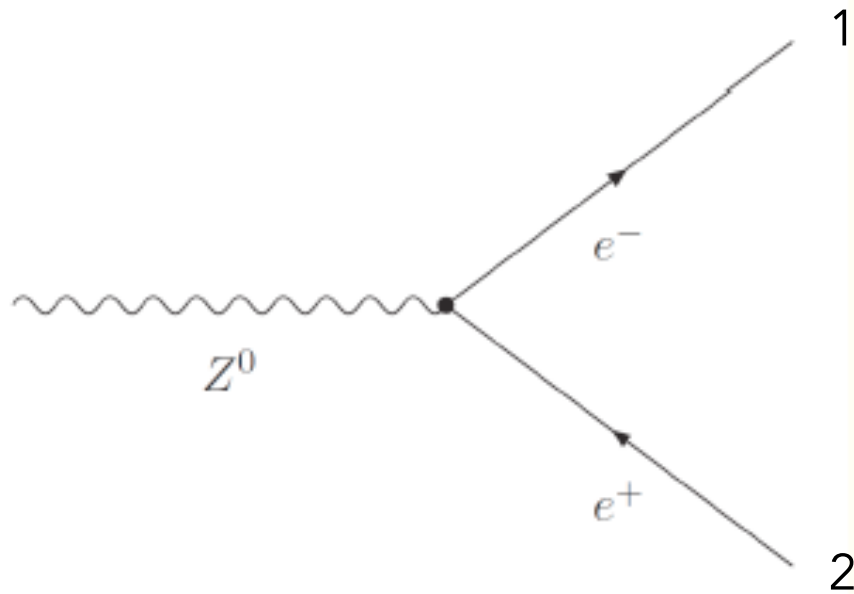


## decadimenti della $Z^0$

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

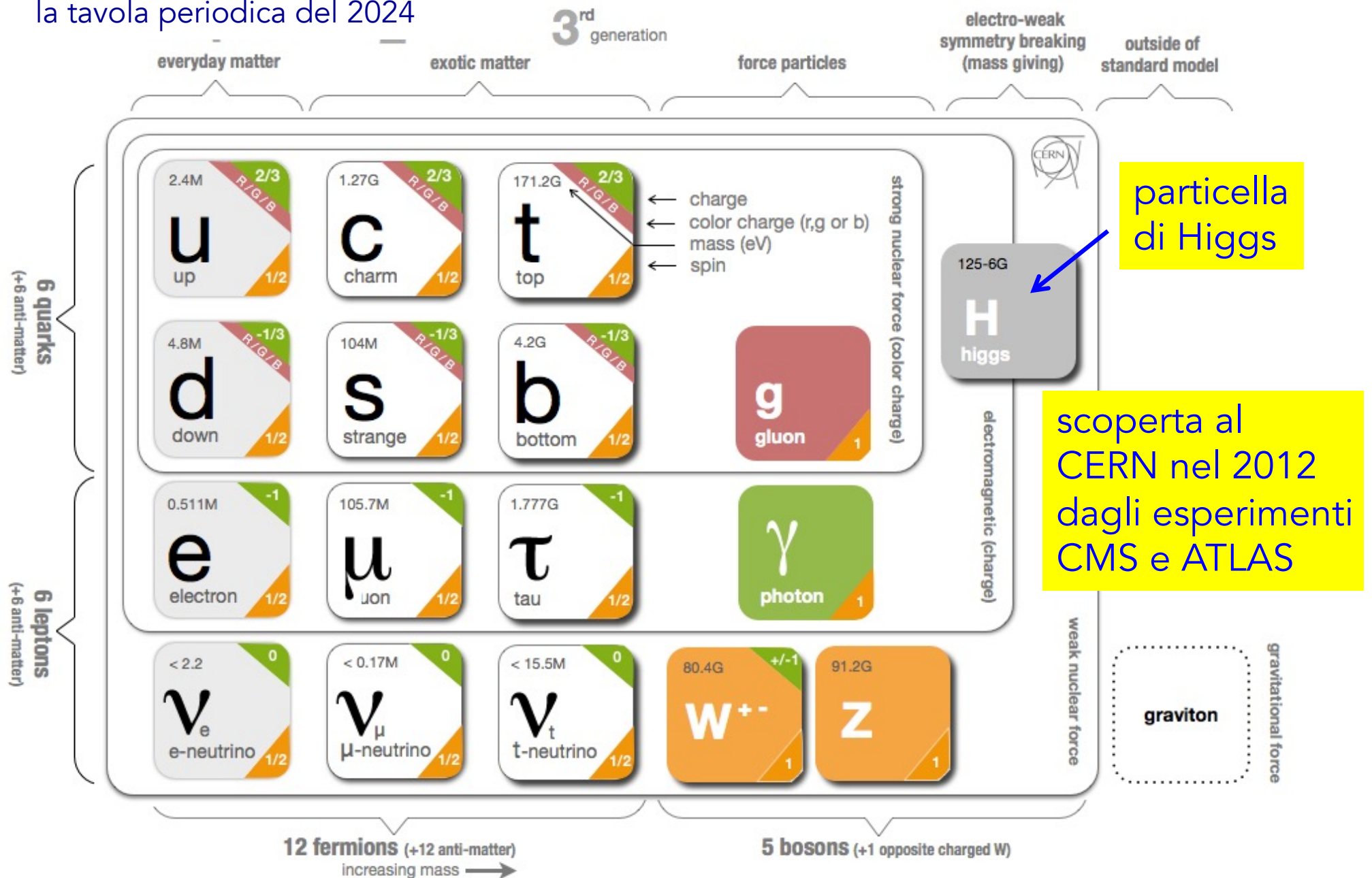
nel decadimento  $Z \rightarrow 1 + 2$

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



# il Modello Standard **sommario**

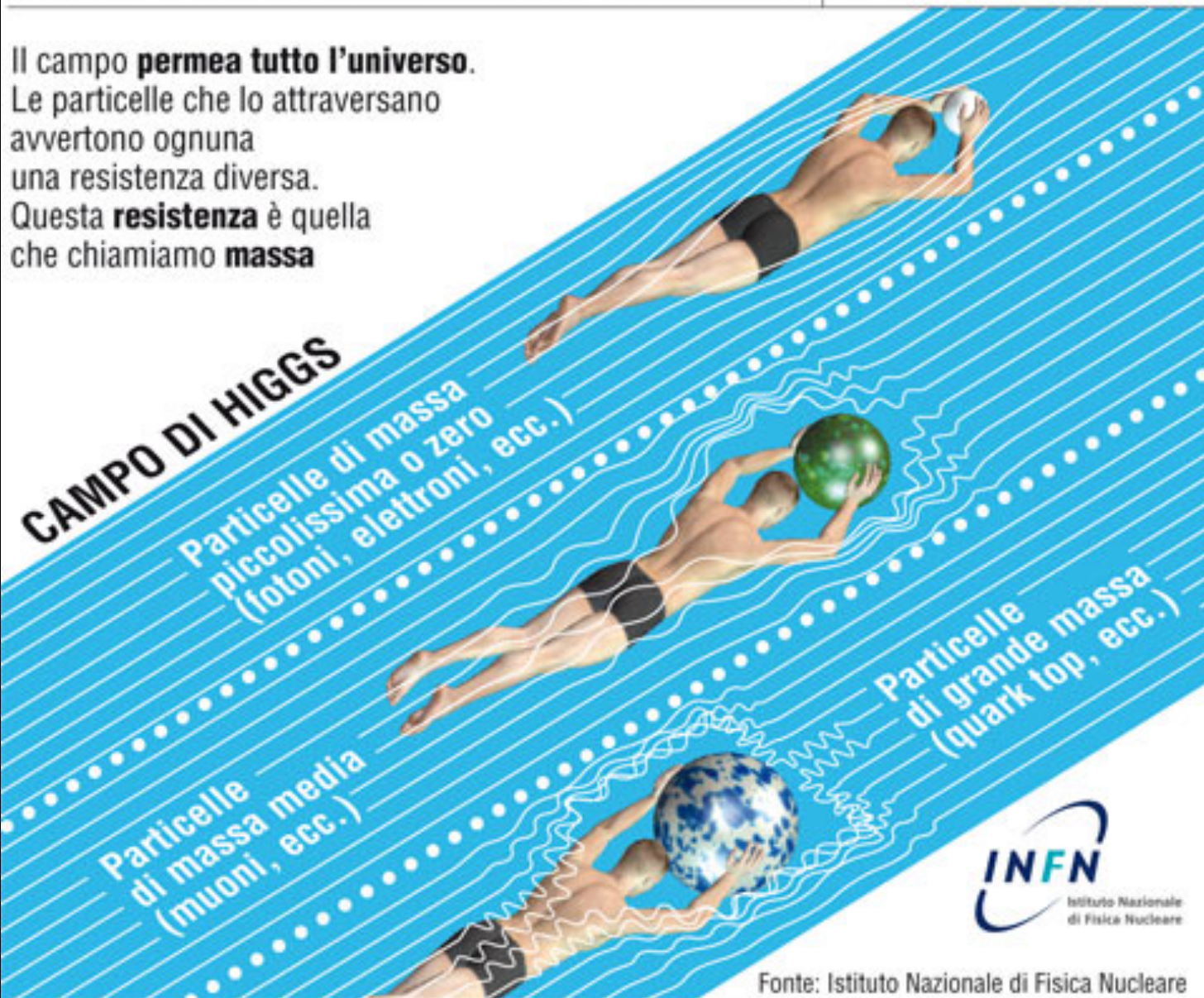
la tavola periodica del 2024



# 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



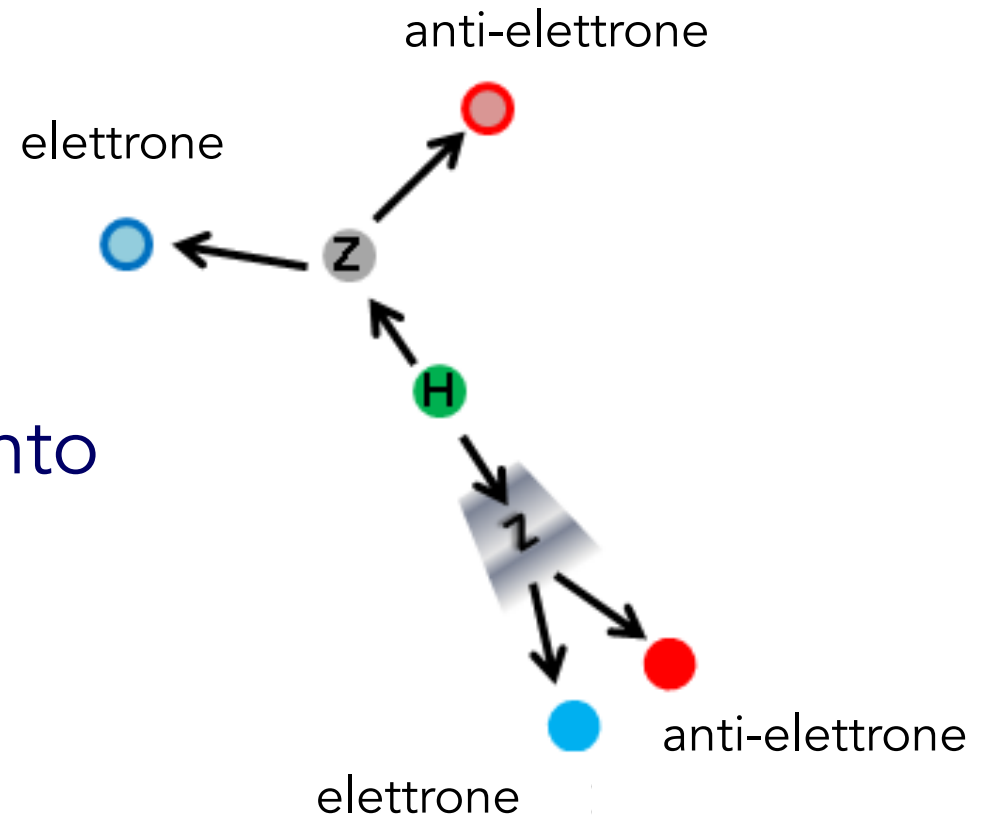
Fonte: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



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

un possibile decadimento

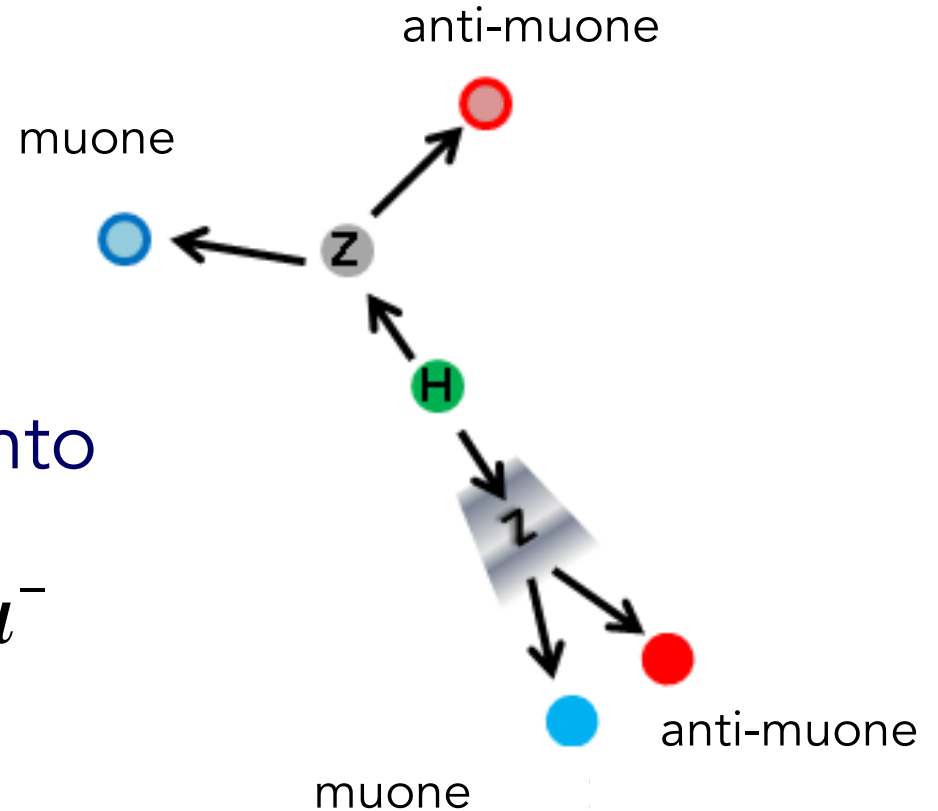
$$H \rightarrow Z Z \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$$



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

un possibile decadimento

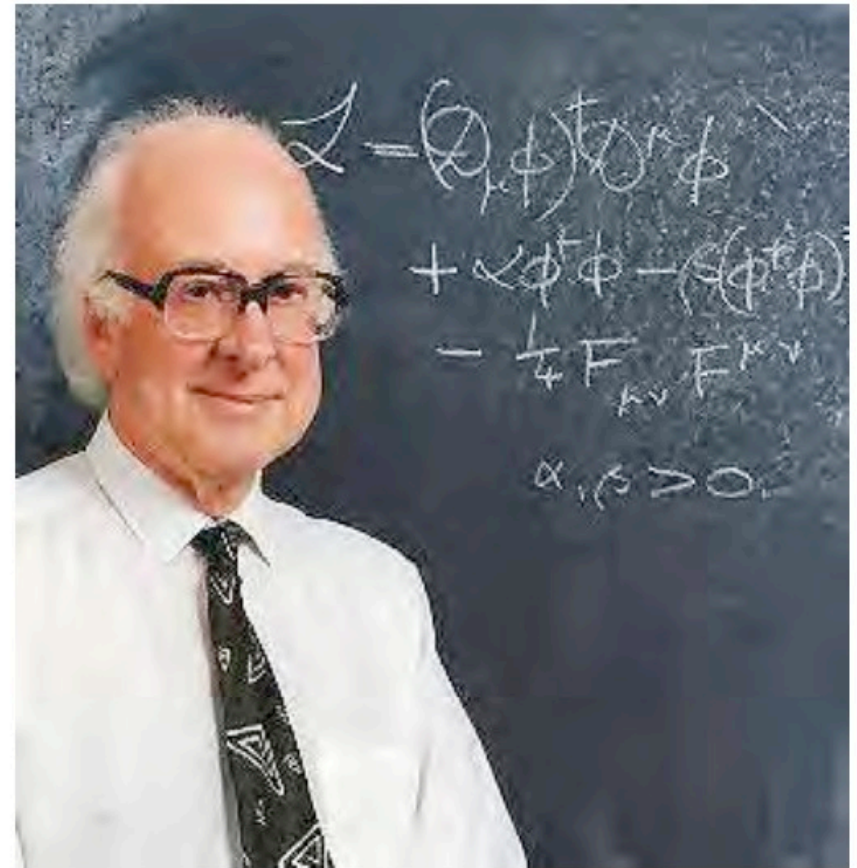
$$H \rightarrow Z Z \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$





Carlo Rubbia  
scoperta delle particelle W e Z

premio Nobel 1984

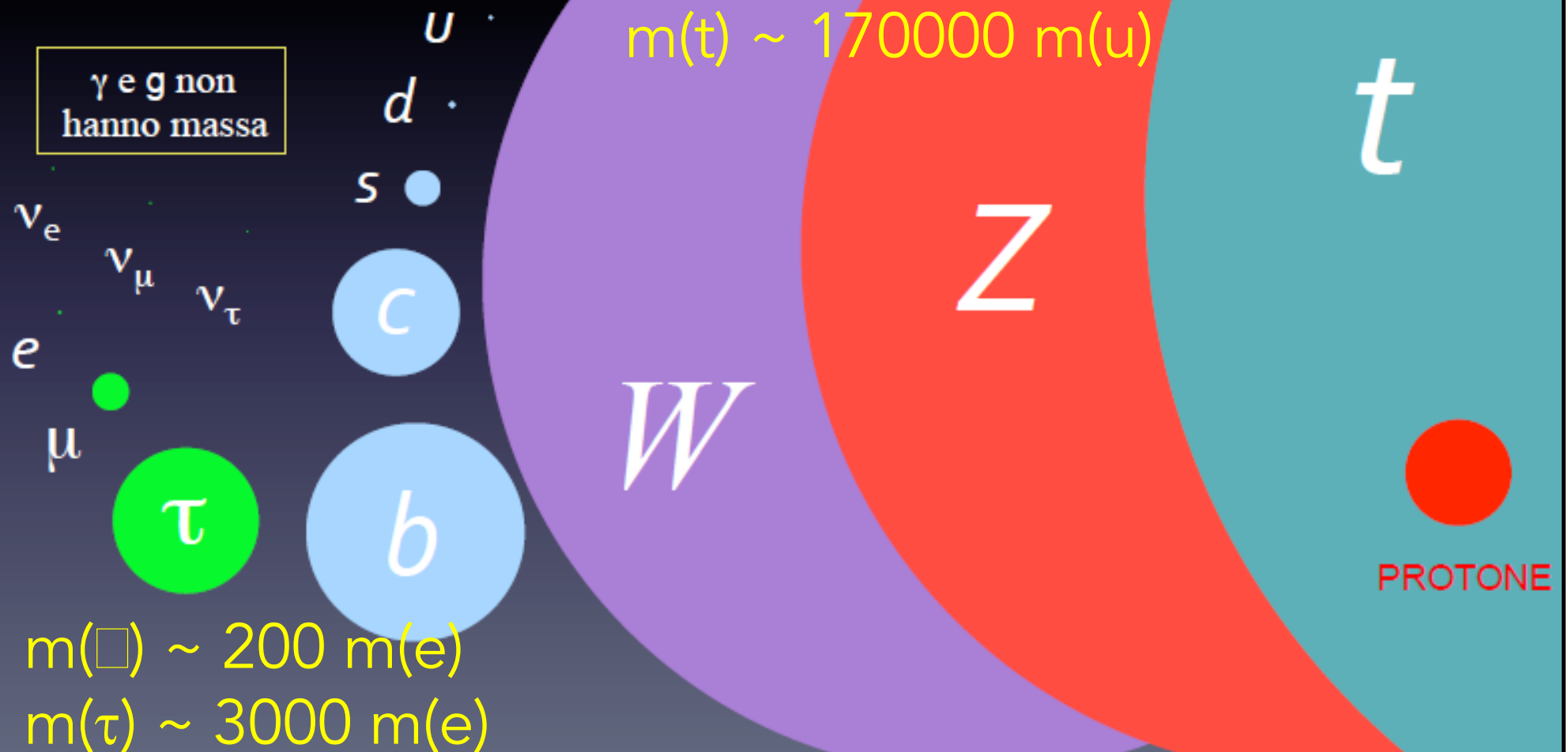


Peter Higgs  
ipotesi della particella H

premio Nobel 2013

# Il Modello Standard non spiega tutto

le particelle hanno una massa enormemente diversa fra loro  
**perchè?**

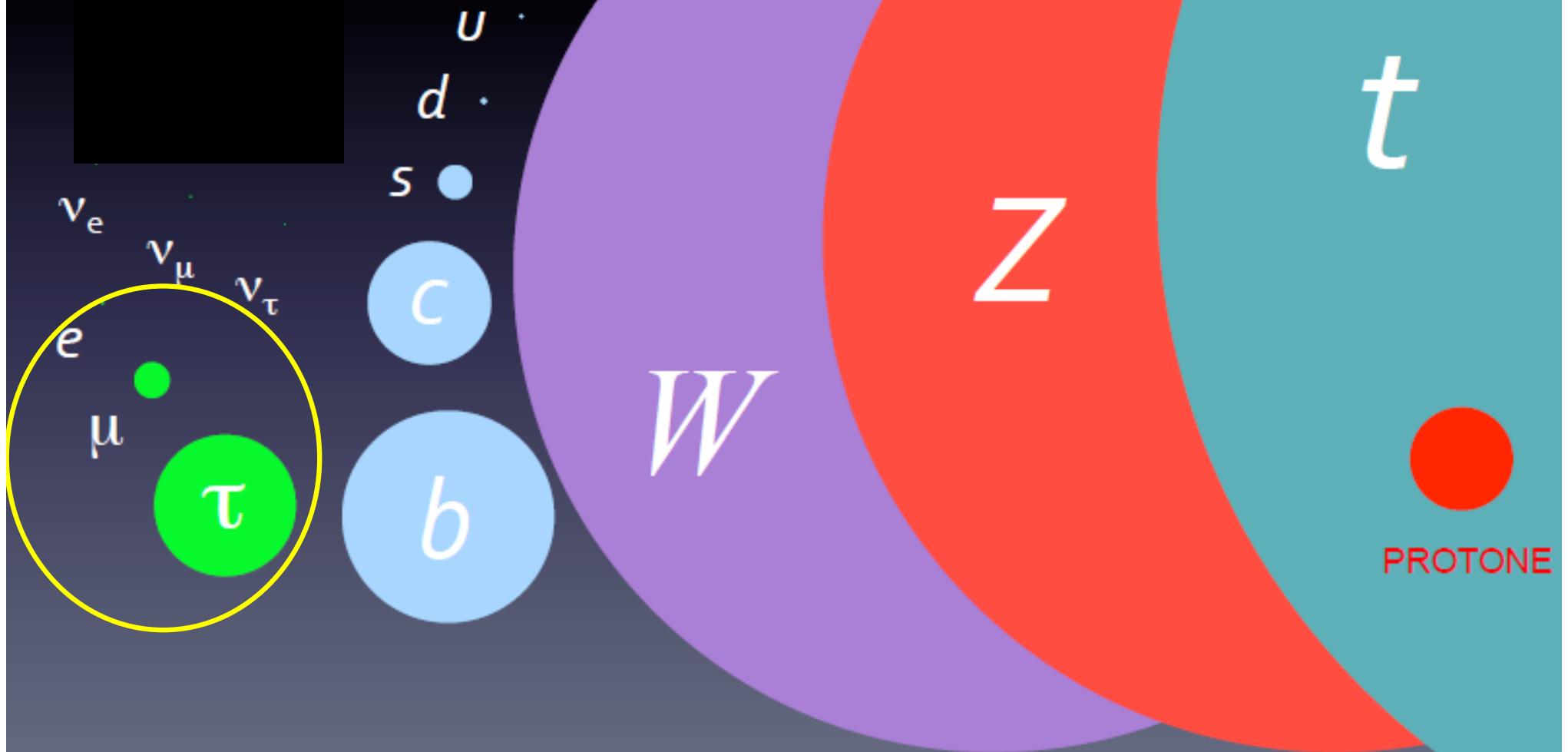


Il Modello Standard non spiega tutto

ci sono tre famiglie di quark e leptoni

perchè?

ce ne sono altre?

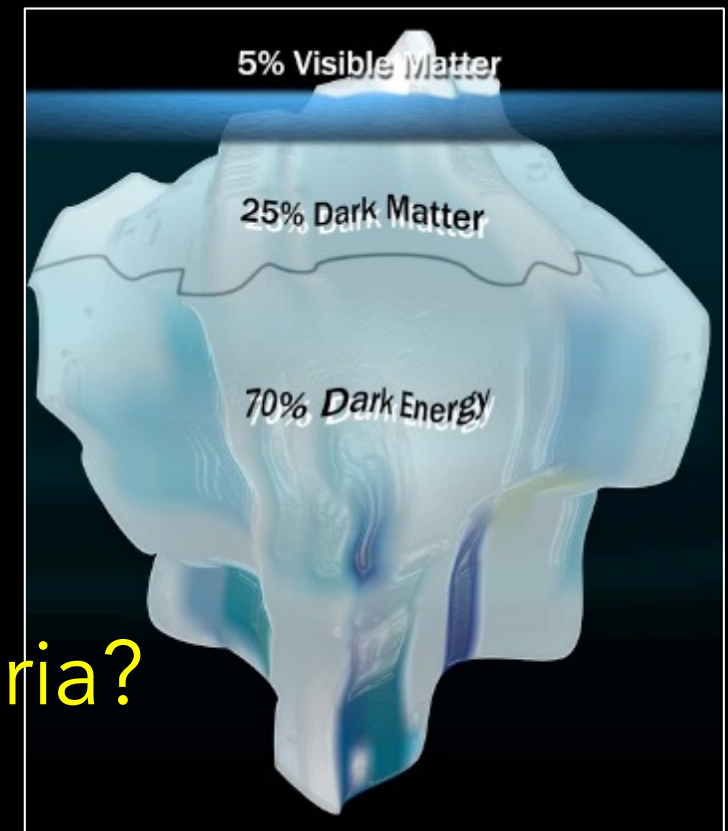
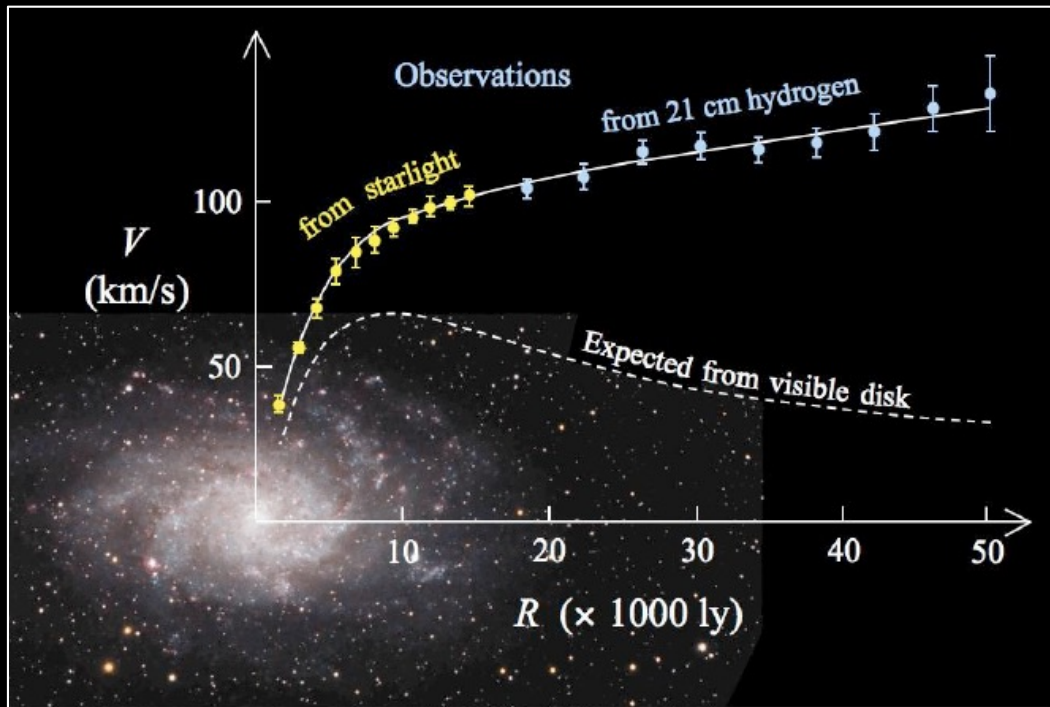


# Il Modello Standard non spiega tutto

In origine, materia e antimateria sono state prodotte insieme  
dov'è finita l'antimateria nell'universo?



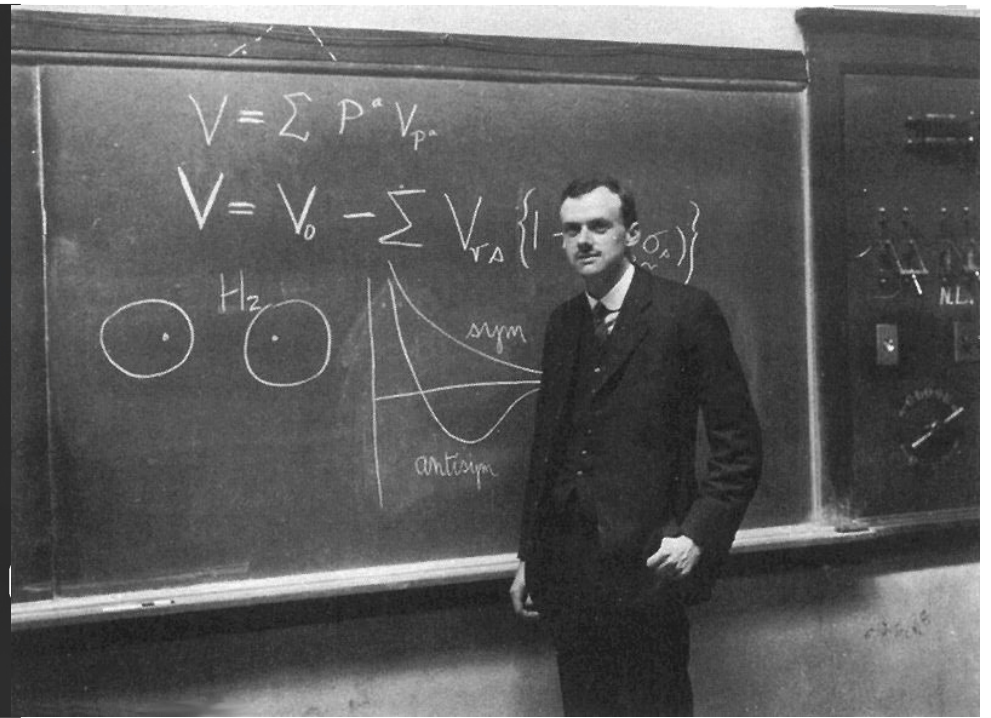
l'universo è composto di altra materia ed energia, di cui non sappiamo nulla



esiste un nuovo tipo di materia?

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

