

fisica delle particelle elementari
ovvero
alla scoperta dei mattoni dell'universo

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

Bari, Dipartimento di Fisica

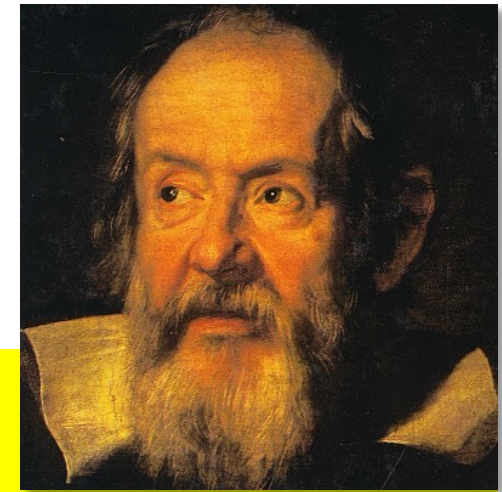
20 marzo 2023



Pietro Colangelo
INFN – Sezione di Bari

nel nostro rapido viaggio nel mondo delle particelle
elementari abbiamo bisogno di un navigatore
satellitare

nel nostro rapido viaggio nel mondo delle particelle elementari abbiamo bisogno di un navigatore satellitare



«il metodo galileiano»

Galileo Galilei: La Scienza Nuova

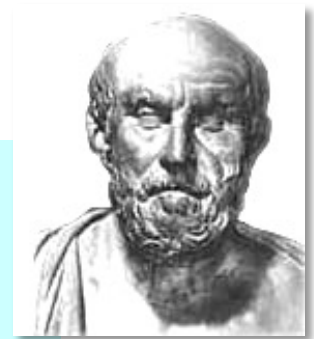
1. i fenomeni devono essere ricondotti a pochi principi generali
2. «il libro della natura è scritto in caratteri matematici»
3. l'esperimento («la sensata esperienza») è il fondamento e la guida nella elaborazione di una teoria scientifica

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)

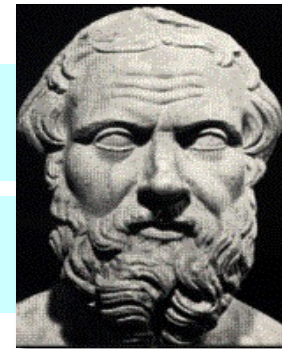
Empedocle (Akragas-Agrigento, V secolo a.C.)

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)

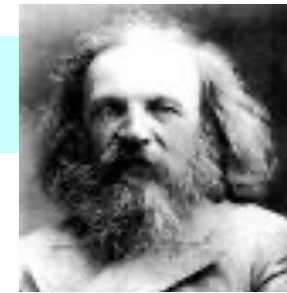


John Dalton (Eaglesfield, 1766 – Manchester, 1844)

elenco (con i pesi atomici) di molti elementi
oggi noti

ELEMENTS	
Hydrogen 1	Strontian 86
Azote 5	Barytes 68
Carbon 5	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

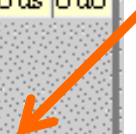
(numero di protoni nel nucleo)

predizione dell'esistenza di
elementi 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 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	U=240	(—)	
12	(—)	(—)		Th=231				

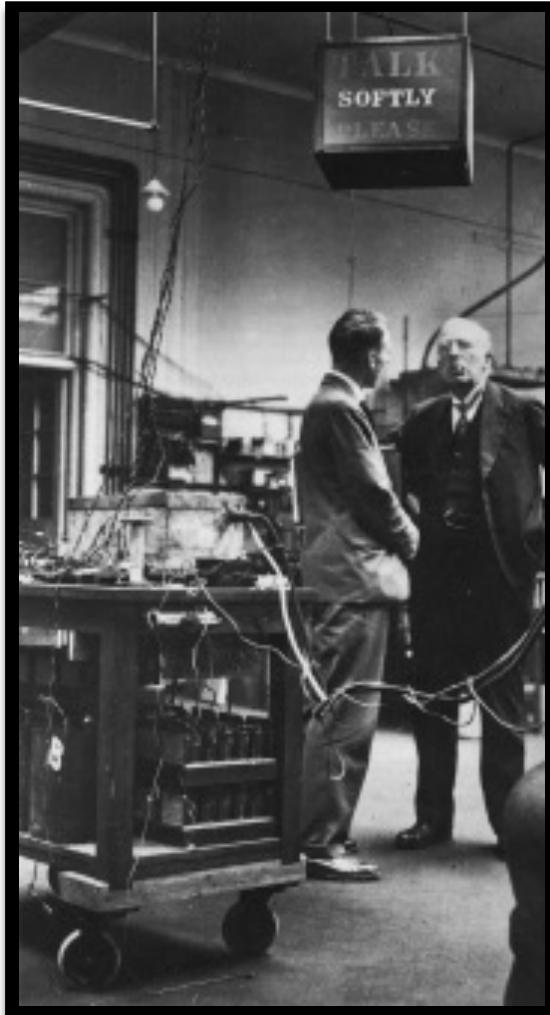
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period																			
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	* Lu	71 Hf	72 Ta	73 W	74 Re	75 Os	76 Ir	77 Pt	78 Au	79 Hg	80 Tl	81 Pb	82 Bi	83 Po	84 At	85 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	** Lr	103 Rf	104 Db	105 Sg	106 Bh	107 Hs	108 Mt	109 Uun	110 Uuu	111 Uub	112 Uut	113 Uuq	114 Uup	115 Uuh	116 Uus	117 Uuo	
*Lanthanides	*		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb			
**Actinides	**		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No			

4 nuovi elementi
scoperti negli ultimi anni



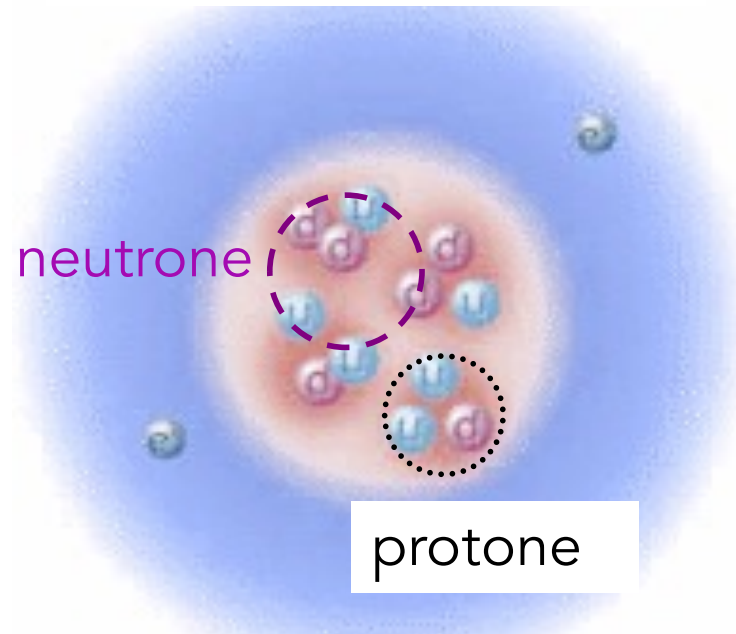
Ernest Rutherford (Brightwater, 1871 – Cambridge, 1937)

gli atomi hanno una struttura

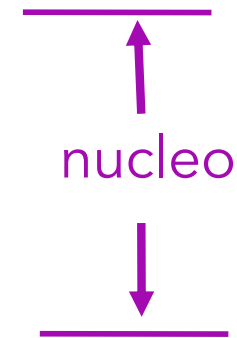


atomo:

1 Angstrom = 10^{-10} m



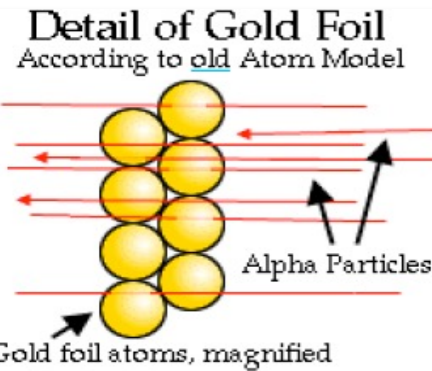
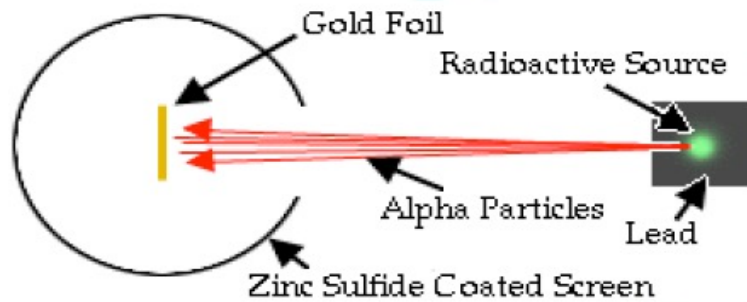
1 Fermi = 10^{-15} m



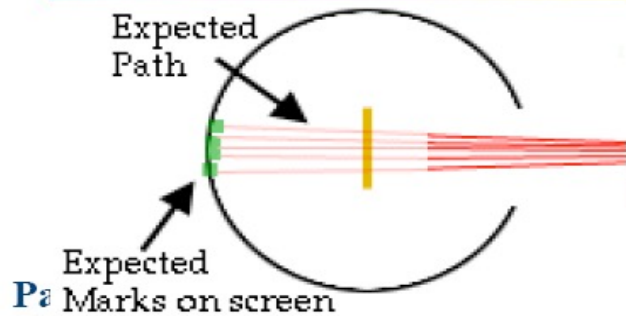
10 Fermi = 10^{-14} m

gli atomi hanno una struttura

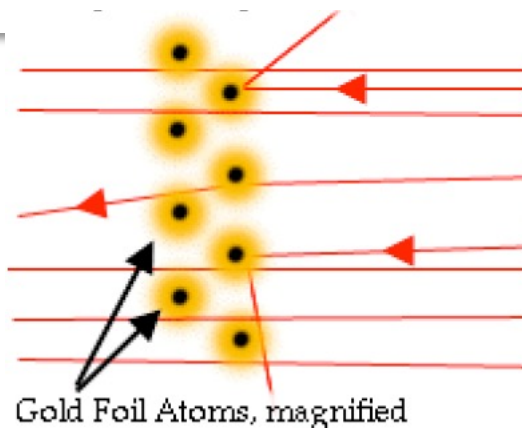
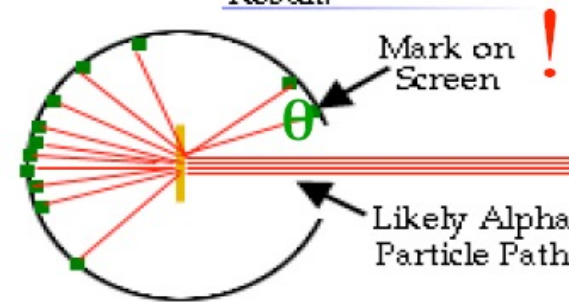
Rutherford



The Predicted Result:



Result:



conclusione:

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

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

neutrone James Chadwick (1932)

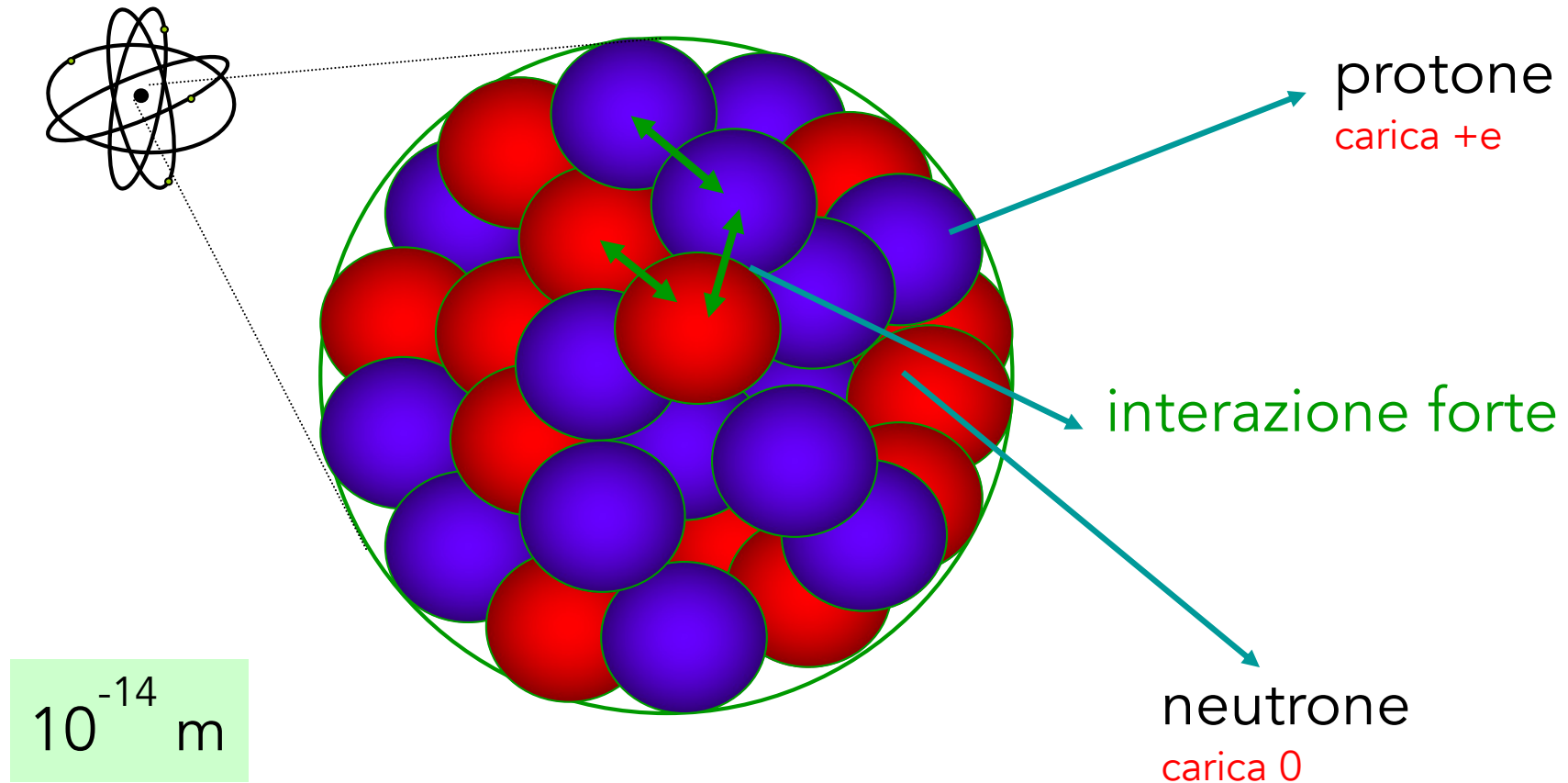
1930 - **Bothe e Becker** bombardano il berillio con particelle alfa: scoprono che dal berillio esce una radiazione neutra molto penetrante. **Frédéric Joliot e Irène Curie** dimostrano che escono delle particelle neutre in grado di espellere i protoni dalla paraffina

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



i nuclei sono formati da protoni e neutroni

quindi i nuclei hanno una struttura



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

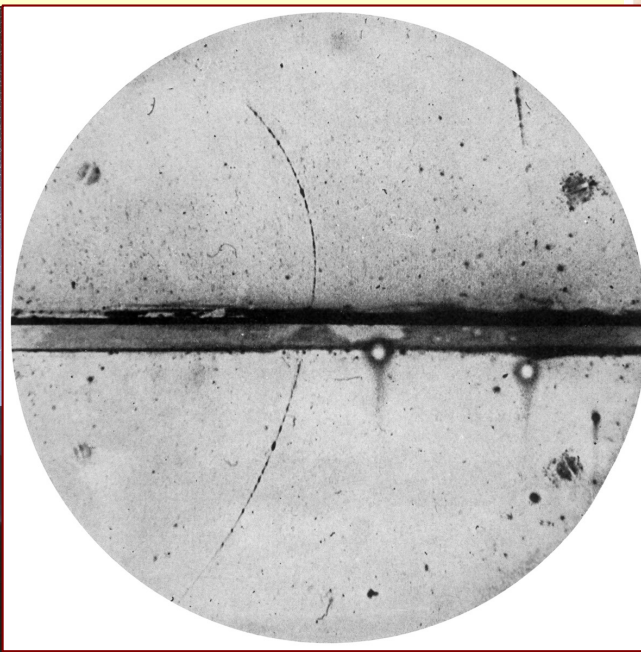
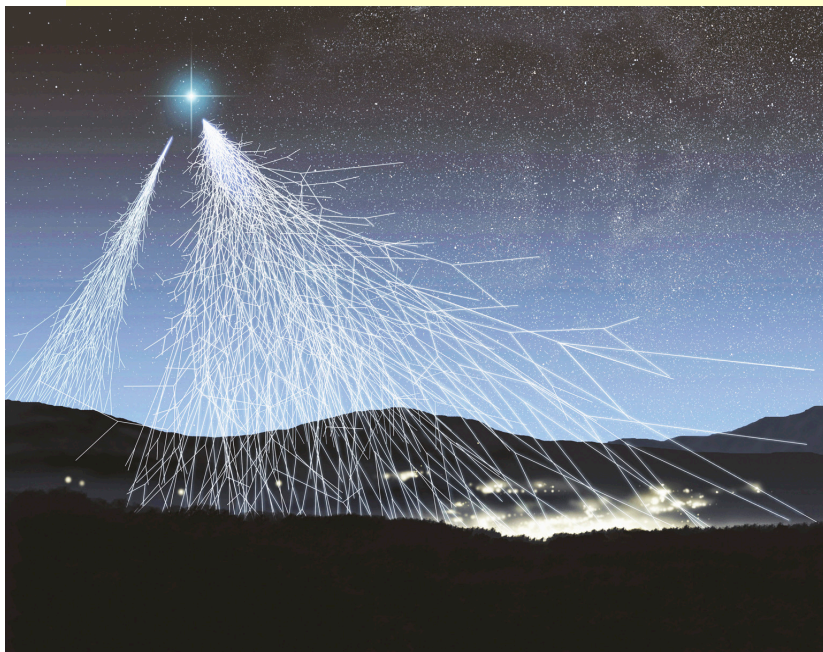
contemporaneamente si scopre l'antimateria

(meccanica quantistica + relatività)

predizione dell'esistenza del positrone (Paul Dirac 1928)

massa del positrone = massa dell'elettrone

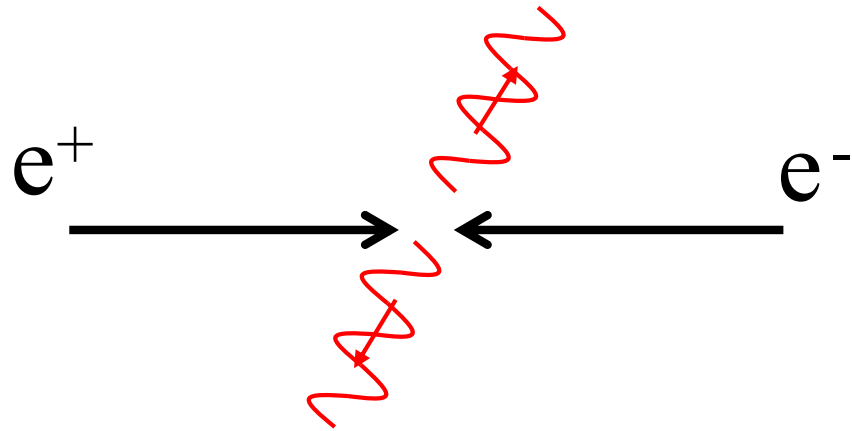
carica del positrone = $+e$ (opposta all'elettrone)



Anderson 1932

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

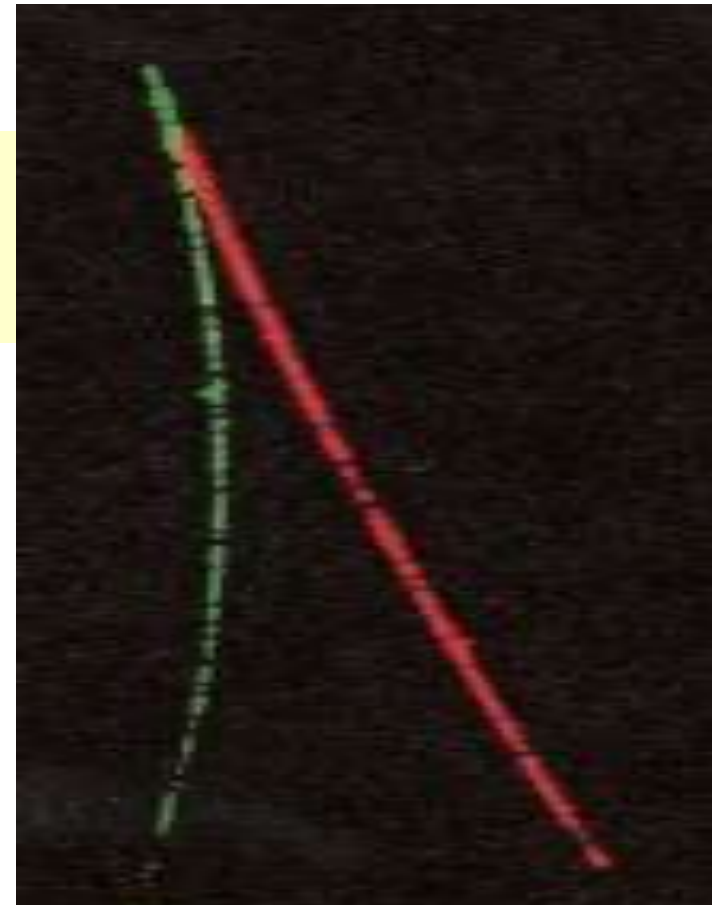
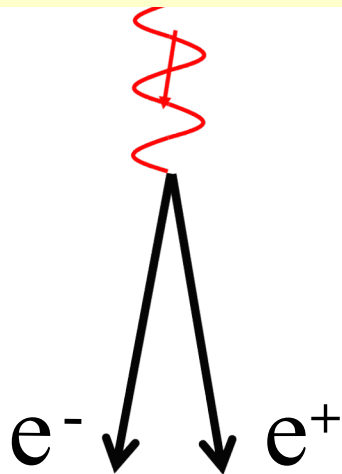
come si evidenzia l' antimateria?



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

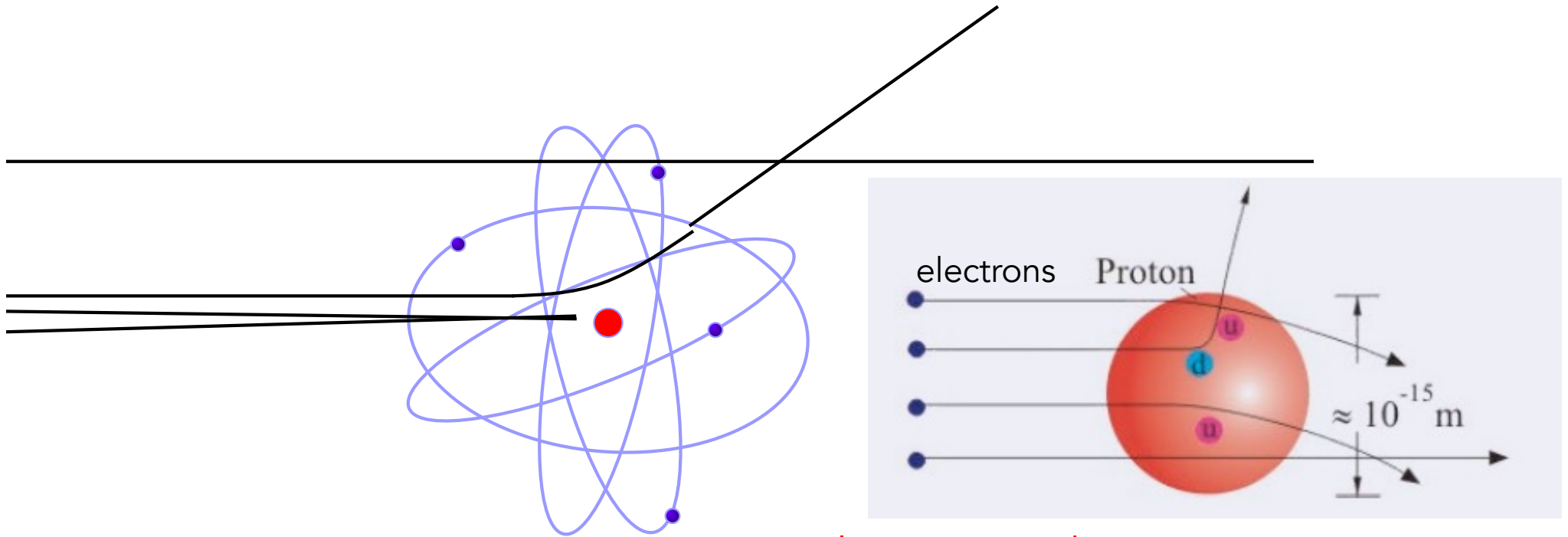
$$E = mc^2$$

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



anche protoni e neutroni hanno una struttura

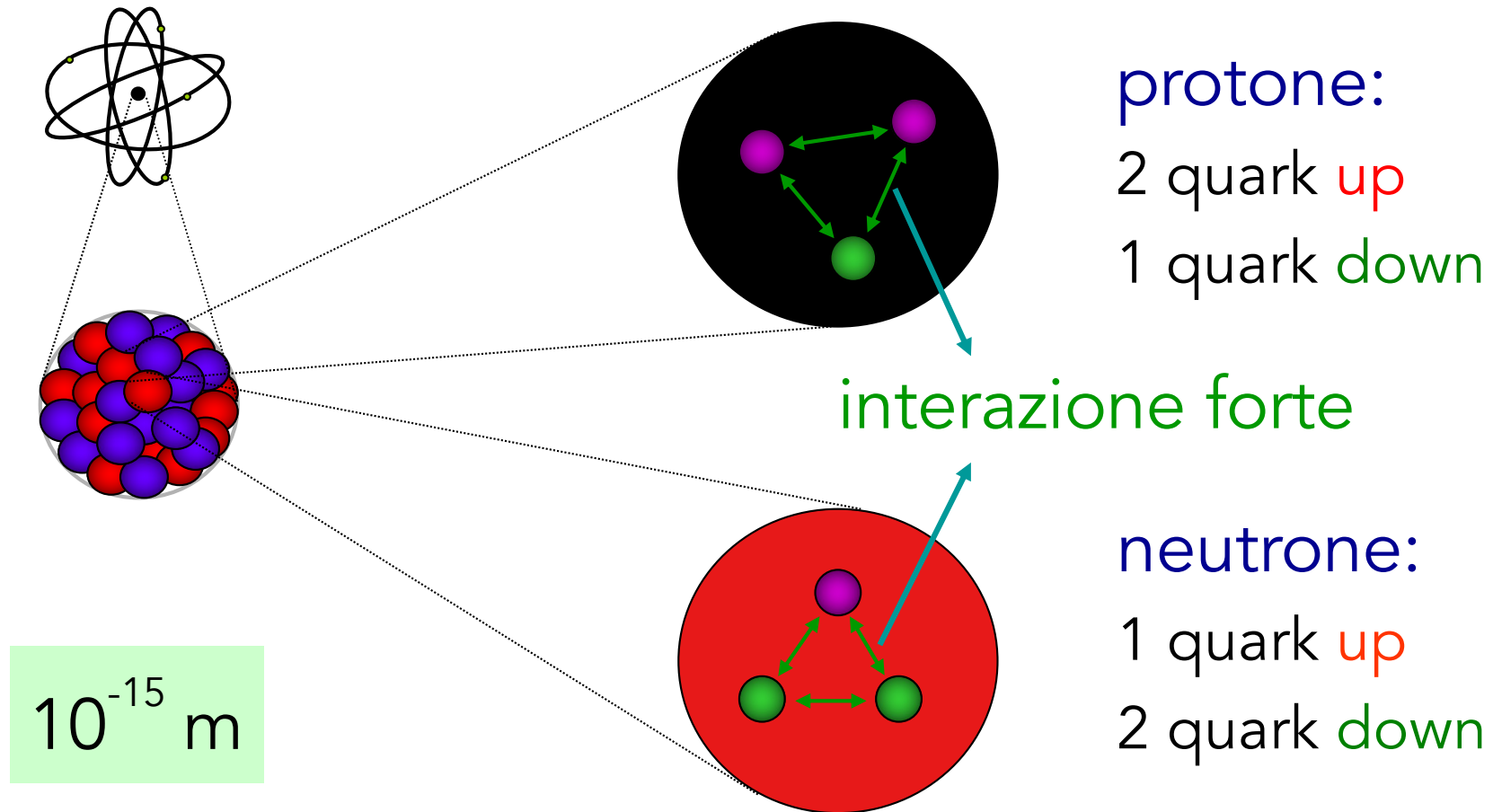
stessa logica dell'esperimento di Rutherford



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

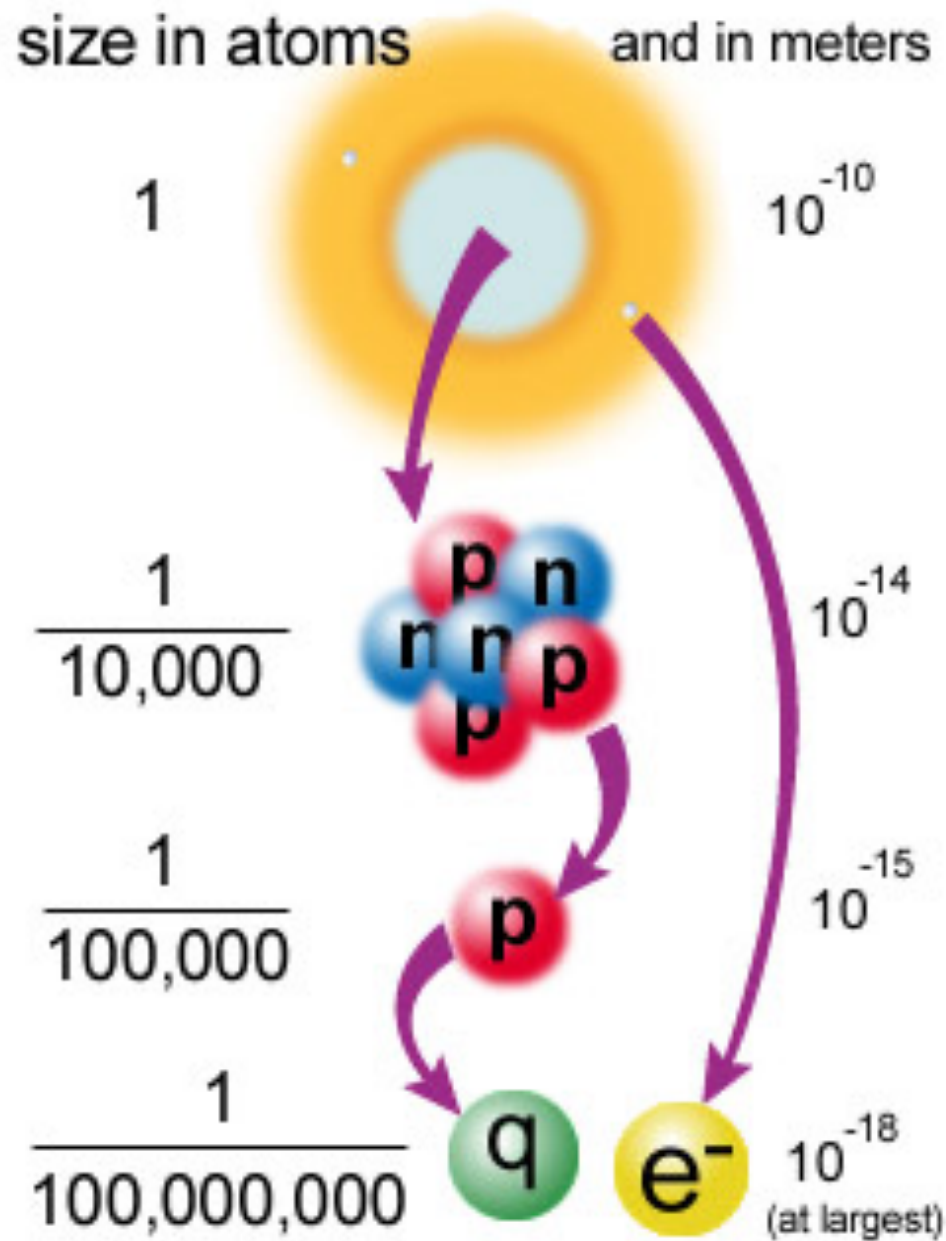
i componenti si chiamano "quark"

struttura dei protoni e dei neutroni

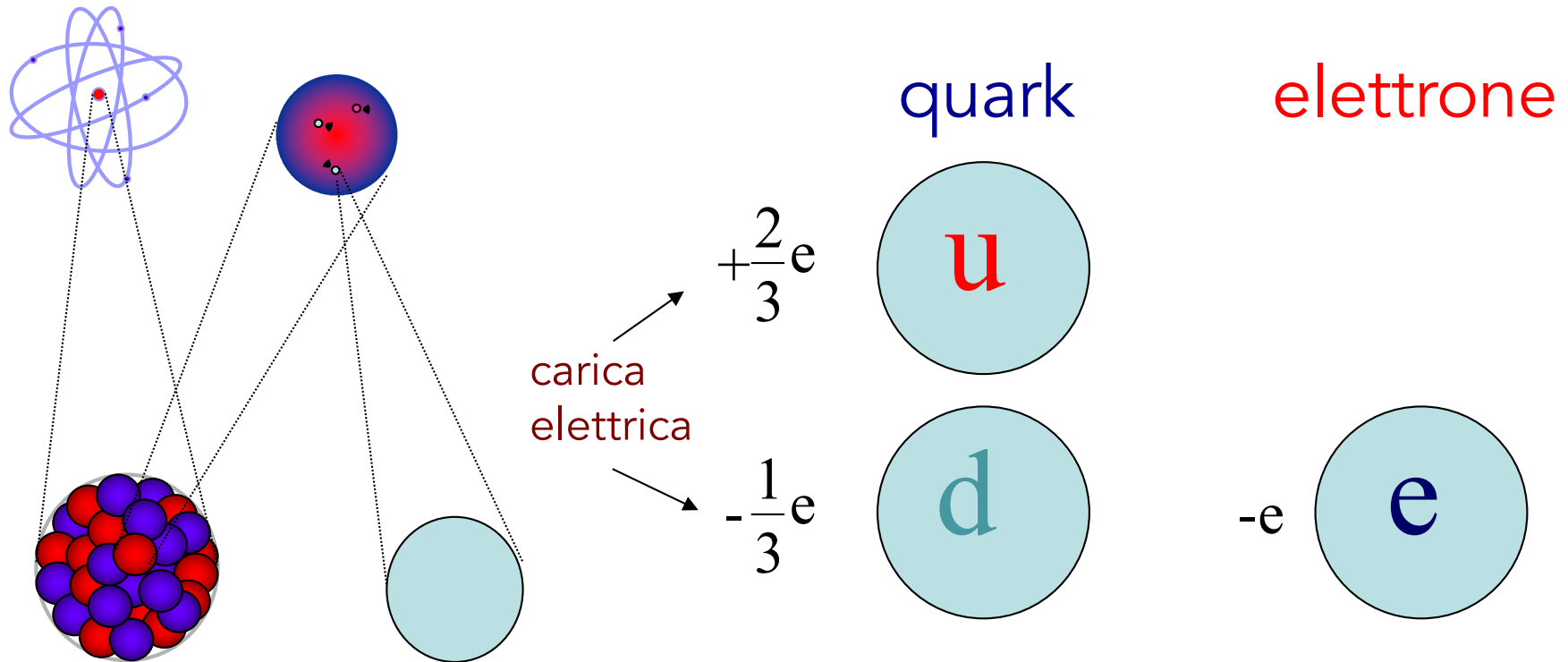


adroni = particelle composte da quark
protoni, neutroni,...

notate le scale
di lunghezza



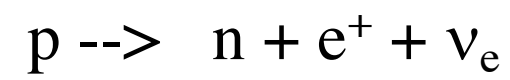
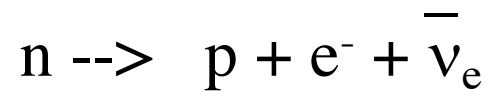
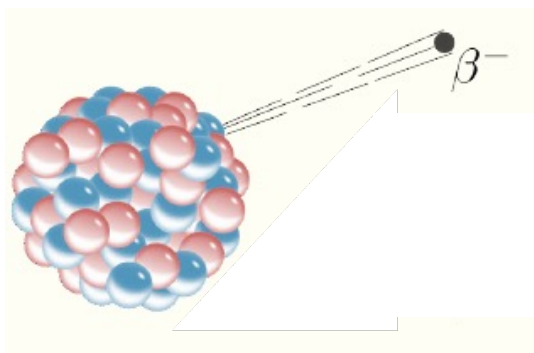
costituenti della materia



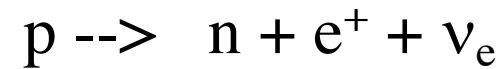
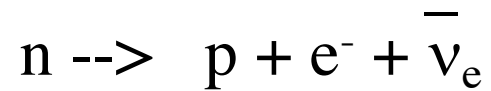
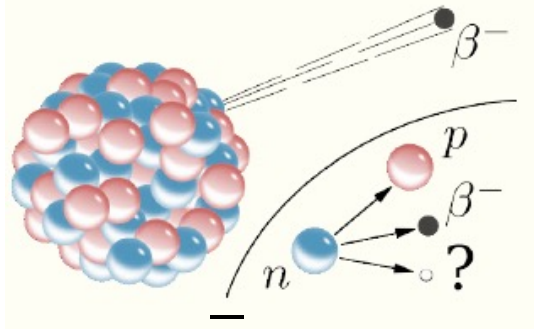
protoni contengono uud \rightarrow carica = $+e$
neutroni contengono udd \rightarrow carica = 0

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

la radioattività

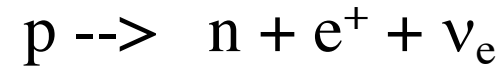
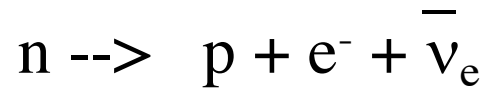
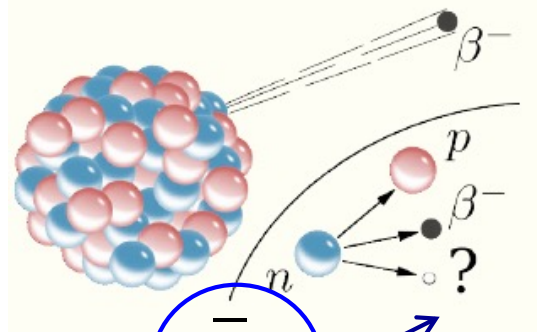


la radioattività



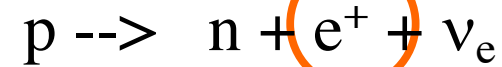
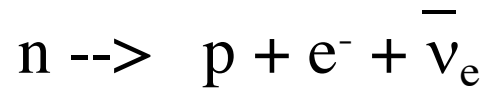
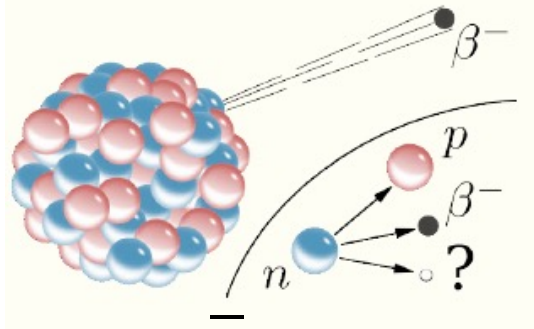
- i quark possono trasformarsi (decadere) in altri quark
- le interazioni coinvolte si chiamano «**deboli**»

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)
- esistono elettroni positivi (antielettroni o positroni)

la radioattività

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

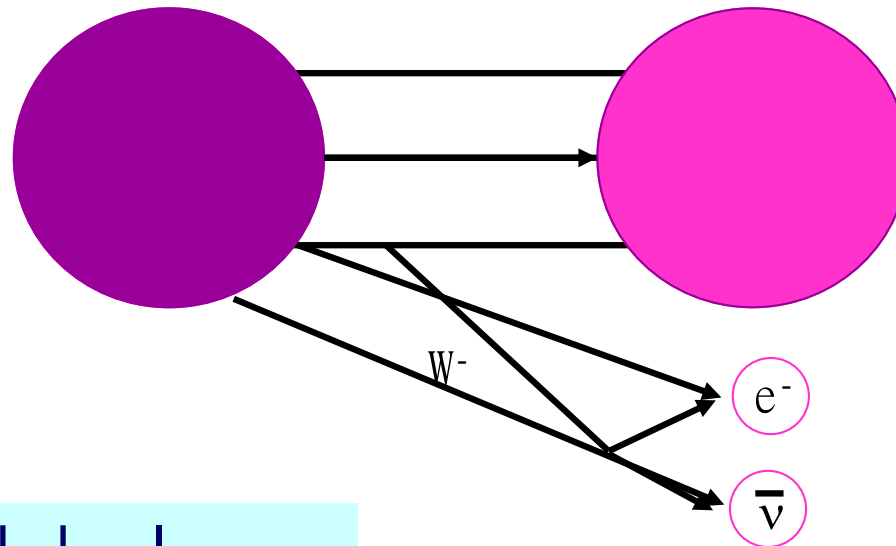


27 protoni
33 neutroni

28 protoni
32 neutroni

neutrone

protone



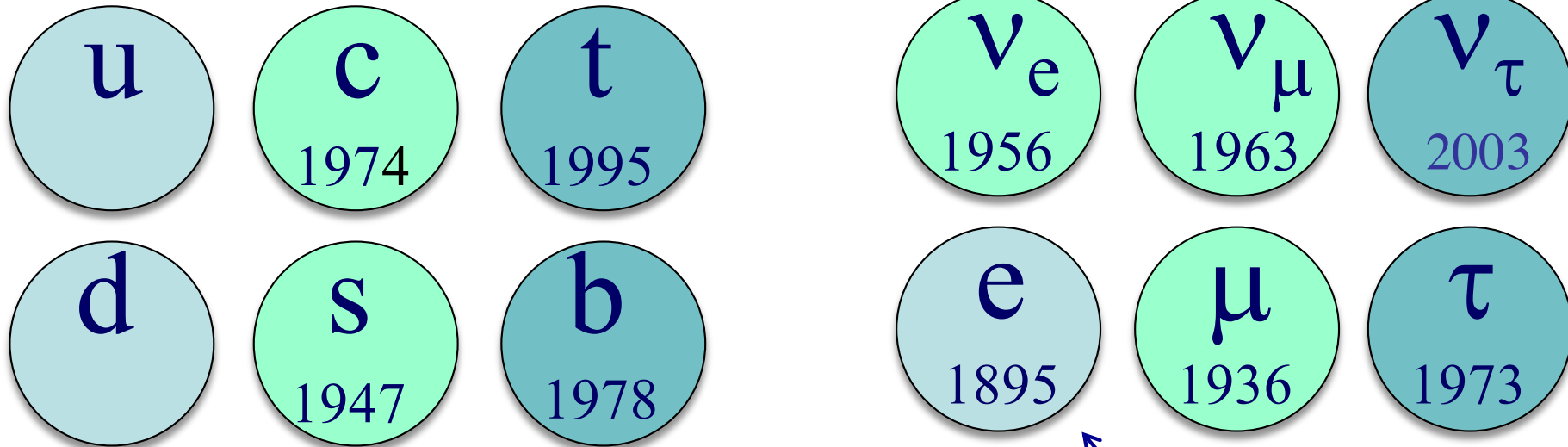
interazione «debole»

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

20 marzo 2023: tutto 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	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	<i>e</i> electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		

solo le masse sono diverse

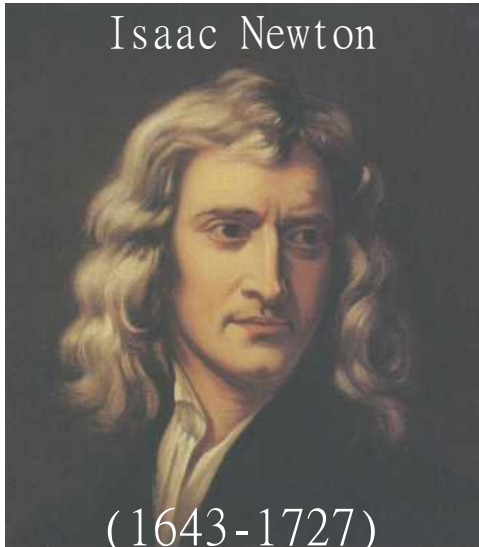
$m(\mu) \sim 200 m(e)$

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

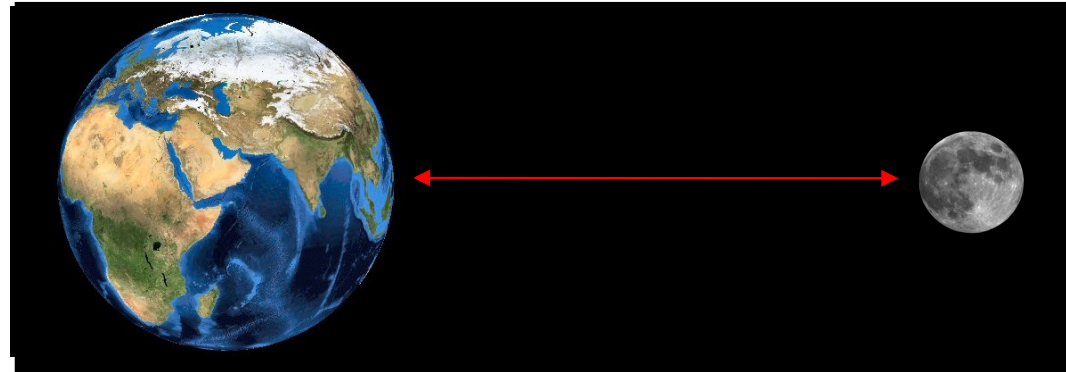
tavola periodica del 2023

le interazioni

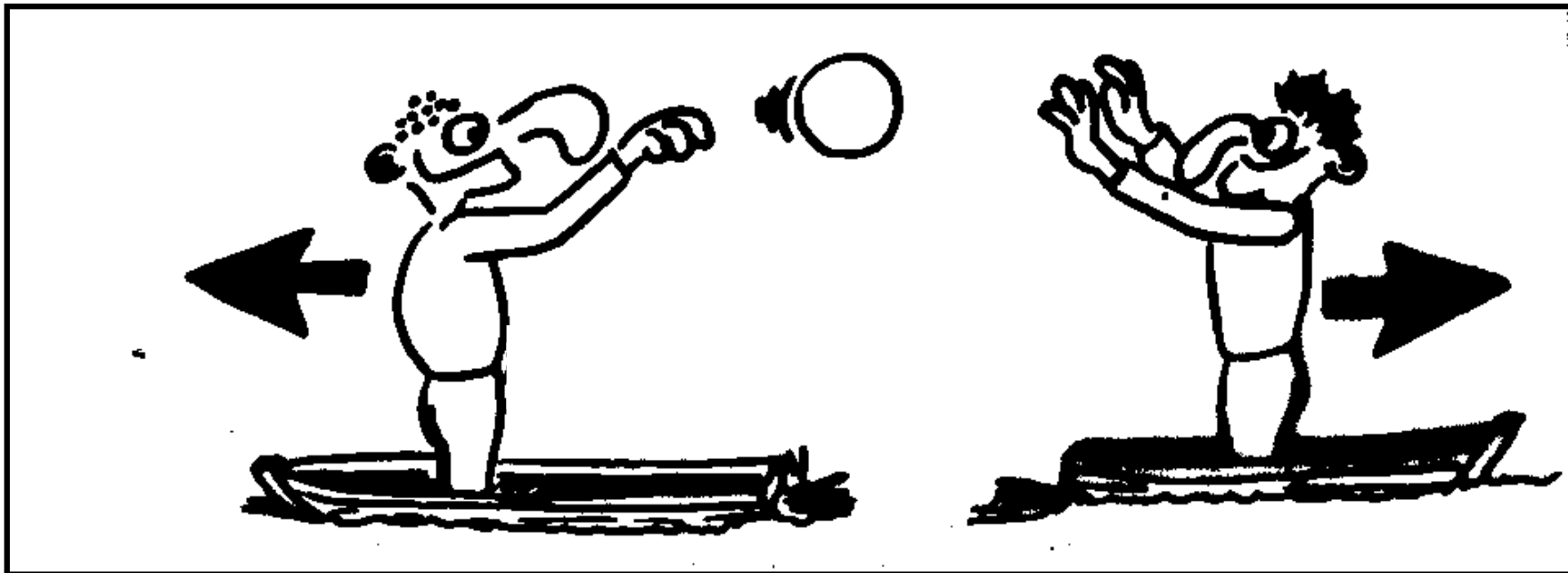
Isaac Newton



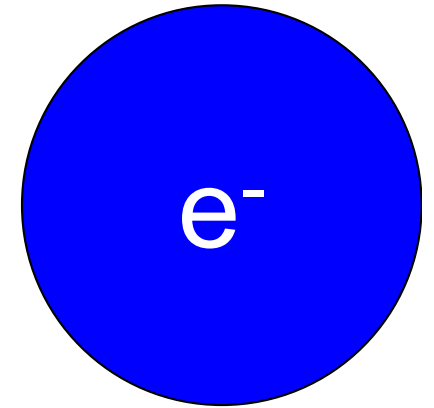
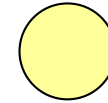
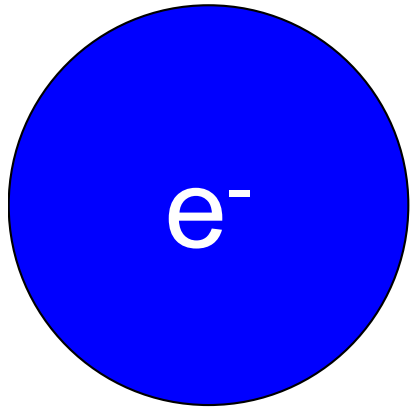
descrizione antica:
azione istantanea a distanza



descrizione moderna: scambio di particelle

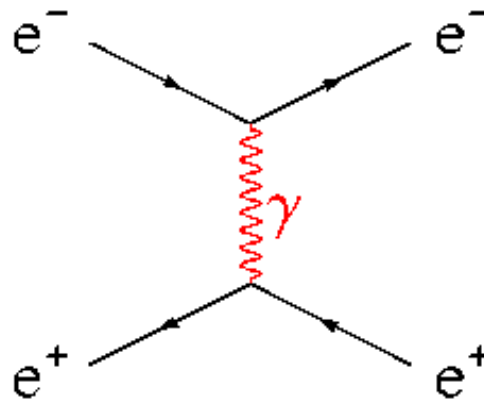


interazione elettromagnetica

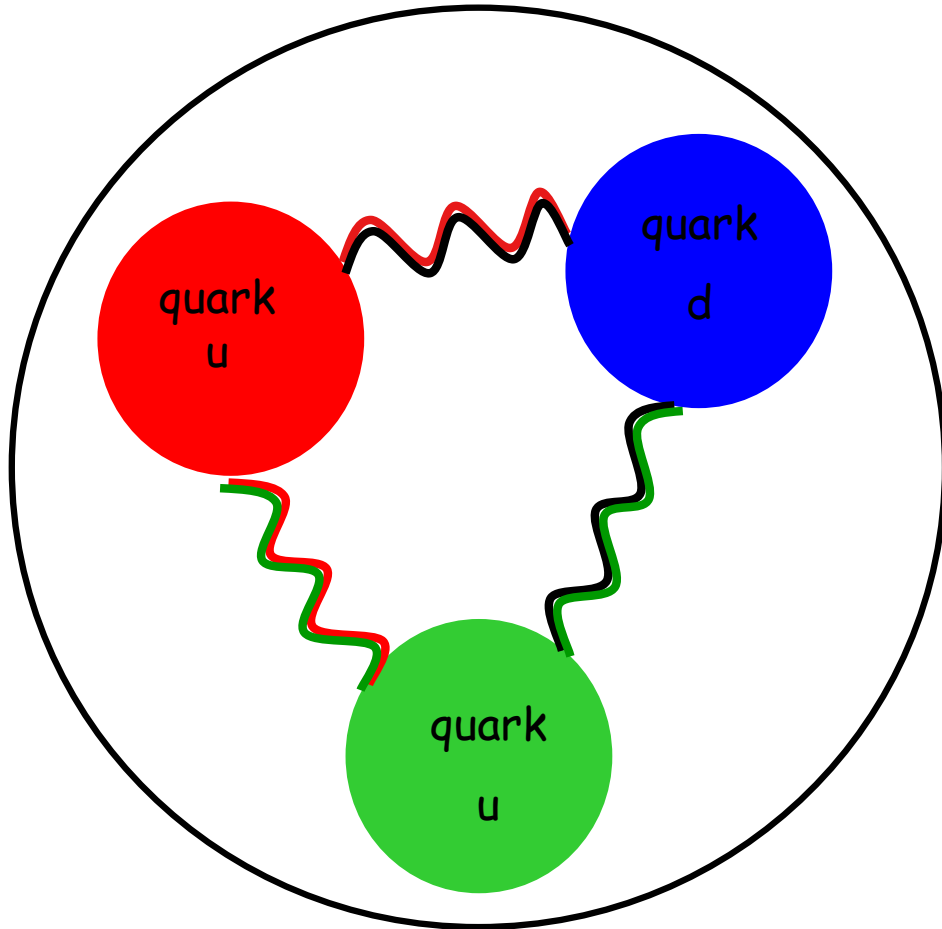


mediatore
« fotone »

massa = 0



interazione « forte »



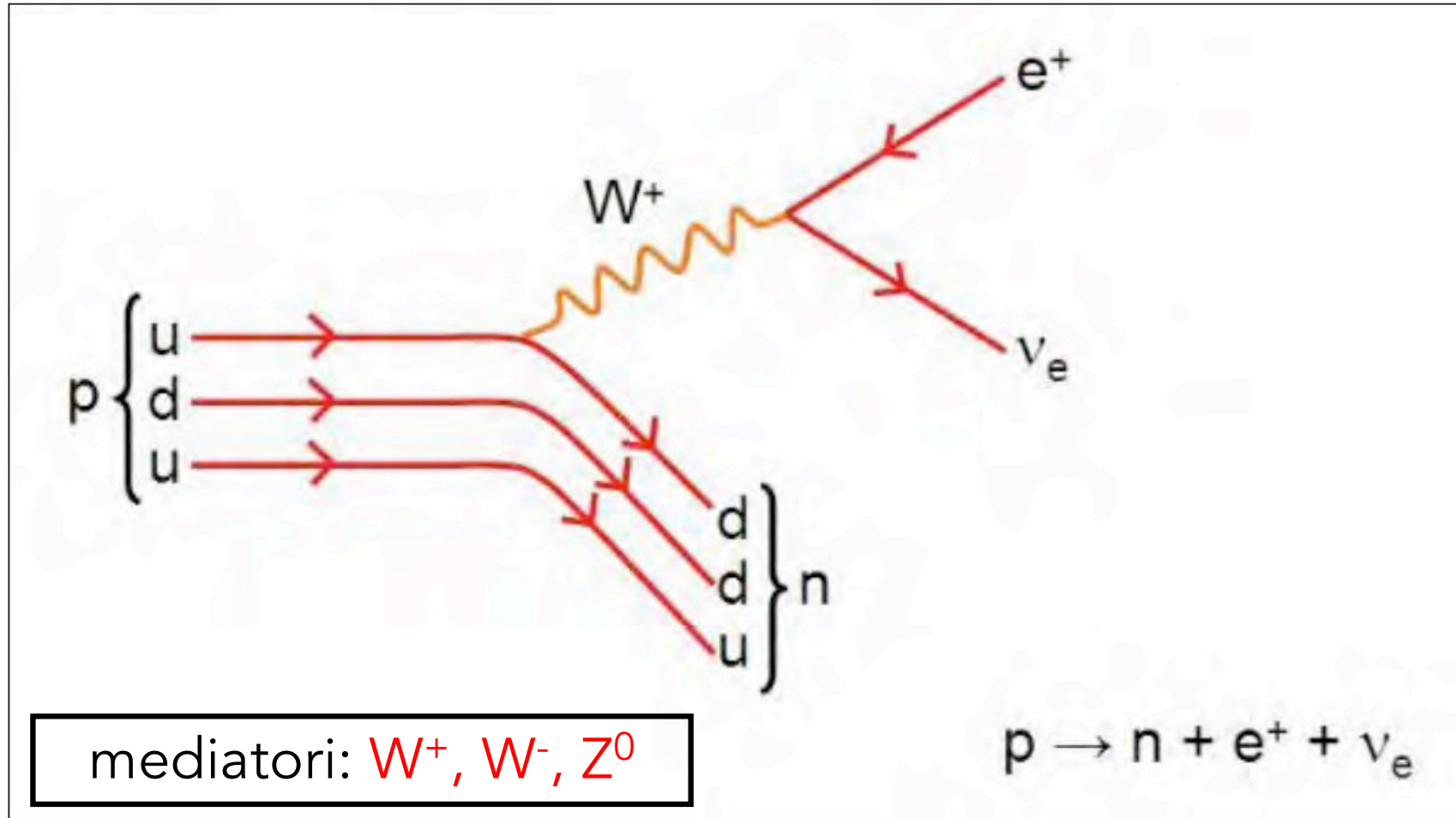
oltre alla carica elettrica, i quark portano un
"colore"
"blu" "verde" "rosso"
il protone è "incolore"

mediatori
« gluoni »

massa = 0

i gluoni tengono insieme
i quark dentro il protone

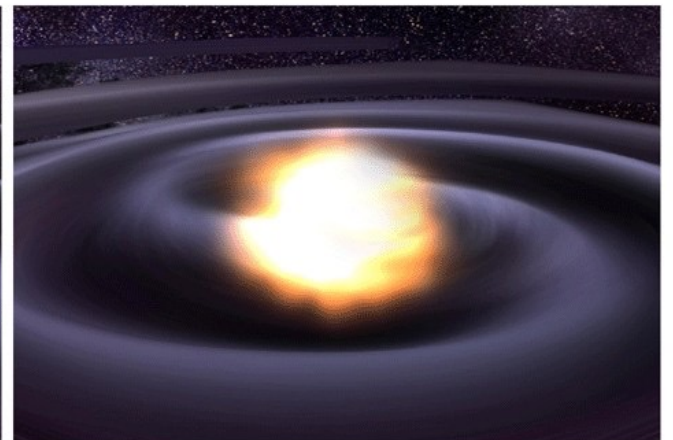
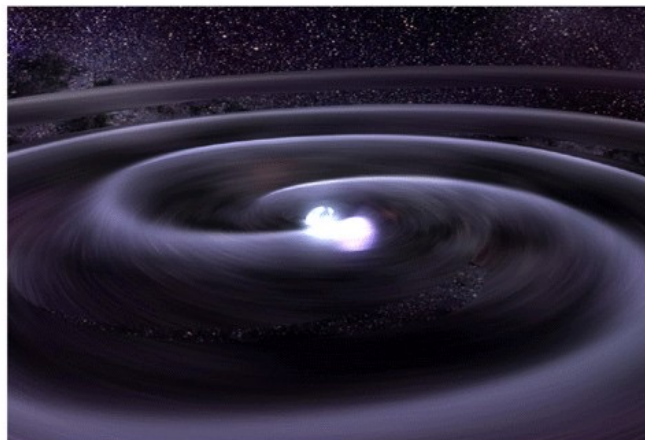
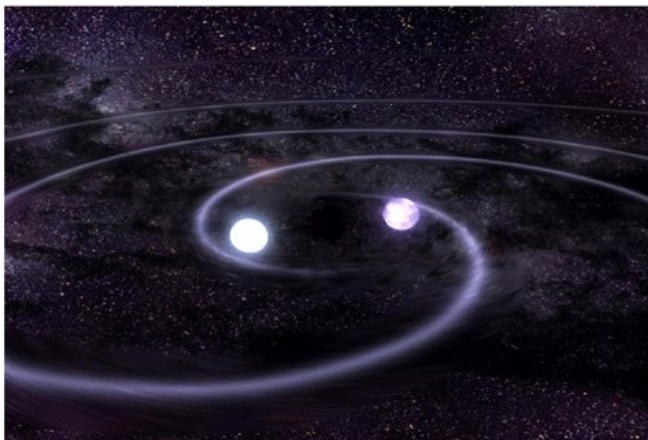
interazione « debole »



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



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

il Modello Standard sommario

la tavola periodica del 2023

3rd generation

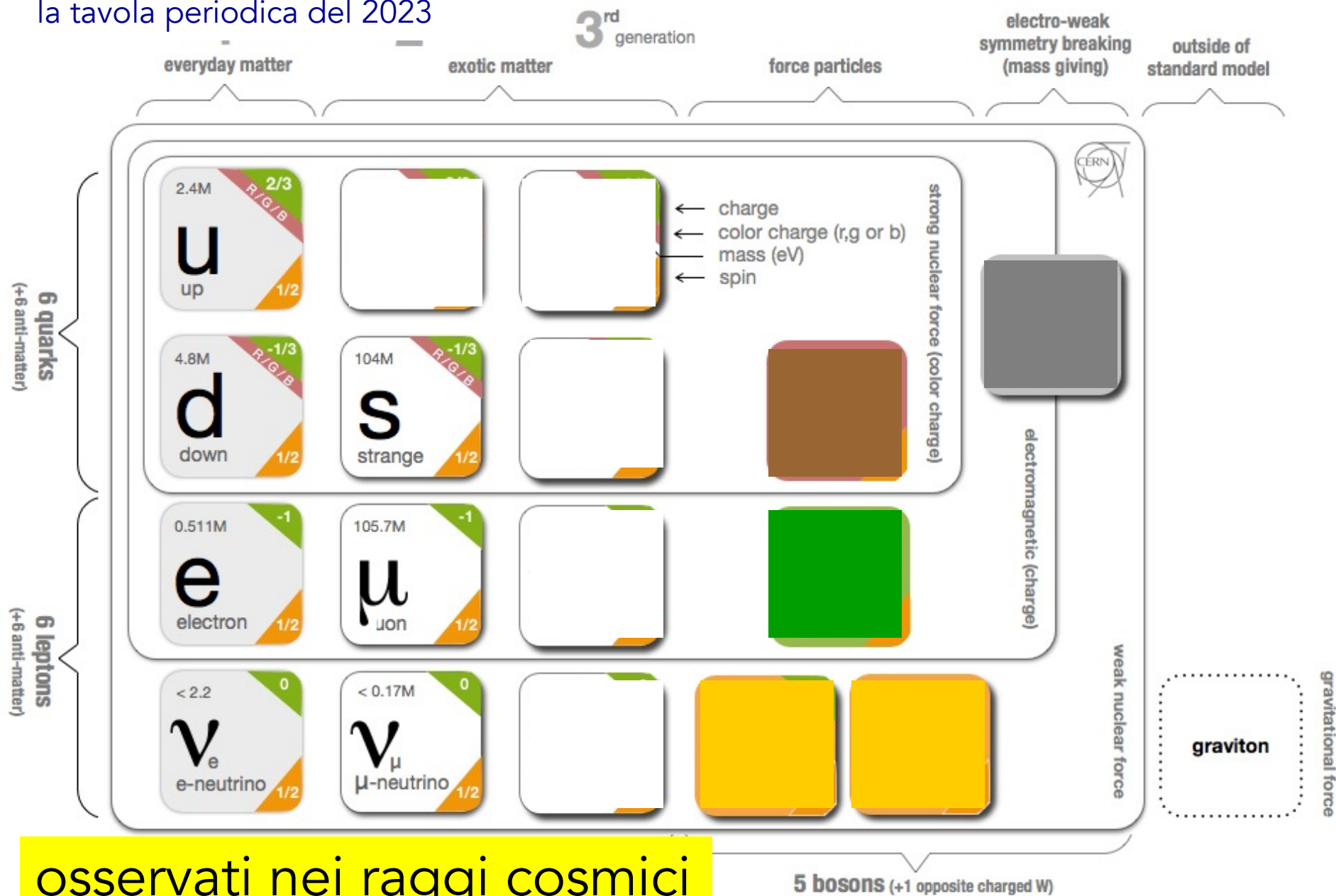
electro-weak symmetry breaking (mass giving)

outside of standard model



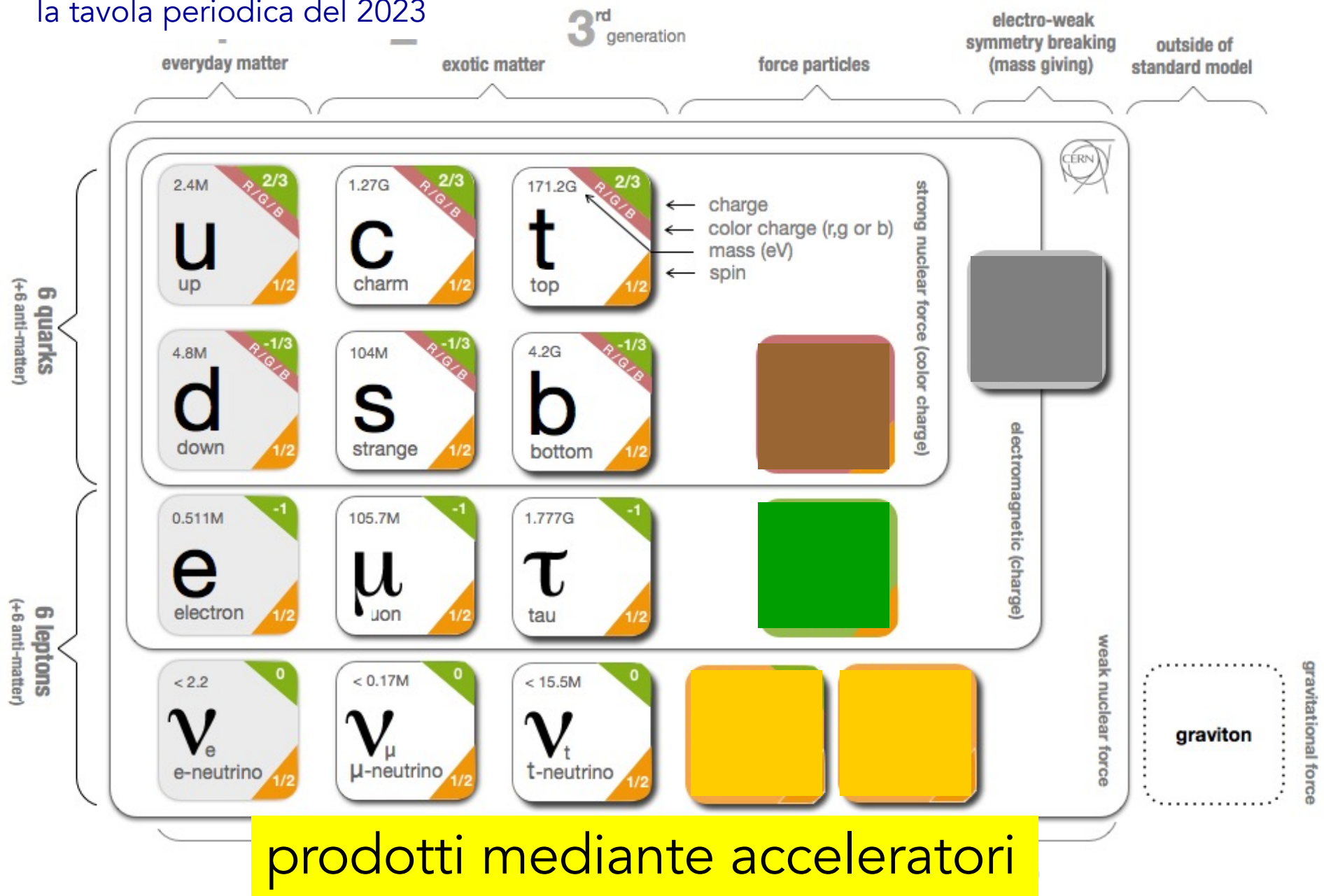
il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2023



il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2023



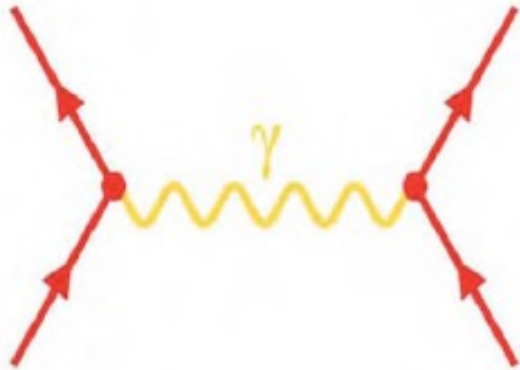
il Modello Standard **sommario**

la tavola periodica del 2023

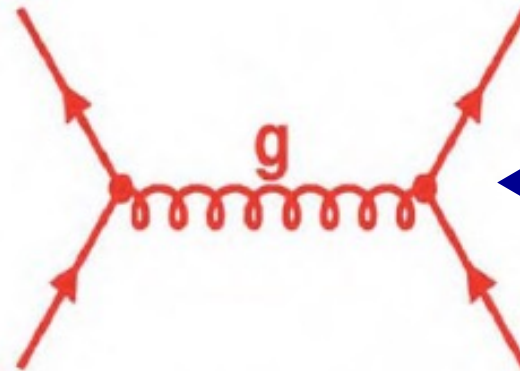


mediatori delle interazioni

fotoni: mediatori delle interazioni elettromagnetiche

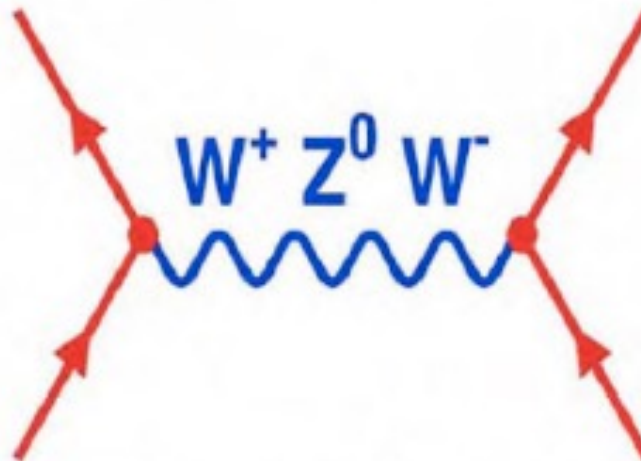


gluoni: mediatori delle interazioni "forti"



processi importanti nello studio di oggi

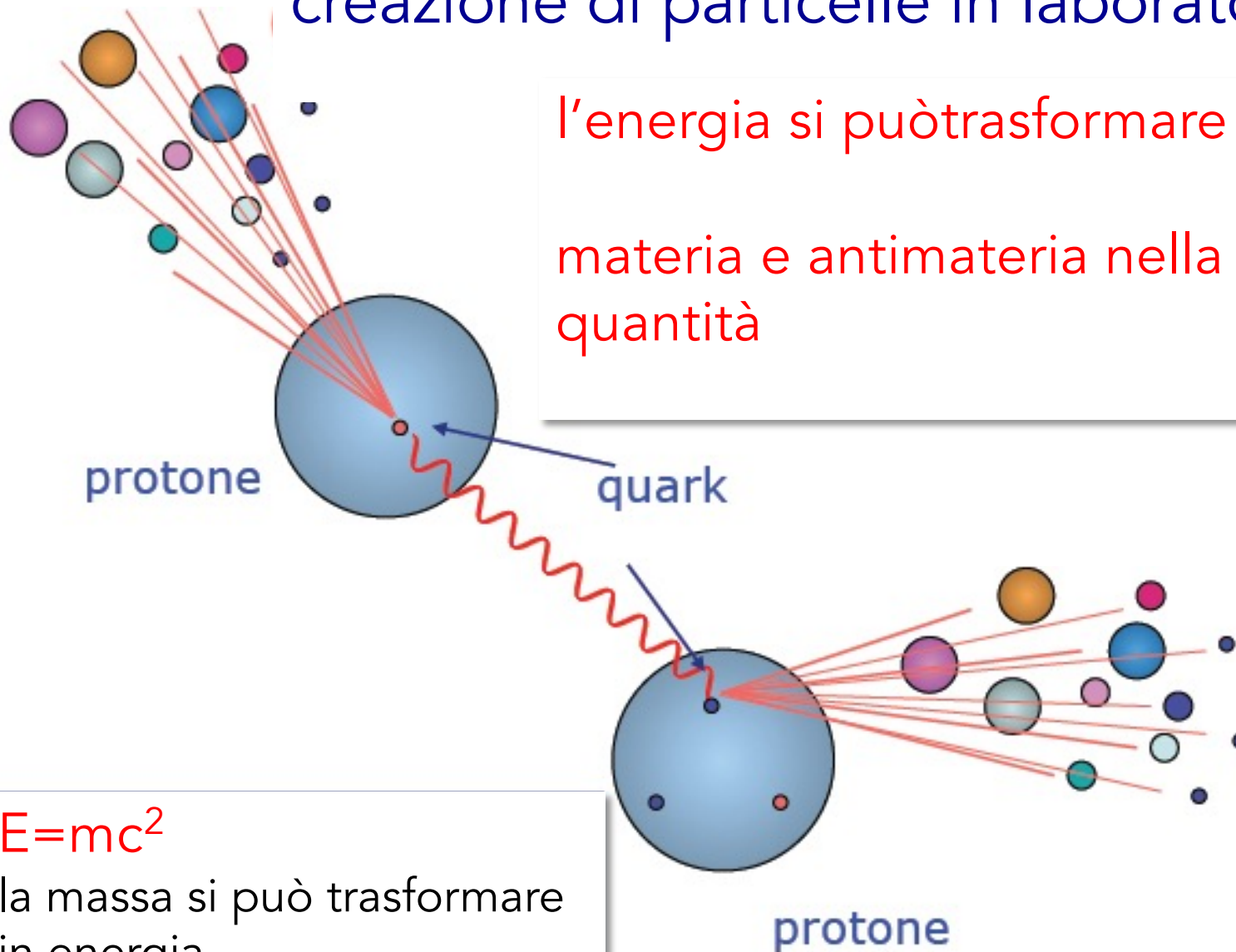
tre mediatori delle interazioni "deboli" **W^{\pm} , Z^0**





creazione di particelle in laboratorio

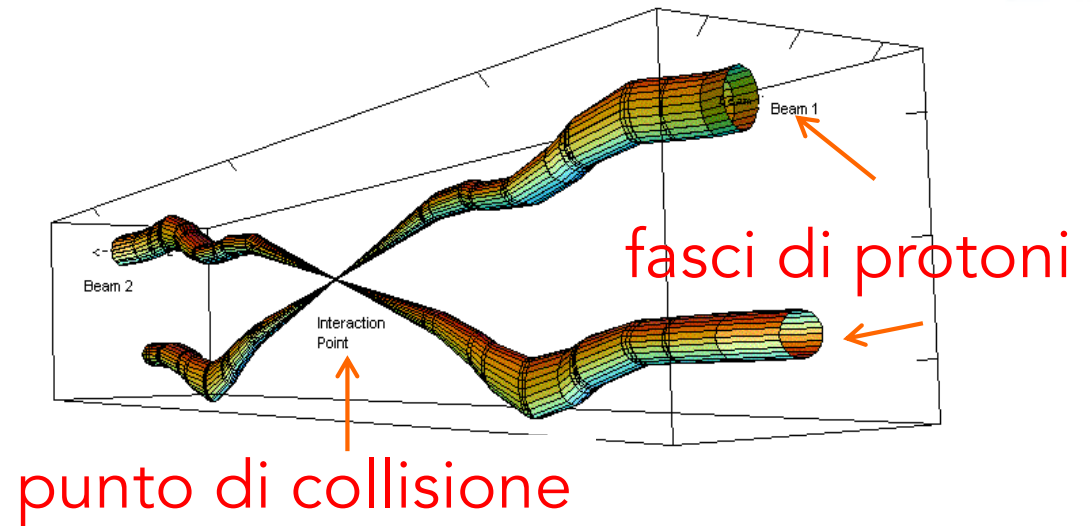
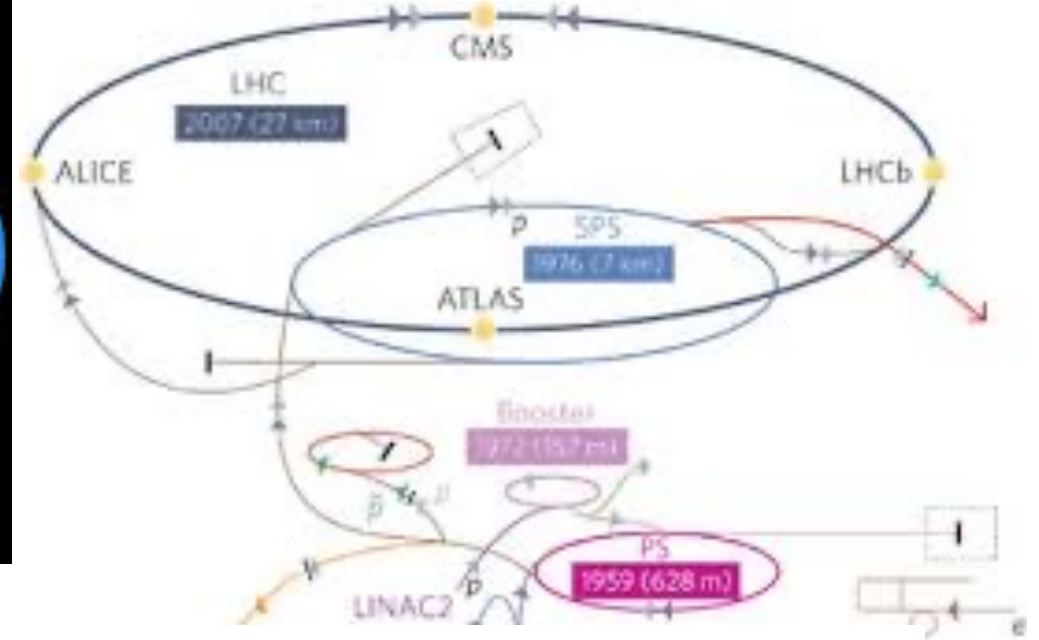
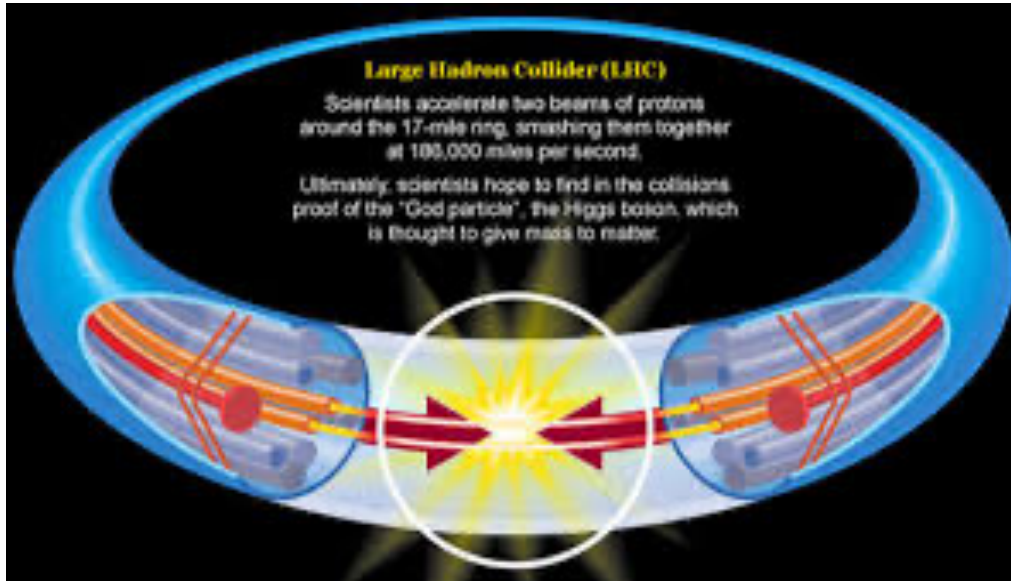
l'energia si può trasformare in materia
materia e antimateria nella stessa
quantità



$$E=mc^2$$

la massa si può trasformare
in energia
e viceversa

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

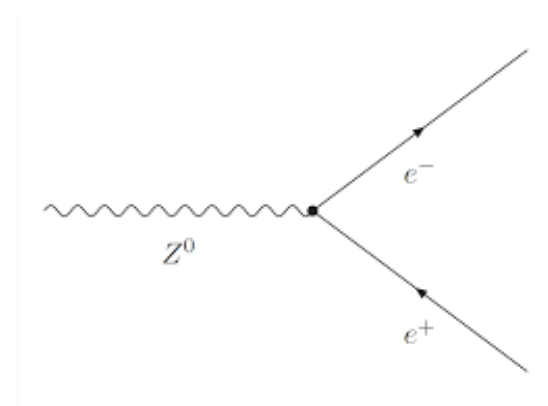
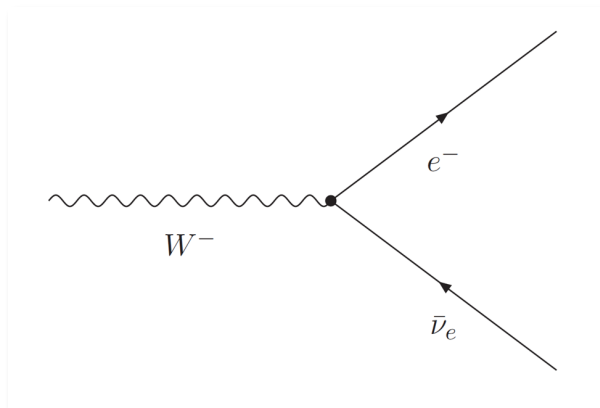


al Large Hadron Collider (LHC) del CERN queste particelle possono essere prodotte

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

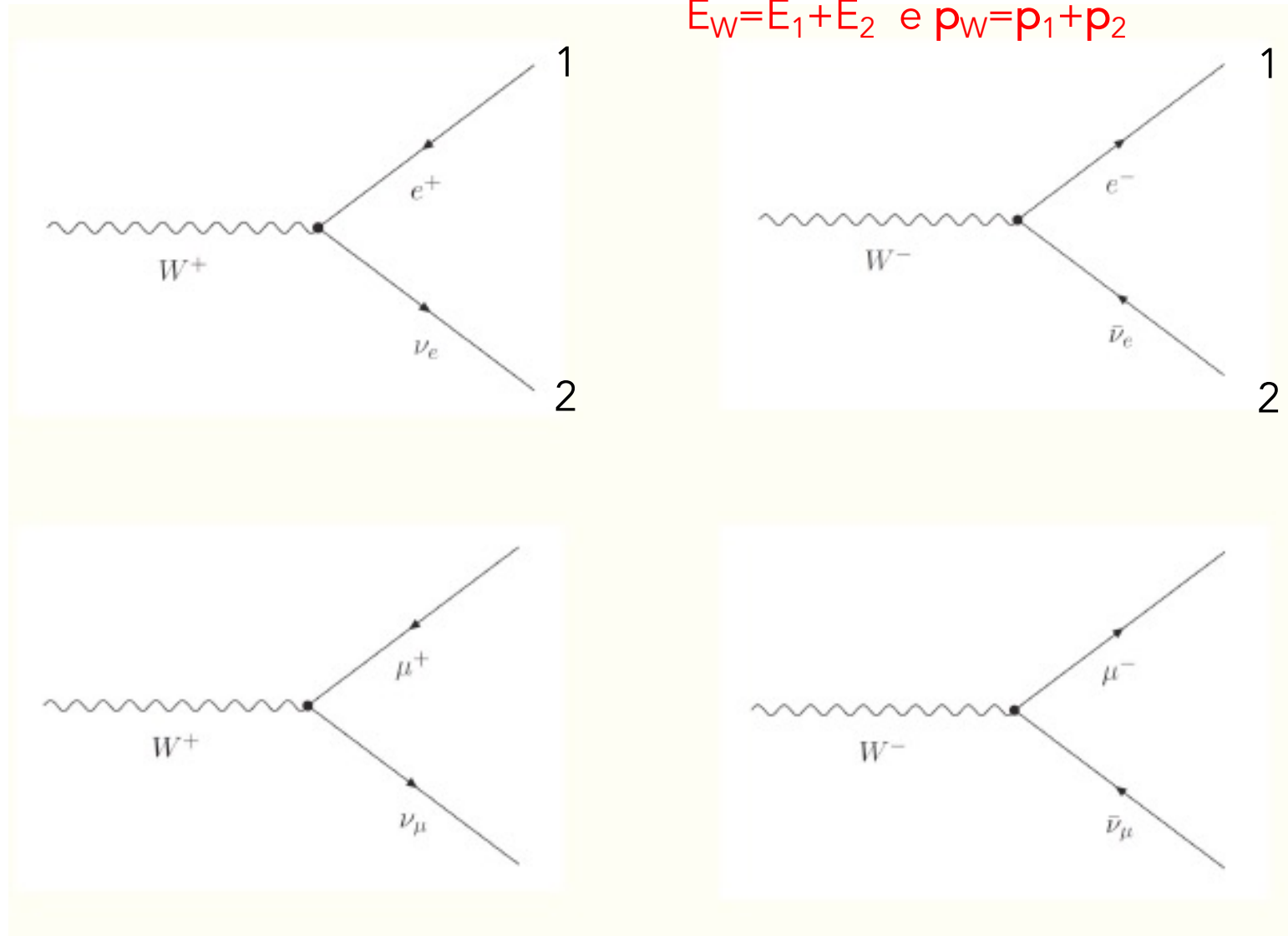


decadimenti dei W^+ e W^-

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 $W \rightarrow 1+2$

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

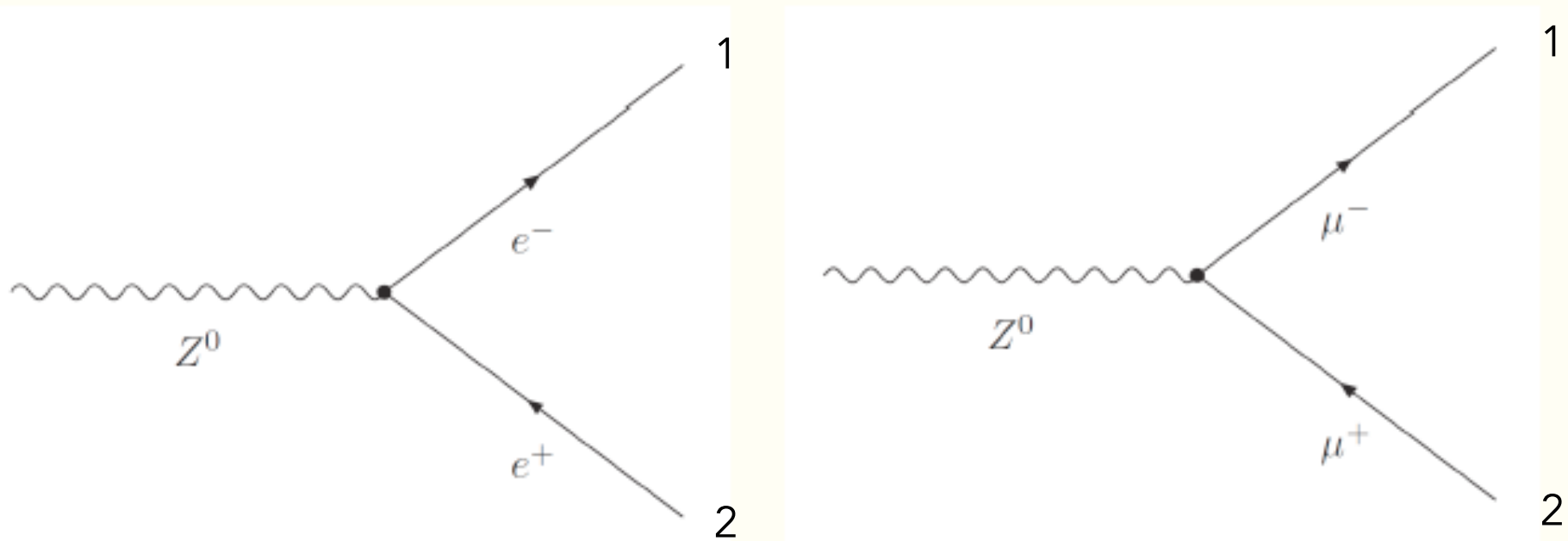


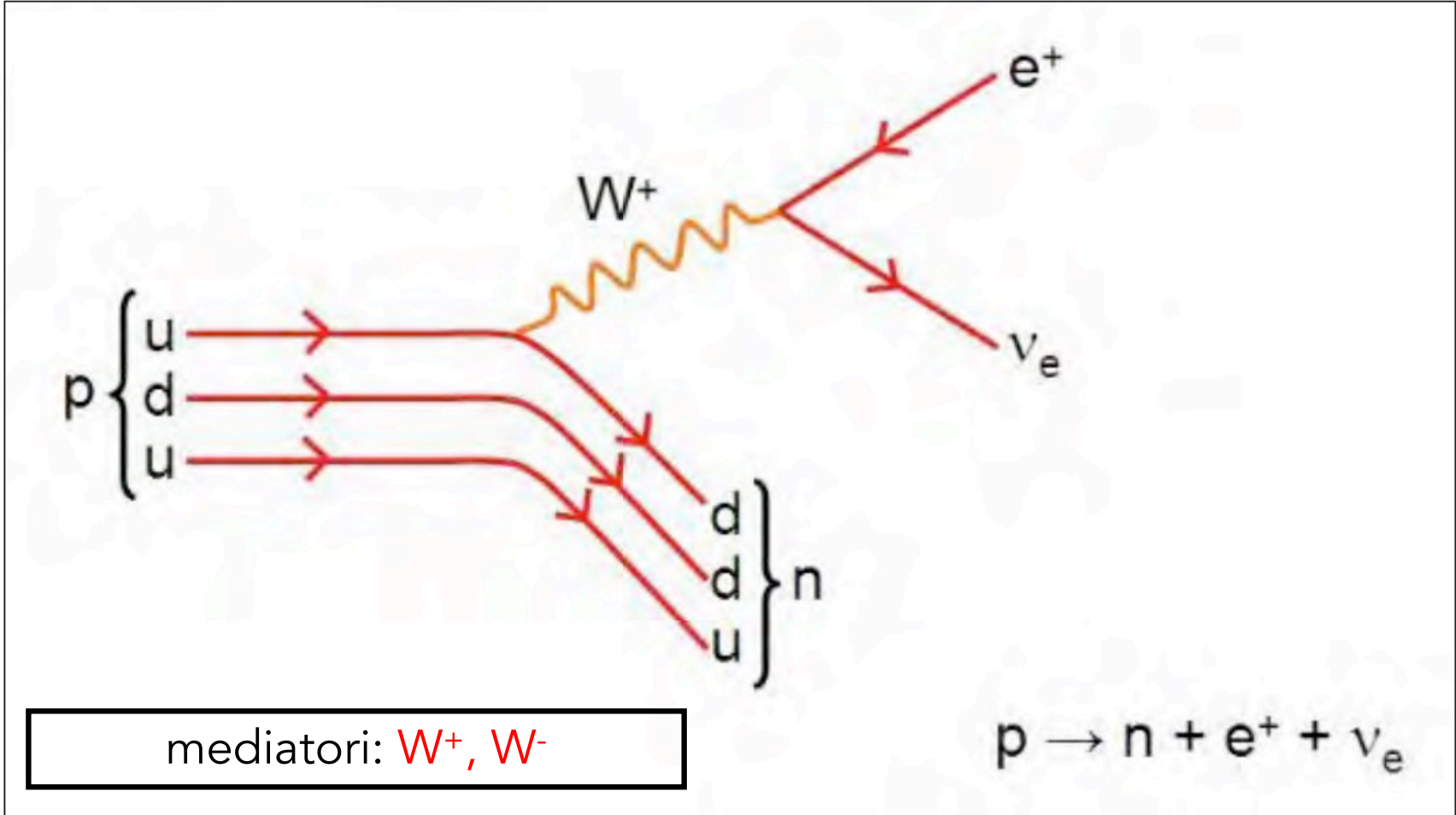
decadimenti della Z^0

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 $Z \rightarrow 1 + 2$

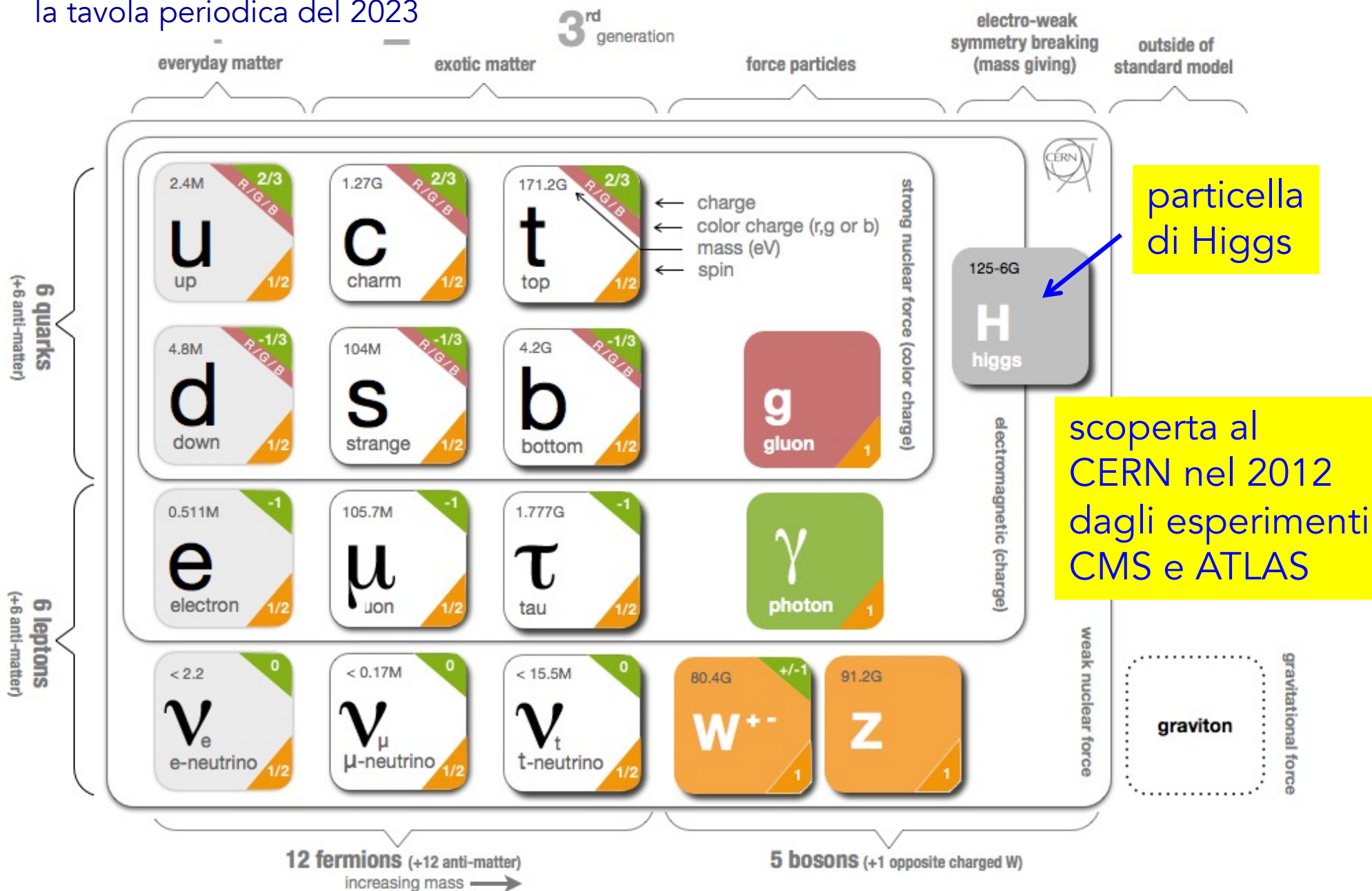
$$E_Z = E_1 + E_2 \quad \text{e} \quad \mathbf{p}_Z = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$$





il Modello Standard sommario

la tavola periodica del 2023



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

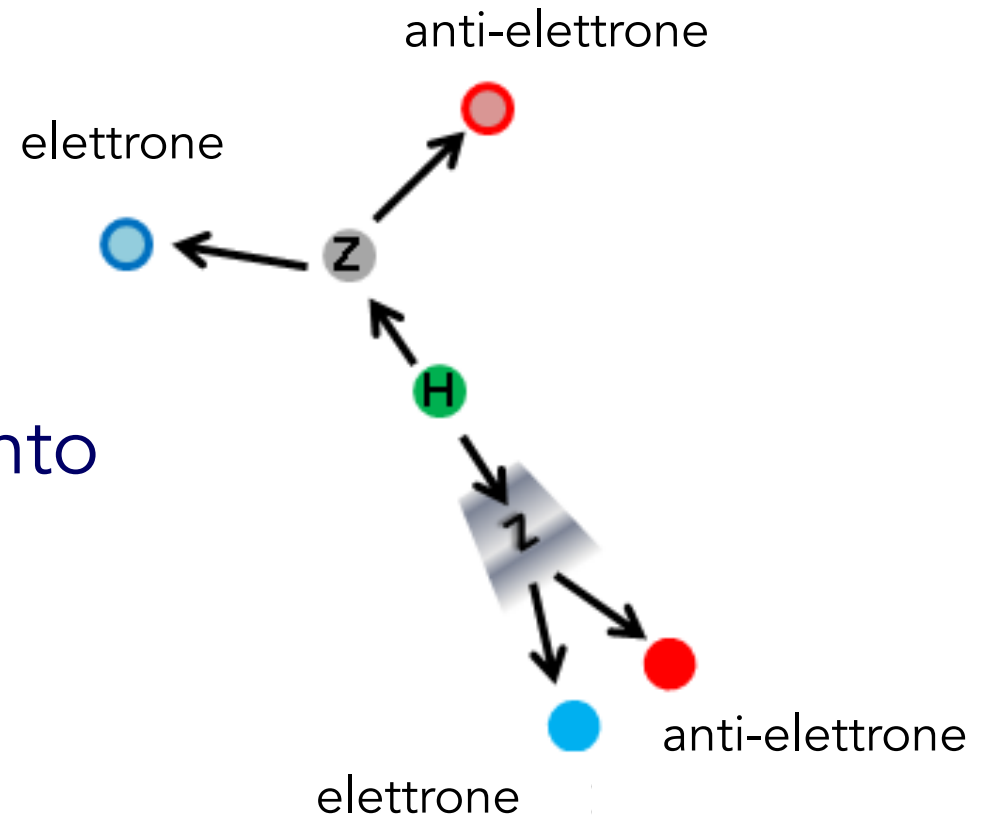


Fonte: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

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

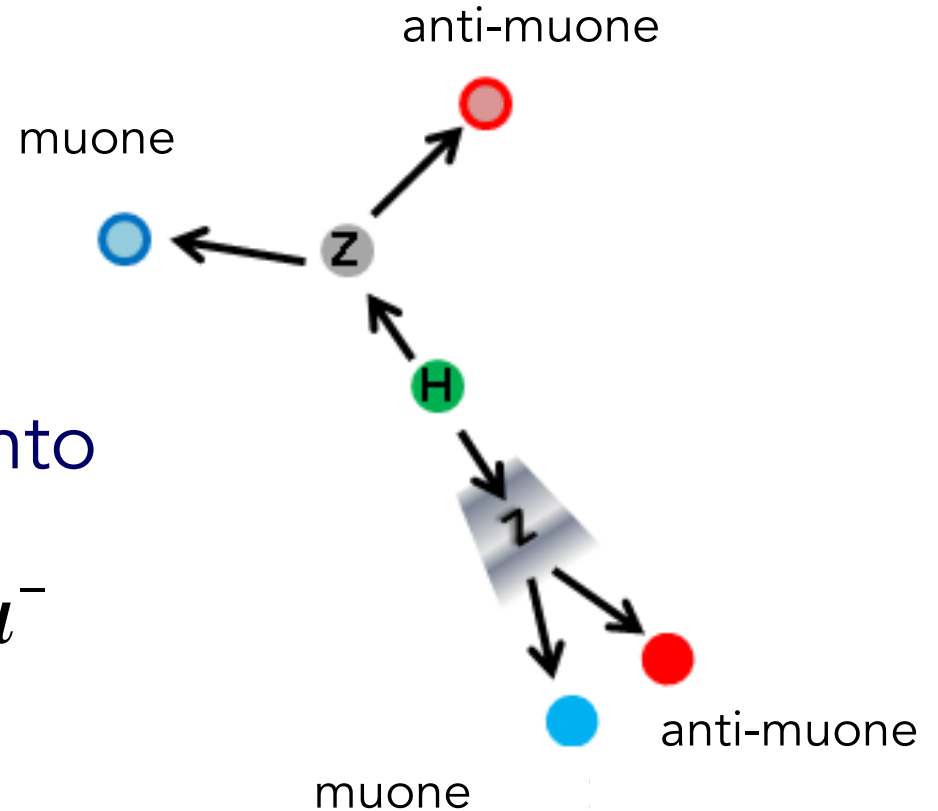
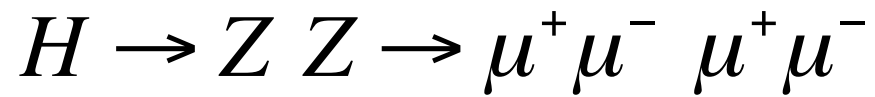
un possibile decadimento

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



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

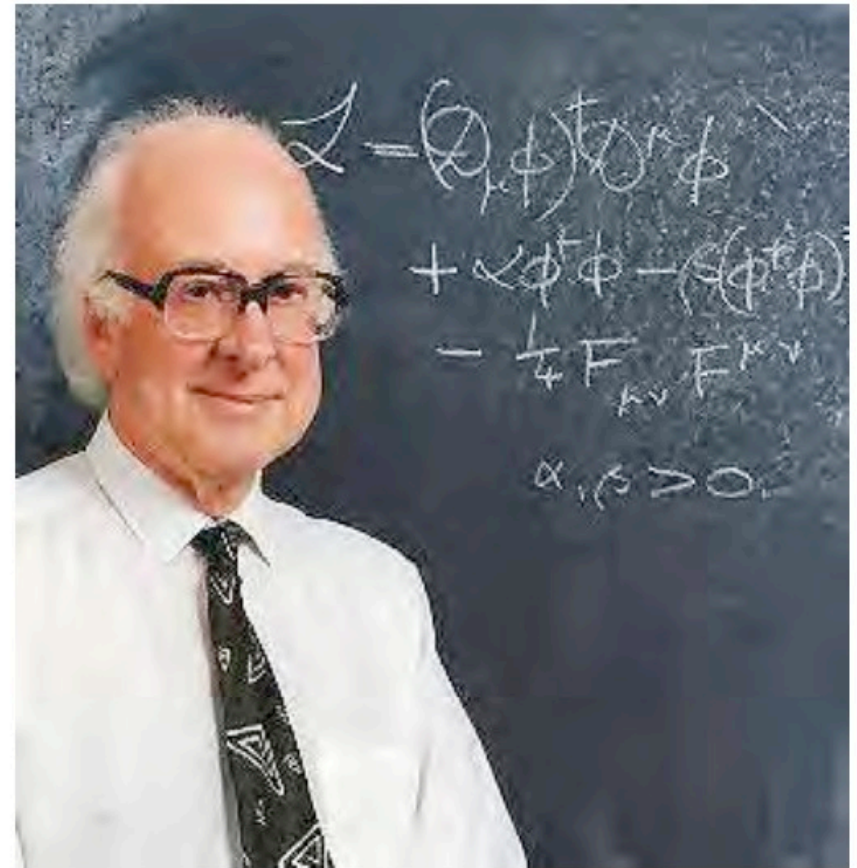
un possibile decadimento





Carlo Rubbia
scoperta delle particelle W e Z

premio Nobel 1984

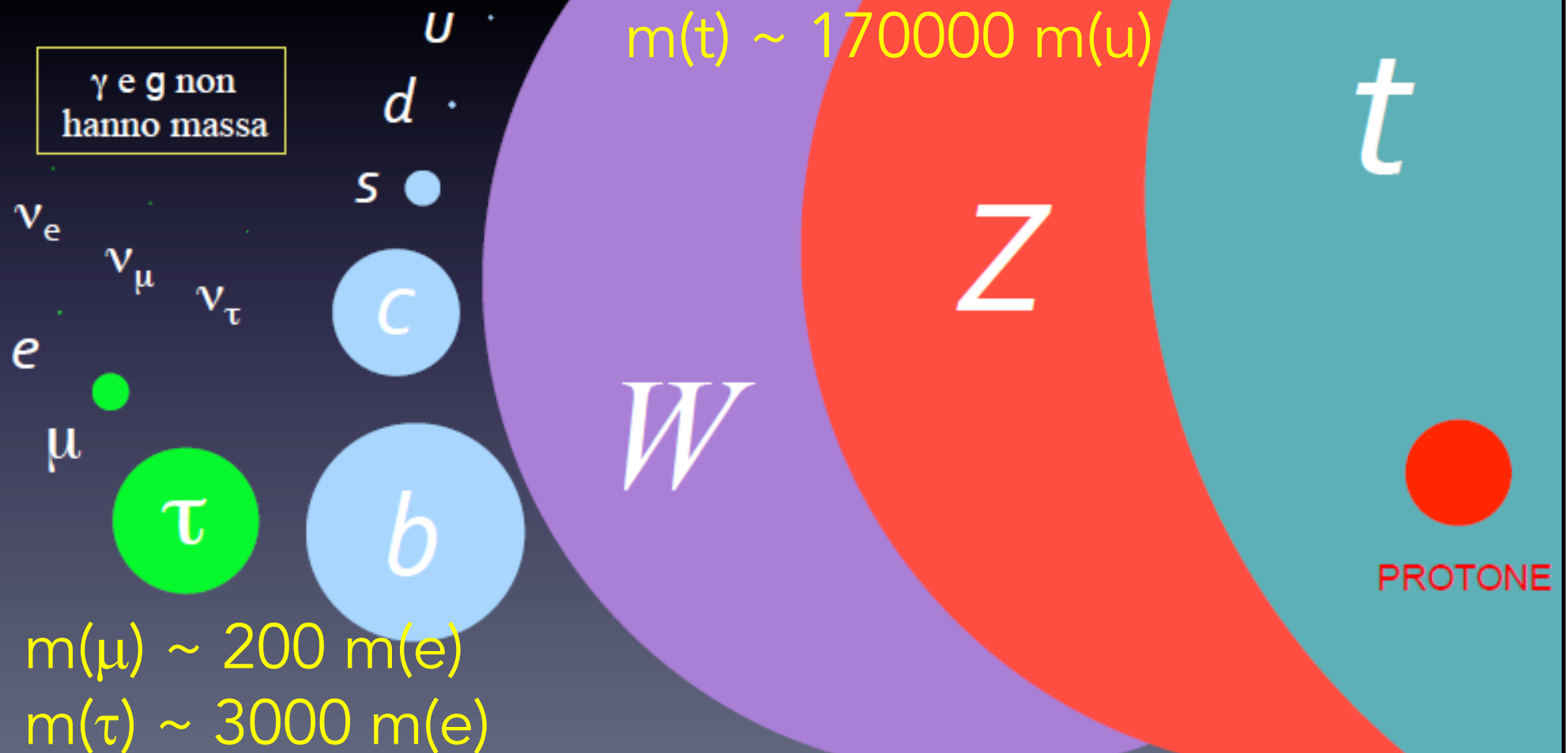


Peter Higgs
ipotesi della particella H

premio Nobel 2013

Il Modello Standard non spiega tutto

le particelle hanno una massa enormemente diversa fra loro
perchè?

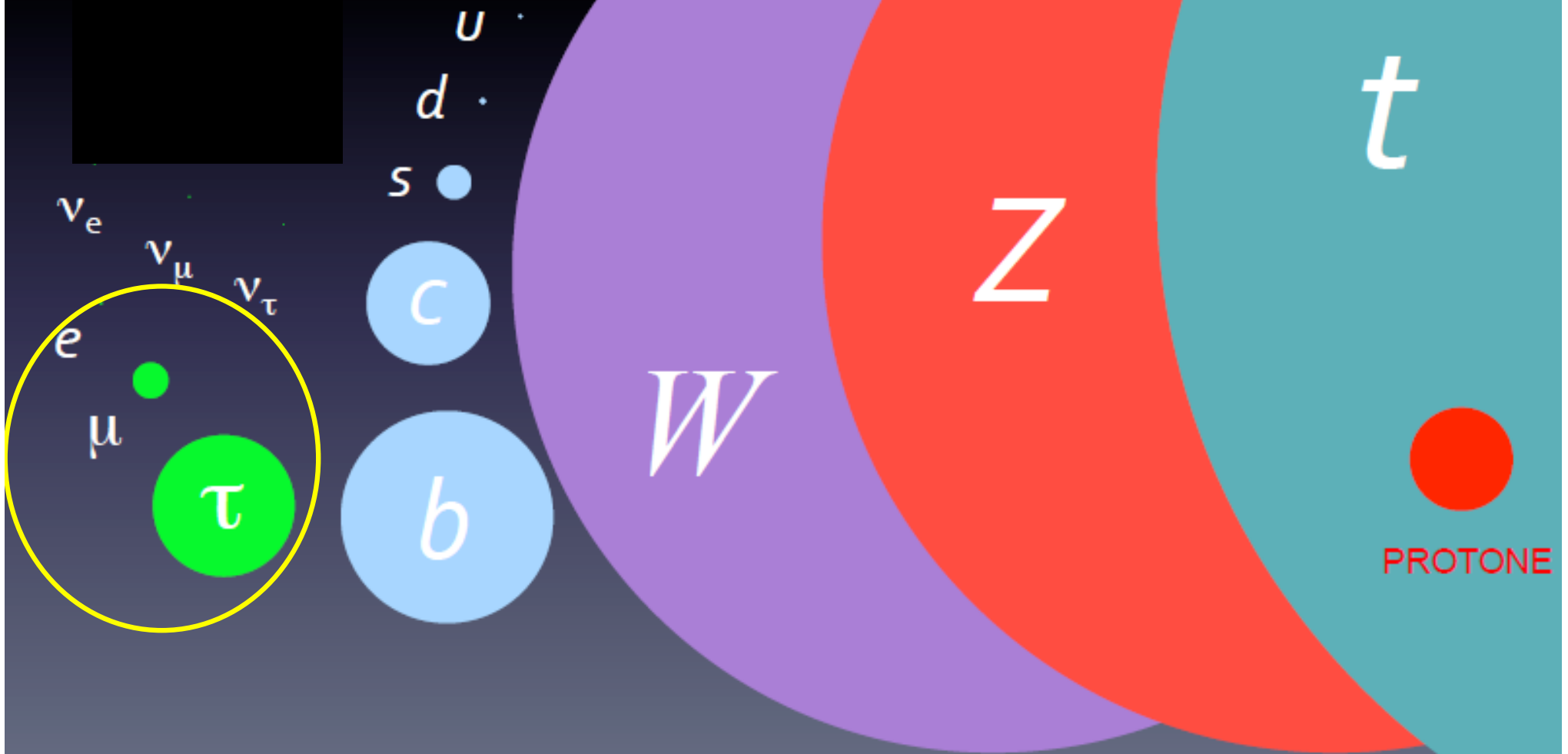


Il Modello Standard non spiega tutto

ci sono tre famiglie di quark e leptoni

perchè?

ce ne sono altre?

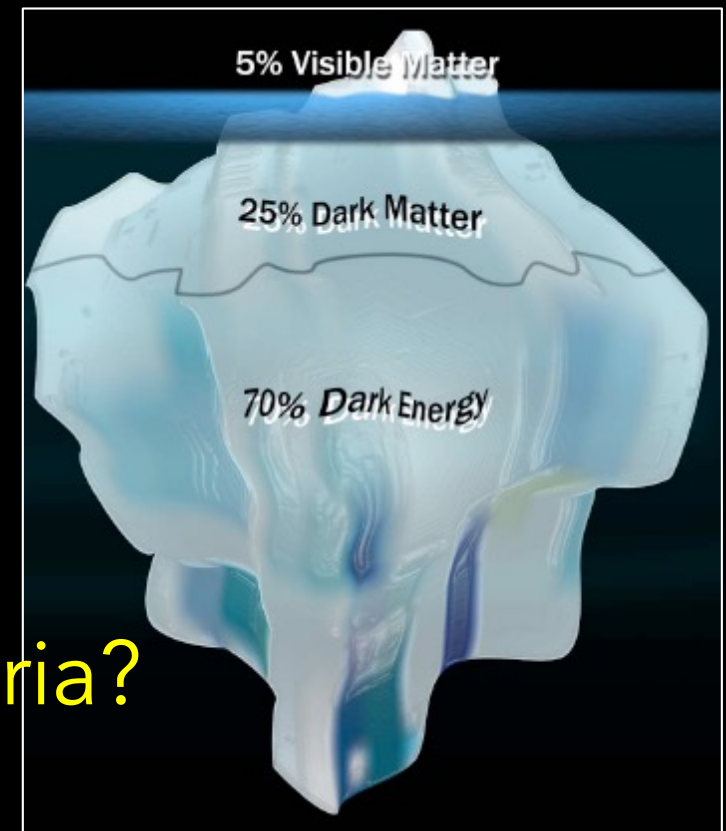
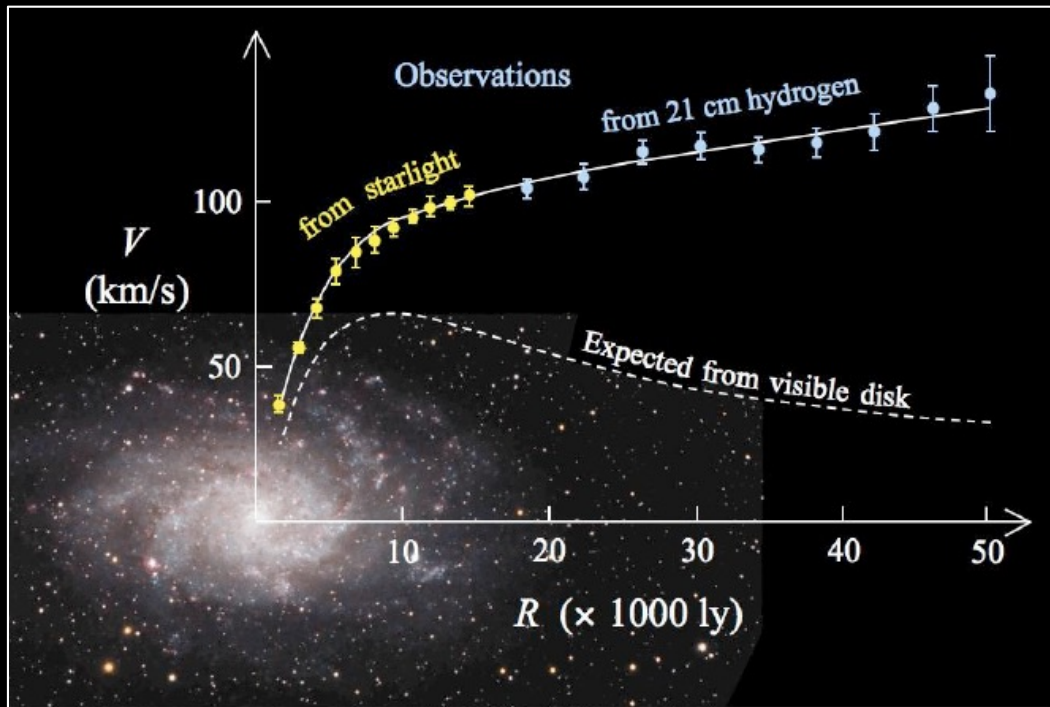


Il Modello Standard non spiega tutto

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

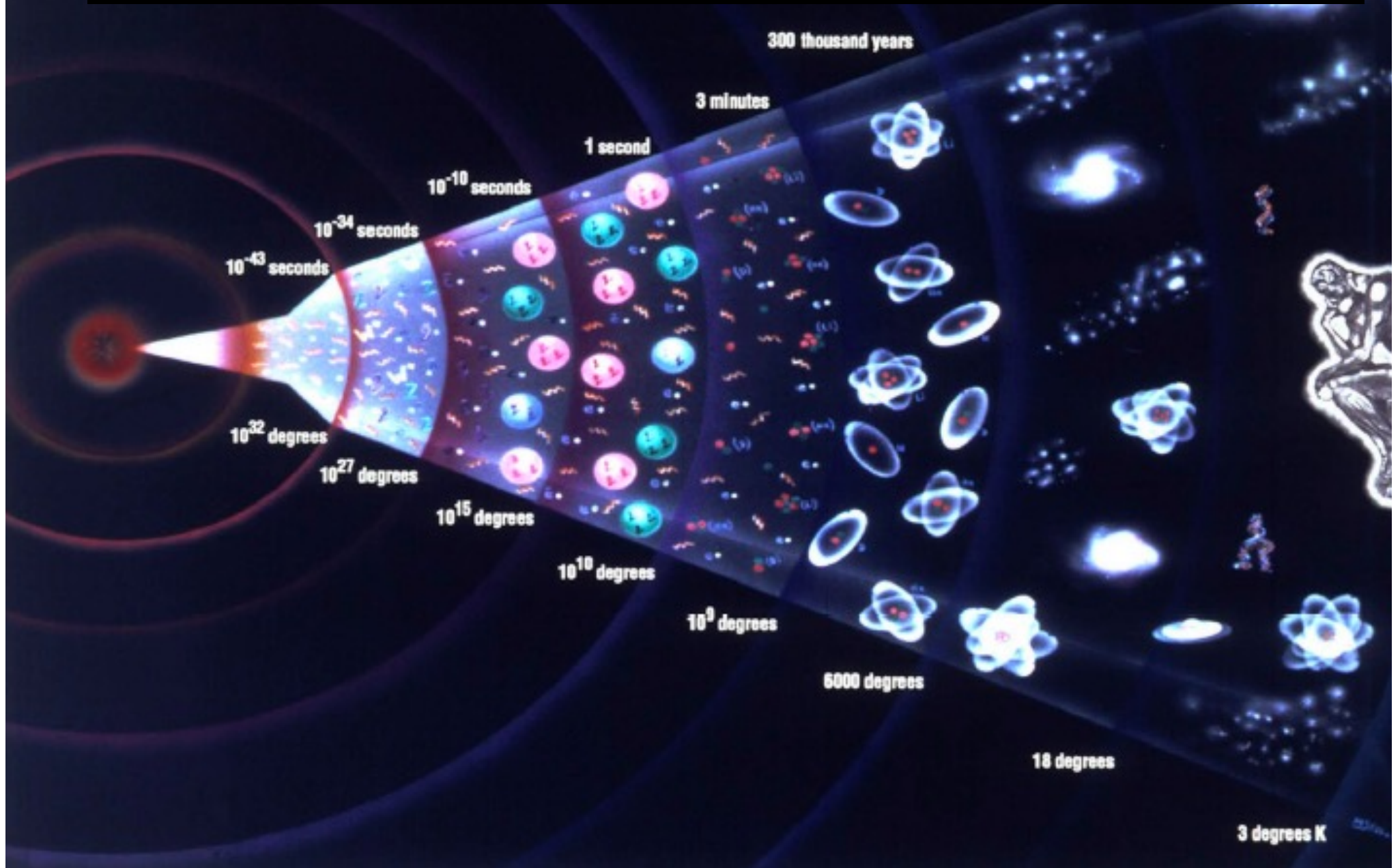


l'universo è composto di altra materia ed energia, di cui non sappiamo nulla

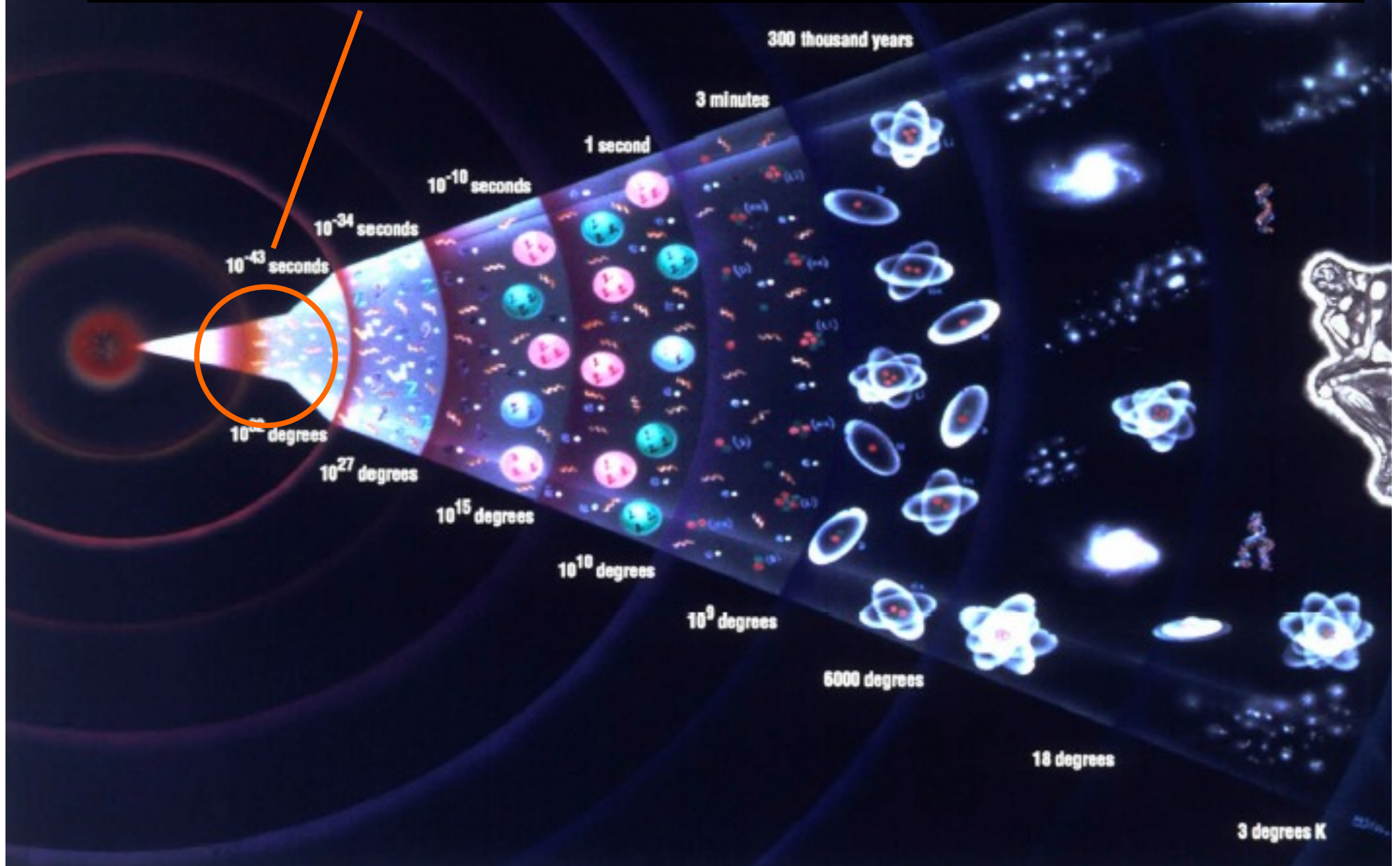


esiste un nuovo tipo di materia?

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



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



per le risposte....

