



Alia ricerca di particelle strane in ALICE

Introduzione alla Fisica delle Particelle



ALICE International Masterclass
Pavia, 1 marzo 2023



Dall'antichità a oggi

«La cosa più bella che possiamo sperimentare è il mistero; è la fonte di ogni vera arte e di ogni vera scienza»
A. Einstein



Le grandi domande della Fisica

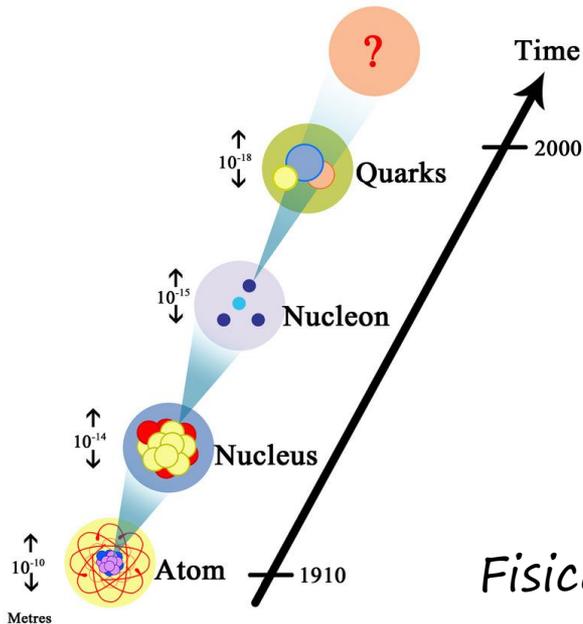
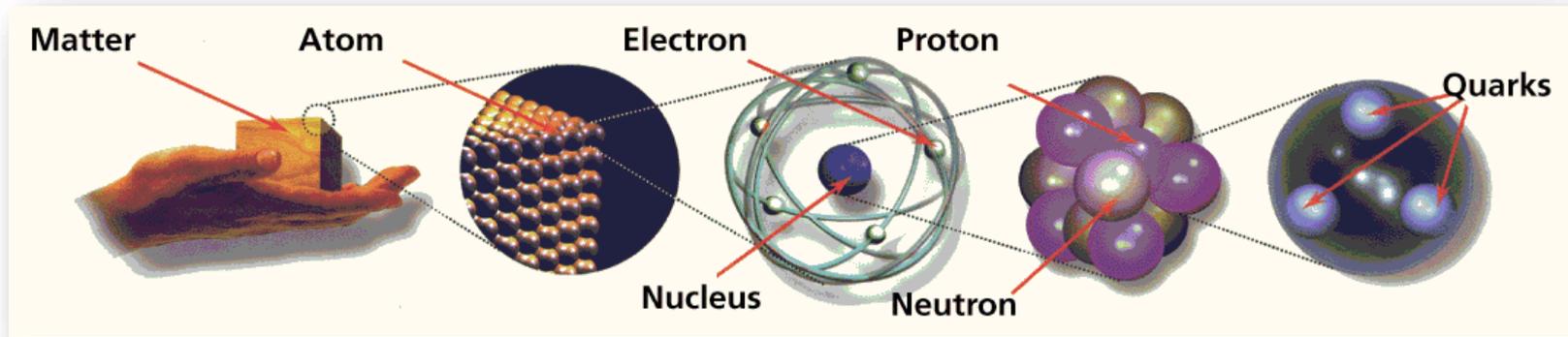
- Quali sono i costituenti fondamentali della materia?
 - Quali forze li governano?
 - Qual è l'origine di queste forze?



Democrito
(460 a.C. – 370 a.C.)

Interpretare *fenomeni complessi* in termini delle proprietà delle *parti più semplici* che li compongono e delle forze che intervengono a comporli

Il concetto di elementare



... e poi??

Fisica delle particelle, oggi:

- quarks (???)
- leptoni (elettrone $r \sim 10^{-18}$ m)

Fisica nucleare, 1930:

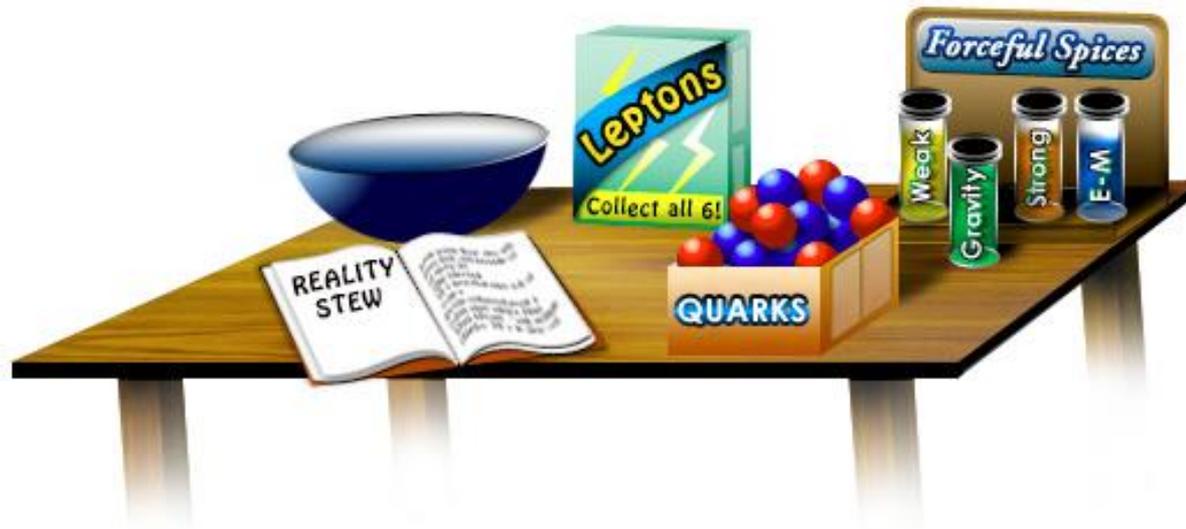
- nucleo ($r \sim 10^{-14}$ m)
- nucleone ($r \sim 10^{-15}$ m)

Fisica atomica, inizio 1900:

atomo ($r \sim 10^{-10}$ m)

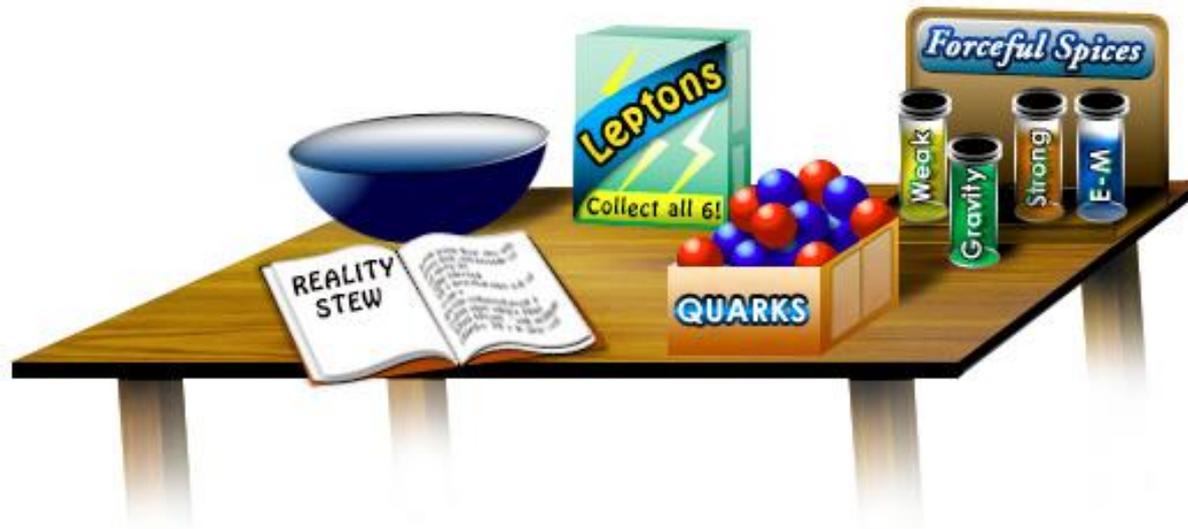
Facciamo un po' di ordine...

Il Modello Standard (SM) è ad oggi la teoria che descrive efficacemente centinaia di particelle e interazioni complesse attraverso «poche» particelle elementari e interazioni fondamentali, fino all'energia di centinaia di GeV.



Facciamo un po' di ordine...

Il Modello Standard (SM) è ad oggi la teoria che descrive efficacemente centinaia di particelle e interazioni complesse attraverso «poche» particelle elementari e interazioni fondamentali, fino all'energia di centinaia di GeV.



...un breve intermezzo...

Unità di misura

La carica elettrica Q delle particelle subatomiche è quantizzata:

$$Q = Ne$$

$$[e \text{ (carica elettrica dell'elettrone)} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}]$$

Vedremo che il modo di dare energia alle particelle si basa sui campi elettrici ed avremo in genere a che fare con differenze di potenziale, che si misurano in **Volt**.

Una carica Q che passa per una differenza di potenziale V ottiene un'energia:

$$E = Q \cdot V$$

Qual è il metodo più diretto di misurare le energie in questo ambito?

Semplice! Basta esprimerle come prodotto di carica per potenziale.

- ✓ L'unità di misura della carica è e
- ✓ L'unità di misura del potenziale è V

→ L'unità di misura dell'energia sarà: **elettron · Volt [eV]**.

electronVolt

1 eV è l'energia cinetica acquistata da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt

1 eV rappresenta un'energia molto piccola

$$1 \text{ eV} = (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ V}) = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

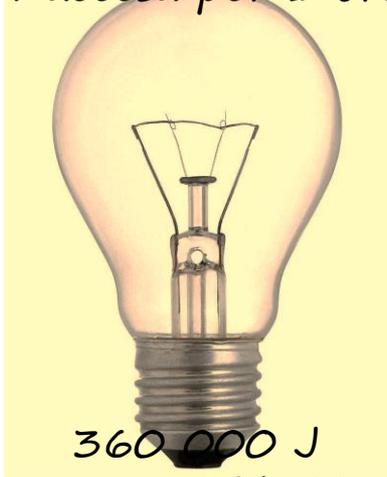
$$10^{12} \text{ eV} = \text{TeV}$$

$$10^9 \text{ eV} = \text{GeV}$$

$$10^6 \text{ eV} = \text{MeV}$$

$$10^3 \text{ eV} = \text{keV}$$

Lampadina da 100 W accesa per 1 ora



360 000 J
 $2.24 \cdot 10^{24} \text{ eV}$

Auto da corsa
 $v = 370 \text{ km/h}$



4 500 000 J
 $28 \cdot 10^{24} \text{ eV}$

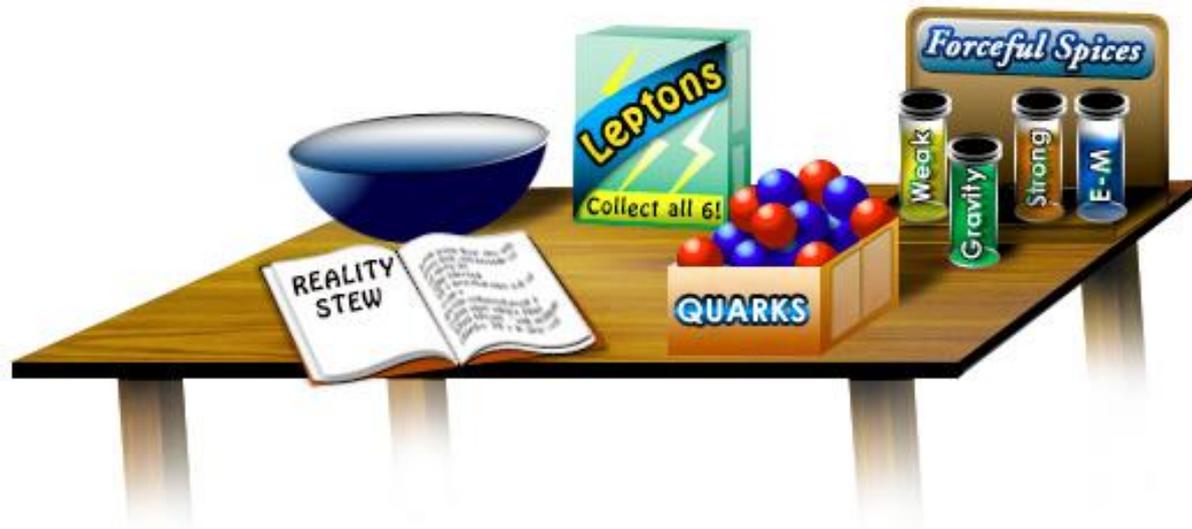
Caldaia 12 600 kcal in funzione per 1 h



52 000 000 J
 $324 \cdot 10^{24} \text{ eV}$

Facciamo un po' di ordine...

Il Modello Standard (SM) è ad oggi la teoria che descrive efficacemente centinaia di particelle e interazioni complesse attraverso «poche» particelle elementari e interazioni fondamentali, fino all'energia di centinaia di GeV.



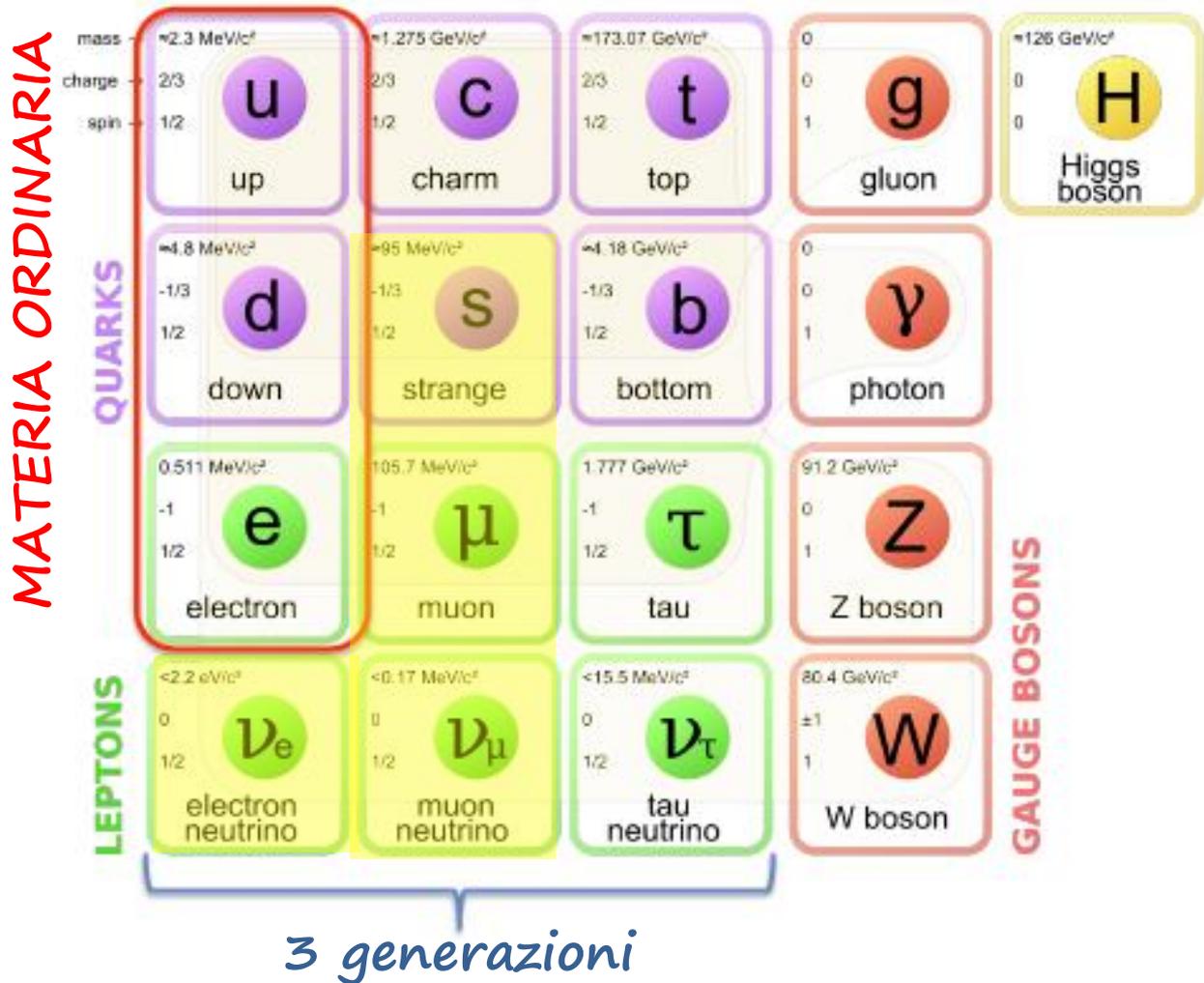
Facciamo un po' di ..ordine?

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{cw} (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\
 & ig_{sw} (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
 & gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H\partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+)) - ig \frac{2s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{2s_w}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{2s_w}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{2s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^3 (q_i^\gamma q_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig_s A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{C}^a \partial^2 C^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{C}^a G^b G_\mu^c + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{cw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{cw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{cw} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$



Le particelle del Modello Standard

Prodotti dall'interazione della radiazione cosmica con l'atmosfera



Le particelle del Modello Standard

Carica elettrica

FERMIONI

BOSONI

Carica elettrica

$2/3$

$-1/3$

-1

0

	FERMIONI			BOSONI		
mass	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson	0
	d down	s strange	b bottom	γ photon		0
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson		0
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson		± 1
	QUARKS			GAUGE BOSONS		
	LEPTONS					

Quarks

Attualmente sono stati scoperti 6 tipi di quarks, divisi in 3 famiglie

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	u	c	t
	up	charm	top
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	d	s	b
	down	strange	bottom

Proprietà:

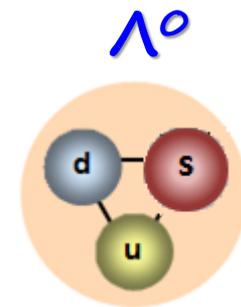
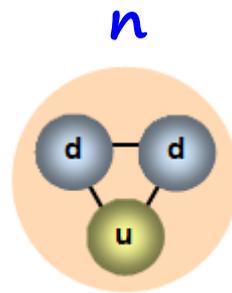
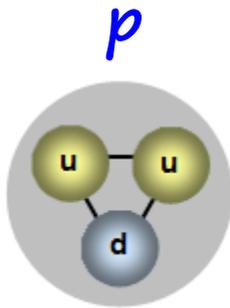
- Spin (momento angolare intrinseco) = $1/2$
- Carica elettrica frazionaria ($2/3$, $-1/3$)
- Non esistono come particelle libere



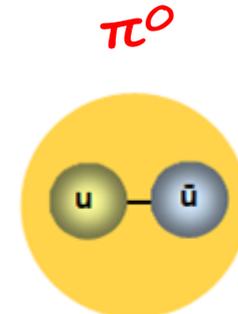
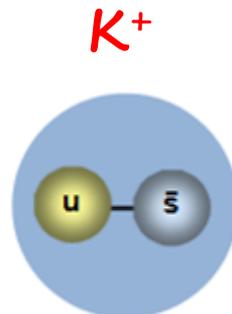
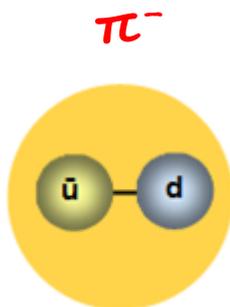
Adroni

Il Modello Standard prevede che i quarks si combinino formando stati legati (particelle), chiamate adroni

□ **BARIONI** → particelle formate da 3 quarks



□ **MESONI** → particelle formate da un quark e un anti-quark



Leptoni

Particelle elementari molto più leggere dei quarks. Esistono 6 leptoni, divisi in 3 famiglie

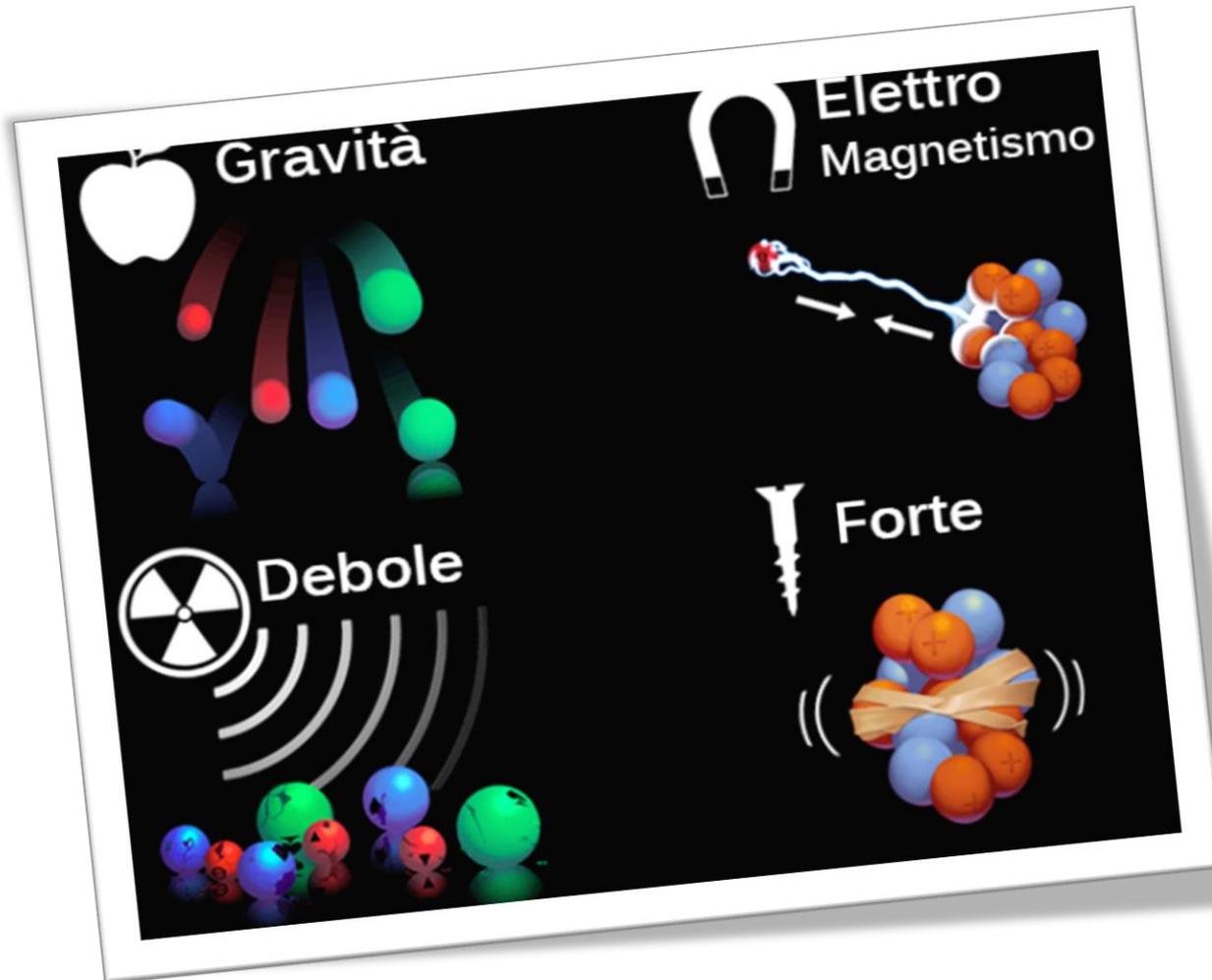
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 τ tau
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_μ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_τ tau neutrino

Proprietà:

- Spin (momento angolare intrinseco) = $1/2$
- Elettrone, mu, tau con carica elettrica negativa
- Neutrini con carica elettrica nulla

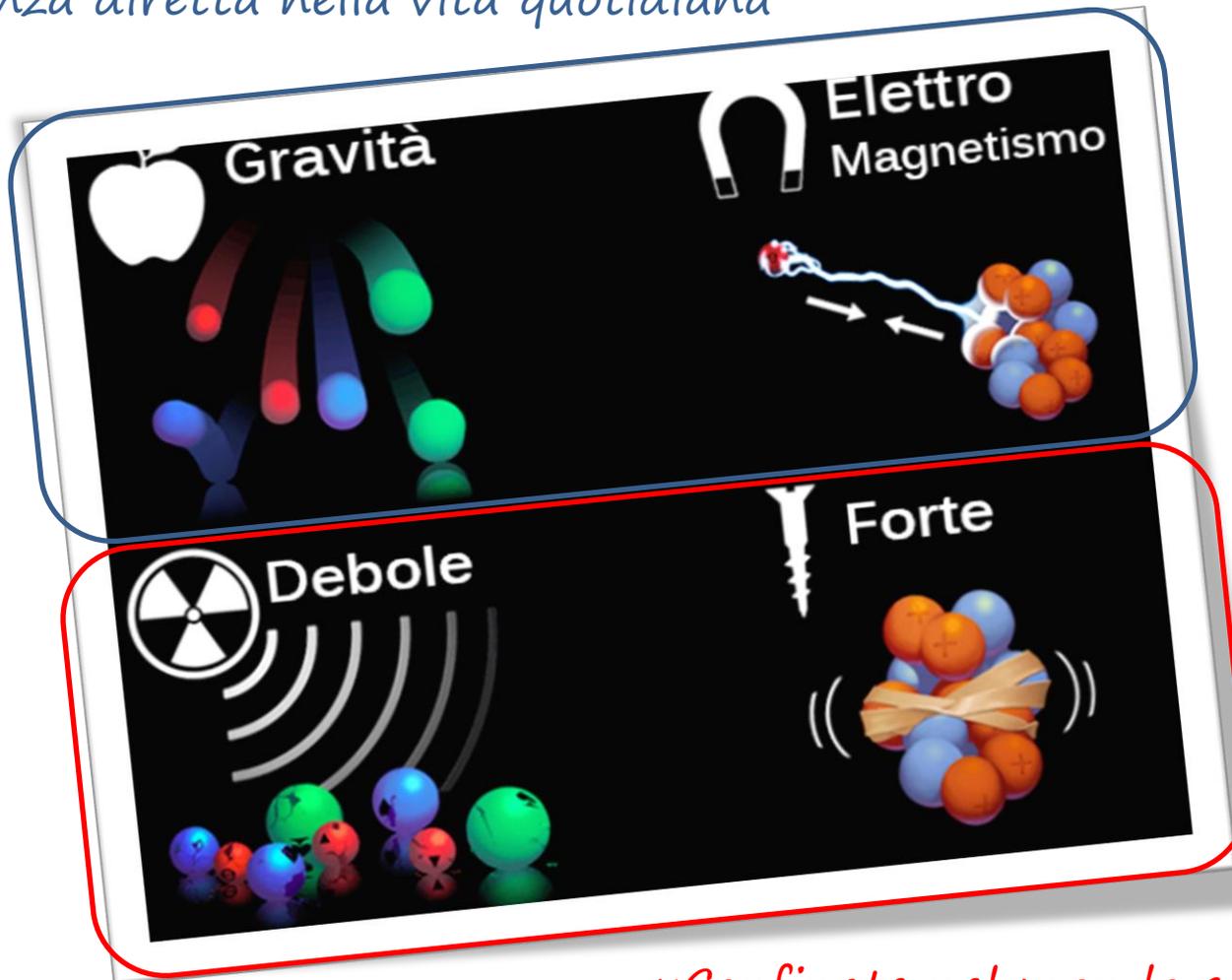


Le 4 interazioni fondamentali



Le 4 interazioni fondamentali

Esperienza diretta nella vita quotidiana



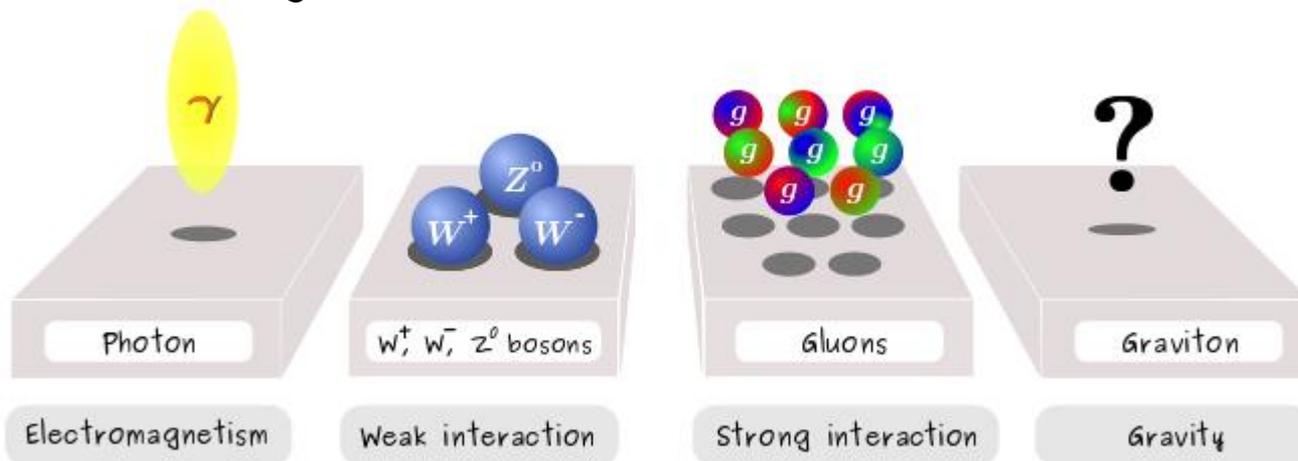
«Confinare nel mondo subatomico»

Interazioni e mediatori

Le interazioni avvengono per scambio di mediatori tra le particelle coinvolte: i bosoni!

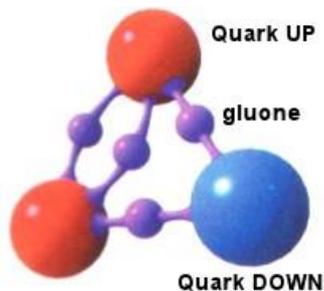


Ogni interazione ha il suo mediatore:

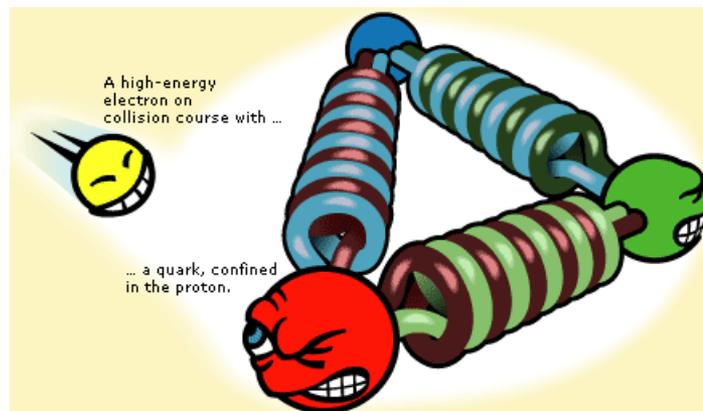


Interazione forte

- È l'interazione più forte!
- Tiene legato il nucleo atomico vincendo la repulsione coulombiana tra i protoni
- Agisce tra i quark, in quanto dotati di carica «di colore» (rosso, verde, blu)
- Mediata dagli 8 gluoni: particelle di massa nulla dotate di «colore» (da cui il nome Cromodinamica Quantistica per la teoria che li descrive) e anti-colore



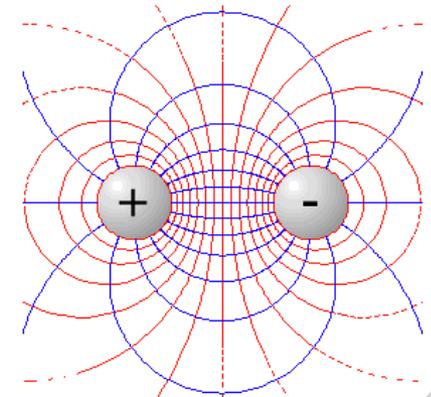
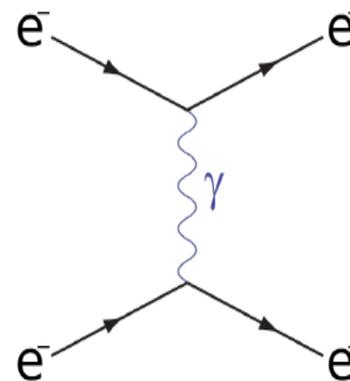
	mass	charge	spin					
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	c charm
					$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	t top
								g gluon
								H Higgs boson
LEPTONS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	s strange
					$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	b bottom
								γ photon
								Z Z boson
GAUGE BOSONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	μ muon
					$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	τ tau
								W W boson
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_μ muon neutrino
					$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_τ tau neutrino



Interazione elettromagnetica

- Si esercita tra tutte le particelle cariche: quarks e leptoni carichi
- Il fotone è il mediatore della forza elettromagnetica
- 100 volte più debole dell'interazione forte
- Compresa a fondo con l'unificazione dei fenomeni elettrici e magnetici, responsabile di numerosissimi fenomeni su scala atomica e sub-atomica
- L'elettrodinamica quantistica (QED) è la teoria più precisa del mondo! Risultati con precisione accuratissima!

	mass $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ u up	mass $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ c charm	mass $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ t top	mass 0 charge 0 spin 1 g gluon	mass $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 H Higgs boson	
QUARKS	mass $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ d down	mass $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ s strange	mass $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ b bottom	mass 0 charge 0 spin 1 γ photon	mass $91.2 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 1 Z Z boson	
	mass $0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ e electron	mass $105.7 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ μ muon	mass $1.777 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ τ tau			mass $80.4 \text{ GeV}/c^2$ charge ± 1 spin 1 W W boson
	mass $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_e electron neutrino	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_μ muon neutrino	mass $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_τ tau neutrino			
LEPTONS				GAUGE BOSONS		



Interazione debole

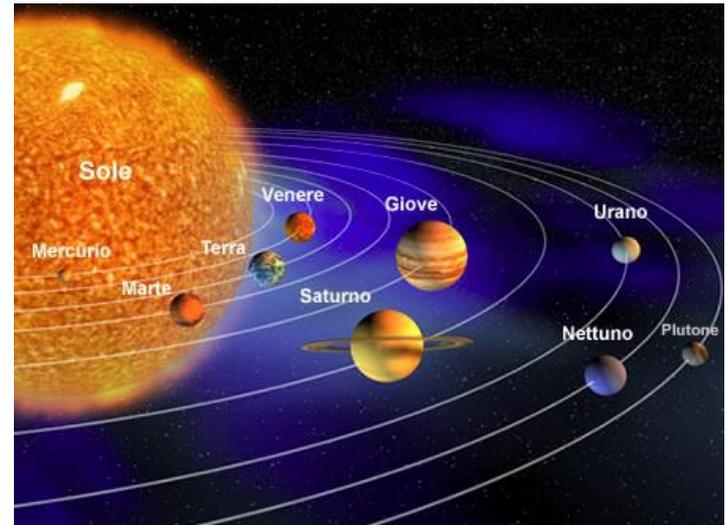
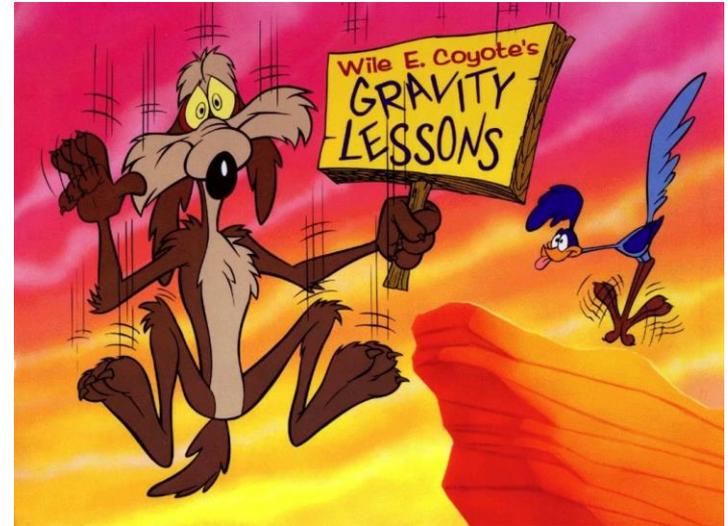
- Si esercita tra quark e leptoni
- È la sola interazione a cui è sensibile il neutrino!
- I bosoni Z e W sono i mediatori della forza debole
 - Massa ~ 100 volte $m_{\text{protone!}}$
 - Scoperti al CERN (1983) → Nobel a C. Rubbia e S. Van der Meer (1984)
- 10 000 000 volte più debole dell'interazione forte
- Raggio di azione piccolissimo, 10^{-18} m
- Viola alcune «simmetrie fondamentali»:
 - Processi visti allo specchio si comportano in modo diverso!
 - Particella e antiparticella possono avere comportamenti diversi!

	mass $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ u up	mass $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ c charm	mass $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge $2/3$ spin $1/2$ t top	mass 0 charge 0 spin 1 g gluon	mass $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 H Higgs boson	
QUARKS	mass $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ d down	mass $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ s strange	mass $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-1/3$ spin $1/2$ b bottom	mass 0 charge 0 spin 1 γ photon		
	mass $0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ e electron	mass $105.7 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ μ muon	mass $1.777 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $1/2$ τ tau	mass $91.2 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 1 Z Z boson	GAUGE BOSONS	
	mass $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_e electron neutrino	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_μ muon neutrino	mass $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $1/2$ ν_τ tau neutrino	mass $80.4 \text{ GeV}/c^2$ charge ± 1 spin 1 W W boson		



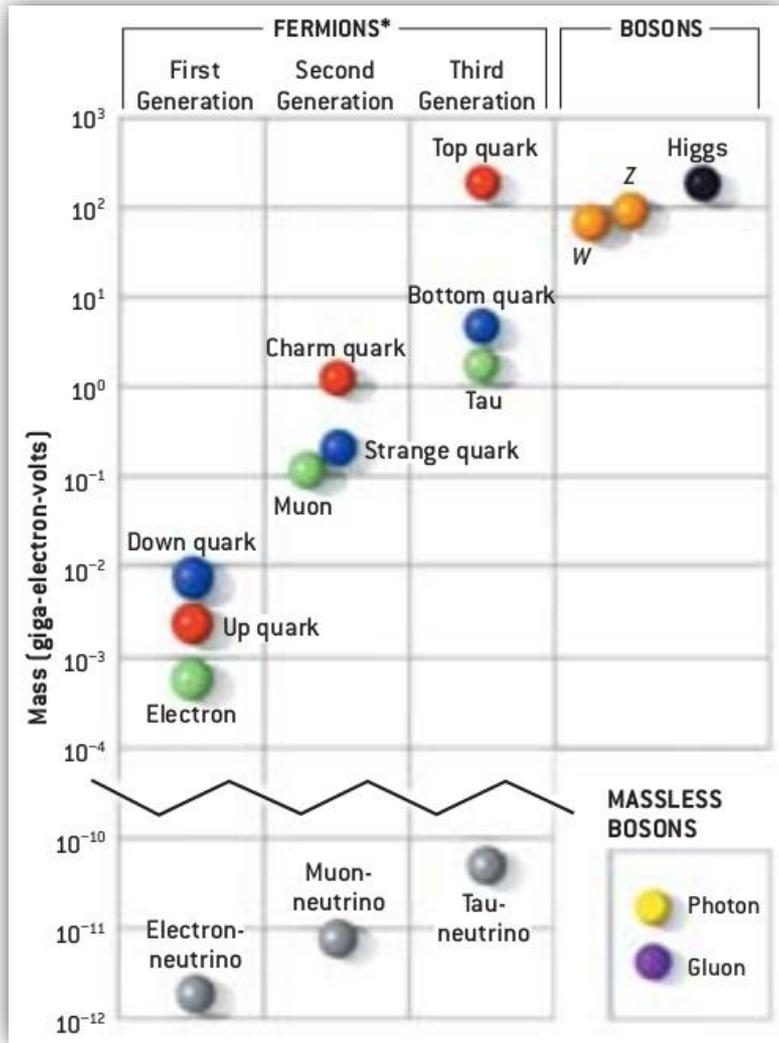
Interazione gravitazionale

- Si esercita tra tutte le particelle dotate di massa: quarks e leptoni carichi
- Il gravitone (non ancora scoperto) è il mediatore della forza gravitazionale
- 10^{39} volte più debole dell'interazione forte
- Raggio di azione infinito, trascurabile su scala atomica e subatomica
- Resta esclusa dal Modello Standard
- Non esiste una teoria quantistica della gravità



E il bosone di Higgs?

...ovvero il problema della massa



$$m = 0 \rightarrow v = c$$

$$m \neq 0 \rightarrow v \neq c$$

- Non c'è regolarità nei valori di massa delle particelle elementari
- I neutrini sono molto leggeri
- L'elettrone è 350 000 volte più leggero del quark più pesante
- Tra i bosoni, il fotone è privo di massa, ma i bosoni W e Z pesano circa come 80-90 protoni

Nella versione originale, il Modello Standard prevedeva particelle a massa nulla!

Meccanismo di Higgs

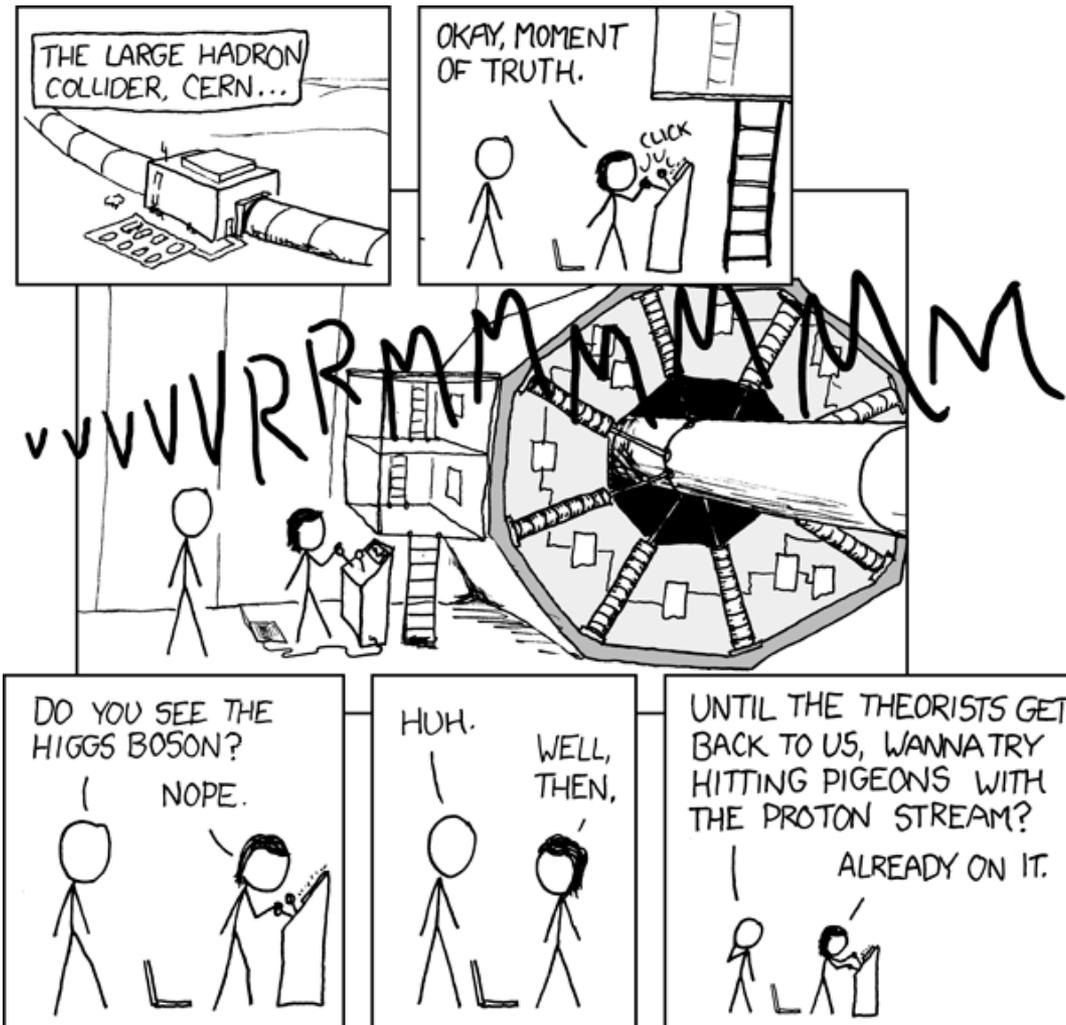
Meccanismo di Higgs (P. Higgs, F. Englert, R. Brout, 1964):

esiste un nuovo bosone, il **bosone di Higgs**. E' stata costruita una teoria della sua interazione con le altre particelle che porta come conseguenza all'esistenza della massa delle altre particelle.

Più forte una particella interagisce con il campo di Higgs, più la particella è massiva.

Alla ricerca dell'Higgs

Lunga ricerca durata decenni...

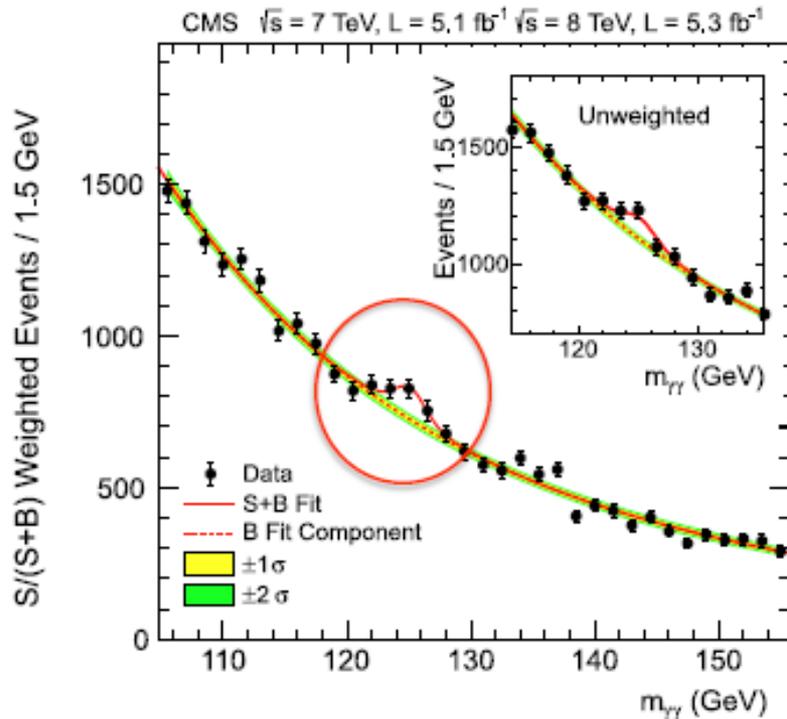


La scoperta dell'Higgs

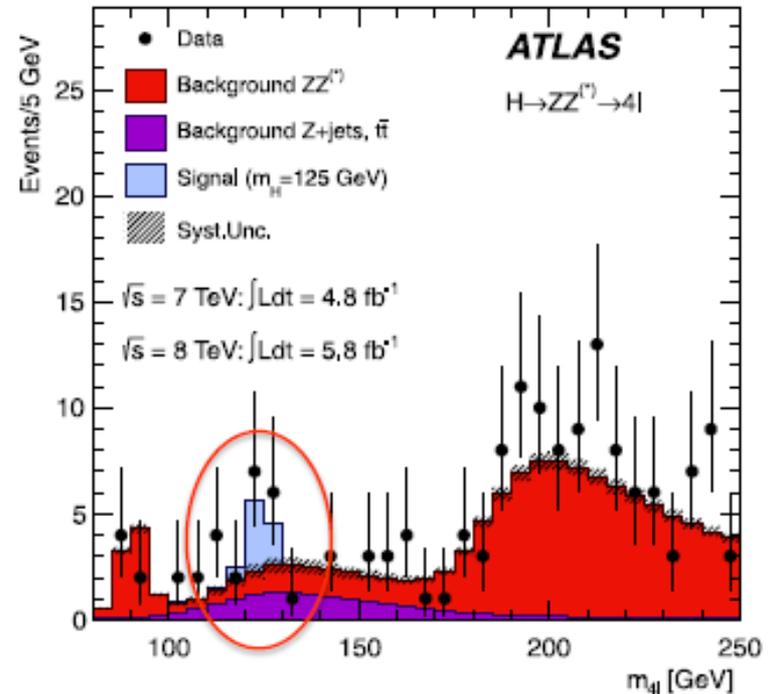
4 luglio 2012:

scoperta del bosone di Higgs a 2 esperimenti di LHC (ATLAS e CMS)

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$$

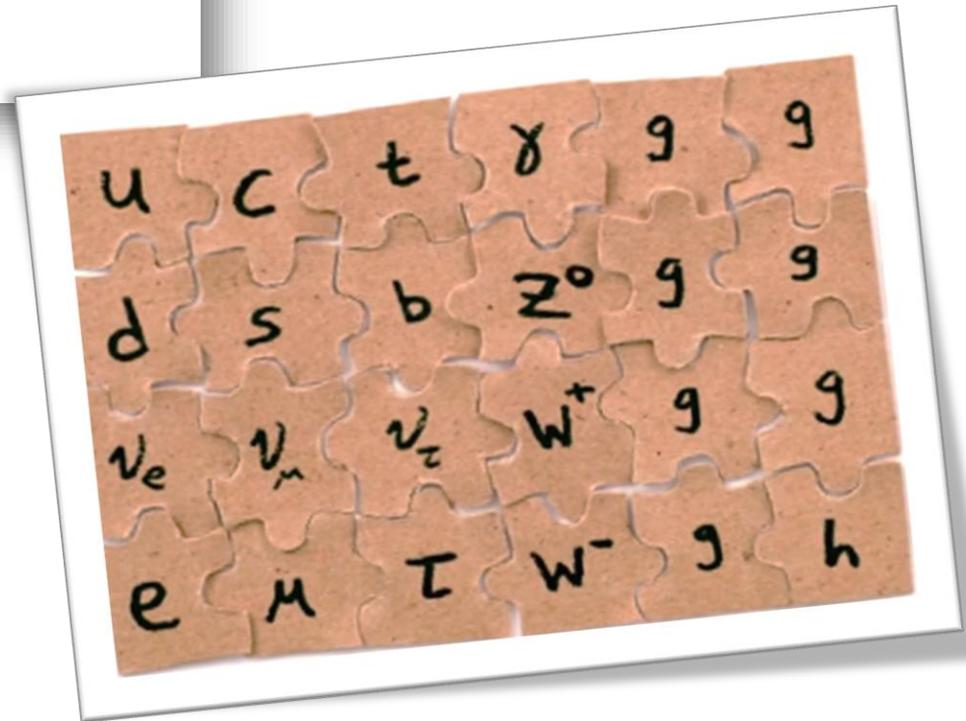


Massa ~ 125 GeV

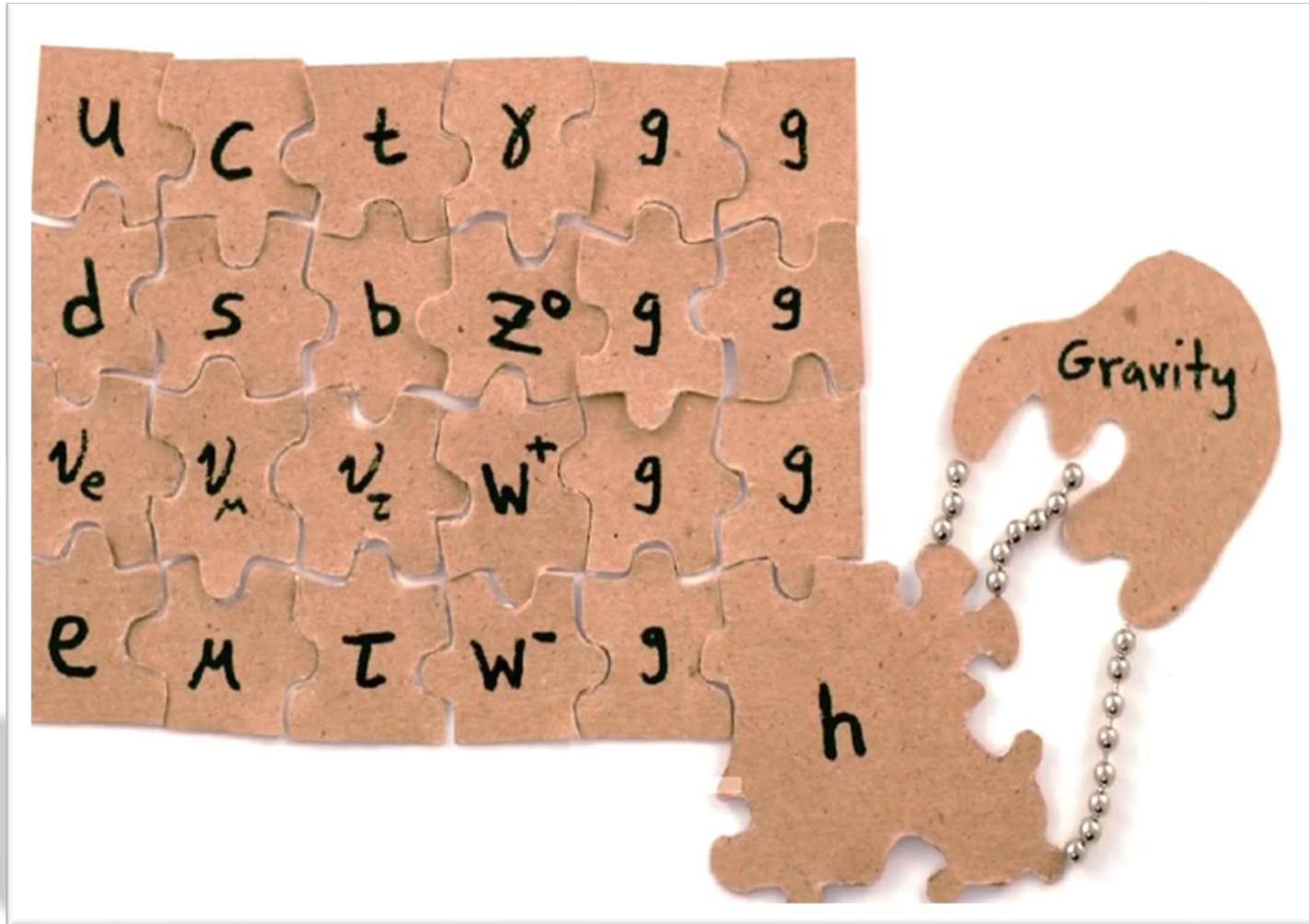
L'ultimo (?) pezzo del puzzle



Higgs



...e la gravità?



Abbiamo finito?!

Il Modello Standard descrive molto bene le proprietà delle particelle e di 3 interazioni fondamentali.

Tuttavia...

restano molte questioni fondamentali irrisolte!

- Perché ci sono **3 generazioni** di quark e leptoni? Non ne bastava solo una?
- Perché le particelle fondamentali hanno **masse così diverse**?
- Esistono **particelle** previste ma **non ancora osservate**?
- Possiamo inserire la **gravità** nel Modello Standard?
- Che fine ha fatto **l'antimateria** nell'Universo?
- Che cos'è la **materia oscura**? ...e **l'energia oscura**?
- ...



Abbiamo finito?!

Il Modello Standard descrive molto bene
e di 3 interazioni fondamentali.

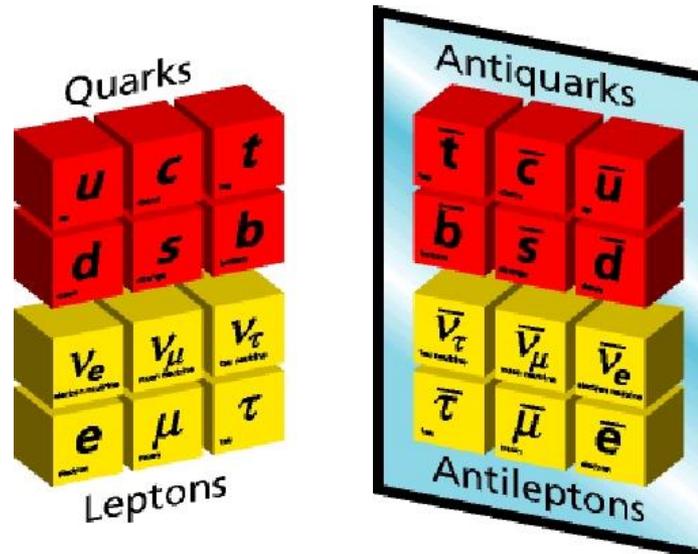
Tuttavia...

restano molte questioni fondamentali.

- Perché ci sono 3 generazioni di quark e le una?
- Perché le particelle fondamentali hanno massa?
- Esistono particelle previste ma non ancora osservate?
- Possiamo inserire la gravità nel Modello Standard?
- Che fine ha fatto **l'antimateria** nell'Universo?
- Che cos'è la materia oscura? ...e l'energia oscura?
- ...



Che cos'è l'antimateria?



Particelle e antiparticelle hanno:

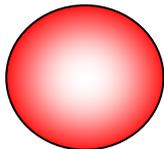
- Stessa massa
- Carica (non solo elettrica) di segno opposto



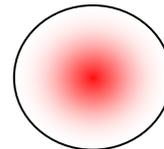
elettrone: carica $-e$
 Massa m



Positrone: carica $+e$
 Massa m



Protone: carica $+e$
 Massa = $1836 m$



Antiprotone: carica $-e$
 Massa = $1836 m$

uud

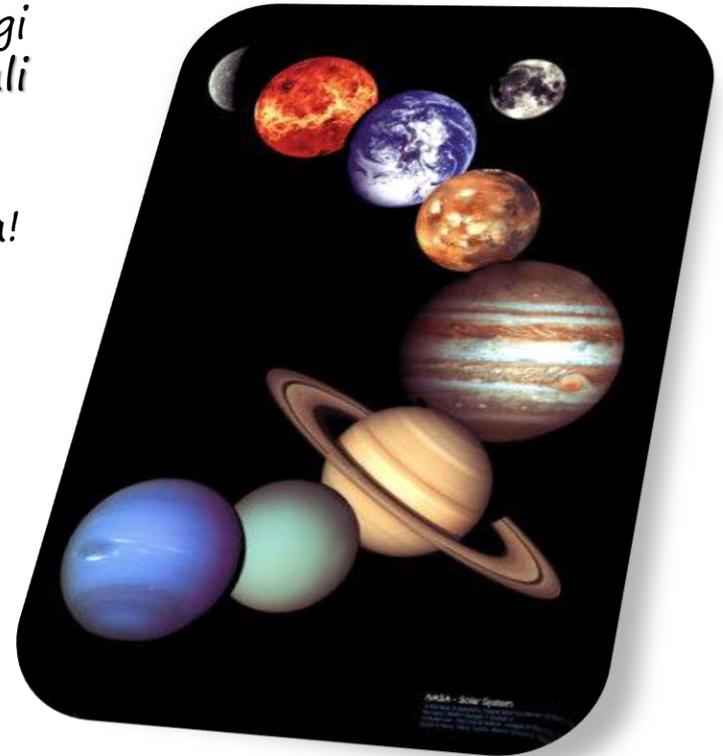
$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$

Dov'è finita l'antimateria?

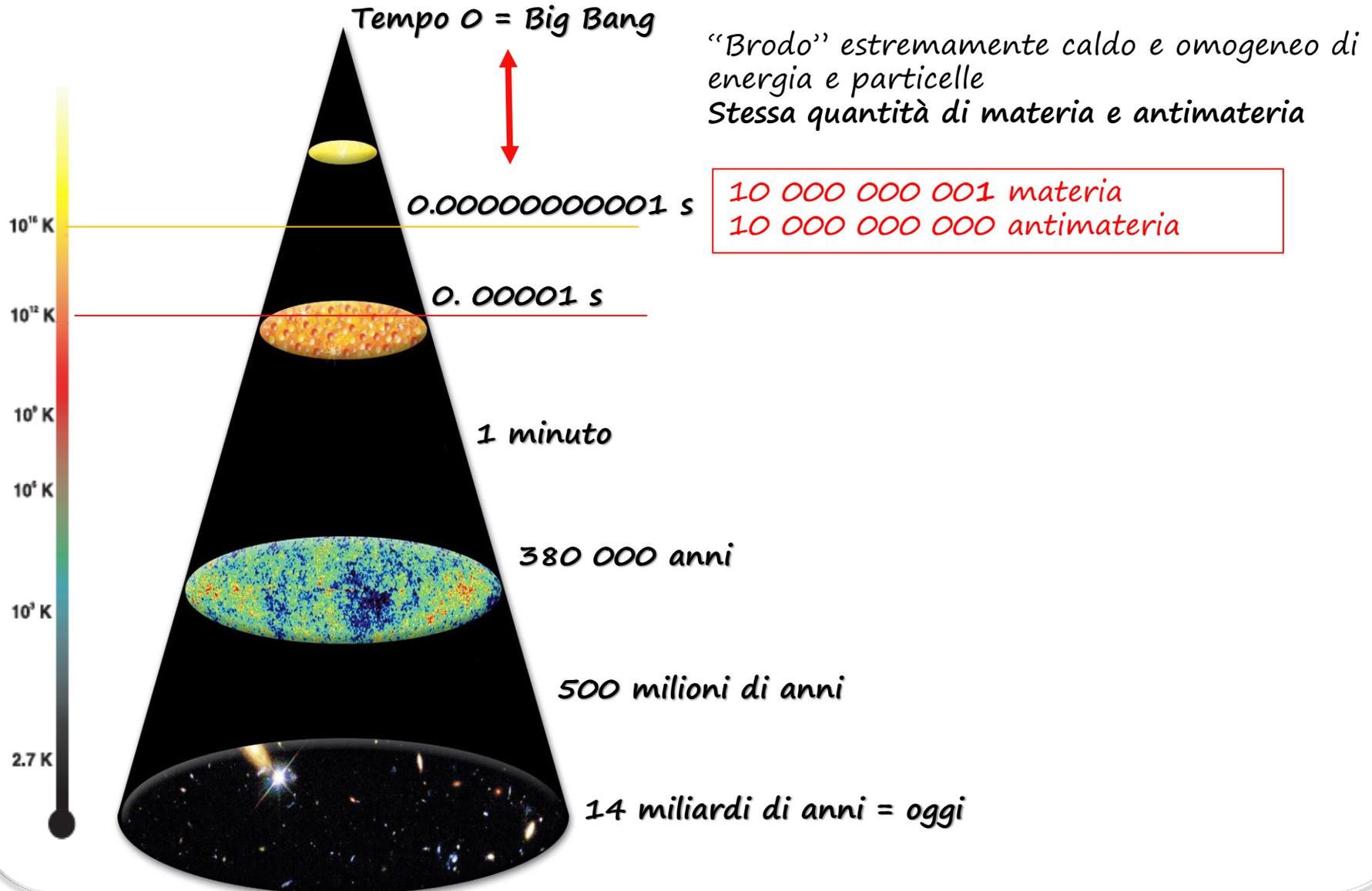
Particelle di materia e antimateria sono sempre create in coppia, in accordo con $E = mc^2$

Applicate su scala cosmica, queste leggi prevederebbero un Universo costituito da uguali quantità di materia e antimateria.

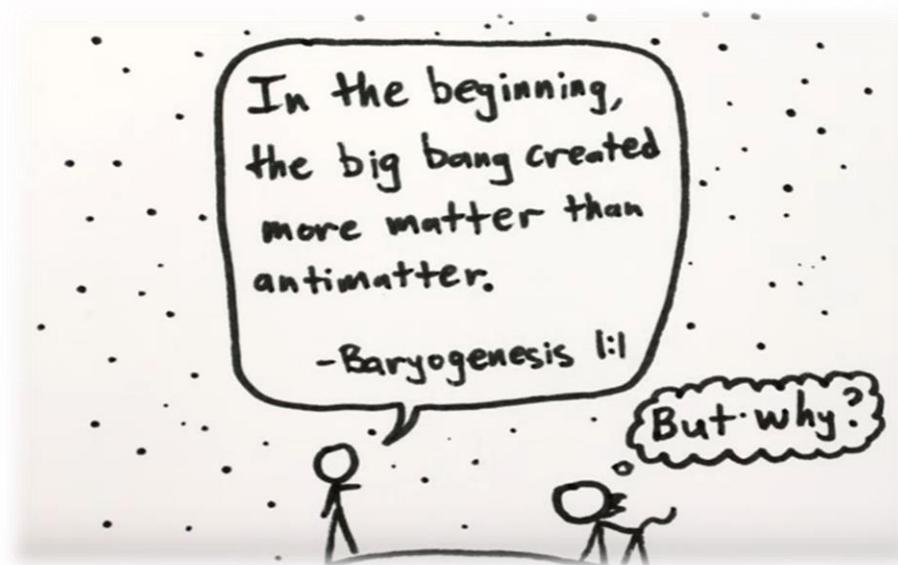
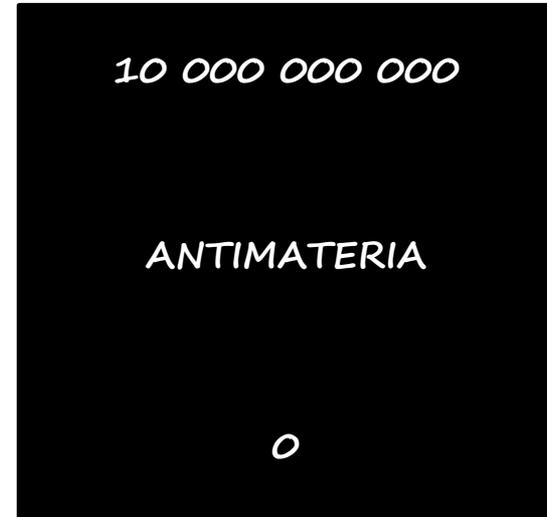
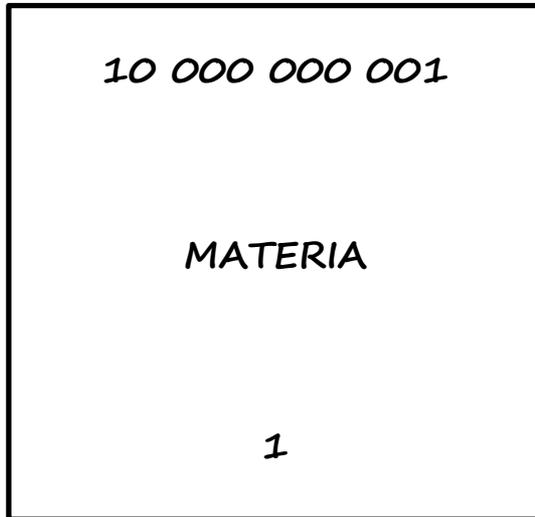
Ma...l'Universo appare solo costituito da materia!
Esistono antistelle, antigalassie e antiuniversi??



Dal Big Bang a oggi



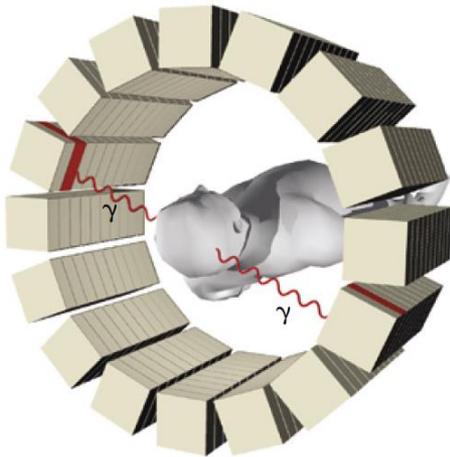
La Grande Annichilazione



Perchè ci interessa l'antimateria?



Ricerca di base



PET scanner

Applicazioni:
Antimateria per la salute
applicata nella tomografia
PET

In generale...

Produzione di
radioisotopi

World Wide Web
(www)

Raggi X

Centrali
nucleari

Ricerca di base
in Fisica delle
Particelle

Adroterapia
(CNAO)

GRID

Radiodatazione

Tomografo PET

<<It doesn't matter how beautiful your theory is, it doesn't matter how smart you are. If it doesn't agree with experiment, it's wrong.>>

R. Feynman

Un problema di dimensioni...

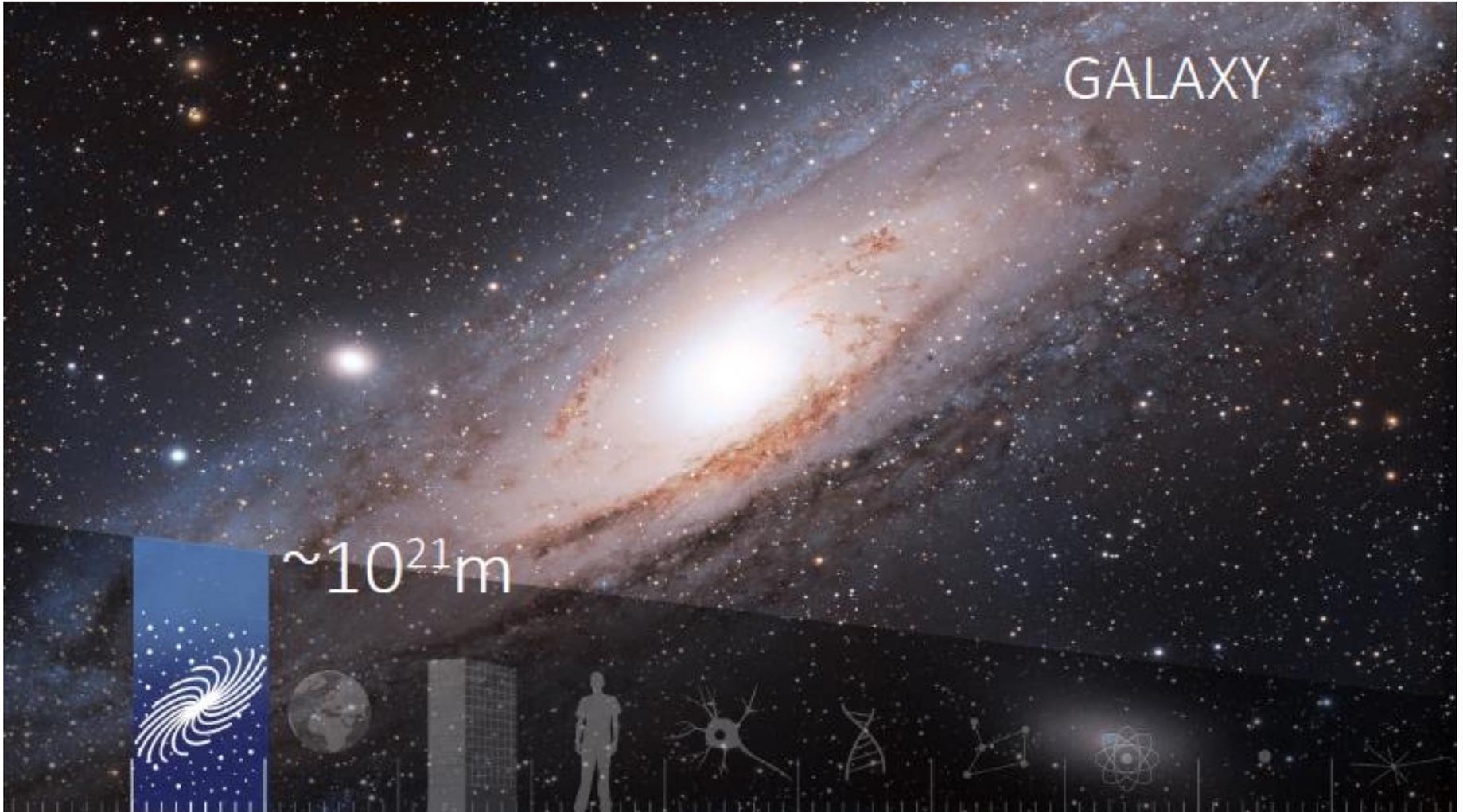
Dal molto grande...

UNIVERSE

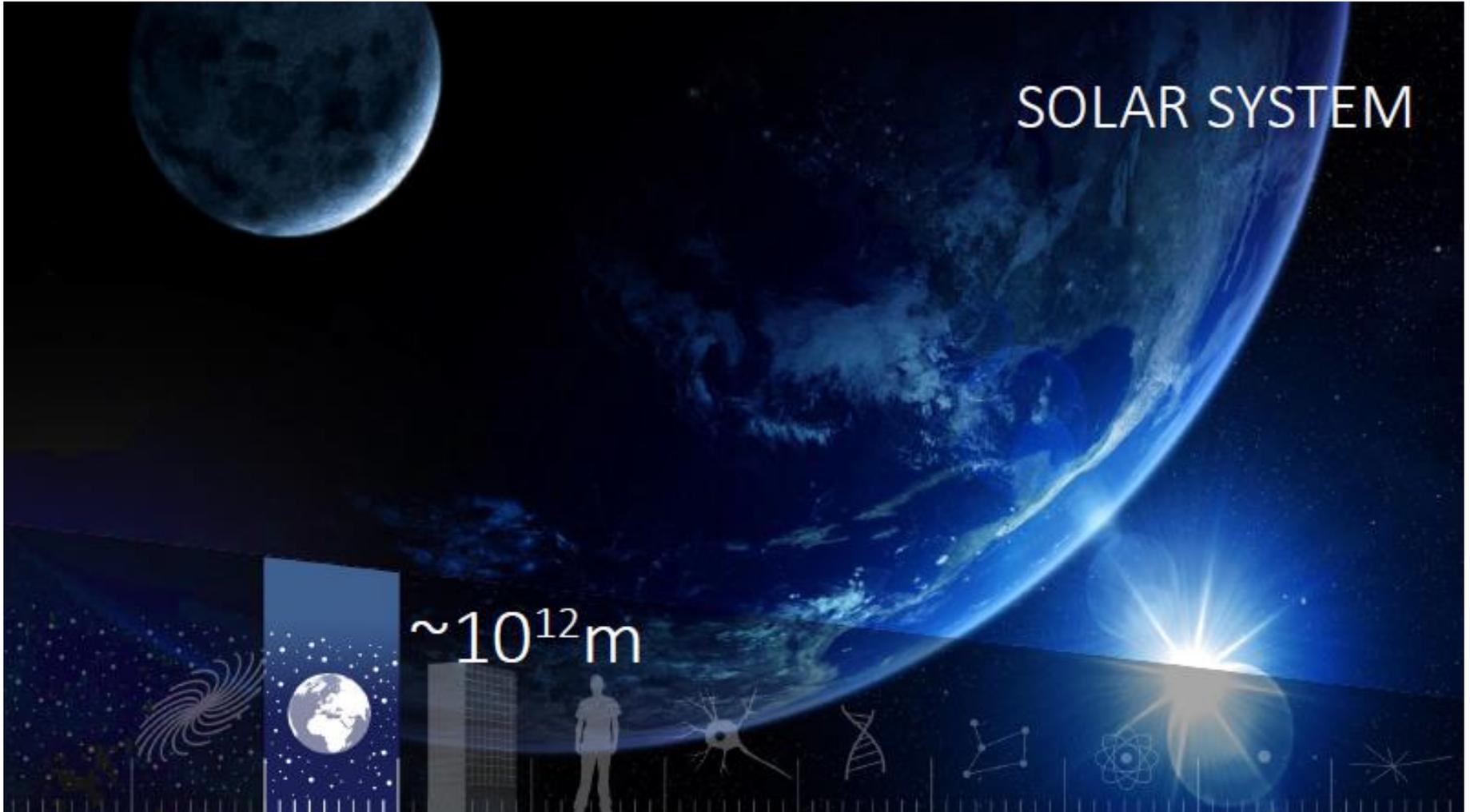
$>10^{26}$ m

© NASA

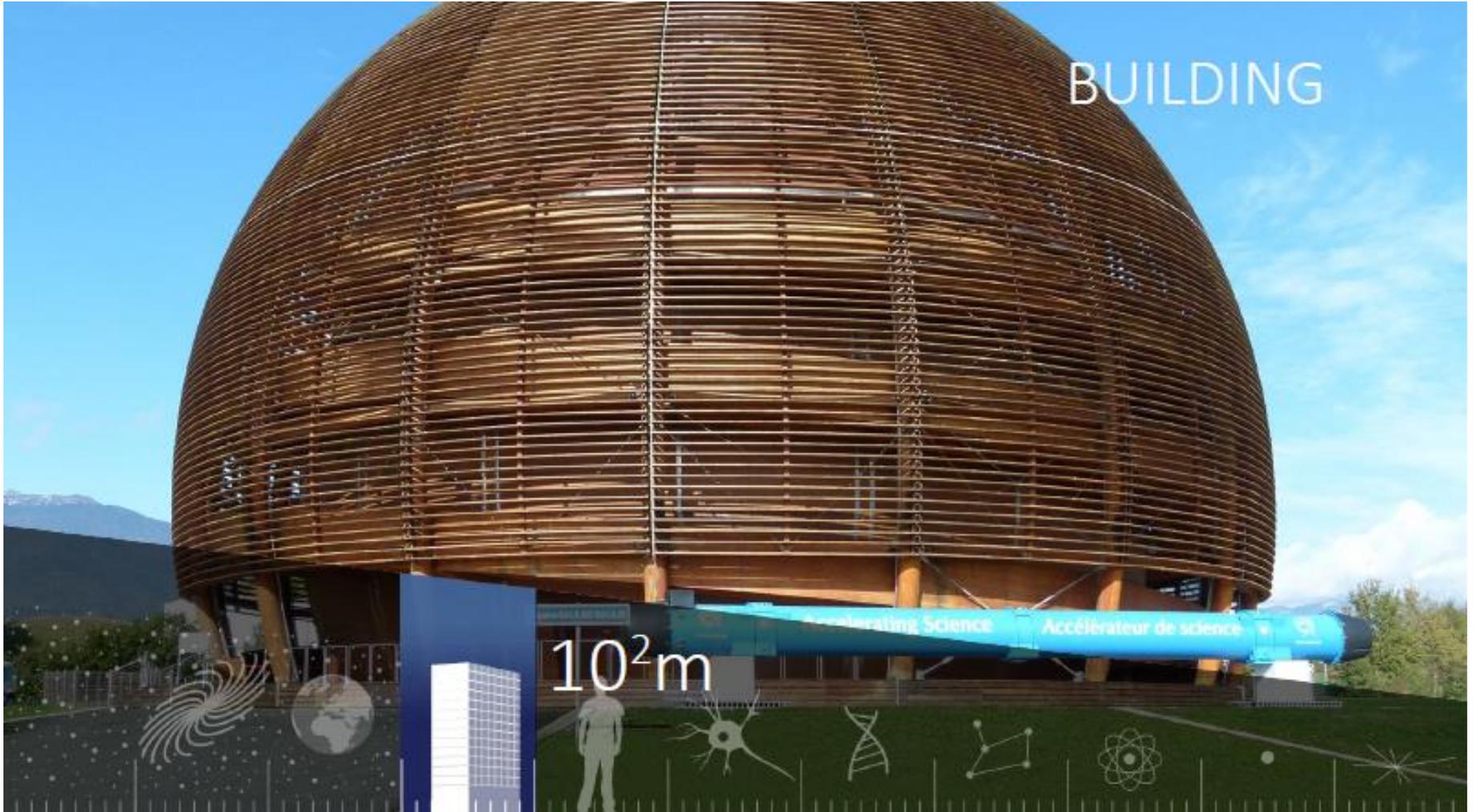
Un problema di dimensioni..



Un problema di dimensioni..



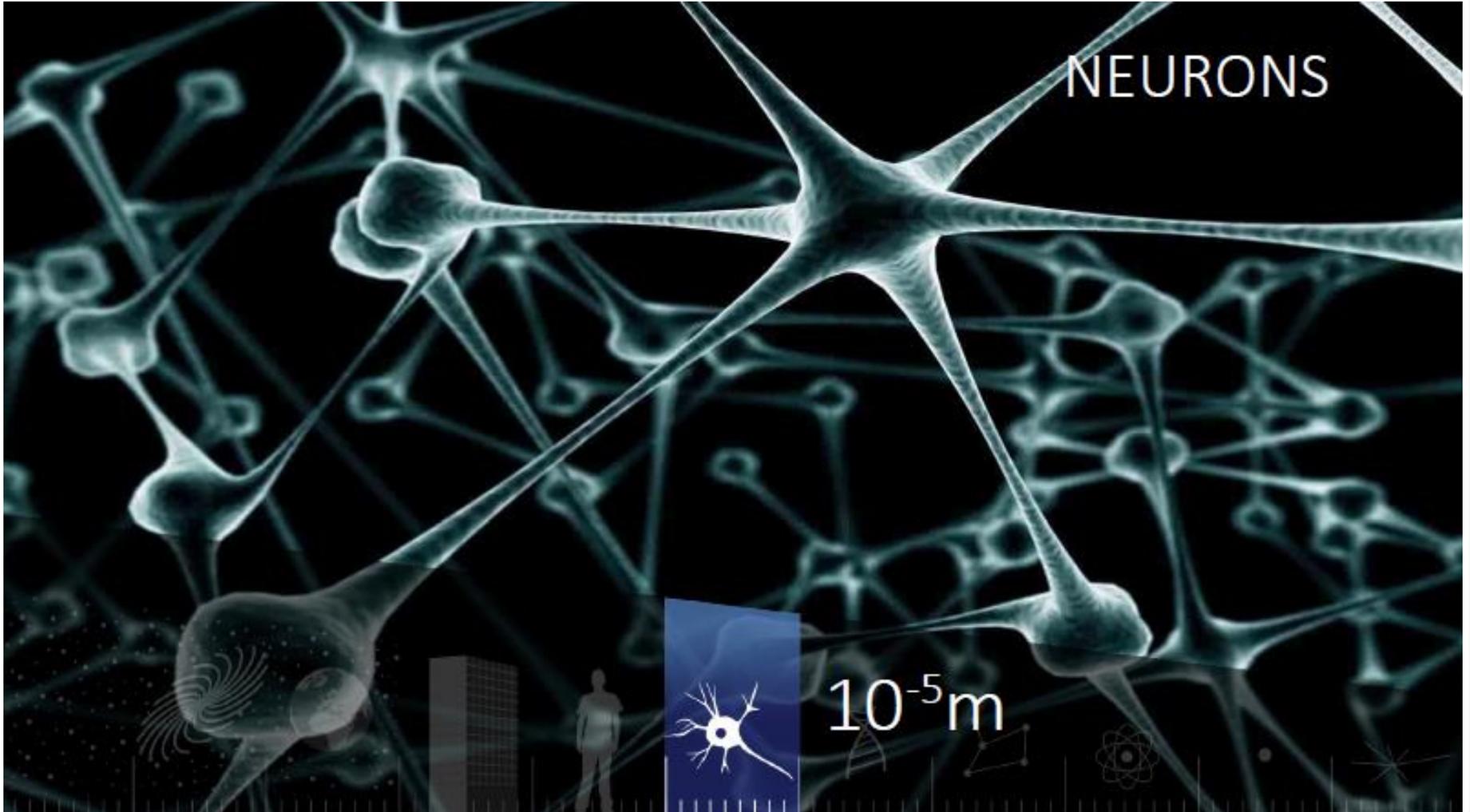
Un problema di dimensioni..



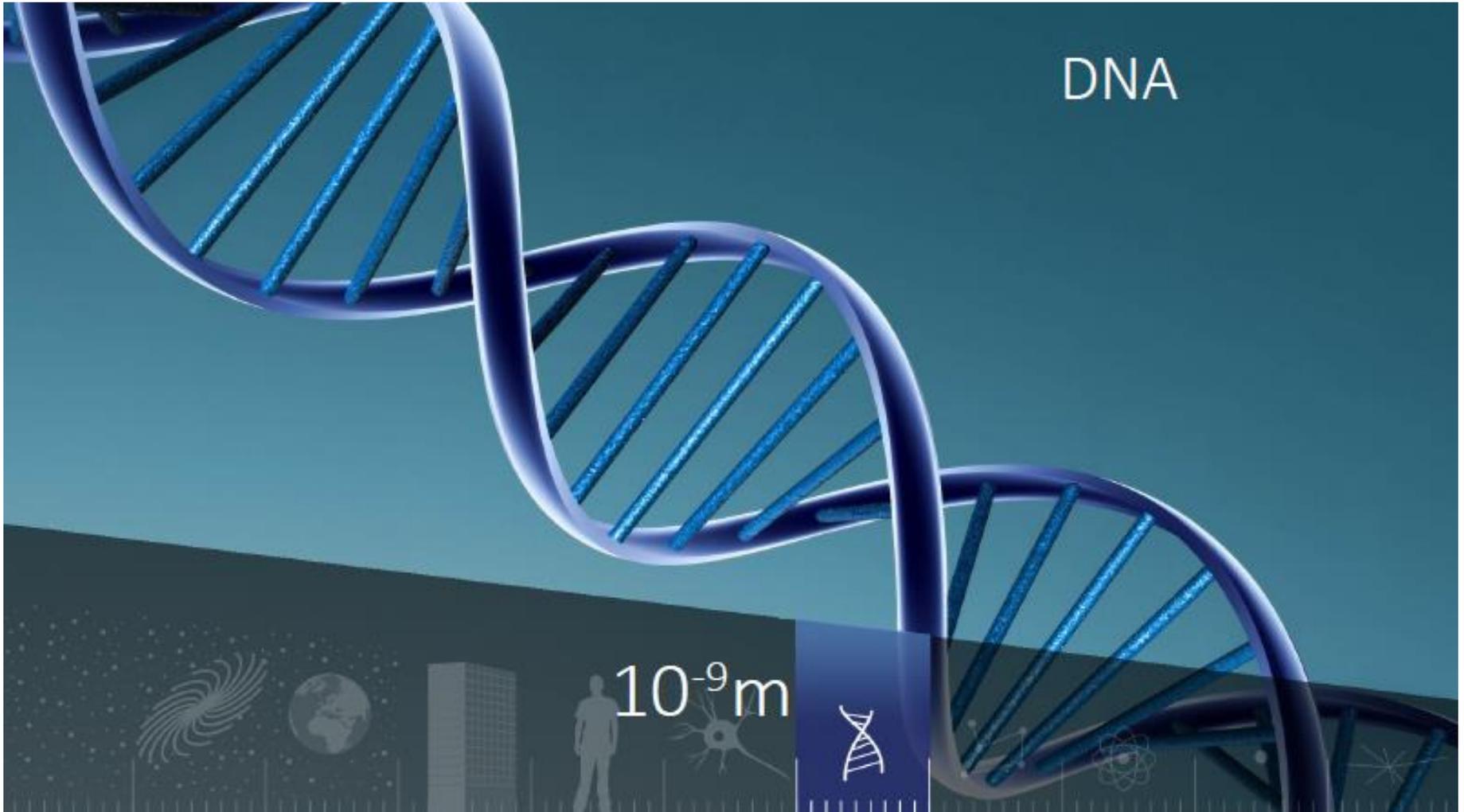
Un problema di dimensioni..



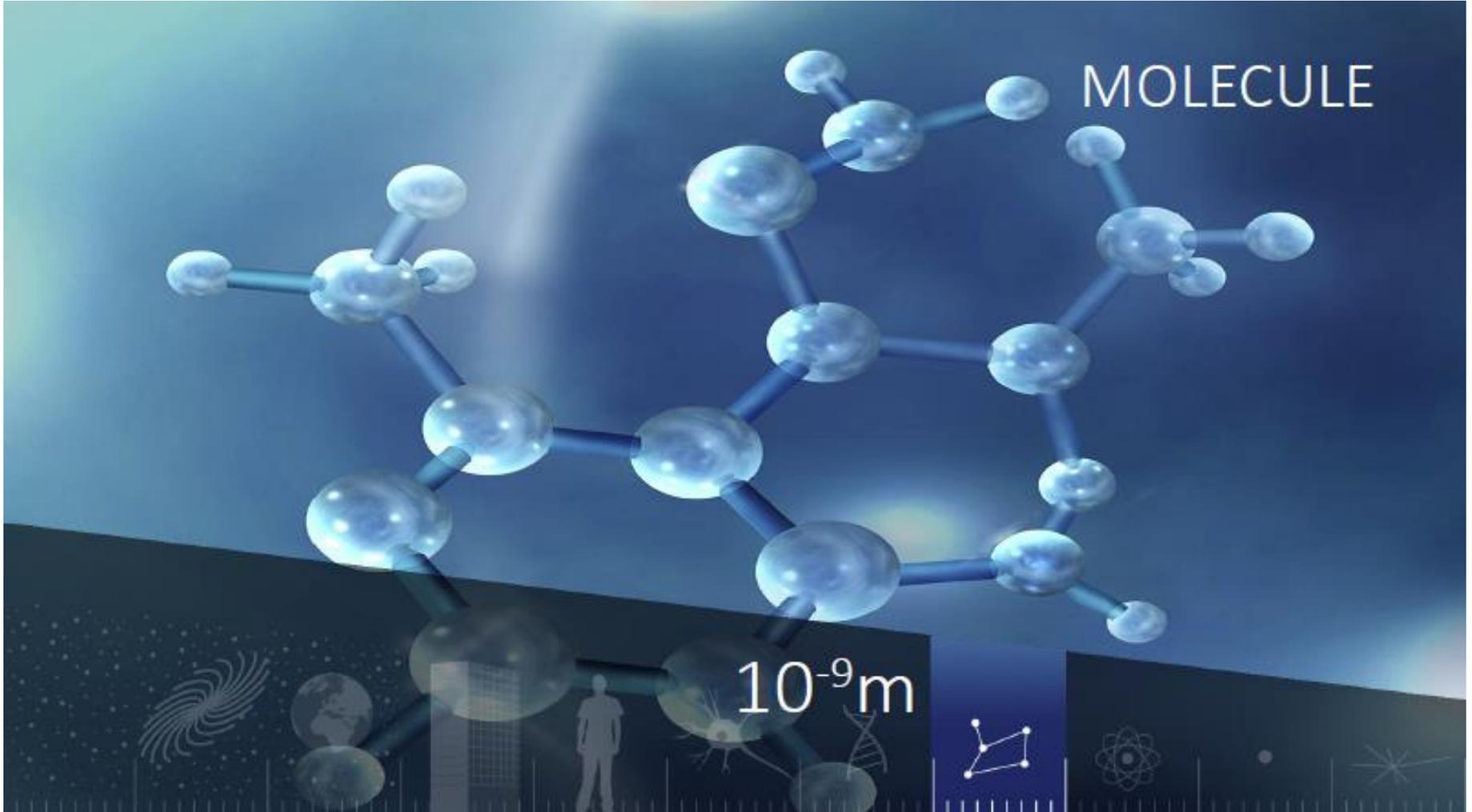
Un problema di dimensioni..



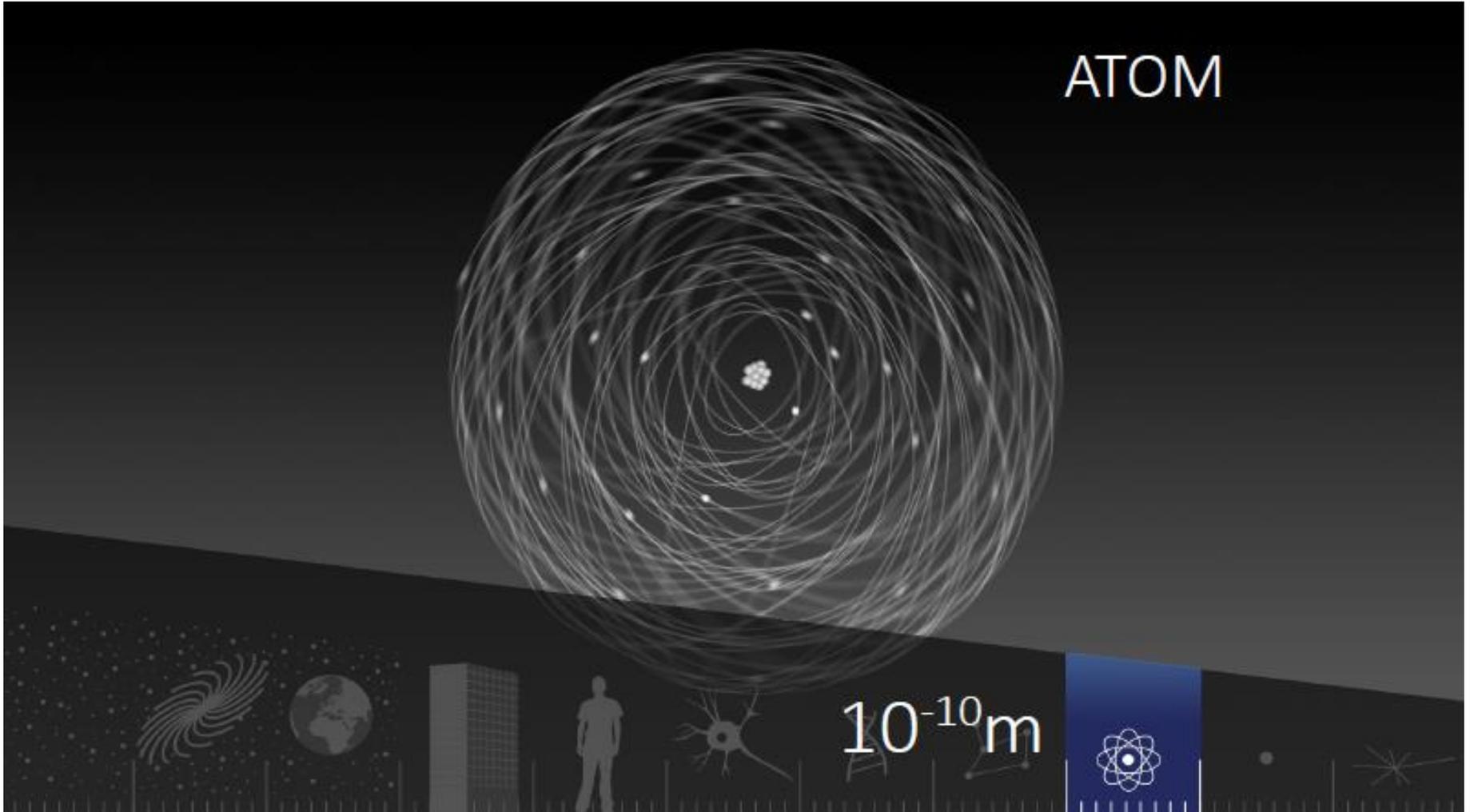
Un problema di dimensioni..



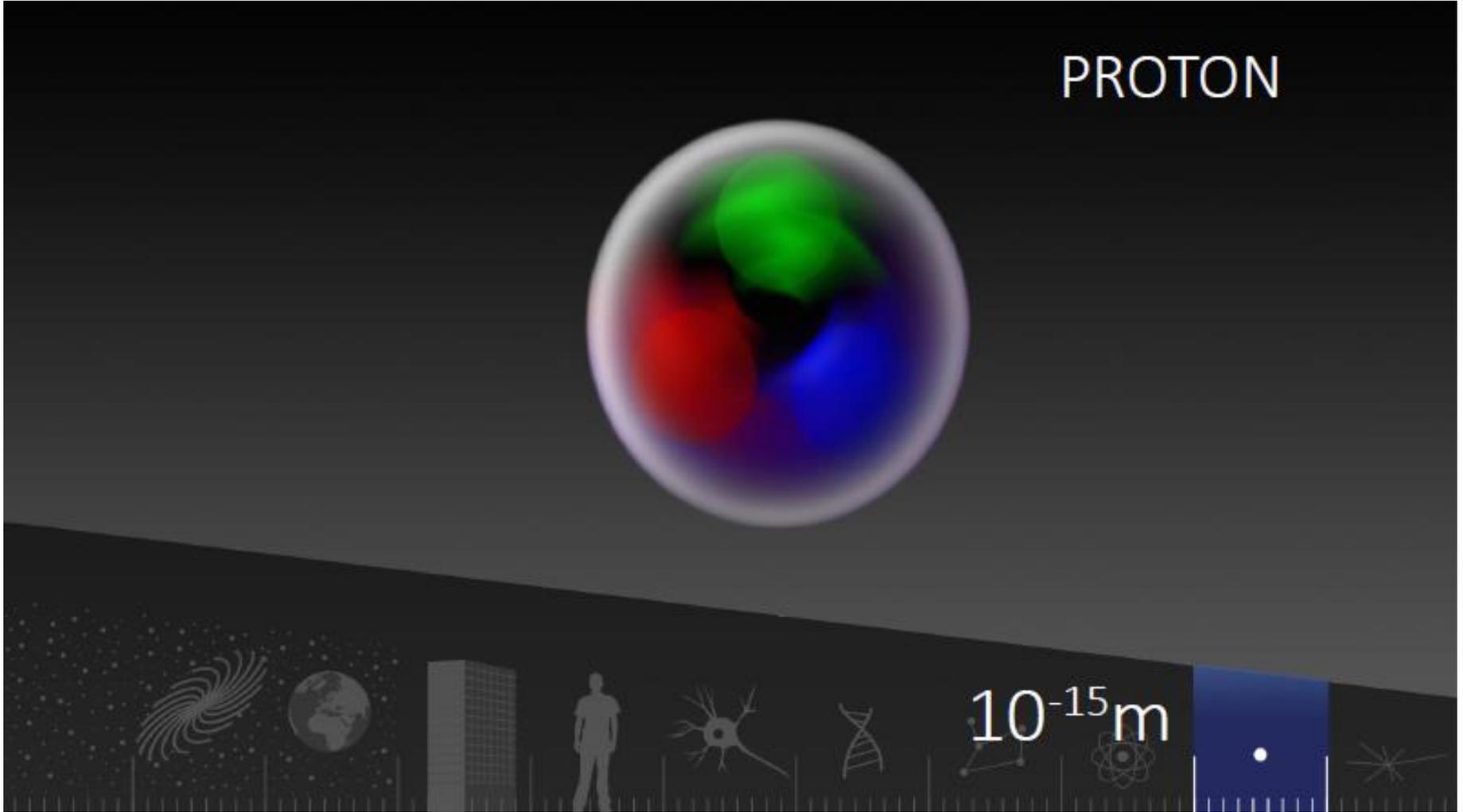
Un problema di dimensioni..



Un problema di dimensioni..



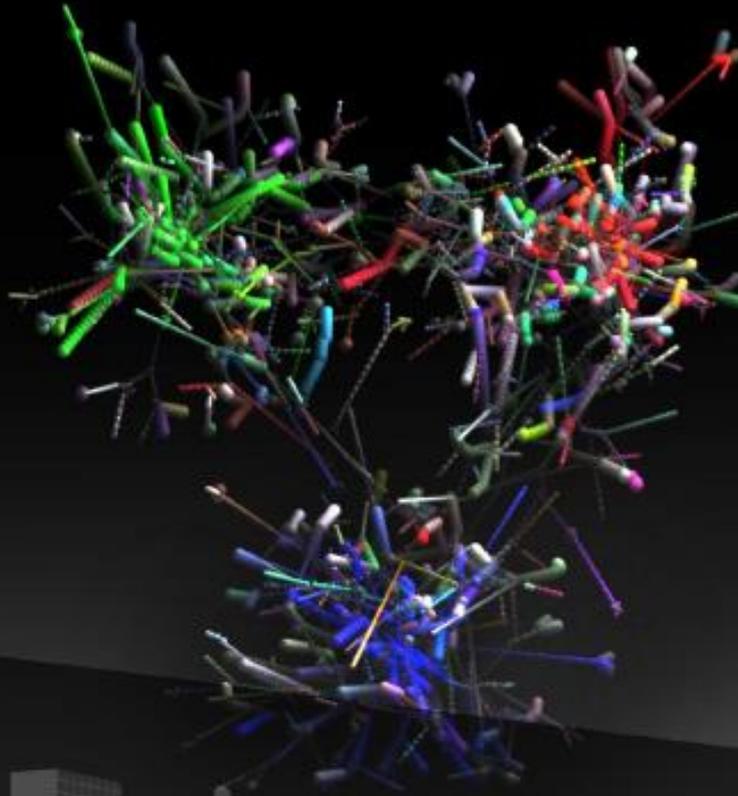
Un problema di dimensioni..



Un problema di dimensioni...

...al molto piccolo

QUARKS

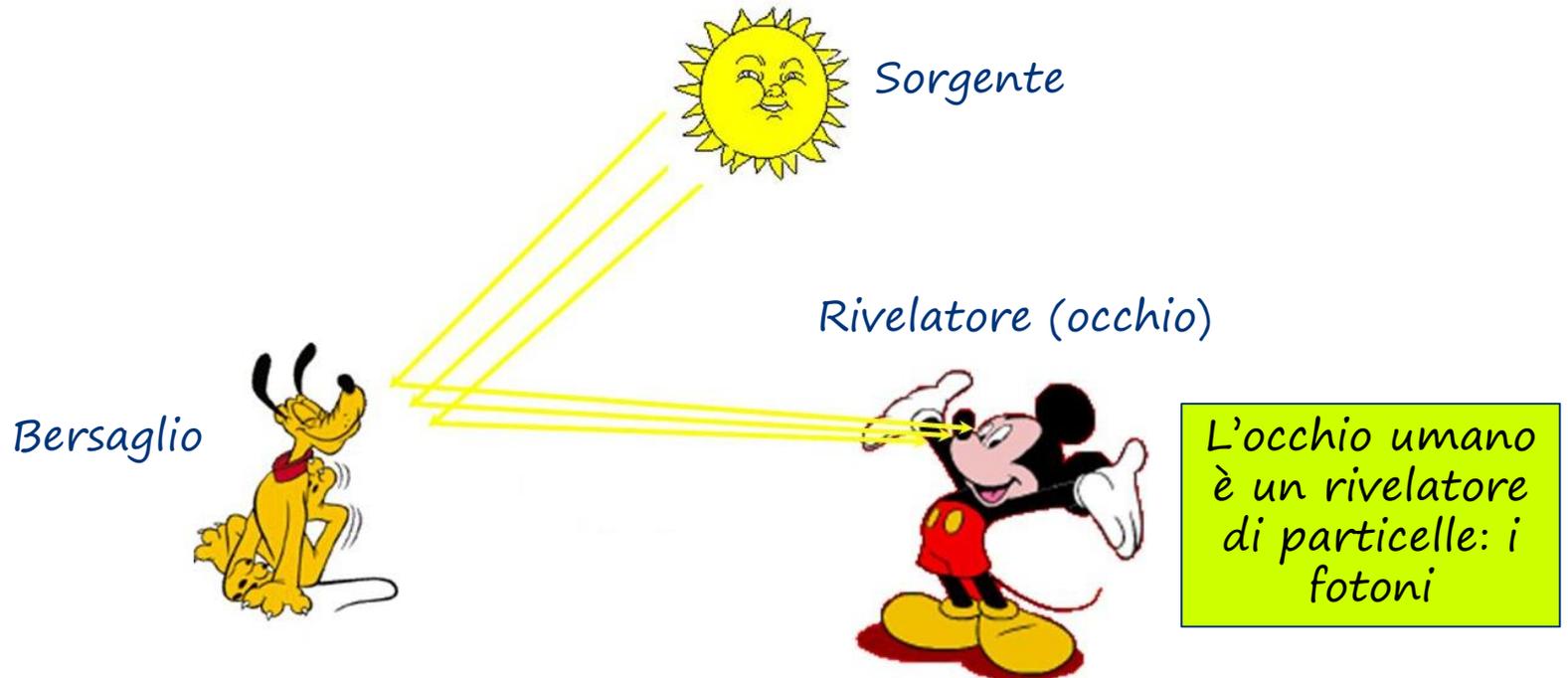


10^{-18}m

I rivelatori

Come possiamo vedere il «molto piccolo»?

- Ci serve un «rivelatore»
- Cos'è un rivelatore?
 - Il rivelatore più familiare: l'occhio

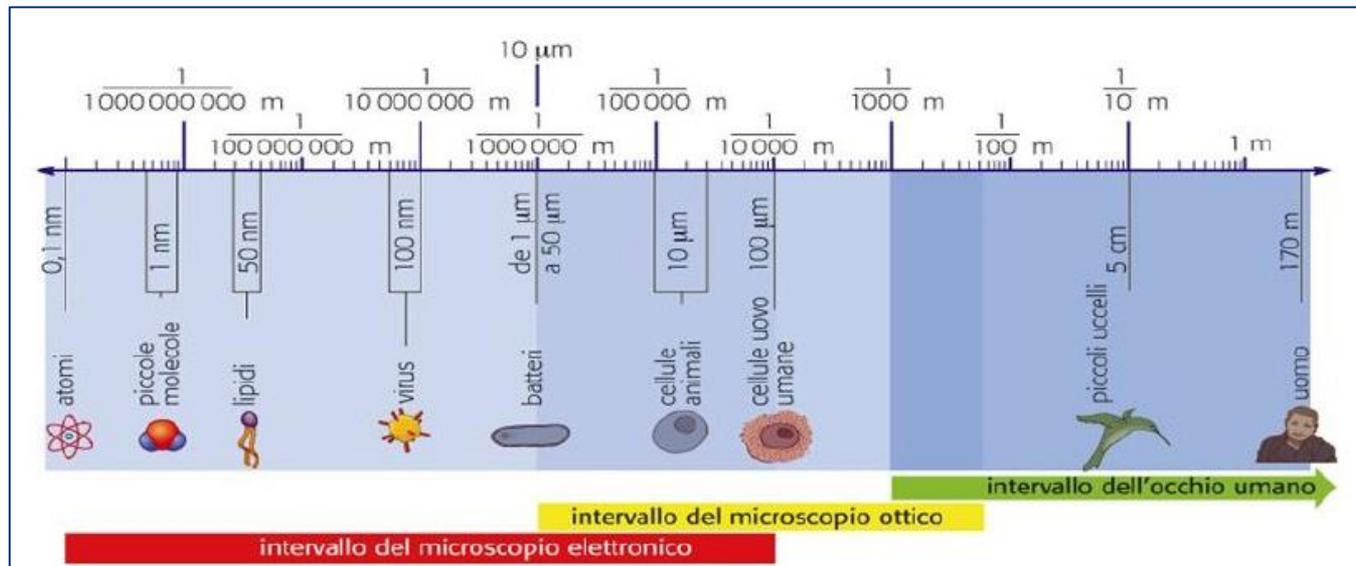


- Ma l'occhio umano riesce a vedere fino a $\sim 10^{-2}$ cm

I rivelatori

Come possiamo vedere il «molto piccolo»?

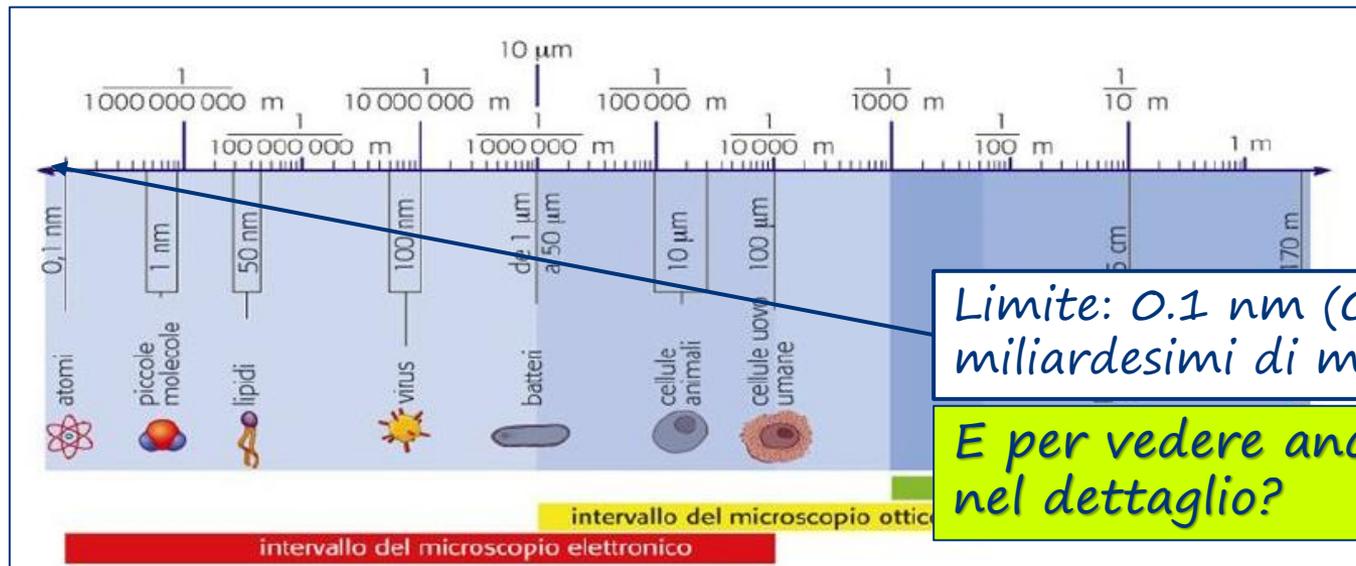
- Ci serve un «rivelatore»
- Cos'è un rivelatore?
 - Il rivelatore più familiare: l'occhio
 - Ma l'occhio umano riesce a vedere fino a $\sim 10^{-2}$ cm
- E per vedere più nel dettaglio?
 - Microscopi (ottici, a scansione elettronica, ...)



I rivelatori

Come possiamo vedere il «molto piccolo»?

- Ci serve un «rivelatore»
- Cos'è un rivelatore?
 - Il rivelatore più familiare: l'occhio
 - Ma l'occhio umano riesce a vedere fino a $\sim 10^{-2}$ cm
- E per vedere più nel dettaglio?
 - Microscopi (ottici, a scansione elettronica, ...)



Limite: 0.1 nm (0.1 miliardesimi di metro).

E per vedere ancora più nel dettaglio?

...e se NON usassimo la luce?

Sorgente



Luce

Osservatore



Oggetto



Come vediamo gli oggetti colpiti dalla luce...

Acceleratore



Rivelatore



Fascio di particelle

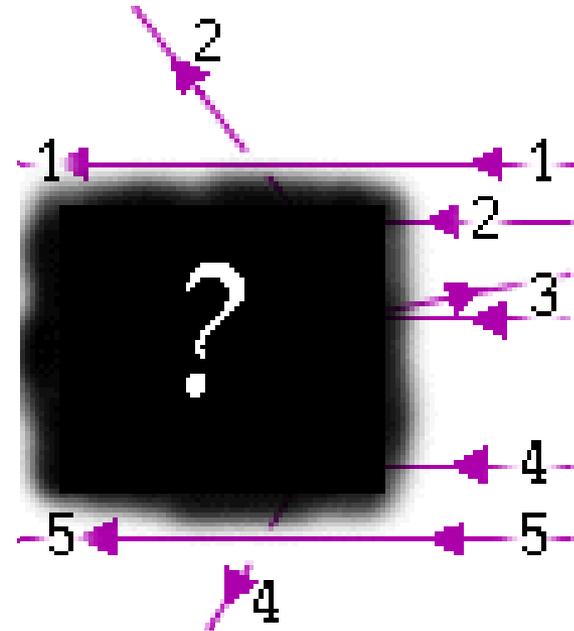
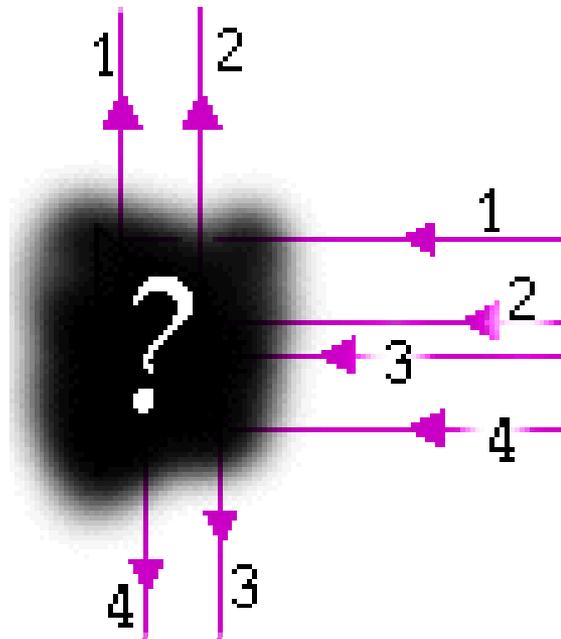


Bersaglio

...allo stesso modo possiamo «vedere» la materia microscopica colpendola con **particelle** prodotte dagli acceleratori e che «rimbalzano» sui rivelatori

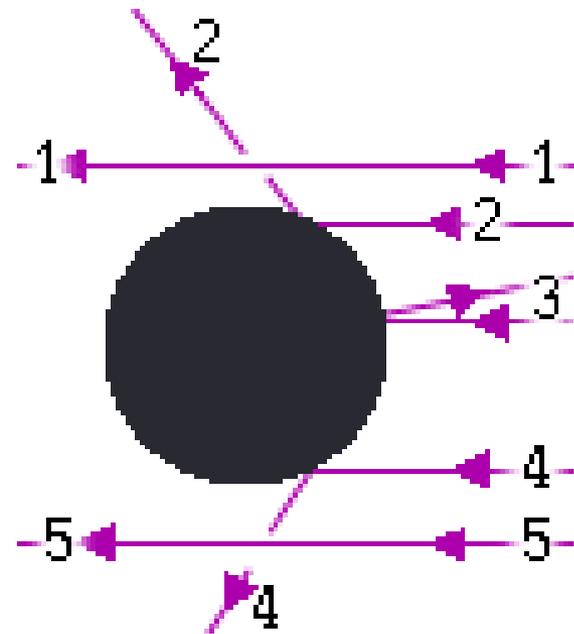
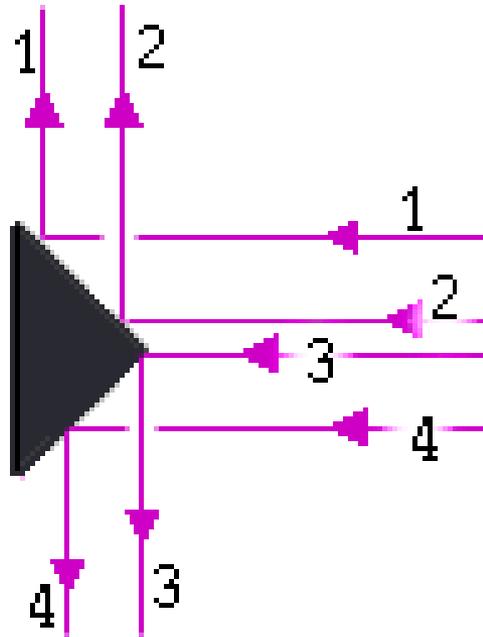
...e se NON usassimo la luce?

In particolare, dal modo in cui le particelle «rimbalzano» sui rivelatori, possiamo capire molte caratteristiche del bersaglio!



...e se NON usassimo la luce?

In particolare, dal modo in cui le particelle «rimbalzano» sui rivelatori, possiamo capire molte caratteristiche del bersaglio!



Un pizzico di meccanica quantistica

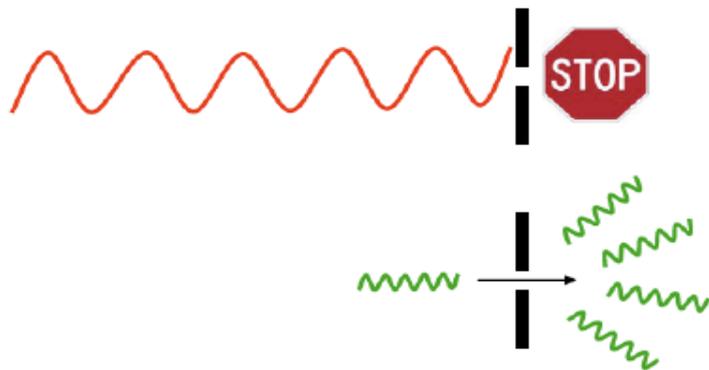
- Una particella si comporta anche come un'onda (cioè come la luce): la sua lunghezza d'onda è tanto più piccola quanto più è grande la sua energia!

$$E = h\nu$$

$$\nu = E/h$$

$$\lambda = c/\nu = hc/E$$

- Lunghezza d'onda piccola = capacità di «infilarsi» in spazi piccoli = possibilità di esplorare cose piccole!



Più è microscopico il mondo che vogliamo esplorare, più deve essere grande l'energia delle particelle che usiamo per osservarlo

Sorgenti di particelle

Sorgenti radioattive

Nuclei pesanti (= molti protoni e neutroni) che hanno una struttura instabile ed emettono particelle



- ✓ **Pro:** energia ben definita ma non sufficientemente alta (alcuni MeV)
- x **Contro:** difficoltà a ottenere un «fascio» di particelle collimate

Raggi cosmici

Particelle ad altissima energia ($10^9 \div 10^{10}$ GeV) che provengono dallo spazio

- 
- ✓ **Pro:** energia molto superiore a quelle ottenibili con qualsiasi macchina umana
 - x **Contro:** intensità (= numero di particelle che arrivano nell'unità di tempo) troppo bassa

Come possiamo unire alta intensità, fasci di particelle ed energia ben determinata?

→ **Acceleratori di particelle!**

Come funziona un acceleratore?

2° principio di Newton: l'accelerazione è conseguenza di una forza

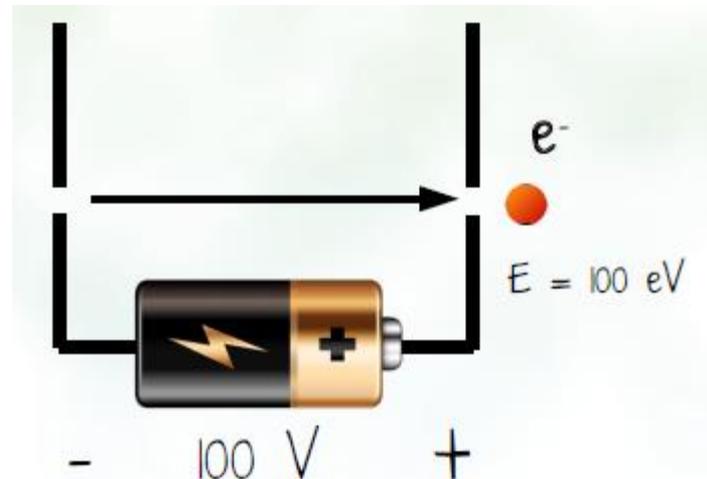
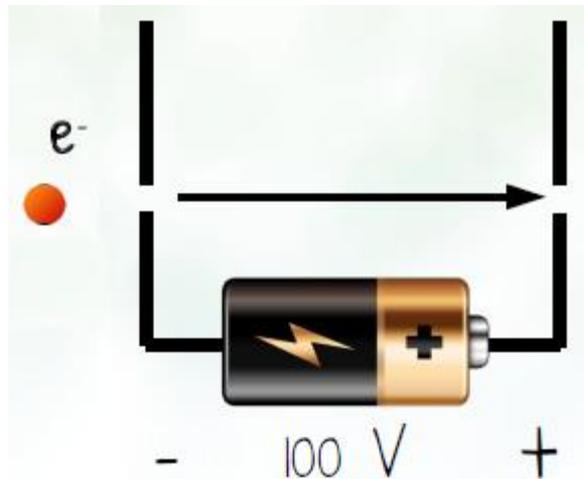
$$F = ma$$

Energia cinetica (= di movimento) di una particella: $E = \frac{1}{2} mv^2$

«accelerare» una particella = darle energia

Come possiamo dare energia a una particella?

I nuclei atomici e molte particelle subnucleari posseggono una carica elettrica → possiamo accelerarle facendole passare attraverso un campo elettrico!



Come si muovono le particelle?

La forza di Lorentz descrive il moto di una particella in un acceleratore

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

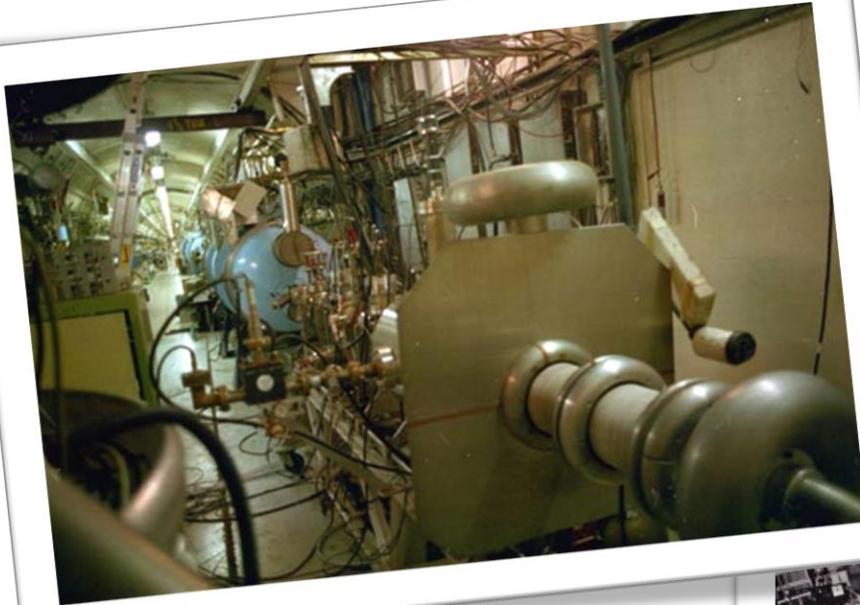
\vec{p} = impulso
 q = carica
 \vec{E} = campo elettrico
 \vec{B} = campo magnetico

Accelerazione

Curvatura e
foccheggiamento



Diversi tipi di acceleratori



Lineare

Stanford Linear
Accelerator Center
(SLAC)

Circolare

ADONE (grande AdA, Anello di
Accumulazione)



Acceleratore circolare

✓ Pro:

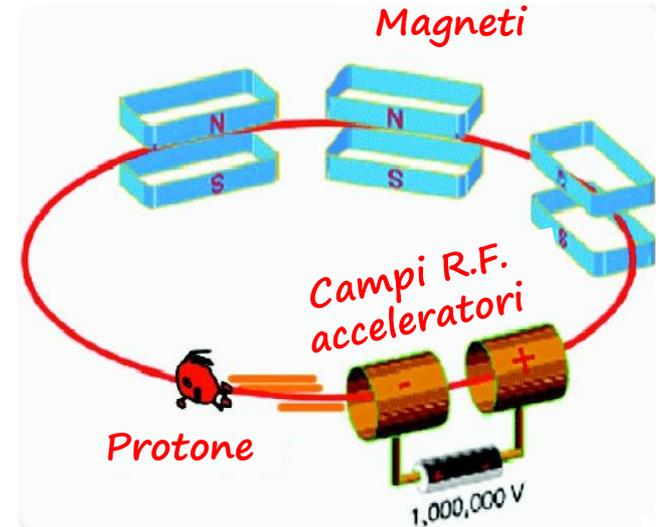
- ✓ Le particelle attraversano più volte la stessa cavità
- ✓ Ad ogni giro, i pacchetti di particelle acquistano energia grazie al campo elettrico accelerante (a radiofrequenza)

x Contro:

- x Perdita di energia a causa della radiazione di sincrotrone emessa nei magneti curvanti
- Una particella carica che viaggia lungo una traiettoria curva perde energia

$$U = \frac{4}{3} \pi \frac{r_0}{(mc^2)^3} \frac{E^4}{\rho}$$

ρ = raggio di curvatura della traiettoria



Più il raggio è grande,
minore è l'energia persa

LARGE Hadron Collider

Bersaglio fisso vs collider

Energia disponibile per la collisione E_F



E_F proporzionale a $\sqrt{E_{\text{protone}}}$

$$E_F = 2xE_{\text{protone}}$$

L'energia nel centro di massa prodotta in esperimenti al collider è maggiore!



Large Hadron **COLLIDER**

Large Hadron Collider



Large Hadron Collider

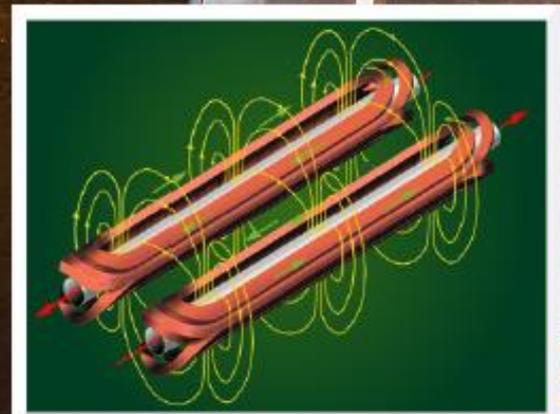
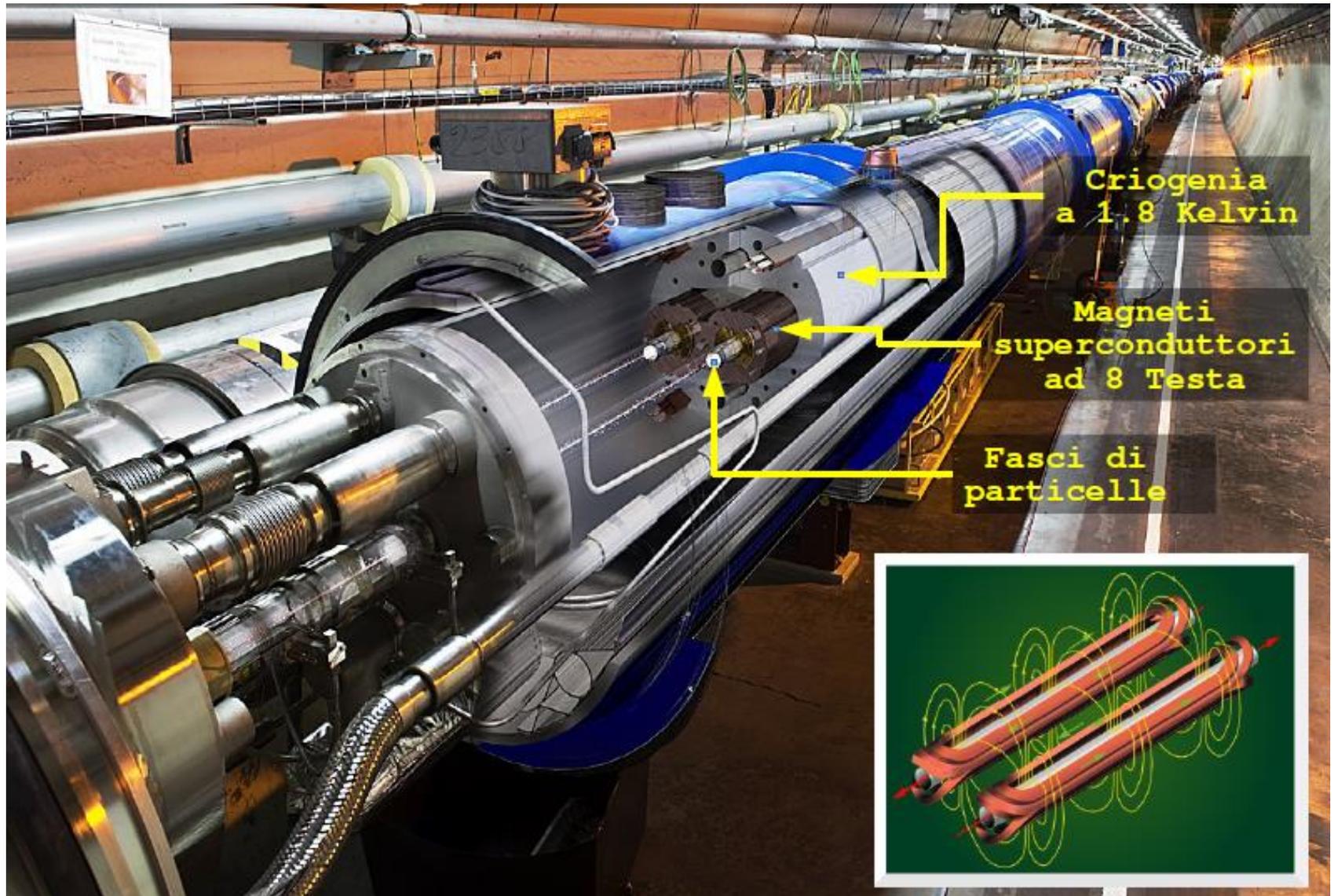


LHC in numeri

È il più grande e potente acceleratore del mondo!!

- Entrato in funzione il 10 settembre 2008
- Circonferenza di 27 km
- 1232 dipoli, più circa 600 altri magneti più piccoli (18 km / 27 km di magneti superconduttori)
 - $B = 8.3$ Tesla
 - Temperatura = 1.9 K (120 tonnellate di L-He)
- $E_{\text{fascio}} = 7 \text{ TeV (design)} \sim 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} \sim 5000$ miliardi di batterie da 1.5 V
- $E_{\text{fascio}} = 7 \text{ TeV} \sim 7500 \cdot m_{\text{protone}} \cdot c^2$
- $E = mc^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \rightarrow v = 0.999\,999\,999\,c$
- $N_{\text{protoni}} \sim 10^{11}$ protoni/pacchetto \times 2800 pacchetti/fascio \times 2 fasci $\sim 10^{14}$ protoni
- Energia immagazzinata $\sim 350 \text{ MJ} \sim 100 \text{ kg di TNT} \sim$ treno ETR ad alta velocità

Large Hadron Collider

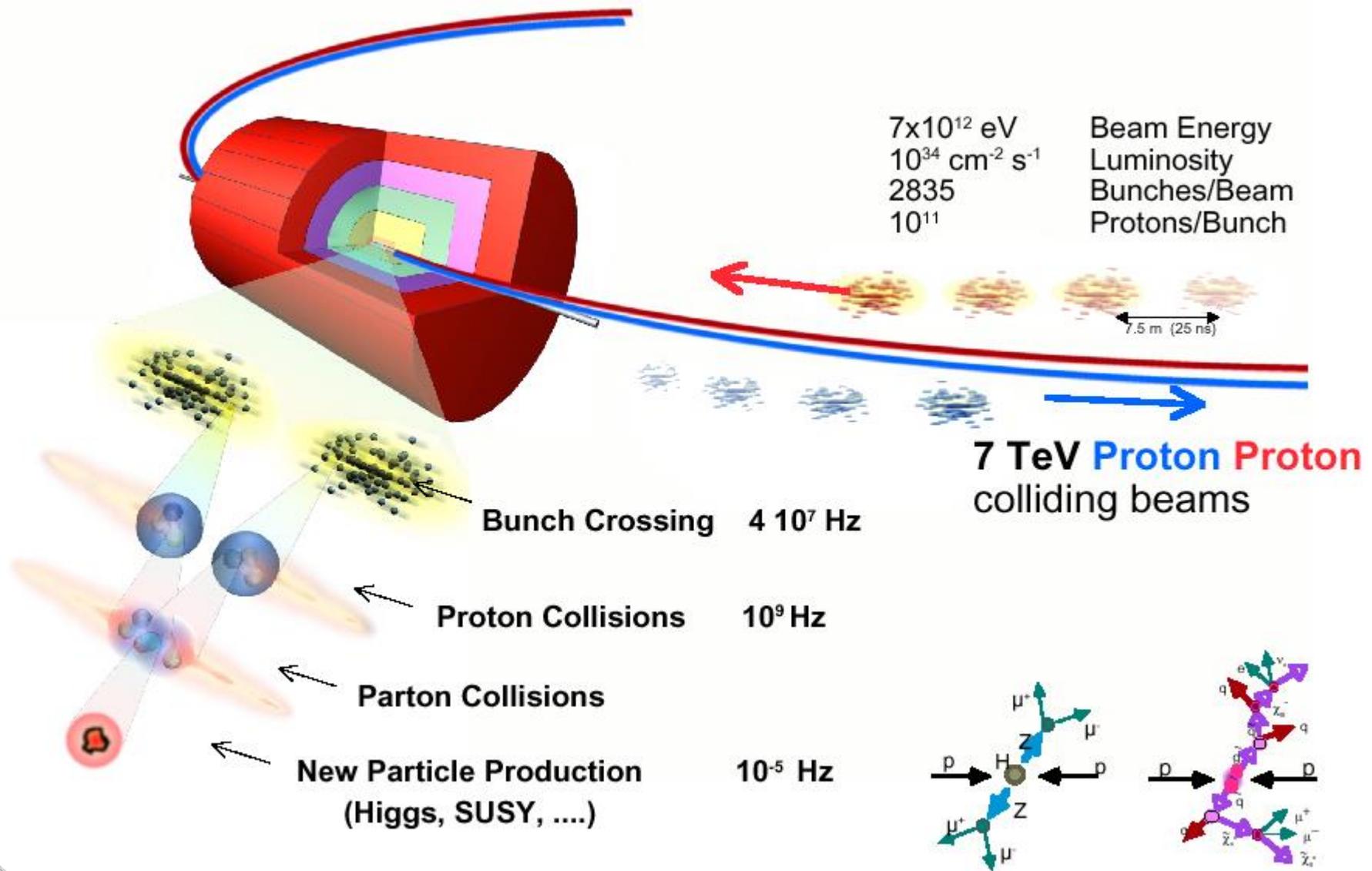


LHC in numeri

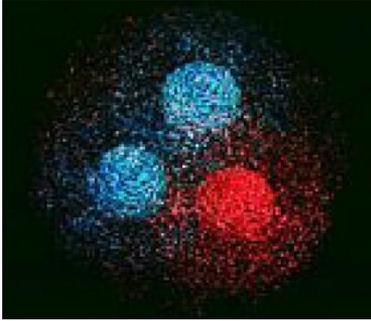
È il più grande e potente acceleratore del mondo!!

- Entrato in funzione il 10 settembre 2008
- Circonferenza di 27 km
- 1232 dipoli, più circa 600 altri magneti più piccoli (18 km / 27 km di magneti superconduttori)
 - $B = 8.3 \text{ T}$
 - $T = 1.9 \text{ K}$ (120 tonnellate di L-He)
- $E_{\text{fascio}} = 7 \text{ TeV (design)} \sim 7 \cdot 10^{12} \text{ eV} \sim 5000 \text{ miliardi di batterie da } 1.5 \text{ V}$
- $E_{\text{fascio}} = 7 \text{ TeV} \sim 7500 \cdot m_{\text{protone}} \cdot c^2$
- $E = mc^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \rightarrow v = 0.999\,999\,99 \text{ c}$
- $N_{\text{protoni}} \sim 10^{11} \text{ protoni/pacchetto} \times 2800 \text{ pacchetti/fascio} \times 2 \text{ fasci} \sim 10^{14} \text{ protoni}$
- Energia immagazzinata $\sim 350 \text{ MJ} \sim 100 \text{ kg di TNT} \sim \text{treno ETR ad alta velocità}$

Come funziona LHC?



Energia a LHC



Un protone al Large Hadron Collider ha un'energia di $E_{\text{protone}} = 7 \text{ TeV}$

7 TeV sono tanti? *Dipende!*

Un'ape ($M_{\text{ape}} = 1 \text{ g}$) che si muove alla velocità
 $v_{\text{ape}} = 1 \text{ m/s}$ ha un'energia
 $E_{\text{ape}} = 10^{-3} \text{ J} = 6250 \text{ TeV}$



L'energia dell'ape in volo è molto maggiore di quella di un protone di LHC!

Densità di energia

Non conta solo l'energia, ma in quanto spazio viene concentrata (densità)!!!

Alta densità di energia → produzione di nuove particelle

Protoni di LHC: $7.4 \cdot 10^{46} \text{ J/m}^3 = 4.6 \cdot 10^{53} \text{ TeV/m}^3$

*Biliardo: Densità di energia delle singole palle:
circa $400 \text{ J/m}^3 = 2.3 \cdot 10^9 \text{ TeV/m}^3$*

Prima e dopo l'urto, stessi oggetti ma velocità e direzione sono ridistribuiti

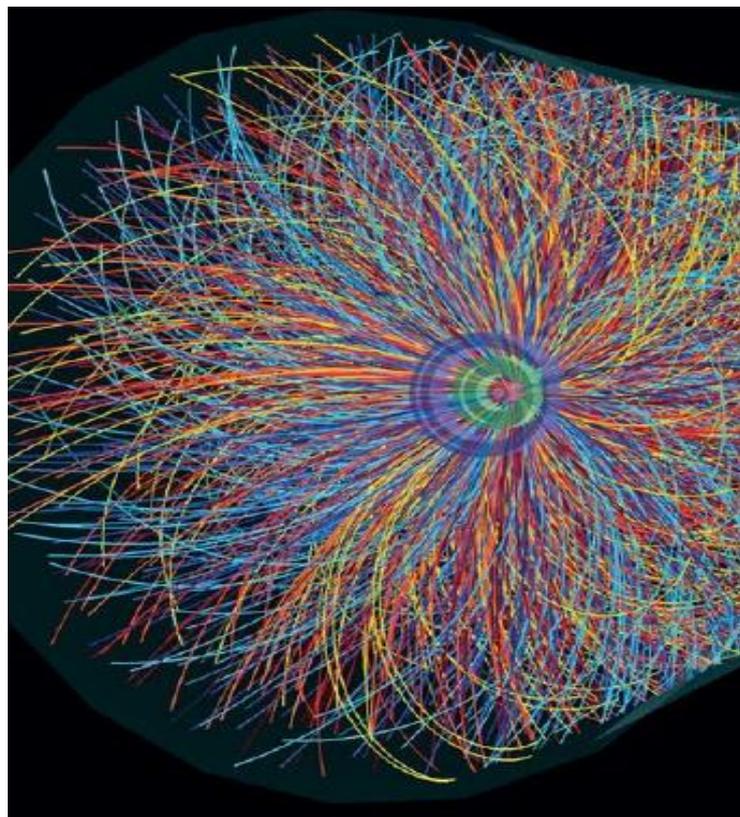
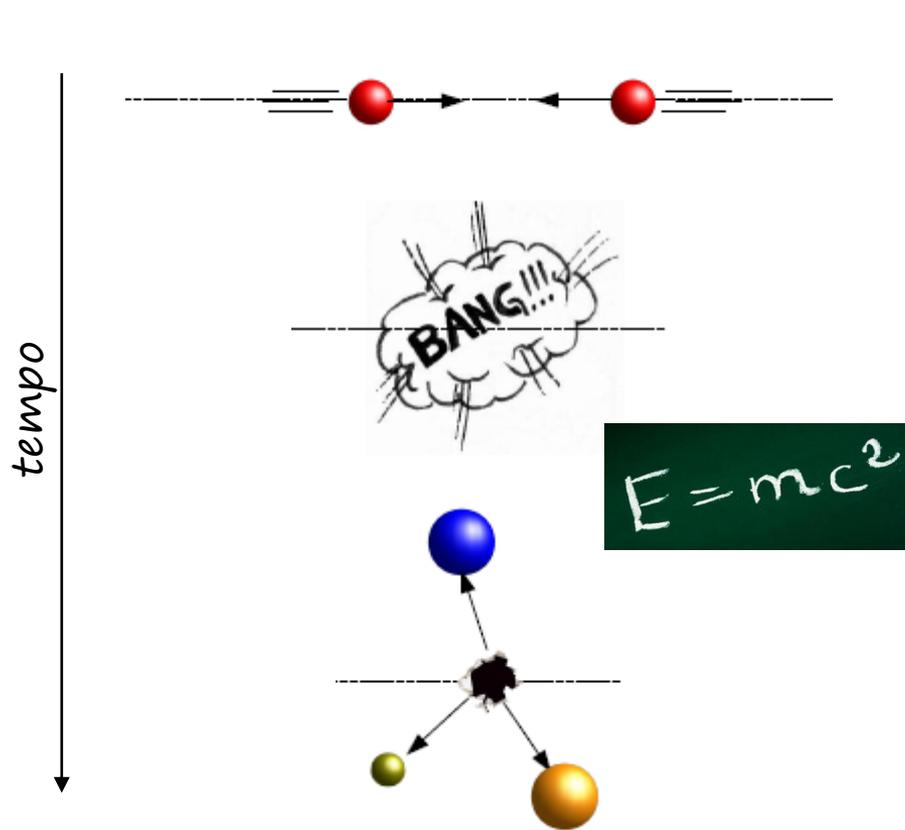


*Incidente: Densità di energia di un'auto (1500 kg)
a 80 km/h:
circa $7500 \text{ J/m}^3 = 2.9 \cdot 10^{10} \text{ TeV/m}^3$*

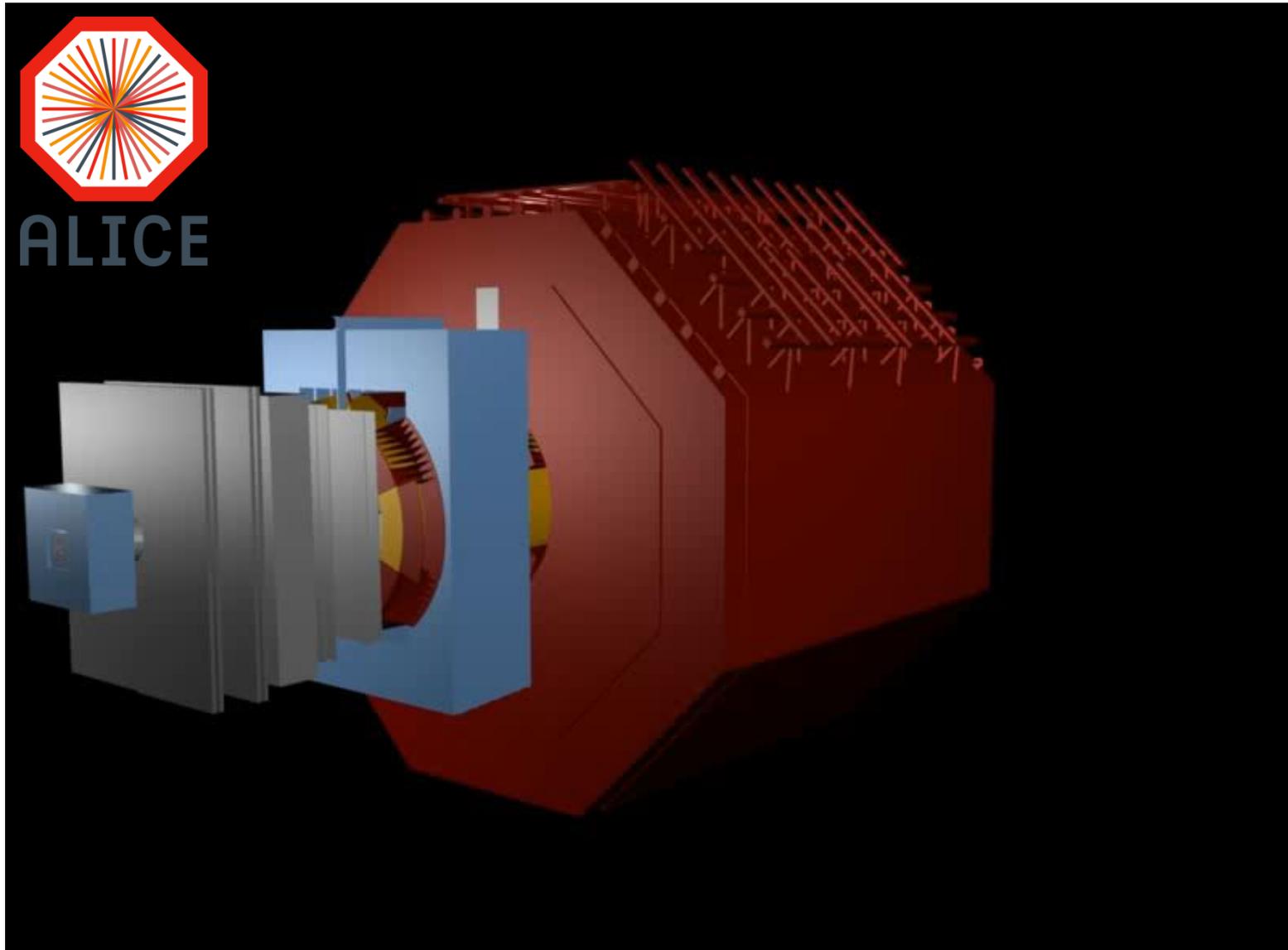
Gli oggetti si distruggono nell'urto, ma l'unione dei pezzi continua a dare le auto originarie!

Nuove particelle!

Nelle collisioni ad alte energia, prima e dopo l'urto cambia l'identità delle particelle:
quelle prodotte possono essere molto diverse da quelle che si scontrano!



Nuove particelle!



Che particelle si producono?

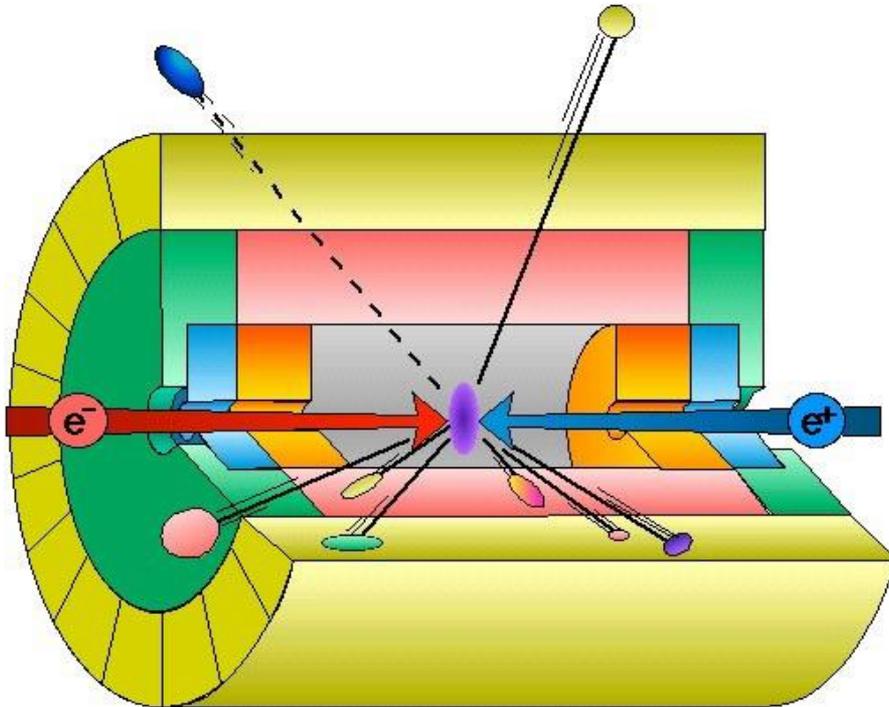
Dipende dall'energia delle particelle che si scontrano:
più alta è l'energia di collisione, più particelle e di più alta
massa possono essere prodotte

La maggior parte delle particelle elementari sono «instabili», cioè dopo un certo periodo di tempo si disgregano spontaneamente in particelle più leggere («decadono»)

Dal punto di vista sperimentale, si definiscono:

- **Particelle «stabili»:**
vivono abbastanza a lungo da poter essere rivelate
- **Particelle «instabili»:**
decadono prima di interagire col rivelatore, ma possono essere ricostruite a partire dalle particelle figlie stabili

E ora?!



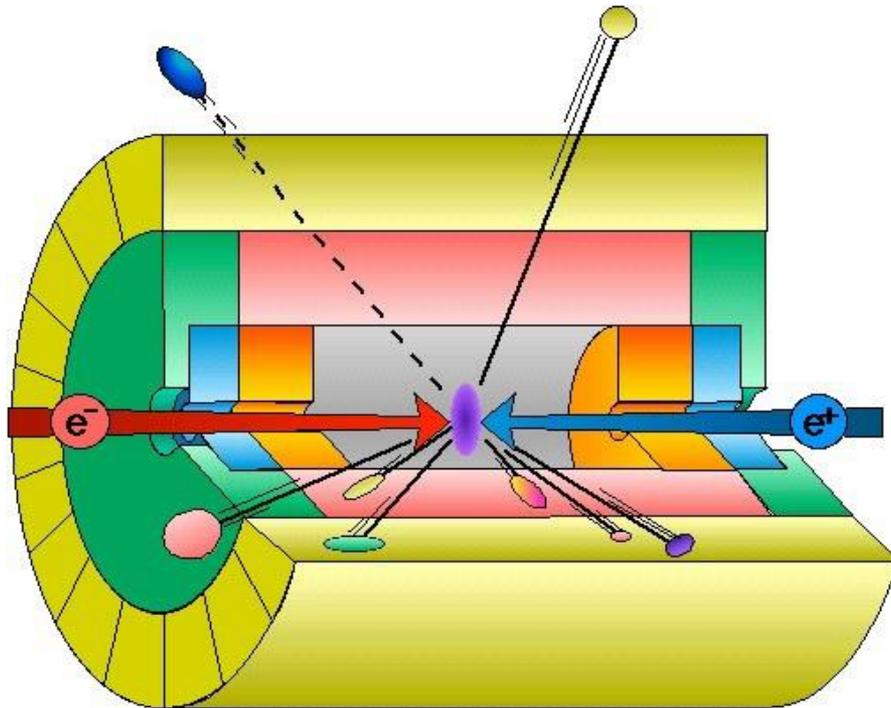
Cosa ci interessa misurare:

- Posizione e direzione del moto
- Carica elettrica
- Energia
- Impulso
- Massa
- Tempi di vita
- ...

di **(tutte)** le particelle create nella collisione



E ora?!



Cosa ci interessa misurare:

- Posizione e direzione del moto
- Carica elettrica
- Energia
- Impulso
- Massa
- Tempi di vita
- ...

di **(tutte)** le particelle create nella collisione

Combinando diverse informazioni misurate, è possibile identificare (quasi) tutte le particelle!

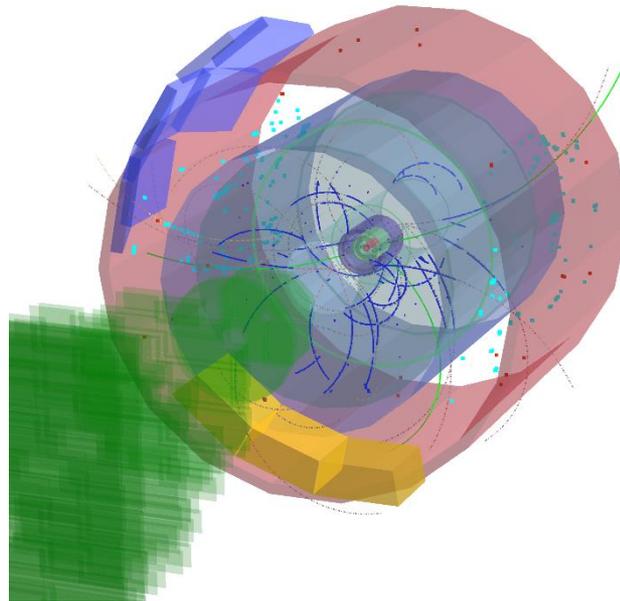


Alla ricerca di tracce



Rivelatori di particelle

Nella fisica sperimentale, un rivelatore di particelle o rivelatore di radiazione è uno strumento usato per rivelare, tracciare e identificare particelle

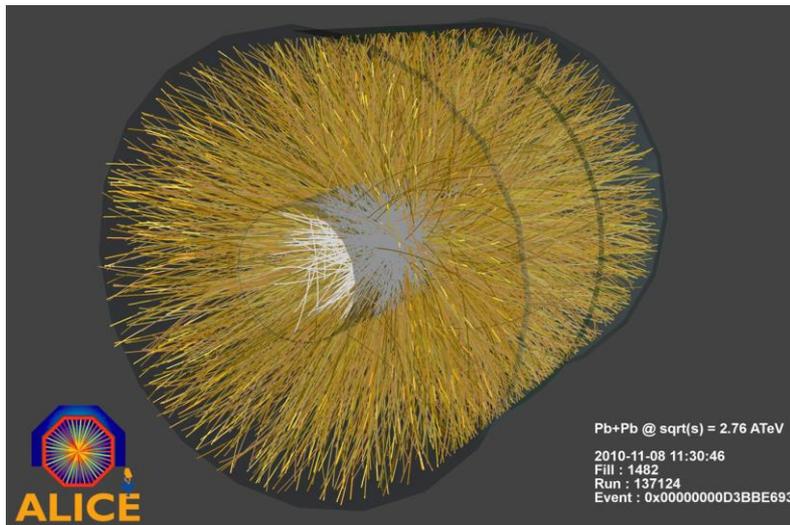
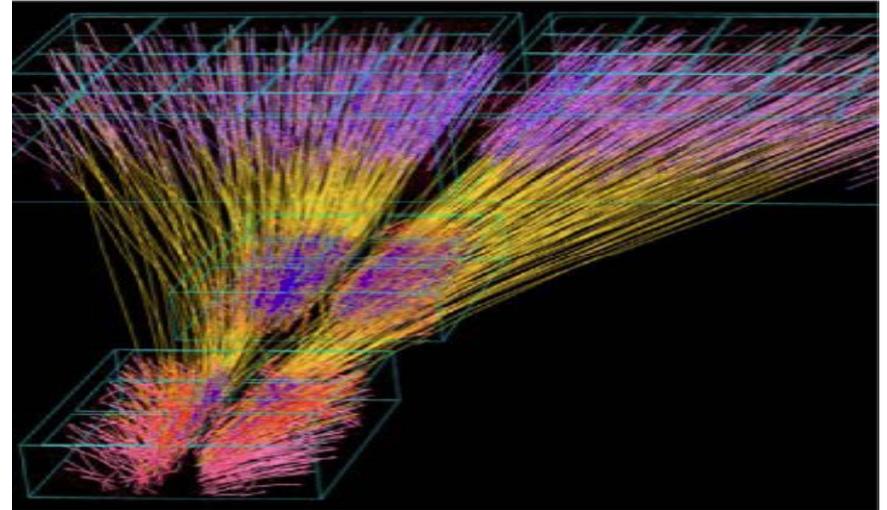


I rivelatori di particelle sono strumenti che producono un **segnale osservabile** quando vengono colpiti da una particella. Sono solitamente costituiti da un **elemento attivo** (con cui interagisce la radiazione) e da un **sistema di lettura** (che forma il segnale e lo invia all'acquisizione dati)

Rivelatori presso gli acceleratori

Molto spesso, negli esperimenti di fisica delle particelle, **non basta un solo rivelatore con un solo tipo di misura**: serve il maggior numero possibile di informazioni su cosa è successo durante la collisione delle particelle!

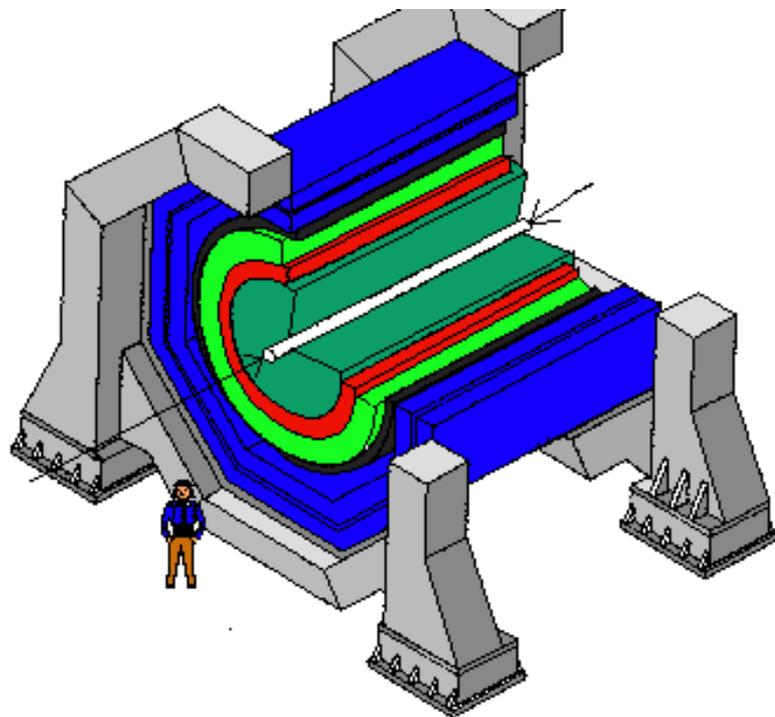
Negli esperimenti a bersaglio fisso, il proiettile «attraversa» il bersaglio, e tutti i prodotti della reazione vanno in avanti (rispetto al bersaglio): posso posizionare i rivelatori in avanti



Nei collider, le particelle possono andare da tutte le parti!

Servono rivelatori «a 4π », cioè che coprano tutto l'angolo solido attorno al punto di collisione

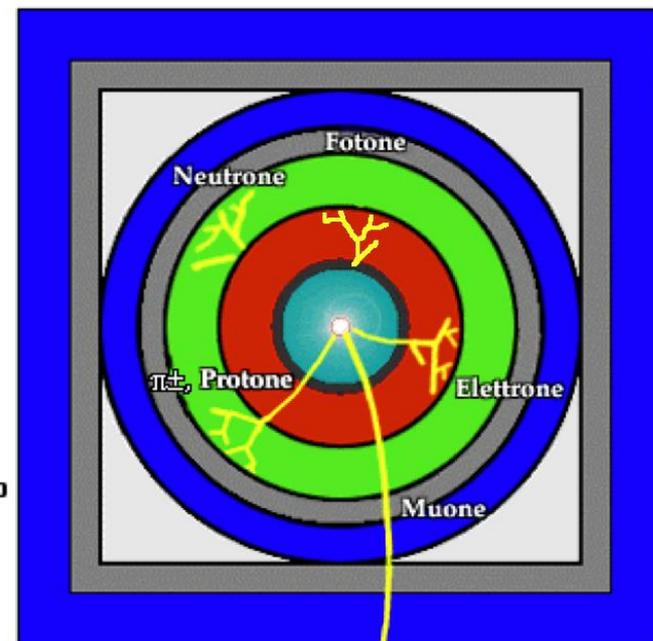
Rivelatori ai collider



Struttura «a cipolla»

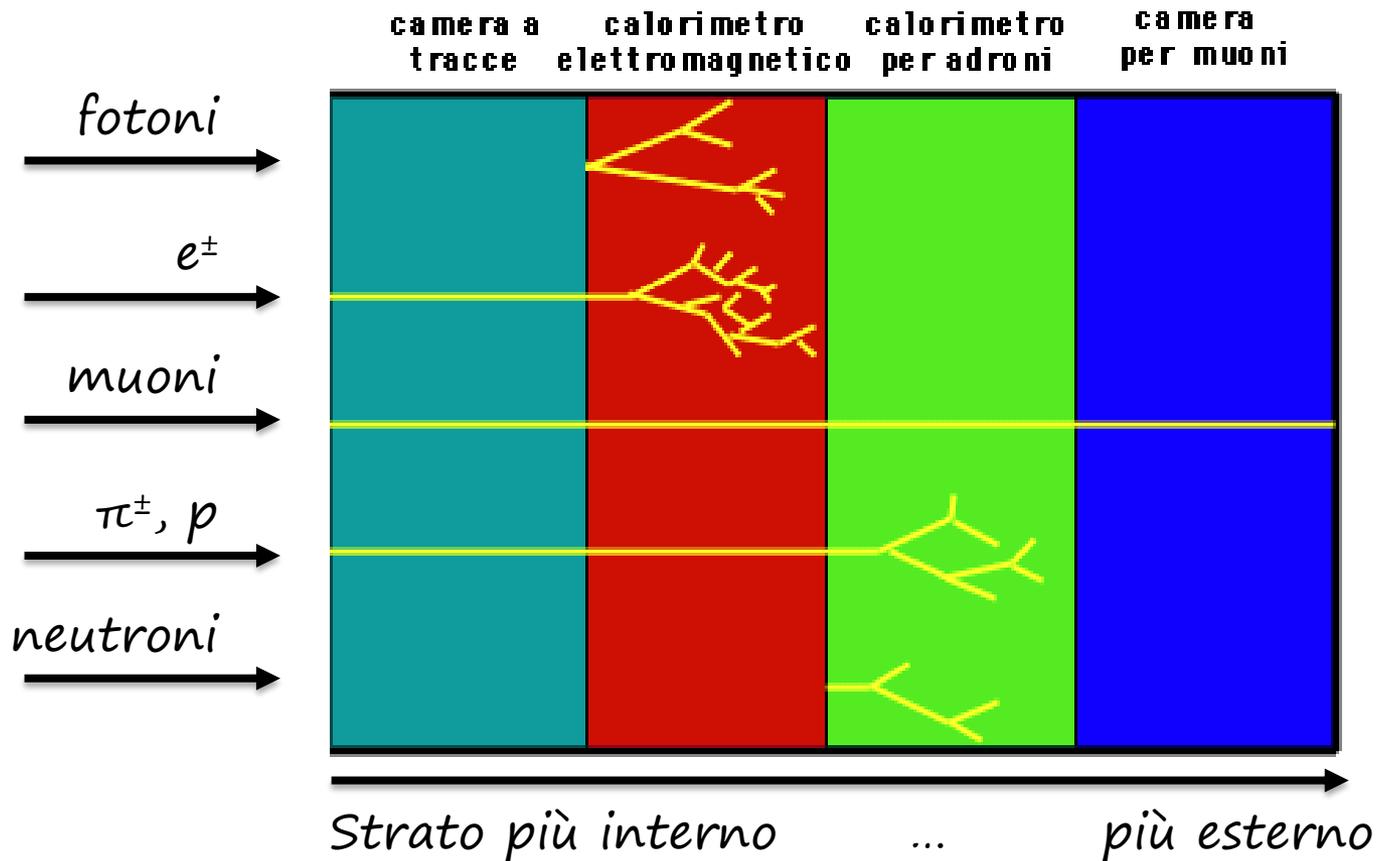
Tutte le particelle, attraversando la materia, perdono una parte della loro energia

- Fascio (al centro)
- Camera a tracce
- Bobina del magnete
- Calorimetro E-M
- Calorimetro per adroni
- Acciaio magnetizzato
- Camere per muoni



Rivelatori ai collider

Struttura «a cipolla»

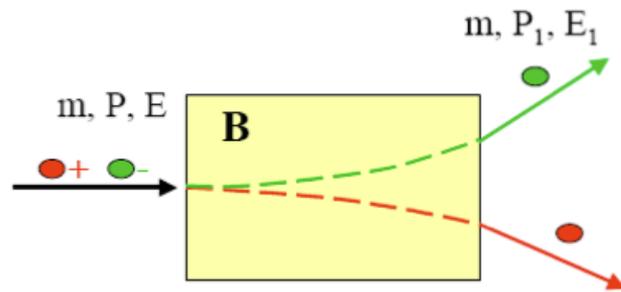


Principio base: conversione dell'energia rilasciata dalle particelle in «segnali» concreti da «rivelare»

Rivelare le particelle

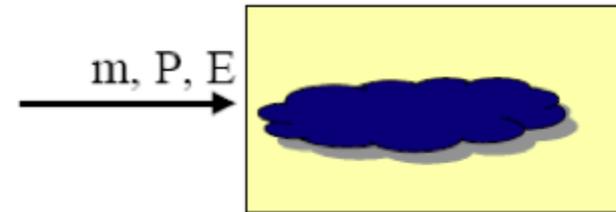
Esistono diversi tipi di rivelatore, ottimizzati per rivelare e misurare **tipi diversi di particelle** e **informazioni fisiche diverse** (energia, impulso, ...)

Tracciatori



- Determinano la **traiettoria** della particella
- Rivelano solo **particelle cariche**
- Se immersi in campi magnetici, determinano anche la carica Q e il momento p
- La particella subisce una minima perdita di energia

Calorimetri



- Determinano l'**energia** della particella
- Possono rivelare anche **particelle neutre** (fotoni, neutroni)
- La particella crea uno sciame viene **completamente assorbita**
- Il segnale prodotto è proporzionale all'energia della particella: $S = kE$

*«All science is either Physics or stamp collecting.»
E. Rutherford*