

# il programma della giornata



# il modello standard delle particelle elementari

Pietro Govoni



# come funziona l'Universo?

pag.

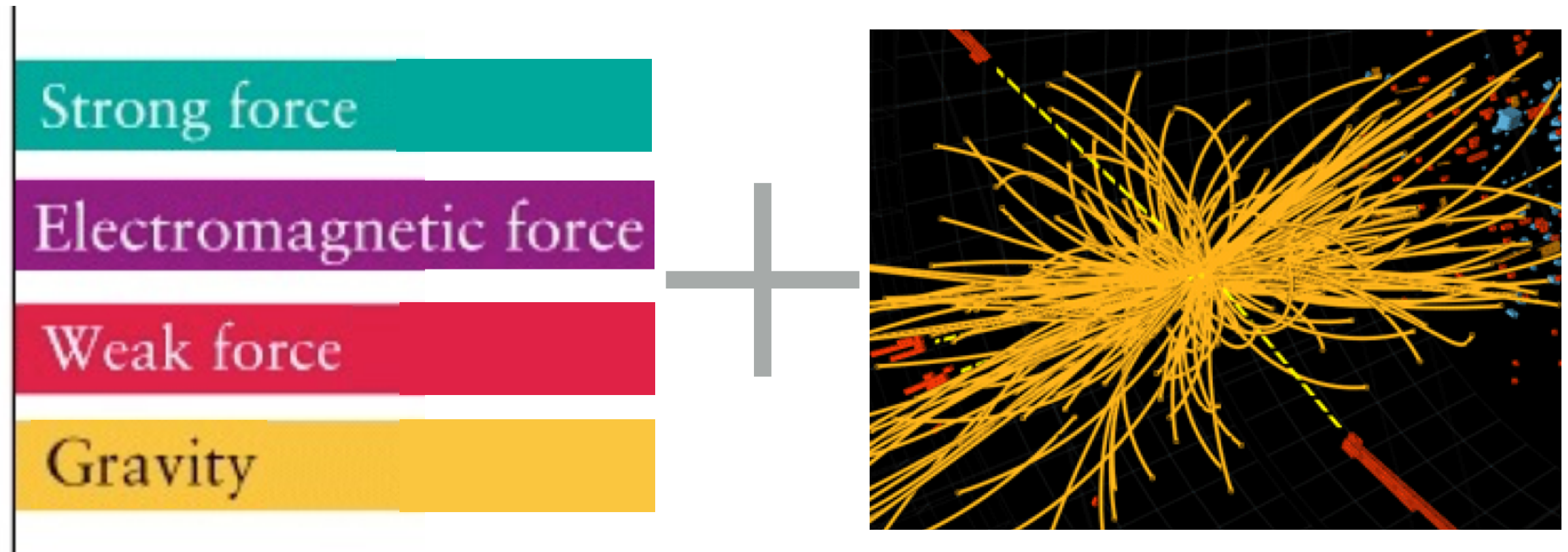
- come è composto?
- quali interazioni lo caratterizzano?
- come si è formato e come evolverà?





# la fisica delle particelle

- ricerca sperimentale delle leggi fondamentali che governano l'universo

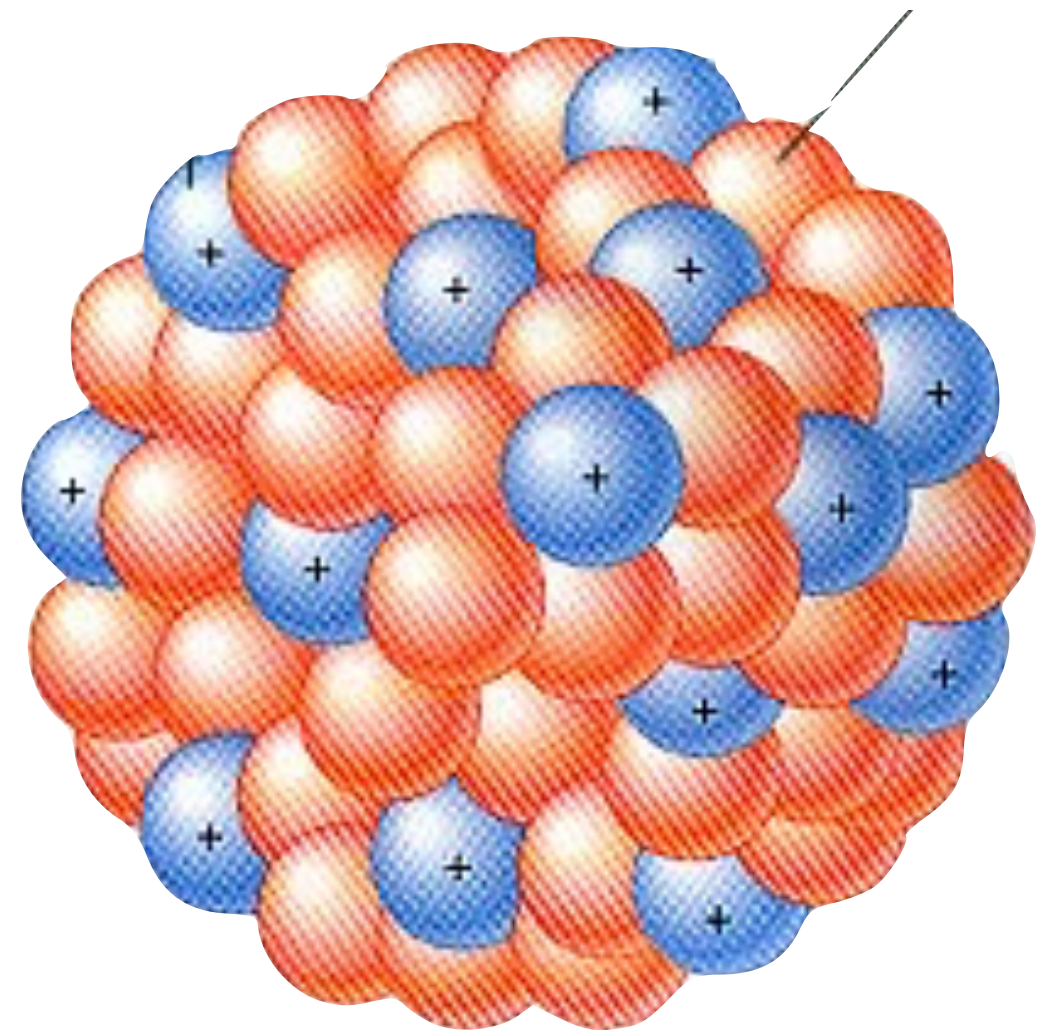
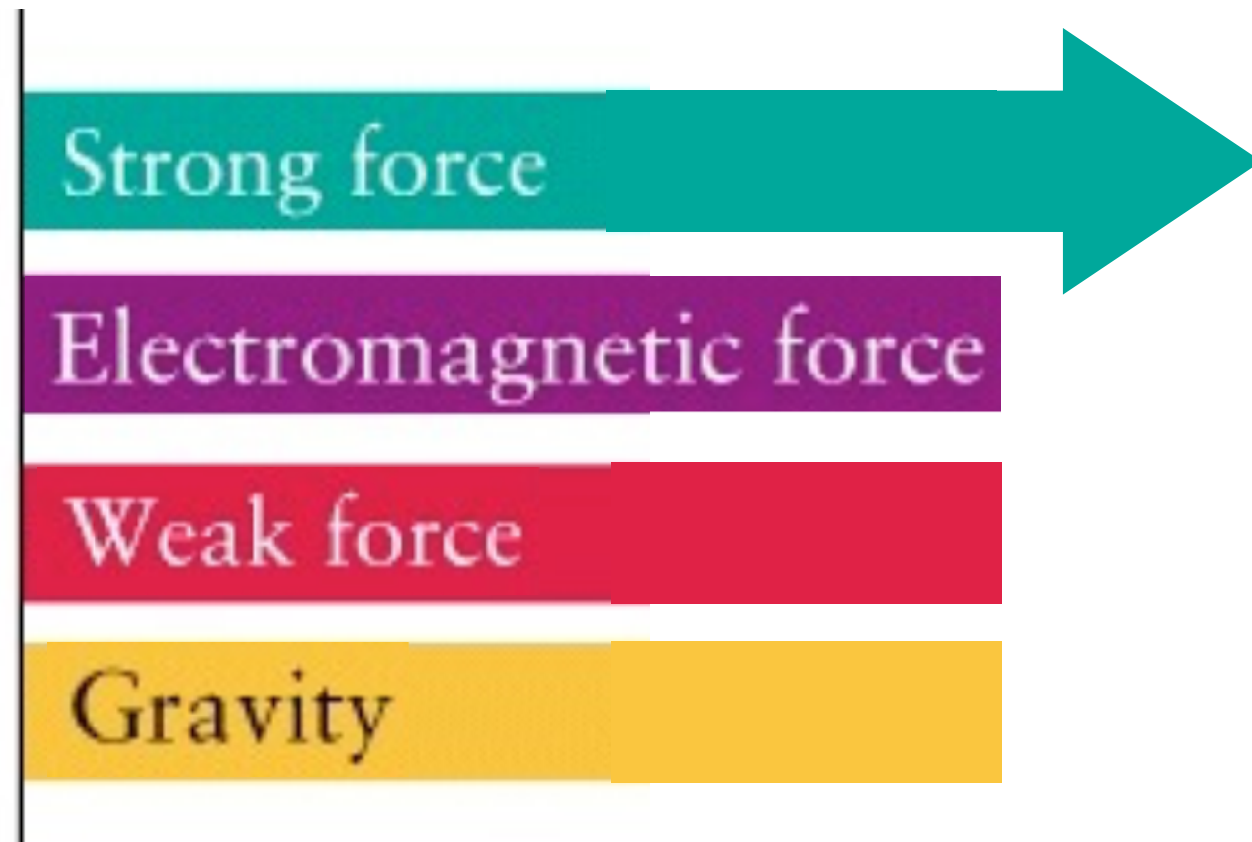


forze

materia

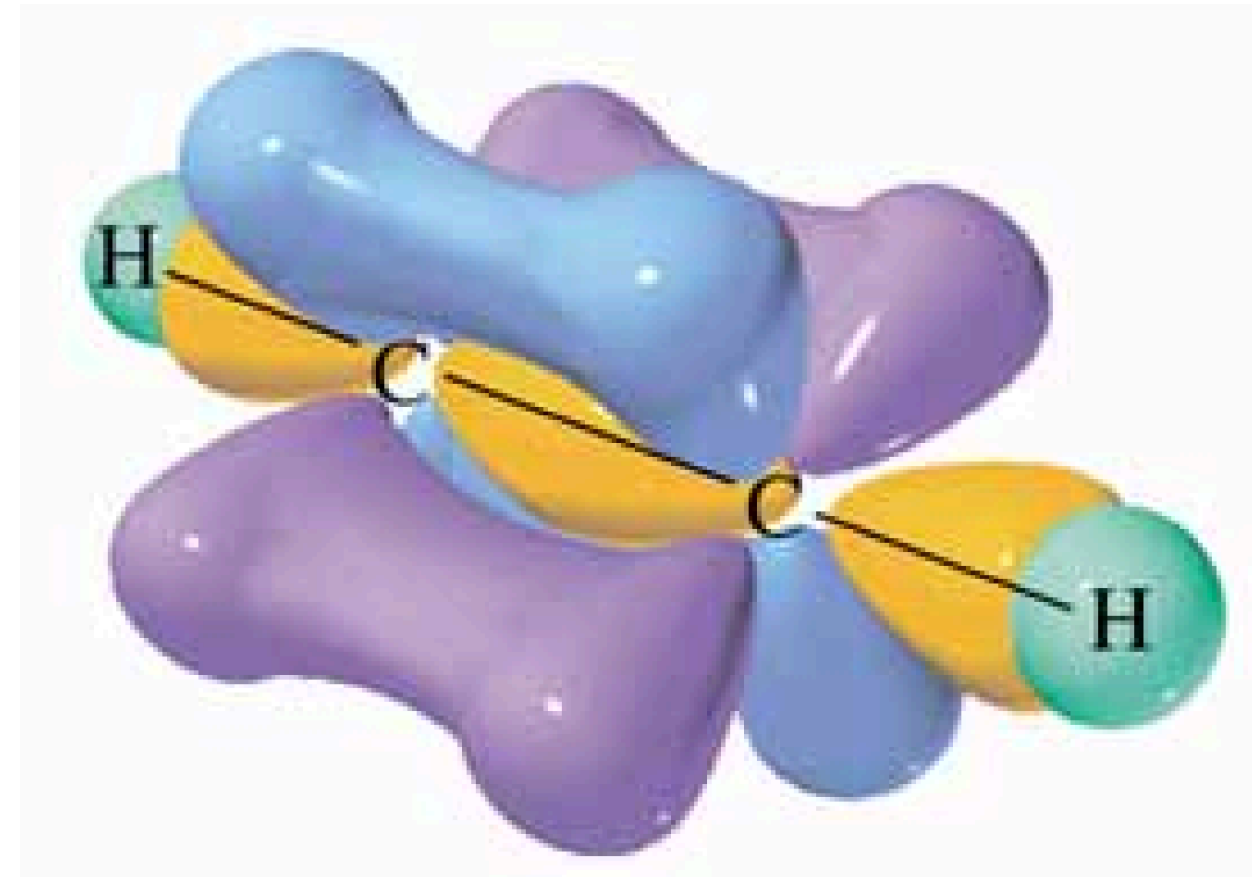
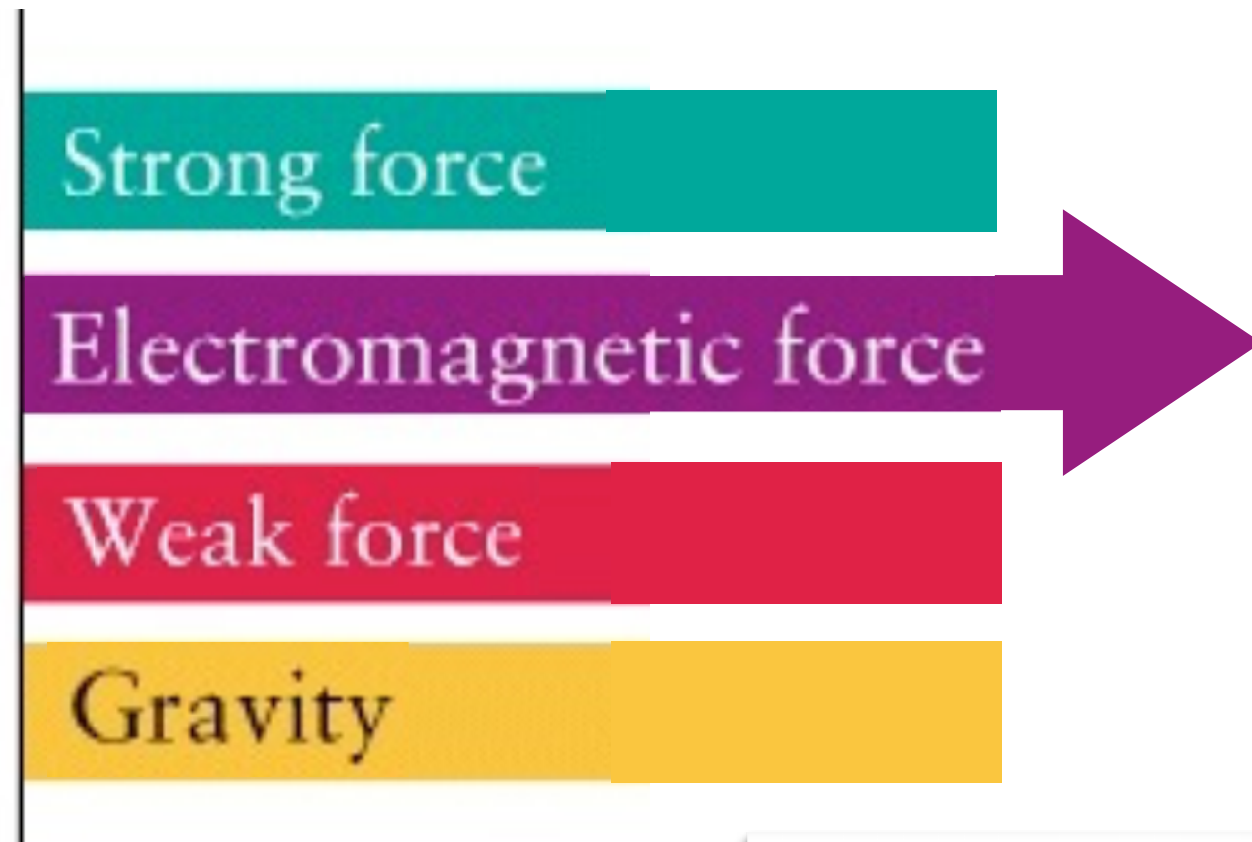


# la cromodinamica quantistica



mantiene legati i protoni ed i neutroni nei nuclei atomici

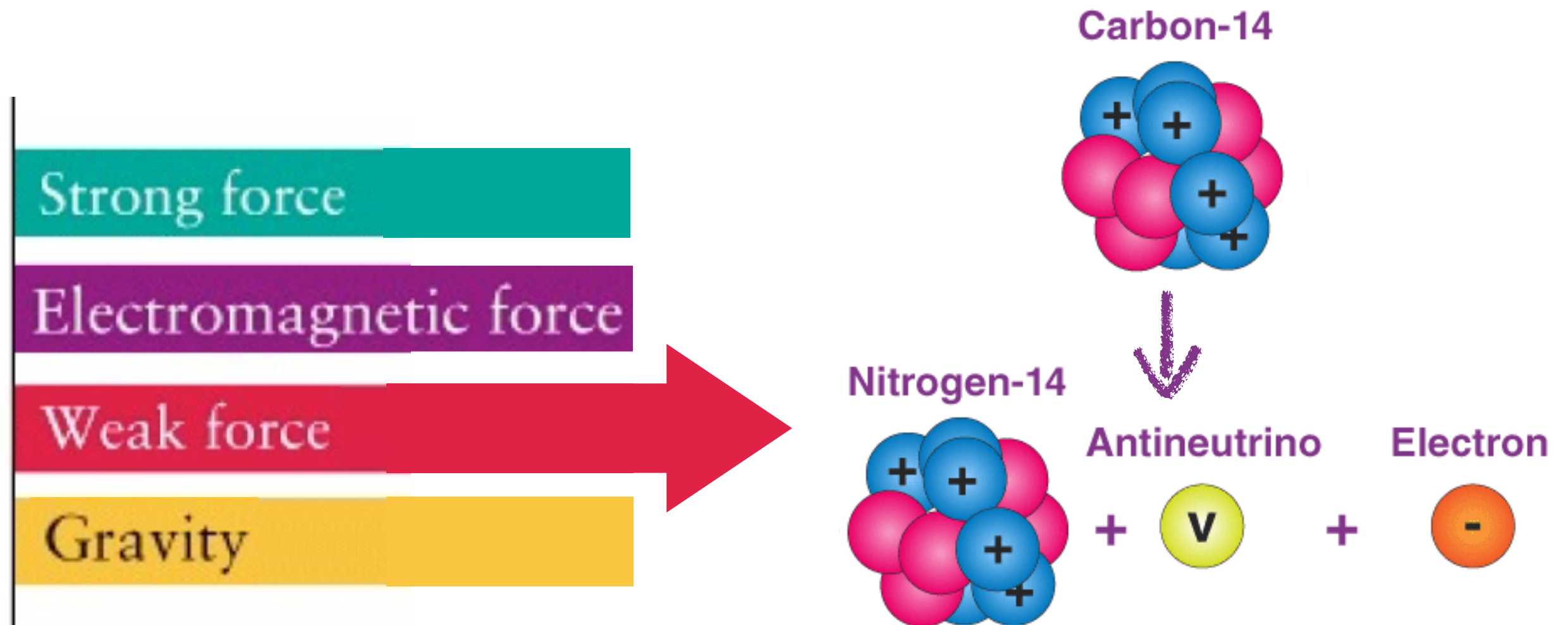
# l'interazione elettromagnetica



mantiene legati gli atomi e le molecole, regola la maggior parte delle interazioni a cui siamo abituati

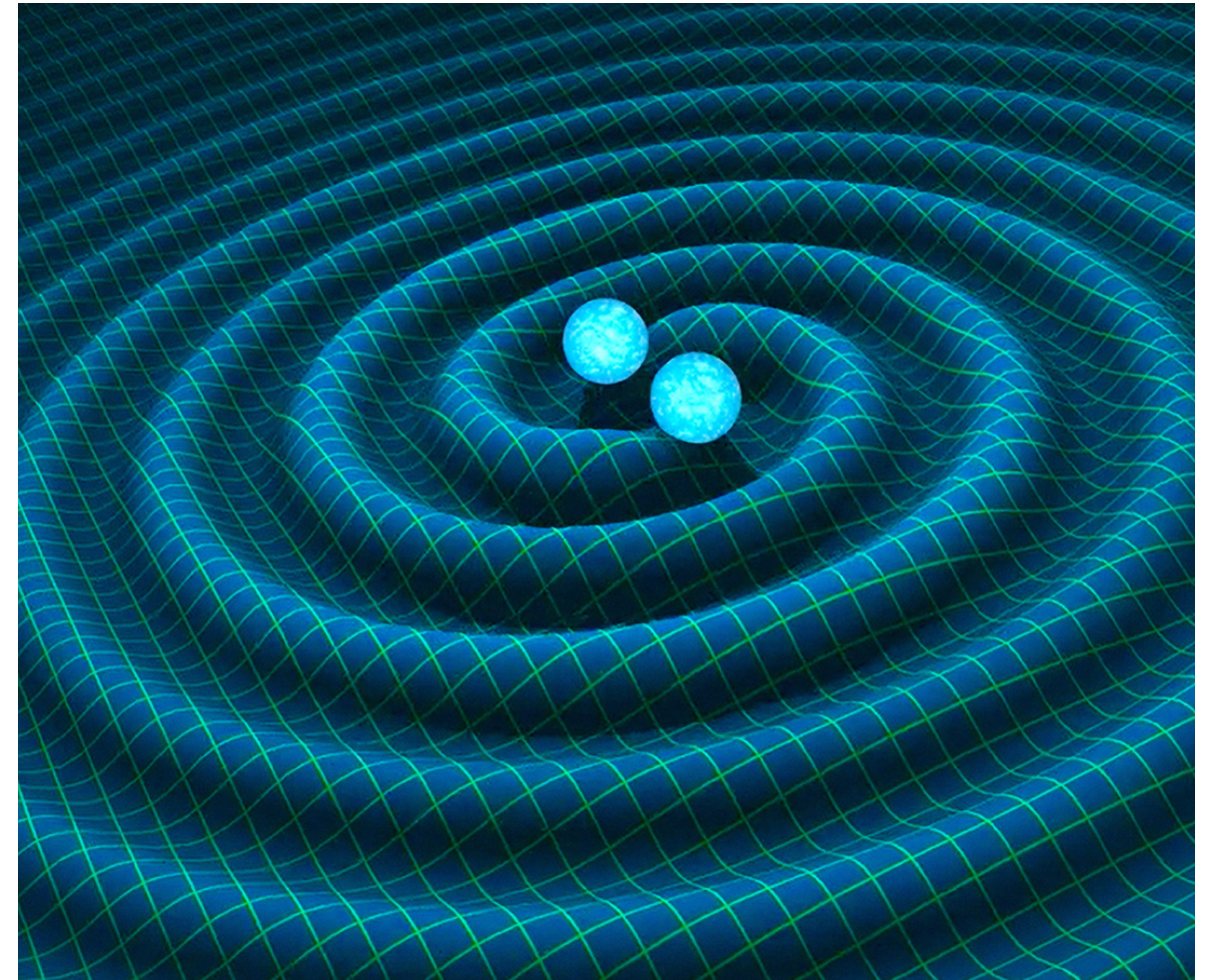


# l'interazione debole



genera decadimenti radioattivi  
e transizioni atomiche

# l'interazione gravitazionale



interazioni gravitazionali



# le particelle del modello standard

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III			I	II	III
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	125 GeV	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nome →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone	<b>h</b> higgs	<b><math>\bar{u}</math></b> up	<b><math>\bar{c}</math></b> charm	<b><math>\bar{t}</math></b> top
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	+	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0		$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone	<b><math>\bar{d}</math></b> down	<b><math>\bar{s}</math></b> strange	<b><math>\bar{b}</math></b> bottom	
Leptoni	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV	Bosoni di gauge	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0	0		0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b><math>Z^0</math></b> forza debole	<b><math>\bar{\nu}_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b> neutrino tauonico	
Leptoni	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	anti Leptoni	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$		+1	+1	+1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b><math>W^\pm</math></b> forza debole	<b><math>e^+</math></b> elettrone	<b><math>\mu^+</math></b> muone	<b><math>\tau^+</math></b> tauone	

# le particelle del modello standard

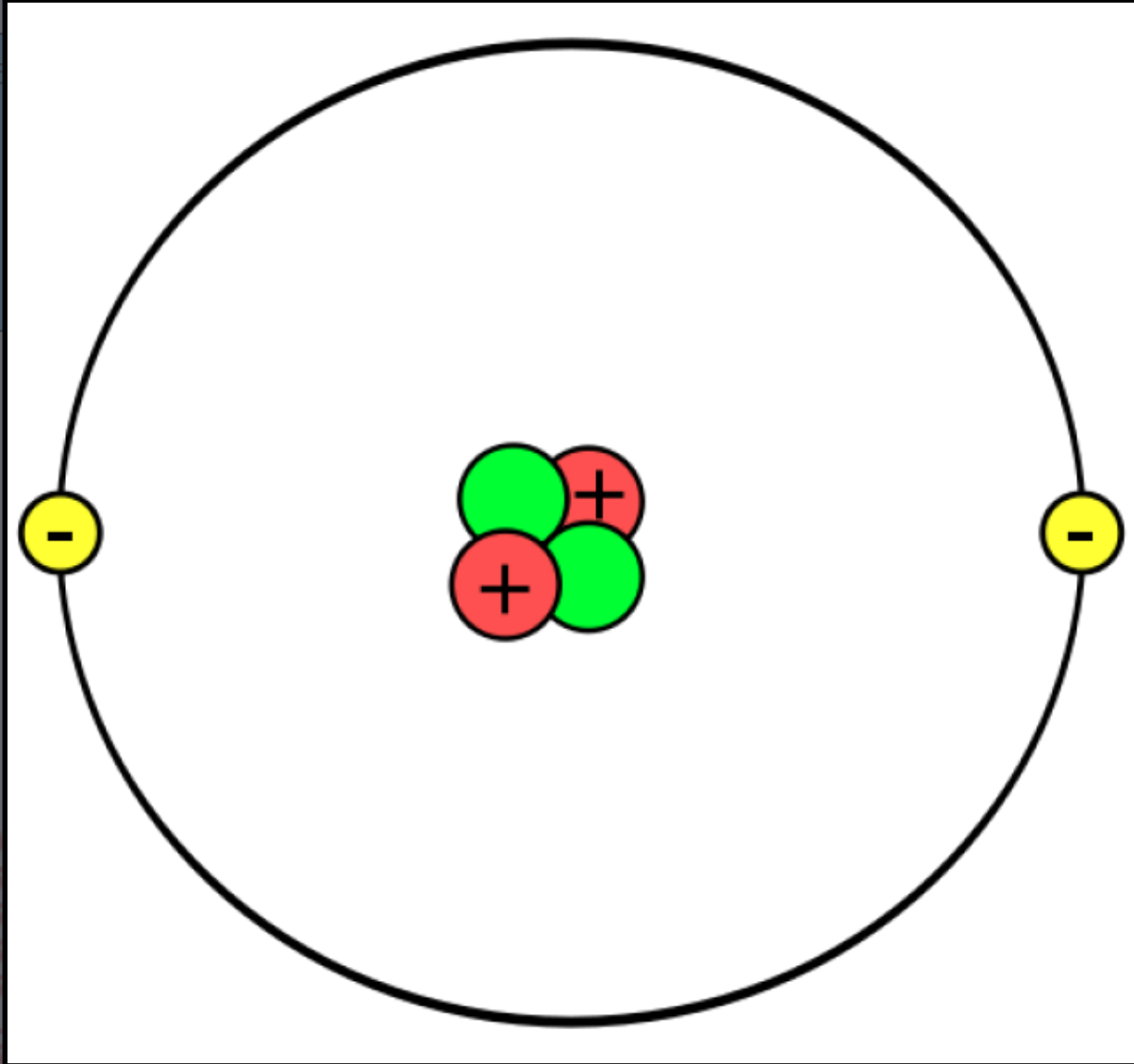
Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III	
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> fotone
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone
	$<2,2$ eV	$<0,17$ MeV	$<15,5$ MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b><math>Z^0</math></b> forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	+1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>e</b> elettrone	<b>μ</b> muone	<b>τ</b> tauone	

**Quark**

**Leptoni**

prima generazione:  
materia ordinaria



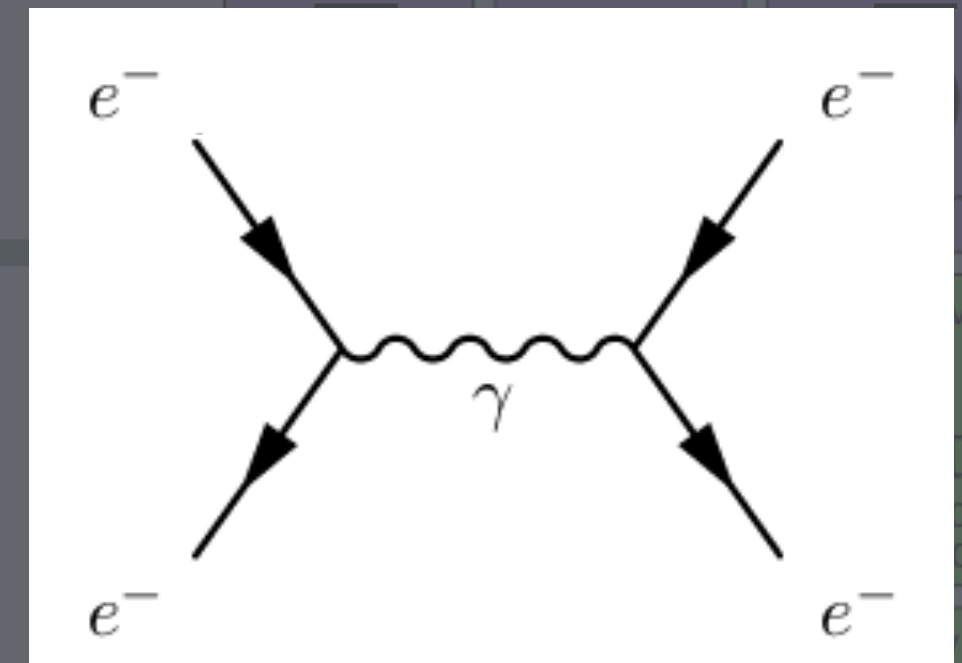


# le particelle del modello standard

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III		
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	125 GeV
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
nome →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> fotone	<b>h</b> higgs
Quark	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluone	
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> neutrino elettronico	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonico	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauonico	91,2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> forza debole	
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> elettrone	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> muone	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> tauone	80,4 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>W<sup>±</sup></b> forza debole	gli gauge
Leptoni					

forza  
**elettromagnetica:**  
mediata dal fotone



prima generazione di fermioni: materia ordinaria

anti Leptoni

+1 $\frac{1}{2}$ <b>e<sup>+</sup></b> elettrone	+1 $\frac{1}{2}$ <b>μ<sup>+</sup></b> muone	+1 $\frac{1}{2}$ <b>τ<sup>+</sup></b> tauone
--	--	---

# le particelle del modello standard

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III			I	II	III
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	125 GeV	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
carica→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nome→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone	<b>h</b> higgs	<b><math>\bar{u}</math></b> up	<b><math>\bar{c}</math></b> charm	<b><math>\bar{t}</math></b> top
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0		4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone		<b><math>\bar{d}</math></b> down	<b><math>\bar{s}</math></b> strange	<b><math>\bar{b}</math></b> bottom
<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV			<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
0	0	0	0			0	0	0
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1			$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b><math>Z^0</math></b> forza debole		<b><math>\bar{\nu}_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b> neutrino tauonico
0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV			0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
-1	-1	-1	$\pm 1$			+1	+1	+1
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1			$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b><math>W^\pm</math></b> forza debole		<b><math>e^+</math></b> elettrone	<b><math>\mu^+</math></b> muone	<b><math>\tau^+</math></b> tauone
Leptoni				Bosoni di gauge		anti Leptoni		

generazioni più pesanti di quark e leptoni (fermioni)



# le particelle del modello standard

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III		
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	125 GeV
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
nome →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone	<b>h</b> higgs
Quark	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$	104 MeV $-\frac{1}{3}$	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$	0	
	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>	<b>g</b>	
	$\frac{1}{2}$ down				
Leptoni	<2,2 eV 0	<0,17 MeV 0	<15,5 MeV 0	91,2 GeV 0	
	<b><math>\nu_e</math></b>	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b><math>\nu_\tau</math></b>	<b><math>Z^0</math></b>	
	$\frac{1}{2}$ neutrino elettronico	$\frac{1}{2}$ neutrino muonico	$\frac{1}{2}$ neutrino tauonico	1 forza debole	
Bosoni di gauge	0,511 MeV -1	105,7 MeV -1	1,777 GeV -1	80,4 GeV $\pm 1$	
	<b>e</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau</math></b>	<b><math>W^\pm</math></b>	
	$\frac{1}{2}$ elettrone	$\frac{1}{2}$ muone	$\frac{1}{2}$ tauone	1 forza debole	

anti-materia

	I	II	III
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
carica →	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nome →	<b><math>\bar{u}</math></b> up	<b><math>\bar{c}</math></b> charm	<b><math>\bar{t}</math></b> top
anti Quark	4,8 MeV $+\frac{1}{3}$	104 MeV $+\frac{1}{3}$	4,2 GeV $+\frac{1}{3}$
	<b><math>\bar{d}</math></b>	<b><math>\bar{s}</math></b>	<b><math>\bar{b}</math></b>
	$\frac{1}{2}$ down	$\frac{1}{2}$ strange	$\frac{1}{2}$ bottom
anti Leptoni	<2,2 eV 0	<0,17 MeV 0	<15,5 MeV 0
	<b><math>\bar{\nu}_e</math></b>	<b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b>	<b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b>
	$\frac{1}{2}$ neutrino elettronico	$\frac{1}{2}$ neutrino muonico	$\frac{1}{2}$ neutrino tauonico
anti Leptoni	0,511 MeV +1	105,7 MeV +1	1,777 GeV +1
	<b><math>e^+</math></b>	<b><math>\mu^+</math></b>	<b><math>\tau^+</math></b>
	$\frac{1}{2}$ elettrone	$\frac{1}{2}$ muone	$\frac{1}{2}$ tauone

# le particelle del modello standard

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III		
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	125 GeV
carica→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
nome→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone	<b>h</b> higgs
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone	
Leptoni	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b><math>Z^0</math></b> forza debole	
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b><math>W^\pm</math></b> forza debole	

Bosoni di gauge

forze non classiche:

forza **nucleare forte**

forza **nucleare debole**



# le particelle del modello standard

bosone di Higgs:  
mediatore  
dell'interazione che  
**dà massa alle  
particelle elementari**

125 GeV
0
0
<b>h</b>
higgs

	I	II	III
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
carica→	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nome→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
$+\frac{1}{3}$	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>
$\frac{1}{2}$	down	strange	bottom
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
0	<b><math>\bar{\nu}_e</math></b>	<b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b>	<b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b>
$\frac{1}{2}$	neutrino elettronico	neutrino muonico	neutrino tauonico
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
+1	<b><math>e^+</math></b>	<b><math>\mu^+</math></b>	<b><math>\tau^+</math></b>
$\frac{1}{2}$	elettrone	muone	tauone

Bosoni di gauge

anti Quark  
Leptoni



# le particelle del modello standard

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III			I	II	III
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	125 GeV	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nome →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone	<b>h</b> higgs	<b><math>\bar{u}</math></b> up	<b><math>\bar{c}</math></b> charm	<b><math>\bar{t}</math></b> top
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	+	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0		$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone	<b><math>\bar{d}</math></b> down	<b><math>\bar{s}</math></b> strange	<b><math>\bar{b}</math></b> bottom	
Leptoni	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV	Bosoni di gauge	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV
	0	0	0	0		0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b><math>Z^0</math></b> forza debole	<b><math>\bar{\nu}_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b> neutrino tauonico	
Leptoni	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	anti Leptoni	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$		+1	+1	+1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b><math>W^\pm</math></b> forza debole	<b><math>e^+</math></b> elettrone	<b><math>\mu^+</math></b> muone	<b><math>\tau^+</math></b> tauone	



# quanto funziona il modello?



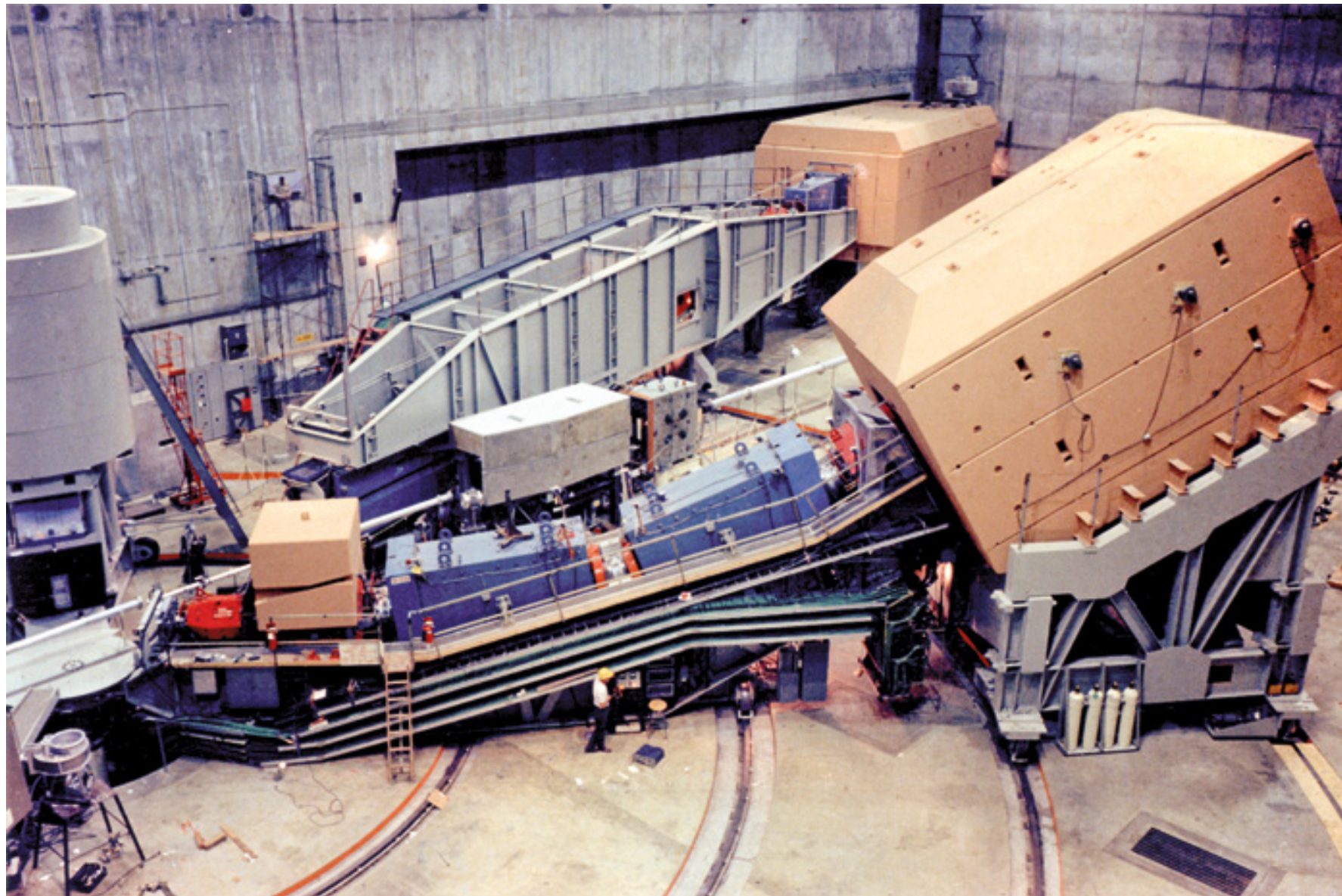
efficace all'energia della vita quotidiana





# a livello microscopico?

- Stanford Linear Accelerator (1967)



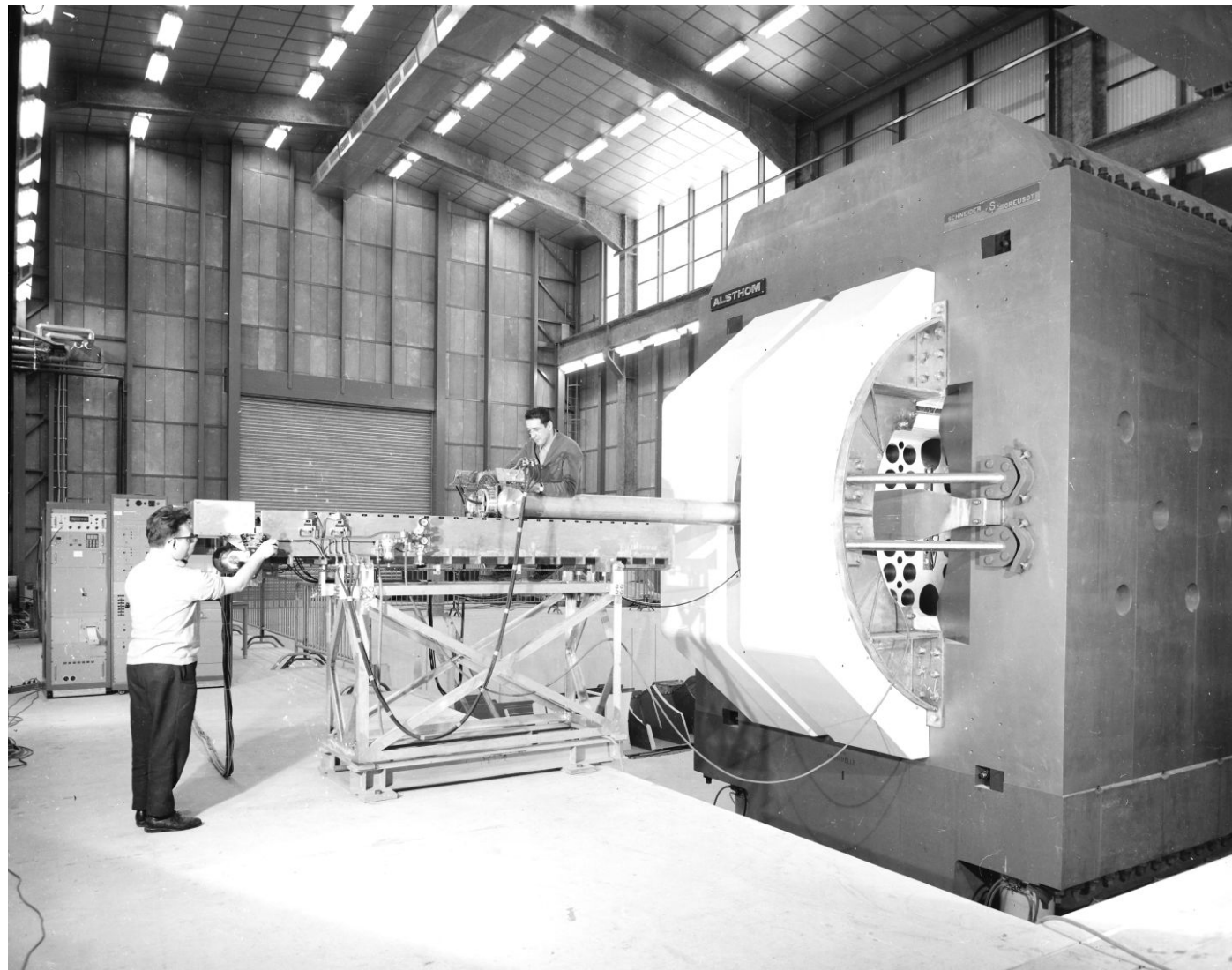
struttura del nucleo e quark





# a livello microscopico?

- Gargamelle (1970-78), CERN
- Large Electron Positron (LEP) Collider, CERN (1989 - 2000)



interazioni deboli





# II CERN

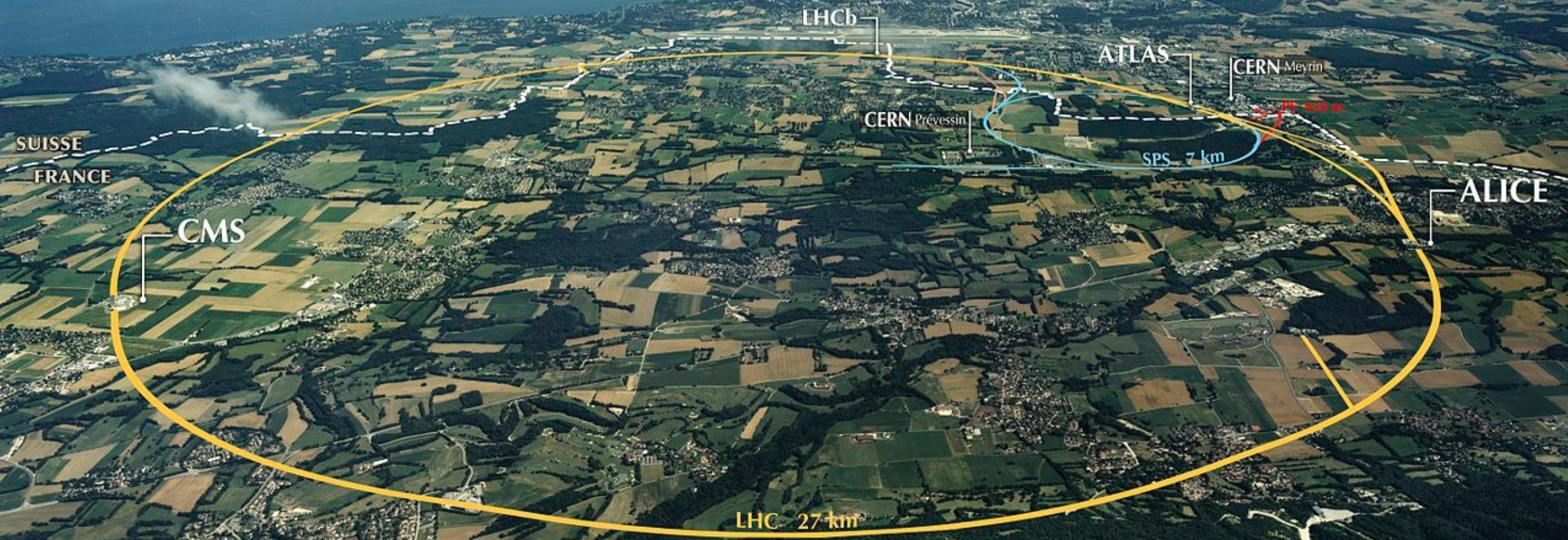




# II CERN

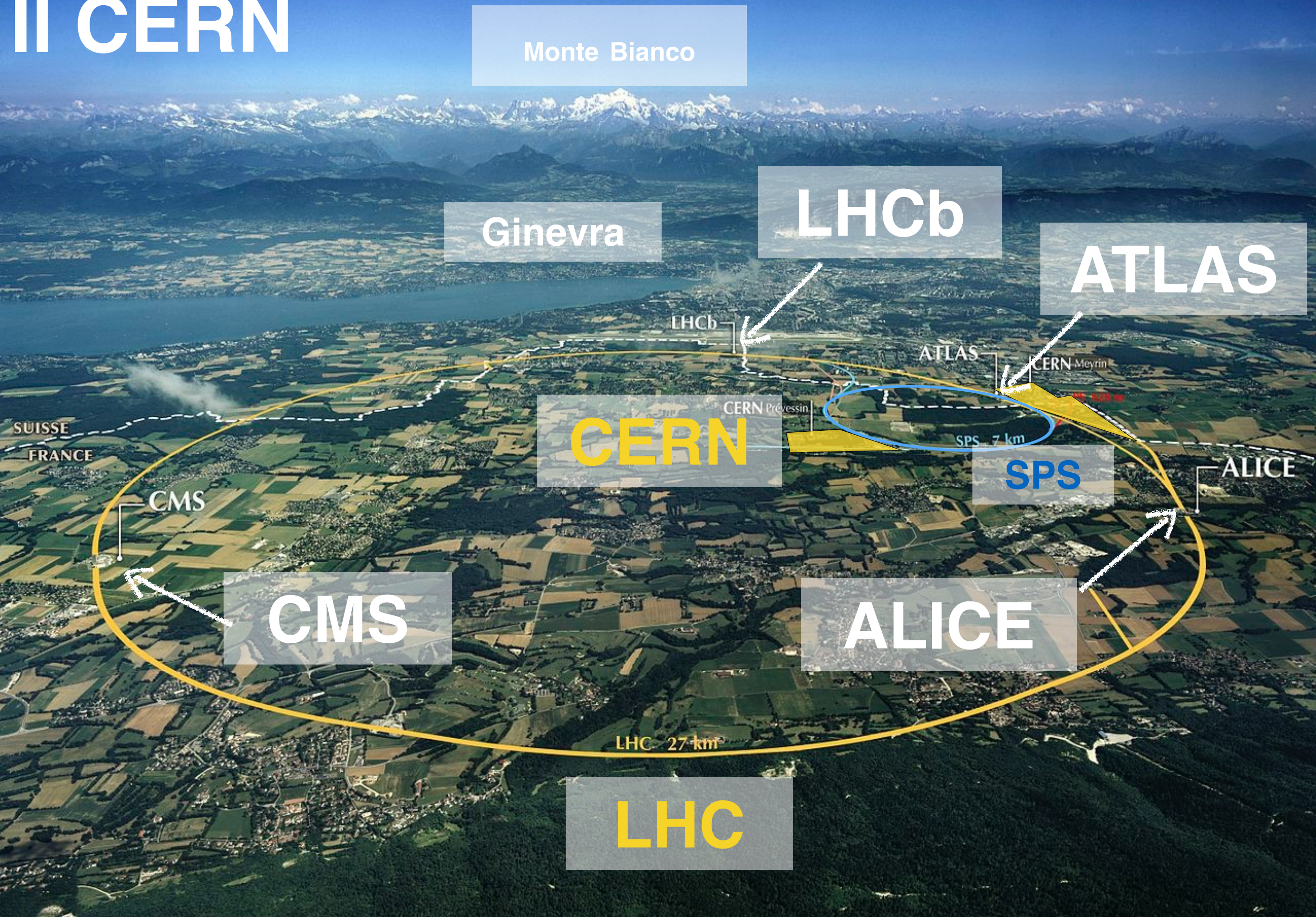
Monte Bianco

Ginevra





# II CERN



Monte Bianco

Ginevra

LHCb

ATLAS

CERN

SPS

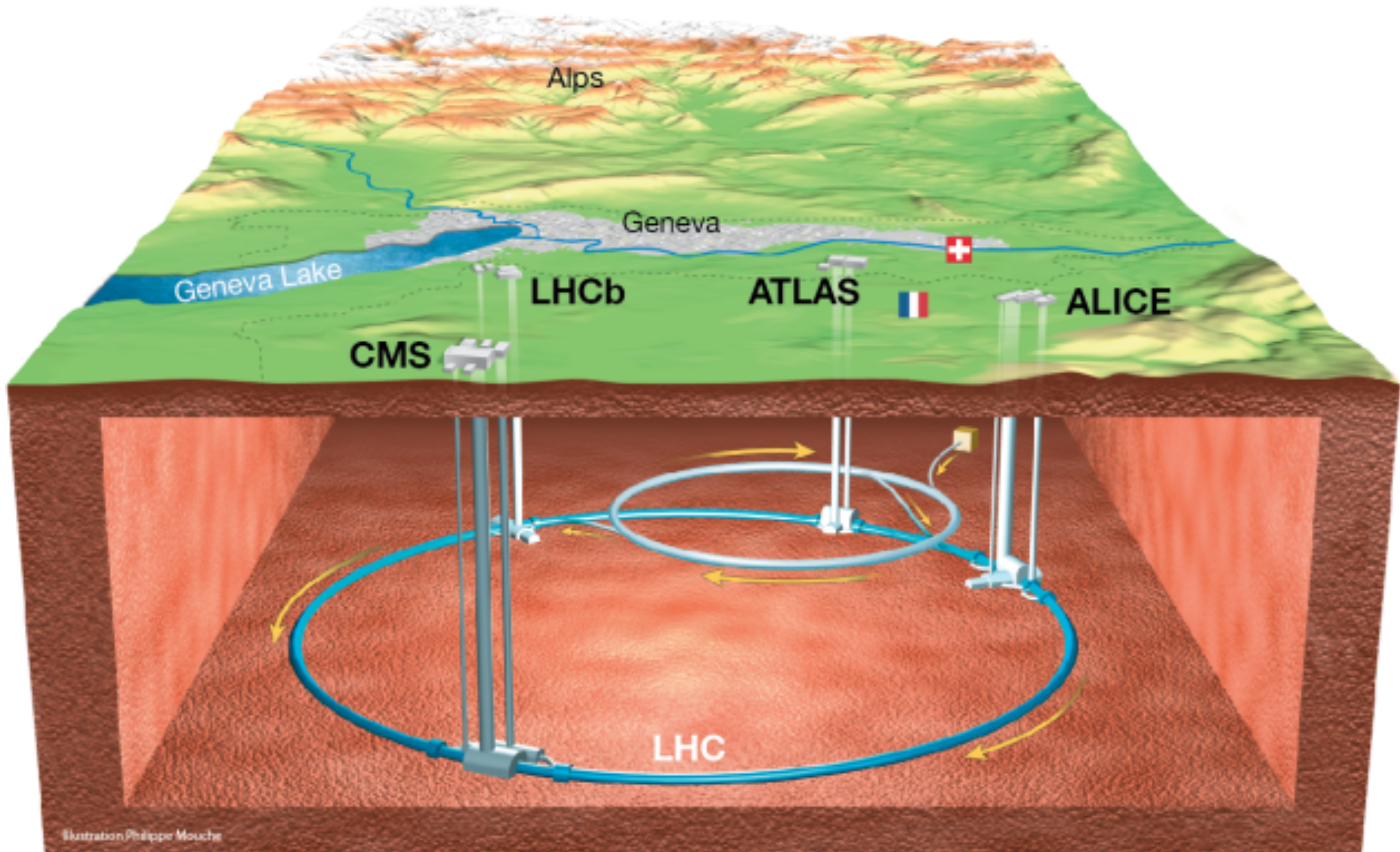
CMS

ALICE

LHC

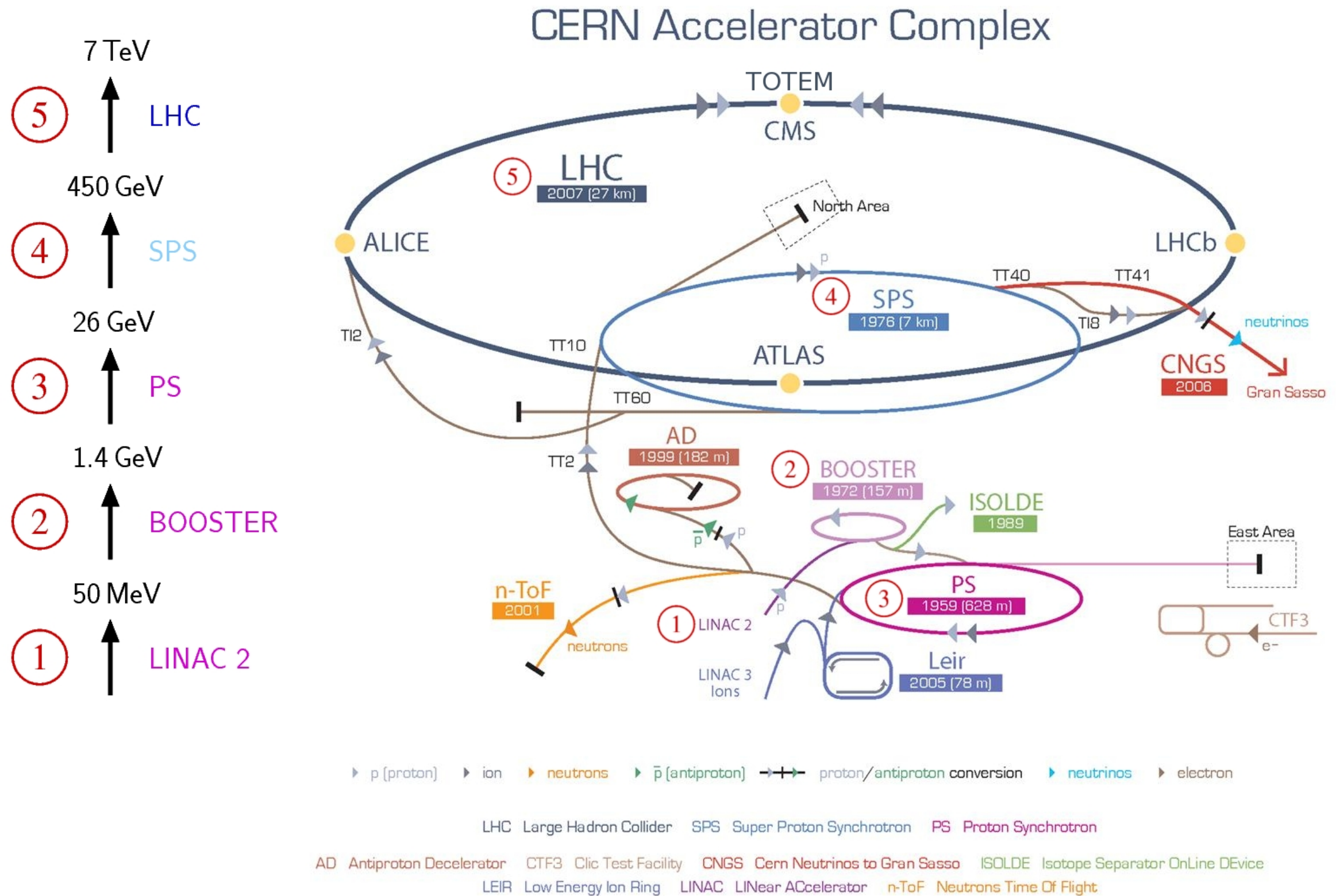


# il Large Hadron Collider



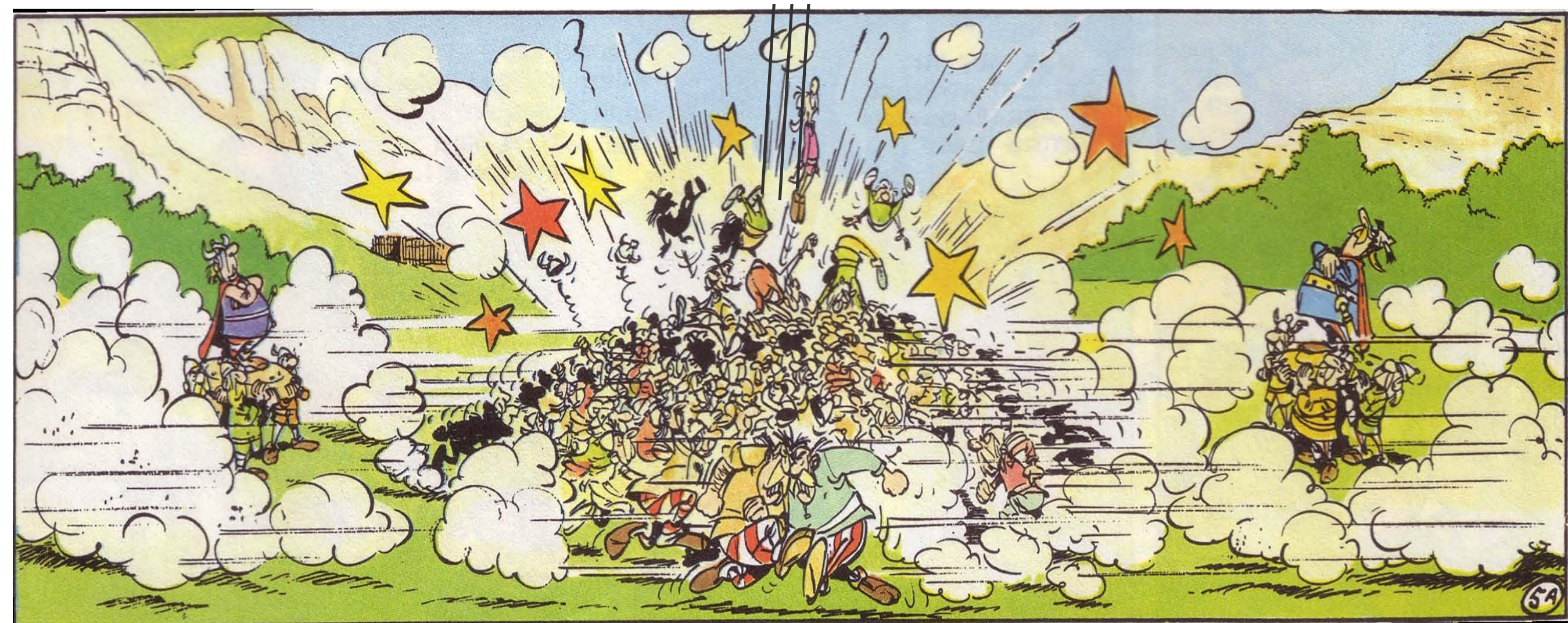


# la metropolitana delle particelle





# la collisione dei due fasci di LHC





# e cosa si cerca

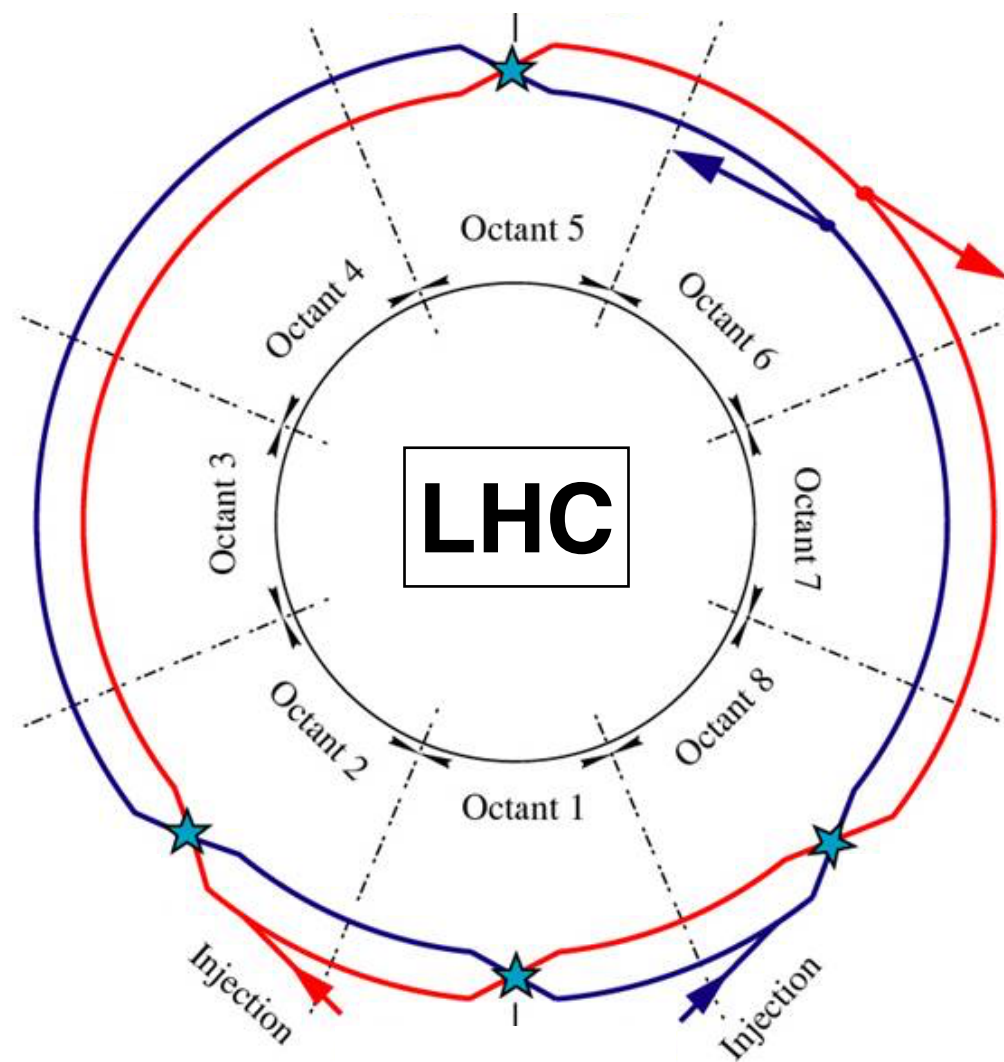
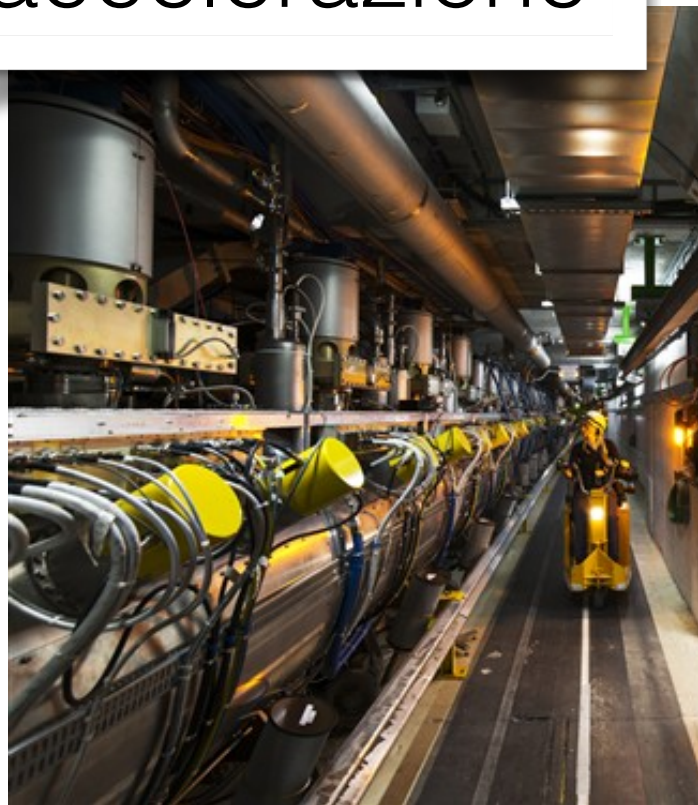


un esempio notevole: il bosone di Higgs



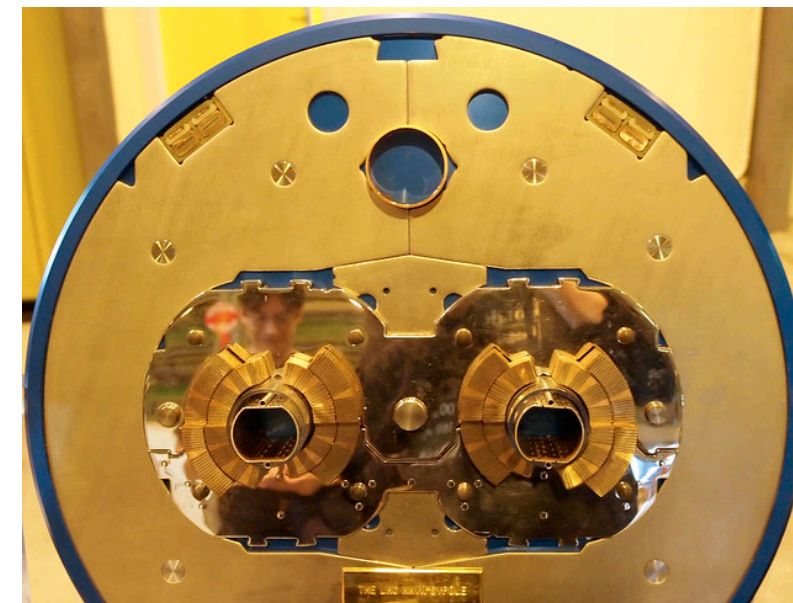
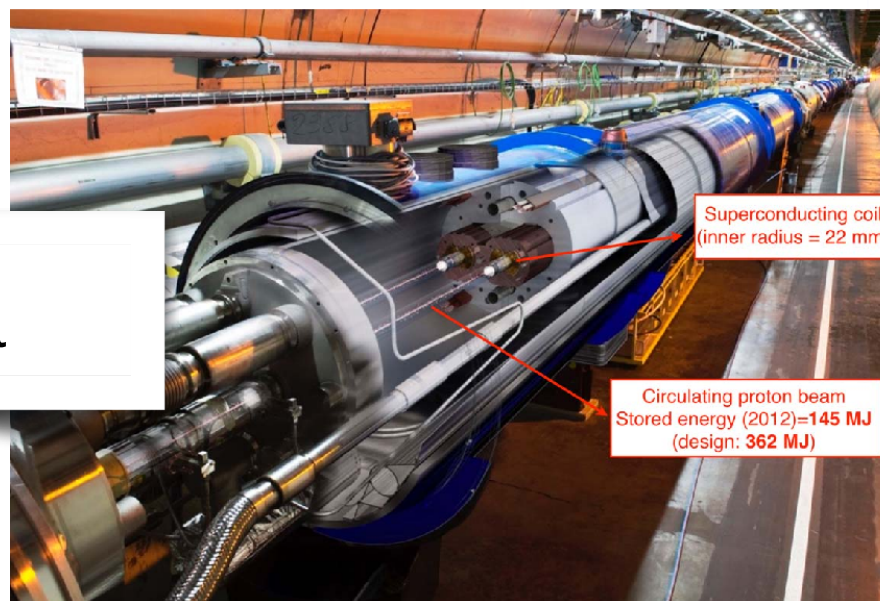
# l'itinerario prima dell'urto...

accelerazione



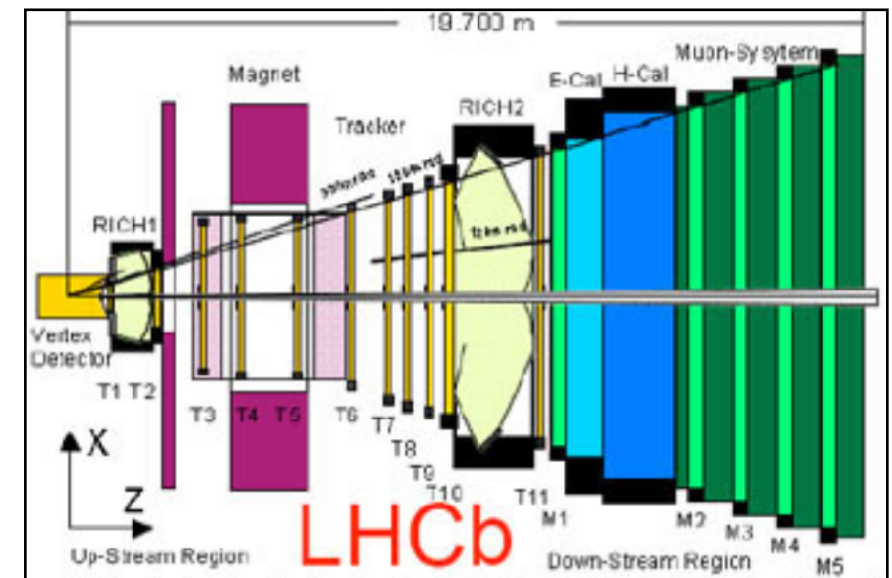
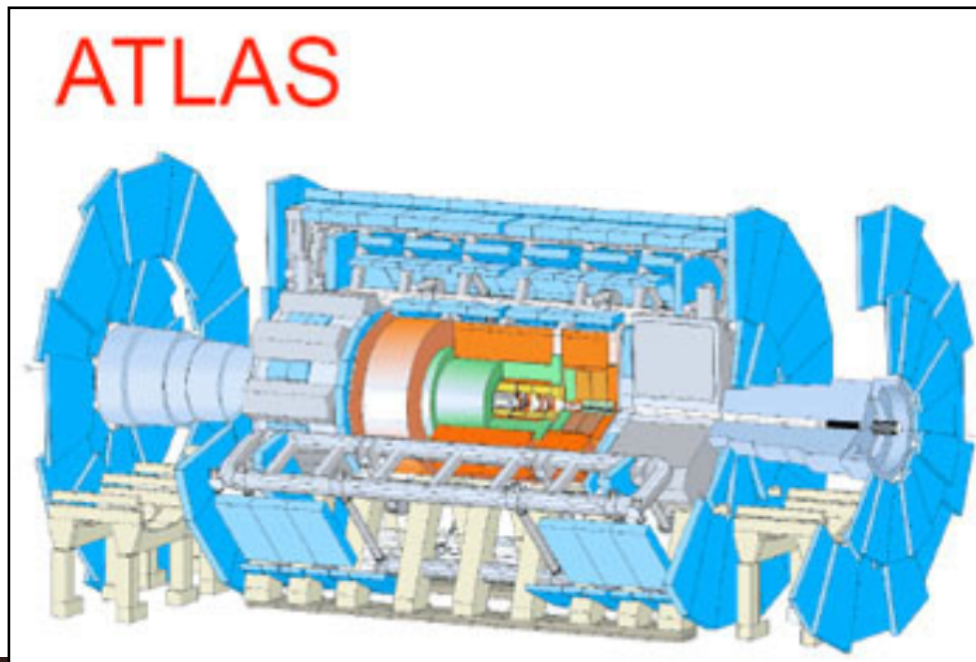
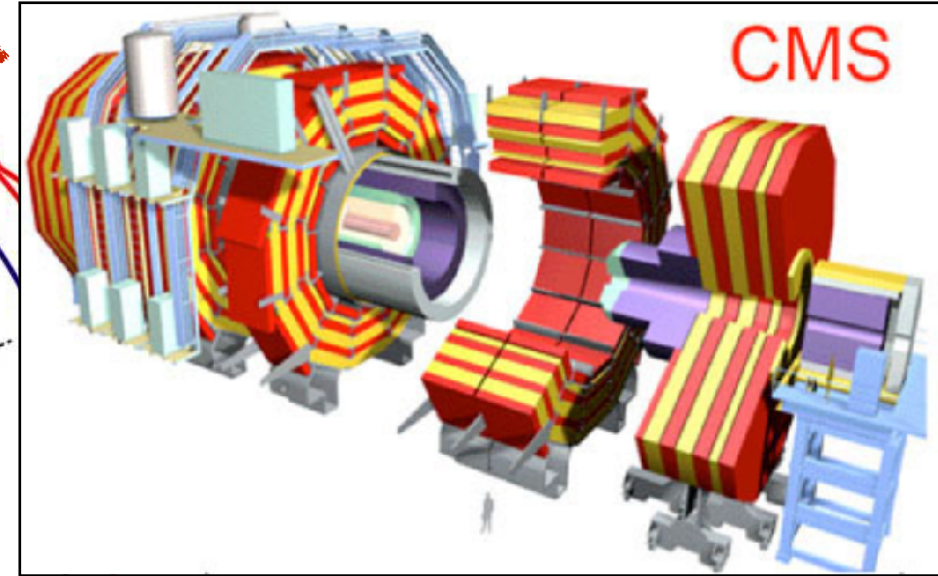
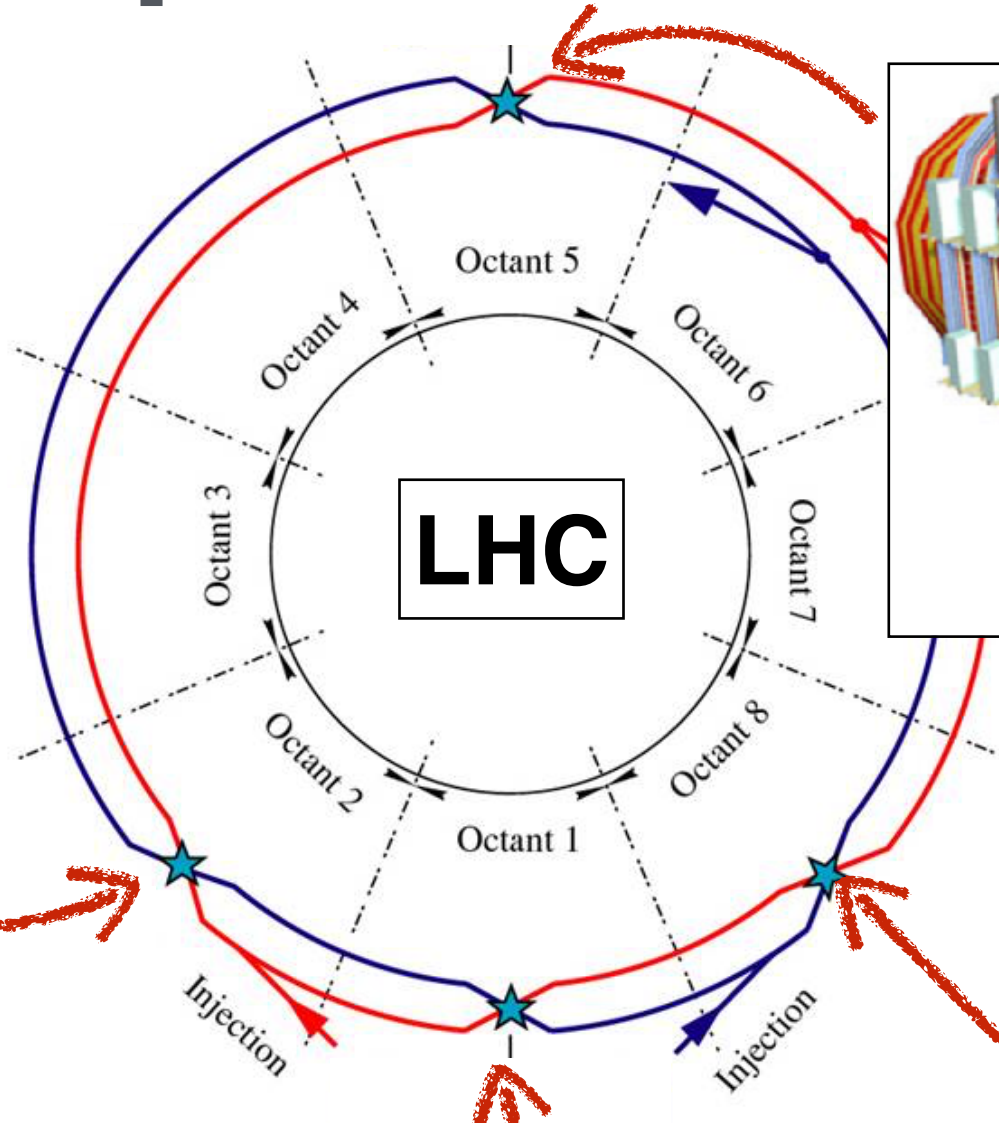
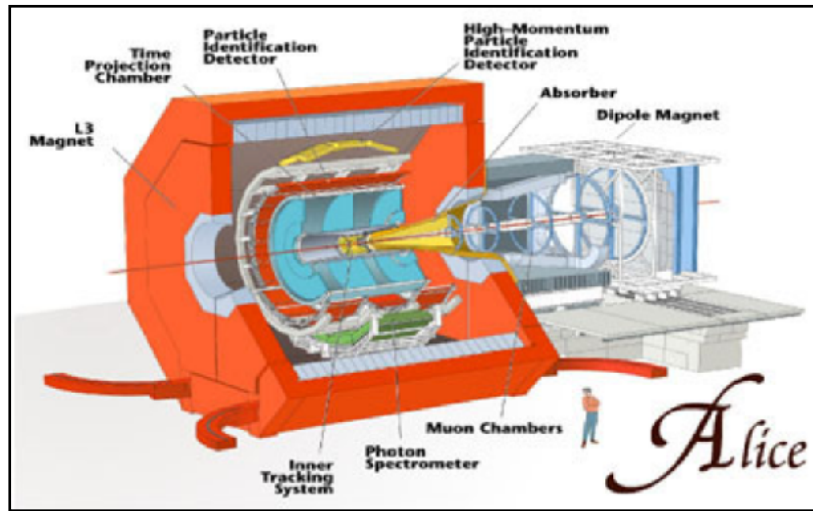
stop

curvatura





# i rivelatori di particelle





# compact muon solenoid, CMS

## CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE  
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS

Pixel ( $100 \times 150 \mu\text{m}$ )  $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$  channels  
Microstrips ( $80 \times 180 \mu\text{m}$ )  $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$  channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying  $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers  
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER

Silicon strips  $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$  channels

FORWARD CALORIMETER

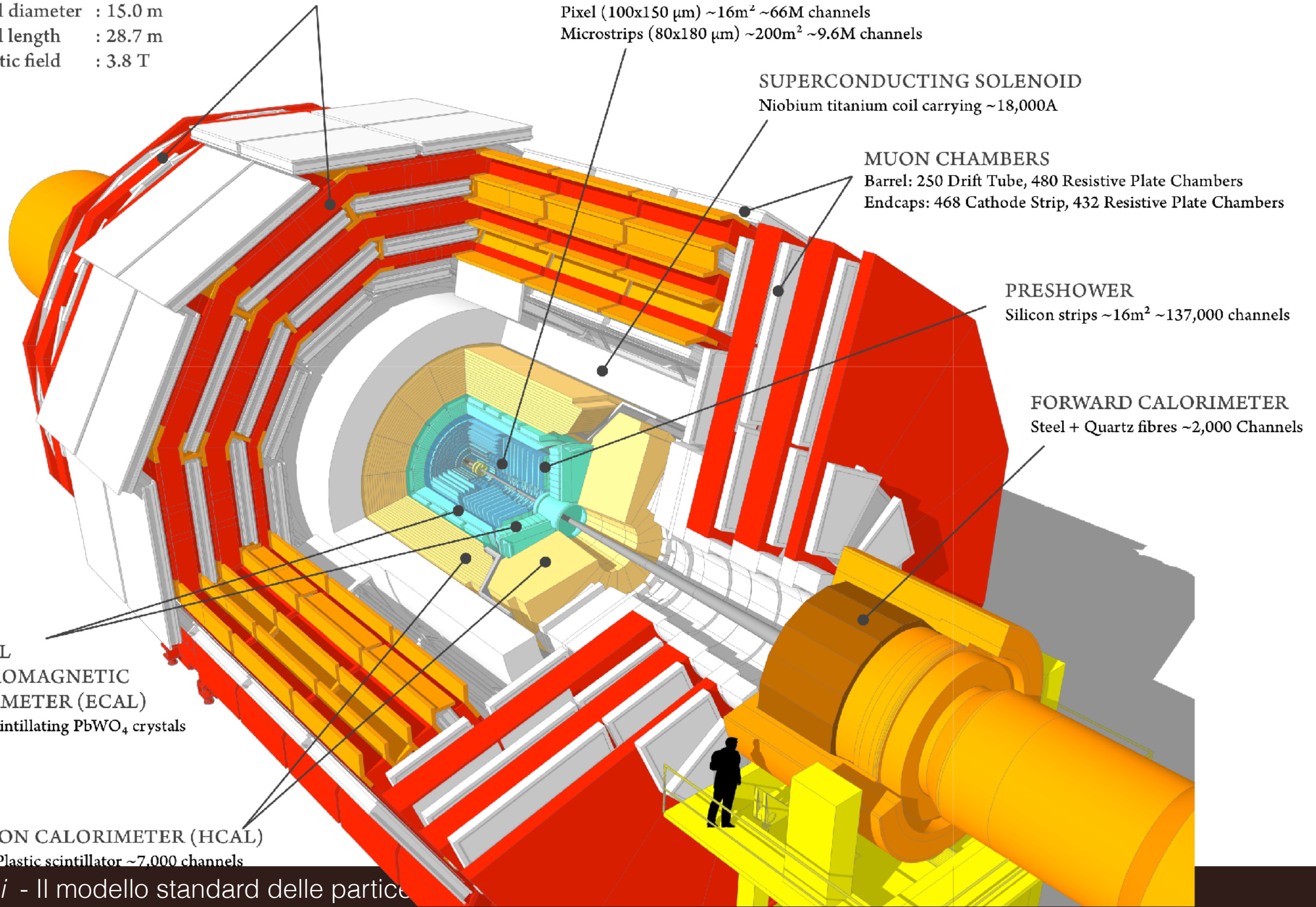
Steel + Quartz fibres  $\sim 2,000$  Channels

CRYSTAL  
ELECTROMAGNETIC  
CALORIMETER (ECAL)

$\sim 76,000$  scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)

Brass + Plastic scintillator  $\sim 7,000$  channels





# compact muon solenoid, CMS

## CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE  
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS  
Pixel ( $100 \times 150 \mu\text{m}$ )  $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$  channels  
Microstrips ( $80 \times 180 \mu\text{m}$ )  $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$  channels



SUPERCONDUCTING SOLENOID  
Niobium-titanium coil carrying  $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS  
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers  
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER  
Silicon strips  $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$  channels

FORWARD CALORIMETER  
Steel + Quartz fibres  $\sim 2,000$  Channels

CRYSTAL  
ELECTROMAGNETIC  
CALORIMETER (ECAL)  
 $\sim 76,000$  scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

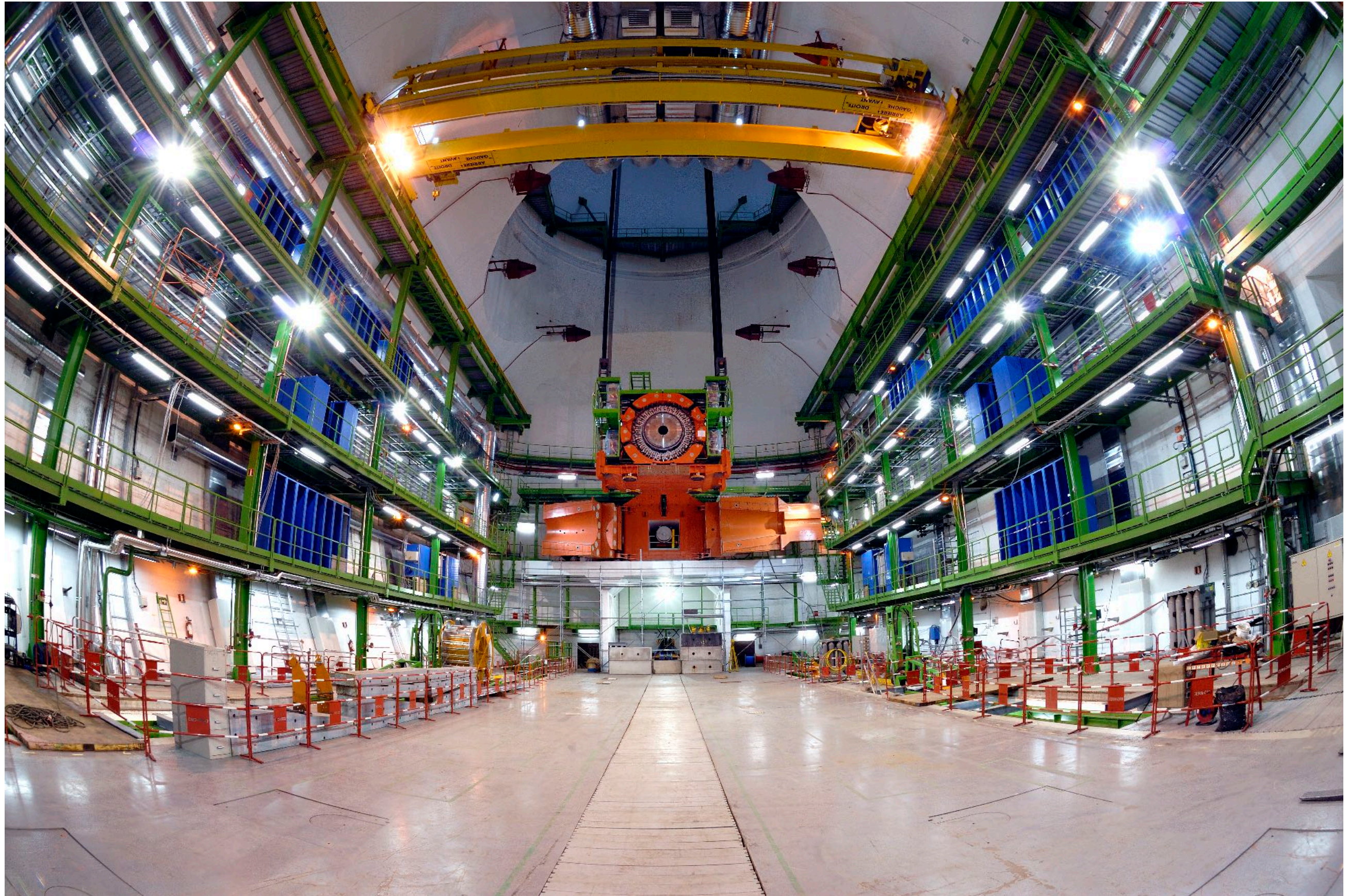
HADRON CALORIMETER (HCAL)  
Brass + Plastic scintillator  $\sim 7,000$  channels

fascio di protoni

fascio di protoni

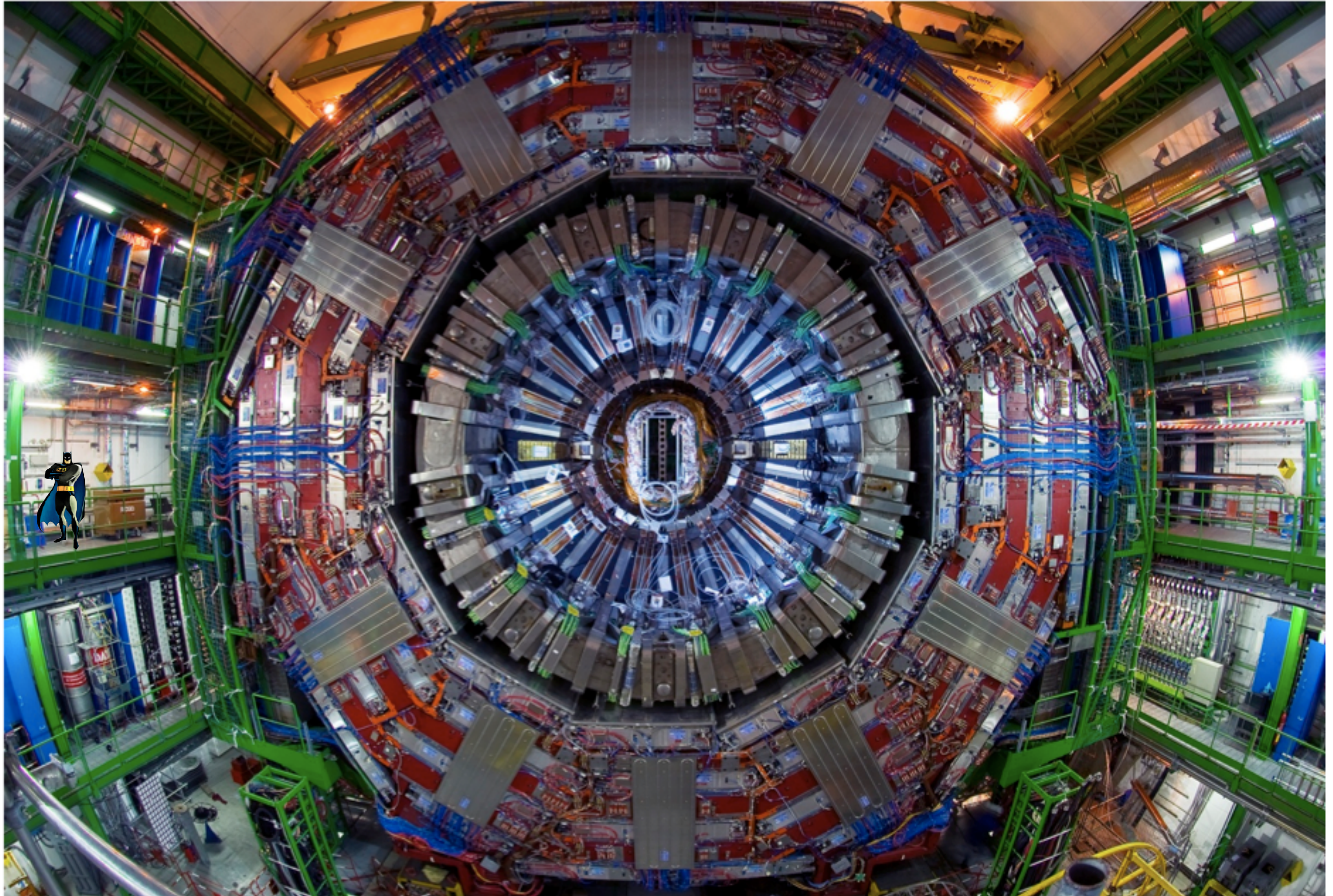


# la caverna che ospita CMS



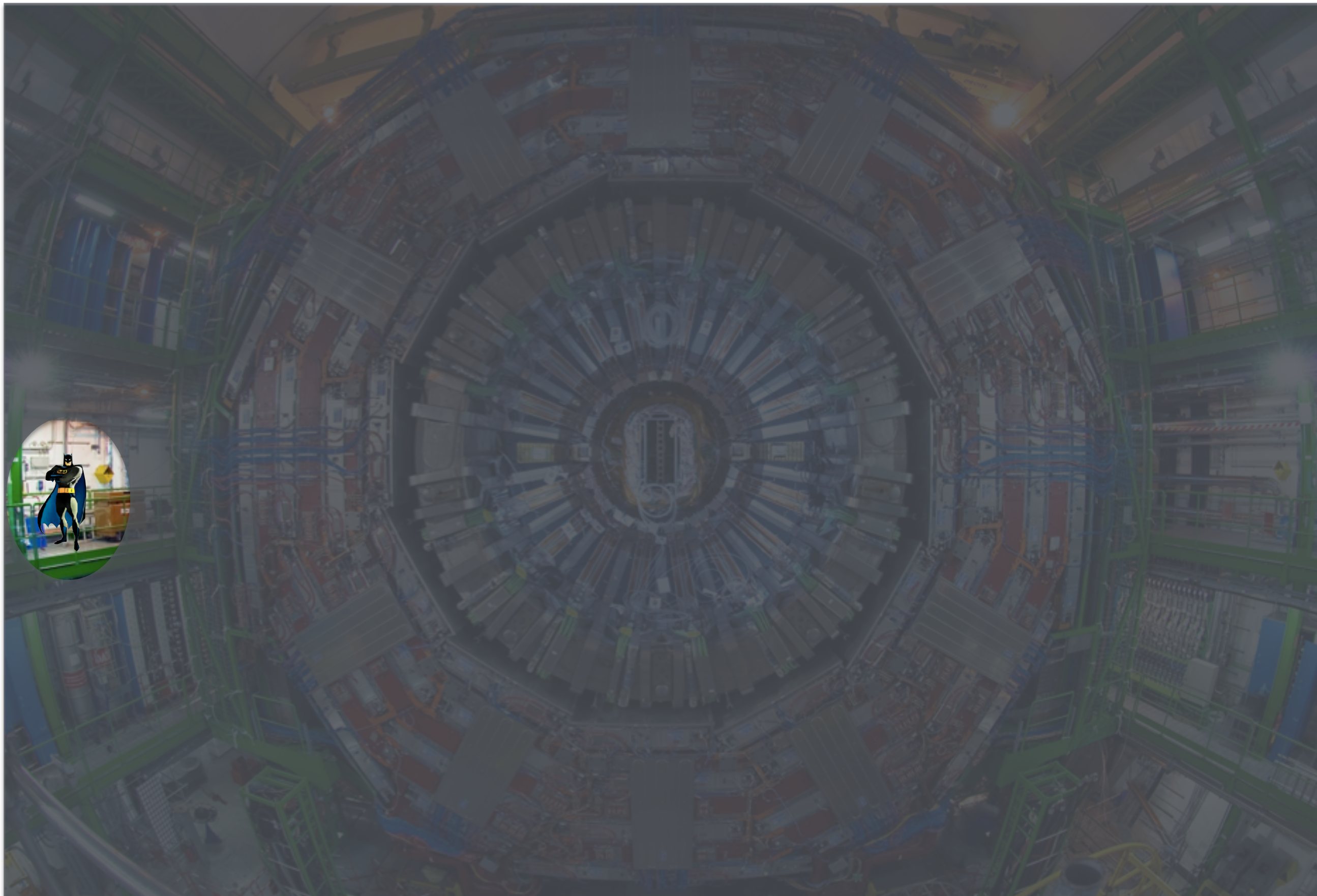


# il rivelatore in caverna



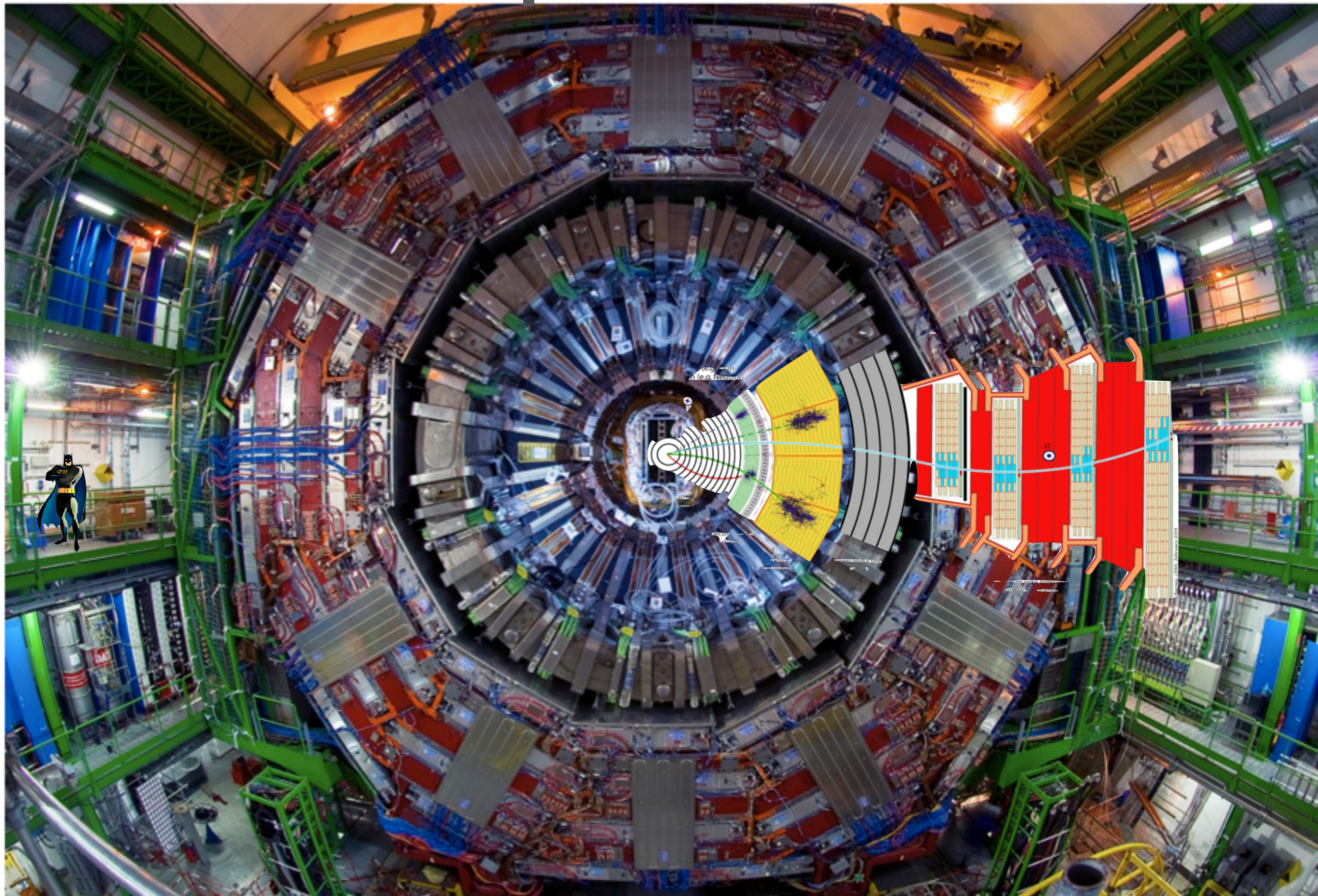


# il rivelatore in caverna



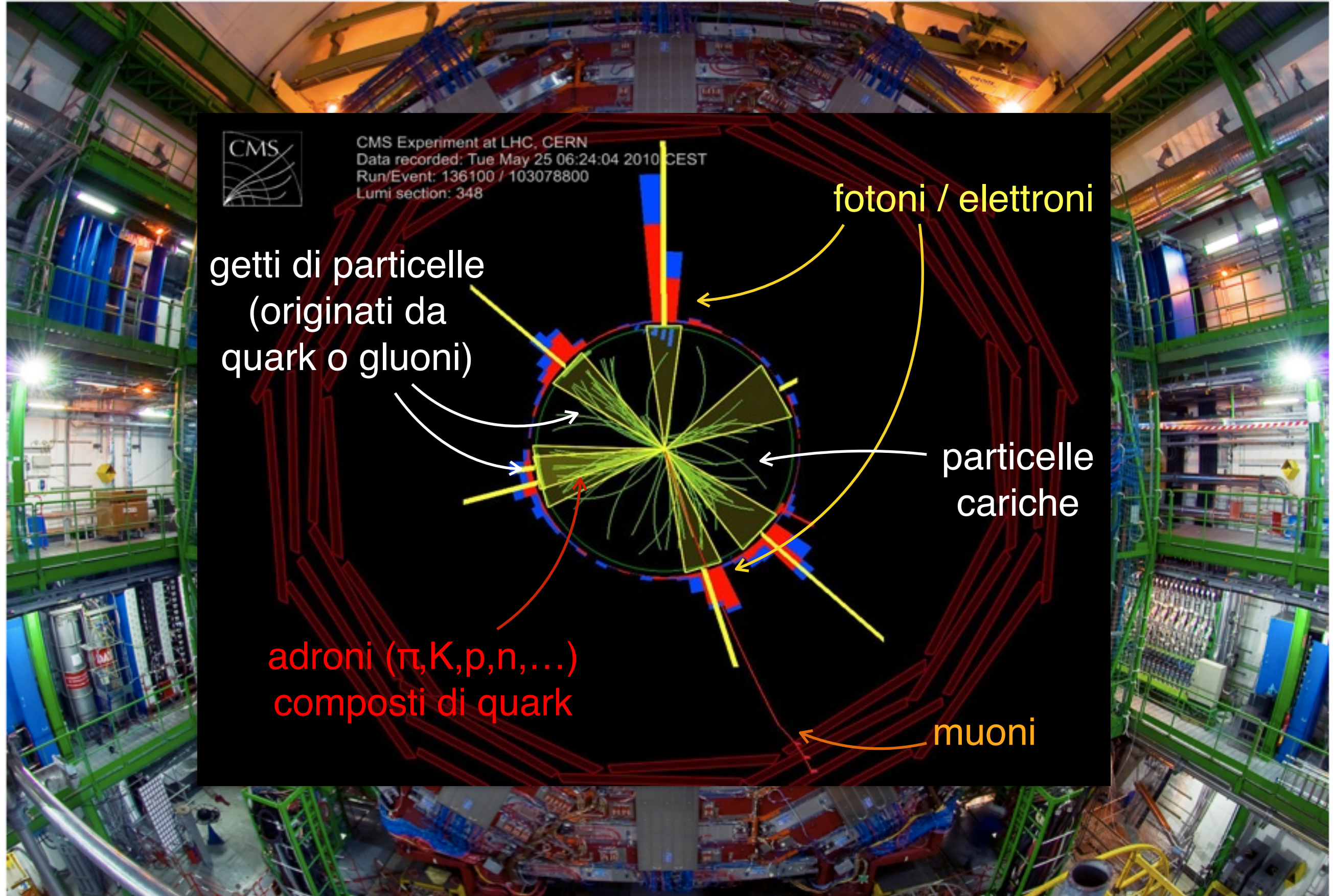


# rivelazione di particelle



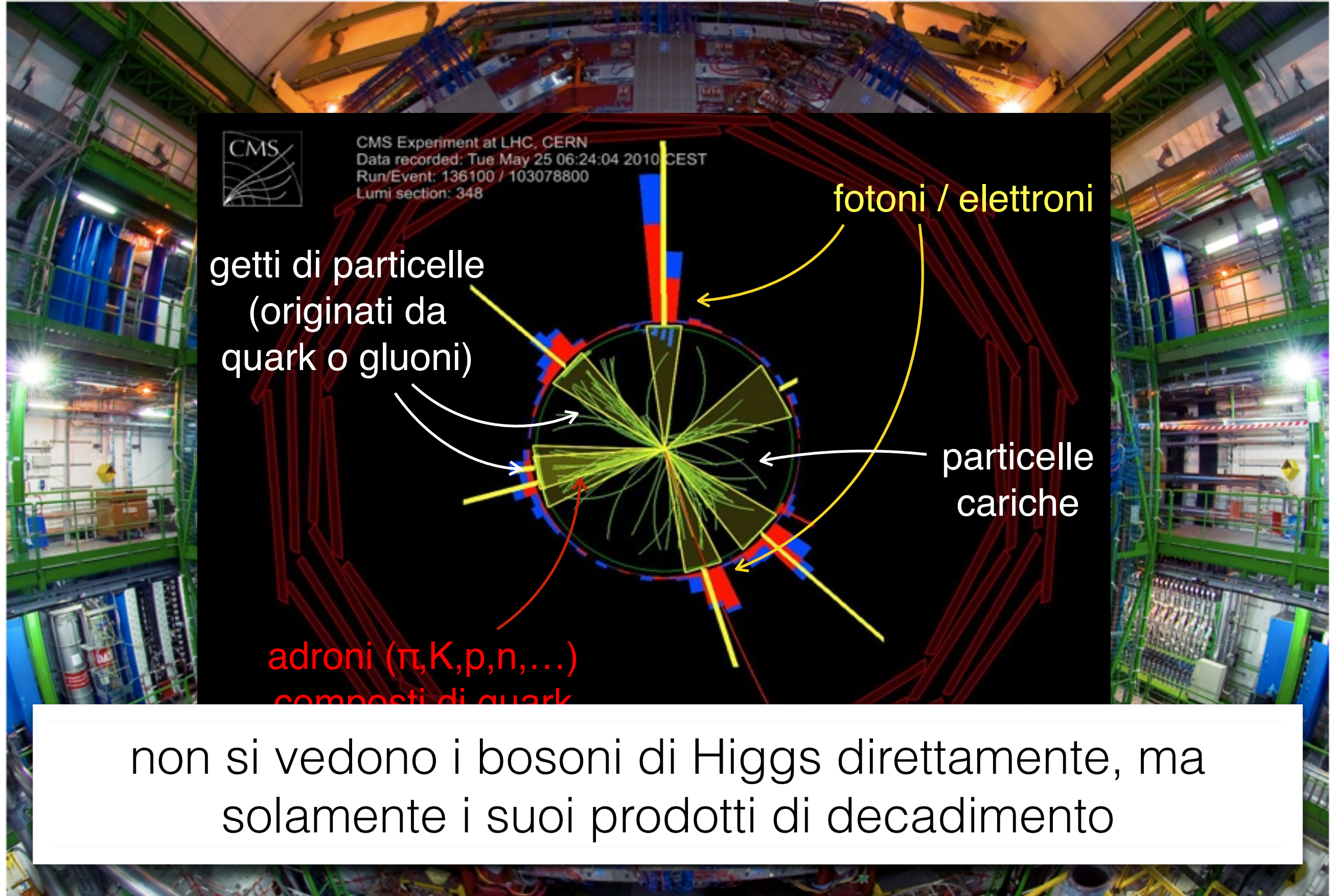


# la visualizzazione degli eventi



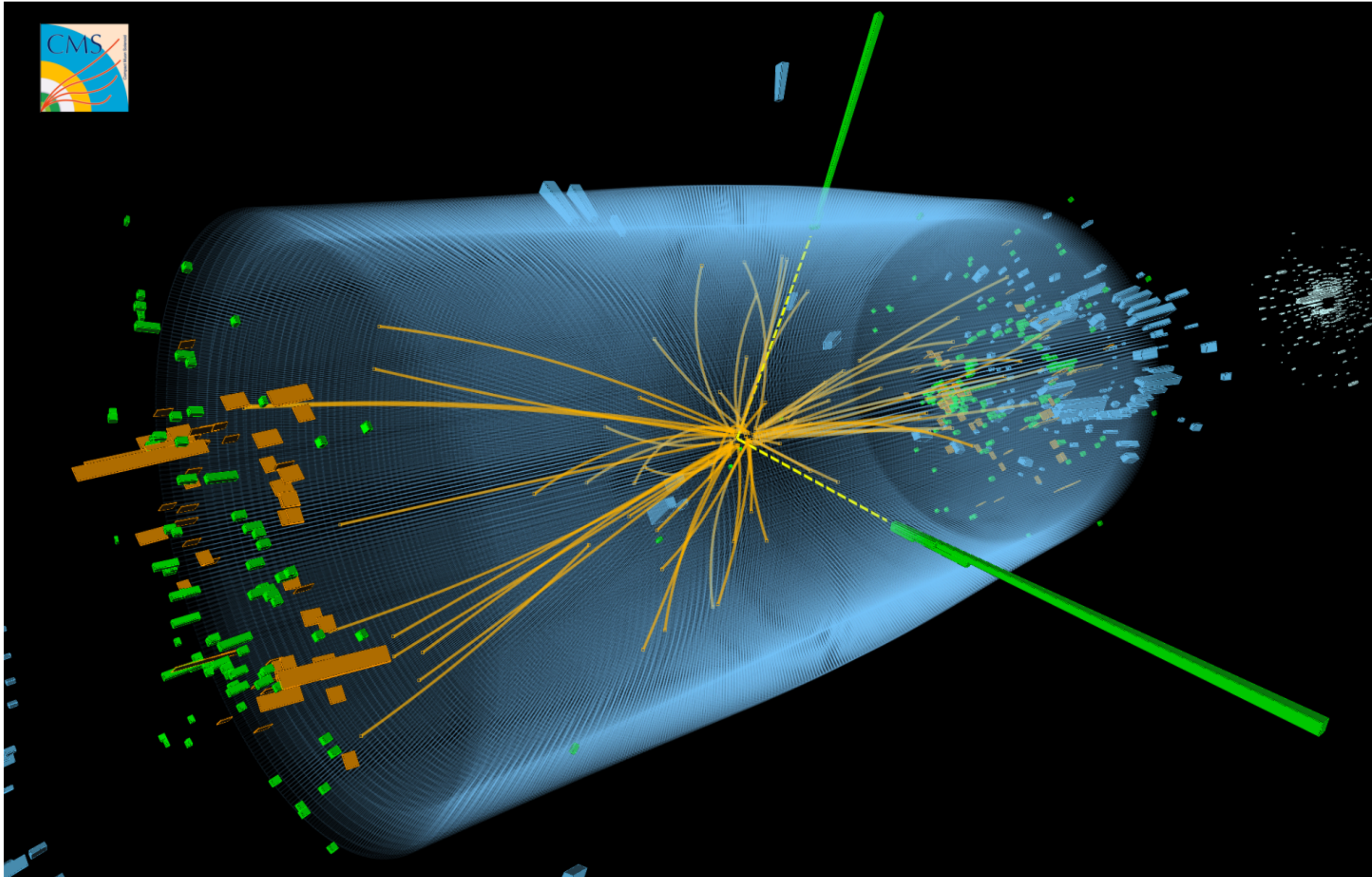


# la visualizzazione degli eventi



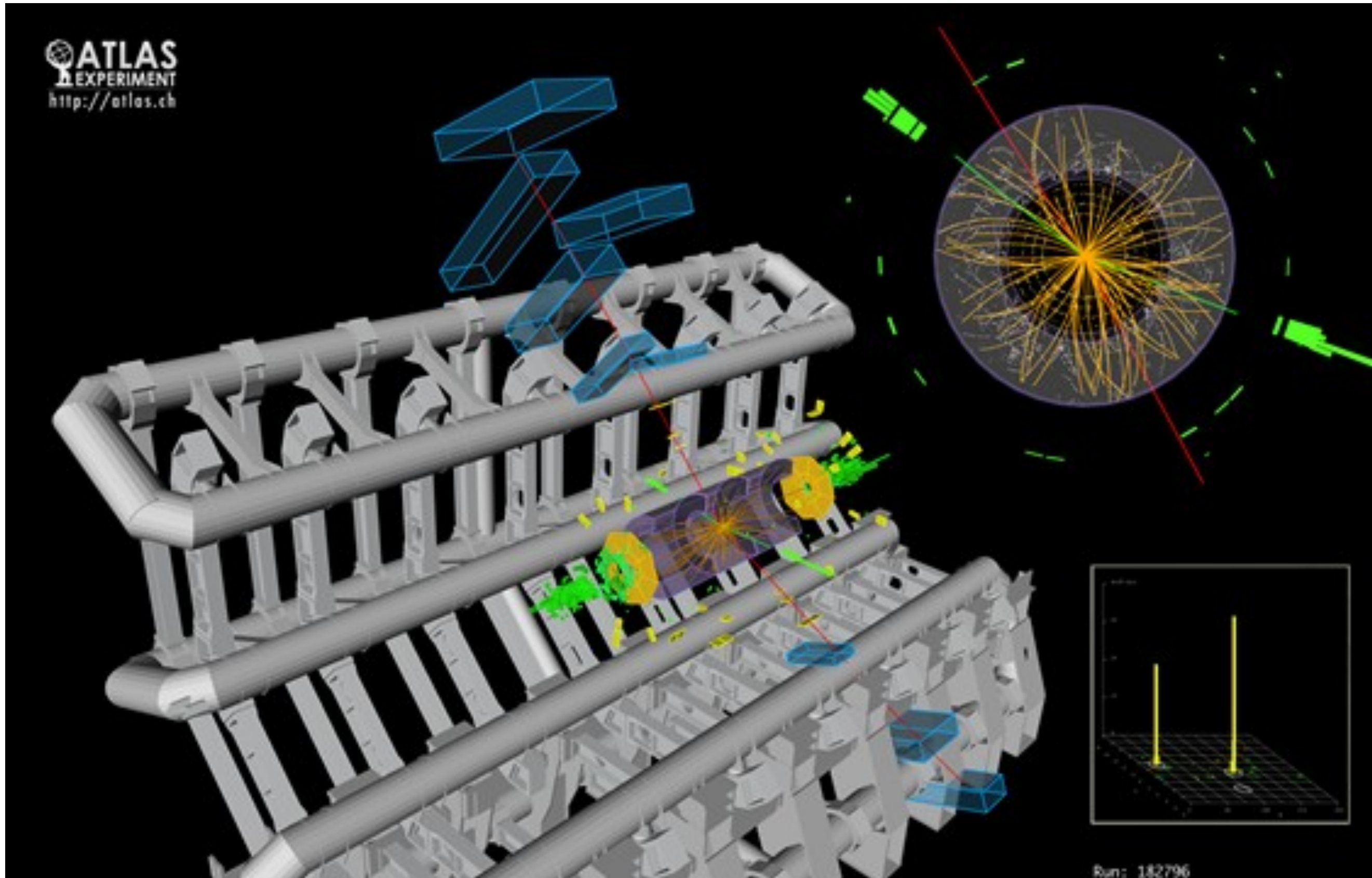


# due fotoni, $h \rightarrow \gamma\gamma$ ?



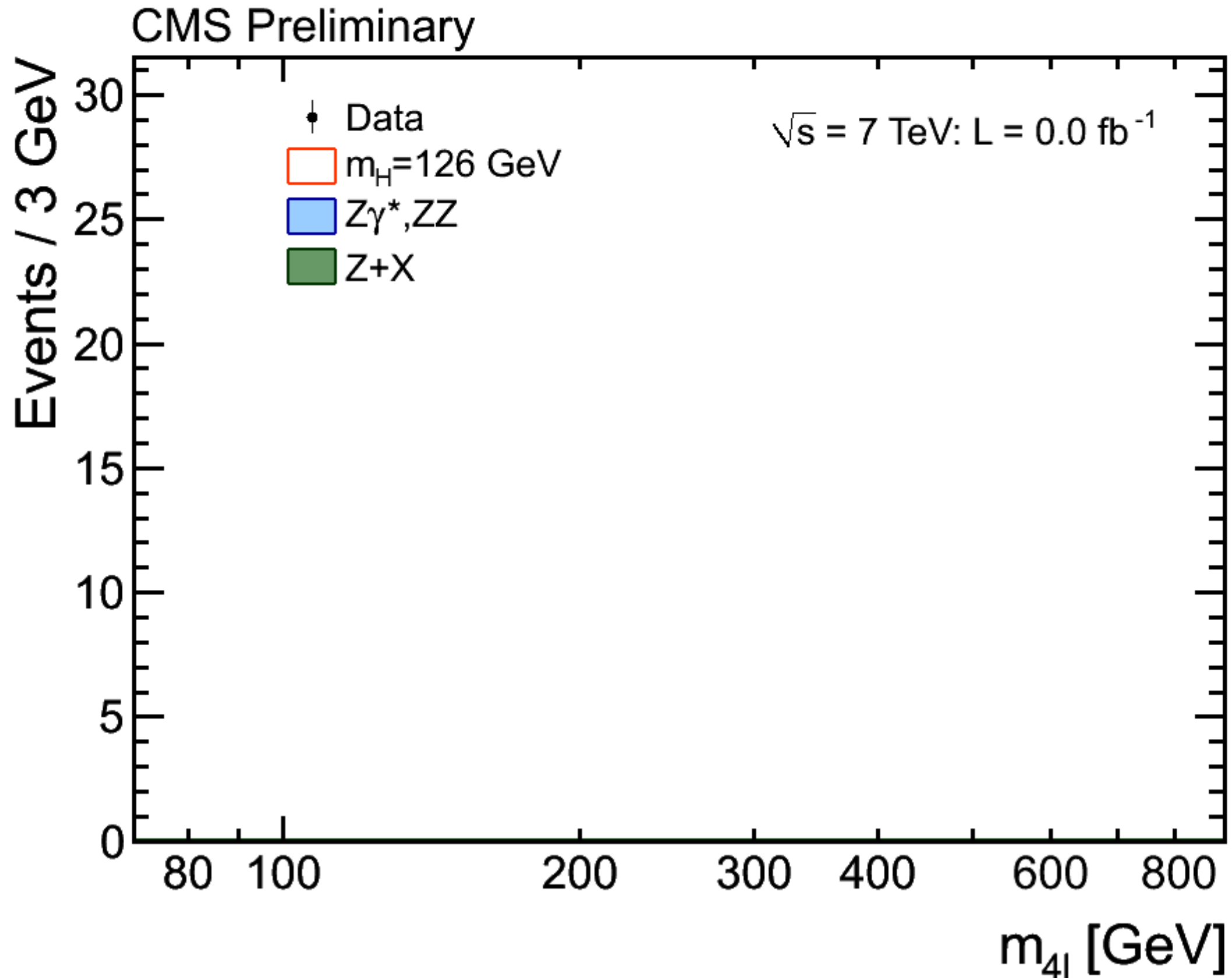


due e e due  $\mu$ ,  $h \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^- \mu^+\mu^-$  ?



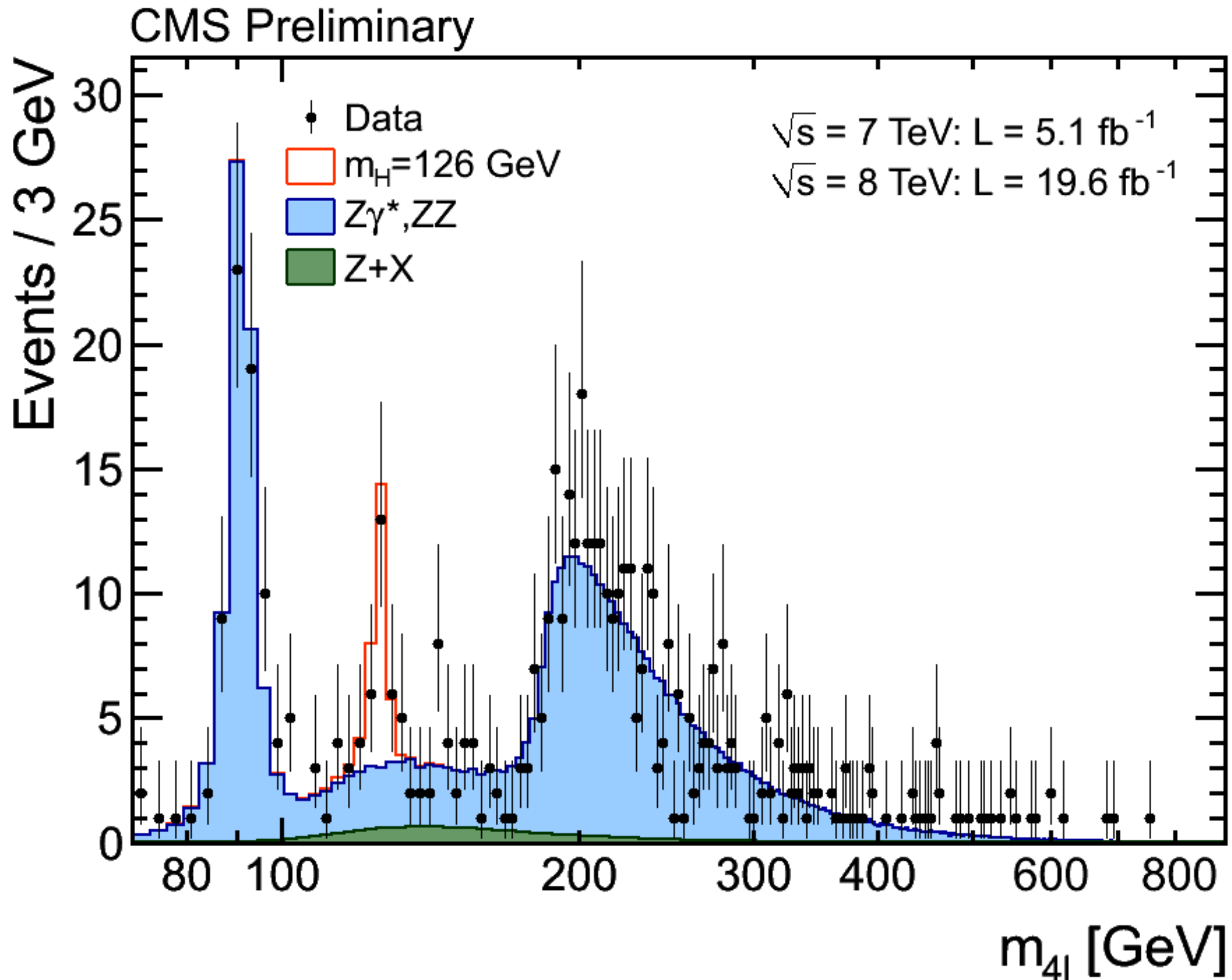


# la scoperta del bosone di Higgs





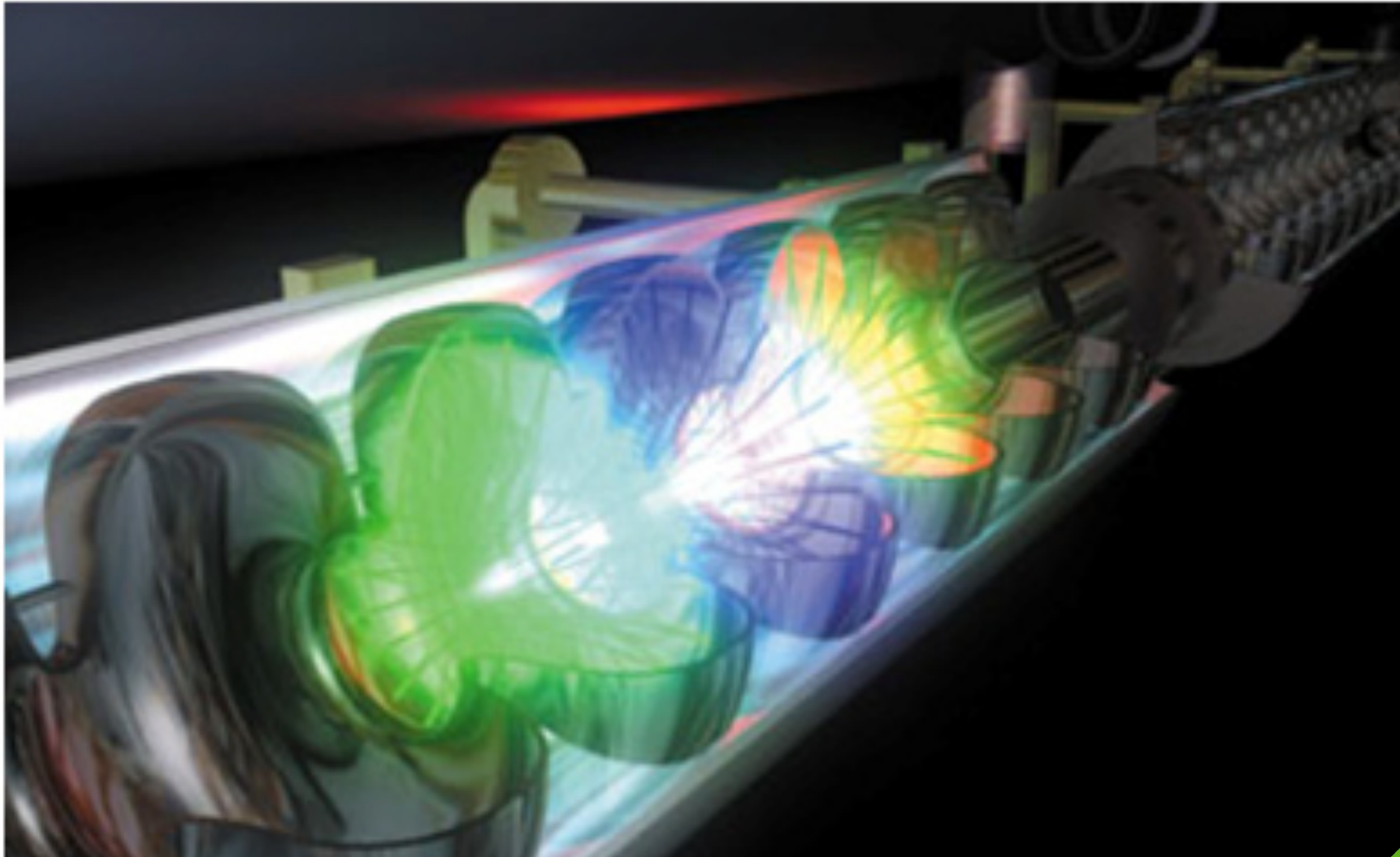
# la scoperta del bosone di Higgs





# quanto funziona il modello... a livello microscopico?

- Large Hadron Collider (LHC), CERN (2008 - oggi)



bosone di Higgs





# alla base della teoria

campo  
elettromagnetico,  
interazioni fra  
bosoni vettori

azione delle forze  
sui fermioni

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

campo di Higgs,  
sua interazione con  
bosoni vettori

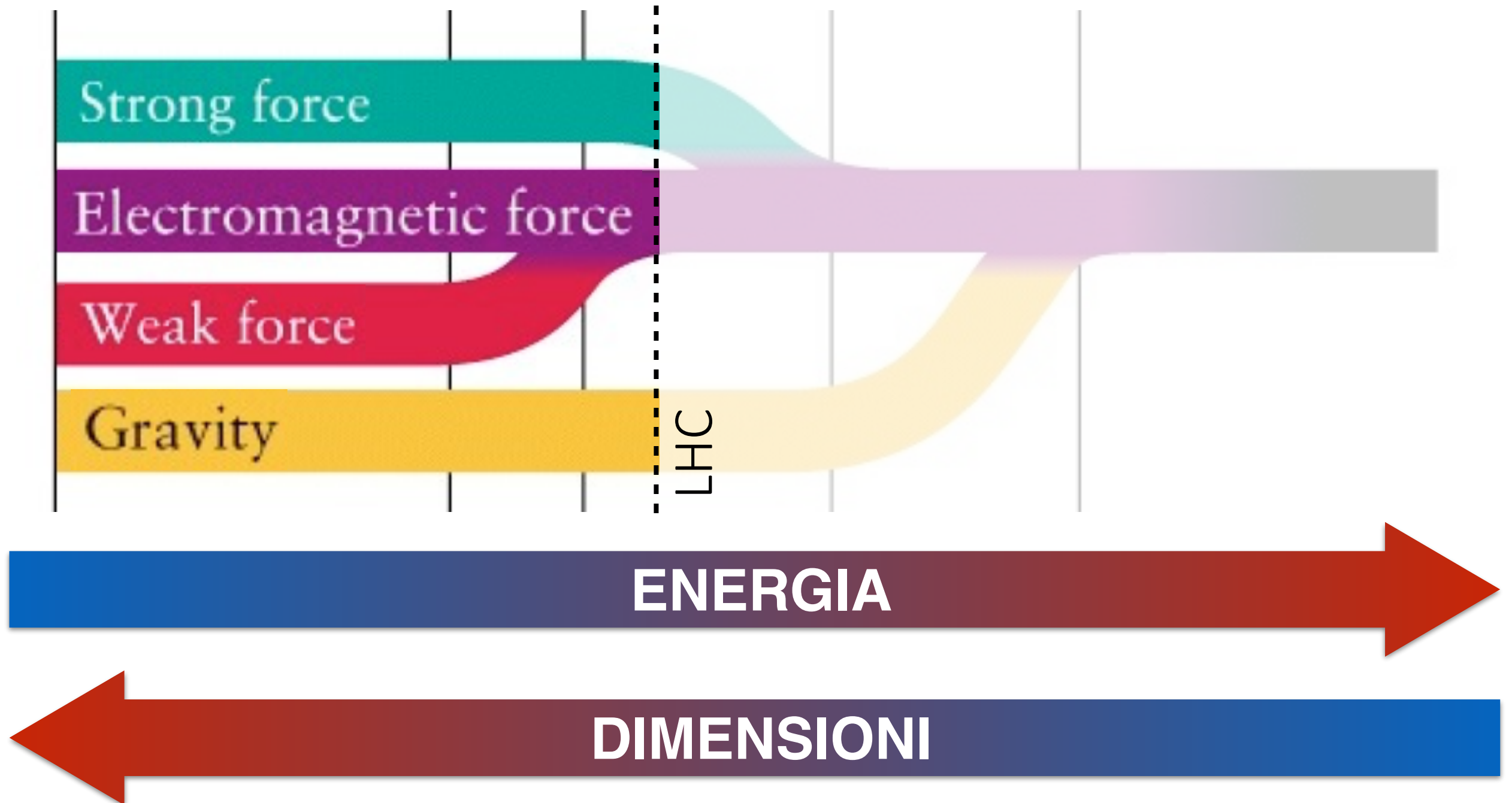
massa dei fermioni,  
loro interazione con  
il campo di Higgs

$$f^{abc} \partial_\mu a^a \partial^\mu b^b \partial^\mu c^c - \frac{1}{2} g^2 f^{abc} f^{ade} a^b a^c a^d a^e +$$



# reductio ad unum...

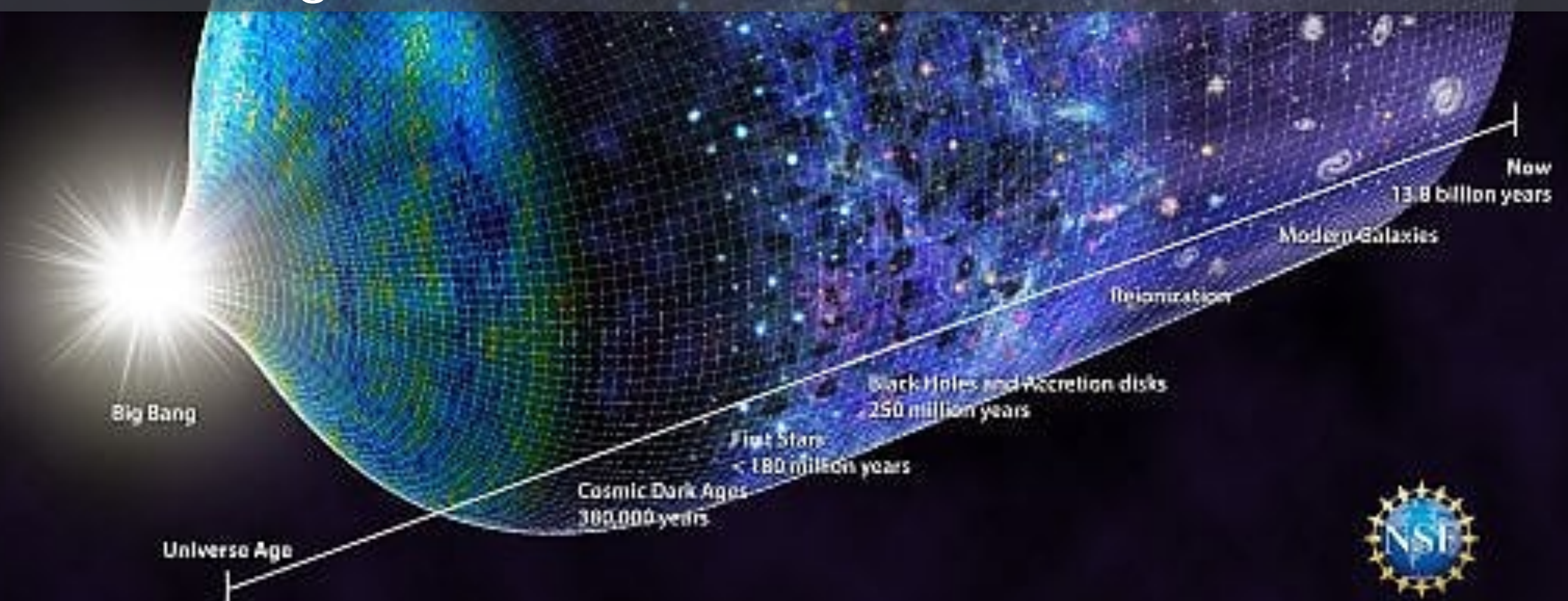
- a grande energie **le forze si unificano**: hanno intensità confrontabile
- descritte da un'**unica teoria matematica**





# a ritroso nel tempo

- dal Big Bang l'universo si espande, quindi in passato era **più denso e più caldo**
- studiare interazioni elementari ed energie sempre più alte è come compiere **un viaggio a ritroso nel tempo** verso l'origine dell'Universo





# a ritroso nel tempo

- dal Big Bang l'universo si espande, quindi in passato era **più denso e più caldo**
- studiare interazioni elementari ed energie sempre più alte è come compiere **un viaggio a ritroso nel tempo** verso l'origine dell'Universo





# questioni aperte



di che cosa è fatta  
la materia oscura?

perché non c'è  
antimateria  
nell'Universo?

perché le particelle  
elementari hanno  
masse così  
diverse?

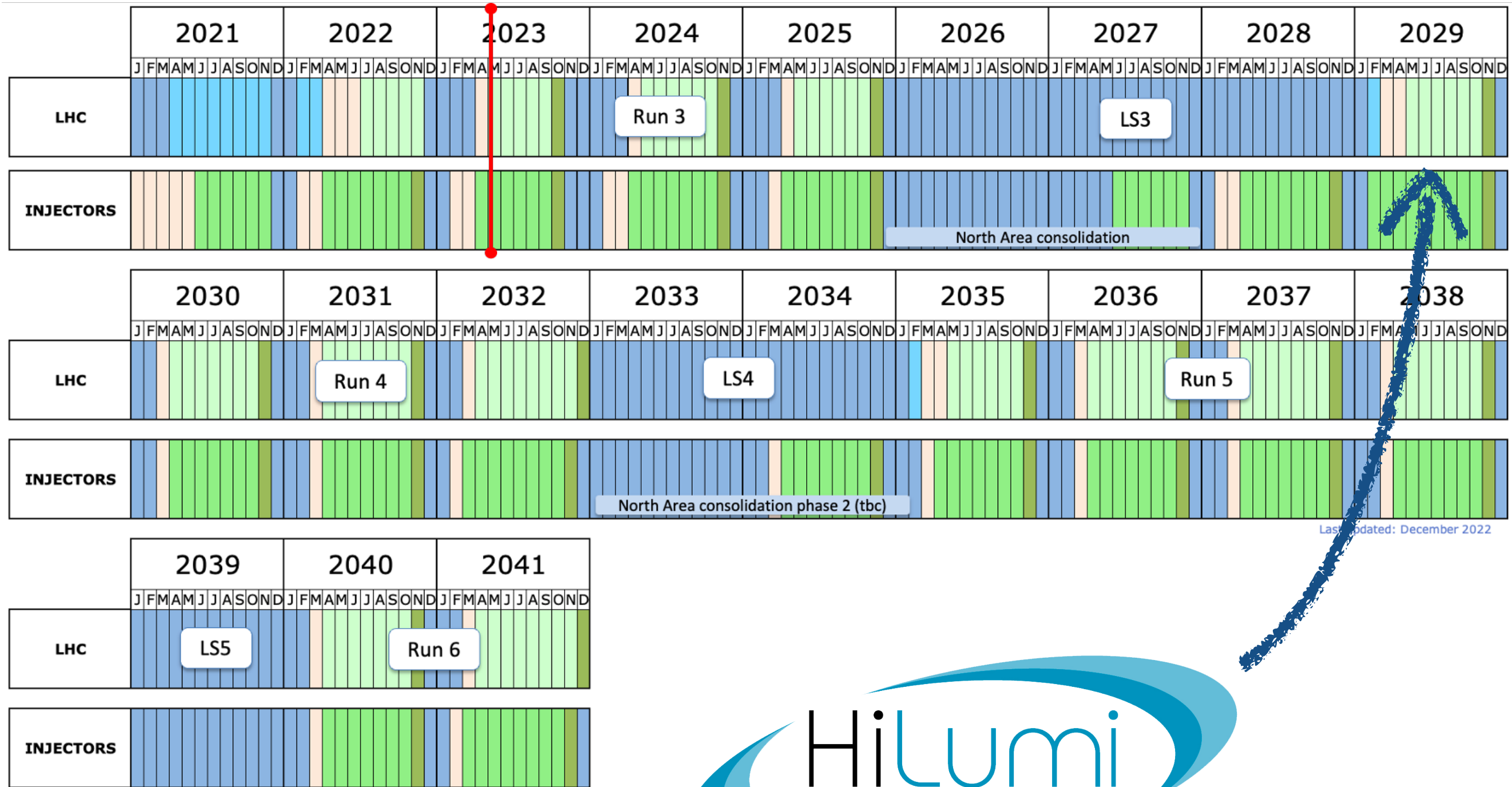
come si fa ad  
unificare la gravità  
con le altre forze?

il neutrino è uguale  
alla sua  
antiparticella?

quale è la massa  
del neutrino?



# il futuro all'LHC



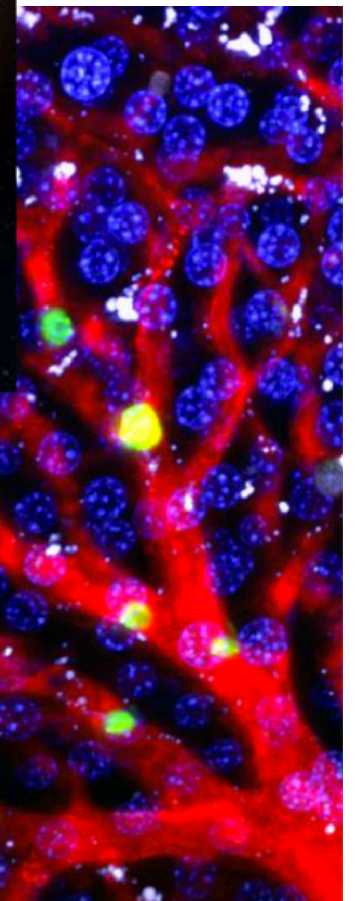
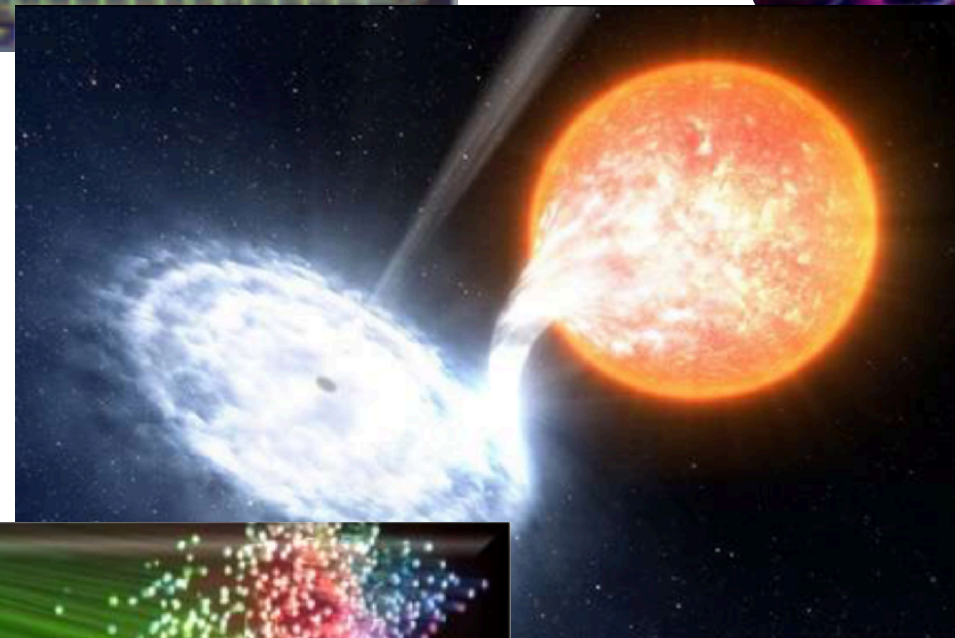
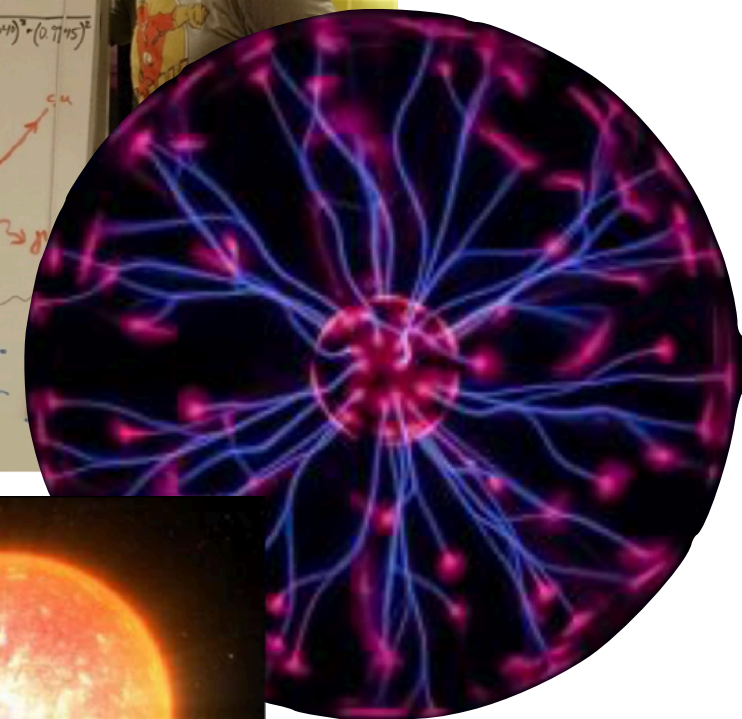
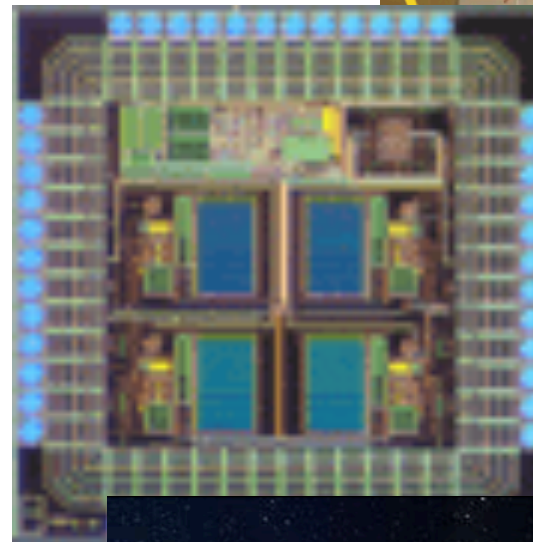
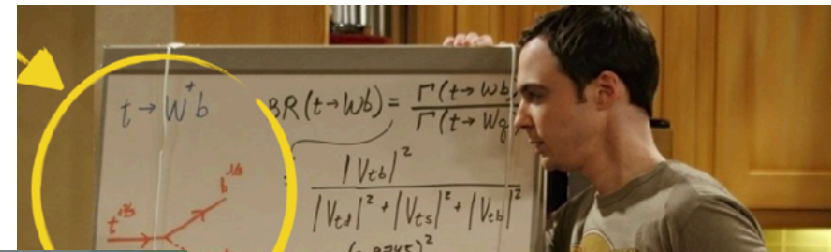


<b>laurea</b>	I	meccanica classica, fondamenti matematici, laboratorio di meccanica
	II	elettromagnetismo ed ottica, matematica avanzata, laboratorio di e.m. ed ottica
	III	fisica moderna, matematica per la fisica, laboratori di indirizzo
<b>laurea magistrale</b>	IV	corsi e laboratori specialistici di indirizzo
	V	tesi di laurea
<b>dottorato di ricerca</b>	3 anni	corsi specialistici, scuole internazionali, ricerca scientifica



# gli indirizzi di fisica

- Fisica delle Particelle
- Fisica Teorica
- Fisica dei Plasmi
- Elettronica
- Biofisica
- Fisica Applicata
- Astrofisica
- Fisica dello Stato Solido
- Informazione Quantistica
- Intelligenza Artificiale





# che cosa sa fare un fisico?



# che cosa sa fare un fisico?

- **impara velocemente** cose nuove
- **si adatta** efficacemente a circostanze mutevoli
- capisce il **quadro generale** dei problemi
- **coordina** gruppi di lavoro eterogenei mantenendo chiaro l'obiettivo finale
- trova la **parte intellettualmente stimolante** del lavoro che sta facendo



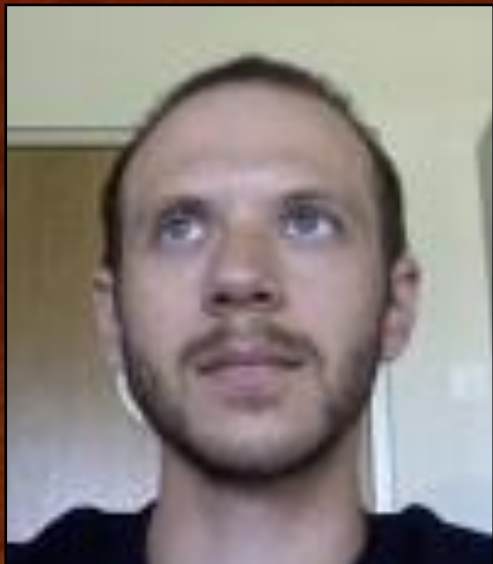
**Physics is like sex: sure, it may  
give some practical results,  
but that's not  
why we do it.**

R. Feynman

**[www.fisica.unimib.it](http://www.fisica.unimib.it)**



# le vostre guide





# il programma della giornata



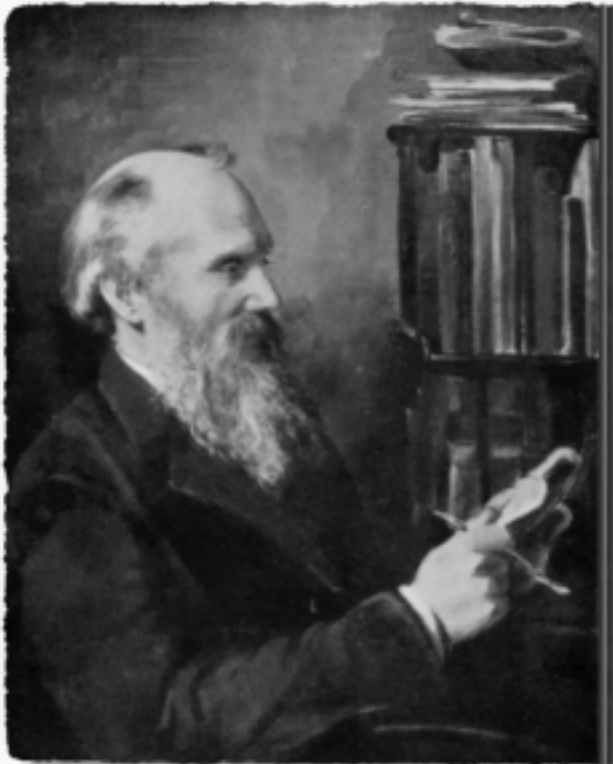


**(un po' di) problemi aperti  
nella fisica delle particelle**



# la storia è finita?

*non c'è nulla di nuovo da scoprire in fisica ormai.  
Tutto quello che rimane sono misure sempre più precise.*



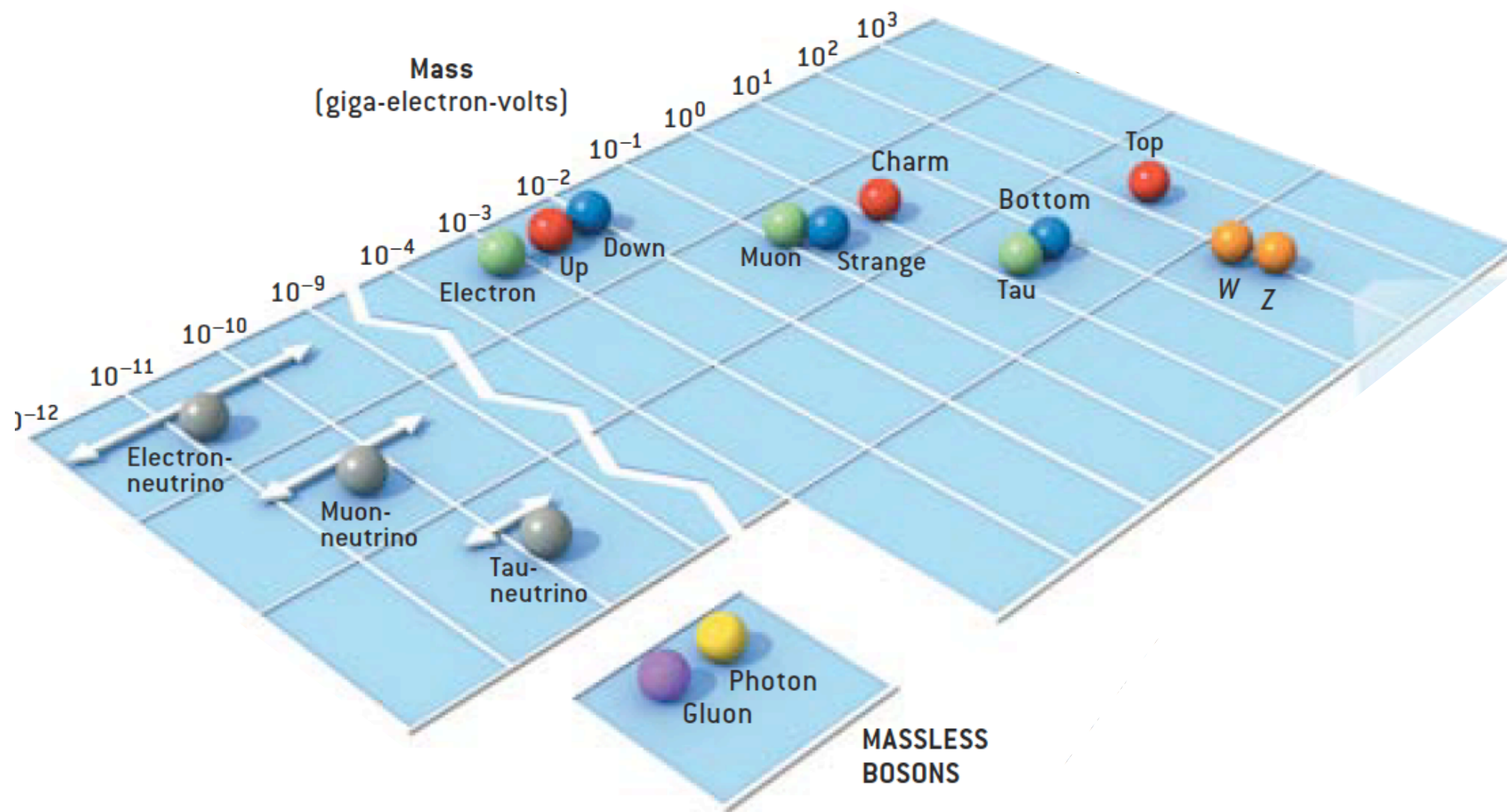
There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.

~ William Thomson (Lord Kelvin), 1900



# le masse delle particelle

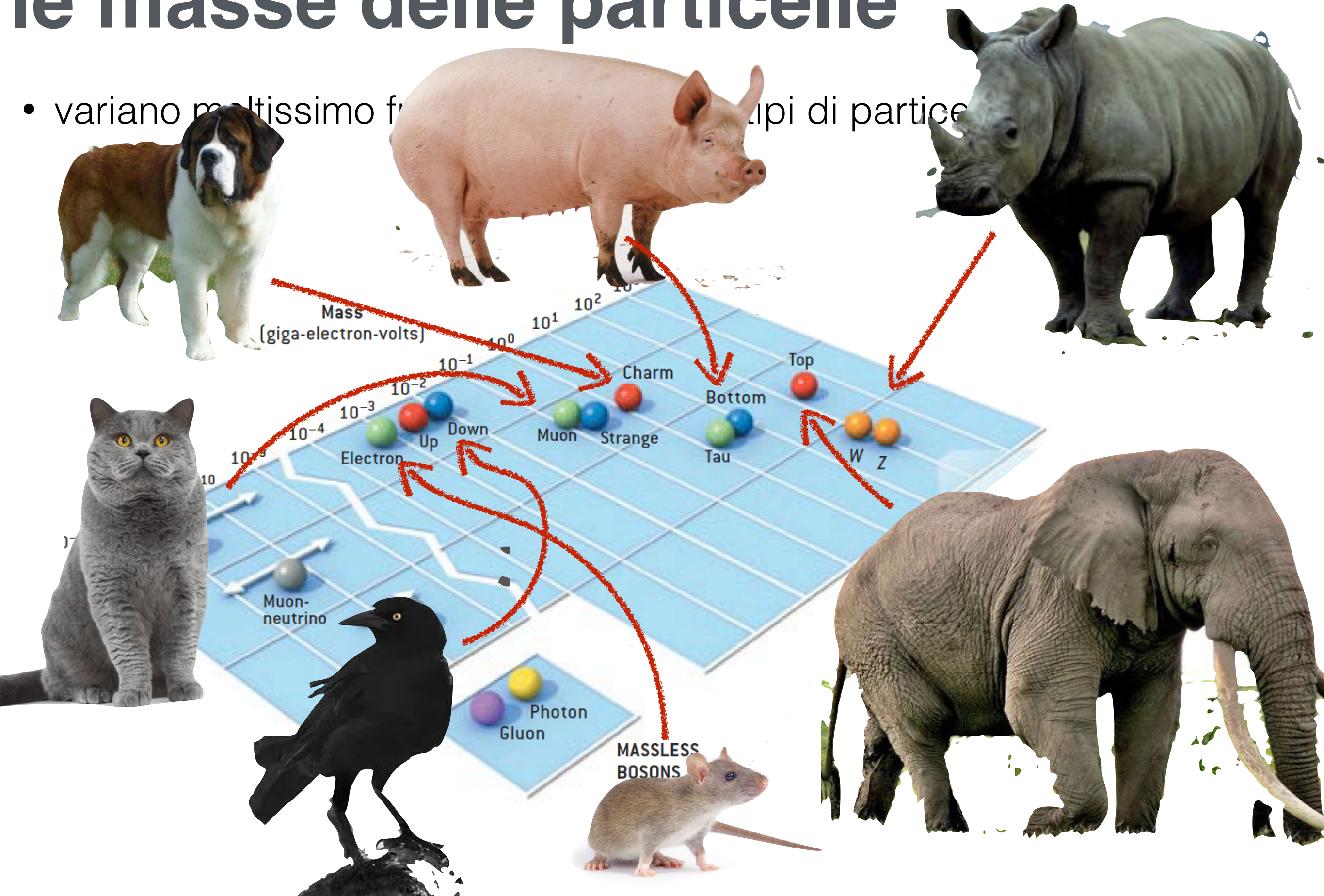
- variano moltissimo fra generazioni e fra tipi di particelle





# le masse delle particelle

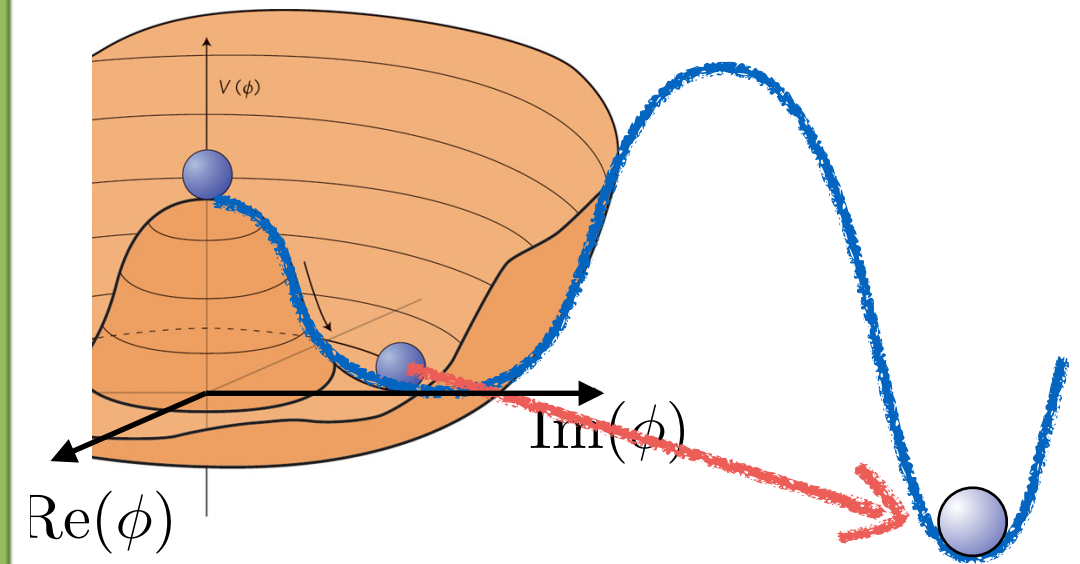
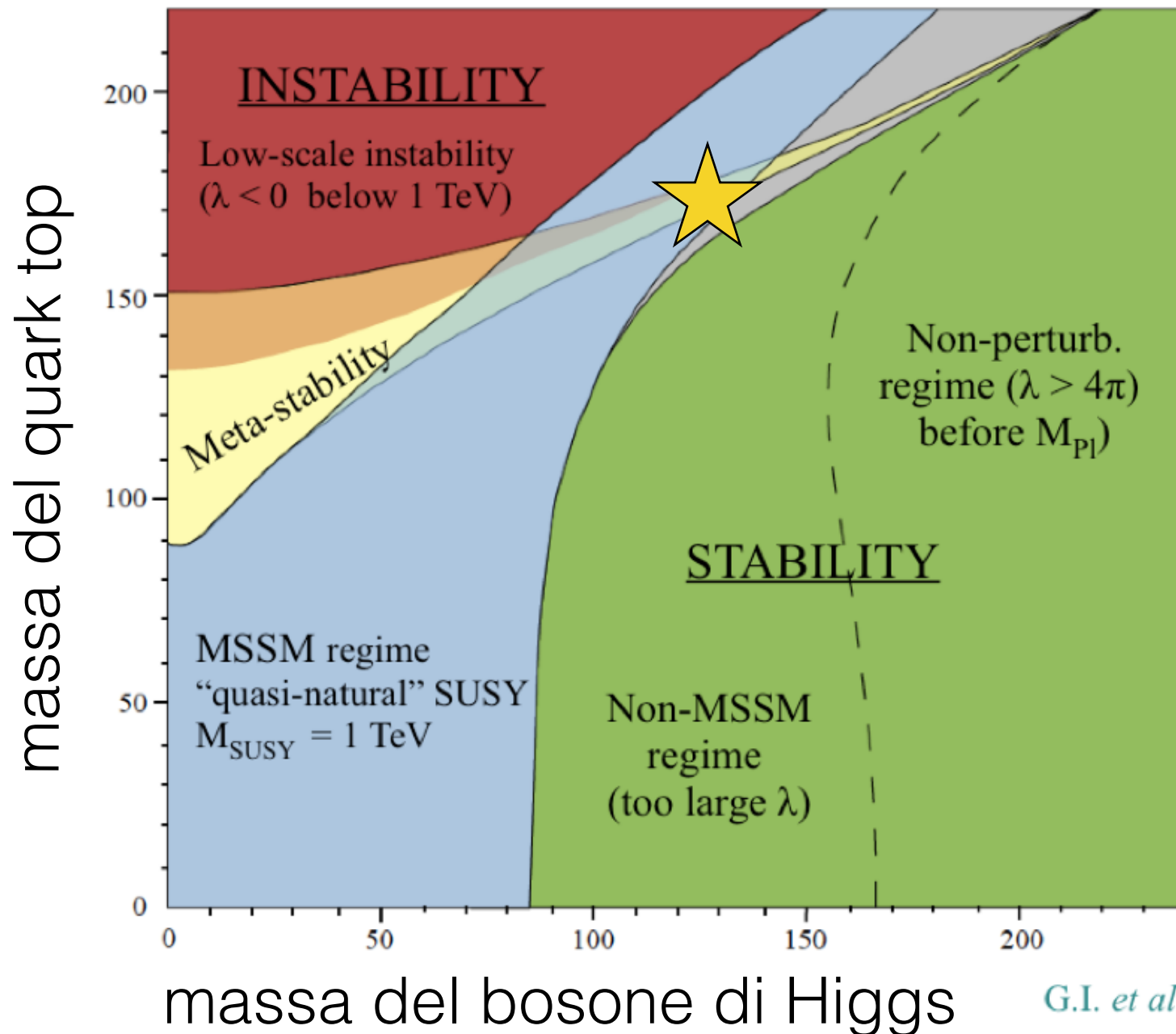
- variano moltissimo fra i diversi tipi di particelle





# il bosone di Higgs nel modello standard

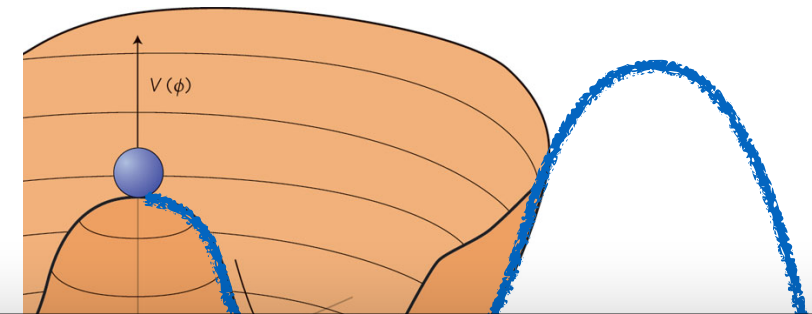
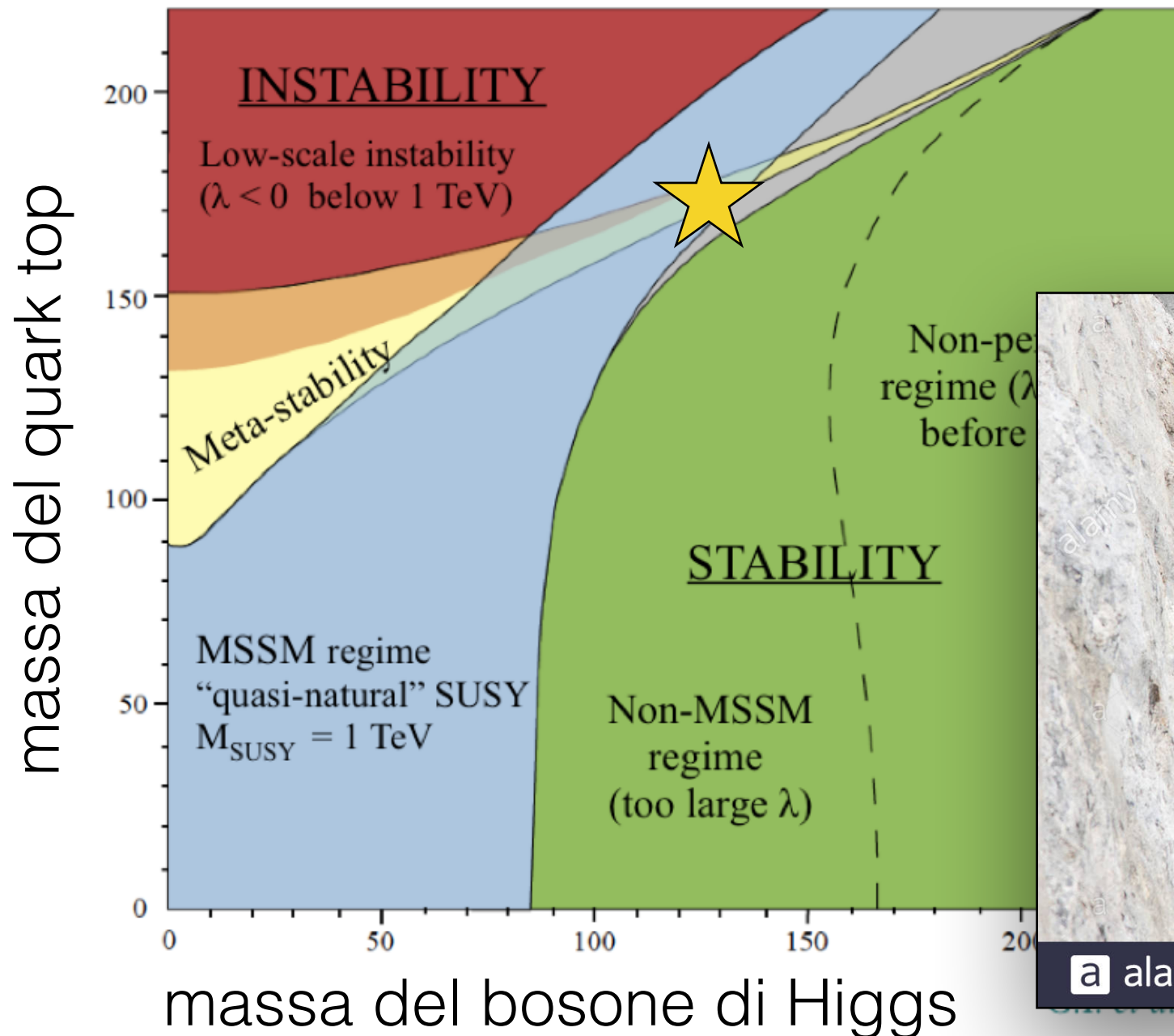
- con la massa di 125 GeV del bosone di Higgs, il modello standard potrebbe essere **meta-stabile**: il potenziale del campo di Higgs potrebbe avere altri minimi ad una energia più alta





# il bosone di Higgs nel modello standard

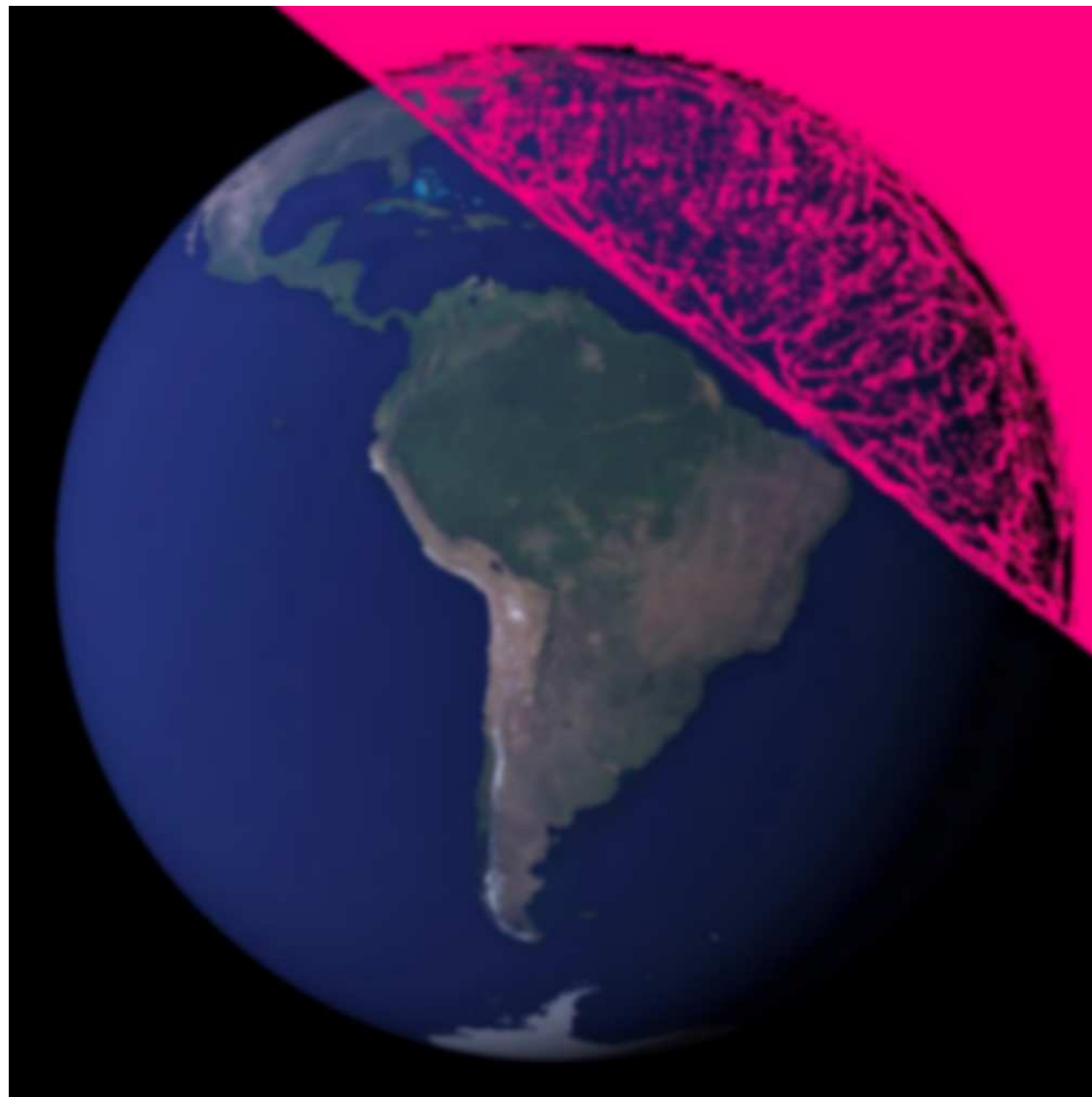
- con la massa di 125 GeV del bosone di Higgs, il modello standard potrebbe essere **meta-stabile**: il potenziale del campo di Higgs potrebbe avere altri minimi ad una energia più alta





# decadimento del vuoto

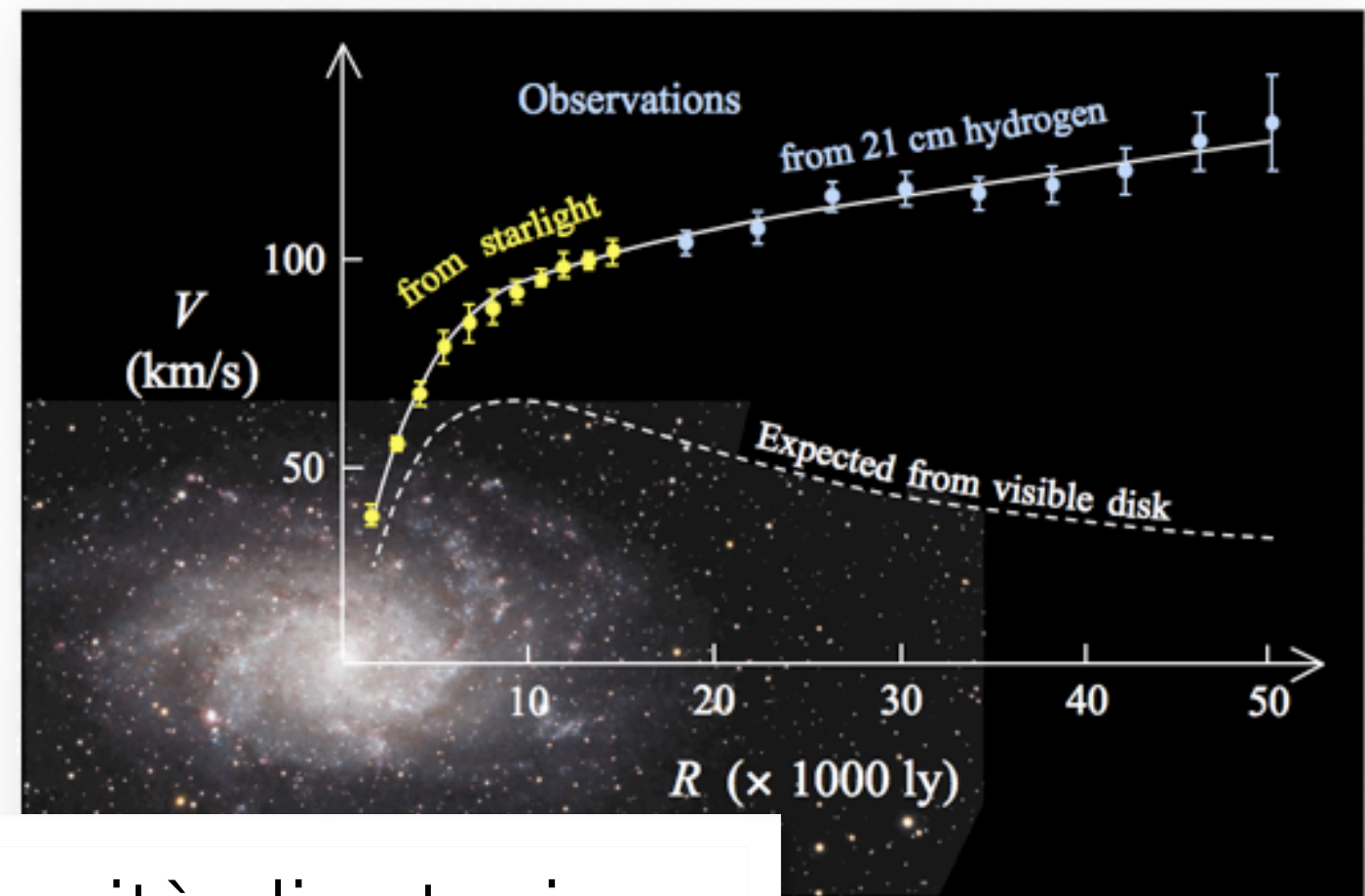
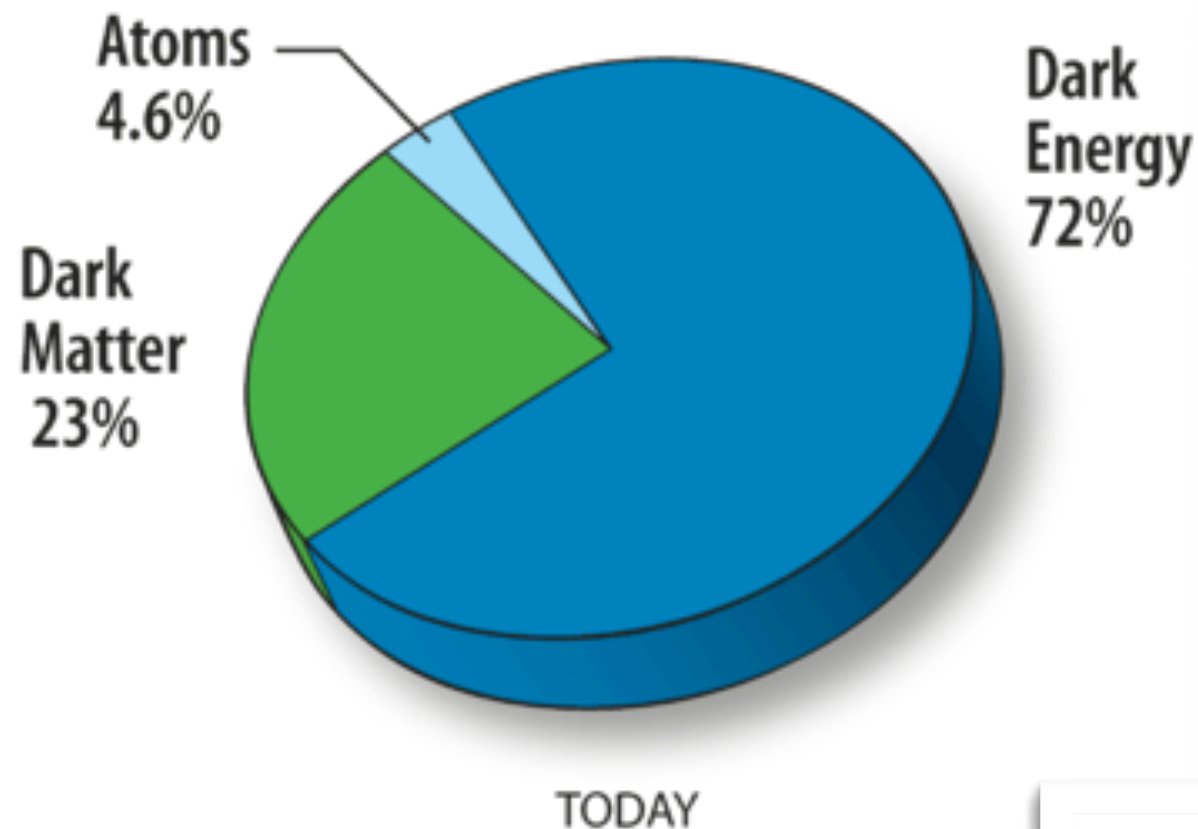
- se l'universo è in stato meta-stabile, prima o poi ci sarà **effetto tunnel verso uno stato più stabile**
- è un processo simile all'ebollizione dell'acqua
- una **bolla di energia negativa** potrebbe apparire nello spazio ed iniziare ad espandersi alla velocità della luce





# la materia oscura

- osservazioni cosmologiche misurano la quantità totale di materia ed energia nell'Universo
- il modello standard rende conto del 5%

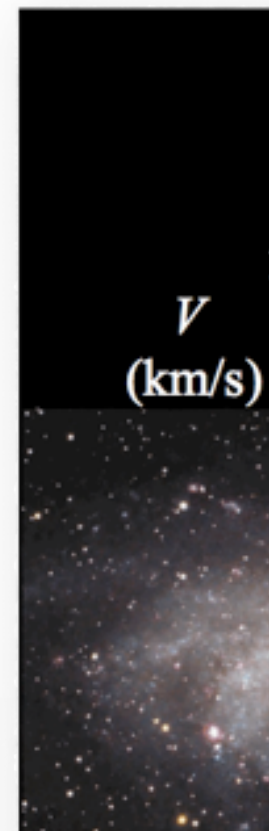
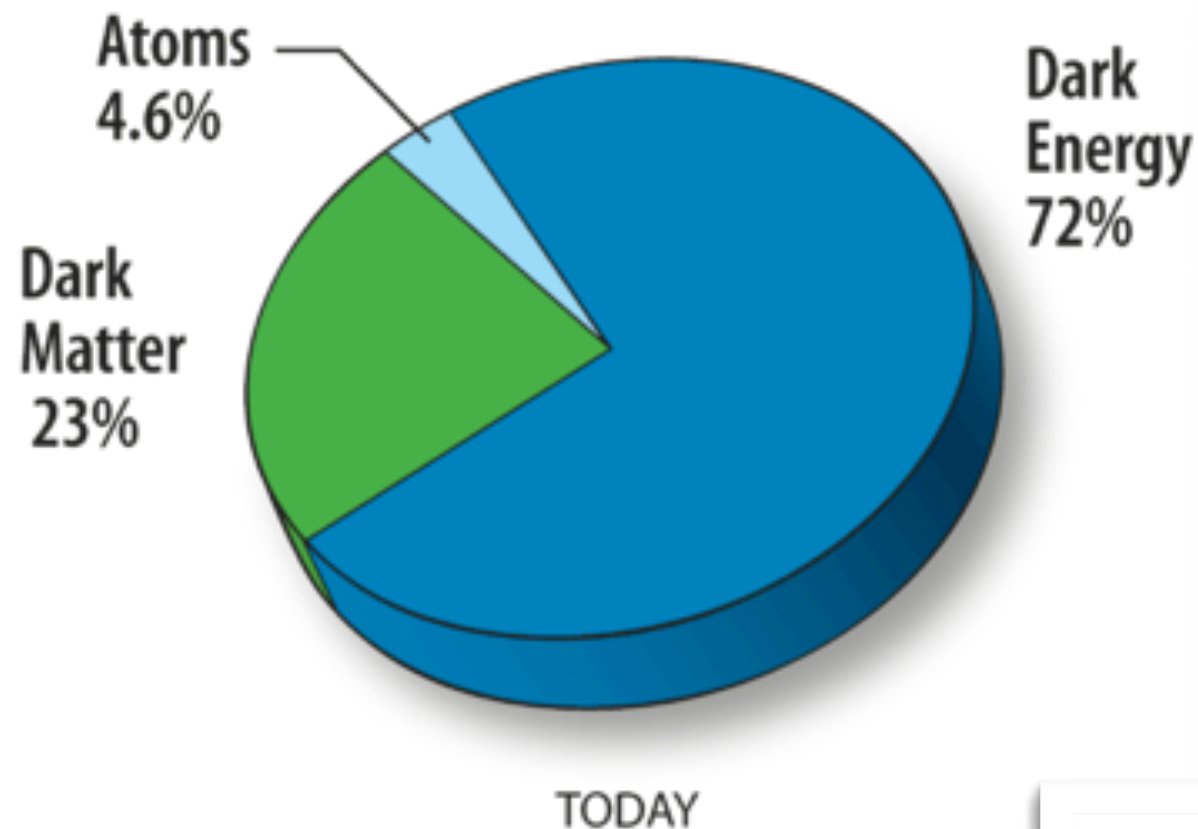


velocità di rotazione  
delle galassie



# la materia oscura

- osservazioni cosmologiche misurano la quantità totale di materia ed energia nell'Universo
- il modello standard rende conto del 5%



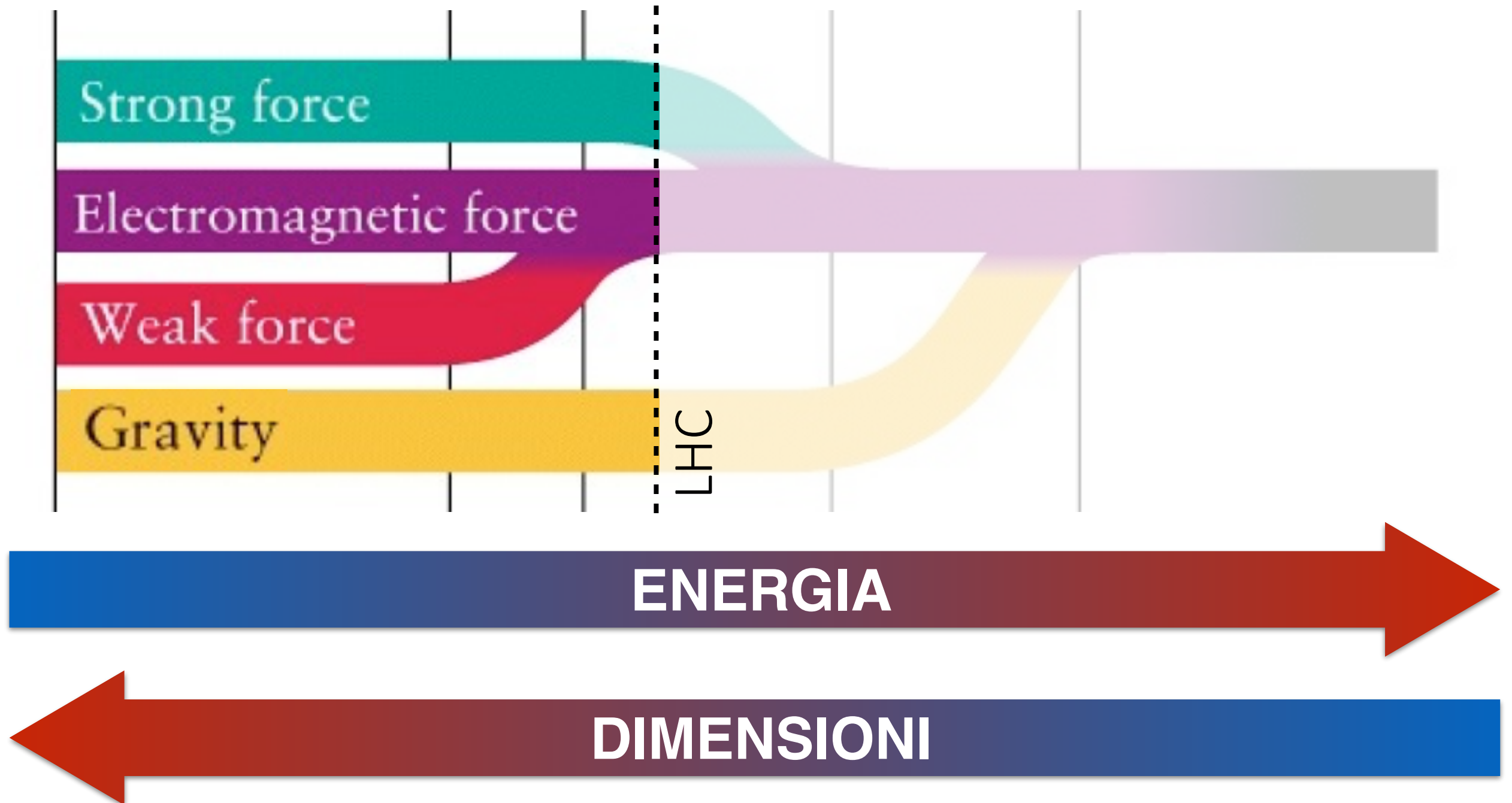
Vera Cooper Rubin at the Lowell Observatory.  
Kent Ford has his back to us. © Bob Rubin.

velocità d  
delle  $\zeta$



# l'unificazione delle forze

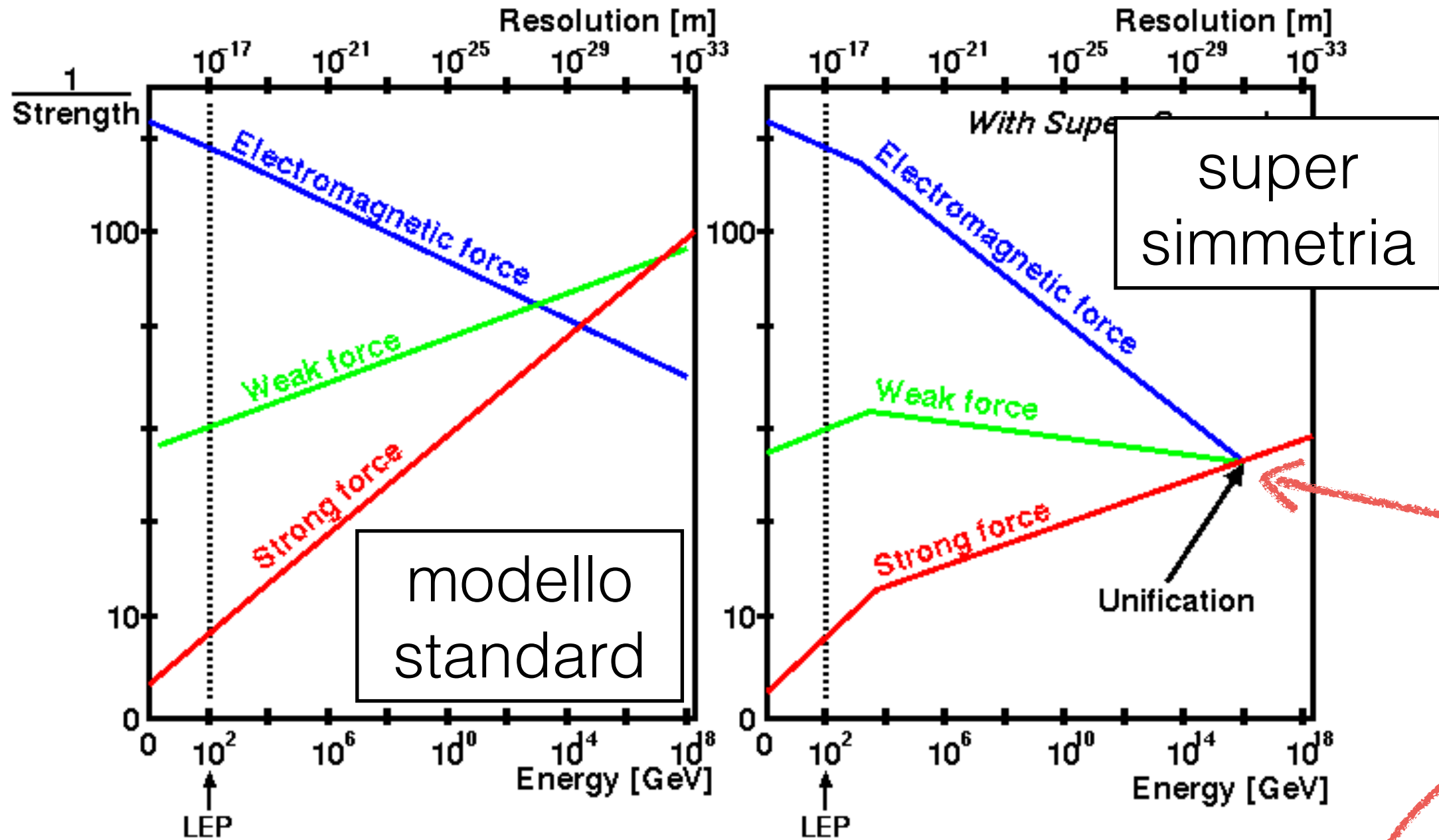
- se potessimo costruire acceleratori ancora più potenti, cosa vedremmo?





# l'unificazione delle forze

- se potessimo costruire acceleratori ancora più potenti, cosa vedremmo?



serve una **teoria nuova** perché questo accada



# dove è finita l'antimateria?

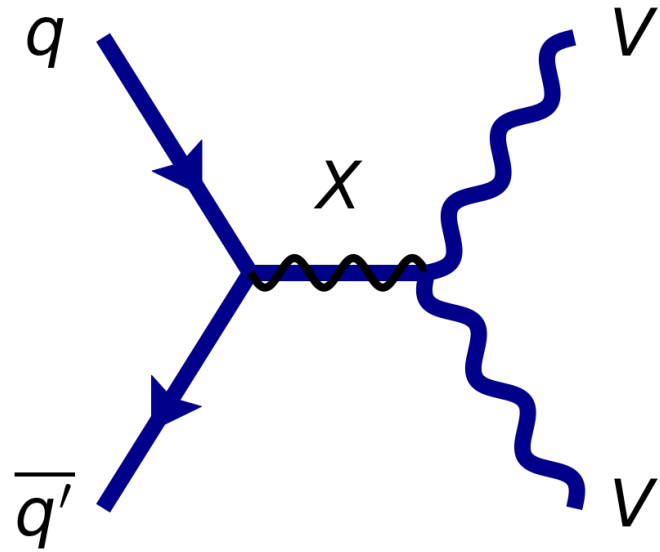
- all'istante iniziale del Big Bang l'Universo era energia pura, dalla quale è scaturita materia ed antimateria



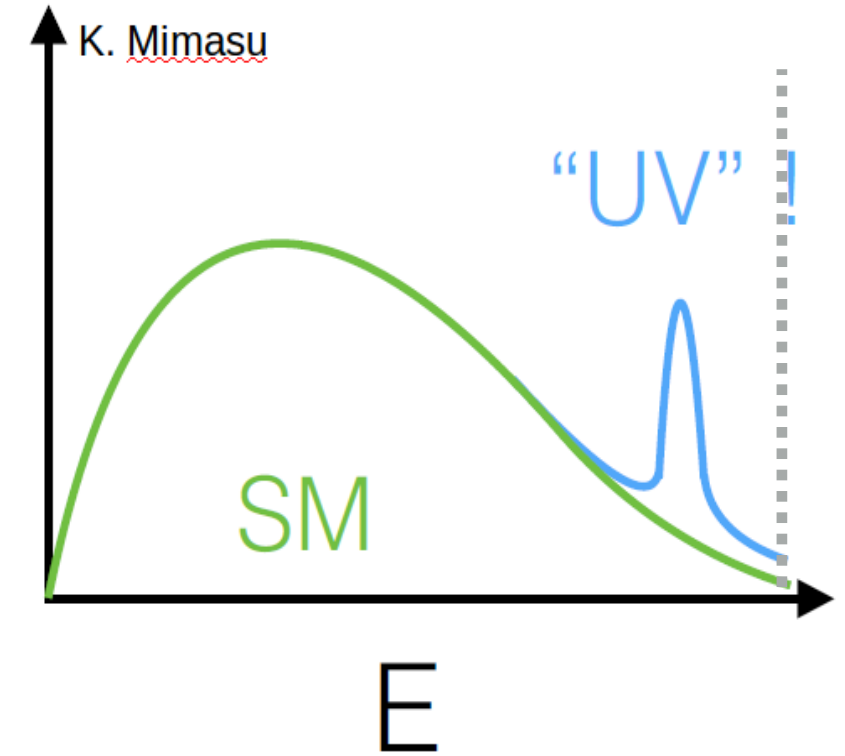
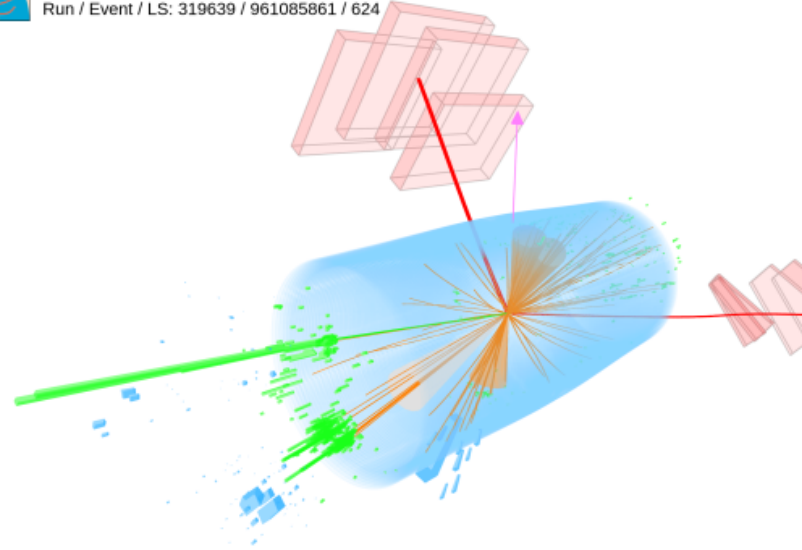


# ricerche di nuova fisica

- **effetti diretti** osservabili ad LHC



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2018-Jul-14 22:42:55.530432 GMT  
Run / Event / LS: 319639 / 961085861 / 624



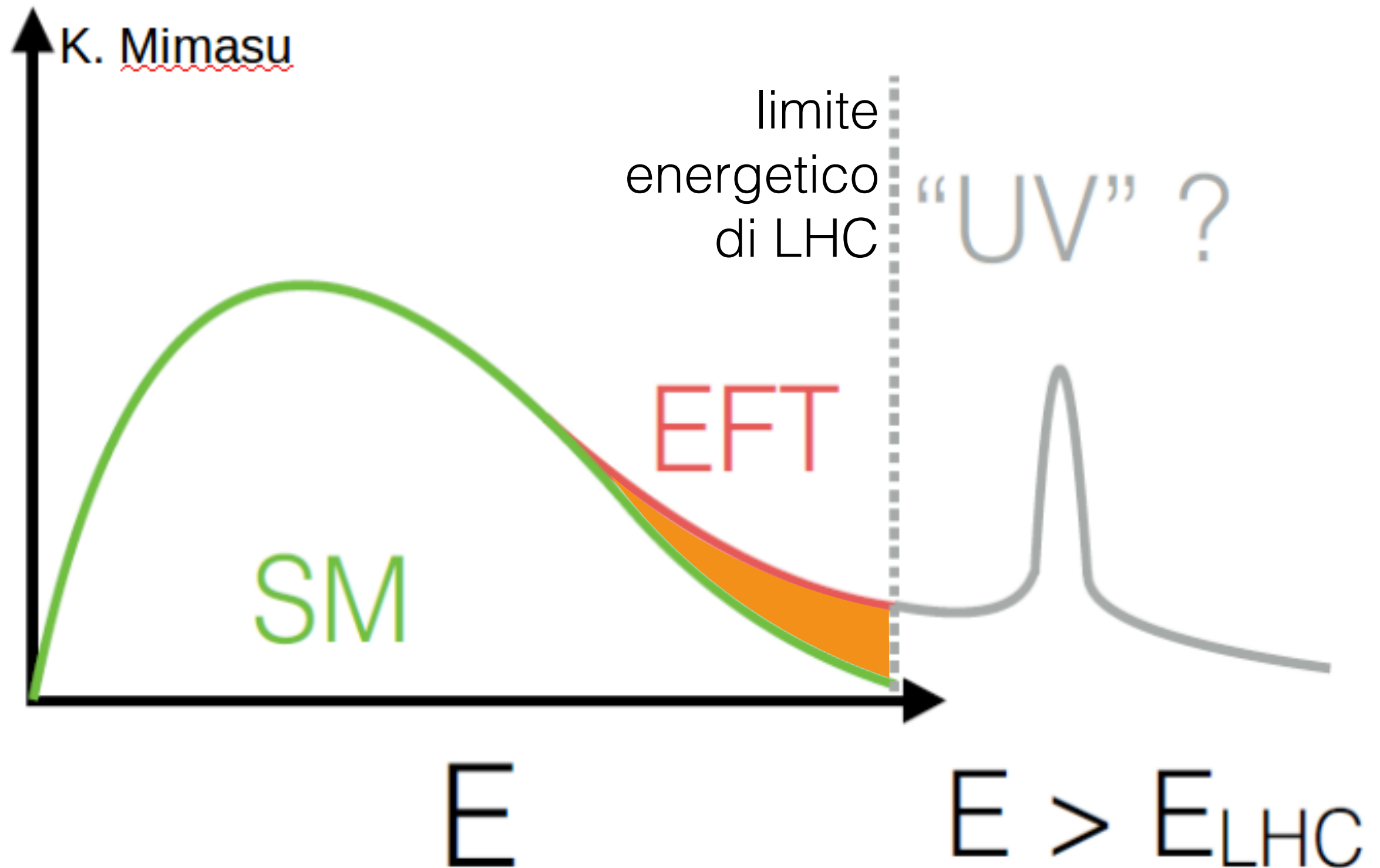
una nuova teoria  
predice un nuovo  
fenomeno



ad LHC viene osservato



# ci sono effetti indiretti?



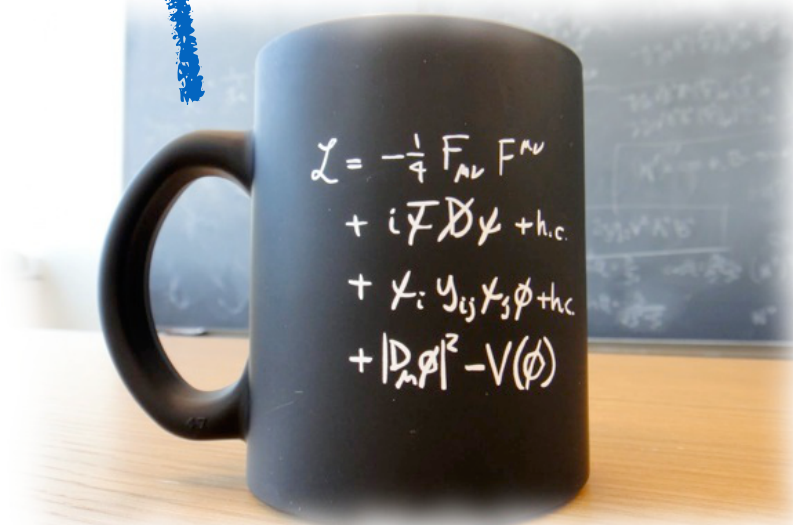


# teoria efficace di campo

**nuova teoria,**  
ignota!

**differenze** fra il Modello  
Standard e la nuova teoria

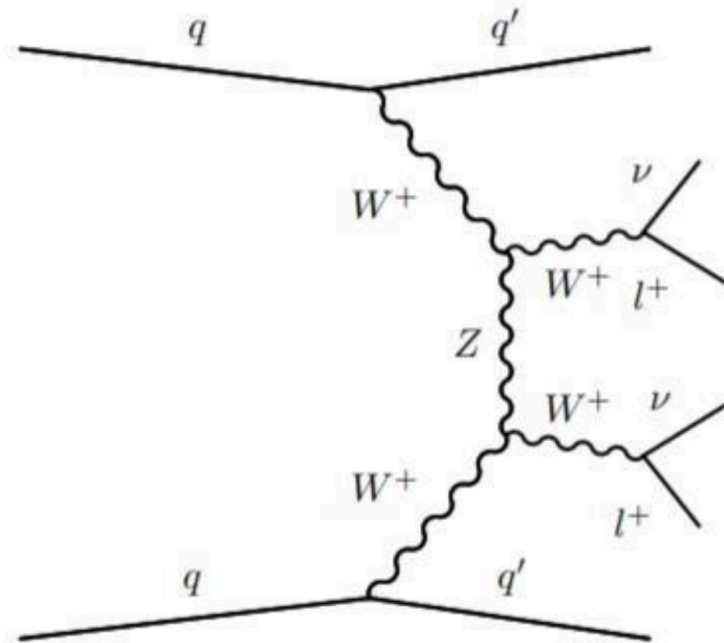
$$\mathcal{L}_{SMEFT} = \mathcal{L}_{SM} + \frac{c^{(5)}}{\Lambda} \mathcal{O}^{(5)} + \frac{1}{\Lambda^2} \sum_i c_i^{(6)} \mathcal{O}_i^{(6)} + \sum_j \sum_k \frac{1}{\Lambda^{2+k}} c_j^{(6+k)} \mathcal{O}^{(6+k)}_j$$





# strumenti: intelligenza artificiale

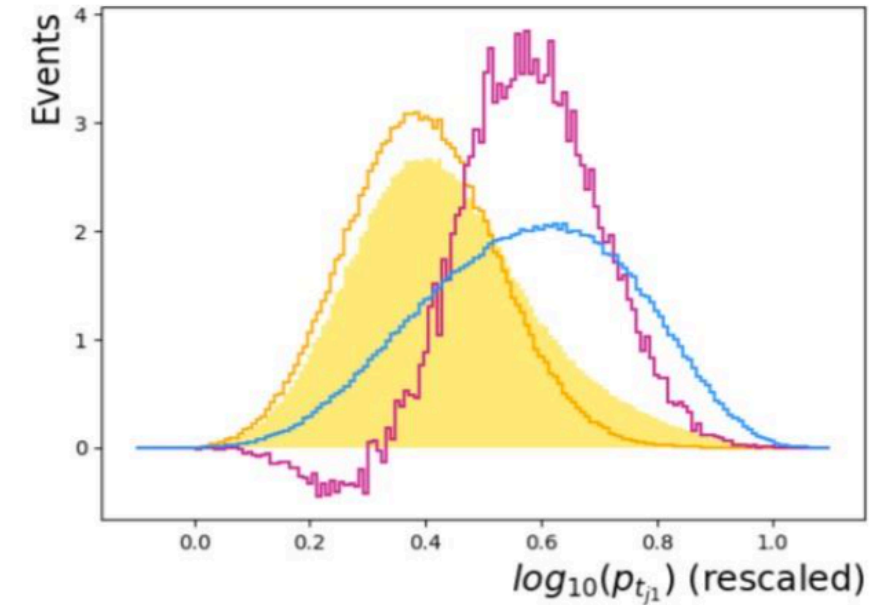
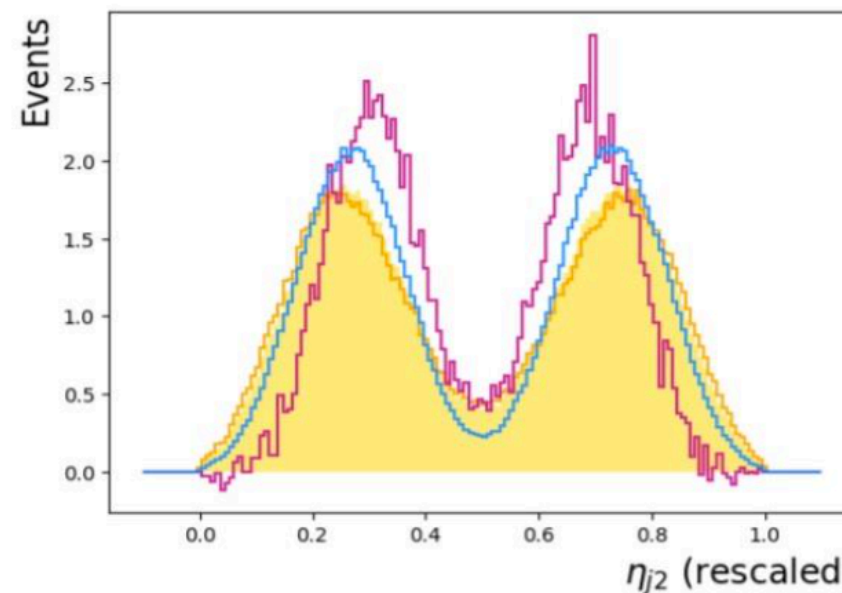
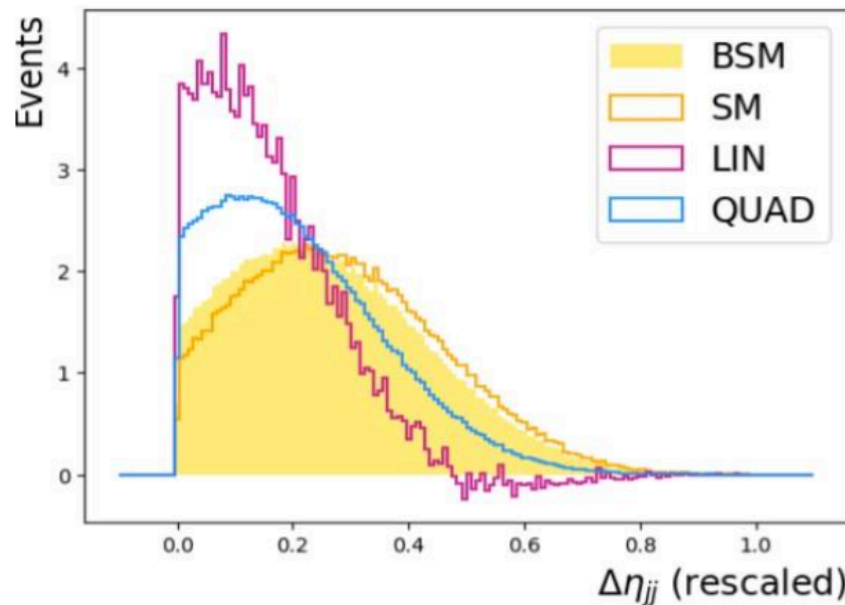
- punto di incontro fra problemi di frontiera, tecniche all'avanguardia e ambiente fecondo per il loro sviluppo



$$\mathcal{L}_{EFT} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_{i, d > 4} \frac{c_i}{\Lambda^{d-4}} \mathcal{O}^{(d_i)}$$

**MODELLO STANDARD**

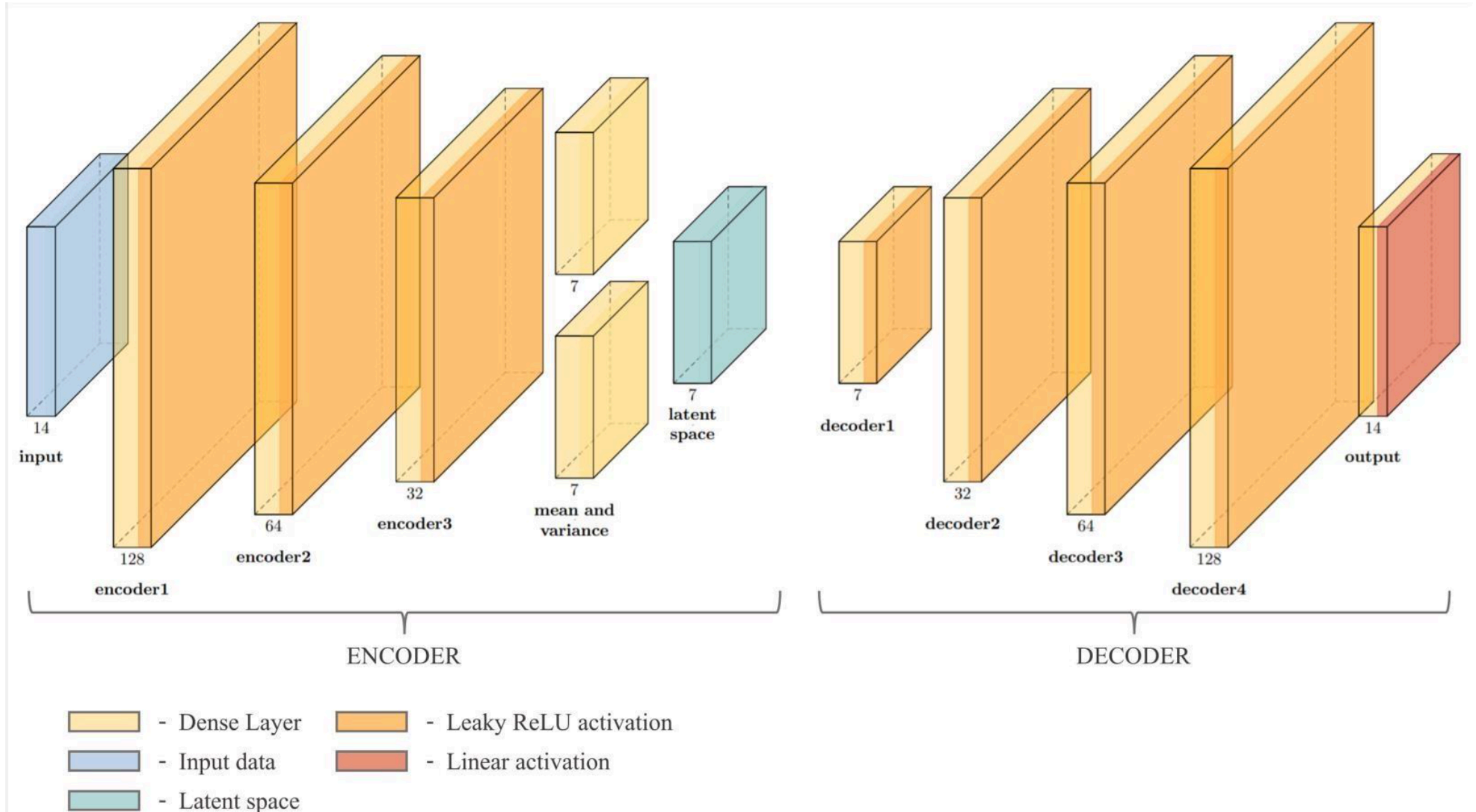
**NUOVA FISICA**





# ricerca di anomalie

- **rete neurale profonda** dedicata: *variational auto-encoder*





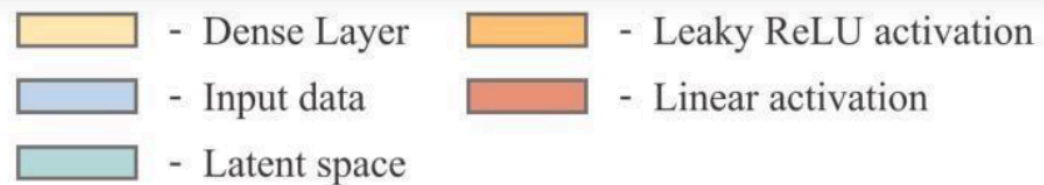
# ricerca di anomalie

- **rete neurale profonda** dedicata: *variational auto-encoder*



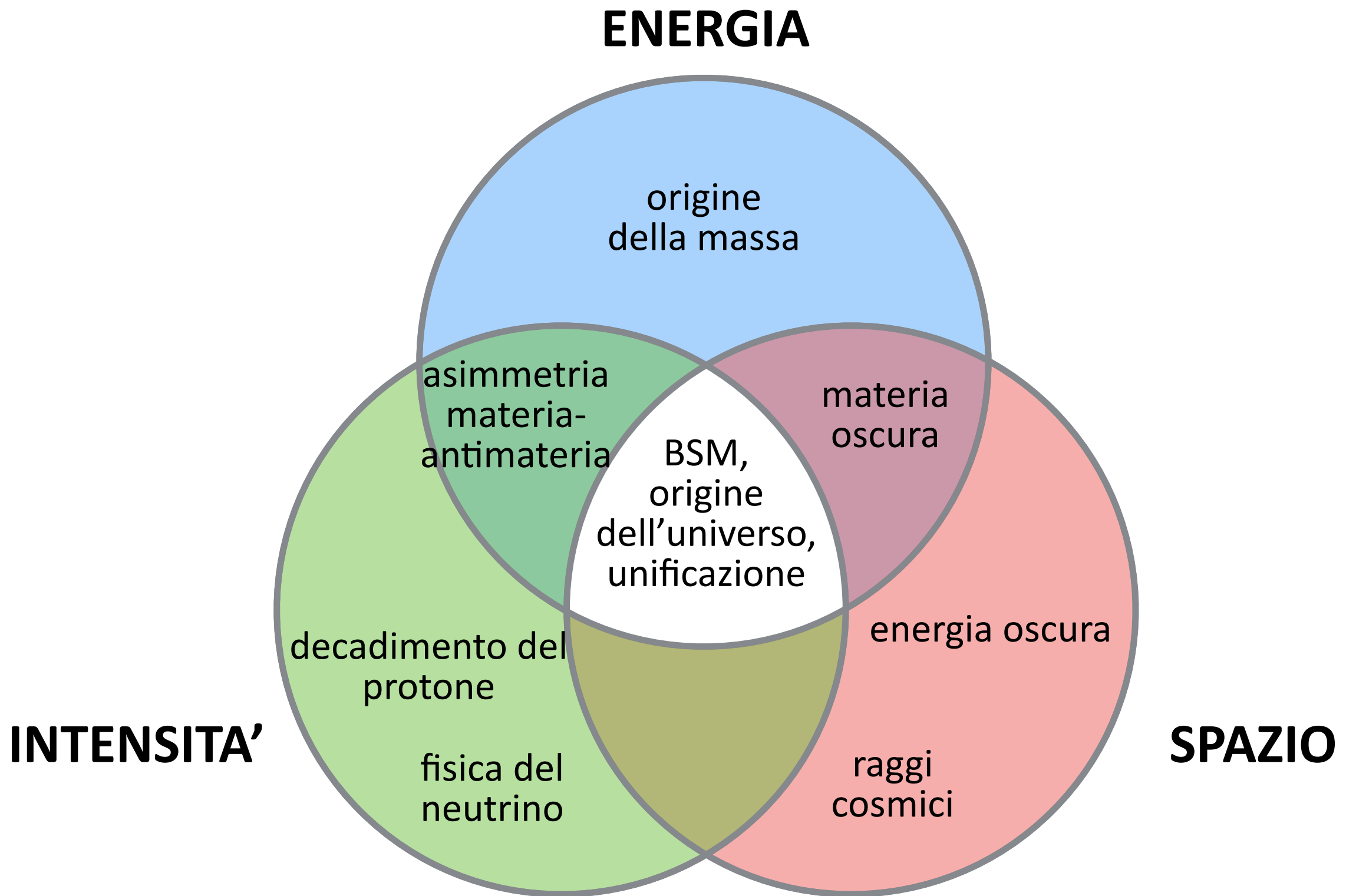
ENCODER

DECODER





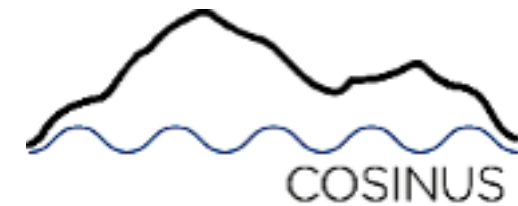
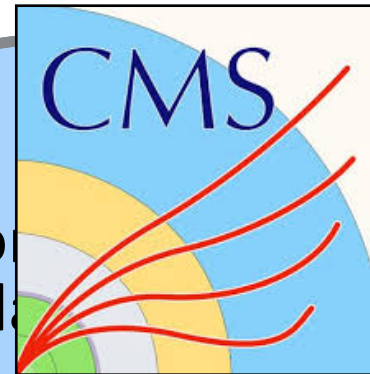
# le frontiere della fisica delle particelle



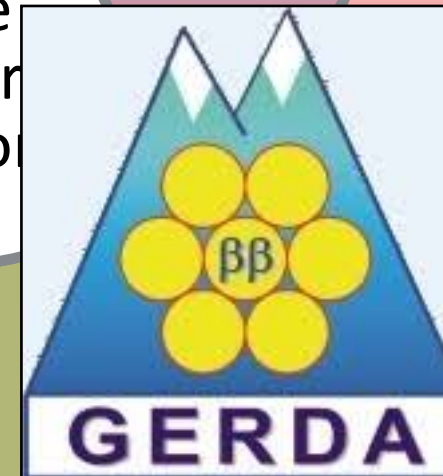


# le frontiere della fisica delle particelle

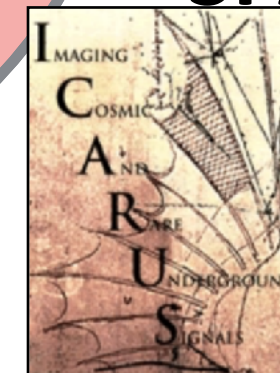
ENERGIA



BSM, origine dell'universo



INTE



MOSCAB



# **la rottura spontanea della simmetria elettrodebole**



# cosa è la massa di un oggetto?

- la massa di un oggetto è **quanto pesa!**

carica dell'interazione gravitazionale nella legge di Newton

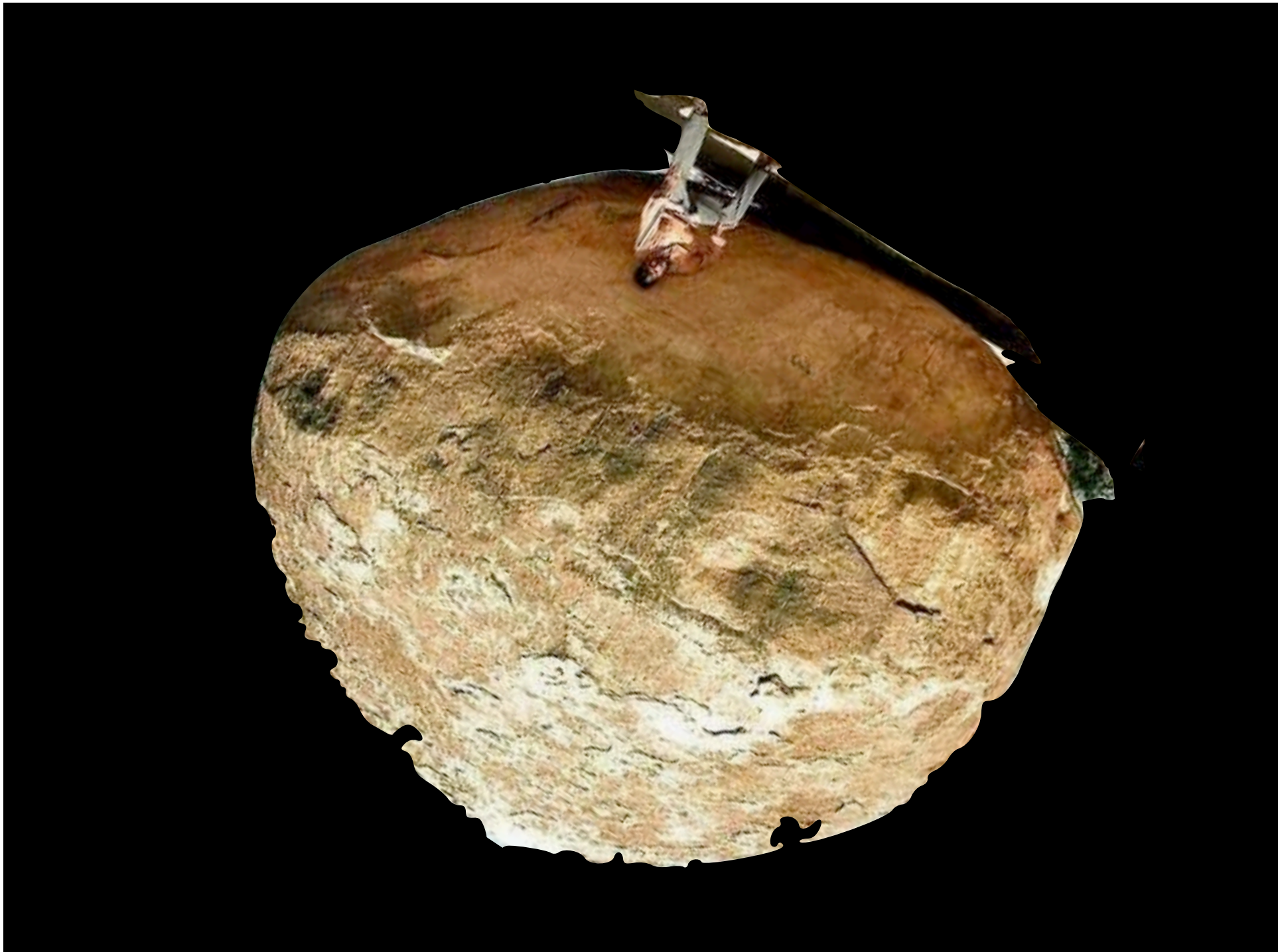
$$F_{12} = G \frac{M_1 M_2}{d_{12}^2}$$





# cosa è la massa di un oggetto?

- nello spazio profondo?





# cosa è la massa di un oggetto?

- **l'inerzia** di un corpo, cioè la sua renitenza a cambiare il proprio moto se subisce una forza
- più in generale, un **parametro** che compare nelle equazioni che descrivono il comportamento di un oggetto
- l'equivalente della “**carica**” delle altre forze che abbiamo già incontrato



# in termini matematici

- in meccanica classica compare **nelle equazioni** del moto
- a partire dalla **legge di Newton**

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

**causa** del moto

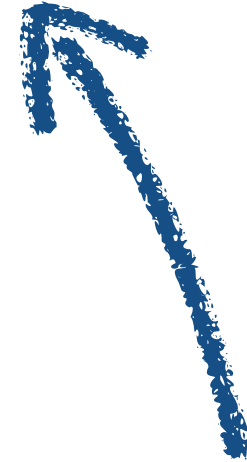
**conseguenze**  
dell'azione di una forza



# in meccanica quantistica?

- la massa compare nell'equazione di Schrödinger in **modo analogo alla meccanica classica**

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left( \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 - \hat{U}(\mathbf{r}) \right) \Psi(\mathbf{r}, t)$$



**termine cinetico:** equivalente dell'energia cinetica classica

# la simmetria in fisica

- Alla base delle equazioni della fisica ci sono spesso **considerazioni di simmetria**
- La simmetria è un trasformazione che **lascia invariato un oggetto**

Riflessione



Traslazione  
spaziale o temporale



Rotazione





# nella meccanica classica

- la **presenza di una invarianza per simmetria nasconde sempre una quantità che si conserva** (teorema di E. Nöther)

<b>le leggi del moto non dipendono dal tempo</b>	<b>l'energia di conserva</b>
--	------------------------------

- se posso fare lo stesso esperimento ad un qualunque istante, allora l'energia a disposizione ad ogni istante è sempre la stessa, cioè si conserva

# nella meccanica classica

- la **presenza di una invarianza per simmetria nasconde sempre una quantità che si conserva** (teorema di E. Nöther)

le leggi del moto non dipendono dal tempo	<b>l'energia si conserva</b>
le leggi del moto non dipendono dalla posizione	<b>la quantità di moto si conserva</b>
le leggi del moto non dipendono dalla direzione	<b>il momento angolare si conserva</b>

- è un **modo molto elegante** di procedere!



# il modello standard

- il modello standard è costruito su una **simmetria che sussiste con particelle senza massa**
- introdurre direttamente la massa delle particelle nella teoria significa renderla asimmetrica
- la teoria asimmetrica **smette di funzionare**

# la rottura spontanea di simmetria

- bisogna **generare asimmetria senza che la teoria se ne accorga**
- il meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole prevede l'esistenza di una nuova particella, il **bosone di Higgs**





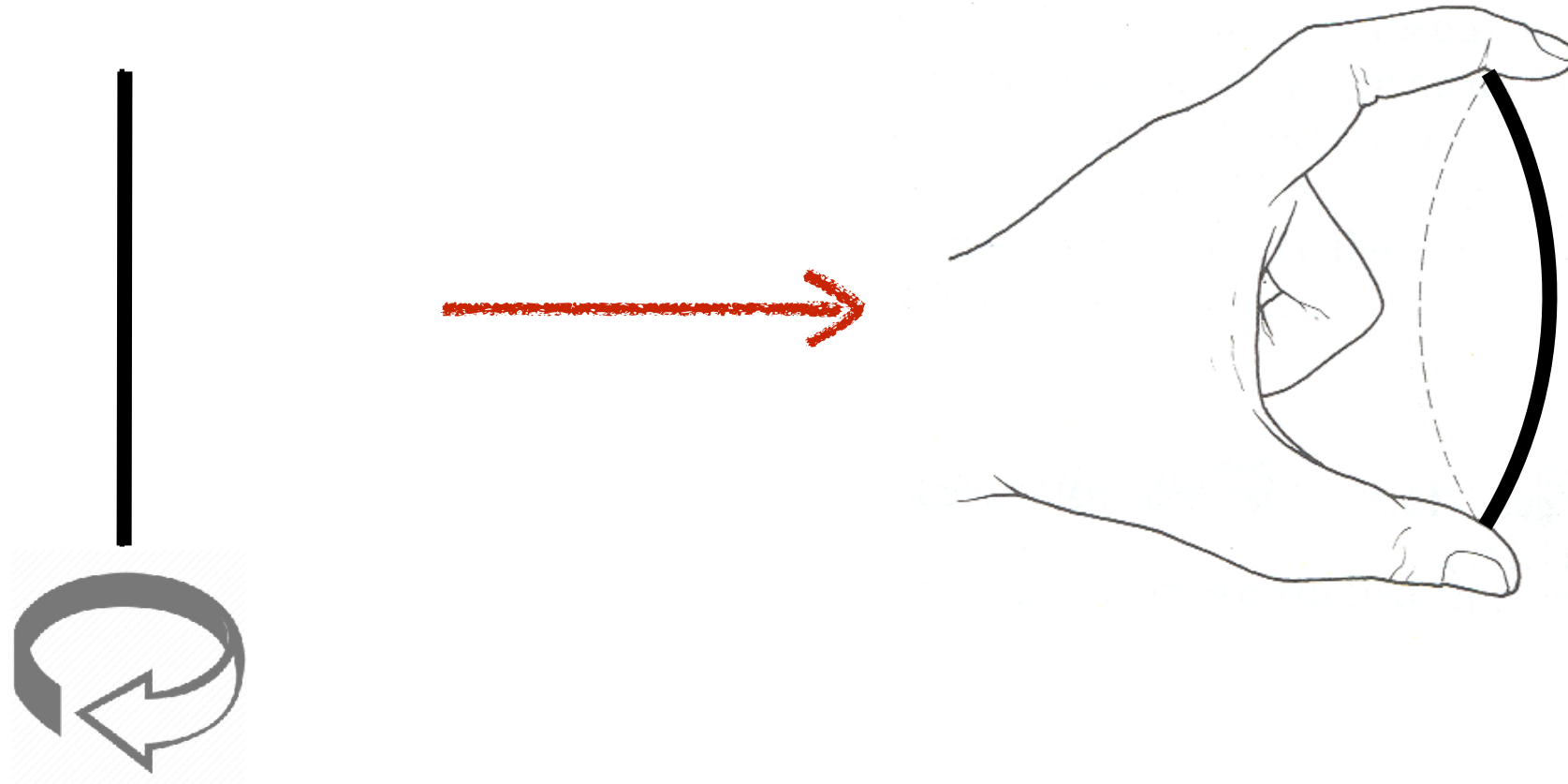
# la rottura spontanea di simmetria

- servono soluzioni non simmetriche per problemi simmetrici



# un esempio più fisico

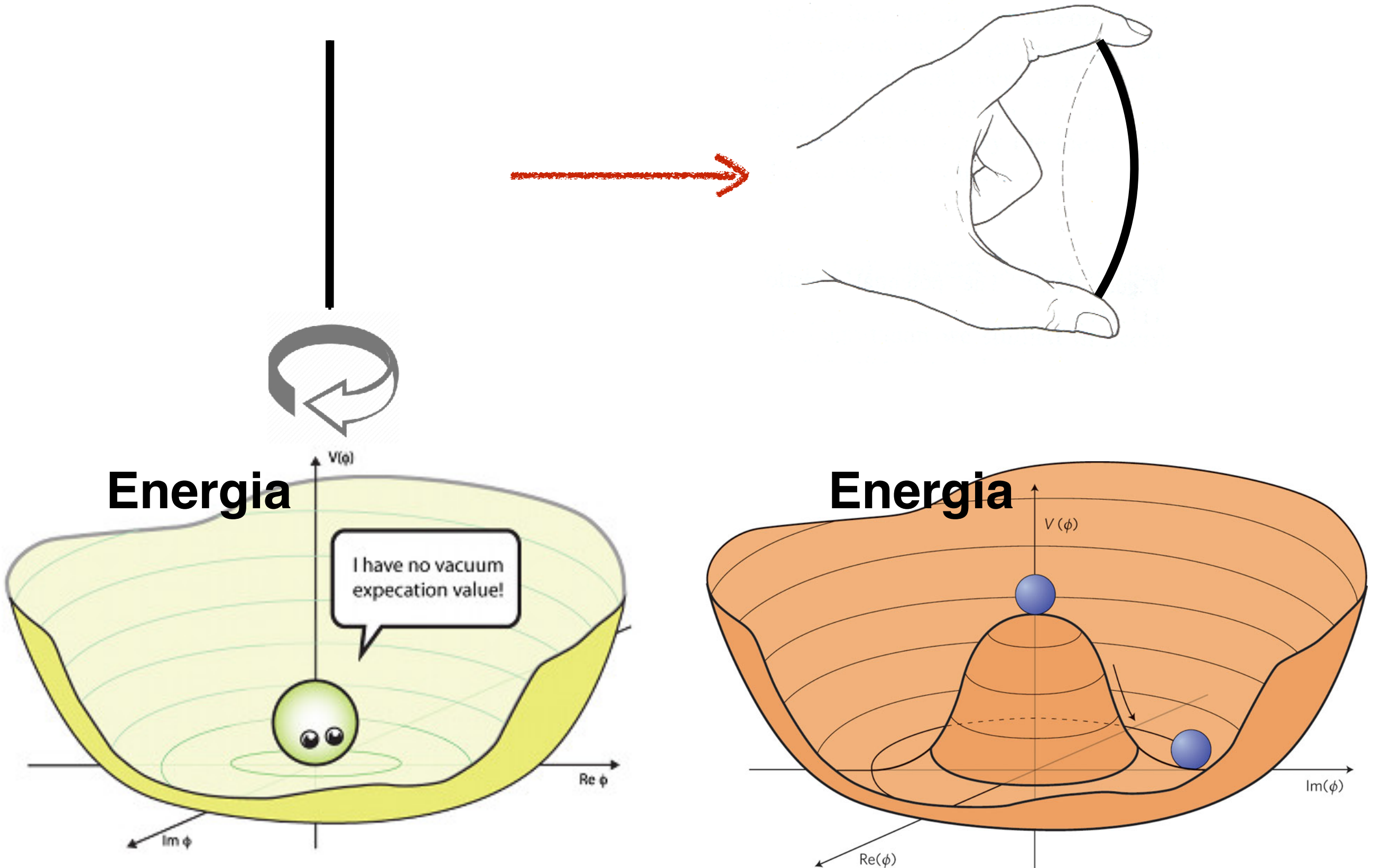
- si considera una sottile asticella di plastica: c'è **simmetria per rotazione** nella descrizione del problema



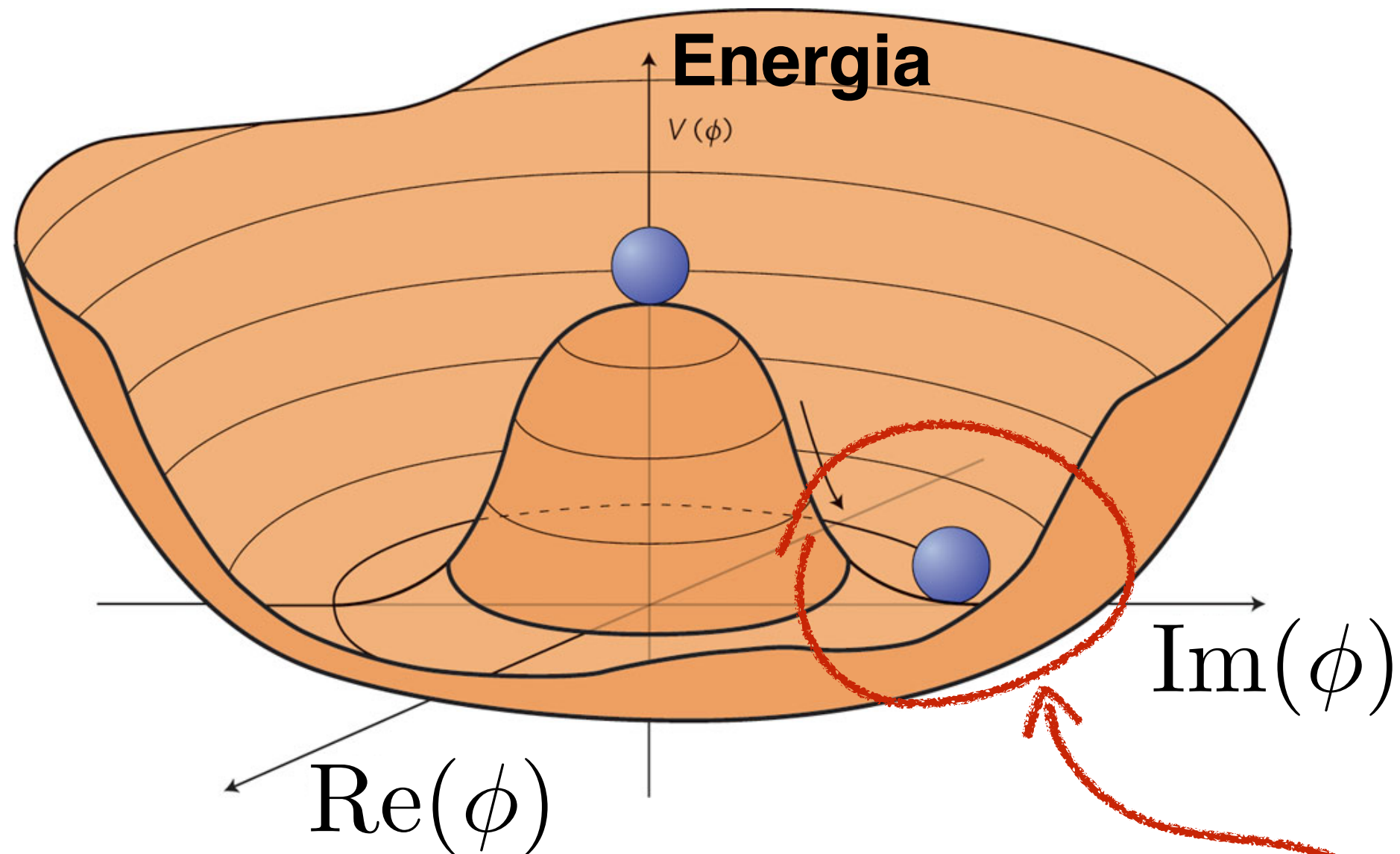
- si preme fra le dita fino a quando l'asticella si flette
- **lo stato di minima energia**, quello della barra flessa, **non rispetta la simmetria per rotazione** delle equazioni dell'elettromagnetismo, le equazioni che governano la struttura interna (atomica) della sbarra



# se volessi disegnare un potenziale...



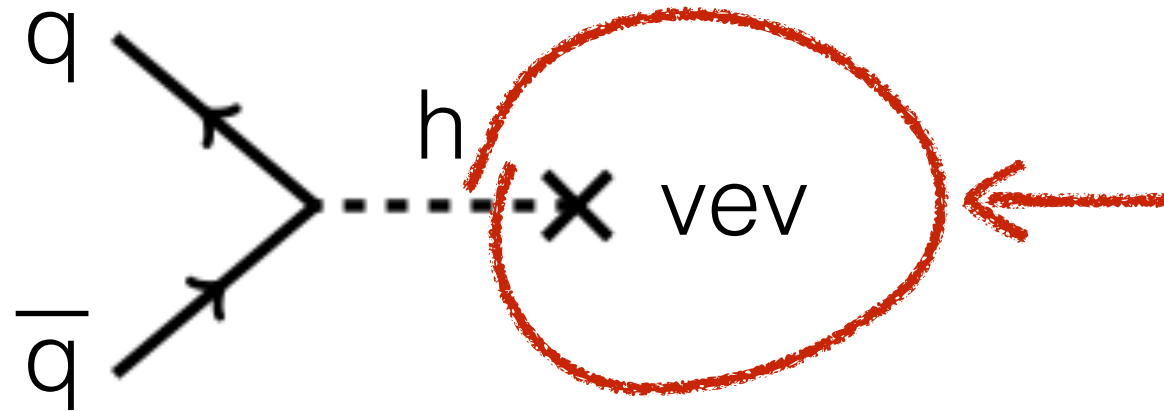
# il campo di Higgs



- $\phi$  è un nuovo campo di forza che permea lo spazio, il **campo di Higgs**
- l'energia nel campo è minima quando il campo non è zero (VEV)
- si trovano soluzioni non simmetriche con una matematica simmetrica
- il campo di Higgs è **non nullo nello spazio**



# particelle che viaggiano nel vuoto



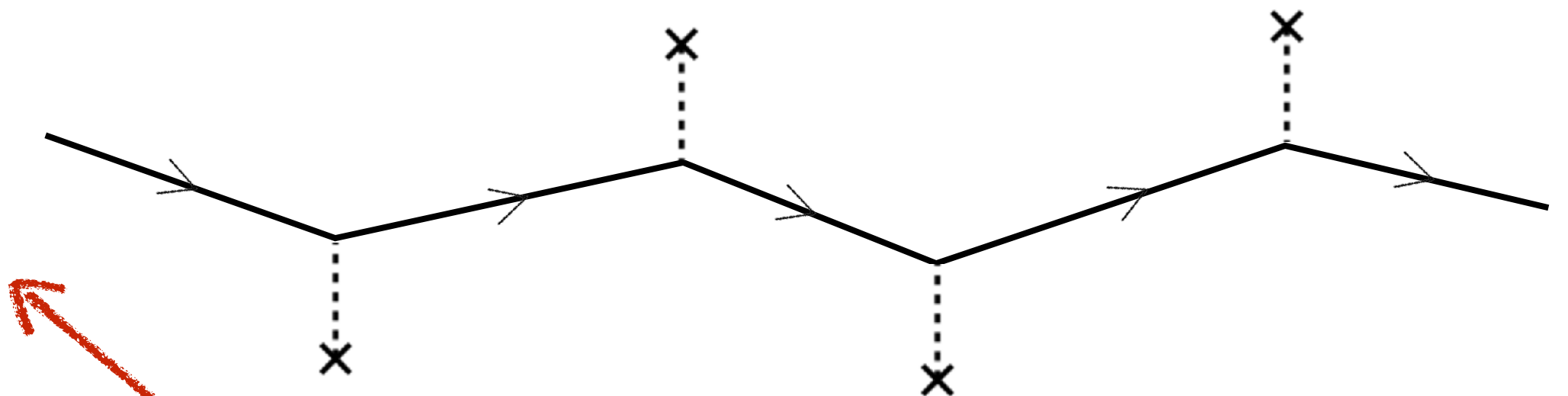
il vuoto non è più vuoto!,  
c'è il campo di Higgs che  
lo permea

massa→	0
carica→	0
spin→	1
nome→	<b>γ</b> fotone



massa nulla = nessuna interazione  
con il campo di Higgs

massa→	0,511 MeV
carica→	-1
spin→	1/2
nome→	<b>e</b> elettrone



massa non nulla = interazione con il campo di Higgs



# un esempio metaforico





# un esempio metaforico



- massa = coefficiente di intensità di una **nuova interazione fondamentale**
- **deve esistere il mediatore** di questa forza: il bosone di Higgs

# **spinoff della fisica delle particelle**



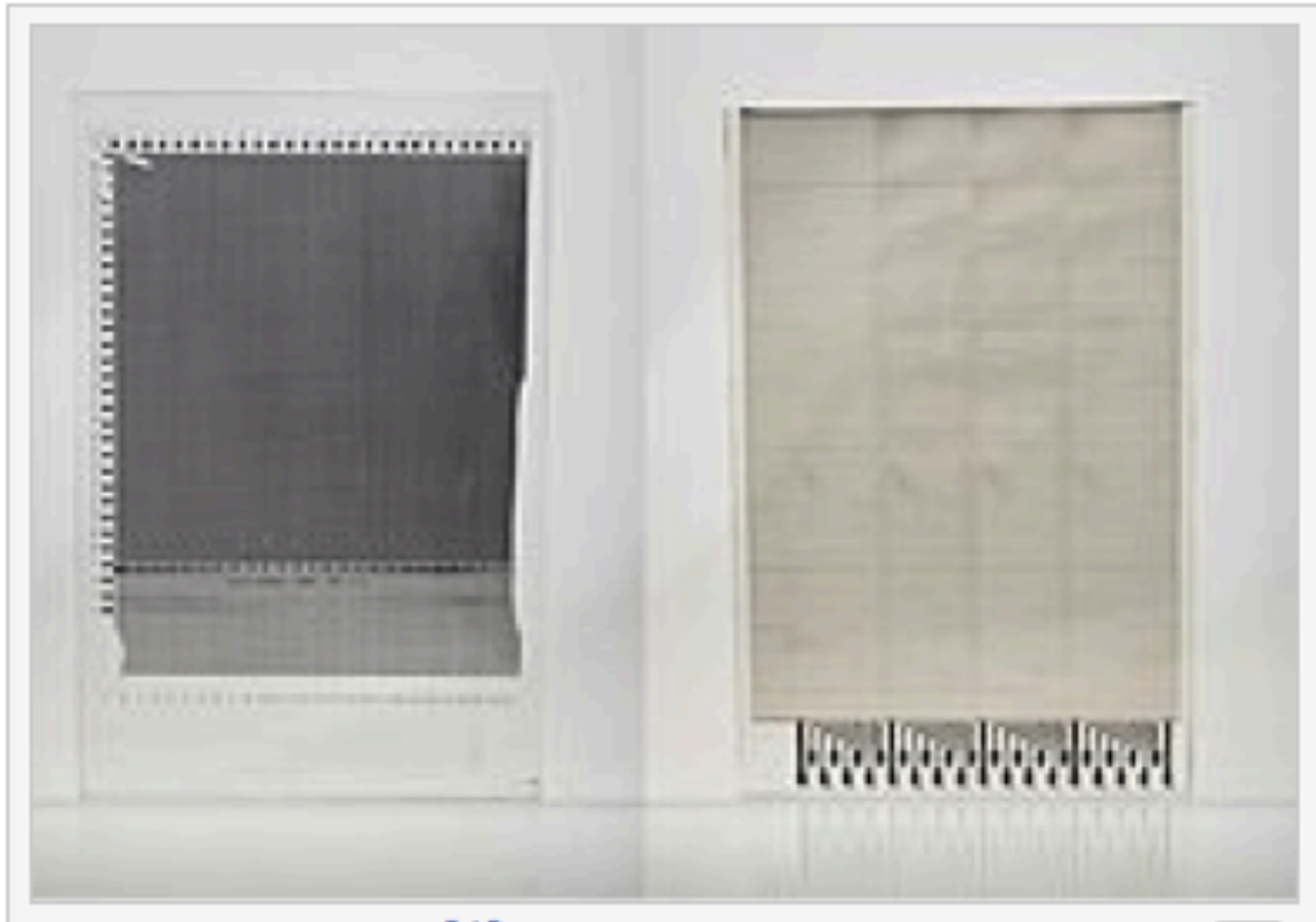
# world wide web

- protocollo sviluppato al CERN (1982) per la condivisione di documenti
- il CERN rinuncia a qualunque diritto



# touch screen

- primo prototipo di schermo capacitivo, realizzato al CERN per il controllo del Super Protosincrotrone (1977)





# tecnologie di vuoto spinto

**aeroporto di Ginevra:  
pannelli solari termici ad ultra-vuoto**





# positron emission tomography

TAC:  
morfologia del corpo

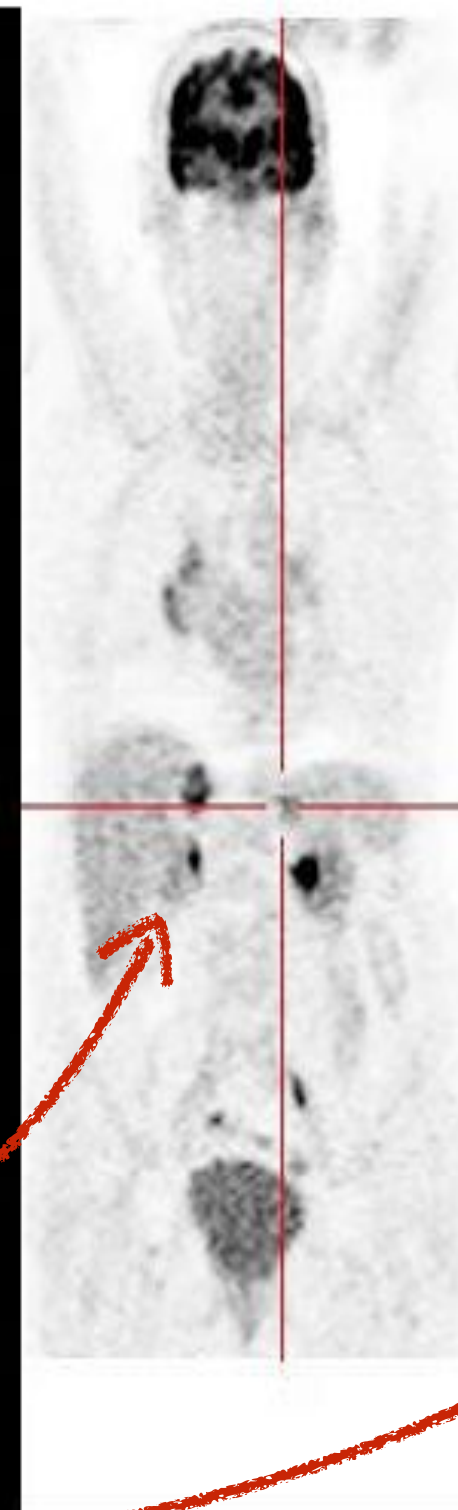
PET:  
metabolismo di  
zuccheri radioattivi

fusione delle  
due immagini

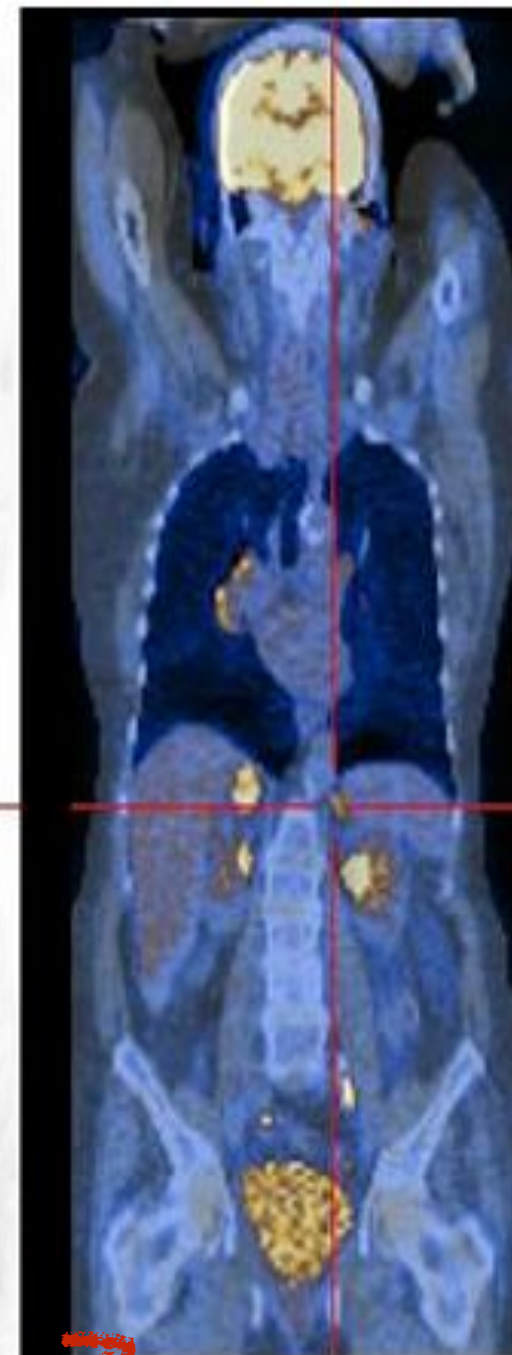


58

CT Coronal



Pet Coronal



Fused Coronal

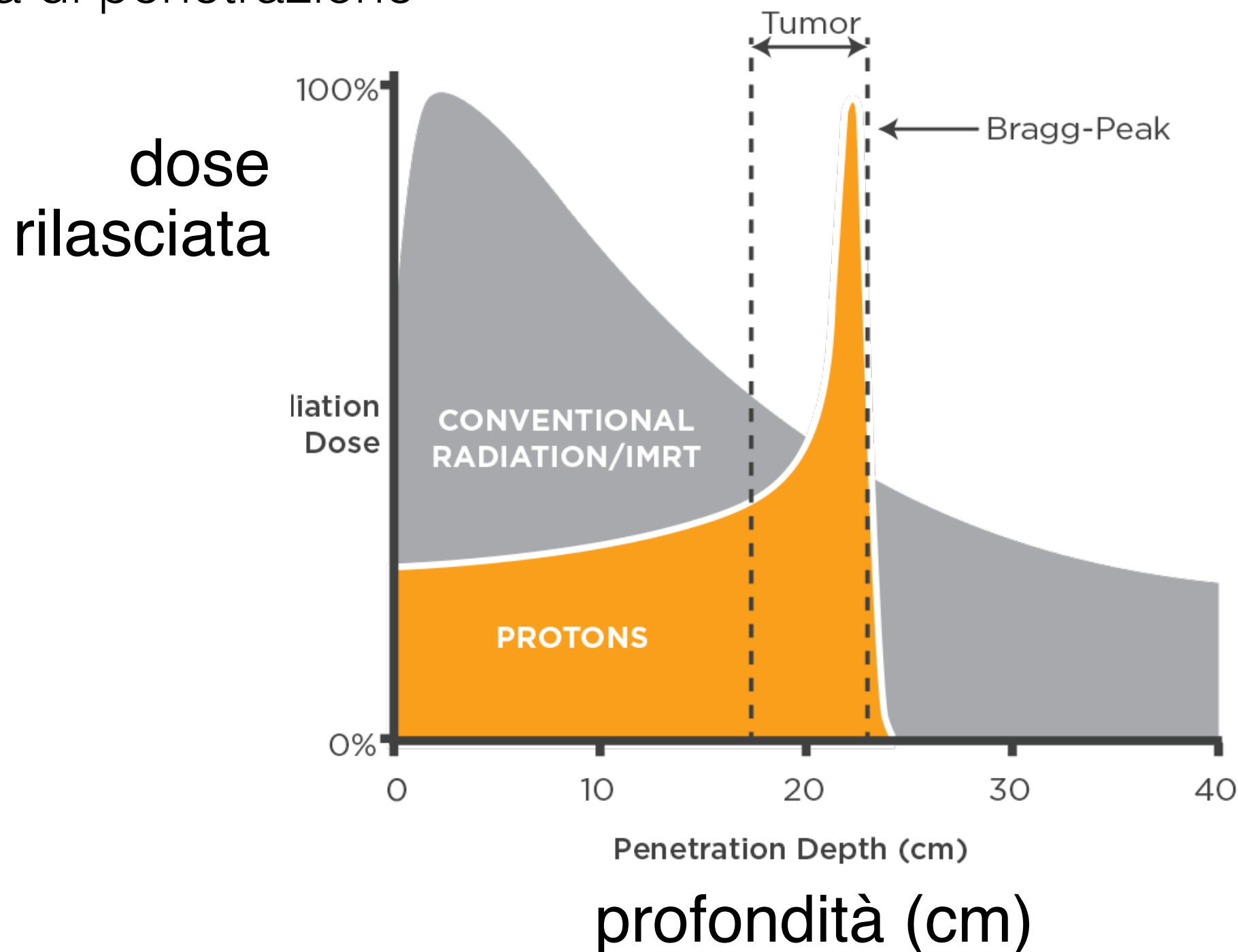


# come funziona



# radioterapia adronica

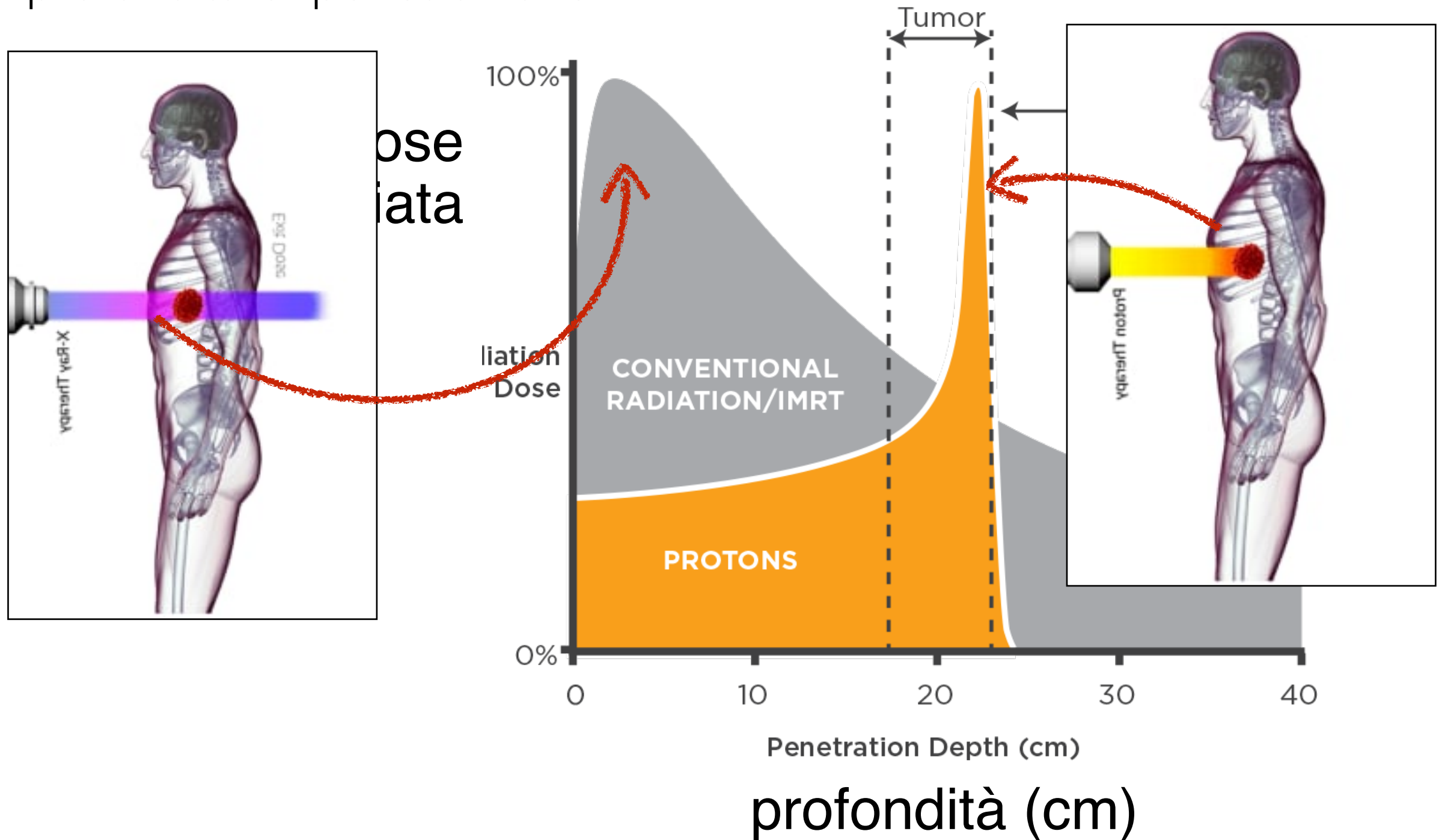
- **profilo di deposizione energetica** di un fascio di particelle in funzione della profondità di penetrazione





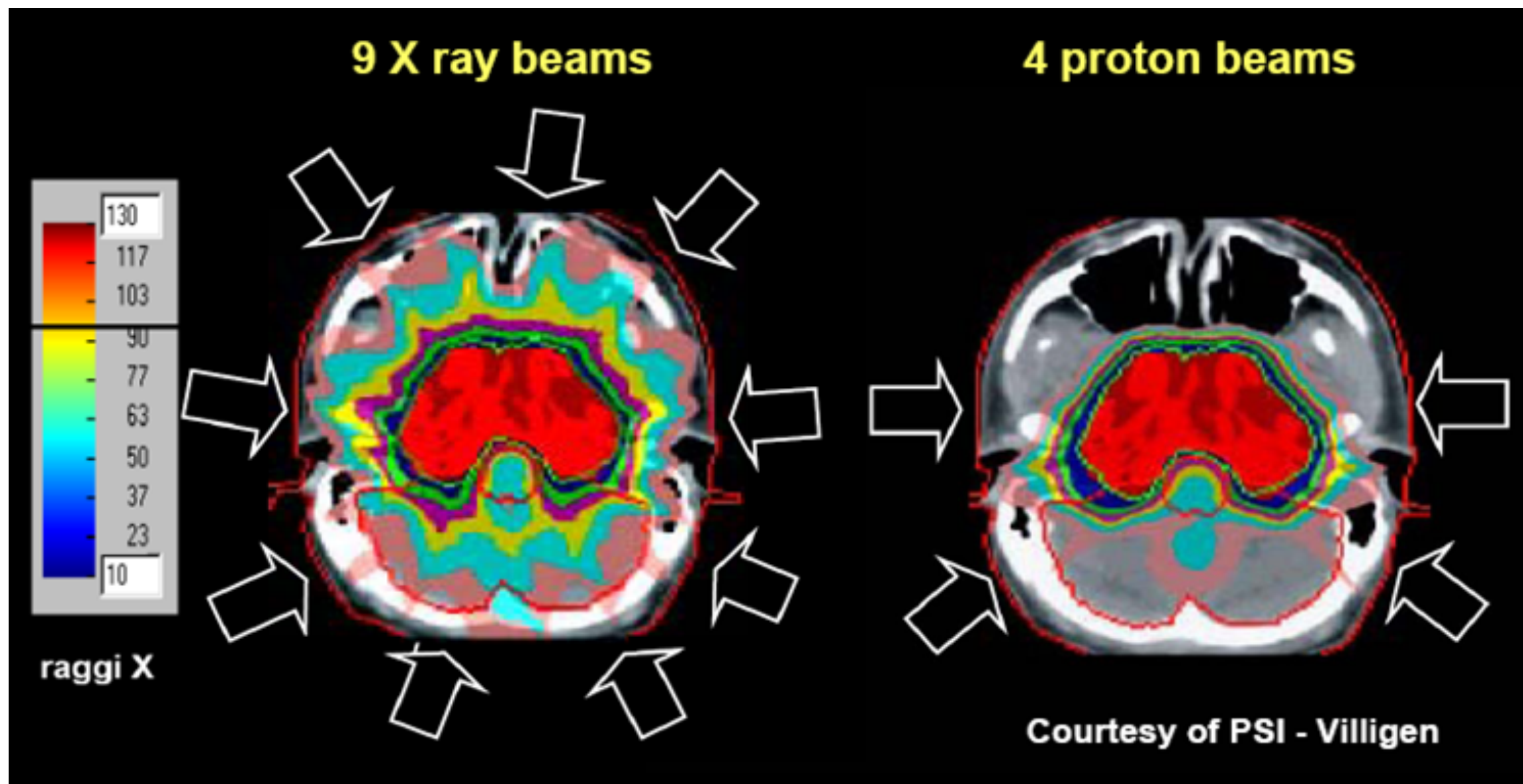
# radioterapia adronica

- **profilo di deposizione energetica** di un fascio di particelle in funzione della profondità di penetrazione



# un esempio di trattamento

- utilizzo di **fasci di particelle cariche** (ad es. protoni) invece che raggi X
- **precisione millimetrica** nella distribuzione geometrica della dose in tumori profondi





# CNAO a Pavia

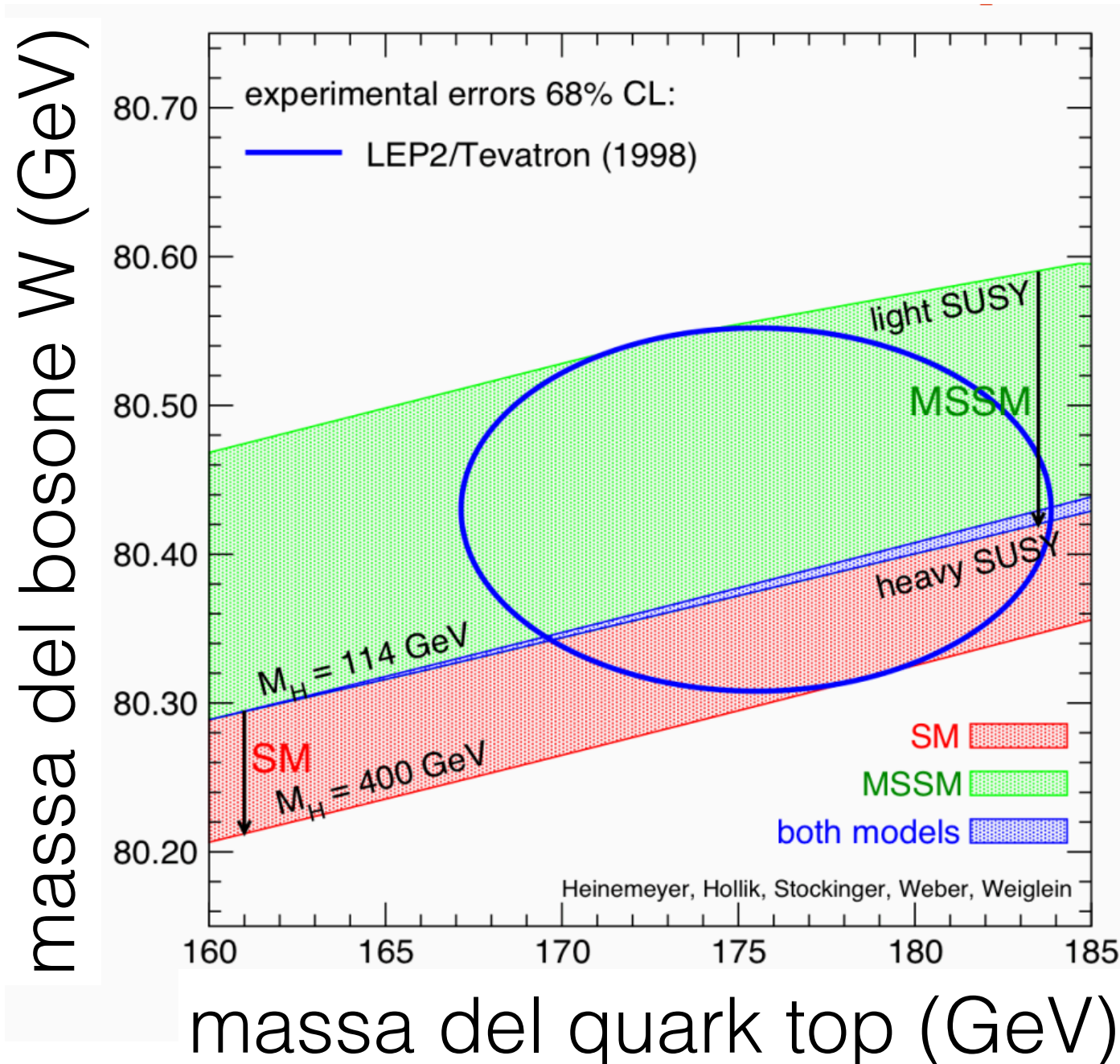


**la massa del bosone W**



# la massa del bosone W

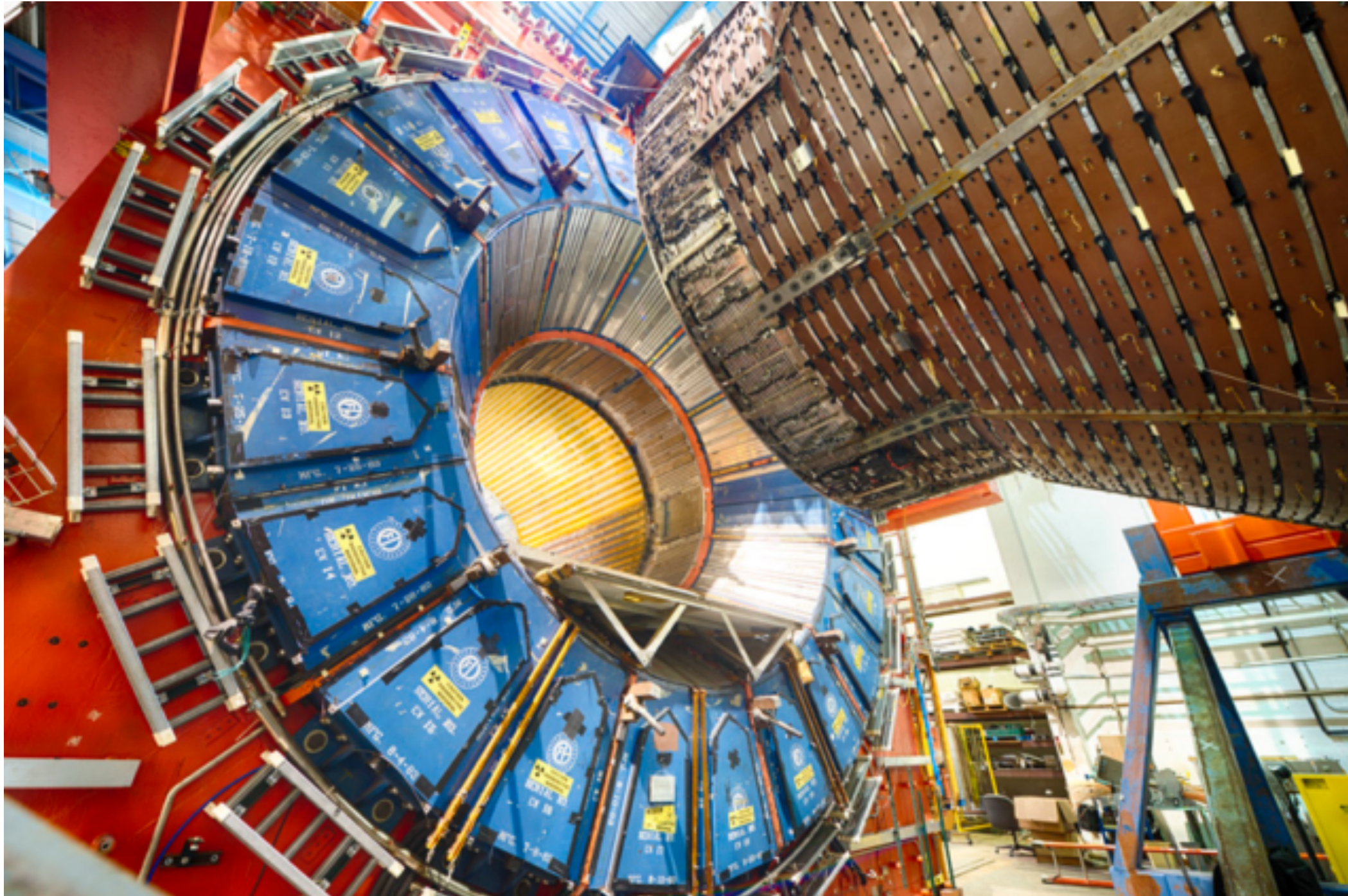
- il modello standard predice **relazioni fra le masse** delle particelle
- deviazioni dalla previsione possono essere **indizio di nuova fisica**





# Tevatron e CDF

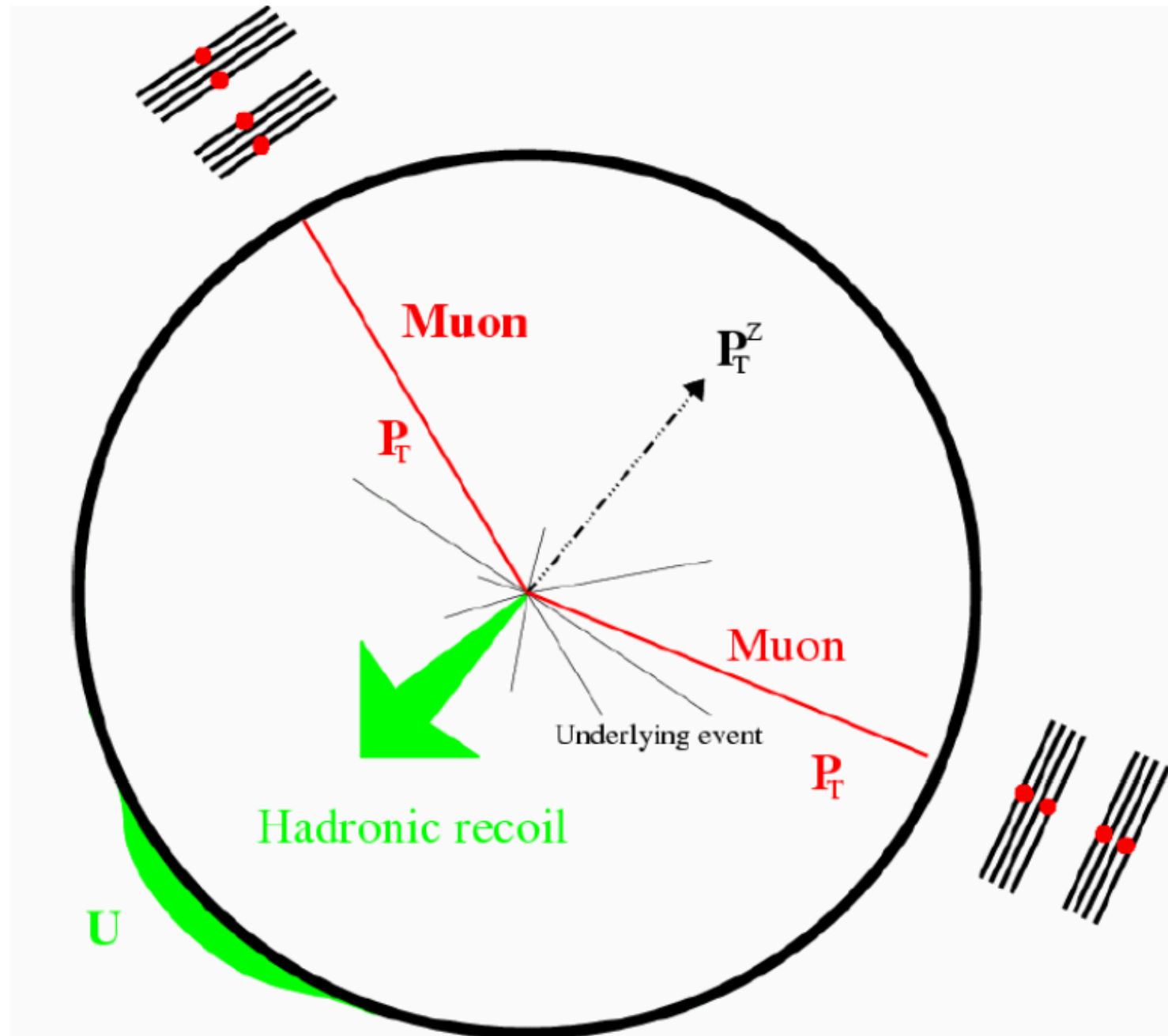
- collisione di **protoni contro anti-protoni** attivo negli anni 1983–2011
- permesso la **scoperta del quark top**



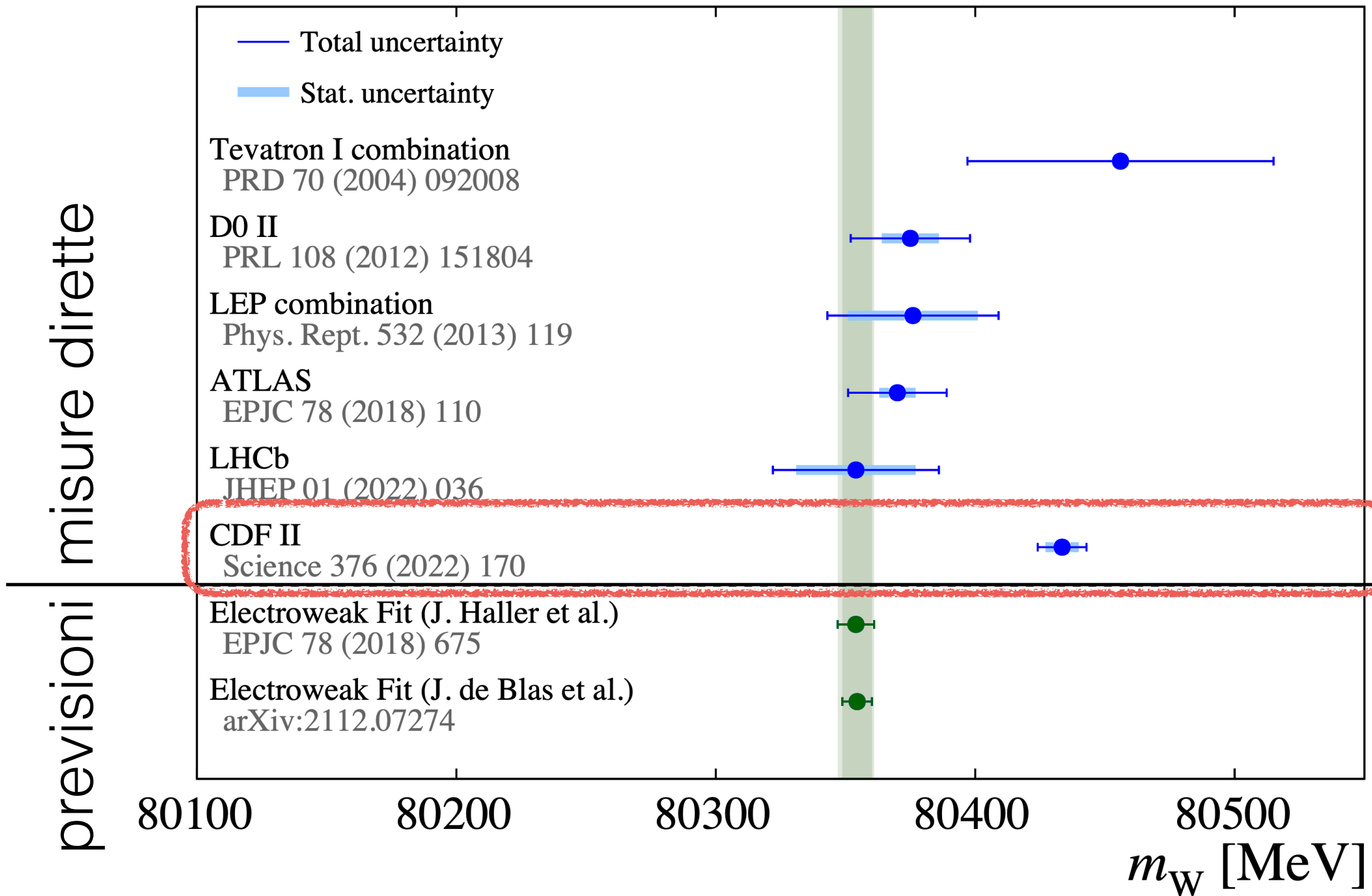


# la misura effettuata

- misura di **grande precisione**
- studio della **cinematica di decadimento dei bosoni vettori W**



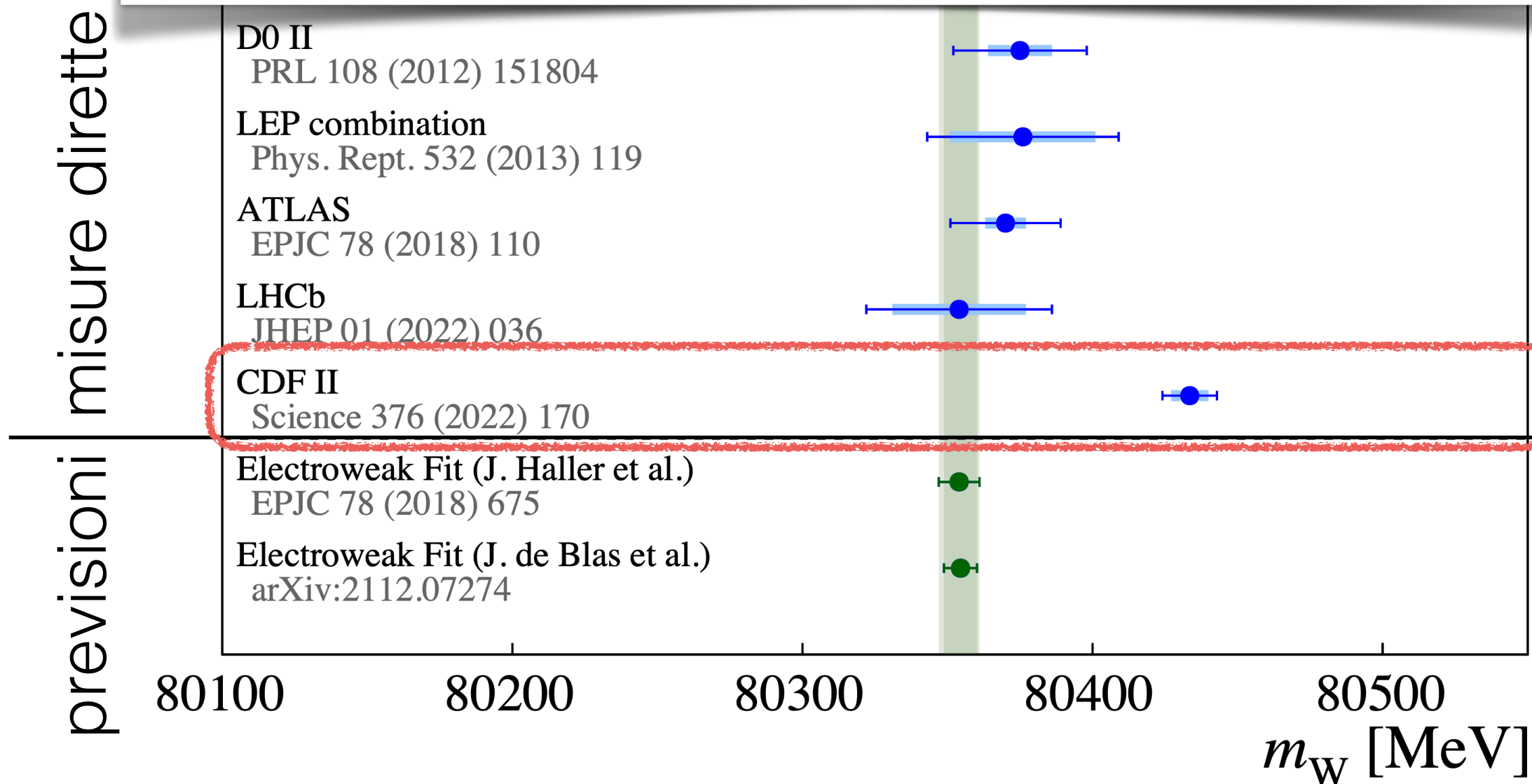
# il risultato della misura





# il risultato della misura

**Differenze non comprese** con le misure dirette passate e con le previsioni del Modello Standard a partire dal resto dei suoi parametri



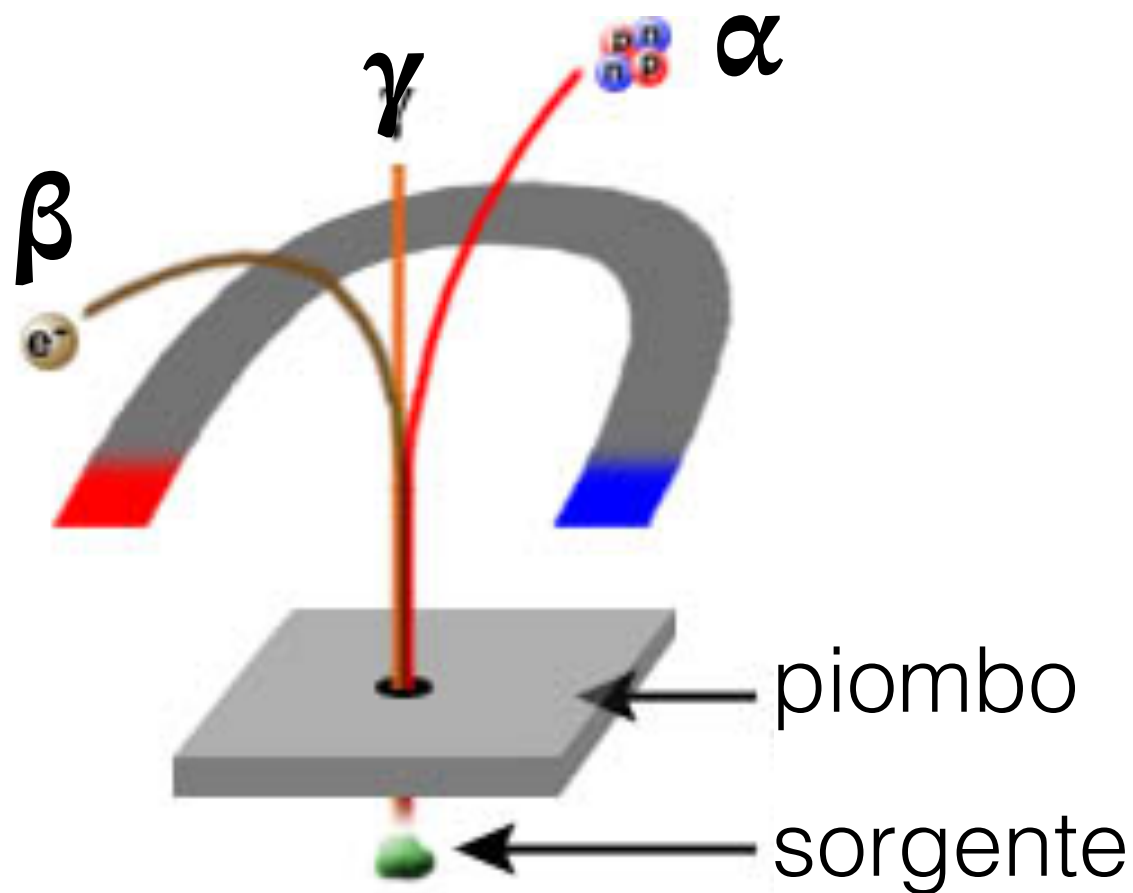
# **le storia delle particelle elementari**

come sappiamo che struttura abbia la materia



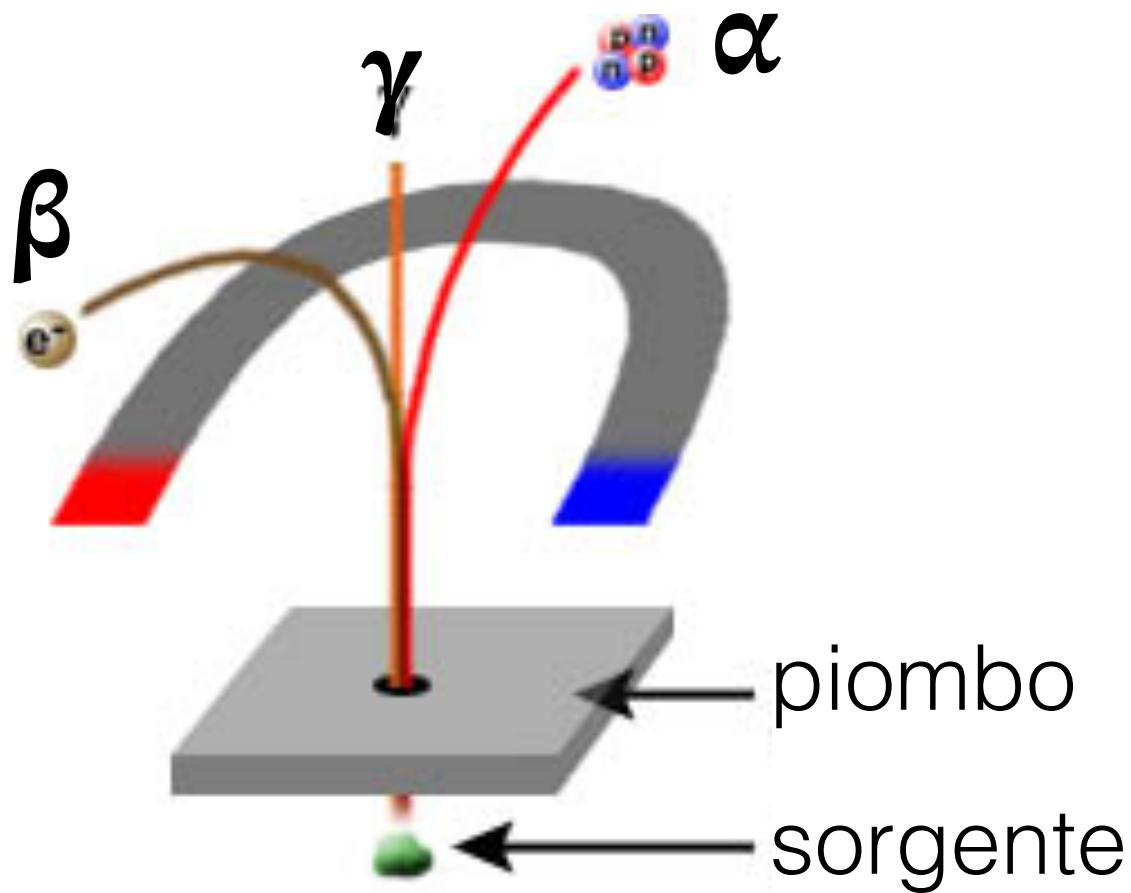
# guardare dentro gli elementi

- 1895: scoperta dei **raggi X** da parte di W. C. Röntgen
- 1896: H. Becquerel scopre la **radioattività** dell'Uranio
- 1898: M. & P. Curie scoprono Polonio e Radio, più radioattivi dell'Uranio
- 1898: J. J. Thomson dimostra che i raggi catodici sono carichi e molto leggeri rispetto agli ioni carichi positivamente, gli **elettroni**



# guardare dentro gli elementi

- 1895 - scoperta dei raggi  $\gamma$  da parte di W. C. Röntgen
  - 1896 - si iniziano ad osservare costituenti carichi della
  - 1897 - materia, ma gli atomi sono neutri: nio
  - 1898 - è ora di guardarci dentro... to
- leggeri rispetto agli ioni carichi positivamente, gli **elettroni**





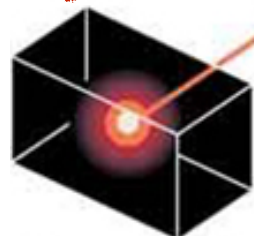
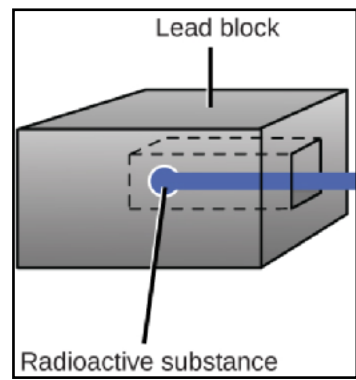
# l'esperimento di Rutherford

- **domanda** alla quale trovare risposta:
  - come è fatto un atomo di materia?
- **dati iniziali**
  - esistono cariche positive e negative all'interno del nucleo
- **ipotesi iniziale** (Thomson)
  - le cariche negative sono immerse in una distribuzione uniforme di carica positiva (modello a panettone)

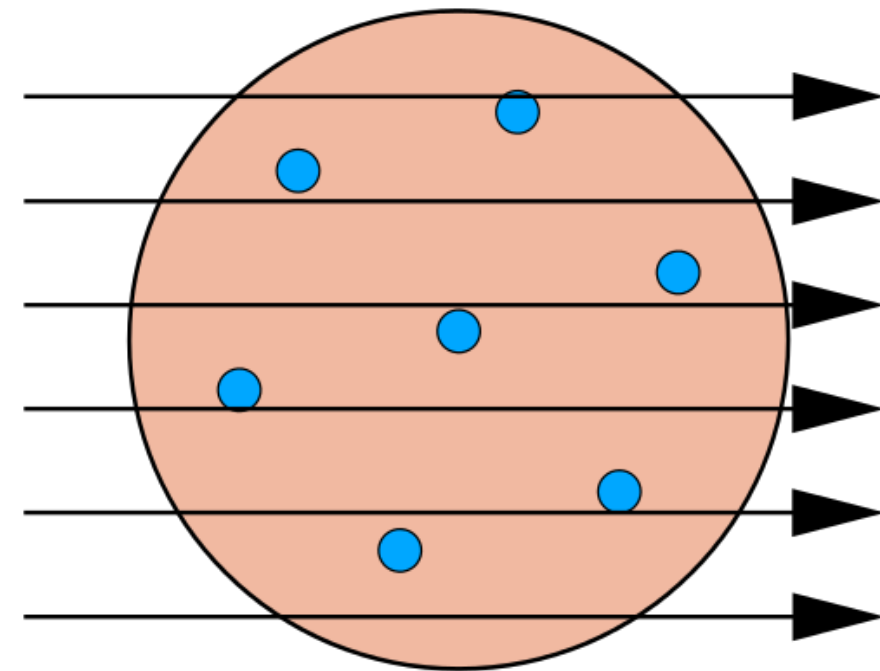
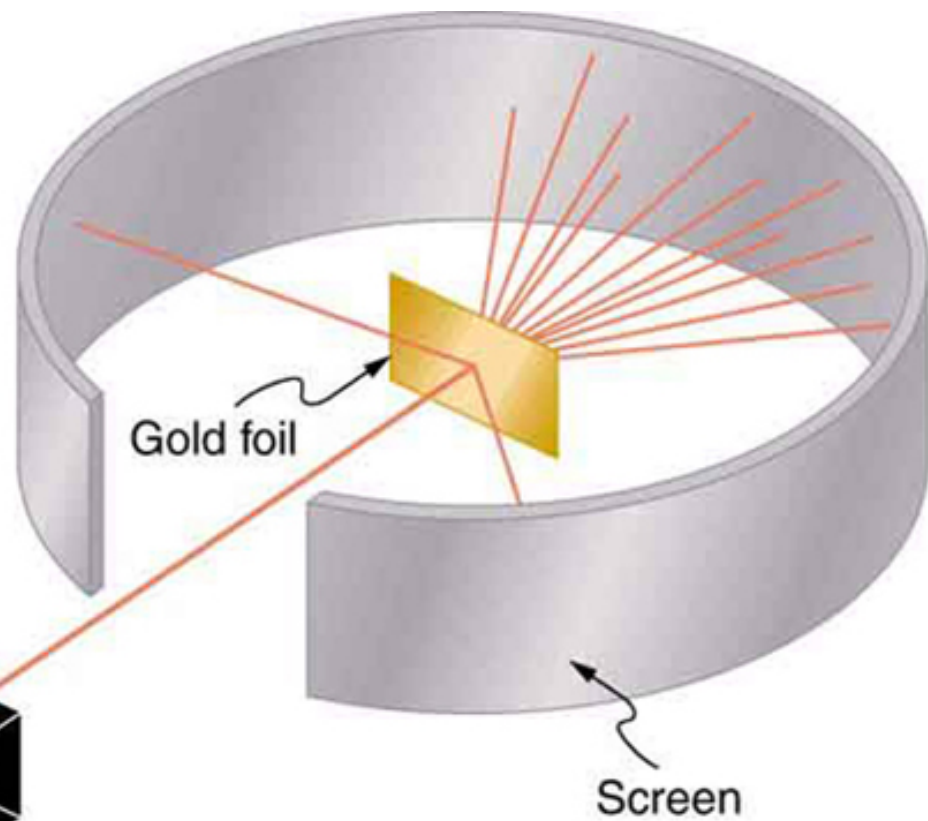


# l'idea sperimentale (1911)

- utilizzare particelle alfa emesse da una sorgente di polonio come sonda (luce) e un foglio sottile d'oro come bersaglio
- l'esperimento è composto dall'**apparato sperimentale** e da quello che ci si aspetta di osservare (**modello teorico**)

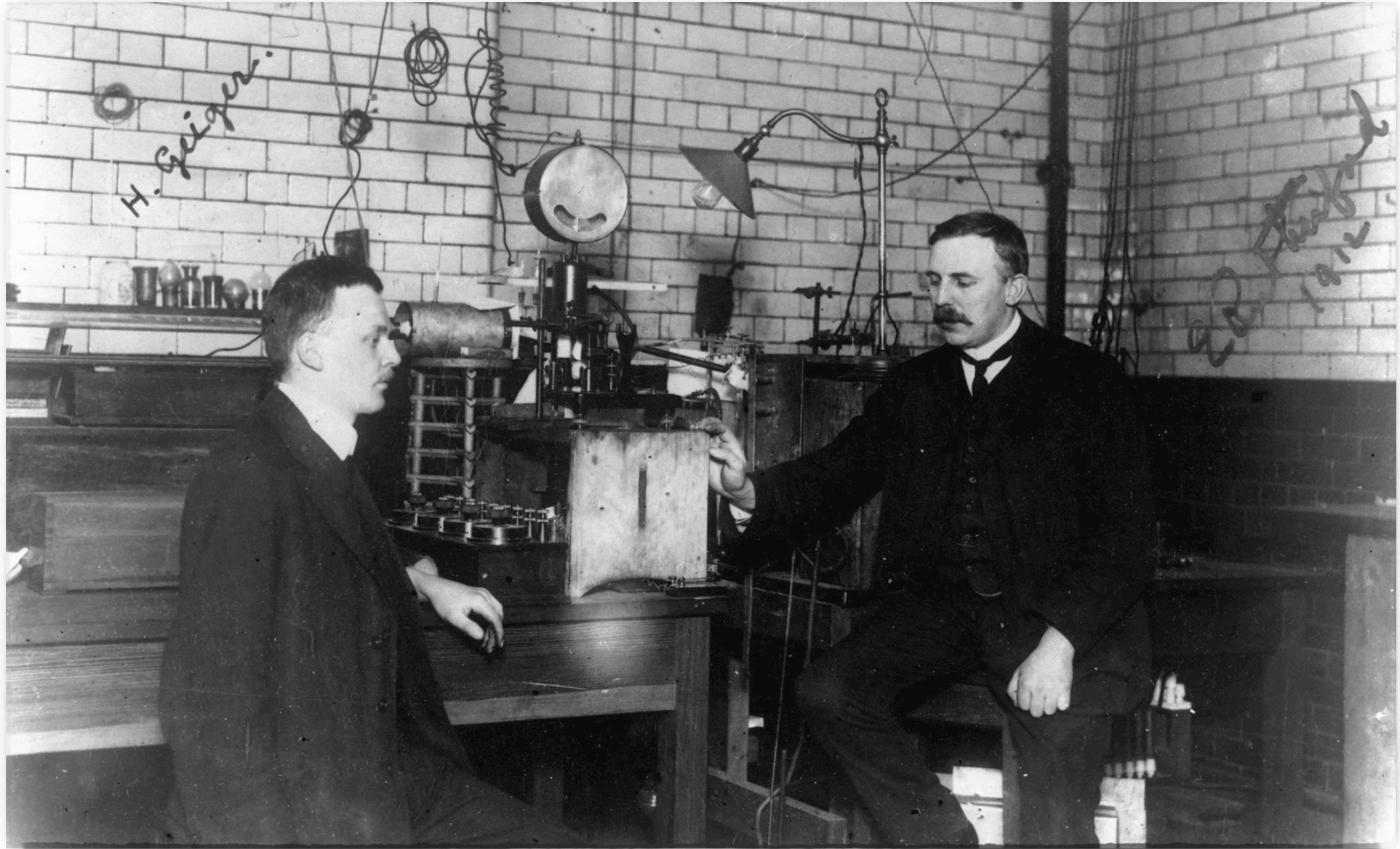


Source of  $\alpha$  particles



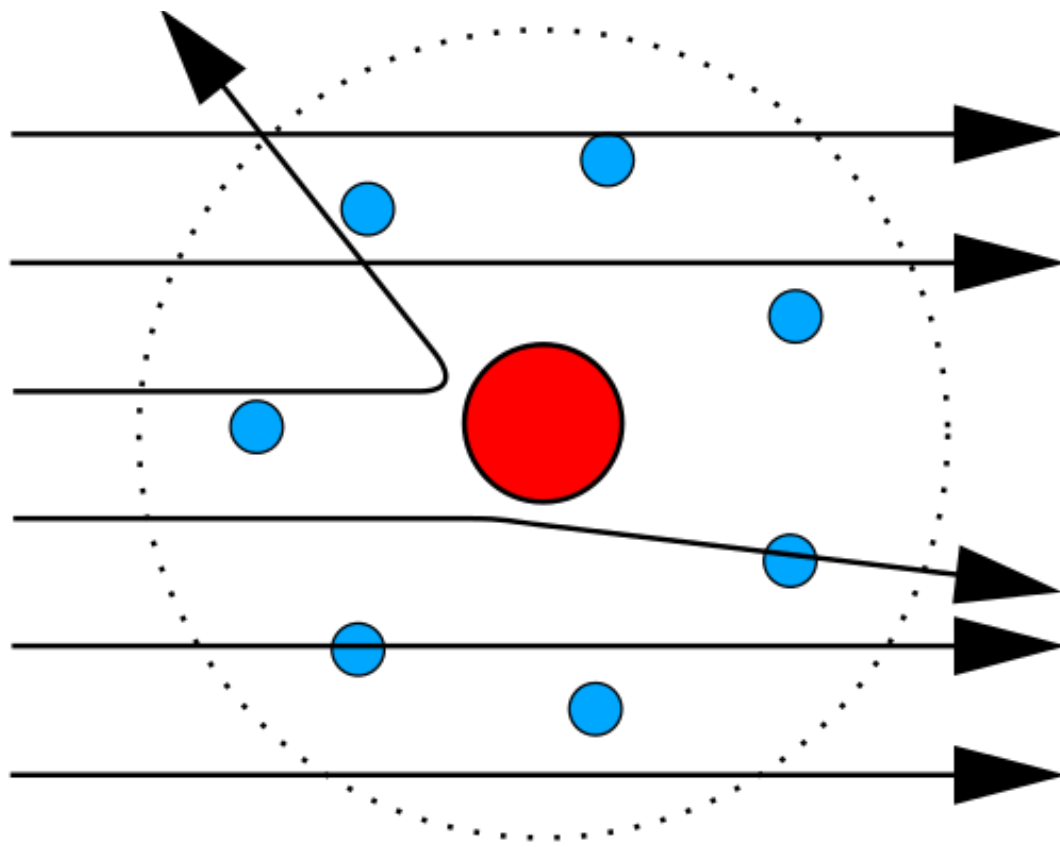


# la paziente misura...



# ... e l'inatteso risultato

- alcune particelle alfa (1/8000) rimbalzano a grandi angoli contro il foglio d'oro
- Rutherford deduce che l'atomo debba **avere un nucleo molto pesante circondato dal vuoto**, dove le cariche elettriche sono libere di orbitare



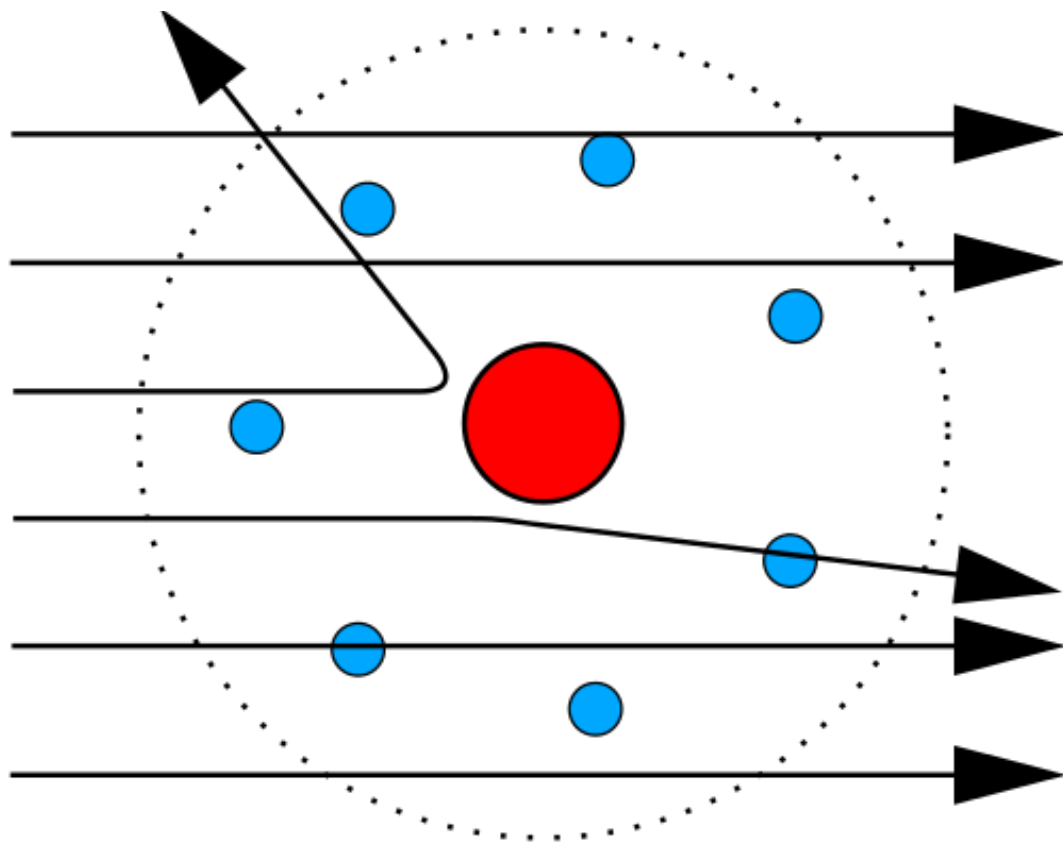
« It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you. On consideration, I realized that this scattering backward must be the result of a single collision, and when I made calculations I saw that it was impossible to get anything of that order of magnitude unless you took a system in which the greater part of the mass of the atom was concentrated in a minute nucleus. It was then that I had the idea of an atom with a minute massive centre, carrying a charge. »

(Ernest Rutherford [3])



# ... e l'inatteso risultato

- alcune particelle alfa (1/8000) rimbalzano a grandi angoli contro il foglio d'oro
- Rutherford deduce che l'atomo debba **avere un nucleo molto pesante circondato dal vuoto**, dove le cariche elettriche sono libere di orbitare

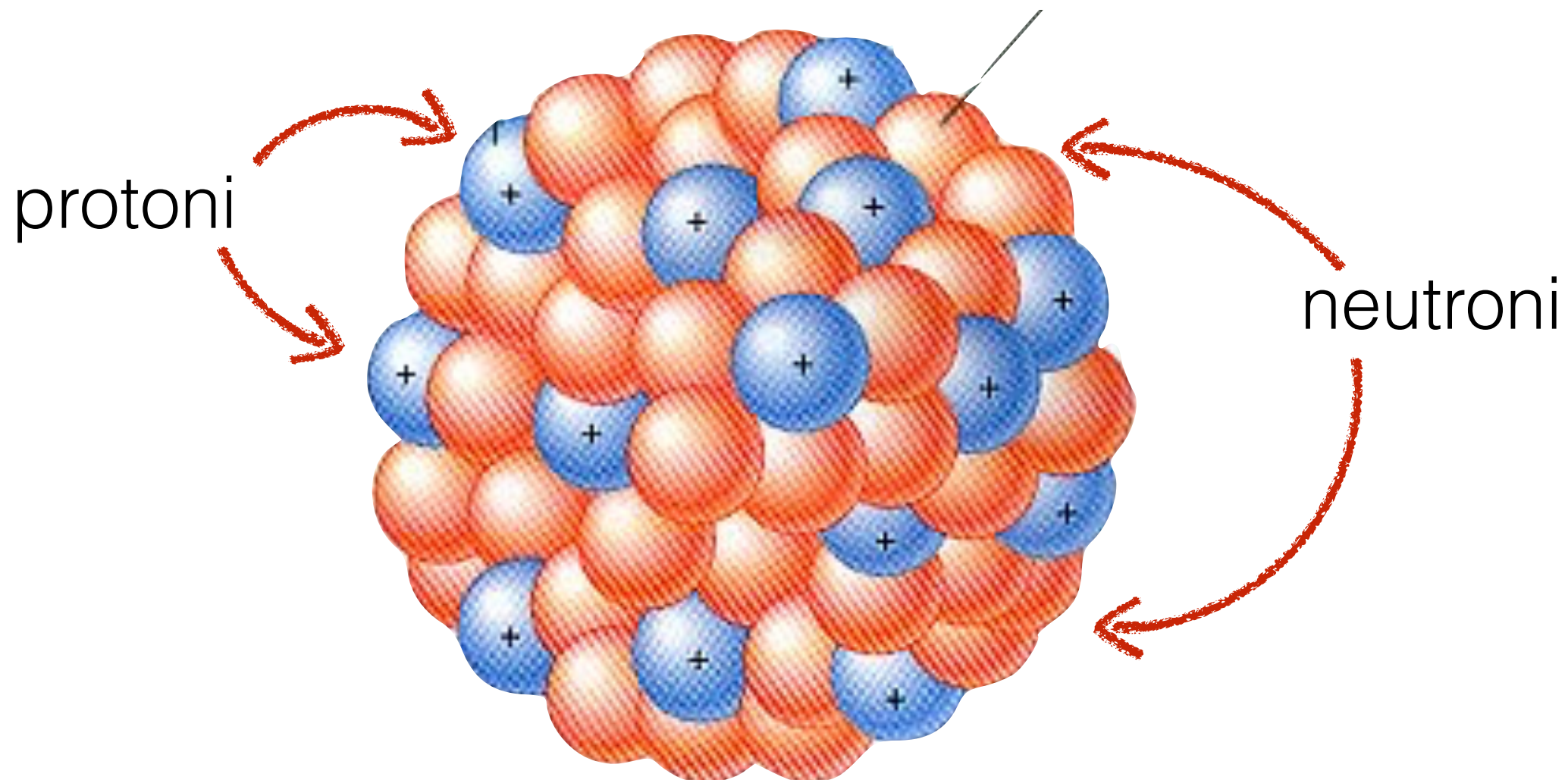


È stato l'evento più incredibile che mi sia mai successo. È stato come se avessi sparato un proiettile di 15 pollici contro un foglio di carta o di stoffa, ed il proiettile fosse rimbalzato indietro.

(Ernest Rutherford [3])

# come è fatto il nucleo

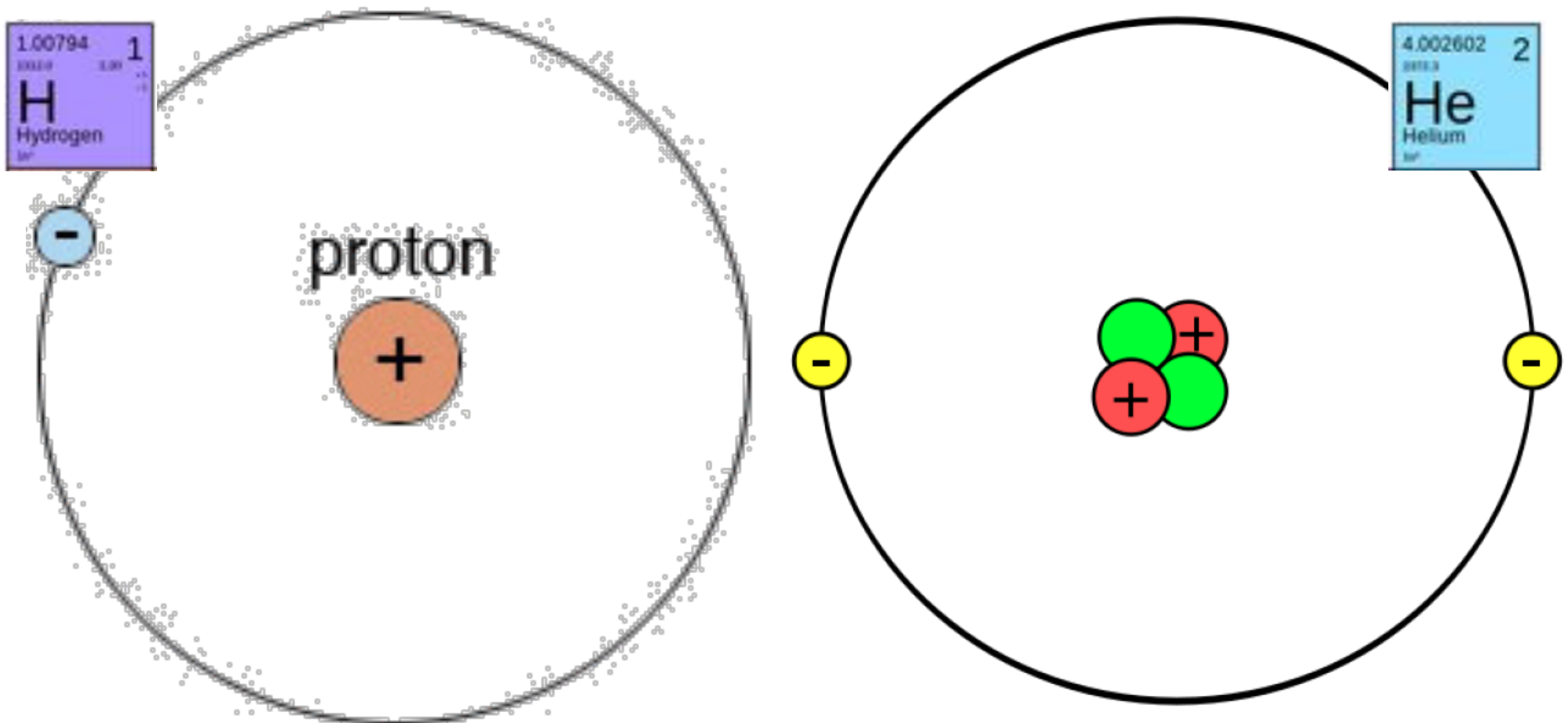
- contiene particelle di carica +1, i **protoni**
- conoscendo la massa dei singoli protoni, il nucleo risulta pesante il doppio di quello che si calcola
- bombardando materiali leggeri, si riesce a produrre (farne uscire) una particella simile al protone, ma di carica neutra: il **neutrone**





# gli atomi più leggeri

- **Idrogeno**: un elettrone orbita attorno ad un protone
- **Elio**: due elettroni orbitano attorno a due protoni più due neutroni
  - il nucleo di Elio è una particella  $\alpha$
- studiare il nucleo di Idrogeno o Elio significa di fatto **guardare dentro il protone ed il neutrone**



# guardare dentro al nucleo (1967)

- stesso principio di Rutherford:
  - **proiettili** energetici (elettroni) **contro bersaglio fisso**  
(gas di Idrogeno Elio, i nuclei più semplici da studiare)
- guardando i dati, R. Feynman capisce che il protone si comporta come un **insieme di cariche puntiformi**

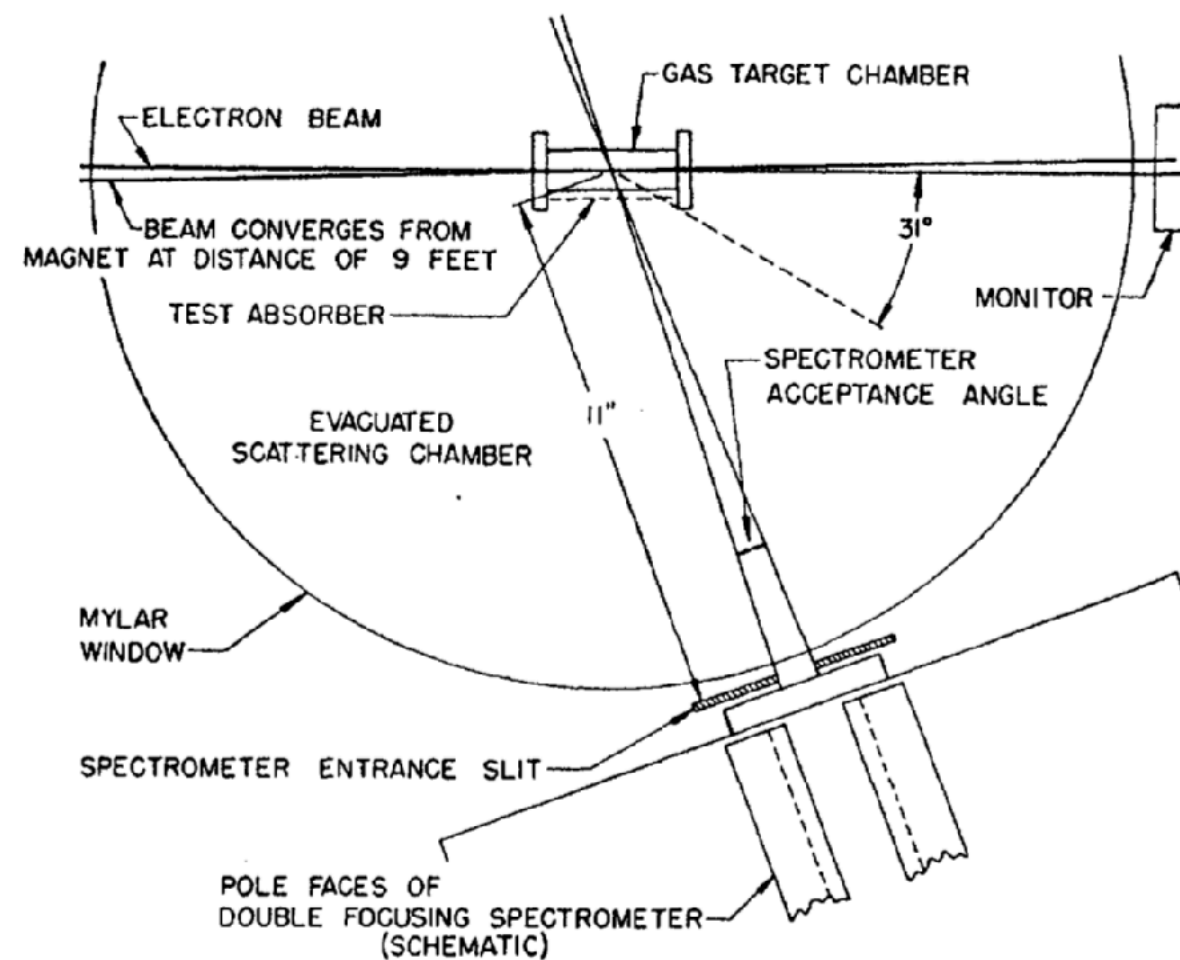


FIG. 2. Arrangement of parts in experiments on electron scattering from a gas target.



# guardare dentro al nucleo (1967)

- stesso principio di Rutherford:
  - **proiettili** energetici (elettroni) **contro bersaglio fisso**  
(gas di Idrogeno Elio, i nuclei più semplici da studiare)
- guardando i dati, R. Feynman capisce che il protone si comporta come un **insieme di cariche puntiformi**

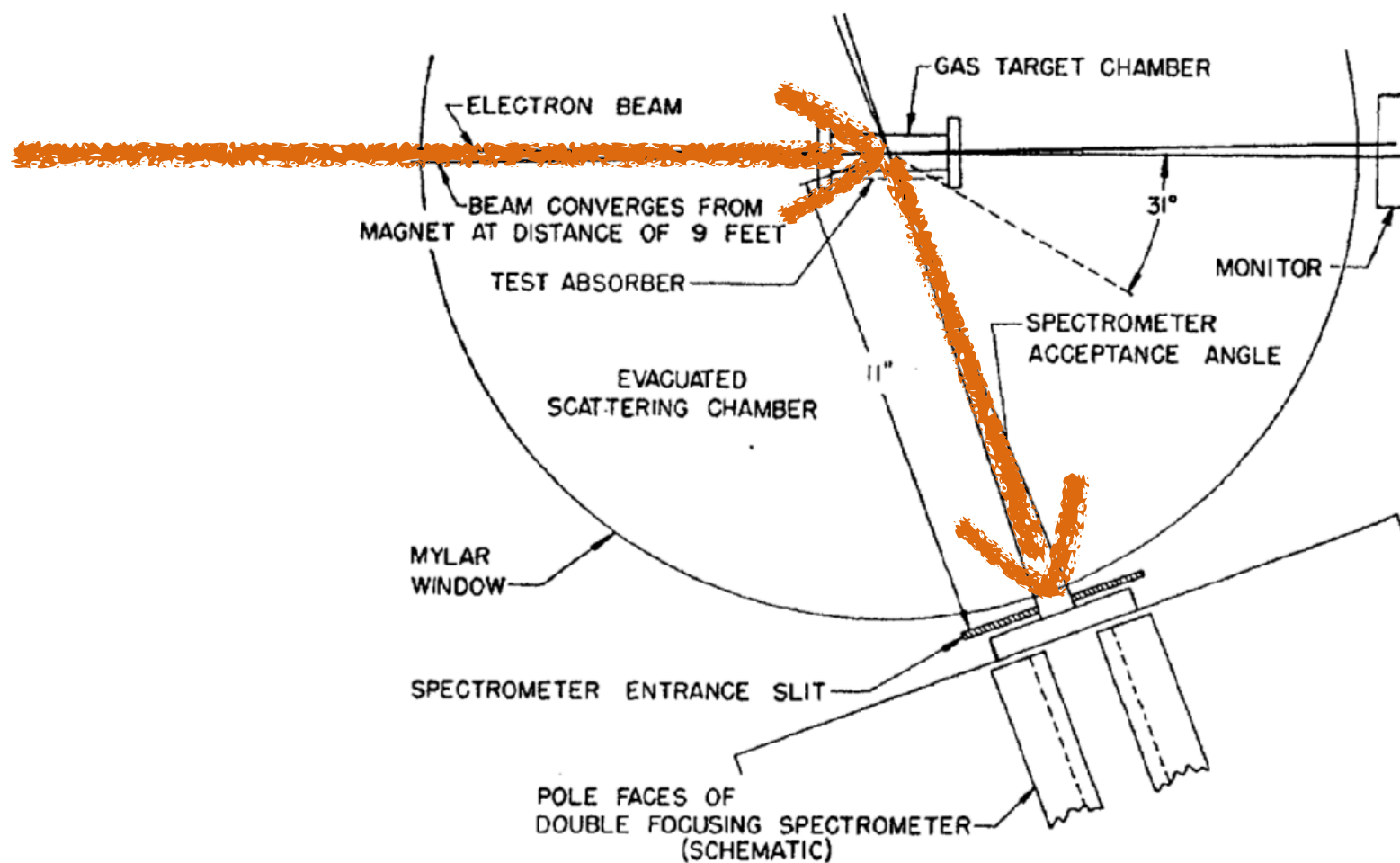


FIG. 2. Arrangement of parts in experiments on electron scattering from a gas target.

# la relazione di de Broglie

- secondo **la meccanica quantistica**, la materia ha un comportamento duale onda-particella:

**ONDA**

**PARTICELLA**

lunghezza  
d'onda

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

costante  
di Plank

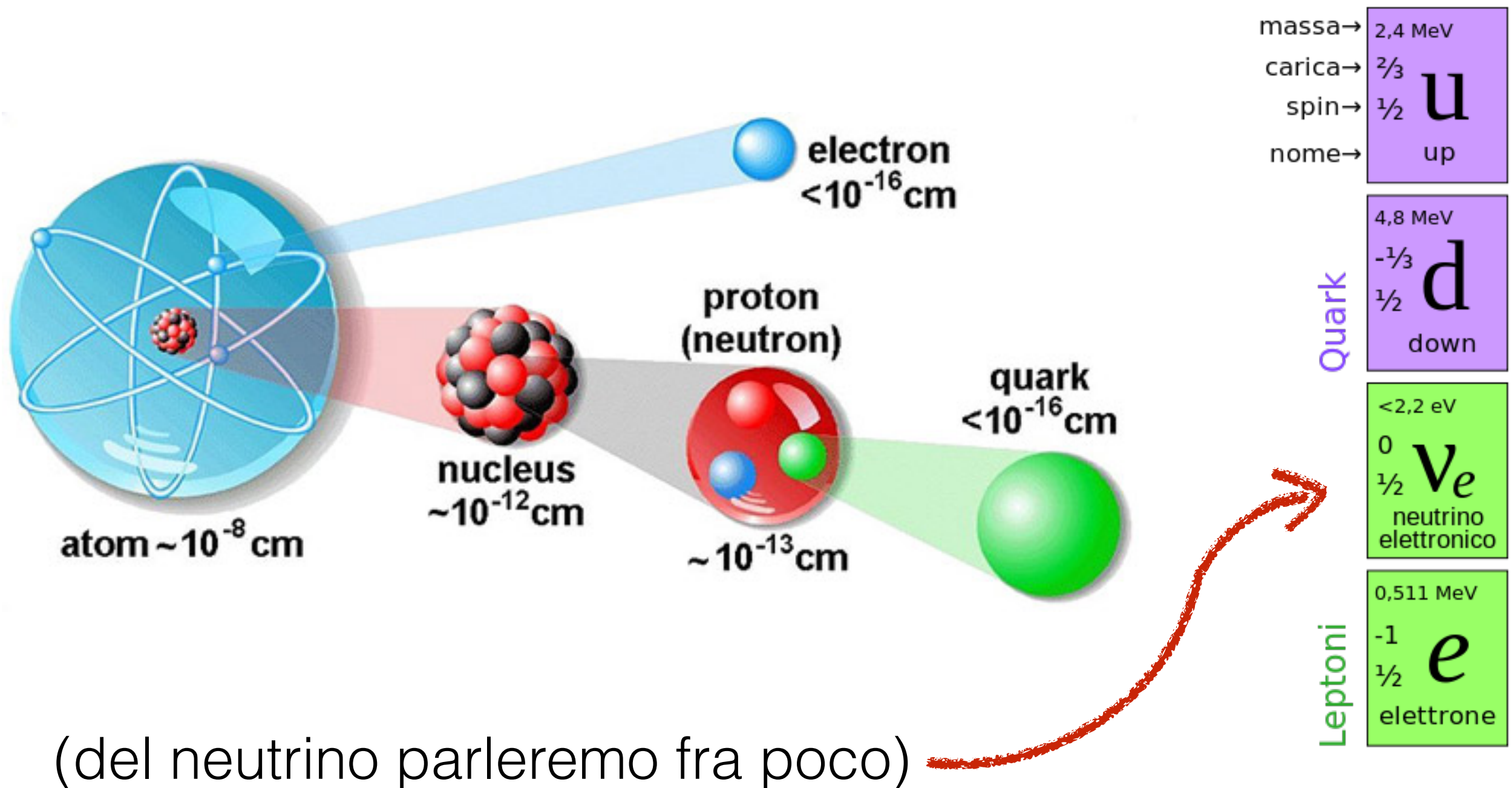
quantità di moto

$$h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$$



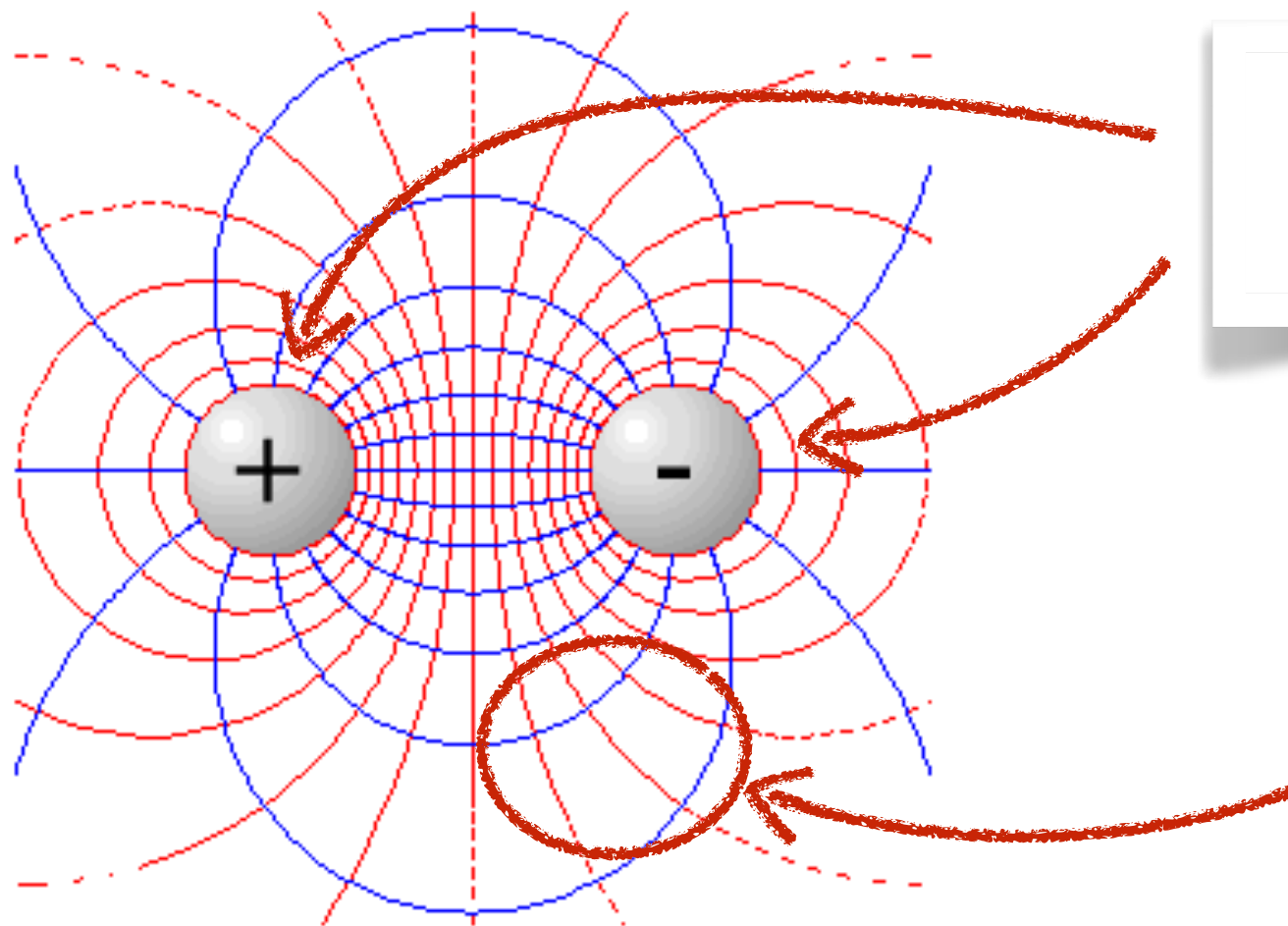
# i mattoni fondamentali della materia

- esperimenti susseguitisi nel secolo scorso e in questo millennio hanno portato ad un **insieme ridotto di particelle fondamentali** che costituiscono la materia visibile



# chi tiene insieme i pezzi?

- il nucleo atomico è carico positivamente, gli elettroni sono carichi negativamente
- la **forza elettromagnetica** tiene unito l'atomo
- il residuo dell'attrazione fra elettroni e nuclei tiene insieme la materia
- **l'intensità della forza è proporzionale alla carica** di elettroni e nucleo



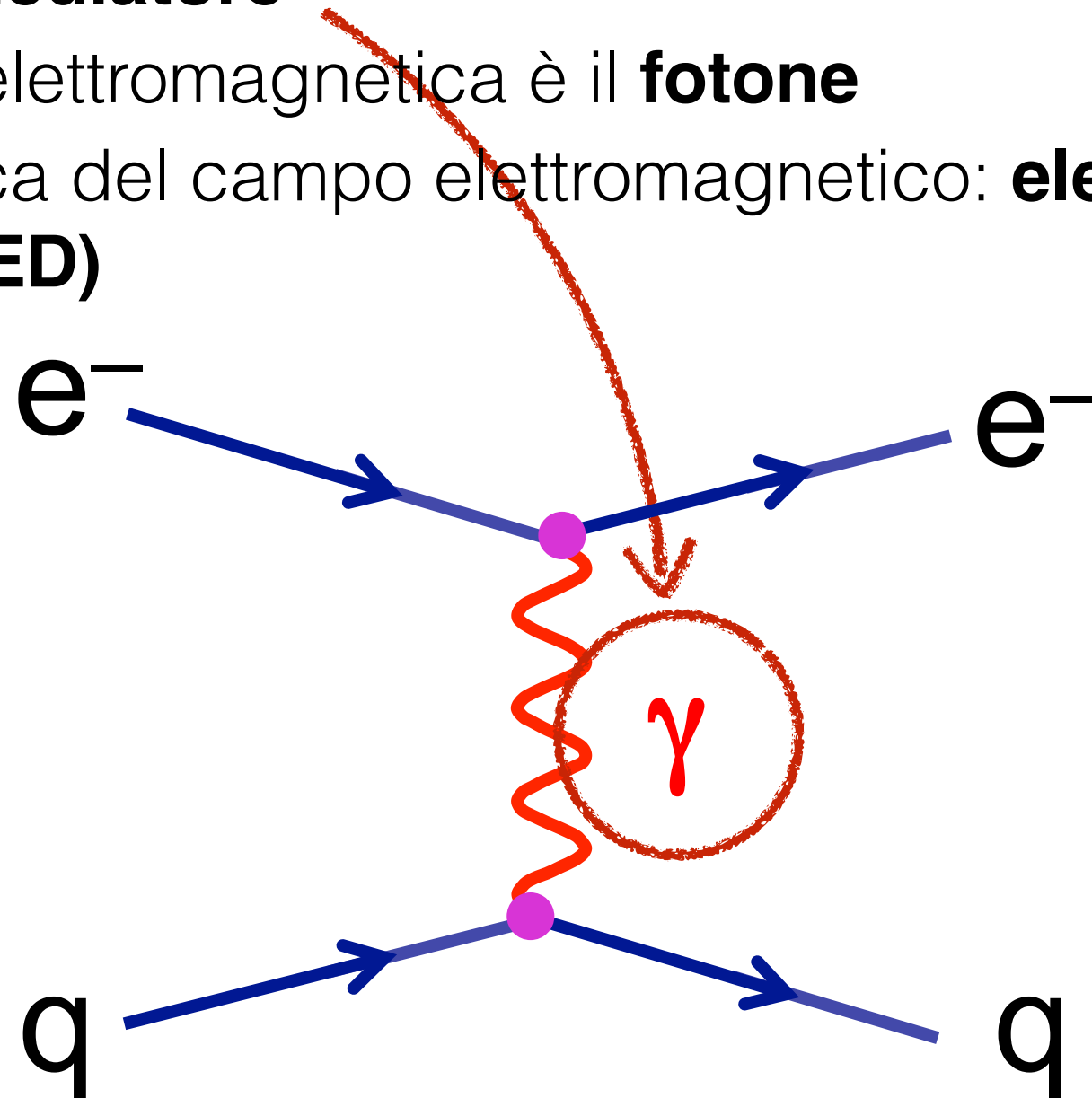
cariche che interagiscono

linee di forza del campo elettrico



# la forza elettromagnetica

- **in teoria quantistica dei campi** una forza...
  - non è di contatto: le particelle cariche non si toccano
  - non è istantanea: le particelle cariche scambiano informazione per interagire, un **mediatore**
- per l'interazione elettromagnetica è il **fotone**
  - teoria quantistica del campo elettromagnetico: **elettrodinamica quantistica (QED)**



# la forza forte (QCD)

- responsabile del **legame dei quark nel protone**
- molto più intensa di quella elettromagnetica
- mediata da **gluoni**
- agisce fra tutte le particelle che hanno una **carica di colore**
- il suo residuo tiene uniti protoni e neutroni nel nucleo
- non esiste un corrispettivo classico, perché agisce soltanto alla dimensione del nucleo di un atomo



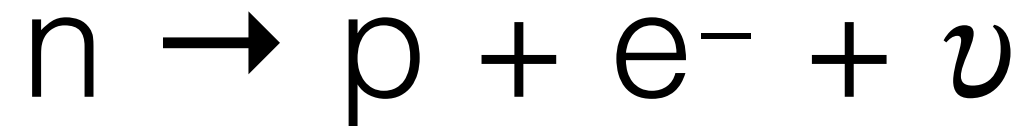
## **generalizzazione!**

la carica della forza non è più un segno, ma un colore e ci sono tre possibili valori (blu, rosso, verde) invece di due (+ e -)



# la forza debole

- genera il **decadimento  $\beta$**
- **teoria di Fermi**: l'elettrone e il neutrino sono “creati” nell'atto del decadimento di un neutrone



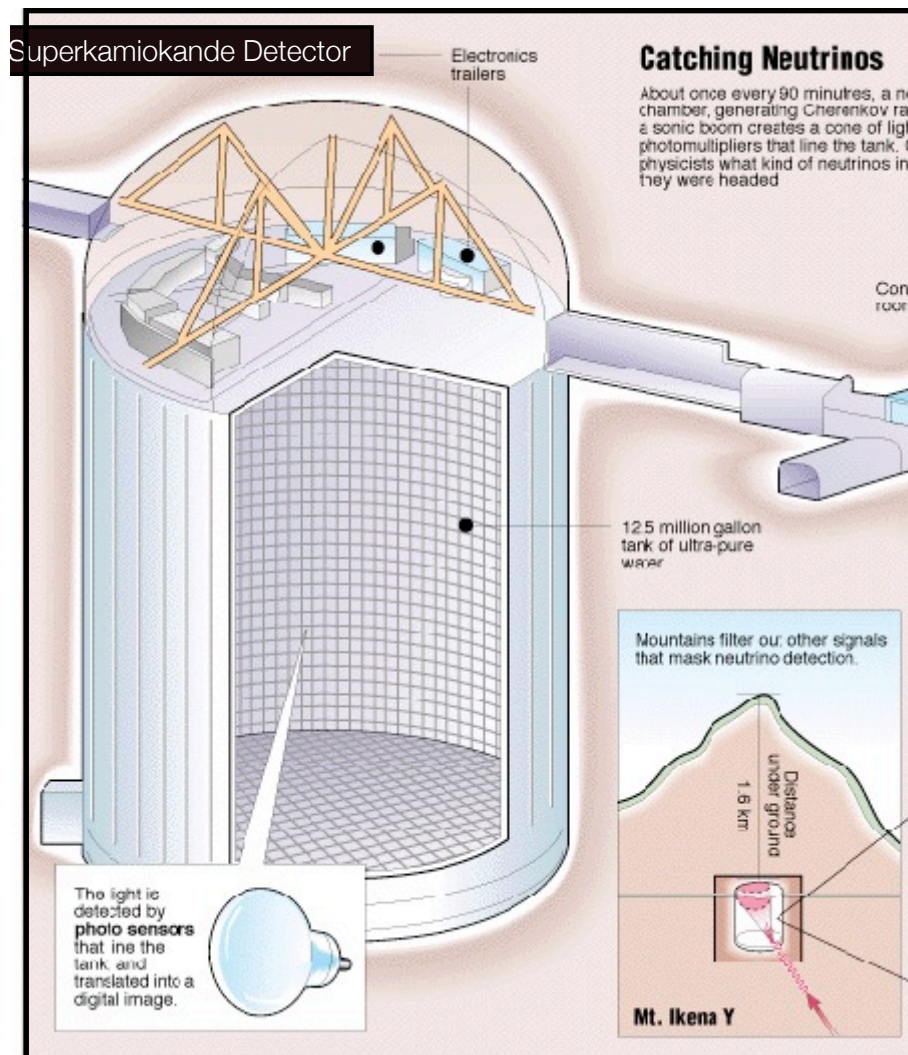
- la teoria dei campi quantizzati diventa il paradigma della fisica subnucleare
- c'è una particella elementare in più: il **neutrino**

## **generalizzazione ulteriore**

una forza non è più necessariamente attrattiva o repulsiva, descrive una possibile interazione fra particelle di materia

# il neutrino

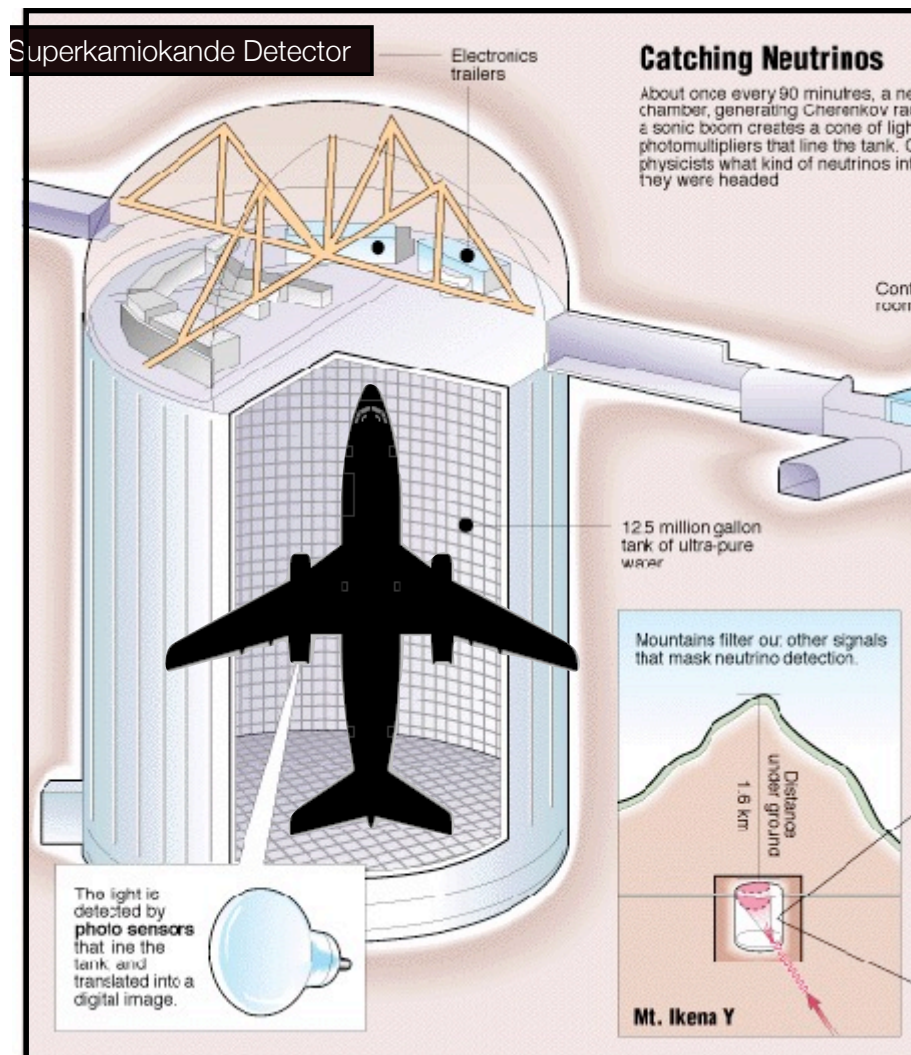
- la forza debole ha intensità infinitesima rispetto alle forze elettromagnetica e forte
- questo si traduce in **bassissima probabilità di interazione** per il neutrino, che risente solo della forza debole
- rivelatori enormi e ambienti di misura molto quieti (sotto le montagne)





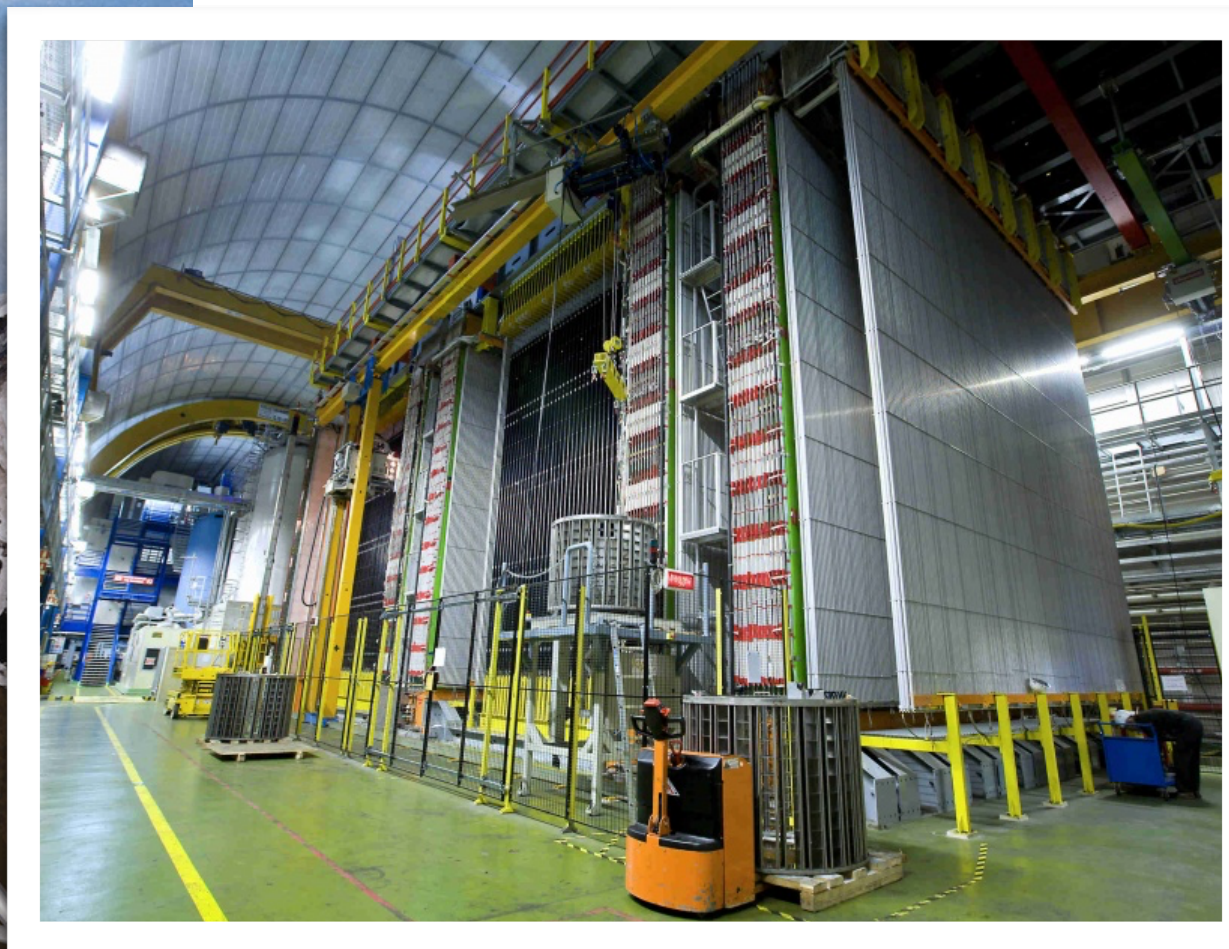
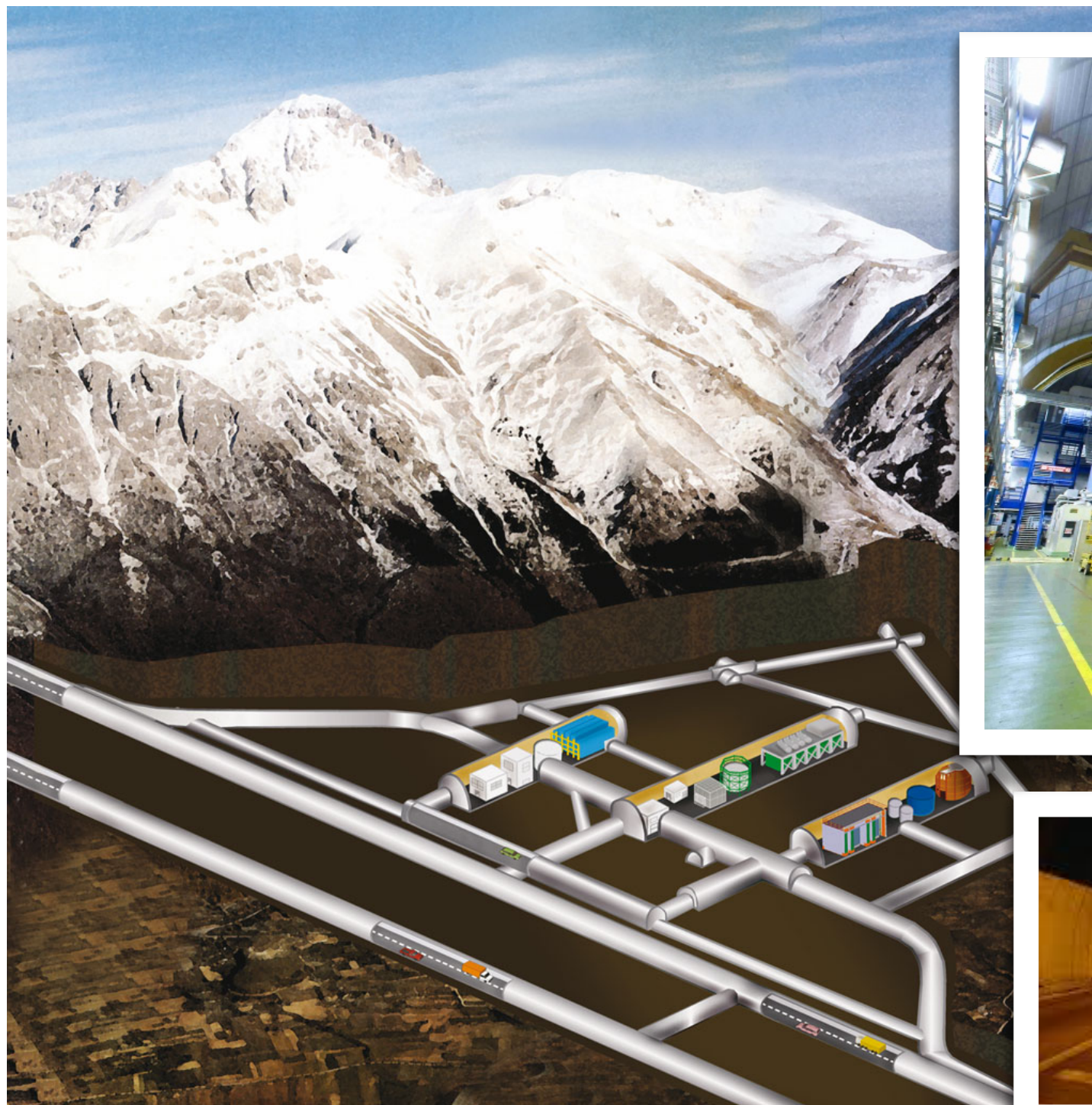
# il neutrino

- la forza debole ha intensità infinitesima rispetto alle forze elettromagnetica e forte
- questo si traduce in **bassissima probabilità di interazione** per il neutrino, che risente solo della forza debole
- rivelatori enormi e ambienti di misura molto quieti (sotto le montagne)



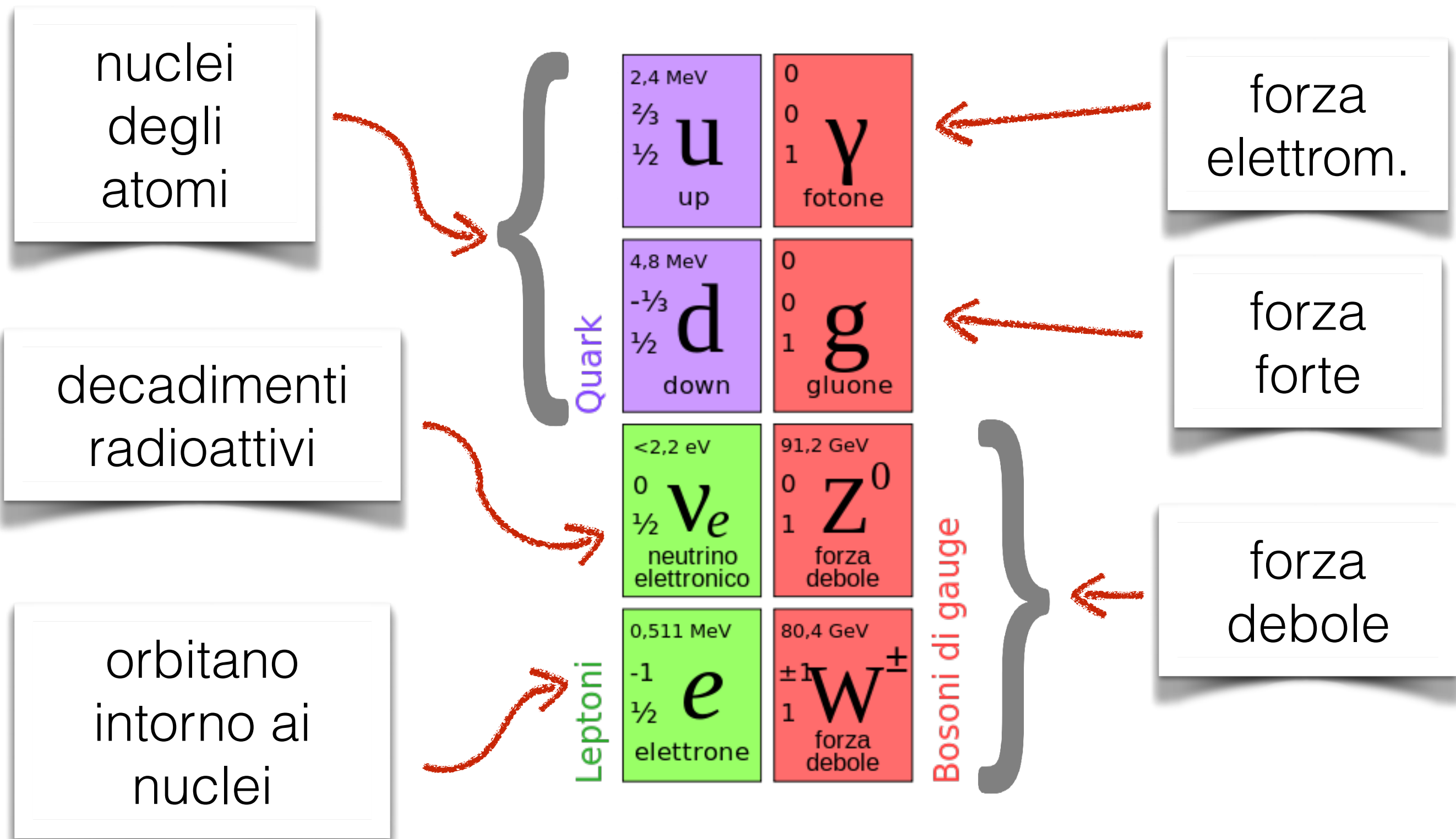


# laboratori del Gran Sasso



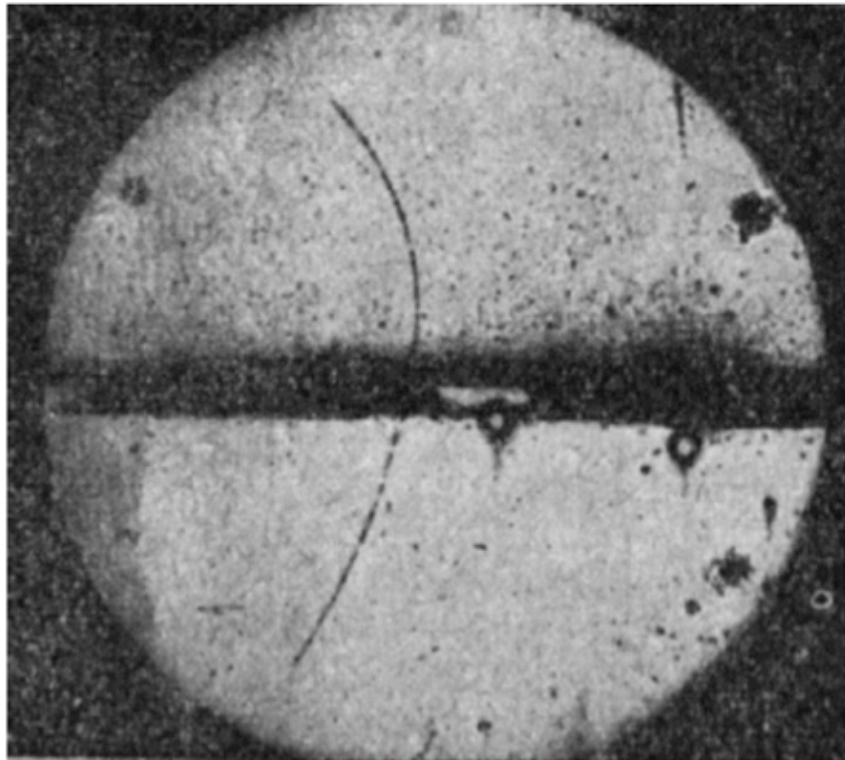


# particelle e forze



# l'anti-materia

- **prevista** dalle equazioni scritte da P.M. Dirac nel 1928, per rendere compatibili la meccanica quantistica di E. Schrödinger con la teoria della relatività ristretta
- **compresa** da E. Majorana, che fu il primo a vedere nelle equazioni di Dirac un nuovo insieme di particelle rispetto a quelle esistenti:
- **per ogni particella esiste un gemello perfettamente identico, di carica opposta.** I due gemelli, se entrano in contatto, producono energia pura (annichilazione).

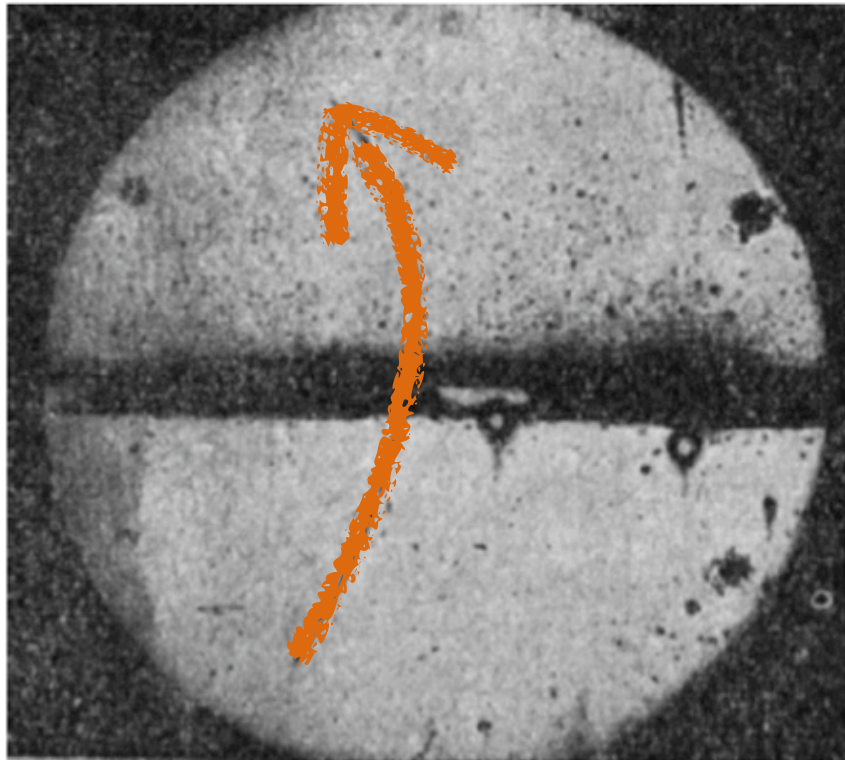


una delle prime immagini al mondo (1932) di un positrone, che viaggia dal basso verso l'alto nella fotografia.



# l'anti-materia

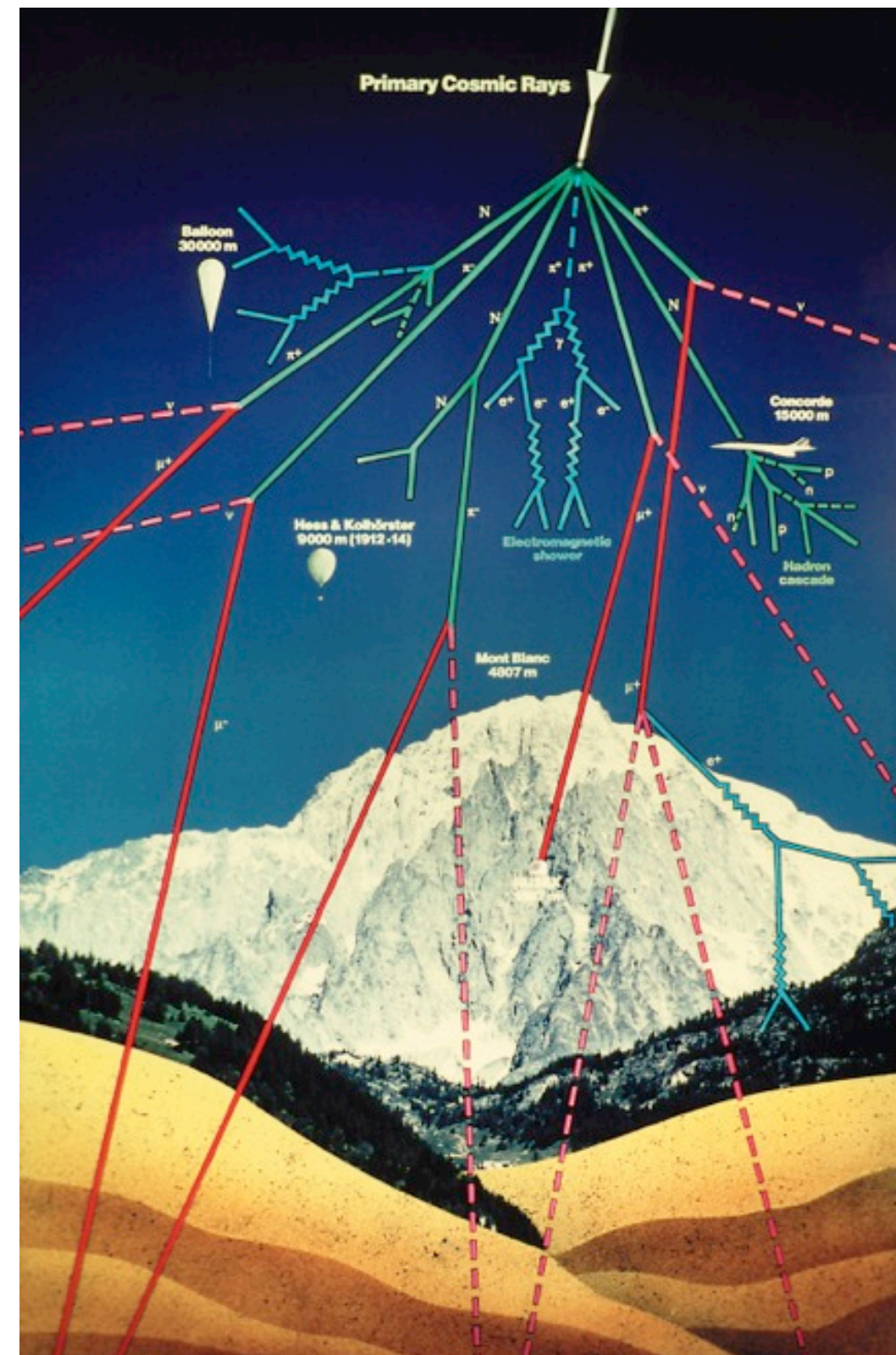
- **prevista** dalle equazioni scritte da P.M. Dirac nel 1928, per rendere compatibili la meccanica quantistica di E. Schrödinger con la teoria della relatività ristretta
- **compresa** da E. Majorana, che fu il primo a vedere nelle equazioni di Dirac un nuovo insieme di particelle rispetto a quelle esistenti:
- **per ogni particella esiste un gemello perfettamente identico, di carica opposta.** I due gemelli, se entrano in contatto, producono energia pura (annichilazione).



una delle prime immagini al mondo (1932) di un positrone, che viaggia dal basso verso l'alto nella fotografia.

# uno zoo di particelle

- 1937: scoperta una **nuova particella elementare** che piove dal cielo (raggi cosmici)
- 1947: B. Pontecorvo mostra che è una **copia pesante dell'elettrone**
- 1940-50 uno **zoo di nuove particelle** emerge dallo studio dei raggi cosmici
- non si trovano nella materia ordinaria, ma si possono **studiare in laboratorio**
- dopo mezzo secolo di esperimenti e di vicissitudini, si giunge ad un quadro consistente e minimale delle particelle elementari....





# le particelle del modello standard

Tre generazioni della materia (fermioni)

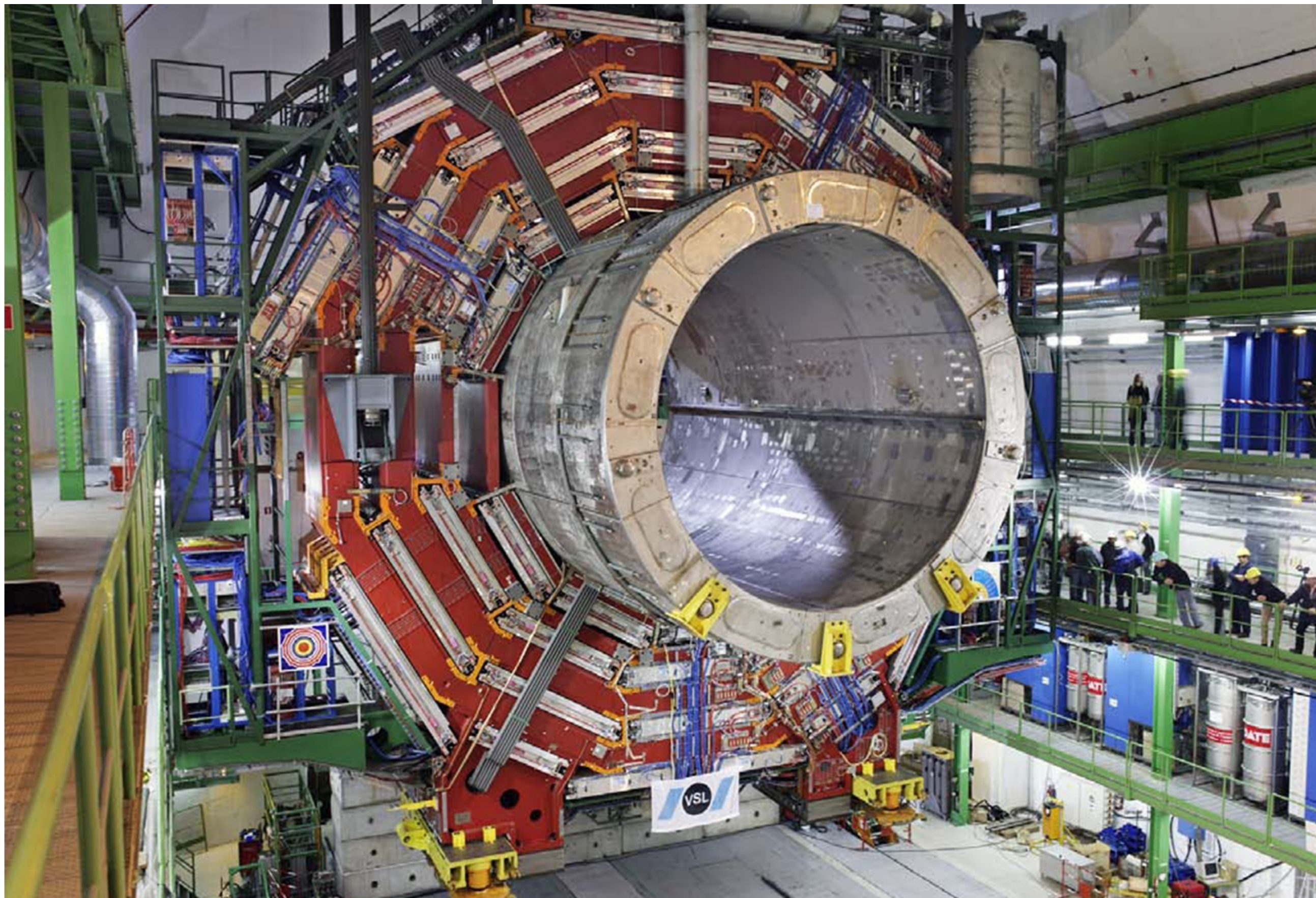
	I	II	III		I	II	III
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nome →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone	<b><math>\bar{u}</math></b> up	<b><math>\bar{c}</math></b> charm	<b><math>\bar{t}</math></b> top
Quark	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>s</b> strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ <b>b</b> bottom	0 0 <b>g</b> gluone	4,8 MeV $+\frac{1}{3}$ <b><math>\bar{d}</math></b> down	104 MeV $+\frac{1}{3}$ <b><math>\bar{s}</math></b> strange	4,2 GeV $+\frac{1}{3}$ <b><math>\bar{b}</math></b> bottom
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	91,2 GeV 0 1 <b><math>Z^0</math></b> forza debole	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\bar{\nu}_e</math></b> neutrino elettronico	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\bar{\nu}_\mu</math></b> neutrino muonico	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b><math>\bar{\nu}_\tau</math></b> neutrino tauonico
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> elettrone	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> muone	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tauone	80,4 GeV $\pm 1$ 1 <b><math>W^\pm</math></b> forza debole	0,511 MeV +1 $\frac{1}{2}$ <b><math>e^+</math></b> elettrone	105,7 MeV +1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu^+</math></b> muone	1,777 GeV +1 $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau^+</math></b> tauone
Leptoni			Bosoni di gauge	+	anti Quark		anti Leptoni

# la rivelazione delle particelle elementari

l'esempio del rivelatore Compact Muon Solenoid (CMS)

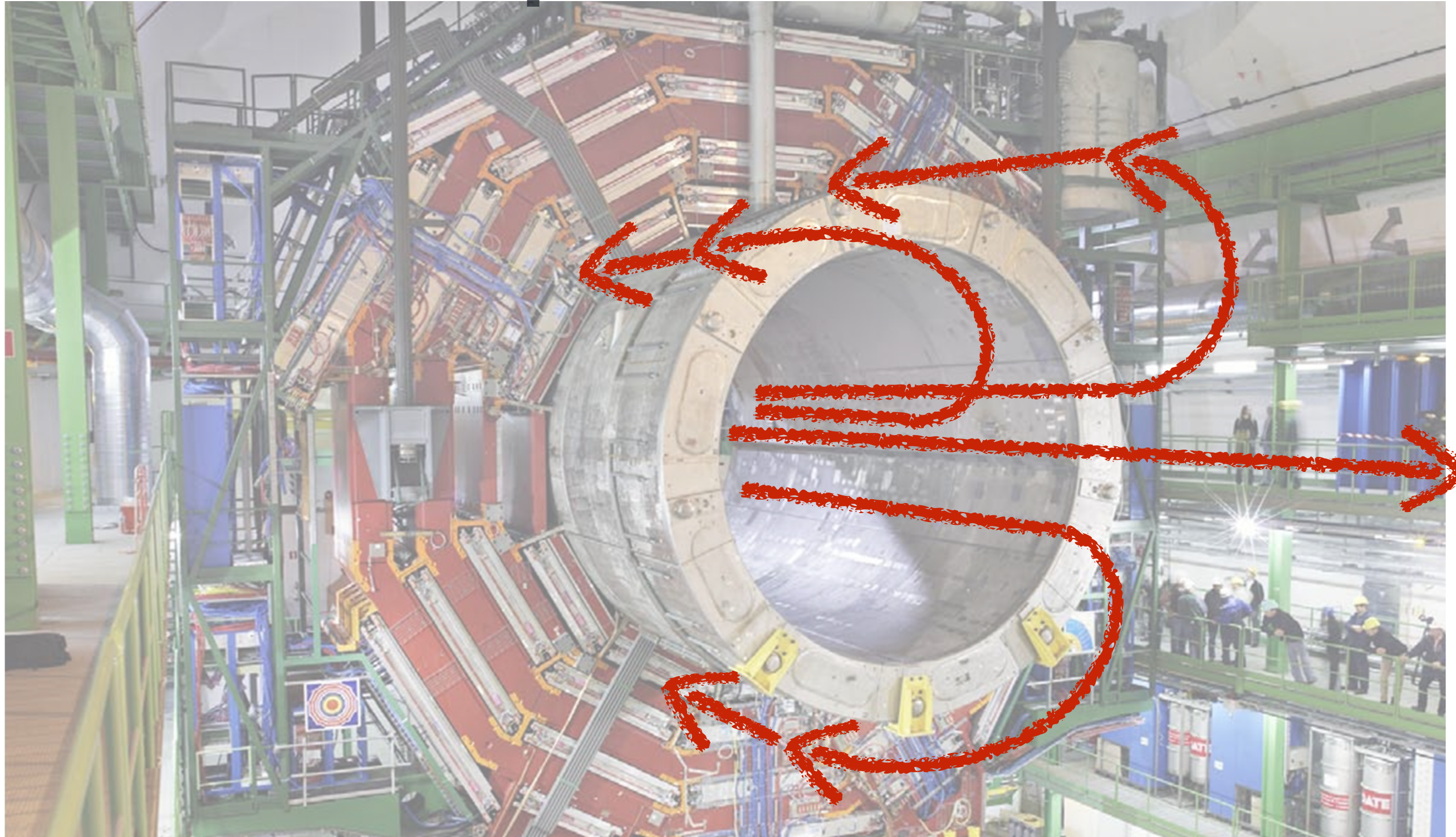


# solenoide superconduttore





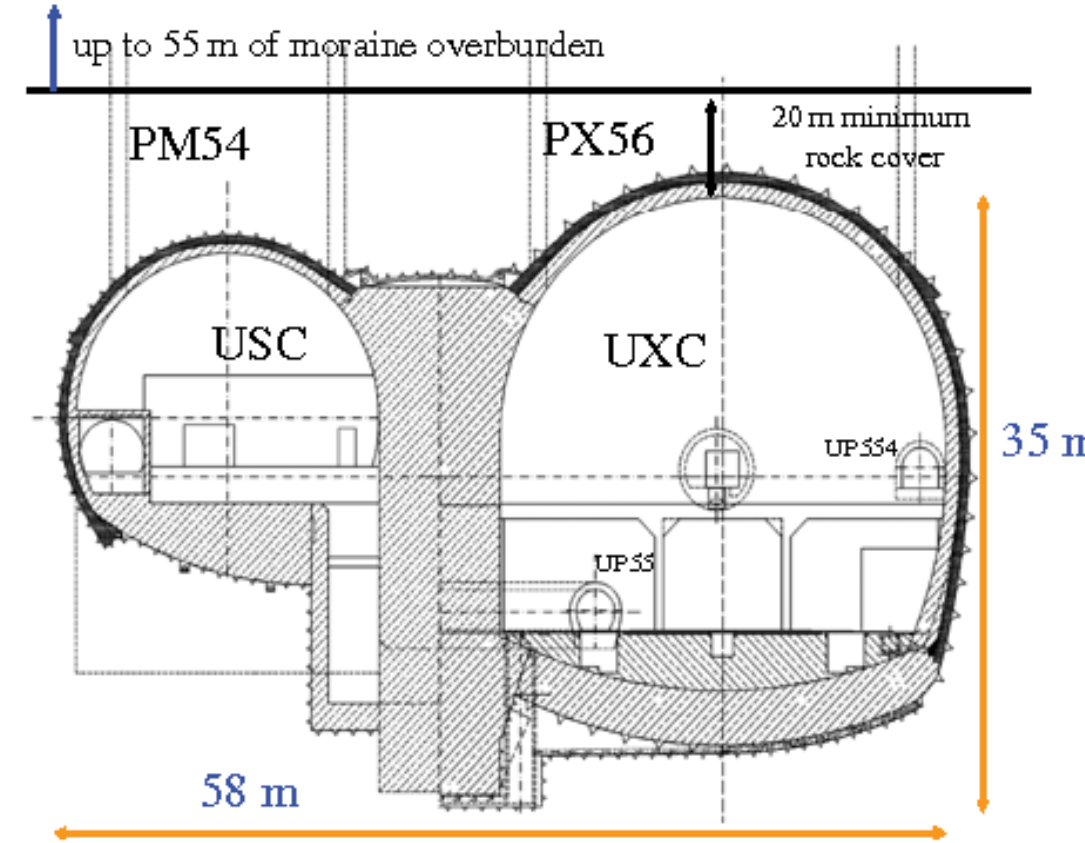
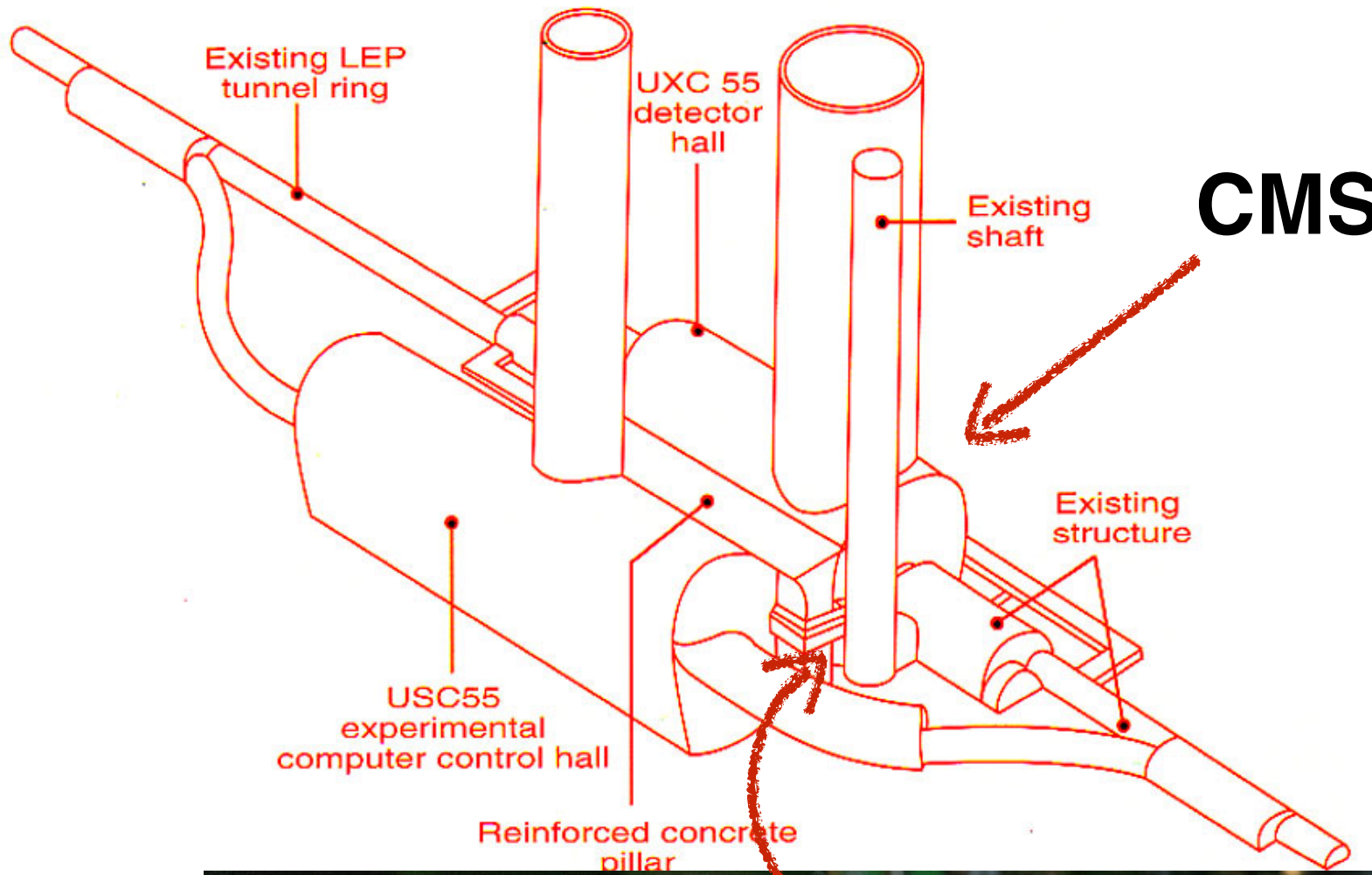
# solenoide superconduttore



campo magnetico di 3.8 T dentro,  $\sim 2$ T fuori dal solenoide

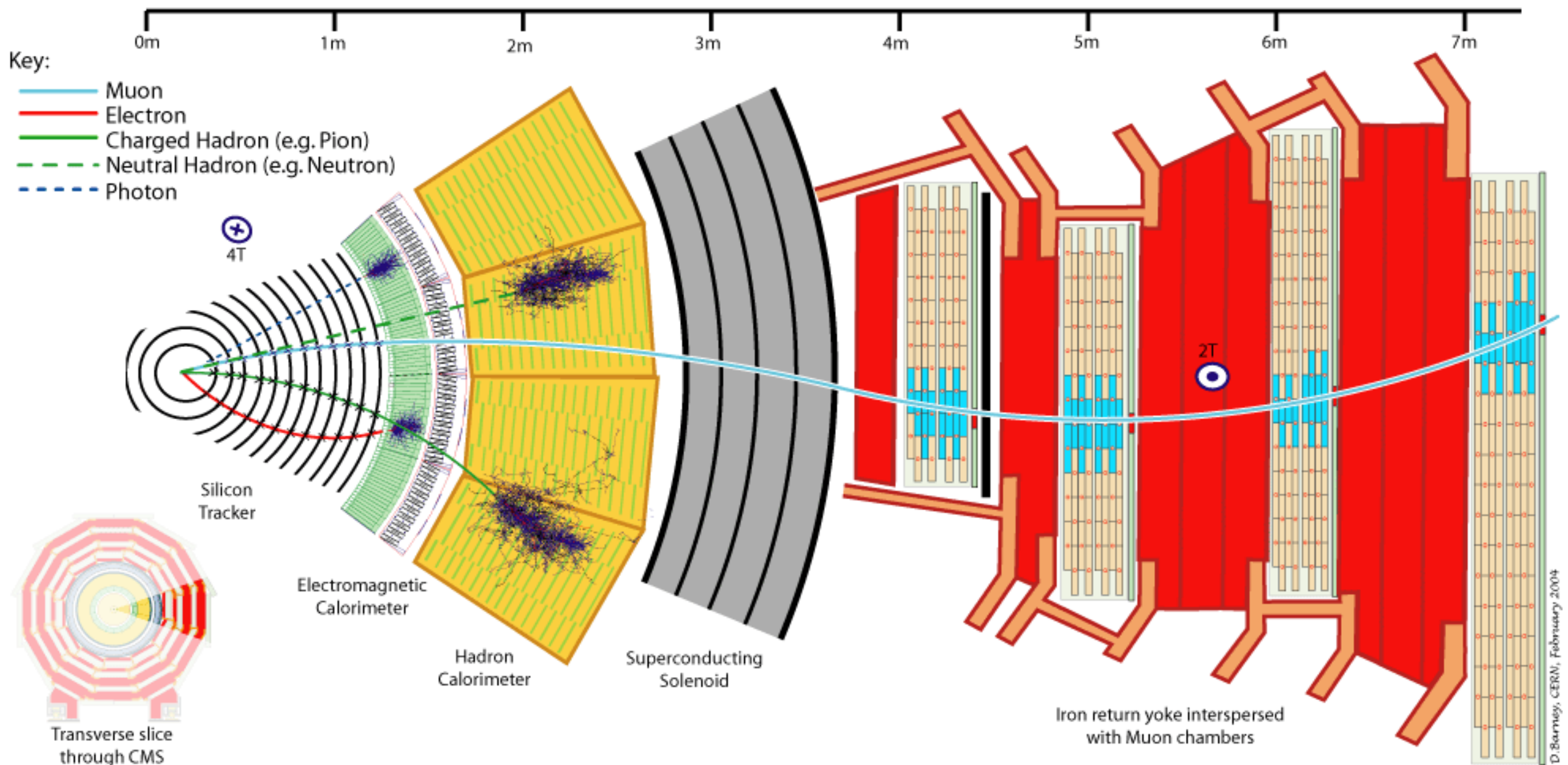


# effetti anche nelle caverne vicine





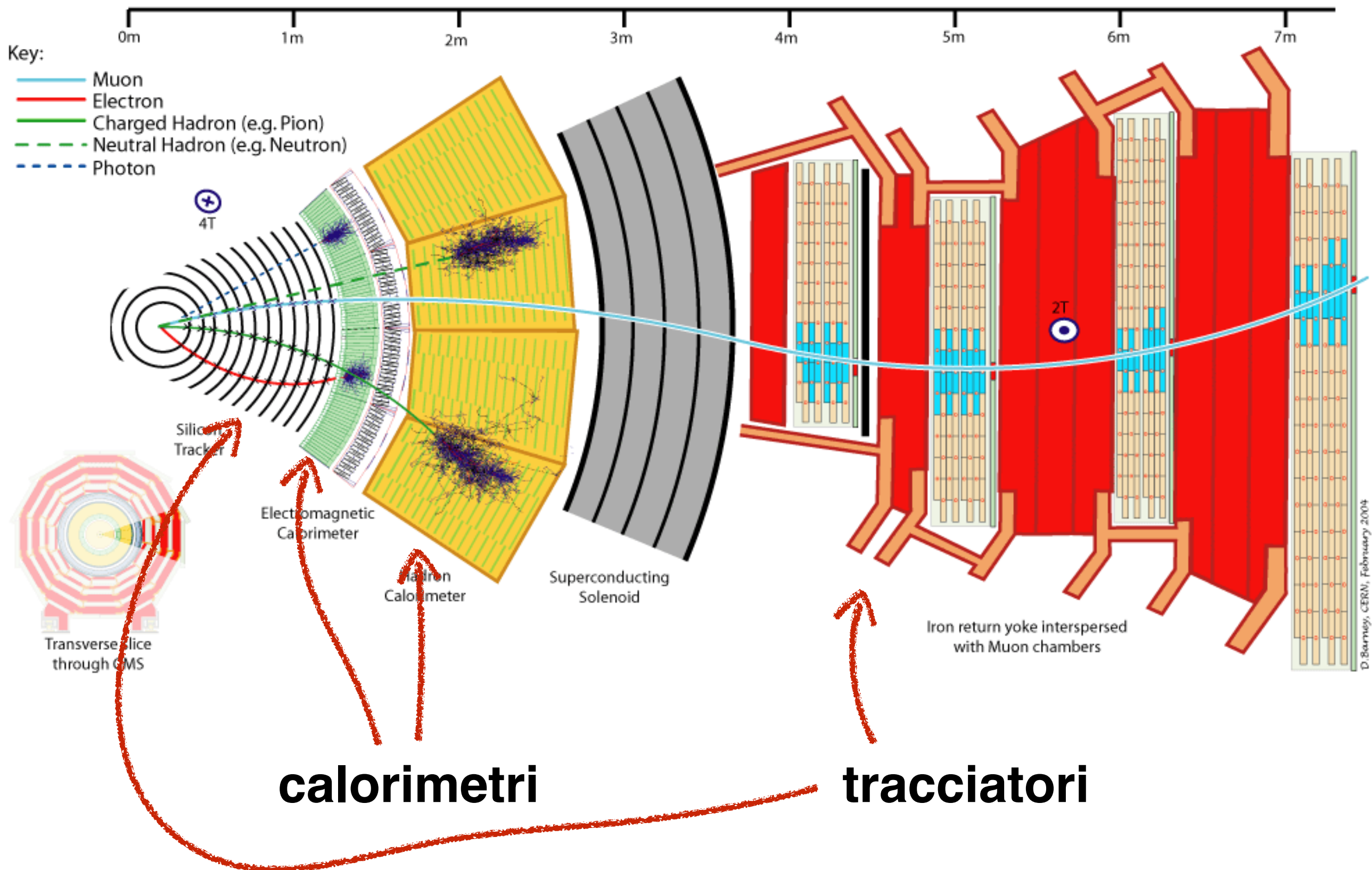
# la rivelazione di particelle



**molteplici elementi per misurare (quasi) tutti i tipi di particelle stabili**



# la rivelazione di particelle

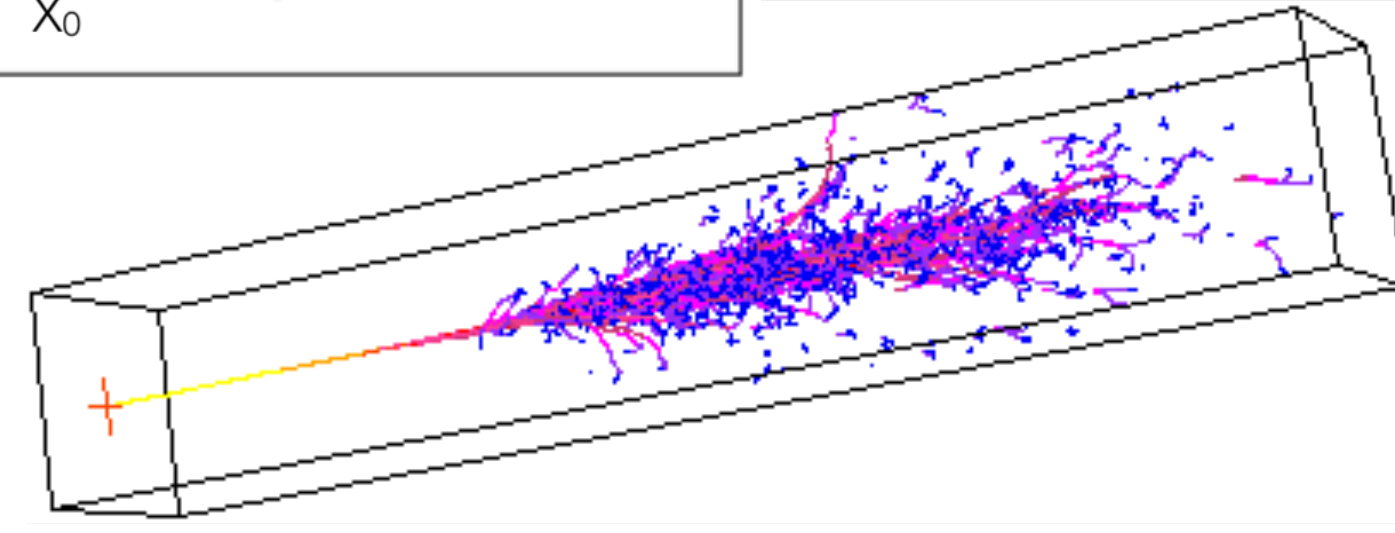
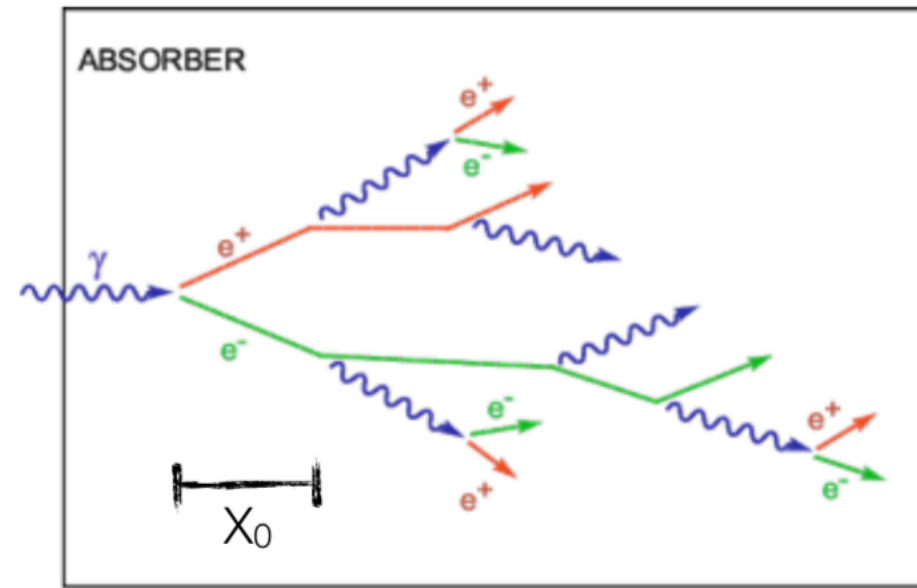
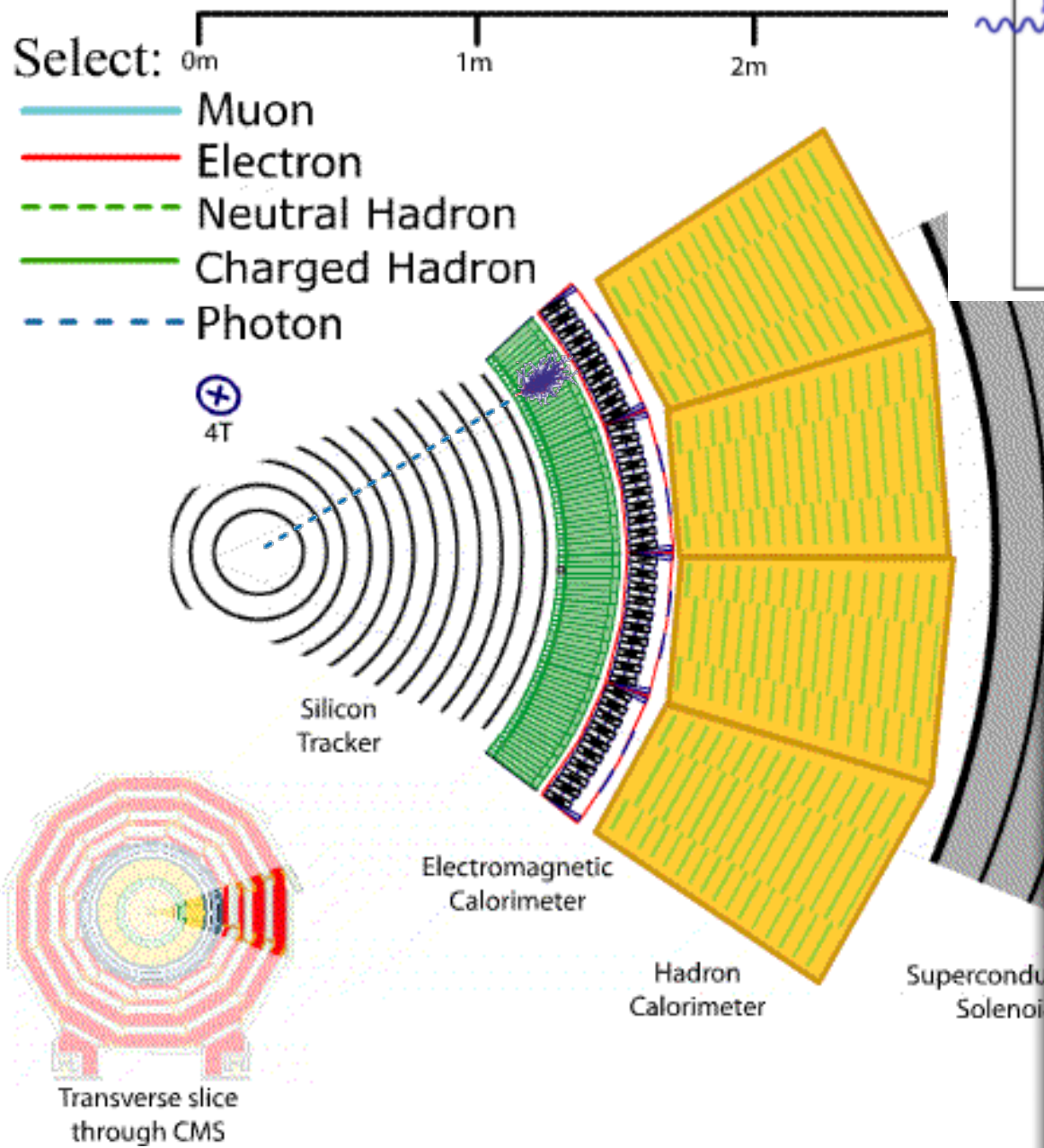


# la rivelazione di particelle





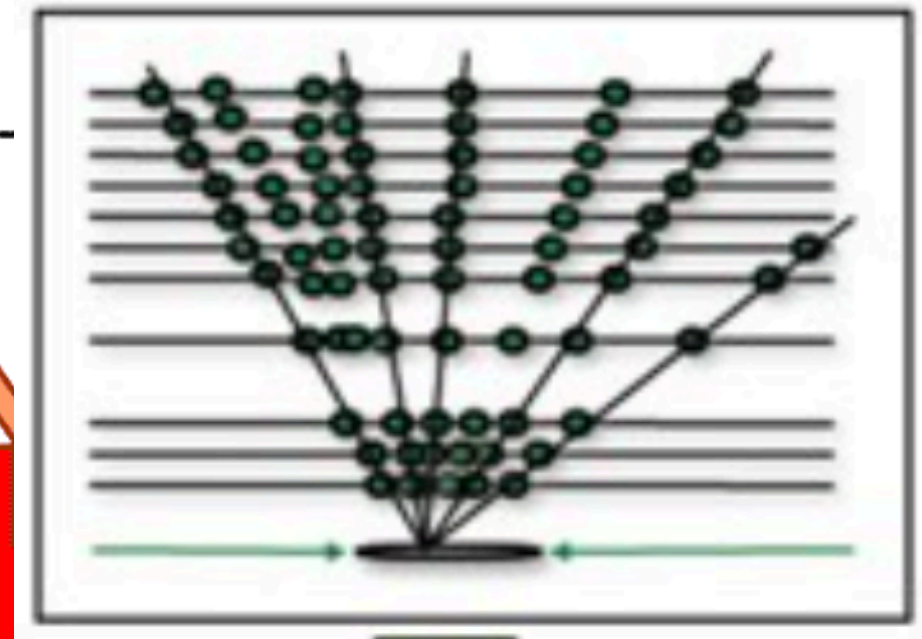
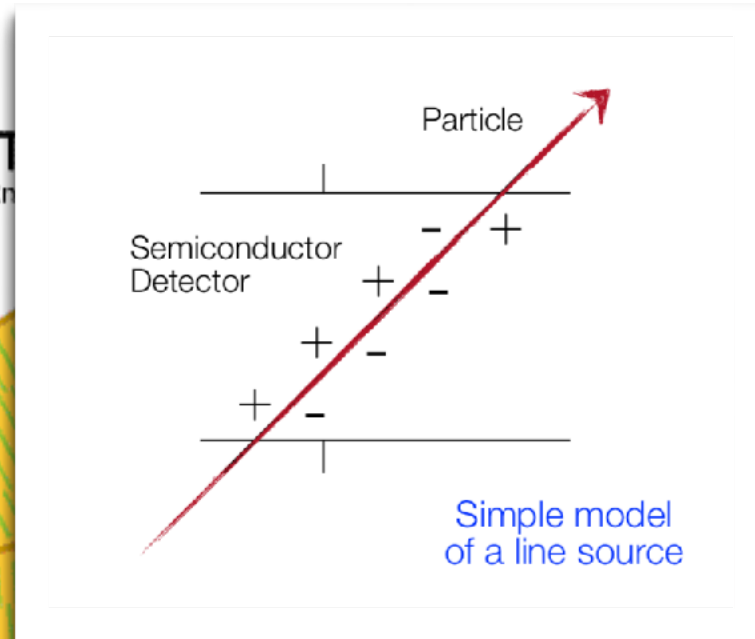
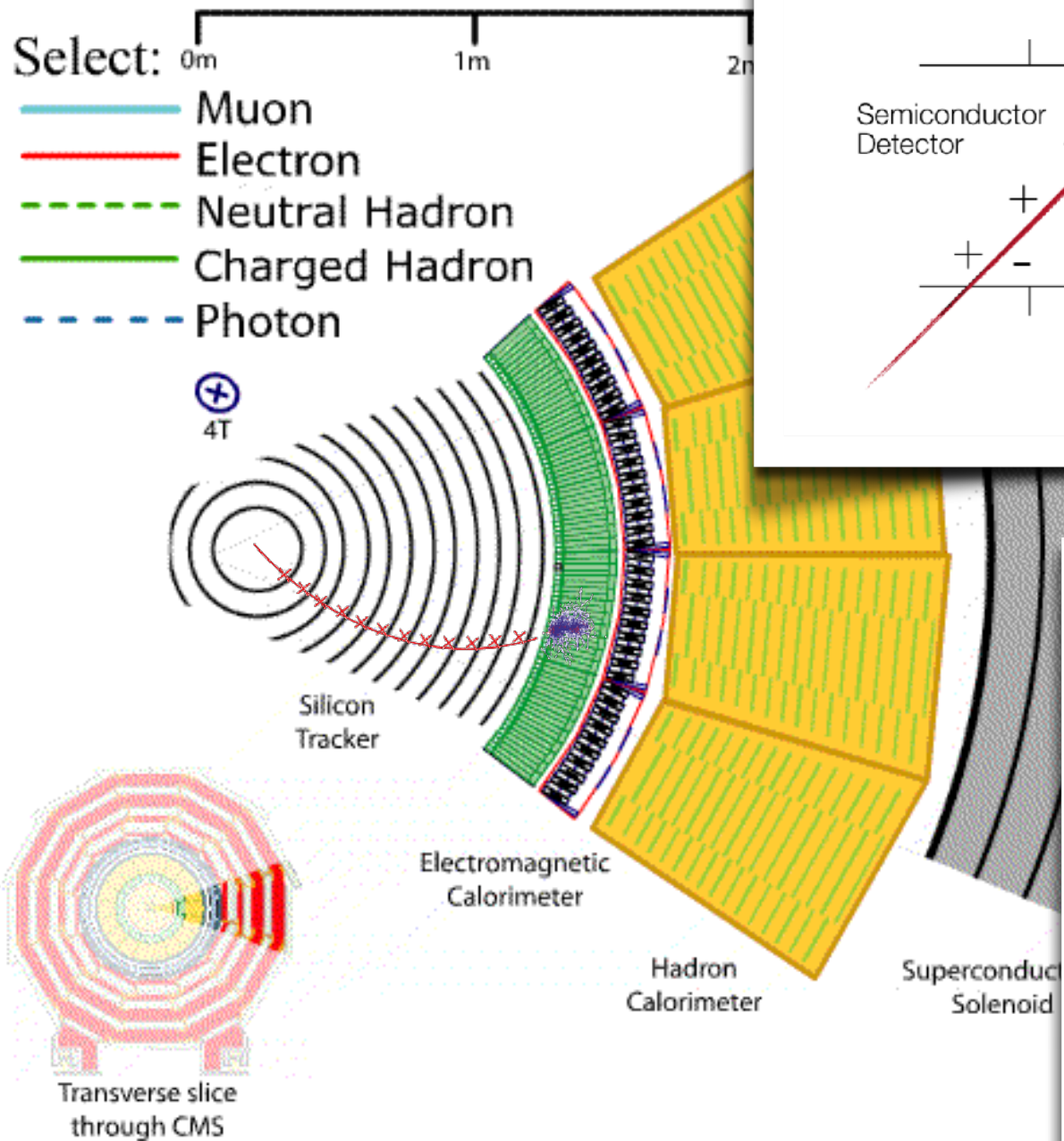
# fotoni



**calorimetro elettromagnetico: misura l'energia di elettroni e fotoni**



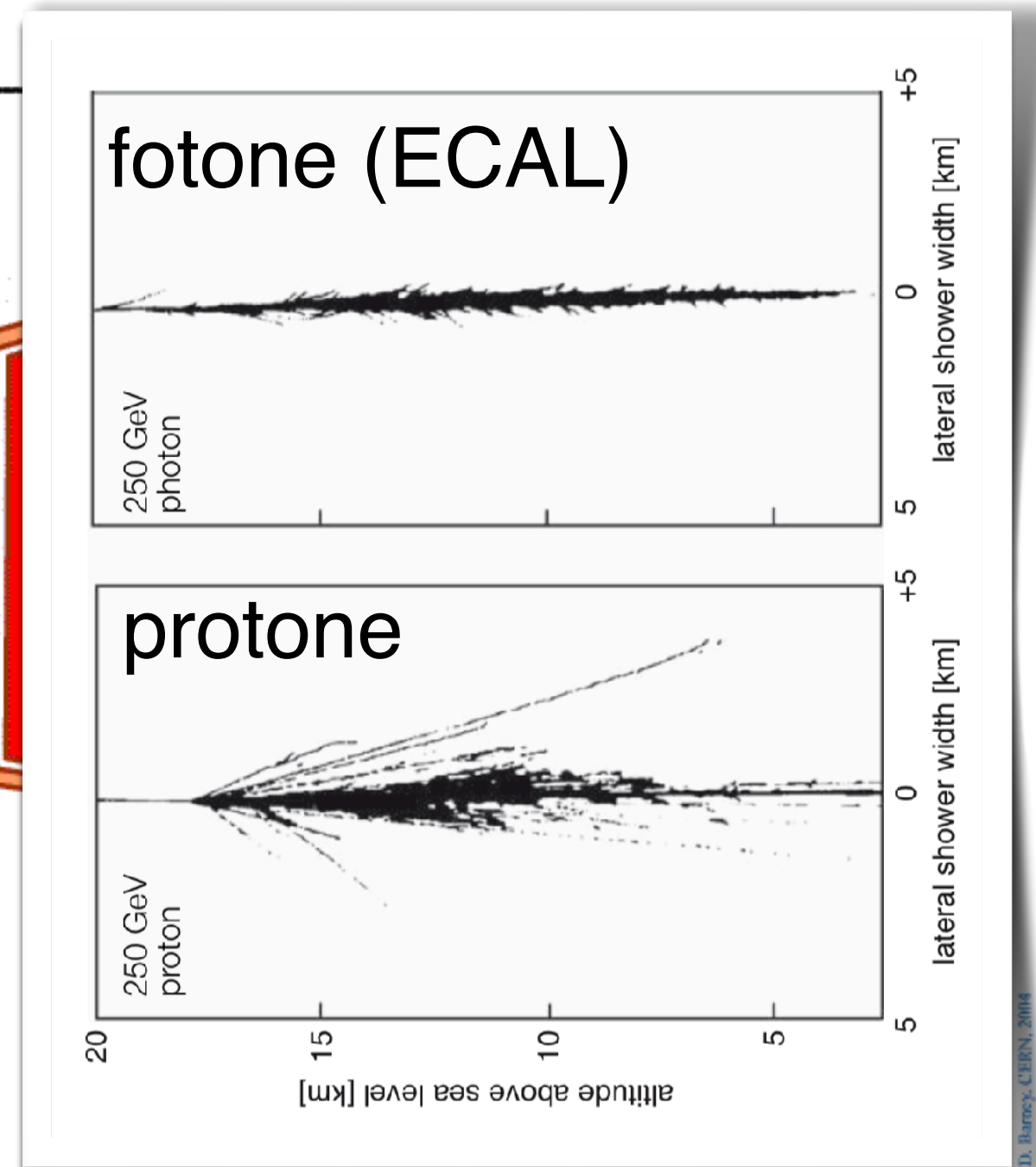
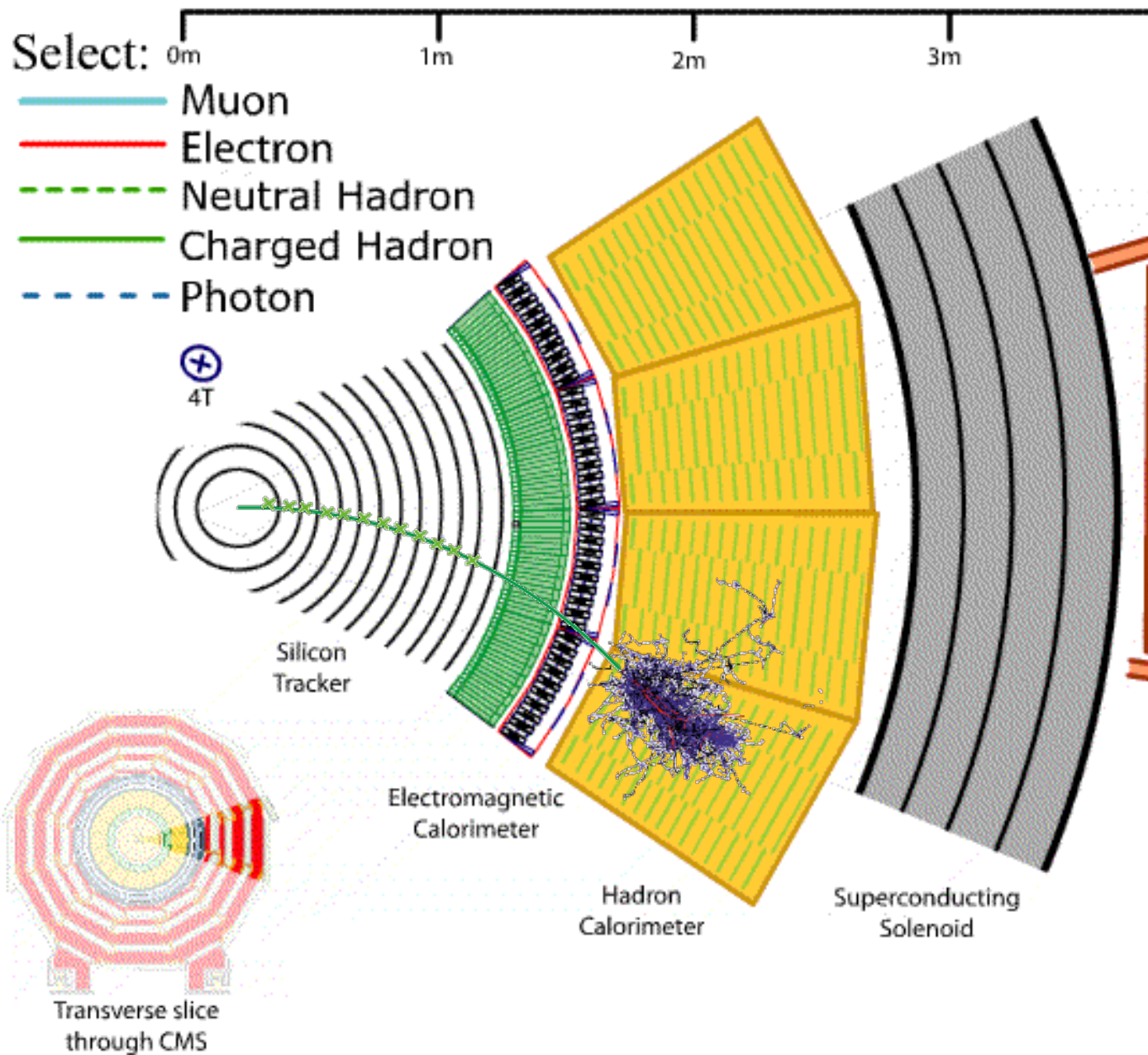
# elettroni



**tracciatore: misura la traiettoria di particelle cariche**



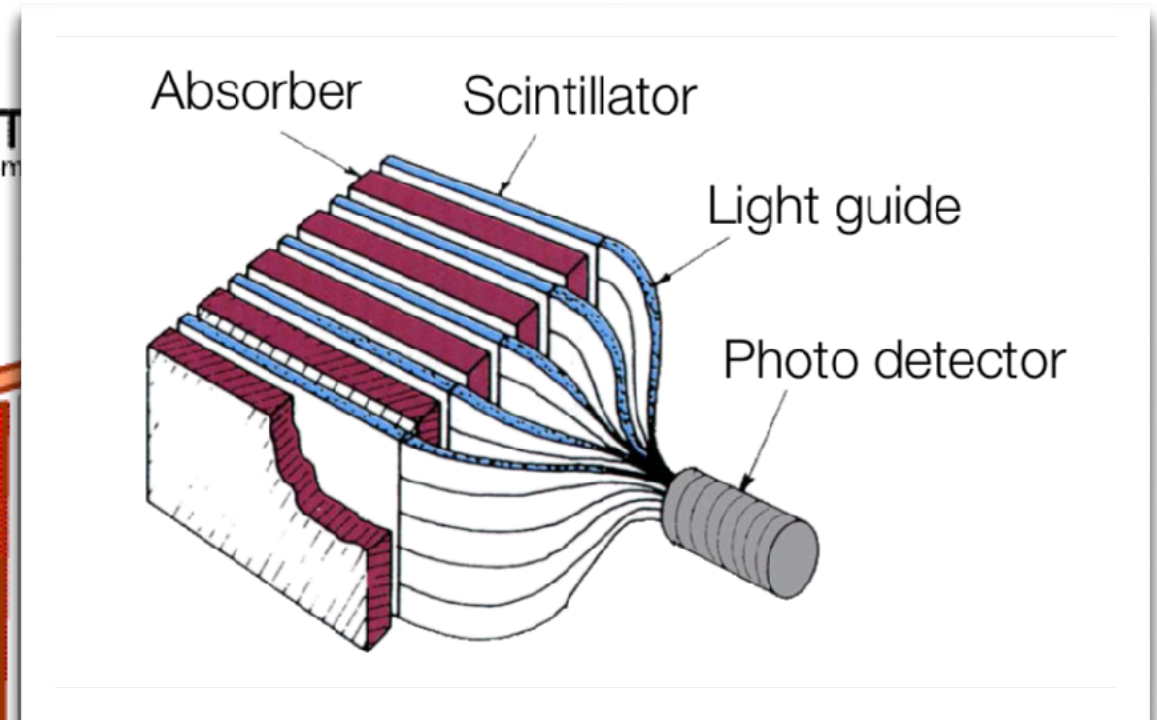
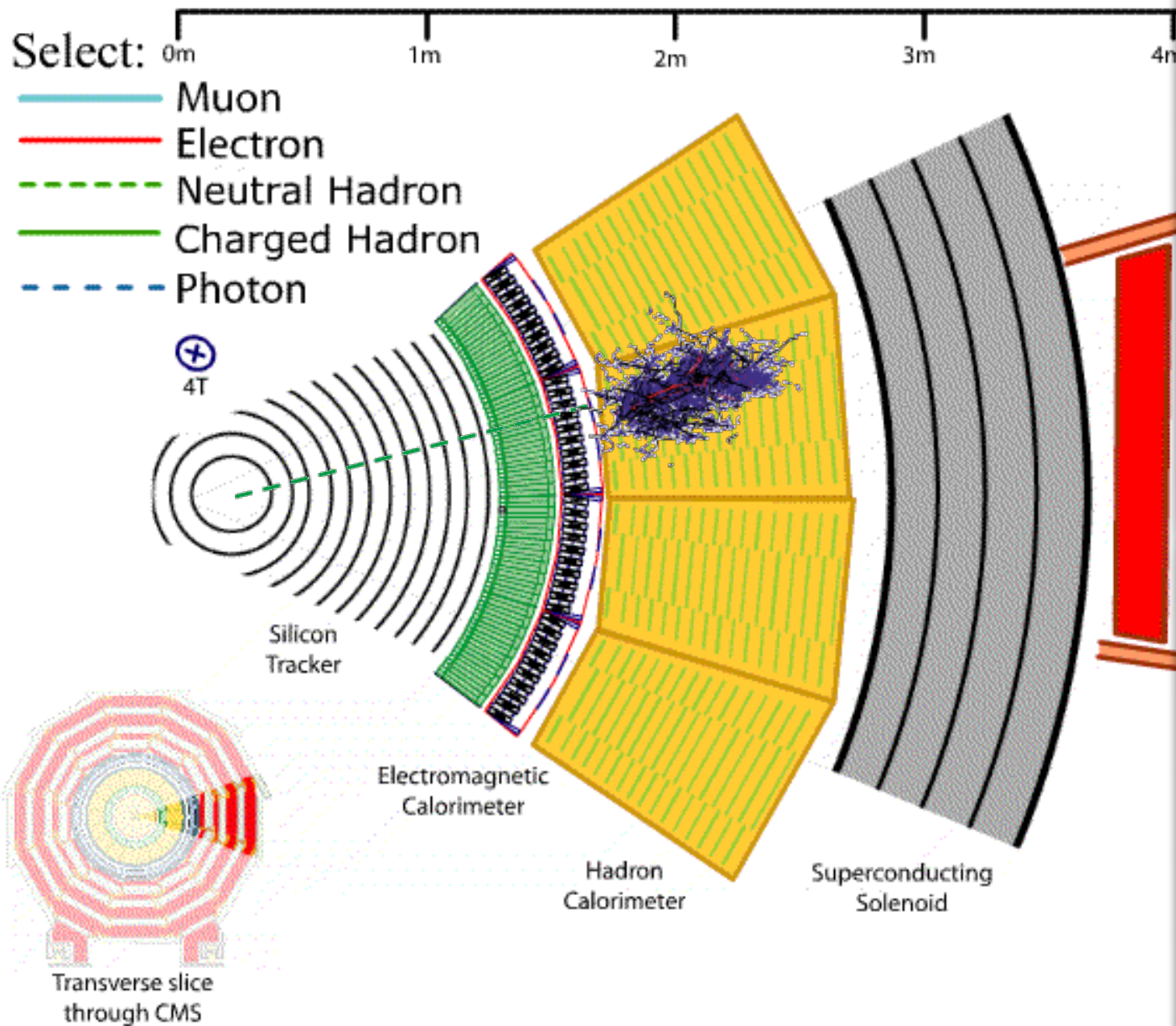
# adroni carichi (protoni)



calorimetri elettromagnetici ed adronici  
misurano cose ben diverse!



# adroni neutri (neutroni)

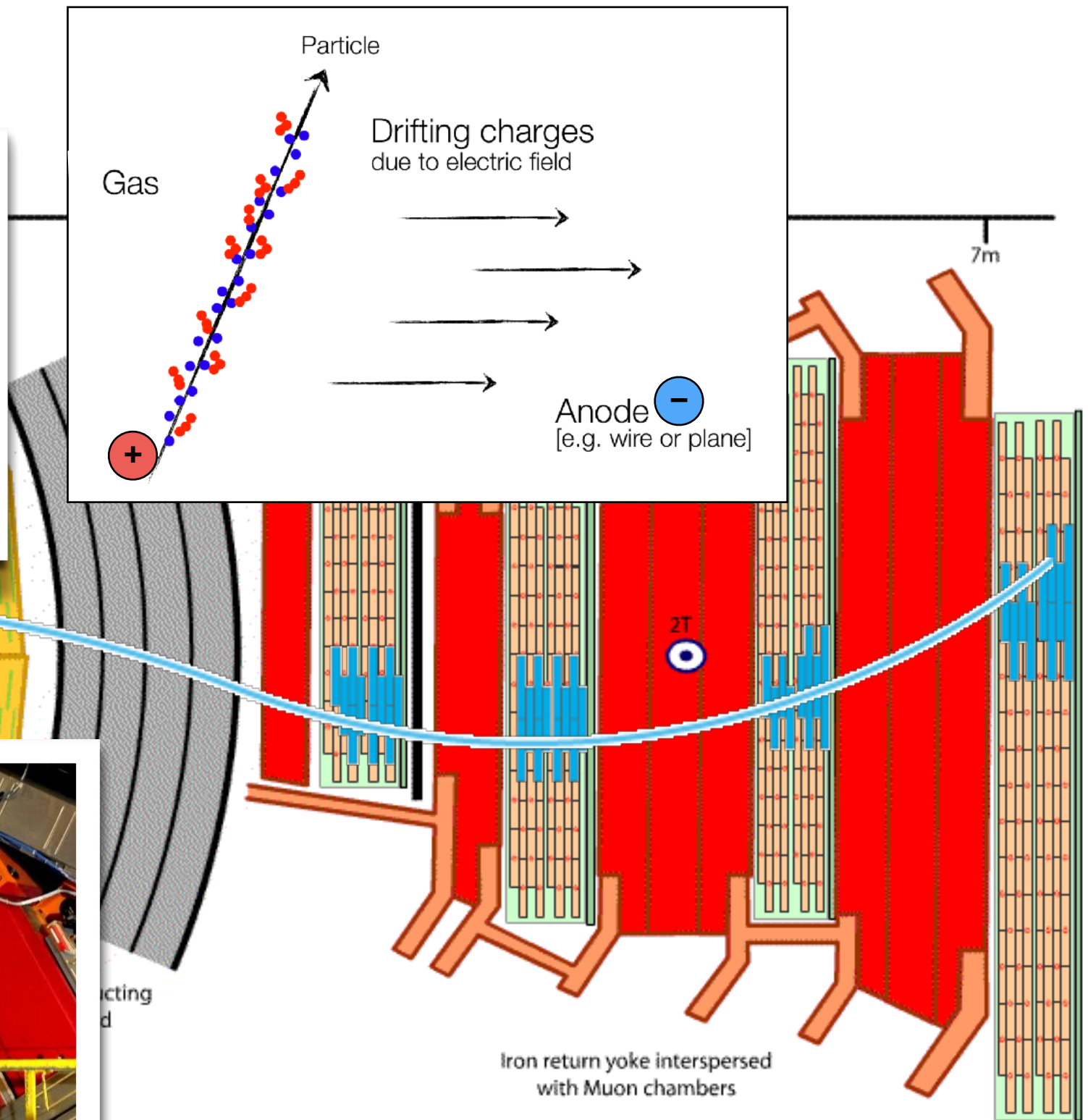
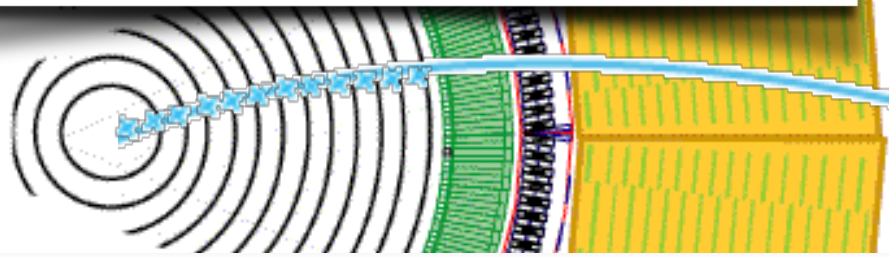
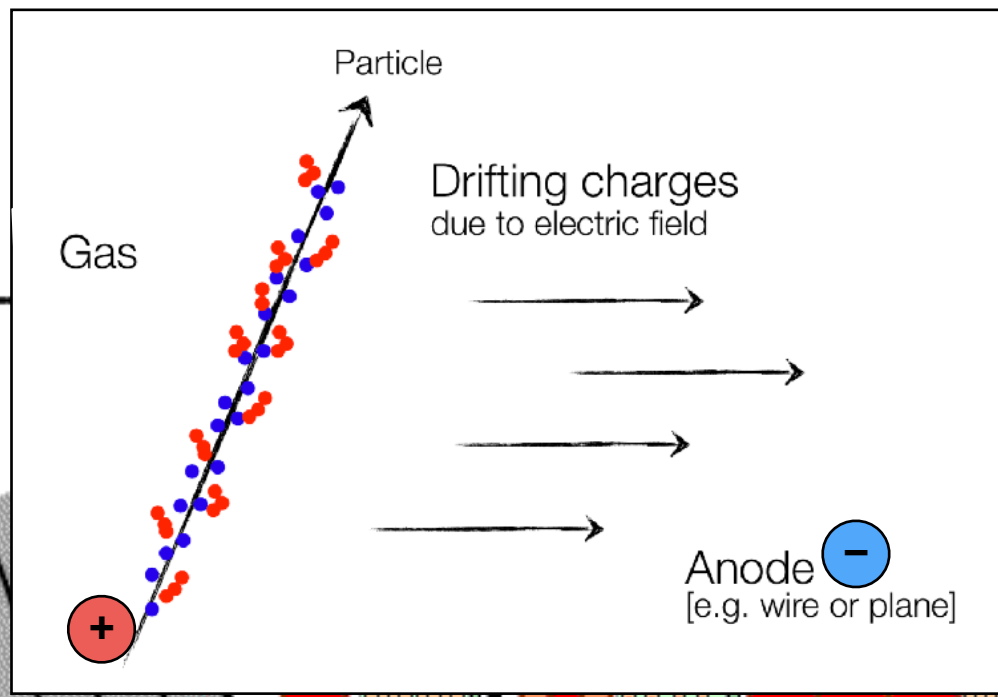
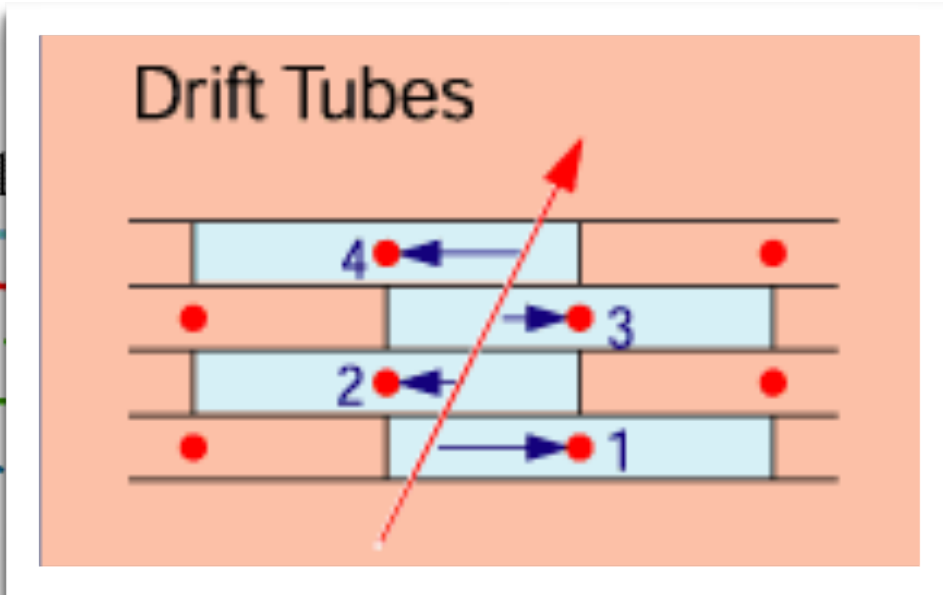


**calorimetro adronico: misura l'energia degli stati legati di quark**



# muoni

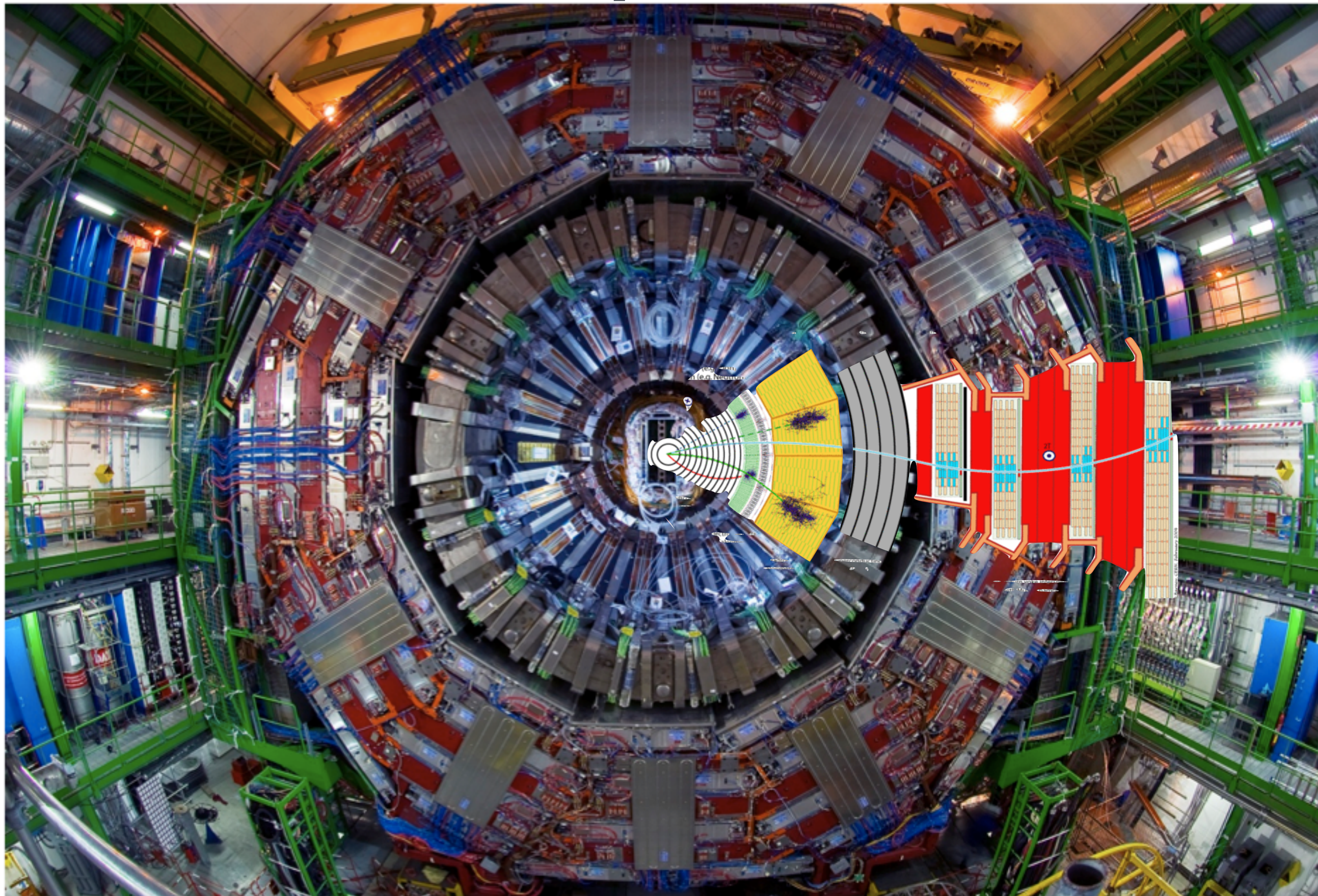
Se  
—  
—  
—  
—  
—



**rivelatori di muoni: misurano la traiettoria dei muoni, che attraversano il rivelatore**



# la rivelazione di particelle





**il dualismo onda particella**

# dualismo onda-particella

## ONDA

- definita in tutto lo spazio
- si propaga in tutte le direzioni
- interazioni diffuse e figure di interferenza



## PARTICELLA

- localizzata nello spazio
- si muove come un proiettile
- interazioni locali

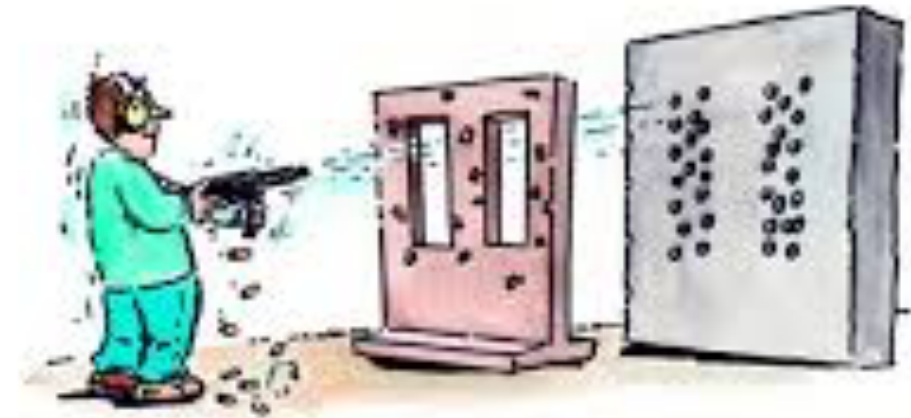
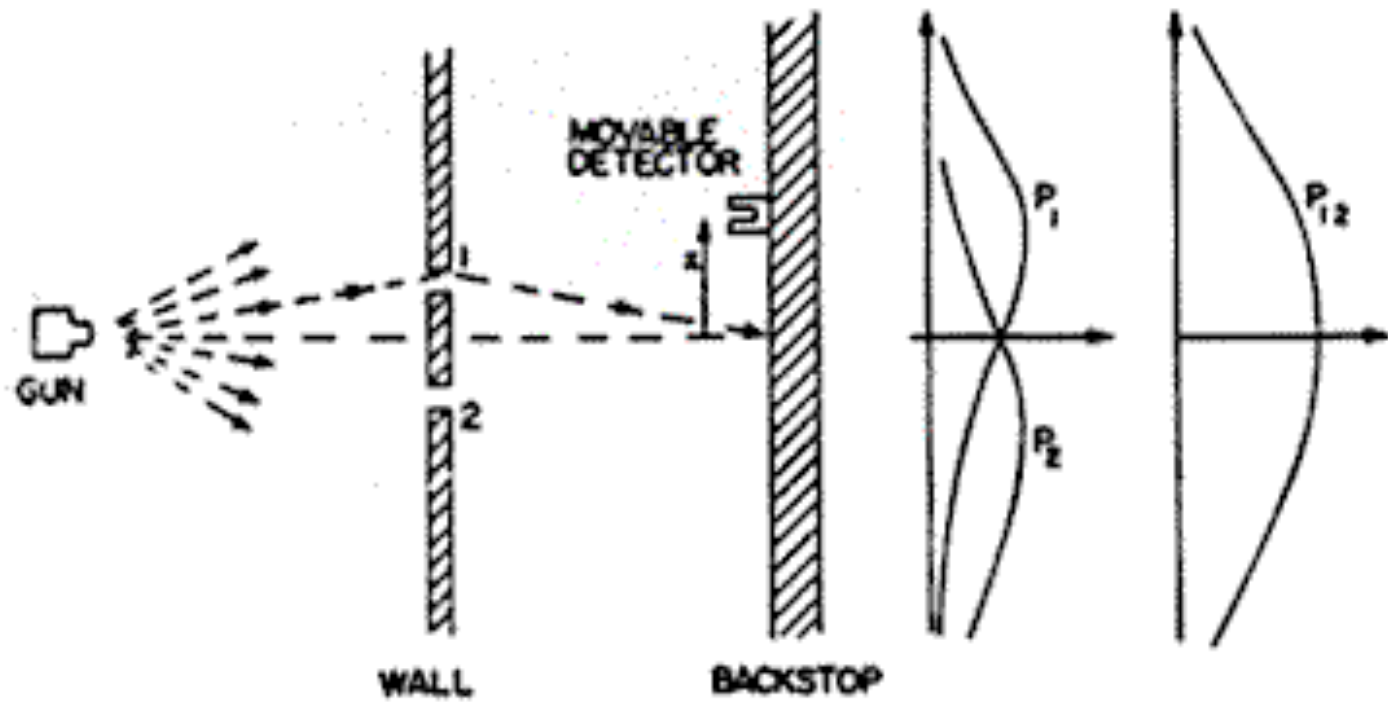




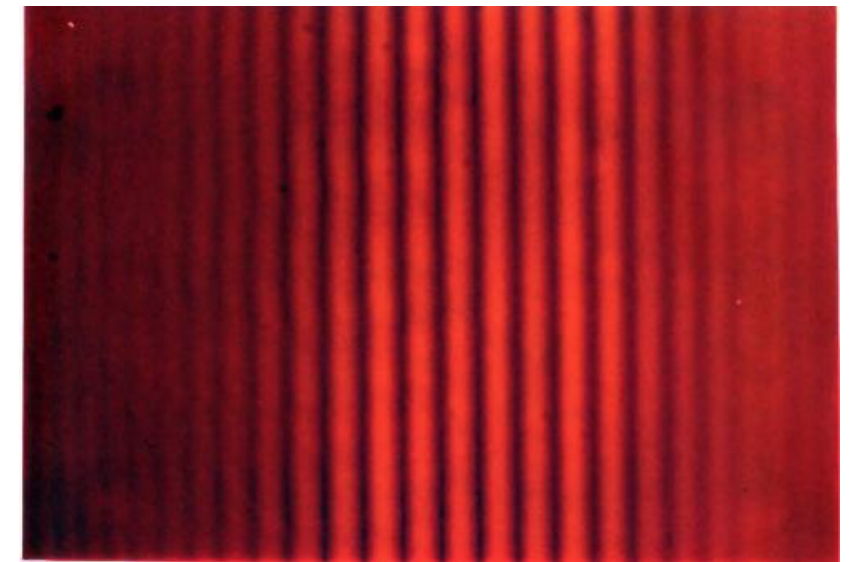
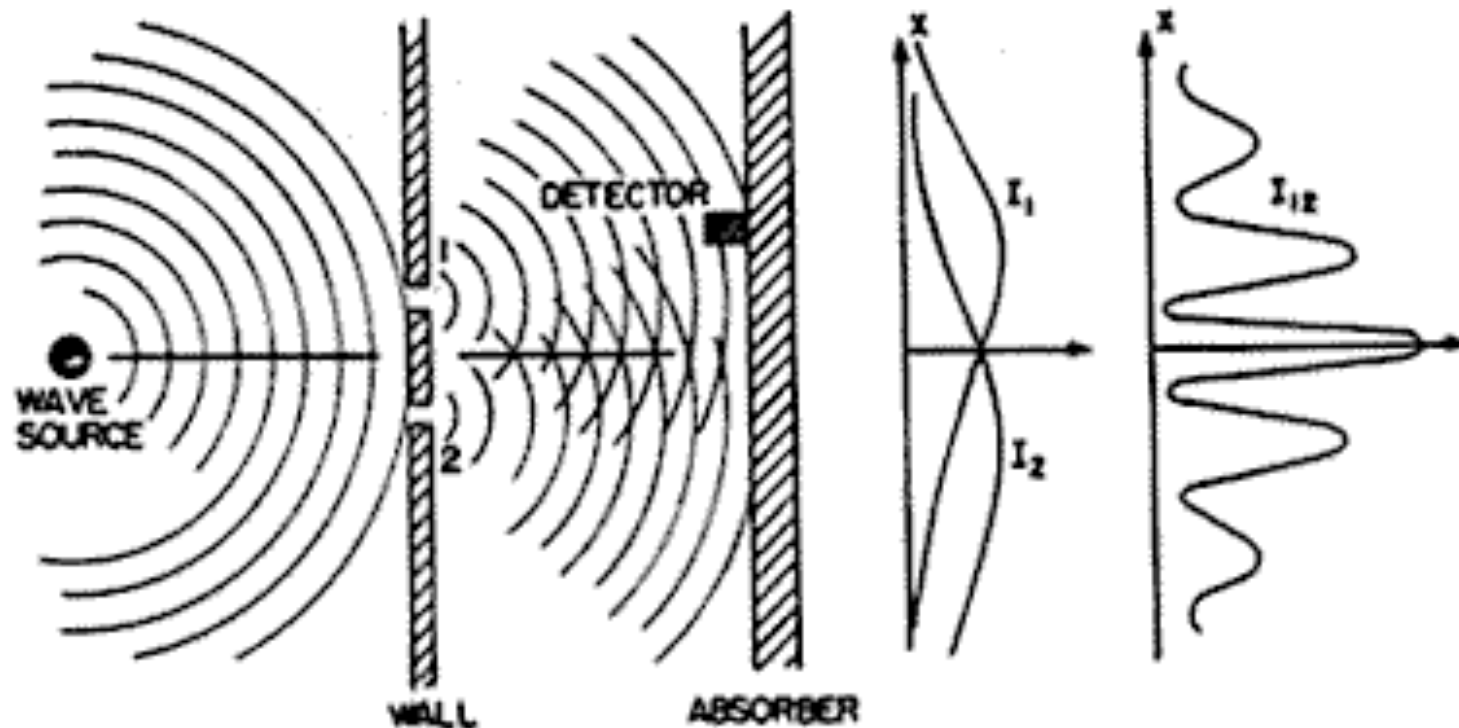
# l'esperimento della doppia fenditura

- quindi, se si fanno passare particelle o onde per due sottili fenditure:

PARTICELLA

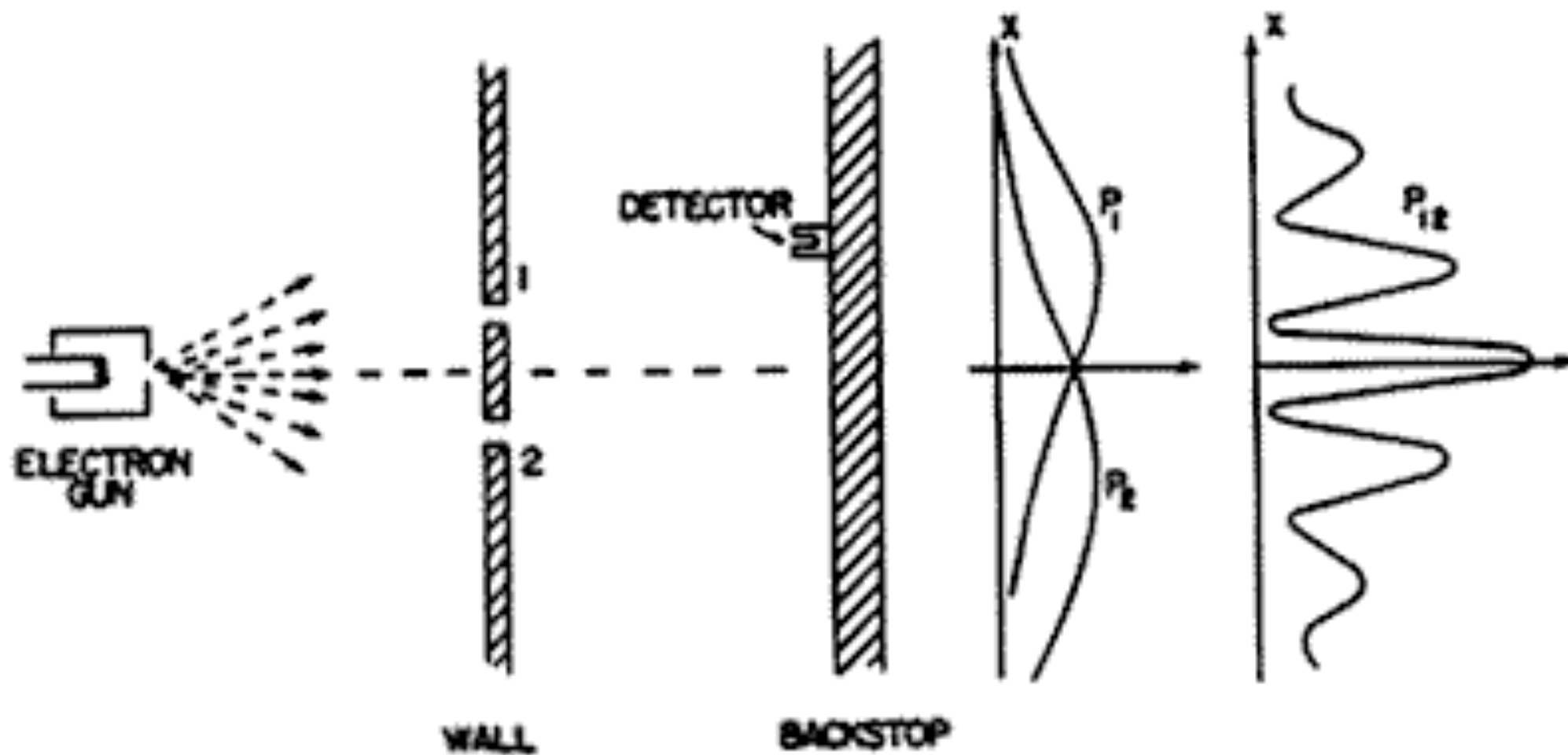


ONDA



# il risultato dell'esperimento

- è un **effetto quantistico!** la meccanica classica non basta più per descrivere il mondo
- oltre a cambiare la strumentazione, dobbiamo **cambiare anche la teoria** (gli strumenti intellettuali) al diminuire delle dimensioni

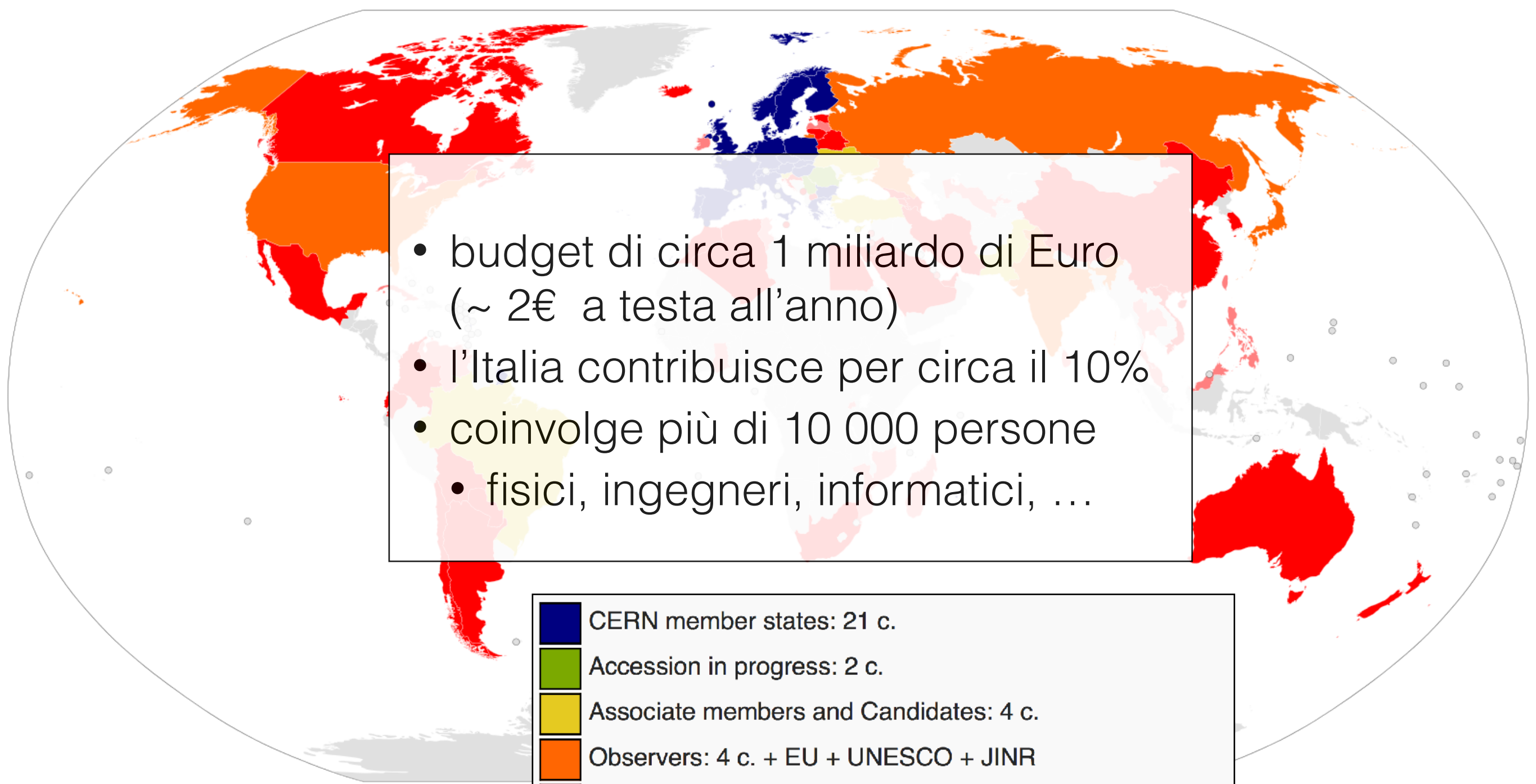










# **i numeri del CERN**

# i numeri del CERN

- European Organization for Nuclear Research

- 
- budget di circa 1 miliardo di Euro (~ 2€ a testa all'anno)
  - l'Italia contribuisce per circa il 10%
  - coinvolge più di 10 000 persone
    - fisici, ingegneri, informatici, ...

	CERN member states: 21 c.
	Accession in progress: 2 c.
	Associate members and Candidates: 4 c.
	Observers: 4 c. + EU + UNESCO + JINR
	Cooperation agreement: 35 c. + Slovenia, Cyprus, Turkey
	Scientific contacts: 19 c.



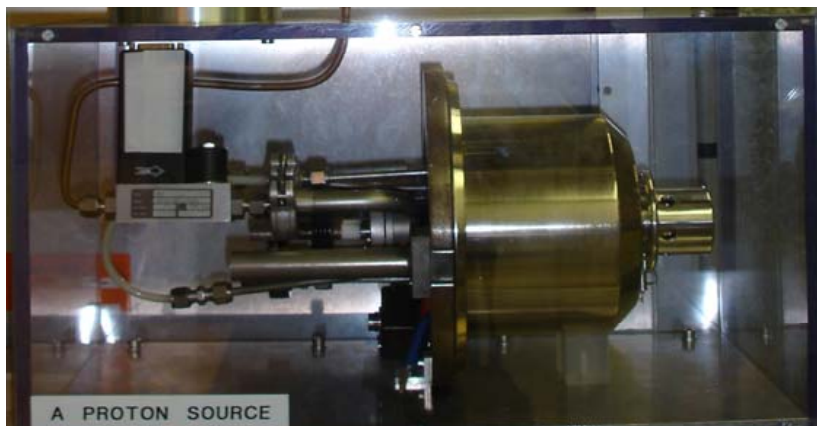
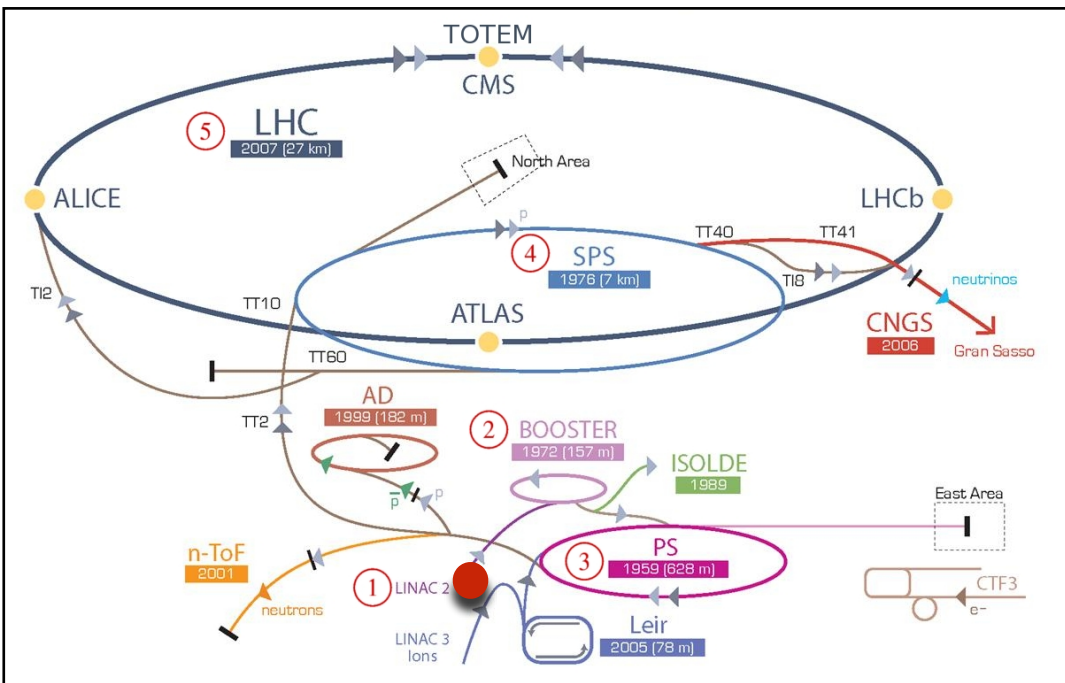
# i costi di LHC

LHC	3 miliardi di Euro
guerra in Iraq	2000 miliardi di Euro
armi vendute nel 2006 da Finmeccanica	12 miliardi di Euro
prodotti Luis Vuitton 2007	14 miliardi di Euro
spese per animali domestici in	1.7 miliardi di Euro
campionati di calcio inglese, italiano, tedesco, spagnolo e francese nel 2008/2009	7.6 miliardi di Euro

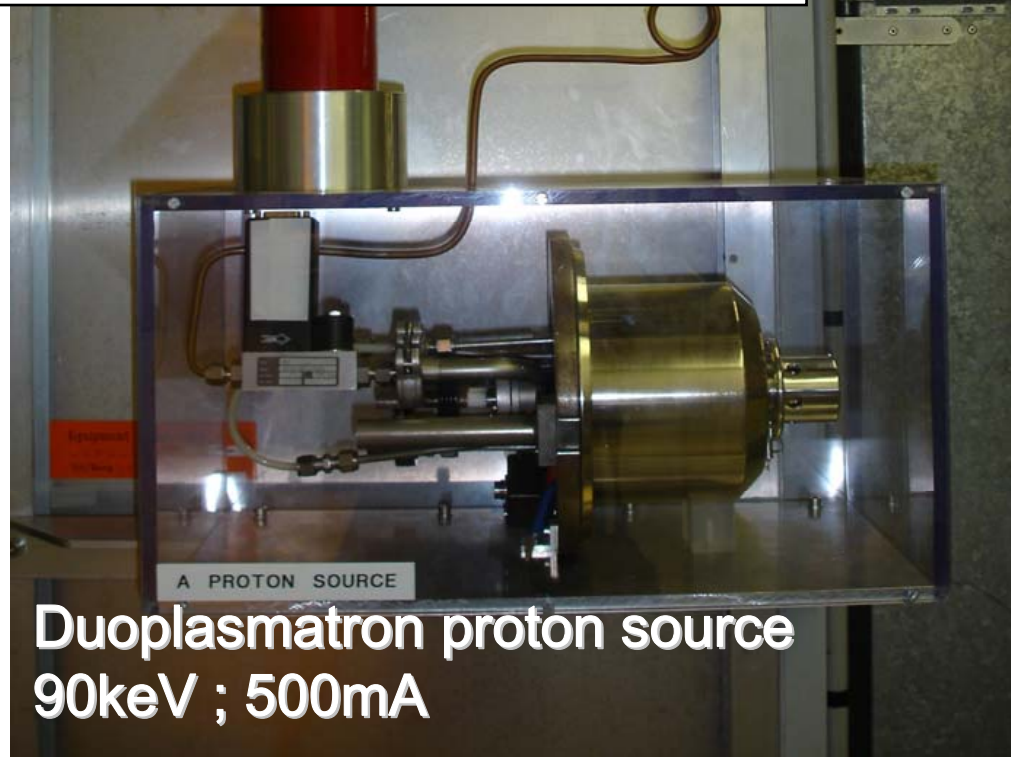
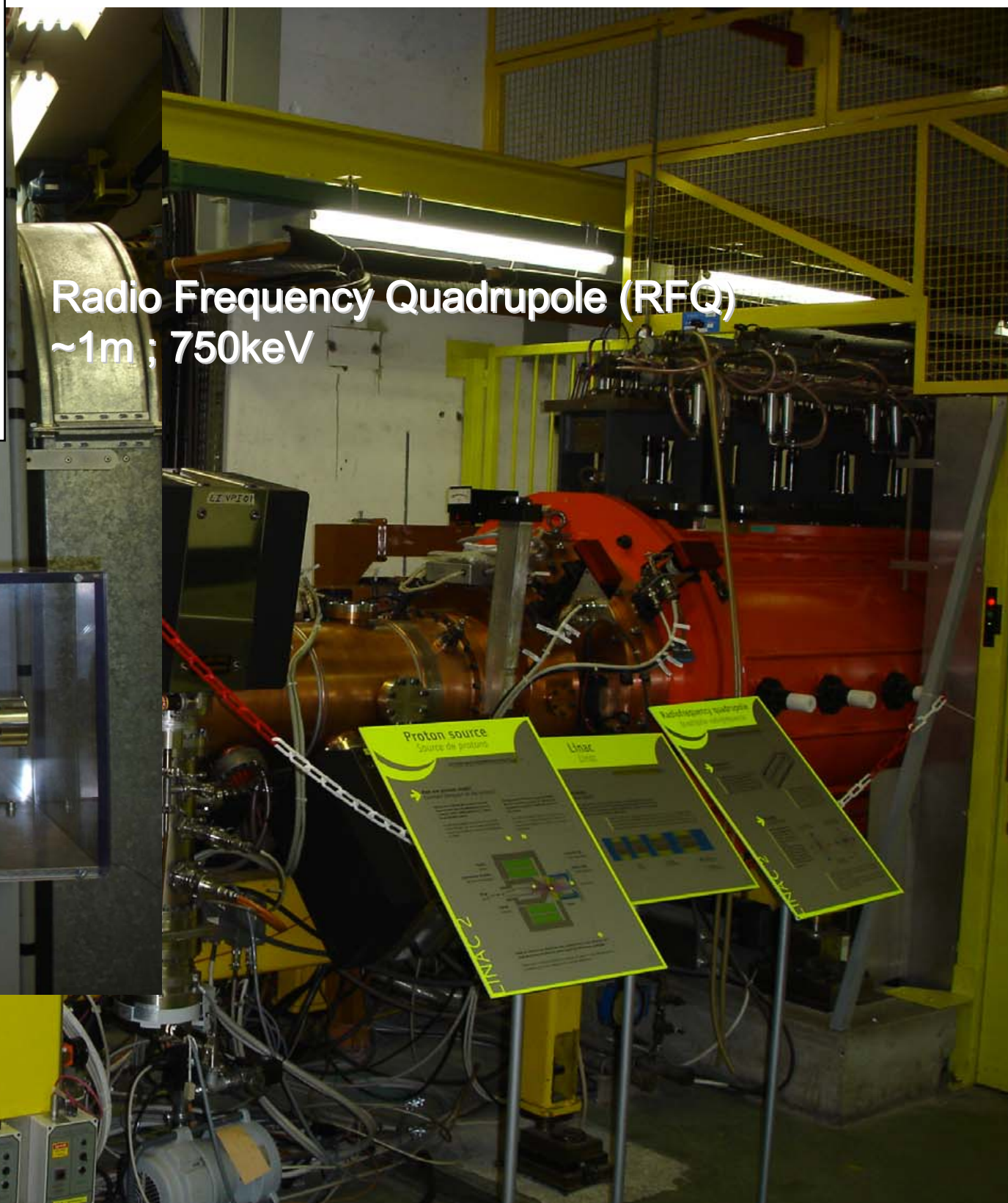
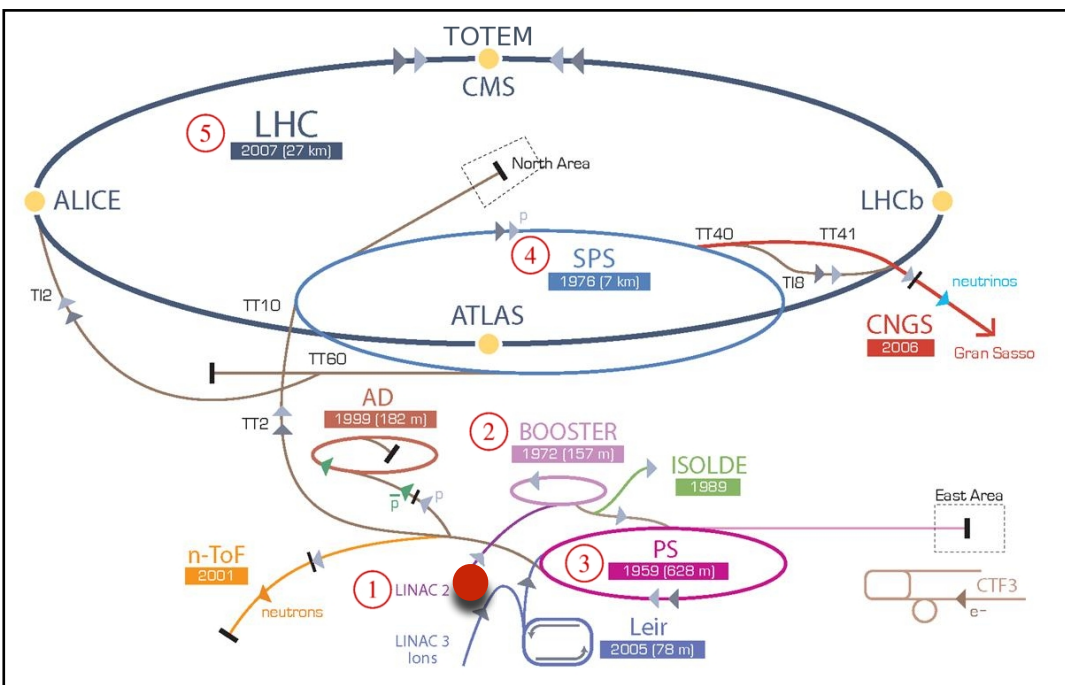
# **l'accelerazione delle particelle cariche**



# la sorgente di protoni

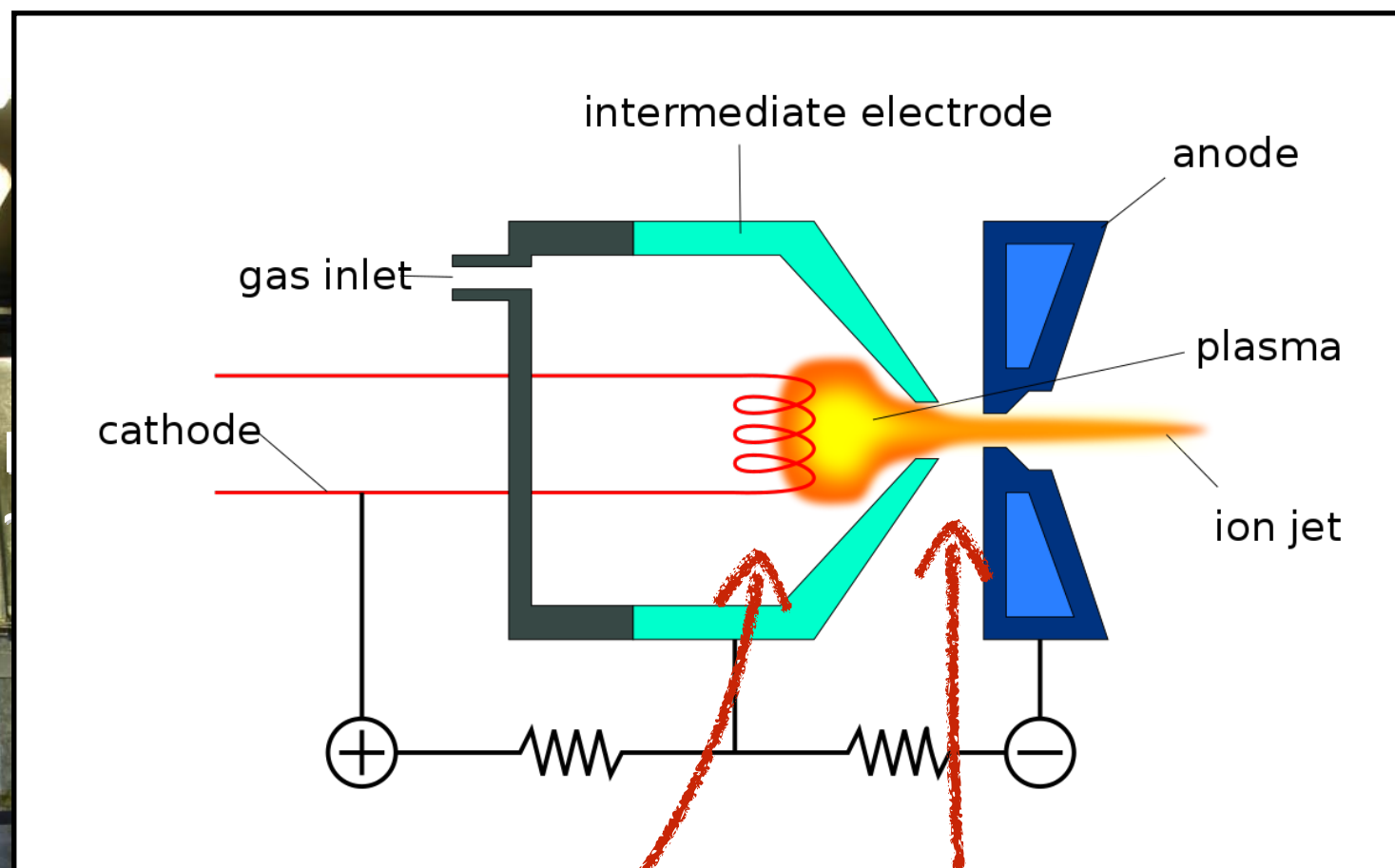
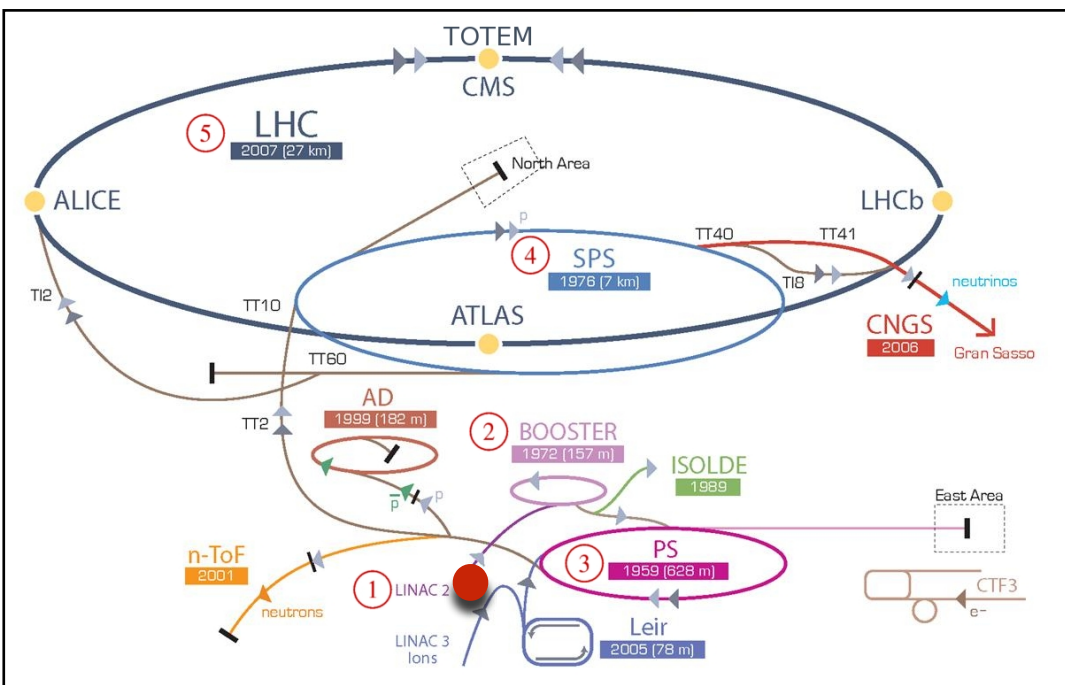


# la sorgente di protoni





# la sorgente di protoni

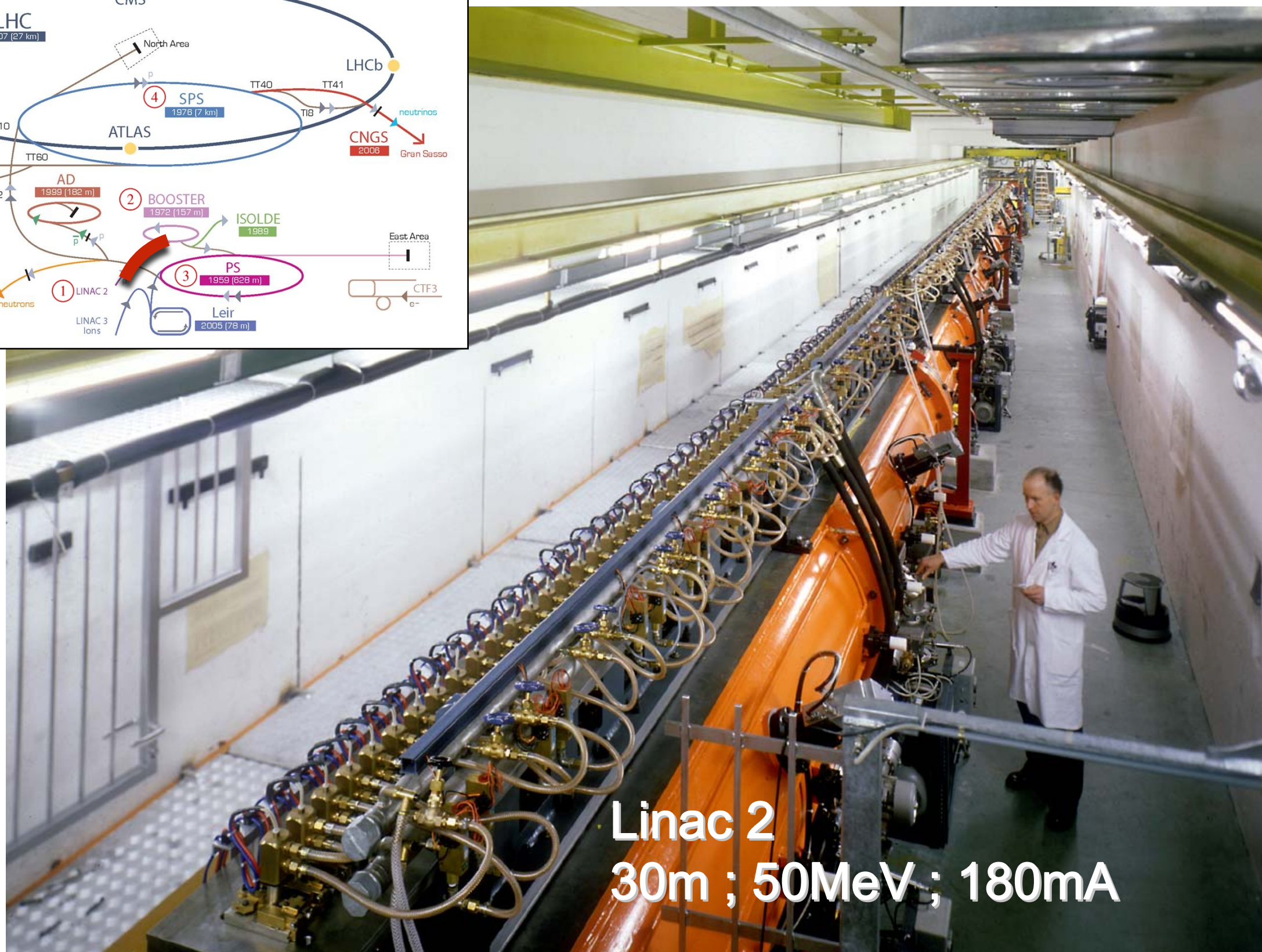
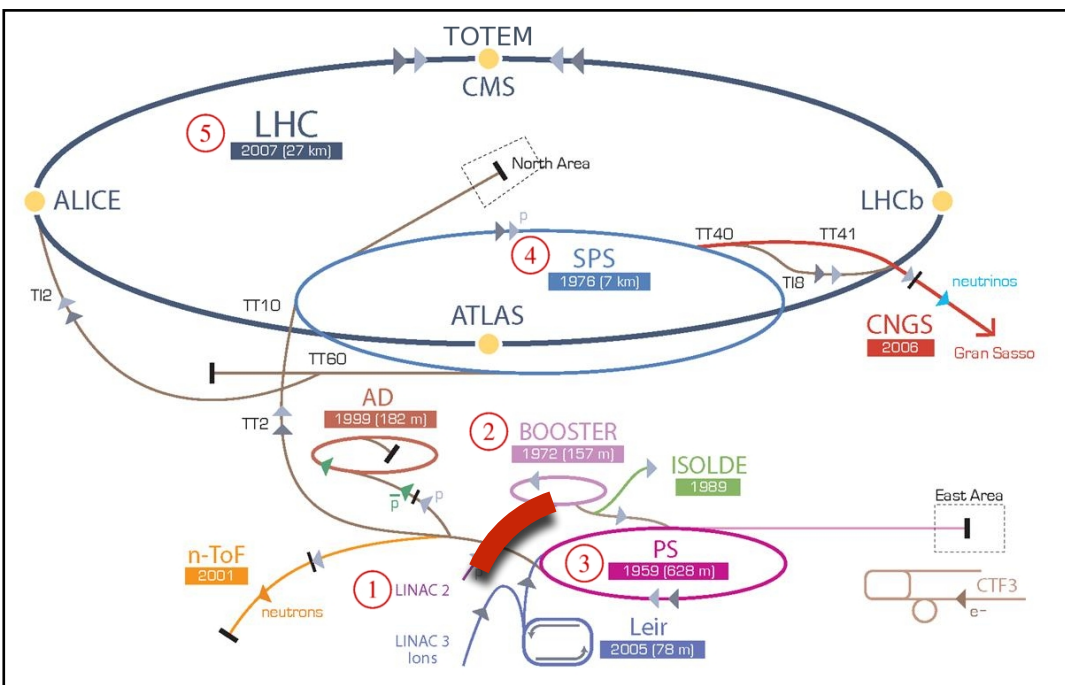


resistenza: gas  
scaldato diventa  
plasma

campo elettrico:  
accelera particelle  
cariche



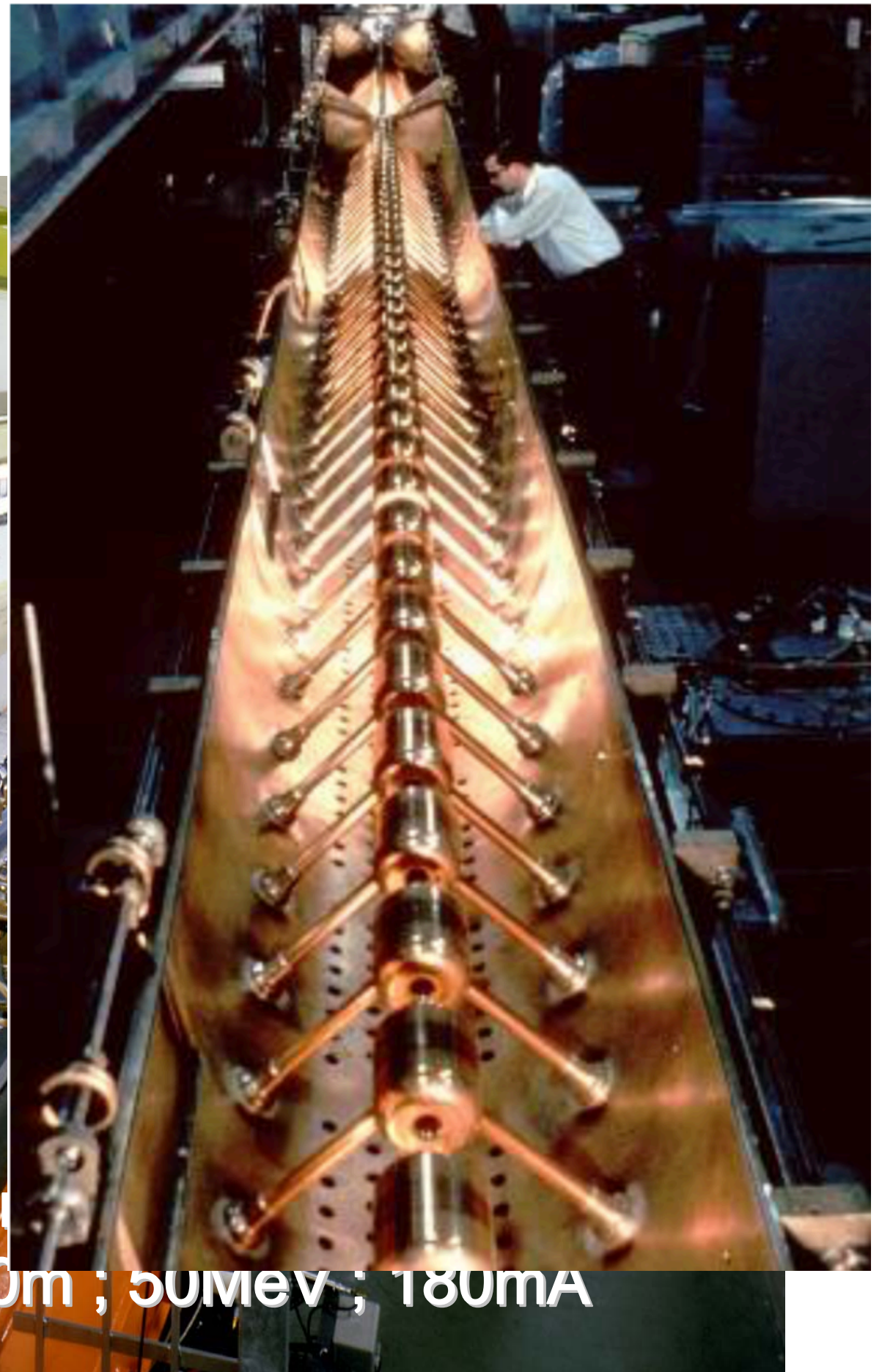
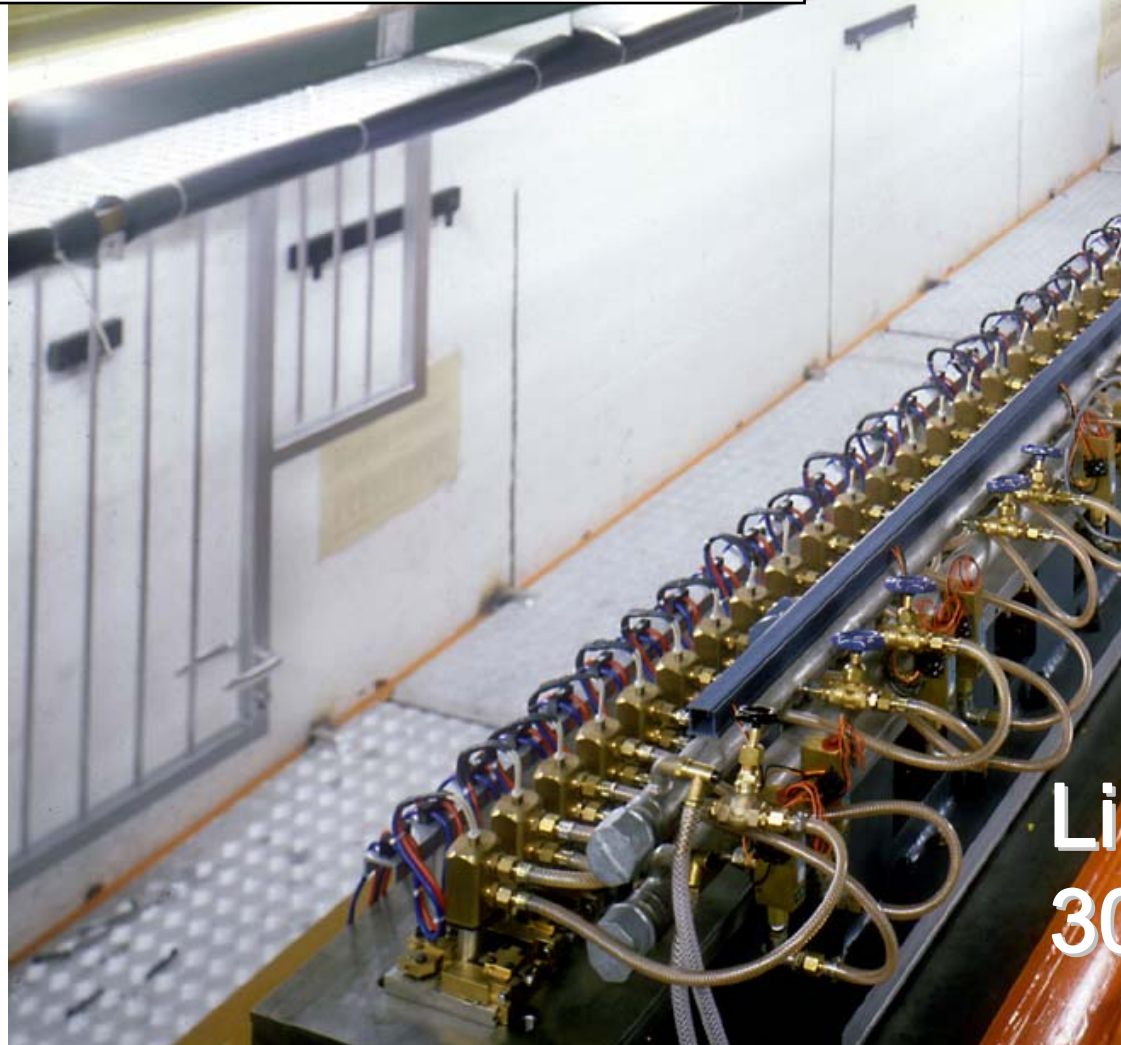
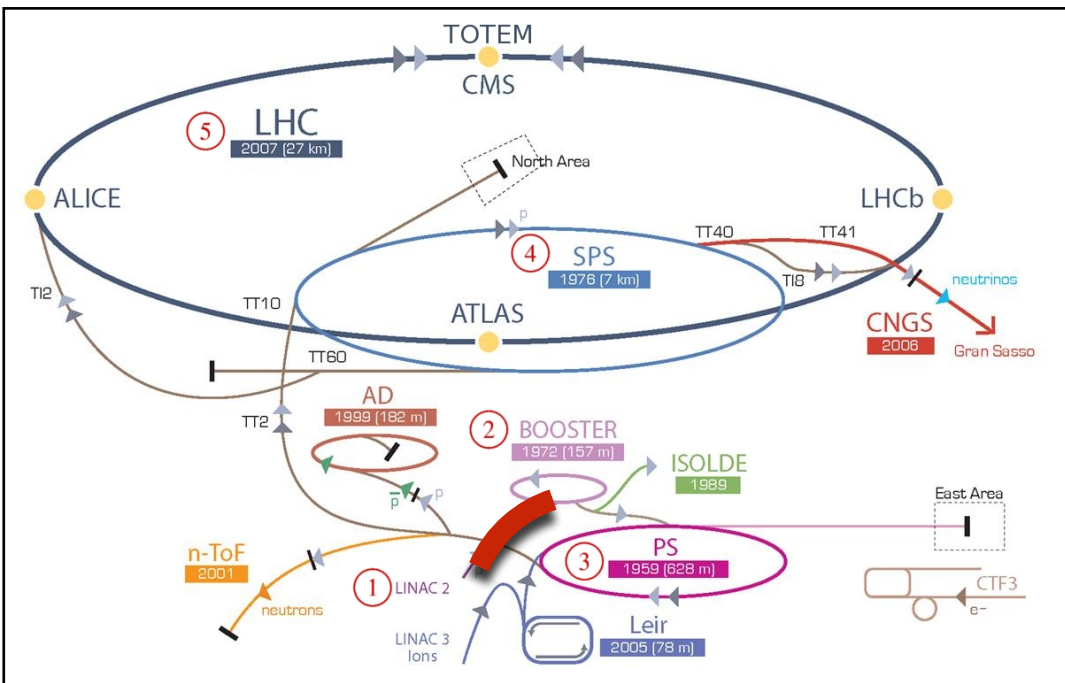
# il Linac2



**Linac 2**  
**30m ; 50MeV ; 180mA**



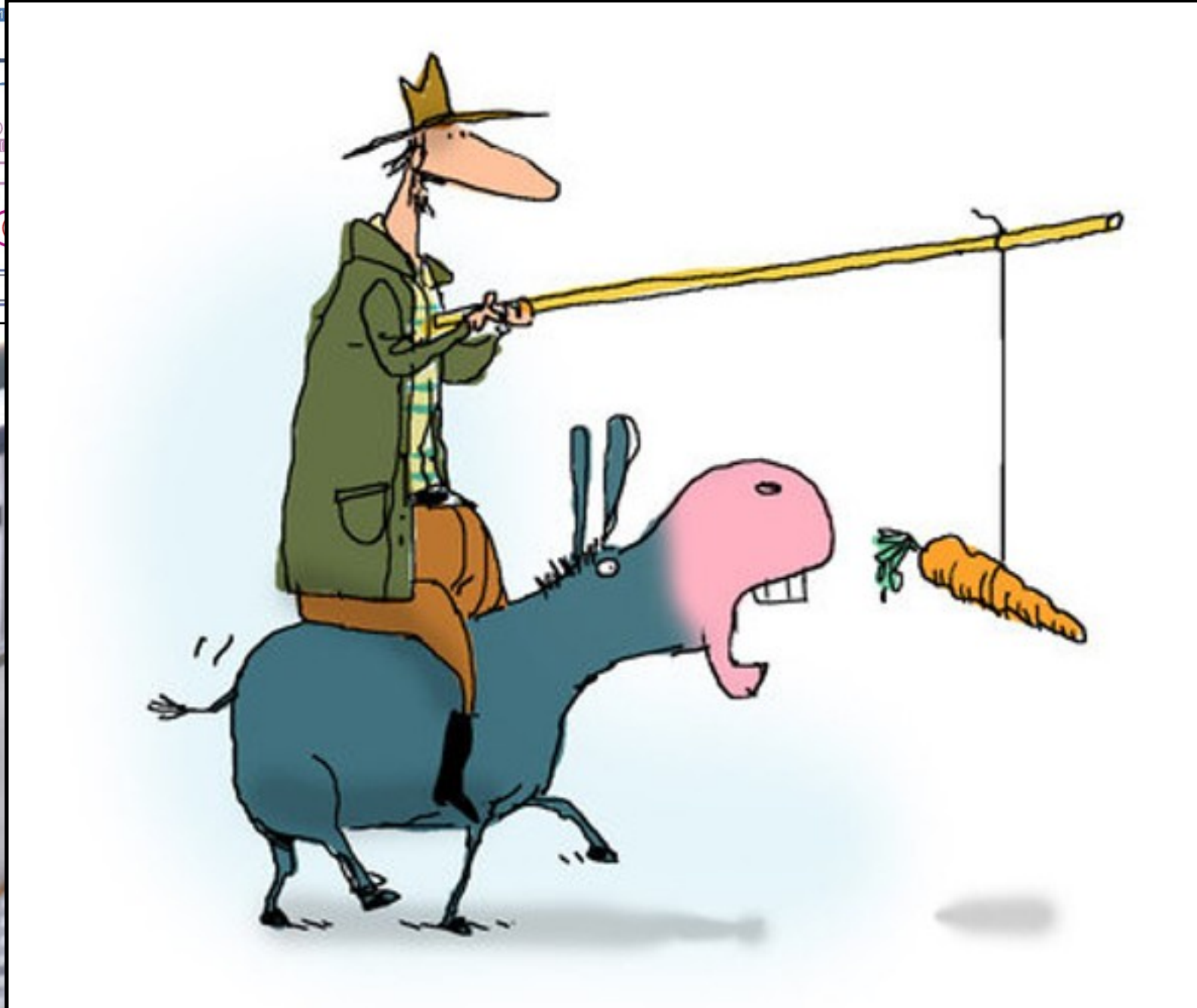
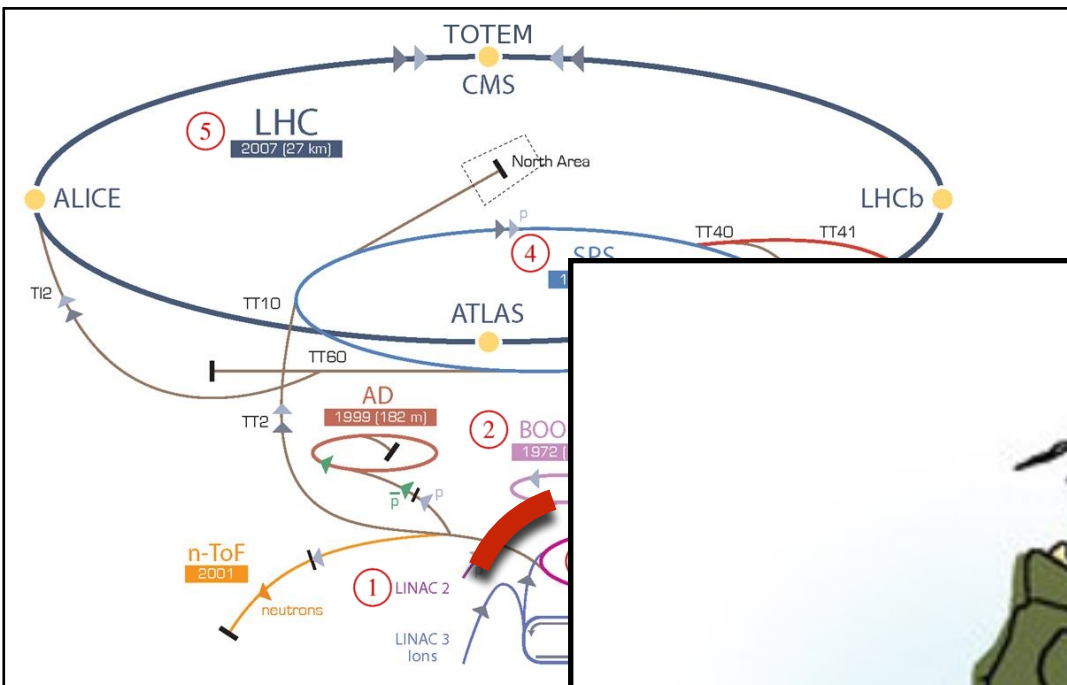
# il Linac2



Linac2  
30m ; 50MeV ; 180mA



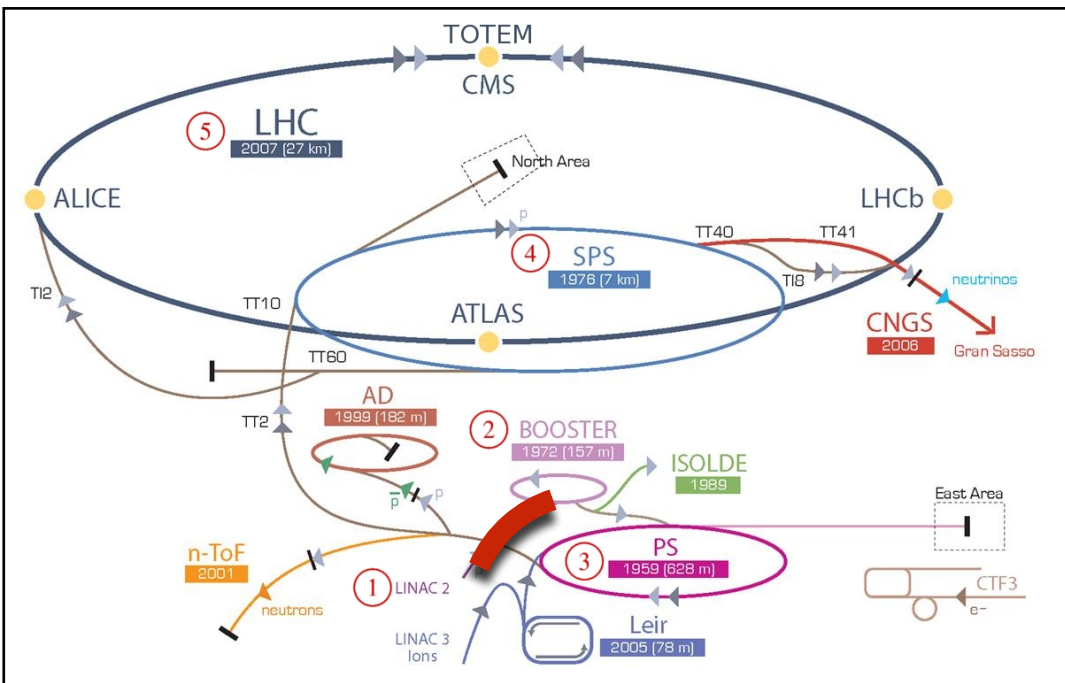
# il Linac2



50m, 50MeV, 100mA



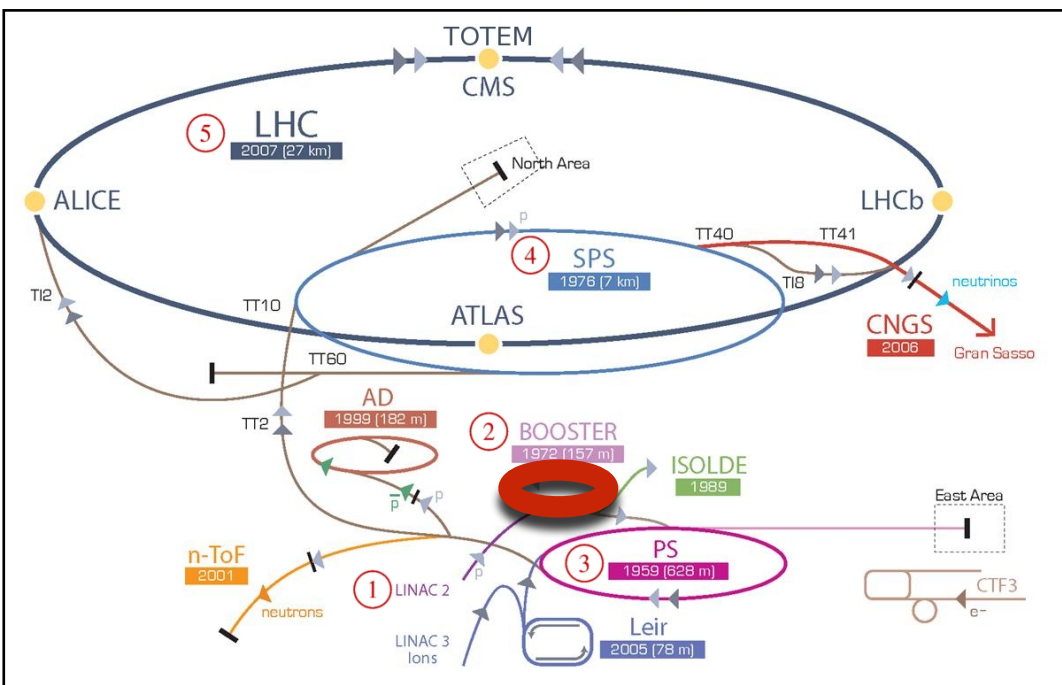
# dal Linac2 al Booster



Transfer line from Linac 2 to Proton Synchrotron Booster (PSB)



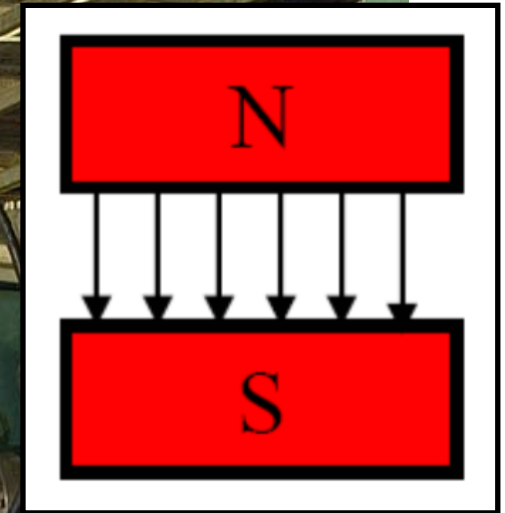
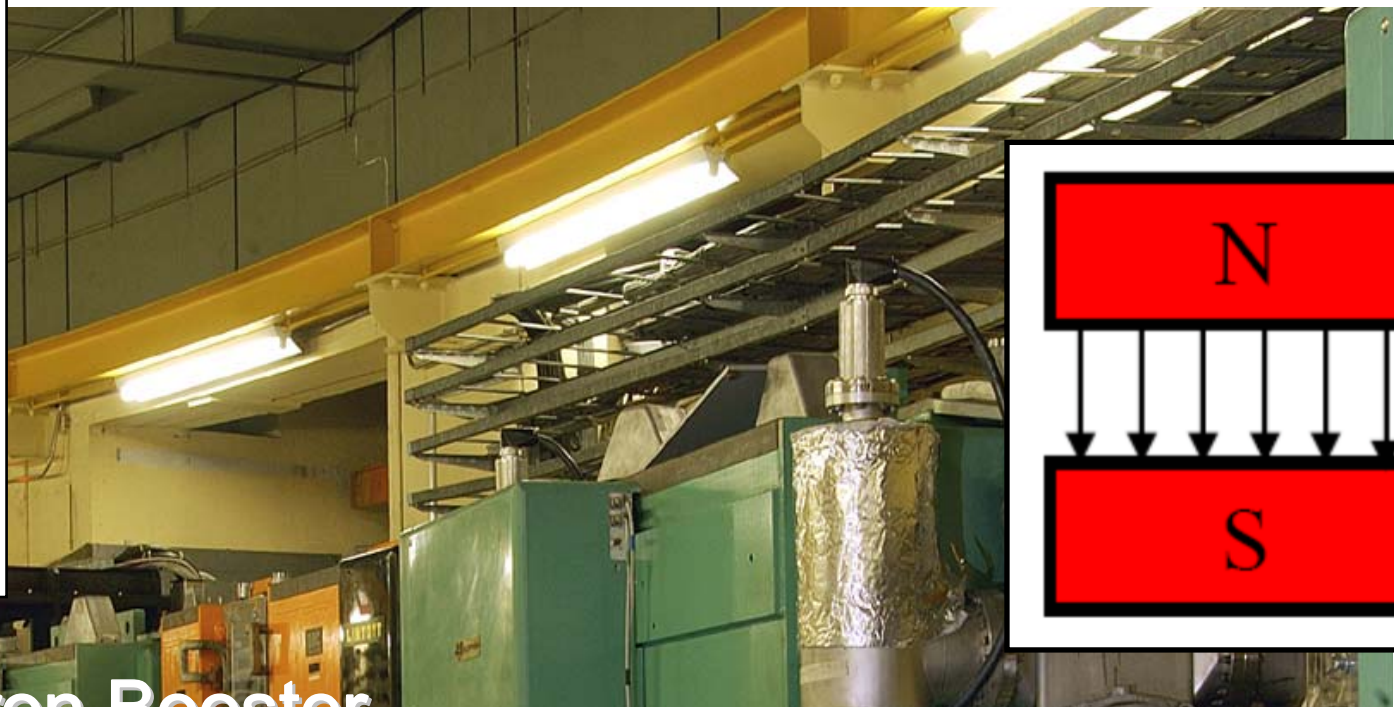
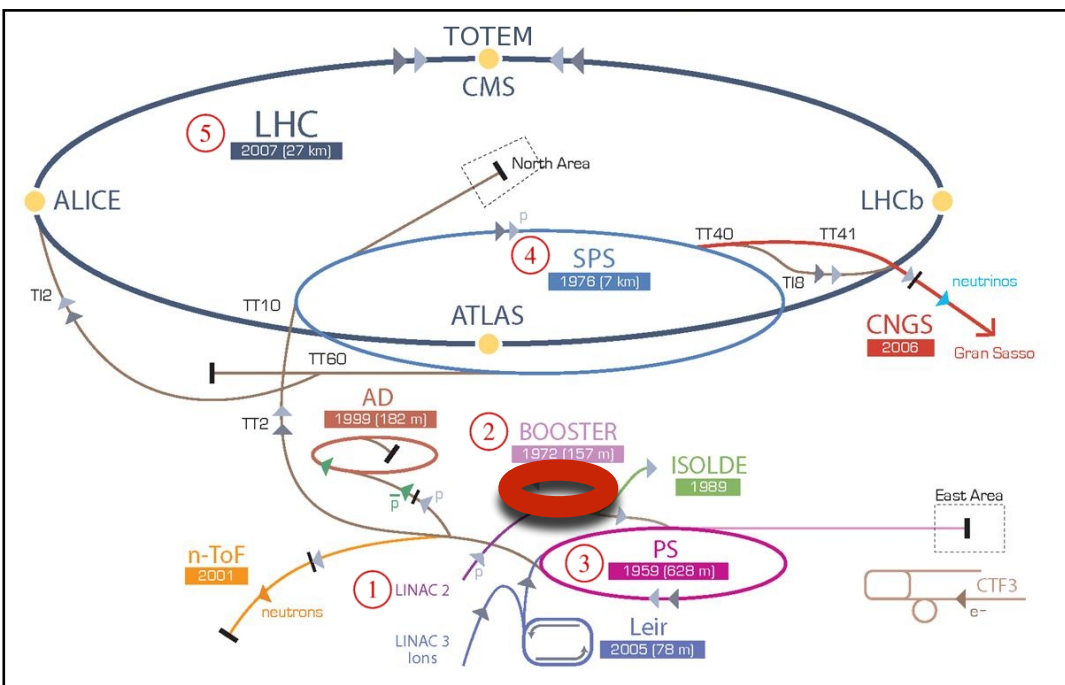
# il Booster



Proton Synchrotron Booster  
4 rings ; 157m each  
1.4GeV ;  $10^{13}$  p<sup>+</sup>/ring

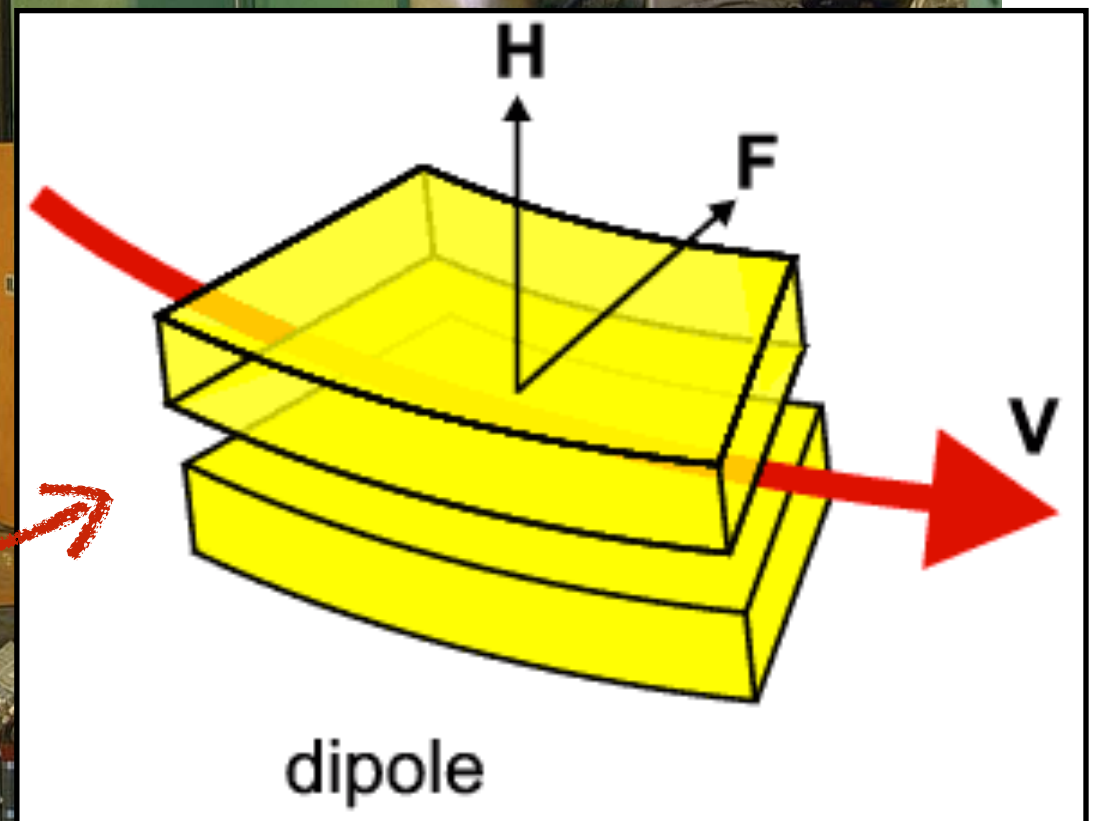


# il Booster



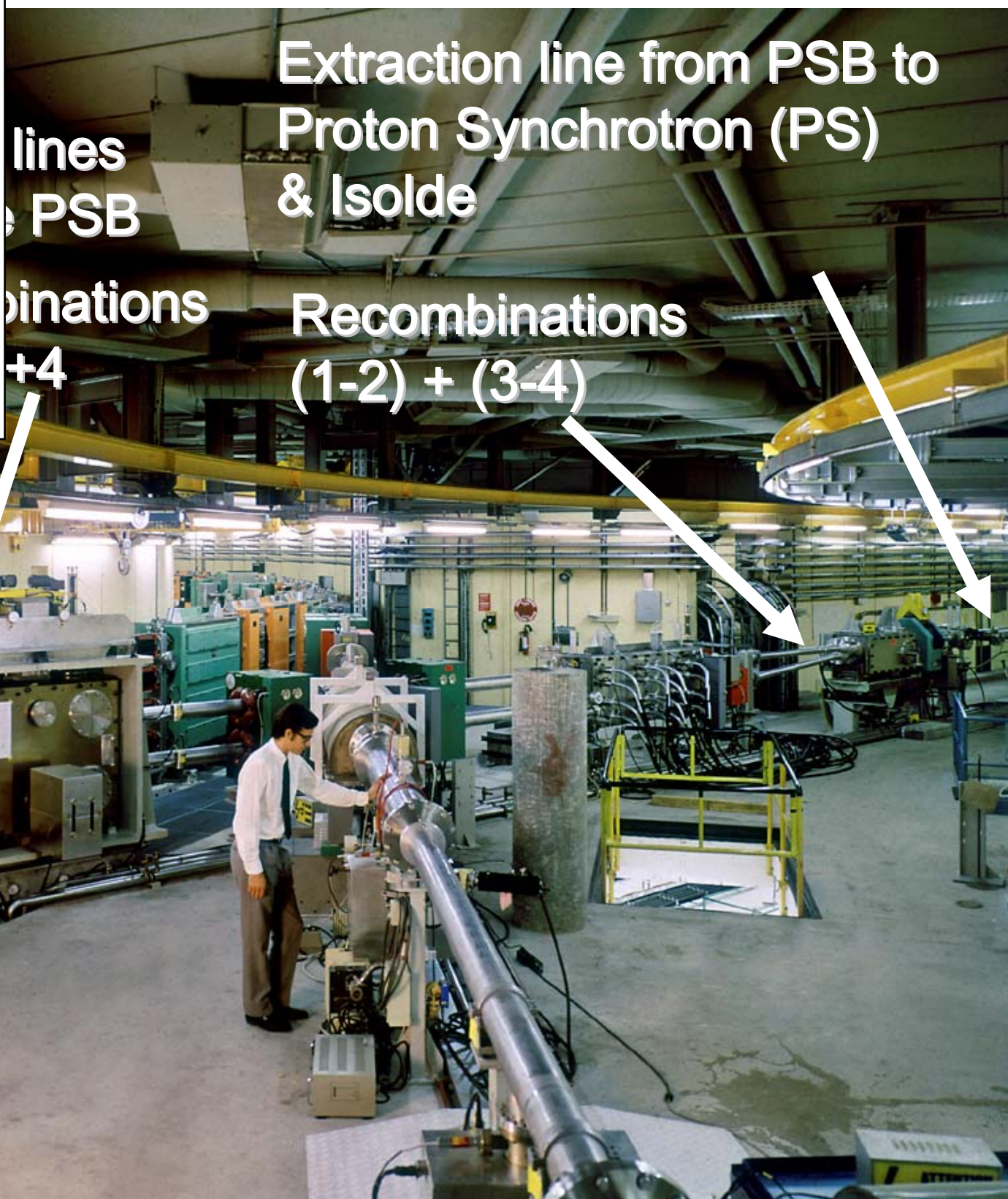
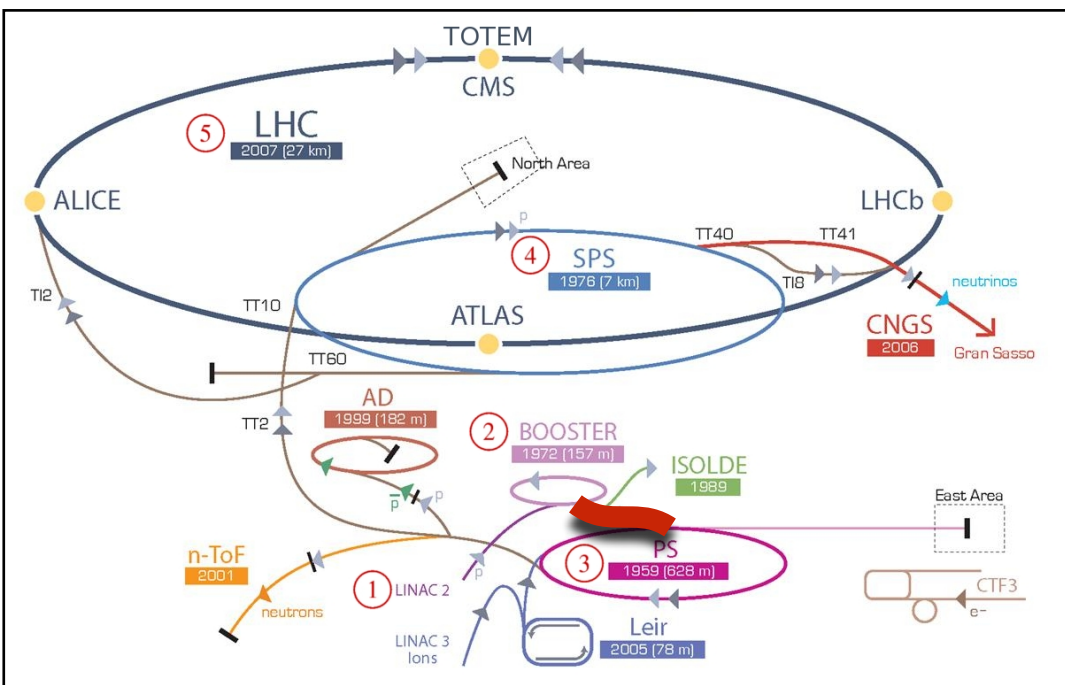
Proton Synchrotron Booster  
4 rings ; 157m each  
1.4GeV ;  $10^{13}$  p<sup>+</sup>/ring

campo magnetico:  
curva la traiettoria  
di particelle cariche



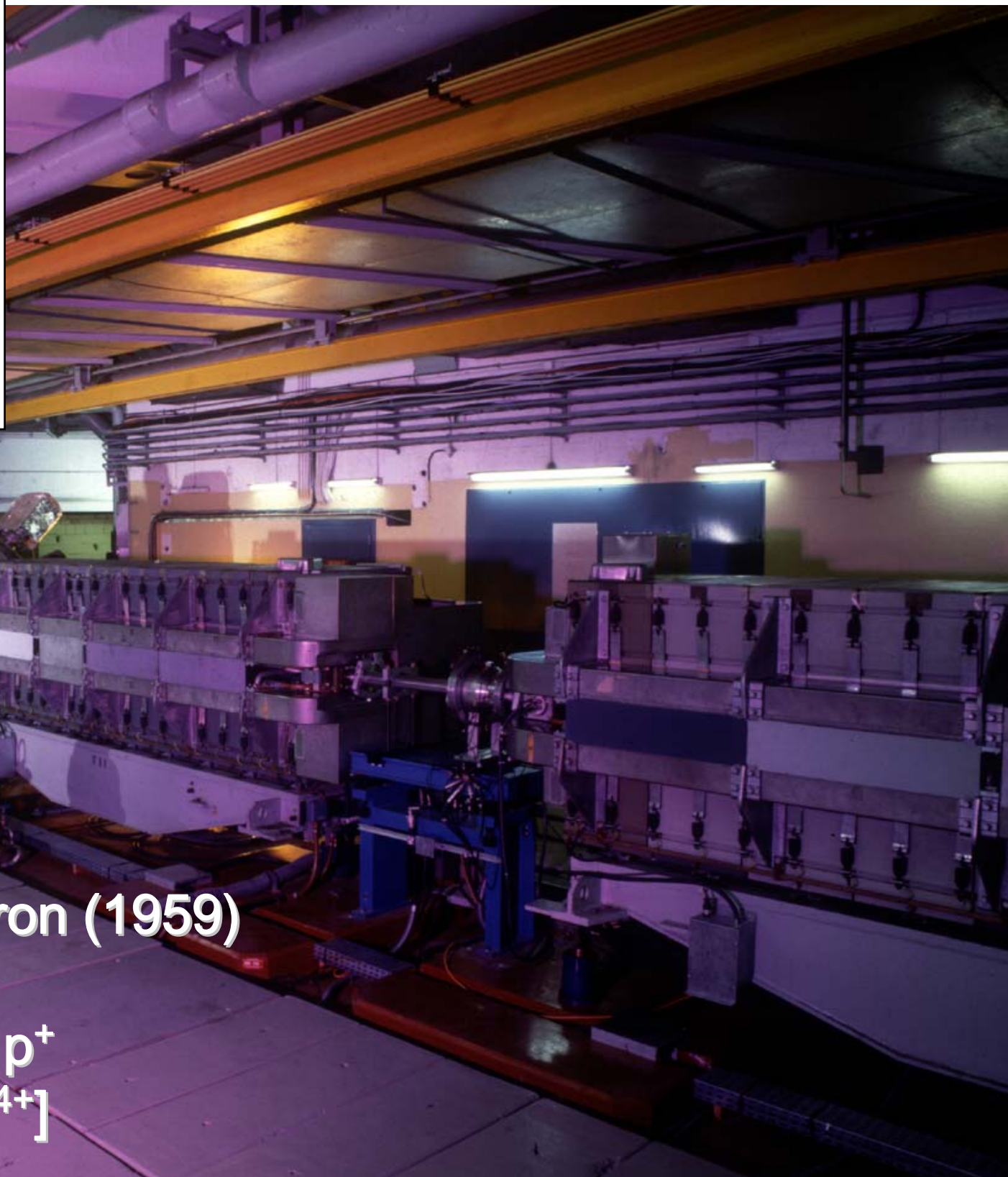
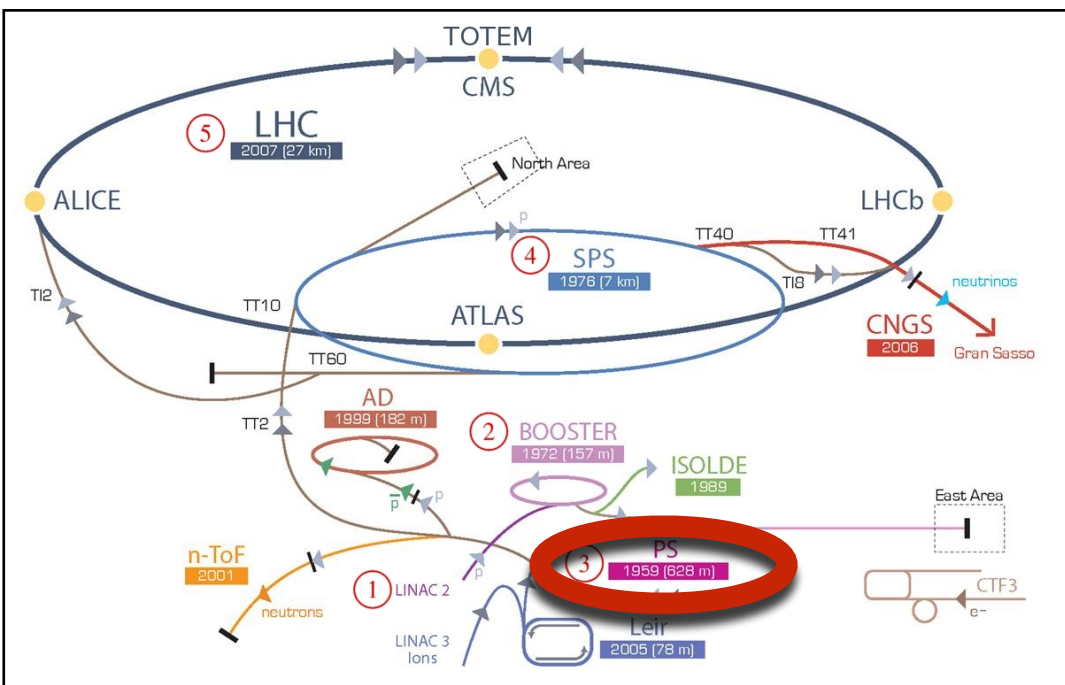


# dal Booster al Proto Sincrotrone (PS)





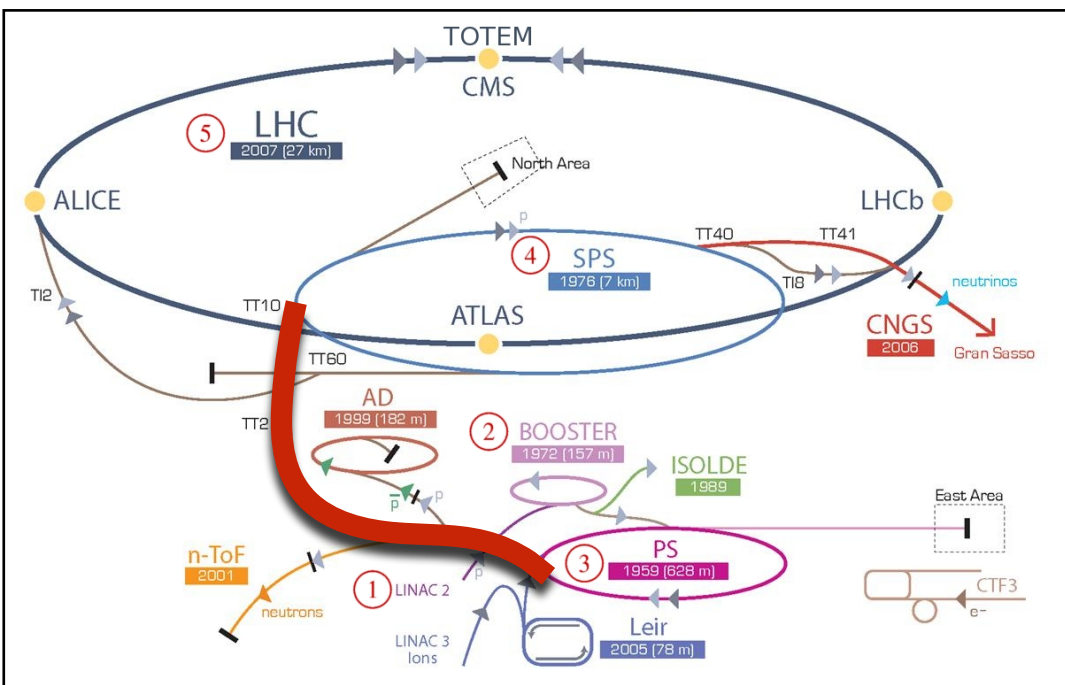
# il Proto Sincrotrone (PS)



**Proton Synchrotron (1959)**  
628 m  
25 GeV ;  $3 \times 10^{13}$  p<sup>+</sup>  
[5.9 GeV/u Pb<sup>54+</sup>]



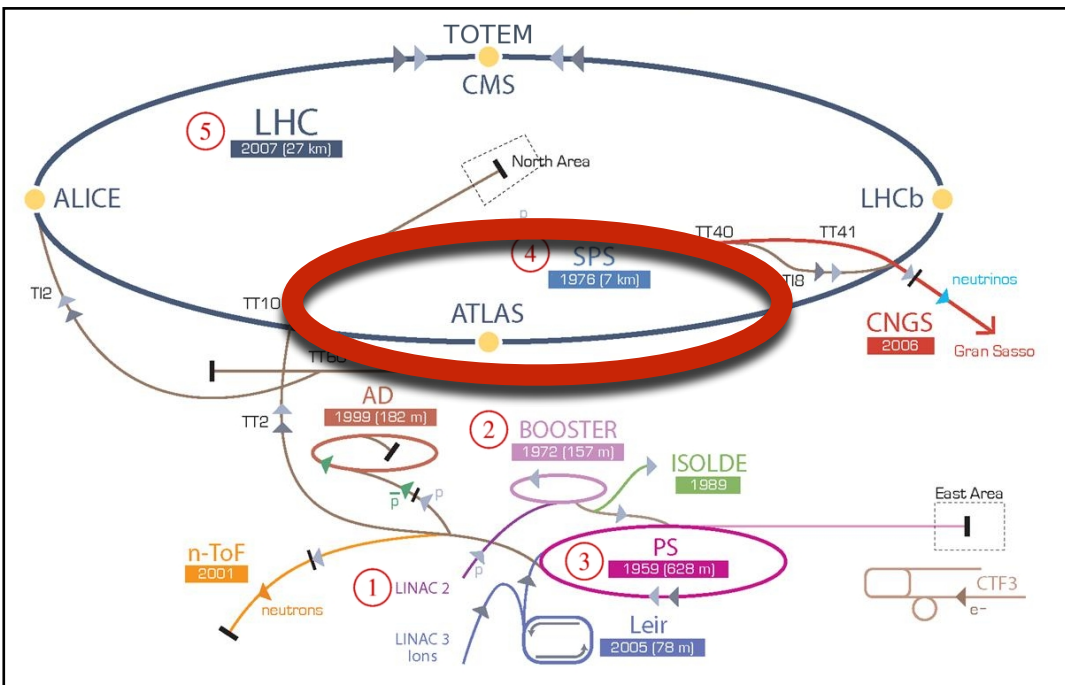
# dal PS al Super Proto Sincrotrone (SPS)



TT2 transfer line from PS to SPS, AD, nTOF, and D3 dump



# il Super Proto Sincrotrone (SPS)



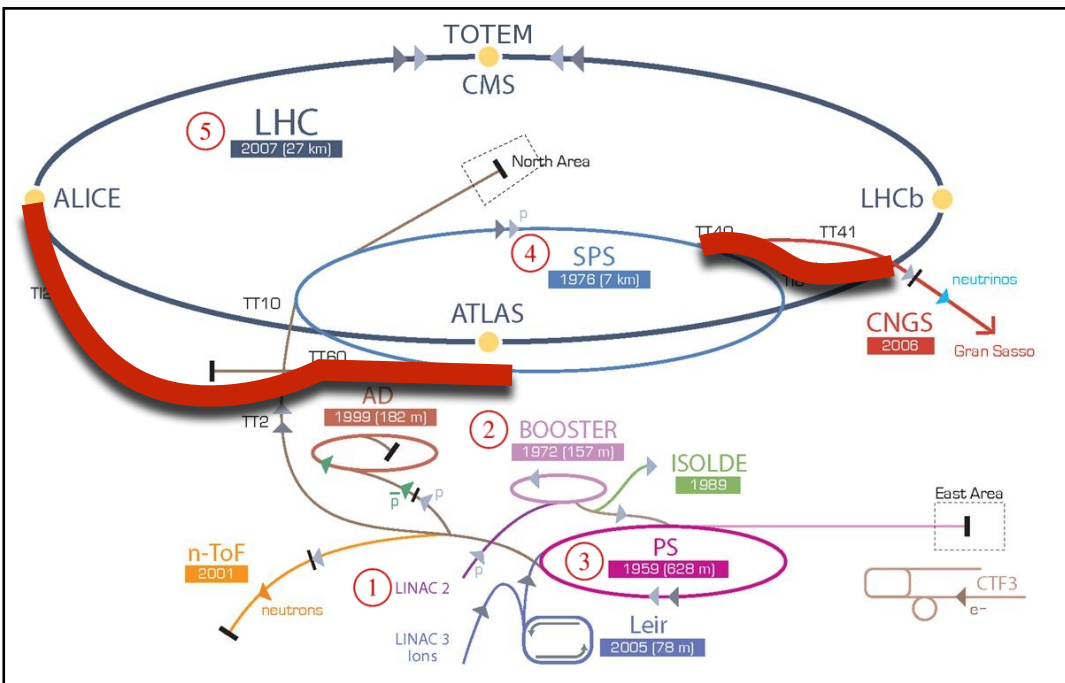
Sincrotrone (SPS)

$3 p^+$   
 $2^+$

Mov09155.mpg



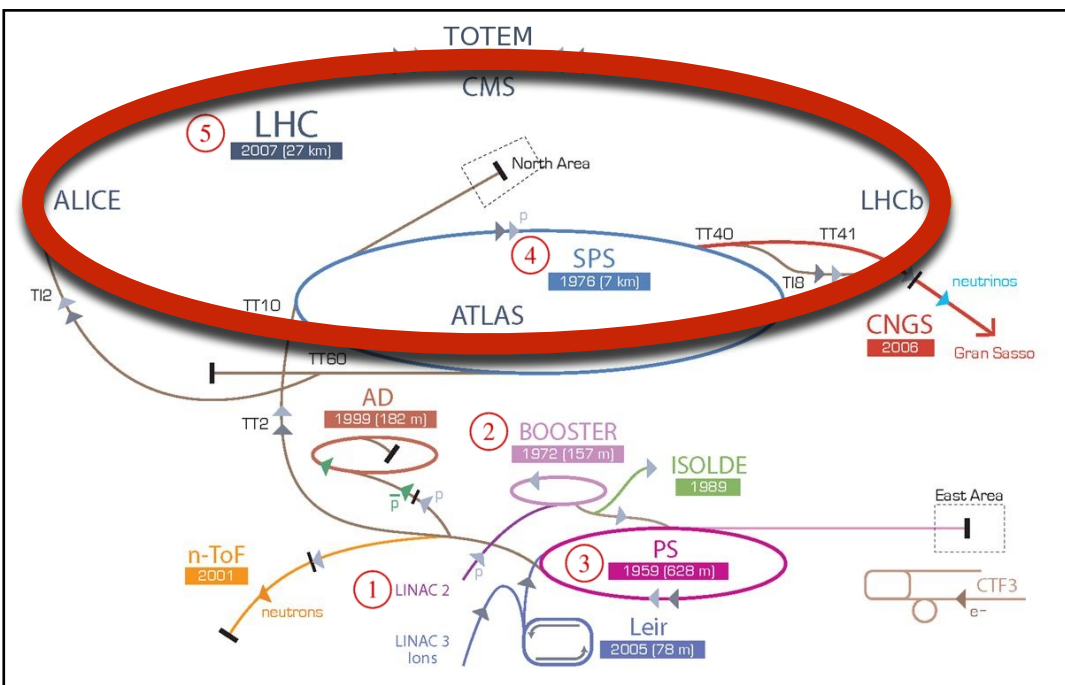
# dal SPS al Large Hadron Collider (LHC)



T18 counter-clockwise transfer line from SPS to LHC



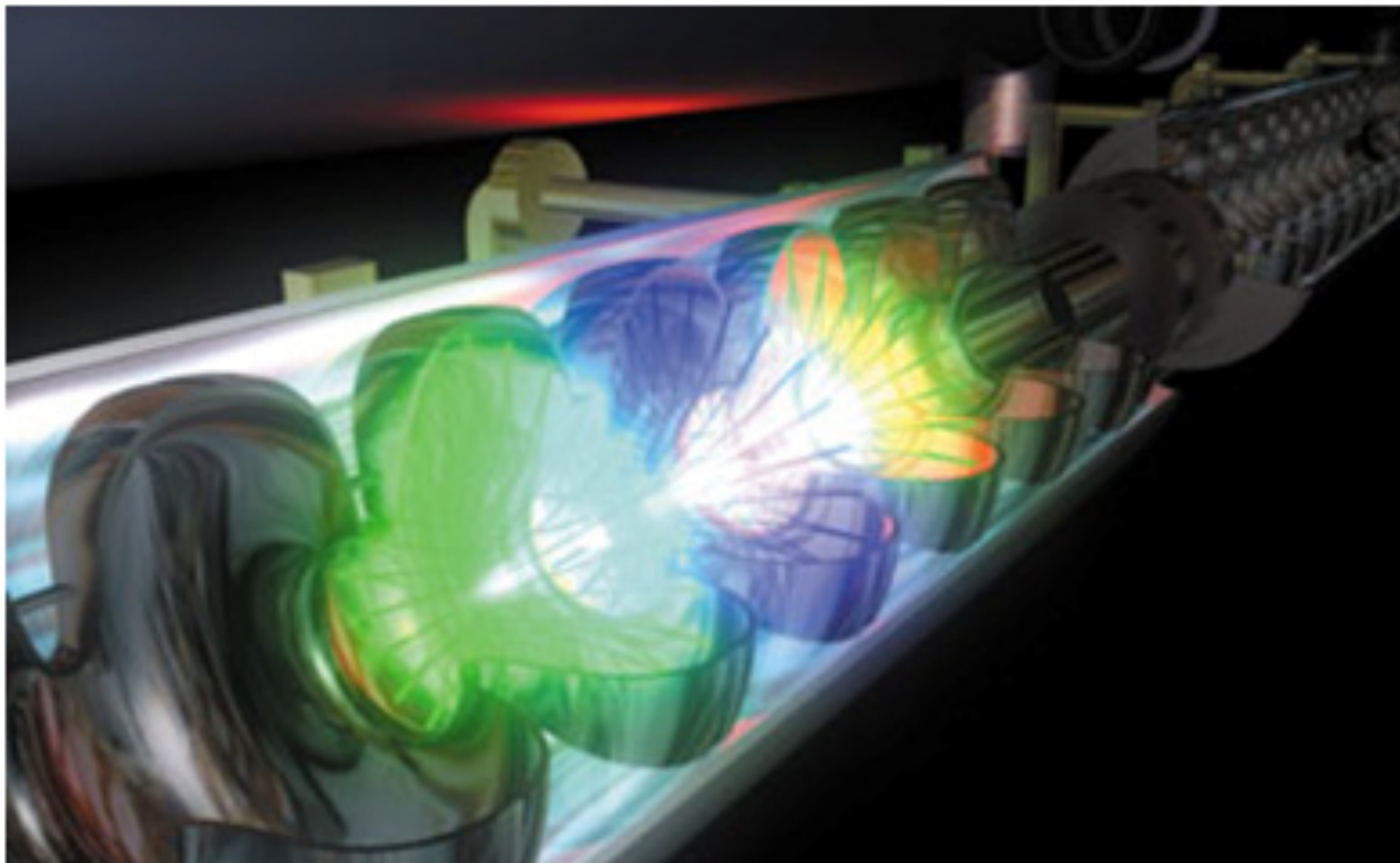
# il tunnel del Large Hadron Collider (LHC)





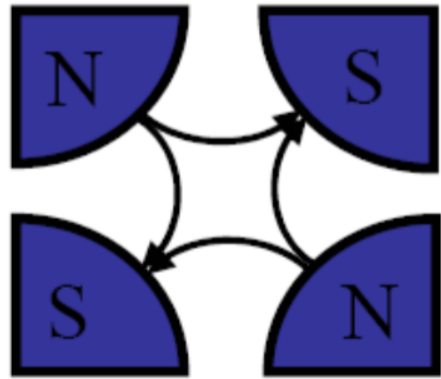
# L'accelerazione del fascio in LHC

- il fascio di protoni viene iniettato in LHC con energia di 450 GeV per fascio: la velocità è prossima a quella della luce
- le particelle vengono accelerate all'energia finale di 13 TeV per mezzo di **cavità risonanti**: elementi simili ad un Linac come concetto
- le particelle fanno “**surf**” **su un'onda elettromagnetica** che si instaura nelle cavità

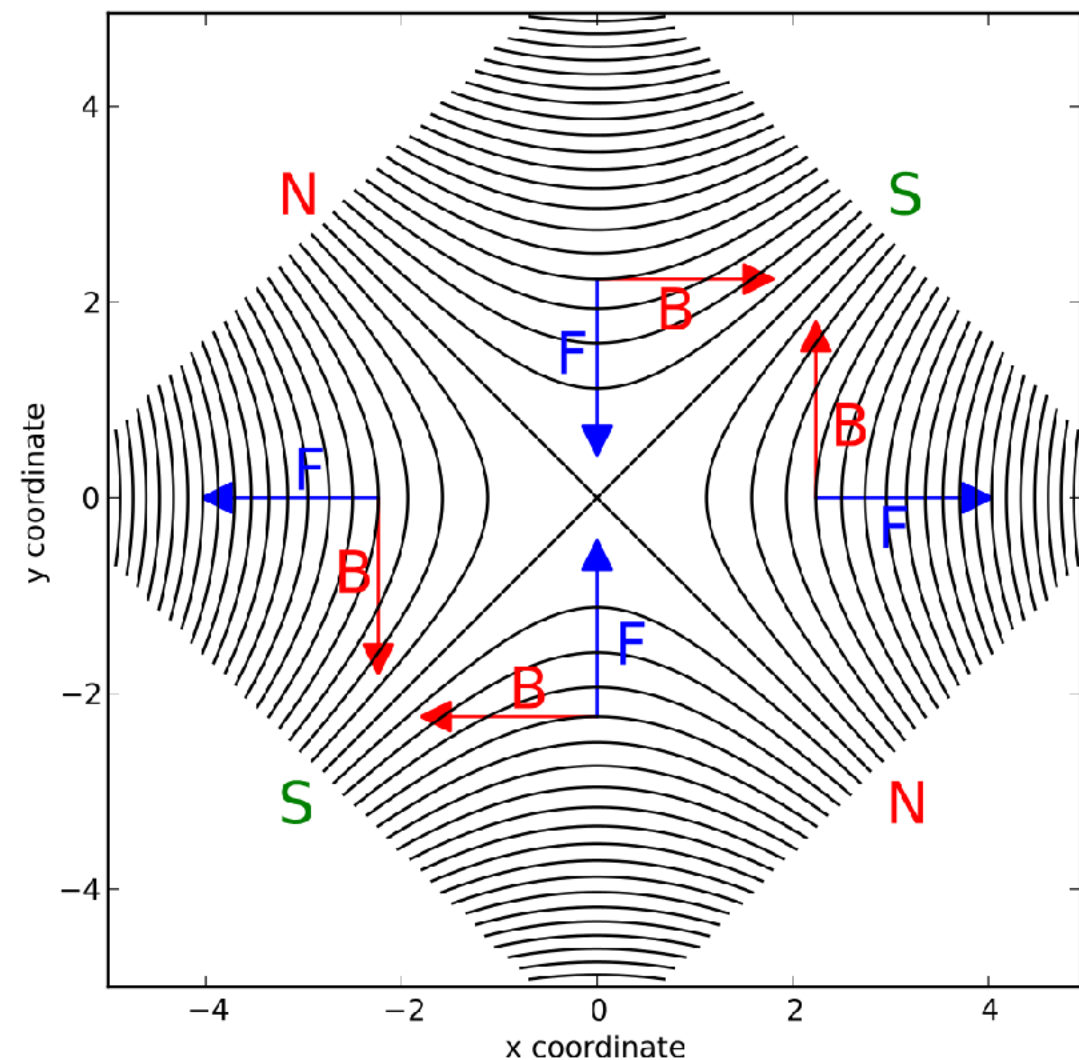




# la focalizzazione del fascio: i quadripoli



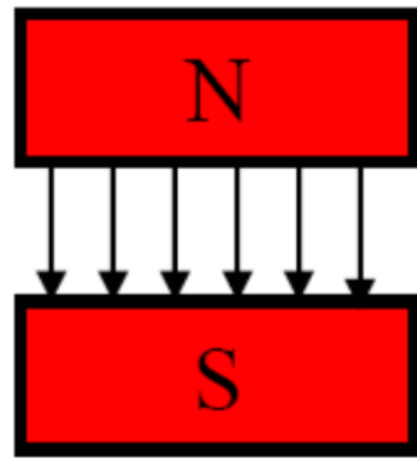
- stringono il fascio di particelle lungo una direzione, (inevitabilmente) lo allargano nell'altra
- una sequenza di quadripoli orientati alternativamente focalizza il fascio



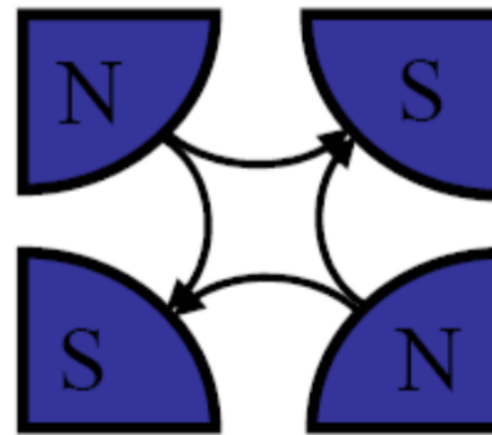
# correzioni ulteriori

- sistemi magnetici (ottiche magnetiche) con ancora più poli operano correzioni più precise al fascio

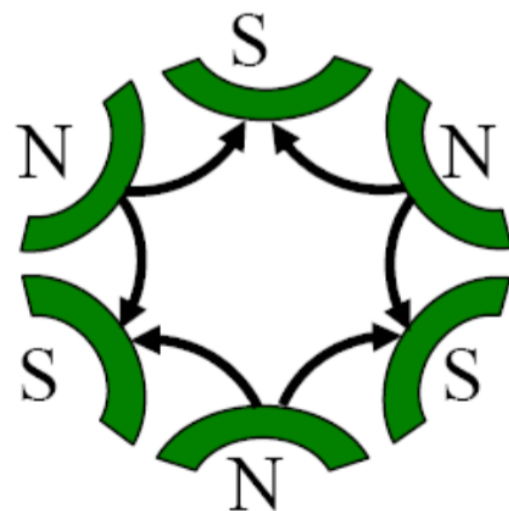
DIPOLO



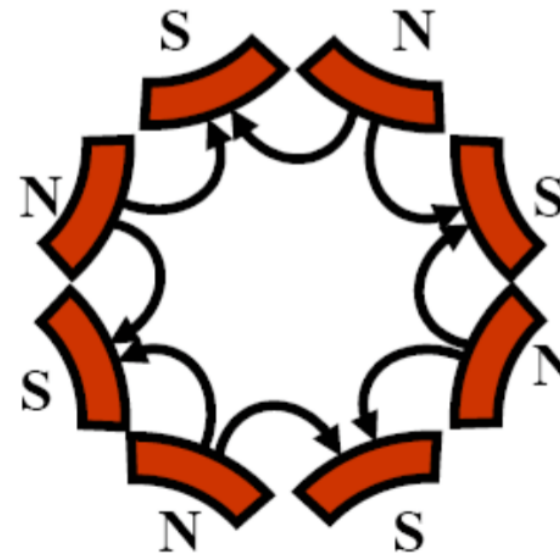
QUADRIPOLO



SESTUPOLO



OTTUPOLO

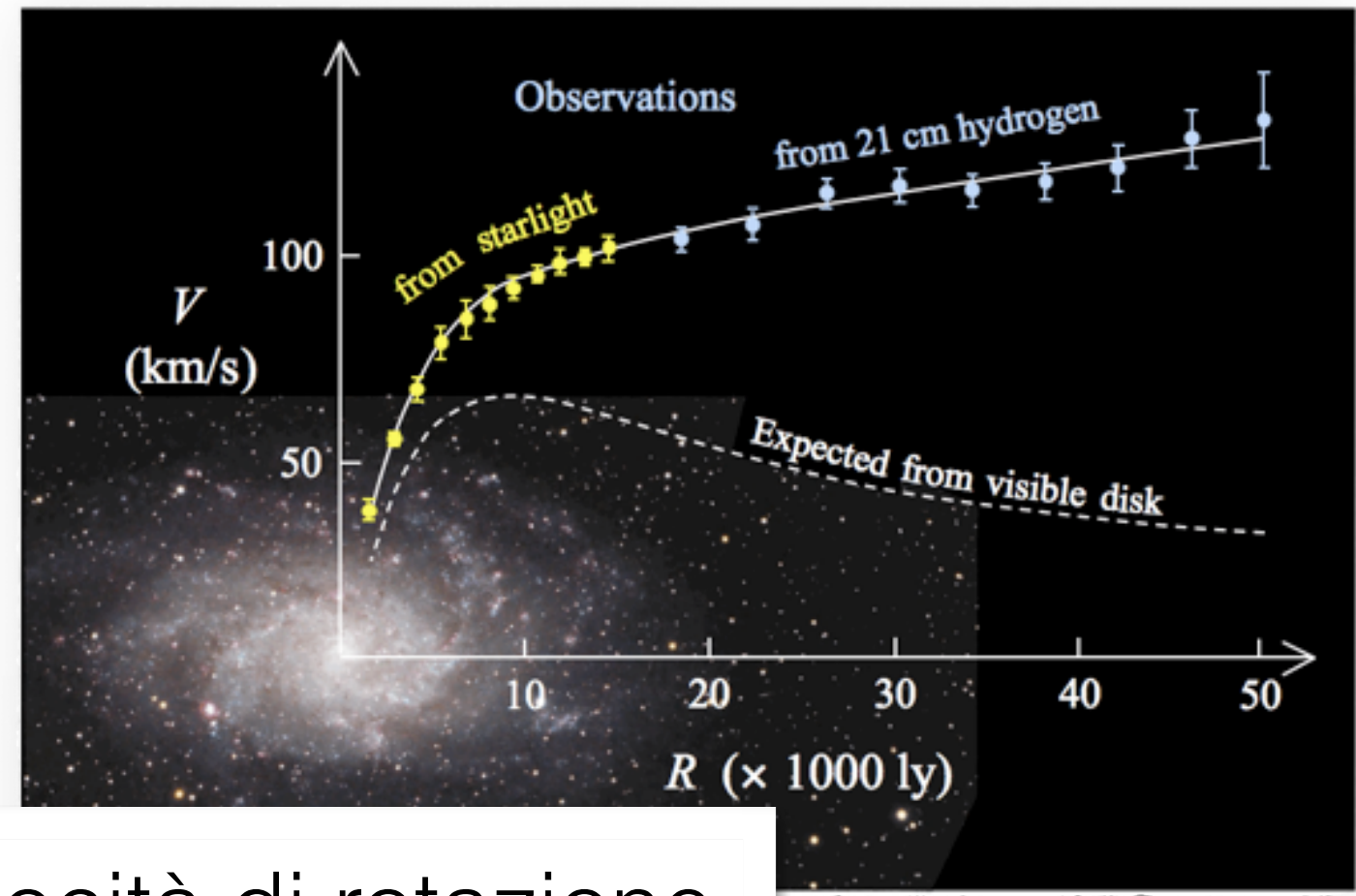
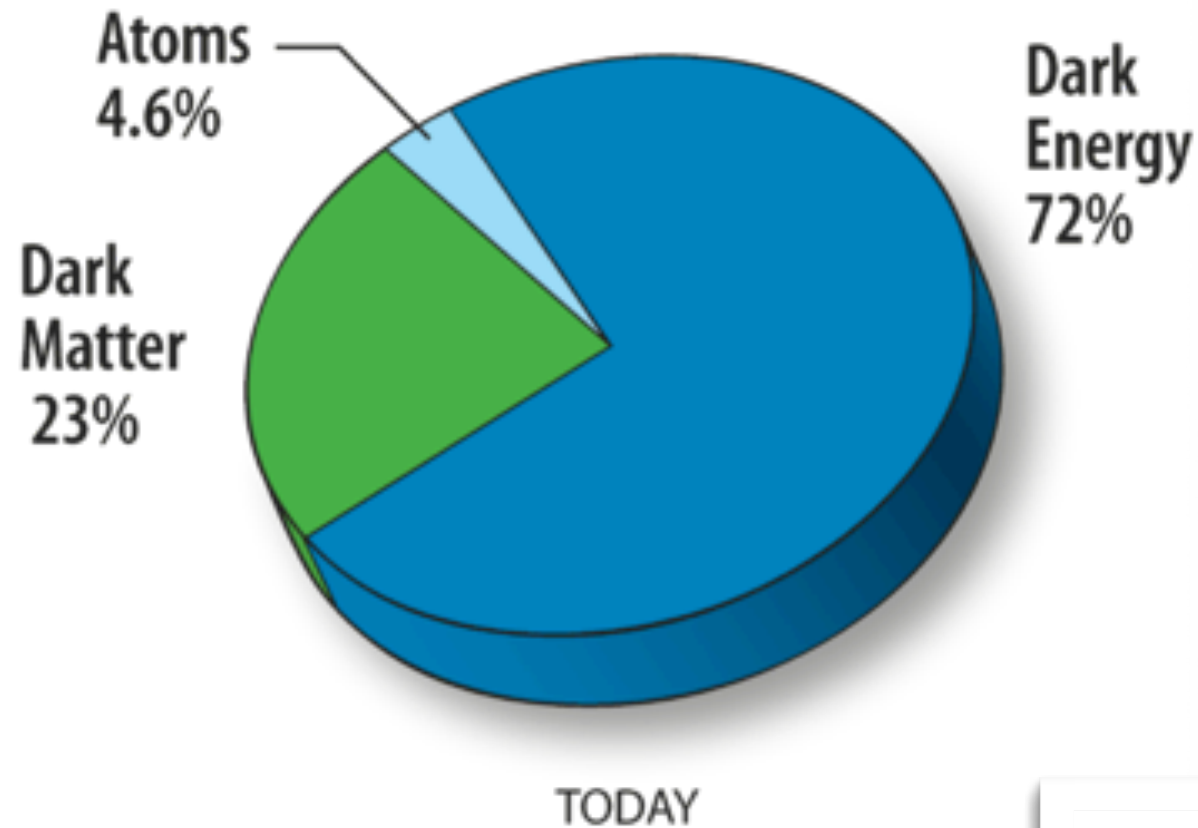




# **la materia oscura**

# velocità di rotazione galattica

- osservazioni cosmologiche misurano la quantità totale di materia ed energia nell'Universo
- il modello standard rende conto del 5%

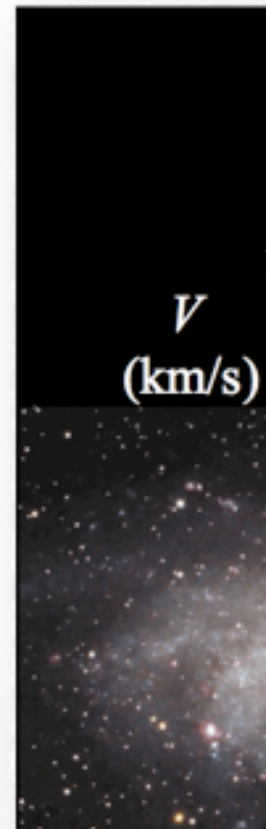
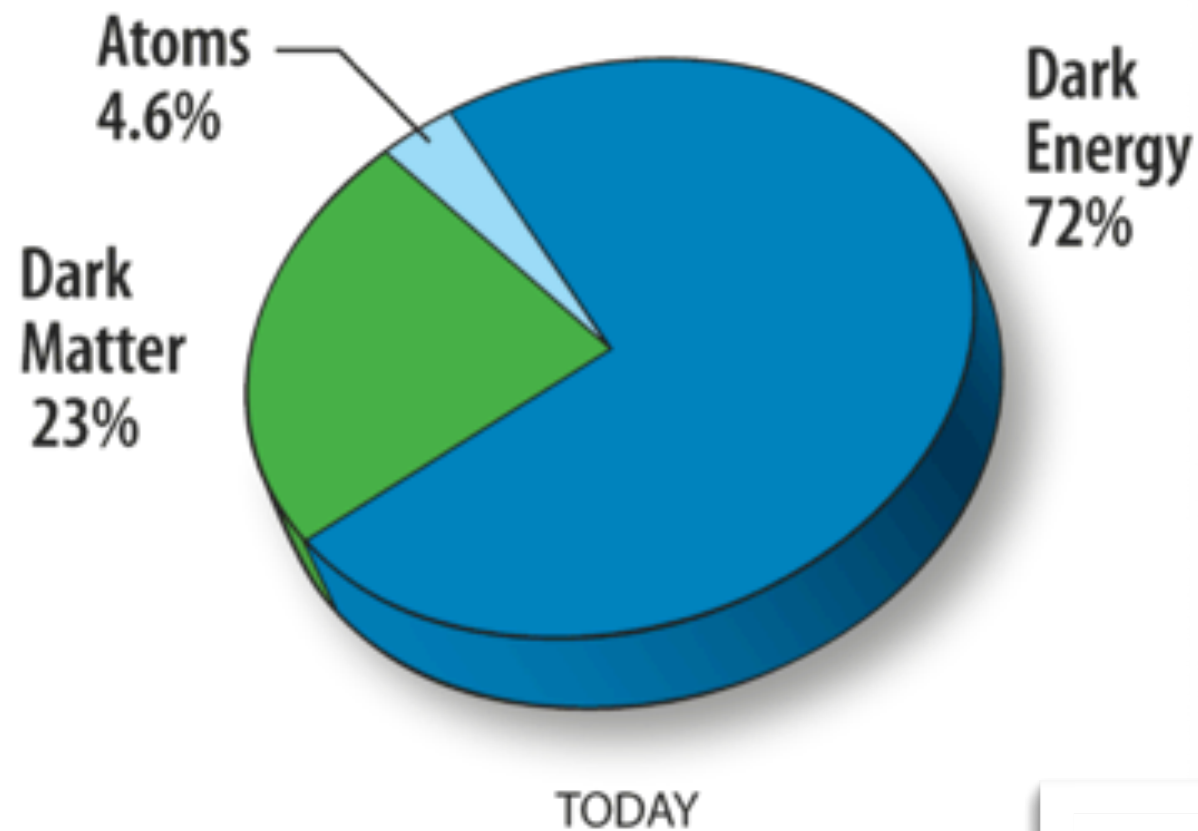


velocità di rotazione  
delle galassie



# velocità di rotazione galattica

- osservazioni cosmologiche misurano la quantità totale di materia ed energia nell'Universo
- il modello standard rende conto del 5%

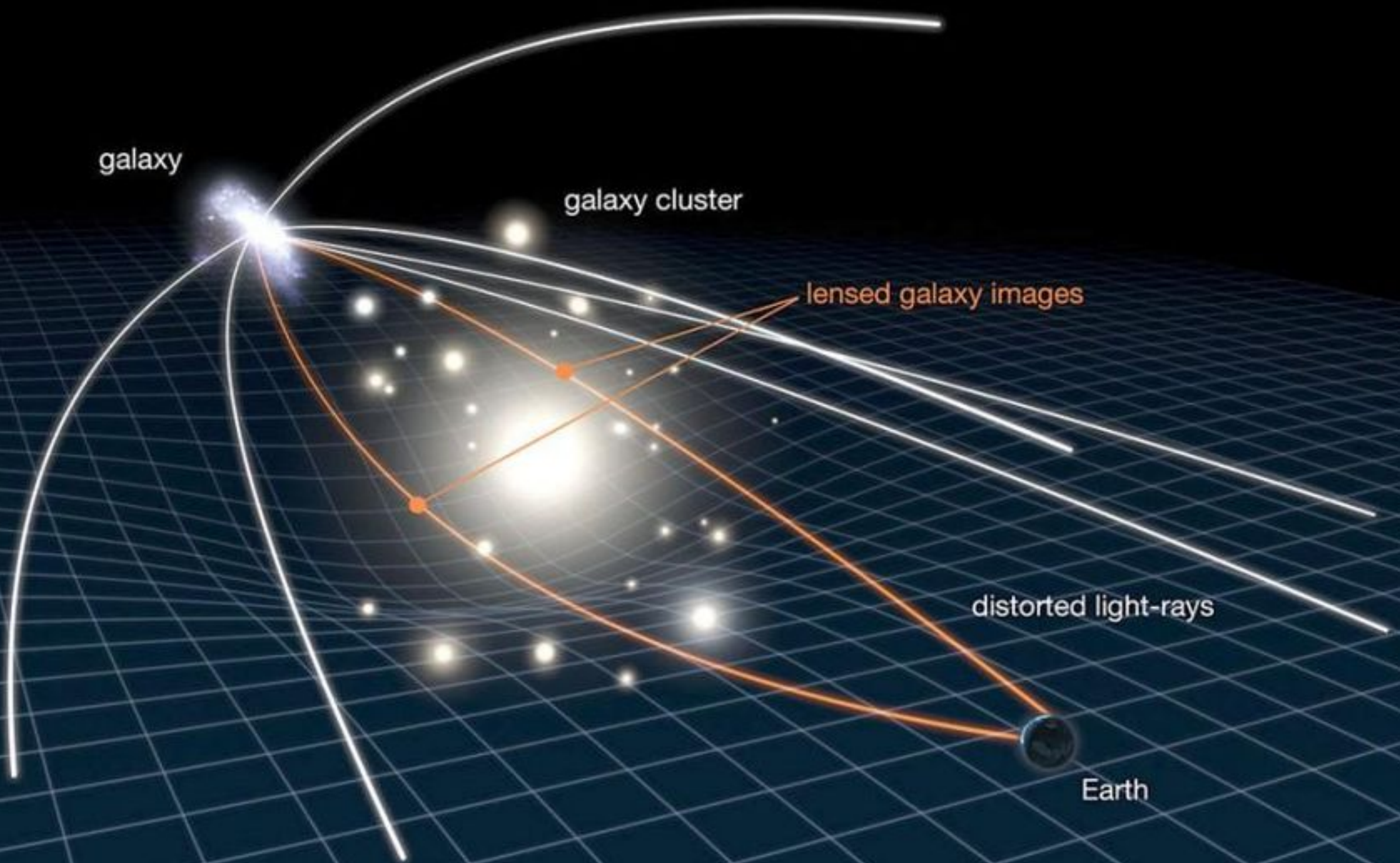


velocità di  
delle  $\zeta$

Vera Cooper Rubin at the Lowell Observatory.  
Kent Ford has his back to us. © Bob Rubin.

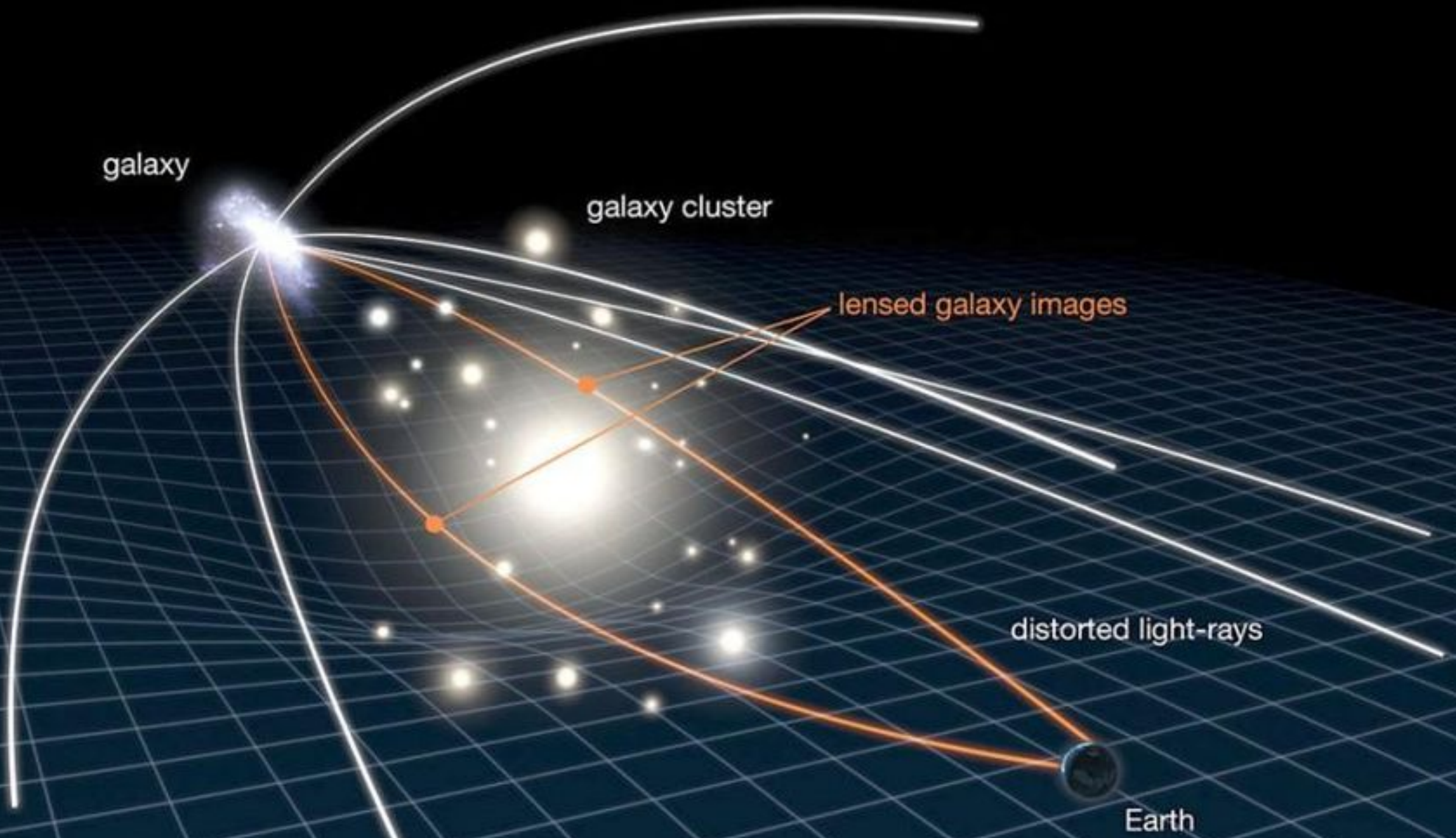


# lenti gravitazionali





# lenti gravitazionali



la massa delle galassie misurata dagli effetti di curvatura è maggiore di quella luminosa



# collisione di cluster di galassie

**le galassie si  
attraversano senza  
rallentare**

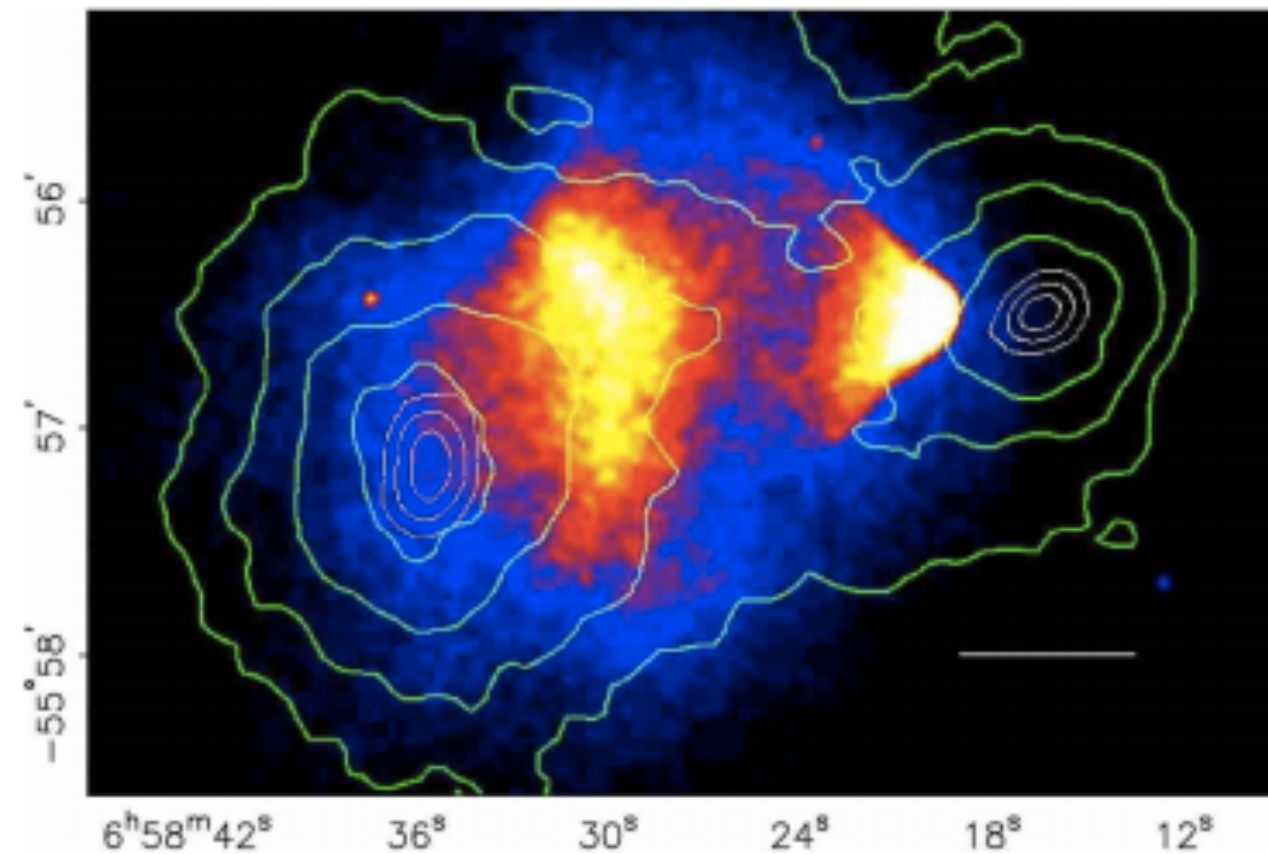
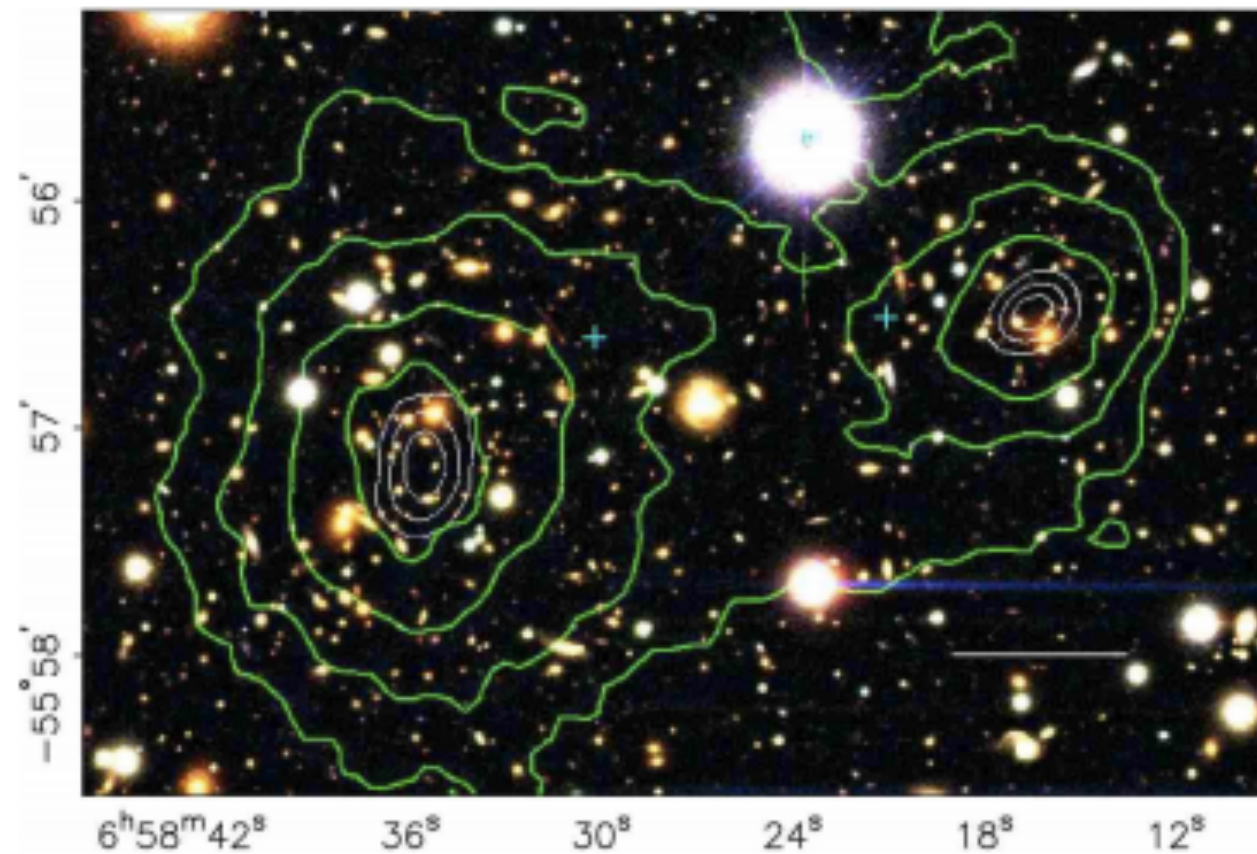


**il gas interstellare  
interagisce e rimane  
nel punto di  
collisione**



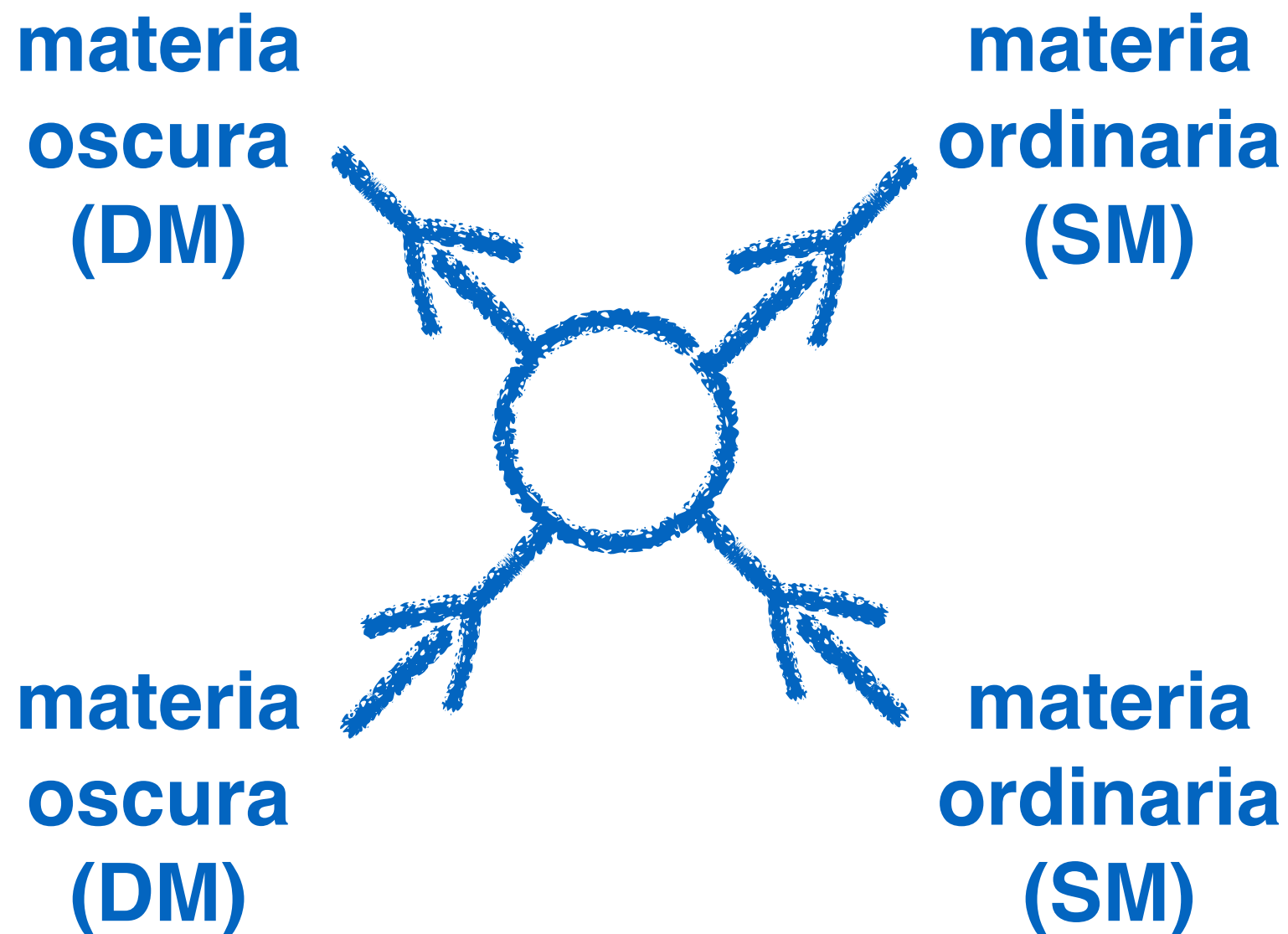
# la distribuzione di massa

- la maggior parte della massa misurata con l'effetto della lente gravitazionale è accumulata dove stanno le galassie
- il contributo del gas alla massa delle galassie è piccolo



# particelle di materia oscura

- se la **materia oscura è costituita da particelle** (ipotesi ragionevole, è l'unico tipo che conosciamo)
- si può cercarla tramite una loro **ipotetica interazione con la materia ordinaria** del modello standard





# osservazione diretta

**IN LABORATORI  
SOTTERANEI IN  
ASSENZA DI RUMORE  
DI FONDO**

una particella di DM  
cosmica urta contro  
una particella di  
materia ordinaria, di  
cui si osserva il rinculo

**DOPO**



**PRIMA**

**DM**

**SM**



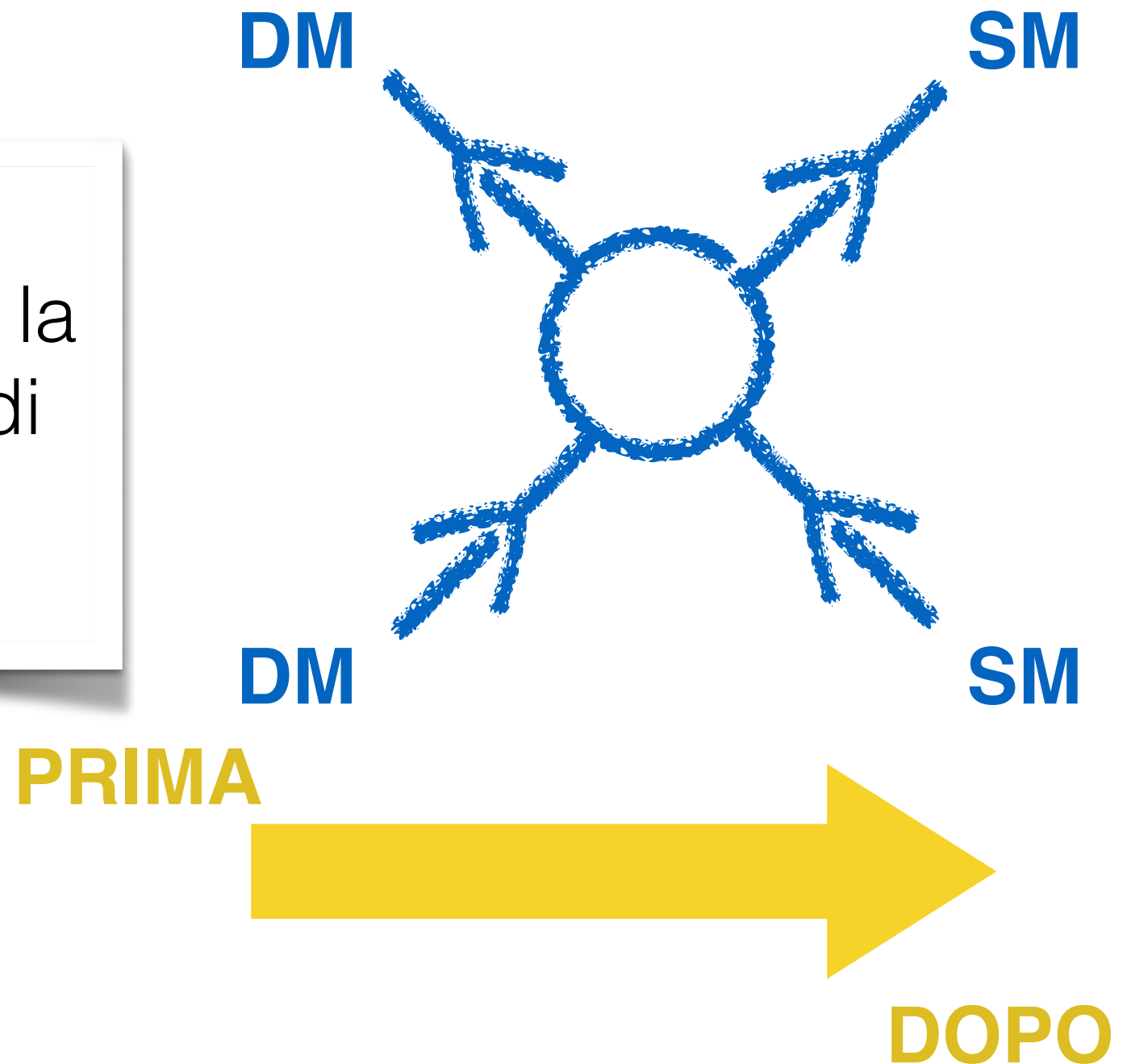
**DM**

**SM**

# osservazione indiretta

## RIVELATORI NELLO SPAZIO O MOLTO ESTESI

due particelle di DM si annichilano e provocano la comparsa di particelle di materia ordinaria, che viene osservata





# produzione artificiale

## AD ACCELERATORI DI PARTICELLE

dalla collisione di particelle elementari vengono prodotte coppie di particelle di DM

- se ne osserva il decadimento
- si osserva la scomparsa di energia

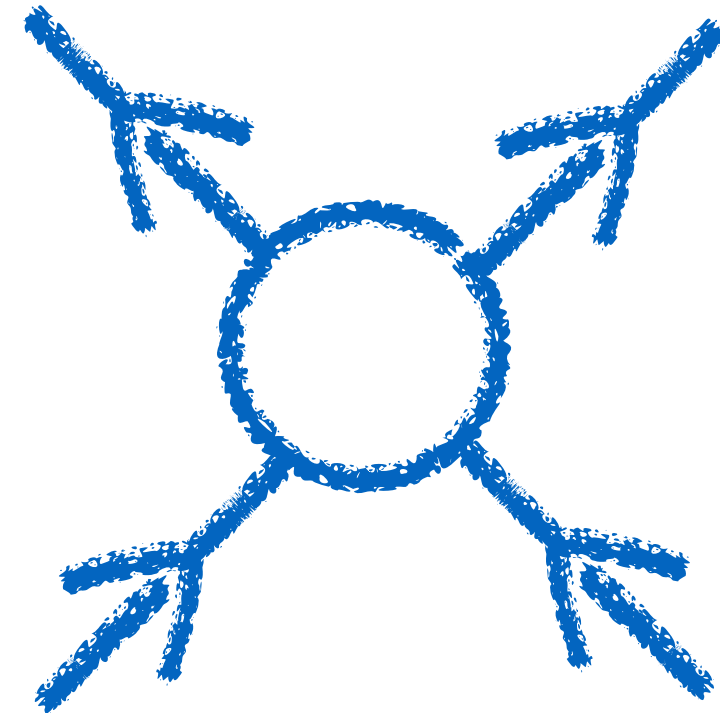
DOPO



PRIMA

DM

SM



DM

SM

# produzione artificiale

## AD ACCELERATORI DI PARTICELLE

dalla collisione di particelle elementari vengono prodotte coppie di particelle di DM

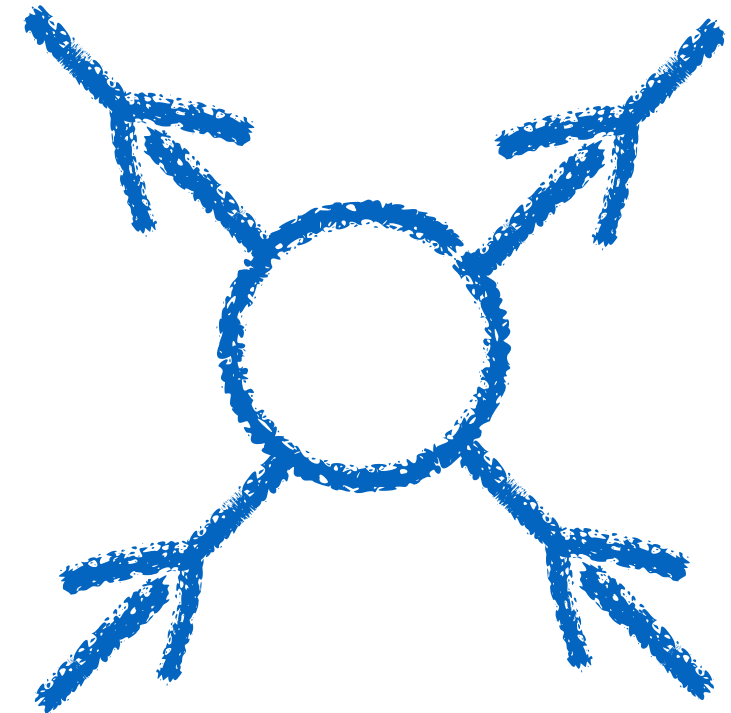
- se ne osserva il decadimento
- si osserva la scomparsa di energia

DOPO

PRIMA

DM

SM



DM

SM

finora **non sono stati osservati segnali** di materia oscura ad alcun acceleratore