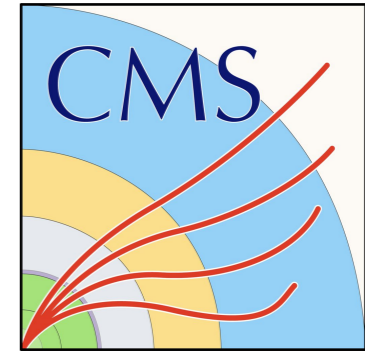




UNIVERSITÀ DI PISA



European Research Council  
Established by the European Commission



# Masterclass CMS Pisa 2025

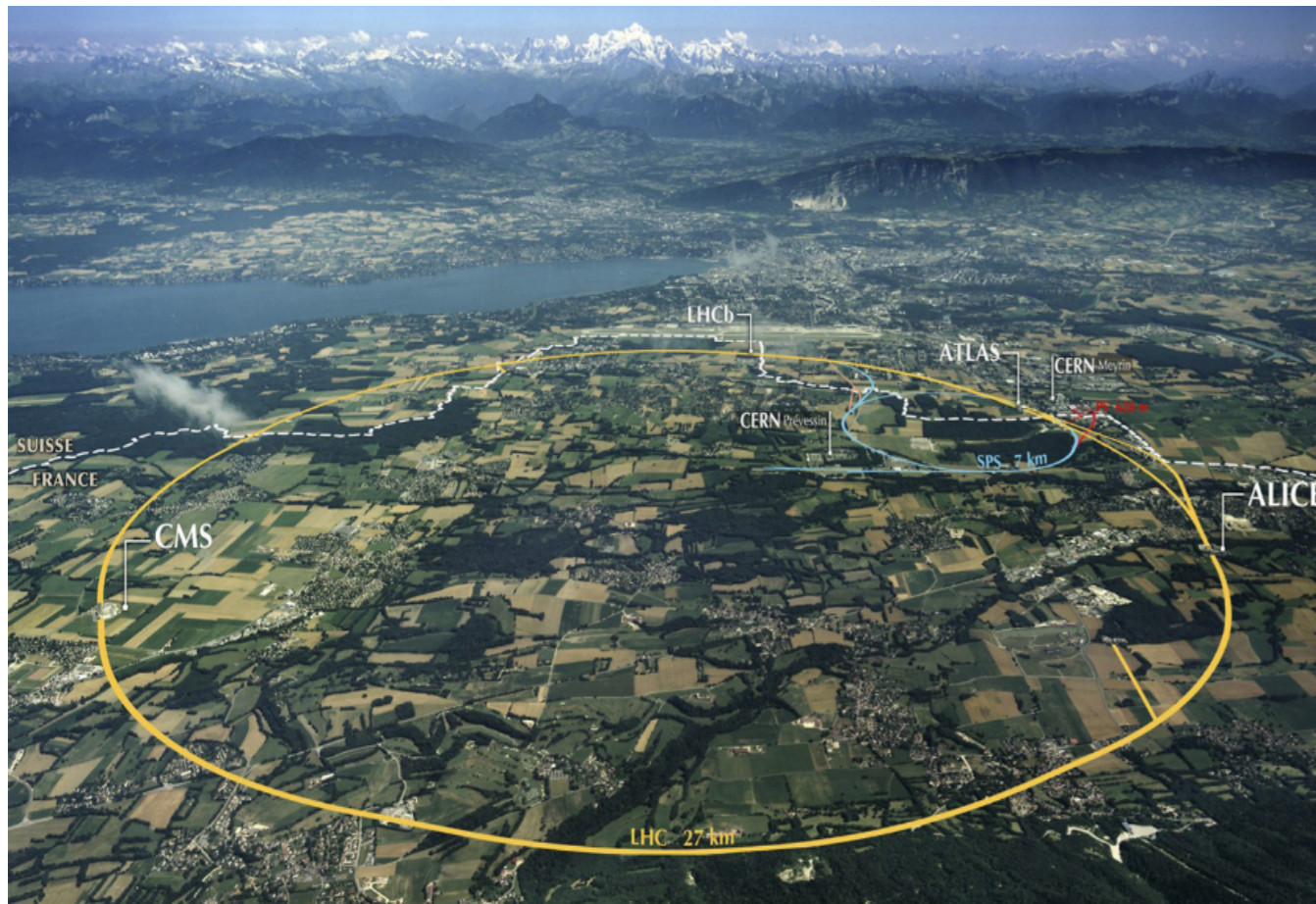
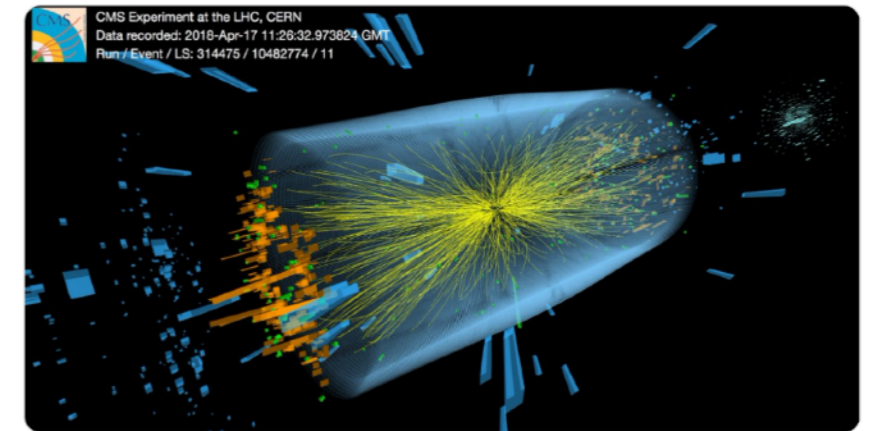
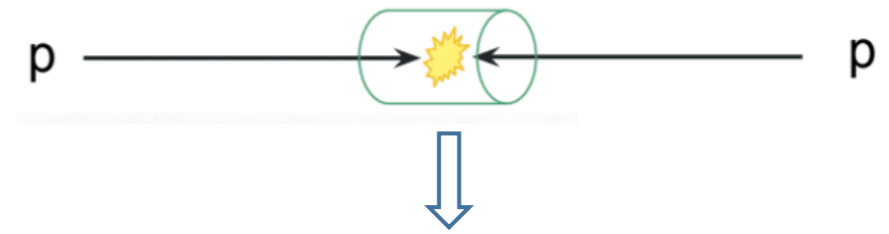
**Patrick Asenov, Marco Cipriani,**  
\*Università & INFN Pisa

21/03/2025

# Fisica delle particelle

Tutto quello che sappiamo dell'universo è descritto da una teoria detta "modello standard" (MS) delle particelle elementari, che descrive la materia in termini di particelle e loro interazioni

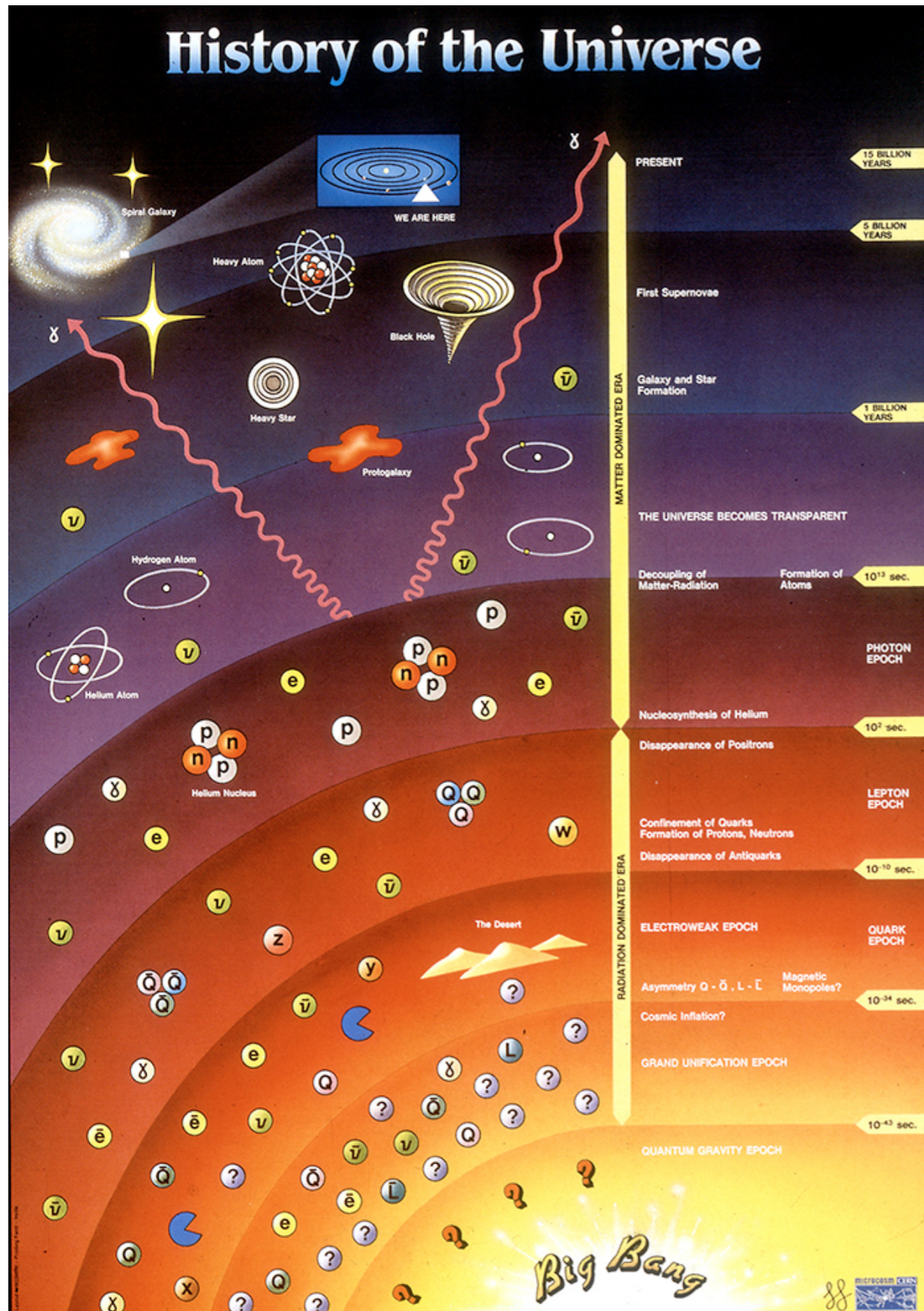
Il Large Hadron Collider (LHC) del CERN rappresenta la frontiera della fisica delle alte energie, il più potente acceleratore di particelle al mondo, in cui fasci di protoni sono accelerati fino all'energia attuale di 6.8 TeV



## Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.11 \text{ GeV}/c^2$
	charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	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><math>\gamma</math></b> photon	
LEPTONS	mass	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	charge	-1	-1	-1	0	1
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
		<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
		$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	$\pm 1$	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

# Breve storia dell'universo: il Big Bang



*“The whole universe was in a hot dense state ...”*



Nell'universo primordiale tutte le particelle note (e non) coesistono in uno stato di equilibrio termico, in cui possono trasformarsi le une nelle altre tramite opportune reazioni rispettando opportune leggi di conservazione (energia, carica elettrica, ...)

Con l'espansione dell'universo l'equilibrio si rompe a favore delle particelle più leggere (che poi vanno a formare la materia attuale)

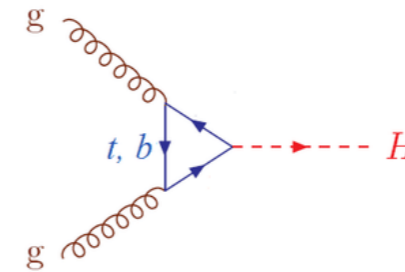
# Particelle fantastiche e come trovarle ...

**Semplificando un po', la materia che ci circonda è fatta di atomi, quindi di elettroni, protoni, e neutroni**

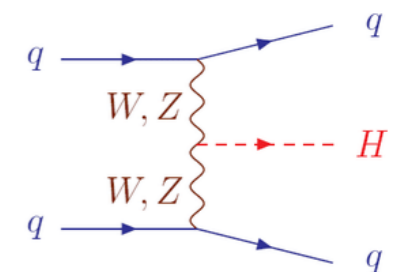
- ma in realtà protoni e neutroni NON sono particelle elementari, sono composti da quark, in particolare di tipo up e down (e altre cose, tra cui i gluoni ...)
- Per studiare le altre particelle più pesanti previste dalla teoria (o scoprirne di nuove) dobbiamo prima produrle ricreando le condizioni di alta densità di energia dell'universo primordiale
- Qui entrano in gioco gli acceleratori di particelle !

**Una particella con una certa massa può essere prodotta nelle collisioni di altre particelle, accelerate in modo da raggiungere un'energia sufficiente affinché la reazione sia possibile**

Alcuni modi di produzione del bosone di Higgs in collisioni protone-protone



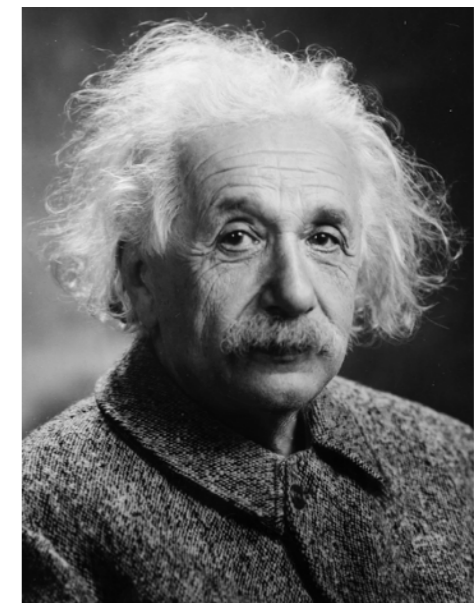
Fusione di gluoni



Fusione di bosoni vettoriali W o Z (emessi dai quark nei protoni)

$$E = mc^2$$

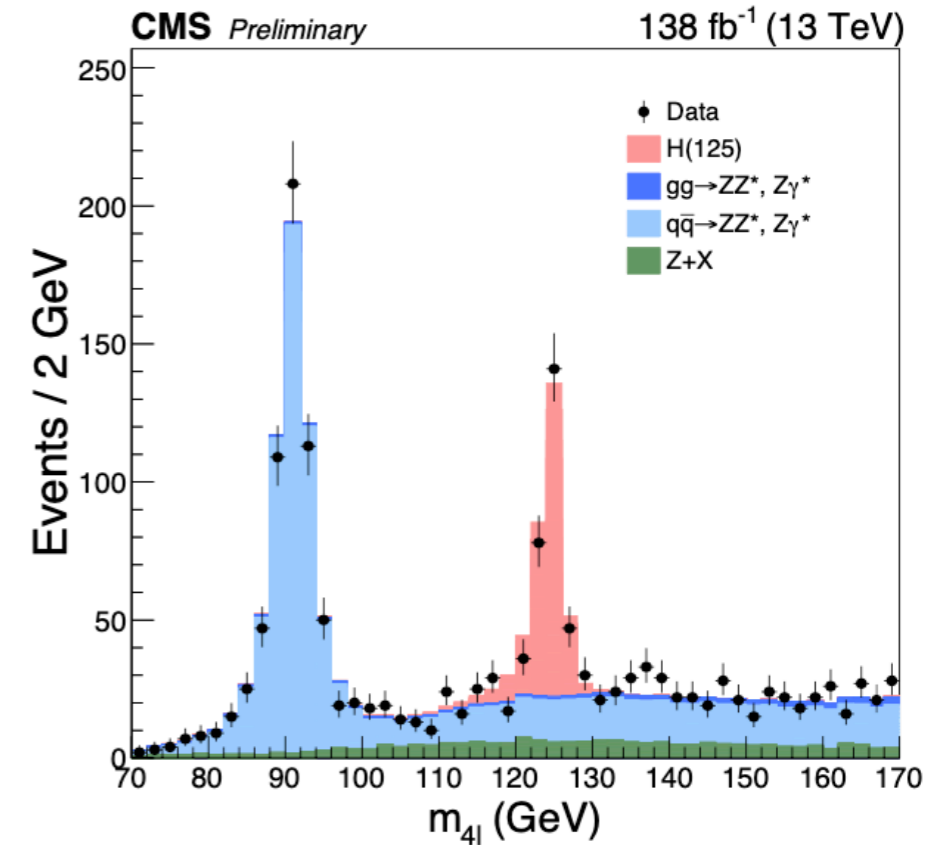
(+ energia cinetica)



# Il bosone di Higgs

## Teorizzato negli anni '60 per spiegare l'origine della massa delle altre particelle

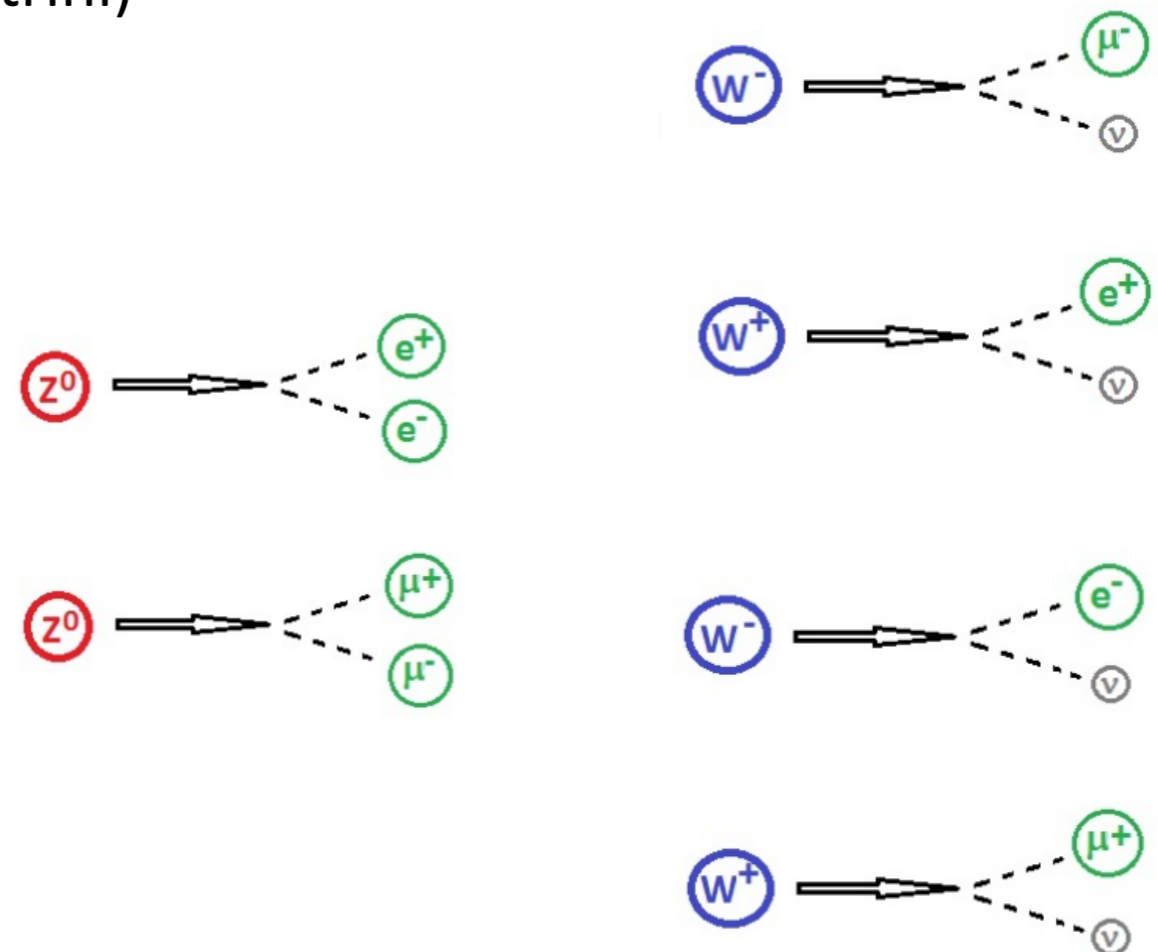
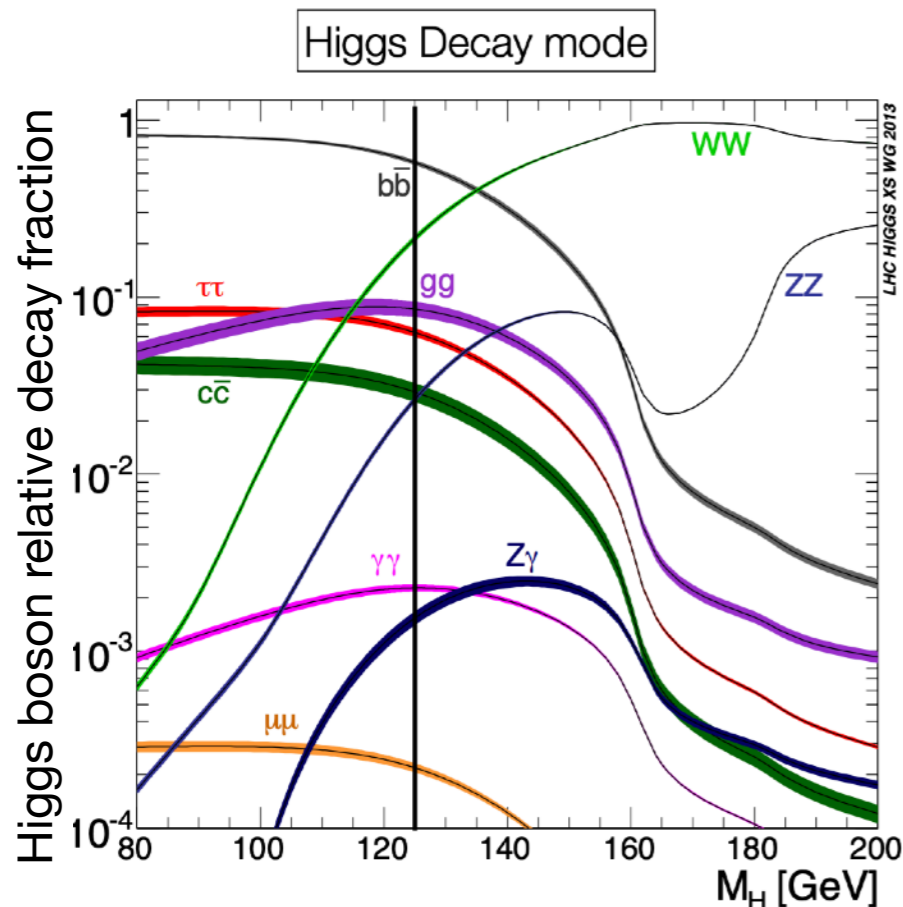
- Scoperto a LHC solo nel 2012 dagli esperimenti ATLAS e CMS (gli acceleratori precedenti non raggiungevano l'energia sufficiente)
- Negli anni successivi, accumulando sempre più dati, è stato possibile studiarne le proprietà con precisione sempre maggiore
- Oggi sappiamo che la massa del bosone di Higgs è circa 125 GeV (un protone ha una massa di poco inferiore a 1 GeV)



# Il bosone di Higgs: produzione e decadimenti

## La produzione di un bosone di Higgs è un processo raro

- In media a LHC se ne produce uno ogni secondo, che corrisponde a un evento di interesse ogni miliardo di collisioni di protoni (ma in realtà non tutti vengono visti ...)
- Il bosone di Higgs decade immediatamente dopo essere stato prodotto, quindi negli esperimenti si devono cercare i prodotti del decadimento
- Ai fini dell'esercizio, ci concentreremo sulla ricerca di decadimenti  $H \rightarrow WW$  e  $H \rightarrow ZZ$
- I bosoni  $W$  e  $Z$  decadono a loro volta producendo leptoni (in particolare ci focalizzeremo su elettroni o muoni, e neutrini)

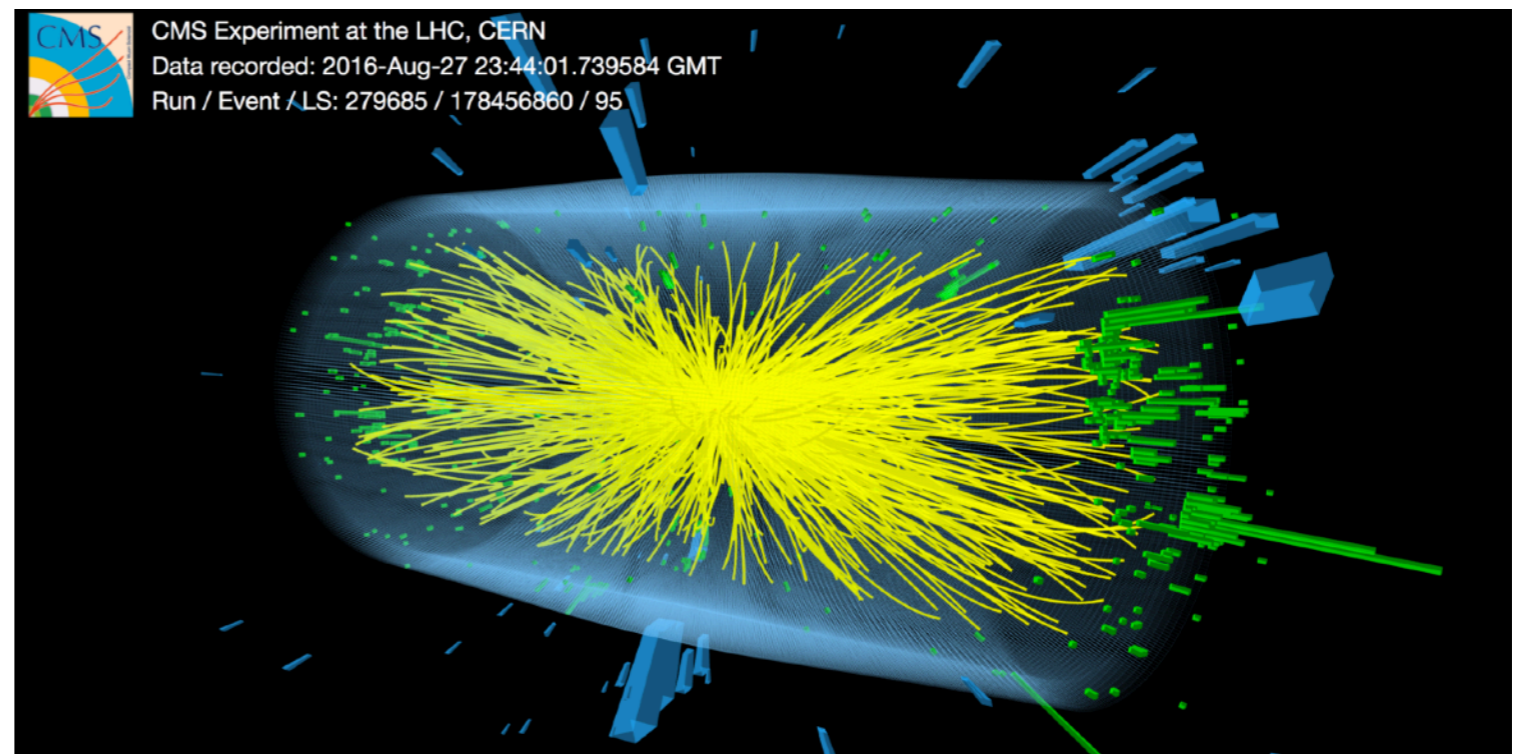


# Rivelatori di particelle

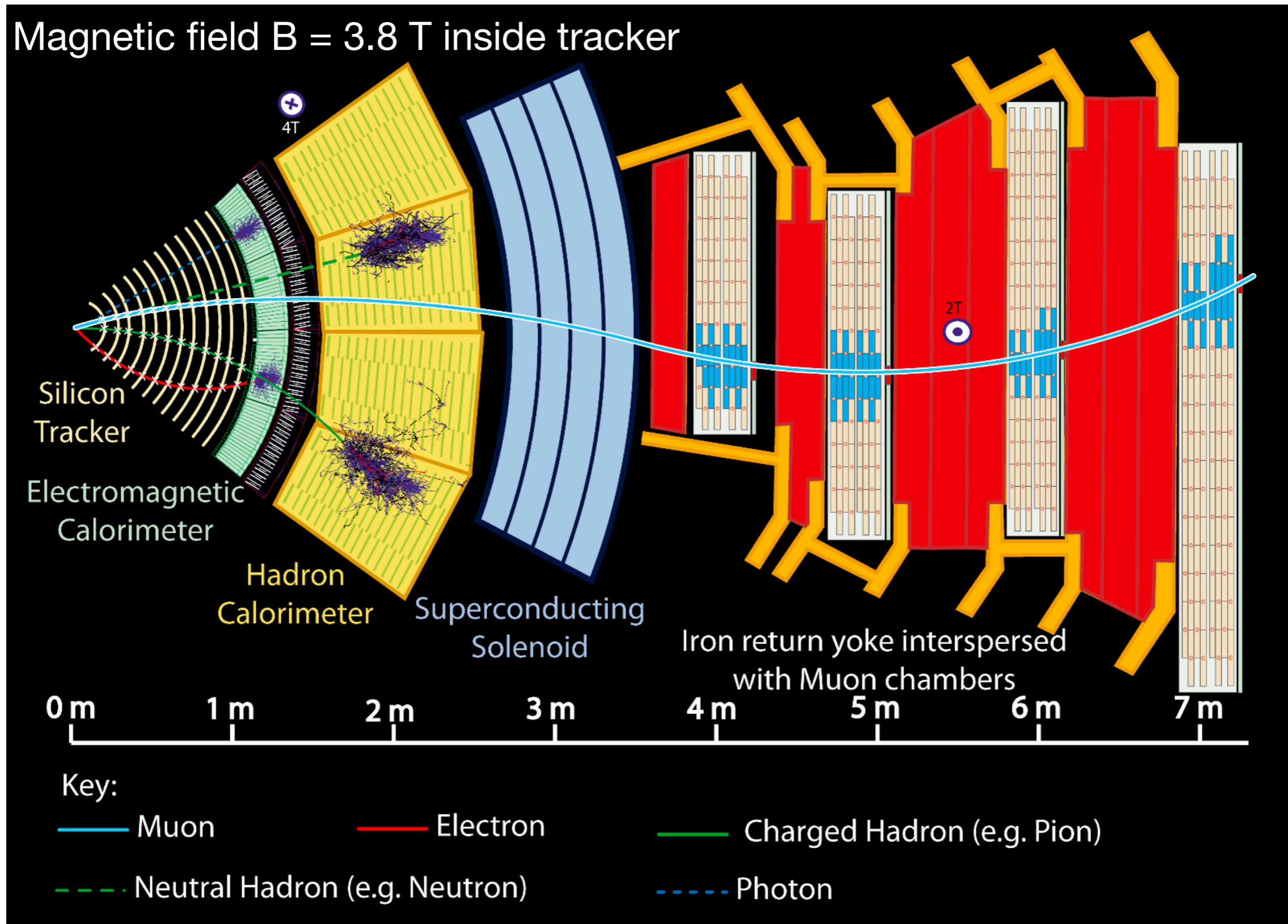
**Una volta che produciamo la reazione che ci interessa, come la vediamo?**

- Ci servono dei rivelatori di particelle
- Un rivelatore produce un segnale misurabile al passaggio di una particella
  - Particelle diverse interagiscono con la materia in modo differente
  - un esperimento è solitamente composto da diversi tipi di rivelatori, ciascuno specializzato per misurare specifiche proprietà
- I segnali prodotti da una particella nei vari rivelatori permettono di ricavare diverse informazioni su di essa, ad esempio direzione, carica elettrica, energia, quantità di moto (anche se non sempre tutte insieme)

Sembra facile, ma nelle collisioni si produce veramente tanta roba che si sovrappone al segnale di interesse ...



# Sezione trasversale di CMS





# THE LORD OF THE LHC RING



**Non si scopre facilmente  
il bosone di Higgs**