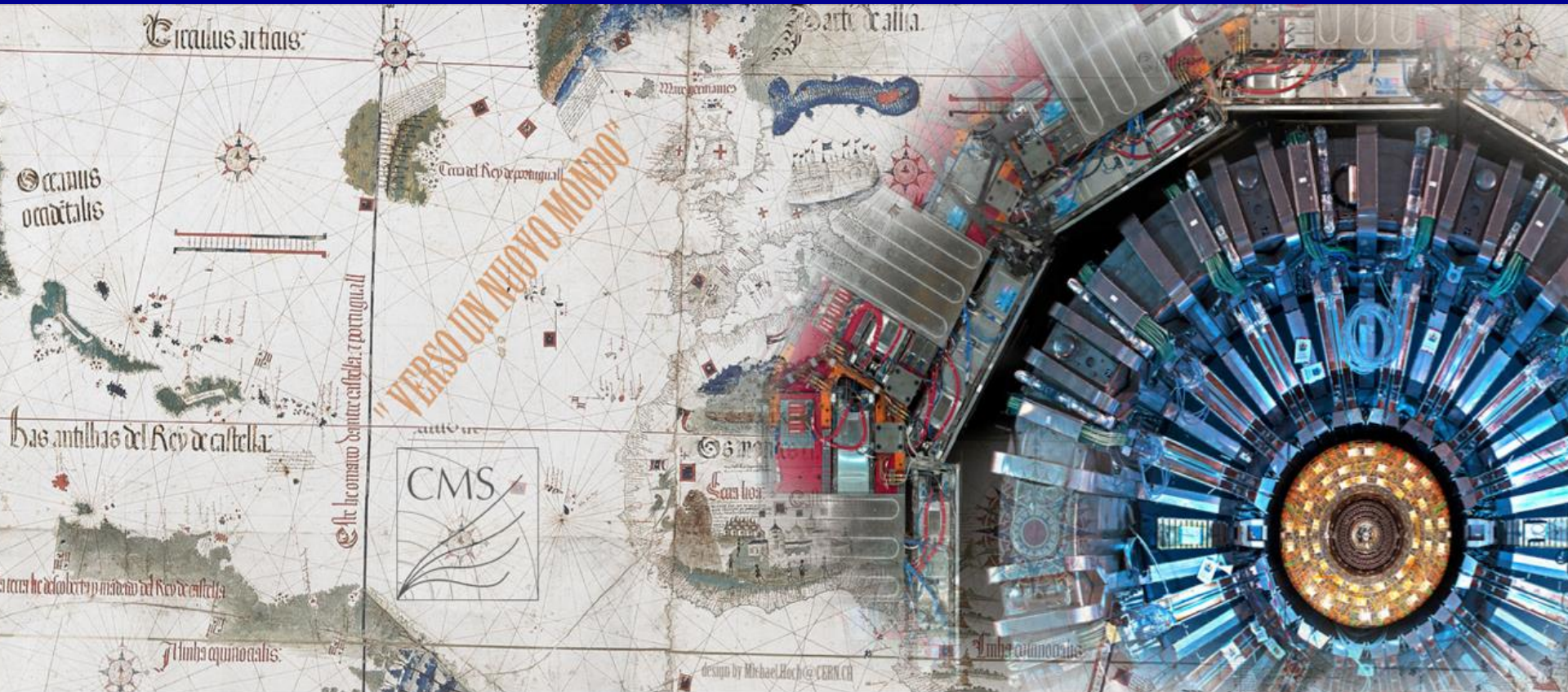


Master Class



Chiara Mariotti

Il Modello Standard

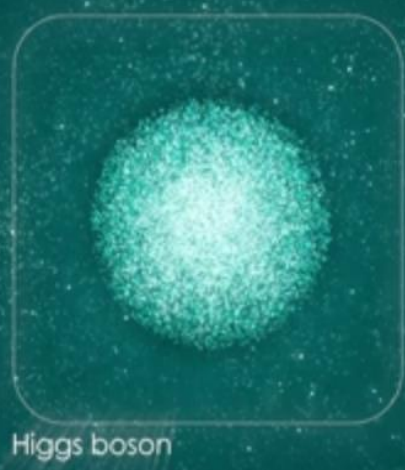
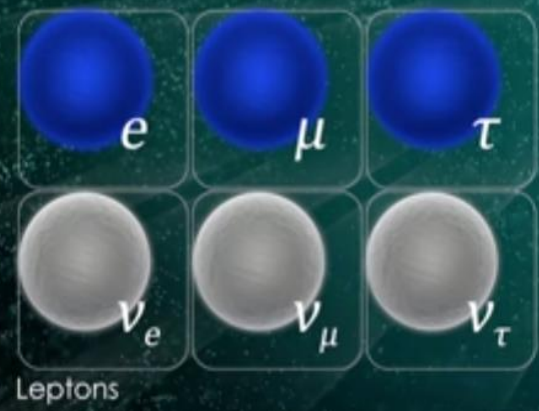
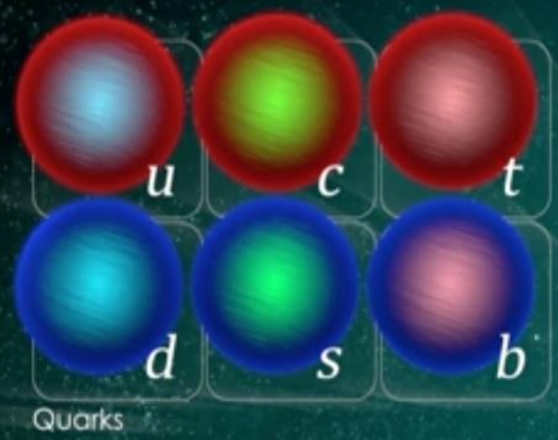


TABLE 2.1: Properties of the quarks [5].

Quark properties			
Generation	Flavour	Electric charge [e]	Mass [MeV]
I	u	+2/3	2.3
	d	-1/3	4.8
II	c	+2/3	1275
	s	-1/3	95
III	t	+2/3	173.21×10^3
	b	-1/3	4.18×10^3

TABLE 2.2: Properties of the leptons [5].

Lepton properties			
Generation	Flavour	Electric charge [e]	Mass [MeV]
I	e	-1	0.511
	ν_e	0	$<2 \times 10^{-3}$
II	μ	-1	105.66
	ν_μ	0	$<2 \times 10^{-3}$
III	τ	-1	1776.82
	ν_τ	0	$<2 \times 10^{-3}$

Il Modello Standard

Interazione forte
Interazione elettromagnetica
Interazione debole

TABLE 2.3: Properties of the gauge bosons [5].

Gauge boson properties			
Boson	Electric charge [e]	Mass [GeV]	Interaction
g	0	0	strong
γ	0	0	electromagnetic
W^\pm	± 1	80.385	weak
Z	0	91.188	weak

Interazione elettromagnetica
Interazione debole

Interazione debole

I numeri quantici sono conservati

EX: Il numero leptonico e' conservato nelle interazioni

Ogni famiglia di leptoni ha un numero quantico definito :

$$L_e, L_\mu, L_\tau = +1$$

Il numero e' negativo per le famiglie di antiquark: -1

stato iniziale

$$\mu^+$$

$$L_\mu = -1$$

$$L_e = 0$$

\rightarrow

stato finale

$$e^+$$

$$\nu_e$$

$$\bar{\nu}_\mu$$

$$L_e = -1$$

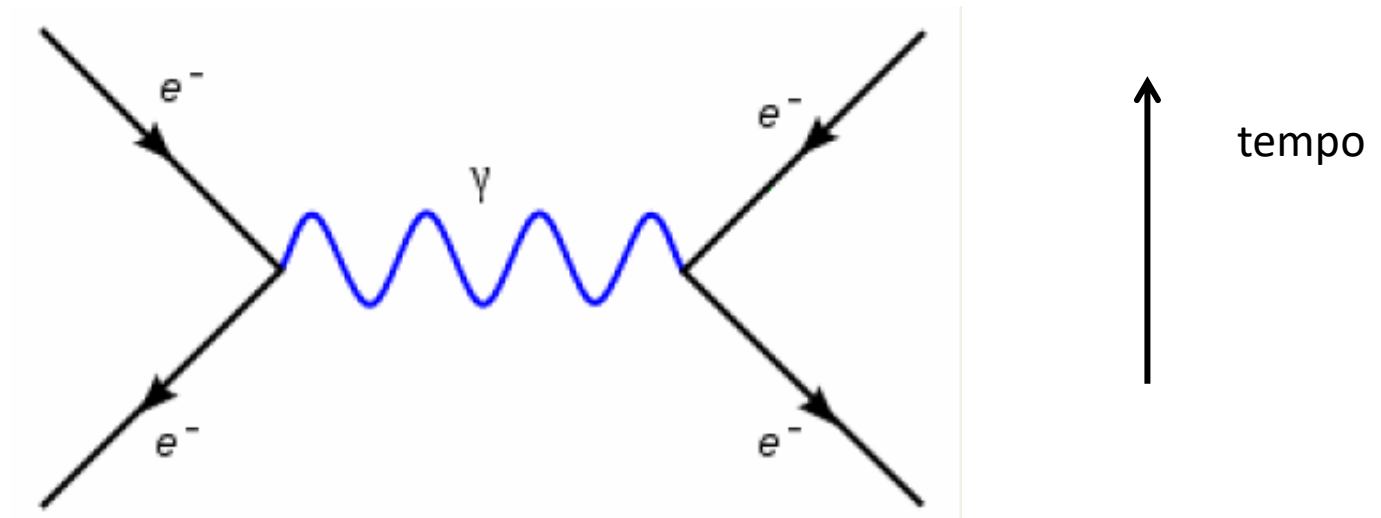
$$L_e = +1$$

$$L_\mu = -1$$

Le interazioni

I diagrammi di Feynmann non solo descrivono il processo fisico, ma permettono di calcolarlo precisamente.

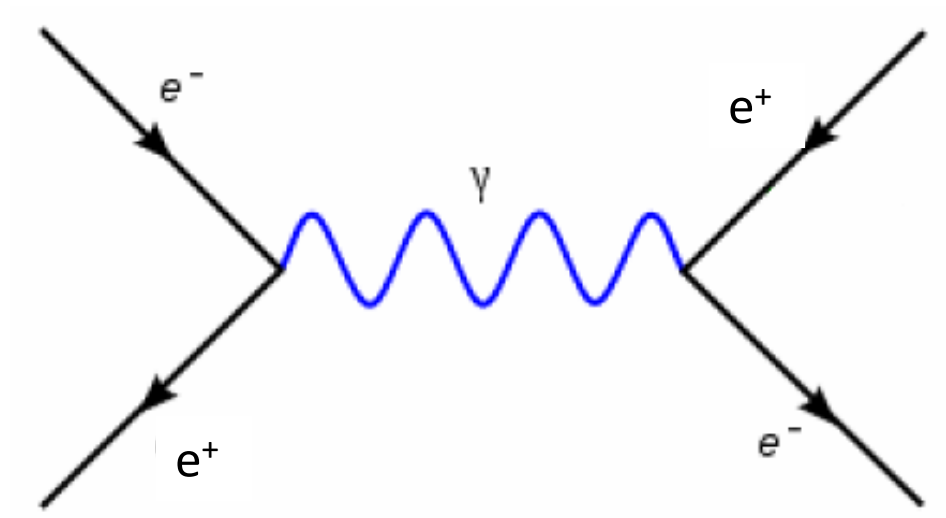
Interazione elettromagnetica :



Les interactions

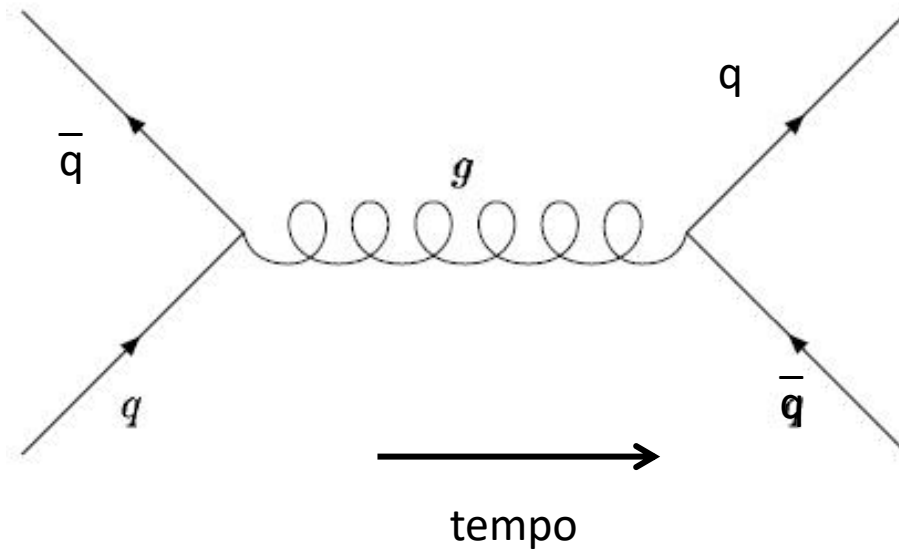
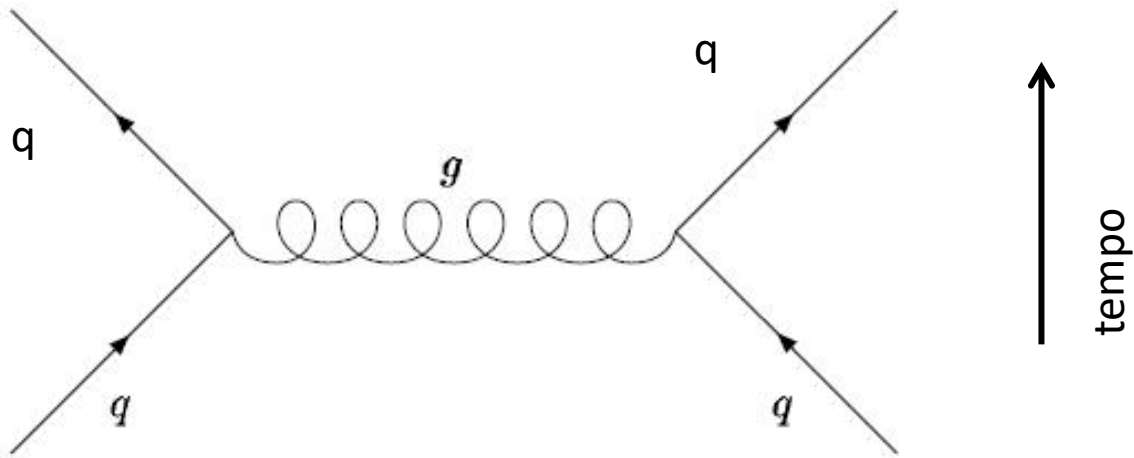
I diagrammi di Feynmann non solo descrivono il processo fisico, ma permettono di calcolarlo precisamente.

Interazione elettromagnetica :



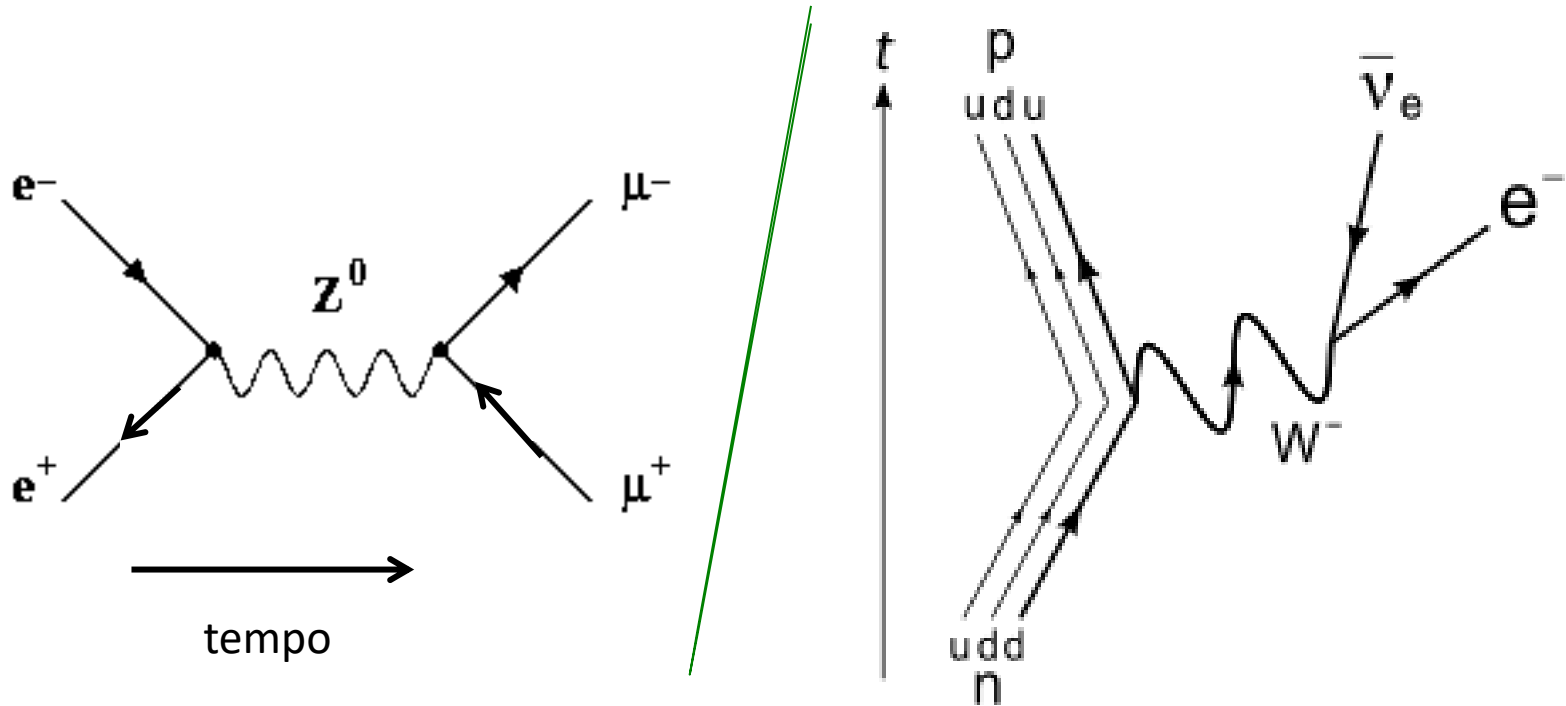
tempo

Interazione forte

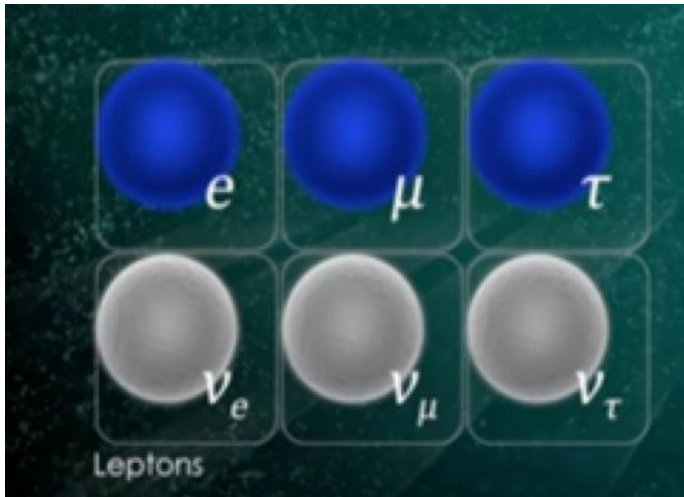
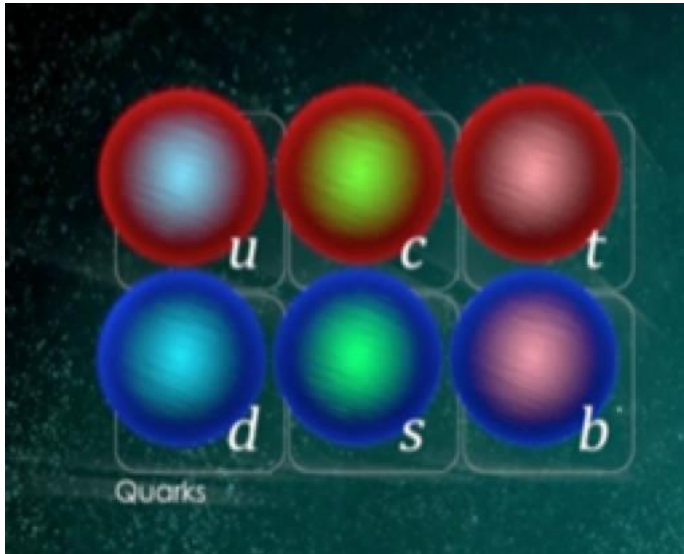


Interazioni deboli

Il modello Standard prevede inoltre: Le modèle standard prédit également :
una interazione DEBOLE NEUTRA – mediata dal bosone Z
una interazione DEBOLE CARICA – mediata dai bosoni W+ e W-



Particelle e interazioni



Quark:

Intergagiscono via interazione:
Elettromagnetica
Forte
Debole

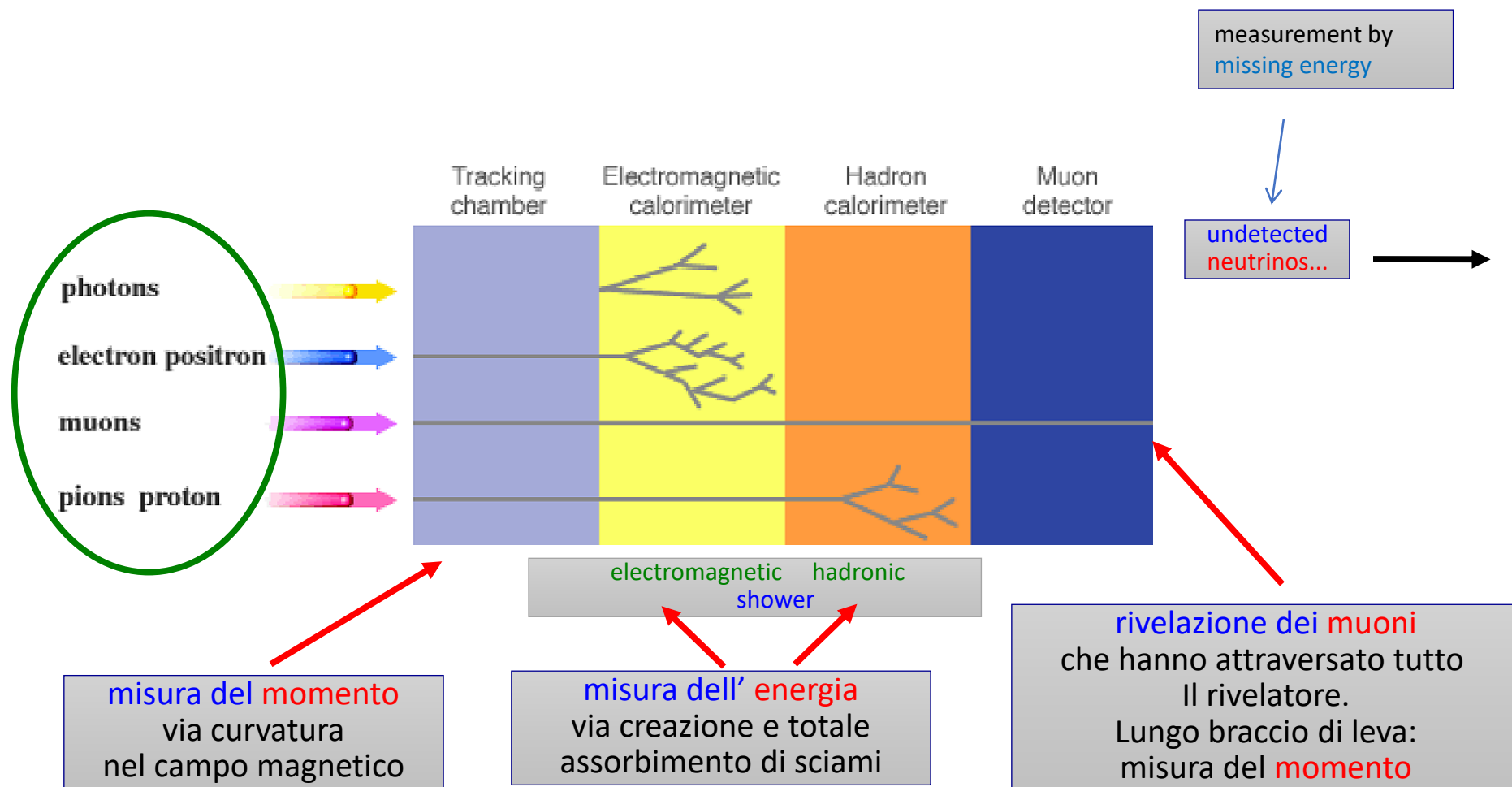
Leptoni carichi (e, mu, tau) :

Intergagiscono via interazione:
Elettromagnetica
Debole

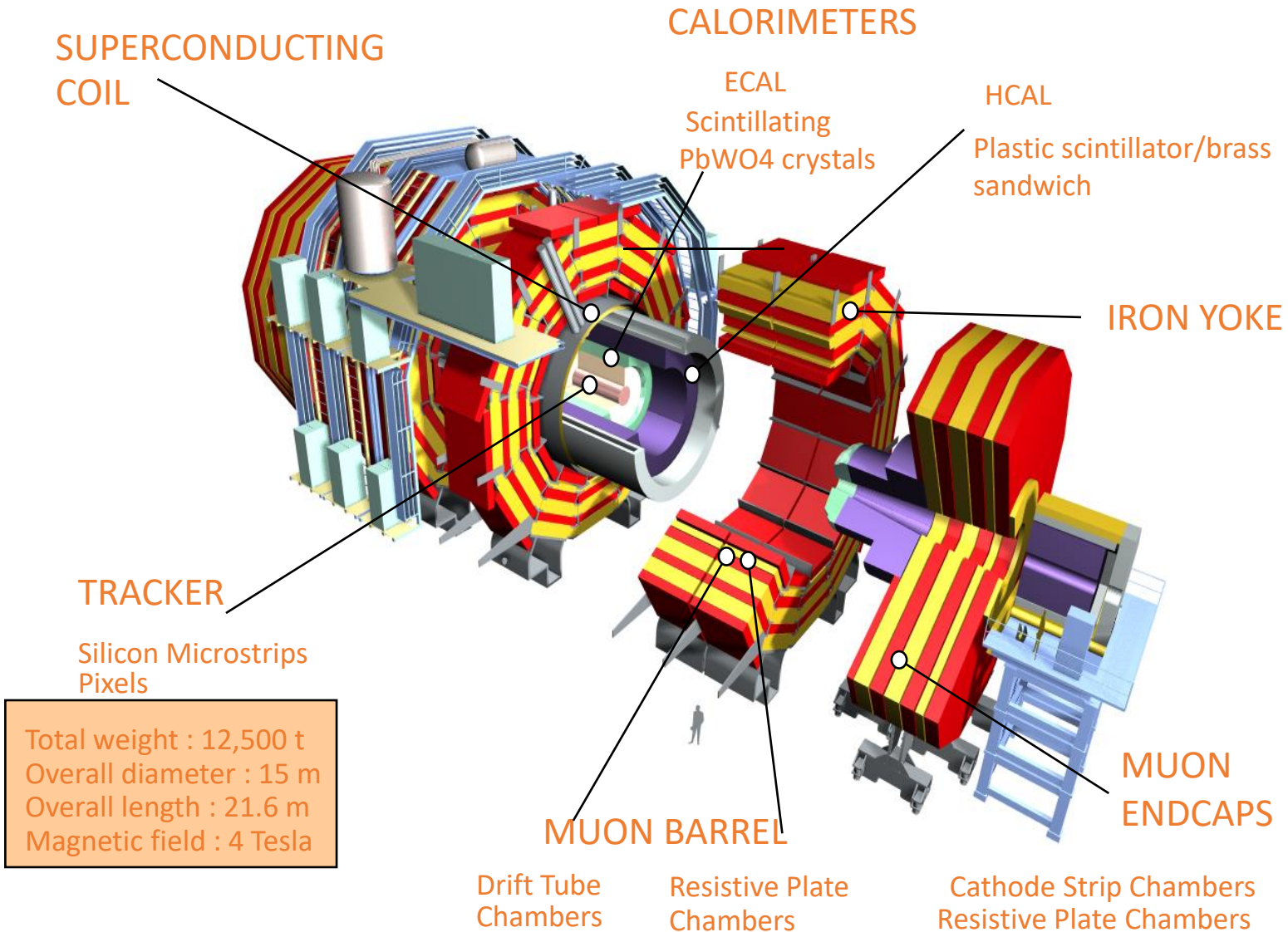
Neutrini:

Intergagiscono via interazione:
Debole

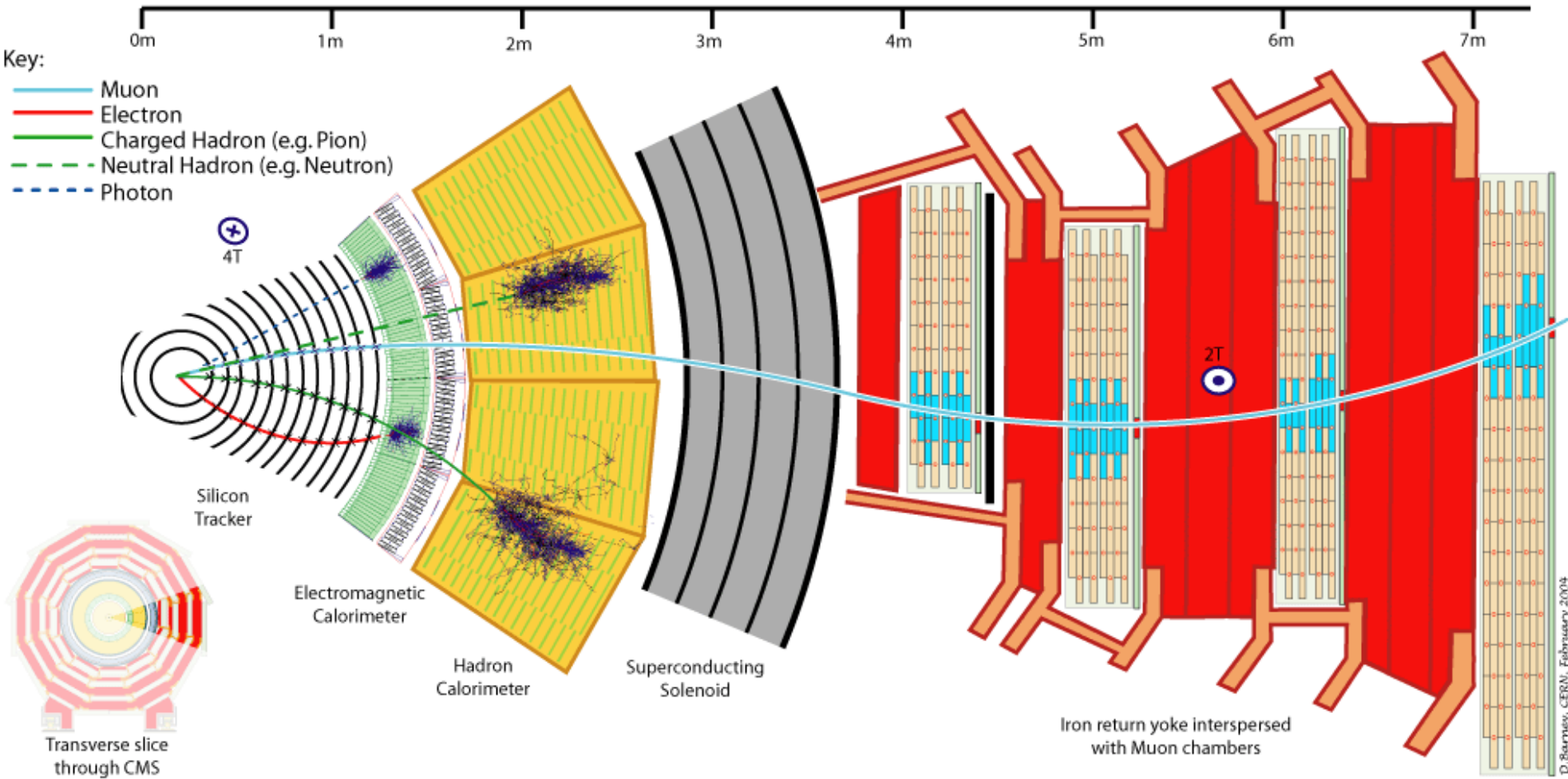
Il passaggio delle particelle

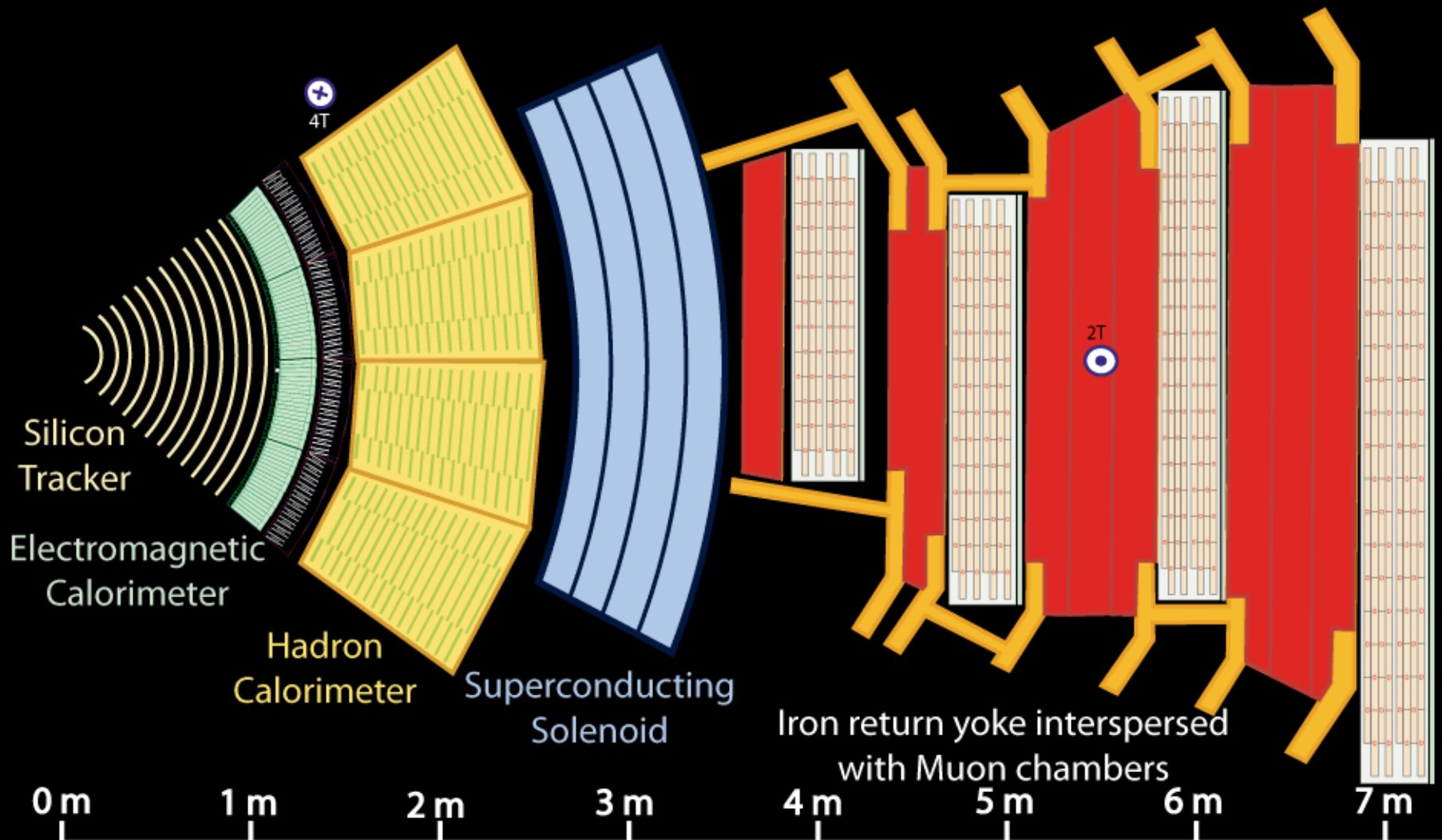


Exploded View of CMS



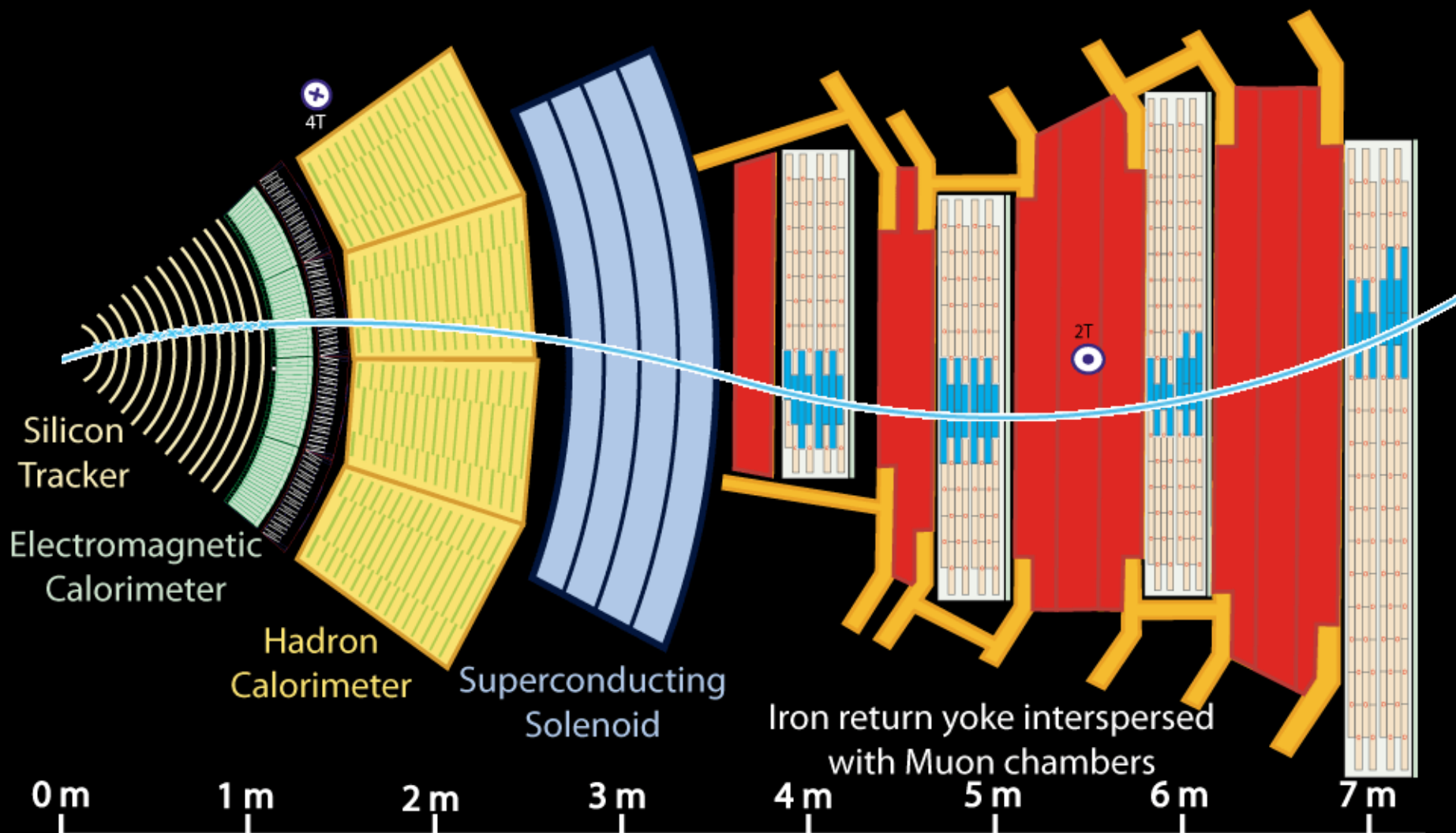
CMS a LHC





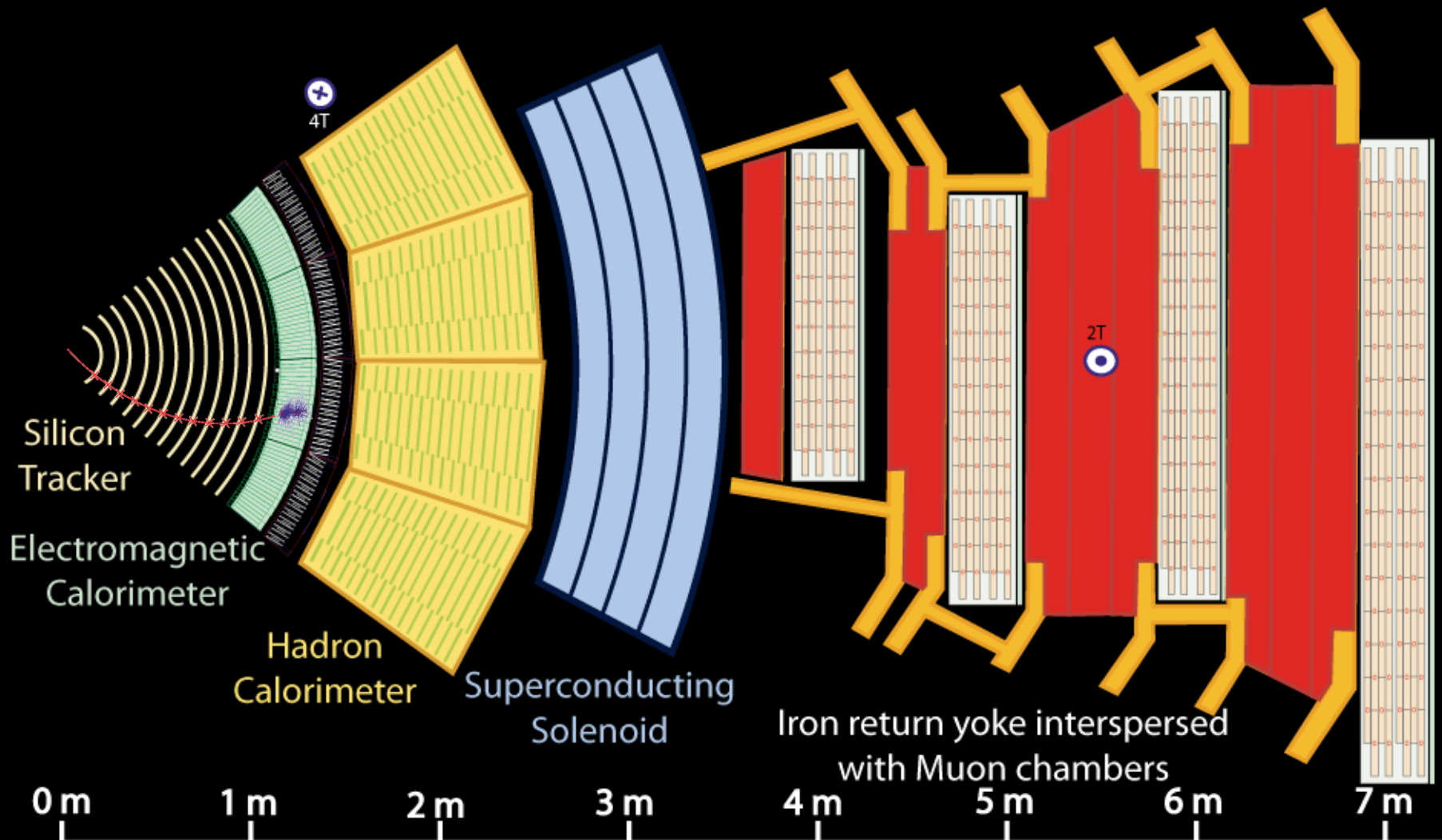
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

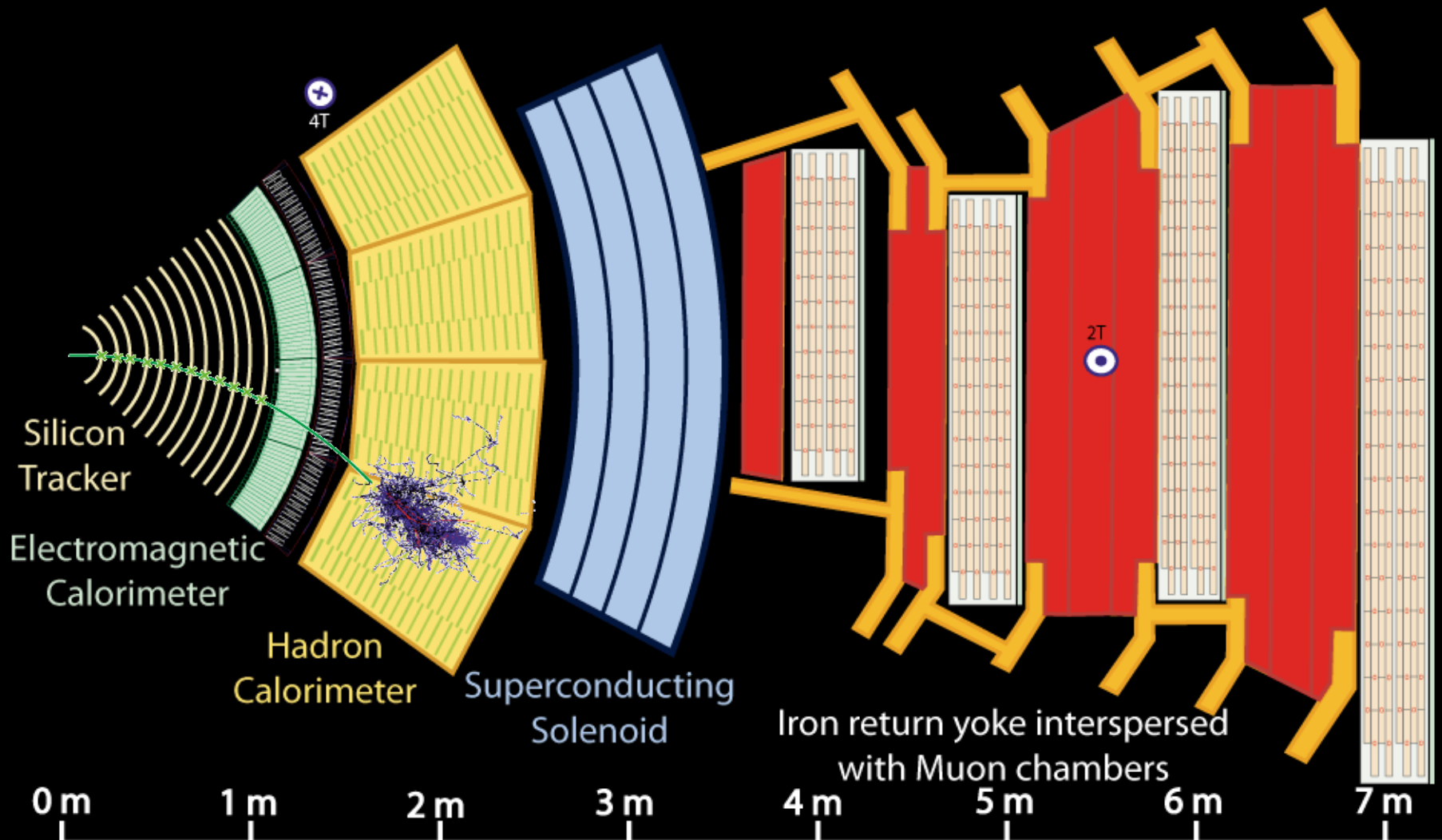
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

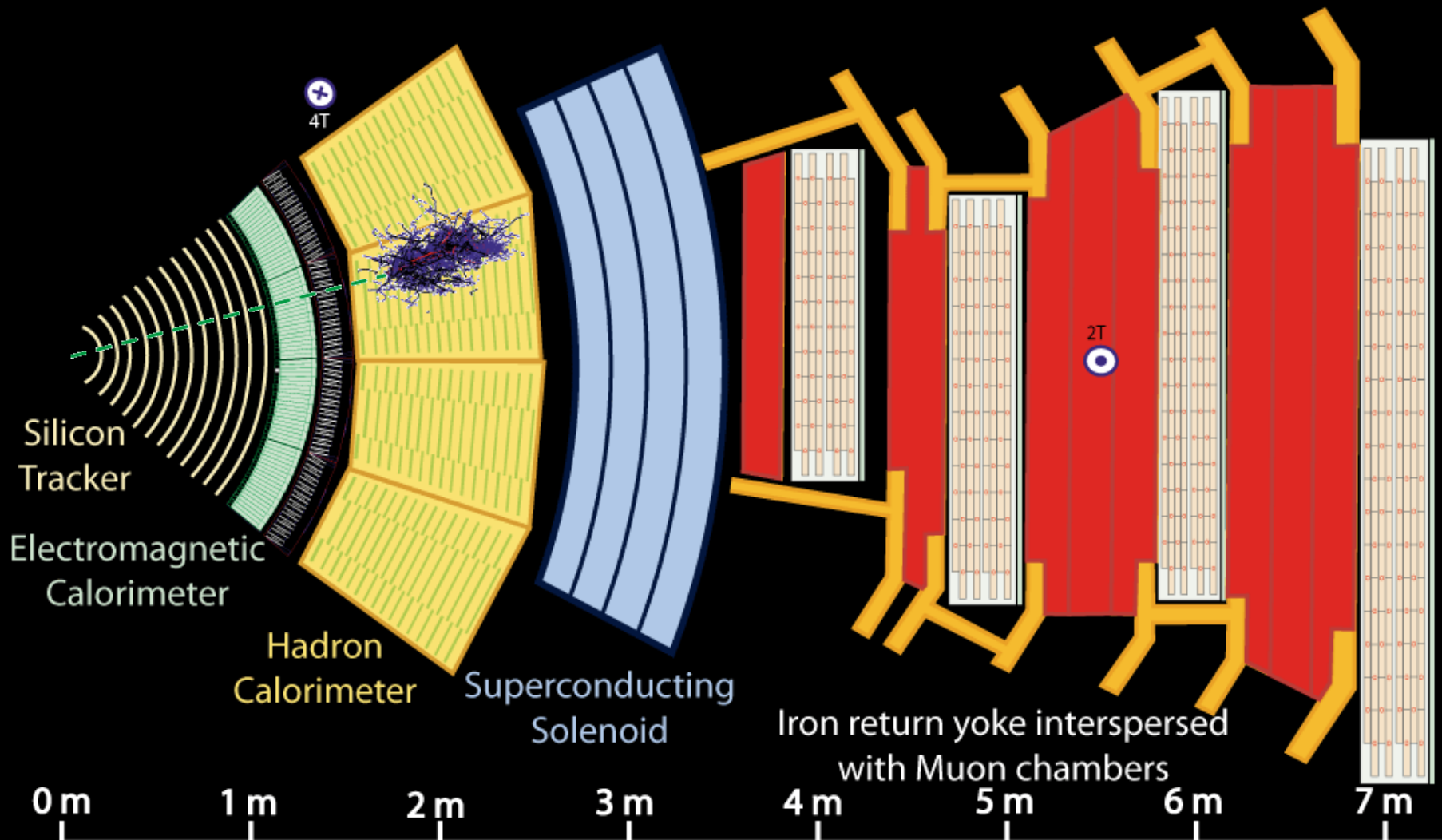
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



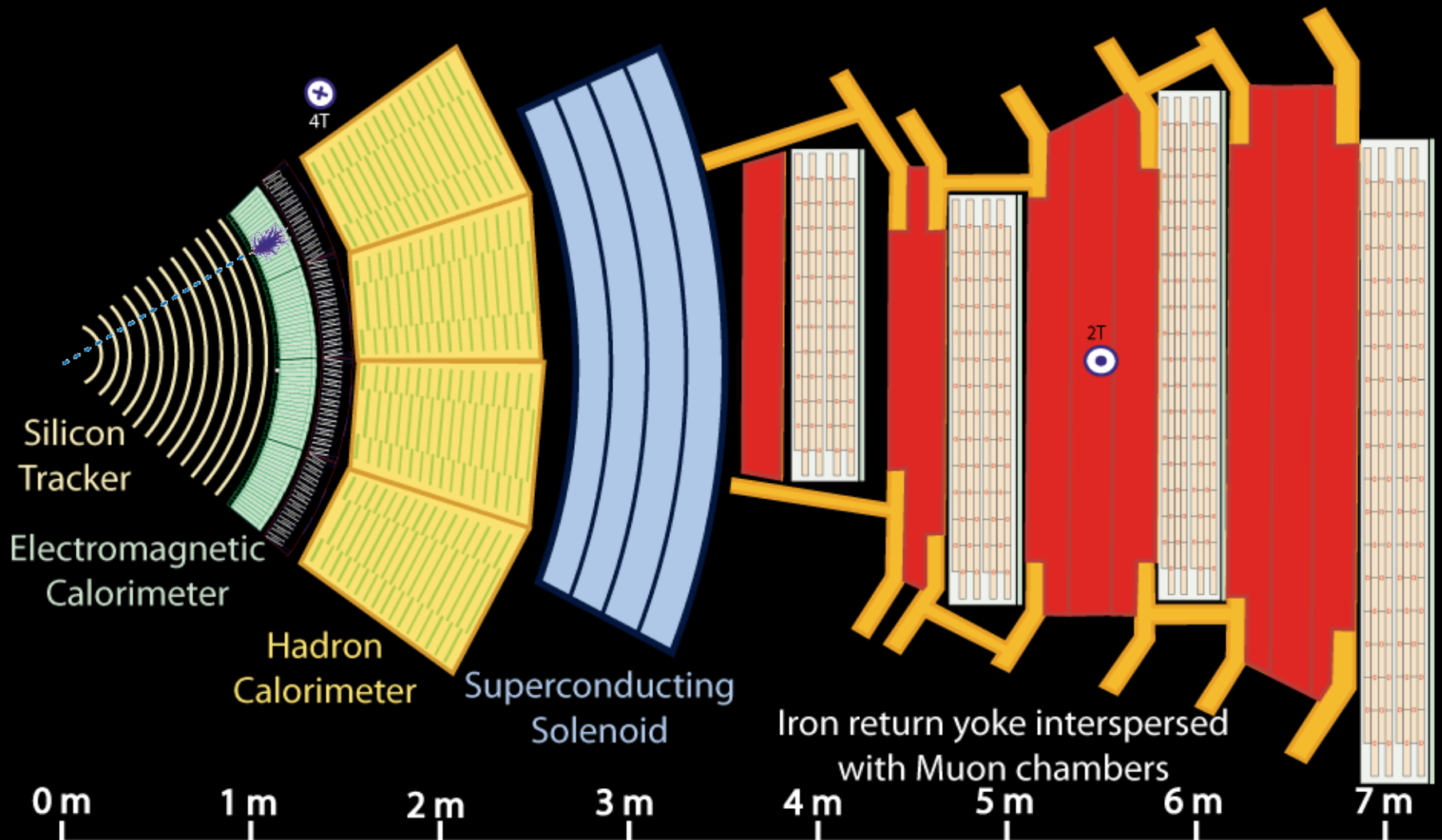
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- Photon
- Neutral Hadron (e.g. Neutron)



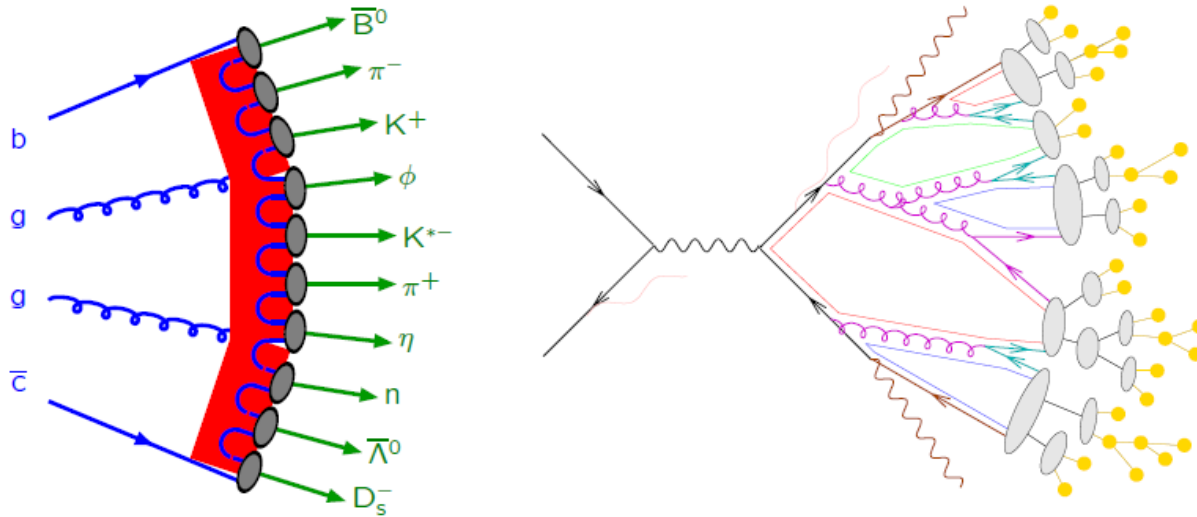
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

Ricostruzione degli “oggetti”: i jet

Nella realta' si osservano gli adroni, i quark non possono esistere “liberi”,
ma solo aggregati dentro gli adroni
(mesoni: particelle composte da 2 quark , barioni: particelle composte da 3 quark)

E' possibile ottenere le informazioni sul quark o sul gluone che ha partecipato
all'interazione studiando gli adroni che sono stati generati:



Gli adroni che provengono da un quark iniziale, tendono ad andare nella stessa direzione e dunque a associarsi in “getti” di particelle.

I JET sono dunque formati da adroni, elettroni, muoni, neutrini, fotoni etc...

Neutrino & energia mancante

Il neutrino non e' rivelabile perche' interagisce molto poco con la materia,

→ si manifesta come mancanza di energia e momento,

le sue caratteristiche sono ricostruibili dalla cinematica dell'evento:

Sommiamo tutte le particelle (energie e momenti): quello che otteniamo deve essere uguale a quello da cui siamo partiti (interazione protone protone). Se manca dell'energia o del momento -> un neutrino e' stato prodotto ed e' uscito dal rivelatore.

$$E(\text{protone} - \text{protone}) = \dot{\hat{a}} \text{Energia}(\text{particelle})$$

$$P_z(\text{protone} - \text{protone}) = \dot{\hat{a}} P_z(\text{particelle})$$

$$P_x(\text{protone} - \text{protone}) = \dot{\hat{a}} P_x(\text{particelle}) = 0$$

$$P_y(\text{protone} - \text{protone}) = \dot{\hat{a}} P_y(\text{particelle}) = 0$$

$$E(\text{neutrino}) = E(\text{protone} - \text{protone}) - \dot{\hat{a}} \text{Energia}(\text{particelle})$$

$$P_x(\text{neutrino}) = 0 - \dot{\hat{a}} P_x(\text{particelle})$$

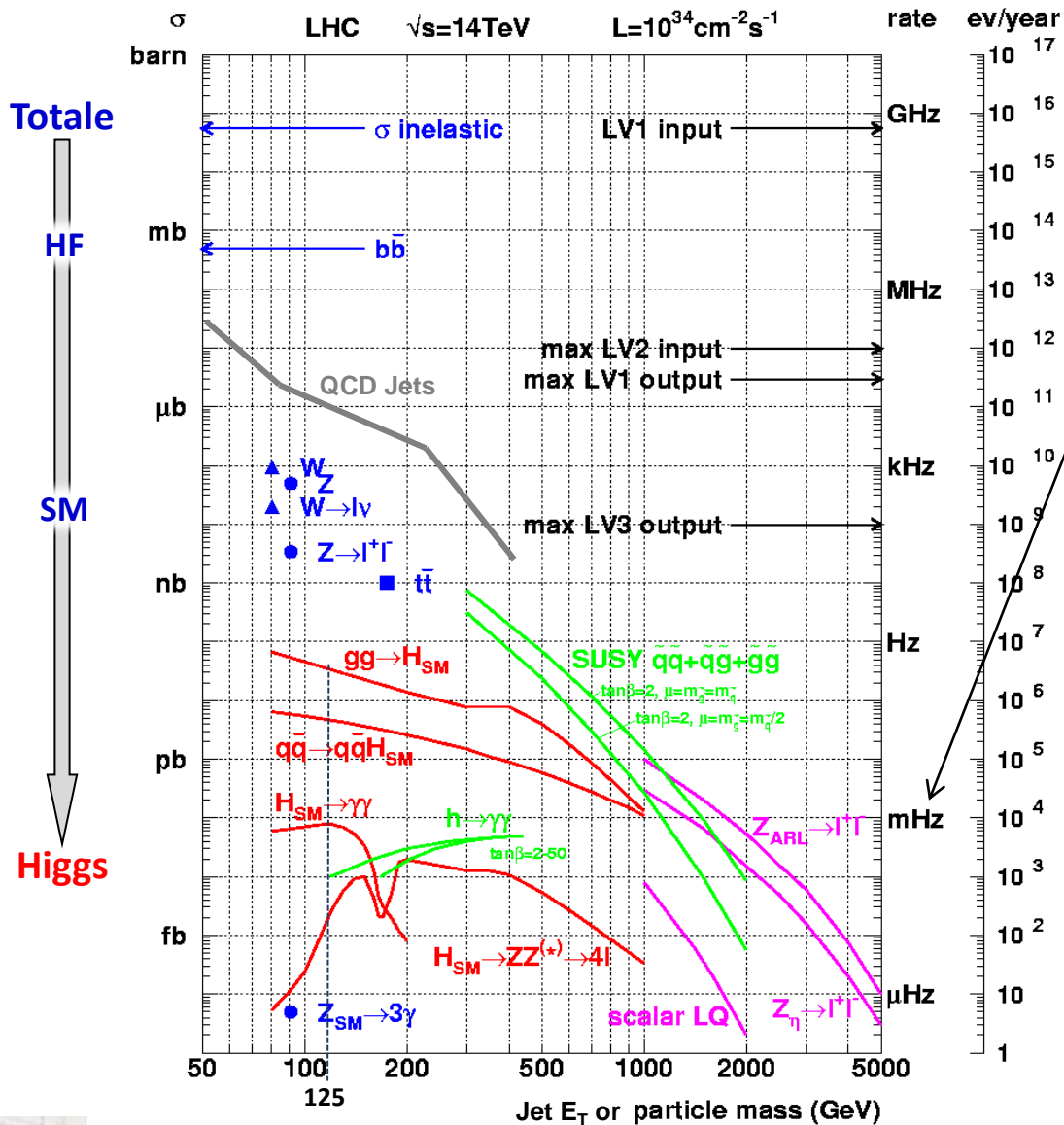
$$P_y(\text{neutrino}) = 0 - \dot{\hat{a}} P_y(\text{particelle})$$

Quante interazioni facciamo?

Sezioni d'urto σ (a 14 TeV):

La sezione d'urto e' la probabilita' che avvenga un certo evento, date le condizioni iniziali

12 ordini di grandezza



Processi molto rari
R=rate

$$R = \mathcal{L}\sigma$$

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{A}$$

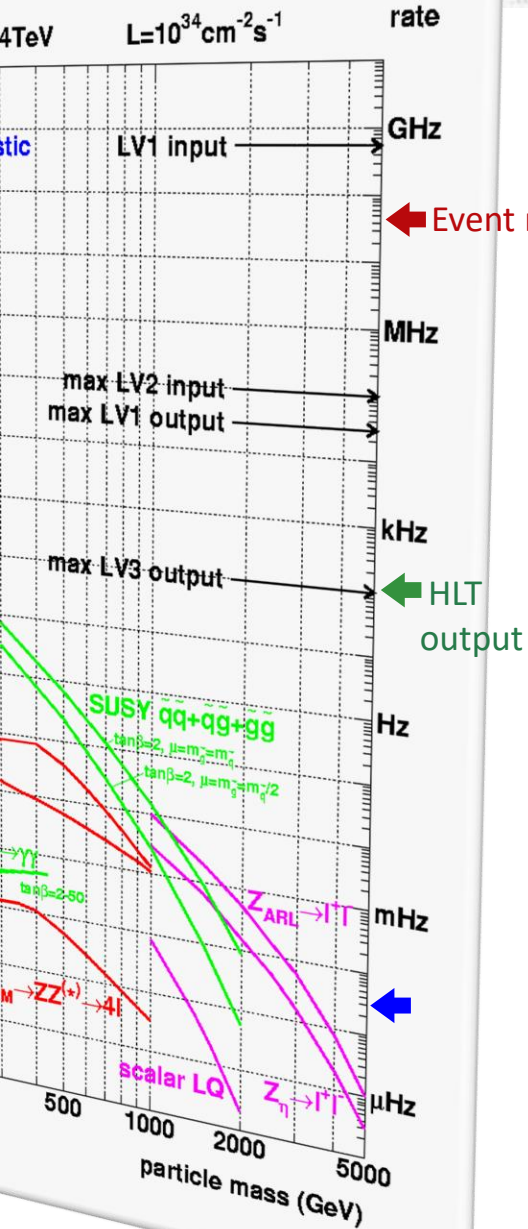
Numero di p nei fasci

Frequenza di collisione

Superficie in cui collidono

⇒ Si cerca la massima luminosità (\mathcal{L}) possibile

Event rate



- Rate di collisioni: **40 MHz**
- ovvero ogni 25 ns
- Dimensione eventi **$\sim 1 \text{ Mbyte}$**
 - Impossibile salvarli tutti!
 - Band width limit $\sim 100 \text{ Gbyte/s}$

TRIGGER: Selezione in tempo reale

- Per ridurre rate a $\sim 100 \text{ Hz}$ per scrittura
- A tutti gli effetti un'analisi di fisica degli eventi

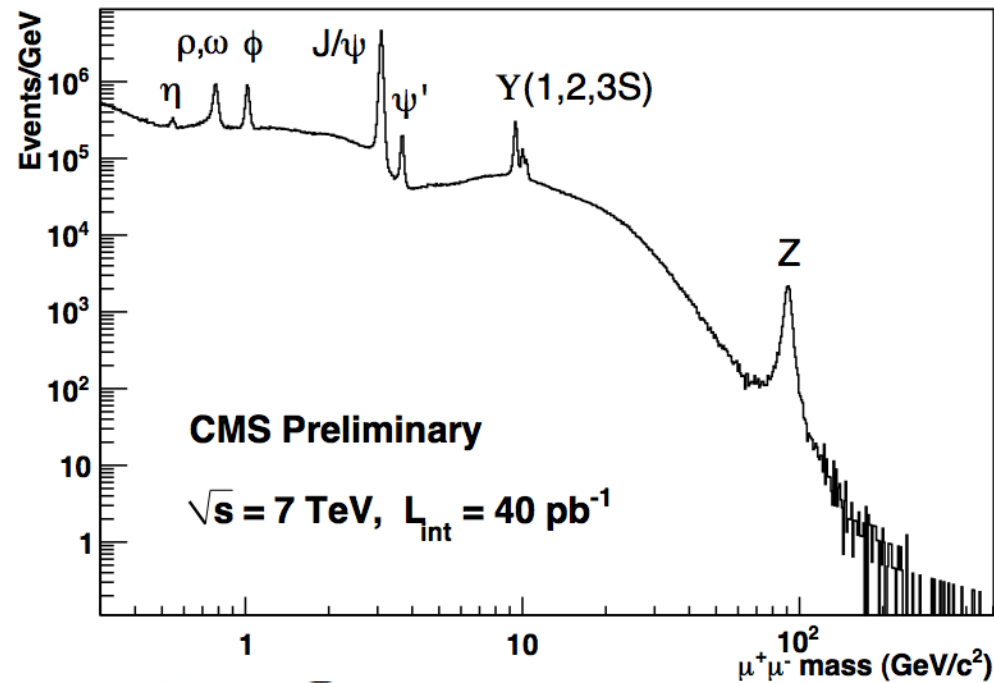
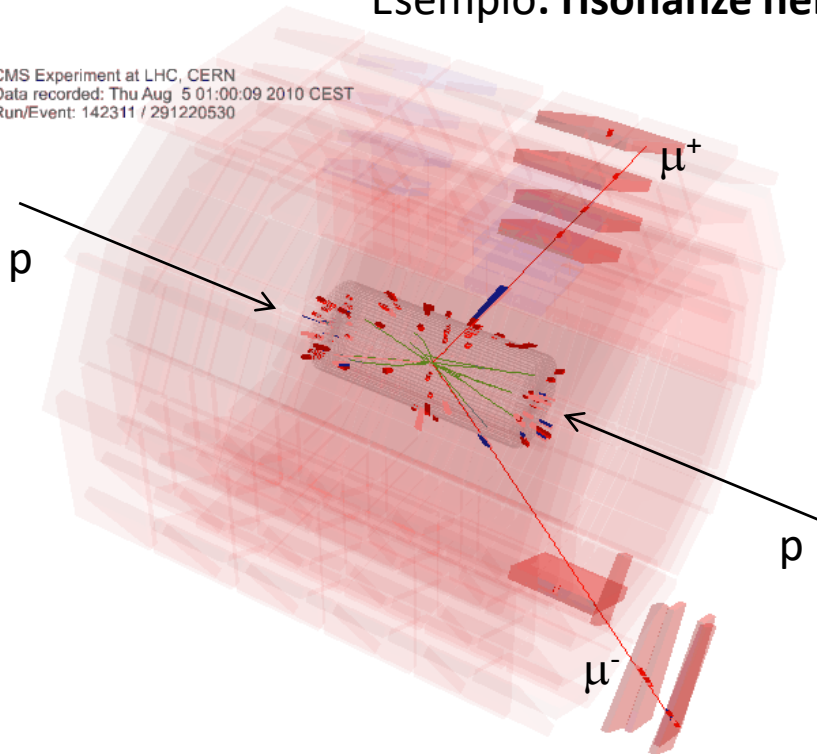
Analisi off-line: ulteriore selezione di 1 evento interessante ogni $\sim 10^6$

Eventi

- Le particelle "interessanti" decadono rapidamente
 - Dobbiamo cercare i loro prodotti di decadimento
 - Spesso in un fondo ("background") di eventi simili prodotti per es. da processi già noti

Esempio: risonanze nello spettro $\mu^+\mu^-$ in collisioni pp

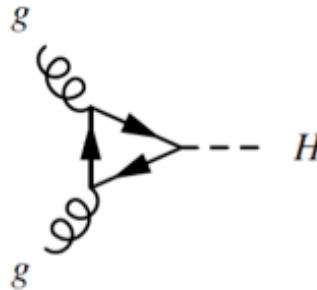
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Thu Aug 5 01:00:09 2010 CEST
Run/Event: 142311 / 291220530



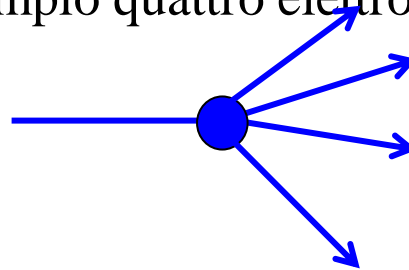
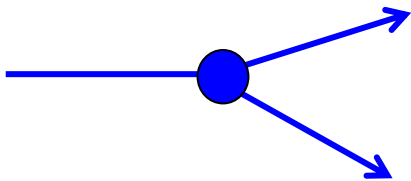
$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2\bar{E}_1 E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos \theta :$$

Produzione e decadimenti del bosone di Higgs

- Il bosone di Higgs puo' essere prodotto nella fusione di 2 dei gluoni che sono all'interno del protone:



- Il bosone di Higgs non e' una particella stabile
- Decade in particelle elementari piu' leggere
- Gli "stati finali" sono molteplici; i piu' importanti sono:
 - $H \rightarrow$ due fotoni ($H \rightarrow \gamma\gamma$)
 - $H \rightarrow$ quattro leptoni, per esempio quattro elettroni o quattro muoni ($H \rightarrow 4l$)

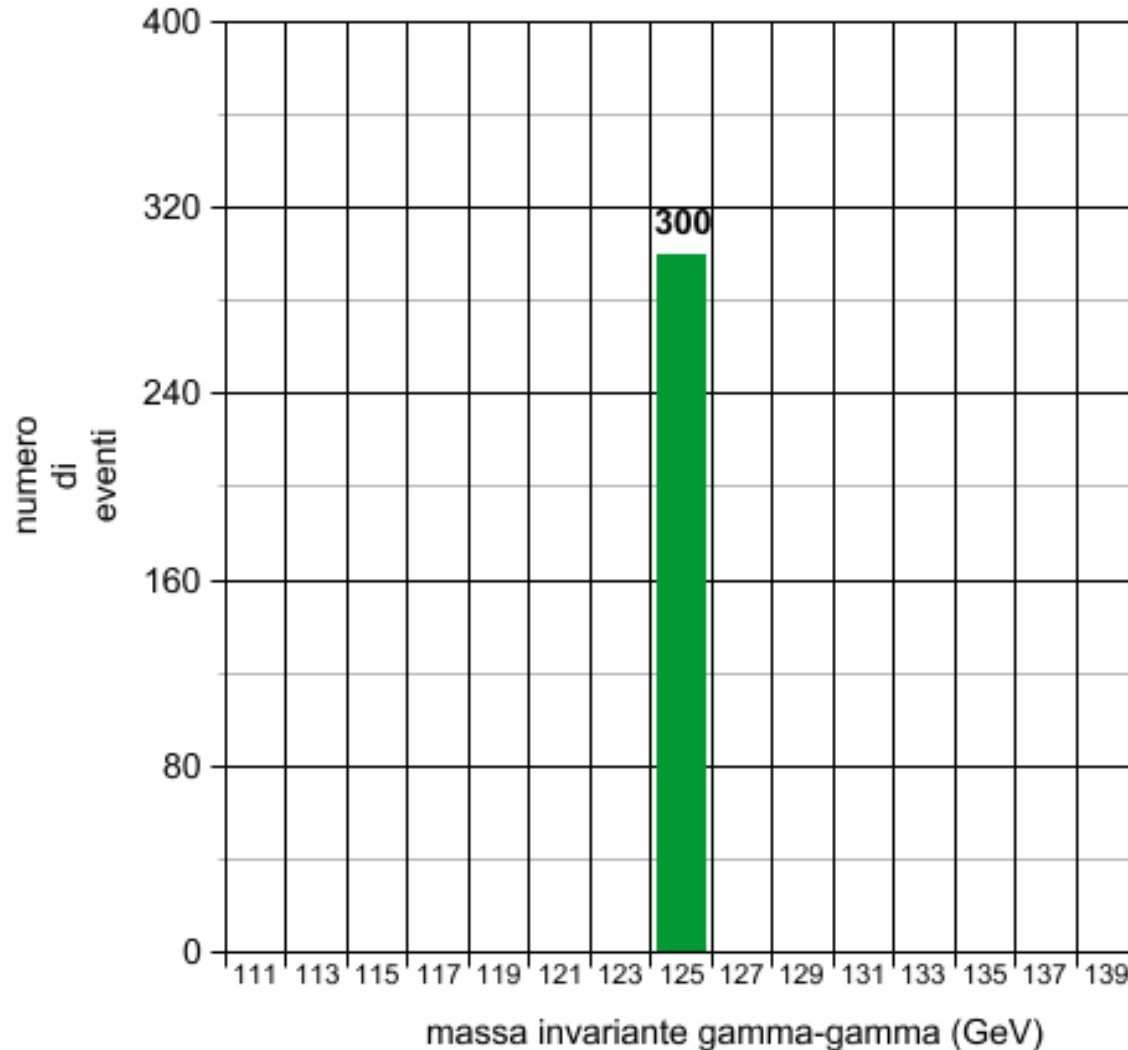


Produzione e decadimenti del bosone di Higgs

- La produzione e gli "stati finali" sono previsti con accuratezza dalla teoria
- **La teoria non fornisce previsione sulla massa del bosone di Higgs**
- Il bosone di Higgs, come tutte le particelle instabili, viene
- "ricostruito" partendo dai prodotti che ci aspettiamo dal suo
- decadimento
- **Nei rivelatori dobbiamo dunque poter ricostruire i prodotti di decadimento**
- **e con una precisione tale (sul momento) da poterli distinguere dagli altri eventi non interessanti, e dominanti.**

Decadimento di una particella di massa 125 GeV

istogramma di massa



Questa e' una simulazione

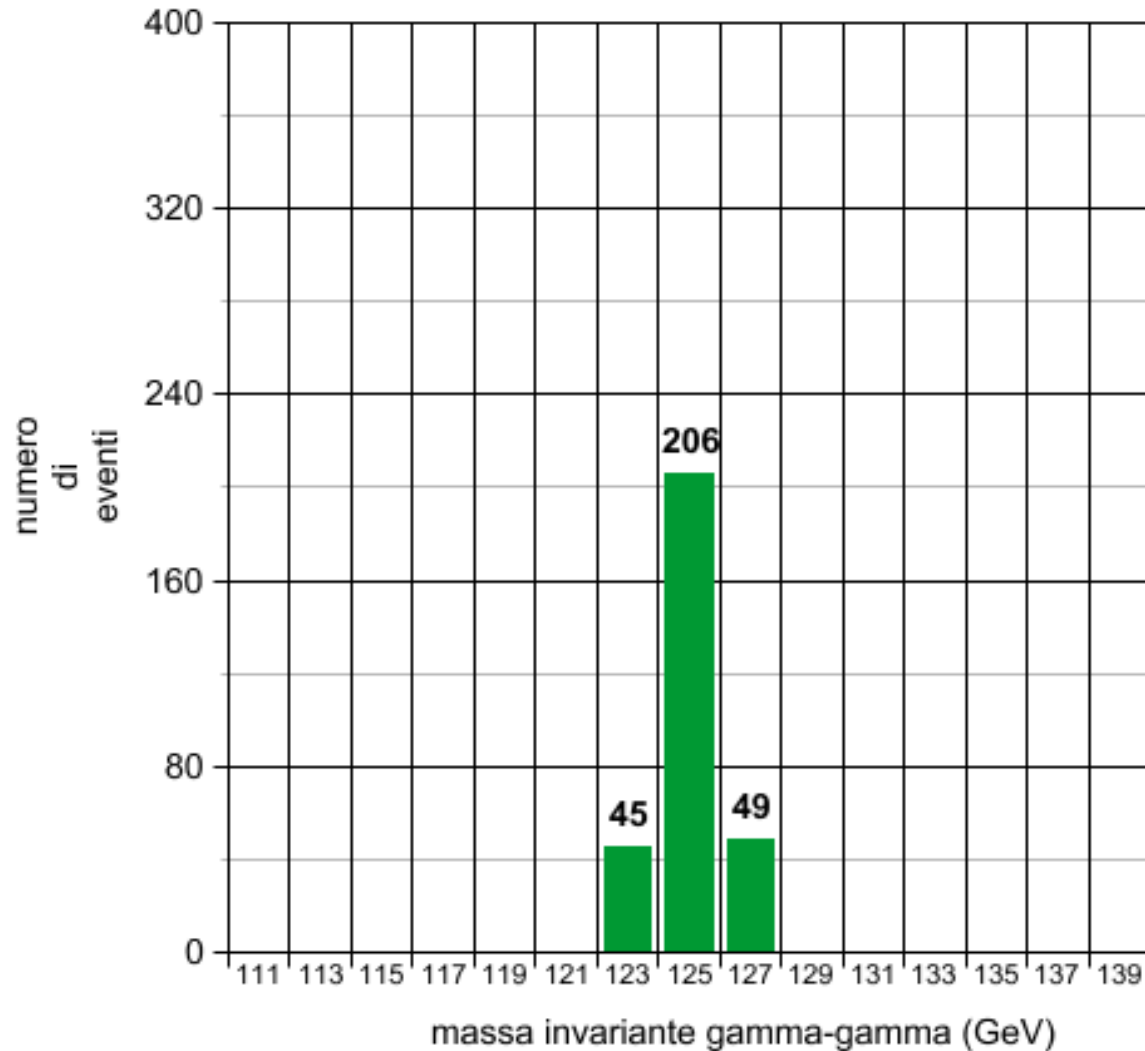
$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta :$$

Decadimento di una particella di massa 125 GeV

istogramma di massa



Questa e' una simulazione

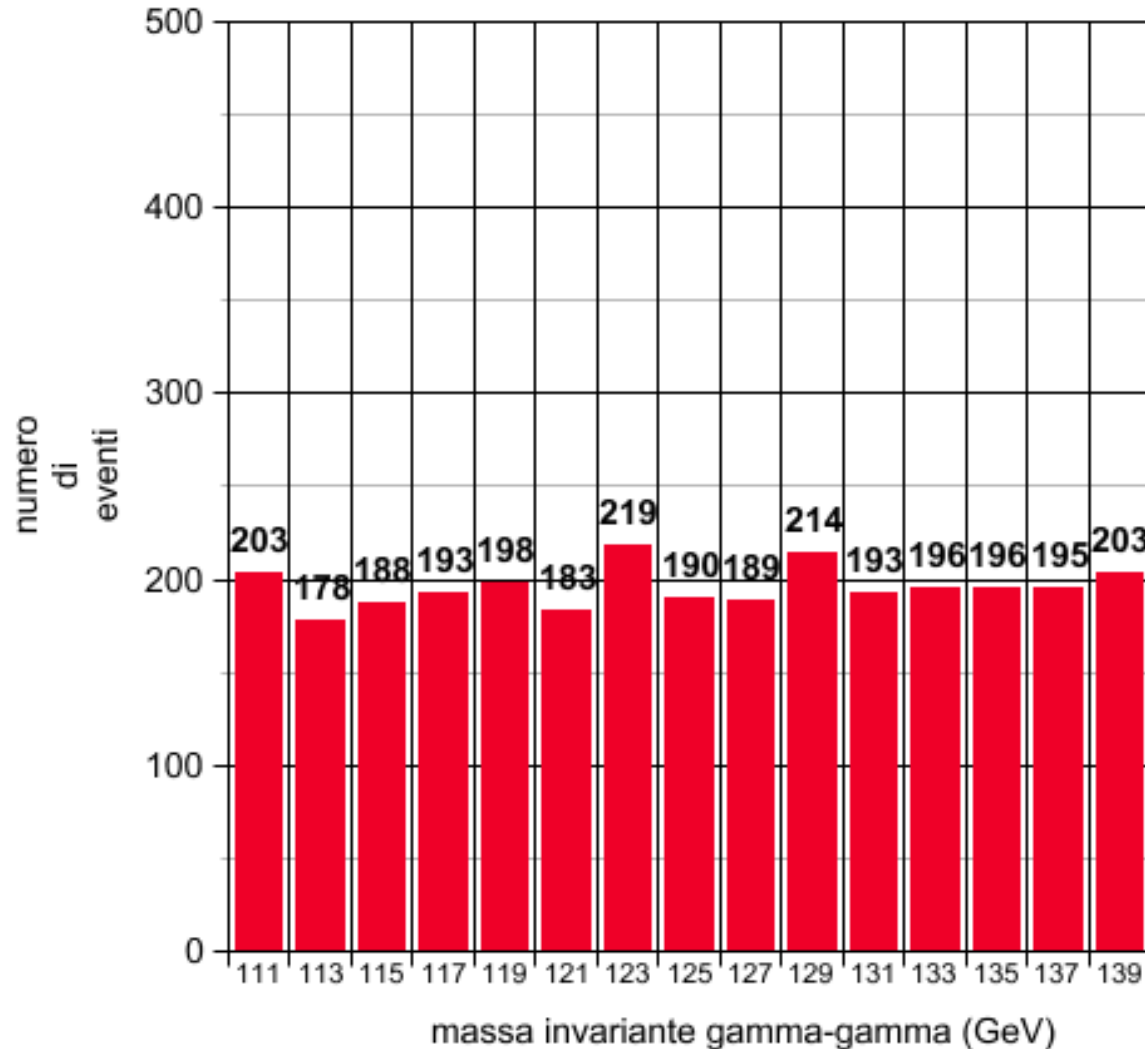
$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Il fondo

Massa di 2 fotoni non associati al decadimento di una particella

istogramma di massa

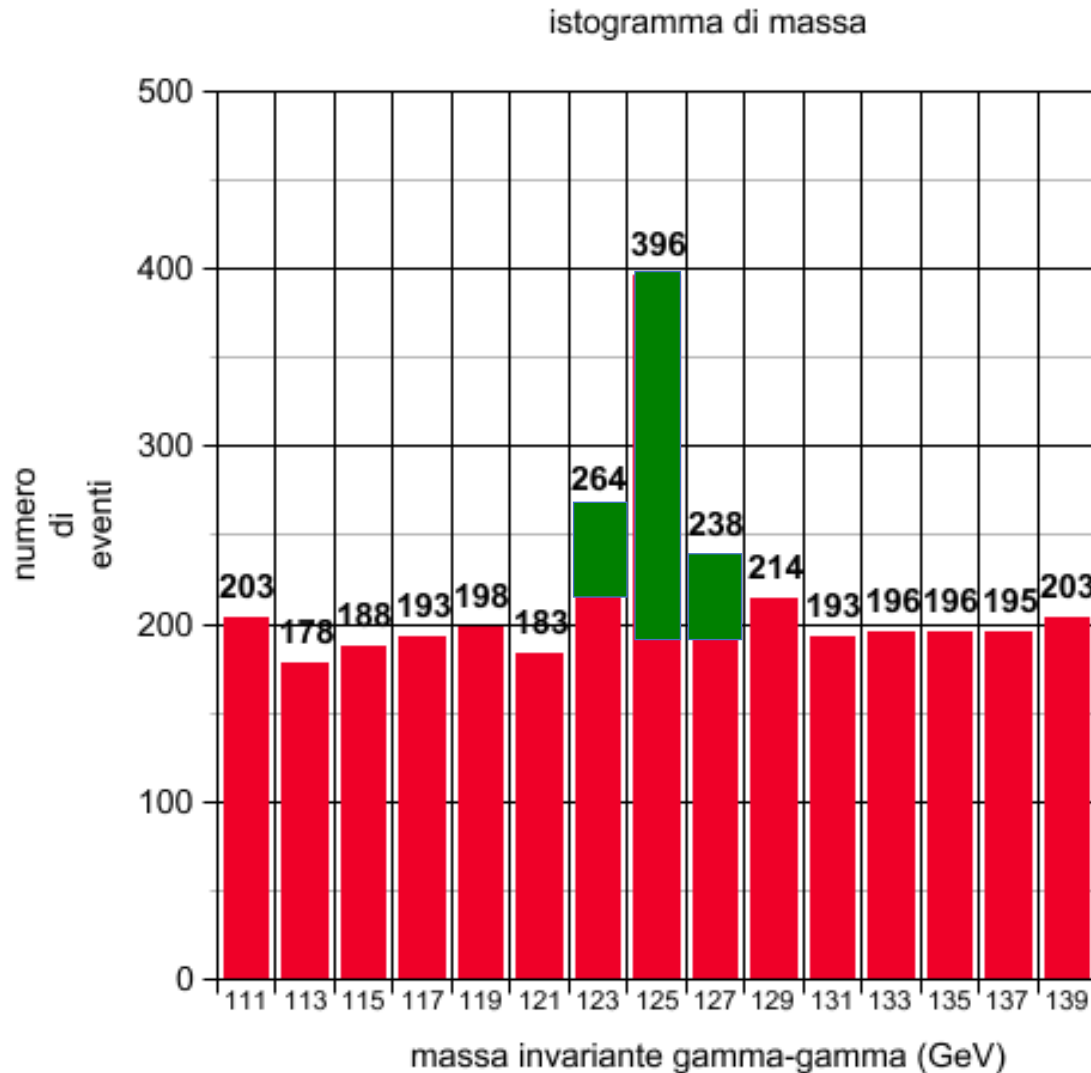


Questa e' una simulazione

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Fondo e Segnale

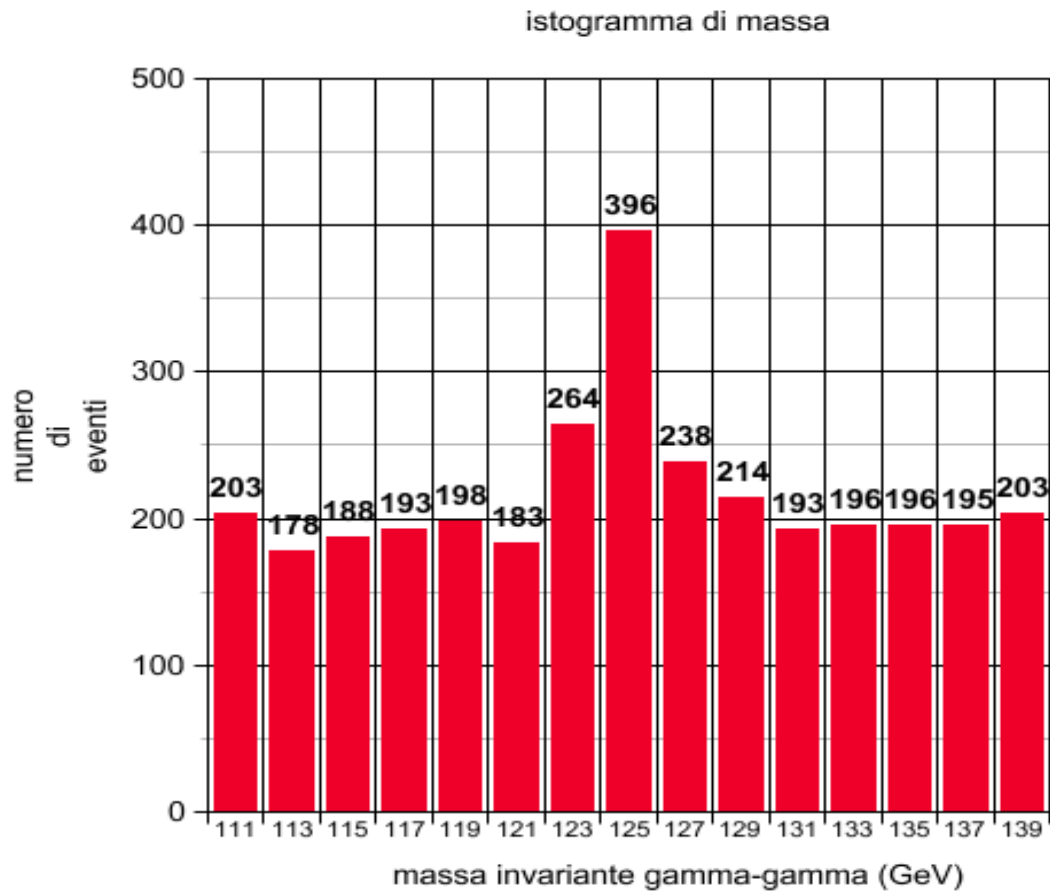


Questa e' una simulazione

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Fondo e Segnale

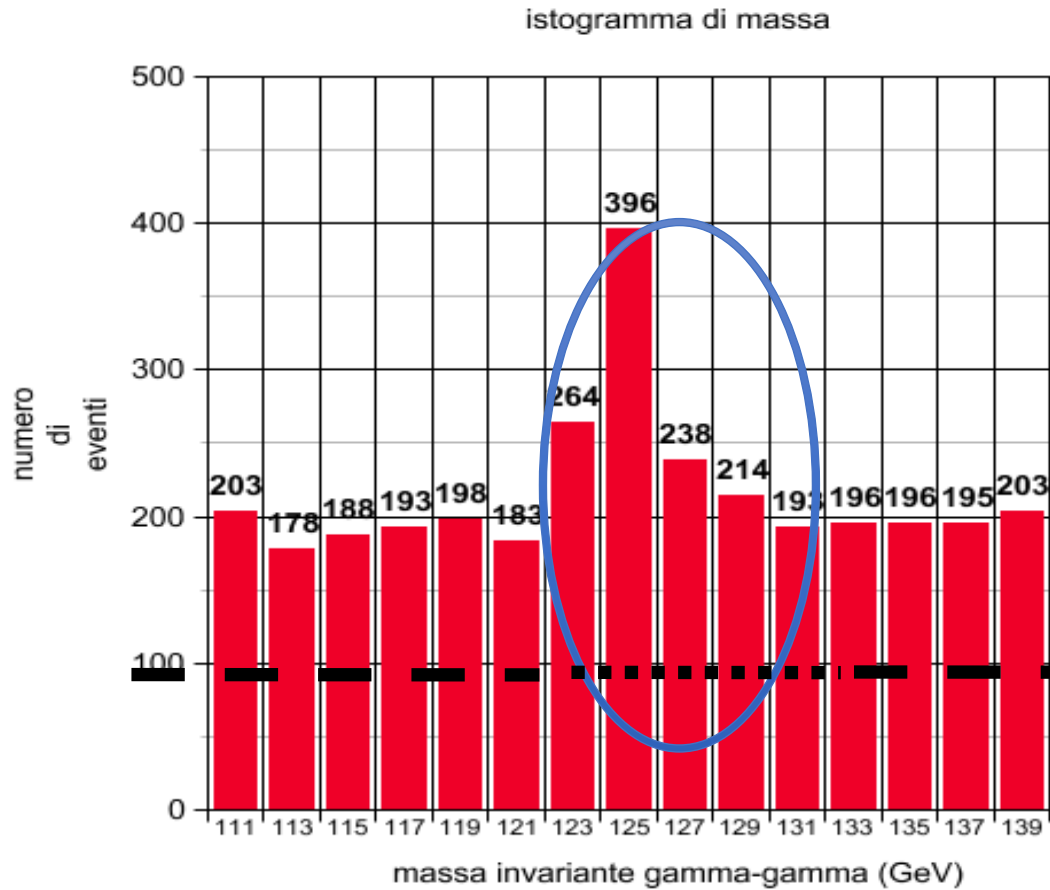


Questa e' una simulazione

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Fondo e Segnale



Questa e' una simulazione

$$p^\mu = \begin{pmatrix} E/c \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^0 \\ p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

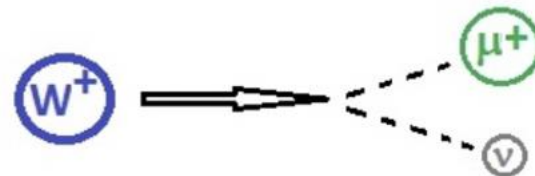
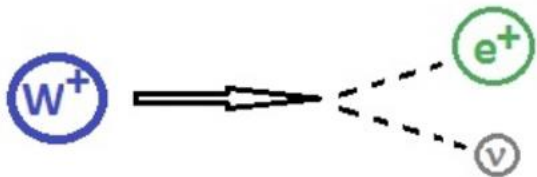
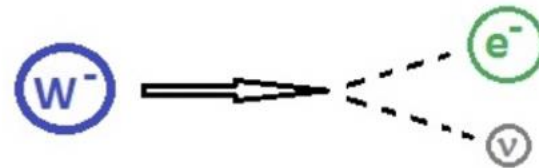
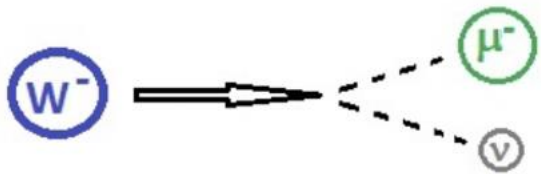
Come ricostruiamo le particelle

- Quando la Z o i W sono prodotti, decadono rapidamente (10^{-25} s)
- Dato che la Z ha carica nulla, decade in 2 leptoni di carica opposta, e della stessa famiglia per la conservazione del numero leptonico (e^+, e^-) or (μ^+, μ^-).

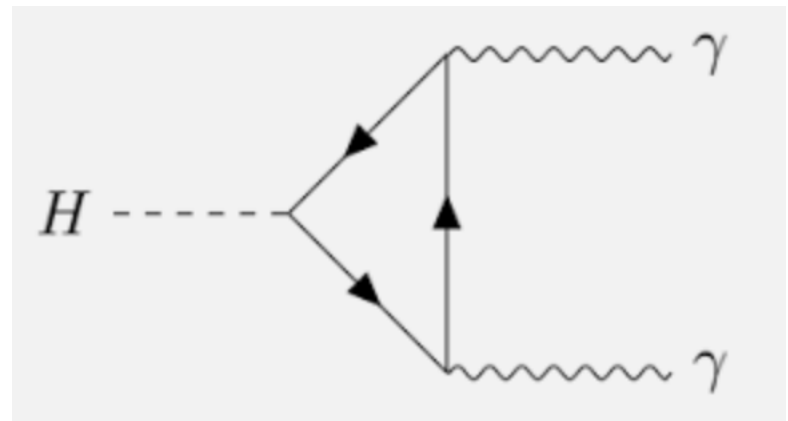
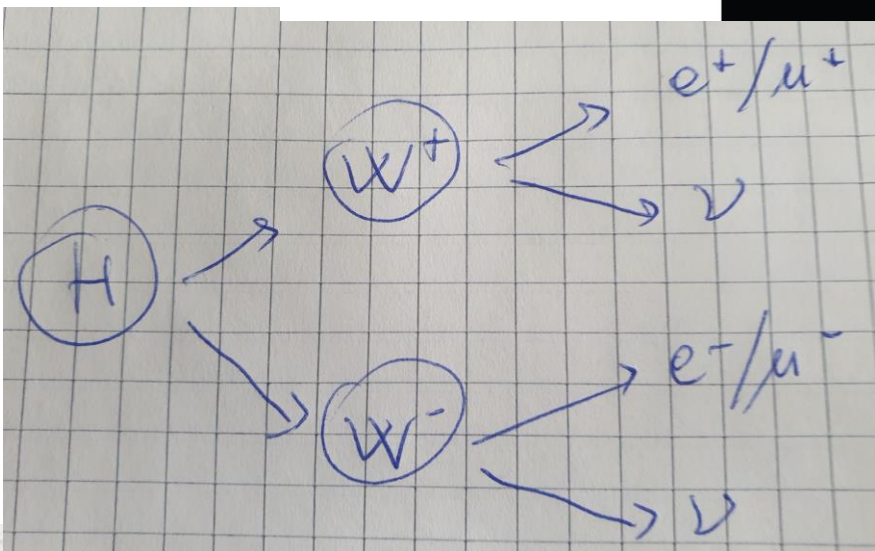
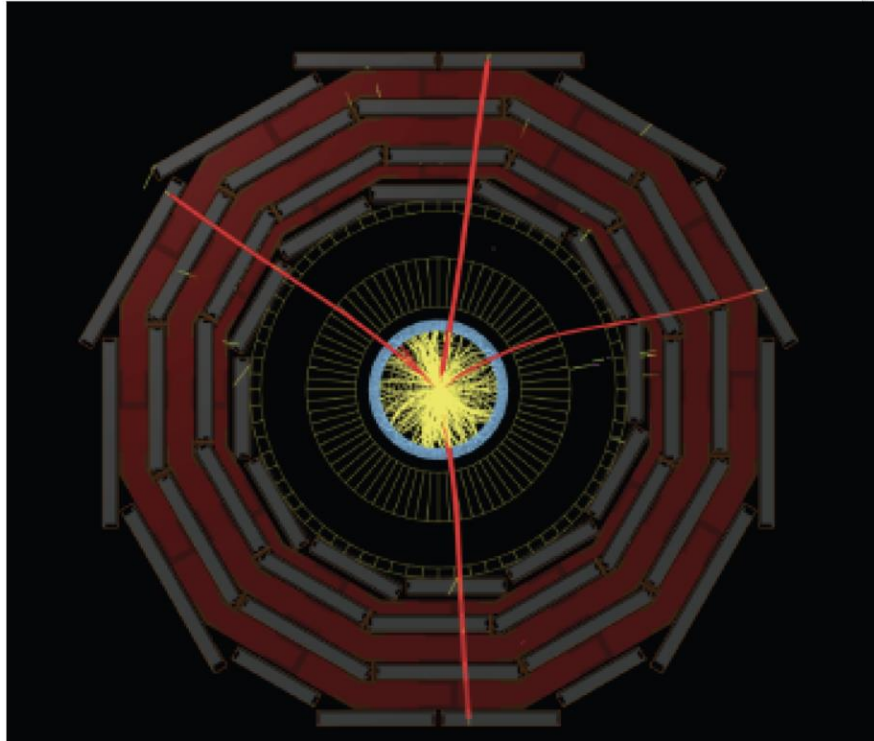
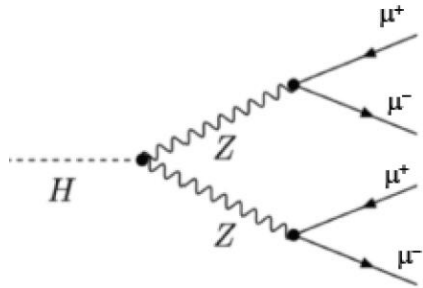


Come ricostruiamo le particelle

- Il bosone W ha una carica -1 o +1, quindi :
 - il W^- decade in un elettrone/muon + neutrino
 - il W^+ decade in un antielectron/antimuon + neutrino.

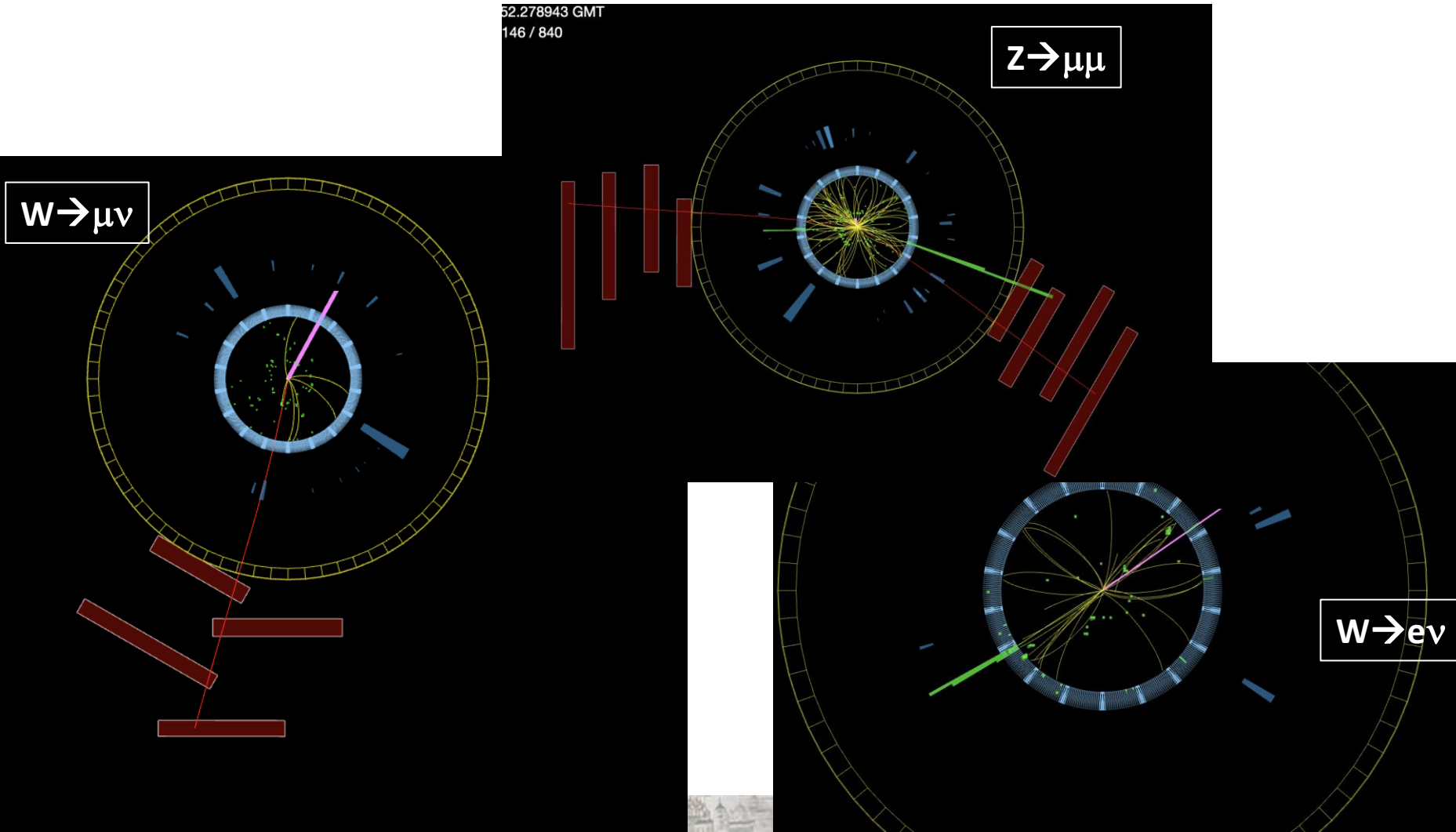


Il bosone di Higgs



Come riconosciamo le particelle

- Elettrone \rightarrow verde (traccia+sciame elettromagnetico)
- Muone \rightarrow rosso (traccia che attraversa tutto il rivelatore CMS)
- Neutrino/energie mancante \rightarrow rosa



Inoltre, per riconoscere gli eventi

- Le particelle di alta massa decadono in particelle di alto p_T

$$p_T \sim M/2$$

- Le particelle ad alto p_T sono curvate poco dal campo magnetico

$$r = \frac{mv}{qB}$$

- La massa della particella:

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos \theta :$$

$$\text{ou } \sim M_X^2 = 2\vec{p}_{T1} \cdot \vec{p}_{T2} (1 - \cos \phi_{12})$$

Ovvero: massa grande \rightarrow **p_T alto** e **grande angolo** tra le particelle

- Se c'è un neutrino (vettore ROSA): NON POTETE CALCOLARE LA MASSA, ma solo determinare la carica del leptone presente.

Massa et impulso trasverso

MASSA

Z	~91 GeV	pT (e,mu) ~ 45 GeV
W+W-	~80 GeV	pT (e,mu) ~ 40 GeV pt (neutrino) ~ 40 GeV
H	~125 GeV	E(gamma) ~ 60 GeV pT(e,mu) ~ 5-45 GeV

“ZOO”

J/ψ(1S)	3.01
ψ(2S)	3.69
ψ(4160)	4.19

η ^b (1S)	9.40
Υ(1S)	9.46
Υ(2S)	10.02
Υ(3S)	10.36

W+ et W-

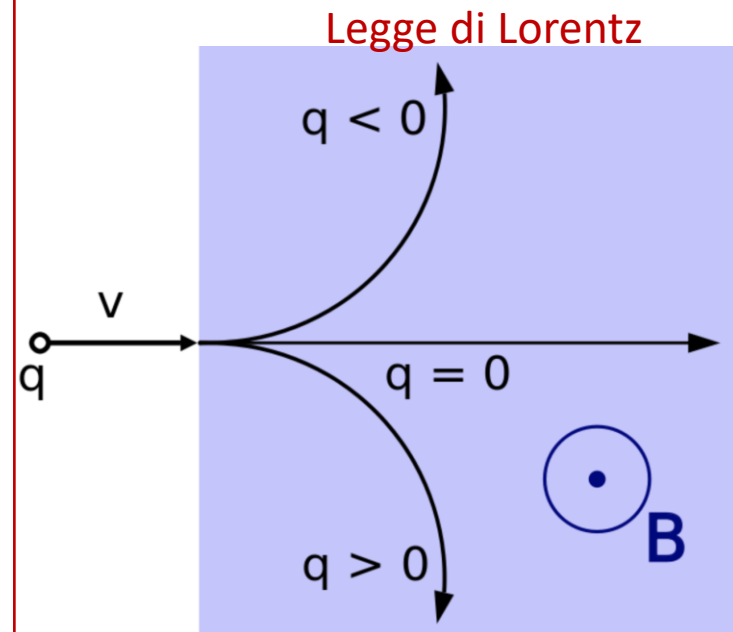
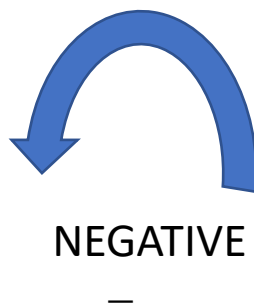
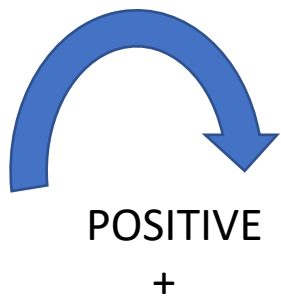
- Una misura molto interessante che possiamo fare è il rapporto:

$$W+ / W -$$

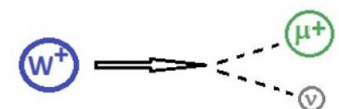
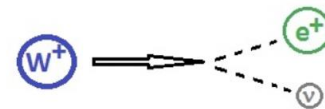
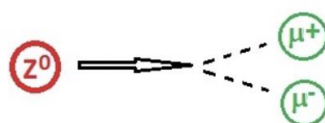
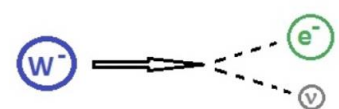
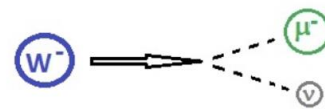
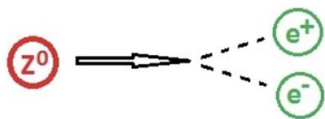
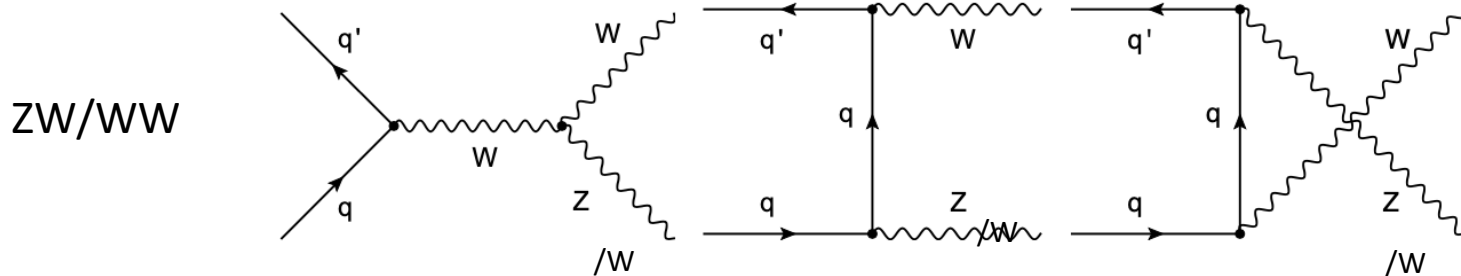
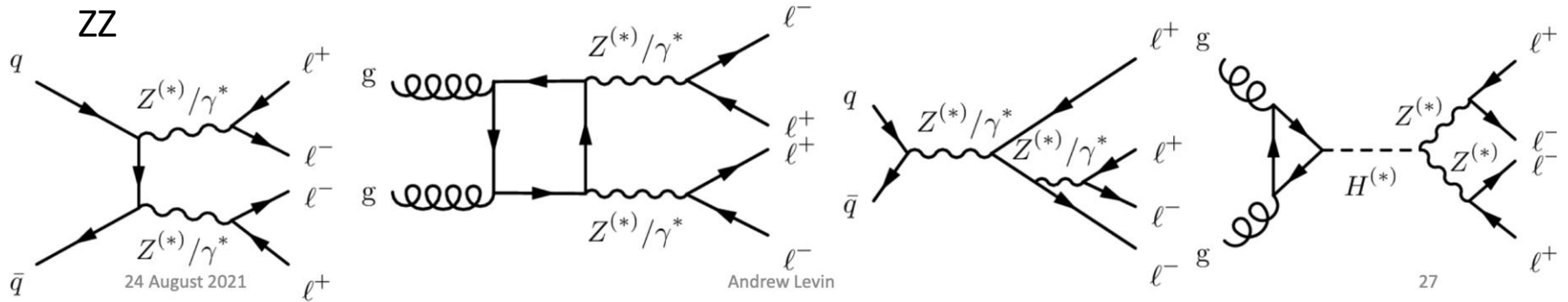
ci indica la composizione in quark del protone

$$pp \rightarrow W+ / W-$$

- Quindi dovrete determinare la carica dei W (W+ o W-)
(ovvero la carica del leptone)



Stato finale a 4 leptoni

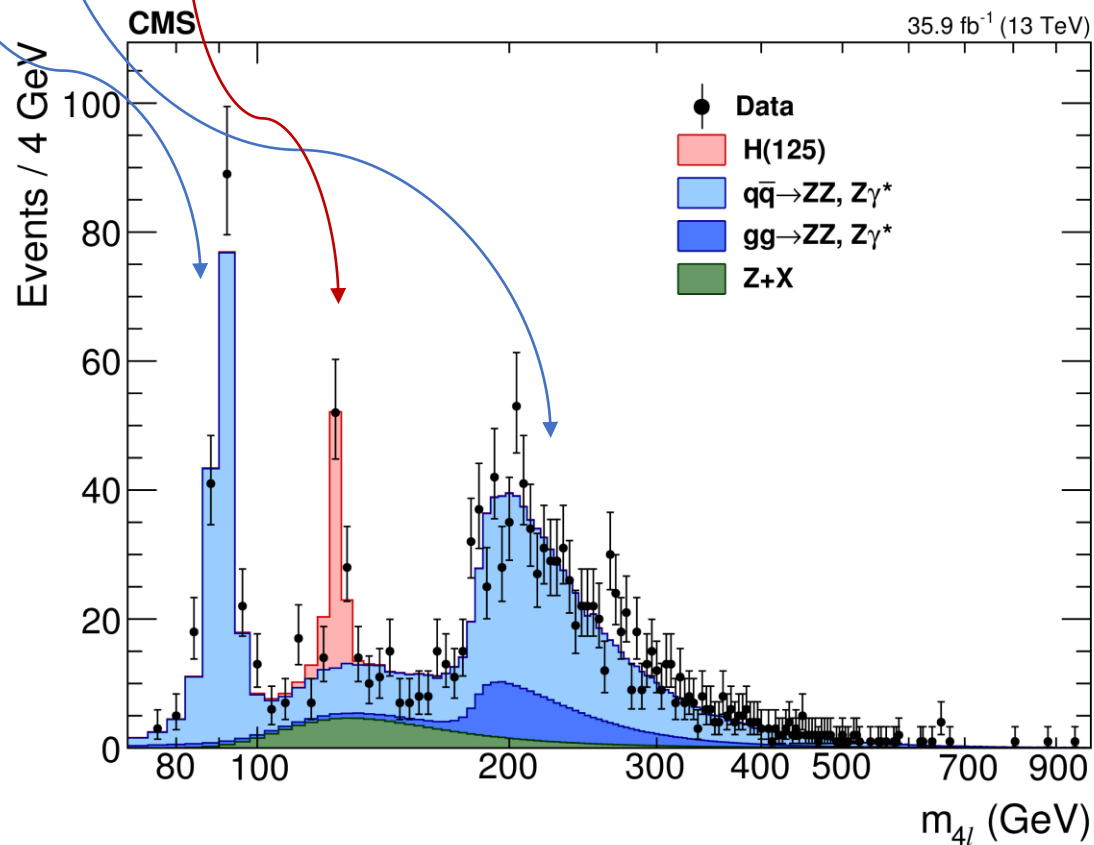


p.s. Se **2 W** sono stati prodotti, e dunque 2 neutrini → **1 solo vettore rosa**

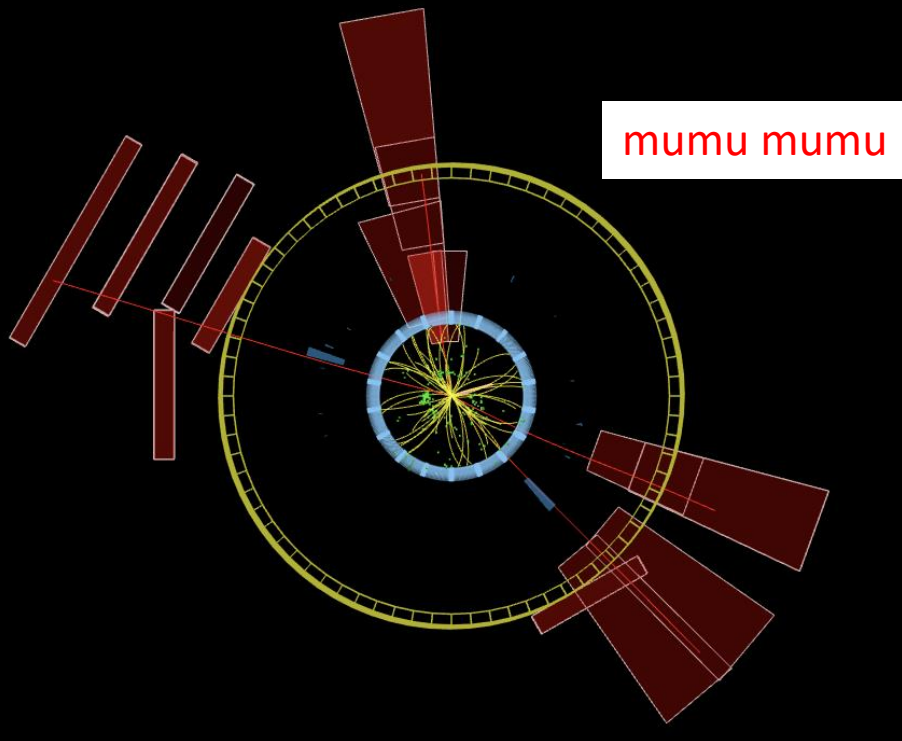
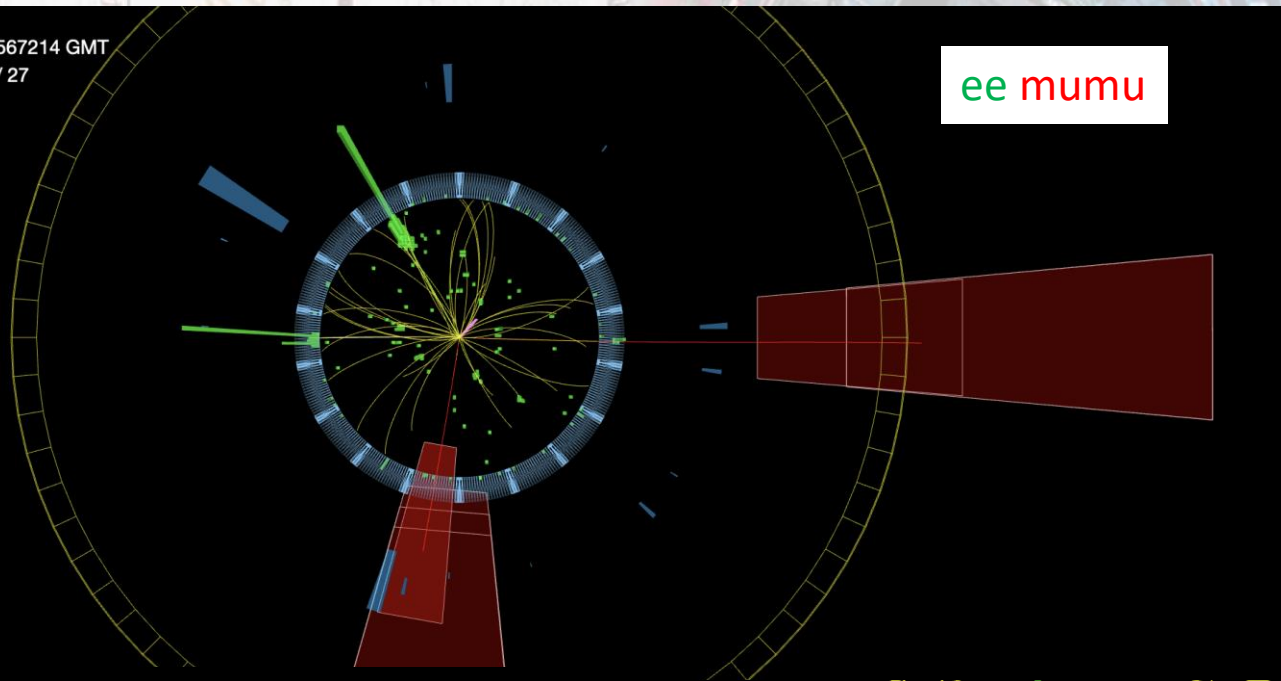
Eventi ZZ, ZW e WW

- Troverete molti eventi a 4 leptoni (carichi e neutri)

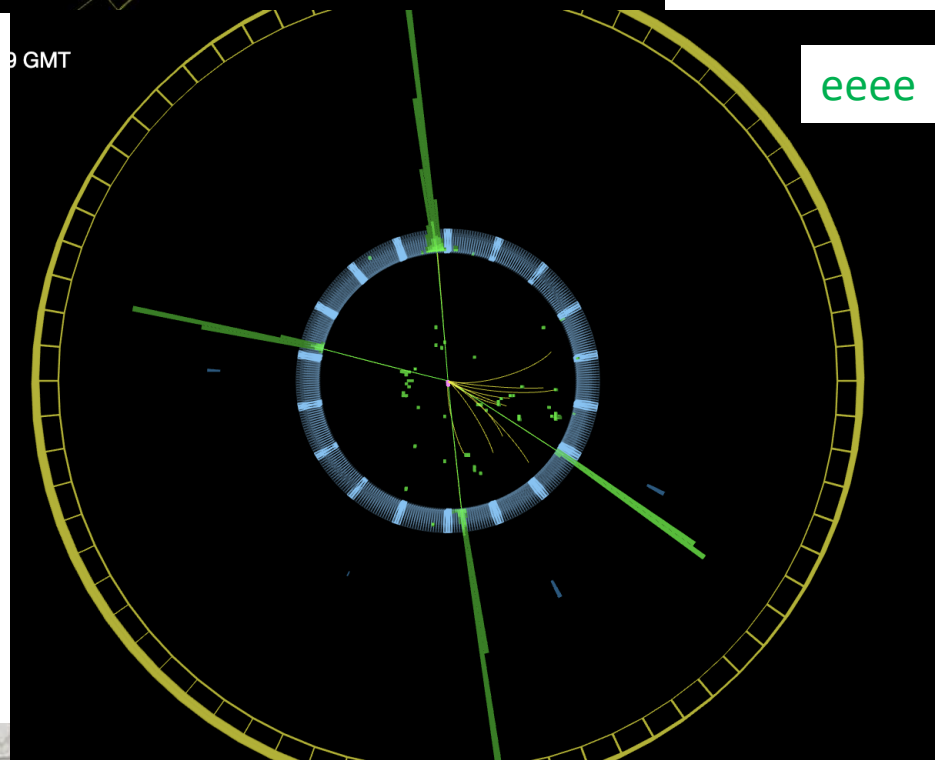
- Z, ZZ, ou WW ou WZ,
- ou a Higgs \rightarrow WW / ZZ



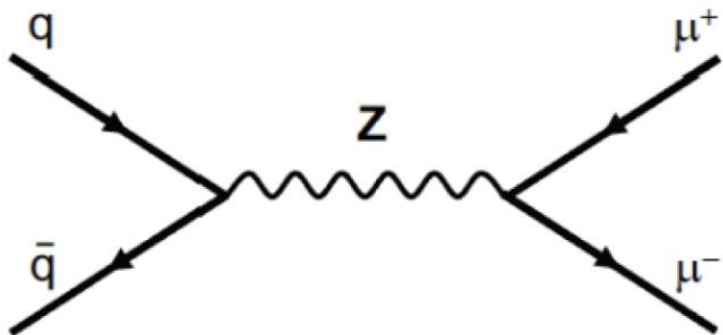
4.567214 GMT
1 / 27



9 GMT



Z → 2 muons



Z 2muons

$pT_1 = 43 \text{ GeV}$

$pT_2 = 39,9 \text{ GeV}$

$\eta_1 = 0,67$

$\eta_2 = 0,8$

$Q_1 = -1$

$Q_2 = +1$

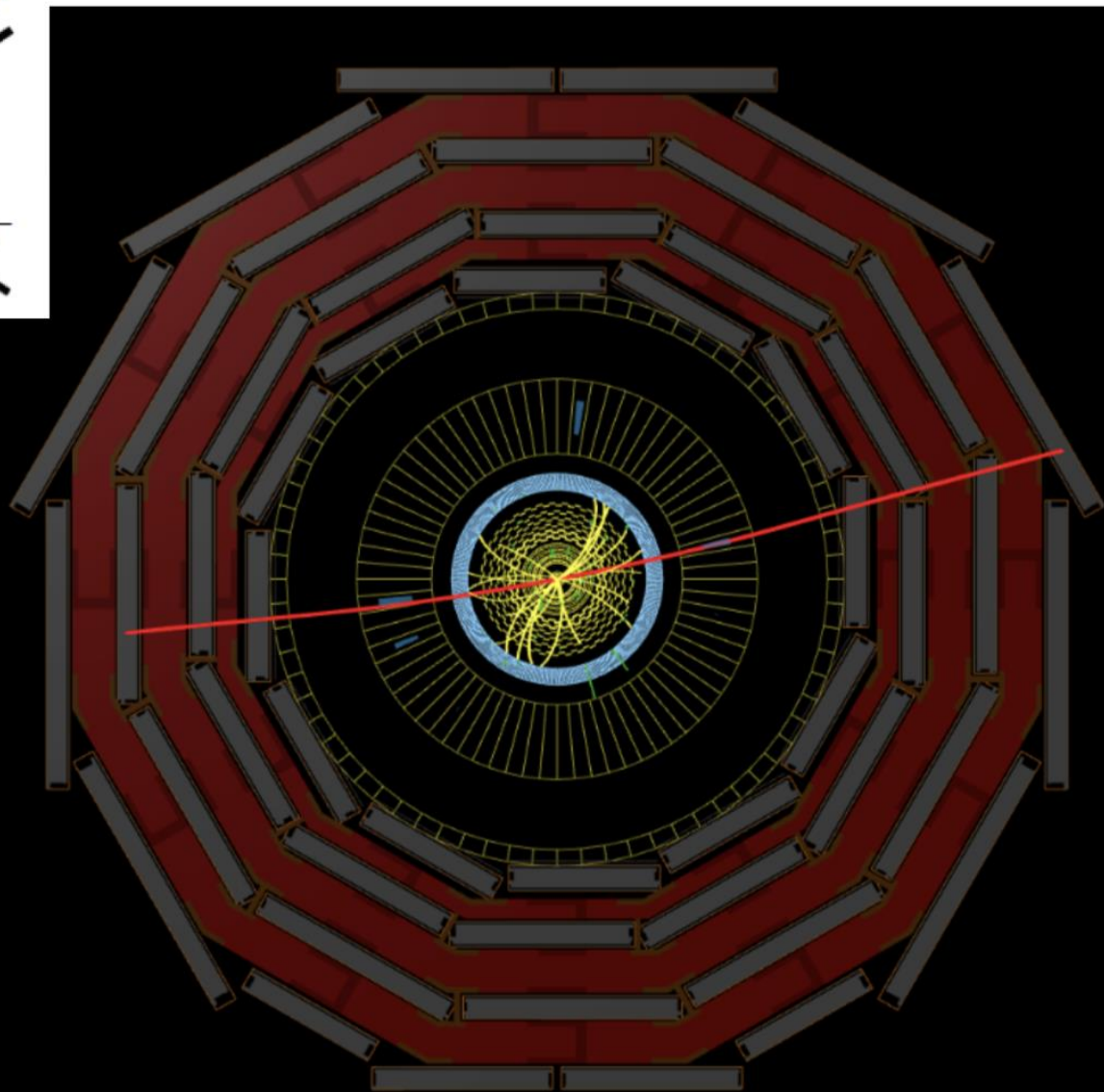
$\phi_1 = 10^\circ$

$\phi_2 = -169^\circ$

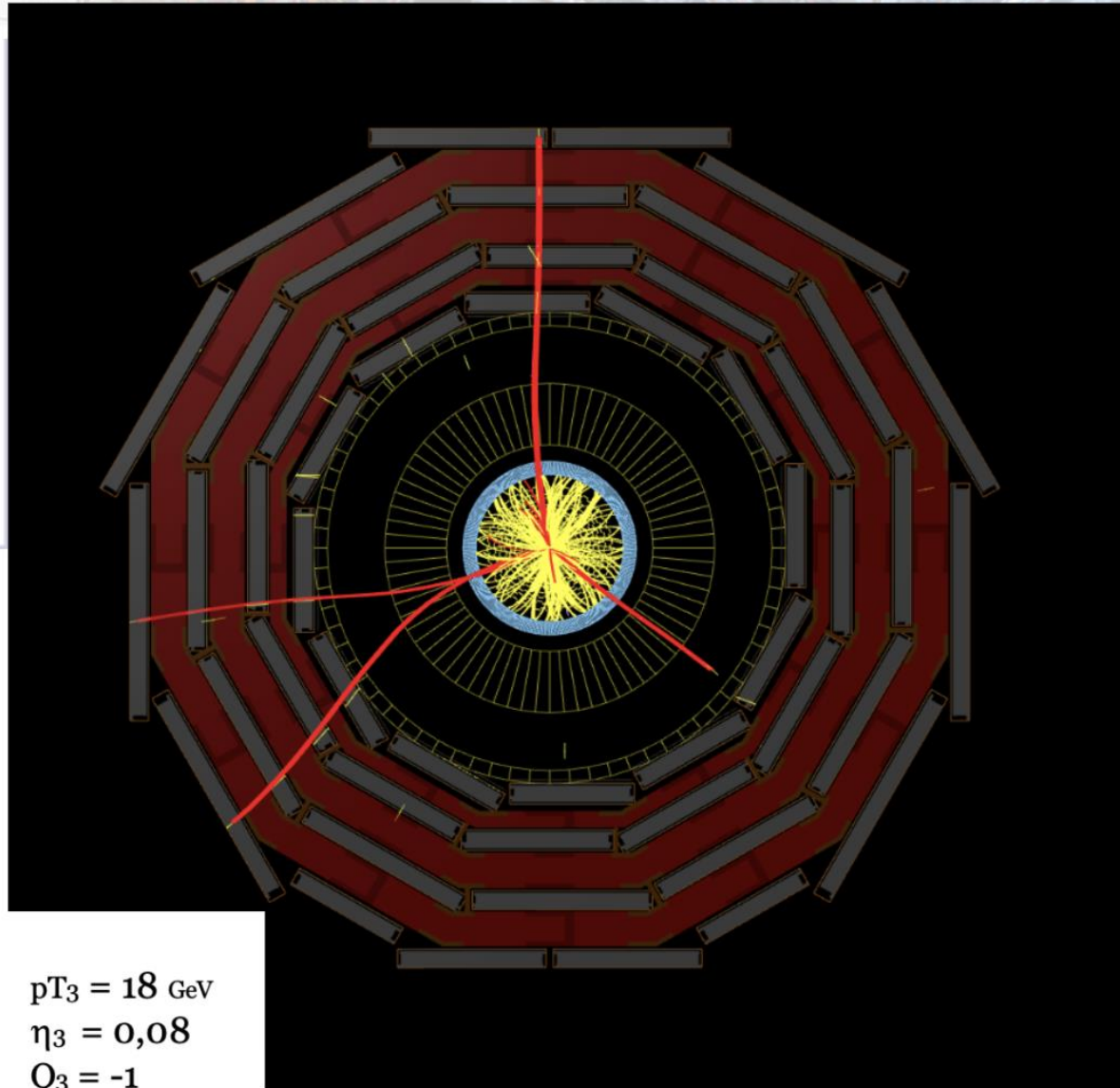
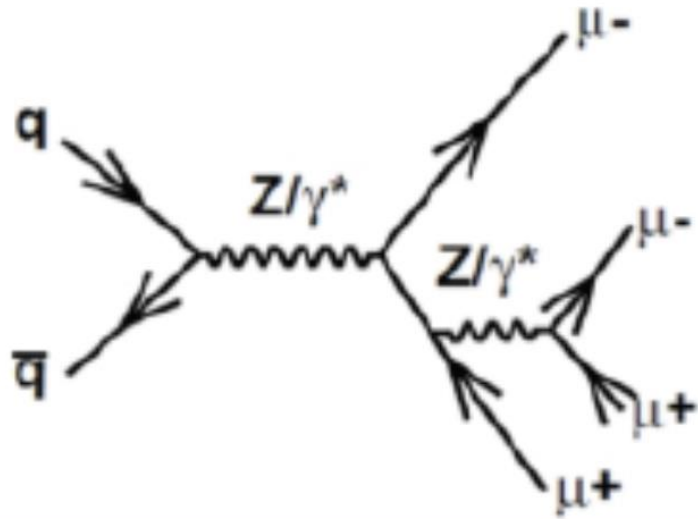
$\phi_{12} = 179^\circ$

$M_1 = 1$

$M_2 = 7$



Z → 4 muons



Z 4muons

$pT_1 = 12 \text{ GeV}$	$pT_4 = 6 \text{ GeV}$	$pT_2 = 24 \text{ GeV}$	$pT_3 = 18 \text{ GeV}$
$\eta_1 = -0,6$	$\eta_4 = 0,47$	$\eta_2 = 1,82$	$\eta_3 = 0,08$
$Q_1 = -1$	$Q_4 = +1$	$Q_2 = +1$	$Q_3 = -1$
$\phi_1 = -156^\circ$	$\phi_4 = -166^\circ$	$\phi_2 = -40^\circ$	$\phi_3 = 100^\circ$
	$\phi_{14} = 10^\circ$		$\phi_{23} = 140^\circ$
$M_1 = 7$	$M_4 = 8$	$M_2 = 12$	$M_3 = 4$

I quark nel protone

Il protone e' formato da:

- 3 quarks di valenza e
- un mare di quark, antiquark e gluoni

Protone = $(u, u, d)_v + \text{mare}$

abbiamo 3 modi di fare un W^+

- quark up u_{v1} di valenza plus antidown quark \bar{d}_{see} del mare
- quark up u_{v2} di valenza plus antidown \bar{d}_{see} del mare
- quark up u_{see} del mare plus antidown \bar{d}_{see} del mare

Abbiamo 2 modi di fare un W^-

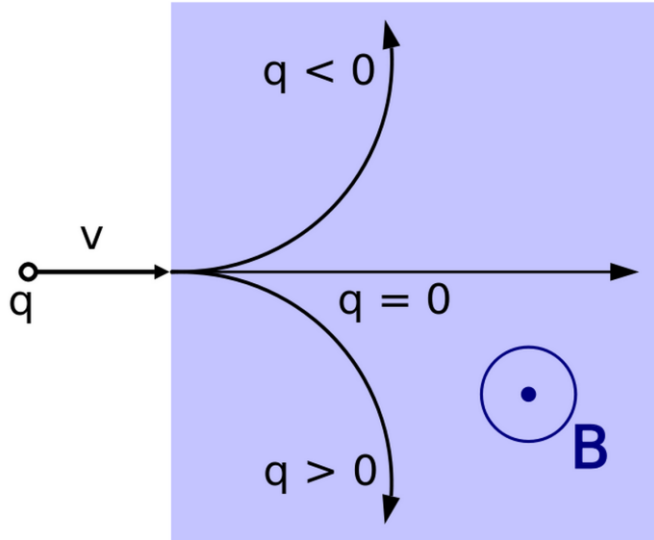
- quark down d_v di valenza plus antiup \bar{u}_{see} del mare
- down del mare d_{see} plus antiup \bar{u}_{see} del mare

3 combinazioni per W^+ / 2 combinazioni per W^- $R = 1,5$

	charge
up	+2/3
down	-1/3
anti-up	-2/3
anti-down	+1/3

Le champ magnétique

Il campo magnetico curva le **particelle cariche**:



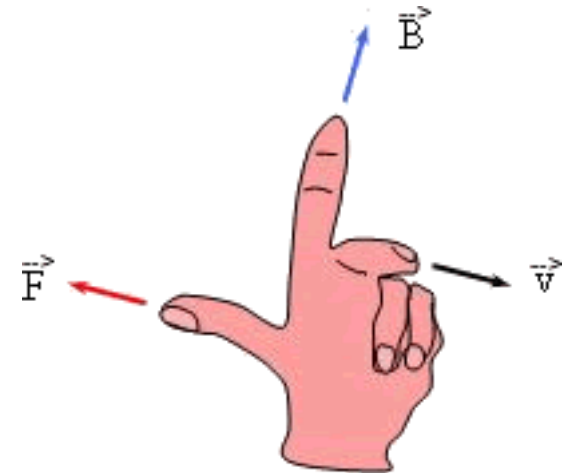
La forza di Lorentz

$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow q \cdot B \cdot R = m \cdot v = |\vec{p}|$$

Un campo magnetico permette di:

- determinare la carica di una particella,
- dato R il raggio di curvatura ed m, determini p (l'impulso)
- o noto l'impulso determini la massa



- <https://www.i2u2.org/elab/cms/cima-wzh/>
- <https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/>