

# Introduzione all'Esercizio

01/03/2024

A. Lapertosa

Uni  
ct

FISICA E ASTRONOMIA  
"ETTORE MAJORANA"

INFN  
CATANIA

# Fisica delle particelle: Modello Standard

Quark

<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> beauty

Leptoni

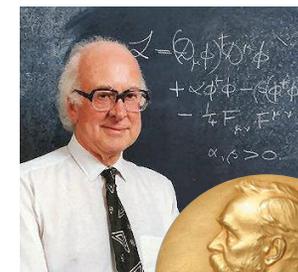
<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tau
<b><math>\nu_e</math></b> neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino

Bosoni

<b>W</b>
<b>Z</b>
<b>g</b> gluone
<b><math>\gamma</math></b> fotone

<b>H</b> Higgs
-------------------

Higgs

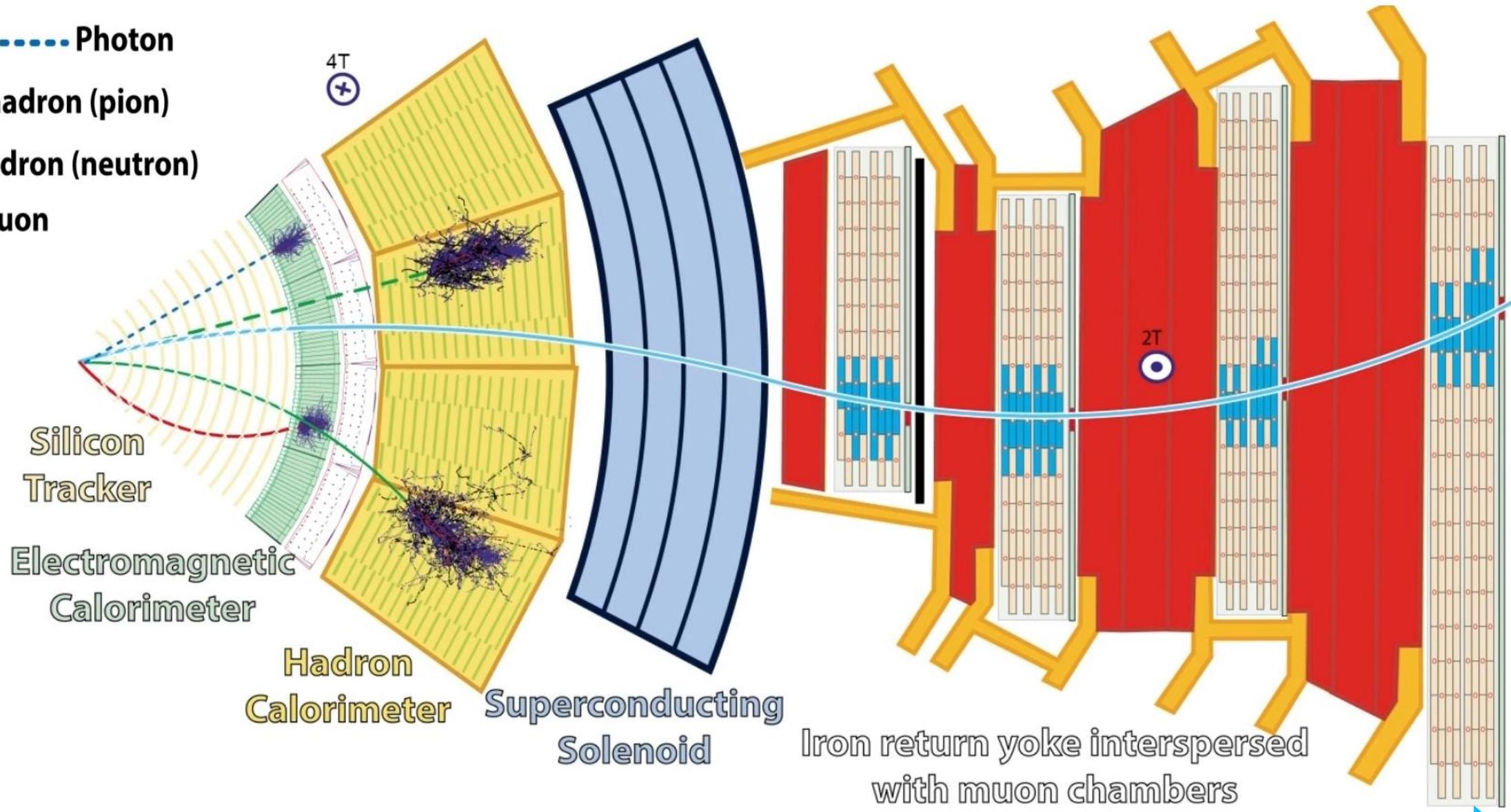


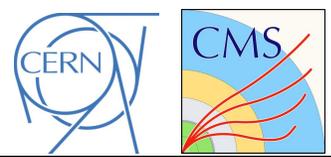
# Una fetta di CMS



# Rivelatori di particelle: l'esperimento CMS

- Electron
- Photon
- Charged hadron (pion)
- - - Neutral hadron (neutron)
- Muon

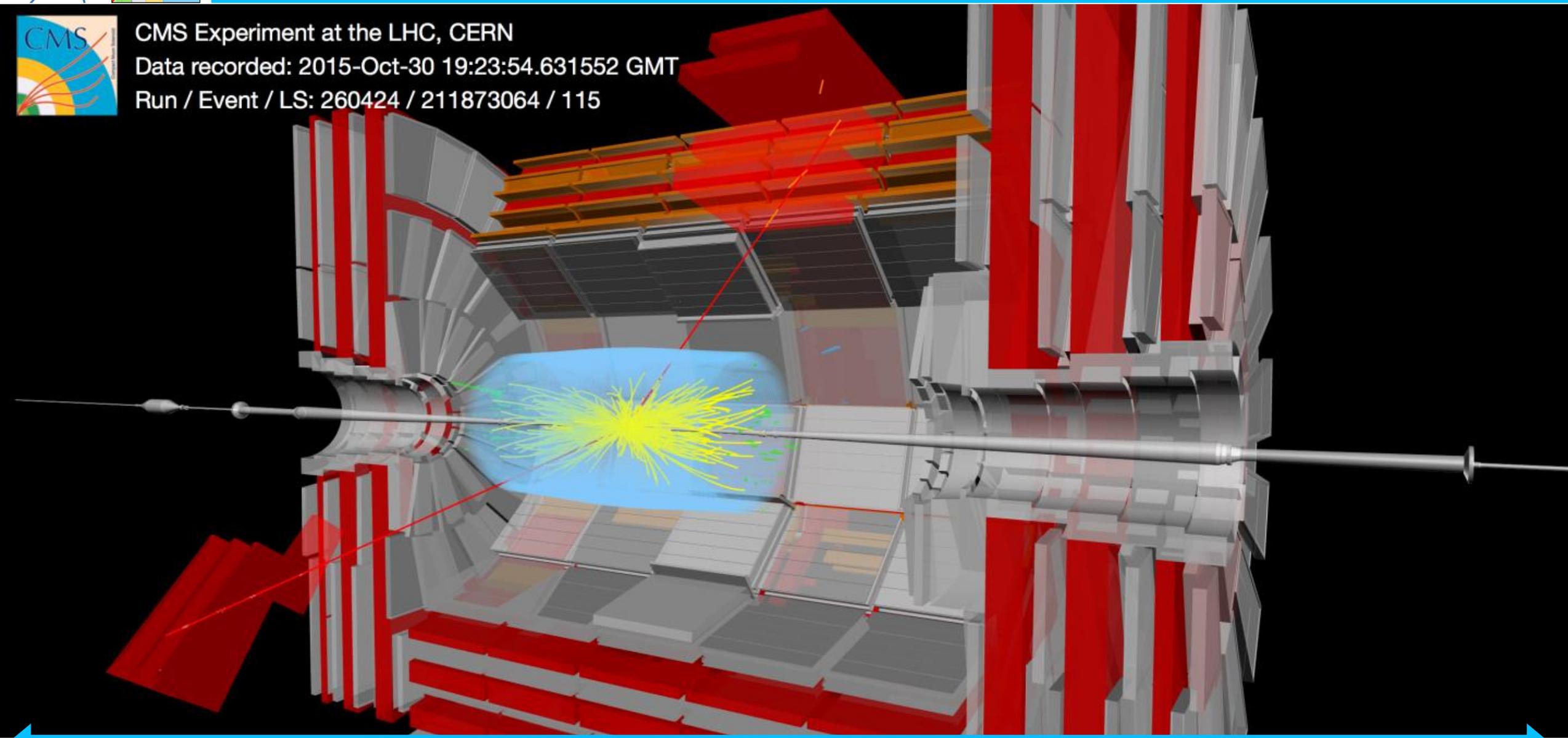




# Le collisioni dentro l'esperimento CMS



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2015-Oct-30 19:23:54.631552 GMT  
Run / Event / LS: 260424 / 211873064 / 115





# Le collisioni

- Al centro del rivelatore CMS, i pacchetti di protoni (100 miliardi) si attraversano ogni 25 ns
- Qualche decina di protoni si “scontra” ogni 25 ns
- Vengono registrate circa 1000 collisioni al secondo
  
- L’obiettivo dell’esercizio di oggi: **identificare le particelle a partire dalle loro tracce**
  - Ingredienti:
    - **100 collisioni reali** registrate da CMS
    - **iSpy “Event Display”**: visualizzare le tracce lasciate dalle particelle
    - **CIMA “Catalogatore”**: registrare la tipologia di particelle osservata

# Segnali dentro l'esperimento CMS

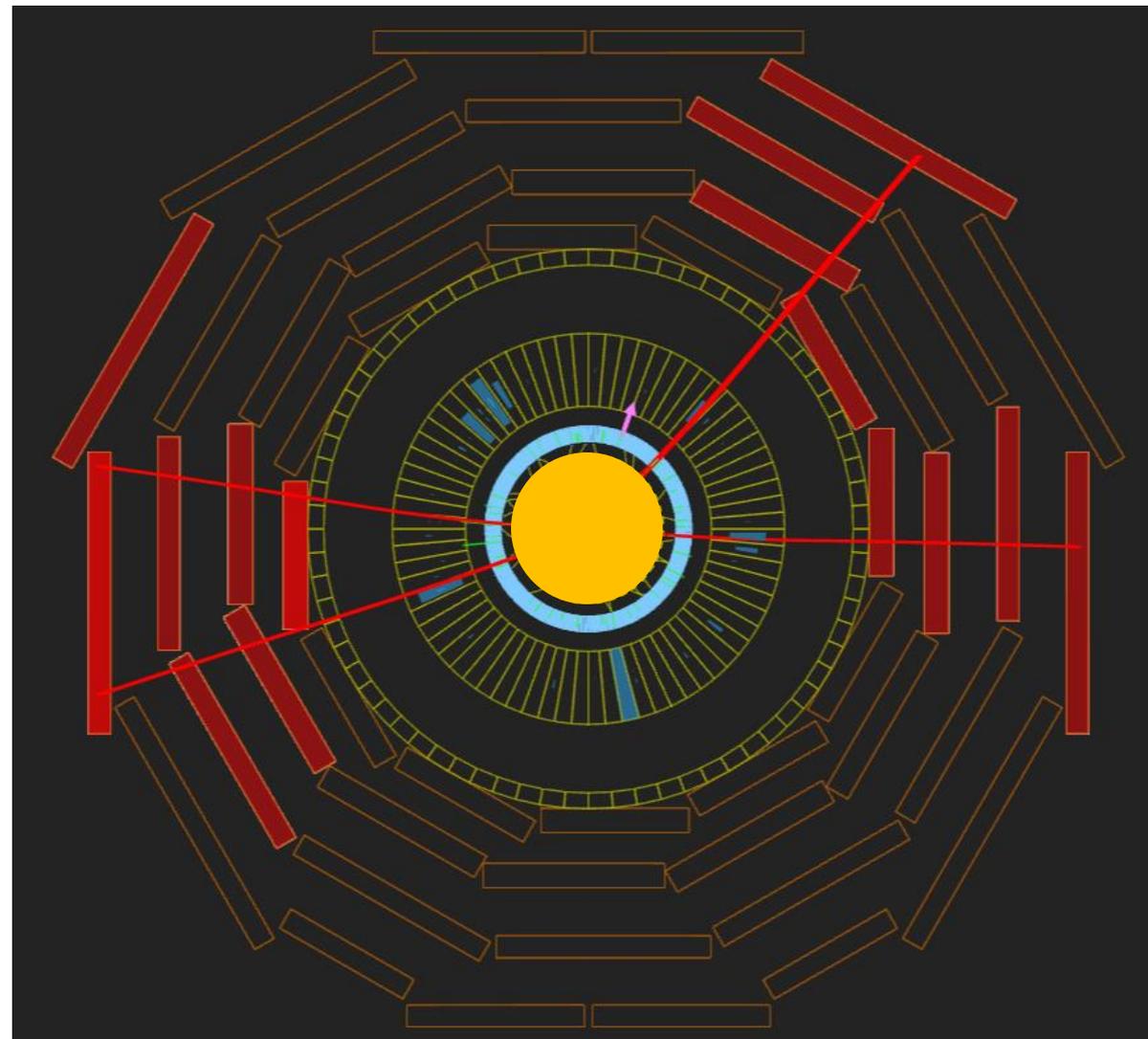
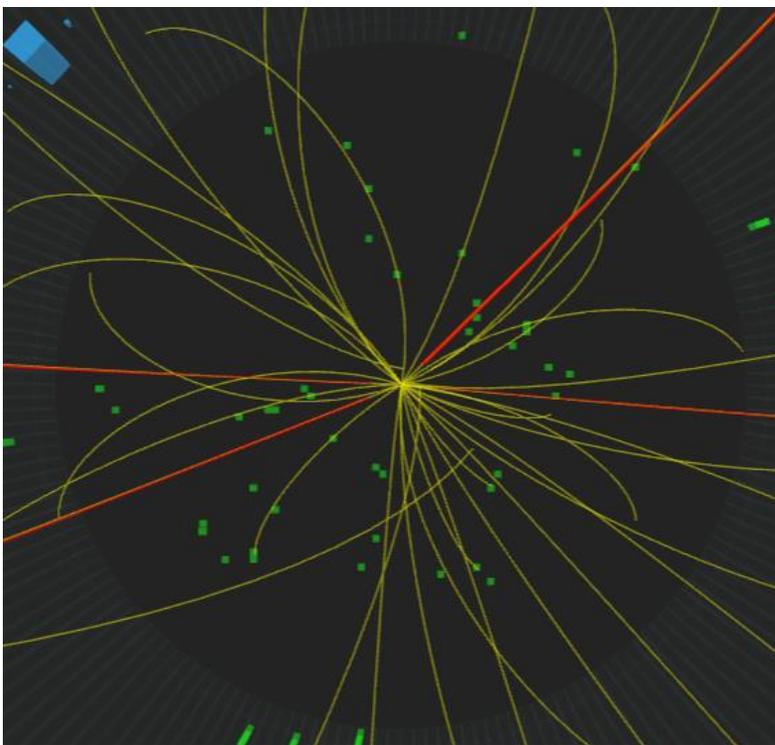
## 1. Tracciatore

2. Calorimetro Elettromagnetico

3. Calorimetro Adronico

4. Solenoide

5. Rivelatore di muoni



# Segnali dentro l'esperimento CMS

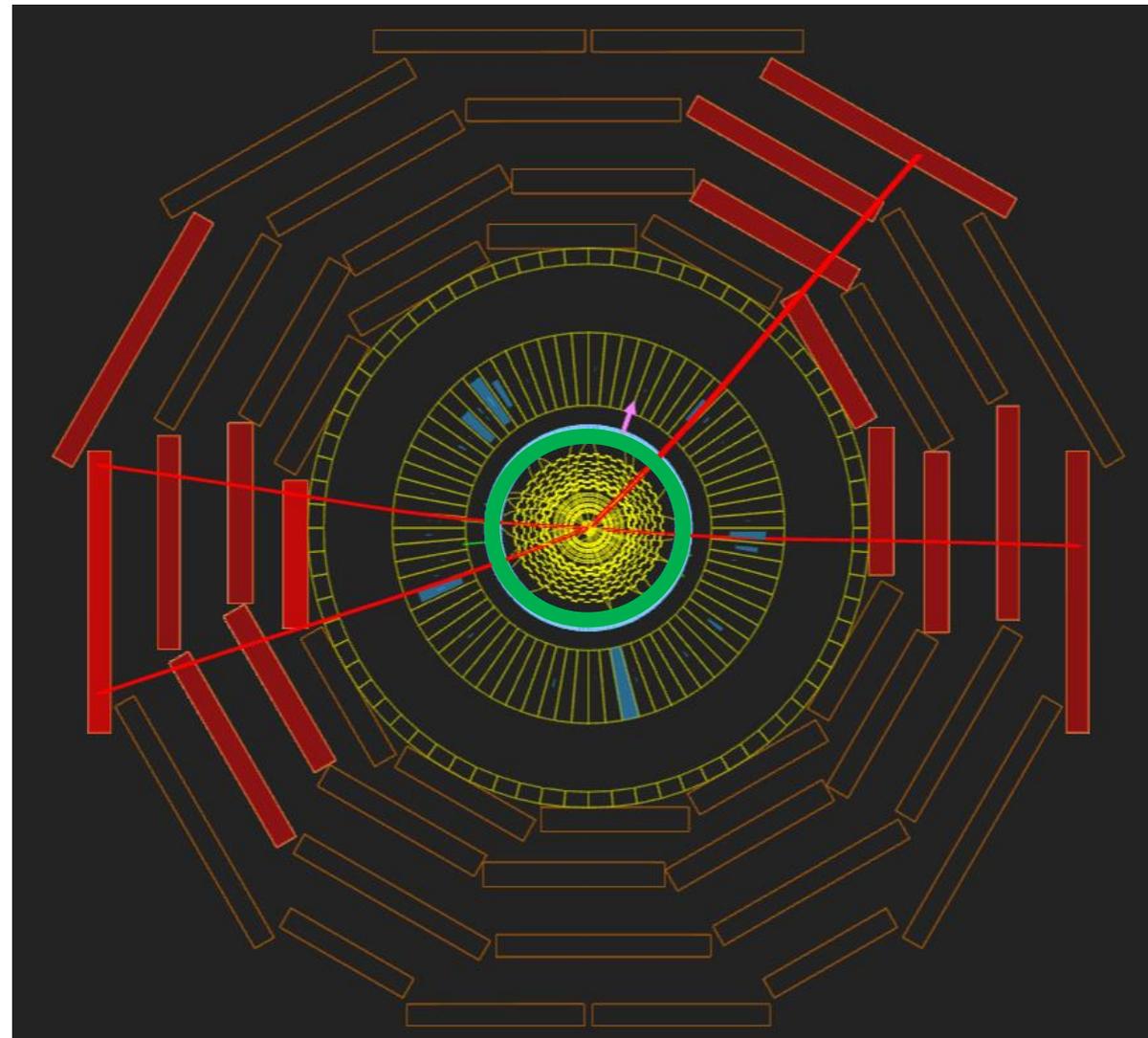
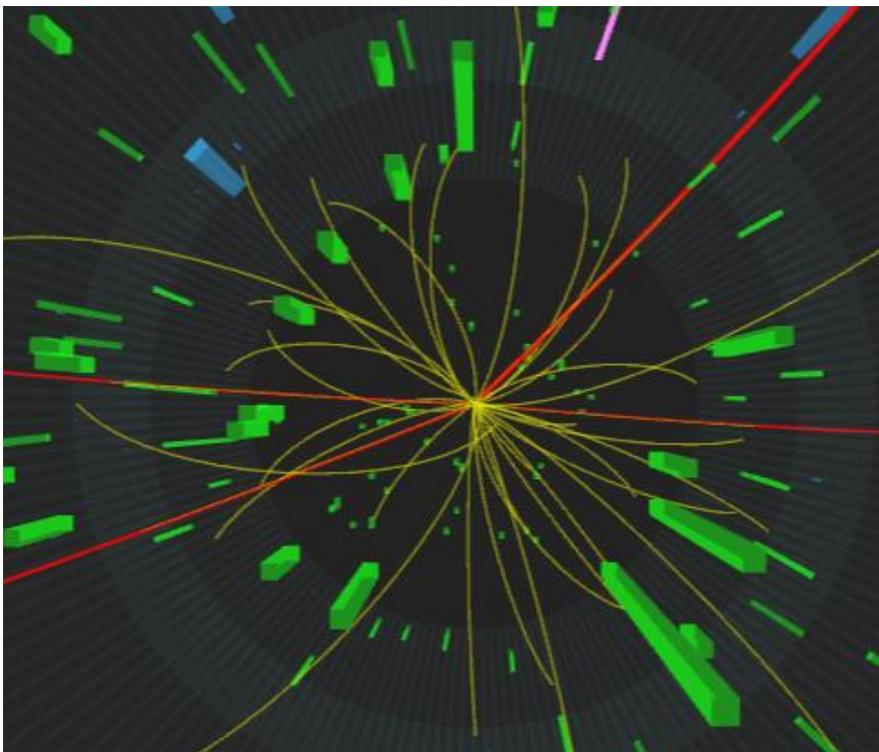
1. Tracciatore

2. Calorimetro Elettromagnetico

3. Calorimetro Adronico

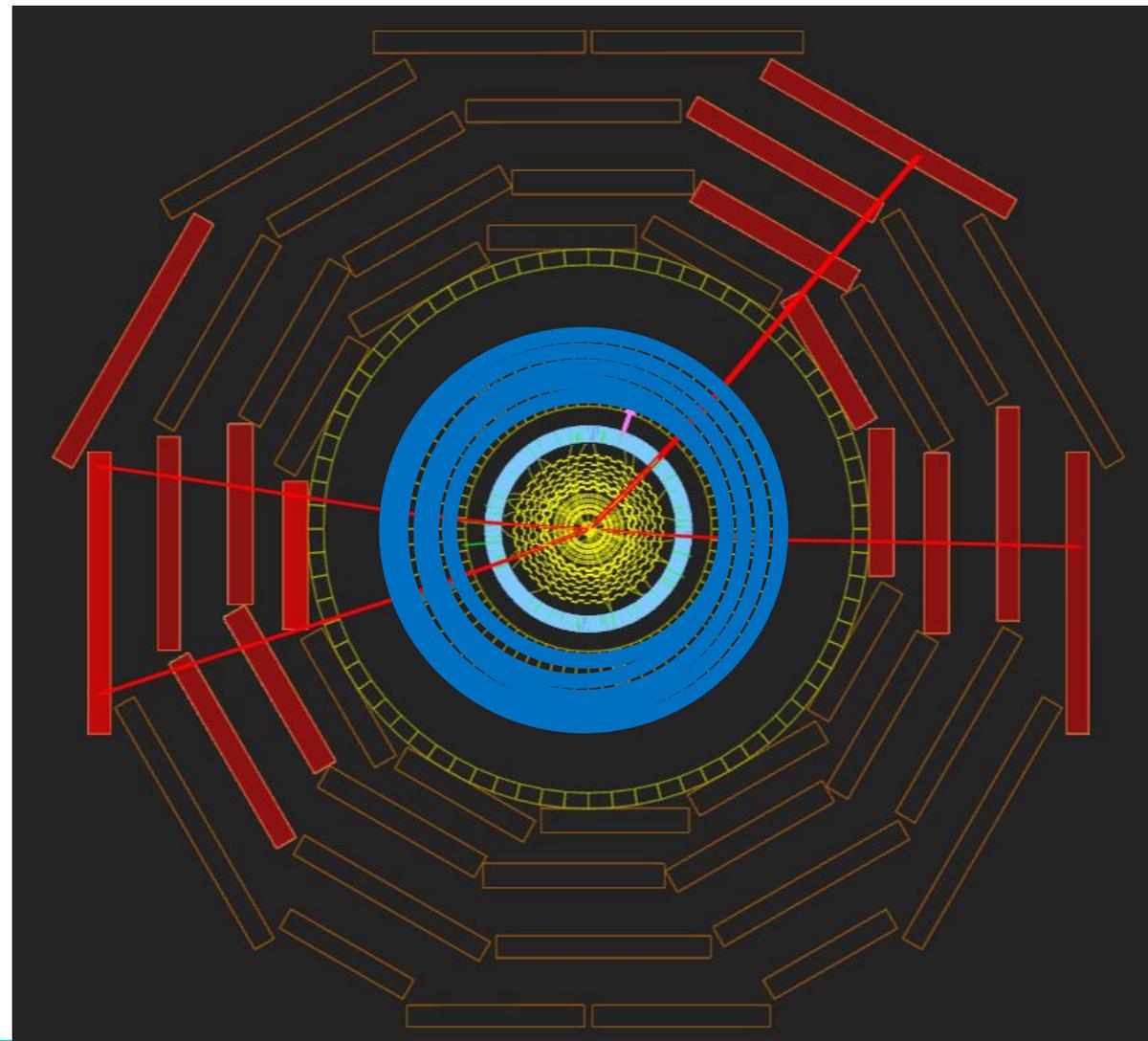
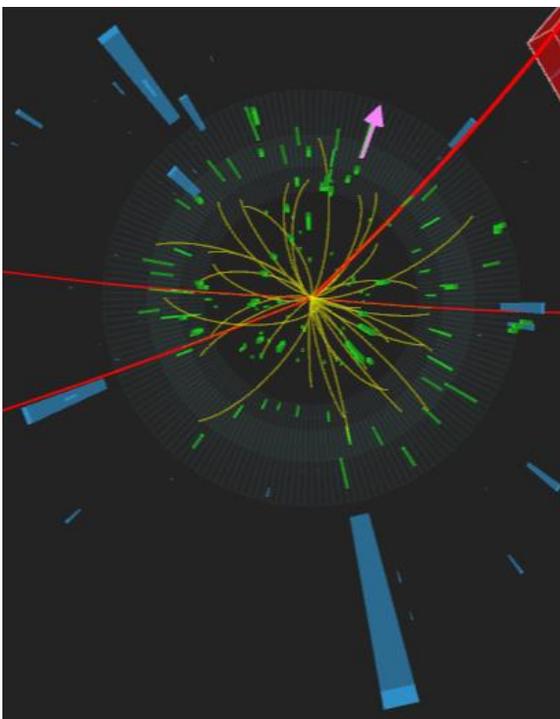
4. Solenoide

5. Rivelatore di muoni



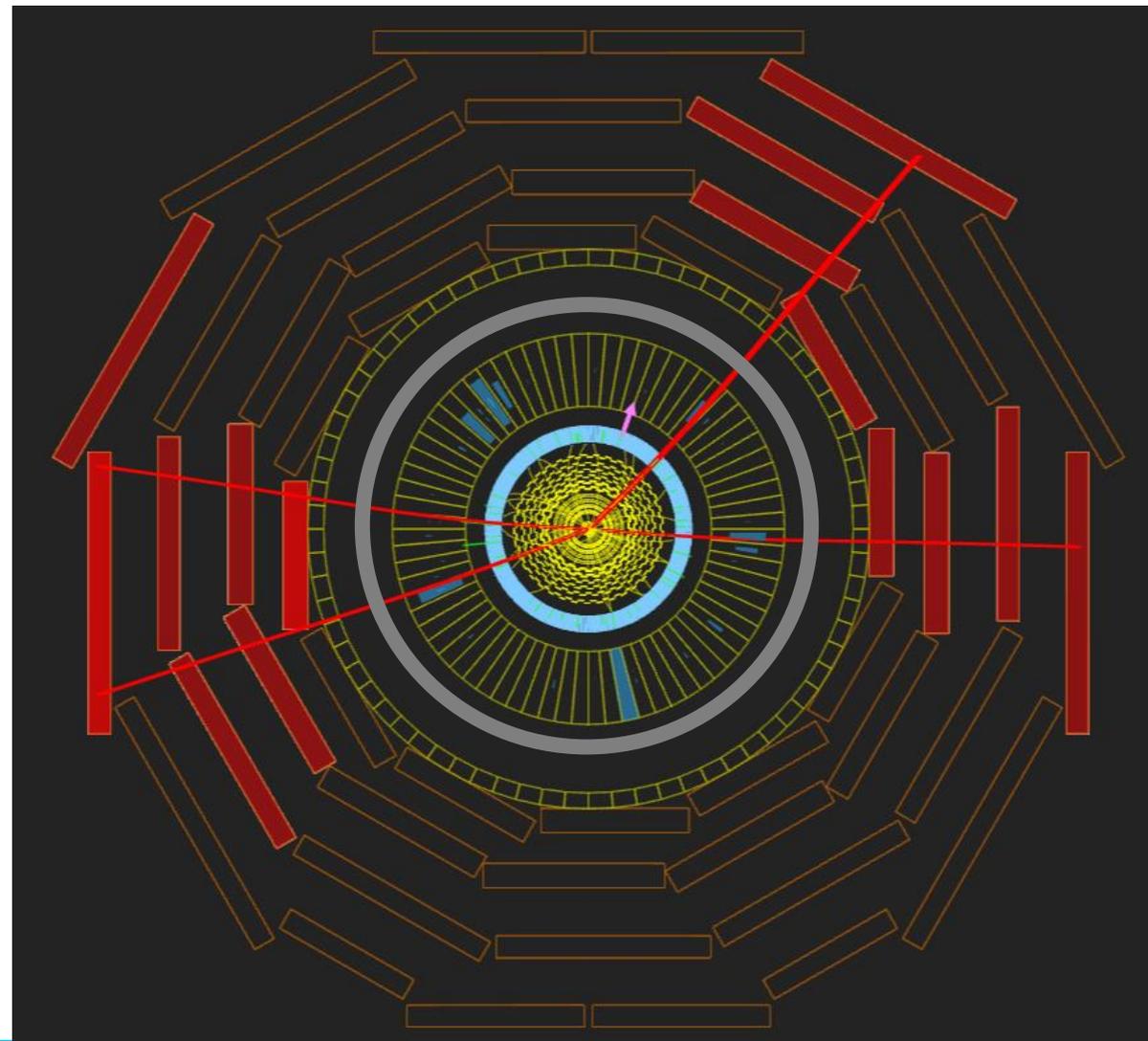
# Segnali dentro l'esperimento CMS

1. Tracciatore
2. Calorimetro Elettromagnetico
- 3. Calorimetro Adronico**
4. Solenoide
5. Rivelatore di muoni



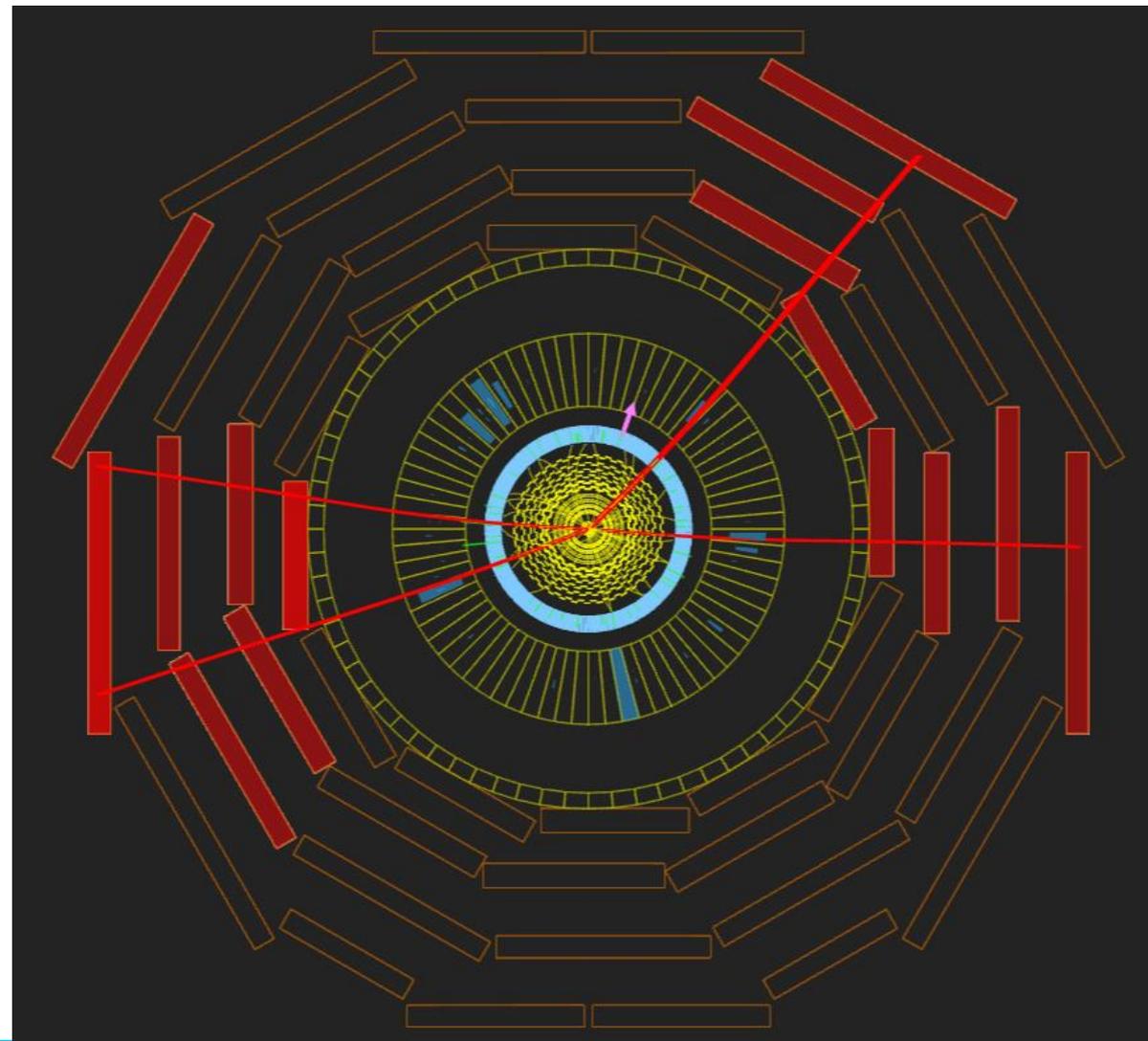
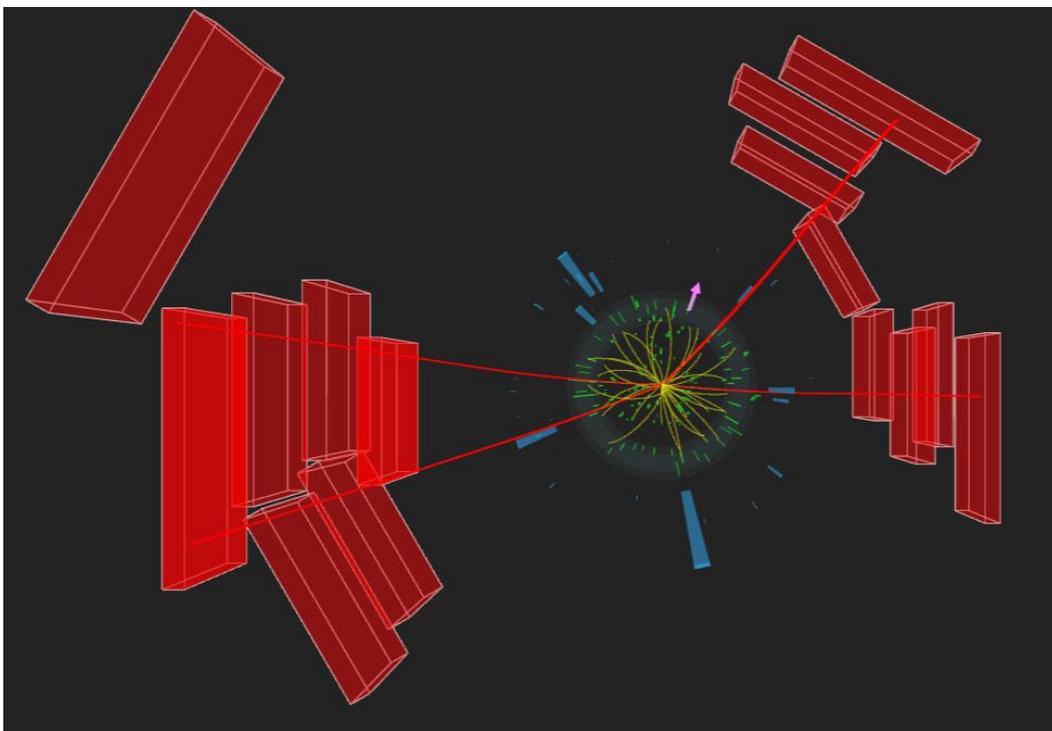
# Segnali dentro l'esperimento CMS

1. Tracciatore
2. Calorimetro Elettromagnetico
3. Calorimetro Adronico
4. Solenoide
5. Rivelatore di muoni



# Segnali dentro l'esperimento CMS

1. Tracciatore
2. Calorimetro Elettromagnetico
3. Calorimetro Adronico
4. Solenoide
- 5. Rivelatore di muoni**



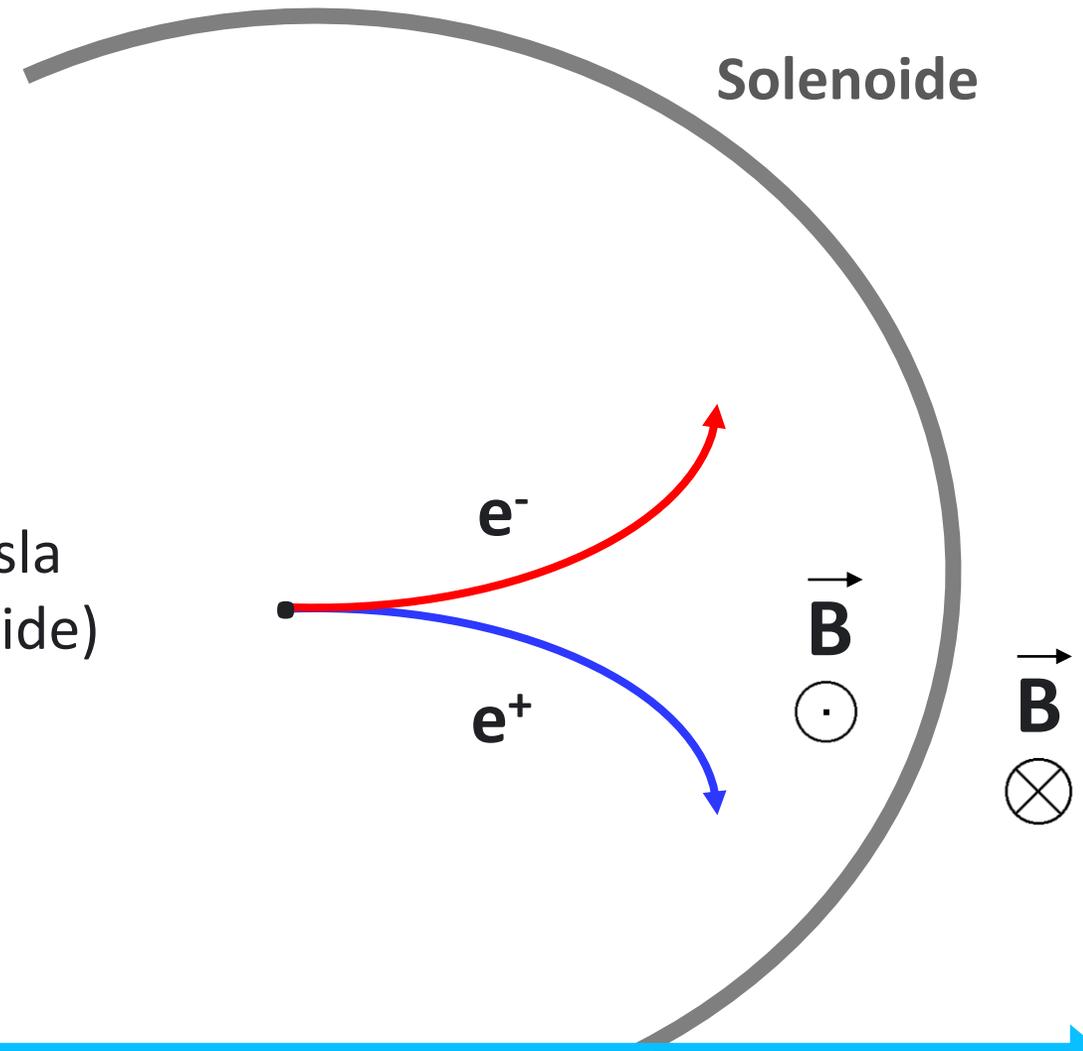
# Forza di Lorentz

- La traiettoria di una particella carica viene deviata in presenza di campo magnetico

- $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$

- F: Forza**
- q: carica**
- v: velocità**
- B: Campo magnetico**

- Il Solenoide al centro di CMS ha un campo di 3.8 Tesla
- Le particelle cariche curvano (all'interno del Solenoide)
  - Carica negativa: curva in senso anti-orario**
  - Carica positiva: curva in senso orario**





# iSpy: l'Event Display

Prossimo  
evento

Zoom

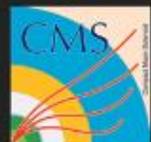
Numero dell'evento

iSpy WebGL

N25:Events/Run\_2/Event\_11 [11 of 100]



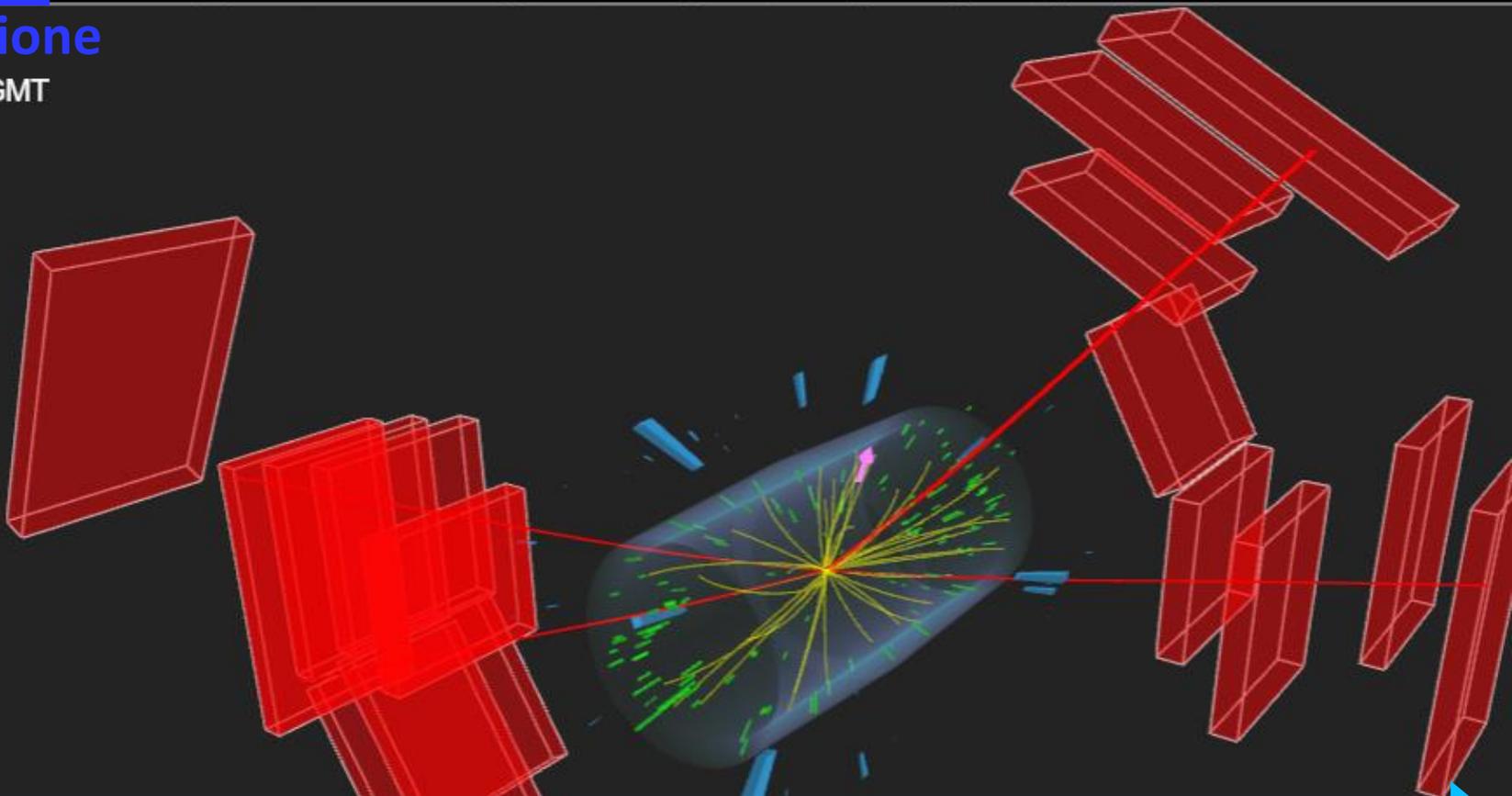
Visione



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-Aug-25 07:54:49.462084 GMT

Run / Event / LS: 201668 / 114003150 / 121





# iSpy: l'Event Display

Prossimo  
evento

Zoom

Numero dell'evento

iSpy WebGL

N25:Events/Run\_2/Event\_11 [11 of 100]



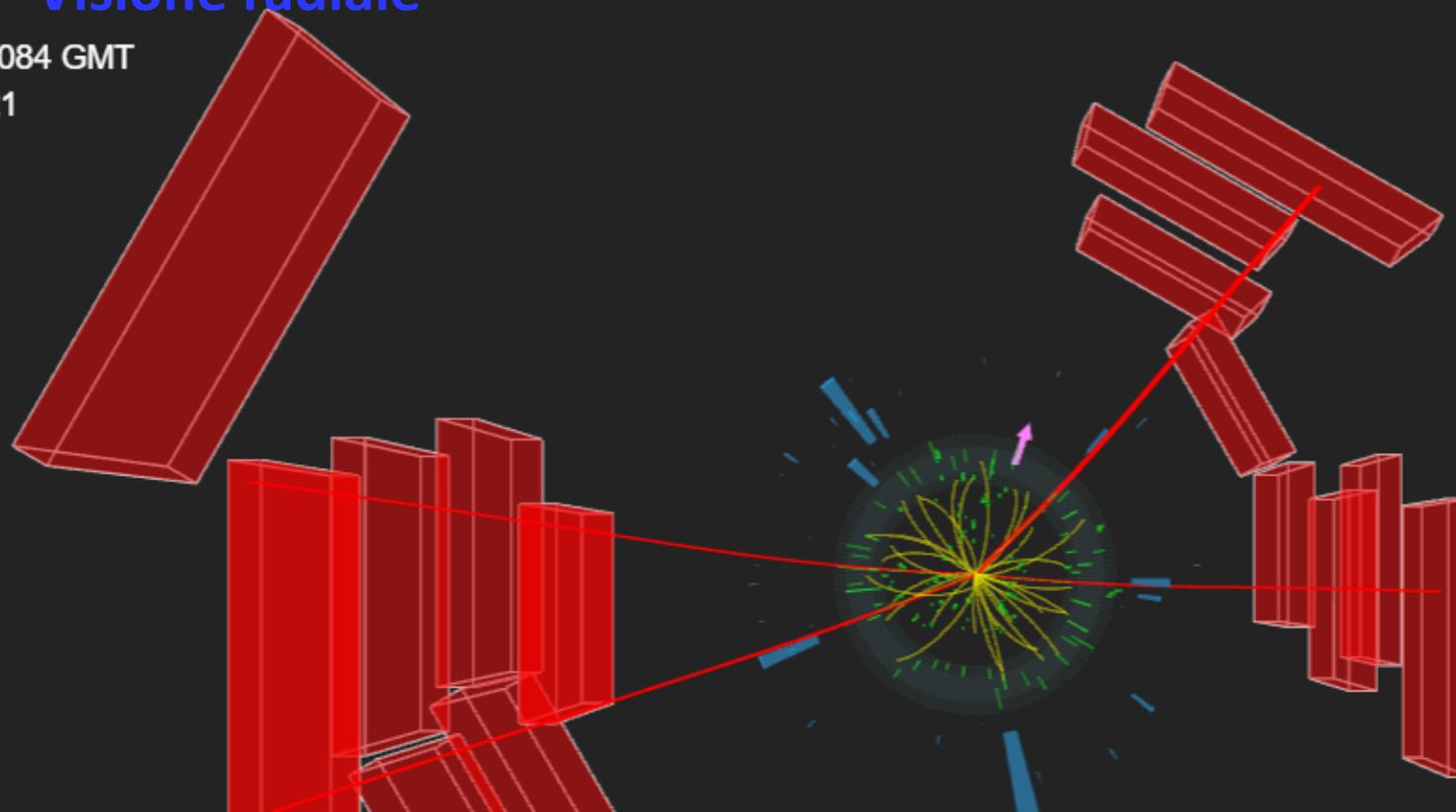
Visione radiale



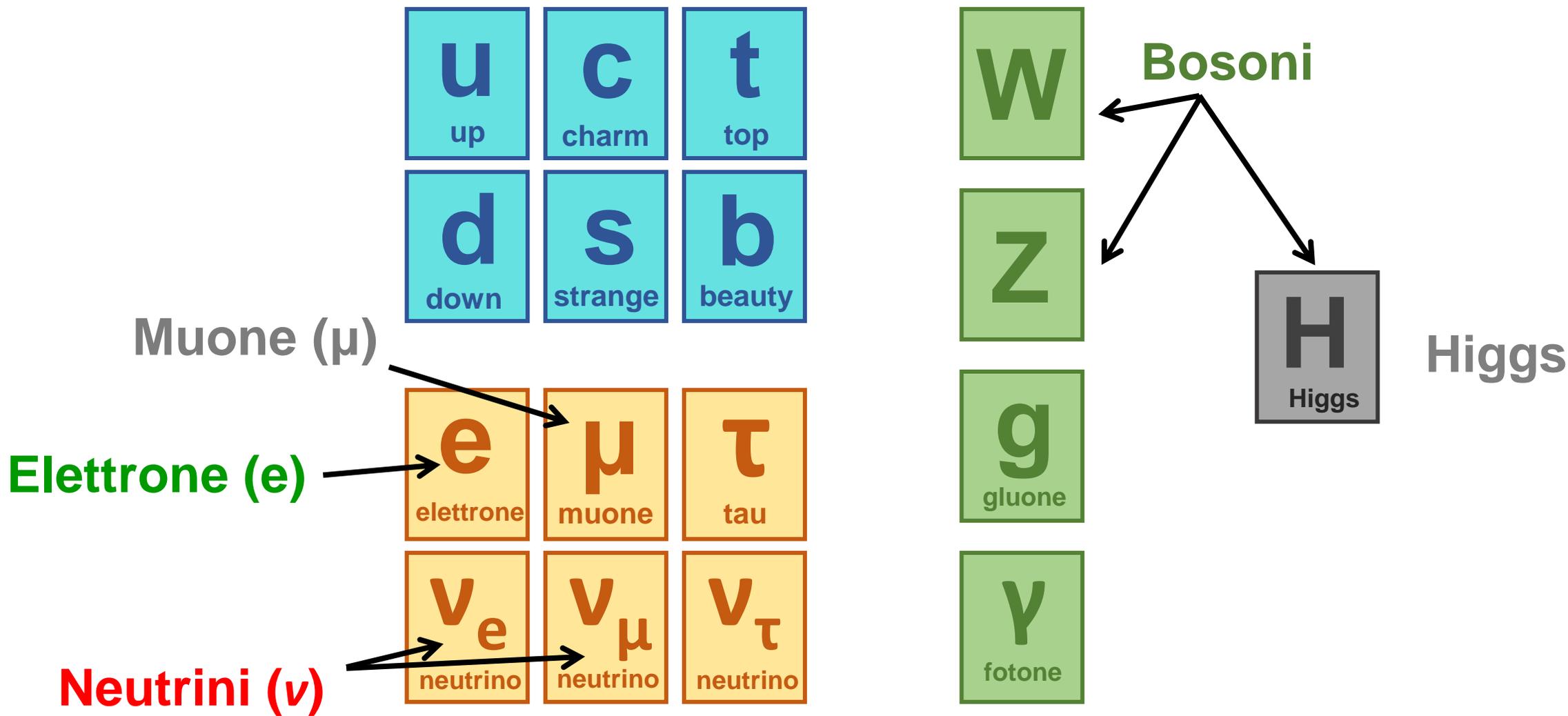
CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-Aug-25 07:54:49.462084 GMT

Run / Event / LS: 201668 / 114003150 / 121

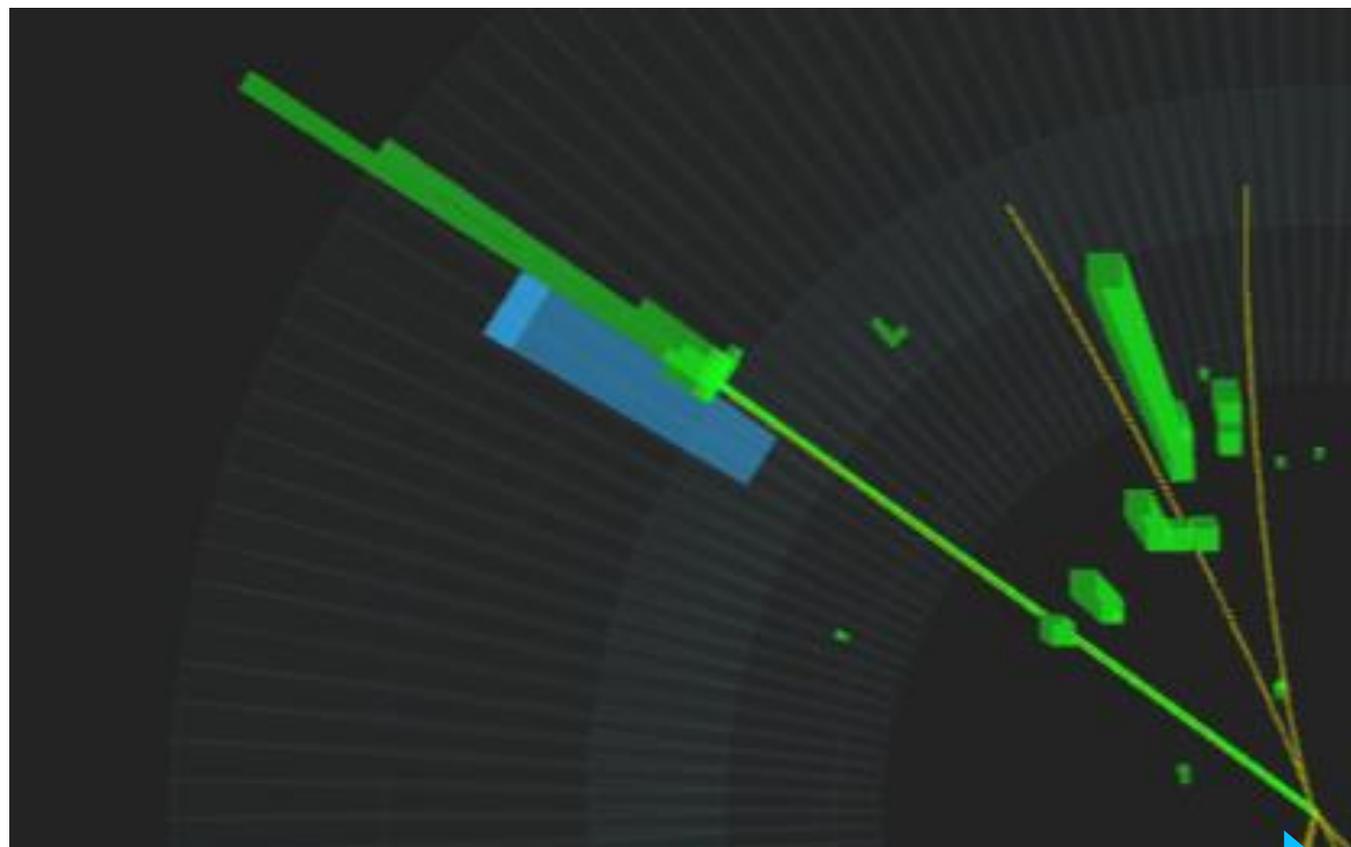


# Cosa cerchiamo nei nostri eventi



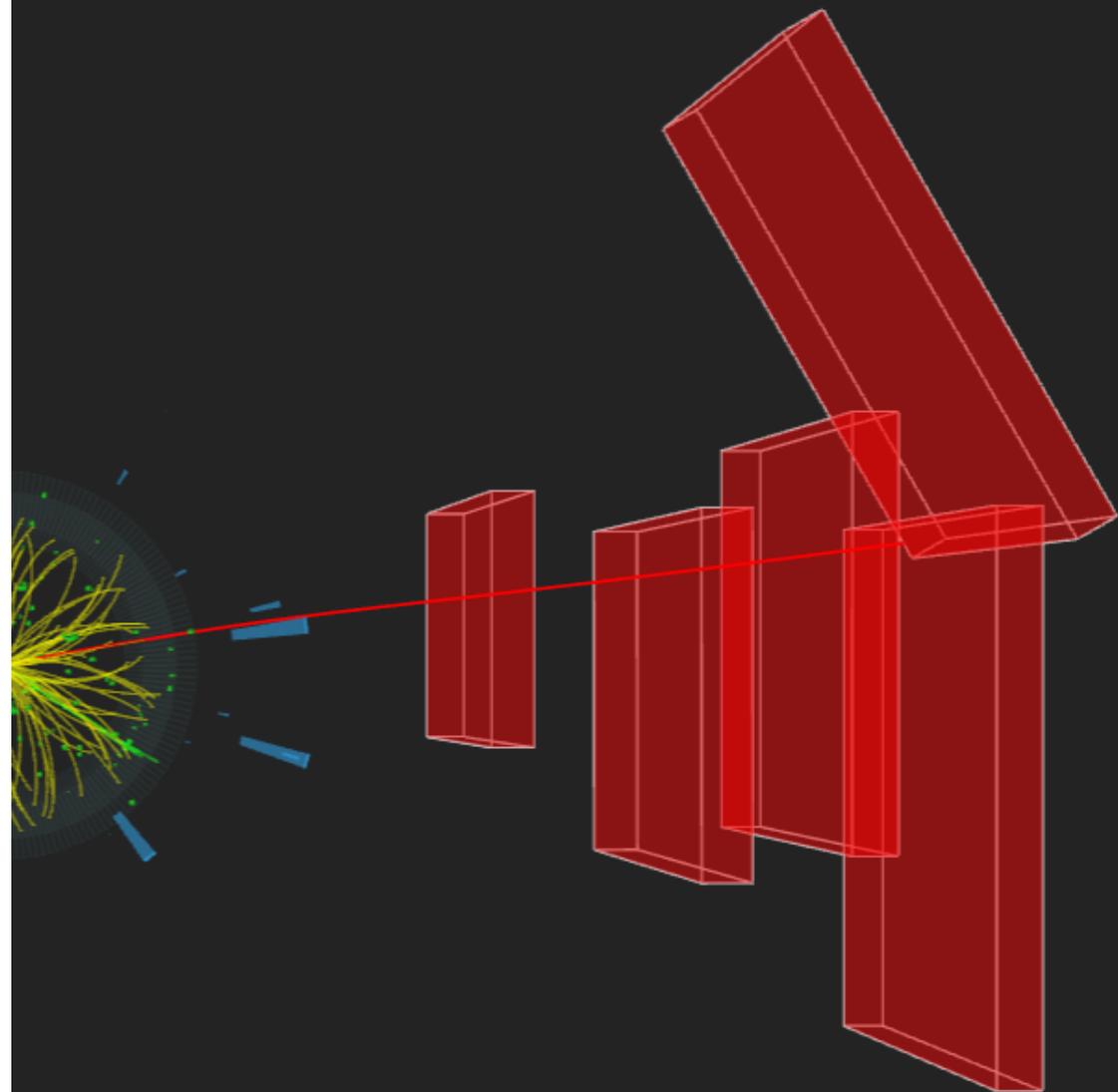
# I segnali: elettrone (e)

- L'elettrone (o positrone) è una particella carica
  - La traiettoria viene deviata dal campo magnetico
  - La traccia viene ricostruita dal tracciatore
  - L'energia viene rilasciata nel Calorimetro Elettromagnetico
- 
- Caratteristiche del segnale:
    - **Traccia: verde**
    - **Blocco di energia: verde**



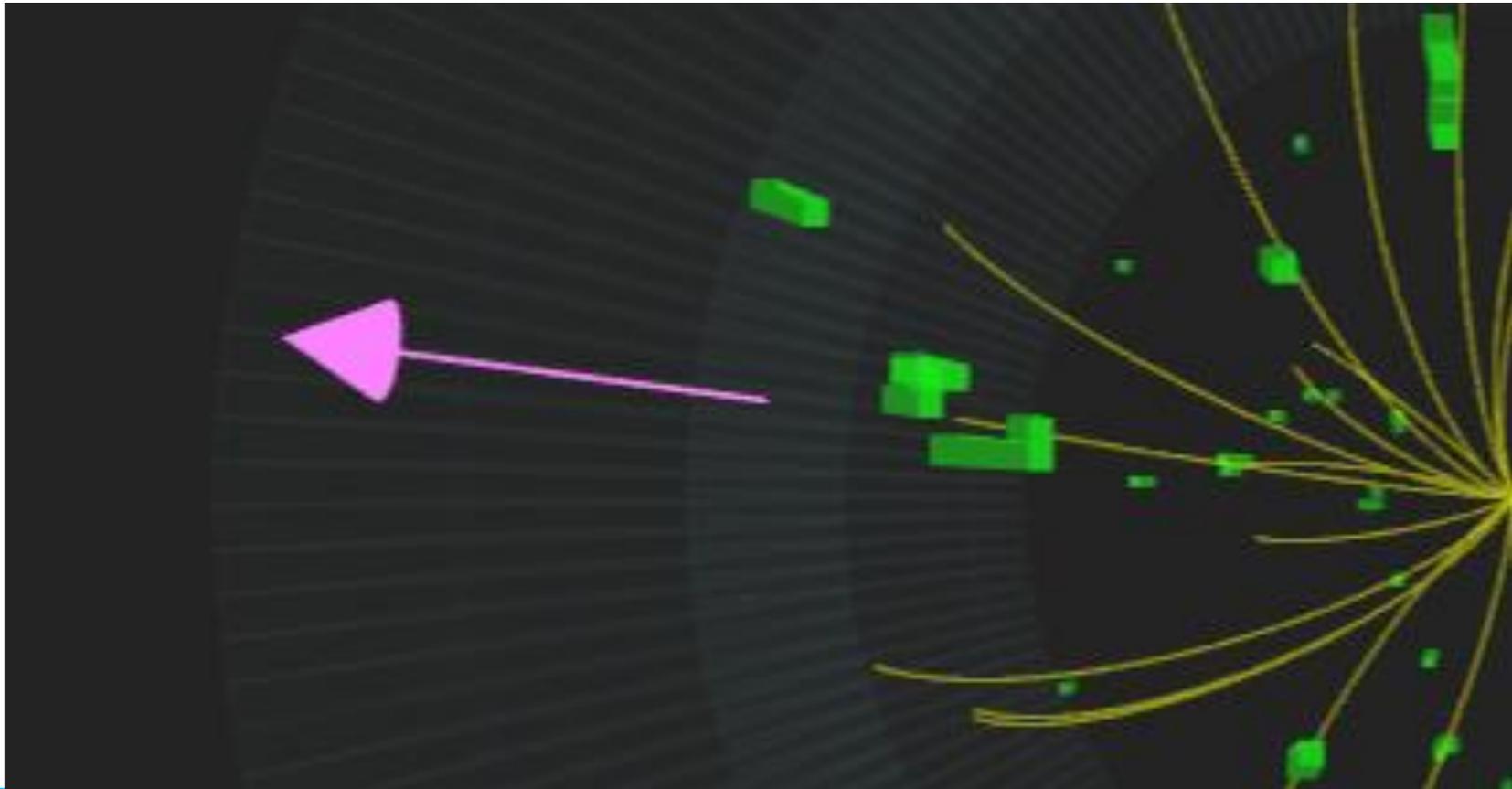
# I segnali: muone ( $\mu$ )

- Il muone (o anti-muone) è una particella carica
  - La traiettoria viene deviata dal campo magnetico
  - La traccia viene ricostruita dal tracciatore
  - La particella attraversa i due Calorimetri
  - La traccia continua nel rivelatore di muoni
- 
- Caratteristiche del segnale:
    - **Traccia: rossa**
    - **Camere a muoni colpite: rosse**

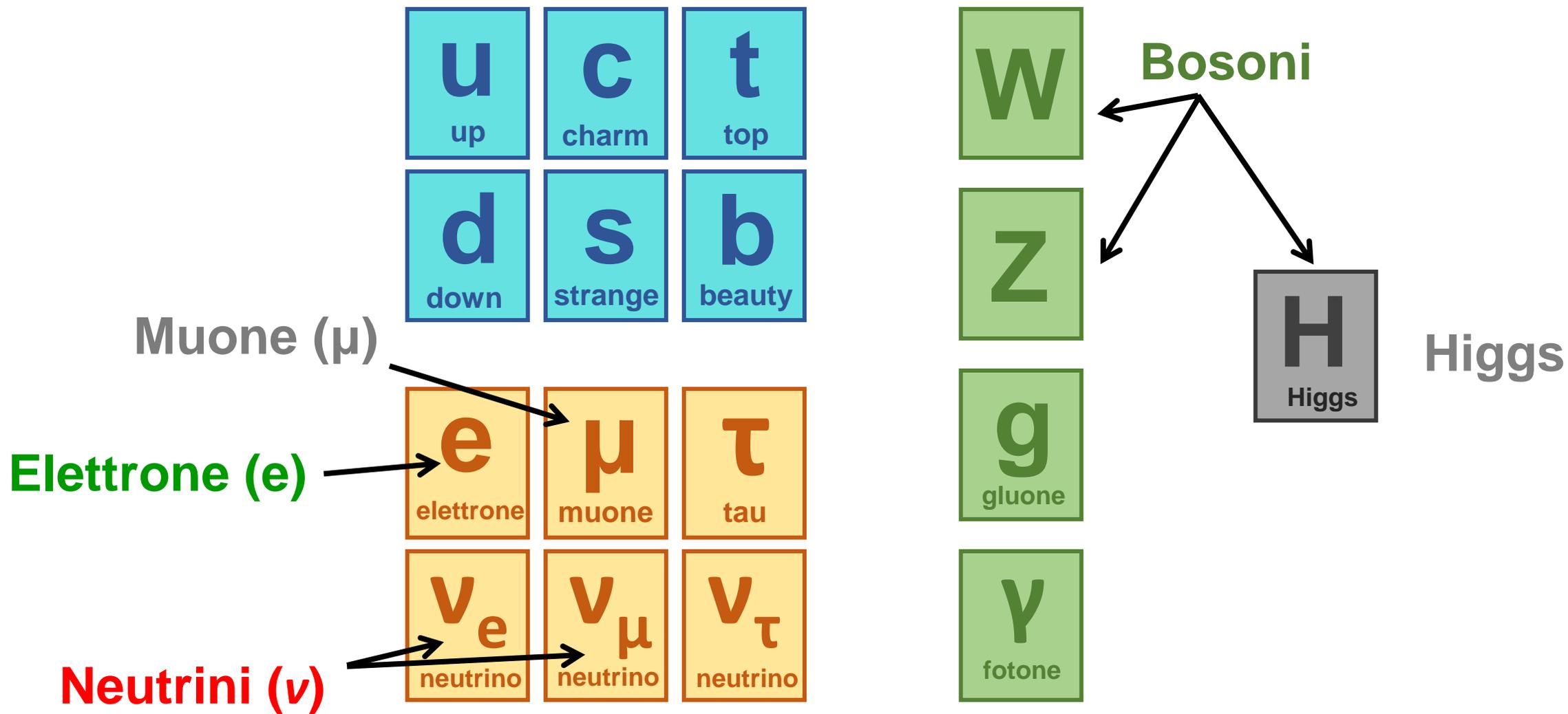


# I segnali: neutrino ( $\nu$ ) ...energia mancante

- Il neutrino (o anti-neutrino) è una particella neutra
  - La particella interagisce solamente tramite Interazione Nucleare Debole
  - Tipicamente attraversa il rivelatore CMS senza interagire
  - Lascia un “buco” nella ricostruzione dell’energia  $\rightarrow$  “energia mancante”
- 
- Caratteristiche del segnale:
    - **Freccia: rosa**



# Cosa cerchiamo nei nostri eventi



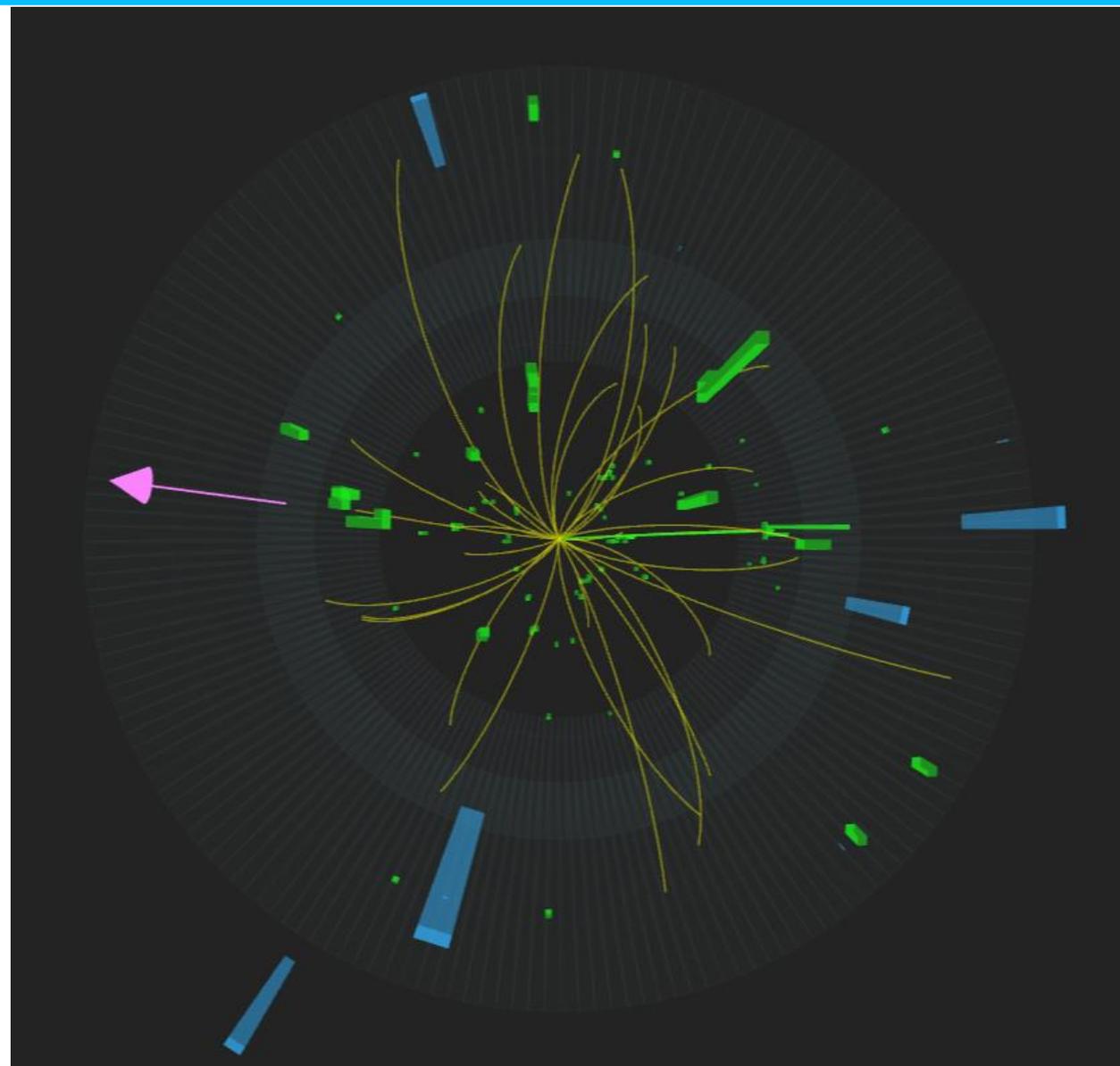
# Le particelle: bosone W (e $\nu$ , $\mu$ $\nu$ )

- Il bosone W è una particella carica ( $W^+$ ,  $W^-$ )
- Il bosone W può “decadere” in tanti modi...
- Le trasformazioni più facili da identificare hanno: **elettroni e neutrini, muoni e neutrini**

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e \quad W^- \rightarrow e^- \nu_e$$

$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad W^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$$

- Caratteristiche del segnale W(e  $\nu$ ):
  - **Traccia: verde**
  - **Freccia: rosa**
- Caratteristiche del segnale W( $\mu$   $\nu$ ):
  - **Traccia: rossa**
  - **Freccia: rosa**

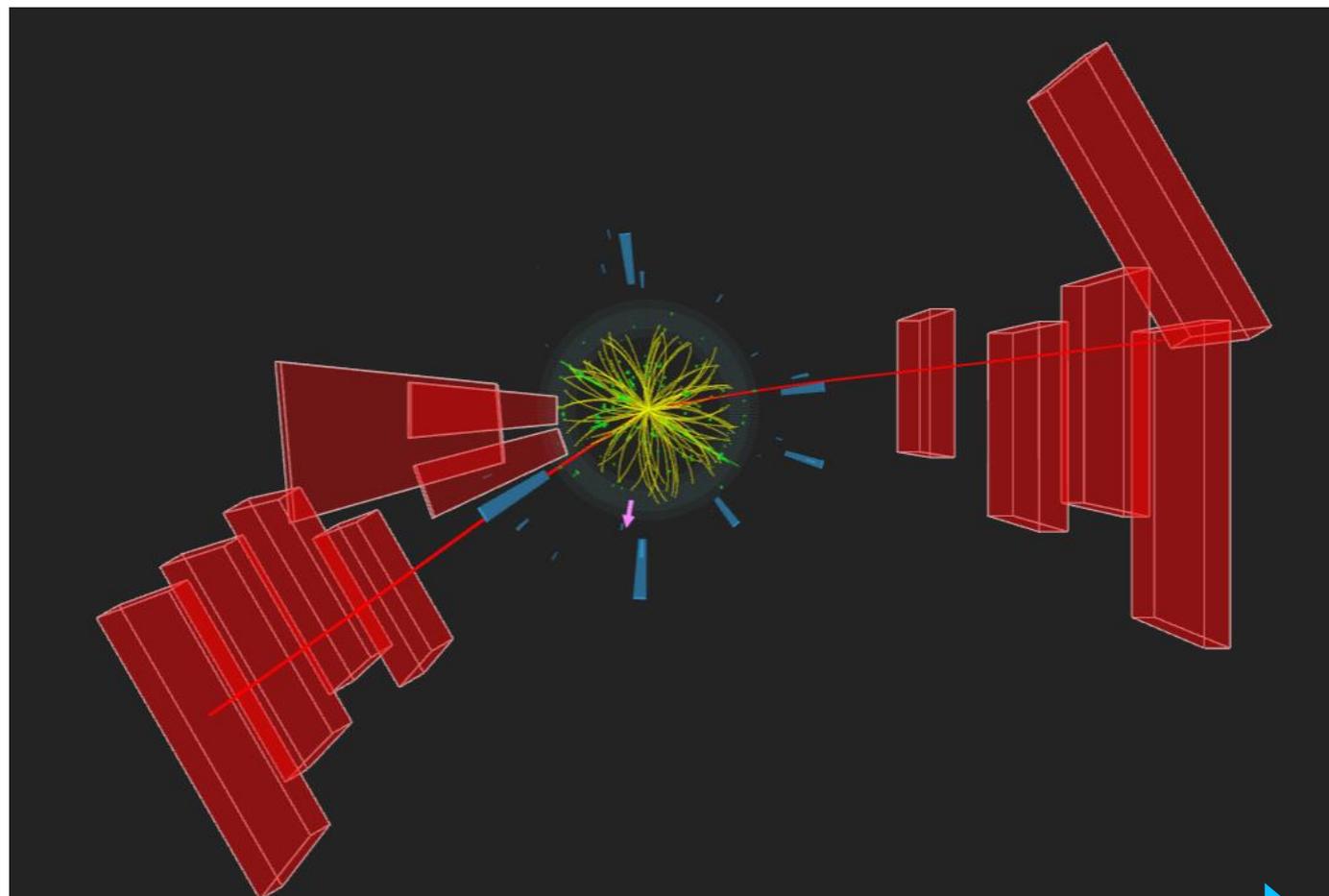


# Le particelle: bosone Z (ee, $\mu\mu$ )

- Il bosone Z è una particella neutra ( $Z^0$ )
- Il bosone Z può “decadere” in tanti modi...
- Le trasformazioni più facili da identificare hanno **coppie di elettroni o di muoni**



- Caratteristiche del segnale Z(ee):
  - **Traccia: verde**
  - **Traccia: verde**
- Caratteristiche del segnale Z( $\mu\mu$ ):
  - **Traccia: rossa**
  - **Traccia: rossa**

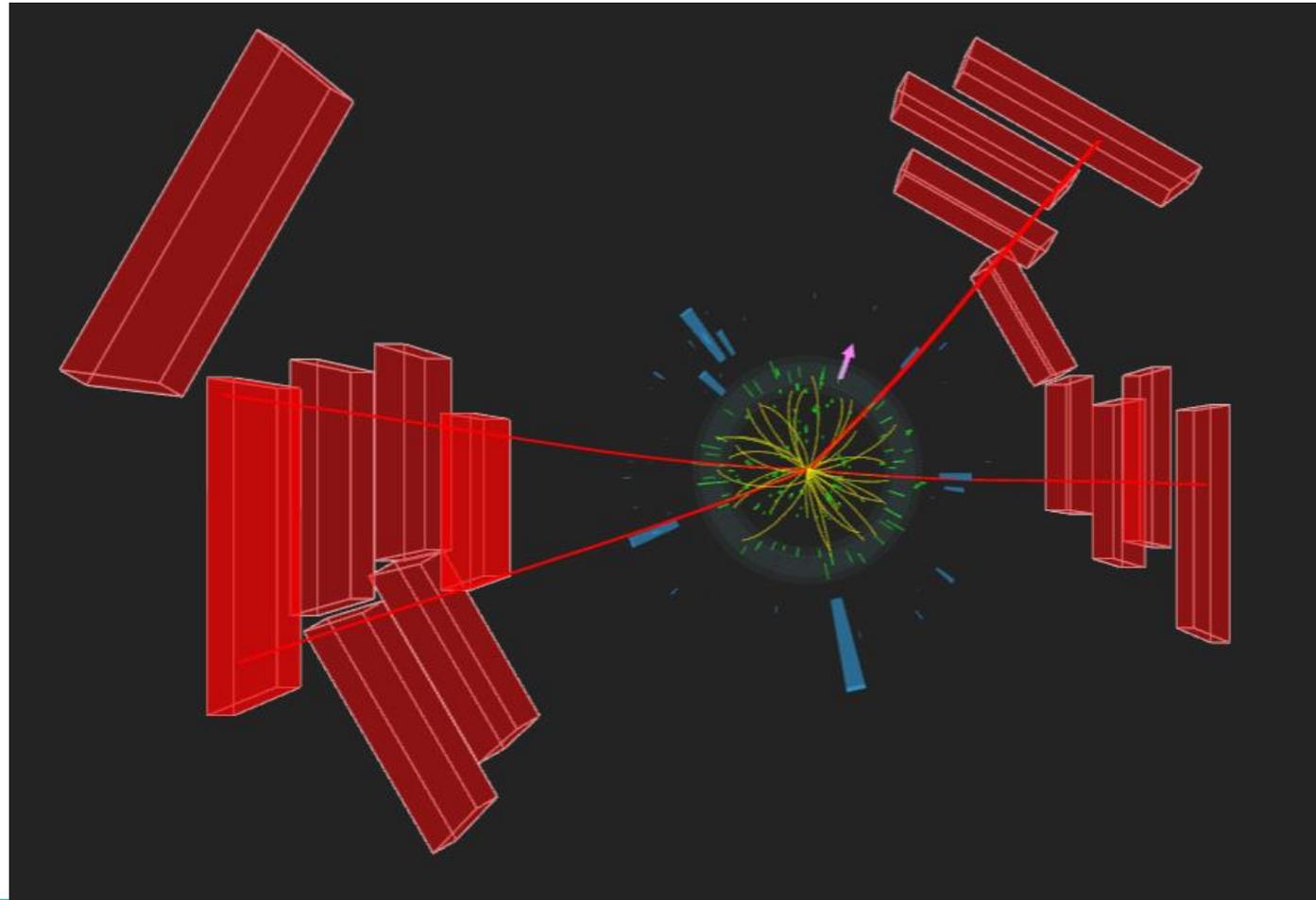


# Le particelle: bosone H (ZZ)

- Il bosone H è una particella neutra ( $H^0$ )
- Il bosone H può “decadere” in tanti modi...
- Le trasformazioni più facili da identificare hanno **due coppie di elettroni o di muoni**

**$H \rightarrow ZZ$**

- Possibili segnali?

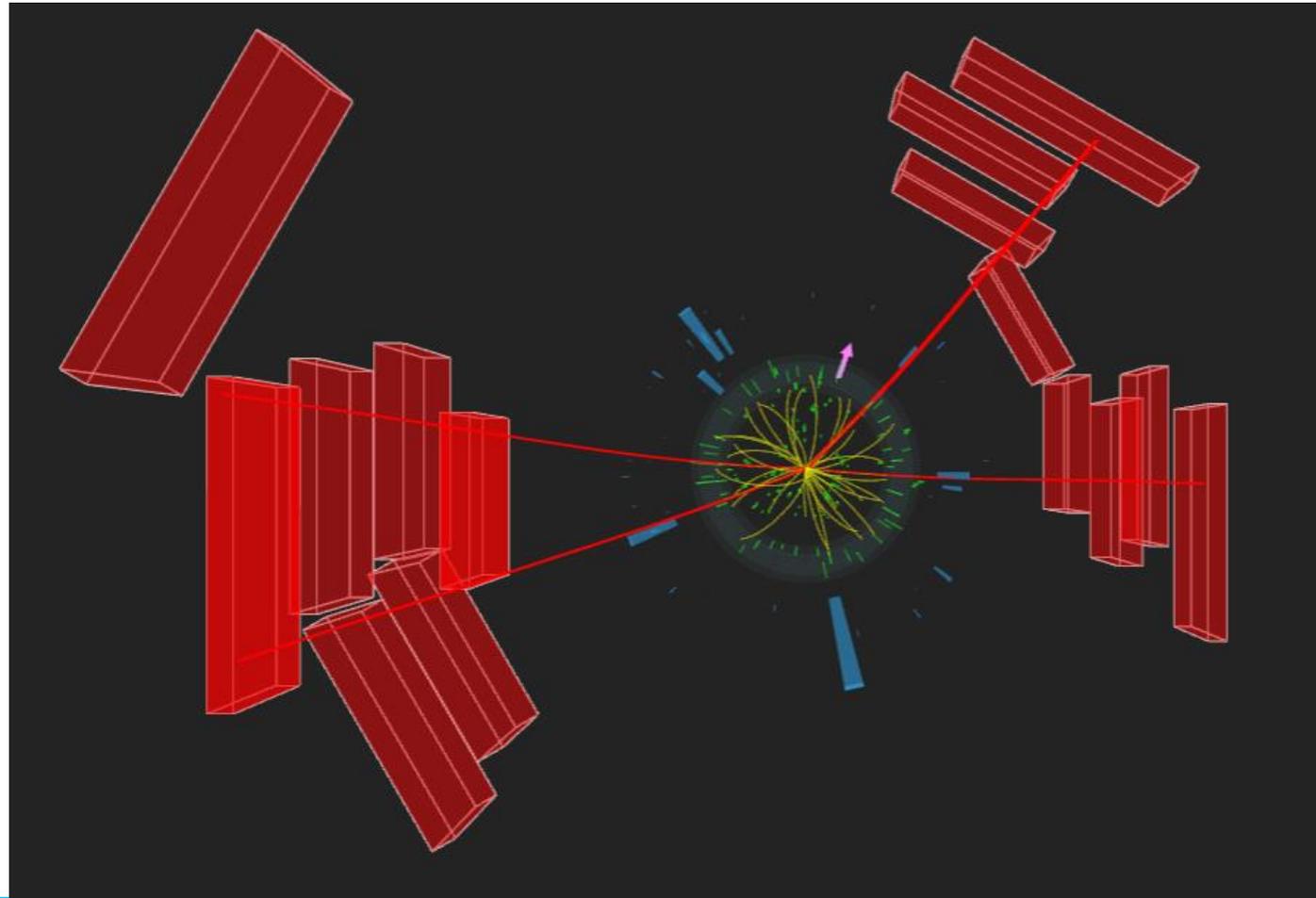


# Le particelle: bosone H (ZZ)

- Il bosone H è una particella neutra ( $H^0$ )
- Il bosone H può “decadere” in tanti modi...
- Le trasformazioni più facili da identificare hanno **due coppie di elettroni o di muoni**

$$H \rightarrow ZZ$$

- Possibili segnali:
  - $e^+ e^- e^+ e^-$
  - $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$
  - $e^+ e^- \mu^+ \mu^-$

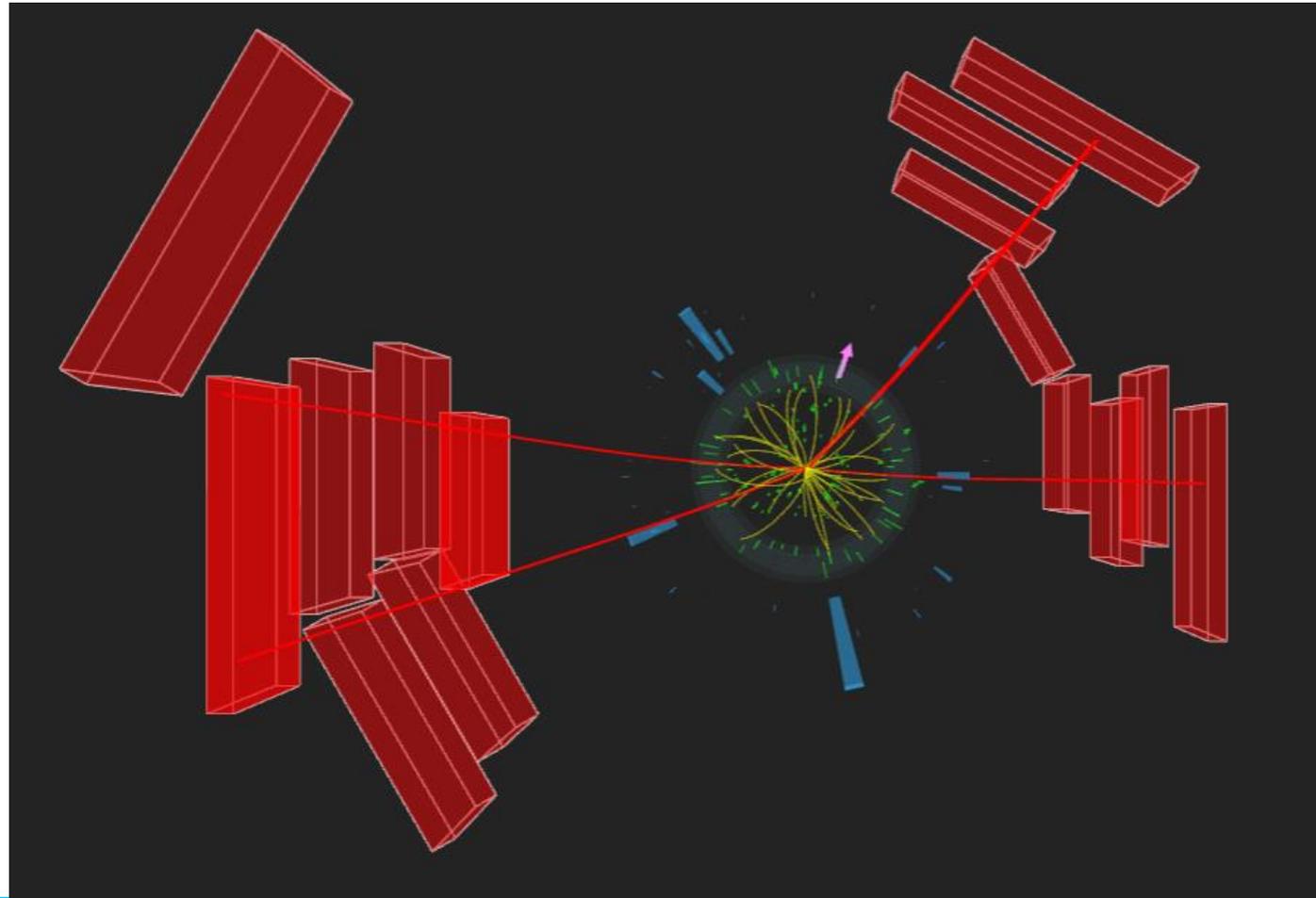


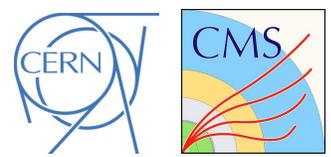
# Le particelle: bosone H (ZZ)

- Il bosone H è una particella neutra ( $H^0$ )
- Il bosone H può “decadere” in tanti modi...
- Le trasformazioni più facili da identificare hanno **due coppie di elettroni o di muoni**

## $H \rightarrow ZZ$

- Possibili segnali:
  - $e^+ e^- e^+ e^-$
  - $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$
  - $e^+ e^- \mu^+ \mu^-$
  - ...
  - $\nu_e \nu_e \nu_\mu \nu_\mu$





# CIMA: selezione del file

- CERN → 1 Marzo 2024 → Catania



Choose your Masterclass	Choose your location	Choose your data file
TestEvents-01Jan2022	Constantine2024-A	10.1
Santander-13May2024	Catania2024	10.2
CERN-27Nov2023	Kharkiv2024	10.3
Salo-07Dec2023	Helsinki2024	10.4
Sofia-13Dec2023	SantiagoCampostela2024	10.5
CERN-LAMAP-08Dec2023		10.6
MP-15Jan2024		10.7
Cakovec-24Jan2024		10.8
Bristol-27Mar2024		10.9
CERN-09Feb2024		100.1
Sandbox-31Dec2023		100.11
CERN-20Feb2024		100.12
CERN-26Feb2024		100.13
CERN-29Feb2024		100.14
CERN-22Feb2024		100.15
CERN-01Mar2024		100.16
CERN-04Mar2024		100.17



Masterclass: CERN-01Mar2024  
 Location: Catania2024  
 Group: 10.1

**Select Event**

Event index:  ▼

Event number: 10.1-1

**Final State**

e ν       μ ν

e e       μ μ

4e       4μ

2e 2μ

**Primary State**

Charged Particle:

W<sup>+</sup>     W<sup>-</sup>     W<sup>±</sup>

Neutral Particle (Z, H)

Zoo

**Enter Mass**

GeV/c<sup>2</sup>

Next

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass

- Numero dell'evento: da 1 a 100
- Final State: quali segnali avete osservato
- Primary State: quale particella era stata prodotta
- Solo per "Neutral Particle (Z, H)" → Inserire il valore della massa "Enter Mass"

01/03/2024

A. Lapertosa

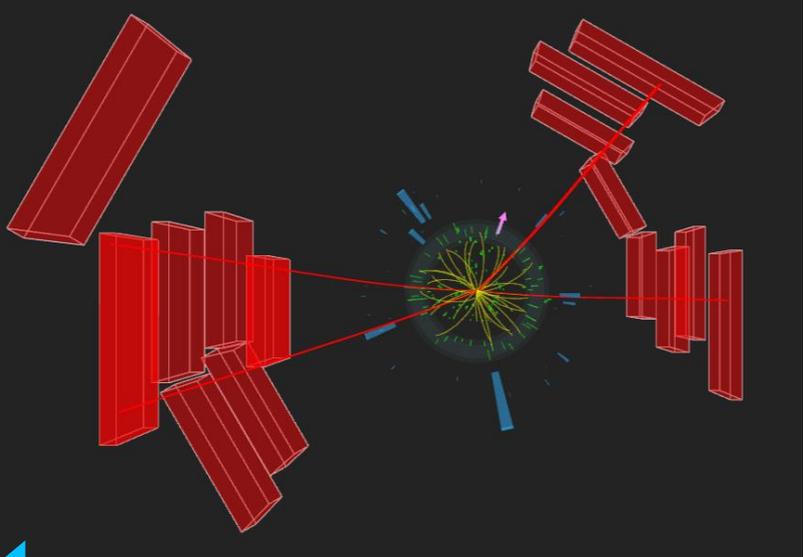
26

# Esempio: $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ (massa 182.95)

<p><b>Select Event</b></p> <p>Event index: <input type="text" value="1"/></p> <p>Event number: 10.1-1</p>	<p><b>Final State</b></p> <p> <input type="radio"/> e v      <input type="radio"/> <math>\mu</math> v  <input type="radio"/> e e      <input type="radio"/> <math>\mu</math> <math>\mu</math>  <input type="radio"/> 4e      <input checked="" type="radio"/> 4<math>\mu</math>  <input type="radio"/> 2e 2<math>\mu</math> </p>	<p><b>Primary State</b></p> <p>Charged Particle:</p> <p> <input type="radio"/> W+      <input type="radio"/> W-      <input type="radio"/> W<math>\pm</math>  <input type="radio"/> Neutral Particle (Z, H)  <input type="radio"/> Zoo         </p>	<p><b>Enter Mass</b></p> <p><input type="text"/> GeV/c<sup>2</sup></p> <p><input type="button" value="Next"/></p>
---	--	---	---

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
-------------	--------------	-------------	---------------	------

## 1. Identificare i segnali e la particella

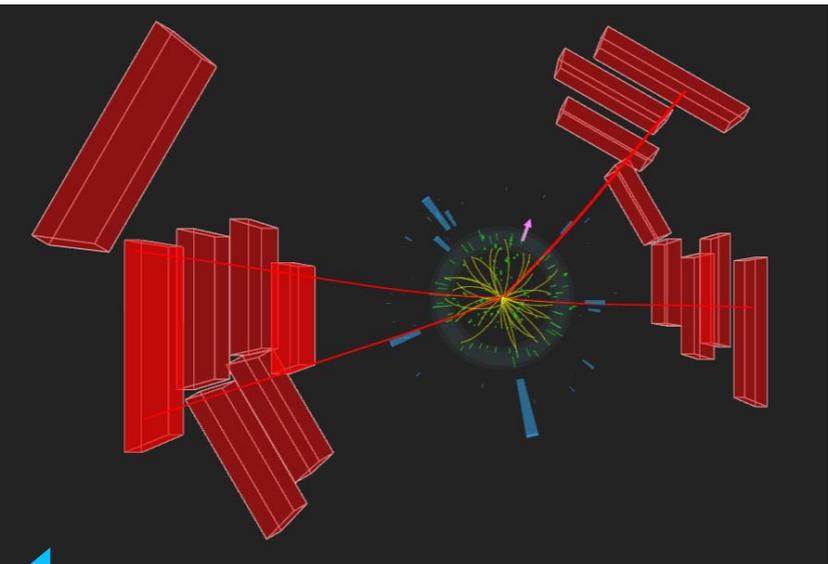


# Esempio: $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ (massa 182.95)

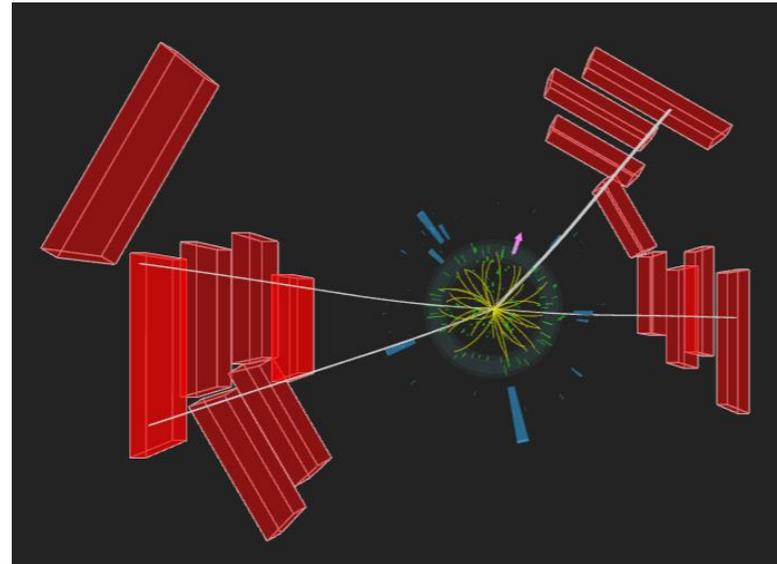
<p><b>Select Event</b></p> <p>Event index: <input type="text" value="1"/></p> <p>Event number: 10.1-1</p>	<p><b>Final State</b></p> <p> <input type="radio"/> e <math>\nu</math>      <input type="radio"/> <math>\mu \nu</math>  <input type="radio"/> e e        <input type="radio"/> <math>\mu \mu</math>  <input type="radio"/> 4e            <input checked="" type="radio"/> 4<math>\mu</math>  <input type="radio"/> 2e 2<math>\mu</math> </p>	<p><b>Primary State</b></p> <p>Charged Particle:</p> <p> <input type="radio"/> W<sup>+</sup>    <input type="radio"/> W<sup>-</sup>    <input type="radio"/> W<math>\pm</math>  <input checked="" type="radio"/> Neutral Particle (Z, H)  <input type="radio"/> Zoo         </p>	<p><b>Enter Mass</b></p> <p><input type="text"/> GeV/c<sup>2</sup></p> <p><input type="button" value="Next"/></p>
---	--	--	---

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
-------------	--------------	-------------	---------------	------

1. Identificare i segnali e la particella



2. Selezionare le tracce col mouse

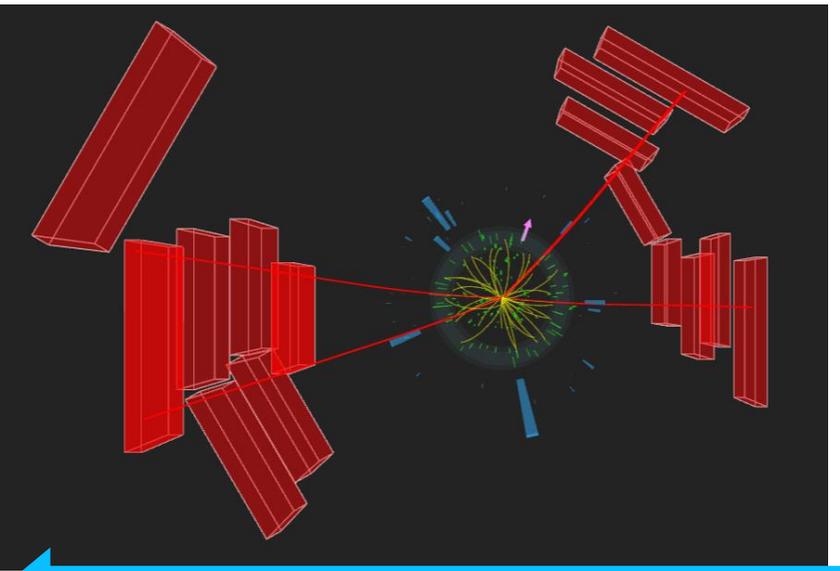


# Esempio: $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ (massa 182.95)

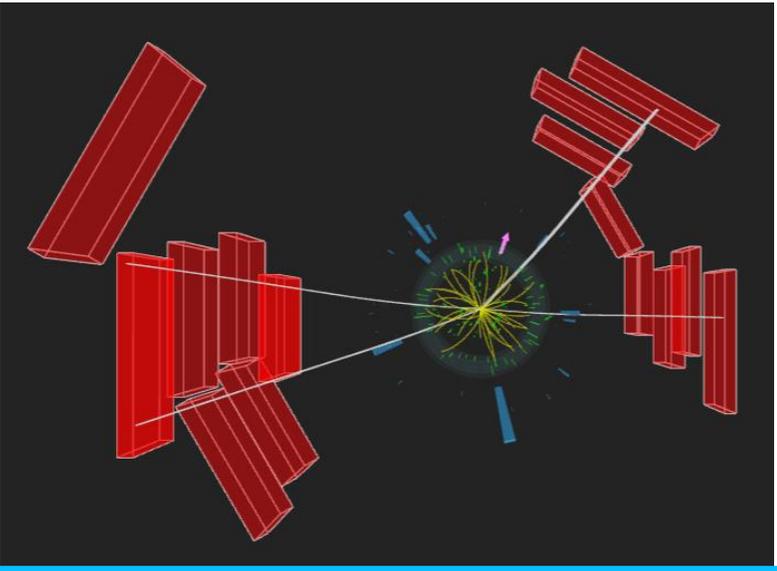
<p><b>Select Event</b></p> <p>Event index: <input type="text" value="1"/></p> <p>Event number: 10.1-1</p>	<p><b>Final State</b></p> <p> <input type="radio"/> e v      <input type="radio"/> <math>\mu</math> v  <input type="radio"/> e e      <input type="radio"/> <math>\mu</math> <math>\mu</math>  <input type="radio"/> 4e      <input checked="" type="radio"/> 4<math>\mu</math>  <input type="radio"/> 2e 2<math>\mu</math> </p>	<p><b>Primary State</b></p> <p>Charged Particle:</p> <p> <input type="radio"/> W+      <input type="radio"/> W-      <input type="radio"/> W<math>\pm</math>  <input checked="" type="radio"/> Neutral Particle (Z, H)  <input type="radio"/> Zoo         </p>	<p><b>Enter Mass</b></p> <p><input type="text" value="182.95"/> GeV/c<sup>2</sup></p> <p><input type="button" value="Next"/></p>
---	--	--	--

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
-------------	--------------	-------------	---------------	------

1. Identificare i segnali e la particella

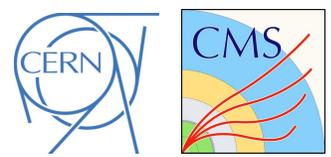


2. Selezionare le tracce col mouse



3. Premere "M" sulla tastiera





# Esempio: $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ (massa 182.95)

<b>Select Event</b> Event index: <input type="text" value="1"/> Event number: 10.1-1	<b>Final State</b> <input type="radio"/> e v <input type="radio"/> $\mu$ v <input type="radio"/> e e <input type="radio"/> $\mu$ $\mu$ <input type="radio"/> 4e <input checked="" type="radio"/> 4 $\mu$ <input type="radio"/> 2e 2 $\mu$	<b>Primary State</b> Charged Particle: <input type="radio"/> W+ <input type="radio"/> W- <input type="radio"/> W $\pm$ <input checked="" type="radio"/> Neutral Particle (Z, H) <input type="radio"/> Zoo	<b>Enter Mass</b> <input type="text" value="182.95"/> GeV/c <sup>2</sup> <input type="button" value="Next"/>
--	---	---	--

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
-------------	--------------	-------------	---------------	------

# Esempio: $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ (massa 182.95)

<p><b>Select Event</b></p> <p>Event index: <input type="text" value="1"/> <span>▼</span></p> <p>Event number: 10.1-1</p>	<p><b>Final State</b></p> <p> <input type="radio"/> e <math>\nu</math>      <input type="radio"/> <math>\mu \nu</math>  <input type="radio"/> e e      <input type="radio"/> <math>\mu \mu</math>  <input type="radio"/> 4e      <input checked="" type="radio"/> 4<math>\mu</math>  <input type="radio"/> 2e 2<math>\mu</math> </p>	<p><b>Primary State</b></p> <p>Charged Particle:</p> <p> <input type="radio"/> W<sup>+</sup>    <input type="radio"/> W<sup>-</sup>    <input type="radio"/> W<math>\pm</math>  <input checked="" type="radio"/> Neutral Particle (Z, H)  <input type="radio"/> Zoo         </p>	<p><b>Enter Mass</b></p> <p><input type="text" value="182.95"/> GeV/c<sup>2</sup></p> <p><input type="button" value="Next"/></p>
--	--	--	--

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass

<p><b>Select Event</b></p> <p>Event index: <input type="text" value="2"/> <span>▼</span></p> <p>Event number: 10.4-2</p>	<p><b>Final State</b></p> <p> <input type="radio"/> e <math>\nu</math>      <input type="radio"/> <math>\mu \nu</math>  <input type="radio"/> e e      <input type="radio"/> <math>\mu \mu</math>  <input type="radio"/> 4e      <input type="radio"/> 4<math>\mu</math>  <input type="radio"/> 2e 2<math>\mu</math> </p>	<p><b>Primary State</b></p> <p>Charged Particle:</p> <p> <input type="radio"/> W<sup>+</sup>    <input type="radio"/> W<sup>-</sup>    <input type="radio"/> W<math>\pm</math>  <input type="radio"/> Neutral Particle (Z, H)  <input type="radio"/> Zoo         </p>	<p><b>Enter Mass</b></p> <p><input type="text"/> GeV/c<sup>2</sup></p> <p><input type="button" value="Next"/></p>
--	---	---	---

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
9001	10.4-1	4e	neutral	182.95



# Programma delle attività del pomeriggio

- 14:00-15:30 – Ogni ricercatore identifica 100 eventi
  - iSPY
  - CIMA
- 15:30-16:00 – Discussione dei risultati: analisi statistica
- 16:00-17:00 – Collegamento in videoconferenza con CERN e altri 4 istituti
  - Presentazione
  - Discussione dei risultati
  - Quiz

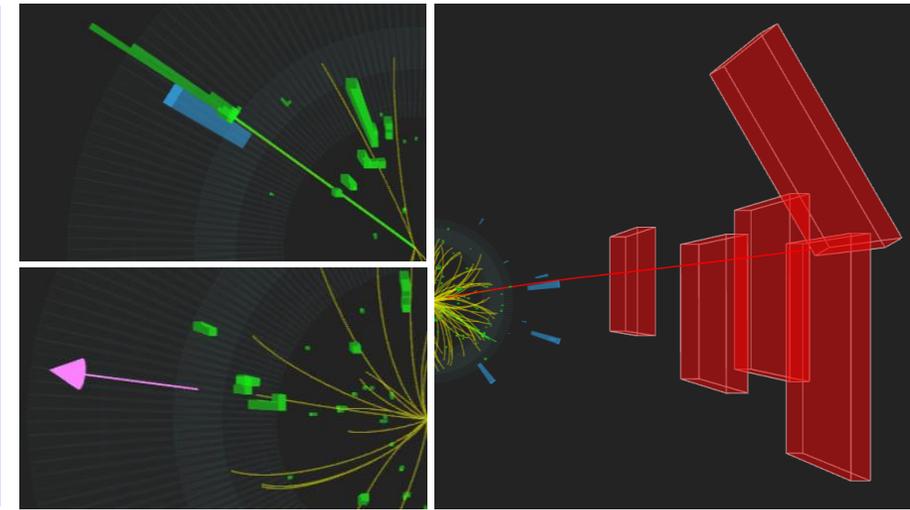
# Legenda

- **Segnali:**

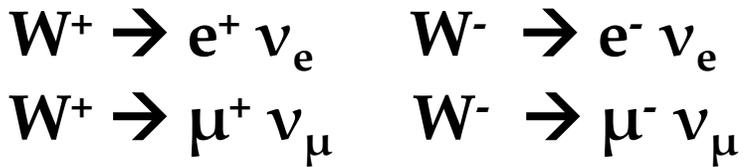
- Elettrone ( $e$ ) : **traccia verde**
- Muone ( $\mu$ ) : **traccia rossa**
- Neutrino ( $\nu$ ) : **freccia rosa**

**Final State**

<input type="radio"/> $e \nu$	<input type="radio"/> $\mu \nu$
<input type="radio"/> $e e$	<input type="radio"/> $\mu \mu$
<input type="radio"/> $4e$	<input type="radio"/> $4\mu$
<input type="radio"/> $2e 2\mu$	



- **Particelle:**



**Primary State**

Charged Particle:

<input type="radio"/> $W^+$	<input type="radio"/> $W^-$
<input type="radio"/> Neutral Particle (Z, H)	
<input type="radio"/> Zoo	

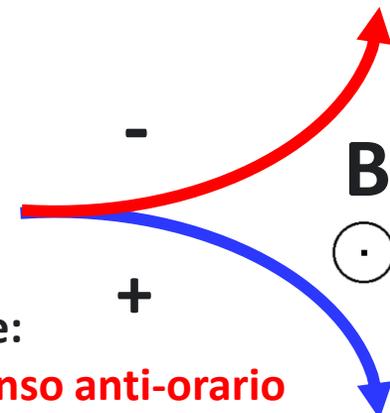
- Click su tracce verdi/rosse
- Premere "M" sulla tastiera

**Enter Mass**

**GeV/c<sup>2</sup>**

- **Curvatura tracce cariche:**

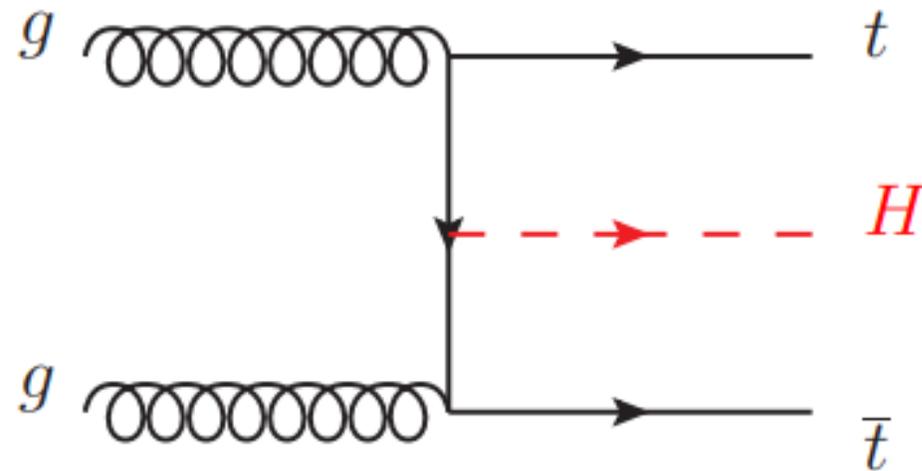
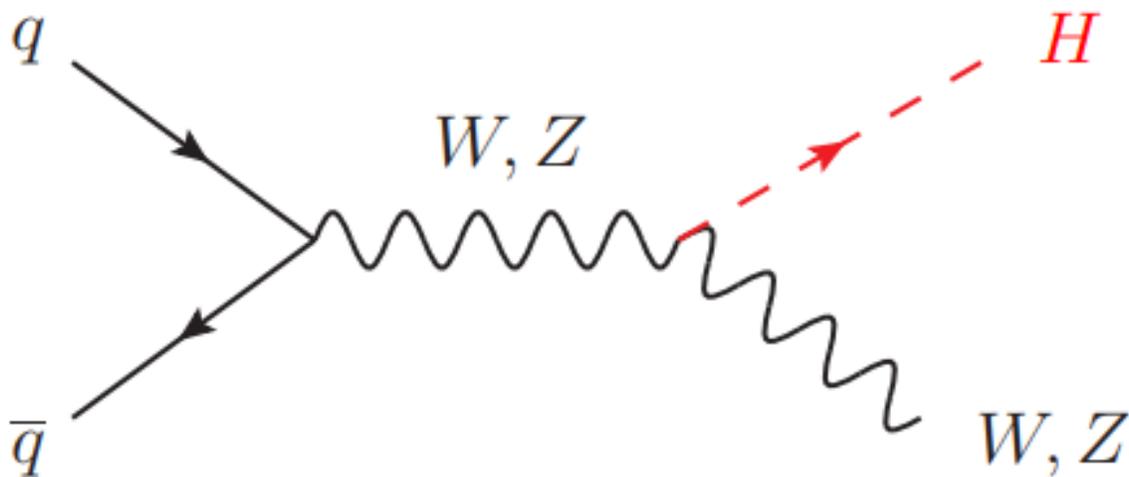
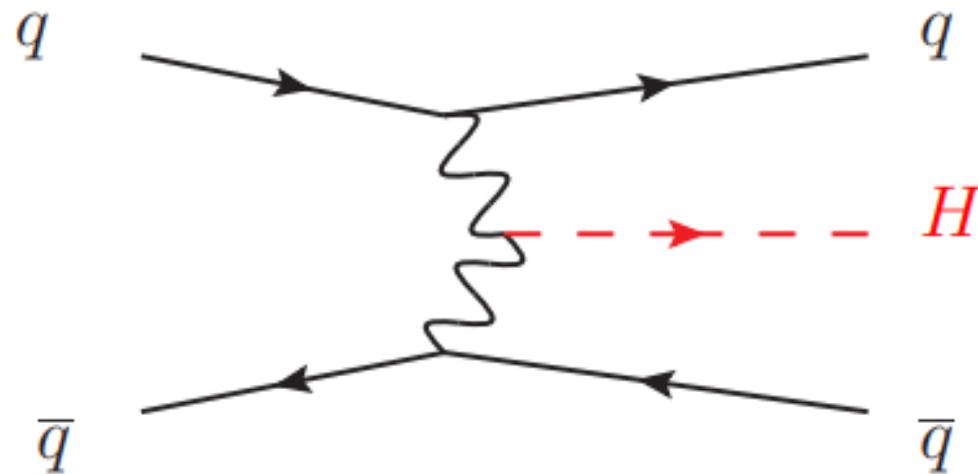
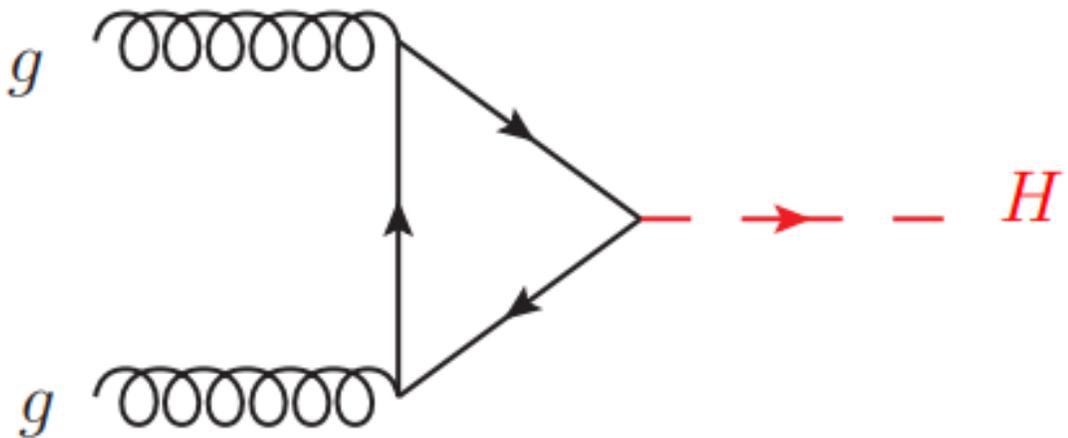
- **Carica negativa: senso anti-orario**
- **Carica positiva: senso orario**





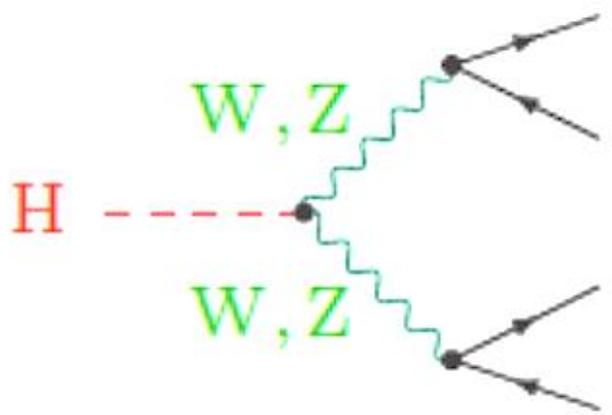
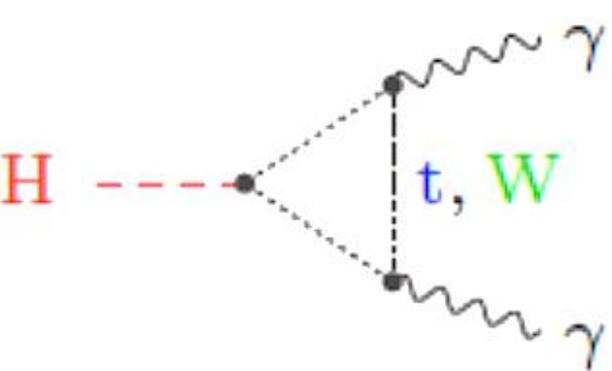
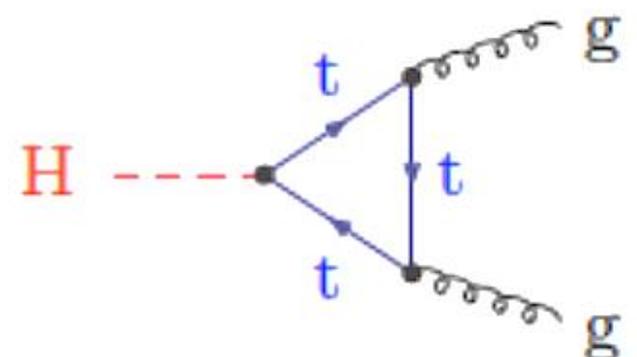
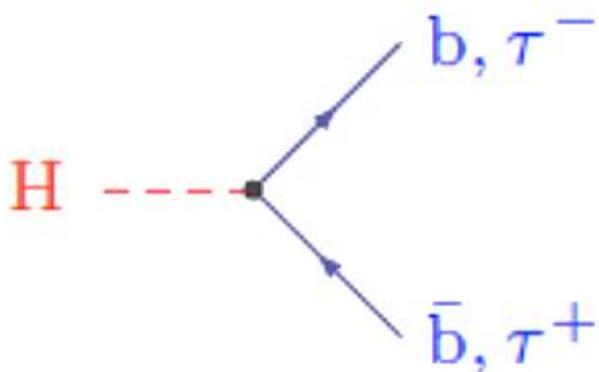
# Backup

# Processi di produzione del Bosone di Higgs



# Canali di Decadimento del Bosone di Higgs

- Testo



Decadimento	Probabilità [%]
$H \rightarrow b\bar{b}$	$57.5 \pm 1.9$
$H \rightarrow WW$	$21.6 \pm 0.9$
$H \rightarrow gg$	$8.56 \pm 0.86$
$H \rightarrow \tau\tau$	$6.30 \pm 0.36$
$H \rightarrow c\bar{c}$	$2.90 \pm 0.35$
$H \rightarrow ZZ$	$2.67 \pm 0.11$
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$0.228 \pm 0.011$
$H \rightarrow Z\gamma$	$0.155 \pm 0.014$
$H \rightarrow \mu\mu$	$0.022 \pm 0.001$

# Meccanismo di Higgs: la massa

- Interazione con bosone di Higgs  
proporzionale alla massa!
  - t: 173 GeV
  - Z: 90 GeV
  - W: 80 GeV
  - b: 4 GeV
  - $\tau$ : 2 GeV
  - $\mu$ : 0.1 GeV

