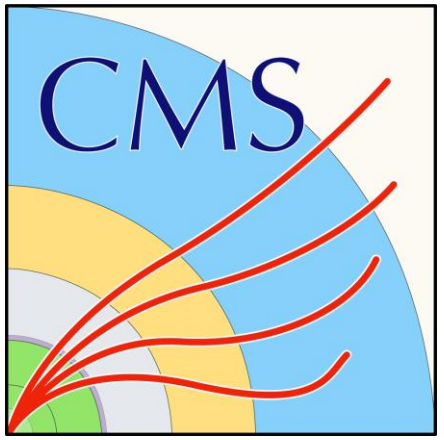


Introduzione all'Esercizio

18/02/2026

A. Lapertosa

Fisica delle particelle: Modello Standard

Quark

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

Leptoni

e elettrone	μ muone	τ tau
ν_e neutrino	ν_μ neutrino	ν_τ neutrino

Bosoni

W

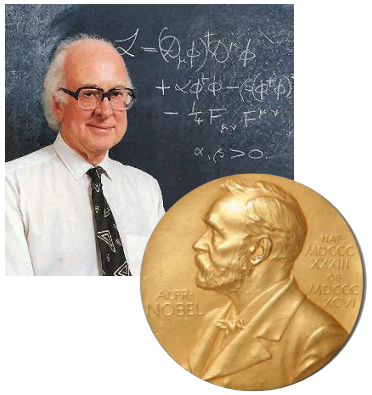
Z

g gluone

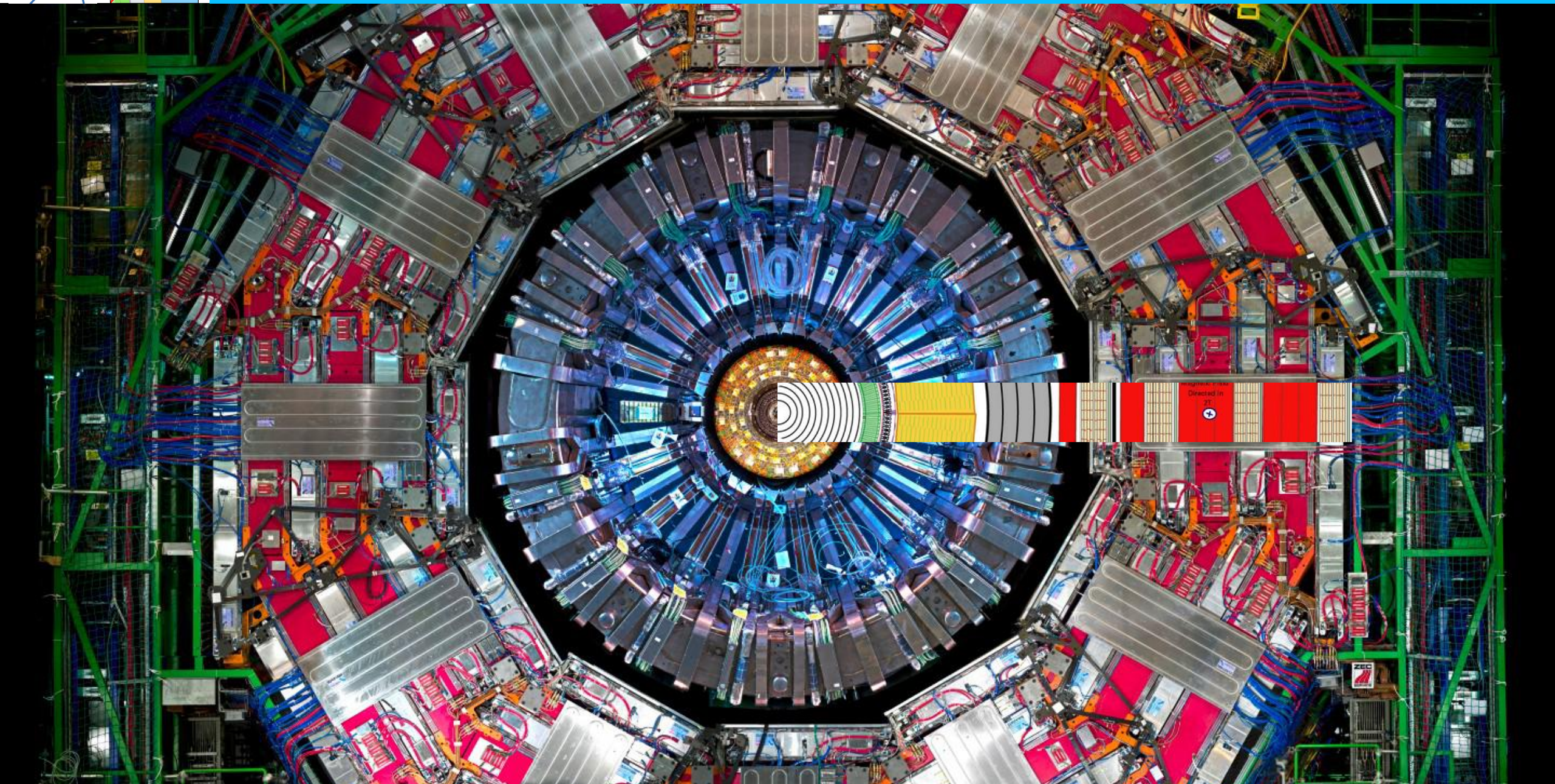
γ fotone

H Higgs

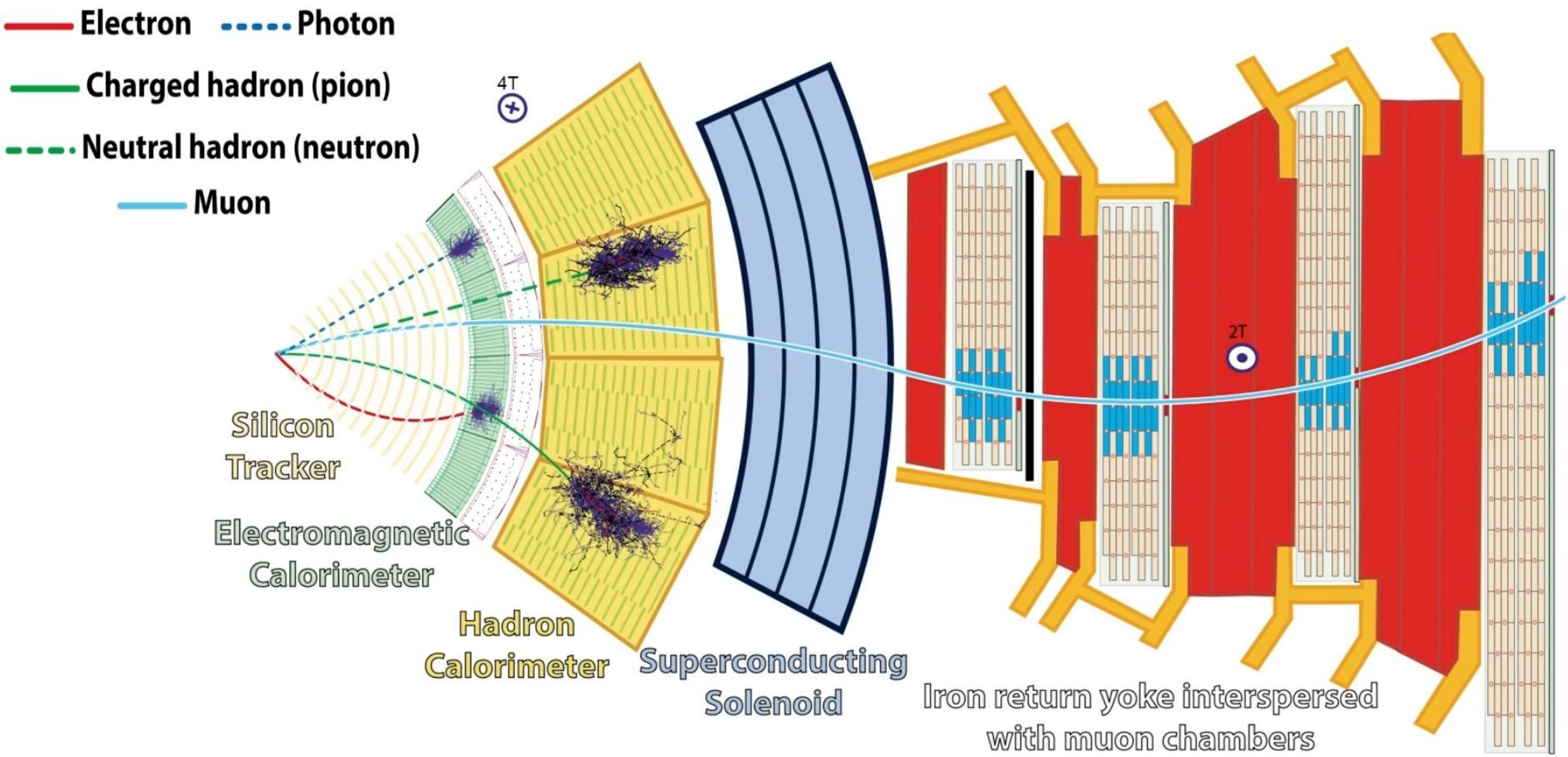
Higgs



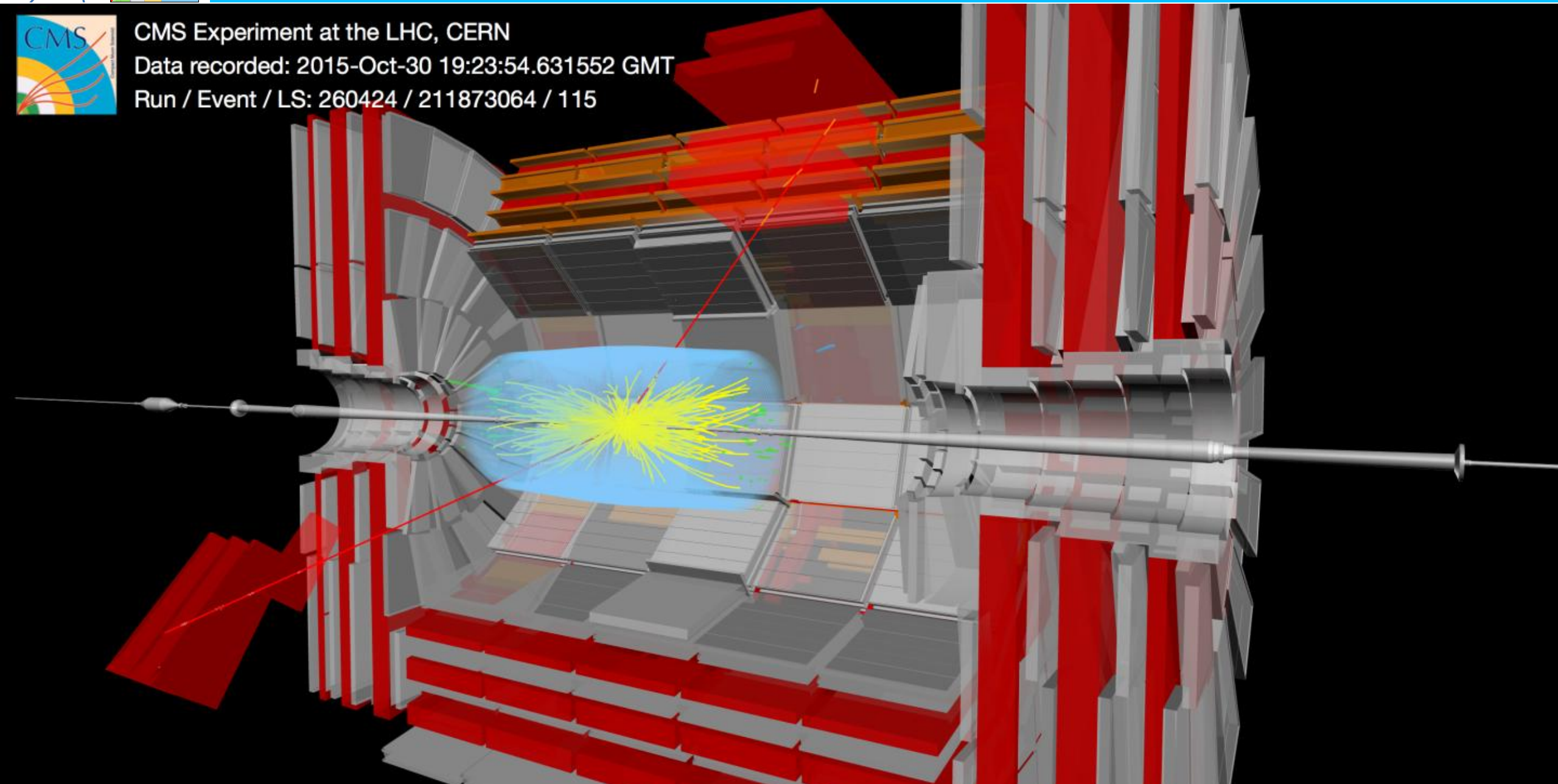
Una fetta di CMS



Rivelatori di particelle: l'esperimento CMS



Le collisioni dentro l'esperimento CMS



Le collisioni

- Al centro del rivelatore CMS, i pacchetti di protoni (100 miliardi) si attraversano
- Alcune decine di protoni si ‘‘scontrano’’ ogni 25 ns
- Vengono registrate circa 1000 collisioni al secondo

- L’obiettivo dell’esercizio di oggi:
  - **Identificare le particelle a partire dalle loro tracce**

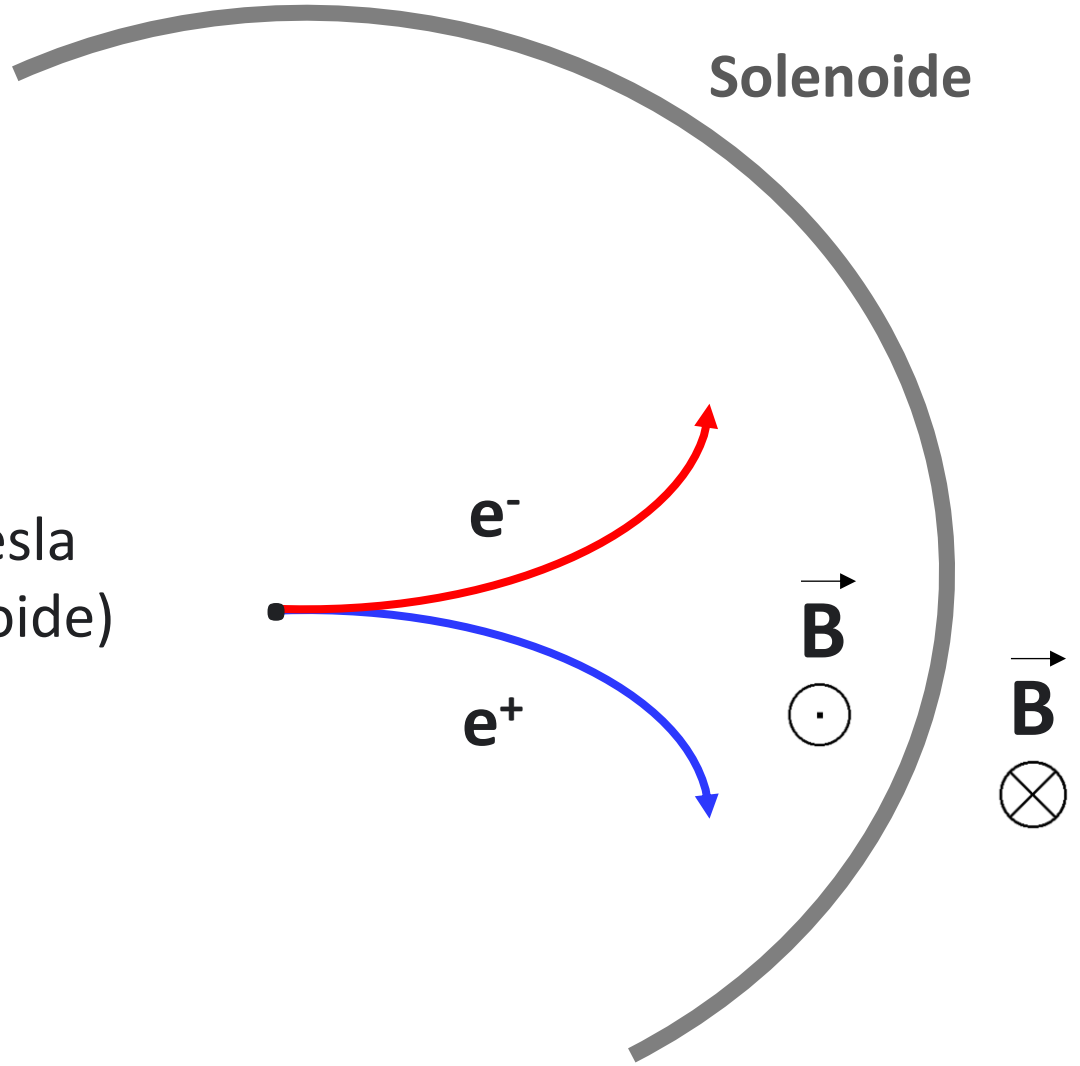
  - Ingredienti:
    - **100 collisioni reali** registrate da CMS
    - **Event display:** visualizzare le tracce lasciate dalle particelle
    - **Tabella:** segnare la tipologia di particelle osservata

Forza di Lorentz

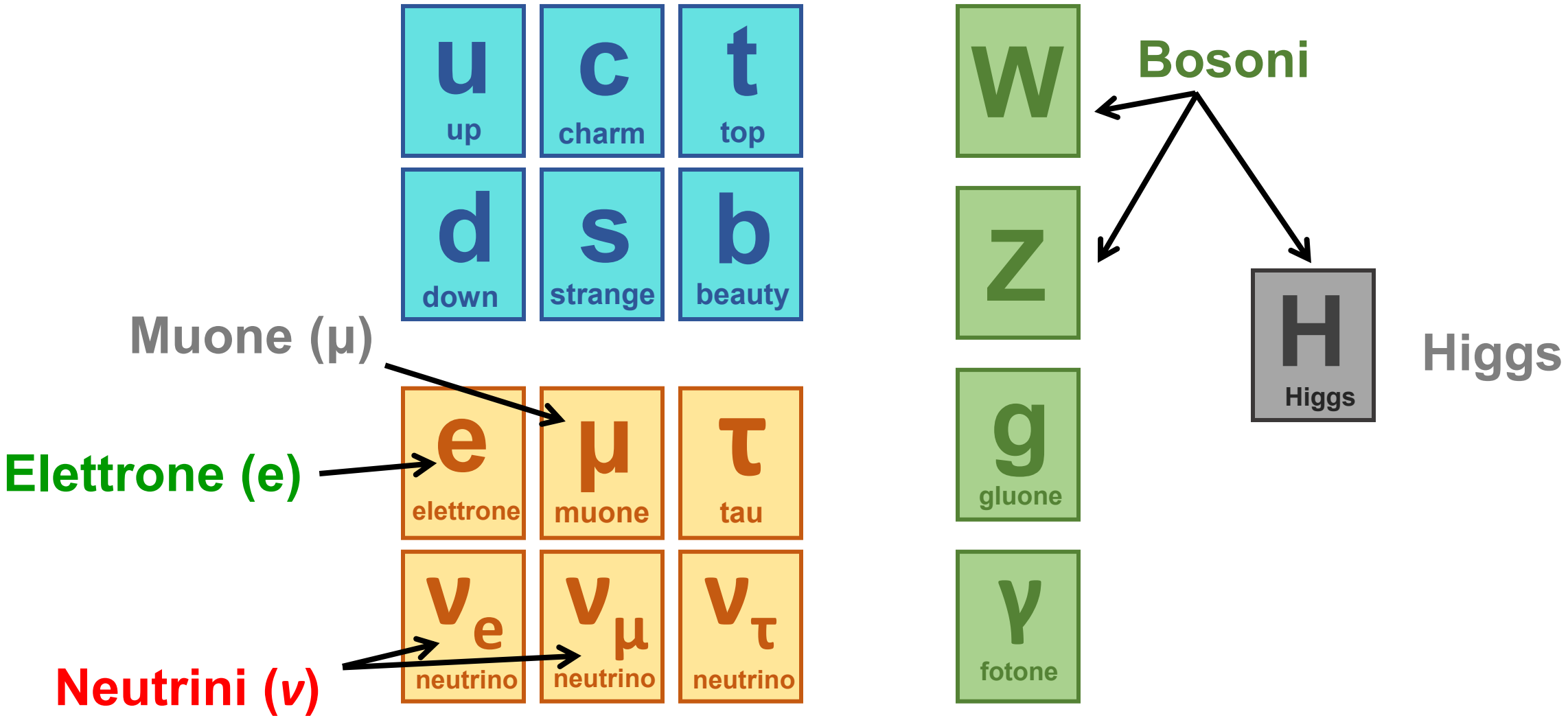
- La traiettoria di una particella carica viene deviata in presenza di campo magnetico

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



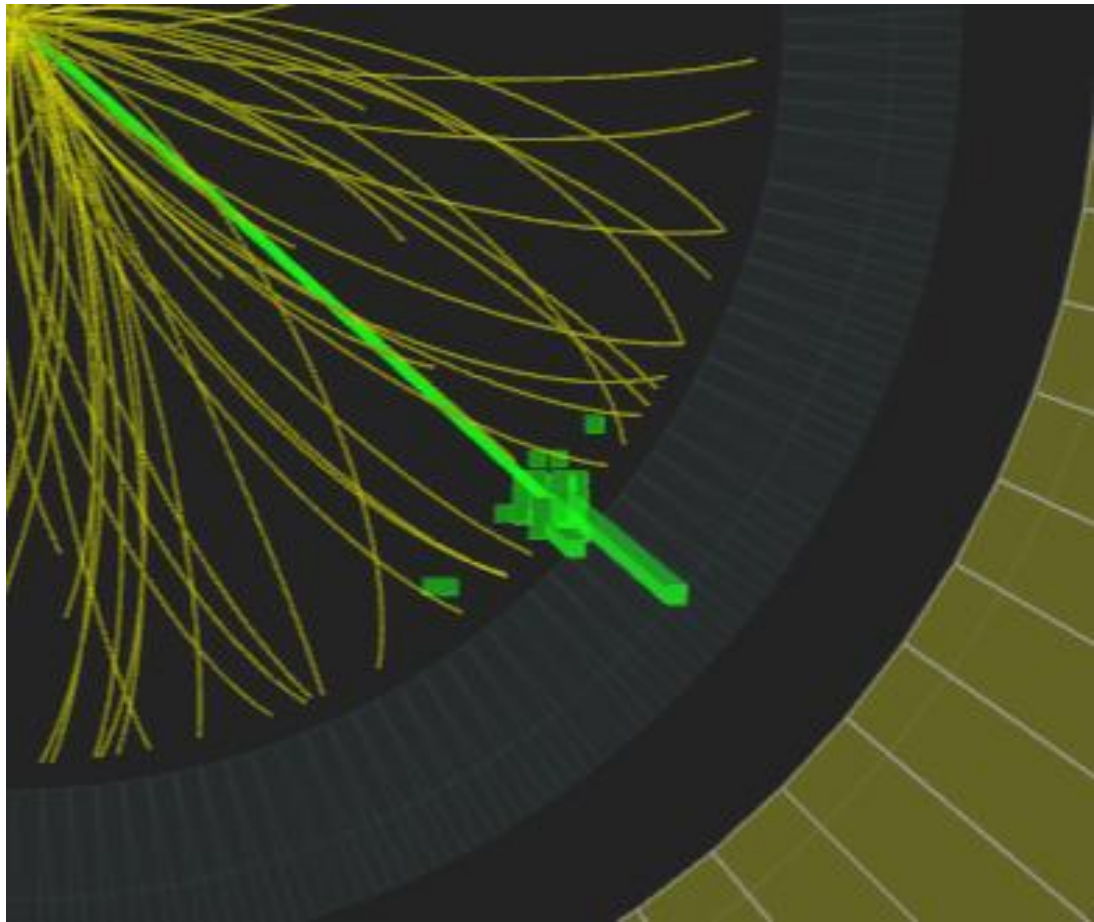
Cosa cerchiamo nei nostri eventi



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

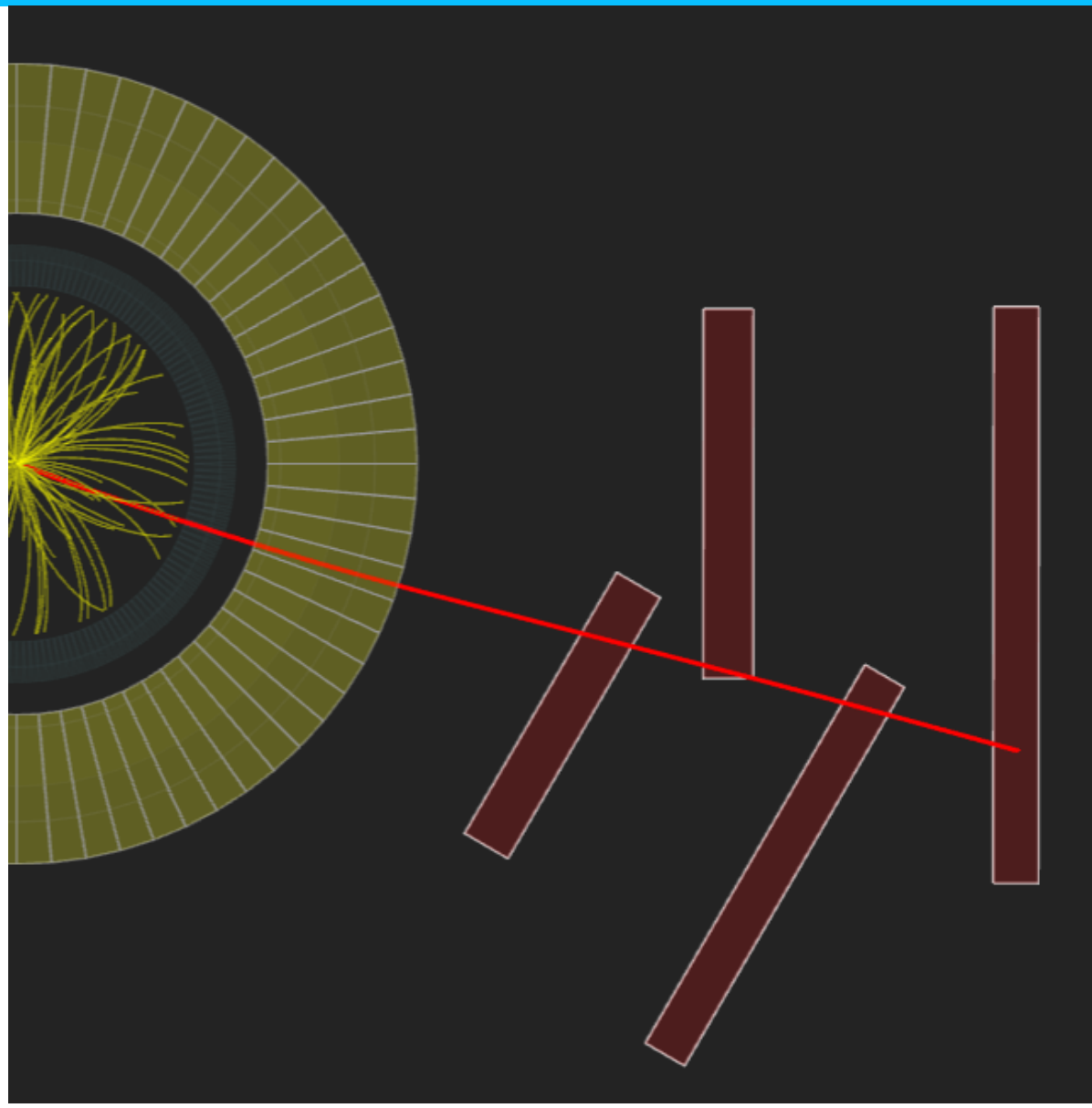
- Caratteristiche del segnale:
  - **Traccia: verde**
  - **Blocco di energia: verde**



I segnali: muone (μ)

- 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

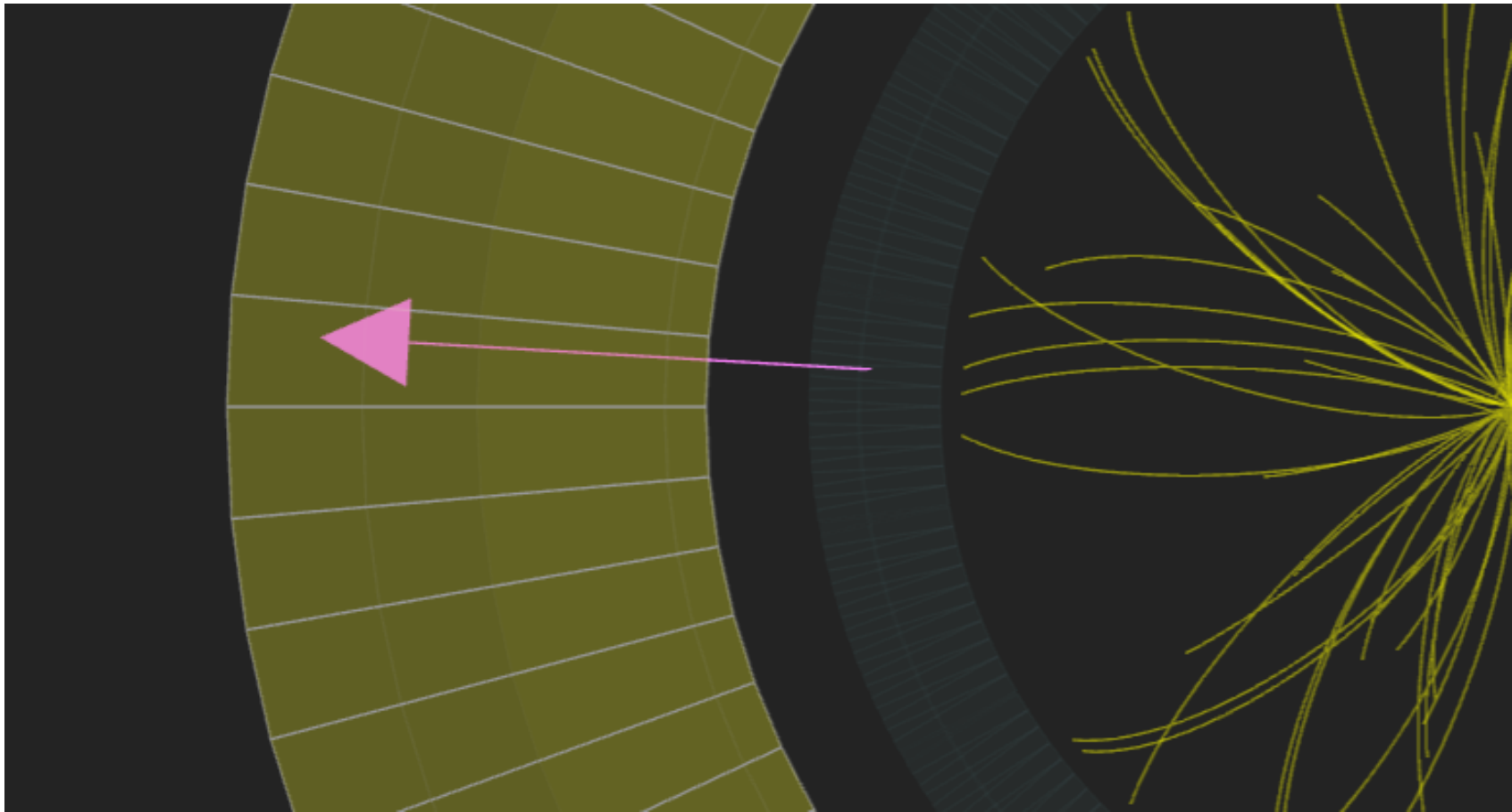
- Caratteristiche del segnale:
  - **Traccia: rossa**
  - **Camere a muoni colpite: rosse**



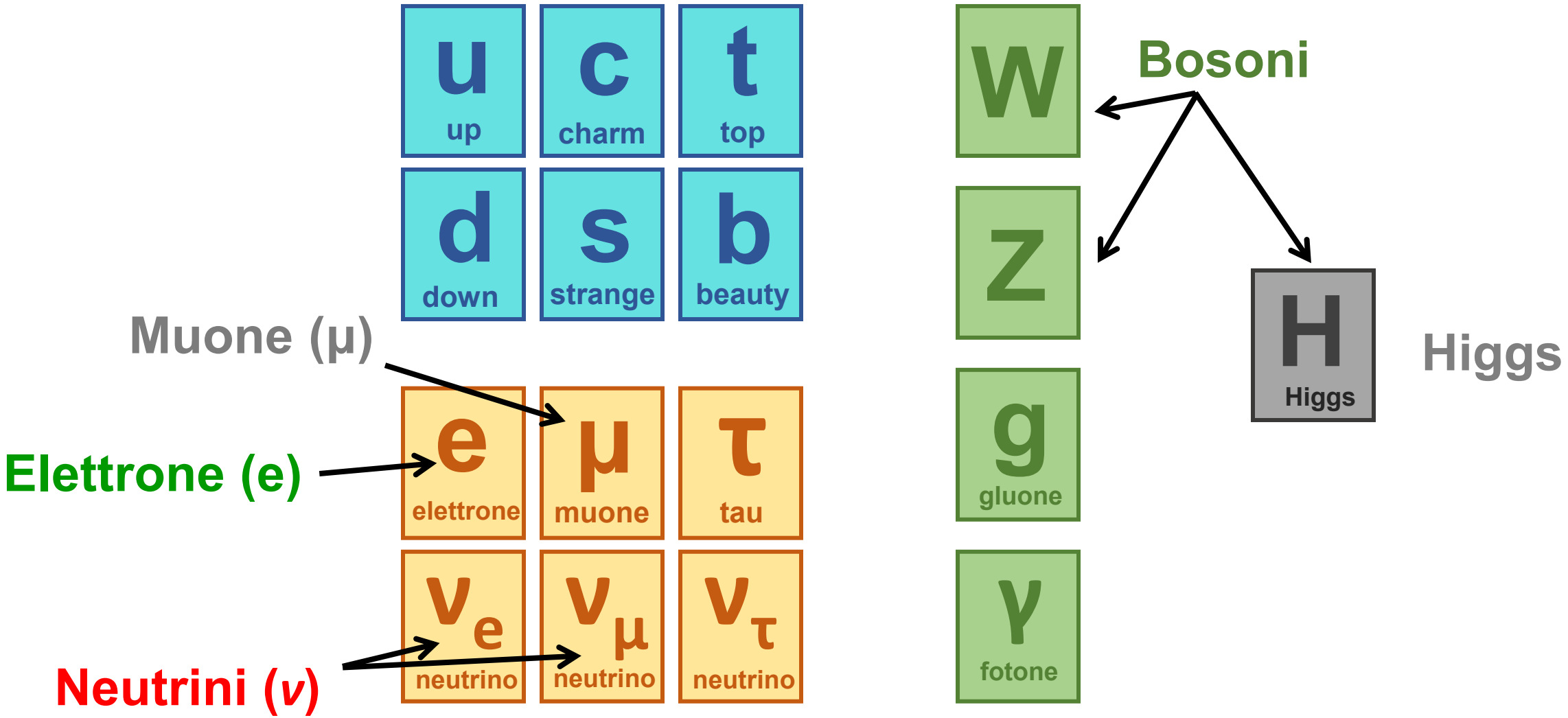
I segnali: neutrino (ν) …energia mancante

- 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 → ‘‘energia mancante’’

- Caratteristiche del segnale:
  - **Freccia: rosa**



Cosa cerchiamo nei nostri eventi



Le particelle: bosone W (e ν, μ ν)

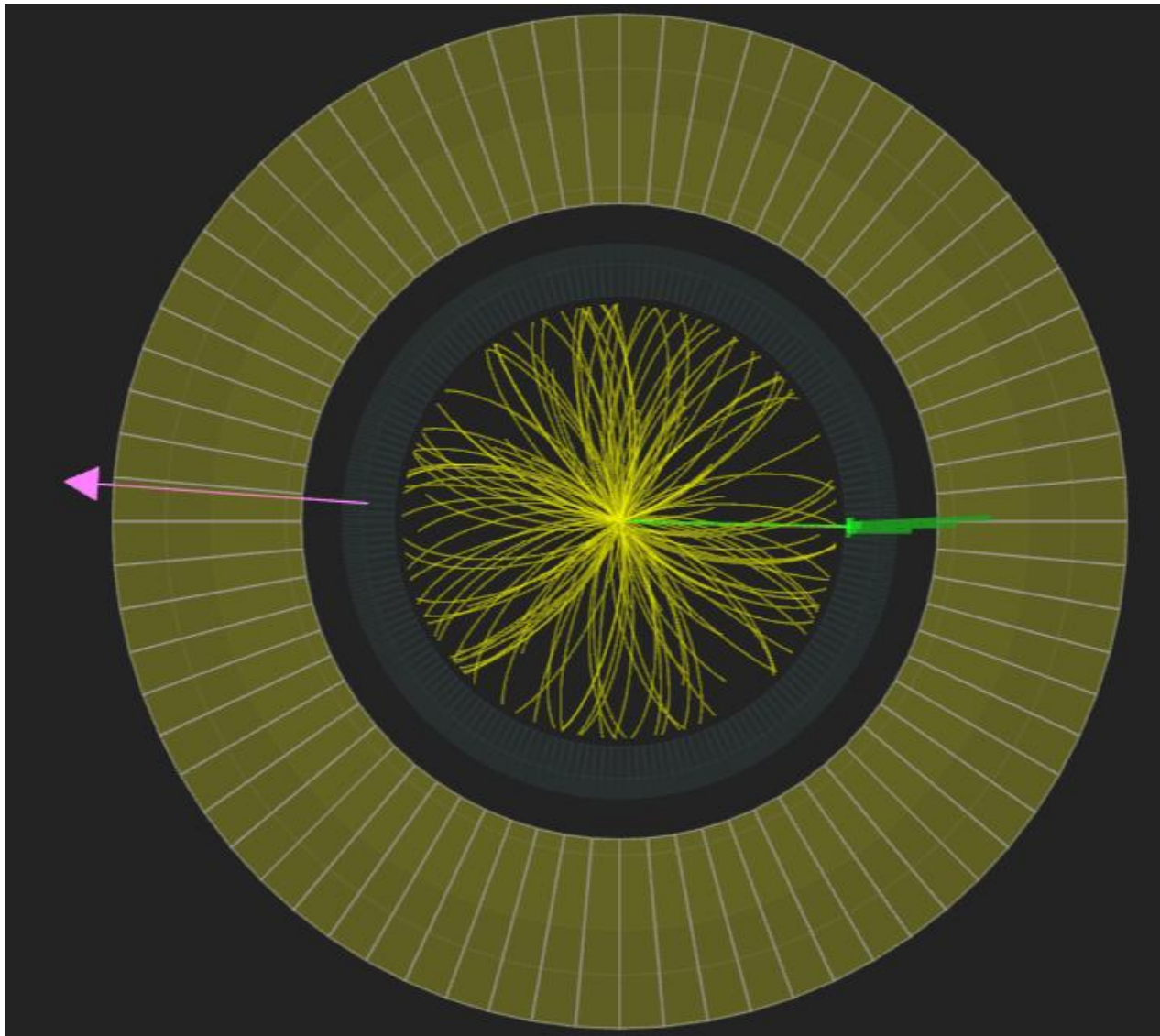
- Il bosone W è una particella carica (W^+, W^-)
- Il bosone W può ‘‘decadere’’ in tanti modi…
- Le trasformazioni più facili da identificare hanno: **elettroni e neutrini, muoni e neutrini**

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

- Caratteristiche del segnale W(e ν):
  - **Traccia: verde**
  - **Freccia: rosa**

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

- Caratteristiche del segnale W(μ ν):
  - **Traccia: rossa**
  - **Freccia: rosa**

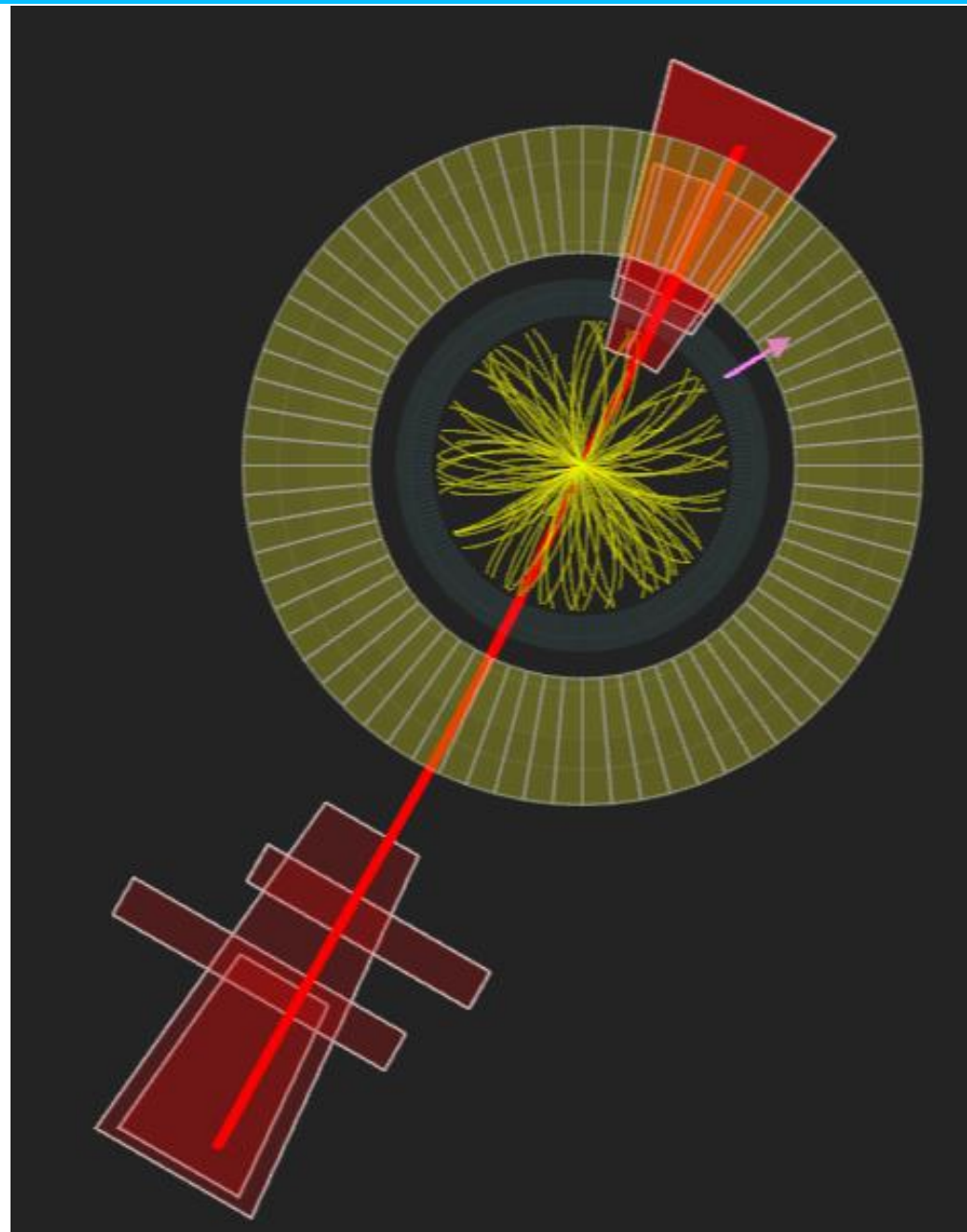


Le particelle: bosone Z (ee, μμ)

- Il bosone Z è una particella neutra (Z^0)
- Il bosone Z può ‘‘decadere’’ in tanti modi…
- Le trasformazioni più facili da identificare hanno **una coppia di elettroni o di muoni**

$$Z \rightarrow e^+ e^- \qquad Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

- Caratteristiche del segnale Z(ee):
  - **Traccia: verde**
  - **Traccia: verde**
- Caratteristiche del segnale Z(μμ):
  - **Traccia: rossa**
  - **Traccia: rossa**



Le particelle: bosone Z (ee, μμ)

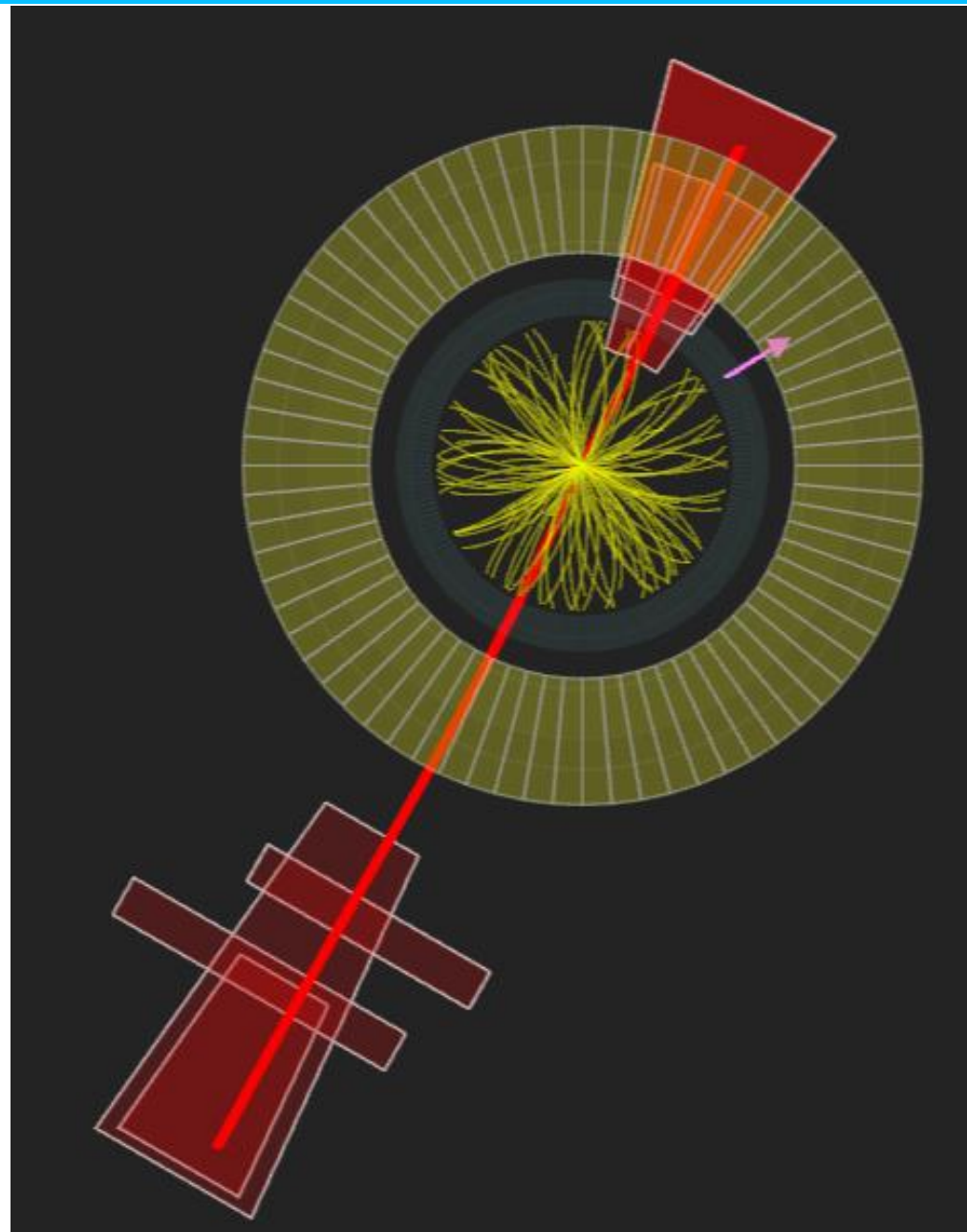
- Il bosone Z è una particella neutra (Z^0)
- Il bosone Z può ‘‘decadere’’ in tanti modi…
- Le trasformazioni più facili da identificare hanno **una coppia di elettroni o di muoni**

$$Z \rightarrow e^+ e^- \qquad Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

- Caratteristiche del segnale Z(ee):
  - **Traccia: verde**
  - **Traccia: verde**
- Caratteristiche del segnale Z(μμ):
  - **Traccia: rossa**
  - **Traccia: rossa**

..e il neutrino?

Quando ci sono coppie di elettroni o muoni, possiamo ignorarlo

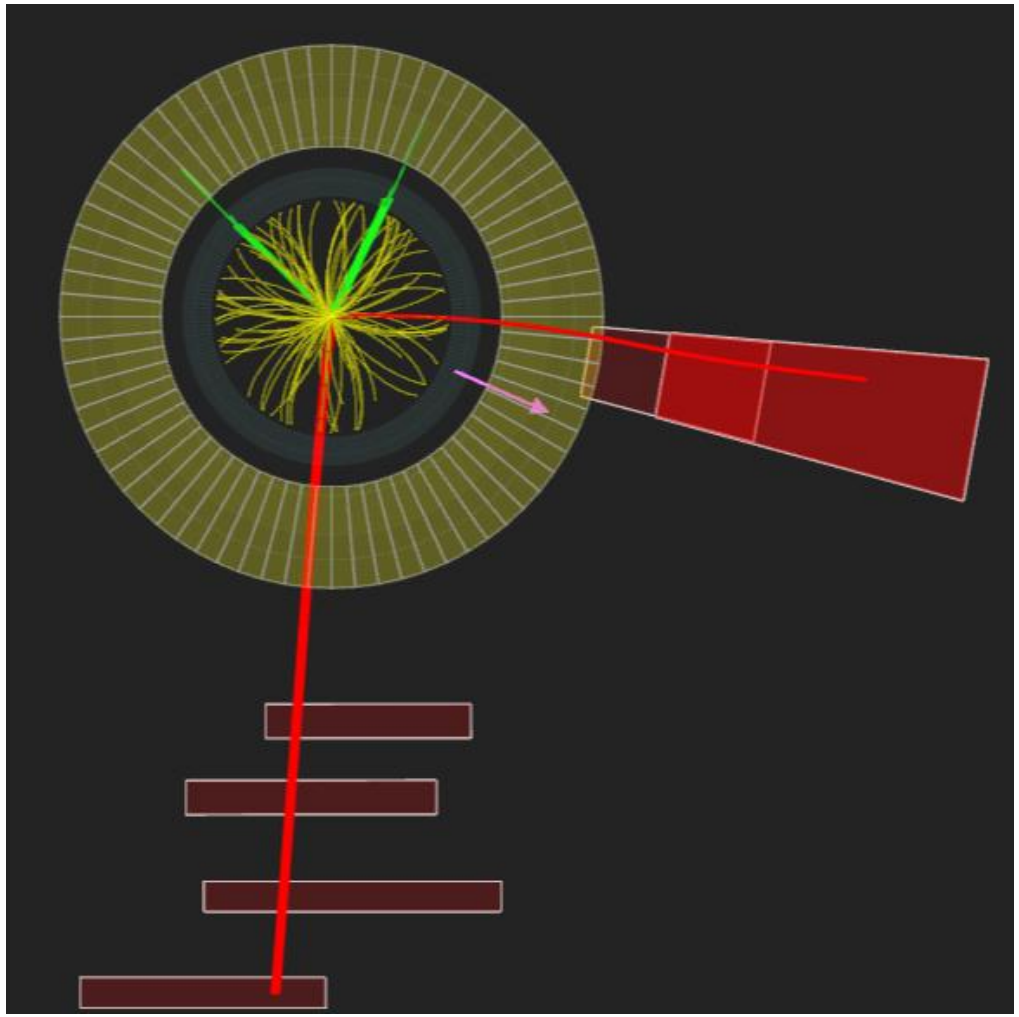


Le particelle: bosone H (ZZ)

- 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?

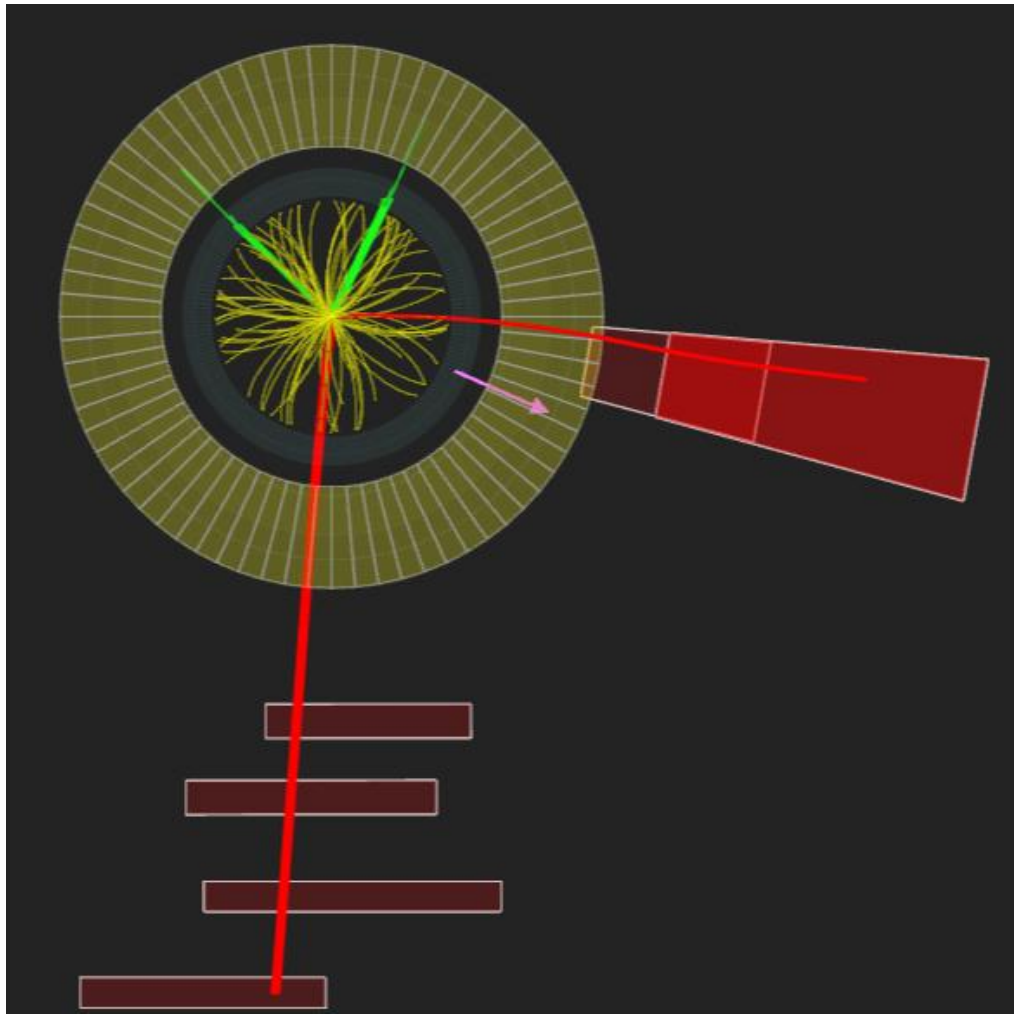


Le particelle: bosone H (ZZ)

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



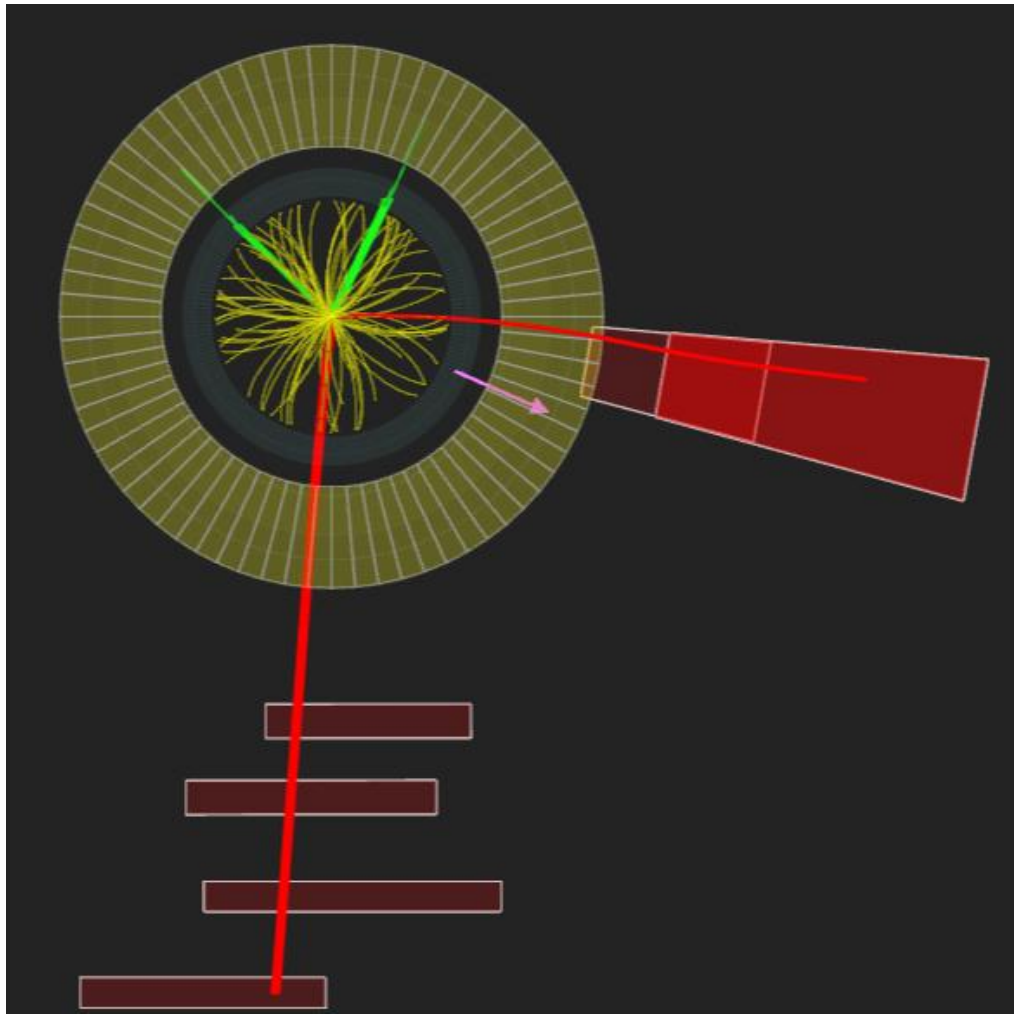
Le particelle: bosone H (ZZ)

- 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**

$$H \rightarrow ZZ$$

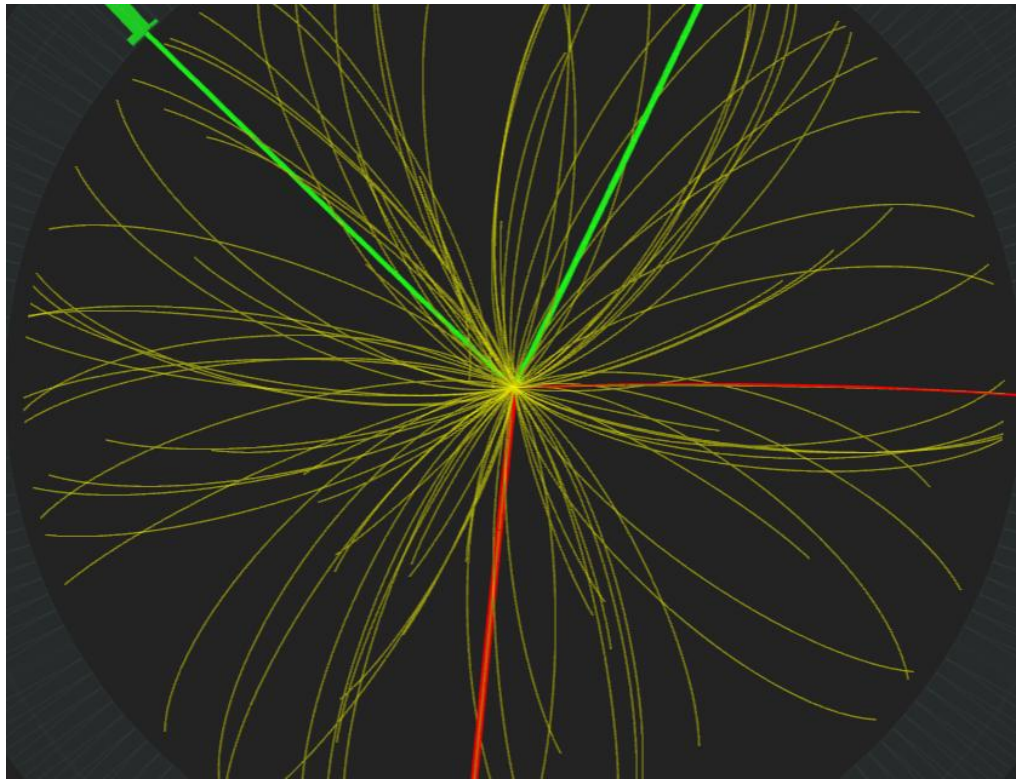
- Possibili segnali:
  - $e^+ e^-$ $e^+ e^-$
  - $\mu^+ \mu^-$ $\mu^+ \mu^-$
  - $e^+ e^-$ $\mu^+ \mu^-$

  …
  - $\nu_e \nu_e \nu_\mu \nu_\mu$



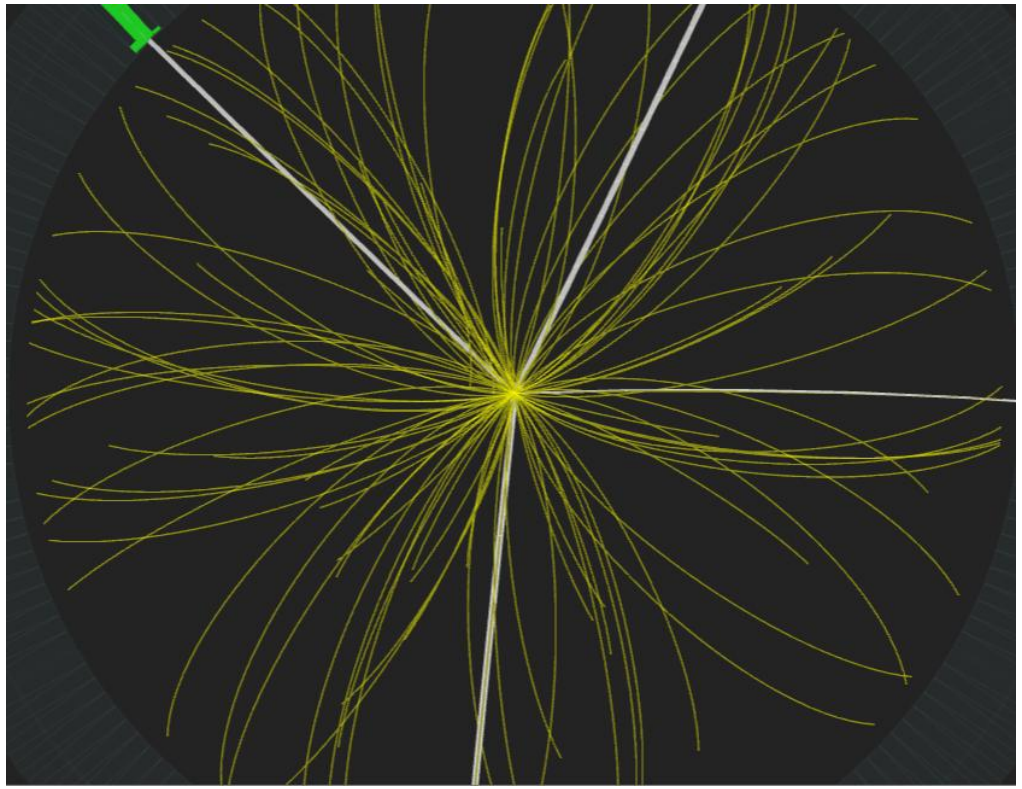
Misurare la massa delle particelle neutre

Zoom verso il centro



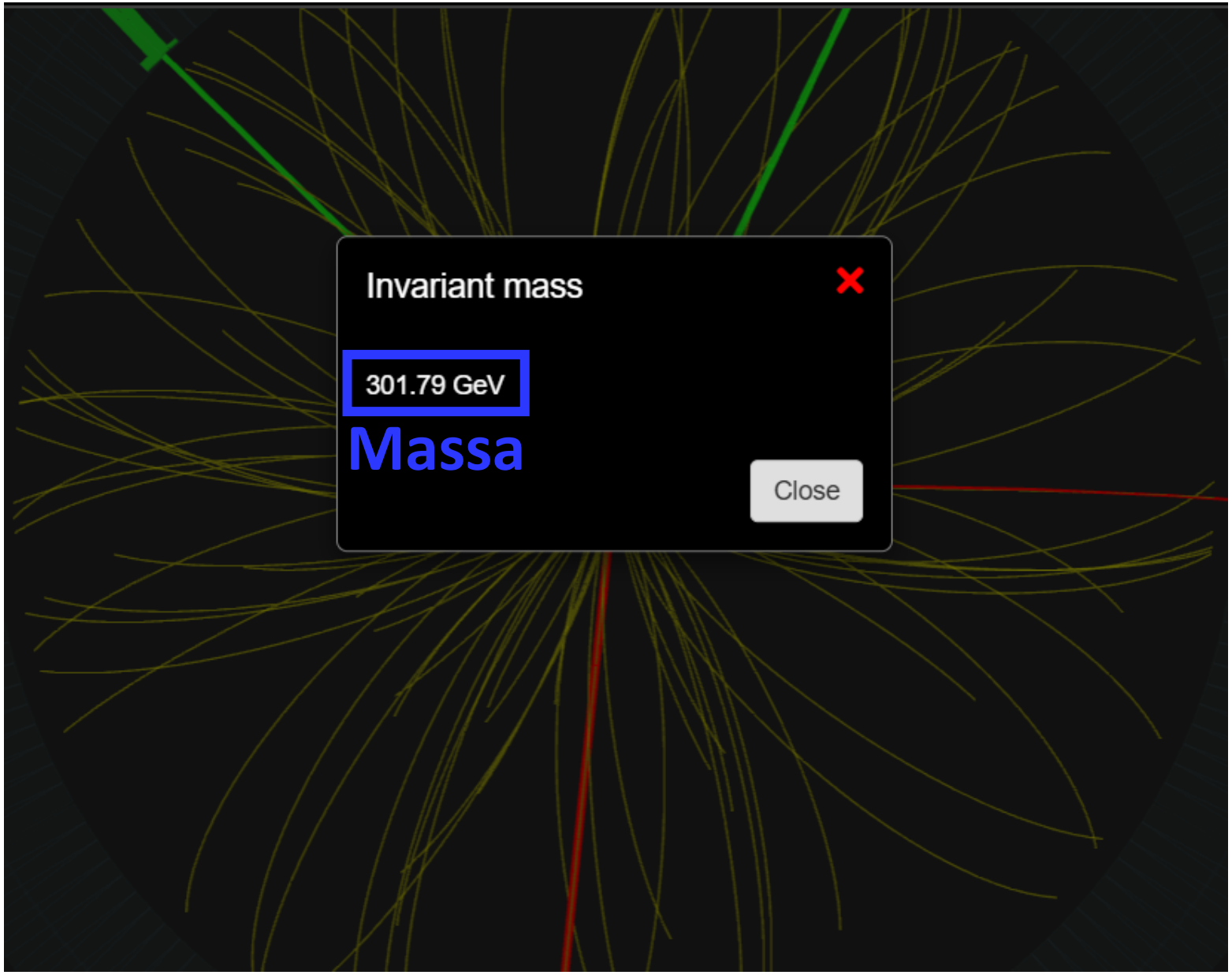
Click su ognuna delle tracce

Tracce selezionate colorate in Grigio



Misurare la massa delle particelle neutre

Premere M sulla tastiera



Tabella

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1			Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
2	Dataset	Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
3	1	1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
4		2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
5		3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
6		4	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

- **Postazione** = Dataset
  - **Numero dell'evento**: da 1 a 100
    - **Stato finale**: quali segnali avete osservato
      - **Stato iniziale**: quale era la particella iniziale
- Solo per particella "Neutra (Z, H)" → Inserire valore in "**Massa [GeV]**"

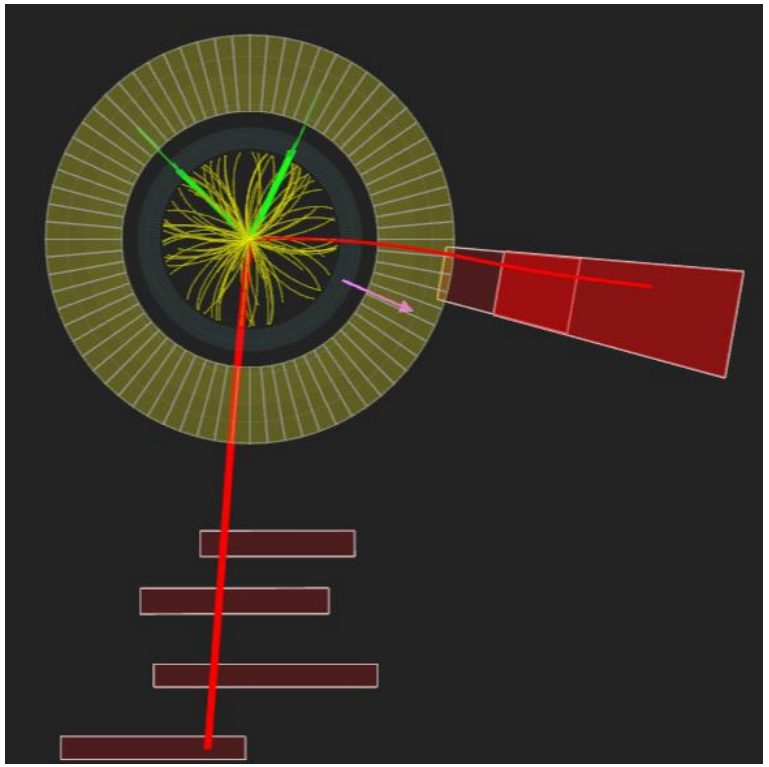
Esempio 1

	Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Esempio 1

	Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

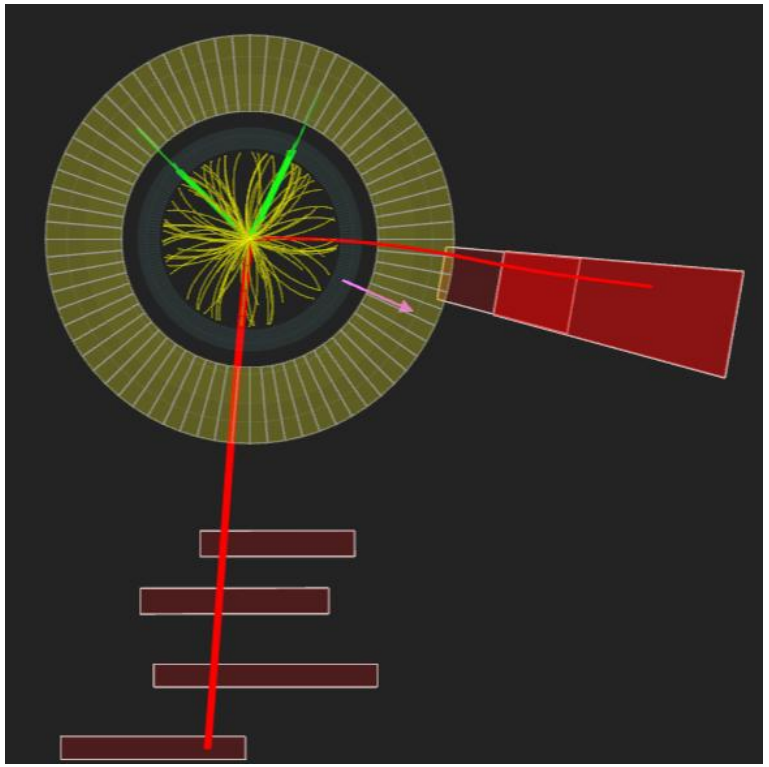
Identificare i segnali e la particella



Esempio 1: eeμμ

	Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

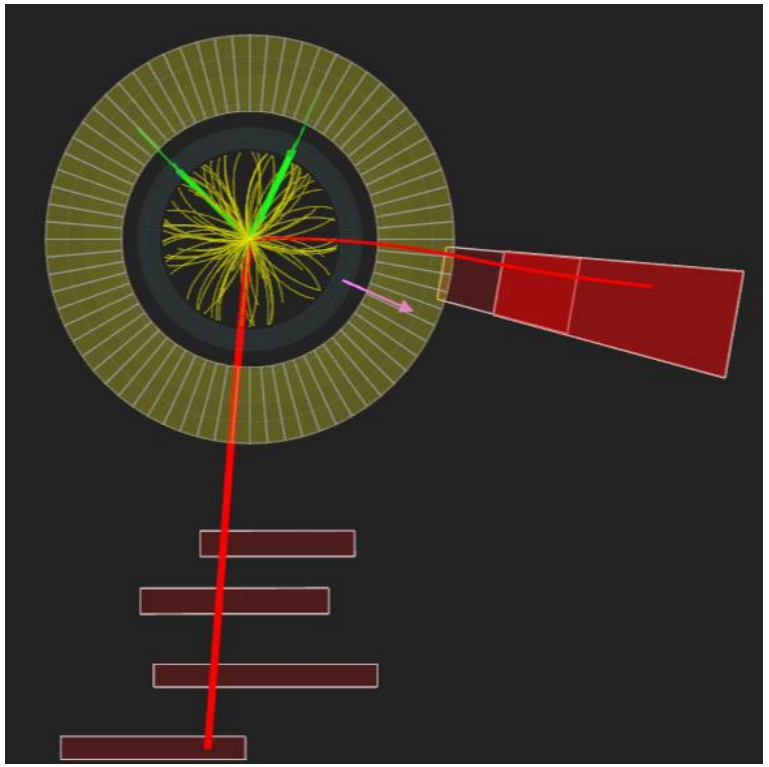
Identificare i segnali e la particella



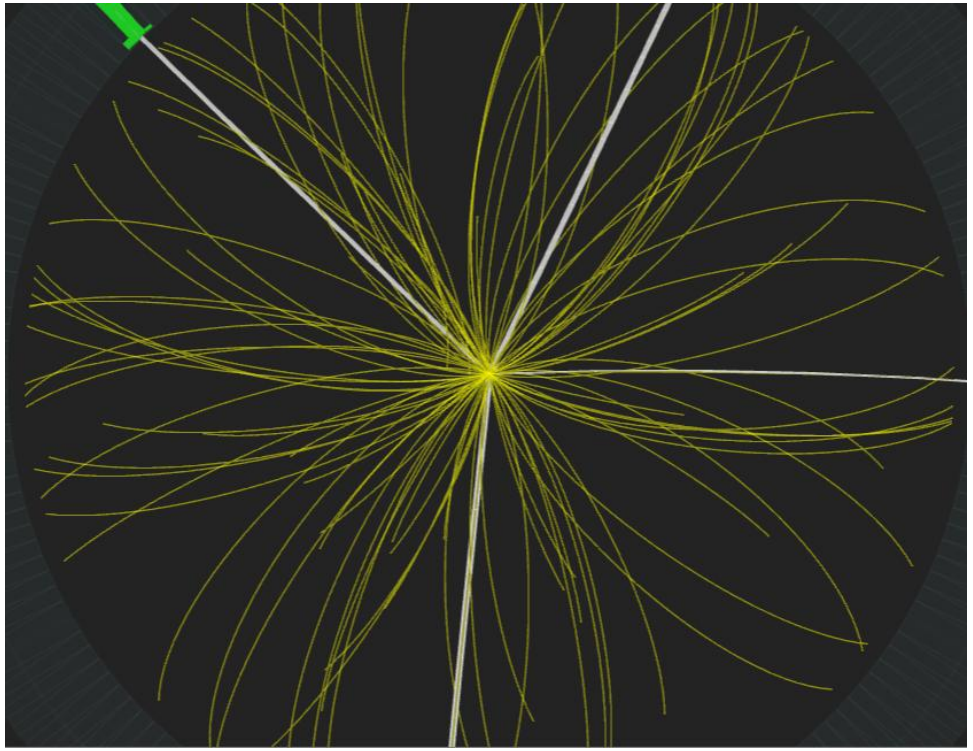
Esempio 1: H → ZZ → eeμμ

	Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Identificare i segnali e la particella



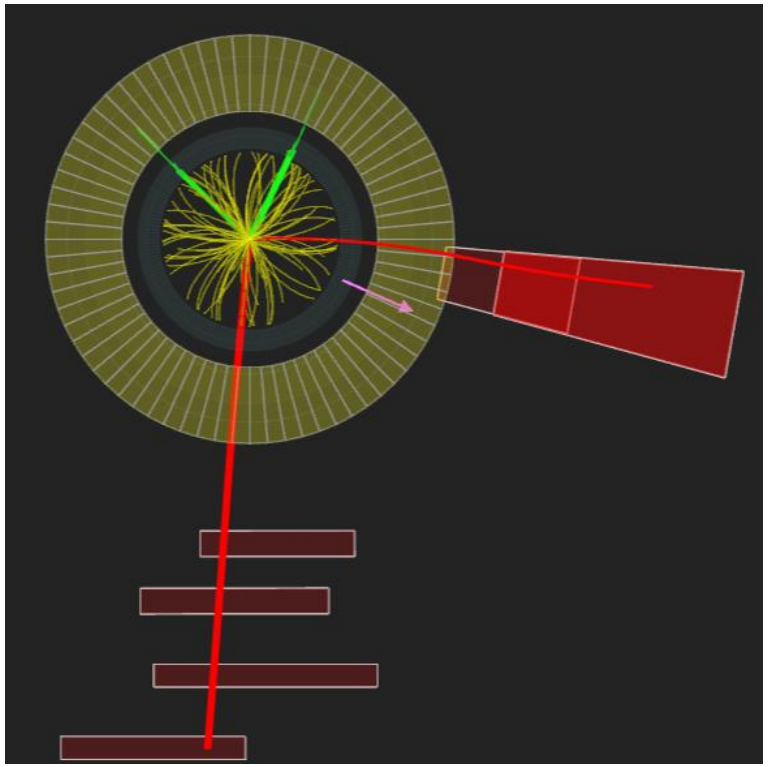
Particella neutra?
Selezionare le tracce col mouse



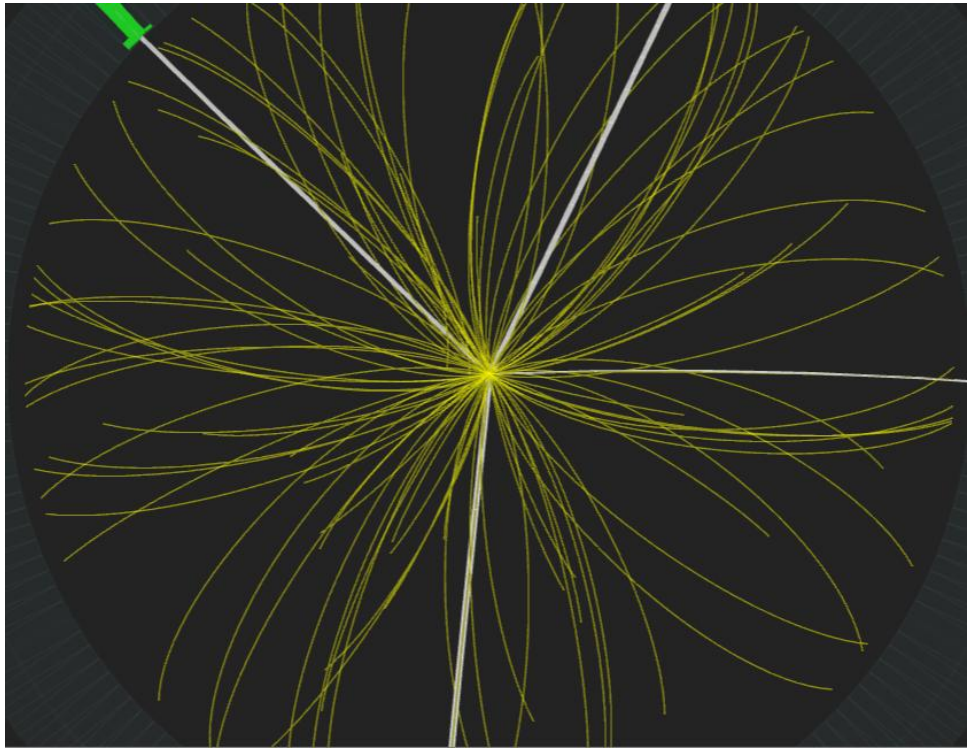
Esempio 1: H → ZZ → eeμμ (massa 301.79)

	Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	301.79
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

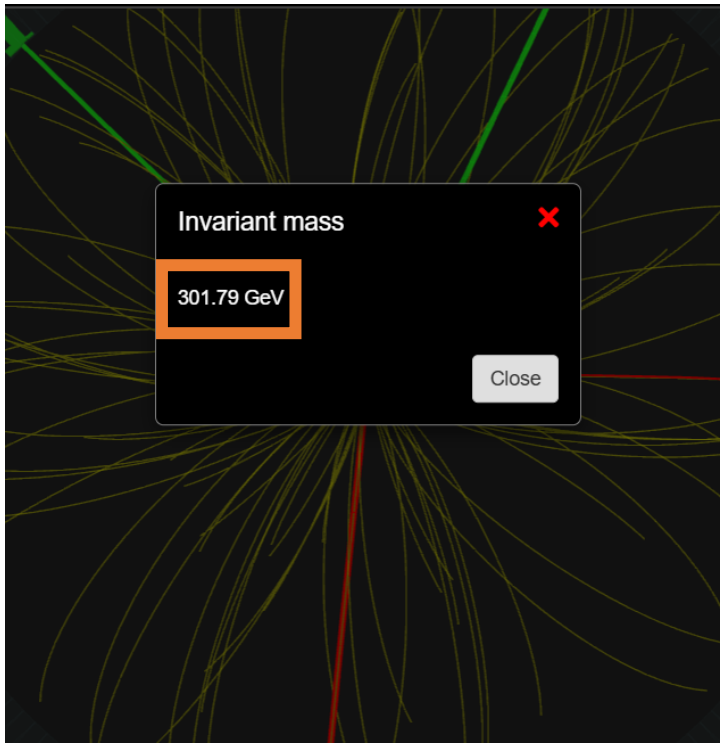
Identificare i segnali e la particella



Particella neutra?
Selezionare le tracce col mouse



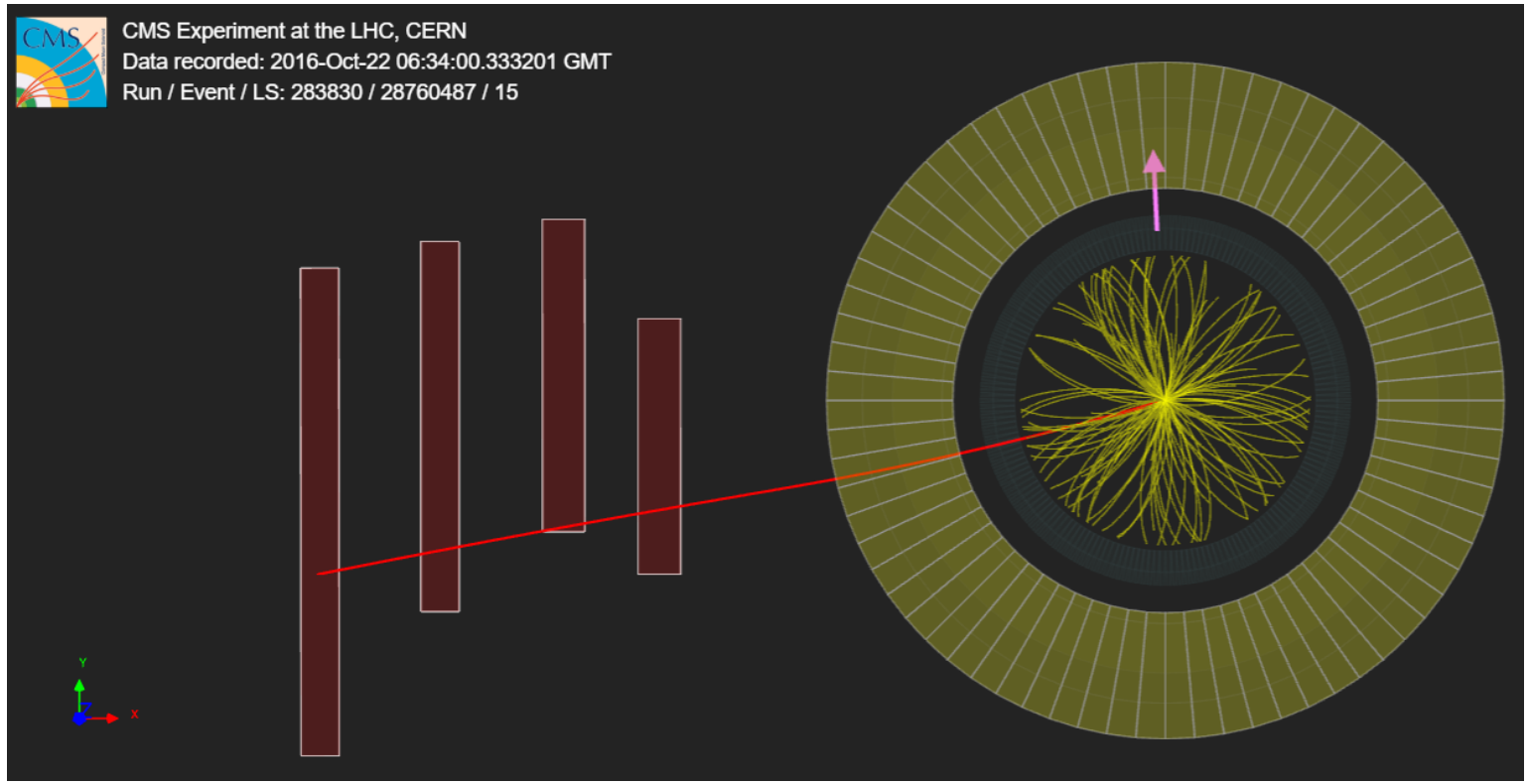
M sulla tastiera
Inserire la massa in tabella



Esempio 2

	Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	301.79
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

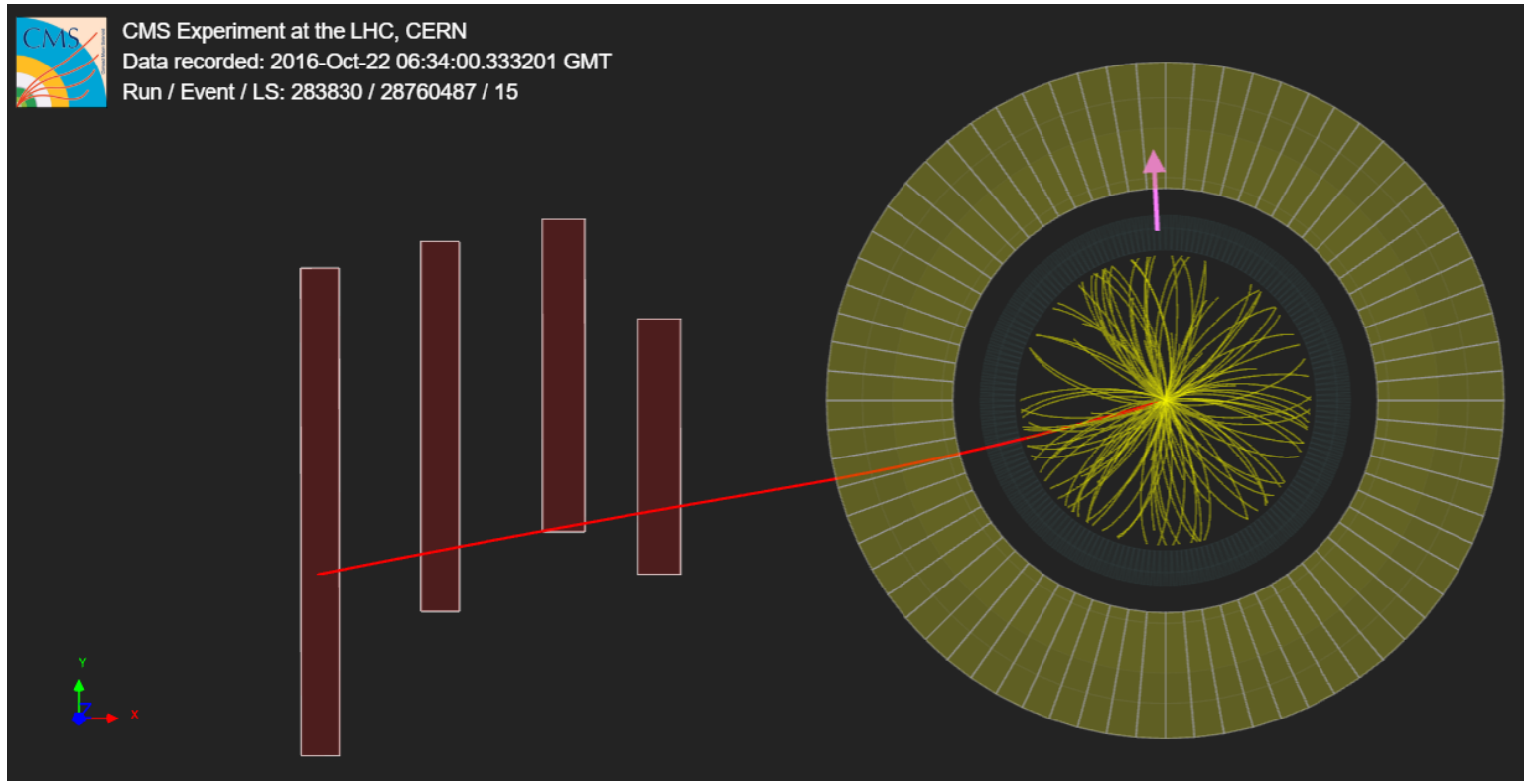
Identificare i segnali e la particella



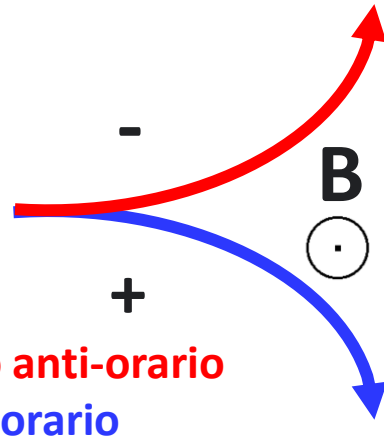
Esempio 2: W → μν

	Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	301.79
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Identificare i segnali e la particella



Osservare curvatura

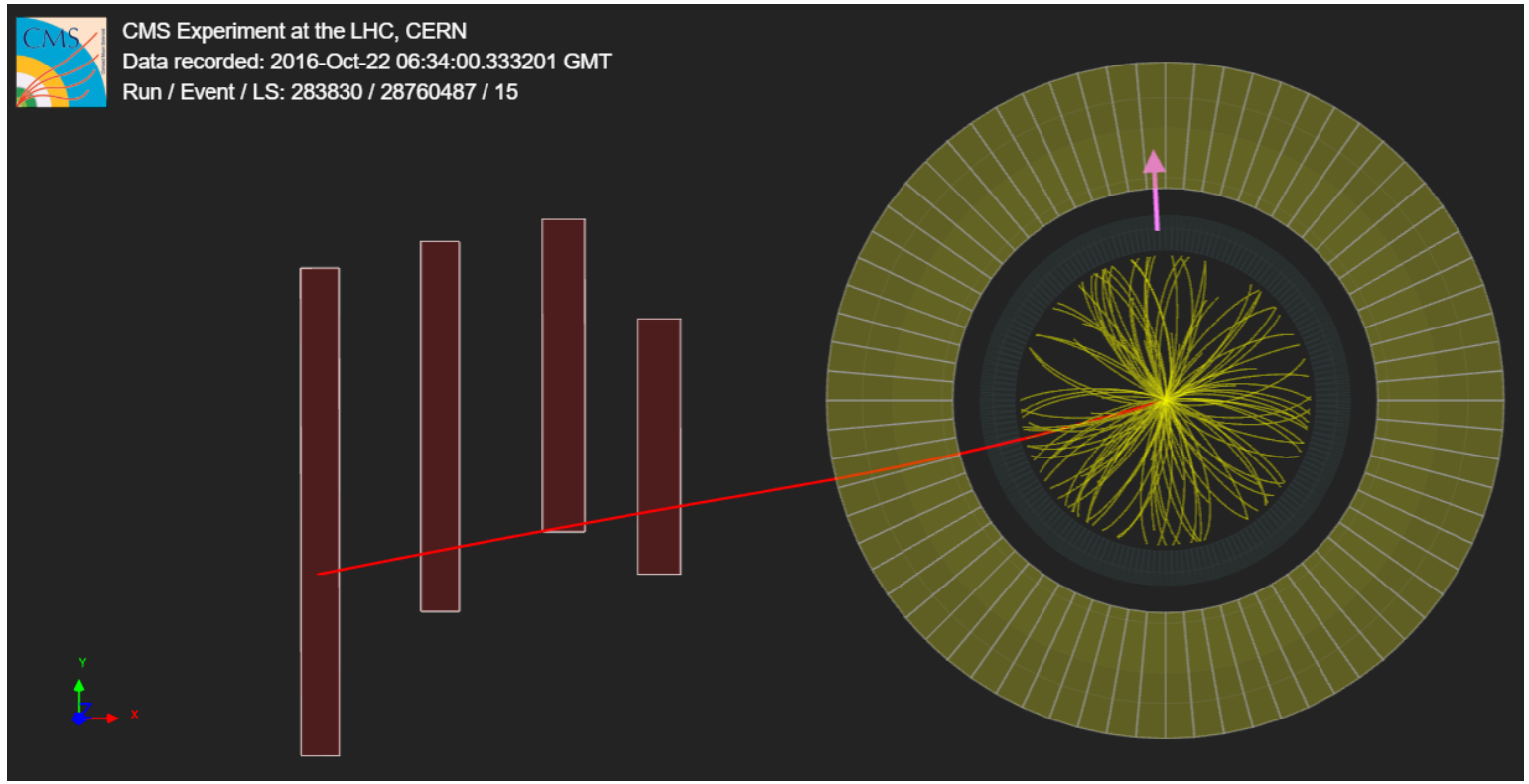


- Curvatura tracce cariche:
  - Carica negativa: senso anti-orario
  - Carica positiva: senso orario

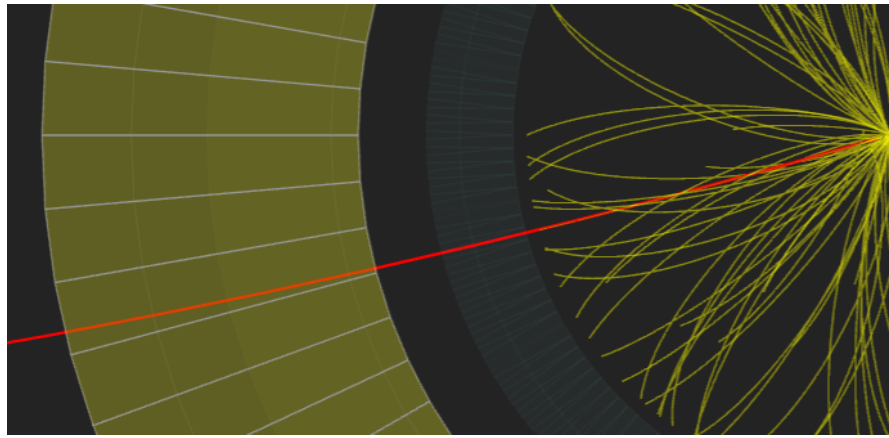
Esempio 2: W → μν

	Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	301.79
2	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☐	

Identificare i segnali e la particella



Osservare curvatura



- Curvatura tracce cariche:
  - Carica negativa: senso anti-orario
  - Carica positiva: senso orario

Altri tipi di eventi

	Particelle nello Stato Finale							Particella iniziale				(Solo Neutre)
Evento	e ν	μ ν	e e	μ μ	4e	4 μ	2 e 2 μ	W+	W-	Neutra (Z,H)	?	Massa [GeV]
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☐	301.79
2	☐	☑	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☐	

Se non è chiaro:

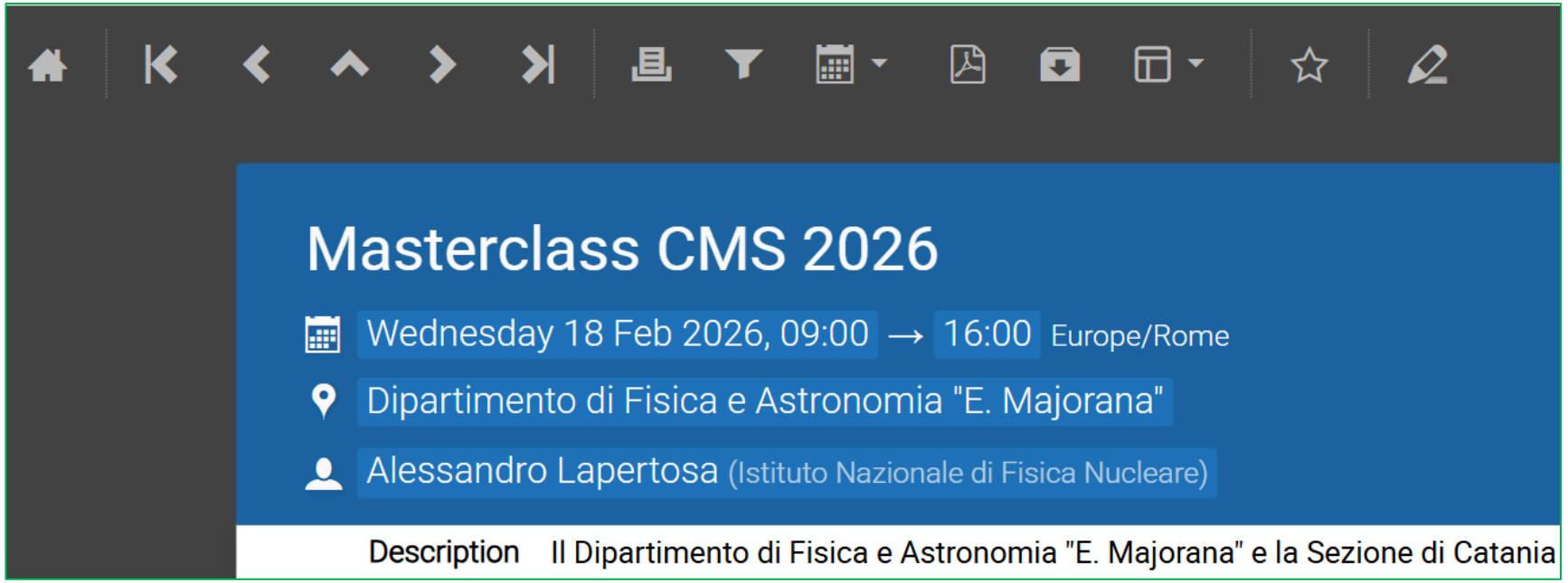
- **il verso della curvatura…**
- **il tipo di stato finale/iniziale…**

Selezionate → ?

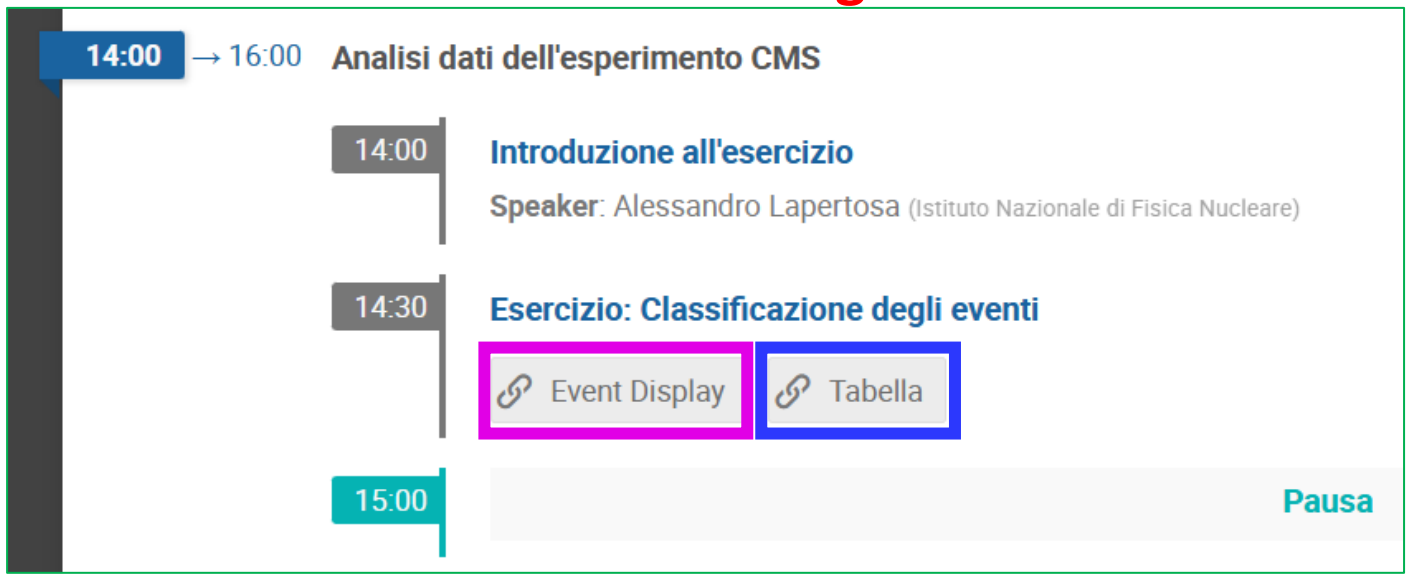
Programma delle attività del pomeriggio

- 14:30-15:00 – Ogni ricercatore identifica almeno 50 eventi
- 15:00-15:30 – Discussione dei risultati: analisi statistica
- 15:30-16:00 – Saluti

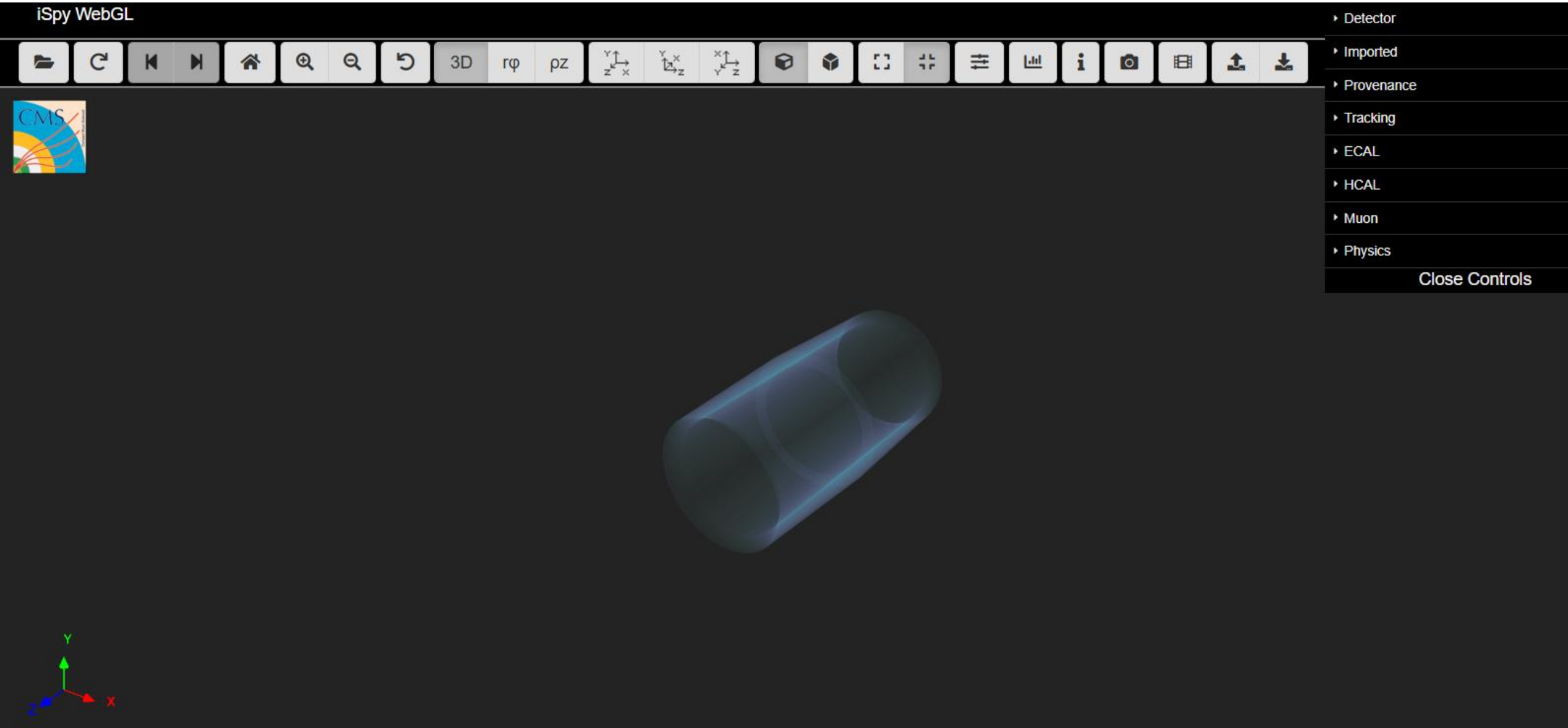
Da Firefox → aprire Event display e Tabella



… Scorrere in giù …

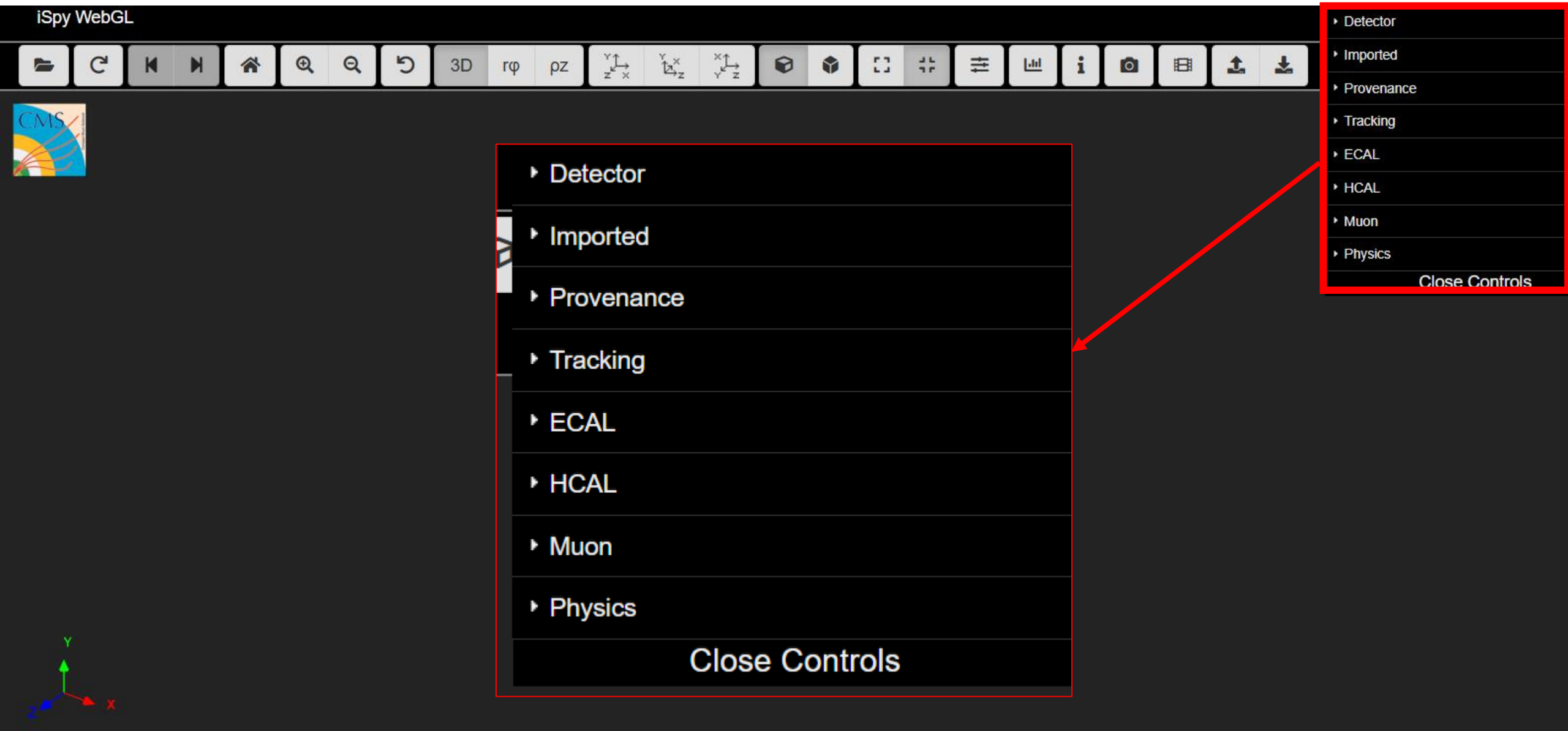


Event display



Event display

Modificare visualizzazione



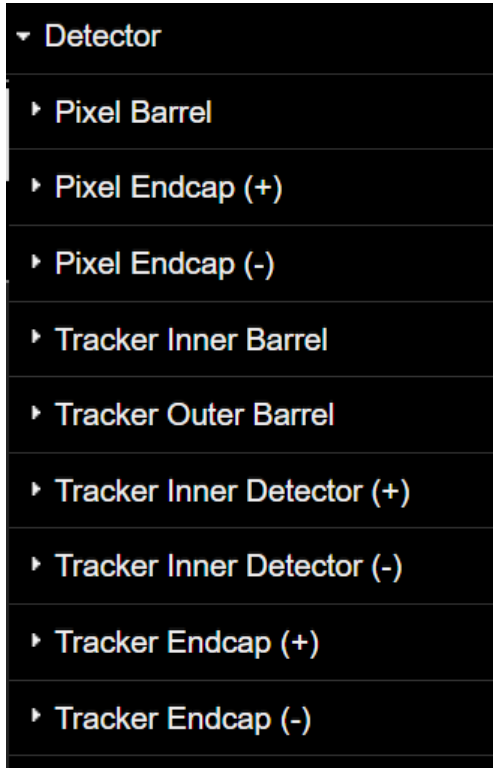
Event display: modificare Detector

Aprire menù “Detector”

Event display: modificare Detector

Aprire menù “Detector”

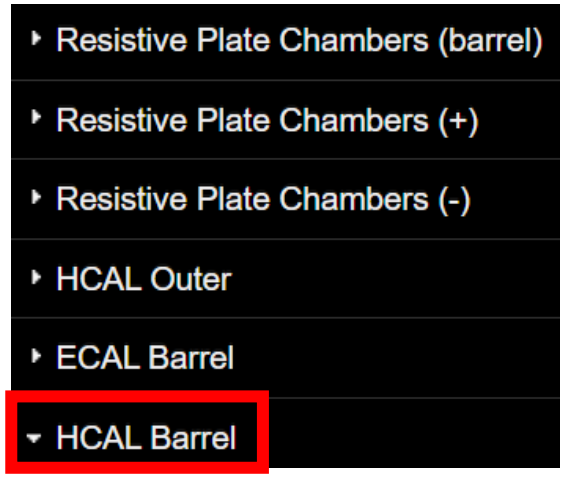
Scorrere la lista…



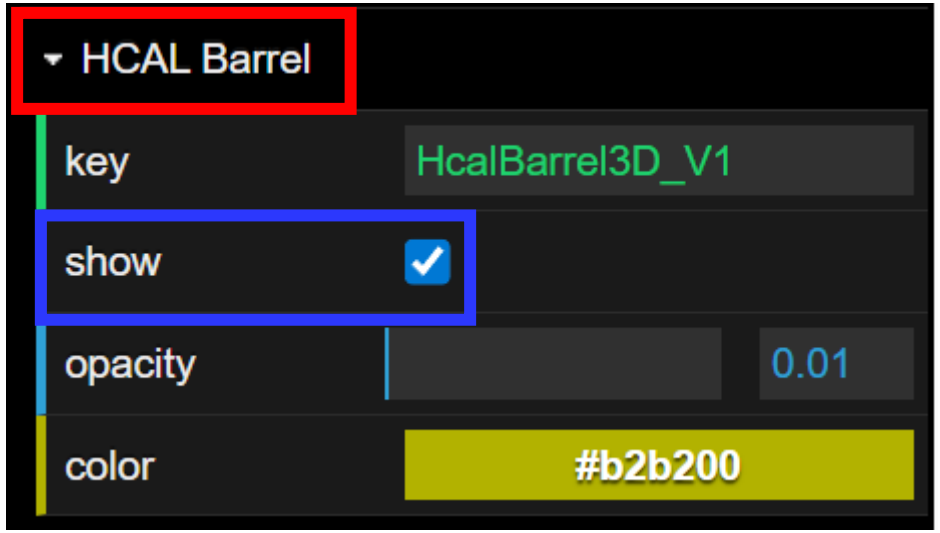
…

Selezionare →

…



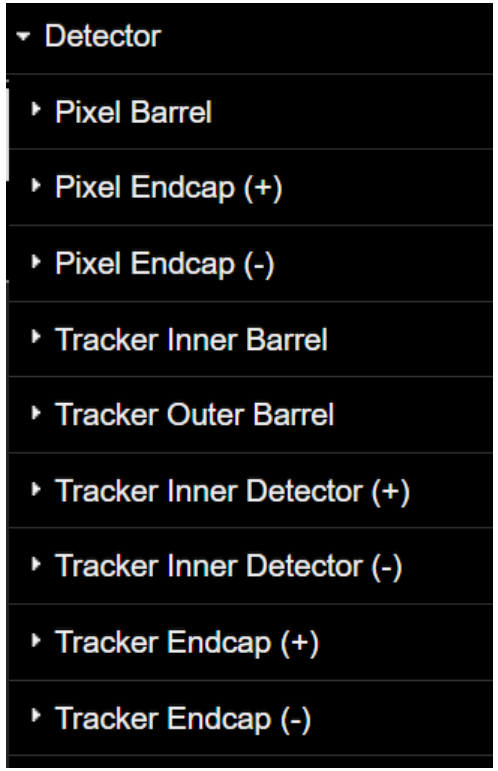
Aprire scheda “HCAL Barrel”



Event display: modificare Detector

Aprire menù “Detector”

Scorrere la lista…

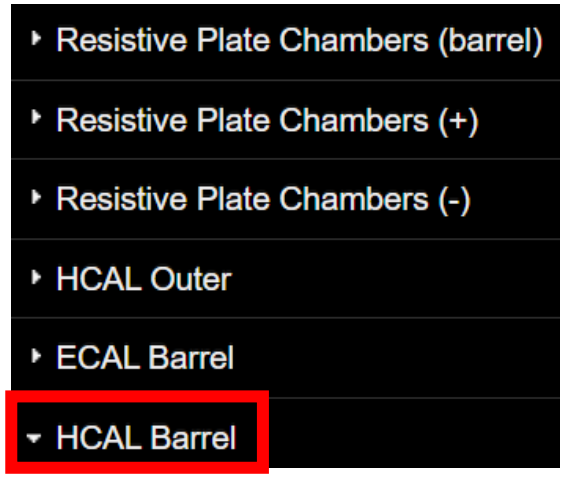


…

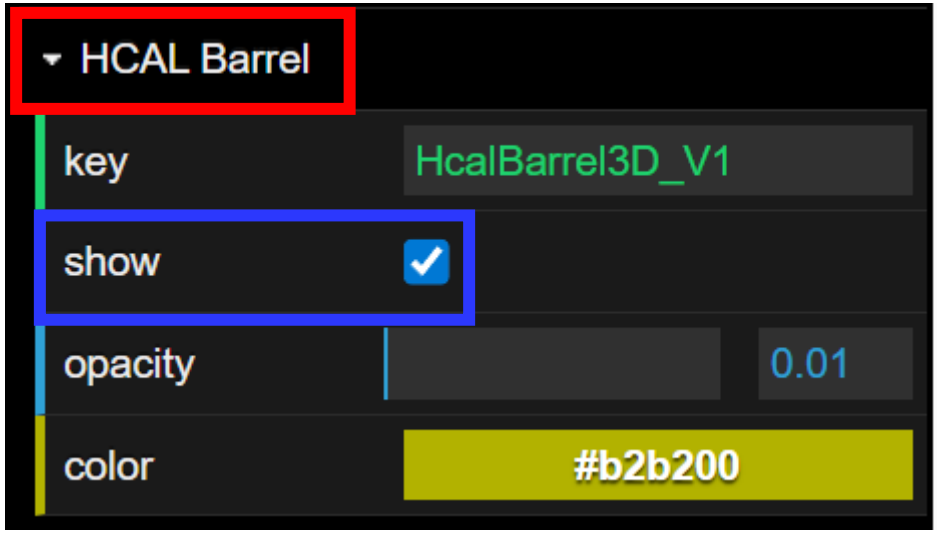
Selezionare →

← Chiudere pannello

…

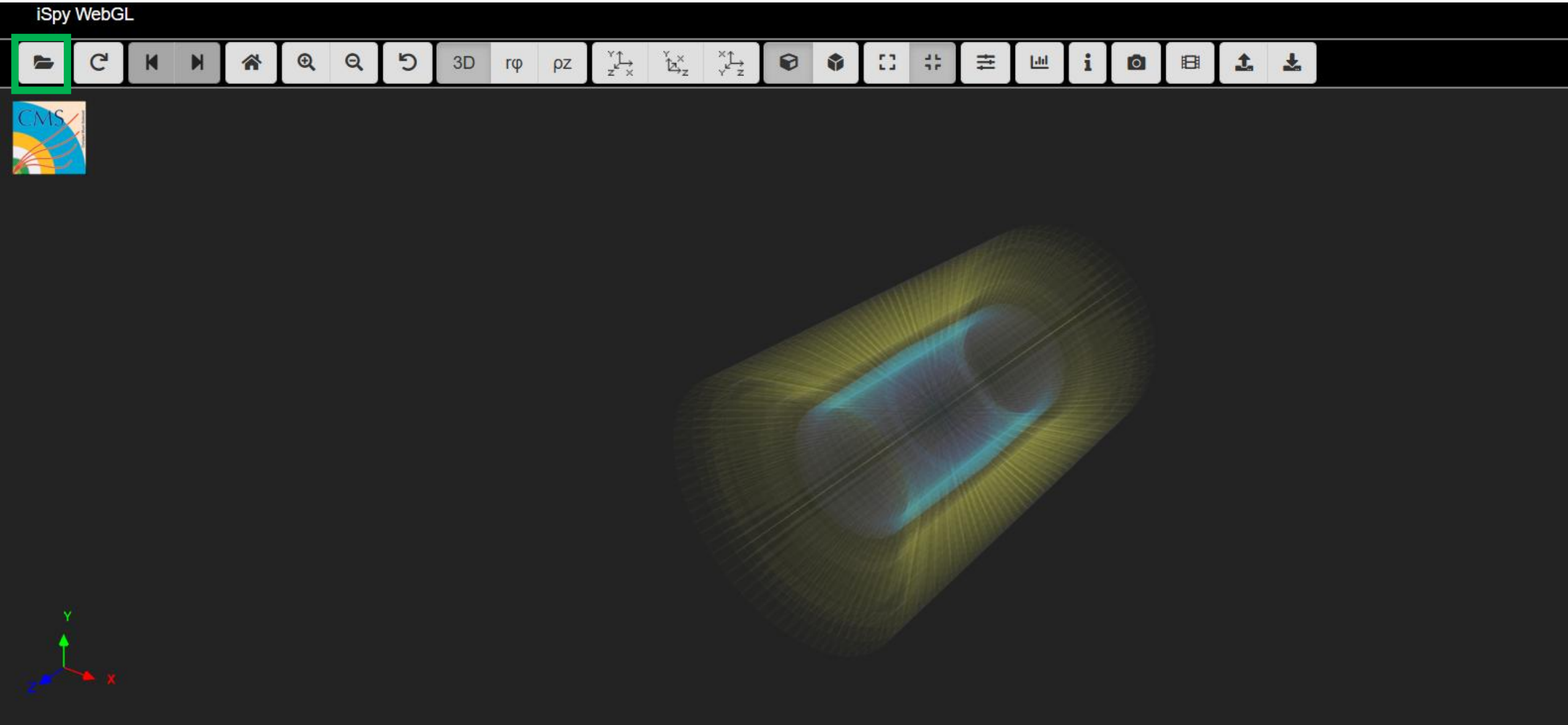


Aprire scheda “HCAL Barrel”



Event display: aprire file

Aprire file



Postazioni → Aprile File masterclass_**N**.ig

Gruppo 1

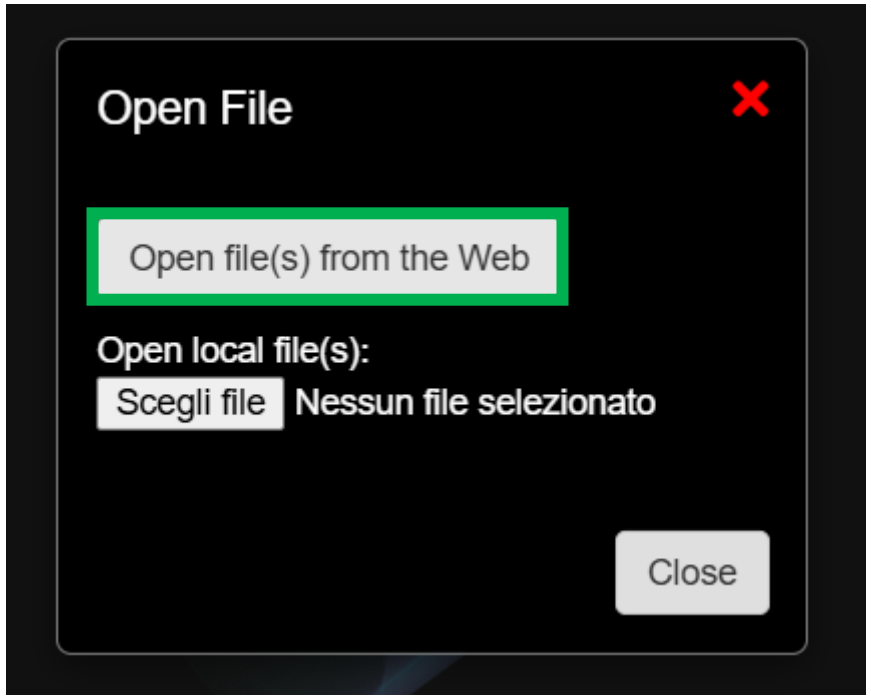
1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20

Gruppo 2

21	22	23	24
25	26	27	28
29	30	31	32
33	34	35	36

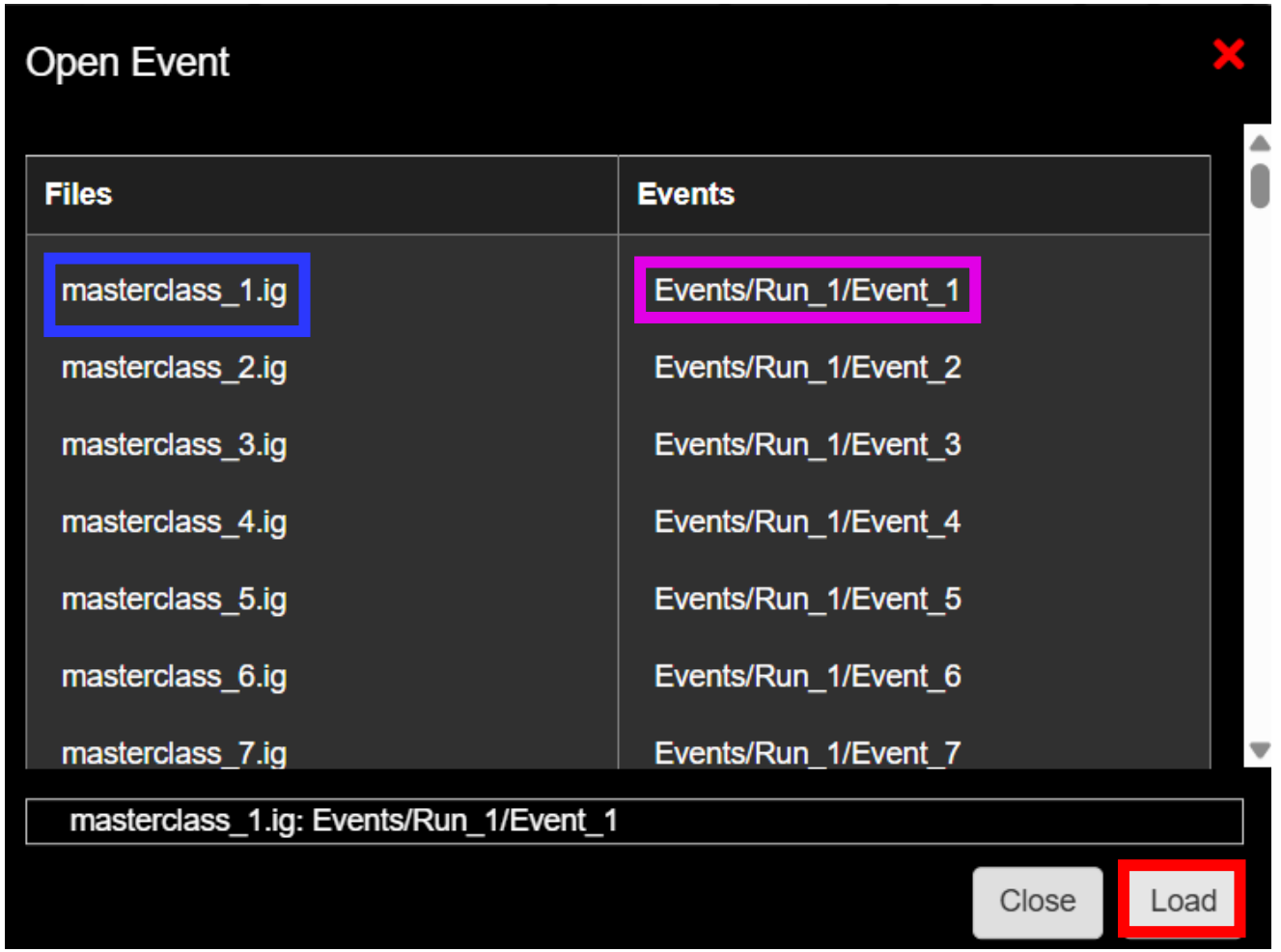
Event display: selezionare file

Aprire file dal Web



File numero 1 … 36

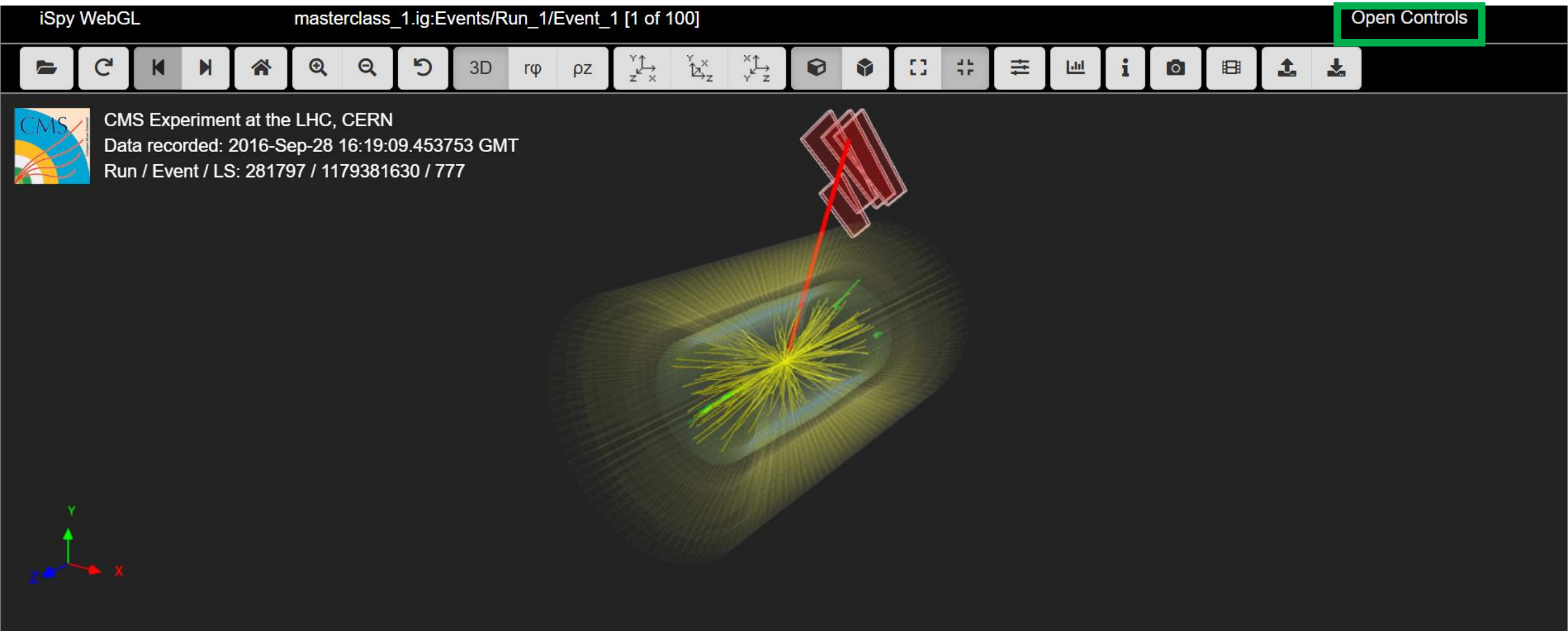
Primo evento



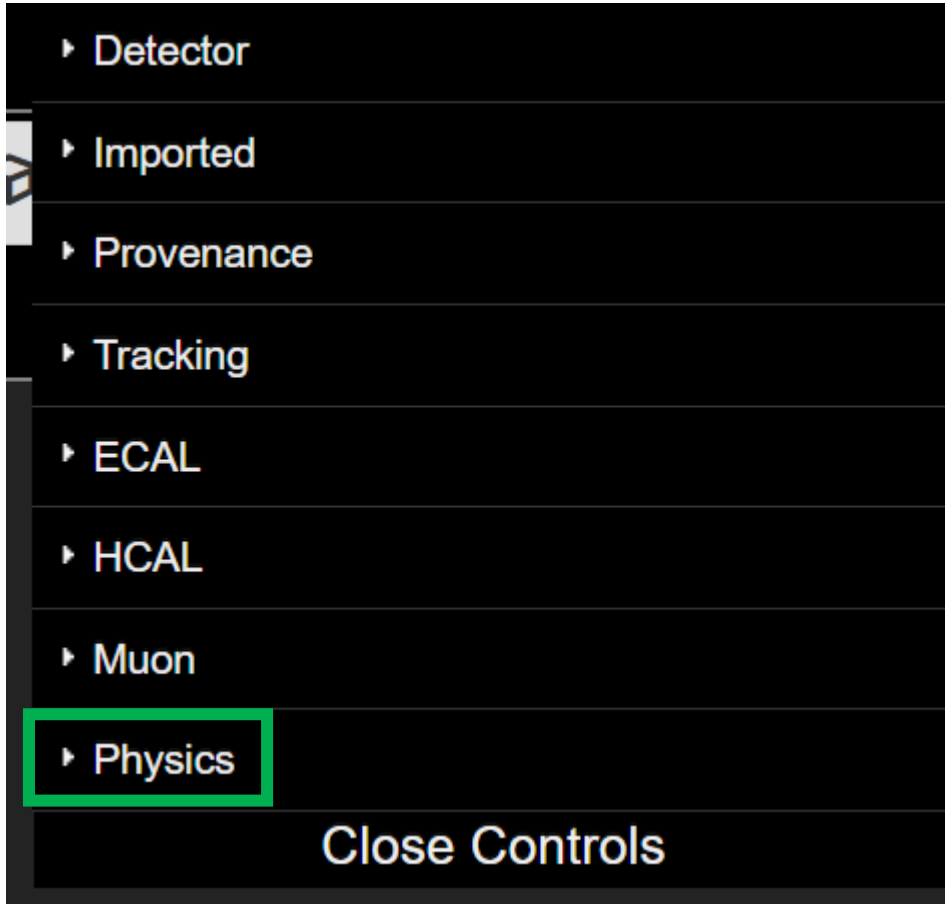
Carica

Event display: ultima modifica!

Aprire pannello



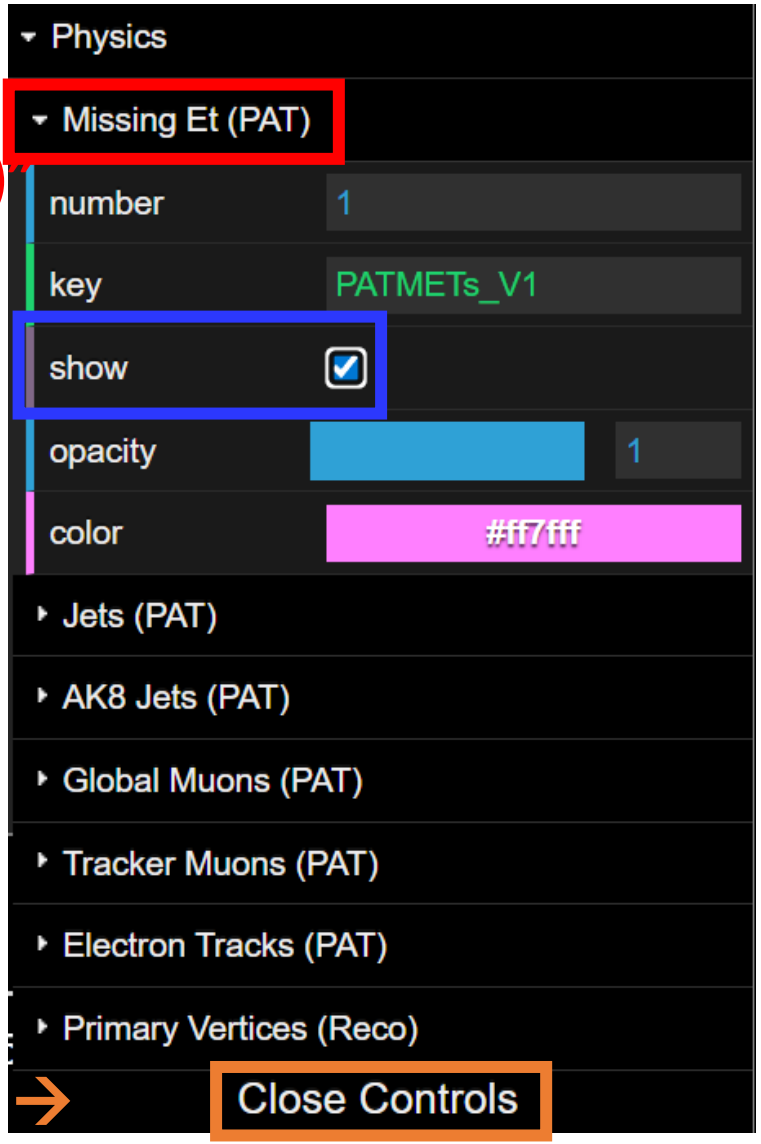
Event display: visualizzare Missing ET



Aprire menù “Physics”

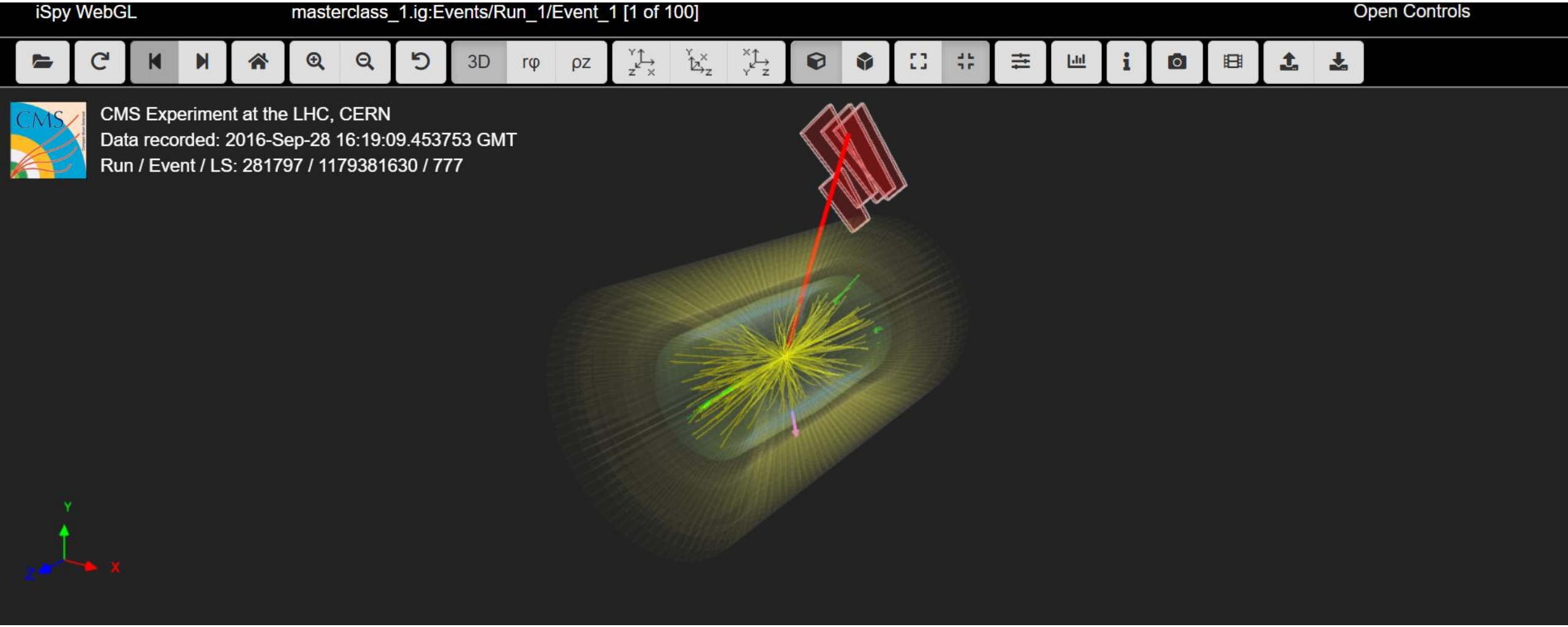
Aprire scheda “Missing ET (PAT)”

Selezionare →



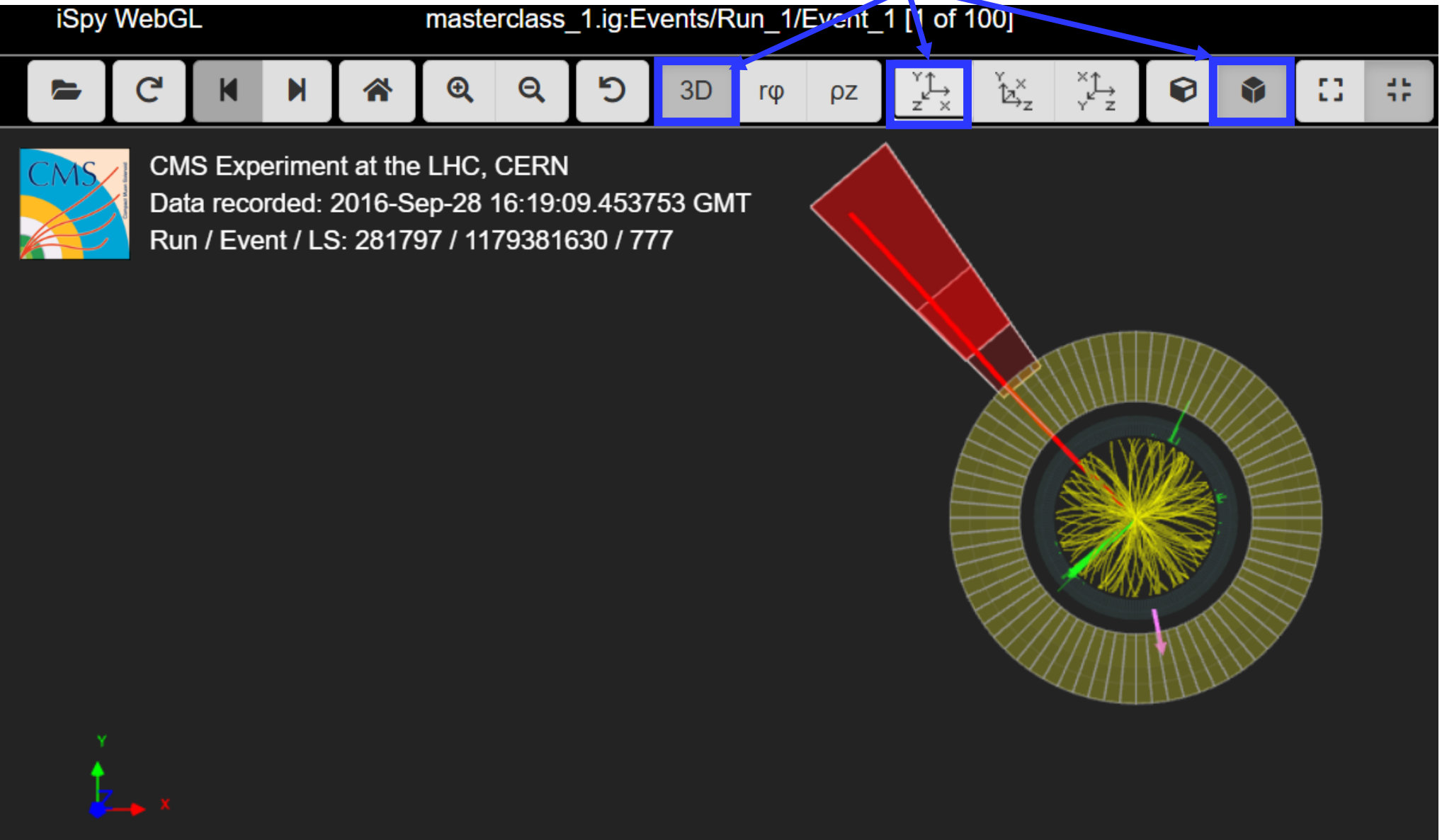
Chiudere pannello →

Event display: quasi pronti



Event display: visione radiale

Visione radiale

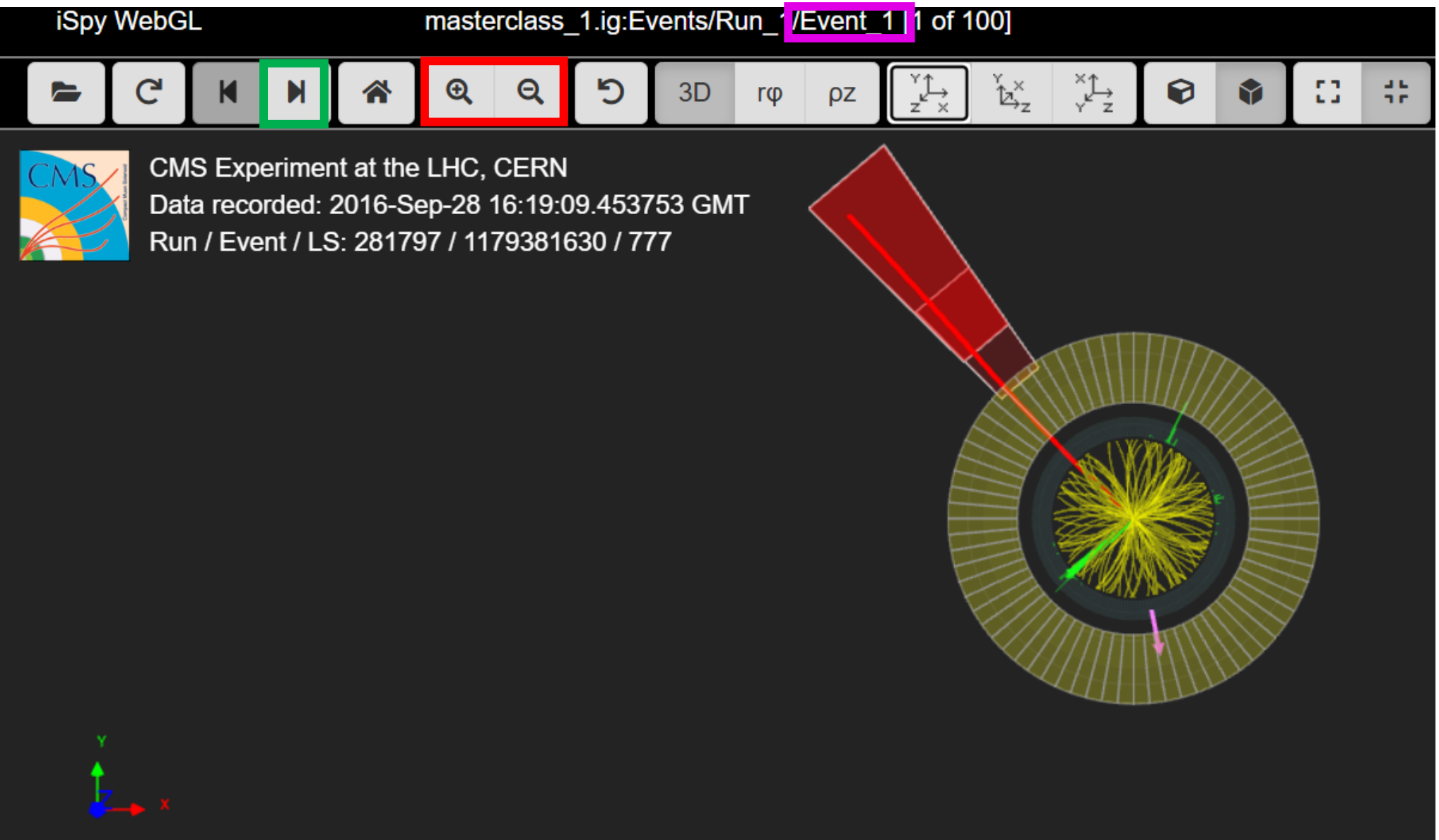


Event display: cambiare evento

Prossimo evento

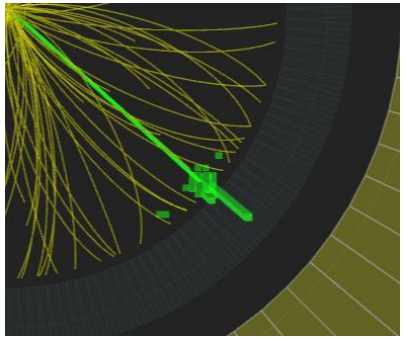
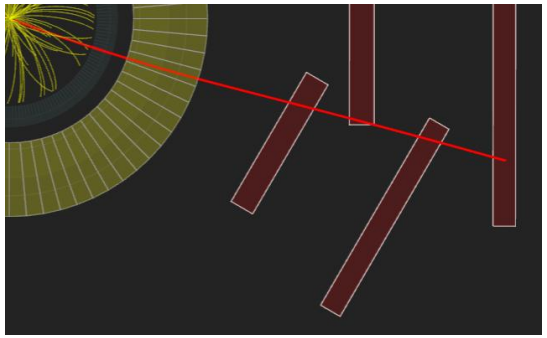
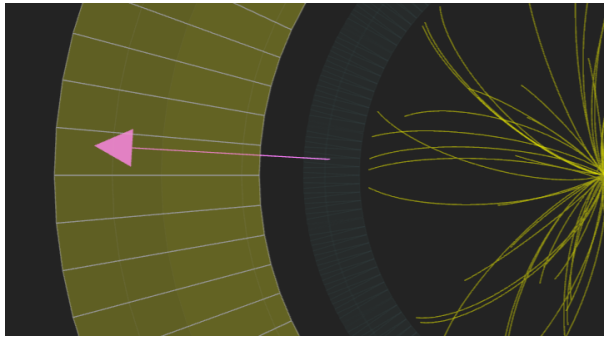
Zoom

Numero dell'evento



Legenda

- **Segnali:**
  - Elettrone (**e**) : **traccia verde**
  - Muone (**μ**) : **traccia rossa**
  - Neutrino (**ν**) : **freccia rosa**

- **Particelle:**

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

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

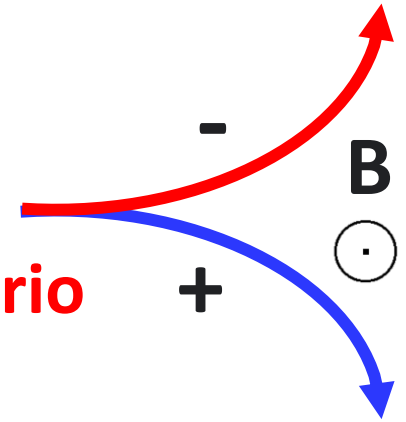
$Z \rightarrow e^+ e^-$ $\quad Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$

$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$

$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$

- **Curvatura tracce cariche:**
  - **Carica negativa: senso anti-orario**
  - **Carica positiva: senso orario**

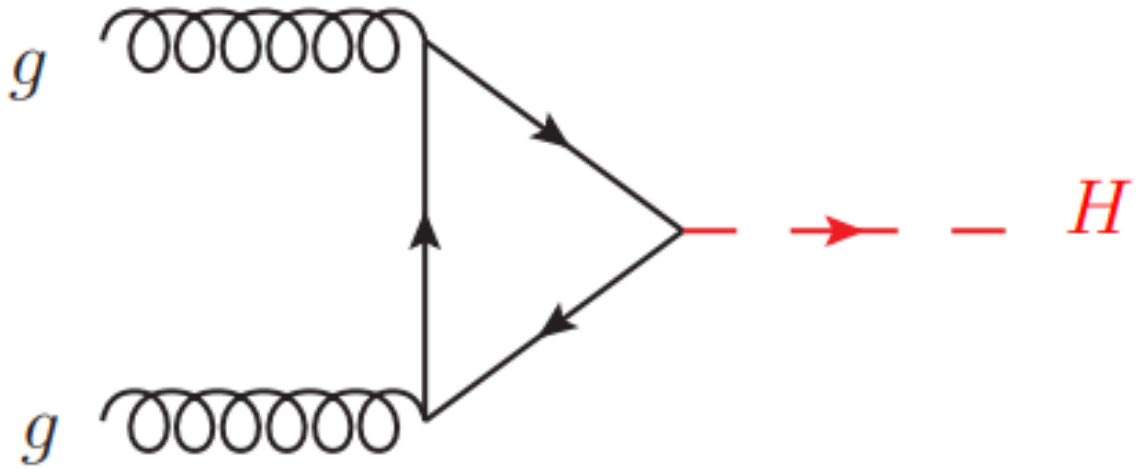


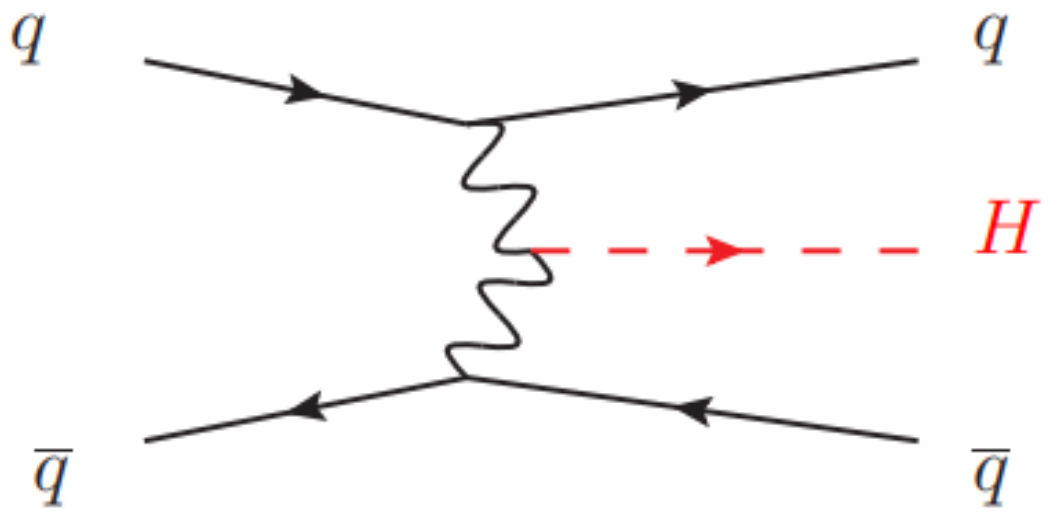
- **Massa particelle neutre:**
  - **Click su tracce verdi/rosse**
  - **Premere "M" sulla tastiera**
  - **Inserire massa in tabella**

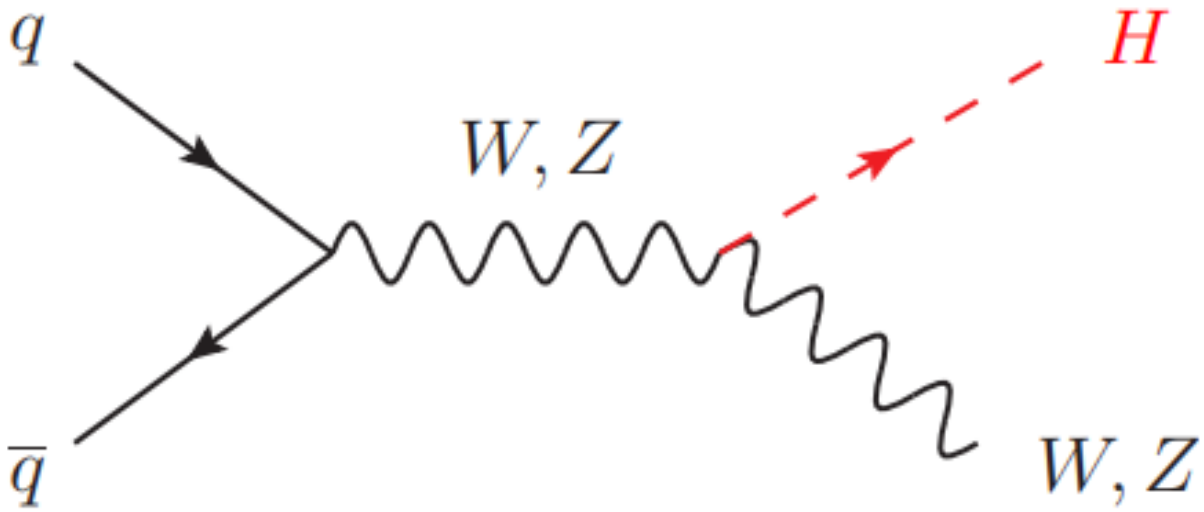
Evento non chiaro? Spunta → ?

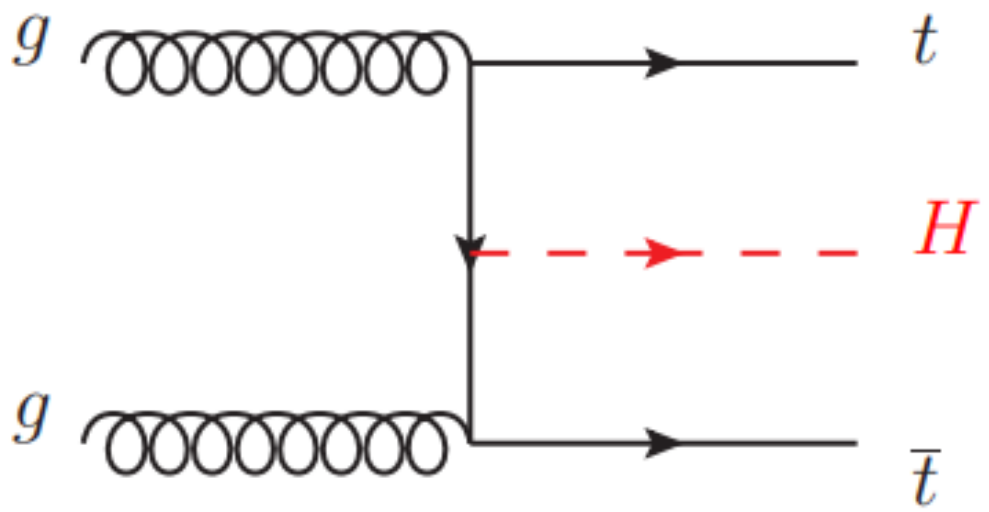
Backup

Processi di produzione del Bosone di Higgs

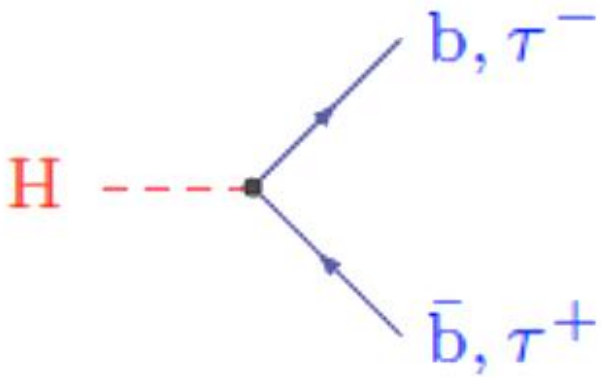


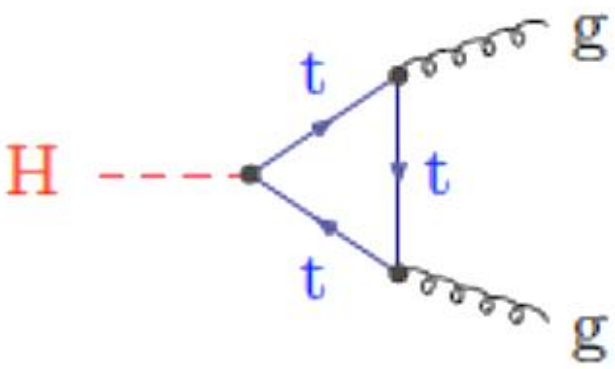


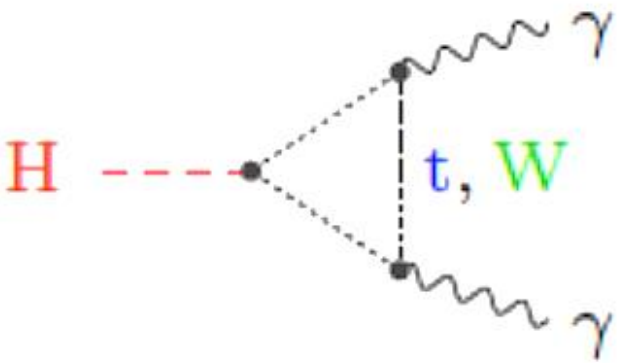


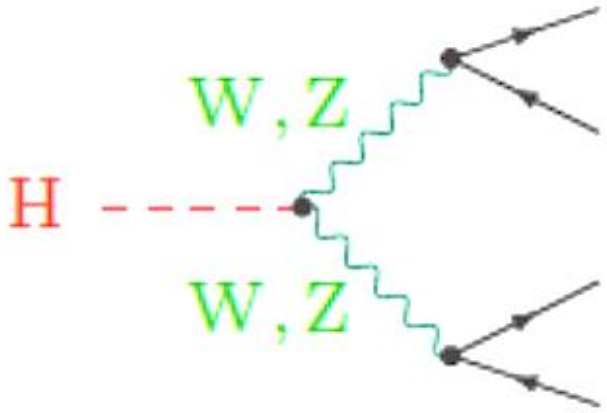


Canali di Decadimento del Bosone di Higgs









Decadimento	Probabilità [%]
$H \to b\bar{b}$	57.5 ± 1.9
$H \to WW$	21.6 ± 0.9
$H \to gg$	8.56 ± 0.86
$H \to \tau\tau$	6.30 ± 0.36
$H \to c\bar{c}$	2.90 ± 0.35
$H \to ZZ$	2.67 ± 0.11
$H \to \gamma\gamma$	0.228 ± 0.011
$H \to Z\gamma$	0.155 ± 0.014
$H \to \mu\mu$	0.022 ± 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
  - **τ**: 2 GeV
  - **μ**: 0.1 GeV