



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei



Piano Nazionale
Lauree Scientifiche



International Particle
Physics Outreach Group

CMS Masterclass 2025

Sabrina Giorgetti, Enrico Lusiani, Andrea Gozzelino

26 Marzo 2025

Università degli Studi di Padova

INFN Sezione di Padova

INFN Laboratori Nazionali Legnaro

Introduzione

OBIETTIVO

- Utilizzare dati raccolti dall'esperimento CMS al fine di **studiare eventi W/Z/H** (bosoni W^+ , W^- , Z e di Higgs)

STRUMENTI A VOSTRA DISPOSIZIONE

- **event display CMS**: interfaccia grafica che permette di visualizzare tridimensionalmente collisioni LHC
- **CIMA**: piattaforma online per la raccolta dei risultati

Modello Standard

Modello Standard delle Particelle Elementari

tre generazioni della materia (fermioni)			mediatori delle forze / interazioni (bosoni)		
	I	II	III		
massa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
carica	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluone	H higgs
QUARK	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ fotone	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e elettrone	μ muone	τ tauone	Z bosone Z	
LEPTONI	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	W bosone W	

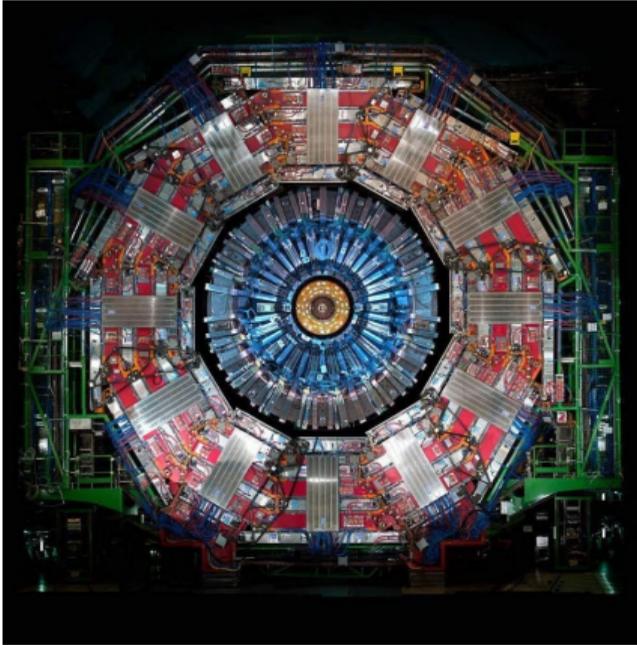
BOSONI DI GAUGE
BOSONI VETTORI

BOSONI SCALARI

MODELLO STANDARD

- Il Modello Standard (SM) è la teoria che descrive le particelle elementari e le interazioni fondamentali.
- Le particelle fondamentali sono suddivise in due categorie principali: fermioni e bosoni.
- I fermioni costituiscono la materia e sono composti da quarks e leptoni.
- I bosoni sono i mediatori delle forze.
- Le forze fondamentali descritte sono l'interazione elettromagnetica mediata dai fotoni γ , l'interazione debole mediata dai bosoni W e Z e l'interazione forte mediata dai gluoni.

L'esperienza CMS

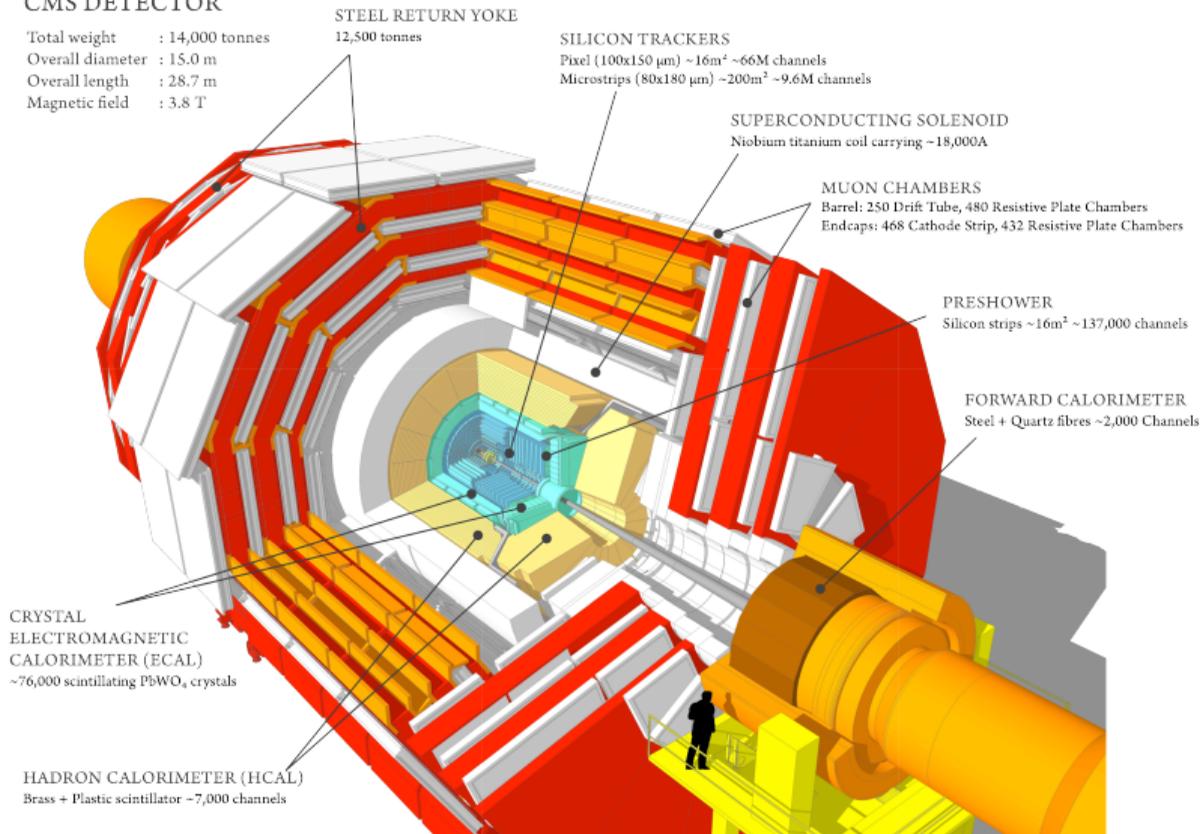


- L'esperienza CMS è uno dei quattro principali esperimenti dell'acceleratore LHC al CERN
- Rivelatore di particelle "multi-scopo" situato 100 m sottoterra
- CMS è l'acronimo di "Compact Muon Solenoid", ovvero solenoide muonico compatto: pesa infatti il doppio della Torre Eiffel.
- Il magnete superconduttore è raffreddato a $-268.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e genera un campo magnetico 100 000 volte più potente del campo magnetico terrestre
- Capace di *fotografare* più di 40 milioni di collisioni al secondo
- CMS è una delle più grandi collaborazioni scientifiche internazionali (≈ 4000 collaboratori da ≈ 40 paesi)
- Nel 2012 ha annunciato, insieme ad ATLAS, la scoperta del bosone di Higgs
- Ampio programma di fisica: da misure di precisione del Modello Standard alla ricerca di nuove teorie e particelle come la materia oscura.

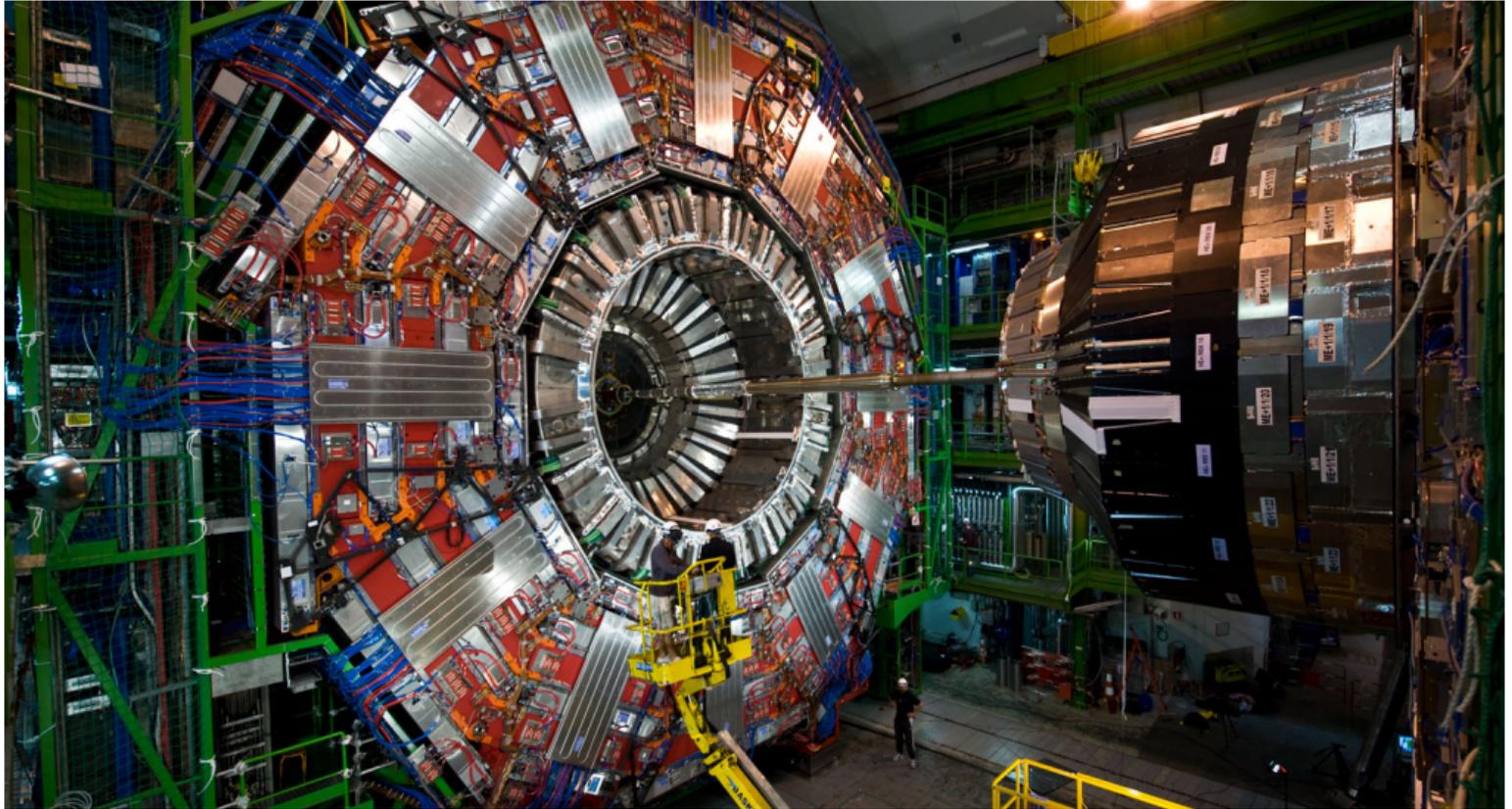
L'esperimento CMS

CMS DETECTOR

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



L'esperimento CMS



Particelle e rivelatori

Le particelle visibili vengono misurate tramite rivelatori diversi ed identificate dai loro comportamenti caratteristici dovuti al tipo di interazione con la materia:

- Le **particelle cariche** rilasciano un segnale nei rivelatori di traccia

- *I tracciatori misurano molto precisamente il percorso delle particelle cariche*

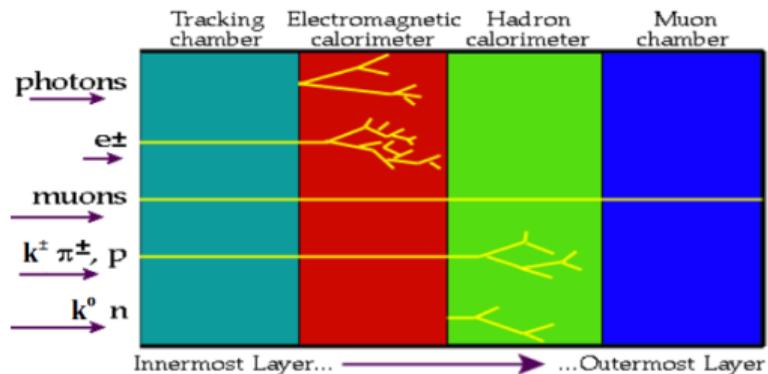
- Le **particelle cariche ed i fotoni** rilasciano energia nei calorimetri elettromagnetici

- Gli **adroni** rilasciano energia nei calorimetri adronici

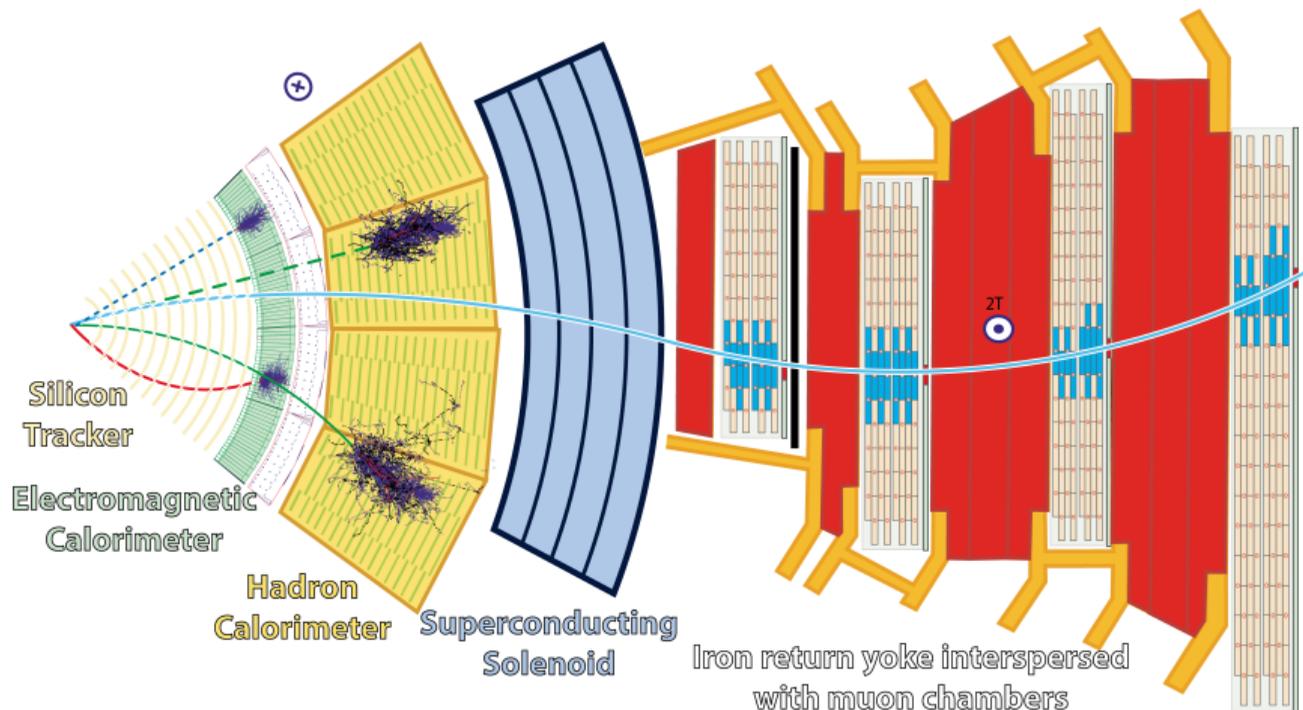
- *I calorimetri sono rivelatori che misurano l'energia di una particella*

- Infine i **muoni** vengono tracciati dalle camere muoniche

- *“Solo” i muoni arrivano così lontano*



Particelle e CMS



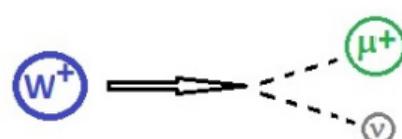
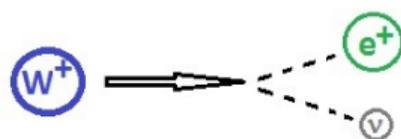
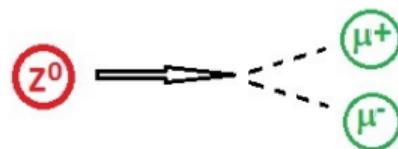
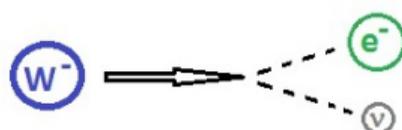
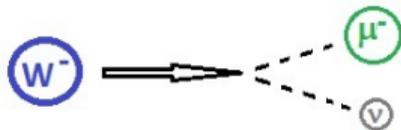
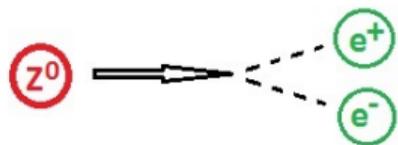
- Muon
- Electron
- Charged hadron (e.g. pion)
- - - Neutral hadron (e.g. neutron)
- - - Photon

Preparazione agli esercizi

Preparazione agli esercizi

Categorie di particelle da riconoscere nell'esercizio:

1. Candidati bosoni W^+ e W^-
2. Candidati NP (Neutral Particles): bosoni Z^0 o particelle neutre più leggere

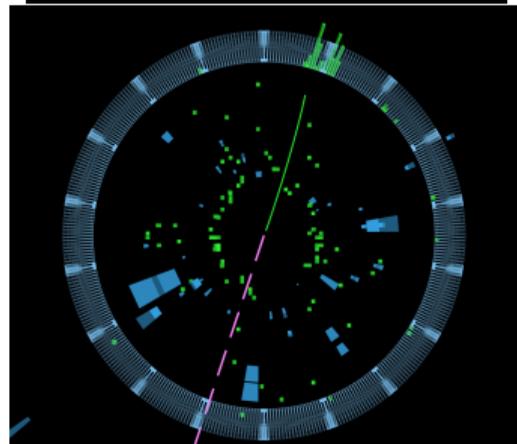
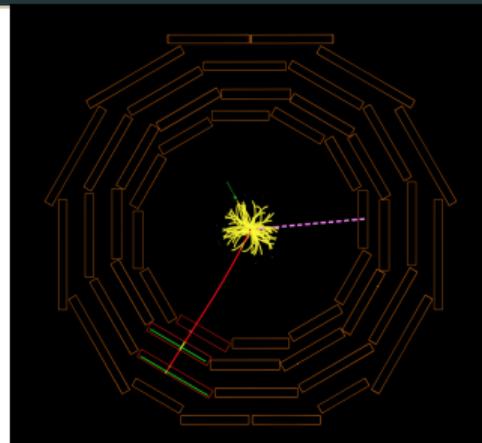


3. Candidati bosoni di Higgs $H \rightarrow Z^0 Z^0$
4. Candidati bosoni di Higgs $H \rightarrow \gamma\gamma$

Eventi candidati bosoni W

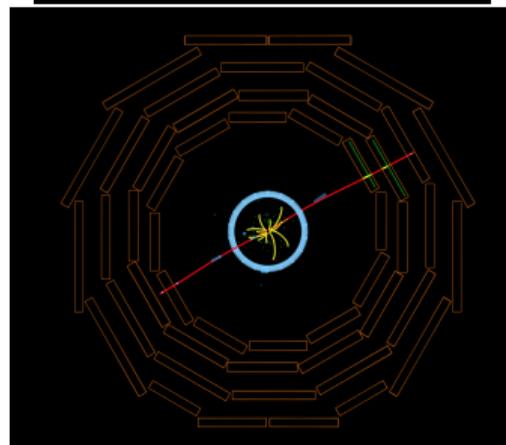
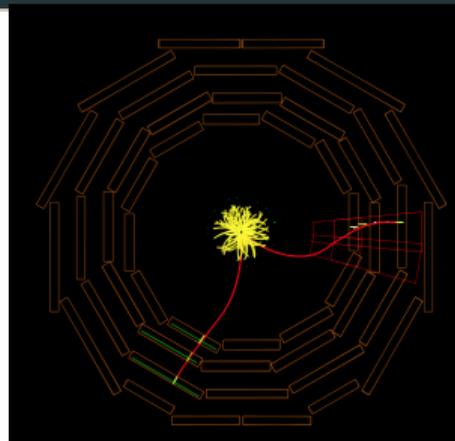
BOSONI W^+ E W^-

- Decadono in muoni o elettroni singoli ed un neutrino ad alta energia non rivelabile (\rightarrow energia mancante E_{miss})
 - $W^+ \rightarrow \mu^+ \nu \rightarrow \mu^+ + E_{\text{miss}}$
 - $W^+ \rightarrow e^+ \nu \rightarrow e^+ + E_{\text{miss}}$
 - $W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu} \rightarrow \mu^- + E_{\text{miss}}$
 - $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu} \rightarrow e^- + E_{\text{miss}}$
- Una traccia rossa che produce un segnale nei rivelatori a muoni corrisponde ad un **muone**
- Una traccia verde che produce un segnale nel calorimetro elettromagnetico corrisponde ad un **elettrone**
- L'**energia mancante** è indicata con una freccia viola
- **La carica si distingue dalla curvatura**
 - senso antiorario \rightarrow carica negativa
 - senso orario \rightarrow carica positiva



PARTICELLE NEUTRE

- **Decadono in coppie di muoni o elettroni**
 - $NP \rightarrow \mu^+ \mu^-$
 - $NP \rightarrow e^+ e^-$
- I prodotti hanno **carica opposta**, quindi una curvatura con opposto segno di rotazione
- Nel caso di Z^0 le tracce sono molto energetiche e quindi quasi dritte
- In questi processi non vengono prodotti neutrini, quindi **non ci aspettiamo energia mancante**
- **La massa invariante di una coppia di tracce si ottiene selezionando le tracce con il cursore, tenendo premuto il tasto “↑ Shift” e cliccando poi M**

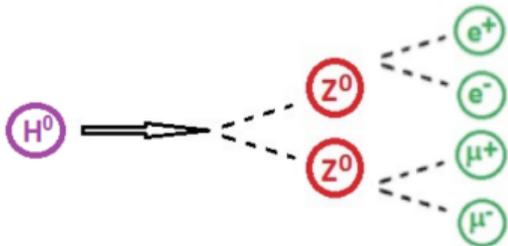


Eventi candidati Higgs

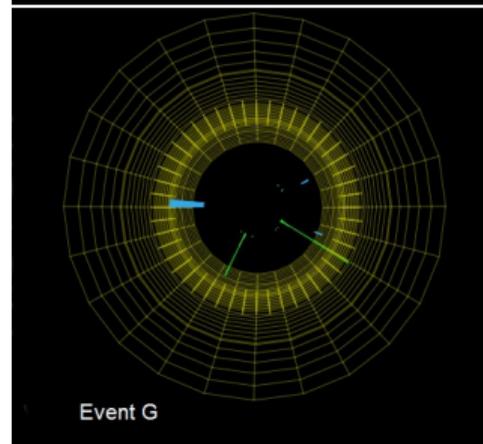
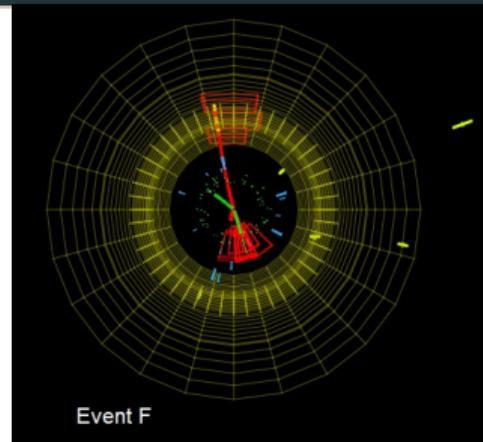
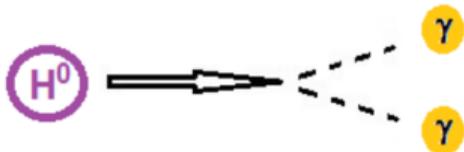
BOSONI DI HIGGS

L'Higgs può decadere in svariati modi, noi ci occuperemo di 2 casi:

1. $H \rightarrow Z^0 Z^0$: i bosoni Z^0 poi decadono in coppie di muoni o di elettroni per un totale di 4 tracce

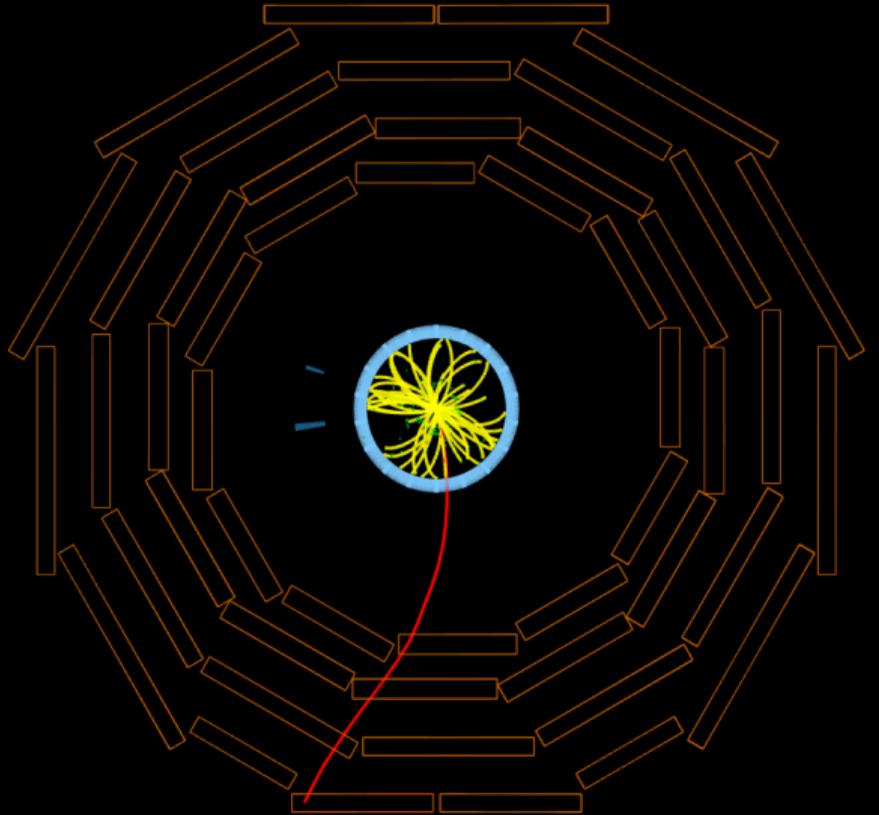


2. $H\gamma\gamma$: i fotoni sono neutri e lasciano segnale solo nel calorimetro elettromagnetico



EVENTI “ZOO”

Gli eventi che non hanno tracce identificate come elettroni o muoni o fotoni oppure che non sono riconducibili a NP, W o H sono classificati come “zoo”



Vi verranno assegnati 100 eventi da esaminare. Analizzando l'evento, domandatevi:

- La traccia che sto osservando è un muone oppure un elettrone?
- È un W, uno Z o un'altra particella dello "zoo"?
- Se è un W, qual è la sua carica?
- Se è più probabile che si tratti di un candidato Z, è possibile identificare le due tracce dei leptoni ed usarle per trovare la massa invariante della particella decaduta?
- Se è più probabile che si tratti di un Higgs, è un decadimento in 4 leptoni o 2 fotoni?

Event Display – Funzioni

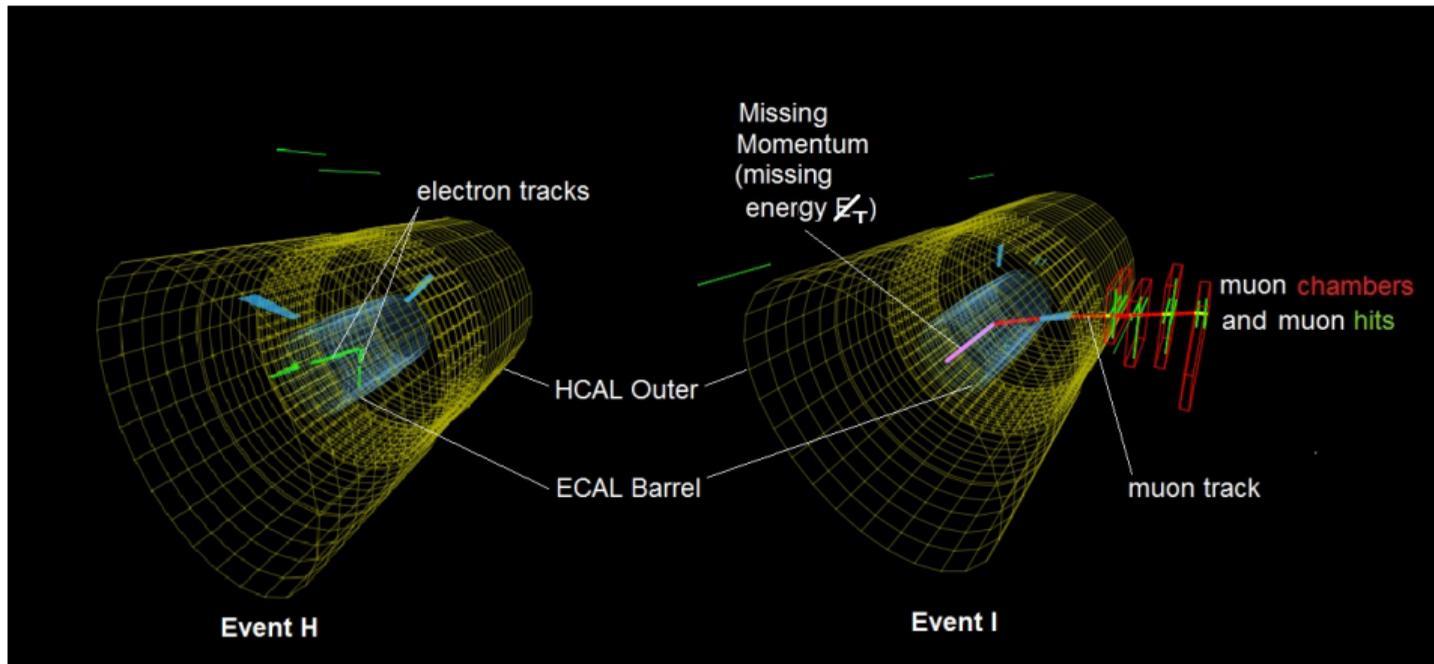
➤	Detector	i
▼	Imported	i
➤	Provenance	i
➤	Tracking	i
➤	ECAL	i
➤	HCAL	i
➤	Muon	i
➤	Physics	i

Il software “iSpyWebGL” dispone di diversi menu a tendina e funzioni

- Visualizzare i diversi rivelatori
- Quando sono stati presi i dati
- Visualizzare le risposte (“hits”) dei diversi rivelatori
- **Visualizzare gli “oggetti” ricostruiti (elettroni, muoni, fotoni, energia mancante)**

Se l’evento contiene oggetti ricostruiti interessanti (muoni, elettroni, fotoni) la selezione è automatica.

Event Display



Event Display – Pulsanti utili

ISpy WebGL masterclass_1.ig:Events/Run_1/Event_1 [1 of 100]

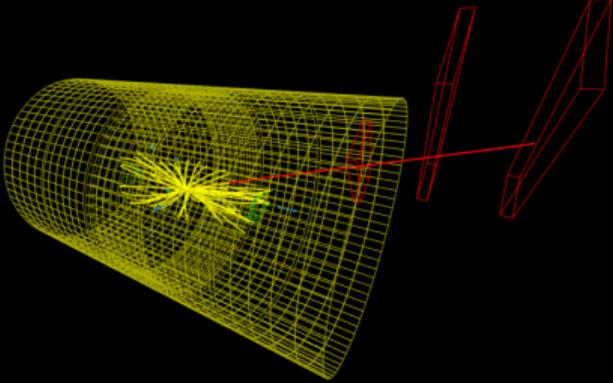
CAMBIARE EVENTO **PROIEZIONE XY** **3D 2D**

◀ ⏪ ⏩ ▶ 🔍 🔍 🗺️ 🗺️ 🗺️ 🗺️ 🗺️ 🗺️ ⚙️ ⓘ 🖨️

▼ Detector 🔴

- Pixel Barrel
- Pixel Endcap (+)
- Pixel Endcap (-)
- Tracker Inner Barrel
- Tracker Outer Barrel
- Tracker Inner Detector (+)
- Tracker Inner Detector (-)
- Tracker Endcap (+)
- Tracker Endcap (-)
- ECAL Barrel
- ECAL Endcap (+)
- ECAL Endcap (-)

 CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2011-Aug-17 06:01:59.493993 GMT
Run / Event / LS: 173389 / 490868544 / 370



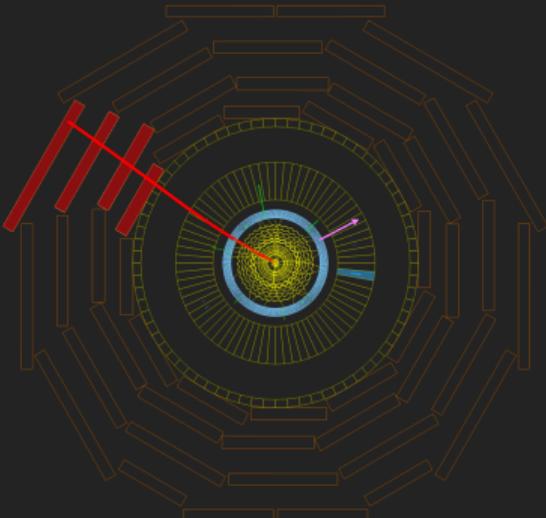
A 3D visualization of the CMS detector. The detector is shown as a yellow wireframe cylinder. A central vertex is visible with several tracks radiating outwards. To the right, two red wireframe structures represent the calorimeters. A small 3D coordinate system is visible in the bottom left corner of the main view area.

Event Display – Pulsanti utili

iSpy WebGL N100:Events/Run_1/Event_1 [1 of 100]

Navigation icons: Home, Search, Refresh, 3D, $r\phi$, p_z , View axes (Y⁺, X⁺, Z⁺), 3D, Fullscreen, Zoom, Info, Camera.

 CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2011-Aug-17 06:01:52.325260 GMT
Run / Event / LS: 173389 / 490419761 / 370



3D visualization of the CMS detector cross-section. The detector is shown in orange outlines. A central event display shows a dense collection of tracks (yellow and blue) with a red line indicating a track and a purple arrow pointing to a vertex. A 3D coordinate system (x, y, z) is visible in the bottom left corner.

Right sidebar (Close Controls):

- Detector
- Imported
- Provenance
- Tracking
- ECAL
- HCAL
- Muon
- Physics
- Missing Et (PF)
 - number: 1
 - key: PFMETs_V1
 - show:
 - opacity: 1
 - color: #ff7fff
- Jets (Reco)
- Global Muons (Reco)
- Stand-alone Muons (Reco)
- Tracker Muons (Reco)
- Vertices (Reco)

Close Controls

Alla fine dell'esercizio saremo in grado di misurare le seguenti cose:

- il rapporto W/Z
- il rapporto W^+ / W^-
- il rapporto e/μ
- la massa del bosone Z e di eventuali altre particelle con decadimenti simili presenti nel grafico della massa invariante

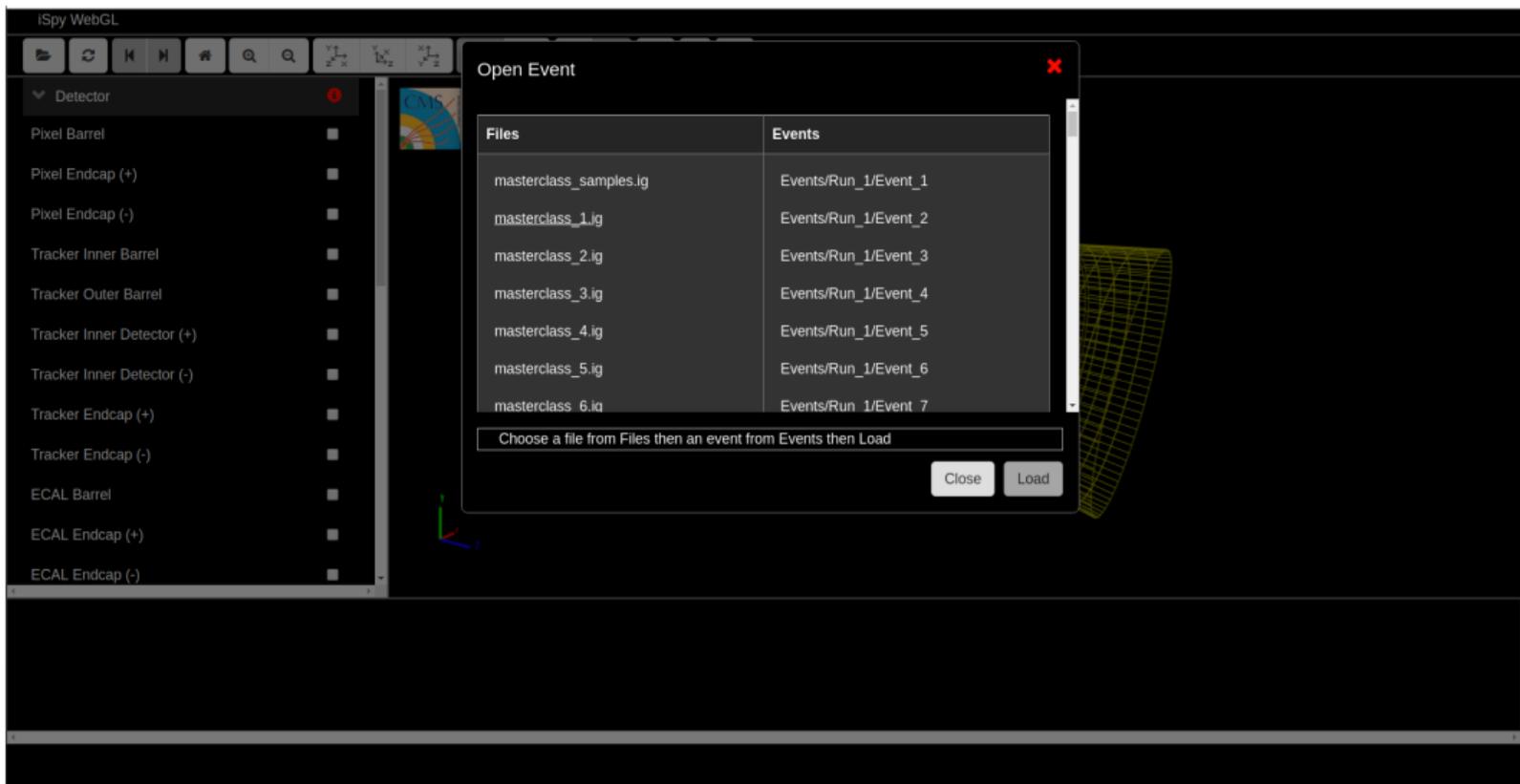
Durante la videoconferenza questi vostri risultati verranno combinati con quelli degli altri istituti, che partecipano alla Masterclass. In particolare:

- Ogni istituto presenterà *rapidamente* i propri risultati
- I moderatori combineranno i dati di tutti gli istituti e vi mostreranno l'istogramma di massa della combinazione
- Ci sarà uno spazio dedicato a domande e risposte

- I risultati vanno riportati utilizzando l'interfaccia CIMA
- Dovrete selezionare la data (CERN-26Mar2025), il luogo (Padova_26mar25) e il vostro gruppo di dati

Choose your Masterclass	Choose your location	Choose your data file
TestEvents-01Jan2022	Istanbu/YTU_26mar25	10.1
Santander-13May2024	Nicosia_26mar25	10.2
MP-15Jan2024	ParisLPNHE_26mar25	10.3
Cakovec-24Jan2024	Padova_26mar25	10.4
Bristol-27Mar2024	Algiers_26mar25	10.5
Sandbox-31Dec2023		10.6
Belgrade-FF		10.7
Zurich-22Mar2024		10.8
Bruxelles-23Mar2024		10.9
Providence-11Apr2024		100.31
Dulovo-15May2024		100.32
Rijeka-09May2024		100.33
CERN-05Jun2024		100.34
Lisboa-05July2024		100.35
London-12July2024		100.36
CIEMAT-11July2024		100.37
Seattle-11Sep2024		100.38
CERN-05Sep2024		100.39
Medelin-24Sep2024		100.41
Pasto_03Dec2024		100.42
FNAL-27Sep2024		100.43
Oviedo-Oct2024		100.44
MilanoBicocca_09Feb2025		100.45
Osijek_17Jan2025		100.46
Sofia-13Jan2025		100.47
Chilton-29Jan2025		100.48
CERN-19Feb2025		100.49
CERN-IDWGS-11Feb2025		100.51
RAL-11to14Mar2025		100.52
CERN-25Feb2025		100.53
CERN-06Mar2025		100.54
CERN-07Mar2025		50.1
CERN-10Mar2025		50.11
CERN-13Mar2025		50.12
CERN-17Mar2025		50.13
CERN-20Mar2025		50.14
CERN-21Mar2025		50.15
CERN-25Mar2025		50.16
CERN-26Mar2025		50.17
CERN-31Mar2025		50.18
CERN-02Apr2025		50.19
CERN-08Apr2025		50.2

Dettagli tecnici: ISPY



The screenshot displays the ISpy WebGL interface. On the left, a sidebar lists detector components with checkboxes: Pixel Barrel, Pixel Endcap (+), Pixel Endcap (-), Tracker Inner Barrel, Tracker Outer Barrel, Tracker Inner Detector (+), Tracker Inner Detector (-), Tracker Endcap (+), Tracker Endcap (-), ECAL Barrel, ECAL Endcap (+), and ECAL Endcap (-). A central window titled 'Open Event' is open, featuring a table with two columns: 'Files' and 'Events'. The table lists seven masterclass files and their corresponding event IDs. Below the table, a text box instructs the user to 'Choose a file from Files then an event from Events then Load'. At the bottom of the dialog are 'Close' and 'Load' buttons. The background shows a 3D visualization of a detector component, likely a barrel, rendered in a wireframe style.

Files	Events
masterclass_samples.ig	Events/Run_1/Event_1
masterclass_1.ig	Events/Run_1/Event_2
masterclass_2.ig	Events/Run_1/Event_3
masterclass_3.ig	Events/Run_1/Event_4
masterclass_4.ig	Events/Run_1/Event_5
masterclass_5.ig	Events/Run_1/Event_6
masterclass_6.ig	Events/Run_1/Event_7

Choose a file from Files then an event from Events then Load

Close Load

Dettagli tecnici: CIMA

Per ogni evento analizzato selezionate:

1. Il numero di evento
2. Le particelle individuate nello stato finale
3. La categoria individuata (W^\pm senza segno quando non si è sicuri della carica)
4. Per i candidati Neutral Particles occorre immettere a mano la massa invariante
5. Terminata la compilazione premete “Next”

Back Events Table (Group 100.1) Mass Histogram (Padova2022A) Results (Padova2022A) [Event Display](#)

Masterclass: CERN-15Mar2022
Location: Padova2022A
Group: 100.1

Select Event Event index: <input type="text" value="1"/> Event number: 100.1-1	Final State <input type="radio"/> e v <input type="radio"/> μ v <input type="radio"/> e e <input type="radio"/> μ μ <input type="radio"/> 4e <input type="radio"/> 4 μ <input type="radio"/> 2e 2 μ	Primary State Charged Particle: <input type="radio"/> W+ <input type="radio"/> W- <input type="radio"/> W \pm <input type="radio"/> Neutral Particle (Z, H) <input type="radio"/> Zoo	Enter Mass <input type="text"/> GeV/c ² <input type="button" value="Next"/>
---	--	--	---

Domande?