



# ALLA RICERCA DEL BOSONE Z

Alessandro Rocchi, Marco Vanadia

---










10 Febbraio 2023

Tor Vergata

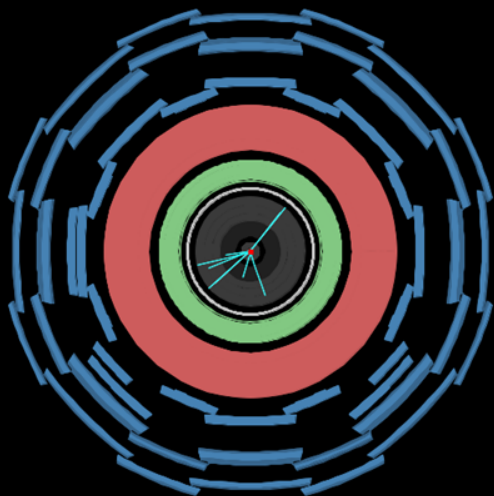
Università degli Studi Roma



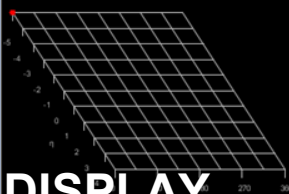
# Hypatia 7.4: alla ricerca dello Z

 configuration	15/02/2016 20.22	Cartella di file	
 events	15/02/2016 20.22	Cartella di file	
 geometry	15/02/2016 20.22	Cartella di file	
 help	15/02/2016 20.22	Cartella di file	
 img	15/02/2016 20.22	Cartella di file	
 lib	15/02/2016 20.22	Cartella di file	
 Hypatia_7.4_Masterclass.jar	15/02/2016 20.22	Compressed file	2.545 KB
 HYPATIA_for_Linux.sh	15/02/2016 20.22	Shell Script	1 KB
 groupA.zip	15/02/2016 20.27	Cartella compressa	28.688 KB

# PANNELLO 4: MASSA INVARIANTE



**PANNELLO 1: L'EVENT DISPLAY**



Tracks		Physics Objects					
Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	$\varphi$	$\theta$		
Tracks 0	-	11.68	4.28	-1.319	0.375		
Tracks 1	+	126.06	39.41	-2.413	0.318		
Tracks 2	+	4.57	4.56	-2.783	1.649		
Tracks 3	-	167.90	53.01	0.906	0.321		
Tracks 4	-	1.34	1.33	-2.949	1.475		
Tracks 5	-	1.75	1.74	-3.090	1.645		
Tracks 6	+	18.61	3.94	-1.818	0.214		

**PANNELLO 2: TRACCE E OGGETTI**

Data	Name	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Status	
<input checked="" type="checkbox"/>	InDet	
<input checked="" type="checkbox"/>	Calo	
<input checked="" type="checkbox"/>	MuonDet	
<input checked="" type="checkbox"/>	Objects	

**PANNELLO 3: CONTROLLI**

The screenshot displays the HYPATIA software interface, which is used for analyzing particle interactions. The main window is divided into several panels:

- Canvas Window:** Shows a top-down view of the detector geometry with tracks overlaid. The tracks are color-coded (blue, red, green) and originate from a central point. A 3D grid is visible in the bottom right of this panel.
- HYPATIA - Track Momenta Window:** A window for managing tracks. It includes a 'Tracks' list on the left and a 'Cerca in:' (Search in) dropdown set to 'Hypatia\_7.4\_Masterclass'. Below this is a file browser showing a directory structure with folders like 'configuration', 'events', 'geometry', 'help', 'img', 'lib', and 'groupA.zip'. The 'Apri' (Open) button is highlighted.
- HYPATIA - Control Window:** A control panel with tabs for 'Parameter Control', 'Interaction and Window Control', and 'Output Display'. Under 'Data', there are checkboxes for 'Status', 'InDet', 'Calo', 'MuonDet', and 'Objects', all of which are checked.

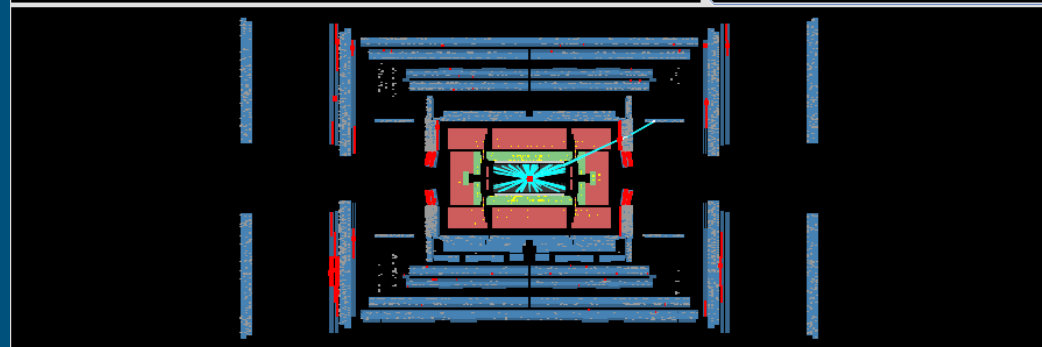
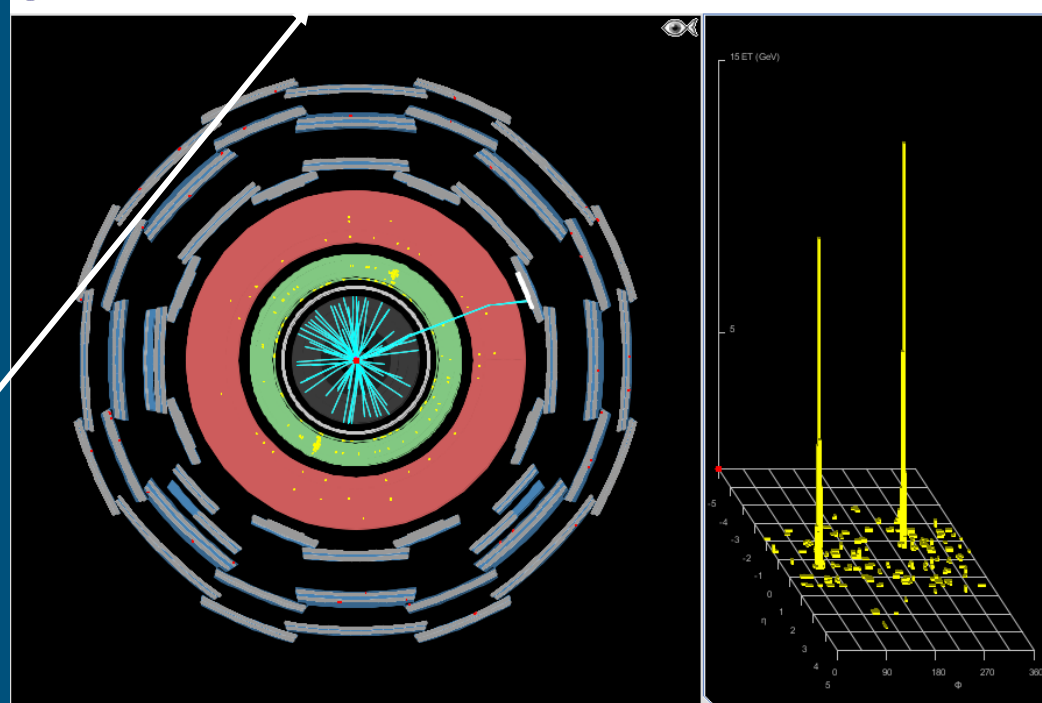
A red arrow points from the 'File' menu in the top-left corner of the Canvas Window to the 'Apri' button in the Track Momenta Window, indicating the workflow for loading a file.

FILE -> READ EVENT LOCALLY -> CARICARE FILE CON IL NOME DEL GRUPPO CONTENENTE GLI EVENTI

# L'EVENT DISPLAY

- Numero identificativo del run di dati (es: il run 204796 equivale ai dati presi dalle 12:34 alle 21:37 di un certo giorno)
- Ogni evento ha un unico numero identificativo

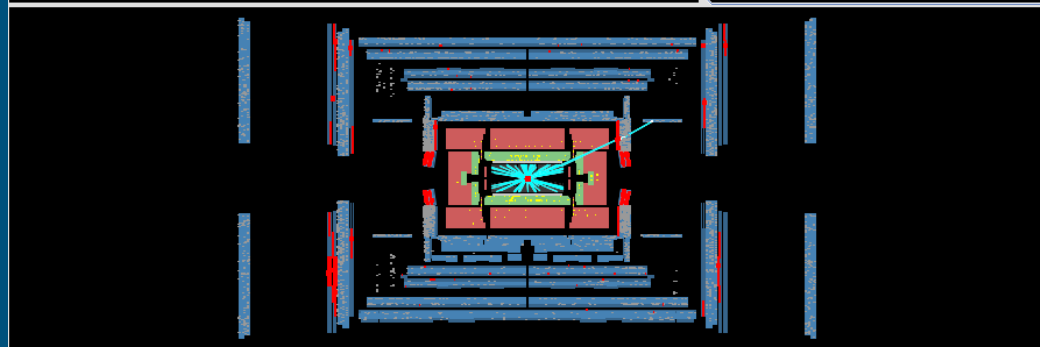
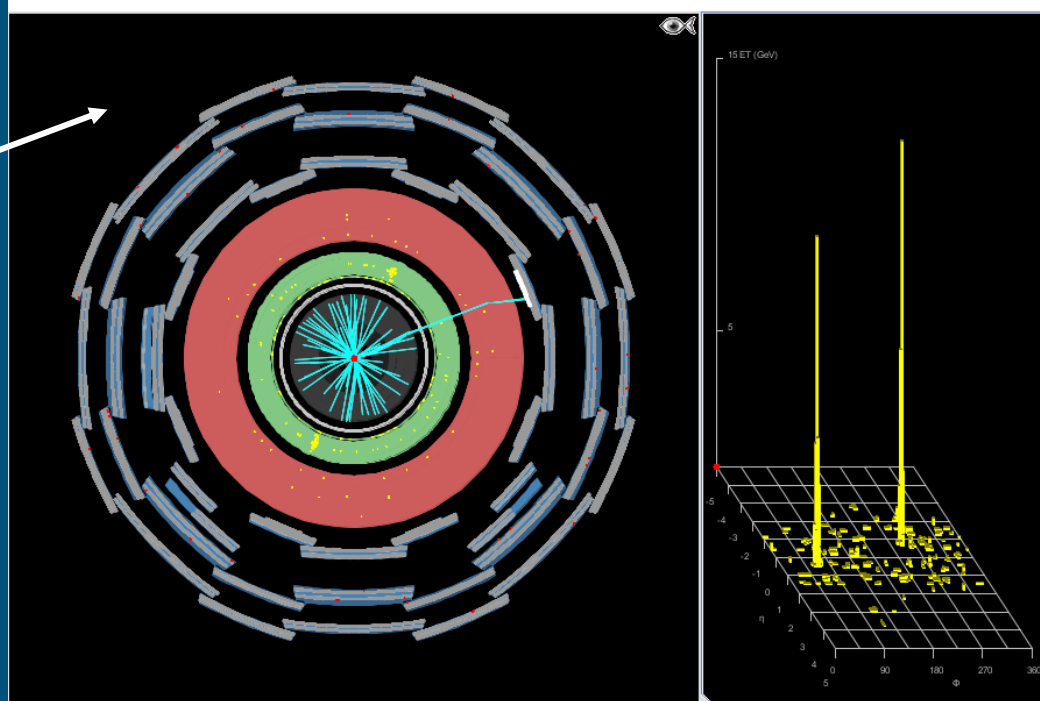
Canvas Window - File: event001.xml Run: 204796 Event: 5060402



# L'EVENT DISPLAY

Vista trasversale

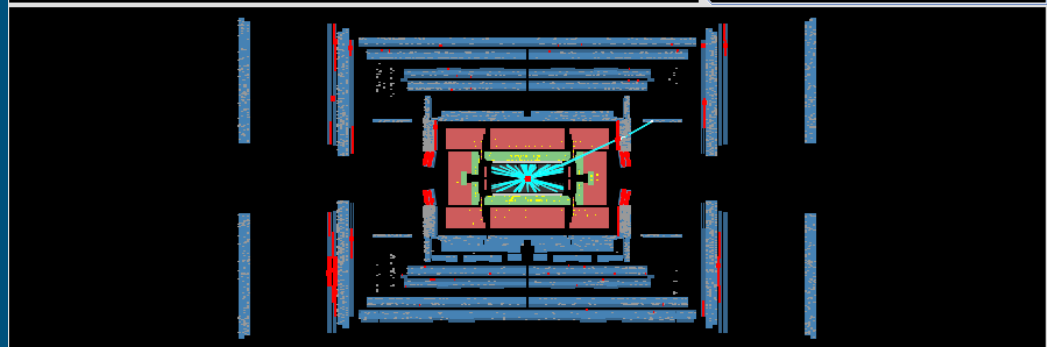
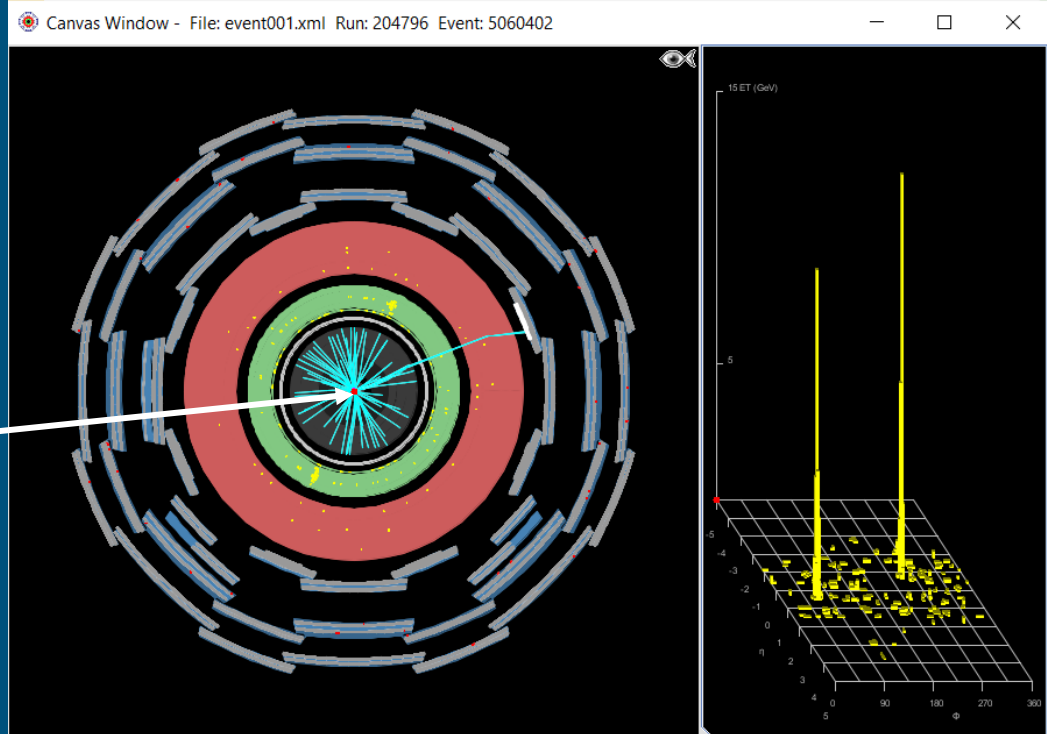
Canvas Window - File: event001.xml Run: 204796 Event: 5060402



# L'EVENT DISPLAY

Vista trasversale

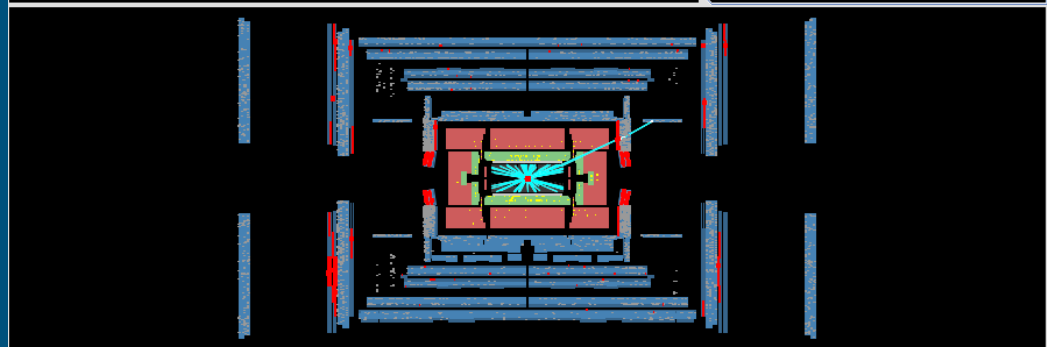
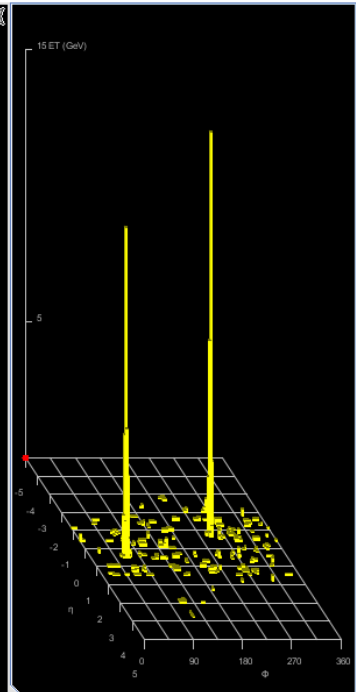
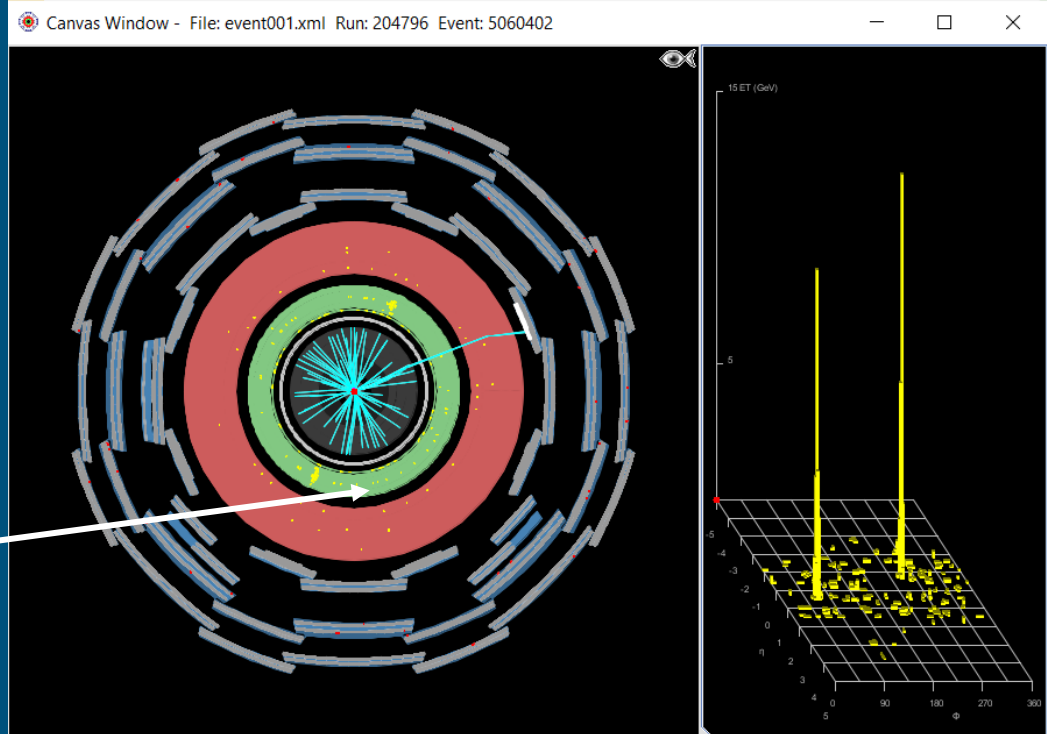
- Tracciatore interno con tracce in azzurro



# L'EVENT DISPLAY

## Vista trasversale

- Tracciatore interno con tracce in azzurro
- Calorimetro elettromagnetico con depositi di energia in giallo

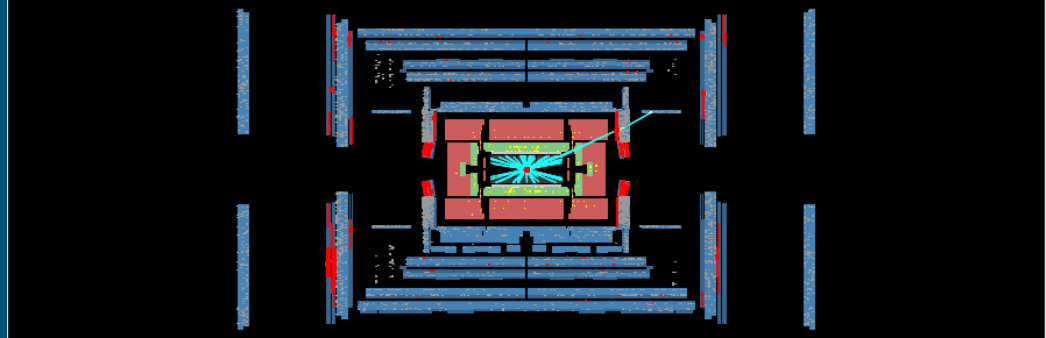
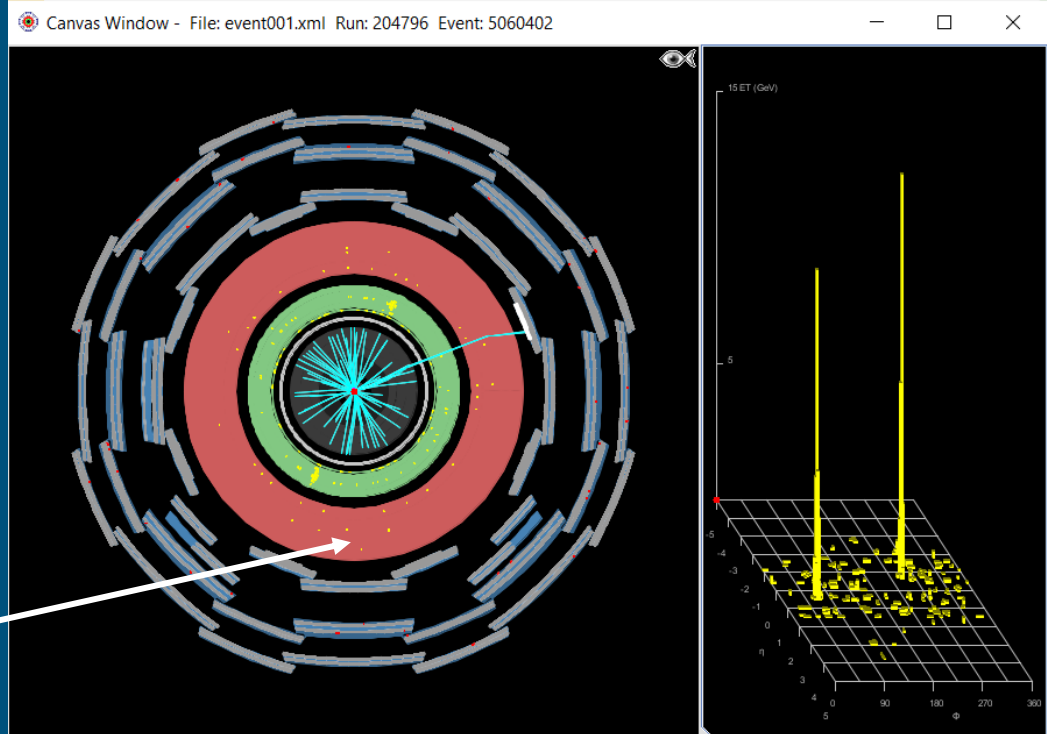




# L'EVENT DISPLAY

## Vista trasversale

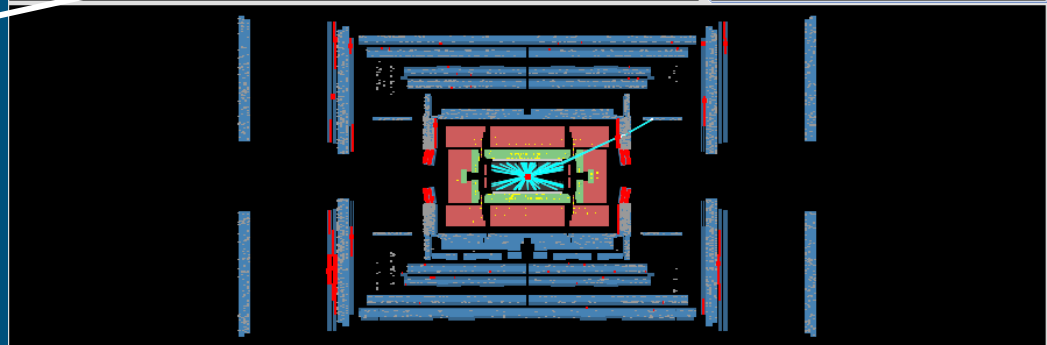
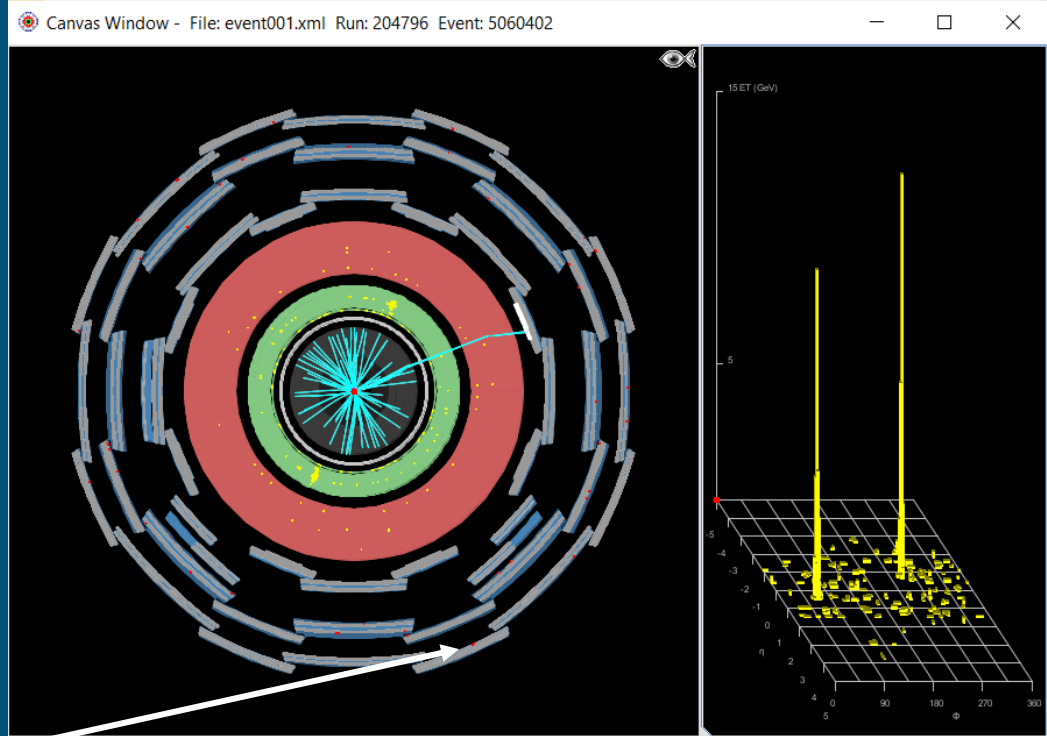
- Tracciatore interno con tracce in azzurro
- Calorimetro elettromagnetico con depositi di energia in giallo
- Calorimetro adronico con depositi di energia in giallo



# L'EVENT DISPLAY

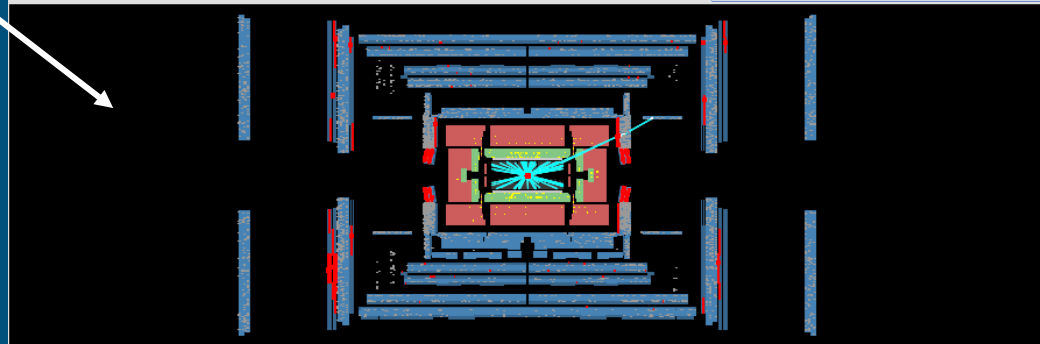
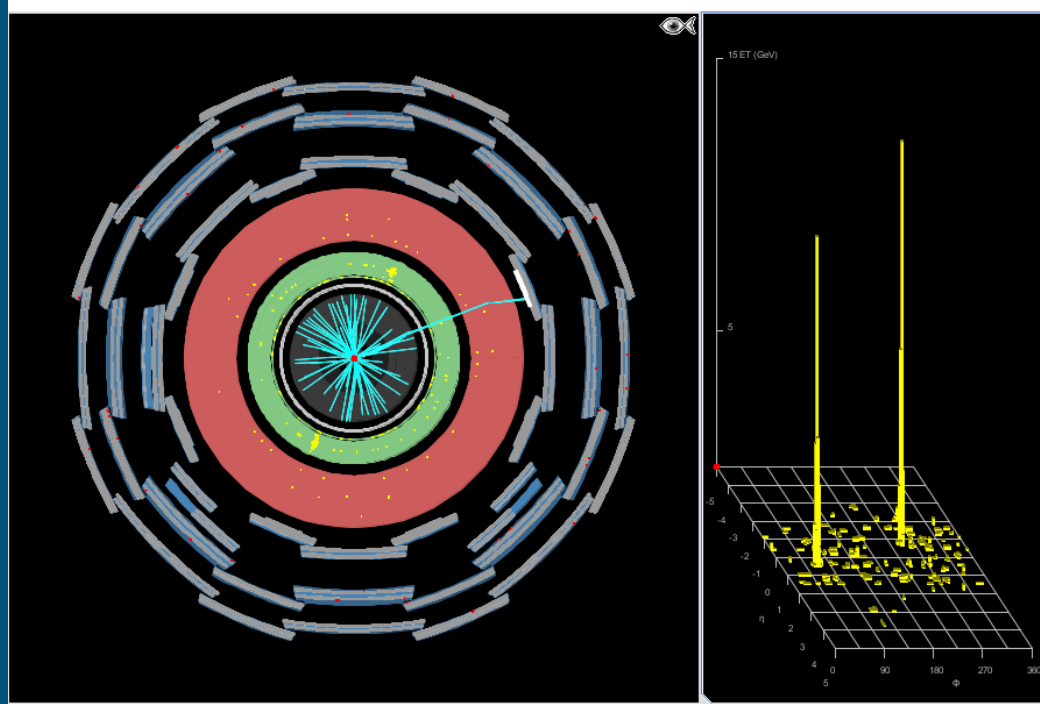
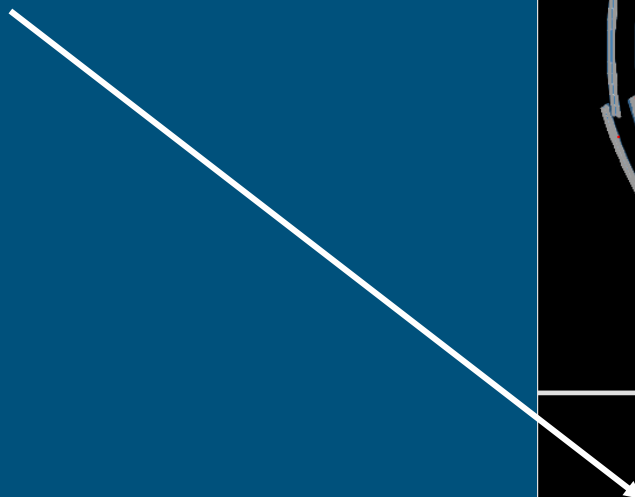
## Vista trasversale

- Tracciatore interno con tracce in azzurro
- Calorimetro elettromagnetico con depositi di energia in giallo
- Calorimetro adronico con depositi di energia in giallo
- Camere per muoni con gli hit in rosso



# L'EVENT DISPLAY

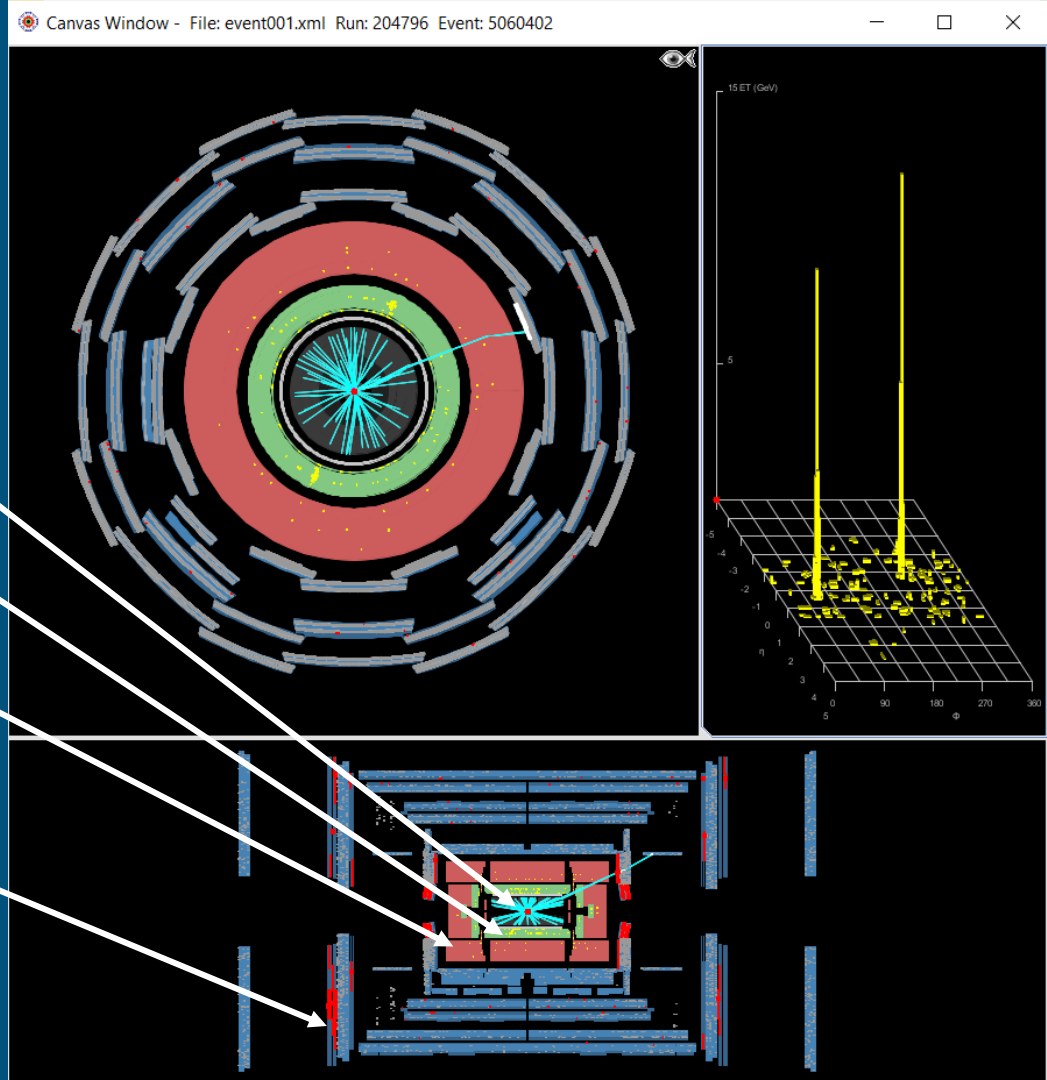
Vista laterale



# L'EVENT DISPLAY

## Vista laterale

- Tracciatore interno con tracce in azzurro
- Calorimetro elettromagnetico con depositi di energia in giallo
- Calorimetro adronico con depositi di energia in giallo
- Camere per muoni con gli hit in rosso

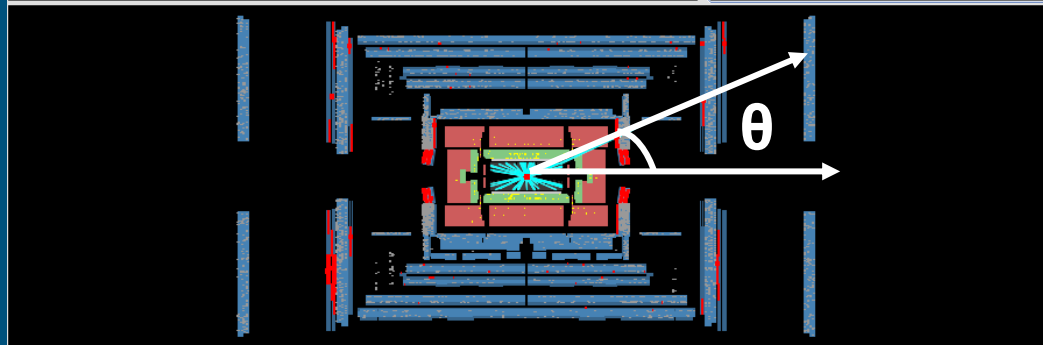
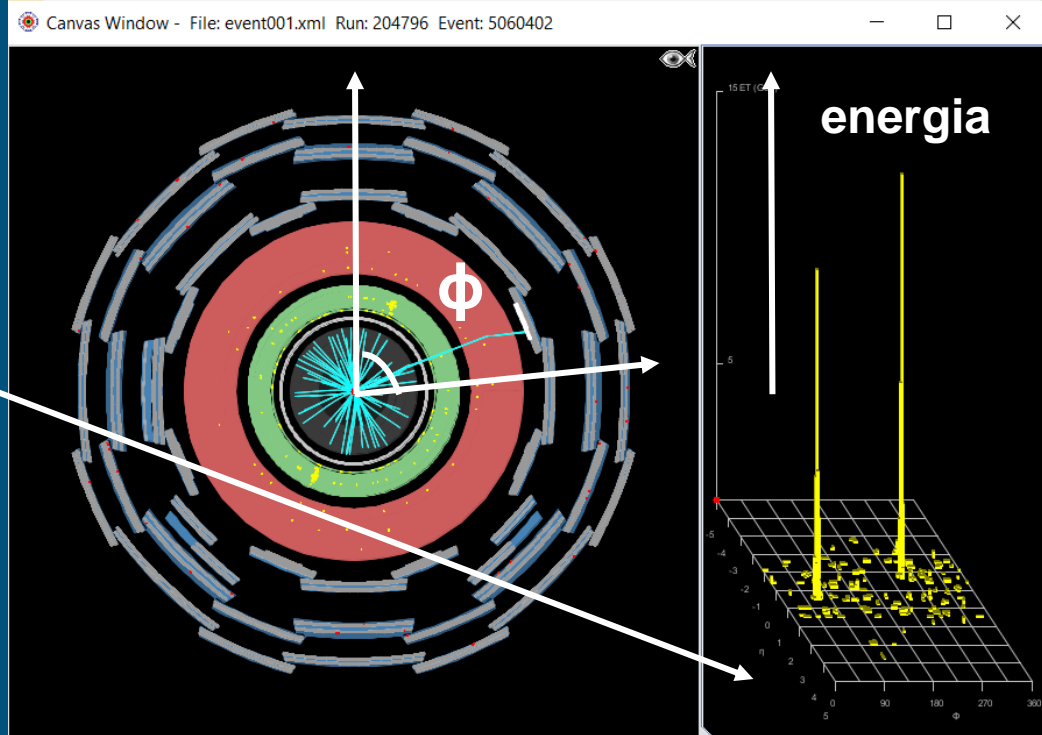


# L'EVENT DISPLAY

Display depositi elettromagnetici:

diagramma delle energie nel calorimetro elettromagnetico in funzione della posizione nel rivelatore  $\eta$ - $\phi$

$\eta$  è una funzione di  $\theta$ :  
 $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$



# Cosa stiamo cercando?

Il bosone Z nei suoi decadimenti leptonici:

- $Z \rightarrow e^+e^-$ 
  - gli elettroni (e i positroni) sono particelle cariche, quindi dobbiamo cercare una coppia di tracce con carica opposta nel tracciatore interno
  - il bosone Z ha una massa alta, mi aspetto che le tracce degli elettroni abbiano un alto impulso trasverso ( $p_T$ )
  - gli elettroni nella materia interagiscono e producono sciami elettromagnetici: vedrò dei depositi di energia nei calorimetri elettromagnetici (verde)

Devo stare attento a non confondermi con i fotoni: i fotoni producono depositi di energia simili a quelli degli elettroni, ma non hanno nessuna traccia associata nel rivelatore interno (o ne hanno due, ma ne parliamo dopo...)

# Cosa stiamo cercando?

Il bosone Z nei suoi decadimenti leptonici:

- $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ 
  - i muoni (e gli antimuoni) sono particelle cariche, quindi dobbiamo cercare una coppia di tracce con carica opposta nel tracciatore interno
  - i muoni lasciano modesti depositi elettromagnetici, però riescono a superare i calorimetri e hanno tracce anche nello spettrometro per muoni...
  - il bosone Z ha una massa alta, quindi mi aspetto che le tracce dei muoni abbiano un alto impulso trasverso ( $p_T$ )

# Come lo cerchiamo?

Sfruttiamo il pannello delle tracce e il pannello di controllo

Possiamo usarli per navigare tra gli event

The image shows two windows from the HYPATIA software. The top window, titled "HYPATIA - Track Momenta Window", displays a table of track data. The bottom window, titled "HYPATIA - Control Window", shows a control panel with various tabs and a data table.

**HYPATIA - Track Momenta Window**

File | Previous Event | Next Event | Electron | Muon | Photon | Delete Track | Reset Canvas

ETMis: 4,167 GeV  $\phi$ : 3,040 rad Collection: MET\_RefFinal

C:\Users\User\Documents\Hypatia\_7.4\_Masterclass\groupA\zip\event001.xml

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	$\psi$	$\theta$
Tracks 4	-	5,83	1,43	0,509	0,248
Tracks 7	-	3,40	1,06	-2,977	0,316
Tracks 8	+	47,07	37,95	-1,978	2,204
Tracks 9	-	2,34	1,28	2,093	0,580
Tracks 11	-	5,42	1,44	0,516	0,269
Tracks 12	-	2,96	1,20	-2,802	2,724
Tracks 13	-	8,30	1,47	2,483	2,964
Tracks 14	-	6,58	2,03	-1,081	0,313
Tracks 15	+	7,59	1,50	-1,220	2,943
Tracks 17	-	2,00	1,12	2,214	2,546
Tracks 21	+	2,65	1,91	-0,290	2,338
Tracks 25	+	6,27	1,30	2,975	0,209
Tracks 27	-	4,12	1,43	0,256	0,355
Tracks 28	-	1,92	1,65	2,064	1,039
Tracks 31	-	1,58	1,54	-1,098	1,367
Tracks 33	-	3,08	1,21	-1,953	0,406
Tracks 35	-	2,88	1,13	-2,993	0,404
Tracks 36	+	2,09	1,86	-1,513	1,094
Tracks 41	-	2,52	1,86	2,745	0,832
Tracks 42	+	1,29	1,22	1,668	1,247
Tracks 44	+	3,95	1,00	-2,840	0,256
Tracks 48	+	3,90	1,10	2,977	0,286
Tracks 49	-	2,86	1,09	0,165	0,391
Tracks 58	+	1,95	1,95	2,874	1,561
Tracks 63	-	8,03	1,87	-0,613	2,906
Tracks 67	-	1,02	1,01	-2,092	1,491

**HYPATIA - Control Window**

Parameter Control | Interaction and Window Control | Output Display

Projection | Data | Cuts | InDet | Calo | MuonDet | Objects | Geometry

Data	Name	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Status	
<input checked="" type="checkbox"/>	InDet	
<input checked="" type="checkbox"/>	Calo	
<input checked="" type="checkbox"/>	MuonDet	
<input checked="" type="checkbox"/>	Objects	



# Il pannello delle tracce

Contiene l'elenco di tutte le tracce e delle loro proprietà:

- carica
- impulso
- impulso trasverso

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	$\phi$	$\theta$
Tracks 4	5,83	1,43	0,509	0,248	
Tracks 7	-3,40	1,06	-2,977	0,316	
Tracks 8	+47,07	37,95	-1,978	2,204	
Tracks 10	-2,34	1,28	2,093	0,580	
Tracks 11	-5,42	1,44	0,516	0,269	
Tracks 12	-2,96	1,20	-2,802	2,724	
Tracks 13	-8,30	1,47	2,483	2,964	
Tracks 14	-6,58	2,03	-1,081	0,313	
Tracks 15	+7,59	1,50	-1,220	2,943	
Tracks 17	-2,00	1,12	2,214	2,546	
Tracks 21	+2,65	1,91	-0,290	2,338	
Tracks 25	+6,27	1,30	2,975	0,209	
Tracks 27	-4,12	1,43	0,256	0,355	
Tracks 28	-1,92	1,65	2,064	1,039	
Tracks 31	-1,58	1,54	-1,098	1,367	
Tracks 33	-3,08	1,21	-1,953	0,406	
Tracks 35	-2,88	1,13	-2,993	0,404	
Tracks 36	+2,09	1,86	-1,513	1,094	
Tracks 41	-2,52	1,86	2,745	0,832	
Tracks 42	+1,29	1,22	1,668	1,247	
Tracks 44	+3,95	1,00	-2,840	0,256	
Tracks 48	+3,90	1,10	2,977	0,286	
Tracks 49	-2,86	1,09	0,165	0,391	
Tracks 58	+1,95	1,95	2,874	1,561	
Tracks 63	-8,03	1,87	-0,613	2,906	
Tracks 67	-1,02	1,01	-2,092	1,491	

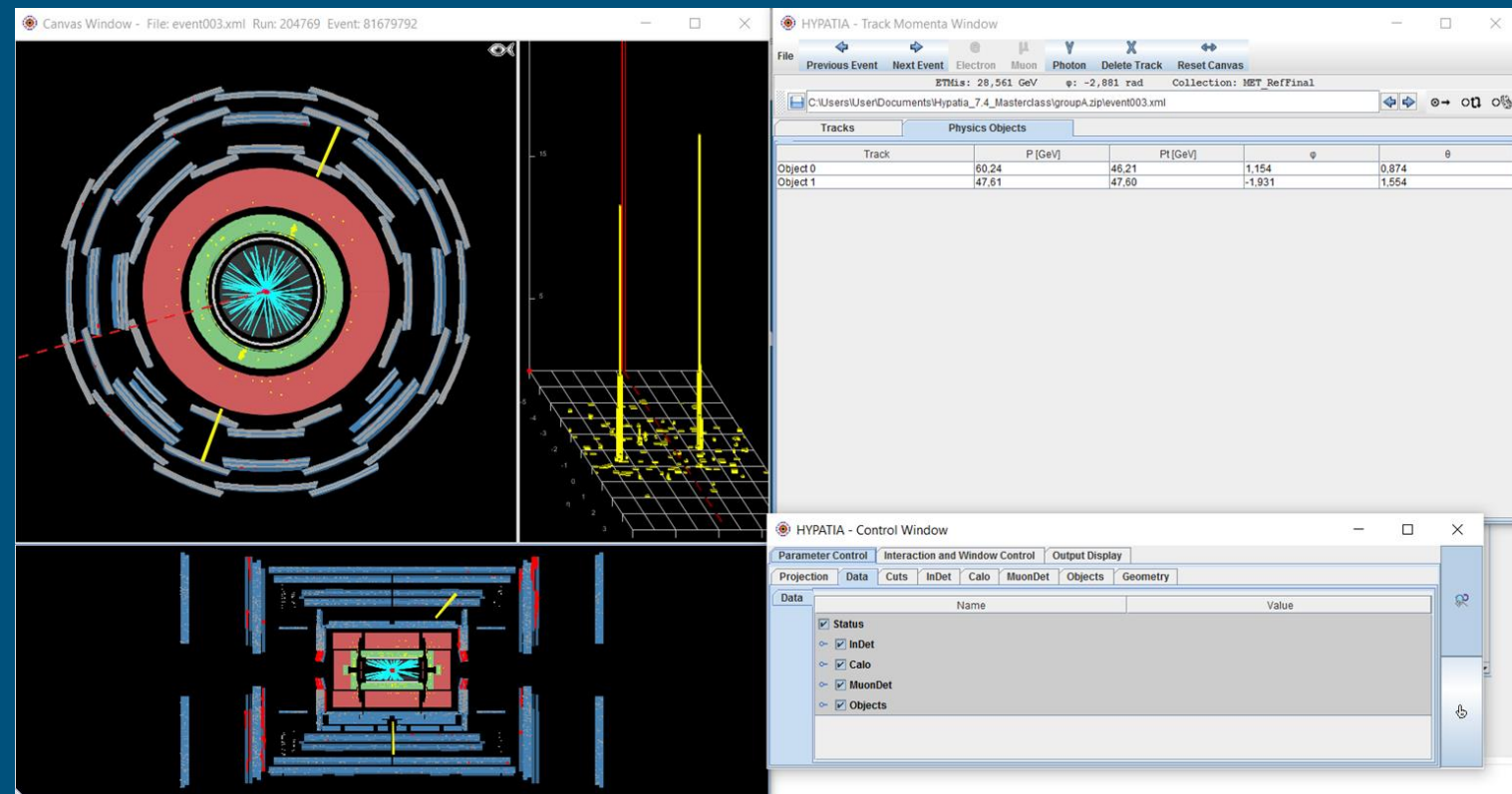
# Il pannello delle tracce

Contiene l'elenco di tutte le tracce e delle loro proprietà:

- carica
- impulso
- impulso trasverso

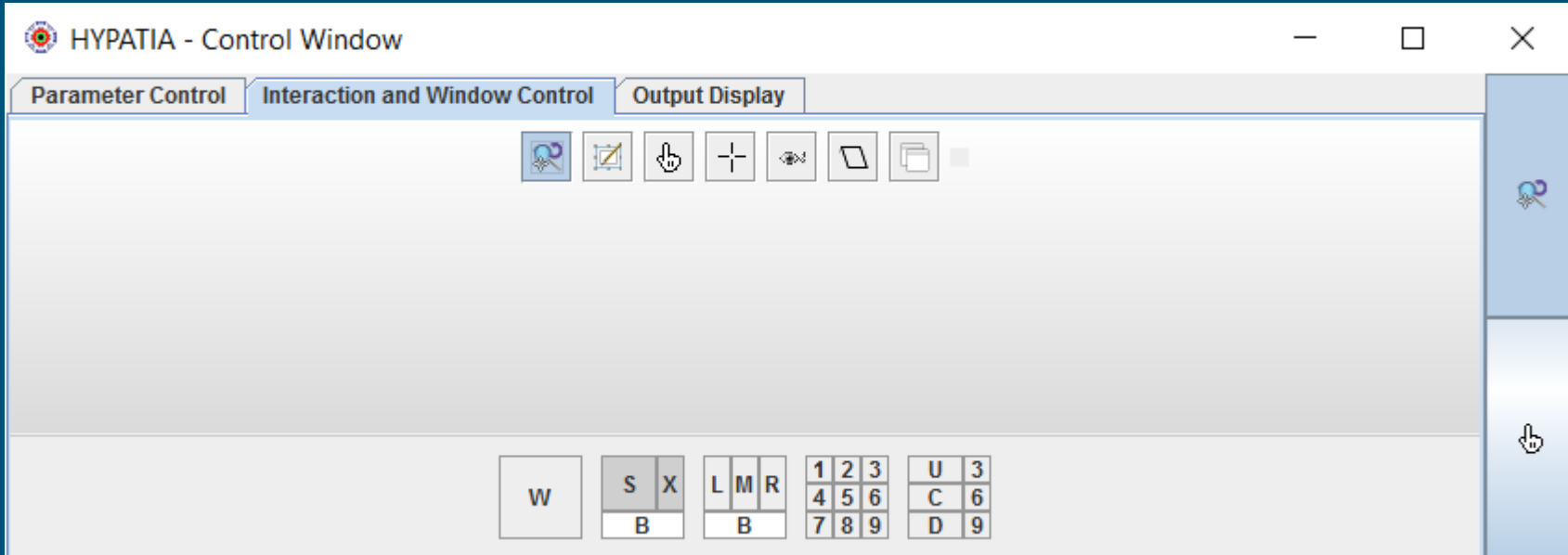
La finestra mostra anche l'energia "invisibile" (ad esempio dovuta a neutrini) dell'evento.

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	$\phi$	$\theta$
Tracks 4	-	5,83	1,43	0,509	0,248
Tracks 7	-	3,40	1,06	-2,977	0,316
Tracks 8	+	47,07	37,95	-1,978	2,204
Tracks 10	-	2,34	1,28	2,093	0,580
Tracks 11	-	5,42	1,44	0,516	0,269
Tracks 12	-	2,96	1,20	-2,802	2,724
Tracks 13	-	8,30	1,47	2,483	2,964
Tracks 14	-	6,58	2,03	-1,081	0,313
Tracks 15	+	7,59	1,50	-1,220	2,943
Tracks 17	-	2,00	1,12	2,214	2,546
Tracks 21	+	2,65	1,91	-0,290	2,338
Tracks 25	+	6,27	1,30	2,975	0,209
Tracks 27	-	4,12	1,43	0,256	0,355
Tracks 28	-	1,92	1,65	2,064	1,039
Tracks 31	-	1,58	1,54	-1,098	1,367
Tracks 33	-	3,08	1,21	-1,953	0,406
Tracks 35	-	2,88	1,13	-2,993	0,404
Tracks 36	+	2,09	1,86	-1,513	1,094
Tracks 41	-	2,52	1,86	2,745	0,832
Tracks 42	+	1,29	1,22	1,668	1,247
Tracks 44	+	3,95	1,00	-2,840	0,256
Tracks 48	+	3,90	1,10	2,977	0,286
Tracks 49	-	2,86	1,09	0,165	0,391
Tracks 58	+	1,95	1,95	2,874	1,561
Tracks 63	-	8,03	1,87	-0,613	2,906
Tracks 67	-	1,02	1,01	-2,092	1,491



- L'energia mancante (o invisibile) è mostrata nell'event display come una linea tratteggiata quando non è trascurabile
- Il pannello delle tracce ha anche una tab "physics object" che mostra dei depositi elettromagnetici di alta energia, potenzialmente dovuti a fotoni

# Il pannello di controllo

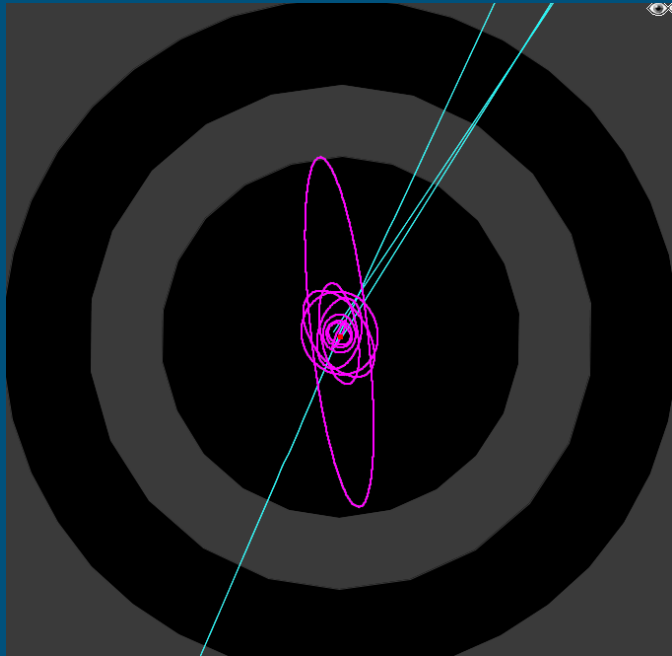


- Il pannello di controllo è molto ricco (state attenti a non perdervi...)
- Si può usare ad esempio per interagire con l'event display: selezionare se si vuole zoomare, o trascinare, ad esempio

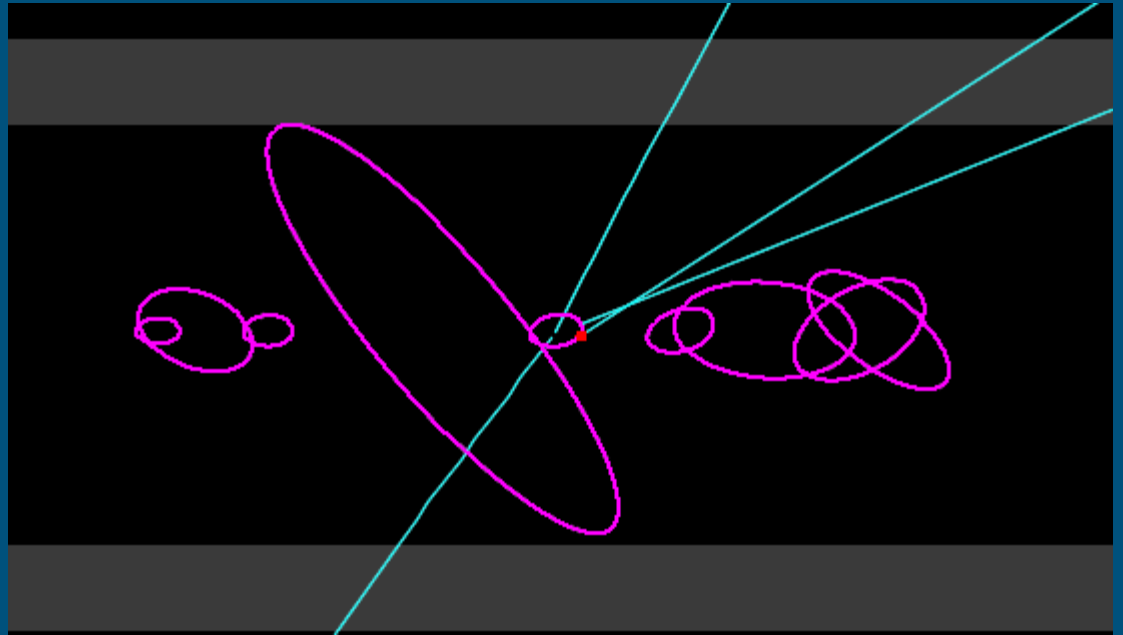
# Associazione delle tracce

---

Vista trasversale



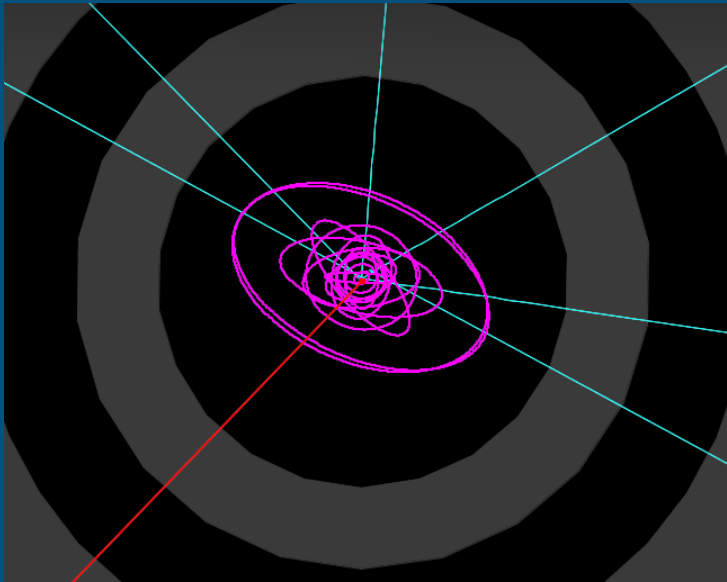
Vista laterale



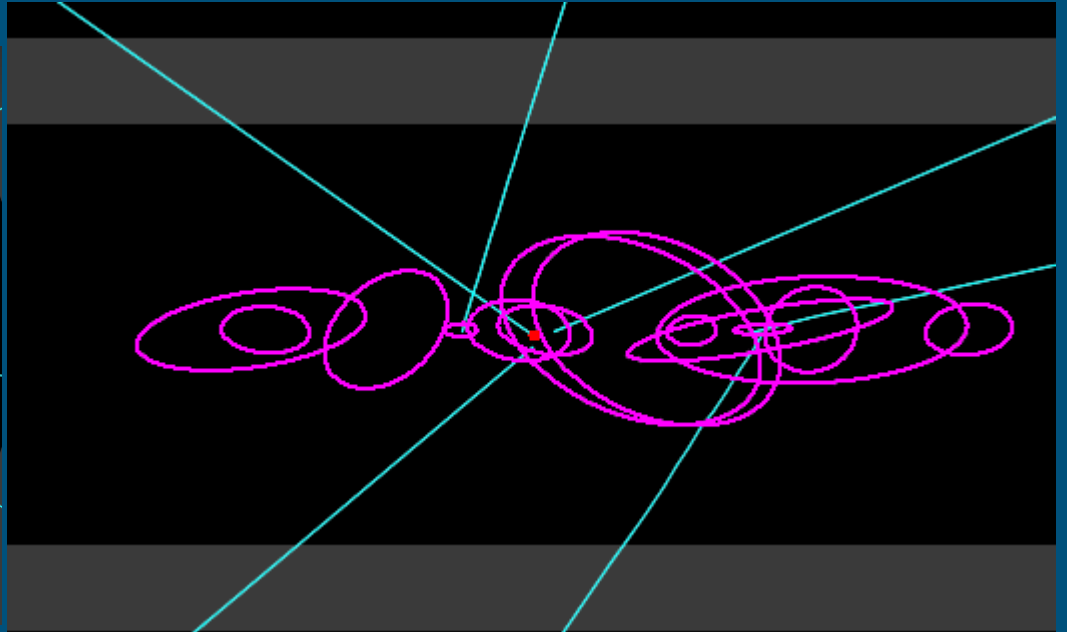
# Associazione delle tracce

---

Vista trasversale



Vista laterale



# Il pannello di controllo

HYPATIA - Control Window

Parameter Control Interaction and Window Control Output Display

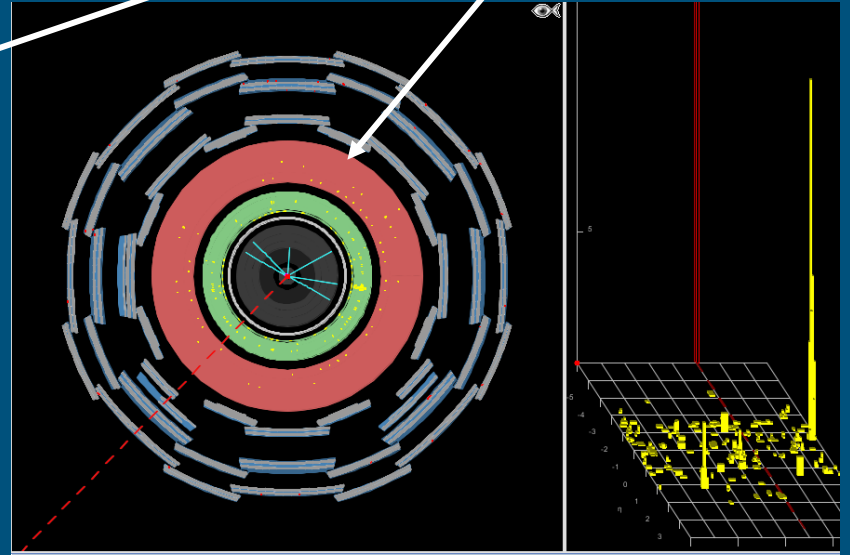
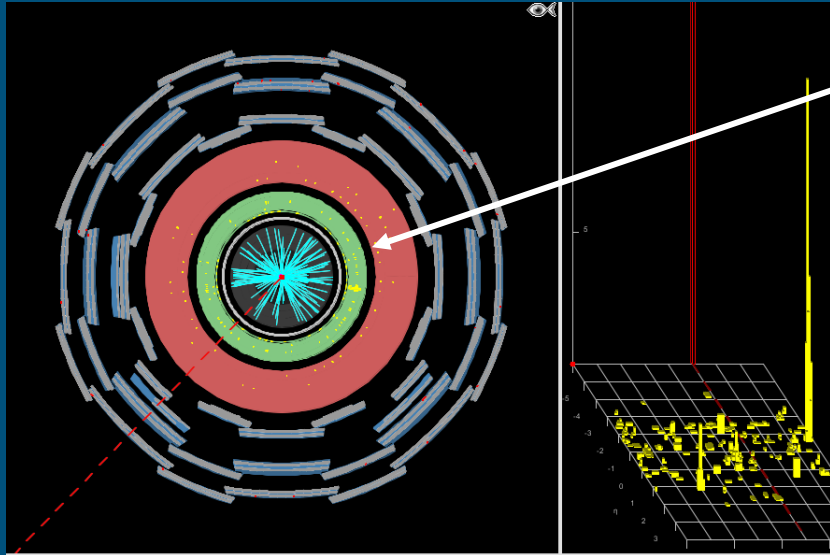
Projection Data Cuts InDet Calo MuonDet Objects Geometry

	Name	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Pt	> 10.0 GeV
<input type="checkbox"/>	Pt2	< 700.0 MeV
<input checked="" type="checkbox"/>	d0	< 2.5 mm
<input checked="" type="checkbox"/>	z0	< 20.0 cm
<input type="checkbox"/>	d0 Loose	< 2.0 cm
<input type="checkbox"/>	z0-zVtx	< 2.5 mm
<input type="checkbox"/>	Layer	> 0

- Nella tab dei parametri potete inserire delle selezioni sull'evento che vi aiutino a capire se stiamo guardando un evento con uno Z o no
- Ad esempio, posso chiedere che le tracce abbiano Pt (impulso trasverso alto): dall'event display scompariranno le tracce di basso impulso

# Il pannello di controllo

Lo stesso evento con un taglio sul Pt delle tracce pari a 1 GeV e a 10 GeV

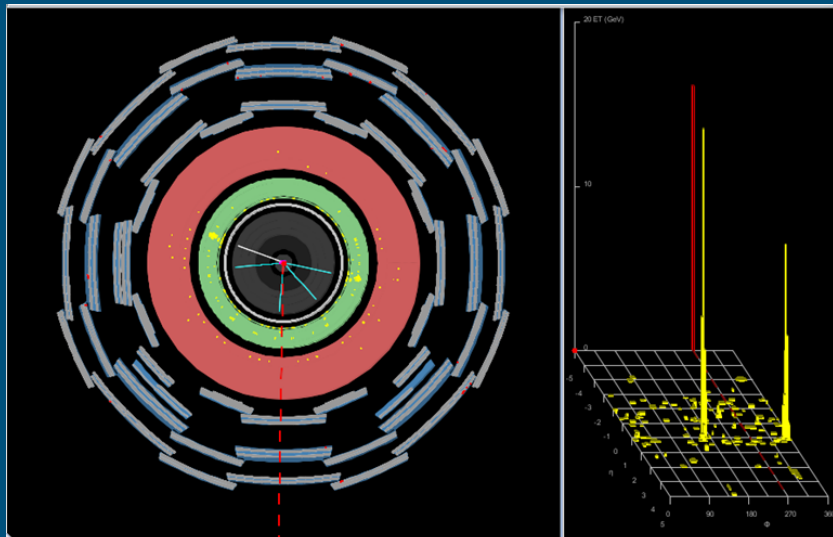




Ad esempio in questo evento vedo che ci sono 5 tracce con  $P_t > 10$  GeV

La traccia 221, evidenziata in bianco quando la selezione, è associata a un deposito calorimetrico (devo controllarlo sia nella vista trasversale che in quella laterale!!!)

E' carica negativamente



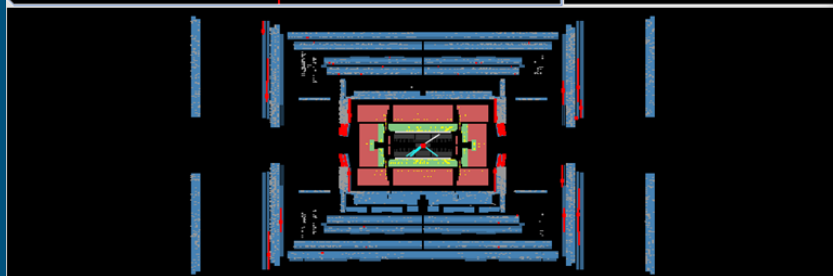
HYPATIA - Track Momenta Window

File Previous Event Next Event Electron Muon Photon Delete Track Reset Canvas

ETMIs: 16,125 GeV  $\psi$ : -1,588 rad Collection: MET\_RefFinal

C:\Users\User\Documents\Hypatia\_1\_Masterclass\groupA\ziplevnet031.xml

Track	P [GeV]	Pt [GeV]	$\psi$	$\theta$
Tracks 221	82.54	44.44	2.767	0.569
Tracks 245	71.18	40.47	-0.188	0.605
Tracks 360	544.67	294.51	-1.652	2.570
Tracks 361	170.30	109.40	-0.826	2.444
Tracks 362	283.57	191.87	-3.052	2.398

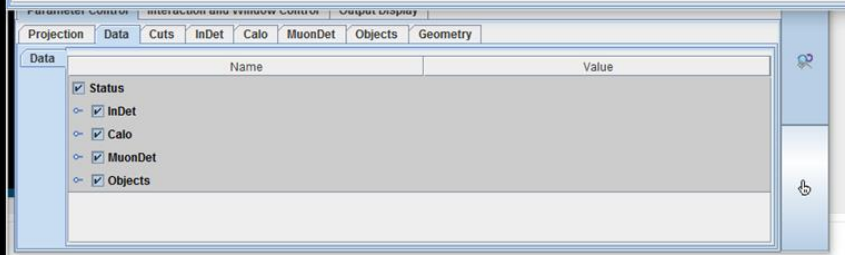
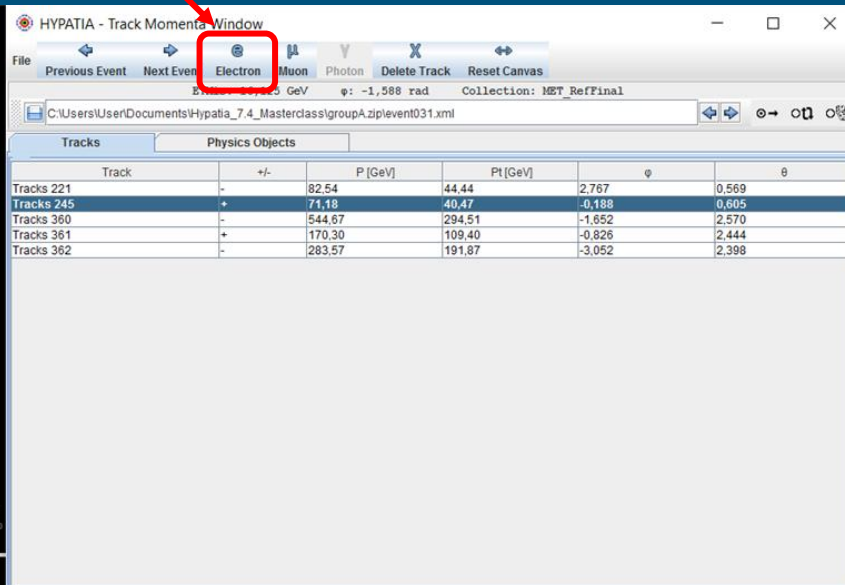
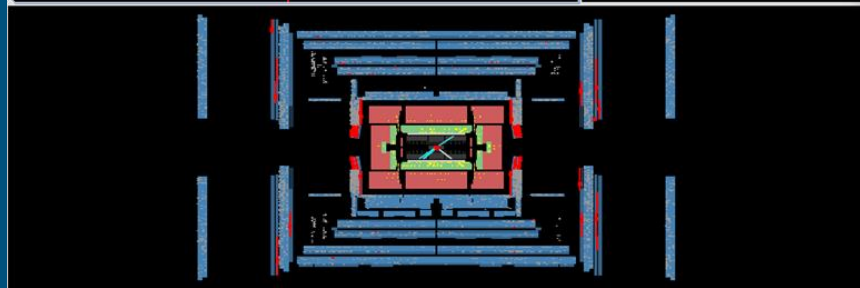
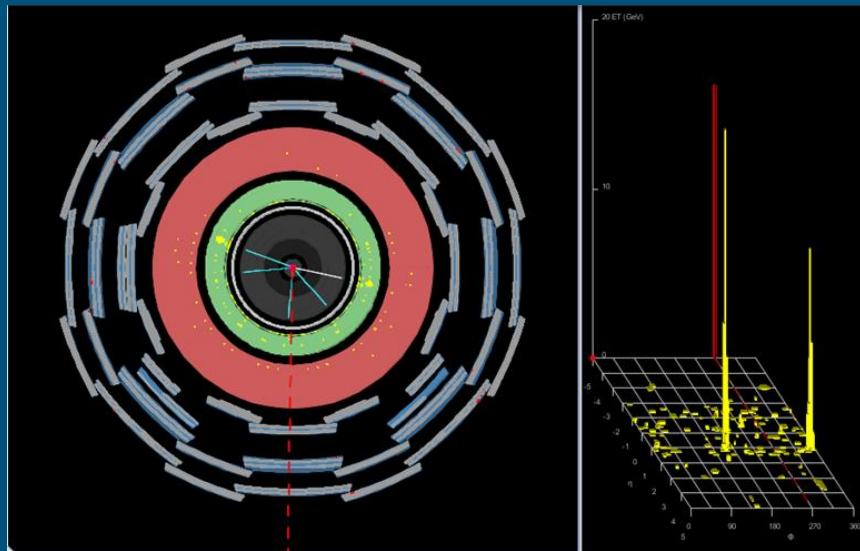


Parameter Control Interaction and Window Control Output Display

Projection Data Cuts InDet Calo MuonDet Objects Geometry

Data	Name	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Status	
<input checked="" type="checkbox"/>	InDet	
<input checked="" type="checkbox"/>	Calo	
<input checked="" type="checkbox"/>	MuonDet	
<input checked="" type="checkbox"/>	Objects	

La traccia 245 è associata a un deposito di energia nel calorimetro elettromagnetico, ed è carica positivamente: sto forse vedendo un evento in cui uno Z è decaduto in una coppia elettrone-positrone? Provo a selezionare le tracce e a identificarle come elettroni



# La finestra della massa invariante

Quando le identifico come elettroni, le tracce mi appaiono nella finestra massa invariante. La massa invariante di questa coppia  $e^+e^-$  mi appare qui

E' molto alta: 84.5 GeV !

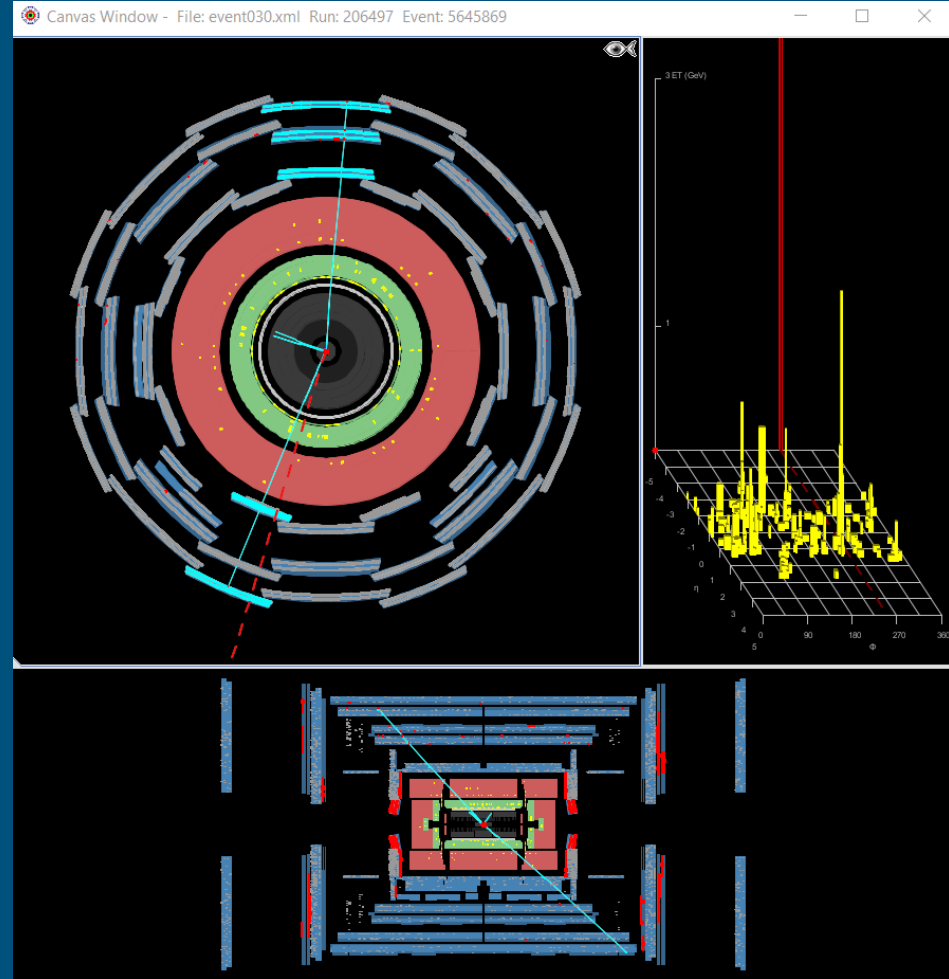
Questo evento sembra un buon candidato  $Z \rightarrow e^+e^-$



File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	$\phi$	$\eta$	M(Z) [GeV]	M(eeee) [GeV]	M(eemm) [GeV]	M(mmmm) [GeV]	e/m/g
event031.xml	16,125	Tracks 221	82.5	-	44.4	2,767	1,230	84,490				e
		Tracks 245	71.2	+	40.5	-0,188	1,165					e

# E un evento con i muoni?

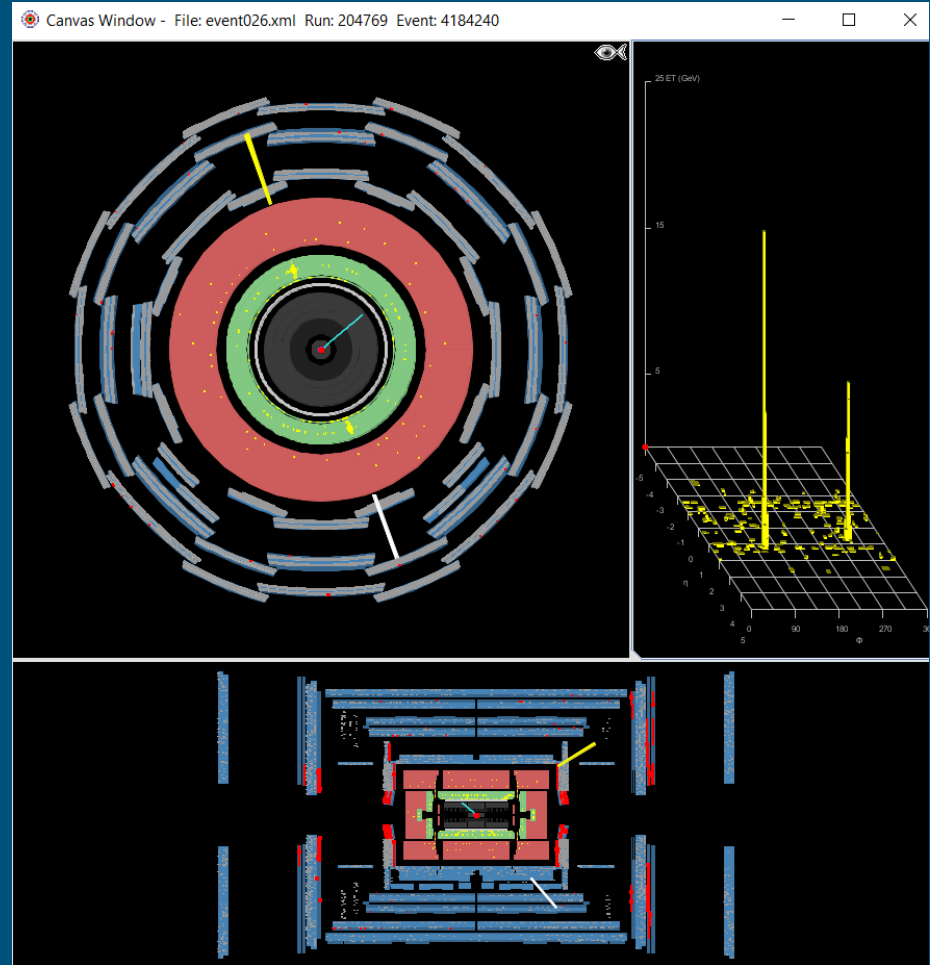
Qui vedo un evento con  
due tracce di muoni, che  
arrivano fino allo  
spettrometro per muoni...  
sarà un evento  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ?



# E un evento con i fotoni?

In questo evento ci sono due depositi EM senza tracce corrispondenti... sembrano dei fotoni.

Ma lo Z non può decadere in due fotoni! Cosa può essere?



# Che cosa posso trovare negli eventi?

- La  $J/\psi$  o la  $\Upsilon$  sono particelle che decadono (tra le altre cose) in  $e^+e^-$  o in  $\mu^+\mu^-$  con massa invariante bassa (circa 3 e 10 GeV rispettivamente)
- Lo  $Z$  decade (tra le altre cose) in  $e^+e^-$  o in  $\mu^+\mu^-$  con massa invariante alta (molte decine di GeV)
- Lo  $Z'$  è una particella ipotetica, simile allo  $Z$  (ha gli stessi decadimenti) ma con massa invariante altissima ( $>1000$  GeV)
- Il **bosone di Higgs** può decadere (tra le altre cose) in due  $Z$  o in due fotoni: se trovo una coppia di fotoni, o due coppie di elettroni/muoni ognuna delle quali corrisponde a uno  $Z$ , forse ho visto un ***bosone di Higgs***! Mi aspetto abbia una massa poco superiore ai 100 GeV
- Ci sono particelle ipotetiche come il **gravitone**, che possono avere gli stessi decadimenti del ***bosone di Higgs***, ma avere una massa molto più alta!
- Ci sono poi eventi in cui non c'è niente di tutto questo: sono gli eventi di **fondo** (background)

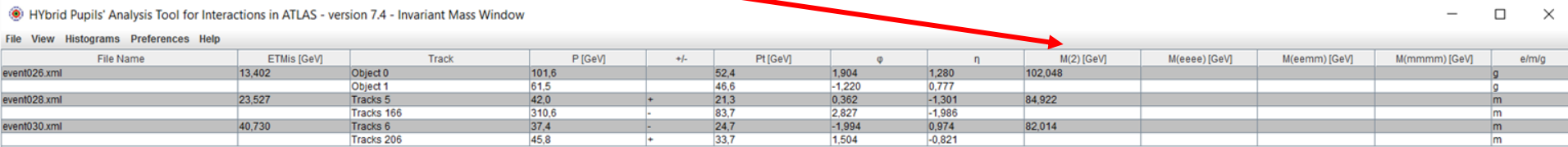
# Una piccola complicazione per i fotoni

---

- I fotoni tipicamente appaiono come un deposito di energia nel calorimetro elettromagnetico senza nessuna traccia associata
- Però è possibile che un fotone interagisca nel tracciatore interno e produca una coppia  $e^+e^-$ !
- In questo caso vedrei un deposito di energia nel calorimetro con due tracce associate!
- Come lo riconosco? Le due tracce hanno carica opposta, ma soprattutto il fotone ha massa nulla... allora la massa invariante delle due tracce deve essere molto vicina a 0
- In ATLAS circa il 40% dei fotoni viene ricostruito così!

# Cosa dovete fare?

- Scorrete gli eventi che avete a disposizione, riconoscete le coppie di elettroni, muoni o fotoni, cercate di capire se l'evento e' associato a una  $Z$  o a una delle altre particelle interessanti ( $J/\psi$ ,  $Y$ , *bosone di Higgs*, *gravitone*)
- Se pensate che l'evento sia un semplice evento di fondo, ignoratelo
- Altrimenti selezionate le particelle rilevanti e salvatele nel pannello della massa invariante
- Nel pannello vedrete sia la massa invariante delle coppie di particelle che selezionate, sia quella combinata di 4 particelle, se ne selezionate 4 in un evento



HYbrid Pupils' Analysis Tool for Interactions in ATLAS - version 7.4 - Invariant Mass Window

File View Histograms Preferences Help

File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	$\phi$	$\eta$	M(2) [GeV]	M(eeee) [GeV]	M(eemm) [GeV]	M(mmmm) [GeV]	e/m/g
event026.xml	13,402	Object 0	101.6		52.4	1,904	1,280	102,048				g
		Object 1	61.5		46.6	-1,220	0,777					g
event028.xml	23,527	Tracks 5	42.0	+	21.3	0,362	-1,301	84,922				m
		Tracks 166	310.6	-	83.7	2,827	-1,986					m
event030.xml	40,730	Tracks 6	37.4	-	24.7	-1,994	0,974	82,014				m
		Tracks 206	45.8	+	33.7	1,504	-0,821					m



# Cosa dovete fare?

- Dal pannello istogrammi potete produrre tanti grafici
  - M(1): massa delle singole particelle selezionate
  - M(2): massa invariante delle coppie di particelle selezionate. Se ho visto tanti Z, dovrei vedere che ho tante coppie di massa simile, la massa dello Z!
  - Grafici delle masse invarianti combinate di 4 leptoni qualsiasi (elettroni/muoni), o di 4 elettroni, o di 4 muoni, o di 2 elettroni e 2 muoni: qui mi posso aspettare di vedere eventi corrispondenti a un bosone di Higgs
- Non vi scordate inoltre di scrivere sui fogli di appunti che avete a disposizione cosa avete scoperto di ogni evento che analizzate!

HYbrid Physics Analysis Tool for Interactions in ATLAS - version 7.4 - Invariant Mass Window

File View Histograms Preferences Help

File Name	ETMis [GeV]	Track	P [GeV]	+/-	Pt [GeV]	$\phi$	$\eta$	M(2) [GeV]	M(eeee) [GeV]	M(eemm) [GeV]	M(mmmm) [GeV]	e/m/g
event026.xml	13,402	Object 0	101.6		52.4	1.904	1.280	102,048				g
		Object 1	61.5		46.6	-1.220	0.777					g
event028.xml	23,527	Tracks 5	42.0	+	21.3	0.362	-1.301	84,922				m
		Tracks 166	310.6	-	83.7	2.827	-1.986					m
event030.xml	40,730	Tracks 6	37.4	-	24.7	-1.994	0.974	82,014				m
		Tracks 206	45.8	+	33.7	1.504	-0.821					m

# Link di aiuto

<http://atlas.physicsmasterclasses.org/it/zpath.htm>

Nella sezione “Al lavoro” ci sono spiegazioni utili su come procedere

<http://cernmasterclass.uio.no/material/Zpath-Cuts.pdf>

Trovate un po' di esempi di tagli di selezione che si possono applicare

<http://cernmasterclass.uio.no/material/Zpath-SignalEvents.pdf>

Esempi di eventi di segnale

[http://atlas.physicsmasterclasses.org/it/zpath\\_analysis.htm](http://atlas.physicsmasterclasses.org/it/zpath_analysis.htm)

Dopo aver completato l'esercizio andate a questo link e provate a rispondere alle domande



**TROVATE LA Z!!**