

PE METTE SU MASSA?



LA PRIMA COSA È TROVÀ ER BORSONE



*Introduzione agli
esercizi*



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Federico Montereali
Università & INFN Roma Tre
12/03/2026



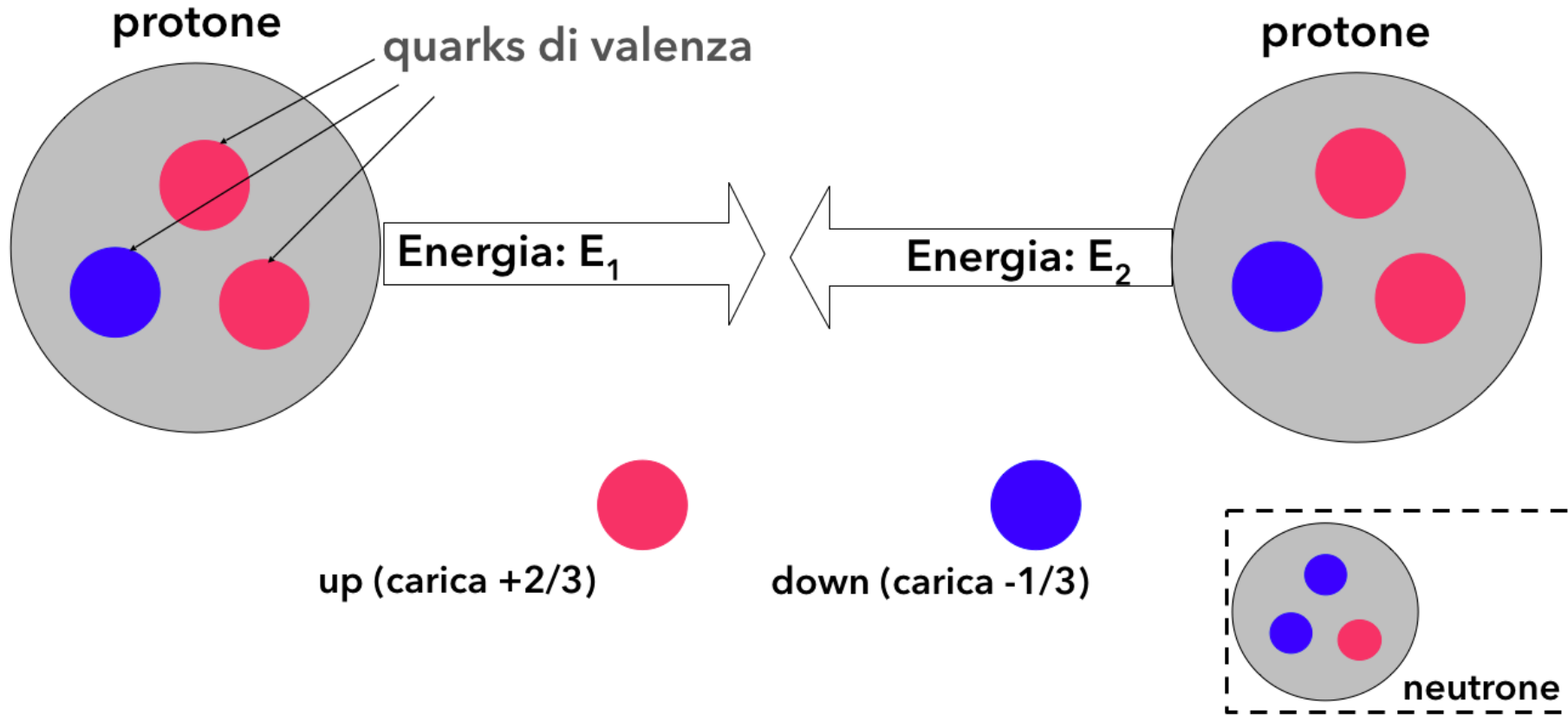
Obiettivo di oggi

- L'obiettivo di oggi è quello di identificare gli eventi in cui vengono prodotti **bosoni W**, singolarmente oppure in coppie
- Gli eventi con un solo bosone W ci permettono di ottenere informazioni sulla struttura interna dei protoni
- Gli eventi WW, invece, li utilizzeremo per studiare il **bosone di Higgs**, il quale può appunto decadere secondo la seguente reazione:



Produzione di W_{\pm} ai collider pp

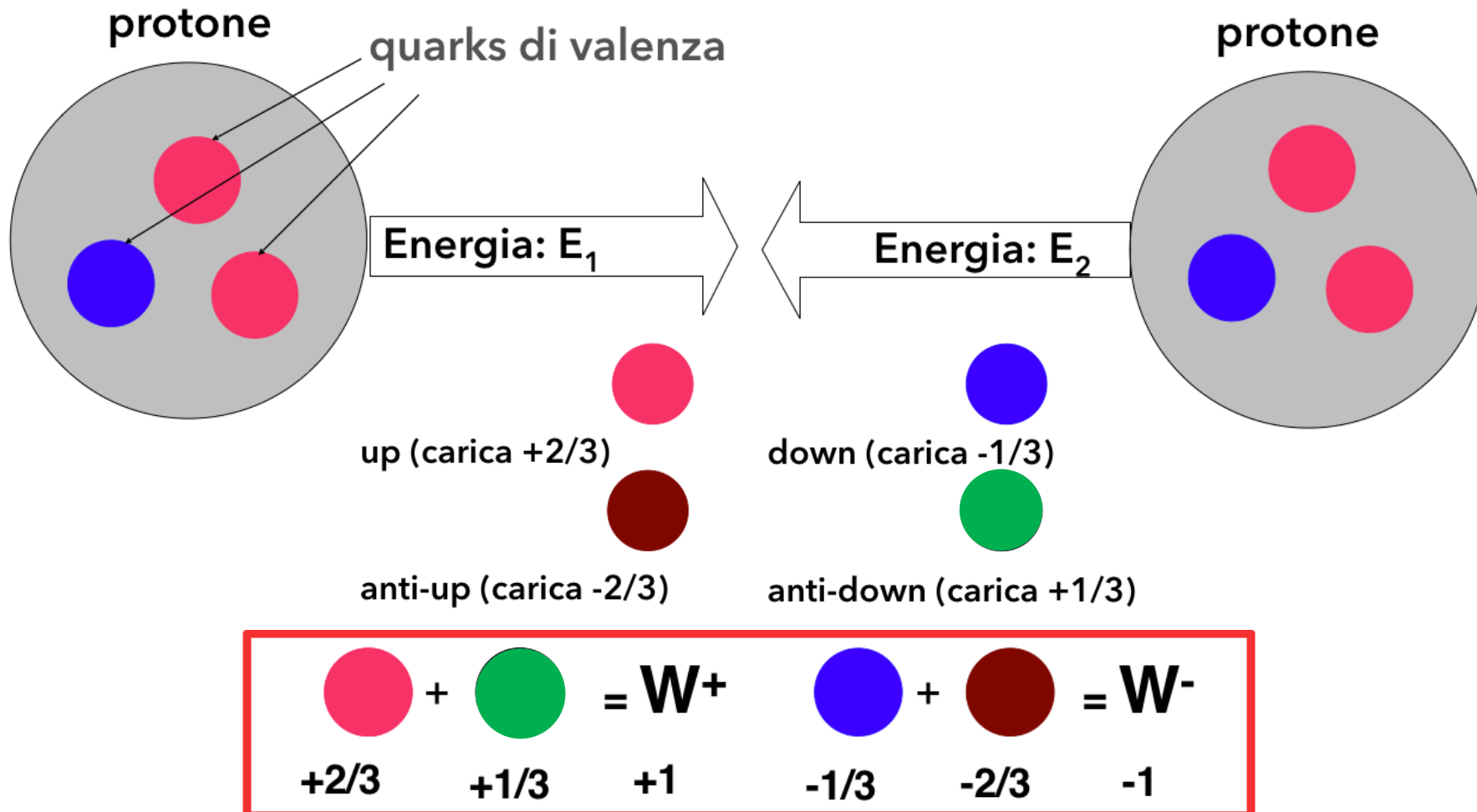
Nelle collisioni protone – protone si possono produrre (e studiare) i **bosoni W**



La conservazione della carica elettrica non permette di formare bosoni W con i soli quark “**di valenza**” dei protoni... ma non ci sono solo loro...

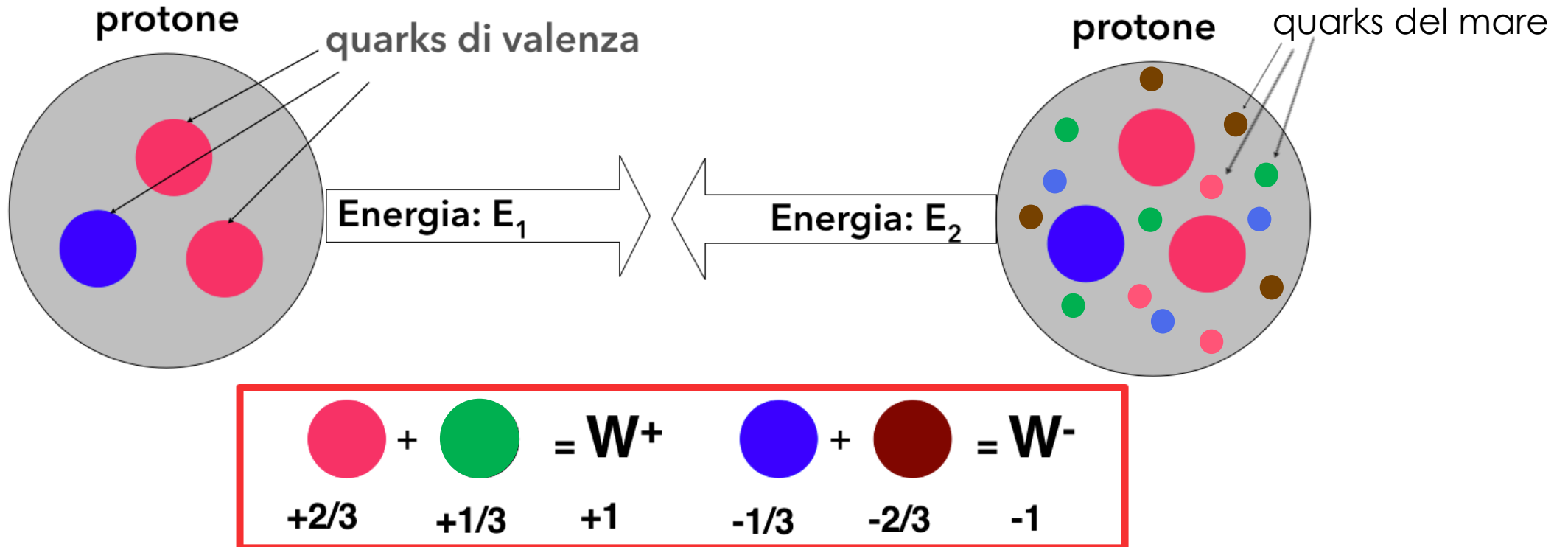
Produzione di W_{\pm} ai collider pp

Nelle collisioni protone – protone si possono produrre (e studiare) i **bosoni W**



Produzione di W^\pm ai collider pp

Nelle collisioni protone – protone si possono produrre (e studiare) i **bosoni W**



Il conteggio relativo del numero di W^+ e di W^- prodotti nelle interazioni pp ci dà informazioni sulla struttura del protone.

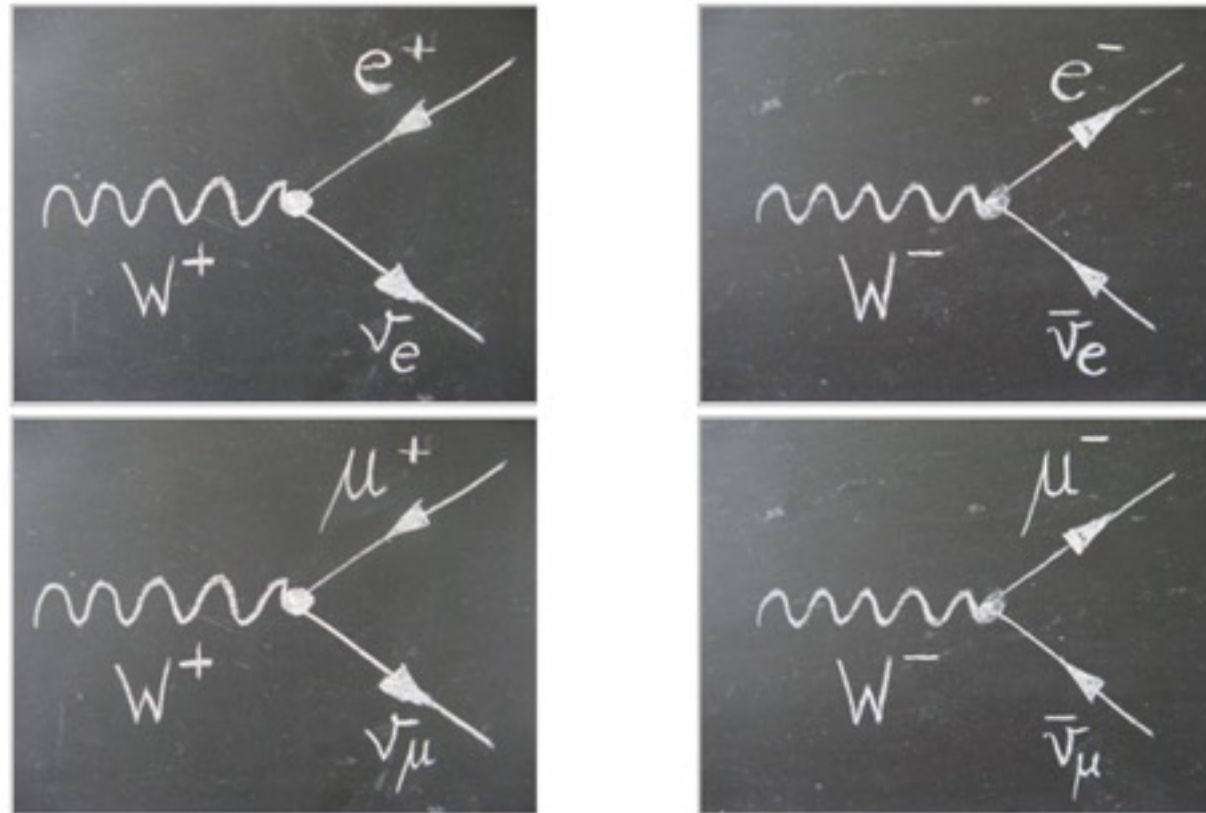
Ci aspettiamo un eccesso di W^+ , essendo i quark up di valenza il doppio dei quark down di valenza

I decadimenti dei bosoni

- La maggior parte delle particelle elementari sono instabili
- Decadono in particelle di massa inferiore con tempi caratteristici detti vite medie, le quali dipendono dall'interazione responsabile della loro disintegrazione
- In particolare, una particella W può decadere in:

• Elettrone - neutrino	$W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e)$	~10 %	} "Segnatura" chiara. Semplici da riconoscere
• Muone - neutrino	$W^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$	~10 %	
• Tau - neutrino	$W^\pm \rightarrow \tau^\pm + \nu_\tau (\bar{\nu}_\tau)$	~10 %	
• due quarks	$W^\pm \rightarrow q + q' \quad (q=u, d, c, s)$	~70 %	} Difficili da separare dal "fondo"

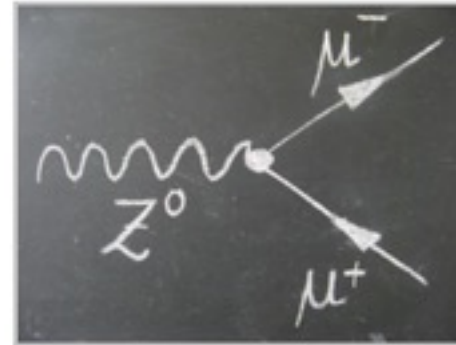
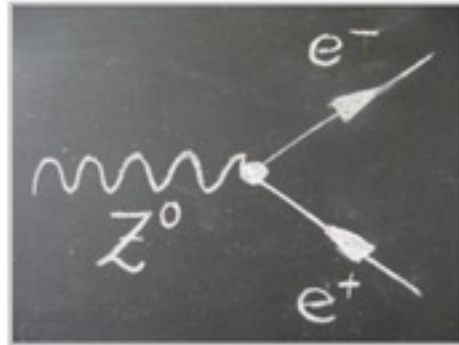
I canali di decadimento del bosone W



- In questi canali di decadimento, è sempre presente un neutrino, che non possiamo rivelare (sono sfuggenti)!
- I neutrini si manifestano come energia mancante nel nostro rivelatore: per cercare i bosoni W dobbiamo quindi richiedere che ci sia della **energia mancante**, che chiameremo **MET** (Missing Transverse Energy)

Come sfruttare la presenza di MET?

- Gli eventi di fondo (o di background) sono gli eventi caratterizzati da particelle nello stato finale identiche a quelle che stiamo cercando per il segnale W o WW
- Potremmo confondere il decadimento di una Z con quello di una coppia WW
- Ci viene in aiuto la MET, che negli eventi Z è piccola o nulla!



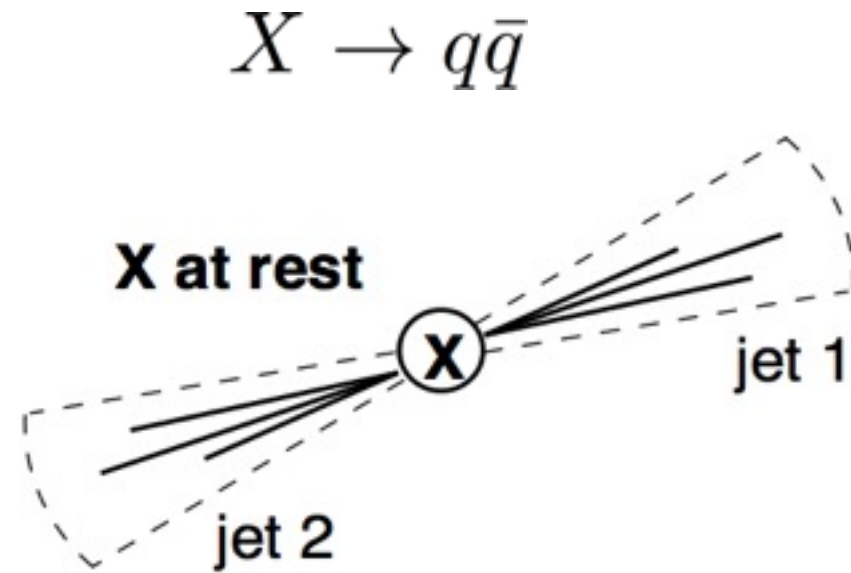
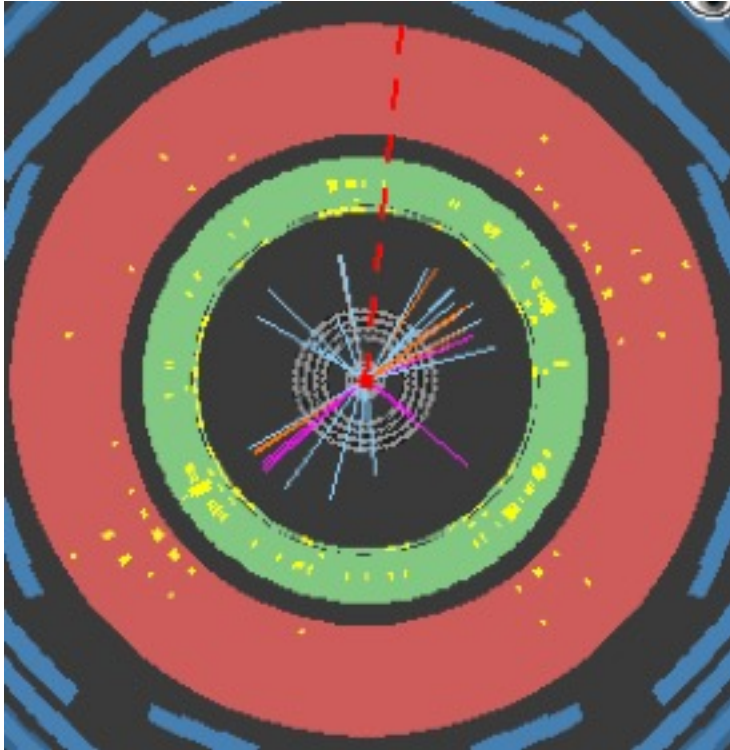
Selezione sugli eventi di segnale: **MET > 20 GeV**

Altri eventi di fondo:
❖ eventi con molti jets
❖ coppie di quark top



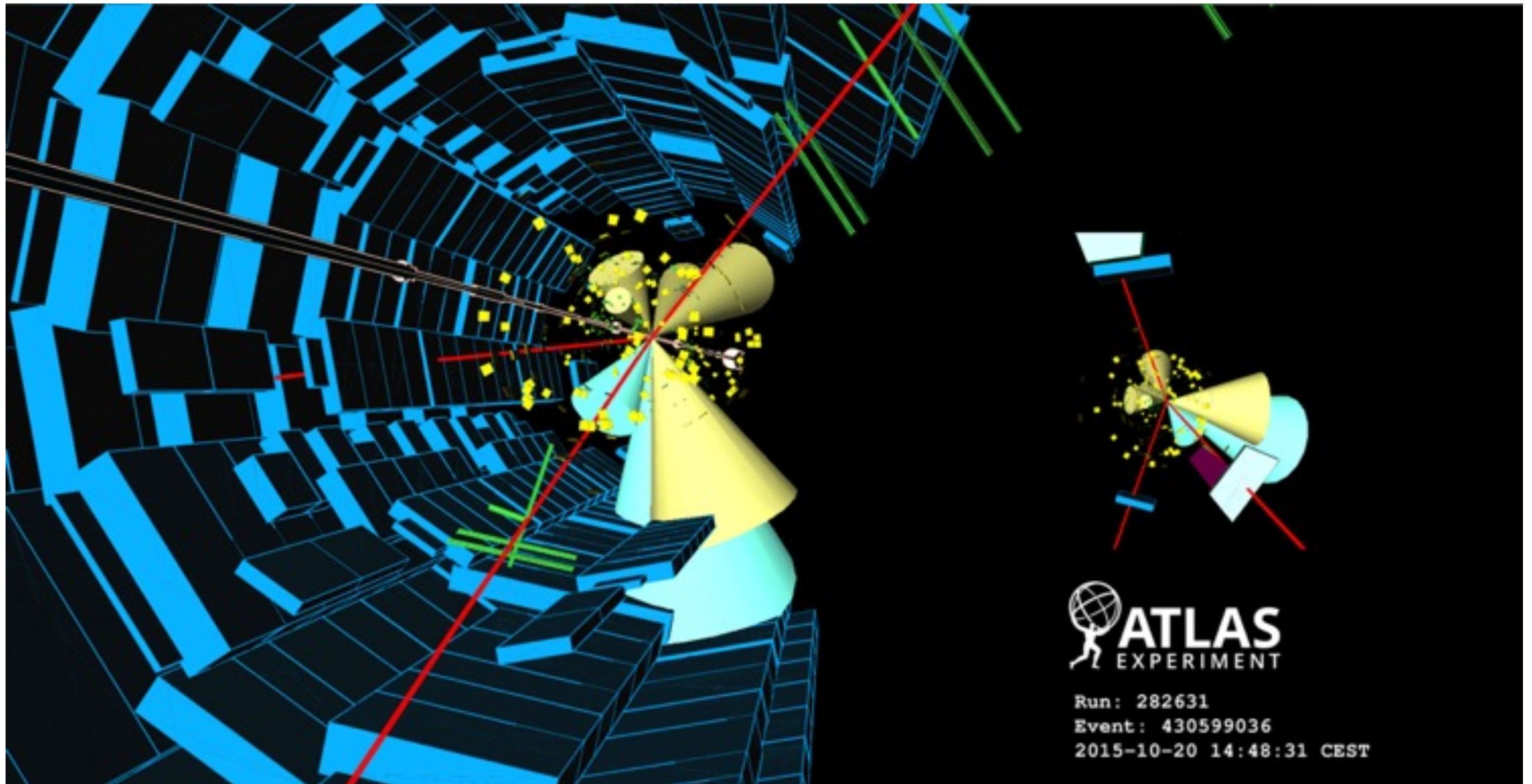
Vedremo presto come
trattare questi processi !

Altri fondi → jet adronici



- Non è possibile rivelare in maniera diretta quark liberi
- Questi “adronizzano” molto velocemente → formano adroni (π , K , etc...)
- Un jet si presenta come un cono sottile di adroni e sono generati dal processo di adronizzazione di un quark o un gluone

Sbam! Un evento di ATLAS

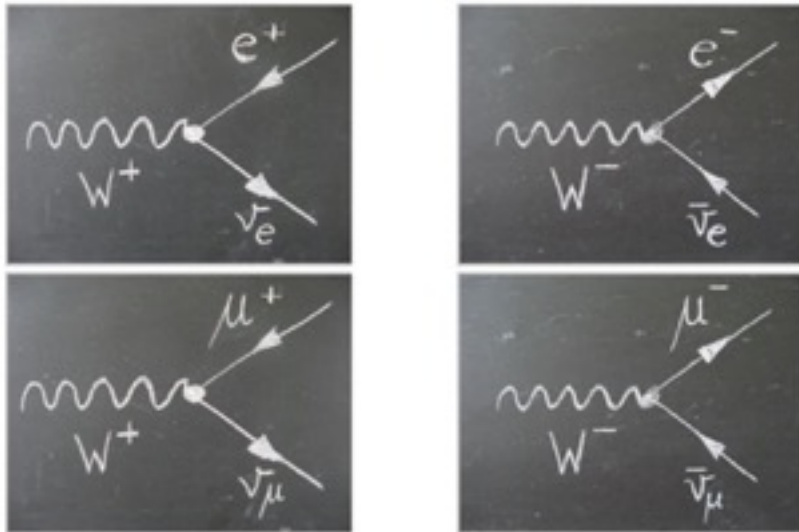


Riepiloghiamo un po'...

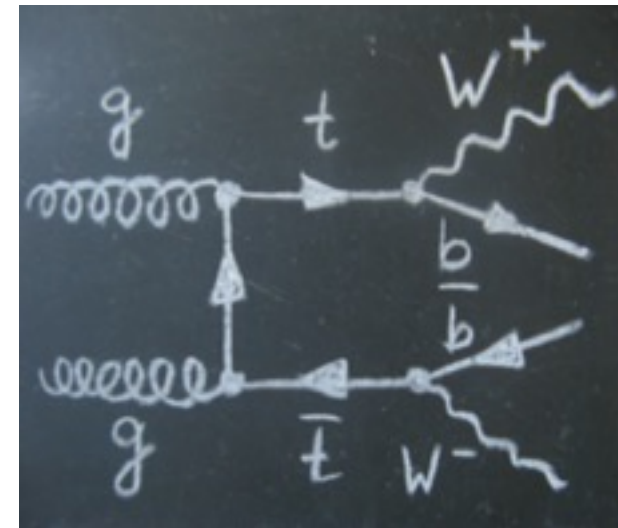
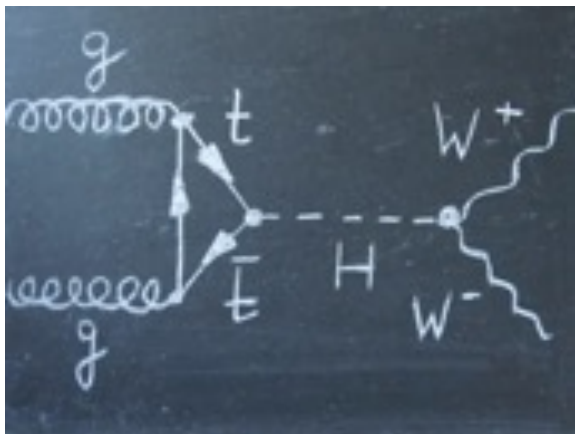
Segnale

Fondi

Struttura
interna
del
protone



Produzione
del bosone
di Higgs

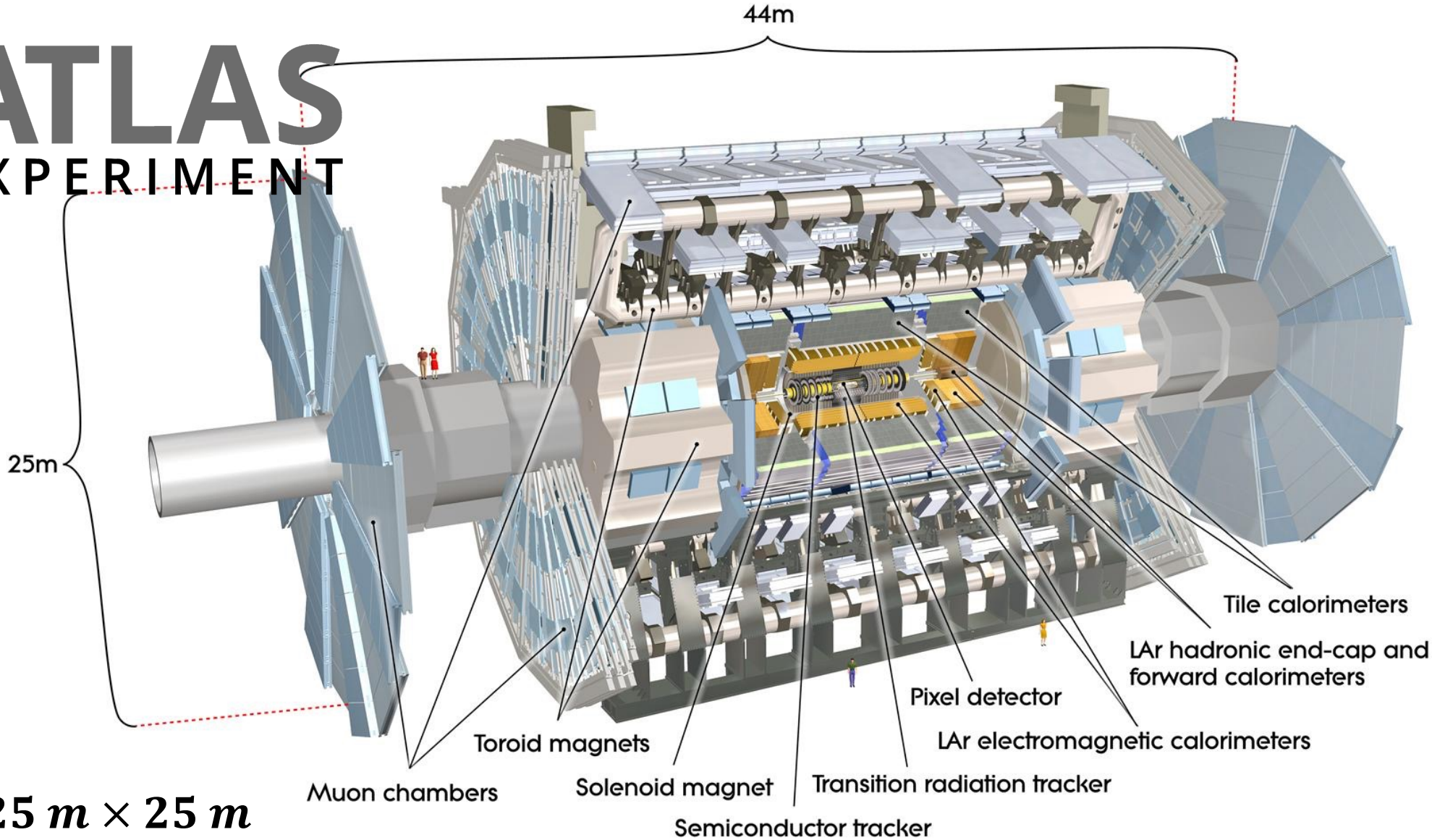


Il rivelatore ATLAS a LHC



ATLAS

EXPERIMENT



Più in dettaglio...

Più in dettaglio...

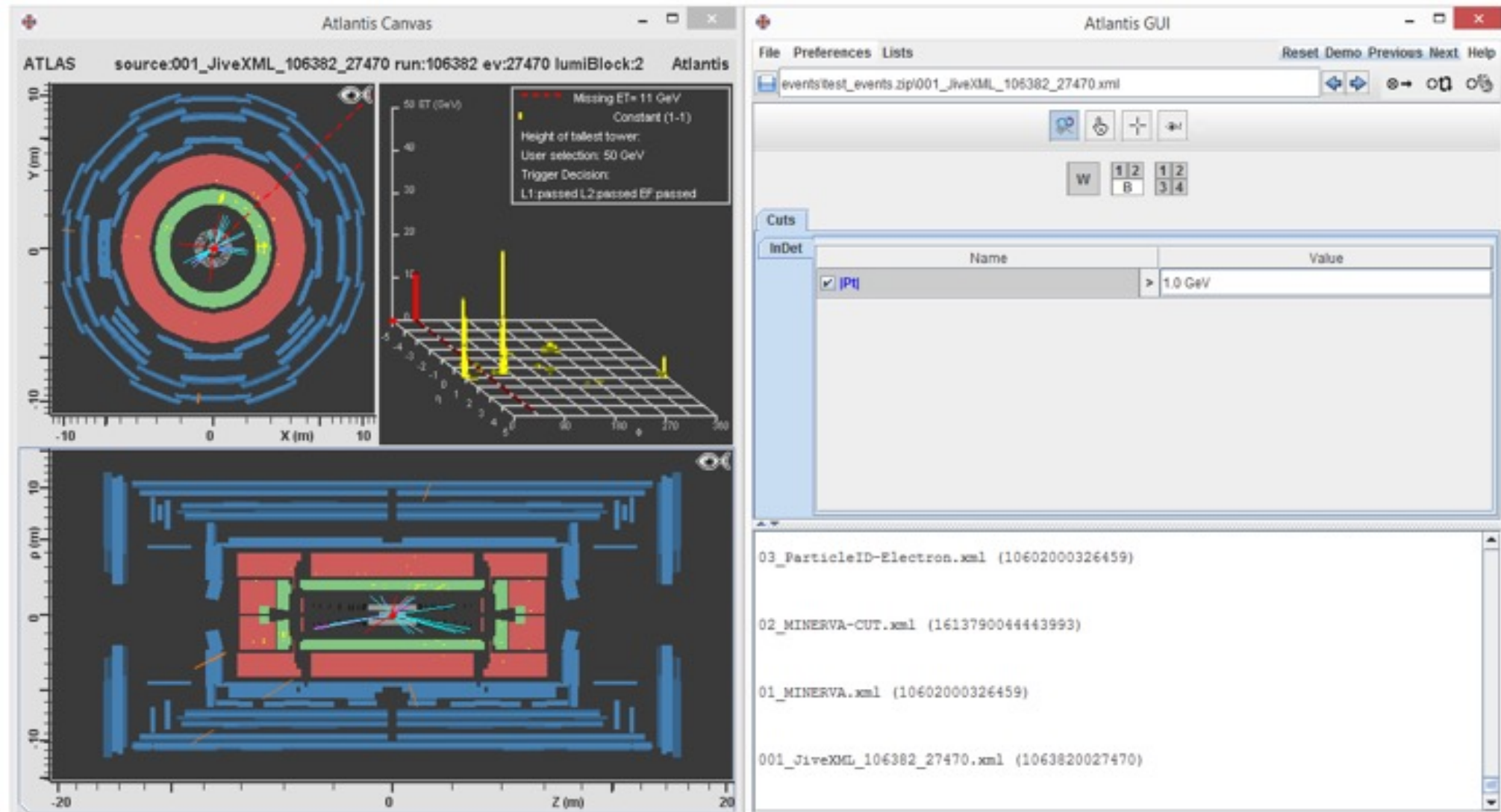




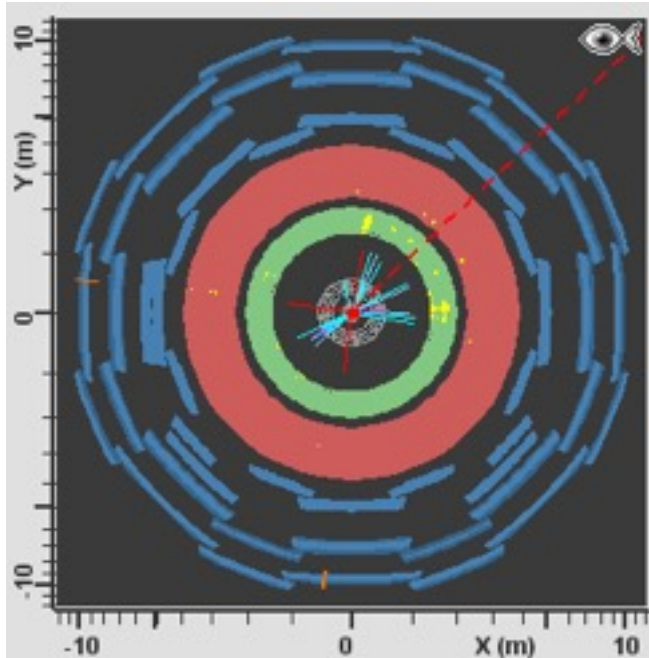
Impariamo ad utilizzare Minerva

Minerva – interfaccia grafica

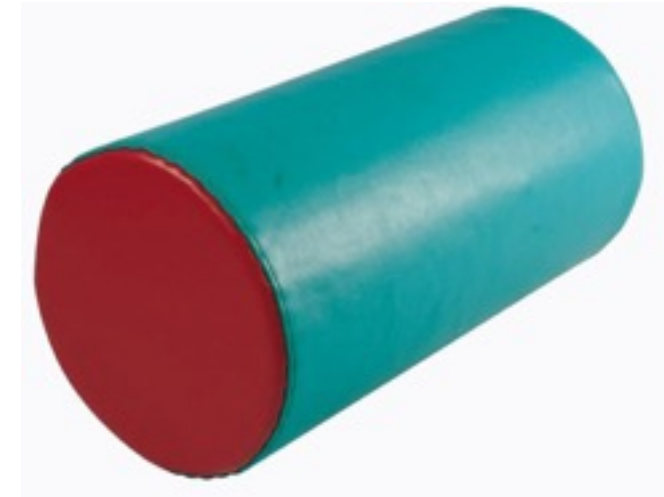
Aprite Minerva (Desktop → MINERVA_Windows.bat)



Proiezione di ATLAS sul piano XY



**ATLAS visto lungo la direzione dell'asse del fascio di protoni
(sezione trasversa XY)**

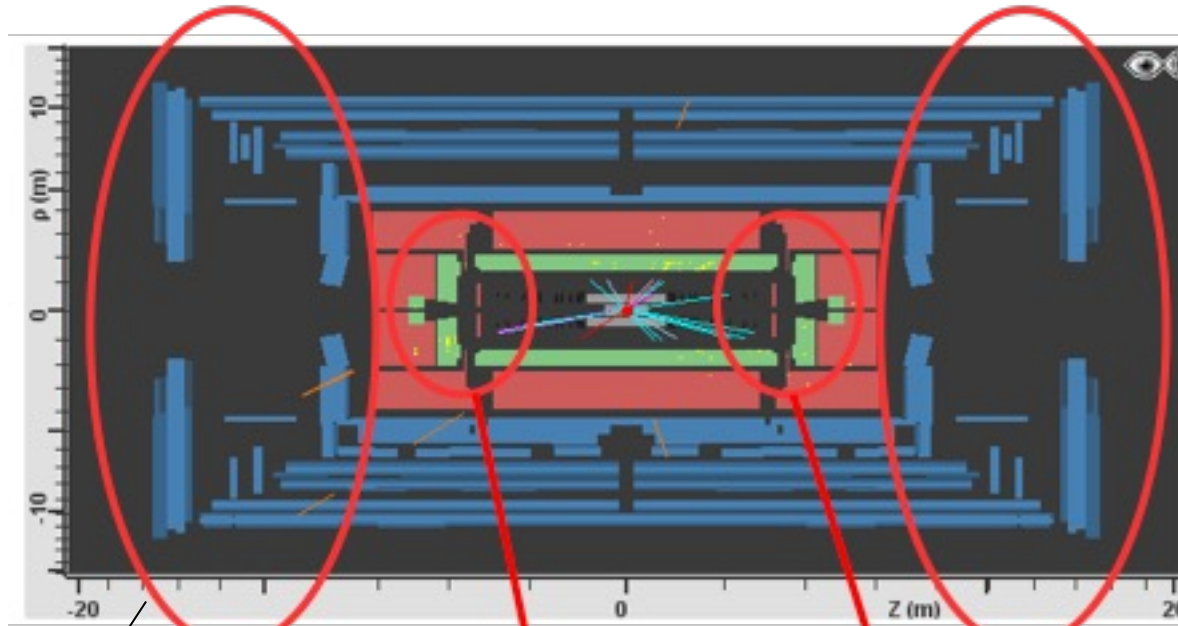


Permette di visualizzare tutte le particelle emergenti dalla superficie laterale

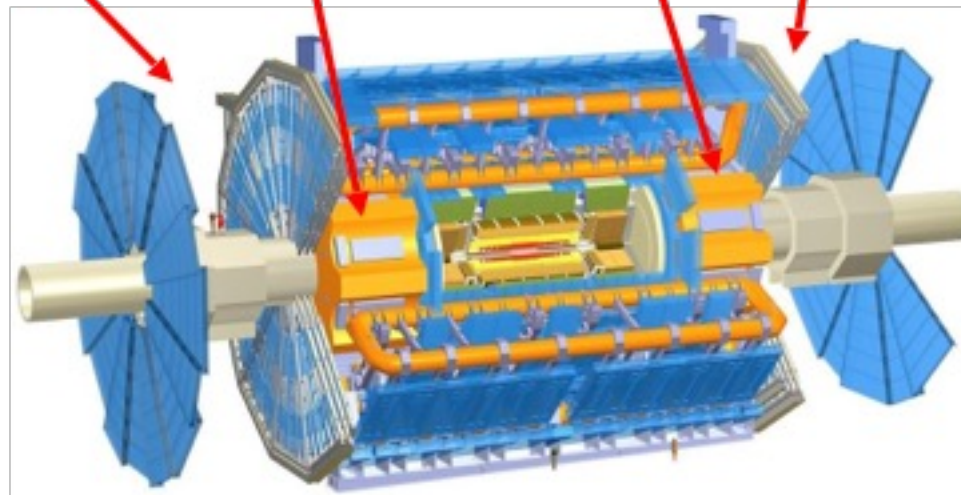
- Attenzione: una particella potrebbe attraversare la superficie di base (area rossa). In questa proiezione non la vedreste!
- Ci viene in aiuto quest'altra schermata di Minerva...

Proiezione di ATLAS sul piano $Z\rho$

Visuale longitudinale

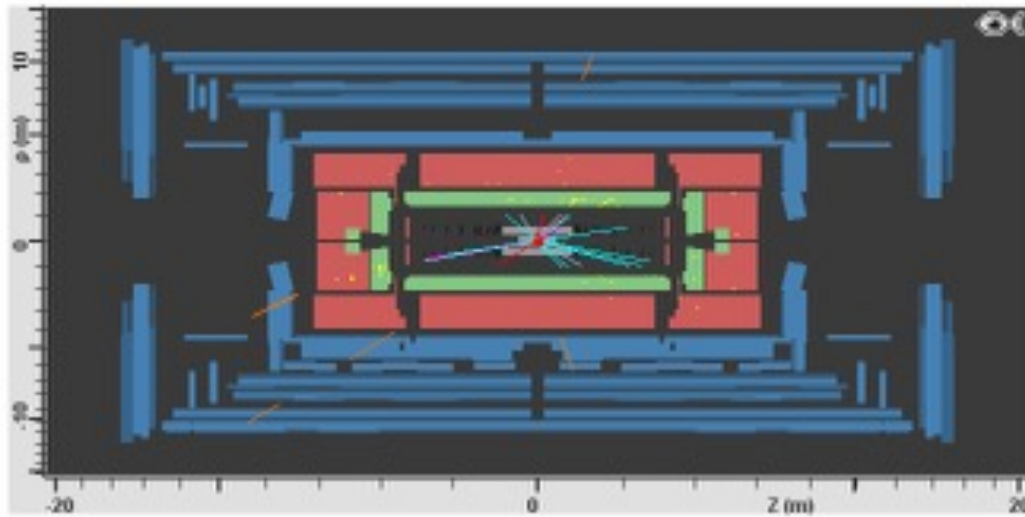


Rivelatori in avanti
(o End-cap)

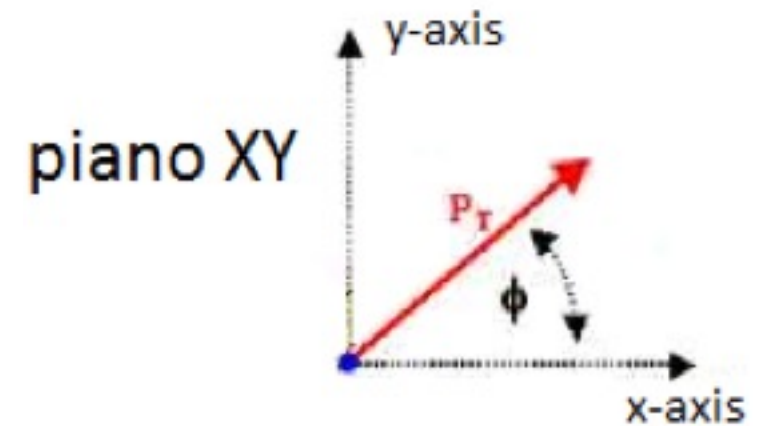
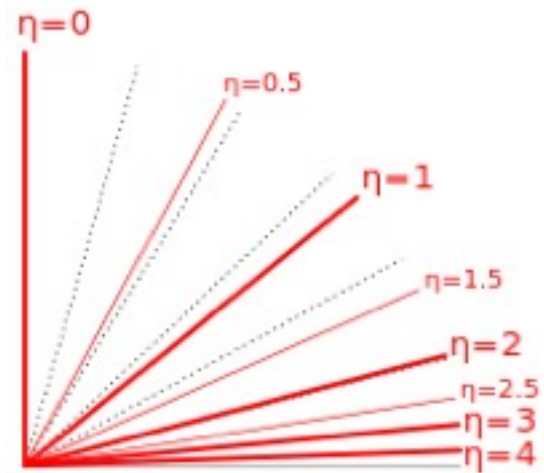
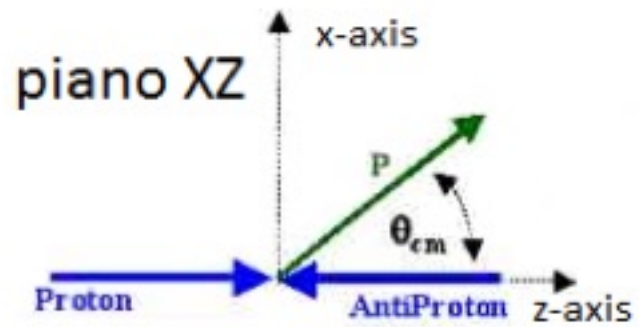
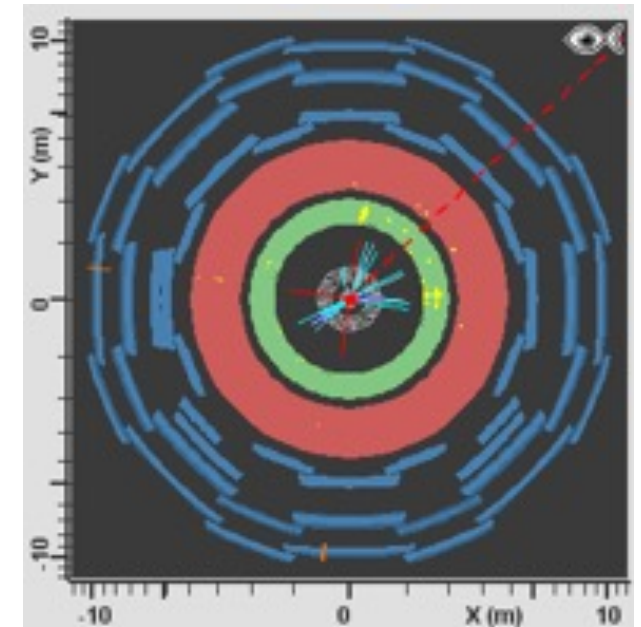


Coordinate η e ϕ

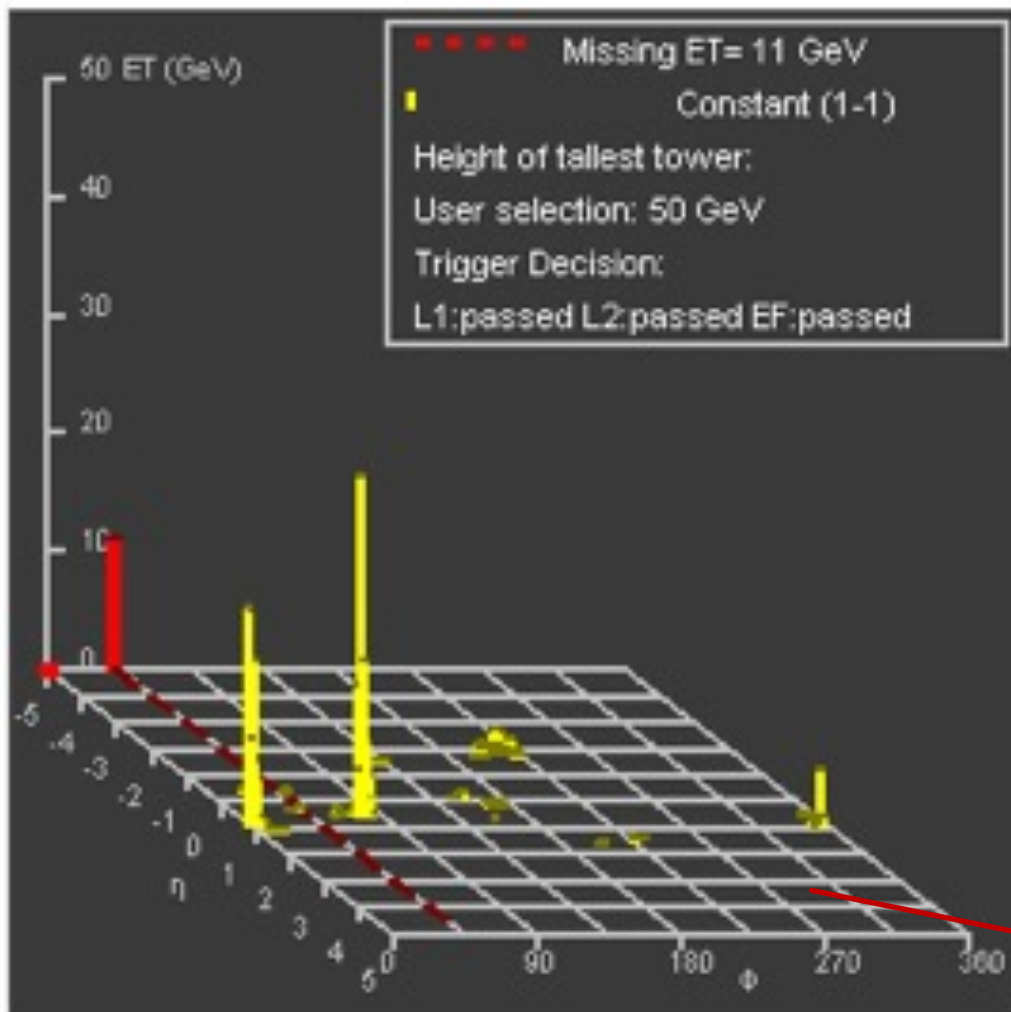
Angolo polare ϑ



Angolo azimutale Φ



Deposito di energia nel calorimetro e MET



- Torri gialle: energia rilasciata nel calorimetro EM
- Non abbiamo informazioni riguardo i depositi di energia nel calorimetro adronico
- Torre-linea tratteggiata rossa: Energia mancante nel piano trasverso (MET)



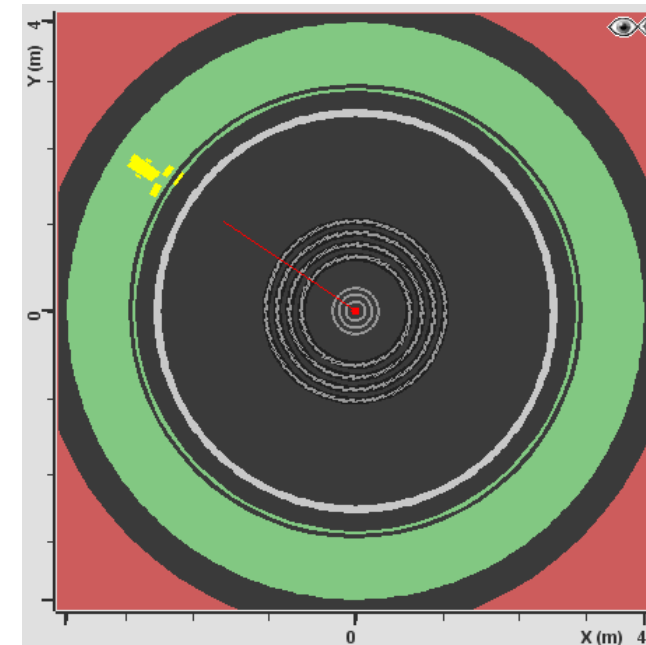
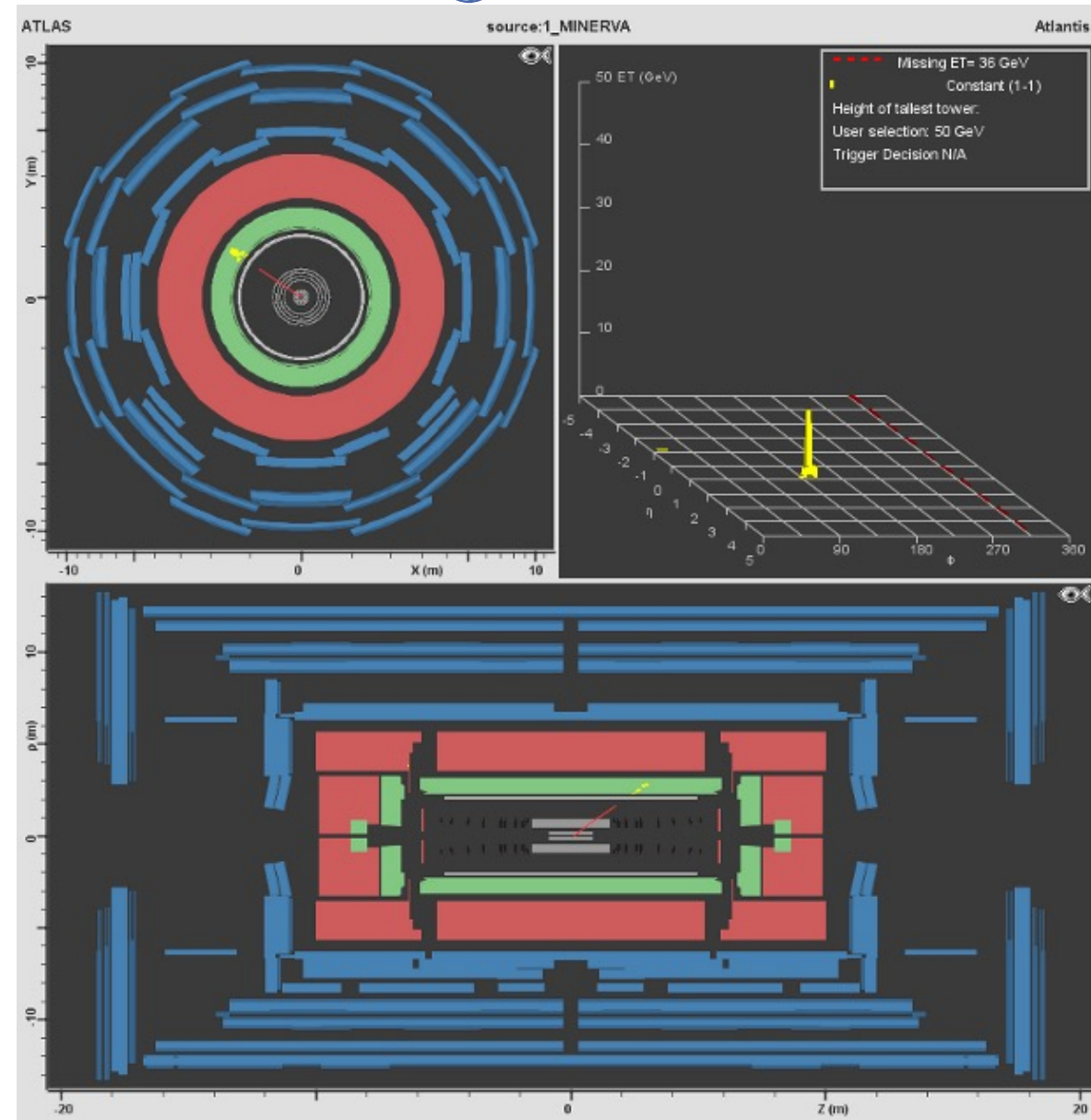
Piano $\eta\phi$: Rivelatore "srotolato"

Come riconosciamo le particelle

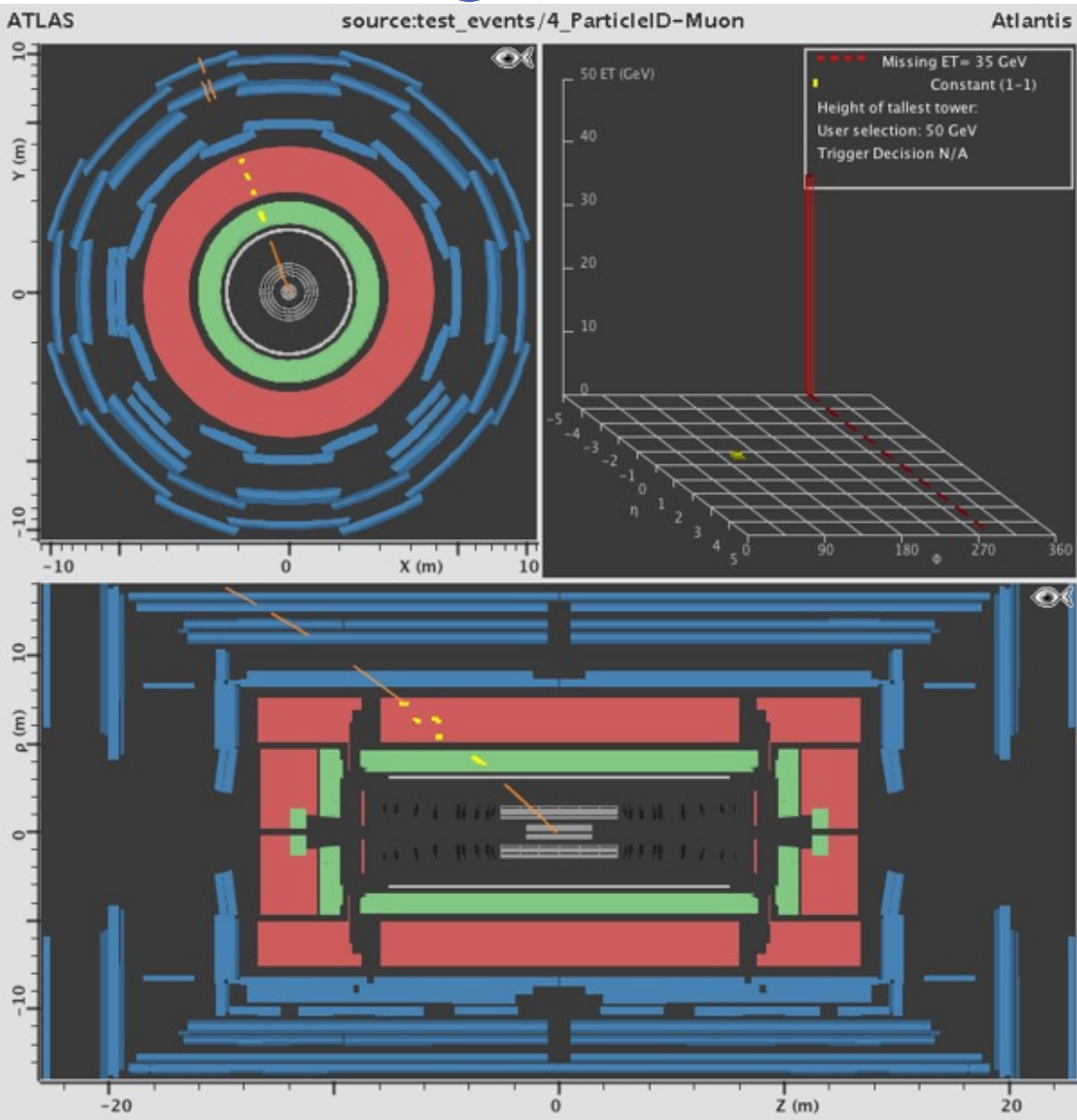
Gli elettroni



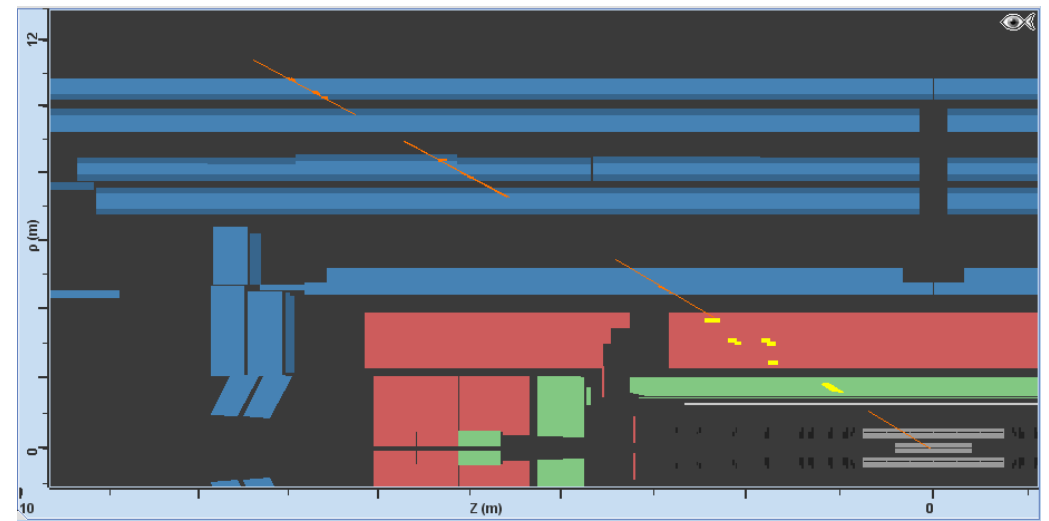
- Gli elettroni sono oggetti carichi quindi lasceranno una traccia nel detector interno
- Sono oggetti inoltre che depositano energia nel calorimetro elettromagnetico



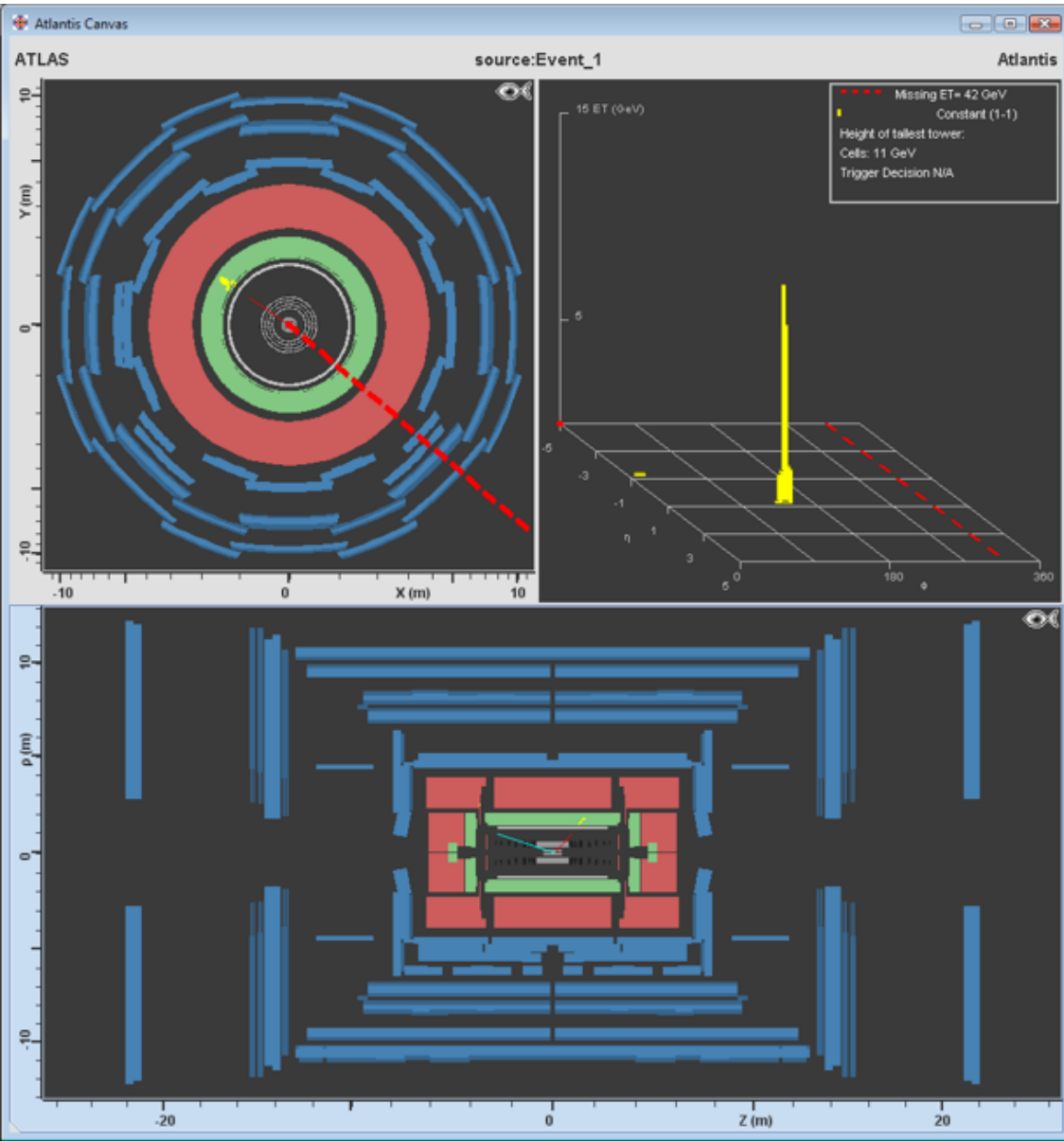
I muoni



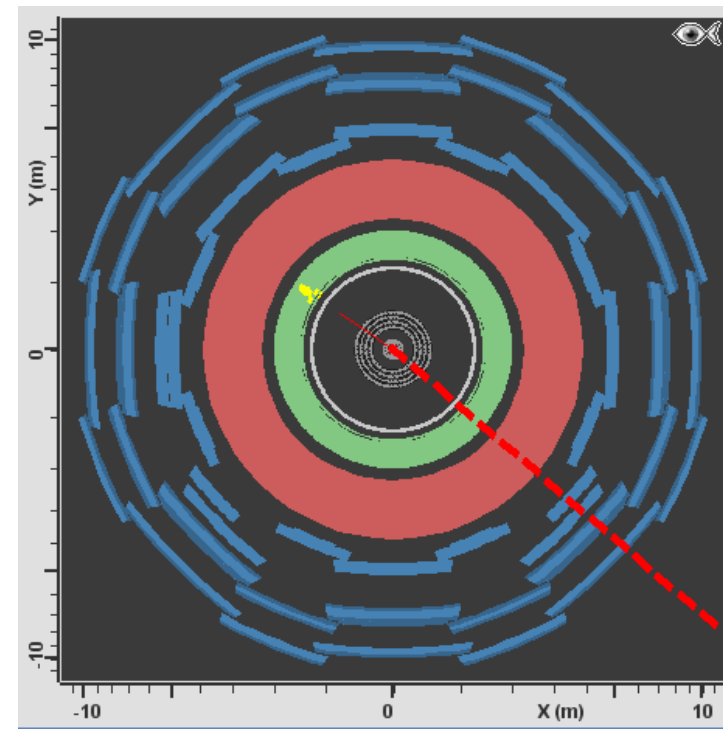
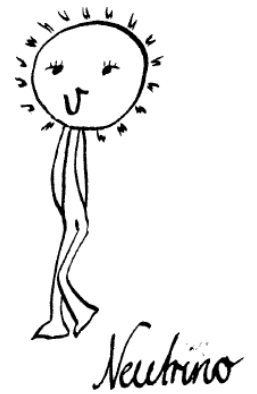
- I muoni sono oggetti carichi quindi lasceranno una traccia nel detector interno
- Sono oggetti inoltre che depositano poca energia nei calorimetri
- Infine vengono ricostruiti come traccia anche nello spettrometro a muoni



I neutrini

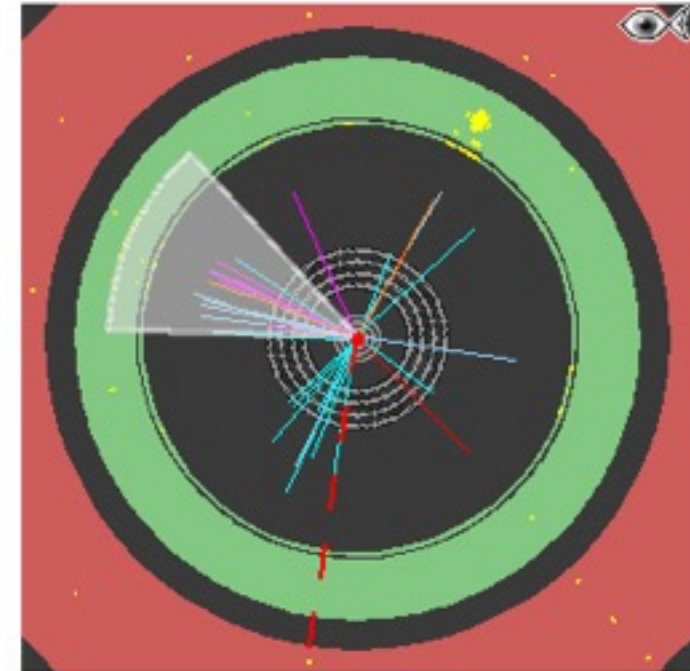
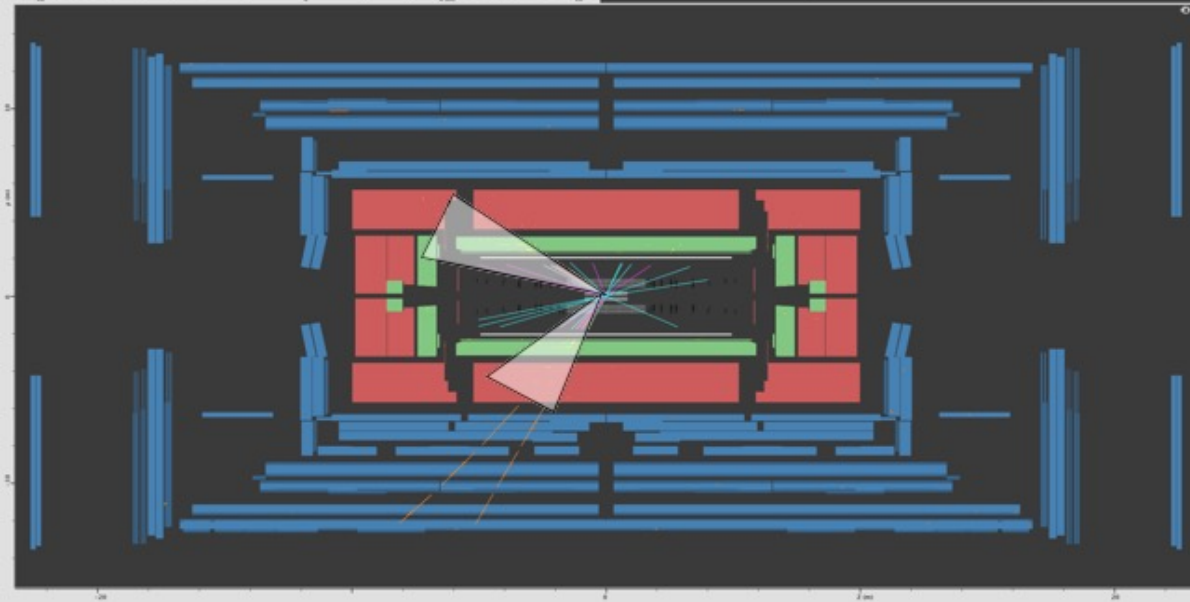
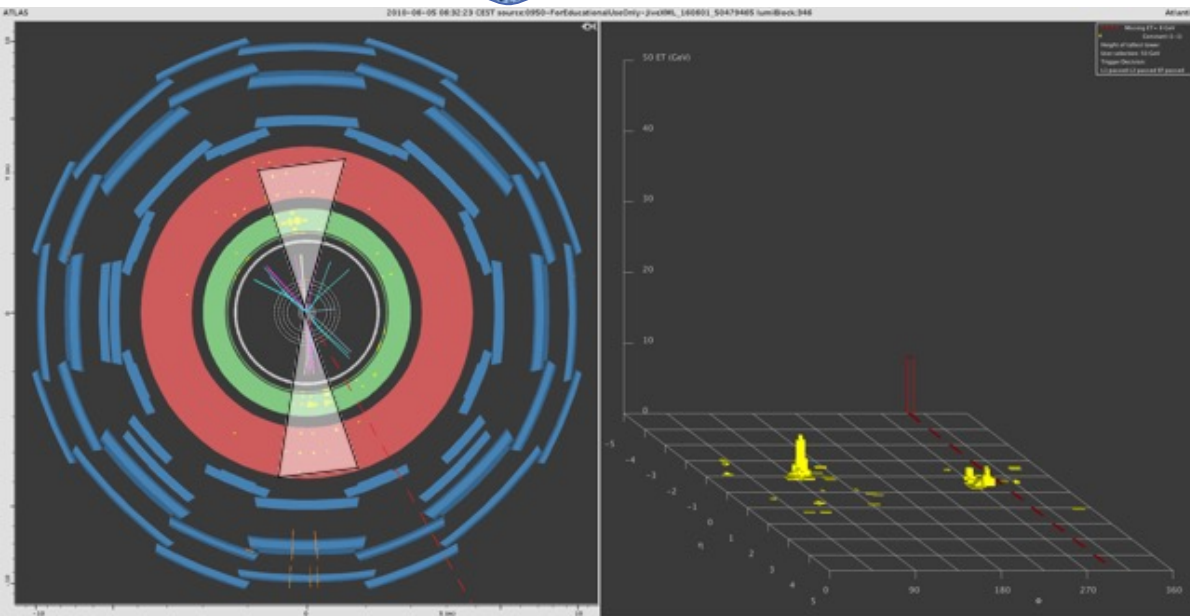
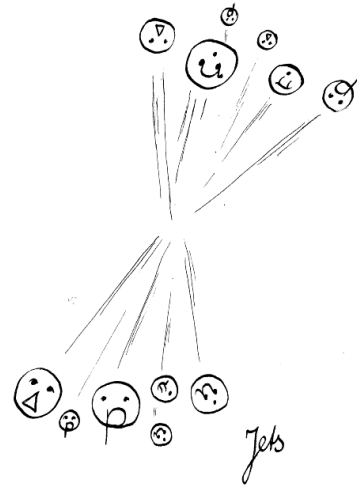


- I neutrini sono particelle sfuggenti!
- Non sono rivelate da nessun detector e sappiamo del loro passaggio attraverso l'energia mancante (MET)



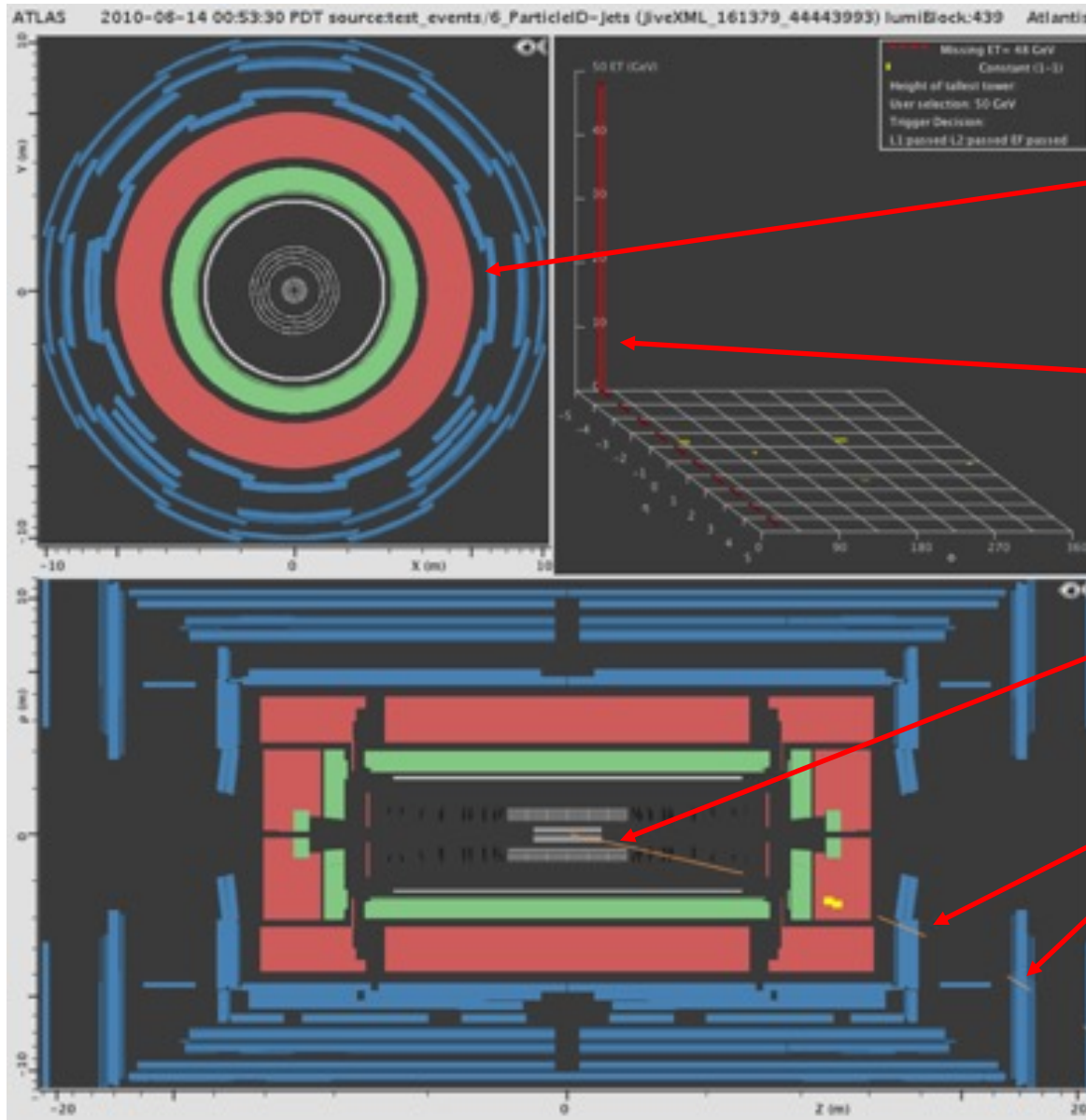
I jets

- I jet sono agglomerati di particelle, alcune cariche che creano tracce nel detector interno.
- Essi rilasciano anche tanta energia nei calorimetri e vengono visualizzati in Minevra con dei coni grigiastri



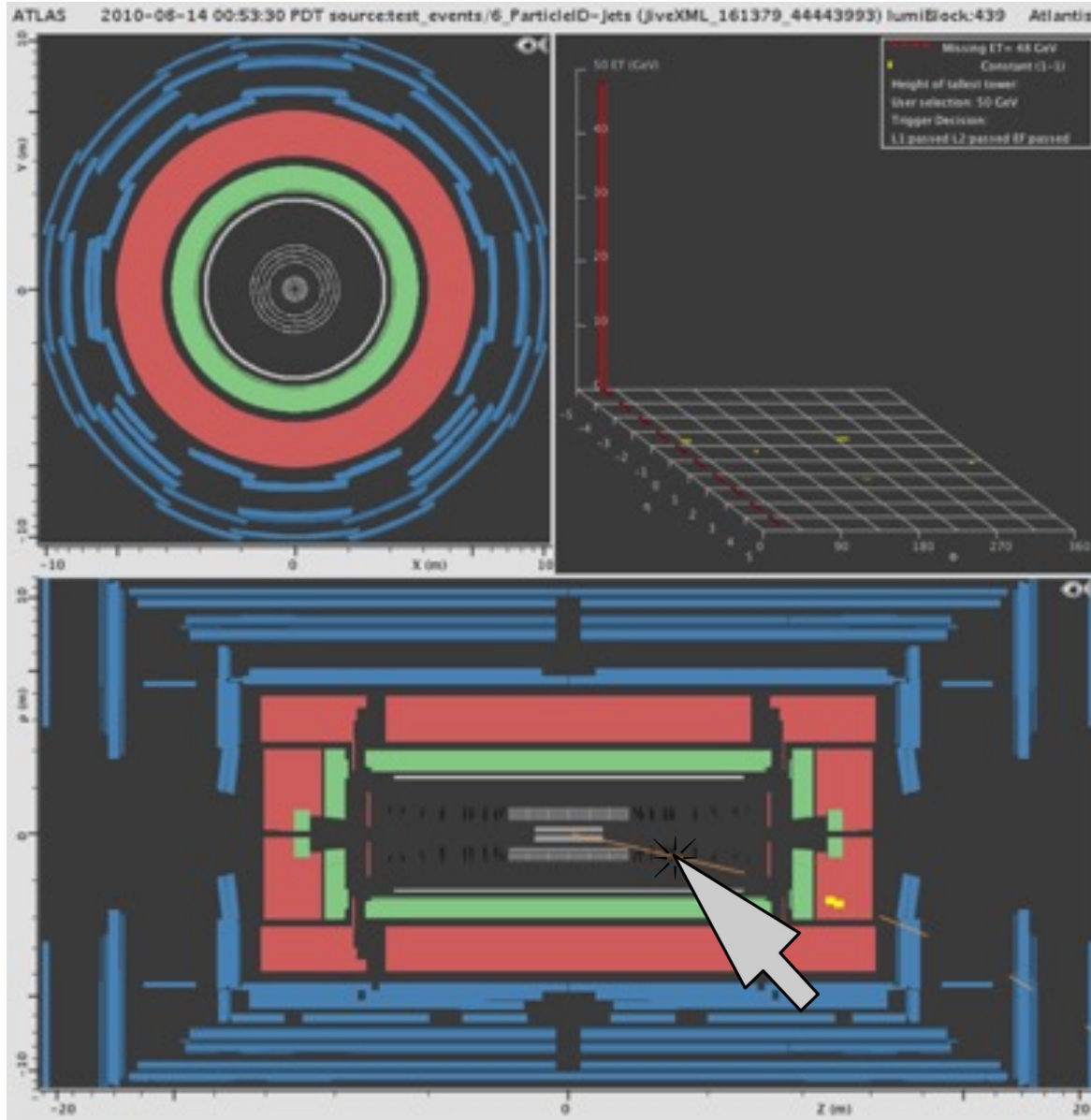
Facciamo un esempio!

Di che particella si tratta?

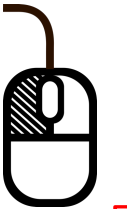


- Nessuna particella nella sezione trasversale
- Energia trasversa mancante (MET) visibile nel calorimetro srotolato
- Traccia nell'Inner Detector
- Segnale nello Spettrometro a Muoni

Di che particella si tratta?



InDet Track index: 0
 $PT = 53.290$ GeV
 $\eta = 1.728$
 $\Phi = 321.668^\circ$
 $P_x = 41.802$ GeV
 $P_y = -33.051$ GeV
 $P_z = 145.215$ GeV
Charge = 1



μ^+

μ^+

μ^+

μ^+

È un anti-muone!!!

μ^+

μ^+

μ^+

per altri esempi sull'identificazione delle particelle consultare il seguente [Link](#)

Introduzione all'esercizio n° 2

Esercizio 2 - La particella di Higgs: [Link](#)

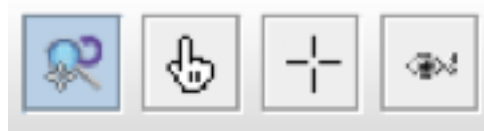
E ora... mano al computer!



Apriete ora Minerva 😊

Gli strumenti di Minerva

- Lente di ingrandimento per fare lo zoom nelle diverse schermate
- Puntatore a “manina” per selezionare le tracce e visualizzarne le proprietà



InDetTrack index: 45
PT = 1,553 GeV
 $\eta = 0,604$
 $\Phi = 6,877^\circ$
Px = 1,542 GeV
Py = 0,186 GeV
Pz = 0,997 GeV
Charge = 1
Isolation = 0,00

- Tasti per cambiare le varie proiezioni di ATLAS



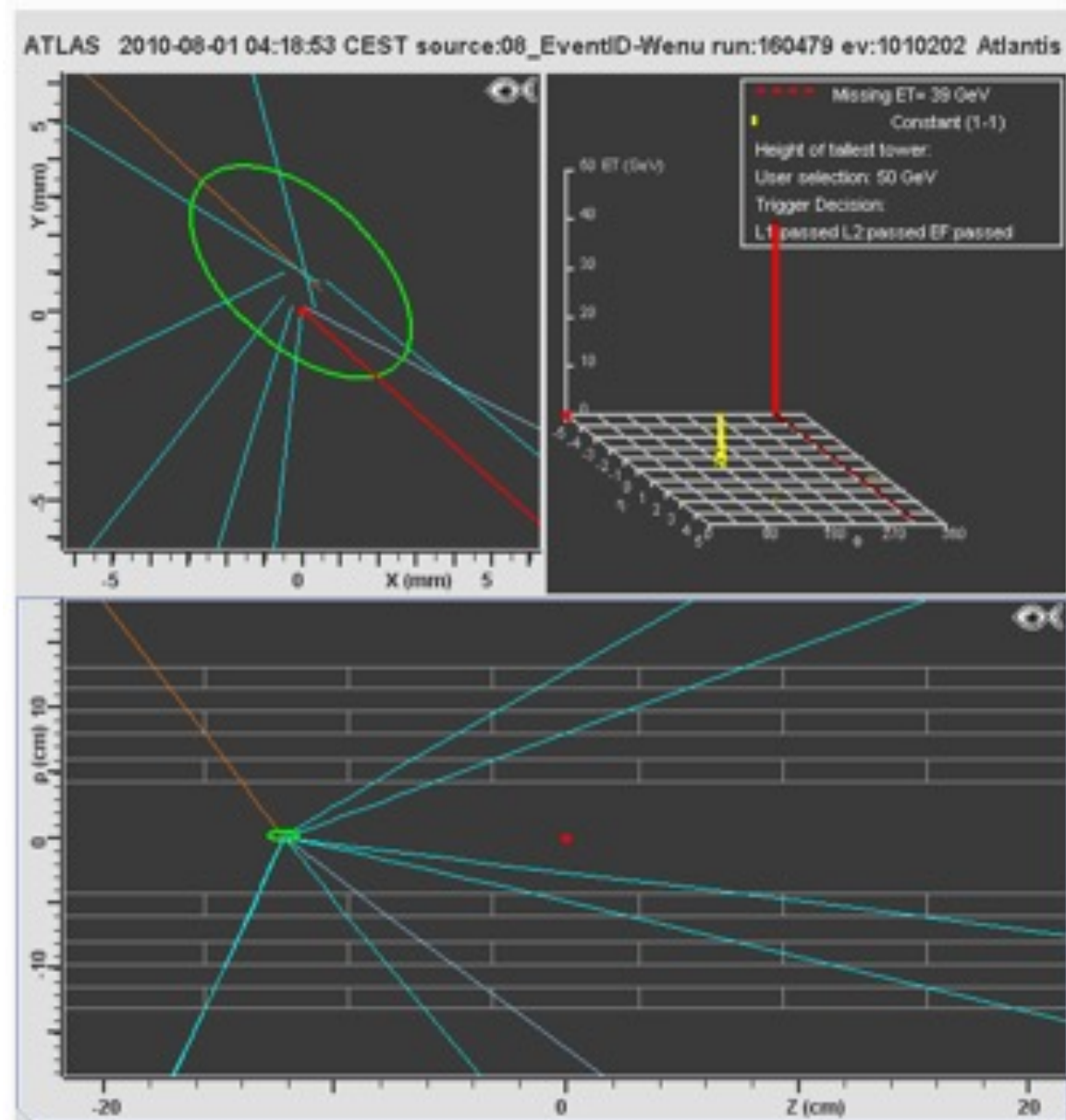
- Taglio sul momento trasverso delle tracce (1 GeV o 10 GeV)

Name	Value
<input checked="" type="checkbox"/> Pt	> 1.0 GeV

- Iniziate ad analizzare ogni evento con un taglio sul **|Pt|**
- Impostate il taglio a 1 GeV per verificare la presenza di jets e per capire l'evento; poi lo imposterete a 10 GeV

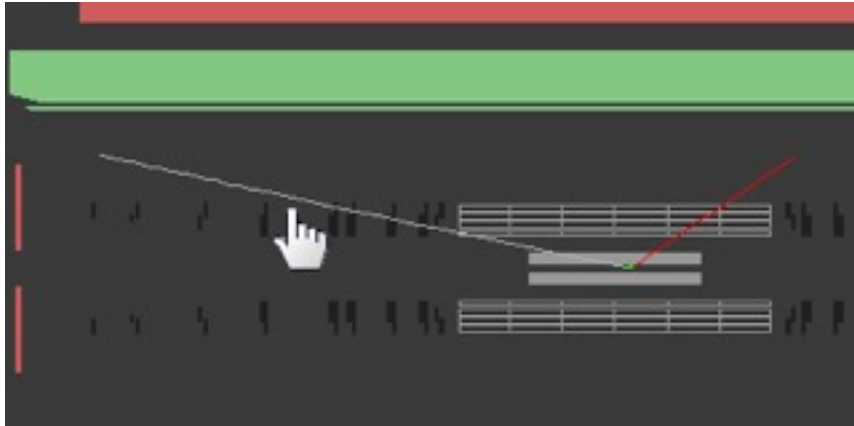
Usate lo ZOOM! Vertici primari

- Non dovete aspettarvi che da un vertice primario emerga una sola traccia
- Possono esserci anche tracce adroniche a basso P_T
- E' importante, però, che ci sia un solo leptone (o due se cerchiamo eventi che vengono fuori dall'Higgs)!



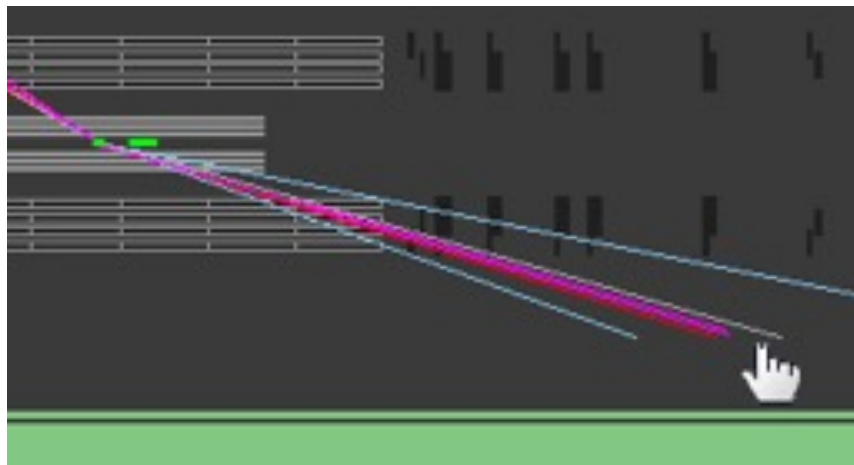
Isolamento di una particella

Un leptone è considerato isolato se è sufficientemente lontano da altre tracce dell'evento.



InDetTrack index: 0
PT = 1,376 GeV
 $\eta = -1,752$
 $\Phi = 37,127^\circ$
Px = 1,097 GeV
Py = 0,830 GeV
Pz = -3,846 GeV
Charge = -1
Isolation = 0,00

Questa traccia è ISOLATA!

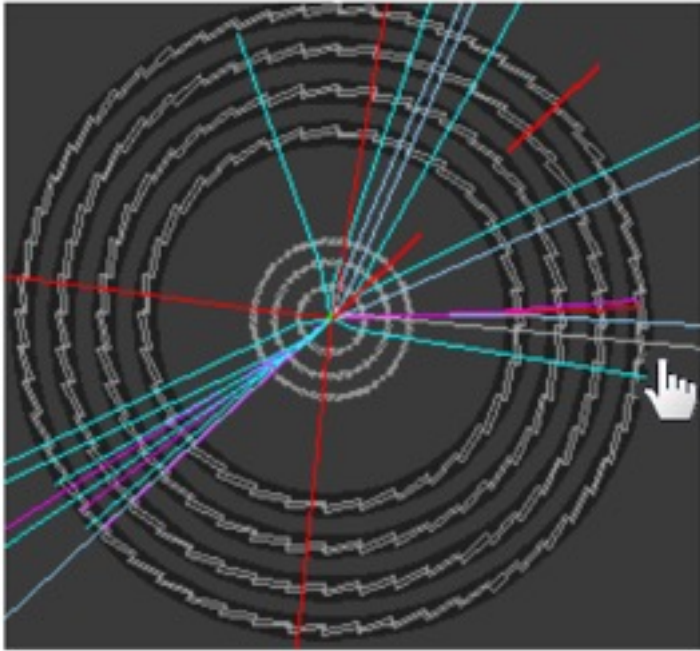


InDetTrack index: 20
PT = 2,414 GeV
 $\eta = 1,470$
 $\Phi = 286,991^\circ$
Px = 0,705 GeV
Py = -2,308 GeV
Pz = 4,972 GeV
Charge = -1
Isolation = 24,82

Questa traccia
NON E' ISOLATA!

Studiamo una traccia

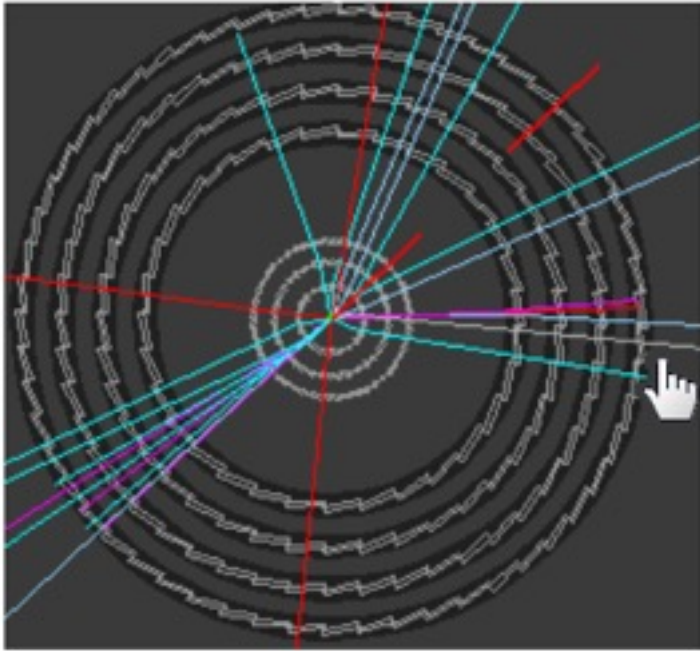
- ❑ **Non fidatevi soltanto dei vostri occhi!**
- ❑ Due tracce possono sembrare molto vicine se viste in una particolare proiezione, ma in realtà, se proiettate su un altro piano, risultano essere ben distanti l'una dall'altra!



Come vi sembra questa traccia in termini di isolamento?

Studiamo una traccia

- **Non fidatevi soltanto dei vostri occhi!**
- Due tracce possono sembrare molto vicine se viste in una particolare proiezione, ma in realtà, se proiettate su un altro piano, risultano essere ben distanti l'una dall'altra!



InDetTrack index: 45
 $PT = 1,553 \text{ GeV}$
 $\eta = 0,604$
 $\Phi = 6,877^\circ$
 $P_x = 1,542 \text{ GeV}$
 $P_y = 0,186 \text{ GeV}$
 $P_z = 0,997 \text{ GeV}$
Charge = 1
Isolation = 0,00

- Per valutare l'isolamento di una traccia, fate sempre ricorso alla variabile ISOLATION!

Riassumiamo quanto detto

- **1 bosone W** --> un leptone carico e **MET > 20 GeV**
- **2 bosoni W** --> due leptoni di carica opposta provenienti dallo stesso vertice + **MET > 20 (o 40) GeV**
- I **leptoni** devono avere un **alto impulso trasverso (Pt)**
- In entrambi i casi, i **leptoni** devono essere **isolati**:
 - Perché lo sia, l'indicatore "isolation" deve fornire un valore < 0.2
 - **Isolation > 0.2** leptone non isolato
 - **Isolation < 0.2** leptone isolato

Esercizio 2 – identificazione degli eventi

- Abbiamo 10 eventi da visualizzare ed identificare con il programma Minerva.
 - Utilizzate tutte le informazioni che ci vengono fornite e tutte le viste del rivelatore ATLAS!
1. Aprite Minerva (MINERVA_Windows.bat)
 2. ATLANTIS GUI (schermata di destra)
 3. File → Read Event Locally → **exercise2-2014.zip**

Evento	$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$	$W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$	$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$	$WW^+ \rightarrow l^+ \bar{\nu}_l + l^+ \nu_l$	Fondo	
01	○	○	○	○	○	○	Check
02	○	○	○	○	○	○	Check
03	○	○	○	○	○	○	Check
04	○	○	○	○	○	○	Check
05	○	○	○	○	○	○	Check
06	○	○	○	○	○	○	Check
07	○	○	○	○	○	○	Check
08	○	○	○	○	○	○	Check
09	○	○	○	○	○	○	Check
10	○	○	○	○	○	○	Check

- Sempre sulla pagina ([Link](#)) “Esercizio 2”
- In fondo alla pagina troverete questa tabella tramite la quale possiamo verificare il corretto riconoscimento degli eventi.

Adesso tocca a voi!

Adesso tocca a voi!

- 1. Aprite Minerva (MINERVA_Windows.bat)**
- 2. ATLANTIS GUI (schermata di destra)**
- 3. File → Read Event Locally → 3X.zip 4X.zip**

Eventi con uno o due bosoni W

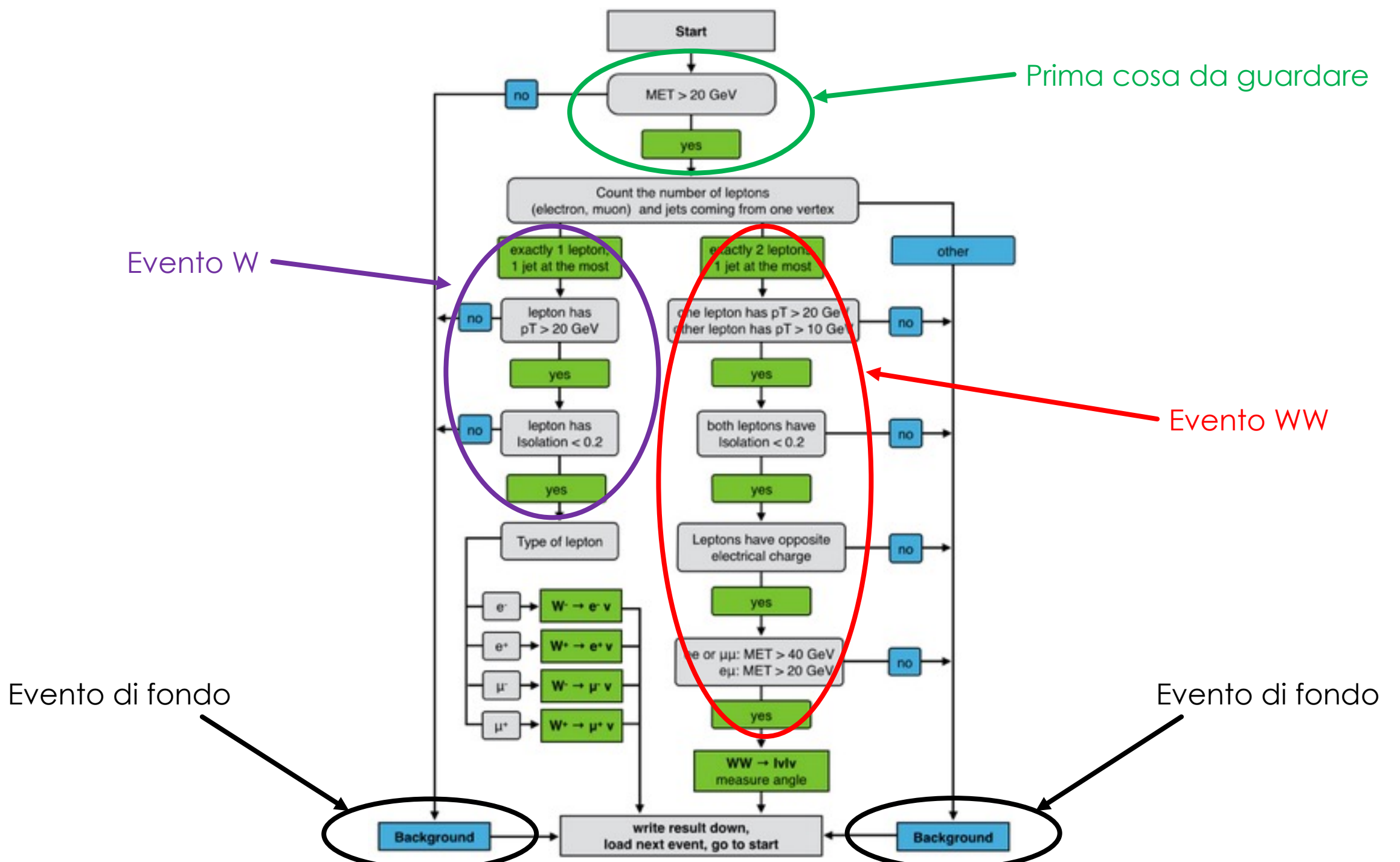
- Il campione che analizzerete contiene eventi con 1 bosone W o con una coppia W^+W^-
- **Misurate l'angolo $\Delta\Phi$** fra i due leptoni (che vengono dai due W) nel piano trasverso
- **Ricordate** che i due leptoni, in questo caso, devono avere **carica opposta!**



IMPORTANTE!!!

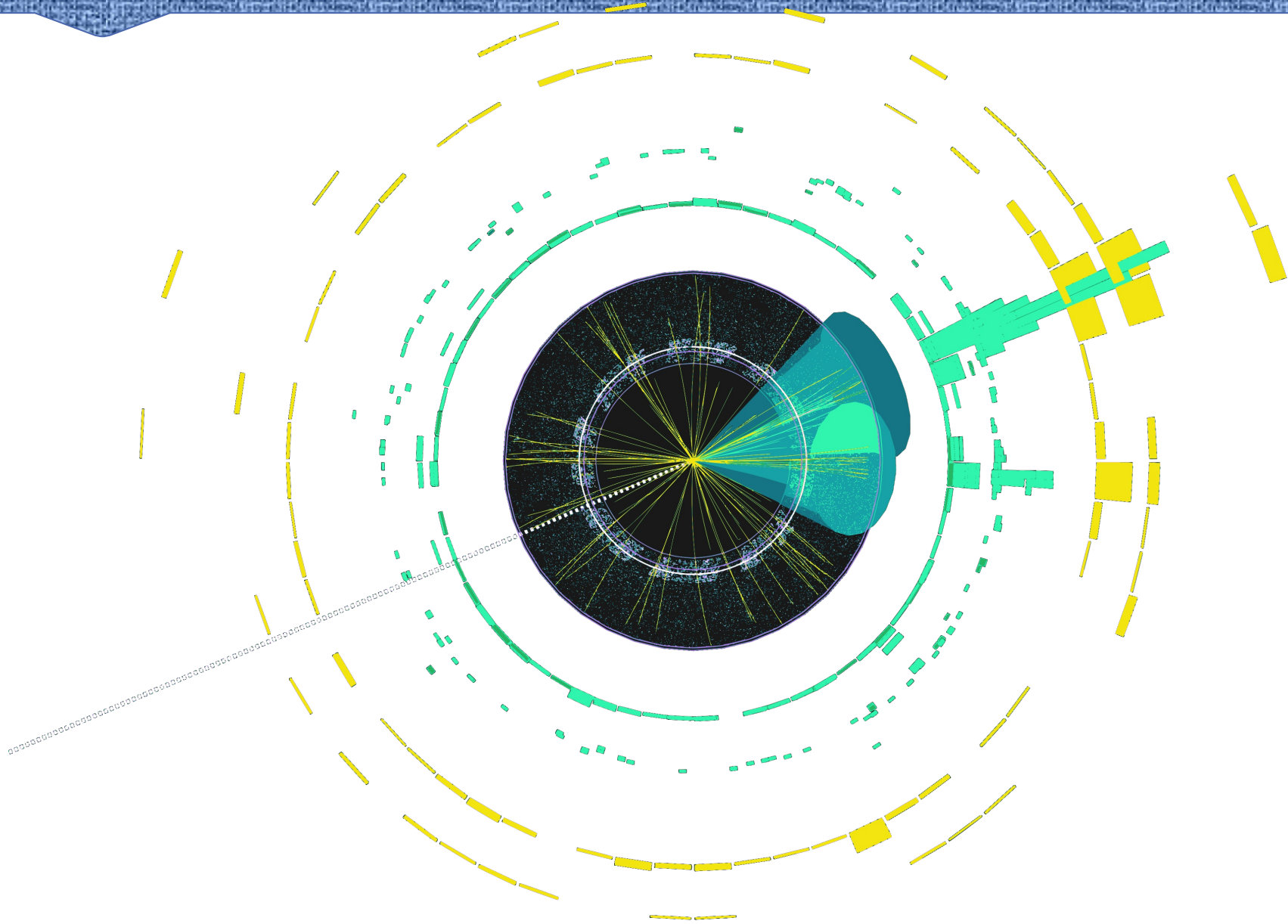
Se avete identificato due leptoni in un evento WW, potete calcolare l'angolo $\Delta\Phi$ tra essi tenendo premuto il tasto "p" e clickando sulle due tracce individuate

**Riportate l'angolo tra i leptoni
sul foglio che avete a disposizione.**

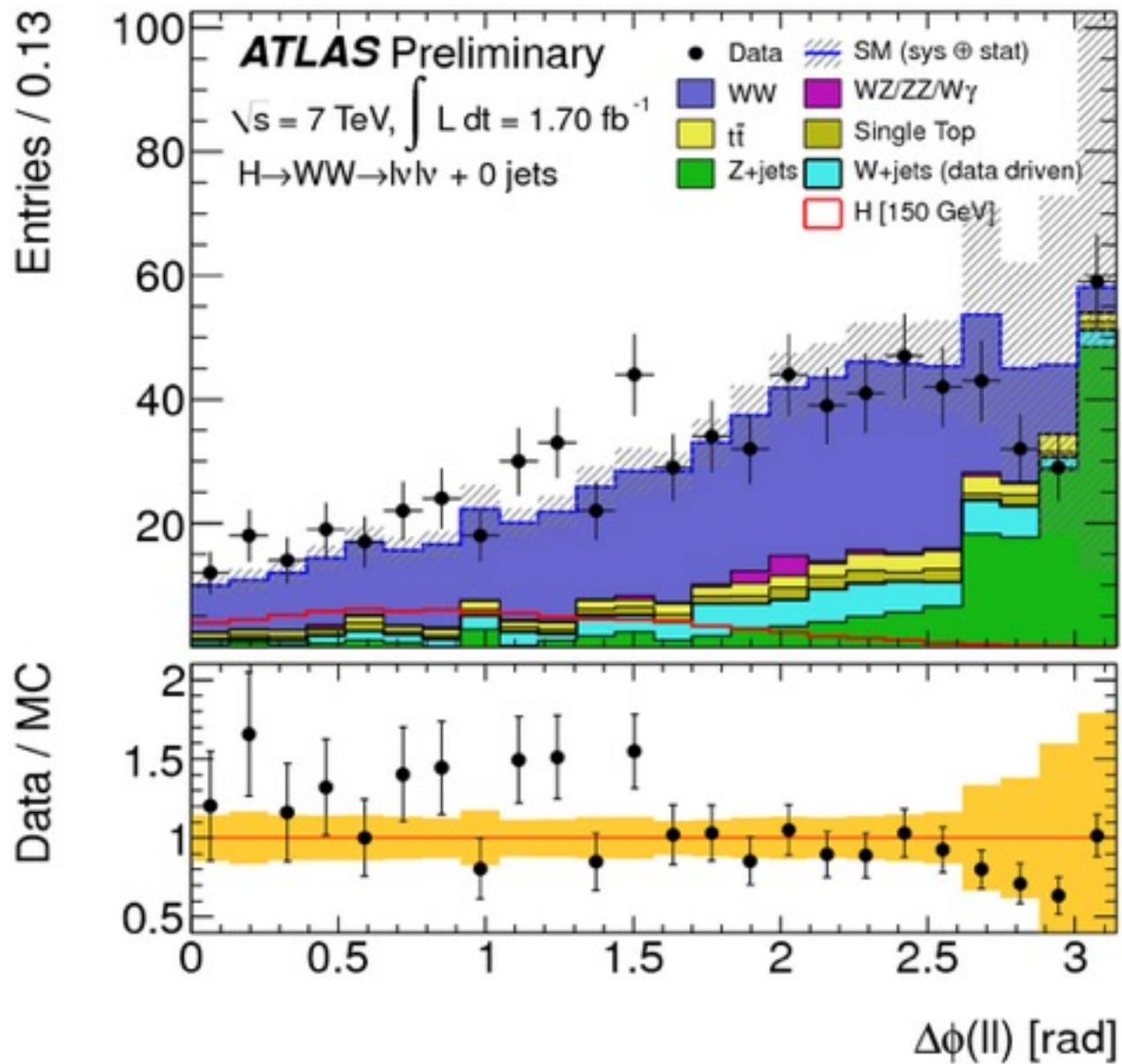


In bocca al lupo e buon divertimento!

Evento ATLAS sul piano trasverso



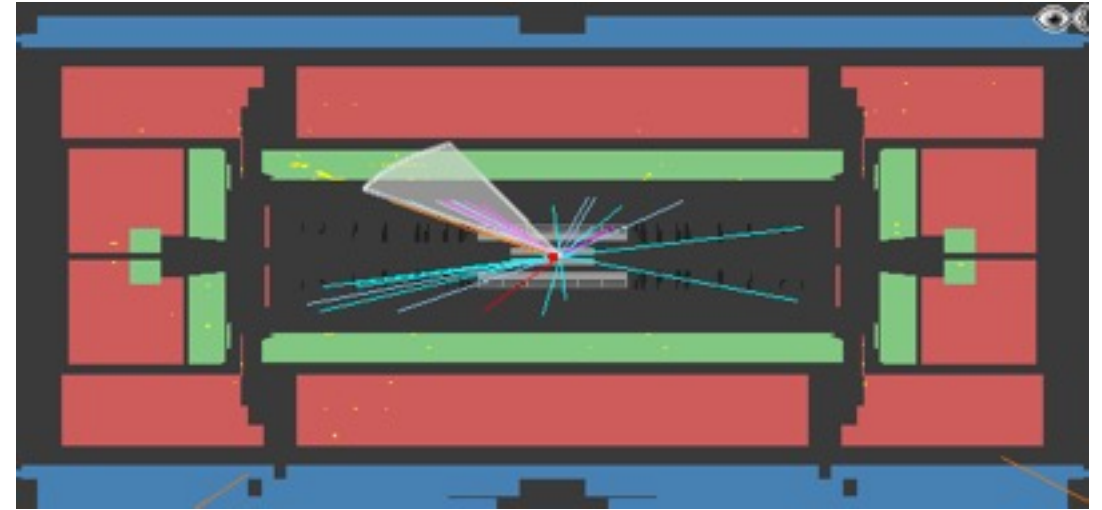
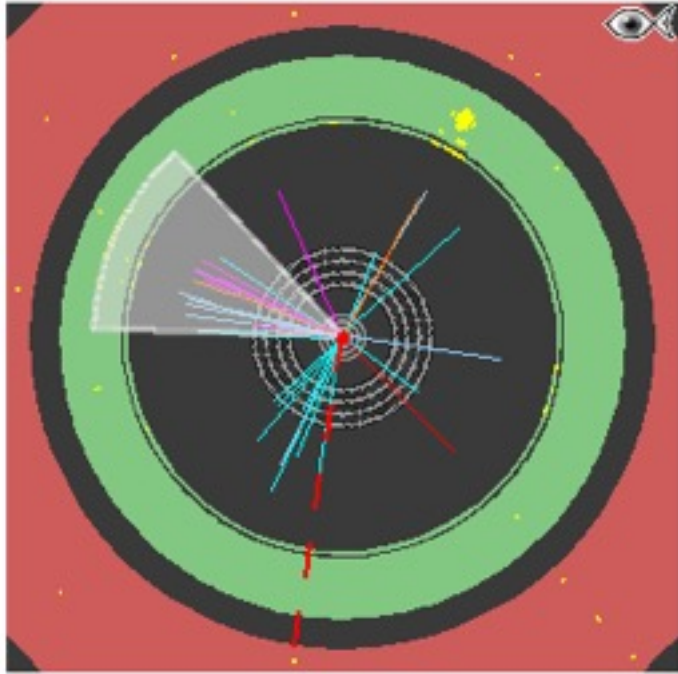
Analisi statistica



Link utili

- ❖ Agenda: <https://agenda.infn.it/event/50906/>
- ❖ International masterclasses: <https://ippog.org/imc-international-masterclasses>
- ❖ Esercizi online: <https://atlas.physicsmasterclasses.org/it/wpath.htm>
- ❖ Dati 2026: https://atlas.physicsmasterclasses.org/it/wpath_data.php

Jets dentro Minerva



- I jet saranno indicati da Minerva con un cono grigio
- Gli eventi di nostro interesse ("segnale") possono contenere al massimo 1 jet
- Spesso, gli elettroni identificati da ATLAS vengono anche ricostruiti come jet, ma non devono essere confusi con questi ultimi