

Misura dei rapporti di decadimento
del bosone Z
con eventi dell'esperimento OPAL

STUDENTS' DAY

1. TEORIA

L'universo in due tabelle

<i>Forza</i>	<i>Bosone</i>
Gravità	gravitone
Elettromagnetismo	fotone (γ)
Forza nucleare debole	Z, W ⁺ , W ⁻
Forza nucleare forte	gluoni

<i>Materia</i>					
<i>quarks</i>			<i>leptoni</i>		
u	c	t	ν_e	ν_μ	ν_τ
d	s	b	e	μ	τ

Il bosone Z

<i>Forza</i>	<i>Bosone</i>
Gravità	gravitone
Elettromagnetismo	fotone (γ)
Forza nucleare debole	Z, W⁺, W⁻
Forza nucleare forte	gluoni

Studiare il bosone Z significa:

- misurare la massa
- misurare “quanto vive”
- studiarne i possibili decadimenti

Il bosone Z

<i>Forza</i>	<i>Bosone</i>
Gravità	gravitone
Elettromagnetismo	fotone (γ)
Forza nucleare debole	Z, W⁺, W⁻
Forza nucleare forte	gluoni

Studiare il bosone Z significa:

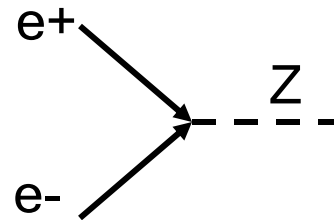
- misurare la massa $\rightarrow m_Z \approx 97 m_p$
- misurare “quanto vive” $\rightarrow 3 \times 10^{-25} \text{ s}$
- studiarne i possibili decadimenti

2. L'ESPERIMENTO

Un esperimento per studiare il bosone Z

1. Usiamo coppie particella-antiparticella per produrre la Z

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



2. Osserviamo la Z decadere in coppie particella-antiparticella

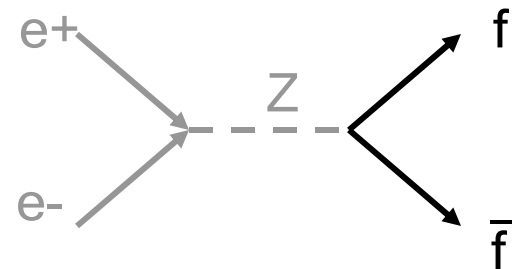
$$Z \rightarrow e^+ e^-$$

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

$$Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

$$Z \rightarrow q \bar{q}$$

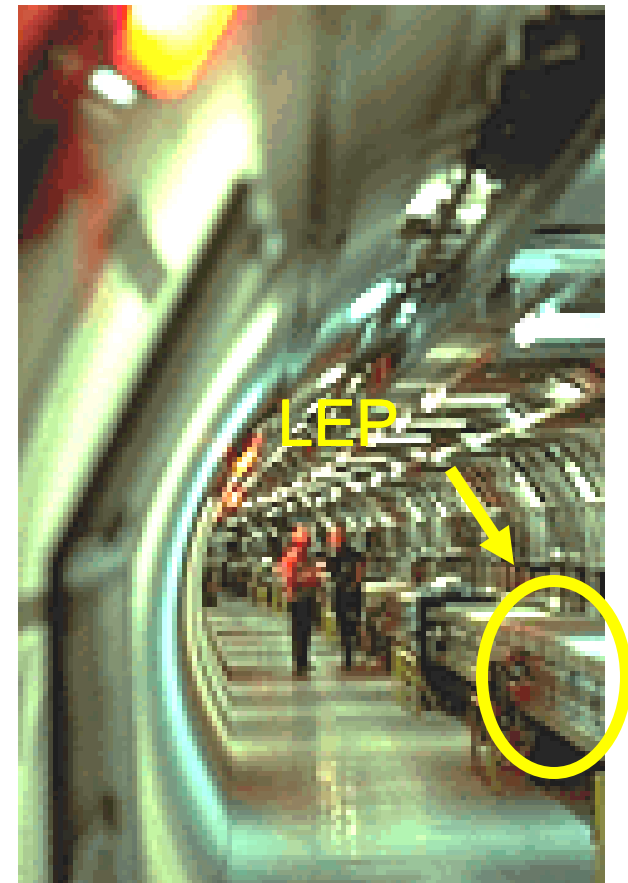
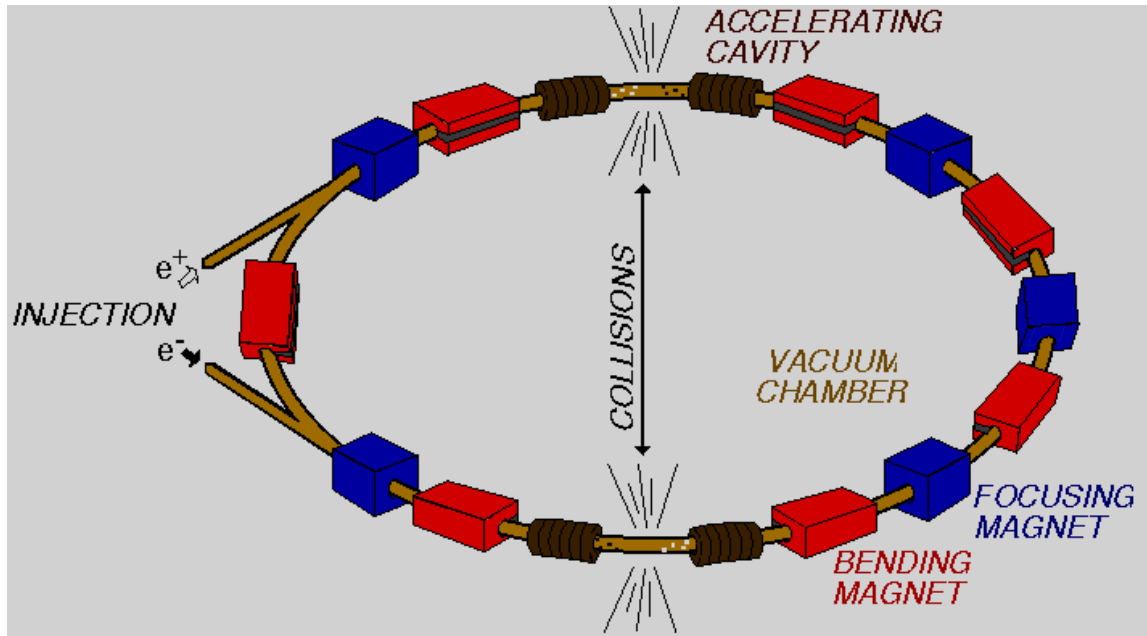
$$Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$$



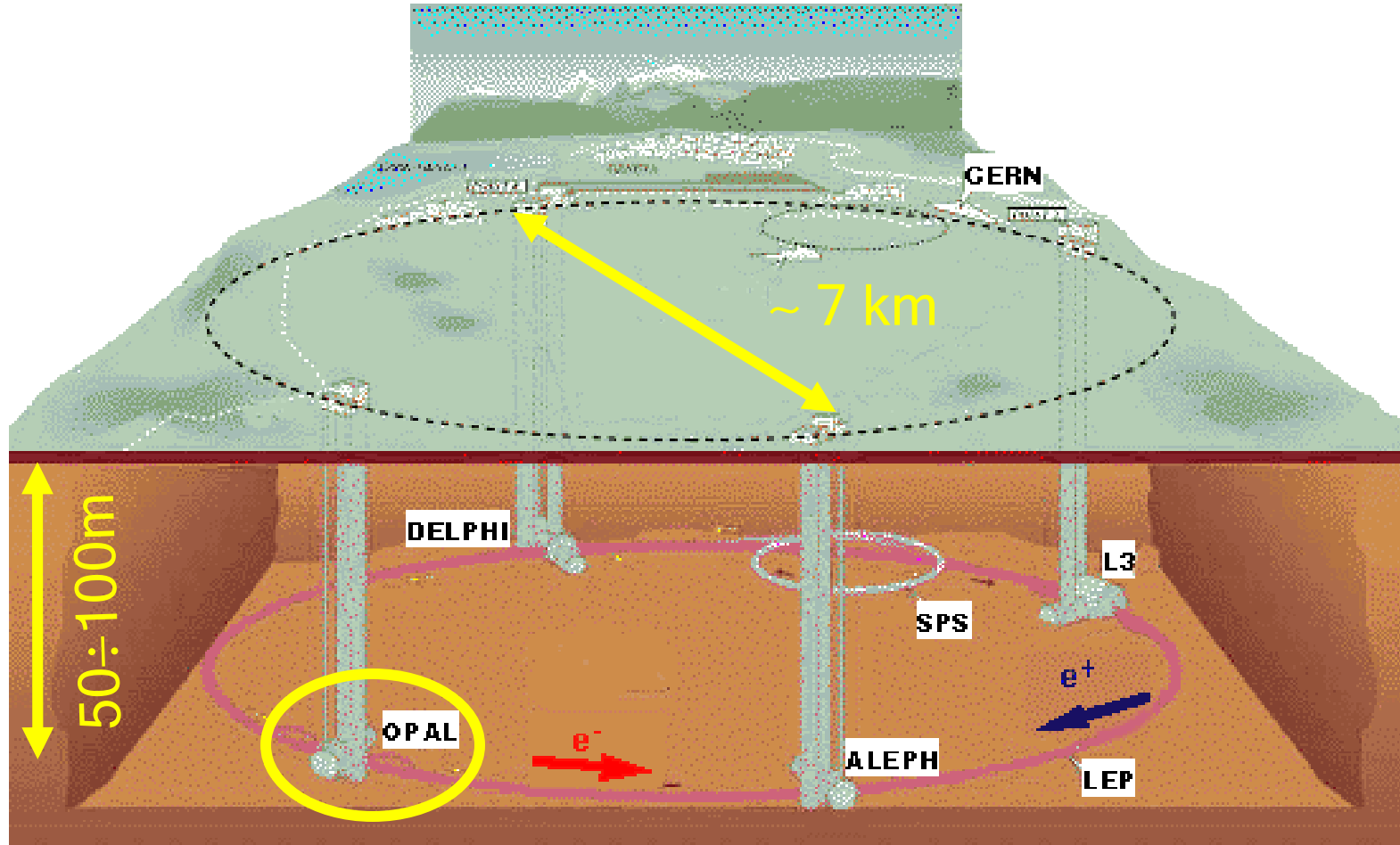
La fabbrica di e^+ ed e^- : LEP

$E=mc^2$: si fanno collidere fasci di e^+ ed e^- con $E=mzc^2$

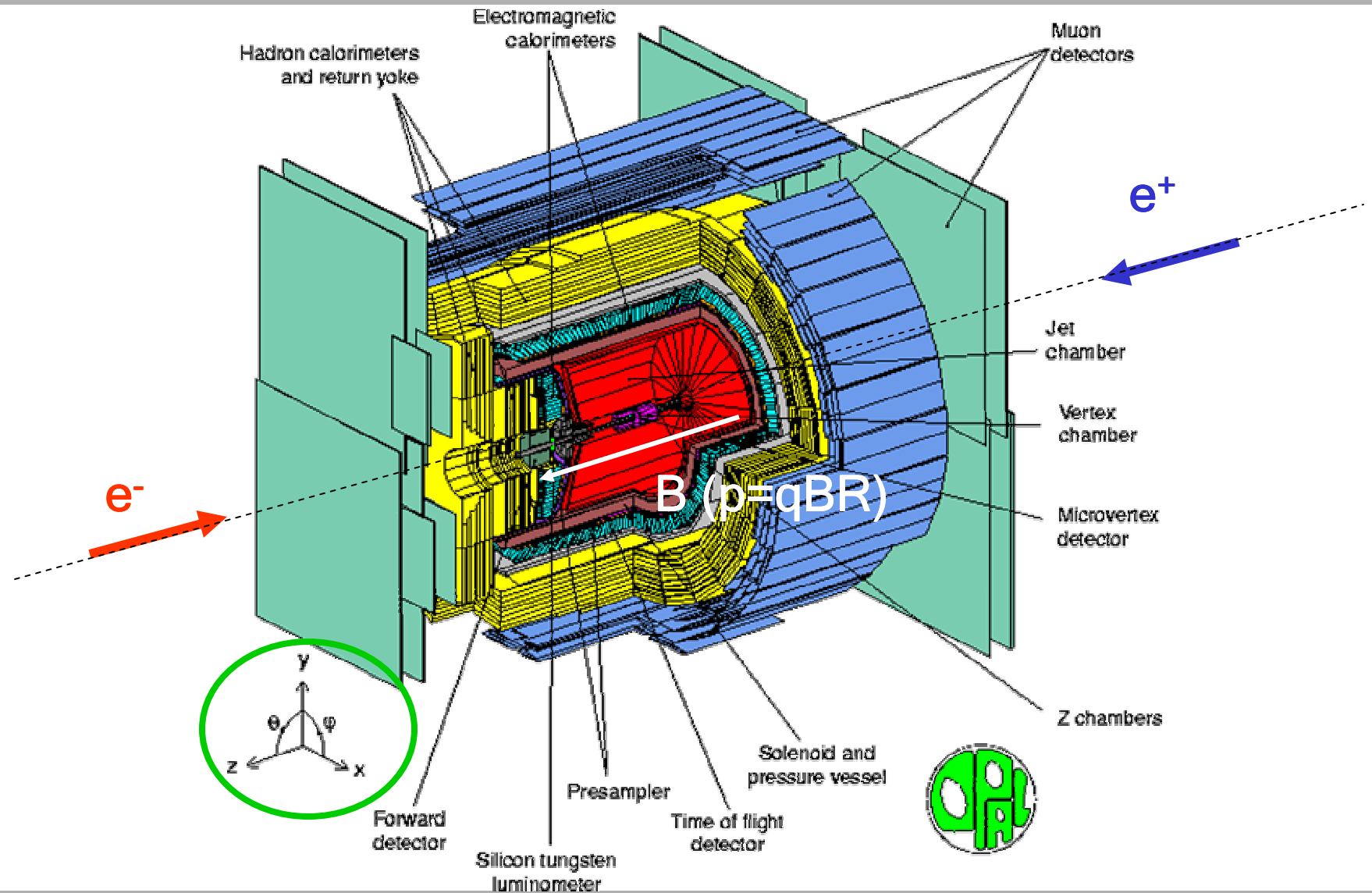
In pratica $E(e^-)=E(e^+)=\frac{1}{2} mzc^2$

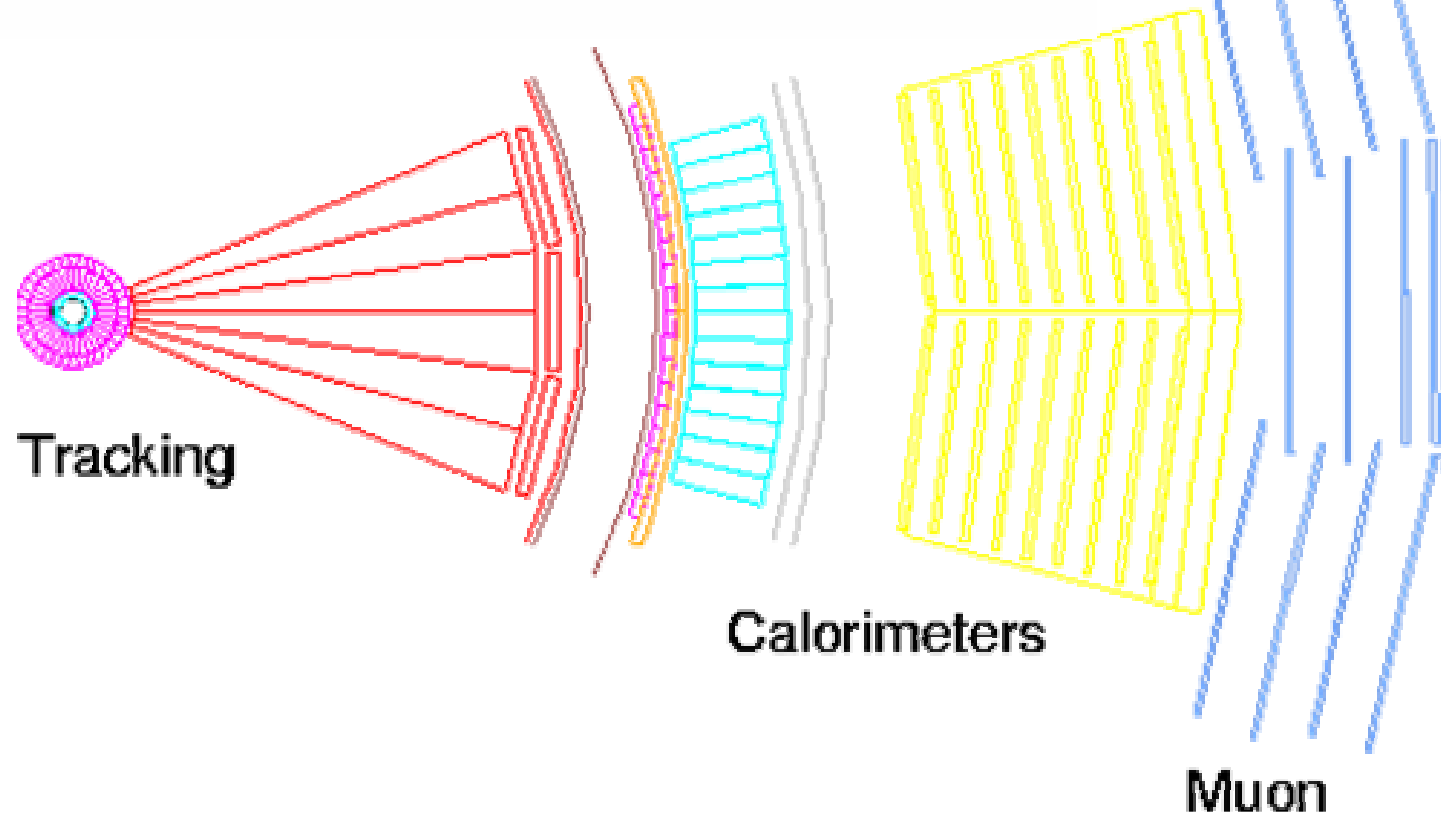
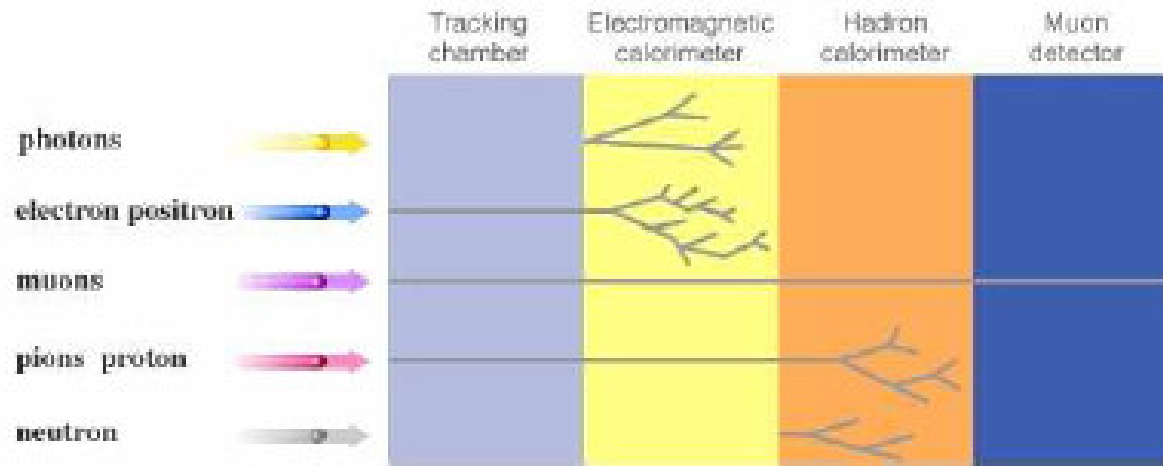




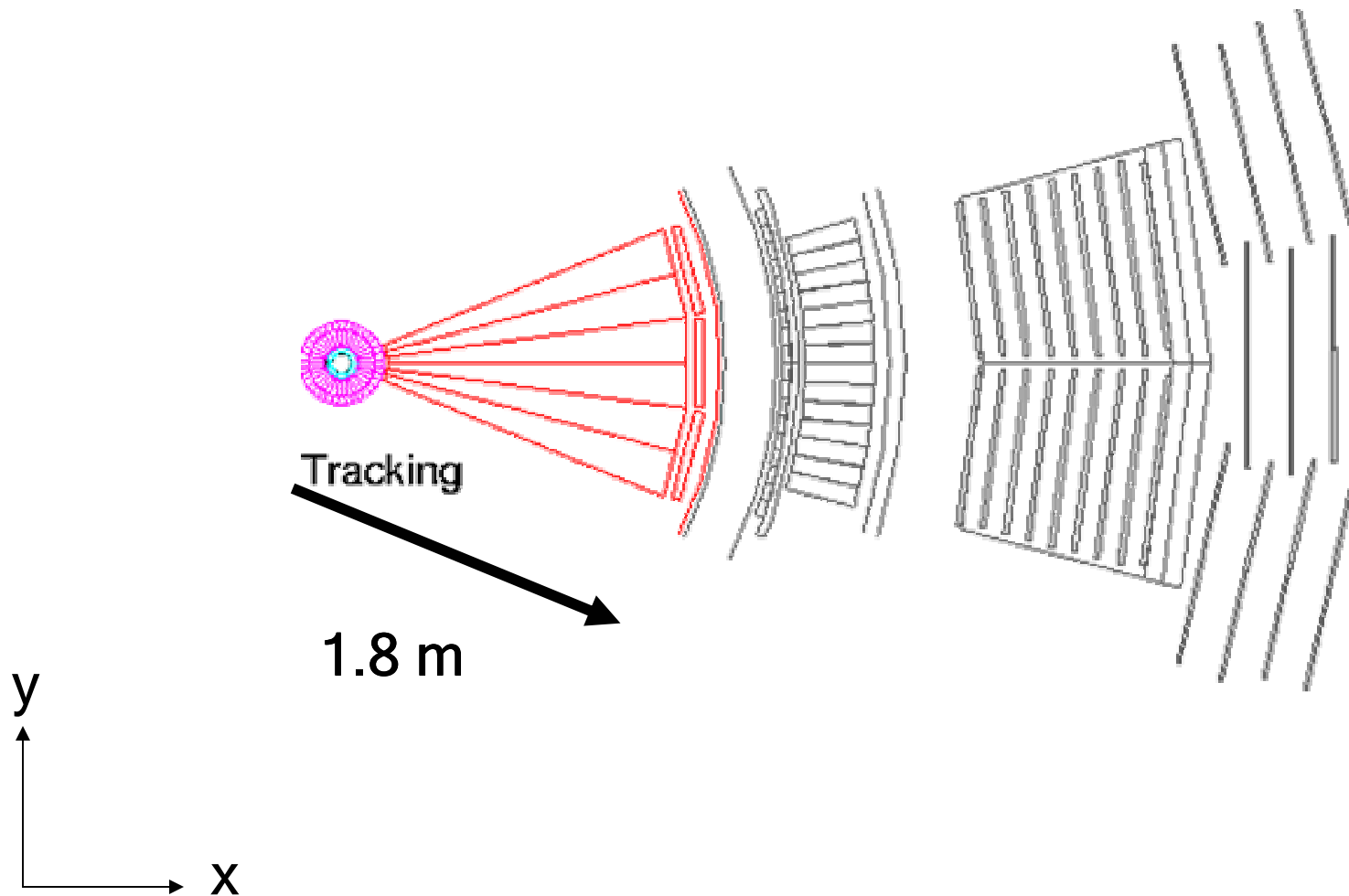


Il rivelatore OPAL

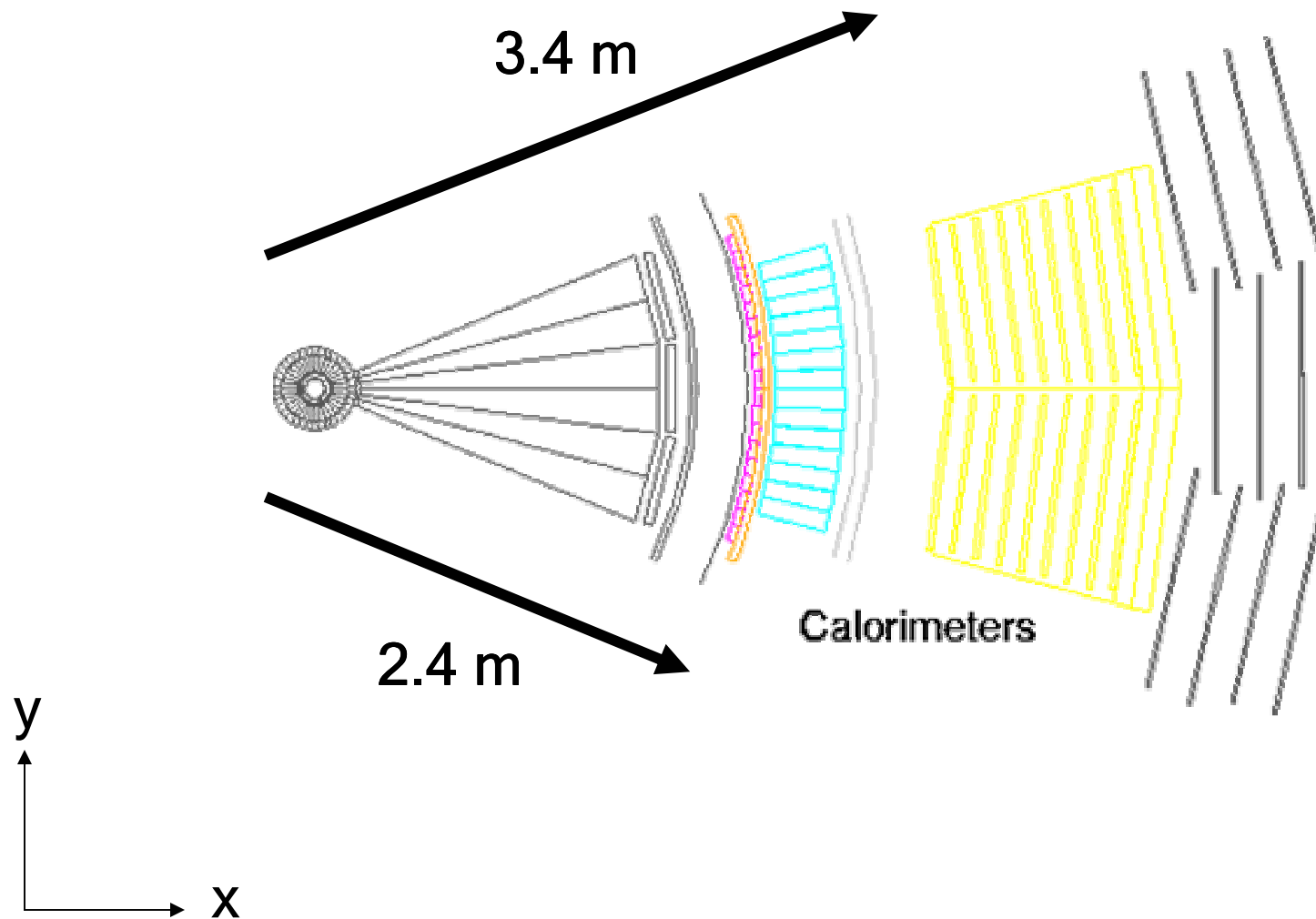




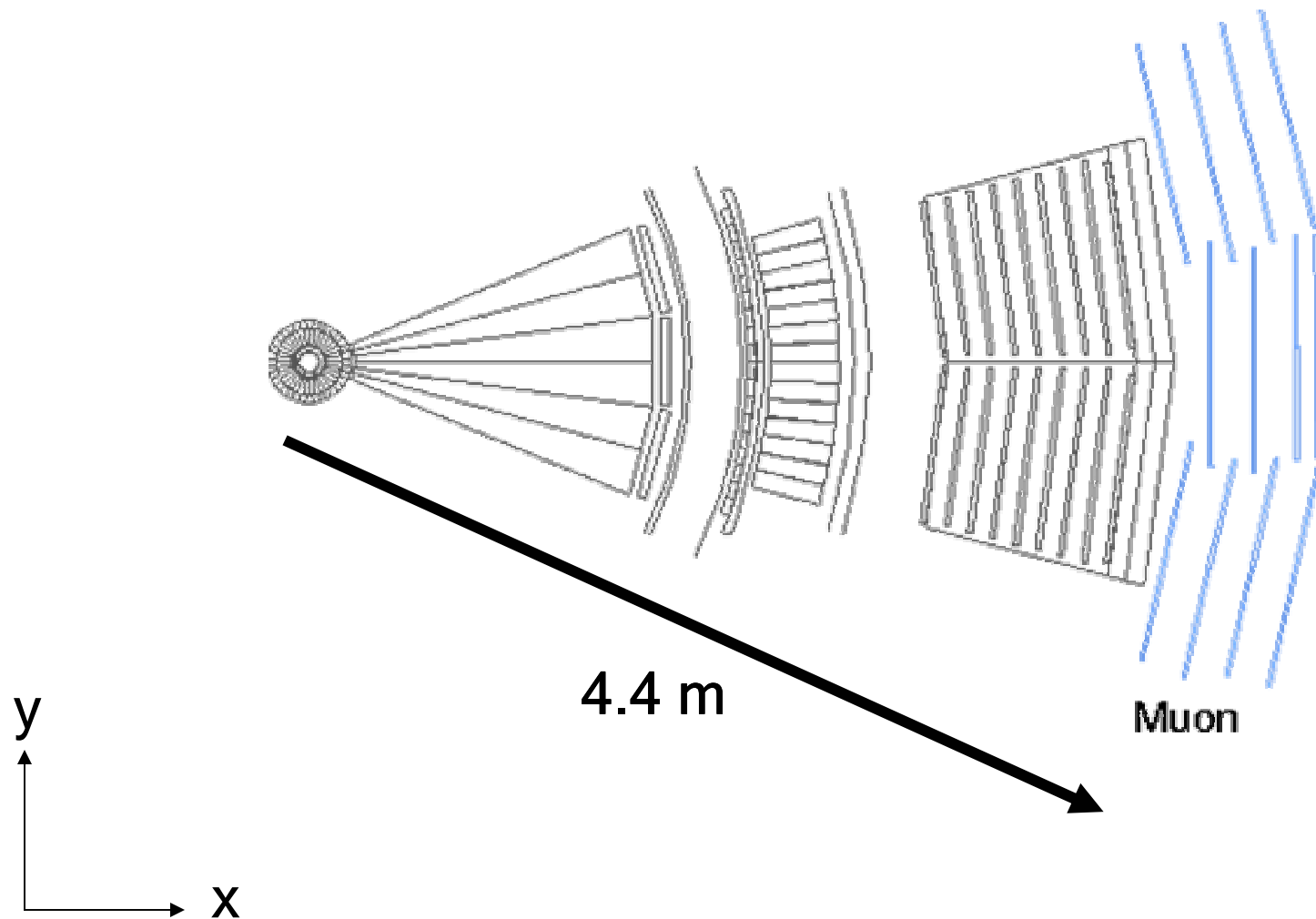
Una “fetta” di OPAL: tracking



Una “fetta” di OPAL: calorimetri



Una “fetta” di OPAL: rivelatori di μ



Un esperimento per studiare il bosone Z

<i>Forza</i>	<i>Bosone</i>
Gravità	gravitone
Elettromagnetismo	fotone (γ)
Forza nucleare debole	Z, W⁺, W⁻
Forza nucleare forte	gluoni

Studiare il bosone Z significa:

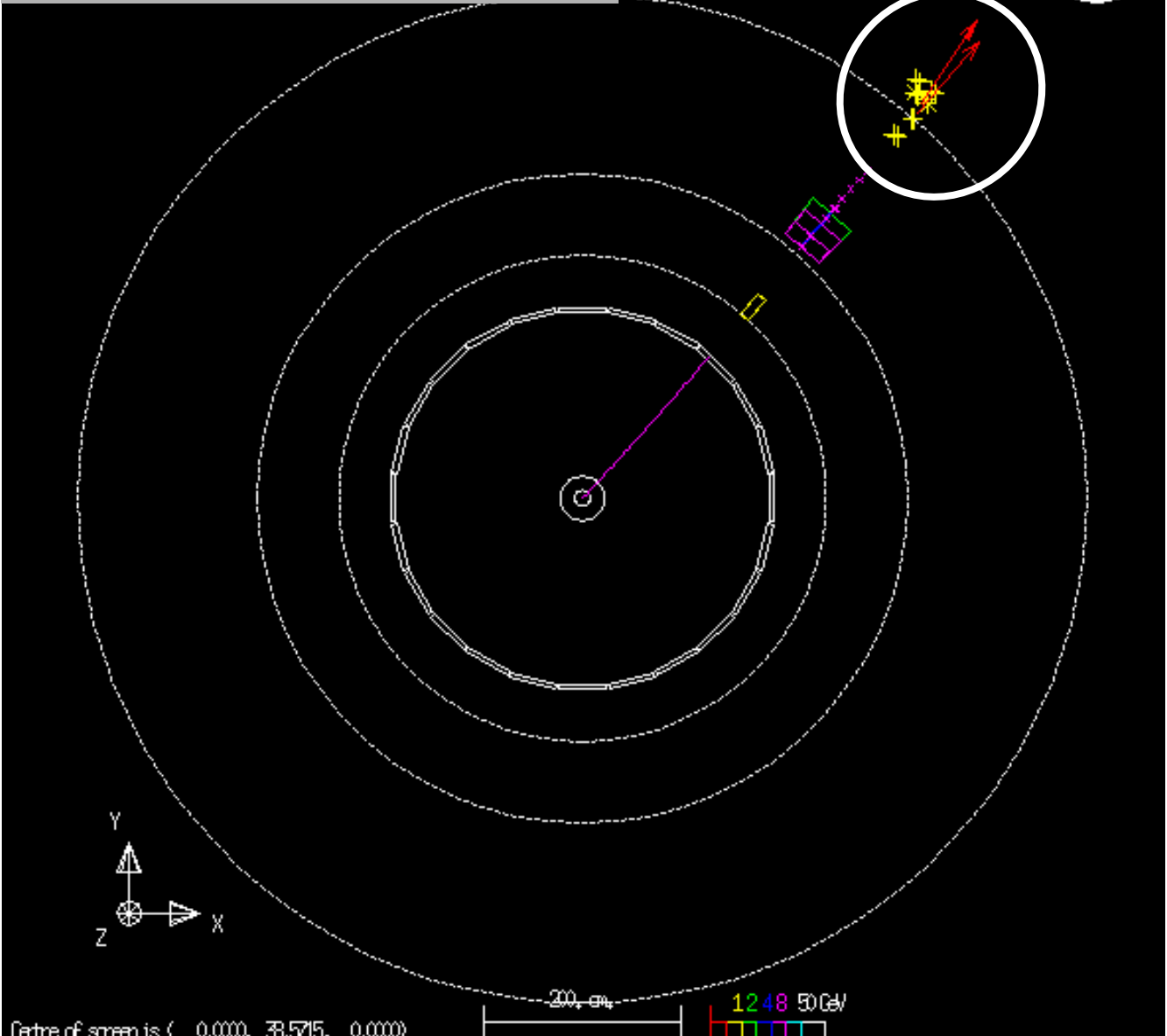
- misurare la massa
- misurare “quanto vive”
- studiarne i possibili decadimenti → **Analisi di 1000 eventi raccolti dal rivelatore OPAL e visualizzati da un ED**

3. “HANDS-ON”

Come OPAL “vede” le particelle

Un muone

(N= 5.7) Ecal(N= 10 SumE= 1.6)
(N= 2 SumE= 2.0) Muon(N= 2)



Il muone è la sola particella che abbia alta probabilità di passare attraverso tutti i calorimetri e di rilasciare un segnale nelle camere per muoni.

Intermezzo: le unità di misura

Energia	eV
Massa ($E=mc^2 \rightarrow m=E/c^2$)	eV/c ²
Quantità di moto ($T=p^2/2m \rightarrow p= \sqrt{2mT}$)	eV/c

- Nella fisica delle particelle si pone $c=1 \rightarrow E,m,p$ espresse tutte in eV!
- Le particelle si muovono a velocità $v \approx c$
Dalla relazione $E=mc^2 \rightarrow E \approx pc$

In pratica confonderemo l'energia delle particelle con la loro q.d.m.

NB: $E(e^-)=E(e^+)=\frac{1}{2} m_Z \rightarrow p(e^-)+p(e^+)=0$

Intermezzo: le unità di misura

- Energia: **eV**
energia di un elettrone accelerato da una d.d.p. di 1 V
(1 eV = 1.6×10^{-19} J)

elettroni nel tubo catodico del televisore $E=20$ keV ($k=10^3$)

- Massa (ricordate $E=mc^2$!): **eV/c²**

1 protone: $m_p=1.672 \times 10^{-27}$ kg oppure $m_p=938$ MeV/c² ($M=10^6$)
o anche $m_p \approx 1$ GeV/c² ($G=10^9$)

- Quantità di moto: **eV/c**

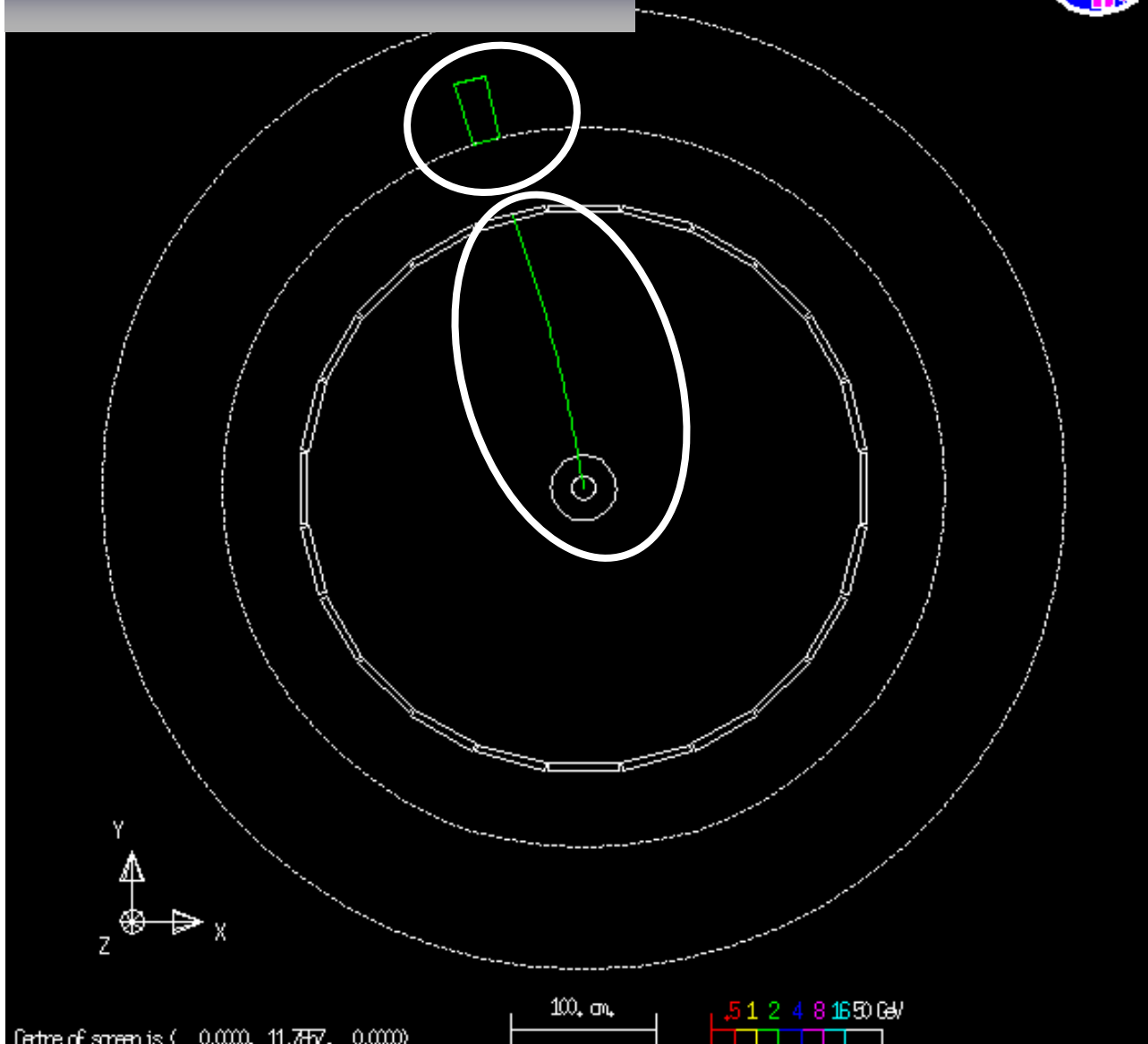
Energia cinetica $T=\frac{1}{2}mv^2$,
q.d.m. $p=mv$

$$T=p^2/2m \rightarrow p=\sqrt{2Tm} \quad \sqrt{\text{eV eV/c}^2}$$

1 mosca (1g) a 1 km/h: $p=5 \times 10^{23}$ eV/c

Un elettrone

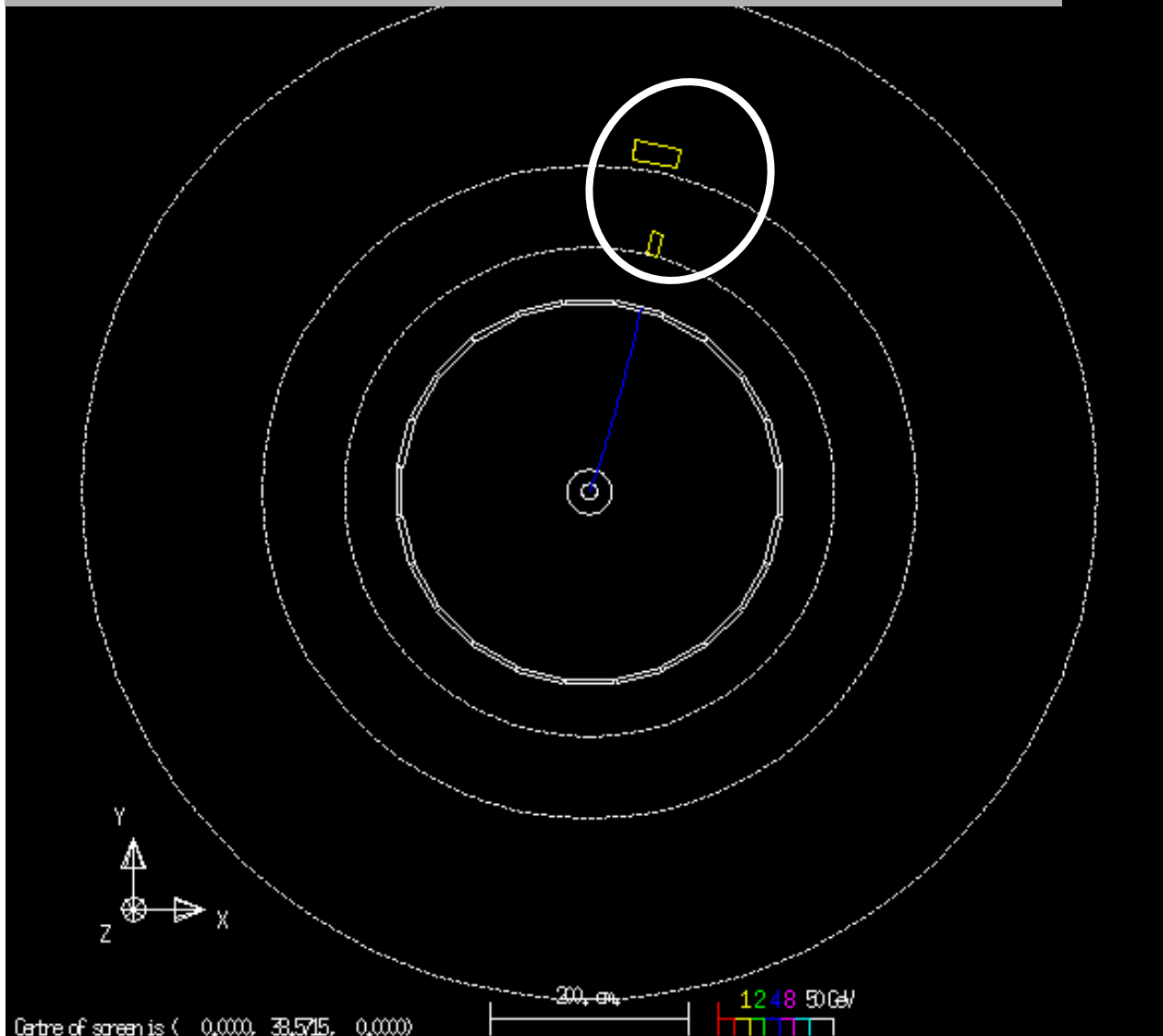
1.5) Ecal(N= 10 SumE= 2.7)
N= 1 SumE= 0.7 Muon(N= 0)



L'elettrone perde tutta la sua energia nel calorimetro elettromagnetico

1. la q.d.m. associata alla traccia della particella carica deve essere simile all'energia depositata (stesso colore).
2. non ci sono depositi di energia nel calorimetro adronico nè segnali nelle camere per muoni.

Un quark? Un adrone!



Un quark di alta energia produce un grappolo (o "jet") di particelle che viaggiano nella direzione del quark originale

1. la q.d.m. della traccia carica osservata è di solito maggiore dell'energia depositata nel punto in cui la particella colpisce il calorimetro adronico.
2. non è prodotto alcun segnale nelle camere per muoni
3. talvolta, ma non sempre, è visibile anche un deposito di energia nel calorimetro elettromagnetico.

La classificazione dei decadimenti

Decadimenti del bosone Z

1. Osserviamo la Z decadere in coppie particella-antiparticella

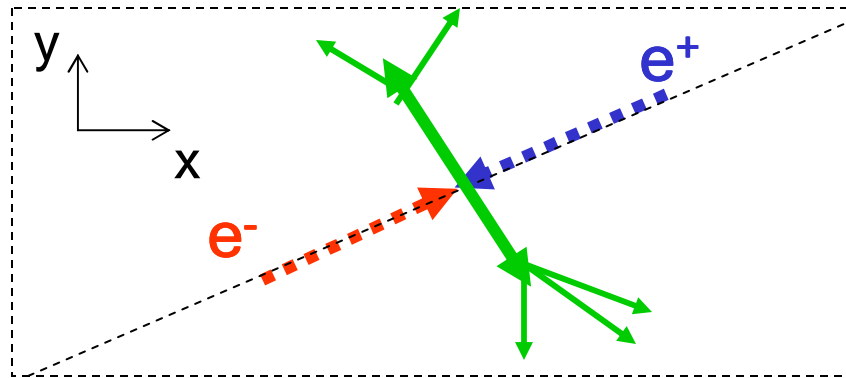
$$Z \rightarrow e^+ e^-$$

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

$$Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

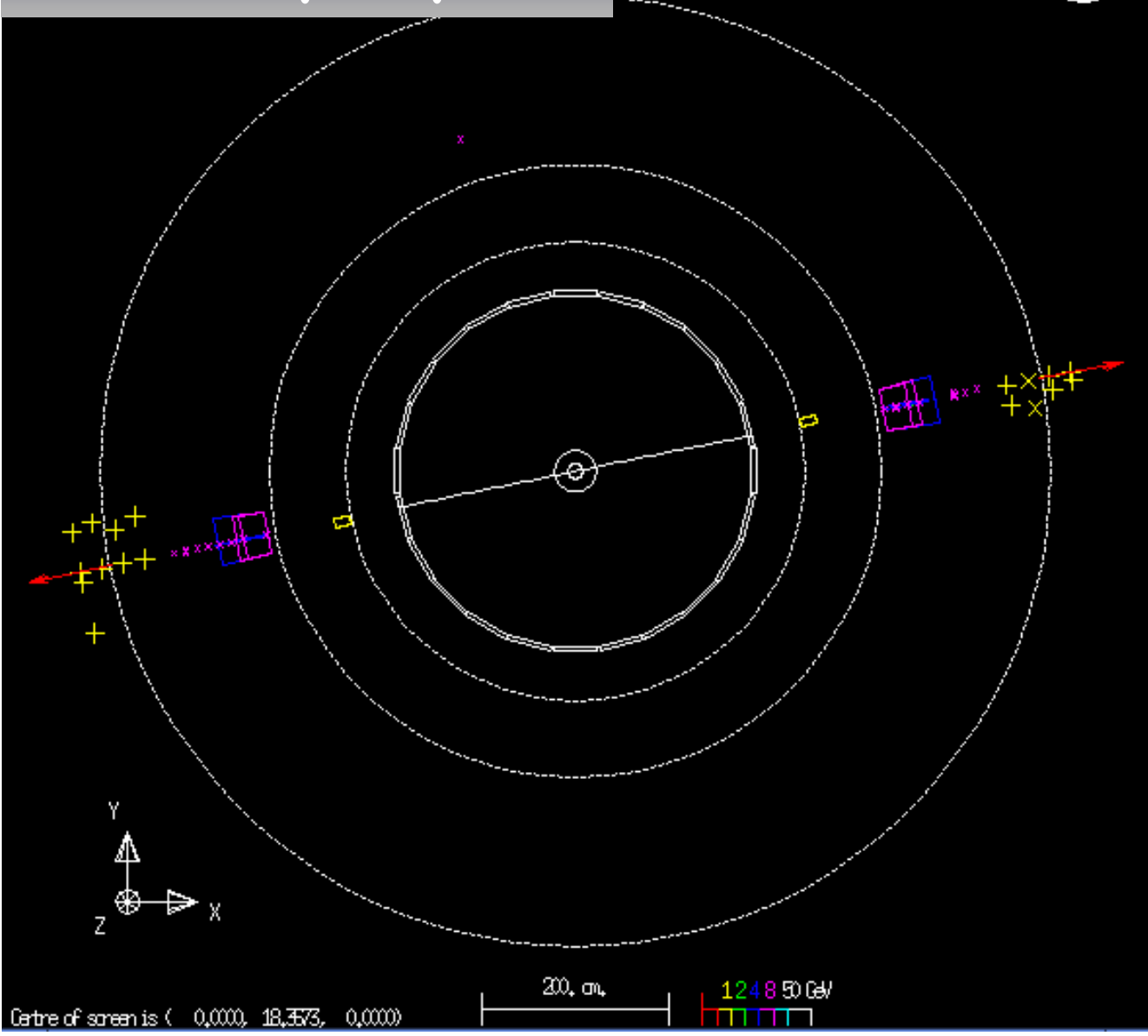
$$Z \rightarrow q \bar{q}$$

2. NB: negli eventi che analizzeremo lo stato finale prodotto nel decadimento della Z contiene solo particella ed antiparticella



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

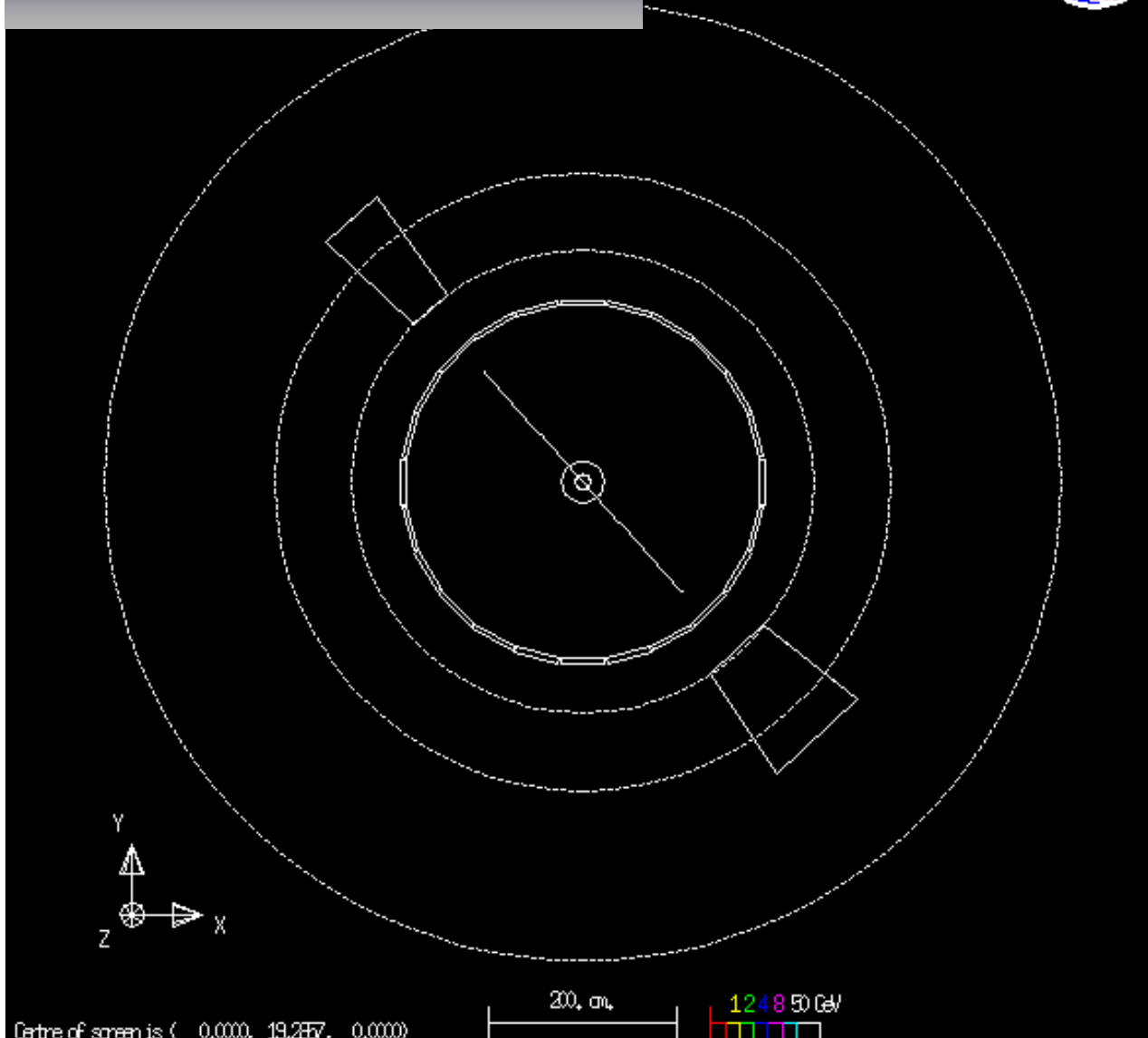
159.0) Ecal(N= 7 SumE= 1.4)
(N= 6 SumE= 8.2) Muon(N= 2)



Due tracce di grande q.d.m. che hanno la stessa linea di volo ma viaggiano in direzione opposta e che rilasciano segnali nelle camere per muoni.

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

10.0) Ecal(N= 15 SumE=175.3)
(= 0 SumE= 0.0) Muon(N= 0)

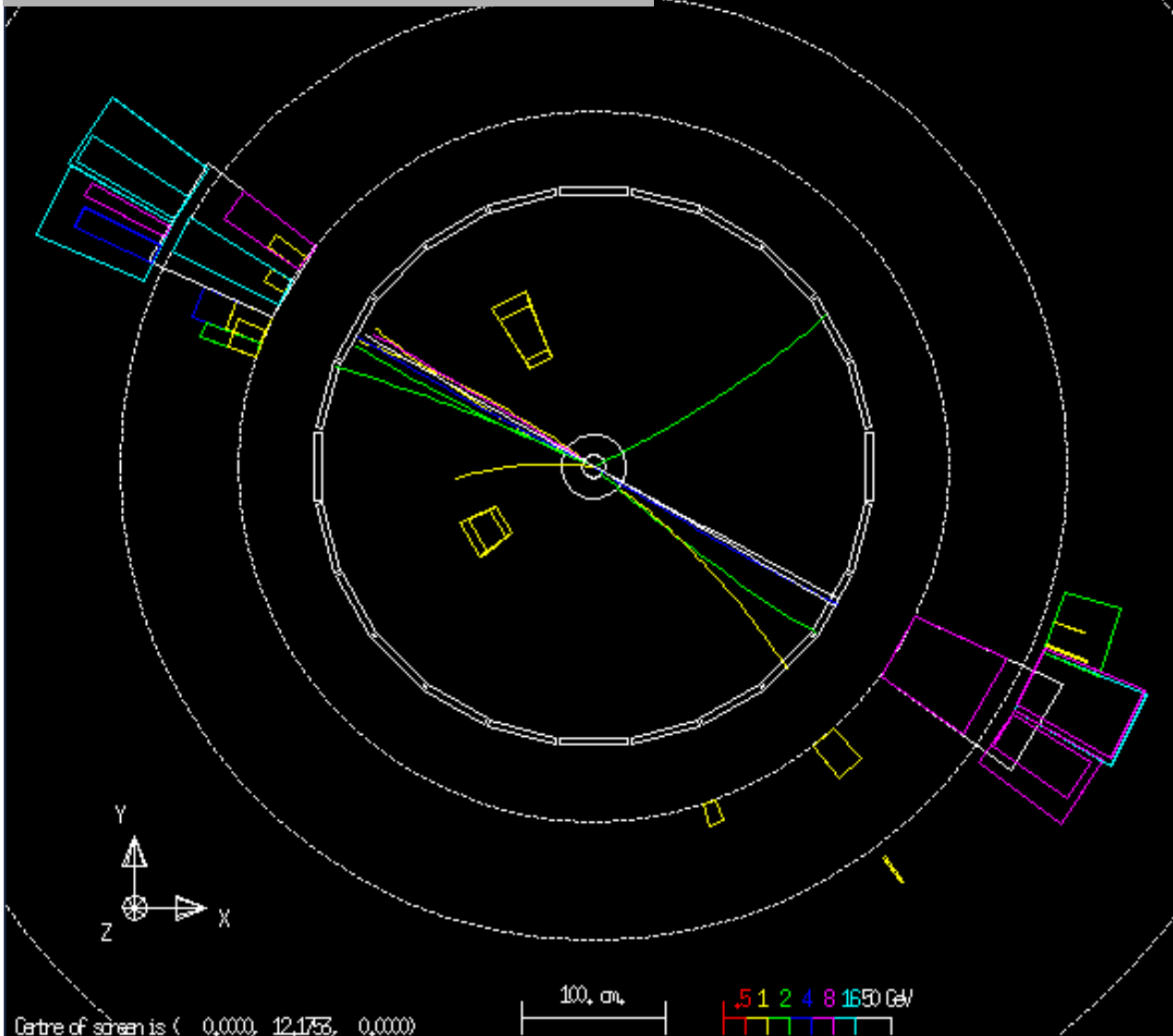


Due tracce che si allontanano lungo la stessa linea di volo e che puntano ciascuna ad un deposito di energia nel calorimetro elettromagnetico.

NB: color-code: tracce/depositi di energia differente sono rappresentate con colori differenti

$Z \rightarrow q\bar{q}$

(11.9) Ecal (N= 32 SumE= 95.1)
(=16 SumE= 39.1) Muon(N= 0)

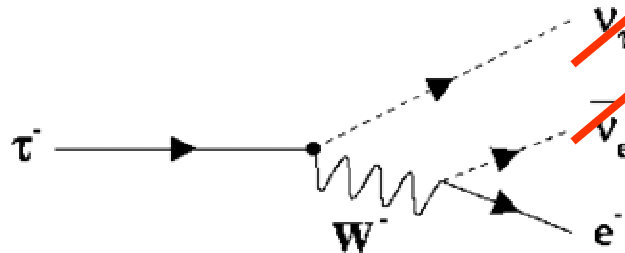


Coppia di "jet" aventi la stessa direzione di volo ma verso opposto. Vedremo perciò un certo numero di tracce cariche ed energia depositata sia nel calorimetro elettromagnetico sia nel calorimetro adronico.

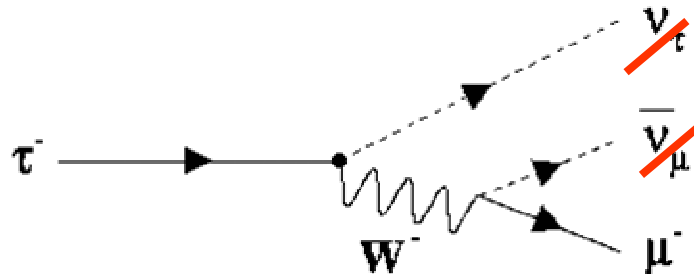
... ed i leptoni τ ?

I leptoni τ “viaggiano” solo una frazione di millimetro dopodichè decadono in altre particelle (non vediamo i τ nel nostro rivelatore!)

- 17% $\tau \rightarrow e \nu \bar{\nu}$



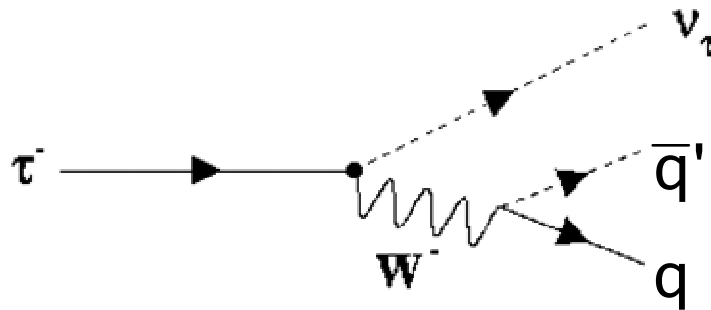
- 17% $\tau \rightarrow \mu \nu \bar{\nu}$



I neutrini non sono rivelati ma portano via con sè una frazione dell'energia del τ

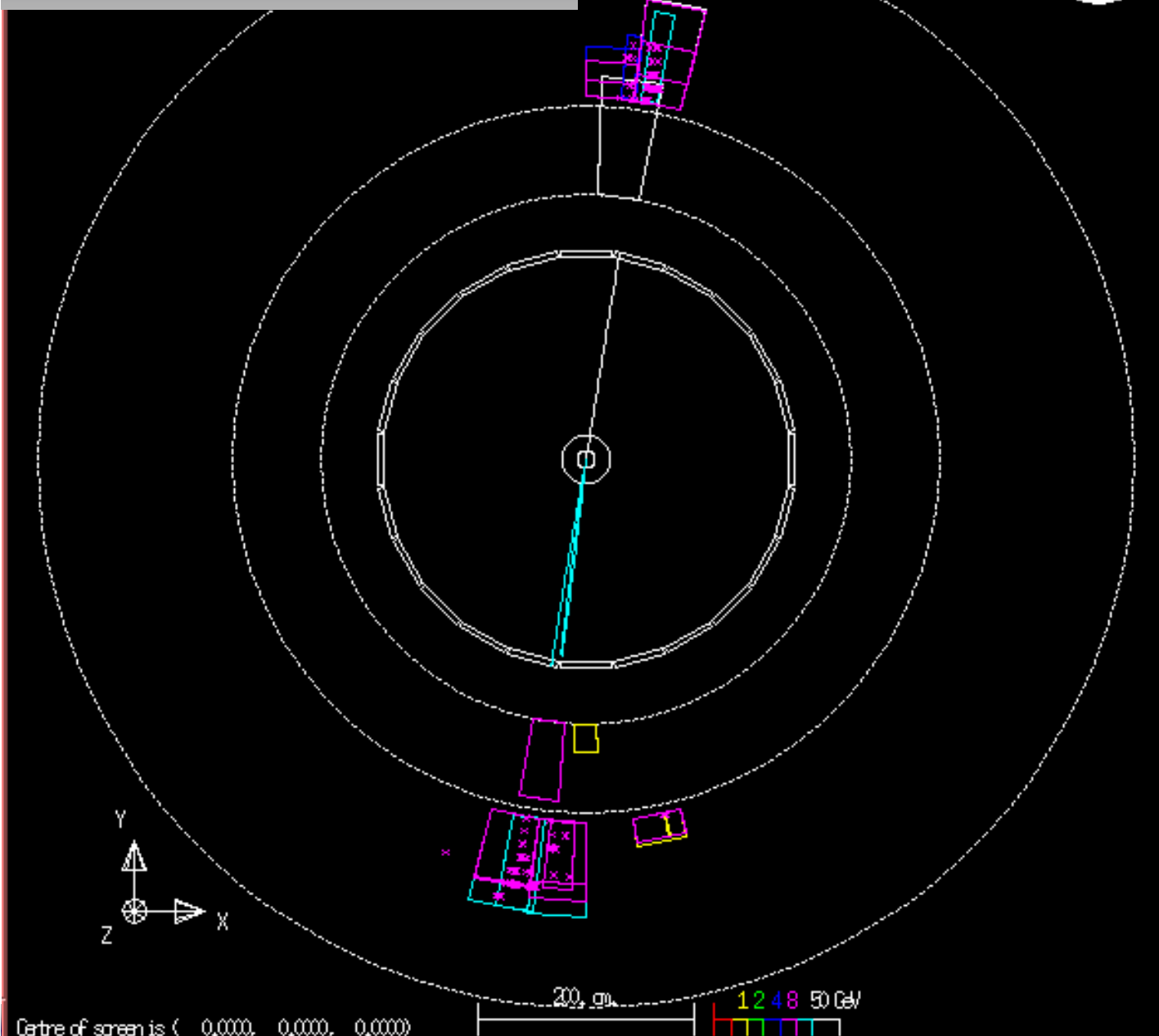
... ed il restante 66%?

- Il restante 66% dei τ decade producendo un neutrino e uno o più adroni
 - 50% 1 adrone carico
 - 16% 3 adroni carichi



$Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$

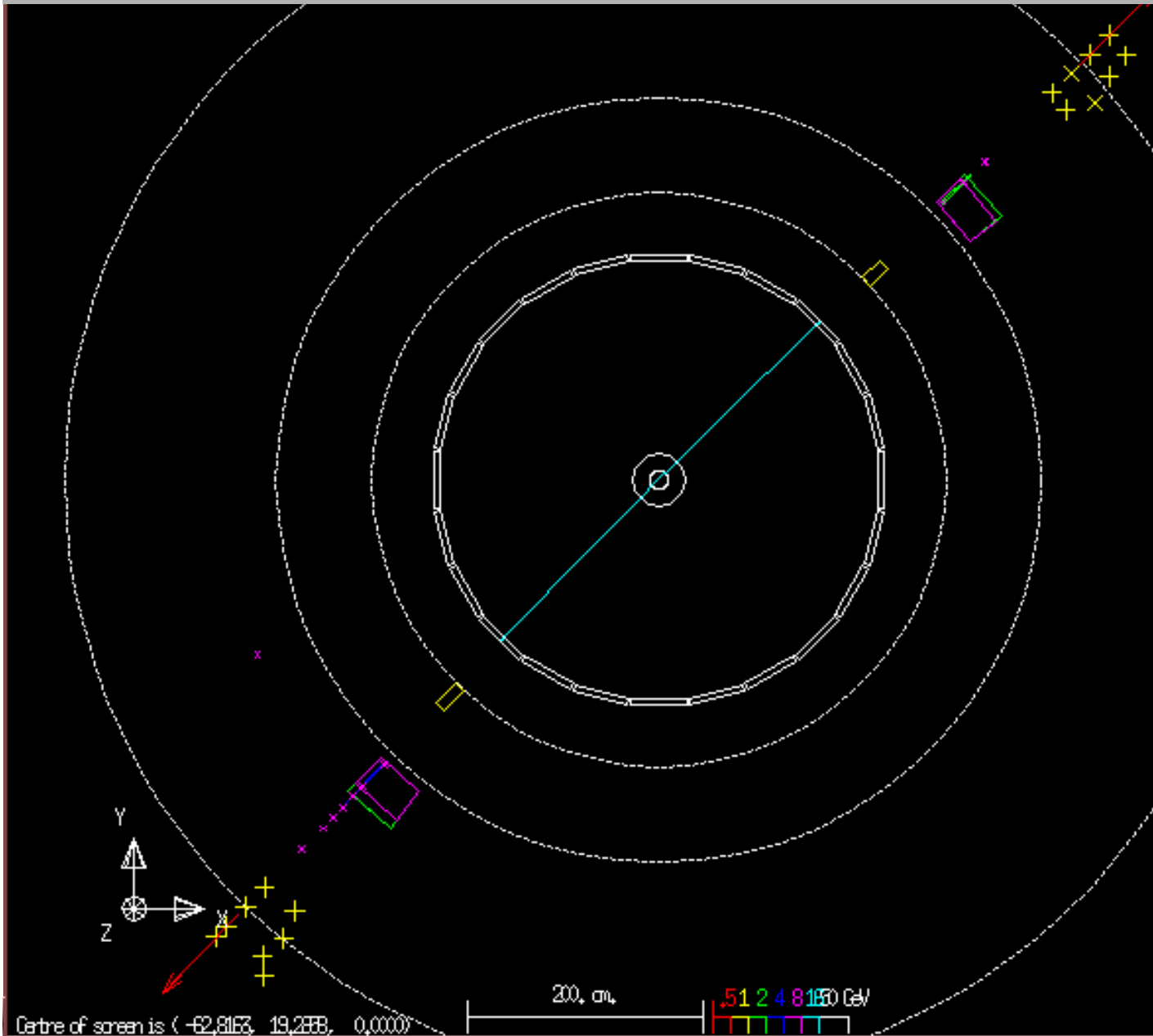
mp=-49.9) Ecal(N= 18 SumE= 49.3)
lcal(N=10 SumE= 49.4) Muon(N= 0)



Centre of screen is (0,000, 0,000, 0,000)

200 cm 12 48 50 GeV

$Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$ oppure $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$?



NB: color-code:
tracce/depositi di
energia differente
sono rappresentate
con colori differenti

Le immagini
rappresentano gli
eventi come sono
“visti” dal rivelatore:
presenza del “brusio”
del rivelatore.

Fate il vostro meglio
per determinare a
quale categoria
l'evento appartiene

Non c'è la soluzione alla
fine del libro!

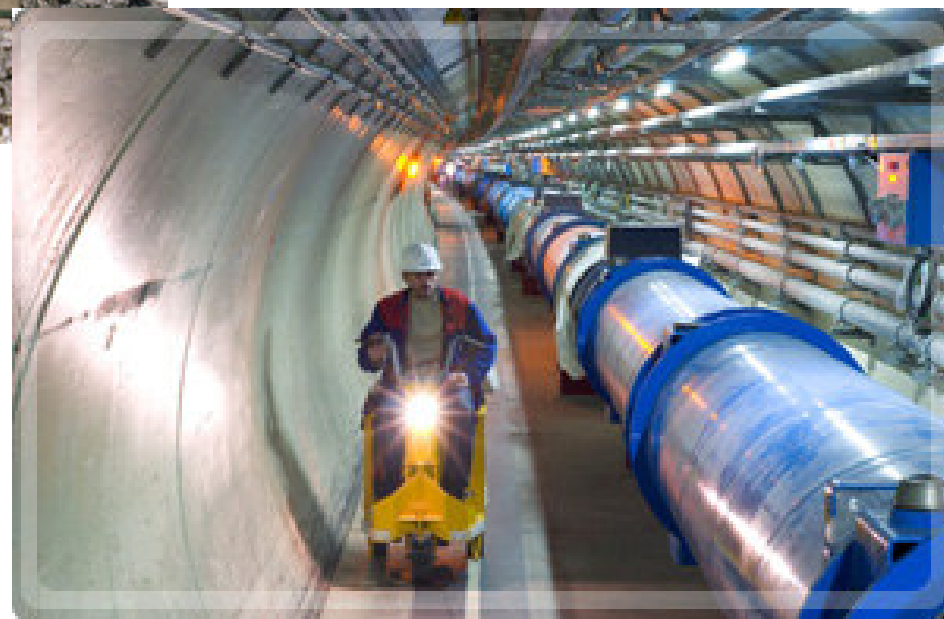
4. ED IL FUTURO?

Il Large Hadron Collider (LHC)



Le collisioni sono p-p

$$E(p_{\text{LHC}}) \approx 150 \times E(e_{\text{LEP}})$$



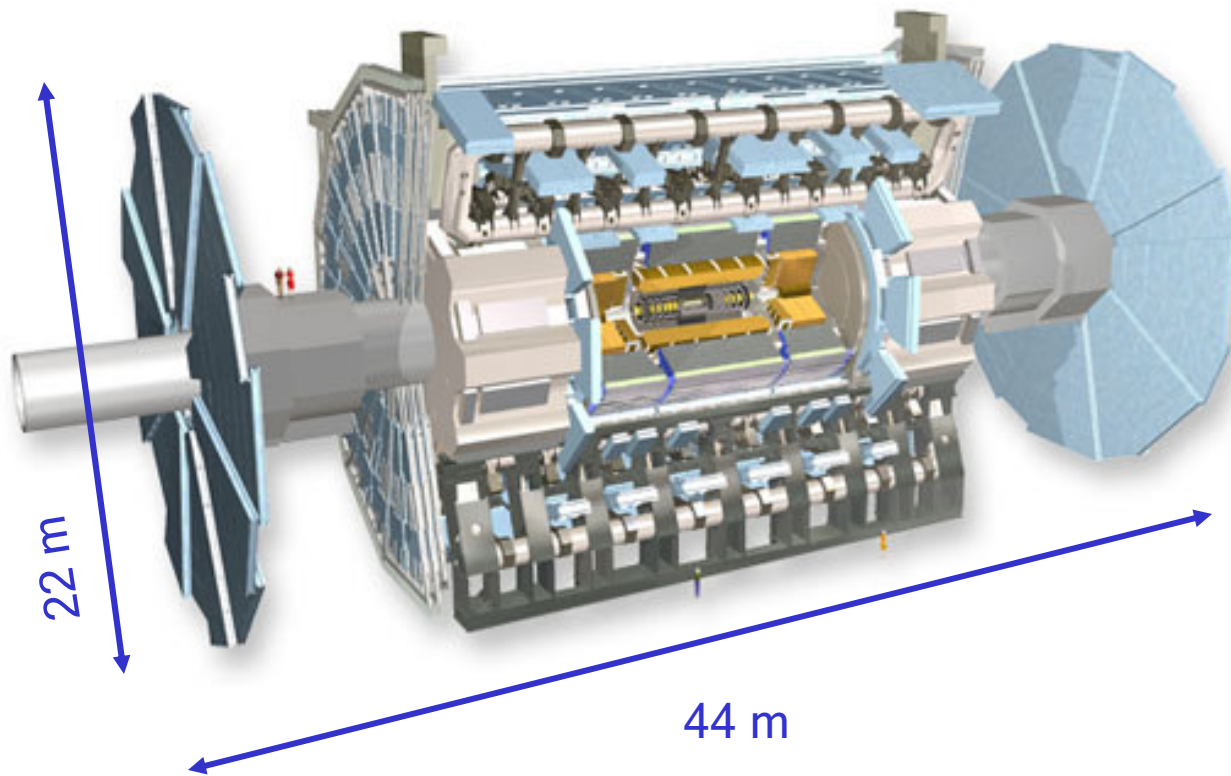
Il Large Hadron Collider (LHC)

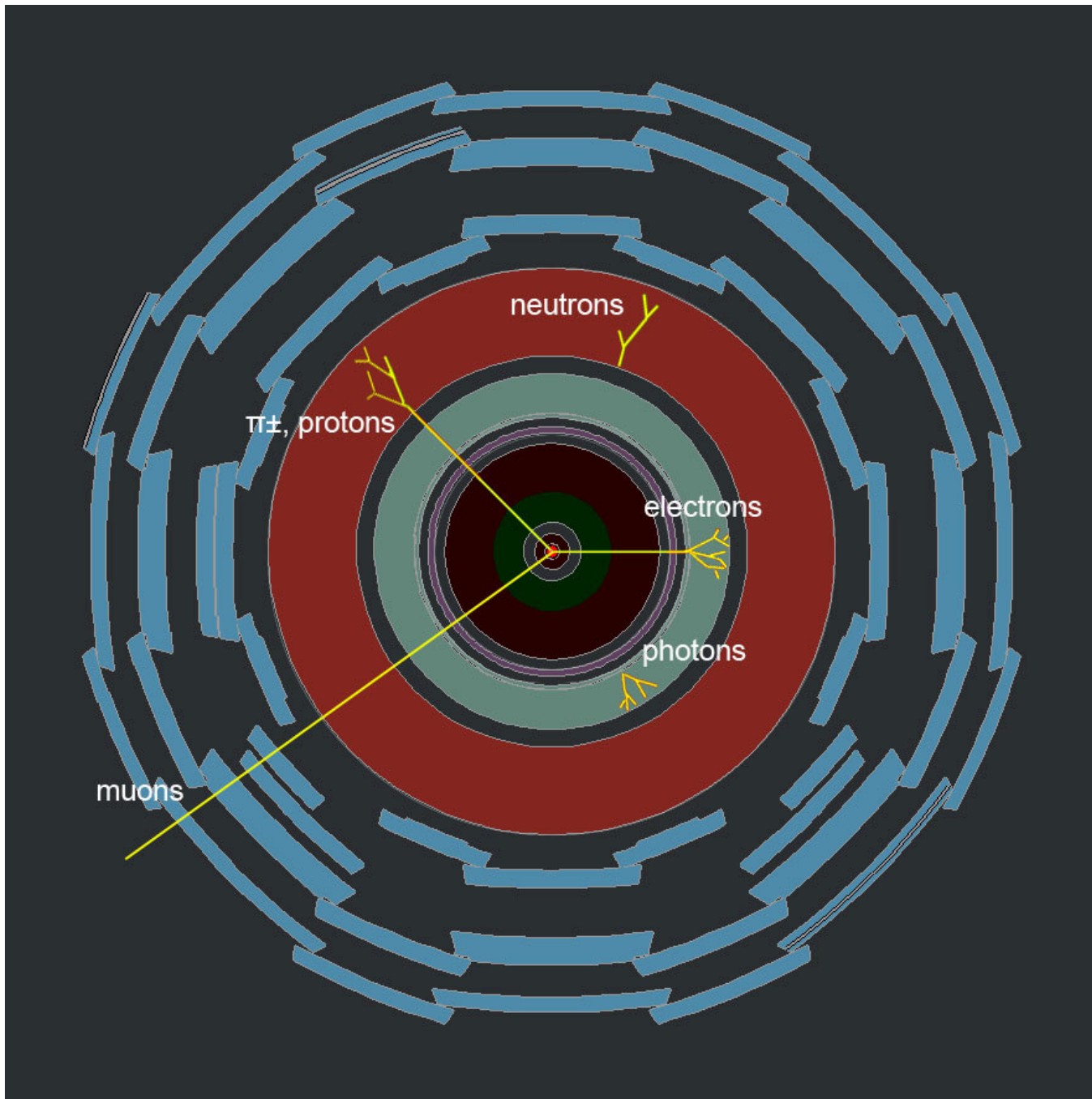
I protoni non sono “elementari” come gli elettroni:

- L'energia a disposizione per creare nuove particelle non è “semplicemente” 150 volte quella che si aveva a disposizione a LEP
- I componenti dei protoni che non partecipano alla collisione “primaria” producono comunque molta attività nei rivelatori

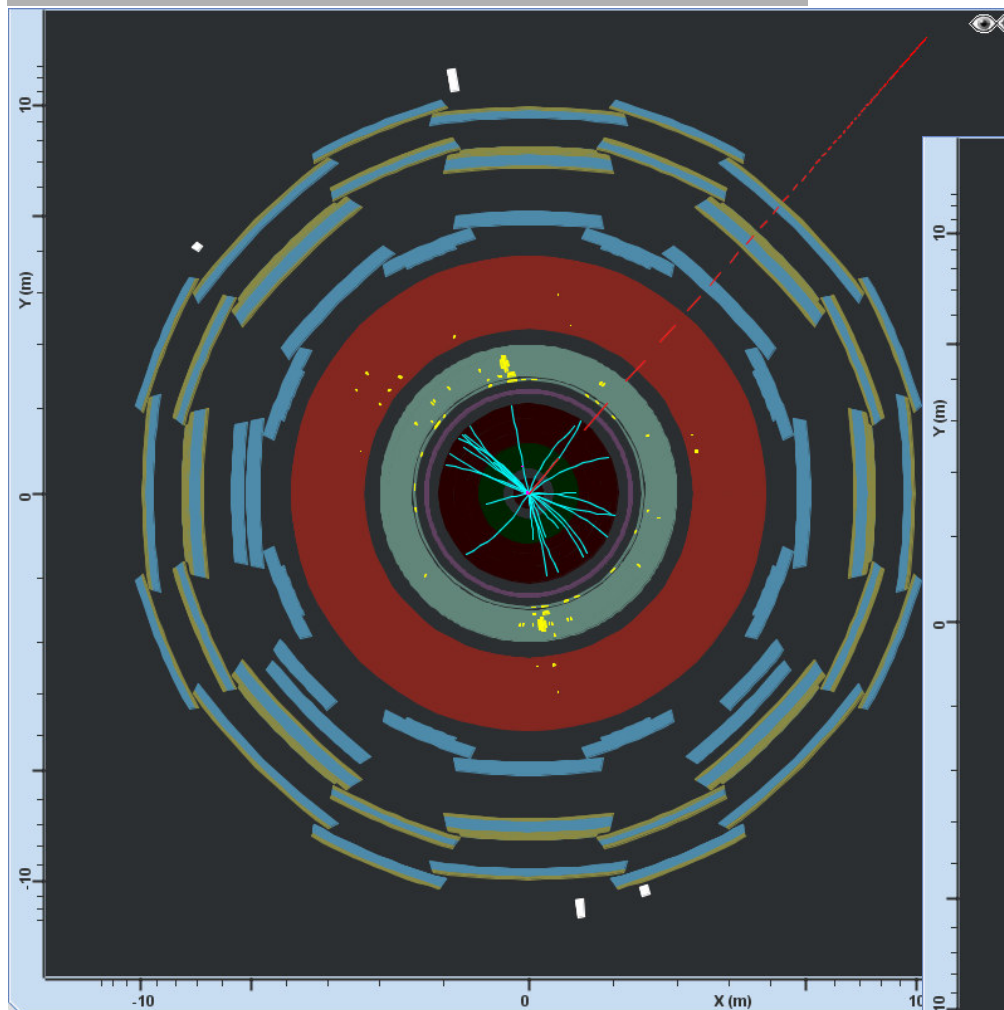
Apparati sperimentali costruiti con lo stesso schema “a cipolla” di quelli usati a LEP ma con dimensioni (e prestazioni) molto maggiori

ATLAS

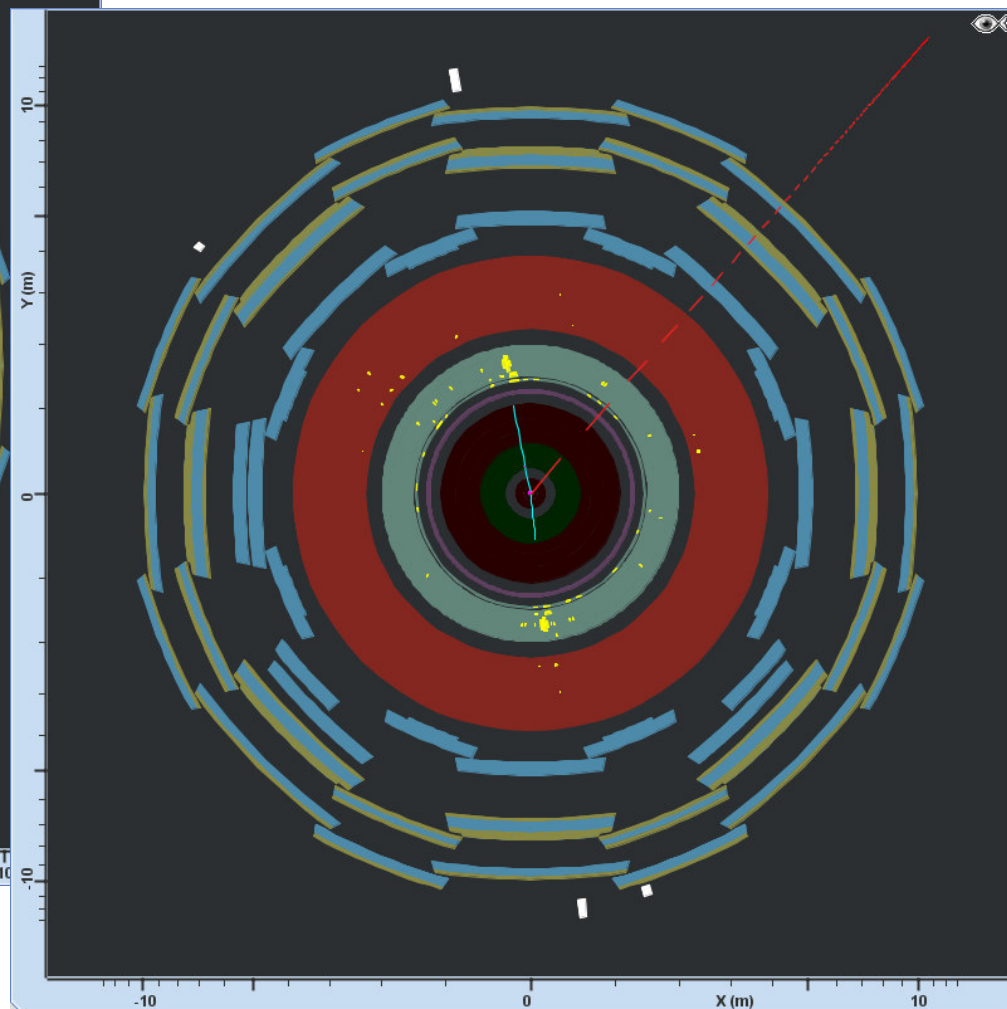




$pp \rightarrow ZX \rightarrow e^+ e^- X$



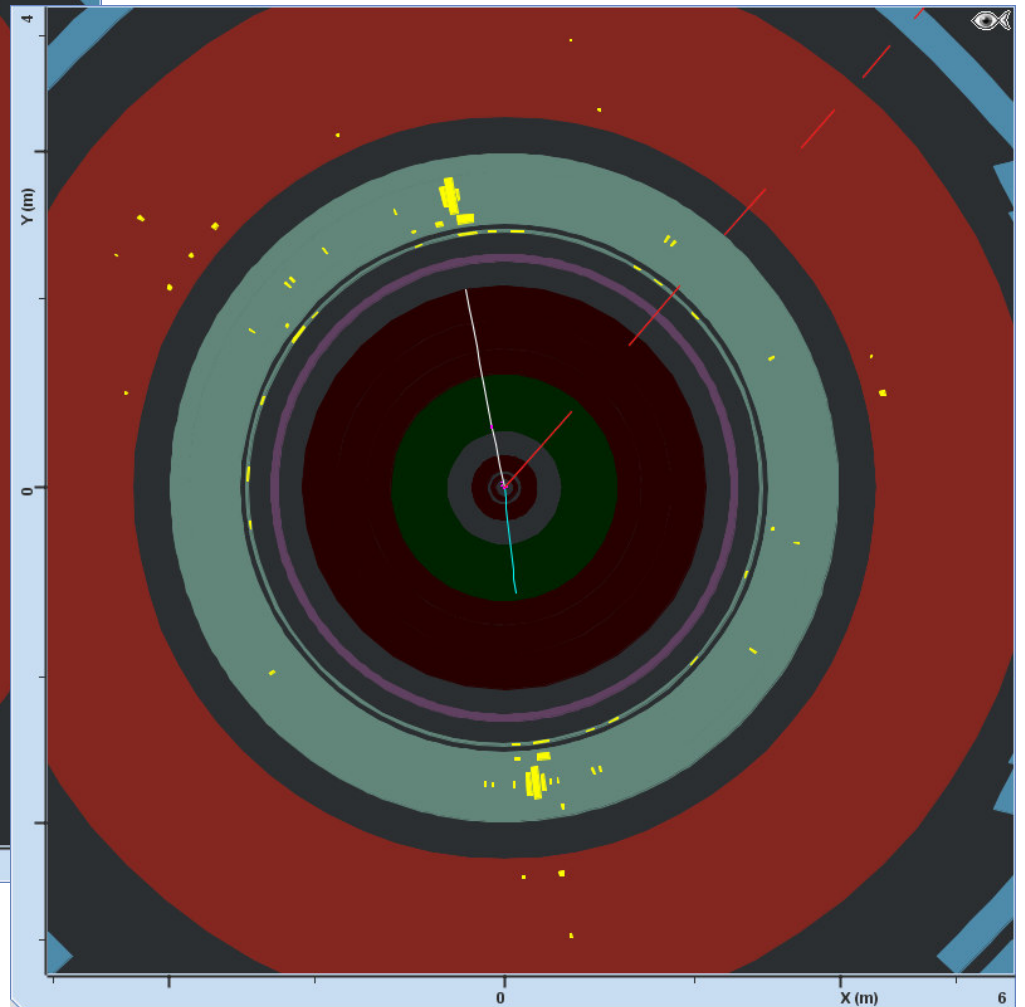
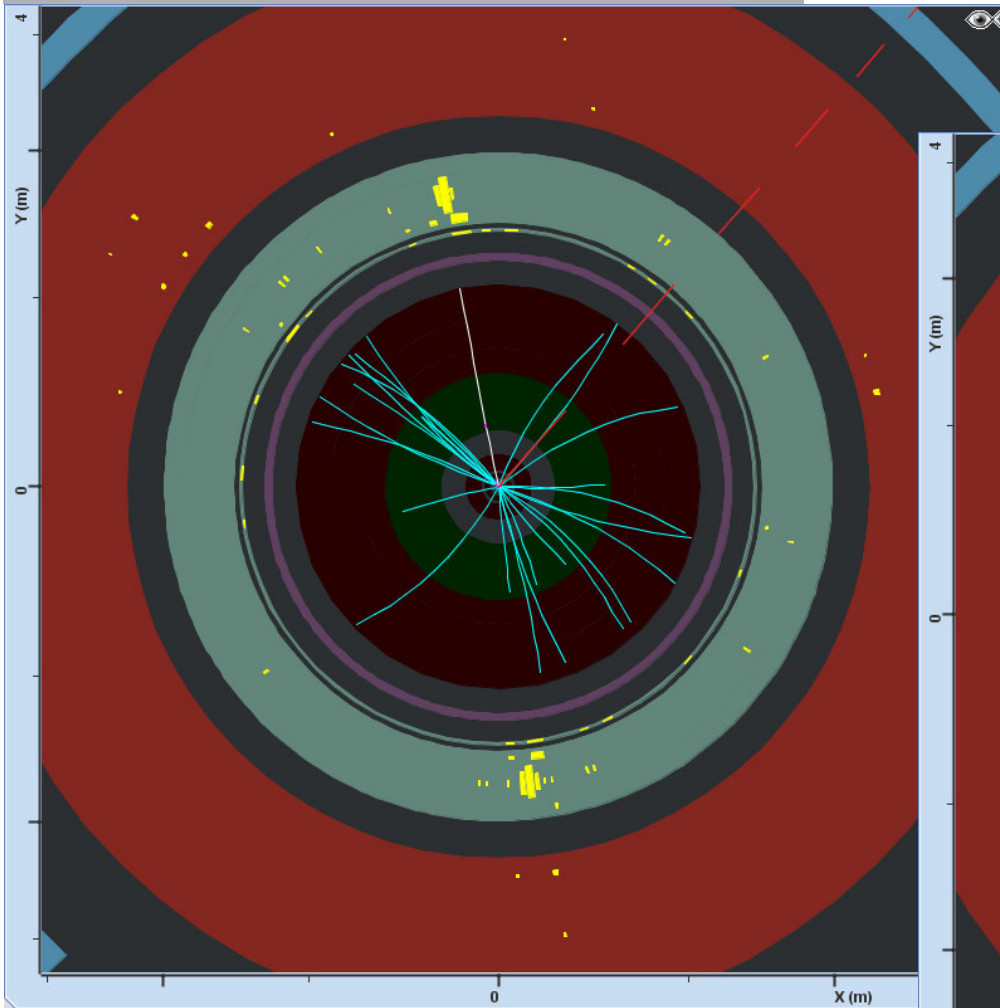
Solo tracce con $p_T > 10$ GeV/c



Tutte le tracce con $p_T > 1$ GeV/c

$pp \rightarrow ZX \rightarrow e^+ e^- X$
Zoomed

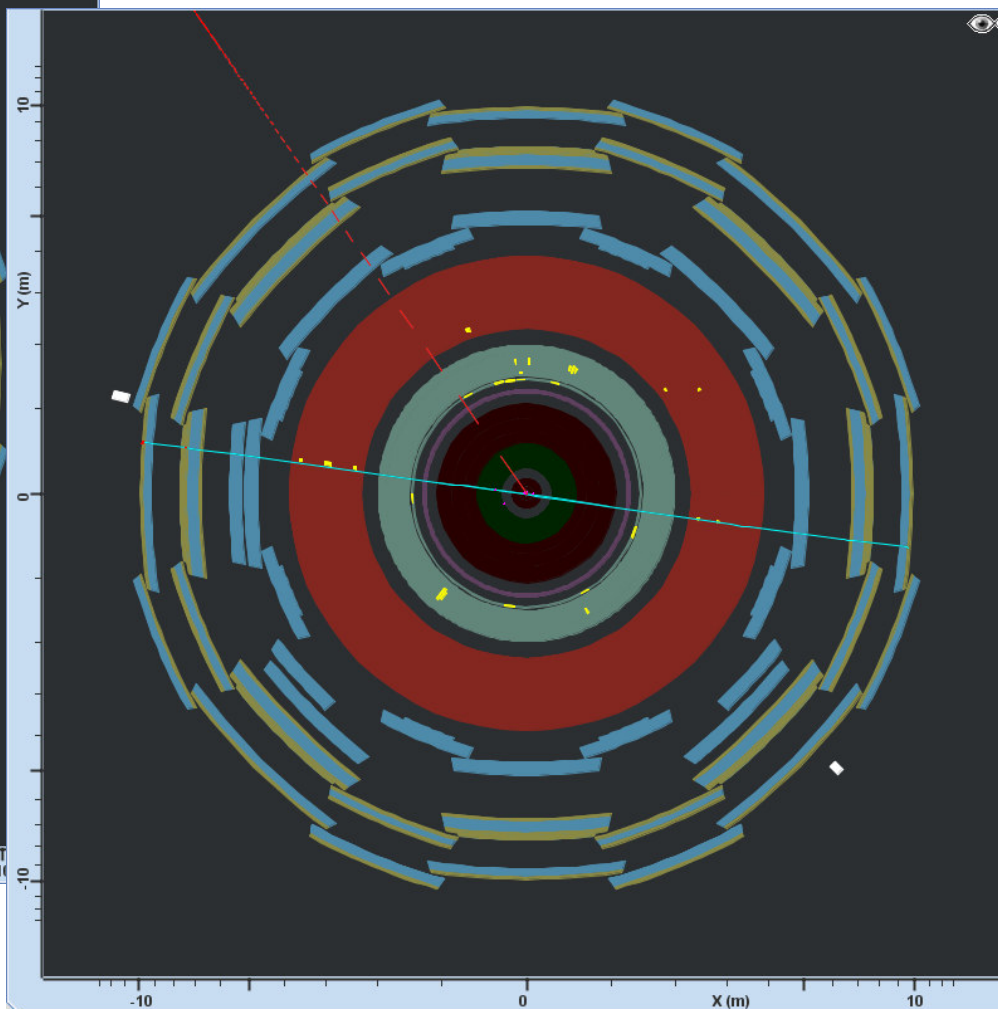
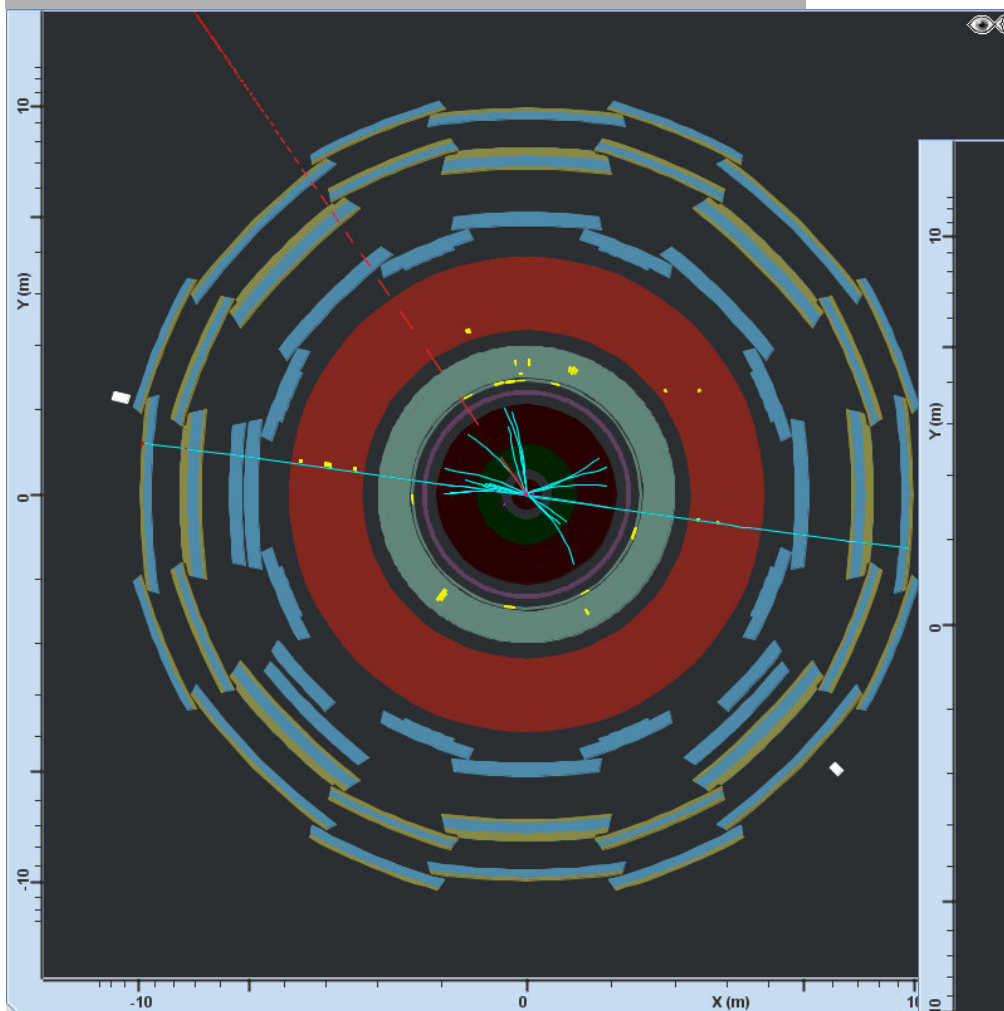
Solo tracce con $p_T > 10$ GeV/c



Tutte le tracce con $p_T > 1$ GeV/c

$$pp \rightarrow ZX \rightarrow \mu^+ \mu^- X$$

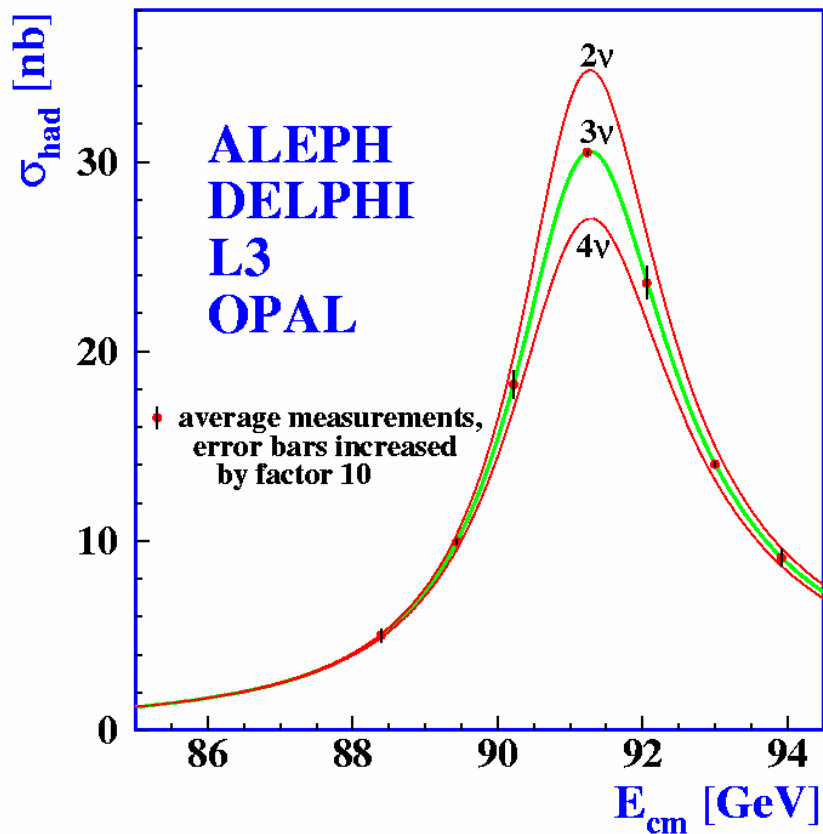
Solo tracce con $p_T > 10 \text{ GeV}/c$



Tutte le tracce con $p_T > 1 \text{ GeV}/c$

EXTRA SLIDES

Massa e larghezza del bosone Z



- Misura di m_Z e $\Gamma_Z = \hbar/\tau_Z$ a partire dalla misura della curva di eccitazione (risonanza) del processo $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ in funzione dell'energia del CM (\sqrt{s})
- Numero di famiglie di neutrini leggeri ($m_\nu < \frac{1}{2}m_Z$)

$$N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$$