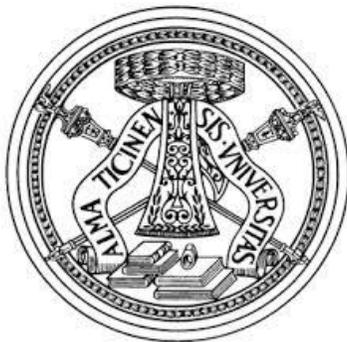




Identificazione di W, Z e H in CMS

Stage 9–19 giugno 2015

Pavia, 15 Giugno 2015



Che cos'è LHC?

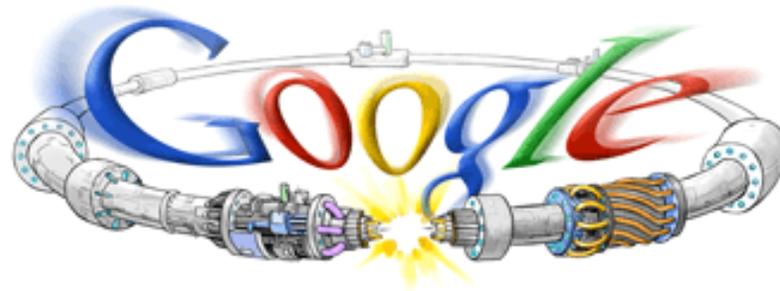
LHC = **L**arge **H**adron **C**ollider → il più grande acceleratore di particelle al mondo

Accelera 2 fasci di protoni ognuno ad un'energia di 7 TeV = 7 Tera eV = 7 000 000 000 000 eV
(1 eV = energia acquisita da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 V)

↓
VELOCITA'



I protoni raggiungono quasi la velocità della luce: circa $c - 10 \text{ km/h}$
($c = 299782 \text{ km/s}$
 $= 1\,080\,000\,000 \text{ km/h}$)



...i parametri più importanti per il funzionamento di LHC...

↓
DENSITA' DI ENERGIA



I protoni hanno altissima densità di energia: $4,6 \cdot 10^{53} \text{ TeV/m}^3$
($7,4 \cdot 10^{46} \text{ J/m}^3$)

Velocità a confronto...

L'uomo più veloce (calcolato sulla breve distanza): **Usain Bolt** → **39,278 km/h**



Fonte:
http://it.wikipedia.org/wiki/Record_di_velocit%C3%A0



Il volatile più veloce in picchiata: **Falco Pellegrino** → **324 km/h**

L'automobile più veloce: **Thrust SuperSonic Car** → **1227,98 km/h**



L'aereo sperimentale più veloce: **Boeing X-43A** → **12144 km/h**



L'oggetto più veloce mai costruito dall'uomo: **Sonda Spaziale Helios II** → **252792 km/h**

I protoni in LHC → **1 079 999 990 km/h**

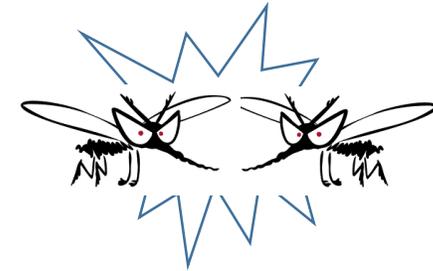


Densità di energia a confronto...

Una **zanzara** pesa 2 mg e vola a 2,4 km/h → la sua energia cinetica è **3 TeV!**

Molto simile a quella dei protoni di LHC

→ ma allora... Se due zanzare si scontrano si ottengono nuove particelle??



→ Ovviamente no!

L'energia è **distribuita su uno spazio molto più grande**: la zanzara occupa uno spazio *1 milione di milioni* di volte quello del protone! Ha densità di energia di circa **10^{41} TeV/m³**

→ Non conta solo l'energia, ma **in quanto spazio viene concentrata!**
Solo con alte densità di energia è possibile produrre **nuove particelle**.



I protoni in LHC → $4,6 \cdot 10^{53}$ TeV/m³

Perchè velocità e densità di energia sono importanti? (1)

Alta velocità → servono grandi campi magnetici → magneti superconduttori

L'accelerazione lungo traiettorie rettilinee richiederebbe percorsi esageratamente lunghi.

→ I protoni devono viaggiare su **percorsi circolari**, altrimenti sarebbe necessario un acceleratore enorme

→ Per mantenerli lungo la traiettoria circolare si usa un **campo magnetico**.

la forza di Lorentz $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ agisce sui protoni mantenendoli su un percorso circolare

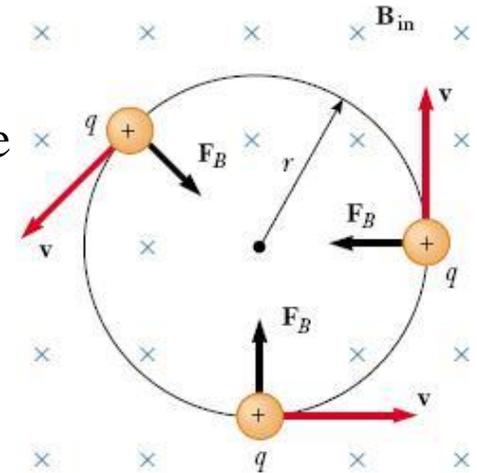
→ Il raggio della traiettoria è $R = \frac{mv}{Bq}$

Più grande è la velocità, più grande è il campo magnetico necessario per mantenere la traiettoria dei protoni!

→ Al massimo della velocità servono circa **8 Tesla = 80'000 Gauss**

Confronta: ✓ il **Sole** ha campo magnetico vicino alla superficie di **1 Gauss**

✓ il campo magnetico usato in medicina per la **risonanza magnetica nucleare** è **1,5 T = 15'000 G**



Perchè **velocità** e **densità di energia** sono importanti? (2)

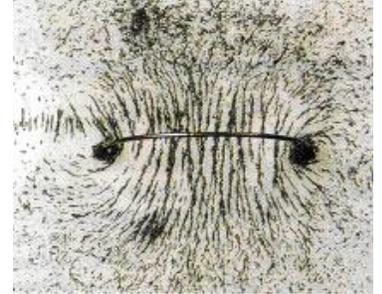
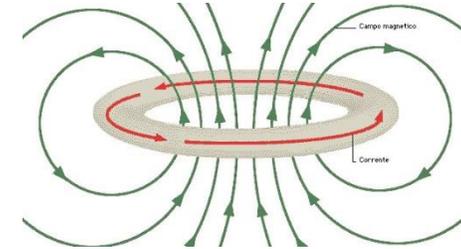
Alta velocità → servono grandi campi magnetici → **magneti superconduttori**

Come si genera il campo magnetico?

Dalla spira...

Spira → filo percorso da corrente lungo un percorso chiuso.

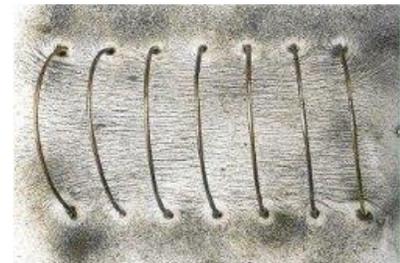
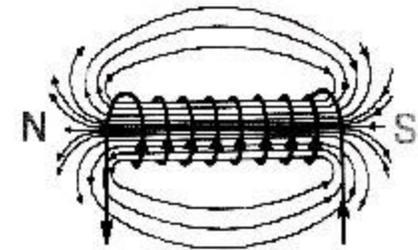
- ✓ Al suo interno è prodotto un **campo magnetico**!
- ✓ L'intensità del campo magnetico cresce con la corrente nel filo.



...alla bobina e gli elettromagneti

Solenoid → tante spire in fila: basta fare **più avvolgimenti** di un filo.

- ✓ Al suo interno c'è un campo magnetico parallelo all'asse del solenoide di intensità crescente con la corrente nel filo.
- ✓ Un **ferro** all'interno del solenoide può rendere il campo magnetico più intenso.



Perchè velocità e densità di energia sono importanti? (2)

Alta velocità → servono grandi campi magnetici → magneti superconduttori



Per ottenere grandi campi magnetici servono grandi correnti



In un normale conduttore, correnti grandi dissipano maggiore energia

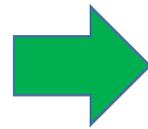
In LHC:

campo di 8 T

→ corrente di quasi 12'000 A

→ un normale conduttore

dissiperebbe troppa potenza solo per mantenere la traiettoria del fascio!



Si usano oltre 1600 magneti superconduttori in lega di niobio e titanio raffreddati alla temperatura di 1,9 K (-271,25 °C) da elio liquido.

La superconduzione

Superconduttori = materiali che sotto una certa temperatura oppongono **resistenza nulla** al passaggio di corrente elettrica.

Alcuni di questi: gallio, alluminio, indio, stagno, mercurio, piombo, niobio
temperature critiche variano da **1,1 K a 9,3 K**.



Caratteristiche fondamentali:

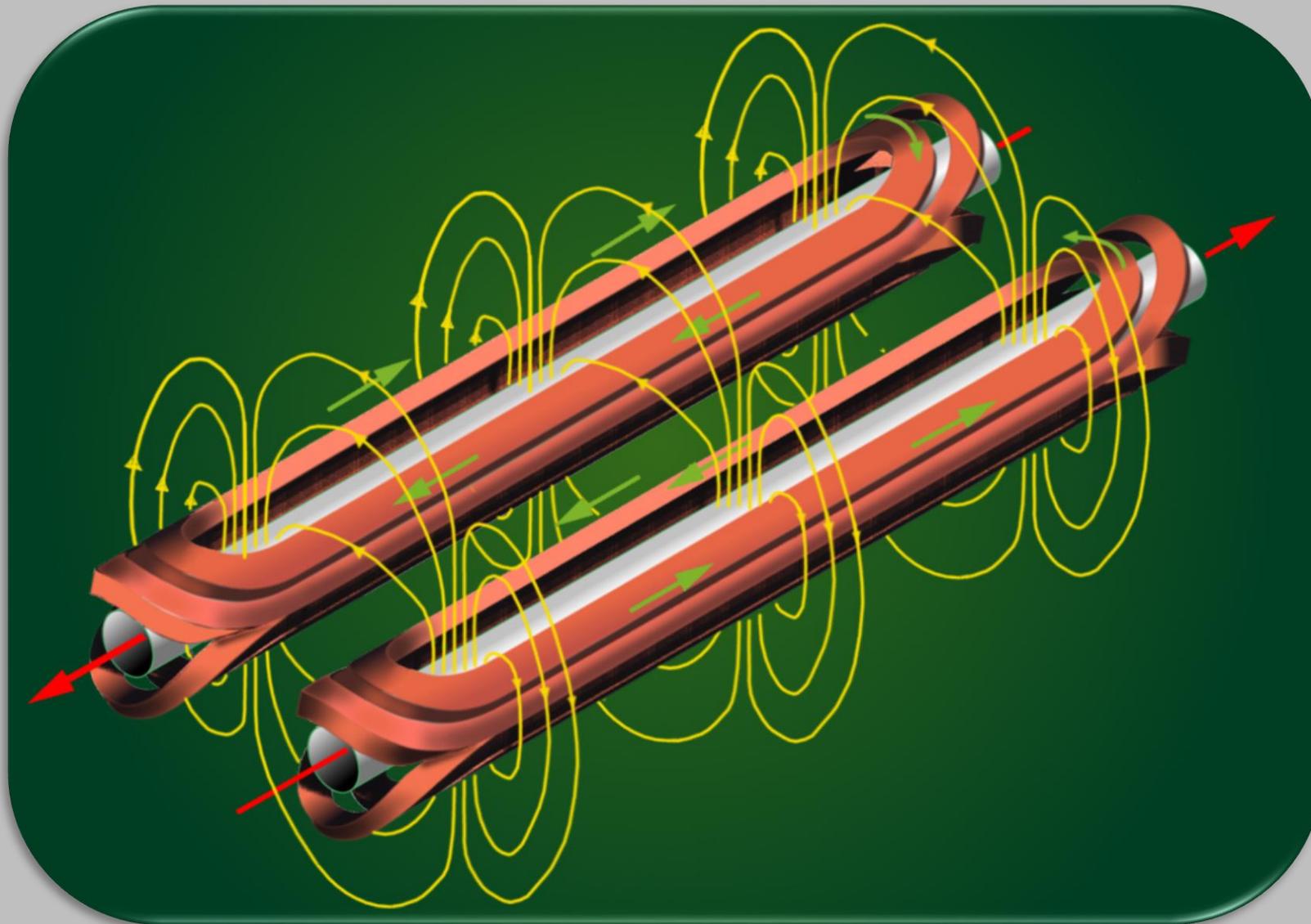
- ✓ la corrente scorre **senza dissipazione di energia** → negli elettromagneti di LHC scorrono fino a 11'850 A.
- ✓ campi magnetici (deboli) non penetrano nel superconduttore

LHC → circonferenza di 27 km, potenza di 50 MW

Se utilizzasse tecnologie classiche → richiederebbe tunnel di 120 km e 1'000 MW di potenza per funzionare



Connessioni superconduttive



Frecce rosse: fascio di protoni
Frecce verdi: corrente elettrica
Linee gialle: campo magnetico

- ✓ 1232 dipoli magnetici per curvare la traiettoria del fascio
- ✓ 15 m di lunghezza
- ✓ peso 35 tonnellate

Bobine a superconduttore usate a LHC per la produzione del campo magnetico.

Perchè velocità e densità di energia sono importanti?

Alta densità di energia → necessaria per produrre nuove particelle

Vediamo degli *scontri* a diverse densità di energia.

Biliardo. Densità di energia delle singole palle:
circa $400 \text{ J/m}^3 = 2,3 \cdot 10^9 \text{ TeV/m}^3$

Prima e dopo l'urto ci sono gli **stessi oggetti**, ma velocità e direzione sono ridistribuite.



Incidente. Densità di energia di un'automobile (1500 kg) a 80 km/h:
circa $7500 \text{ J/m}^3 = 2,9 \cdot 10^{10} \text{ TeV/m}^3$



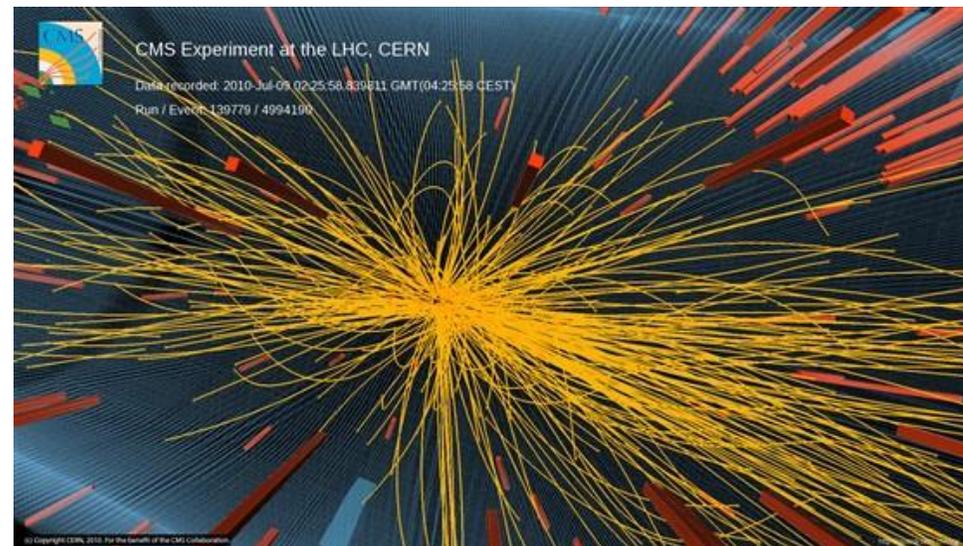
Gli oggetti *si distruggono* nell'urto, ma l'unione dei pezzi rimasti continua a dare le automobili originarie.
In realtà **nulla viene modificato!**

Perchè velocità e densità di energia sono importanti?

Alta densità di energia → necessaria per produrre nuove particelle

Protoni di LHC: $7,4 \cdot 10^{46} \text{ J/m}^3 = 4,6 \cdot 10^{53} \text{ TeV/m}^3$

Prima e dopo l'urto cambia l'identità delle particelle:
quelle prodotte possono essere molto diverse da quelle che si scontrano!



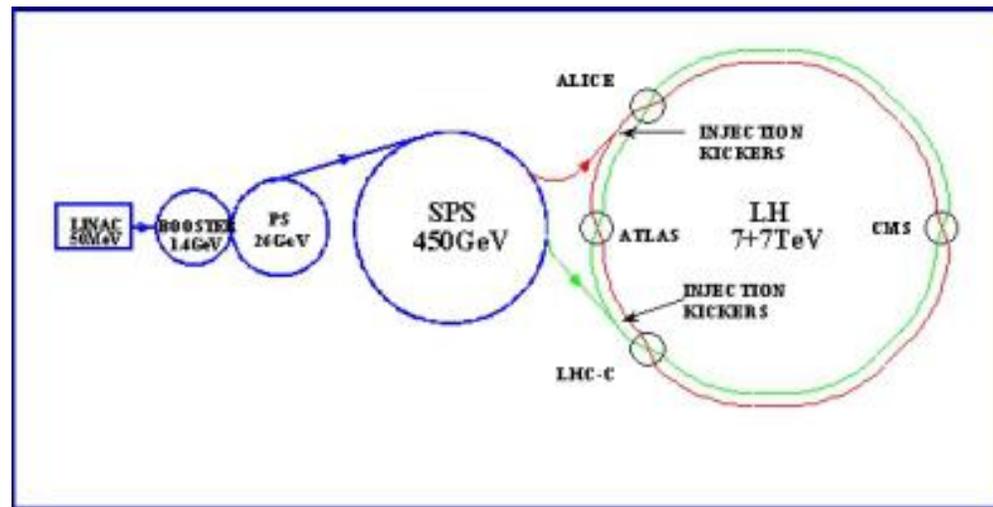
Scontro di due protoni di 7 TeV con produzione di oltre 100 particelle cariche.

...l'accelerazione in sintesi

Accelerazione \longleftrightarrow Campo elettrico ($\vec{F} = e\vec{E}$)

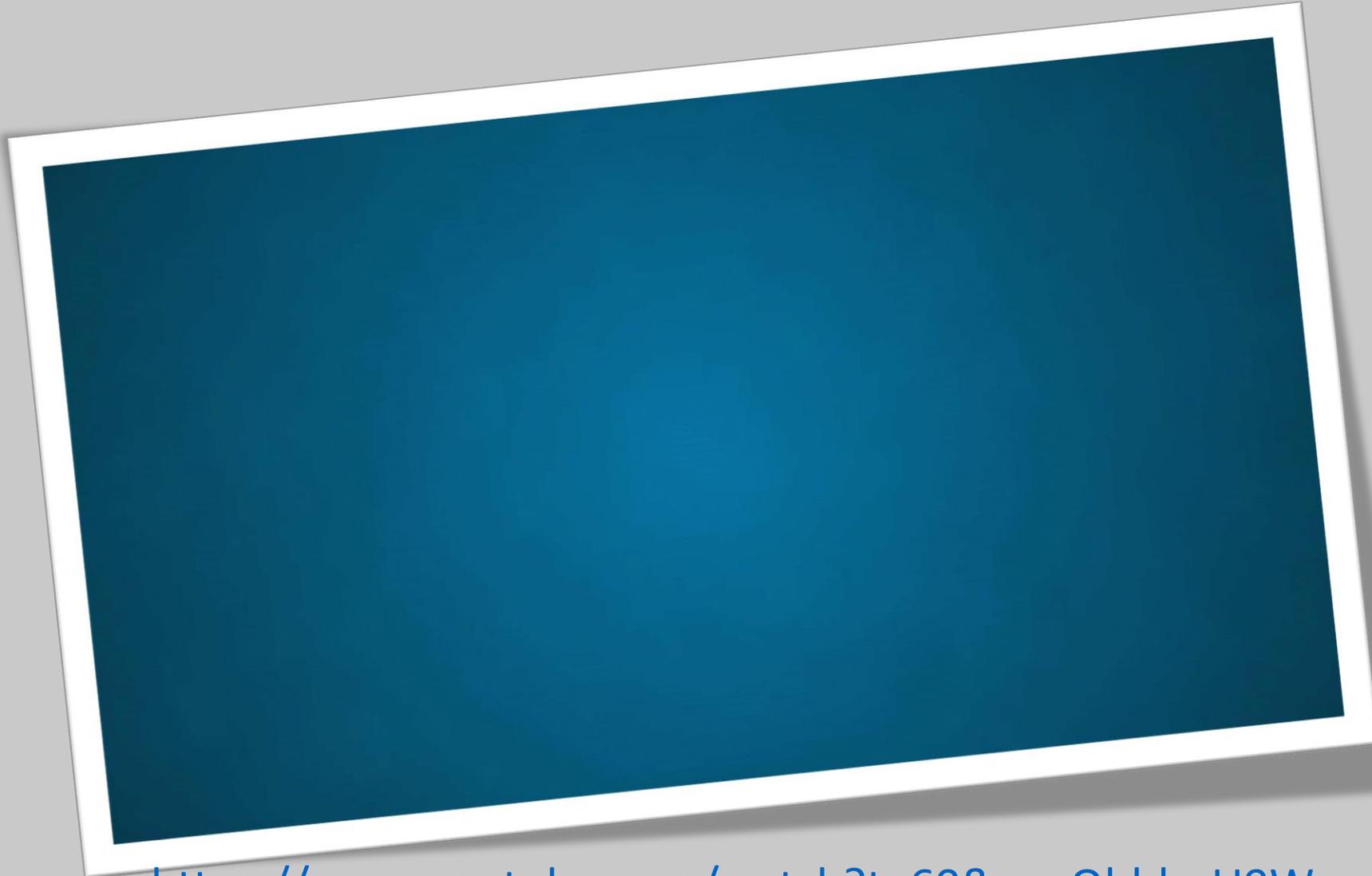
Traiettoria circolare \longleftrightarrow Campo magnetico ($\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$)

Il raggio della
traiettoria è $R = \frac{mv}{Bq}$ \longrightarrow più i protoni diventano veloci,
più è difficile mantenerli su un
anello di piccolo raggio \longrightarrow man mano che aumenta la
velocità si usano anelli di
accelerazione sempre più
grandi



Le fasi di accelerazione

Fase 1...



1. Acceleratore Lineare (LINAC 2)

- vengono strappati elettroni ad atomi di **idrogeno producendo protoni**;
- ottenute particelle positive, possono essere **accelerate** da un campo elettrico.

In uscita. *un terzo della velocità della luce*

<https://www.youtube.com/watch?t=60&v=pQhbhpU9Wrg>

Le fasi di accelerazione

...Fase 2...

2. BOOSTER

Circonferenza 157 m

- ogni pacchetto è diviso in 4;
- ciascuno è accelerato in uno dei 4 anelli del booster;
- i pacchetti sono accelerati e «compressi»;
- sono infine ricomposti in un unico pacchetto.

In uscita: *91,6% della velocità della luce*

15 Giugno 2015

Stage 9-19 Giugno 2015

Le fasi di accelerazione

...Fase 3...

3. PROTON SYNCHROTRON

Circonferenza 628 m

Tempo nel PS: 1,2 secondi

Si raggiunge il **punto di transizione**: i protoni sono **prossimi alla velocità della luce** → l'energia fornita dal campo elettrico ai protoni non provoca più un aumento di velocità, ma un **aumento della massa**.

Visto che non possono andare più veloci, **diventano più pesanti!**

*In uscita: 99,9% della velocità della luce,
25 volte più pesanti rispetto alla massa a riposo*

Le fasi di accelerazione

...Fase 4...

4. SUPER PROTON SYNCHROTRON Circonferenza 7 km

Riceve in ingresso protoni con 25 GeV di energia e li accelera fino a 450 GeV.

15 Giugno 2015

Stage 9-19 Giugno 2015

Le fasi di accelerazione

...Fase 5...

5. LHC (Large Hadron Collider) Circonferenza 27 km sottoterra

- 2 circuiti → protoni in direzioni opposte;
- i fasci si incrociano in 4 detector caverns → avviene la collisione, i rivelatori tracciano i frammenti della collisione avvenuta;
- 30 minuti per inserire 2832 pacchetti;
- ciascun pacchetto è lungo 30 cm, ha dimensione trasversa di 16 micron nel punto di collisione;
- Pacchetti distano tra loro 7,5 m (o 25 ns);
- ciascuno contenente $1,15 \cdot 10^{11}$ protoni.

Le fasi di accelerazione

...VELOCITA' MASSIMA!

quasi alla velocità della luce!

*in **un secondo** oltre **11 000 giri!***

***7 000 volte più pesanti** rispetto alla massa a riposo!*

*il campo magnetico necessario per mantenere la traiettoria è così grande da richiedere **12 000 A** negli elettromagneti!*

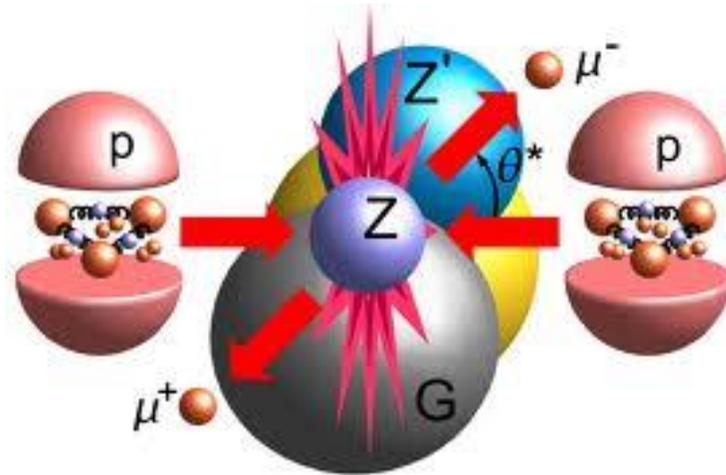
15 Giugno 2015

Stage 9-19 Giugno 2015

I due fasci di protoni che si muovono in direzione opposta si scontrano
in alcuni punti lungo l'anello



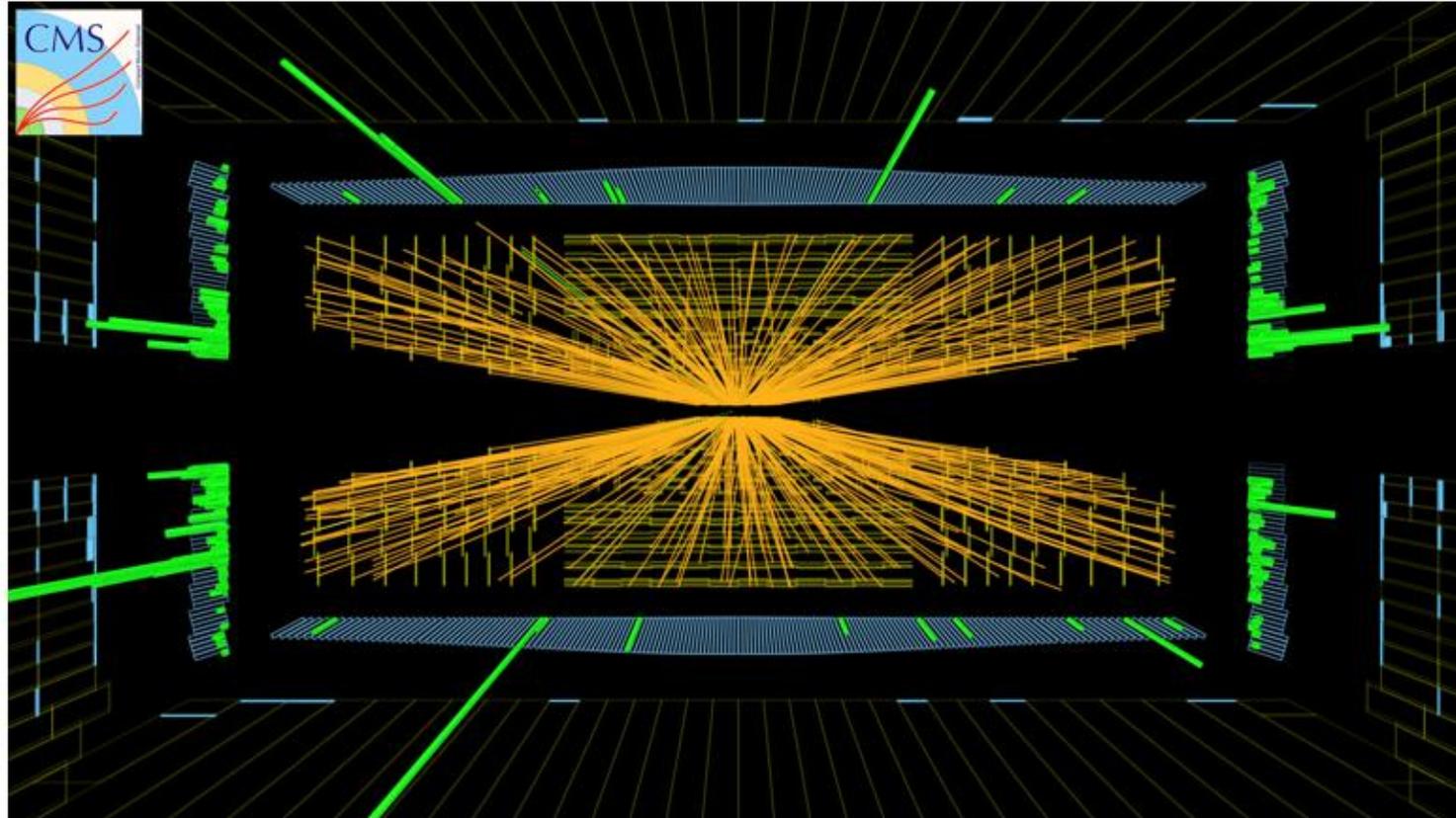
Nelle collisioni vengono prodotte nuove
particelle



Considerando che in LHC:

- Ci sono 2 Fasci di protoni da 7 TeV
- Ogni fascio è composto da 2832 «pacchetti» di protoni
- Ogni «pacchetto» contiene 10^{11} protoni
- Si hanno 40 000 000 interazioni al secondo

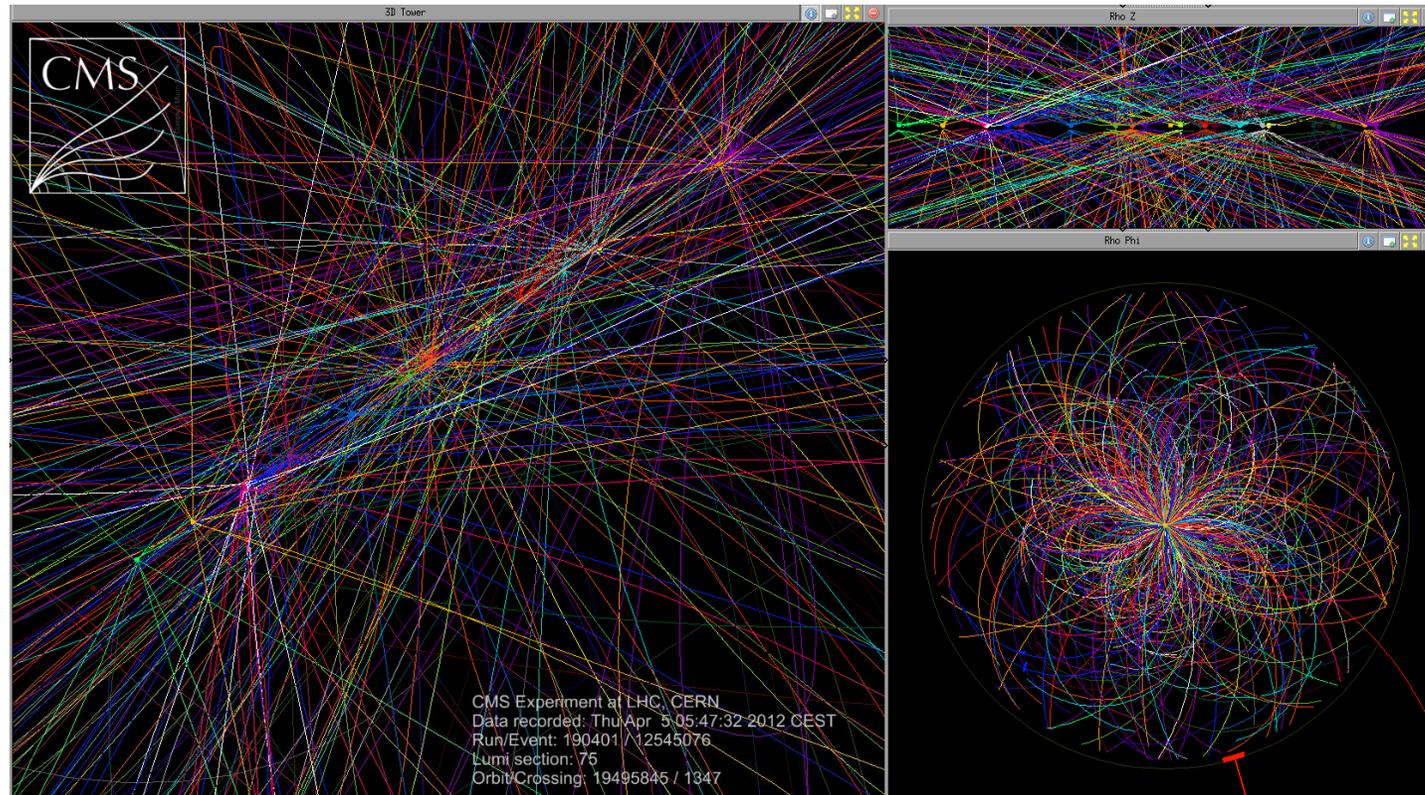
→ La situazione realistica diventa



Considerando che in LHC:

- Ci sono 2 Fasci di protoni da **7 TeV**
- Ogni fascio è composto da **2832 «pacchetti»** di protoni
- Ogni «pacchetto» contiene **10^{11} protoni**
- Si hanno **40 000 000 interazioni al secondo**

→ La situazione realistica diventa



Come si fa a capire cosa sta succedendo?



Nei punti in cui i due fasci di protoni si scontrano sono posizionati dei rivelatori di particelle

Il loro ruolo è quello di identificare le particelle e misurare la loro energia e direzione



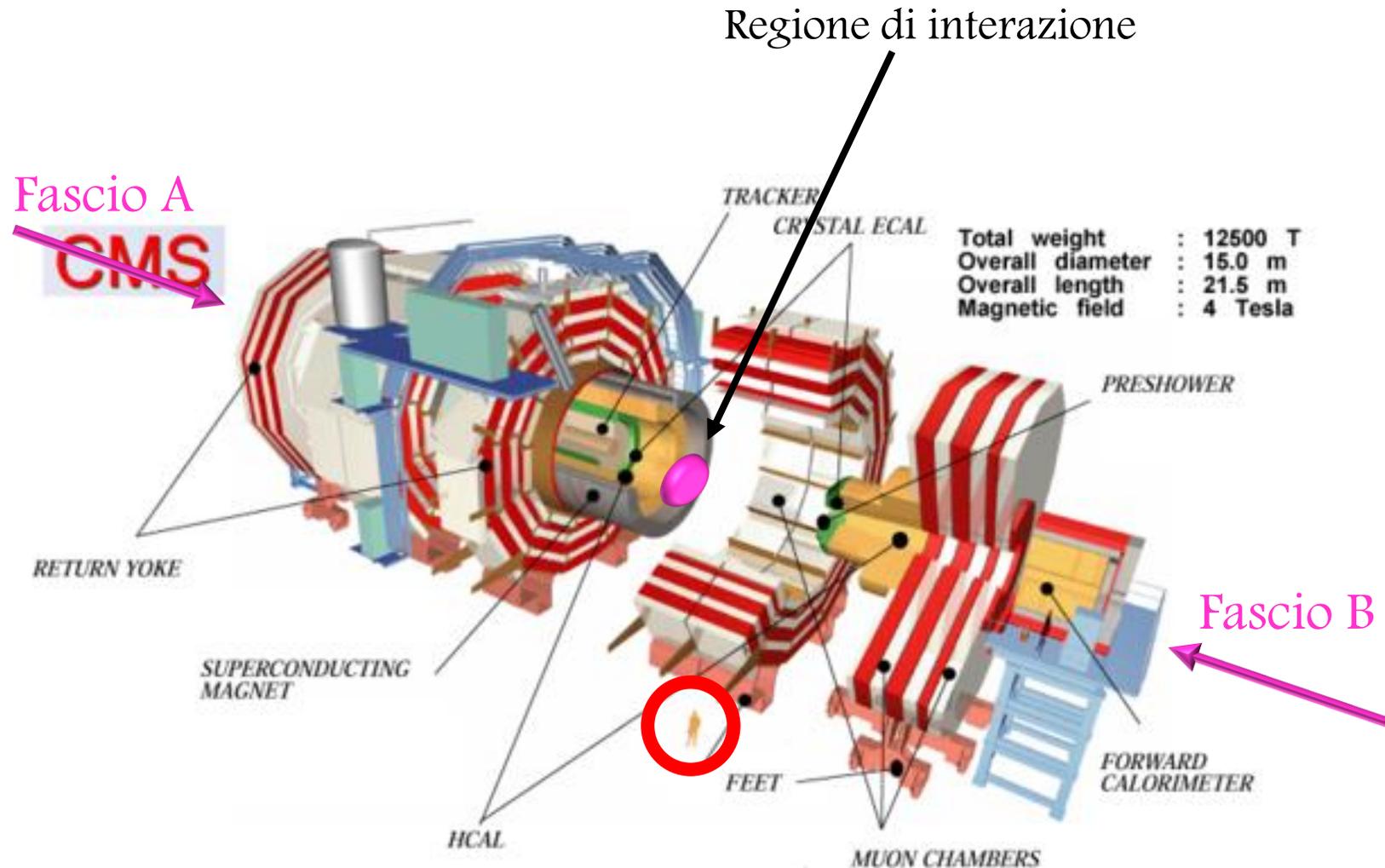
Oggi cercheremo di capire come funziona l'esperimento **CMS** e di analizzare alcuni dei dati che ha raccolto

CMS = Compact Muon Solenoid

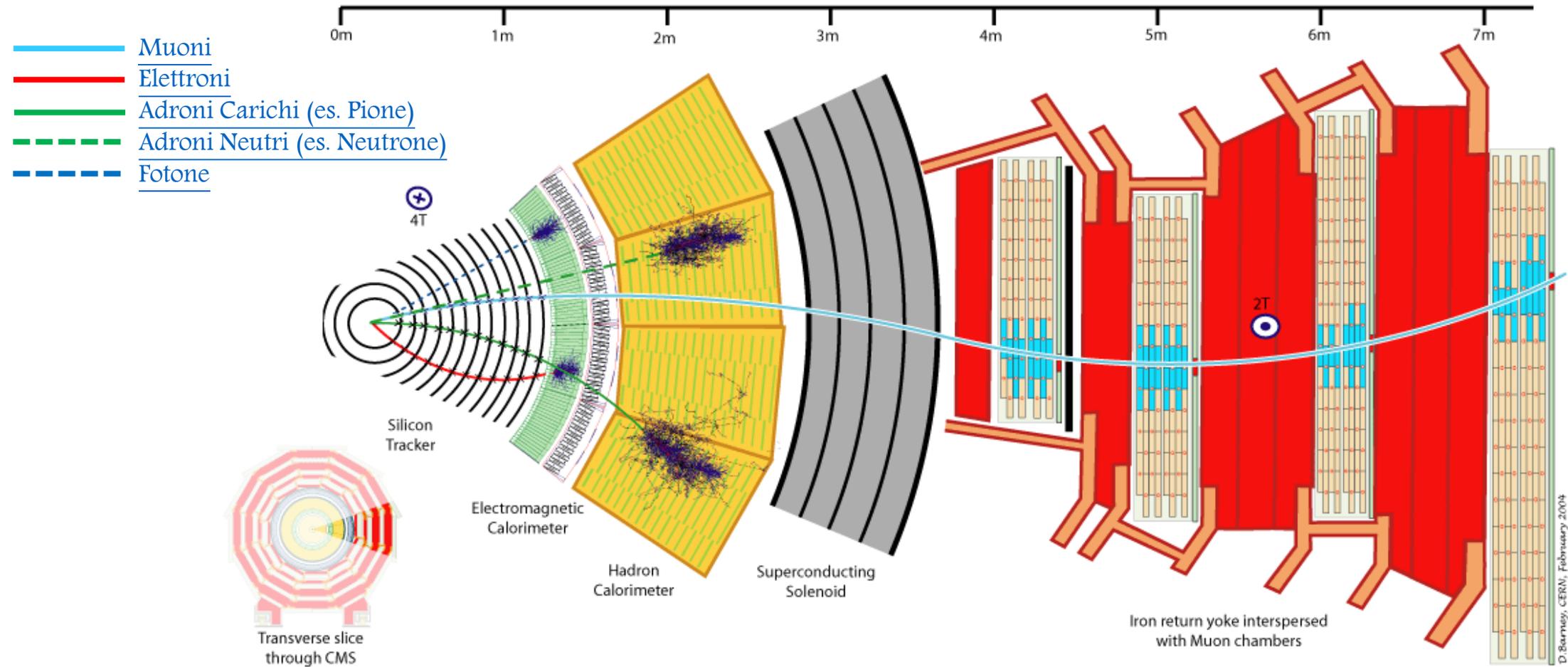
Compact → rivelatore compatto per rivelare le particelle emesse in ogni direzione, senza lasciare zone scoperte

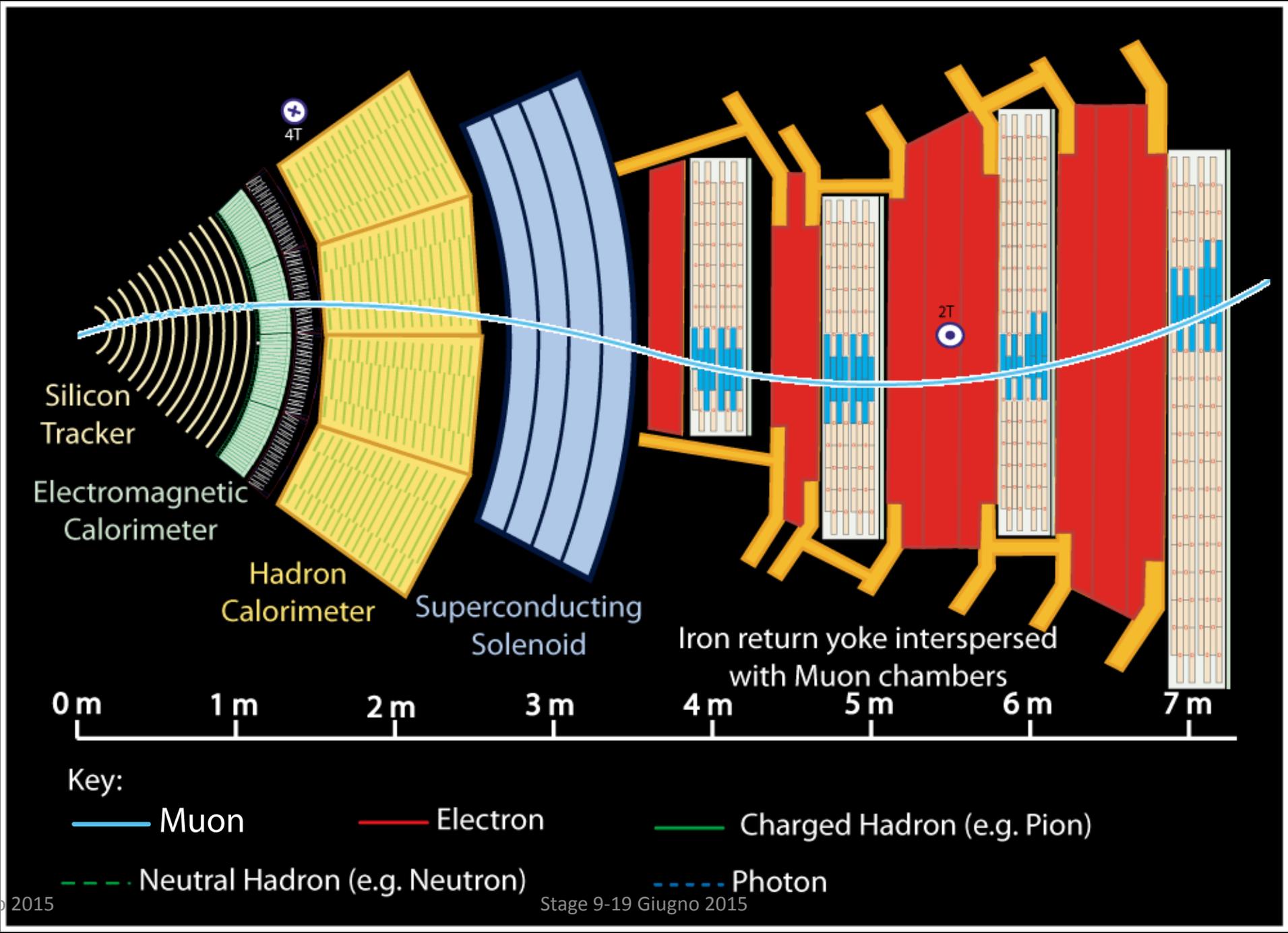
Muon → la particella più importante per la fisica di CMS è il muone

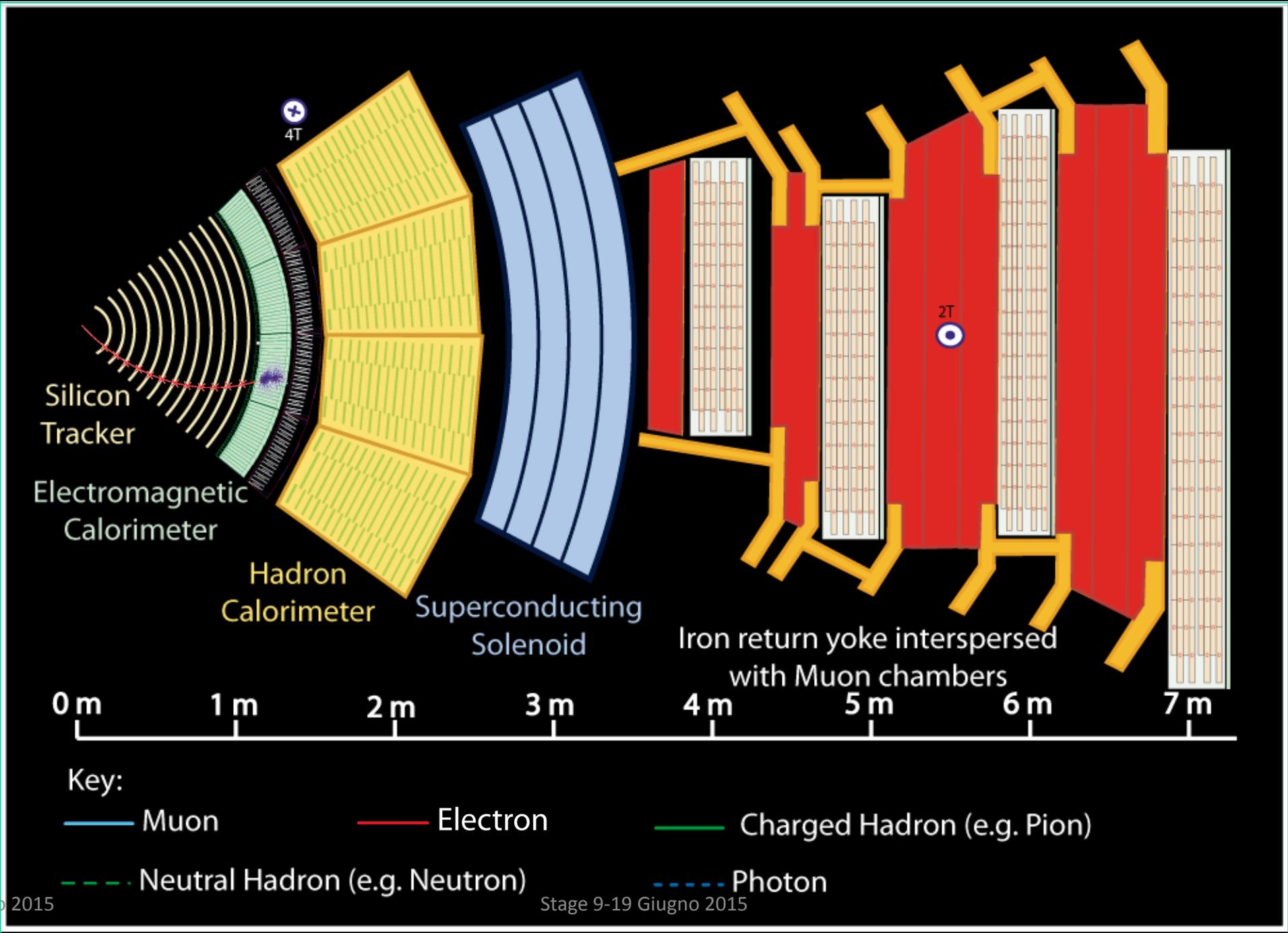
Solenoid → il campo magnetico di 4 T è solenoidale

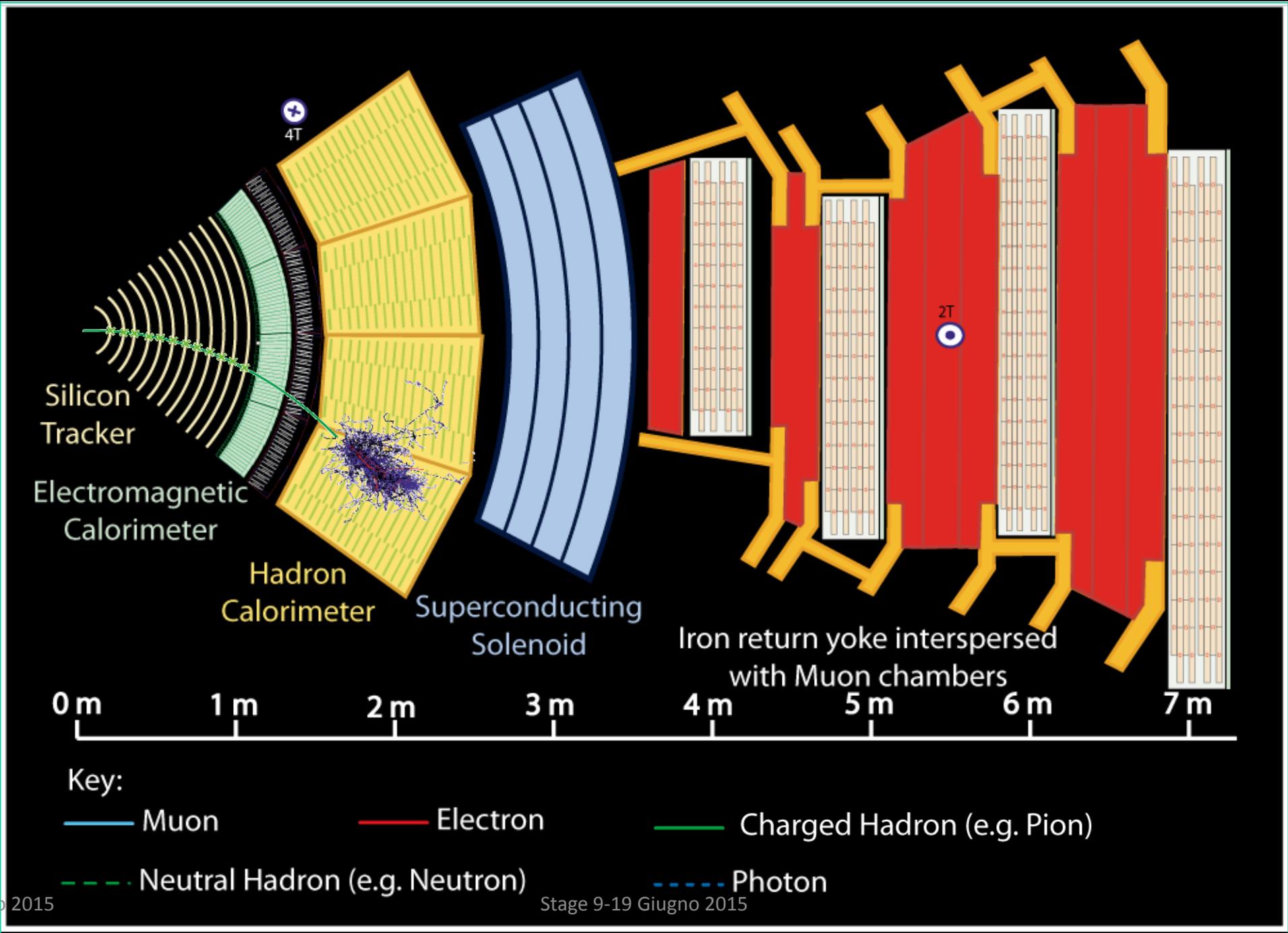


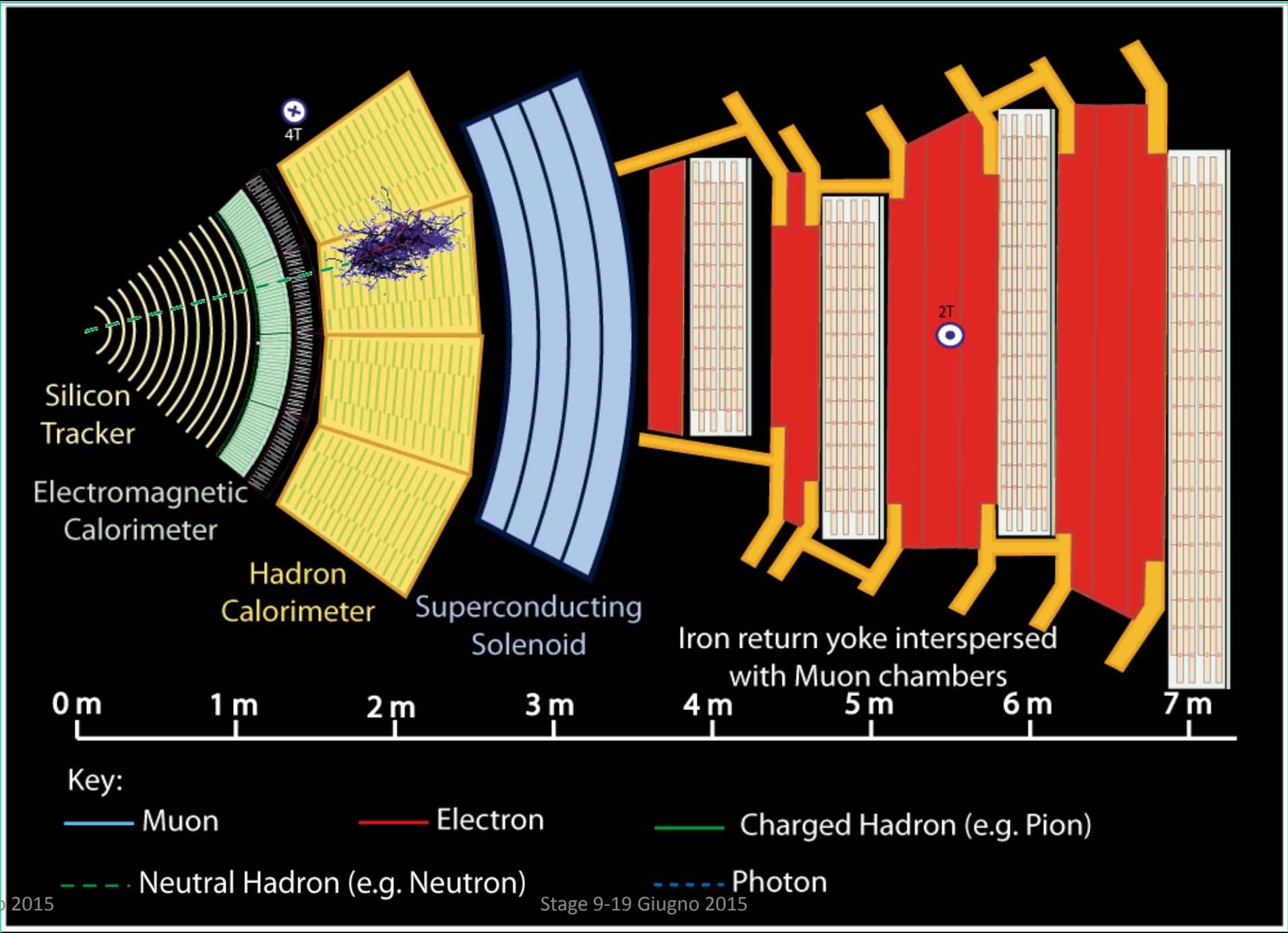
Come è fatto CMS?

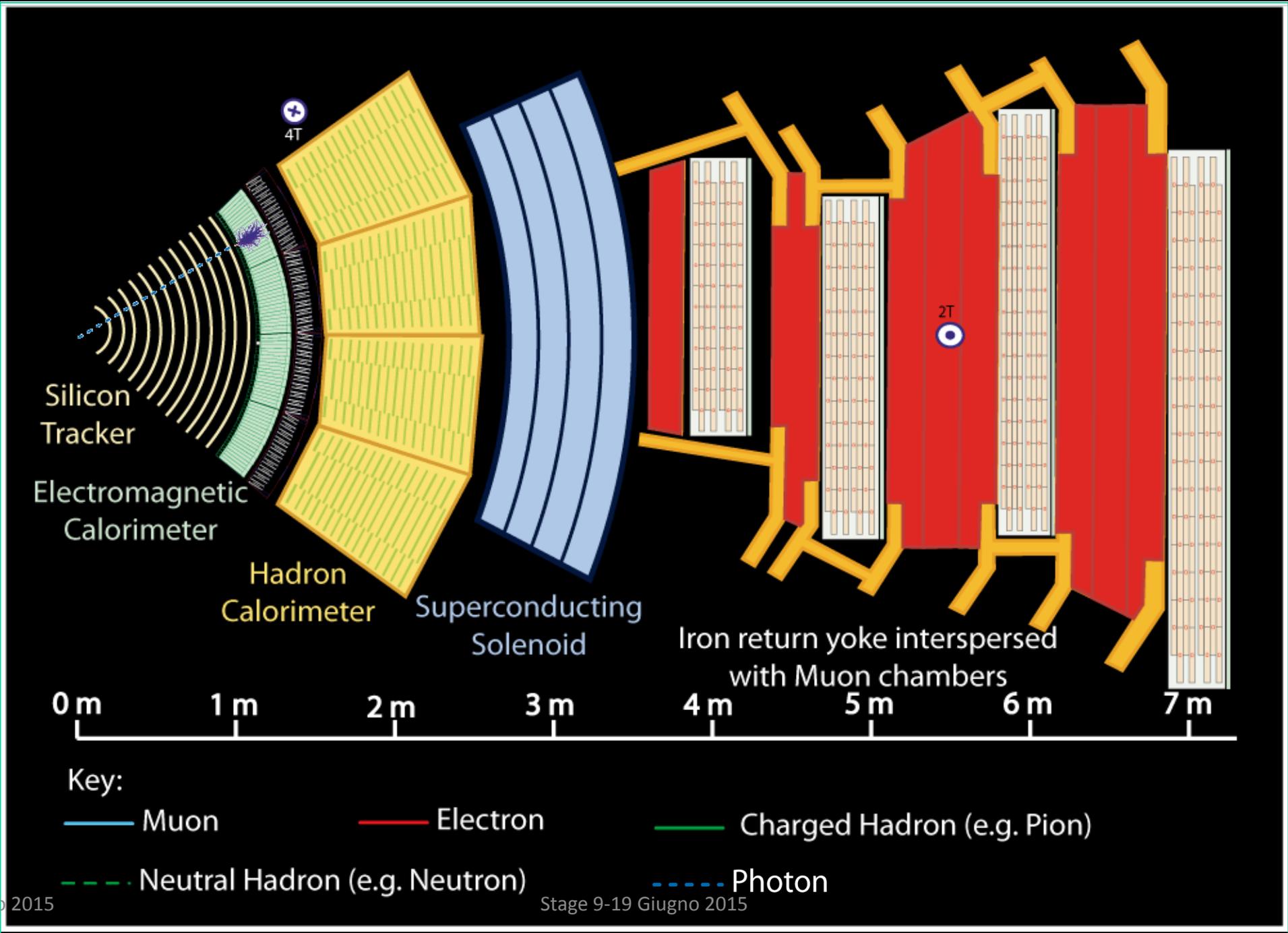










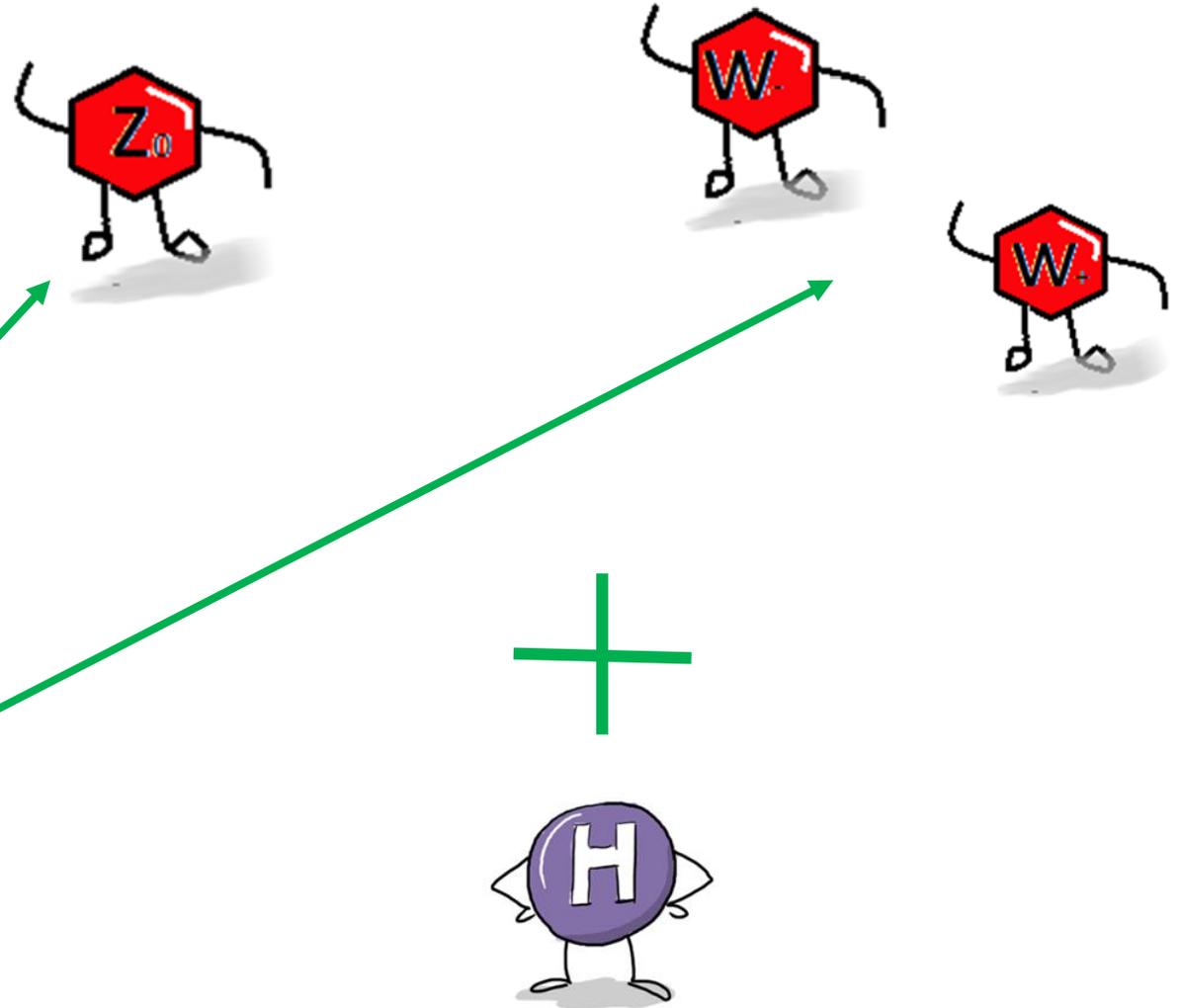


Quali particelle stiamo cercando?

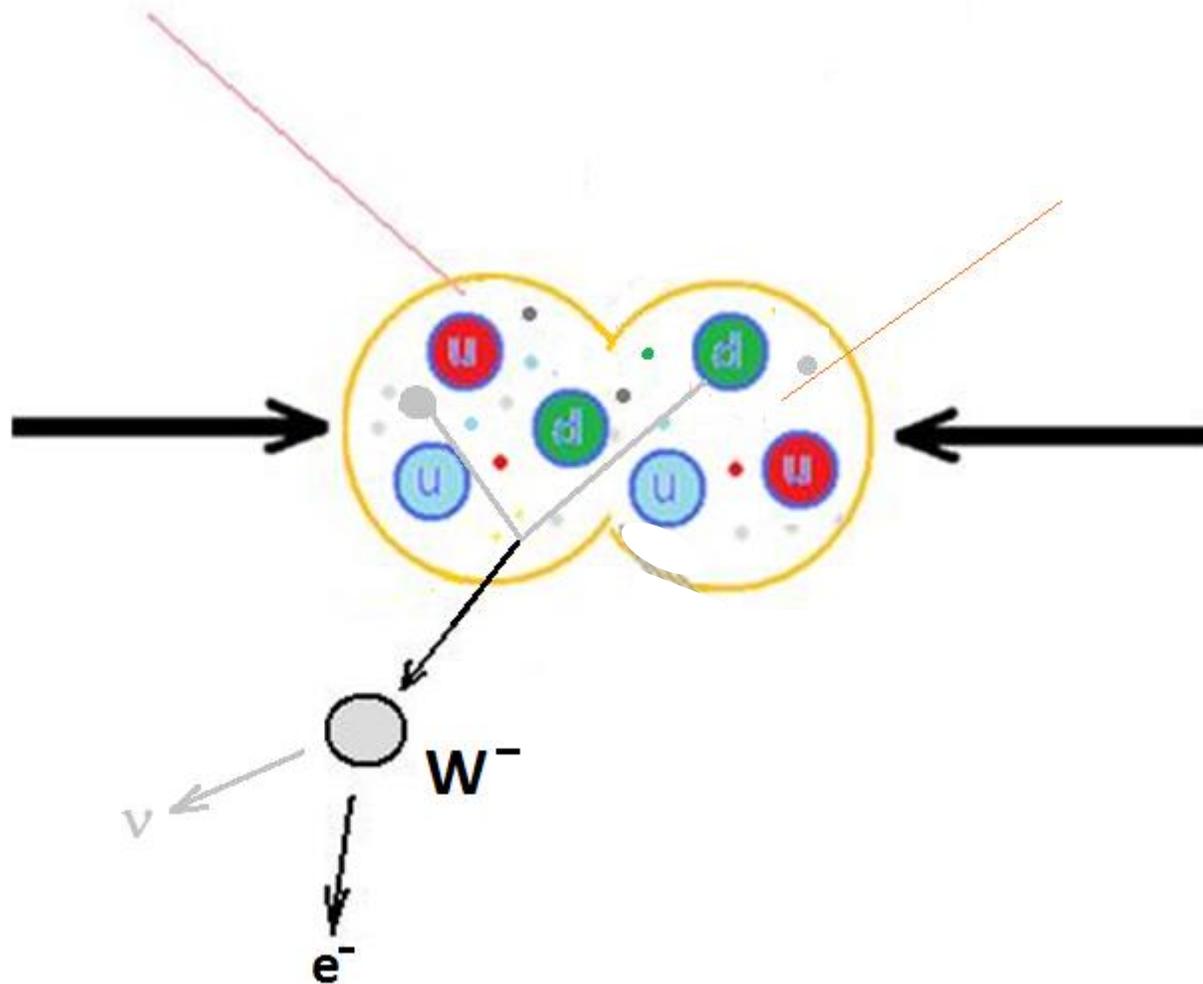
Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III	
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome→	u up	c charm	t top	γ fotone
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	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	g gluone
Leptoni	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	Z^0 forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e elettrone	μ muone	τ tauone	W^\pm forza debole

Bosoni di gauge



I bosoni $W^{+/-}$: come si formano?



Come si devono combinare le componenti dei protoni per generare un W^+ o un W^- ?

$$u\bar{d} \rightarrow W^+$$

$$Q_u = 2/3, Q_{\bar{d}} = 1/3 \rightarrow Q_{W^+} = +1$$

\bar{d} , essendo un **antiquark**, deve venire per forza dal mare, mentre u può essere sia di valenza sia del mare

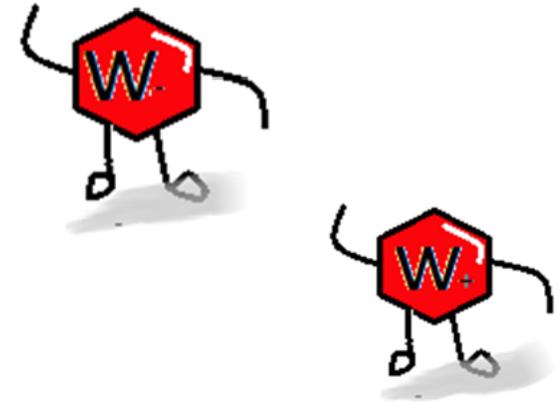
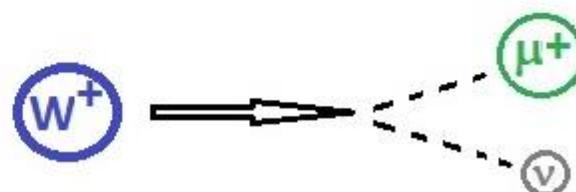
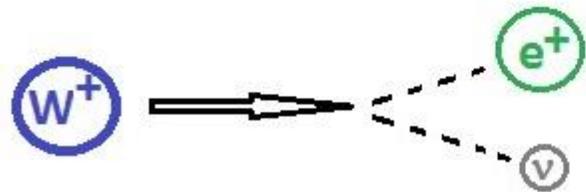
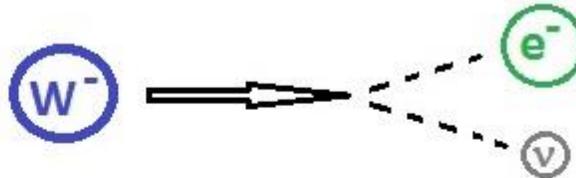
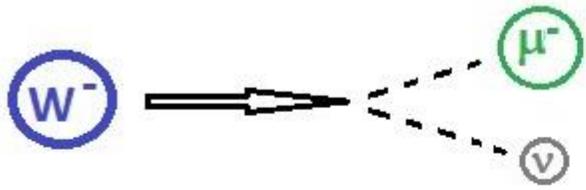
$$\bar{u}d \rightarrow W^-$$

$$Q_{\bar{u}} = -2/3, Q_d = -1/3 \rightarrow Q_{W^-} = -1$$

\bar{u} , essendo un **antiquark**, deve venire per forza dal mare, mentre d può essere sia di valenza sia del mare

I bosoni $W^{+/-}$: come decadono?

I bosoni $W^{+/-}$ hanno **carica elettrica +1 o -1** → possono decadere in un elettrone + neutrino o in un muone + neutrino

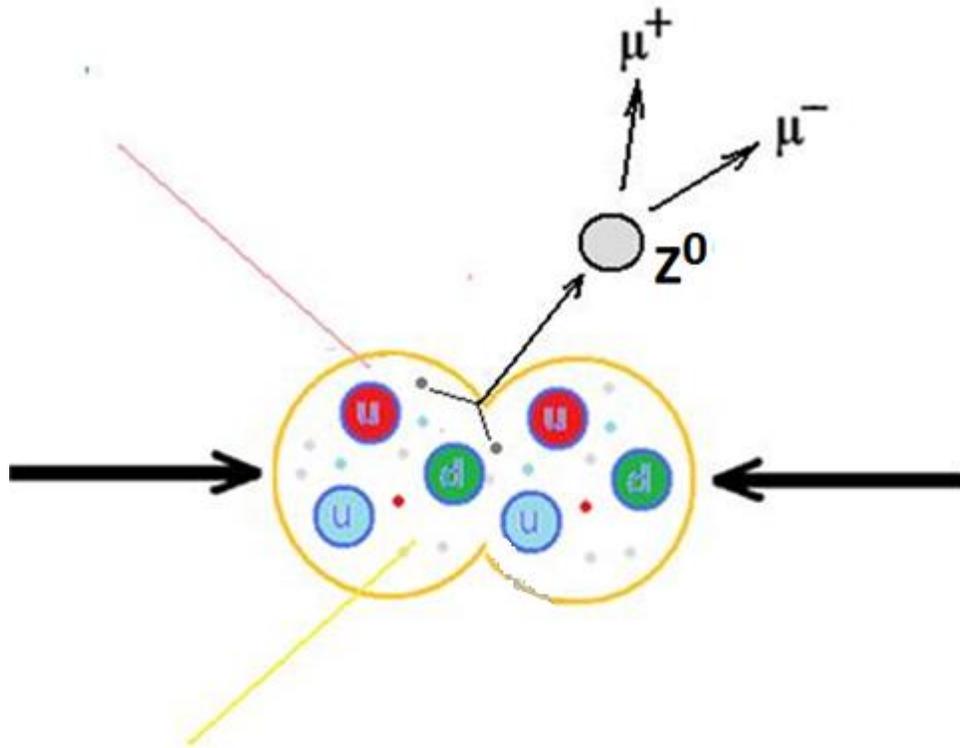


Nella nostra analisi quindi avremo:

- **Elettrone** + **energia mancante***
- **Muone** + **energia mancante***

*indicato nel seguito con Missing E_T

Il bosone Z: come si forma?



Come si devono combinare le componenti dei protoni per generare uno Z?

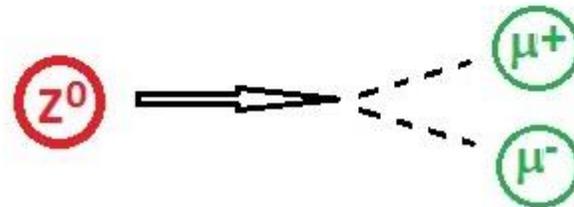
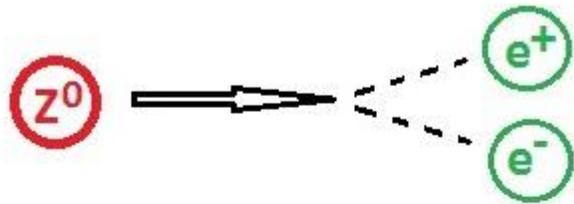
$$q\bar{q} \rightarrow Z$$

$$Q_q = 2/3 \text{ o } -1/3, Q_{\bar{q}} = -2/3 \text{ o } 1/3 \rightarrow Q_Z = 0$$

L'**antiquark** deve venire per forza dal mare, mentre il **quark** può essere sia di valenza sia del mare

Il bosone Z: come decade?

Il bosone Z ha **carica elettrica nulla** → può decadere in **coppie di leptoni** di carica opposta



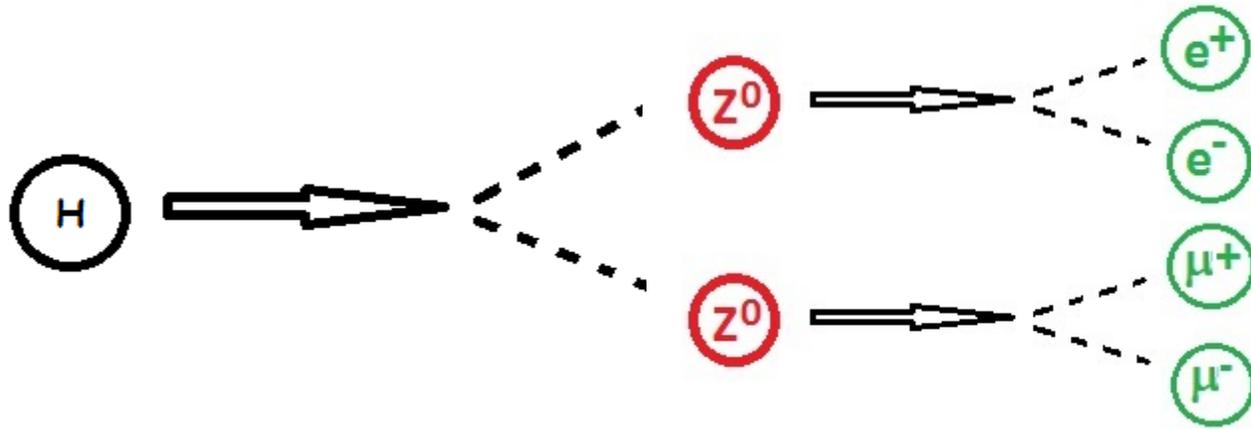
Nella nostra analisi i due leptoni possono essere:

- Una coppia elettrone-positrone e^-e^+
- Una coppia muone-antimuone $\mu^-\mu^+$

Non vengono prodotti neutrini, quindi non dovremmo vedere energia mancante...in realtà potrebbe esserci anche **energia mancante** dovuta a imprecisioni nella misura dell'energia delle particelle o a particelle che sono passate in zone non sensibili del rivelatore...

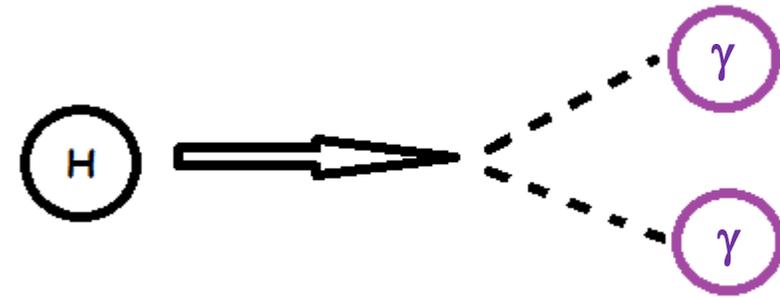
Il bosone di Higgs

Il bosone di Higgs può decadere in tantissimi modi...oggi ci concentreremo solo due di essi:



Ognuno dei due Z può decadere nei modi visti nella slide precedente

Nel secondo caso H decade in due fotoni



Per riassumere...

Bosone W^+ :

- $W^+ \rightarrow e^+ + \nu \rightarrow e^+ + \text{Missing } E_T$
- $W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu \rightarrow \mu^+ + \text{Missing } E_T$

Bosone W^- :

- $W^- \rightarrow e^- + \nu \rightarrow e^- + \text{Missing } E_T$
- $W^- \rightarrow \mu^- + \nu \rightarrow \mu^- + \text{Missing } E_T$

Bosone Z :

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

Bosone di Higgs:

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

NB: Come capire il segno della carica elettrica delle particelle?

Il campo magnetico di CMS fa curvare le particelle:

- **Carica positiva** \rightarrow **Senso orario**
- **Carica negativa** \rightarrow **Senso antiorario**

(nella proiezione del moto sul piano xy – vedi slide 27)

Tutto ciò che non rientra in questi casi lo classifichiamo **Zoo** \rightarrow rappresenta la moltitudine di altre particelle che potrebbero esser state prodotte, ma su cui non ci concentriamo....

Quale strumento utilizzeremo?

CMS 3D Event Display *

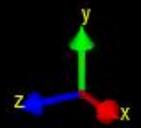
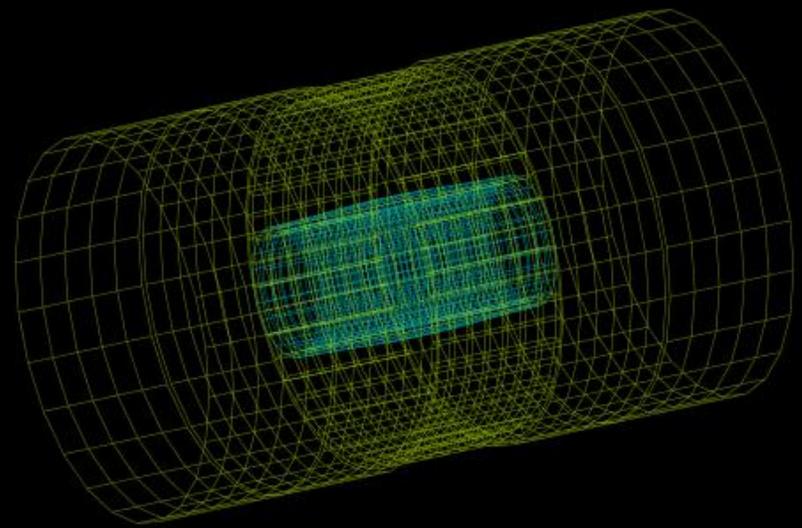
- Riproduce tutti i rivelatori di CMS in 3D
- Riproduce tutti i segnali generati dalle particelle prodotte in una collisione in tutti i rivelatori
- Permette di selezionare solo i rivelatori e le particelle interessanti per la nostra analisi

Andiamo a vedere come...

* Dovreste trovare un'icona sul Desktop per accedervi, altrimenti utilizzate l'indirizzo <https://www.i2u2.org/elab/cms/event-display/>



- Detect Model ?
- Tracker Barrels
- Tracker Endcaps
- ECAL Barrel
- ECAL Endcaps
- ECAL Preshower
- HCAL Barrel
- HCAL Endcaps
- HCAL Outer
- HCAL Forward
- Drift Tubes (muon)
- Cathode Strip Chambers (muon)
- Resistive Plate Chambers (muon)
- Tracking ?
- ECAL ?
- HCAL ?
- Muon ?
- Physics Objects ?



Seleziona i rivelatori da visualizzare

- Controls:
- rotate
 - Ctrl + → pan x/y
 - Ctrl + → pan x/y
 - Shift + → zoom
 - Shift + → zoom

Detector Model ?

- Tracker Barrels
- Tracker Endcaps
- ECAL Barrel
- ECAL Endcaps
- ECAL Preshower
- HCAL Barrel
- HCAL Endcaps
- HCAL Outer
- HCAL Forward
- Drift Tubes (muon)
- Cathode Strip Chambers (muon)
- Resistive Plate Chambers (muon)

Tracking ?

ECAL ?

HCAL ?

Muon ?

Physics Objects ?

Open Event

Files	Events
collections	
masterclass-2014	
masterclass-2015	
masterclass-samples	

Close Load

Controls:

- rotate
- Ctrl + pan x/y
- Ctrl + pan x/y
- Shift + zoom
- Shift + zoom

Apri la cartella degli eventi

Masterclass-2015

Detector Model

- Tracker Barrels
- Tracker Endcaps
- ECAL Barrel
- ECAL Endcaps
- ECAL Preshower
- HCAL Barrel
- HCAL Endcaps
- HCAL Outer
- HCAL Forward
- Drift Tubes (muon)
- Cathode Strip Chambers (muon)
- Resistive Plate Chambers (muon)

Tracking ?

ECAL ?

HCAL ?

Muon ?

Physics Objects ?

Controls:

- rotate
- Ctrl + → pan x/y
- Ctrl + → pan x/y
- Shift + → zoom
- Shift + → zoom

Scegli il gruppo

Open Event

Files	Events
...	
masterclass-2015	
masterclass_1.ig	
masterclass_10.ig	
masterclass_11.ig	
masterclass_12.ig	
masterclass_13.ig	
masterclass_14.ig	
masterclass_15.ig	
masterclass_16.ig	
masterclass_17.ig	
masterclass_18.ig	
masterclass_19.ig	
masterclass_2.ig	
masterclass_20.ig	
masterclass_21.ig	
...	

Close Load

Detector Model

- Tracker Barrels
- Tracker Endcaps
- ECAL Barrel
- ECAL Endcaps
- ECAL Preshower
- HCAL Barrel
- HCAL Endcaps
- HCAL Outer
- HCAL Forward
- Drift Tubes (muon)
- Cathode Strip Chambers (muon)
- Resistive Plate Chambers (muon)

Tracking ?

ECAL ?

HCAL ?

Muon ?

Physics Objects ?

Controls:

- rotate
- Ctrl + rotate → pan x/y
- Ctrl + ↑ ↓ ← → → pan x/y
- Shift + rotate → zoom
- Shift + ↑ ↓ → zoom

Seleziona evento 1

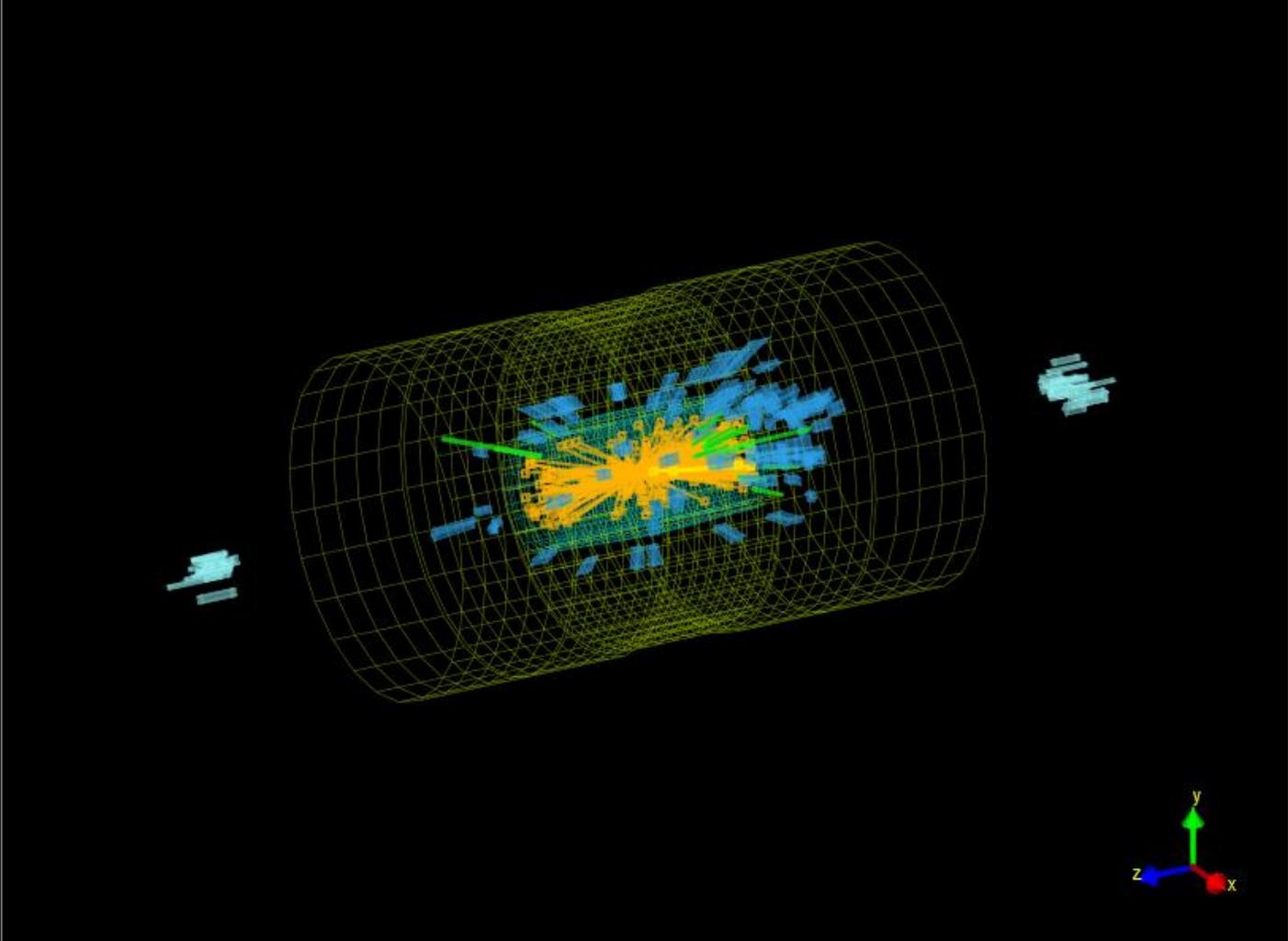
Open Event

Files	Events
**	Events/Run_1/Event_1
masterclass-2015	Events/Run_1/Event_2
masterclass_1.ig	Events/Run_1/Event_3
masterclass_10.ig	Events/Run_1/Event_4
masterclass_11.ig	Events/Run_1/Event_5
masterclass_12.ig	Events/Run_1/Event_6
masterclass_13.ig	Events/Run_1/Event_7
masterclass_14.ig	Events/Run_1/Event_8
masterclass_15.ig	Events/Run_1/Event_9
masterclass_16.ig	Events/Run_1/Event_10
masterclass_17.ig	Events/Run_1/Event_11
masterclass_18.ig	Events/Run_1/Event_12
masterclass_19.ig	Events/Run_1/Event_13
masterclass_2.ig	Events/Run_1/Event_14
masterclass_20.ig	Events/Run_1/Event_15
masterclass_21.ig	Events/Run_1/Event_16

Close Load



- Detector Model** ?
 - Tracker Barrels
 - Tracker Endcaps
 - ECAL Barrel
 - ECAL Endcaps
 - ECAL Preshower
 - HCAL Barrel
 - HCAL Endcaps
 - HCAL Outer
 - HCAL Forward
 - Drift Tubes (muon)
 - Cathode Strip Chambers (muon)
 - Resistive Plate Chambers (muon)
- Tracking** ?
 - Tracks (reco.)
 - Clusters (Si Pixels)
 - Clusters (Si Strips)
 - Rec. Hits (Tracking)
- ECAL** ?
 - Barrel Rec. Hits ▶
 - Endcap Rec. Hits ▶
 - Preshower Rec. Hits ▶
- HCAL** ?
 - Barrel Rec. Hits ▶
 - Endcap Rec. Hits ▶
 - Forward Rec. Hits ▶
 - Outer Rec. Hits ▶



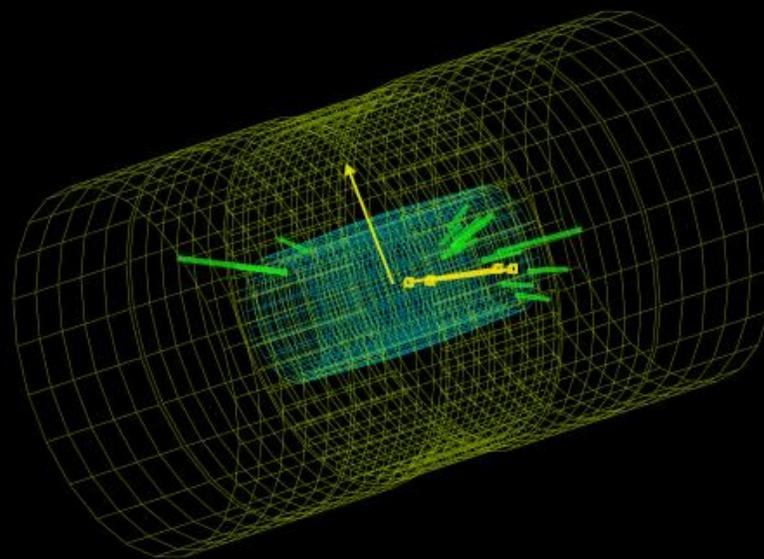
- Controls:**
- rotate
 - Ctrl** + → pan x/y
 - Ctrl** + → pan x/y
 - Shift** + → zoom
 - Shift** + → zoom



- HCAL Barrel
- HCAL Endcaps
- HCAL Outer
- HCAL Forward
- Drift Tubes (muon)
- Cathode Strip Chambers (muon)
- Resistive Plate Chambers (muon)
- Tracking** ?
- Tracks (reco.)
- Clusters (Si Pixels)
- Clusters (Si Strips)
- Rec. Hits (Tracking)
- ECAL** ?
- Barrel Rec. Hits
- Endcap Rec. Hits
- Preshower Rec. Hits
- HCAL** ?
- Barrel Rec. Hits
- Endcap Rec. Hits
- Forward Rec. Hits
- Outer Rec. Hits
- Muon** ?
- DT Rec. Hits
- DT Rec. Segments (4D)
- CSC Segments
- RPC Rec. Hits
- CSC Rec. Hits (2D)

Controls:

- rotate
- Ctrl** + → pan x/y
- Ctrl** + → pan x/y
- Shift** + → zoom
- Shift** + → zoom



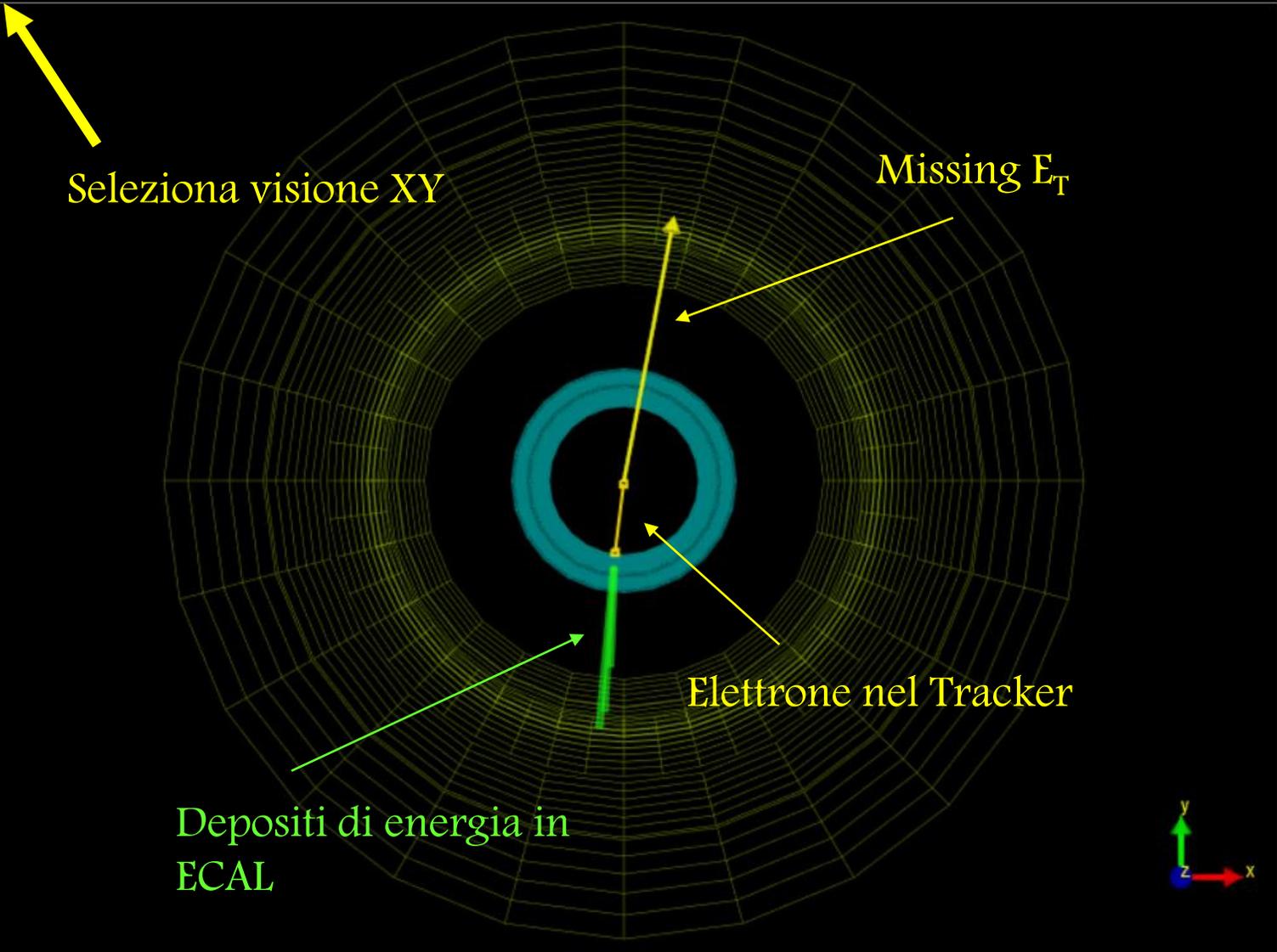
Seleziona i segnali nei rivelatori → ci interessano:

- ECAL Barrel Rec. Hits
- Electron Tracks
- Tracker Muons
- Global Muons
- Missing ET





- Clusters (SI Strips)
- Rec. Hits (Tracking)
- ECAL** ?
- Barrel Rec. Hits
- Endcap Rec. Hits
- Preshower Rec. Hits
- HCAL** ?
- Barrel Rec. Hits
- Endcap Rec. Hits
- Forward Rec. Hits
- Outer Rec. Hits
- Muon** ?
- DT Rec. Hits
- DT Rec. Segments (4D)
- CSC Segments
- RPC Rec. Hits
- CSC Rec. Hits (2D)
- Physics Objects** ?
- Electron Tracks (GSF)
- Tracker Muons (Reco)
- Stand-alone Muons (Reco)
- Global Muons (Reco)
- Calorimeter Energy Towers
- Jets
- Missing Et (Reco)



Seleziona visione XY

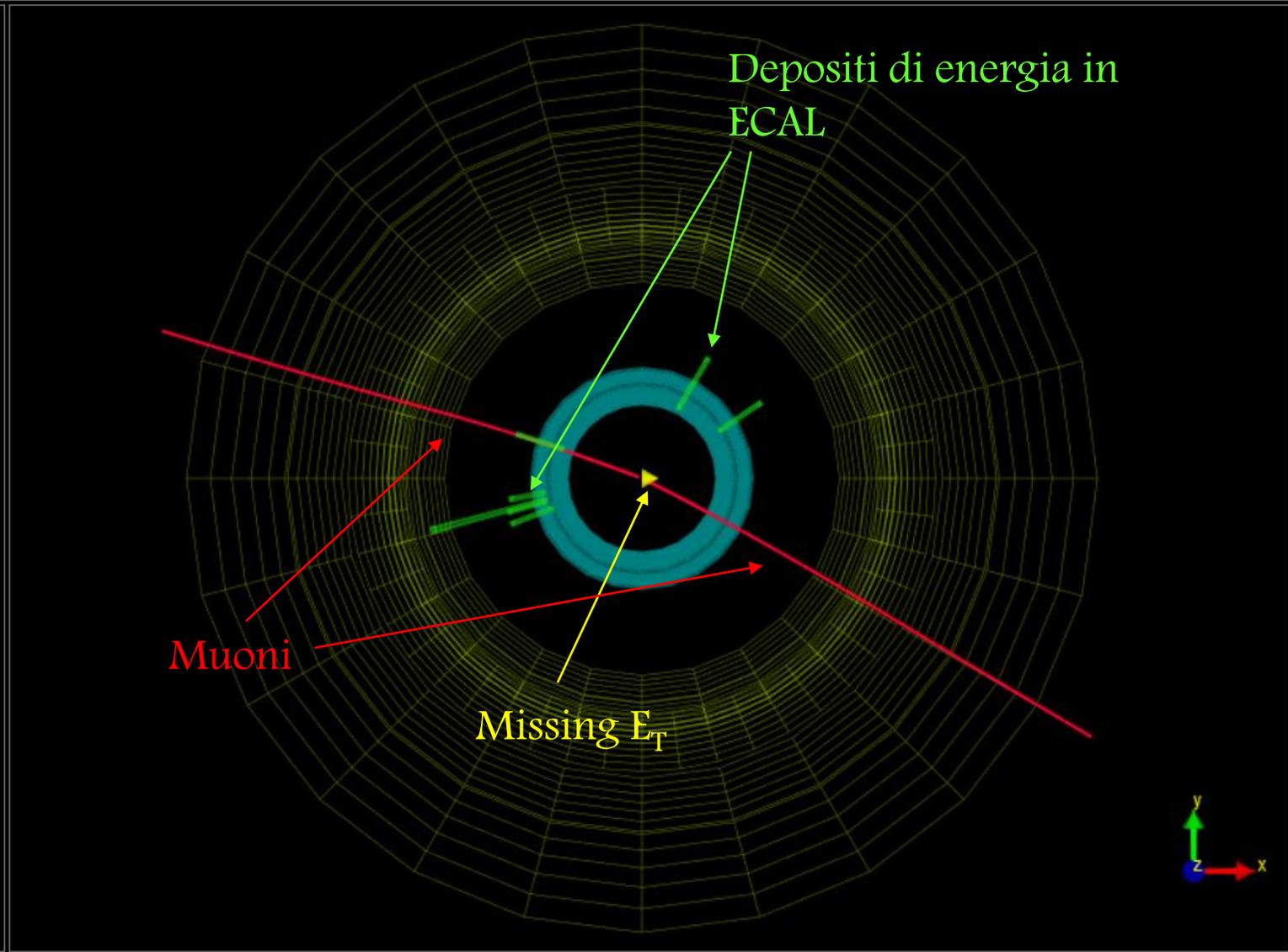
Missing E_T

Elettrone nel Tracker

Depositi di energia in ECAL



- Clusters (SI Strips)
- Rec. Hits (Tracking)
- ECAL** ?
- Barrel Rec. Hits
- Endcap Rec. Hits
- Preshower Rec. Hits
- HCAL** ?
- Barrel Rec. Hits
- Endcap Rec. Hits
- Forward Rec. Hits
- Outer Rec. Hits
- Muon** ?
- DT Rec. Hits
- DT Rec. Segments (4D)
- CSC Segments
- RPC Rec. Hits
- CSC Rec. Hits (2D)
- Physics Objects** ?
- Electron Tracks (GSF)
- Tracker Muons (Reco)
- Stand-alone Muons (Reco)
- Global Muons (Reco)
- Calorimeter Energy Towers
- Jets
- Missing Et (Reco)



Controls: → rotate

Ora che sappiamo riconoscere le particelle, come costruiamo l'istogramma?

Utilizziamo CIMA (CMS Instrument for Masterclass Analysis) *

- Permette di selezionare le particelle identificate in CMS Event Display
- Permette di selezionare la particella da cui esse provengono
- Calcola la massa della particella
- Permette di costruire l'istogramma
- Calcola i rapporti W/Z , W_+/W_- , e/μ

Andiamo a vedere come...

* Dovreste trovare un'icona sul Desktop per accedervi, altrimenti utilizzate l'indirizzo <https://www.i2u2.org/elab/cms/cima/index.php>

CIMA

CMS Instrument for Masterclass Analysis



Choose your Masterclass

GeneralUseTables

Pavia-15June2015

CERN-04.Jun2015

QN_Data_Workshops_Summer2015

ND-iLED-16July2015

CIMA

CMS Instrument for Masterclass Analysis



Choose your Masterclass

- GeneralUseTables
- Pavia-15June2015**
- CERN-04Jun2015
- QN_Data_Workshops_Summer2015
- ND-iLED-16July2015

Choose your location

- SquadraFisica**



CIMA

CMS Instrument for Masterclass Analysis



Choose your Masterclass	Choose your location	Choose your group
GeneralUseTables	SquadraFisica	1
Pavia-15June2015		2
CERN-04Jun2015		3
QN_Data_Workshops_Summer2015		4
ND-iLED-16July2015		5
		6
		7
		8
		9
		10
		11
		12
		13
		14
		15

Scegliete il vostro gruppo



Particella nello stato finale

Particella da cui provengono

Massa della particella iniziale

Back **Events Table (Group 1)** Mass Histogram (table_1) Results (table_1) [Event Display](#)

Masterclass: Test2
 location: table_1
 Group: 1

Event index:

Event number:
 1-2

fi

primary

W-
 W+

Z
 W

Mass:

Submit

Event index

Event nun

89
88
87
86
85
84
83
82
81
80
79
78
77
76
75
74
73
72

1-89
1-88
1-87
1-86
1-85
1-84
1-83
1-82
1-81
1-80
1-79
1-78
1-77
1-76
1-75
1-74
1-73
1-72

e;W-
e;W
Z;mu
mu;W+
Z;mu
mu;W+
e;Z
Z;mu
Zoo
Z;mu
mu;W-
e;W+
mu;W
e;W+
e;W+
mu;W+
e;W-

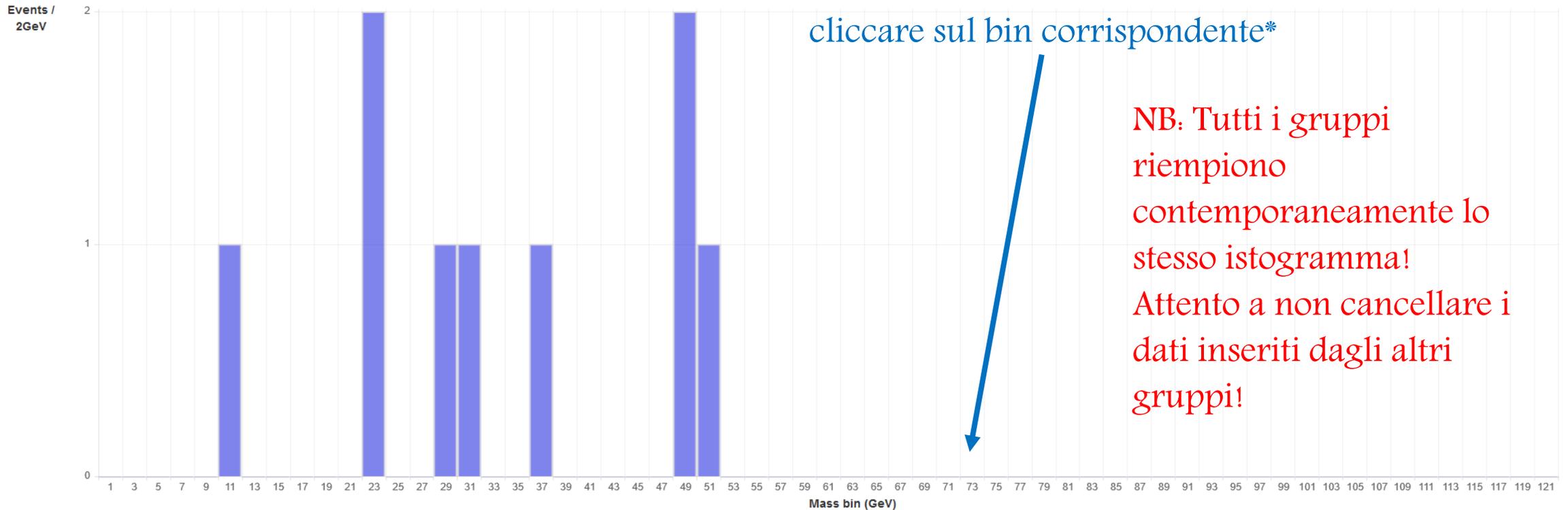
80.128
76.568
5.456
19.667
2.584



Se viene mostrata la massa della particella iniziale (W o Higgs) va inserita **a mano nell'istogramma** di massa.

Back Events Table (Group 1) **Mass Histogram (table_1)** Results (table_1) [Event Display](#)

Masterclass: Test2
Location: table_1
Groups: all groups



Per inserire un evento basta cliccare sul bin corrispondente*

NB: Tutti i gruppi riempiono contemporaneamente lo stesso istogramma! Attento a non cancellare i dati inseriti dagli altri gruppi!

Tip: Remove data from the histogram by holding the ctrl key (the command key for mac users)

***In caso di errore, Ctrl + Click sul valore da eliminare**

Masterclass: Test2**Location:** table_1**Groups:** 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30

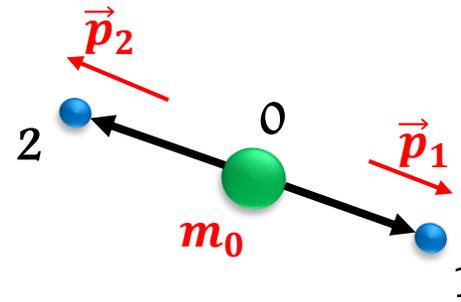
Group	Muon	Electron	W	W-	W+	Z	Higgs	Zoo	Total
1	43	44	4	23	34	26	3	5	95
2	1	1	1	0	0	1	0	2	4
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	3	4	0	2	1	4	1	1	9
5	0	1	0	0	1	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	1	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	0	0	1	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Total:

Muon	Electron	W	W-	W+	Z	Higgs	Zoo	Sum	e/mu	W+/W-
49	51	5	25	37	33	5	8	113	1.04	1.48

La massa invariante

La **particella iniziale** decade in **due particelle figlie**.



Come possiamo risalire alla **massa** della **particella iniziale**?

Come a basse energie, applicando:

la conservazione dell'Energia

la conservazione della quantità di moto

$$\left\{ \begin{array}{l} E_0 = E_1 + E_2 \\ \vec{p}_0 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{array} \right.$$

Ricordando due **differenze** fondamentali rispetto al caso classico:

! ...L'energia per particelle così veloci è quella relativistica!

! ...Dopo l'urto le particelle prodotte possono essere molto diverse da quella iniziale!

~~$$E = \frac{1}{2} m v^2$$~~



$$E^2 = (m_0 c)^2 + (pc)^2$$

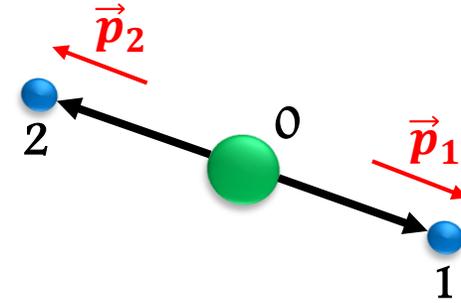


...infine...

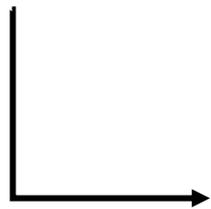
$$m_0 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

Reminder: l'istogramma di massa invariante

$$m_0 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$



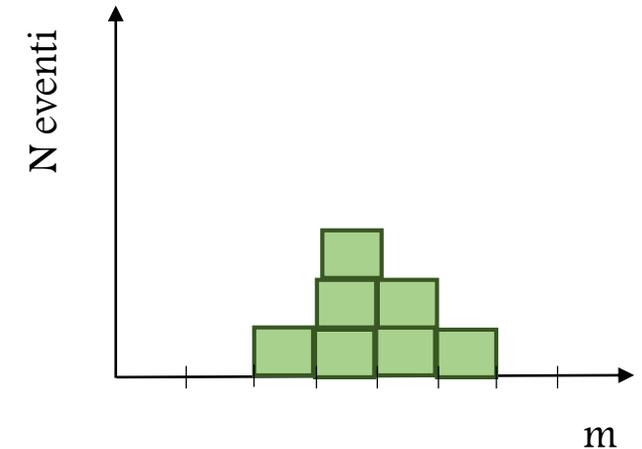
Si può dimostrare matematicamente che questo vale in tutti i sistemi di riferimento, quindi anche quando la particella iniziale è in moto → **massa invariante**



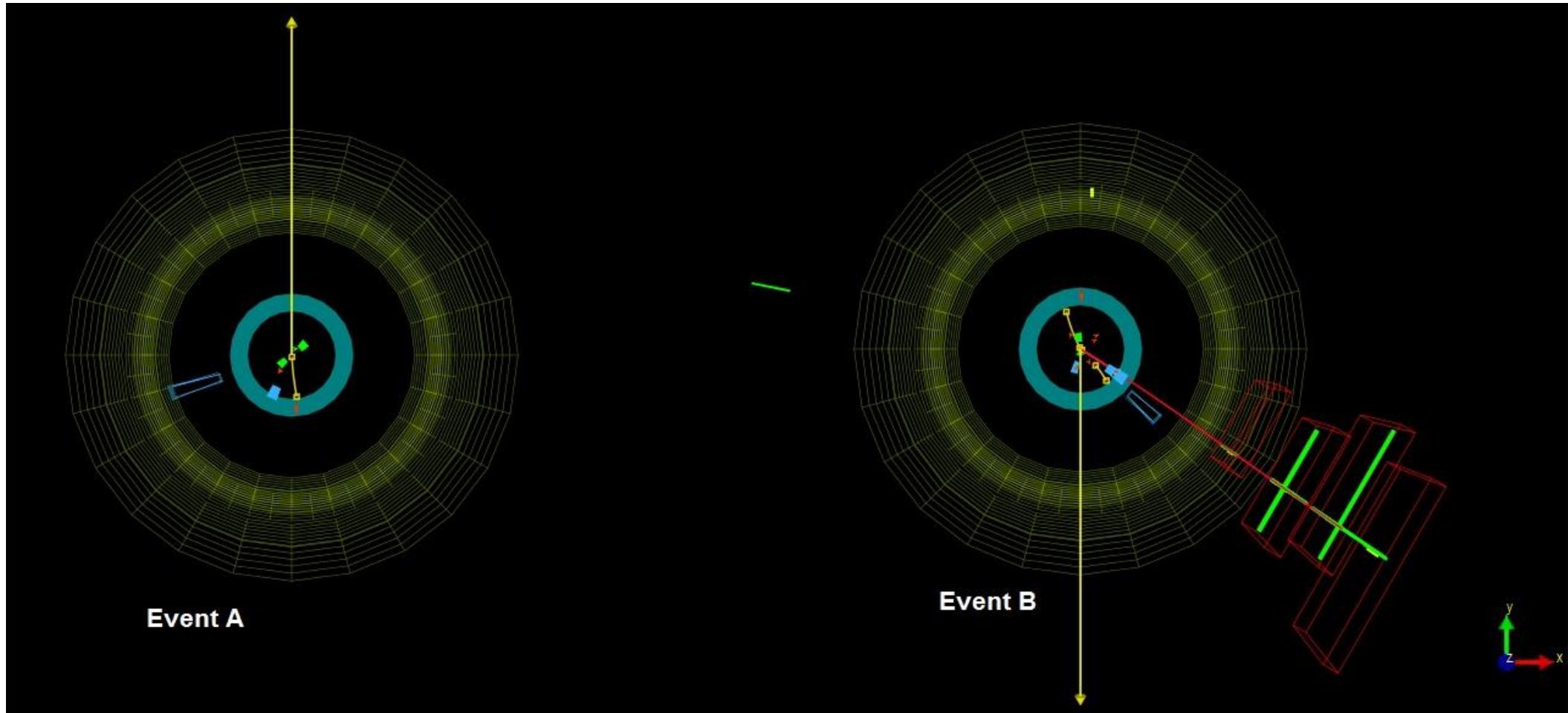
Per ogni evento
che vediamo
possiamo
ricostruire un
valore di massa



Costruiamo
l'**istogramma** di
tutte le masse
ricostruite



Qualche esempio...



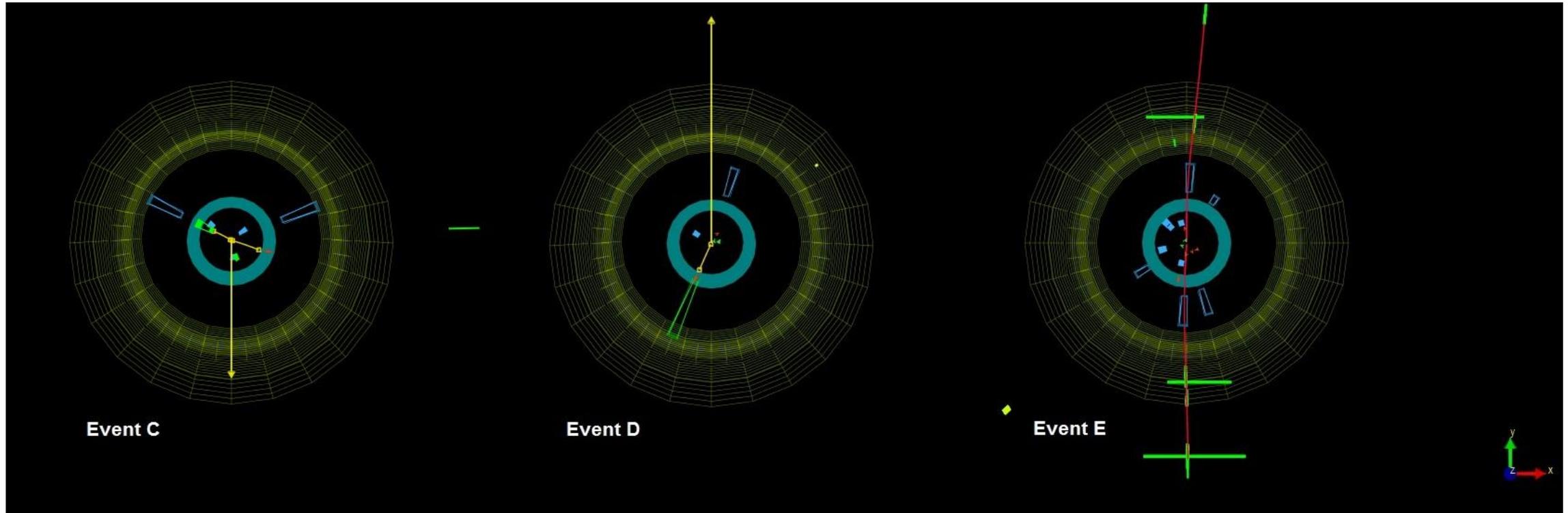
Event A

Event B

W^-

W^+

Qualche esempio...

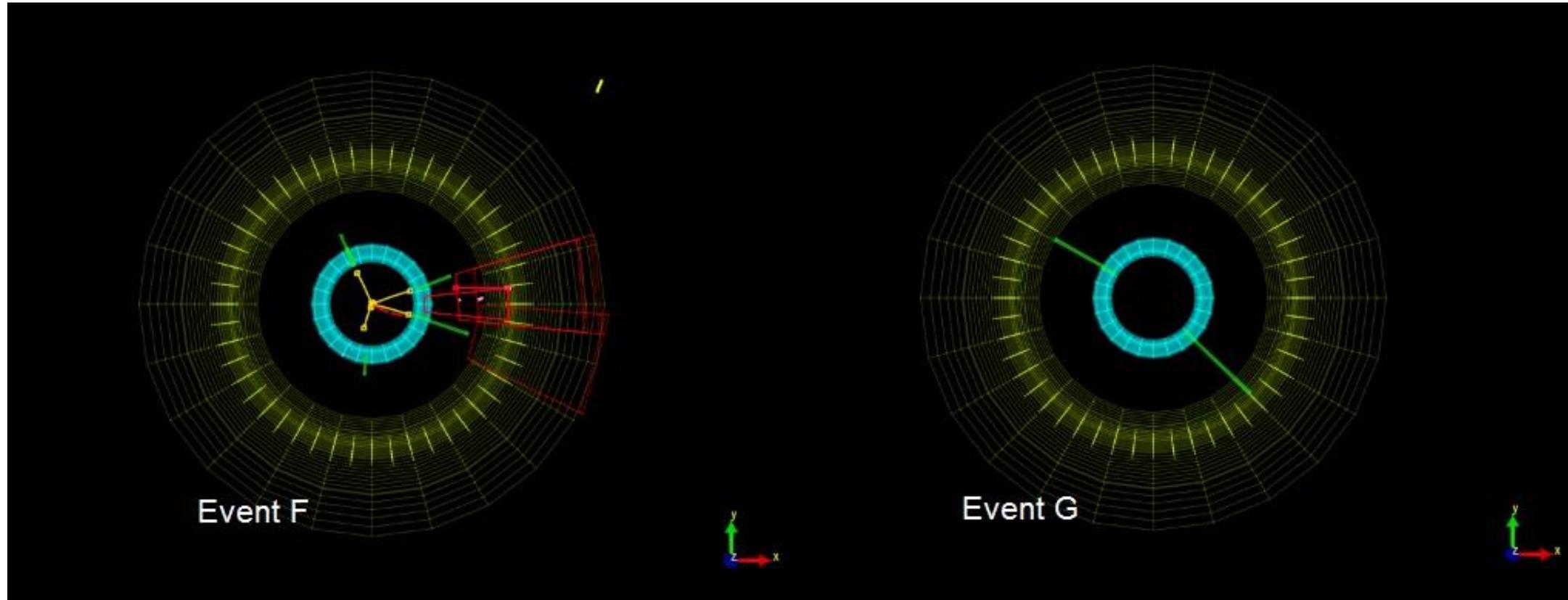


Z

W^+

Z

Qualche esempio...



$$H \rightarrow 4l$$

$$H \rightarrow 2\gamma$$

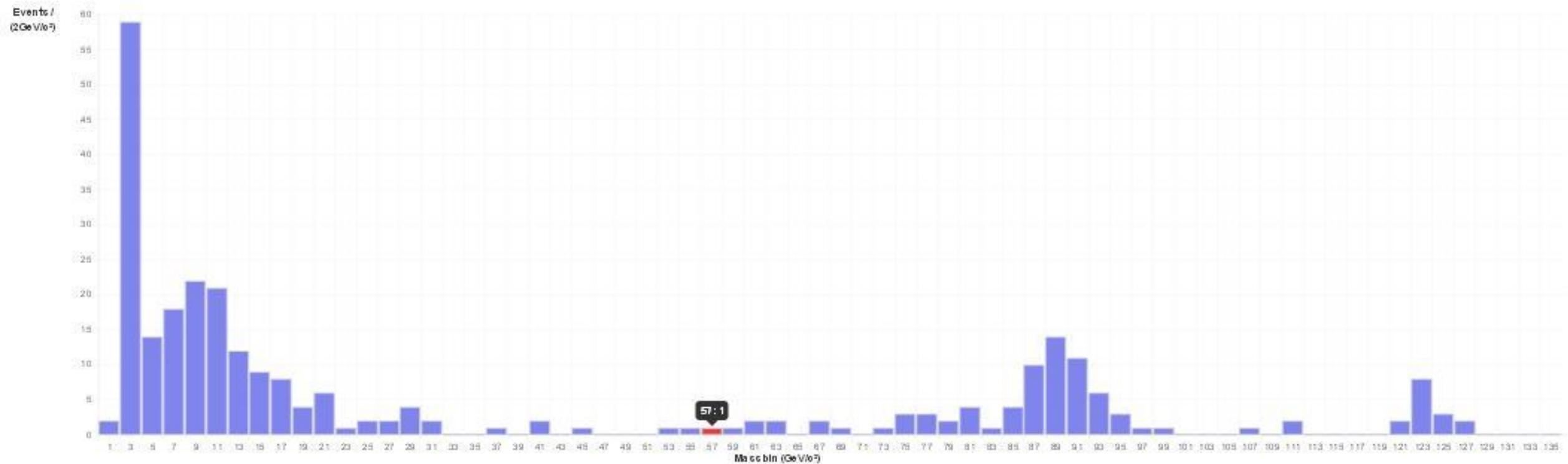
Backup

...il vostro risultato!

Masterclass: Pisa-15June2015
Location: SquadraFisica
Group: all groups

Instructions (also available as screenshot):

You can add the mass values from your events table into the mass histogram by clicking on the matching bin. The bins have a 2 GeV/c² width, so the bin labelled "1" should contain events from 0.000 GeV/c² to 1.999 GeV/c² and so on. If you made a mistake, you can remove an entry from a bin as explained below the histogram. Please be aware that the mass histogram is used by all groups. Thus you can see entries from other groups as well.

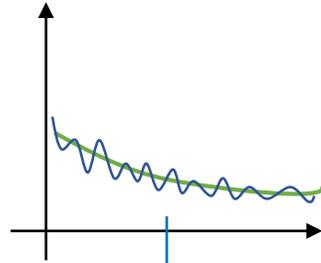


Tip: Remove data from the histogram by holding the ctrl key
(the command key for mac users)

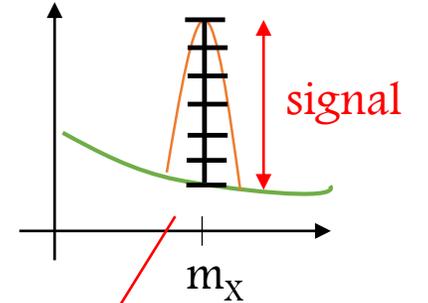
...un po' di statistica

Quando possiamo dire di avere *trovato* qualcosa?

Se la *particella che cerchiamo non esiste*, allora l'istogramma della massa trasversa mostrerà soltanto «fondo»



Se invece *esiste* una particella con massa m_X , allora l'istogramma della massa trasversa mostrerà un «picco» sopra il fondo!



La statistica permette di calcolare la **probabilità che il picco sia dovuto a fluttuazioni statistiche** e non al decadimento di una particella!

σ misura la fluttuazione statistica che può avere il fondo

Signal è l'altezza del picco sopra la curva del fondo

E' IMPORTANTE IL RAPPORTO

$$\frac{\text{signal}}{\sigma}$$

Se è > 5

la probabilità che il picco sia dovuto a una fluttuazione del fondo è di solo $2,87 \cdot 10^{-7}$!



La particella di massa m_X esiste con probabilità $> (1 - 2,87 \cdot 10^{-7}) = 99,9999713\%$

Quanti eventi W^+ e W^- ci aspettiamo di osservare?

...INGREDIENTI A DISPOSIZIONE

Ciascun protone fornisce

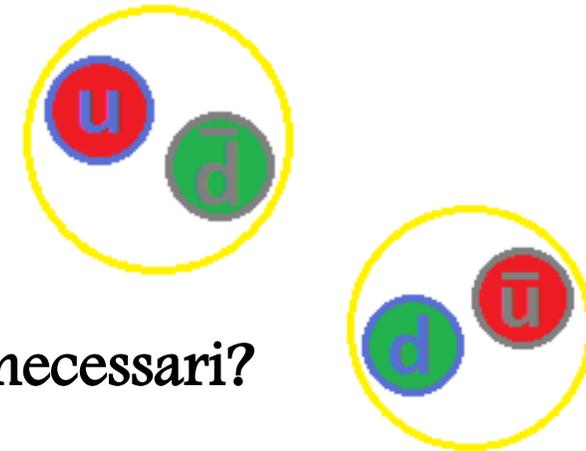
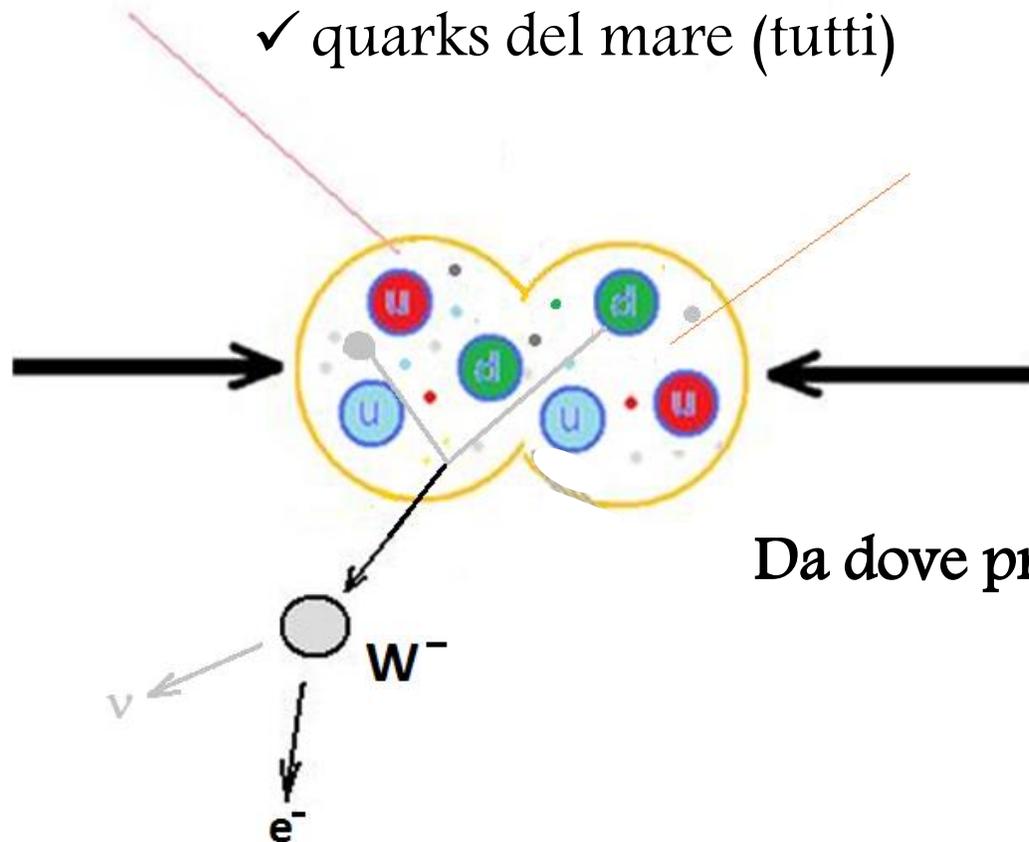
- ✓ quarks di valenza $p = u u d$
- ✓ quarks del mare (tutti)

GLI INGREDIENTI NECESSARI

Per produrli servono quark u, d, \bar{u}, \bar{d} :

$$u + \bar{d} \rightarrow W^+$$

$$\bar{u} + d \rightarrow W^-$$



Da dove prendereste i quarks necessari?



Quanti eventi W^+ e W^- ci aspettiamo di osservare?

...INGREDIENTI A DISPOSIZIONE

Ciascun protone fornisce

- ✓ quarks di valenza $p = u u d$
- ✓ quarks del mare (tutti)

GLI INGREDIENTI NECESSARI

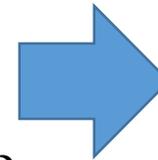
Per produrli servono quark u, d, \bar{u}, \bar{d} :

$$u + \bar{d} \rightarrow W^+$$

$$\bar{u} + d \rightarrow W^-$$

Da dove prendereste i quarks necessari?

- i quarks \bar{u}, \bar{d} provengono per forza dal mare
- gli u di valenza disponibili sono **il doppio** del numero di d di valenza.



Si aspetta che il numero di W^+ osservati sia il doppio di W^- .

In realtà il rapporto non è *esattamente 2*, perché anche gli u, d possono provenire anche dal mare!

$$\frac{W^+}{W^-} \approx 1,42.$$

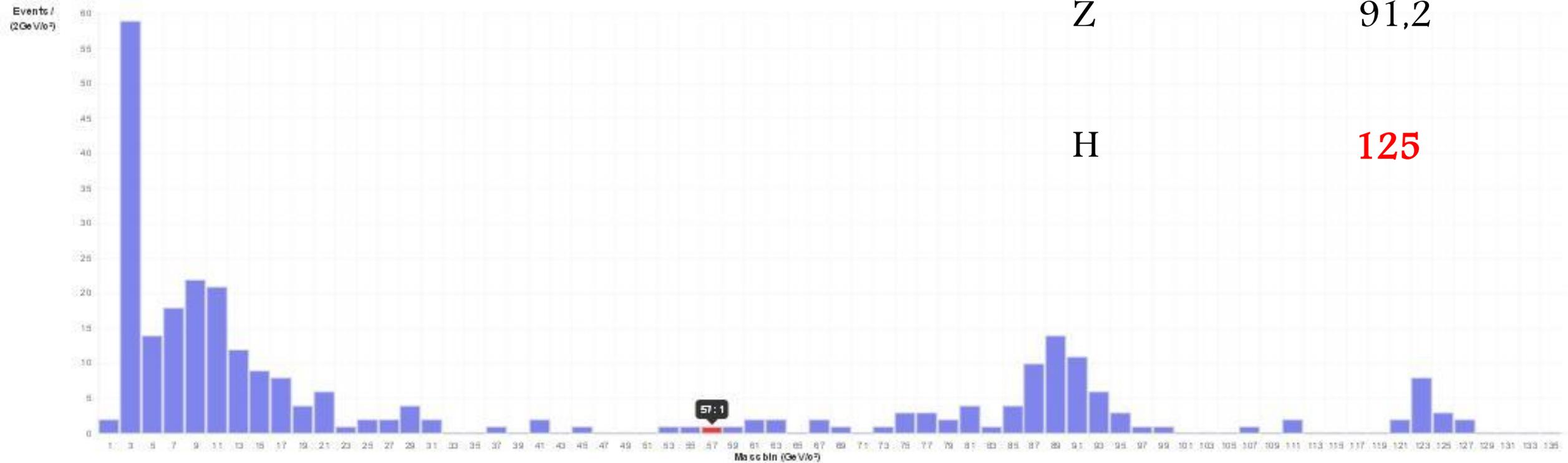
...il vostro risultato!

Rapporto W^+/W^- **1,38**

Particelle note	Massa [GeV]
J/ Ψ	3,1
Υ	9,5
W	80,4
Z	91,2
H	125

Masterclass: Pisa-15June2015
 Location: SquadraFisica
 Group: all groups

Instructions (also available as screenshot):
 You can add the mass value from your events table into the mass histogram by clicking on the matching bin. This bin has a 2 GeV/c width, e.g. the bin labeled "1" should contain events from 0.000 GeV/c to 1.999 GeV/c and so on. If you made a mistake, you can remove an entry from a bin as explained below the histogram. Please be aware that the mass histogram is used by all groups. Thus you can see entries from other groups as well.



Tip: Remove data from the histogram by holding the ctrl key (the command key for mac users)

...il vostro risultato!

Total:

Muon	Electron	W	W-	W+	Z	Higgs	Zoo	Sum	e/mu	W+/W-
478	489	190	217	300	260	16	251	1234	1.02	1.38

...la realtà è un po' meno semplice...

Gli istogrammi realistici non sono così «puliti»...

- ✓ Il fondo è più complesso
 - Il fondo «continuo» può essere così tanto da «soffocare» la presenza del picco
 - Possono esserci altre particelle nelle vicinanze il cui picco copre quello che si sta cercando

→ Influisce la scelta dei **criteri di selezione** degli eventi!
- ✓ Le probabilità di produrre determinate particelle possono essere molto basse
 - un bosone **H ogni 1 miliardo** di collisioni tra protoni!
 - un bosone Z ogni 1 milione di collisioni tra protoni
 - un bosone W ogni 100 mila di collisioni tra protoni

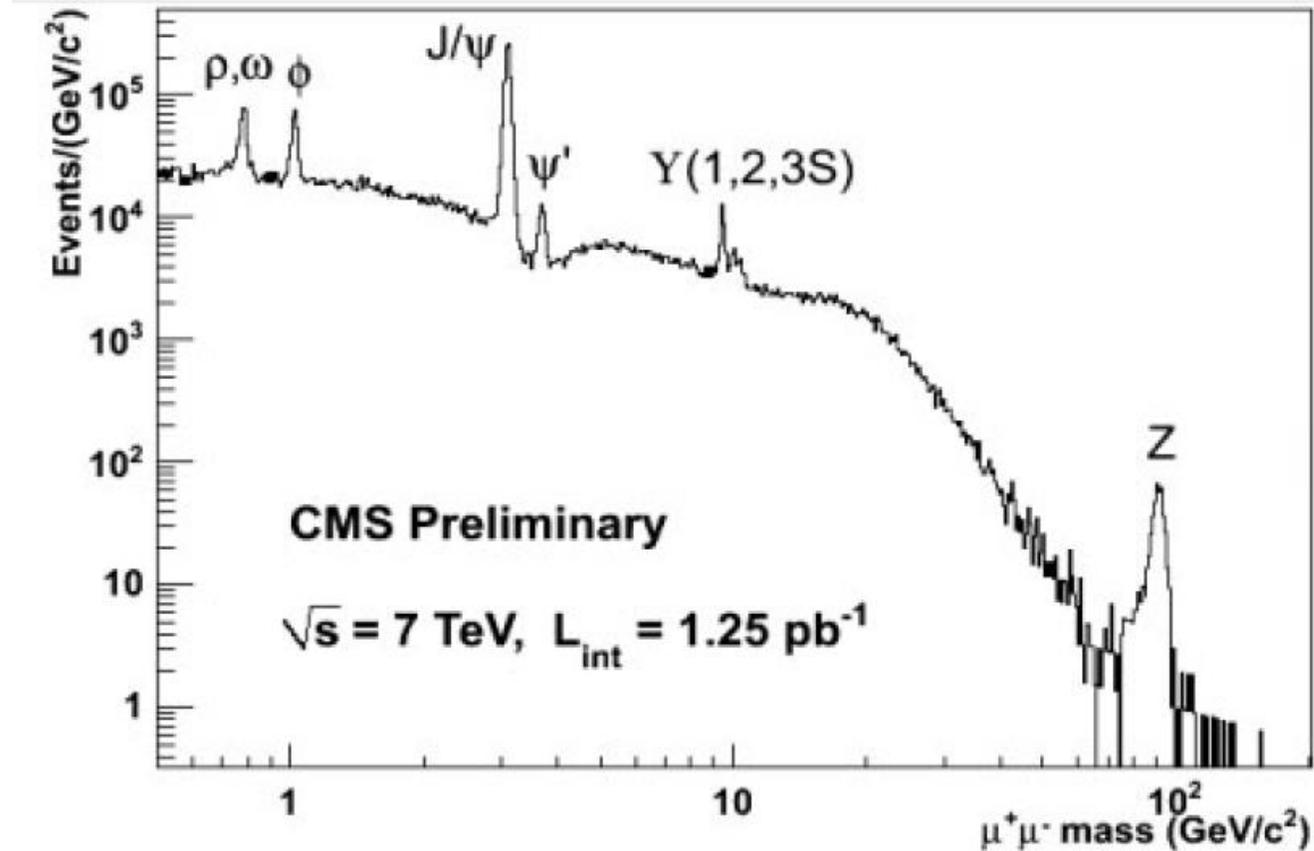
Raggiungere la condizione

$$\frac{\text{signal}}{\sigma} > 5$$

nella realtà può non essere semplice

...gli istogrammi originali!

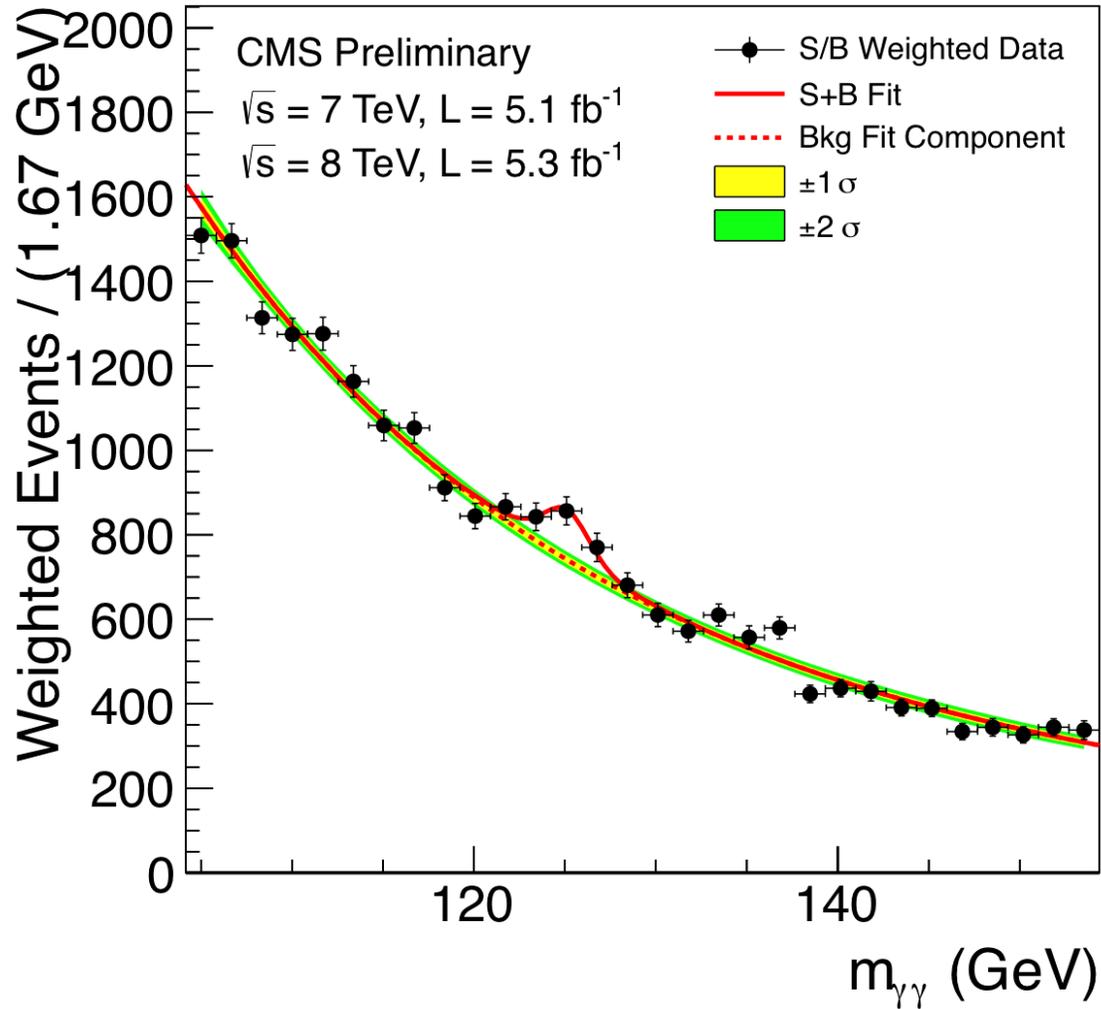
$Z \rightarrow \mu\mu$



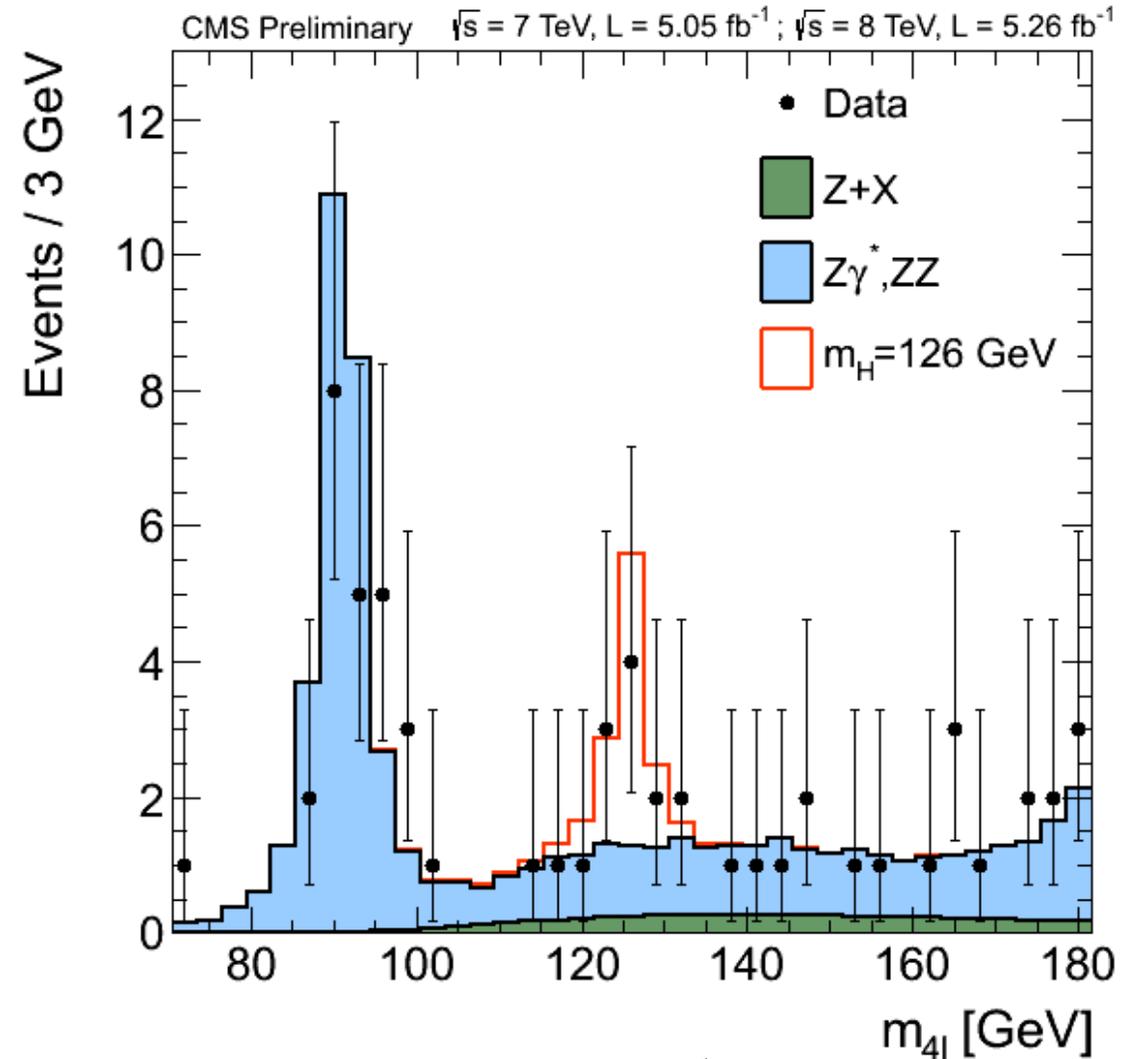
Courtesy of: Dan Green

- The ρ was discovered in 1961.
- The J-psi [J/ψ] was discovered in 1974 (and earned a Nobel Prize for experimenters at the Massachusetts Institute of Technology and SLAC National Accelerator Laboratory).
- The ψ' was discovered in 1977.
- The Y was discovered in 1977.
- The Z was discovered in 1983 (and earned a Nobel Prize for experimenters at CERN).

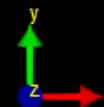
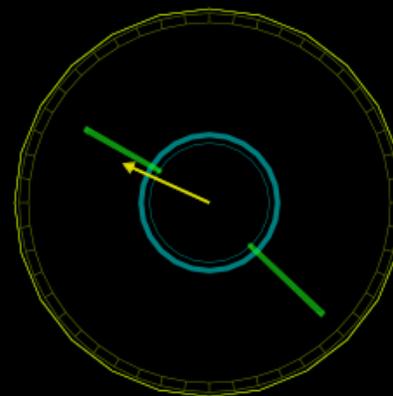
...gli istogrammi originali!



$H \rightarrow \gamma\gamma$



$H \rightarrow 4l$

**Tracking** ?Tracks (reco.) **ECAL** ?Barrel Rec. Hits ▶Endcap Rec. Hits ▶Preshower Rec. Hits ▶**HCAL** ?Barrel Rec. Hits ▶Endcap Rec. Hits ▶Forward Rec. Hits ▶Outer Rec. Hits ▶**Muon** ?**Physics Objects** ?Electron Tracks (GSF) Tracker Muons (Reco) Stand-alone Muons (Reco) Global Muons (Reco) Calorimeter Energy Towers ▶Jets ▶Missing Et (Reco) ▶**Controls:**

-  → rotate
- Ctrl** +  → pan x/y
- Ctrl** +     → pan x/y
- Shift** +  → zoom
- Shift** +   → zoom