



Tecniche sperimentali in fisica delle particelle elementari e introduzione alle attività pratiche

Massimo Casarsa
INFN – Sezione di Trieste



International Masterclasses 2013
Trieste, 4 marzo 2013

Programma

- ◆ Parte I:

tecniche di rivelazione delle particelle elementari;

- ◆ Parte II:

esempio di un vero rivelatore: il rivelatore CMS (Compact Muon Solenoid) al Large Hadron Collider del CERN;

- ◆ Parte III:

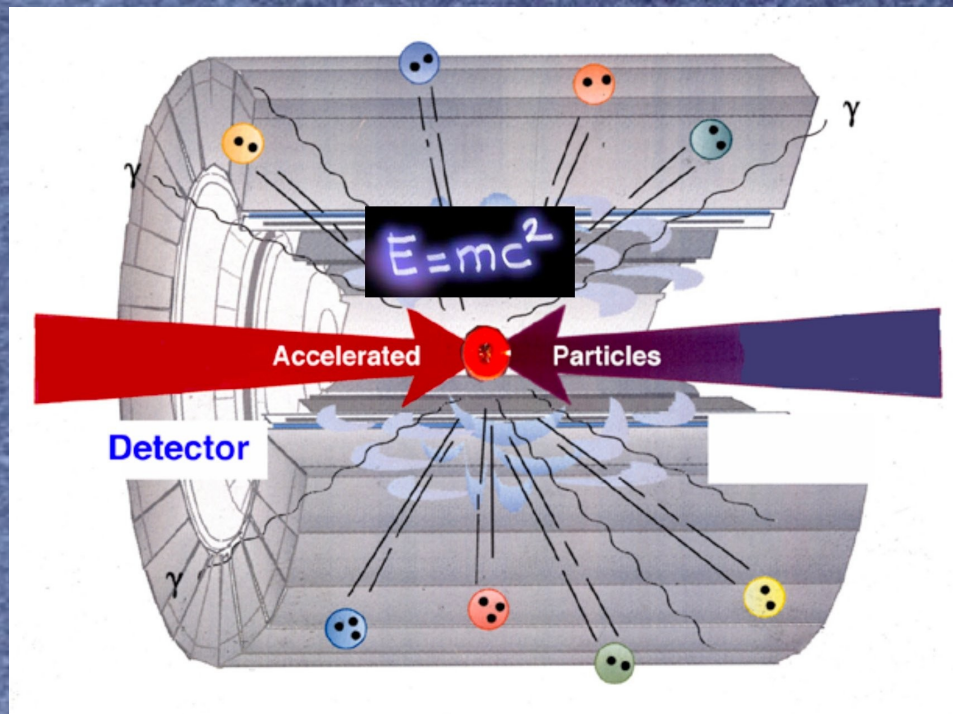
introduzione all'attività di oggi: ricerca delle particelle Z^0 e $W^\pm$ col rivelatore CMS.

Parte I

Rivelazione delle particelle elementari

Come produciamo le particelle da rivelare?

- ◆ Einstein ci ha insegnato che massa ed energia sono equivalenti: $E = mc^2$.
- ◆ Accelerando ad alte energie e facendo collidere due fasci di particelle si creano nuove particelle elementari.



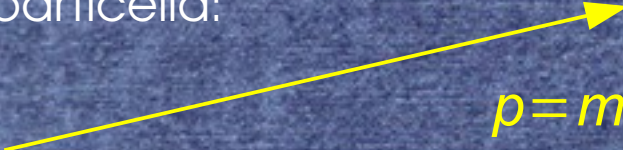
- ◆ Lo studio dei prodotti della collisione consente di investigare i costituenti fondamentali della materia e capire le forze che agiscono tra di loro.

Che particelle sono prodotte nelle collisioni?

- ◆ Dipende essenzialmente dall'energia delle particelle che si scontrano: semplificando, più alta è l'energia della collisione, più particelle e di più alta massa possono essere prodotte.
- ◆ La maggior parte delle particelle elementari sono "instabili", cioè dopo un certo periodo di tempo si disintegrano spontaneamente in particelle più leggere (si dice che "**decadono**").
- ◆ Dal punto di vista sperimentale definiamo:
 - ◆ particelle "**stabili**": vivono abbastanza a lungo da poter essere in principio rivelate:
 - ◆ elettroni (simbolo e);
 - ◆ muoni (simbolo μ), sono come gli elettroni ma 200 volte più pesanti;
 - ◆ adroni carichi e neutri (particelle composte da quark, che "sentono" la forza nucleare forte, come per esempio i protoni e i neutroni);
 - ◆ fotoni (simbolo γ);
 - ◆ neutrini (simbolo ν), sono come gli elettroni, ma neutri e molto più leggeri.
 - ◆ particelle "**instabili**": decadono prima di interagire col rivelatore, ma possono essere "**ricostruite**" a partire dalle particelle figlie stabili.

Cosa misuriamo?

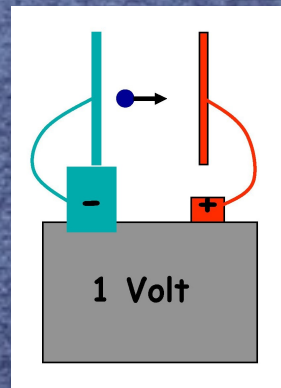
- ◆ Le particelle elementari sono caratterizzate da diverse proprietà:
massa, carica elettrica, *spin* (momento angolare intrinseco),
altri “numeri quantici”.
- ◆ Le informazioni sperimentali che possiamo ricavare con un rivelatore sono:
 - ◆ la **posizione**, cioè dove la particella è passata, e il **tempo** del passaggio;
 - ◆ il **momento** $\vec{p}$ della particella:


$$p = mv \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

- ◆ l'**energia** E della particella:
$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$
- ◆ la **carica elettrica**.
- ◆ Combinando diverse informazioni misurate è possibile identificare il tipo di particella.

Intermezzo: unità di misura dell'energia in Fisica delle Particelle

- ♦ Massa ed energia si equivalgono, possiamo perciò utilizzare la stessa unità di misura.
- ♦ Per praticità nella Fisica delle Particelle Elementari si usa l'**electronVolt**: l'energia che acquista un elettrone quando attraversa una differenza di potenziale di 1 V.



$$E = 1 \text{ eV}$$

- ♦ Per esempio:

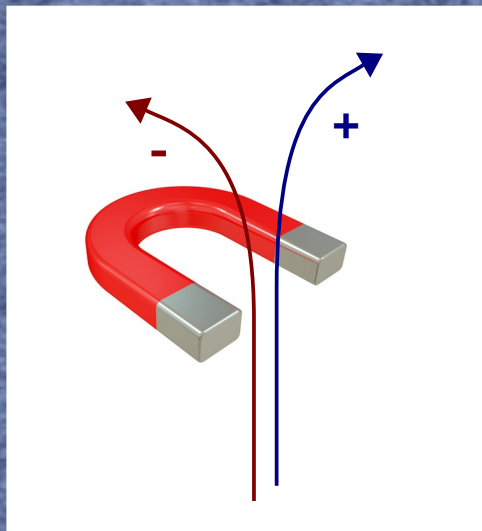
$$m_{\text{protone}} = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg} = 0.938 \text{ GeV}$$

$$m_{\text{elettrone}} = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.0005 \text{ GeV}$$

$$1 \text{ GeV (Giga-electronVolt)} = 10^9 \text{ eV}$$

Misura del momento e della carica elettrica delle particelle cariche (elettroni, muoni, adroni carichi)

♦ Per misurare il **momento** e la **carica** di elettroni muoni e adroni carichi sfruttiamo due fenomeni:



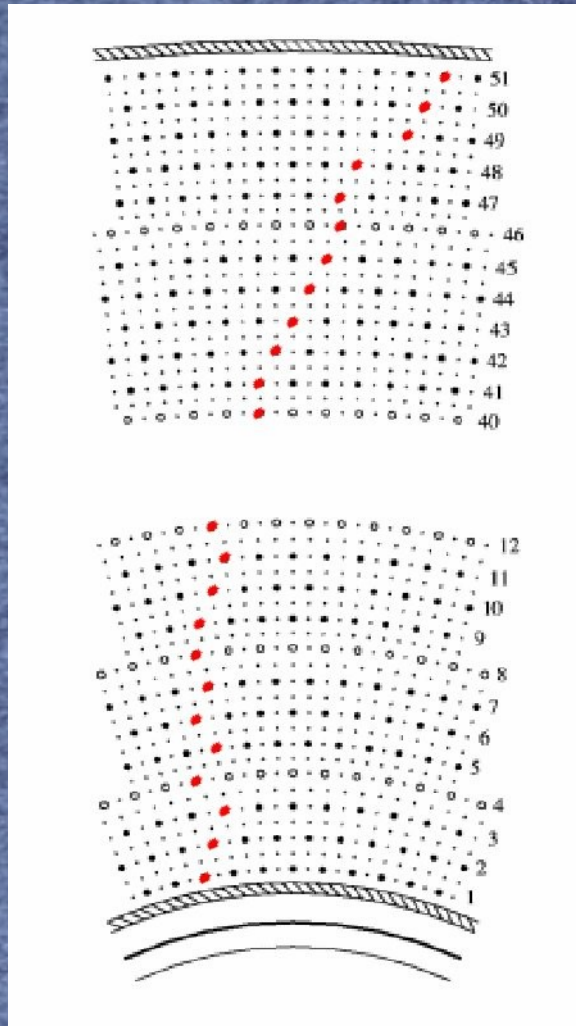
- 1 una particella carica, attraversando un campo magnetico B , percorre una traiettoria curva; se B è uniforme e perpendicolare alla direzione della particella, la traiettoria è una circonferenza di raggio R proporzionale al momento p :

$$p = 0.3 \, B \, R$$

- 2 attraversando materiali non troppo densi, le particelle cariche rilasciano lungo il loro percorso piccole quantità di energia che possono essere rivelate.

Misura del momento e della carica elettrica delle particelle cariche

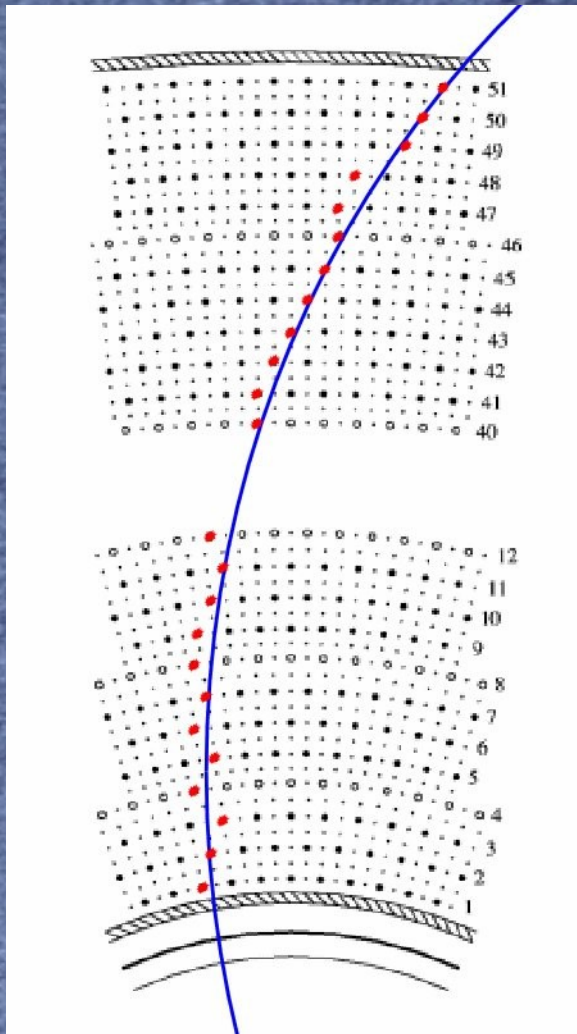
(elettroni, muoni, adroni carichi)



- ◆ Facciamo passare le particelle create nella collisione dentro un campo magnetico uniforme e ne ricostruiamo la traiettoria o “traccia”:
- ◆ una serie di rivelatori disposti nello spazio attorno al punto della collisione (“tracciatori”) indicano dove la particella carica è passata;
- ◆ cerchiamo l'arco di circonferenza che meglio approssimi i punti misurati e ne determiniamo il raggio;
- ◆ la carica della particella è data dal verso di curvatura della traiettoria, orario o antiorario.

Misura del momento e della carica elettrica delle particelle cariche

(elettroni, muoni, adroni carichi)

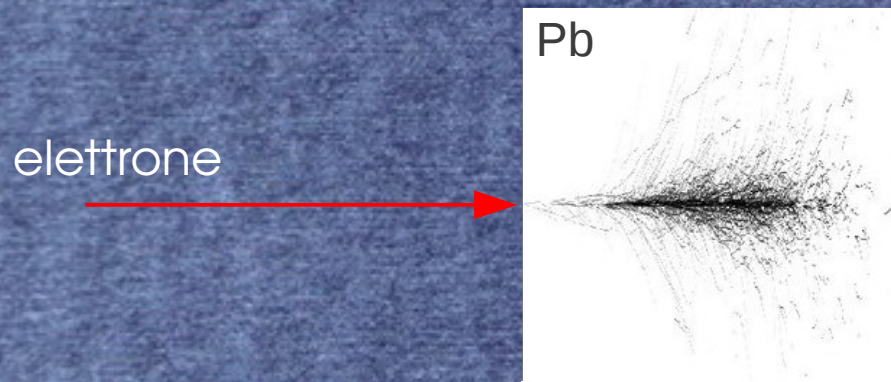


- ◆ Facciamo passare le particelle create nella collisione dentro un campo magnetico uniforme e ne ricostruiamo la traiettoria o “traccia”:
- ◆ una serie di rivelatori disposti nello spazio attorno al punto della collisione (“tracciatori”) indicano dove la particella carica è passata;
- ◆ cerchiamo l'arco di circonferenza che meglio approssimi i punti misurati e ne determiniamo il raggio;
- ◆ la carica della particella è data dal verso di curvatura della traiettoria, orario o antiorario.

Misura dell'energia delle particelle

(elettroni, fotoni, adroni carichi e neutri)

- ♦ Per misurare l'energia degli elettroni, dei fotoni e degli adroni carichi e neutri usiamo i “**calorimetri**”:
 - ♦ le particelle vengono fatte passare attraverso una grossa quantità di materiale molto denso (ferro, tungsteno, piombo, cristalli speciali ...) dove dissipano tutta la loro energia e si fermano;

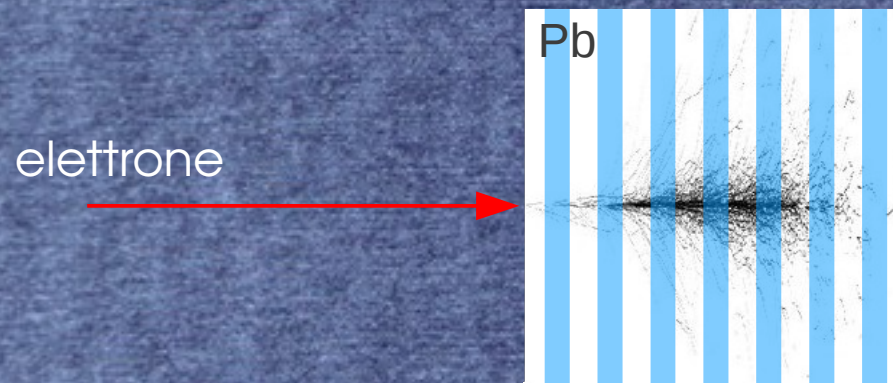


- ♦ intervallando il materiale dissipatore con materiale sensibile, l'energia della particella viene campionata e convertita in un segnale misurabile che è proporzionale all'energia.
- ♦ A differenza della misura del momento nei tracciatori, la misura dell'energia nei calorimetri rappresenta una “**misura distruttiva**” della particella.

Misura dell'energia delle particelle

(elettroni, fotoni, adroni carichi e neutri)

- ♦ Per misurare l'energia degli elettroni, dei fotoni e degli adroni carichi e neutri usiamo i “**calorimetri**”:
 - ♦ le particelle vengono fatte passare attraverso una grossa quantità di materiale molto denso (ferro, tungsteno, piombo, cristalli speciali ...) dove dissipano tutta la loro energia e si fermano;

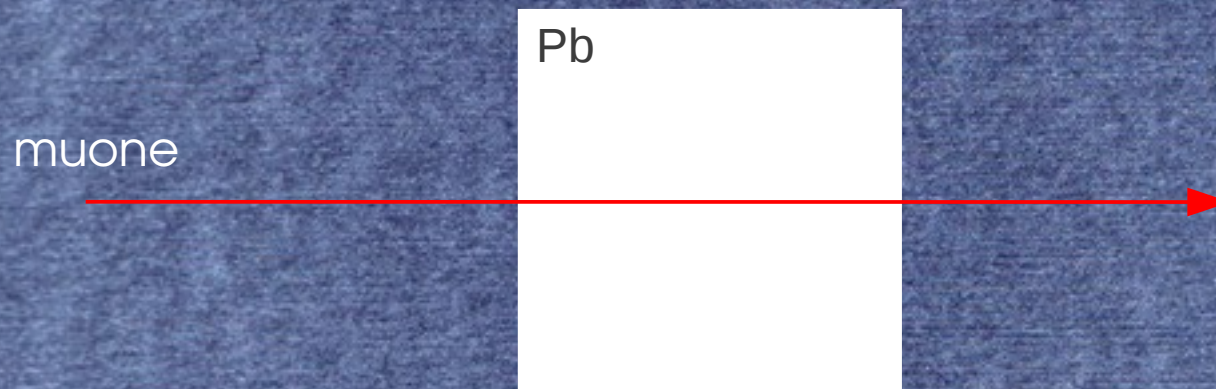


- ♦ intervallando il materiale dissipatore con materiale sensibile, l'energia della particella viene campionata e convertita in un segnale misurabile che è proporzionale all'energia.
- ♦ A differenza della misura del momento nei tracciatori, la misura dell'energia nei calorimetri rappresenta una “**misura distruttiva**” della particella.

Un caso un po' particolare: i muoni

♦ I muoni (μ):

- ♦ perdono pochissima energia quando passano attraverso anche la materia più densa, sono particelle altamente “penetranti”;



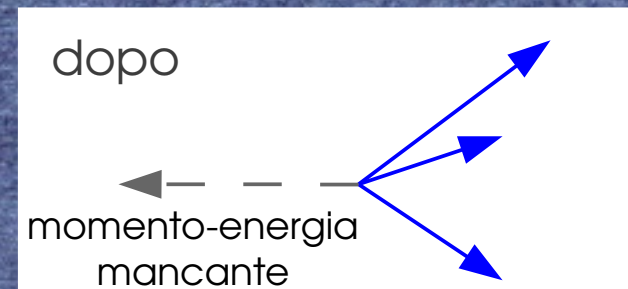
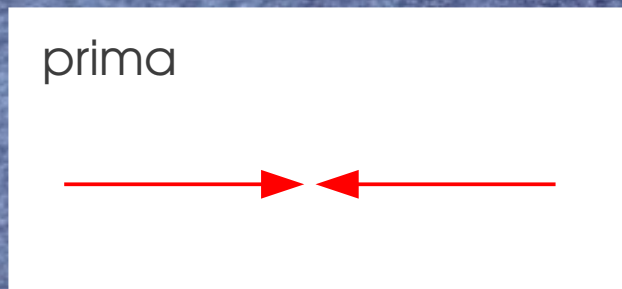
- ♦ rilasciano solo una frazione piccolissima della loro energia nei calorimetri, però sono particelle cariche e producono una traccia nel tracciatore, da cui si misura il momento;
- ♦ questa loro peculiarità li rende facilmente identificabili.

Un caso ancora più particolare: i neutrini

♦ I neutrini (ν):

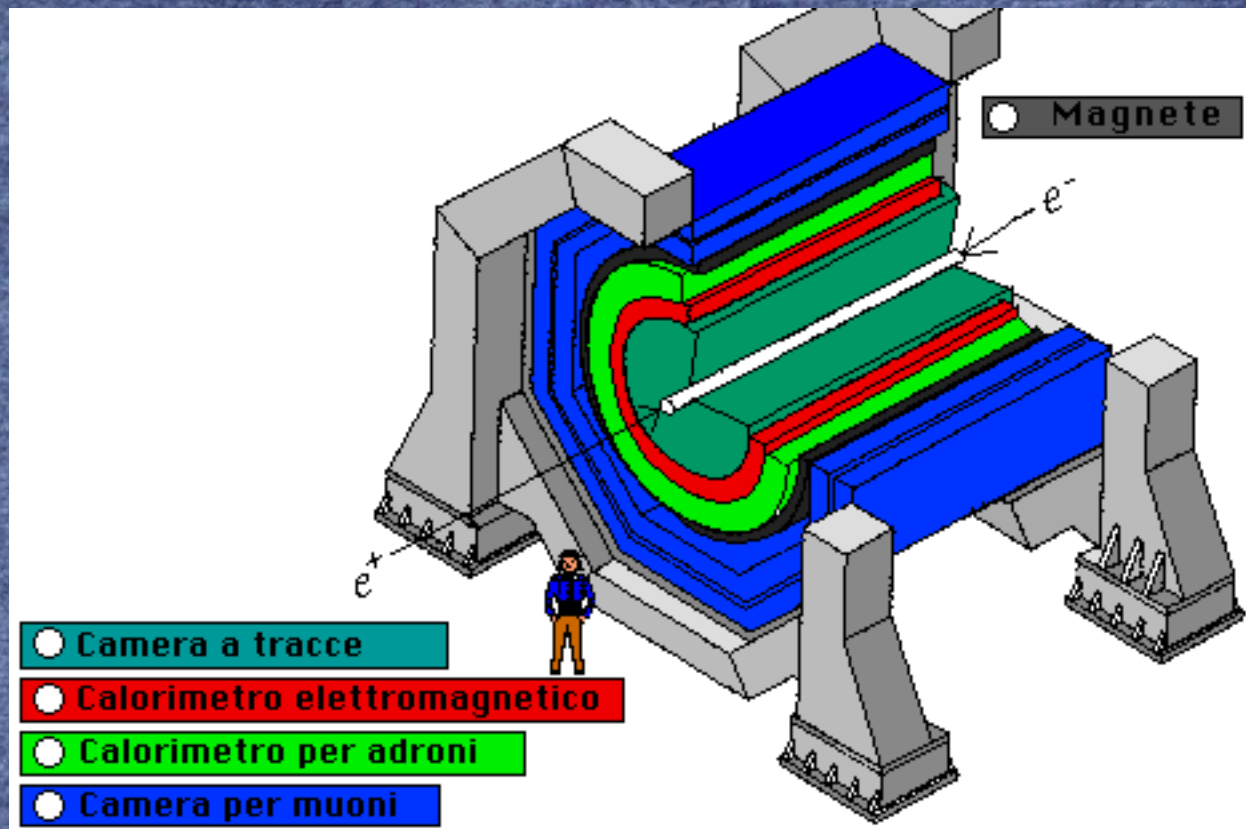
- ♦ sono particelle neutre leggerissime, che interagiscono pochissimo con la materia che attraversano;
- ♦ non vengono rivelati direttamente: non lasciano tracce nel tracciatore né energia nei calorimetri;
- ♦ la loro presenza è però indicata indirettamente dal **momento ed energia mancanti**:

momento ed energia totali si conservano tra prima e dopo la collisione, una mancanza di momento o energia indicano la presenza di particelle non rivelate.



Struttura tipica dei rivelatori

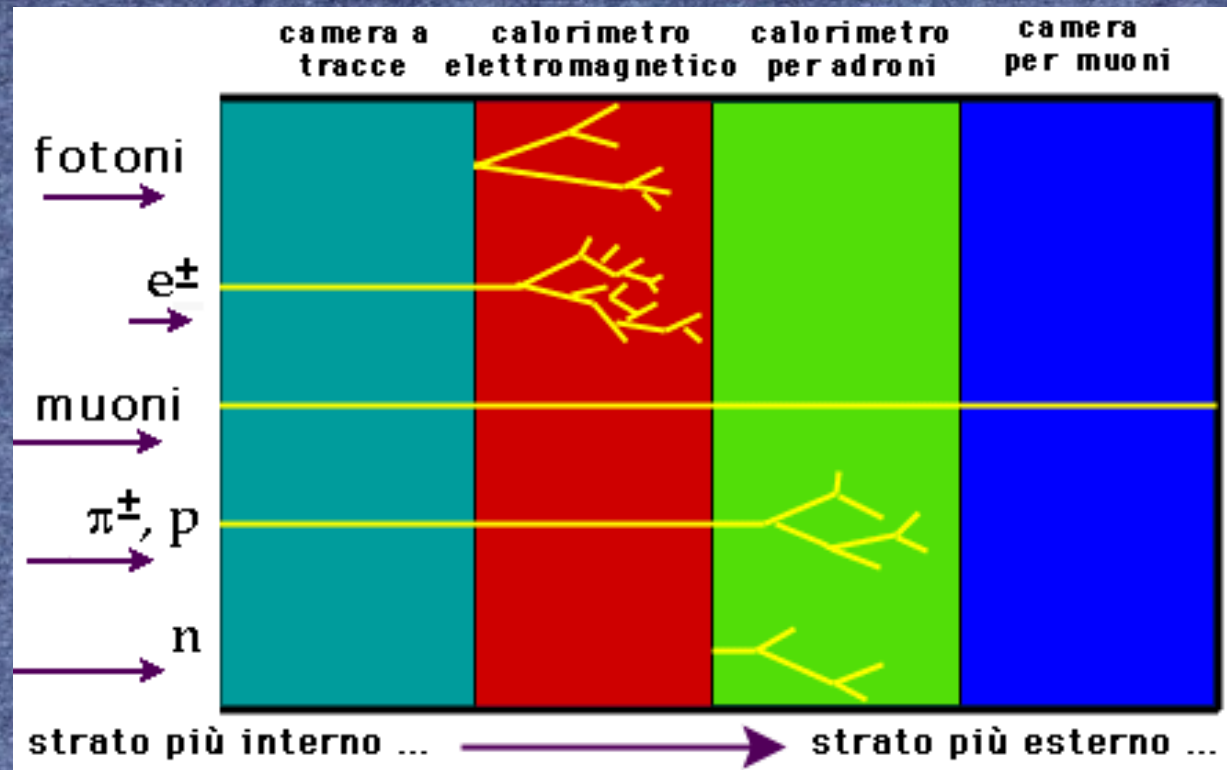
- ♦ I rivelatori di particelle sono costituiti da un insieme di sotto-rivelatori diversi.
- ♦ Le tecniche di rivelazione descritte precedentemente dettano una **struttura a strati** cilindrici concentrici per i rivelatori operanti ai *collider*.
- ♦ Procedendo dall'asse del cilindro verso l'esterno tipicamente abbiamo:
 - ♦ un **tracciatore** immerso in un campo magnetico uniforme;
 - ♦ un “**calorimetro elettromagnetico**” per misurare l'energia degli elettroni e dei fotoni;
 - ♦ un “**calorimetro adronico**” per misurare l'energia degli adroni;
 - ♦ “**rivelatori di posizione**” per rivelare il passaggio dei muoni.



Identificazione delle particelle

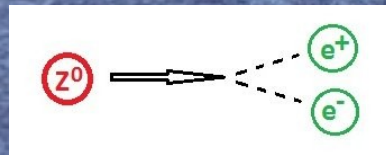
♦ Quindi, disponendo i rivelatori in un certo ordine e combinandone le informazioni, è possibile identificare diversi tipi di particelle:

- ♦ **fotone**: energia nel calorimetro elettromagnetico;
- ♦ **elettrone**: traccia + energia nel calorimetro elettromagnetico;
- ♦ **muone**: traccia + segnale nei rivelatori di muoni;
- ♦ **adrone carico**: traccia + energia nel calorimetro adronico;
- ♦ **adrone neutro**: energia nel calorimetro adronico.



E le particelle instabili?

- ◆ Le particelle instabili decadono immediatamente in particelle più leggere ("particelle figlie") prima di poter essere rivelate.
- ◆ Sfruttando le leggi di conservazione cui i processi di decadimento son soggetti (momento, energia, carica elettrica ...), è possibile determinare le caratteristiche ("ricostruire") della particella instabile a partite dalle particelle figlie.
- ◆ Esempio:

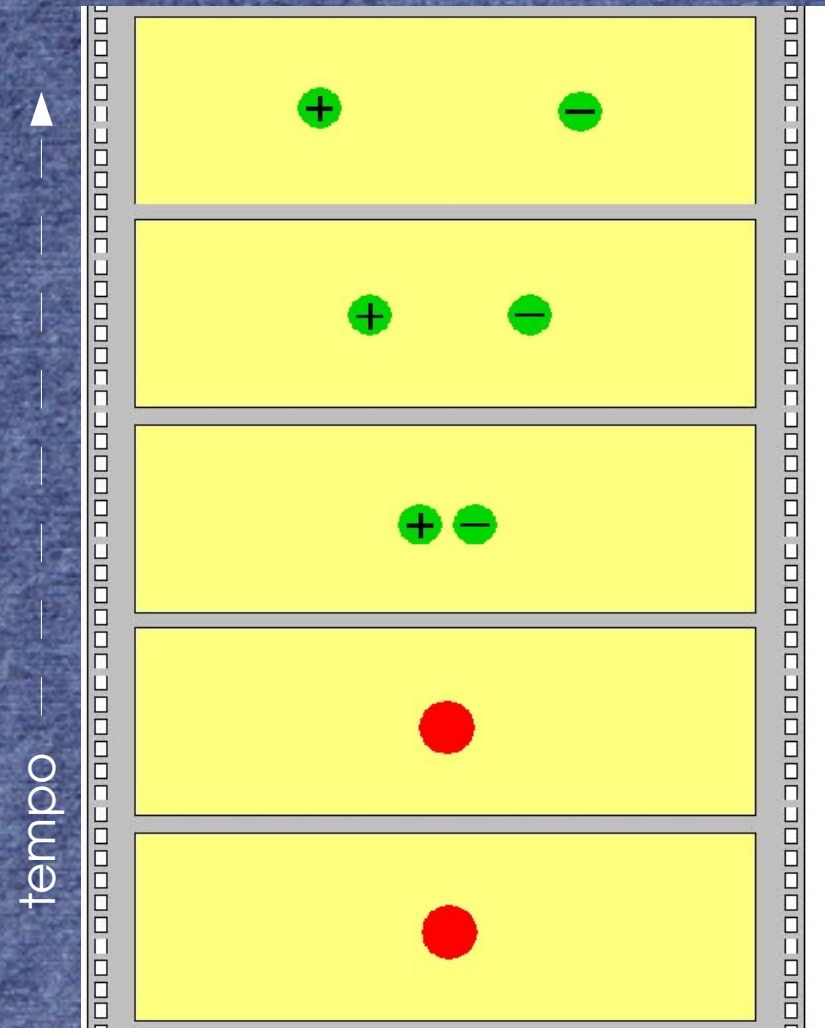


- ◆ carica della Z⁰:

$$Q = +1 - 1 = 0$$

- ◆ massa della Z⁰:

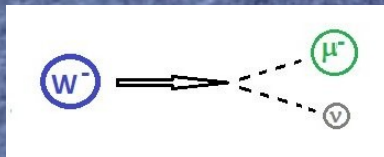
$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2)$$



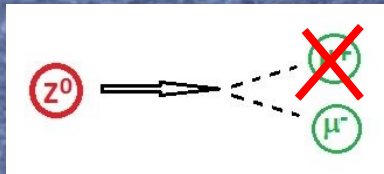
Ma la vita non è sempre così facile!

- ◆ Ci sono casi in cui non è possibile ricostruire completamente la particella instabile:

- ◆ se una delle particelle figlie è un neutrino, come per esempio

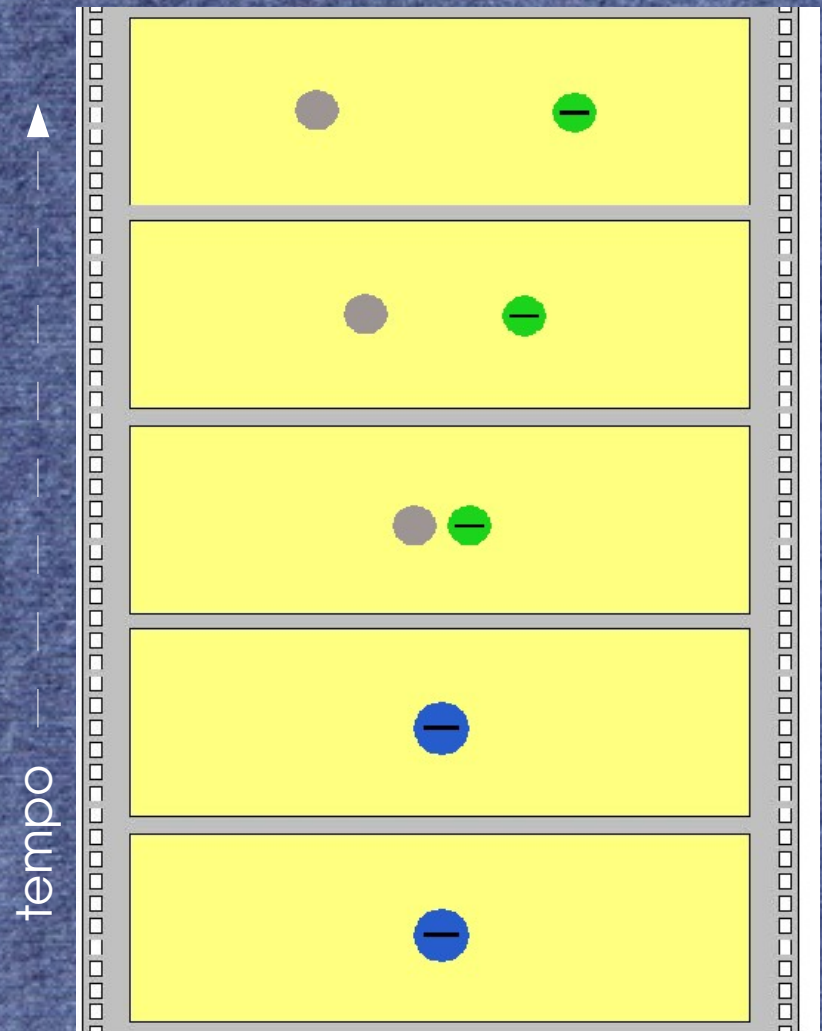


- ◆ se una delle figlie per qualche motivo non viene rivelata:



- ◆ E casi in cui la particella instabile viene ricostruita male:

- ◆ tra le tante particelle prodotte nella collisione vengono scelte quelle sbagliate.



Parte II

Il rivelatore CMS al Large Hadron Collider del CERN

Il Large Hadron Collider

- ♦ LHC (Large Hadron Collider) è un acceleratore di particelle, costruito in un tunnel sotterraneo circolare al confine tra Francia e Svizzera vicino Ginevra.

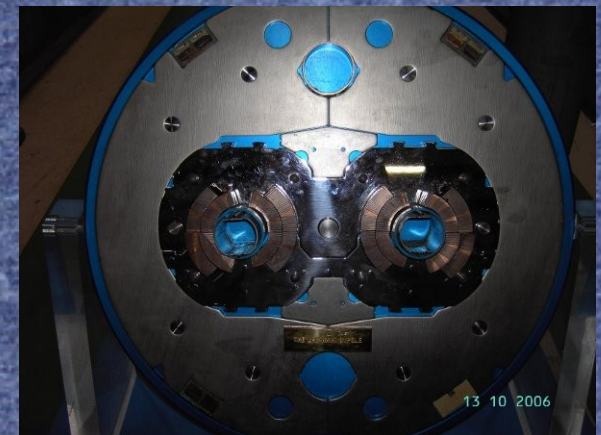


LHC in breve

Large perché è lungo 27 km ed è costituito da oltre 1600 magneti;
Hadron perché accelera “fasci” di adroni:
protoni (il 90% del tempo) e nuclei di piombo;
Collider perché fa collidere le particelle che accelera.

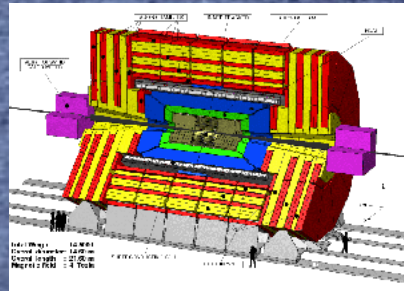
♦ Come funziona?

- ♦ Due fasci di protoni circolano in tubi sotto vuoto (“beam-pipe”) in direzioni opposte.
- ♦ Campi elettrici molto intensi accelerano i fasci di protoni a un'energia di **4000 GeV** e velocità prossime a quella della luce.
- ♦ Potenti magneti superconduttori, mantenuti alla temperatura di $-271,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, sono usati per focalizzare i fasci e farli curvare.
- ♦ I fasci di protoni sono fatti collidere 40.000.000 di volte ogni secondo.



Gli esperimenti di LHC

- ♦ I fasci di protoni/nuclei di Pb collidono in corrispondenza di quattro rivelatori:
 - ♦ due esperimenti “general purpose”, progettati cioè per studiare tutti i processi di fisica accessibili a LHC, e ottimizzati per trovare cose nuove:

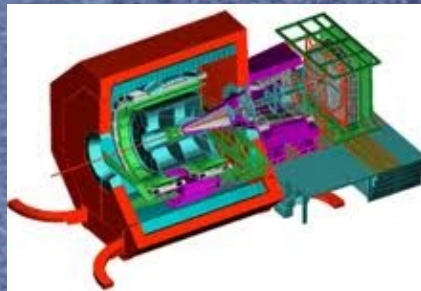


CMS



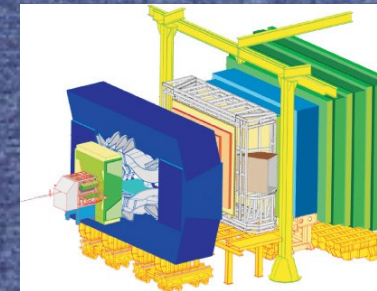
ATLAS

- ♦ due esperimenti specializzati per studiare processi particolari di fisica:



ALICE

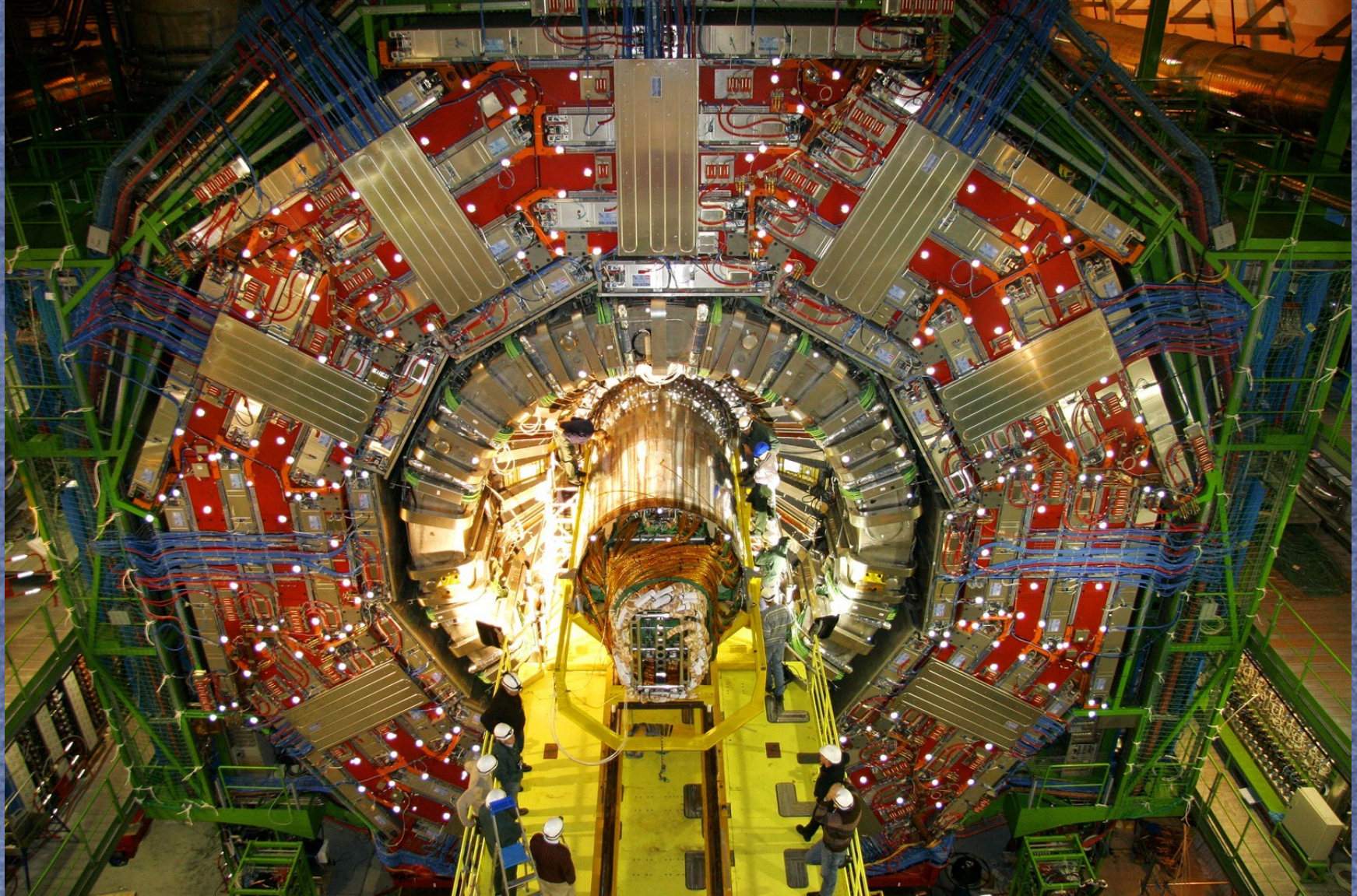
per studiare le collisioni Pb/Pb



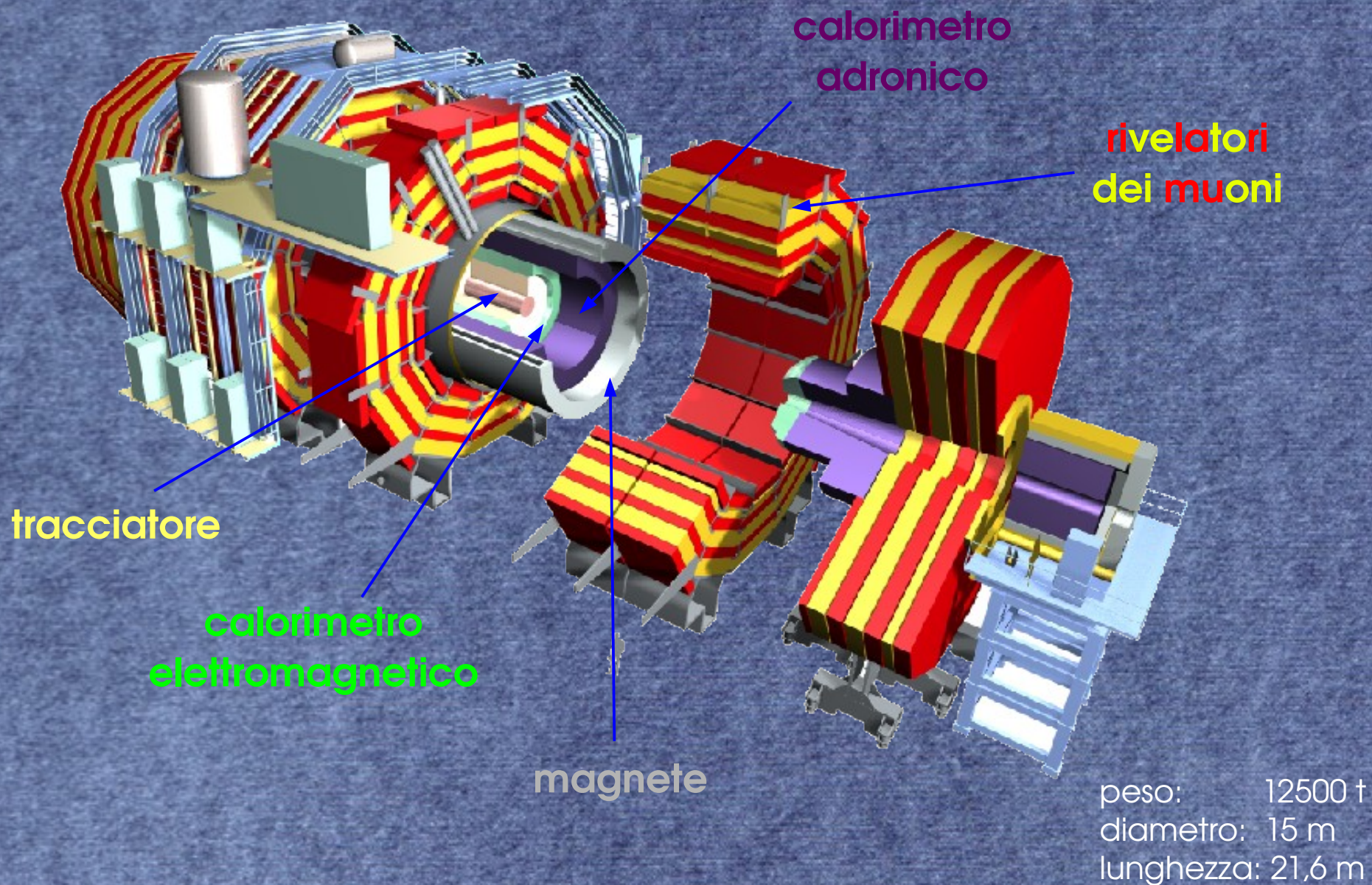
LHCb

per studiare i quark *b*

Il rivelatore CMS

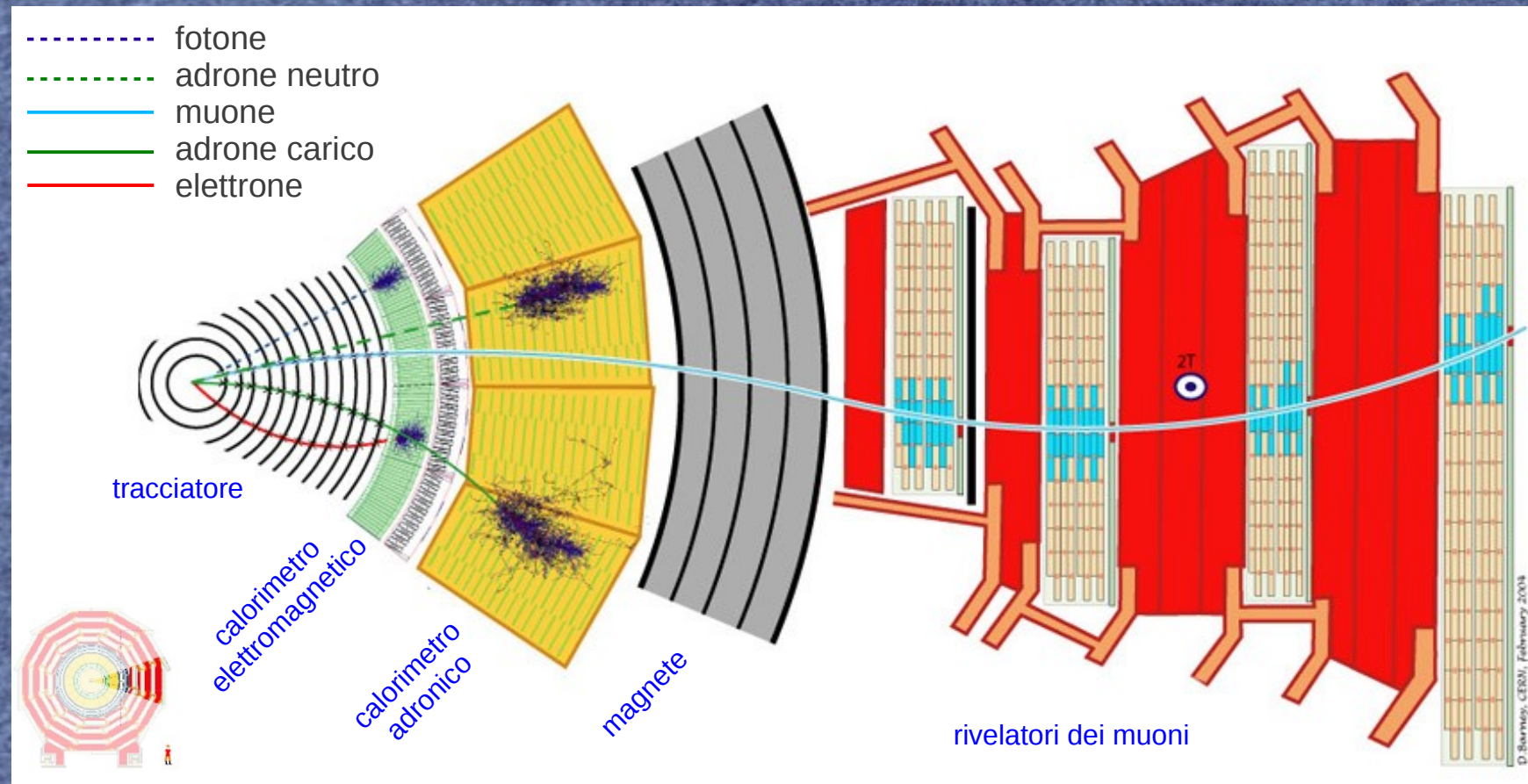


Il rivelatore CMS



Cosa succede dentro il rivelatore?

- Le particelle che attraversano CMS dal centro verso l'esterno interagiscono a seconda del tipo coi diversi sotto-rivelatori.



Cosa vede il rivelatore?

- ♦ I sotto-rivelatori che compongono CMS registrano i segnali rilasciati dalle particelle.



Cosa ci trasmette il rivelatore?

- ♦ I segnali raccolti dai sotto-rivelatori ad ogni collisione sono convertiti in formato binario e registrati.

```
000100001111110000111000111000001110000000111000000111110000011
11110111011010101010011100111001000110011000100011000101000100
101001010000110100100100010010001000100010001001000100000000
0000000111110000000000000000111110101010101000000000100101011111
1111111111110000010010010001001000100001010101101010101010100
0101111110000010001000100110010100100100010110001000100010001
0010000100100001000100010001000100010001001001010010000100010001
00001001000100001000100010000100001000100000000101111100000010
0111010011100100100010001001000100100101000101110001111000100
101111111111100100100010010100010001011111110011111000101010101
010101010101010101010101010101010100000011100100100100011110001
001001010001000100100010010100010001110010010010010010010010
01010101010101010101011001111000011100011100111110011111100010
```


Un enorme flusso di dati

- ◆ CMS è come una fotocamera digitale da 78 Megapixels che scatta 40.000.000 di foto al secondo.
- ◆ Ogni secondo vengono prodotti circa 300.000 Gb di dati, un flusso troppo grande per salvare tutti i dati su qualsiasi tipo di supporto.
- ◆ Bisogna selezionare in tempo reale solo i dati più interessanti.
- ◆ Il sistema preposto a questo si chiama “trigger”:
 - ◆ 100 foto al secondo selezionate per analisi dettagliata;
 - ◆ 200 Mbyte/secondo scritti su nastro magnetico.

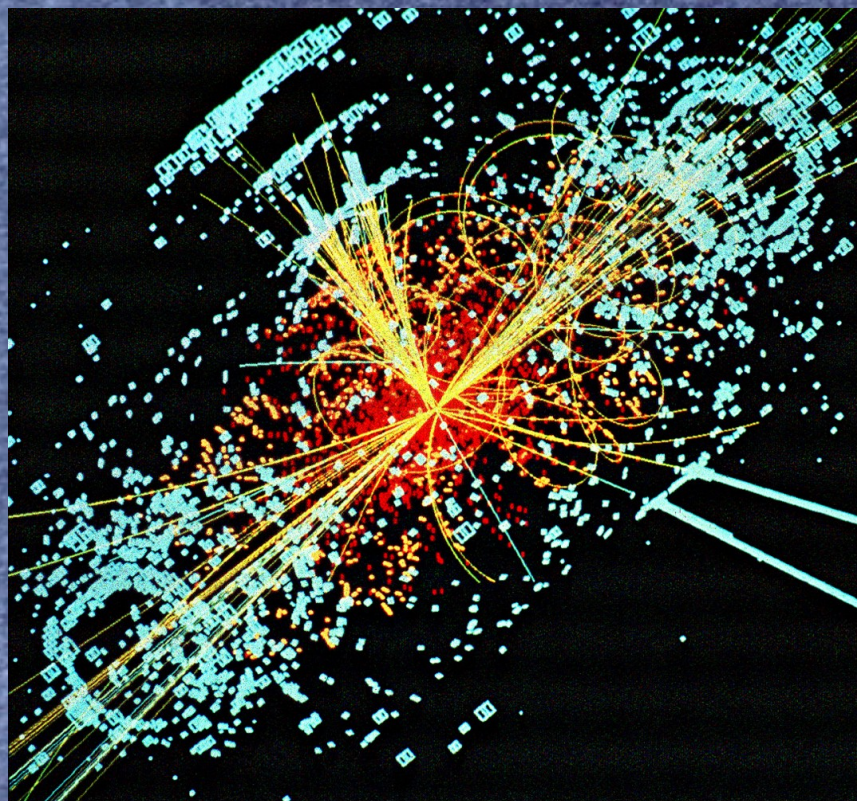


200 MB/s



L'evento

- ◆ Decodificando e combinando le informazioni provenienti da tutti i sottorivelatori ad ogni collisione, ricostruiamo “l'evento”, cioè l'insieme dei prodotti di una collisione, la “foto” di quello che succede al meglio di come il nostro rivelatore permetta.



Che uso fanno i fisici di tutti questi eventi?

♦ Cosa?

- ♦ Misurano le proprietà di fenomeni noti per confrontarsi con le predizioni della teoria e verificarne la fondatezza;
- ♦ discriminano tra modelli teorici diversi;
- ♦ ricercano fenomeni nuovi non inquadrati in nessuna teoria.

♦ Come?

- ♦ Le collisioni artificialmente prodotte nell'acceleratore, consentono di effettuare le misure in modo controllato e ripetibile.
- ♦ I risultati ottenuti vengono sottoposti allo scrutinio della comunità scientifica internazionale: sono documentati dettagliatamente e pubblicati, affinché possano essere ripetuti e verificati.

Parte III

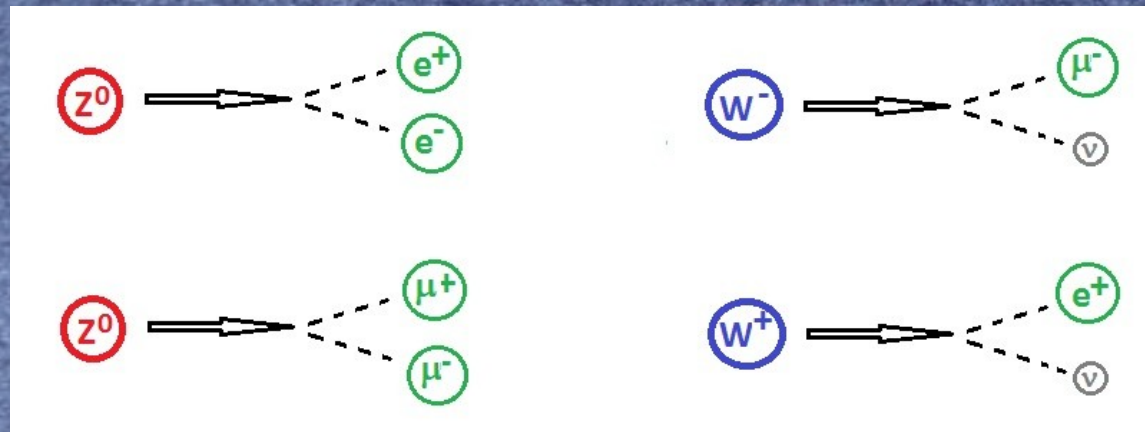
Ricerca di Z^0 e $W^\pm$ col
rivelatore CMS

Ricerca di Z^0 e $W^\pm$

- ◆ Questo pomeriggio avrete la possibilità di provare direttamente il lavoro del fisico sperimentale.
- ◆ Avrete a disposizione 100 eventi di CMS da “**analizzare**”, cioè passare in rassegna alla ricerca di candidati Z^0 e $W^\pm$ (ma si fa lo stesso anche per il bosone di Higgs).
- ◆ Cosa sono le Z^0 e $W^\pm$?
 - ◆ sono le particelle mediatrici della forza nucleare debole, si chiamano “bosoni”;
 - ◆ furono predette dai teorici alla fine degli anni '60 e scoperte al CERN nel 1983 da Carlo Rubbia e i suoi collaboratori;
 - ◆ sono prodotte in abbondanza a LHC, pesano rispettivamente 90 e 80 volte il protone e decadono molto rapidamente.

Cosa si cerca in pratica?

- ♦ L'esito delle collisioni è casuale, non vengono prodotte sempre le stesse particelle, alcuni processi sono molto rari e bisogna vagliare molti milioni di eventi per trovarli, per esempio la produzione del bosone di Higgs.
- ♦ In genere una particolare ricerca si focalizza su uno dei tanti modi di decadimento della particella "instabile" cercata, nel vostro caso:



Metodologia seguita

♦ Il metodo di solito seguito consiste in:

- ① individuare le caratteristiche peculiari del decadimento cercato, per esempio due elettroni di carica opposta;
- ② stabilire a priori una serie di criteri oggettivi di selezione dei “candidati”, per esempio contare gli elettroni che hanno una certa carica;
- ③ applicare tali criteri sull'insieme di eventi a disposizione.

♦ Due note:

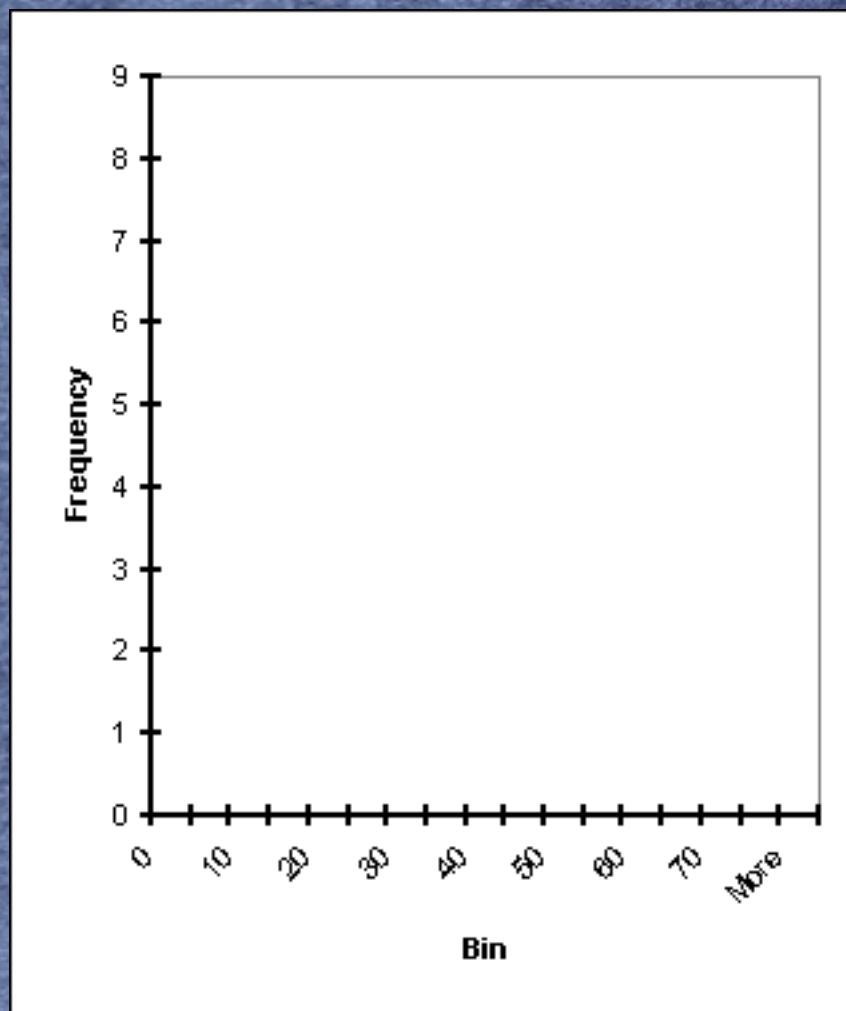
- ♦ Parliamo di “candidati” perché identifichiamo le Z^0 e $W^\pm$ a partire dalle loro figlie, ma non è garantito che pigliamo sempre quelle giuste, in realtà scegliamo delle potenziali Z^0 o $W^\pm$.
- ♦ La ricerca che voi farete “a mano” su 100 eventi, in genere la si fa in modo computerizzato su milioni di eventi, ma la procedura è la stessa.

♦ Una distinzione:

- ♦ nel caso della Z^0 è possibile ricostruirne la massa a partire dalle masse e dai momenti misurati delle particelle figlie;
- ♦ ciò non si può fare nel caso della $W^\pm$ a causa del neutrino non rivelato.

Cosa sono gli istogrammi?

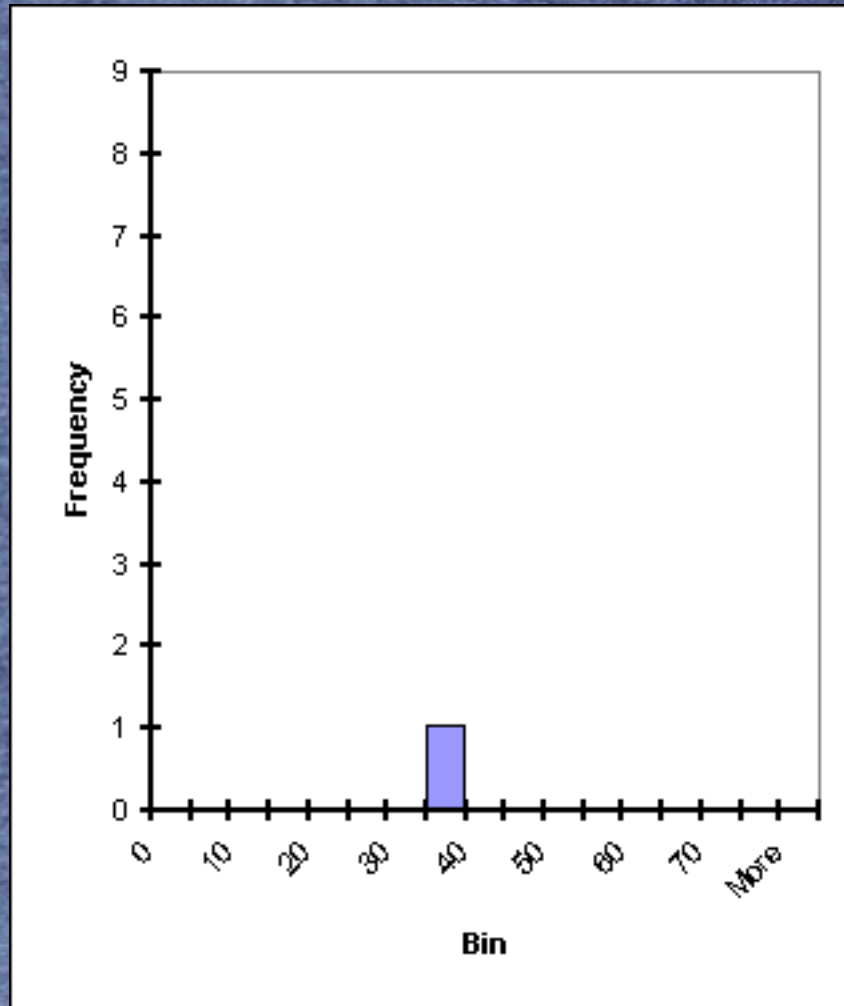
- ◆ Un metodo molto pratico e conveniente di organizzare i dati e visualizzarli graficamente è di riportarne la frequenza di occorrenza in un **istogramma**:



- ◆ consideriamo il caso di una ipotetica particella instabile X: riportiamo sull'asse x il valore della massa ricostruita;
 - ◆ dividiamo l'asse x in intervallini: nell'esempio tra 0 e 5, 5 e 10, ... ;
 - ◆ ogni volta che la massa ricostruita cade in uno degli intervallini, aumentiamo di un'unità l'altezza della colonnina corrispondente.
- ◆ Ci aspettiamo un **"picco"** in corrispondenza del valore della massa della particella madre.

Cosa sono gli istogrammi?

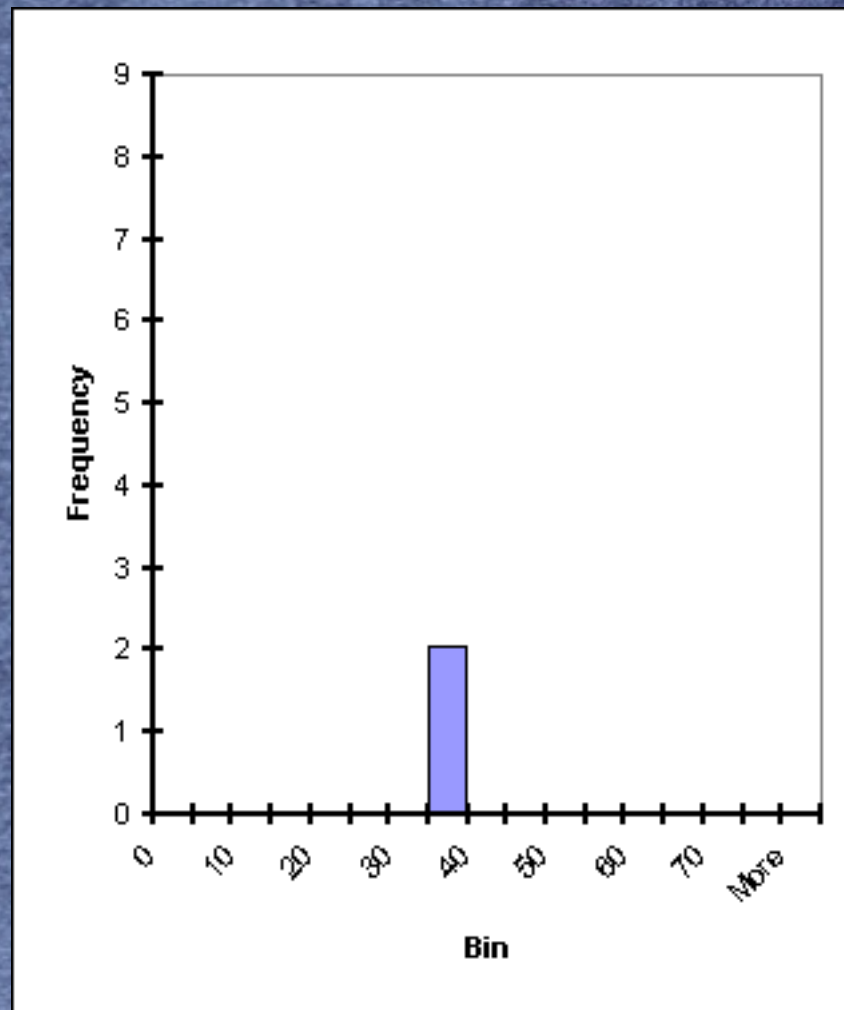
- ◆ Un metodo molto pratico e conveniente di organizzare i dati e visualizzarli graficamente è di riportarne la frequenza di occorrenza in un **istogramma**:



- ◆ consideriamo il caso di una ipotetica particella instabile X: riportiamo sull'asse x il valore della massa ricostruita;
 - ◆ dividiamo l'asse x in intervallini: nell'esempio tra 0 e 5, 5 e 10, ... ;
 - ◆ ogni volta che la massa ricostruita cade in uno degli intervallini, aumentiamo di un'unità l'altezza della colonnina corrispondente.
- ◆ Ci aspettiamo un **"picco"** in corrispondenza del valore della massa della particella madre.

Cosa sono gli istogrammi?

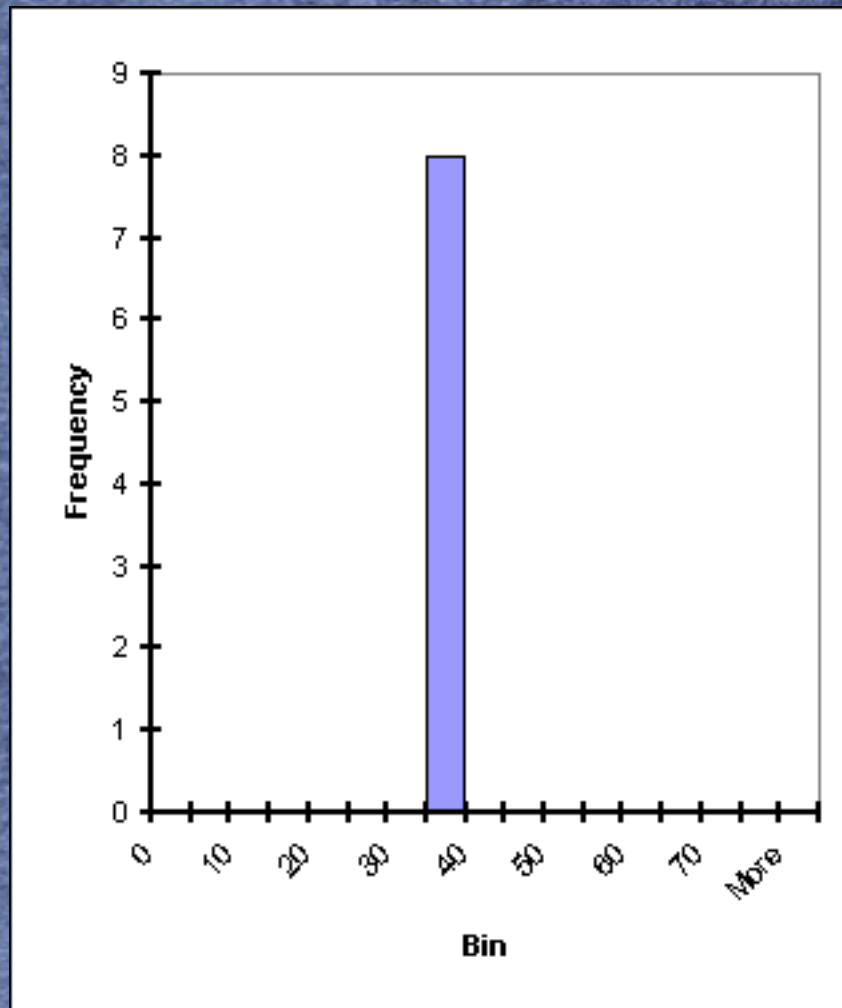
- ◆ Un metodo molto pratico e conveniente di organizzare i dati e visualizzarli graficamente è di riportarne la frequenza di occorrenza in un **istogramma**:



- ◆ consideriamo il caso di una ipotetica particella instabile X: riportiamo sull'asse x il valore della massa ricostruita;
 - ◆ dividiamo l'asse x in intervallini: nell'esempio tra 0 e 5, 5 e 10, ... ;
 - ◆ ogni volta che la massa ricostruita cade in uno degli intervallini, aumentiamo di un'unità l'altezza della colonnina corrispondente.
- ◆ Ci aspettiamo un **"picco"** in corrispondenza del valore della massa della particella madre.

Cosa sono gli istogrammi?

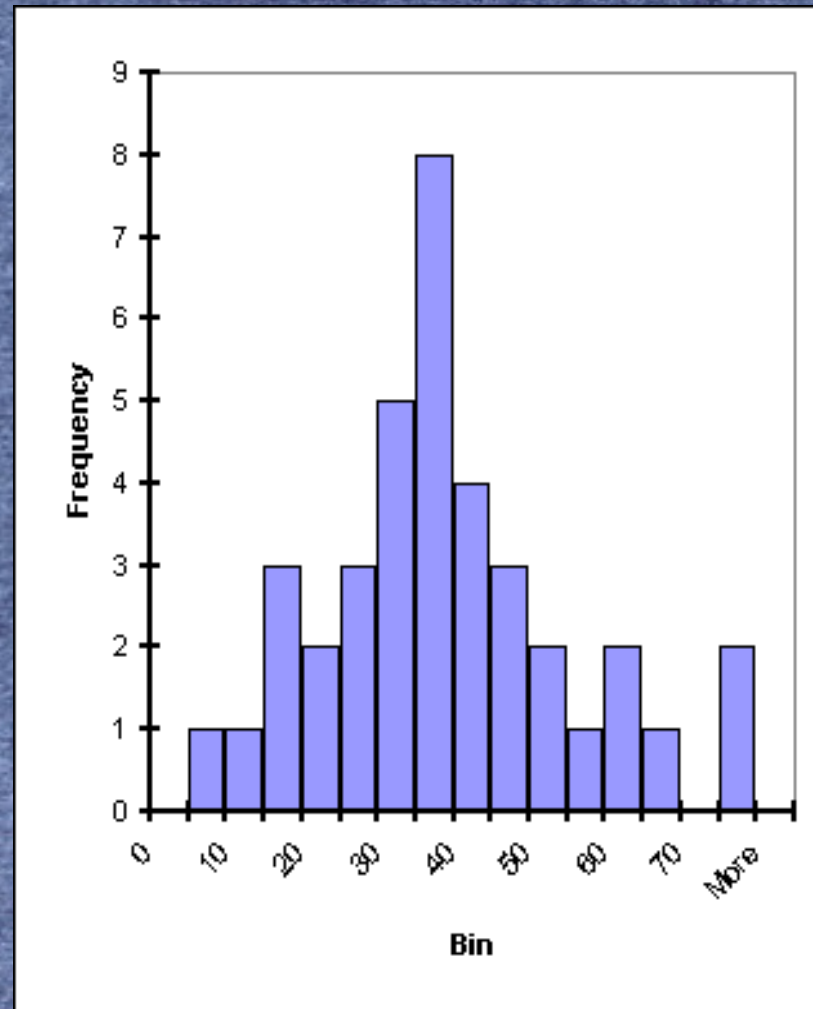
- ◆ Un metodo molto pratico e conveniente di organizzare i dati e visualizzarli graficamente è di riportarne la frequenza di occorrenza in un **istogramma**:



- ◆ consideriamo il caso di una ipotetica particella instabile X: riportiamo sull'asse x il valore della massa ricostruita;
 - ◆ dividiamo l'asse x in intervallini: nell'esempio tra 0 e 5, 5 e 10, ... ;
 - ◆ ogni volta che la massa ricostruita cade in uno degli intervallini, aumentiamo di un'unità l'altezza della colonnina corrispondente.
- ◆ Ci aspettiamo un **"picco"** in corrispondenza del valore della massa della particella madre.

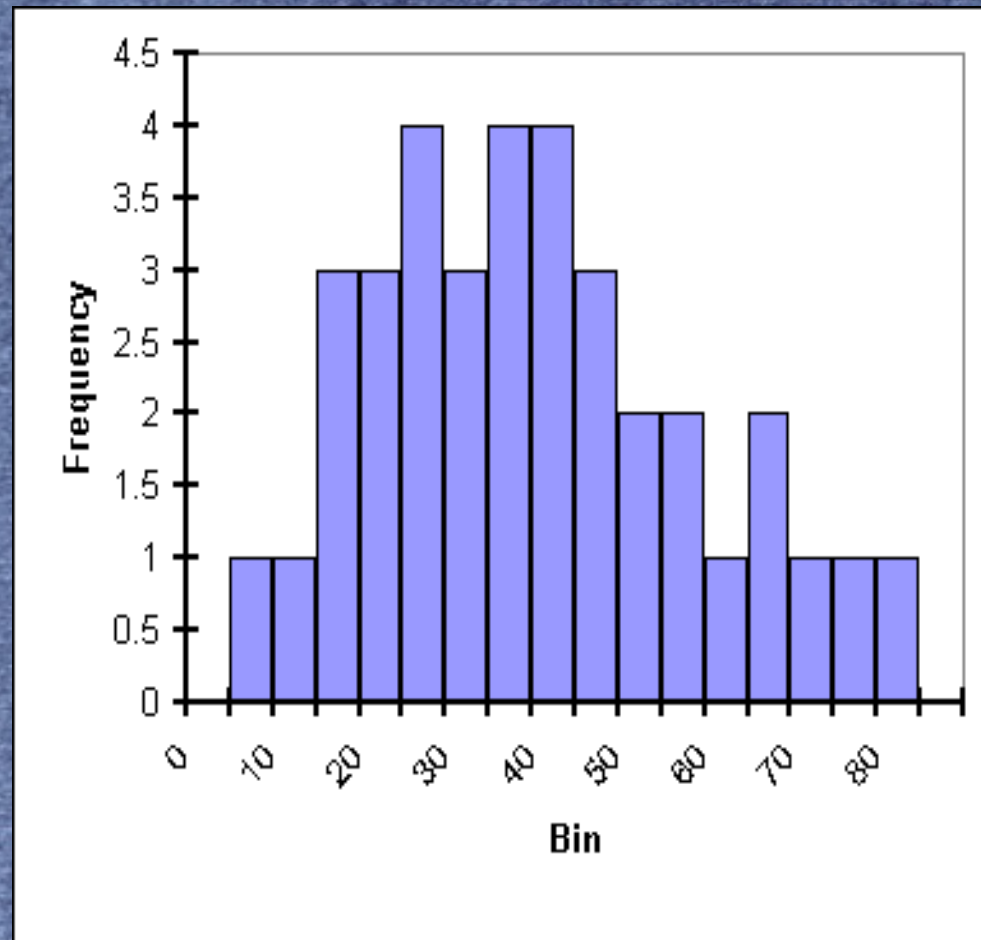
Ma non è sempre così facile

- ◆ Non ricostruiamo sempre esattamente la massa della particella madre, perché non misuriamo perfettamente i momenti delle particelle figlie: il picco si allarga.

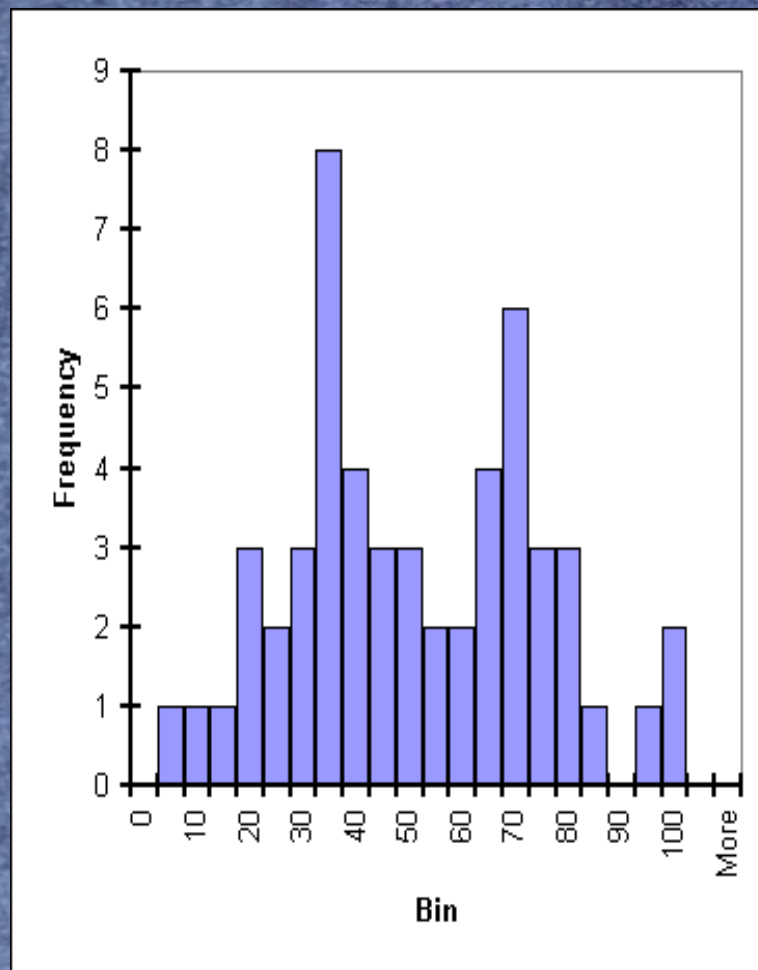


Alcune volte è difficile

- ♦ In certi casi è difficile individuare un picco ben definito:
 - ♦ ricostruiamo la massa della particella instabile prendendo una combinazione casuale di particelle;
 - ♦ oppure scegliamo le particelle figlie di un'altra particella instabile.



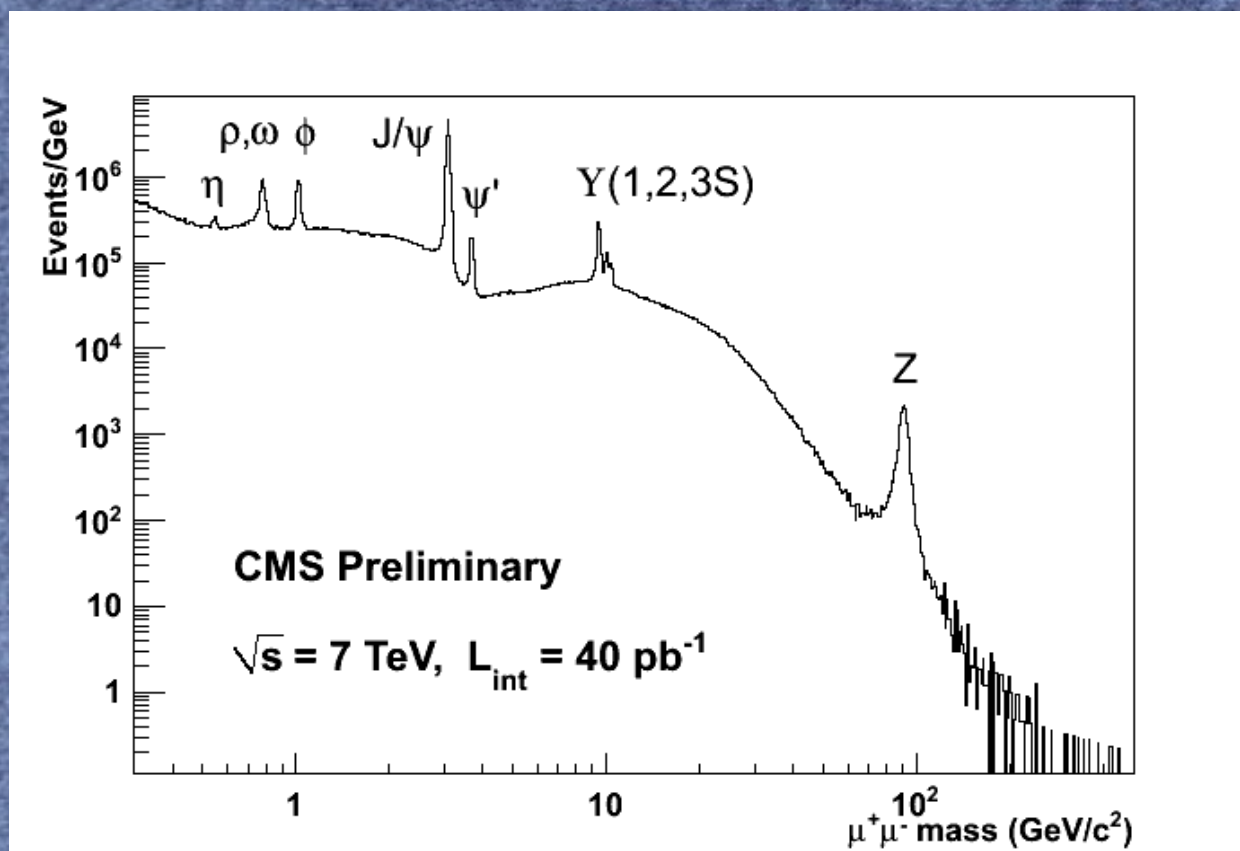
Alcune volte è ancora più difficile



- ◆ Ci sono due picchi! Uno dove non ce lo aspettavamo!
- ◆ Sono entrambi veri? Abbiamo cioè scoperto una nuova particella?
- ◆ O si tratta di un processo noto di cui non abbiamo tenuto conto?
- ◆ O si tratta di un errore (un problema nel rivelatore, un errore nella misura dei momenti delle particelle figlie ...)?
- ◆ Bisogna ricominciare daccapo, ricontrollare tutti i passi e rifare la misura, magari avere un riscontro indipendente da colleghi di un altro esperimento.

Un esempio reale

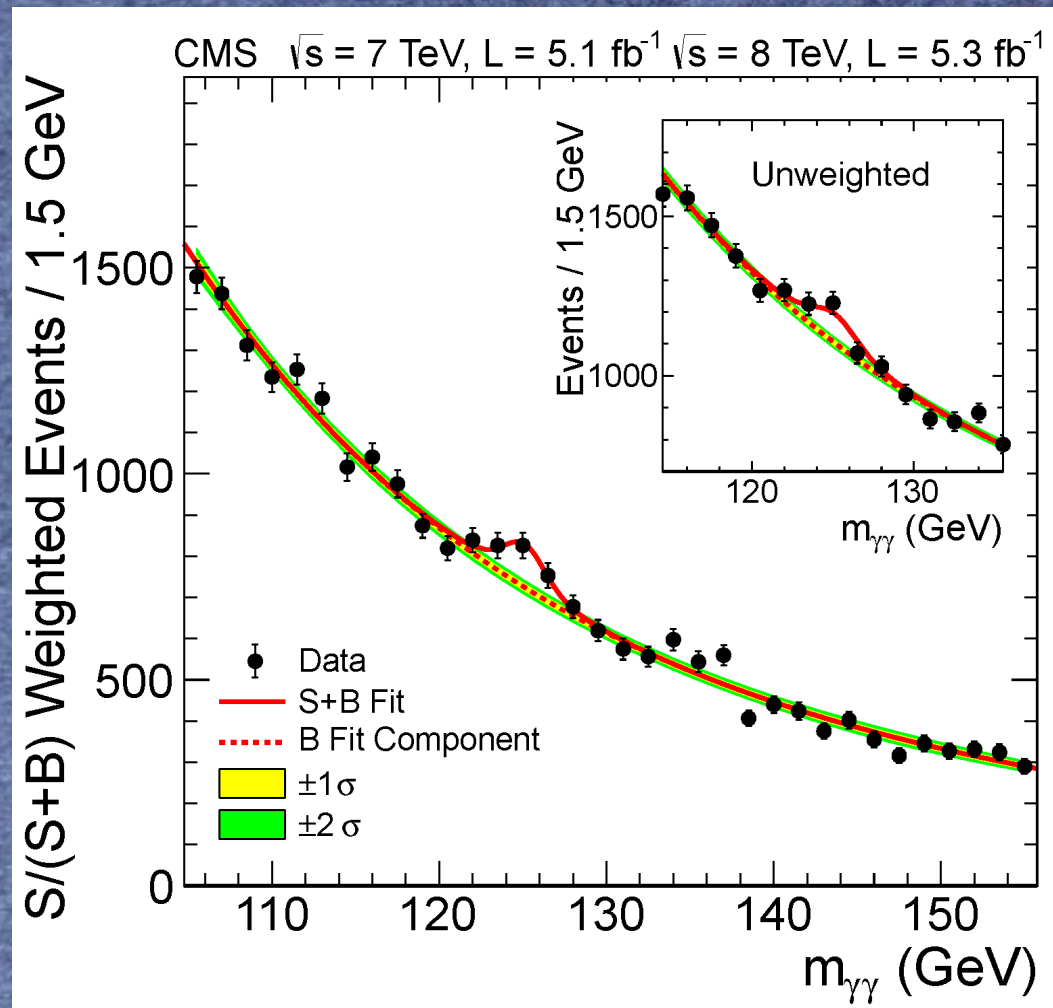
- ◆ Selezionando nei dati di CMS tutti gli eventi che contengono una coppia di muoni di carica opposta e ricostruendo la masa di una ipotetica particella madre si ottiene:



- ◆ Quindi “vedere” una particella instabile (il più delle volte) significa trovare il picco nell'istogramma della massa ricostruita.

Un esempio più attuale

♦ E se invece di due muoni usiamo due fotoni?



♦ Troviamo il **bosone di Higgs**!

L'esercizio

- ♦ L'esercizio del pomeriggio consisterà nell'analizzare una serie di eventi registrati col rivelatore CMS:
 - ♦ identificare elettroni e muoni;
 - ♦ individuare i candidati $W^\pm$, Z^0 e Z^0Z^0 ;
 - ♦ nel caso dei candidati $W^\pm$:
 - ♦ distinguere W^+ da W^- e misurarne il rapporto;
 - ♦ distinguere i decadimenti in elettroni da quelli in muoni e misurarne il rapporto;
 - ♦ nel caso di candidati Z^0 e Z^0Z^0 :
 - ♦ fare l'istogramma di massa.
- ♦ Ulteriori dettagli ed istruzioni verranno forniti nel pomeriggio.

Domande?