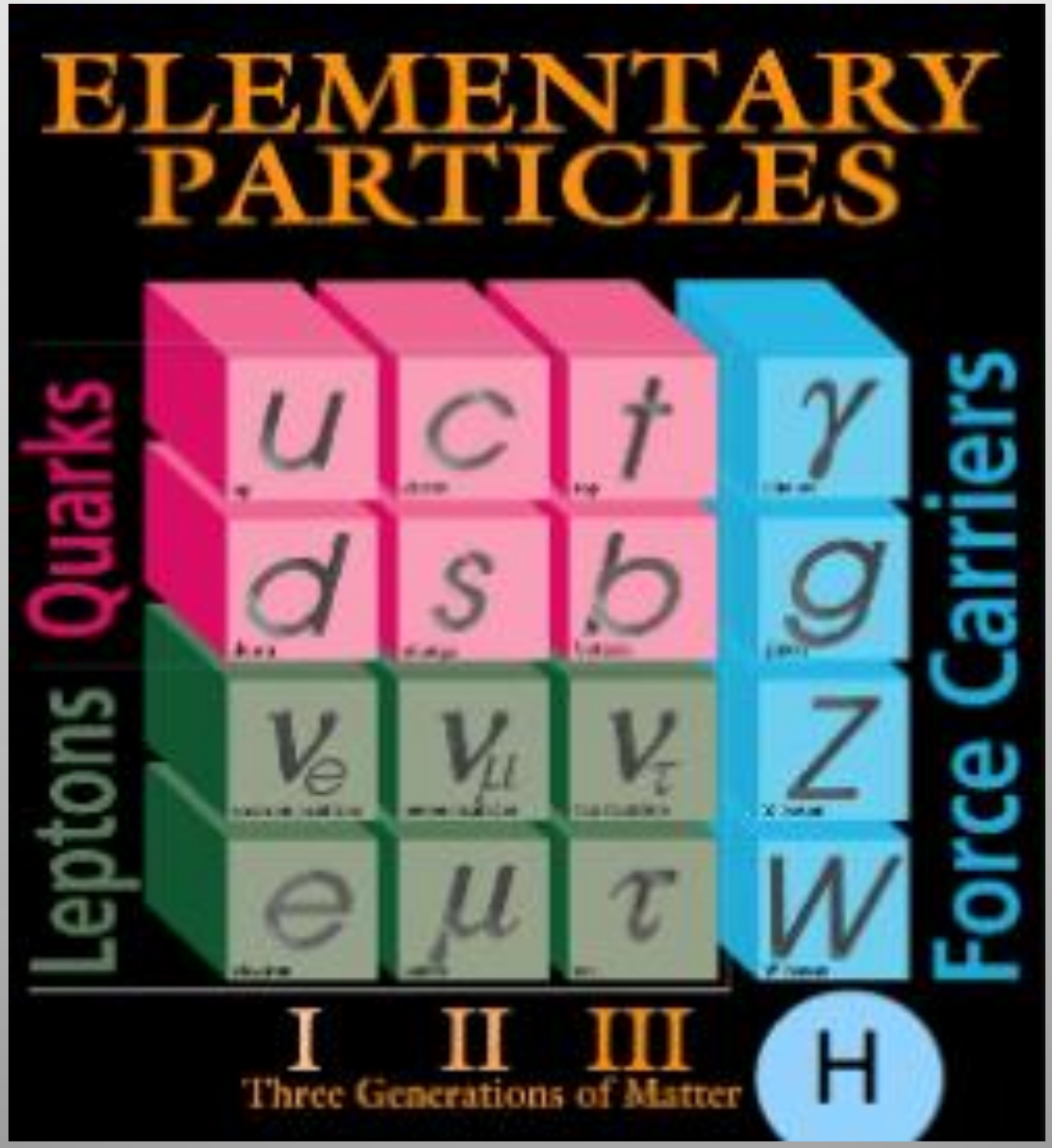
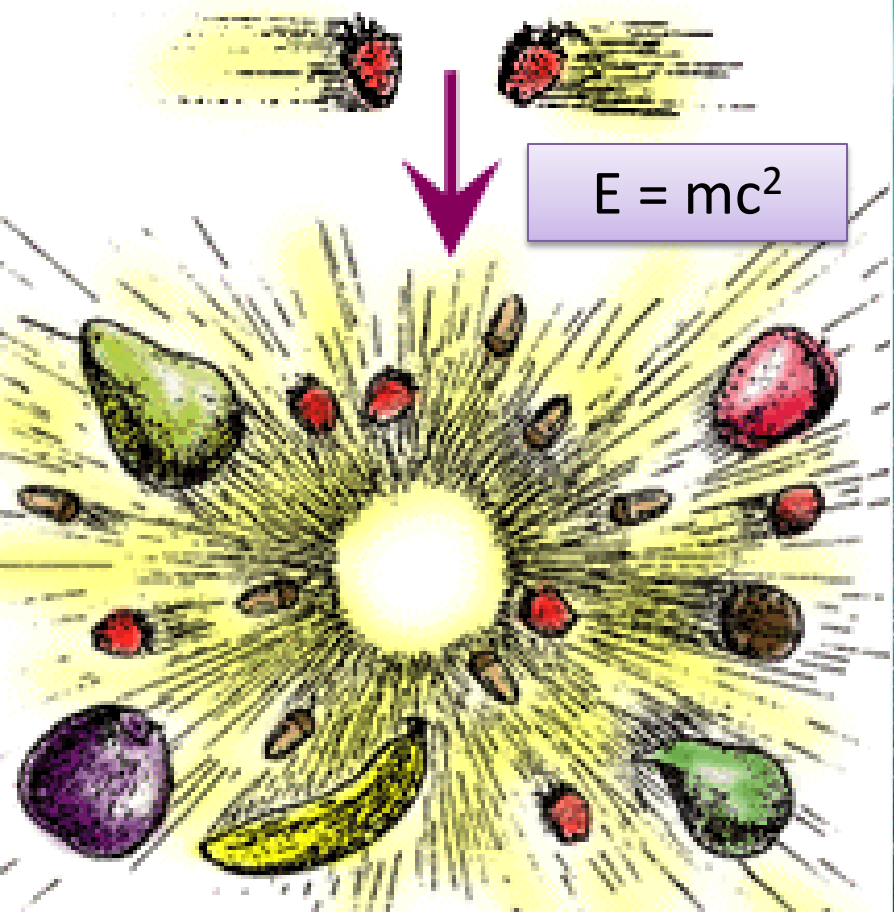
Dai segnali nei rivelatori alla scoperta dell'Higgs

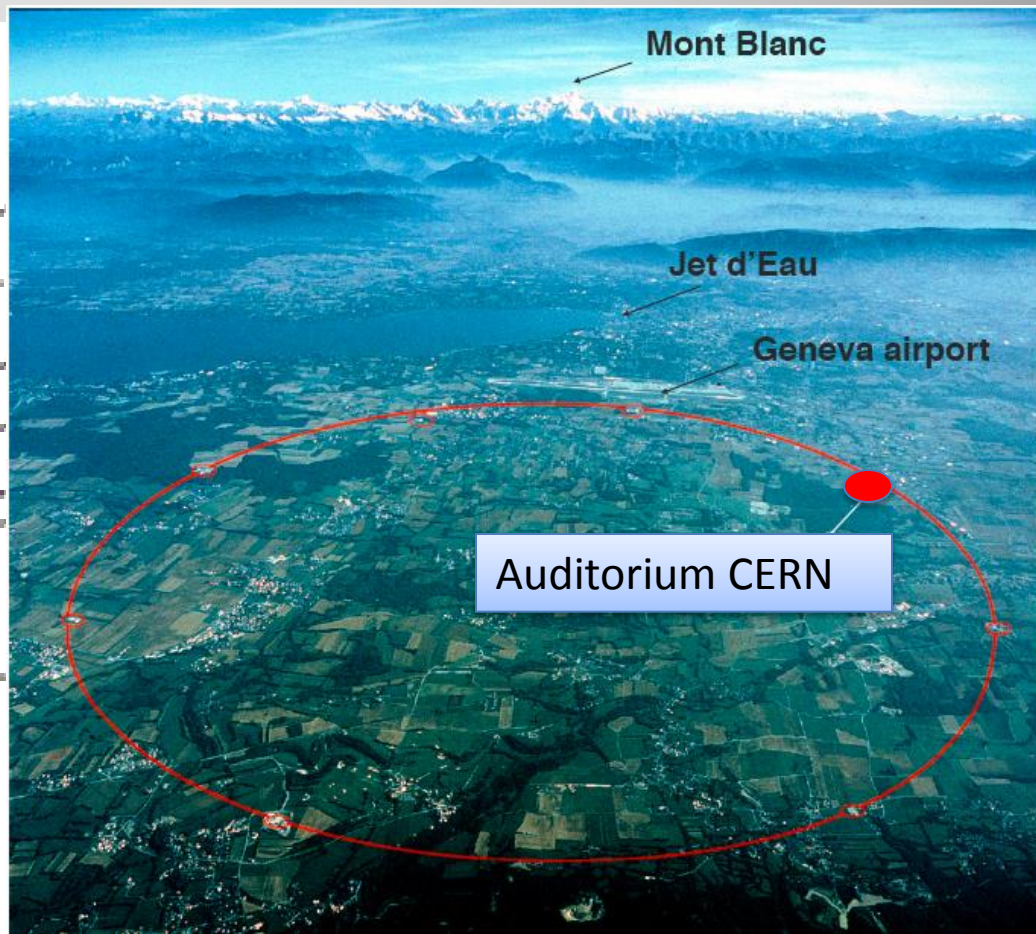
Chiara Roda – Universita` di Pisa e Istituto di Fisica Nucleare

Cosa avete gia` visto


ELEMENTARY PARTICLES
Quarks
Leptons
Force Carriers
u c t γ
d s b g
νe νμ ντ Z
e μ τ W
H
I II III
Three Generations of Matter

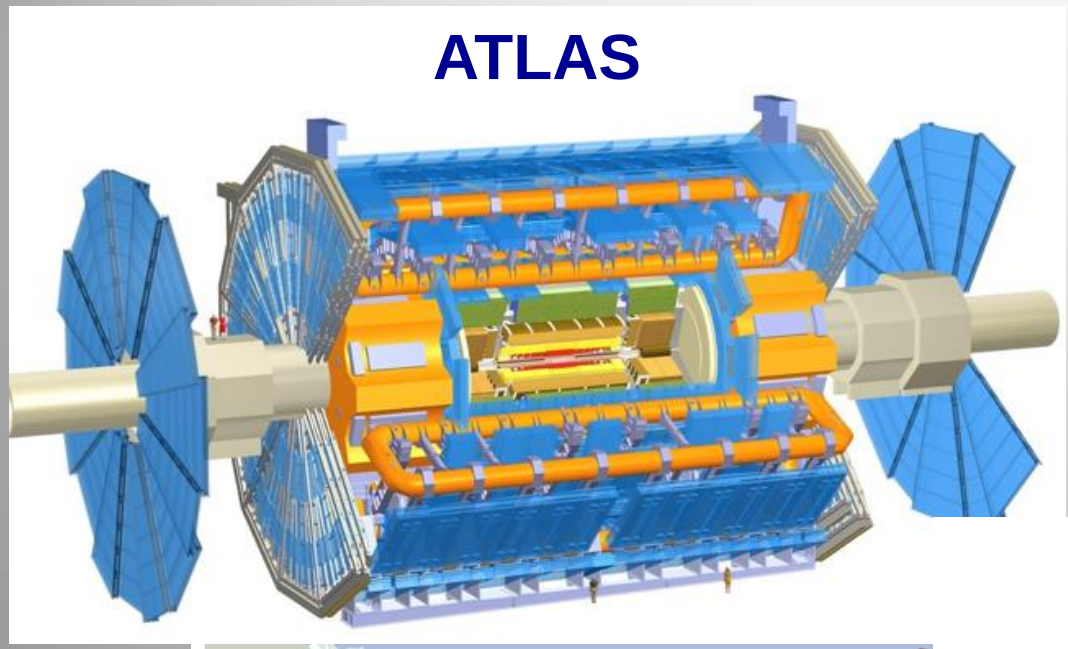
Un acceleratore come mezzo per produrre particelle che non sopravvivono nella materia ordinaria



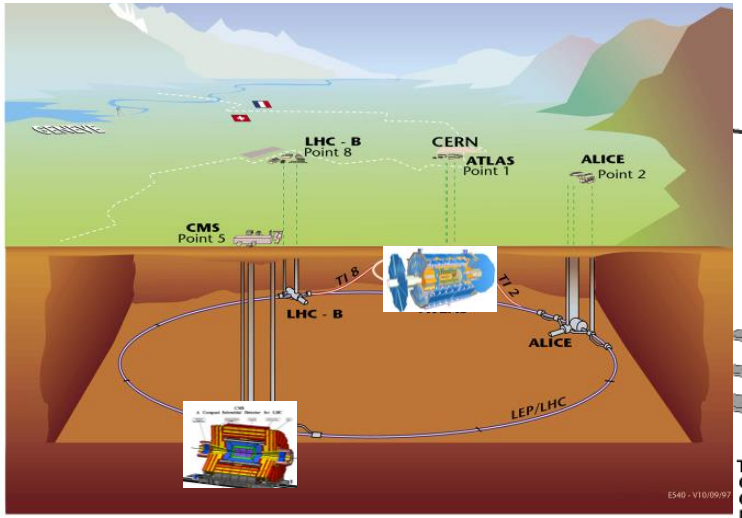


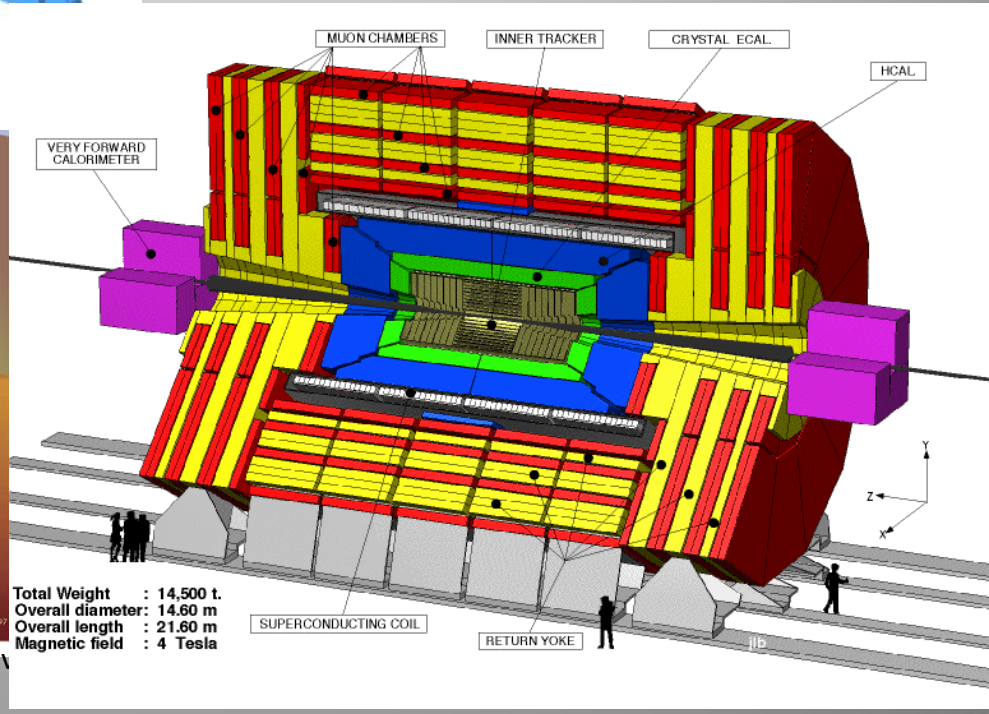
ATLAS e CMS: gli occhi per vedere

ATLAS

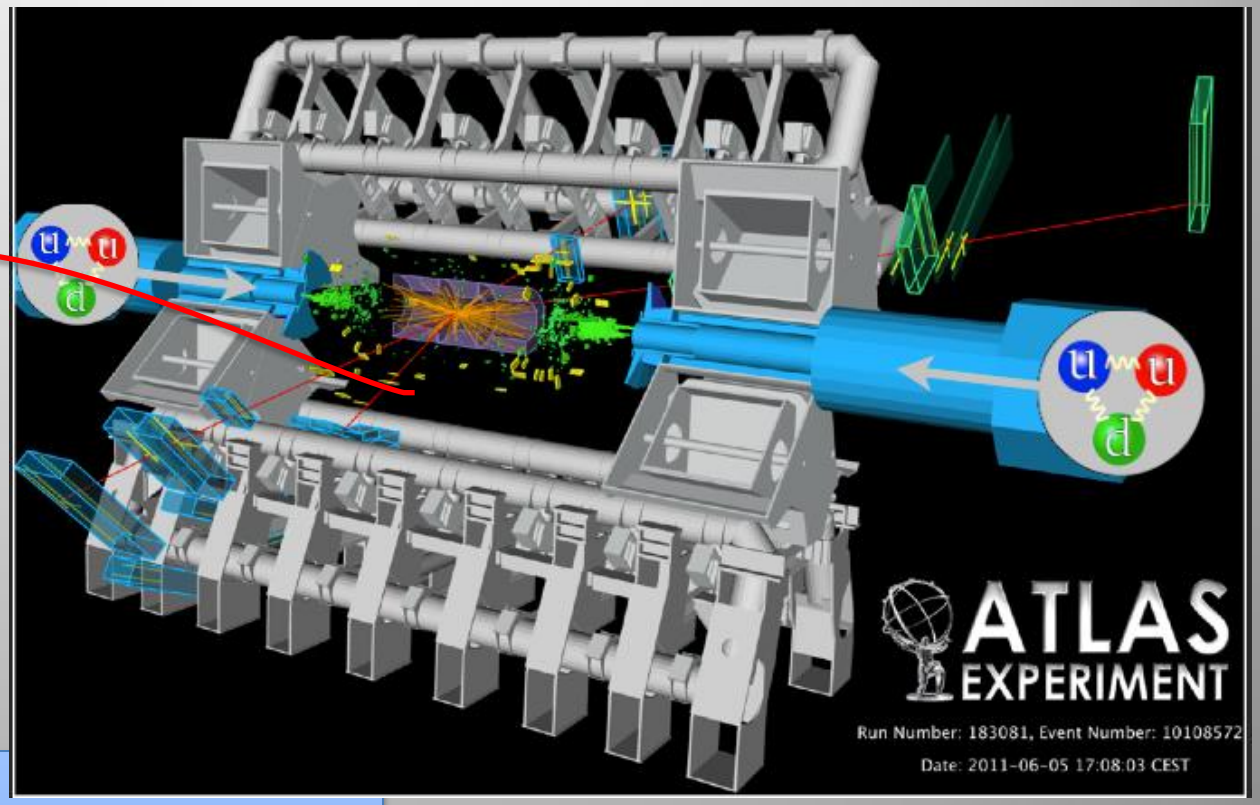


CMS





Una collisione protone-protone == un evento



= Evento 1Mbyte ~ 1 foto digitale …

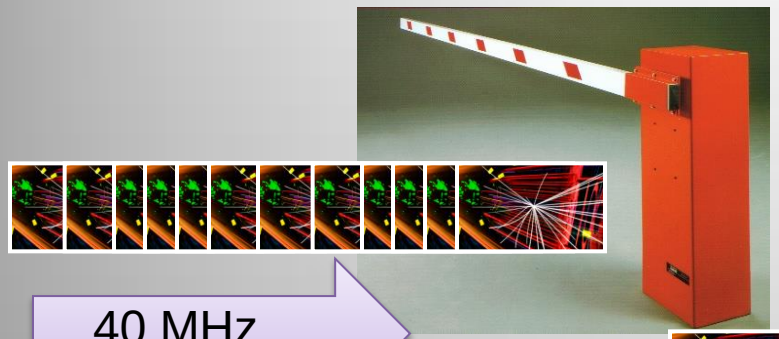
Selezione degli eventi in tempo reale: trigger

40 MHz

40 Milioni di foto al secondo = 1 Milione di CD al secondo

Determinata dalla frequenza di collisione

Selezione degli eventi in tempo reale: trigger



Selezione online
== trigger

40 MHz

200 Hz

200 eventi /foto
al secondo

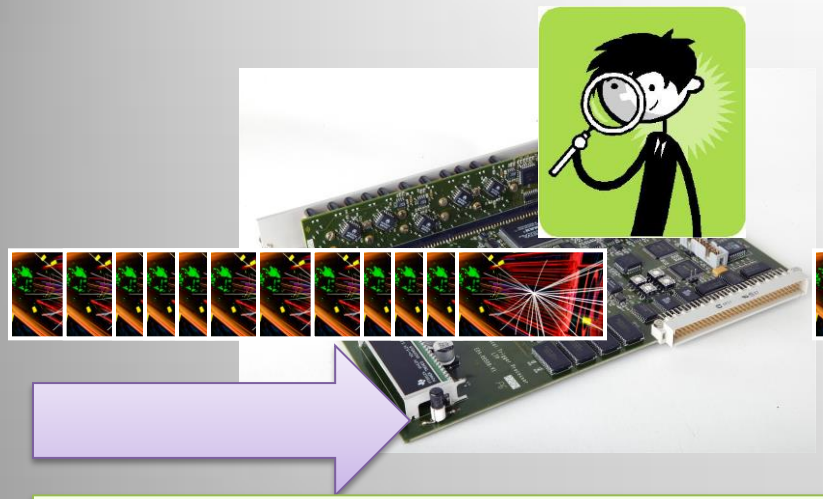
40 Milioni di foto al
secondo = 1 Milione di CD
al secondo

Determinata dalla
frequenza di collisione

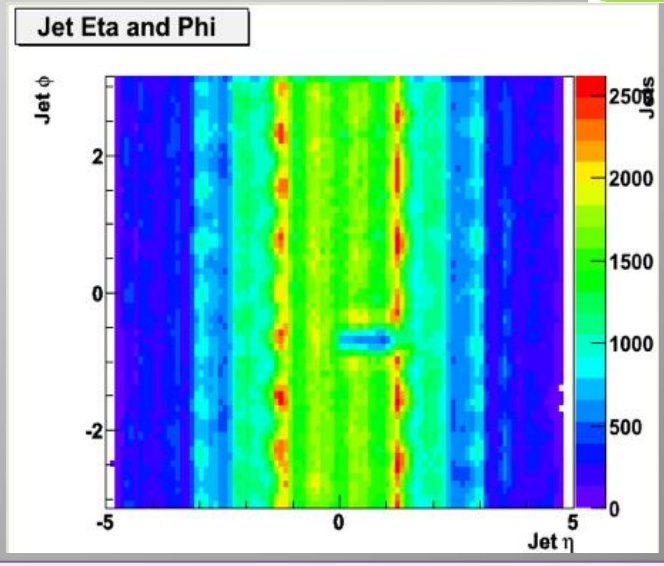
La maggior parte delle
collisioni - 99.9995% - e'
scartata…e` importante
non sbagliare

L'analisi inizia ancora prima che i dati siano salvati
su memoria permanente: Data Quality

100 Milioni di canali da controllare

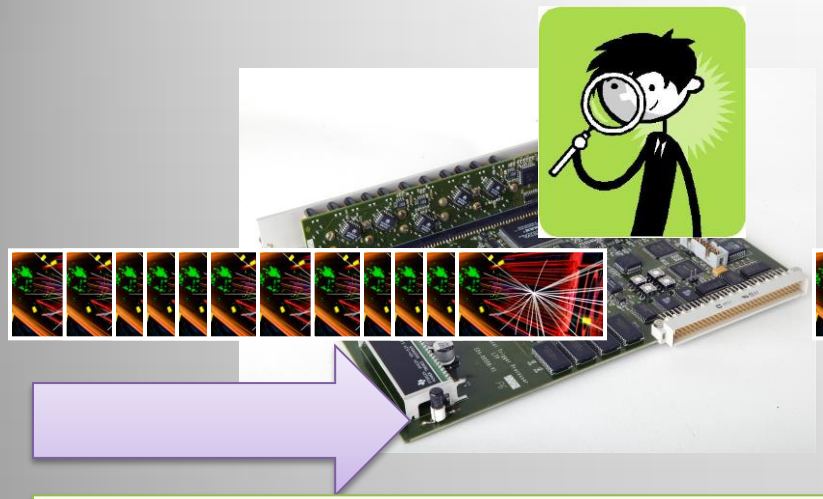


In presa dati turni 24h su 24h. Circa 50 persne /gg coinvolte in questi controlli.

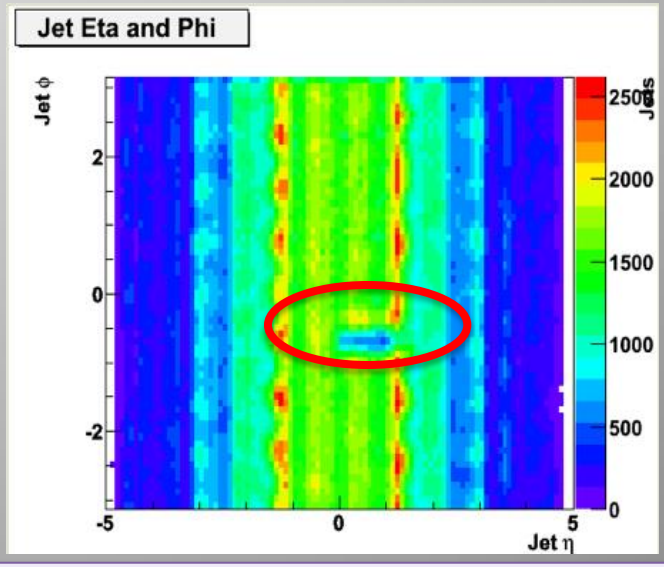


36 Ore dopo che un evento e` apparso e` pronto per essere analizzato con tutte le informazioni aggiornate per ottenere la migliore qualita` dei dati.

100 Milioni di canali da controllare



In presa dati turni 24h su 24h. Circa 50 persne /gg coinvolte in questi controlli.



36 Ore dopo che un evento e` apparso e` pronto per essere analizzato con tutte le informazioni aggiornate per ottenere la migliore qualita` dei dati.

Cosa voglio estrarre dai miei dati

Natura

Teoria: la nostra comprensione della natura

$$S = \mathrm{i} \int \mathrm{d}^4x \, \mathcal{L}(x)$$

?

Cosa voglio estrarre dai miei dati

Natura

Teoria

$$S = \mathrm{i} \int \mathrm{d}^4x \, \mathcal{L}(x)$$

?

Un altro esempio: la ricerca di qualcosa di inaspettato

La teoria della Cromodinamica quantistica (QCD) prevede lo frequenza con cui produco partoni (quark e gluoni) di alta energia. Con LHC produco jet attraverso collisioni di protoni ad una energia mai sperimentata precedentement. Sono come me li aspetto ? C'e` qualcosa di nuovo a queste energie ?

Cosa voglio estrarre dai miei dati

Natura

Teoria

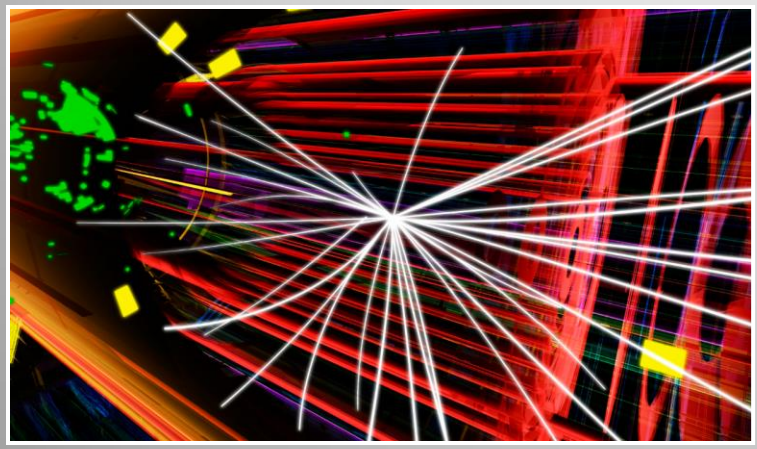
$$S = \mathrm{i} \int \mathrm{d}^4x \, \mathcal{L}(x)$$

?

Un esempio: la conferma di una predizione

Il meccanismo di Borut-Englert-Higgs prevede l'esistenza di una particella di massa ignota – Bosone di Higgs. Esiste il bosone di Higgs ? Se esiste come posso rivelarlo ? Che massa ha ?

Quale informazione contiene un evento ?



RAW DATA

Per ogni evento ho la lista completa dei canali del rivelatore che hanno registrato un segnale, l'ampiezza del segnale a volte il tempo a cui e` stato registrato questo segnale.

La ricostruzione

RAW DATA

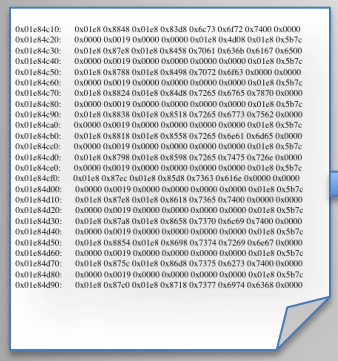
```
0x01e84c10:  0x01e8 0x8848 0x01e8 0x83d8 0x6c73 0x6f72 0x7400 0x0000
0x01e84c20:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x01e8 0x4d08 0x01e8 0x5b7c
0x01e84c30:  0x01e8 0x87e8 0x01e8 0x8458 0x7061 0x636b 0x6167 0x6500
0x01e84c40:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84c50:  0x01e8 0x8788 0x01e8 0x8498 0x7072 0x6f63 0x0000 0x0000
0x01e84c60:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84c70:  0x01e8 0x8824 0x01e8 0x84d8 0x7265 0x6765 0x7870 0x0000
0x01e84c80:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84c90:  0x01e8 0x8838 0x01e8 0x8518 0x7265 0x6773 0x7562 0x0000
0x01e84ca0:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84cb0:  0x01e8 0x8818 0x01e8 0x8558 0x7265 0x6e61 0x6d65 0x0000
0x01e84cc0:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84cd0:  0x01e8 0x8798 0x01e8 0x8598 0x7265 0x7475 0x726e 0x0000
0x01e84ce0:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84cf0:  0x01e8 0x87ec 0x01e8 0x85d8 0x7363 0x616e 0x0000 0x0000
0x01e84d00:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84d10:  0x01e8 0x87e8 0x01e8 0x8618 0x7365 0x7400 0x0000 0x0000
0x01e84d20:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84d30:  0x01e8 0x87a8 0x01e8 0x8658 0x7370 0x6c69 0x7400 0x0000
0x01e84d40:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84d50:  0x01e8 0x8854 0x01e8 0x8698 0x7374 0x7269 0x6e67 0x0000
0x01e84d60:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84d70:  0x01e8 0x875c 0x01e8 0x86d8 0x7375 0x6273 0x7400 0x0000
0x01e84d80:  0x0000 0x0019 0x0000 0x0000 0x0000 0x0000 0x01e8 0x5b7c
0x01e84d90:  0x01e8 0x87c0 0x01e8 0x8718 0x7377 0x6974 0x6368 0x0000
```

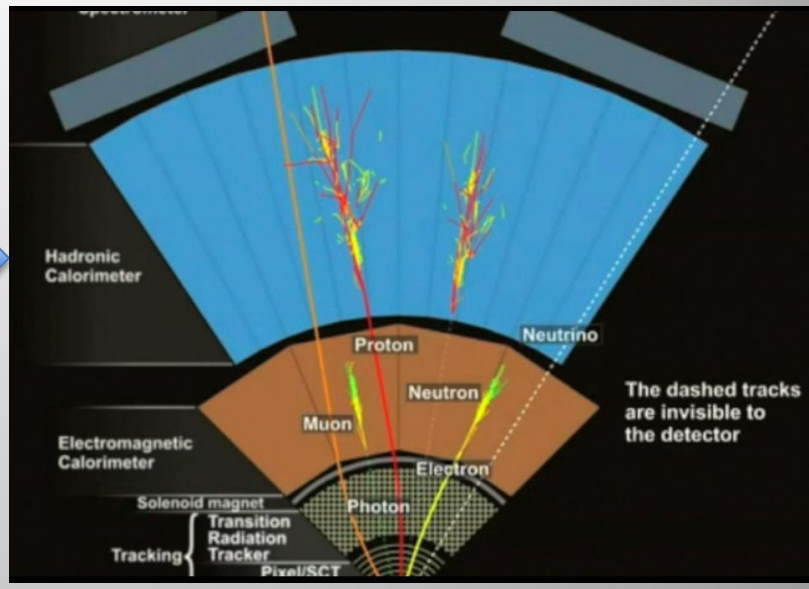
Posizione di tutti le parti di rivelatore colpite
Traiettorie di tutte le tracce
Errore sui prametri delle tracce
Cluster di depositi di energia nei calorimetri
Forma dei depositi di energia
.
.
.

Il problema della data-reduction:
- selezionare solo l'insieme di informazioni che sono necessarie
- l'insieme delle informazioni necessarie puo` variare a secondo dello scopo
- fare in modo che la dimensione dei dati sia sostenibile
- unificare l'utilizzo delle informazioni all'interno della collaborazione

La ricostruzione

RAW DATA





Il formato da utilizzare per l'analisi:

Un sommario che per ogni evento contiene la lista delle particelle identificate e delle loro caratteristiche cinematiche:

Evento 1

Lista elettroni

Lista jet

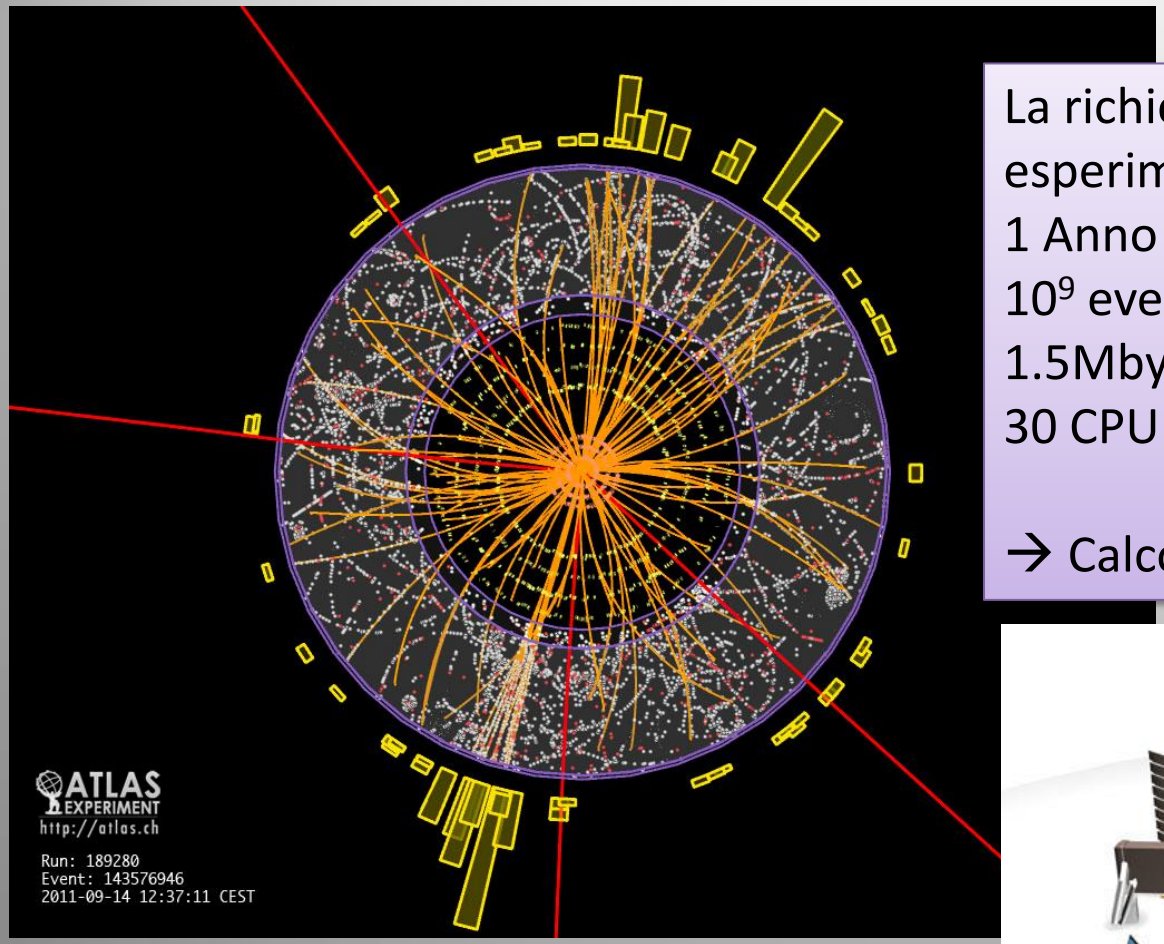
Lista fotoni

Lista muoni

Evento 2

.....

Grid: calcolo e storage a livello mondiale



La richiesta di calcolo e storage degli esperimenti LHC e` straordinaria.
1 Anno di dati = 1 pila di CD alta 2 Km
10^9 eventi / anno - ogni evento 1.5Mbyte
30 CPU sec per evento

→ Calcolo e storage distribuito

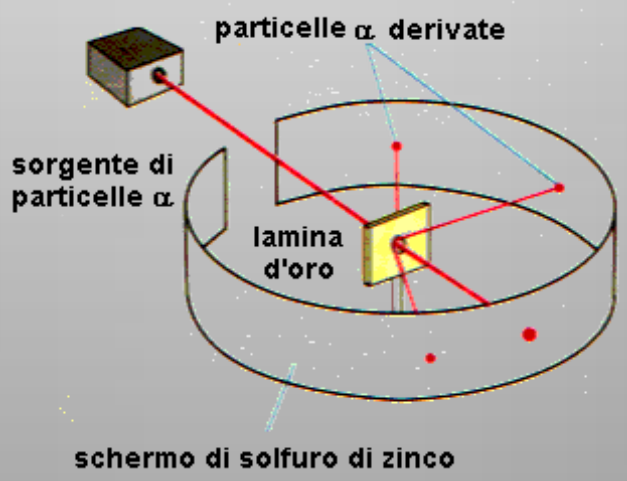
100 mila processori e decine di milioni di Gbyte di spazio disco distribuiti su 130 siti e 34 nazioni

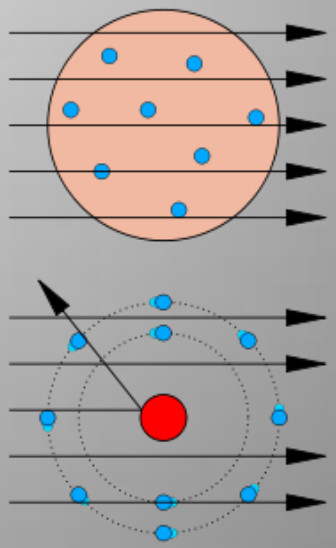
Un primo esempio di analisi

La teoria della Cromodinamica quantistica (QCD) prevede lo frequenza con cui produco partoni (quark e gluoni) di alta energia. Con LHC per la prima volta posso produrre e rivelare prodotti da collisioni di protoni a cosi` alta energia. Sono come me li aspetto ? C'e` qualcosa di nuovo a queste energie ?

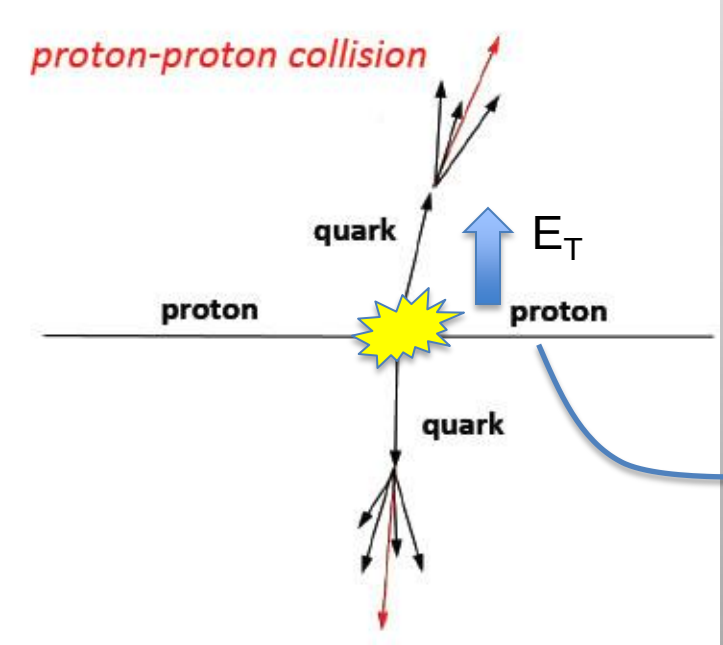
Perche` e` interessante ?

Ancora l'esperimento di Rutherford ….
Con i raggi alpha sull'oro si indagava la struttura dell'atomo. Alle energie di LHC si indaga la struttura dei componenti dei protoni: i partoni.



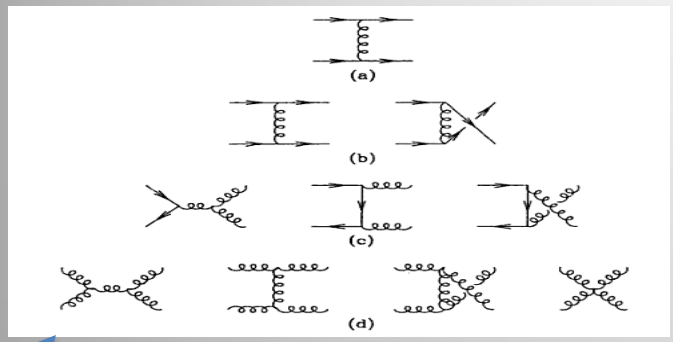


Cosa so dalla teoria … ?

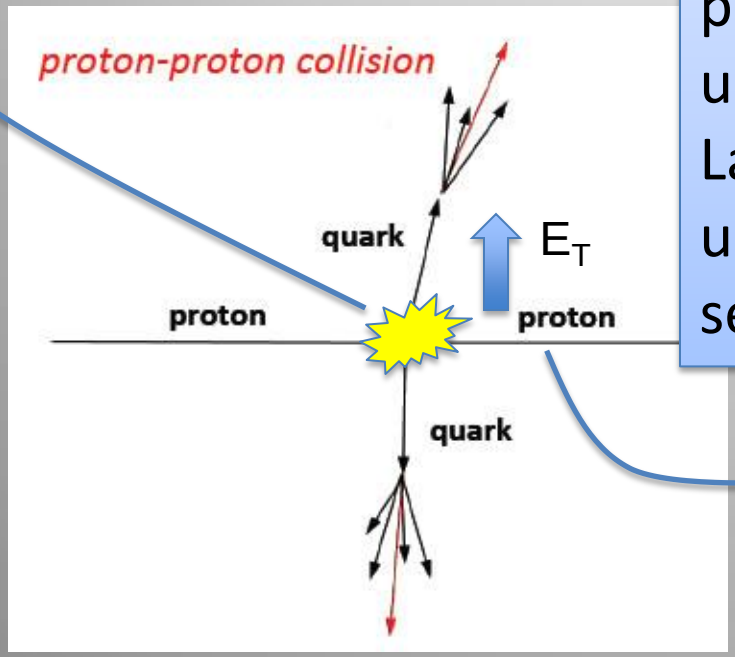


Alto E_T → grande deflessione in analogia con Rutherford

Cosa so dalla teoria … ?



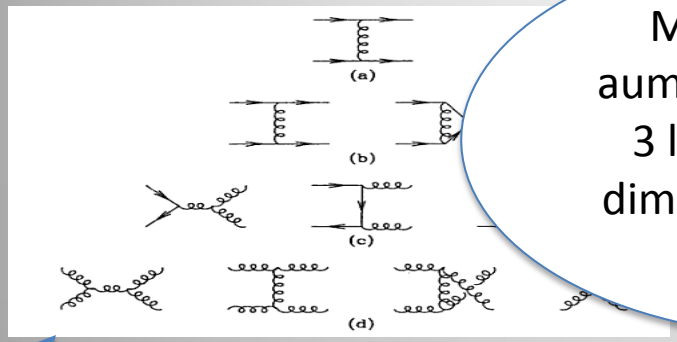
QCD and collider Physics – Ellis, Stirling, Webber



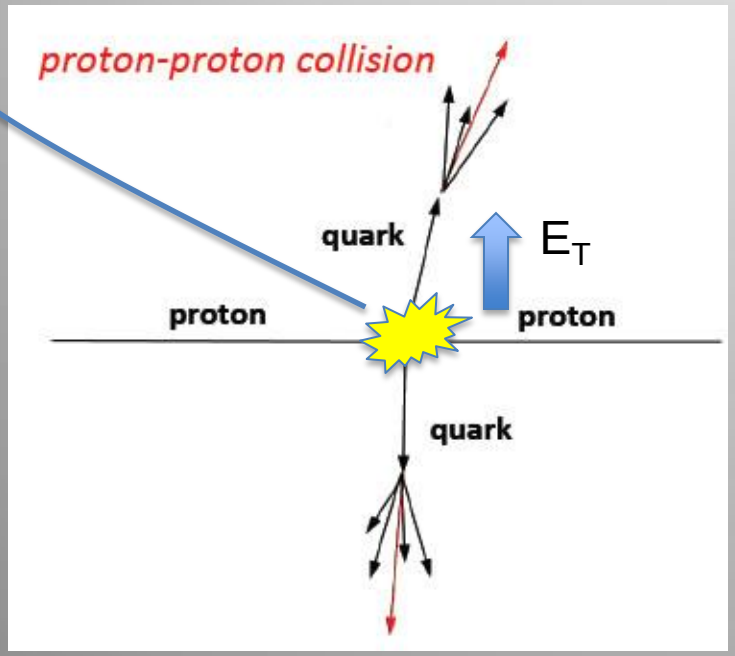
La teoria QCD descrive i due protoni che collidono come un insieme di quark e gluoni e mi permette di calcolare con quale probabilita` la collisione di due protoni produce quark e gluoni (jet) di una data energia` trasversa.
La probabilita` e` legata al nro di jet ad una dato E_T diviso il nro totale di dati: sezione d'urto.

Alto E_T → grande deflessione in analogia con Rutherford

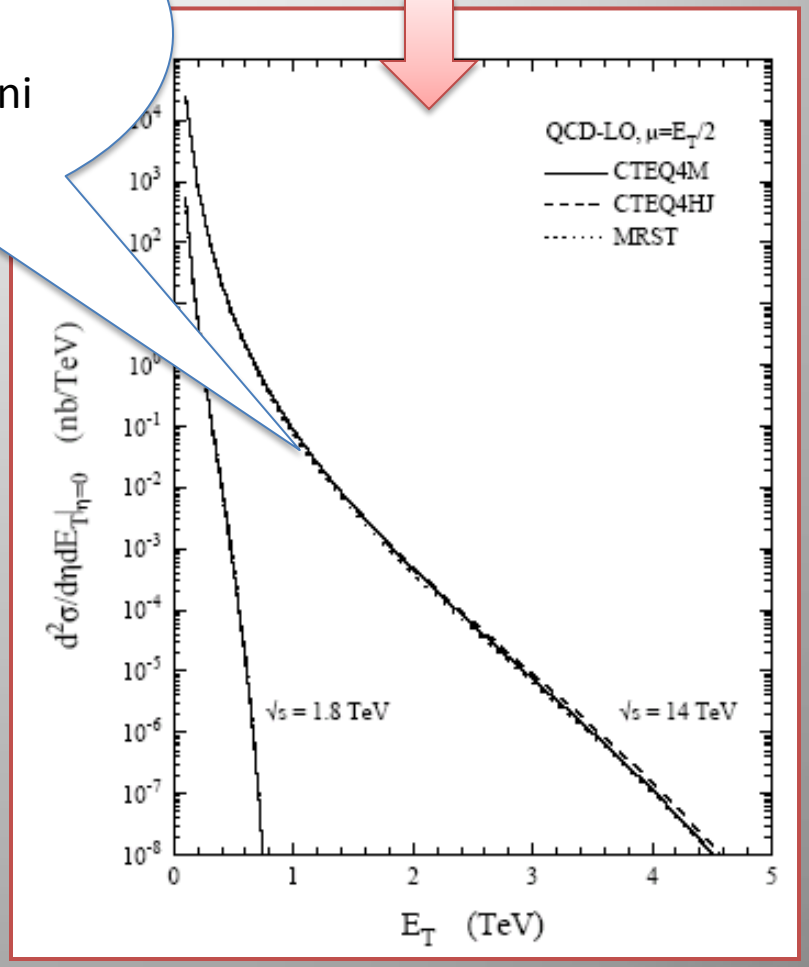
Cosa so e cosa voglio misurare ?



Mentre l'energia aumenta di un fattore 3 la sezione d'urto diminuisce di 5 ordini di grandezza

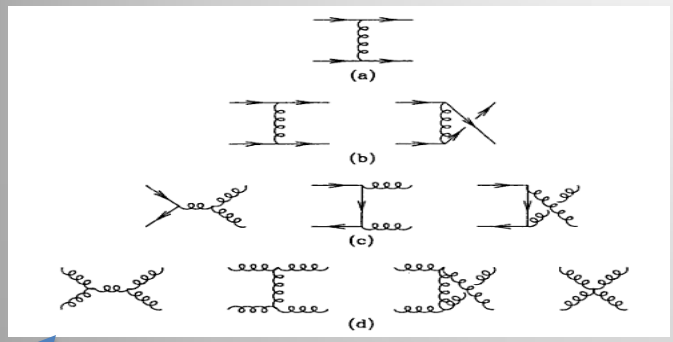


Predizione teorica

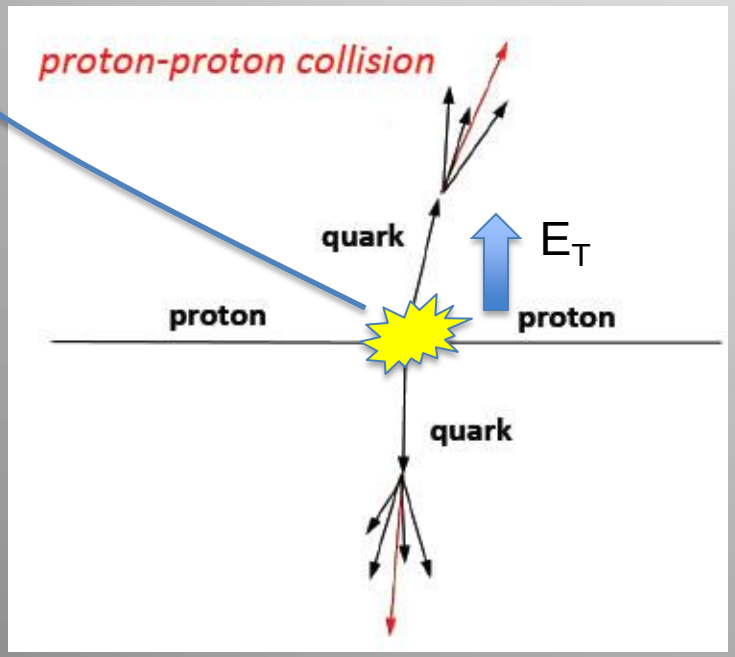


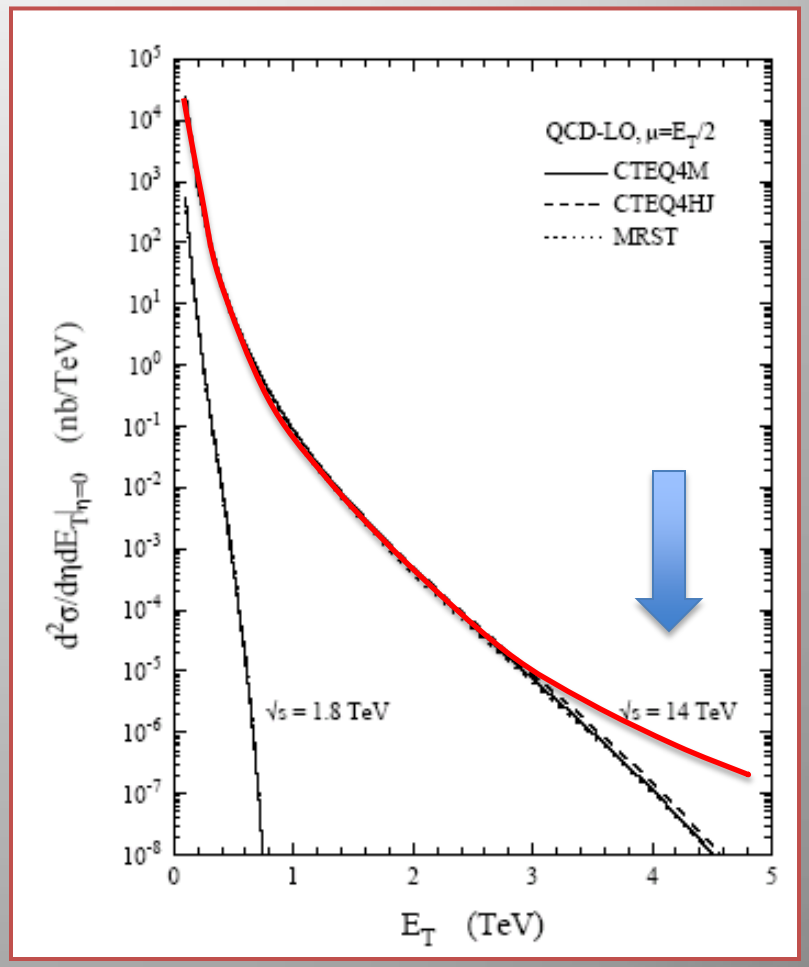
Come si vedrebbe una eventuale sotto struttura dei partoni ?

Cosa so dalla teoria …



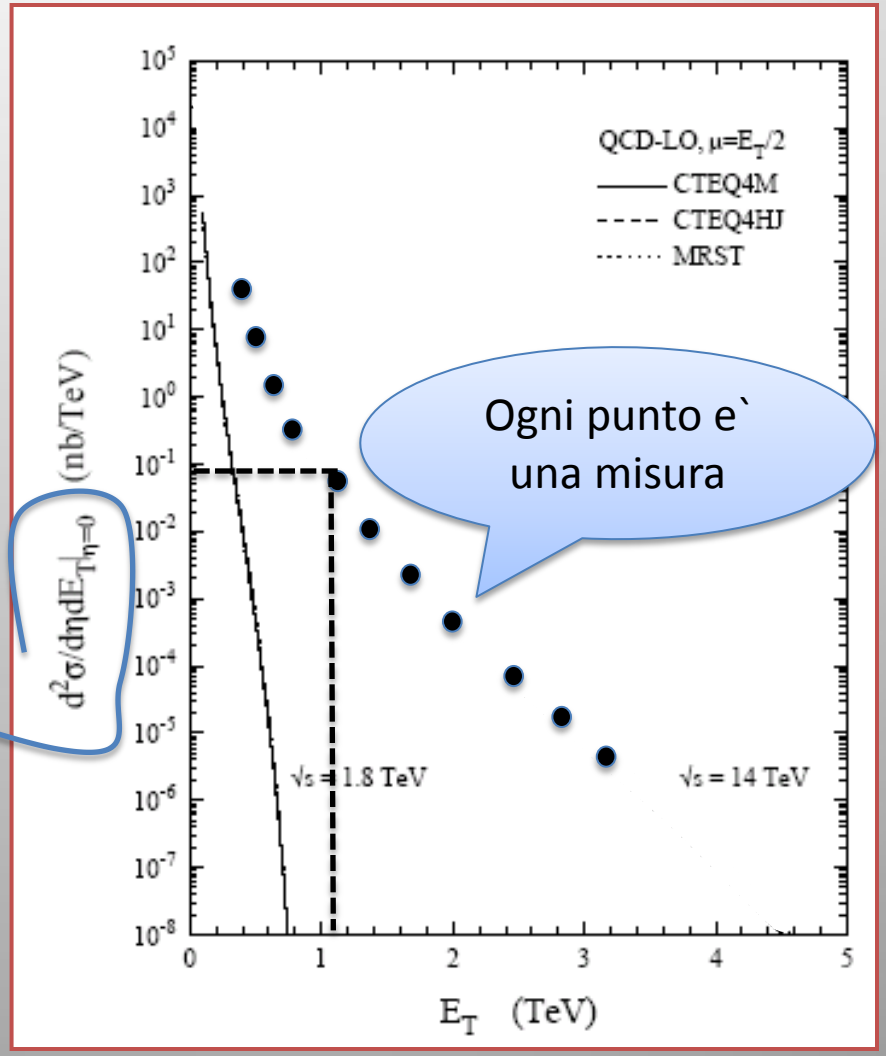
QCD and collider Physics – Ellis, Stirling, Webber





… e cosa voglio misurare ?

$$\left\langle \frac{\mathrm{d}^2\sigma}{\mathrm{d}E_T\mathrm{d}\eta} \right\rangle = \frac{N}{\Delta E_T \Delta\eta\, \epsilon\, \mathcal{L}}$$

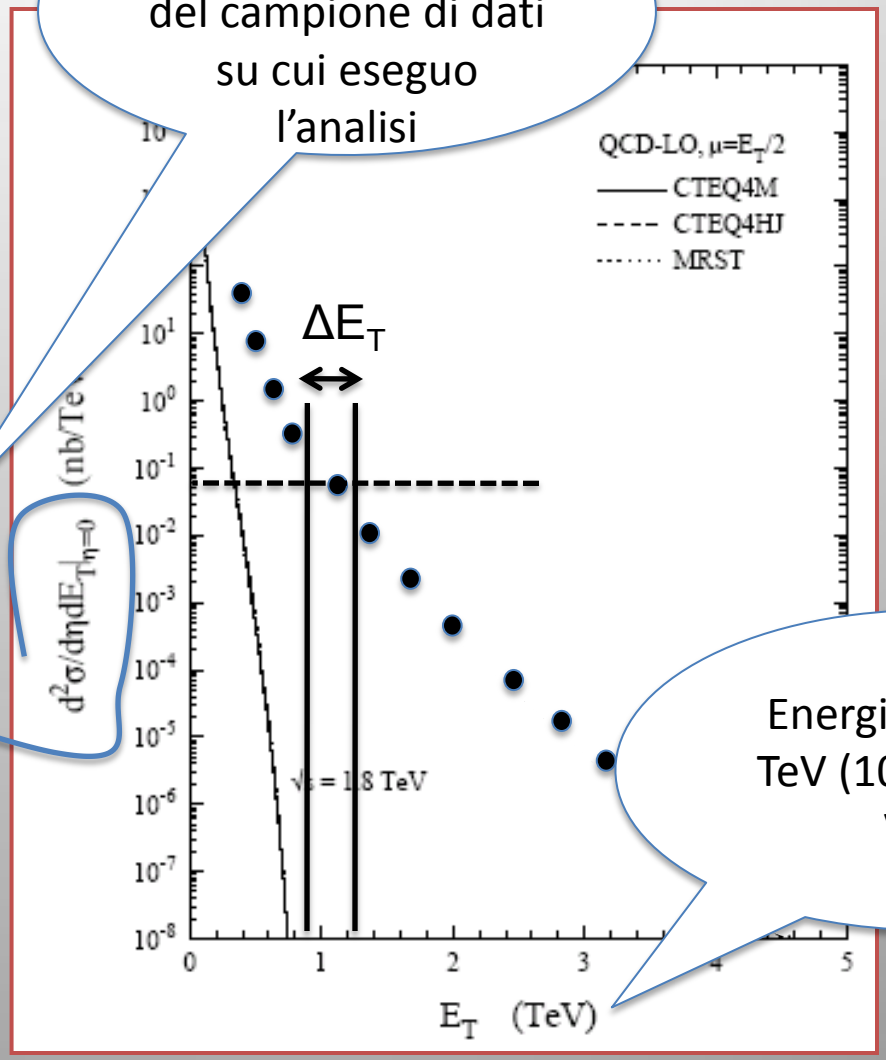


… e cosa v… …rare ?

N = Numero di jet per il range di E_T considerato

Luminosita` integrata = Totale del campione di dati su cui eseguo l'analisi

$$\left\langle \frac{d^2\sigma}{dE_T d\eta} \right\rangle = \frac{N}{\Delta E_T \Delta\eta \, \mathcal{L}}$$

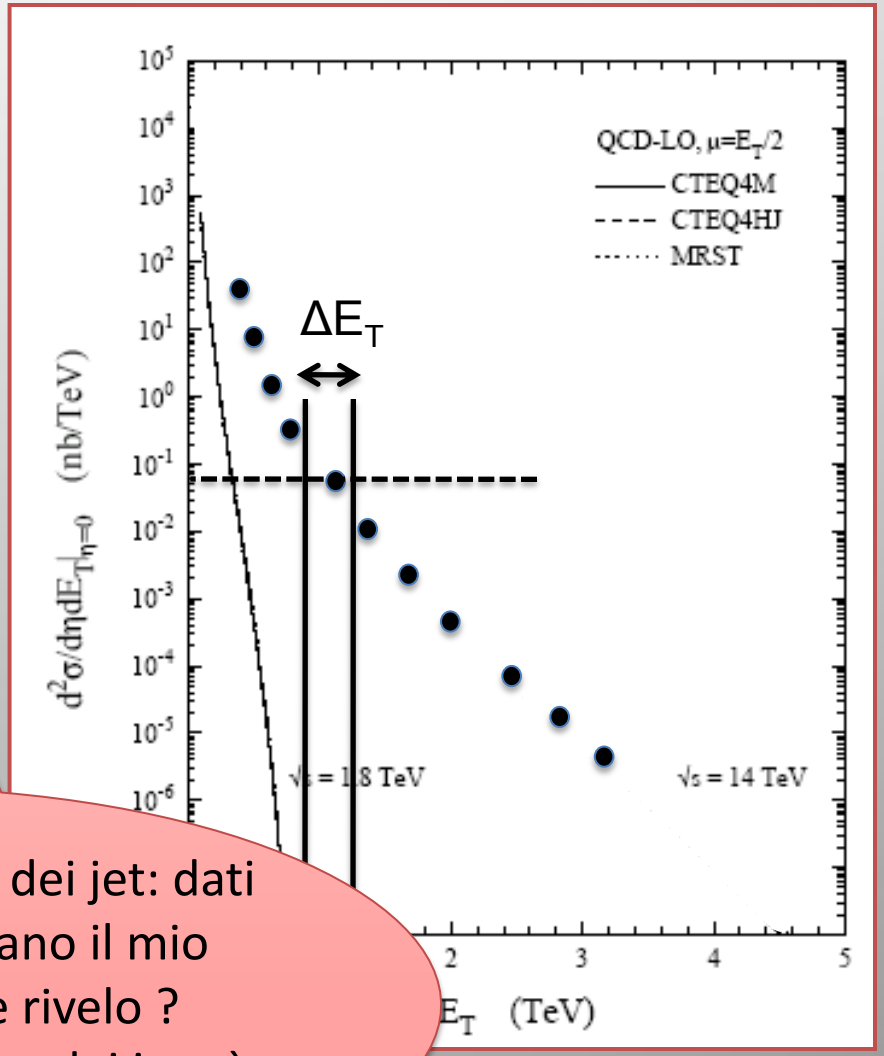


Intervallo di Energia trasversa (ΔE_T) e intervallo geometrico ($\Delta\eta$)

Energia dei jet in TeV (10^{12} elettron Volt)

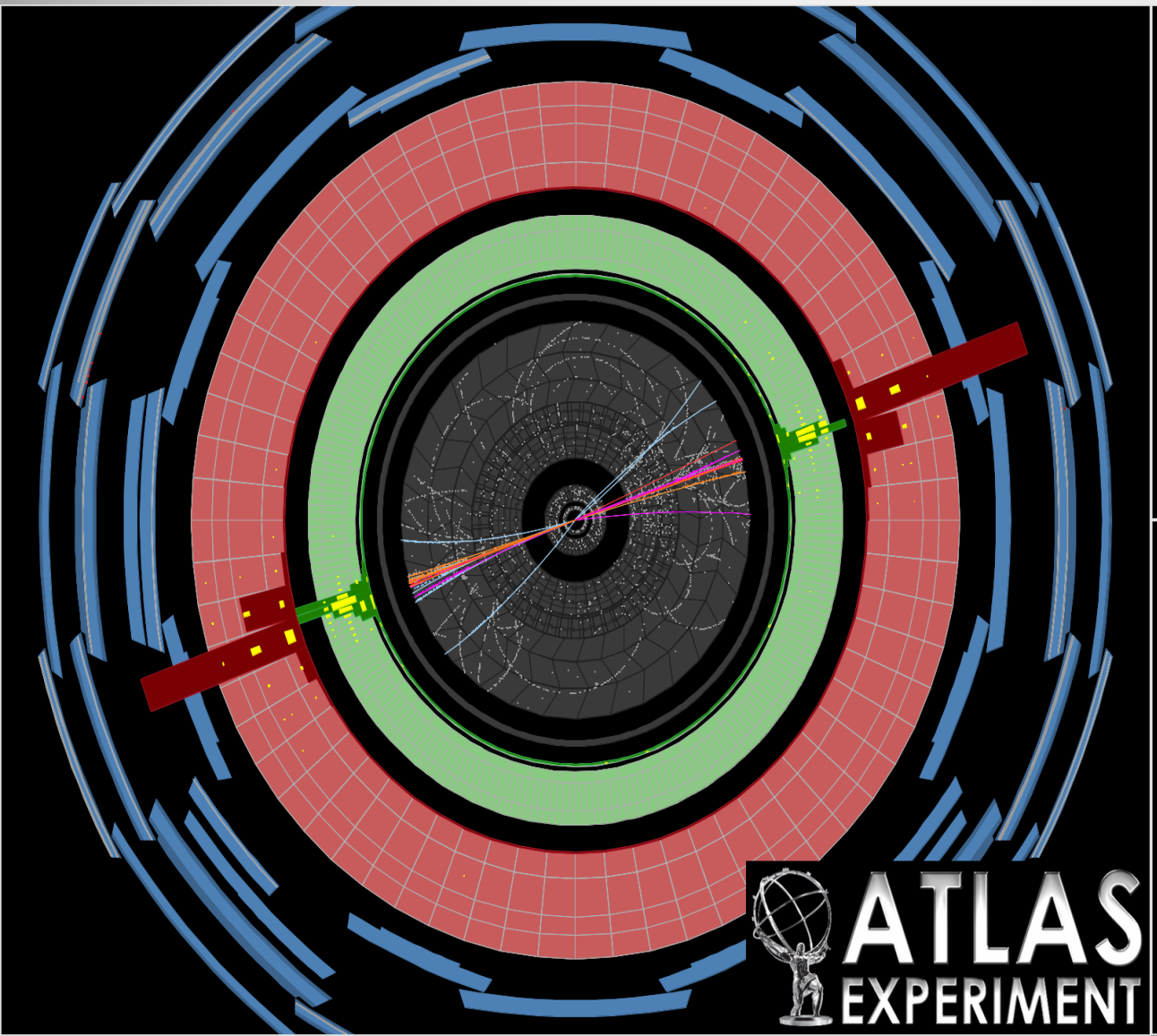
… e cosa voglio misurare ?

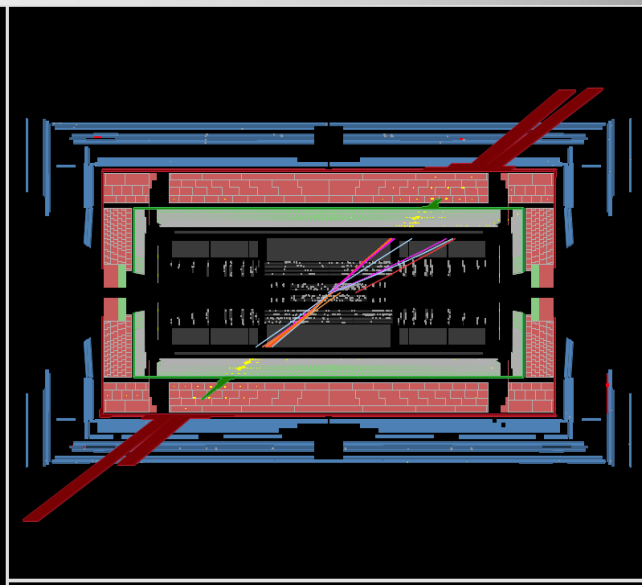
$$\left\langle \frac{\mathrm{d}^2\sigma}{\mathrm{d}E_T \mathrm{d}\eta} \right\rangle = \frac{N}{\Delta E_T \Delta\eta\, \epsilon\, \mathcal{L}}$$

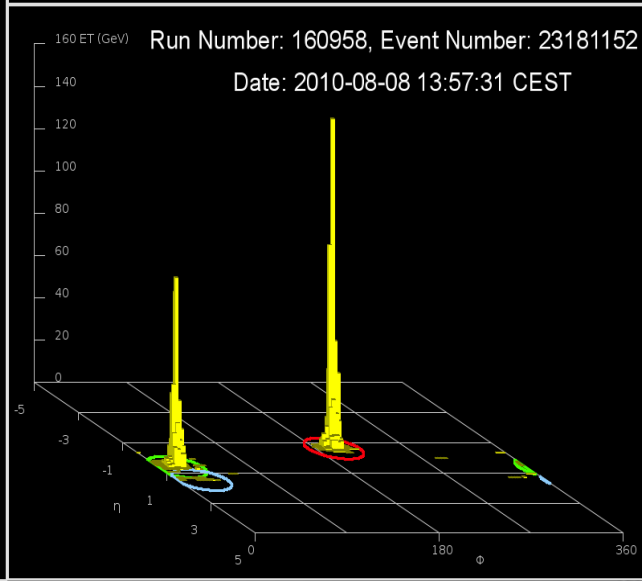


Efficenza di rivelazione dei jet: dati 100 jet che attraversano il mio rivelatore quanti ne rivelo ?
L'efficenza di rivelazione dei jet e` alta ~95%-100%

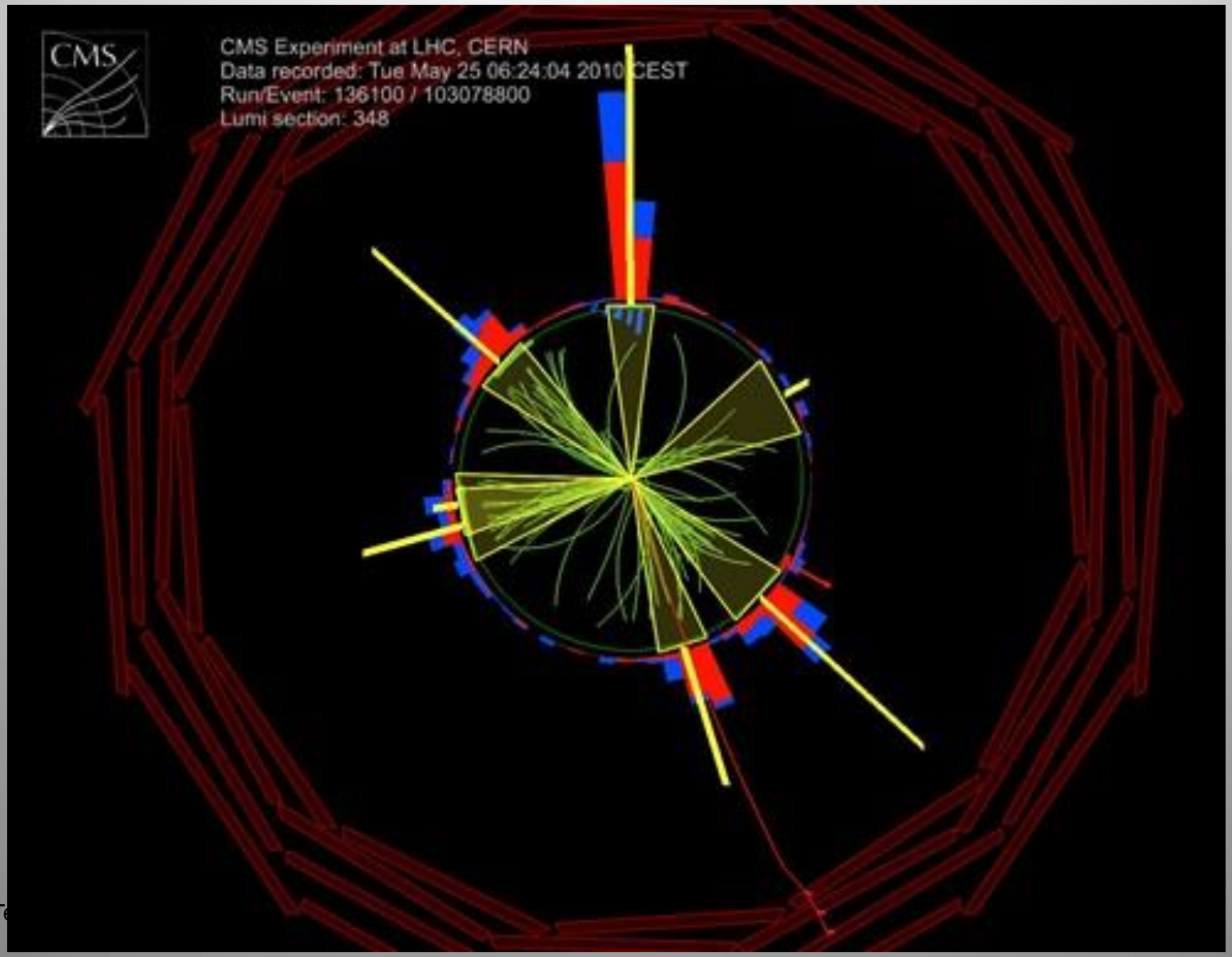
Evento con due jets a ATLAS



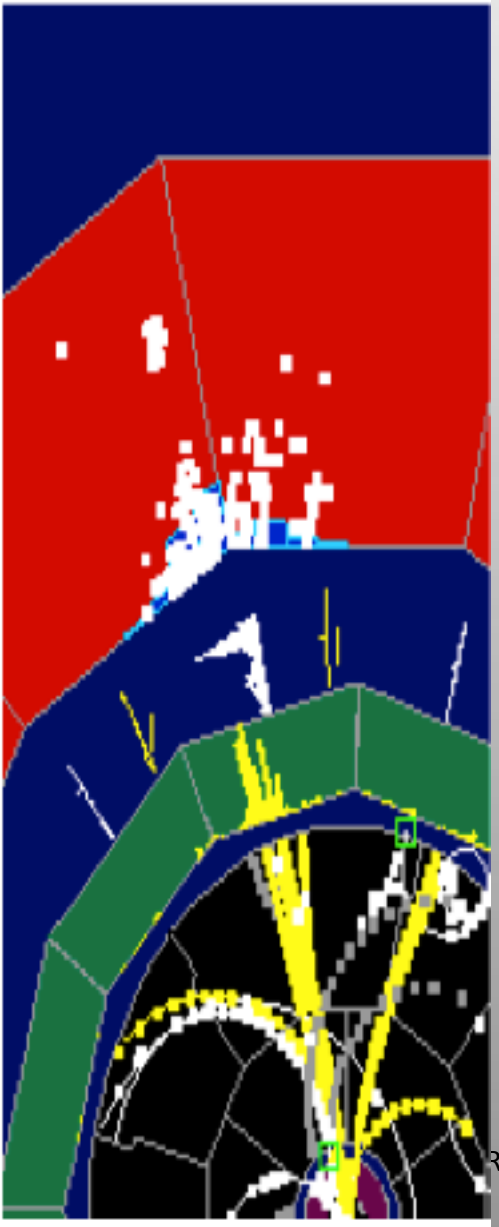




Evento con sei jets a CMS

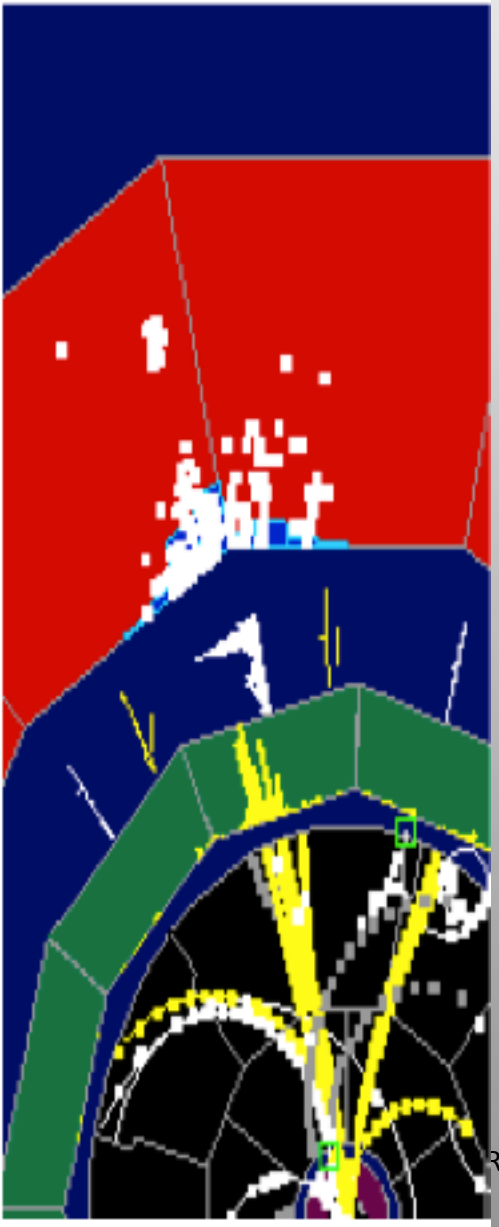


Misura dell’energia dei jet

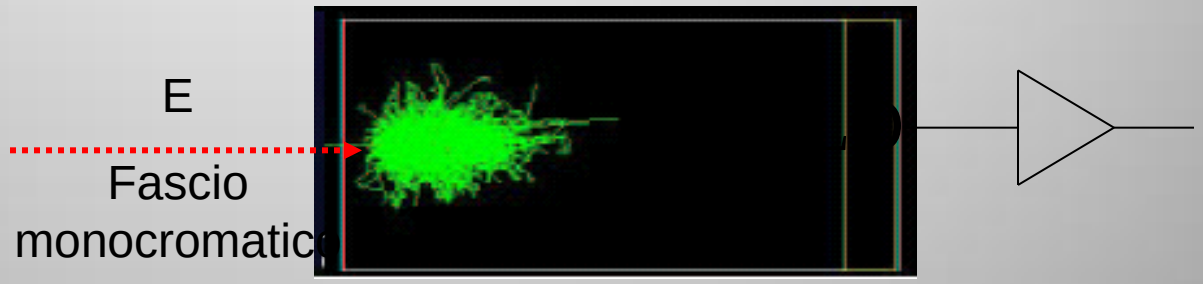


Energia del jet e` valutata utillizando la misura dell’energia nelle varie celle del calorimetro a volte univta alla misura dell’impulso delle tracce.

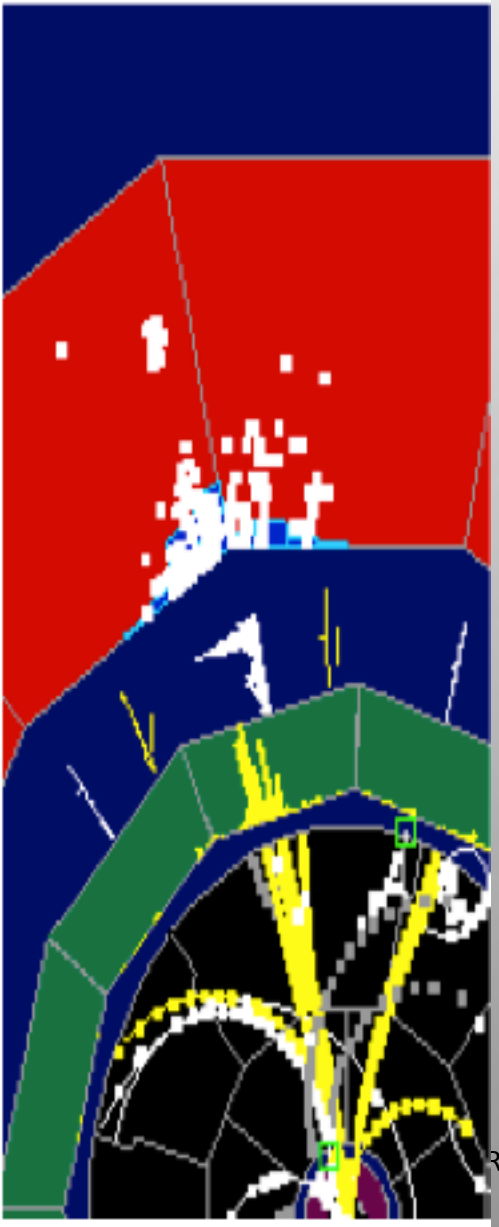
Misura dell’energia dei jet



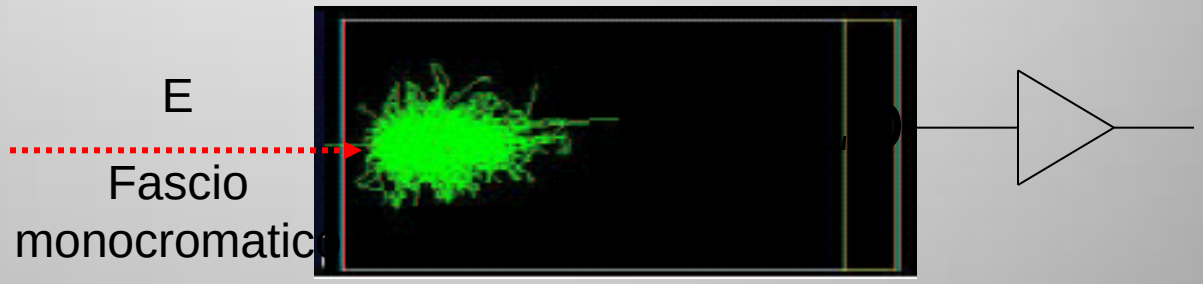
Energia del jet e` valutata utillizando la misura dell’energia nelle varie celle del calorimetro a volte univta alla misura dell’impulso delle tracce.
La qualita` della ricostruzione dell’energia:



Misura dell'energia dei jet

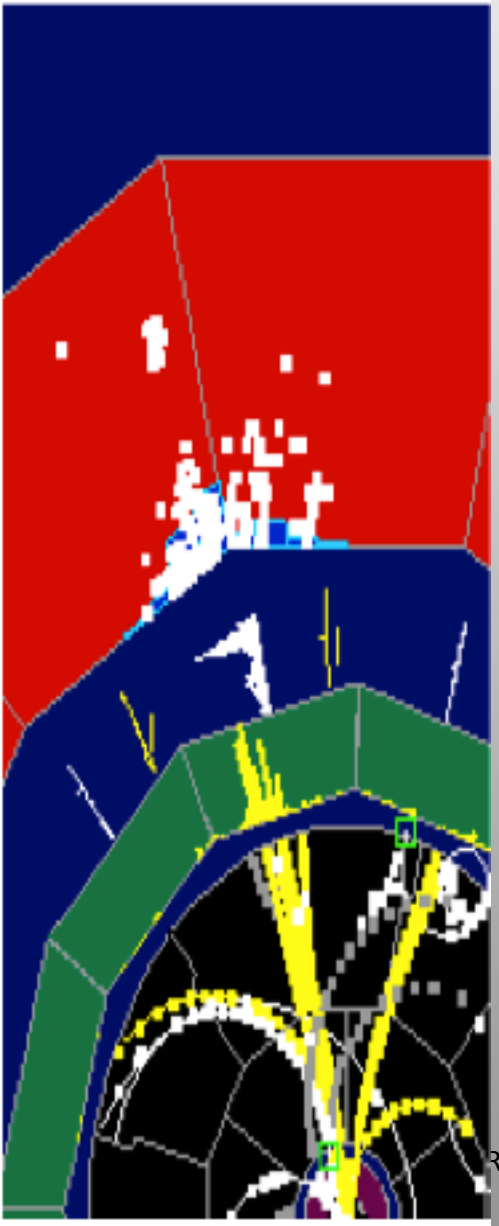


Energia del jet e` valutata utillizando la misura dell'energia nelle varie celle del calorimetro a volte univta alla misura dell'impulso delle tracce.
La qualita` della ricostruzione dell'energia:

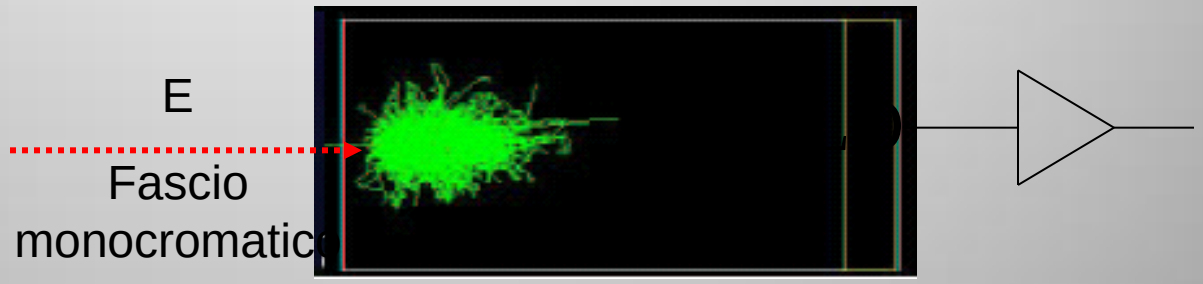


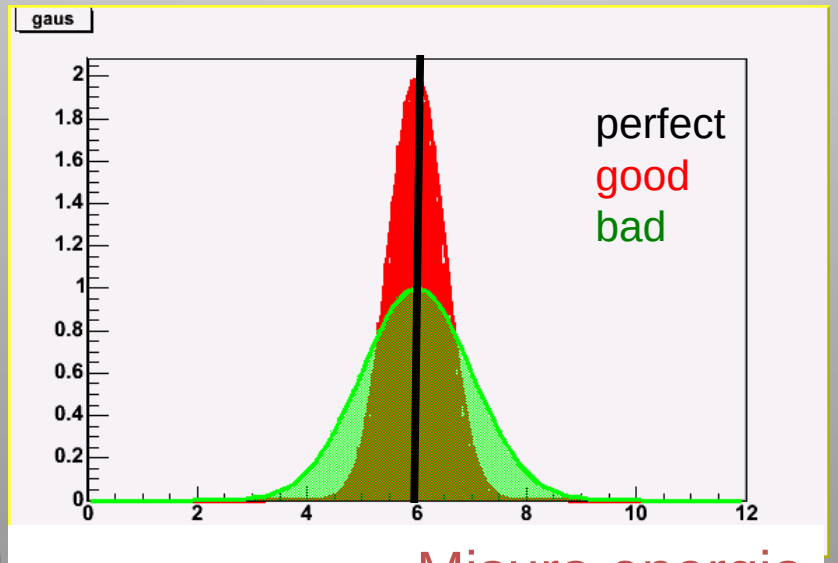
Misura energia

Misura dell'energia dei jet



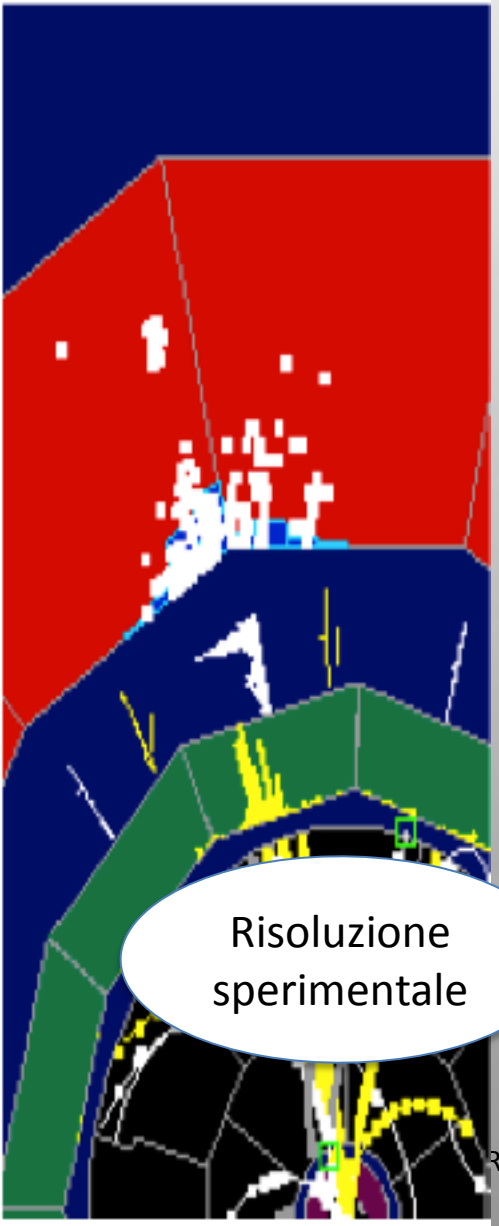
Energia del jet e` valutata utillizando la misura dell'energia nelle varie celle del calorimetro a volte univta alla misura dell'impulso delle tracce.
La qualita` della ricostruzione dell'energia:



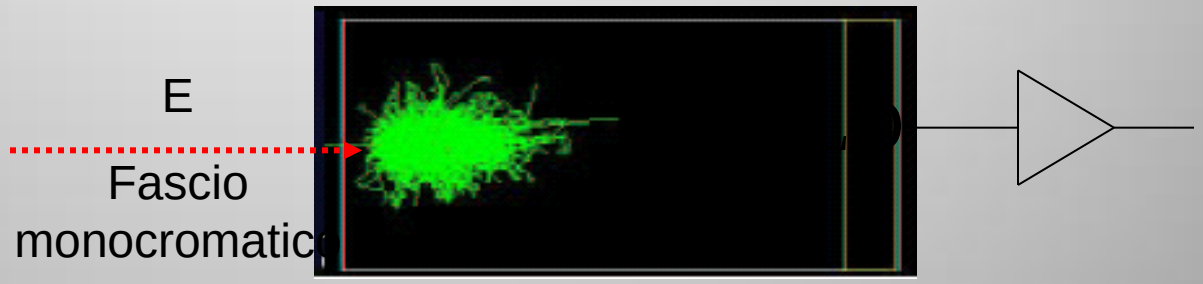


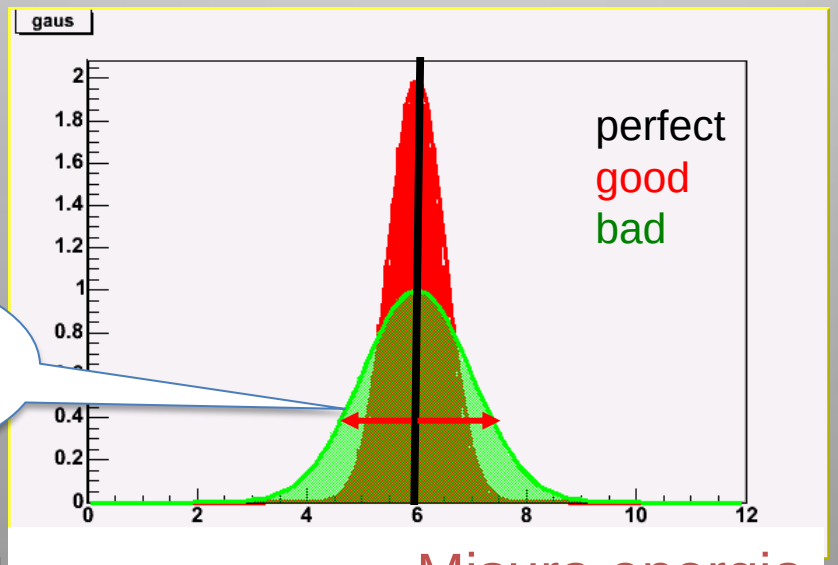
Misura energia

Misura dell'energia dei jet



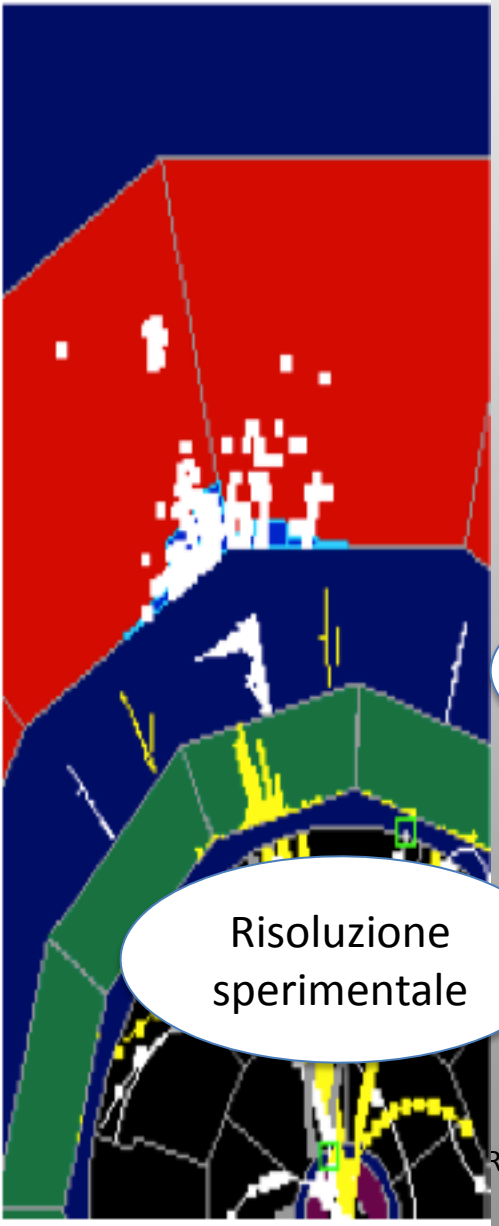
Energia del jet e` valutata utillizando la misura dell'energia nelle varie celle del calorimetro a volte univta alla misura dell'impulso delle tracce.
La qualita` della ricostruzione dell'energia:



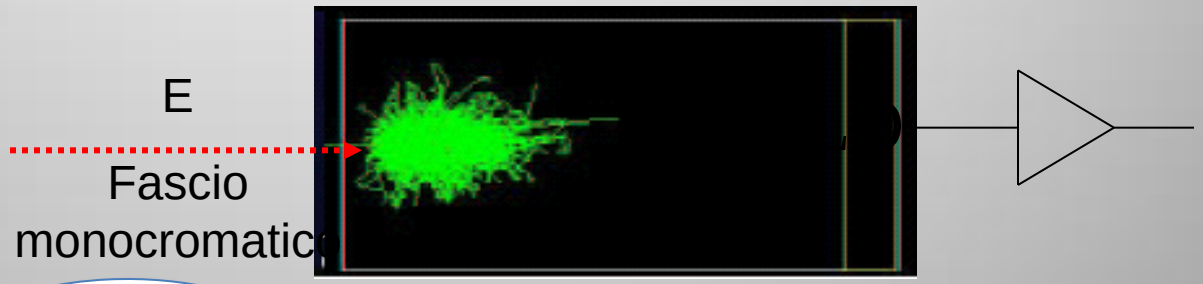


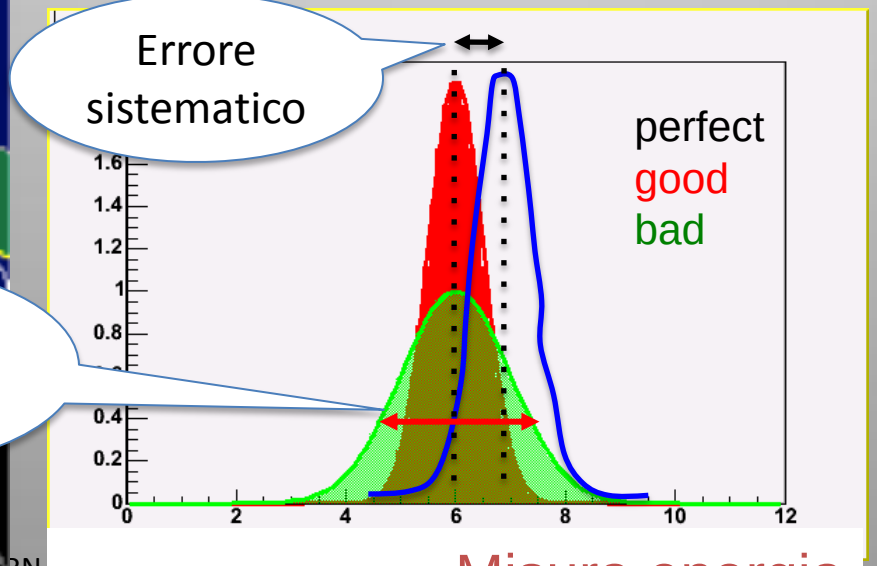
Misura energia

Misura dell'energia dei jet



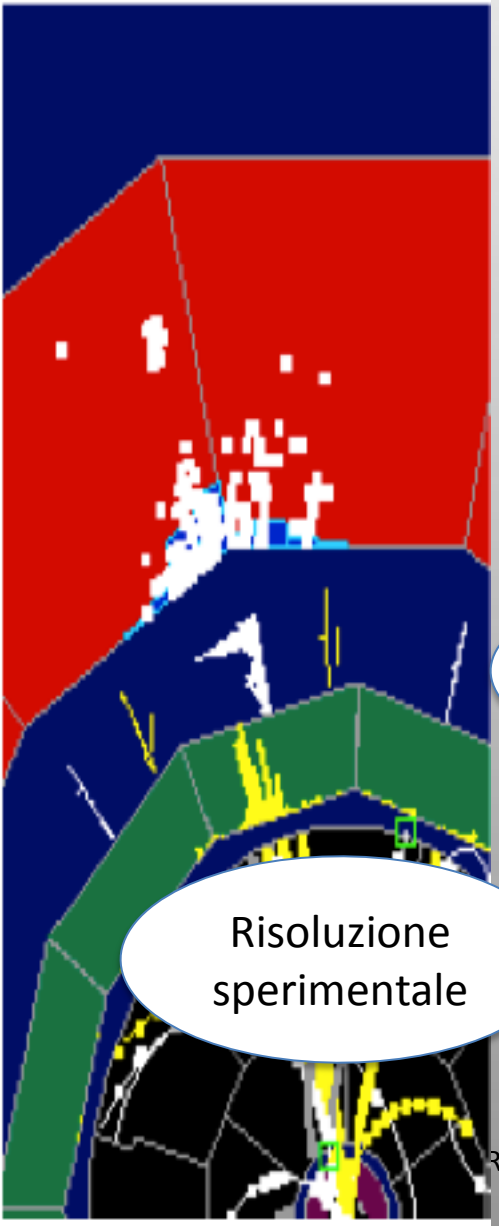
Energia del jet e` valutata utillizando la misura dell'energia nelle varie celle del calorimetro a volte univta alla misura dell'impulso delle tracce.
La qualita` della ricostruzione dell'energia:



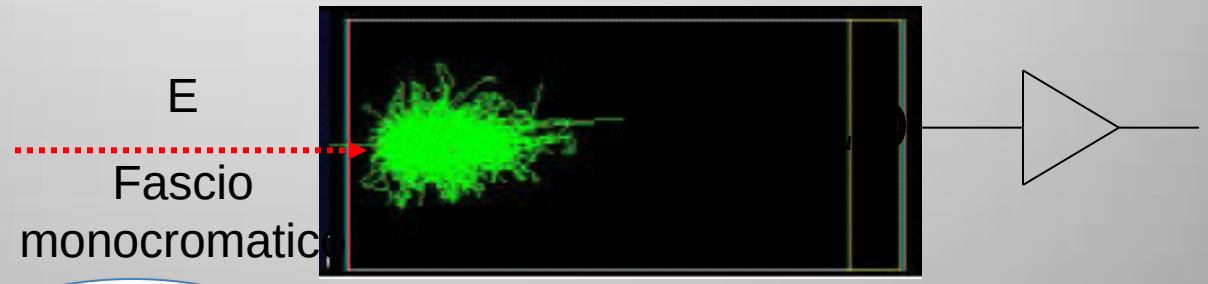


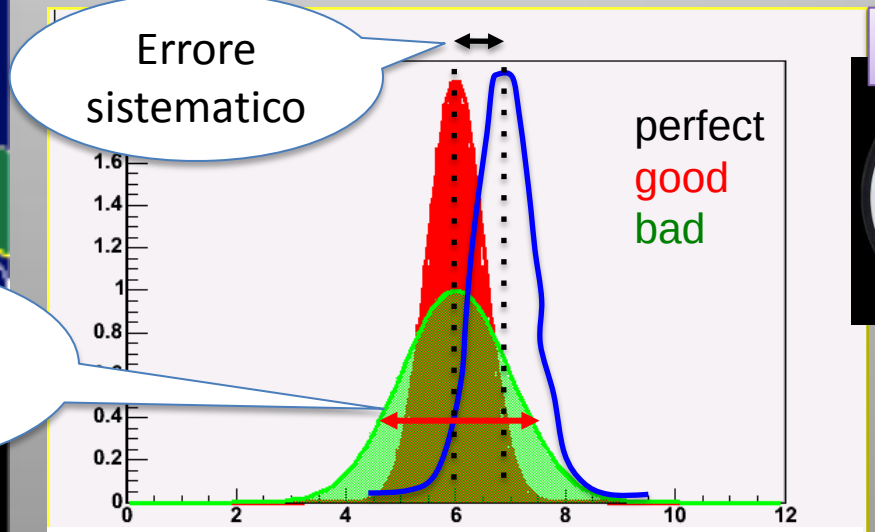
Misura energia

Misura dell'energia dei jet



Energia del jet e` valutata utillizando la misura dell'energia nelle varie celle del calorimetro a volte univta alla misura dell'impulso delle tracce.
La qualita` della ricostruzione dell'energia:





Misura energia

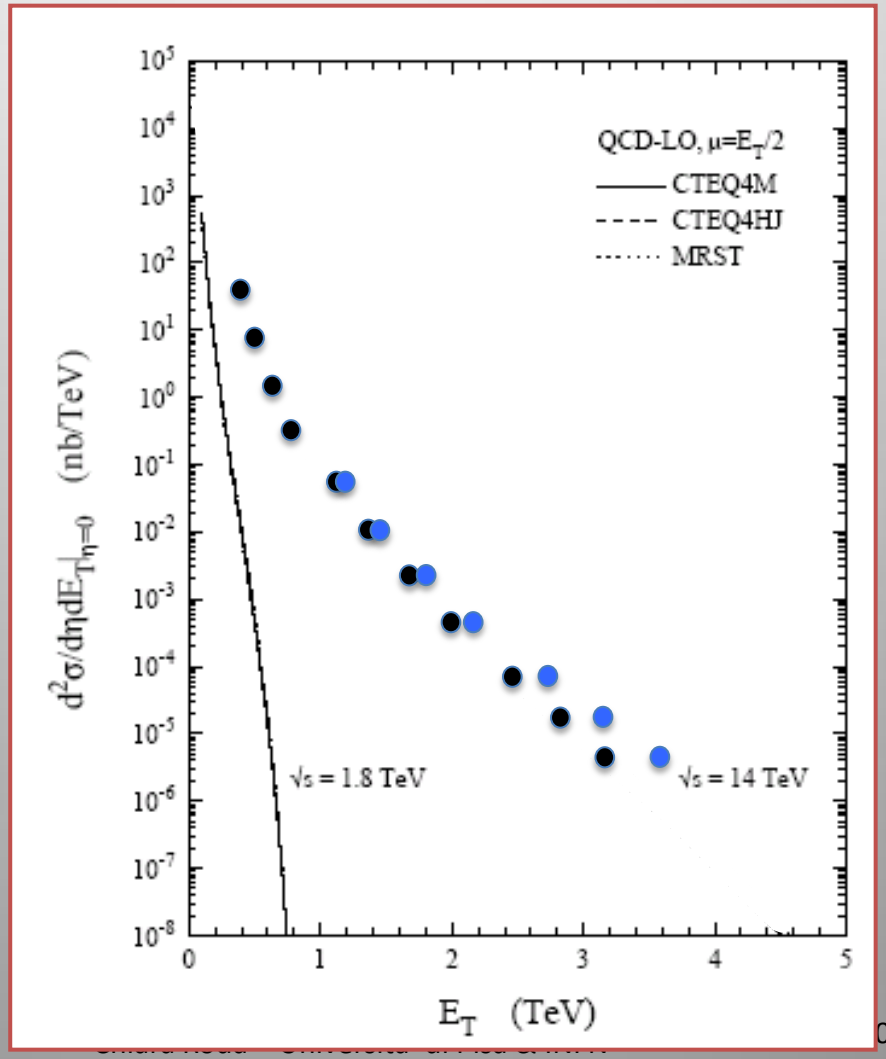
Risoluzione

Errore sistematico

Orologio avanti di dieci minuti

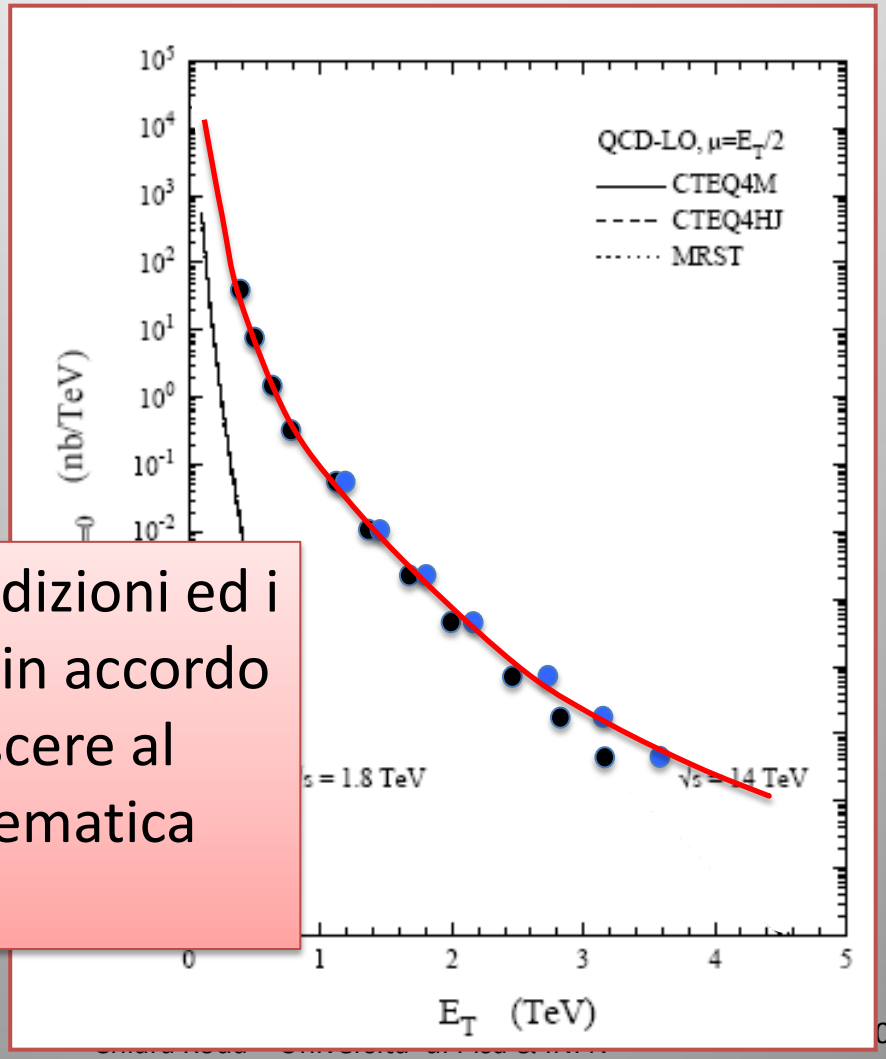
Errore sistematico sulla scala dei jet

Un'incertezza del 5% sulla misura di E_T → 30% di errore sulla sezione d'urto.



Errore sistematico sulla scala dei jet

Un'incertezza del 5% sulla misura di E_T → 30% di errore sulla sezione d'urto.



Per poter dire se le predizioni ed i dati sperimentali sono in accordo e` fondamentale conoscere al meglio l'incertezza sistematica sull'energia dei jet

Dati artificiali: la simulazione

(stesso concetto del flight simulator)

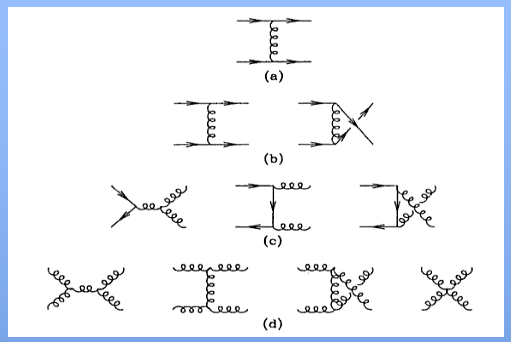
Dati prodotti con il computer … ma a cosa servono ?

- A capire meglio le misure del rivelatore: per esempio la incertezza sistematica sulla scala dei jet
- Ma non solo:
  - progettare gli esperimenti
  - a definire i criteri di selezione nelle analisi
  - a stimare quali processi sopravvivono ai criteri di selezione (composizione del fondo)
  - a stimare efficenze e fake rate
  - …

Una simulazione affidabile permette di sfruttare i rivelatori a meglio

I componenti della simulazione

Generazione eventi di collisione p-p



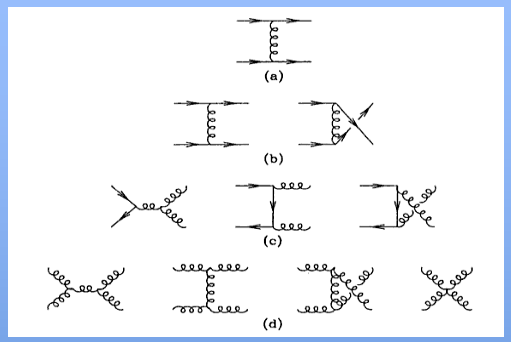
Questa parte contiene codificata la teoria delle interazione.

Output: N eventi con Lista di particelle con i relativi quadrivettori.

Nella simulazione conosco la natura dell'evento che genera il segnale (truth).

I componenti della simulazione

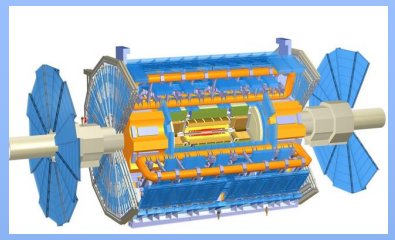
Generazione eventi di collisione p-p



Questa parte contiene codificata la teoria delle interazione.

Output: N eventi con Lista di particelle con i relativi quadrivettori.

Simulazione del rivelatore



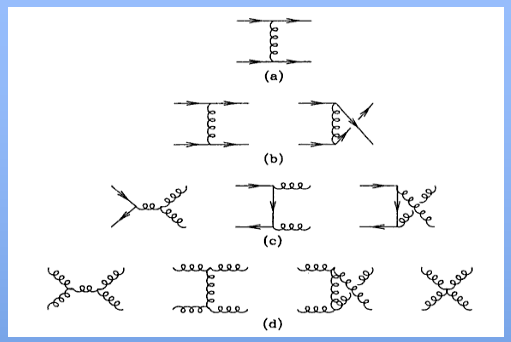
- interazione radiazione - materia
- precisa descrizione del rivelatore
- risposta dell'elettronica dei rivelatori

Output: formato raw data == dati reali

Nella simulazione conosco la natura dell'evento che genera il segnale (truth).

I componenti della simulazione

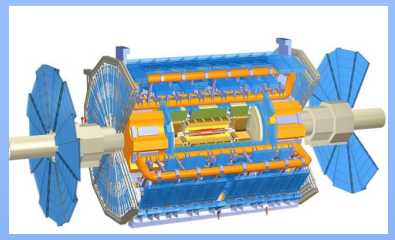
Generazione eventi di collisione p-p



Questa parte contiene codificata la teoria delle interazione.

Output: N eventi con Lista di particelle con i relativi quadrivettori.

Simulazione del rivelatore



- interazione radiazione - materia
- precisa descrizione del rivelatore
- risposta dell'elettronica dei rivelatori

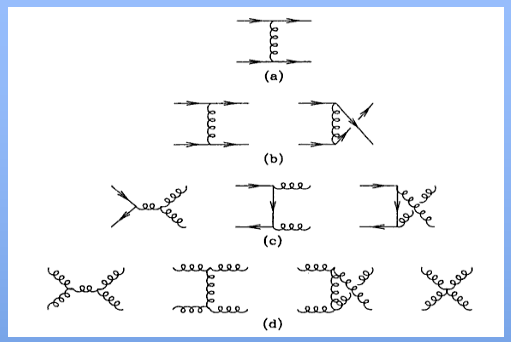
Output: formato raw data == dati reali

RICOSTRUZIONE

Nella simulazione conosco la natura dell'evento che genera il segnale (truth).

I componenti della simulazione

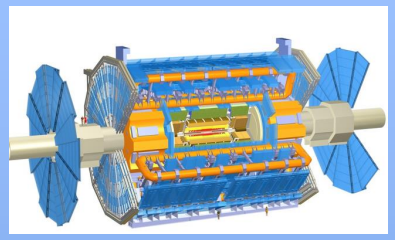
Generazione eventi di collisione p-p



Questa parte contiene codificata la teoria delle interazione.

Output: N eventi con Lista di particelle con i relativi quadrivettori.

Simulazione del rivelatore

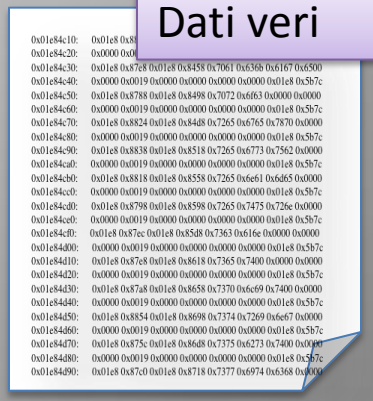


- interazione radiazione - materia
- precisa descrizione del rivelatore
- risposta dell'elettronica dei rivelatori

Output: formato raw data == dati reali

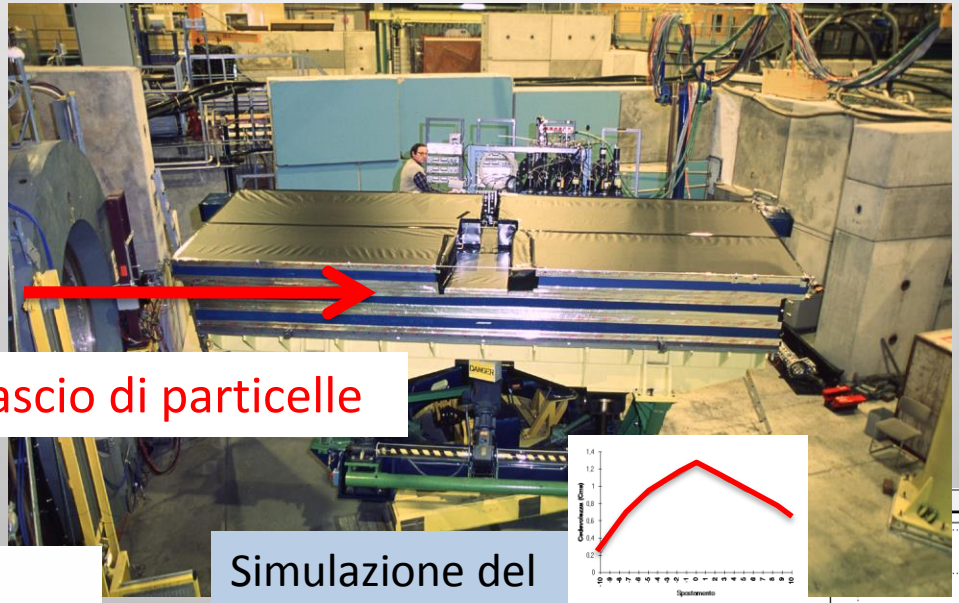
RICOSTRUZIONE

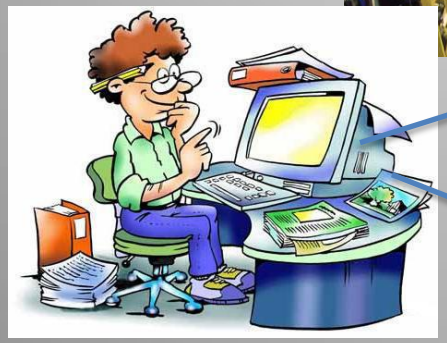
Dati veri



Nella simulazione conosco la natura dell'evento che genera il segnale (truth).

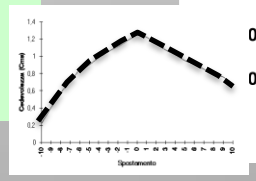
Anni di lavoro prima della presa dati per la messa punto della simulazione

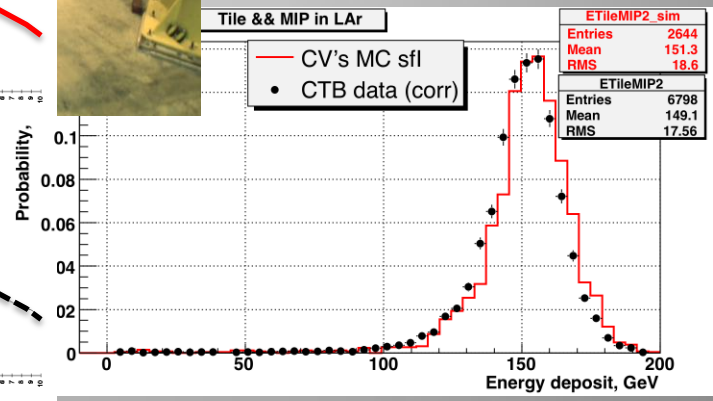




Simulazione del rivelatore

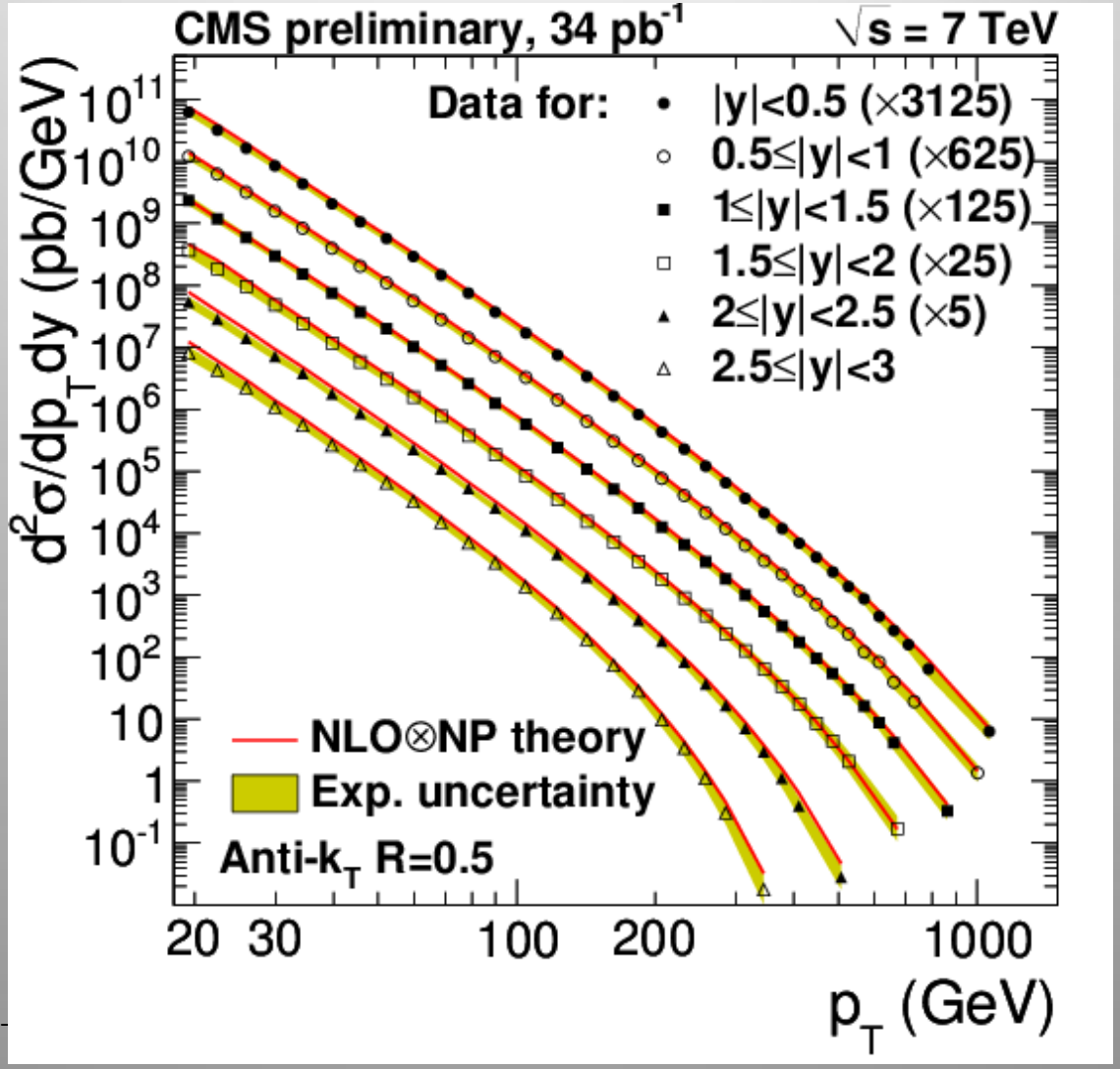
Analisi dei dati sperimentali





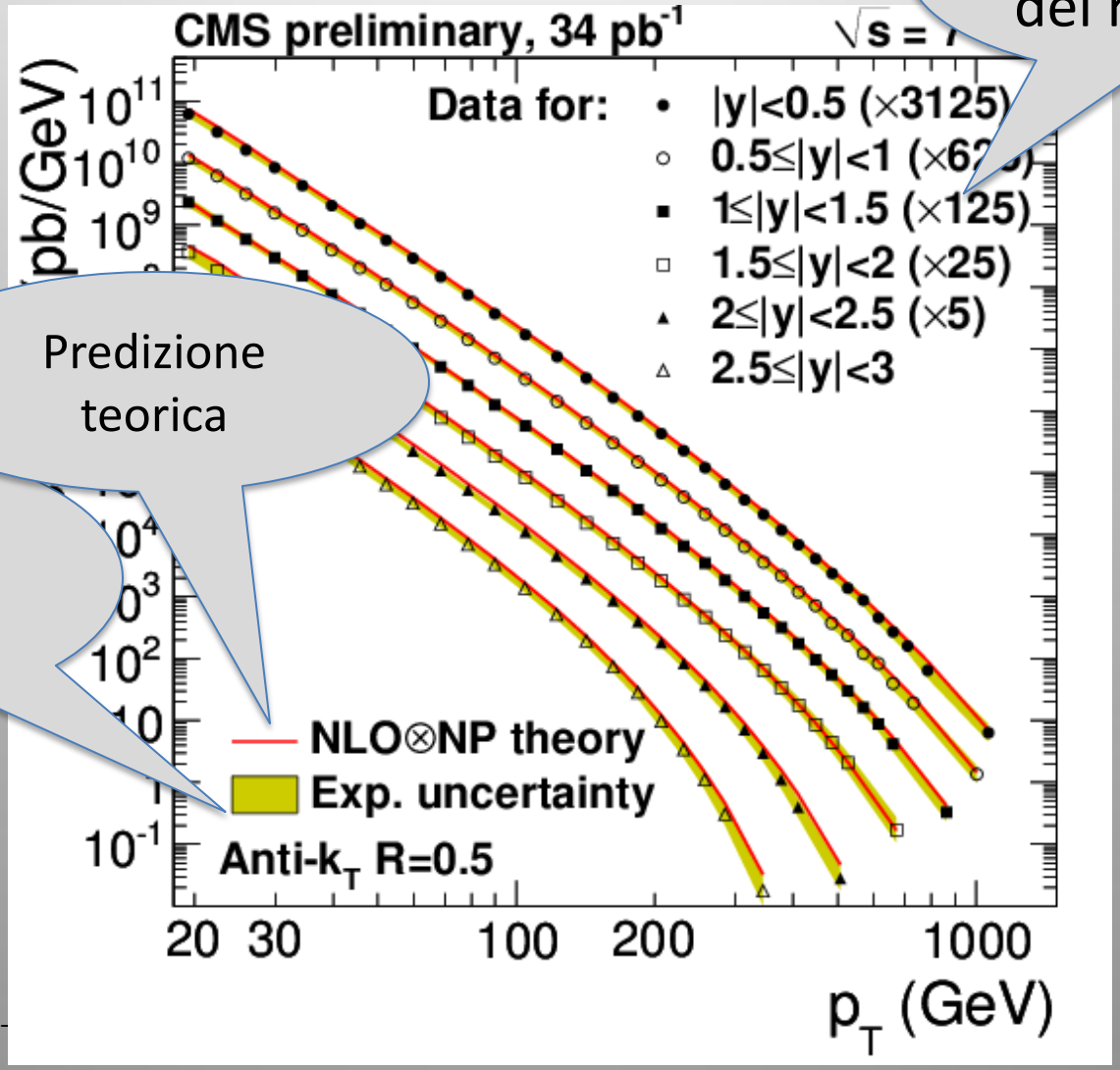
Dopo un anno dalla presa dati la scala di energia dei jet era conosciuta a qualche percento su una scala di energia da 20 GeV a 2 TeV !

La misura della sezione d'urto inclusiva dei jet



La misura della sezione d'urto inclusiva dei jet

Varie regioni del rivelatore

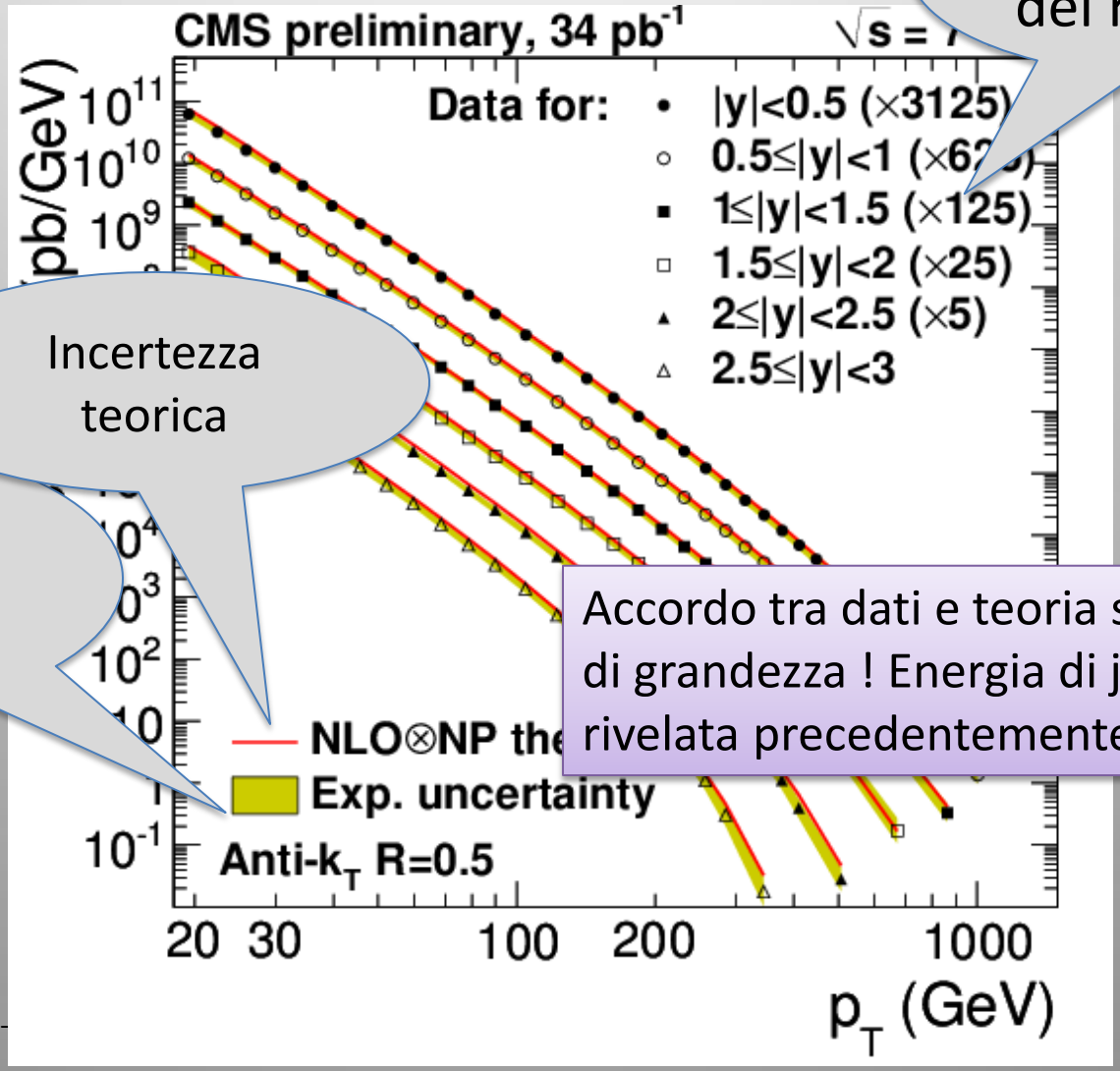


Predizione teorica

Incertezza sistematica sperimentale (JES)

La misura della sezione d'urto inclusiva dei jet

Varie regioni del rivelatore



Incertezza teorica

Incertezza sistematica sperimentale (JES)

Accordo tra dati e teoria su 8 ordini di grandezza ! Energia di jet mai rivelata precedentemente.

Il secondo esempio: la ricerca del bosone di Higgs

Il meccanismo di Borut-Englert-Higgs prevede l'esistenza di una particella di massa ignota – Bosone di Higgs – di massa ignota.
Esiste il bosone di Higgs ? Se esiste come posso rivelarlo ?

Channel	m_H range (GeV)
$H \to \gamma\gamma$	110-150
$H \to \tau\tau \to ll+\nu$	110-140
$H \to \tau\tau \to l\tau_{had}$	100-150
$W/ZH \to bbl(l)$	110-130
$H \to WW^{(*)} \to l\nu l\nu$	110-300
$H \to ZZ^{(*)} \to 4l$	110-600
$H \to ZZ \to ll\,\nu\nu$	200-600
$H \to ZZ \to ll\,qq$	200-600
$H \to WW \to l\nu qq$	240-600

Il secondo esempio: la ricerca del bosone di Higgs

Il meccanismo di Borut-Englert-Higgs prevede l'esistenza di una particella di massa ignota – Bosone di Higgs – di massa ignota.
Esiste il bosone di Higgs ? Se esiste come posso rivelarlo ?

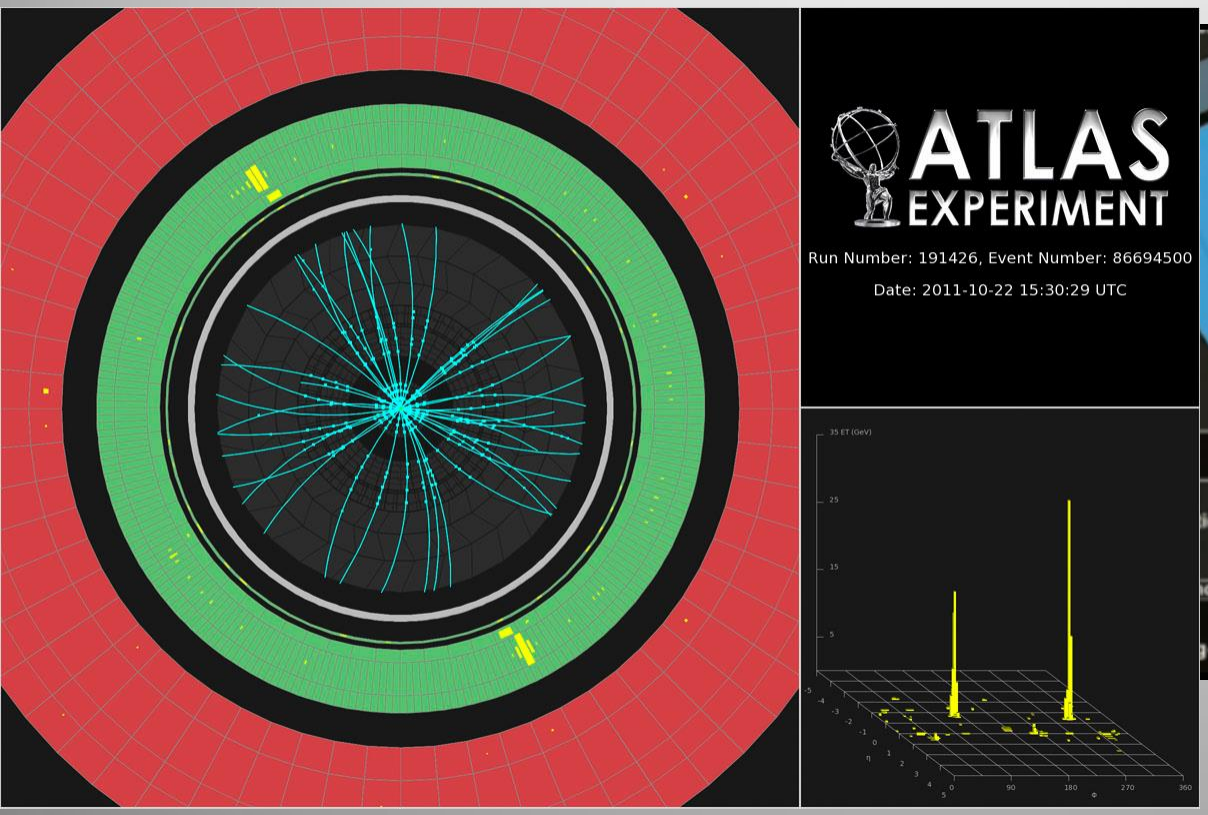
Un segnale diverso per ogni range di massa, per bassa massa:

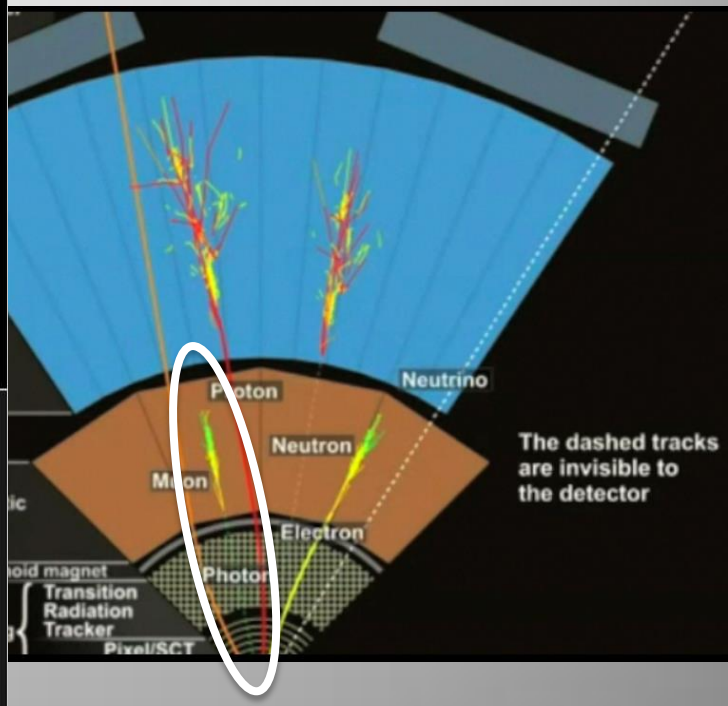
$$pp \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma$$

Channel	m_H range (GeV)
$H \rightarrow \gamma\gamma$	110-150
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow ll+\nu$	110-140
$H \rightarrow \tau\tau \rightarrow l\tau_{had}$	100-150
$W/ZH \rightarrow bbl(l)$	110-130
$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$	110-300
$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$	110-600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\,\nu\nu$	200-600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\,qq$	200-600
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu qq$	240-600

Un candidato Higgs misurato in ATLAS

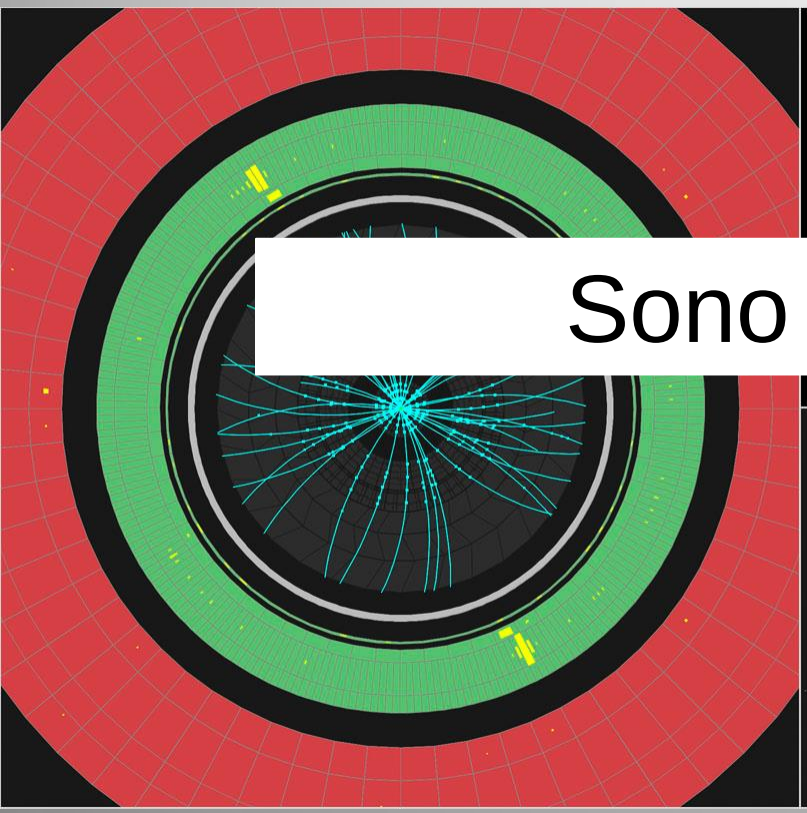
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

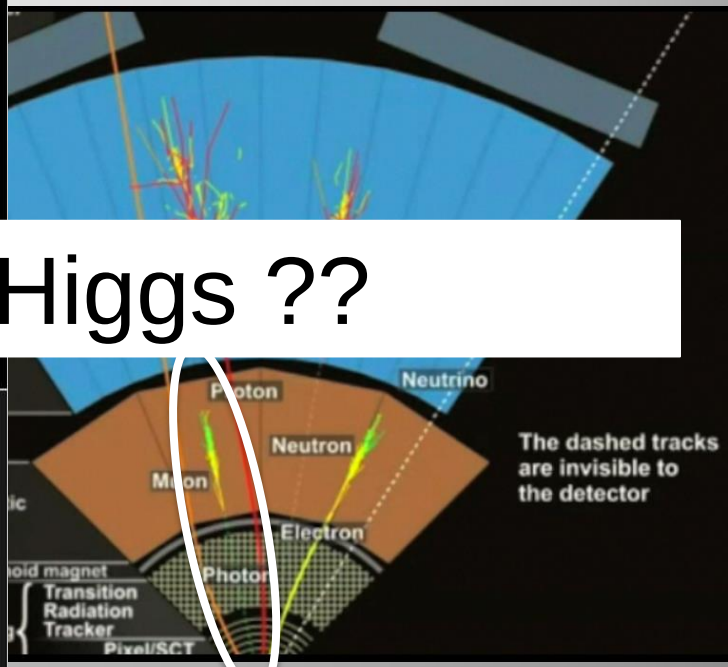




Un candidato Higgs misurato in ATLAS

$H \rightarrow \gamma\gamma$





Sono davvero Higgs ??

Sono davvero Higgs ??

La domanda e` lecita perche` come faccio a distinguere tra questi due casi ?

Segnale

$$pp \to H \to \gamma\gamma$$

Fondo

Fake photons

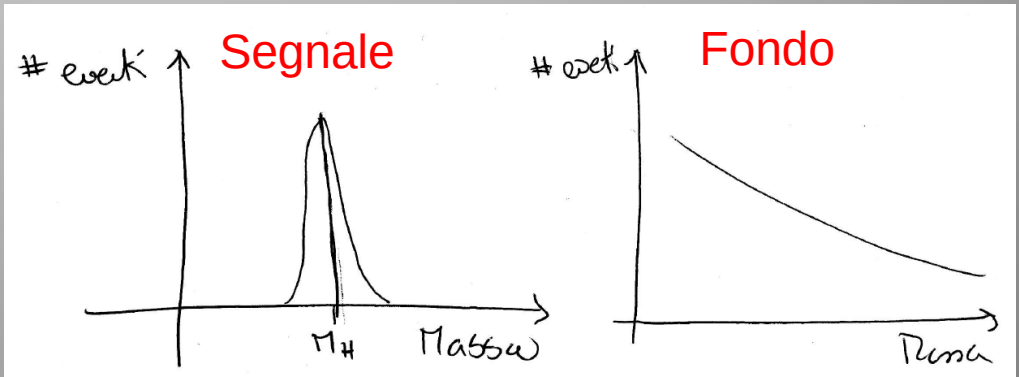
$$pp \to jet\gamma$$

$$pp \to \gamma\gamma$$

$$pp \to jetjet$$

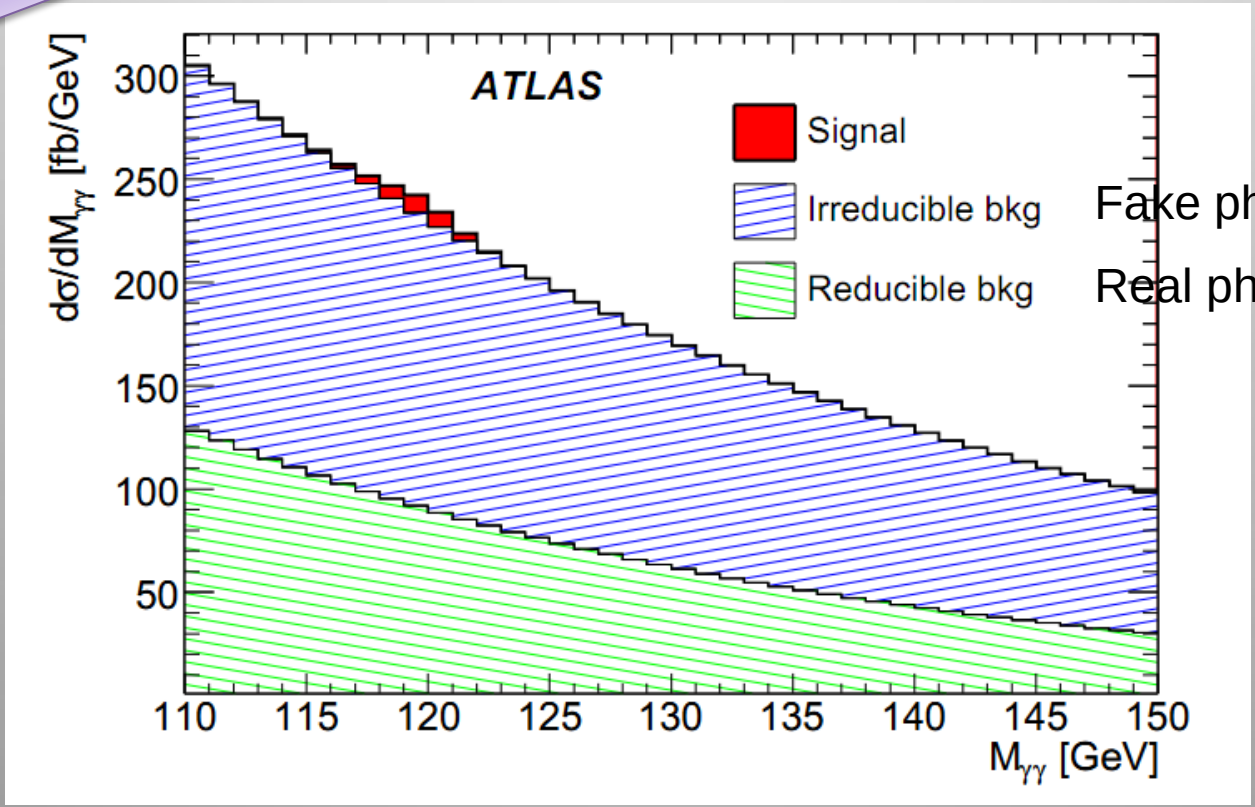
Stesso stato finale ma le particelle che osservo nel rivelatore si "ricordano" della massa della particelle da cui provengono…massa invariante

$$M_{\gamma\gamma} = 2E_1E_2(1-\cos\theta_{12})$$



La distribuzione di massa invariante

Simulazione



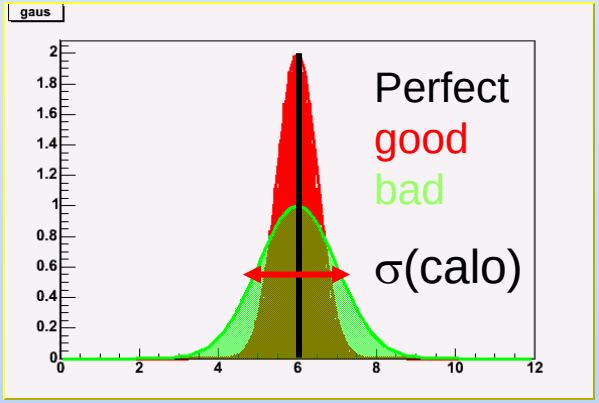
Fake photons

Real photons

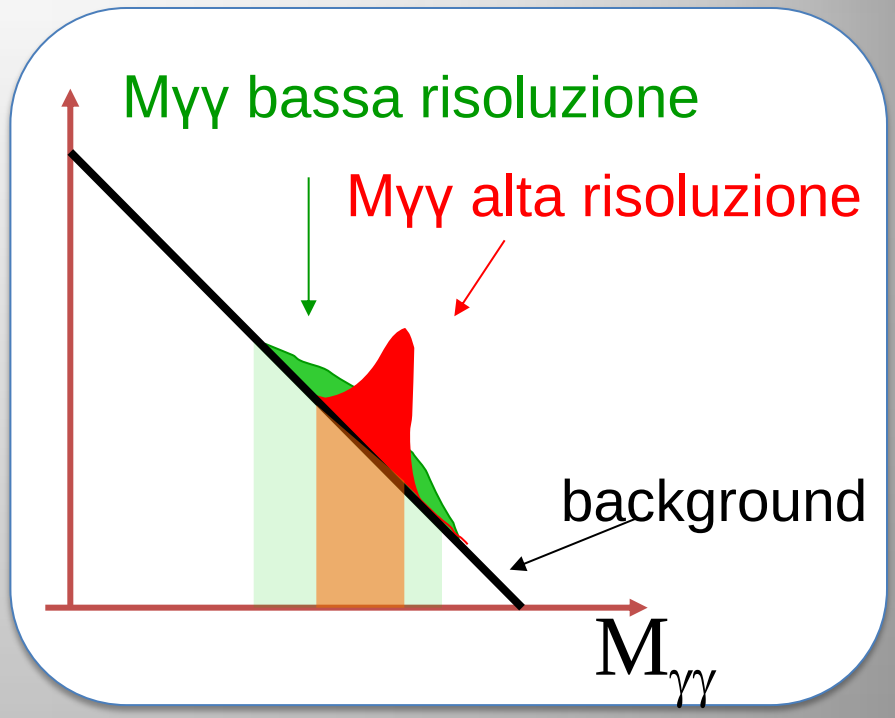
Il segnale appare come una piccola “gobba” su un grosso fondo.

Misura dell'energia dei fotoni

$$M_{\gamma\gamma} = 2E_1E_2(1-\cos\theta_{12})$$



Eccellente risoluzione nella misura della massa invariante di due fotoni per osservare un picco (e non un bozzo…) sul un fondo

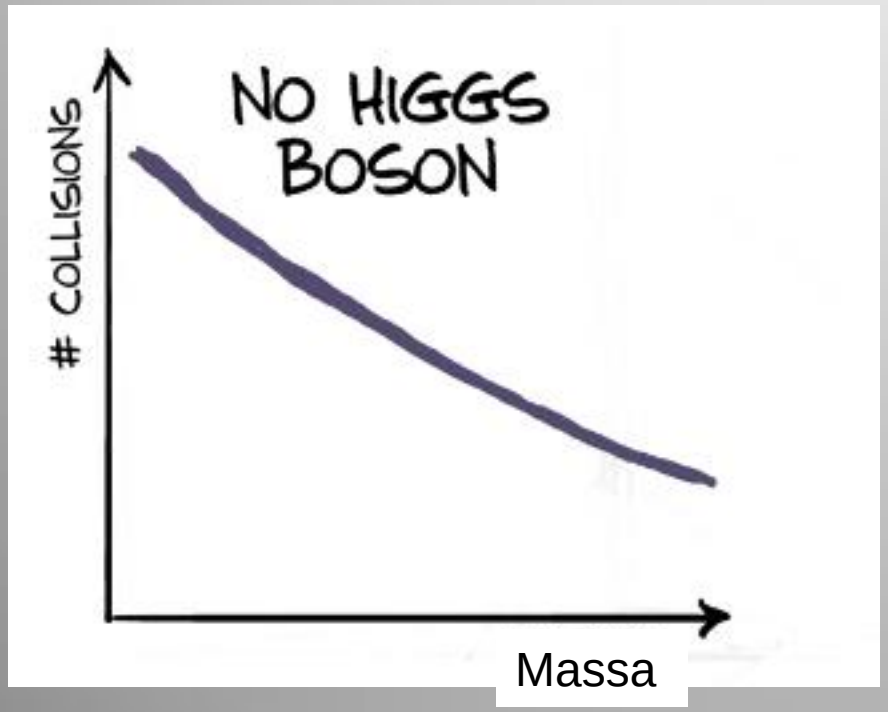


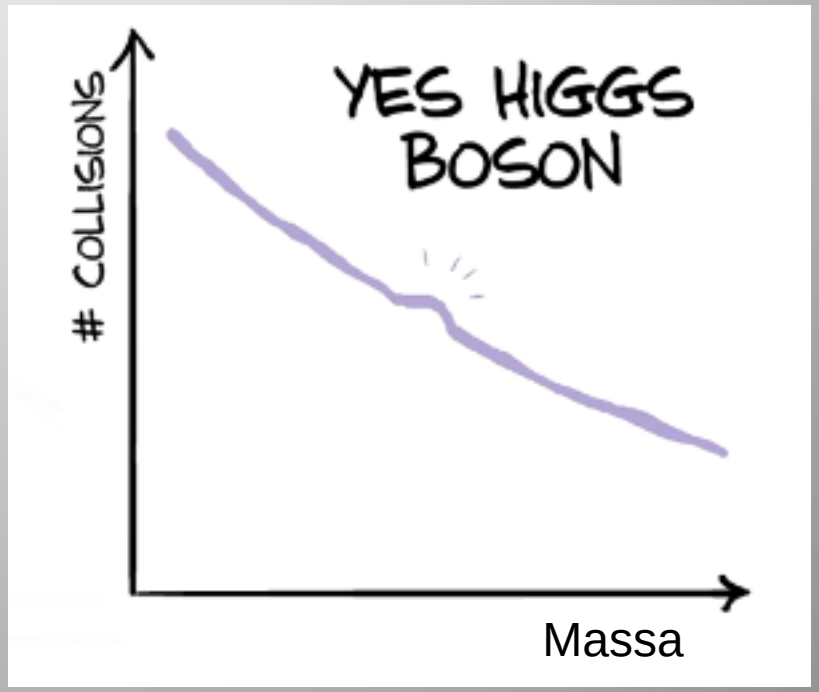
$$\int_{-2\sigma_{\gamma\gamma}}^{+2\sigma_{\gamma\gamma}} segnale = S$$

$$\int_{-2\sigma_{\gamma\gamma}}^{+2\sigma_{\gamma\gamma}} background = B \propto \sigma_{\gamma\gamma}$$

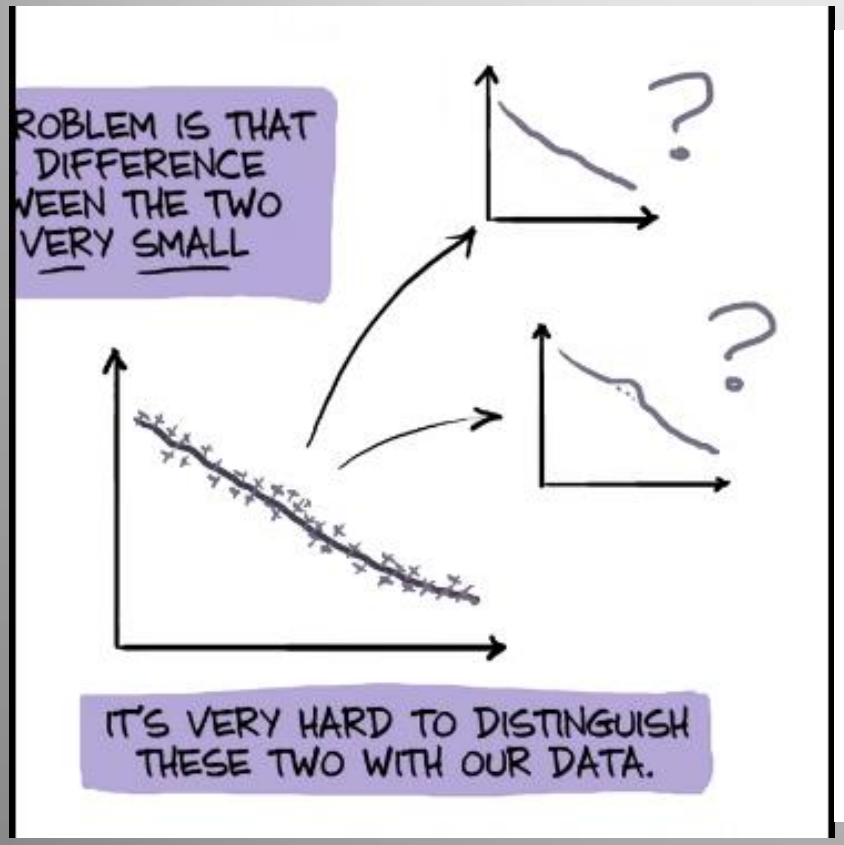
$$\frac{S}{B} \propto \frac{1}{\sigma_{\gamma\gamma}}$$

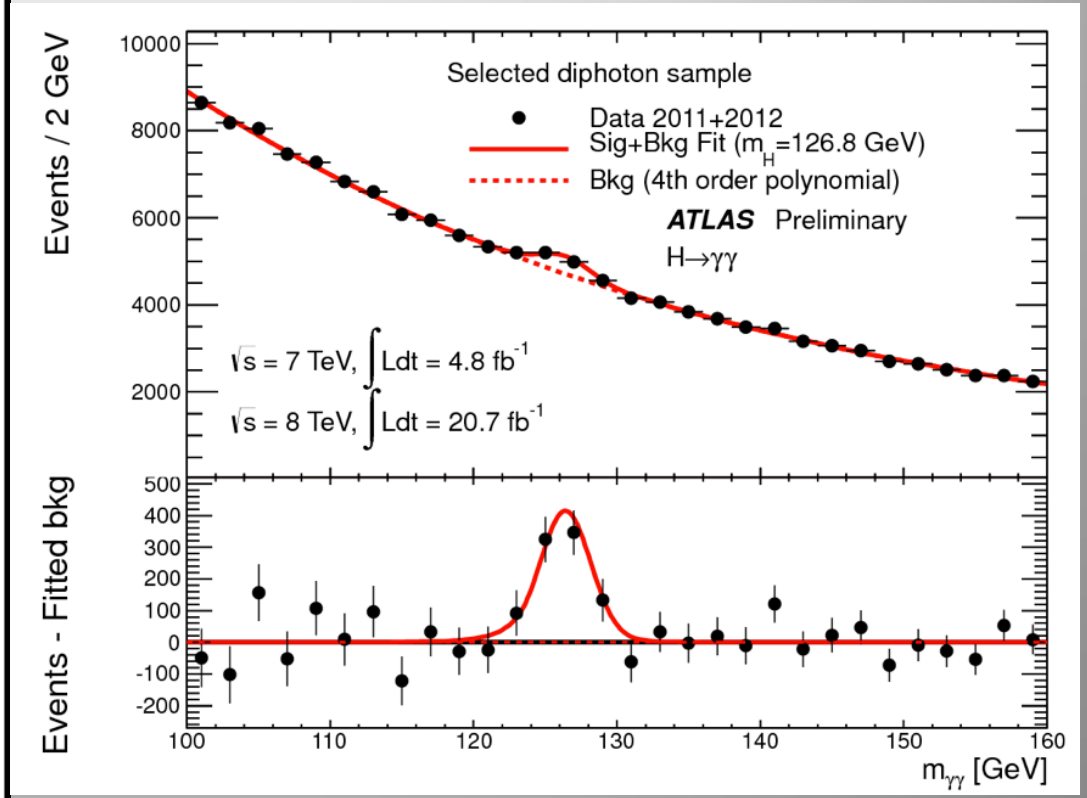
Higgs o non Higgs ?



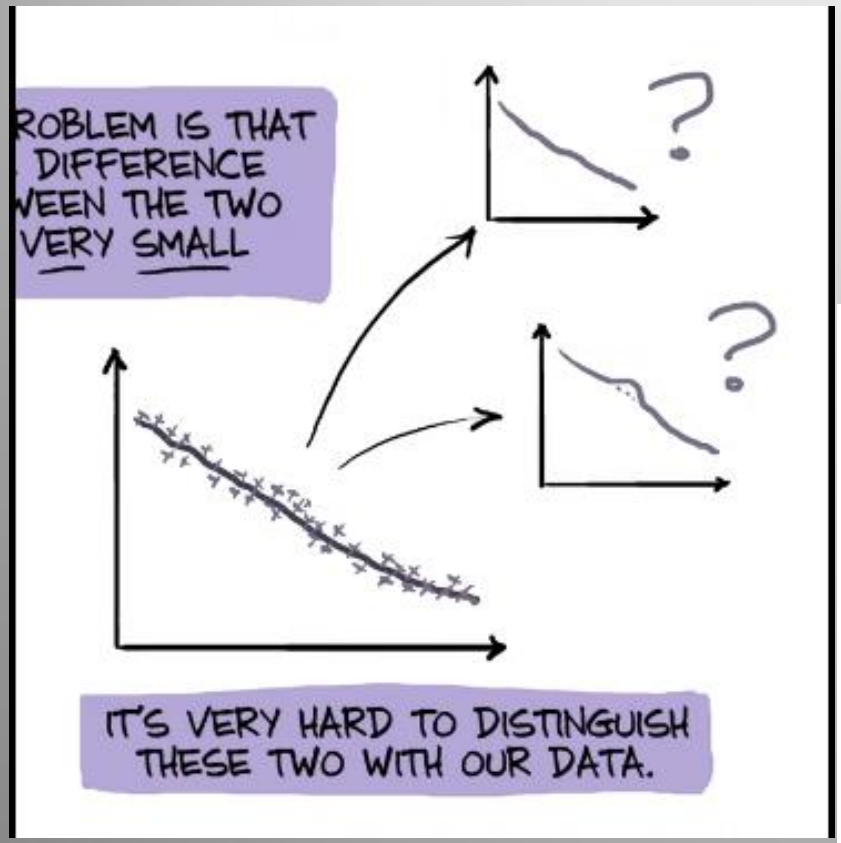


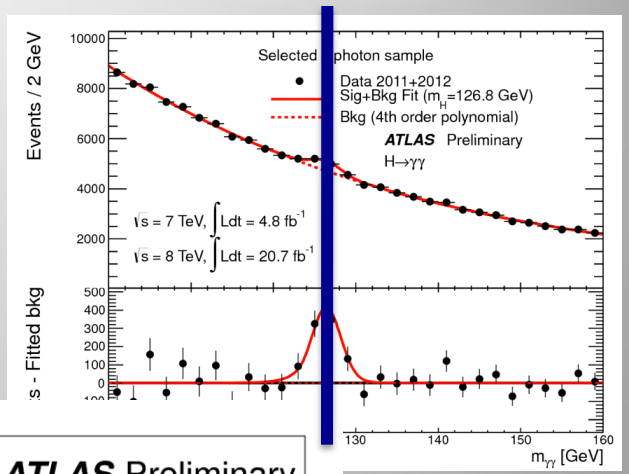
Higgs in due fotoni

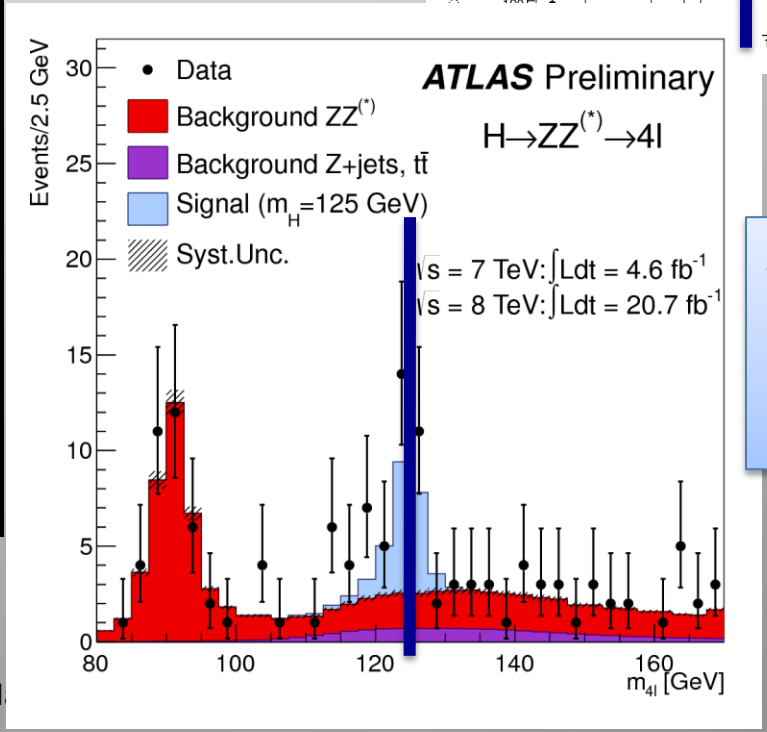




La distribuzione della massa delle particelle



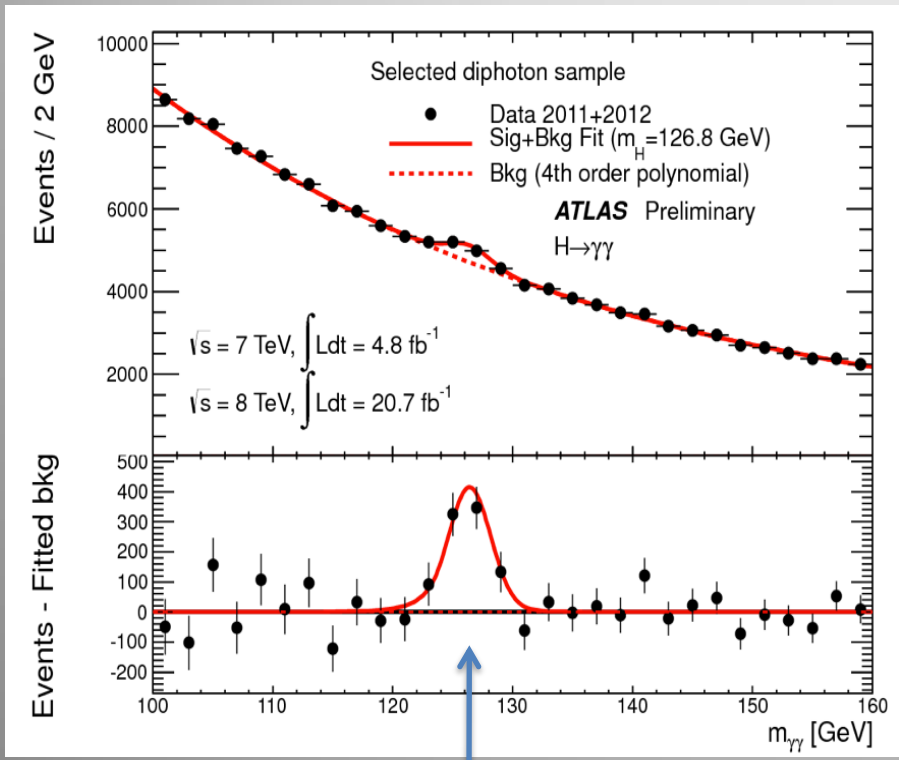


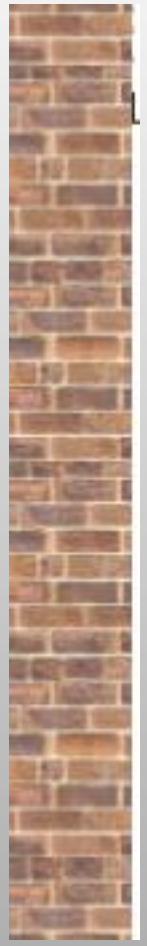


Stessa Massa per diverse analisi

... e i due esperimenti insieme

ATLAS



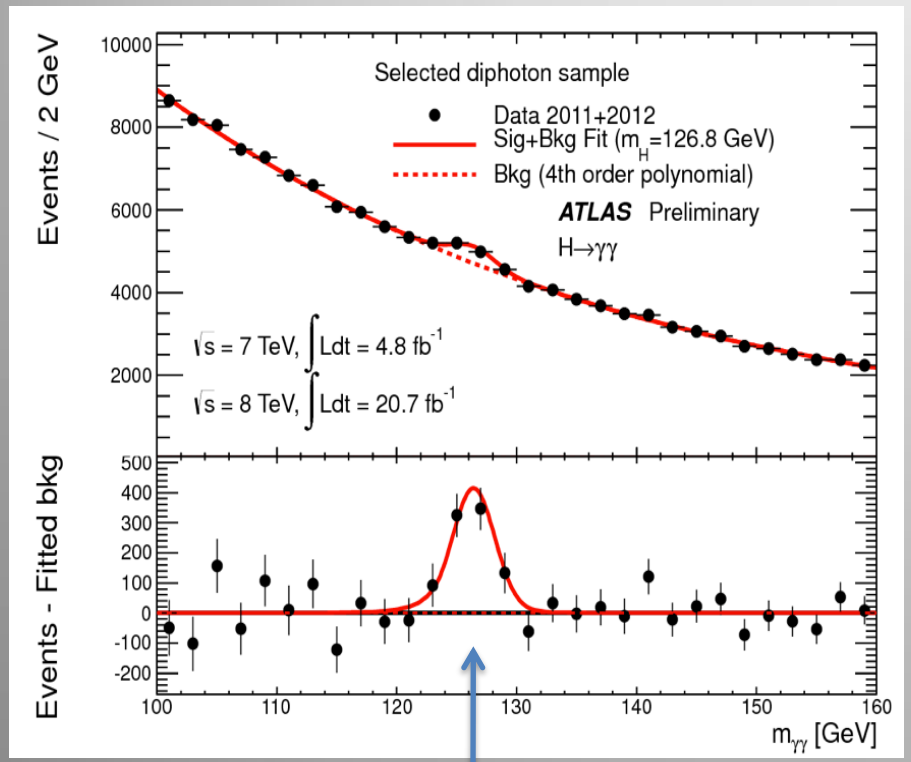


CMS

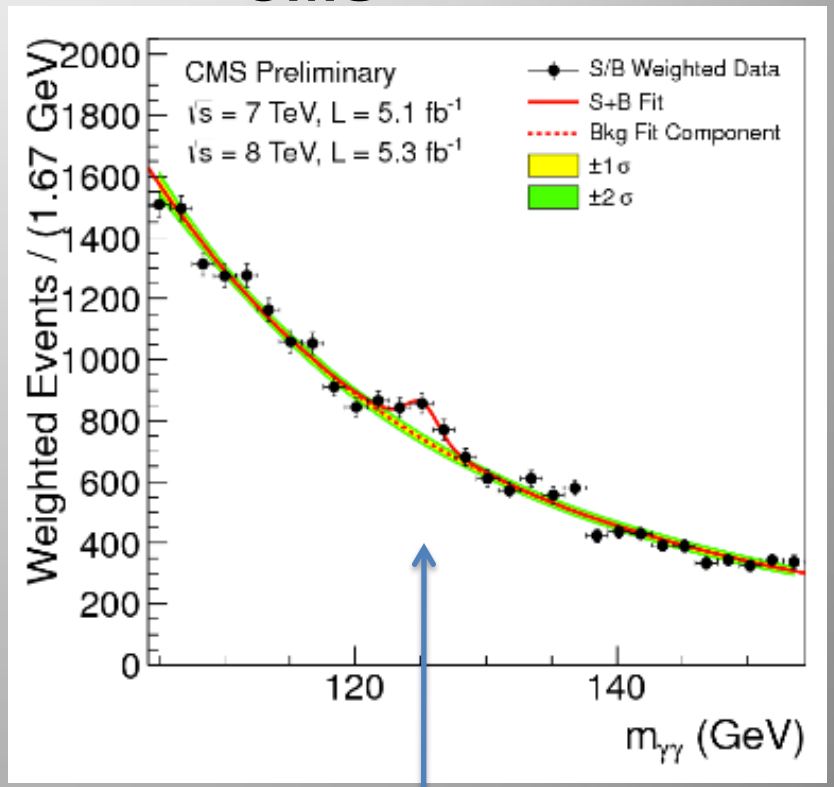
?

... e i due esperimenti insieme

ATLAS



CMS



Stessa massa rivelata nei due esperimenti

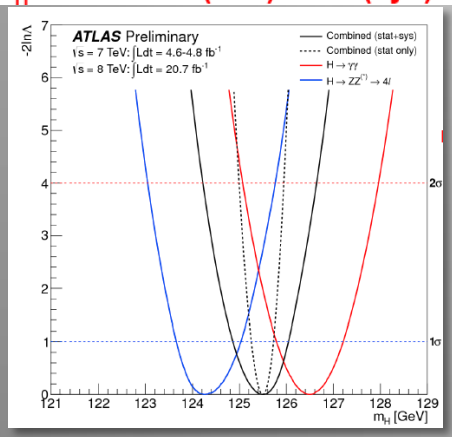
Luglio 2012

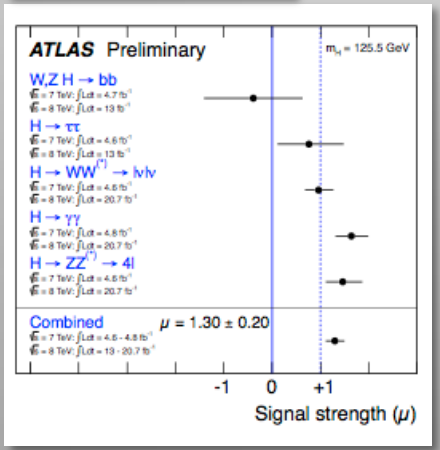
E` proprio il bosone di Higgs ?

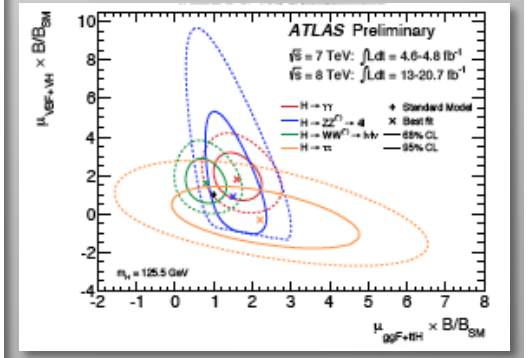
Abbiamo trovato una particella di massa 125 GeV ma e` proprio il bosone di Higgs ?

Si possono misurare le altre caratteristiche della particella … il modello data la massa predice il resto.

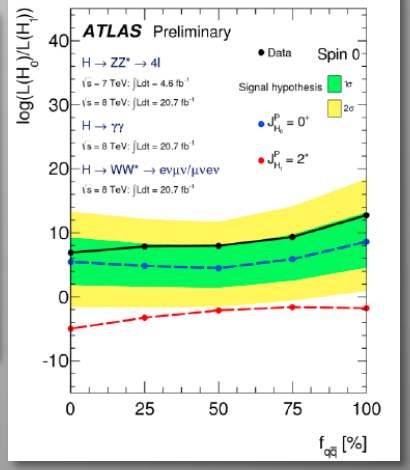
m_H=125.5± 0.2 (stat) ± 0.6 (sys) GeV







Compatibility with spin 0



Tutto quello che volete sapere e non avete mai osato chiedere sul bosone di Higgs nel prossimo seminario del Prof. Guido Tonelli.

La vera forza di questi esperimenti

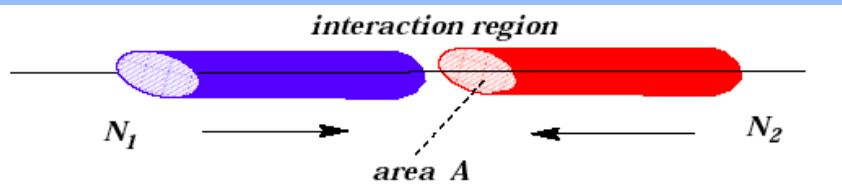
La vera forza di questi esperimenti

Back up

Alta luminosita` ?

Il rate di eventi prodotti dipende dal:
- probabilita` di produrre un particolare processo: σ x BR
- da quanti protoni riesco a far collidere: luminosita` istantanea (L)

$$N_{eventi}/\sec = \sigma \times BR \times L$$



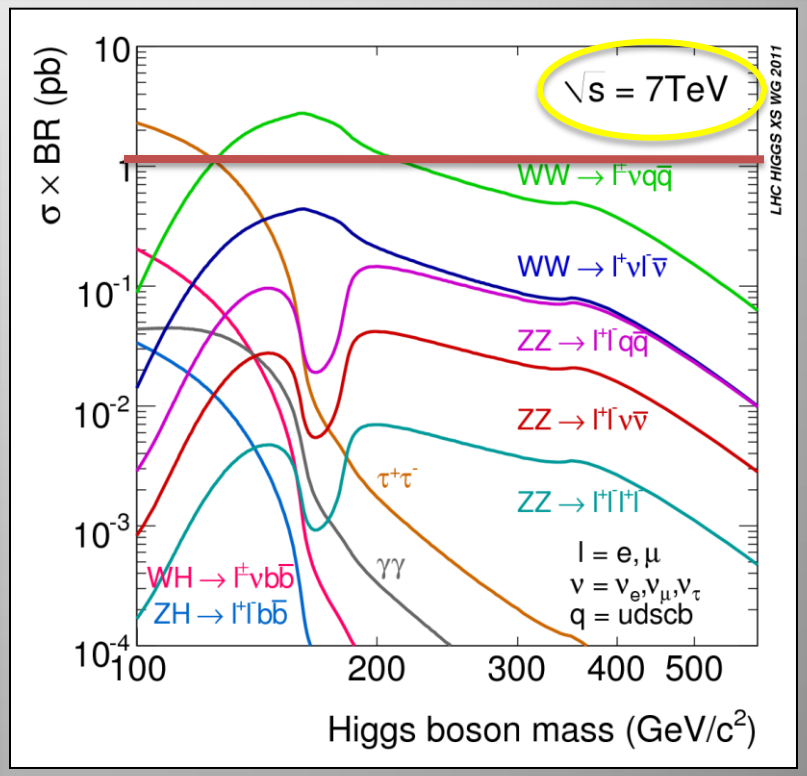
$$L = \frac{n_b \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot f_{rev}}{A} \qquad [L] = [L]^{-2}[T]^{-1}$$

$$N_{eventi}/anno = \sigma \times BR \times \int_{anno} L dt$$

Es.: Higgs 10^{-2} pb x 5 fb^{-1} = 50 eventi

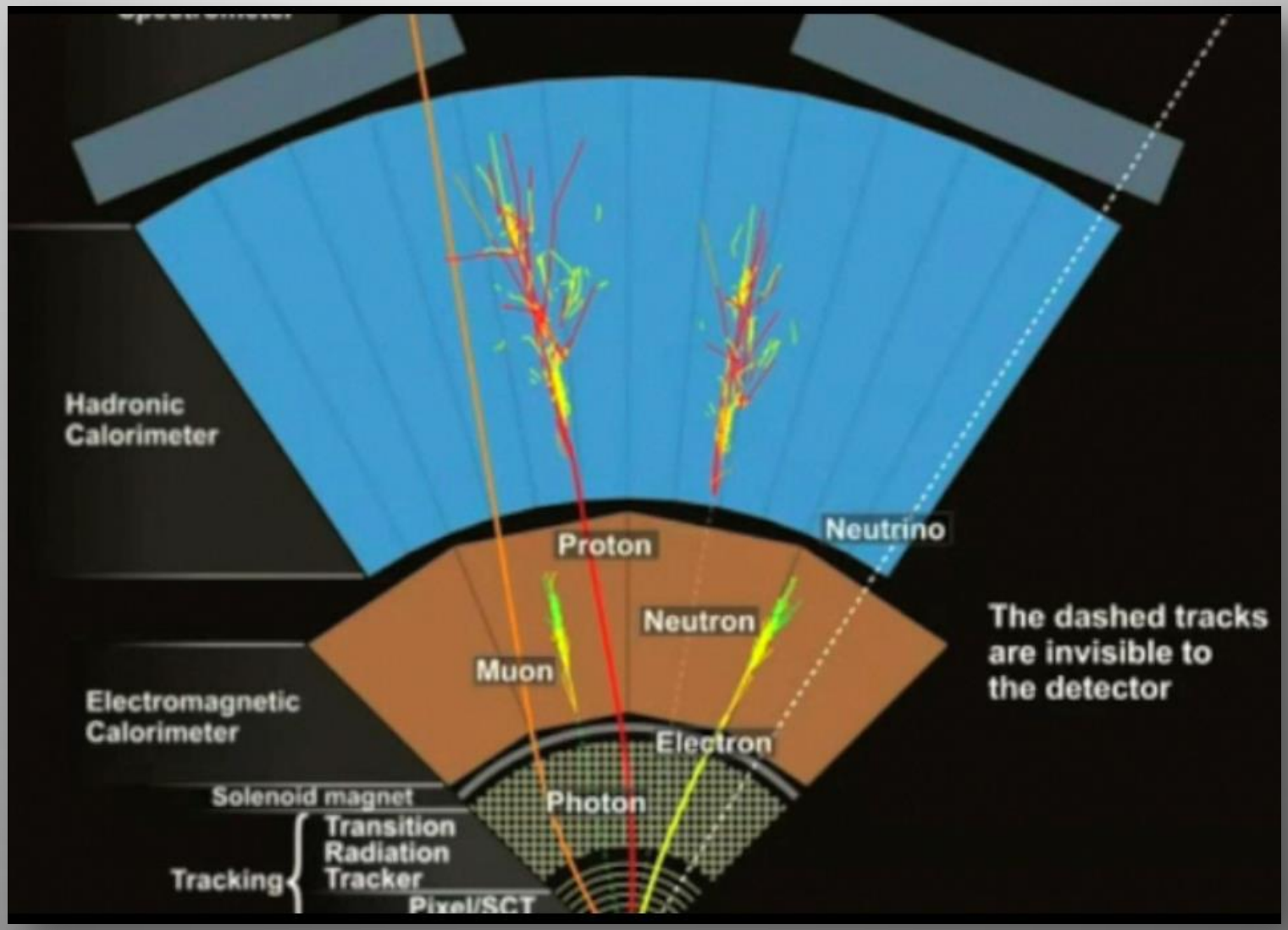
1barn = $10^{-24}cm^2$

Higgs per ogni canale: σ x BR ~ 10^{-2} pb



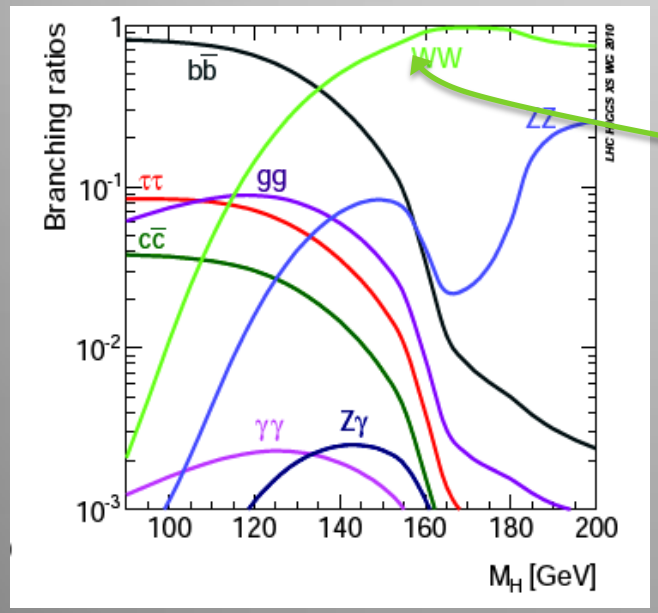
statistica accumulata da Tevatron in 20 anni …

Tutto insieme



Invece l'Higgs come appare ?

- L'Higgs decade immediatamente dopo essere stato prodotto cioe` si trasforma in altre particelle
- spesso anche i prodotti di decadimento a loro volta decadono → nei rivelatori si "vedono" le particelle finali di questa catena di decadimento
- Il tipo di decadimento dipende dalla massa dell'Higgs



Due esempi:

$H \rightarrow W^+W^- \rightarrow e^+ \nu e^- \bar{\nu}$

$H \rightarrow \gamma\gamma$

Queste sono le particelle che attraversano I rivelatori

Scegliere gli eventi…

$L = 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$

$$N_{eventi}/\sec = \sigma \times BR \times L$$

Gli eventi piu` probabili sono quelli con piu` alta sezione d'urto.

S/B senza selezione $< 10^{-9}$

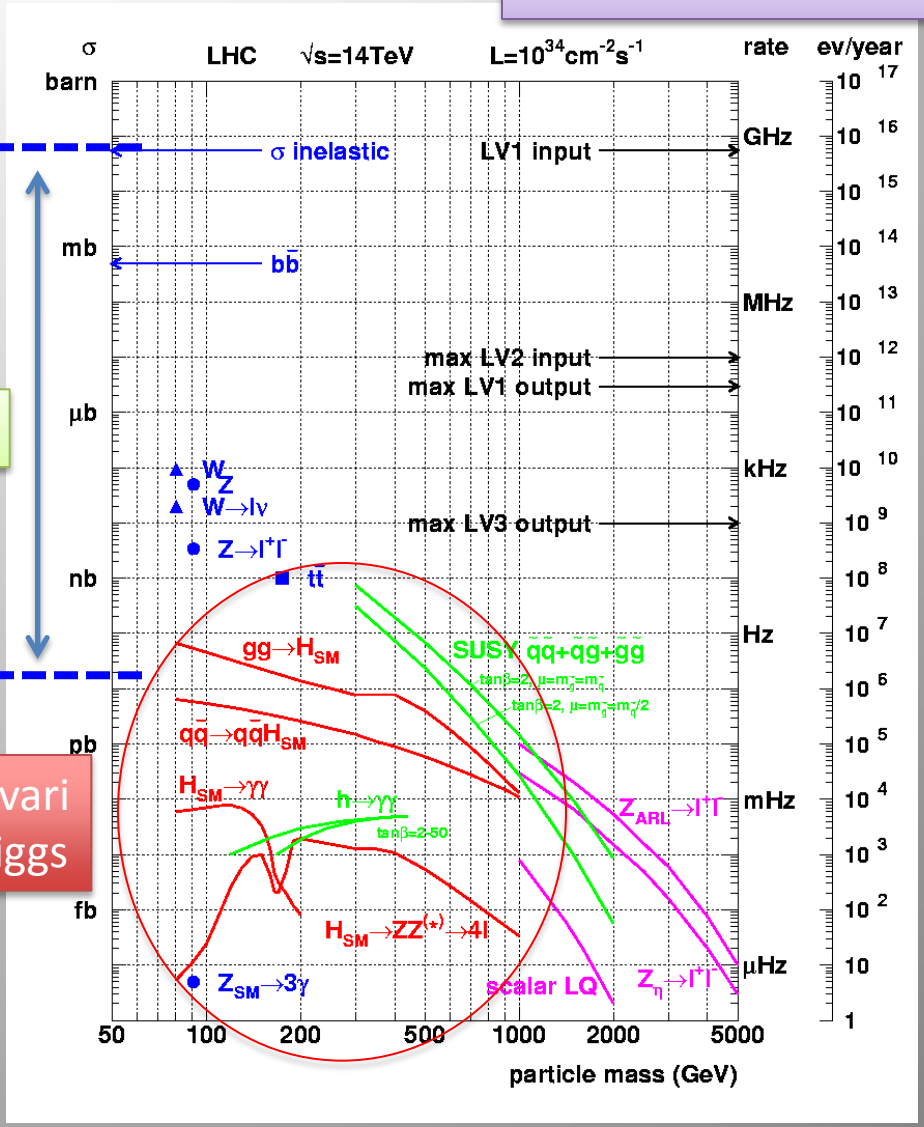
Su cosa basare il trigger ?

In cosa sono diversi gli eventi di Higgs dagli eventi piu` comuni ?

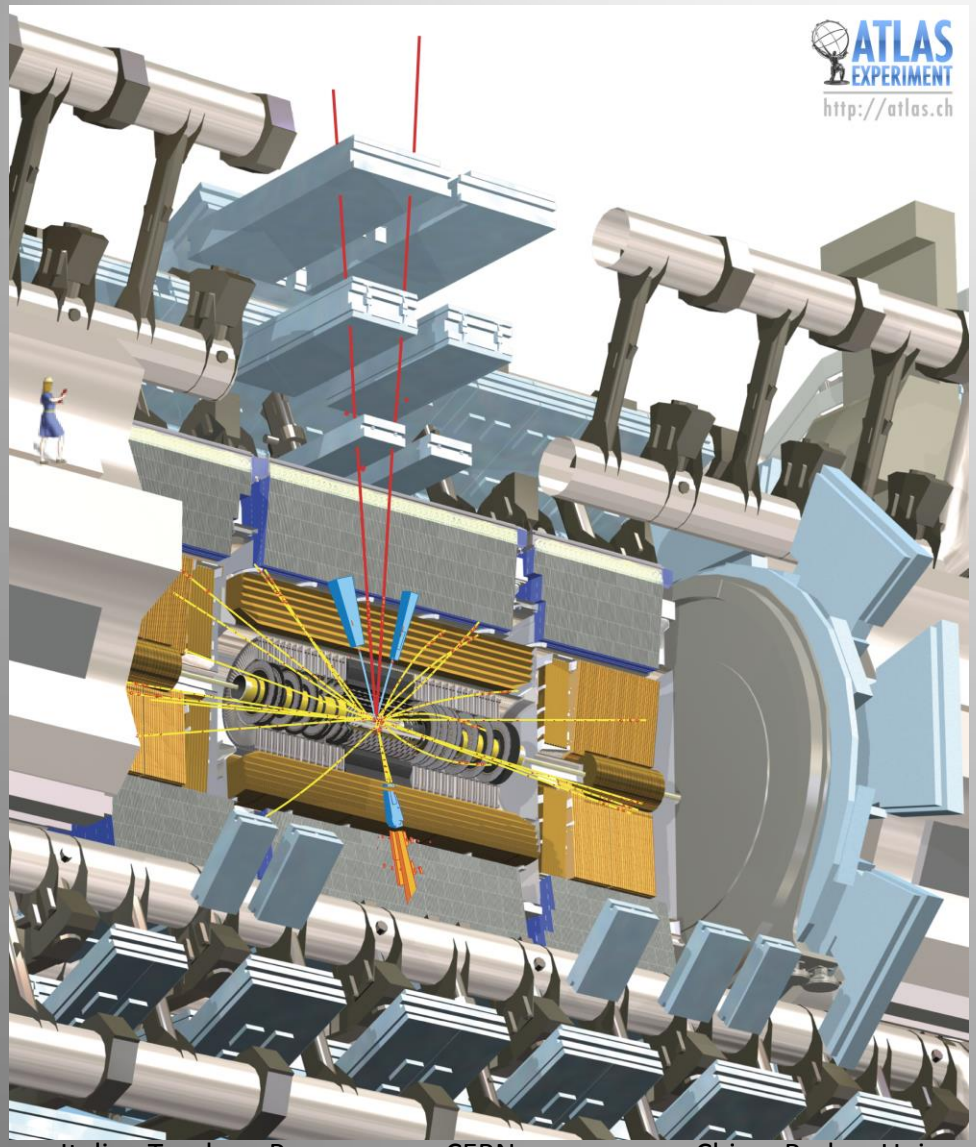
Cosa sono gli eventi piu` comuni ?

$S/B < 10^{-9}$

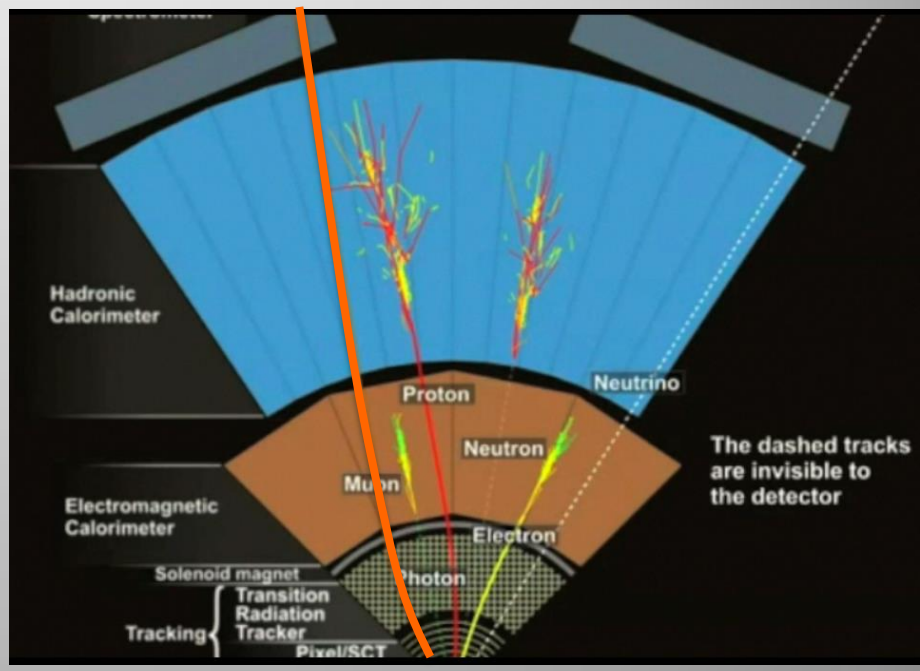
Linee rosse vari segnali di Higgs



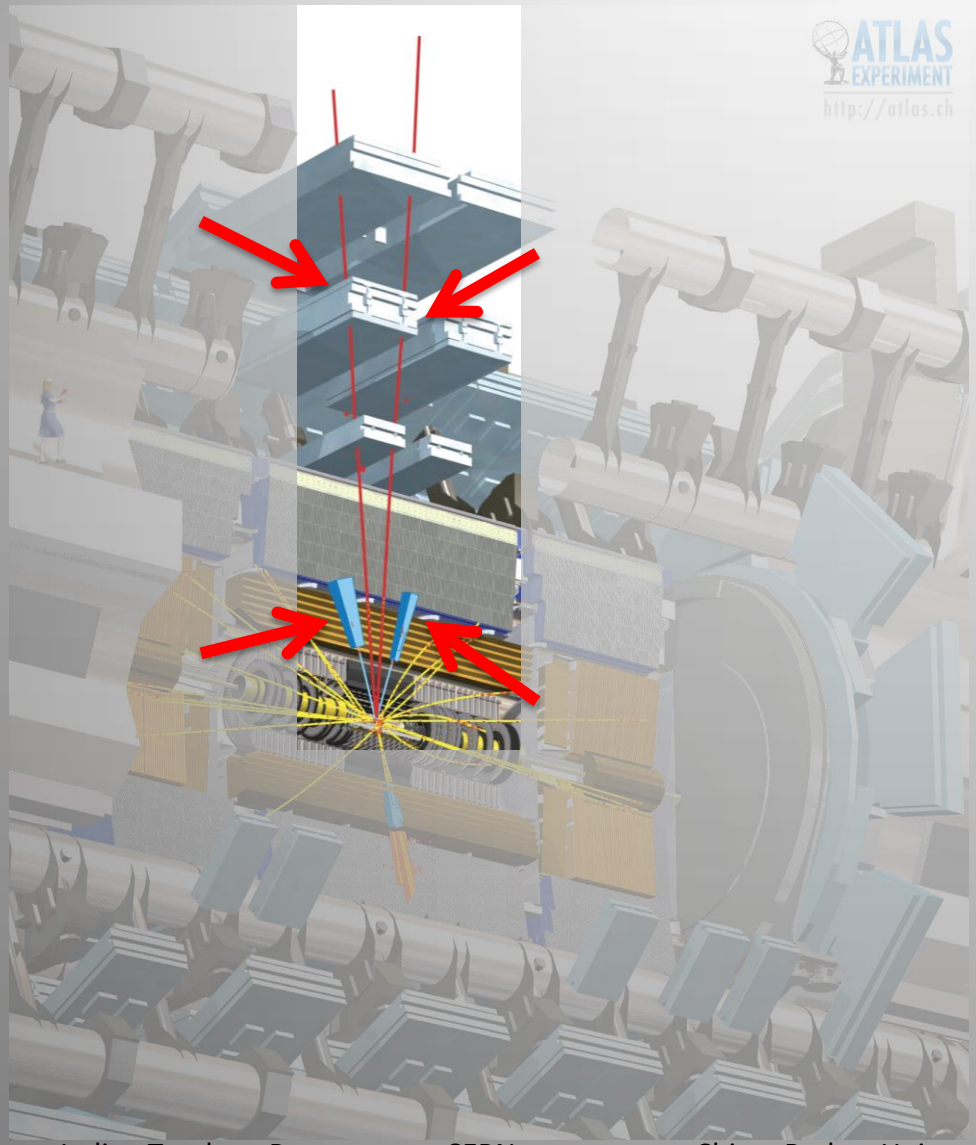
Alla ricerca dell'Higgs: un evento simulato



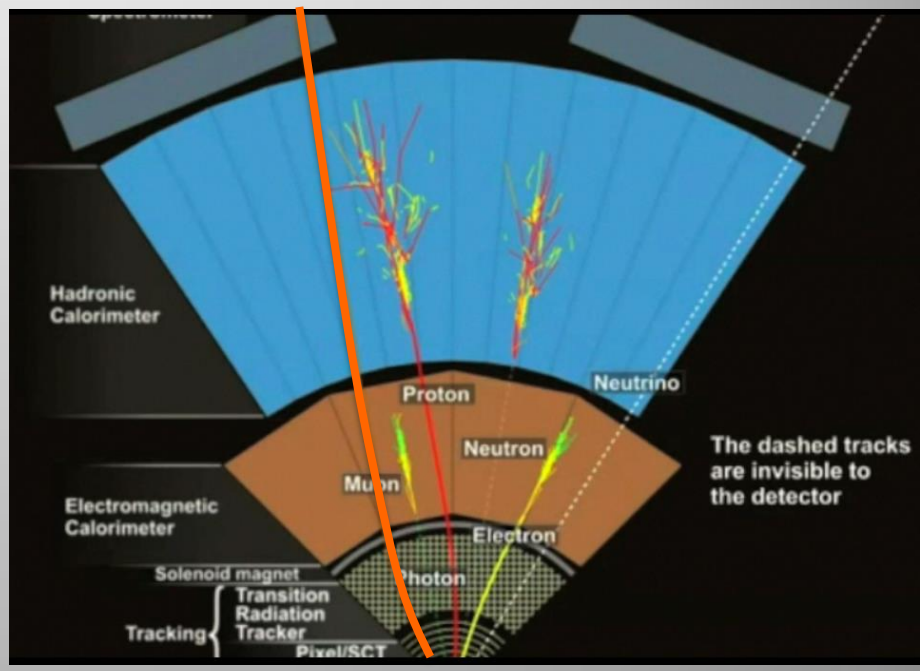
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$$



Alla ricerca dell'Higgs: un evento simulato

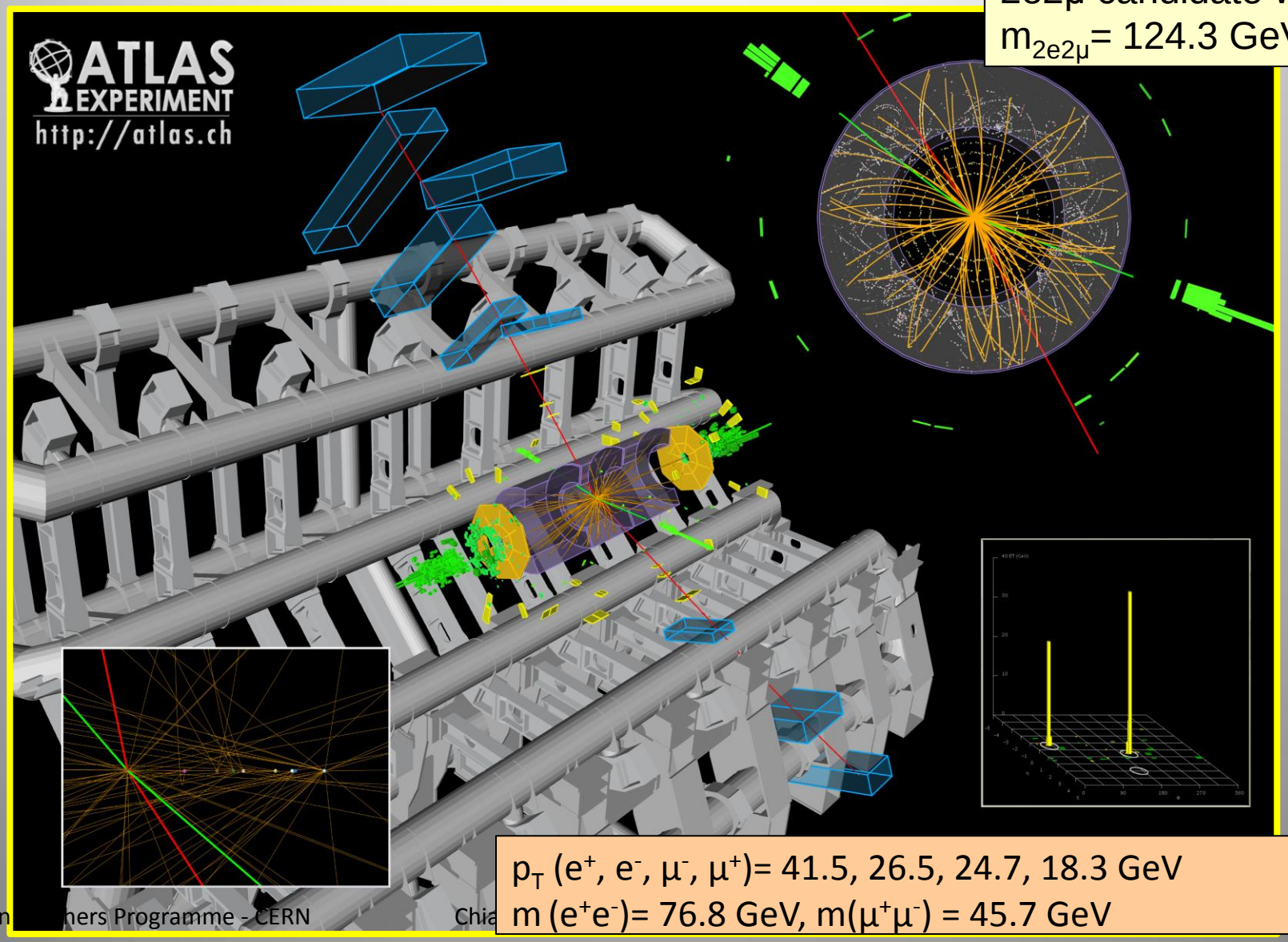


$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$$



Alla ricerca dell'Higgs: un evento reale

2e2μ candidate with
$m_{2e2\mu}$= 124.3 GeV

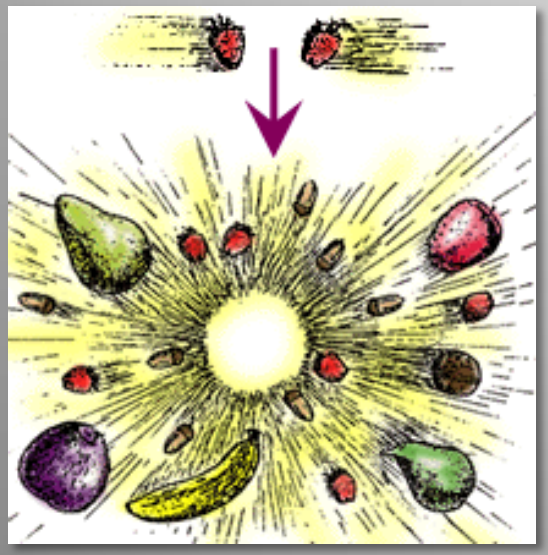


p_T (e^+, e^-, μ^-, μ^+)= 41.5, 26.5, 24.7, 18.3 GeV
m (e^+e^-)= 76.8 GeV, m($\mu^+\mu^-$) = 45.7 GeV

Come possiamo trovare una risposta ai problemi ancora aperti

Ricreiamo in laboratorio le condizioni in cui si possono generare le particelle che cerchiamo.

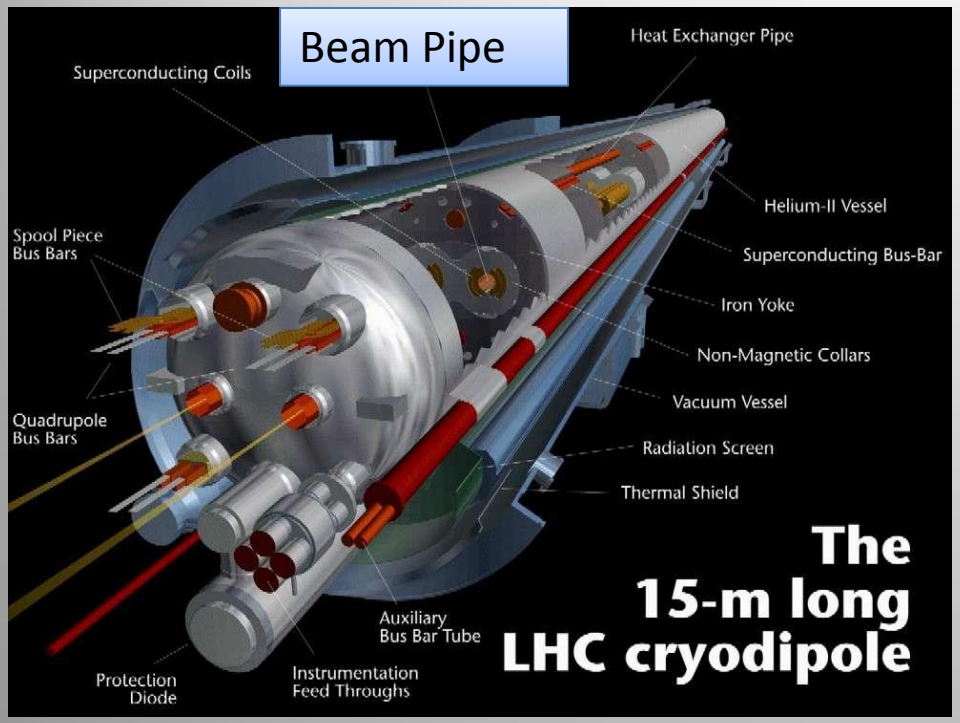
Collisioni di particelle di alta energia



Alto numero di collisioni

Apparato preciso

La parte piu' speciale di LHC



- L'intensita` del campo magnetico pari a 8.3 Tesla richiede l'utilizzo di magneti superconduttori
- I magneti diventano superconduttori a temperature bassissime -271.3 ^{o}C circa un grado in meno della temperatura dello spazio cosmico
- Il sistema di raffreddamento di LHC e` il piu` grande mai costruito ed e` fatto utilizzando He superfluido
- Il raffreddamento a -271.3 ^{o}C dei 27 Km di circonferenza richiede 3-4 settimane

B= Campo Magnetico
p ~ velocita` dei protoni
ρ = raggio di LHC
e = carica dei protoni

$$B\rho = \frac{p}{e}$$