

Il bosone di Higgs compie un anno

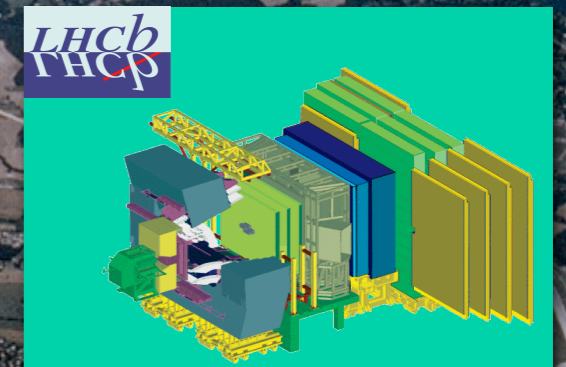
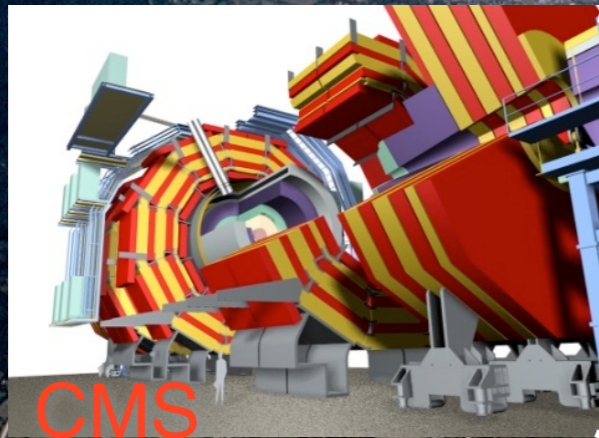
**LHC e l'osservazione
nei canali $H \rightarrow 4l$, $H \rightarrow \tau\tau$**

L. Guiducci

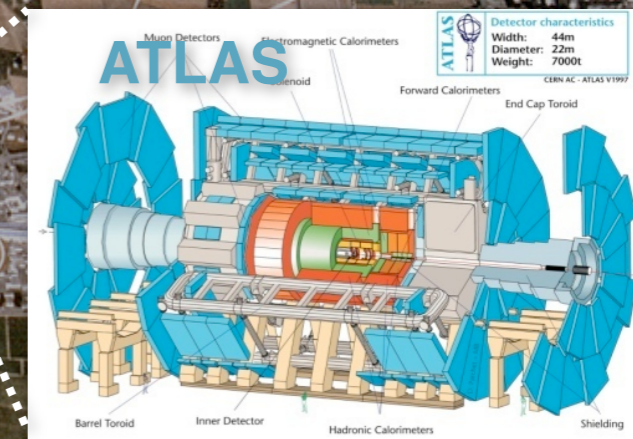
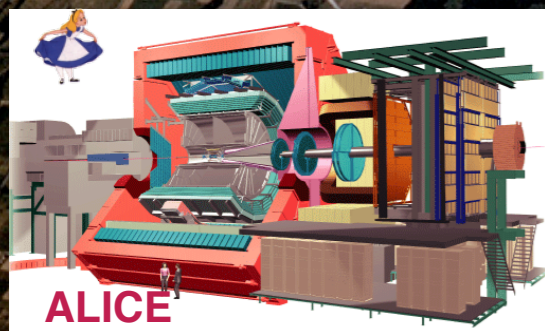
INFN & Università di Bologna

Principali esperimenti a LHC

General-purpose (ATLAS e CMS): origine della massa, SUperSYmmetria...
Dedicato (LHCb) allo studio dell'origine dell'asimmetria materia-antimateria...
Dedicato (ALICE) allo studio delle proprietà dei fluidi di quark e gluoni...

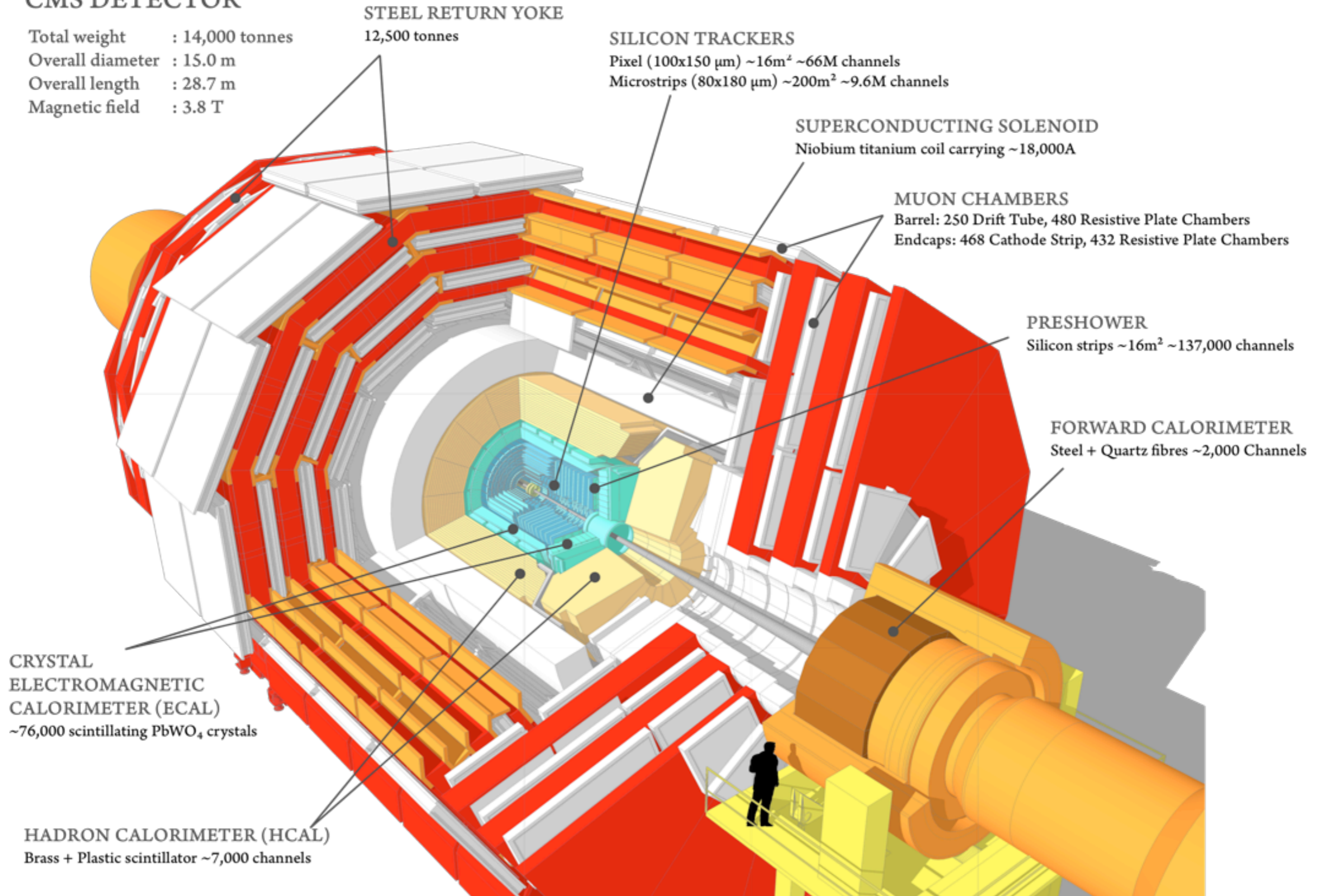


Una nuova frontiera in energia
Collisioni protone-protone at $E_{CM} = 7-8 - 14$ TeV
Collisioni Pb-Pb at $E_{CM} = 2.76 - 5.4$ TeV



CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
 Overall diameter : 15.0 m
 Overall length : 28.7 m
 Magnetic field : 3.8 T





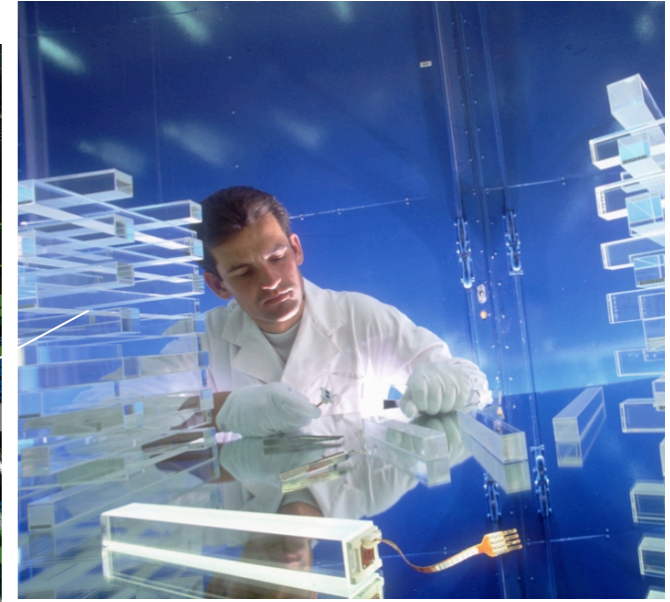
Silicon Tracker



Gas ionization chambers

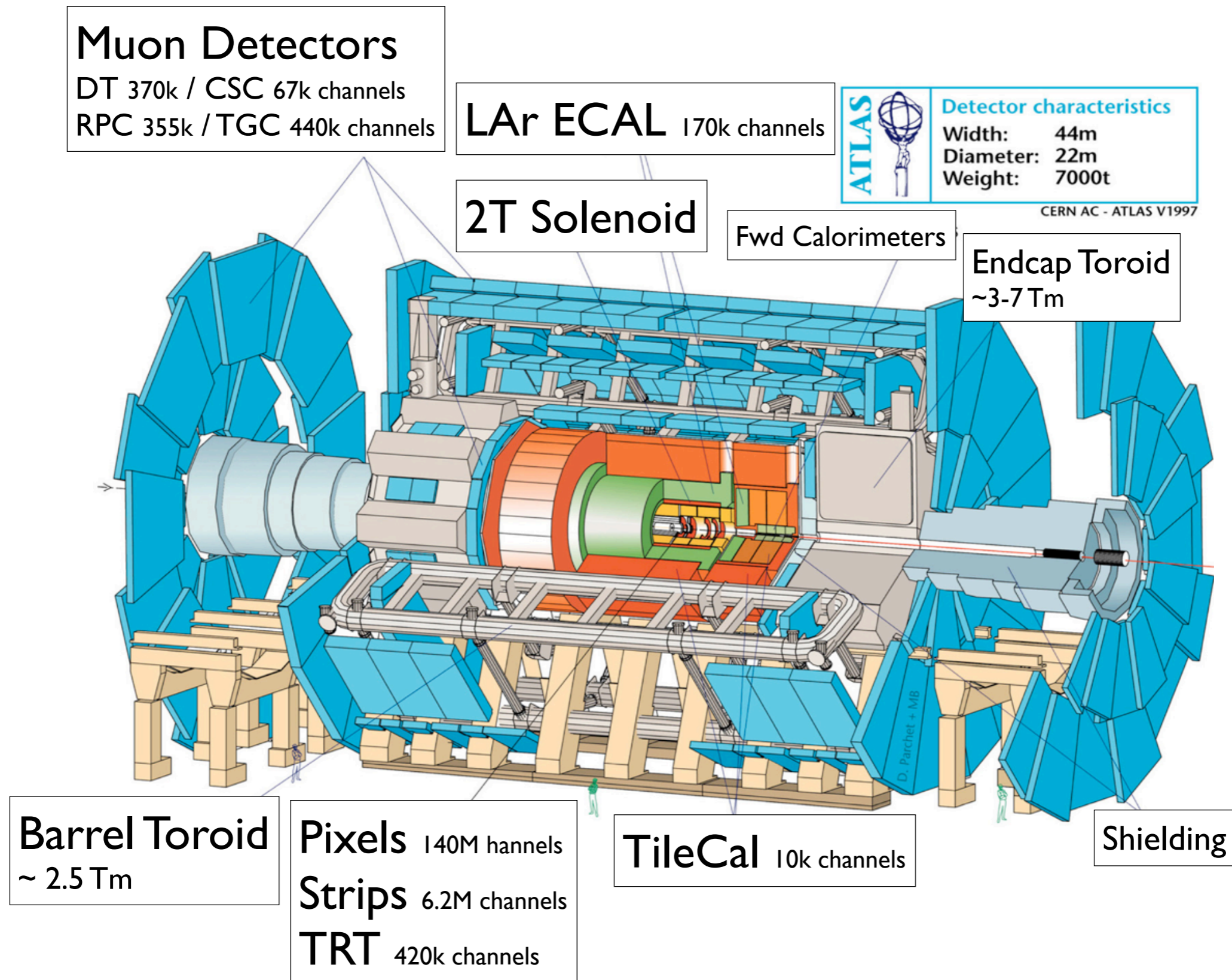


Scintillating Crystals

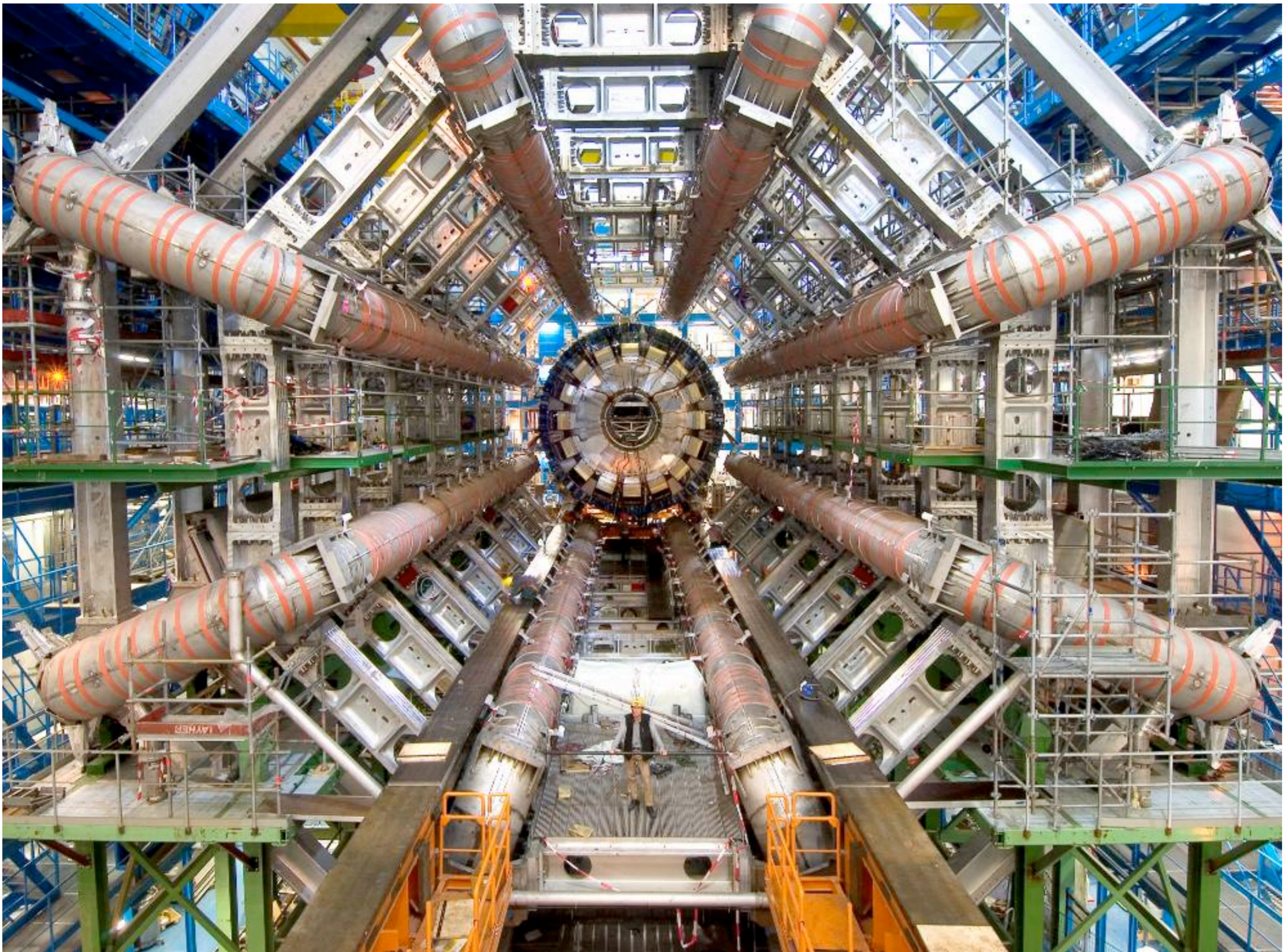


Brass plastic scintillator

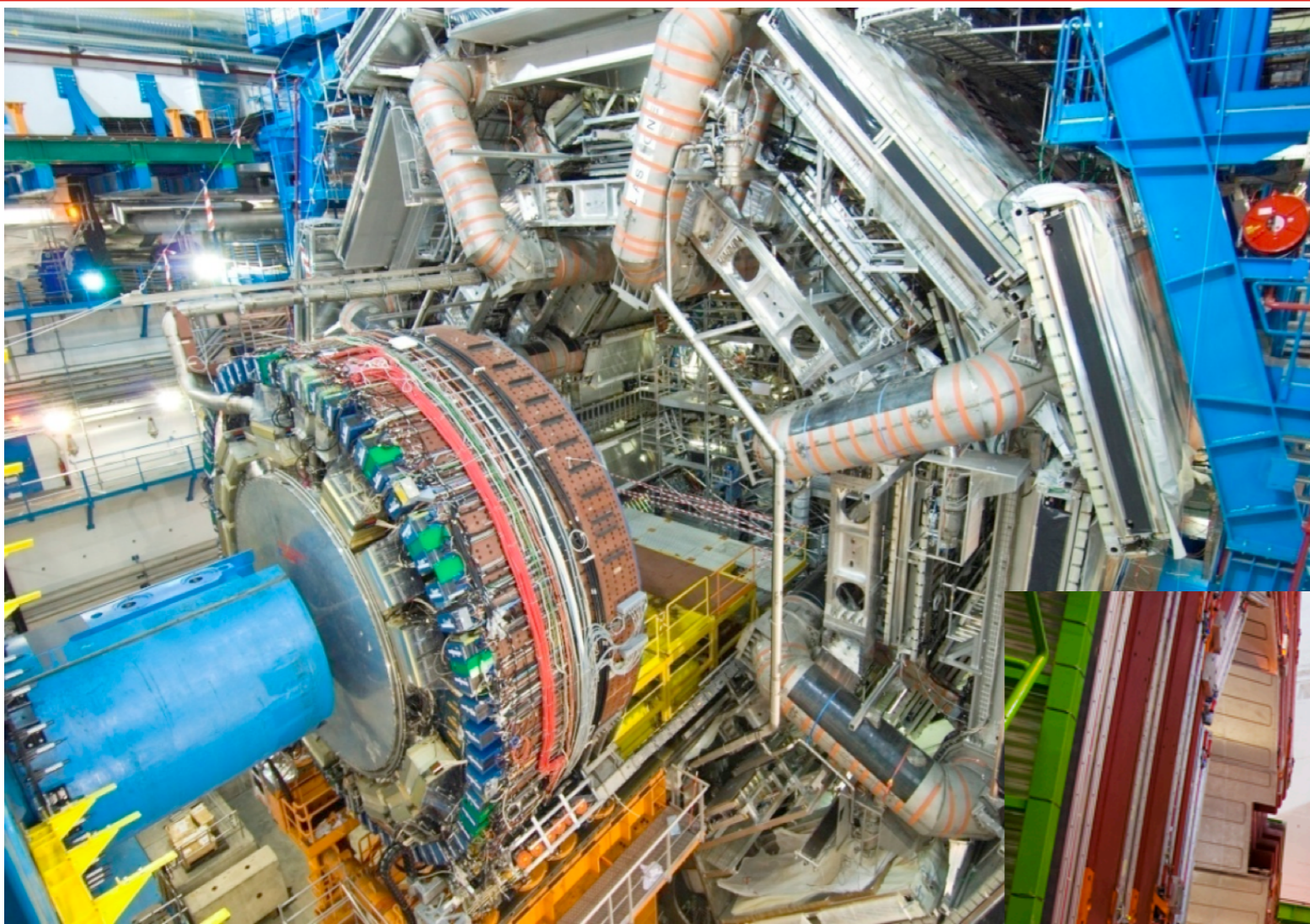
Atlas



Atlas



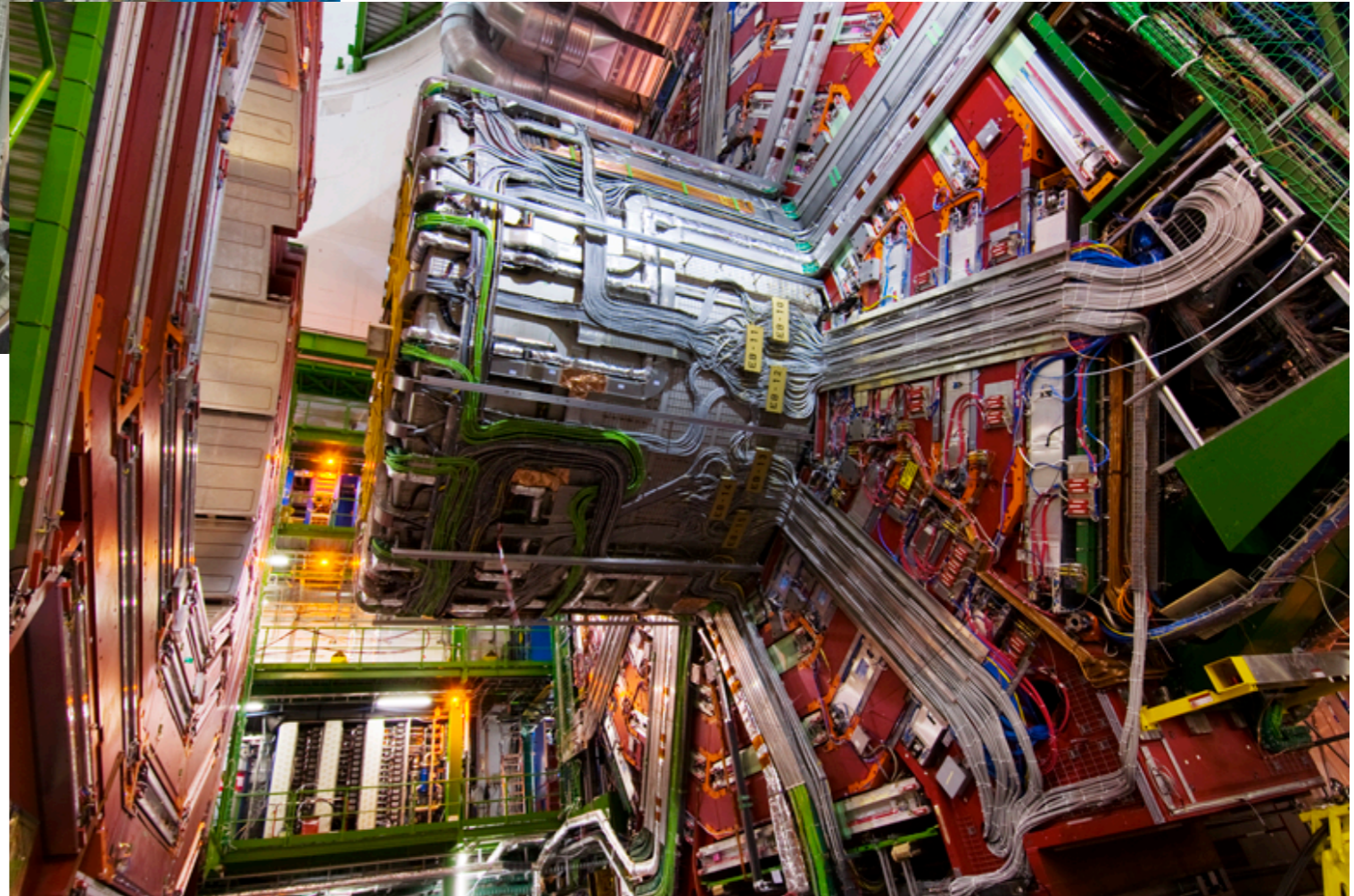
Una sfida ingegneristica!



Atlas



CMS



Sezioni d'urto: un ago in un pagliaio

- ▶ Sezione d'urto (σ): misura della probabilità che avvenga un certo processo
- ▶ σ_{tot} : una qualunque interazione tra i protoni
- ▶ σ_W : produrre un bosone W
- ▶ σ_{Higgs} : produrre un bosone di Higgs

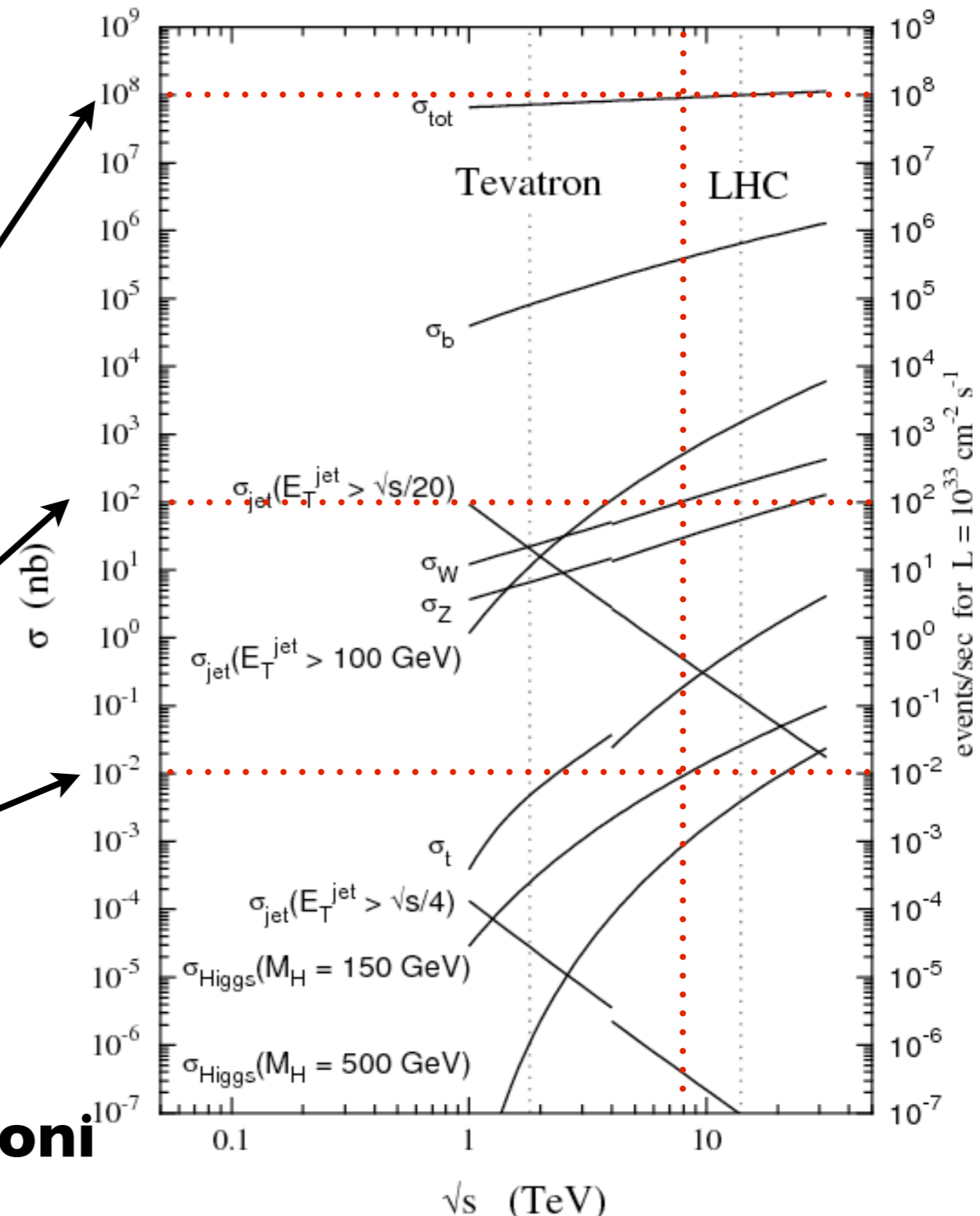
tot: ~ 7000000000000 ($\sim 10^{11}$ pb)

W: ~ 100000 (10^5) pb

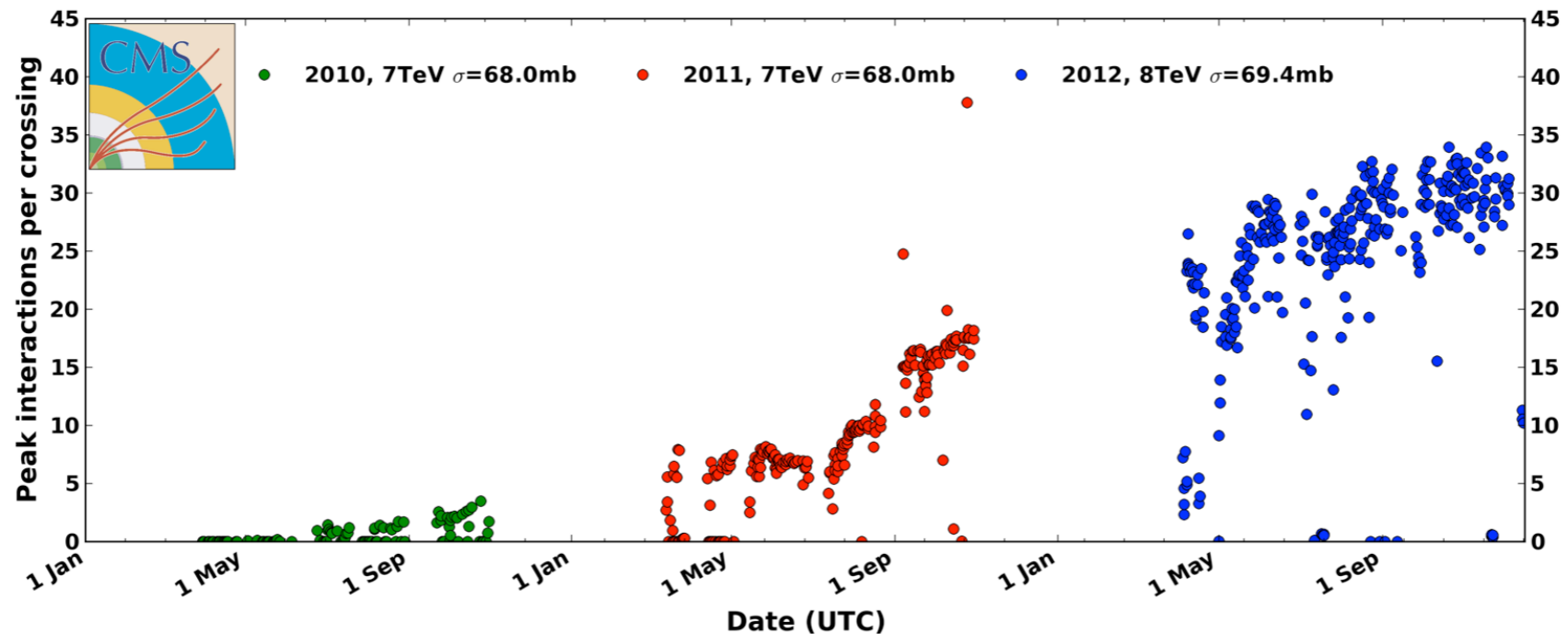
Higgs: ~ 10 pb

~ 1 Higgs ogni 70 miliardi di collisioni

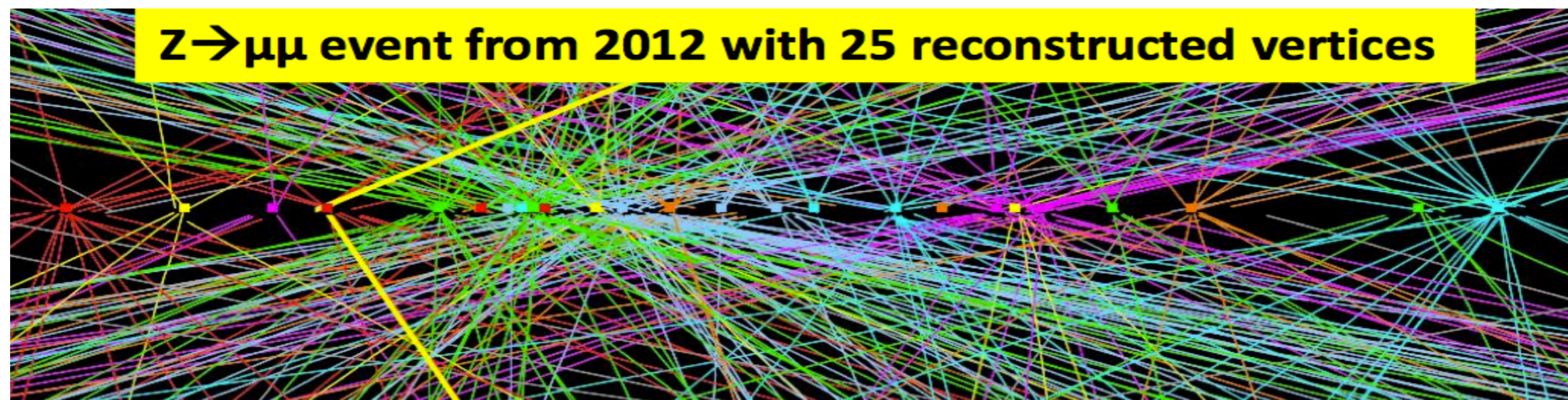
proton - (anti)proton cross sections



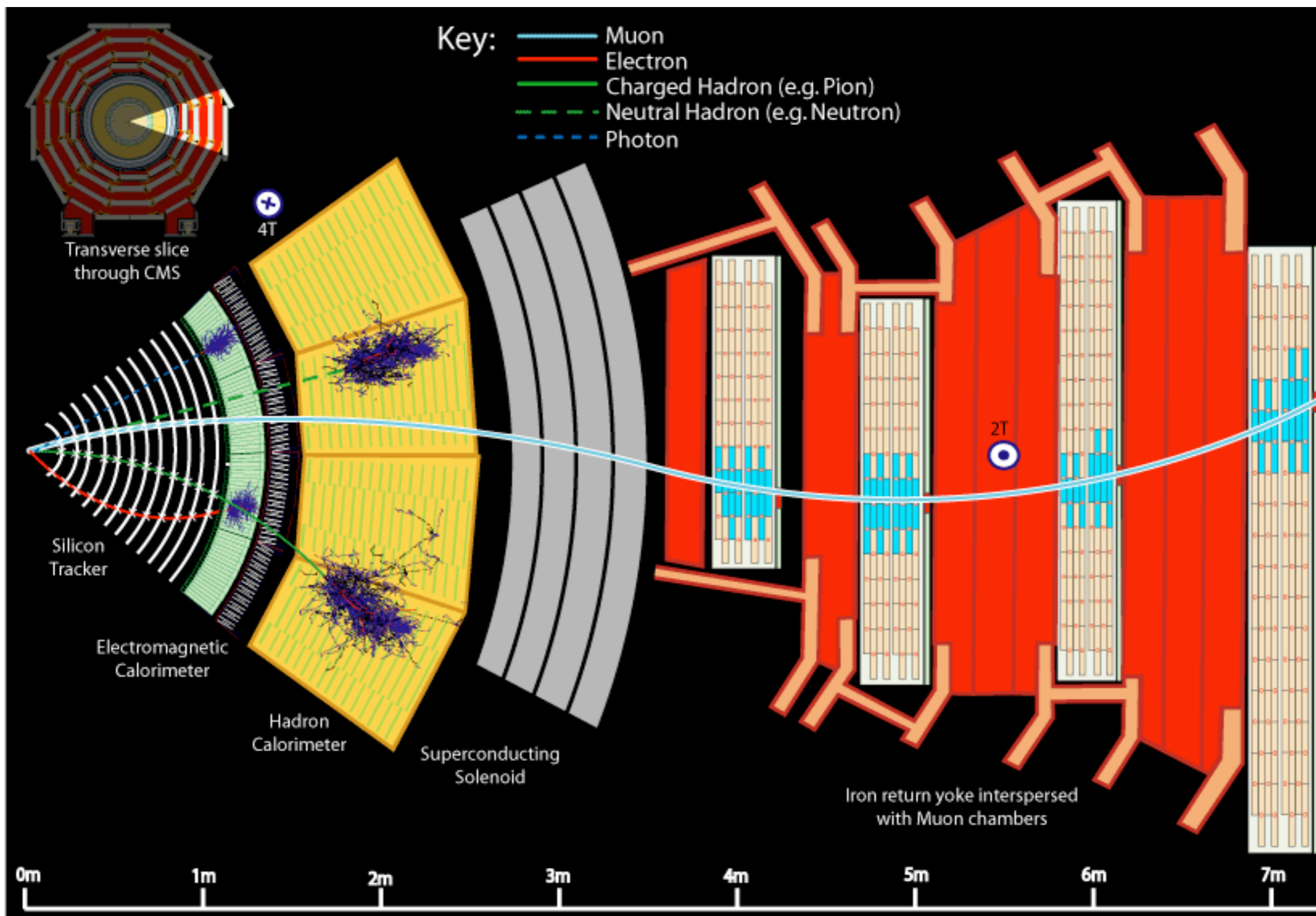
Condizioni difficili per i rivelatori



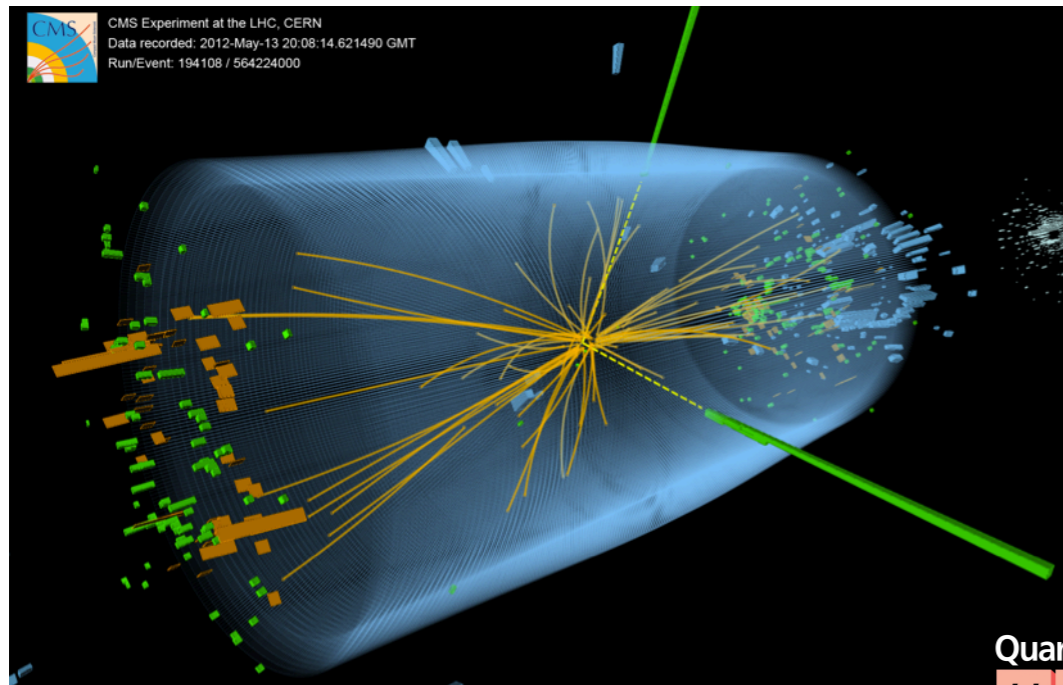
- ▶ Per produrre il maggior numero possibile di bosoni di Higgs (e tutto il resto...), LHC produce un enorme numero di collisioni pp
- ▶ A ciascun incrocio di due dei ~ 1400 pacchetti di protoni circolanti in ciascun fascio del LHC, nel 2012 si verificavano fino a 30-35 collisioni che sono osservate in sovrapposizione (pile-up) dai rivelatori. **Mezzo miliardo di collisioni al secondo**



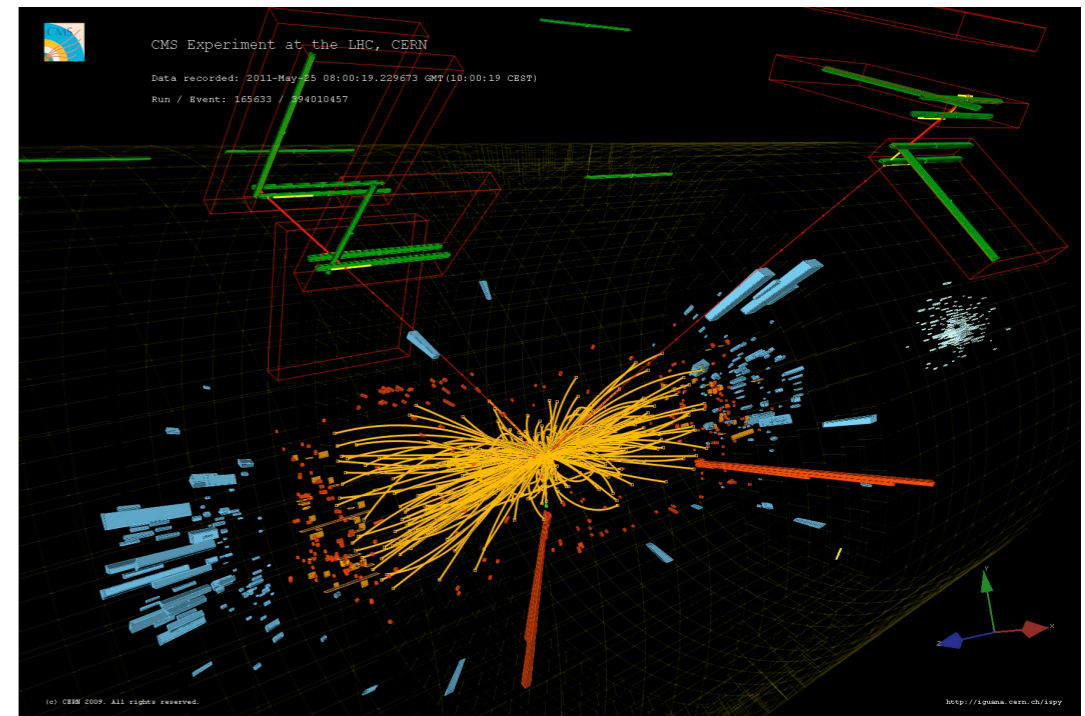
Identificare diverse particelle



Particelle "viste" dal rivelatore



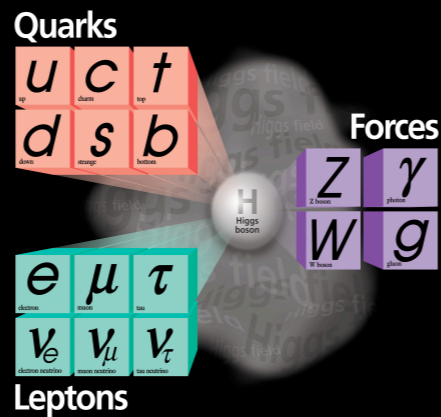
Muoni
Elettroni



Fotoni

Quark, gluoni, tau

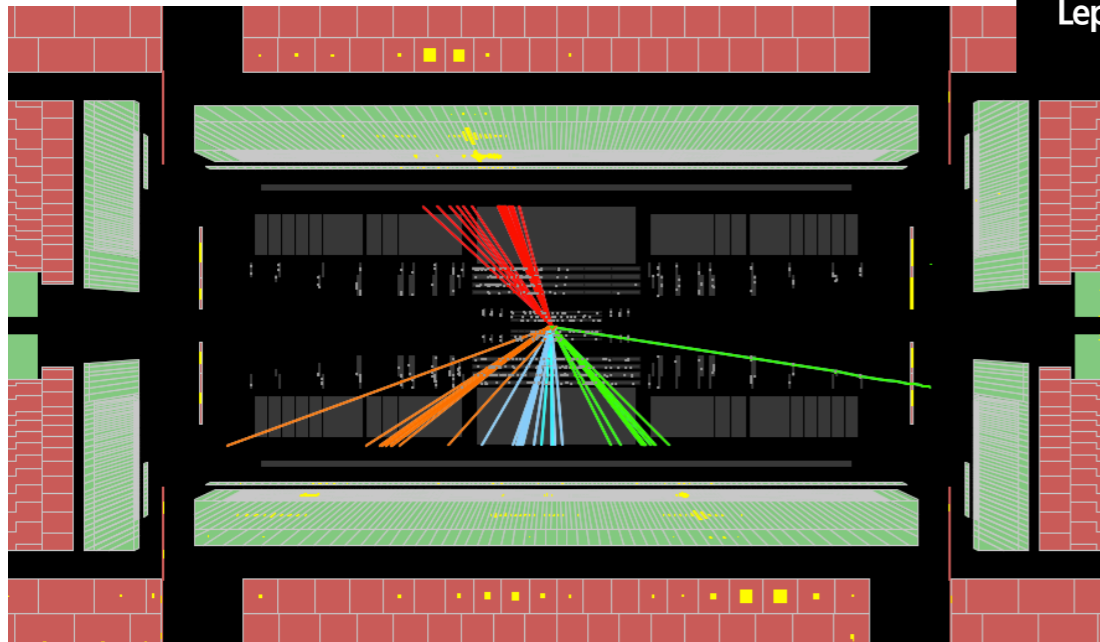
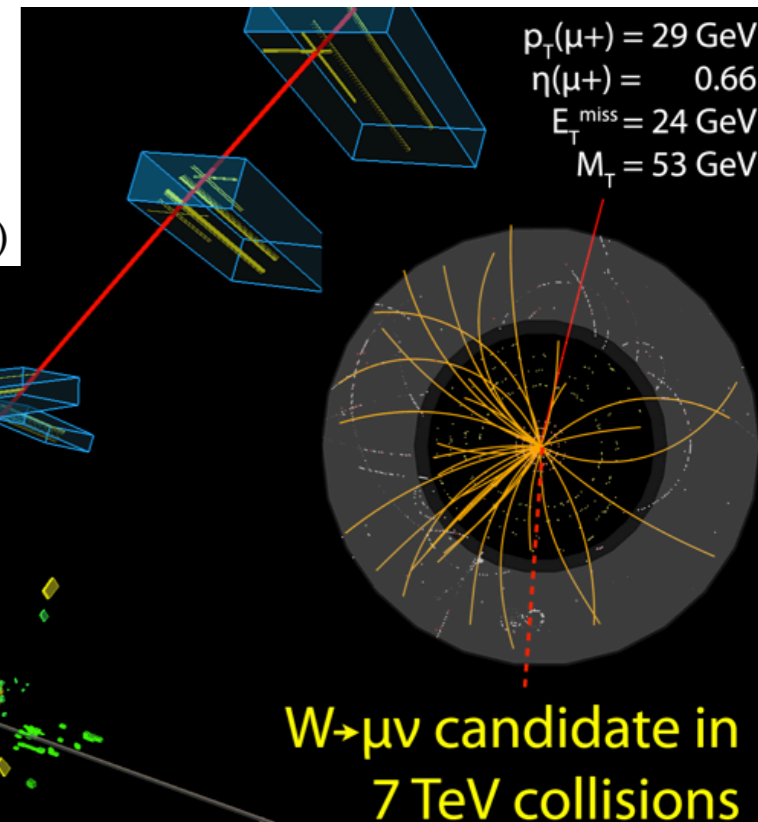
"Getti" di particelle stabili
o di lunga vita media



Neutrini

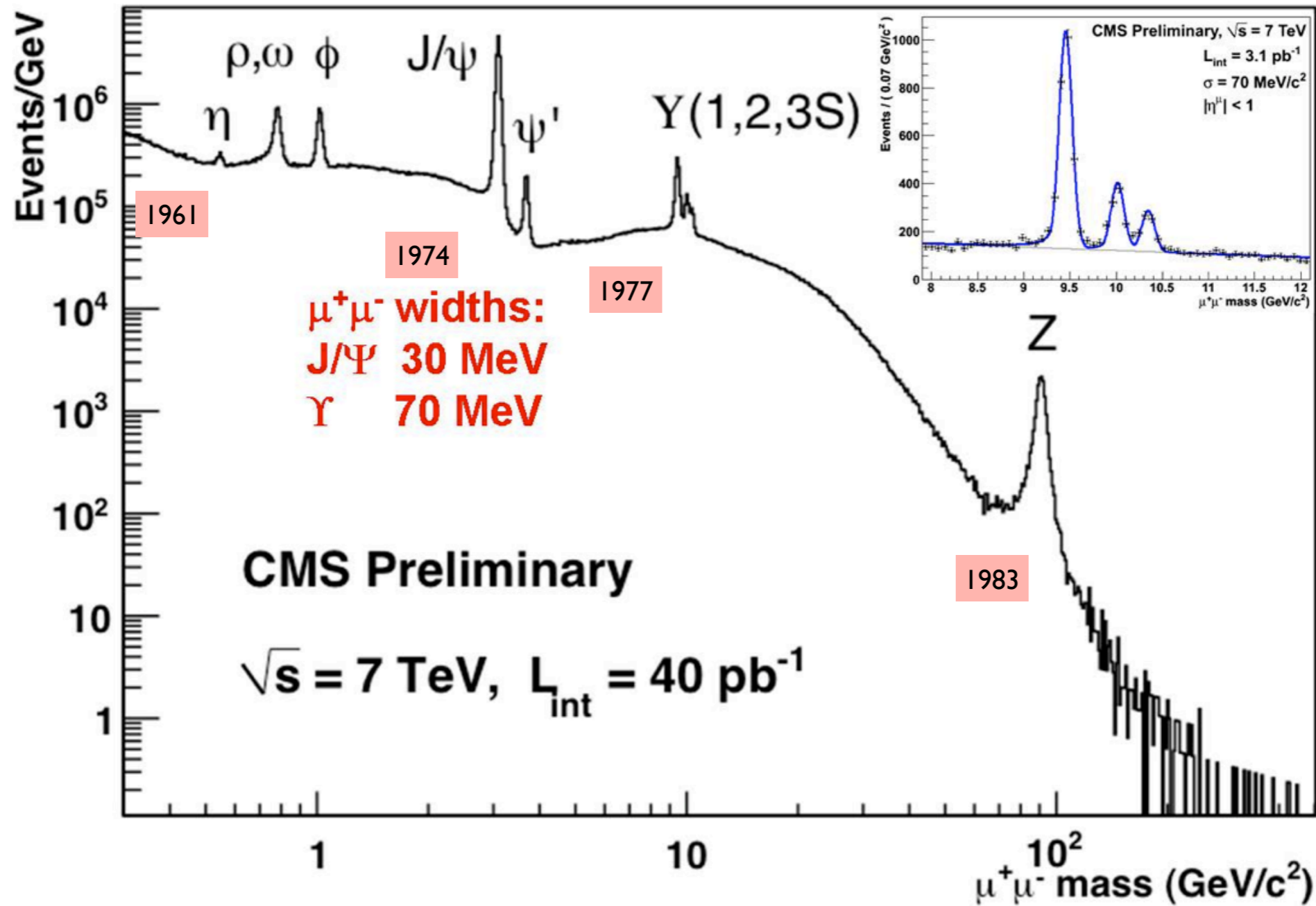
Energia mancante
(per questo occorre
un calorimetro "ermetico")

Date: 2010-04-01 00:31:22 CEST



Un criterio fondamentale: massa

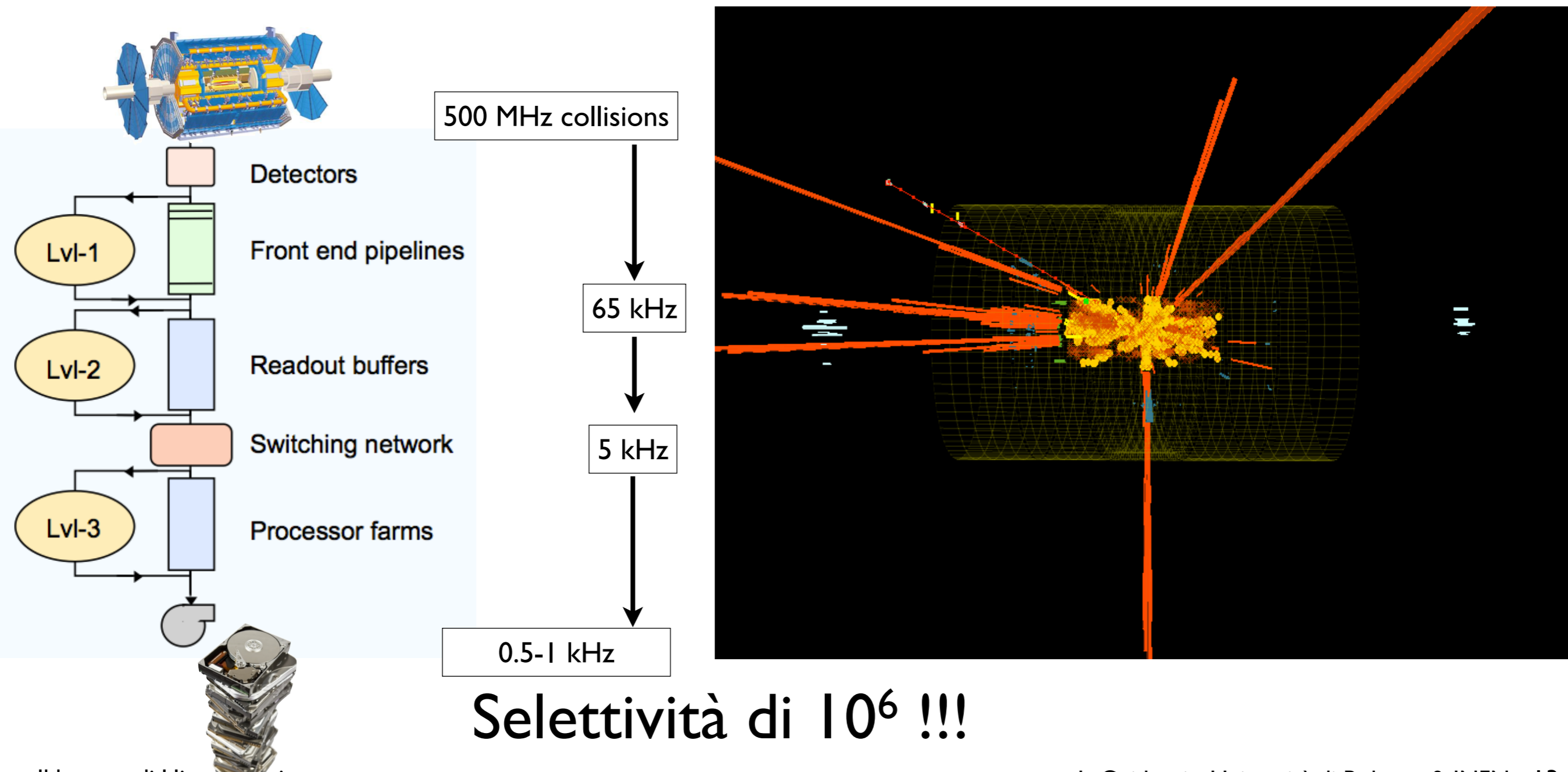
Quante volte trovo
quel valore di
massa invariante



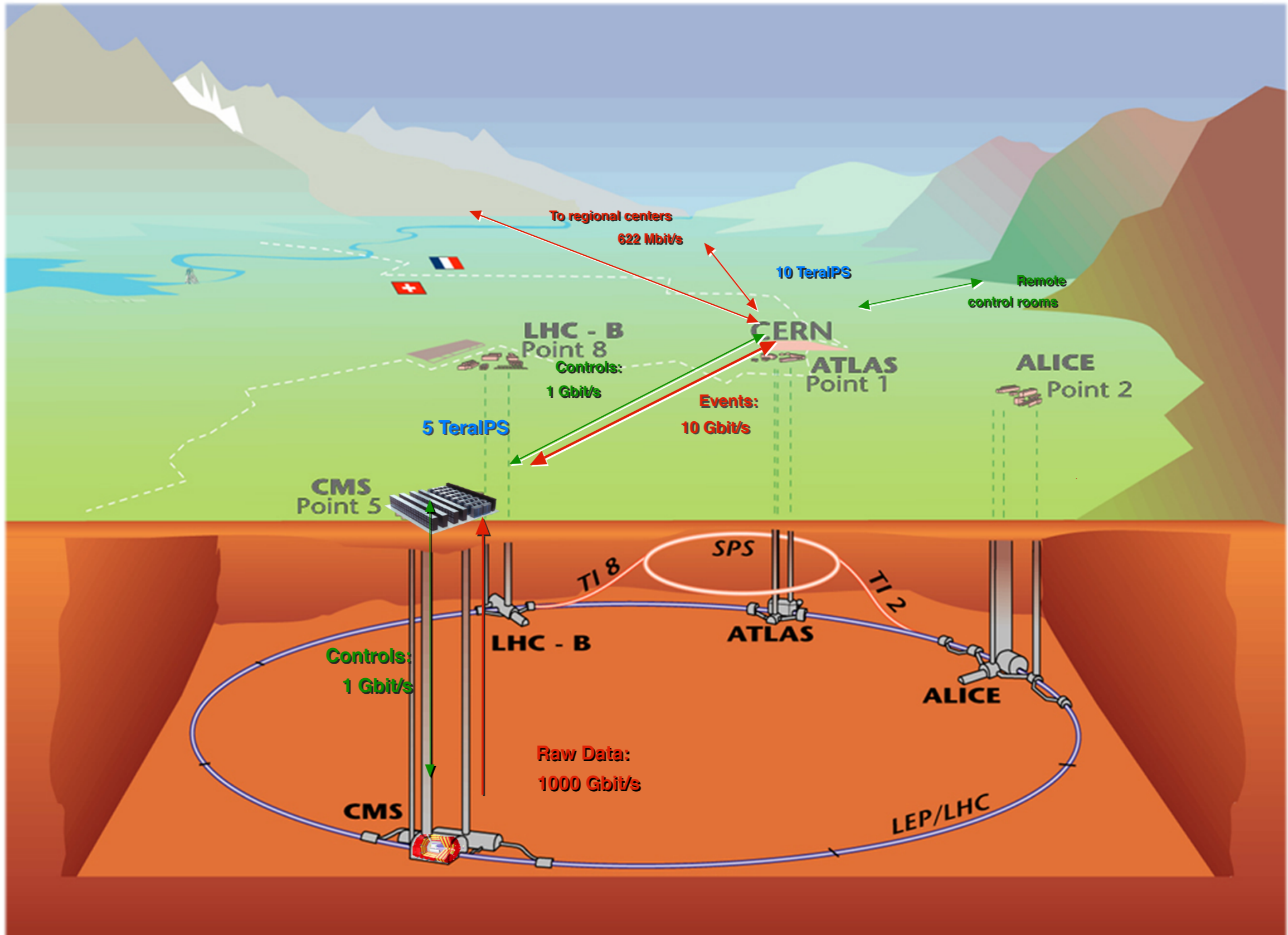
Massa invariante di due muoni: combinare le informazioni sulla direzione e impulso dei due muoni di opposta carica, per ottenere quale fosse la massa della presunta particella “madre”.

Selezione degli eventi interessanti (trigger)

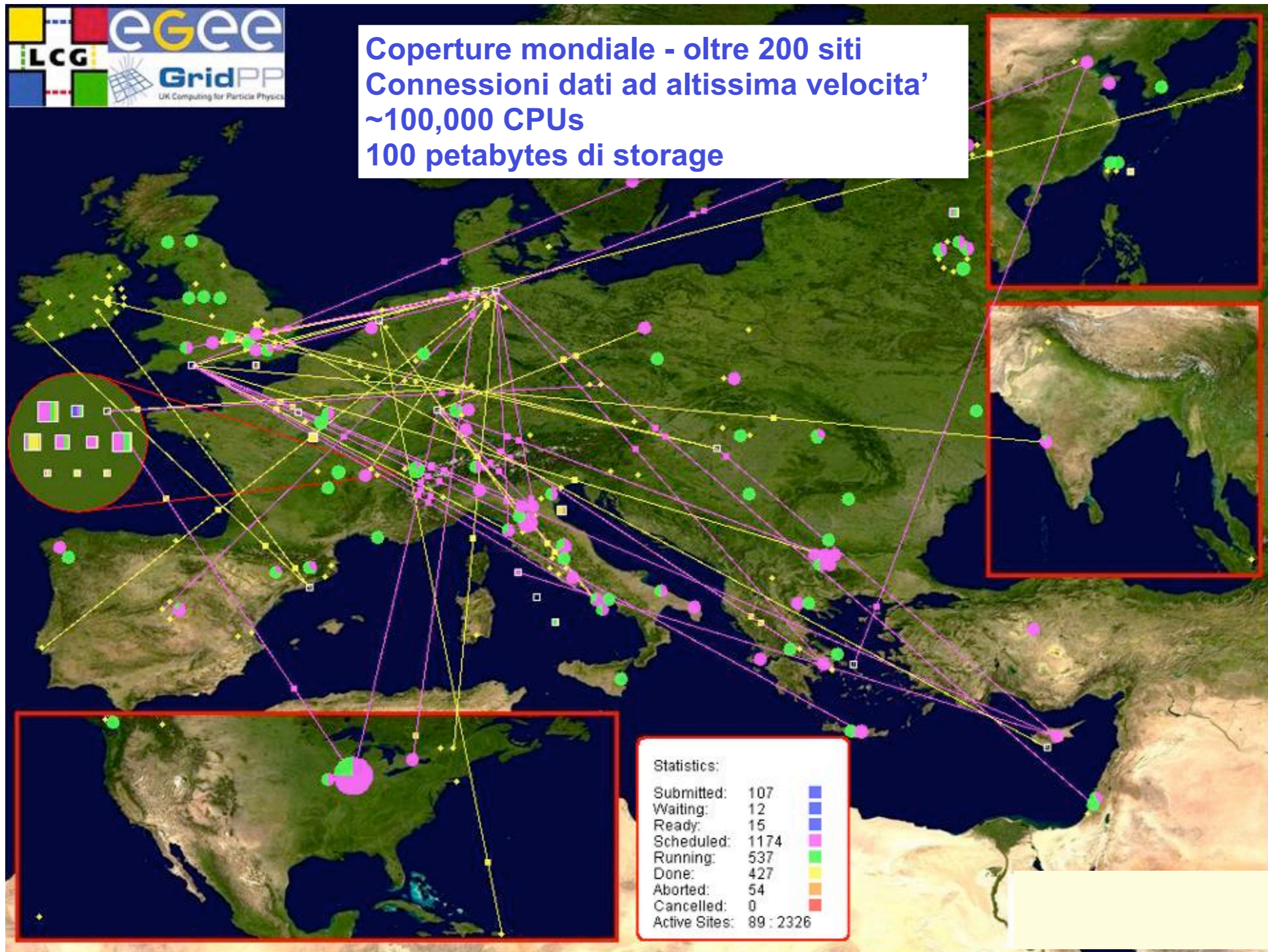
- ▶ Prima selezione "online": trigger. Decide che cosa salvare su disco per la successiva analisi. Quello che viene scartato è perso per sempre!
- ▶ Tipicamente, una collisione è considerata interessante se contiene oggetti di grande energia/impulso (trasverso, a grande angolo rispetto ai fasci)



Computing: reti, farm, flussi di dati



Computing Grid

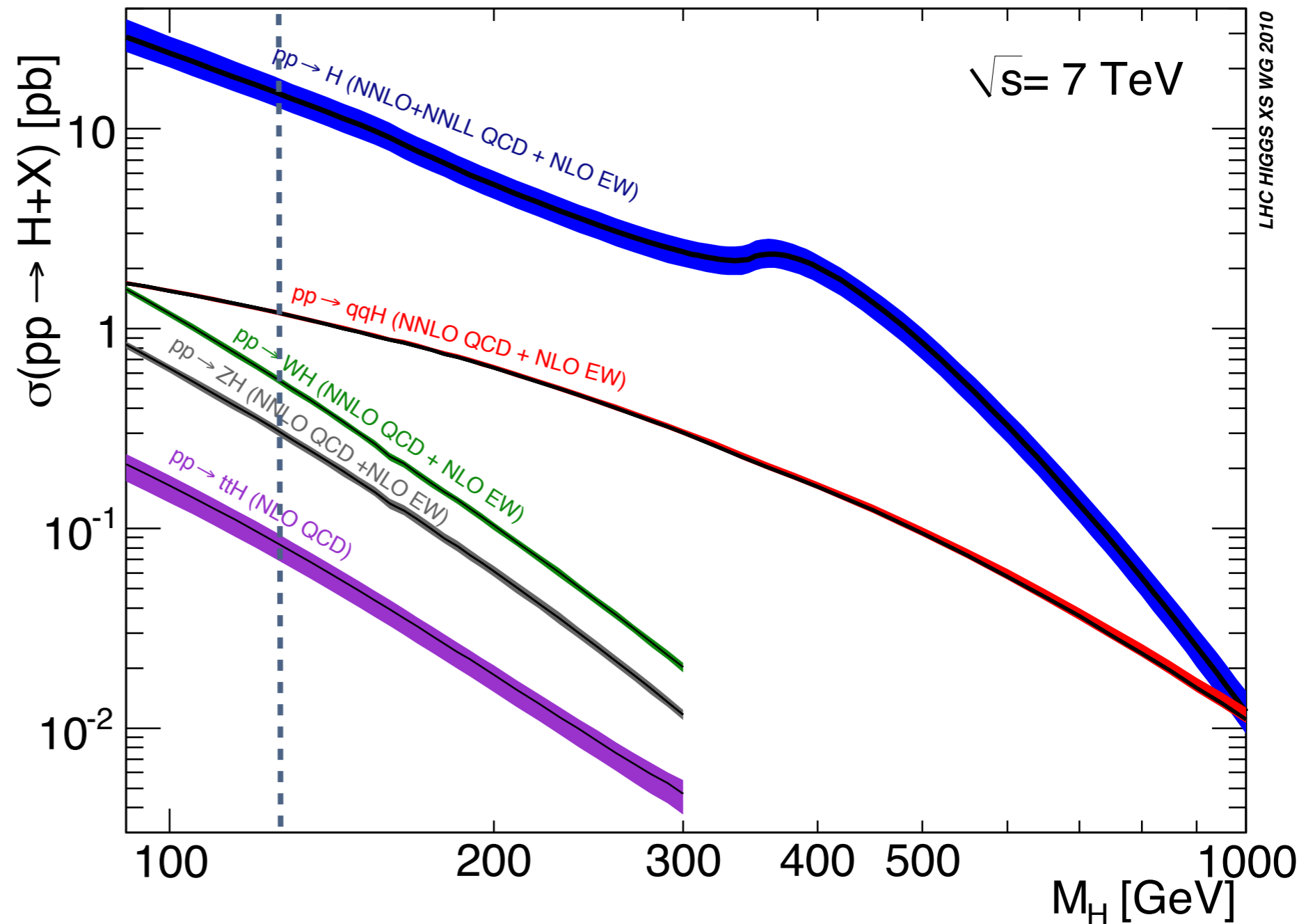
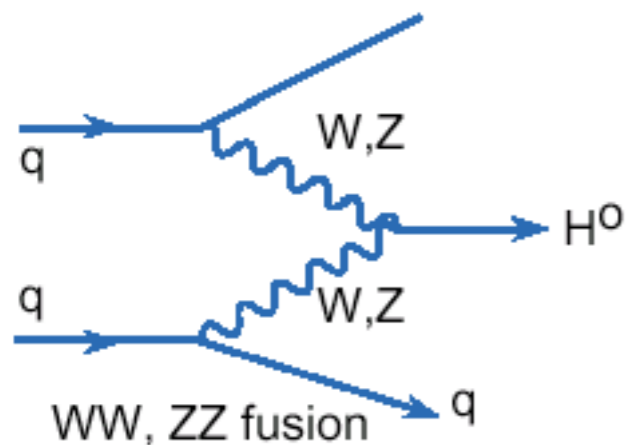
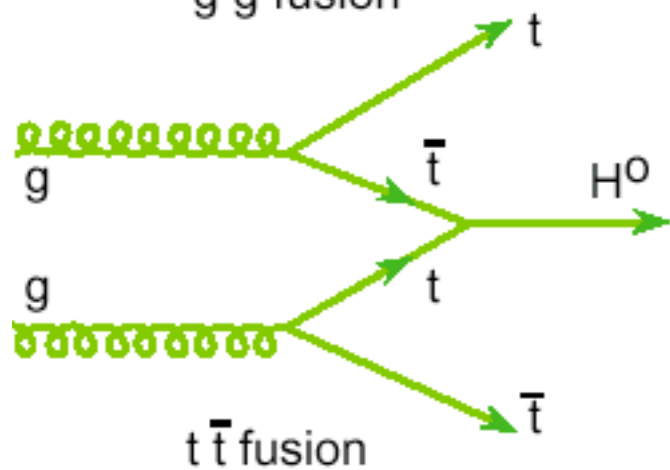
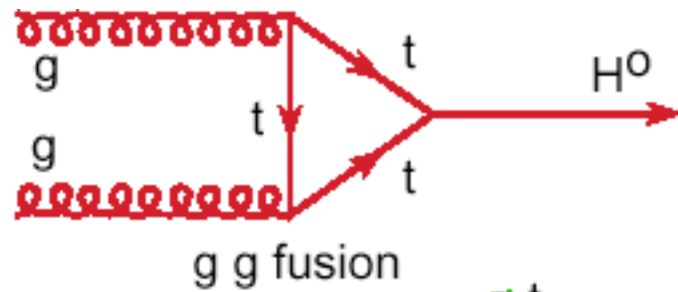


Rivelare il bosone di Higgs

La capacità di rivelazione del bosone di Higgs dipende da diversi fattori:

- ▶ La massa del bosone di Higgs
- ▶ La risoluzione in massa
- ▶ La sezione d'urto (\sim probabilità) di produzione del bosone di Higgs
- ▶ La frazione di decadimento nello stato finale considerato
- ▶ L'efficienza di selezione del segnale (stato finale)
- ▶ Il livello dei fondi con uno stato finale identico o simile

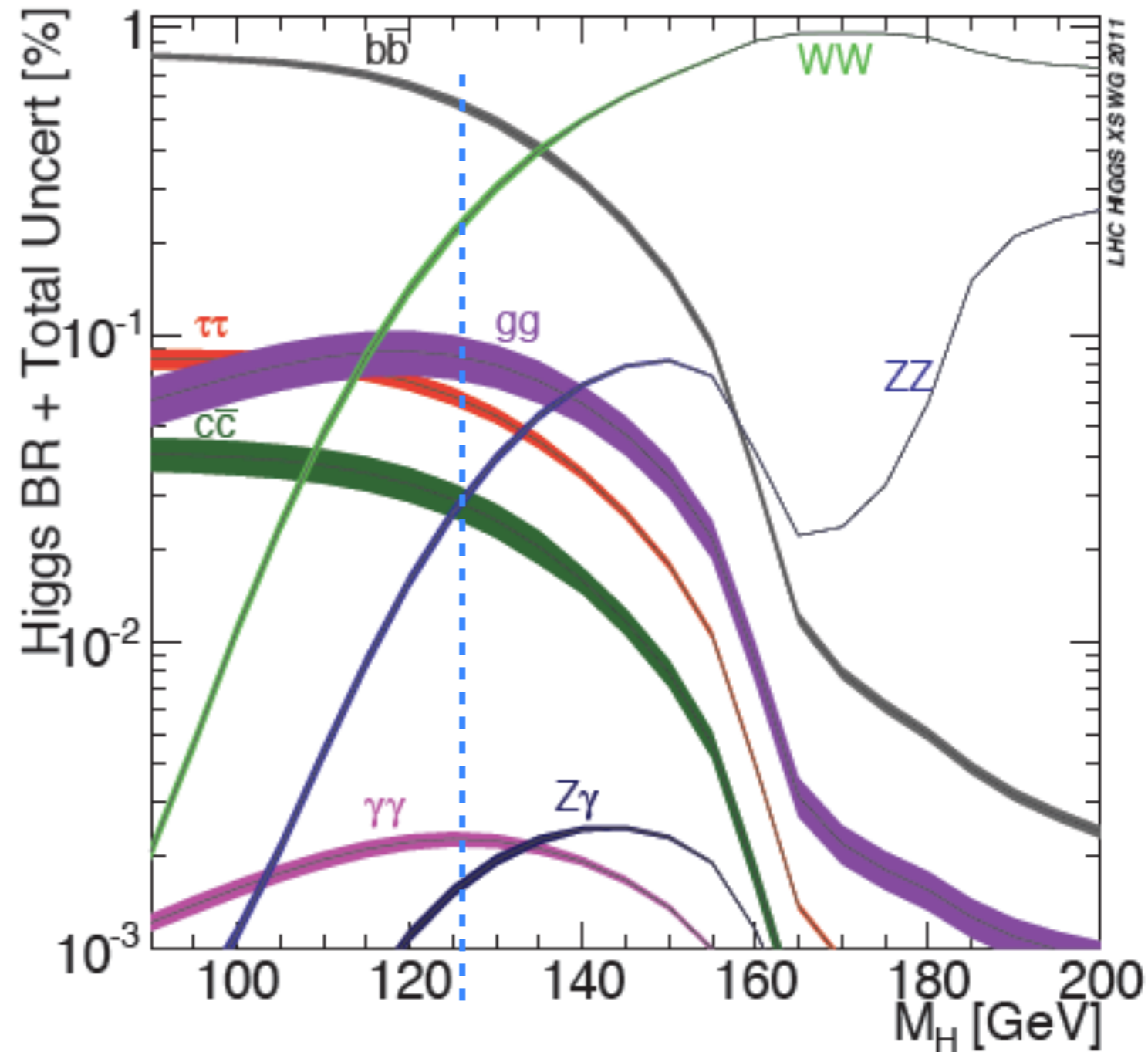
Produzione dell'Higgs



Consideriamo 20 fb^{-1} (quantità di dati 2012):
 $\sim 10^{15}$ collisioni pp osservate
 $\sim 3 \cdot 10^5$ Higgs (125 GeV) prodotti

Decadimento e osservazione dell'Higgs

- ▶ Il canale "ottimale" dipende dalla massa dell'Higgs
 - ▶ Sono necessari rivelatori in grado di misurare e identificare quanti più oggetti possibili nell'evento!
- ▶ Due canali con ottima risoluzione in massa (~ 1 GeV):
 - ▶ $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ (BR $\sim 2 \cdot 10^{-3}$)
 - ▶ $H \rightarrow \gamma\gamma$ (BR $\sim 2 \cdot 10^{-4}$)
- ▶ Per $m(H) \sim 125$ GeV altri modi di decadimento sono rivelabili
 - ▶ $H \rightarrow bb$ di gran lunga dominante ma \sim impossibile separare dal fondo
 - ▶ $H \rightarrow WW$ (BR $\sim 20\%$)
 - ▶ $H \rightarrow \tau\tau$ (BR $\sim 5\%$)
- ▶ Confronto tra diversi modi di decadimento \rightarrow verifica delle proprietà Higgs Modello Standard



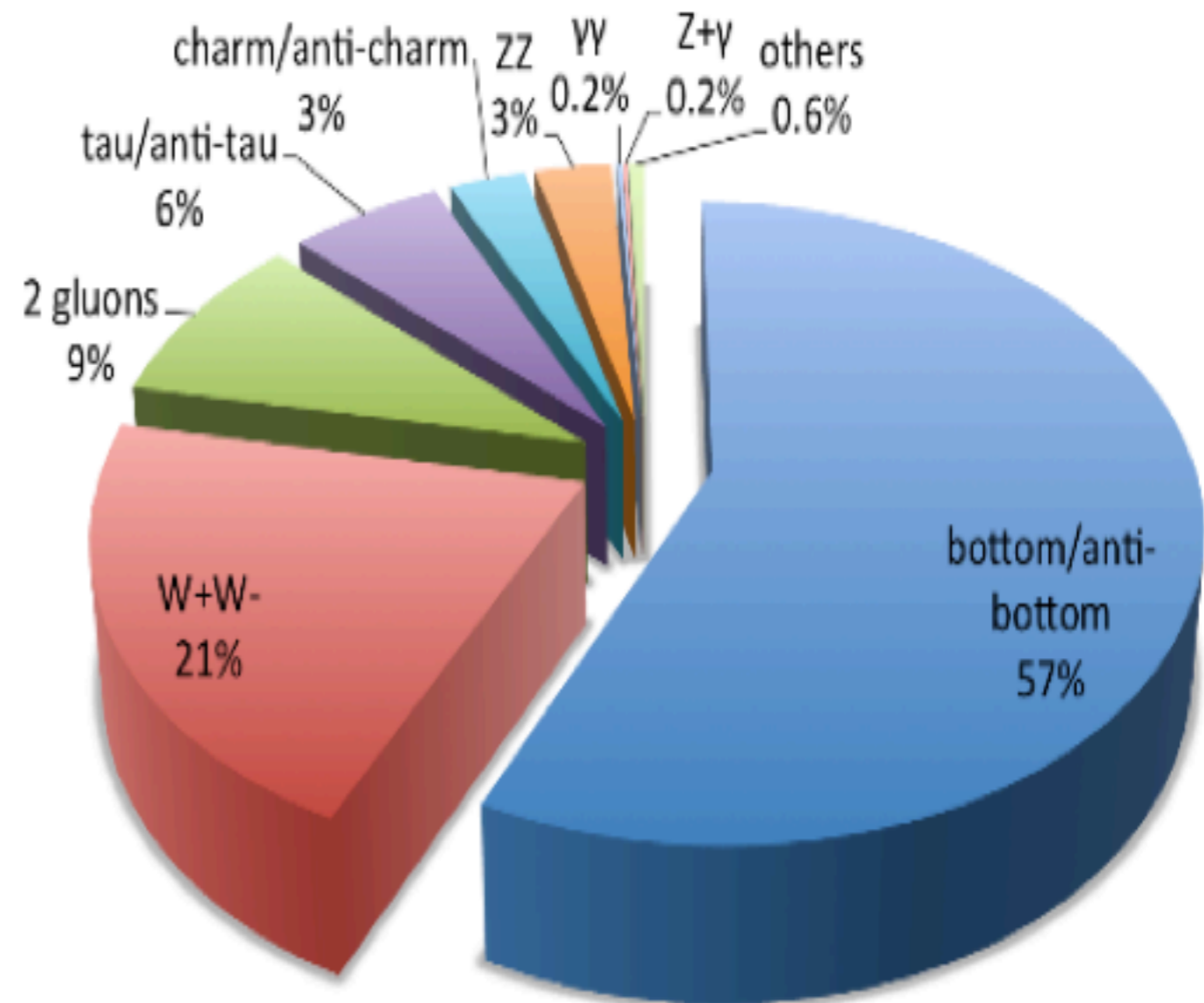
- ▶ Oggi presenteremo risultati per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow WW$

Decadimento e osservazione dell'Higgs

- ▶ Il canale "ottimale" dipende dalla massa dell'Higgs
 - ▶ Sono necessari rivelatori in grado di misurare e identificare quanti più oggetti possibili nell'evento!
- ▶ Due canali con ottima risoluzione in massa (~ 1 GeV):
 - ▶ $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ (BR $\sim 2 \cdot 10^{-3}$)
 - ▶ $H \rightarrow \gamma\gamma$ (BR $\sim 2 \cdot 10^{-4}$)
- ▶ Per $m(H) \sim 125$ GeV altri modi di decadimento sono rivelabili
 - ▶ $H \rightarrow bb$ di gran lunga dominante ma \sim impossibile separare dal fondo
 - ▶ $H \rightarrow WW$ (BR $\sim 20\%$)
 - ▶ $H \rightarrow \tau\tau$ (BR $\sim 5\%$)
- ▶ Confronto tra diversi modi di decadimento \rightarrow verifica delle proprietà Higgs Modello Standard

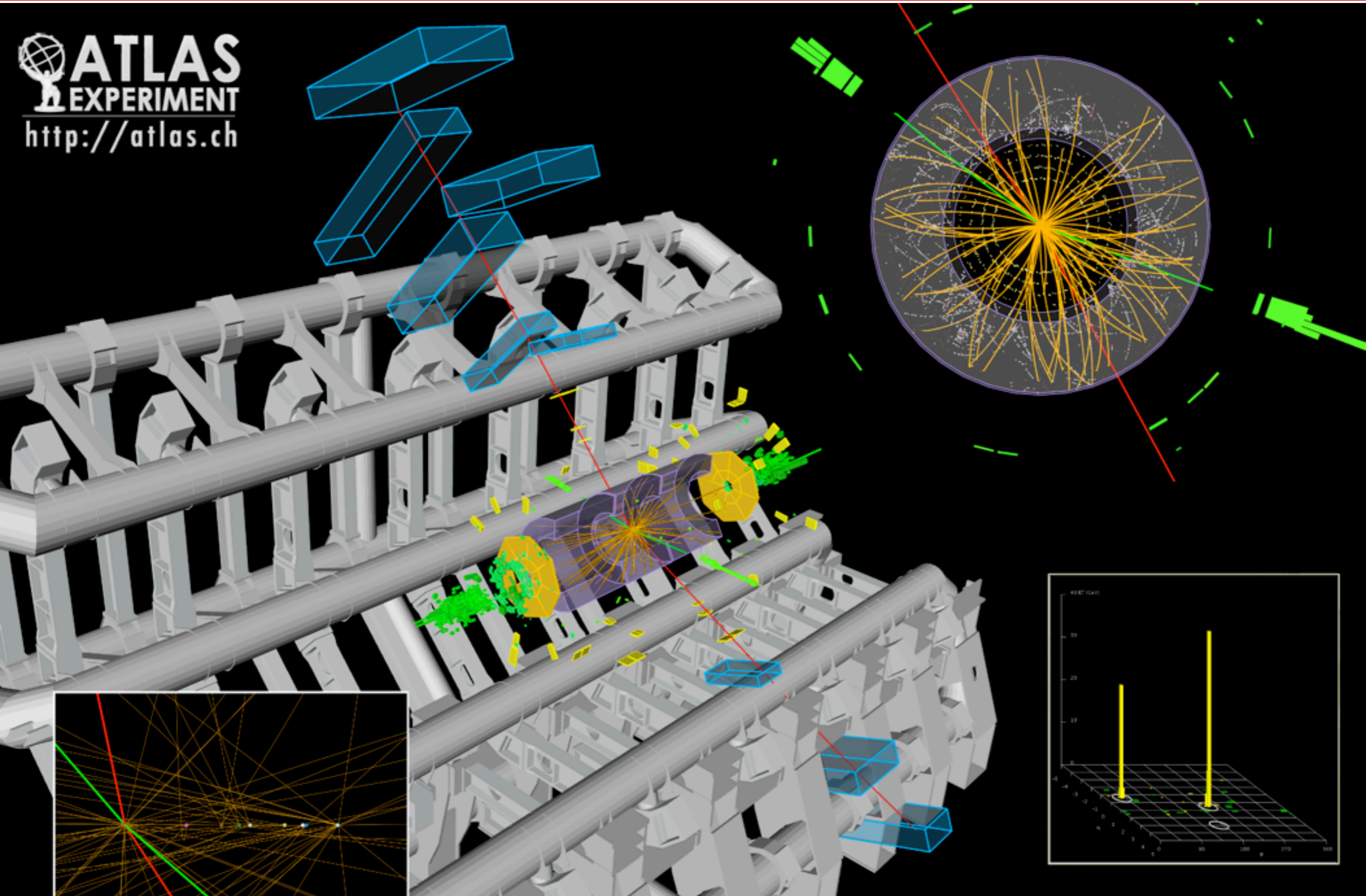
▶ Oggi presenteremo risultati per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow WW$

Decays of a 125 GeV Standard-Model Higgs boson



$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\text{leptoni}$

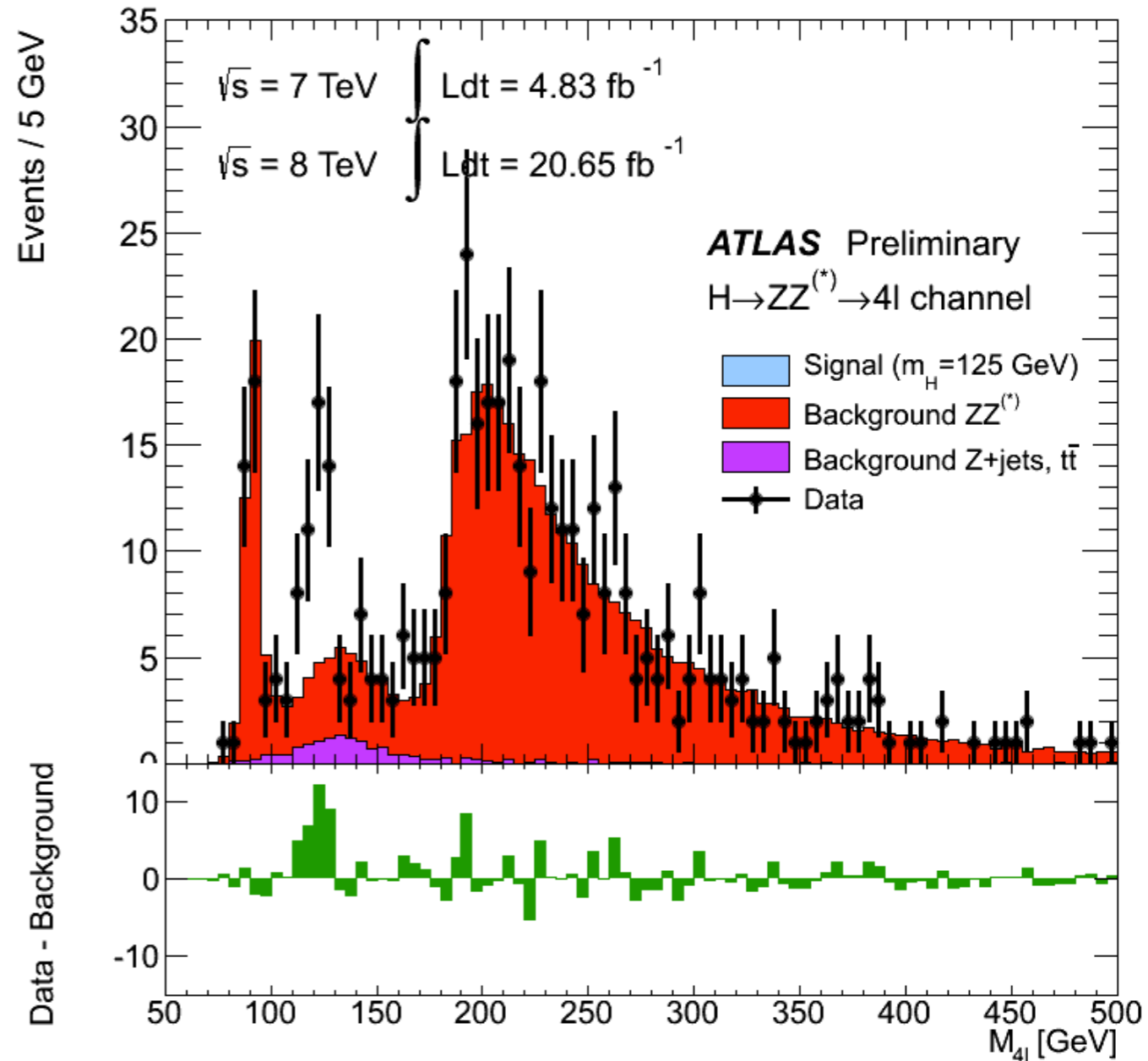
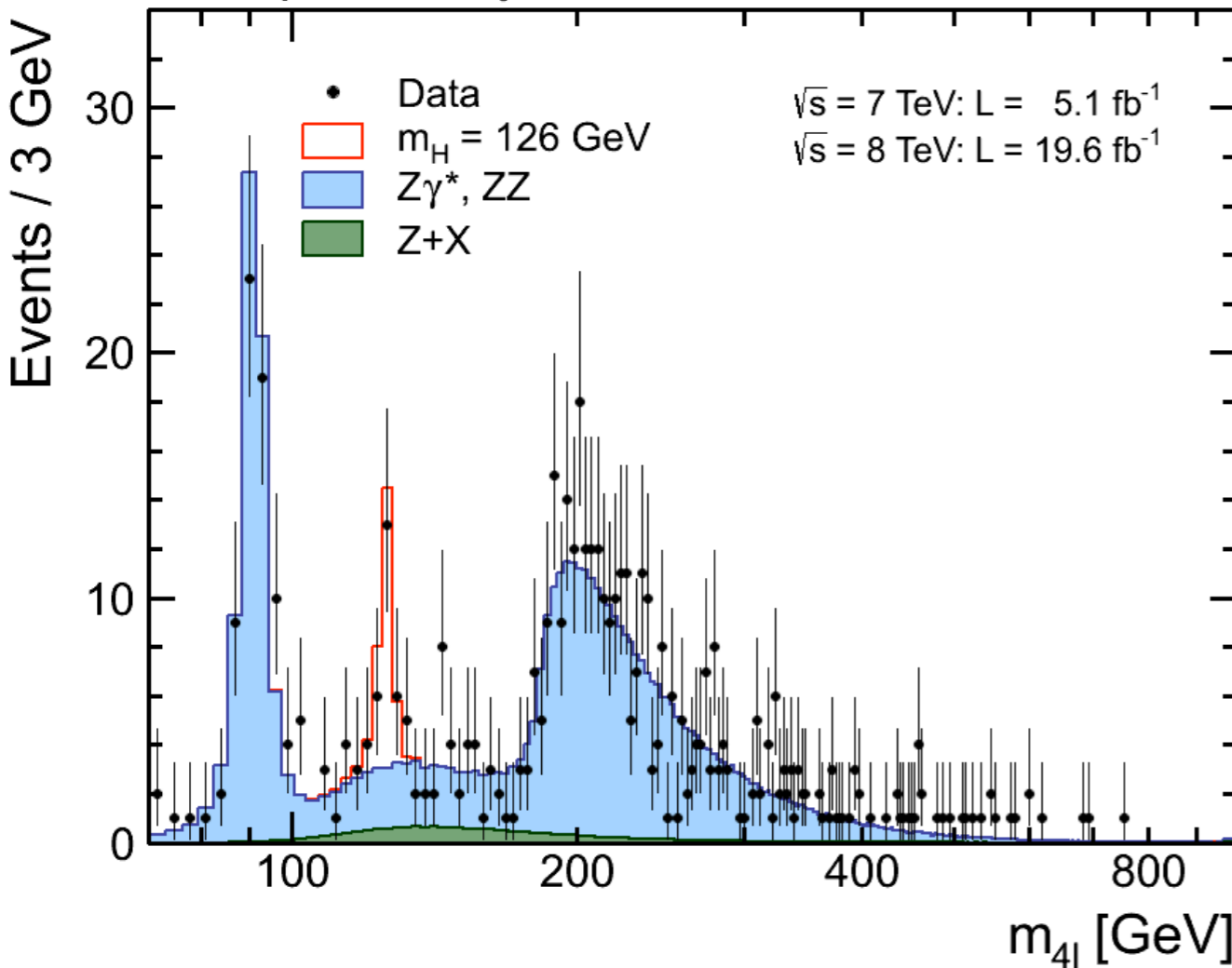
ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



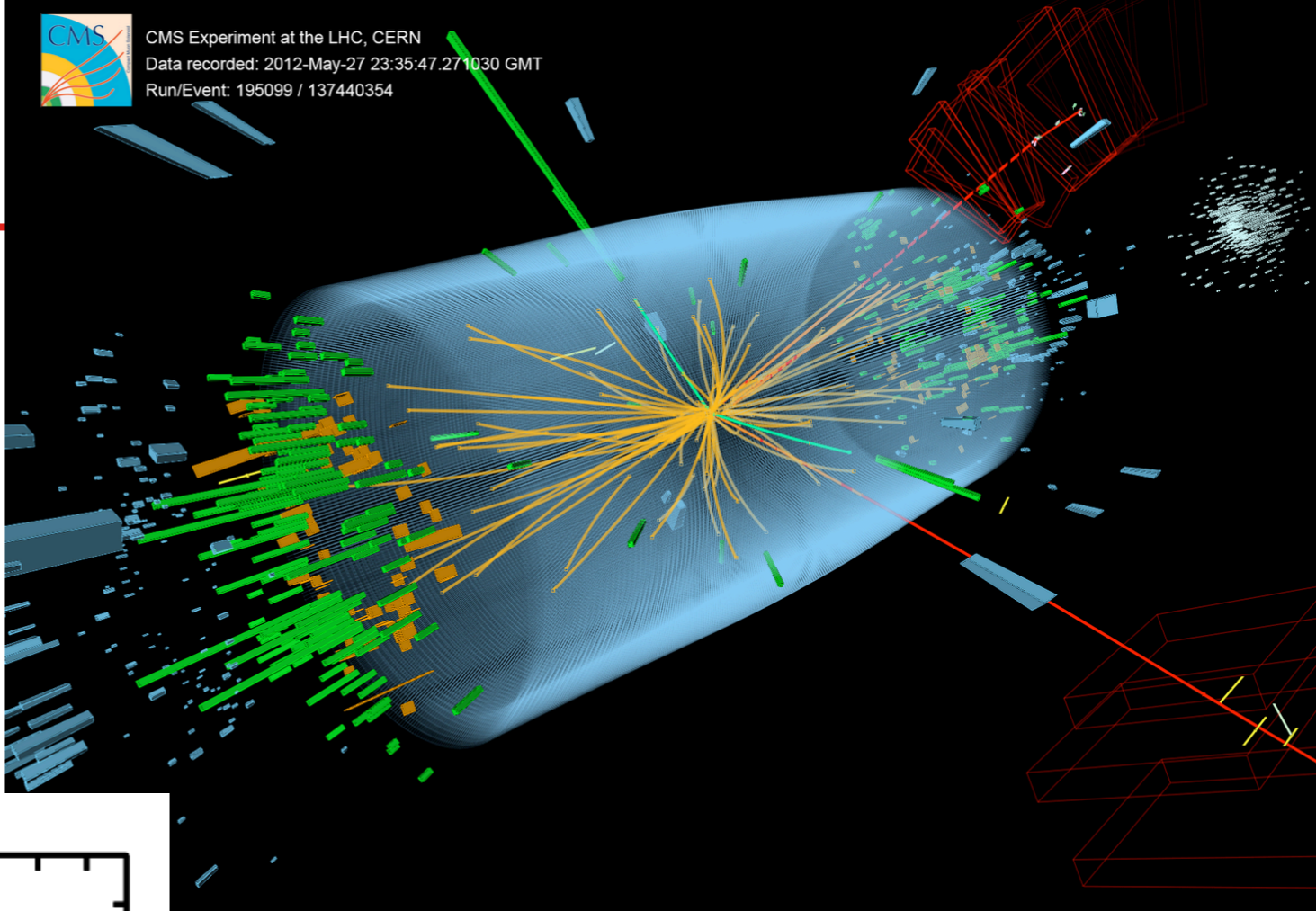
$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\text{leptoni}$

- ▶ Ricerca di un picco molto stretto nello spettro di massa di quattro leptoni
- ▶ Piccolo fondo. Una segnatura molto pulita ma con pochi eventi attesi

CMS preliminary

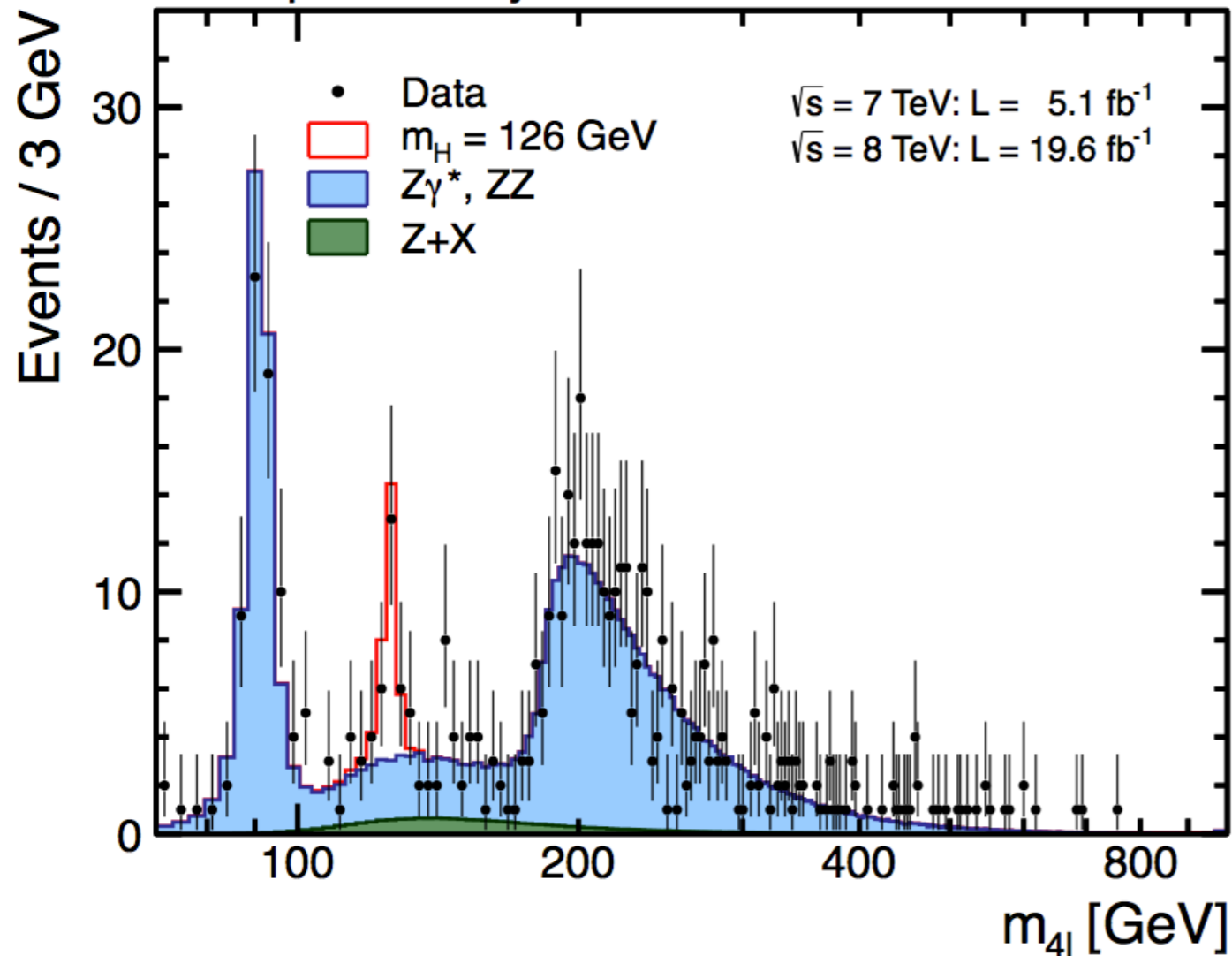


$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\text{leptoni}$

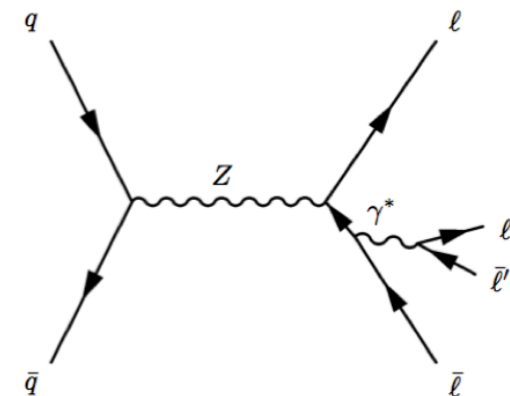


- ▶ Principali fondi riducibili:
 Zbb , tt , $Z+\text{jets}$, $WZ+\text{jets}$
- ▶ Richiesta di isolamento dei leptoni
- ▶ Richiesta di piccolo parametro di impatto

CMS preliminary

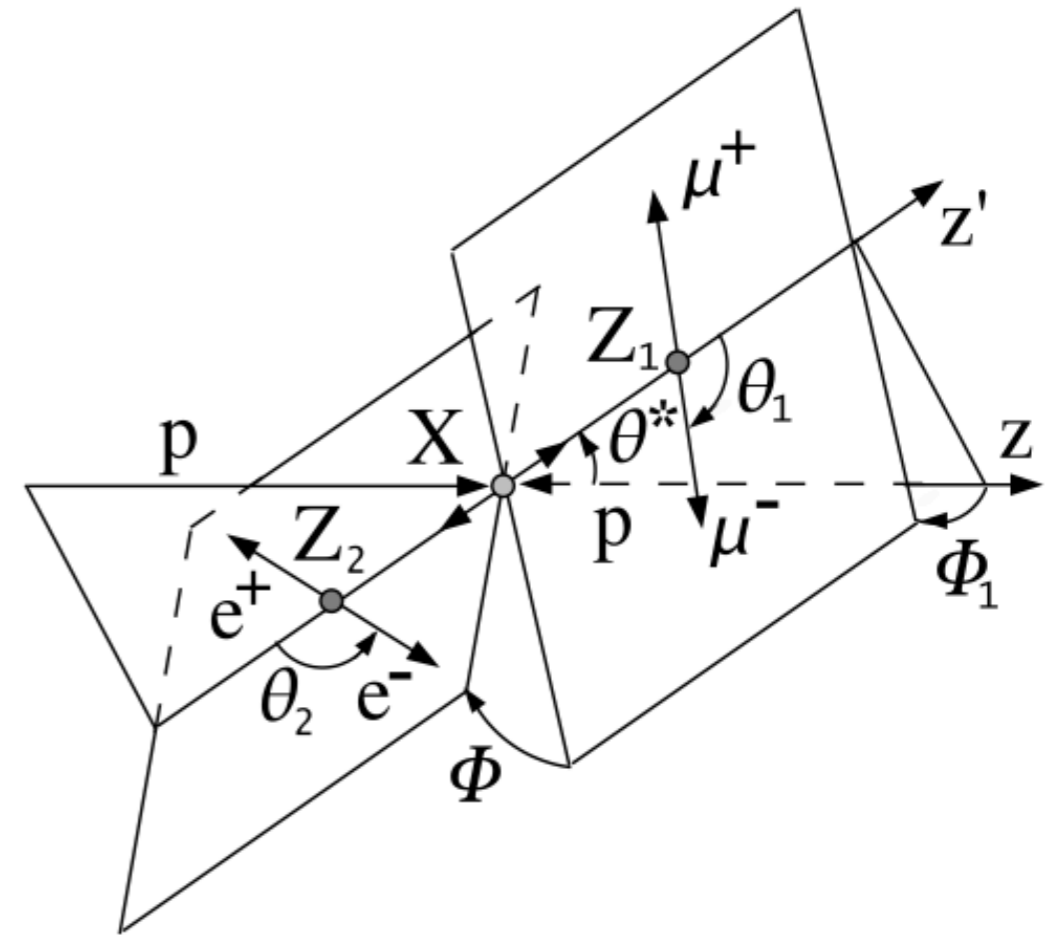
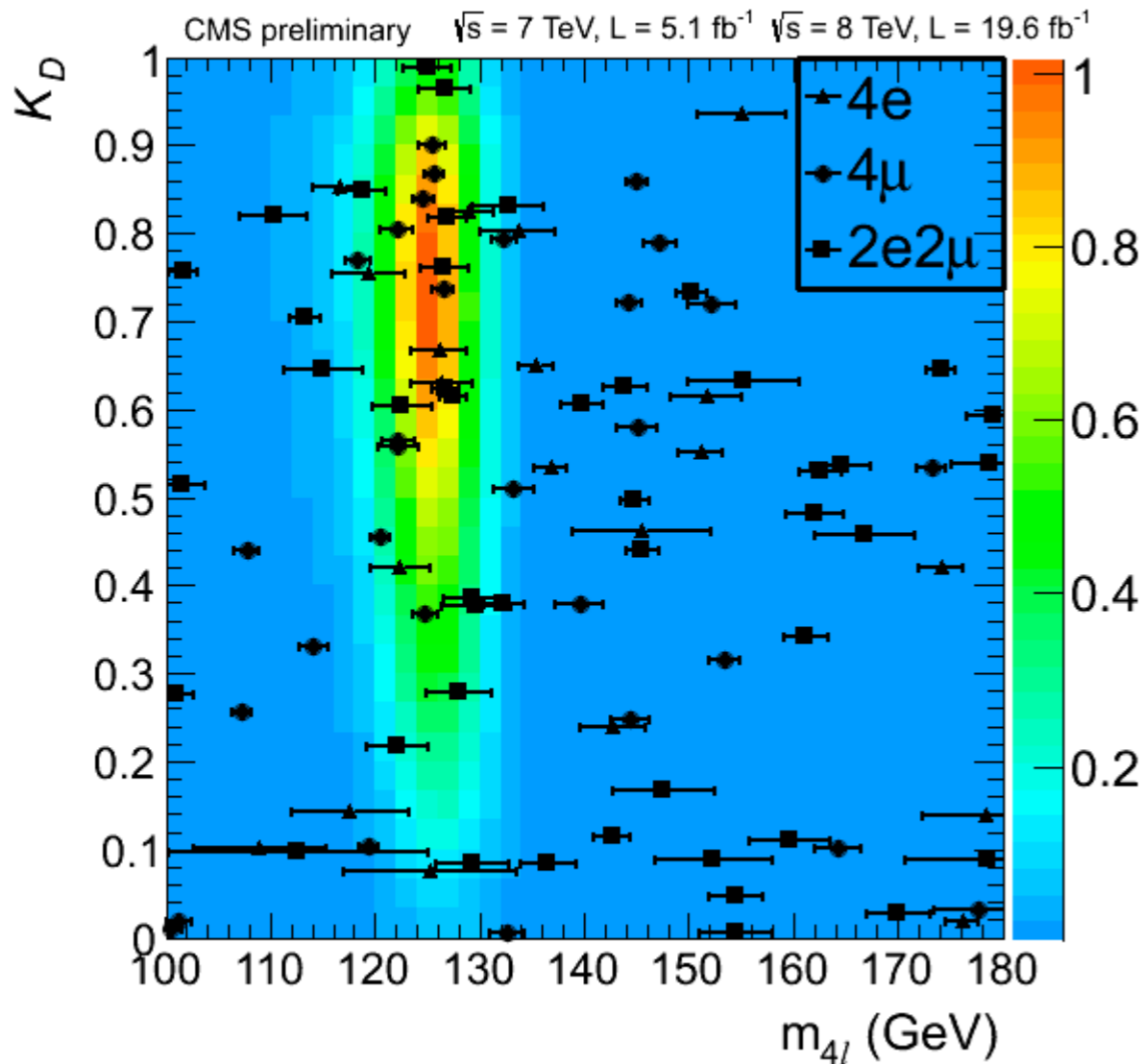


- ▶ Fondo irriducibile:
 ZZ , da simulazione MC
- ▶ Picco di $Z \rightarrow 4l$ usato per cross-check
 del metodo di misura della massa



Discriminante cinematico

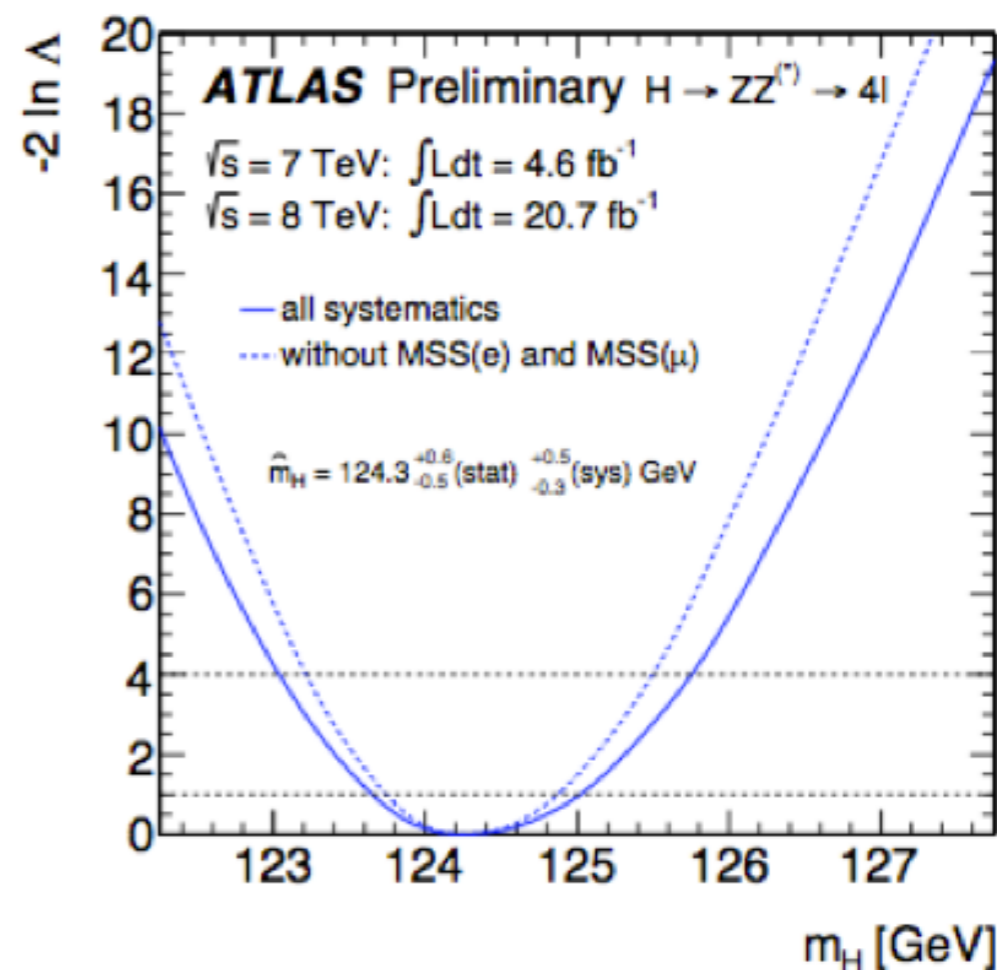
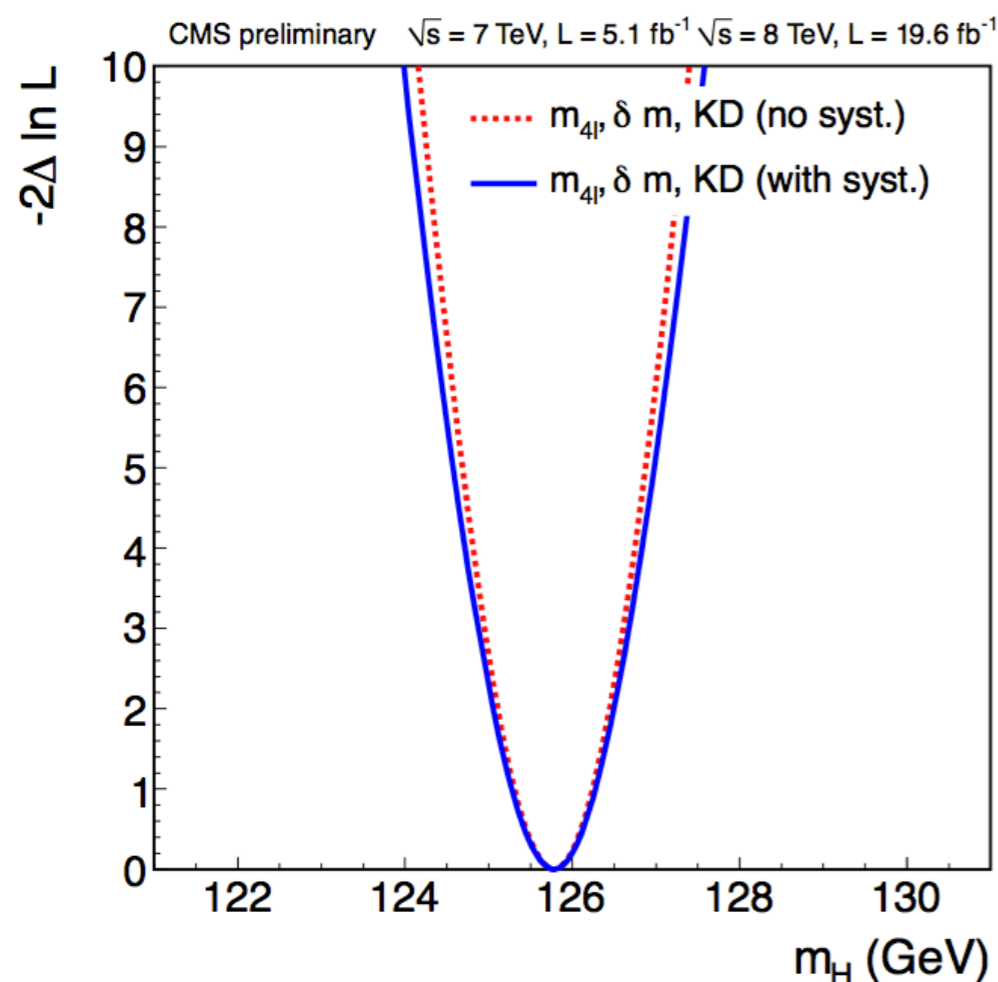
- ▶ Le masse delle due Z ricostruite e 5 angoli descrivono completamente la cinematica del decadimento
- ▶ È possibile costruire un indicatore k_D in grado di discriminare tra l'ipotesi decadimento dell'Higgs e il principale fondo ZZ



Colori: attesa per segnale $m_H = 125 \text{ GeV}$
 Punti: eventi osservati (con errori sulla massa)
 A 125 GeV, i punti si raggruppano ad alti valori di k_D

Misura della massa

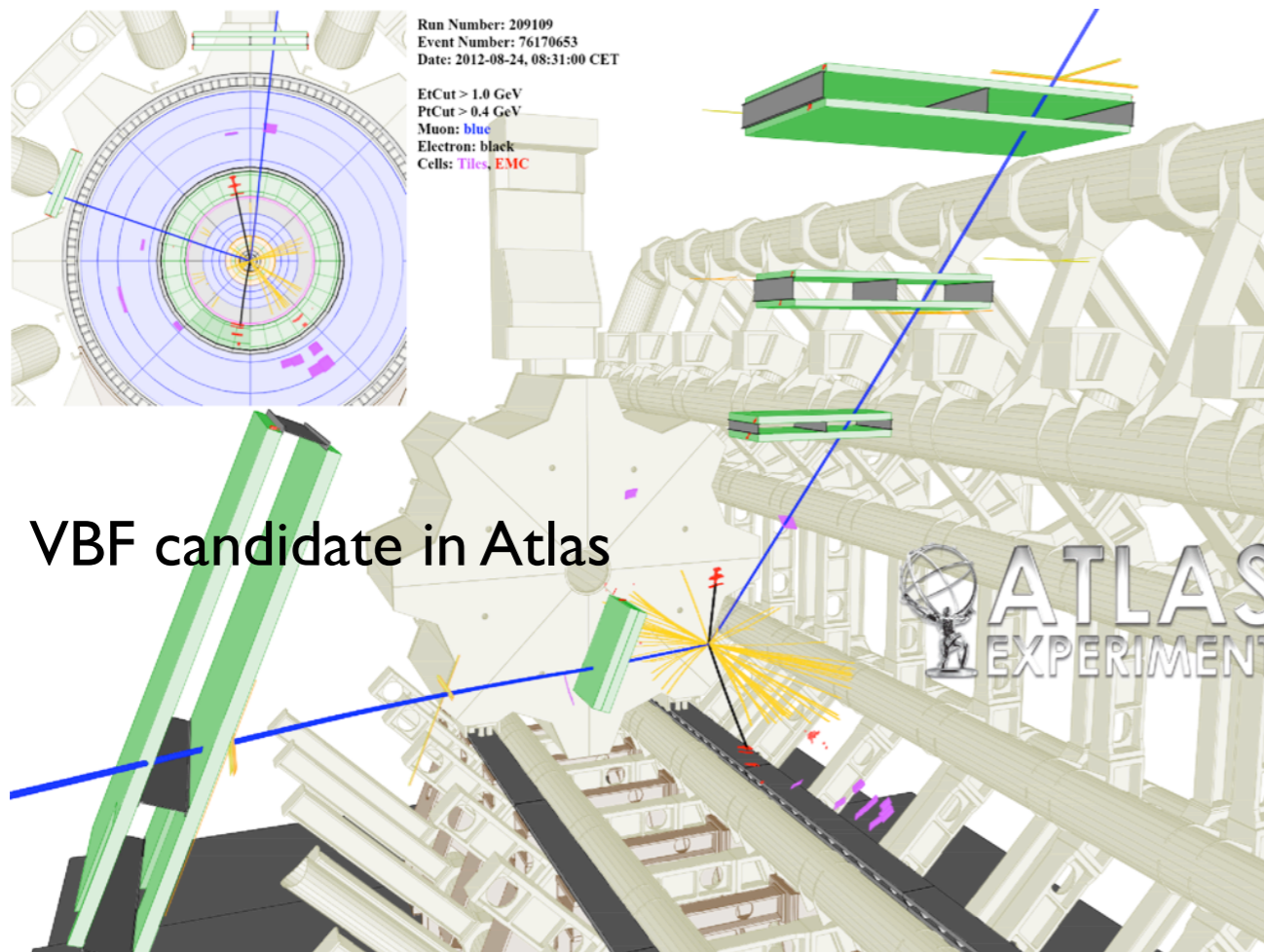
- ▶ Scansione della likelihood in funzione della ipotetica massa dell'Higgs
 - ▶ Il minimo corrisponde al valore piu' probabile
 - ▶ Mostrata con (linea continua) e senza (linea tratteggiata) errori sistematici



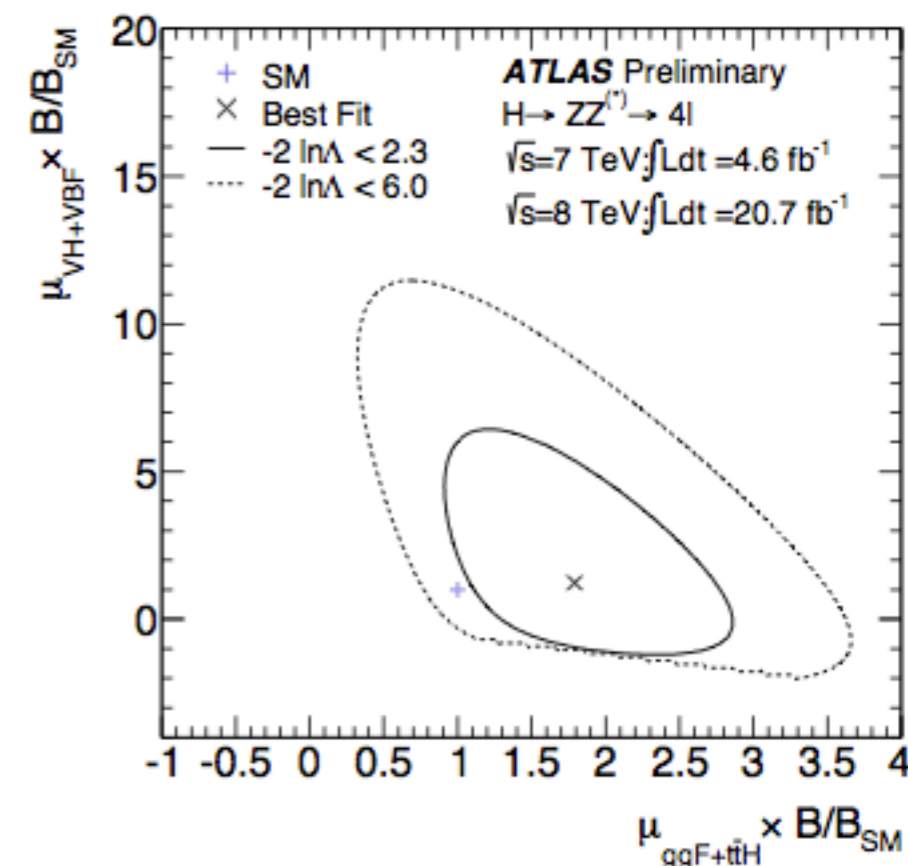
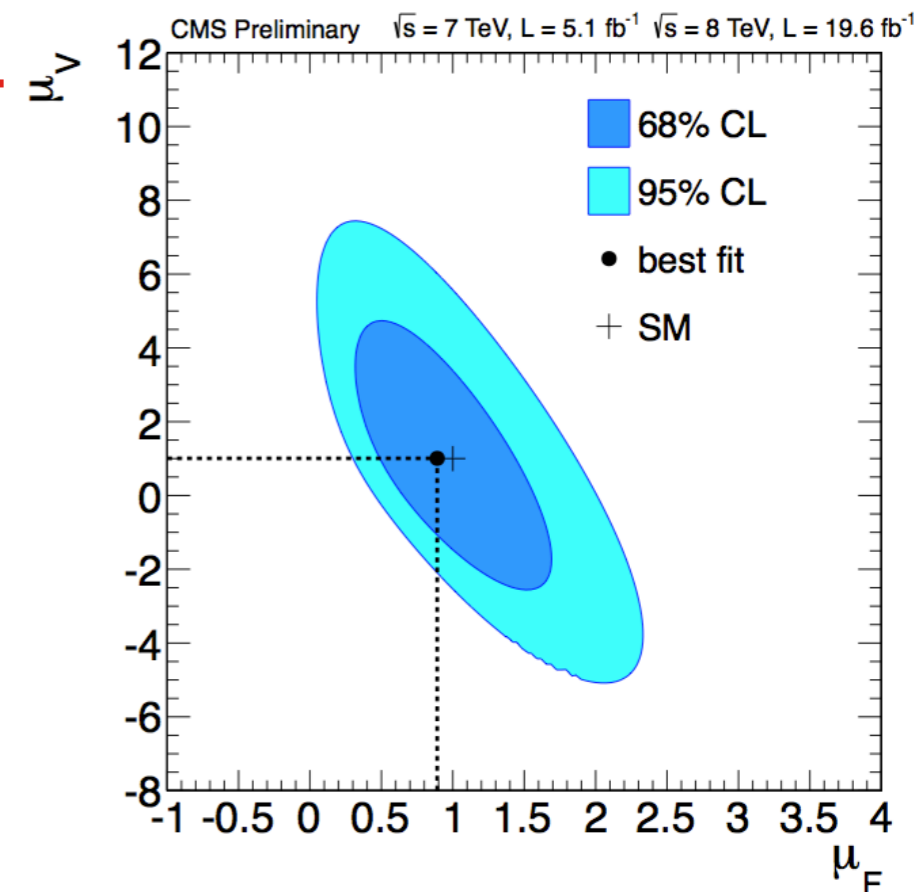
CMS: $m_H = 125.8 \pm 0.5 \text{ (stat.)} \pm 0.2 \text{ (syst.) GeV}$

Atlas: $m_H = 124.3^{+0.6}_{-0.5} \text{ (stat)} \text{ } ^{+0.5}_{-0.3} \text{ (syst) GeV}$

Meccanismo di produzione

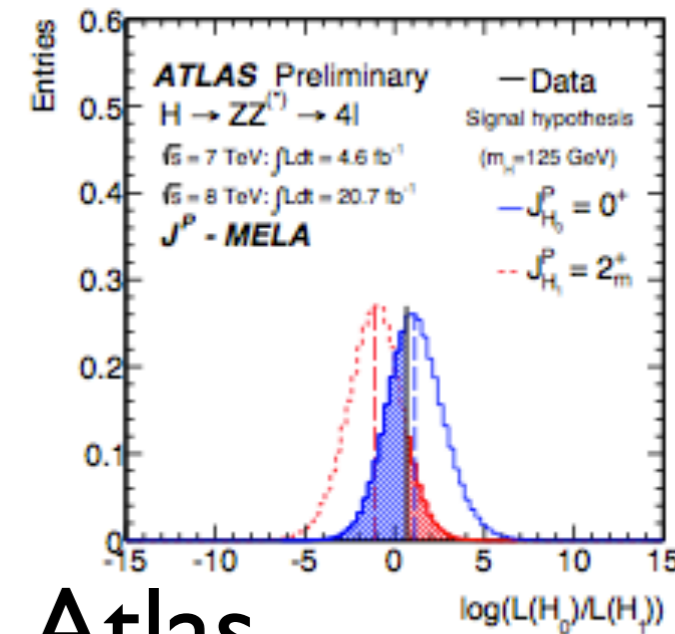
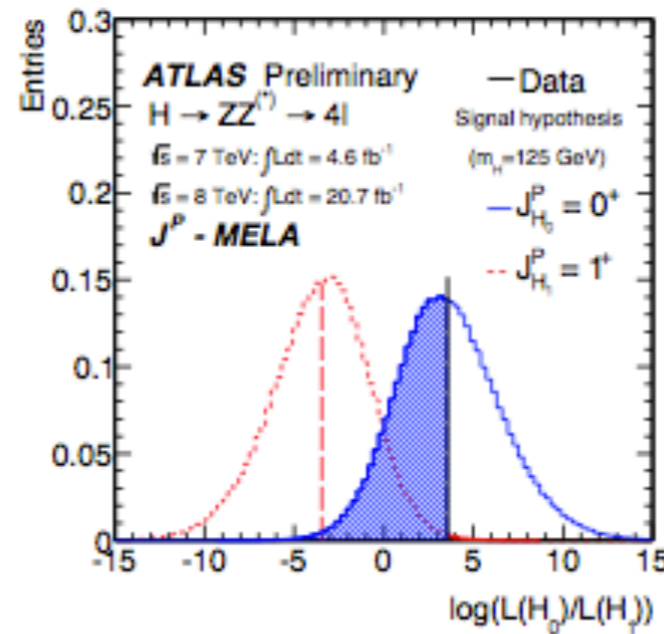
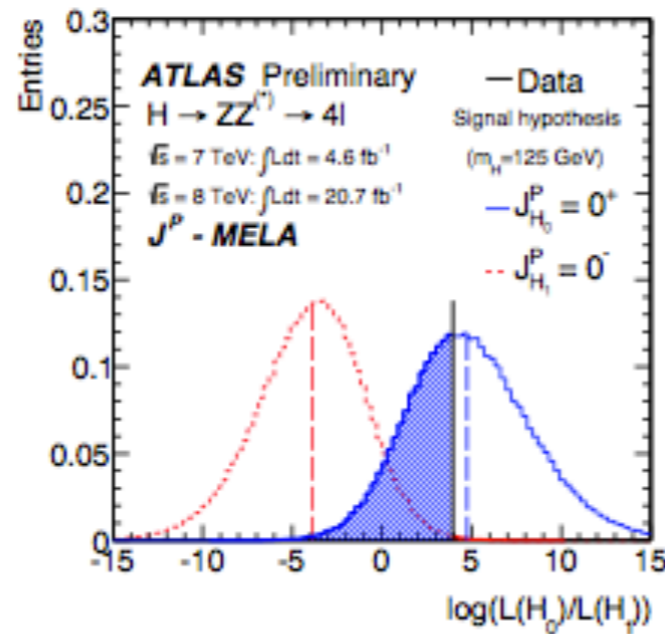


- ▶ Eventi categorizzati in base alla presenza di 0, 1 o 2 jets e alla loro topologia/cinematica
- ▶ In questo modo è possibile discriminare la produzione per mezzo di fermioni (ggF, ttH) da quella per mezzo di bosoni (VBF, VH) e misurare separatamente l'intensità del segnale, ottenendo un test delle proprietà del modello standard
- ▶ La statistica è ancora bassa ma le misure sono compatibili con le previsioni del modello standard (punto (1,1) nel plot)



Spin

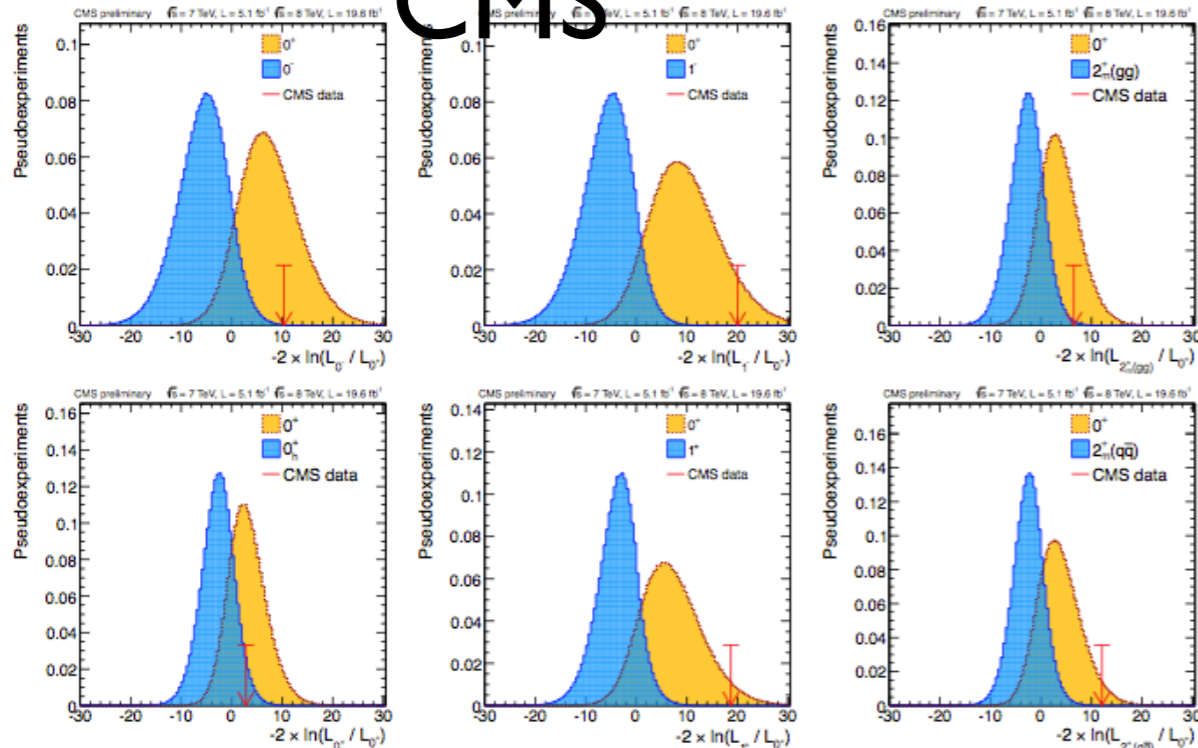
- ▶ Analisi dello spin
- ▶ Confronto del MS (scalare, 0^+ , in blu) con le possibili alternative (rosso)
- ▶ Utilizzando gli angoli di decadimento



Atlas

- ▶ Le grandezze relative dell'area blu e dell'area rossa quantificano la probabilità dell'ipotesi scalare e dell'alternativa ($0^-, 1^+, 2^+$)

CMS

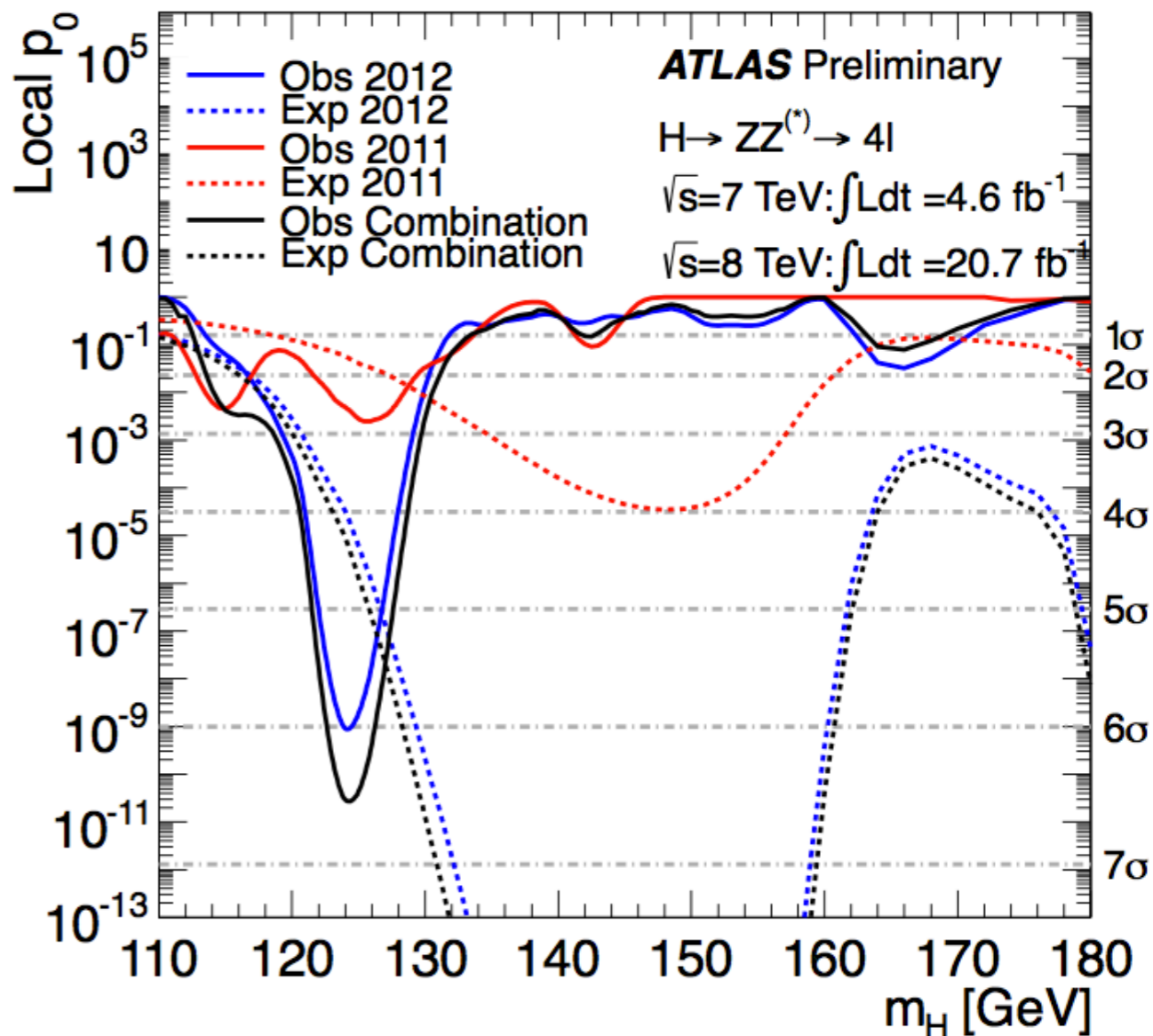
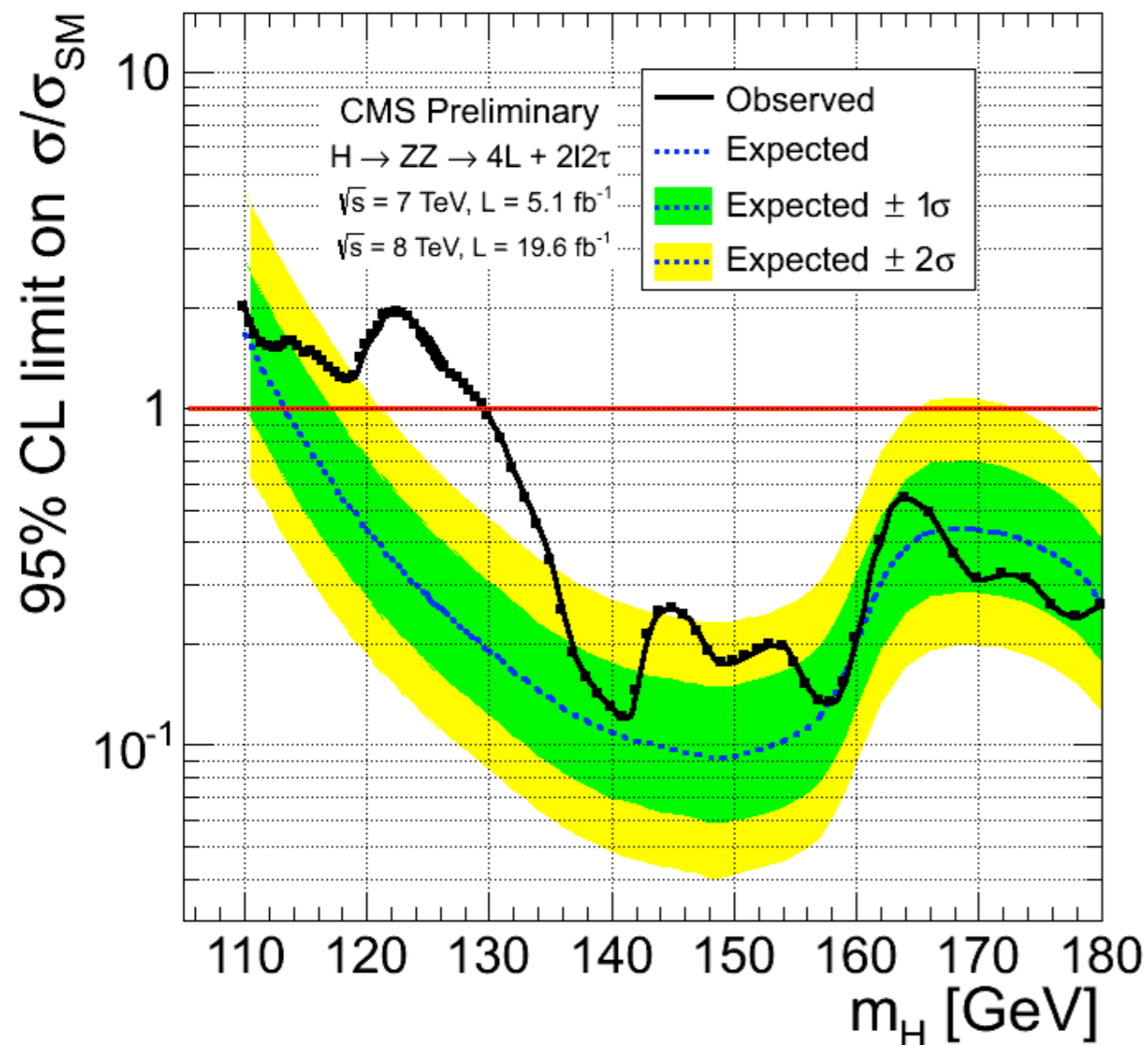


- ▶ Lo stato SM (0^+) e' favorito in tutti i confronti, gli stati 0^- e 1^+ sono esclusi al 97.8% CL (Atlas)
- ▶ Similmente CMS, che esclude anche l'ipotesi spin 2 al 98.5%

, $H \rightarrow \tau\tau$

Limiti e significativita'

- ▶ Higgs escluso nel range di massa da ~ 130 a ~ 800 GeV
- ▶ Chiaro eccesso a ~ 125 GeV



- ▶ Probabilita' dell'ipotesi "solo fondo"
- ▶ Tra 10^{-10} e 10^{-11} ($\sim 6.5 \sigma$) per ciascun esperimento per l'eccesso a 125-126 GeV

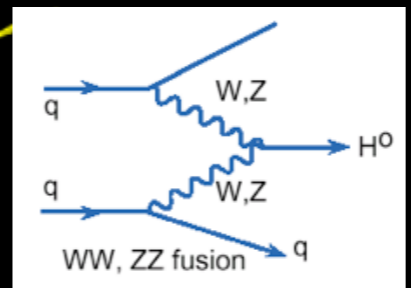
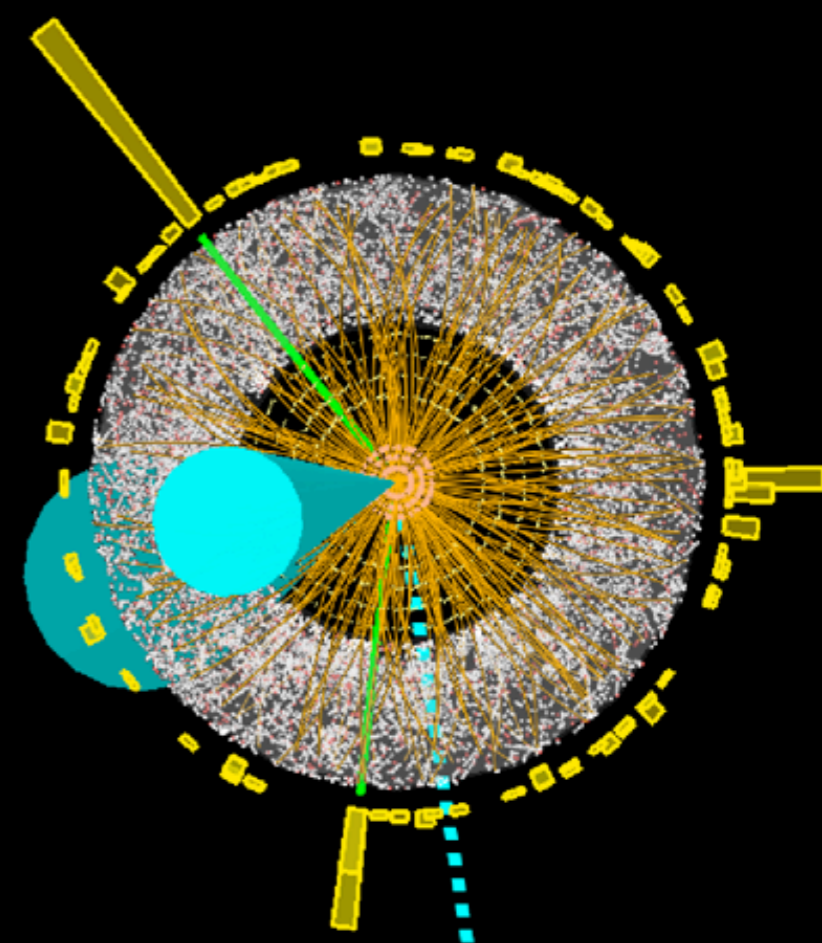
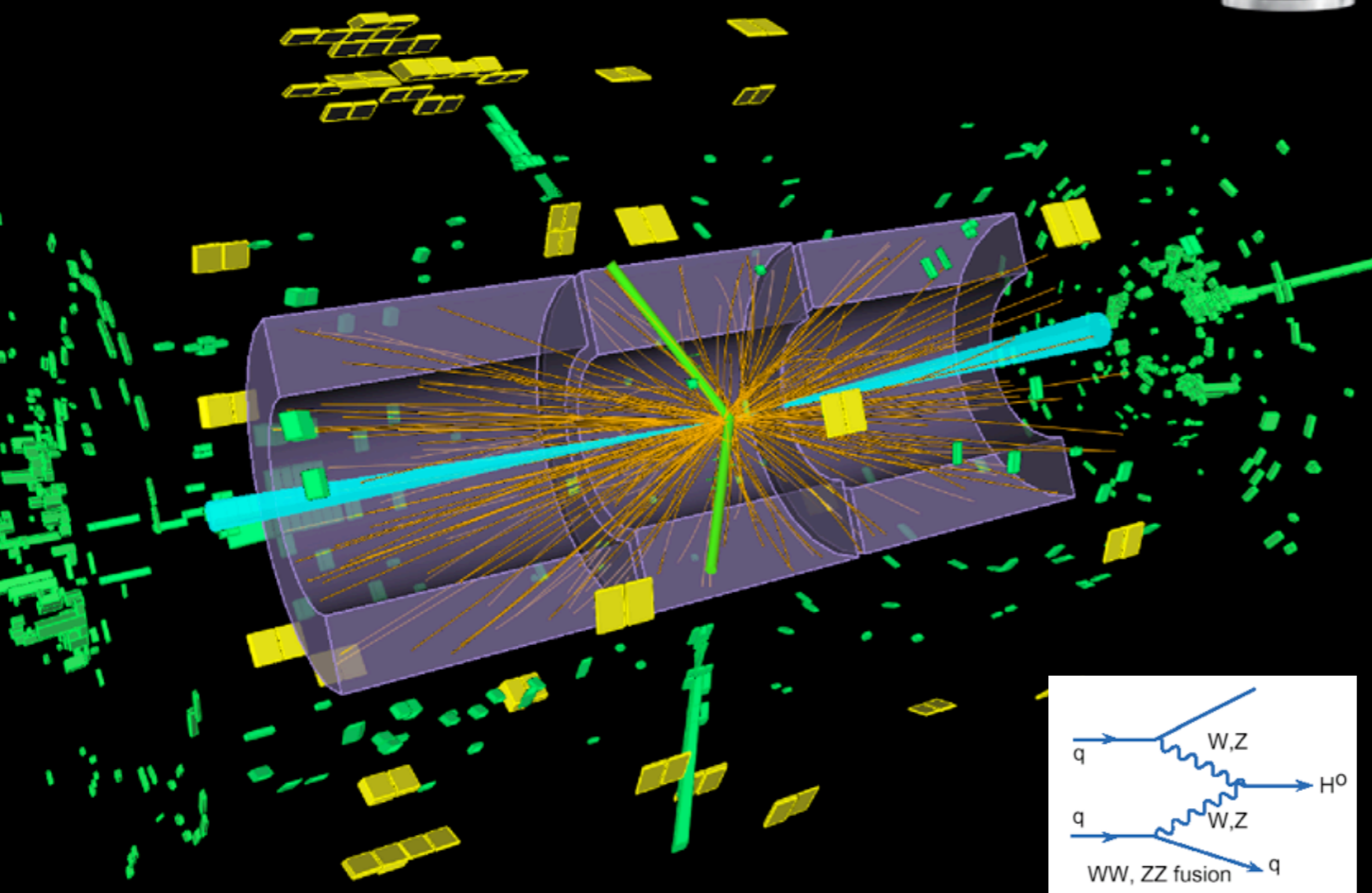
$H \rightarrow \tau\tau$

Run Number: 209109, Event Number: 86250372

Date: 2012-08-24 07:59:04 UTC

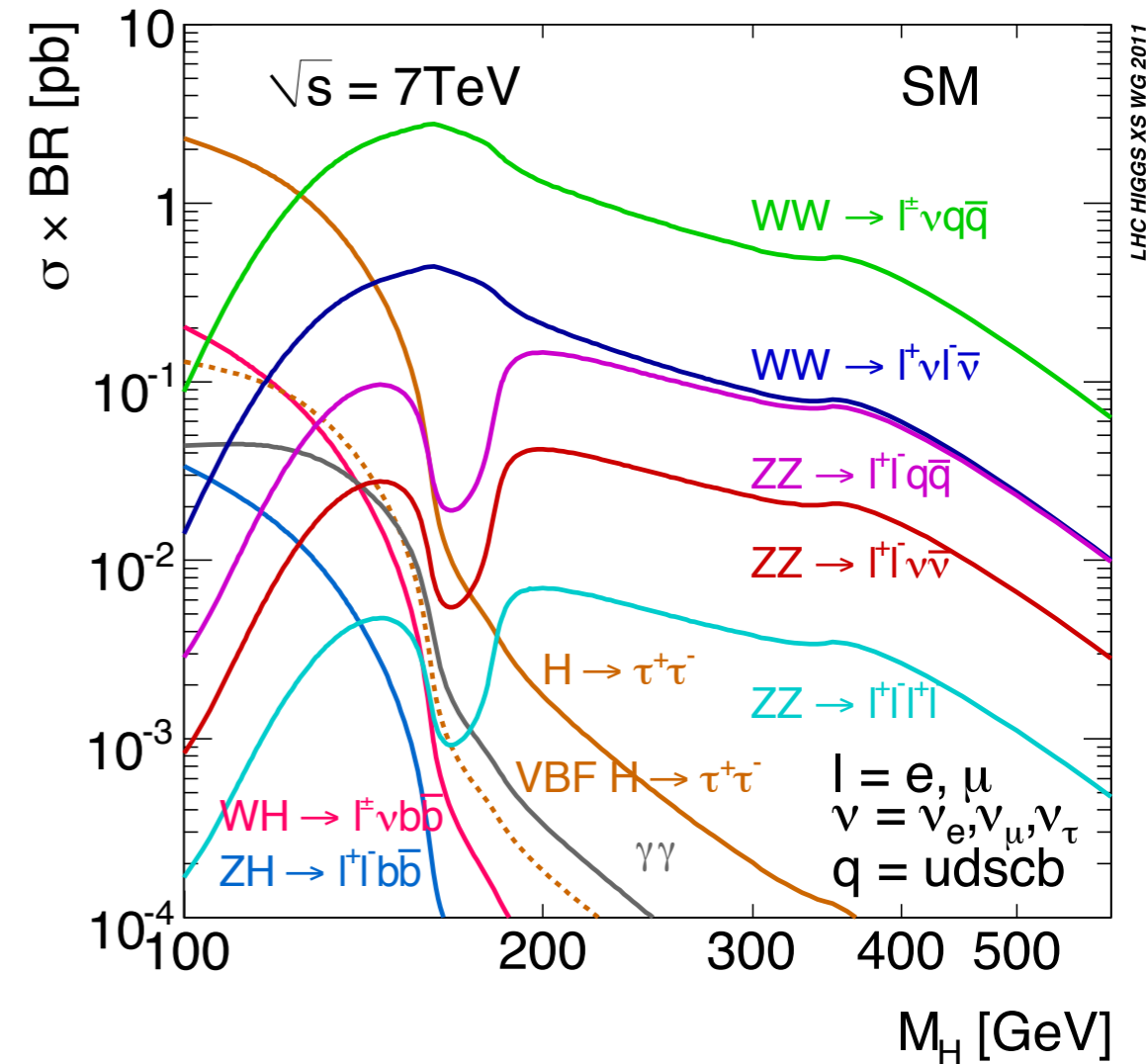


ATLAS
EXPERIMENT

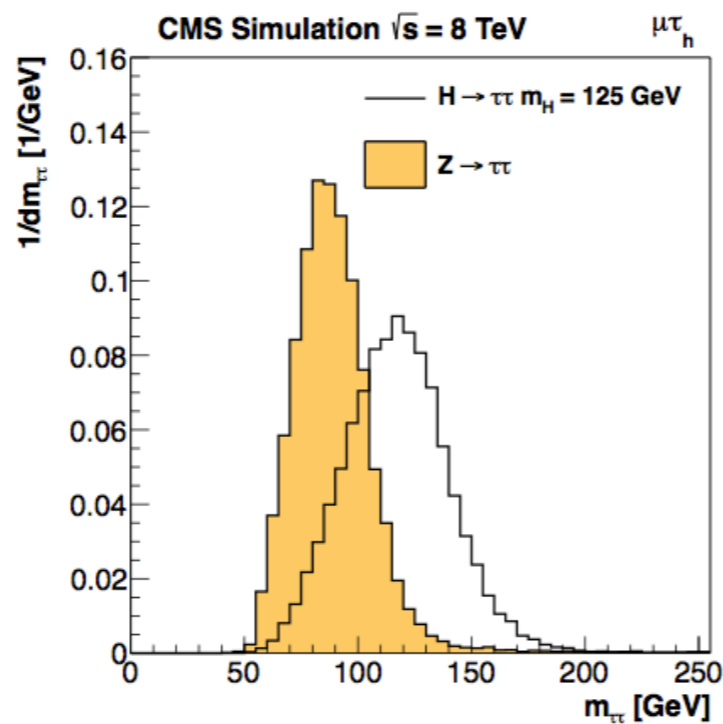
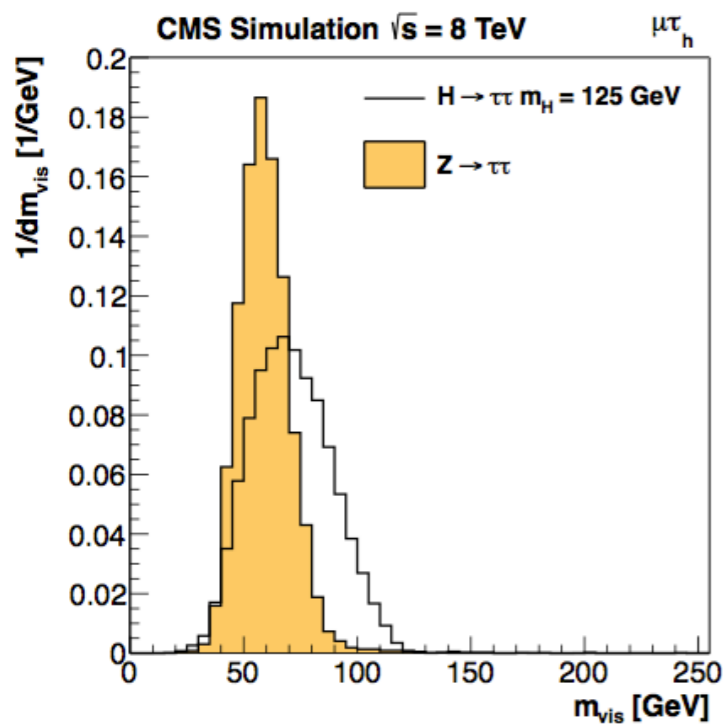


H → ττ

- ▶ Il canale più promettente per misurare il decadimento del bosone di Higgs in fermioni
 - ▶ Inoltre grande BR, possibilità di sfruttare la classificazione VBF (jets in avanti) per migliorare S/B
- ▶ 5 categorie:
 - $\mu\tau_h$, $e\tau_h$, $e\mu$, $\tau_h\tau_h$, $\mu\mu$
 - a seconda dei decadimenti del τ (e, μ , adronico)
- ▶ Massa $m_{\tau\tau}$ determinata con metodo massima verosimiglianza utilizzando tutti gli osservabili
 - ▶ Recupero dei gamma da pi0 che convertono in e+e-
 - ▶ Parte non visibile (neutrini)



LHC HIGGS XS WG 2011



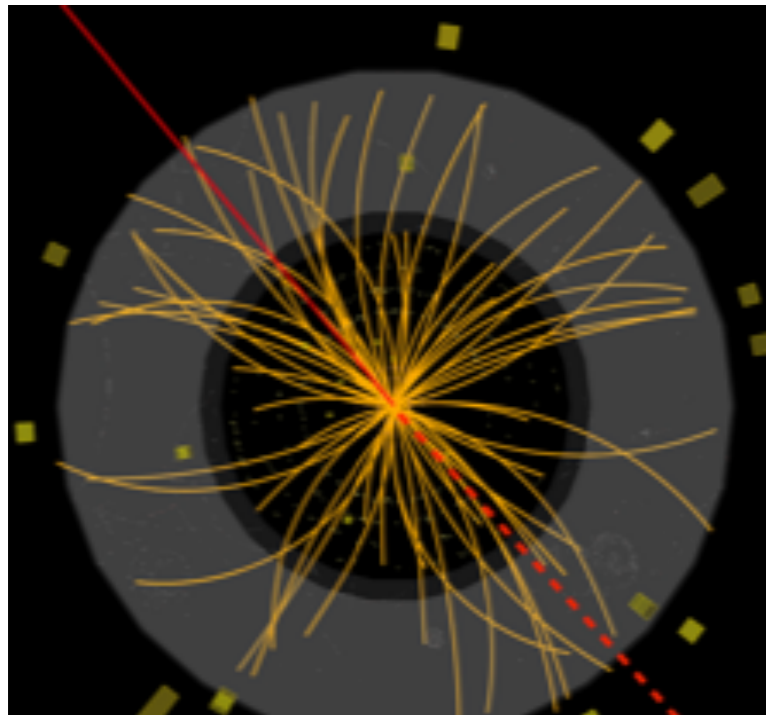
H → ττ

- ▶ Il neutrino prodotto nel decadimento del τ e' quasi collineare agli altri prodotti di decadimento (per i p_T in gioco): si richiede la massa trasversa

$$m_T = \sqrt{2p_T E_T^{\text{miss}} (1 - \cos(\Delta\phi))} < 20 \text{ GeV}$$

- ▶ Utile per la riduzione del fondo da W+jets e tt, dove tipicamente l'energia mancante e' opposta al(ai) leptone(i)

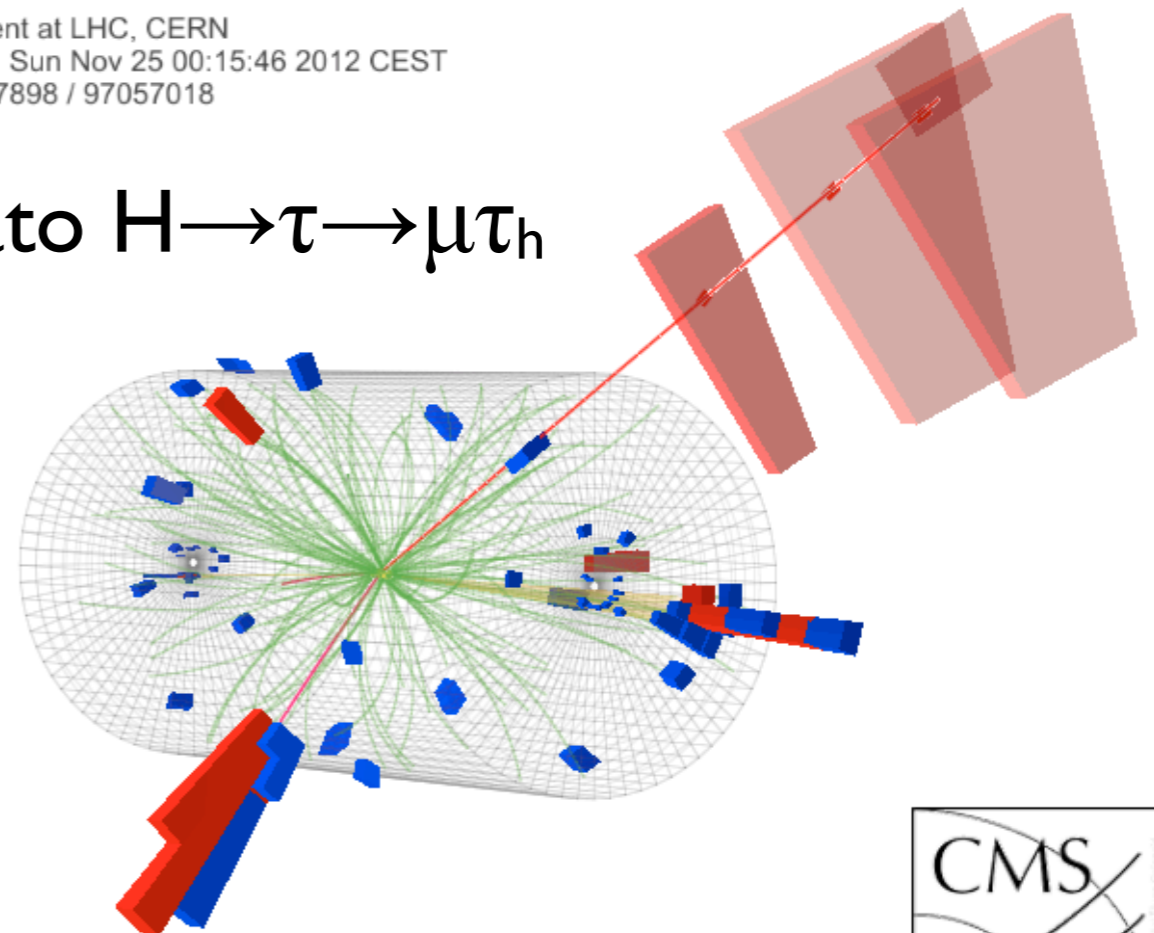
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun Nov 25 00:15:46 2012 CEST
Run/Event: 207898 / 97057018



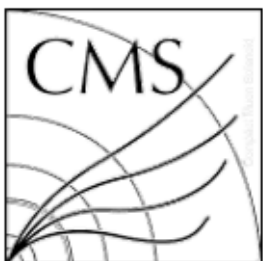
W → μν

Il bosone di Higgs compie un anno

Candidato H → τ → μτ_h



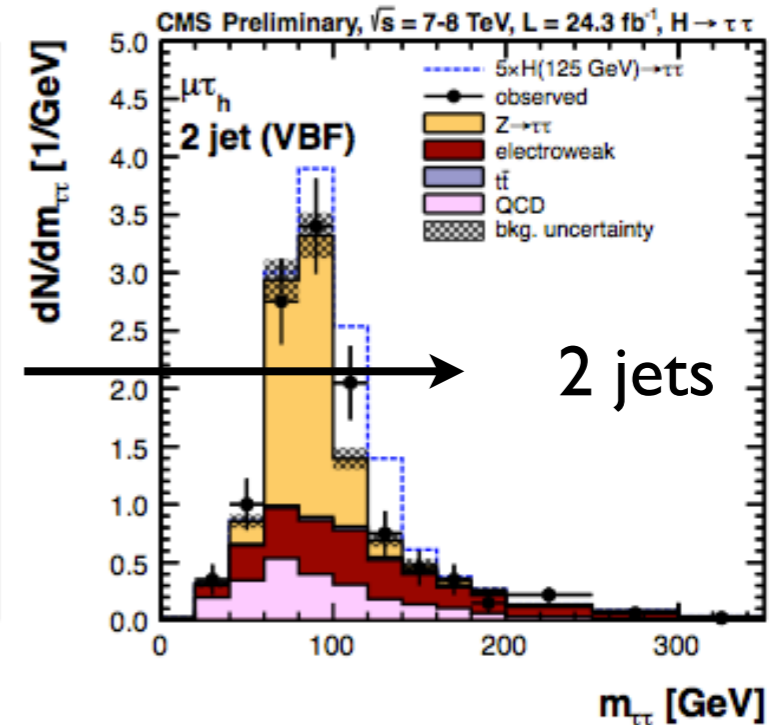
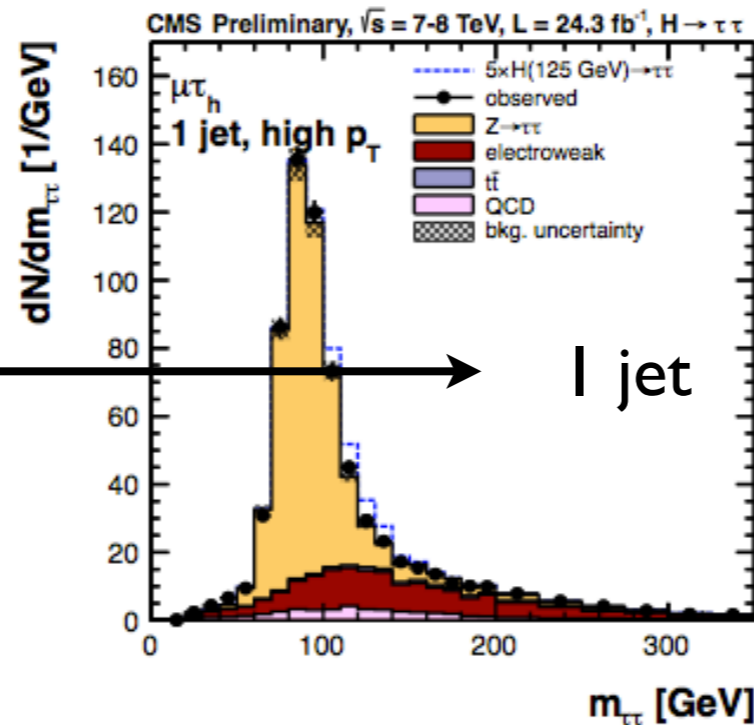
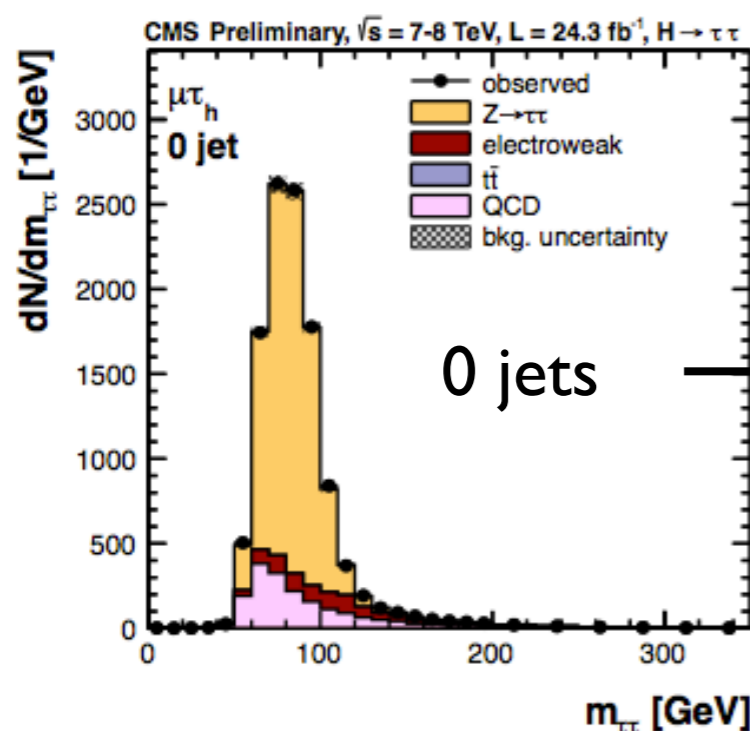
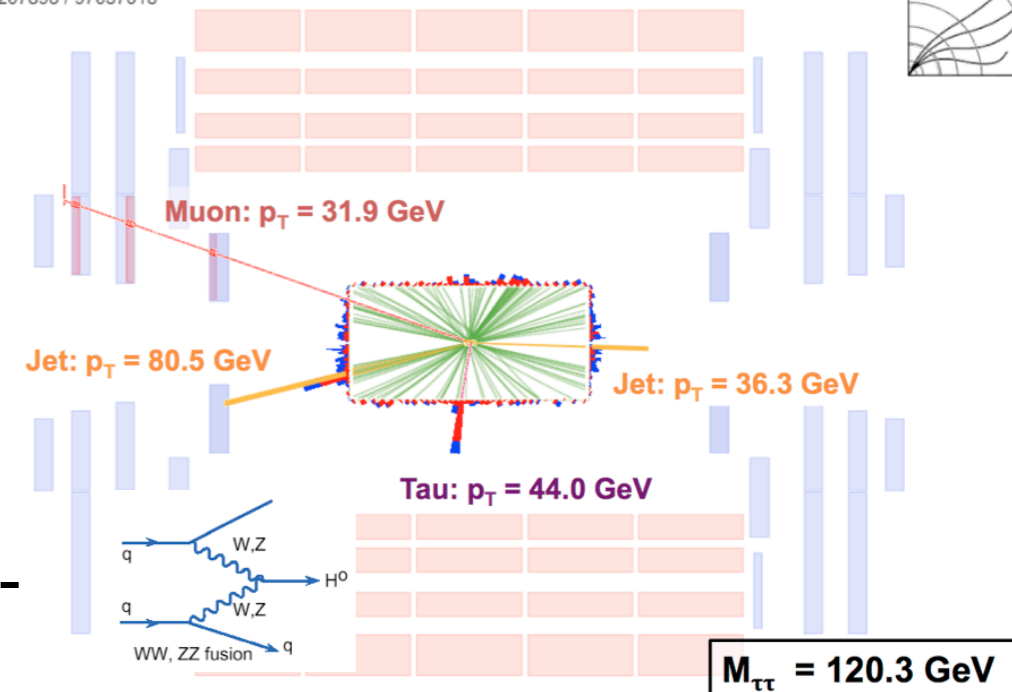
LHC e H → 4l,



Classificazione meccanismo di produzione

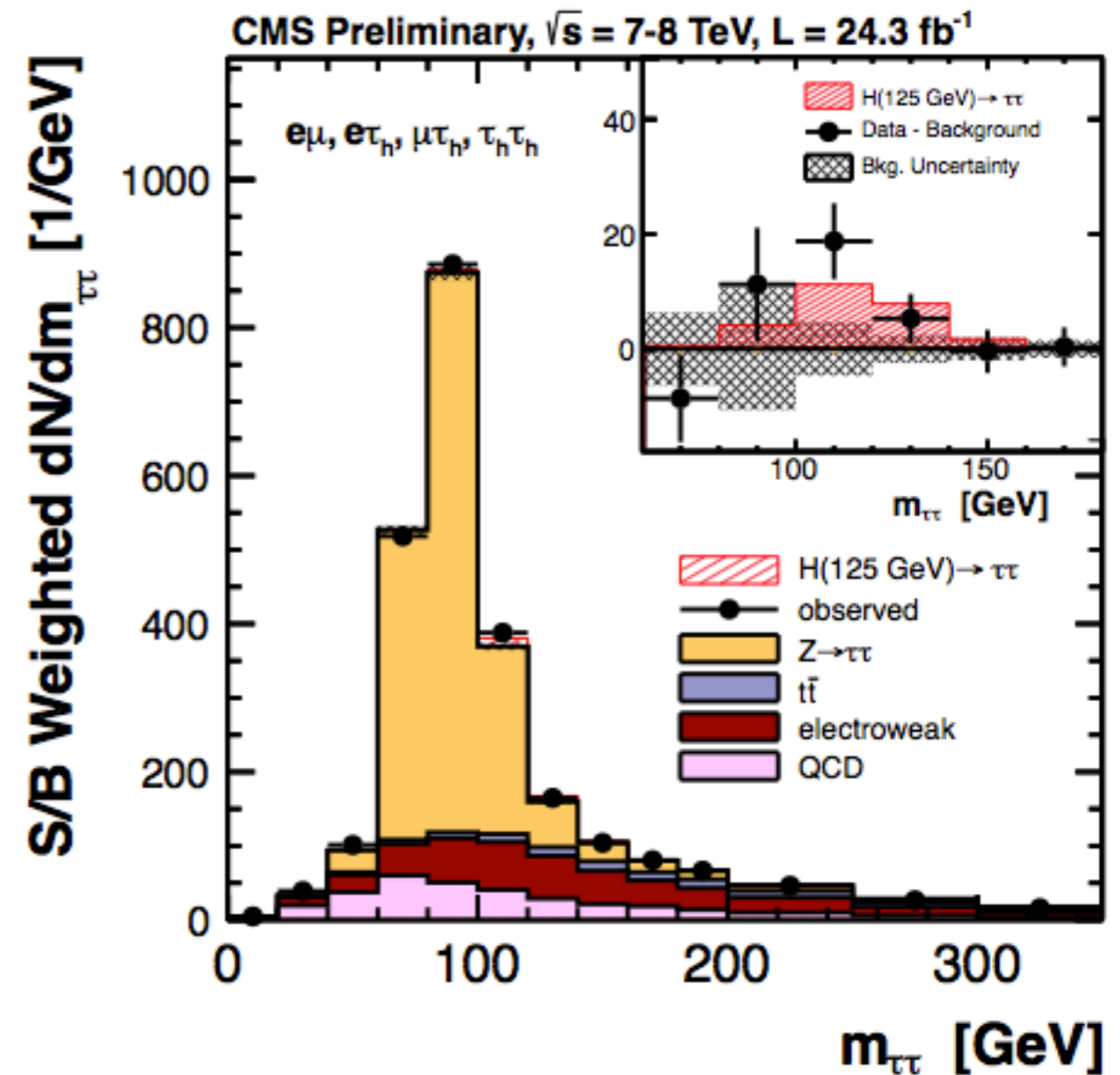
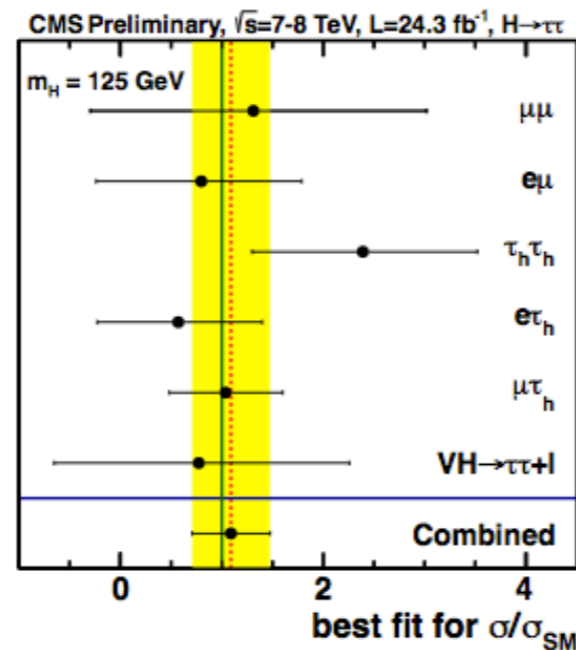
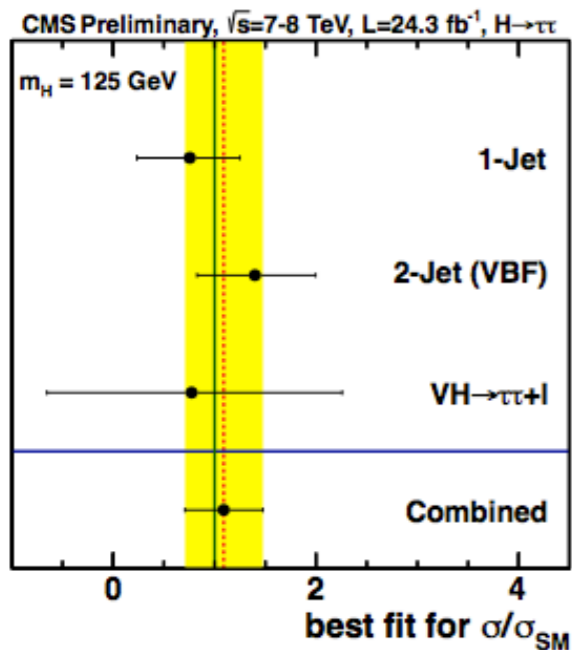
- ▶ Classificazione degli eventi in base al numero di jet presenti
 - ▶ 0 jets unicamente per normalizzare il fondo, misurare efficienze, ...
 - ▶ 1 jet identifica eventi prodotti per gluon fusion e produzione associata con W/Z che decadono adronicamente
 - ▶ 2 jet, a grande distanza in pseudorapidità, seleziona eventi prodotti per vector boson fusion, e potenzia il segnale
- ▶ Fondo di $Z \rightarrow \tau\tau$ fortemente ridotto nelle categorie 1- e 2-jets

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun Nov 25 00:15:46 2012 CEST
Run/Event: 207898 / 97057018



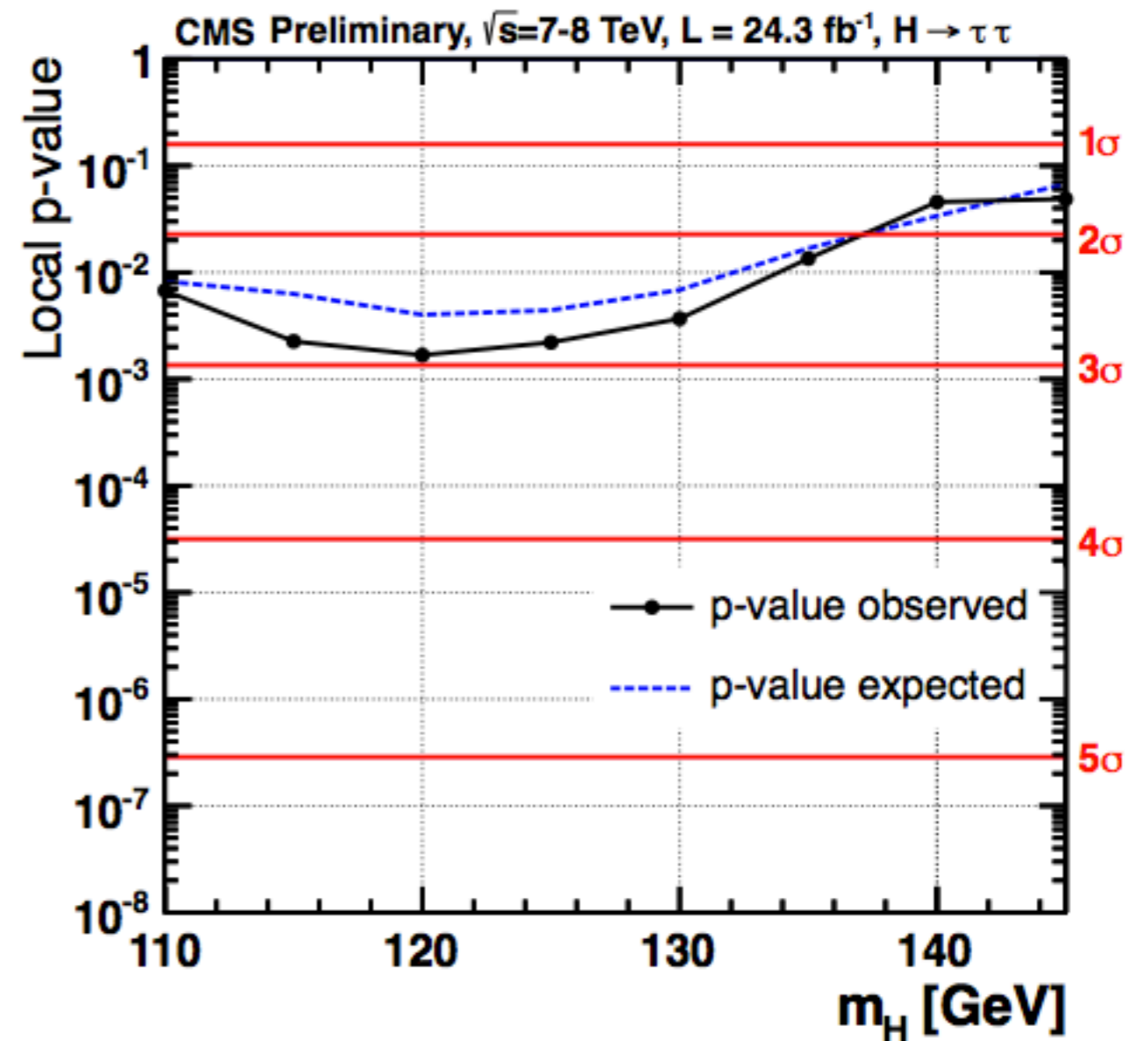
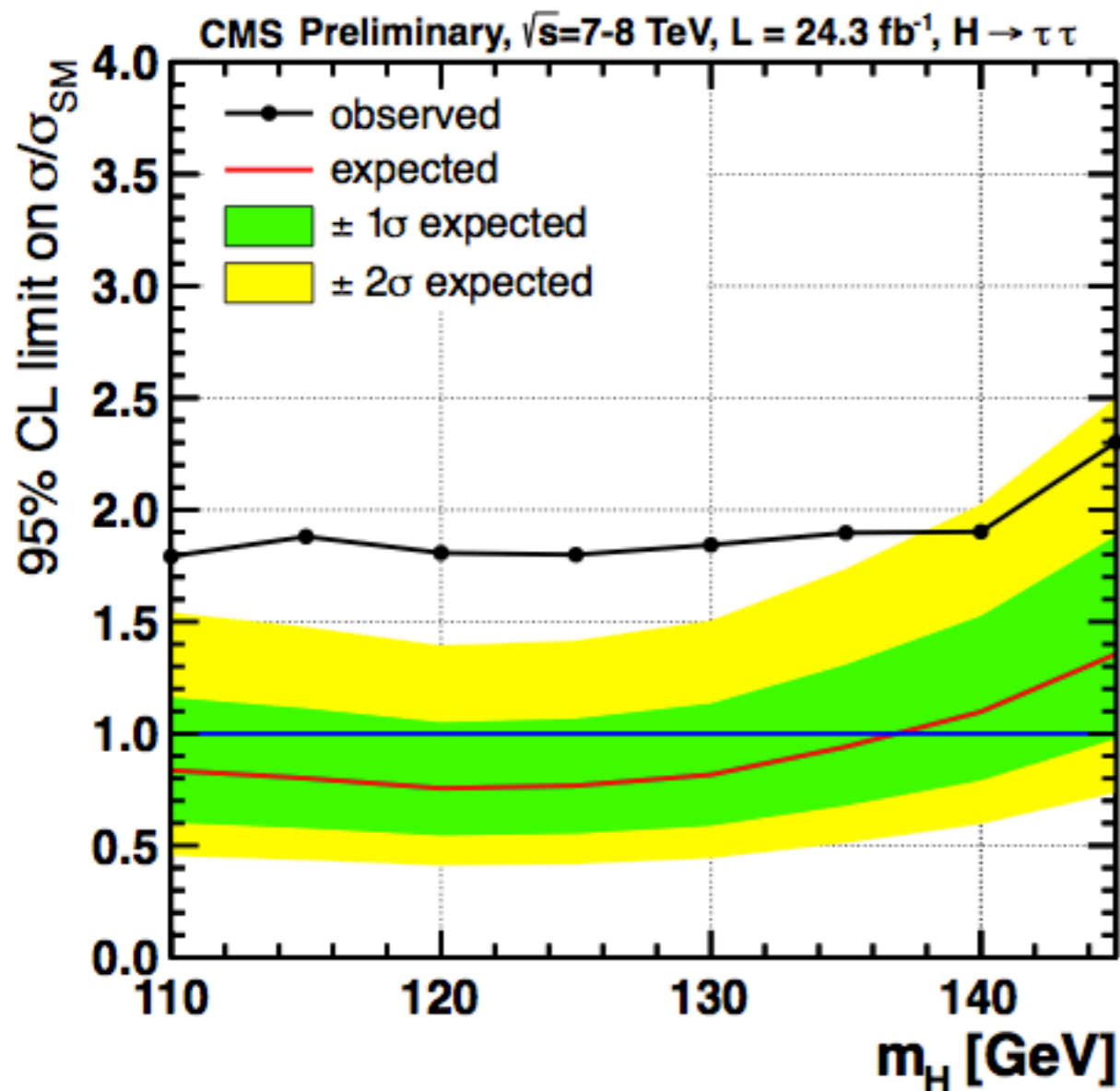
Risultati complessivi $H \rightarrow \tau\tau$

- ▶ Combinando tutte le categorie, e' possibile discriminare un piccolo eccesso al di sopra del picco della Z, \sim compatibile con le attese per un Higgs SM
- ▶ Il segnale e' quantitativamente compatibile con quanto atteso dallo SM
 - ▶ I contributi dalle diverse categorie sono compatibili



Limiti e significatività

- ▶ Eccesso nel range ~ 110 - 135 GeV
- ▶ Massima significatività 2.93σ per $m_H=120$ GeV, a $m_H=125$ GeV si ha 2.85σ
- ▶ Segnale compatibile con la previsione del Modello Standard



Conclusioni

- ▶ LHC ha aperto una nuova frontiera in energia, il primo run di presa dati è stato di grande successo e la macchina ha funzionato benissimo
- ▶ Atlas e CMS, rivelatori di dimensioni e complessità senza precedenti, sono stati in grado di raccogliere dati di grande qualità e con grande efficienza, nelle difficili condizioni di grande luminosità che LHC è riuscito a fornire
- ▶ L'eccellente lavoro svolto durante la costruzione, il collaudo e l'utilizzo dei rivelatori, sia nei diversi istituti che hanno costruito i rivelatori, che al CERN, è stato consacrato il 4 luglio scorso dalla scoperta di una nuova particella, compatibile con il bosone di Higgs
- ▶ Ho presentato i risultati dell'analisi di due importanti modi di decadimento del bosone di Higgs, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ e $H \rightarrow \tau\tau$, in notevole accordo tra loro e con le previsioni del Modello Standard
- ▶ Lascio ora a Riccardo che mostrerà come sono stati rivelati e misurati ulteriori modi di decadimento dell'Higgs e le conclusioni che si possono trarre dalla combinazione di tutte le osservazioni condotte all'LHC



1970s

- ▶ Se esiste, ha una massa tra 10 e 1000 GeV

A PHENOMENOLOGICAL PROFILE OF THE HIGGS BOSON

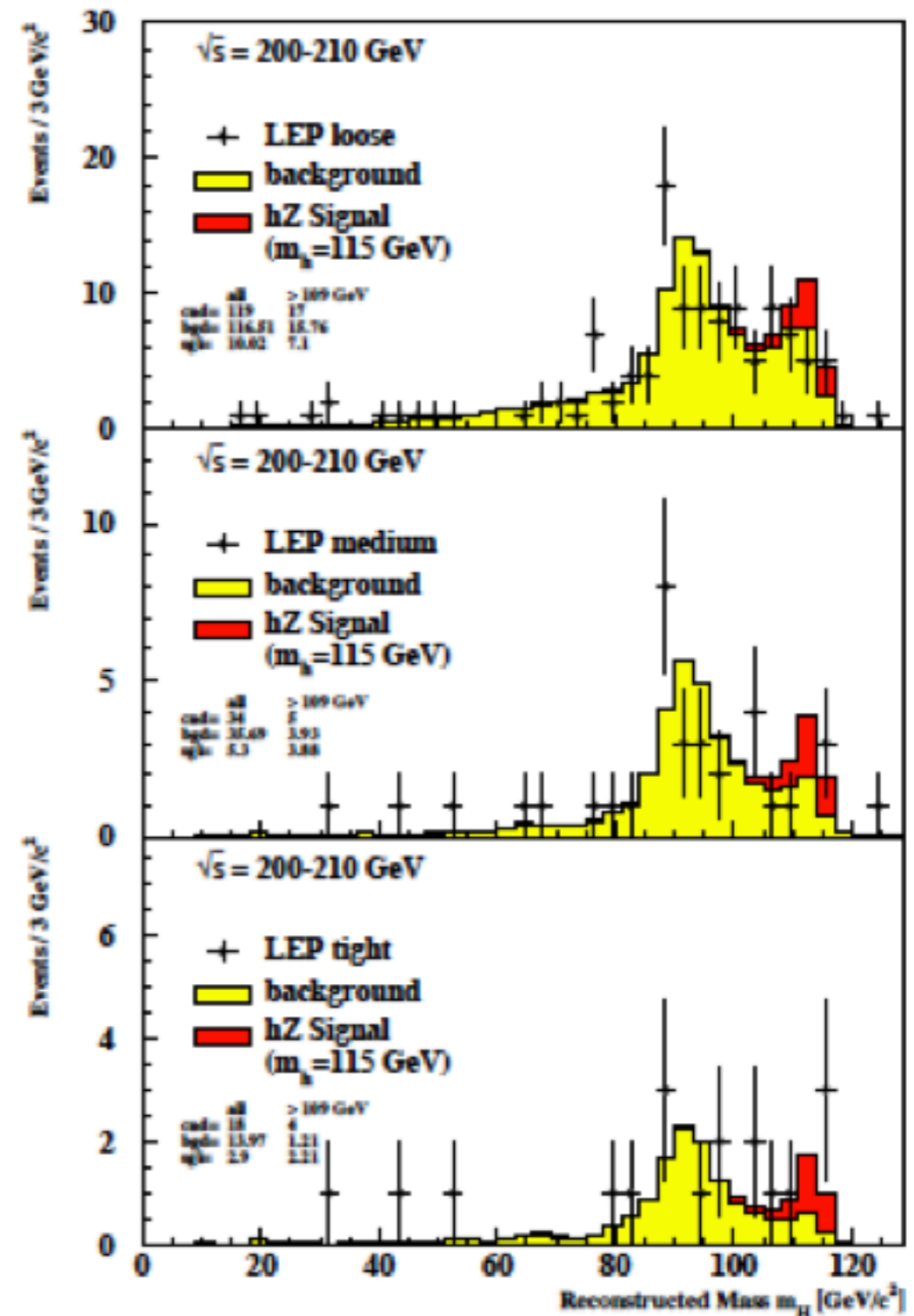
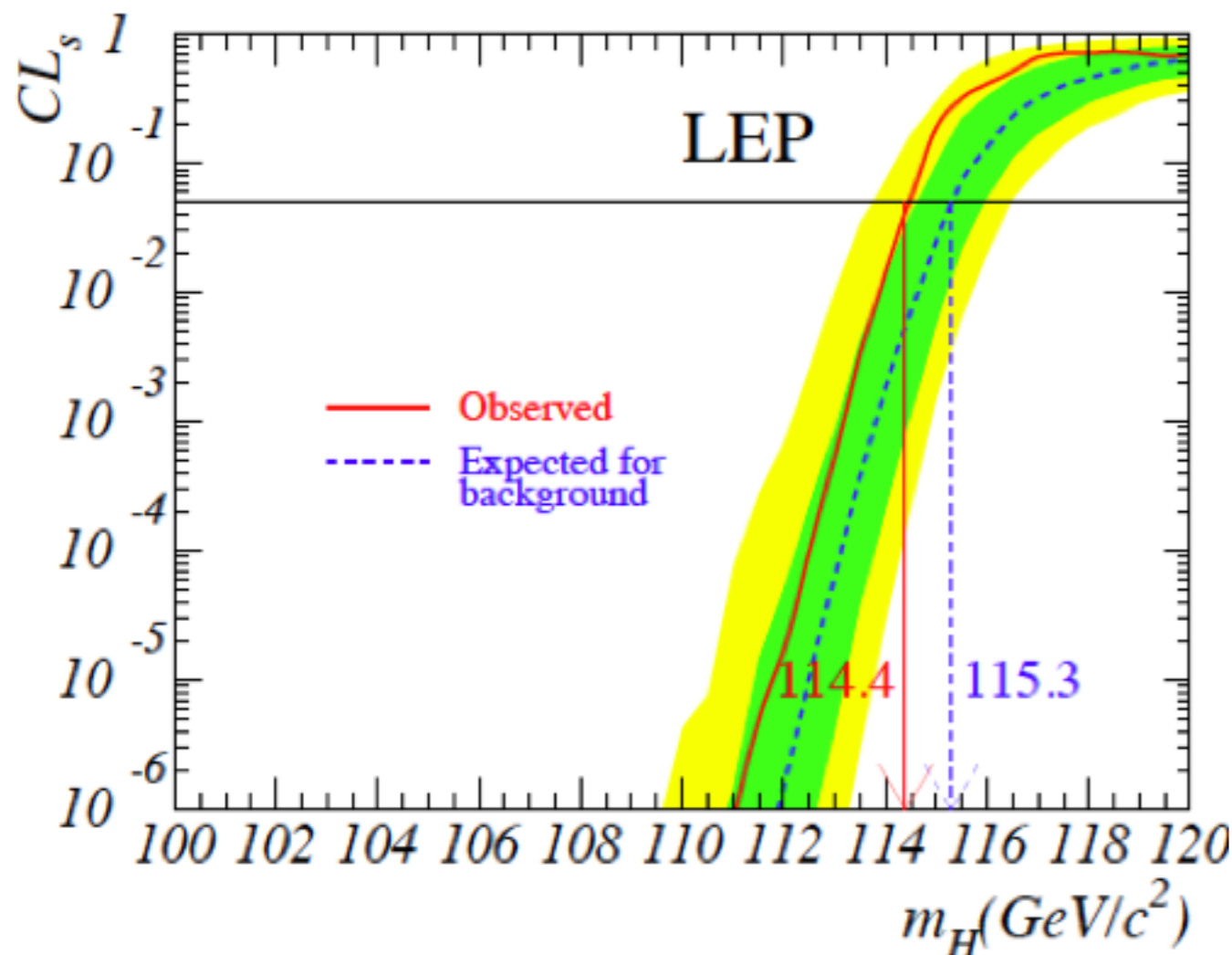
John ELLIS, Mary K. GAILLARD ^{*} and D.V. NANOPOULOS ^{**}
CERN, Geneva

Received 7 November 1975

We should perhaps finish with an apology and a caution. We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson, unlike the case with charm [3,4] and for not being sure of its couplings to other particles, except that they are probably all very small. For these reasons we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson, but we do feel that people performing experiments vulnerable to the Higgs boson should know how it may turn up.

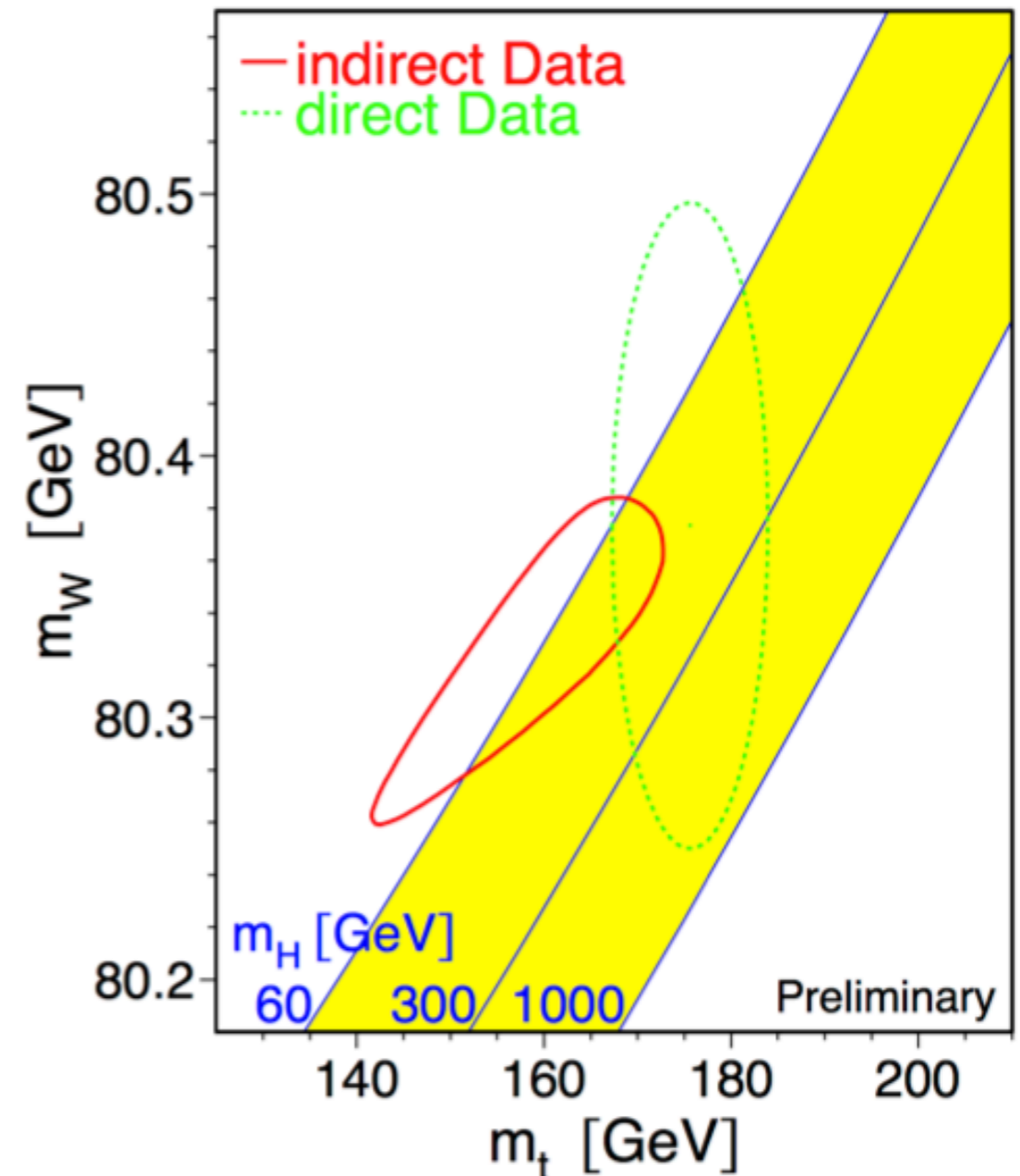
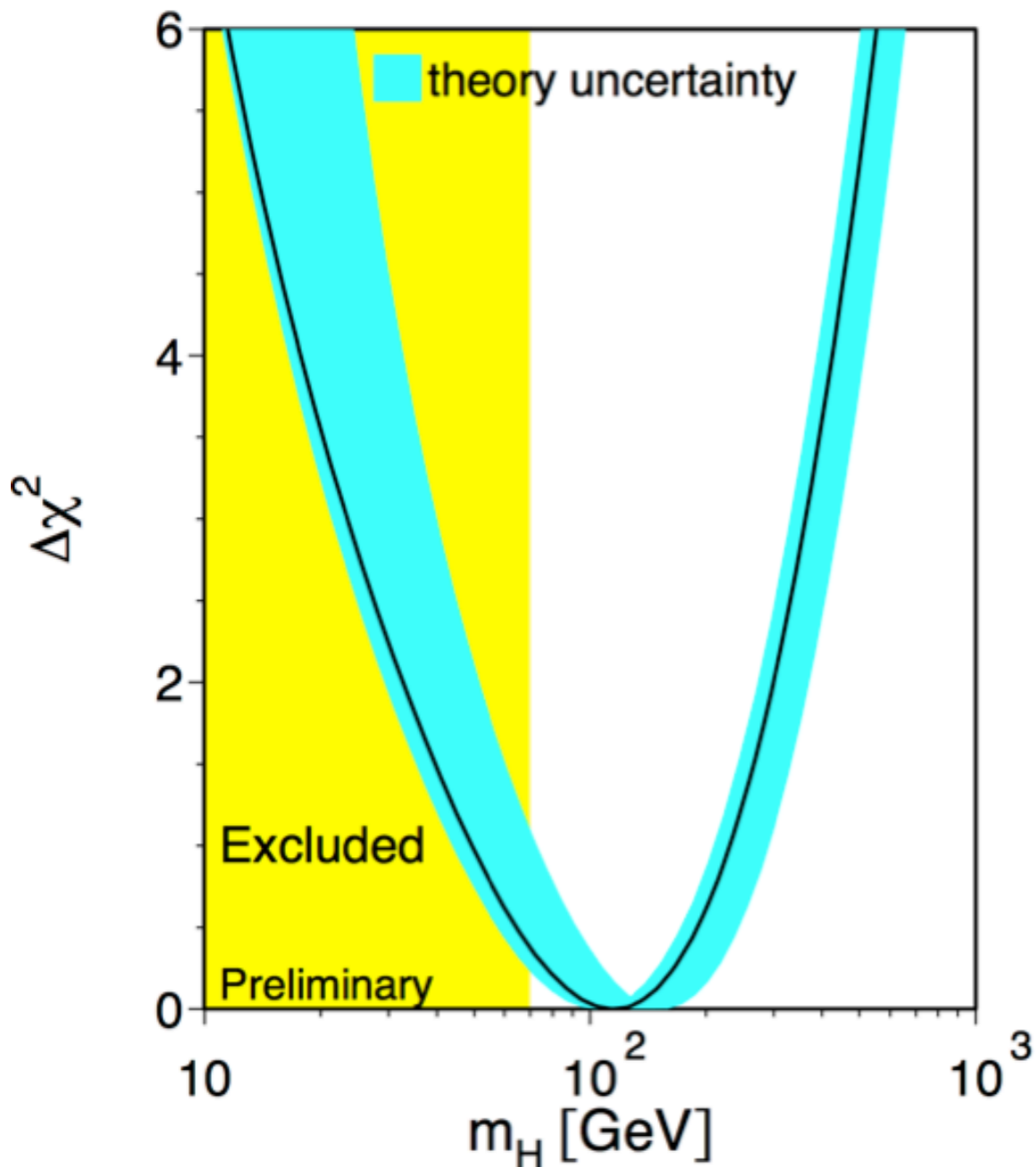
1980s

- ▶ Primo studio dettagliato da LEP appare nel 1986
 - ▶ Una caccia continuata fino alla chiusura di LEP2 (2000)
- ▶ LEP posiziona un limite inferiore alla massa dell'Higgs a 114.4 GeV (95% CL)
- ▶ Tra 12 e 80 GeV, LEP esclude un bosone di Higgs "Standard Model" con sezione d'urto fino a 20 volte inferiore a quella prevista dallo SM

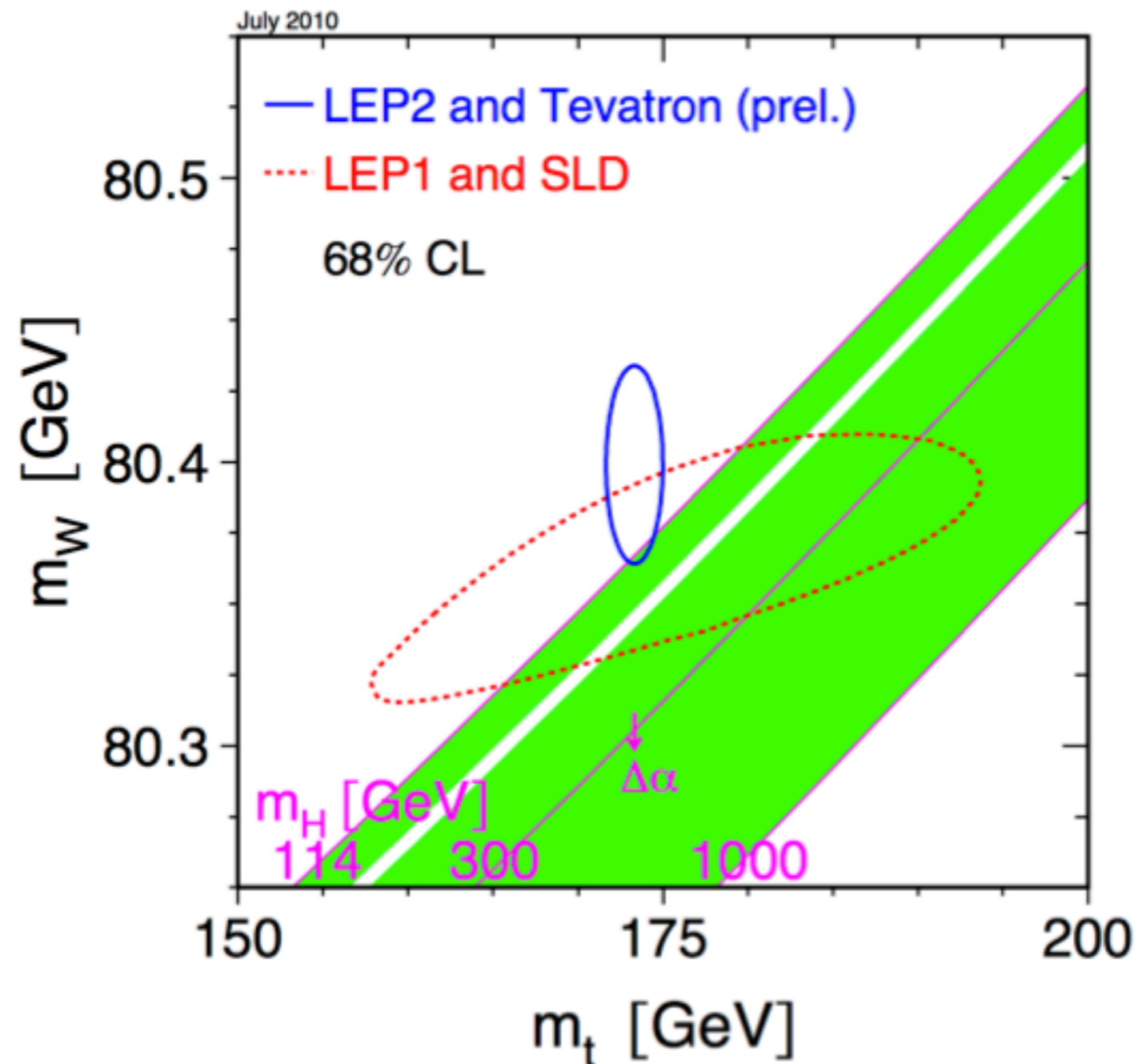
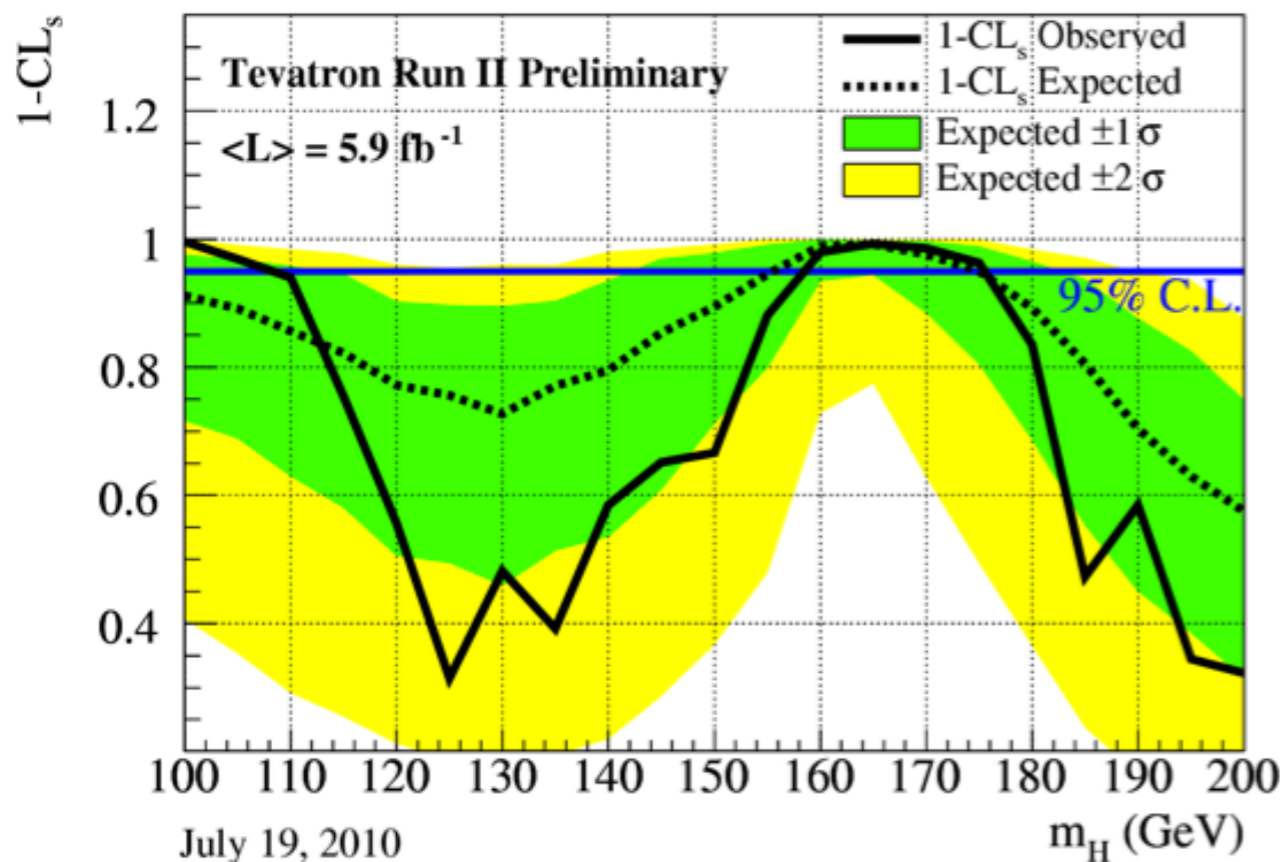


1990s

- ▶ Cominciano i constrain indiretti con la scoperta del quark top e la misura della massa della W e del top

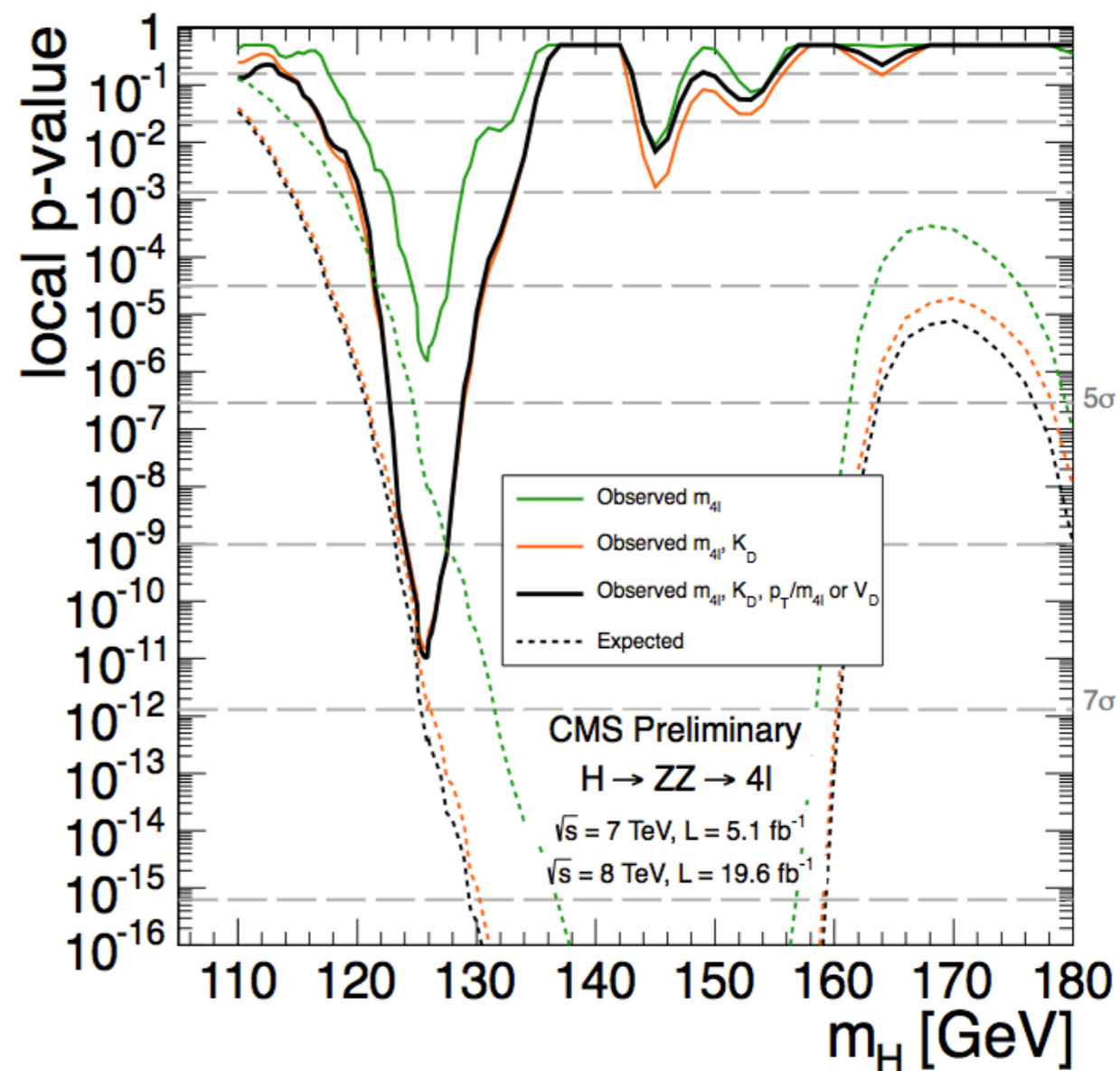
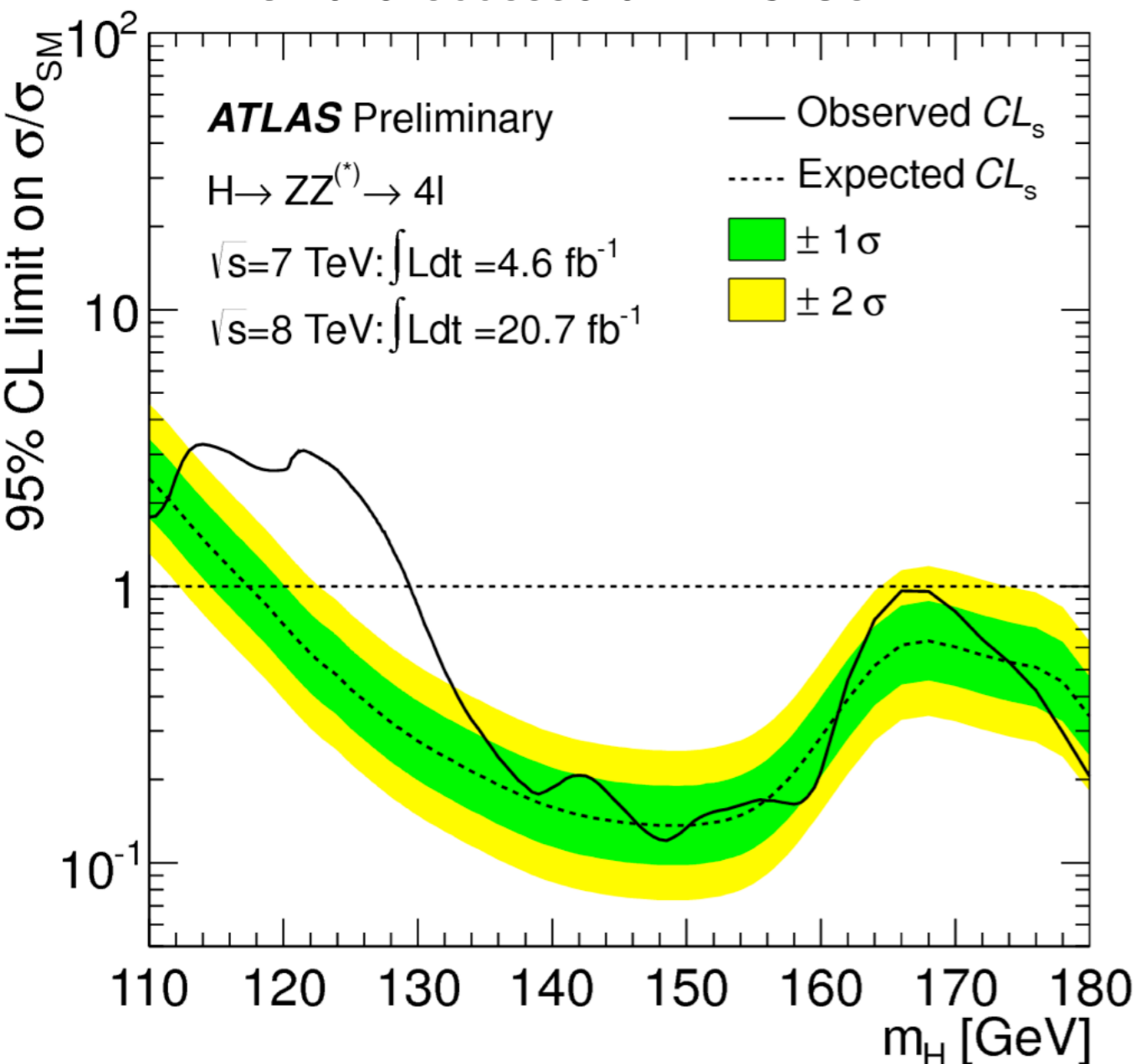


2000s



Limiti e significatività CMS/Atlas H-4l

- ▶ Higgs escluso nel range di massa da ~ 130 a ~ 800 GeV
- ▶ Chiaro eccesso a ~ 125 GeV



- ▶ Probabilità dell'ipotesi "solo fondo"
- ▶ Tra 10^{-10} e 10^{-11} ($6.5-7 \sigma$) per ciascun esperimento per l'eccesso a 125-126 GeV