



Analisi dati: anatomia di una scoperta

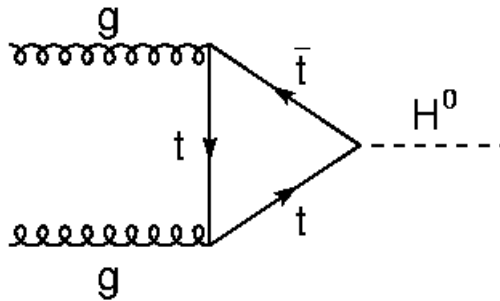
Mario Pelliccioni

INFN Torino

- Vogliamo cercare il bosone di Higgs in un particolare decadimento
 - Prenderò come esempio $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
- Selezione degli eventi
- Caratterizzazione del segnale e del fondo
 - Efficienza, risoluzione sperimentale, eventi attesi
- Misura della sezione d'urto
 - Come stimiamo un eccesso?
- Misura delle proprietà (massa, spin, accoppiamenti)

Il segnale: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

- Bosone di Higgs in collisioni p-p prodotto principalmente in fusione di gluoni



- Secondo contributo (VBF) almeno un'ordine di grandezza minore
- Stato finale contiene quattro leptoni:
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$ (N.B. Anche $e^+ e^- \mu^+ \mu^- \dots$)

Il segnale: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

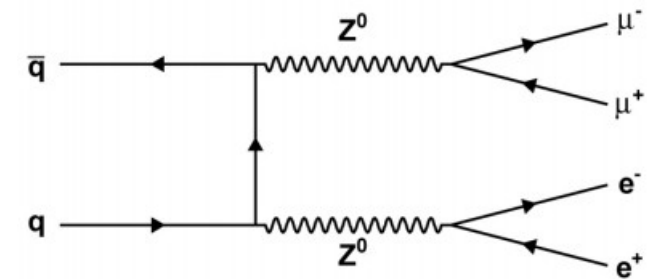
- Stato finale “pulito”
 - L'Higgs viene interamente ricostruito (no τ , no neutrini)
 - La distribuzione di massa invariante dovrebbe mostrare un picco in presenza di segnale
 - Ma il $BR(Z \rightarrow 2l)$ è estremamente basso
 - Efficienza gioca un ruolo fondamentale nell'analisi
 - Entrambe Z on-shell solo se $m_H > 180 \text{ GeV}$
 - Questo ha conseguenze sulla selezione degli eventi
-

I fondi per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

Il fondo principale costituito dalla produzione non risonante di due bosoni Z:

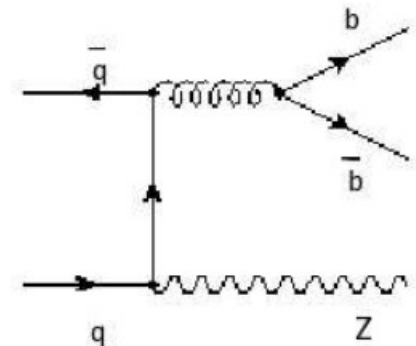
$$ZZ \rightarrow 4l$$

- Fondo topologicamente simile al segnale
- Non può essere rimosso con tagli sulla cinematica → **Fondo irriducibile**



Fondi riducibili

- $Zb\bar{b}$, con leptoni da decadimenti del B
- $t\bar{t} \rightarrow W^+b W^- \bar{b}$, con leptoni da decadimenti del B e del W
 - Contengono 4 leptoni veri nello stato finale
 - Topologia differente rispetto al segnale, facilmente eliminabili



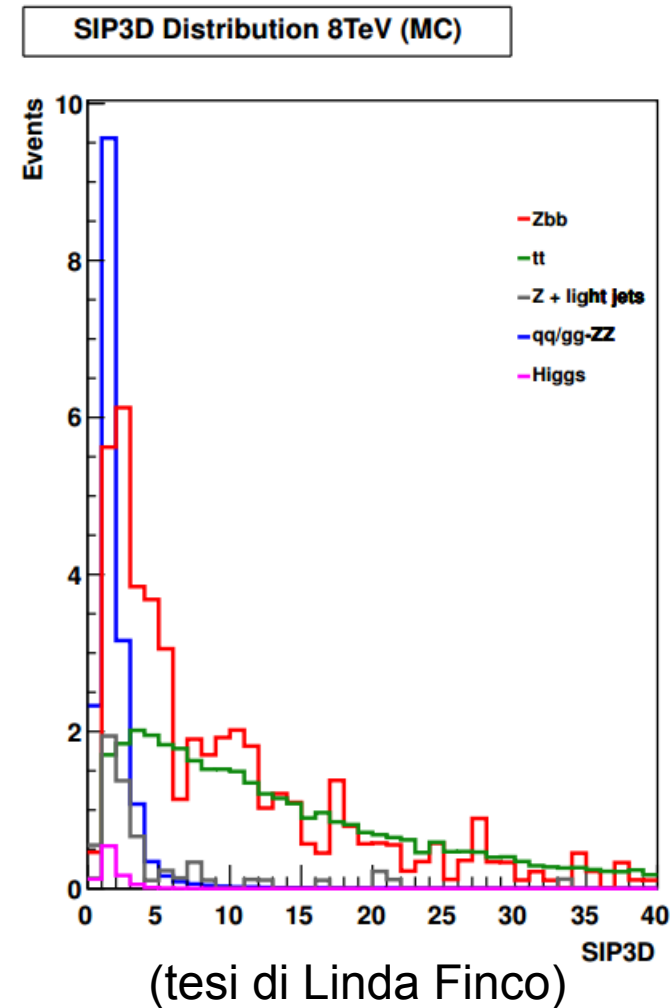
Fondi strumentali

- $Z + \text{jet}$, $WZ + \text{jet}$, con jet misidentificati come leptoni

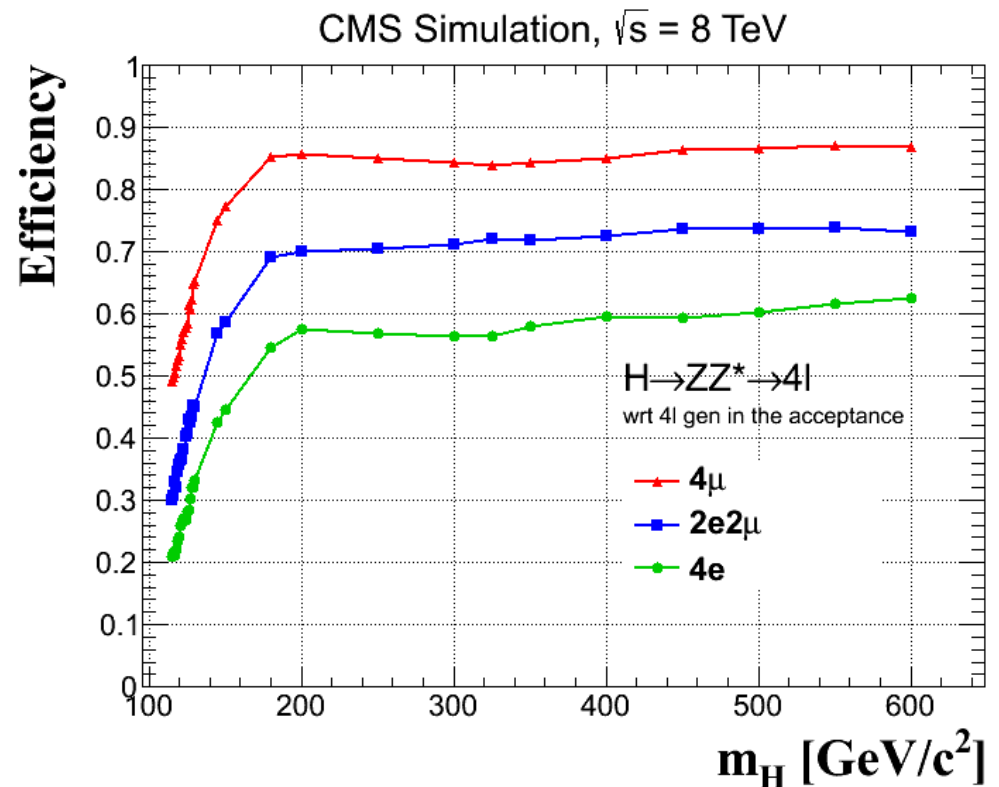
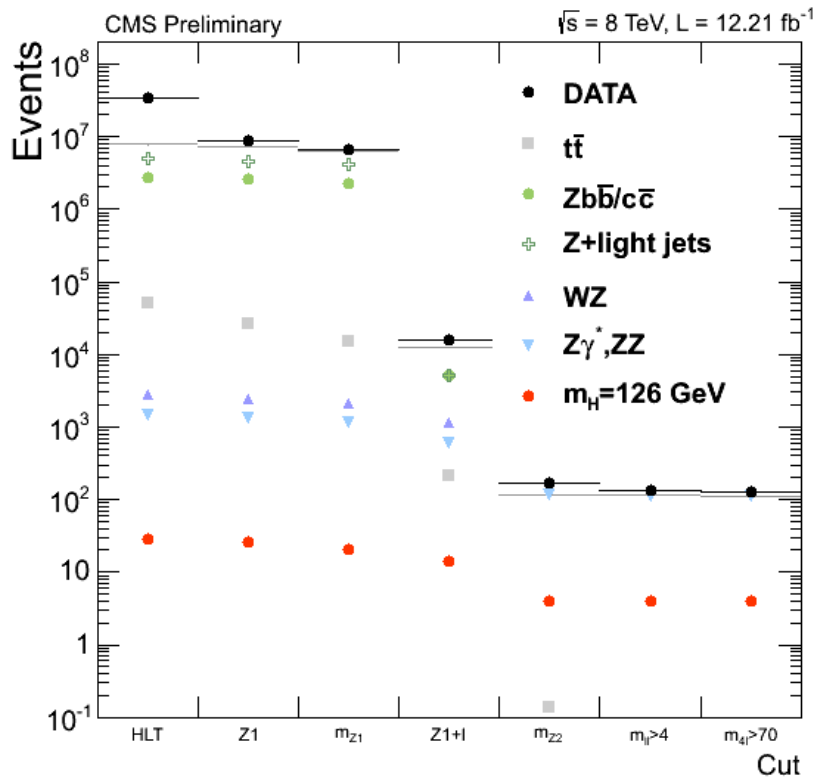
Fondi riducibili e strumentali facilmente eliminabili, ma sezione d'urto grande rispetto al segnale!

Selezione degli eventi

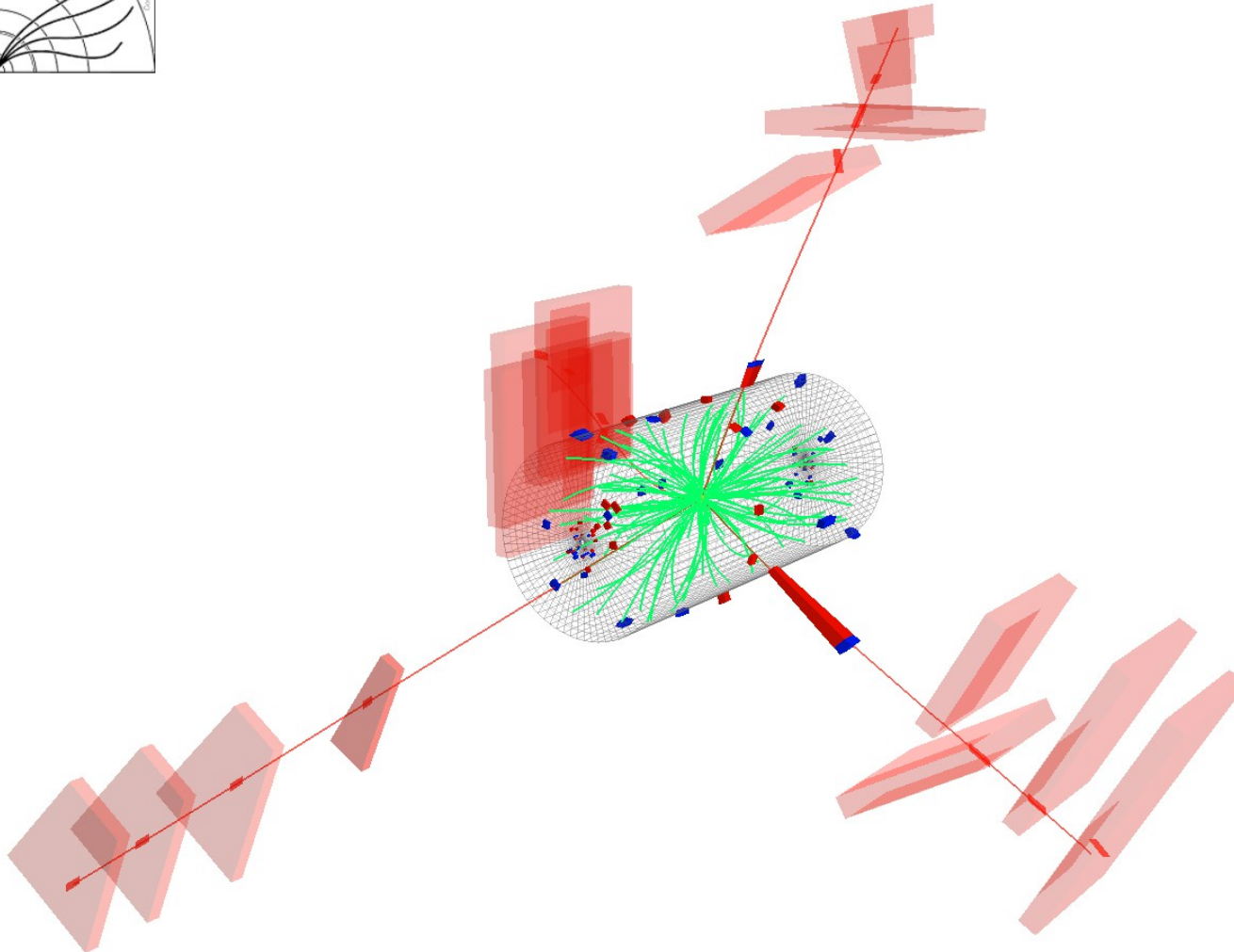
- **Trigger:** richiesta di un evento con almeno
 - Due muoni OR
 - Due elettroni OR
 - Un muone e un elettrone
- Richiesti almeno 4 leptoni con taglio sulla distanza dal vertice primario (**parametro d'impatto**)
 - Elimina fondi riducibili ($Zb\bar{b}$, $t\bar{t}$)
- Richiesta di **isolamento** sui leptoni: taglio sull'energia in un cono attorno al leptone
 - Elimina i fondi strumentali (Z +jets, WZ +jets)



- Selezionati I due leptoni di stesso sapore e segno opposto con m_{l+l-} più vicina alla massa nominale: candidato Z_1
- Selezionata la seconda coppia di leptoni con stesso sapore e segno opposto: candidato Z_2

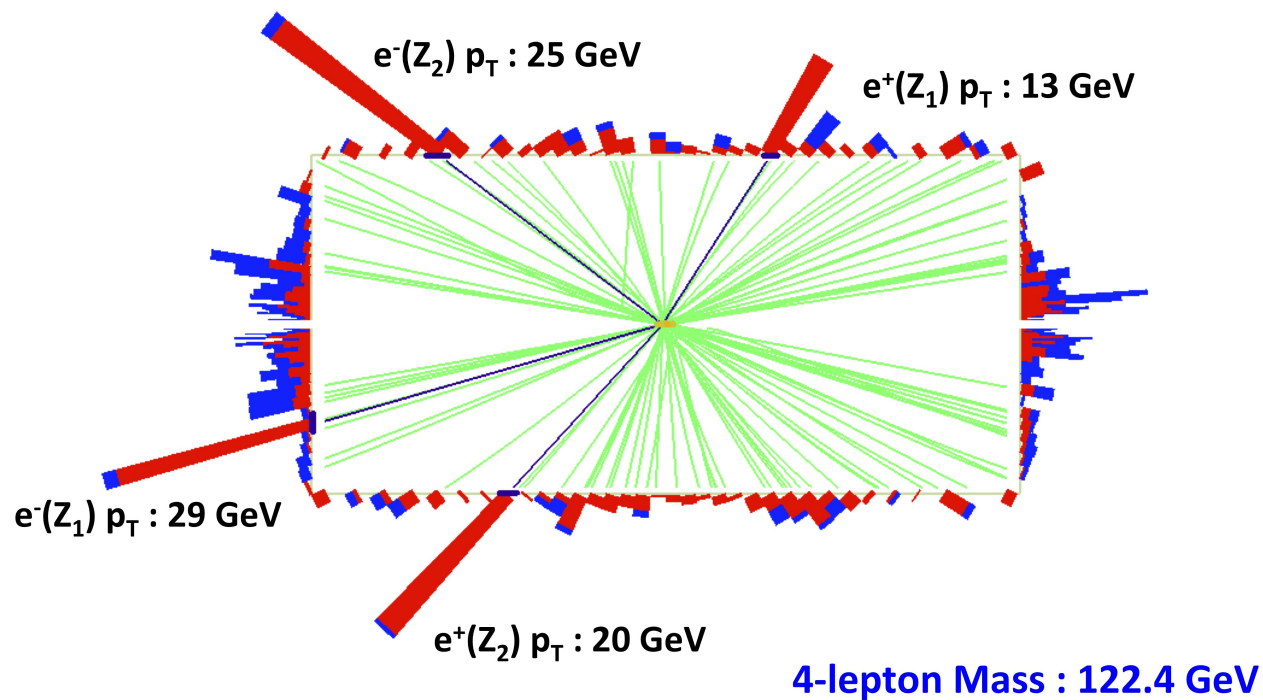


Eventi selezionati: 4μ



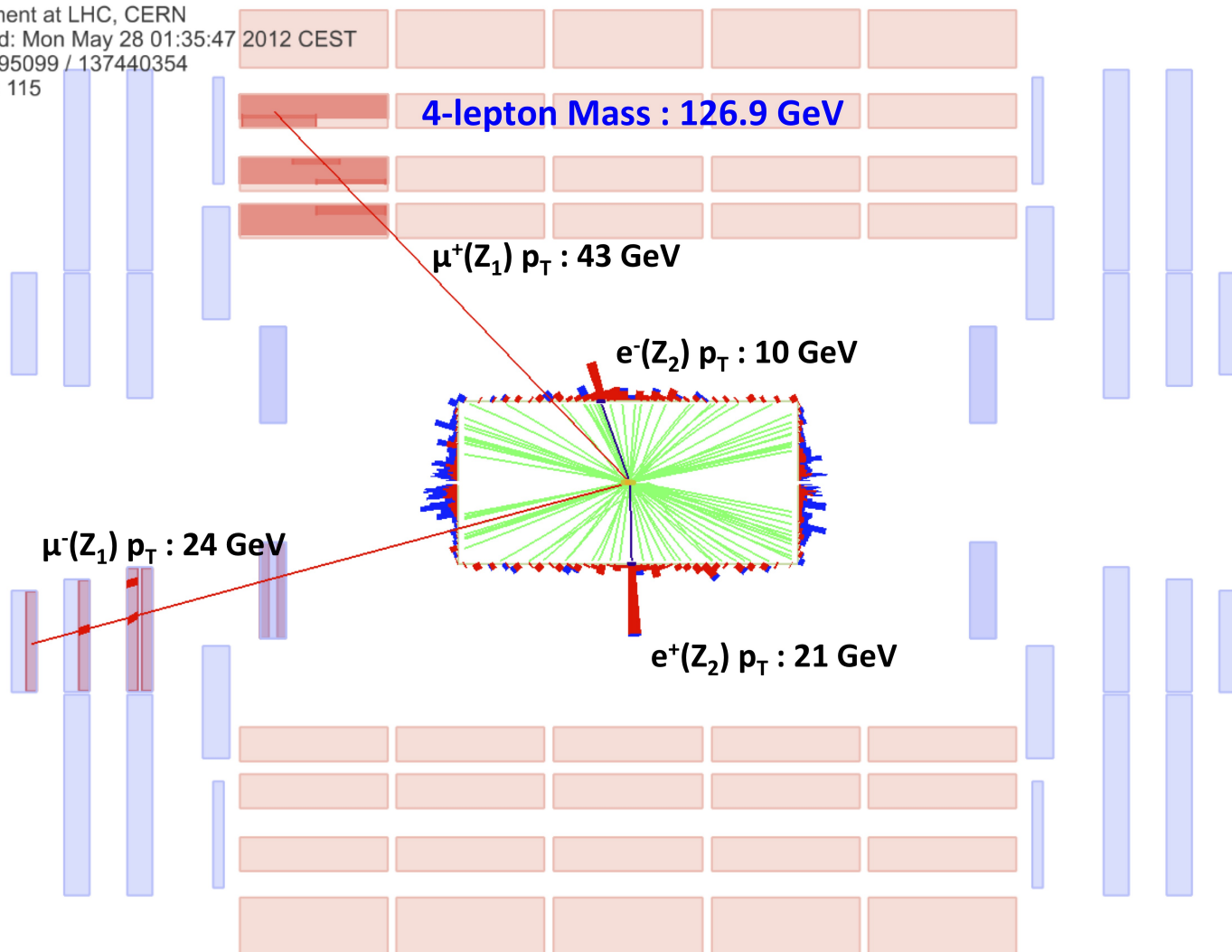
Eventi selezionati: 4e

CMS Experiment at LHC, CERN
 Data recorded: Mon May 7 09:46:20 2012 CEST
 Run/Event: 193575 / 400912970
 Lumi section: 523



Eventi selezionati: $2\mu 2e$

CMS Experiment at LHC, CERN
 Data recorded: Mon May 28 01:35:47
 Run/Event: 195099 / 137440354
 Lumi section: 115



Caratterizzazione di segnale e fondo

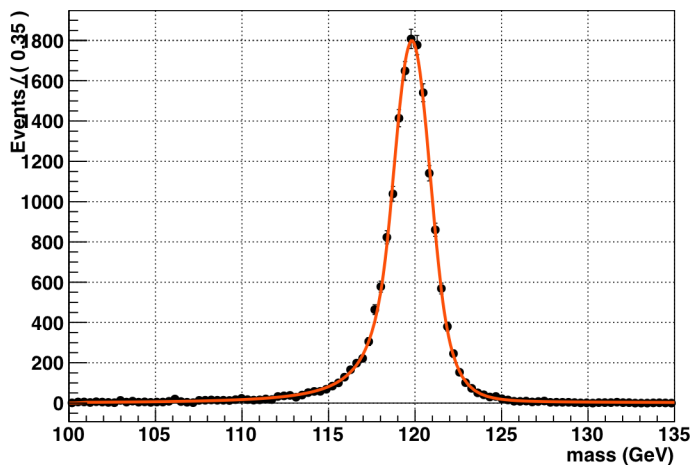
Caratterizzazione del segnale

- Vogliamo individuare un picco corrispondente ad un nuovo segnale su un intervallo di massa invariante molto grande (100-1000 GeV)
- Simulazioni MC per caratterizzare la **forma del segnale** sullo spettro di massa
 - Dobbiamo avere campioni MC con diverse ipotesi di massa per l'Higgs nell'intervallo studiato
 - Fit alla distribuzione di massa ricostruita dal MC
- **Numero di eventi attesi:**
 - sezione d'urto e branching ratio forniti dall' Higgs Cross Section Working Group
 - MC ripesato per sezione d'urto, applicati i tagli di selezione

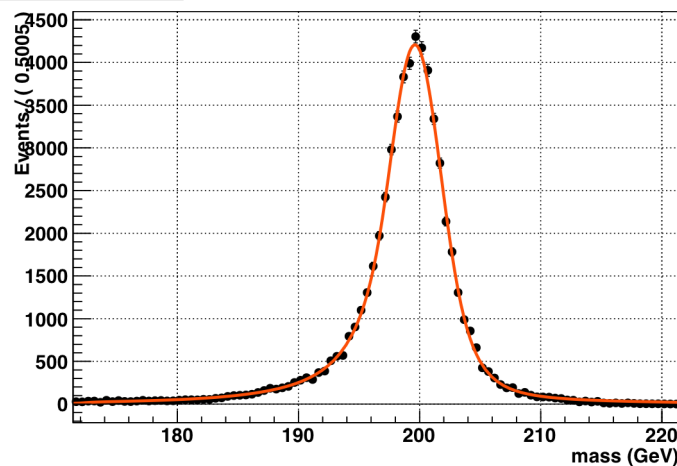
$$N_{\text{exp}} = L * \sigma_{pp \rightarrow HX} * BR(H \rightarrow 4l) * \epsilon_{4l}$$

Descrizione della forma del segnale

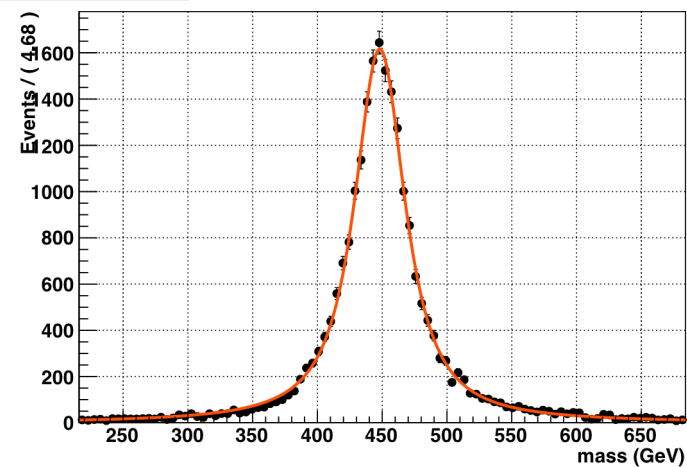
$4\mu, m_H = 120 \text{ GeV}$



$4\mu, m_H = 200 \text{ GeV}$



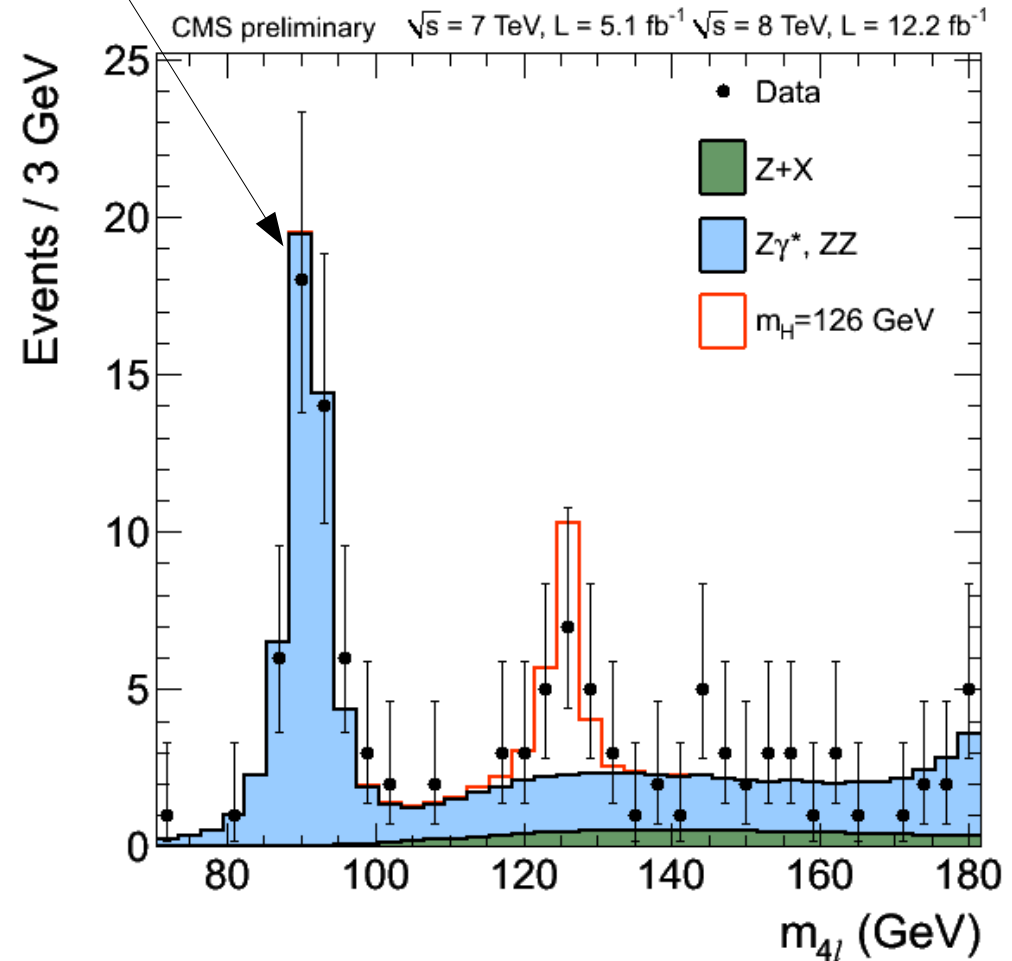
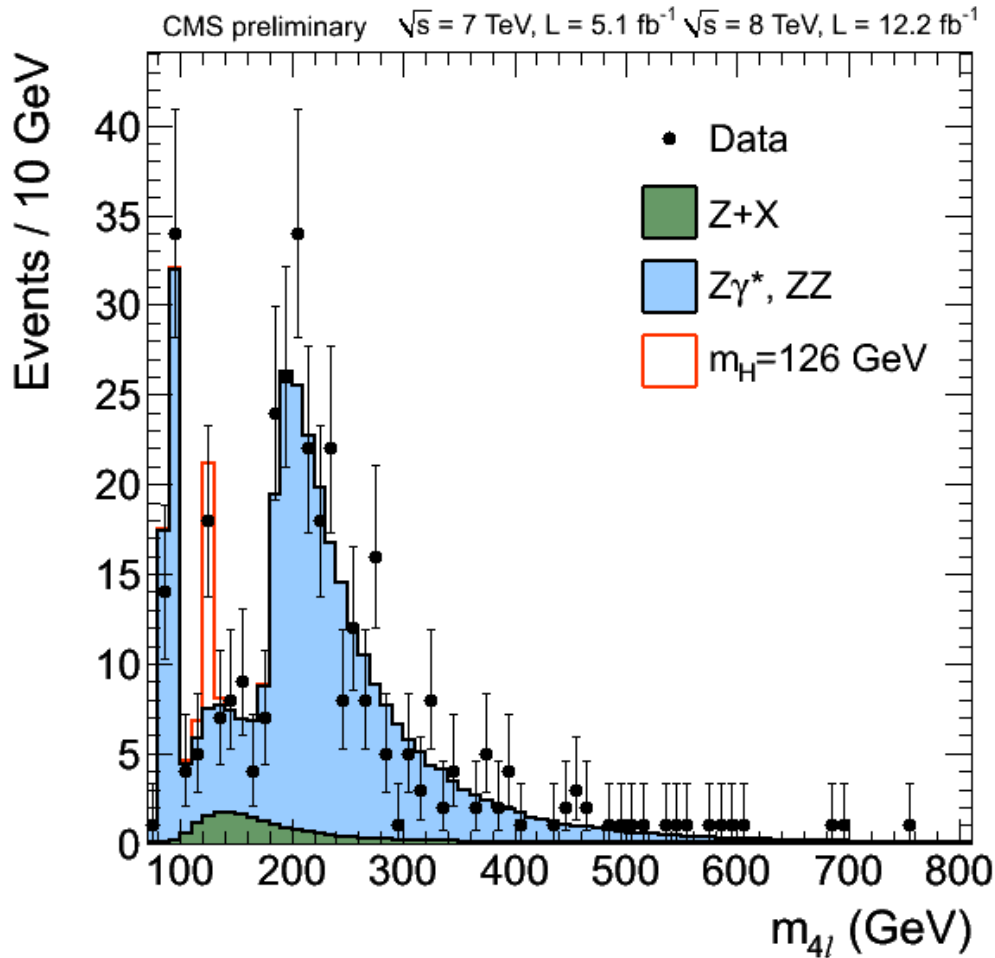
$4\mu, m_H = 450 \text{ GeV}$



- **Fondo irriducibile** $ZZ \rightarrow 4l$
 - Forma del segnale estratta da un fit al campione MC
 - Numero di eventi attesi: sezione d'urto fornita dall'Higgs Cross Section Working group (correzioni NNLO)
- **Fondo riducibile** ($Zb\bar{b}$, $t\bar{t}$) e **strumentale** (Z +jets):
 - Si rilassano le richieste su isolamento e parametro d'impatto per i muoni di Z_2
 - Si richiedono due leptoni con stessa carica per Z_2 , poi si usa probabilità di misidentificazione per stimare nella regione di segnale
 - Si invertono i tagli su isolamento e parametro d'impatto

Spettro di massa invariante

$Z \rightarrow 4l$



Interpretazione dei risultati

Limite superiore per la sezione d'urto

- Dato lo spettro di massa invariante, vogliamo stimare il limite alla sezione d'urto * BR per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
 - Abbiamo stimato il numero di eventi attesi per il fondo SM
- Consideriamo 183 ipotesi di massa per l'Higgs sull'intervallo 110-1000 GeV
- Per ogni valore di massa considerato, viene fatto un fit di likelihood

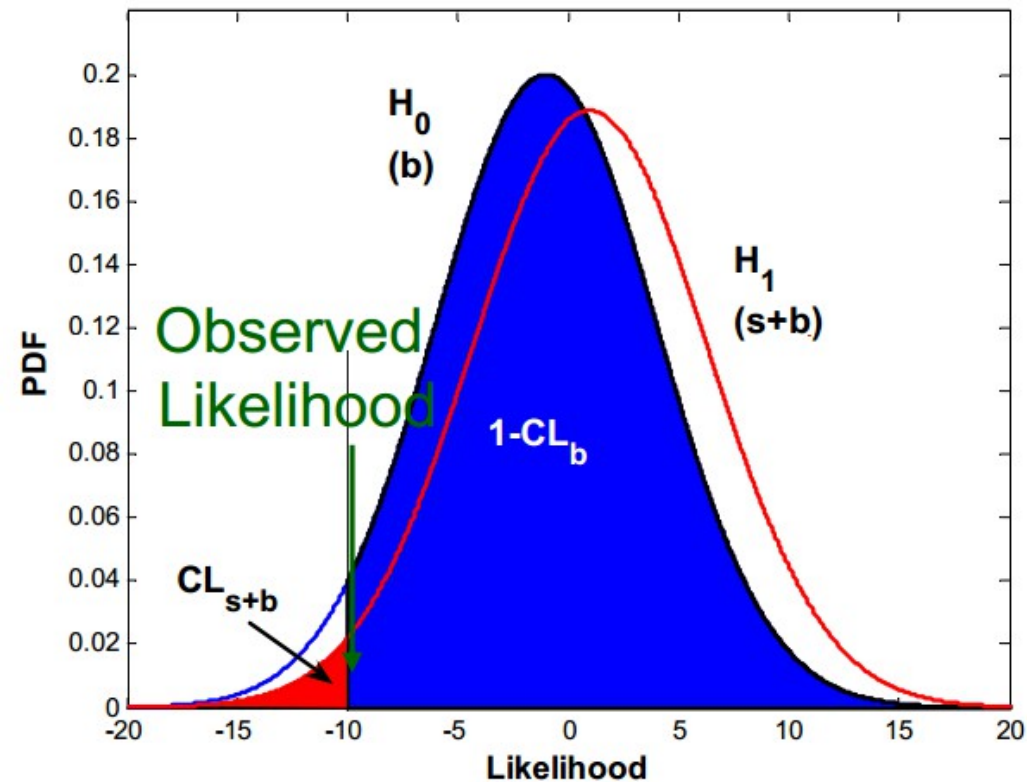
...e viene calcolato un limite alla sezione d'urto di segnale...

Calcolo dell'UL

- $H_0 \rightarrow$ solo background
- $H_1 \rightarrow$ Higgs + background
- Si varia la sezione d'urto del segnale finchè

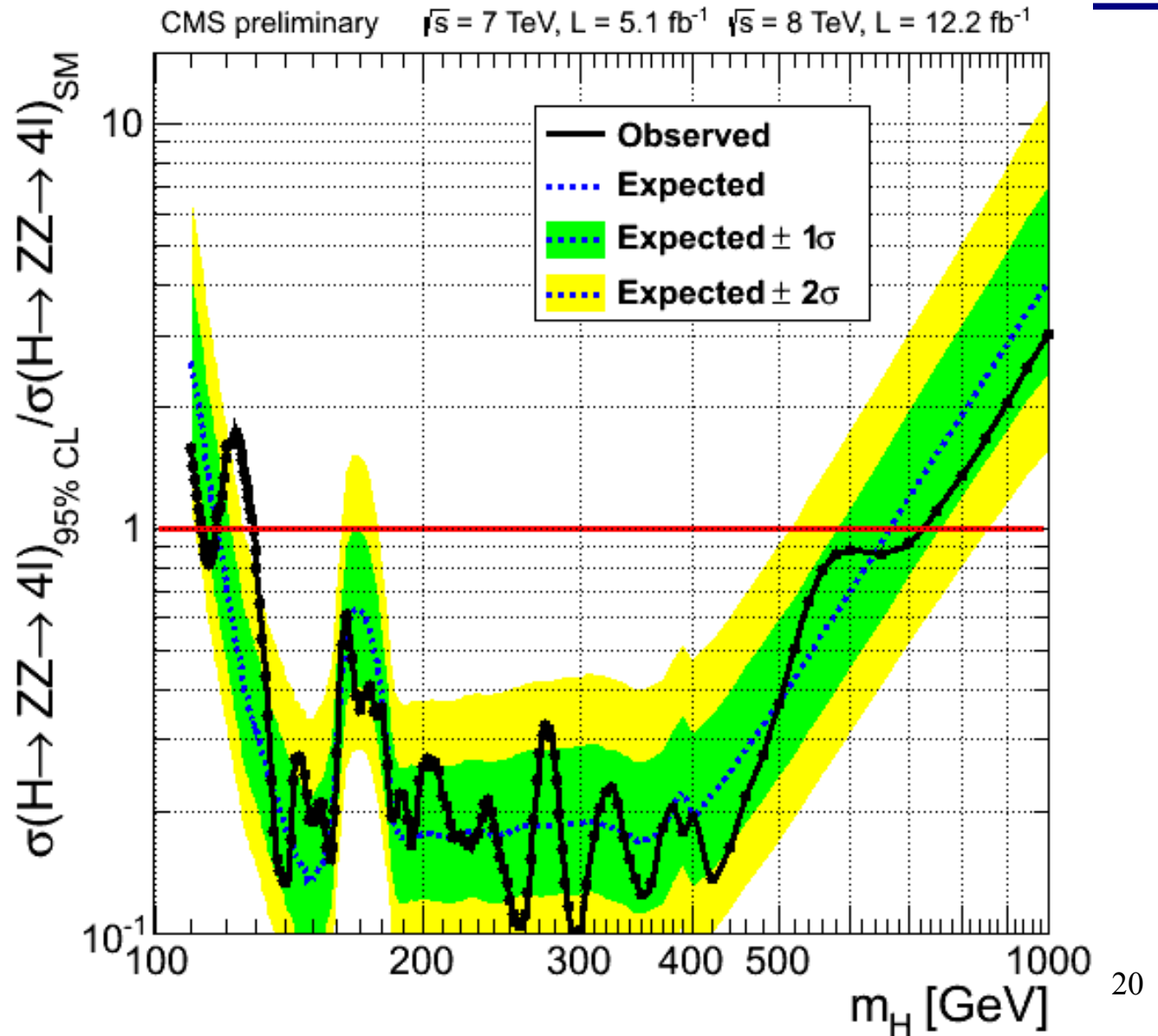
$$CL_{s+b} / CL_b = 0.05$$

- Questo valore rappresenta il limite superiore alla sezione d'urto al 95%

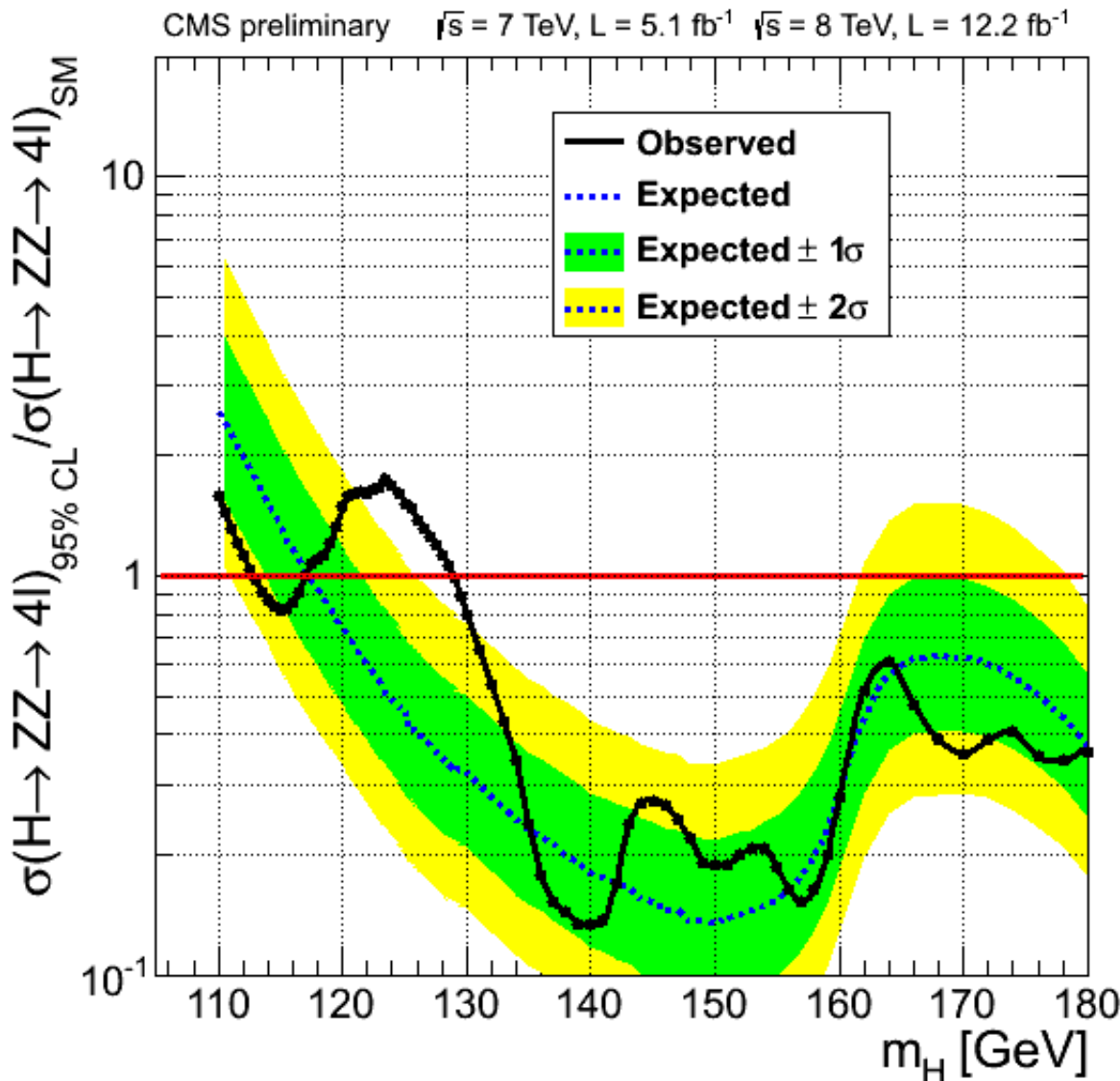


Limite superiore per la sezione d'urto

Limite normalizzato alla sezione d'urto SM per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

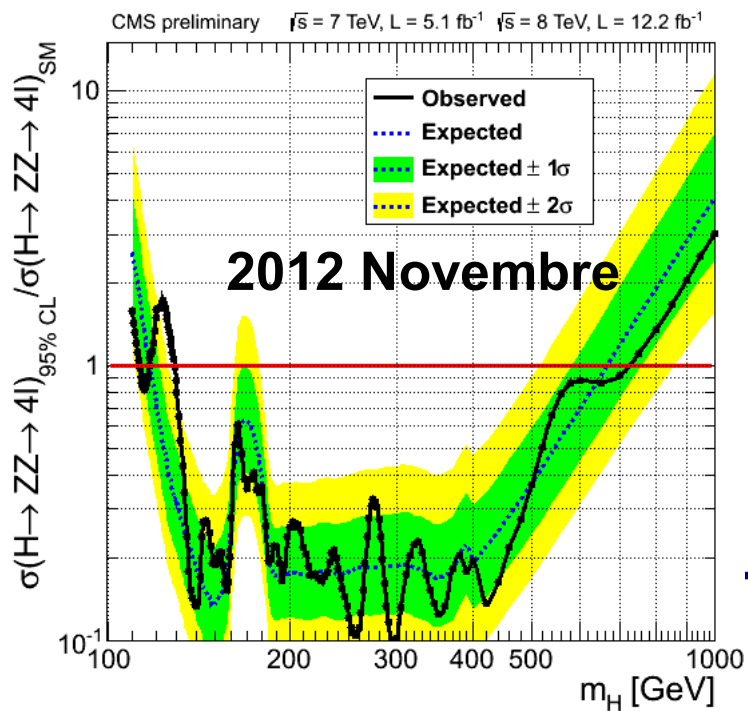
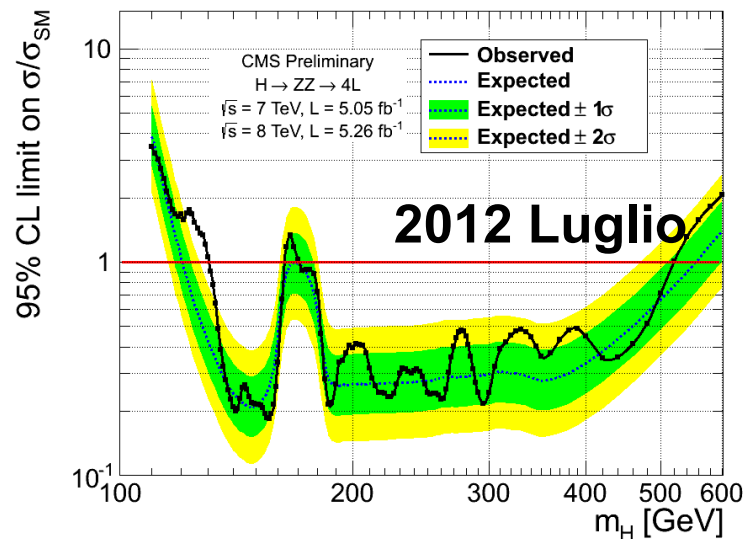
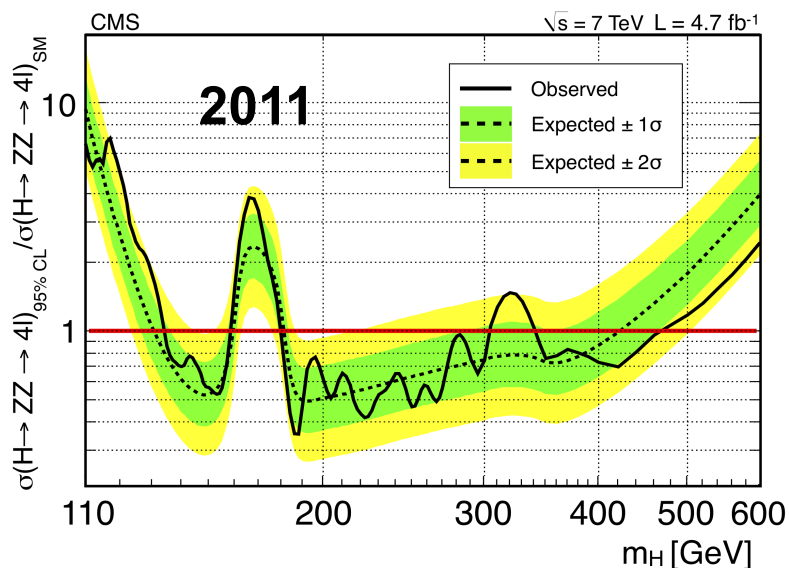


Zoom nel range 110-180 GeV



- Eccesso visibile nella regione $\sim 126 \text{ GeV}$
- Come stimare l'eccesso?

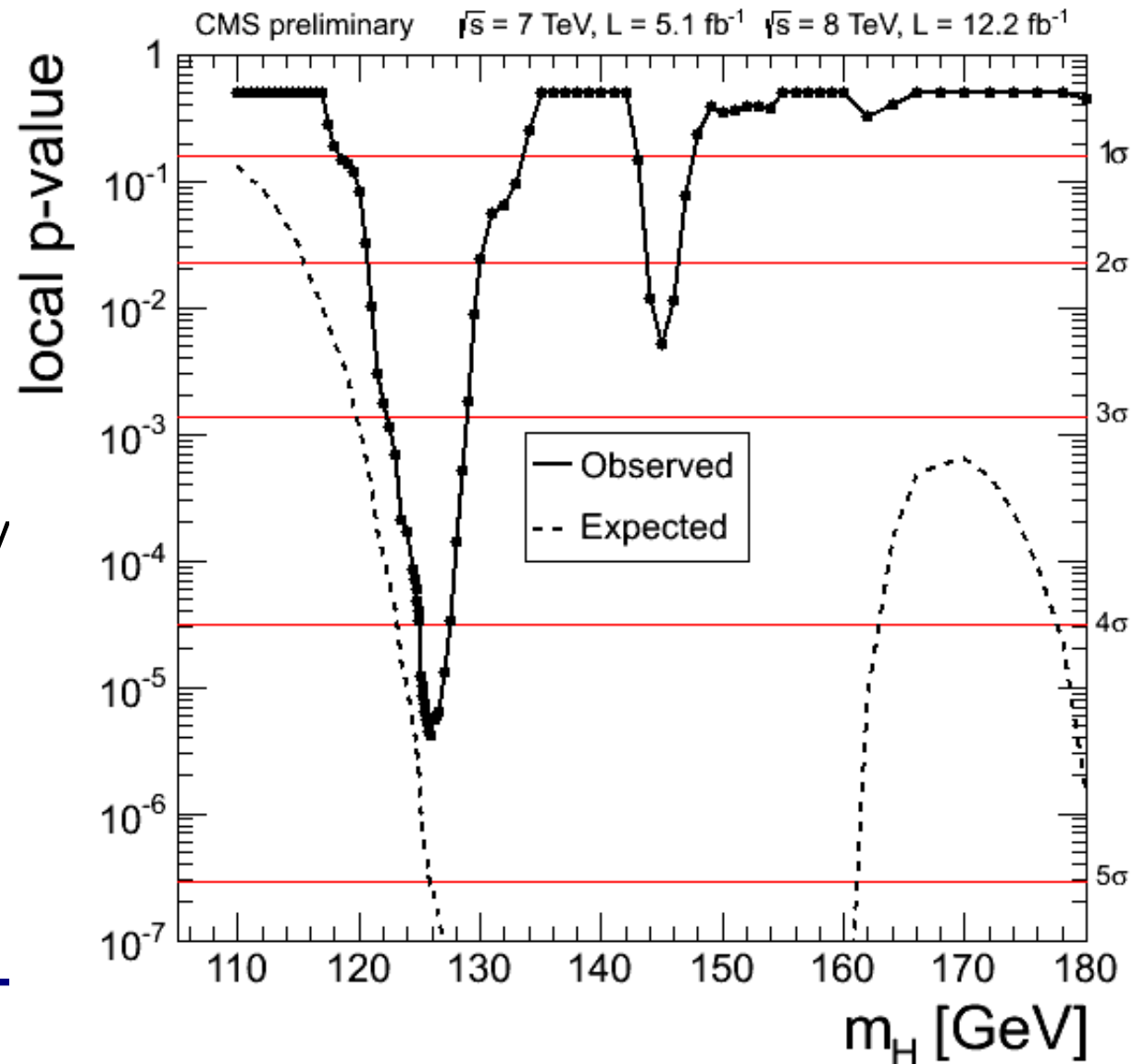
Limite superiore nel tempo



Stima del p-value

- Stimiamo probabilità che il fondo abbia subito un'oscillazione statistica tale da mostrare l'eccesso
- Questo in pratica è $1-CL_b$
- Il minimo e' situato a ~ 125.9 GeV
- Il p-value nel minimo corrisponde ad una **significanza di 4.5σ**
- **Signal strength** a 126 GeV:

$$\mu = 0.80^{+0.35}_{-0.28}$$



Incertezze sistematiche

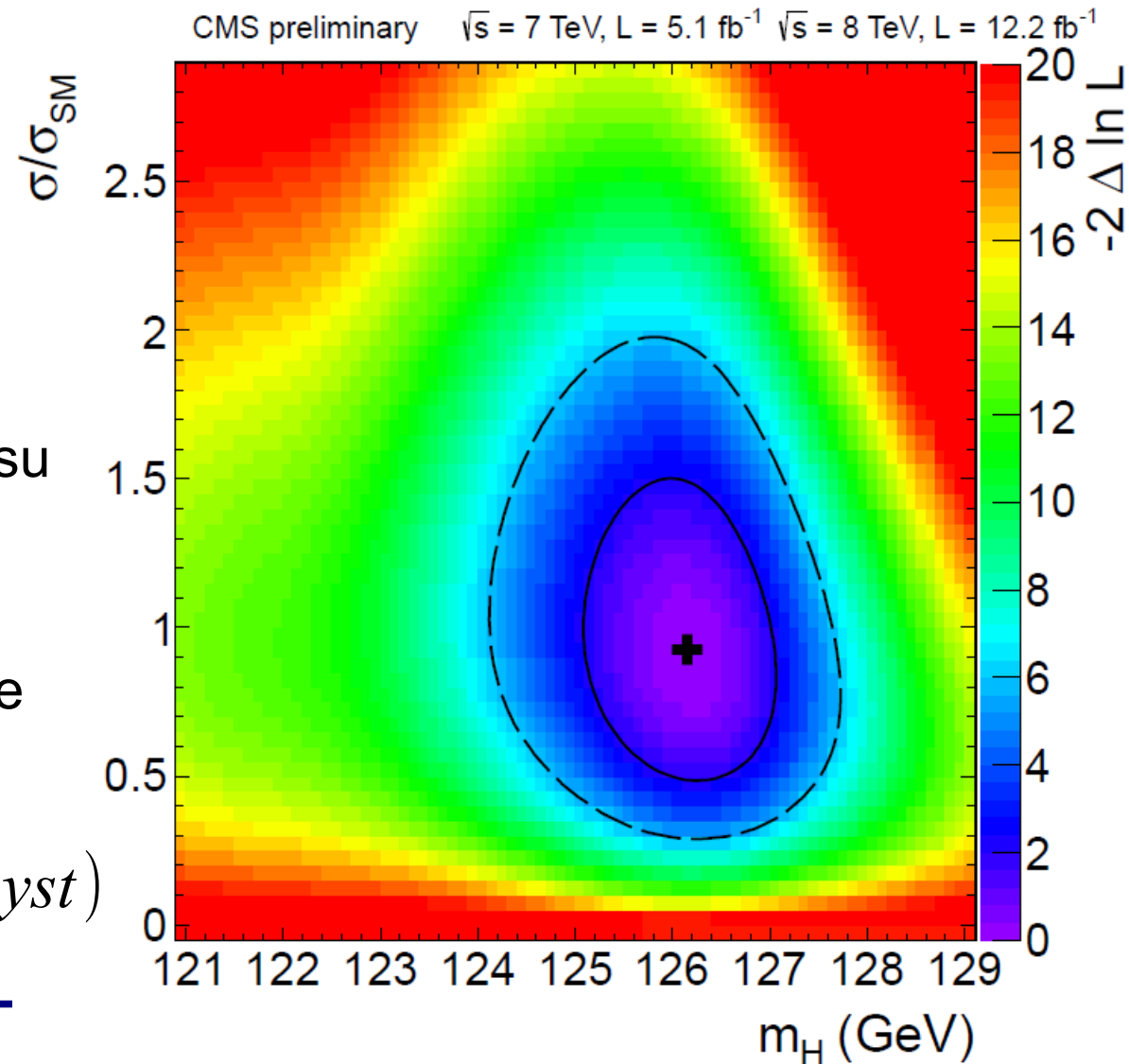
- Il maggior contributo proviene da incertezze teoriche sulla sezione d'urto
 - A 8 TeV, incertezza a 126 GeV $\sim 15\%$
 - Di cui $\sim 7\%$ da QCD scale e $\sim 7\%$ da PDF
- Sistemati sperimentali
 - Efficienza reco/ID muoni e elettroni (MC) $\sim 3\% - 8\%$
 - Luminosità $\sim 2\%$
 - Fondi riducibili $\sim 50\%$ (N.B. Contributo piccolo)
 - Trigger $\sim 2\%$

Misura delle proprietà

Misura della massa

- Per $m_H \sim 126$ GeV, risoluzione sperimentale dominante
 - $\Gamma_H \sim 4$ MeV, $\sigma_{4l} \sim 1$ GeV
- Errori su m_H evento per evento
 - Propaghiamo le incertezze su p_i alla massa invariante misurata
- Scan della likelihood in funzione di m_H e sezione d'urto

$$m_H = 126.2 \pm 0.6 (stat) \pm 0.2 (syst)$$

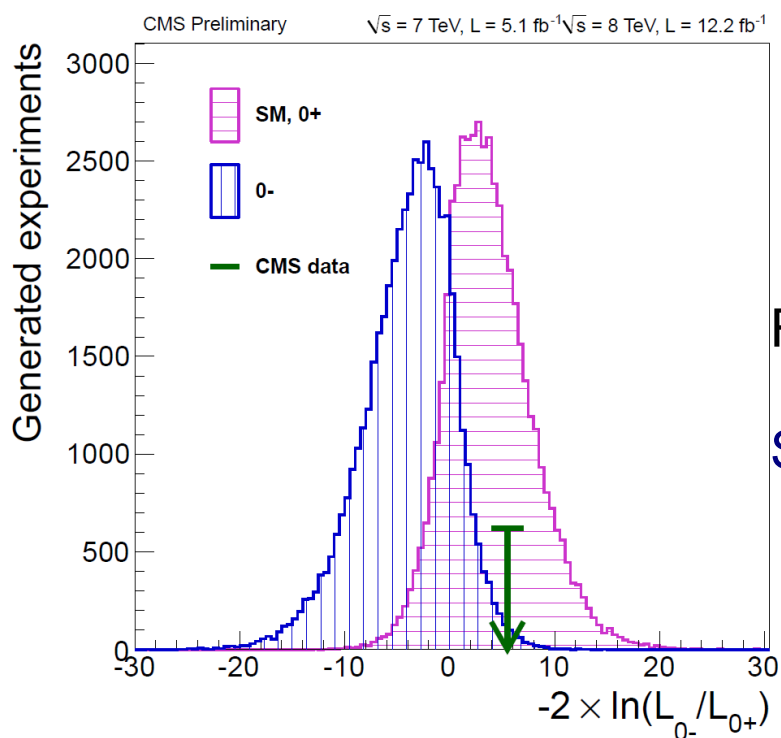
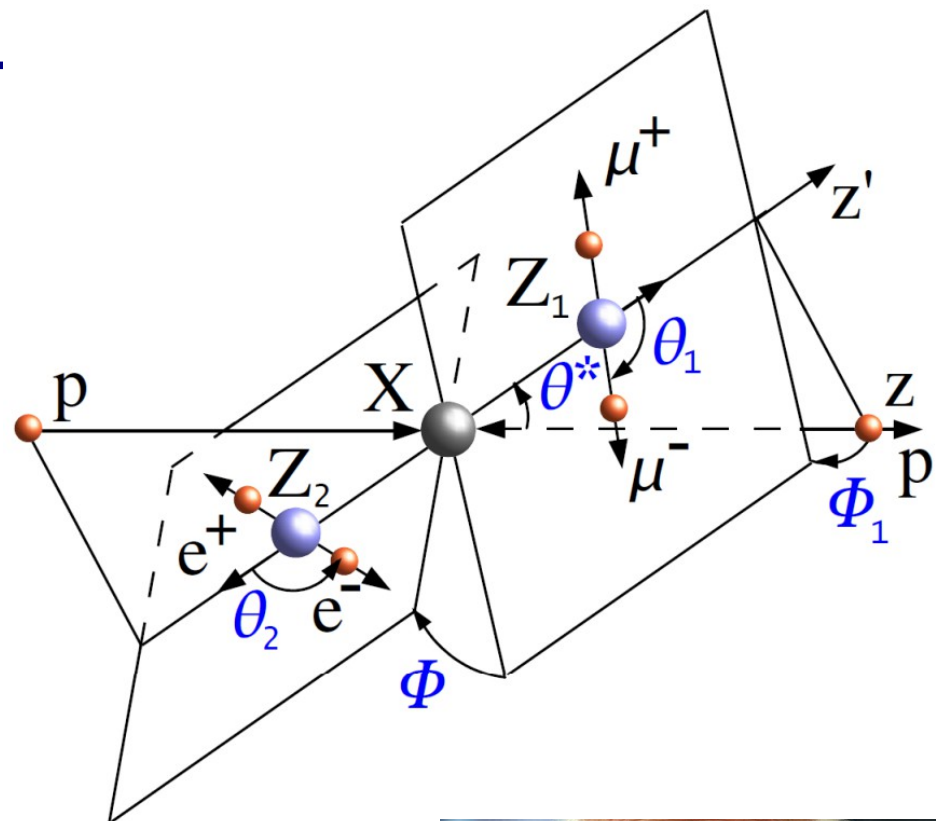


Il bosone osservato è veramente l'Higgs?

- Come possiamo dire che il bosone che abbiamo osservato è l'Higgs?
- Spin
 - Non può avere spin 1 perchè osservato $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - Discriminare tra spin 0 e spin 2
- Parità
 - Se SM Higgs, il bosone osservato è scalare
- Accoppiamenti

Misura della parità

- Discriminare 0^+ da 0^- utilizzando distribuzione angolare dei prodotti del decadimento
- Viene costruito un discriminante cinematico (KD) che contiene tutti gli angoli rilevanti
- Fit a $\{m_{4l}, \text{KD}\}$ per separare segnale da fondo



Risultato consistente con 0^- a 2.4σ

Scenario 0^- escluso con $CL > 95\%!!$



- Analisi dei dati di collisioni p-p a 7 e 8 TeV
- Determinato un limite alla sezione d'urto di produzione di Higgs nell'intervallo 110-1000 GeV
- Evidenza di un eccesso con $m_H \sim 126$ GeV a 4.5σ
- Misura della massa
- Esclusa l'ipotesi 0^- al 95% CL
- Discriminazione spin 0/2 sarà possibile solo con ulteriore statistica