



# Ricerca del bosone di Higgs del Modello Standard a LHC

Matteo Sani  
University of California, San Diego



# Sommario



- 1) Il bosone di Higgs a LHC:
  - a- sezione d'urto
  - b- canali di decadimento
- 2) Massa del bosone di Higgs
- 3) Strategie di ricerca
- 4) Analisi e misura dei parametri
- 5) Conclusioni

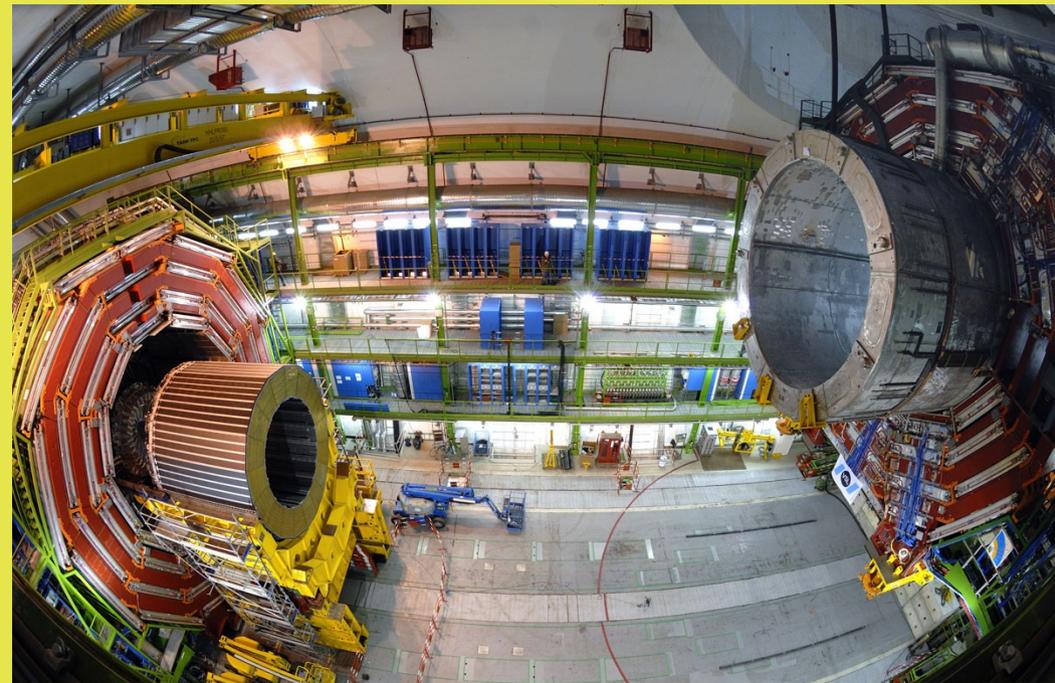


# Motivazioni

→ Perché cercare il bosone di Higgs ?

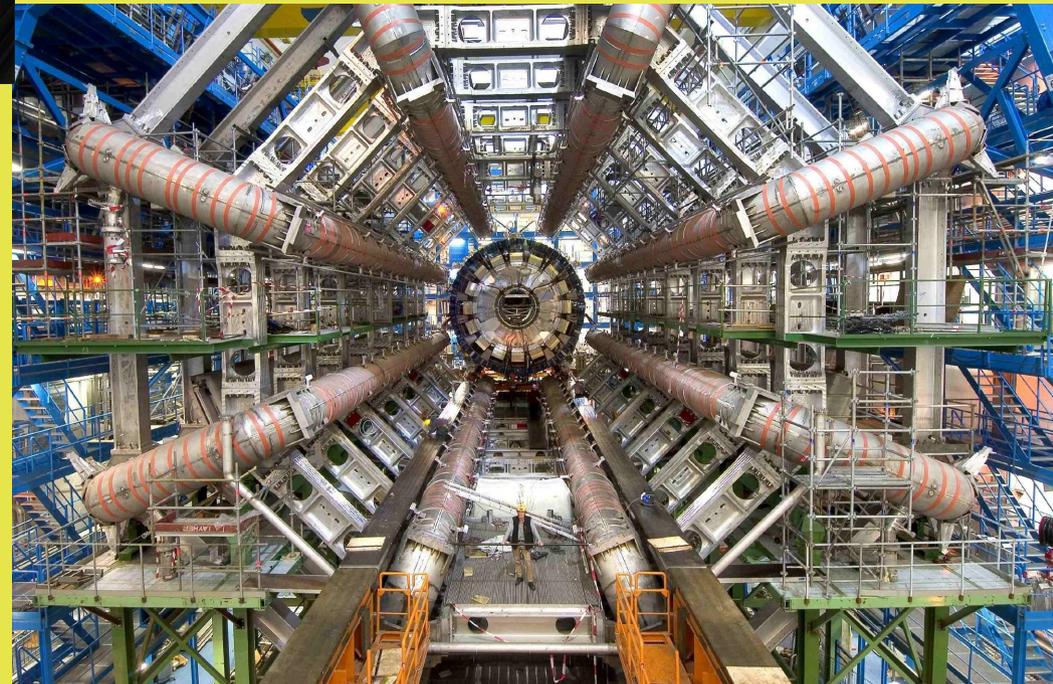
- E' l'anello mancante del Modello Standard !
- La sua eventuale scoperta e lo studio delle sue proprietà potrebbe portare alla comprensione dell'origine della massa delle particelle elementari.

# ATLAS & CMS

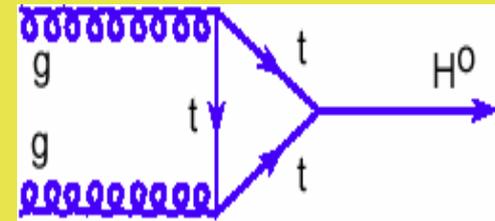


*La prima meta` di CMS e` stata calata a P5 dopo i soddisfacenti risultati del Magnet Test (raggiunti 4T).*

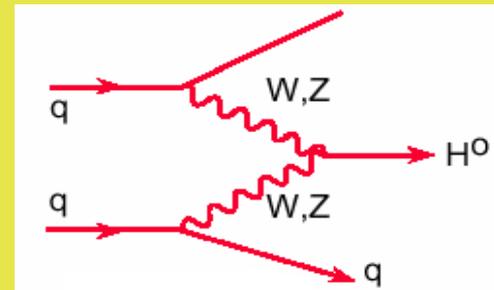
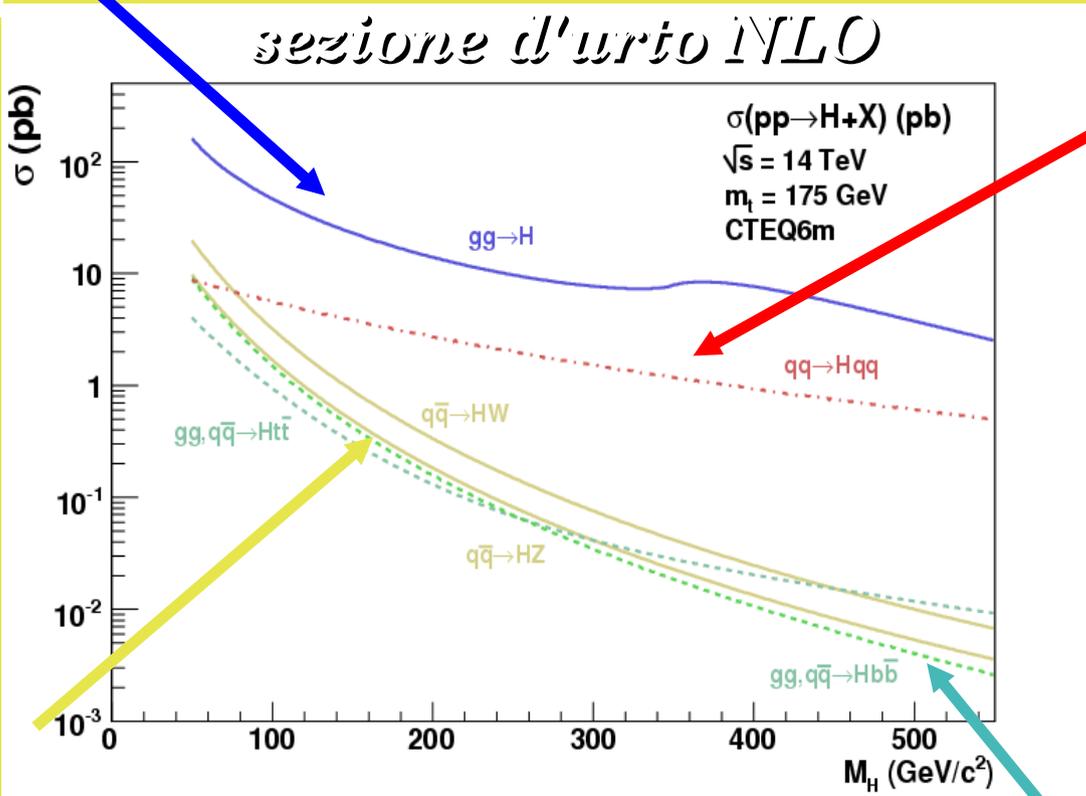
*ATLAS sta seguendo una diversa strategia: il rivelatore viene assemblato direttamente a P1.*



# Produzione dello SM Higgs a LHC

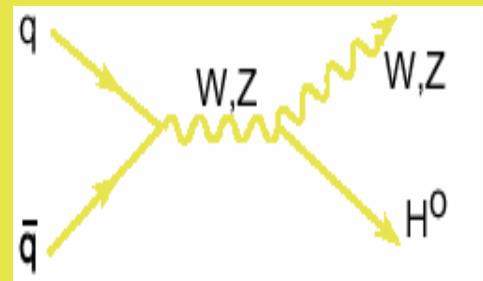


gluon fusion  
processo  
dominante

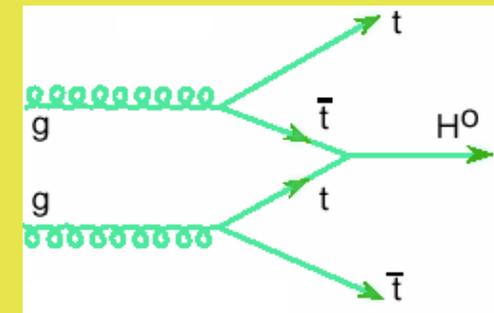


**W,Z fusion  
importante  
a masse elevate:**

- **~1/10 a 200 GeV**
- **~1 a 1 TeV**



produzione associata  
nella regione  
di bassa massa



**tt-fusion**

# Canali di decadimento

→  $M_H < 130 \text{ GeV}/c^2$ :

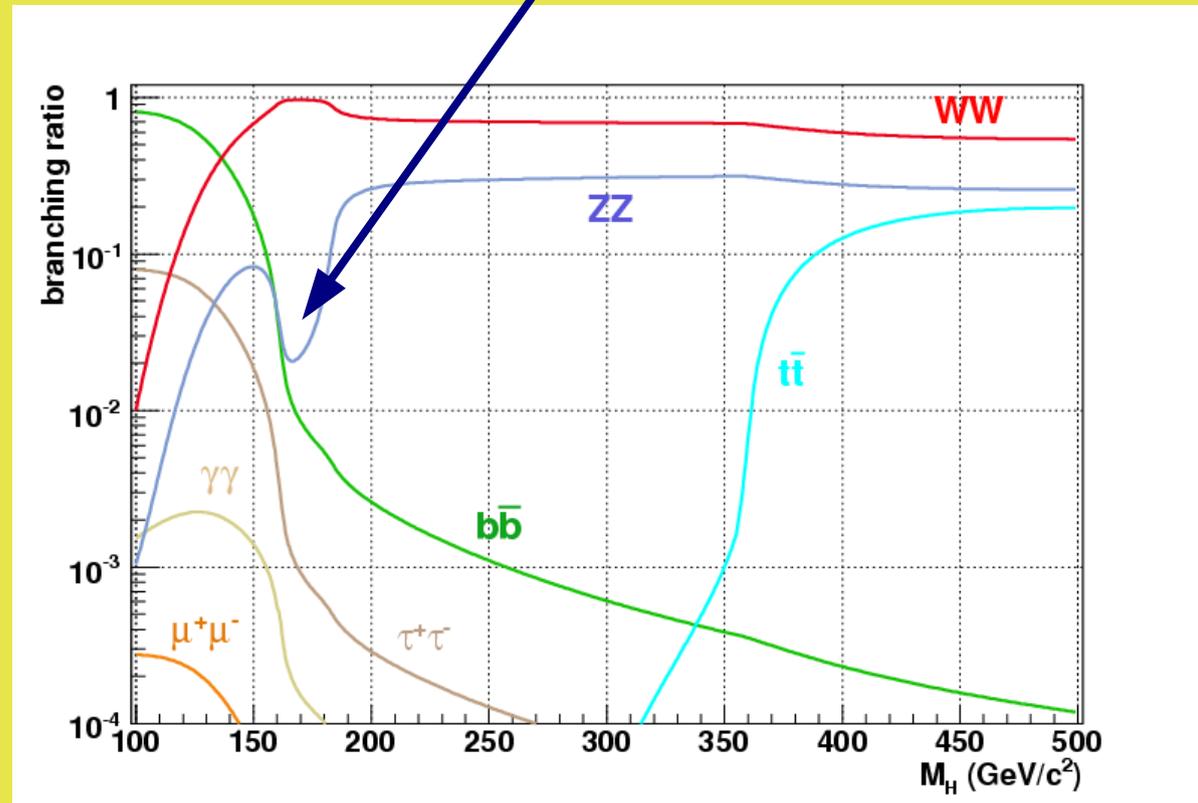
- decadimento in una coppia  $bb$  dominante

→ Fondo QCD troppo elevato:

- nessuna speranza di estrarre uno stato finale completamente adronico
- ricerca di stati finali con  $l$  ( $e, \mu$ ),  $\gamma$

→  $M_H > 180 \text{ GeV}/c^2$ : canali principali  $WW$  e  $ZZ$ .

*Evidente  
diminuzione nel  
BR del canale  $ZZ$   
quando  $M_H \sim 2M_W$*



# Massa del bosone di Higgs

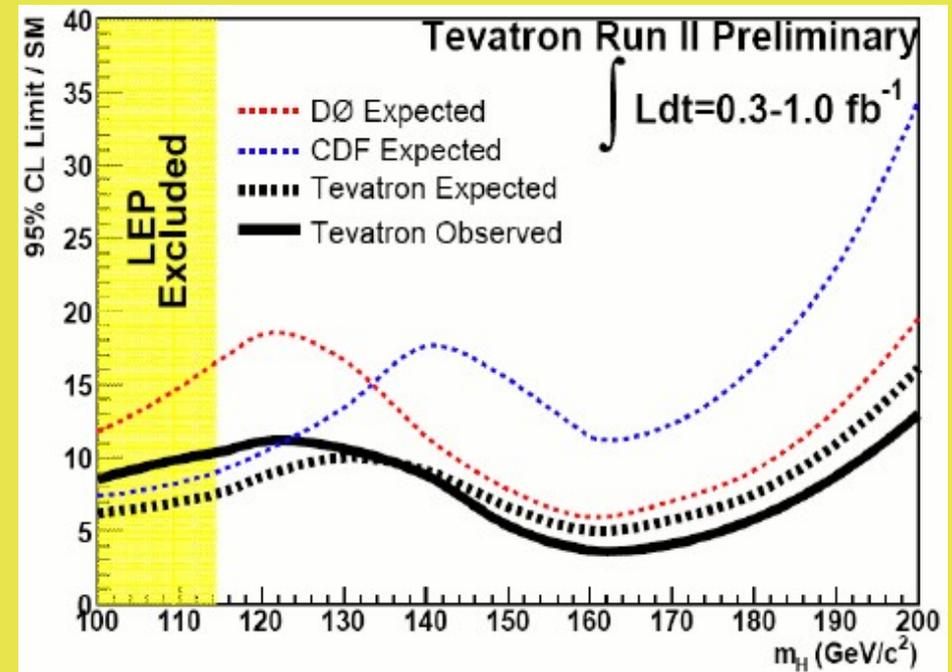
→ Qual'è la massa del bosone di Higgs ?

→ Ricerche dirette a LEP hanno dato risultati negativi:

- SM Higgs:  $M_H > 114.1 \text{ GeV}/c^2$  @ 95 % C.L.

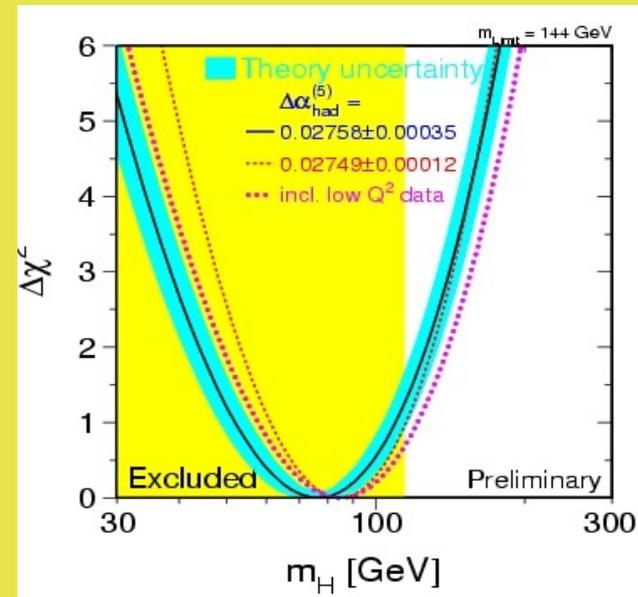
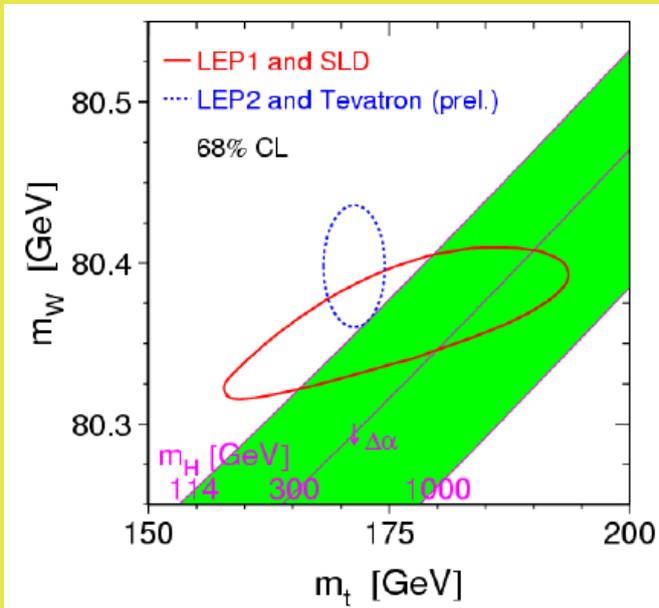
→ Tevatron:

- i risultati più recenti mostrano come ci si avvicini ad all'esclusione di un bosone di Higgs con massa tra 160 e 170  $\text{GeV}/c^2$ .



# Limiti indiretti

- La richiesta che il potenziale di Higgs rimanga finito conduce al limite superiore di  $M_H < 1 \text{ TeV}/c^2$ .
- Nuova stima della massa del quark top  $170.9 \pm 1.8 \text{ GeV}/c^2$  e la nuova misura di  $M_W$  portano a nuovi limiti alla massa del bosone di Higgs:
  - $M_H < 144 \text{ GeV}/c^2 @ 95\% \text{ C.L.}$  ( $182 \text{ GeV}/c^2$  se si include LEP).



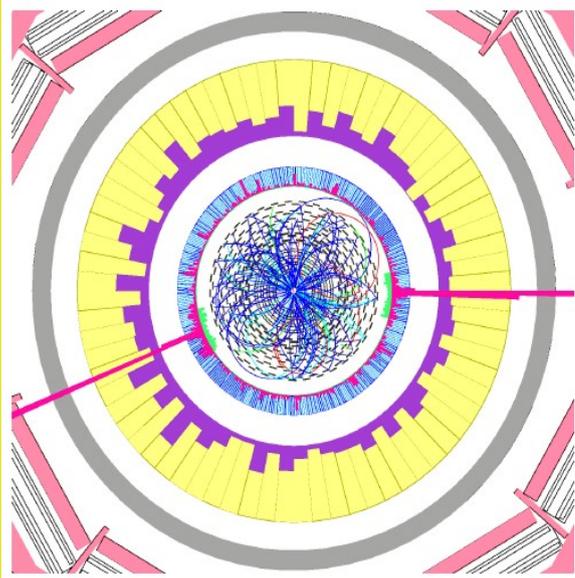


# Canali di ricerca dello SM Higgs

→ Principali canali di scoperta:

- $100 \text{ GeV}/c^2 < M_H < 150 \text{ GeV}/c^2$ :
  - $H \rightarrow \gamma\gamma$  (piccolo BR,  $\sigma^*BR \sim 90 \text{ fb}$  per  $M_H \sim 120 \text{ GeV}/c^2$ , ma segnale pulito)
  - $ttH \rightarrow bb+X$ , Vector Boson Fusion ( $qqH \rightarrow \tau\tau, WW, \gamma\gamma$ )
  - $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$
- $150 \text{ GeV}/c^2 < M_H < 180 \text{ GeV}/c^2$ :
  - $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow 2l2\nu$
  - Vector Boson Fusion ( $qqH \rightarrow \tau\tau, WW$ )
- $M_H > 180 \text{ GeV}/c^2$ :
  - $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$  (migliore sensibilità fra 200 e 500  $\text{GeV}/c^2$ ,  $>500 \text{ GeV}/c^2$  più promettente  $2l2\nu$ , BR x6)
  - $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$  (masse elevate  $lv2j$ , segnale 50 volte superiore)

# H $\rightarrow$ $\gamma\gamma$



→ Segnale: due fotoni di elevato  $p_T$ , chiaro picco sopra il fondo della produzione non risonante  $\gamma\gamma$ .

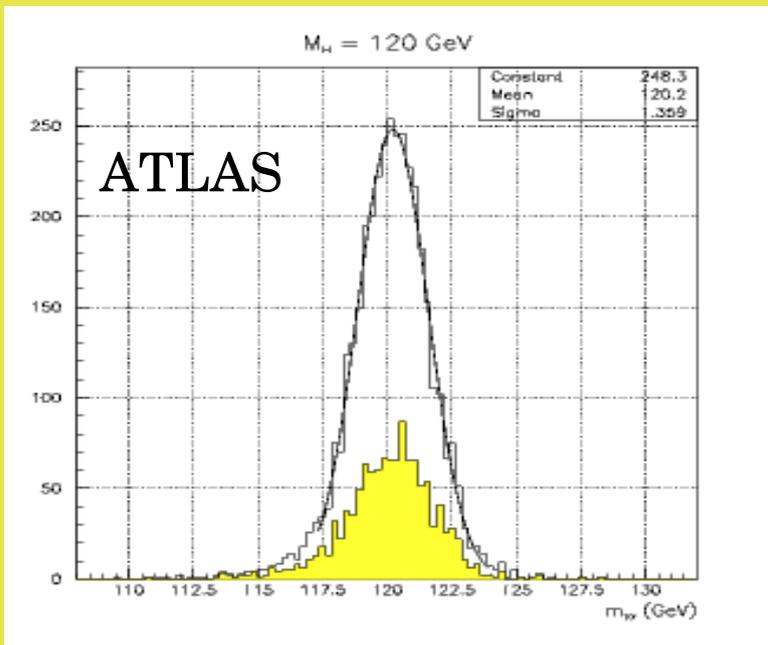
→ Fondo:

- $pp \rightarrow \gamma\gamma + X$ , continuo coppie di fotoni, irriducibile
- riducibile: fotoni da jet e/o  $\pi^0$  isolati

→ Richiede eccellente risoluzione in energia, ottima discriminazione jet/ $\gamma$ .

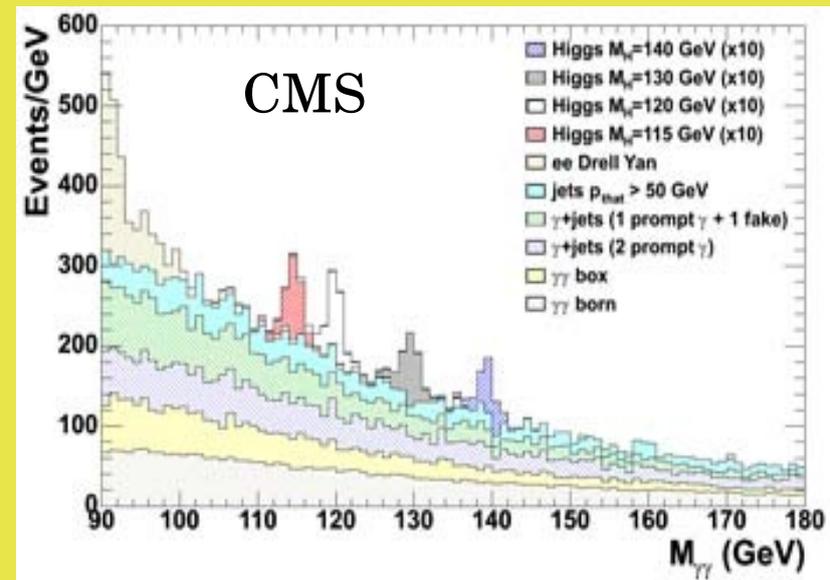
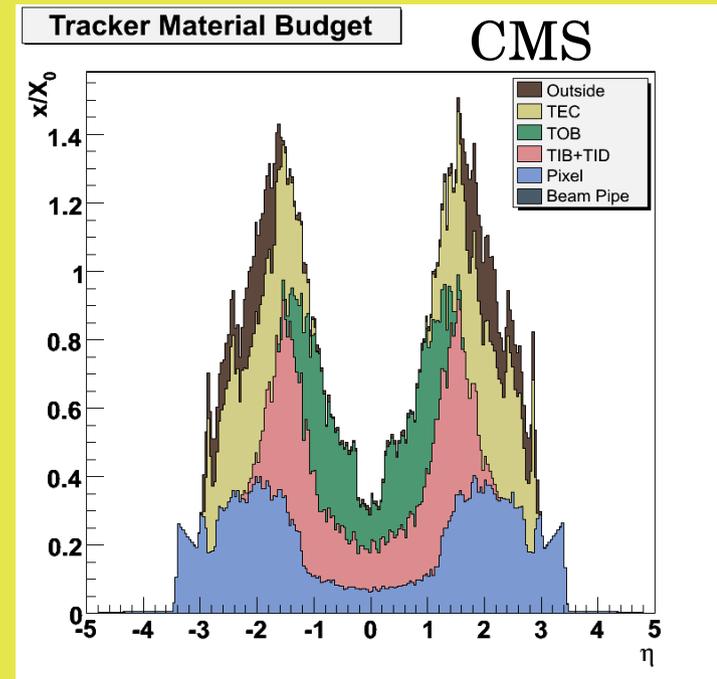
→ Vertice primario determinato dalla distribuzione in impulso delle tracce cariche, quelle dell'interazione primaria hanno spettro più duro (eff. 81%).

*Ottima risoluzione in massa ~ 1%*



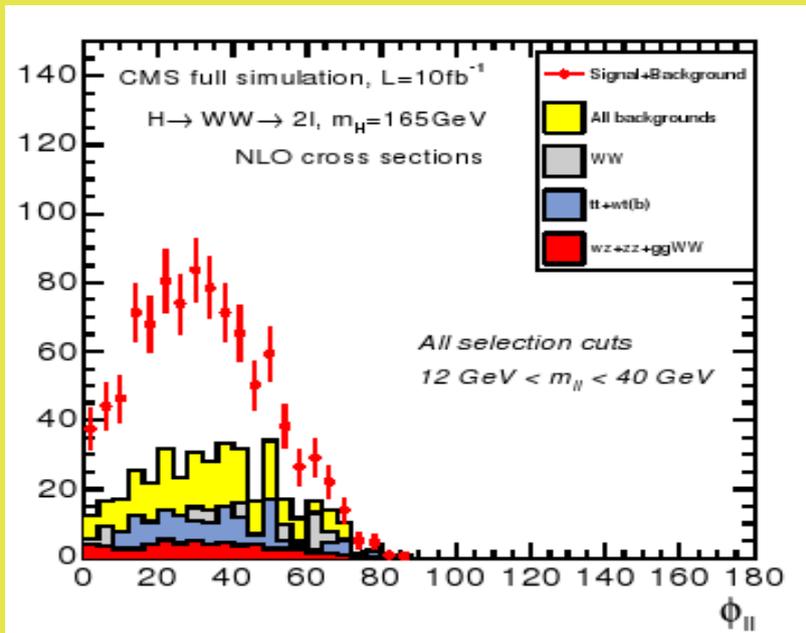
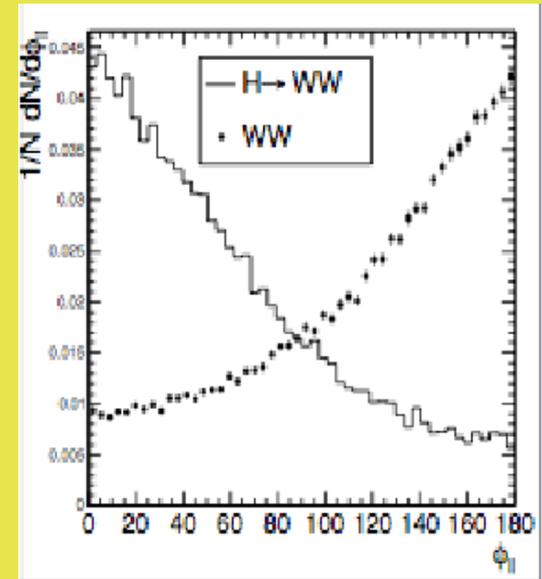
# $H \rightarrow \gamma\gamma$

- Sono state sviluppate due strategie di analisi:
  - cut-based, eventi divisi in categorie basate sulla qualità della ricostruzione ( $R_g$ )
  - NN, cinematica e isolamento dei  $\gamma$
- Precisa stima del fondo dalle sidebands:
  - incertezze segnale (20%, contributo solo al limite di esclusione):
    - sezione d'urto, luminosità, material budget, energy scale, underlying event
  - incertezze “reali” (0.65%):
    - forma distribuzione massa invariante, errore statistico del fit alle sidebands (dipendente da L)
- Esclusione dopo  $5 \text{ fb}^{-1}$  dal limite di LEP fino a  $140 \text{ GeV}/c^2$ .
- Analisi ottimizzata  $\sim 8 \text{ fb}^{-1}$  sono sufficienti per la scoperta per  $M_H \sim 120 \text{ GeV}/c^2$ .



# $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ inclusivo

- Segnale: 2 leptoni isolati di elevato  $p_T$  e MET.
- Nessun picco in massa invariante puo` essere ricostruito in questo caso:
  - necessario un buon rapporto segnale su fondo
- Fondi principali: WW (irriducibile), tt and Drell-Yan:
  - correlazione angolare dei leptoni
  - nessun jet nella regione centrale del rivelatore (tt)
  - MET (Drell-Yan)



→ Correzioni agli ordini superiori dipendenti dal  $p_T$  per segnale e fondo WW.

$$BR(H \rightarrow WW) \sim 1$$

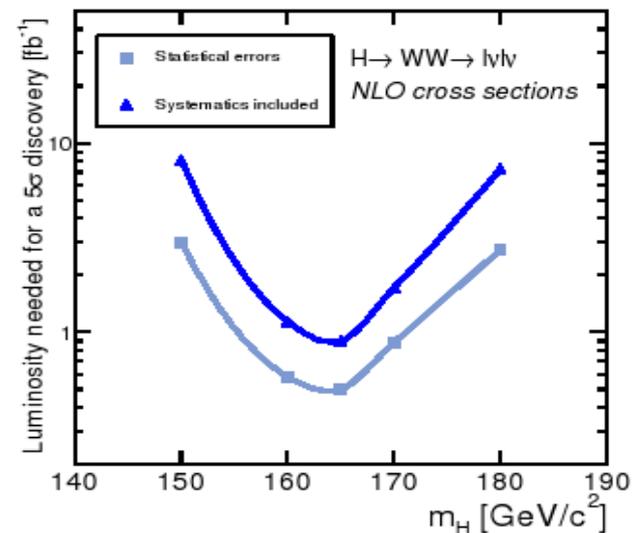
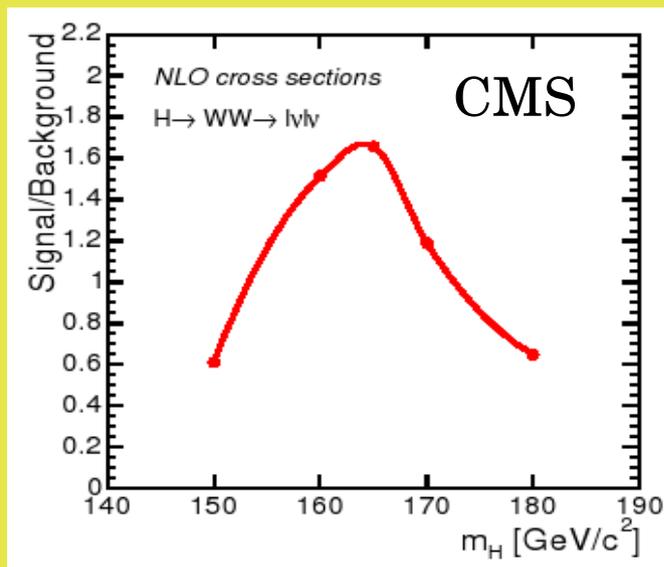
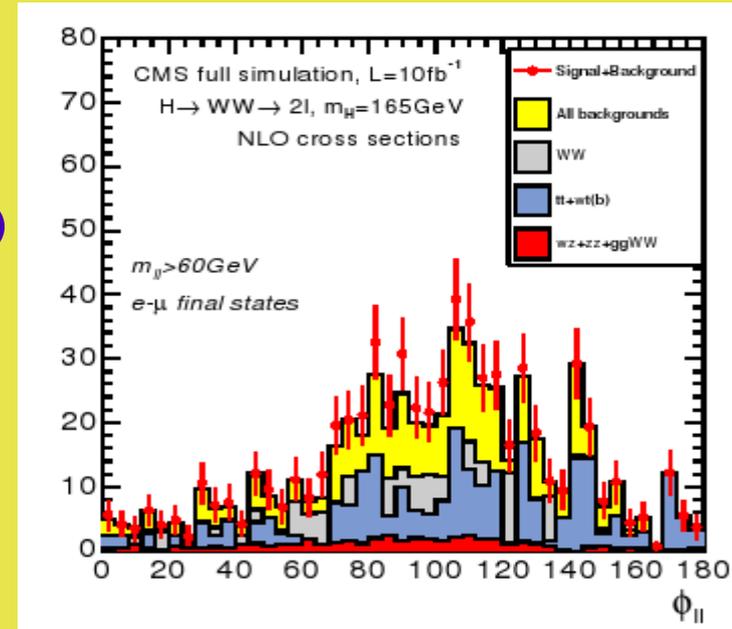
$$\text{per } M_H \sim 160 \text{ GeV}/c^2$$

# $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$ inclusivo

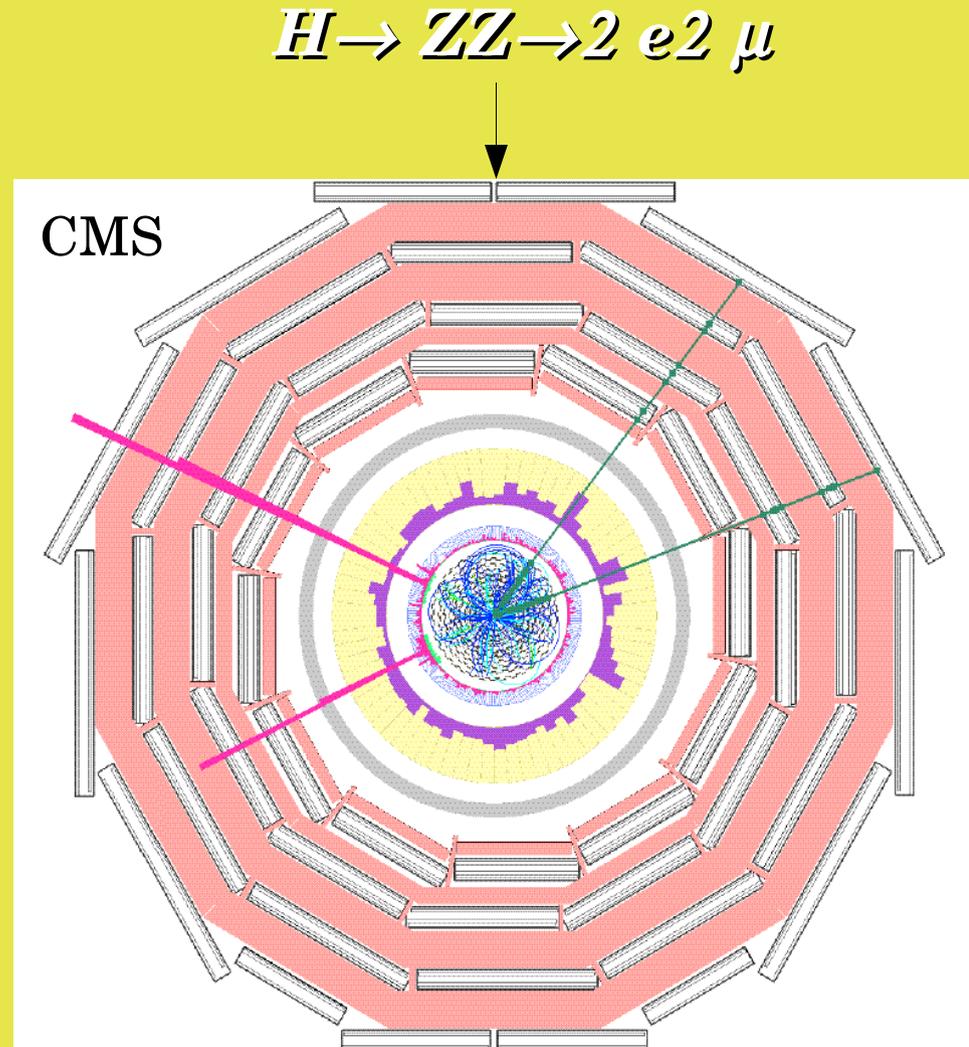
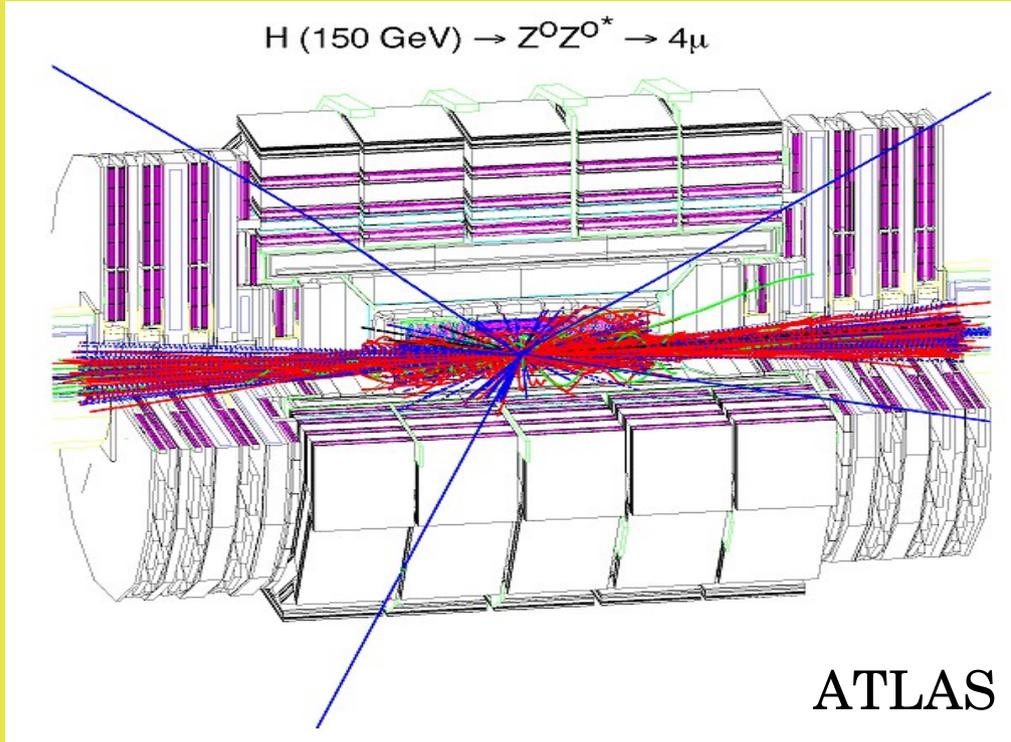
→ La difficoltà principale è la precisa comprensione del fondo:

- utilizzate diverse regioni di controllo ( $\Delta B \sim 13\%$ )
- la stima del fondo WW è complicata perché difficilmente separabile dagli altri contributi

→ Per  $M_H \sim 165 \text{ GeV}/c^2$  scoperta con solo  $1 \text{ fb}^{-1}$ : dopo qualche settimana di presa dati a bassa luminosità.



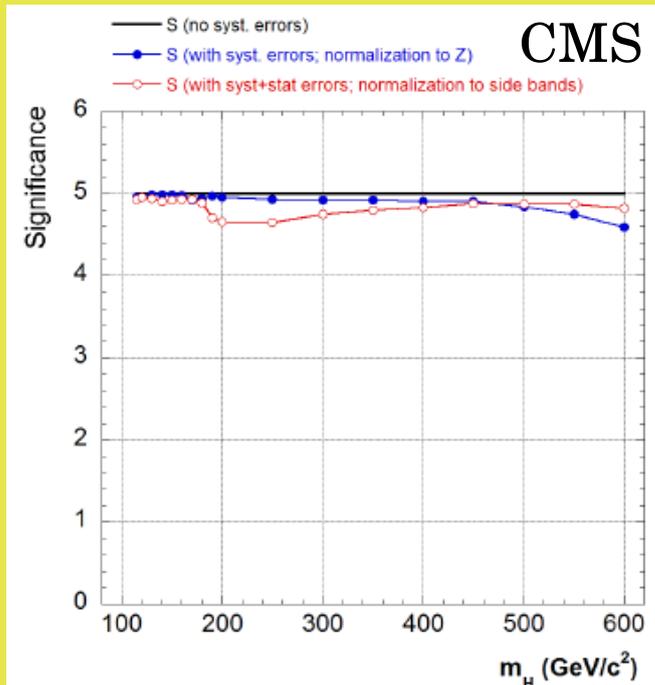
# $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$



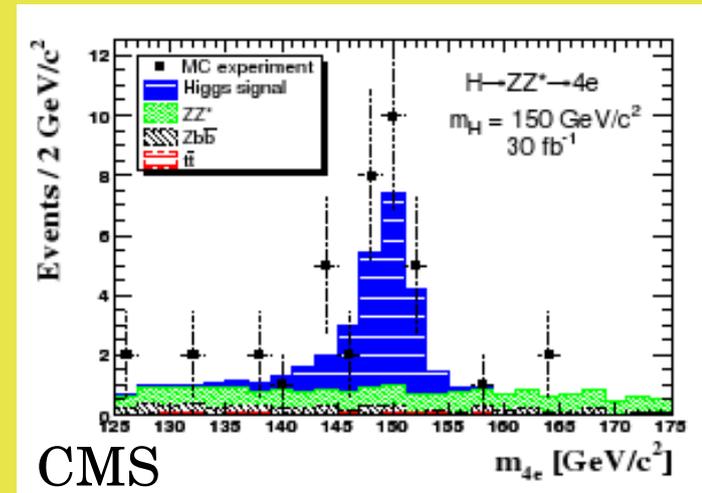
- Segnale: 4 leptoni isolati di elevato  $p_T$ .
- Fondo irriducibile:  $ZZ$ 
  - stesse caratteristiche del segnale
- Altri fondi:  $tt, Zbb$ 
  - riducibili richiedendo leptoni isolati

# $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$

→ Ottima risoluzione nella determinazione della massa del bosone di Higgs:  $\sim 1\%$ .



→ Incertezze sistematiche:



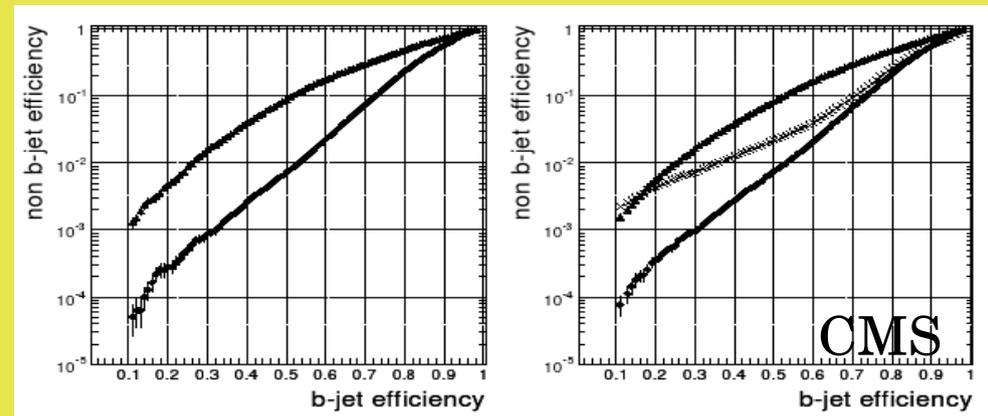
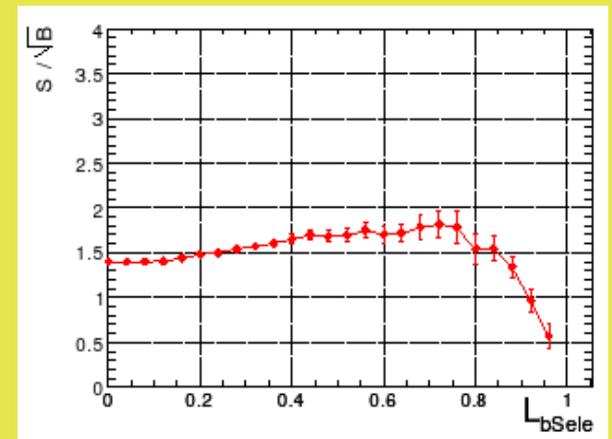
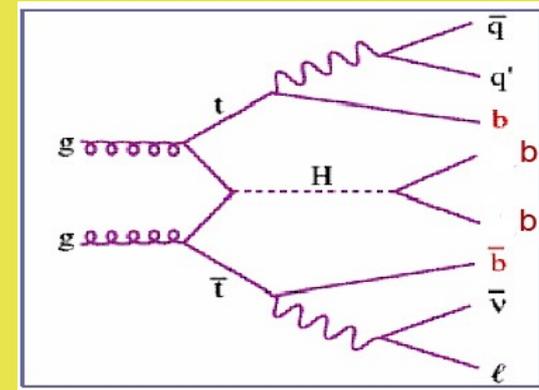
- PDF+QCD scale, contributi NLO
- Material budget, calibrazione dell'energia, efficienza ricostruzione  $\mu$ ...
- Controllo del fondo ZZ:
  - $Z \rightarrow 2l$  o con le sidebands.
- incertezza stimata compresa fra 5 e 10%.

→ Esclusione al 95% C.L. per  $M_H \sim 200 \text{ GeV}/c^2$  con soli  $2 \text{ fb}^{-1}$ .

→ Scoperta a  $5\sigma$  possibile con  $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$  negli intervalli  $140 \div 150$  and  $190 \div 400 \text{ GeV}/c^2$ .

# Produzione associata: $ttH$

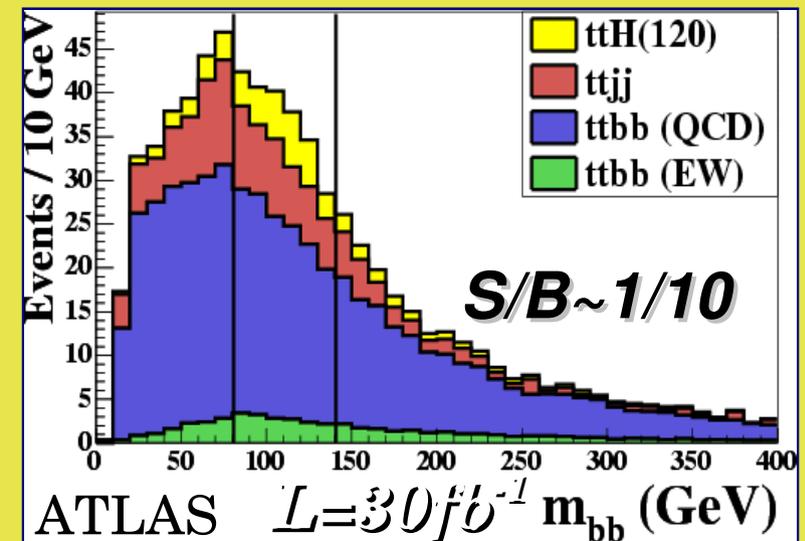
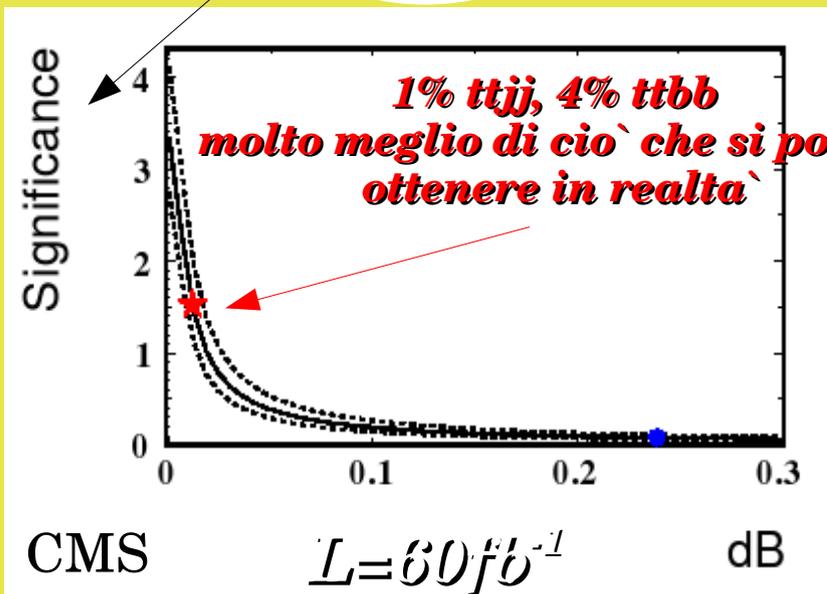
- $H \rightarrow bb$  è il canale di decadimento dominante per masse fino a circa  $135 \text{ GeV}/c^2$ :
  - fondo QCD troppo elevato
- Se il bosone di Higgs è prodotto in associazione con una coppia  $tt$  il fondo è sensibilmente ridotto.
  - ricostruzione della massa non precisa (risoluzione 20%), combinatorio dei 4 jet
- Principali fondi:  $ttjj$ ,  $ttbb$ ,  $ttZ$  ( $Z \rightarrow bb$ ).
- b-tagging è la componente fondamentale dell'analisi: likelihood btag discriminant per i 4 jet.
- bjet pairing per ricostruire  $M_H$ : efficienza 31 %.



# ttH, H → bb

- Errori sistematici: jes (3÷10%), risoluzione jet (10%), b-jet and c-jet tagging (4%), uds-tagging (10%), luminosita` (3%).
- Elevate incertezze teoriche nella normalizzazione del fondo, specialmente per ttjj.
- Difficile prevedere con quale precisione riusciremo a conoscere il fondo.

$$\frac{S}{\sqrt{B + dB}}$$

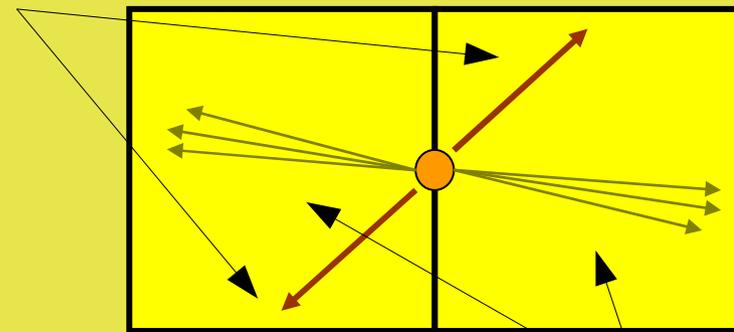
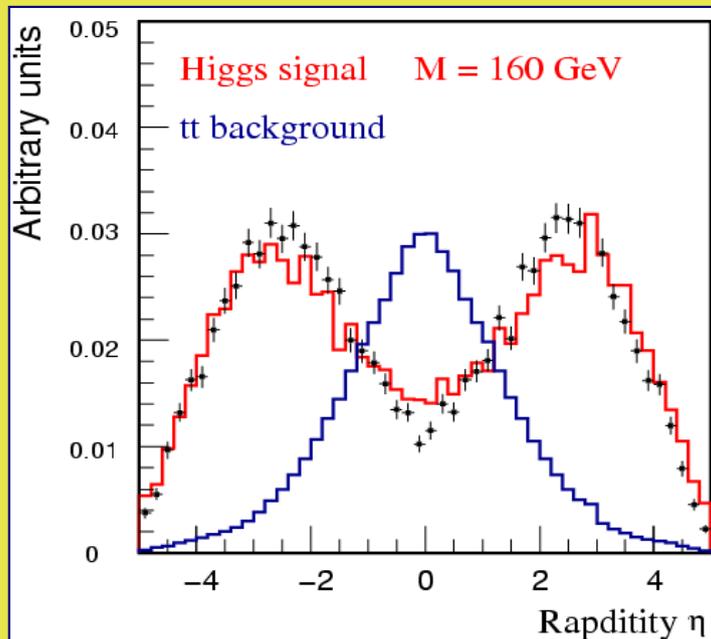


- Contrariamente a studi precedenti, le prospettive sono piu` pessimistiche a causa del maggiore realismo della simulazione:
  - mis-tagging dei light jets in eventi ttjj problema piu` serio del previsto.

# Vector Boson Fusion (VBF): $qqH$

- L'utilizzo di VBF aumenta il potenziale di scoperta, permette di migliorare la misura dei parametri del bosone di Higgs (coupling, valori di CP).
- Segnatura della VBF: 2 jets nella regione in avanti.
  - elevato  $\Delta\eta$  dei jet a causa dell'assenza di scambio di colore, spazio "libero" per i prodotti di decadimento dell'Higgs.

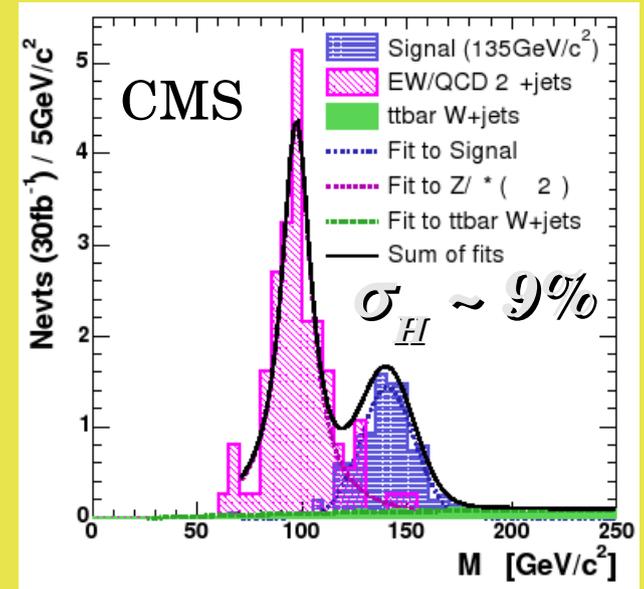
## *Decadimento dell'Higgs*



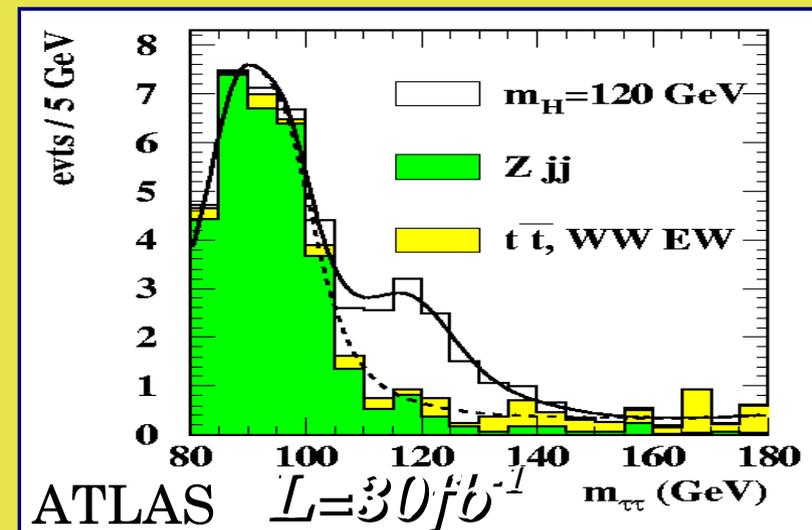
*Segnale VBF*

# VBF: $qqH$ ( $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow ll, lj$ )

- Segnale: VBF jets + leptoni e/o jet + MET.
- Fondo: produzione QCD e EW  $Z(\tau\tau)$ +jets,  $W$ +jets e  $tt$  (riducibile).
- Veto su jet centrali di QCD, taglio sulla qualità del jet per ridurre il numero di fake dall'underlying event.
- $N_s$  and  $N_b$  determinati dal fit di  $m_{\tau\tau}$  che è dunque l'unico contributo all'incertezza. Stima dell'errore determinata tramite esperimenti MC (6%).
- $5\sigma$  per masse al di sotto di  $140 \text{ GeV}/c^2$  con  $60 \text{ fb}^{-1}$ , sopra a  $145 \text{ GeV}/c^2$  il BR è troppo piccolo.
- Canale competitivo per basse masse.

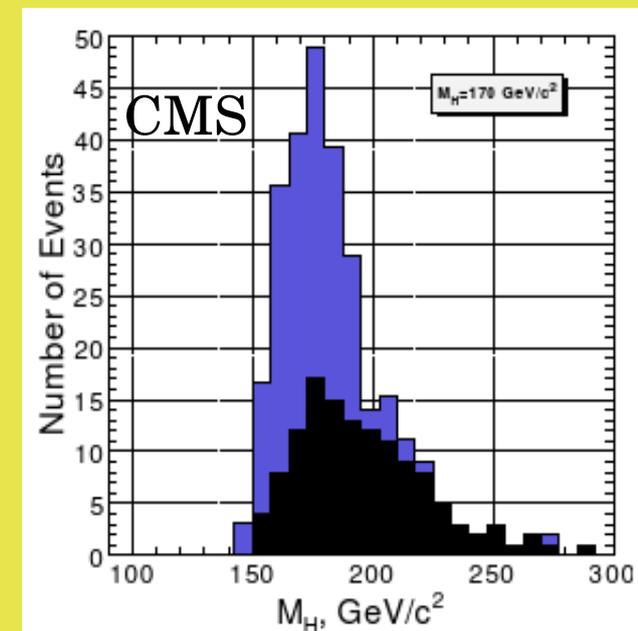


$\tau$ -tag ~ 35%  
per eventi di segnale

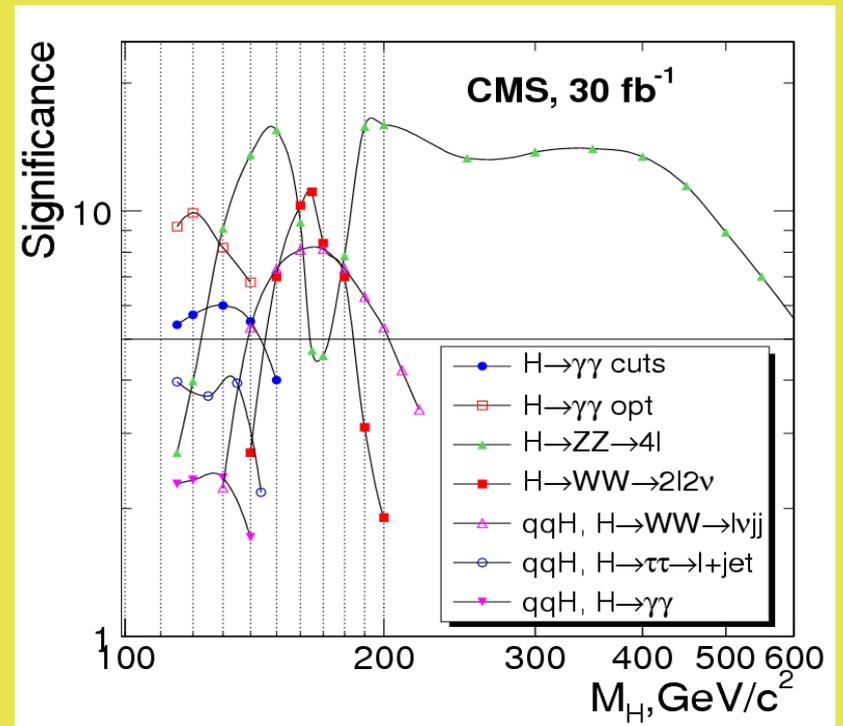
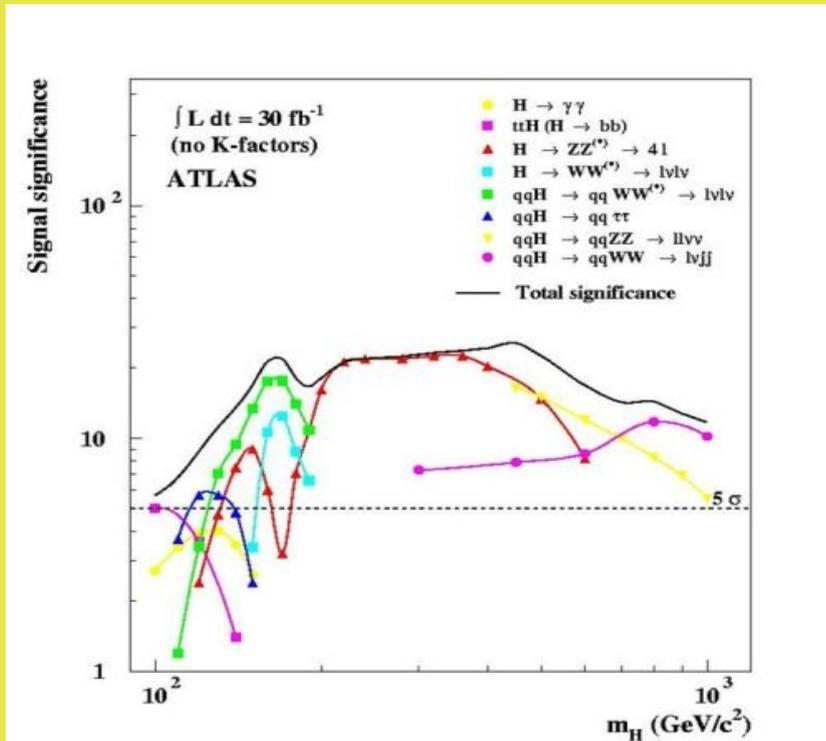


# VBF: $qqH (H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow lvjj)$

- Già studiato per masse elevate ( $M_H > 300 \text{ GeV}/c^2$ ), adesso anche nell'intervallo di masse basse.
- Principali difficoltà in questo intervallo di massa:
  - molti fondi ( $tt$ +jets,  $W$ +Njets,  $Z$ +Njets) con elevata  $\sigma$  e medesimo stato finale
  - bassa  $E_T^{\text{miss}}$  e  $E_T^{\text{jet}}$  peggiorano la risoluzione in massa ( $\sim 10\%$ )
- Maggiore incertezza dall'efficienza di selezione dei jet rispetto alla soglia più bassa in  $E_T$  (incertezza totale: 16%).
- Tale rate può essere misurato dai dati per calibrare il MC (<6% incertezza jes).
- Significanza a  $5\sigma$  con circa  $30 \text{ fb}^{-1}$  ( $140 < M_H < 180 \text{ GeV}/c^2$ ).



# Potenziale di scoperta



- ➔ CMS e ATLAS possono sondare l'intero intervallo di massa dal limite di LEP fino a  $\sim 1 \text{ TeV}/c^2$ .
- ➔ Tutte le masse accessibili a  $5\sigma$  con soli  $10 \text{ fb}^{-1}$ .
- ➔ Importante il contributo di VBF a bassa massa.
- ➔ Con pochi  $\text{fb}^{-1}$  possibile la scoperta del bosone di Higgs per  $M_H \sim 160 \text{ GeV}/c^2$  sfruttando il decadimento in WW.

# Parametri del bosone di Higgs

→ La massa del bosone di Higgs puo` essere misurata con una precisione  $< 1\%$ :

- calibrazione del rivelatore, scoperta risonanza con  $H \rightarrow \gamma\gamma$  o  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ , fit del picco (poca luminosita` integrata  $\sim 10\%$ ,  $L > 30 \text{ fb}^{-1} \sim 0.1\%$ )

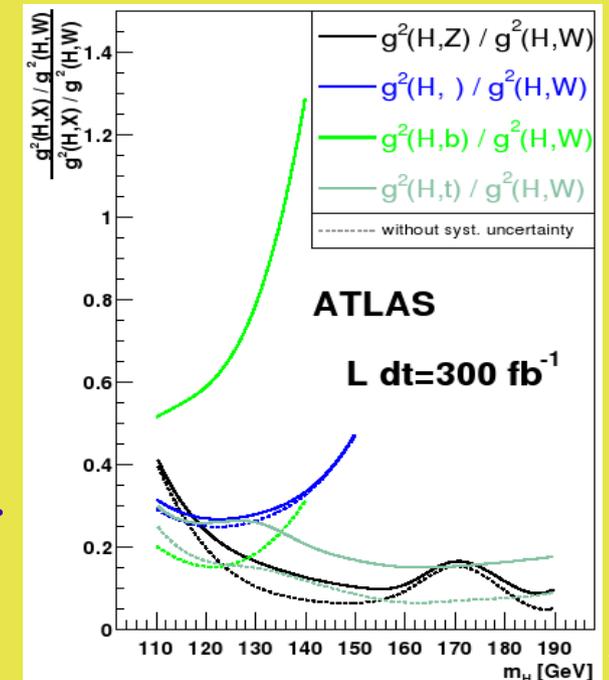
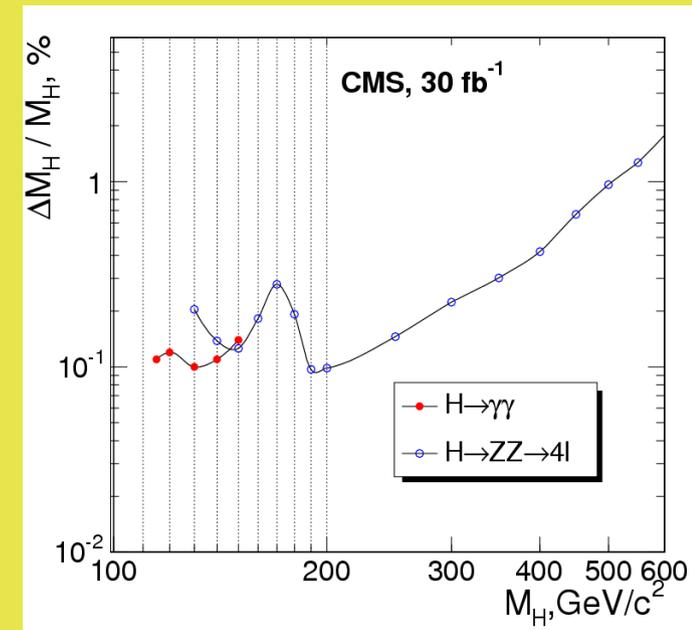
→ Accoppiamento ai bosoni o ai fermioni:

$$\sigma_{YY \rightarrow H} \cdot \text{BR}(H \rightarrow XX) \sim \Gamma_Y \frac{\Gamma_X}{\Gamma_H}$$

- $\Gamma_H$  non puo` essere determinata se  $M_H < 200 \text{ GeV}/c^2$ :

- misura di rapporti di accoppiamenti (normalizzazione a  $\Gamma_W$ )
- misura di accoppiamenti assoluti (assunzioni teoriche)

→ Tutti gli accoppiamenti relativi possono essere misurati con una precisione del 15-45% (con  $300 \text{ fb}^{-1}$ ). Top coupling al 25% ( $125 \leq M_H \leq 190 \text{ GeV}/c^2$ ,  $L = 30 \text{ fb}^{-1}$ ).



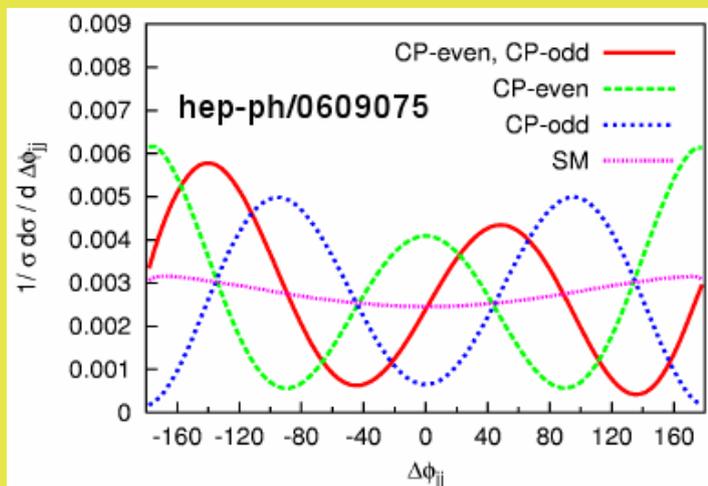
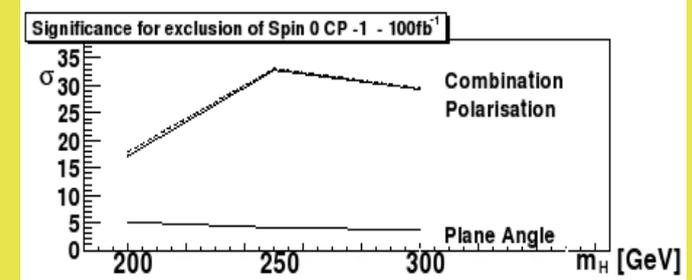
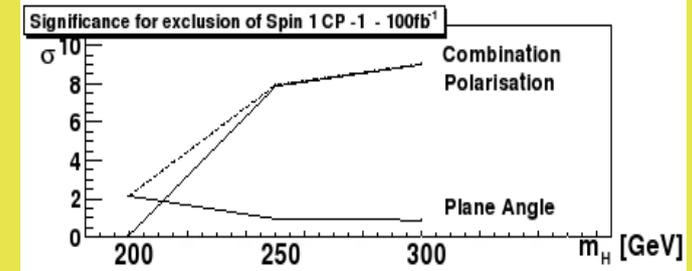
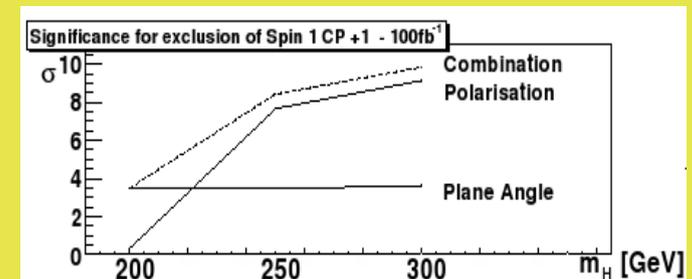
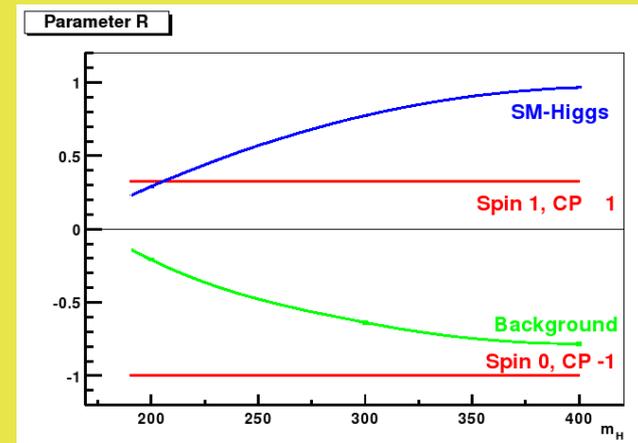
# Parametri del bosone di Higgs

→ La distribuzione angolare dei leptoni nel canale  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$  dipende dalle proprietà di spin e CP:

$$G(\vartheta) = T * (1 + \cos^2 \vartheta) + L * \sin^2 \vartheta \rightarrow R = \frac{(L-T)}{(L+T)}$$

→ Per  $M_H > 200 \text{ GeV}/c^2$  un Higgs spin 0 odd e spin 1 (even, odd) può essere escluso a  $2\sigma$  ( $L=100 \text{ fb}^{-1}$ ), per  $M_H > 230 \text{ GeV}/c^2$  a livello di  $5\sigma$ .

→ La misura di CP per  $M_H < 200 \text{ GeV}/c^2$  è a livello di studio preliminare con VBF.





# Conclusioni

- Sia ATLAS che CMS sono in grado di scoprire lo SM Higgs nell'intervallo di massa compreso fra il limite di LEP e  $\sim \text{TeV}/c^2$ .
- Le due collaborazioni hanno effettuato studi per tutti i più importanti canali di decadimento (simulazione completa dei rivelatori, pileup, misura del fondo dai dati...).
- Con dei rivelatori “maturi” ed una luminosità ragionevole: la scoperta a  $5\sigma$  è possibile con pochi mesi di presa dati.
- La misura della massa con risoluzione di poche centinaia di  $\text{MeV}/c^2$  è possibile con i canali  $H \rightarrow \gamma\gamma$  e  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$  (per masse basse o intermedie).
- Inoltre le proprietà del bosone di Higgs (coupling, CP/Spin) possono essere misurate con  $100 \text{ fb}^{-1}$ .



# “Bibliografia”

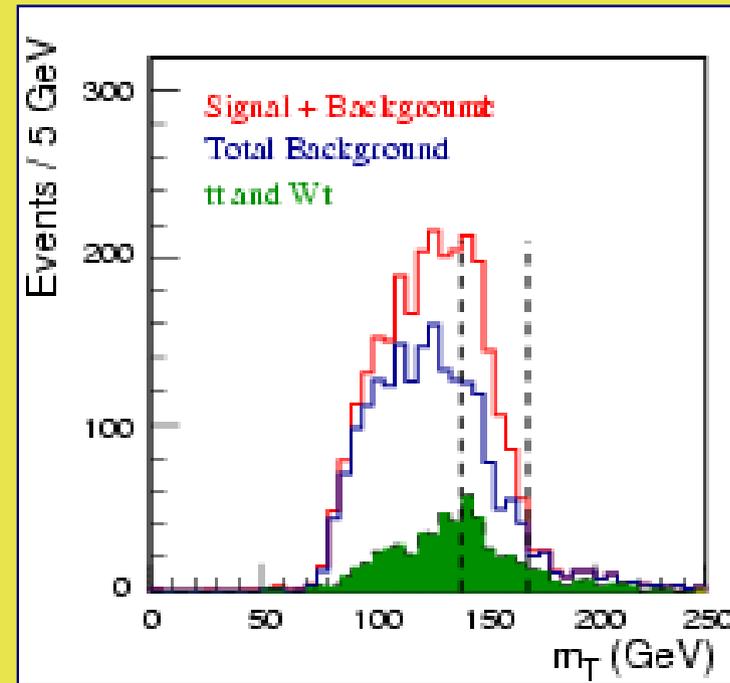
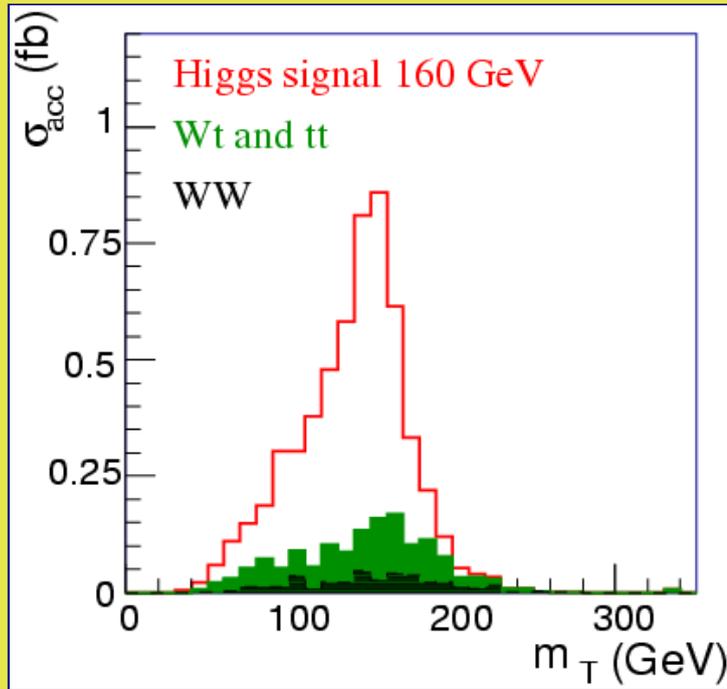
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ : CMS-NOTE 2006/, ATLAS-PHYS-PUB 2006/016
- $H \rightarrow WW$  inclusivo: ATLAS-PHYS-2002-010
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ : CMS-NOTE 2006/106, 112, 136, 115
- $ttH$ :  $H \rightarrow bb$  CMS-NOTE 2006/119, ATLAS-PHYS-2004-031
- VBF: Czech. J. Phys. 55:B109-B116, 2005
  - $H \rightarrow WW$  CMS-NOTE 2006/092, ATLAS-PHYS-2004-019
  - $H \rightarrow \tau\tau$  CMS-NOTE 2006/088
- Parametri: CMS-NOTE 2006/94, hep-ex/0505022, ATLAS-PHYS-2004-030





# BACK UP

# H → WW, inclusivo/VBF



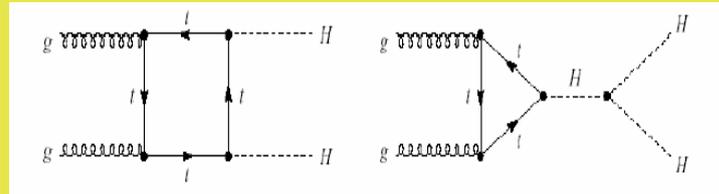
→ VBF vs gluon fusion

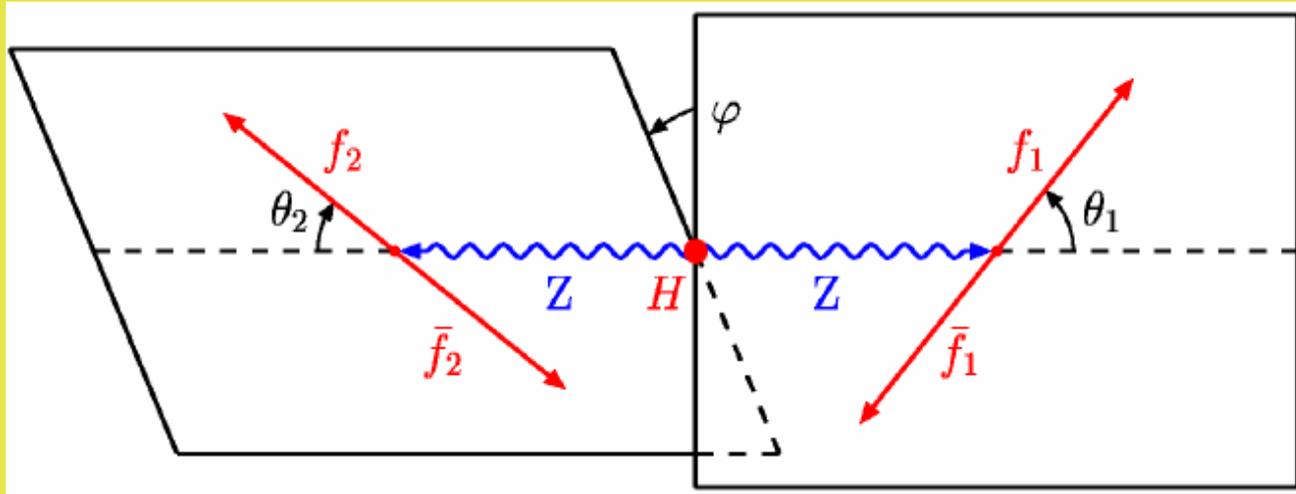
- rate più basso, maggior rapporto segnale/fondo, minori K-factor
- necessaria una migliore comprensione del rivelatore
- significatività dipendente dal canale e da  $M_H$

# Higgs self coupling

→ Higgs self-coupling:  $gg \rightarrow HH \rightarrow WW WW \rightarrow lv jj lv jj$

- small signal cross sections, large backgrounds from  $WWjj$ ,  $WWjjjj$ ...  $\Rightarrow$  so far, no measurement known at the LHC, sensitivity possible at SLHC





- Distribution of plane angle :  $F(\varphi) = 1 + \alpha \cos(\varphi) + \beta \cos(2\varphi)$
- Distribution of polar angle :  $G(\theta) = T^*(1 + \cos^2\theta) + L^*\sin^2\theta$   
:  $R = (L - T)/(L + T)$

# ttH: btagging

