

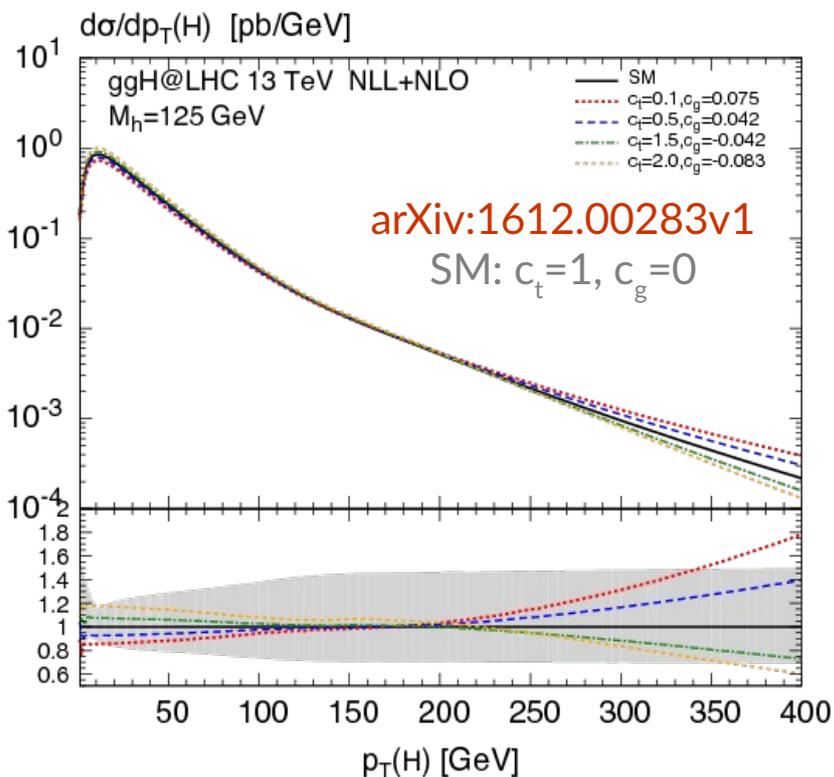
# Misura delle proprietà del bosone di Higgs nel canale di decadimento in due bosoni W con il rivelatore CMS ad LHC

Lorenzo Viliani  
INFN Firenze

Seminario  
Consiglio di Sezione

Firenze - 04/09/2018

- Dopo la scoperta nel 2012, le misure di precisione delle proprietà del bosone di Higgs sono diventate uno degli obiettivi principali di LHC:
  - Test delle previsioni del Modello Standard;
  - Ricerca di effetti di fisica Beyond the Standard Model (BSM).



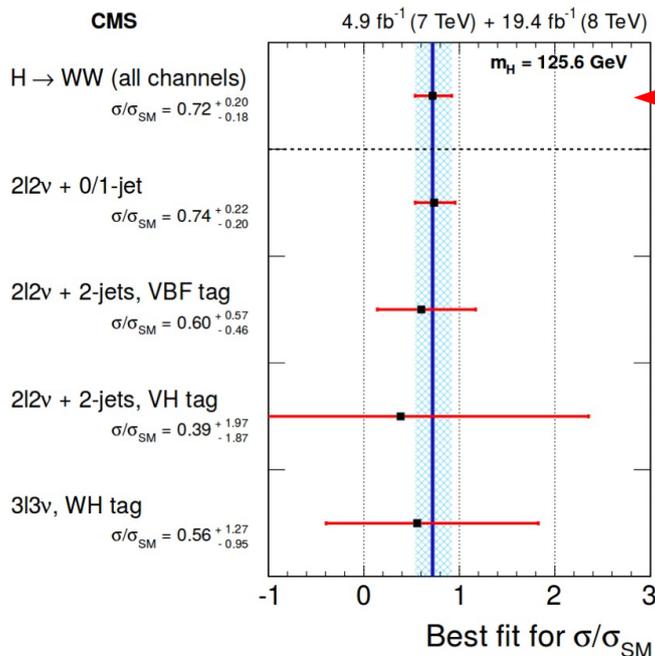
## Possibili effetti di modelli BSM

Model	$\kappa_V$	$\kappa_b$	$\kappa_\gamma$
Singlet Mixing	$\sim 6\%$	$\sim 6\%$	$\sim 6\%$
2HDM	$\sim 1\%$	$\sim 10\%$	$\sim 1\%$
Decoupling MSSM	$\sim -0.0013\%$	$\sim 1.6\%$	$\sim -0.4\%$
Composite	$\sim -3\%$	$\sim -(3 - 9)\%$	$\sim -9\%$
Top Partner	$\sim -2\%$	$\sim -2\%$	$\sim +1\%$

arXiv:1310.8361 -  $m_{NP} \sim 1$  TeV

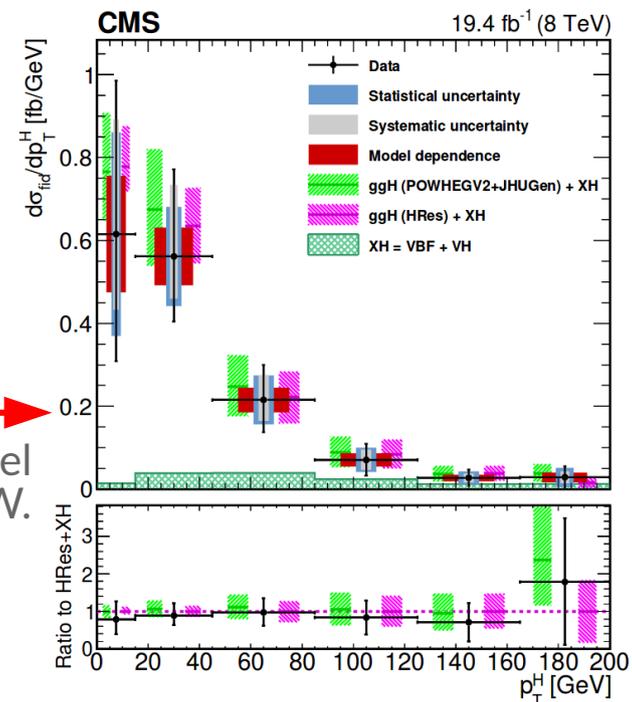
$H \rightarrow WW$  è un canale chiave per le misure di precisione del bosone di Higgs  
 ...ma permette anche ricerche dirette di nuove risonanze.

# Alcuni "highlights" dal Run1



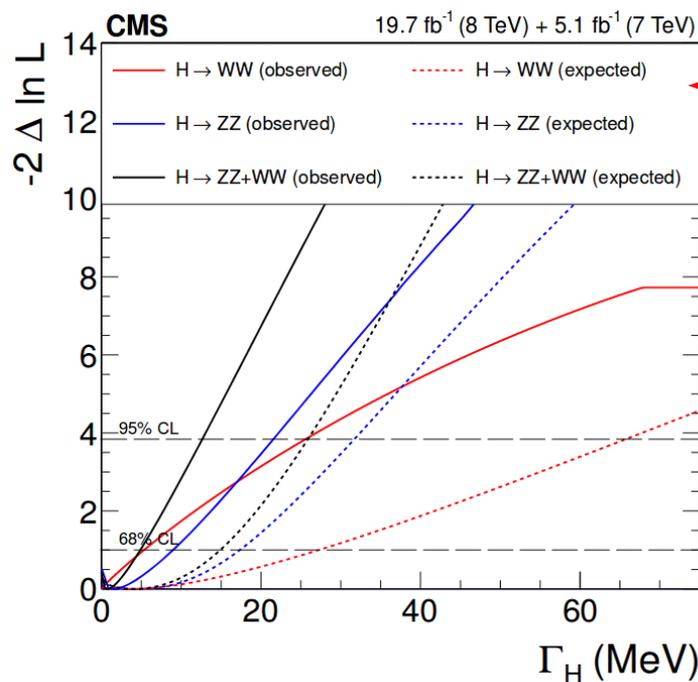
**JHEP01(2014)096**

Misura di sezione d'urto e accoppiamenti per vari meccanismi di produzione e con H→WW.



**JHEP03(2017)032**

Misura differenziale del pT del bosone di Higgs con H→WW.

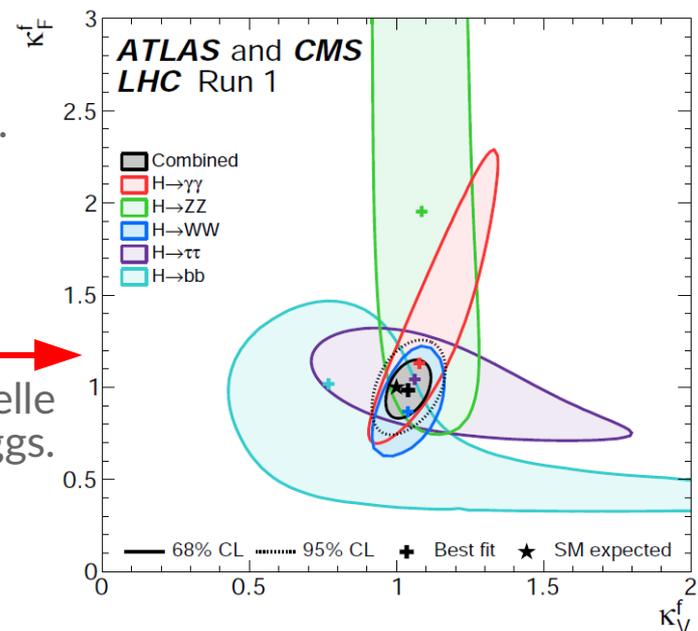


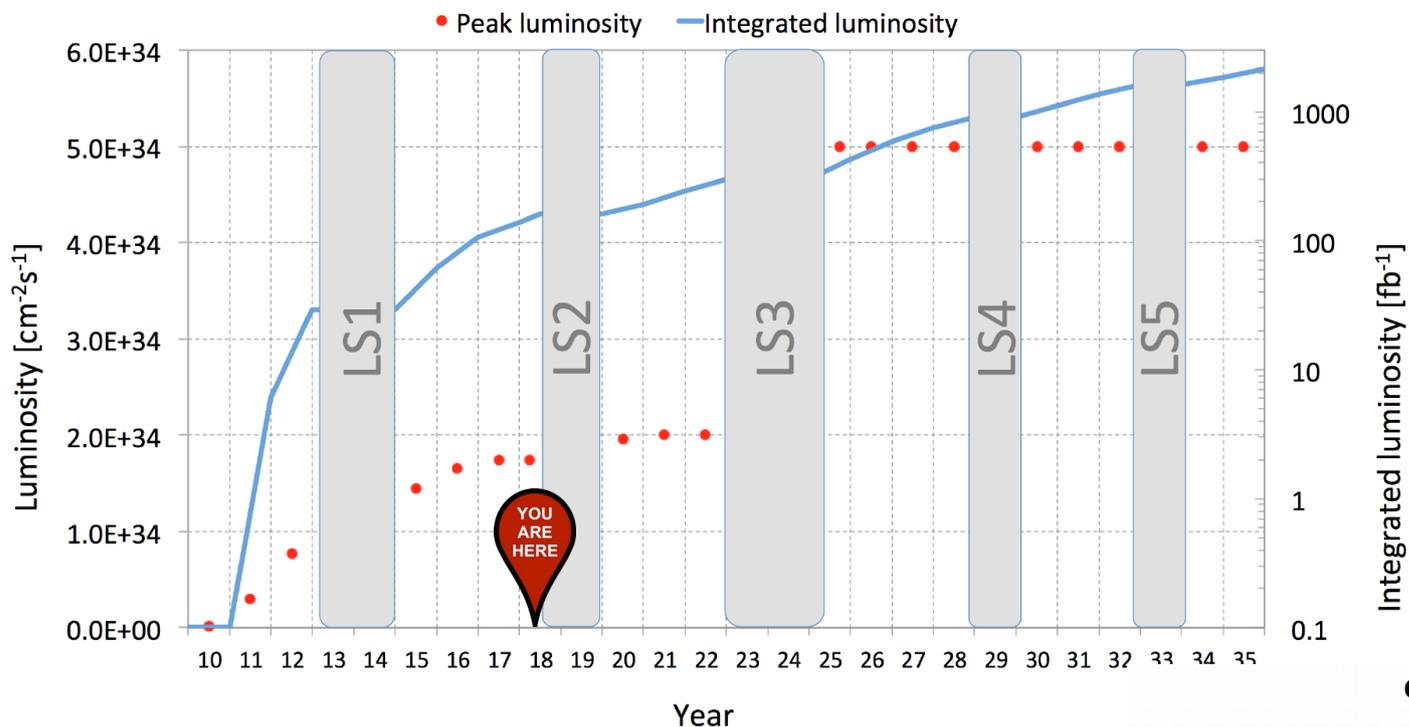
**JHEP09(2016)051**

Misura della larghezza di decadimento del bosone di Higgs. Combinazione H→WW e H→ZZ.

**JHEP08(2016)045**

Combinazione ATLAS e CMS delle misure del Run 1 sul bosone di Higgs.

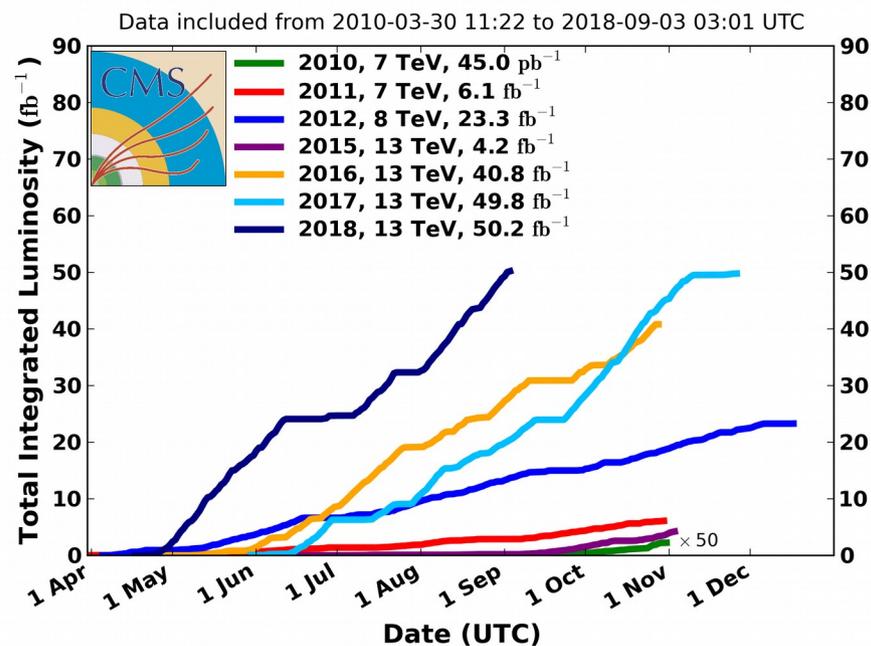


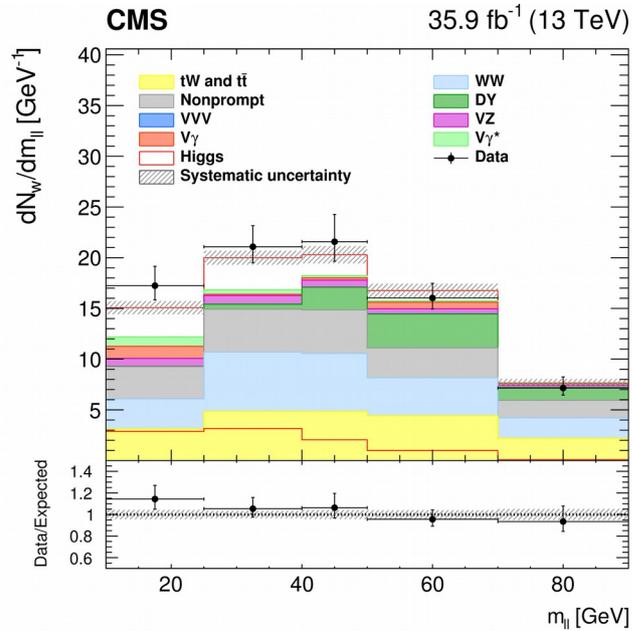


- Long-shutdown 2 a fine 2018.
- LHC verrà riaperto nel 2020 per l'inizio del Run3.

CMS Integrated Luminosity, pp

- Ottime prestazioni di CMS durante il Run2.
  - Già  $\sim 50 \text{ fb}^{-1}$  raccolti nel 2018.
  - $> 150 \text{ fb}^{-1}$  attesi con tutta la statistica del Run2.
- I risultati in questa presentazione sono stati ottenuti con i dati del 2016.





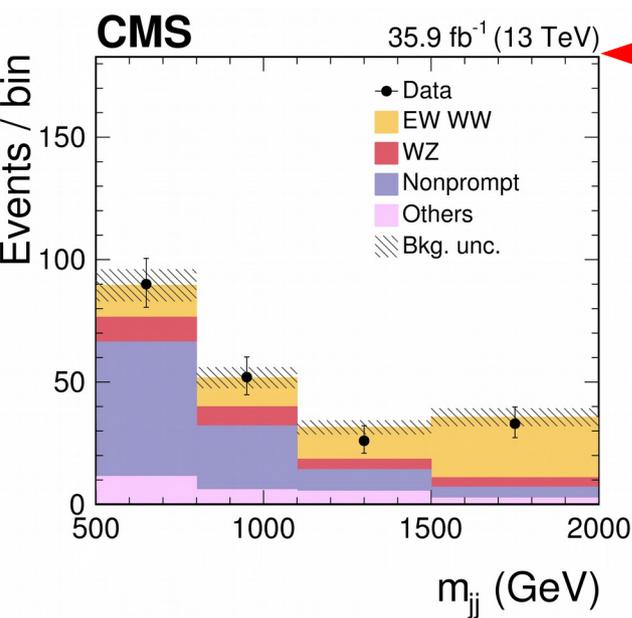
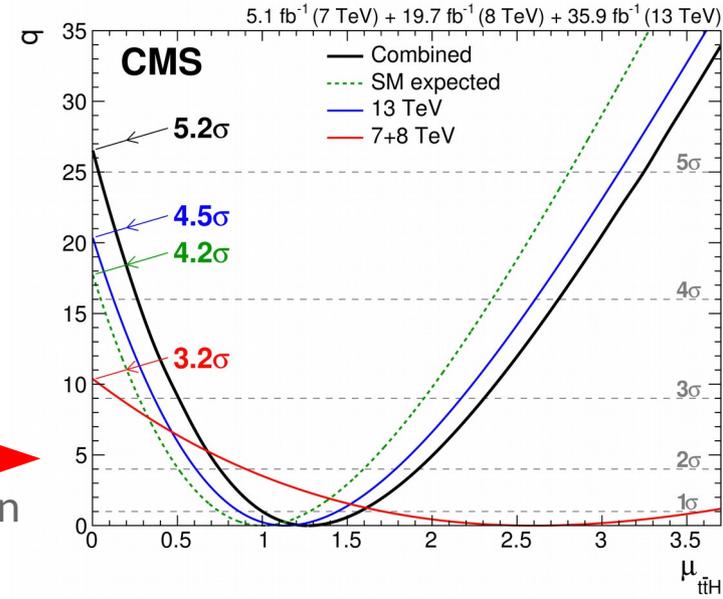
## CMS-HIG-16-042

Measurements of properties of the Higgs boson decaying to a W boson pair in pp collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV  
arXiv1806.05246

Sottomessa a PLB  
Mostrata a ICHEP2018

PRL 120(2018)231801

Observation of ttH production

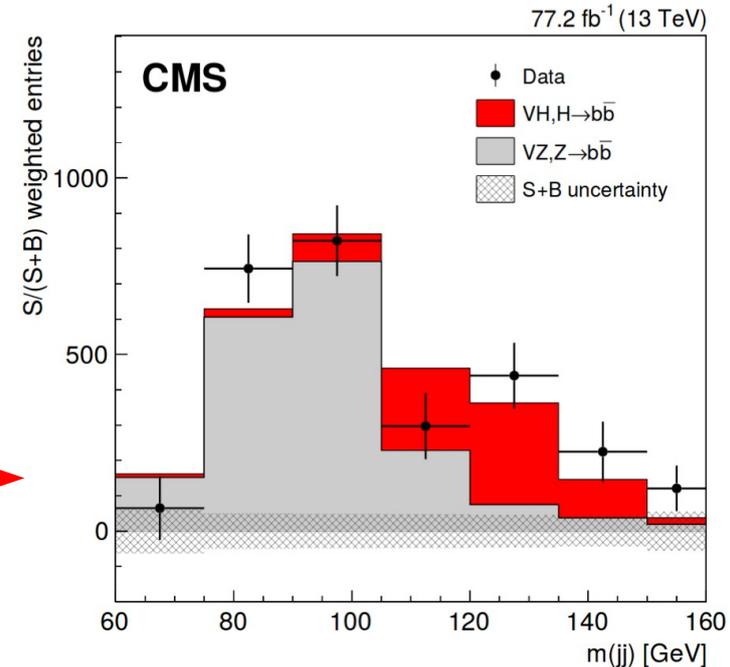


## PRL 120(2018)081801

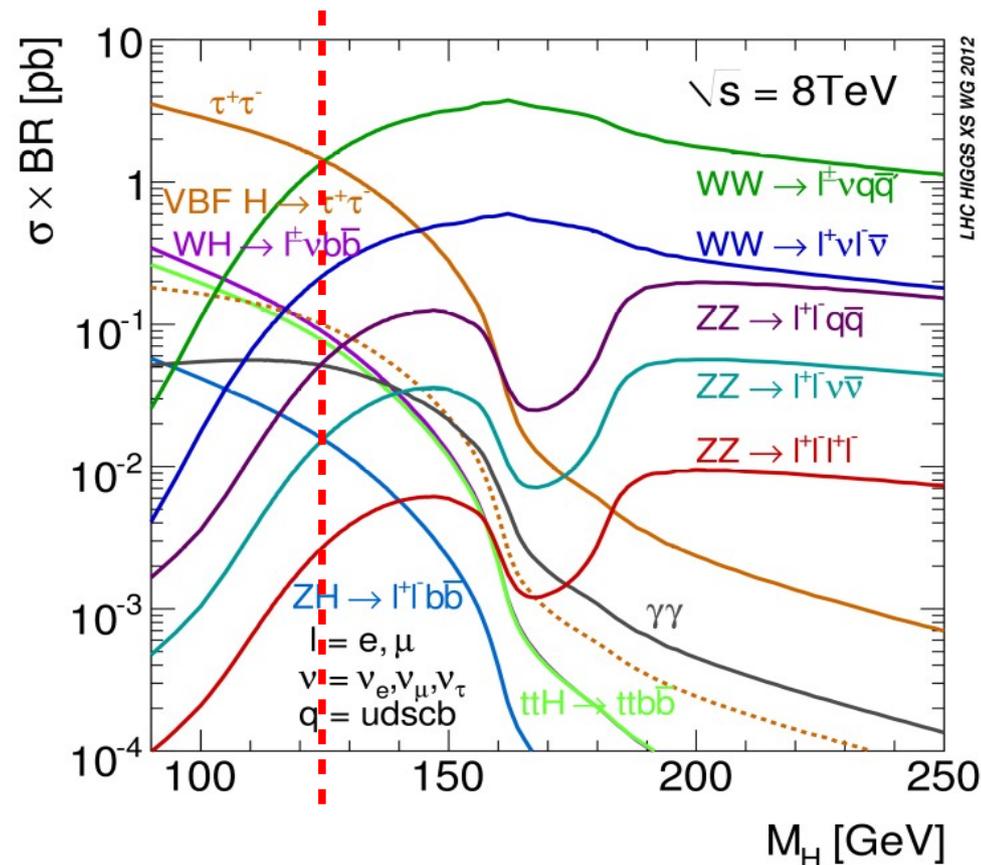
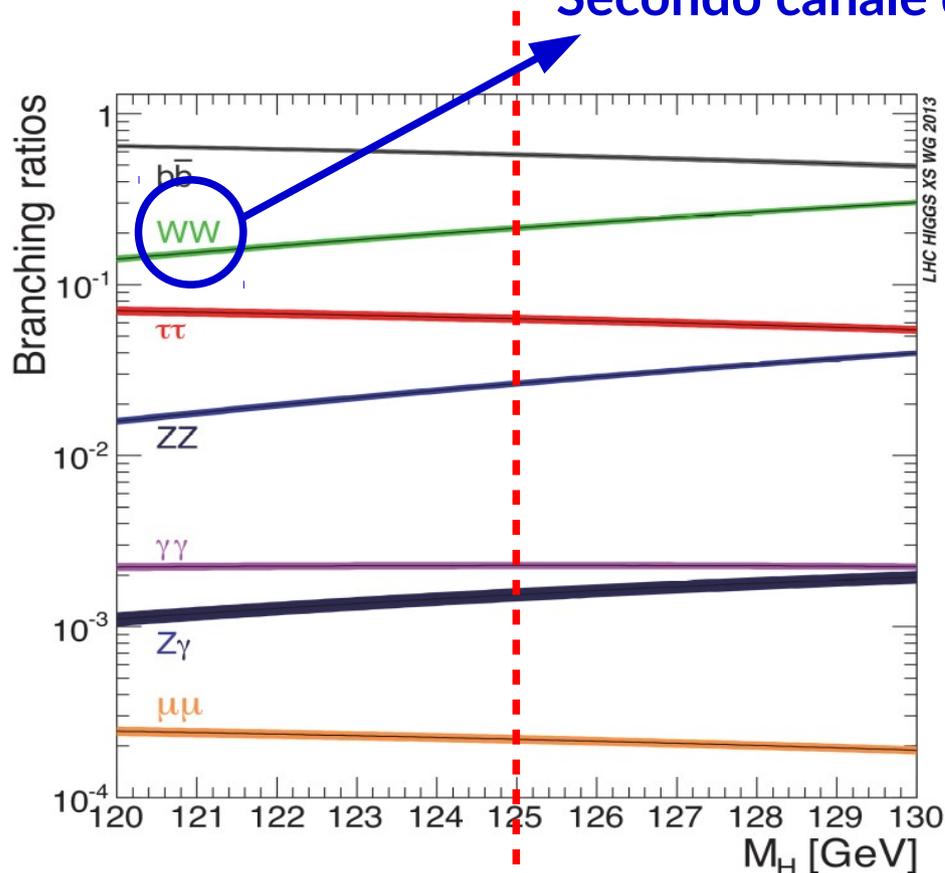
Observation of electroweak production of same-sign W boson pairs in the two jet and two same-sign lepton final state in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV

CMS-HIG-18-016

Observation of Higgs boson decay to bottom quarks  
arXiv:1808.08242

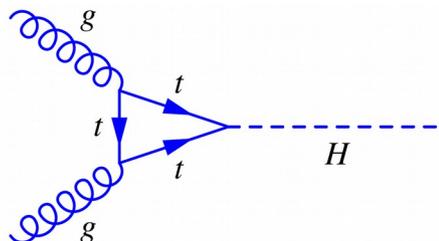


## Secondo canale di decadimento con BR più elevato



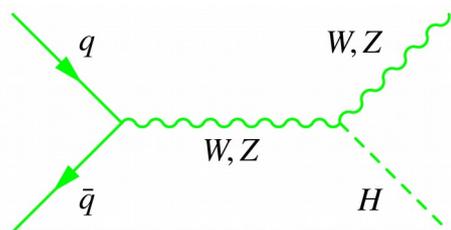
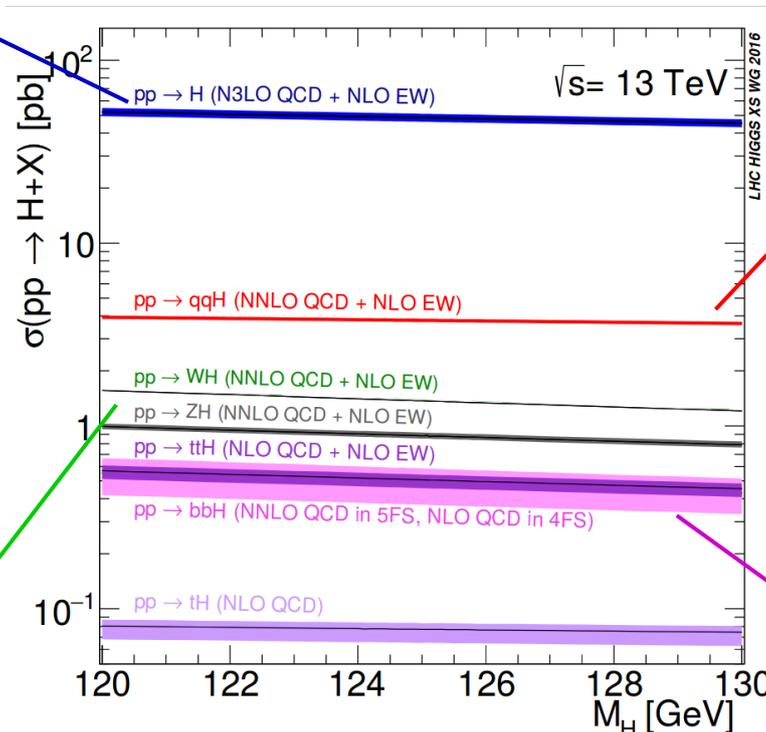
- Lo stato finale semi-leptonico ha BR maggiore ma anche molto più fondo
  - Utilizzato soprattutto per ricerche di risonanze di alta massa
- Canale completamente leptonico ha BR minore ma molto più pulito
  - Ideale per misure di precisione a bassa massa.

Grazie all'elevato BR, il canale  $H \rightarrow WW$  è sensibile a tutti i principali meccanismi di produzione



## Gluon fusion (ggH)

- Sensibile agli accoppiamenti dell'Higgs con i fermioni (quark  $t$  e  $b$ ).
- $$\sigma \times \mathcal{B}(H \rightarrow WW) = 9.5 \text{ pb}$$



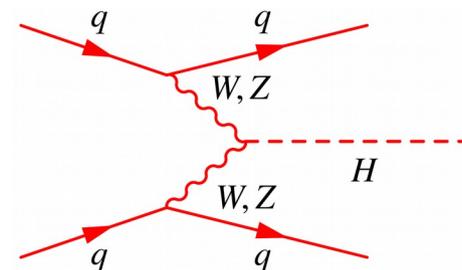
## Vector boson associated prod. (VH)

- Sensibile all'accoppiamento con W e Z.
- $$\sigma \times \mathcal{B}(H \rightarrow WW) = 0.5 \text{ pb}$$

## Vector boson fusion (VBF)

- Sensibile all'accoppiamento con W e Z.

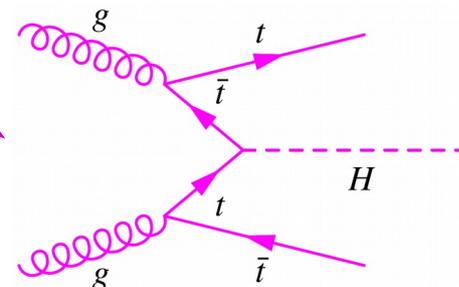
$$\sigma \times \mathcal{B}(H \rightarrow WW) = 0.8 \text{ pb}$$



## Top associated production (ttH)

- Sensibile all'accoppiamento diretto con il quark top.

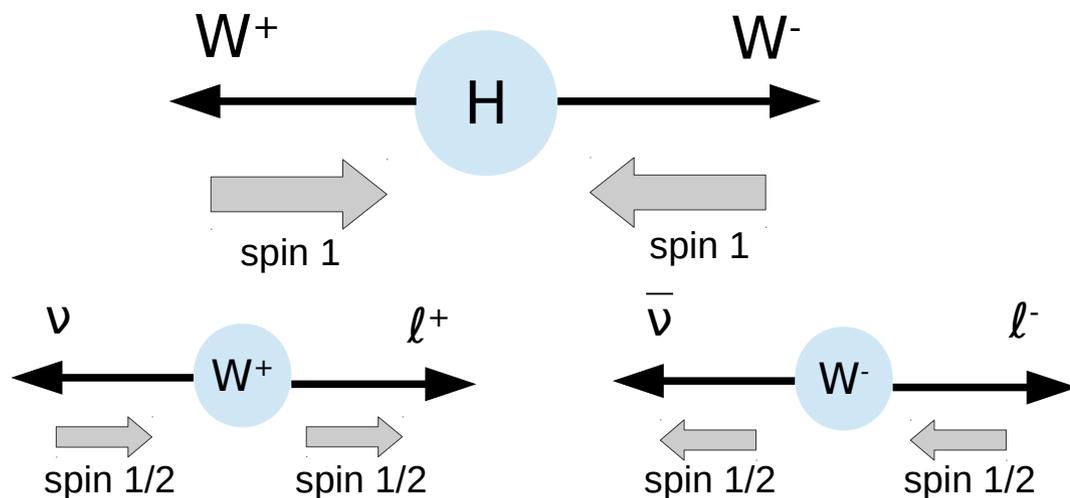
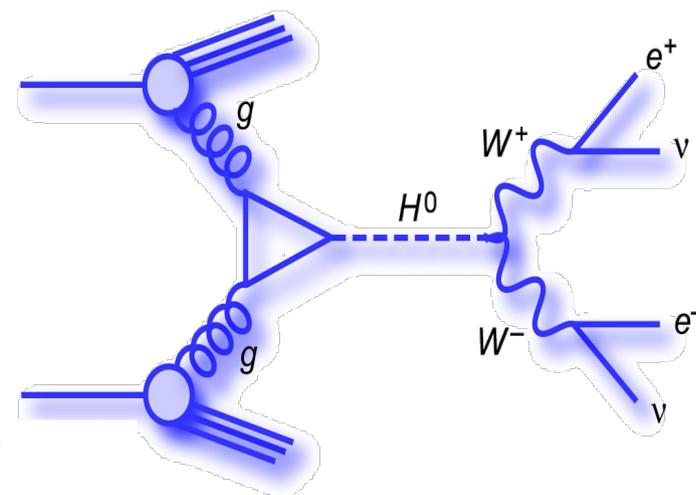
$$\sigma \times \mathcal{B}(H \rightarrow WW) = 0.1 \text{ pb}$$



# $H \rightarrow WW \rightarrow 2\ell 2\nu$

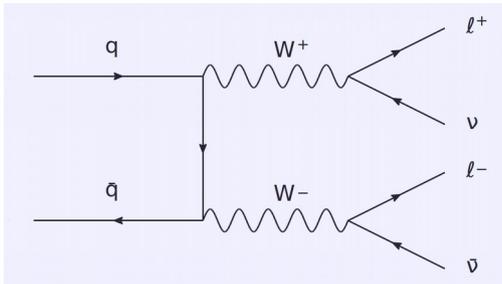
- 2 leptoni carichi isolati (elettroni o muoni) con carica opposta.
- Presenza di energia mancante nel piano trasverso (MET).
- Presenza di jet a seconda del meccanismo di produzione.

- Tanti eventi di segnale
- Segnatura sperimentale pulita
- Moderata presenza di eventi di fondo
- I due neutrini impediscono la ricostruzione completa della massa dell'Higgs



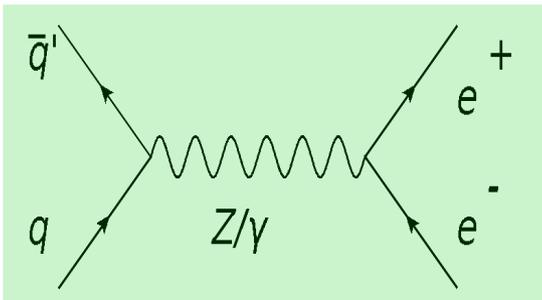
- L'Higgs ha spin 0:
  - $\rightarrow$  i leptoni carichi vengono emessi preferenzialmente vicini fra loro.
  - $\rightarrow$  piccola massa invariante del sistema dileptonico ( $m_{\ell\ell}$ ).

## WW



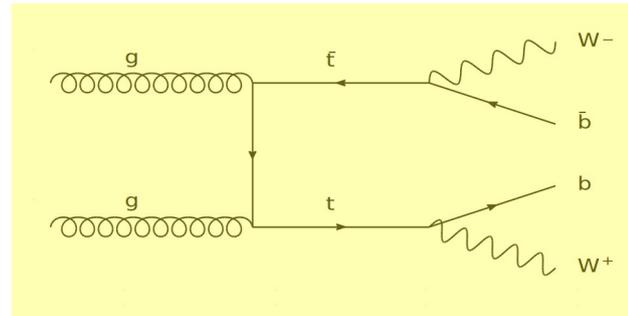
Stesso stato finale del segnale

## Drell-Yan



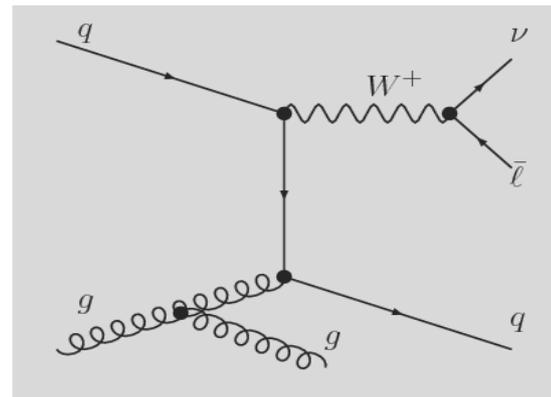
Dominante per stati finali con 2 leptoni con stesso flavour.

## t $\bar{t}$



Sezione d'urto elevata.  
Stesso stato finale del segnale + 2 b-jets.  
Ridotto grazie a tecniche di b-tagging

## Nonprompt



Un jet scambiato per un leptone. Ridotto grazie a identificazione e isolamento dei leptoni.  
Contributo anche da t $\bar{t}$  semileptonico.  
Misurato direttamente nei dati.

- **Altri fondi minori:** single-top,  $gg \rightarrow WW, W\gamma^{(*)}, WZ, ZZ, VVV$  ( $V=W,Z$ ).
- Fondi di quark top e DY simulati con programmi MC (solitamente al NLO) e normalizzati usando i dati in regioni di controllo.
- WW simulato con MC e normalizzazione lasciata libera (nessun vincolo) nel fit.
  - Segnale e fondo WW hanno distribuzioni cinematiche diverse.

Selezione degli eventi interessanti nei dati tramite trigger opportuni

Simulazione di eventi MC per tutti i processi di interesse

**Selezione degli eventi e stima dei fondi**  
Selezioni ottimizzate con le simulazioni MC

**Stima delle incertezze sistematiche**  
Sperimentali, teoriche, ecc.

**Procedura di fit e estrazione del segnale**  
Binned maximum likelihood fit basato su template MC

## “Divide et impera”

- Fondamentale categorizzare gli eventi
  - Per essere sensibili a canali di produzione e decadimento diversi;
  - Per aumentare la significanza del segnale.

## Procedura “blind”

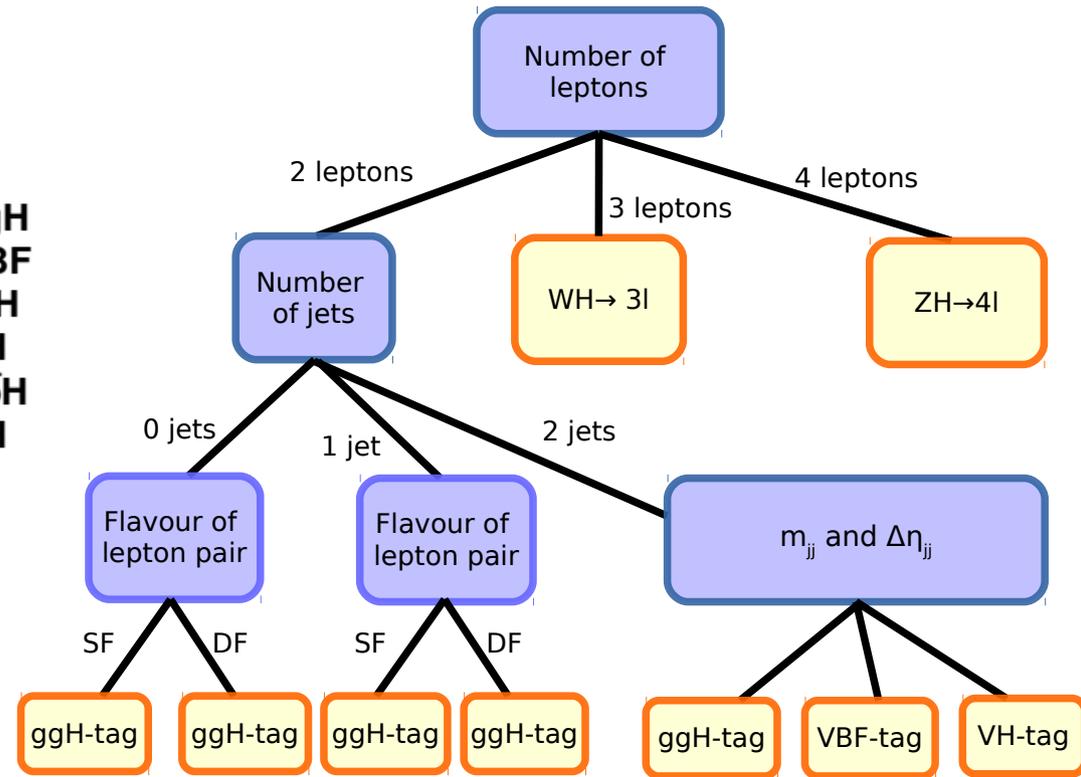
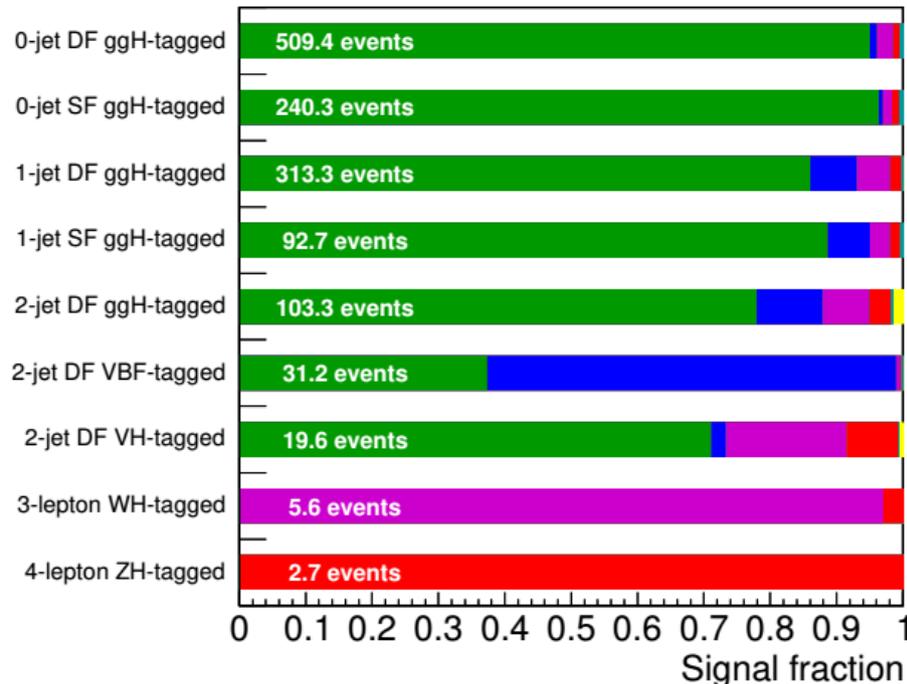
Si guardano i dati solo quando l'analisi è ottimizzata e approvata dalla collaborazione.

- Trigger: uno o due leptoni carichi (elettroni o muoni).
- Preselezione degli eventi:
  - 2 leptoni carichi con  $p_{T1} > 25$  GeV e  $p_{T2} > 10(13)$  GeV per  $\mu(e)$
  - MET  $> 20$  GeV,  $p_{Tee} > 30$  GeV
  - b-tagged jet veto  $\rightarrow$  soppressione del fondo da quark top

## Eventi suddivisi in 9 macro-categorie di segnale

Ognuna suddivisa in sottocategorie (30 categorie di segnale + varie regioni di controllo)

CMS Simulation 35.9 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)



SF: Same Flavour (ee/μμ)  
DF: Different Flavour (eμ)

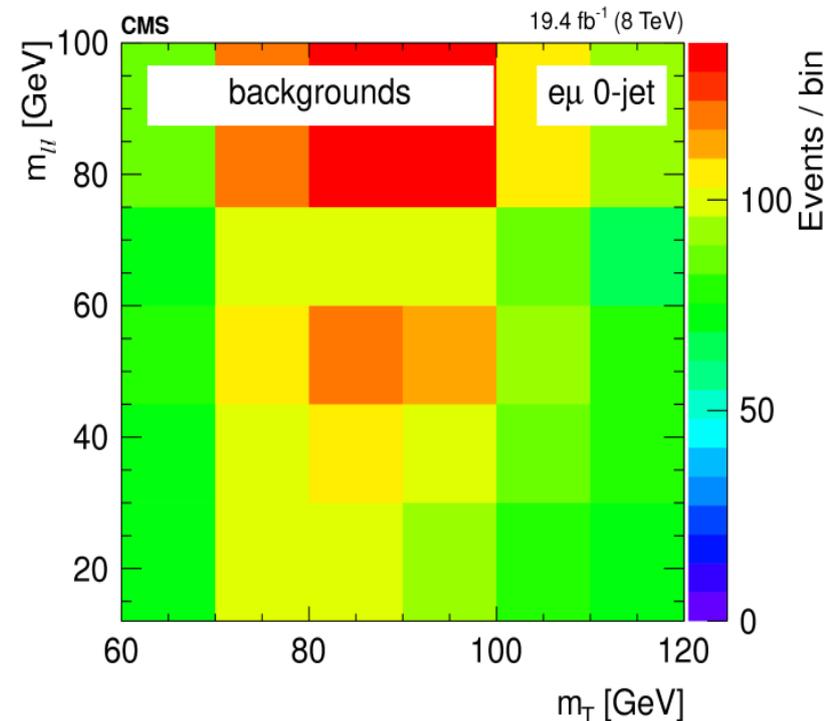
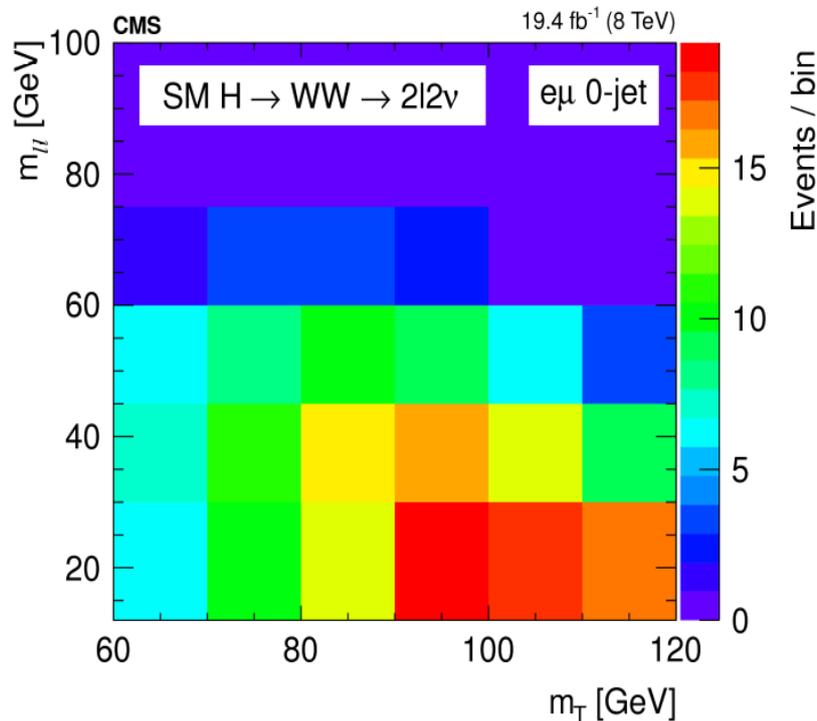
- Anche dopo le preselezioni gli eventi di fondo sono molti.
- La cinematica dello stato finale è usata per distinguere segnale e fondo.
- Segnale estratto con binned likelihood fit usando i template delle variabili discriminanti per segnale e fondi.

## Massa invariante dei 2 leptoni

$$m_{\ell\ell} = \sqrt{(E_{\ell 1} + E_{\ell 2})^2 - |\vec{p}_{\ell 1} + \vec{p}_{\ell 2}|^2}$$

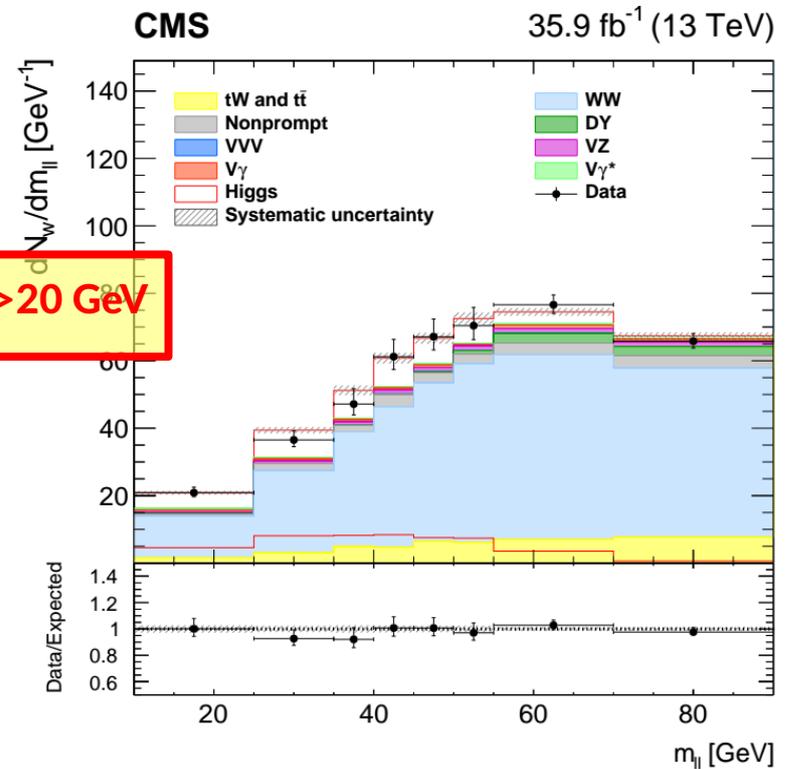
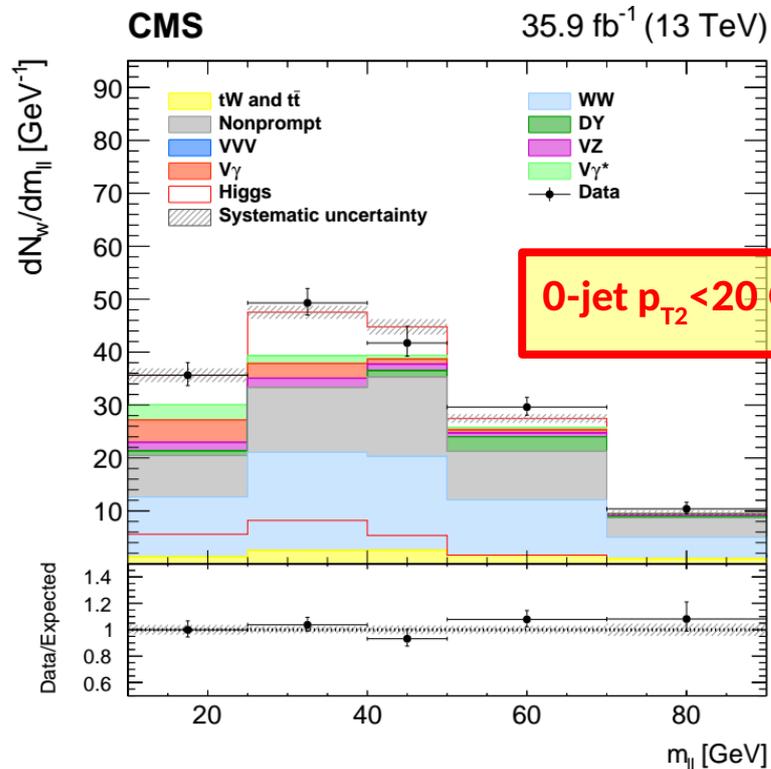
## Massa invariante nel piano trasverso

$$m_T = \sqrt{2p_T^{\ell\ell} E_T^{\text{miss}} (1 - \cos\Delta\phi(\vec{p}_T^{\ell\ell}, \vec{p}_T^{\text{miss}}))}$$



- Variabili discriminanti:  $m_{ll}$  e  $m_T$ 
  - Different flavour: template fit 2D.
  - Same flavour: Cut&Count ottimizzando con un BDT.
- **Categorie con 0, 1 e 2 jet** per ridurre il fondo di quark top.
- Eventi ulteriormente suddivisi in base al flavour e alla carica dei 2 leptoni
  - $e^+\mu^-$ ,  $e^-\mu^+$ ,  $\mu^+e^-$ ,  $\mu^-e^+$ ,  $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$
- Ulteriore suddivisione in base al  $p_T$  del leptone subleading ( $p_{T2} > < 20$  GeV).

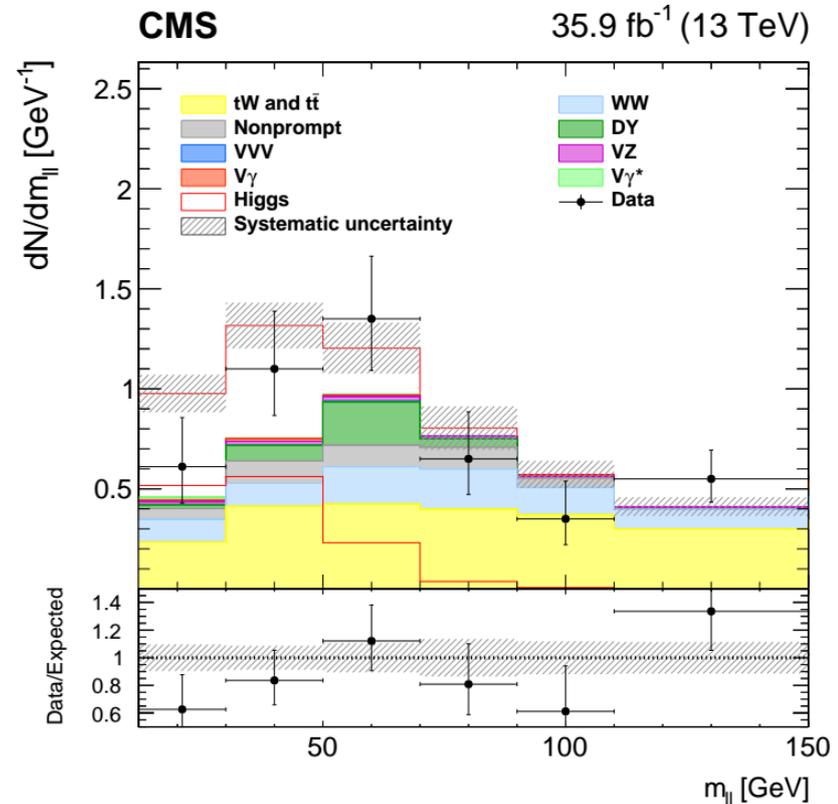
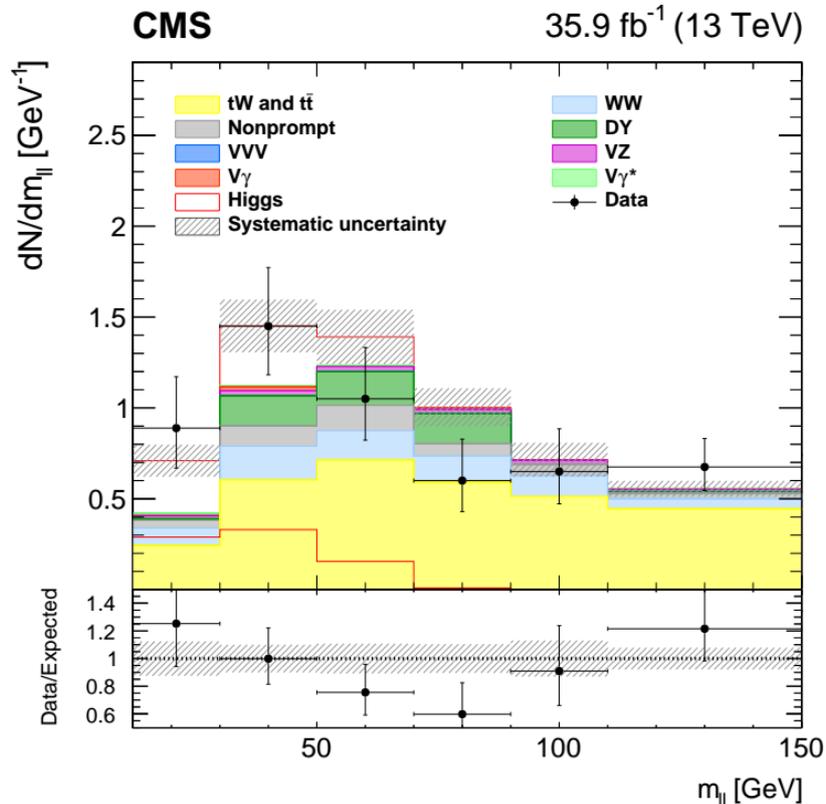
Riduzione fondo nonprompt



- Aumento di S/B selezionando eventi con topologia VBF
  - $m_{jj} > 400$  GeV e  $|\Delta\eta_{jj}| > 3.5$
- Template fit di  $m_{ll}$  in 2 categorie di  $m_{jj}$ .
  - Si sfrutta la diversa composizione di segnale e fondo per aumentare la significanza.

400 <  $m_{jj}$  < 700 GeV

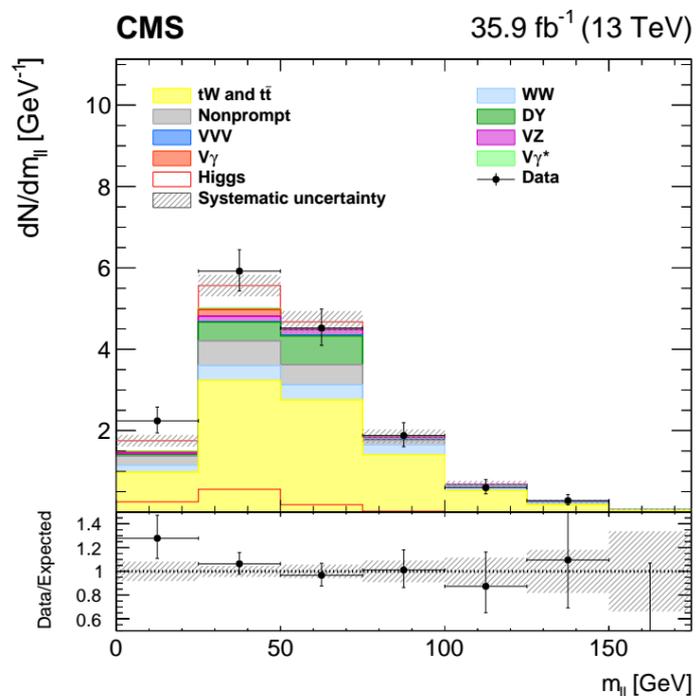
$m_{jj} > 700$  GeV



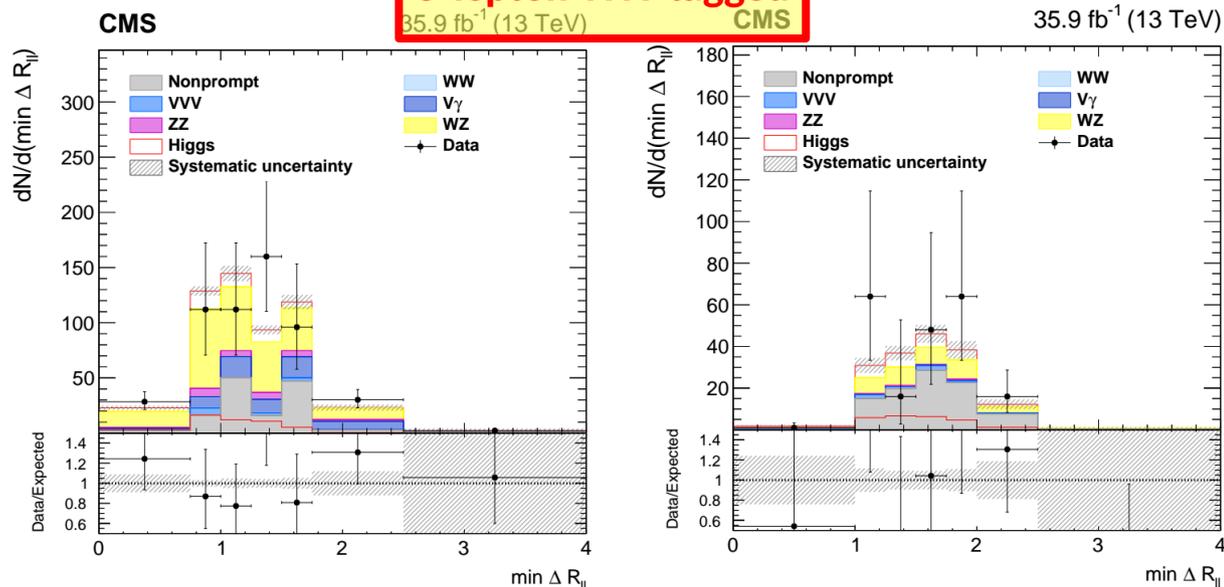
- 3 categorie diverse per 3 stati finali diversi

- VH-tagged con  $V \rightarrow$  adroni,  $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$   $\rightarrow$  Shape analysis basata su  $m_{ll}$
- 3-lepton WH-tagged con  $W \rightarrow l\nu$ ,  $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$   $\rightarrow$  Shape analysis basata su  $\min(\Delta R_{ll})$
- 4 lepton ZH-tagged con  $Z \rightarrow 2l$ ,  $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$   $\rightarrow$  Event counting analysis

## 2-jet VH-tagged



## 3-lepton WH-tagged

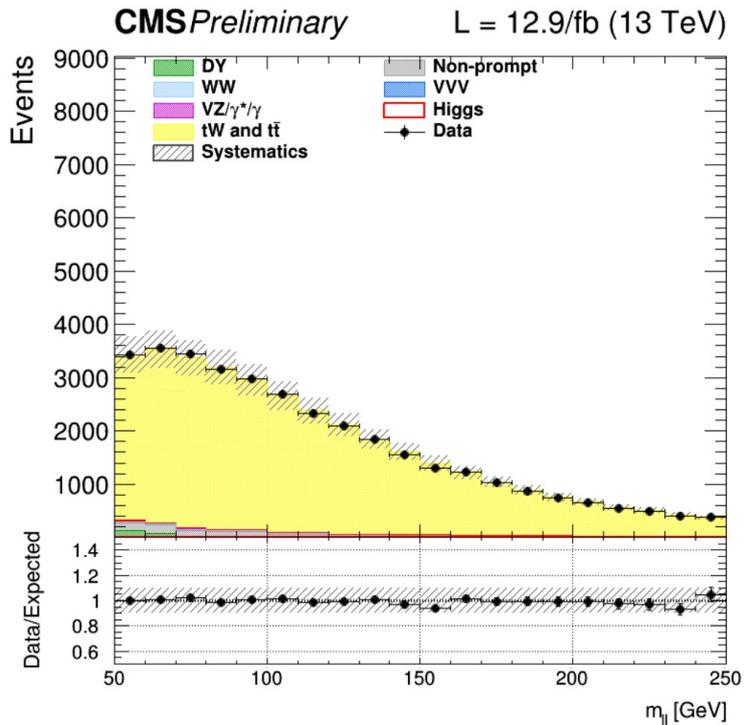


$$\mu^\mp \mu^\pm e^\mp / e^\mp e^\pm \mu^\mp$$

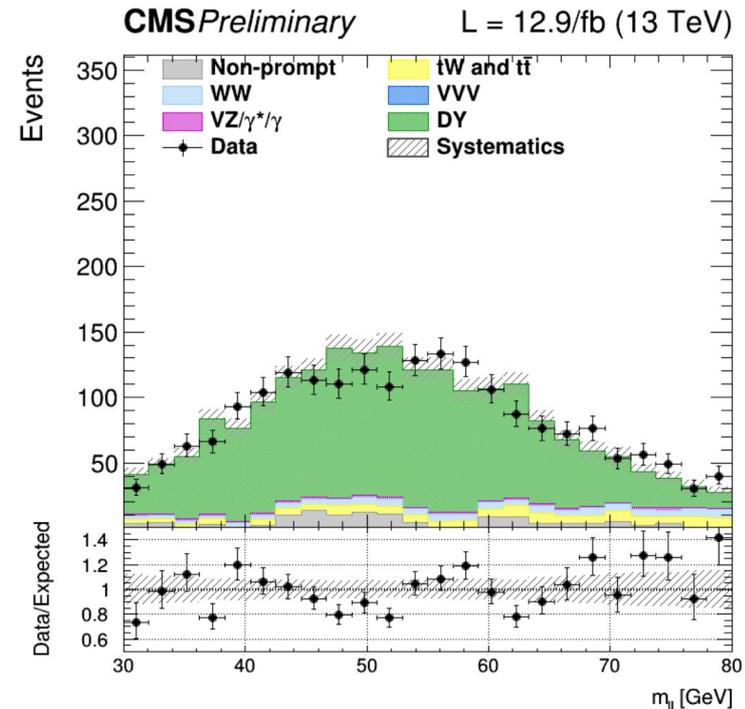
$$\mu^\pm \mu^\pm e^\mp / e^\pm e^\pm \mu^\mp$$

Ulteriore suddivisione nelle categorie WH- and ZH-tagged basata su flavour e carica dei 3 o 4 leptoni.

- Per ogni categoria si definiscono regioni di controllo ortogonali alle regioni di segnale
  - Utilizzate per stimare la **normalizzazione** dei fondi principali dai dati.
  - Ogni regione deve essere pura per il fondo considerato.



Regione di controllo per il fondo di top  
presenza di jet con b-tag

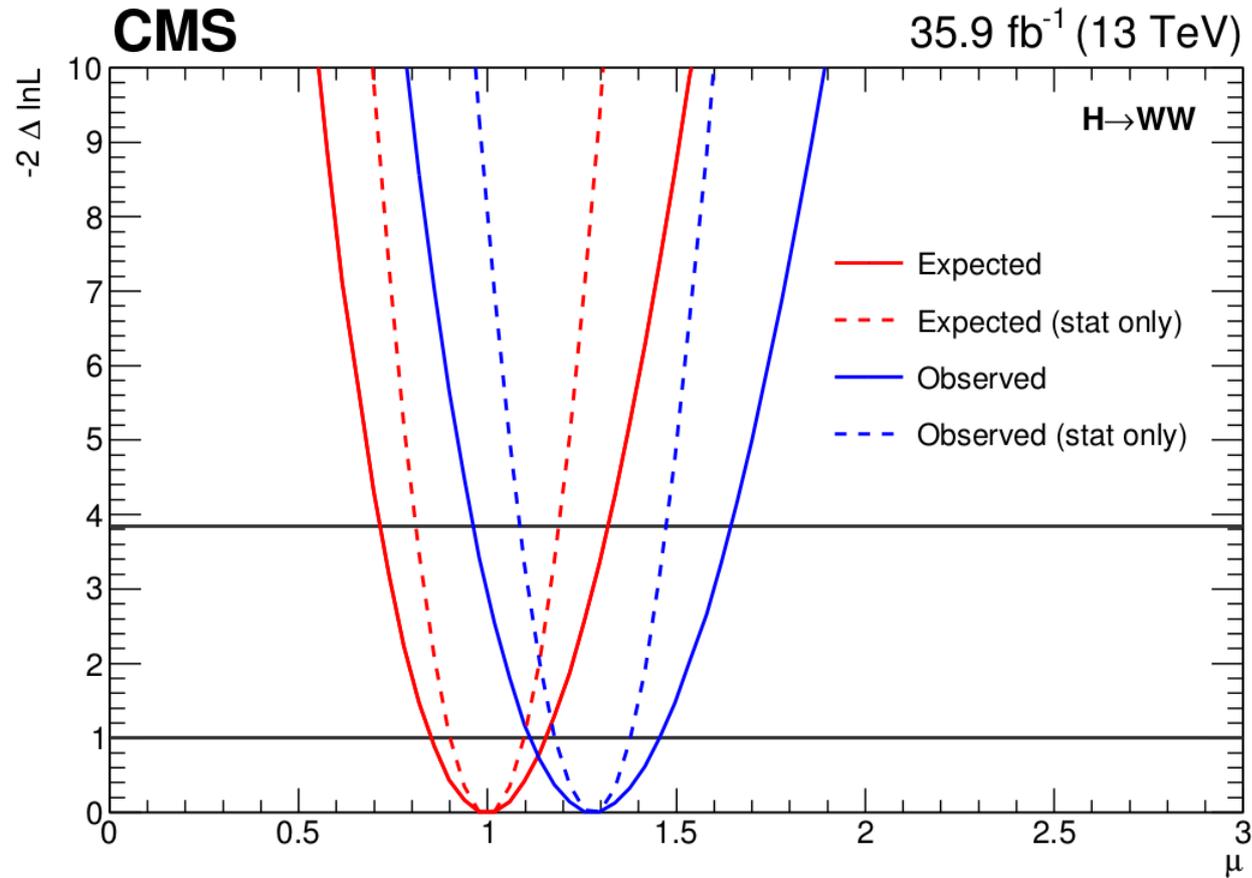


Regione di controllo per il fondo DY  
 $m_T < 50$  GeV (>50 GeV nella regione di segnale)

- Altre regioni di controllo:
  - per i fondi WZ e Z $\gamma$  nelle categorie WH-tagged
  - per il fondo ZZ nelle categorie ZH-tagged

# Misura della signal strength

- Si misura la signal strength ( $\mu = \sigma / \sigma_{SM}$ ) effettuando un fit combinato di tutte le categorie.



$$\mu = 1.28_{-0.17}^{+0.18} = 1.28 \pm 0.10(\text{stat}) \pm 0.11(\text{syst})_{-0.07}^{+0.10}(\text{theo})$$

Significance = 9.1 $\sigma$  (7.1 $\sigma$  exp)

**Prima osservazione  
di H → WW in CMS!**

~stesso contributo delle incertezze statistiche, sistematiche e teoriche

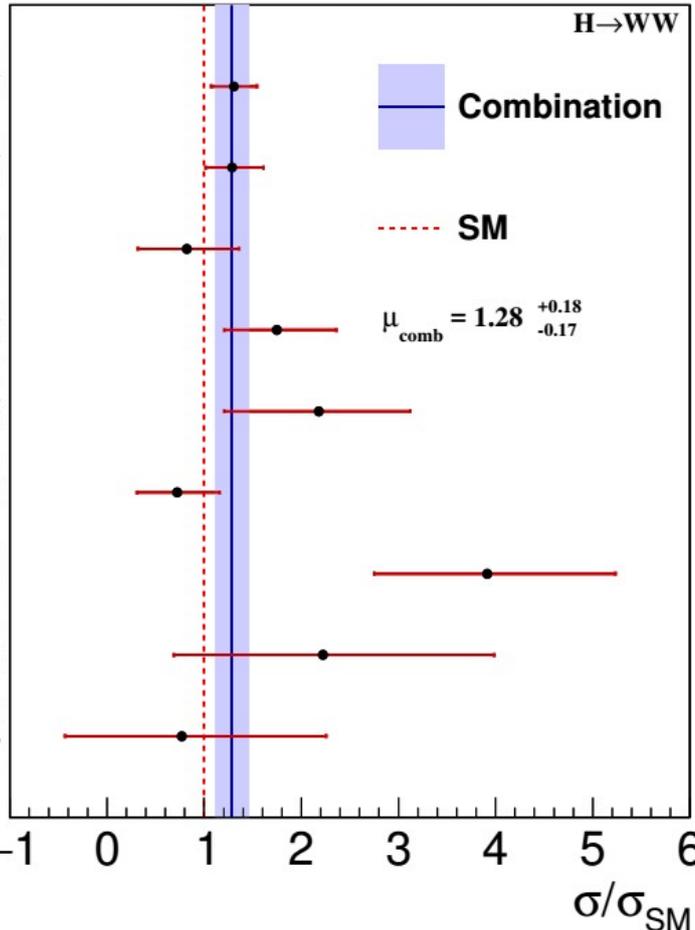
Type	Source	Impact (%)
Theoretical	Signal	7
	WW	2
	Top quark	2
	PS and UE	2
	MC statistics	2
	Electrons	5
	Luminosity	4
Experimental	Muons	3
	b-tagging	3
	Nonprompt	3
	Jets	2
	$p_T^{\text{miss}}$	2
	VZ/ $V\gamma^*$ scale factor	2
DY SF scale factor	2	

- Variazioni delle scale QCD, PDF, ma soprattutto incertezze sulle jet bin migrations per ggH.
- NB: precisione sulla sezione d'urto ggH N3LO (QCD) e NLO (EW)!
- Incertezze sperimentali legate soprattutto a elettroni, luminosità, muoni e jet.
- Incertezze sperimentali sulla stima degli eventi di fondo riducibili con più statistica.

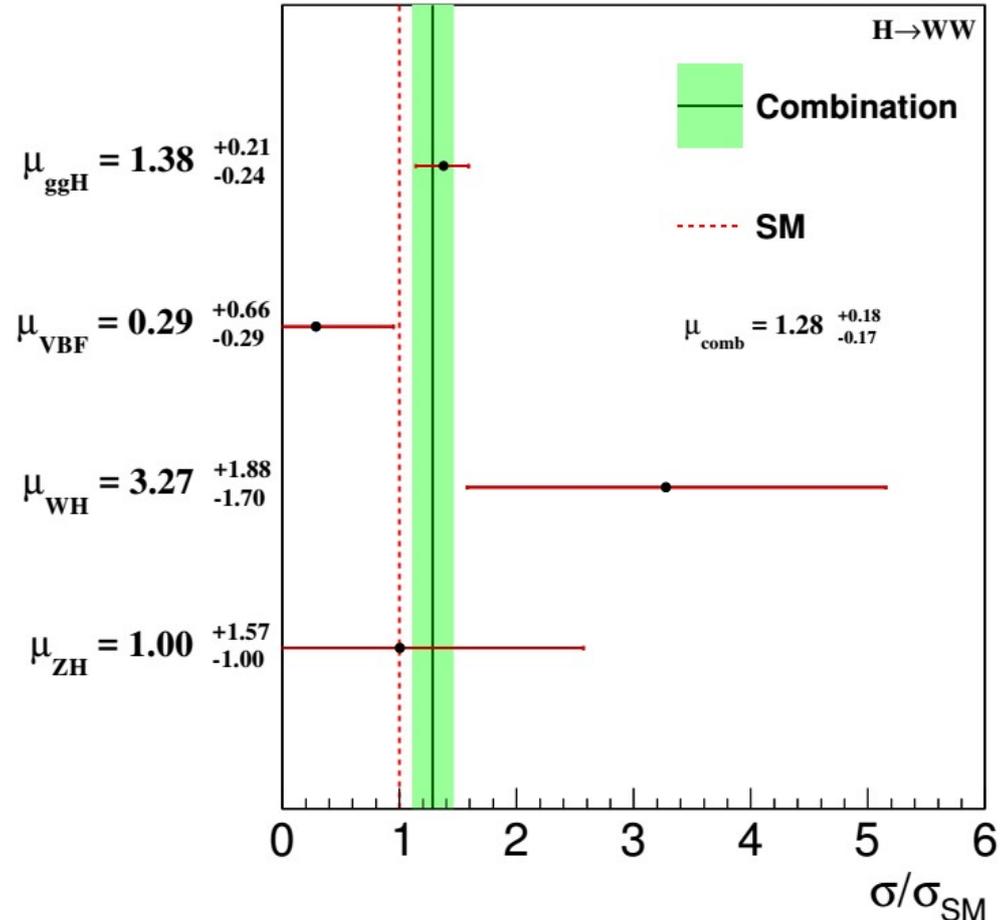
# Misura delle signal strength

- Tramite fit simultanei di tutte le categorie si misurano anche:
  - $\sigma/\sigma_{SM}$  per categoria
  - $\sigma/\sigma_{SM}$  per meccanismo di produzione

**CMS** 35.9 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)



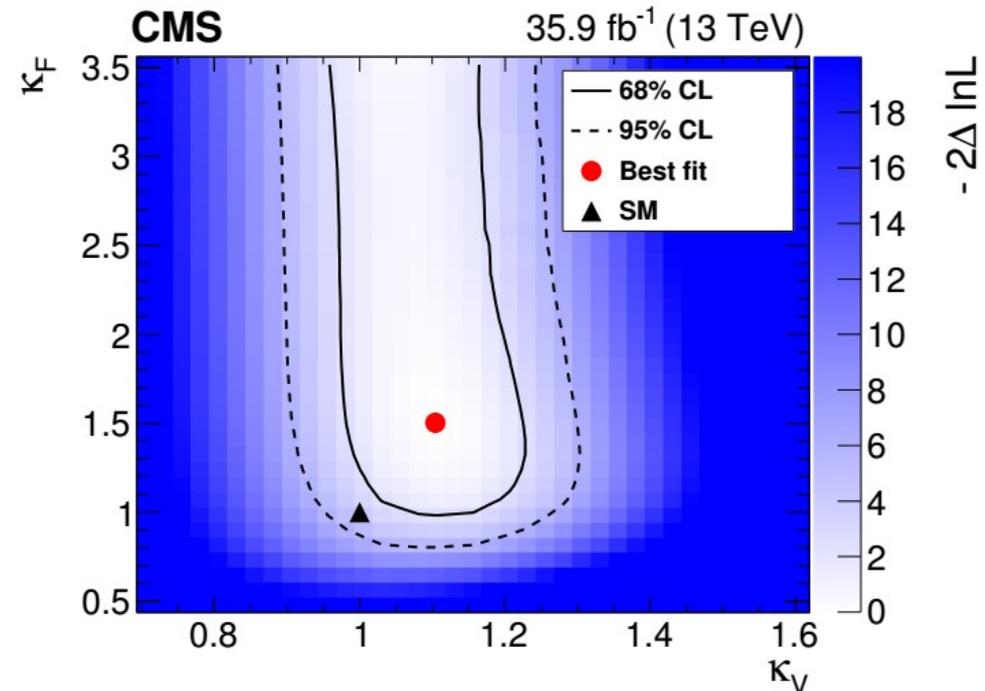
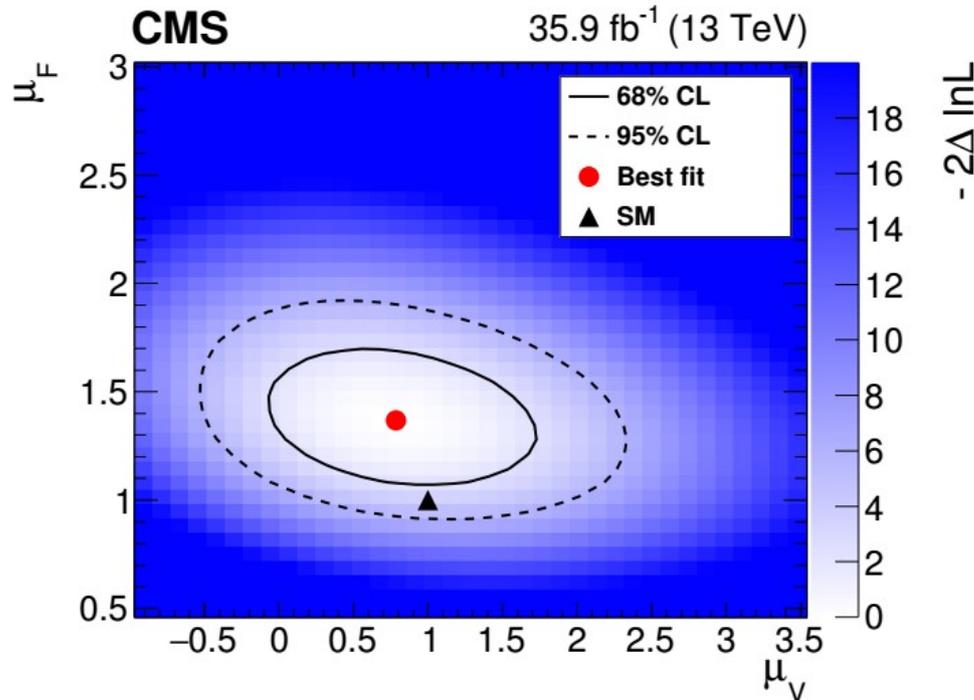
**CMS** 35.9 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)



- Misura degli accoppiamenti dell'Higgs a fermioni e bosoni in 2 parametrizzazioni:
  - $\mu_F, \mu_V$ : signal strengths associate a ggH e VBF/VH
  - $\kappa_F, \kappa_V$ : costanti di accoppiamento associate a processi fermionici e bosonici nell'ambito del "kappa" framework.

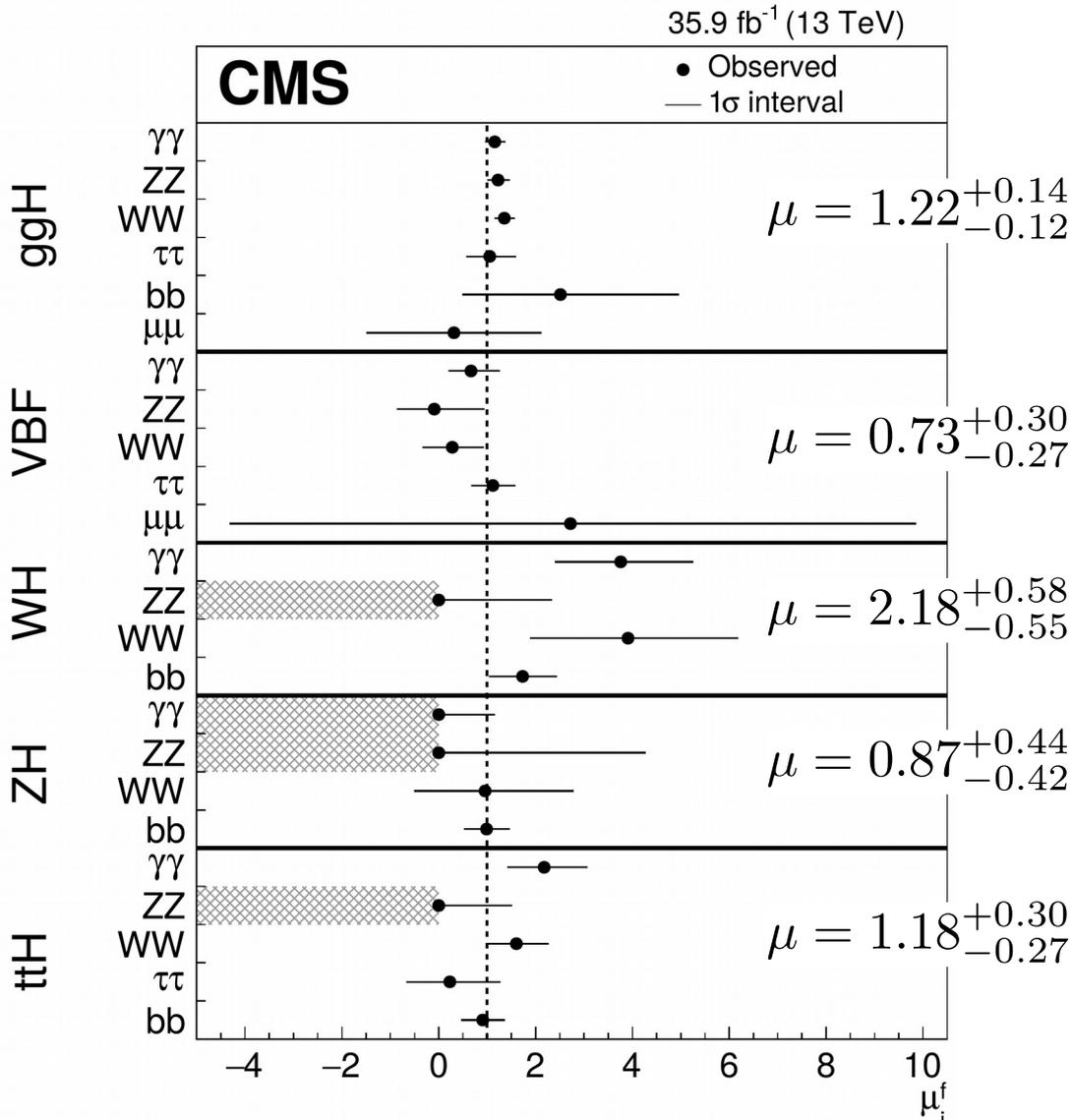
$$\sigma \times \mathcal{B}(X \rightarrow H \rightarrow WW) = \kappa_i^2 \frac{\kappa_V^2}{\kappa_H^2} \sigma_{SM} \times \mathcal{B}_{SM}(X \rightarrow H \rightarrow WW)$$

$$\kappa_H = \kappa_H(\kappa_f, \kappa_V) \quad \leftarrow \text{total width modifier}$$



**Compatibilità con lo SM entro 2 $\sigma$**

- Combinazione di tutti i canali di decadimento con i dati 2016.
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $H \rightarrow WW$ ,  $H \rightarrow ZZ$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$ ,  $H \rightarrow bb$ ,  $H \rightarrow \mu\mu$ ,  $H \rightarrow \text{invisible}$



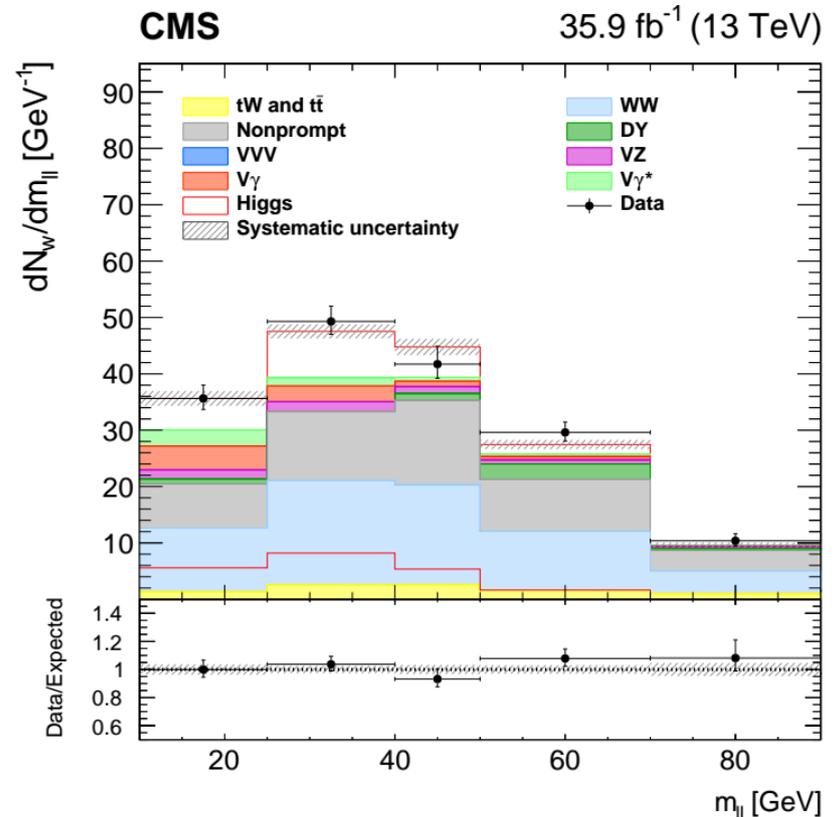
Incerteza su ggH ridotta del 33%  
rispetto alla combinazione  
ATLAS+CMS del Run1

Incerteza su ttH ridotta del 50%  
rispetto alla combinazione  
ATLAS+CMS del Run1

Incerteza su VBF e VH ridotta del  
20% rispetto alla combinazione CMS  
del Run1

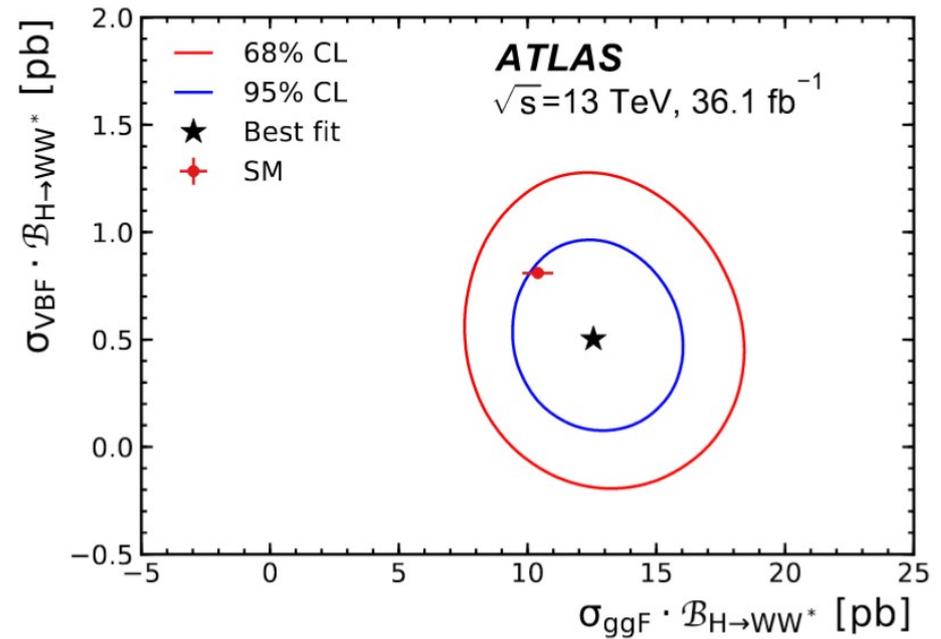
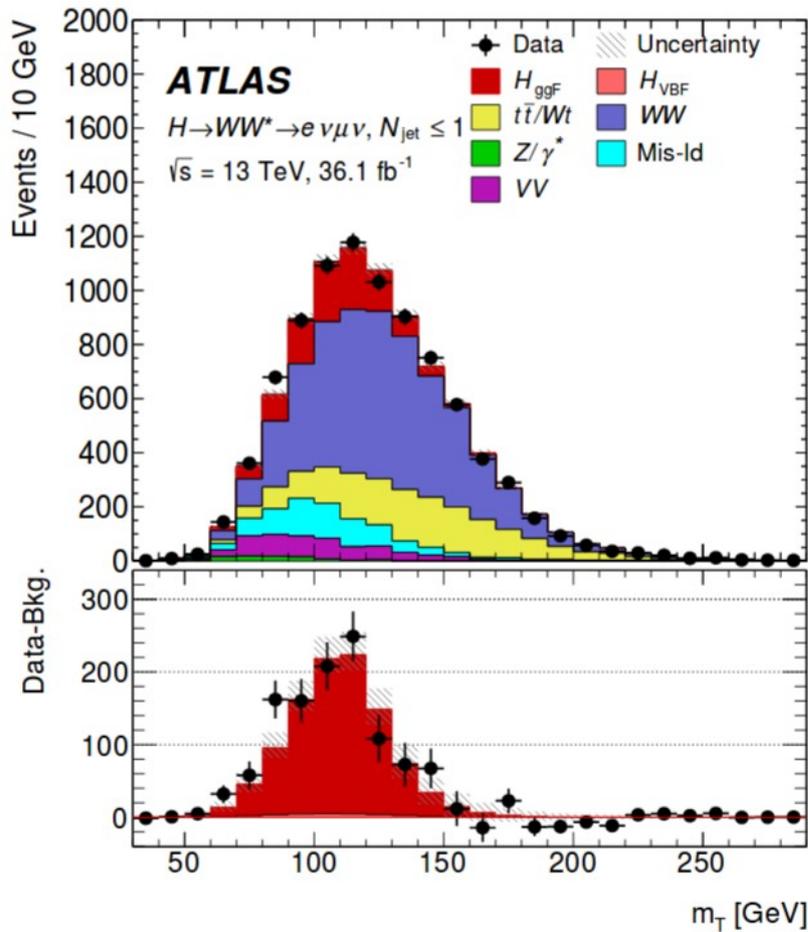
$$\mu_{\text{comb}} = 1.17 \pm 0.10$$

- $H \rightarrow WW$  è un canale molto importante per le misure di precisione nel settore del bosone di Higgs.
- Prima osservazione di  $H \rightarrow WW$  in CMS!
- Le misure mostrano un buon accordo con le previsioni dello SM
  - Alcune “tensioni” da tenere d’occhio.
- Usando tutti i dati del Run2 sarà possibile ottenere precisioni su signal strength e accoppiamenti significativamente migliori.
  - Molte categorie ancora limitate dalla statistica.
- Lavori in corso e analisi future:
  - Ricerca di risonanze scalari di alta massa (200 GeV – 3 TeV) in WW.
  - Misure differenziali di  $p_{TH}$ , # jet,  $p_{Tj}$ , ...
  - Analisi dedicata al meccanismo di produzione VBF.



# BACKUP

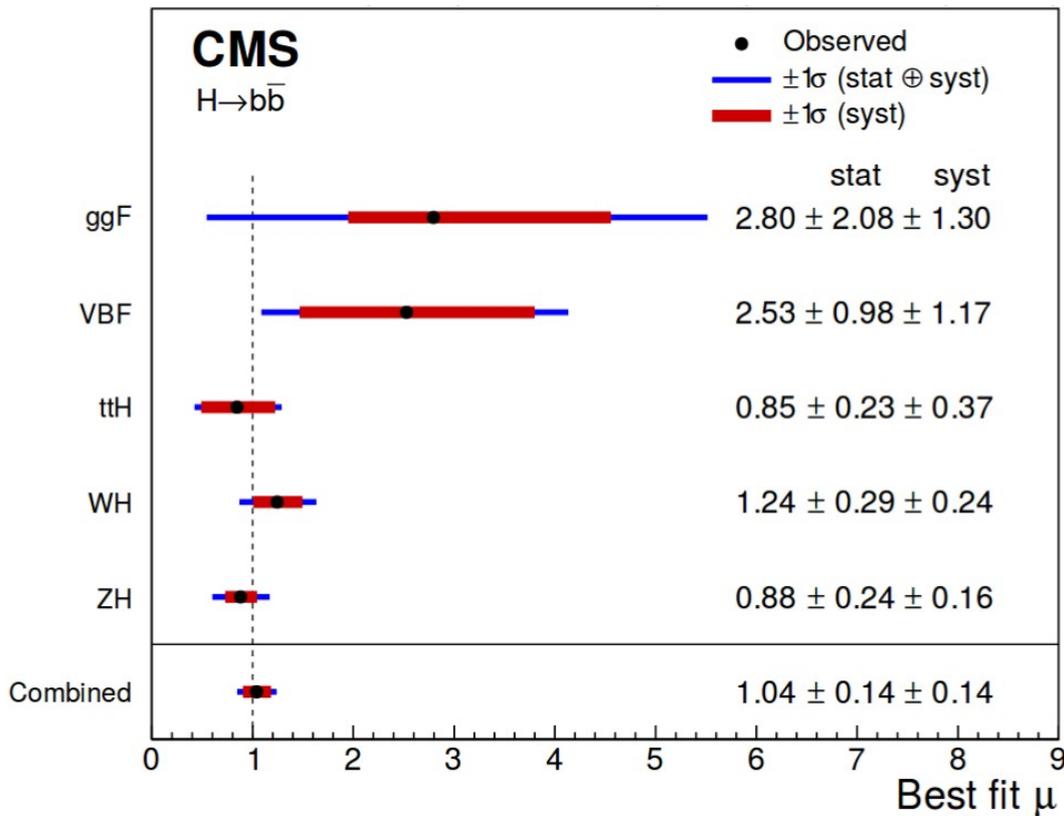
- Misura di ggH e VBF con i dati a 13 TeV del 2016.
- Utilizzo di BDT per la misura del contributo VBF.



$$\mu_{\text{ggF}} = 1.21 \pm 0.10(\text{stat.})^{+0.13}_{-0.12}(\text{theo syst.}) \pm 0.15(\text{exp syst.}) = 1.21^{+0.22}_{-0.21}$$

$$\mu_{\text{VBF}} = 0.62^{+0.30}_{-0.28}(\text{stat.}) \pm 0.13(\text{theo syst.}) \pm 0.16(\text{exp syst.}) = 0.62^{+0.37}_{-0.36}$$

- Prima misura dell'accoppiamento diretto dell'Higgs con il quark b.
- Canali più importanti:  $W(\rightarrow l\nu)H(\rightarrow b\bar{b})$ ,  $Z(\rightarrow ll)H(\rightarrow b\bar{b})$  e  $Z(\rightarrow \nu\nu)H(\rightarrow b\bar{b})$ 
  - Combinazione dei dati a 7, 8 e 13 TeV (2016+2017)
- Fit simultaneo di tutte le categorie usando l'output di un DNN (Deep Neural Network) come variabile discriminatoria.

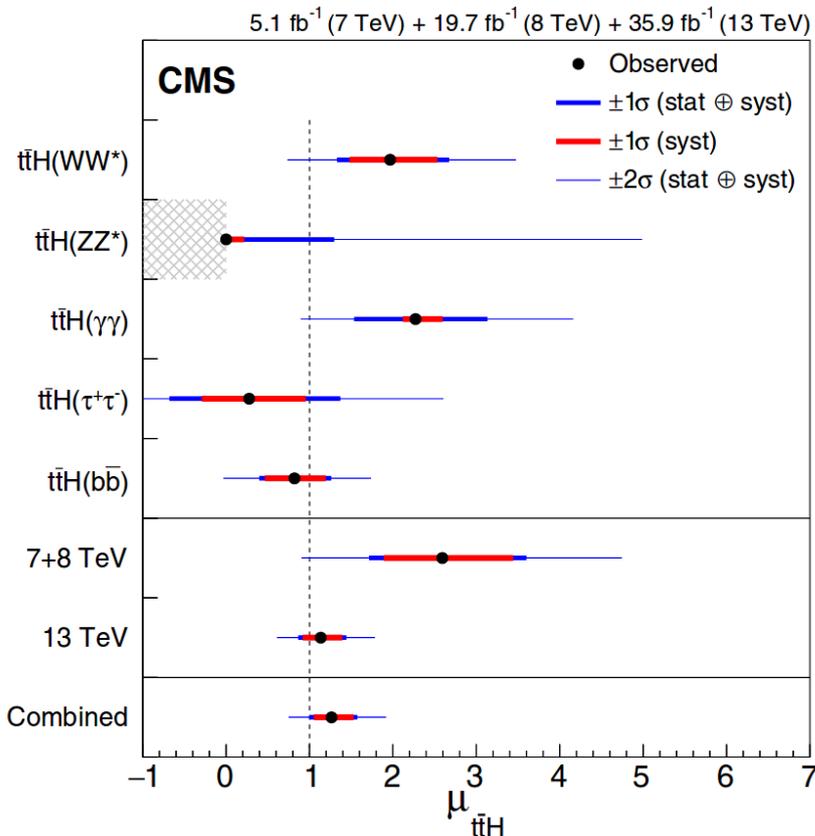


Significance =  $5.6\sigma$  ( $5.5\sigma$  exp)

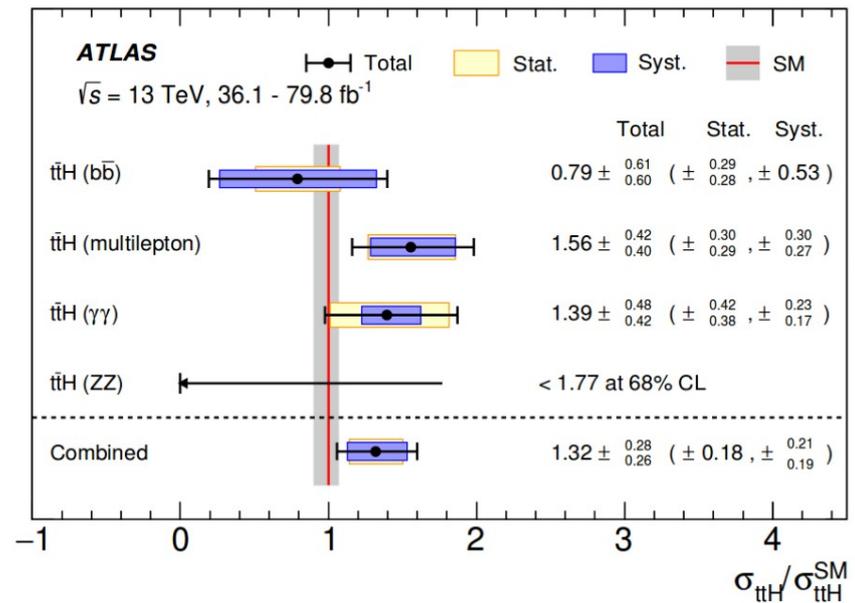
- Osservazione confermata da un'analisi simile di ATLAS

Channel	Significance	
	Exp.	Obs.
VBF+ggF	0.9	1.5
$t\bar{t}H$	1.9	1.9
VH	5.1	4.9
$H \rightarrow b\bar{b}$ combination	5.5	5.4

- Prima misura dell'accoppiamento diretto dell'Higgs con il quark top.
- Moltitudine di stati finali analizzati, usando tecniche diverse a seconda del canale.
  - $H \rightarrow WW$ ,  $H \rightarrow ZZ$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $H \rightarrow bb$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$
  - Combinazione dei dati a 7, 8 e 13 TeV (solo 2016)



- Osservazione confermata da un'analisi simile di ATLAS che usa anche i dati a 13 TeV raccolti nel 2017



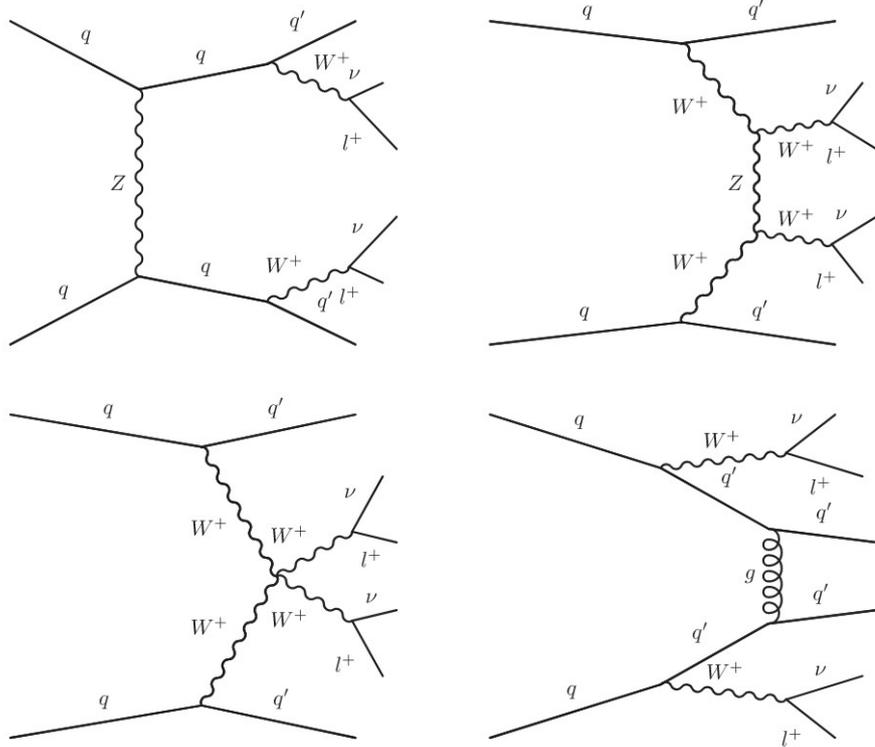
Significance = 5.2σ (4.2σ exp)

$$\mu = 1.26^{+0.31}_{-0.26}$$

Significance = 6.3σ (5.1σ exp)

# Same sign vector boson scattering

- Prima osservazione del processo elettrodebole di VBS  $W^{+/-}W^{+/-}$
- Sezione d'urto divergente se non esiste il canale s con l'Higgs.
- Sensibile ad accoppiamenti quartici anomali (aQGC) e nuove risonanze ( $H^{++}/H^{-}$ )
- Risultato ottenuto usando i dati a 13 TeV (solo 2016).

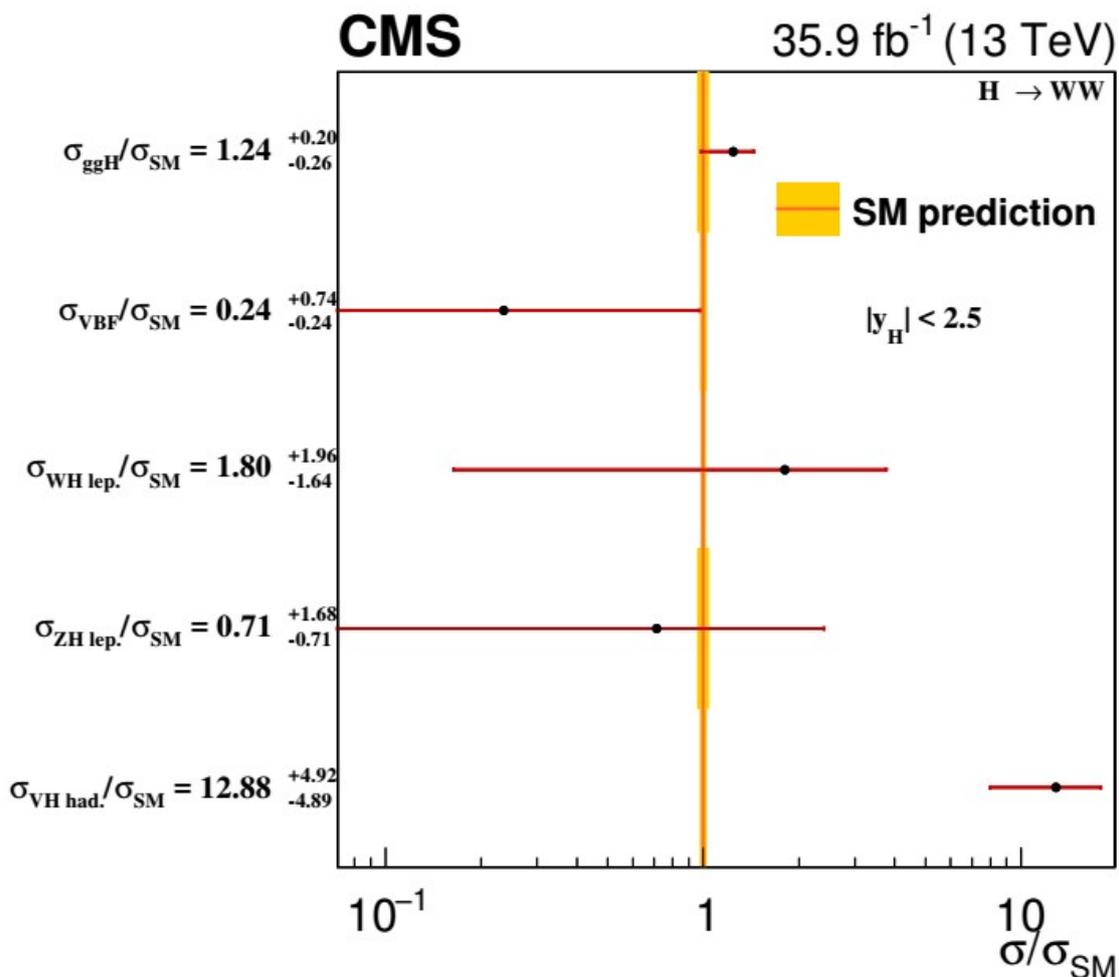


Significance =  $5.5\sigma$  ( $5.7\sigma$  exp)

$$\mu = 0.90 \pm 0.22$$

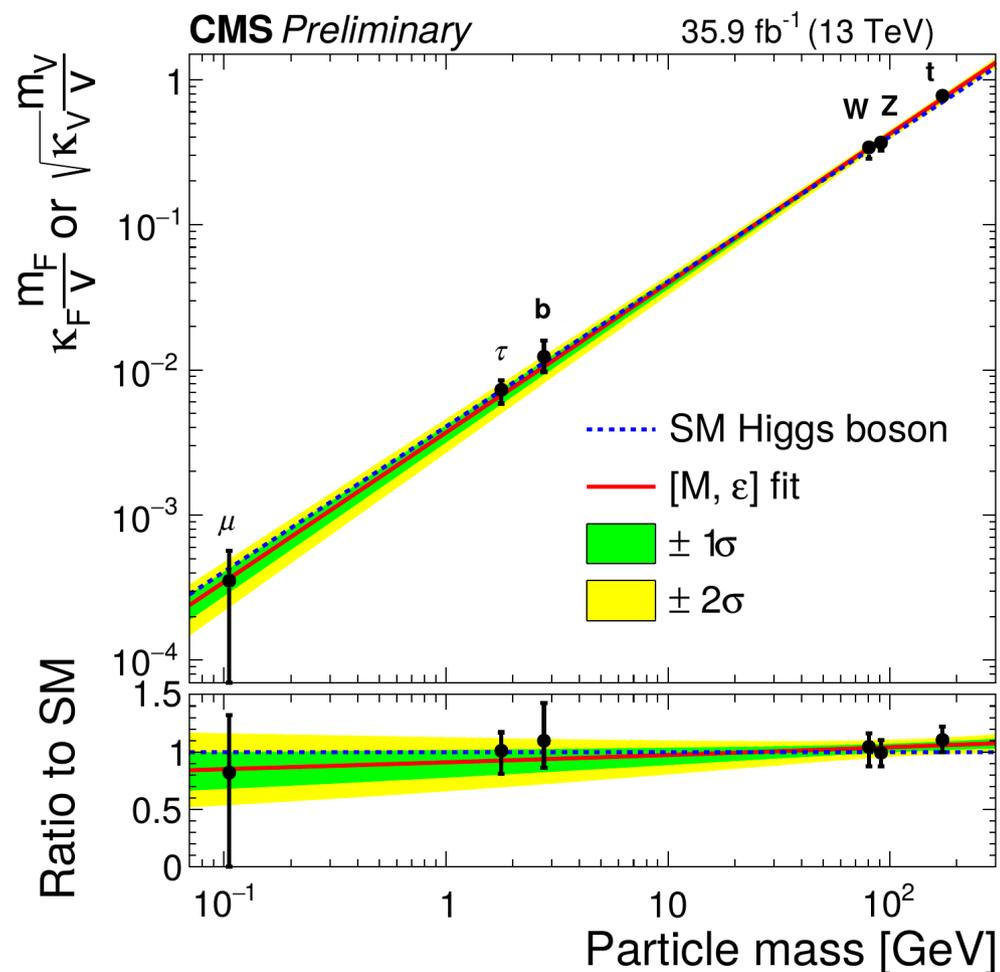
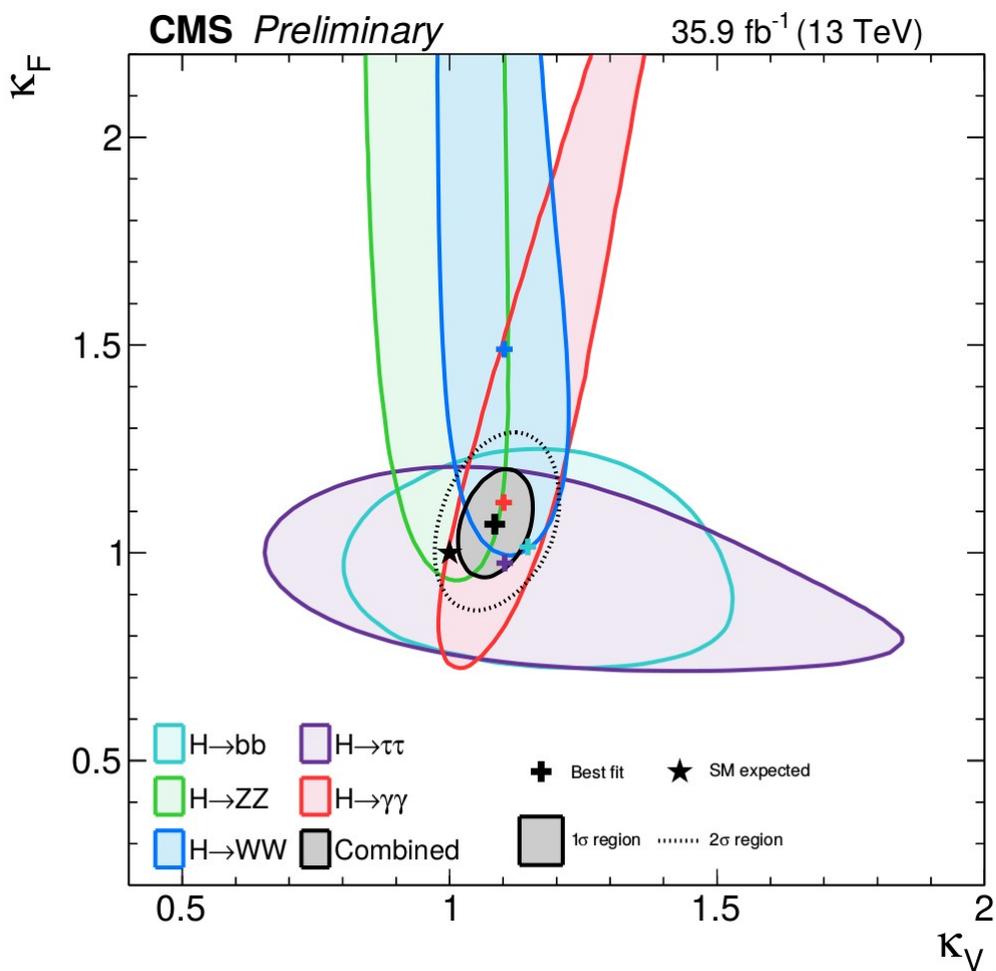
- Limiti stringenti sulla presenza di aQGC e  $H^{++}/H^{-}$  prodotti tramite VBF.

- Misura delle sezioni d'urto fiduciali in accordo con il modello delle “stage-0” simplified template cross sections.
- Handbook of LHC Higgs Cross Sections 4 ([arXiv 1610.07922](https://arxiv.org/abs/1610.07922))



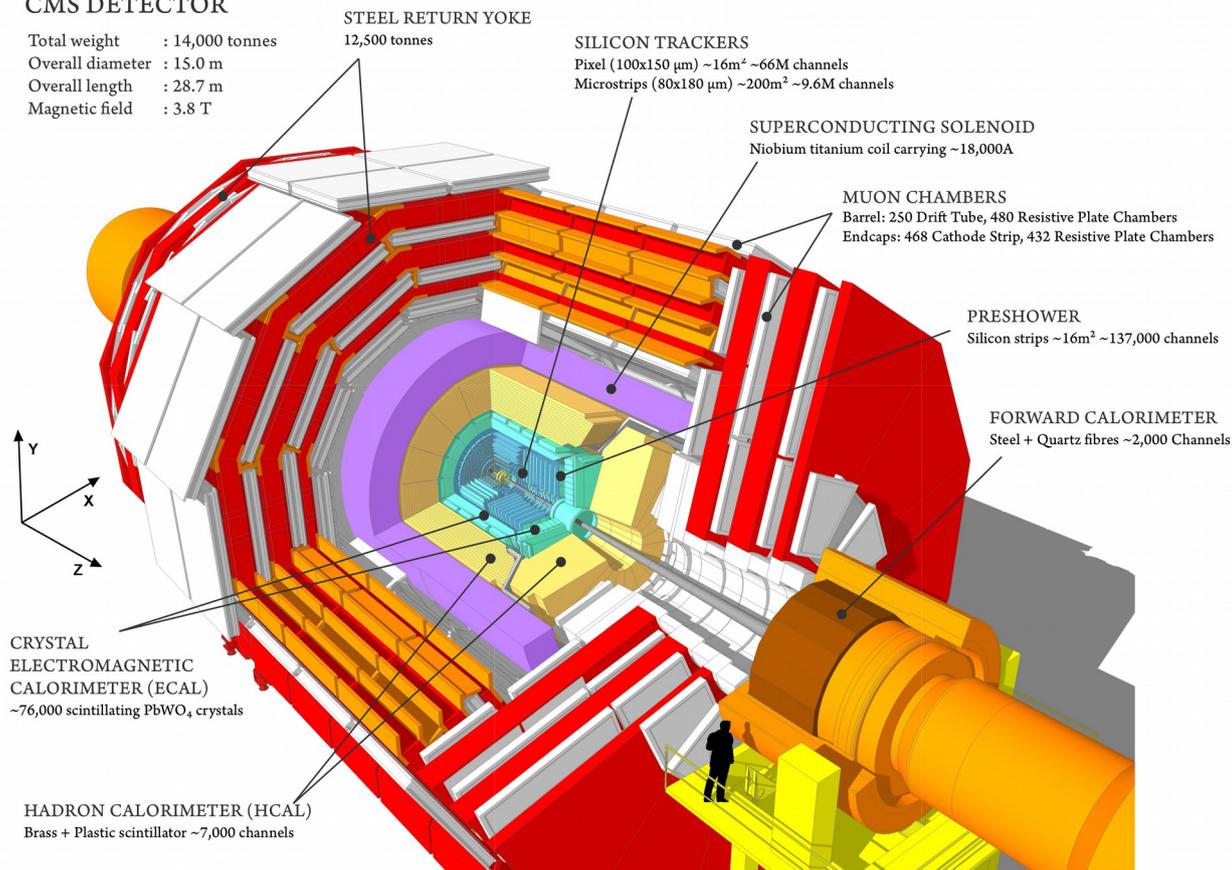
- Sezioni d'urto misurate per 5 processi di segnale:
  - ggH, VBF, W(→lv)H, Z(→ll)H, V(→had)H
- Selezione fiduciale  $|y_H| < 2.5$  a particle-level.
- Confronto con i più recenti calcoli teorici sulle sezioni d'urto dei vari processi.

- Accoppiamenti in accordo con quanto atteso dallo SM entro  $2\sigma$ .



## CMS DETECTOR

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



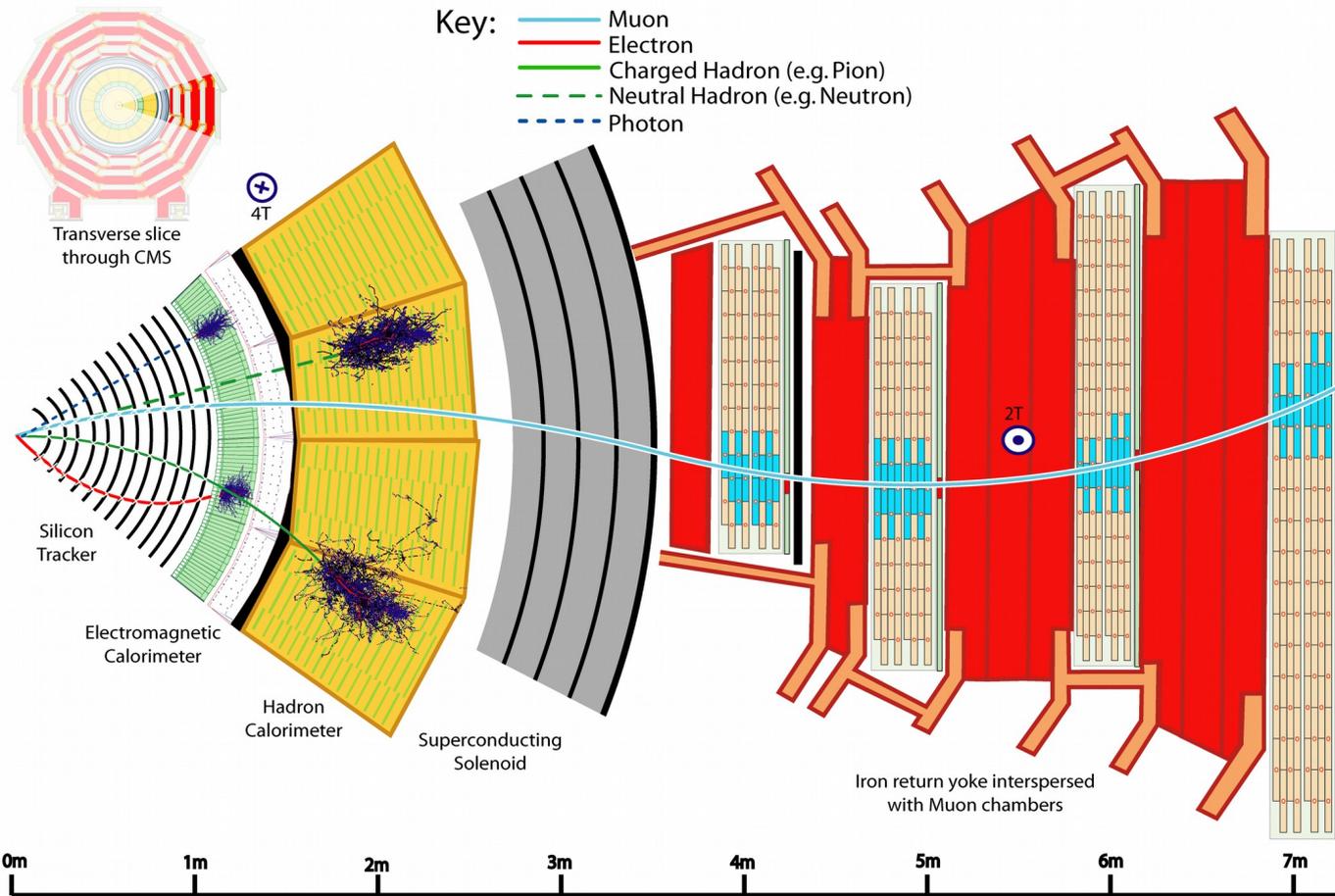
- CMS is a general purpose detector

## ● Physics program:

- Higgs boson search and studies;
- SM physics;
- Top quark physics;
- SUSY;
- Exotic searches.

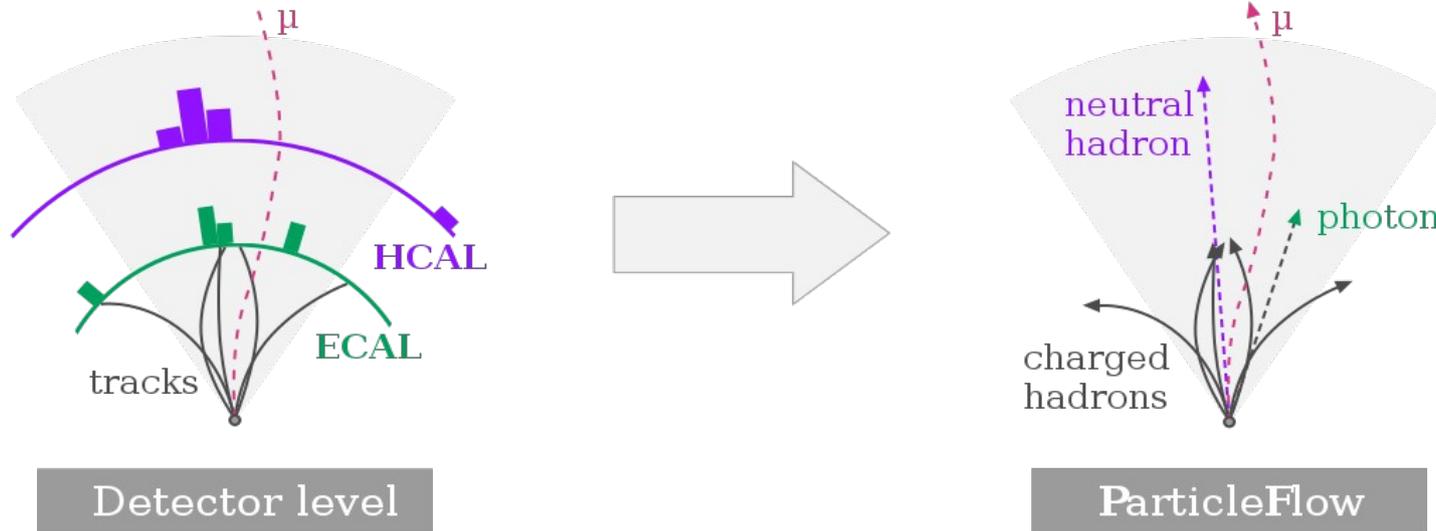
## ● Main features:

- 3.8 T magnetic field parallel to the beam axis;
- Cylindrical symmetry around the beam direction;
- Central part (barrel) closed at both ends with two endcaps.



- From the beam axis to the outside (barrel):
  - Tracker;
  - Electromagnetic calorimeter (ECAL);
  - Hadron calorimeter (HCAL);
  - Magnetic coil;
  - Muon chambers.
- +2 endcap disks.

- **Particle Flow (PF) technique:** particles in the event are reconstructed starting from the information of each sub-detector.



## Electrons

- Tracker + ECAL

## Jets

- All sub-detectors
- Anti- $k_t$  algorithm

## Muons

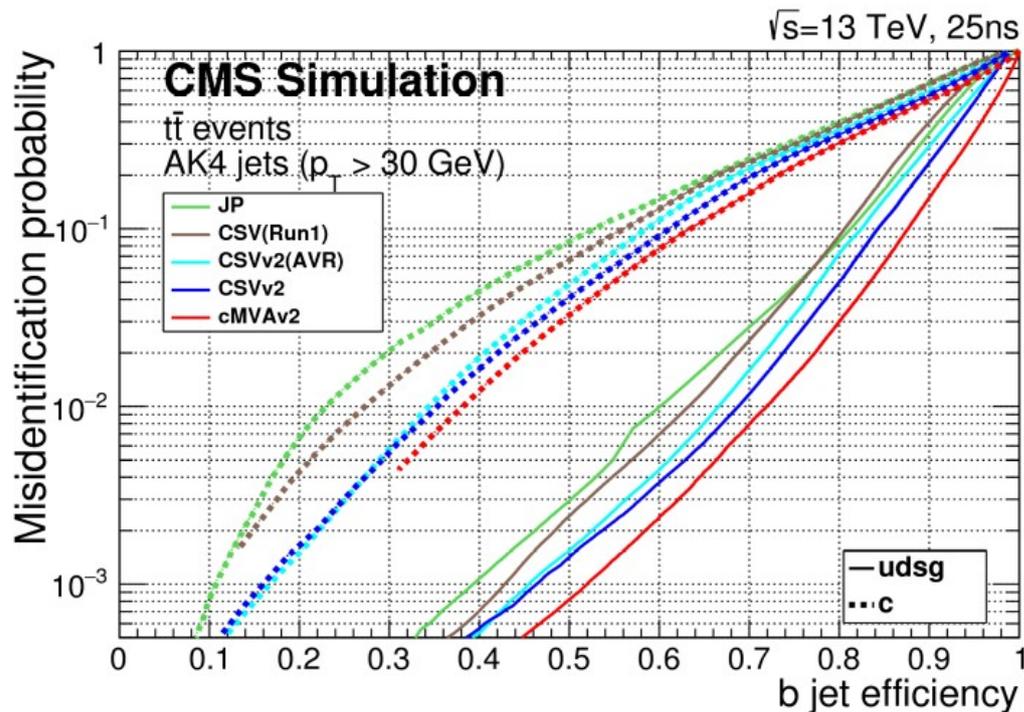
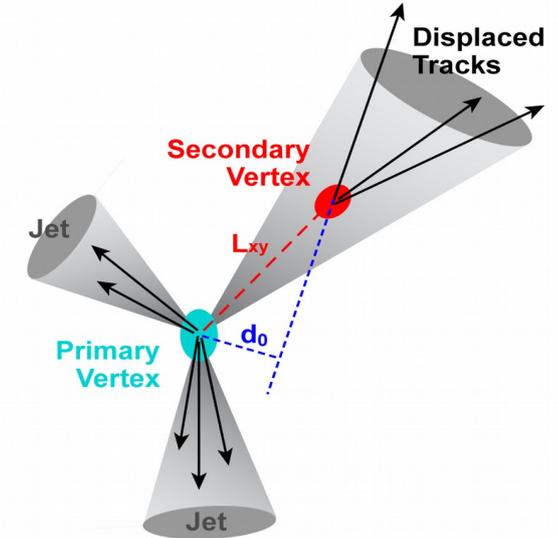
- Tracker + muon chambers

$$E_T^{\text{miss}}$$

- All sub-detectors

$$\vec{p}_T^{\text{miss}} = - \sum_{\text{PF obj}} \vec{p}_T^{\text{PF obj}}$$

- Jets arising from b quarks fragmentation (b-jets) can be identified using b tagging techniques.
  - Crucial to reduce background contamination in many physics analyses.
- Relatively large mass and long lifetime of B hadrons are exploited.



- B tagging algorithms use several input variables:
  - Secondary vertices;
  - Impact parameters of tracks inside the jet;
  - Presence of muons inside the jet.
- A discriminator value for each jet describes the likelihood to be a b-jet.

- Data are selected requiring different HLT triggers:
  - **Double lepton trigger**: two leptons with  $p_T > 17$  and  $8$  GeV;
  - **Single electron trigger**: one electron with  $p_T > 27$  GeV;
  - **Single muon trigger**: one muon with  $p_T > 24$  GeV.
- Integrated luminosity at 8 TeV (collected in 2012) =  $19.4 \text{ fb}^{-1}$
- Integrated luminosity at 13 TeV (collected in 2015) =  $2.3 \text{ fb}^{-1}$



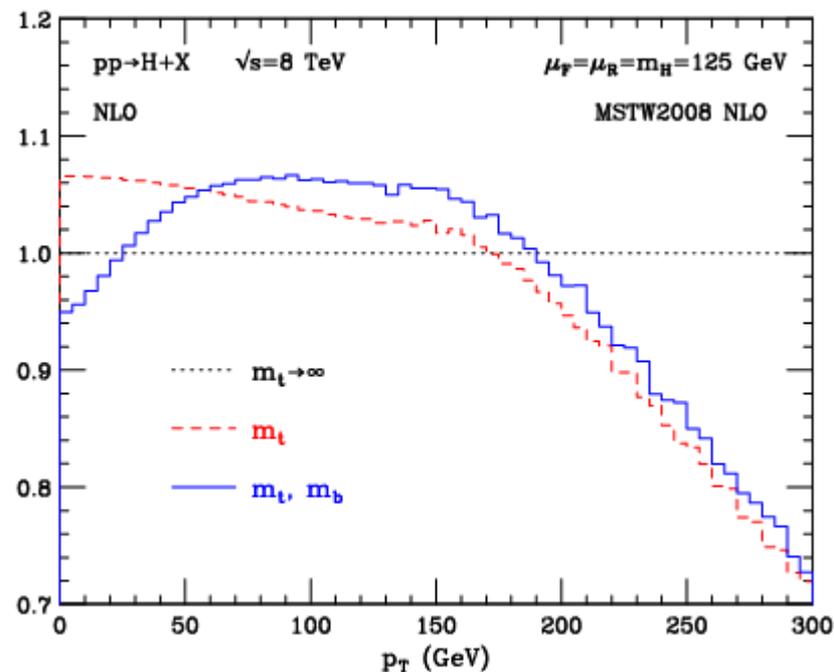
DATA

- Several MC generators used to simulate the processes of interest:
  - **Powheg** → matrix element event generator;
  - **Madgraph5\_aMC@NLO** → matrix element event generator;
  - **Pythia** → used together with matrix element generators for parton shower and hadronization;



MC

- The Higgs boson production at hadron colliders is described using two observables:  $p_T$  and  $\eta$
- Higgs  $\eta$  distribution driven by PDF of the partons inside the colliding hadrons
- Higgs  $p_T$  distribution sensitive to QCD radiative corrections
  - ggH production mode at LO in QCD (order  $\alpha_s^2$ )  $\rightarrow p_T^H = 0$
  - $p_T^H$  different from 0 only starting from  $O(\alpha_s^3)$
- The  $p_T^H$  spectrum is sensitive to the Higgs boson couplings to fermions and bosons.
- Differences with respect to the SM can show up as a different  $p_T^H$  spectrum.



$$\mathcal{L}(\text{data}|\mu, \theta) = \prod_i \frac{(\mu s_i(\theta) + b_i(\theta))^{n_i}}{n_i!} e^{(-\mu s_i(\theta) + b_i(\theta))} p(\tilde{\theta}|\theta)$$

Diagram illustrating the Likelihood function  $\mathcal{L}(\text{data}|\mu, \theta)$  with annotations:

- signal strength  $\mu$
- set di "nuisance parameters"  $\theta$
- eventi di segnale attesi nel bin  $i$   $s_i(\theta)$
- eventi di fondo attesi nel bin  $i$   $b_i(\theta)$
- eventi osservati nel bin  $i$   $n_i$
- vincoli dei "nuisance parameters"  $p(\tilde{\theta}|\theta)$

Category	Subcategory	Requirements
Preselection	—	$m_{\ell\ell} > 12 \text{ GeV}$ , $p_{T1} > 25 \text{ GeV}$ , $p_{T2} > 13 \text{ (10) GeV}$ for e ( $\mu$ ), $p_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$ , $p_T^{\ell\ell} > 30 \text{ GeV}$ no additional leptons with $p_T > 10 \text{ GeV}$ electron and muon with opposite charges
0-jet ggH-tagged	$\left. \begin{array}{l} e^+\mu^- \\ e^-\mu^+ \\ \mu^+e^- \\ \mu^-e^+ \end{array} \right\} p_{T2} > 20 \text{ GeV}$	$m_T > 60 \text{ GeV}$ , $m_T^{\ell 2, p_T^{\text{miss}}} > 30 \text{ GeV}$ subleading lepton $p_T > 20 \text{ GeV}$ no jets with $p_T > 30 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T$ between 20 and 30 GeV
	$\left. \begin{array}{l} e^+\mu^- \\ e^-\mu^+ \\ \mu^+e^- \\ \mu^-e^+ \end{array} \right\} p_{T2} < 20 \text{ GeV}$	$m_T > 60 \text{ GeV}$ , $m_T^{\ell 2, p_T^{\text{miss}}} > 30 \text{ GeV}$ subleading lepton $p_T < 20 \text{ GeV}$ no jets with $p_T > 30 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T$ between 20 and 30 GeV
1-jet ggH-tagged	$\left. \begin{array}{l} e^+\mu^- \\ e^-\mu^+ \\ \mu^+e^- \\ \mu^-e^+ \end{array} \right\} p_{T2} > 20 \text{ GeV}$	$m_T > 60 \text{ GeV}$ , $m_T^{\ell 2, p_T^{\text{miss}}} > 30 \text{ GeV}$ subleading lepton $p_T > 20 \text{ GeV}$ exactly one jet with $p_T > 30 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$
	$\left. \begin{array}{l} e^+\mu^- \\ e^-\mu^+ \\ \mu^+e^- \\ \mu^-e^+ \end{array} \right\} p_{T2} < 20 \text{ GeV}$	$m_T > 60 \text{ GeV}$ , $m_T^{\ell 2, p_T^{\text{miss}}} > 30 \text{ GeV}$ subleading lepton $p_T < 20 \text{ GeV}$ exactly one jet with $p_T > 30 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$
2-jet ggH-tagged	$e\mu$	at least two jets with $p_T > 30 \text{ GeV}$ $m_T^{\ell 2, p_T^{\text{miss}}} > 30 \text{ GeV}$ and $m_T > 60 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$ $m_{jj} < 65 \text{ GeV}$ or $105 < m_{jj} < 400 \text{ GeV}$

Category	Subcategory	Requirements
Preselection	—	$m_{\ell\ell} > 12 \text{ GeV}$ , $p_{T1} > 25 \text{ GeV}$ , $p_{T2} > 13 \text{ (10) GeV}$ for e( $\mu$ ), $p_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$ , $p_T^{\ell\ell} > 30 \text{ GeV}$ no additional leptons with $p_T > 10 \text{ GeV}$ electron and muon with opposite charges
	e $\mu$ low $m_{jj}$	exactly two jets with $p_T > 30 \text{ GeV}$ $60 < m_T < 125 \text{ GeV}$ leptons $\eta$ between the two leading jets $400 < m_{jj} < 700 \text{ GeV}$ and $ \Delta\eta_{jj}  > 3.5$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$
2-jet VBF-tagged	e $\mu$ high $m_{jj}$	exactly two jets with $p_T > 30 \text{ GeV}$ $60 < m_T < 125 \text{ GeV}$ leptons $\eta$ between the two leading jets $m_{jj} > 700 \text{ GeV}$ and $ \Delta\eta_{jj}  > 3.5$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$

---

Category	Subcategory	Requirements
Preselection	—	$m_{\ell\ell} > 12 \text{ GeV}$ , $p_{T1} > 25 \text{ GeV}$ , $p_{T2} > 13 \text{ (10) GeV}$ for e ( $\mu$ ) $p_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$ , $p_T^{\ell\ell} > 30 \text{ GeV}$ no additional leptons with $p_T > 10 \text{ GeV}$ electron and muon with opposite charges
	2-jet VH-tagged	e $\mu$

Category	Subcategory	Requirements
Preselection	—	$m_{\ell\ell} > 12 \text{ GeV}$ , $p_{T1} > 25 \text{ (20) GeV}$ for e ( $\mu$ ), $p_{T2} > 13 \text{ (10) GeV}$ for e ( $\mu$ ), track $p_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$ , $p_T^{\ell\ell} > 30 \text{ GeV}$ no additional leptons with $p_T > 10 \text{ GeV}$ two electrons or two muons with opposite charges
0-jet ggH-tagged	$e^+e^-$ $p_{T2} < 20 \text{ GeV}$ $\mu^+\mu^-$ $p_{T2} < 20 \text{ GeV}$	$\text{DYMVA} > 0.991$ , $m_{\ell\ell} < 55 \text{ GeV}$ , $m_T > 50 \text{ GeV}$ , $p_{T2} < 20 \text{ GeV}$ , $\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.7$ no jets with $p_T > 30 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$
	$e^+e^-$ $p_{T2} > 20 \text{ GeV}$ $\mu^+\mu^-$ $p_{T2} > 20 \text{ GeV}$	$\text{DYMVA} > 0.991$ , $m_{\ell\ell} < 55 \text{ GeV}$ , $m_T > 50 \text{ GeV}$ , $20 \text{ GeV} < p_{T2} < 50 \text{ GeV}$ , $\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.7$ no jets with $p_T > 30 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$
1-jet ggH-tagged	$e^+e^-$ $\mu^+\mu^-$	$\text{DYMVA} > 0.95$ , $m_{\ell\ell} < 57 \text{ GeV}$ , $50 < m_T < 155 \text{ GeV}$ , $p_{T1} < 50 \text{ GeV}$ , $\Delta\phi_{\ell\ell} < 1.75$ exactly one jet with $p_T > 30 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$

Category	Subcategory	Requirements
Preselection	—	$p_{T1} > 25 \text{ GeV}, p_{T2} > 20 \text{ GeV}, p_{T3} > 15 \text{ GeV}$ no additional leptons with $p_T > 10 \text{ GeV}$ $\min -m_{\ell+\ell^-} > 12 \text{ GeV}$ , total lepton charge sum $\pm 1$
3-lepton WH-tagged	OSSF	no jets with $p_T > 30 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$ $p_T^{\text{miss}} > 50 \text{ GeV}, \min -m_{\ell+\ell^-} < 100 \text{ GeV}$ Z boson veto: $ m_{\ell\ell} - m_Z  > 25 \text{ GeV}$ $\Delta\phi(\ell\ell, \vec{p}_T^{\text{miss}}) > 2.2$
	SSSF	no jets with $p_T > 30 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$ $\Delta\phi(\ell\ell, \vec{p}_T^{\text{miss}}) > 2.5$

Category	Subcategory	Requirements
Preselection	—	four tight and isolated leptons, with zero total charge $p_T > 25 \text{ GeV}$ for the leading lepton $p_T > 15 \text{ GeV}$ for the second leading lepton $p_T > 10 \text{ GeV}$ for the remaining two leptons no additional leptons with $p_T > 10 \text{ GeV}$ Z dilepton mass $> 4 \text{ GeV}$ X dilepton mass $> 4 \text{ GeV}$
	XSF	$ m_{\ell\ell} - m_Z  < 15 \text{ GeV}$ $10 < m_X < 50 \text{ GeV}$ $35 < p_T^{\text{miss}} < 100 \text{ GeV}$ four-lepton invariant mass $> 140 \text{ GeV}$
4-lepton ZH-tagged	XDF	$ m_{\ell\ell} - m_Z  < 15 \text{ GeV}$ $10 < m_X < 70 \text{ GeV}$ $p_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$ no b-tagged jets with $p_T > 20 \text{ GeV}$

	Category							
	0-jet DF		1-jet DF		0-jet SF		1-jet SF	
	ggH-tagged		ggH-tagged		ggH-tagged		ggH-tagged	
ggH	483.1	(642.1)	269.1	(339.3)	231.2	(324.6)	82.0	(92.8)
VBF	5.6	(7.4)	22.1	(29.4)	1.5	(2.5)	5.9	(9.3)
WH	12.4	(16.4)	15.8	(20.6)	3.3	(4.3)	2.9	(3.8)
ZH	5.2	(6.9)	5.0	(6.7)	2.6	(3.4)	1.4	(1.8)
t $\bar{t}$ H	<0.1	(<0.1)	0.2	(0.2)	<0.1	(<0.1)	<0.1	(<0.1)
b $\bar{b}$ H	3.4	(4.4)	1.5	(2.0)	1.7	(2.3)	0.5	(0.7)
Signal	509	(677)	313	(398)	240	(337)	93	(108)
$\pm$ total unc.		( $\pm$ 31)		( $\pm$ 19)		( $\pm$ 24)		( $\pm$ 13)
WW	7851	(9088)	3553	(3727)	1596	(1805)	373	(365)
Top quark	2505	(2422)	5395	(5224)	334	(339)	452	(443)
Nonprompt	1555	(1006)	781	(482)	301	(260)	111	(97)
DY	154	(154)	283	(302)	437	(459)	178	(216)
VZ/V $\gamma^*$	368	(385)	327	(338)	101	(104)	43	(43)
V $\gamma$	213	(210)	137	(128)	23	(26)	17	(19)
Other diboson	5.1	(5.3)	3.5	(3.7)	9.3	(9.4)	2.0	(2.1)
Triboson	9.3	(9.6)	16	(17)	1.2	(1.2)	1.3	(1.3)
Background	12660	(13280)	10496	(10222)	2803	(3004)	1177	(1186)
$\pm$ total unc.		( $\pm$ 141)		( $\pm$ 178)		( $\pm$ 97)		( $\pm$ 83)
Data	13964		10591		3364		1308	

	Category									
	2-jet DF ggH-tagged		2-jet DF VBF-tagged		2-jet DF VH-tagged		3-lepton WH-tagged		4-lepton ZH-tagged	
ggH	80.4	(100.6)	11.6	(14.6)	13.9	(17.4)	<0.1	(<0.1)	<0.1	(<0.1)
VBF	10.3	(13.3)	19.2	(24.5)	0.4	(0.6)	<0.1	(<0.1)	<0.1	(<0.1)
WH	7.2	(9.3)	0.2	(0.2)	3.6	(4.6)	5.4	(7.2)	<0.1	(<0.1)
ZH	3.3	(4.3)	<0.1	(<0.1)	1.5	(2.1)	0.2	(0.2)	2.7	(3.5)
t $\bar{t}$ H	1.6	(2.1)	<0.1	(<0.1)	0.1	(0.2)	<0.1	(<0.1)	<0.1	(<0.1)
b $\bar{b}$ H	0.6	(0.7)	<0.1	(0.1)	<0.1	(<0.1)	<0.1	(<0.1)	<0.1	(<0.1)
Signal	103	(130)	31	(40)	20	(25)	5.6	(7.4)	2.7	(3.5)
$\pm$ total unc.		( $\pm 16$ )		( $\pm 3$ )		( $\pm 3$ )		( $\pm 0.7$ )		( $\pm 0.3$ )
WW	1048	(860)	69	(46)	52	(34)	<0.1	(<0.1)	<0.1	(<0.1)
Top quark	5197	(5187)	157	(158)	230	(229)	<0.1	(<0.1)	0.3	(0.3)
Nonprompt	359	(305)	30	(20)	42	(37)	19	(21)	<0.1	(<0.1)
DY	110	(112)	20	(19)	29	(30)	<0.1	(<0.1)	<0.1	(<0.1)
VZ/V $\gamma^*$	136	(137)	7.1	(6.9)	11	(10)	<0.1	(<0.1)	<0.1	(<0.1)
V $\gamma$	59	(53)	2.8	(2.8)	4.2	(4.6)	3.8	(9.6)	<0.1	(<0.1)
Other diboson	2.1	(2.3)	0.3	(0.3)	1.2	(1.3)	32	(37)	13	(13)
Triboson	15	(15)	0.3	(0.3)	2.0	(2.0)	2.1	(2.1)	0.4	(0.4)
Background	6926	(6671)	287	(253)	371	(348)	57	(70)	13.7	(13.7)
$\pm$ total unc.		( $\pm 502$ )		( $\pm 17$ )		( $\pm 37$ )		( $\pm 7$ )		( $\pm 0.6$ )
Data	6802		285		386		85		15	