



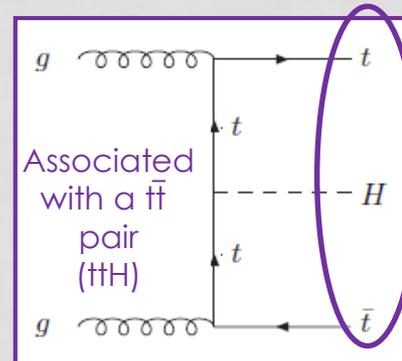
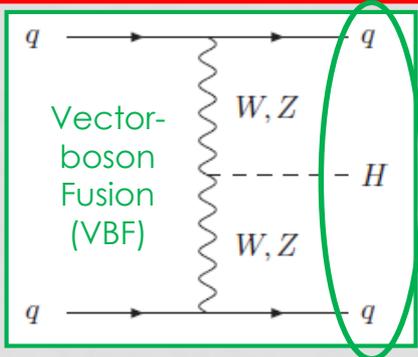
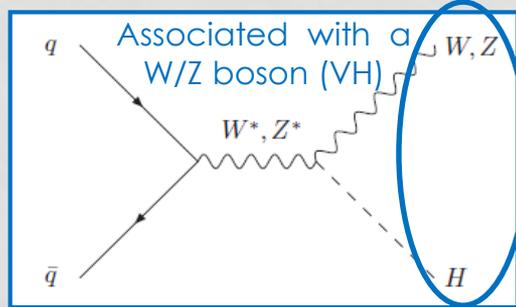
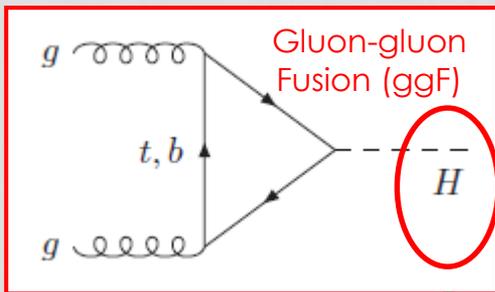
# RISULTATI RECENTI DI LHC SUL BOSONE DI HIGGS A 13 TEV

ROBERTO COVARELLI (UNIV./INFN TORINO)  
PER LE COLLABORAZIONI ATLAS E CMS

INCONTRI DI FISICA DELLE ALTE ENERGIE  
GENOVA, 1 APRILE 2016

# ANALISI HIGGS A LHC

- Determinazione precisa della massa vincola input teorici
- Le **misure inclusive** sono progressivamente sostituite da **ricerche nei vari modi di produzione** (analisi separate o categorizzazione degli eventi)
  - Selezione di **eventi con maggior purezza** (necessario per canali ad alto fondo come  $b\bar{b}$ ,  $\tau\tau$ , invisibile)
  - Misura di **accoppiamenti a fermioni/bosoni vettori**



×

- SM decays
  - $Z^*Z^{(*)} \rightarrow 2l2l'$
  - $W^*W^{(*)} \rightarrow 2l2\nu$
  - $\gamma\gamma$
  - $\tau\tau$
  - $b\bar{b}$

- Suppressed or forbidden in SM
  - $\mu\mu$
  - Invisible ... etc.

# STATO DELL'ARTE DOPO RUN1

# MASSA DEL BOSONE DI HIGGS

Phys. Rev. Lett. 114,  
191803 (2015)

- Canali  $ZZ^*$  e  $\gamma\gamma$  (risoluzione in massa = 1-2%)

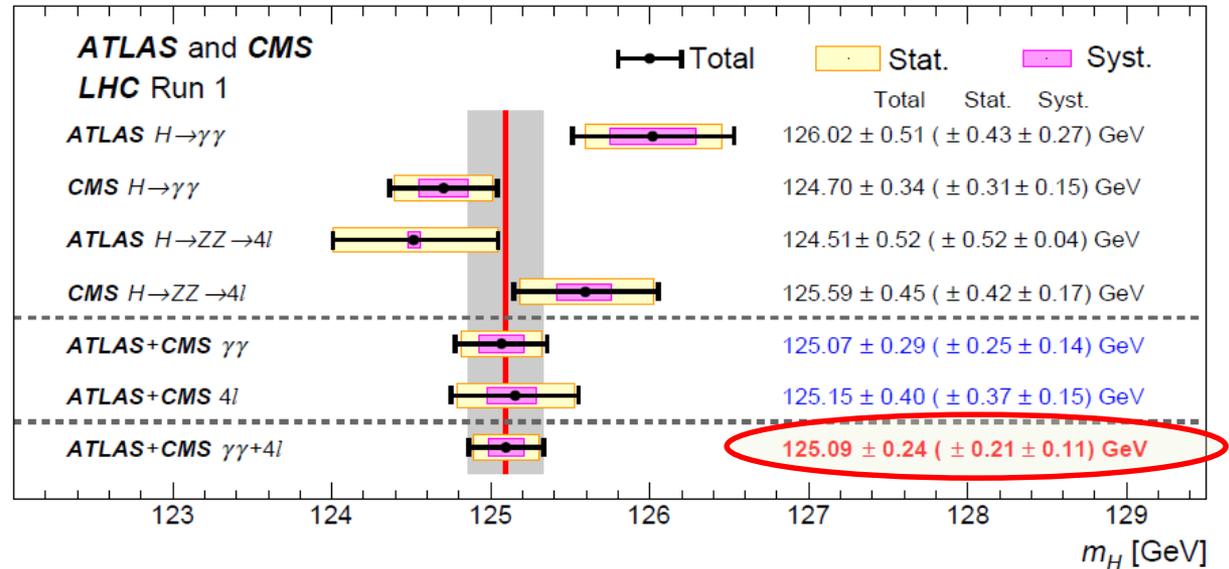
## ATLAS+CMS

- Principali incertezze sistematiche

- $ZZ^*$ : calibrazione dell'impulso dei leptoni
- $\gamma\gamma$ : risposta calorimetrica (non linearità, forma laterale dello sciame, calibrazione con  $Z \rightarrow ee$  etc.) e stima materiale antistante il calorimetro

- Buona compatibilità tra canali ed esperimenti

- Attese del SM per tutte le quantità che entrano nella combinazione calcolate a questo valore di massa



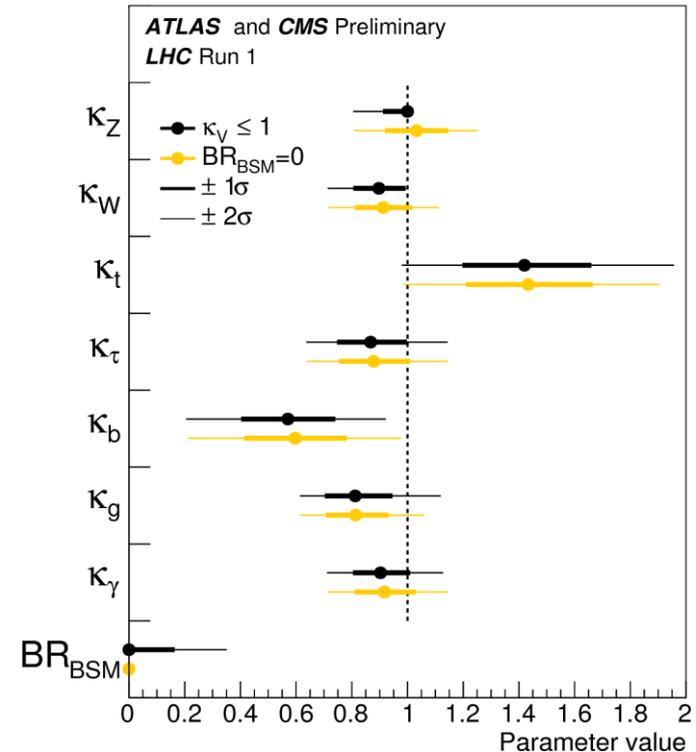
# VINCOLI SU ACCOPPIAMENTI (1)

- Si calcolano i  $(\sigma \cdot \text{BR})$ , scalando gli accoppiamenti del bosone di Higgs SM con parametri liberi  $\kappa = c/c_{\text{SM}}$ 
  - La maggior parte delle  $\sigma$  e  $\Gamma$  dipendono dai corrispondenti  $\kappa^2$ , ma *non tutte*, es. *interferenza tra i loop di t e W in  $H \rightarrow \gamma\gamma$*

$$\sigma_i \cdot \text{BR}^f = \frac{\sigma_i(\vec{\kappa}) \cdot \Gamma^f(\vec{\kappa})}{\Gamma_H}$$

- Anche negli scenari di Nuova Fisica più generali sono comunque richieste ipotesi su  $\Gamma_H$ 
  - Somma delle larghezze parziali vincolata al SM ( $\Gamma_H = \sum_i \Gamma_{\text{SM},i}$ )
  - Decadimenti BSM permessi ( $\Gamma_H = \sum_i \Gamma_{\text{SM},i} + \Gamma_{\text{BSM}}$ ) ma  $\kappa_W, \kappa_Z \leq 1$
- Ipotesi valide in quasi tutte le teorie BSM

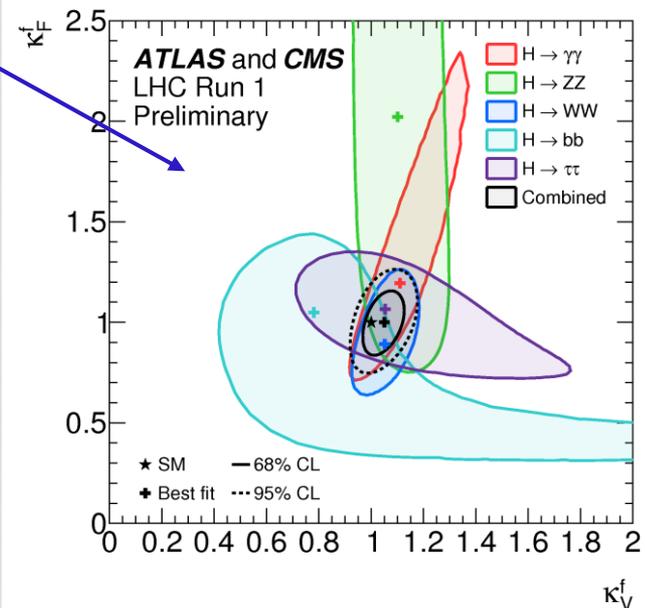
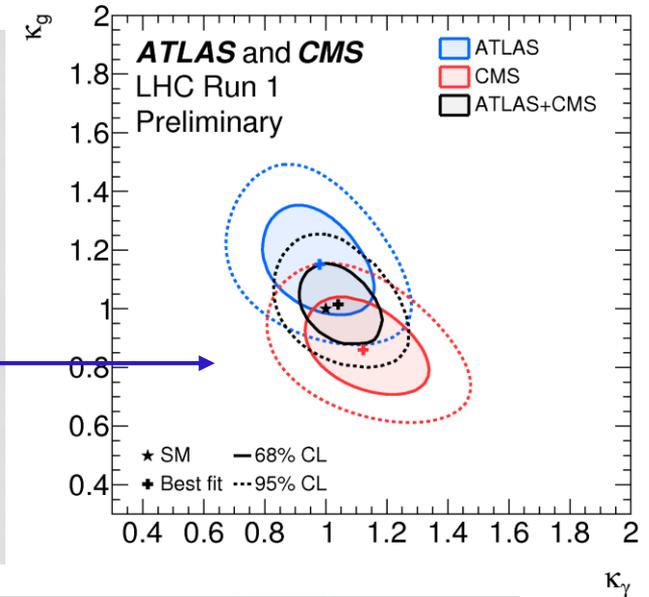
ATLAS-CONF-2015-044  
CMS-PAS-HIG-15-002



# VINCOLI SU ACCOPPIAMENTI (2)

- Scenari con **vincoli più restrittivi** dedicati a specifiche classi di teorie BSM. Esempi:
  - uniche correzioni possibili: agli **accoppiamenti efficaci nei processi ad 1 loop** ( $\kappa_g, \kappa_\gamma$ )
  - **Fattori di scala comuni** per tutti i fermioni e tutti i bosoni ( $\kappa_V, \kappa_f$ )
- Risultati **indipendenti dal modello** («signal strengths», rapporti di sezioni d'urto e BR: osservati / SM)

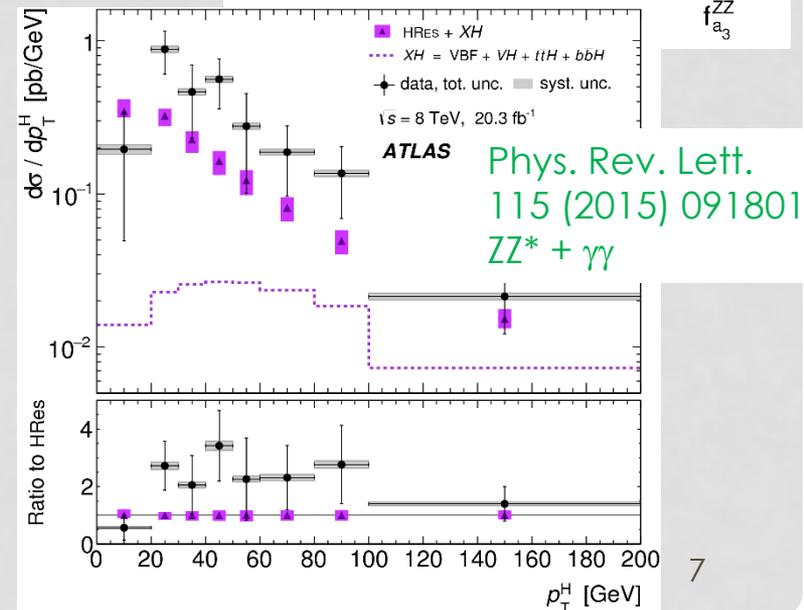
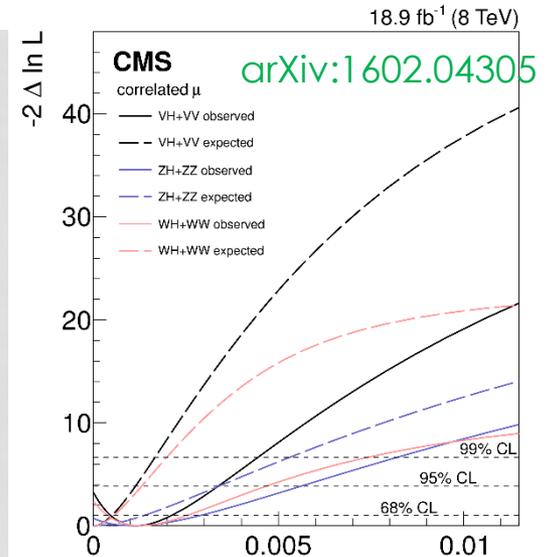
$$\mu_{\text{glob}} = 1.09 \pm 0.11$$



# SPIN / DISTRIBUZIONI DIFFERENZIALI

- Ipotesi di spin-parità alternative ( $0^-, 1, 2^+_m, 2^+_h, 2^-$  ecc. ecc.) ampiamente sfavorite da ATLAS e CMS, combinando i canali  $ZZ^*$ ,  $WW^*$  e  $\gamma\gamma$
- Accurate analisi della struttura tensoriale degli accoppiamenti  $HVV$  (parametri efficaci di Nuova Fisica che indurrebbero componenti pseudoscalari, tensoriali ecc. nell'ampiezza totale)
- Distribuzioni differenziali in accordo con risultati (N)NLL QCD risommati?  $\rightarrow$  risultati non conclusivi

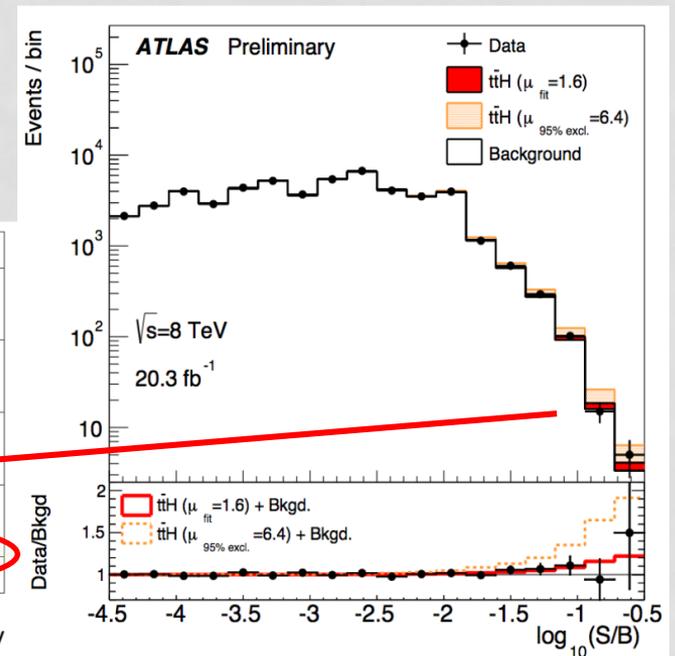
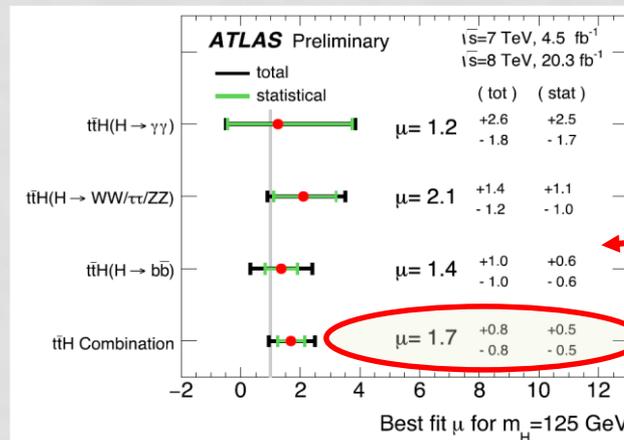
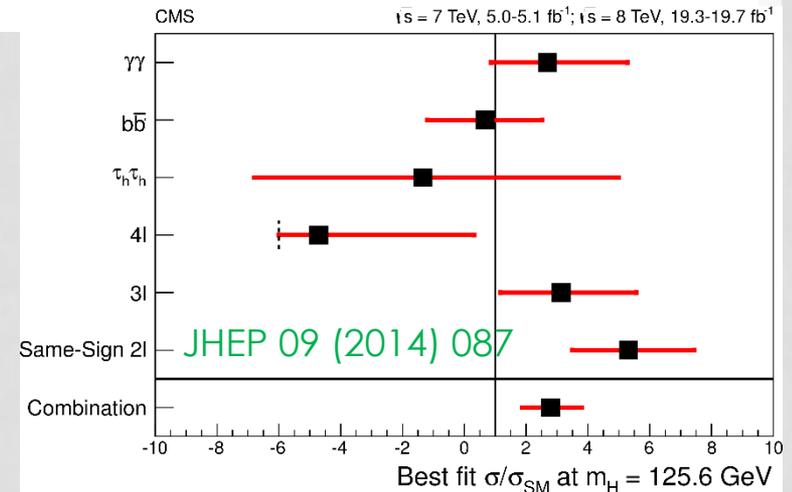
effective pseudoscalar cross-section fraction  $f_{a_3}^{ZZ} < 0.0034$  @ 95% C.L.



# CANALI RARI: $t\bar{t}H$

- Diversi canali di decadimento (esclusivi o semi-esclusivi)
  - CMS trova un lieve eccesso ( $\mu = 2.8 \pm 1.0$ ) dominato da yields in stati finali con 2 o 3 leptoni
  - ATLAS ha aggiornato recentemente aggiungendo  $t\bar{t}H$ ,  $H \rightarrow b\bar{b}$  completamente adronico
    - alto BR, bassissima purezza  $\rightarrow$  complessa stima del fondo multi-jet derivata dai dati

L. Dall'Asta @ Moriond EWK '16  
Articoli in preparazione



# CANALI RARI: COPPIE DI HIGGS

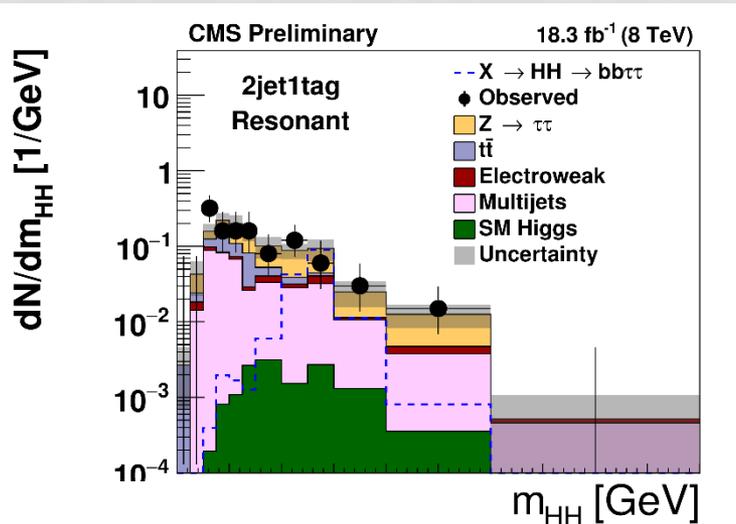
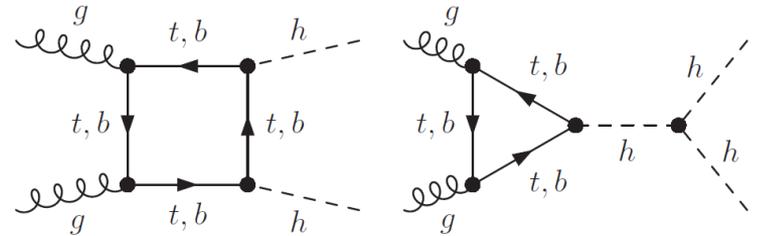
- Nel SM non ancora rivelabile

- $\sigma_{\text{NNLO}} \sim 11$  (38) fb a 8 (13) TeV

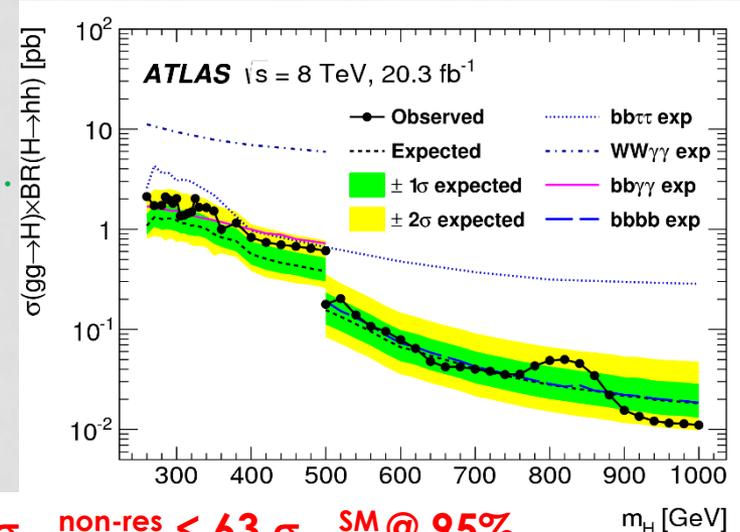
- Incrementata in vari modelli BSM sia in forma risonante

( $G_{\text{KK}}^*$ , radione, heavy  $H^0 \rightarrow HH$ ) che non-risonante

- Diverse analisi in ATLAS e CMS cercano di sfruttare canali ad alto BR ( $bbbb$ ,  $bb\tau\tau$ ) o puliti ( $bb\gamma\gamma$ ,  $WW\gamma\gamma$ ) in vari range di massa



Phys. Rev.  
D 92,  
092004  
(2015)



$\sigma_{\text{HH}}^{\text{non-res}} < 63 \sigma_{\text{HH}}^{\text{SM}} @ 95\%$

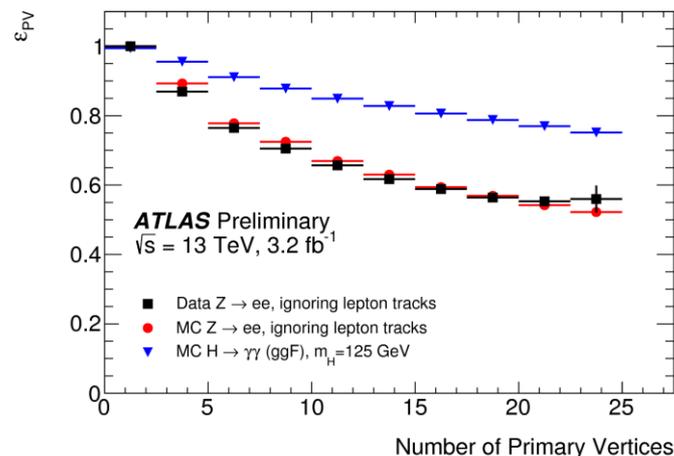
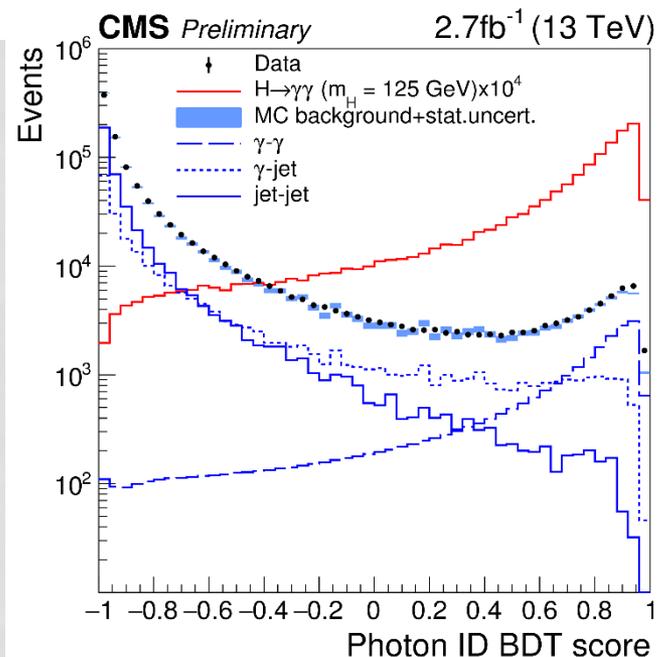
# PRIMI RISULTATI DI RUN2

# $H \rightarrow \gamma\gamma$

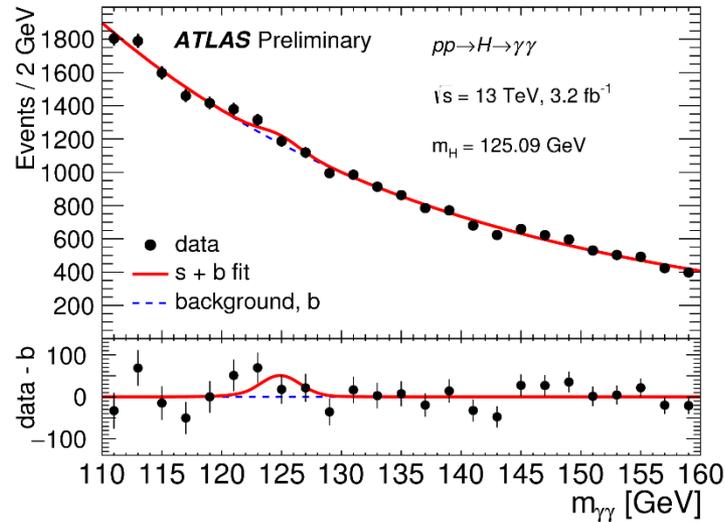
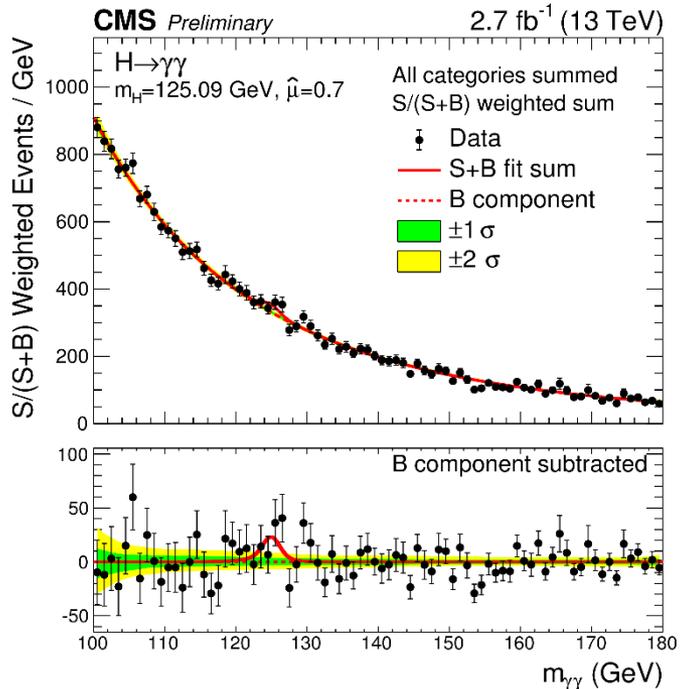
ATLAS-CONF-2015-060  
CMS-PAS-HIG-15-005

## • Punti chiave della misura

- Risoluzione in energia e selezione dei fotoni
  - Analisi a tagli (ATLAS) o multivariata (CMS)
  - Variabili che riflettono la forma e il contenimento atteso degli sciami, isolamento, rigetto di  $\pi^0$
- Identificazione del vertice primario
  - CMS: analisi multivariata usando  $\Sigma p_T^2$  e bilanciamento del  $p_T$  con le tracce del vertice primario
  - ATLAS: tecnica simile ma sfruttando **traiettoria del  $\gamma$  dal calorimetro puntante**
- Fit alla **distribuzione di  $m_{\gamma\gamma}$**  in categorie di segnale



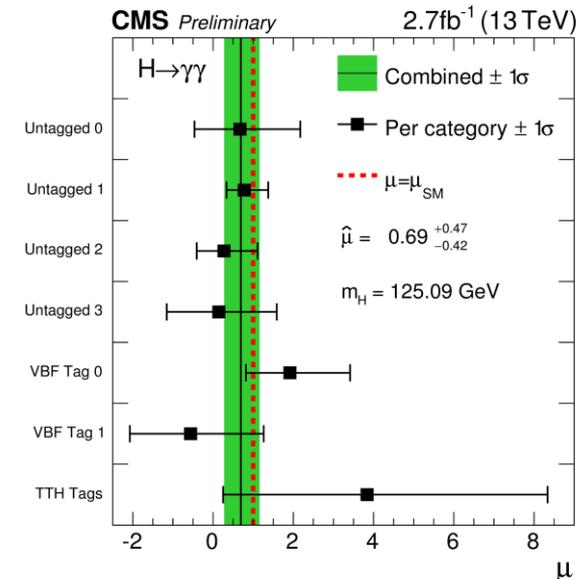
# H $\rightarrow$ $\gamma\gamma$



- Spettri massa invariante

- «Signal strengths» in CMS
  - Compatibili con SM in tutte le categorie

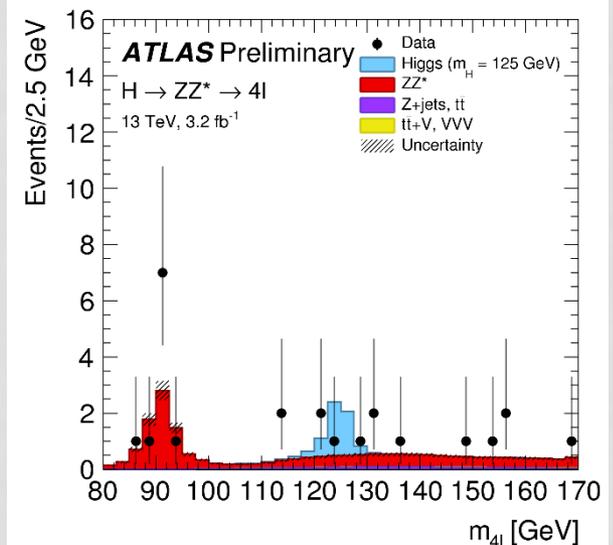
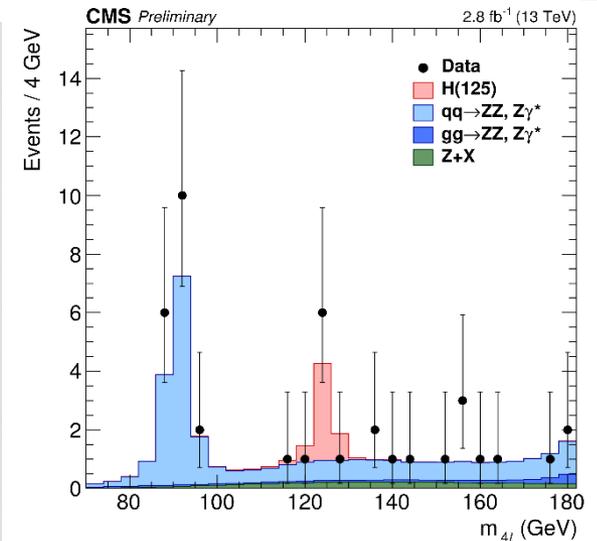
$$\hat{\mu} = 0.69^{+0.47}_{-0.42}$$



$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$

ATLAS-CONF-2015-059  
CMS-PAS-HIG-15-004

- Punti chiave della misura
  - Selezione di leptoni di alta qualità
    - Recupero di fotoni FSR
  - Stima dei fondi:
    - Irriducibile ( $ZZ^*$  non risonante): teoria a ordine (N)NLO QCD
    - Riducibile (leptoni «fake»): stima con regioni di controllo
  - Estrazione del segnale
    - ATLAS:  $m_{4l}$  dopo fit cinematico con vincolo di massa
    - CMS:  $m_{4l}$ , discriminante cinematico, 2 categorie di segnale («VBF-tagged», altri eventi)



# $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

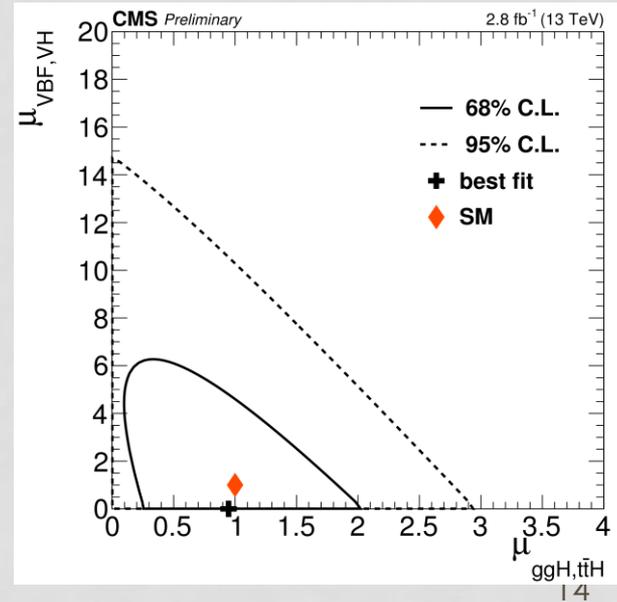
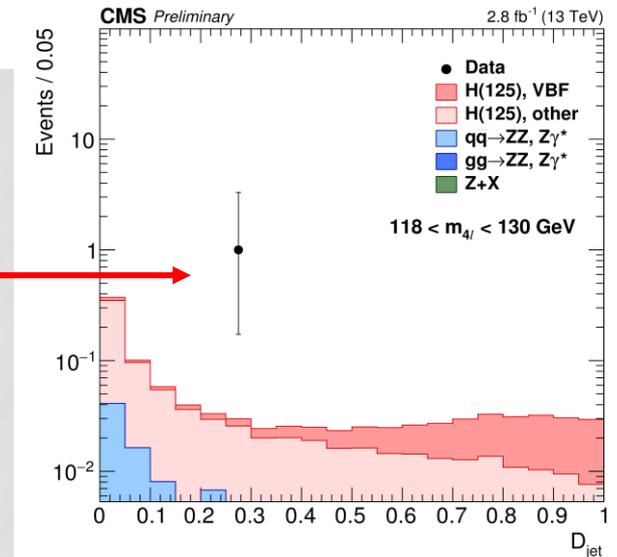
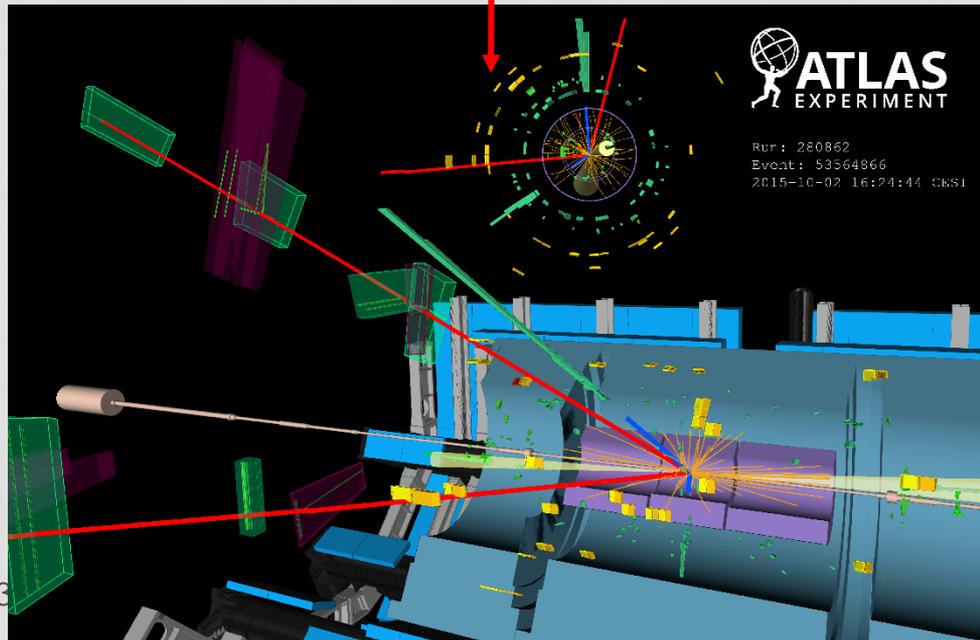
- Primi indizi di rivelazione di modi di produzione esclusivi?

- CMS: 1 evento di-jet, bassa probabilità di produzione VBF

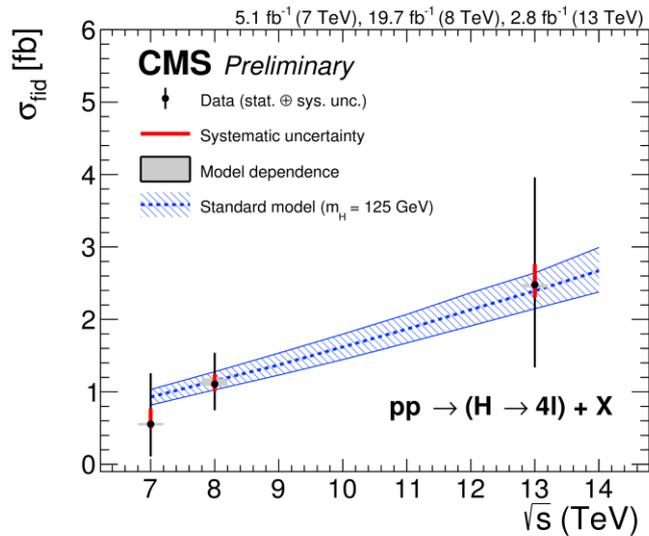
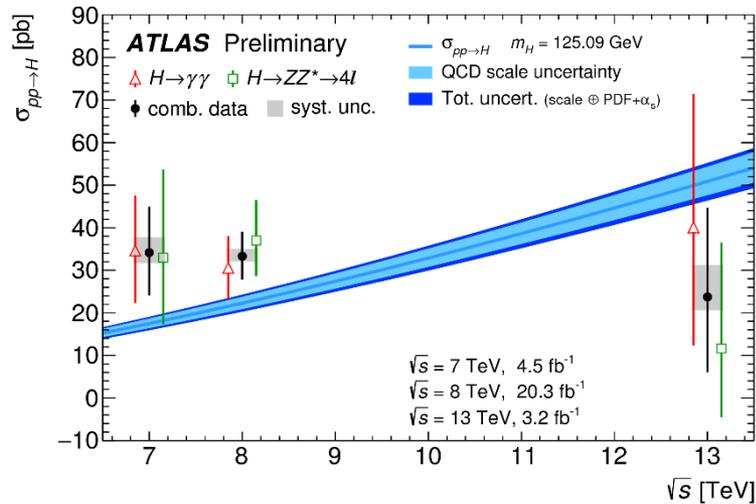
$$\mu_{ggH, t\bar{t}H} = 0.95^{+0.64}_{-0.49}$$

$$\mu_{VBF, VH} = 0.0^{+2.5}_{-0.0}$$

- ATLAS: 1 evento compatibile con produzione VBF



# SEZIONI D'URTO HIGGS

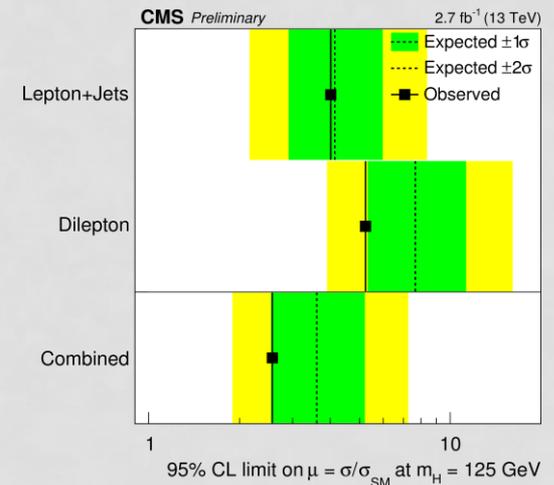
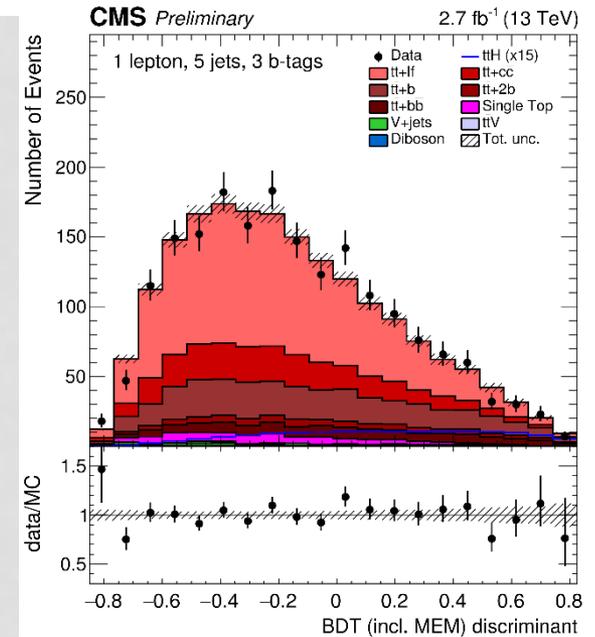


- Confronti tra osservazione e teoria all'ordine NNLO QCD
- ATLAS: Sezione d'urto totale combinata  $\gamma\gamma + ZZ^*$
- CMS: Sezione d'urto fiduciale per  $ZZ^*$

ATLAS-CONF-2015-069  
CMS-PAS-HIG-15-004

# CMS: NUOVI RISULTATI $t\bar{t}H$

- $t\bar{t}H, H \rightarrow b\bar{b}$  a 13 TeV ( $\sigma_{SM} \times 3.8$ )
  - Canale molto complesso
    - Fondo dominante  $t\bar{t}$ +jets (soprattutto  $t\bar{t}b\bar{b}$ , con grosse incertezze teoriche)
    - Limitata risoluzione in massa Higgs
    - Combinatorio dei jet
  - Due selezioni principali
    - **Dileptonica**: 2l,  $\geq 3$  jet,  $\geq 2$  b-taggiati
    - **Semileptonica**: 1l,  $\geq 4$  jet,  $\geq 2$  b-taggiati
  - Ulteriore classificazione per **numero di jet**, di **jet b-taggiati** e **ad alto impulso**
    - 13 categorie esclusive
    - Selezione tramite **boosted decision tree (BDT)** in ognuna di esse



# CMS: NUOVI RISULTATI $t\bar{t}H$

## $t\bar{t}H$ , multileptonico

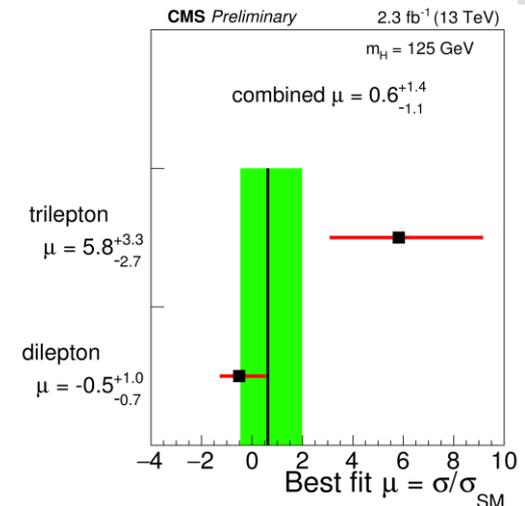
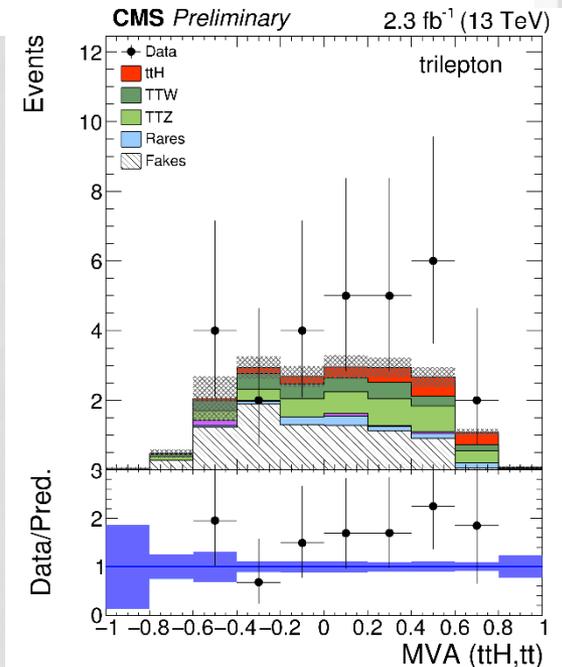
CMS-PAS-HIG-15-008

- Include diversi canali possibili dell'Higgs ( $\tau\tau$ ,  $WW^*$ ,  $ZZ^*$  con successivi decadimenti leptonici)
- Fondi dominanti:  $t\bar{t}$ +jets con leptoni «fake»,  $t\bar{t}V$ 
  - Selezione con BDT in categorie
  - «Fake rates» da regioni di controllo

## $t\bar{t}H$ , $H \rightarrow \gamma\gamma$ incluso nell'analisi inclusiva

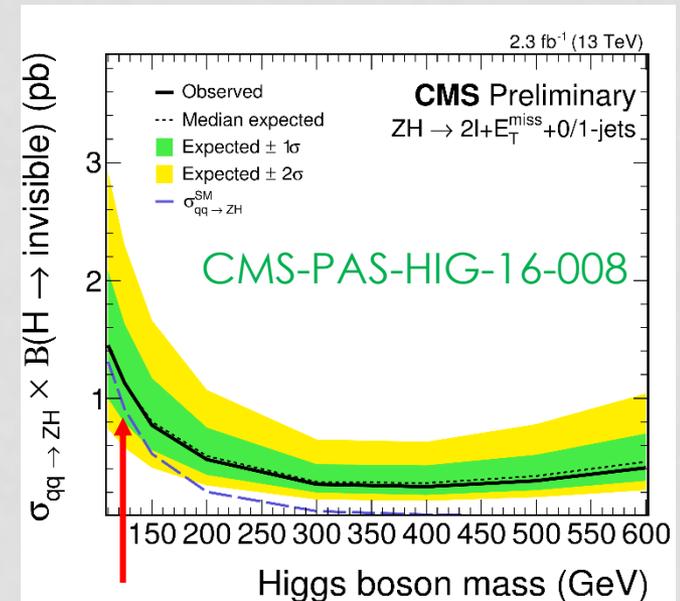
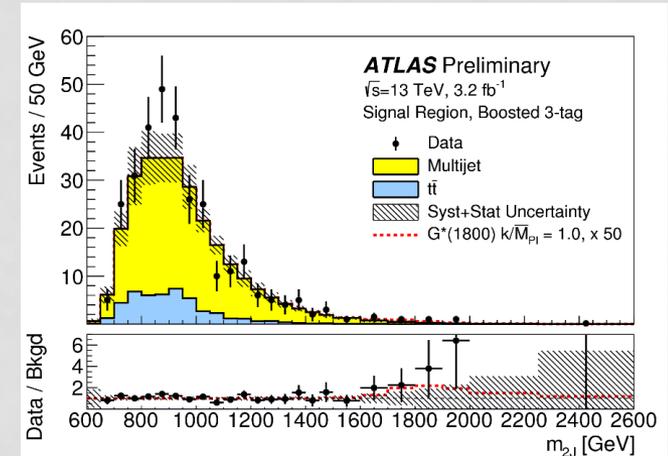
## Risultati (signal strengths):

$t\bar{t}H(\gamma\gamma)$	$\hat{\mu}_{\text{obs}} = 3.8^{+4.5}_{-3.6}$
$t\bar{t}H(\text{multilepton})$	$\hat{\mu}_{\text{obs}} = 0.6^{+1.4}_{-1.1}$
$t\bar{t}H(bb)$	$\hat{\mu}_{\text{obs}} = -2.0^{+1.8}_{-1.8}$



# DECADIMENTI INVISIBILI E HH

- Ricerca di produzione di coppie HH nei canali  $b\bar{b}b\bar{b}$  (ATLAS/CMS) e  $b\bar{b}\gamma\gamma$  (ATLAS)
  - Esclusione di risonanze ad alta massa simile rispetto a Run1 (con  $b\bar{b}b\bar{b}$  si copre un intervallo di massa più ampio, usando merged jets)
  - Sezione d'urto non-risonante  
 $\sigma_{HH}^{\text{non-res}} < 95 \text{ (102)} \sigma_{HH}^{\text{SM}} @ 95\% \text{ CL}$   
 in  $b\bar{b}b\bar{b}$  ( $b\bar{b}\gamma\gamma$ )  
 ATLAS-CONF-2016-004  
 ATLAS-CONF-2016-017
- Ricerca di  $H \rightarrow \text{invisibile}$  usando il modo di produzione ZH
  - Stato finale:  $2l + ME_T$
  - Fondo dominante:  $ZZ \rightarrow 2l2\nu$
  - Per produzione SM, nessun BR escluso (non ancora raggiunta sensibilità di Run1)



# CONCLUSIONI

- Ri-scoperta del bosone di Higgs a 13 TeV nei canali ben conosciuti
  - Difetto di eventi (non significativo) osservato in ATLAS non confermato da CMS
  - Limiti su ttH già vicini a Run1 con sola statistica 2015
- Il futuro
  - Osservazione di modi di produzione esclusivi in tutti i canali
    - Raggiungimento di una migliore precisione negli accoppiamenti, specialmente in quelli a fermioni pesanti (ttH, Hbb) ed a 1 loop
  - Distribuzioni differenziali
  - Misure di SM che richiedono altissima precisione (VBS, HH,  $\mu_{\text{offshell}}$  e misura indiretta della larghezza)
  - «Esotici»: Higgs pesanti, risonanze BSM che decadono in bosoni di Higgs etc. → già molti risultati a 13 TeV, alcuni non elencati in questa presentazione

# BACKUP

# ATLAS: SEZIONI D'URTO SM

