

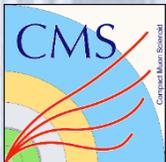
Misura delle proprietà del bosone di Higgs nello stato finale in quattro leptoni a $\sqrt{s}=13$ TeV

Alessandra Cappati

Università degli Studi di Torino & INFN Torino
per la Collaborazione CMS

XVII Incontri di Fisica delle Alte Energie

4-6 Aprile 2018, Milano





Il bosone di Higgs

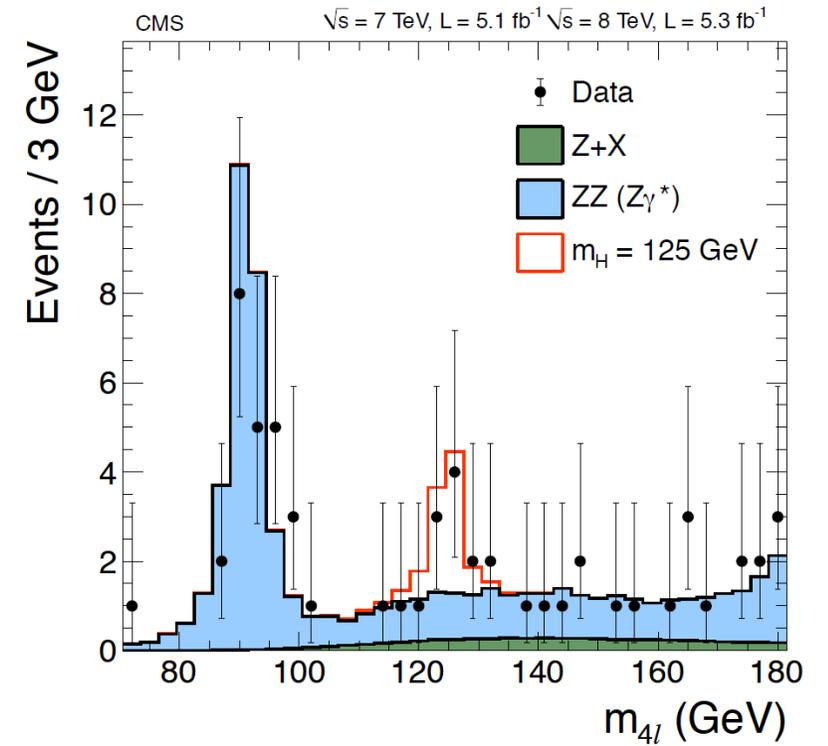
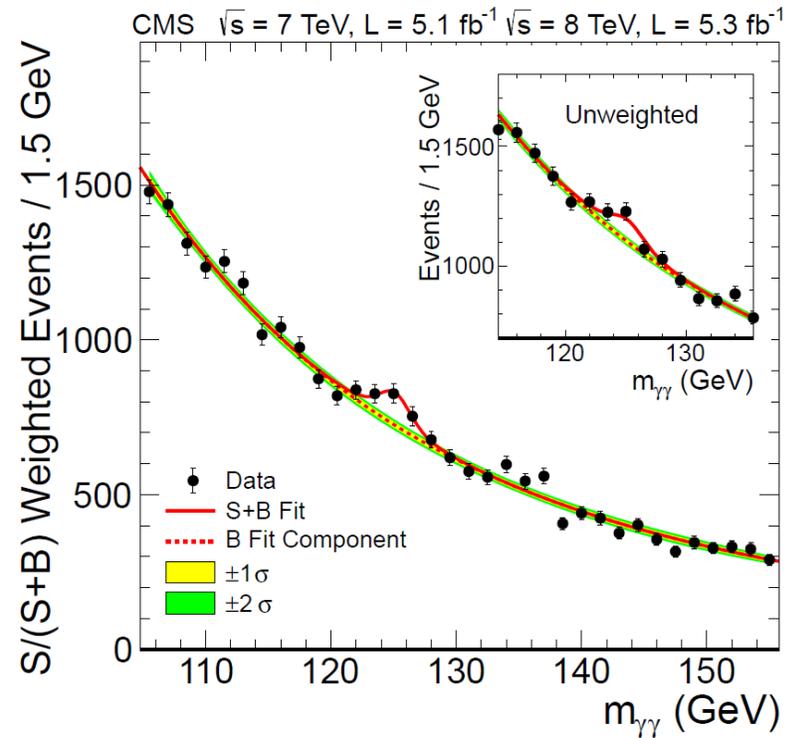
- Introdotto per spiegare come le particelle del Modello Standard (MS) acquistano massa (1964)
- Scoperto dagli esperimenti ATLAS e CMS [1] al CERN (2012)

[1] JHEP 06 (2013) 081

Il bosone di Higgs

- Introdotto per spiegare come le particelle del Modello Standard (MS) acquistano massa (1964)
- Scoperto dagli esperimenti ATLAS e CMS [1] al CERN (2012)

- Due canali di decadimento principali per la scoperta:
 - $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

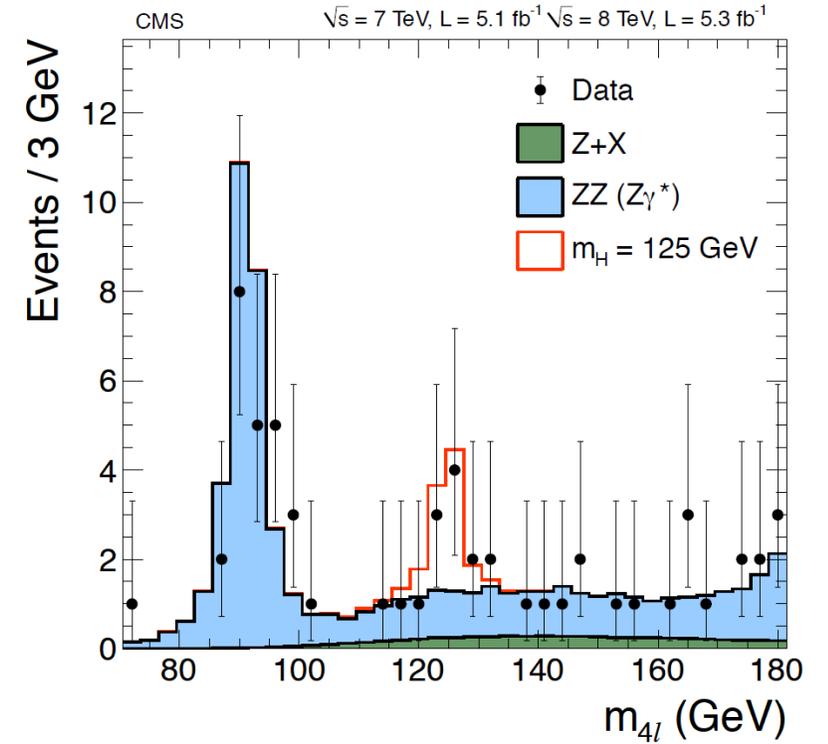
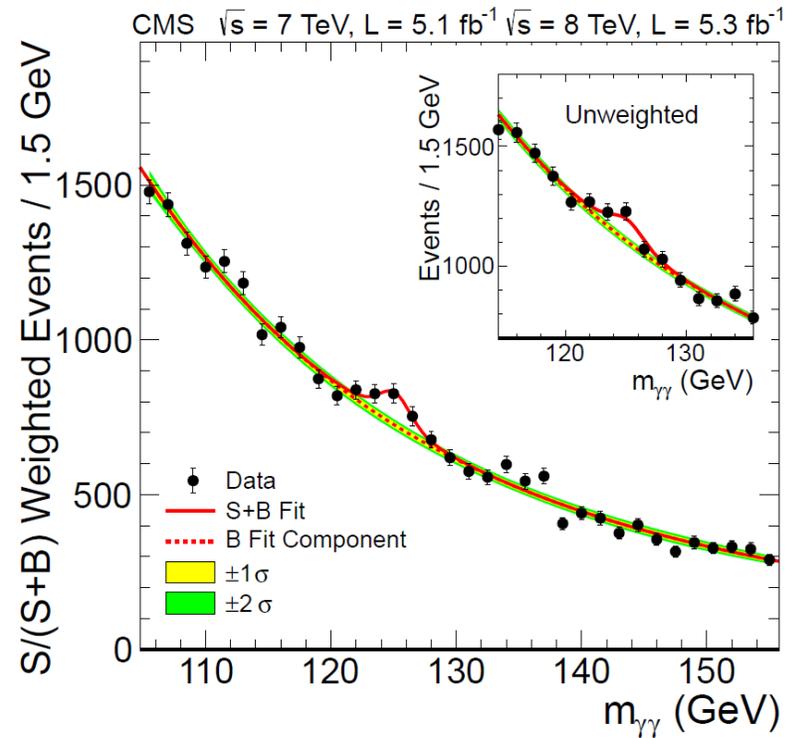


[1] JHEP 06 (2013) 081

Il bosone di Higgs

- Introdotto per spiegare come le particelle del Modello Standard (MS) acquistano massa (1964)
- Scoperto dagli esperimenti ATLAS e CMS [1] al CERN (2012)

- Due canali di decadimento principali per la scoperta:
 - $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



Le sue proprietà vengono studiate per investigare la sua natura e testare eventuali discrepanze rispetto al MS

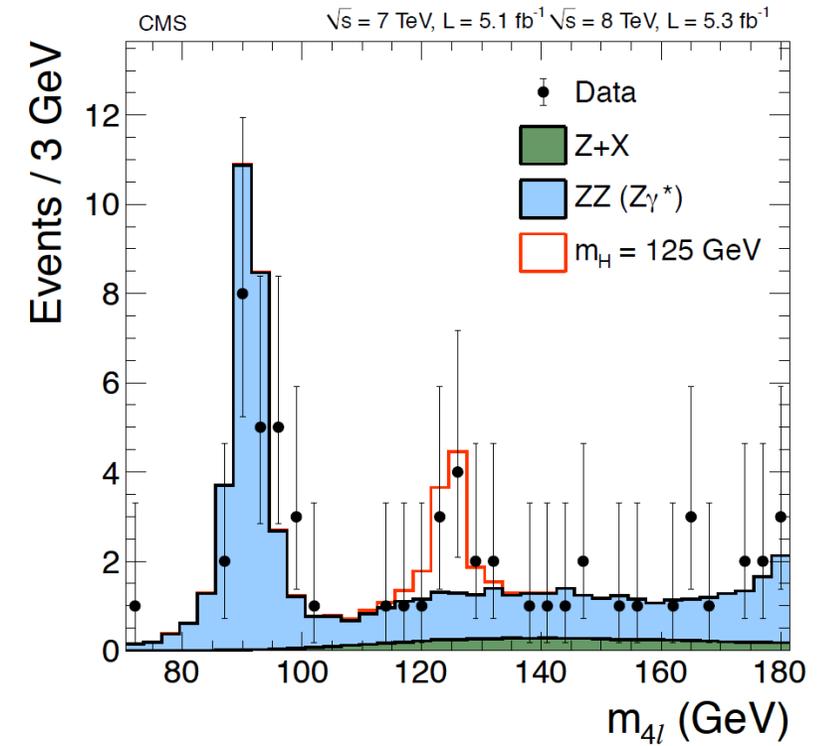
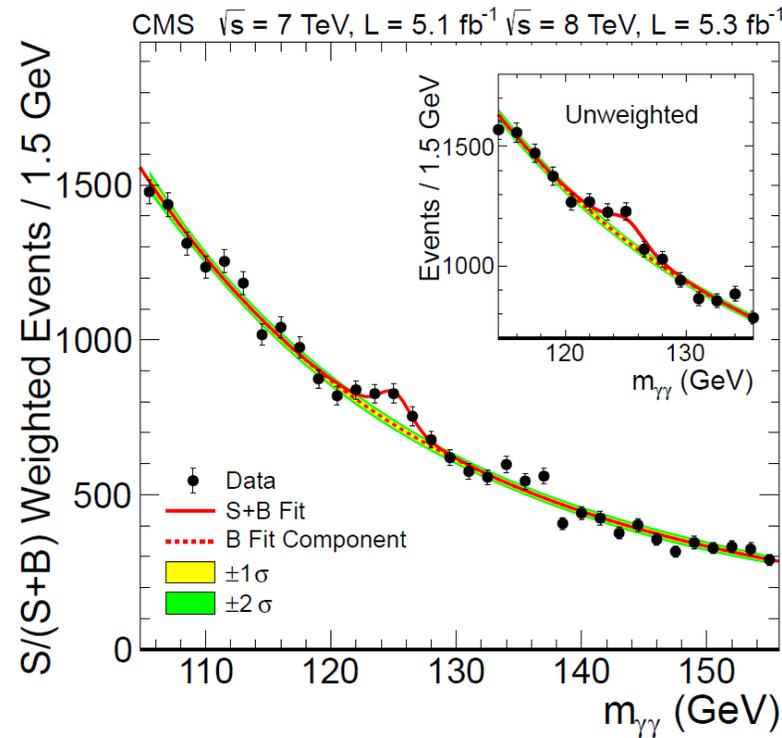
[1] JHEP 06 (2013) 081

Il bosone di Higgs

- Introdotto per spiegare come le particelle del Modello Standard (MS) acquistano massa (1964)
- Scoperto dagli esperimenti ATLAS e CMS [1] al CERN (2012)

- Due canali di decadimento principali per la scoperta:

- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



Le sue proprietà vengono studiate per investigare la sua natura e testare eventuali discrepanze rispetto al MS

[1] JHEP 06 (2013) 081

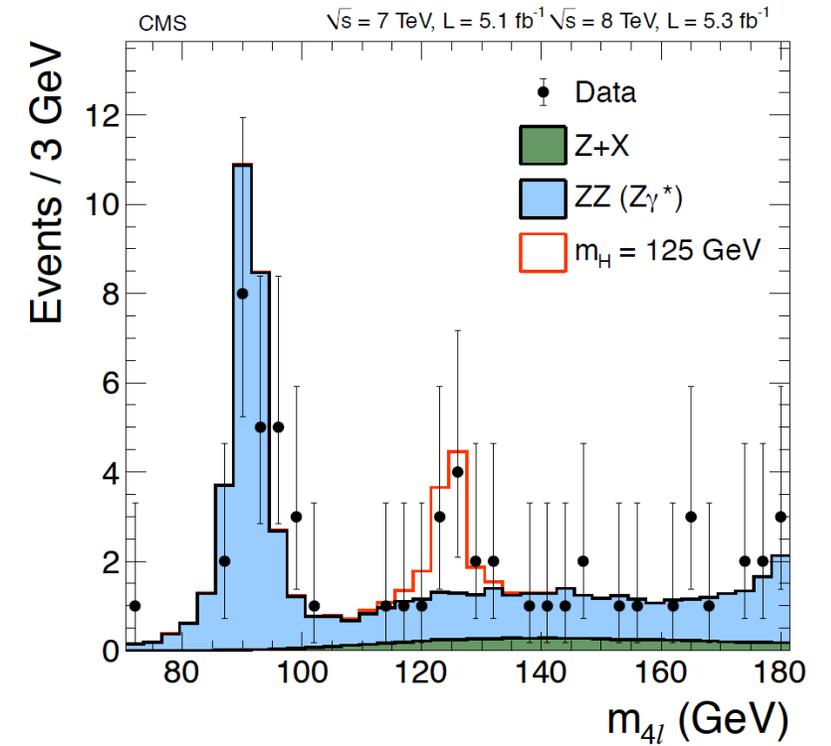
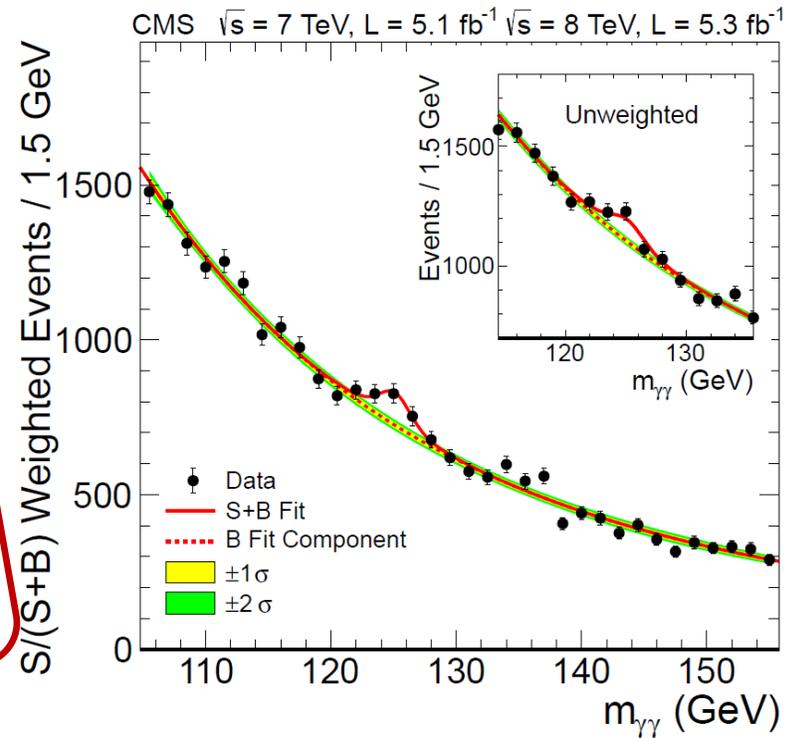
Il bosone di Higgs

- Introdotto per spiegare come le particelle del Modello Standard (MS) acquistano massa (1964)
- Scoperto dagli esperimenti ATLAS e CMS [1] al CERN (2012)

- Due canali di decadimento principali per la scoperta:

- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

Nel seguito vengono presentati
analisi e risultati con dati 2016
(35.9 fb^{-1}) a 13 TeV [2]

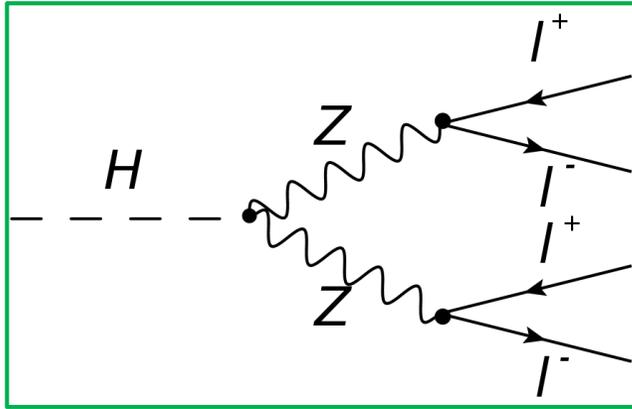


Le sue proprietà vengono studiate per investigare la sua natura e testare eventuali discrepanze rispetto al MS

[1] JHEP 06 (2013) 081

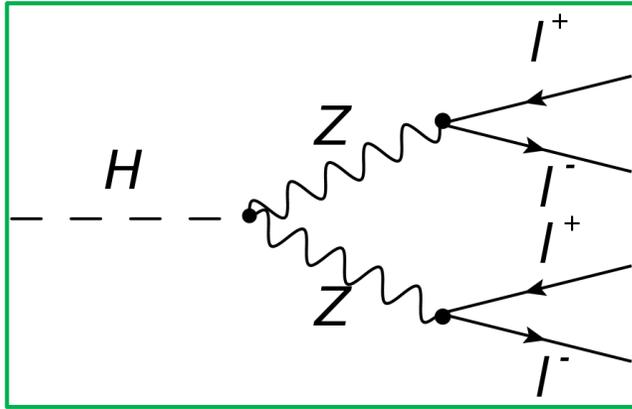
[2] JHEP 11 (2017) 047

Il canale $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l=e, \mu$)



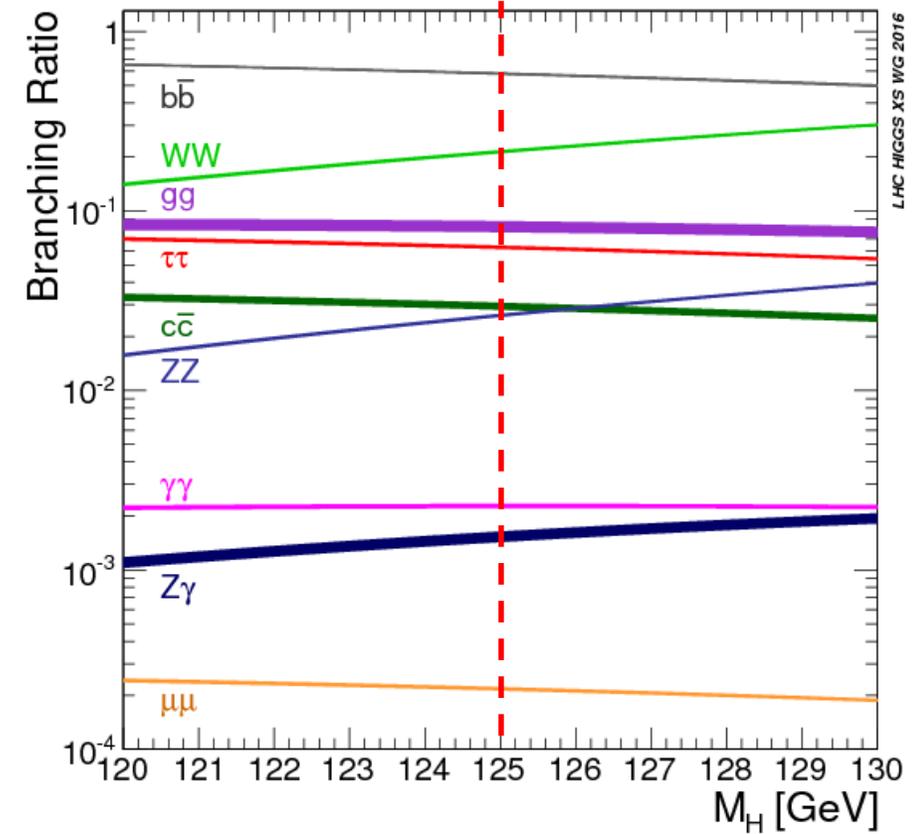
Questo canale presenta:

Il canale $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l=e, \mu$)

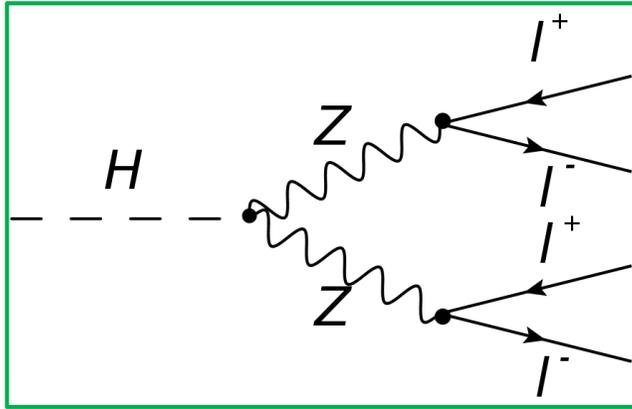


Questo canale presenta:

Piccola frazione di decadimento
 $(\sim 2 \times 10^{-2} \times (6 \times 10^{-2})^2)$



Il canale $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l=e, \mu$)

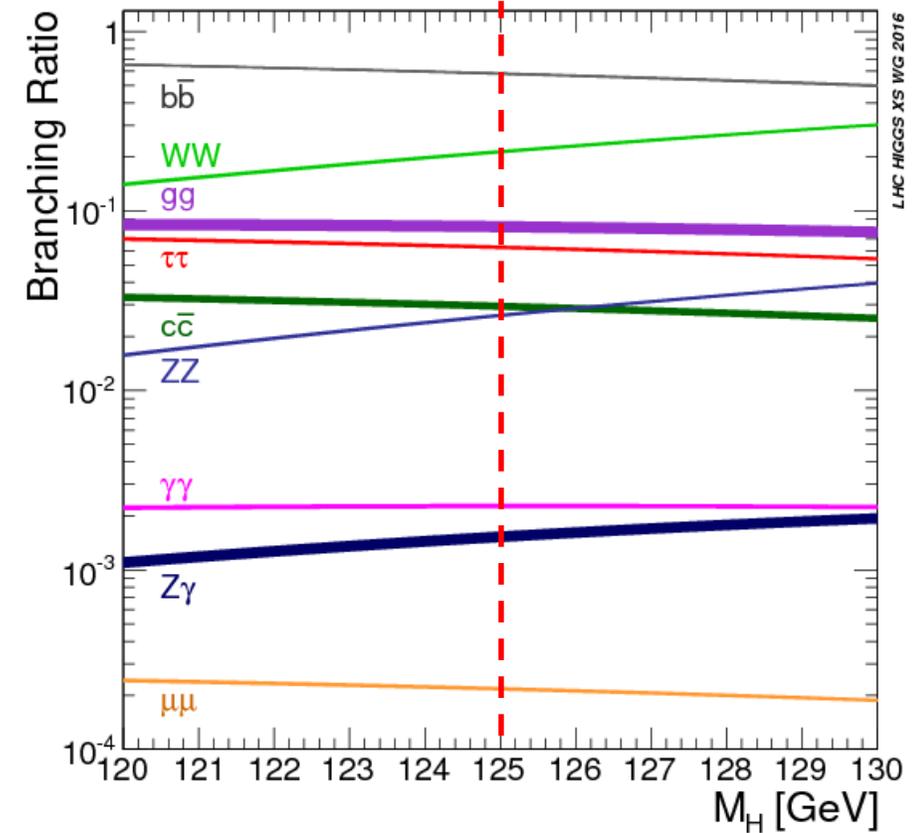


Questo canale presenta:

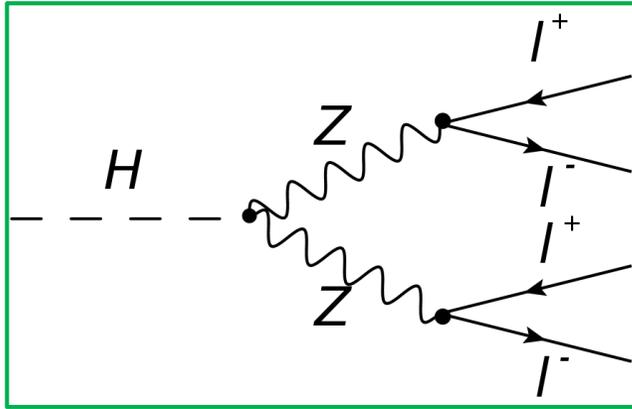
Piccola frazione di decadimento
 $(\sim 2 \times 10^{-2} \times (6 \times 10^{-2})^2)$

Ma:

Grande **rapporto segnale su fondo** ($\sim 2/1$)



Il canale $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l=e, \mu$)



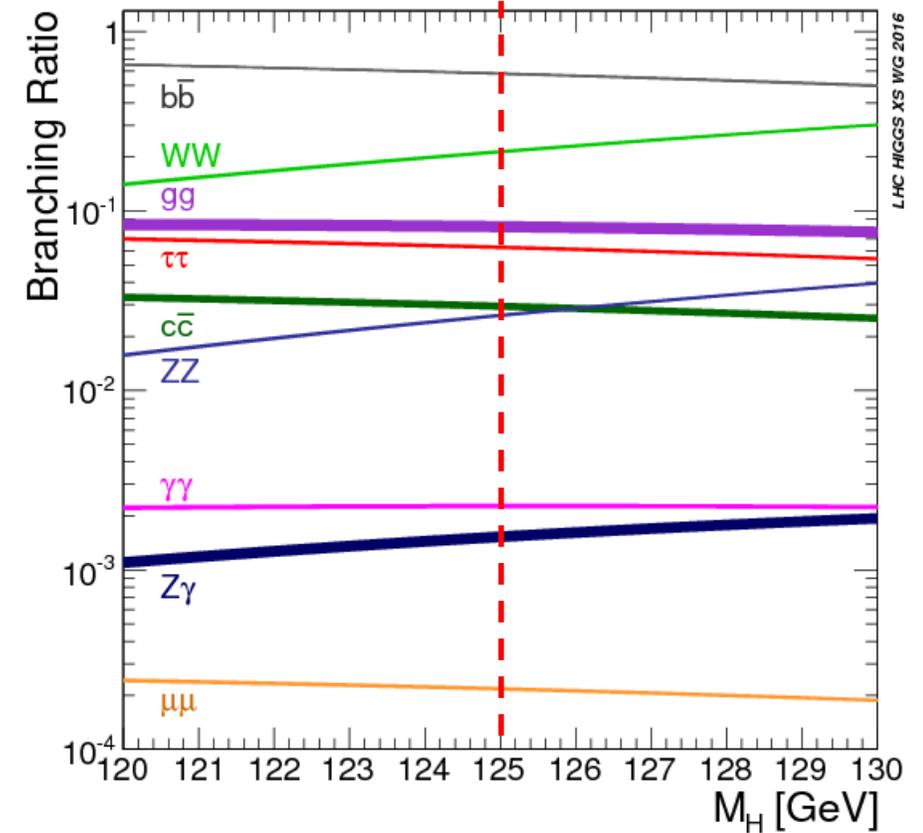
Questo canale presenta:

Piccola frazione di decadimento
 $(\sim 2 \times 10^{-2} \times (6 \times 10^{-2})^2)$

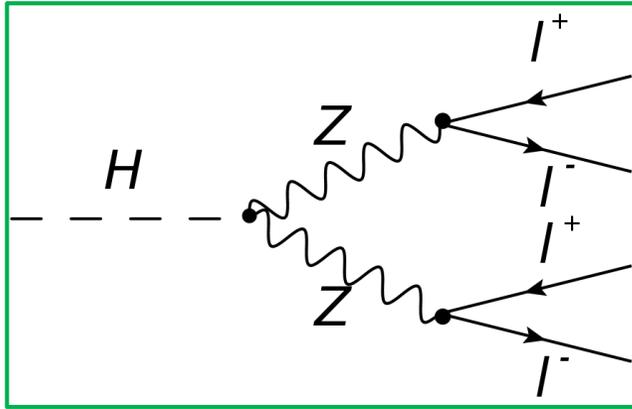
Ma:

Grande **rapporto segnale su fondo** ($\sim 2/1$)

Buona **risoluzione in massa** ($\sim 1 - 2\%$)



Il canale $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l=e, \mu$)



Questo canale presenta:

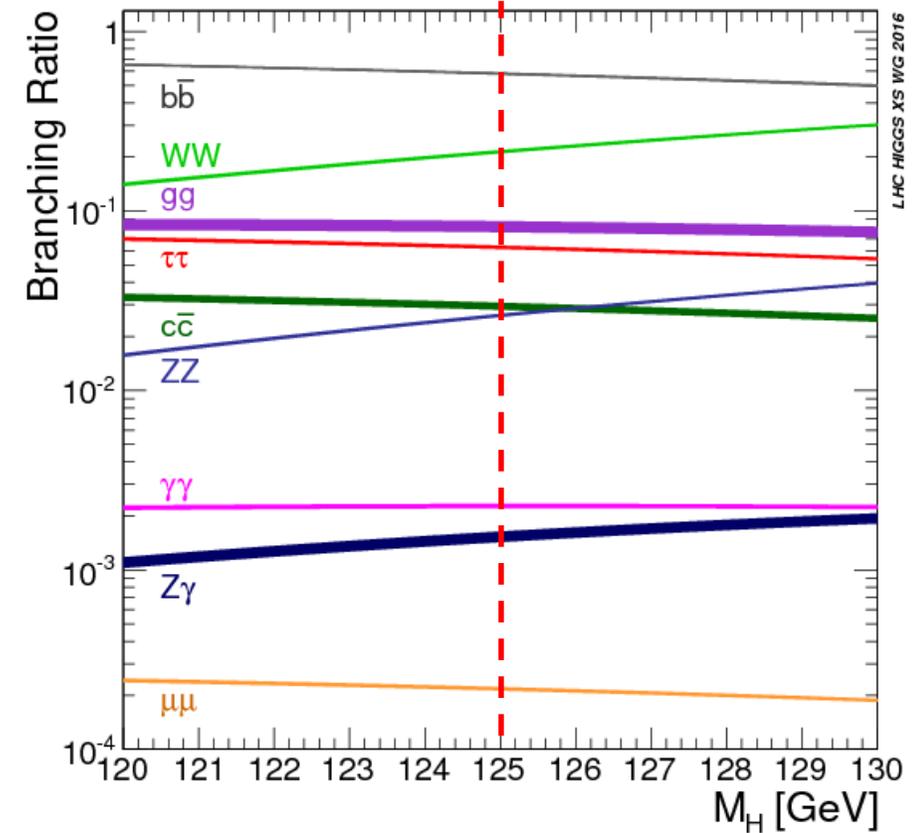
Piccola frazione di decadimento
 $(\sim 2 \times 10^{-2} \times (6 \times 10^{-2})^2)$

Ma:

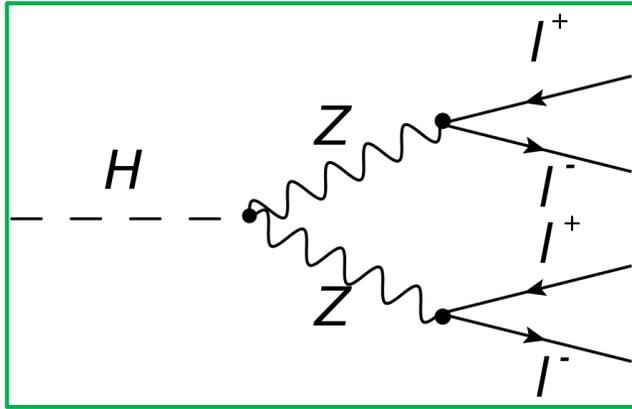
Grande **rapporto segnale su fondo** ($\sim 2/1$)

Buona **risoluzione in massa** ($\sim 1 - 2\%$)

Possibilità di **ricostruire** interamente la **cinematica del decadimento**



Il canale $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l=e, \mu$)



Questo canale presenta:

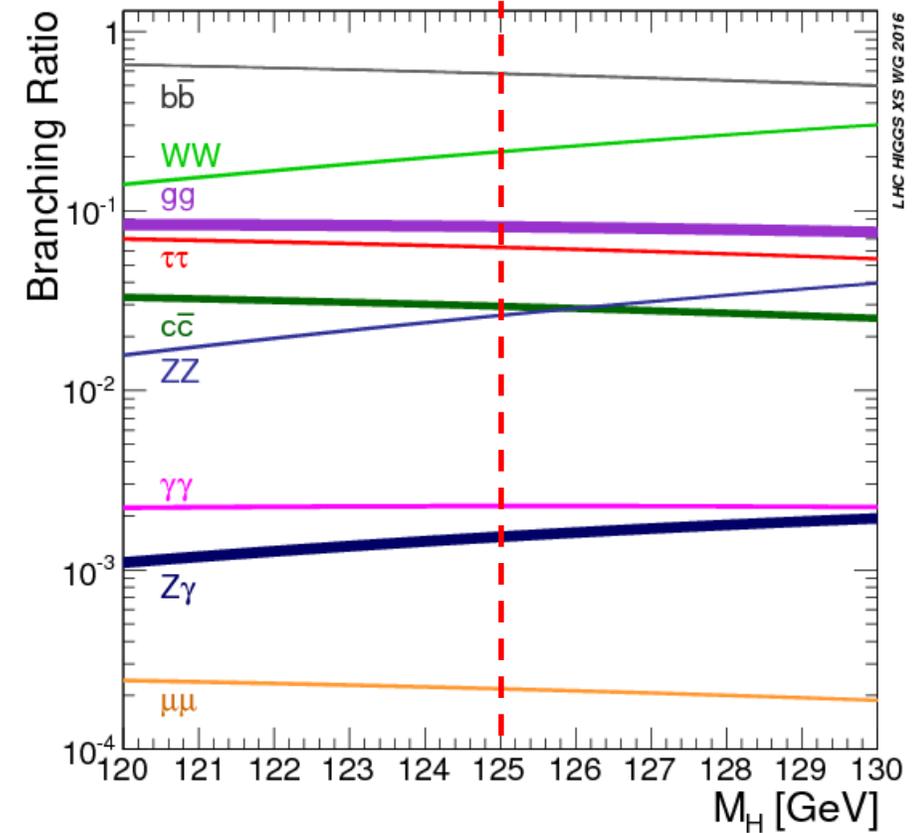
Piccola frazione di decadimento
 $(\sim 2 \times 10^{-2} \times (6 \times 10^{-2})^2)$

Ma:

Grande **rapporto segnale su fondo** ($\sim 2/1$)

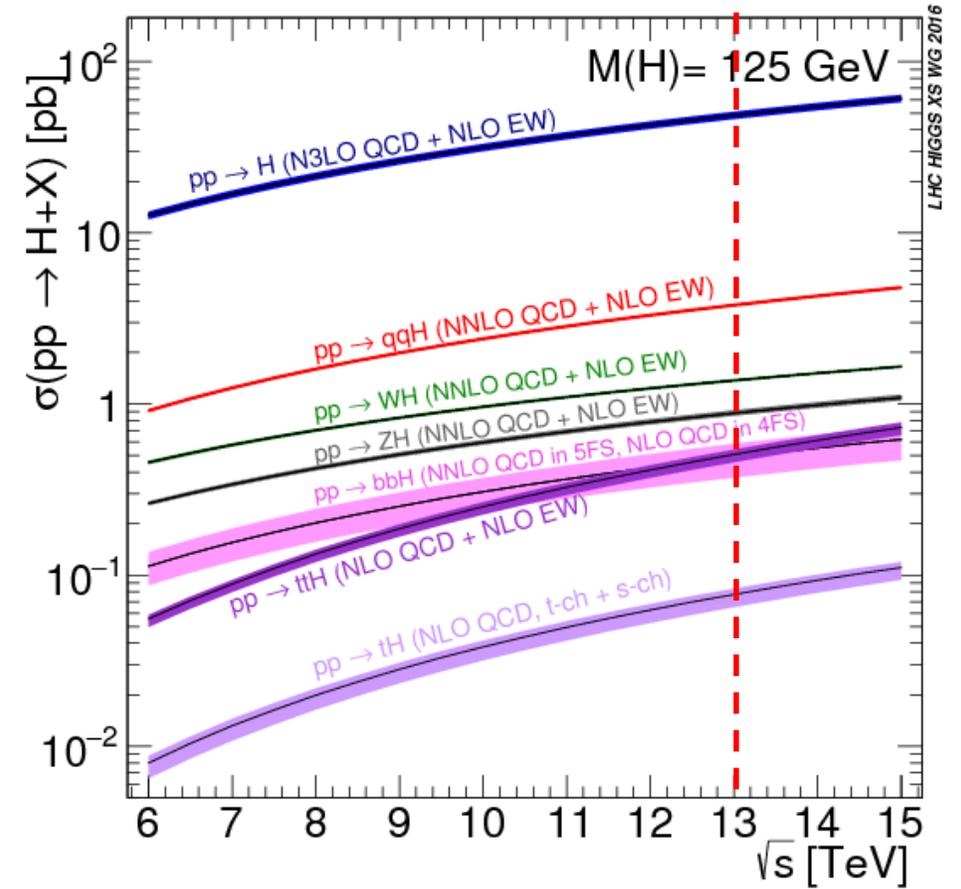
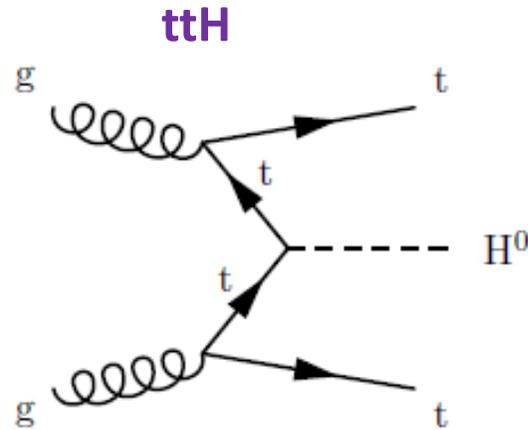
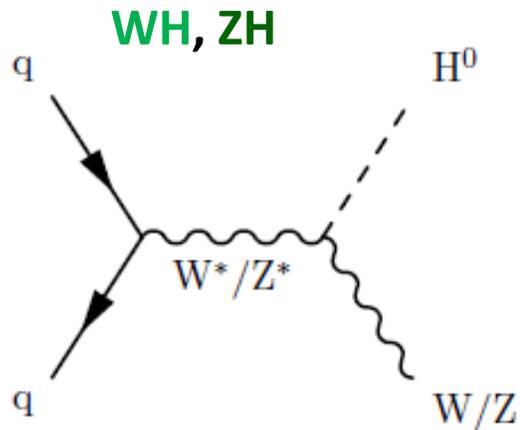
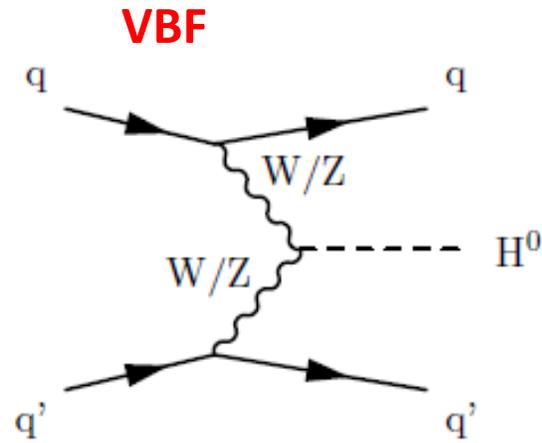
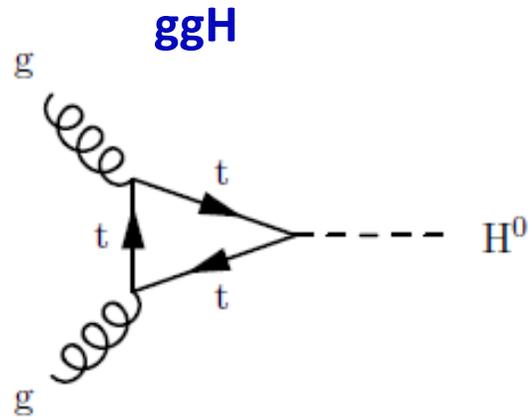
Buona **risoluzione in massa** ($\sim 1 - 2\%$)

Possibilità di **ricostruire** interamente la **cinematica del decadimento**

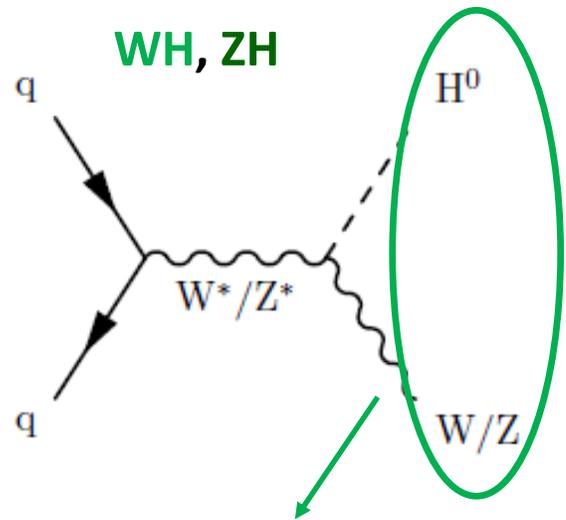
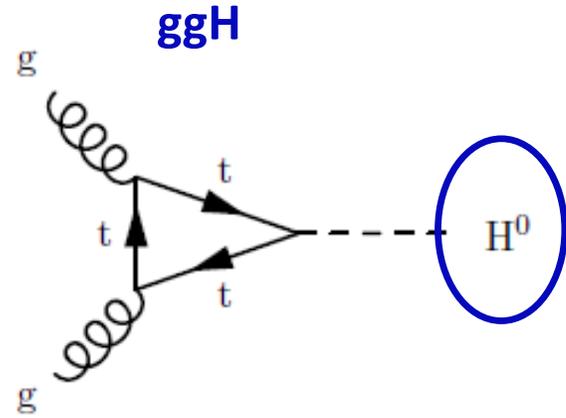


Permette di ricavare molte informazioni sulle proprietà del bosone di Higgs

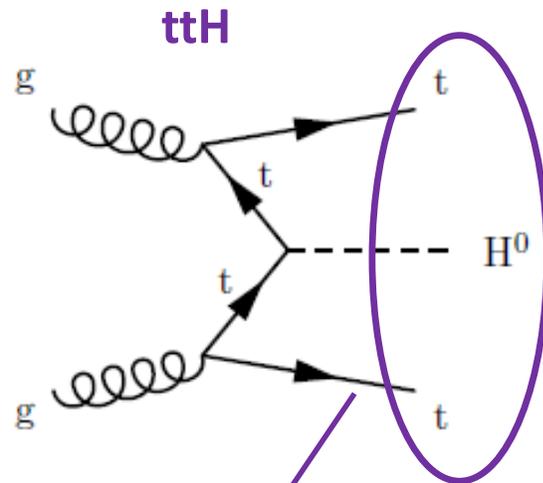
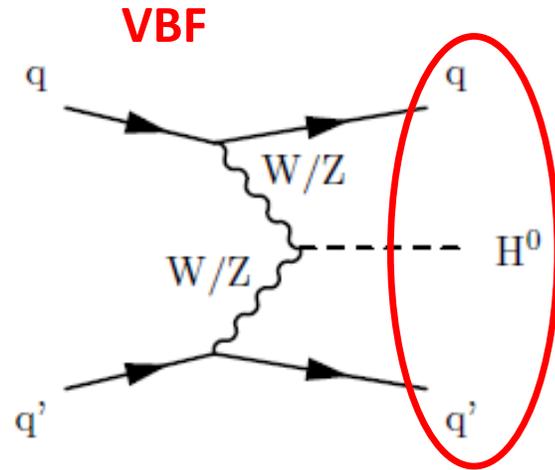
Produzione del bosone di Higgs a LHC



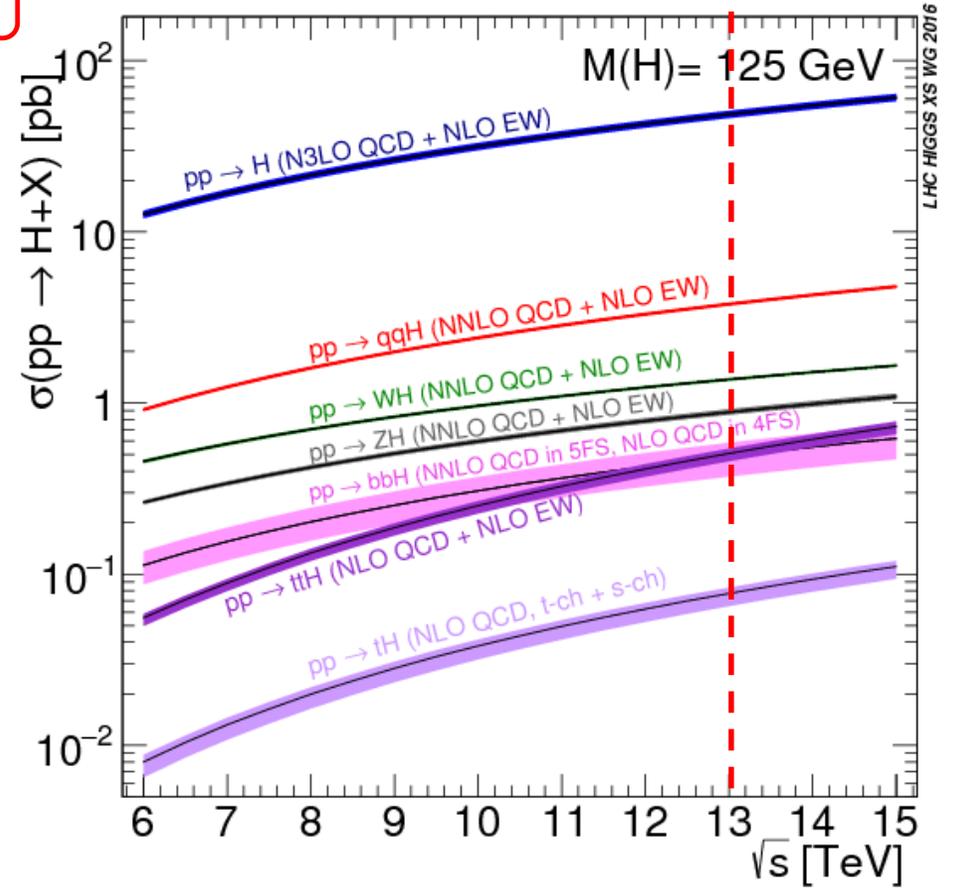
Produzione del bosone di Higgs a LHC



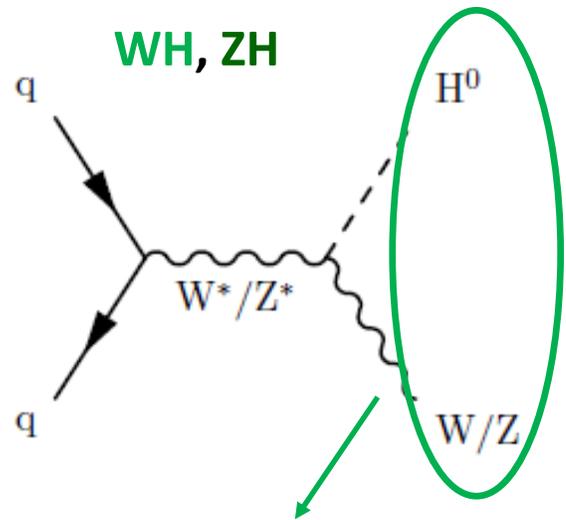
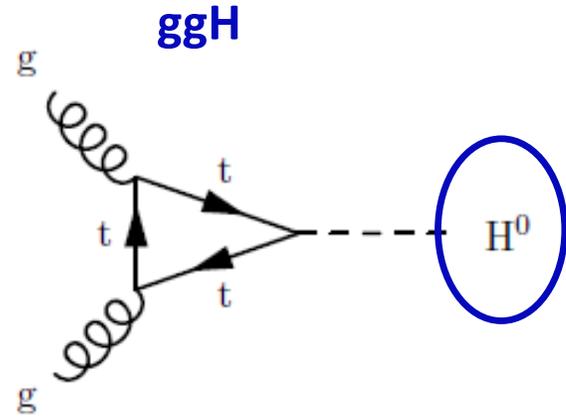
leptoni aggiuntivi/ MET



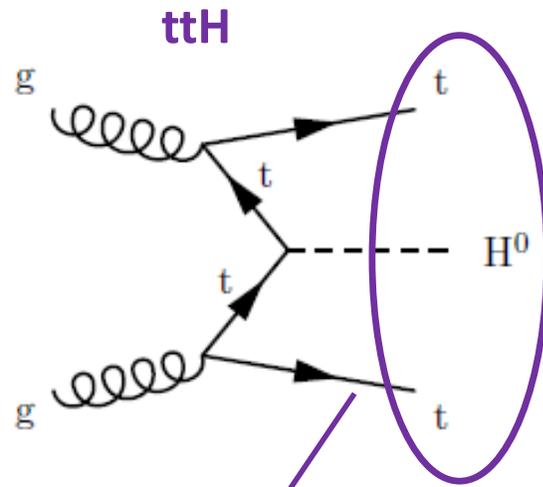
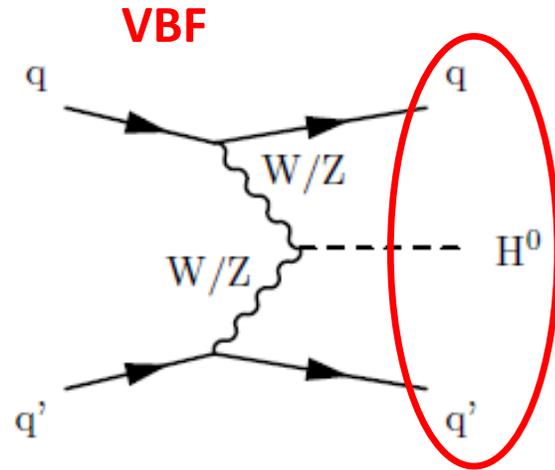
b-jets e jets



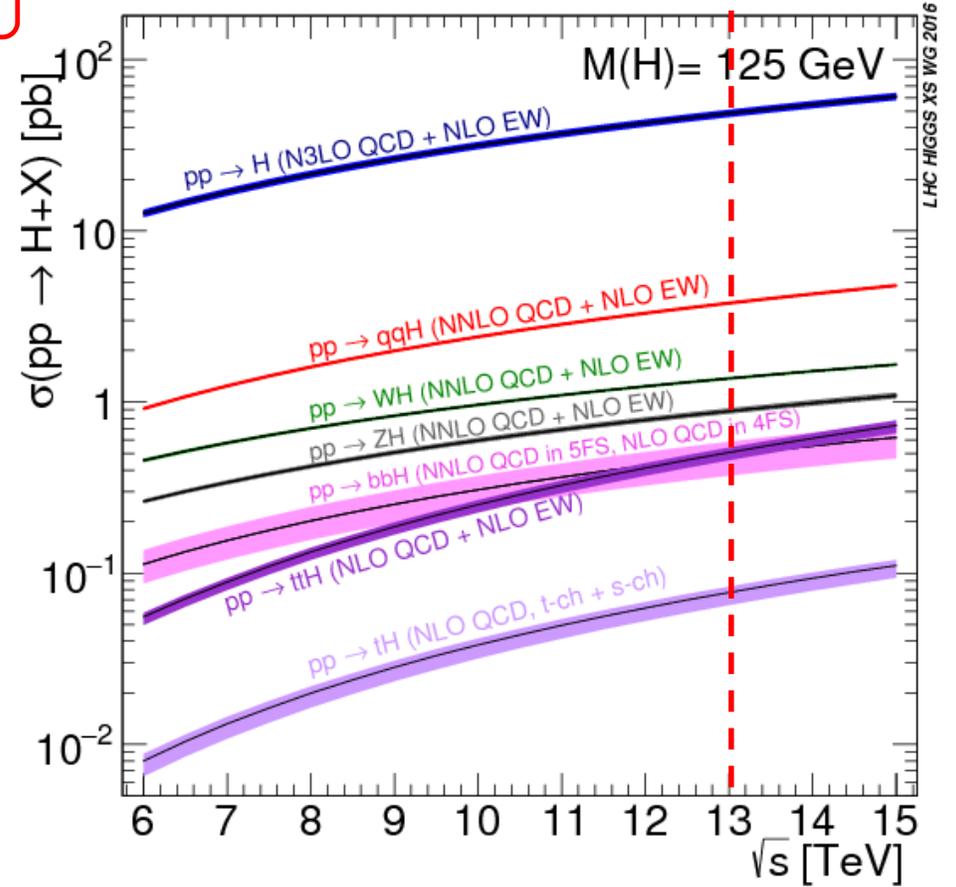
Produzione del bosone di Higgs a LHC



leptoni aggiuntivi/ MET



b-jets e jets



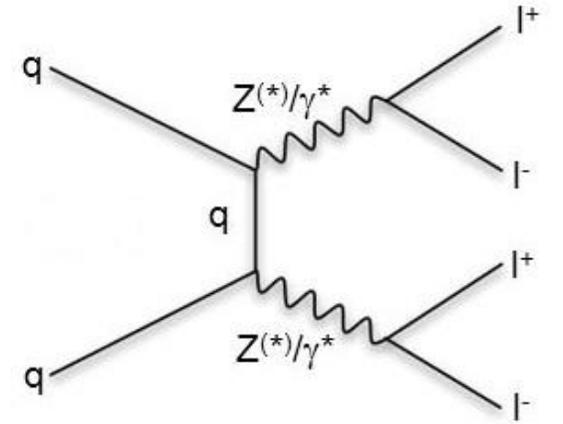
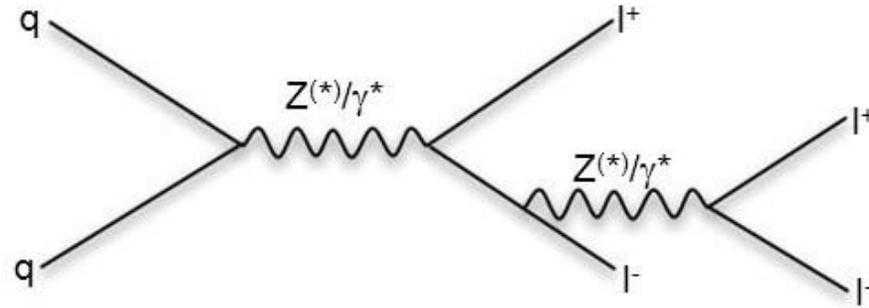
Categorie definite secondo le signature aggiuntive negli stati finali

Diversi tipi di fondo

Irriducibile

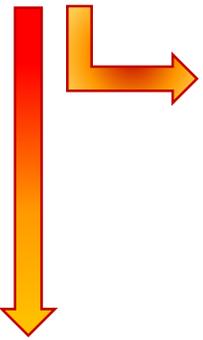


$qq \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

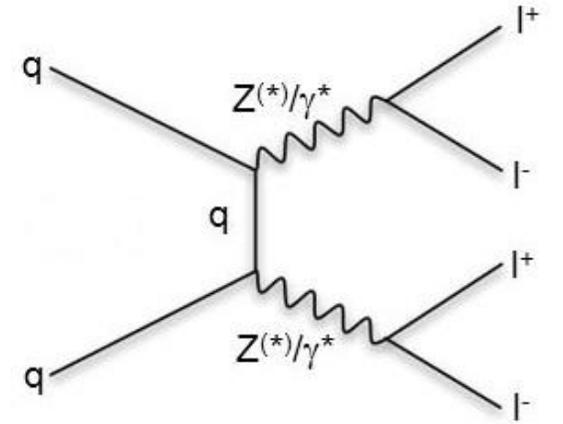
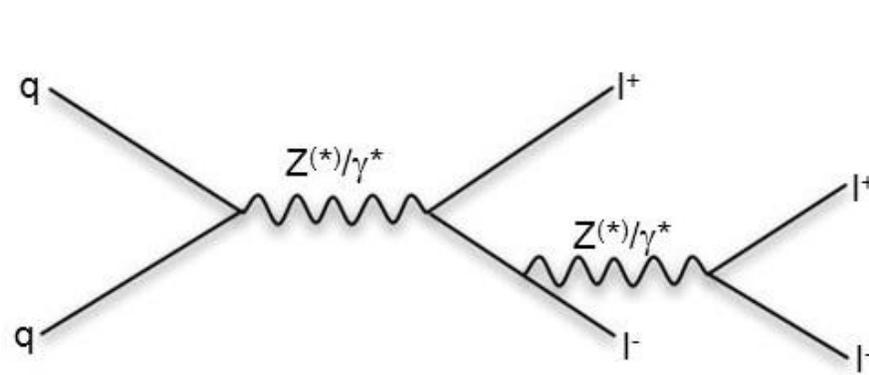


Diversi tipi di fondo

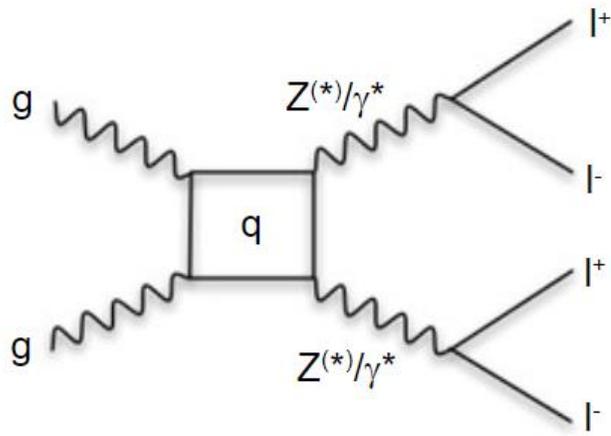
Irriducibile



$qq \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



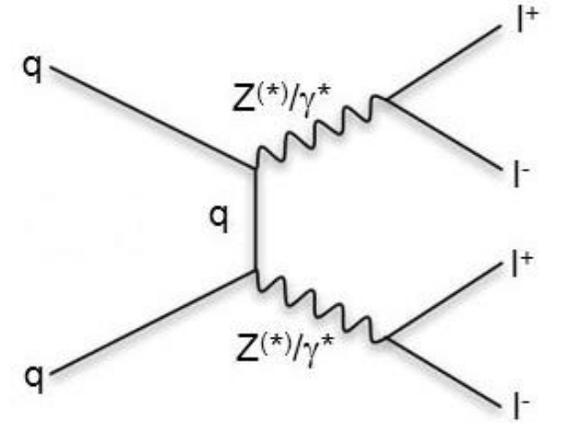
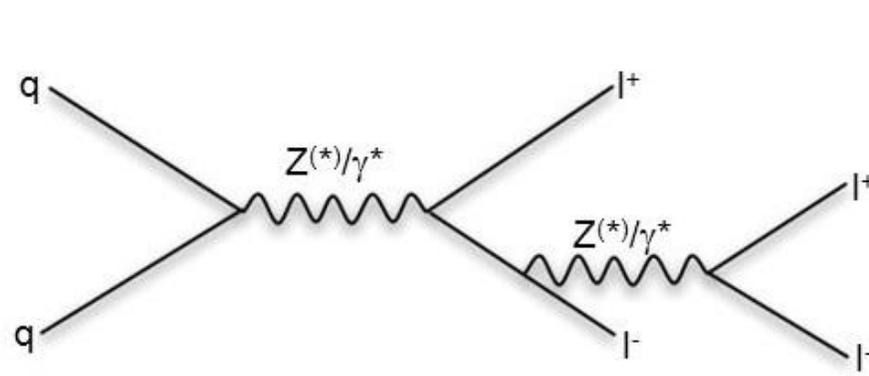
$gg \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



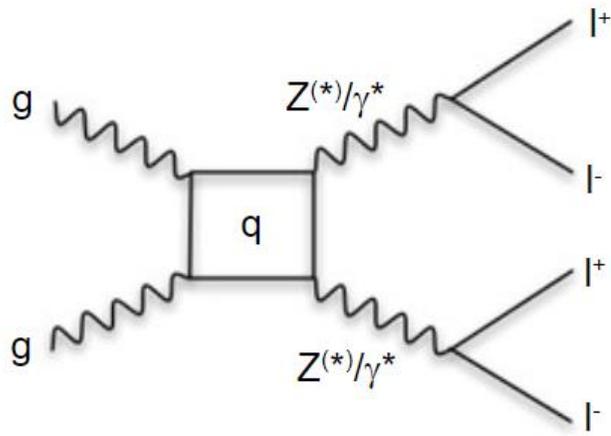
Diversi tipi di fondo

Irriducibile

$qq \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

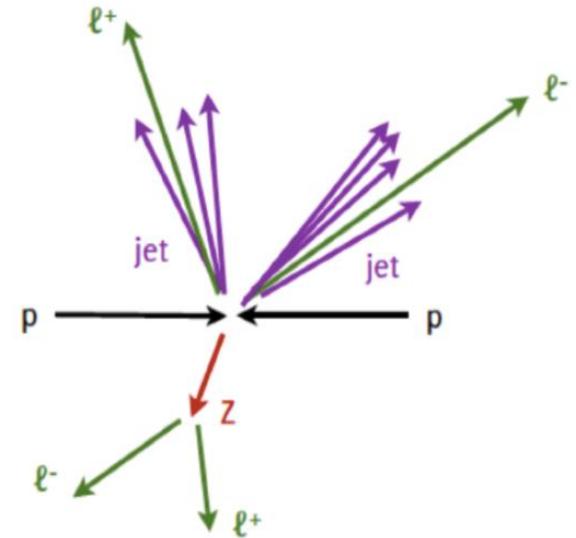


$gg \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



Riducibile

Z+X



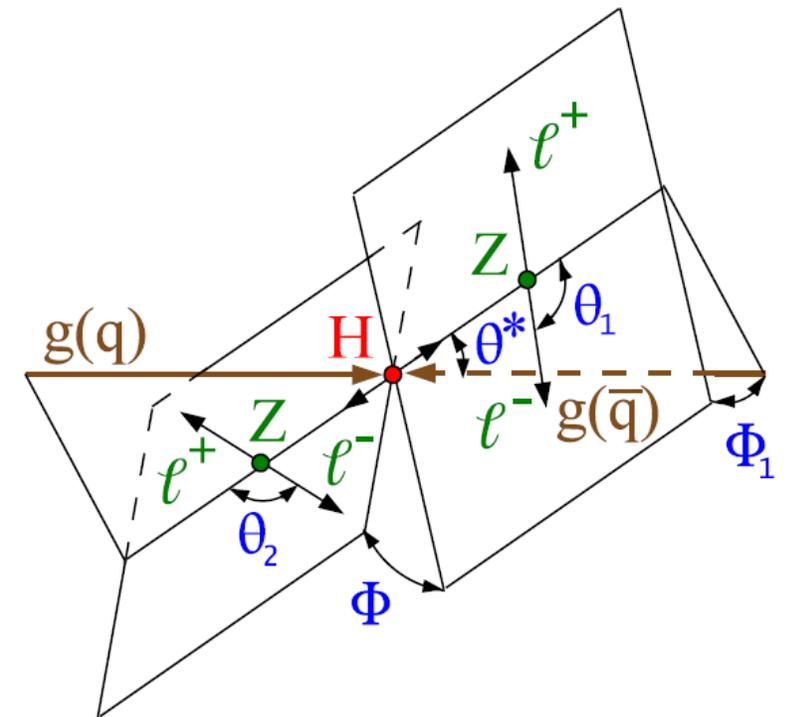
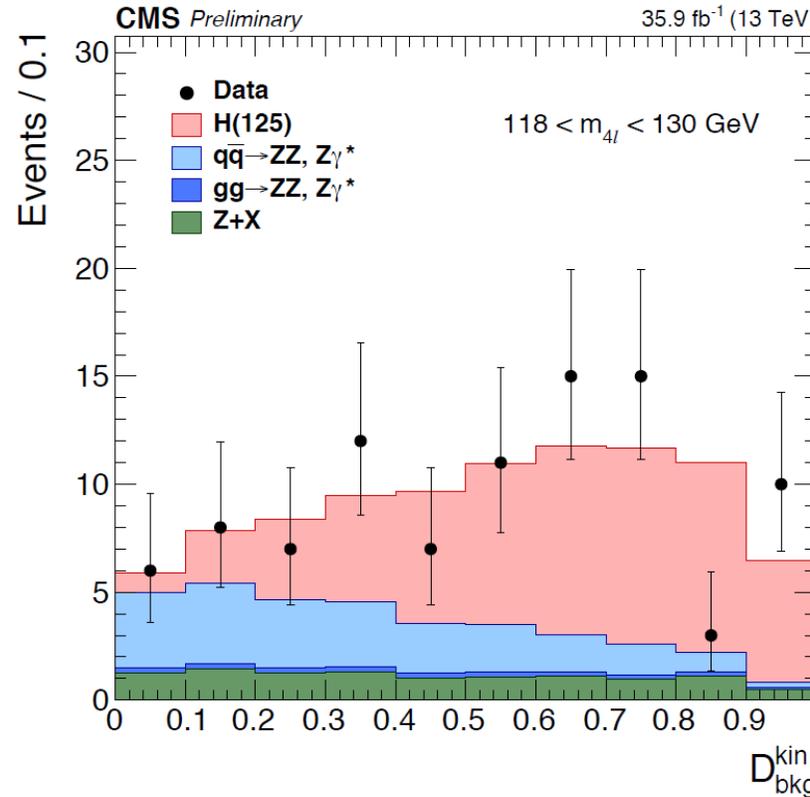
Discriminanti

MELA: insieme di discriminanti definiti in base alla cinematica dell'evento (nel sistema di riferimento del bosone di Higgs a riposo)

Per meglio distinguere segnale dal fondo



$$D_{\text{bkg}}^{\text{kin}} = \left[1 + \frac{\mathcal{P}_{\text{bkg}}^{\text{q}\bar{\text{q}}}(\vec{\Omega}^{\text{H}\rightarrow 4\ell} | m_{4\ell})}{\mathcal{P}_{\text{sig}}^{\text{gg}}(\vec{\Omega}^{\text{H}\rightarrow 4\ell} | m_{4\ell})} \right]^{-1} = \frac{P_{\text{sig}}}{P_{\text{sig}} + P_{\text{bkg}}}$$



Discriminanti

MELA: insieme di discriminanti definiti in base alla cinematica dell'evento (nel sistema di riferimento del bosone di Higgs a riposo)

Per meglio distinguere segnale dal fondo

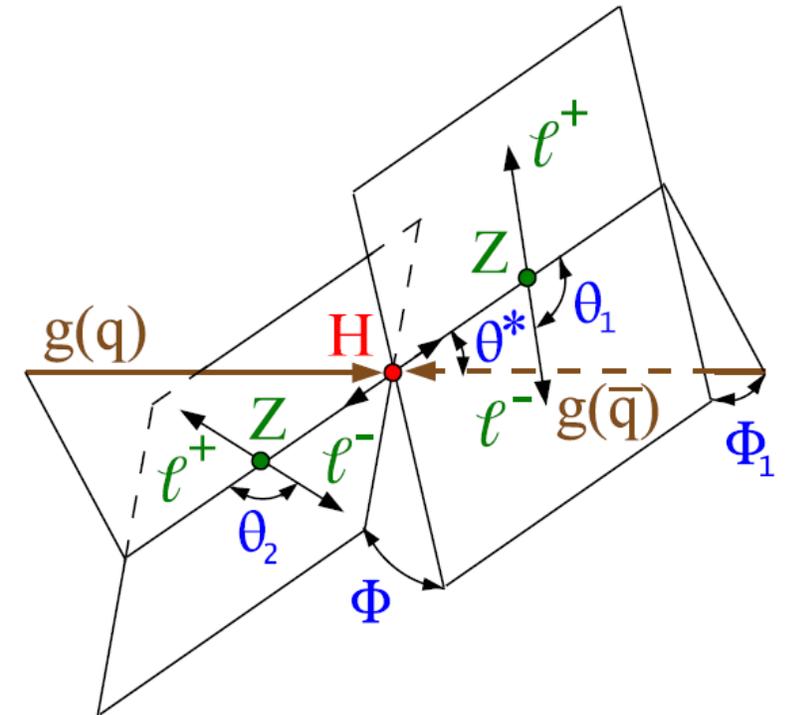
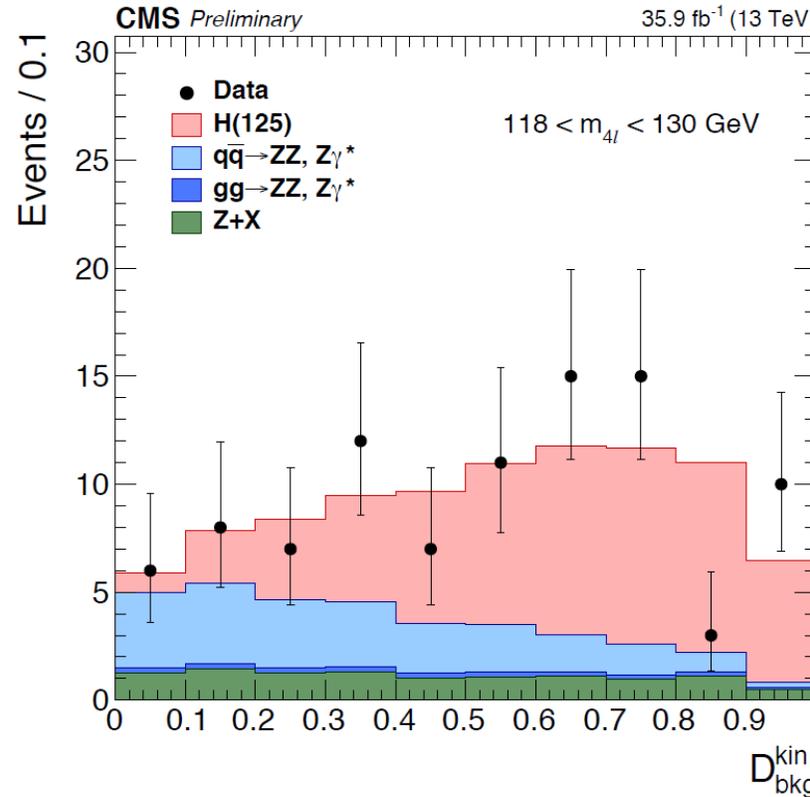


$$D_{\text{bkg}}^{\text{kin}} = \left[1 + \frac{\mathcal{P}_{\text{bkg}}^{\text{q}\bar{\text{q}}}(\vec{\Omega}^{\text{H}\rightarrow 4\ell} | m_{4\ell})}{\mathcal{P}_{\text{sig}}^{\text{gg}}(\vec{\Omega}^{\text{H}\rightarrow 4\ell} | m_{4\ell})} \right]^{-1} = \frac{P_{\text{sig}}}{P_{\text{sig}} + P_{\text{bkg}}}$$

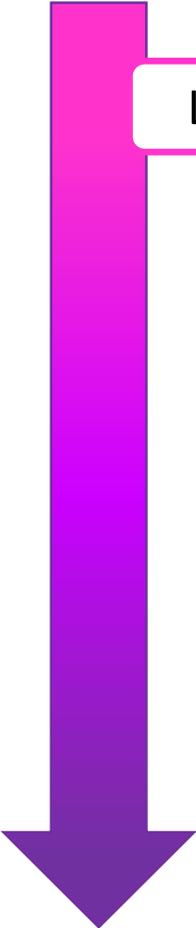
Per distinguere i diversi modi di produzione (separare VBF/VH da ggH+jj)



$D_{2\text{jets}}, D_{1\text{jets}}$
 $D_{\text{WH}}, D_{\text{ZH}}$



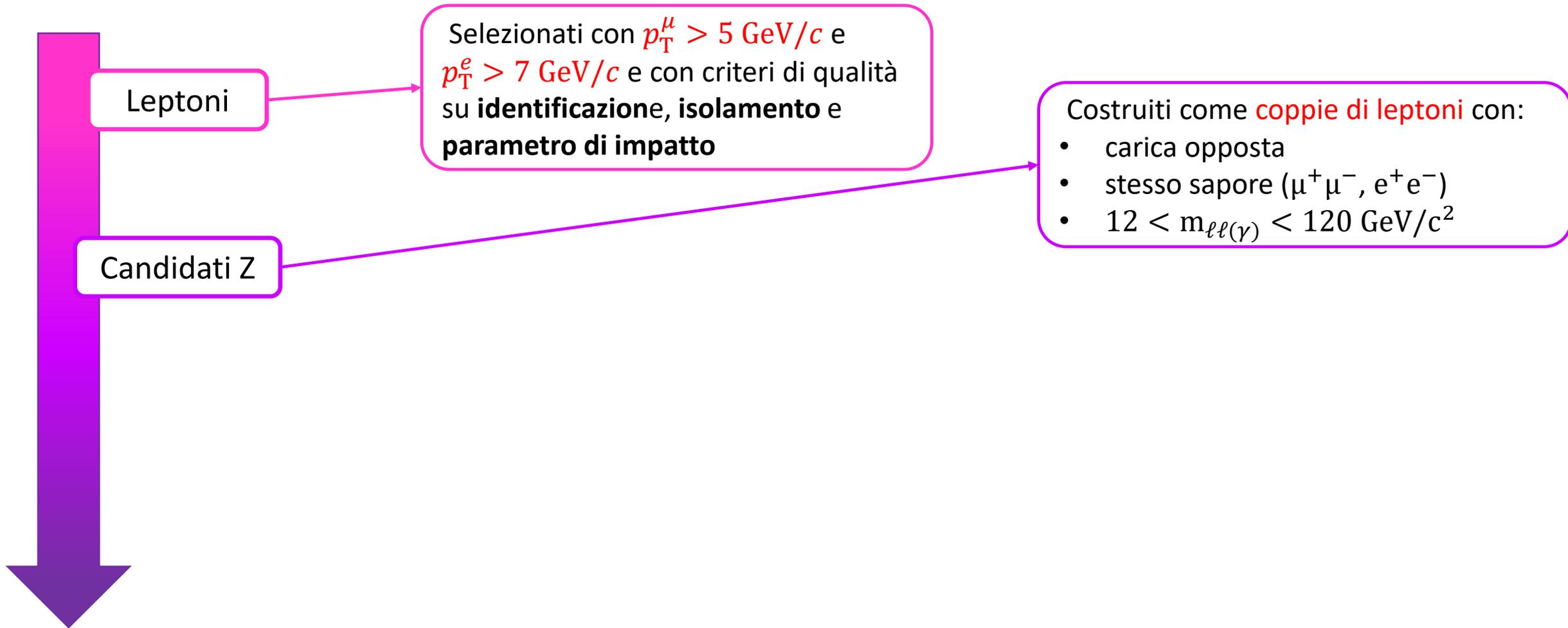
Selezione degli eventi per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016



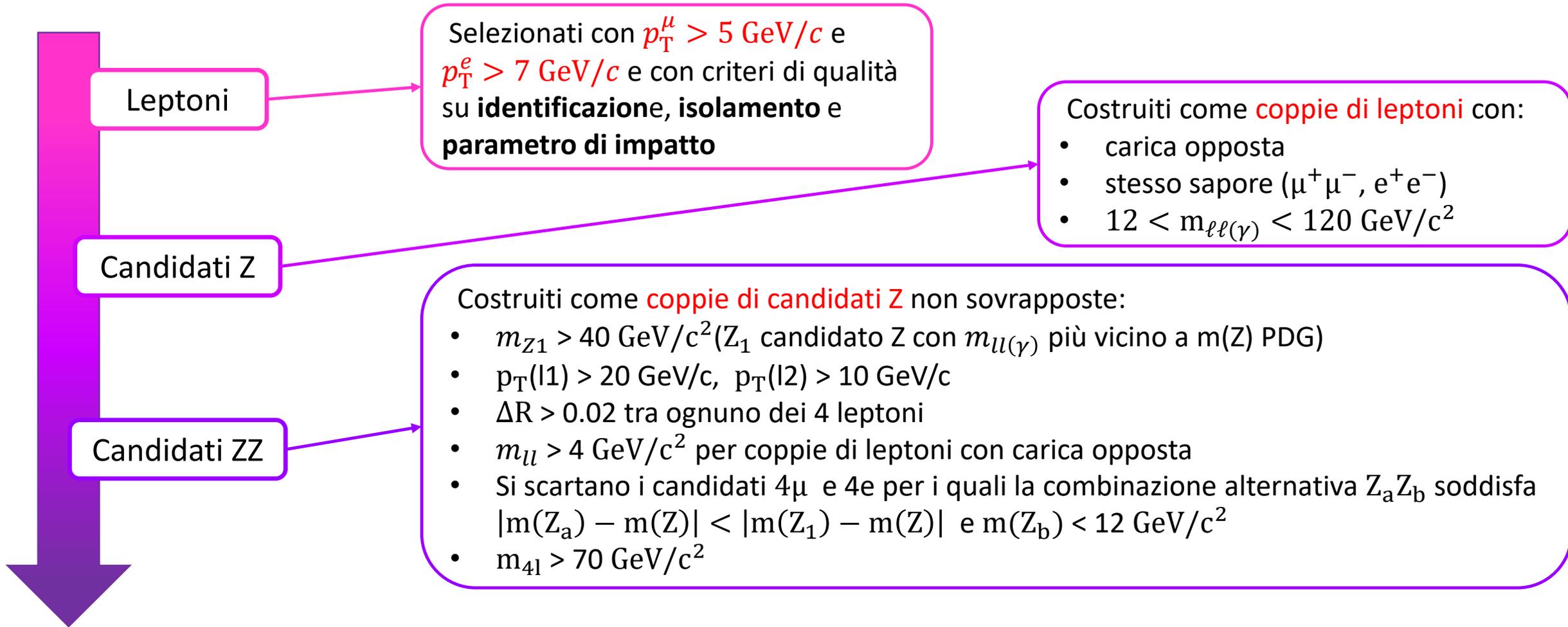
Leptoni

Selezionati con $p_T^\mu > 5 \text{ GeV}/c$ e $p_T^e > 7 \text{ GeV}/c$ e con criteri di qualità su **identificazione, isolamento e parametro di impatto**

Selezione degli eventi per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016



Selezione degli eventi per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016



Selezione degli eventi per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016

Leptoni

Selezionati con $p_T^\mu > 5 \text{ GeV}/c$ e $p_T^e > 7 \text{ GeV}/c$ e con criteri di qualità su **identificazione, isolamento e parametro di impatto**

Costruiti come **coppie di leptoni** con:

- carica opposta
- stesso sapore ($\mu^+\mu^-$, e^+e^-)
- $12 < m_{\ell\ell(\gamma)} < 120 \text{ GeV}/c^2$

Candidati Z

Costruiti come **coppie di candidati Z** non sovrapposte:

- $m_{Z_1} > 40 \text{ GeV}/c^2$ (Z_1 candidato Z con $m_{l(l)}$ più vicino a $m(Z)$ PDG)
- $p_T(l_1) > 20 \text{ GeV}/c$, $p_T(l_2) > 10 \text{ GeV}/c$
- $\Delta R > 0.02$ tra ognuno dei 4 leptoni
- $m_{ll} > 4 \text{ GeV}/c^2$ per coppie di leptoni con carica opposta
- Si scartano i candidati 4μ e $4e$ per i quali la combinazione alternativa $Z_a Z_b$ soddisfa $|m(Z_a) - m(Z)| < |m(Z_1) - m(Z)|$ e $m(Z_b) < 12 \text{ GeV}/c^2$
- $m_{4l} > 70 \text{ GeV}/c^2$

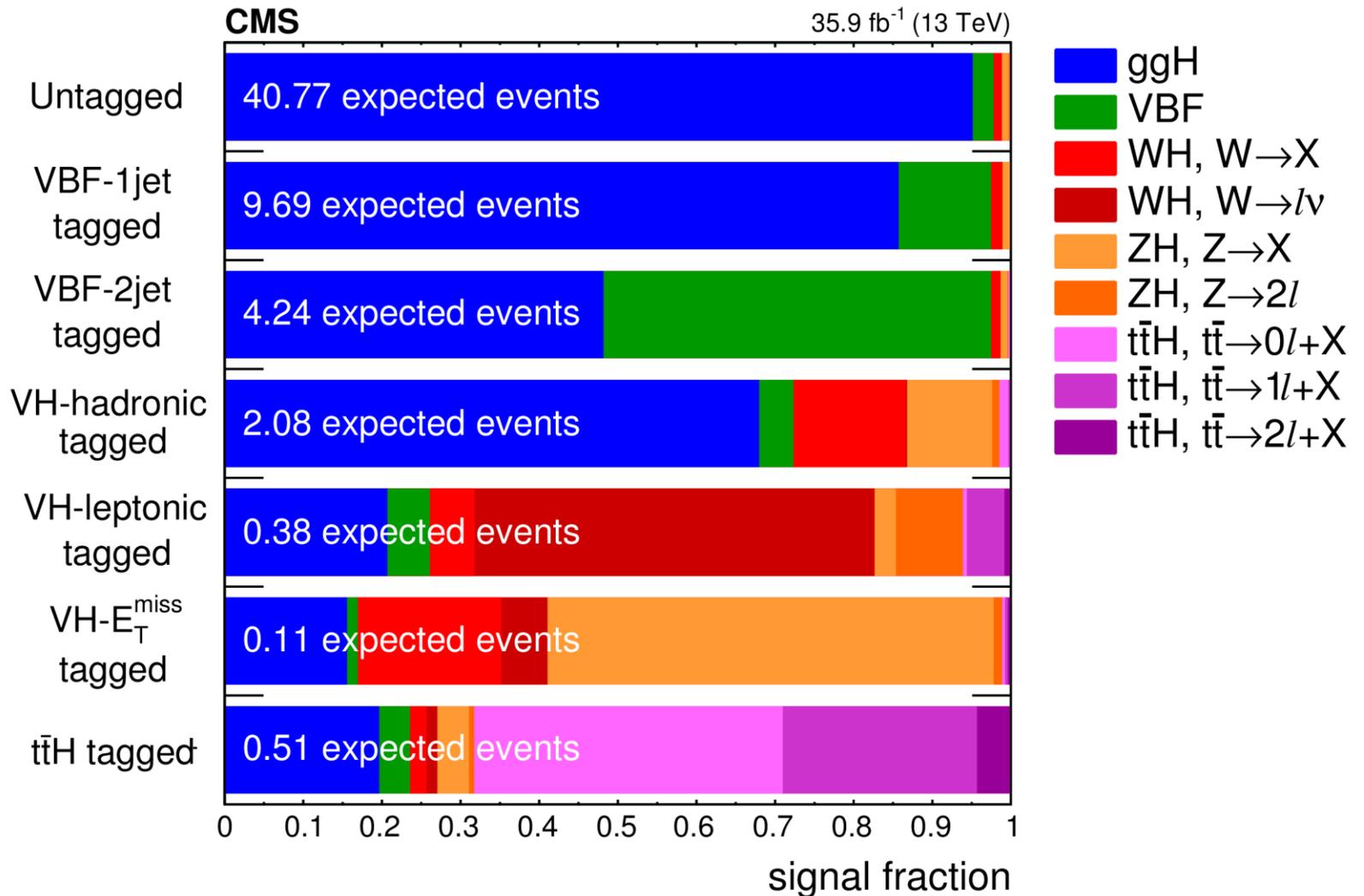
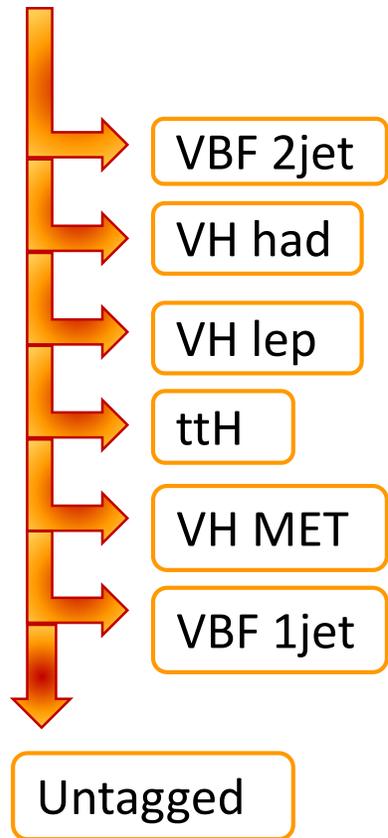
Candidati ZZ

Miglior Candidato ZZ

- Se più di un candidato ZZ sopravvive si sceglie quello con **valore di D_{bkg}^{kin} più alto**
- Se il valore di D_{bkg}^{kin} è uguale, si sceglie quello con la massa di Z_1 più vicina a $m(Z)$

Categorie per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016

Eventi selezionati classificati in 7 categorie mutuamente esclusive





Normalizzazione e modellizzazione di segnale e fondo

Ricavati per ogni **modo di produzione** di H e **sorgente di fondo**,
categoria e stato finale (4μ , $4e$, $2\mu 2e$)

Normalizzazione e modellizzazione di segnale e fondo

Ricavati per ogni modo di produzione di H e sorgente di fondo, categoria e stato finale (4μ , $4e$, $2\mu 2e$)

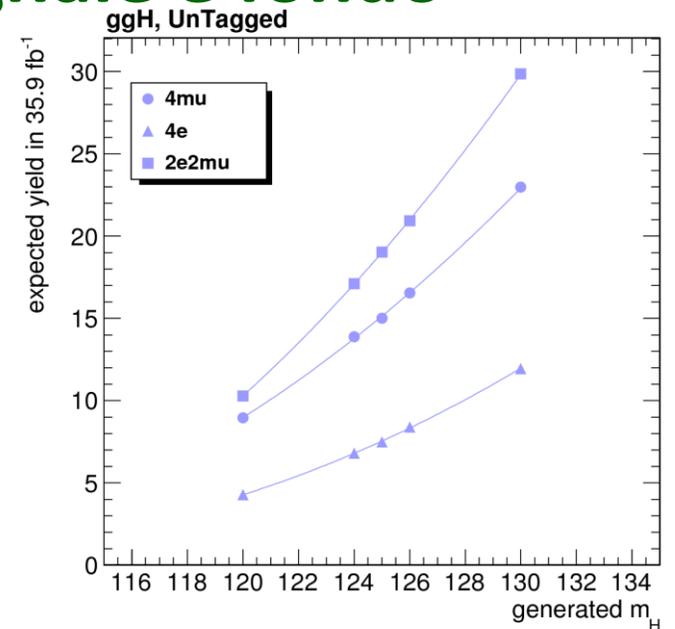
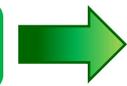
Numero di eventi attesi:



Segnale: da MC, parametrizzati in funzione di m_H

Fondo irriducibile: da MC

Fondo riducibile: dai dati



Normalizzazione e modellizzazione di segnale e fondo

Ricavati per ogni modo di produzione di H e sorgente di fondo, categoria e stato finale (4μ , $4e$, $2\mu 2e$)

Numero di eventi attesi:

Segnale: da MC, parametrizzati in funzione di m_H

Fondo irriducibile: da MC

Fondo riducibile: dai dati

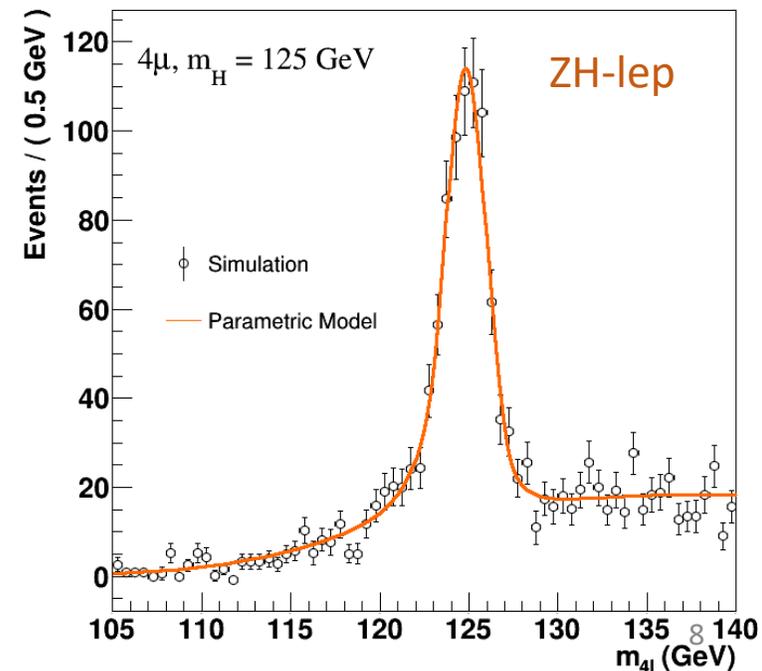
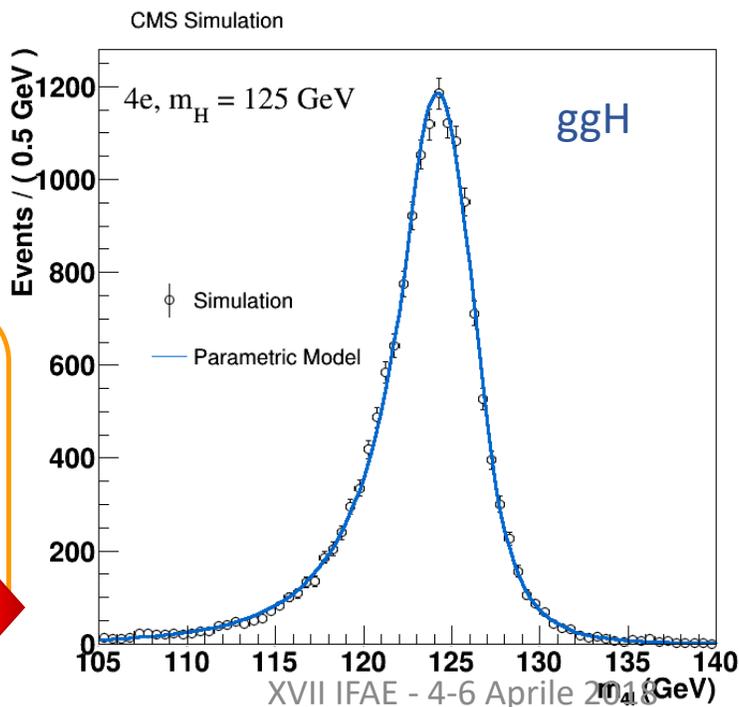
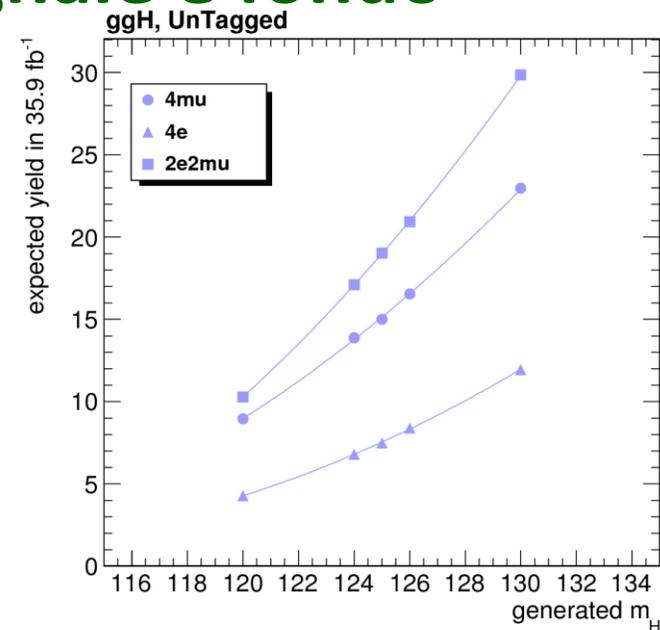
Forma funzionale attesa

Fondi: funzioni polinomiali

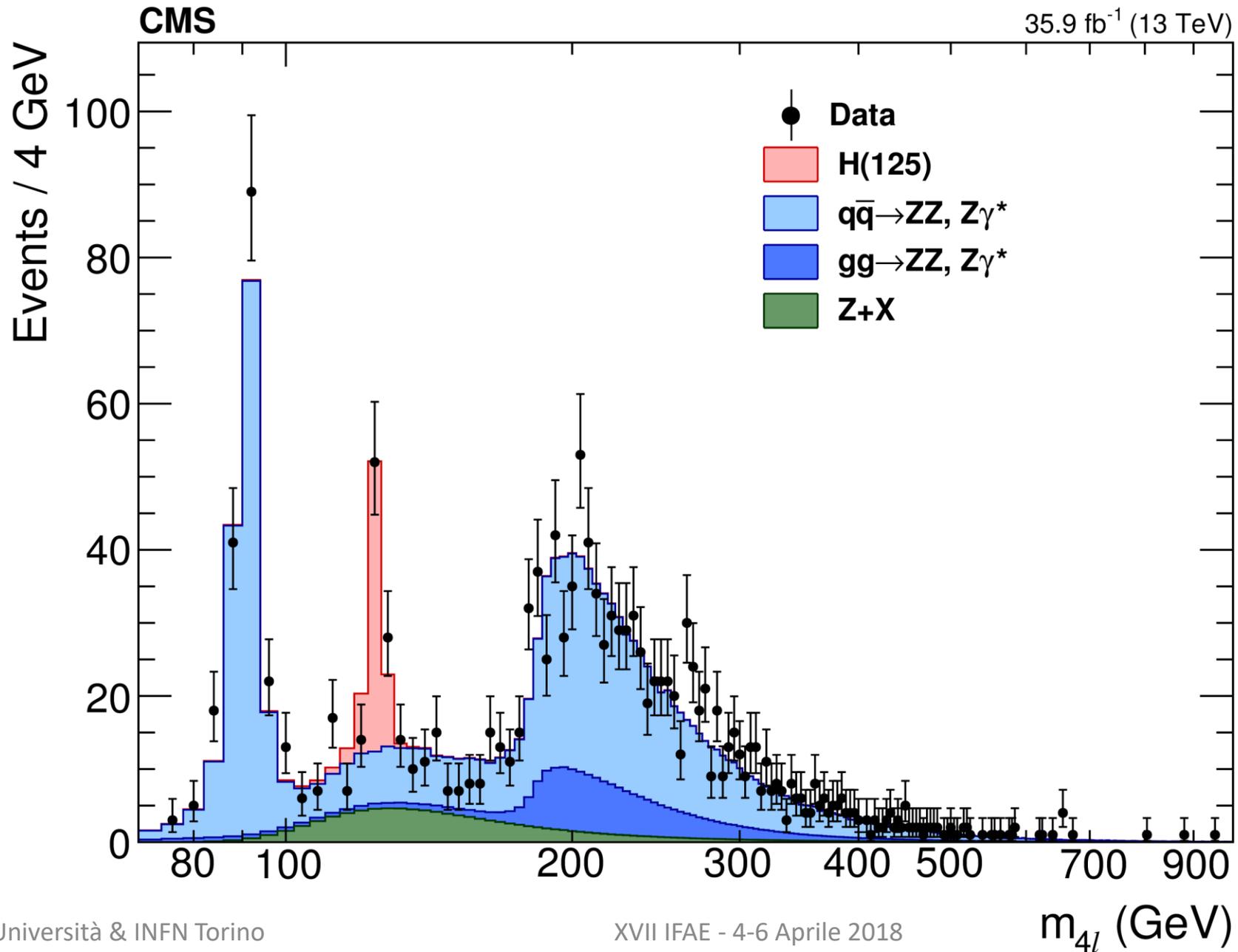
Segnale

$$dCB(\xi) = N \cdot \begin{cases} A \cdot (B + |\xi|)^{-n_L}, & \text{for } \xi < \alpha_L \\ A \cdot (B + |\xi|)^{-n_R}, & \text{for } \xi > \alpha_R \\ \exp(-\xi^2/2), & \text{for } \alpha_L \leq \xi \leq \alpha_R \end{cases}$$

(+ Landau)



Risultati per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016: m_{4l}



Risultati per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016: μ

$$\sigma = \mu \sigma_{SM}$$

Ricavato mediante regressione (ML fit)
multidimensionale su:

$$\mathcal{L}_{2D}(m_{4l}, \mathcal{D}_{\text{bkg}}^{\text{kin}}) = \mathcal{L}(m_{4l}) \mathcal{L}(\mathcal{D}_{\text{bkg}}^{\text{kin}} | m_{4l})$$

Modello statistico

2D Template

Risultati per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016: μ

$$\sigma = \mu \sigma_{SM}$$

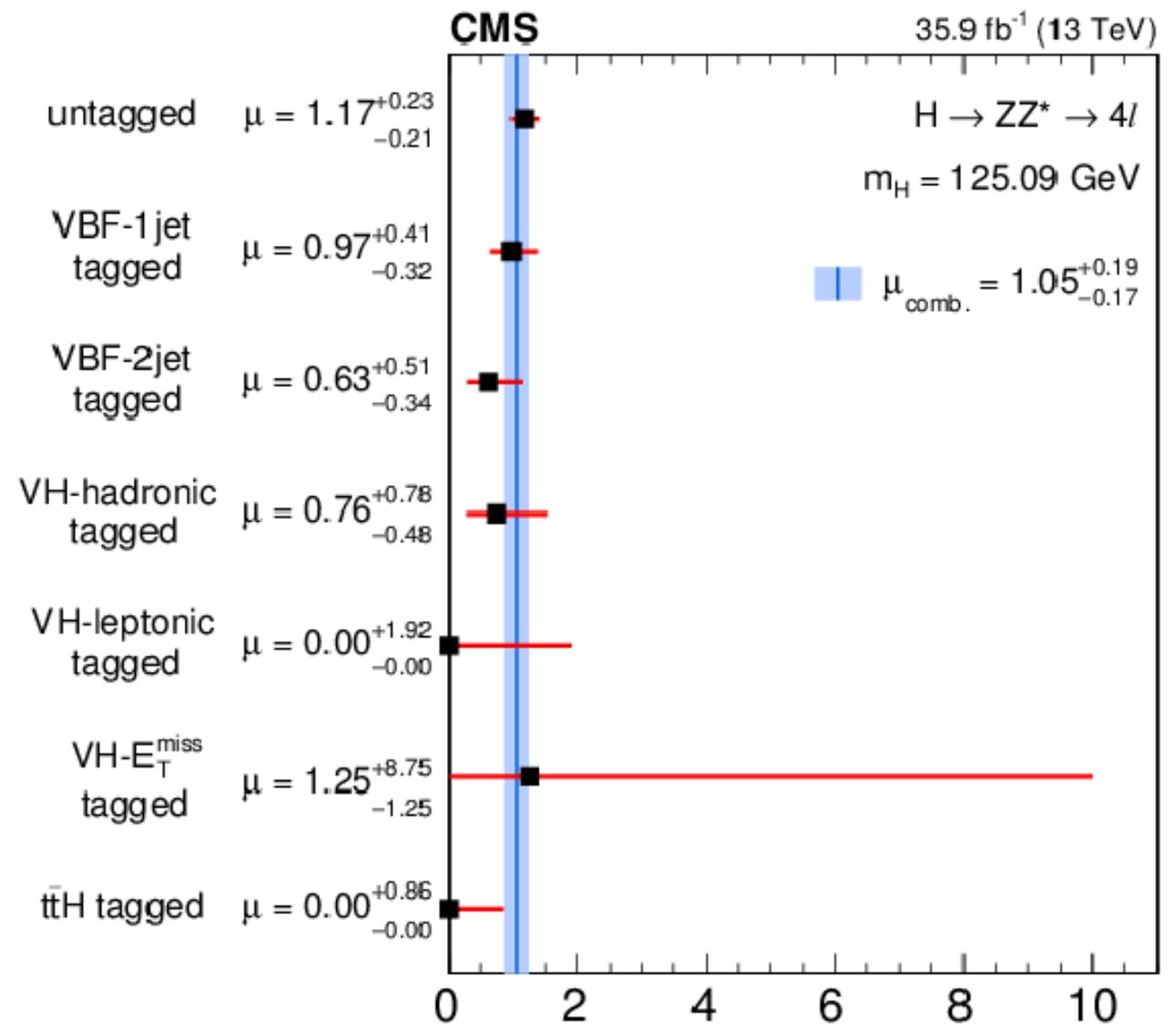
Ricavato mediante regressione (ML fit) multidimensionale su:

$$\mathcal{L}_{2D}(m_{4l}, \mathcal{D}_{bkg}^{kin}) = \mathcal{L}(m_{4l}) \mathcal{L}(\mathcal{D}_{bkg}^{kin} | m_{4l})$$

Modello statistico

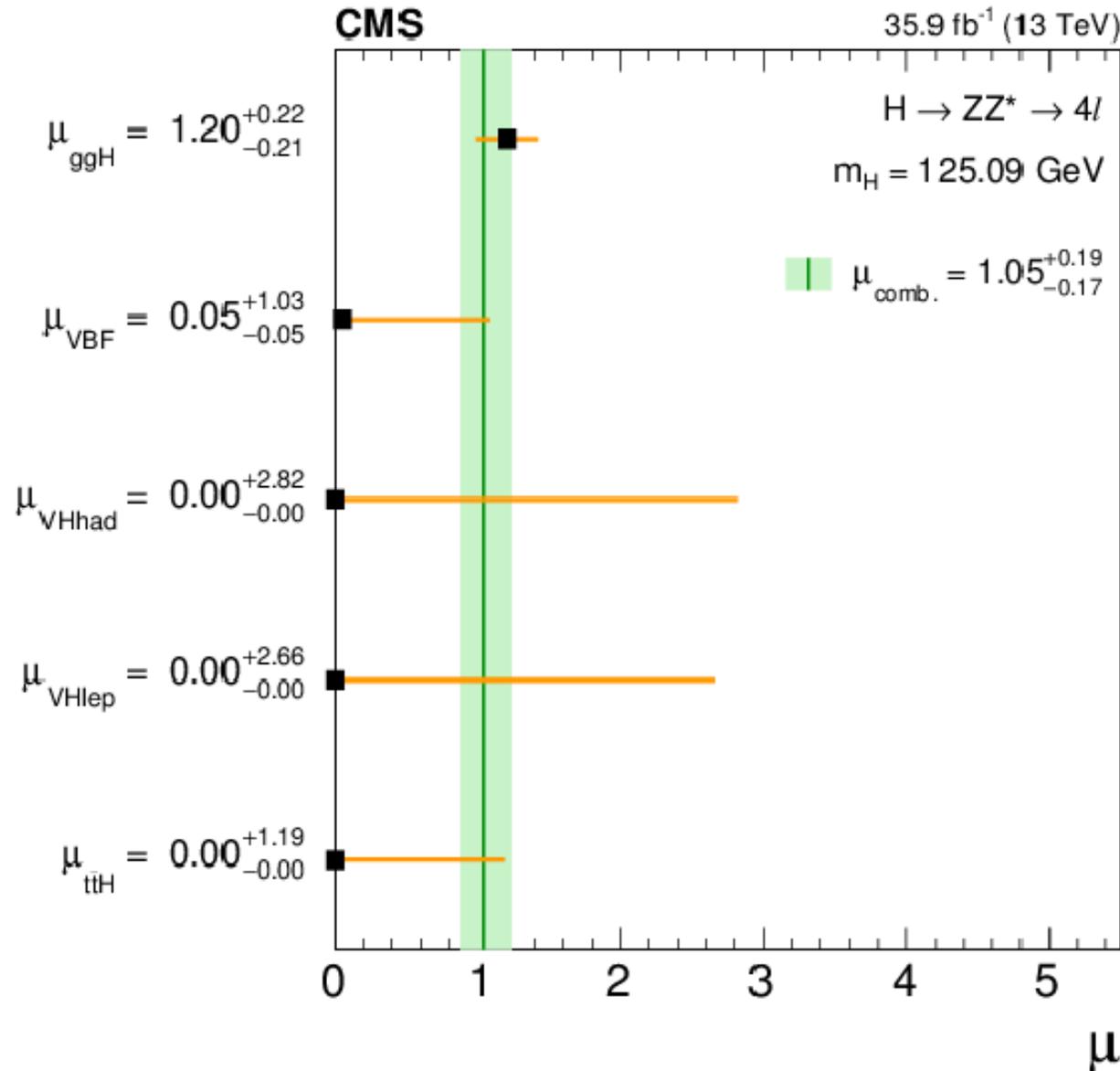
2D Template

Risultato per categoria ricavato da con regressione simultanea nelle 7 categorie

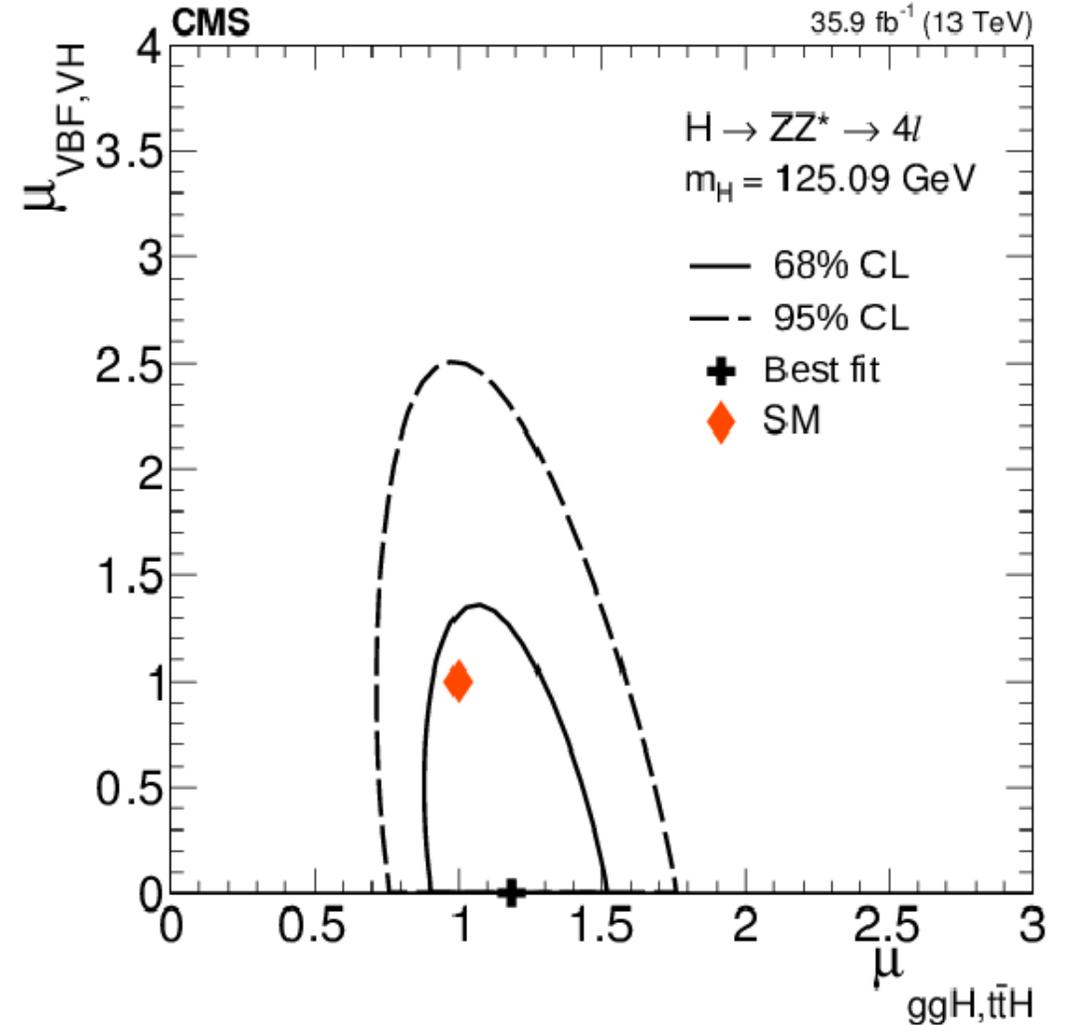
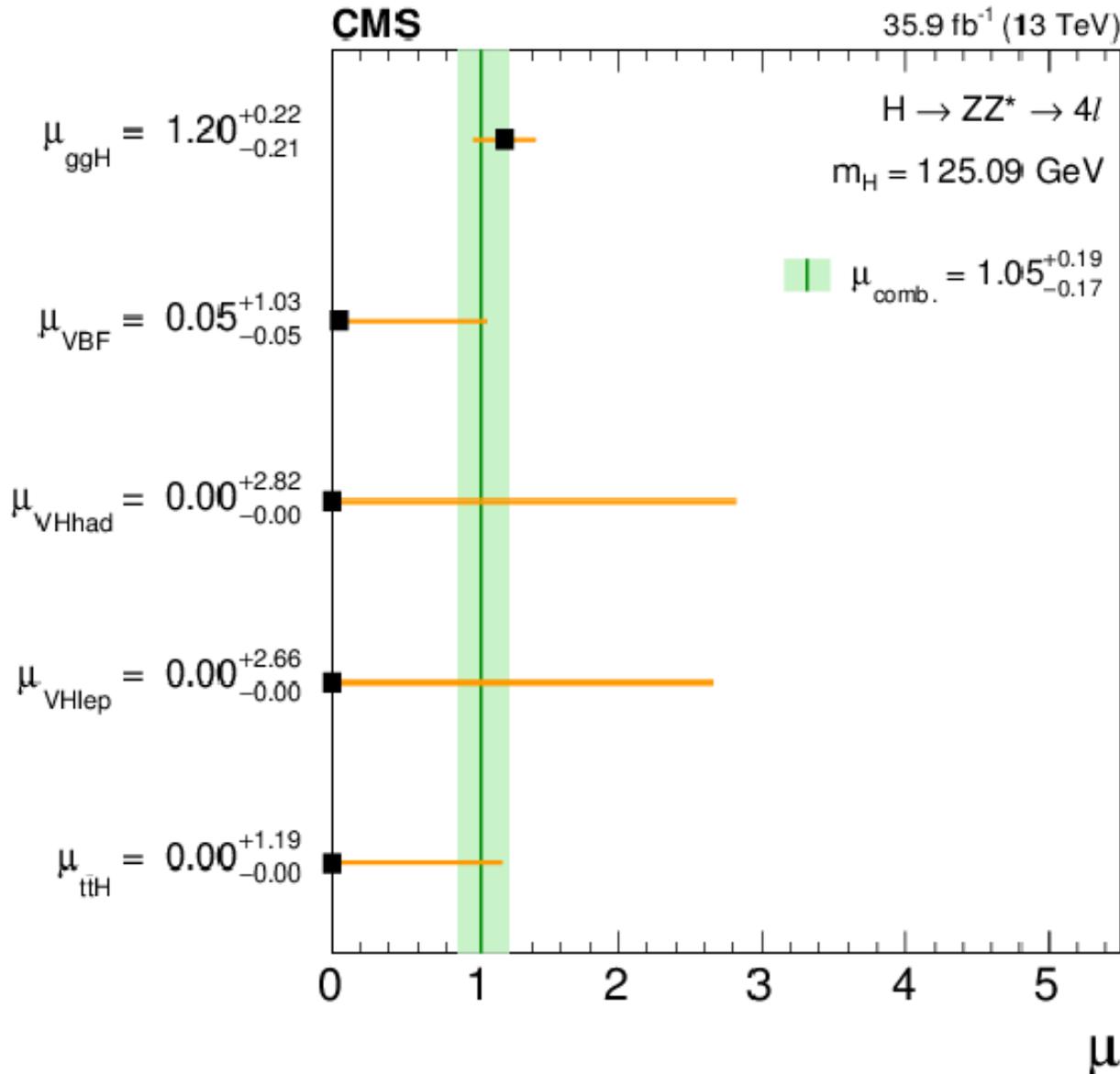


JHEP 11 (2017) 047

Risultati per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016: μ



Risultati per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016: μ



$$\mu_{ggH, t\bar{t}H} = 1.19^{+0.21}_{-0.20}, \quad \mu_{VBF, VH} = 0.00^{+0.81}_{-0.00}$$

Risultati per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016: massa

Misura della massa ricavata mediante regressione (ML fit) multidimensionale su:

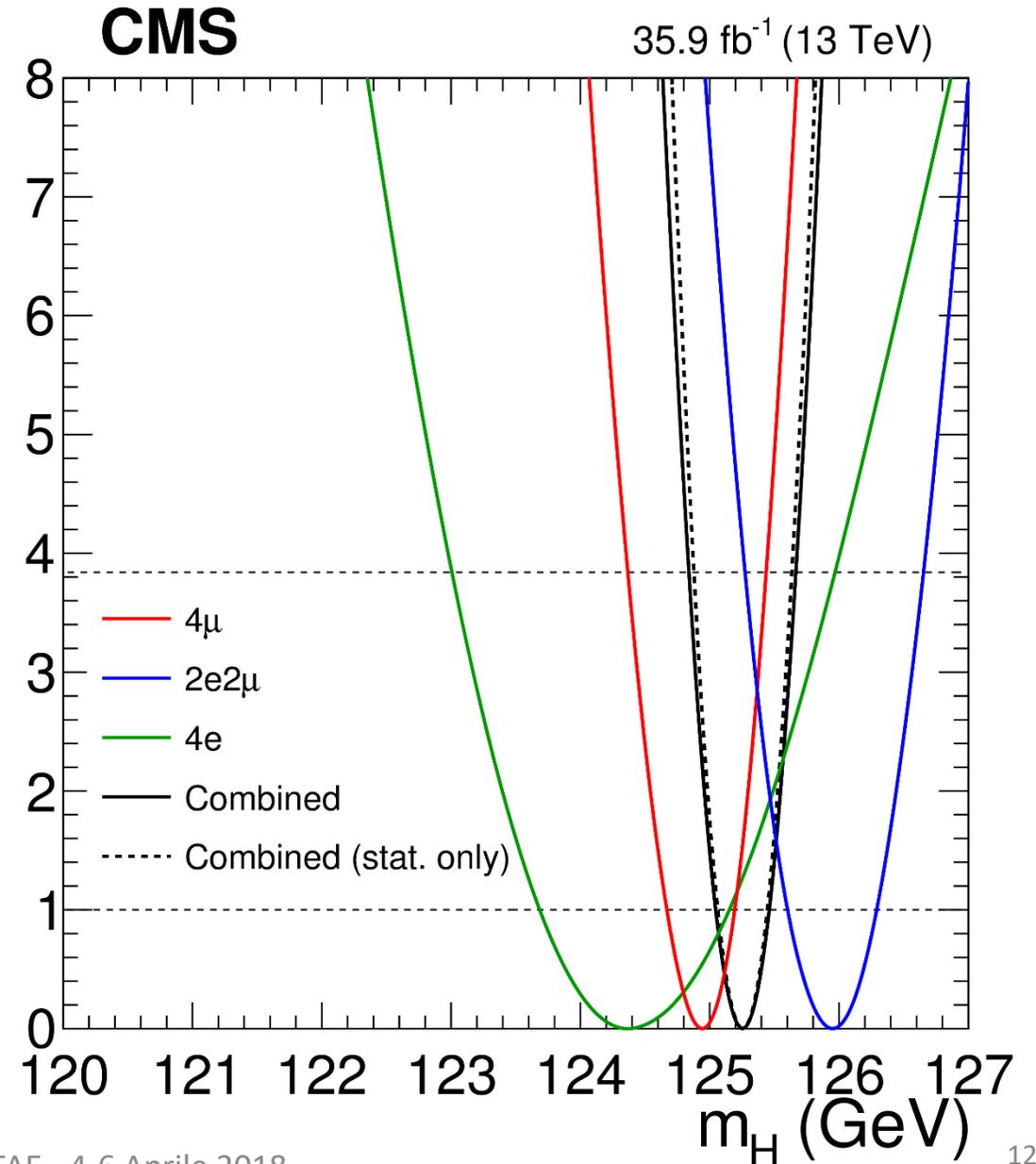
$$\mathcal{L}(m_{4l}, D_{mass}, D_{bkg}^{kin})$$

Incertezza su m_{4l}

Misura effettuata dopo aver applicato correzioni evento per evento su m_{4l} e D_{mass}

$$m_H = 125.26 \pm 0.20(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst}) \text{ GeV}/c^2$$

$-2 \Delta \ln L$

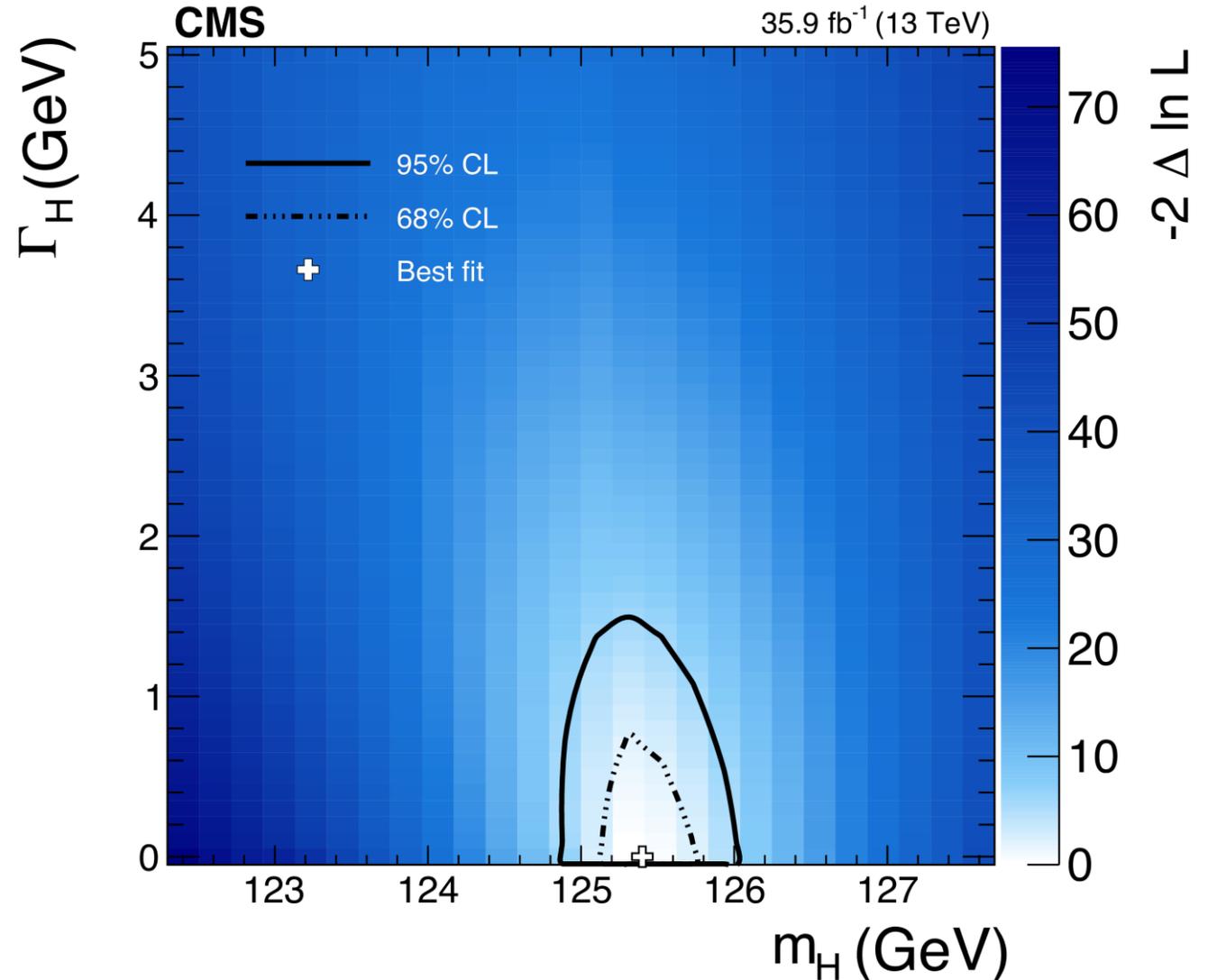


Risultati per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016: larghezza (on-shell)

Misura ricavata mediante regressione (ML fit) su m_{4l} nell'intervallo $105 < m_{4l} < 140 \text{ GeV}/c^2$

Limitata dalla risoluzione sperimentale in massa (sensibile a larghezze $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$)

$\Gamma_H < 1.10 \text{ GeV}/c^2$ @ 95% CL



Conclusioni

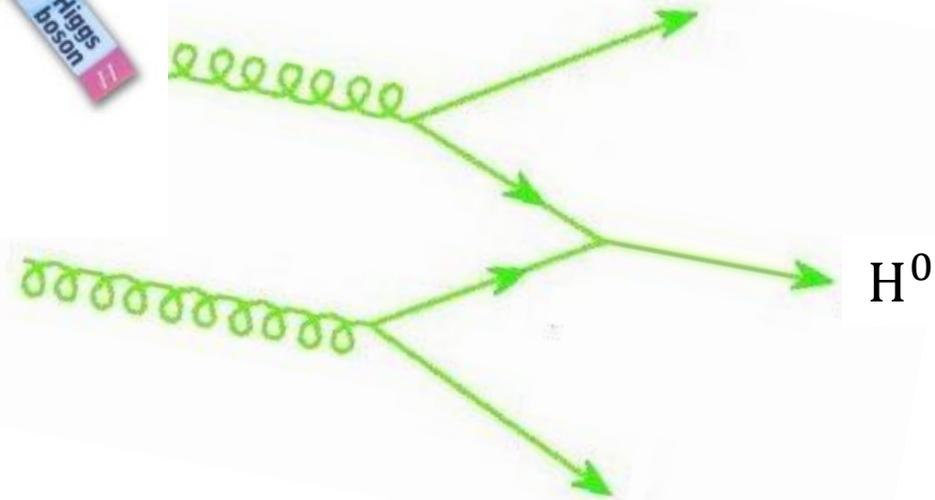
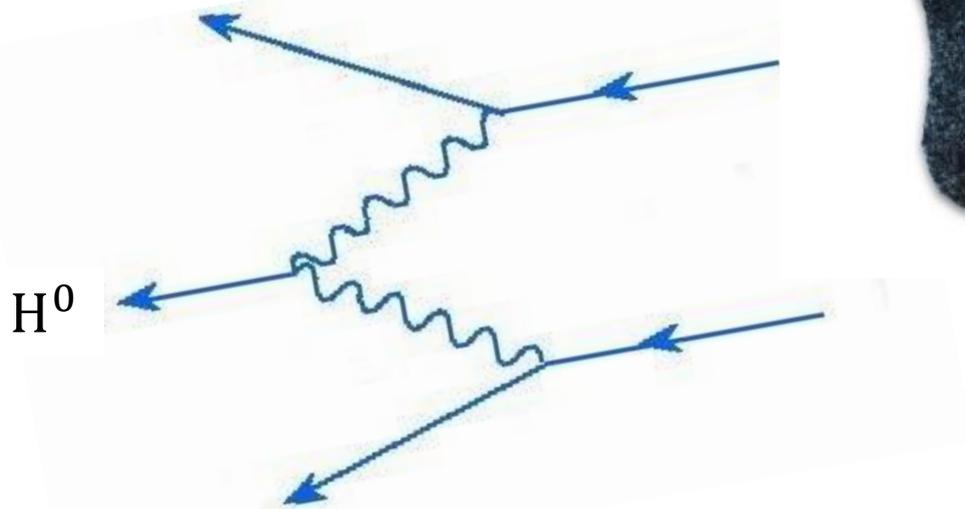
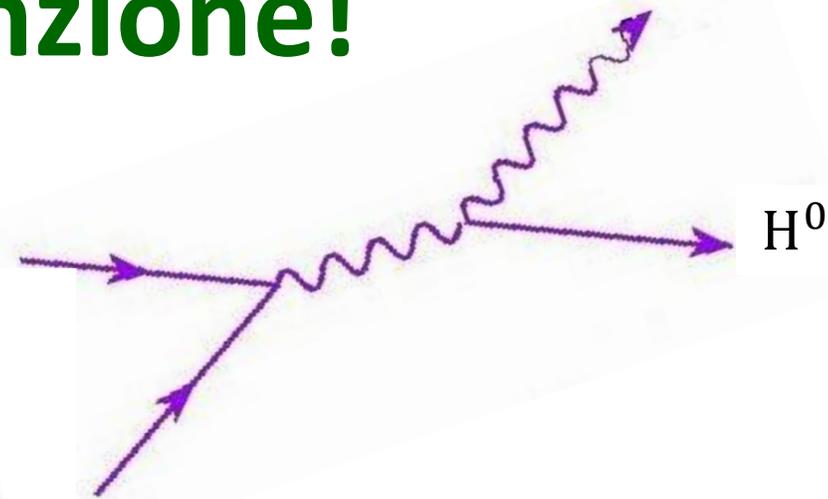
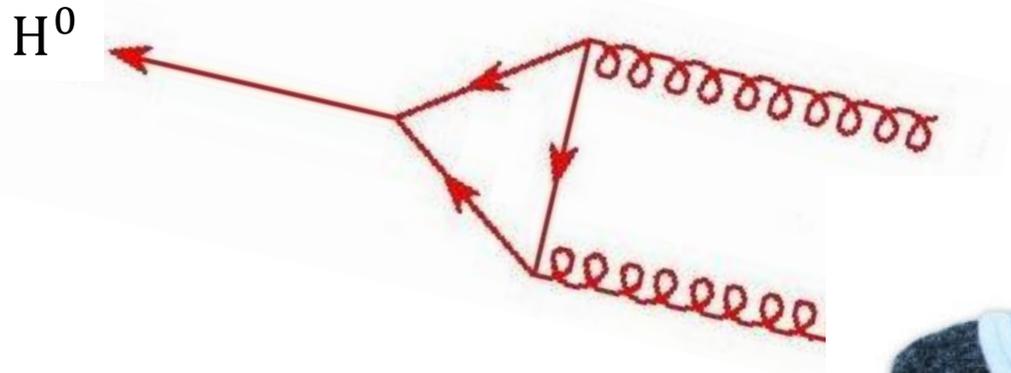
Misura delle proprietà del bosone di Higgs effettuata nel canale di decadimento $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ con dati pp a 13 TeV dell'Esperimento CMS corrispondenti a 35.9 fb^{-1} [2]:

- $\mu = 1.05_{-0.14}^{+0.15}(\text{stat})_{-0.09}^{+0.11}(\text{syst}) @ m_H = 125.09 \text{ GeV}/c^2$
- $\mu_{\text{ggH,ttH}} = 1.19_{-0.20}^{+0.21}$, $\mu_{\text{VBF,VH}} = 0.00_{-0.00}^{+0.81} @ m_H = 125.09 \text{ GeV}/c^2$
- $m_H = 125.26 \pm 0.20(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst}) \text{ GeV}/c^2$
- $\Gamma_H < 1.10 \text{ GeV}/c^2 @ 95\% \text{ CL}$

Le proprietà di decadimento e di produzione del bosone di Higgs misurate sono compatibili entro le incertezze con le previsioni del Modello Standard

[2] JHEP 11 (2017) 047

Grazie per l'attenzione!

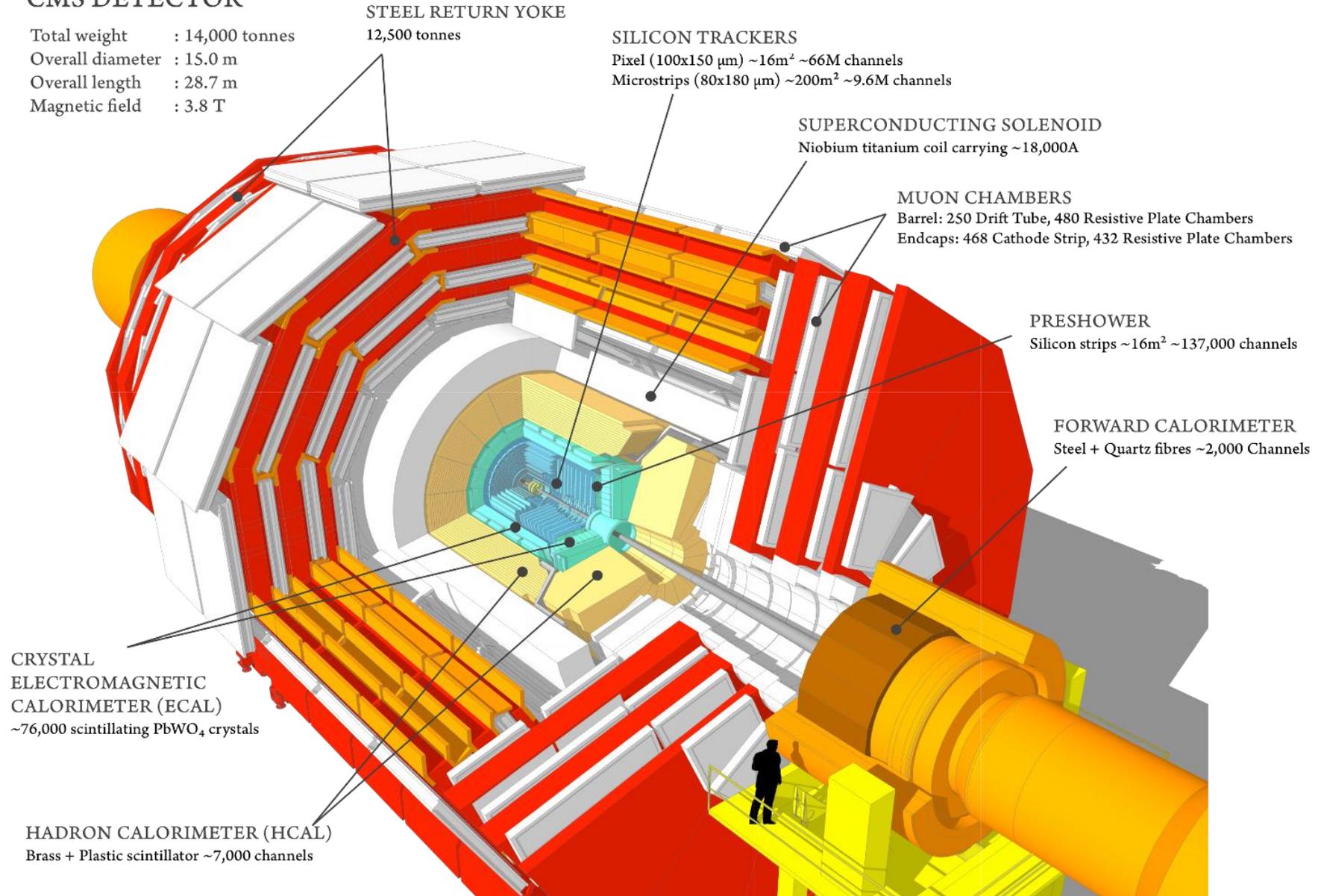


Diapositive Extra

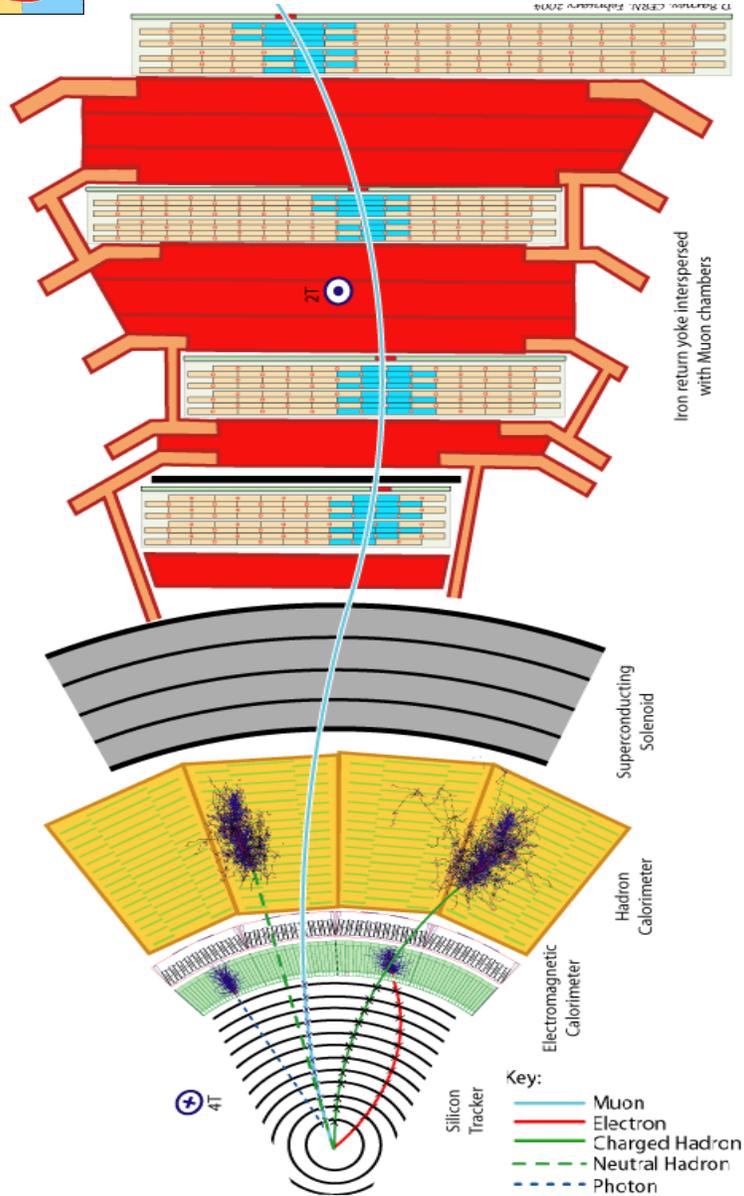
Il rivelatore di CMS

CMS DETECTOR

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



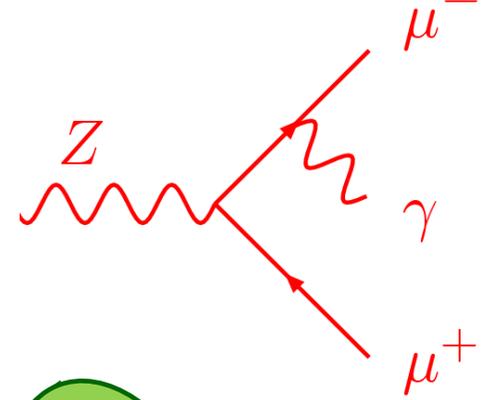
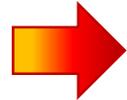
Selezione degli oggetti per $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 2016



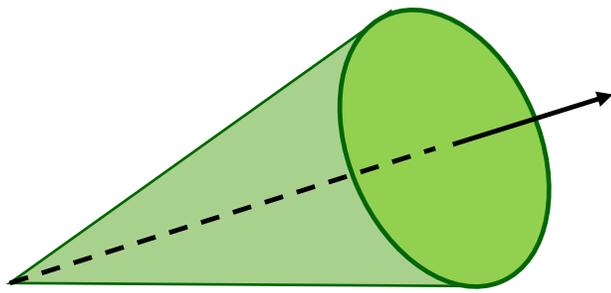
- Muoni:**
- $p_T > 5 \text{ GeV}/c$
 - $|\eta| < 2.4$
 - $d_{xy} < 0.5 \text{ cm}$
 - $d_z < 1 \text{ cm}$
 - $SIP < 4$
 - $\text{Iso}(\Delta R = 0.3) < 0.35$

- Elettroni:**
- $p_T > 7 \text{ GeV}/c$
 - $|\eta| < 2.5$
 - $d_{xy} < 0.5 \text{ cm}$
 - $d_z < 1 \text{ cm}$
 - $SIP < 4$
 - $\text{Iso}(\Delta R = 0.3) < 0.35$

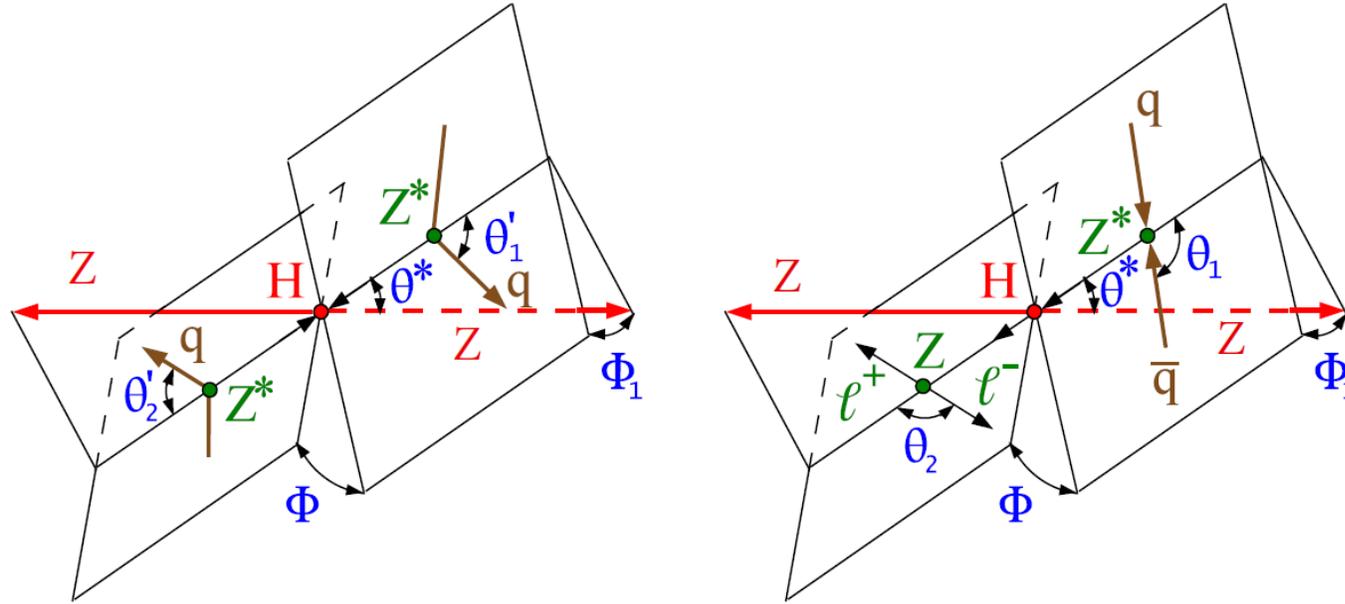
- FSR:**
- $p_T > 2 \text{ GeV}/c$
 - $|\eta| < 2.4$
 - $\text{Iso}(\Delta R(\gamma, \text{leptone}) < 0.5) < 1.8$



- Jets:**
- $p_T > 30 \text{ GeV}/c$
 - $|\eta| < 4.7$



Discriminanti



$$\mathcal{D}_{2\text{jet}} = \left[1 + \frac{\mathcal{P}_{H+JJ}(\vec{\Omega}^{H+JJ}|m_{4\ell})}{\mathcal{P}_{\text{VBF}}(\vec{\Omega}^{H+JJ}|m_{4\ell})} \right]^{-1}$$

$$\mathcal{D}_{\text{WH}} = \left[1 + \frac{\mathcal{P}_{H+JJ}(\vec{\Omega}^{H+JJ}|m_{4\ell})}{\mathcal{P}_{\text{WH}}(\vec{\Omega}^{H+JJ}|m_{4\ell})} \right]^{-1}$$

$$\mathcal{D}_{1\text{jet}} = \left[1 + \frac{\mathcal{P}_{H+J}(\vec{\Omega}^{H+J}|m_{4\ell})}{\int d\eta_J \mathcal{P}_{\text{VBF}}(\vec{\Omega}^{H+JJ}|m_{4\ell})} \right]^{-1}$$

$$\mathcal{D}_{\text{ZH}} = \left[1 + \frac{\mathcal{P}_{H+JJ}(\vec{\Omega}^{H+JJ}|m_{4\ell})}{\mathcal{P}_{\text{ZH}}(\vec{\Omega}^{H+JJ}|m_{4\ell})} \right]^{-1}$$

Criteria di categorizzazione

- **VBF-2jet-tagged:** 4 leptoni + (2 o 3 jets almeno uno dei quali b-tagged, oppure 4 jets non b-tagged) + $D_{2j} > 0.5$
- **VH-hadronic-tagged:** 4 leptoni + (2 o 3 jets, oppure almeno 4 jets not b-tagged) + $D_{VH} = \max(D_{WH}, D_{ZH}) > 0.5$
- **VH-leptonic-tagged:** meno di 3 jets e nessun b-tagged jet + (1 leptone aggiuntivo oppure un paio di leptoni di stesso sapore e carica opposta); oppure nessun jets e almeno un leptone aggiuntivo
- **$t\bar{t}H$ -tagged:** almeno 4 jets con uno b-tagged oppure almeno un leptone aggiuntivo
- **VH-MET-tagged:** 4 leptoni + non più di 1 jet + più di 100 GeV di MET
- **VBF-1jet-tagged:** 4 leptoni + 1 jet + $D_{1j} > 0.5$
- **Untagged:** restanti eventi selezionati

Incertezze sistematiche

Sorgente di incertezza	tipo	valore (4e / 4μ / 2e2μ)
Luminosity	N	2.6%
Trigger + reconstruction + selection efficiencies	N	11% / 6% / 9%
Reducible background estimation	N	32% / 35% / 34%
4ℓ mass resolution	S	20% / 10% / 15%
Lepton energy scale	S	0.3% / 0.04% / 0.17%
b-tagging efficiency	N	0 – 8 %
Jet energy scale	N	2 – 18 %
H→ZZ→4ℓ branching ratio	N	2%
QCD scale	N	3 – 10%
PDF set	N	3 – 5%
NLO/LO EW corrections for $q\bar{q} \rightarrow ZZ$	N	1 – 8%
NNLO/LO K-factor for $gg \rightarrow ZZ$	N	10%