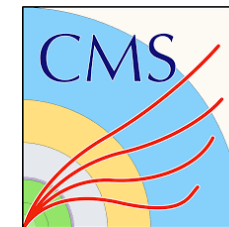




UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Risultati recenti di VBS e VBF con gli esperimenti ATLAS e CMS

BENEDETTA CAMAIANI

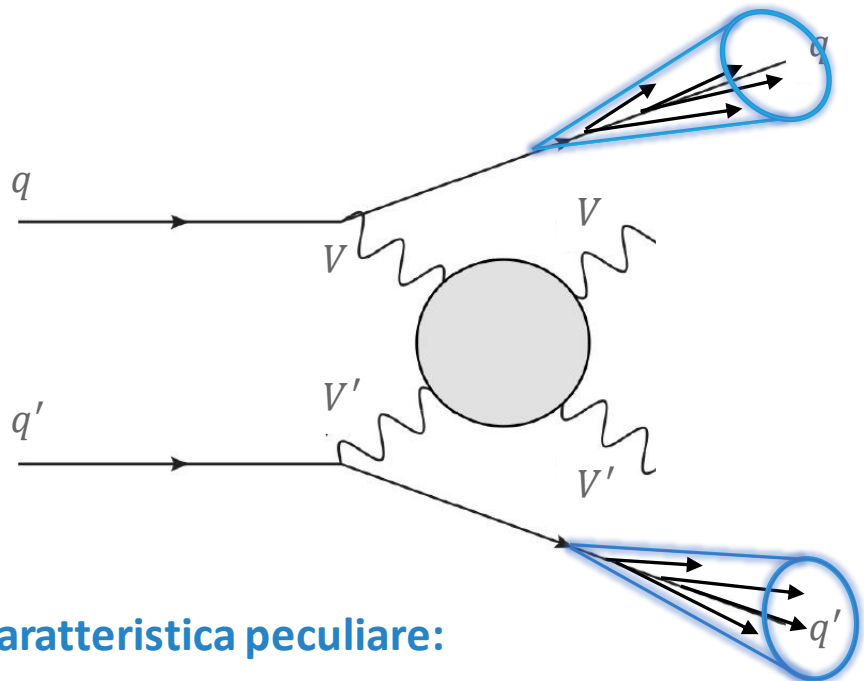
A nome delle collaborazioni ATLAS e CMS

Incontri di Fisica delle Alte Energie

Catania, 12-14 Aprile 2023

Introduzione

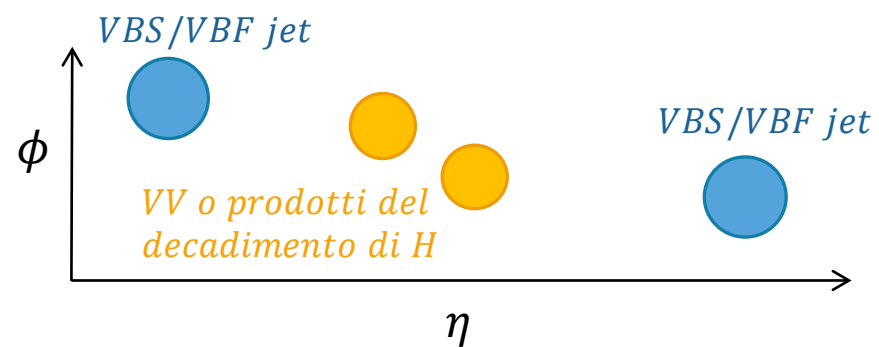
- La natura dei processi di *Scattering/Fusione di bosoni vettori (VBS/VBF)* è strettamente legata alla rottura della simmetria elettrodebole del Modello Standard (MS)



Caratteristica peculiare:

→ 2 jet adronici *forward-backward* con grande massa invariante m_{jj} e ben separati in pseudorapidità ($\Delta\eta_{jj}$)

- Processi rari, estremamente sensibili ad effetti di nuova fisica
- Test del settore elettrodebole del MS alla scale del TeV
- Auto-accoppiamenti dei bosoni vettori e accoppiamenti con il bosone di Higgs
- Sensibili agli accoppiamenti triplici e quartici anomali tra bosoni di gauge (aTGC/aQGC)



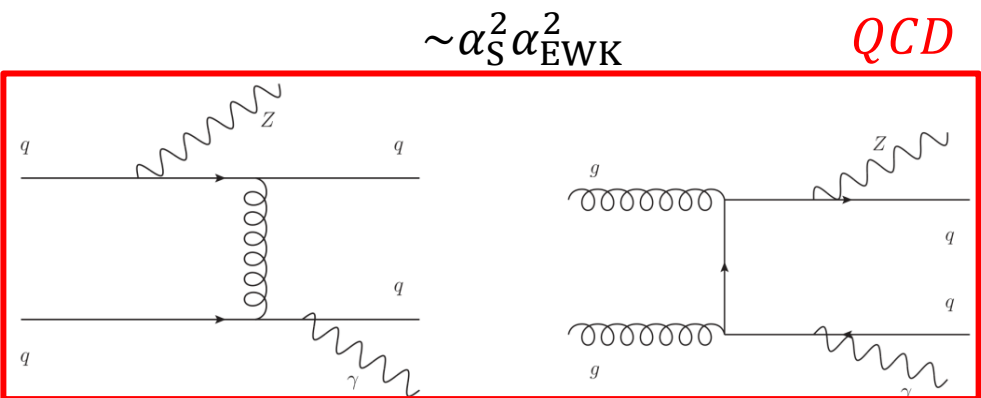
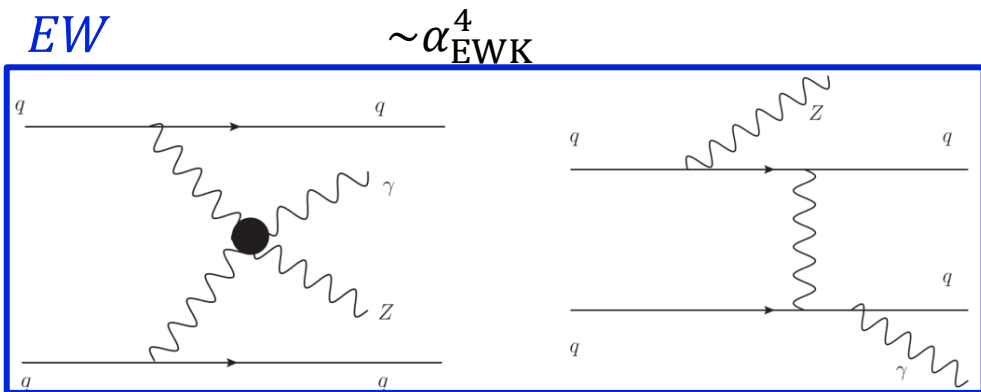
- Risultati recenti degli esperimenti ATLAS e CMS utilizzando tutto il dataset del Run2 a $\sqrt{s} = 13$ TeV ($\mathcal{L} \sim 140$ fb⁻¹)

Produzione elettrodebole $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$

Accettato dalla rivista Journal of High Energy Physics

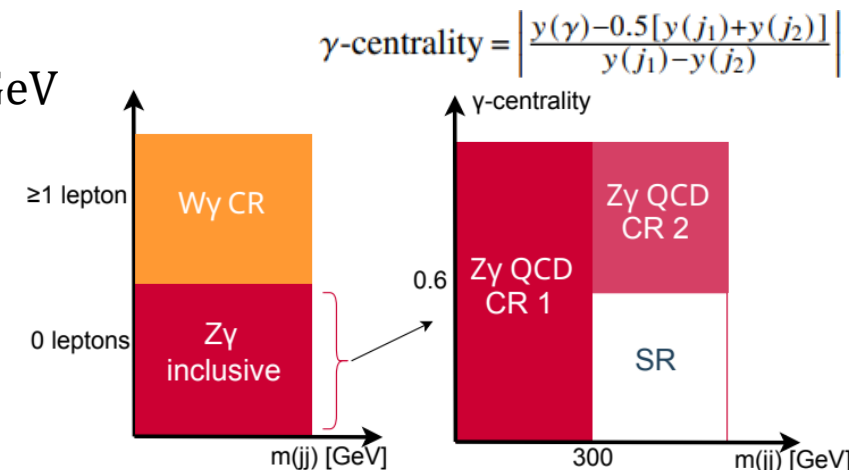
Arxiv:2208.12741

Produzione elettrodebole $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ (1)



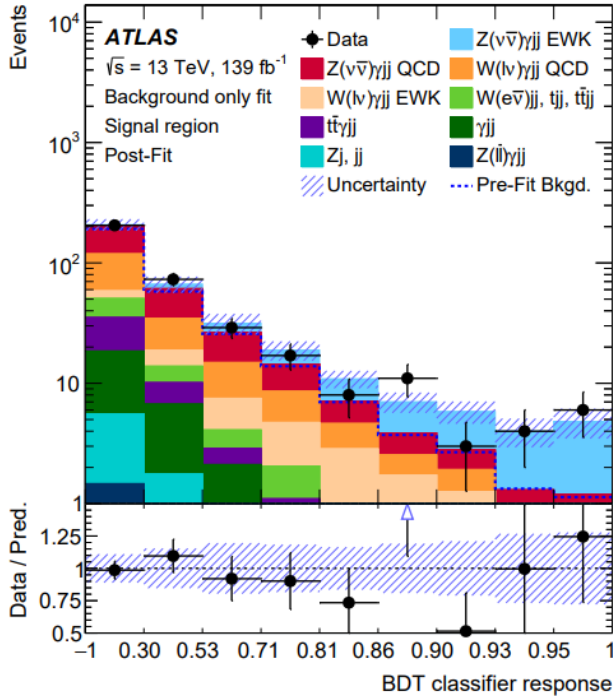
- $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$
 - $BR(Z \rightarrow \nu\bar{\nu}) > BR(Z \rightarrow \ell\bar{\ell})$
 - Miglior controllo del fondo rispetto a canali adronici

- Fotone isolato con $p_T^\gamma > 150$ GeV
Energia trasversa mancante
Almeno due jet adronici



- Fondi principali:
 - $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ tramite **QCD**, misurato in $Z\gamma$ CR1
 - $W(\ell\nu)\gamma jj$ (**EWK** + **QCD**), misurato in $W\gamma$ CR
- Selezione degli eventi di segnale tramite classificatore basato su un Boosted Decision Tree (BDT), allenato usando la selezione $Z\gamma$ inclusiva (alcune variabili di input: $m_{jj}, \Delta y_{jj}, E_{miss}^T, p_T(j_1), \eta(j_2)$)

Produzione elettrodebole $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ (2)



- Estrazione del segnale tramite fit di massima verosimiglianza in bin:
 - BDT output in SR
 - m_{jj} in $Z\gamma$ CRs e $W\gamma$ CR

→ Sezione d'urto fiduciale osservata: $\sigma_{Z\gamma\text{EWK}} = 0.77^{+0.34}_{-0.30} \text{ fb}$

- Predizione al NLO: $\sigma_{Z\gamma\text{EWK}}^{\text{pred}} = 0.98 \pm 0.02 \text{ (stat.)} \pm 0.09 \text{ (scale)} \pm 0.02 \text{ (PDF)} \text{ fb}$

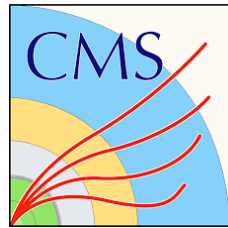
→ **Evidenza della produzione elettrodebole** con significanza osservata di 3.2σ (attesa 3.7σ)

- Combinazione con la [precedente misura di ATLAS](#) ($15 < p_T^\gamma < 110 \text{ GeV}$)
 → Significanza osservata 6.3σ (attesa 6.6σ)

- Produzione elettrodebole usata per porre limiti sugli accoppiamenti quartici anomali tra bosoni di gauge (aQGC)

- Limiti ai parametri di dimensione 8 di EFT
- Competitivi o più stringenti rispetto ai risultati precedenti di ATLAS e CMS**
- Sensibili solo al vertice quartico neutro**

Coefficient	E_c [TeV]	Observed limit [TeV ⁻⁴]	Expected limit [TeV ⁻⁴]
f_{T0}/Λ^4	1.7	$[-8.7, 7.1] \times 10^{-1}$	$[-8.9, 7.3] \times 10^{-1}$
f_{T5}/Λ^4	2.4	$[-3.4, 4.2] \times 10^{-1}$	$[-3.5, 4.3] \times 10^{-1}$
f_{T8}/Λ^4	1.7	$[-5.2, 5.2] \times 10^{-1}$	$[-5.3, 5.3] \times 10^{-1}$
f_{T9}/Λ^4	1.9	$[-7.9, 7.9] \times 10^{-1}$	$[-8.1, 8.1] \times 10^{-1}$
f_{M0}/Λ^4	0.7	$[-1.6, 1.6] \times 10^2$	$[-1.5, 1.5] \times 10^2$
f_{M1}/Λ^4	1.0	$[-1.6, 1.5] \times 10^2$	$[-1.4, 1.4] \times 10^2$
f_{M2}/Λ^4	1.0	$[-3.3, 3.2] \times 10^1$	$[-3.0, 3.0] \times 10^1$



Produzione elettrodebole $W\gamma jj$

Accettato dalla rivista Physical Review D

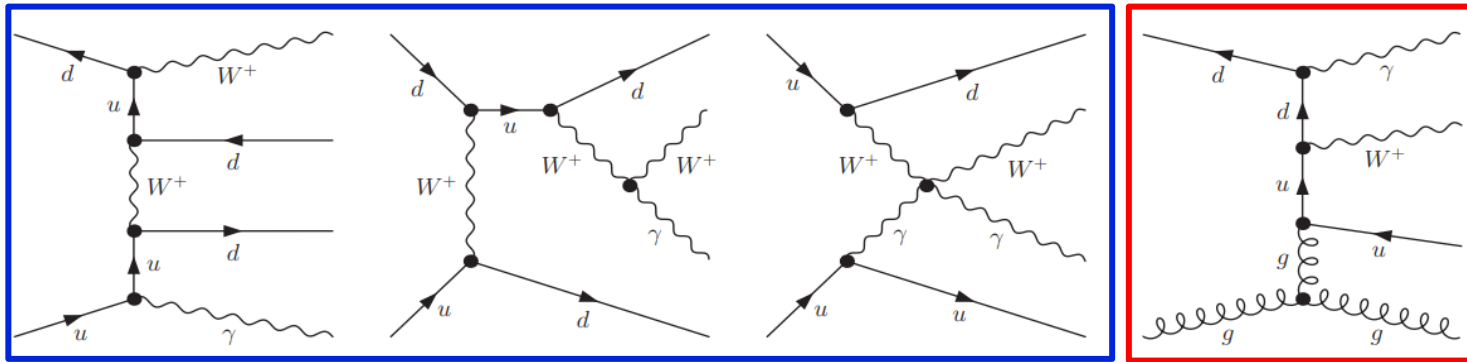
Arxiv:2212.12592

Produzione elettrodebole $W\gamma jj$ (1)



EW $W\gamma jj$

QCD $W\gamma jj$

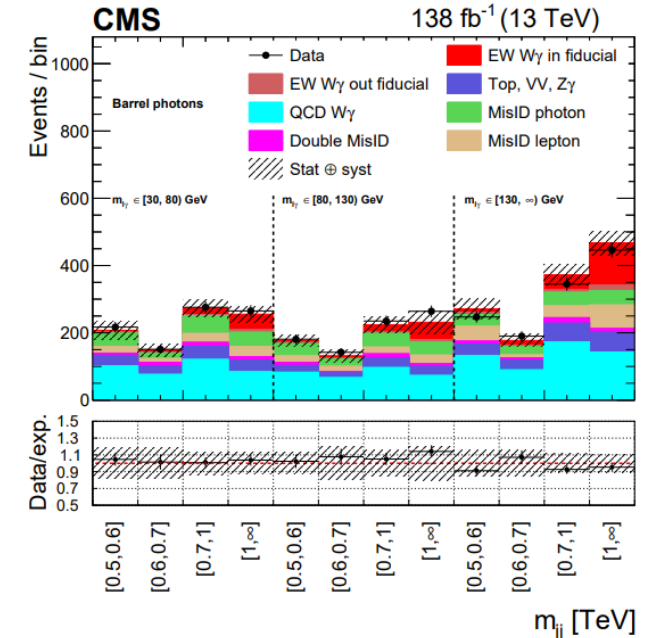


- e/μ isolato ad alto p_T
- Energia trasversa mancante ($W \rightarrow \ell\nu$)
- Fotone ad alto p_T
- Due jet adronici con alta m_{jj} e ben separati in η

Barrel
 $|\eta_\gamma| < 1.444$

Endcap
 $1.566 < |\eta_\gamma| < 2.5$

- Processi di fondo:
 - $W\gamma jj$ tramite QCD, misurato in una CR dedicata
 - W +jets ed eventi con quark top, dove i jet vengono erroneamente ricostruiti come fotoni
- Estrazione del segnale tramite fit di massima verosimiglianza in bin 2D di m_{jj} VS $m_{\ell\gamma}$
 → **Prima osservazione della produzione elettrodebole a $\sqrt{s} = 13$ TeV** con significanza di 6.0σ (significanza attesa 6.08σ)



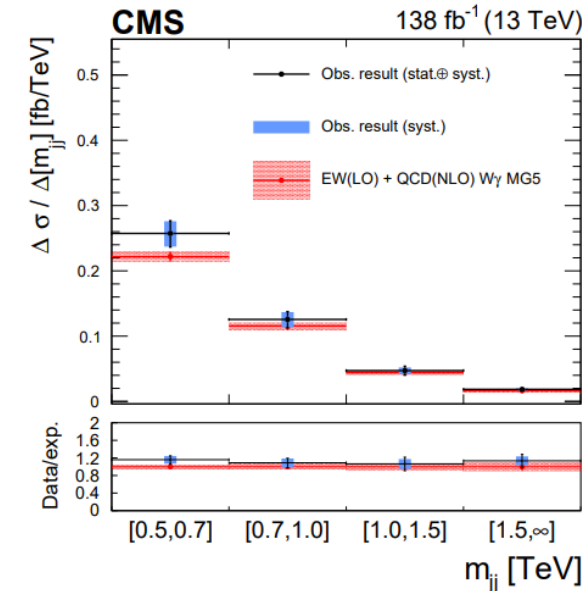
Produzione elettrodebole $W\gamma jj$ (2)



- Misura fiduciale e differenziale della sezione d'urto di produzione elettrodebole (EW) e totale (EW+QCD)

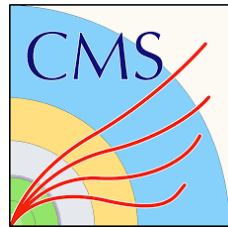
$$\sigma_{EW}^{fid} = 23.5 \pm 2.8 \text{ (stat)}_{-1.7}^{+1.9} \text{ (theo)}_{-3.4}^{+3.5} \text{ (syst) fb}$$

$$\sigma_{EW+QCD}^{fid} = 113 \pm 2.0 \text{ (stat)}_{-2.3}^{+2.5} \text{ (theo)}_{-13}^{+13} \text{ (syst) fb}$$



- Componente elettrodebole sensibile agli operatori EFT tramite effetti di accoppiamenti quartici anomali tra bosoni di gauge (aQGC)
 - Limiti ai parametri di dimensione 8
 - Più stringenti fino ad oggi

Expected limit	Observed limit	U_{bound}
$-5.1 < f_{M,0}/\Lambda^4 < 5.1$	$-5.6 < f_{M,0}/\Lambda^4 < 5.5$	1.7
$-7.1 < f_{M,1}/\Lambda^4 < 7.4$	$-7.8 < f_{M,1}/\Lambda^4 < 8.1$	2.1
$-1.8 < f_{M,2}/\Lambda^4 < 1.8$	$-1.9 < f_{M,2}/\Lambda^4 < 1.9$	2.0
$-2.5 < f_{M,3}/\Lambda^4 < 2.5$	$-2.7 < f_{M,3}/\Lambda^4 < 2.7$	2.7
$-3.3 < f_{M,4}/\Lambda^4 < 3.3$	$-3.7 < f_{M,4}/\Lambda^4 < 3.6$	2.3
$-3.4 < f_{M,5}/\Lambda^4 < 3.6$	$-3.9 < f_{M,5}/\Lambda^4 < 3.9$	2.7
$-13 < f_{M,7}/\Lambda^4 < 13$	$-14 < f_{M,7}/\Lambda^4 < 14$	2.2
$-0.43 < f_{T,0}/\Lambda^4 < 0.51$	$-0.47 < f_{T,0}/\Lambda^4 < 0.51$	1.9
$-0.27 < f_{T,1}/\Lambda^4 < 0.31$	$-0.31 < f_{T,1}/\Lambda^4 < 0.34$	2.5
$-0.72 < f_{T,2}/\Lambda^4 < 0.92$	$-0.85 < f_{T,2}/\Lambda^4 < 1.0$	2.3
$-0.29 < f_{T,5}/\Lambda^4 < 0.31$	$-0.31 < f_{T,5}/\Lambda^4 < 0.33$	2.6
$-0.23 < f_{T,6}/\Lambda^4 < 0.25$	$-0.25 < f_{T,6}/\Lambda^4 < 0.27$	2.9
$-0.60 < f_{T,7}/\Lambda^4 < 0.68$	$-0.67 < f_{T,7}/\Lambda^4 < 0.73$	3.1



Sezione d'urto fiduciale e differenziale

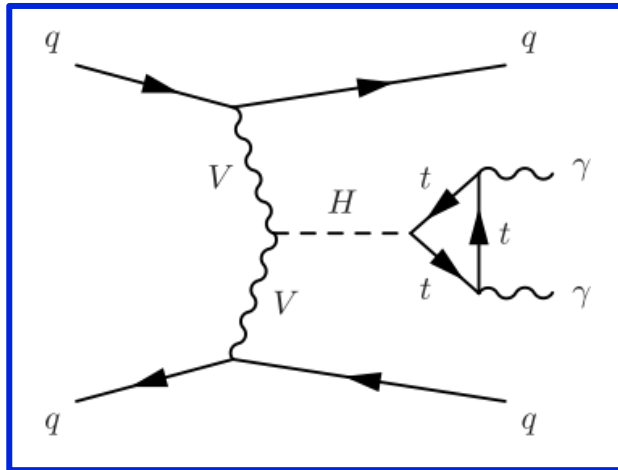
VBF in $H \rightarrow \gamma\gamma$

Accettato dalla rivista Journal of High Energy Physics

Arxiv:2208.12279

VBF $H \rightarrow \gamma\gamma$ (1)

- Ampio set di risultati:
 - Sezione d'urto fiduciale inclusiva
 - Sezioni d'urto fiduciali differenziali
 - Misura doppio-differenziale



- Processi di fondo:
 - Eventi di QCD $\gamma\gamma$
 - Eventi con due jet e γ +jet, dove i jet vengono erroneamente ricostruiti come fotoni

Analisi nello spazio delle fasi VBF

Spazio fiduciale

$$\begin{array}{l}
 p_T^{\gamma 1} / m_{\gamma\gamma} > 1/3 \\
 p_T^{\gamma 2} / m_{\gamma\gamma} > 1/4 \\
 \mathcal{L}_{\text{gen}}^\gamma < 10 \text{ GeV} \\
 |\eta^\gamma| < 2.5
 \end{array}$$

Energia adronica totale in un cono con $\Delta R = 0.3$ attorno al fotone



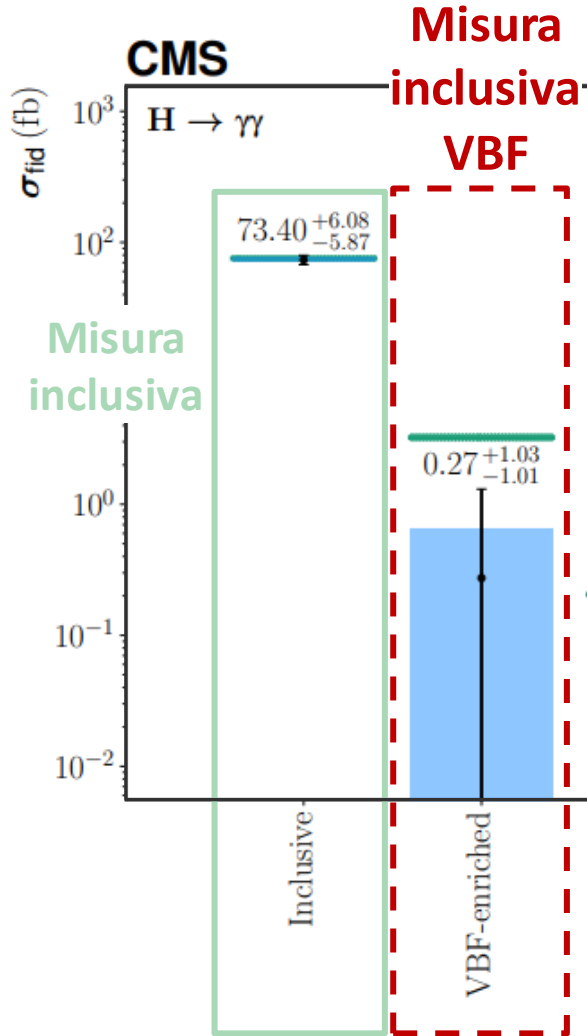
Regione VBF

$$\begin{array}{l}
 n_{\text{jets}} \geq 2 \\
 p_T^j > 30 \text{ GeV} \\
 |\eta^j| < 4.7 \\
 \Delta\eta^{jj} > 3.5 \\
 m^{jj} > 200 \text{ GeV}
 \end{array}$$

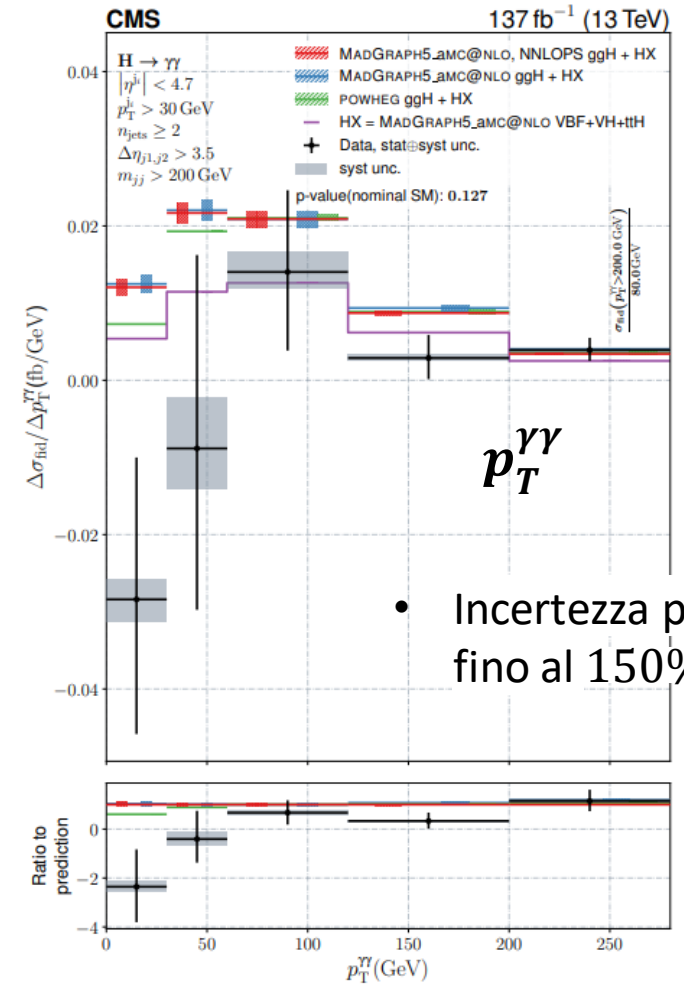
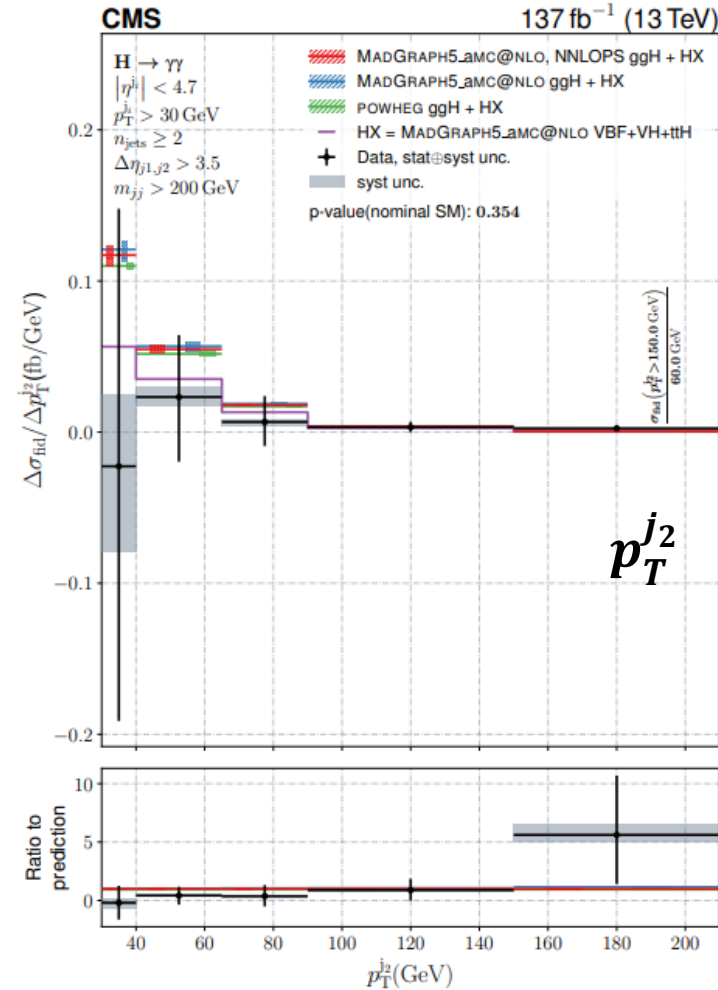
$$\left\{ \begin{array}{l}
 p_T^{\gamma\gamma} \\
 p_T^{j_2} \\
 |\Delta\phi_{j_1 j_2}| \\
 |\Delta\phi_{\gamma\gamma, j_1 j_2}|
 \end{array} \right.$$

VBF $H \rightarrow \gamma\gamma$ (2)

MADGRAPH5_aMC@NLO, NNLOPS
 Data, stat+syst unc.
 syst unc.



Misura differenziale VBF



Proprietà di CP del vertice HVV VBF in $H \rightarrow \gamma\gamma$

Accettato dalla rivista Physical Review Letters

Arxiv:2208.02338

Proprietà di CP in $VBF H \rightarrow \gamma\gamma$ (1)

- Qualsiasi deviazione da un'interazione di tipo CP -pari del bosone di Higgs con le altre particelle del MS potrebbe indicare nuova fisica oltre il MS (BSM)
- Una componente CP -dispari nel vertice di accoppiamento HVV ($V = W, Z$) può essere descritta mediante un approccio EFT, aggiungendo operatori di dimensione 6 alla Lagrangiana del MS
- Si può costruire una osservabile CP -dispari a partire dal quadrimpulso del bosone di Higgs (H) e dei due jet adronici:

«Osservabile ottimale»
$$OO = 2 \cdot \frac{\text{Re}(\mathcal{M}_{\text{SM}}^* \cdot \mathcal{M}_{\text{CP-dispari}})}{|\mathcal{M}_{\text{SM}}|^2}$$

Indipendente dal canale di decadimento, già introdotto in [H → ττ \(ATLAS\)](#)

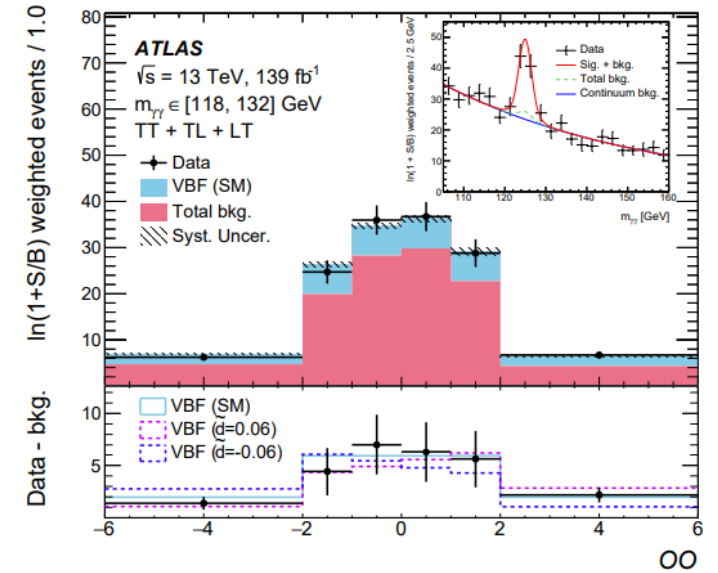
- Il MS predice una distribuzione di OO simmetrica e a media nulla, ogni effetto di asimmetria indica quindi il contributo di termini che violano CP

→ In questa analisi vengono costretti i coefficienti di Wilson che moltiplicano gli operatori che descrivono accoppiamenti HVV con CP -dispari:

- Base HISZ
- Base Warsaw

Proprietà di CP in $VBF H \rightarrow \gamma\gamma$ (2)

- Sensibilità agli eventi di segnale massimizzata tramite due BDT, allenati usando le stesse variabili di input (ad esempio $m_{jj}, \Delta\eta_{jj}, p_T^{Hjj}, \Delta\phi(\gamma\gamma, jj), \Delta R_{\gamma j}^{min}$):
 - $BDT_{VBF/ggF}$ per discriminare eventi di Gluon Fusion
 - $BDT_{VBF/continuum}$ per discriminare eventi di fondo continuo ($\gamma\gamma, \gamma j$ o jj)
- Tre regioni di segnale (SR) definite tagliando sugli output dei BDT
- Estrazione del segnale tramite fit della distribuzione di $m_{\gamma\gamma}$ in bin di OO nelle SR



• Risultati nella base di HISZ: ($\tilde{d}_B = \tilde{d}$, Terzo coefficiente nullo)

- Sensibilità sufficiente per CL 95%
- Risultati compatibili con il MS
- Precisione limitata da incertezza statistica (CL 95% $\Delta_{syst} < 2\%$)

	68% (exp.)	95% (exp.)	68% (obs.)	95% (obs.)
\tilde{d} (inter. only)	[-0.027, 0.027]	[-0.055, 0.055]	[-0.011, 0.036]	[-0.032, 0.059]
\tilde{d} (inter.+quad.)	[-0.028, 0.028]	[-0.061, 0.060]	[-0.010, 0.040]	[-0.034, 0.071]
\tilde{d} from $H \rightarrow \tau\tau$	[-0.038, 0.036]	-	[-0.090, 0.035]	-
Combined \tilde{d}	[-0.022, 0.021]	[-0.046, 0.045]	[-0.012, 0.030]	[-0.034, 0.057]

Combinazione con la precedente misura $H \rightarrow \tau\tau$

*Risultati nella base di Warsaw in [backup](#)

Conclusioni

- I processi VBS/VBF giocano un ruolo fondamentale all'interno del Modello Standard
- Sono state presentate alcune delle più recenti misure VBS/VBF pubblicate dagli esperimenti ATLAS e CMS, in cui sono stati usati i dati raccolti durante il Run2 di LHC
- Il Run3 di LHC permetterà un nuovo set di misure VBS/VBF che consentirà una comprensione ancora più accurata del settore elettrodebole del Modello Standard

Grazie per l'attenzione

Backup

Produzione elettrodebole $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ (3)

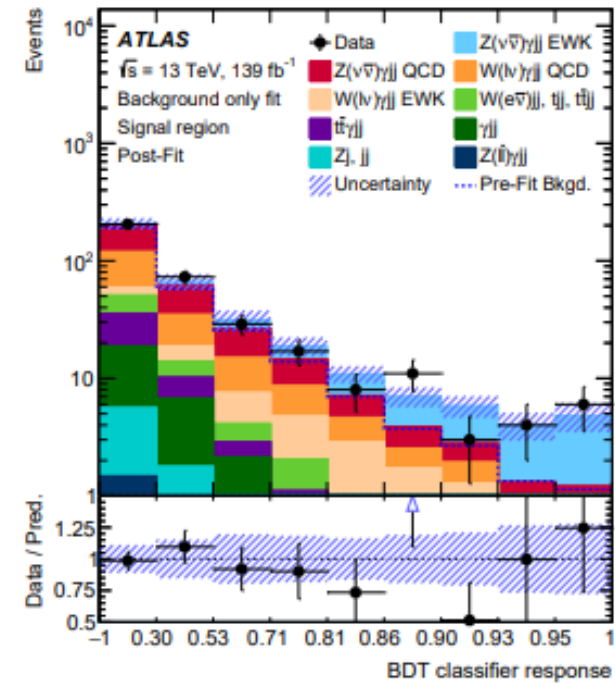
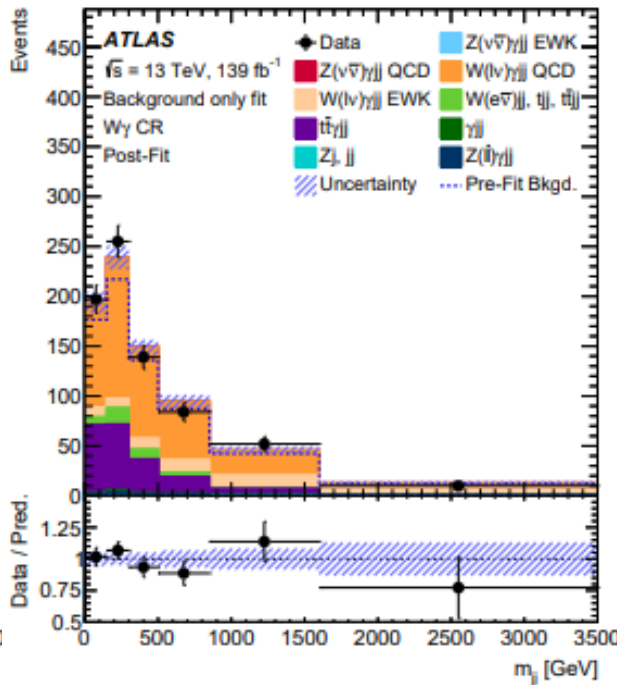
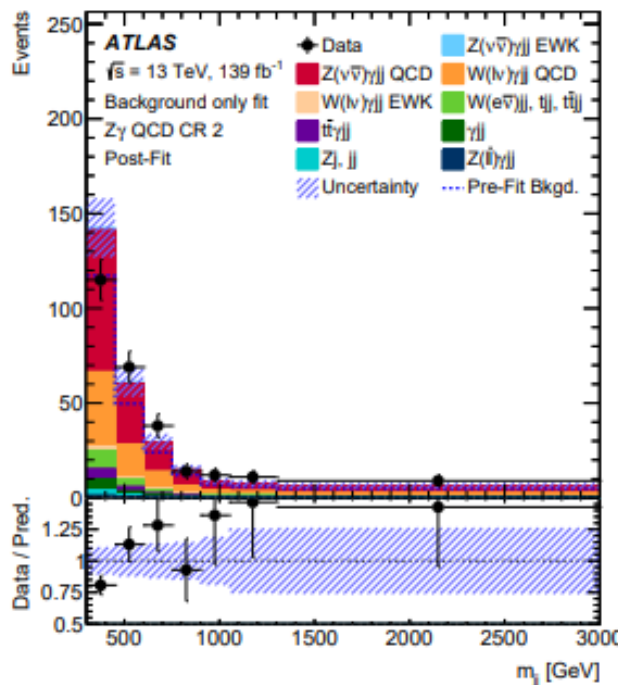
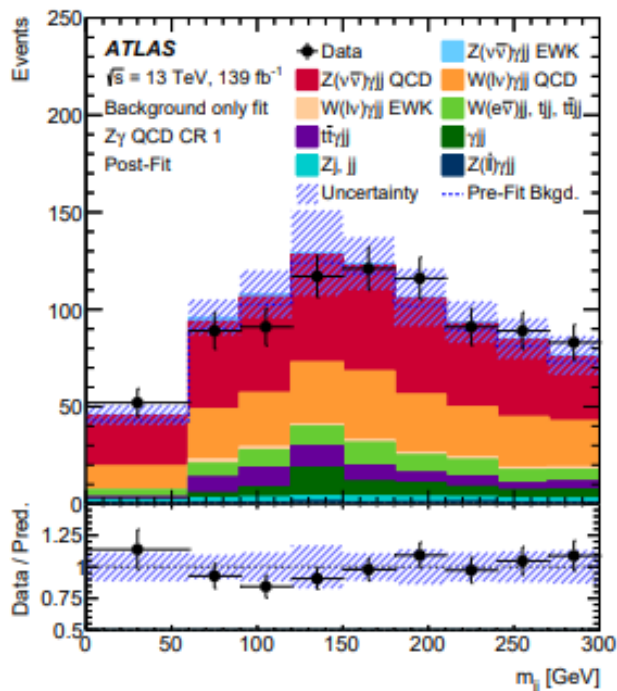
Physics process	Generator	Parton shower	Cross-section order in pQCD	Tune	PDF set
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ EWK, $W(\ell\nu)\gamma jj$ EWK	MADGRAPH5_AMC@NLO 2.6.2	PYTHIA 8.235	LO, K -factor to NLO	A14	NNPDF2.3LO
$Z\gamma jj$ interference, aQGC	MADGRAPH5_AMC@NLO 2.6.7	PYTHIA 8.244	LO	A14	NNPDF2.3LO
Alternative $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ EWK & $W(\ell\nu)\gamma jj$ EWK	MADGRAPH5_AMC@NLO 2.6.2	HERWIG 7.13	LO	A14	NNPDF2.3LO
$t\bar{t}\gamma jj$	MADGRAPH5_AMC@NLO 2.3.3	PYTHIA 8.212	LO, K -factor to NLO	A14	NNPDF2.3LO
Alternative $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$	MADGRAPH5_AMC@NLO 2.3.3	PYTHIA 8.212	NLO	A14	NNPDF2.3LO
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$, $W(\ell\nu)\gamma jj$, $Z(\ell\bar{\ell})\gamma jj$	SHERPA 2.2.2	SHERPA 2.2.2	NLO	default	NNPDF3.0NNLO
$W(e\nu)jj$, $W(\tau\nu)jj$, $Z(\nu\bar{\nu})jj$, $Z(e\bar{e})$	SHERPA 2.2.1	SHERPA 2.2.1	NLO	default	NNPDF3.0NNLO
γjj	SHERPA 2.1	SHERPA 2.1	LO, K -factor to NLO	default	CT10NLO
jj	SHERPA 2.1.1	SHERPA 2.1.1	LO	default	CT10NLO
tjj , $t\bar{t}jj$	POWHEG Box v2	PYTHIA 8.230	NLO	A14	NNPDF3.0NLO, NNPDF2.3LO

Produzione elettrodebole $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ (4)

- Definizione del volume fiduciale

Selections	Cut value
E_T^{miss}	$> 120 \text{ GeV}$
E_T^γ	$> 150 \text{ GeV}$
Number of isolated photons	$N_\gamma = 1$
Photon isolation	$E_T^{\text{cone40}} < 0.022p_T + 2.45 \text{ GeV}, p_T^{\text{cone20}}/p_T < 0.05$
Number of jets	$N_{\text{jets}} \geq 2$ with $p_T > 50 \text{ GeV}$
Overlap removal	$\Delta R(\gamma, \text{jet}) > 0.3$
Lepton veto	$N_e = 0, N_\mu = 0$
$ \Delta\phi(\gamma, \vec{p}_T^{\text{miss}}) $	> 0.4
$ \Delta\phi(j_1, \vec{p}_T^{\text{miss}}) $	> 0.3
$ \Delta\phi(j_2, \vec{p}_T^{\text{miss}}) $	> 0.3
m_{jj}	$> 300 \text{ GeV}$
γ -centrality	< 0.6

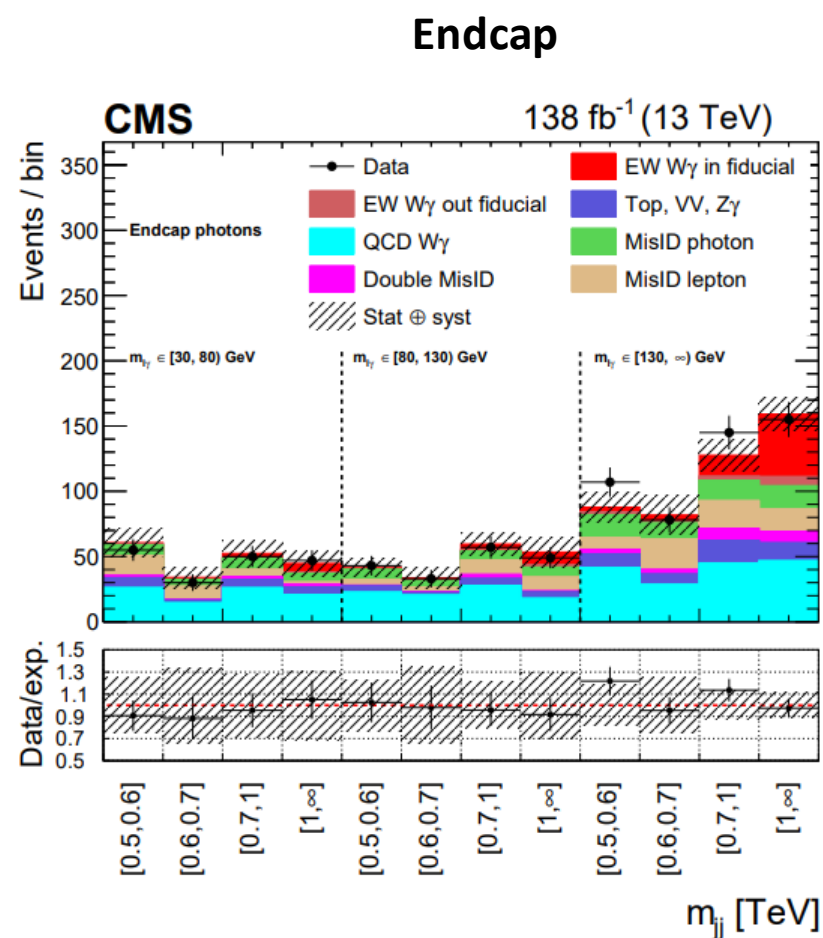
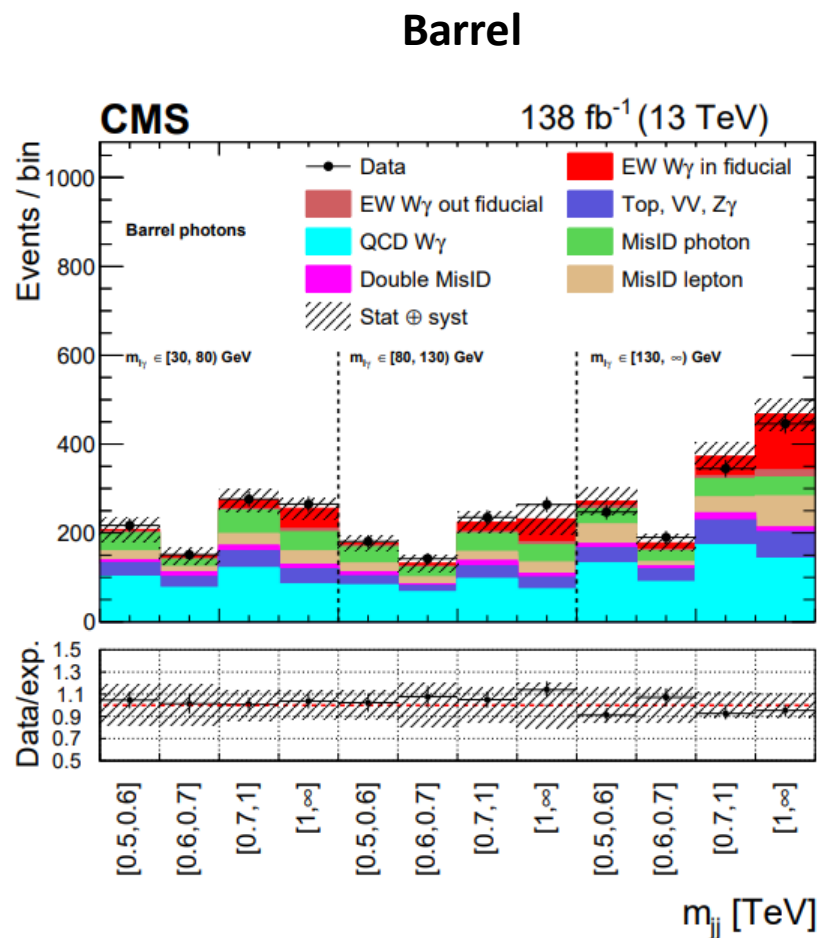
Produzione elettrodebole $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ (5)



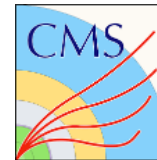
Produzione elettrodebole $Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ (6)

Source of uncertainty	$\Delta\sigma/\sigma$ [%]
Experimental	
Jets	-3.2/+3.4
Electrons and photons	-0.3/+1.7
Muons	-0.4/+0.5
E_T^{miss}	-1.8/+2.2
Pile-up modelling	-1.7/+3.2
Trigger efficiency	-0.9/+2.1
Luminosity	-1.2/+2.6
Theory	
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ EWK/QCD interference	-0.6/+2.6
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ EWK process	-6 /+12
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ QCD process	-15 /+16
Other processes	-5.3/+7.7
Other sources	
Data-driven backgrounds	-0.9/+1.2
Pile-up background	-1.2/+2.6
$Z(\nu\bar{\nu})\gamma jj$ QCD m_{jj} modelling	-4.4/+4.4

Produzione elettrodebole $W\gamma jj$ (3)



Produzione elettrodebole $W\gamma jj$ (4)

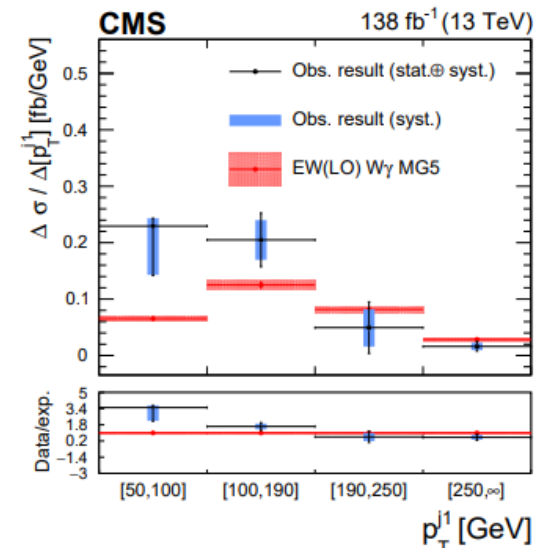
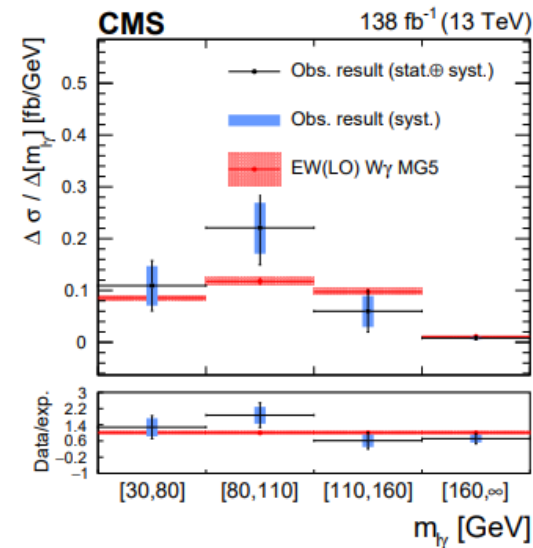
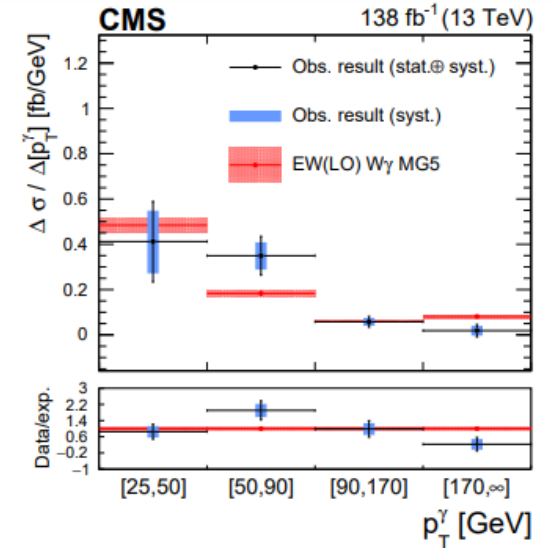
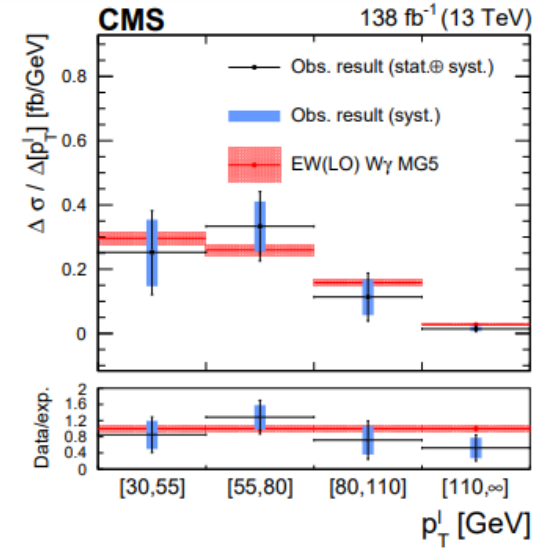
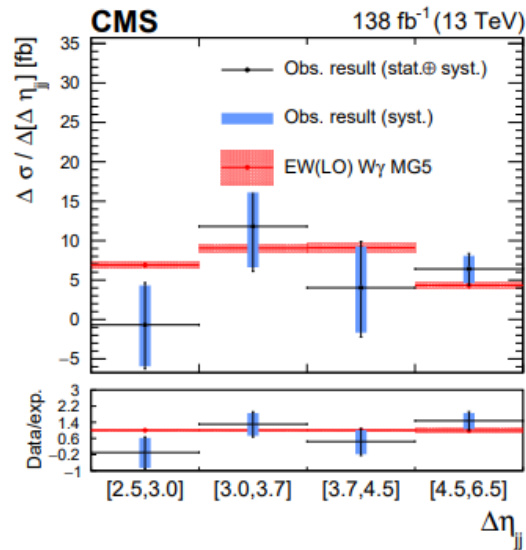
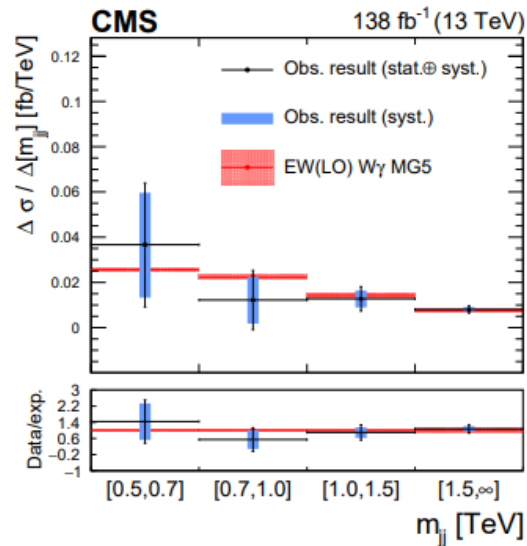


- Selezione fiduciale:
 - 2 jet con $p_T^j > 50$ GeV e $|\eta| < 4.7$
 - $p_T^\gamma > 25$ GeV e $|\eta| < 1.4442$ o $1.566 < |\eta| < 2.5$
 - $p_T^{\ell 1} > 35$ GeV e $|\eta| < 2.4$
 - $p_T^{miss} > 30$ GeV e $m_T^W > 30$ GeV
 - $m_{jj} > 500$ GeV e $|\eta_{jj}| < 2.5$
 - $\Delta R_{jj}, \Delta R_{j\gamma}, \Delta R_{j\ell}, \Delta R_{\ell\gamma} > 0.5$

Produzione elettrodebole $W\gamma jj$ (5)



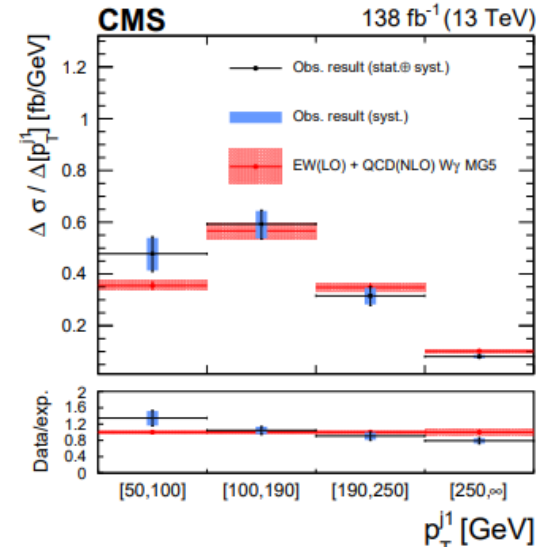
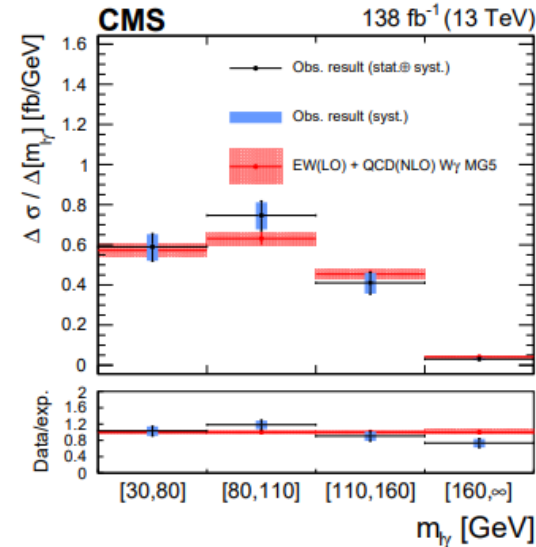
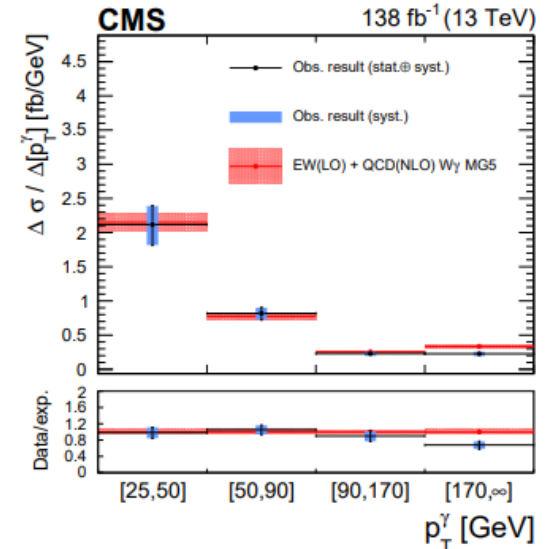
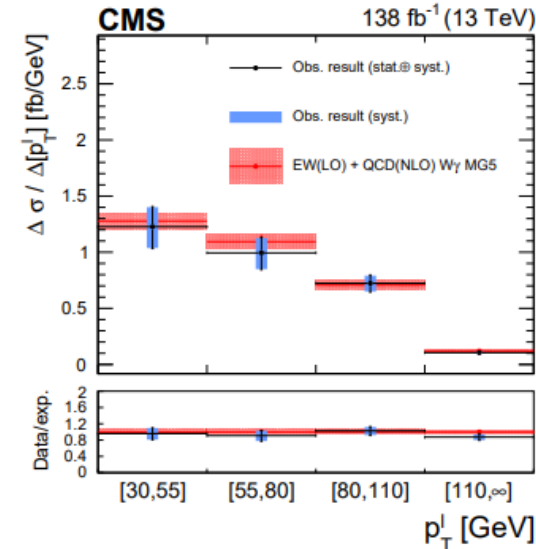
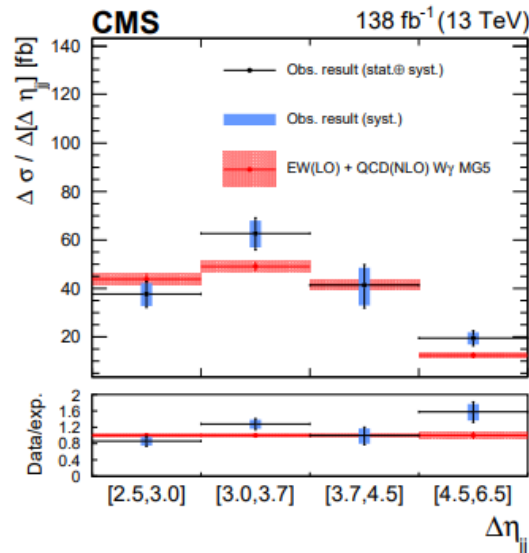
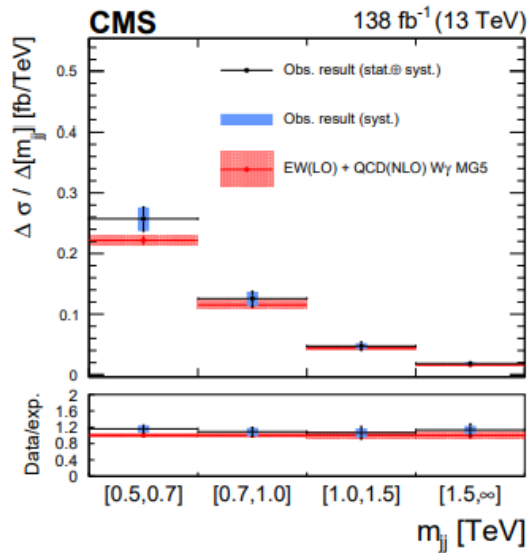
- Misura differenziale della produzione EWK



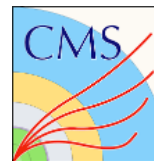
Produzione elettrodebole $W\gamma jj$ (6)



- Misura differenziale della produzione EWK+QCD



VBF $H \rightarrow \gamma\gamma$ (3)



- Definizione dello spazio delle fasi fiduciale e osservabili di interesse

Phase space region	Observable	Bin boundaries								
Baseline $p_T^{\gamma\gamma} / m_{\gamma\gamma} > 1/3$ $p_T^{\gamma\gamma} / m_{\gamma\gamma} > 1/4$ $ \eta^{\gamma\gamma} < 2.5$ $\mathcal{L}_{\text{gen}}^{\gamma\gamma} < 10 \text{ GeV}$	$p_T^{\gamma\gamma}$	0	5	10	15	20	25	30	35	
		45	60	80	100	120	140	170	200	
		250	350	450	∞					
	n_{jets}	0	1	2	3	≥ 4				
	$ y^{\gamma\gamma} $	0.0	0.1	0.2	0.3	0.45	0.6	0.75	0.90	
		2.5								
	$ \cos(\theta^*) $	0.0	0.07	0.15	0.22	0.35	0.45	0.55	0.75	
		1.0								
	$ \phi_\eta^* $	0.0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	
		1.0	1.5	2.5	4.0	∞				
$p_T^{\gamma\gamma}, n_{\text{jets}} = 0$		0	5	10	15	20	25	30	35	
		45	60	∞						
$p_T^{\gamma\gamma}, n_{\text{jets}} = 1$		0	30	60	100	170	∞			
$p_T^{\gamma\gamma}, n_{\text{jets}} > 1$		0	100	170	250	350	∞			
n_{bjets}		0	1	≥ 2						
n_{leptons}		0	1	≥ 2						
p_T^{miss}		0	30	50	100	200	∞			
1-jet Baseline + ≥ 1 jet $p_T^j > 30 \text{ GeV}$ $ \eta^j < 2.5$	p_T^j	30	40	55	75	95	120	150	200	
		∞								
	$ y^{j1} $	0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.6	2.0	2.5	
	$ \Delta\phi_{\gamma\gamma j1} $	0.0	2.0	2.6	2.85	3.0	3.07	π		
	$ \Delta y_{\gamma\gamma j1} $	0.0	0.3	0.6	1.0	1.4	1.9	2.5	∞	
	τ_C^j	< 15	15	20	30	50	80	∞		
	$p_T^{\gamma\gamma}, \tau_C^j < 15 \text{ GeV}$	0	45	120	∞					
	$p_T^{\gamma\gamma}, 15 \text{ GeV} \leq \tau_C^j < 25 \text{ GeV}$	0	45	120	∞					
	$p_T^{\gamma\gamma}, 25 \text{ GeV} \leq \tau_C^j < 40 \text{ GeV}$	0	120	∞						
	$p_T^{\gamma\gamma}, 40 \text{ GeV} \leq \tau_C^j$	0	200	350	∞					
2-jets Baseline + ≥ 2 jets $p_T^j > 30 \text{ GeV}$ $ \eta^j < 4.7$	p_T^{j2}	30	40	65	90	150	∞			
	$ y^{j2} $	0.0	0.6	1.2	1.8	2.5	3.5	5.0		
	$ \Delta\phi_{j1j2} $	0.0	0.5	0.9	1.3	1.7	2.5	π		
	$ \Delta\phi_{\gamma\gamma j1j2} $	0.0	2.0	2.7	2.95	3.07	π			
	$ \bar{\eta}_{j1j2} - \eta_{\gamma\gamma} $	0.0	0.2	0.5	0.85	1.2	1.7	∞		
	m^{jj}	0	75	120	180	300	500	1000	∞	
	$ \Delta\eta_{j1j2} $	0.0	0.7	1.6	3.0	5.0	∞			
VBF-enriched 2-jets + $n_{\text{jets}} \geq 2$ $\Delta\eta^{jj} > 3.5$ $m^{jj} > 200 \text{ GeV}$	$p_T^{\gamma\gamma}$	0	30	60	120	200	∞			
	p_T^{j2}	30	40	65	90	150	∞			
	$ \Delta\phi_{j1j2} $	0.0	0.5	0.9	1.3	1.7	2.5	π		
	$ \Delta\phi_{\gamma\gamma j1j2} $	0.0	2.0	2.7	2.95	3.07	π			

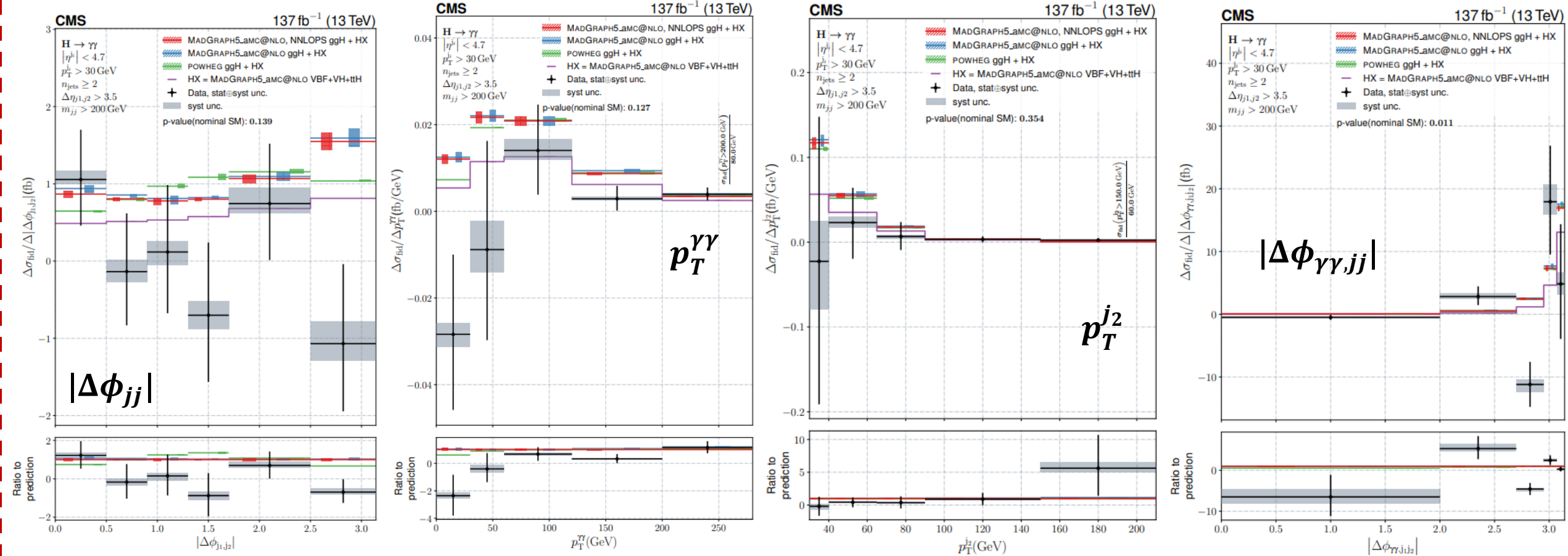
VBF $H \rightarrow \gamma\gamma$ (4)

- Categorizzazione degli eventi basata su estimatore della risoluzione di massa decorrelato (σ_m^D) e sull'output di un classificatore di fotoni basato su un BDT (photon ID MVA):
 - $\frac{\sigma_m}{m}$ è l'estimatore della risoluzione di massa per una coppia di fotoni, definito come la somma quadratica della risoluzione energetica relativa per ogni fotone
 - Viene decorrelato rispetto alla massa invariante del sistema $m_{\gamma\gamma} \rightarrow \sigma_m^D$
→ Decorrelazione necessaria per evitare distorsioni delle distribuzioni dei fondi
- Ottimizzazioni separate per i tre anni in tutto lo spazio delle fasi fiduciali
- Vengono definite 3 categorie di σ_m^D per ogni anno

VBF $H \rightarrow \gamma\gamma$ (5)

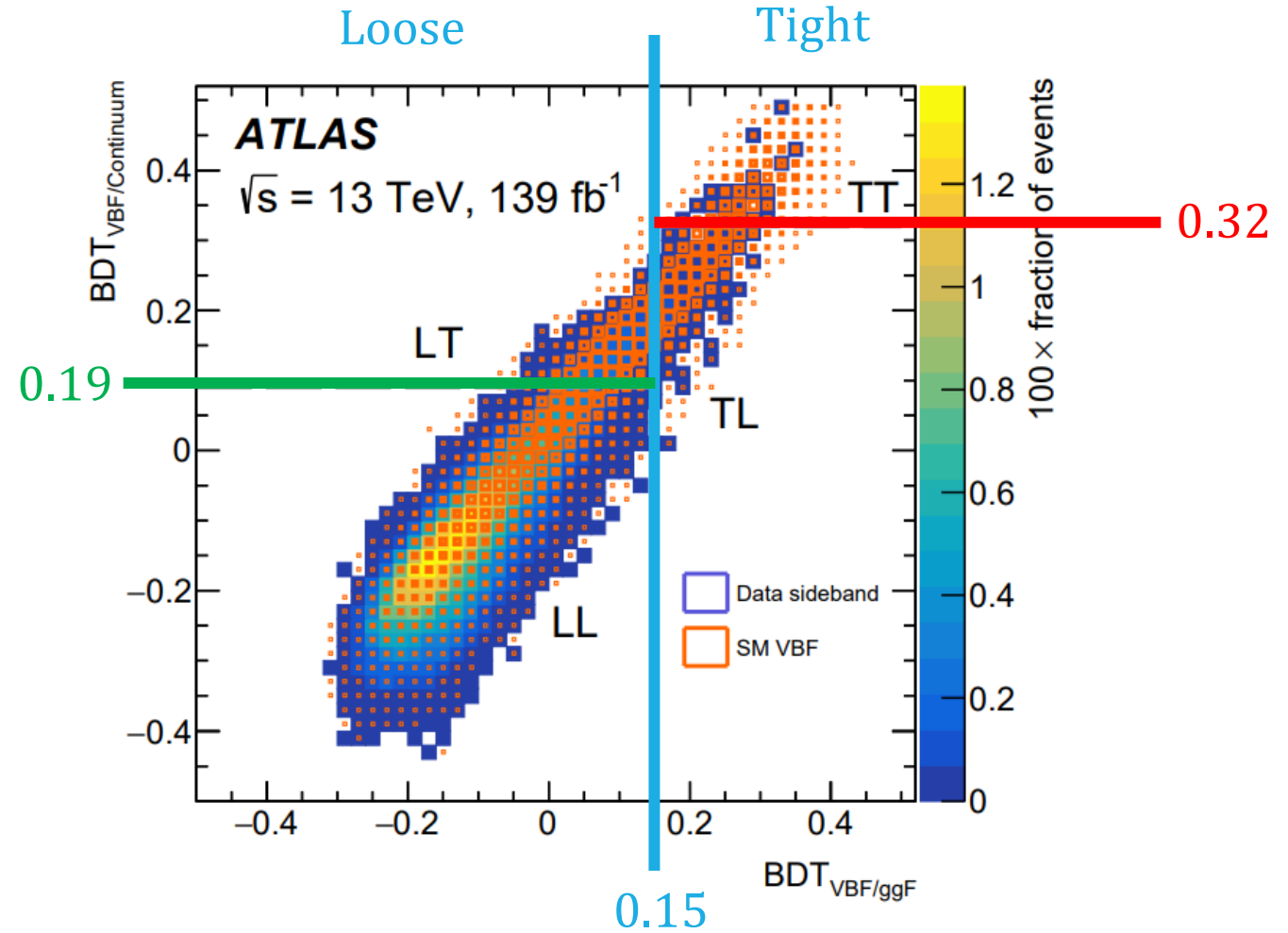


Misura differenziale VBF



Proprietà di CP in $VBF H \rightarrow \gamma\gamma$ (3)

- Distribuzione 2D degli output dei due BDT nella regione $m_{\gamma\gamma} \in [104,118]\text{GeV}$ o $[132,160]\text{GeV}$
 - Gli eventi vengono separati in «tight» (T) e «loose» (L) tagliando su $BDT_{VBF/ggF}$ (linea azzurra)
 - Ulteriore selezione tagliando su $BDT_{VBF/continuum}$ (linea verde e linea rossa)



Proprietà di CP in $VBF H \rightarrow \gamma\gamma$ (4)

Base HISZ

$$\tilde{d}_B = \tilde{d}$$

Terzo coefficiente nullo

- Sensibilità sufficiente per CL 95%
- Risultati compatibili con il MS
- Precisione limitata da incertezza statistica (CL 95% $\Delta_{syst} < 2\%$)

	68% (exp.)	95% (exp.)	68% (obs.)	95% (obs.)
\tilde{d} (inter. only)	[-0.027, 0.027]	[-0.055, 0.055]	[-0.011, 0.036]	[-0.032, 0.059]
\tilde{d} (inter.+quad.)	[-0.028, 0.028]	[-0.061, 0.060]	[-0.010, 0.040]	[-0.034, 0.071]
\tilde{d} from $H \rightarrow \tau\tau$	[-0.038, 0.036]	-	[-0.090, 0.035]	-
Combined \tilde{d}	[-0.022, 0.021]	[-0.046, 0.045]	[-0.012, 0.030]	[-0.034, 0.057]

Combinazione con la precedente misura $H \rightarrow \tau\tau$

Base Warsaw

$$c_{H\bar{B}} = c_{H\bar{B}W} = 0$$

$c_{H\bar{W}}$ (inter. only)	[-0.48, 0.48]	[-0.94, 0.94]	[-0.16, 0.64]	[-0.53, 1.02]
$c_{H\bar{W}}$ (inter.+quad.)	[-0.48, 0.48]	[-0.95, 0.95]	[-0.15, 0.67]	[-0.55, 1.07]

- CL più stringenti rispetto alle misure precedenti di ATLAS e CMS in 4ℓ