

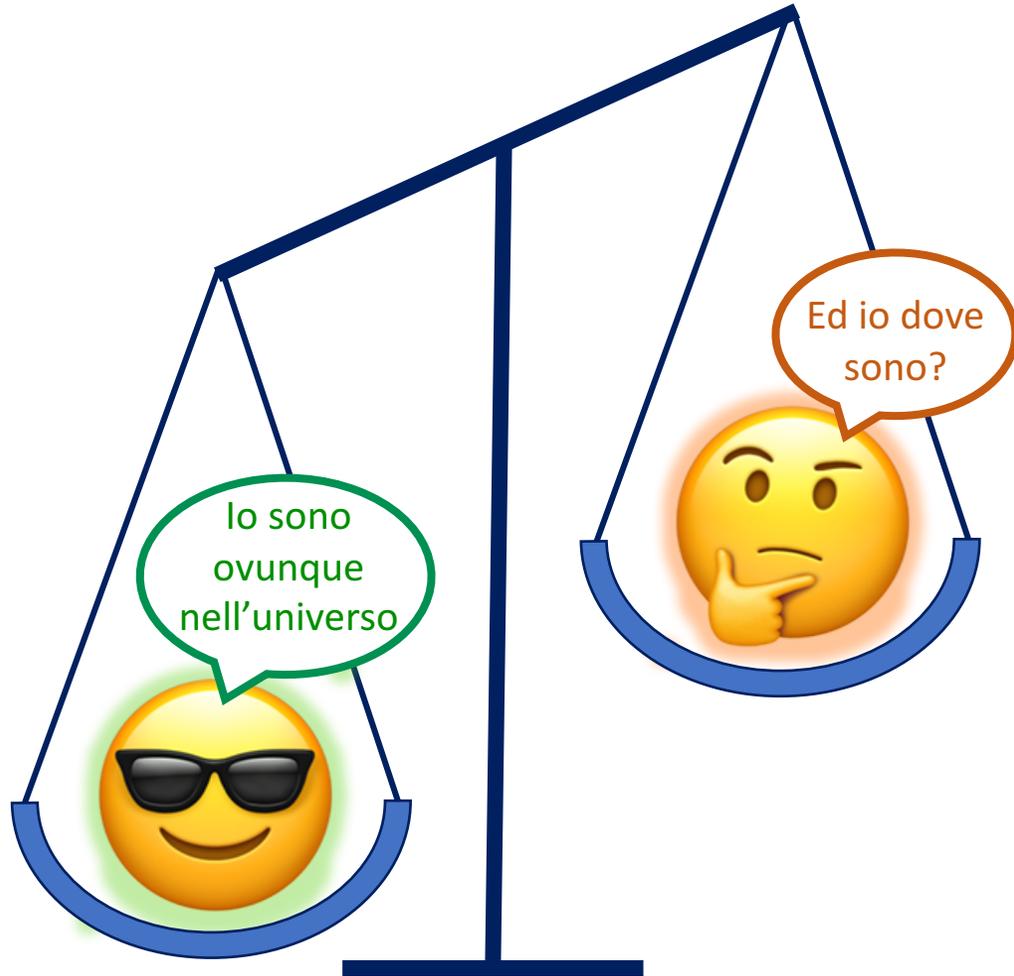


Ricerca della violazione di CP nelle interazioni del bosone di Higgs con i bosoni vettori

Chiara Arcangeletti

Incontri di Fisica delle Alte Energie, Catania, 2023

La Natura è CP-simmetrica?



L'asimmetria tra il contenuto di **materia** ed **antimateria** nell'universo è uno dei problemi irrisolti della Fisica



Questo implica la violazione della coniugazione di carica e della simmetria per parità



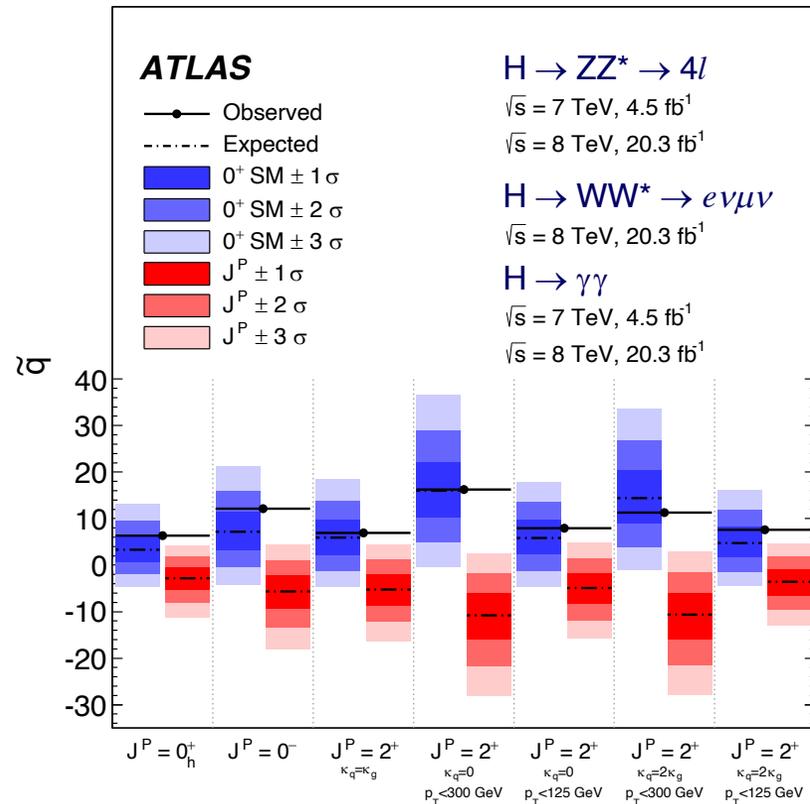
Il Modello Standard può spiegare solo una piccola parte della violazione di CP necessaria

→ Altre sorgenti di violazione di CP devono esistere Oltre il Modello Standard

La violazione di CP nel settore del Higgs

Il Bosone di Higgs nel Modello Standard è una particella scalare CP-pari con $J^{CP} = 0^{++}$

Ogni segno di **violazione di CP** implicherebbe **Fisica Oltre il Modello Standard**



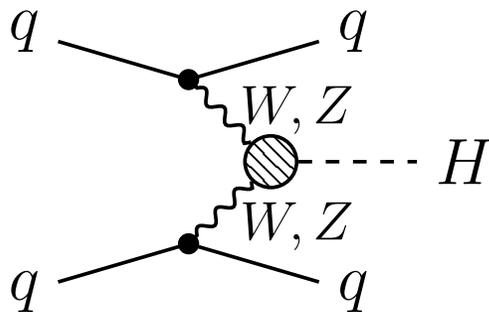
Cosa è stato fatto durante il **Run 1** ($\sqrt{s} = 7-8 \text{ TeV}, 25 \text{ fb}^{-1}$) dall'esperimento ATLAS

- Le analisi miravano a dimostrare che il bosone di Higgs fosse CP-pari
 - Test a ipotesi fissate di spin e parità: $J^P = 0^+$ confrontato con modelli di spin alternativi
 - ipotesi non-SM escluse con 99.9% di confidenza in favore di un bosone di Higgs con Spin/Parità 0^{++}
- Identificazione di stati di CP-pari e CP-dispari guardando alla struttura tensoriale dell'interazione HVV
 - Ottimo accordo con il Modello Standard
- Approccio seguito anche durante il **Run 2** ($\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}, 139 \text{ fb}^{-1}$)
 - Studiando anche altri vertici di interazioni dell'Higgs
 - non solo i decadimenti, ma anche quelli di produzione

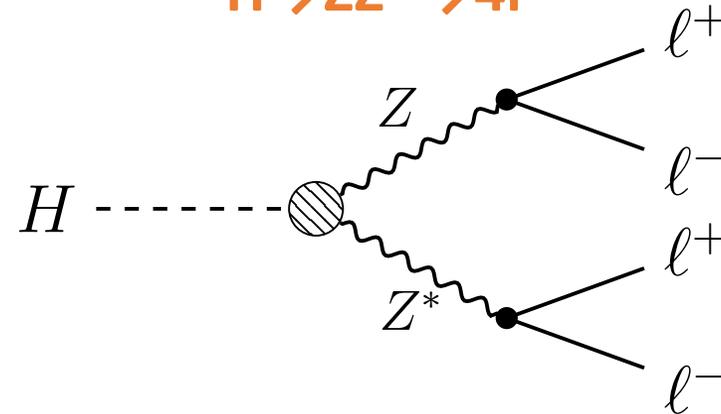
Struttura CP del vertice di interazione HVV

Effetti di **violazione di CP** nell'interazione tra il bosone di Higgs e i bosoni vettori può essere ricercata in due processi fondamentali

La produzione tramite fusione di bosoni vettori VBF



Il decadimento in due bosoni Z $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$



Risultati pubblicati dall'**esperimento ATLAS** che guardano a questi processi:

- La **produzione VBF** è stata studiata nei decadimenti $H \rightarrow \tau\tau$ (36.1 fb^{-1}), $H \rightarrow \gamma\gamma$ (139 fb^{-1}) e $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ (139 fb^{-1}), che ha guardato anche al vertice di decadimento.
- **Analisi basate sulla sola forma della distribuzione di osservabili sensibili ad effetti di CP**
 - Ignora dipendenza della sezione d'urto dai possibili scenari di mescolamento di CP
 - Porre limiti ad accoppiamenti CP-dispari a partire da modelli di Teoria di Campo Effettiva

Teoria di Campo Effettiva

Effetti BSM sono parametrizzati come termini perturbativi di ordini superiori della Lagrangiana del Modello Standard (validi fino ad una scala di energia $\Lambda \sim 1$ TeV)

$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i^{(6)} \quad c_i \text{ sono i coefficienti di Wilson}$$

Un gruppo completo di operatori di dimensione-6 prevede 3 accoppiamenti CP-dispari indipendenti, e si possono definire diverse basi a seconda delle assunzioni che vengono fatte.

Base di Warsaw^[1]

- Auto-stati dei campi prima della rottura di simmetria

$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \mathcal{L}_{\text{CP-even}} + c_{\text{H}\tilde{W}} H^\dagger H \tilde{W}_{\mu\nu}^I W^{I\mu\nu} + c_{\text{H}\tilde{B}} H^\dagger H \tilde{B}_{\mu\nu} B^{\mu\nu} + c_{\text{H}\tilde{W}B} H^\dagger \tau^I H \tilde{W}_{\mu\nu}^I B^{\mu\nu} + \dots$$

Base di Higgs^[2]

- Auto-stati di massa dopo la rottura di simmetria

$$\dots + \tilde{c}_{zz} \frac{g^2 + g'^2}{4} h Z_{\mu\nu} \tilde{Z}^{\mu\nu} + \tilde{c}_{z\gamma} \frac{gg'}{2} h Z_{\mu\nu} \tilde{A}^{\mu\nu} + \tilde{c}_{\gamma\gamma} \frac{g^2 g'^2}{4(g^2 + g'^2)} h A_{\mu\nu} \tilde{A}^{\mu\nu} + \dots$$

Base di Hawk^{[3][4]}

- Dopo la rottura spontanea di simmetria

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \tilde{g}_{\text{HAA}} H \tilde{A}_{\mu\nu} A^{\mu\nu} + \tilde{g}_{\text{HAZ}} H \tilde{A}_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} + \tilde{g}_{\text{HZZ}} H \tilde{Z}_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} + \tilde{g}_{\text{HWW}} H \tilde{W}_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu}$$

→ solo due degli accoppiamenti g_{HVV} sono indipendenti: espressi in termini di accoppiamenti adimensionali \tilde{d} e \tilde{d}_B che descrivono l'intensità della violazione di CP Assunzione: $\tilde{d} = \tilde{d}_B$

$$\tilde{g}_{\text{HAZ}} = \frac{g}{2m_W} \sin 2\theta_W (\tilde{d} - \tilde{d}_B) = 0$$

$$\tilde{g}_{\text{HAA}} = \frac{g}{2m_W} (\tilde{d} \sin^2 \theta_W + \tilde{d}_B \cos^2 \theta_W) = \tilde{g}_{\text{HZZ}}$$

$$\tilde{g}_{\text{HZZ}} = \frac{g}{2m_W} (\tilde{d} \cos^2 \theta_W + \tilde{d}_B \sin^2 \theta_W) = \tilde{g}_{\text{HAA}}$$

$$\tilde{g}_{\text{HWW}} = \frac{g}{2m_W} \tilde{d} = 2\tilde{g}_{\text{HZZ}} = 2\tilde{g}_{\text{HAA}}$$

Violazione di CP nella produzione VBF, $H \rightarrow \tau\tau$ & $H \rightarrow \gamma\gamma$

Phys. Lett. B 805 (2020) 135426

Selezione eventi

- $H \rightarrow \tau\tau$: Di-leptonico stessa carica di sapore ($\tau_{lep}\tau_{lep}$ SF), diversa carica di sapore ($\tau_{lep}\tau_{lep}$ DF), semi-leptonico ($\tau_{lep}\tau_{had}$) e totalmente adronico ($\tau_{had}\tau_{had}$)
- $H \rightarrow \gamma\gamma$: Due fotoni $105 \text{ GeV} < m_{\gamma\gamma} < 160 \text{ GeV}$

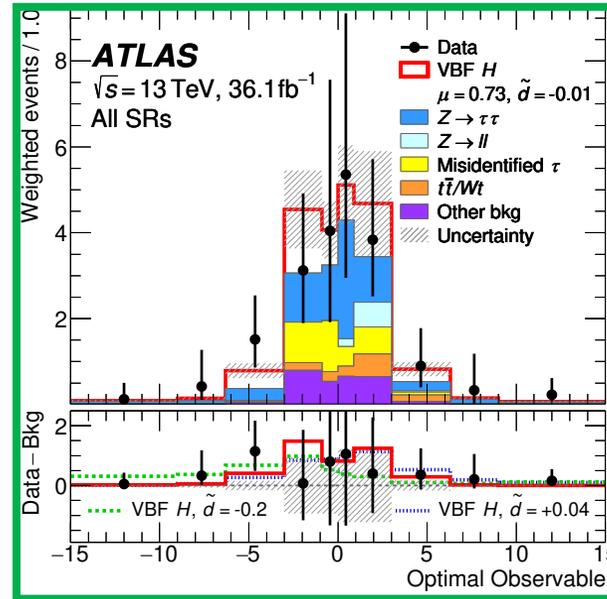
Segnale VBF

- $H \rightarrow \tau\tau$: $N_{jets} \geq 2$, un BDT per discriminare il segnale VBF dal fondo \rightarrow taglio sul BDT per definire regione di segnale (SR). Regioni di controllo (CR) definite per vincolare i fondi.
- $H \rightarrow \gamma\gamma$: $N_{jets} \geq 2$, $\Delta\eta_{jj} > 2$, $\eta^{Zep} < 5$, due BDT per discriminare VBF vs. ggF e VBF vs. fondo continuo \rightarrow tagli sui BDT per definire tre regioni di segnale.

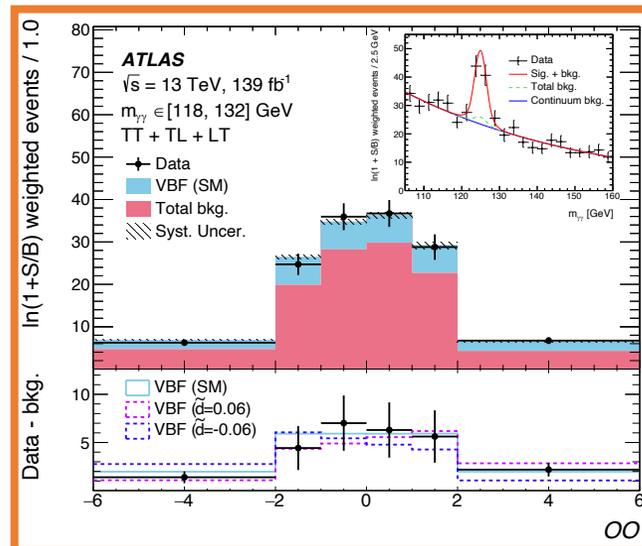
Misura degli accoppiamenti

- $H \rightarrow \tau\tau$: Fit di massima verosimiglianza simultaneo usando la distribuzione delle OO (SR) e della massa invariante $m_{\tau\tau}$ (CR)
- $H \rightarrow \gamma\gamma$: Fit di massima verosimiglianza simultaneo della distribuzione $m_{\gamma\gamma}$ in ogni bin OO in ogni SR.

* $\eta^{Zep} = |\eta - (\eta + \eta)/2|$

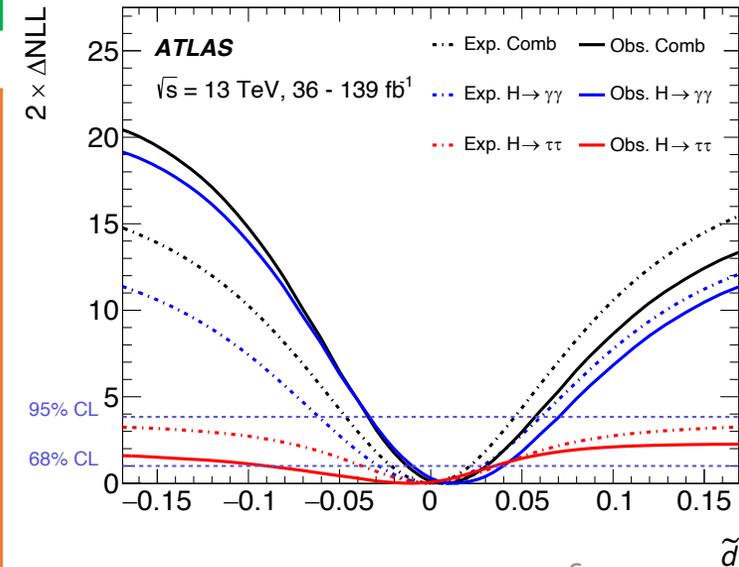


arXiv:2208.02338



Osservabili Ottimali costruite a partire dalle informazioni cinematiche del sistema Higgs + 2 jets

Limite osservato @ 68% CL sull'accoppiamento \tilde{d}
 $H \rightarrow \tau\tau = [-0.090, 0.035]$
 $H \rightarrow \gamma\gamma = [-0.010, 0.040]$
Combinato = [-0.012, 0.030]



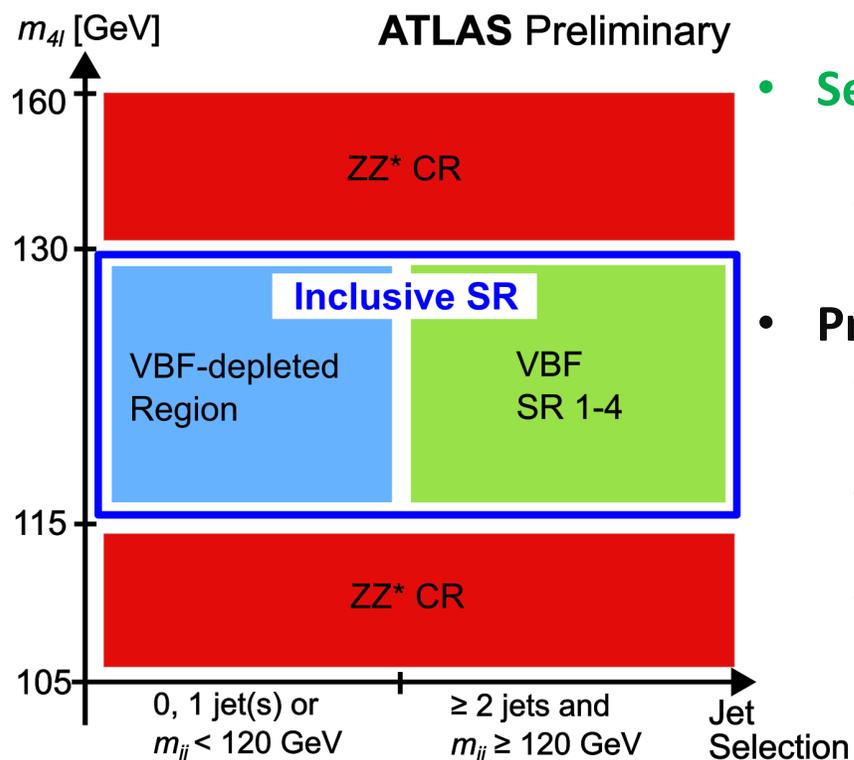
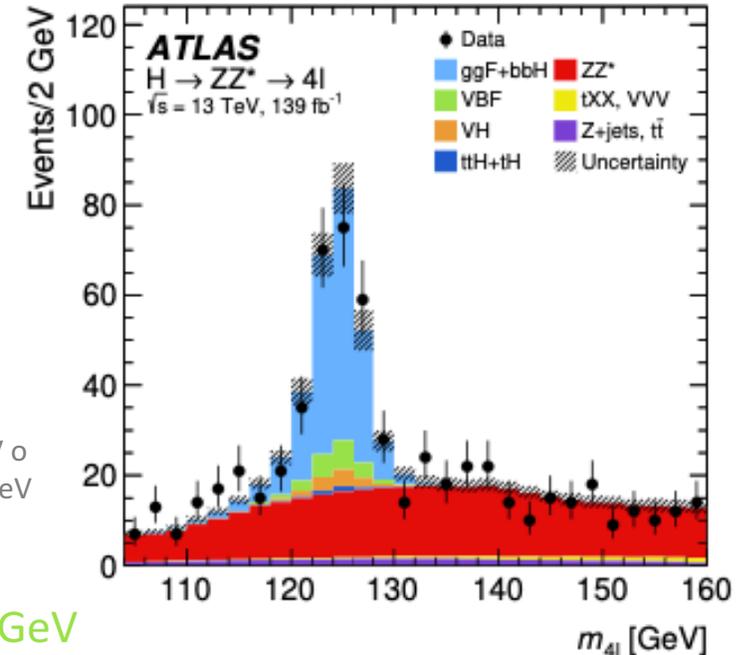
Violazione di CP nei processi VBF e $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

Selezione degli eventi e categorizzazione

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

- Due coppie di leptoni di stesso sapore, ma carica opposta
- Leptoni con $p_{T>} > 20, 15, 10, 5$ GeV e ben isolati
- Masse invarianti: $50 < m_{12} < 106$ GeV e $m_{thr}^* < m_{34} < 115$ GeV ; 105 GeV $< m_{4l} < 160$ GeV
- **Regione di Segnale (Inclusive SR): 115 GeV $< m_{4l} < 130$ GeV**

* $m_{thr} = 12$ GeV se $m_{4l} < 140$ GeV o
 $m_{min}(12, 50$ GeV) se $m_{4l} > 140$ GeV



• Segnale VBF

- $N_{jets} \geq 2$, $m_{jj} > 120$ GeV e $115 < m_{4l} < 130$ GeV

- Uso di una rete neurale (NN) discriminante tra segnali VBF, VH e ggF per definire 4 diverse regioni di segnale (VBF SR 1-4)

• Principali fondi

- **Produzione ZZ^* non risonante**: normalizzazione vincolata in regioni di controllo (ZZ^* CR) $m_{4l} = [105-115]$ GeV + $m_{4l} = [130-160]$ GeV
- Fondi riducibili Z+jets, $t\bar{t}$, WZ: stima a partire dai dati usando diverse regioni di controllo (due stime diverse per processi $ll\mu\mu$ e $llee$). tXX, VVV da Montecarlo.
- Per la produzione VBF anche il **processo ggF rappresenta un fondo**: contributo vincolato in una regione di controllo (VBF-depleted Region) **ortogonale alla selezione VBF**

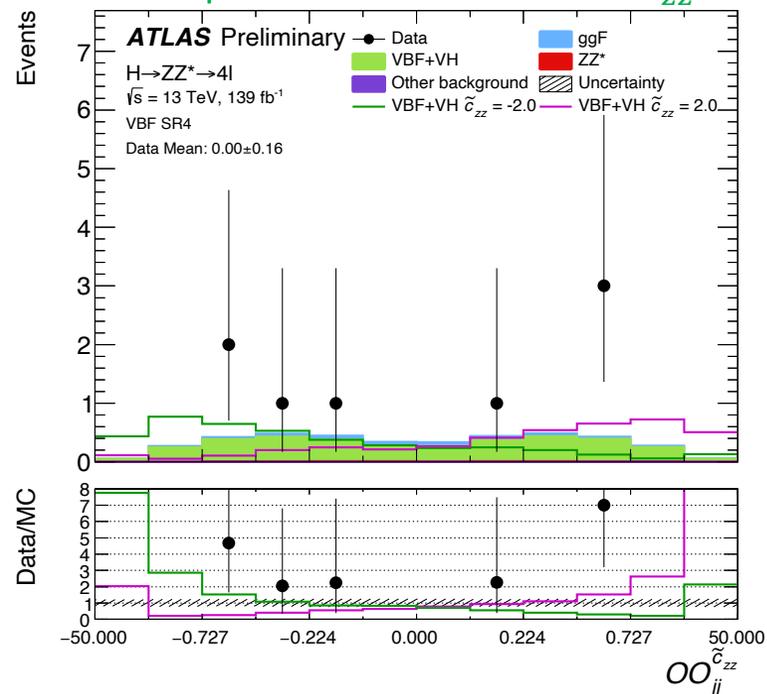
Violazione di CP nei processi VBF e $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

Misura degli accoppiamenti

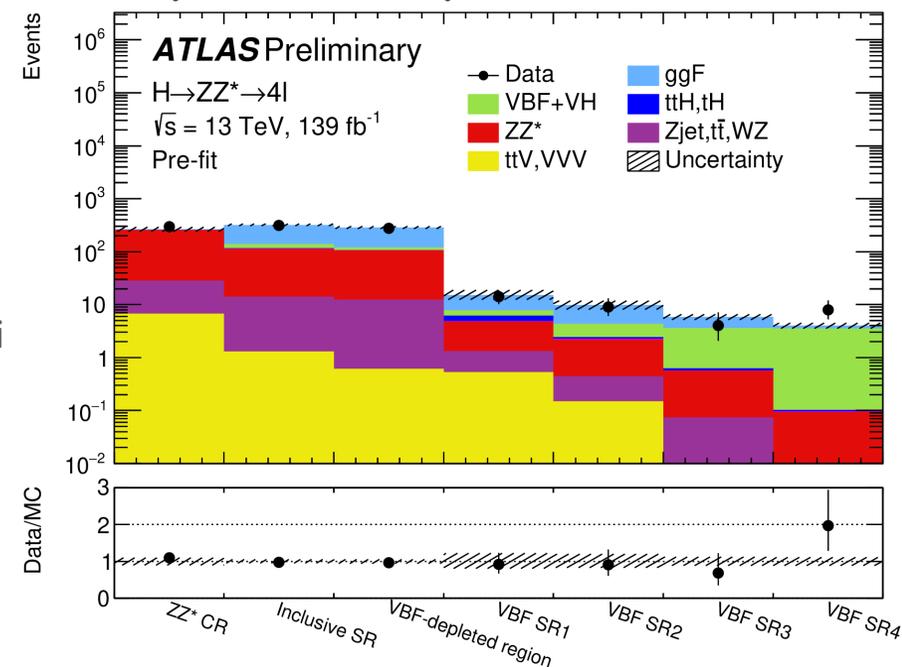
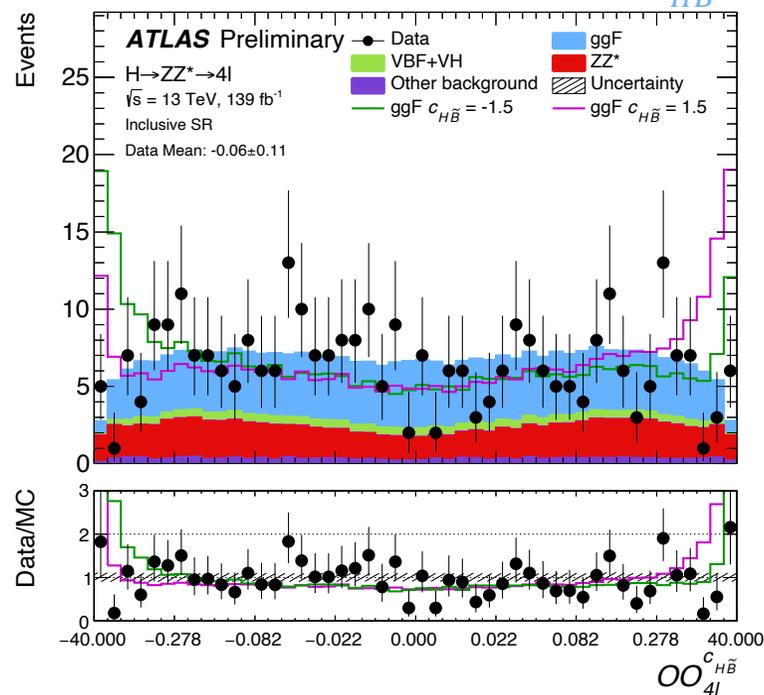
Diversi livelli di analisi, a seconda del processo che si vuole andare a studiare:

- **Livello produzione:** sensibilità ad effetti CP-dispari sia nel vertice di produzione VBF che in quello di decadimento $H \rightarrow ZZ^*$
 - Si costruiscono delle **distribuzioni delle OO per il sistema Higgs + 2 jet (OO_{jj})** di cui si fa il fit simultaneo nelle 4 regioni di segnale VBF SR 1-4
 - Normalizzazione dei fondi ZZ e ggF entrano nel fit nelle rispettive CR

OO di produzione calcolata con $\tilde{c}_{ZZ}=1$



OO di decadimento calcolata con $c_{H\tilde{B}}=1$



- **Livello decadimento:** effetti CP-dispari studiati solo al vertice $H \rightarrow ZZ^*$
 - Si costruiscono delle **distribuzioni delle OO per il sistema Higgs in 4 leptoni (OO_{4l})** di cui si fa il fit nella regione inclusiva di segnale
 - Normalizzazione del fondo ZZ vincolata nel fit nella ZZ^* CR
- **Combinazione**
 - Fit simultaneo delle OO_{jj} delle regioni VBF e delle OO_{4l} nella regione *depleted*

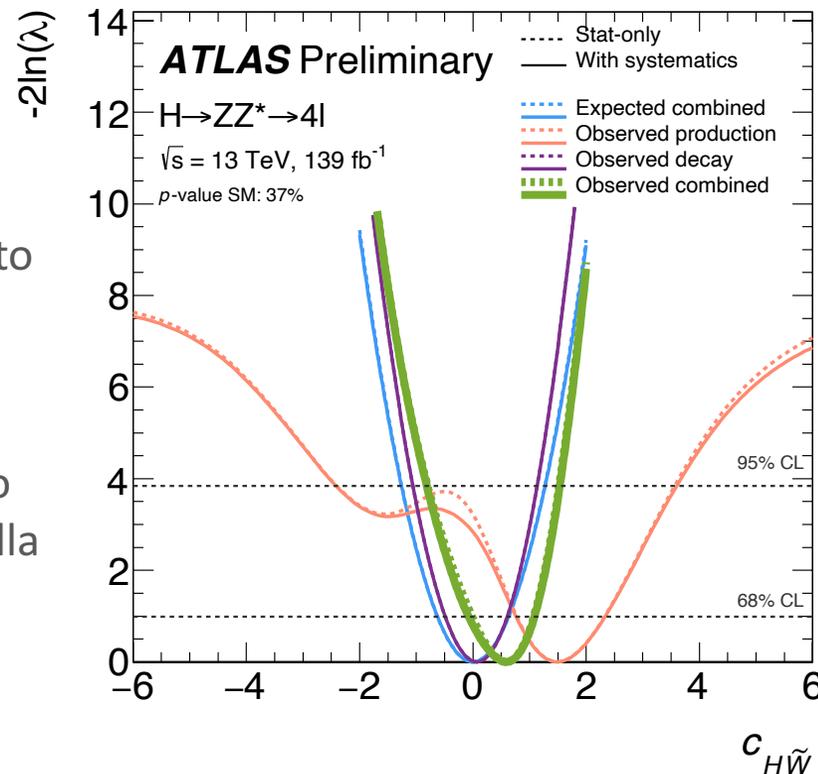
Violazione di CP nei processi VBF e $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

Risultati

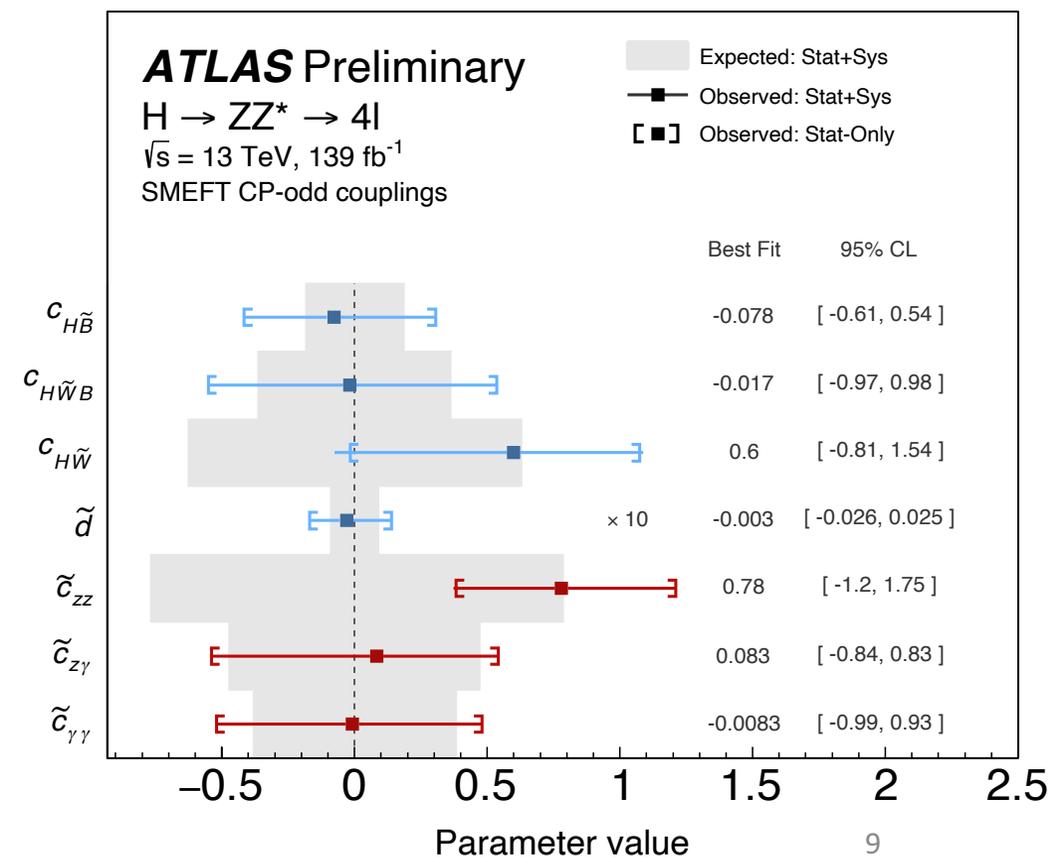
Non tutti gli approcci utilizzati nell'analisi sono sensibili a tutti gli accoppiamenti, perciò sono riportati i limiti migliori ottenuti dai singoli.

- Risultati compatibili con quanto atteso dal Modello Standard

- Esempio di una scansione della funzione di massima verosimiglianza (NLL) in funzione dell'accoppiamento $c_{H\tilde{W}}=1$ che confronta i tre approcci
- In generale i limiti ottenuti dagli eventi di decadimento sono più stringenti grazie alla migliore statistica (~ 200 eventi rispetto ai soli ~ 10 eventi VBF).



Riassunto dei limiti sui vari accoppiamenti nelle diverse basi investigate

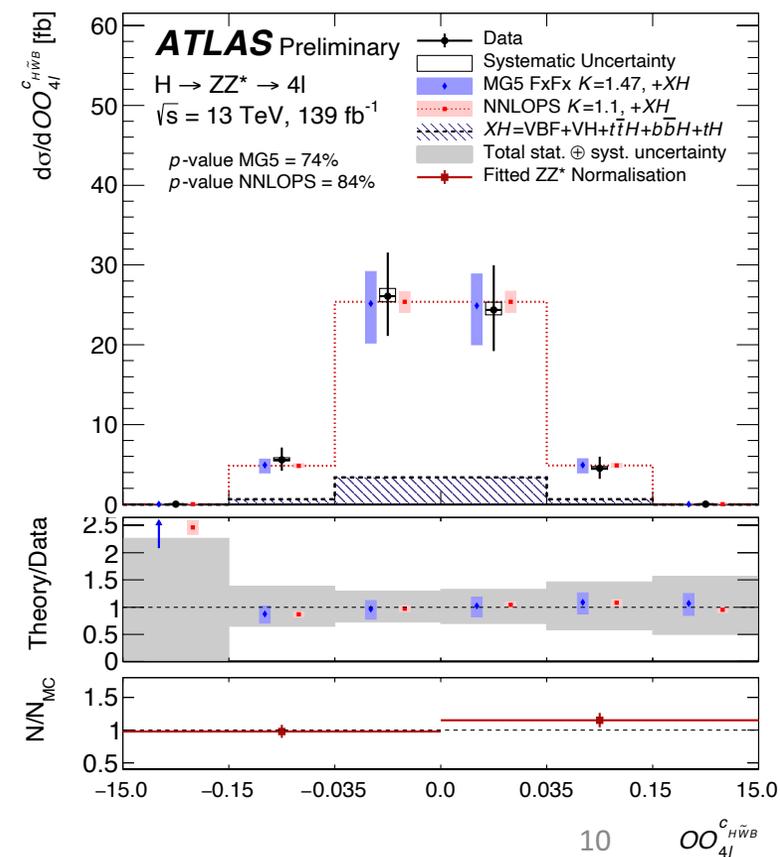
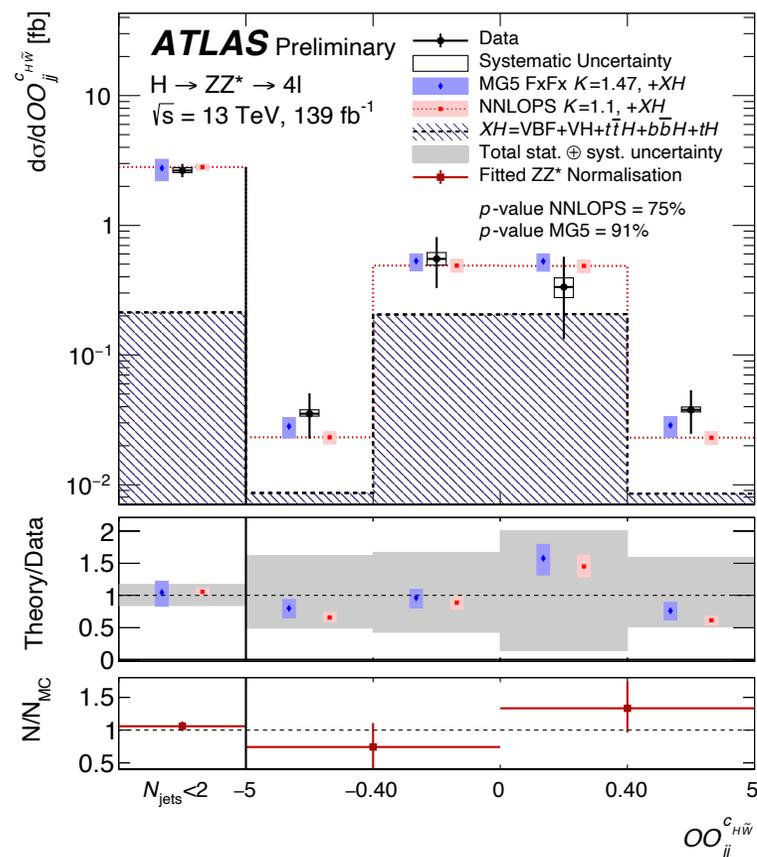


Misure differenziali delle osservabili ottimali

Una misura della distribuzione delle sezioni d'urto differenziali delle osservabili ottimali offre la possibilità di avere una **misura più indipendente dai modelli** rispetto a quelle illustrate precedentemente. Questo permette la **re-interpretazione** dei risultati in diversi modelli che prevedano la violazione di CP

Misura delle sezioni d'urto differenziali fiduciali nel canale $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

- Definizione di un **volume fiduciale** basato sull'accettazione del rivelatore per minimizzare dipendenze dal modello dello stesso
- Correzione degli effetti di risoluzione dei rivelatore e tener conto delle migrazioni tramite l'uso del processo di **"unfolding"** basato sulla **matrice di risposta** del rivelatore
- Estrazione del segnale effettuata da un **fit della distribuzione di m_{4l}** in ogni bin della distribuzione delle OO



Conclusioni

- Lo studio delle proprietà di Spin/Parità del bosone di Higgs è un campo importante da sondare per la fisica oltre il Modello Standard
 - Ricerca di segni di violazione di CP negli accoppiamenti di Higgs
- Studi effettuati dall'esperimento ATLAS con i dati raccolti a 13 TeV hanno indagato gli accoppiamenti dell'Higgs con i bosoni vettori nella produzione VBF, quanto nel vertice di decadimento nel canale $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$
 - Approcci teorici diversi nel contesto EFT per sondare accoppiamenti diversi
 - Utilizzo delle Osservabili Ottimali come migliori variabili sensibili ad effetti di accoppiamenti CP-dispari
 - Nel canale $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ fornita la misura delle sezioni d'urto differenziali fiduciali delle OO con possibilità di re-interpretazione
- Nessuna evidenza di effetti di violazione di CP fino ad ora



Backup