

Misura di accoppiamenti anomali CP dispari dell'Higgs nel processo di Vector Boson Fusion

Alessia Murrone

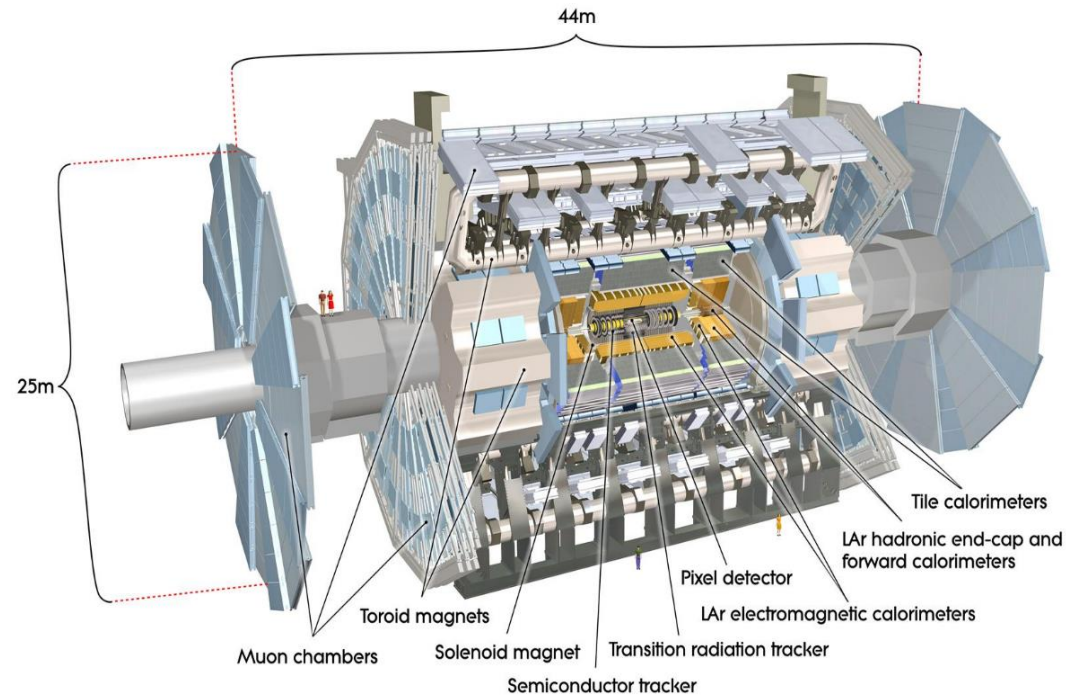
Università degli Studi di Milano

101° Congresso Nazionale SIF - Roma, 25/09/2015

ATLAS

Uno dei 4 esperimenti a LHC (ATLAS, CMS, LHCb, ALICE)

Una collaborazione di ~ 3000 persone!



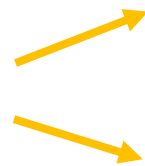
Il mio lavoro di tesi si è svolto all'interno della collaborazione ATLAS

Modello Standard e Bosone di Higgs

- Il bosone di Higgs è previsto dal meccanismo di rottura spontanea di simmetria, predetto da Higgs-Brout-Englert nel 1964
- E' stato scoperto nel Luglio 2012 in maniera separata sia da ATLAS che da CMS, arxiv.org/abs/1207.7214
- $m_H = 125.09 \pm 0.21 (stat) \pm 0.11 (syst)$ GeV, misura combinata di ATLAS e CMS, *Phys.Rev.Lett.* 114(2015), 191803
- $J^P = 0^+$

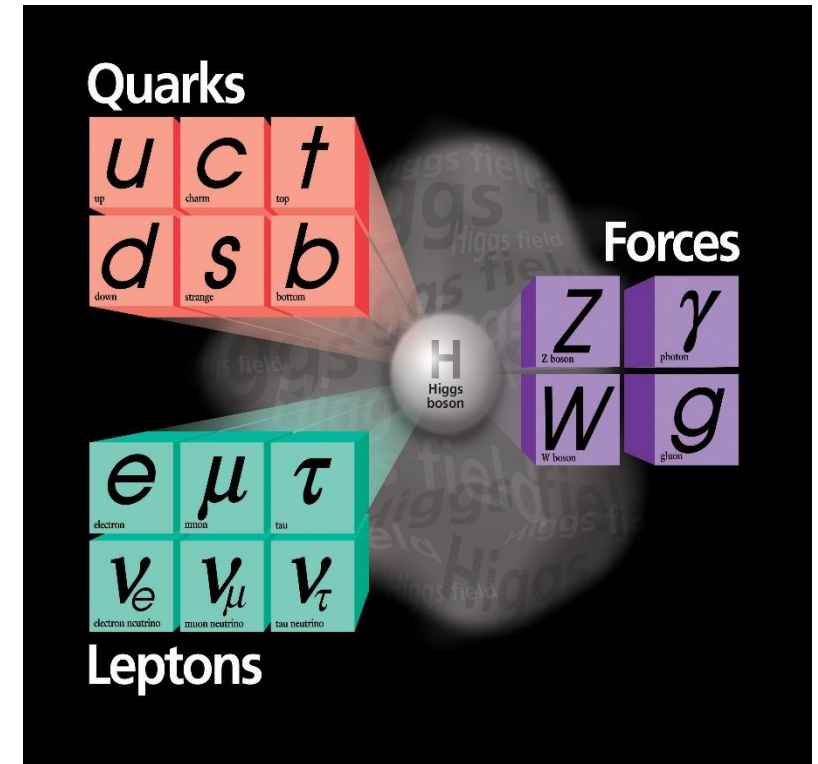
I risultati del RUN 1 mostrano un Higgs del tipo predetto dal Modello Standard ma alcune misure presentano ancora grandi incertezze statistiche

Violazione di CP: perché è interessante?

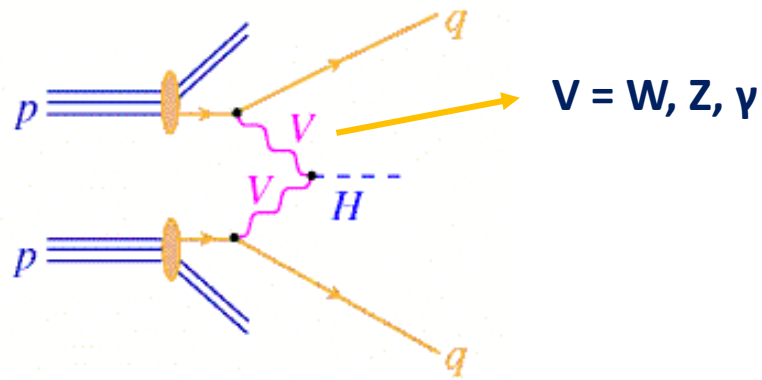


Il settore di Higgs è ancora da esplorare: possibilità di sorgenti di violazione di CP?

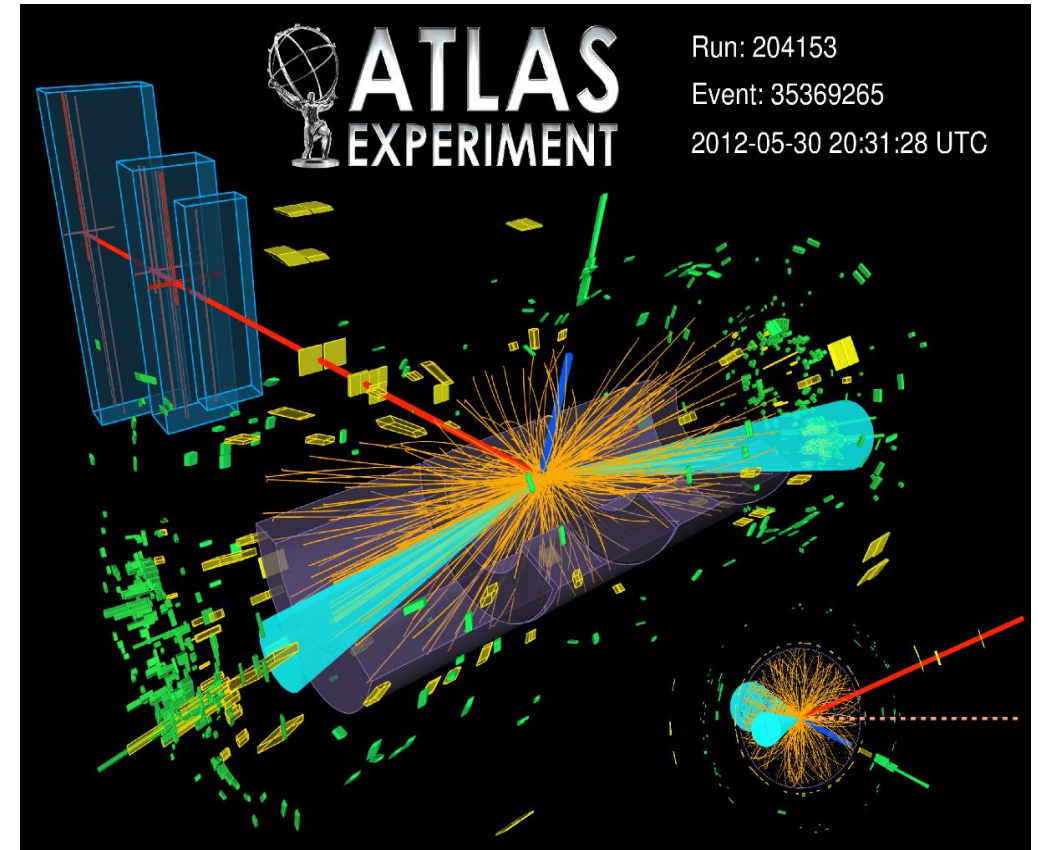
Asimmetria barionica nell'universo



Vector Boson Fusion



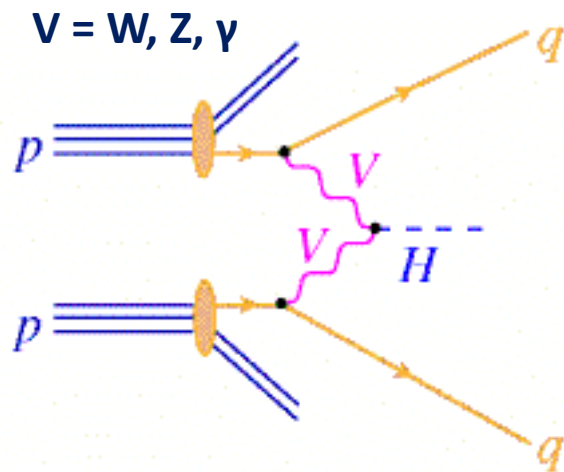
- Lo scopo dell'analisi è di studiare eventuale presenza di fisica oltre il Modello Standard, in particolare accoppiamenti che violano CP nel vertice dove l'Higgs si accoppia a due bosoni vettori tramite il processo di produzione di **Vector Boson Fusion** (VBF)
- I principi su cui si basa l'analisi sono indipendenti dal decadimento
- Il canale $H \rightarrow \tau\tau$ è utile per l'abbondanza di eventi VBF
B.R. 6.32×10^{-2}



Display di un evento di Higgs che decade in coppie di leptoni τ ed è stato prodotto tramite Vector Boson Fusion

Vector Boson Fusion

La struttura tensoriale del vertice HVV è stata studiata nel decadimento dell'Higgs in due bosoni vettori ma mai nella produzione in VBF ([arXiv:1506.05669](https://arxiv.org/abs/1506.05669), [arXiv:1411.3441](https://arxiv.org/abs/1411.3441))



Espressione generale Lorentz-invariante per il tensore che descrive il vertice HVV:

$$T^{\mu\nu}(q_1, q_2) = a_1(q_1, q_2)g^{\mu\nu} \quad \text{SM: CP PARI}$$

$$+ a_2(q_1, q_2)[q_1 \cdot q_2 g^{\mu\nu} - q_2^\mu q_1^\nu] \quad \text{CP PARI}$$

$$+ a_3(q_1, q_2)\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} q_{\rho,1} q_{\sigma,2} \quad \text{CP DISPARI}$$

Modello Standard:

$$a_1 = \frac{2m_V^2}{v}, \quad a_2 = 0, \quad a_3 = 0$$

Perturbazione CP-dispari al modello standard:

$$a_1 = \frac{2m_V^2}{v}, \quad a_2 = 0, \quad a_3 \neq 0$$

$$\left. \begin{aligned} a_3^{HZZ} &= \frac{2e}{M_W \sin\theta_W} (\tilde{d} \cos^2\theta_W + \tilde{d}_B \sin^2\theta_W) \\ a_3^{HWW} &= \frac{2e}{M_W \sin\theta_W} \tilde{d} \\ a_3^{HZ\gamma} &= \frac{2e}{M_W} (\cos\theta_W (\tilde{d} - \tilde{d}_B)) \\ a_3^{H\gamma\gamma} &= \frac{2e}{M_W \sin\theta_W} (\tilde{d} \sin^2\theta_W + \tilde{d}_B \cos^2\theta_W) \end{aligned} \right\}$$

Variabili discriminanti

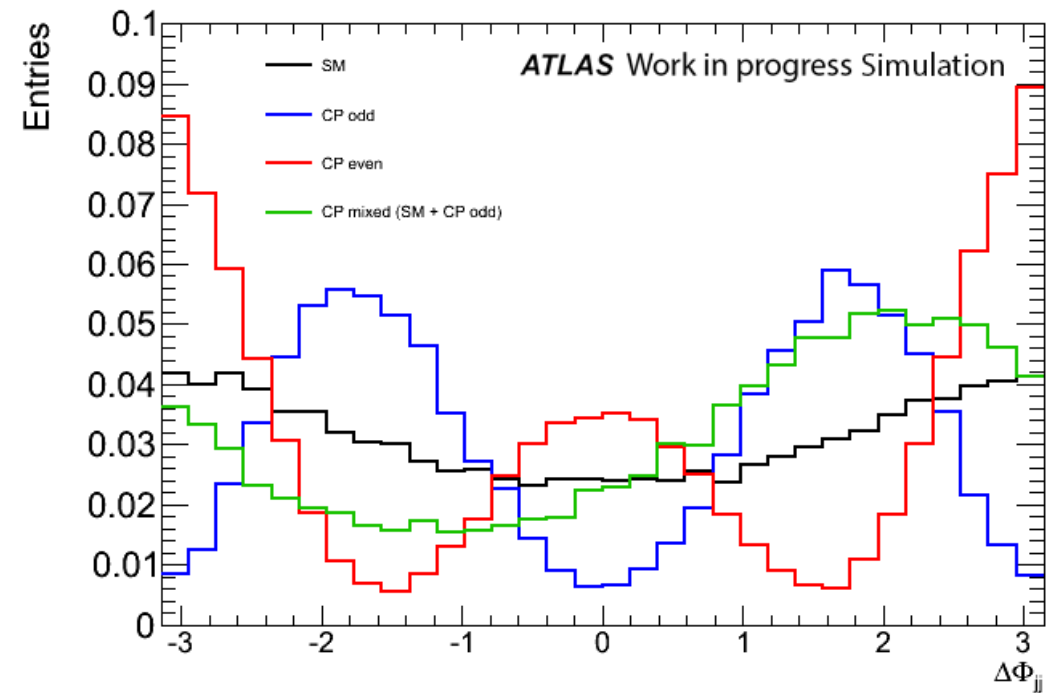
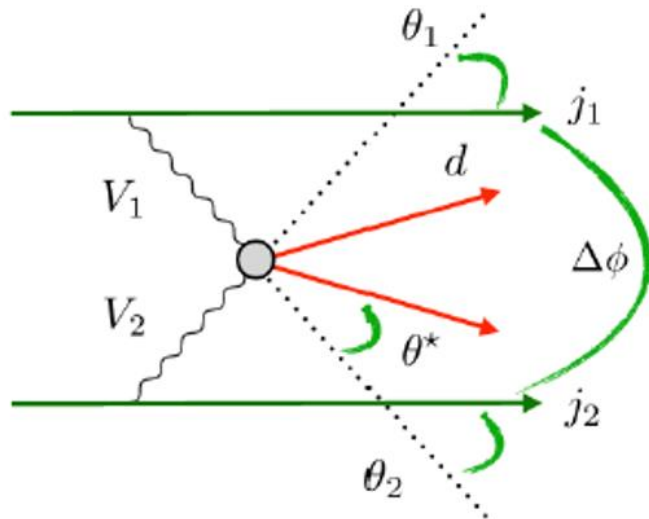
Misurando i parametri \tilde{d} e \tilde{d}_B , si può risalire al fattore di forma a_3 e quindi alla struttura del tensore

1. Delta Phi

Una variabile sensibile alla presenza di accoppiamenti anomali è l'angolo tra i due getti nello stato finale

$$\varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} b_+^\mu p_+^\nu b_-^\rho p_-^\sigma = 2p_{T,+}p_{T,-} \sin(\phi_+ - \phi_-) = 2p_{T,+}p_{T,-} \sin(\Delta\phi_{jj})$$

(b_+, b_- sono i quadrimomenti dei protoni entranti mentre p_+, p_- sono i quadrimomenti dei jet uscenti in modo che b_+ punti nello stesso emisfero di p_+)



2. Optimal Observable

nuova tecnica, mai utilizzata nel contesto della produzione dell'Higgs in VBF, utilizzata dalla OPAL collaboration nella misura di polarizzazione del processo $Z \rightarrow \tau\tau$, Z.Phys. C66 (1995) 31–44.

Perturbazione CP dispari al Modello Standard

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



$$M_{non-SM} = M_{SM} + \tilde{d} \cdot M_{CP-dispari}$$

Elemento di matrice al quadrato:

$$|M_{non-SM}^2| = \underbrace{|M_{SM}^2|}_{\text{CP-pari}} + \underbrace{\tilde{d} \cdot 2 \operatorname{Re}(M_{SM}^* M_{CP-dispari})}_{\text{CP-dispari: origine della violazione di CP}} + \underbrace{\tilde{d}^2 |M_{CP-dispari}^2|}_{\text{CP-pari}}$$

CP-pari

CP-dispari: origine della
violazione di CP

CP-pari

Optimal Observables:

$$O_1 := \frac{2 \operatorname{Re}(M_{SM}^* M_{CP-dispari})}{|M_{SM}^2|}$$

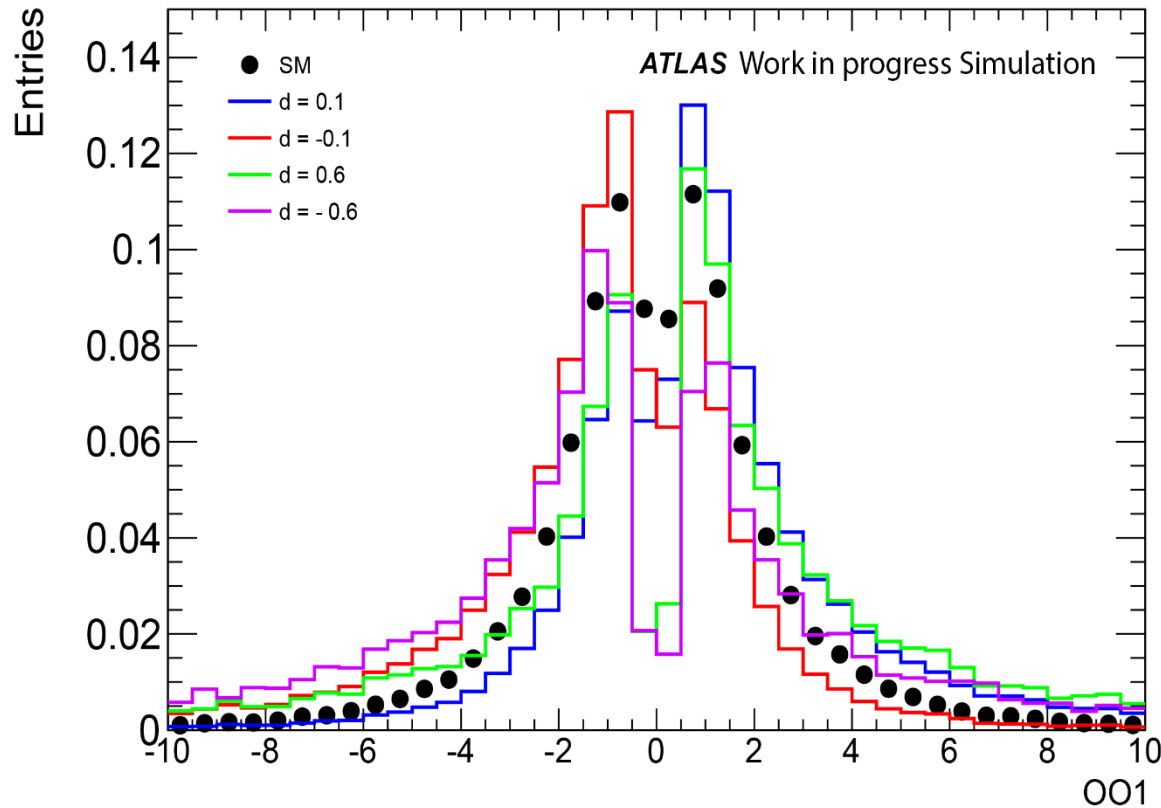
Sensibile all'accoppiamento CP-odd
per il termine lineare in \tilde{d}

$$O_2 := \frac{|M_{CP-dispari}^2|}{|M_{SM}^2|}$$

Sensibile all'accoppiamento CP-odd
per il termine quadratico in \tilde{d}

In questo studio è stata considerata l'Optimal Observable di primo ordine

L'Optimal Observable viene costruita utilizzando la cinematica dello stato finale:
 p_T dei due jets, p_T dell'Higgs e x di Bjorken



- I punti costituiscono la curva che si ottiene per il Modello Standard e il suo valore medio è intorno allo zero

$$\langle O \rangle = 0$$

- Le curve colorate sono per differenti valori di $\tilde{d} = \tilde{d}_B$. Il valore medio è in questo caso spostato rispetto allo 0 e dipendente dal segno di \tilde{d} .

$$\langle O \rangle \neq 0$$

Reweighting

Differenti modelli CP-misti possono essere generati utilizzando la tecnica del reweighting ed evitando di fare una simulazione completa (parton level + parton shower + detector simulation)

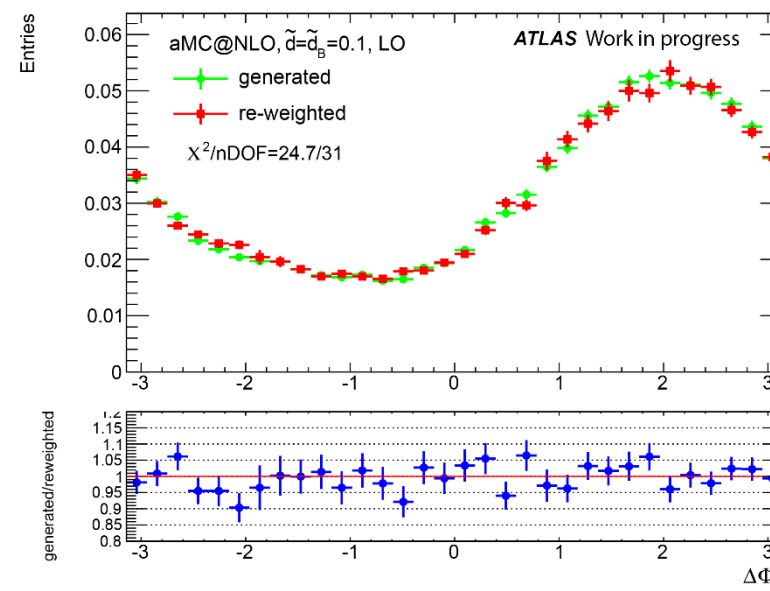
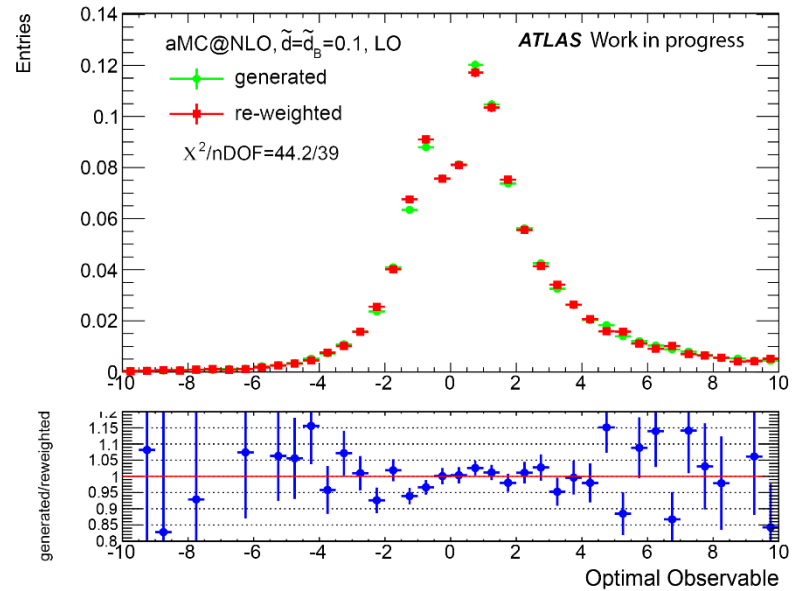
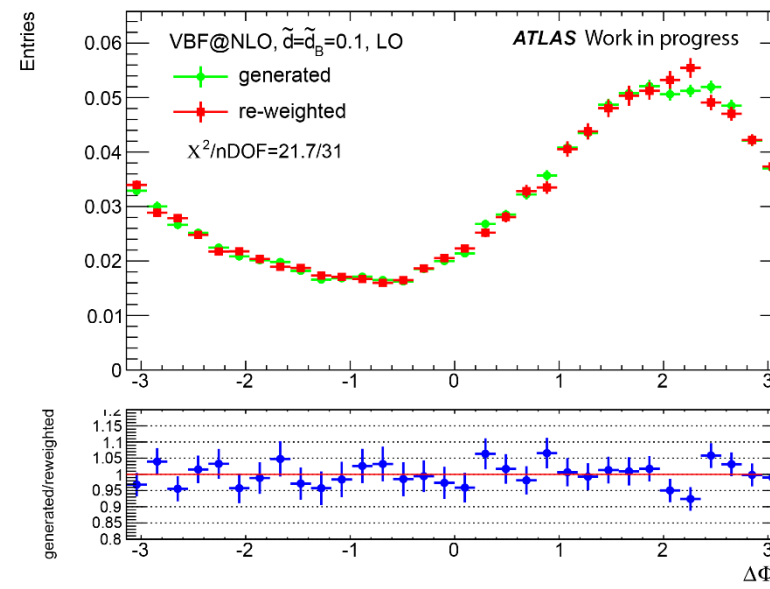
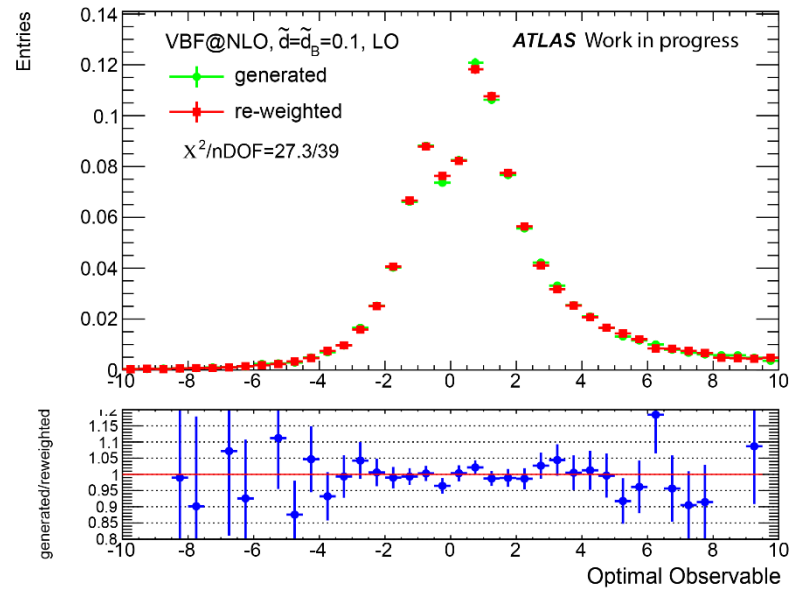
- Si parte dal campione Modello Standard (SM). Per ogni evento SM viene calcolato un peso definito come $w = \frac{|M_{non-SM}^2|}{|M_{SM}^2|}$, calcolato al Leading order
- Il calcolo del peso è basato sulla cinematica finale: p_T dei due (o tre nel caso di NLO) jets nello stato finale, p_T dell'Higgs, e x di Bjorken
- Il campione con eventi SM viene quindi «ripesato» utilizzando i pesi definiti prima

Gli elementi di matrice sono stati calcolati a partire da un codice estratto dal generatore Monte Carlo HAWK

Due sono i generatori Monte Carlo studiati: **VBFNLO** e **Madgraph5_aMC@NLO**.

- Madgraph5_aMC@NLO è importante in particolare perché è l'unico a dare predizioni all'ordine Next-to-Leading (NLO) per gli accoppiamenti anomali dell'Higgs.
- Ho calcolato le equazioni che permettono di passare dalla parametrizzazione usata in VBF@NLO a quella usata in Madgraph5_aMC@NLO e viceversa

1. Leading Order



La parametrizzazione usata da VBF@NLO e da HAWK è la stessa quindi è facile fare un confronto, diversa è la situazione per aMC@NLO

Tagli VBF:

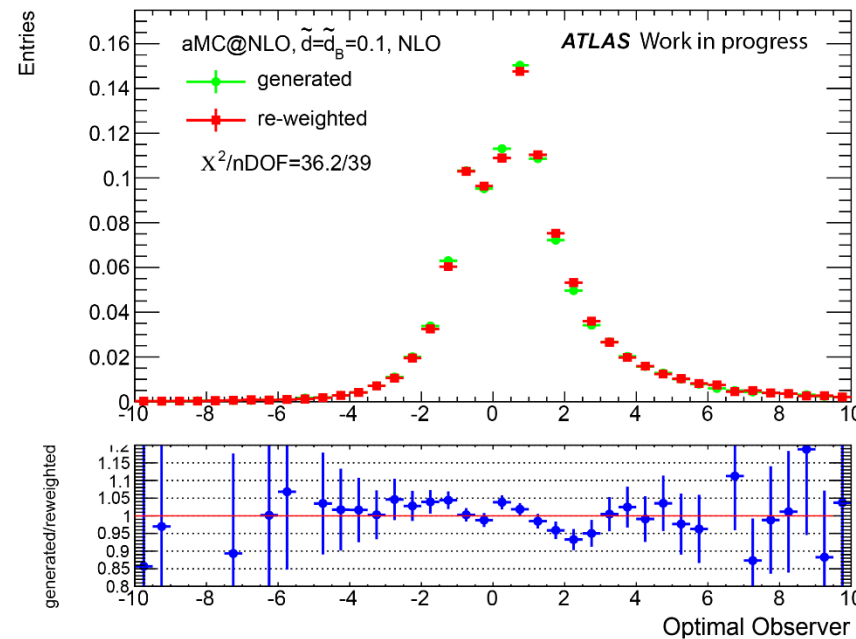
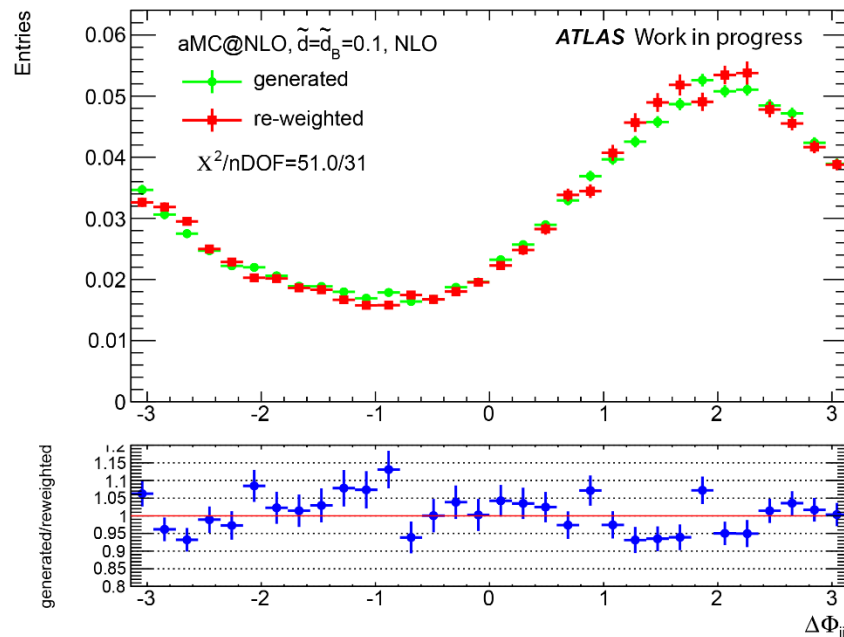
- $p_t \text{ jets} > 25 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 4.5$
- $|\Delta\eta| > 2.8$
- $|\Delta R| > 0.4$
- $M_{j1j2} > 500 \text{ GeV}$

2. Next-to-Leading Order

3 sono i possibili processi a livello partonico per la VBF all'ordine NLO:

- $q q \rightarrow q q H$
- $q g \rightarrow q q \bar{q} H$ (q e \bar{q} possono essere scambiati)
- $q q \rightarrow q q g H$ (q e \bar{q} possono essere scambiati)

HAWK è in grado di calcolarli e questo fornisce una buona approssimazione ad un NLO vero e proprio



Tagli VBF:

- $P_t \text{ jets} > 25 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 4.5$
- $|\Delta\eta| > 2.8$
- $|\Delta R| > 0.4$
- $M_{j1j2} > 500 \text{ GeV}$

I campioni di Madgraph5_aMC@NLO sono stati ottenuti interfacciando un parton shower (PYTHIA8) all'elemento di matrice al NLO

Conclusioni

- Sono stati studiati i generatori Monte Carlo VBFNLO e Madgraph5_aMC@NLO, in particolare di quest'ultimo è stato validato il modello (Higgs Characterization Model) utilizzato in questo lavoro.
- E' stata studiata e validata la procedura di reweighting. Le curve mostrano un buon accordo sia per il LO che per il NLO.
- La tecnica di reweighting è stata utilizzata nell'analisi di CP del bosone di Higgs, nel canale $H \rightarrow \tau$. La sua validazione permette di non introdurre errori sistematici legati a questa tecnica nell'analisi.
- E' necessario estendere la validazione della procedura di reweighting e studiare le sue performance, in particolare visto il crescente interesse verso la fisica oltre il Modello Standard e le Teorie Effettive di Campo.
- In generale i modelli BSM possono essere più complicati ed è utile andare a vedere se il reweighting è in grado di fornire buone predizioni anche in queste situazioni oppure è necessario sviluppare nuovi metodi.

Referenze

- Madgraph5_aMCNLO <http://amcatnlo.web.cern.ch/amcatnlo/>
- Madgraph5_aMCNLO, Higgs characterisation model **Eur.Phys.J. C74 (2014) 1, 2710** , [arXiv:1311.1829](#)
- VBF@NLO <https://www.itp.kit.edu/~vbfnlweb/wiki/doku.php?id=overview>, [arXiv:1404.3940](#)
- HAWK, **Comput.Phys.Commun. 195 (2015) 161-171** [arXiv:1412.5390](#)

BACKUP


Generatori Monte Carlo

VBF@NLO

Sono implementati accoppiamenti anomali per il processo di VBF, seguendo la parametrizzazione presentata nella diapositiva 3.

I parametri rilevanti sono quindi \tilde{d} , \tilde{d}_B

File di eventi (LHE) vengono prodotti solo al Leading Order al Next-to-Leading si hanno solo le sezioni d'urto e le distribuzioni differenziali


$$\left\{ \begin{aligned} s_\alpha k_{A\bar{W}W} &= -2 \frac{e\Lambda}{M_W \sin\theta_W} \tilde{d} \\ s_\alpha k_{AZZ} &= -2 \frac{e\Lambda}{M_W \sin\theta_W} (\tilde{d} \cos^2\theta_W + \tilde{d}_B \sin^2\theta_W) \end{aligned} \right.$$


Madgraph5_aMC@NLO

Sono implementati accoppiamenti anomali per il processo VBF, seguendo la parametrizzazione dell'Higgs characterization model (REF)

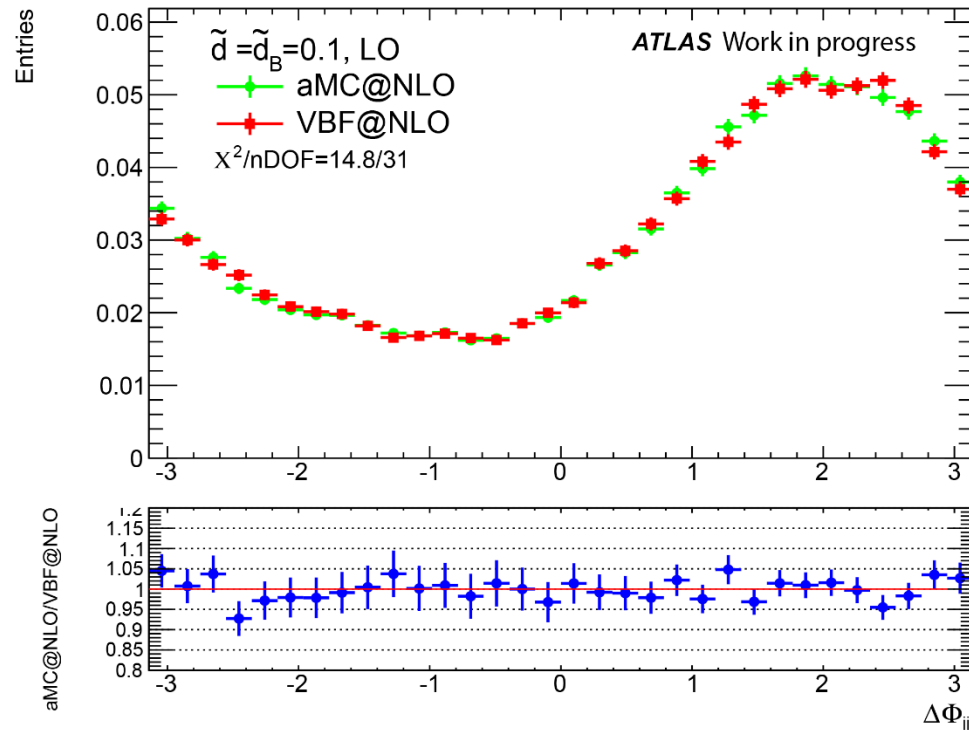
I parametri rilevanti in questo caso sono:

$$k_{SM}, k_{A\bar{W}W}, k_{AZZ}, k_{AZ\gamma}, k_{A\gamma\gamma}, s_\alpha$$

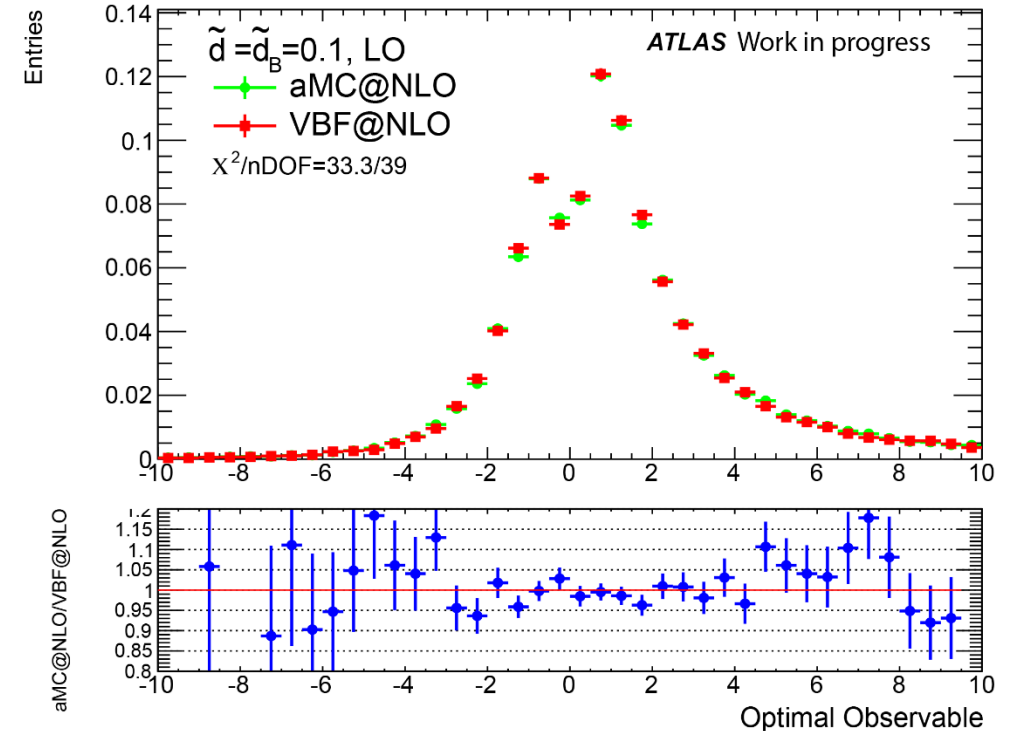
Unico generatore a fornire file di eventi anche per accoppiamenti anomali al Next-To-Leading order


$$\left\{ \begin{aligned} s_\alpha k_{A\gamma\gamma} &= -2 \frac{e}{g_{A\gamma\gamma} M_W \sin\theta_W} (\tilde{d} \sin^2\theta_W + \tilde{d}_B \cos^2\theta_W) \\ s_\alpha k_{AZ\gamma} &= -\frac{e}{g_{AZ\gamma} M_W \sin\theta_W} \sin 2\theta_W (\tilde{d} - \tilde{d}_B) \end{aligned} \right.$$

Buon accordo per le predizioni tra i due generatori



Parametrizzazione usata: $\tilde{d} = \tilde{d}_B = 0.1$



Tagli VBF:

- Pt jets > 25 GeV
- $|\eta| < 4.5$
- $|\Delta\eta| > 2.8$
- $|\Delta R| > 0.4$
- $M_{j_1 j_2} > 500 \text{ GeV}$