

106° CONGRESSO NAZIONALE SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

14-18 settembre 2020

Studi di produzione di coppie di bosoni di Higgs in diversi canali di decadimento usando i dati del Run-2 con il rivelatore ATLAS

Valerio D'Amico



PhD Università & INFN Roma Tre





106° Congresso Nazionale Società Italiana di Fisica

14-18 settembre 2020



Produzione di coppie di Higgs

Nel Modello Standard la produzione di coppie di bosoni di Higgs è prevista con una sezione d'urto molto piccola, ma permette di testare il valore dell'autoaccoppiamento dell'Higgs $\kappa_{\lambda}(=\lambda_3 / \lambda_{3,SM})$

Dal potenziale di Higgs:

Espansione a basse energie

attorno al minimo

 $V = -\mu^2 \Phi^{\dagger} \Phi + \lambda (\Phi^{\dagger} \Phi)^2$ $V \to -\frac{M_H^2}{2} H^2 + \lambda_3 H^3 + \lambda_4 H^4$ $\longrightarrow \lambda_3 = \frac{M_H^2}{2w}$

Canali attualmente studiati in ATLAS:

 $b\overline{b}b\overline{b}$

ο bbττ

bbyy

bbVV (*WW*/*ZZ*) con 0 o 1 leptone

• Multilepton

bbll: *bbZZ/WW/\tau\tau* con 2 leptoni



Alcuni canali sono già stati pubblicati da ATLAS analizzando dati corrispondenti a 36.1 *f b⁻¹: bbbb, bbWW, bbττ, bbγγ, WWWW, WWγγ*

 Di-Higgs decay BR asuming SM Higgs BR and m_H = 125 GeV
 Published
 O.4%
 O.3%
 O.3%
 O.4%
 O.3%
 O.3%
 O.4%
 O.3%
 O.3%
 O.4%
 O.4%
 O.3%
 O.4%
 O.4%

Risultati pubblici

[Physics Letters B 800 (2020) 135103]

Dei sei canali analizzati con i dati parziali del Run2 di ATLAS, i 3 canali più sensibili sono stati combinati per ottenere un miglior limite sulla misura della sezione d'urto di produzione HH:

E' stato inoltre calcolato il valore del parametro κ_{λ} , ponendo un limite al 95% CL pari a -5.0 < κ_{λ} < 12.1

	Allowed κ_{λ} interval at 95% CL					
Final state	Obs.	Exp.	Exp. stat.			
$bar{b}bar{b}$	-10.9 - 20.1	-11.6 - 18.8	-9.8 - 16.3			
$bar{b} au^+ au^-$	-7.4 — 15.7	-8.9 - 16.8	-7.8 - 15.5			
$bar{b}\gamma\gamma$	-8.1 - 13.1	-8.1 - 13.1	-7.9 - 12.9			
Combination	-5.0 - 12.0	-5.8 - 12.0	-5.3 - 11.5			



E' stata effettuata anche una combinazione dei tre canali HH con le maggiori analisi di produzione di un singolo Higgs nei canali di decadimento $\gamma\gamma$, ZZ^* , WW^* , $\tau^+\tau^-$ e $b\bar{b}$

Le analisi di Higgs singolo sono infatti sensibili all'auto-accoppiamento dell'Higgs tramite diagrammi di ordine superiore al primo, e permettono di incrementare la statistica a disposizione

Si è ottenuto così il migliore limite su κ_{λ} pari a –2.3 < κ_{λ} < 10.3



[ATLAS-CONF-2019-049]



H

g 0000

g Q Q Q Q Q

Risultati pubblici

Due analisi con i dati completi del Run2 sono già pubbliche.

- > $ggF HH \rightarrow bbll (139 fb^{-1})$:
 - Selezione degli eventi tramite multi-class Deep Neural Network per distinguere il segnale dai fondi principali: Top, $Z \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$, $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$
 - Combinazione dei guattro output
 - Risultato consistente con lo Standard Model: upper limit osservato (aspettato) su $\sigma_{HH} = 40 (29) \times SM$

> VBF $HH \rightarrow b\overline{b}b\overline{b}$ (126 fb^{-1}):

- Sezione d'urto Standard Model: $\sigma_{VBF} = 1.726 f b_{-0.04\%}^{+0.03\%} (scale) \pm 2.1\% (\alpha_s)$
- Analisi sensibile all'accoppiamento c_{2V}
- La selezione dei jet da VBF sono aggiunti alla selezione dell'analisi ggF
- La massa invariante m_{4b} è ricostruita ed usata per calcolare la sezione d'urto



Nessuna deviazione significativa osservata.

ATLAS

SR. SF+DF

Primo limite in assoluto sul coupling VVHH: $c_{2V} < -1.02 \land c_{2V} > 2.71$ regione esclusa al 95%CL (limite aspettato $c_{2V} < -1.09 \land c_{2V} > 2.82$)

Upper limit osservato (aspettato) su $\sigma_{HH} = 1600 (1000^{+400}_{-300}) fb$



Canale *bbWW**** con stato finale a 1 leptone**

- Seconda maggiore Branching Ratio: ~ 25%, $\sigma(HH \rightarrow bbWW^* \rightarrow bbqql\nu) \sim 2.5 fb$
- Lo stato finale a singolo leptone riduce il fondo dovuto al multijet
- Fondo irriducibile di processi $t\bar{t} \rightarrow bbqqlv$
- Vincoli sulla massa invariante ($m_{WW} e m_{bb}$) e variabili angolari utili per discriminare segnale e fondo

Analisi cut-based con $36 f b^{-1}$ pubblicata in

Ottenuta una <u>sensibilità molto bassa</u> rispetto agli altri canali, dovuta ai tagli in massa invariante troppo stringenti

[JHEP 04 (2019) 092]



 $\sigma(pp \rightarrow HH) \cdot B(HH \rightarrow b\bar{b}WW^*) < 2.5 \ pb @95\% \ CL \rightarrow \sim 300 \times SM$

- * <u>Nuova analisi in corso</u> con l'intero dataset del Run-2 pari a 139 fb^{-1} di luminosità integrata
- Modificata selezione degli oggetti e aggiunti nuovi trigger
- Selezione degli eventi mediante l'utilizzo di multi-class Deep Neural Networks e di nuove variabili discriminanti
- Stima del fondo dovuto a fakes da processi multijet migliorato

tt

Selezione eventi

Selezione degli oggetti:

Oggetto	$p_T [GeV]$	$ \eta $	Dettagli
Elettroni	> 10	< 2.5	Isolamento richiesto sulle tracce associate nel tracker
Muoni	> 10	< 2.7	Isolamento richiesto sulle tracce associate nel tracker
Jets	> 20	< 2.5	Ricostruiti con algoritmo di Particle Flow \rightarrow migliore risoluzione

Richieste nello stato finale per selezione eventi:

- > Evento selezionato con trigger di singolo leptone o trigger MET
- > Esattamente un leptone avente match con il trigger
- > Esattamente 2 jet b-taggati con algoritmo DNN ed efficienza del 77%
- Almeno 2 jet non b-taggati
- > Veto per eventi aventi un tau ricostruito

Gli eventi selezionati in questo modo sono poi utilizzati per addestrare una *multi-class Deep Neural Network* per una ulteriore classificazione degli eventi e la costruzione delle regioni di segnale e di controllo.

- 5 layer nascosti con funzione di attivazione ReLu.
- Layer di output con 3 nodi (uno per ogni classe) con funzione di attivazione Softmax
- Applicato un *Dropout* (con rate 0.5) tra ogni layer per evitare l'overtraining



Risultati DNN

Le 36 variabili di input del classificatore sono:



La funzione di attivazione *softmax* sul layer di output permette di ottenere le distribuzioni di probabilità per la classificazione dell'evento nelle 3 classi: p_{HH} , p_{ttbar} , p_{Wjets}



 $m, \Delta R, \Delta \phi$ del sistema bb

 $\Delta R_{min}(l,b)$, $\Delta R_{max}(l,b)$

 $\Delta R_{min}(l, j)$, $\Delta R_{max}(l, j)$

 p_T, η, ϕ dei due b – jets

Numero di jet nell'evento

 $m_T(WW)$

•

•

•

٠

٠

 10^{-6}

-15

-10

 p_T, η, ϕ dei tre jets piu' alti in p_T

 $\Delta \phi_{min}(E_T^{miss}, b), \Delta \phi_{max}(E_T^{miss}, b)$

Higgsness, Topness [ATL-PHYS-PUB-2019-040]

ATLAS Work in Progress

dHH

-5

5

7

10

 m, p_T, η, ϕ del leptone

 E_T^{miss} , $\phi(E_T^{miss})$

 $m_T(l,\nu)$, $\Delta\phi(l,\nu)$

- *dHHTopnessVR* : $d_{HH} > -3$, $Topness < 10 \rightarrow$ regione di validazione
- **dHHSR** : $d_{HH} > -3$, $Topness > 10 \rightarrow$ regione di segnale con 99% degli eventi di segnale per fit finale

Stima e normalizzazione dei fondi

I fondi principali dell'analisi sono $t\bar{t}$, W + jets, single - top e il fondo da *multijet*.

- Tutti i processi di fondo sono stimati con simulazioni Monte Carlo
- Il fondo multijet è stimato con tecniche data-driven a causa della complessità nella simulazione di questi processi
- Normalizzazione dei fondi $t\bar{t}$, W + jets e multijet tramite fit simultaneo sulle regioni di controllo (TopCR, WjetsCR, dHHCR)



Metodo ABCD per una stima preliminare del contributo dei fakes con regioni definite nello spazio (MET, d0sig_{leptone})

- Nuovo metodo in corso di sviluppo basato sull'isolamento dei leptoni e effettuato su una regione con 2 leptoni (fake enriched)
- Aspettata una migliore incertezza statistica e una stima più accurata del contributo del fondo *multijet*

Sensibilità aspettata

Sensibilità valutata con un Maximum Likelihood fit sugli eventi Monte Carlo aspettati, mantenendo oscurati i dati nella regione di segnale

- Stima effettuata con valori standard delle sistematiche in attesa della loro valutazione completa
- Utilizzata la distribuzione di dHH per un fit di shape nella regione di segnale



ATLAS Work in Progress

-2σ	-1σ	Expected μ^*	$+1\sigma$	$+2\sigma$
13.5	18.2	25.2	35.1	47.1

- □ La <u>sensibilità aspettata</u> sulla signal strenght μ^* è <u>circa 10 volte migliore</u> di quella della precedente analisi (300×*SM*)
- □ La statistica quadruplicata porta un miglioramento di un fattore 2
- □ Il restante fattore 5 è portato dalla riprogettazione ottimizzata
 - dell'analisi e dall'utilizzo delle tecniche di Machine Learning

I perfezionamenti attesi nella stima del fondo multijet e dei tool di analisi potrebbero migliorare ancora la sensibilità

Conclusioni

- In corso in ATLAS diverse analisi per la ricerca di processi di produzione di coppie di bosoni di Higgs, in diversi canali di decadimento, utilizzando l'intero dataset del Run2 (139 fb⁻¹)
- > Combinazione dei risultati a 36.1 fb^{-1} e combinazione con analisi di singolo Higgs sono state effettuate e hanno portato ai migliori limiti sul termine di auto-accoppiamento dell'Higgs κ_{λ}
- > Le analisi $ggF HH \rightarrow bbll \in VBF HH \rightarrow b\overline{b}b\overline{b}$ mostrano interessanti miglioramenti e primi nuovi limiti su termini di accoppiamento dell'Higgs (c_{2V}):

Analisi *bbll*: $\sigma_{HH} = 40 (29) \times SM$ (analisi *bbll*)

Analisi VBF 4b: $c_{2V} < -1.02 \wedge c_{2V} > 2.71$ regione esclusa al 95%CL

Il canale $bbWW^*$ con 1 leptone mostra un grande miglioramento, con una sensibilità aspettata ~ $25 \times SM$. Circa 10 volte maggiore della precedente misura ($300 \times SM$) ed è in corso di ottimizzazione e finalizzazione.

Nuova selezione degli oggetti

Nuovo approccio dell'analisi tramite l'utilizzo di multi-class Deep Neural Networks nella selezione degli eventi

□ Stima dei processi di fondo migliorata e in corso di perfezionamento ulteriore

□ Valutazione delle incertezze sistematiche iniziata per portare a conclusione l'analisi