

Studio di un algoritmo di fit cinematico per la ricerca di coppie di bosoni di Higgs nel canale $b\bar{b}\gamma\gamma$ ad ATLAS

Romano Orlandini^[1]

In collaborazione con B. Di Micco^[1], F. Montereali^[1]

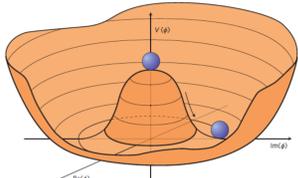
^[1]Università degli studi & INFN Roma Tre,



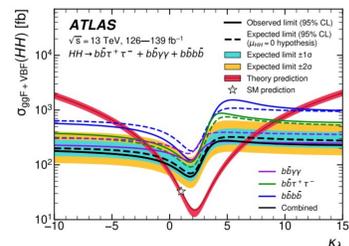
1. Introduzione

La misura dei termini di auto-accoppiamento del campo di Higgs è uno step fondamentale per la determinazione del suo **potenziale**.

$$V(\phi^\dagger\phi) = \mu^2\phi^\dagger\phi + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2 \rightarrow \frac{1}{2}m_H^2 H^2 + \lambda_3 H^3 + \frac{\lambda_4}{4} H^4$$



Tra questi, l'accoppiamento **tri-lineare** (λ_3) è ad oggi il termine più accessibile in quanto i suoi effetti influenzano direttamente i diagrammi di produzioni di coppie di bosoni di Higgs in interazioni protone-protone.



Tuttavia, questi processi sono molto rari e produzioni di coppie **HH** non sono ancora mai state osservate all'attuale luminosità di LHC. Dunque **nessun termine di auto-accoppiamento** è stato ancor mai **misurato**.

Di conseguenza, una delle attuali priorità di questi studi è lo sviluppo di metodi di analisi dati sempre più performanti.

Nel canale $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, uno tra i metodi più promettenti è il **Fit Cinematico**, un algoritmo potenzialmente in grado di migliorare sensibilmente la risoluzione di osservabili adroniche e migliorare così la sensibilità dell'esperimento.

Upper limit al 95% dell'accoppiamento anomalo ($\kappa_\lambda = \lambda_3/\lambda_3^{SM}$) ottenuto combinando più canali di decadimento^[1]. Deviazioni da 1 indicano fisica BSM.

2. Canale di decadimento

Il termine di auto-accoppiamento può essere misurato osservando vari canali di decadimento. Tra i più sensibili vi sono i canali $b\bar{b}b\bar{b}$, $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ e $b\bar{b}\gamma\gamma$ ma ognuno di questi ha comunque dei **pro e contro** da tenere in considerazione.

- HH → bbb̄b̄:**
 - ✓ Maggiore BR (34%)
 - ✗ Fondo multi-jet
- HH → bbb̄τ+τ-:**
 - ✓ Buon compromesso tra BR e capacità di ricostruzione
 - BR modesta (7.3%)
 - ✗ Importanti contributi di fondi da processi EW e di quark top
- HH → bbb̄γγ:**
 - ✓ Stato finale relativamente pulito
 - ✓ Eccellente risoluzione γγ
 - ✗ Bassa BR (0.26%)

	bb	WW	ττ	ZZ	γγ
bb	34%				
WW	25%	4.6%			
ττ	7.3%	2.7%	0.39%		
ZZ	3.1%	1.1%	0.33%	0.069%	
γγ	0.26%	0.10%	0.028%	0.012%	0.0005%

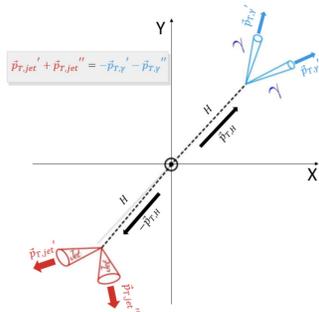
Gli studi qui proposti sono riferiti al canale $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, uno dei canali più promettenti proprio per via dell'ottima risoluzione della sua componente EM la quale lo rende un candidato ideale per l'applicazione di un **Fit Cinematico**.

3. Fit Cinematico

3.1 Basi concettuali

In generale, il Fit Cinematico è un algoritmo di analisi che permette di migliorare la risoluzione di particolari osservabili fisiche di un evento, vincolandole secondo note relazioni cinematiche del decadimento.

Nel canale $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, possiamo chiaramente sfruttare informazioni come la conservazione dell'impulso trasverso totale dell'evento e la massa dell'Higgs per correggere la componente adronica del decadimento (i **b-jets**), migliorandone la notoriamente cattiva risoluzione energetica, bilanciandola con la componente fotonica.



3.2 Implementazione

In pratica, il Fit Cinematico viene applicato tramite la minimizzazione di una **NNL** (Negative Log Likelihood) costruita ad hoc, i cui parametri liberi sono proprio le osservabili dell'evento.

$$-2 \log(\mathcal{L}) = \sum_{j=\text{jets}} \left[-2 \log \left[f_E \left(\frac{E_{fit,j} - E_{Event,j}}{E_{fit,j}} \right) \right] - 2 \log \left[f_{p_T} \left(\frac{p_{T,fit,j} - p_{T,Event,j}}{p_{T,fit,j}} \right) \right] \right] + \sum_{j=\text{photons}} \left[\left(\frac{E_{fit,j} - E_{Event,j}}{\sigma_E} \right)^2 \right] - 2 \lambda_{p_T} \log[f_2(p_T^{HH})] - 2 \lambda_{p_T} \log[f_2(p_T^{\gamma\gamma})] - \lambda_m (m_{bb}^{fit} - m_H)^2$$

La likelihood presenta due tipologie di componenti:

➤ **Funzioni di trasferimento:**

- **Jet** (risoluzioni di E e p_T) → $f_{E/p_T} = N \cdot (\tan^{-1}(a(x-m)) + \frac{\pi}{2})^\alpha \cdot (e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}) \cdot (\tan^{-1}(-b(x-n)) + \frac{\pi}{2})^\beta$
- **Fotoni** (risoluzione E)
- **Vincoli:**
- p_T **totale** (distribuzioni per evento) → $f_2 = N \cdot (\tan^{-1}(a(x-m)) + \frac{\pi}{2})^\alpha (\tan^{-1}(-b(x-n)) + \frac{\pi}{2})^\beta$
- **Massa invariante di-jet** (fissata alla massa dell'Higgs)

4. Funzioni di Trasferimento

Le **Funzioni di Trasferimento** di energia (E) e impulso trasverso (p_T) dei jet sono ottenute tramite studi di simulazioni montecarlo di segnale **ggF**

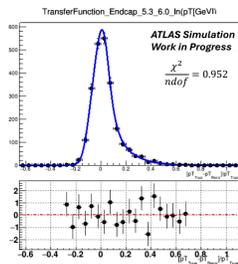
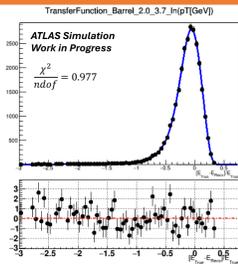
Le PDF desiderate sono ottenute fittando con funzioni opportune le distribuzioni di $\frac{E_{Truth} - E_{Reco}}{E_{Truth}}$ e $\frac{p_{T,Truth} - p_{T,Reco}}{p_{T,Truth}}$ in 4 specifiche regioni di η (Barrel, Crack, Endcap e NoTrack) e 6 range di $\log(p_T)$ (6 intervalli compresi in $\log(p_T) \in [2, 6]$ contenenti approssimativamente lo stesso numero di eventi).

Questo produce un totale di 24 distribuzioni che sono state fittate con una appropriata combinazione di **'funzioni gradino'**:

$$TaOGaTa = N \cdot (\tan^{-1}(a(x-m)) + \frac{\pi}{2})^\alpha \cdot (e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}) \cdot (\tan^{-1}(-b(x-n)) + \frac{\pi}{2})^\beta$$



La funzione ad hoc è giustificata dalla necessità di avere una funzione **differenziabile** (per minimizzare facilmente la **NNL**) ma anche **versatile** (vista la grande variazione delle distribuzioni a diverse scale di energia).



Esempi di funzioni di trasferimento fittate diverse scale e zone.

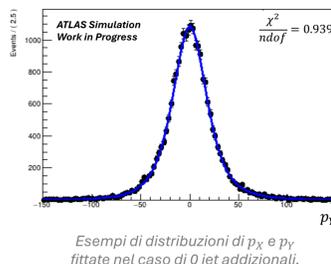
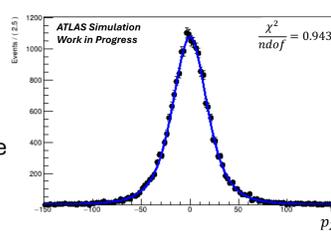
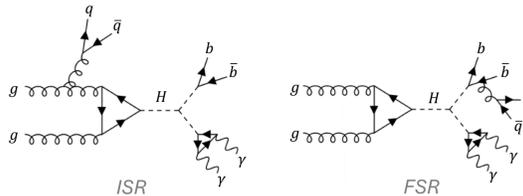
5. Vincoli sugli impulsi

I **vincoli** in p_T sono ottenuti in maniera simile ma separando i casi con diversi numeri di **'jet addizionali'** (l'analisi non ammette più di 5 jet totali nell'evento per tenere sotto controllo il background **ttH**).

Anche la funzione di fit usata in questo caso è una combinazione di funzioni a gradino come la precedente anche se un po' più semplice.

$$TaOTa = N \cdot (\tan^{-1}(a(x-m)) + \frac{\pi}{2})^\alpha \cdot (\tan^{-1}(-b(x-n)) + \frac{\pi}{2})^\beta$$

Jet addizionali: jet extra rispetto a quelli richiesti dal segnale minimo (2 b-jet) probabilmente dovuti a fenomeni di radiazione di stato iniziale/finale.



Esempi di distribuzioni di p_x e p_y fittate nel caso di 0 jet addizionali.

6. Risultati

Le performance dell'algoritmo sono valutate su un campione di segnale montecarlo $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ prodotto per processo di **ggF** con $\kappa_\lambda = 1$, comparando risoluzioni di osservabili particolarmente utili nella selezione del segnale (m_{bb} e $m_{bb\gamma\gamma}^*$), ottenute applicando: Fit Cinematico (**KF**), Correzioni di calibratura dei jet (**BCal**^[2]) o nessuna correzione (**NoCorr**).

Per massimizzare l'impatto sulle risoluzioni di m_{bb} e $m_{bb\gamma\gamma}^*$, sono stati in realtà applicati **due Fit Cinematici distinti**.

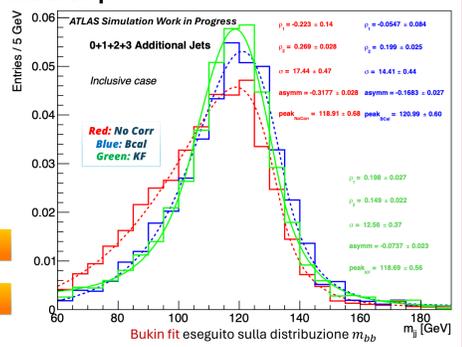
$$m_{bb\gamma\gamma}^* = m_{bb\gamma\gamma} - m_{bb} - m_{\gamma\gamma} - 250 \text{ GeV}$$

Fit Cinematico₁

- Sono applicati vincoli sul p_T totale:
- Nessun vincolo sulla massa ($\lambda_m = 0$)
- Il fattore di intensità del vincolo di impulso (λ_{p_T}) non è un parametro del fit ma è invece fissato al valore relativo alla migliore risoluzione in $m_{bb} \rightarrow \lambda_{p_T} = 3.05$

✓ σ_{KF} migliora rispetto a σ_{BCal} del **12.83%**

✓ σ_{KF} migliora rispetto a σ_{NoCorr} del **27.98%**



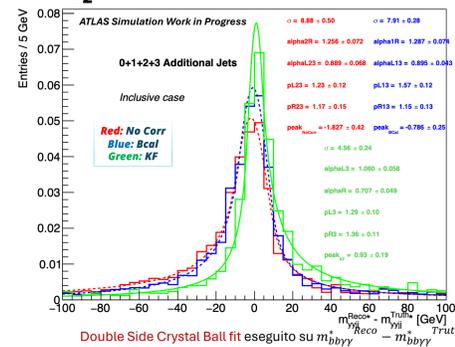
Entrambi i vincoli sono applicati:

- Stessa configurazione in p_T ($\lambda_{p_T} = 3.05$)
- Il fattore di intensità del vincolo di massa è fissato dopo uno scan al valore relativo alla migliore risoluzione in $m_{bb\gamma\gamma}^{Reco} - m_{bb\gamma\gamma}^{Truth}$ → $\lambda_m = 0.1$

✓ σ_{KF} migliora rispetto a σ_{BCal} del **42.35%**

✓ σ_{KF} migliora rispetto a σ_{NoCorr} del **48.65%**

Fit Cinematico₂



7. Conclusioni

L'attuale studio ha mostrato come un algoritmo di fit cinematico sia in grado di apportare significativi miglioramenti all'analisi $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ tra cui:

- Un miglioramento di ~ 49% sulla risoluzione di $m_{bb\gamma\gamma}^*$ (confronto Truth-Reco)
- Un miglioramento di ~ 28% sulla risoluzione di m_{bb}

Referenze

- [1] ATLAS Collaboration, "Combination of searches for non-resonant and resonant Higgs boson pair production in the $b\bar{b}\gamma\gamma$, $b\bar{b}\tau^+\tau^-$ and $b\bar{b}b\bar{b}$ decay channels using pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector", ATLAS-CONF-2021-052, URL: <https://cds.cern.ch/record/2786865>
- [2] M. Belfkir, "Search for Higgs pair production at LHC collider (CERN): The first measurement for Higgs potential and search for new physics", CERN-THESIS-2021-221



IFPAE 2024
Frontiera Energia
Frontiera Intelligenza
Cosmologia ed Astrofisica
Nuove Tecnologie
Firenze, 3-5 Aprile 2024
Istituto degli Astrofisici, Piazza S.S. Annunziata

Università degli studi & INFN Roma Tre

