



Studi di produzione di coppie di bosoni di Higgs a LHC

Federico Montereali

Università & INFN Roma Tre

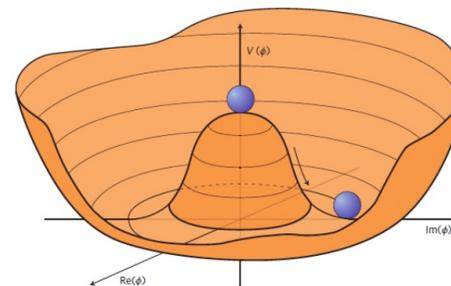


IFAE 2023, Catania, 12-14 Aprile 2023

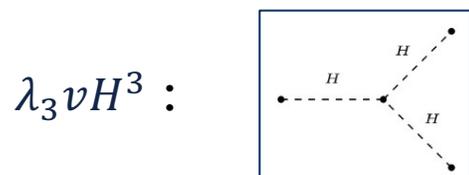
Perché studiare coppie di bosoni di Higgs?

- *Auto-accoppiamento* del bosone di Higgs non ancora misurato
- Studio del *potenziale* di Higgs
- Deviazioni dal Modello Standard (SM) possono indicare *nuova fisica*

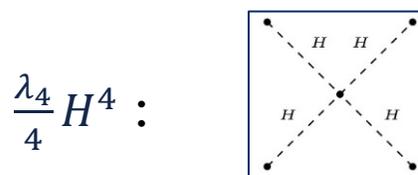
$$V(\phi^\dagger\phi) = \mu^2\phi^\dagger\phi + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2 \supset \frac{1}{2}m_H^2 H^2 + \lambda_3 v H^3 + \frac{\lambda_4}{4} H^4$$



- $m_H = 125 \text{ GeV}$
- $v \sim 246 \text{ GeV}$

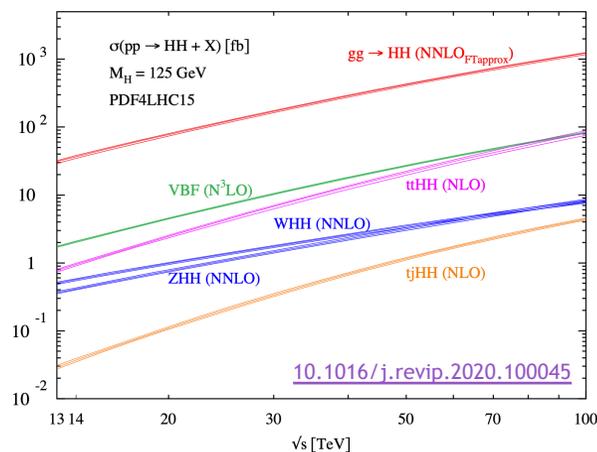


Autoaccoppiamento trilineare λ_3
Accessibile tramite coppia HH



Autoaccoppiamento quartico λ_4
Ancora non accessibile (sfida anche per HL-LHC)

Modello Standard predice

$$\lambda_3 = \frac{m_H^2}{2v^2} \sim 0.13, \quad \lambda_3 = \lambda_4$$


Fusione gluone-gluone (ggF) ~88%
Fusione di bosoni vettori (VBF) ~7%
 Produzione associata a W,Z (VHH) ~4%
 Produzione associata ttHH ~1%

Studio della deviazione dal valore SM predetto

$$\kappa_\lambda = \frac{\lambda_3}{\lambda_3^{SM}}$$

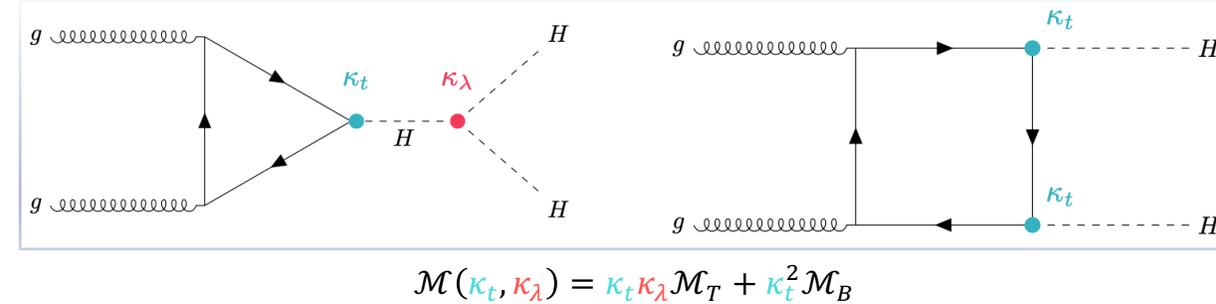
tramite analisi della produzione di coppia HH

Produzione di coppie di Higgs a LHC

Produzione non risonante di coppie di Higgs

➤ Fusione gluone-gluone (ggF) (31 fb a 13 TeV per $m_H = 125$ GeV)

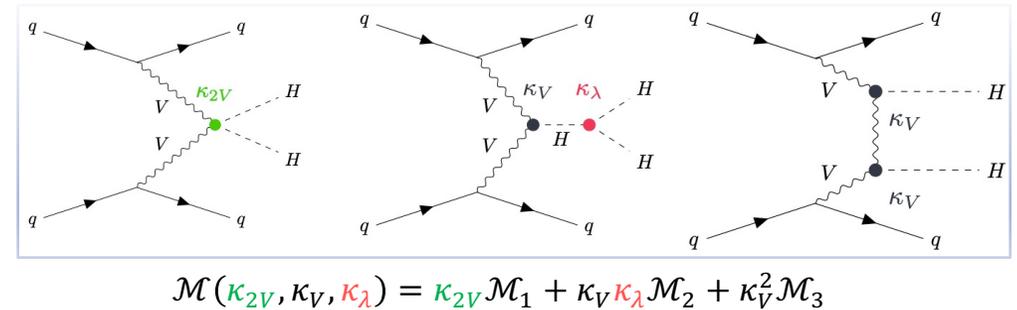
- SM σ_{HH}^{ggF} molto piccola a causa dell'interferenza distruttiva
 $\sim 1000x$ più piccola del singolo Higgs ($\sigma_{ggF}^{SM}(H) = 48$ pb)
- La sezione d'urto è un polinomiale del secondo ordine in κ_t e κ_λ
 $\sigma(\kappa_t, \kappa_\lambda) \sim \kappa_t^4 |\mathcal{M}_T|^2 + \kappa_t^3 \kappa_\lambda (\mathcal{M}_T \mathcal{M}_B + \mathcal{M}_B \mathcal{M}_T) + \kappa_\lambda^2 \kappa_t^2 |\mathcal{M}_B|^2$



➤ Fusione di vettori bosoni (VBF) (1.7 fb a 13 TeV per $m_H = 125$ GeV)

- Accesso diretto all'accoppiamento con due bosoni vettori κ_{2V}
- La sezione d'urto è una polinomiale del secondo ordine in κ_λ e κ_{2V}

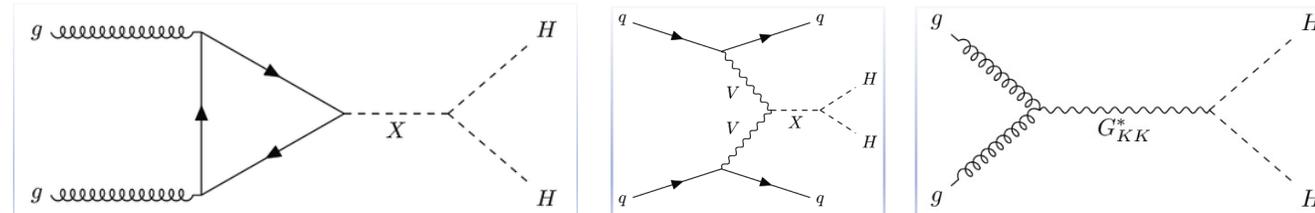
$$\sigma(\kappa_{2V}, \kappa_V, \kappa_\lambda) \sim \kappa_{2V}^2 |\mathcal{M}_1|^2 + \kappa_V^4 |\mathcal{M}_2|^2 + \kappa_V^2 \kappa_\lambda^2 |\mathcal{M}_3|^2 + \kappa_{2V} \kappa_V^2 |\mathcal{M}_1 \mathcal{M}_2 + \mathcal{M}_2 \mathcal{M}_1| + \kappa_{2V} \kappa_V \kappa_\lambda |\mathcal{M}_1 \mathcal{M}_3 + \mathcal{M}_3 \mathcal{M}_1| + \kappa_V^3 \kappa_\lambda |\mathcal{M}_2 \mathcal{M}_3 + \mathcal{M}_3 \mathcal{M}_2|$$



Produzione risonante di coppie di Higgs

Molte teorie Oltre il Modello Standard prevedono nuove particelle (risonanze spin-0, spin-2, gravitoni...) che possono decadere in una coppia di di bosoni di Higgs

- modello a 2 doppietti di Higgs, di Higgs composto, con extradimensioni...



Canali di decadimento HH

Tutti i canali di decadimento sono un compromesso tra Branching Ratio (BR) e purezza del segnale (S/B) dello stato finale

→ Non c'è un singolo canale d'oro (*golden channel*)

	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%

Complementarità delle ricerche in diversi canali di decadimento
 ↓
 sensibilità complementare alle variazioni degli accoppiamenti

➤ Ulteriori canali analizzati da ATLAS e CMS con i dati del Run-2 completo:

- ✓ ATLAS: $HH \rightarrow bbWW$ ([arXiv:1908.06765](https://arxiv.org/abs/1908.06765))
- ✓ CMS: $HH \rightarrow bbWW$ ([CMS-PAS-HIG-21-005](https://arxiv.org/abs/2101.005)), $HH \rightarrow WW\gamma\gamma$ ([CMS-PAS-HIG-21-014](https://arxiv.org/abs/2101.014)), $HH \rightarrow bbZZ$ ([arXiv:2206.10657](https://arxiv.org/abs/2206.10657)), $HH \rightarrow WWWW, WW\tau\tau, \tau\tau\tau$ (multileptone) ([arXiv:2206.10268](https://arxiv.org/abs/2206.10268))

Focus sui risultati delle analisi dei seguenti processi:

[Ottenuti con i dati del Run-2 completo raccolti dai rivelatori [ATLAS](#) e [CMS](#)]

1. $HH \rightarrow bbbb$ (più sensibile per produzione VBF e variazioni di κ_{2V}):

- ✓ BR più alto (34%)
- x Complicato per fondo multi-jet

2. $HH \rightarrow bb\tau\tau$ (più sensibile per κ_λ e κ_{2V} vicino a SM):

- BR modesto (7.3%)
- ✓ Buon compromesso BR/ricostruzione stato finale
- x Fondo Elettrodebole e quark-t mimano segnale

3. $HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ (più sensibile per grandi variazioni di κ_λ):

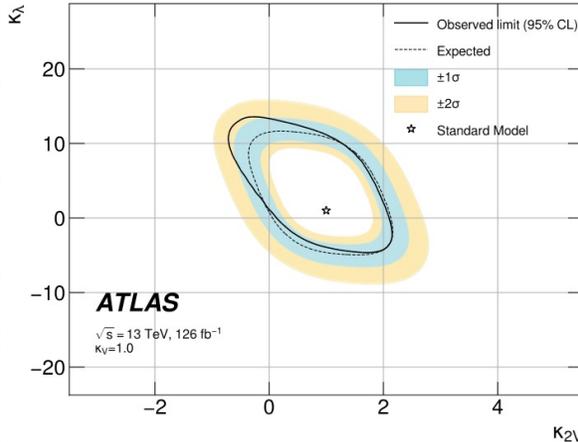
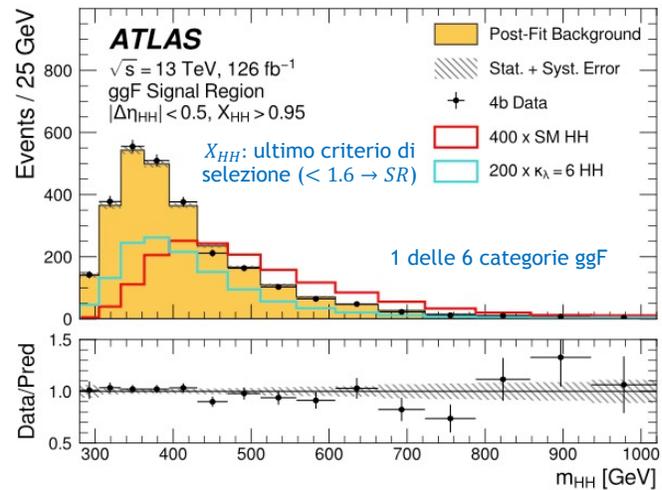
- x BR piuttosto limitato (0.26%)
- ✓ Stato finale molto pulito
- ✓ Eccellente risoluzione massa $\gamma\gamma$

Processo $HH \rightarrow bbbb$

- Selezione di eventi con 4 jet b-tagati (anti-kt, $R=0.4$, *DL1r* - ATLAS, *DeepJet* - CMS)
- Fondo: Multi-jet, tt stimato dai dati (*NN-ATLAS*, $RS_{(pesata\ con\ RC)}\ 3b \rightarrow 4b$ -CMS)

ATLAS [arXiv:2301.03212](https://arxiv.org/abs/2301.03212)

- ▶ Coppie di jet: la più alta in p_T ha la più piccola separazione ΔR ($\rightarrow 90\%$ efficienza accoppiamento $H \rightarrow bb$)
- ▶ m_{HH} usata come *variabile discriminante* (categ: 6 ggF, 2 VBF)

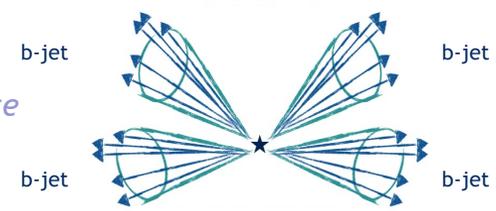


Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL :

- $\sigma/\sigma_{SM} : 5.4$ (8.1)
- $-3.9 < \kappa_\lambda < 11.1$ ($-4.6 < \kappa_\lambda < 10.8$)
- $-0.03 < \kappa_{2V} < 2.11$ ($-0.05 < \kappa_{2V} < 2.12$)

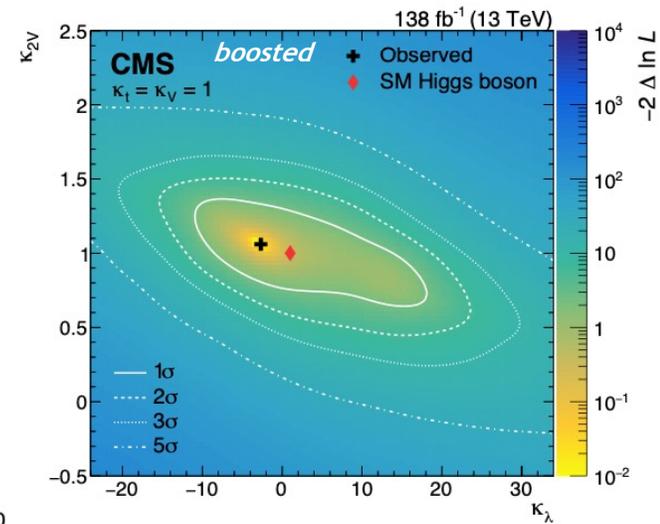
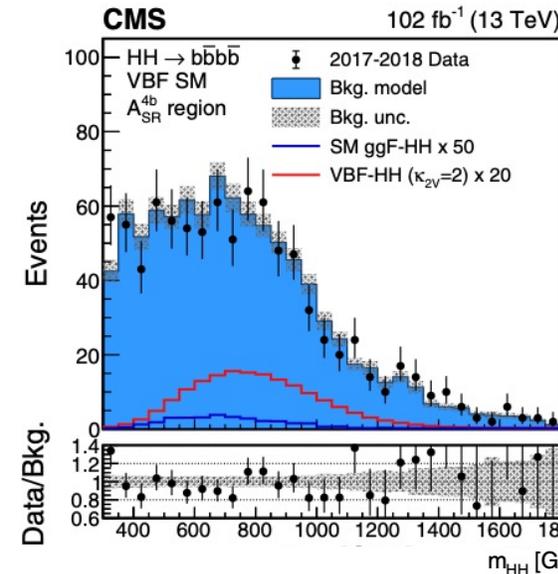
Analisi migliorata di un fattore > 2 rispetto alla precedente a 36.1 fb^{-1} (¹[JHEP 01 \(2019\) 030](#), ²[PRB 800 \(2020\) 135103](#))

Produzione non risonante (ggF+VBF)



CMS [Phys. Rev. Lett. 129,081802](https://arxiv.org/abs/2205.06667)

- ▶ BDT per migliorare purezza delle categorie (2 ggF, 2 VBF)
- ▶ Variabili discriminanti S/F: BDT output (ggF) e m_{HH} (VBF)
- *Boosted* ($\Delta R = 0.8$ jet con $p_T > 300\text{ GeV}$, *ParticleNet*) [arXiv:2205.06667](https://arxiv.org/abs/2205.06667)



Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 3.9$ (7.8) (9.9 (5.1) Boosted)
- $-2.3 < \kappa_\lambda < 9.4$ ($-5.0 < \kappa_\lambda < 12.0$)
- $0.62 < \kappa_{2V} < 1.41$ ($0.66 < \kappa_{2V} < 1.37$) (Boosted)

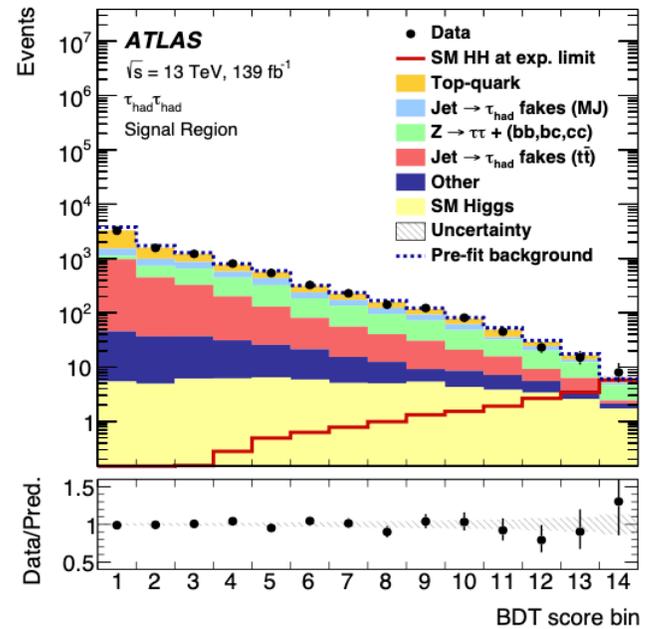
limite più stringente su κ_{2V} a LHC ($\kappa_{2V} = 0$ escluso a 6.3σ)

Processo $HH \rightarrow bb\tau\tau$

➤ Selezione di eventi con 2 jet b-tagati e 2 τ (τ_{had} +leptone carica opposta (e, μ, τ))

ATLAS [arXiv:2209.10910](https://arxiv.org/abs/2209.10910)

- ▶ Eventi divisi in tre categorie basandosi su decadimento del τ e condizioni di trigger usate ($\tau_{had}\tau_{had}$, $\tau_{lep}\tau_{had}$:SLT, LTT)
- ▶ BDT ($\tau_{had}\tau_{had}$) e NN ($\tau_{lep}\tau_{had}$) per estrarre eventi dopo le selezioni: outputs MVA \rightarrow *discriminanti finali*
- ▶ Fondo: tt , Z+Jet, Fake- τ (dati e simulazioni Monte Carlo)

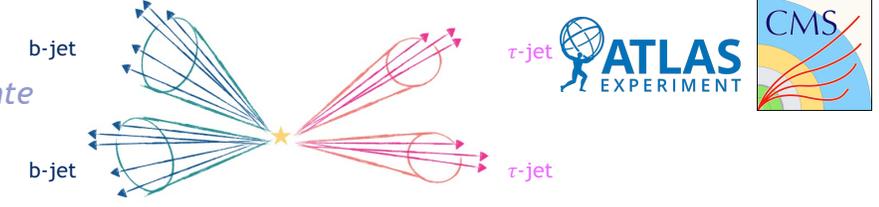


Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 4.7$ (3.9)

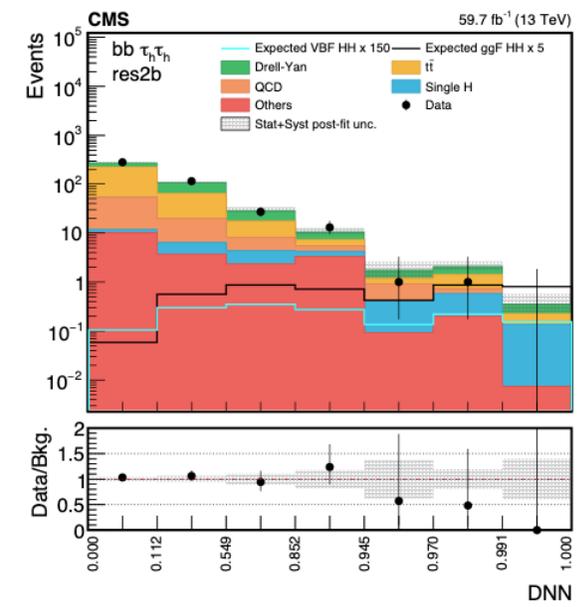
Miglioramento di un fattore > 2.5 rispetto all'analisi a 36.1 fb^{-1} (PRL 121(2018)191801)

Produzione non risonante (ggF+VBF)



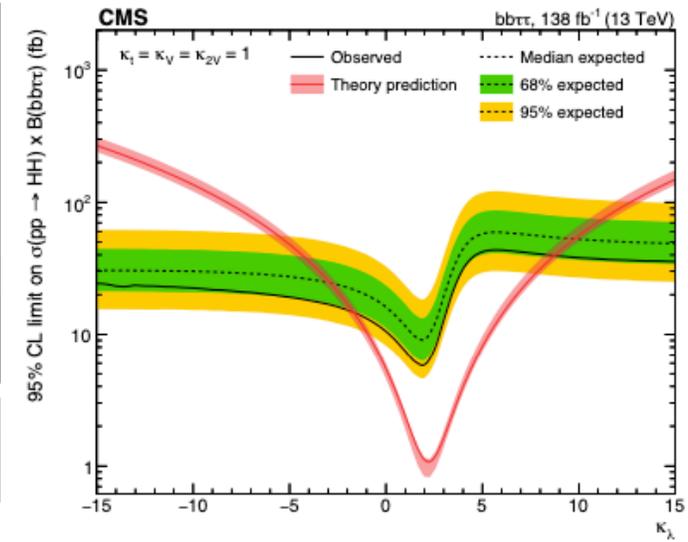
CMS [Phys. Rev. Lett. 129,081802](https://arxiv.org/abs/1808.08180)

- ▶ Eventi divisi in 8 categorie per massimizzare sensibilità ggF e VBF
- ▶ Algoritmi di tagging: *DeepJet* e *DeepTau*
- ▶ Deep Neural Network per discriminare S/F
- ▶ Fondo: $Z\gamma^* \rightarrow ll$, tt , multi-jet QCD



Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 3.3$ (5.2)
- $-1.7 < \kappa_\lambda < 8.7$ ($-2.9 < \kappa_\lambda < 9.8$)
- $-0.4 < \kappa_{2V} < 2.6$ ($-0.6 < \kappa_{2V} < 2.8$)

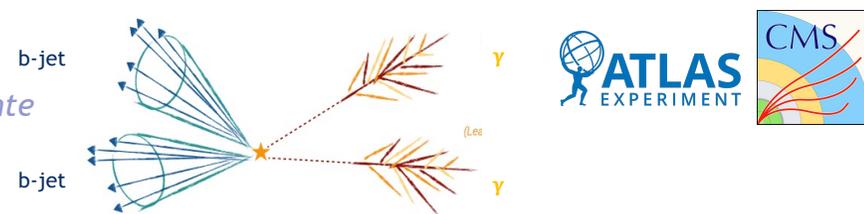


Miglioramento di un fattore > 4.5 su σ/σ_{SM} rispetto al risultato precedenti a 35.9 fb^{-1} ([arXiv:1808.00336](https://arxiv.org/abs/1808.00336))

Processo $HH \rightarrow bb\gamma\gamma$

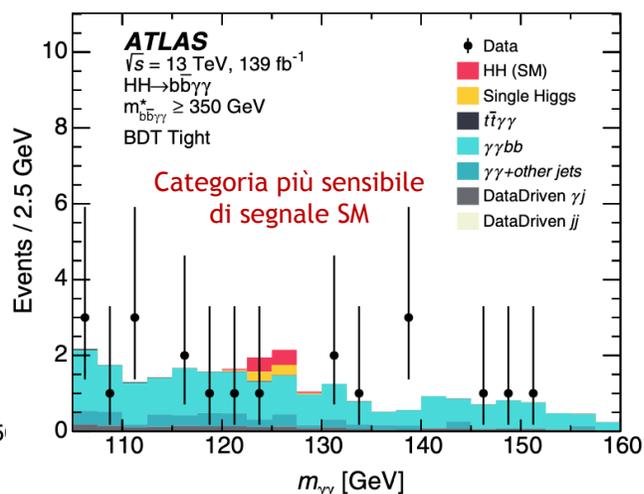
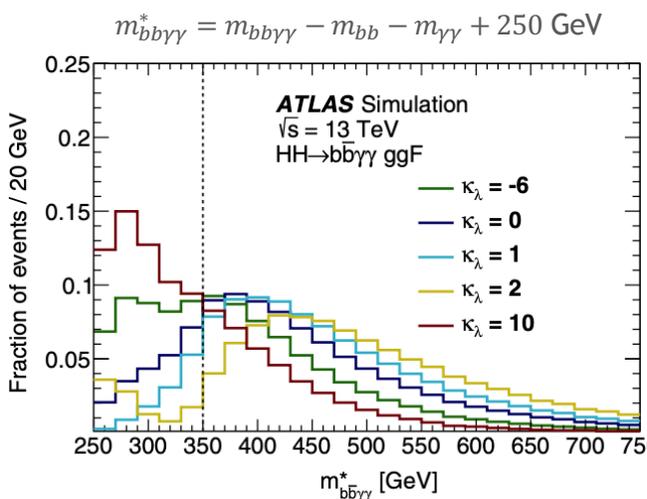
- Selezione di eventi con 2 jet b-tagati e 2 γ
- Fondo: $\gamma\gamma$ +jet continuo, singolo Higgs stimato dai dati (+simulazioni MC-ATLAS)

Produzione non risonante
(ggF+VBF)



ATLAS [Phys. Rev. D 106 \(2022\) 052001](#)

- BDT_{training} su ggF utilizzati per separare segnale (ggF+VBF) e fondo (m_{bb} *variabile con più potere discriminante S/B*)
- 4 categorie basate su $m_{bb\gamma\gamma}^*$ (> 350 GeV SM, $<$ BSM) e output BDT
- $m_{\gamma\gamma}$ usata come *variabile discriminante* ($105 < m_{\gamma\gamma} < 160$ GeV)



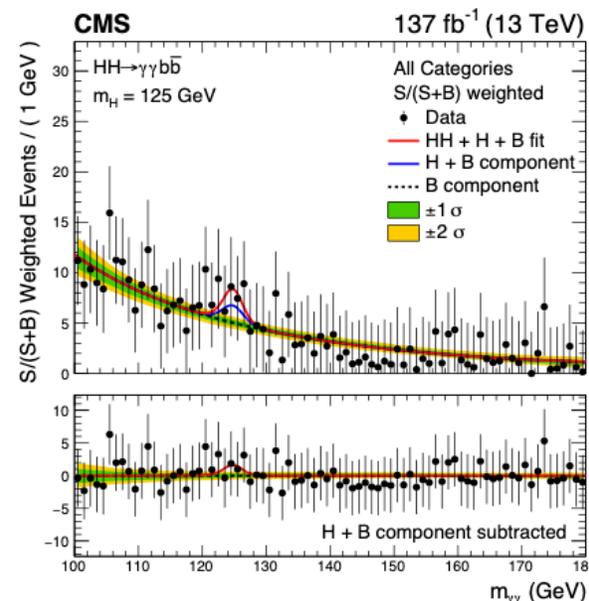
Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 4.2$ (5.7)
- $-1.5 < \kappa_\lambda < 6.7$ ($-2.4 < \kappa_\lambda < 7.7$)

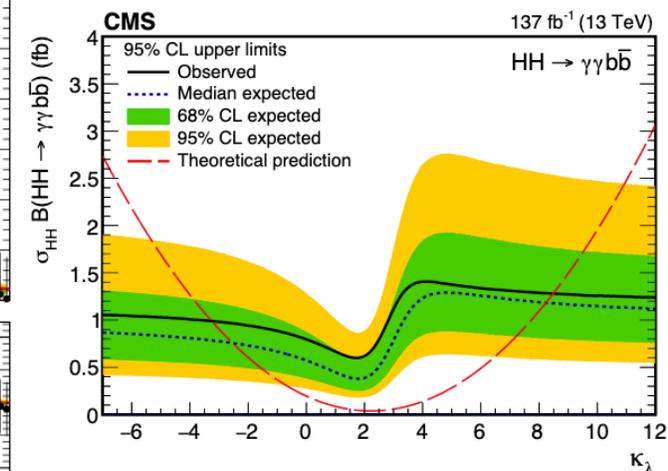
Miglioramento di un fattore > 4.5 su σ/σ_{SM} e ~ 2 su κ_λ rispetto ai risultati precedenti a 36.1 fb⁻¹ (JHEP(2018)040)

CMS [JHEP03\(2021\)257](#)

- DNN (ttH Score) per ridurre fondo ttH
- 2 BDT (ggF, VBF) per discriminare S/F
- Fit 2D ($m_{\gamma\gamma}, m_{jj}$) per estrarre il segnale (categ (BDT, \tilde{M}_X): 12 ggF, 2 VBF)



$$\tilde{M}_X = M_{bb\gamma\gamma} - M_{bb} - M_{\gamma\gamma} + 2M_H$$



Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 7.7$ (5.2)
- $-3.3 < \kappa_\lambda < 8.5$ ($-2.5 < \kappa_\lambda < 8.2$)
- $-1.3 < \kappa_{2V} < 3.5$ ($-0.9 < \kappa_{2V} < 3.1$)

Analisi migliorata di un fattore 4 rispetto alla precedente a 35.9 fb⁻¹ (arXiv:1806.00408)

Combinazione risultati ATLAS-CMS



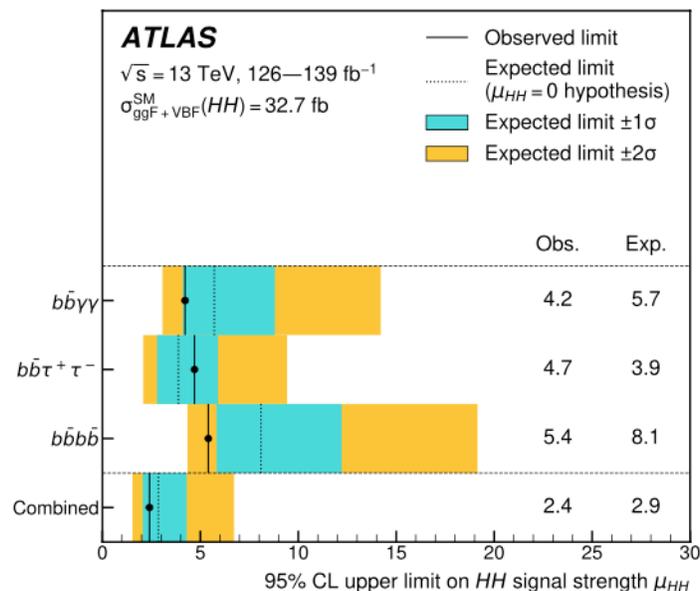
ATLAS [arXiv:2211.01216](https://arxiv.org/abs/2211.01216)

Combinazione delle tre analisi discusse (13 TeV @LHC 2015-2018)

$b\bar{b}\gamma\gamma$ (139 fb^{-1}), $b\bar{b}\tau\tau$ (139 fb^{-1}), $b\bar{b}b\bar{b}$ (126 fb^{-1})

considerate statisticamente indipendenti (overlap di eventi fra le tre analisi $< 0.1\%$)
(*prodotto di likelihood* $\rightarrow L = (\vec{\alpha}, \vec{\theta})$)

Risultati migliorati dalla precedente analisi ([PRB 800 \(2020\) 135103](https://arxiv.org/abs/2002.13510))
(36.1 fb^{-1} , $+bbWW, WWW, WW\gamma\gamma$) di un **fattore ~ 3** su σ/σ_{SM}



Limiti su σ/σ_{SM} : 6.9 (10)

Risultati $_{ggF+VBF}$ combinati Osservati (**Attesi**) 95%CL:
 \rightarrow Limiti su σ/σ_{SM} : 2.4 (2.9)

CMS [Nature 607 \(2022\) 60-68](https://doi.org/10.1038/s41586-022-0348-4)

Combinazione delle tre analisi (13 TeV @LHC 2016-2018, 138 fb^{-1})

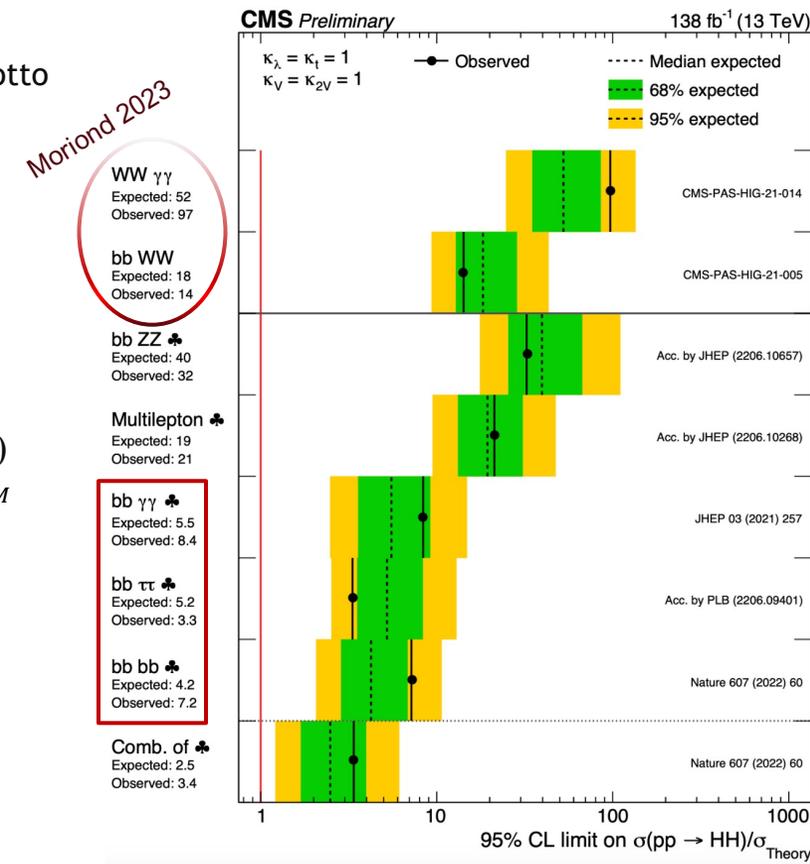
$b\bar{b}\gamma\gamma, b\bar{b}\tau\tau, b\bar{b}b\bar{b}$ e delle analisi $bbZZ, bbWW, WW\gamma\gamma$ e *Multileptoniche*

statisticamente indipendenti
(*likelihood combinata*: prodotto di funzioni di probabilità di Poisson)

Risultati migliorati dalla precedente analisi ([Phys. Rev. Lett. 122, 121803](https://arxiv.org/abs/2002.12180))
(35.9 fb^{-1} , 3 analisi+ $bbVV$)
di un **fattore > 5** su σ/σ_{SM}

Limiti su σ/σ_{SM} : 22.2 (12.8)

Risultati $_{ggF+VBF}$ combinati Osservati (**Attesi**) 95%CL:
 \rightarrow Limiti su σ/σ_{SM} : 3.4 (2.5)



Combinazione risultati ATLAS-CMS

ATLAS [arXiv:2211.01216](https://arxiv.org/abs/2211.01216)

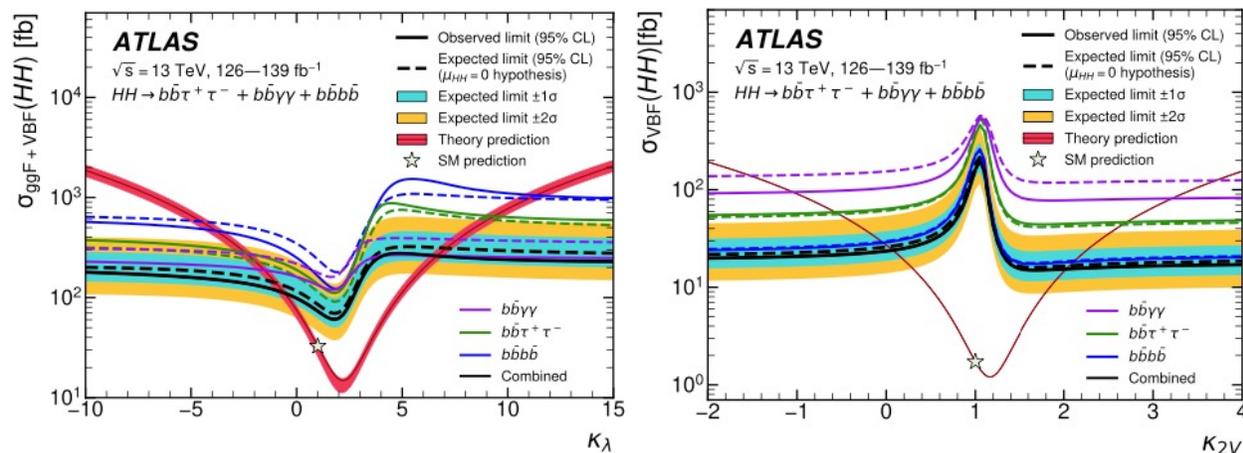
Combinazione delle tre analisi discusse (13 TeV @LHC 2015-2018)

$bb\gamma\gamma$ (139 fb⁻¹), $bb\tau\tau$ (139 fb⁻¹), $bbbb$ (126 fb⁻¹)

Risultati migliorati dalla precedente analisi ([PRB 800 \(2020\) 135103](https://arxiv.org/abs/2007.13510))

(36.1 fb⁻¹, + $bbWW$, $WWWW$, $WW\gamma\gamma$) di un **fattore > 8** su κ_λ

Limiti su accoppiamento: $-5.0 < \kappa_\lambda < 12$ ($-5.8 < \kappa_\lambda < 12$)



Risultati_{ggF+VBF} combinati Osservati (Attesi) 95%CL:

→ Limiti su accoppiamenti:

- $-0.6 < \kappa_\lambda < 6.6$ ($-2.1 < \kappa_\lambda < 7.8$)
- $0.1 < \kappa_{2V} < 2.0$ ($0.0 < \kappa_{2V} < 2.1$)

CMS [Nature 607 \(2022\) 60-68](https://doi.org/10.1038/s41586-022-0340-4)

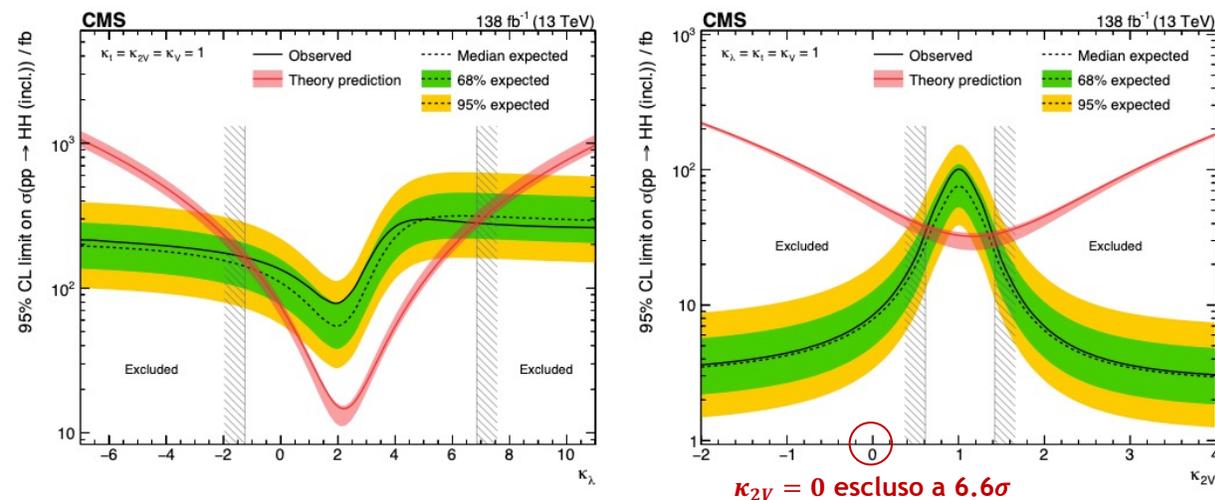
Combinazione delle tre analisi (13 TeV @LHC 2016-2018, 138 fb⁻¹)

$bb\gamma\gamma$, $bb\tau\tau$, $bbbb$ e delle analisi $bbZZ$ e *Multileptoniche*

Risultati migliorati dalla precedente analisi ([Phys. Rev. Lett. 122, 121803](https://arxiv.org/abs/2107.12180))

(35.9 fb⁻¹, 3 analisi+ $bbVW$) di un **fattore > 2** su κ_λ

Limiti su accoppiamento: $-11.8 < \kappa_\lambda < 18.8$ ($-7.1 < \kappa_\lambda < 13.6$)



Risultati_{ggF+VBF} combinati Osservati (Attesi) 95%CL:

→ Limiti su accoppiamenti:

- $-1.24 < \kappa_\lambda < 6.49$ ($-2.28 < \kappa_\lambda < 7.94$)
- $0.67 < \kappa_{2V} < 1.38$ ($0.61 < \kappa_{2V} < 1.42$)

Processi risonanti ATLAS - CMS

Focus risonanze spin-0

➤ Risultati ottenuti negli stessi stati finali analizzati per HH non risonante (*strategie di analisi simili*)

ATLAS

bbγγ ($m_X: 251 \rightarrow 1000 \text{ GeV}$)

• Fondo aggiuntivo: *SM HH*

1. BDT per *S / F γγ* e *tτγγ*

2. BDT pre *S / F* singolo *H*

⇒ 1 BDT_{Tot} output → regioni di analisi

sensibile a bassa m_X

bbττ ($260 \rightarrow 1600 \text{ GeV}$)

• Parametrised NN (PNN) in m_X

• Fit su distribuzioni output PNN

sensibile a $m_X \in [400 - 800] \text{ GeV}$

bbbb ($m_X 251 \rightarrow 1500 | 900 \rightarrow 3000 \text{ GeV}$)

1. Resolved.

2. Boosted.

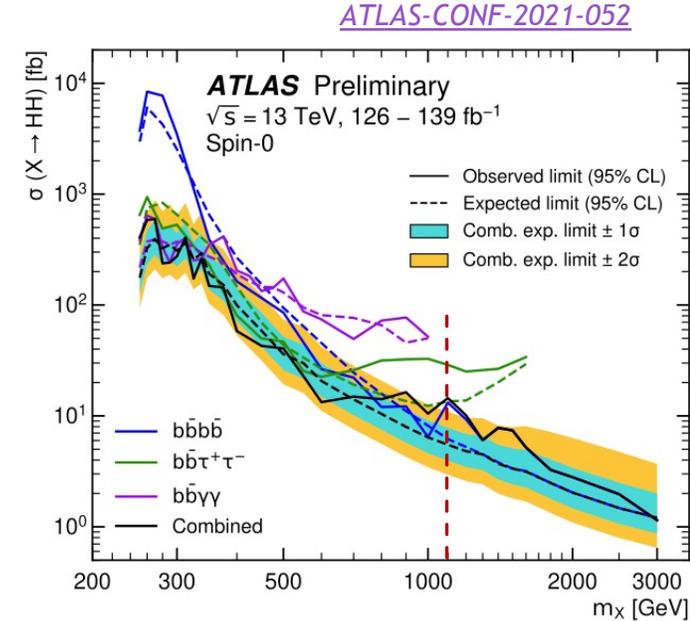
• $\geq 2 \text{ jet } \Delta R = 1$

• b-tag basato sui *track-jet*

sensibile ad alta m_X

Complementarietà delle analisi

La più grande deviazione dal Modello Standard è osservata a 1.1 TeV con una significatività locale (globale) di 3.2σ (2.1σ)



CMS

➤ Analisi principali *bbγγ* e *bbbb* (e *bbWW* e *Multileptoniche*)

➤ *bbγγ* → segnale estratto da fit 2D $m_{\gamma\gamma} - m_{bb}$

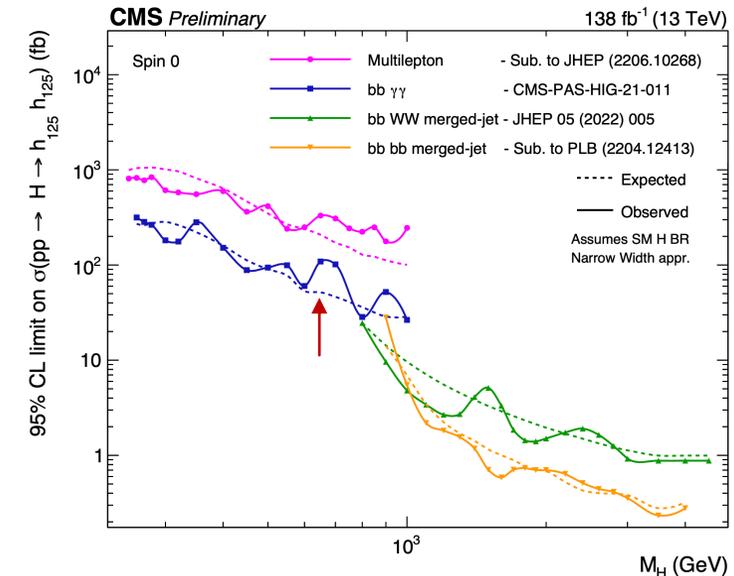
[CMS-PAS-HIG-21-011](#)

La deviazione maggiore dall'ipotesi di solo background è osservata a 650 GeV con una significatività locale (globale) di 3.8σ (2.8σ)

➤ *bbbb* boosted → ParticleNet per identificare AK8 jet come $h \rightarrow bb$ vs fondo multi-jet

[arXiv:2204.12413](#)

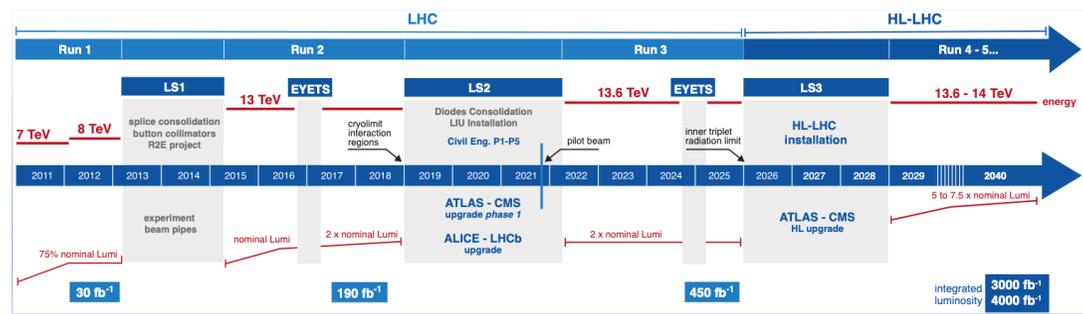
➡ Non vengono osservati eccessi di eventi statisticamente significativi



Proiezioni HL-LHC



ATL-PHYS-PUB-2022-053
CMS-HIG-22-001



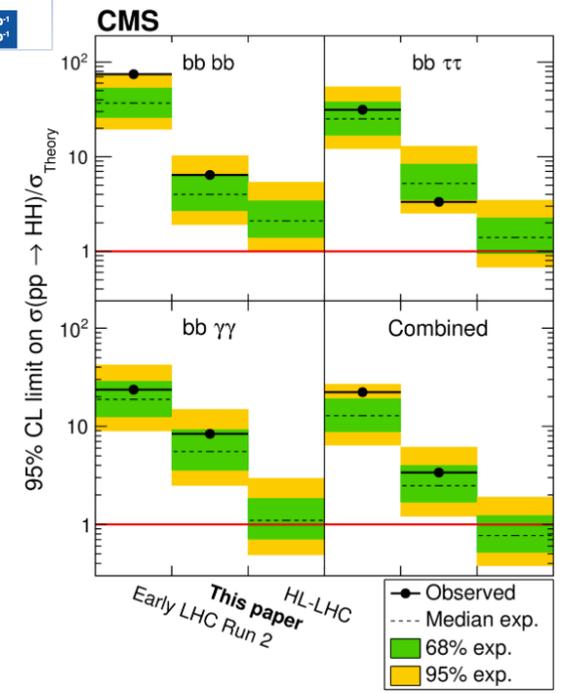
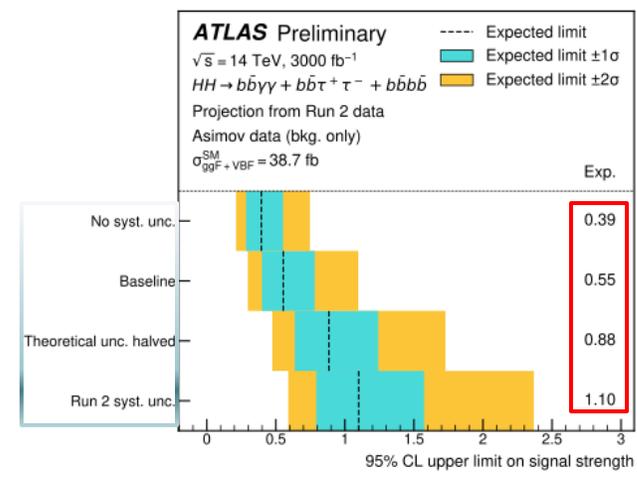
$$\uparrow \sqrt{s} \Rightarrow \uparrow \sigma_{HH}$$

HL-LHC (2029-2040, Run 4 & 5)

- 3000 fb⁻¹ data, $\sqrt{s} = 14$ TeV, pile-up 140-200
- ~20x (10x) statistica Run2 (+Run3) (180M bosoni di Higgs prodotti per esperimento)
- Upgrade dei rivelatori ATLAS e CMS

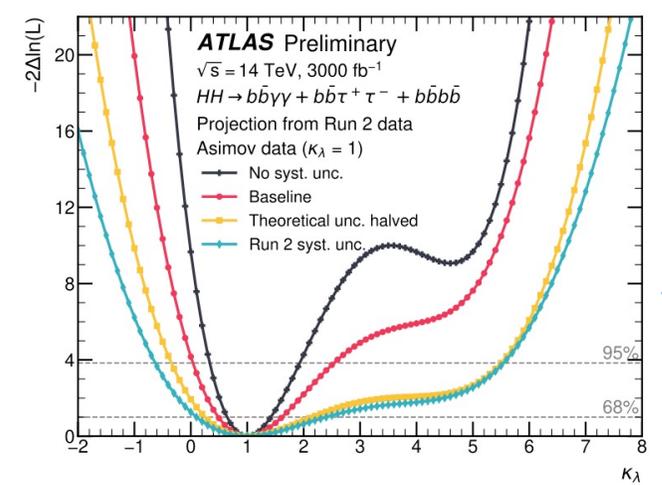
- ATLAS *estrapolazione risultati ottenuti con dati Run 2 (ggF+VBF) riscalati per la luminosità e sezione d'urto a 14 TeV*

- performance dei rivelatori e di trigger uguali a Run-2
- 4 differenti scenari per assunzioni fatte su incertezze sistematiche



- CMS *simulazione* parametrica del rivelatore con HL-LHC upgrade (software DELPHES, include HL-LHC pile-up scenario)

- Le performance degli algoritmi di ricostruzione ed identificazione sono parametrizzate tramite simulazione
- Incertezze statistiche (e sperimentali) scalate di $1/\sqrt{L}$



Uncertainty scenario	κ_λ 68% CI	κ_λ 95% CI
No syst. unc.	[0.7, 1.4]	[0.3, 1.9]
Baseline	[0.5, 1.6]	[0.0, 2.5]
Theoretical unc. halved	[0.3, 2.2]	[-0.3, 5.5]
Run 2 syst. unc.	[0.1, 2.4]	[-0.6, 5.6]

Sia ATLAS che CMS si aspettano un limite $\frac{\sigma}{\sigma_{SM}} < 1.0$ dopo la combinazione dei differenti canali

Conclusioni

- L'analisi dei meccanismi di produzione e decadimento di coppie di bosoni di Higgs è importante per comprendere il settore scalare del Modello Standard
- Panoramica dei più recenti risultati sulle sezioni d'urto HH e auto-accoppiamento trilineare e quartico VVHH nei processi non risonanti dei canali $b\bar{b}\gamma\gamma$, $b\bar{b}\tau\tau$, $b\bar{b}b\bar{b}$

- Limite superiore combinato **osservato(atteso)** 95%CL per σ/σ_{SM} $ggF+VBF$:

2.4 (2.9) **ATLAS** , 3.4 (2.5) **CMS**

- Limiti superiori combinati **osservati(attesi)** 95%CL per gli accoppiamenti:

κ_λ : -0.6 – 6.6 (-2.1 – 7.8) **ATLAS** , -1.24 – 6.49 (-2.28 – 7.94) **CMS**
 κ_{2V} : 0.1 – 2.0 (0.0 – 2.1) **ATLAS** , 0.67 – 1.38 (0.61 – 1.42) **CMS**

$\kappa_{2V} = 0$ escluso a 6.6σ

- Studio HH risonante, dove ancora non è stato osservato un eccesso di eventi statisticamente significativo
- Proiezioni ad alta luminosità @HL-LHC → *Higgs factory*
 - Ottimizzazione degli algoritmi di ricostruzione ed identificazione
 - Sviluppo di nuove analisi dedicate per migliorare l'estrapolazione del segnale dal fondo
 - Miglioramento sensibilità ⇒ *evidenza/osservazione della produzione HH*

Grazie per la vostra attenzione!

Back-up

Il rivelatore ATLAS



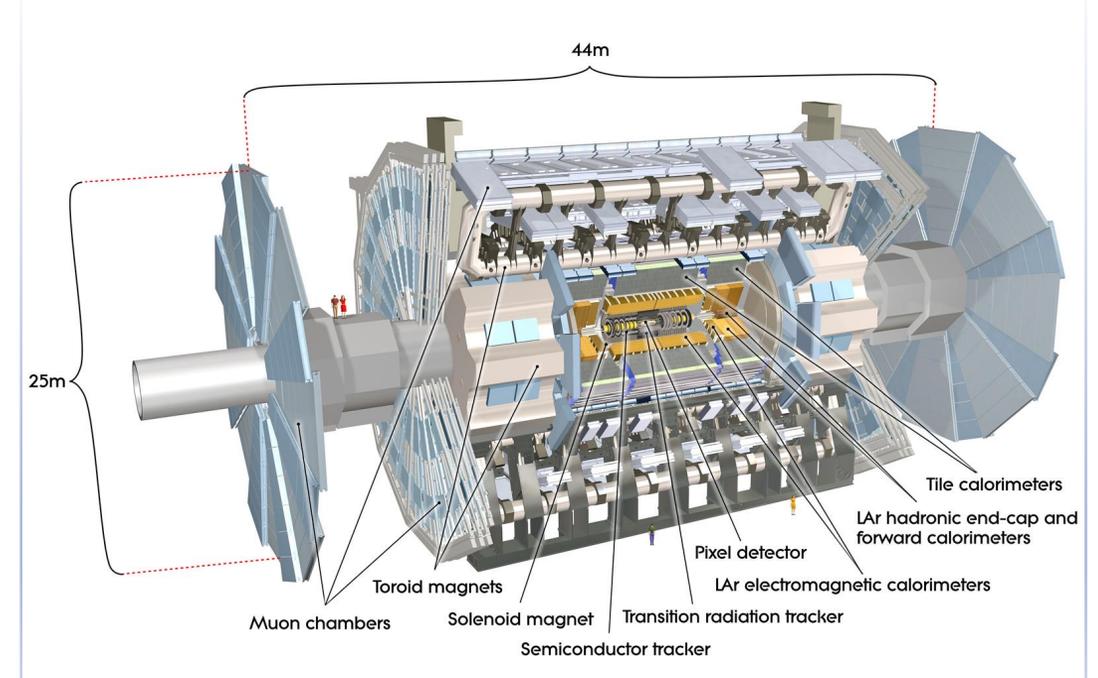
2008 JINST 3 S08003

Il rivelatore ATLAS copre quasi l'intero angolo solido attorno al punto di collisione ed è strutturato in tre sistemi di sottorivelatori cilindrici concentrici:

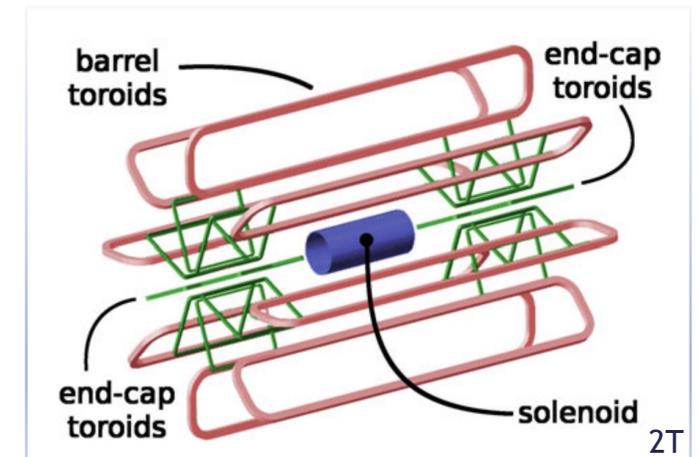
- ▶ **Rivelatore Interno**, che permette di ricostruire le tracce e misurare la quantità di moto di tutte le particelle cariche prodotte nelle collisioni. *[upgrade rivelatore interno - 2025]*
- ▶ Il **sistema calorimetrico**, che è disposto intorno al rivelatore interno ed è composto da un calorimetro elettromagnetico, dedicato all'identificazione delle shower elettromagnetiche, e da un calorimetro adronico, per necessario per identificare e misurare l'energia dei jet adronici. *[upgrade dell'elettronica calorimetro Lar]*
- ▶ Lo **spettrometro**, che è dedicato all'identificazione e alla misurazione ad alta precisione dei muoni e della loro quantità di moto. *[New Small Wheels]*

Questi rivelatori sono divisi longitudinalmente in tre regioni:

- La parte centrale, chiamata **barrel**
- Le due estremità che chiudono il cilindro, chiamati **end-caps**



Sistema magnetico :



Il rivelatore CMS

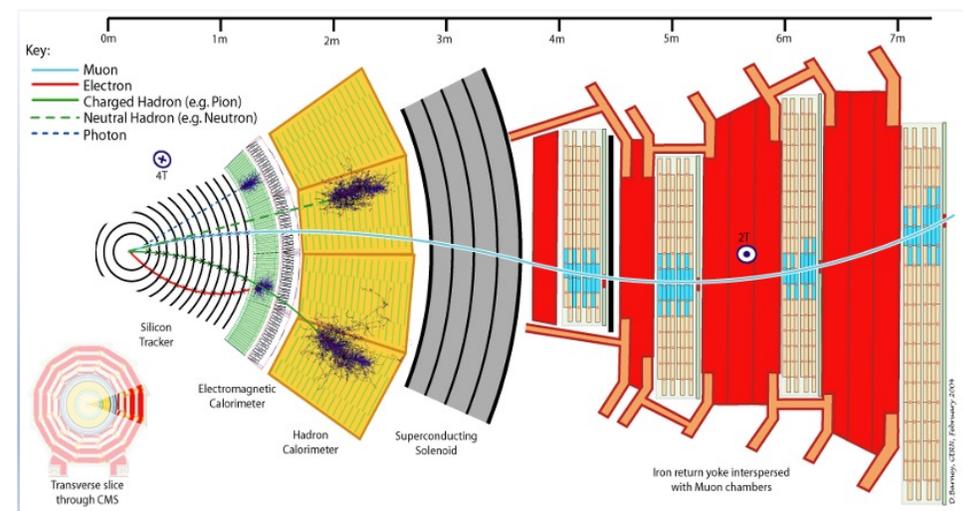
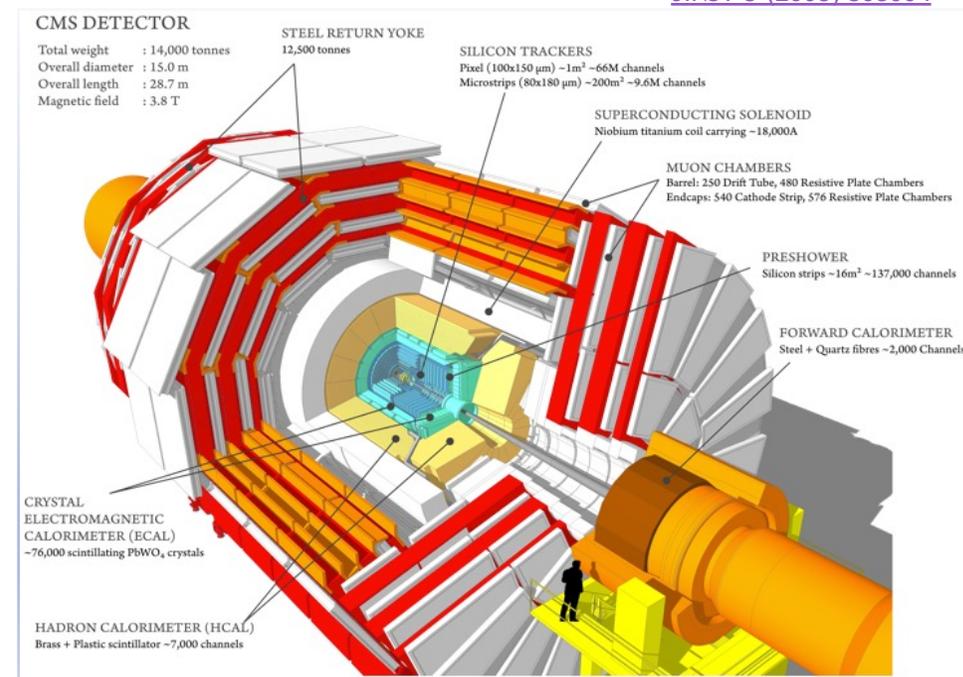


JINST 3 (2008) S08004

CMS è costituito da una serie di rivelatori disposti a cipolla attorno al punto di collisione.

- ▶ **Magnete solenoide:** $B=3.8\text{ T}$
- ▶ Il **Tracciatore**, dispositivo in silicio (15148 strip+1856 pixel), è il sistema più interno di CMS, rivela passaggio particelle cariche ($|\eta| < 3.0$) fornendo misure di posizione ($\sigma(d_{xy}) \sim 20 - 75\ \mu\text{m}$) e di quantità di moto ($\sigma(p_T) \sim 1.5\%$) fino a 100 GeV
- ▶ Il **Calorimetro Elettromagnetico**, calorimetro omogeneo con cristalli di PbWO_4 ($\sigma(p_T) \sim 1.6 - 5\%$), misura l'energia degli elettroni, positroni e fotoni
- ▶ Il **Calorimetro Adronico** si trova all'interno del magnete (solenoido più potente mai realizzato - 3.8 T) e misura l'energia degli adroni
- ▶ Il **sistema a muoni** è costituito da 1400 camere a muoni

→ CMS è progettato per rivelare i muoni molto accuratamente



Processo $HH \rightarrow bbbb$ - ATLAS

ATLAS [arXiv:2301.03212](https://arxiv.org/abs/2301.03212)

1. Per eliminare fondo $tt \rightarrow$ discriminante *top-veto*

$$X_{Wt} = \min \left[\sqrt{\left(\frac{m_{jj} - m_W}{0.1 m_{jj}} \right)^2 + \left(\frac{m_{jjb} - m_t}{0.1 m_{jjb}} \right)^2} \right]$$

2. Ultimo criterio di selezione per stabilire compatibilità con decadimento HH (*SR*): $X_{HH} < 1.6$

$$X_{HH} = \sqrt{\left(\frac{m_{H1} - 124 \text{ GeV}}{0.1 m_{H1}} \right)^2 + \left(\frac{m_{H2} - 117 \text{ GeV}}{0.1 m_{H2}} \right)^2}$$

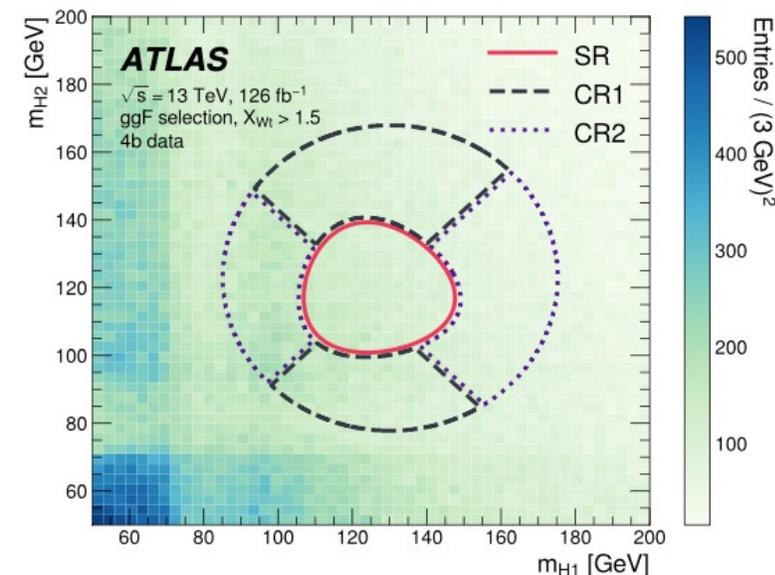
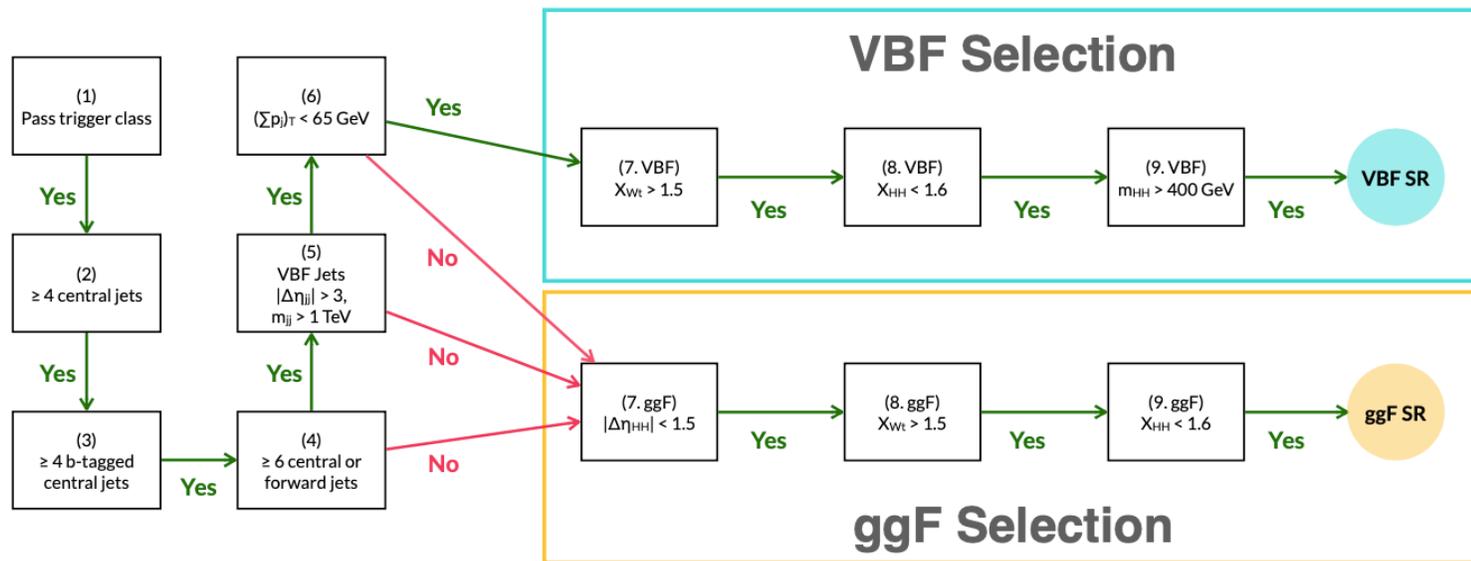
CR: regione circolare R_{CR}

- CR1 \rightarrow stimare fondo
- CR2 \rightarrow ottenere incertezze

$$R_{CR} = \sqrt{\left(m_{H1} - 1.05 \cdot 124 \text{ GeV} \right)^2 + \left(m_{H2} - 1.05 \cdot 117 \text{ GeV} \right)^2} = 45 \text{ GeV}$$

Stima Fondo: Dati presi dalla regione di segnale, ma dove solo 2 jet b-tagati sono selezionati

- Ripesati usando i dati dalla CR
- Neural Network (NN) usata per ottenere il peso come funzione delle variabili cinematiche \rightarrow minimizza likelihood che contiene funzione di ripeso (allenata su CR1)



Processo $HH \rightarrow bbbb$ - CMS



Resolved [Phys. Rev. Lett. 129,081802](https://arxiv.org/abs/1205.08180)

Accoppiamento jet per ricostruzione H basato su :

$$d = \frac{|M_{H_1} - kM_{H_2}|}{\sqrt{1+k^2}} \text{ più vicino alla diagonale } (M_{H_1}, M_{H_2})$$

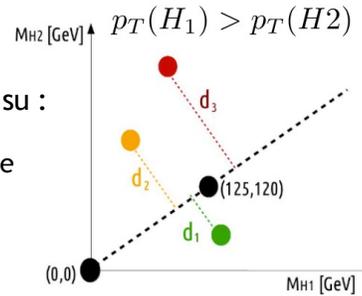
$$k = 125/120 = 1.04$$

96% correttezza accoppiamento ggF HH

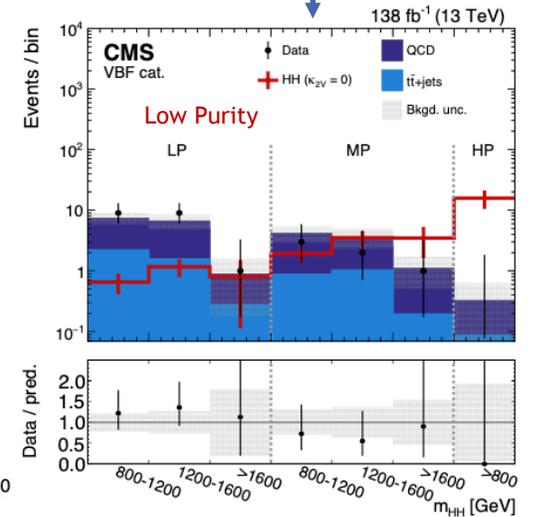
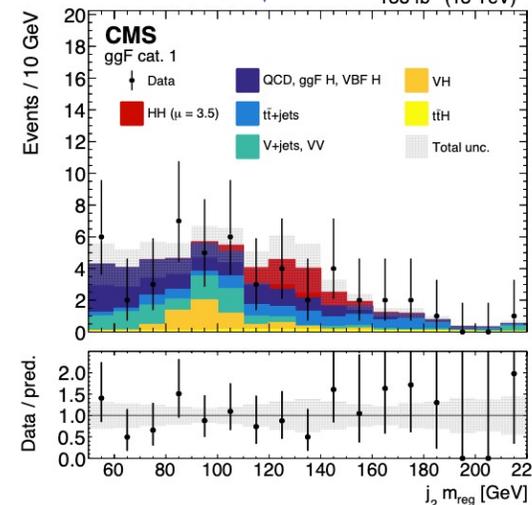
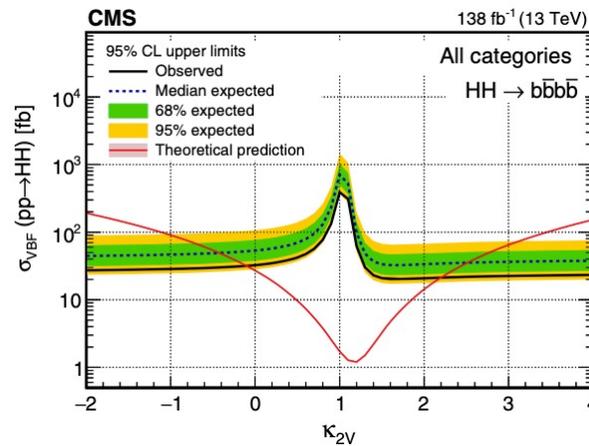
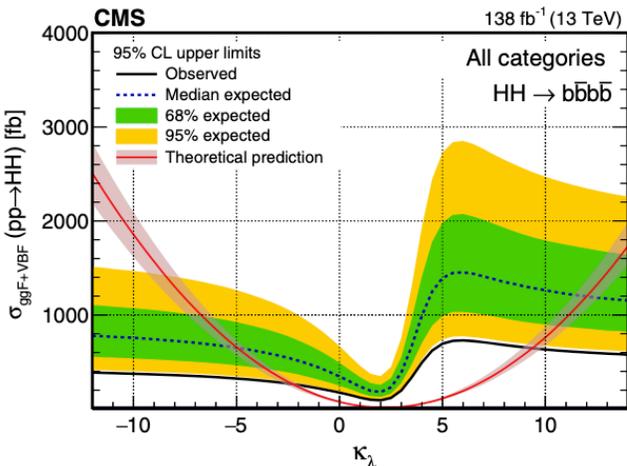
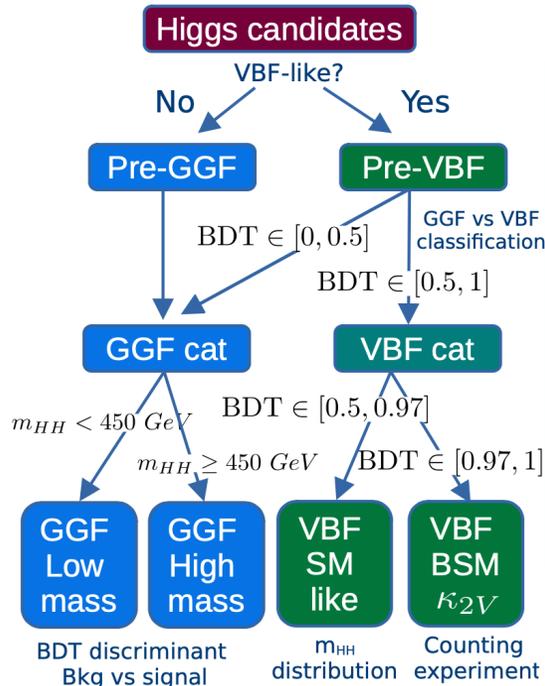
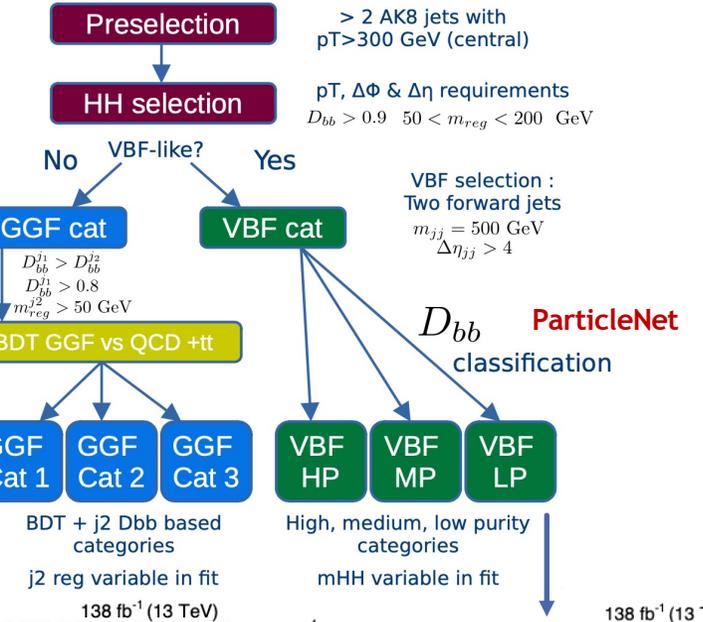
Stima Fondo: sia SR che CR divise in regioni 3b e 4b

- ▶ Eventi di fondo in SR_{4b} sono modellati da eventi in SR_{3b}
- ▶ Gli eventi in SR_{3b} sono scalati del rapporto del numero di eventi nelle CR_{4b} e CR_{3b}

- ▶ **Reweighting** con BDT allenato in CR_{4b} e CR_{3b}, applicato a SR_{3b} per modellare SR_{4b}
- ▶ Minimizza i problemi relativi alle incertezze statistiche derivanti dal numero limitato di eventi nelle due regioni SR



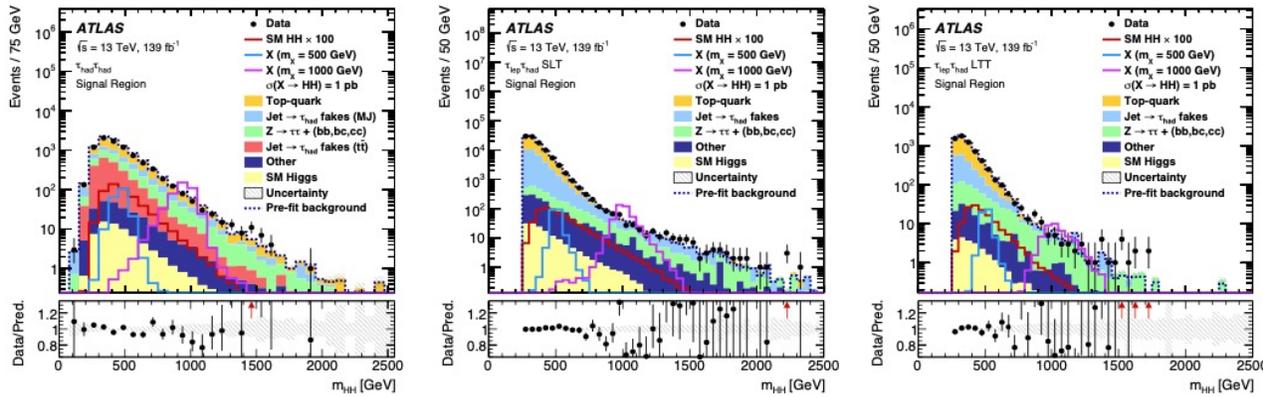
Boosted [arXiv:2205.06667](https://arxiv.org/abs/2205.06667)



Processo $HH \rightarrow bb\tau\tau$

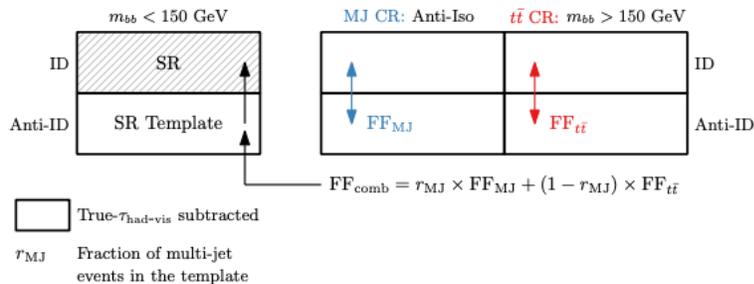
ATLAS [arXiv:2209.10910](https://arxiv.org/abs/2209.10910)

- ▶ CR per $Z + HF$ - normalizzazione del fondo (fit $m_{ll} \rightarrow Z + HF/tt$)
- ▶ Variabili di input MVA più importanti per estrarre il segnale: $m_{HH}, m_{bb}, m_{\tau\tau}$



- ▶ **Stima fondo:**
 - tt con τ_{had} reale e $Z + HF$ da simulazioni (+normalizzazione)
 - Singolo Higgs e altri processi da simulazioni
 - Jet \rightarrow fake τ_{had} dai dati (*fake factor method*)

$\tau_{lep}\tau_{had}$ channel



- Fondo fake in $\tau_{had}\tau_{had}$ trattato separatamente per multijet ($OS_{2b}-SS_{1b,2b}$) e tt (FS per mis-id)

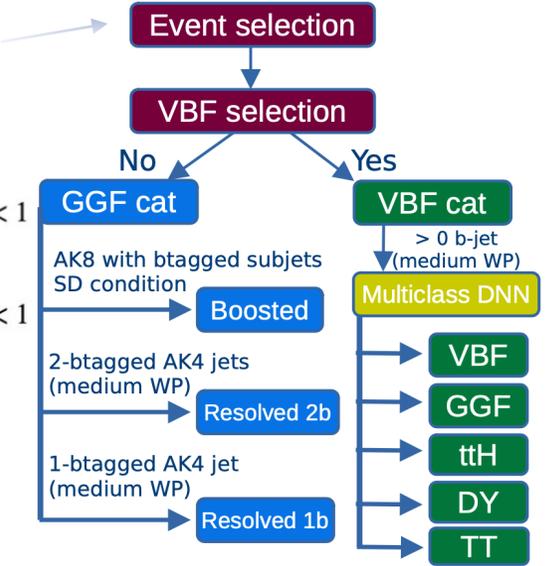
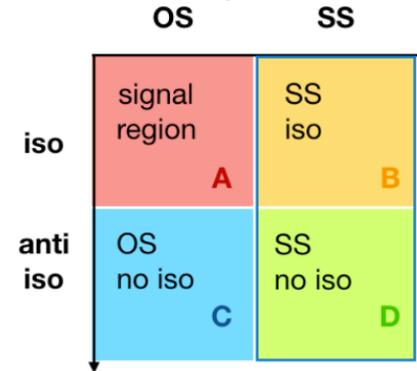
CMS [Phys. Rev. Lett. 129,081802](https://arxiv.org/abs/1808.08180)

- ▶ Tagli sulle masse m_{bb} e $m_{\tau\tau}$ per ggF
 - Minimizza fondo e eff. Segnale >90%

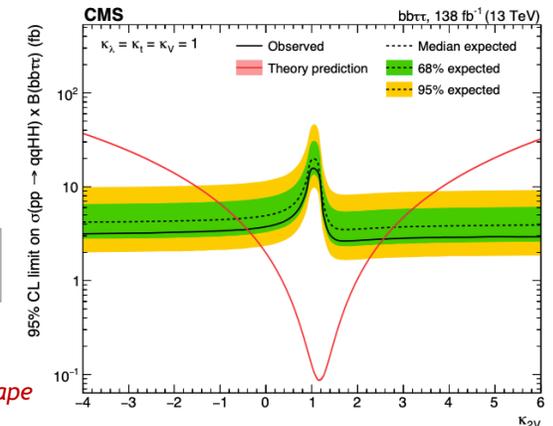
$$\text{Resolved} \quad \frac{(m_{\tau\tau} - 129 \text{ GeV})^2}{(53 \text{ GeV})^2} + \frac{(m_{bb} - 169 \text{ GeV})^2}{(145 \text{ GeV})^2} < 1$$

$$\text{Boosted} \quad \frac{(m_{\tau\tau} - 128 \text{ GeV})^2}{(60 \text{ GeV})^2} + \frac{(m_{bb} - 159 \text{ GeV})^2}{(94 \text{ GeV})^2} < 1$$

- ▶ **Stima fondo:**
 - tt , DY+jet da simulazioni (+normalizzazione CR)
 - Multijet QCD dai dati con metodo ABCD
 - Altri processi da simulazioni

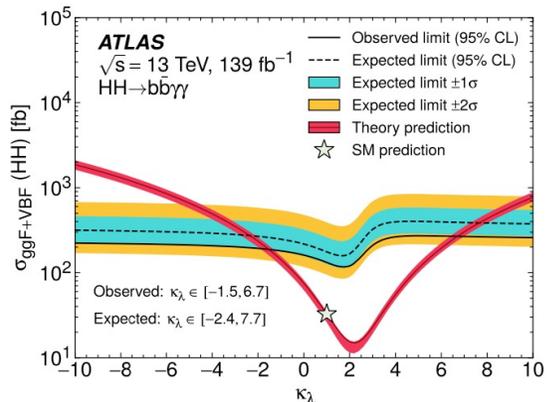
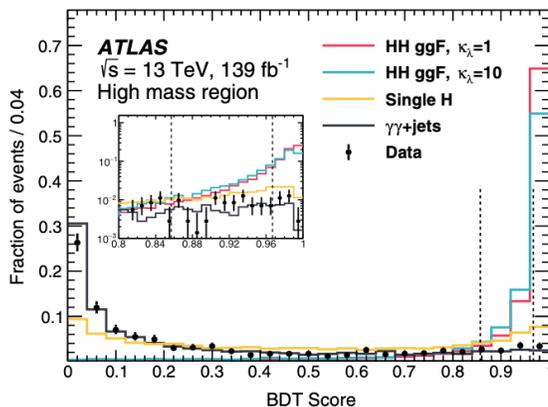
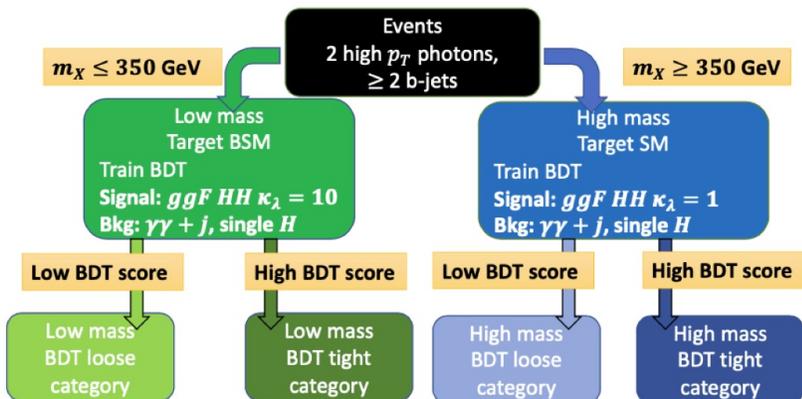


+ DNN $bb\tau\tau$ vs background
All categories are exclusive, DNN score used in fit

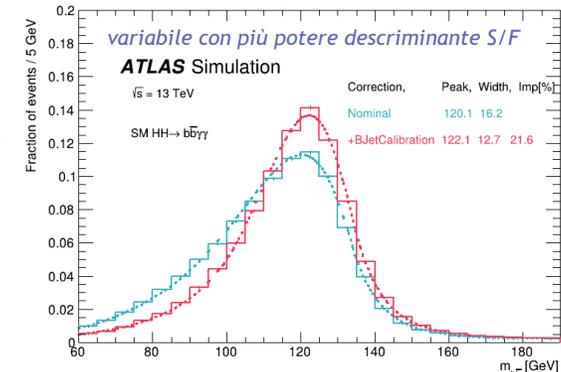


Processo $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$

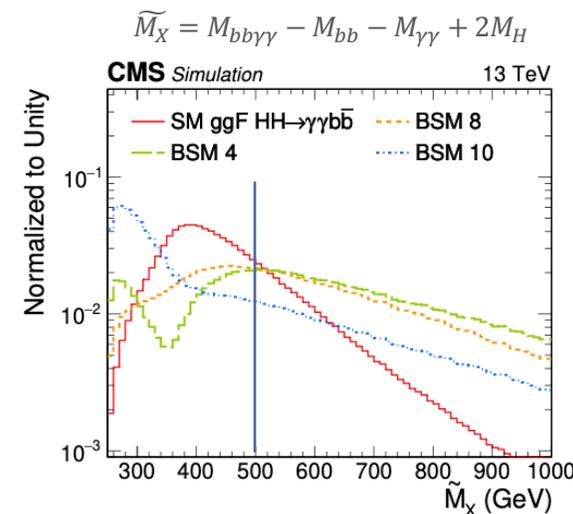
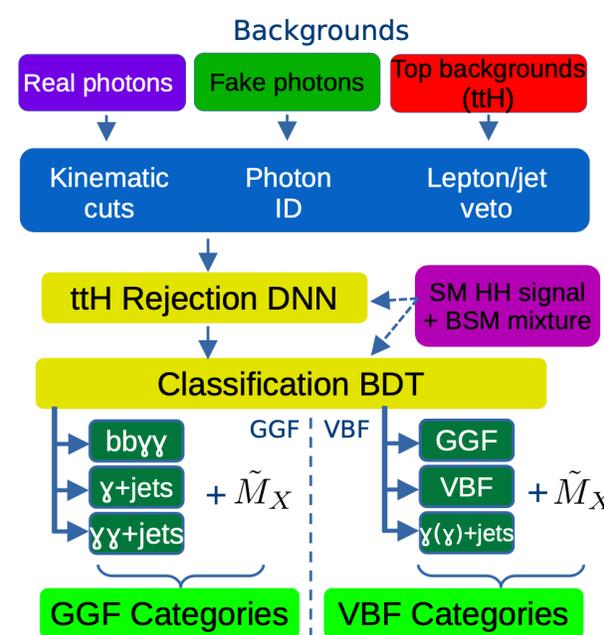
ATLAS [Phys. Rev. D 106 \(2022\) 052001](#)



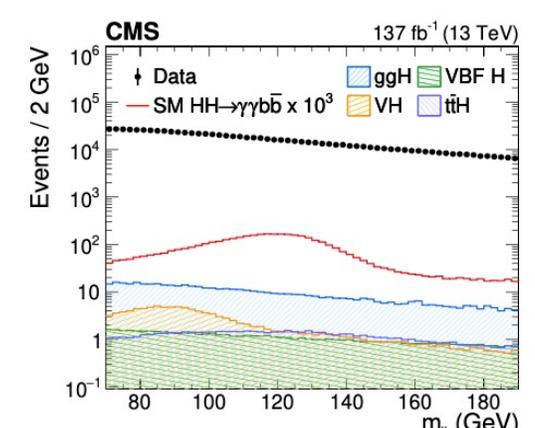
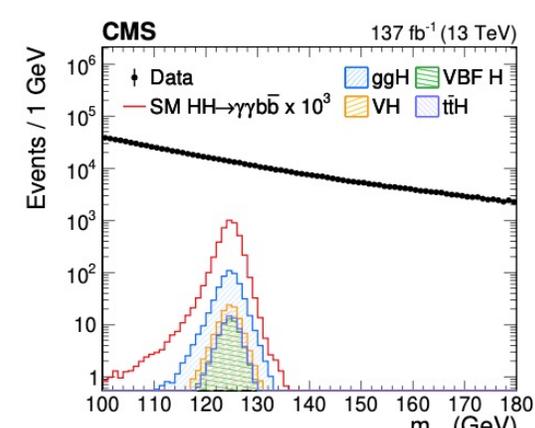
Limiti Osservati (Attesi) al 95% CL sulla sezione d'urto in funzione di κ_λ



CMS [JHEP03\(2021\)257](#)



► Fit 2D ($m_{\gamma\gamma}, m_{jj}$) per estrarre il segnale (categ (BDT, \tilde{M}_X): 12 ggF, 2 VBF)



ATLAS

bbbb:

Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL :

- $\sigma/\sigma_{SM} : 5.4 (8.1)$
- $-3.3 < \kappa_\lambda < 11.4 (-5.2 < \kappa_\lambda < 11.6)$
- $0.0 < \kappa_{2V} < 2.1 (0.0 < \kappa_{2V} < 2.1)$

(test stat. $-2\ln \Lambda$
da artic. Combin:
[arXiv:2211.01216](https://arxiv.org/abs/2211.01216))

bb $\tau\tau$:

Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 4.7 (3.9)$
- $-2.7 < \kappa_\lambda < 9.5 (-3.1 < \kappa_\lambda < 10.2)$
- $-0.6 < \kappa_{2V} < 2.7 (-0.5 < \kappa_{2V} < 2.7)$

(test stat. $-2\ln \Lambda$
da artic. Combin:
[arXiv:2211.01216](https://arxiv.org/abs/2211.01216))

bb $\gamma\gamma$:

Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 4.2 (5.7)$
- $-1.4 < \kappa_\lambda < 6.5 (-3.2 < \kappa_\lambda < 8.1)$
- $-0.8 < \kappa_{2V} < 3.0 (-1.6 < \kappa_{2V} < 3.7)$

(test stat. $-2\ln \Lambda$
da artic. Combin:
[arXiv:2211.01216](https://arxiv.org/abs/2211.01216))

Combinati:

Risultati_{ggF+VBF} combinati Osservati (Attesi) 95%CL:

→ Limiti su $\sigma/\sigma_{SM} : 2.4 (2.9)$

Risultati_{ggF+VBF} combinati Osservati (Attesi) 95%CL:

→ Limiti su accoppiamenti:

- $-0.6 < \kappa_\lambda < 6.6 (-2.1 < \kappa_\lambda < 7.8)$
- $0.1 < \kappa_{2V} < 2.0 (0.0 < \kappa_{2V} < 2.1)$

CMS

bbbb:

Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 3.9 (7.8) (9.9 (5.1) \text{ Boosted})$
- $-2.3 < \kappa_\lambda < 9.4 (-5.0 < \kappa_\lambda < 12.0) \quad -9.9 < \kappa_\lambda < 16.9 (-5.1 < \kappa_\lambda < 12.2) (\text{Boosted})$
- $0.62 < \kappa_{2V} < 1.41 (0.66 < \kappa_{2V} < 1.37) (\text{Boosted})$

bb $\tau\tau$:

Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 3.3 (5.2)$
- $-1.7 < \kappa_\lambda < 8.7 (-2.9 < \kappa_\lambda < 9.8)$
- $-0.4 < \kappa_{2V} < 2.6 (-0.6 < \kappa_{2V} < 2.8)$

bb $\gamma\gamma$:

Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- $\sigma/\sigma_{SM} : 7.7 (5.2)$
- $-3.3 < \kappa_\lambda < 8.5 (-2.5 < \kappa_\lambda < 8.2)$
- $-1.3 < \kappa_{2V} < 3.5 (-0.9 < \kappa_{2V} < 3.1)$

Combinati:

Risultati_{ggF+VBF} combinati Osservati (Attesi) 95%CL:

→ Limiti su $\sigma/\sigma_{SM} : 3.4 (2.5)$

Risultati_{ggF+VBF} combinati Osservati (Attesi) 95%CL:

→ Limiti su accoppiamenti:

- $-1.24 < \kappa_\lambda < 6.49 (-2.28 < \kappa_\lambda < 7.94)$
- $0.67 < \kappa_{2V} < 1.38 (0.61 < \kappa_{2V} < 1.42)$

Processo $HH \rightarrow bbWW$ CMS



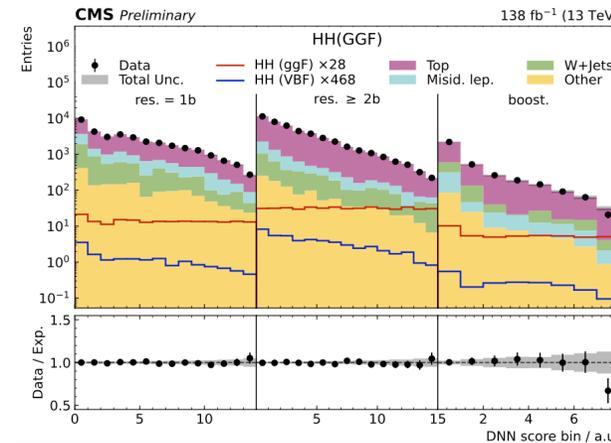
Moriond 2023

CMS-PAS-HIG-21-005

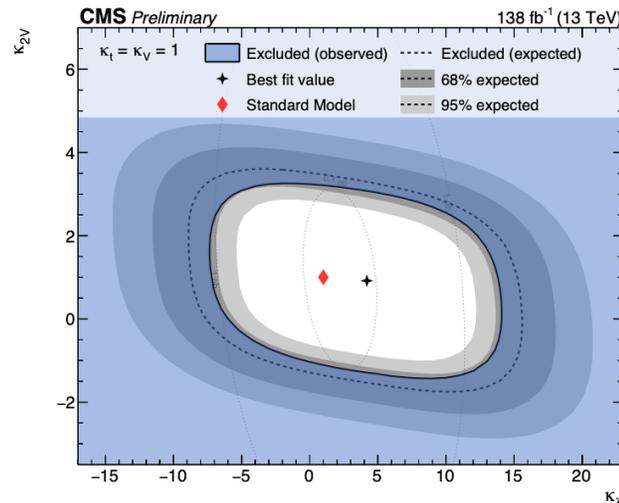
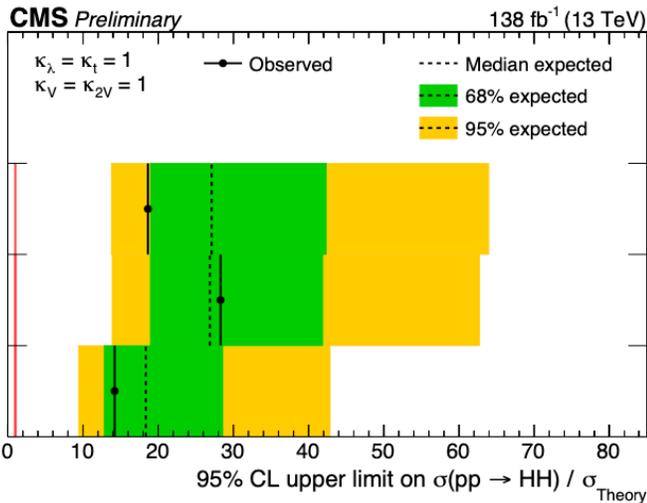
- **BR alto (25%)**
- Almeno un W decade in leptoni ($H \rightarrow WW$) e un jet b-tagato $\Delta R = 0.4$ ($H \rightarrow bb$) (1 jet b-tagato $\Delta R = 1$ se regime boosted)
- 2 canali basati su $H \rightarrow WW$ (\rightarrow DNN multiclass+tipologia $H \rightarrow bb$: 9(x2) categorie S&F) ("single-lepton", "dilepton" se solo un W o entrambi decadono in leptoni)
- Fondo: tt (dominante), W +jet (single-lepton), DY (dilepton), singolo t/H
- Fit simultaneo nelle diverse categorie sui DNN score

"single-lepton"

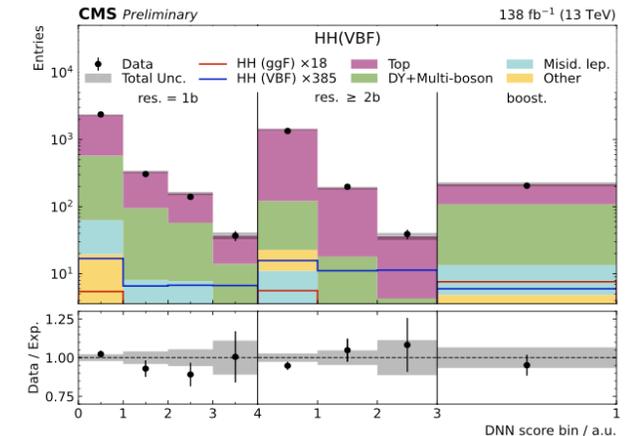
Categories	Sub-Categories		
HH(GGF)	Resolved 1b	Resolved 2b	Boosted
HH(VBF)	Resolved 1b	Resolved 2b	Boosted
Top + Higgs	Resolved		Boosted
WJets + Other	Inclusive		



"single-lepton"



"dilepton"



Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

- 14 (18)
- $-7.2 < \kappa_\lambda < 13.8$ ($-8.7 < \kappa_\lambda < 15.2$)
- $-1.1 < \kappa_{2V} < 3.2$ ($-1.4 < \kappa_{2V} < 3.5$)

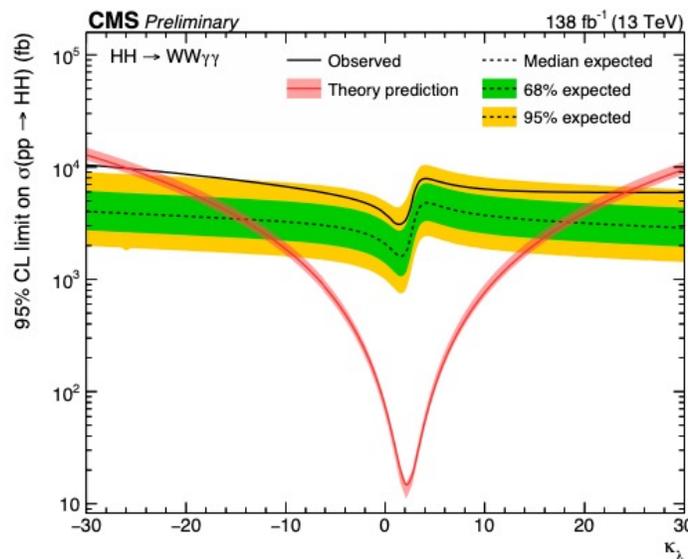
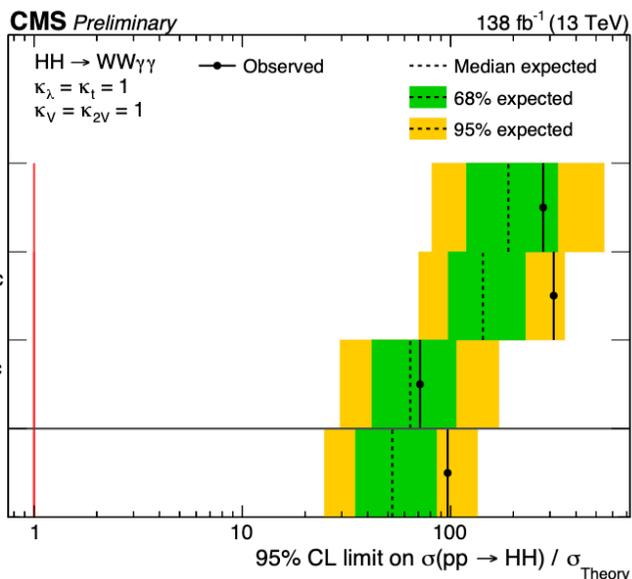
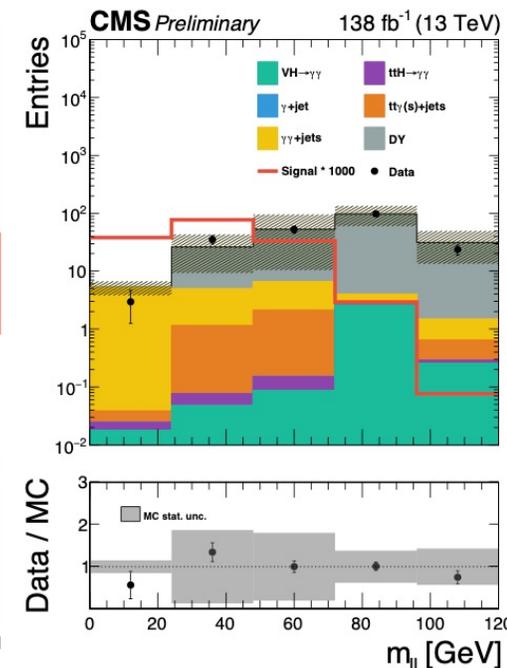
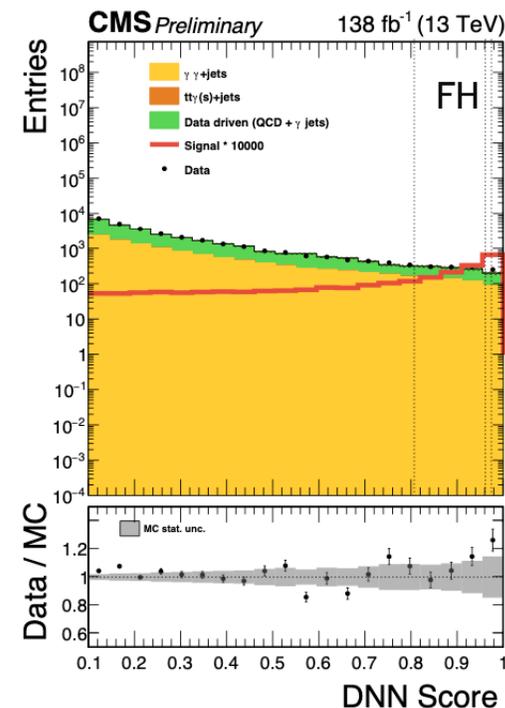
Processo $HH \rightarrow WW\gamma\gamma$ CMS



Moriond 2023

CMS-PAS-HIG-21-014

- *Eccellente risoluzione $m_{\gamma\gamma}$, $BR(H \rightarrow WW)=22\%$*
- Solo produzione ggF
- 3 categorie basate sul decadimento WW
(*compl. Leptonico (FL), semileptonico (SL), compl. Adronico (FH)*)
- Fondo: $tt/W + \gamma + \text{jet}$, singolo H , $DY Z \rightarrow ll$ (per FL)
- 2 DNN (FH e SL) e selezioni più stringenti (FL) per discriminare S/F
- Fit simultaneo in tutte le categorie su $m_{\gamma\gamma}$ (100 – 180 GeV)

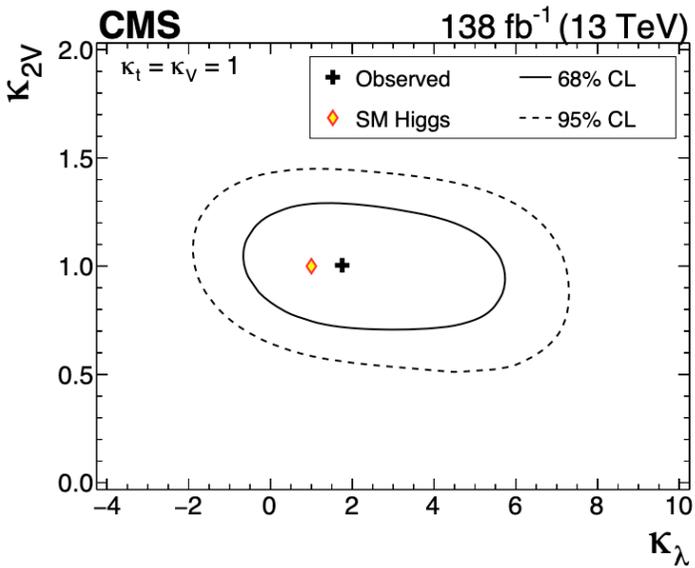


Limiti superiori Osservati (Attesi) 95%CL:

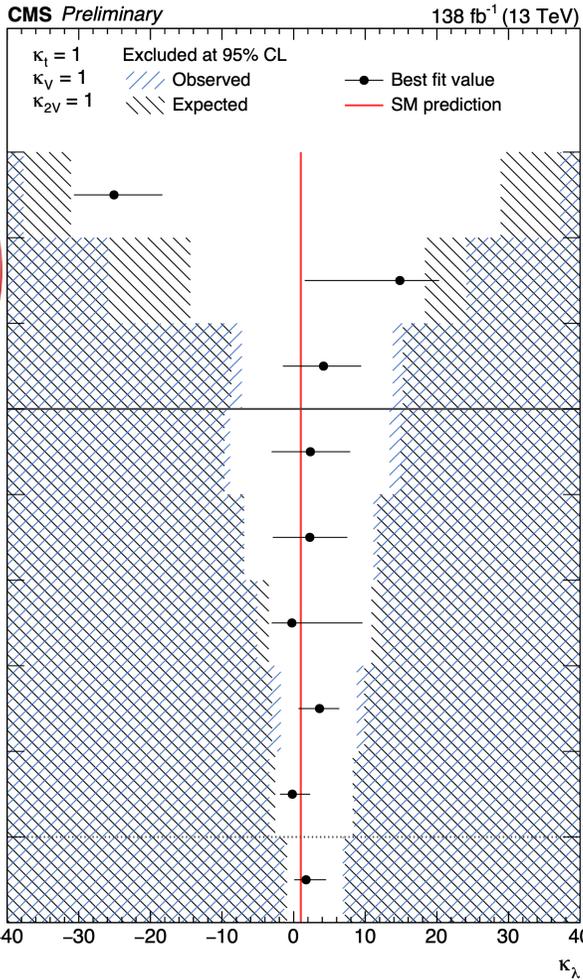
- $\sigma/\sigma_{SM} : 96.8 (52.5)$
- $-25.8 < \kappa_\lambda < 24.1$ ($-14.4 < \kappa_\lambda < 18.3$)

Combinazione risultati CMS

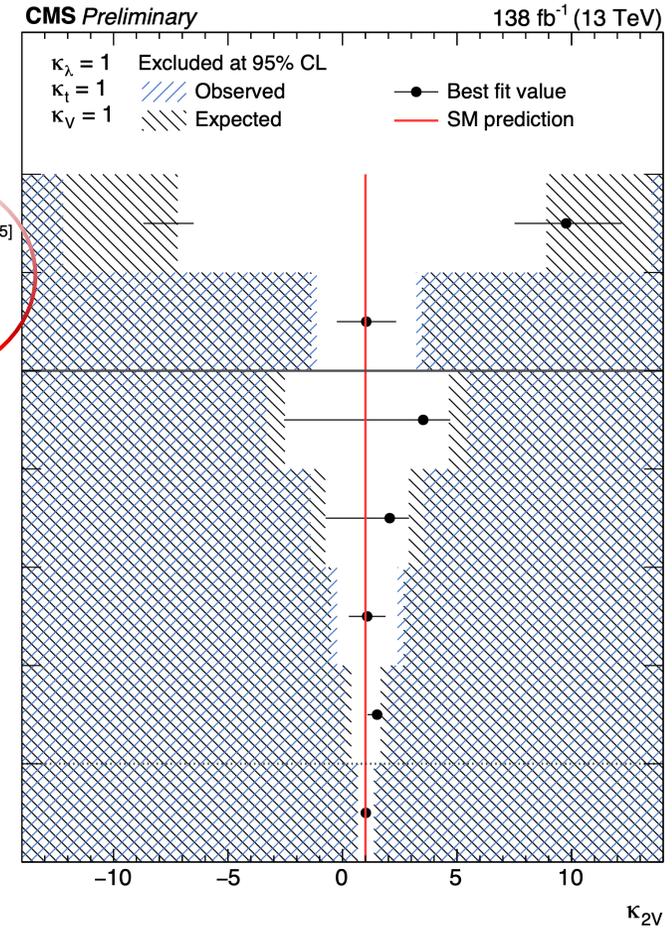
Nature 607 (2022) 60-68



Moriond 2023



Moriond 2023



Produzione non risonante HH oltre il Modello Standard

- E' possibile studiare fisica oltre il Modello Standard applicando una Teoria di campo effettiva ("Effective Field Theory", EFT)

- Operatori effettivi che possono modificare produzione HH ggF

- ❖ **Approccio H_{iggs} EFT** (simil teoria perturbativa chirale, H è un singoletto ED, approccio generale (accoppiamenti indipendenti), naturale estensione del κ - framework)

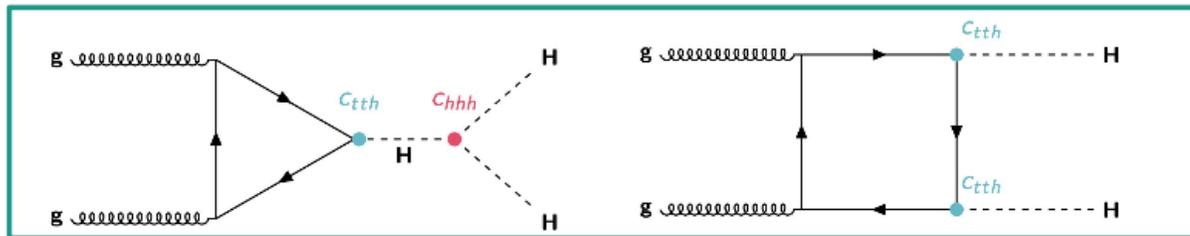
I parametri HEFT sono $c_{hhh}, c_{tth}, c_{ggh}, c_{tthh}, c_{ggghh}$ dove $c_{hhh} = \kappa_\lambda$ e $c_{tth} = \kappa_t$

In SM: $c_{hhh} = c_{tth} = 1$ e $c_{ggh} = c_{tthh} = c_{ggghh} = 0$

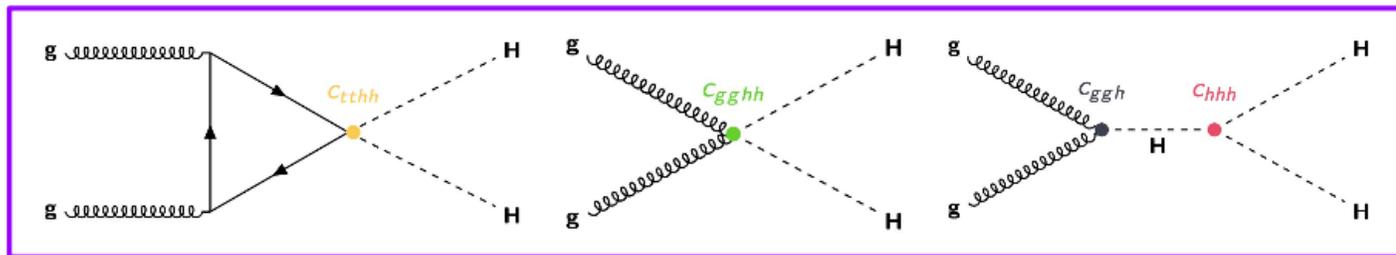
$$\Delta \mathcal{L}_{\text{HEFT}} = -m_t \left(c_t \frac{h}{v} + c_{tt} \frac{h^2}{v^2} \right) \bar{t} t - c_{hhh} \frac{m_h^2}{2v} h^3 + \frac{\alpha_s}{8\pi} \left(c_{ggh} \frac{h}{v} + c_{ggghh} \frac{h^2}{v^2} \right) G_{\mu\nu}^a G^{a,\mu\nu}$$

- Vari benchmark che rappresentano le differenti forme di m_{HH} ottenute dalla variazione di $c_{hhh}, c_{tth}, c_{ggh}, c_{tthh}, c_{ggghh}$ (BSM) in HEFT a NLO
- HH sensibile a c_{hhh} ma anche a c_{ggghh} e $c_{tthh} \rightarrow$ limiti 2D su (c_{hhh}, c_{ggghh}) e (c_{hhh}, c_{tthh})

↓
Limiti imposti sugli accoppiamenti e sezione d'urto in alcune analisi ATLAS e CMS

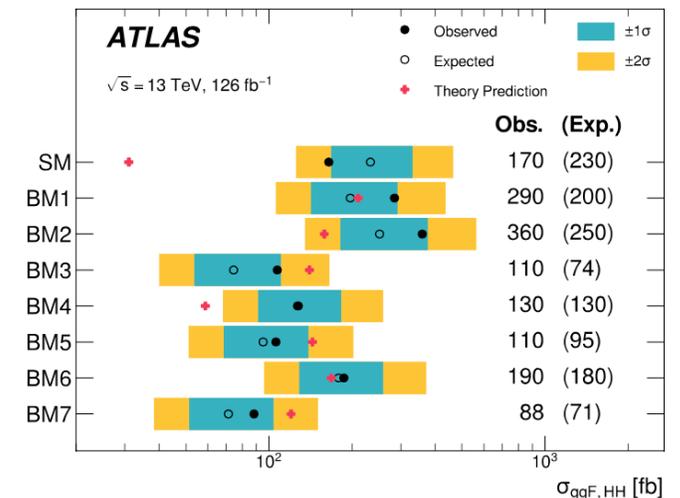


SM
O(4)



BSM
O(6)

ATLAS HH \rightarrow bbbb [arXiv:2301.03212](https://arxiv.org/abs/2301.03212)



Incertezze sistematiche

Le analisi HH sono dominate dall'incertezza statistica, le incertezze sistematiche hanno un effetto relativamente basso ma sono tuttavia importanti da considerare.

Per le tre analisi ($bb\gamma\gamma$, $bb\tau\tau$, $bbbb$) ATLAS le incertezze sistematiche dominanti sono:

$bb\gamma\gamma$: [Phys. Rev. D 106 \(2022\) 052001](#)

Source	Type	Relative impact of the systematic uncertainties [%]	
		Nonresonant analysis HH	Resonant analysis $m_X = 300$ GeV
Experimental			
Photon energy resolution	Norm. + Shape	0.4	0.6
Jet energy scale and resolution	Normalization	<0.2	0.3
Flavor tagging	Normalization	<0.2	0.2
Theoretical			
Factorization and renormalization scale	Normalization	0.3	<0.2
Parton showering model	Norm. + Shape	0.6	2.6
Heavy-flavor content	Normalization	0.3	<0.2
$\mathcal{B}(H \rightarrow \gamma\gamma, b\bar{b})$	Normalization	0.2	<0.2
Spurious signal	Normalization	3.0	3.3

TABLE VIII. Breakdown of the dominant systematic uncertainties. The impact of the uncertainties corresponds to the relative variation of the expected upper limit on the cross section when reevaluating the profile likelihood ratio after fixing the nuisance parameter in question to its best-fit value, while all remaining nuisance parameters remain free to float. The impact is shown in %. Only systematic uncertainties with an impact of at least 0.2% are shown. Uncertainties of the “Norm + Shape” type affect both the normalization and the parameters of the functional form. The rest of the uncertainties affect only the yields.

$bb\tau\tau$: [arXiv:2209.10910](#)

Source of Uncertainty	$\Delta\mu/\mu$
Theory uncertainties	
Theory uncertainty in signal cross-section	-9.0%
All other theory uncertainties	-1.4%
Background modeling uncertainties	
Bootstrap uncertainty	-7.1%
CR to SR extrapolation uncertainty	-7.5%
$3b1f$ nonclosure uncertainty	-2.0%

Table 8: Breakdown of the dominant systematic uncertainties. The impact of the uncertainties on the expected upper limit on $\mu_{\text{sig}^{\text{F+VBF}}}$ when re-evaluating the profile likelihood ratio after fixing the nuisance parameter(s) in question to its (their) best-fit value(s), while all remaining nuisance parameters remain free to float. The impact is shown in %. Only (groups of) systematic uncertainties that have an impact of at least 1% are shown. The impact of each experimental source of systematic uncertainty described in the text, as well as of all of them together, is less than 1%.

$bbbb$: [ATL-HDBS-2019-29](#)

Uncertainty source	Resonant $X \rightarrow HH$			
	Non-resonant HH	300 GeV	500 GeV	1000 GeV
Systematic	58%	65%	43%	37%
MC statistical	28%	44%	33%	18%
Experimental	12%	31%	8%	12%
Jet and E_T^{miss}	8%	27%	5%	4%
b -jet tagging	5%	5%	3%	7%
$\tau_{\text{had-vis}}$	6%	12%	3%	8%
Electrons and muons	3%	3%	2%	2%
Luminosity and pile-up	3%	2%	2%	5%
Background and signal and modelling	42%	39%	26%	30%
Fake- $\tau_{\text{had-vis}}$	8%	19%	4%	8%
Top-quark	24%	17%	12%	8%
$Z(\rightarrow \tau\tau) + \text{HF}$	9%	17%	9%	15%
Single Higgs boson	29%	2%	14%	15%
Other backgrounds	3%	2%	5%	3%
Signal	5%	14%	7%	15%

Table 4: Breakdown of the relative contributions to the uncertainty in the extracted signal cross-sections, as determined in the likelihood fit (described in Section 8) to data. They are obtained by fixing the relevant nuisance parameters in the likelihood fit, subtracting the square of the obtained uncertainty in the fitted signal cross-section from the square of the total uncertainty, taking the square root, and then dividing by the total uncertainty. The sum in quadrature of the individual components differs from the total uncertainty due to correlations between uncertainties in the different groups.

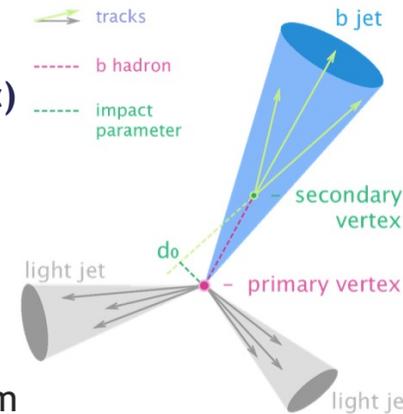
Algoritmo di b-tagging ATLAS

- Flavor tagging: identificazione dei jet prodotti da quark pesanti (b, c)
 - **b-jets: jets contengono B-adroni**
- Misurare la probabilità per un jet di essere compatibile con l'adronizzazione di un quark b, identificando le proprietà tipiche di un mesone B e il suo decadimento come
 - ❑ Vita media significativa, 1.6 ps, lunghezza di decadimento di pochi mm
 - ❑ Grande massa, ≥ 5 GeV
 - ❑ Frammentazione, B-adroni prendono $\sim 3/4$ dell'energia del jet
 - ❑ Vertice secondario, ~ 3 mm dal punto di interazione primario
 - ❑ Parametro di impatto
 - ❑ Leptoni leggeri, BR mesoni B per un decadimento semileptonico: 35%

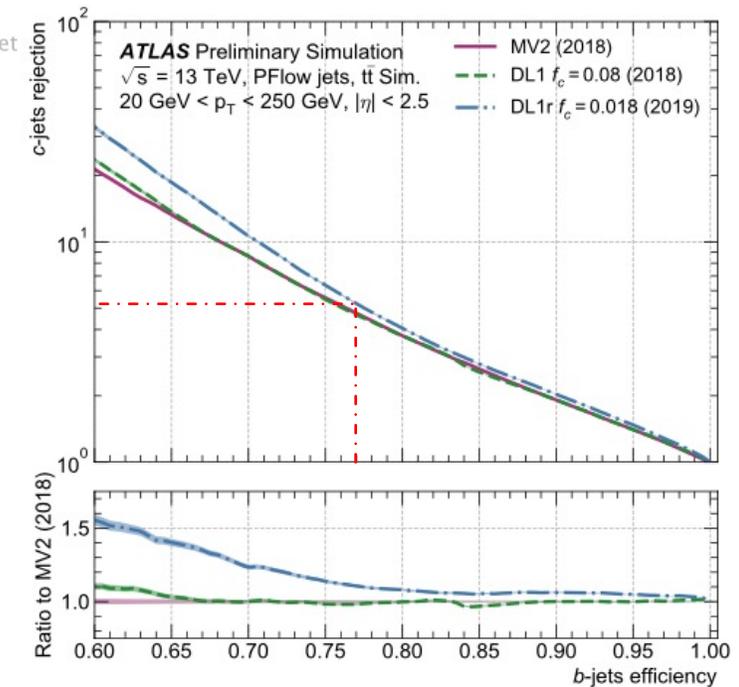
↓
Tecniche MVA

Variabile discriminante finale

- L'output degli algoritmi di flavor tagging è una variabile continua
 - ↓ valore discriminante: ↑ b-jet ma ↑ no b-jet



Flavor tagging performance:
reiezione jet c e leggeri vs
efficienza b-tagging



Più alta efficienza WP : 77%

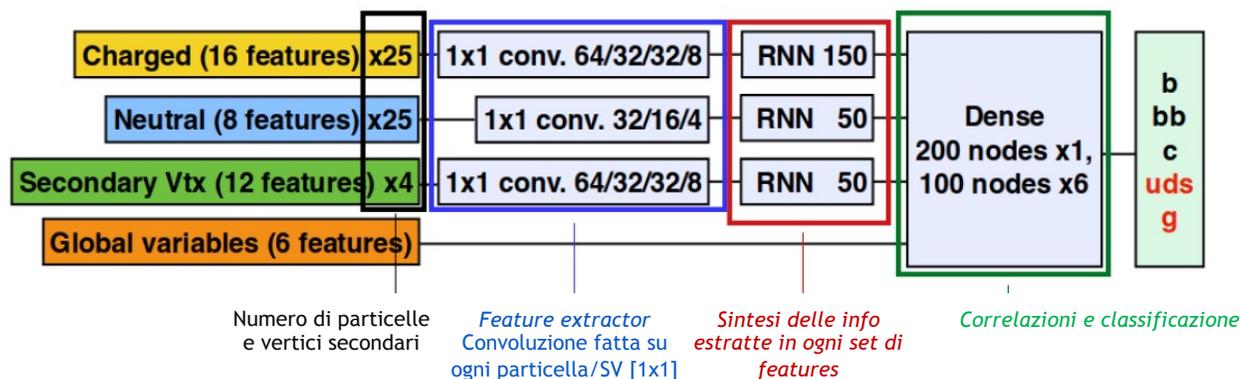
DL1r: aggiunta RNNIP (+ottimizzazione architettura network) → miglioramento significativo della reiezione jet -c e leggeri

Algoritmi di tagging CMS - 1



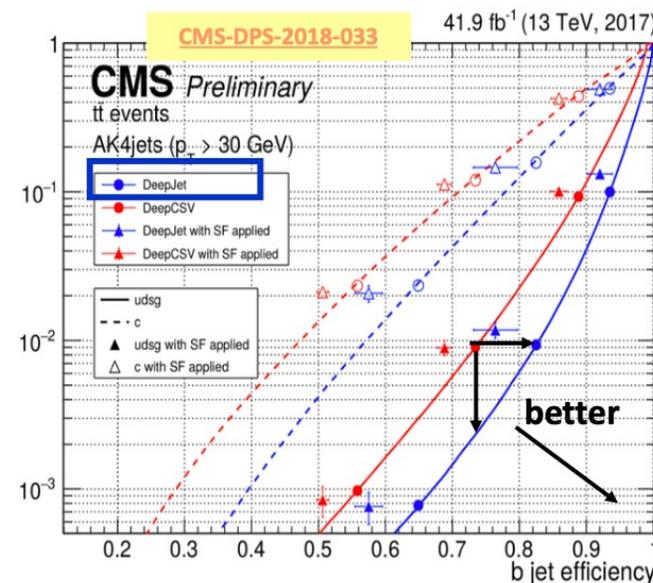
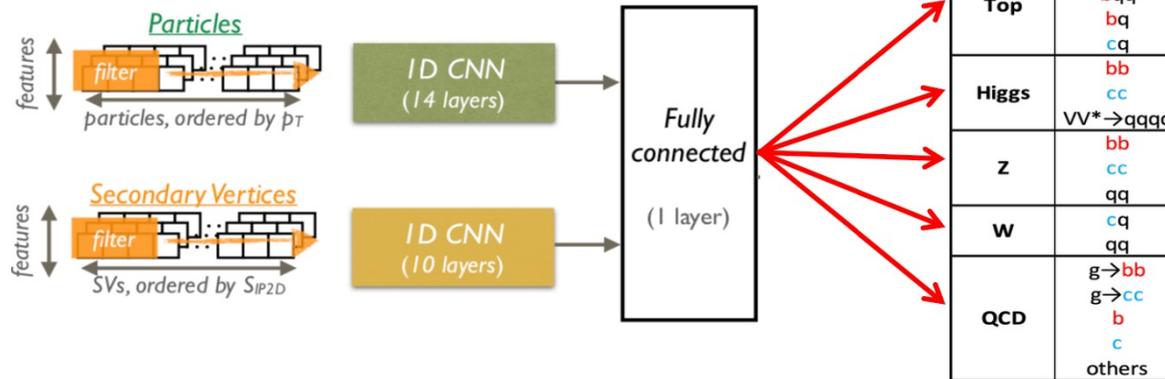
➤ DeepJet (piccolo R, AK4)

- Uso delle informazioni *low-level* direttamente in una complessa Deep Neural Network per tagging jet
- Jet come lista di particelle (CNN-1D)
- Tagging quark pesanti & separazione quark-gluone *in one go*



➤ DeepAK8 (grande R - boosted)

- Jet come sequenza di particelle
- Molto versatile → differenti decadimenti con differente contenuto in flavour



Algoritmi di tagging CMS - 2



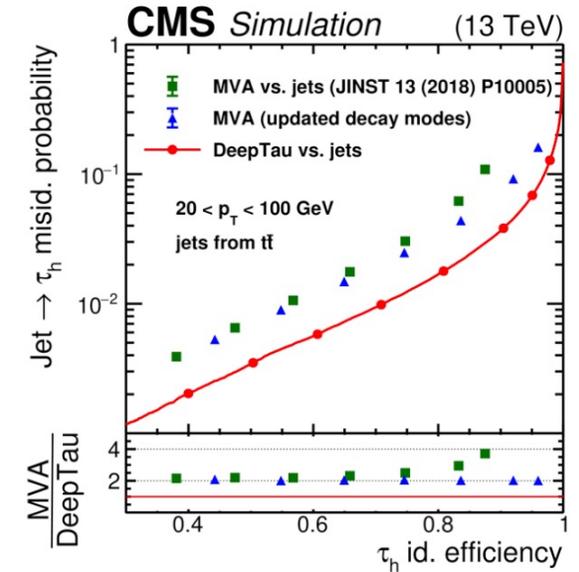
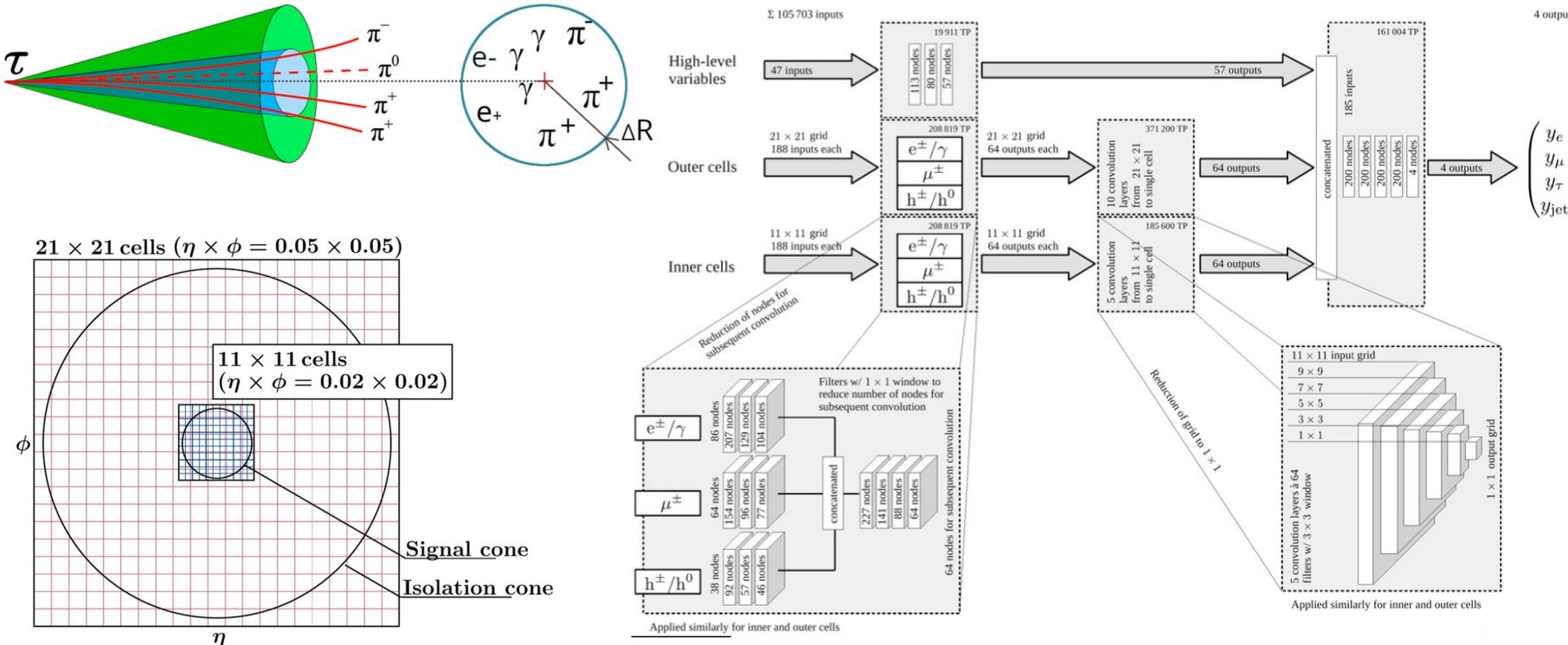
➤ DeepTau

- Convolutional Deep Neural Network per discriminare τ_{had} da jet, elettroni e muoni
- Le informazioni su τ *High-level* e proprietà dell'evento sono combinate con quelle su candidati ParticleFlow *low-level*, elettroni e muoni completamente ricostruiti ed usate come input
- Ogni candidato è inserito in una griglia (η, ϕ) , divisa in tre blocchi (*adronico, muonico, e-gamma*)
- *Cono di segnale*: $\Delta R < 0.1$ (11x11) ; *cono di isolamento*: $\Delta R < 0.5$ (21x21)

➤ Tre discriminatori finali

$$D_{\tau}^{\alpha}(p) = \frac{p_{\tau}}{p_{\tau} + p_{\alpha}}$$

Dove $\alpha = e, \mu, jet$



Algoritmi di tagging CMS - 3



➤ ParticleNet

- Graph Neural Network per classificare jet
- Jet trattati come set non ordinati di particelle nello spazio
- Input: candidati ParticleFlow e vertici secondari
- Multiclassificatore con diversi nodi di output: W/Z/H/top/QCD+decadimenti (es: discriminante bb $D_{bb} = \frac{P[X \rightarrow bb]}{P[X \rightarrow bb] + P[QCD]}$)
- Impara in modo gerarchico: prima le strutture locali poi quelle globali
- Miglioramento significativo in performance rispetto ai precedenti algoritmi (come AK8) → di un fattore 2 per jet S/F

