

Prospettive per la misura della produzione associata di due bosoni di Higgs nel canale $HH \rightarrow bb4l$ con il rivelatore CMS a HL-LHC



Elisa Fontanesi

on behalf of the CMS Collaboration



8 - 10 Aprile 2019
**Incontri di Fisica
delle Alte Energie**
Napoli



Sommario

2

Produzione doppio Higgs

HL-LHC

HH

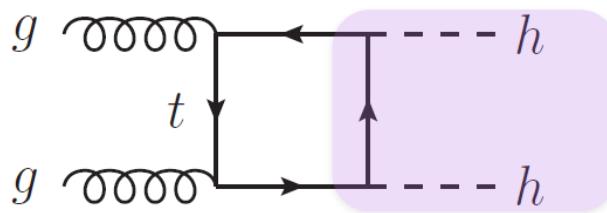
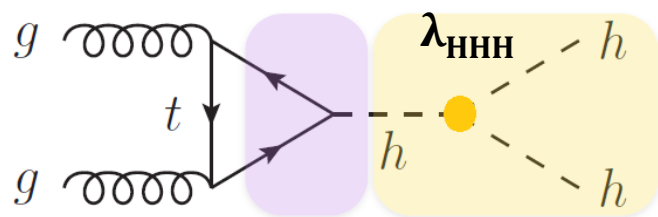
$HH \rightarrow bbZZ(4\ell)$

Risultati combinati

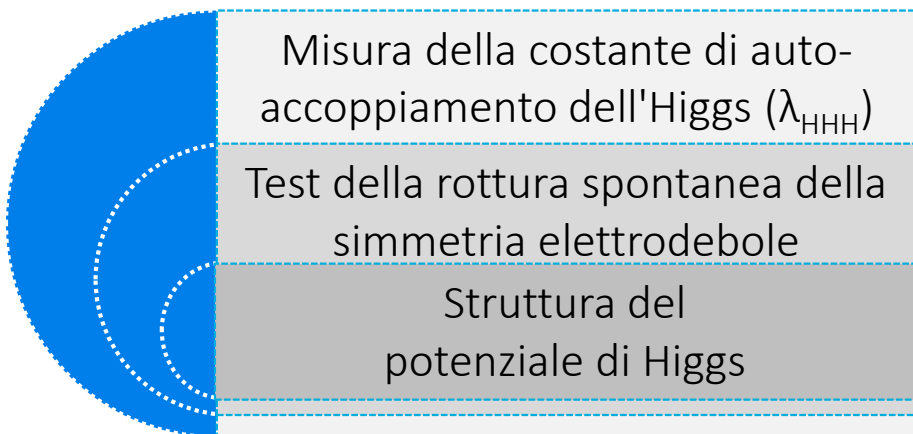
Produzione del doppio Higgs

3

Nei collider adronici il canale di produzione non-risonante di una coppia di Higgs è costituito dalla **fusione gluone-gluone**:



Interferenza distruttiva
=
piccola sezione d'urto



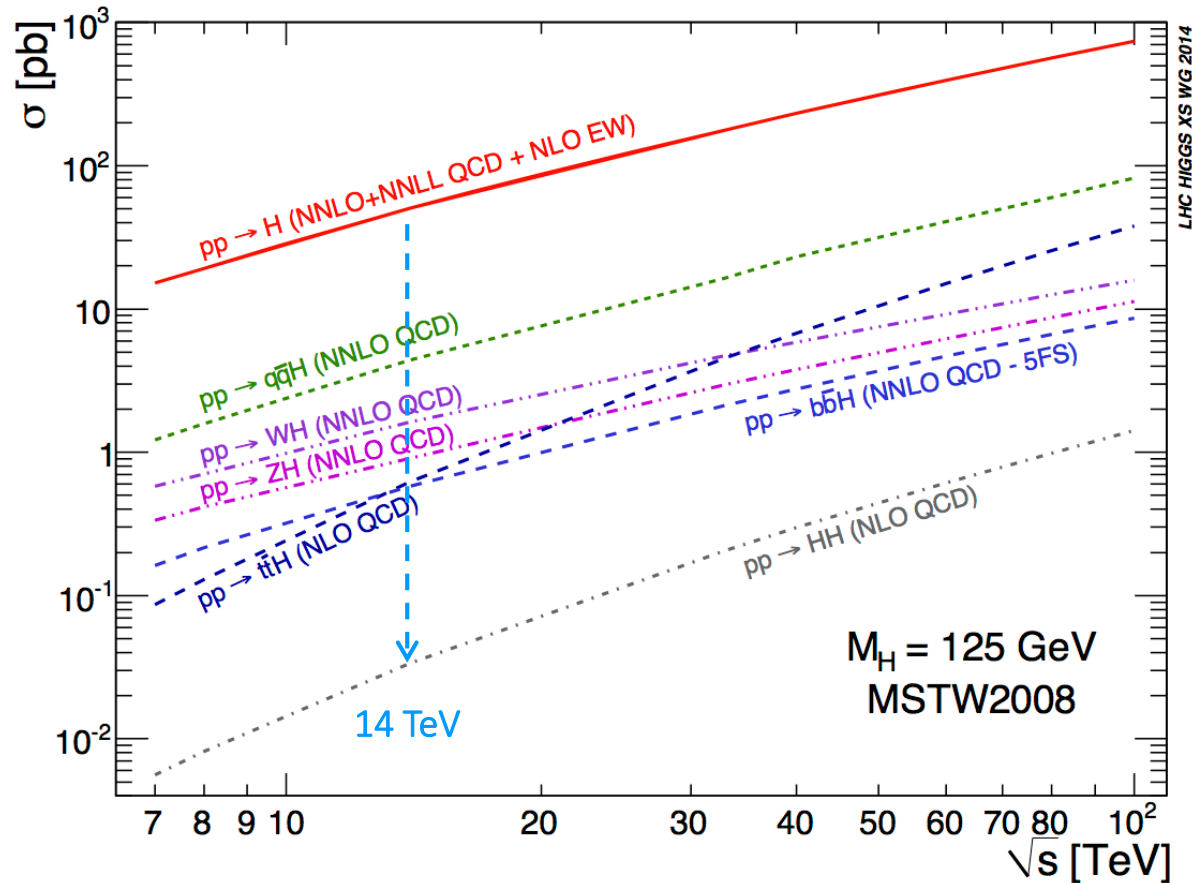
+

Ogni possibile deviazione di λ_{HHH} potrebbe dare indicazioni di nuova fisica:

$$\kappa_\lambda = \lambda_{HHH} / \lambda_{HHH}^{\text{SM}}$$

Produzione del doppio Higgs

4

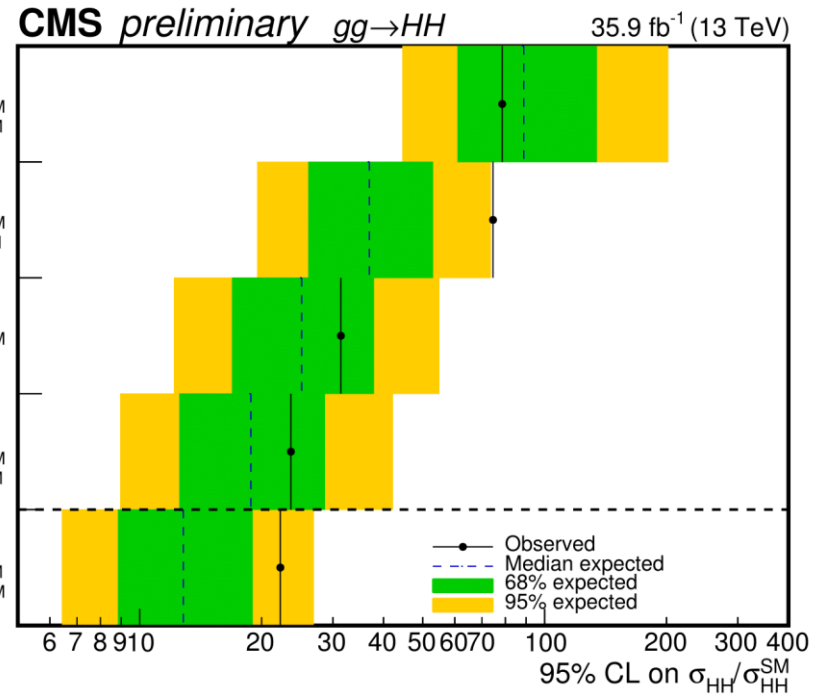
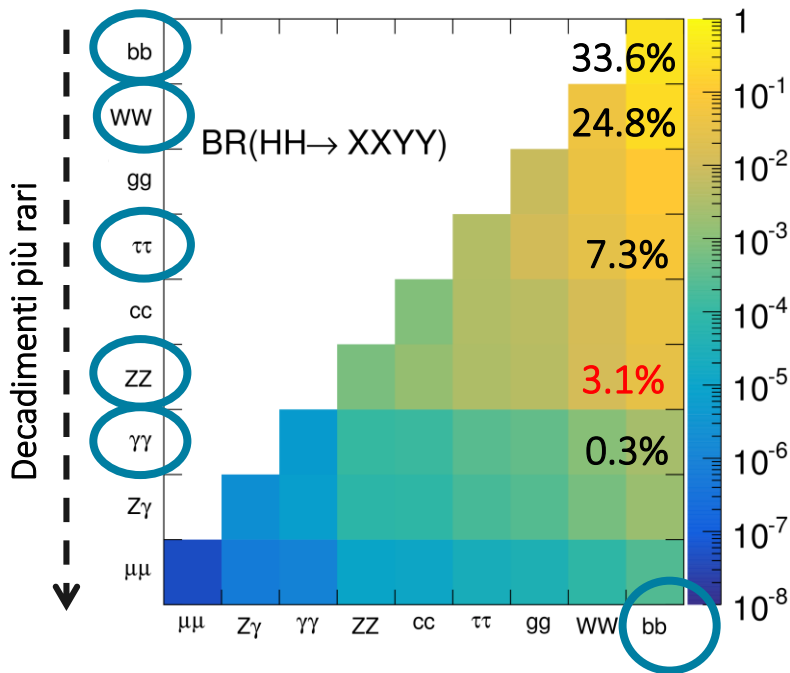


Processo raro nel MS:
 $\sigma(gg \rightarrow HH) \approx 0.1\% \cdot \sigma(gg \rightarrow H)$

σ_{HH}	
13 TeV	31.05 fb
14 TeV	36.69 fb

HH @ Run 2

5



- Sono stati studiati cinque canali: bbbb, bb $\tau\tau$, bb $\gamma\gamma$, bbVV(lvlv) con V=W/Z.
- Il limite superiore osservato (atteso) sulla sezione d'urto di produzione HH è fissato al 95% CL a 22.2 (12.8) volte il valore del MS.

HH $\rightarrow$ bbZZ(4 ℓ) @ HL-LHC

6

HL-LHC

dieci anni di presa
dati ad alta luminosità
=
ampia statistica
disponibile

Difficili condizioni di
presa dati
=
elevato numero di
eventi di pile-up (PU)

Stato finale pulito ma raro:

bbZZ*(4 ℓ)

Analisi inserita in uno studio più ampio:
combinazione dei risultati ottenuti nei
cinque canali (ortogonali fra loro)

bbbb, bb $\tau\tau$, bb $\gamma\gamma$, bbWW(lvlv), bbZZ*(4 ℓ)

SEGNALE

La presenza di quattro leptoni associati a due b jet porta ad una **topologia dello stato finale pulita**, che consente di mantenere sotto controllo i fondi a fronte di una buona efficienza di selezione del segnale.

FONDI

I principali processi di fondo sono:

- ttH(ZZ)
- ttZ
- ggH
- ZH

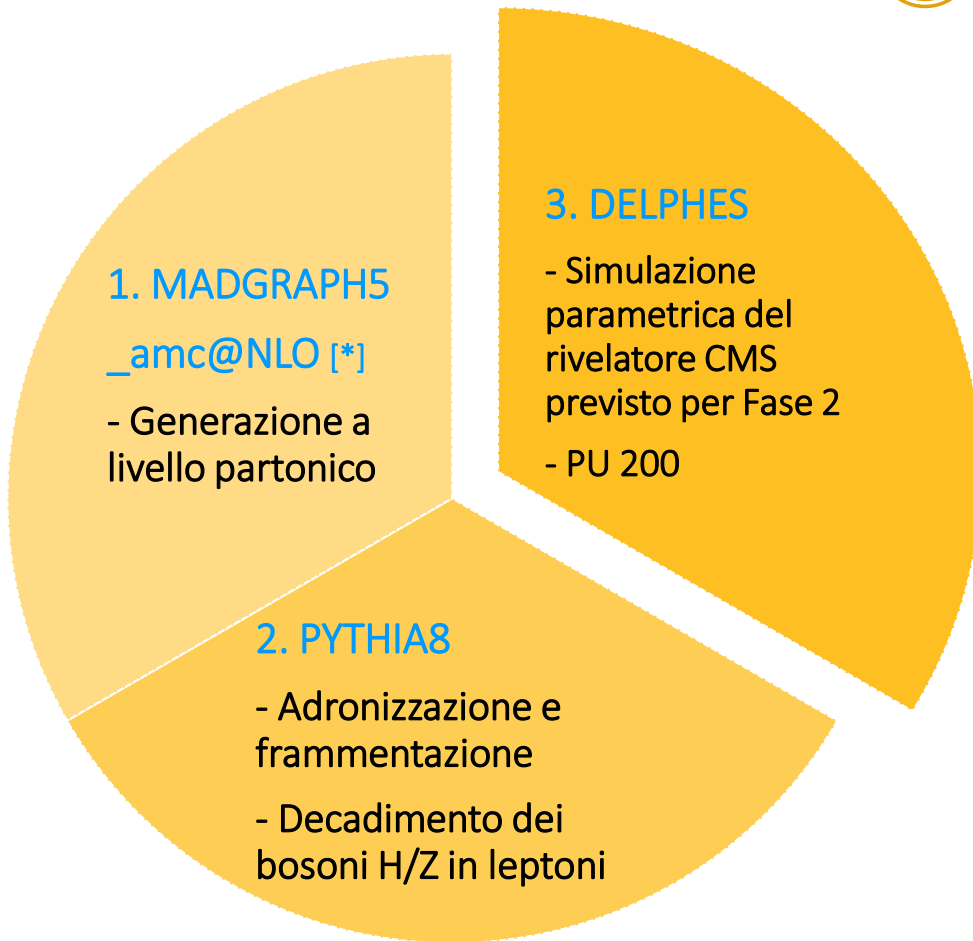
Contributi minori: WH, VBF

Contributo trascurabile: ttZZ, ttH(WW)

Simulazione degli eventi

7

[3] arXiv:1405.0301
[4] arXiv:1410.3012
[5] arXiv:1307.6346



Process	$\sigma \times \text{BR} [\text{fb}]$ [**]
$gg \rightarrow HH \rightarrow bbZZ^*(4l)$	0.0053
$gg \rightarrow ttH(4l)$	0.0761
$gg \rightarrow Z(bb)H(4l)$	0.0183
$gg \rightarrow WH(4l)$	0.1876
$gg \rightarrow ttZ(2l)$	69.224
$VBF H(4l)$	1.1690
$gg \rightarrow H(4l)$	15.007

[*] Produzione privata di segnali e fondi ad esclusione di ggH e VBF

[**] Sezioni d'urto teoriche

Selezione degli eventi

8

Segnale e fondi sono stati studiati utilizzando una classica analisi “cut-based”

PRESELEZIONE

Leptoni

$|\eta| < 2.8$
 $p_T > 5$ (7) GeV per μ (e)
Identificazione “loose” per i muoni
Identificazione “medium” per gli elettroni
Isolamento relativo < 0.7
 $\Delta R(\ell_i - \ell_j, j \neq i) > 0.02$

Jet

Algoritmo anti-kt con $R=0.4$
B tag di tipo “medium MTD” [*]

[*] Si tiene conto dell’informazione temporale sulle particelle legata all’inserimento di un nuovo rivelatore progettato per gli interventi di Fase 2 su CMS, il Mip Timing Detector (MTD).

SELEZIONE

$H(4\ell) + 2$ b -jet

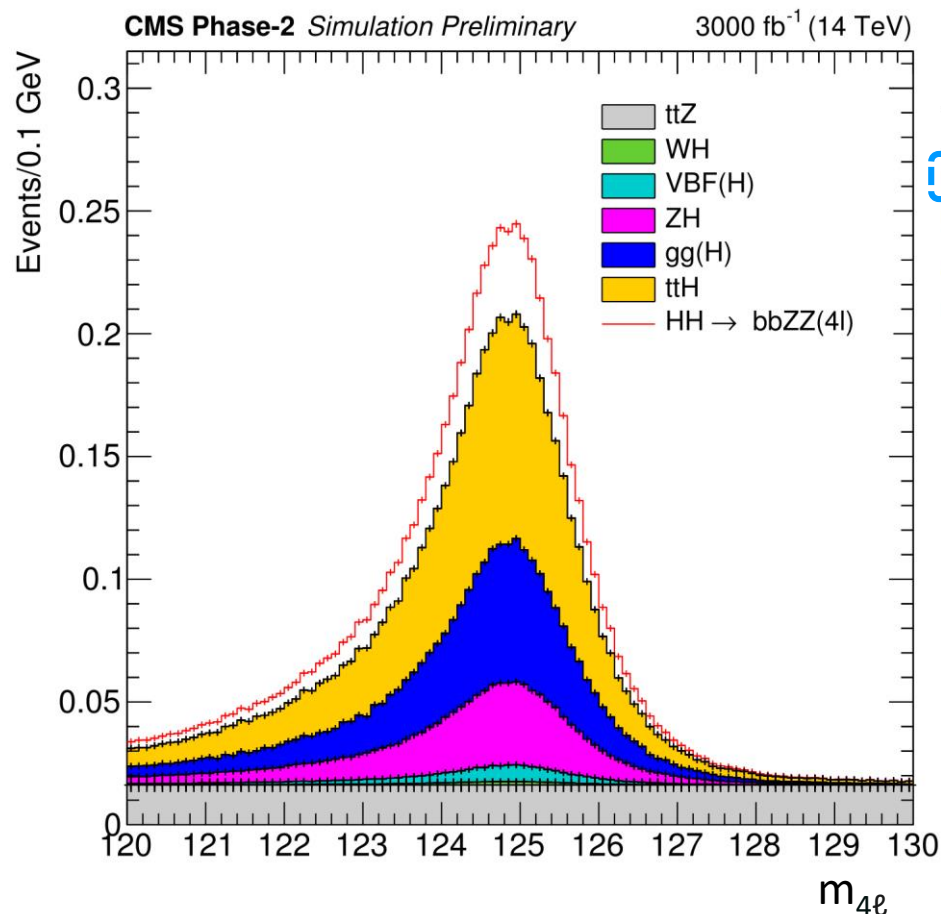
$N(\ell) \geq 4$
 $N(\text{coppie } \ell^+\ell^-) \geq 2$
 $M_{Z1} = [50, 100]$ GeV
 $M_{Z2} = [12, 60]$ GeV
 p_T minimo per due ℓ ($> 20 / > 10$ GeV)
 $M_{4\ell} = [120, 130]$ GeV

$2 \leq N(b \text{ jet}) \leq 3$
 $M_{bb} = [80, 160]$ GeV
 $0.5 < \Delta R(bb) < 2.3$

$MET < 150$ GeV
 $\Delta R(HH) > 2.0$

Risultati

9



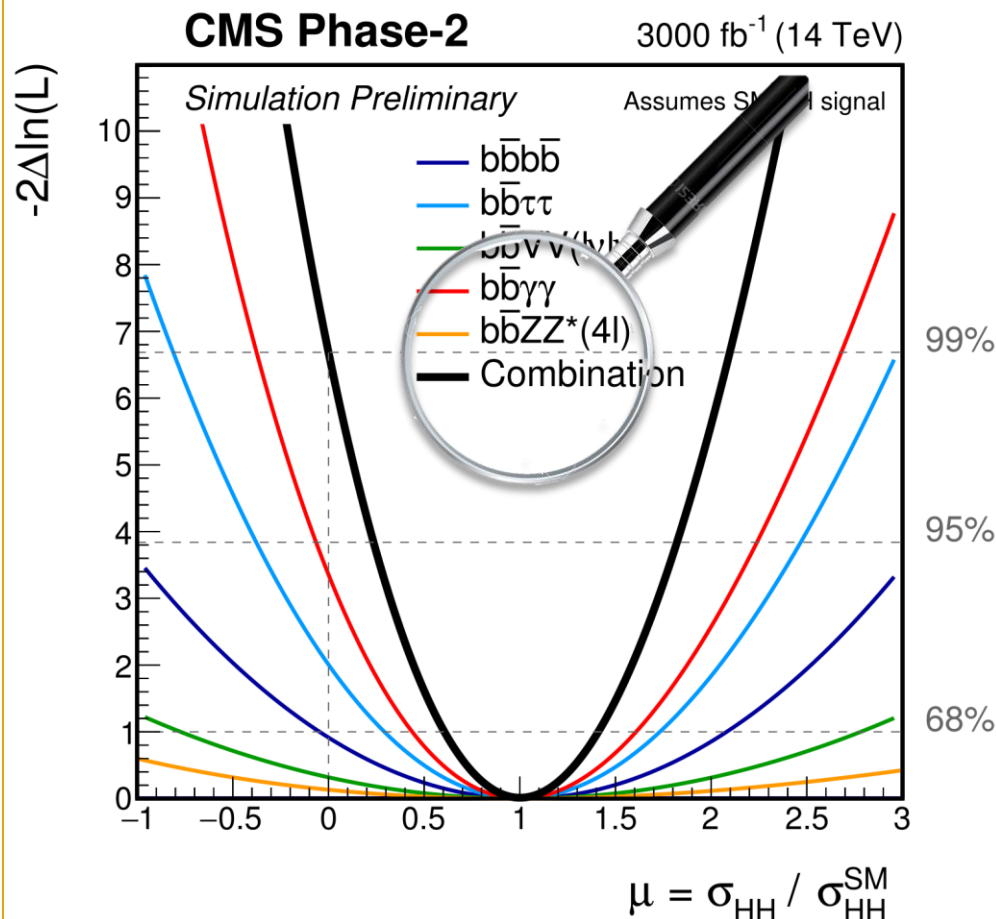
Eventi selezionati nel canale bbZZ*(4ℓ) @ 3000 fb⁻¹

	HH	t̄tH	ggH	ZH	WH	VBF	t̄tZ
$b\bar{b}4\ell$	1.0	2.5	1.5	$9.4 \cdot 10^{-1}$	$4.0 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-1}$	1.6
$b\bar{b}4\mu$	$4.9 \cdot 10^{-1}$	1.3	$6.9 \cdot 10^{-1}$	$4.9 \cdot 10^{-1}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-1}$	$8.1 \cdot 10^{-1}$
$b\bar{b}4e$	$8.8 \cdot 10^{-2}$	$2.0 \cdot 10^{-1}$	$5.3 \cdot 10^{-2}$	$6.9 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	0
$b\bar{b}2e2\mu$	$2.6 \cdot 10^{-1}$	$7.5 \cdot 10^{-1}$	$2.7 \cdot 10^{-1}$	$5.9 \cdot 10^{-2}$	$7.2 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$8.1 \cdot 10^{-1}$

Considerata una luminosità integrata pari a 3000 fb⁻¹, nello stato finale inclusivo bb4ℓ ci si aspetta **1 evento HH** per un totale di **6.8 eventi di fondo**.

Risultati

10



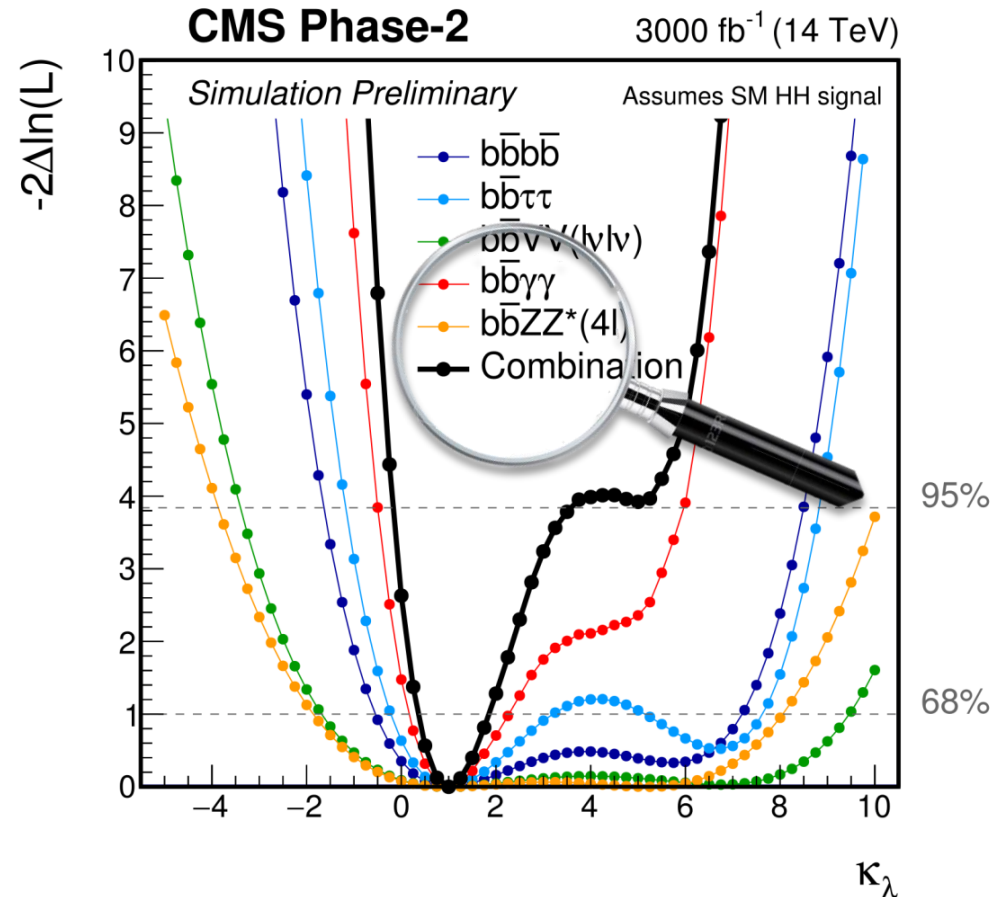
La significatività attesa per il segnale non risonante HH per il canale **bbZZ(4ℓ)** in accordo con le previsioni del MS è **0.37 σ**.

Un limite superiore sulla sezione d'urto del processo è fissato a **6.6 volte la previsione del MS** con un livello di confidenza del 95%.

Risultati

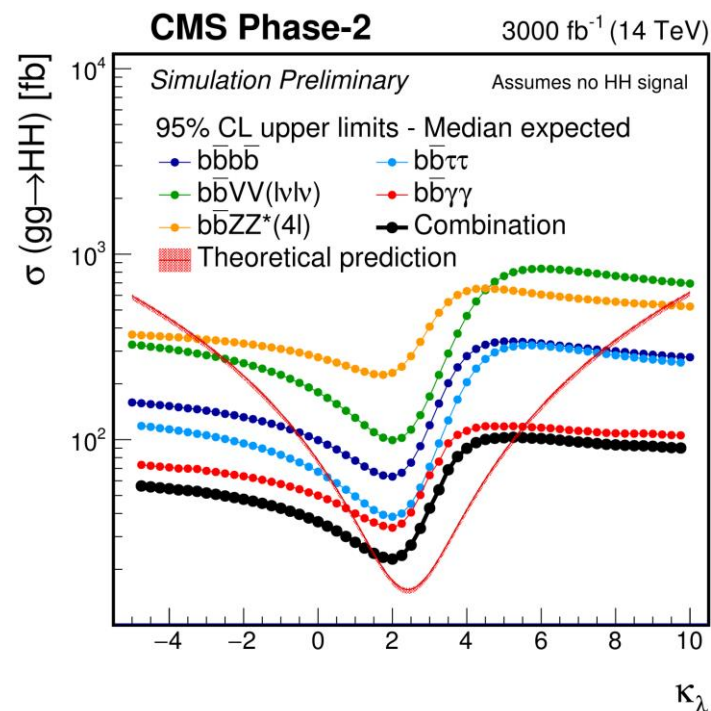
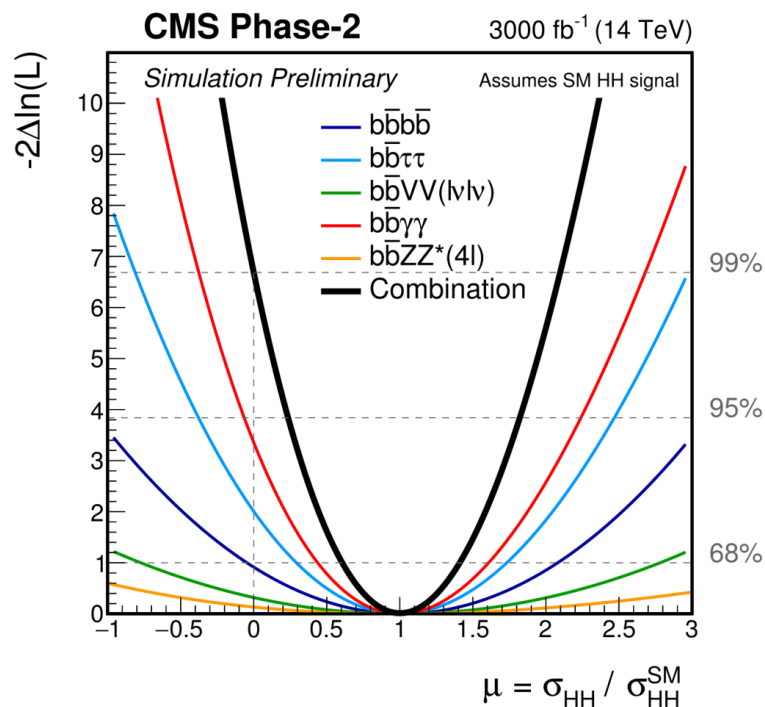
11

- Per studiare la sensibilità al parametro κ_λ , sono stati generati vari campioni di segnale per diversi valori di κ_λ nell'intervallo $[-10, 10]$.
- Approccio per modellizzare il segnale per valori di κ_λ diversi da 1 (scenario MS): yield parametrizzati in funzione del parametro κ_λ con una funzione quadratica fittando vari campioni di segnale dopo la selezione completa.



Combinazione dei canali

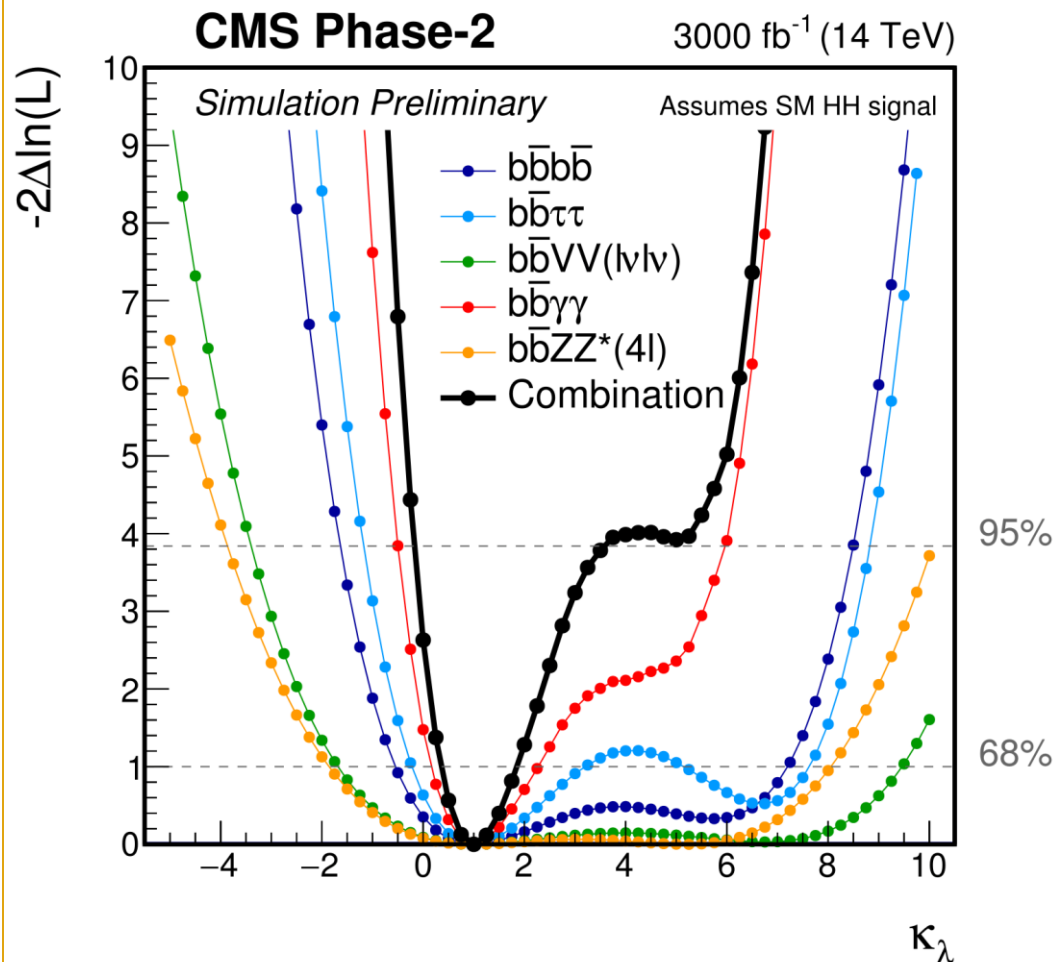
12



HH →	bbbb	bbττ	bbγγ	bbVV(lvlv)	bbZZ*(4l)	Combinazione
Significatività (σ)	0.95	1.4	1.8	0.56	0.37	2.6
Limite @ 95% CL	2.1	1.4	1.1	3.5	6.6	0.77

Combinazione dei canali

13



Intervalli di confidenza per κ_λ

68% CL

[0.35, 1.9]

95% CL

[-0.18, 3.6]

Conclusioni

14



Le prestazioni dell'analisi $HH \rightarrow bb4\ell$ ($\ell = e, \mu$) sono state studiate nel contesto della ricerca della produzione associata di due bosoni di Higgs durante HL-LHC:

- la significatività attesa per il segnale non risonante HH in accordo con le previsioni del MS è **0.37σ** ;
- un limite superiore sulla sezione d'urto del processo è fissato a **6.6 volte la previsione del MS** con un livello di confidenza del 95%.



L'analisi $HH \rightarrow bb4\ell$ contribuisce alla combinazione dei risultati di cinque differenti canali per fornire le prospettive per la misura della produzione HH ad HL-LHC con l'esperimento CMS:

- la significatività attesa per il segnale non risonante HH in accordo con le previsioni del MS è **2.6σ** ;
- un limite superiore sulla sezione d'urto del processo è fissato a **0.77 volte la previsione del MS** con un livello di confidenza del 95%;
- gli intervalli di confidenza attesi su κ_λ sono **$[0.35, 1.9]$ e $[-0.18, 3.6]$ al 68% e 95% CL.**



I risultati sono stati inclusi all'interno dello Yellow Report, completato a gennaio 2019. Nel documento:

Higgs Physics at the HL-LHC and HE-LHC (arXiv:1902.00134)

sono incluse anche le proiezioni ottenute dalla combinazione dei risultati di CMS con quelli ottenuti da ATLAS

$$\mathcal{L}_{hh} = -\frac{m_h^2}{2v} \left(1 - \frac{3}{2}c_H + c_v\right) h^3 + \frac{\alpha_s c_g}{4\pi} \left(\frac{h}{v} + \frac{h^2}{2v^2}\right) G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} \\ - \left[\frac{m_t}{v} \left(1 - \frac{c_H}{2} + c_t\right) \bar{t}_L t_R h + \text{h.c.}\right] - \left[\frac{m_t}{v^2} \left(\frac{3c_t}{2} - \frac{c_H}{2}\right) t_L t_R h^2 + \text{h.c.}\right]$$

Grazie per la
vostra attenzione

$$\mathcal{L}_{hh} = -\frac{m_{\tilde{t}}^2}{2v} \left(1 - \frac{3}{2}c_H + c_u\right) h^3 + \frac{\alpha_s c_g}{4\pi} \left(\frac{h}{v} + \frac{h^2}{2v^2}\right) G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} \\ - \left[\frac{m_t}{v} \left(1 - \frac{c_H}{2} + c_t\right) \bar{t}_L t_R h + \text{h.c.}\right] - \left[\frac{m_t}{v^2} \left(\frac{3c_t}{2} - \frac{c_H}{2}\right) t_L t_R h^2 + \text{h.c.}\right]$$

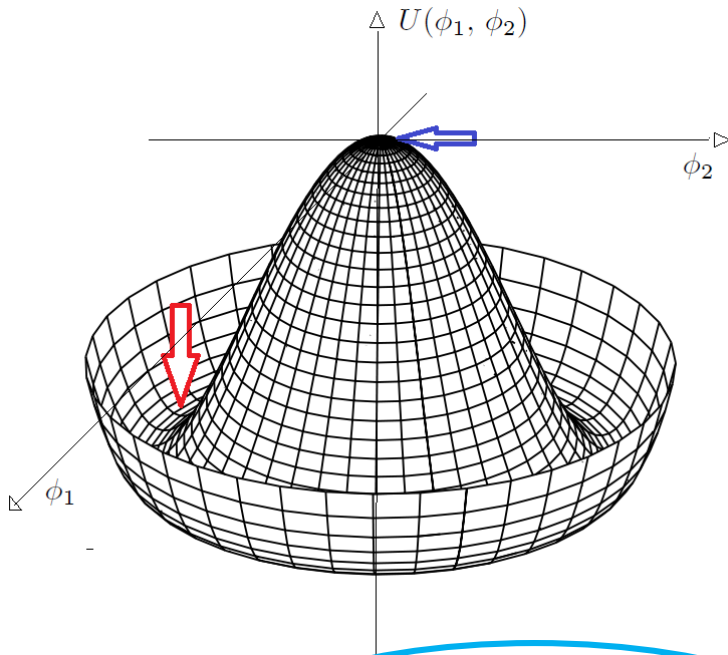
BACK UP

Lagrangiana hh

Costanti d'accoppiamento del bosone di Higgs:

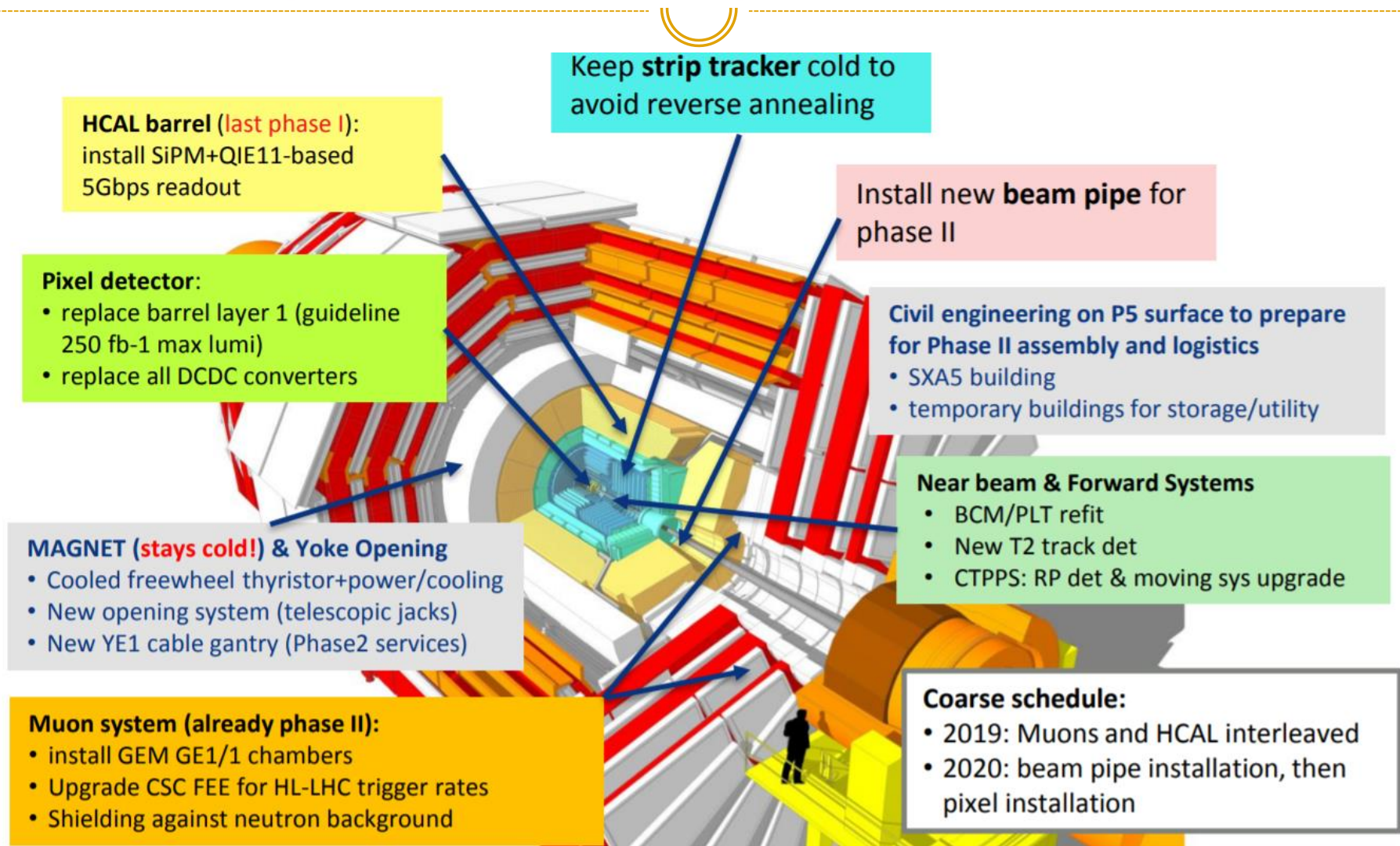
$$g_{HVV} \sim \frac{2m_v^2}{v}$$

$$g_{Hff} \sim \frac{m_f}{v}$$



$$\mathcal{L}_{hh} = -\frac{m_h^2}{2v} \left(1 - \frac{3}{2}c_H + c_6 \right) h^3 + \frac{\alpha_s c_g}{4\pi} \left(\frac{h}{v} + \frac{h^2}{2v^2} \right) G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} - \left[\frac{m_t}{v} \left(1 - \frac{c_H}{2} + c_t \right) \bar{t}_L t_R h + \text{h.c.} \right] - \left[\frac{m_t}{v^2} \left(\frac{3c_t}{2} - \frac{c_H}{2} \right) \bar{t}_L t_R h^2 + \text{h.c.} \right]$$

Upgrade di Fase 2



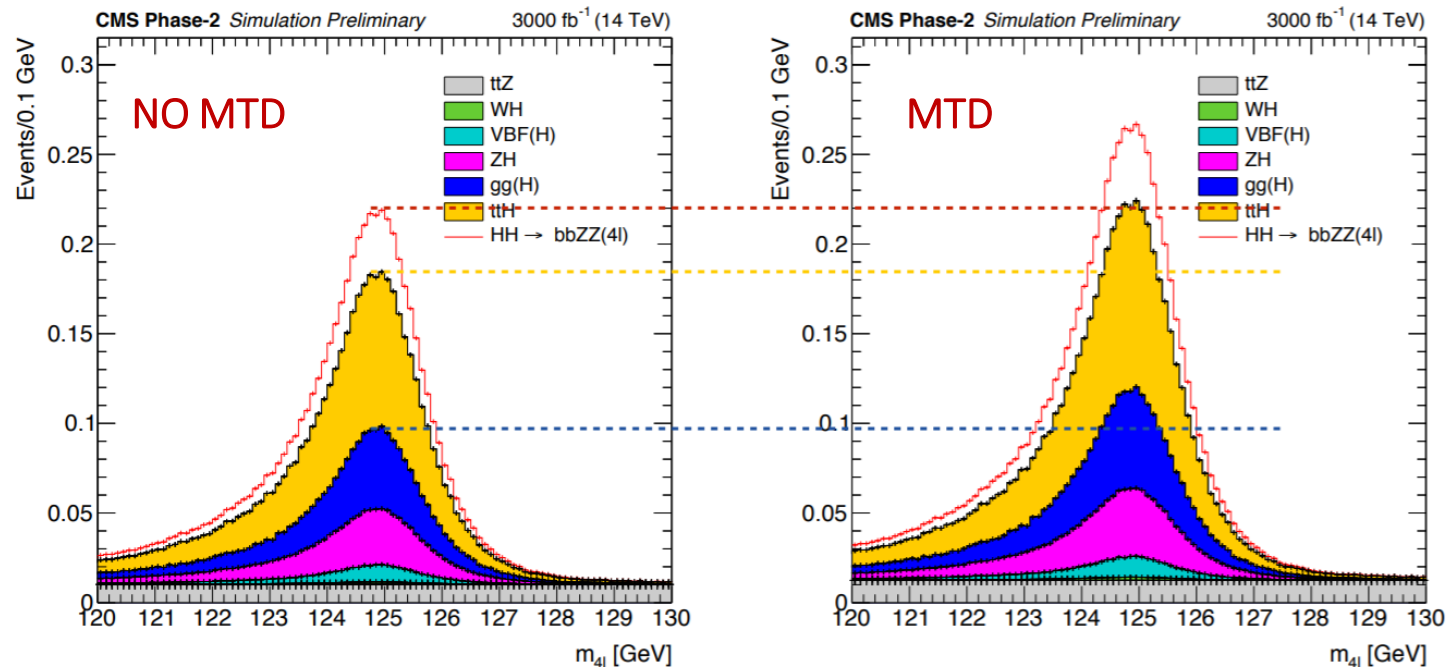
Incertezze sistematiche

- Luminosità: 1%
- Efficienza di b tag (η , p_T): 1% ($p_T < 300$ GeV), 2-6% (grandi p_T), 1% (sotto-jet),
- Ricostruzione dei jet: 0.2-2%
- Efficienze di identificazione e isolamento per gli elettroni): 2.5% ($p_T < 20$ GeV), 0.5% ($p_T > 20$ GeV)
- Efficienze di identificazione e isolamento per i muoni: 0.5%
- Ricostruzione τ : 5%
- Ricostruzione γ e efficienza di identificazione: 1%
- Scala di energia e risoluzione per i γ : 0.5% e 5%
- Trigger: pienamente efficienti
- Incertezze sulle sezioni d'urto teoriche: ridotte della metà rispetto ai valori attuali

HH $\rightarrow$ bbZZ(4 ℓ) con MTD

La presenza del rivelatore MTD può aumentare la sensibilità nella ricerca della produzione HH in quanto determina un impatto considerevole su vari tipi di oggetti.

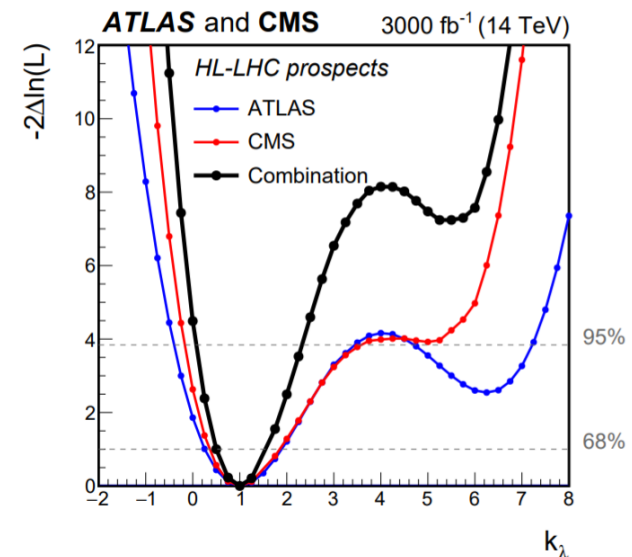
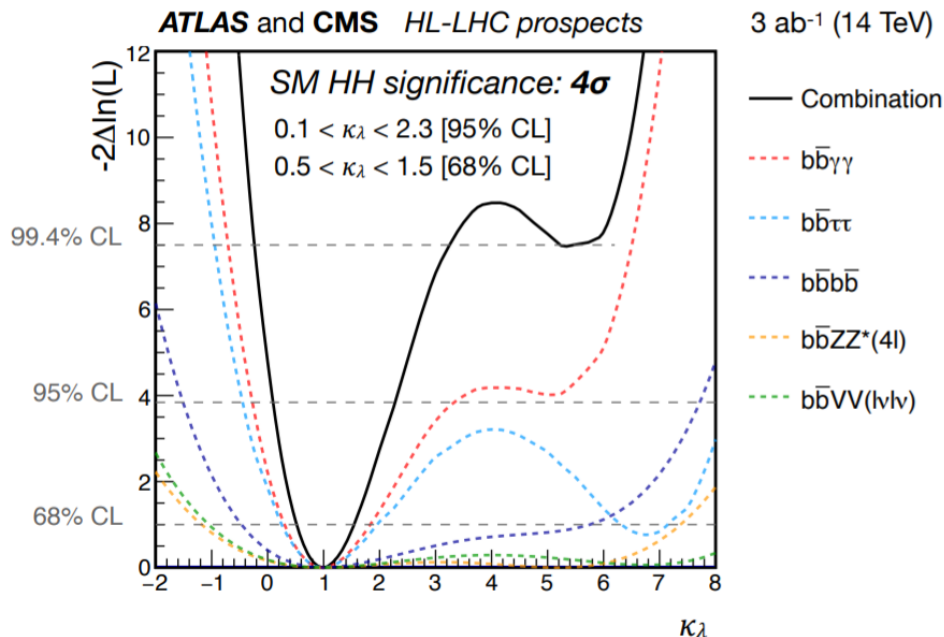
- L'impatto è stato studiato riscaldando a livello di analisi l'efficienza attesa su leptoni e jet in modo da confrontare due scenari: NO MTD (medium b tag) e MTD (fattori di scala per parametrizzare le prestazioni di MTD su leptoni e jet).
- Si osserva un miglioramento del 10% nella significatività e del 10-15% nella precisione su κ_λ



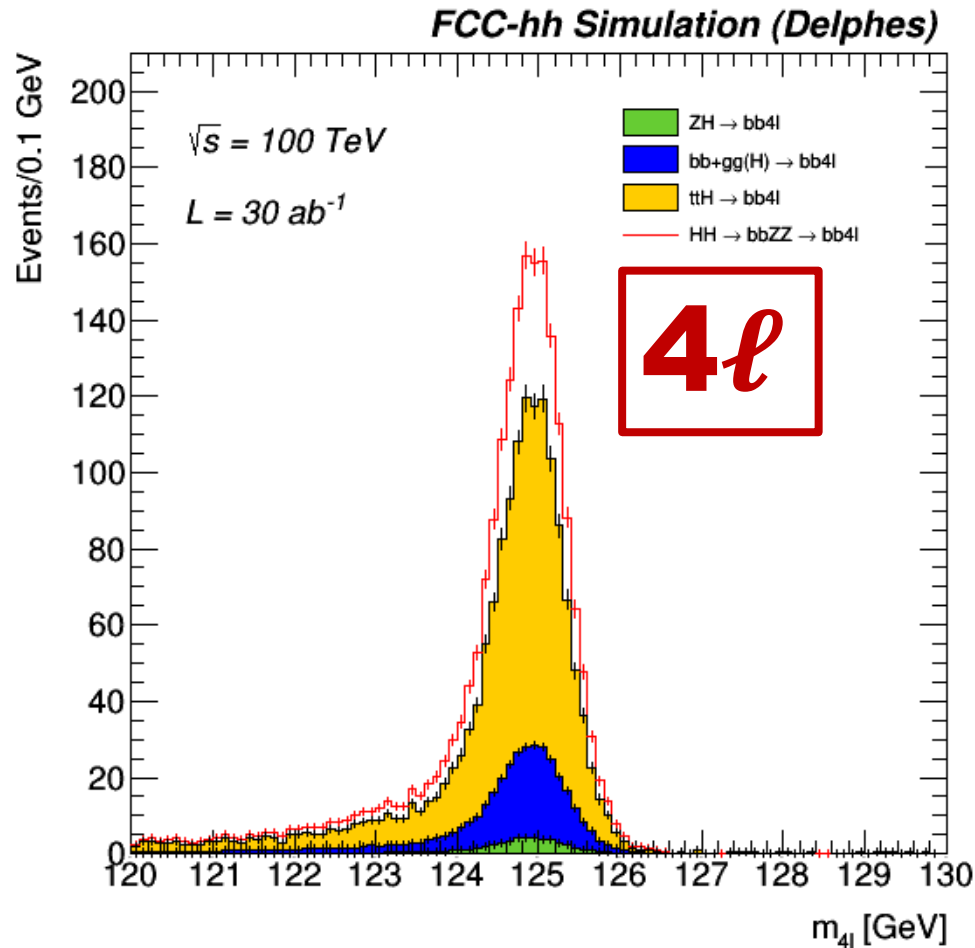
Combinazione CMS + ATLAS

La significatività del segnale HH è presentata nei canali individuali e per la combinazione degli stessi distintamente per ATLAS e CMS. Nella combinazione dei risultati dei due esperimenti la significatività attesa è pari a 4σ .

	Statistical-only		Statistical + Systematic	
	ATLAS	CMS	ATLAS	CMS
$HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	1.4	1.2	0.61	0.95
$HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$	2.5	1.6	2.1	1.4
$HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$	2.1	1.8	2.0	1.8
$HH \rightarrow b\bar{b}VV(l\nu\nu)$	-	0.59	-	0.56
$HH \rightarrow b\bar{b}ZZ(4l)$	-	0.37	-	0.37
combined	3.5	2.8	3.0	2.6
	Combined		Combined	
	4.5		4.0	



HH $\rightarrow$ bbZZ(4 ℓ) @ FCC-hh (1)

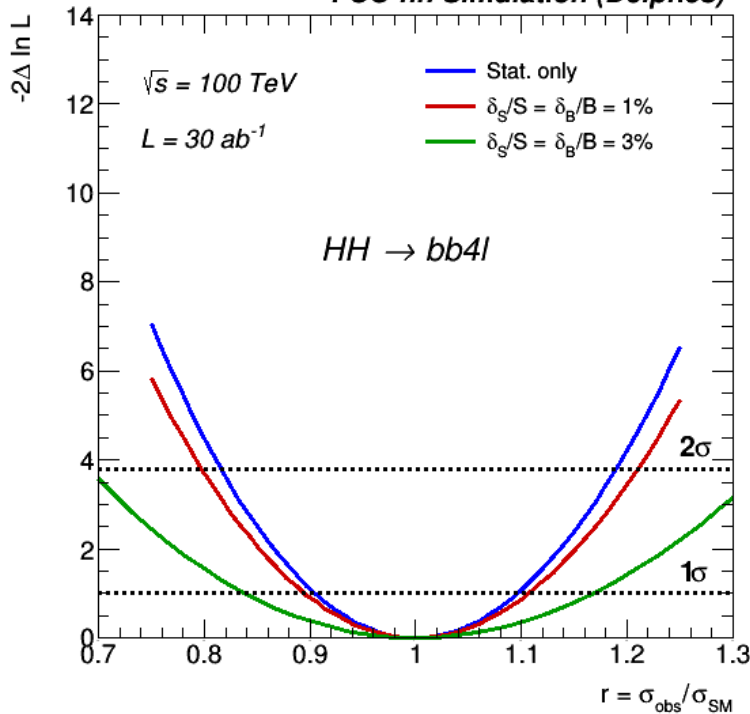


Processso	# eventi
HH	489
ttH	1162
gg(H)+bb	317
ZH	52
ttZ	179

HH $\rightarrow$ bbZZ(4 ℓ) @ FCC-hh (2)

μ	No sist.	1%	3%
1σ	10%	11%	17%
2σ	19%	21%	34%

FCC-hh Simulation (Delphes)



k_λ	No sist.	1%	3%
1σ	14%	15%	24%
2σ	28%	31%	51%

FCC-hh Simulation (Delphes)

