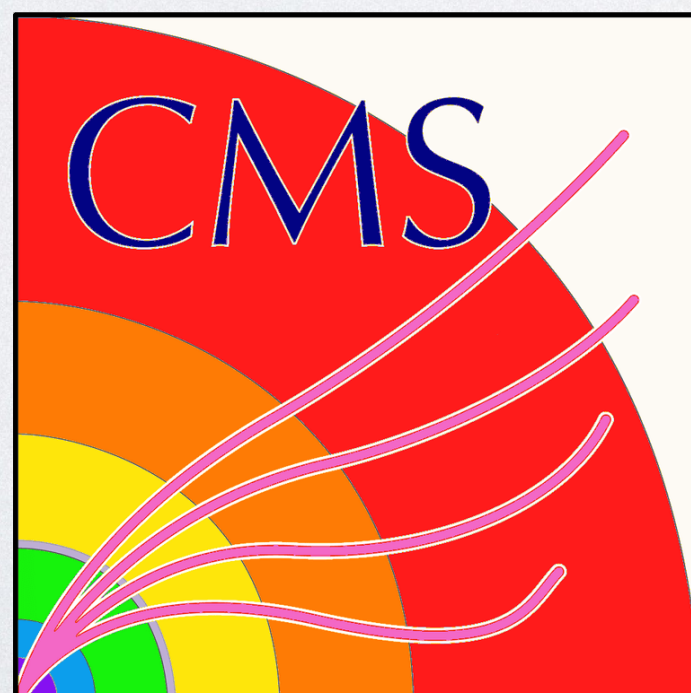


LE RICERCHE DI PRODUZIONE DI DUE BOSONI DI HIGGS A LHC



Lisa Borgonovi
INFN, Sezione di Bologna

per le Collaborazioni ATLAS e CMS

106° Congresso Nazionale
Società Italiana di Fisica
14 - 18 Settembre 2020

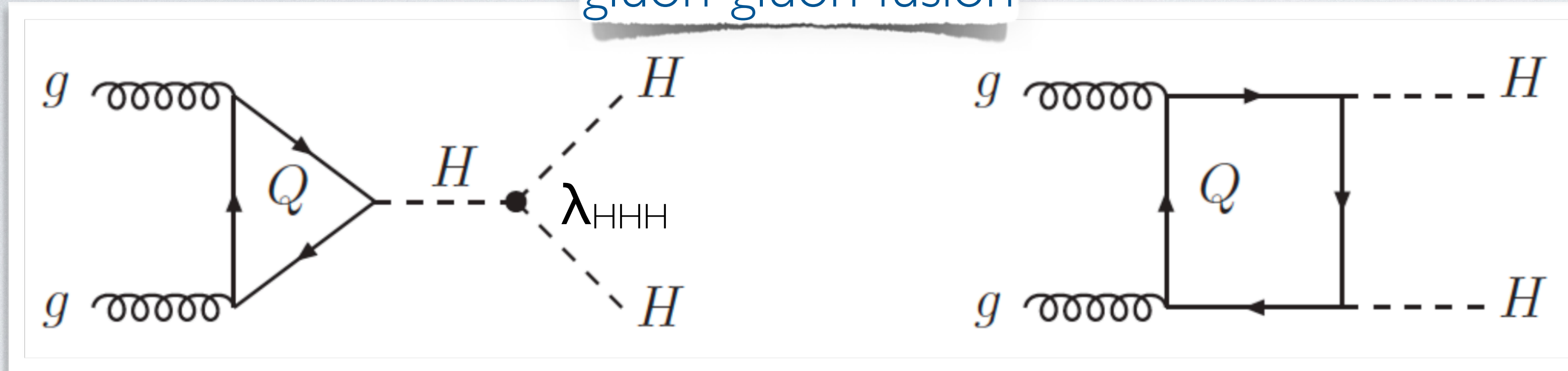


Perché cercare coppie di bosoni di Higgs?

- La produzione associata di due bosoni di Higgs è fondamentale:
 - ➔ prevista dal Modello Standard
 - ➔ consente di avere un accesso diretto alla costante di accoppiamento trilineare dell'Higgs (λ_{HHH})
 - ➔ fornisce informazioni sulla forma del potenziale di Higgs
- La misura di λ_{HHH} può fornire una conferma del Modello Standard o dare indizi di nuova fisica oltre il Modello Standard

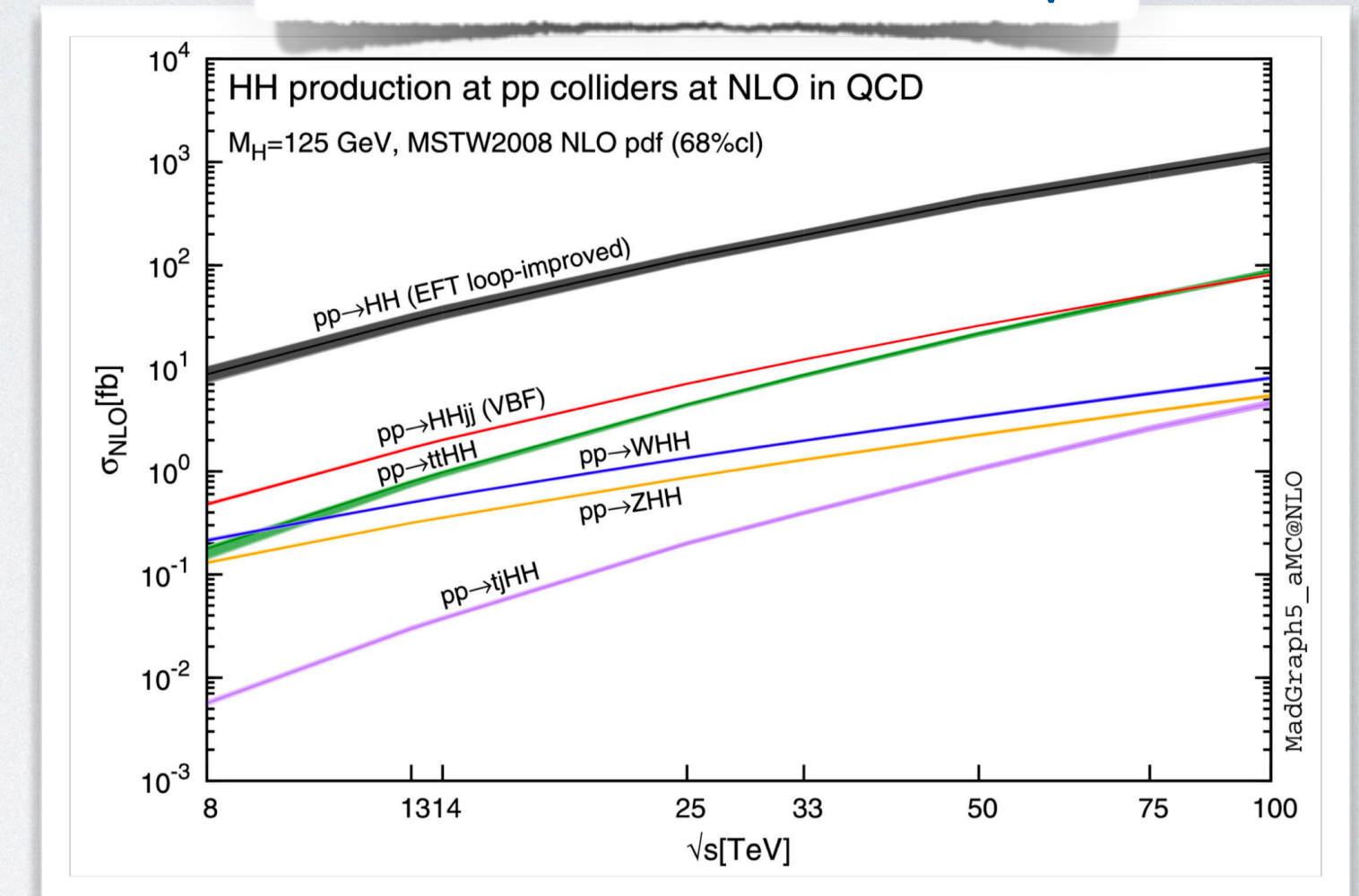
HH nel Modello Standard

gluon-gluon fusion



➔ modo di produzione principale

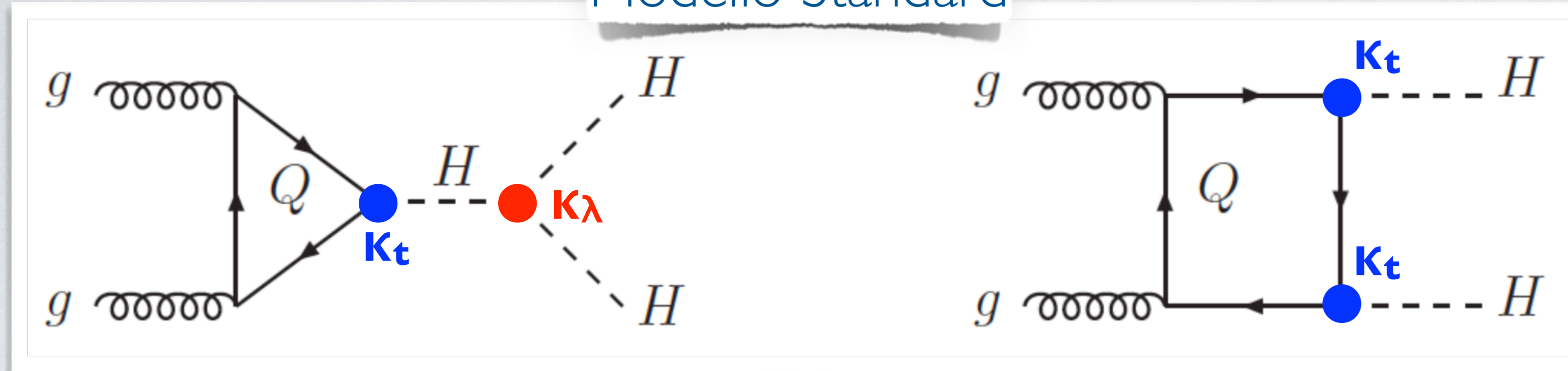
sezione d'urto vs \sqrt{s}



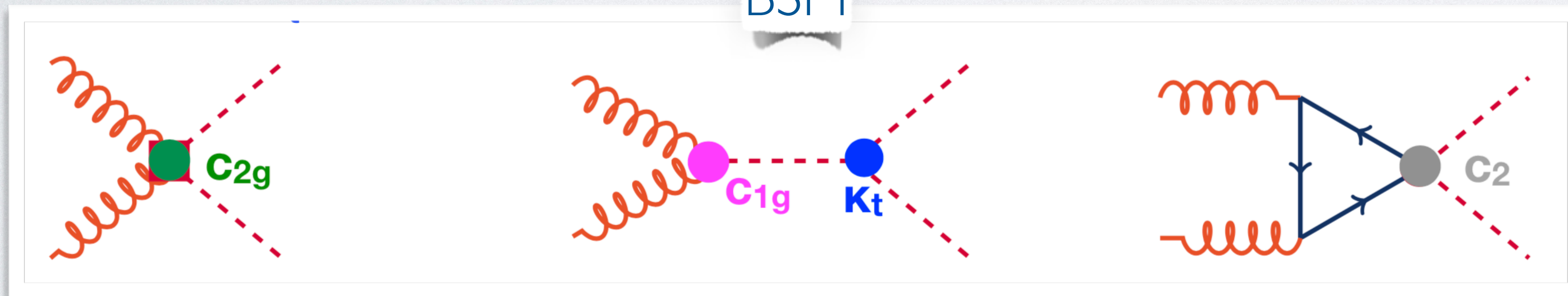
- La produzione di due bosoni di Higgs è prevista dal Modello Standard
- Sezione d'urto ≈ 31 fb (a 13 TeV)
 - ➔ interferenza distruttiva tra i due diagrammi di Feynman
 - ➔ troppo piccola affinché HH fosse osservato con i dati raccolti finora dagli esperimenti a LHC

HH **oltre** il Modello Standard : **BSM** (I)

Modello Standard



BSM



$$\kappa_\lambda = \frac{\lambda_{HHH}}{\lambda_{HHH}^{SM}} \quad \kappa_t = \frac{y_t}{y_t^{SM}}$$

$$\text{SM} : \kappa_\lambda = 1, \kappa_t = 1$$

$$C_2 = C_{2g} = C_{1g} = 0$$

- Effetti BSM potrebbero comparire come:

nuovi diagrammi di Feynman

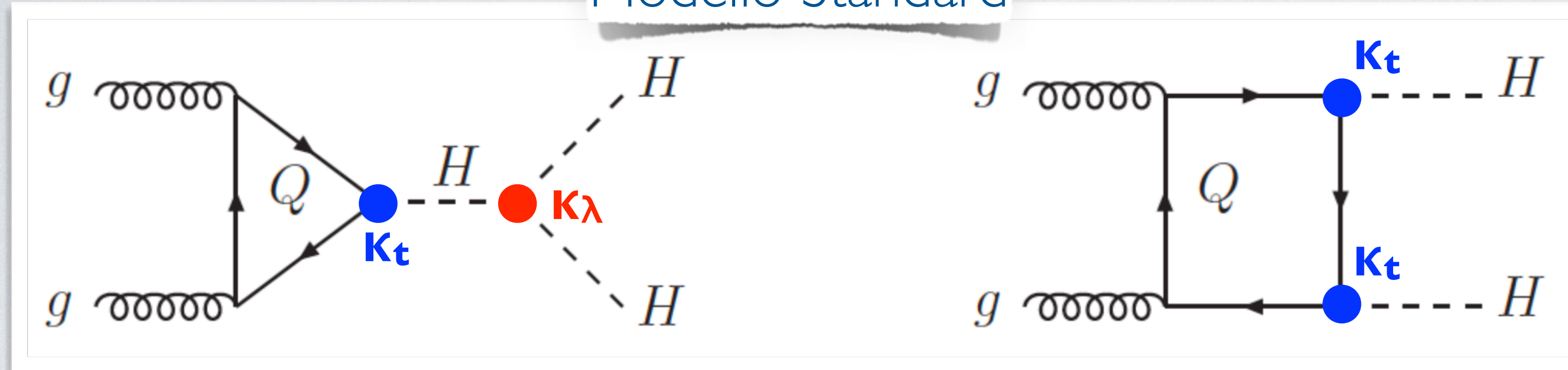
→ nuove costanti di accoppiamento

→ aumento della sezione d'urto

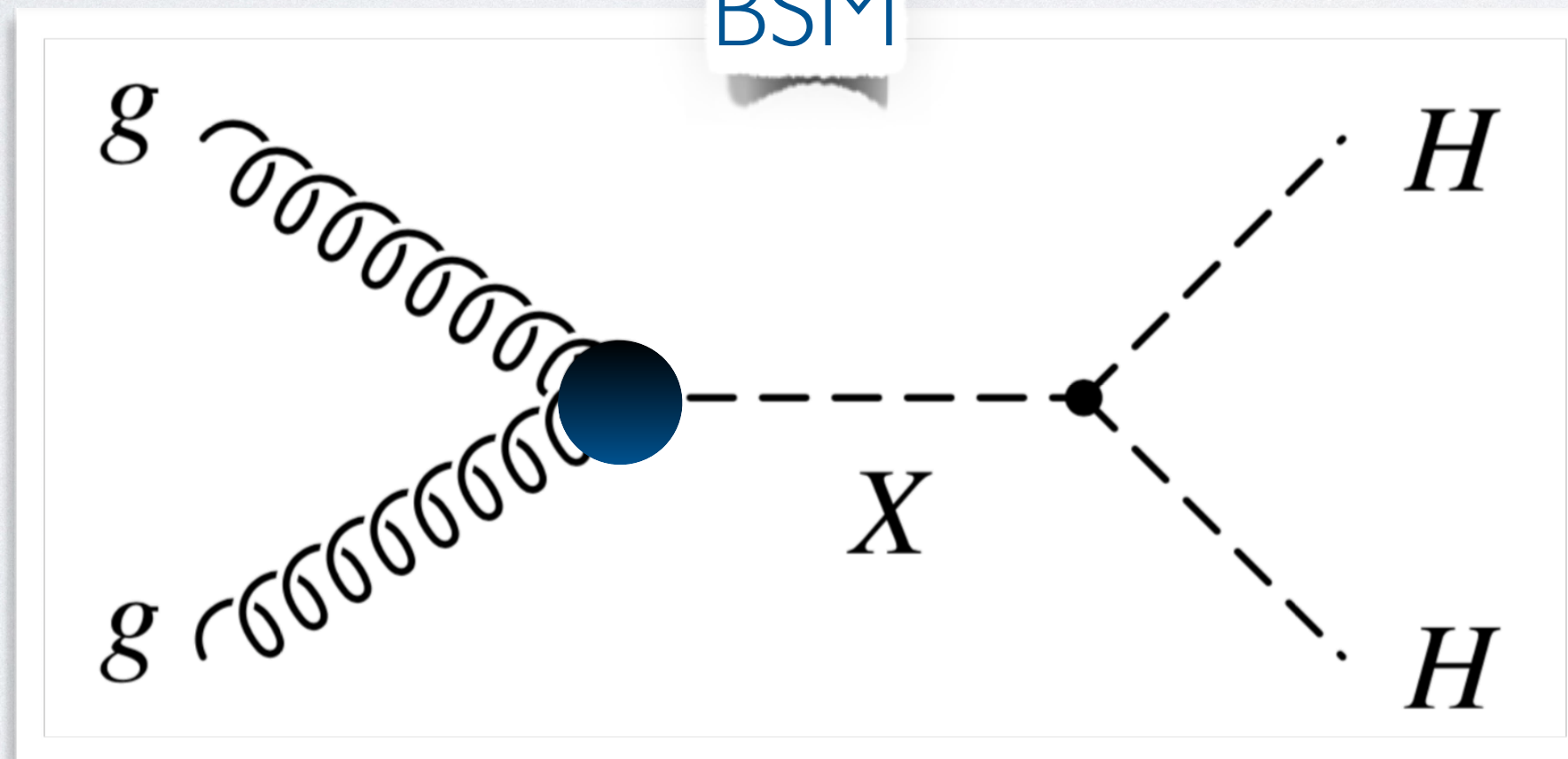
Produzione **NON RISONANTE**

HH **oltre** il Modello Standard : **BSM** (2)

Modello Standard



BSM



- Effetti BSM potrebbero comparire come :

nuova particella che decade in una coppia di bosoni di Higgs

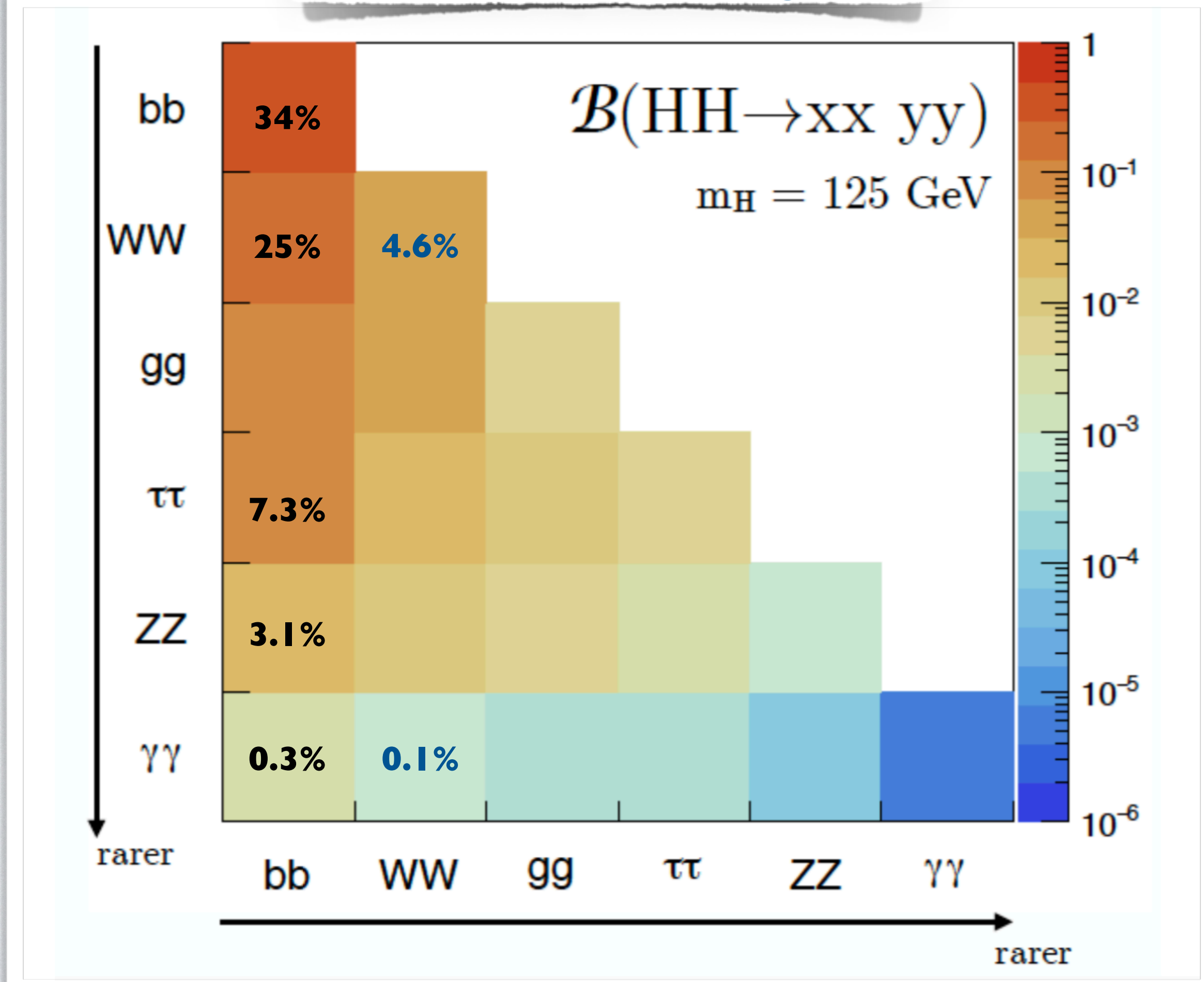
➔ prevista da vari modelli BSM

- Randall-Sundrum Warped Extra Dimensions (Kaluza-Klein **graviton, spin 2**)
- Electroweak singlet model, Two-Higgs-Doublet model as MSSM (**spin 0 radion**)

Produzione **RISONANTE**

Canali di decadimento

Stati finali : branching ratio



- Grande varietà di canali di decadimento
- $H \rightarrow bb$: più alto branching ratio
- Stati finali con leptoni : alta riduzione del fondo + ottima identificazione

ATLAS:

**bbbb, bbWW, bb $\tau\tau$, bbZZ, bb $\gamma\gamma$,
WWWW, WW $\gamma\gamma$**

CMS:

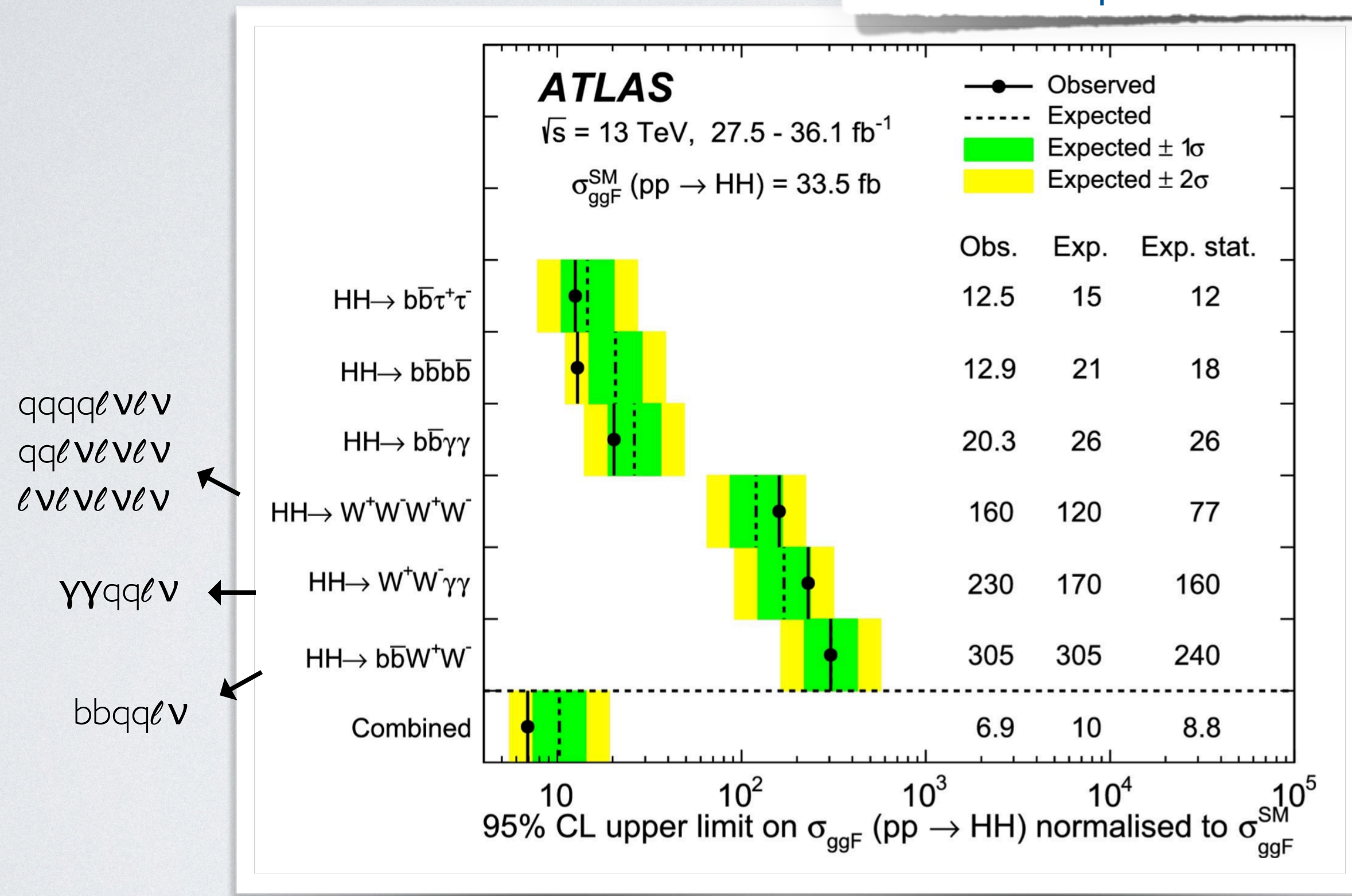
bbbb, bbWW, bb $\tau\tau$, bbZZ, bb $\gamma\gamma$

HH **non** risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

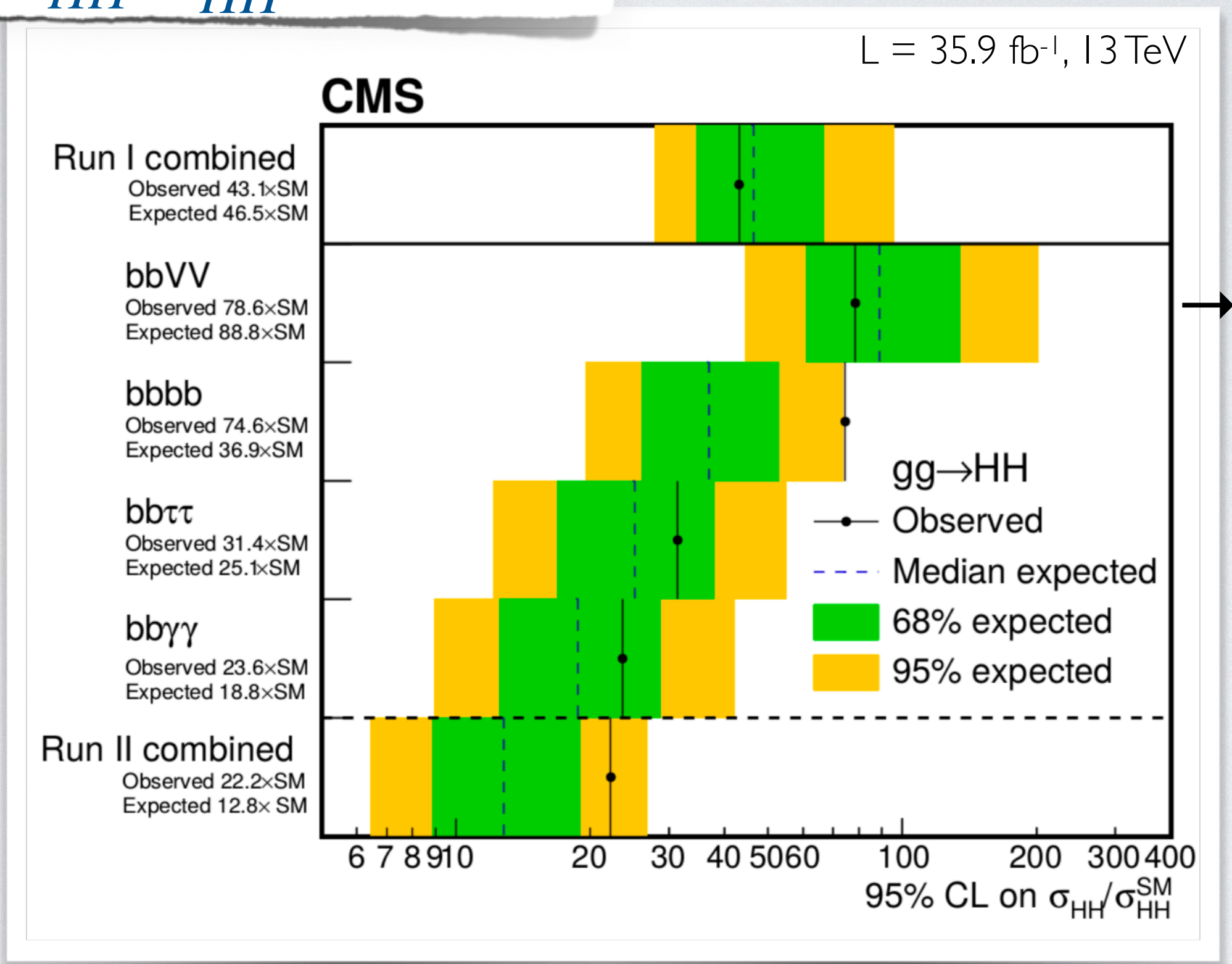
Phys. Lett. B 800 (2020) 135103

Limite superiore su $\sigma_{HH}/\sigma_{HH}^{SM}$ al 95% CL

Phys. Rev. Lett. 122, 121803



$qqqq\ell\ell V$
 $qq\ell\ell V\ell V$
 $\ell\ell V\ell V\ell V$
 $\gamma\gamma qq\ell V$
 $bbqq\ell V$



$V = W, Z$
 $bb\ell V\ell V$ o $bb\ell V V$

Limite ATLAS : **6.9** (**10**) **osservato** (**atteso**)

Limite CMS : **22.2** (**12.8**) **osservato** (**atteso**)

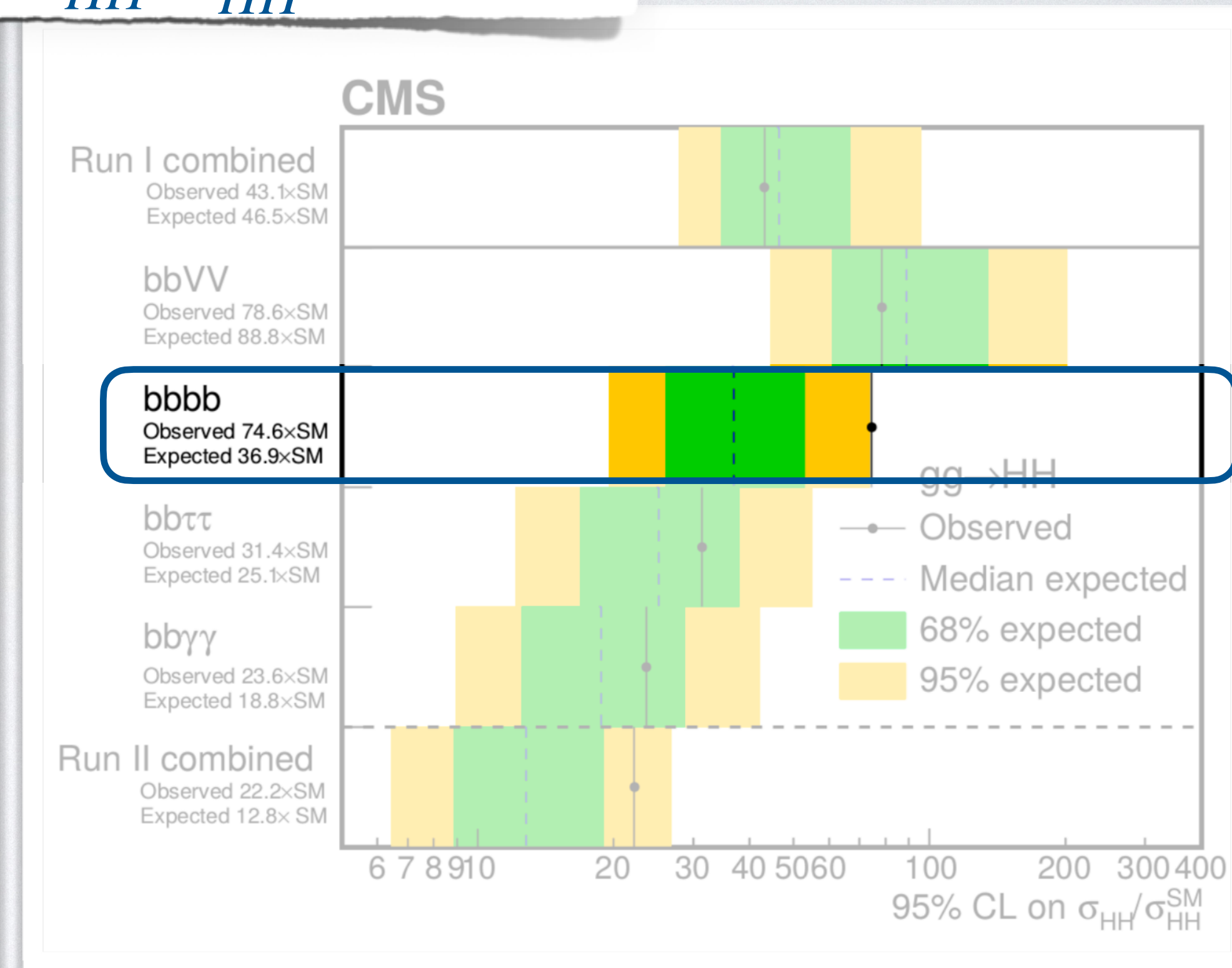
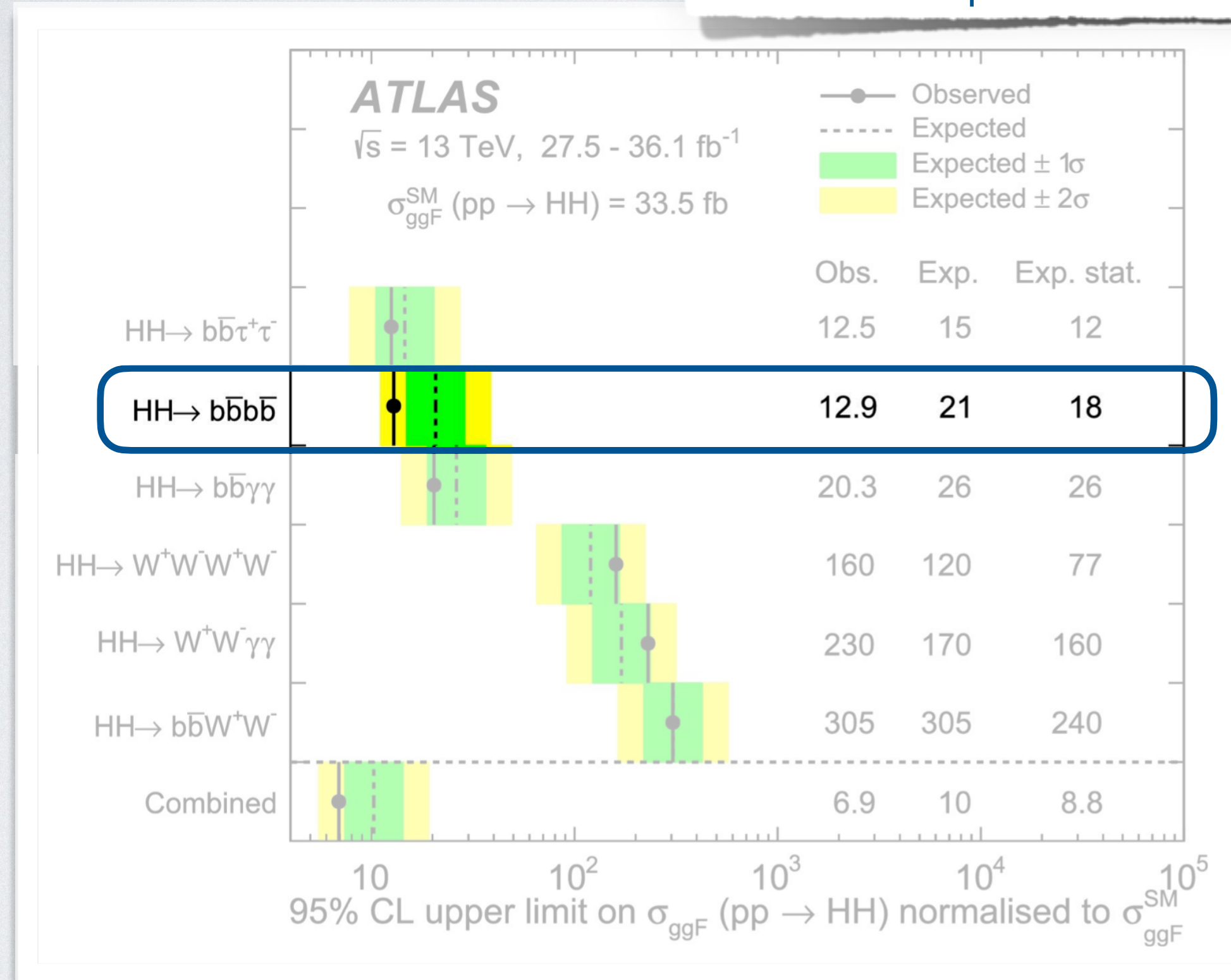
HH **non** risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

HH → **bbbb**

Phys. Lett. B 800 (2020) 135103

Limite superiore su $\sigma_{HH}/\sigma_{HH}^{SM}$ al 95% CL

Phys. Rev. Lett. 122, 121803



Limite ATLAS : **12.9 (21) osservato (atteso)**

Limite CMS : **75 (37) osservato (atteso)**

HH **non** risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

ATLAS

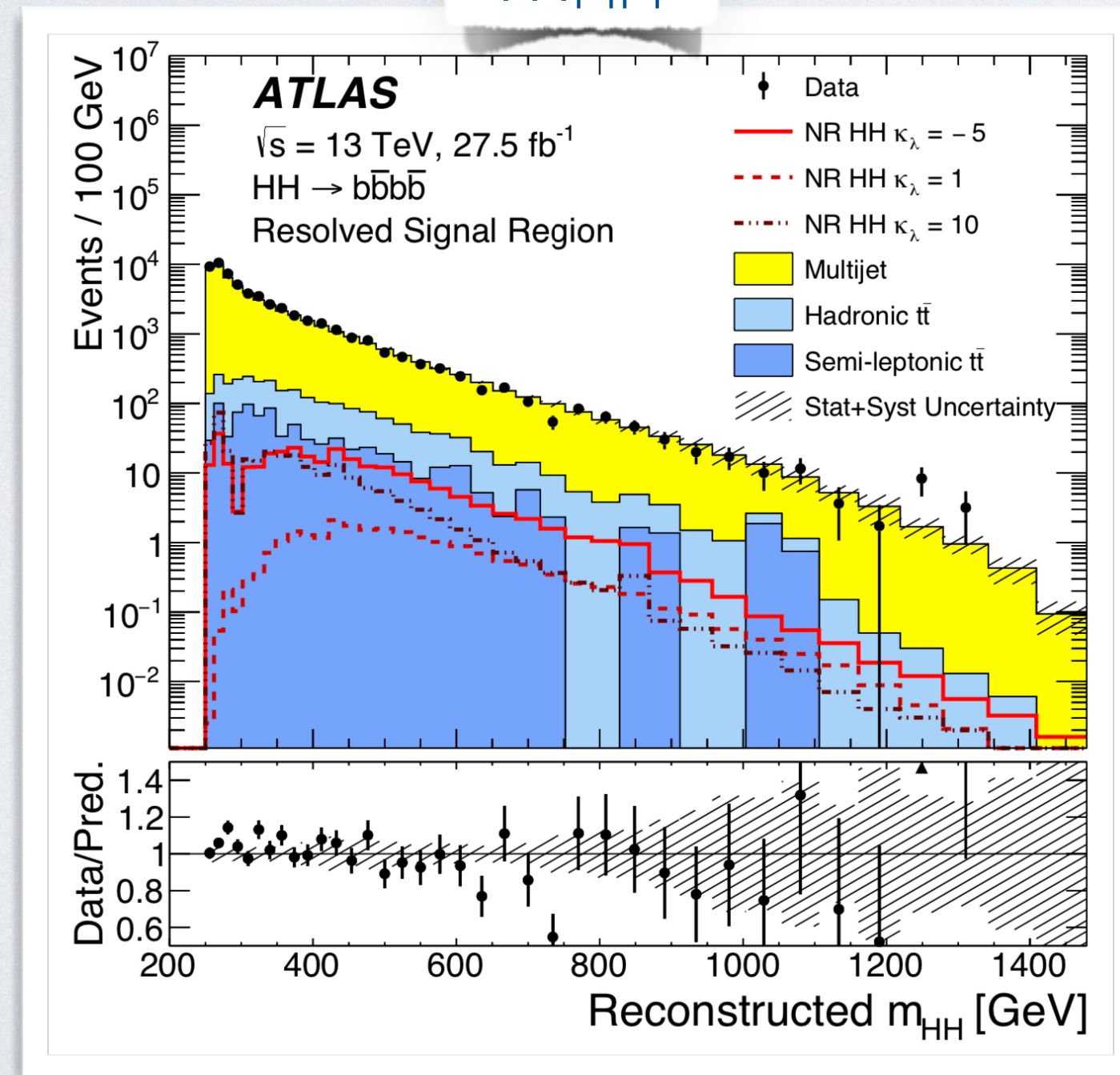
HH → bbbb

CMS

- 4 b-jet (anti- k_t , $R=0.4$)
- Fondo principale: multi-jet QCD
- m_{HH} usata per discriminare segnale-fondo
- Boosted Decision Tree per discriminare segnale-fondo

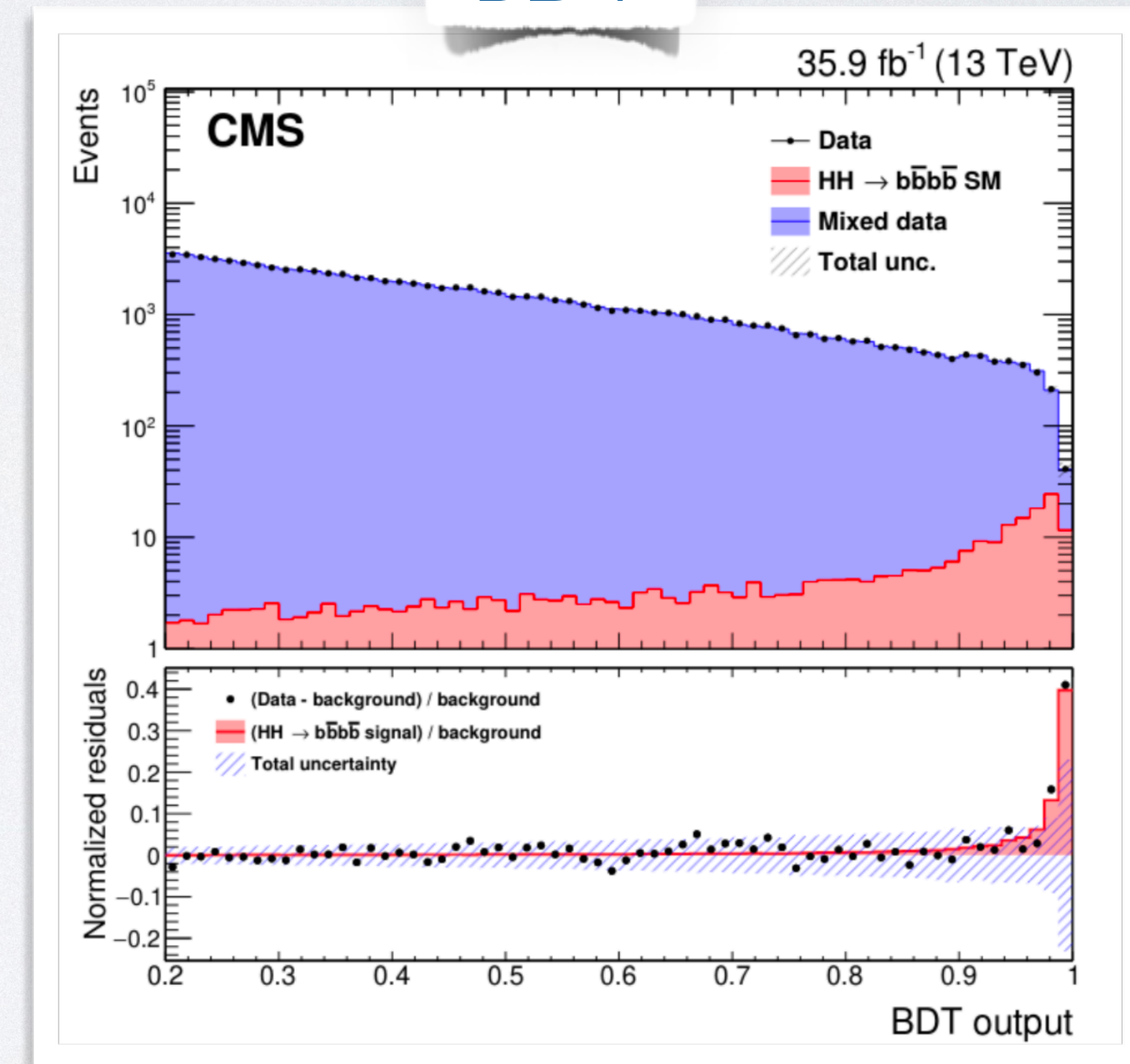
JHEP 01 (2019) 030

m_{HH}



JHEP 04 (2019) 112

BDT



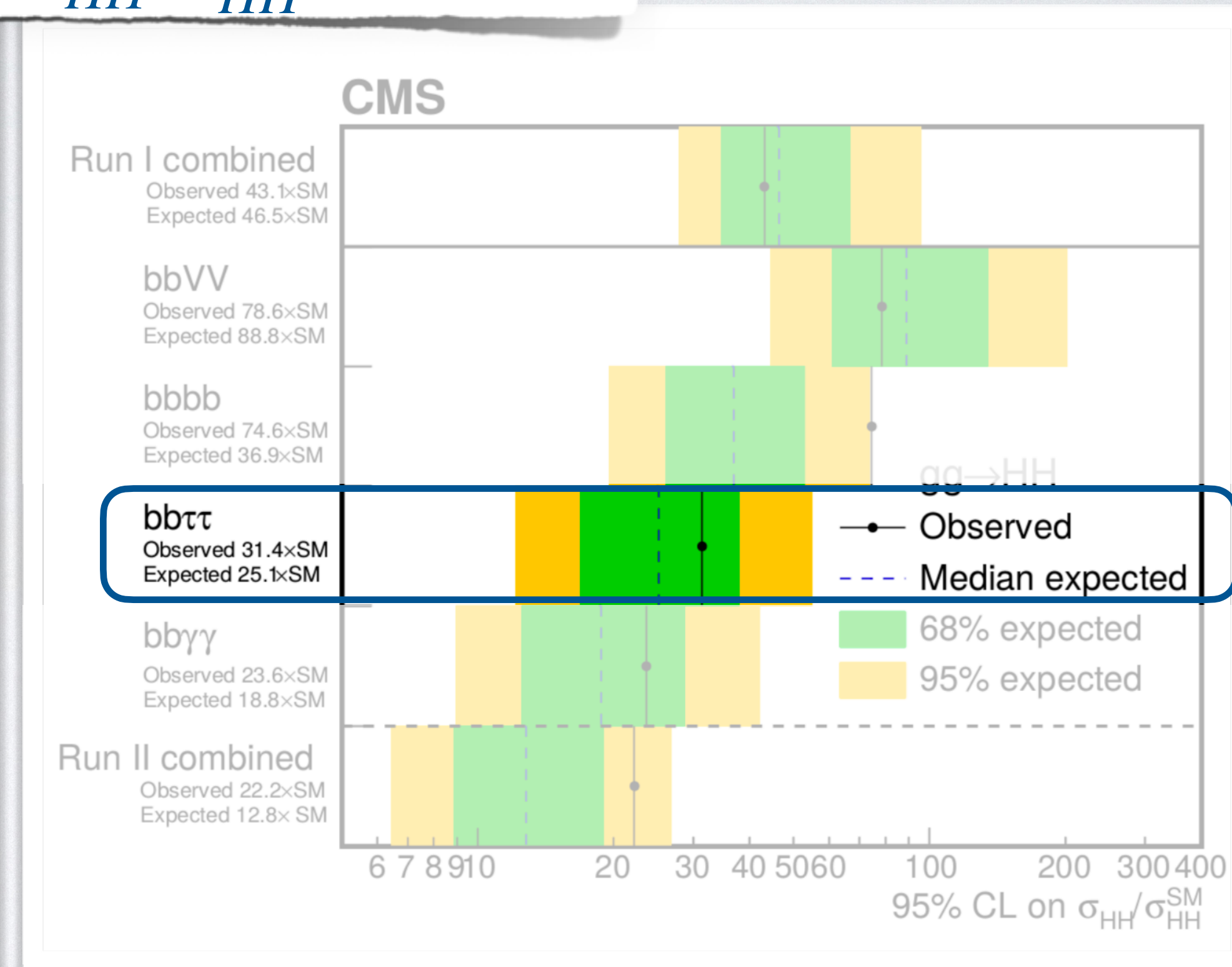
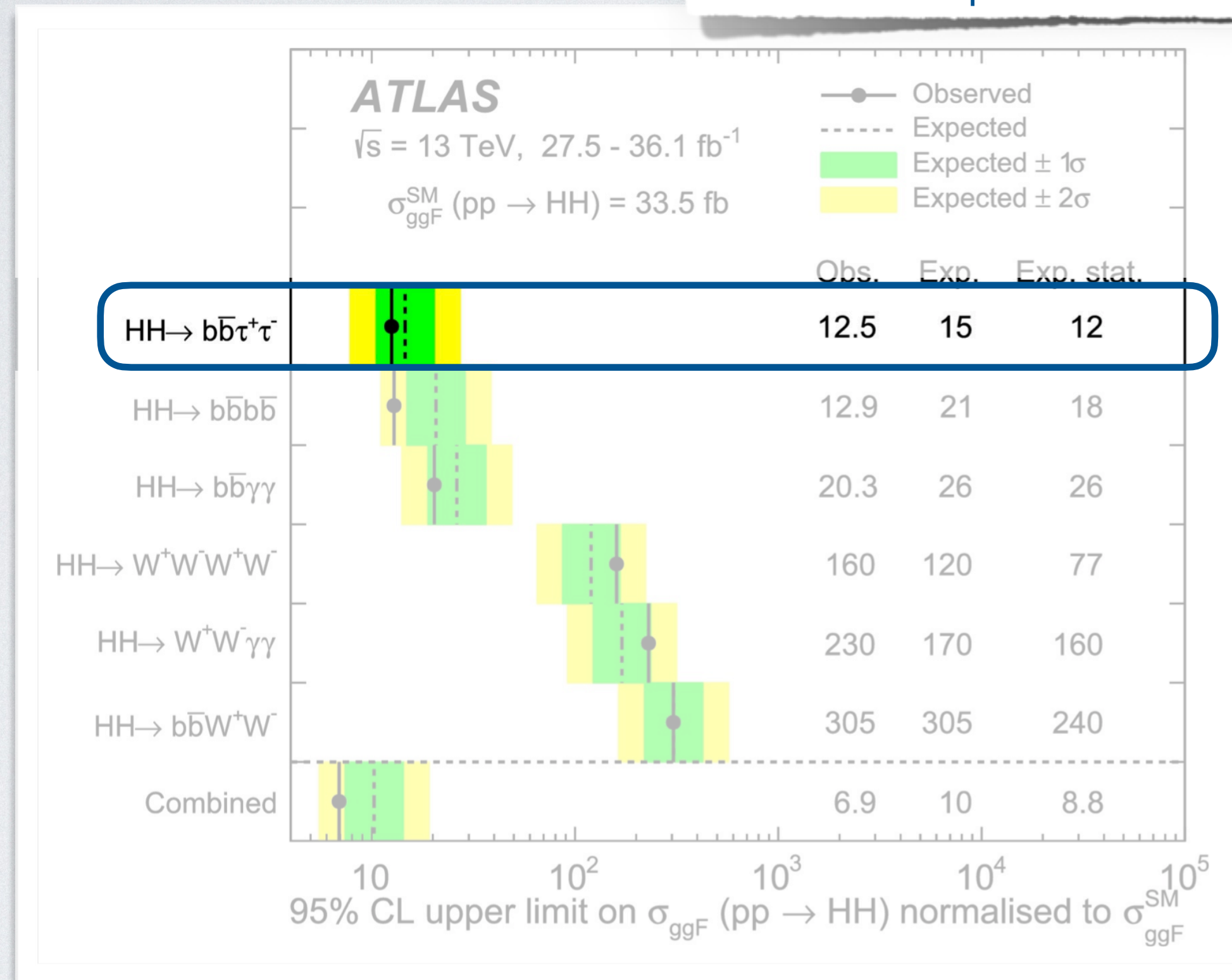
HH **non** risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

HH → bbττ

Phys. Lett. B 800 (2020) 135103

Limite superiore su $\sigma_{HH}/\sigma_{HH}^{SM}$ al 95% CL

Phys. Rev. Lett. 122, 121803



Limite ATLAS : **12.5** (**15**) **osservato** (**atteso**)

Limite CMS : **30** (**25**) **osservato** (**atteso**)

HH **non** risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

ATLAS

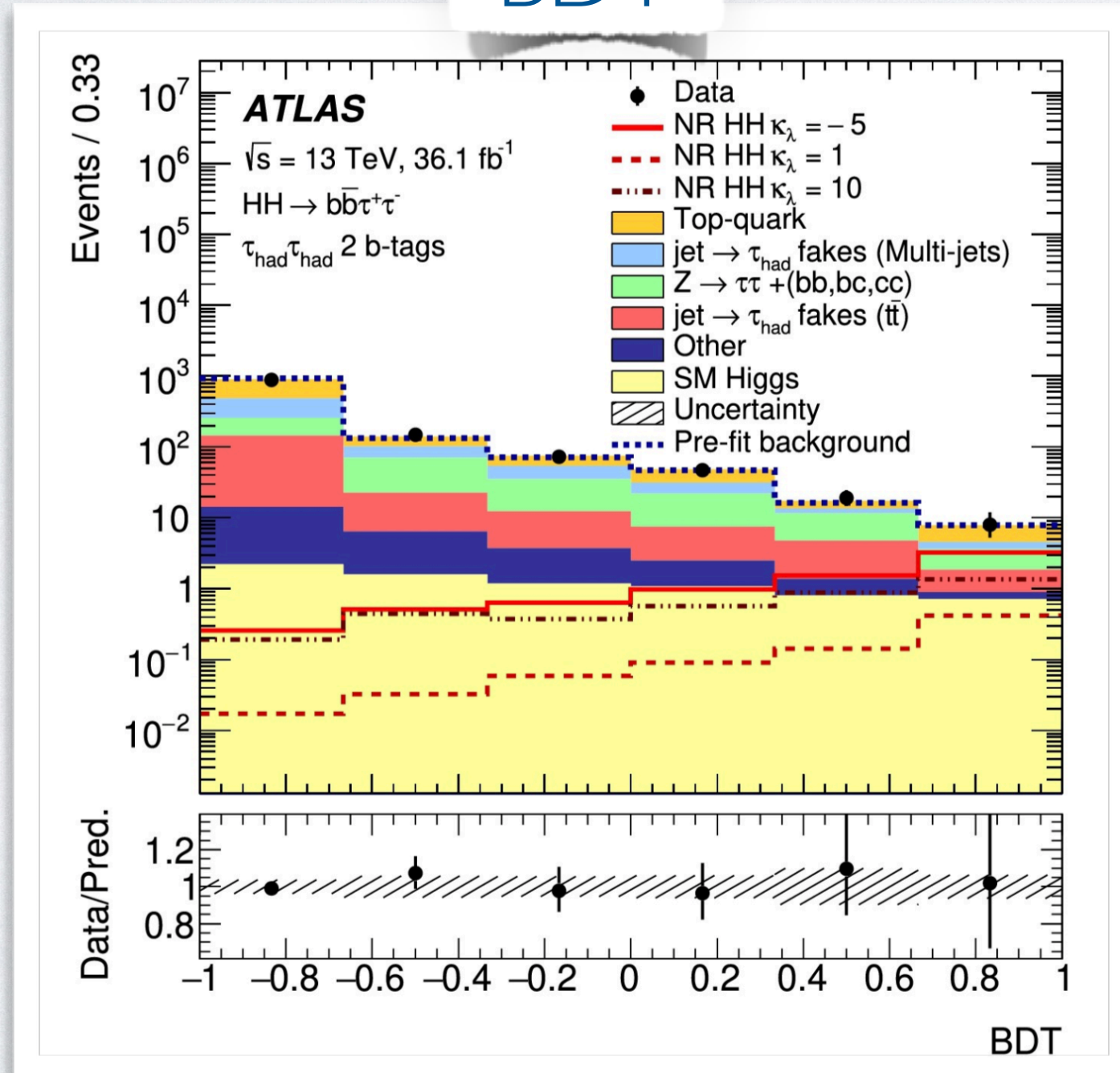
HH → bbττ

CMS

- Trigger: \mathbf{T}_{had} , $\mathbf{T}_{had} + \mathbf{T}_{had}$, $\ell, \ell + \mathbf{T}_{had}$
- \mathbf{T}_{had} + leptone con carica opposta (e, μ , τ)
- BDT per ridurre fondo tt, multi-jet QCD

Phys. Rev. Lett. 121, 191801

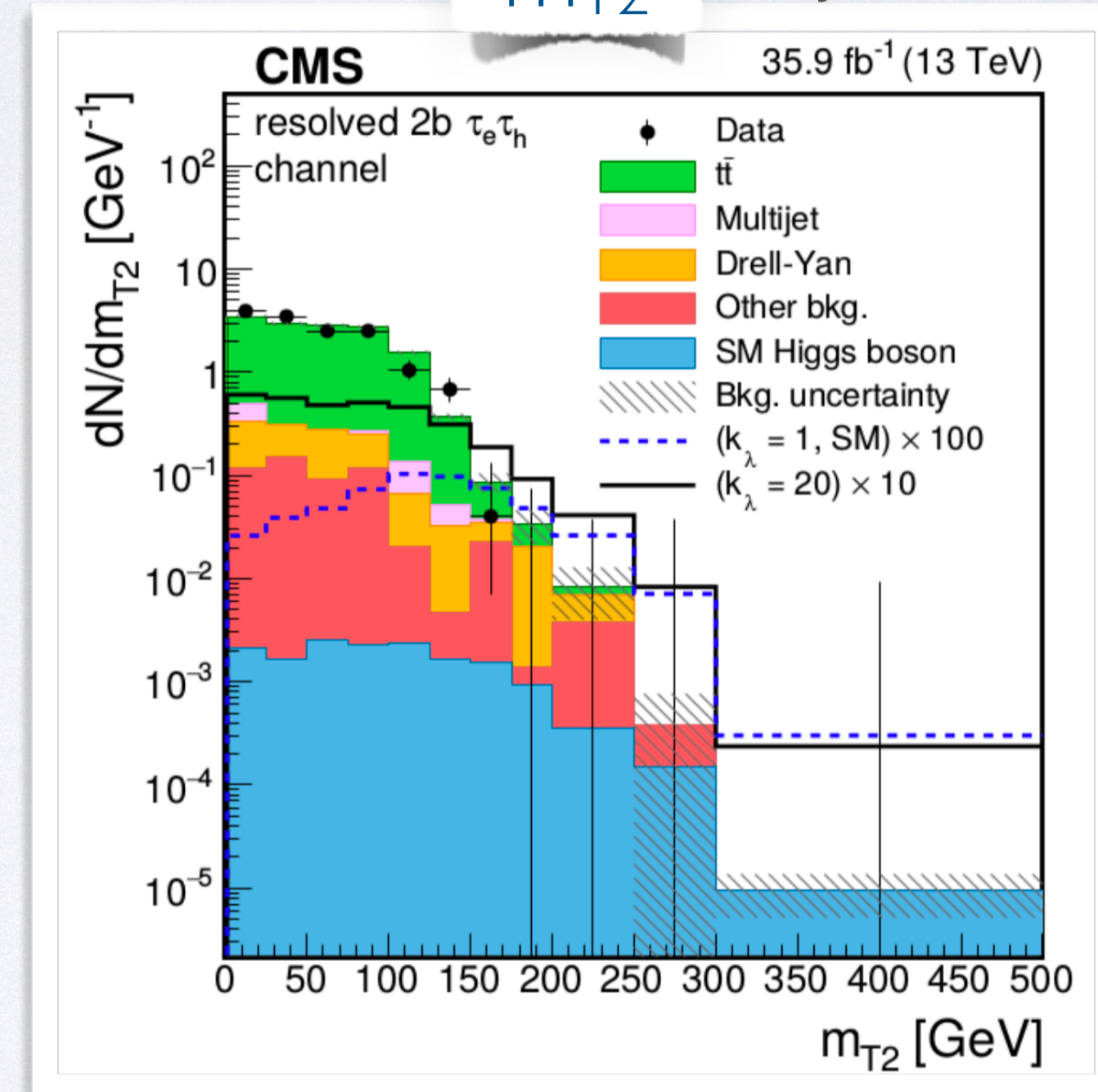
BDT



- Categorizzazione per numero di b-jet

m_{T2}

Phys. Lett. B 778 (2018) 101



m_{T2} transverse mass:
 massa più grande
 della particella
 genitore compatibile
 con la cinematica
 dell'evento

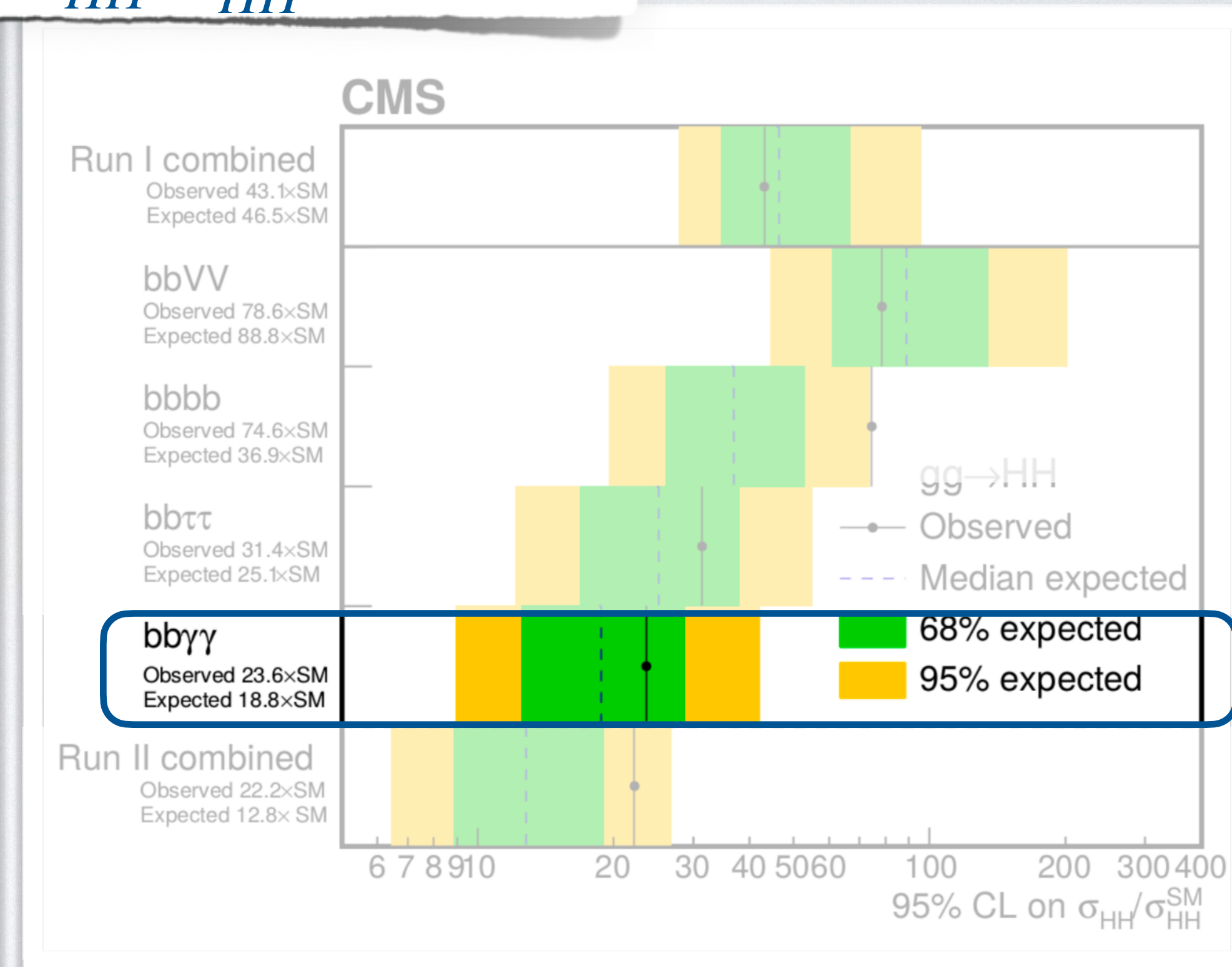
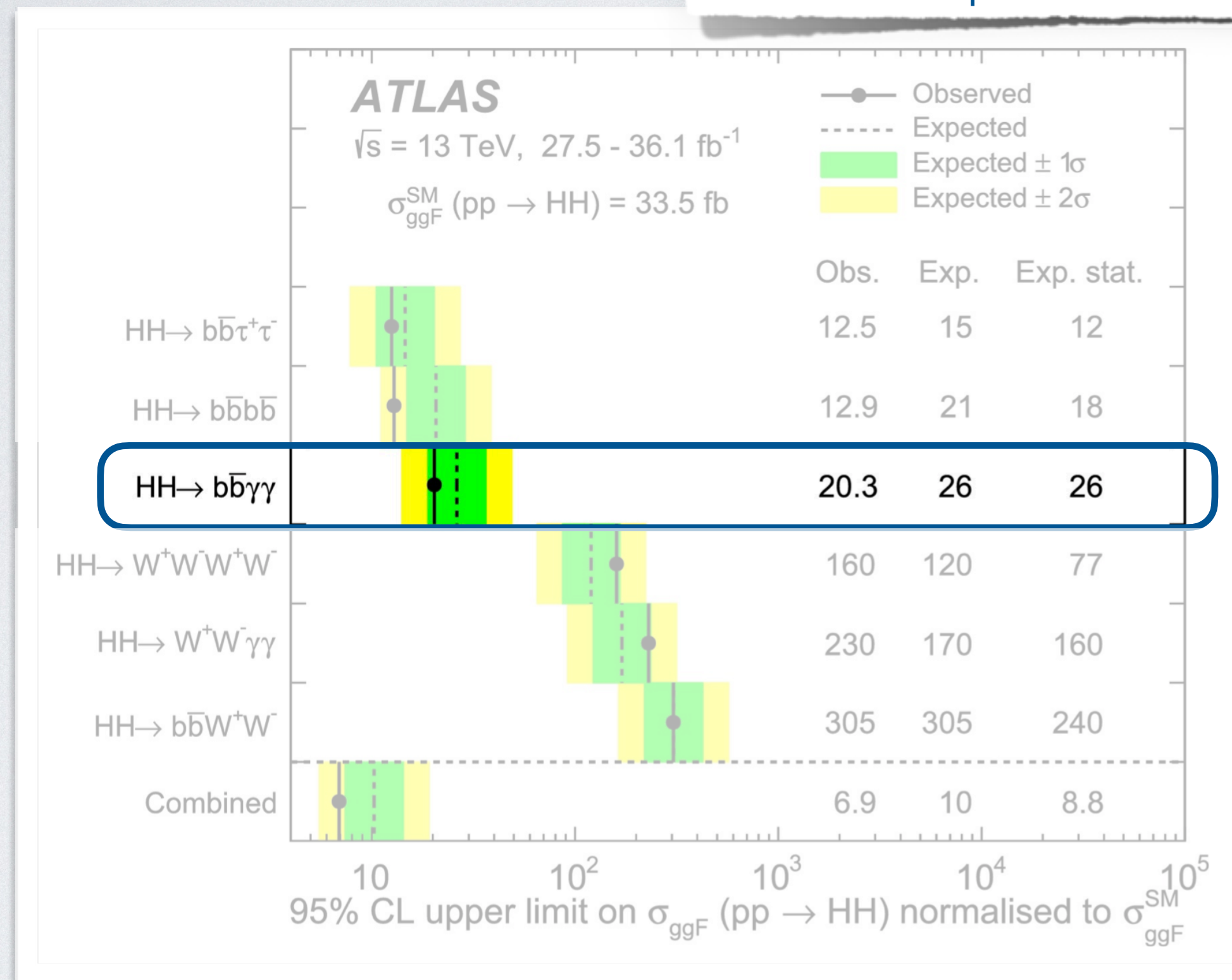
HH **non** risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

HH → bbγγ

Phys. Lett. B 800 (2020) 135103

Limite superiore su $\sigma_{HH}/\sigma_{HH}^{SM}$ al 95% CL

Phys. Rev. Lett. 122, 121803



Limite ATLAS : **20.3** (**26**) **osservato** (**atteso**)

Limite CMS : **24** (**9**) **osservato** (**atteso**)

HH **non** risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

ATLAS

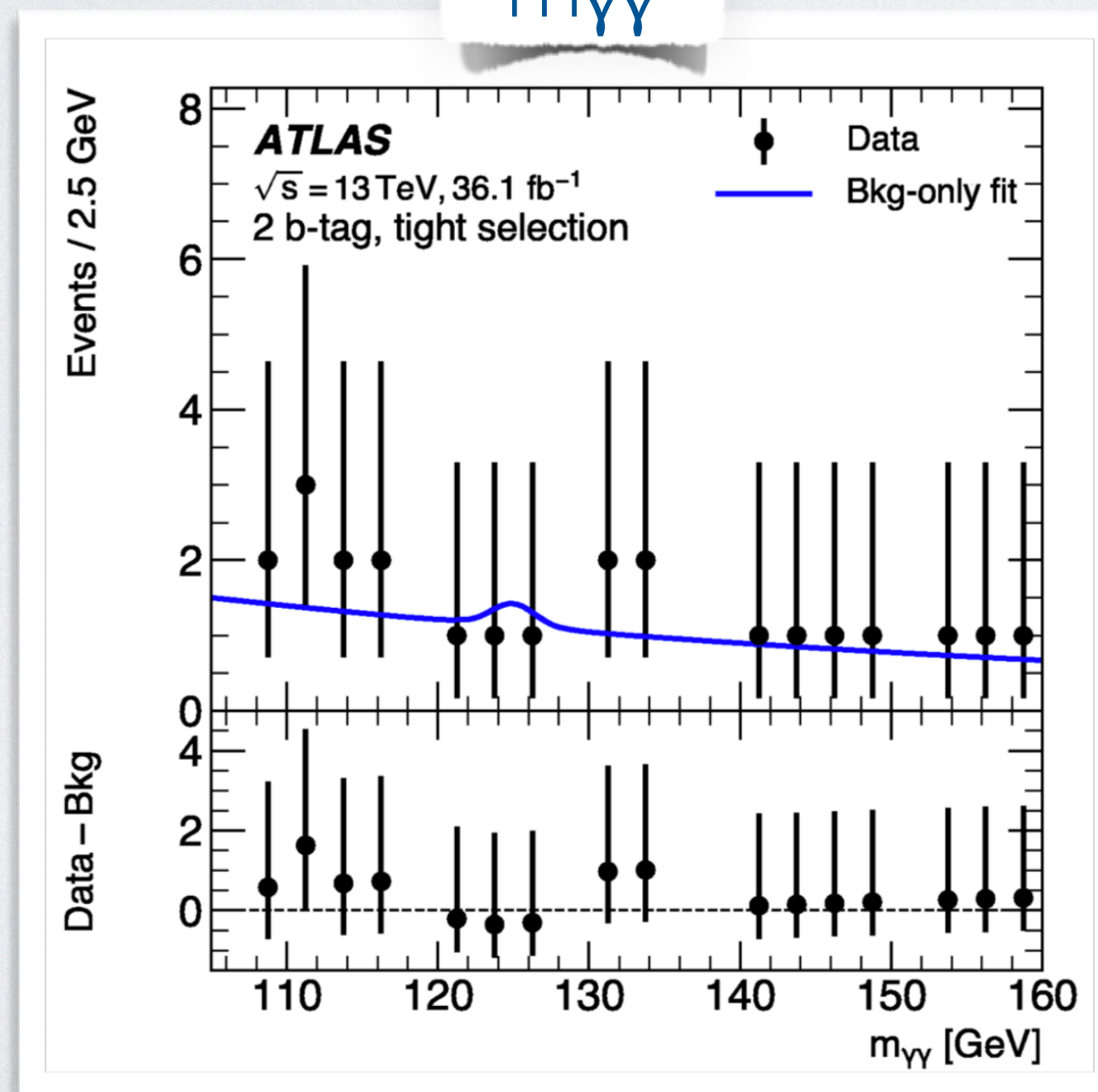
HH → bbγγ

CMS

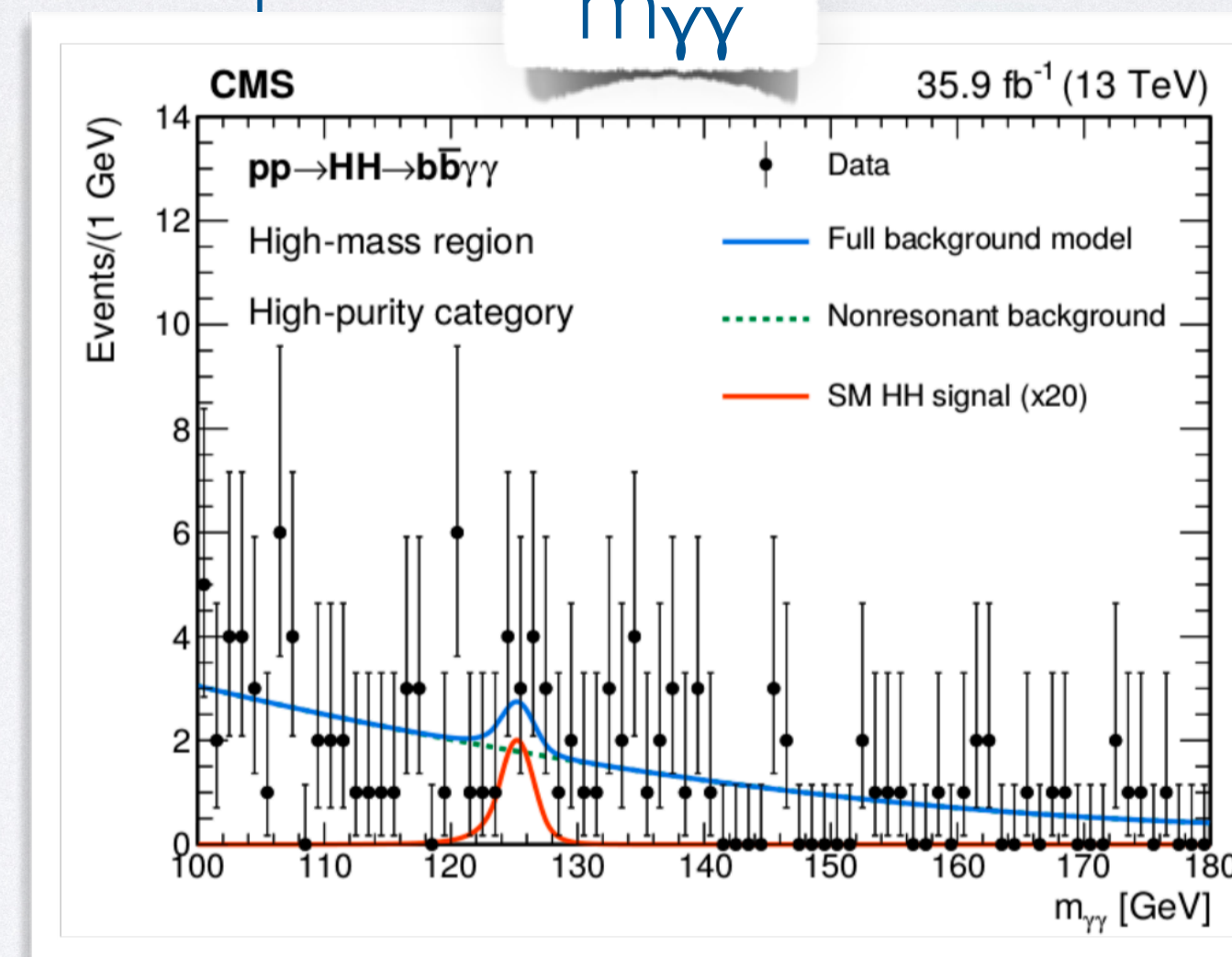
- 1 o 2 b-jet (R=0.4)
 - Alto branching ratio (bb) + ottima risoluzione per m(γγ)
 - Categorizzazione degli eventi con MVA e M_X
- $$M_X = M(bb\gamma\gamma) - M(bb) - M(\gamma\gamma) + 2M_H$$

JHEP 11 (2018) 040

m_{γγ}

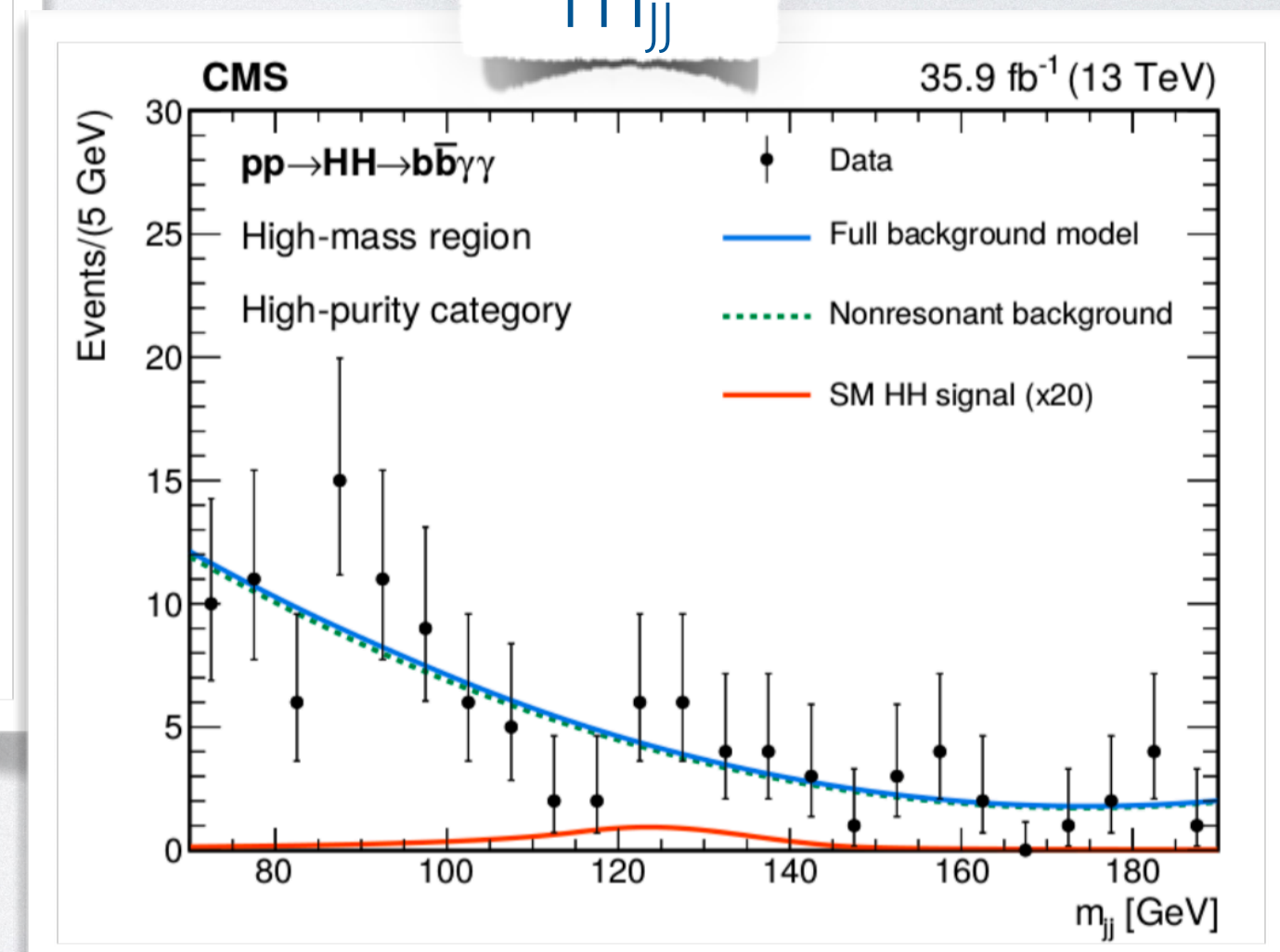


m_{γγ}



Phys. Lett. B 788 (2019) 7

m_{jj}



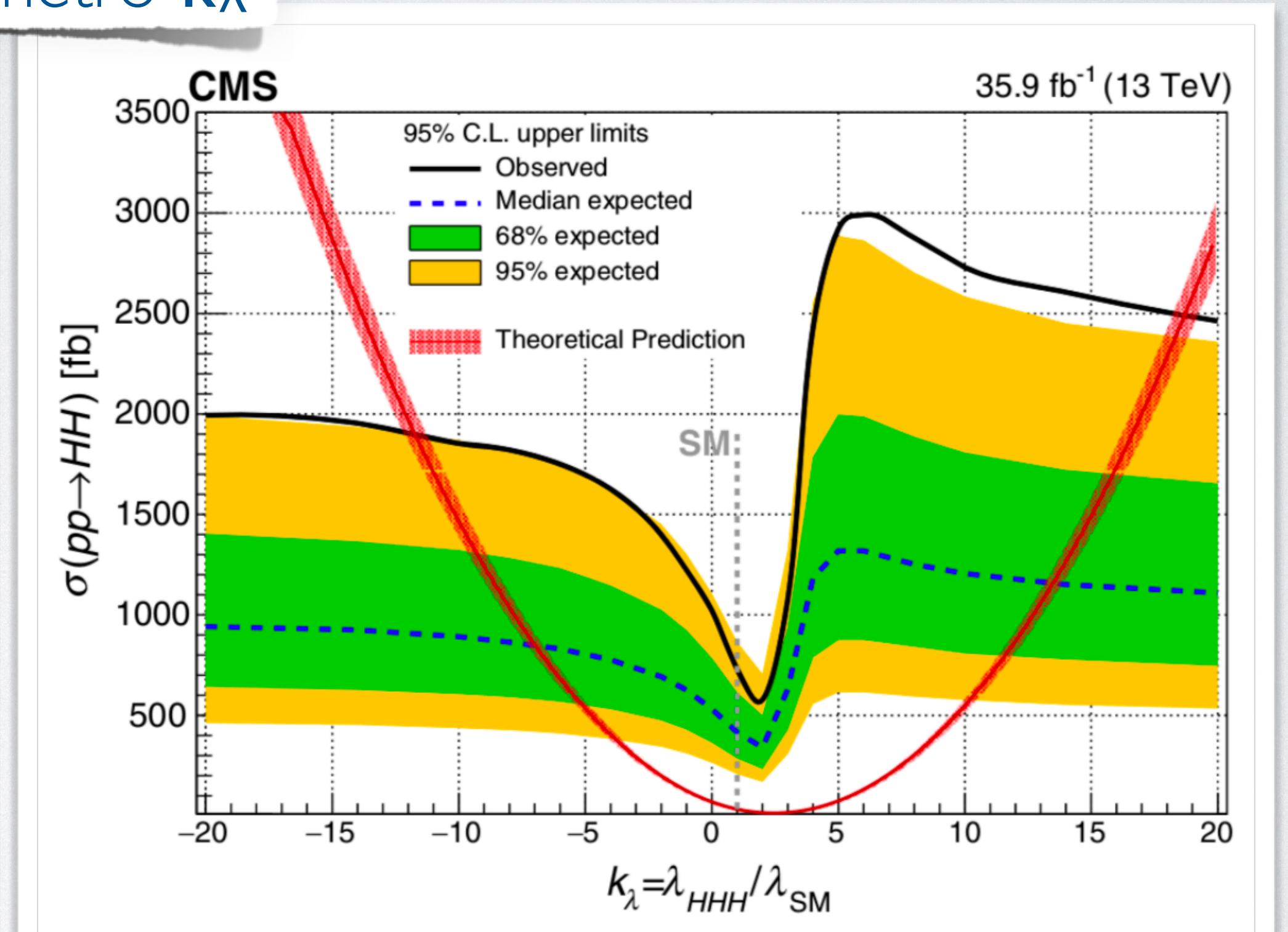
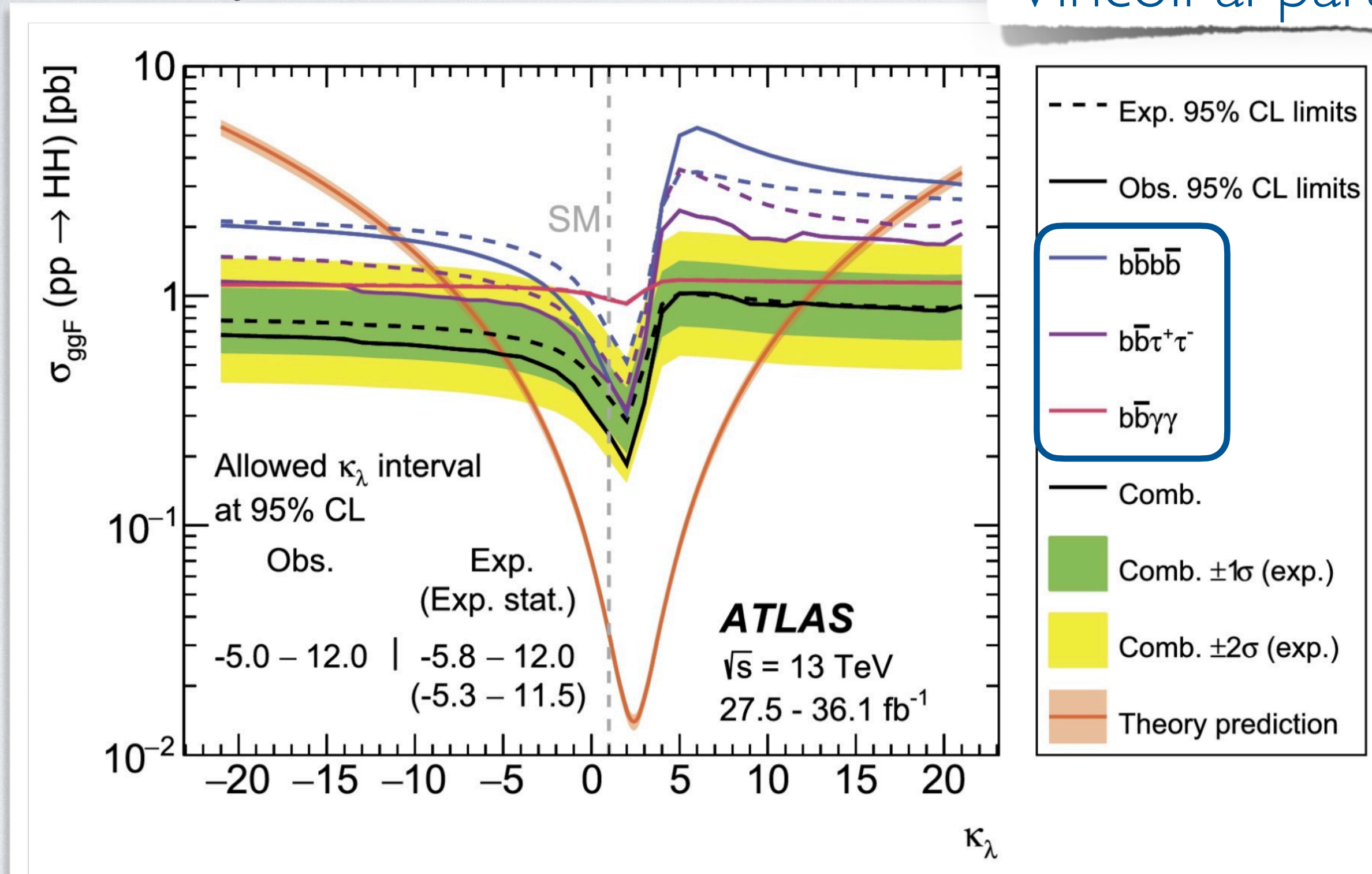
HH **non** risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

Altri parametri fissati al valore SM : $\mathbf{K}_t = 1$, $\mathbf{c}_2 = \mathbf{c}_{2g} = \mathbf{c}_{1g} = 0$

Phys. Lett. B 800 (2020) 135103

Vincoli al parametro \mathbf{K}_λ

Phys. Rev. Lett. 122, 121803



$b\bar{b}b\bar{b}$
 $b\bar{b}\tau^+\tau^-$
 $b\bar{b}\gamma\gamma$
 $b\bar{b}V\bar{V}$

ATLAS : **$-5.0 < \kappa_\lambda < 12.0$ osservato**
 $-5.8 < \kappa_\lambda < 12.0$ atteso

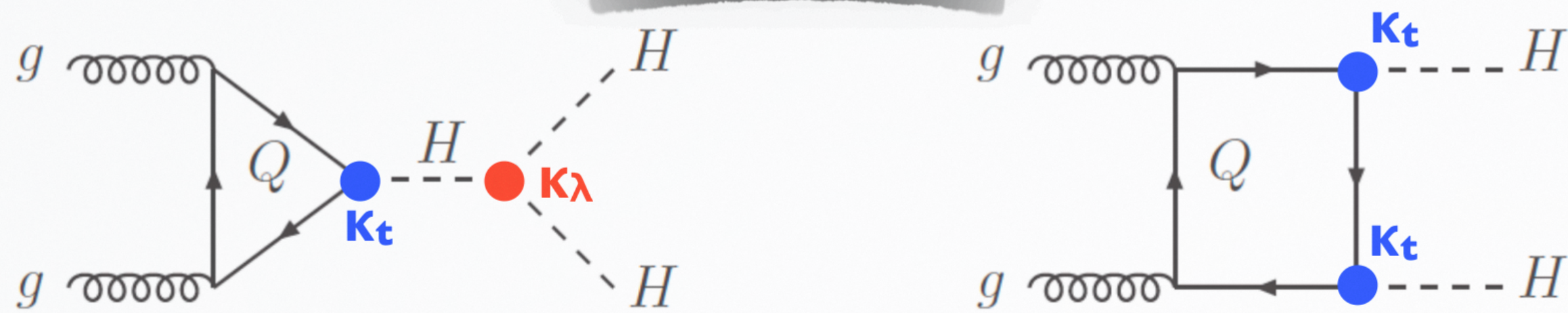
CMS : **$-11.8 < \kappa_\lambda < 18.8$ osservato**
 $-7.1 < \kappa_\lambda < 13.6$ atteso

HH **non** risonante : 12 benchmark

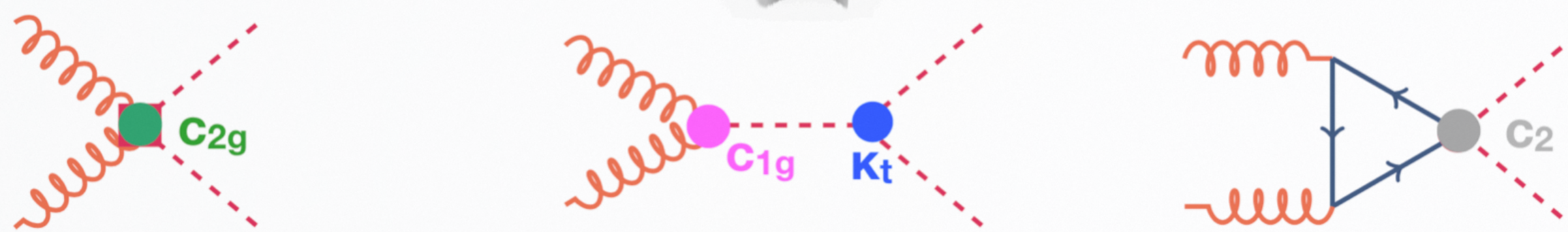
Nuove costanti d'accoppiamento

HH **oltre** il Modello Standard : **BSM**

Modello Standard



BSM



- Variazione “continua” di tutti i parametri

K_λ , K_t , C_2 , C_{2g} , C_{1g}

- ➔ spazio delle fasi raggruppato in 12 benchmark con caratteristiche simili

12 benchmark

Benchmark	κ_λ	κ_t	c_2	c_g	c_{2g}
1	7.5	1.0	-1.0	0.0	0.0
2	1.0	1.0	0.5	-0.8	0.6
3	1.0	1.0	-1.5	0.0	-0.8
4	-3.5	1.5	-3.0	0.0	0.0
5	1.0	1.0	0.0	0.8	-1
6	2.4	1.0	0.0	0.2	-0.2
7	5.0	1.0	0.0	0.2	-0.2
8	15.0	1.0	0.0	-1	1
9	1.0	1.0	1.0	-0.6	0.6
10	10.0	1.5	-1.0	0.0	0.0
11	2.4	1.0	0.0	1	-1
12	15.0	1.0	1.0	0.0	0.0
SM	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0

[arXiv:1910.00012](https://arxiv.org/abs/1910.00012)

[arXiv:1608.06578](https://arxiv.org/abs/1608.06578)

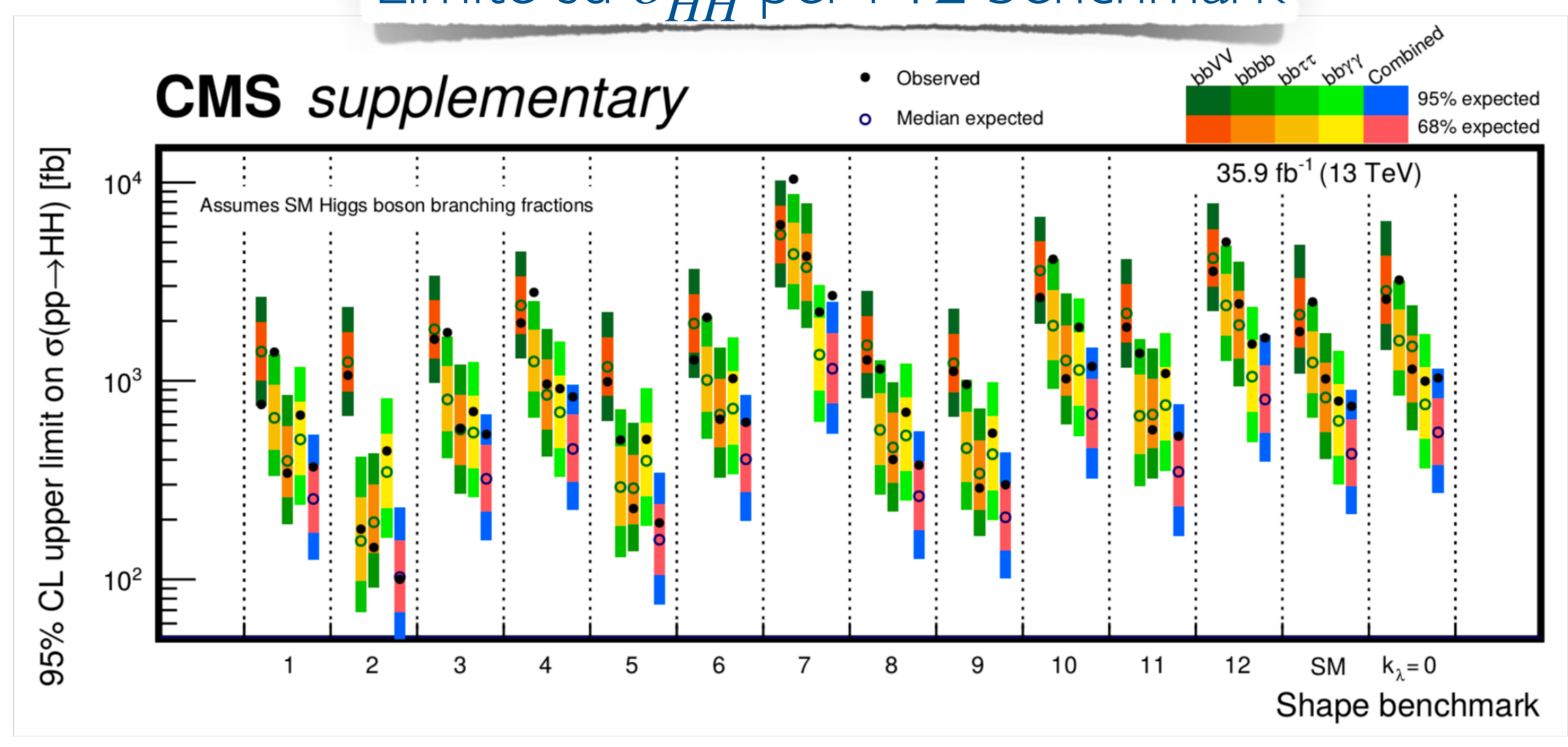
HH **non** risonante : 12 benchmark

- Variazione “continua” di tutti i parametri

κ_λ , κ_t , c_2 , c_{2g} , c_{1g}

- ➔ spazio delle fasi raggruppato in 12 benchmark con caratteristiche simili

Limite su σ_{HH} per i 12 benchmark



12 benchmark

Benchmark	κ_λ	κ_t	c_2	c_g	c_{2g}
1	7.5	1.0	-1.0	0.0	0.0
2	1.0	1.0	0.5	-0.8	0.6
3	1.0	1.0	-1.5	0.0	-0.8
4	-3.5	1.5	-3.0	0.0	0.0
5	1.0	1.0	0.0	0.8	-1
6	2.4	1.0	0.0	0.2	-0.2
7	5.0	1.0	0.0	0.2	-0.2
8	15.0	1.0	0.0	-1	1
9	1.0	1.0	1.0	-0.6	0.6
10	10.0	1.5	-1.0	0.0	0.0
11	2.4	1.0	0.0	1	-1
12	15.0	1.0	1.0	0.0	0.0
SM	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0

[arXiv:1910.00012](https://arxiv.org/abs/1910.00012)

[arXiv:1608.06578](https://arxiv.org/abs/1608.06578)

HH risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

- Risultati ottenuti negli stessi stati finali analizzati anche per HH **non** risonante
 - ➔ Strategie di analisi molto simili
 - ➔ Aggiunta di topologie boosted (massa della risonanza fino a 3 TeV)

ATLAS

HH → bbbb : 2 jet boosted ($R=1$) + sub-jet b-taggiati

[JHEP 01 \(2019\) 030](#)

HH → bb $\gamma\gamma$

selezione “loose”/“tight” basata sul p_T dei jet

selezione “loose” → $m_X < 500$ GeV

selezione “tight” → $m_X > 500$ GeV

[JHEP 11 \(2018\) 040](#)

CMS

HH → bbbb

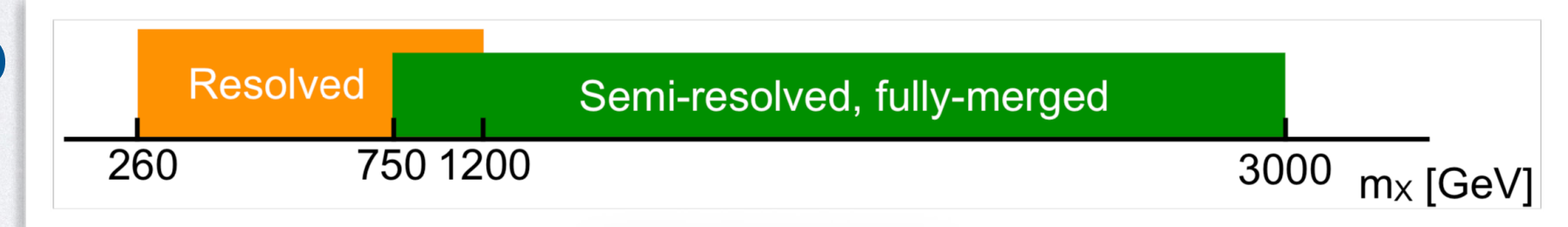
[JHEP 08 \(2018\) 152](#)

[JHEP 01 \(2019\) 040](#)

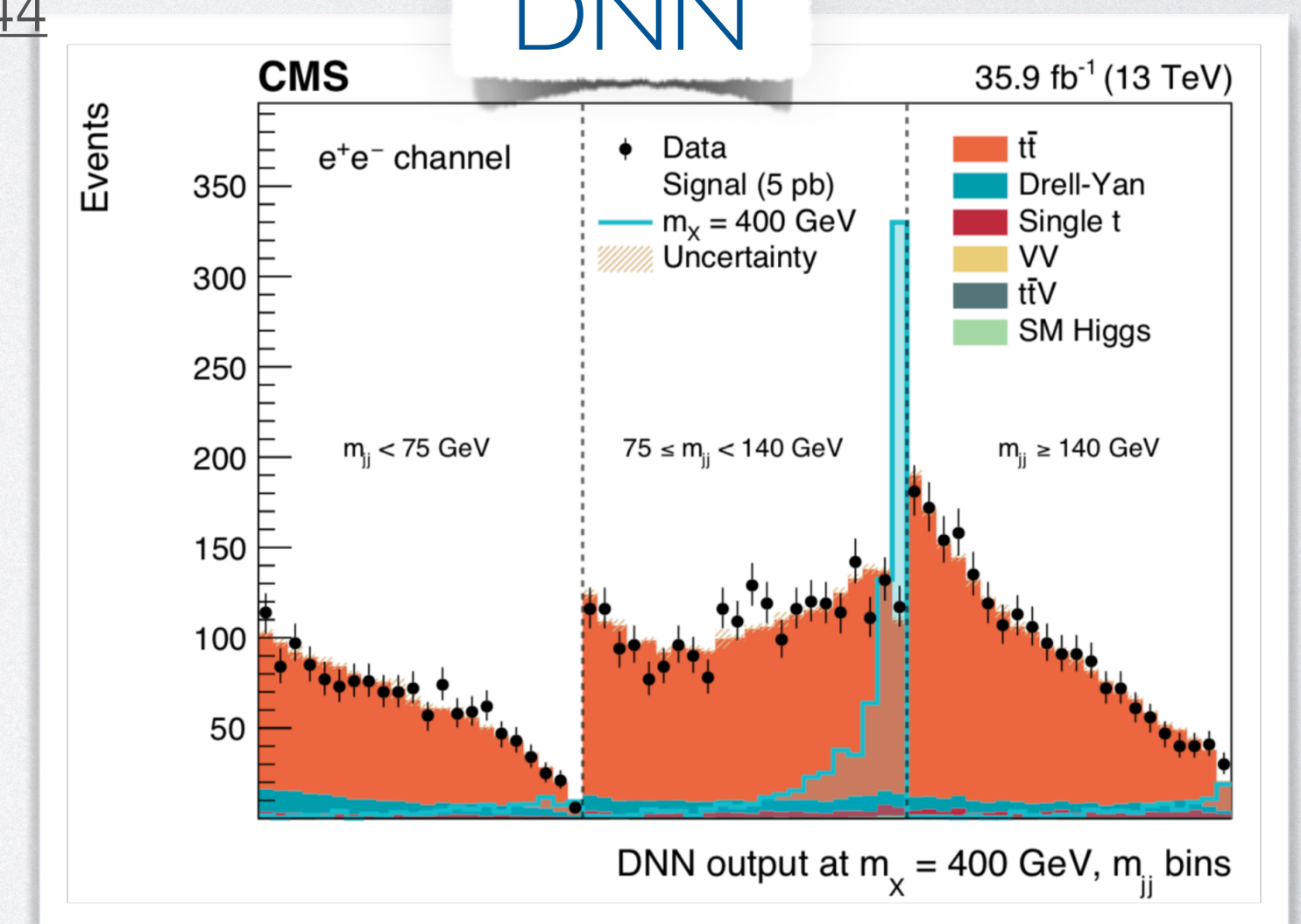
[Phys. Lett. B 781 \(2018\) 244](#)

HH → bb $\nu\nu$

[JHEP 01 \(2018\) 054](#)



DNN

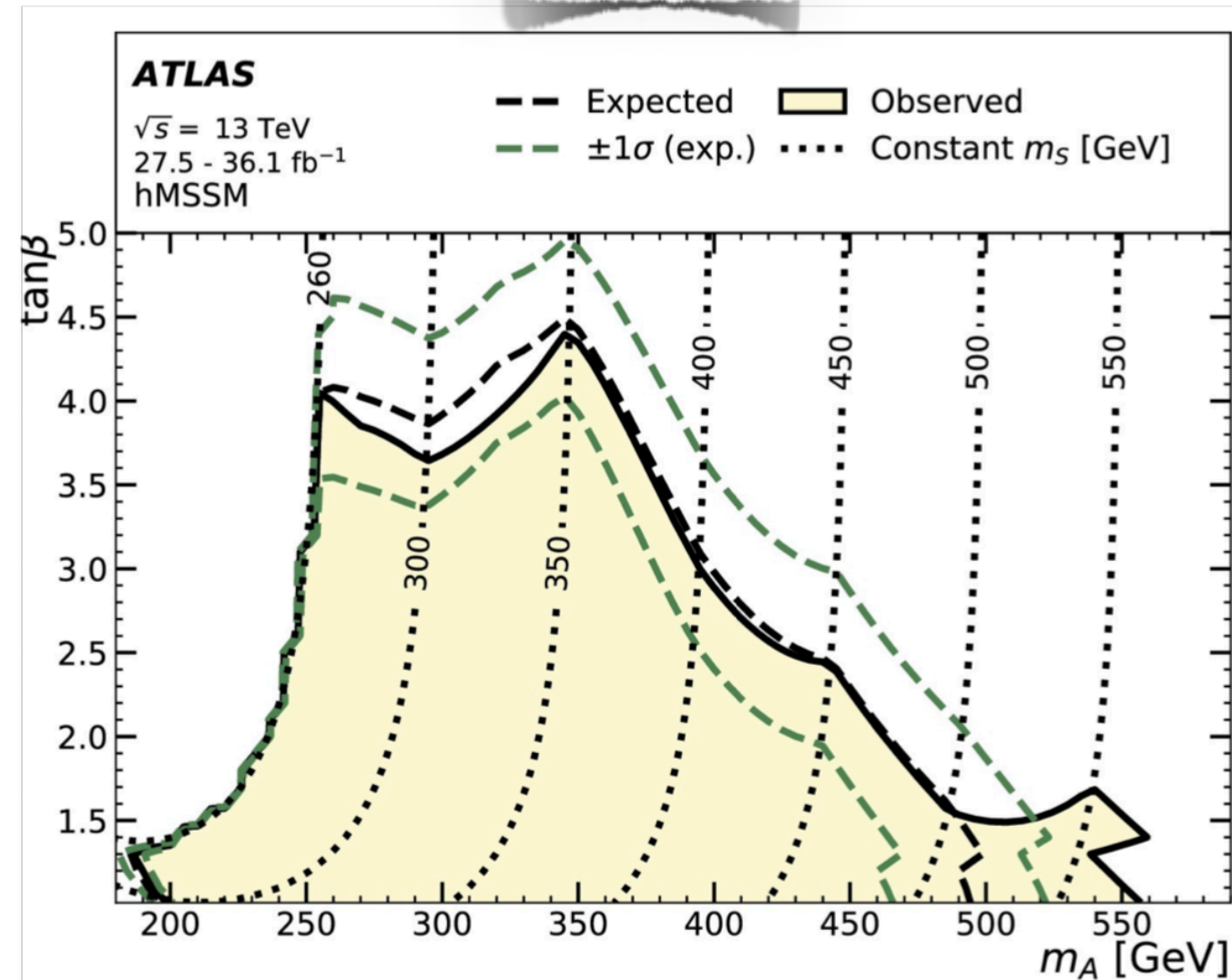


HH risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

arXiv:1910.00012

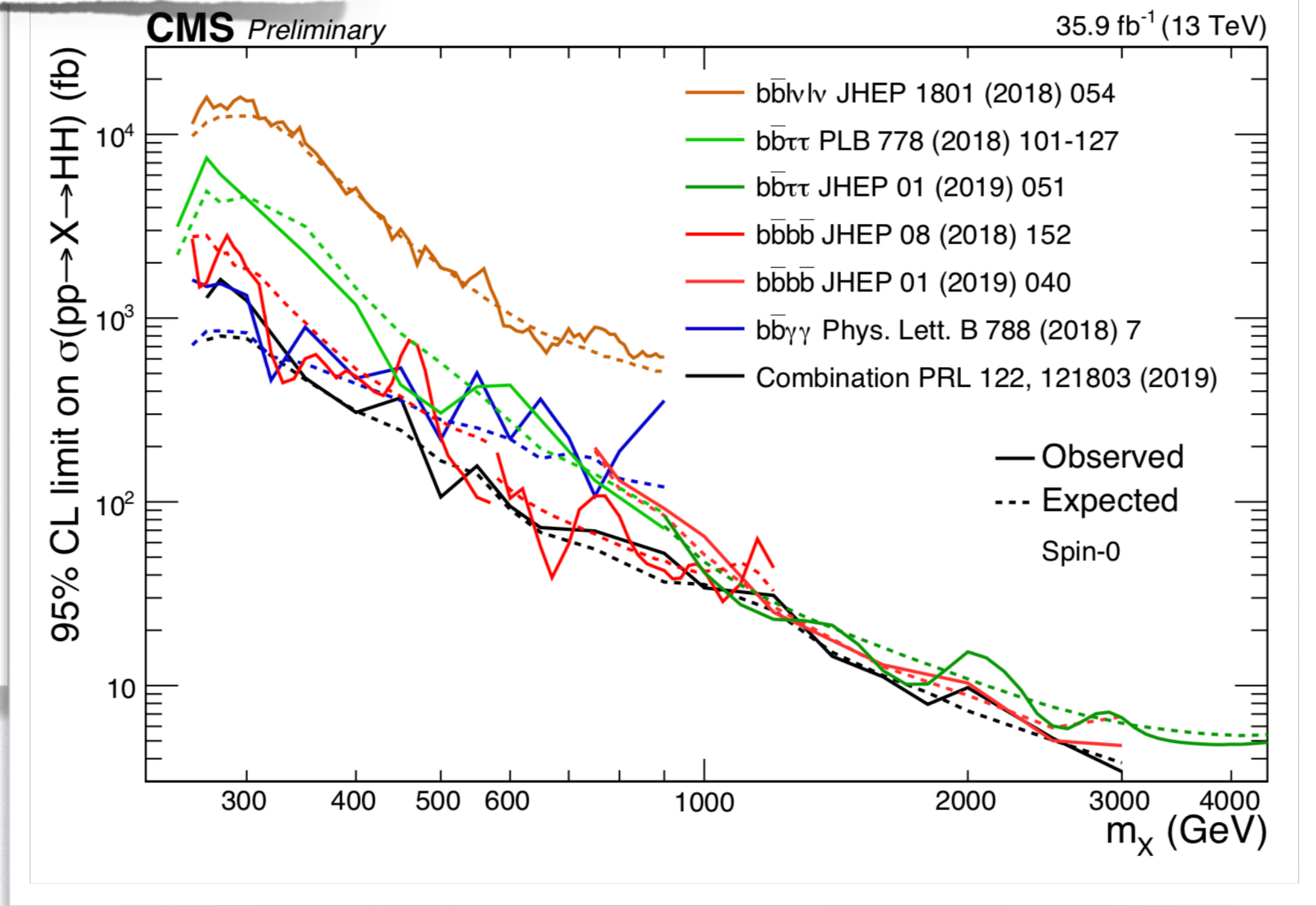
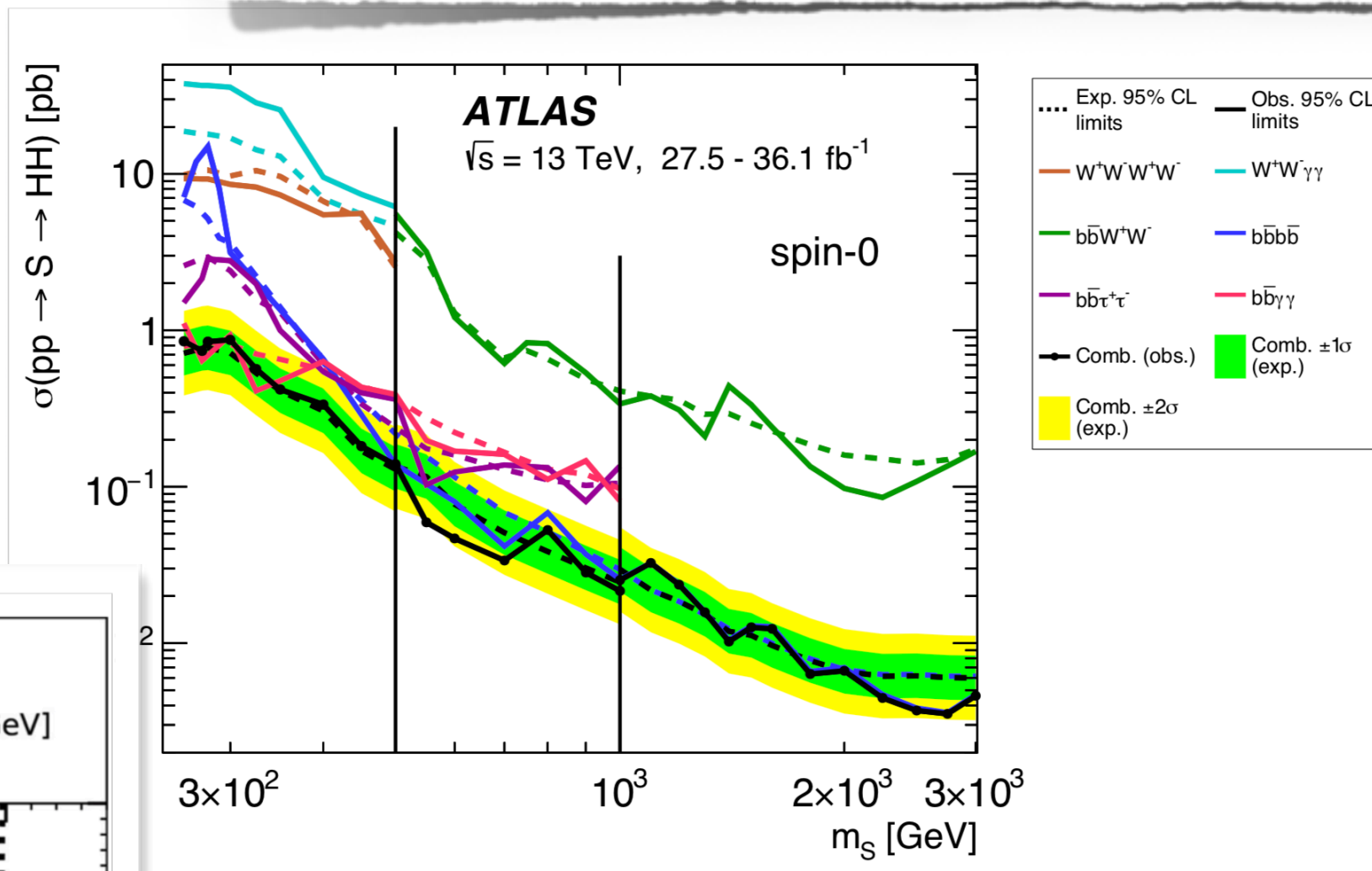
Phys. Lett. B 800 (2020) 135103

hMSSM



Limite superiore su σ (risonanza **spin-0**)

arXiv:1910.00012



arXiv:1910.00012

Phys. Lett. B 800 (2020) 135103

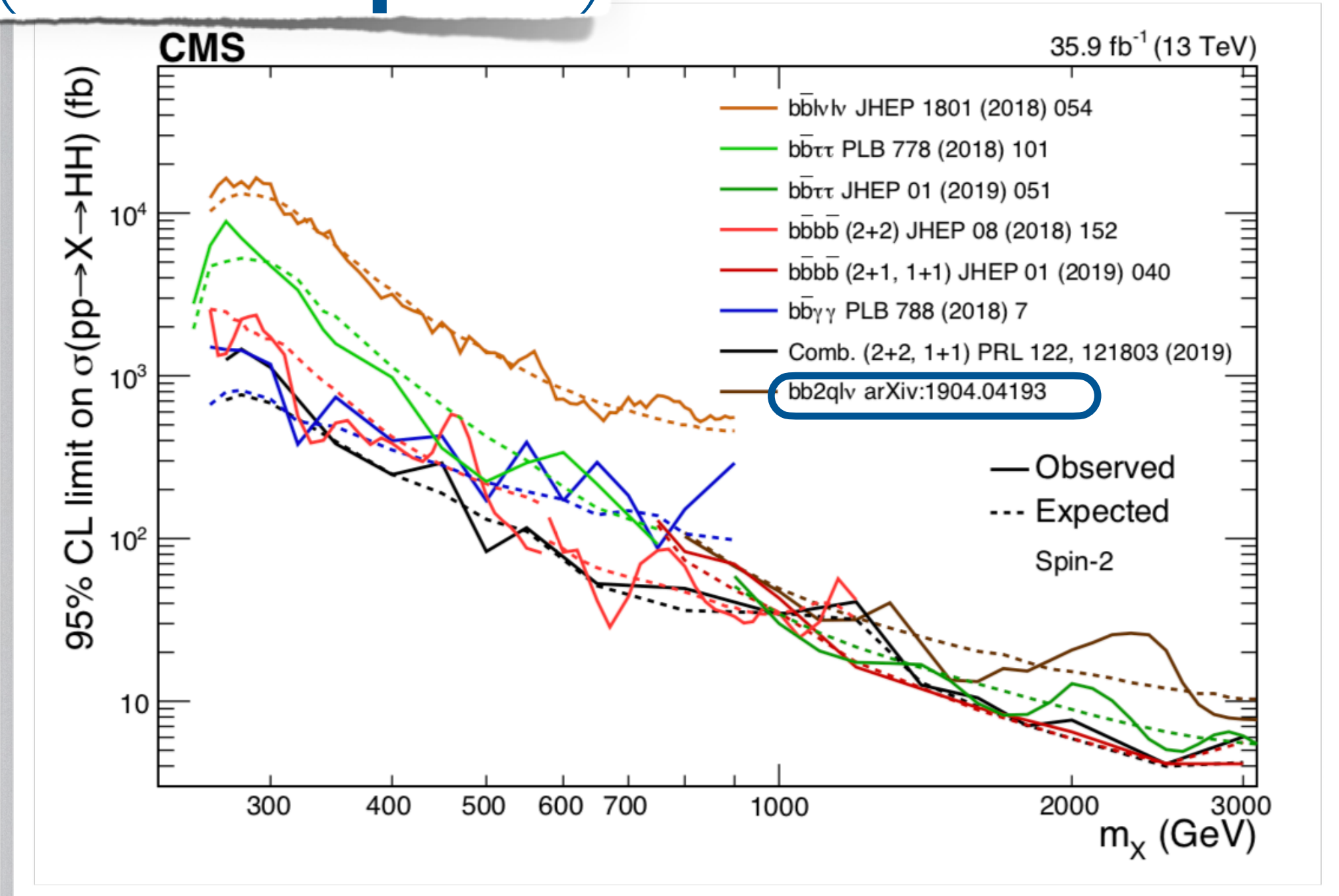
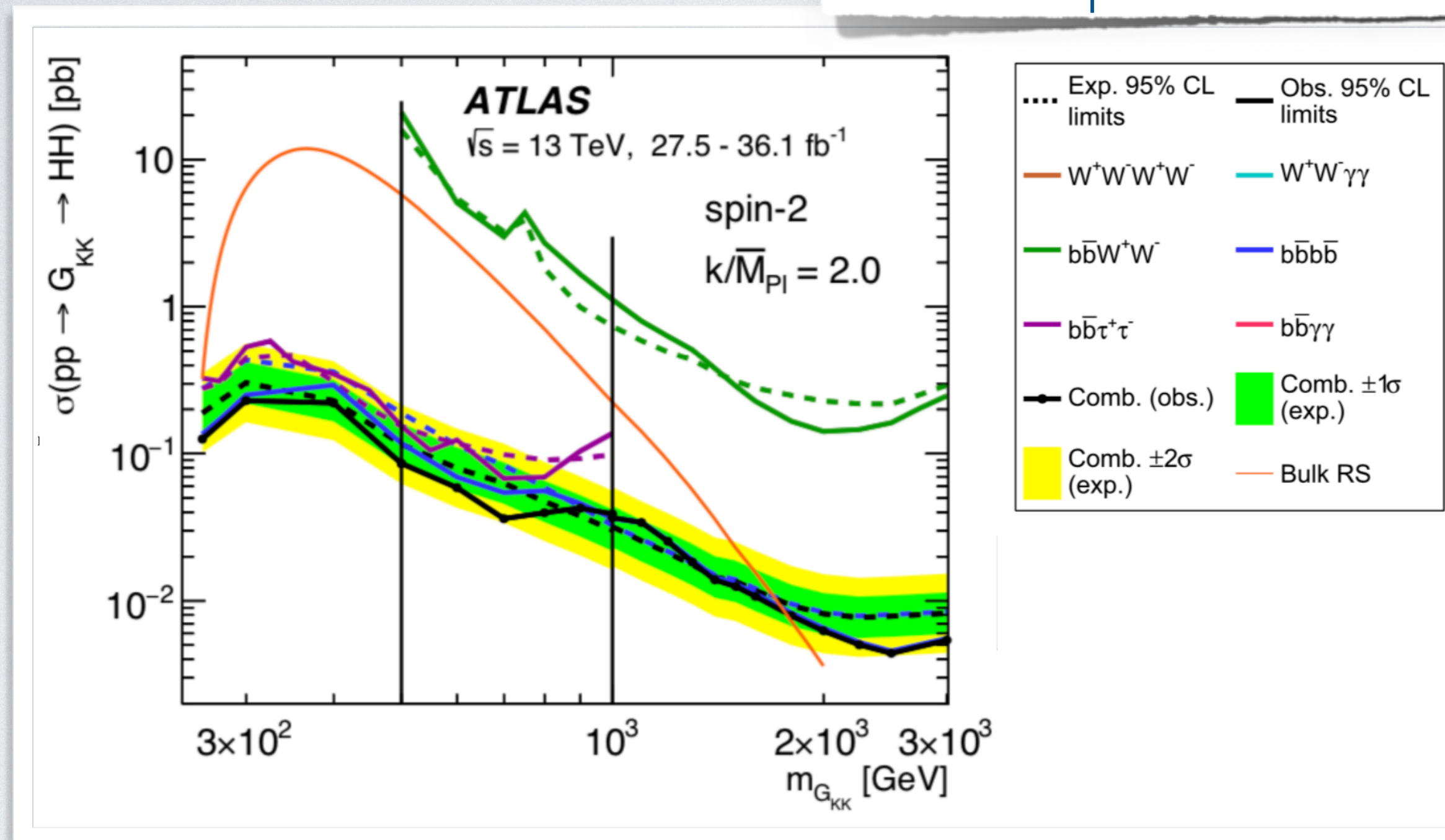
HH risonante : combinazione risultati Run 2 (2016)

arXiv:1910.00012

Phys. Lett. B 800 (2020) 135103

arXiv:1910.00012

Limite superiore su σ (risonanza **spin-2**)



HH → bbVV (non in comb.) e HH → bbTT

HH → bbVV

HH → bbWW(qqℓν) [JHEP 10 \(2019\) 125](#)

1 b-jet boosted + 1 jet (qq) + 1 leptone

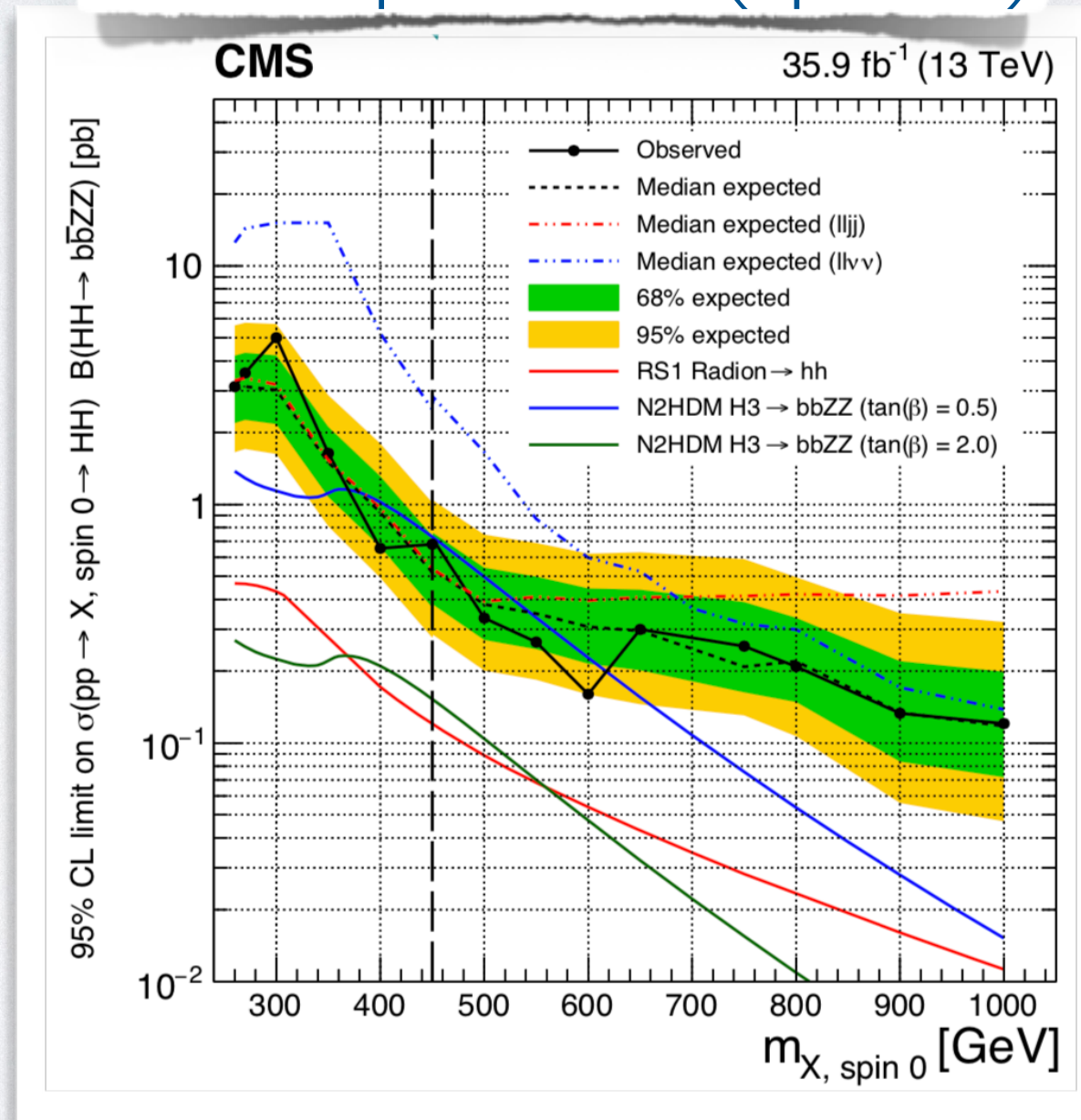
HH → bbZZ(ℓℓ qq/νν)

Prima analisi che studia il decadimento adronico di Z

Interpretazione anche nel modello N2HDM (exo)

[Phys. Rev. D 102, 032003](#)

Limite per m_X (spin-0)

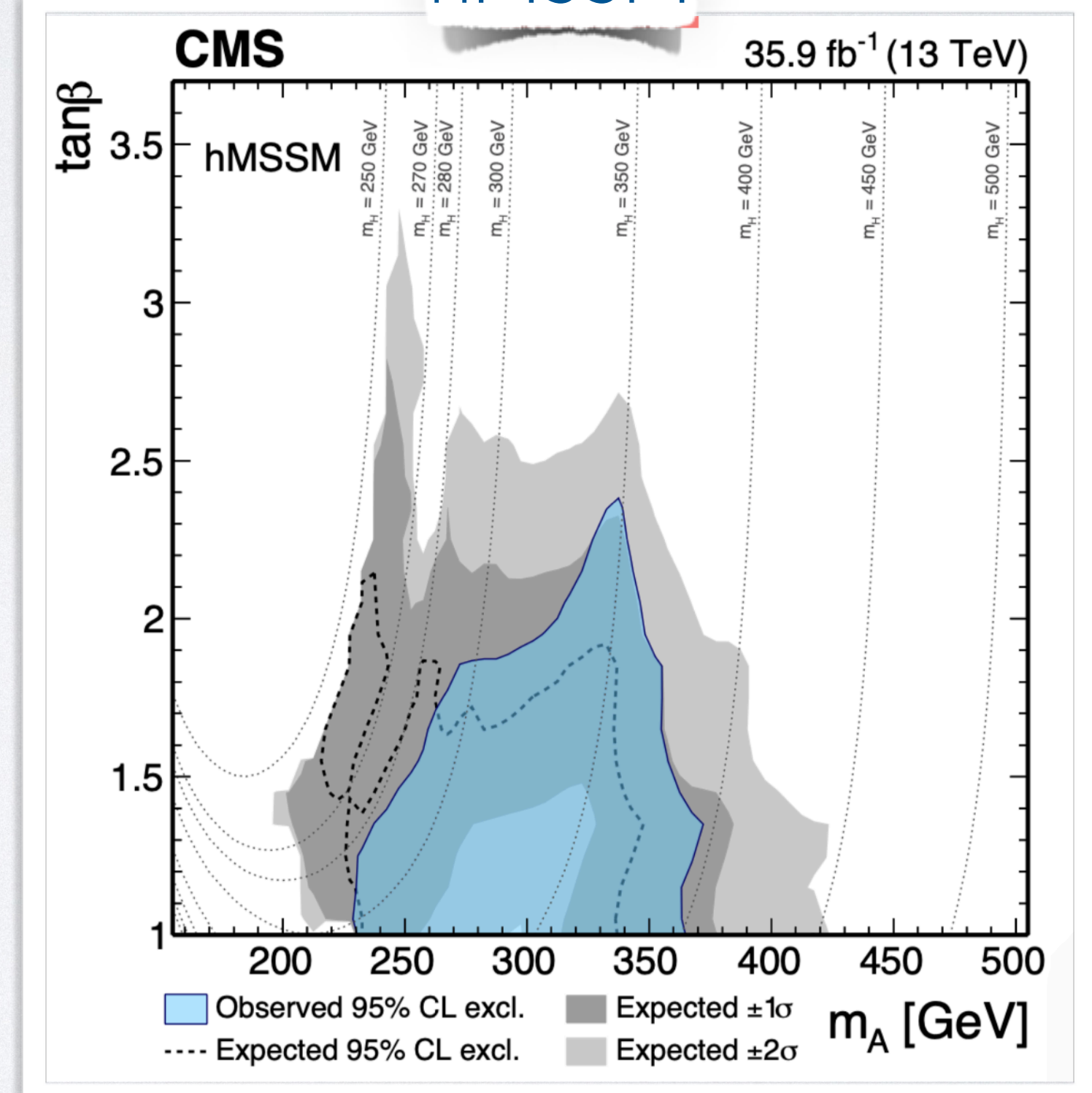


HH → bbTT

- Interpretazione anche nel modello hMSSM
- m_A escluso tra 230 e 360 GeV, tanβ fino a 2

[Phys. Lett. B 778 \(2018\) 101](#)

hMSSM



HH → bbZZ(4ℓ) Full Run 2!

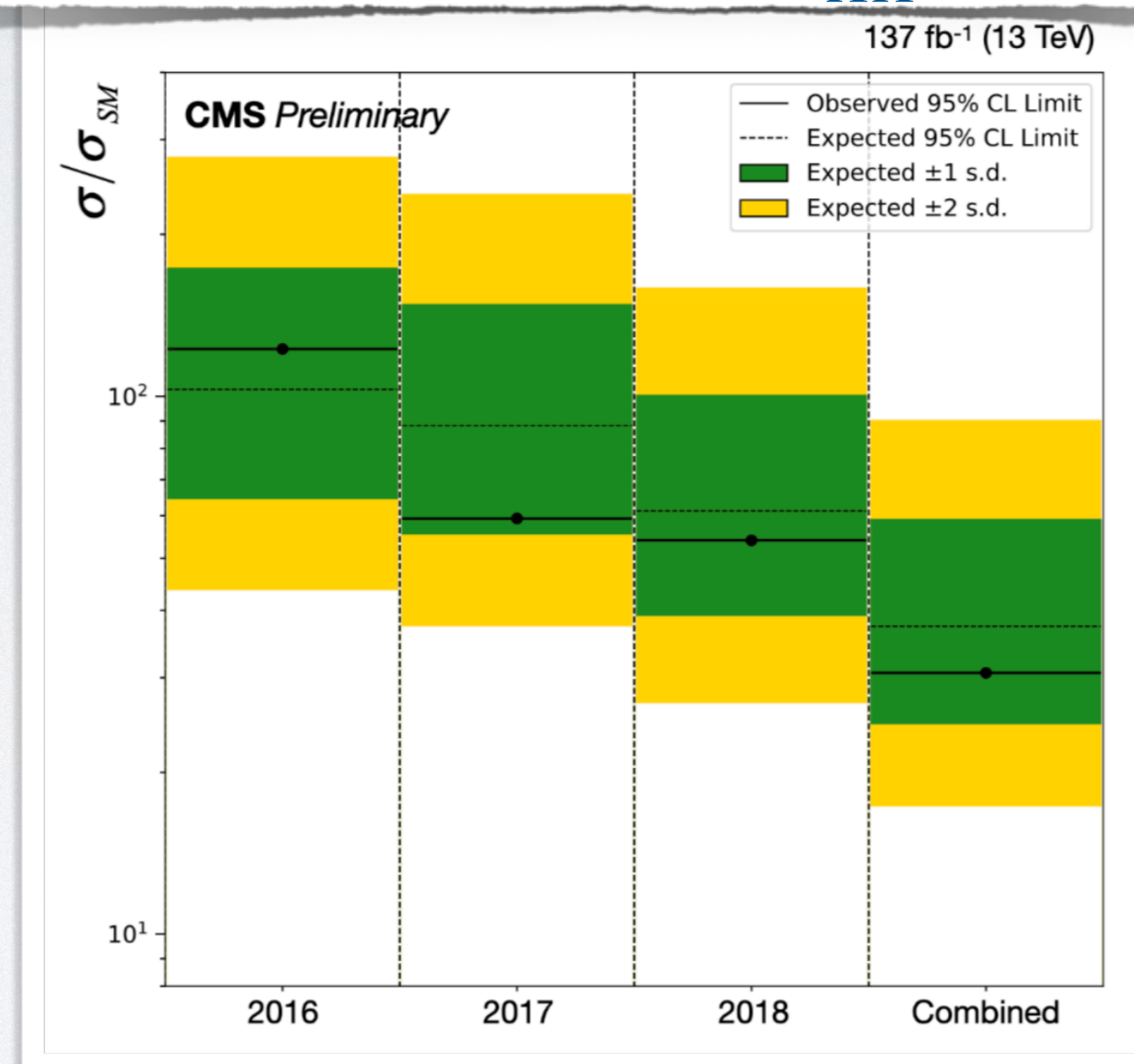
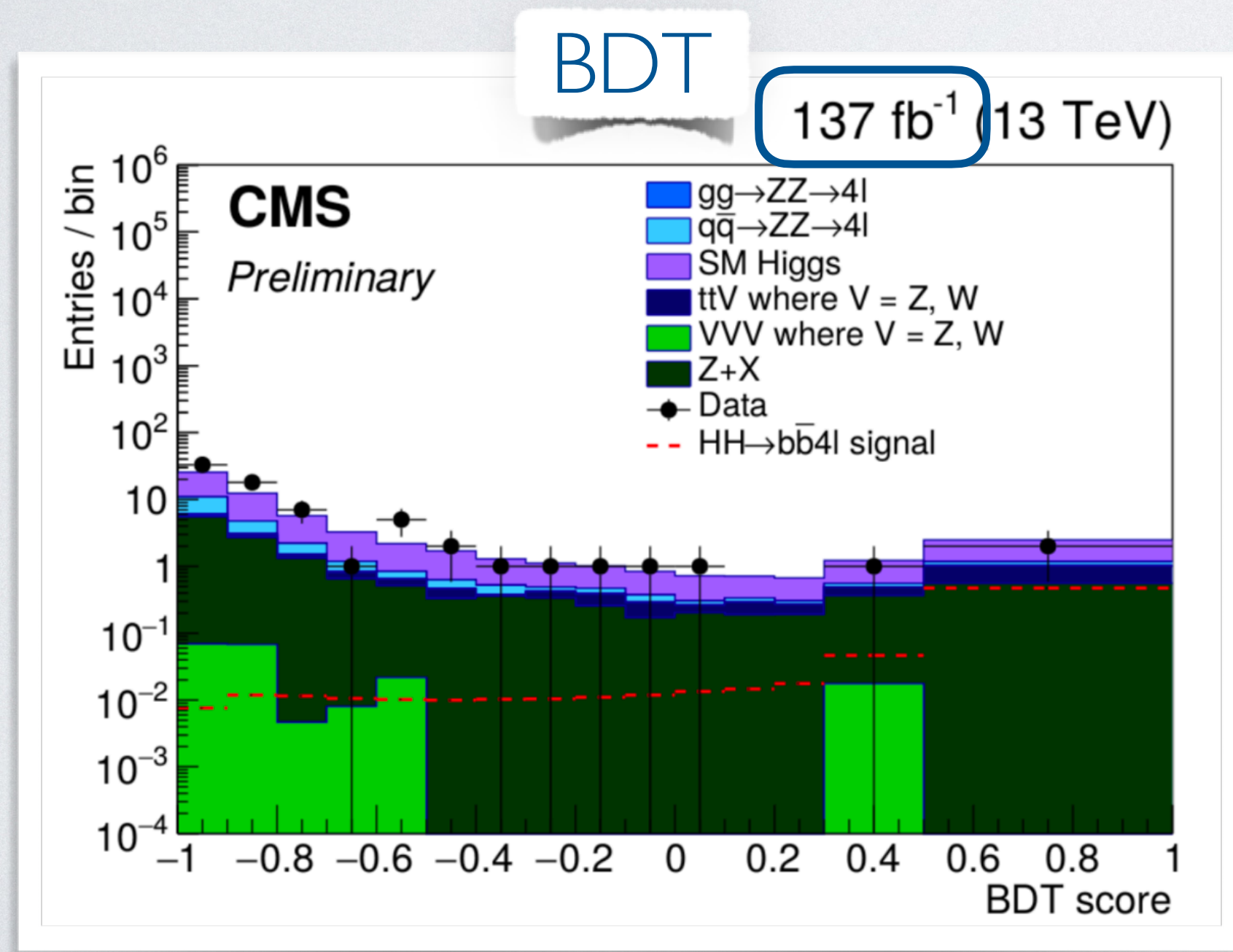
CMS-PAS-HIG-20-004

- Canale di decadimento mai studiato prima
- 4 leptoni + 2 jet
- Fondo principale : H (SM)
- BDT per discriminare segnale-fondo

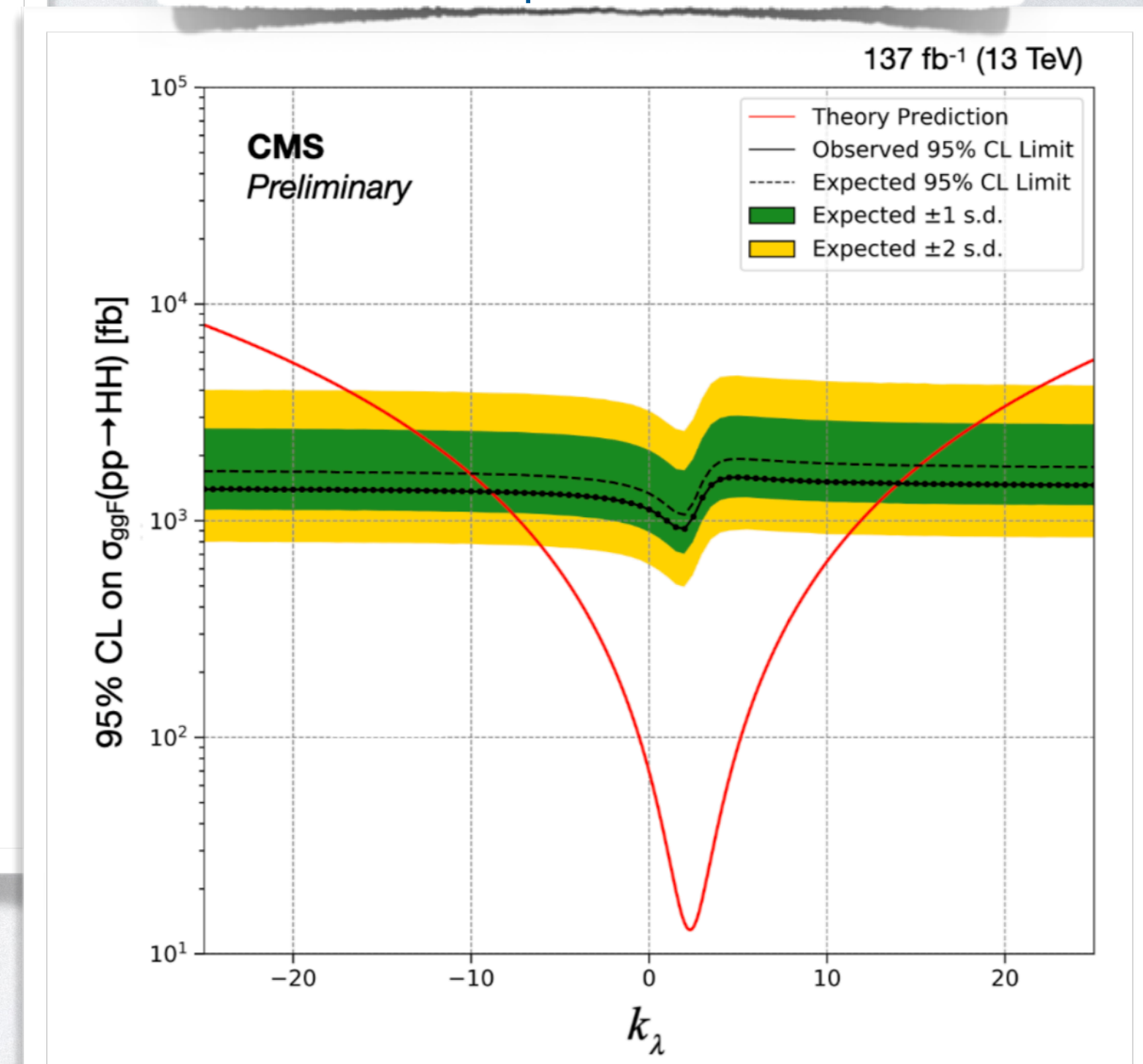
Limite superiore su $\sigma_{HH}/\sigma_{HH}^{SM}$ al 95% CL

-9 < κ_λ < 14 osservato
-10.5 < κ_λ < 15.5 atteso

Vincoli al parametro κ_λ



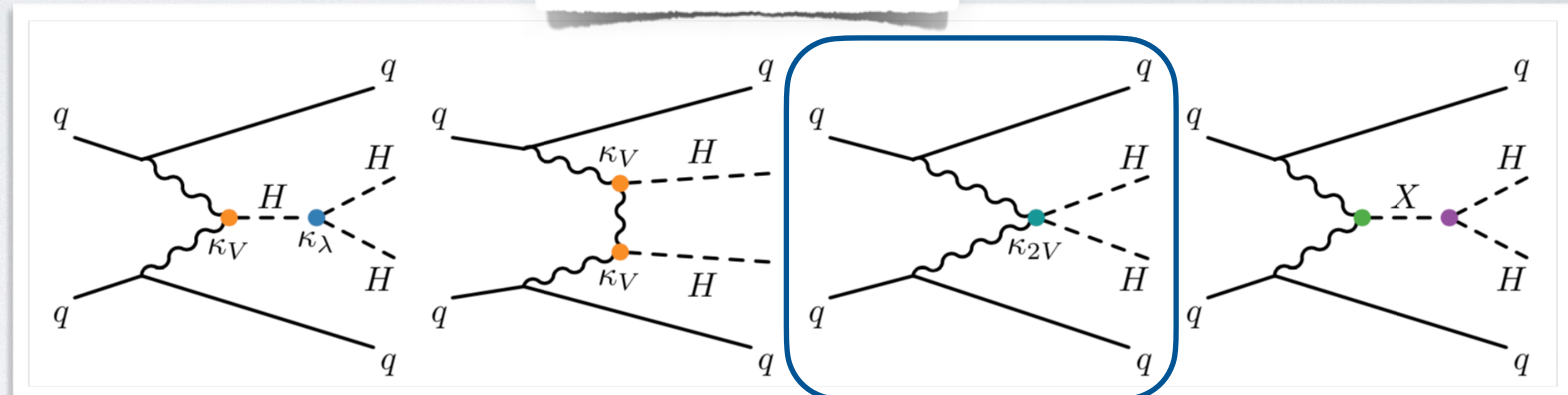
122(102) 59(88) 53(61) 30(37)
osservato (atteso)



VBF HH → bbbb Full Run 2!

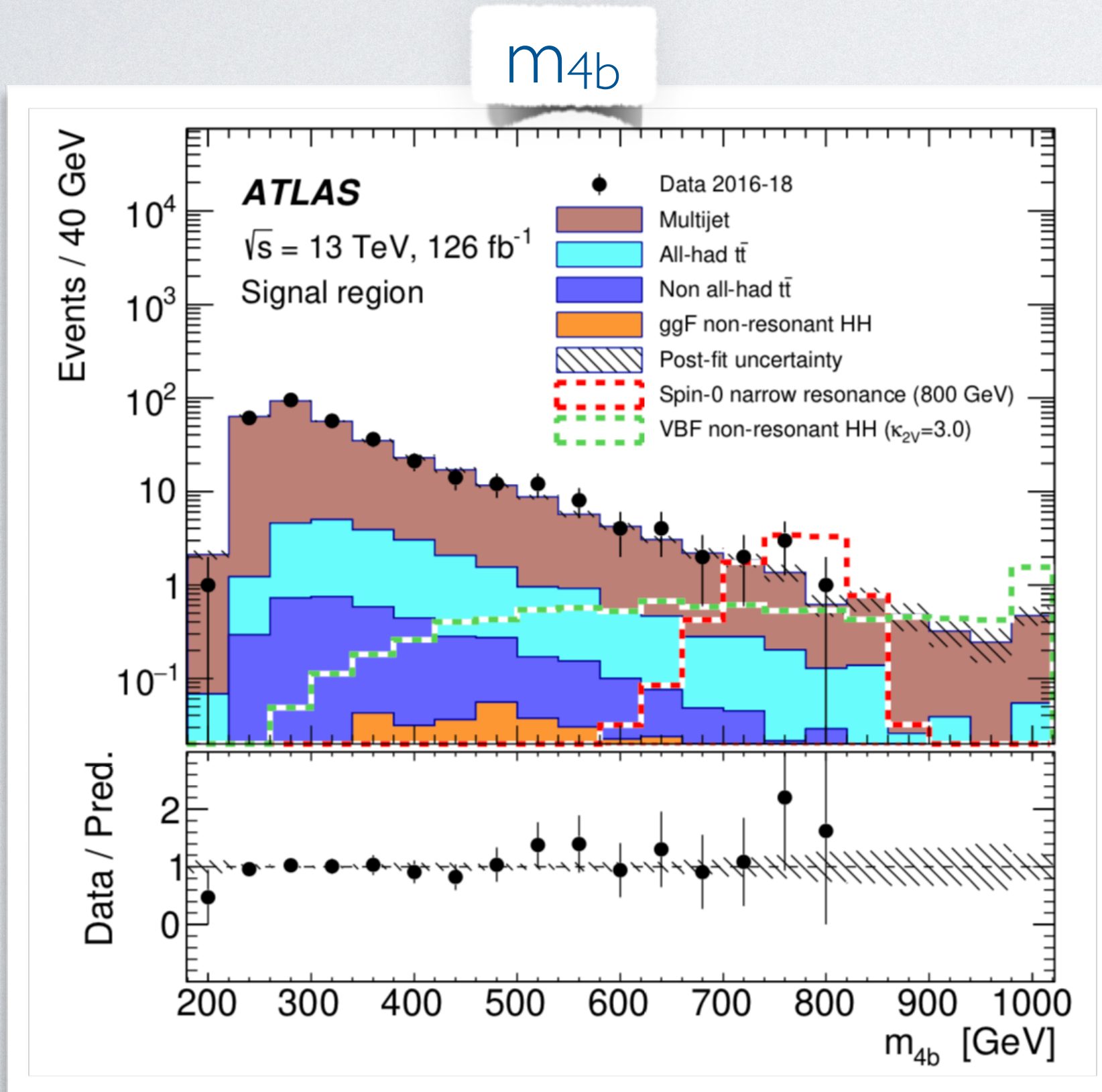
- Modo di produzione mai studiato prima → accesso diretto alla costante di accoppiamento quartica (VVHH)
- 4 b-jet centrali + 2 jet ad alto p_T
- Fondo principale : multi-jet

Produzione VBF



NON risonante

risonante



- Limite su $\sigma_{HH(VBF)} / \sigma_{HH(VBF)}^{SM}$: **840 (550) osservato (atteso)**

- Vincoli sulla costante quartica **κ_{2V}** :

$$\mathbf{-0.76 (-0.91) < \kappa_{2V} < 2.90 (3.11) \text{ osservato (atteso)}$$

JHEP 07 (2020) 108

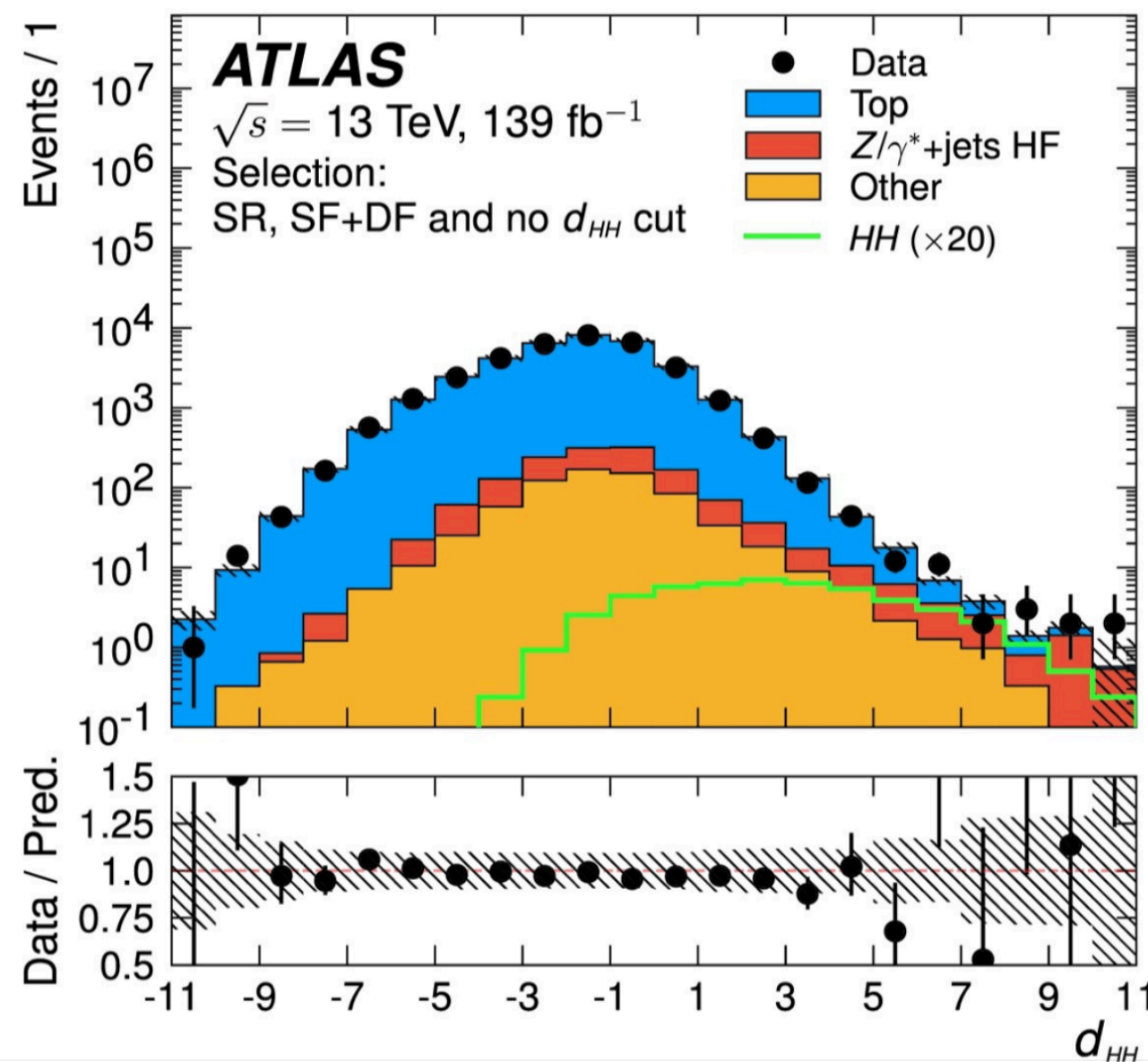
HH → bbℓℓ e HH → bbττ boosted Full Run 2!

HH → bbℓℓ

- H → bb, H → WW/ZZ/ττ
- ➔ 2 b-jet + 2 leptoni con carica opposta

Deep Neural Network

$$d_{HH} = \ln \left[\frac{p_{HH}}{p_{\text{Top}} + p_{Z-\ell\ell} + p_{Z-\tau\tau}} \right]$$



- DNN + tagli su m_{bb} e $m_{\ell\ell}$

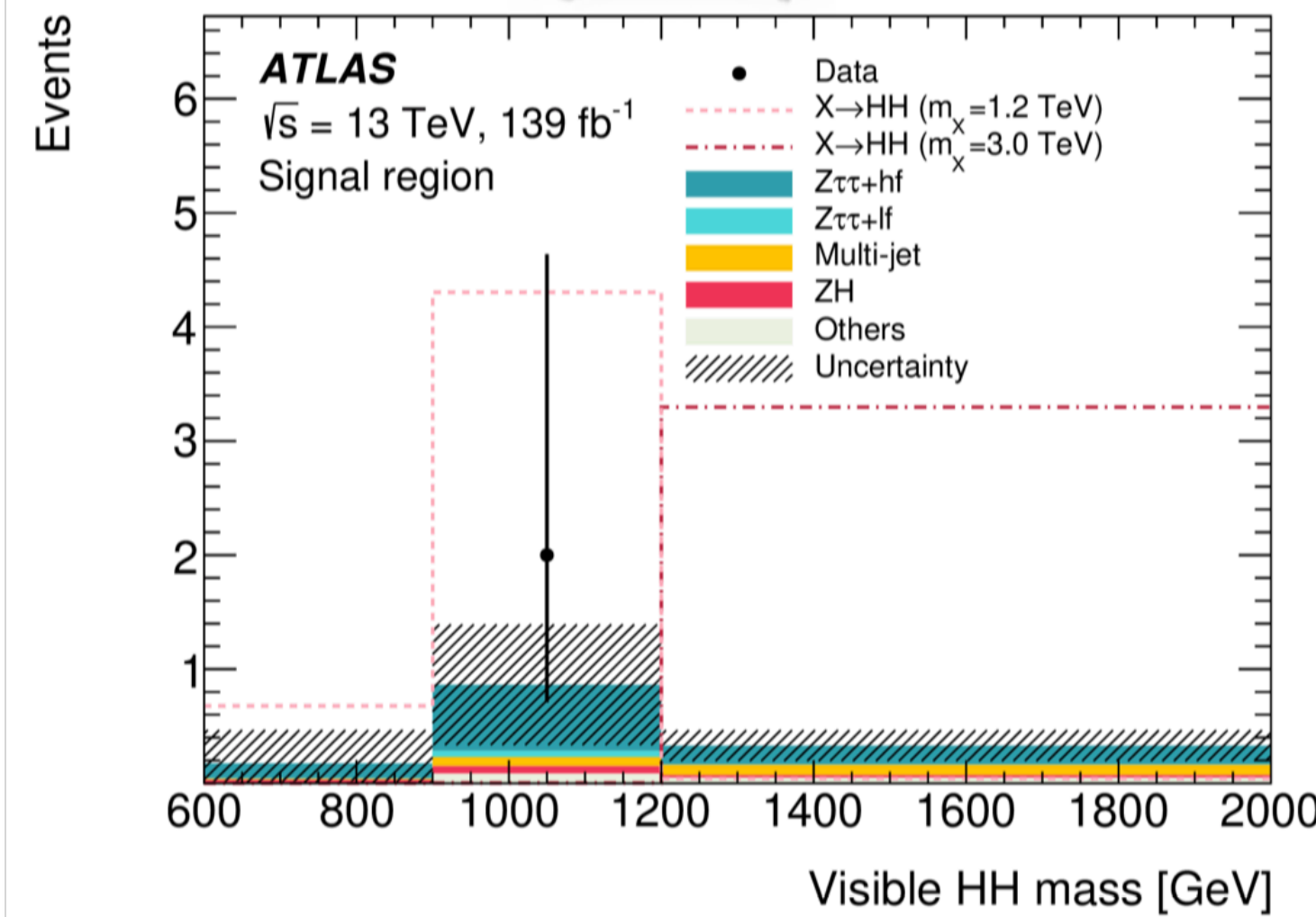
• Limite su $\sigma_{HH}/\sigma_{HH}^{SM}$:
40 (29)
oss. (att.)

Phys. Lett. B 801 (2020) 135145

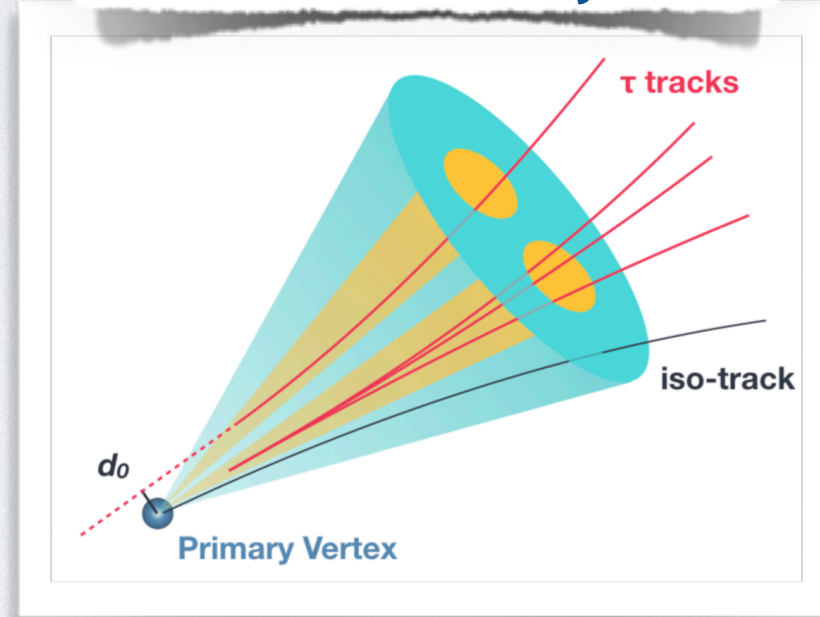
HH → bbττ boosted

- Estensione dell'analisi già esistente
- Nuova tecnica di ricostruzione delle coppie di τ boosted: τ_{had} ricostruiti come 1 jet (R=1) con più sub-jet (R=0.2), bb come 1 jet (R=1)

m_{HH}



Boosted jet



arXiv:2007.14811

fondi molto piccoli
➔ cut and count

High-Luminosity LHC : cosa ci riserva il futuro?

HL-LHC : 3000 fb⁻¹ (luminosità integrata), $\sqrt{s} = 14$ TeV,
pile up ≈ 200

- upgrade dei rivelatori ATLAS e CMS
- Higgs-factory!

Risultati di fisica previsti ad HL :

ATLAS

Estrapolazione risultati ottenuti con dati Run 2 (2016),
riscalati per la luminosità e sezione d'urto a 14 TeV

eccezione: HH → bbγγ : prestazioni del rivelatore
con upgrade per HL parametrizzate

HH → bbbb, HH → bbγγ, HH → bbττ

HL-LHC schedule

HL-LHC project



CMS

Simulazione parametrica del rivelatore con
upgrade (DELPHES) + pile up

**HH → bbbb, HH → bbγγ, HH → bbττ,
HH → bbWW(bbℓνℓν), HH → bbZZ(4ℓ)**

High-Luminosity LHC : ATLAS + CMS

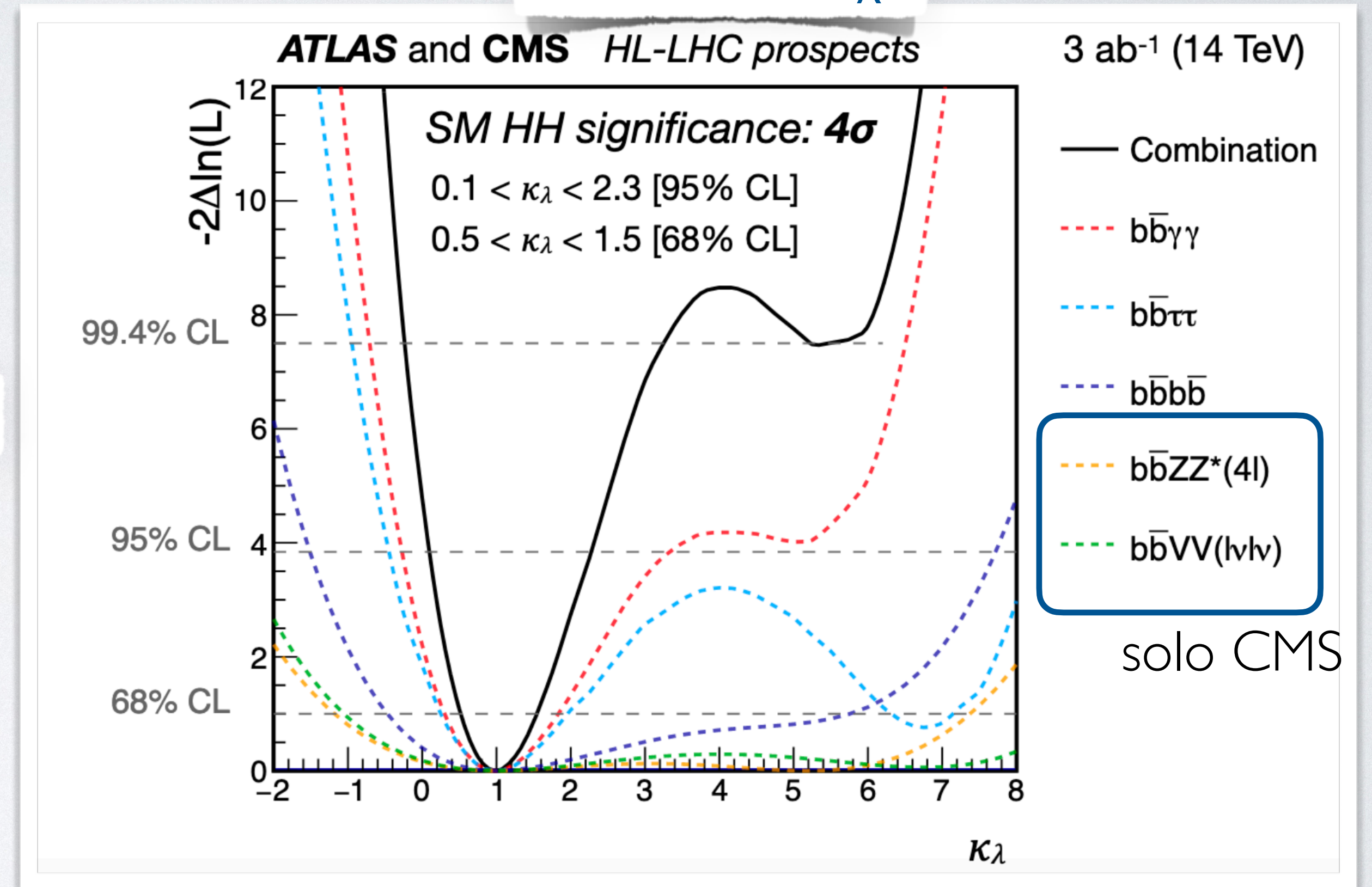
Assunzione sugli errori sistematici :

- incertezze teoriche ridotte di un fattore 2 rispetto alle analisi Run 2
- incertezze sperimentali scalate come $1/\sqrt{L}$

Significanza (in σ) per la produzione HH ($\kappa_\lambda=1$)

	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
$HH \rightarrow b\bar{b}VV^*$	-	0.59	-	0.56
$HH \rightarrow b\bar{b}ZZ(4\ell)$	-	0.37	-	0.37
Combination	3.5	2.8	3.0	2.6
	4.5		4.0	

Vincoli su κ_λ



CERN-2019-007

arXiv:1902.00134

Conclusioni

- Meccanismi di produzione e decadimento di coppie di bosoni di Higgs sono fondamentali per capire il settore dell'Higgs

- HH **non** risonante

→ limite superiore osservato (atteso) sulla sezione d'urto HH : $6.9 (10) \times \text{SM}$ **ATLAS**
 $22.2 (12.8) \times \text{SM}$ **CMS**

→ vincoli su κ_λ : $-5.0 (-5.8) < \kappa_\lambda < 12.0 (12.0)$ **ATLAS**
 $-11.8 (-7.1) < \kappa_\lambda < 18.8 (13.6)$ **CMS**

Run 2 (2016) : 36 fb⁻¹

- HH risonante : limiti per gravitone spin 2 (Kaluza-Klein), radion spin 0, interpretazioni in hMSSM, N2HDM, ..

- Nuovi canali di decadimento esplorati : VBF (ATLAS), HH → bbZZ(4ℓ) (CMS) ⇒ **Full Run 2 !**

in corso per tutti gli altri canali di decadimento!

- Fase ad alta luminosità HL-LHC : Higgs factory

→ ottimizzazione degli algoritmi di ricostruzione e identificazione

→ sviluppo di nuove analisi dedicate per ottimizzare la rimozione dei fondi

→ potenzialità per misure di precisione nel settore dell'Higgs (e interessanti scoperte di nuova fisica?)