

# Highlights dei risultati di ATLAS sulla fisica del bosone di Higgs

Paolo Francavilla  
[paolo.francavilla@cern.ch](mailto:paolo.francavilla@cern.ch)  
Università di Pisa  
INFN Sezione di Pisa

Consiglio di Sezione  
12/3/2024





# Introduzione

- Stranamente le masse sembrano numeri più o meno a caso, e non sembrano rispettare regole di simmetria.

- Simmetrie locali alla base dello SM predicono le masse dei bosoni vettori pari a 0. **W e Z???**

Three generations of matter (fermions)

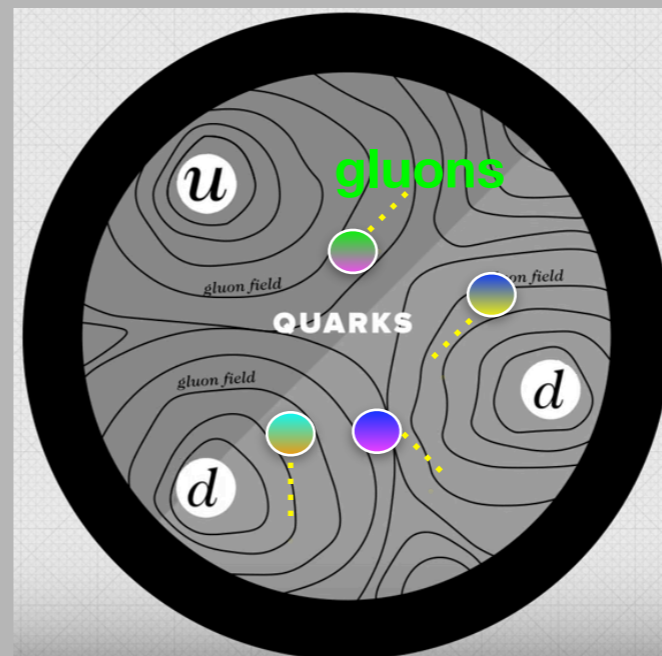
	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge →	<sup>2/3</sup>	<sup>2/3</sup>	<sup>2/3</sup>	0
spin →	<sup>1/2</sup>	<sup>1/2</sup>	<sup>1/2</sup>	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	<sup>-1/3</sup>	<sup>-1/3</sup>	<sup>-1/3</sup>	0
	<sup>1/2</sup>	<sup>1/2</sup>	<sup>1/2</sup>	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	0
	<sup>1/2</sup>	<sup>1/2</sup>	<sup>1/2</sup>	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	±1
	<sup>1/2</sup>	<sup>1/2</sup>	<sup>1/2</sup>	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson

Gauge bosons

# Introduzione

- Stranamente le masse sembrano numeri più o meno a caso, e non sembrano rispettare regole di simmetria.
  - Simmetrie locali alla base dello SM predicono le masse dei bosoni vettori pari a 0.  
**W e Z???**
- La massa è una proprietà emergente di un sistema risultato di qualche tipo di interazioni.

## Esempio - il neutrone



La massa dei quarks è



della massa dei neutroni/protoni

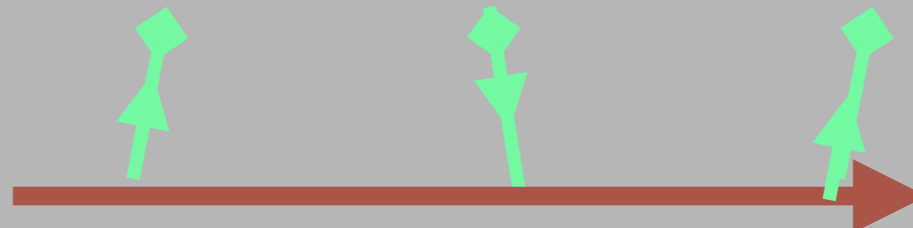
il 99% della massa di un oggetto è dovuta alle interazioni forti

# Introduzione

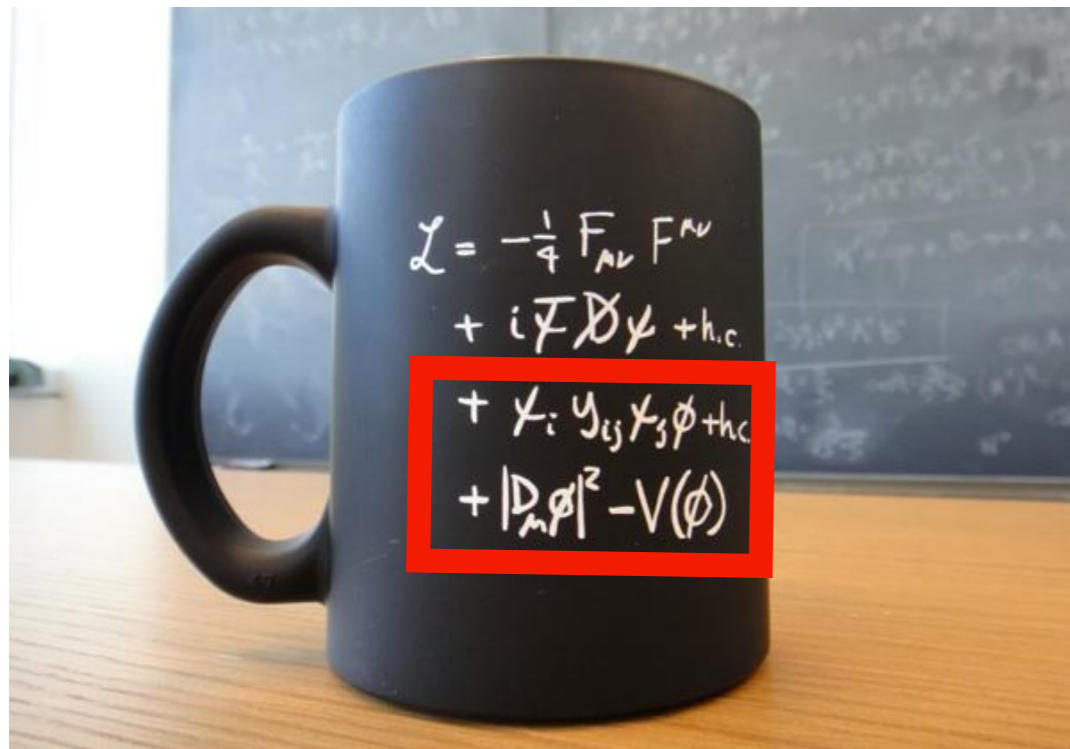
- Stranamente le masse sembrano numeri più o meno a caso, e non sembrano rispettare regole di simmetria.
  - Simmetrie locali alla base dello SM predicono le masse dei bosoni vettori pari a 0.  
**W e Z???**
- La massa è una proprietà emergente di un sistema risultato di qualche tipo di interazioni.
- Il **campo** di Higgs è introdotto proprio con lo scopo di introdurre queste interazioni per le particelle fondamentali

## Le ipotesi nel meccanismo di Brout-Englert-Higgs

- esiste un nuovo campo (di Higgs);
- in natura, il campo di Higgs si trovi in uno stato di condensato;  
di fatto, questo stato è presente ovunque, e determina alcune delle proprietà peculiari dello stato di vuoto.
- il condensato di Higgs interagisce in continuazione con le particelle dello SM;
- l'interazione tra il campo di Higgs e le particelle dello SM è tanto maggiore quanto maggiore è la massa della particella



# Il modello standard e il campo di Higgs



## There are parameters of the SM

$g_1, g_2, g_3$  3 gauge couplings

+QCD vacuum angle  $\theta_{QCD}$

$\theta_{ij}, \delta_{CP}$  3 CKM angles +1 phase

$m_{q_i}, m_{l_j}$  6 quark masses+3 charged leptons

$m_h, v$  Higgs mass and VEV

**19 in fact, 15 of which are because of the Higgs!**

\*If you add Neutrino masses, then  $19 \rightarrow 26$  at least, but Higgs is responsible for  $15 \rightarrow 22$  of them, or there must be a NEW source of EW symmetry breaking!

- Nello SM il campo di Higgs ha un ruolo speciale.
- Di fatto la sua presenza introduce gran parte dei parametri liberi della teoria.

# Produzione del bosone di Higgs

- Le onde di questo nuovo campo si manifestano come una nuova particella: **Il bosone di Higgs**
- Nello zoo delle particelle fondamentali, il bosone di Higgs é tra le particelle piú strane:



- **Unico particella scalare**

- **Accoppia con i fermioni massivi dello SM senza seguire alcuna regola apparente di simmetria**

• ...

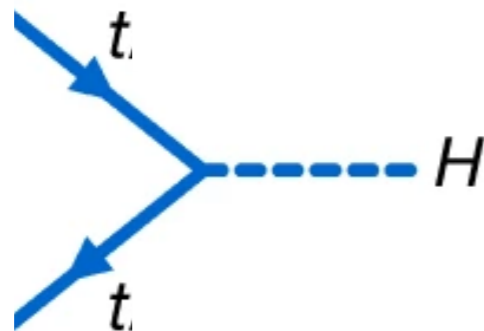
- **Studiando il bosone di Higgs possiamo indagare come é fatto il campo di Higgs e possiamo verificare se tutto é coerente con quanto ci aspettiamo**

2.4 MeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 <b>u</b> up	1.27 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 <b>c</b> charm	171.2 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 <b>t</b> top	0 0 1 <b>γ</b> photon	? GeV/c <sup>2</sup> 0 0 <b>H</b> Higgs boson
4.8 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>d</b> down	104 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>s</b> strange	4.2 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon	
<2.2 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<15.5 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	91.2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>e</b> electron	105.7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>μ</b> muon	1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>τ</b> tau	80.4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> W boson	

Gauge bosons

# Produzione del bosone di Higgs

- Le onde di questo nuovo campo si manifestano come una nuova particella: **Il bosone di Higgs**
- Studiando il bosone di Higgs possiamo indagare come é fatto il campo di Higgs e possiamo verificare se tutto é coerente con quanto ci aspettiamo
- Come si perturba il vuoto per generare il bosone di Higgs?
  - Idea: Faccio urtare le particelle piú massive dello SM.

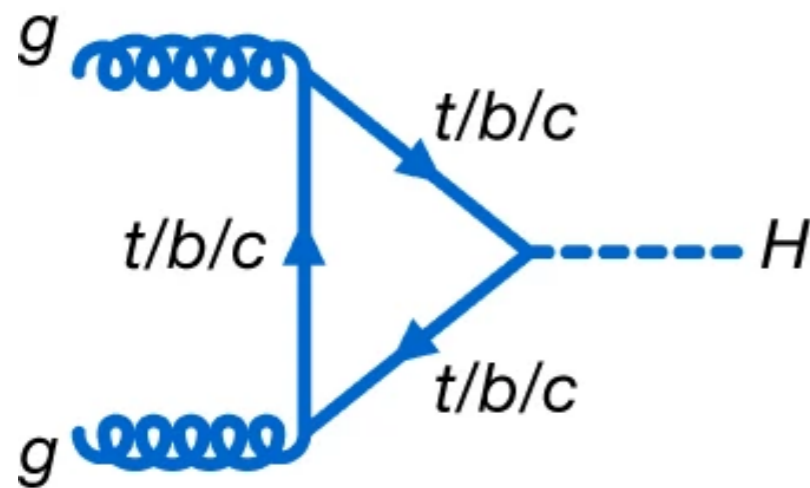


2.4 MeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 <b>u</b> up	1.27 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 <b>c</b> charm	171.2 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 <b>t</b> top	0 0 1 <b>γ</b> photon	? GeV/c <sup>2</sup> 0 0 <b>H</b> Higgs boson
4.8 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>d</b> down	104 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>s</b> strange	4.2 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon	
<2.2 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<15.5 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	91.2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>e</b> electron	105.7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>μ</b> muon	1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>τ</b> tau	80.4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> W boson	Gauge bosons

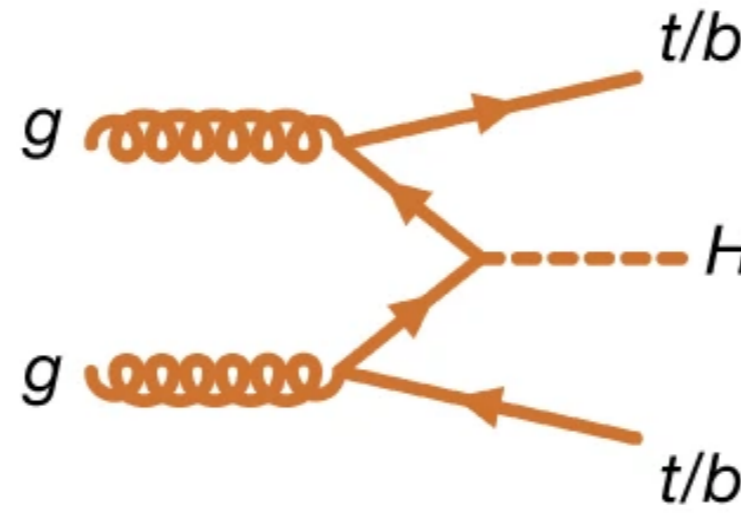


# Produzione del bosone di Higgs

- Le onde di questo nuovo campo si manifestano come una nuova particella: **Il bosone di Higgs**
- Studiando il bosone di Higgs possiamo indagare come é fatto il campo di Higgs e possiamo verificare se tutto é coerente con quanto ci aspettiamo
- Come si perturba il vuoto per generare il bosone di Higgs?
  - Idea: Faccio urtare le particelle piú massive dello SM.



gluon-gluon fusion



ttH

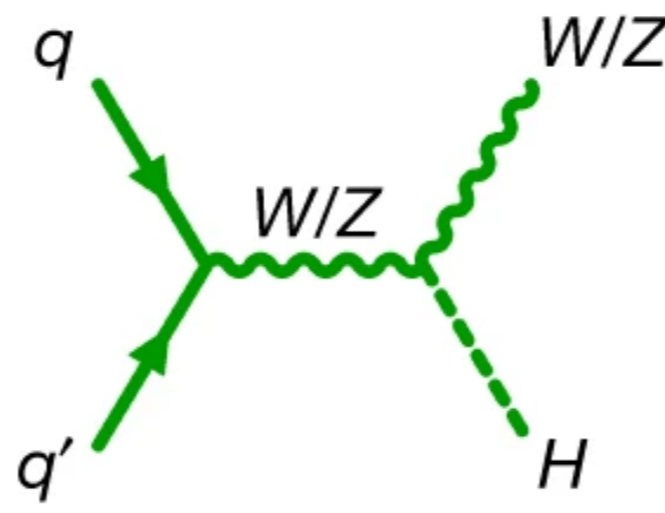
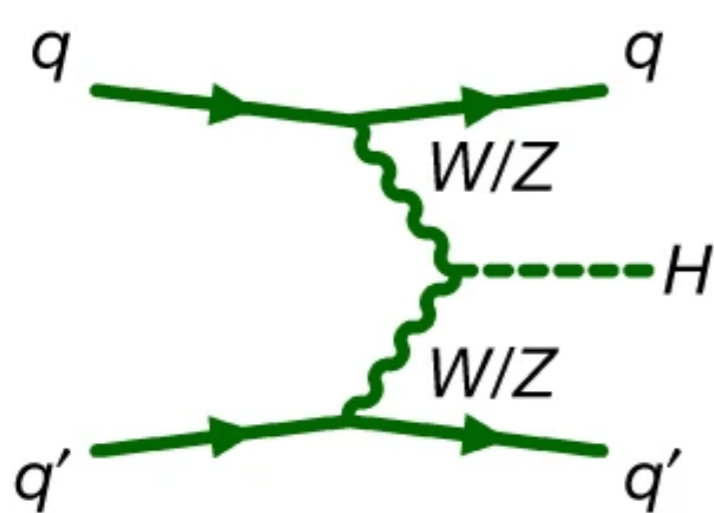
2.4 MeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 <b>u</b> up	1.27 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 <b>c</b> charm	171.2 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 <b>t</b> top	0 0 1 <b>γ</b> photon	? GeV/c <sup>2</sup> 0 0 <b>H</b> Higgs boson
4.8 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>d</b> down	104 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>s</b> strange	4.2 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon	
<2.2 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<15.5 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	91.2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>e</b> electron	105.7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>μ</b> muon	1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>τ</b> tau	80.4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> W boson	Gauge bosons

# Produzione del bosone di Higgs

- Le onde di questo nuovo campo si manifestano come una nuova particella: **Il bosone di Higgs**
- Studiando il bosone di Higgs possiamo indagare come é fatto il campo di Higgs e possiamo verificare se tutto é coerente con quanto ci aspettiamo
- Come si perturba il vuoto per generare il bosone di Higgs?



- Idea: Faccio urtare le particelle piú massive dello SM.



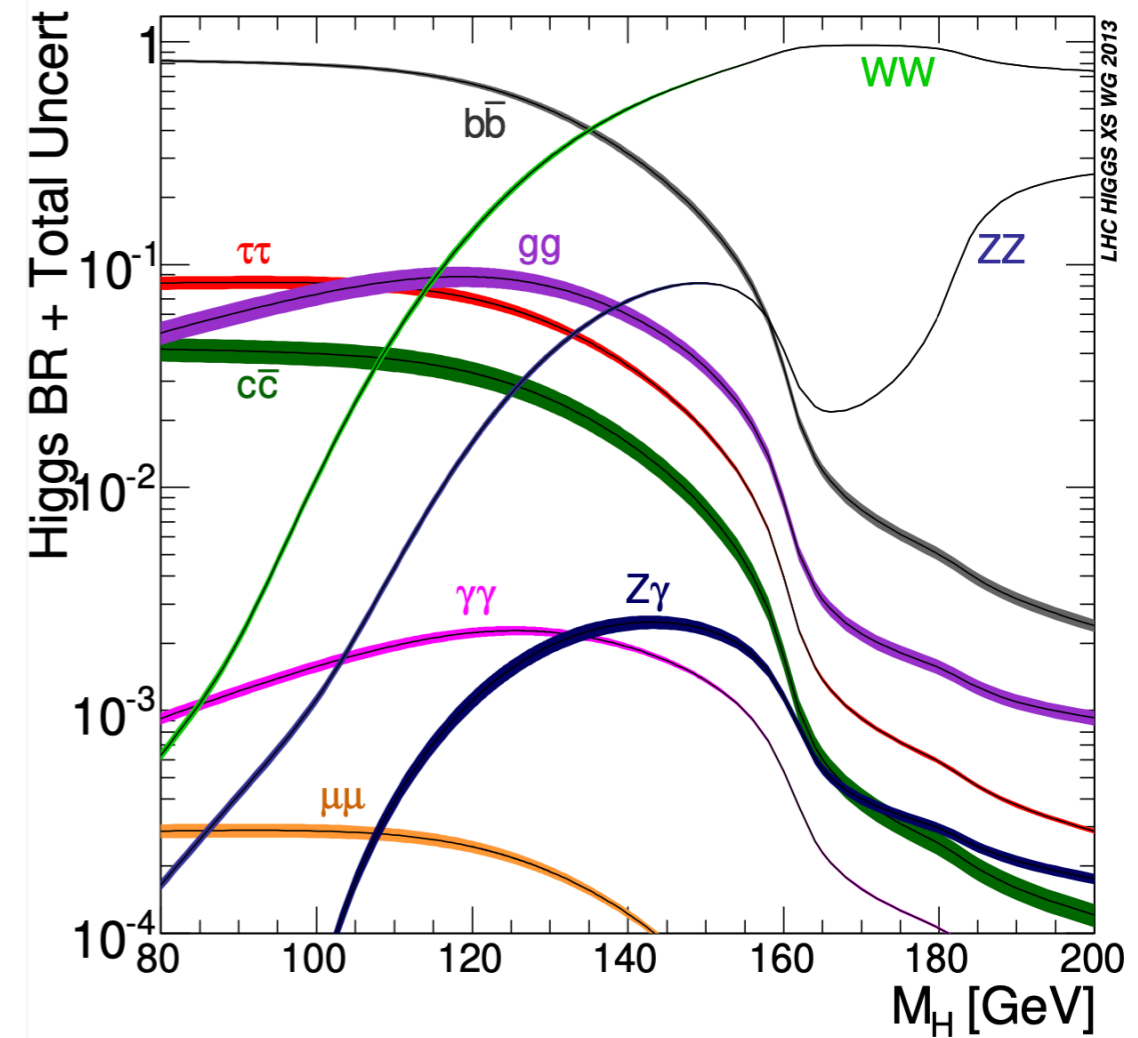
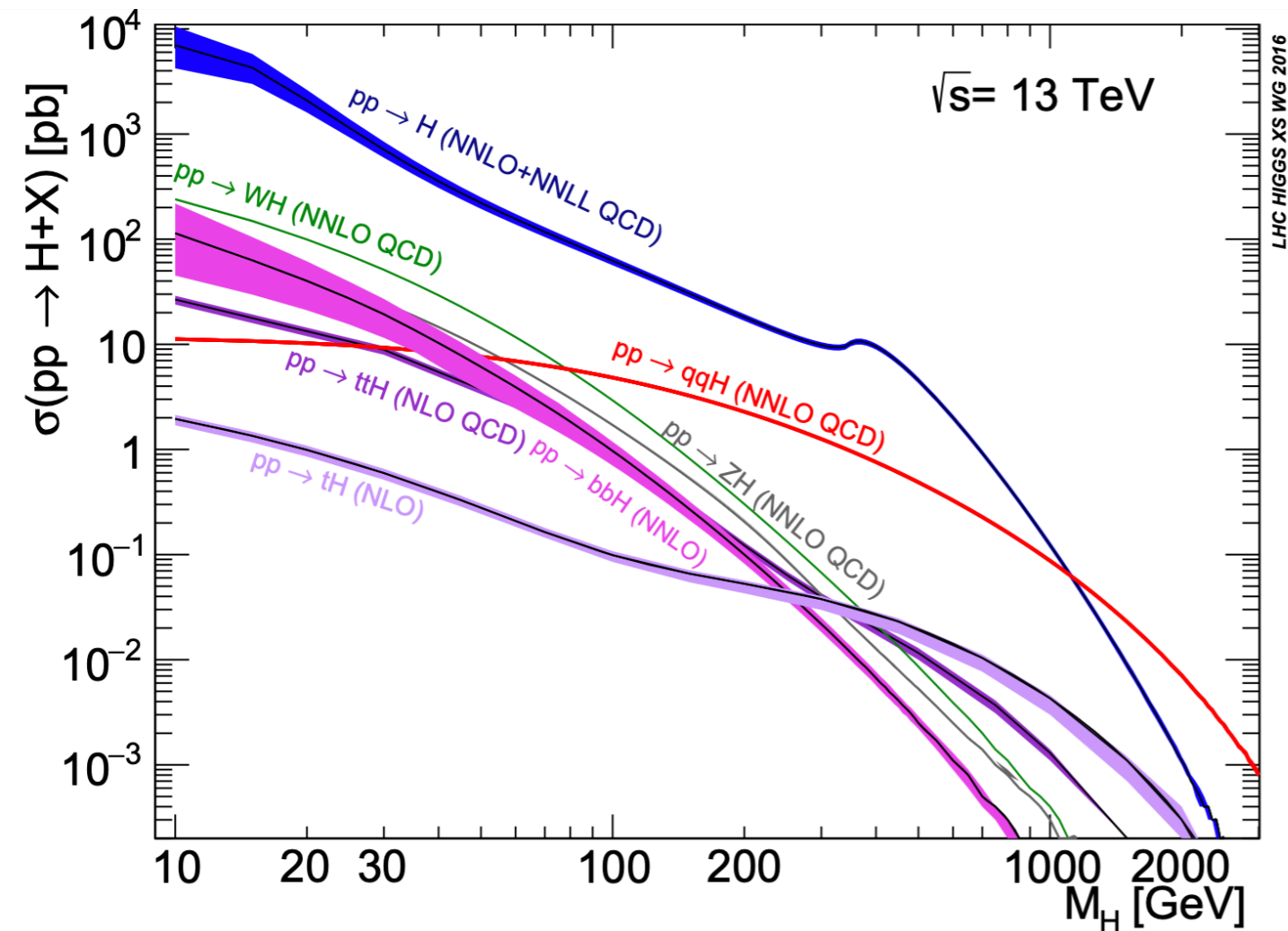
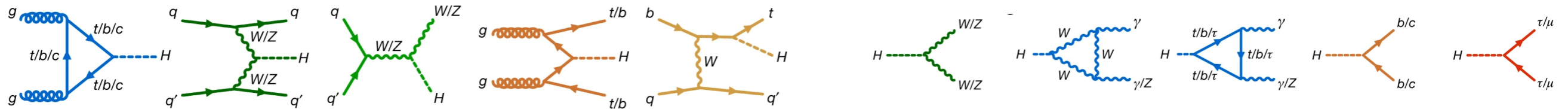
Vector boson fusion

Higgs-strahlung

2.4 MeV/c <sup>2</sup> <sup>2/3</sup> <sup>1/2</sup> <b>u</b> up	1.27 GeV/c <sup>2</sup> <sup>2/3</sup> <sup>1/2</sup> <b>c</b> charm	171.2 GeV/c <sup>2</sup> <sup>2/3</sup> <sup>1/2</sup> <b>t</b> top	0 0 1 <b>γ</b> photon	? GeV/c <sup>2</sup> 0 0 <b>H</b> Higgs boson
4.8 MeV/c <sup>2</sup> <sup>-1/3</sup> <sup>1/2</sup> <b>d</b> down	104 MeV/c <sup>2</sup> <sup>-1/3</sup> <sup>1/2</sup> <b>s</b> strange	4.2 GeV/c <sup>2</sup> <sup>-1/3</sup> <sup>1/2</sup> <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon	
<2.2 eV/c <sup>2</sup> 0 <sup>1/2</sup> <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 <sup>1/2</sup> <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<15.5 MeV/c <sup>2</sup> 0 <sup>1/2</sup> <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	91.2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 <sup>1/2</sup> <b>e</b> electron	105.7 MeV/c <sup>2</sup> -1 <sup>1/2</sup> <b>μ</b> muon	1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 <sup>1/2</sup> <b>τ</b> tau	80.4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> W boson	

Gauge bosons

# Fenomenologia del bosone di Higgs



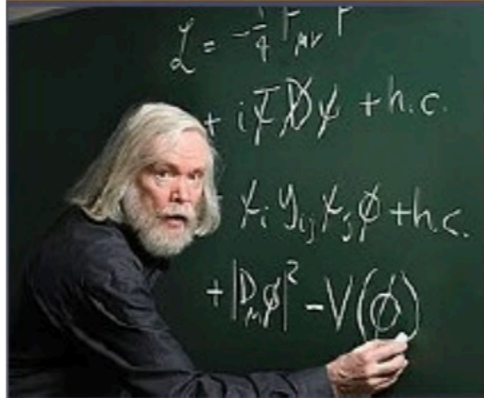
Teoria é predittiva se conosciamo la massa del bosone di Higgs

# Fenomenologia del bosone di Higgs

## First Study of the Higgs, 1976

- The beginning of Higgs phenomenology

We should perhaps finish with an apology and a caution. We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson, unlike the case with charm [3,4] and for not being sure of its couplings to other particles, except that they are probably all very small. For these reasons we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson, but we do feel that people performing experiments vulnerable to the Higgs boson should know how it may turn up.



Ellis

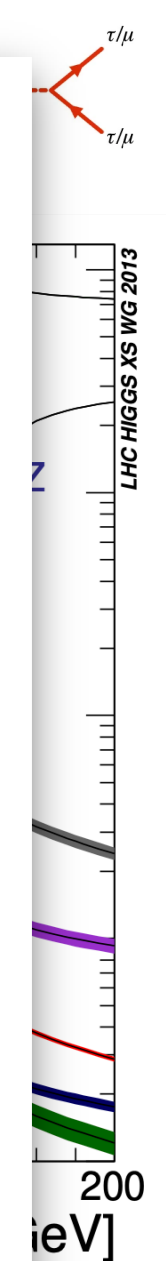
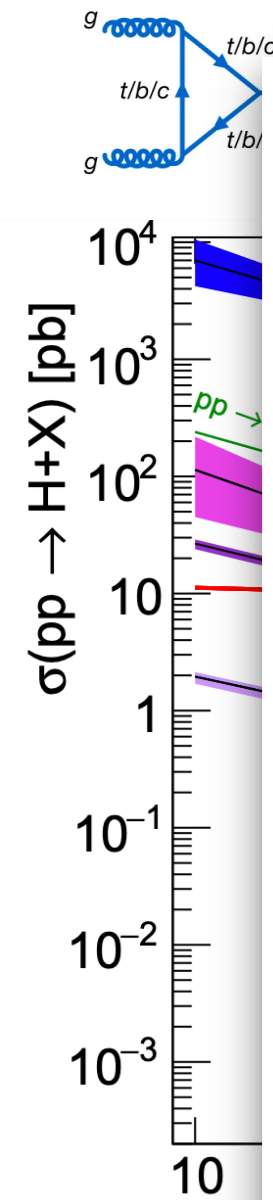


Gaillard

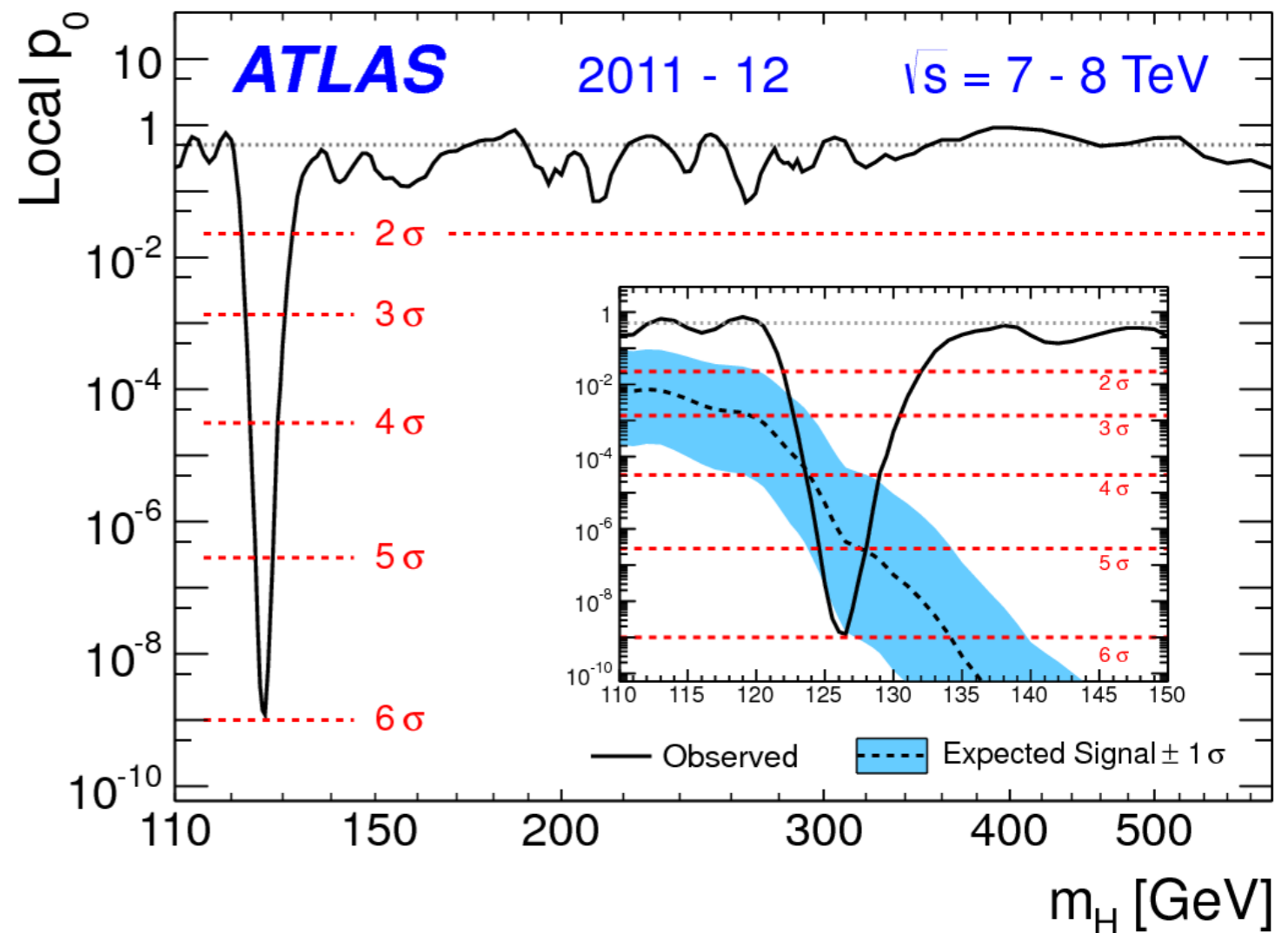


Nanopoulos

S. Dawson, BNL



# 2012: L'anno della scoperta!



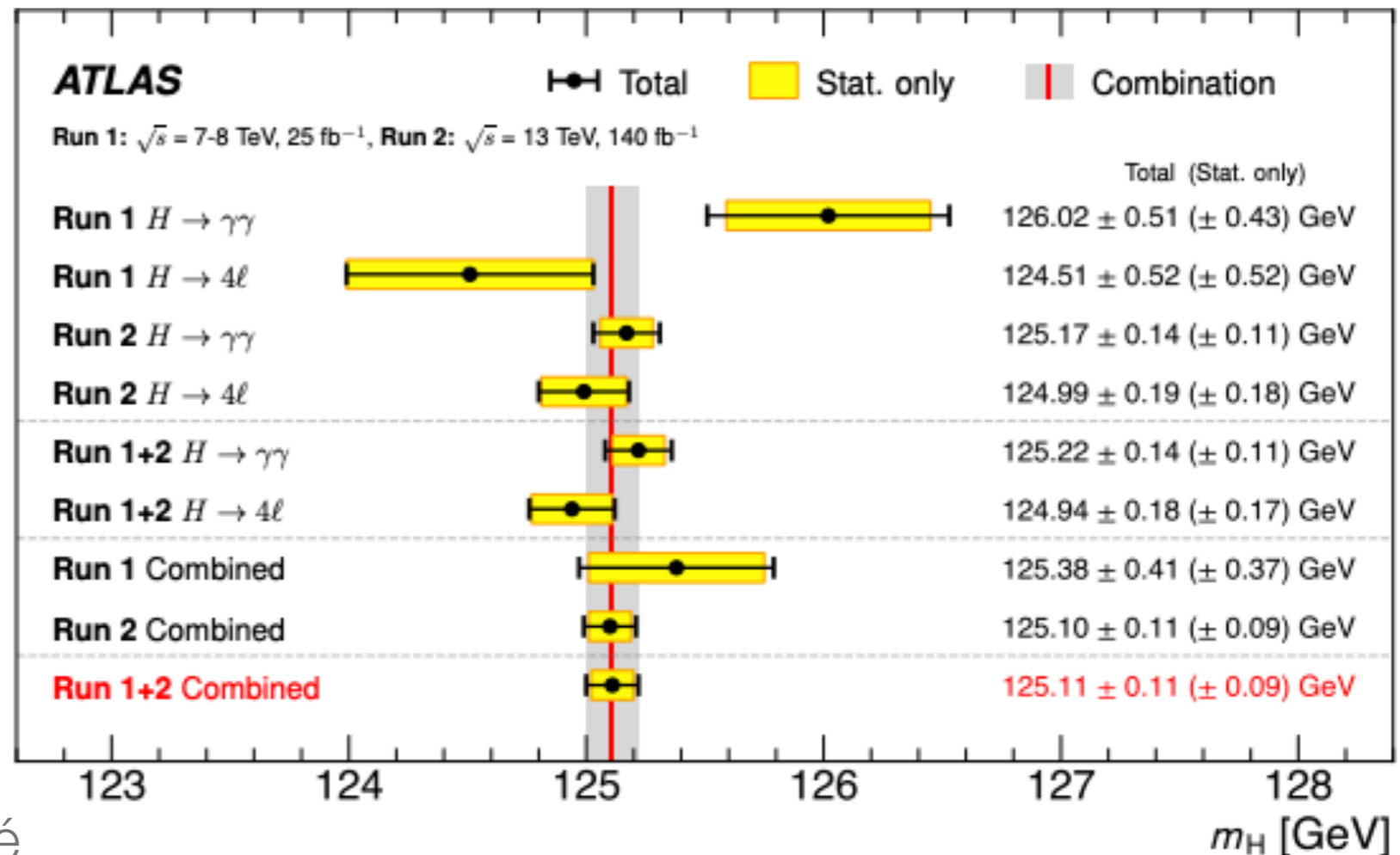
- Prima stima della massa  $\sim 126$  GeV
- 2014: prima misura “precisa” della massa:
  - **$125.36 \pm 0.41$  GeV**
- (130 volte la massa del protone)

# La massa del bosone di Higgs

- $m_H$  non è predetta dal SM

- Parametro centrale per calcolare il resto delle predizioni teoriche sul bosone di Higgs nel Modello Standard.

- La massa del bosone di Higgs è misurata con una accuratezza al meglio del **0.1%** usando i **dati del Run2**.



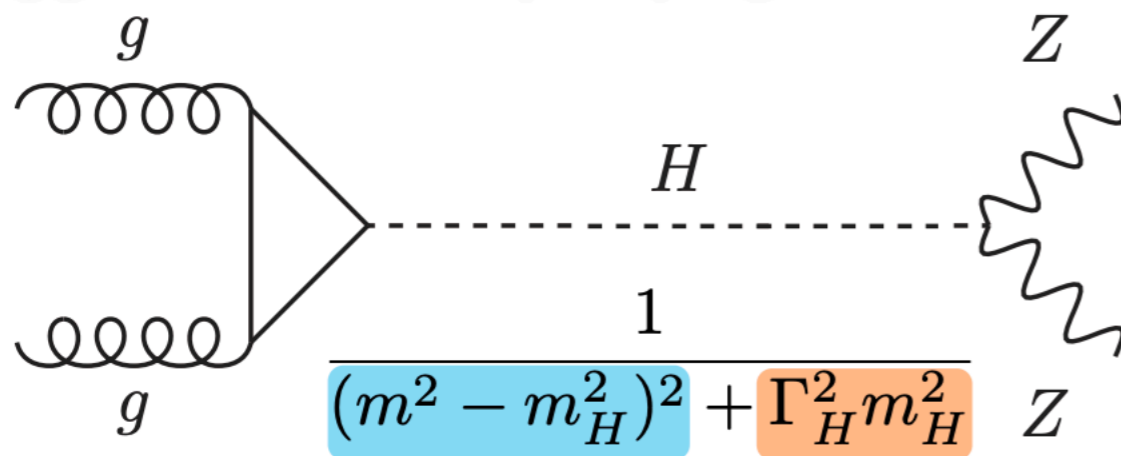
**$125.11 \pm 0.11$  GeV (ATLAS).**

**$125.08 \pm 0.12$  GeV (CMS) (4l only)**

**4 volte più precisa della prima misura del 2014, a fronte di un miglioramento previsto grazie all'aumento dei dati di un fattore 2.5**

# La larghezza del bosone di Higgs

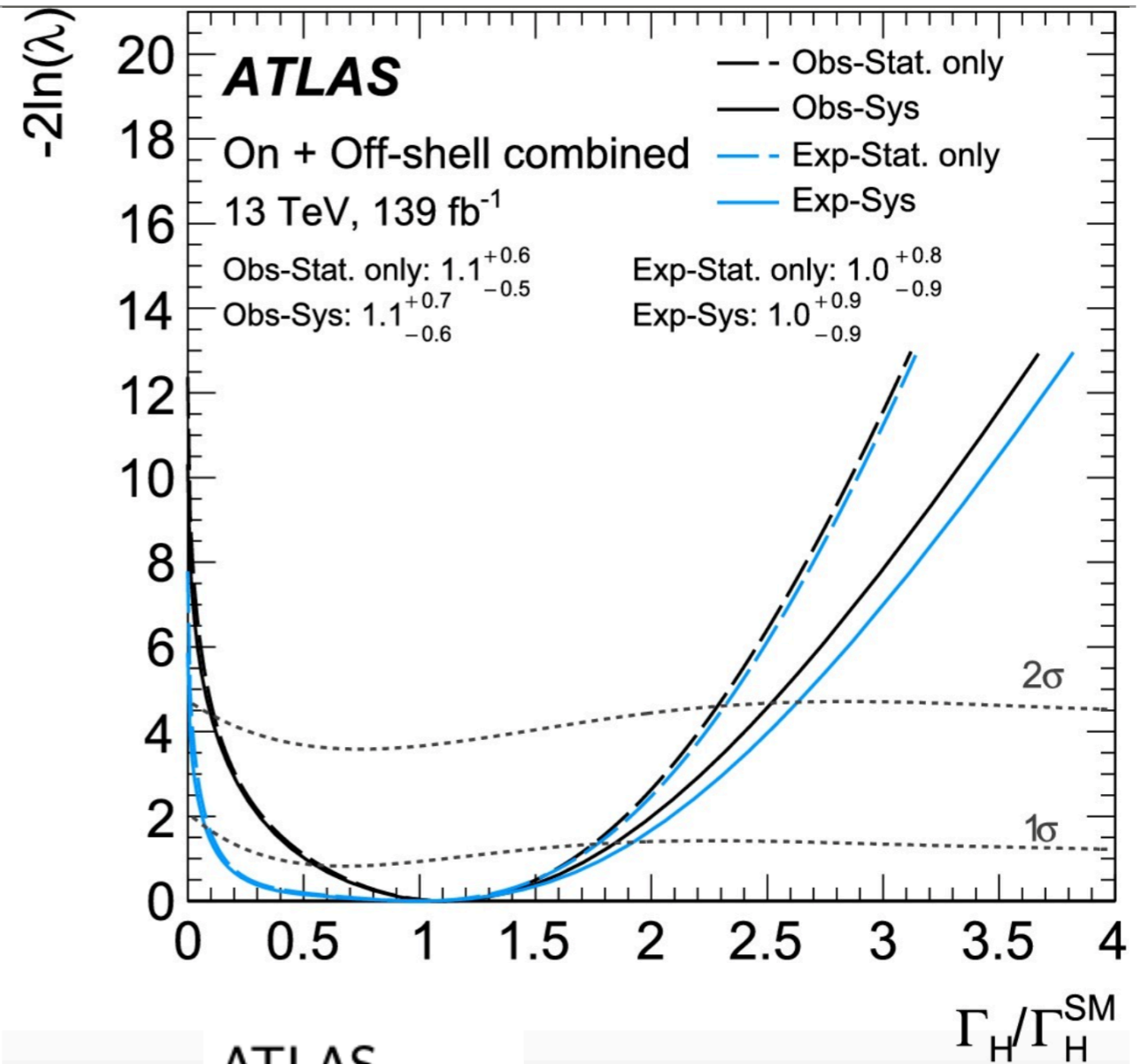
- La larghezza naturale  $\Gamma_H$  (4.1 MeV) del bosone di Higgs é troppo piccola per essere misurata direttamente da una risonanza in cui il picco può essere ricostruito.



- Il rapporto tra gli eventi ricostruiti a  $m \gg m_H$  e  $m \sim m_H$  da accesso alla larghezza  $\Gamma_H$

$$\frac{\mu_{\text{off-shell}}}{\mu_{\text{on-shell}}} = \frac{\Gamma}{\Gamma_{\text{SM}}}$$

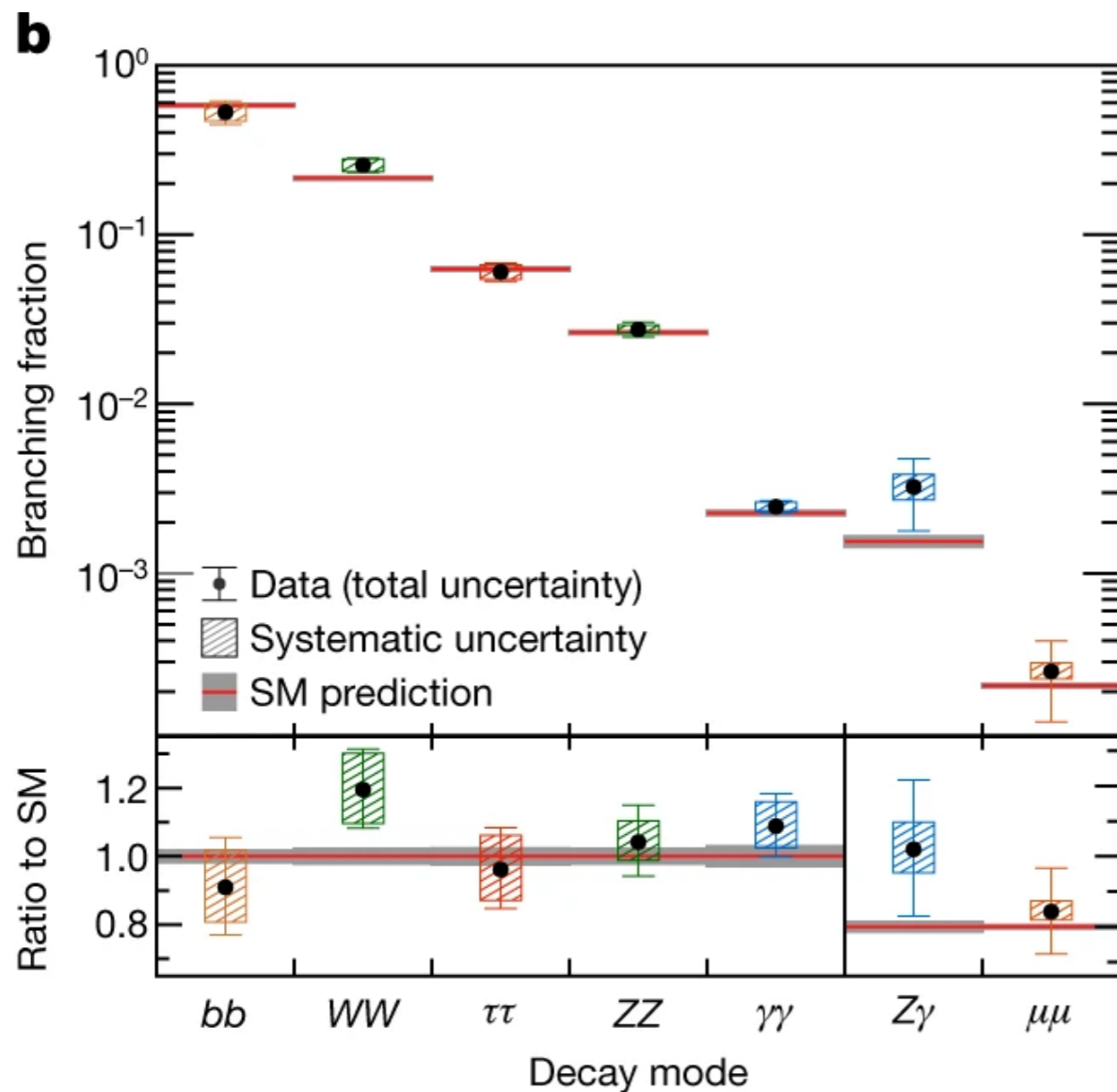
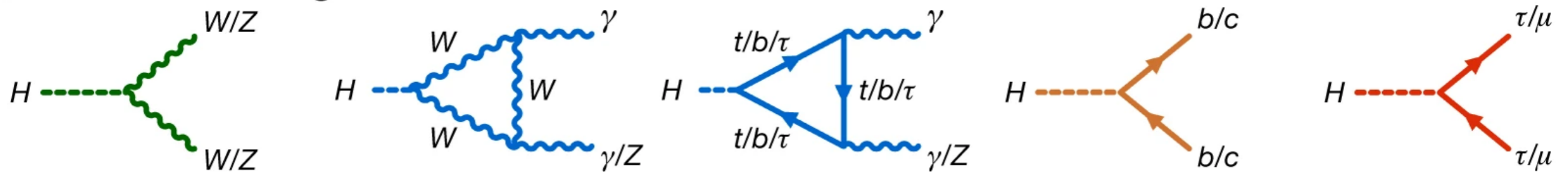
(vita media:  $1.6 \times 10^{-22}$  s)



ATLAS  
 $4.5^{+3.3}_{-2.5}$  MeV

CMS  
 $3.2^{+2.4}_{-1.7}$  MeV

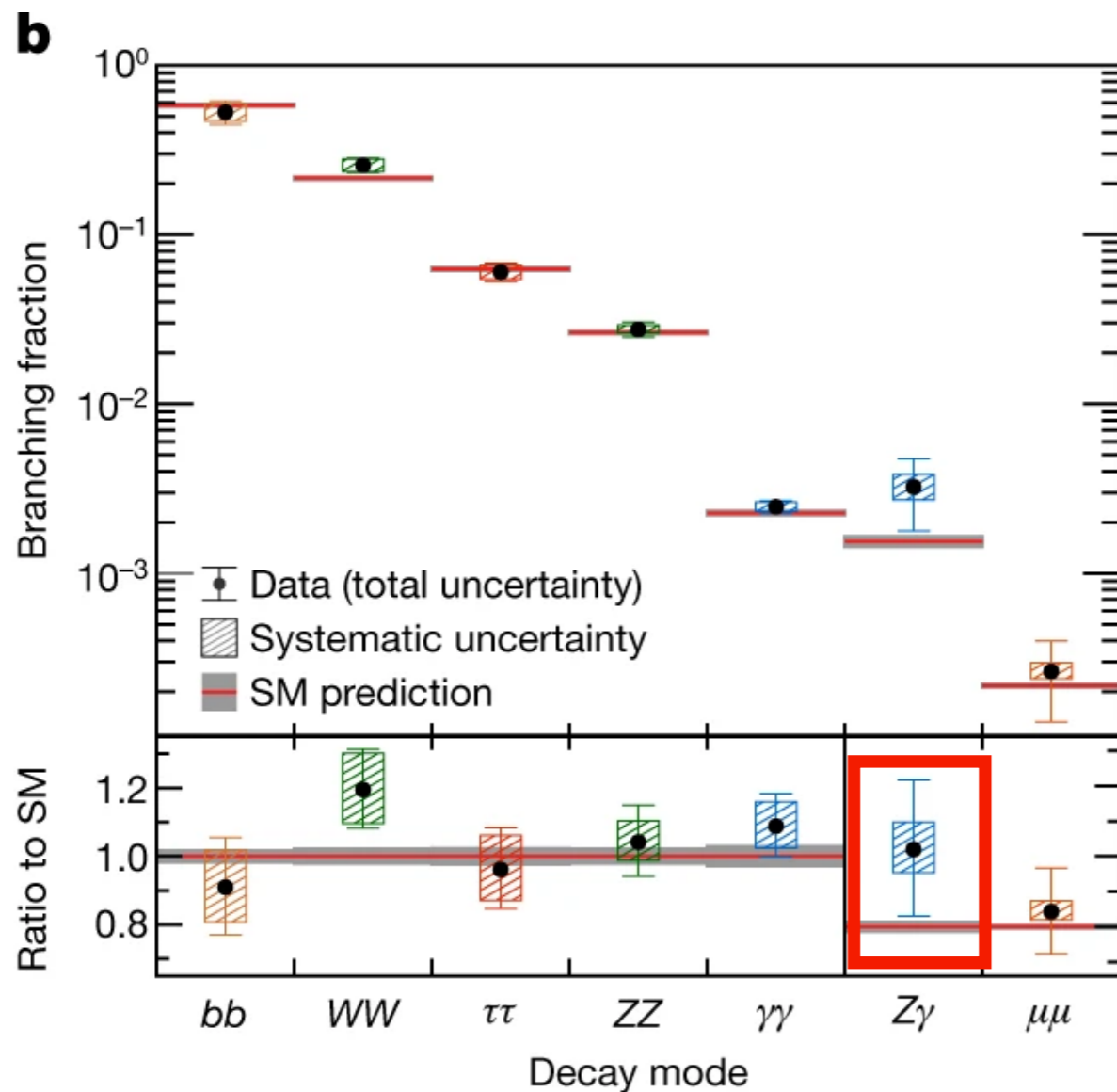
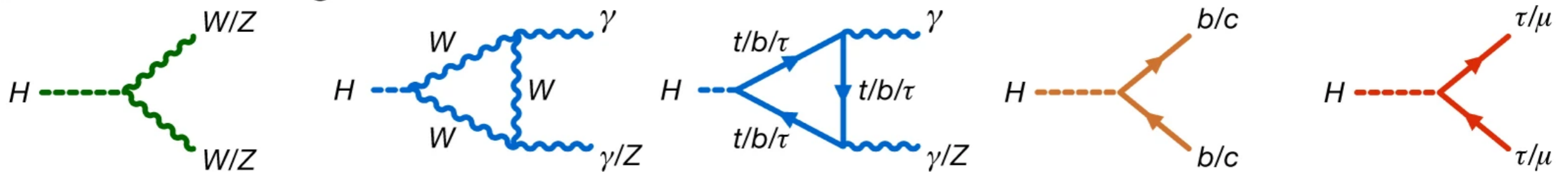
# Come decade il bosone di Higgs?



- Precisione nei decadimenti in bosoni vettori e in b-quarks e  $\tau$ -hadrons:  $\sim 10\%$
- Incertezza nei decadimenti rari ancora importante
- $\Rightarrow$  i dati che prenderemo in questi anni saranno interessanti



# Come decade il bosone di Higgs?

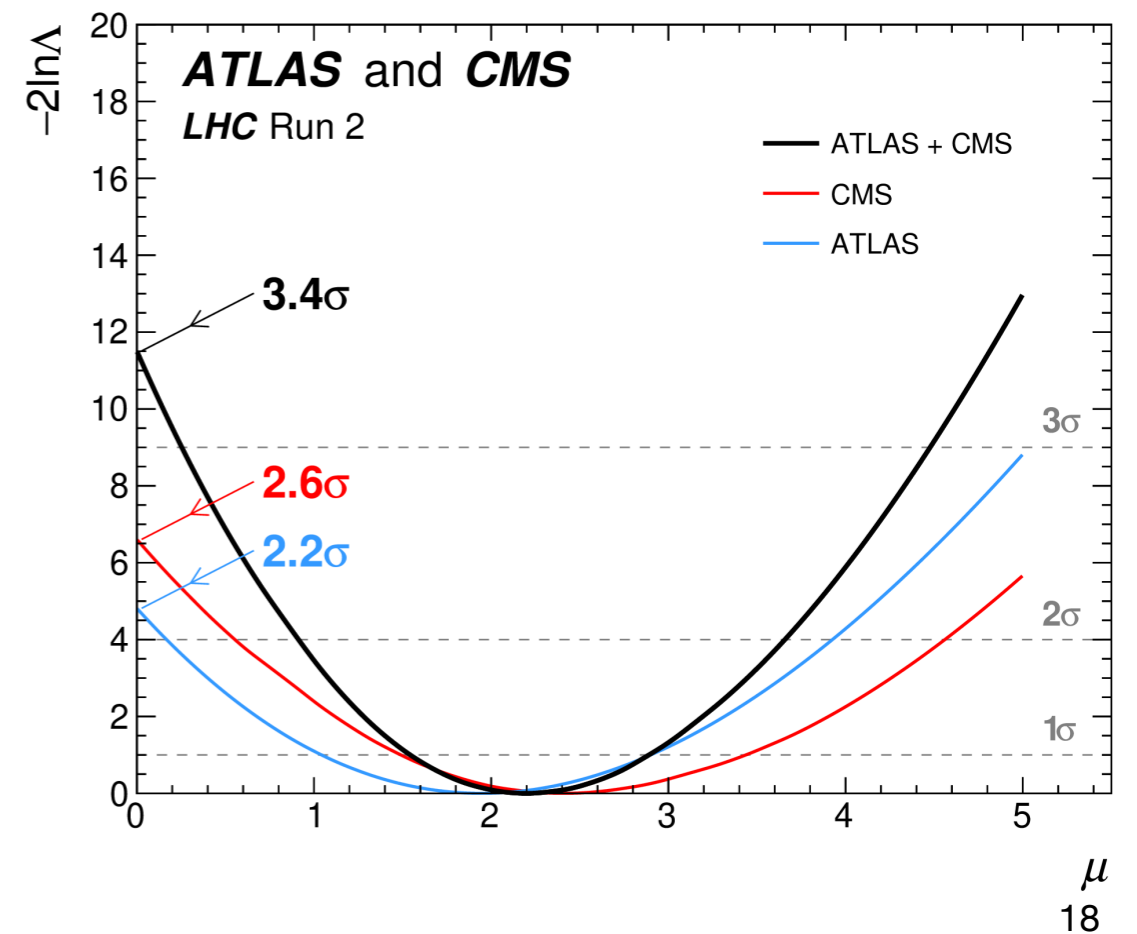
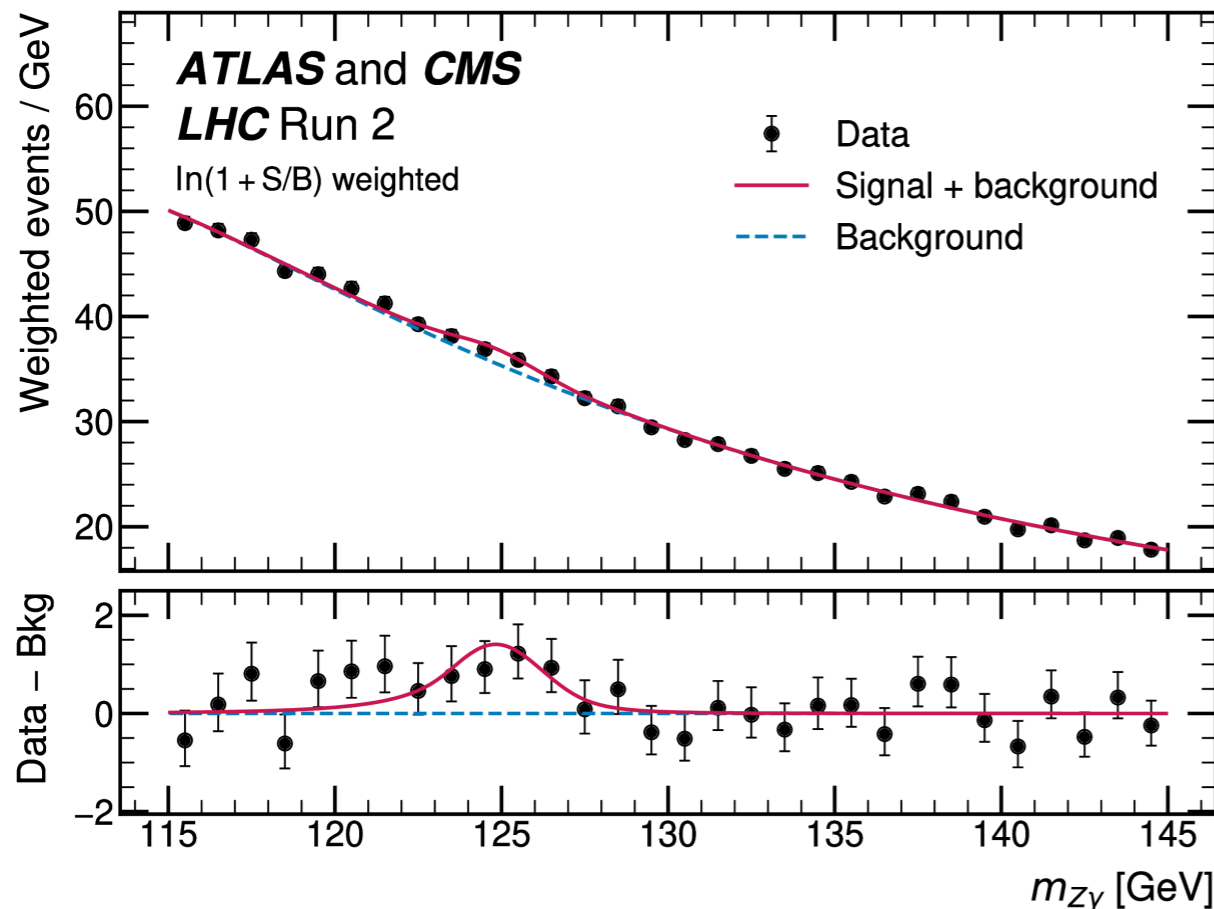
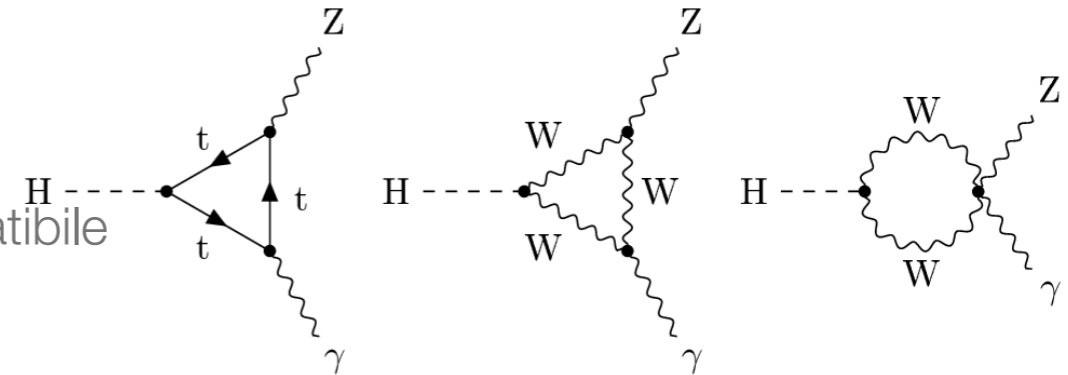


- Precisione nei decadimenti in bosoni vettori e in b-quarks e  $\tau$ -hadrons:  $\sim 10\%$
- Incertezza nei decadimenti rari ancora importante
- $\Rightarrow$  i dati che prenderemo in questi anni saranno interessanti

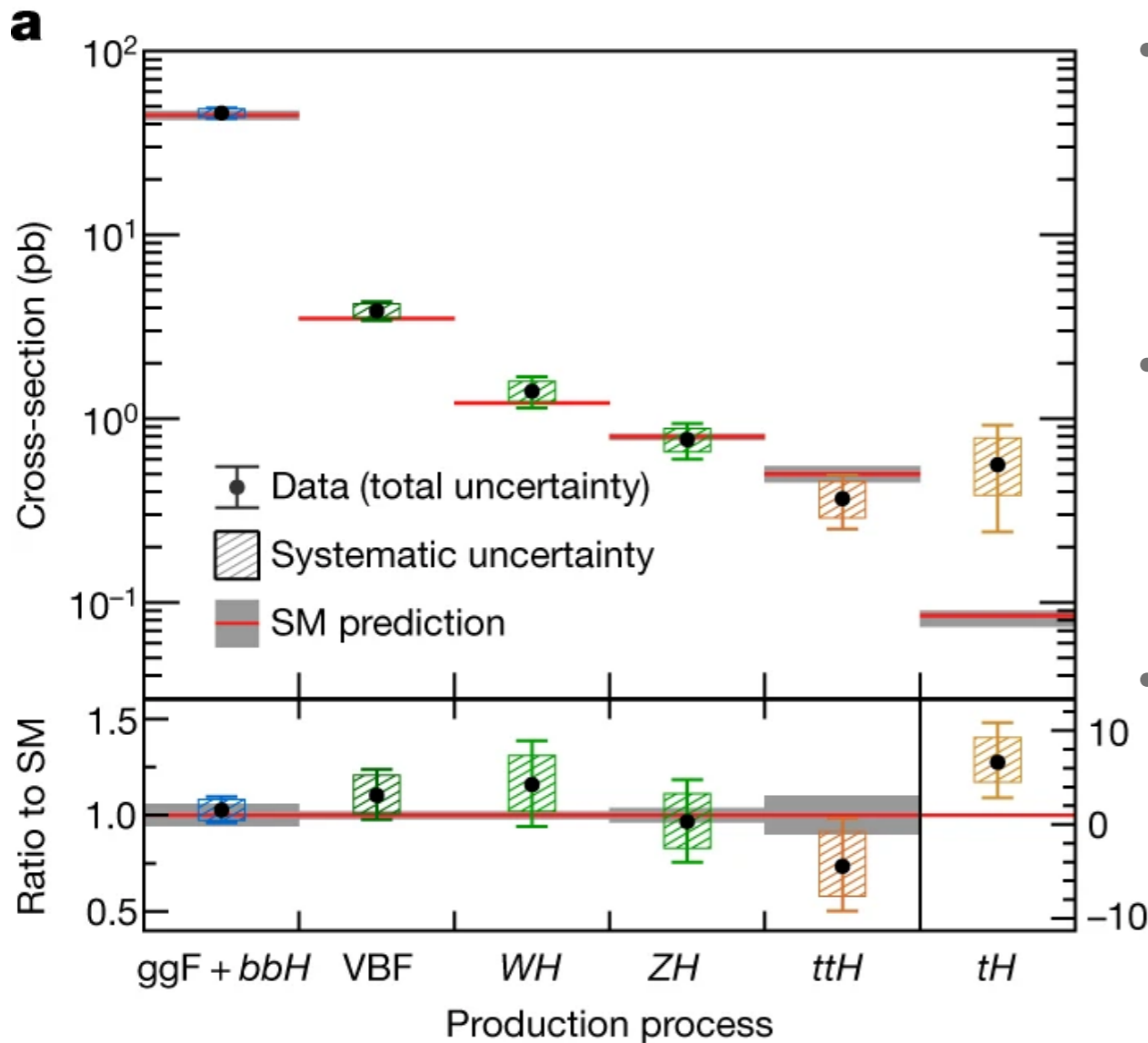
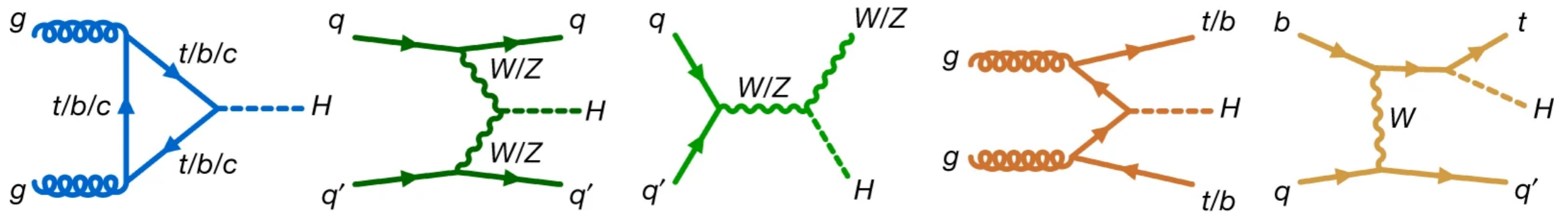
# Prime Combinazioni ATLAS & CMS (dati 2015-2018)

## $H \rightarrow Z\gamma$

- Decadimento elusivo che stiamo provando a misurare da circa 10 anni
- Sensibile a nuova fisica
- Prima evidenza combinando i risultati di ATLAS e CMS.
- Il numero di eventi misurati é  $2.2 \pm 0.7$  quelli attesi, ancora compatibile con il modello standard

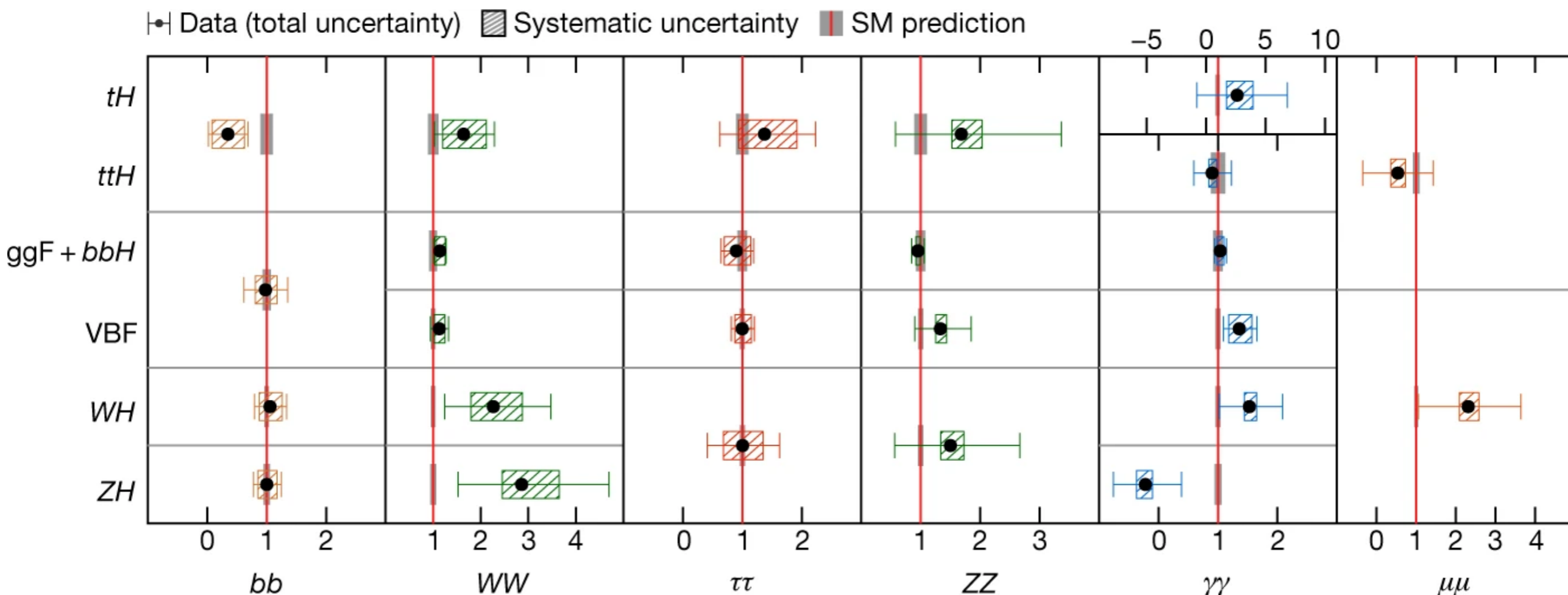


# Produzione del bosone di Higgs



- gluon-gluon fusion: Precisione meglio del 10%!
- Precisione del 10-20% per gli altri modi di produzione
- Misura di  $\sigma_{tH}$  → Si iniziano a testare modi di produzione rari

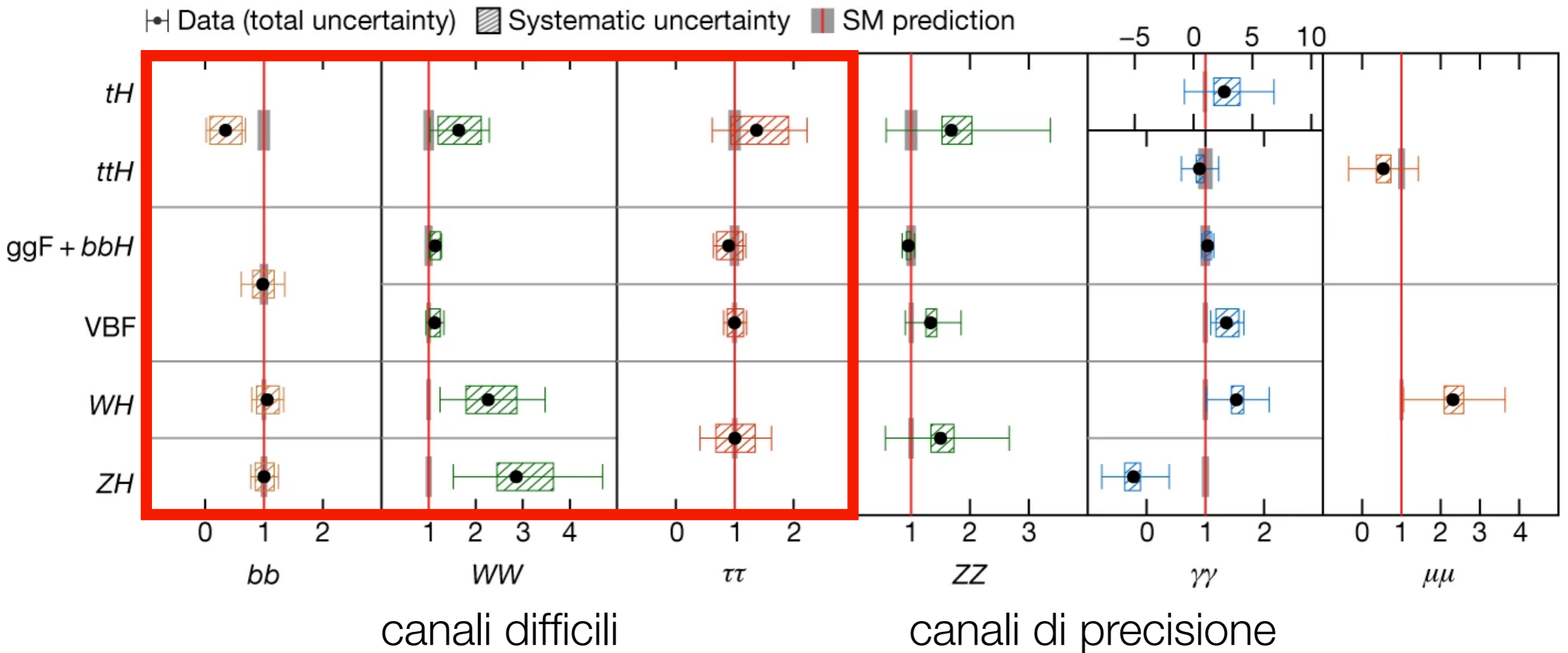
# Quanti modi di misurare il bosone di Higgs?



Lavoro di più di 500 fisici

- Mancano le seguenti analisi già pubblicate (o inviate a rivista):
  - $H \rightarrow Z\gamma$
  - Misura di  $WH$  e  $ZH$  con  $H \rightarrow \tau\tau$
  - Misura di  $WH/ZH$  con  $H \rightarrow bb$  e  $W/Z \rightarrow qq$
  - Misura di  $VBF$   $WH$  con  $H \rightarrow bb$
  - ...

# Quanti modi di misurare il bosone di Higgs?



- Misure su cui si sta lavorando per sfruttare fino in fondo i dati del Run2.

## Tre (tra le varie) domande...

---

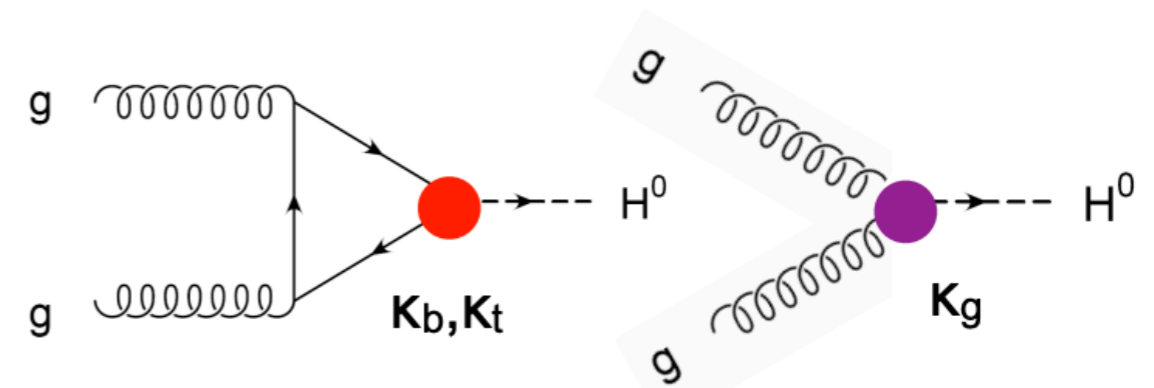
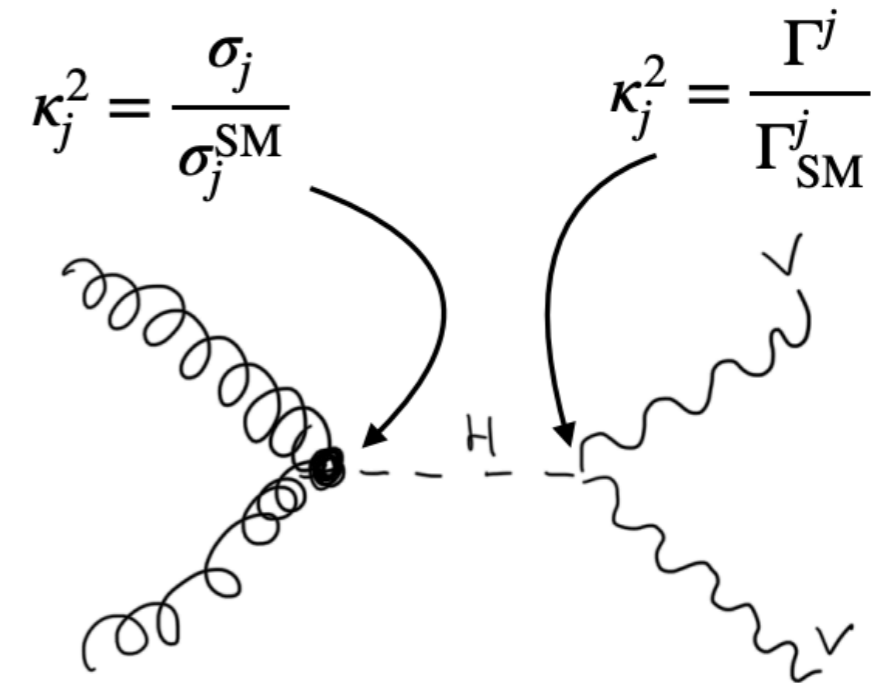
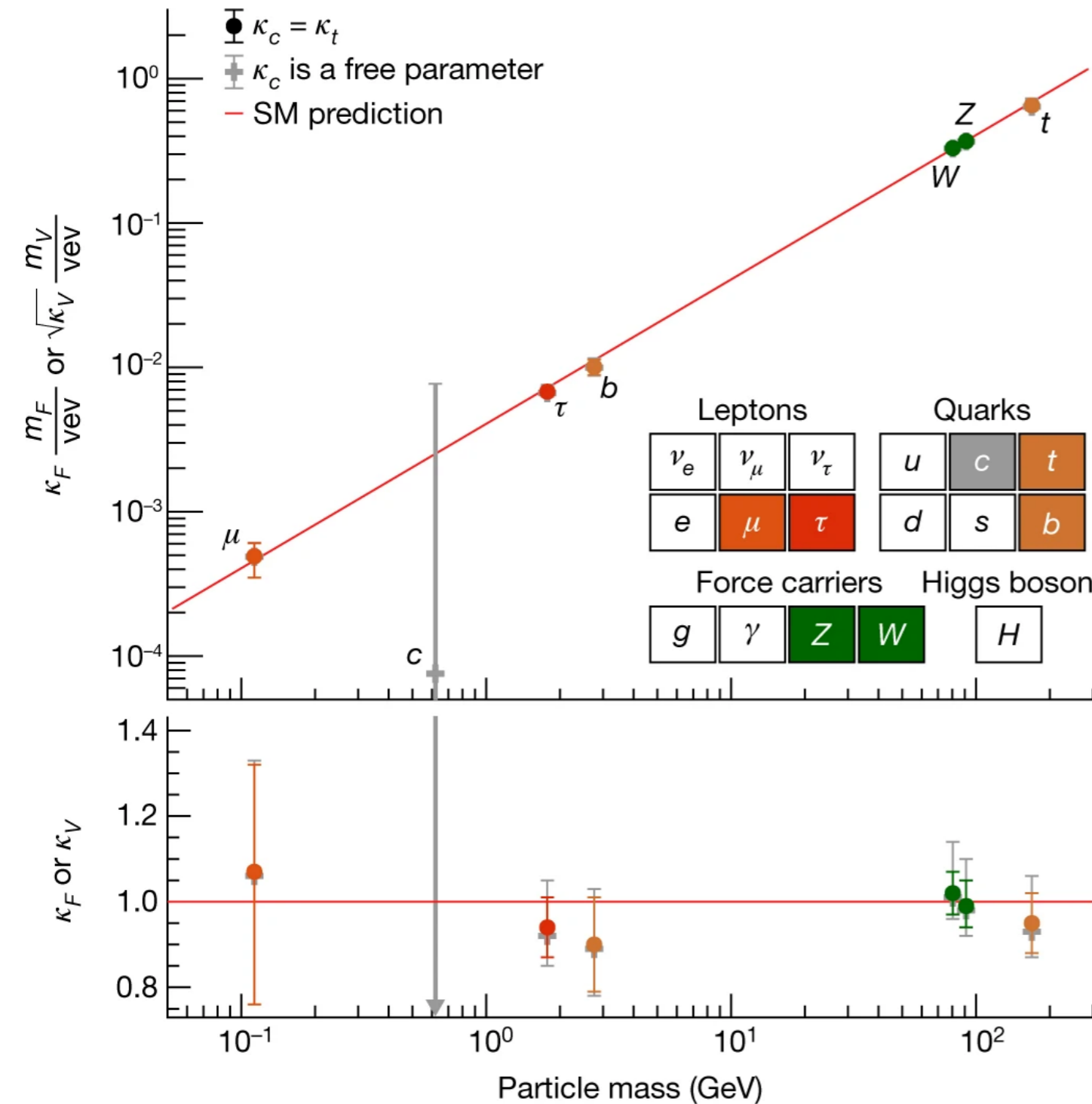
- Il bosone di Higgs interagisce con le particelle coerentemente a come queste interagiscono con il condensato?
- Il campo di Higgs (e il bosone di Higgs) interagisce anche con particelle che non sono nello SM?
- Quale é la dinamica che ha portato a questo stato di vuoto “speciale”?

## Tre (tra le varie) domande...

---

- **Il bosone di Higgs interagisce con le particelle coerentemente a come queste interagiscono con il condensato?**
- Il campo di Higgs (e il bosone di Higgs) interagisce anche con particelle che non sono nello SM?
- Quale é la dinamica che ha portato a questo stato di vuoto “speciale”?

# Coupling modifiers



- Test di consistenza su 4 ordini di grandezza!
- Va notato come la misura dei bosoni vettori e della terza famiglia fermionica é molto precisa.
- Il Run3 e HL-LHC ci aiuterà a misurare meglio la seconda famiglia ( $\mu$  e charm)

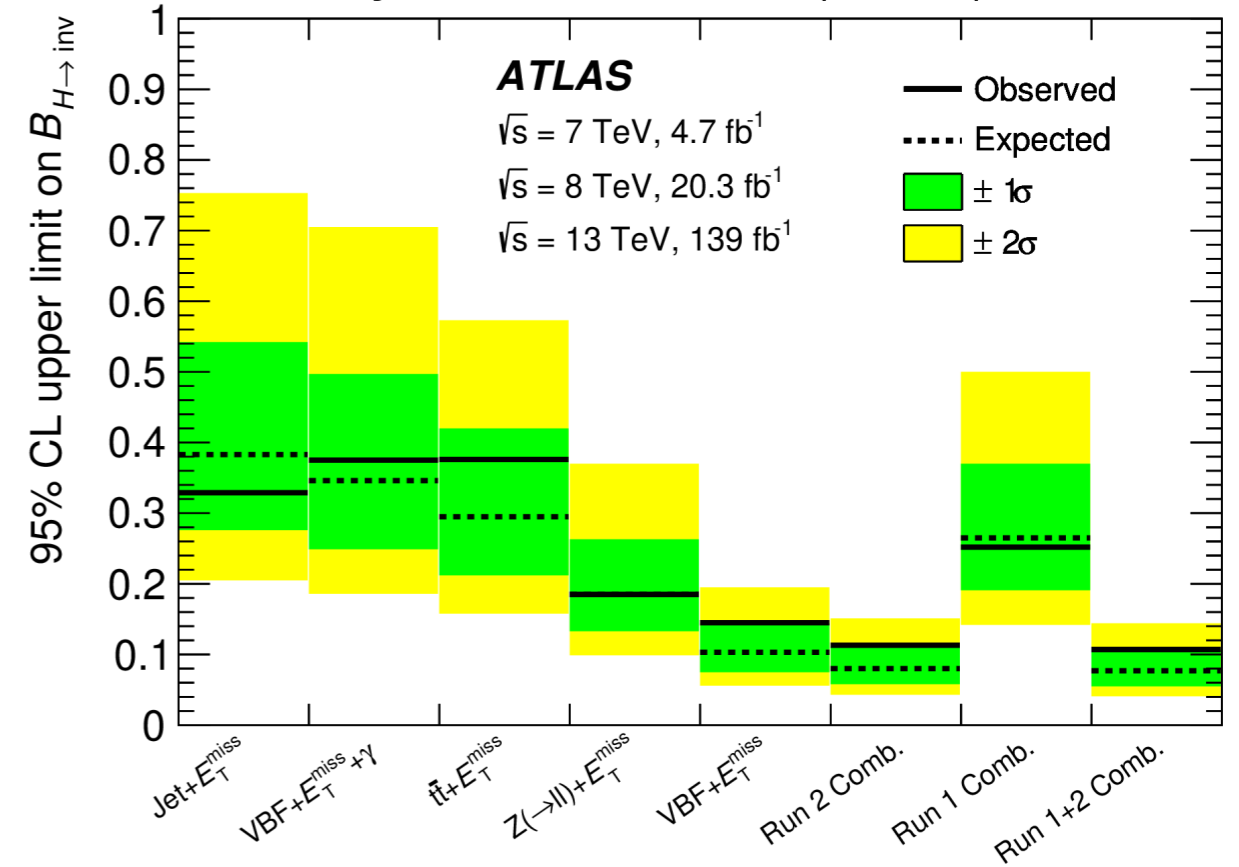
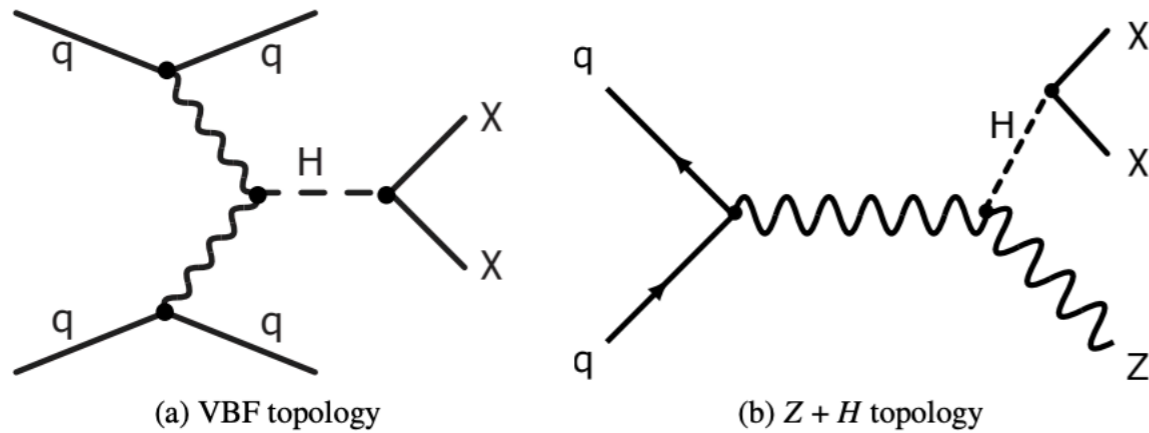


## Tre (tra le varie) domande...

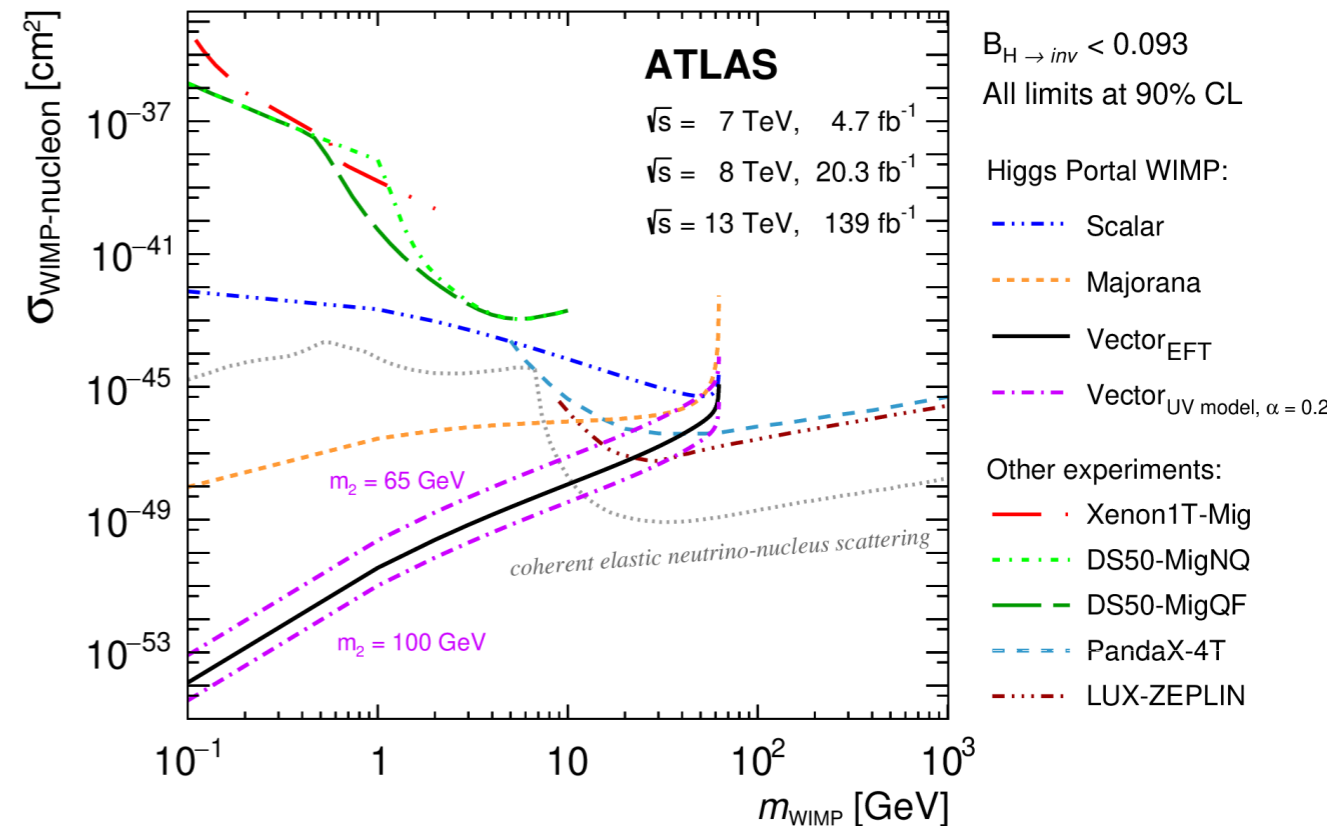
---

- Il bosone di Higgs interagisce con le particelle coerentemente a come queste interagiscono con il condensato?
- **Il campo di Higgs (e il bosone di Higgs) interagisce anche con particelle che non sono nello SM?**
- Quale é la dinamica che ha portato a questo stato di vuoto “speciale”?

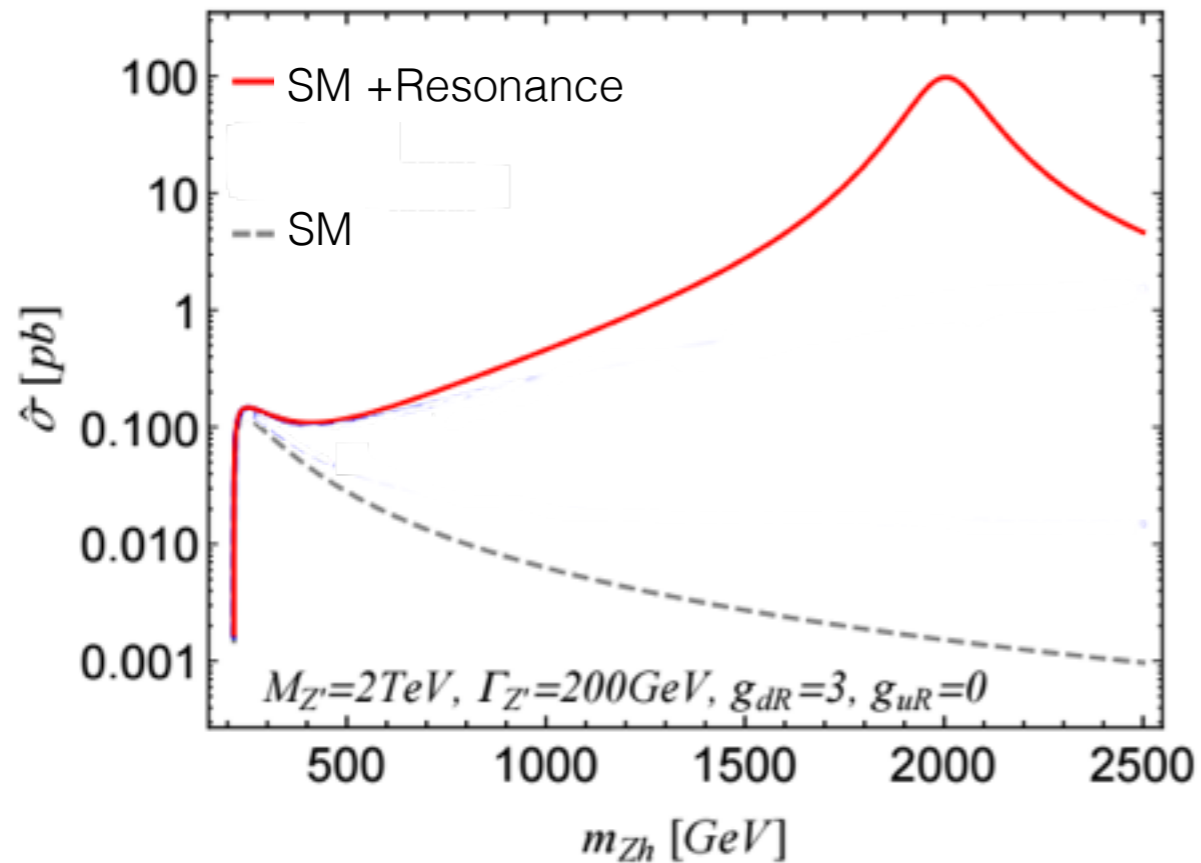
# Higgs Invisible



- Può il bosone di Higgs essere un portale verso nuove particelle che non interagiscono con il resto dello SM?
  - Se la nuova particella ha massa  $m < m_H/2 \Rightarrow$  Decadimento invisibile del bosone di Higgs
- E se questa particella invisibile fosse la responsabile per la materia oscura?



# Risonanze, ma non solo...

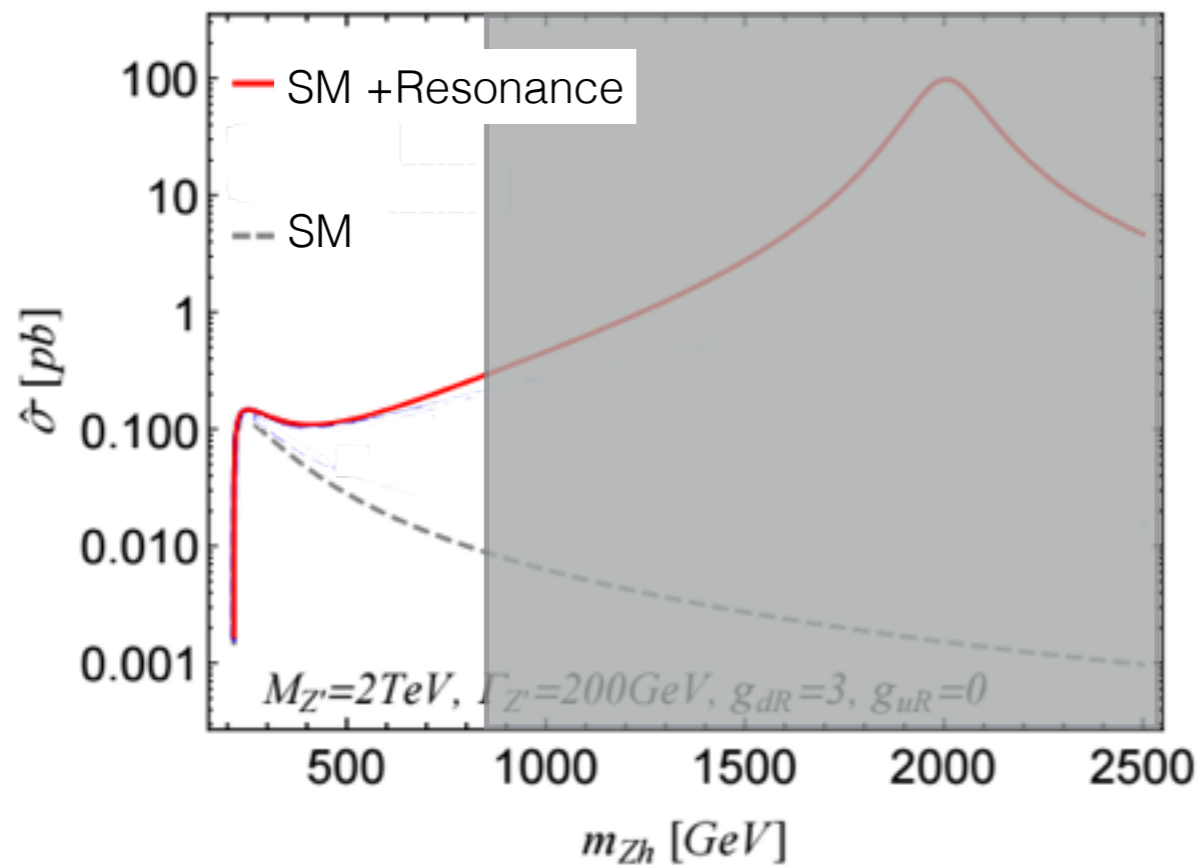


Un modo naturale per cercare nuove particelle che interagiscono con il bosone di Higgs é cercare:

- risonanze che decadono in  $H+X$ ;
- decadimenti esotici del bosone di Higgs;

Per ora non sono stati trovati altri bumps  
(Non le coprirò in questo seminario)

# Risonanze, ma non solo...



Un modo naturale per cercare nuove particelle che interagiscono con il bosone di Higgs é cercare:

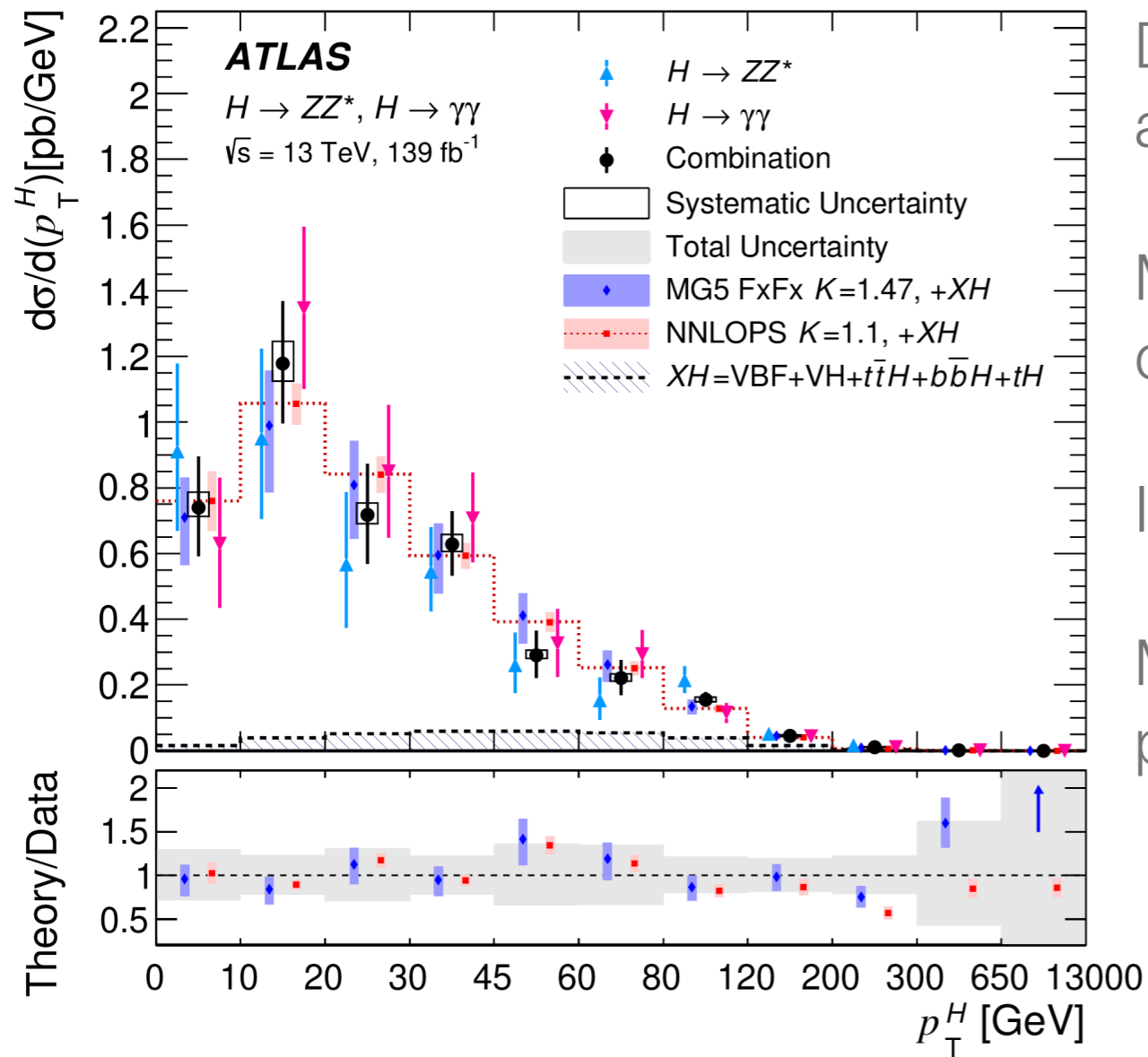
- risonanze che decadono in  $H+X$ ;
- decadimenti esotici del bosone di Higgs;

Per ora non sono stati trovati altri bumps (Non le coprirò in questo seminario)

Ma se queste particelle avessero una massa superiore a quella che oggi possiamo misurare?

Deviazioni delle distribuzioni cinematiche rispetto alle predizioni del modello standard.

# Misure differenziali



Distribuzioni cinematiche misurate grazie alle misure differenziali.

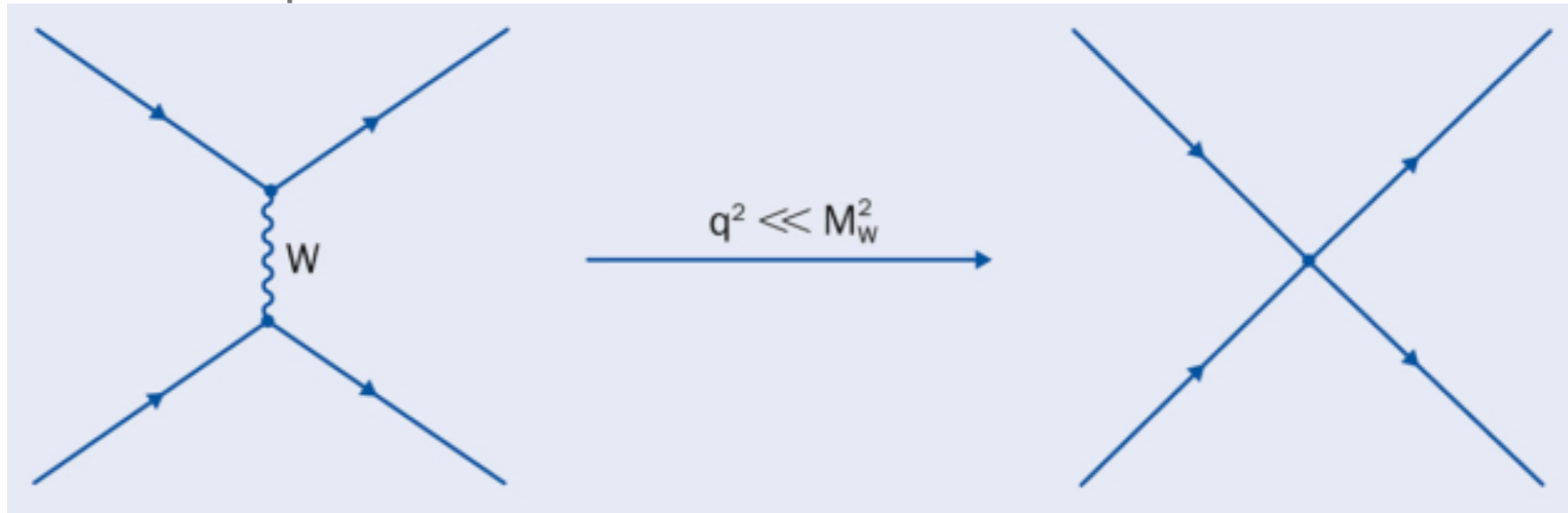
Misure effettuate in differenti canali di decadimento ( $\gamma\gamma, ZZ, WW, bb$ )

I risultati di  $\gamma\gamma$  e  $ZZ$  sono stati combinati.

Misure usate per estrarre informazioni sulla presenza di deviazioni dovute a nuova fisica.

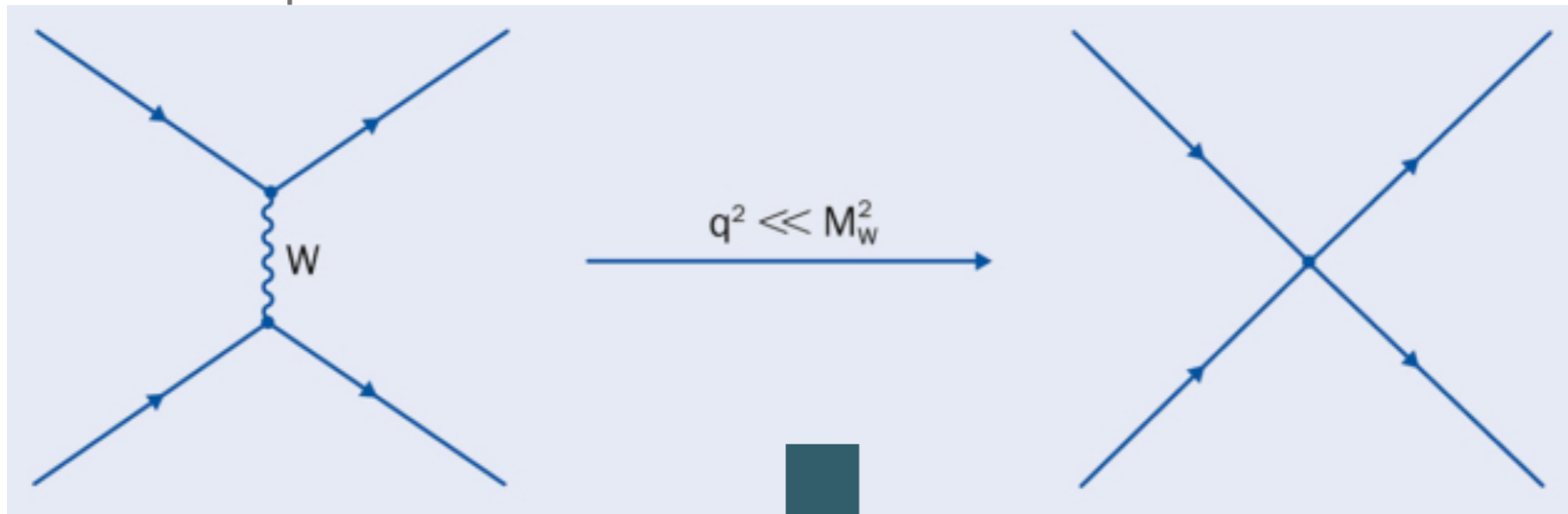
# Oltre i coupling modifiers - Effective field theory

Prototipo: Teoria di Fermi delle interazioni deboli



# Oltre i coupling modifiers - Effective field theory

Prototipo: Teoria di Fermi delle interazioni deboli



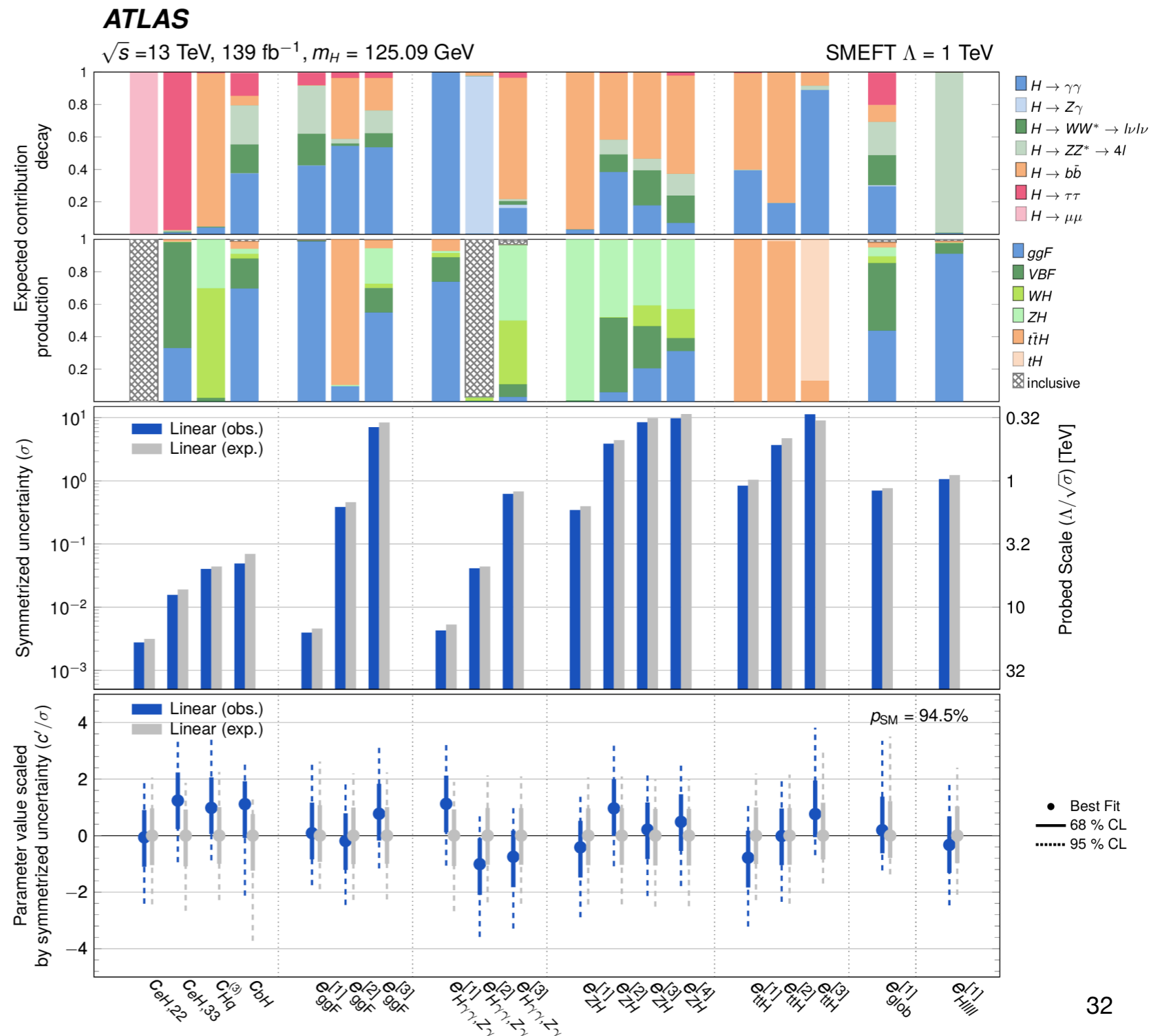
$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i^{N_{d=6}} \frac{c_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i^{(6)} + \sum_j^{N_{d=8}} \frac{b_j}{\Lambda^4} \mathcal{O}_j^{(8)} + \dots,$$

- Lagrangiana effettiva che mappa deviazioni misurate in operatori effettivi tra i campi dello SM
- Sviluppo sistematico di tutti i possibili contributi in serie di  $1/\Lambda$ , dove  $\Lambda$  rappresenta la scala caratteristica della nuova fisica
- Modelli BSM con scale  $\Lambda$  sufficientemente alte sono mappati in questi sviluppi.

# Oltre i coupling modifiers - EFT

$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i^{N_{d=6}} \frac{c_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i^{(6)} + \sum_j^{N_{d=8}} \frac{b_j}{\Lambda^4} \mathcal{O}_j^{(8)} + \dots,$$

- Risultati ottenuti combinando insieme tutti i canali di produzione e di decadimento.
- I risultati includono le informazioni cinematiche
- È interessante notare quale contributo ogni canale di produzione e di decadimento da complessivamente
- Non ci sono deviazioni significative rispetto al modello standard

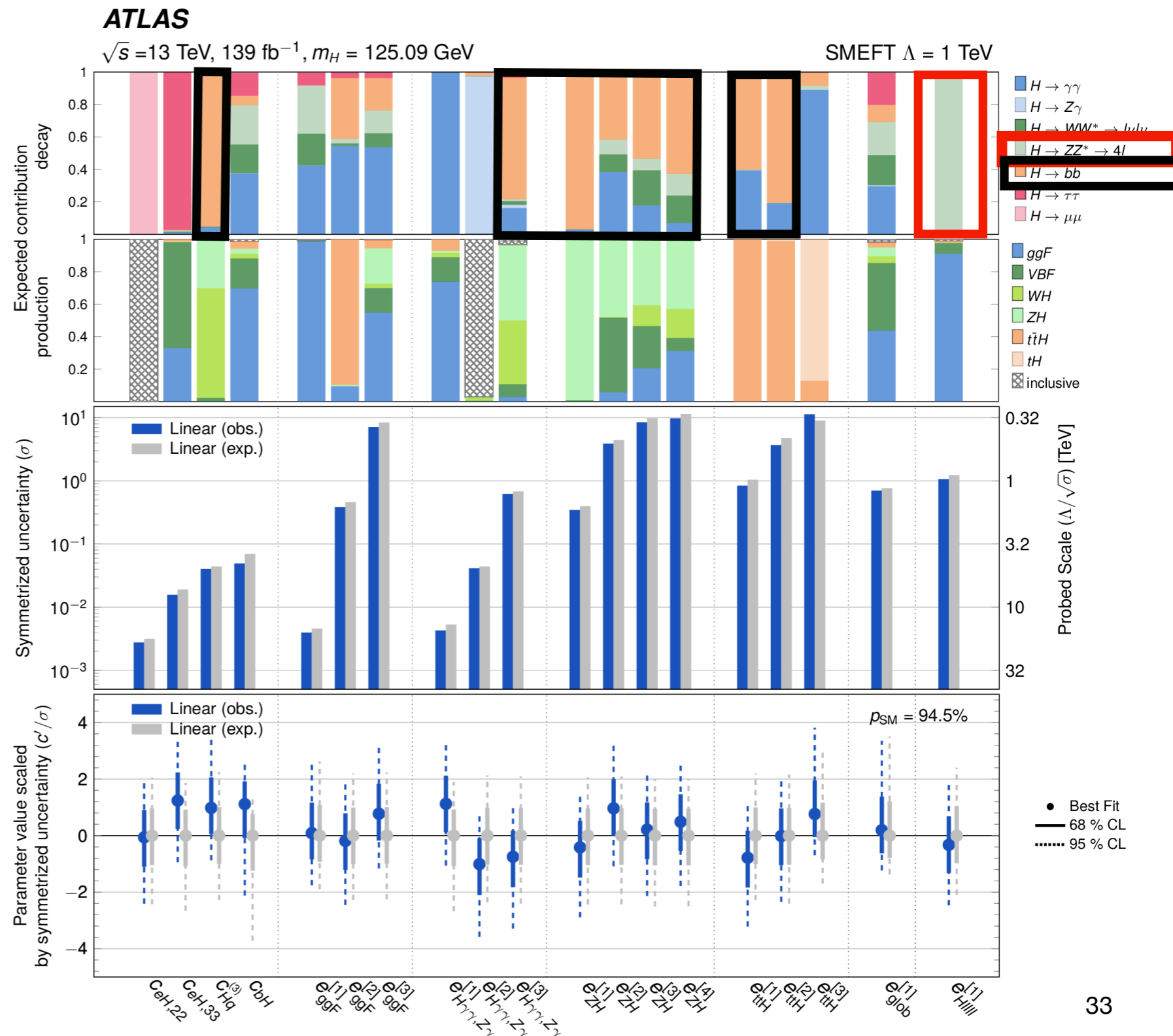




# Oltre i coupling modifiers - EFT

$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i^{N_{d=6}} \frac{c_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i^{(6)} + \sum_j^{N_{d=8}} \frac{b_j}{\Lambda^4} \mathcal{O}_j^{(8)} + \dots,$$

- Risultati ottenuti combinando insieme tutti i canali di produzione e di decadimento.
- I risultati includono le informazioni cinematiche
- È interessante notare quale contributo ogni canale di produzione e di decadimento da complessivamente
- Non ci sono deviazioni significative rispetto al modello standard



## Tre (tra le varie) domande...

---

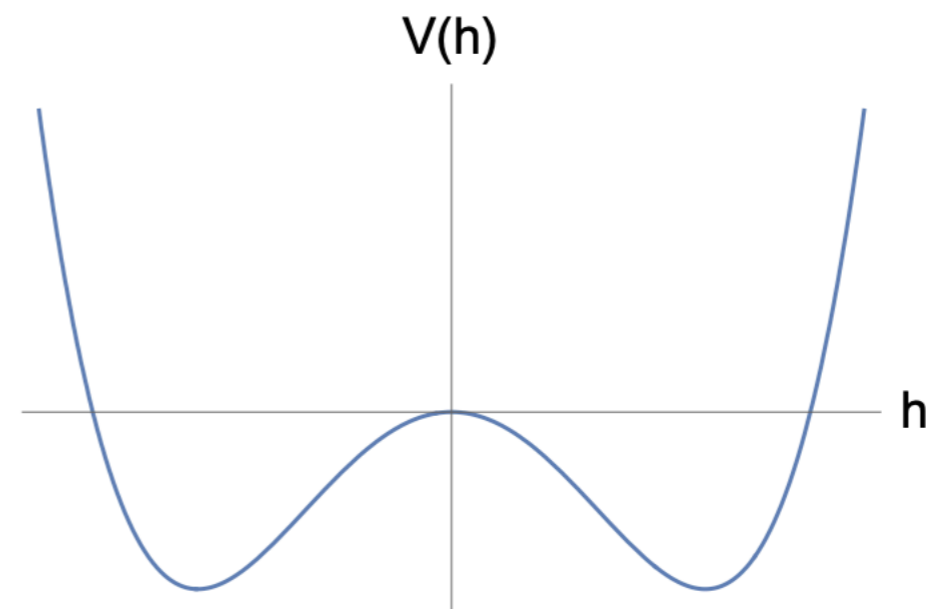
- Il bosone di Higgs interagisce con le particelle coerentemente a come queste interagiscono con il condensato?
- Il campo di Higgs (e il bosone di Higgs) interagisce anche con particelle che non sono nello SM?
- **Quale é la dinamica che ha portato a questo stato di vuoto “speciale”?**

# Il potenziale

---

Tutte le peculiarità del campo di Higgs e del bosone di Higgs nascono dalla forma del suo potenziale.

Un potenziale simile é presente per descrivere la superconduttività nel modello di Ginzburg-Landau (1950).



$$V(\Phi) = -\mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

$$V(\Phi) = V_0 + \frac{1}{2} m_H^2 H^2 + \lambda v H^3 + \frac{1}{4} \lambda H^4$$

$$m_H = \sqrt{2}\mu$$

# Il potenziale

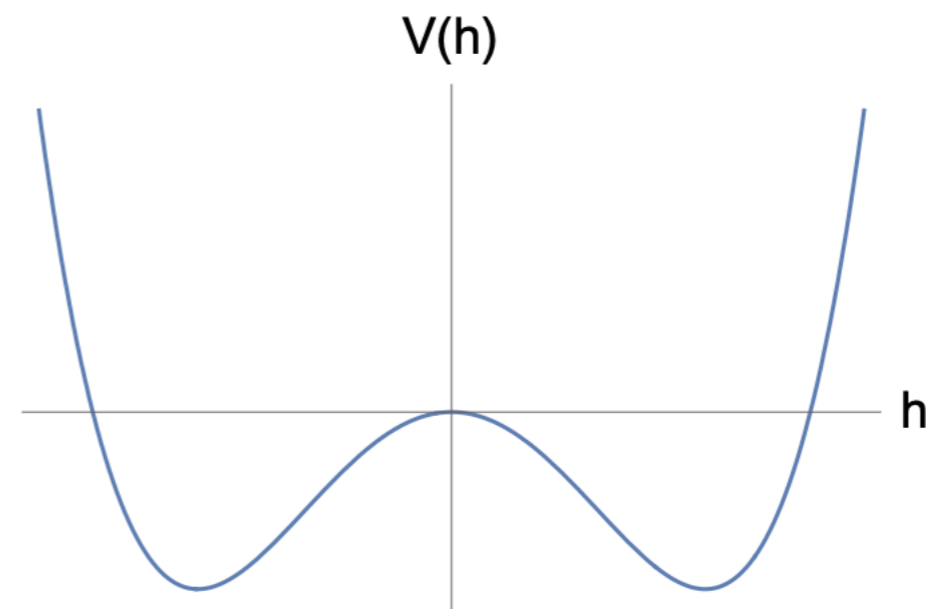
---

Tutte le peculiarità del campo di Higgs e del bosone di Higgs nascono dalla forma del suo potenziale.

Un potenziale simile é presente per descrivere la superconduttività nel modello di Ginzburg-Landau (1950).

Come in GL, potenziale introdotto “a mano”.

MA in superconduttività, nel 1957 é arrivata una motivazione per il potenziale:  
Teoria BCS



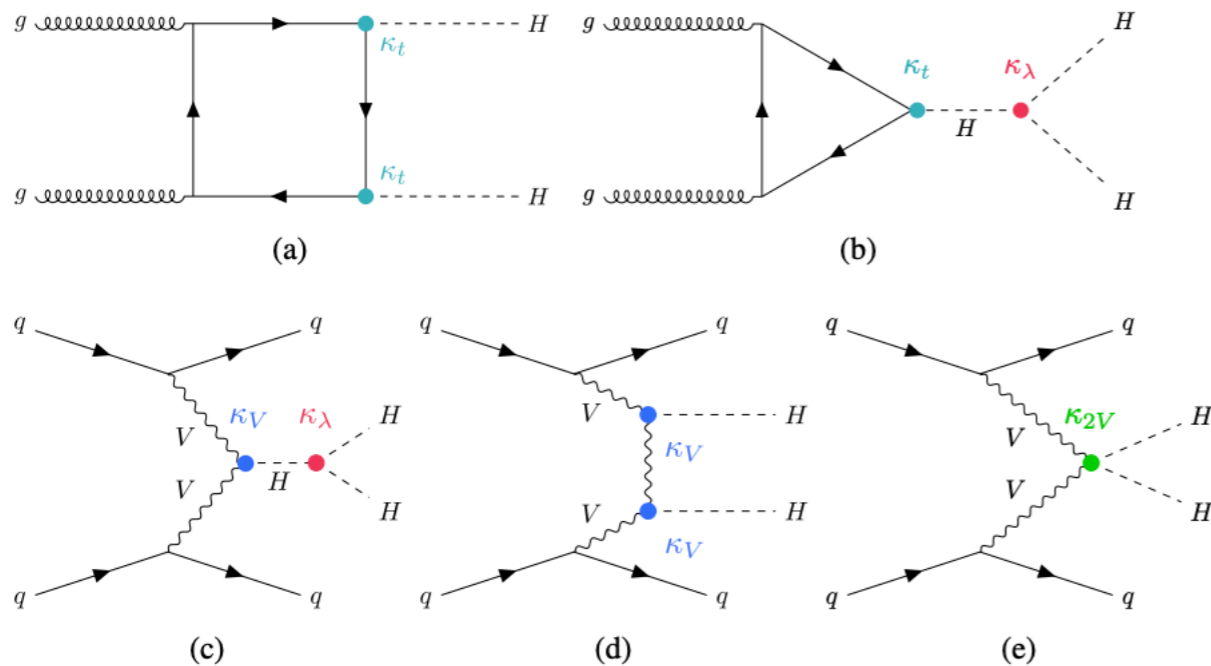
$$V(\Phi) = -\mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

$$V(\Phi) = V_0 + \frac{1}{2} m_H^2 H^2 + \lambda v H^3 + \frac{1}{4} \lambda H^4$$

$$m_H = \sqrt{2\mu}$$

# Doppio Higgs

$$V(\Phi) = V_0 + \frac{1}{2} m_H^2 H^2 + \lambda H^3 + \frac{1}{4} \lambda H^4$$

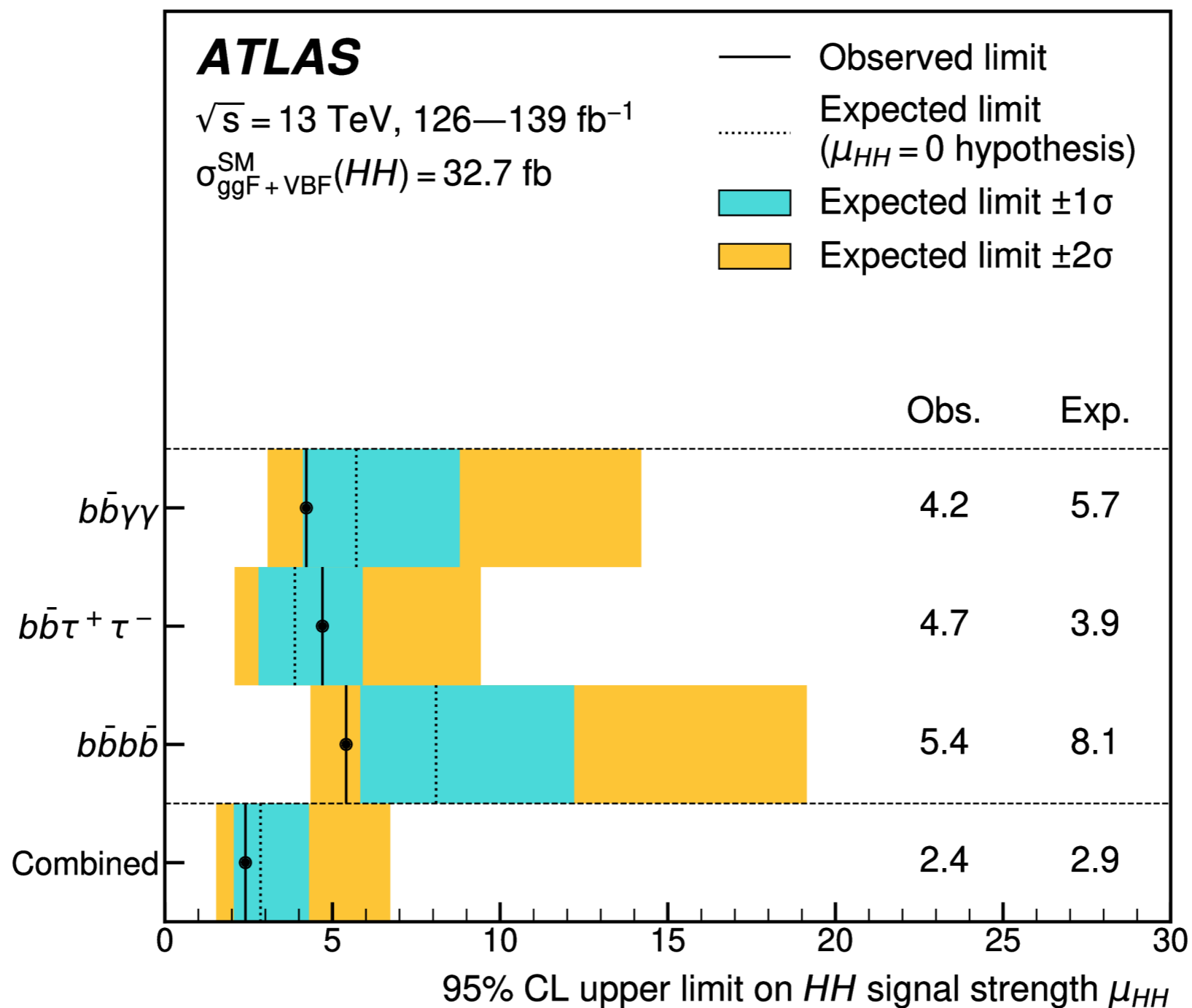


	bb	WW	ττ	ZZ	γγ
bb	34%				
WW	25%	4.6%			
ττ	7.3%	2.7%	0.39%		
ZZ	3.1%	1.1%	0.33%	0.069%	
γγ	0.26%	0.10%	0.028%	0.012%	0.0005%

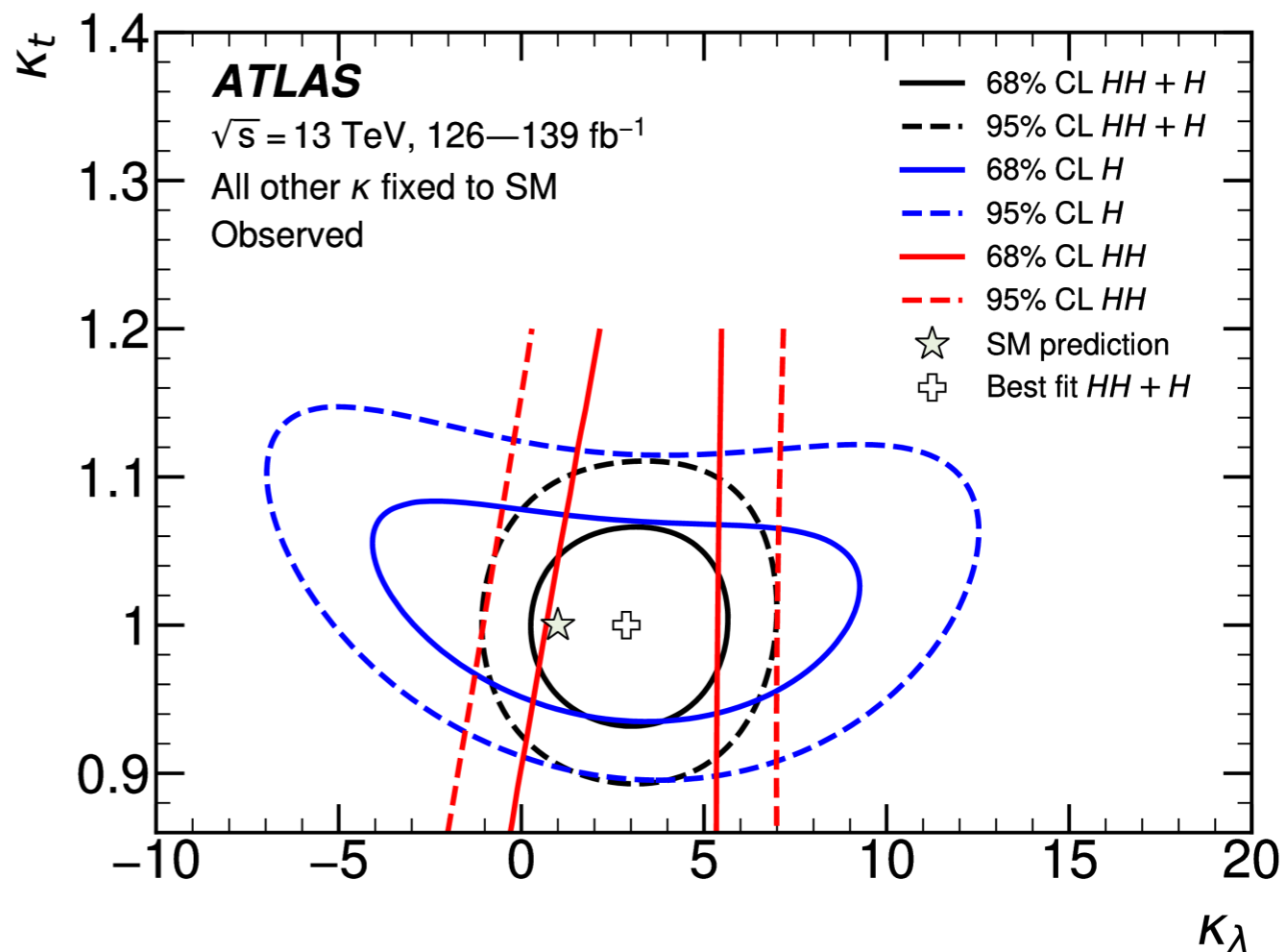
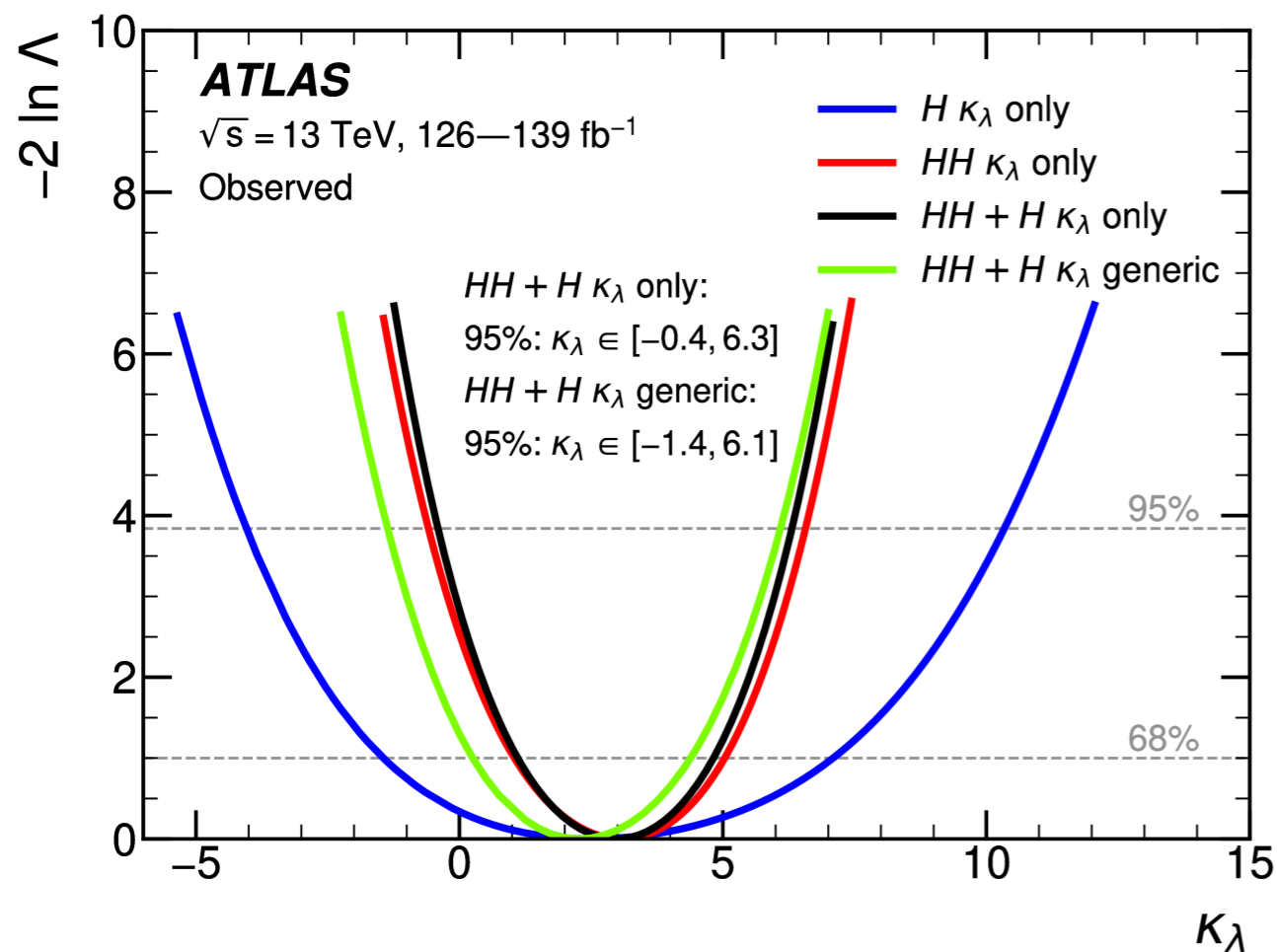
La misura della produzione di 2(o più) bosoni di Higgs é lo strumento principale per verificare se il parametro  $\lambda$  é uguale a quello atteso dalla teoria

# Doppio Higgs

Combinazione dei canali piú importanti



# Doppio Higgs e Single Higgs

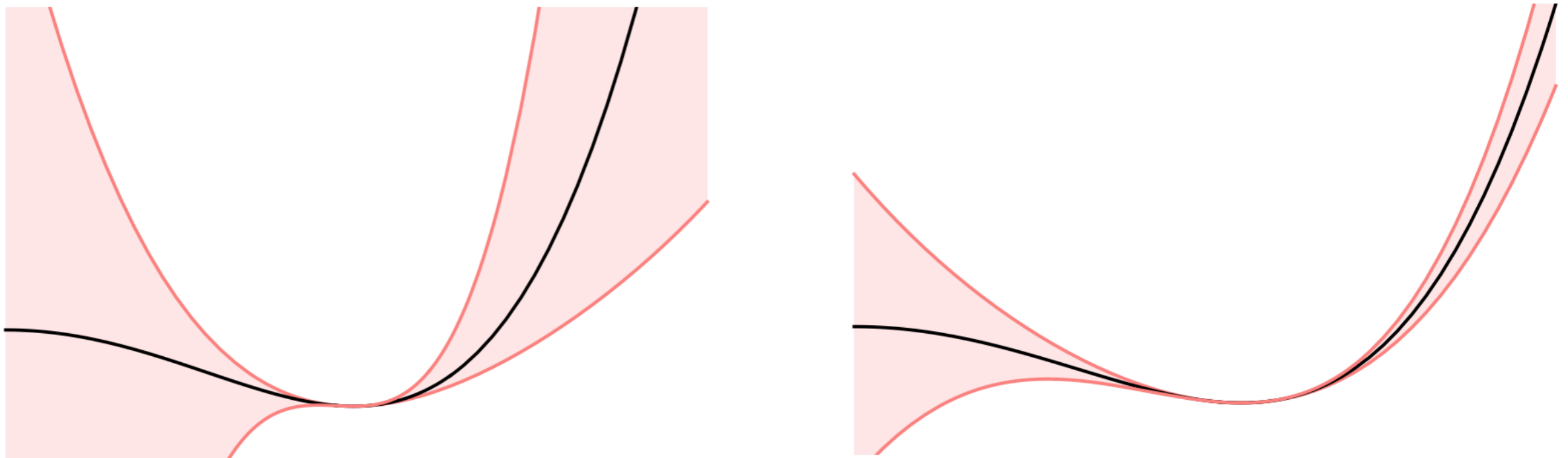


## Summary of ATLAS HH+H combined results:

- ▶ Profile  $\kappa_\lambda$  only:  $-0.4 < \kappa_\lambda < 6.3$  (95% CL).
- ▶ Profile  $\kappa_\lambda, \kappa_t, \kappa_V, \kappa_b, \kappa_\tau$ :  $-1.3 < \kappa_\lambda < 6.1$  (95% CL).

# Quanto bene conosciamo il potenziale oggi

---



H/T N.Craig, R.  
Petrossian-Byrne

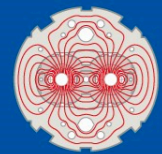
**Current LHC**



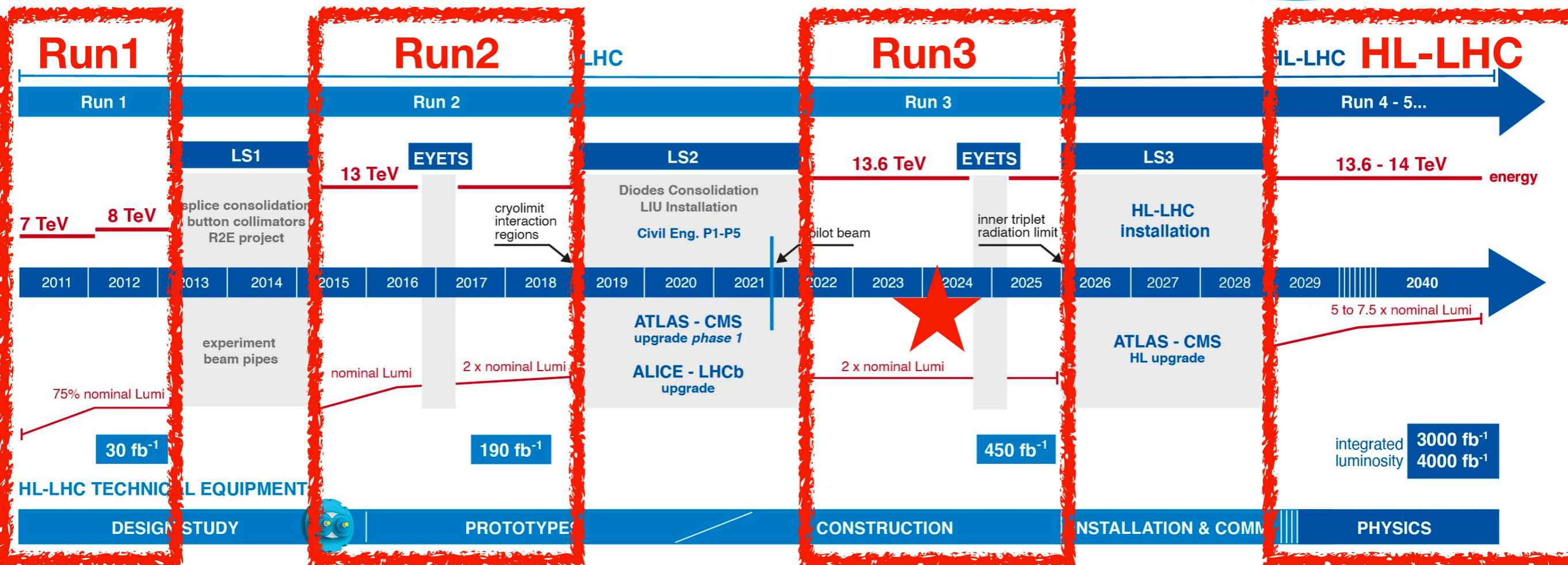
**HL-LHC  
(assuming 50%)**



# L'avventura del LHC é ricominciata



## LHC / HL-LHC Plan

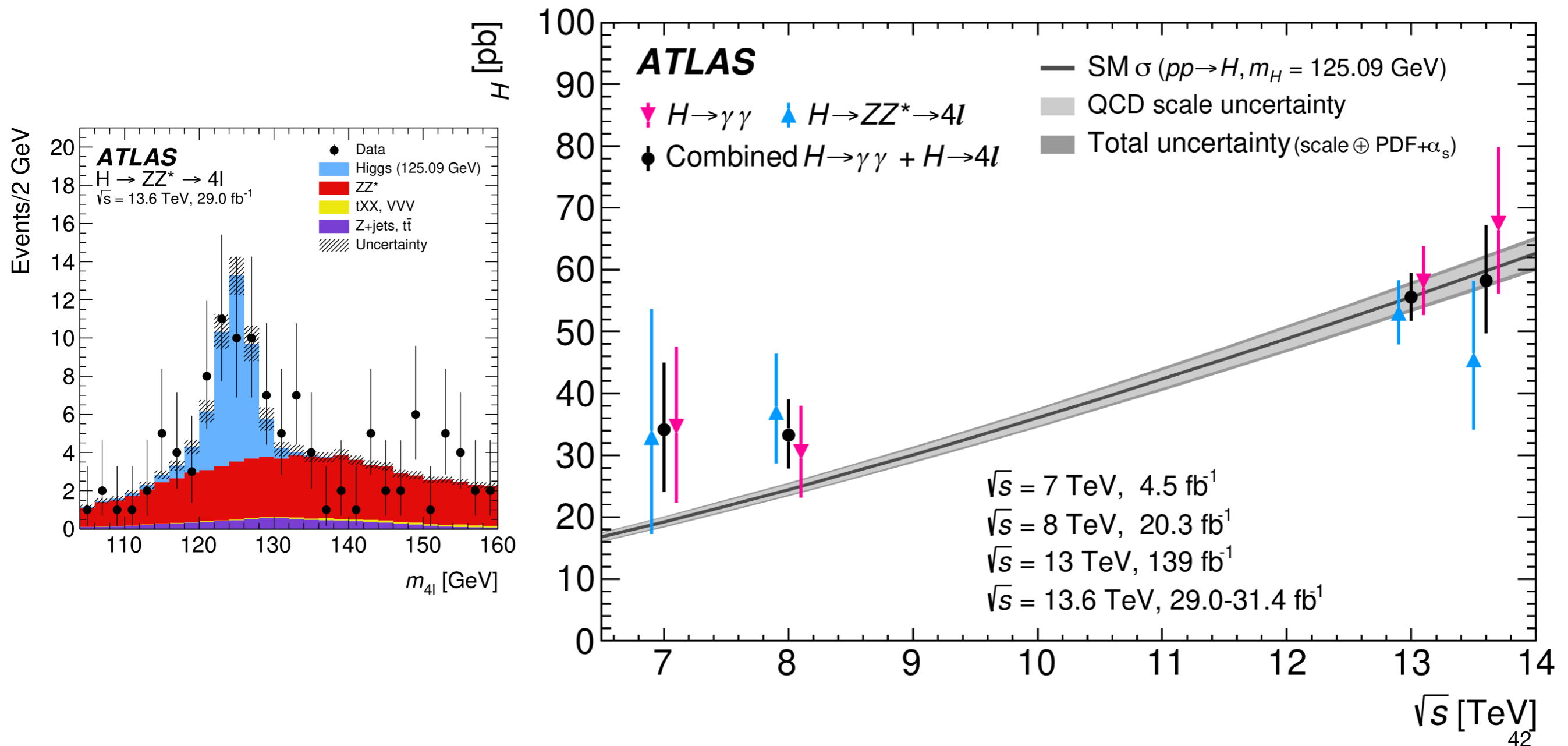


### HL-LHC CIVIL ENGINEERING:



# Prima misura del Run3 - 2022

Con i dati del 2022 é stata possibile una prima misura della sezione d'urto di produzione a 13.6 TeV



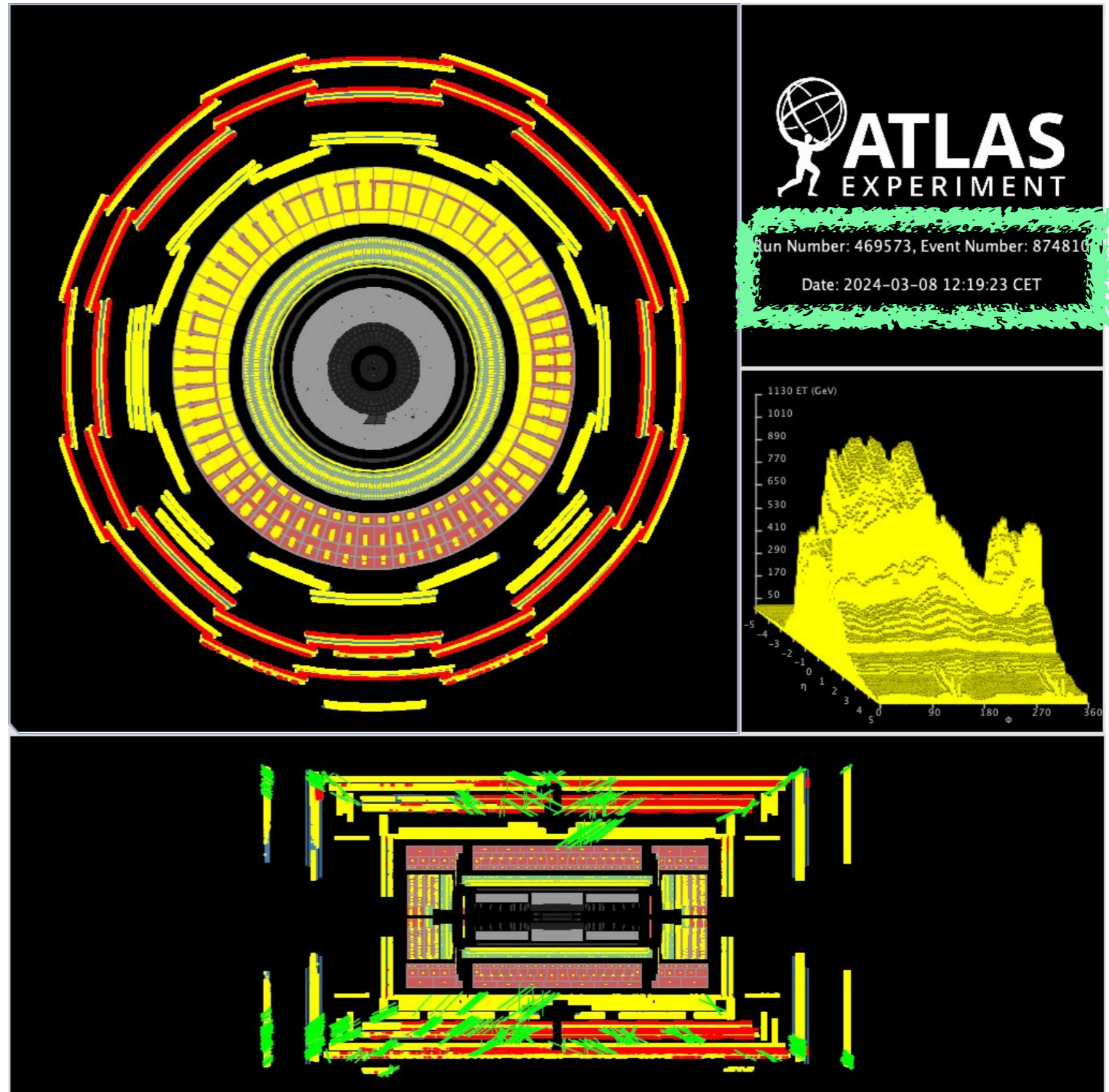
# Dati presi e piani (2023-2024)

Registrati in totale circa  $65 \text{ fb}^{-1}$  (#Higgs: 3.8 Milioni circa) alla fine del 2023.

Intense settimane al CERN

Il piano per il 2024 é di aggiungere circa  $90 \text{ fb}^{-1}$  (#Higgs: 5.4 Milioni circa)

Alla fine dell'anno dovremmo avere piú dati del Run2



# Higgs e INFN Pisa

## Higgs 2022 Pisa (Novembre 2022)

**HIGGS 2022**  
November 7-11 Pisa, Italy  
<https://www.pi.infn.it/Higgs2022>

**International Organising Committee**

- Illaria Brivio (Heidelberg University)
- Fabrizio Caola (Oxford University)
- Viviana Cavaliere (BNL)
- Nathaniel Craig (UC Santa Barbara)
- Stefania Gori (UC Santa Cruz)
- Gudrun Heinrich (KIT)
- Giovanni Petruccioli (CERN)
- Giacinto Piacquadio (Stony Brook University)
- Stefano Pozzorini (Zurich University)
- Aidan Robson (University of Glasgow)
- Roberto Salerno (LLR)
- Kerstin Tackmann (DESY & University of Hamburg)
- Mika Westerinen (University of Warwick)
- Meng Xiao (Zhejiang University)

**Local Organising Committee**

- Paolo Azzurri (INFN PI)
- Giuseppe Bagliesi (INFN PI)
- Riccardo Barbieri (SNS)
- Lorenzo Bianchini (Unipi)
- Dario Buttazzo (INFN PI)
- Rino Castaldi (INFN PI)
- Vincenzo Cavasini (Unipi)
- Giorgio Chiarelli (INFN PI)
- Maria Agnese Ciocci (Unipi)
- Vitaliano Gullì (Unipi)
- Stefania De Curtis (GGI)
- Silvio Donato (INFN PI)
- Paolo Francavilla (INFN PI)
- Piergiulio Lenzi (Unipi)
- Sandra Leone (INFN PI)
- Giuliano Panico (Unipi)
- Michele Redi (Unipi)
- Andrea Rizzi (Unipi)
- Chiara Roda (Unipi)
- Gigi Rolandi (SNS)
- Fabrizio Scuri (INFN PI)
- Paolo Spagnolo (INFN PI)
- Guido Tonelli (Unipi)
- Monica Verducci (Unipi)
- Lorenzo Villani (INFN PI)

Logos: INFN, GGI, UNIVERSITÀ DI PISA, UNIVERSITÀ DI SIENA, SCUOLA NORMALE SUPERIORE, FRONTIER DETECTORS FOR FRONTIER PHYSICS, COMUNE DI PISA

higgs2022@pi.infn.it

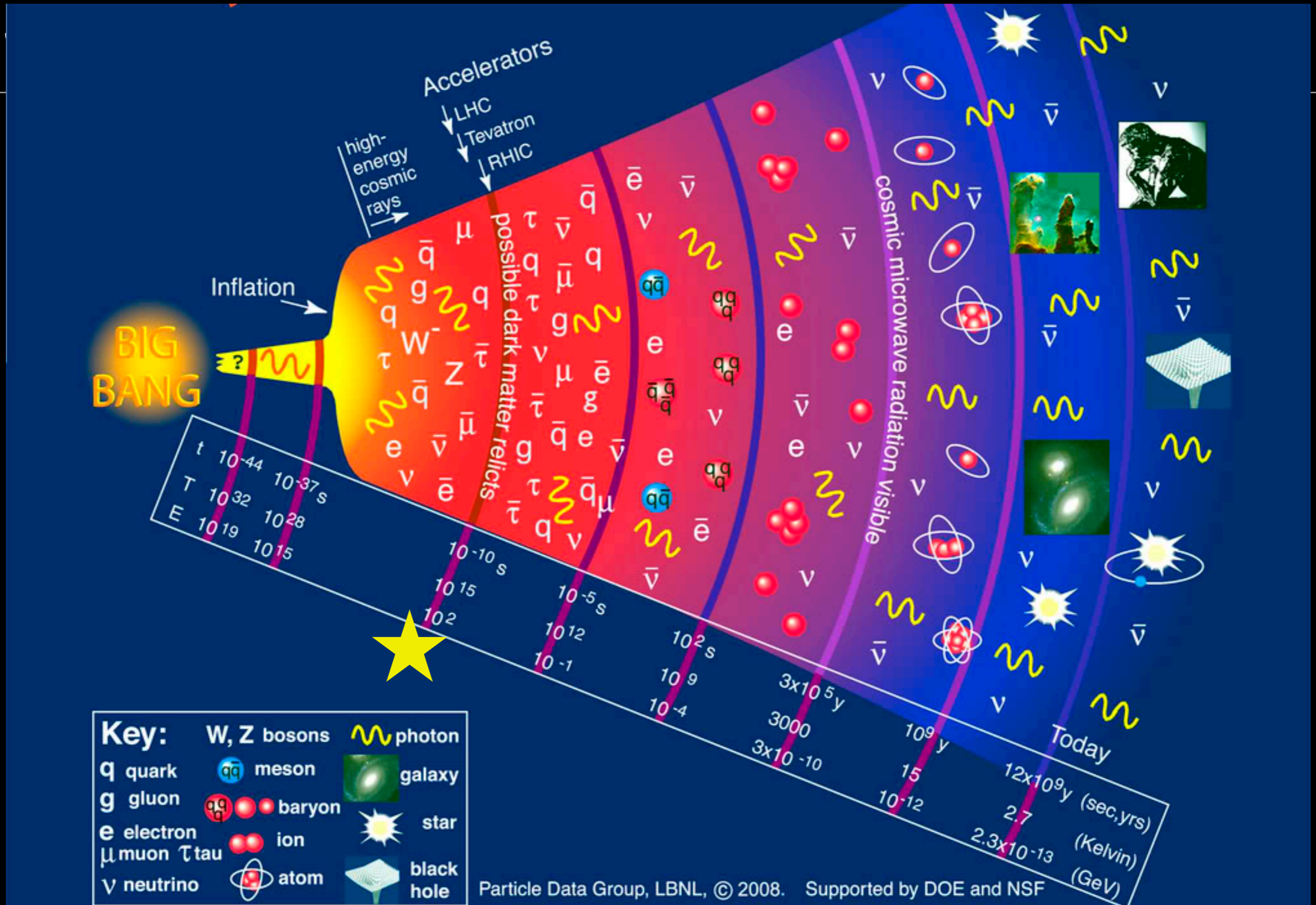
Double Higgs 2025  
Isola d'Elba (Maggio 2025)



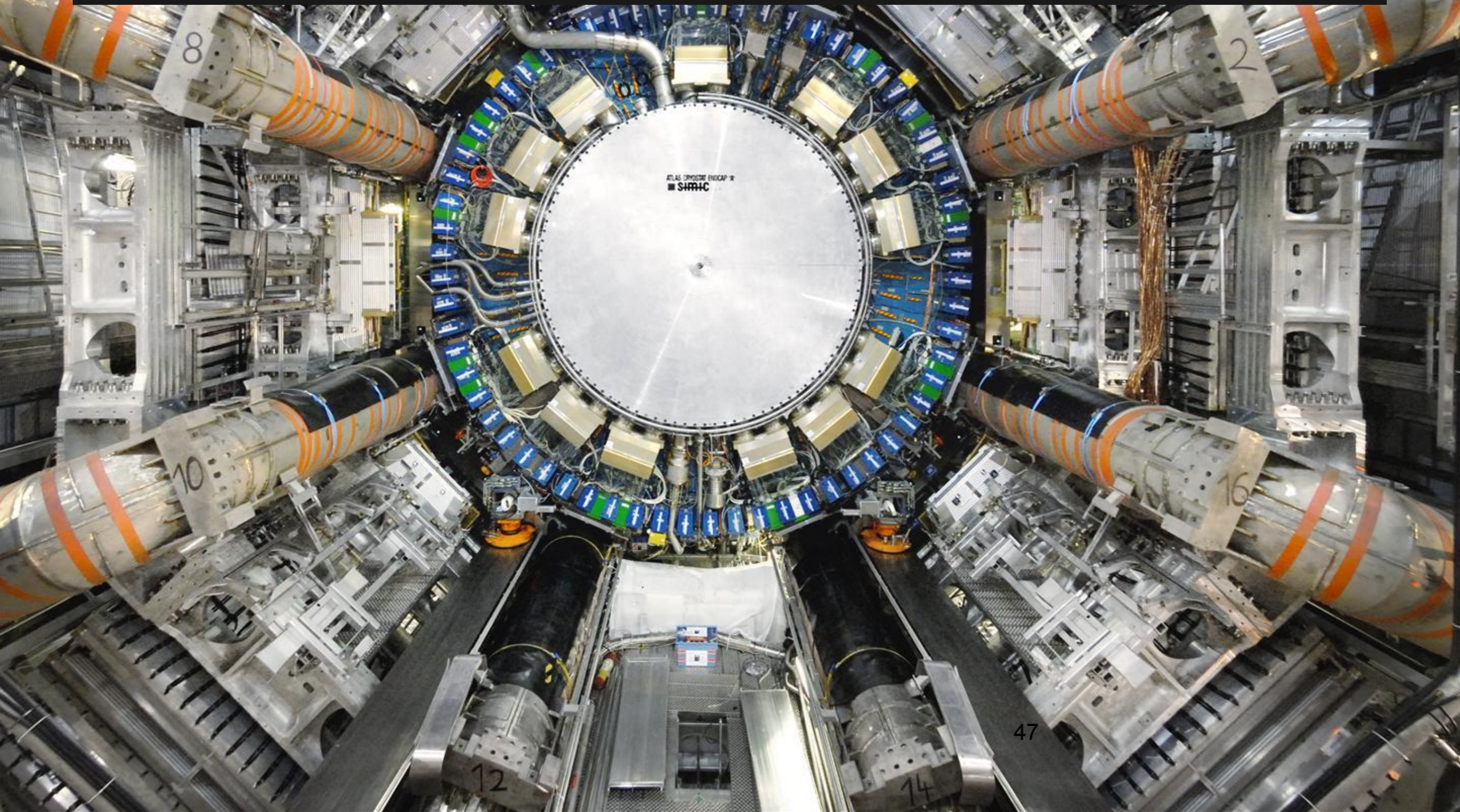
Grazie dell'attenzione !

[paolo.francavilla@cern.ch](mailto:paolo.francavilla@cern.ch)

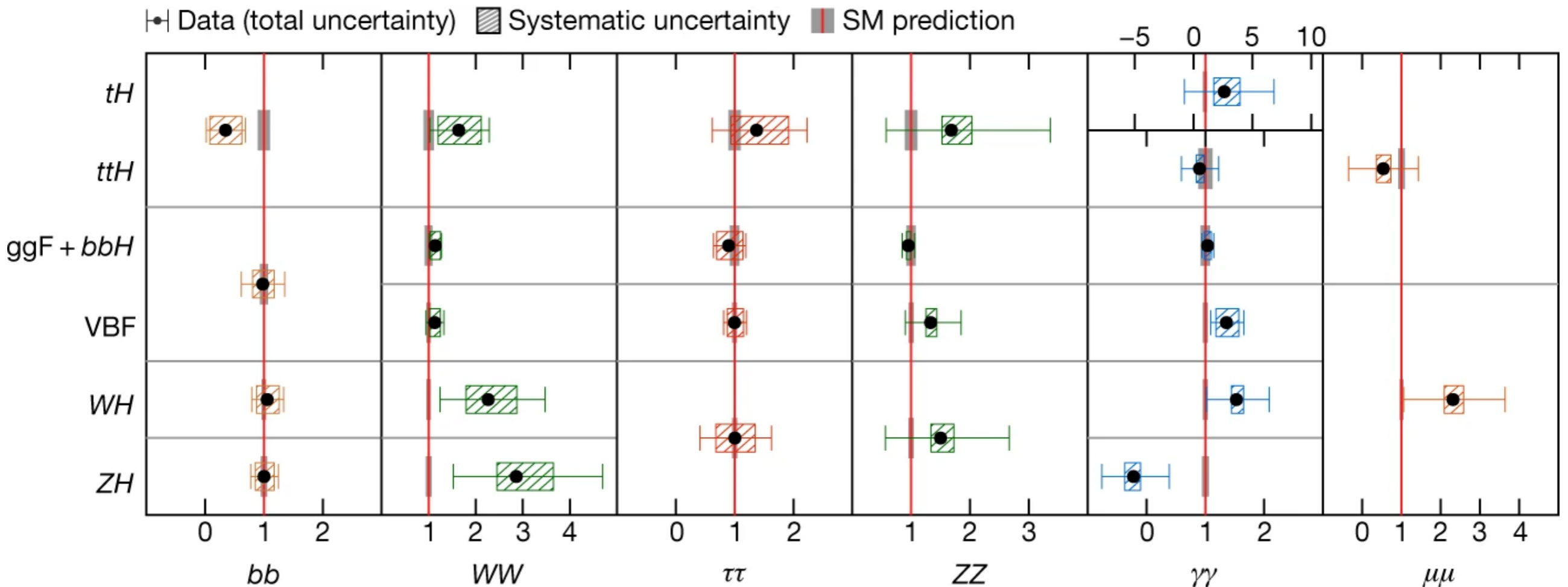
# Qualcosa che é successo dopo $10^{-11}$ $10^{-10}$ s dal Big Bang e che ha cambiato il resto della storia dell'Universo



# ATLAS



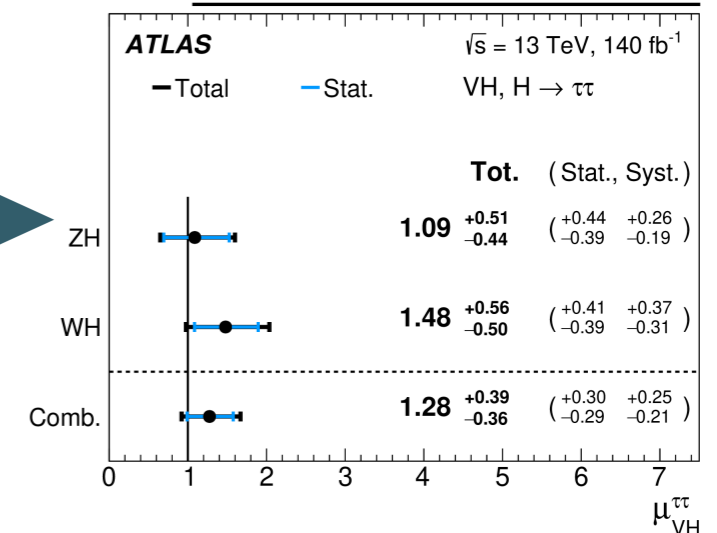
# Quanti modi di misurare il bosone di Higgs?



arXiv:2312.02394

• Mancano le seguenti analisi già pubblicate (o inviate a rivista):

- $H \rightarrow Z\gamma$
- Misura di WH e ZH con  $H \rightarrow \tau\tau$
- Misura di WH/ZH con  $H \rightarrow bb$  e  $W/Z \rightarrow qq$
- Misura di VBF WH con  $H \rightarrow bb$
- ...

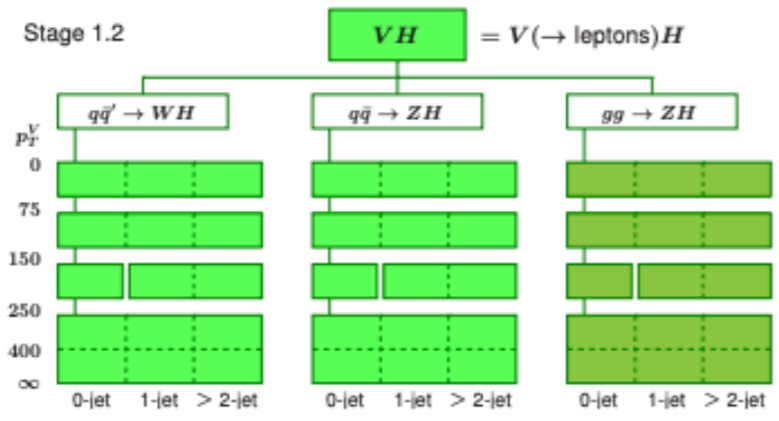
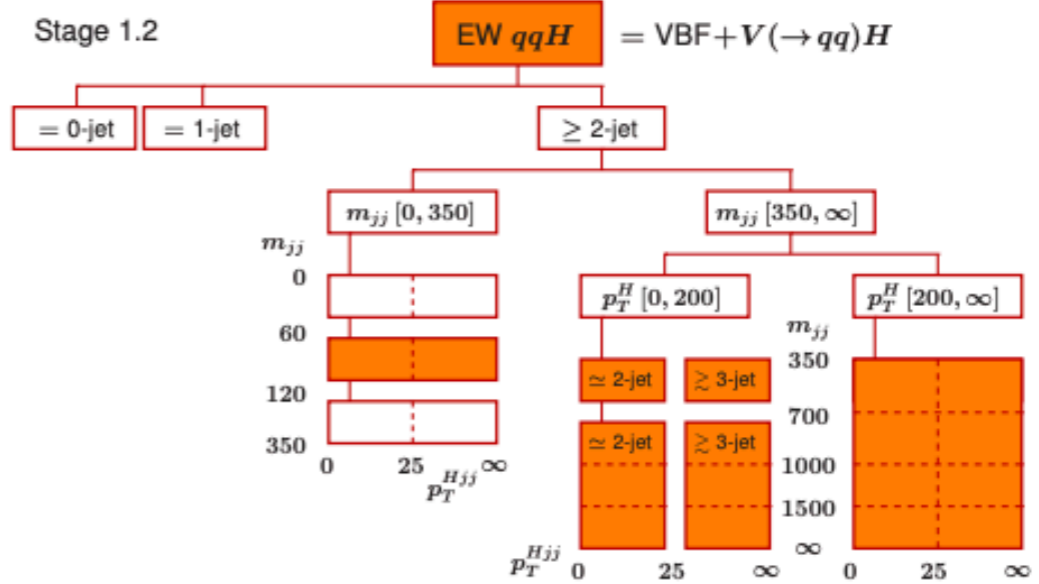
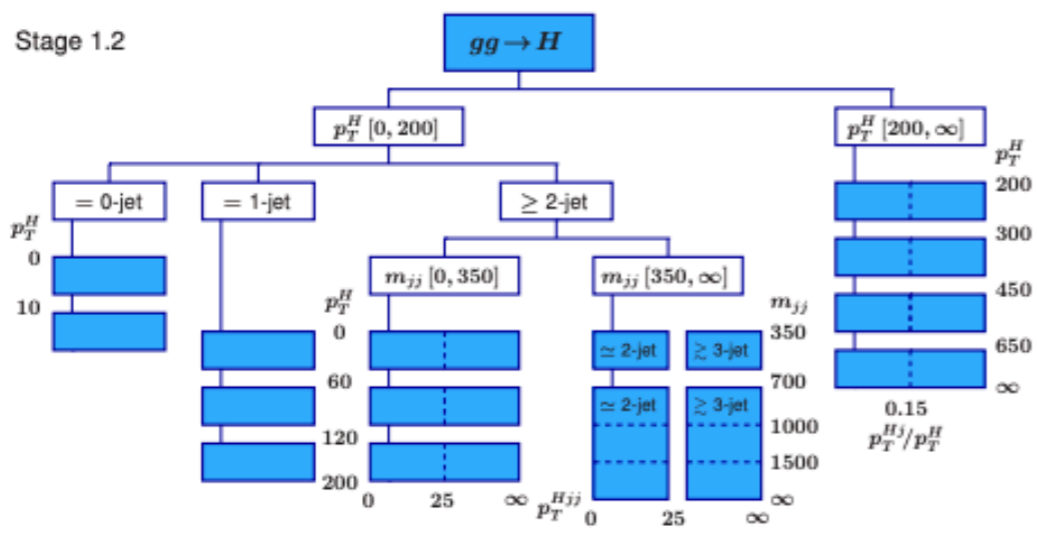




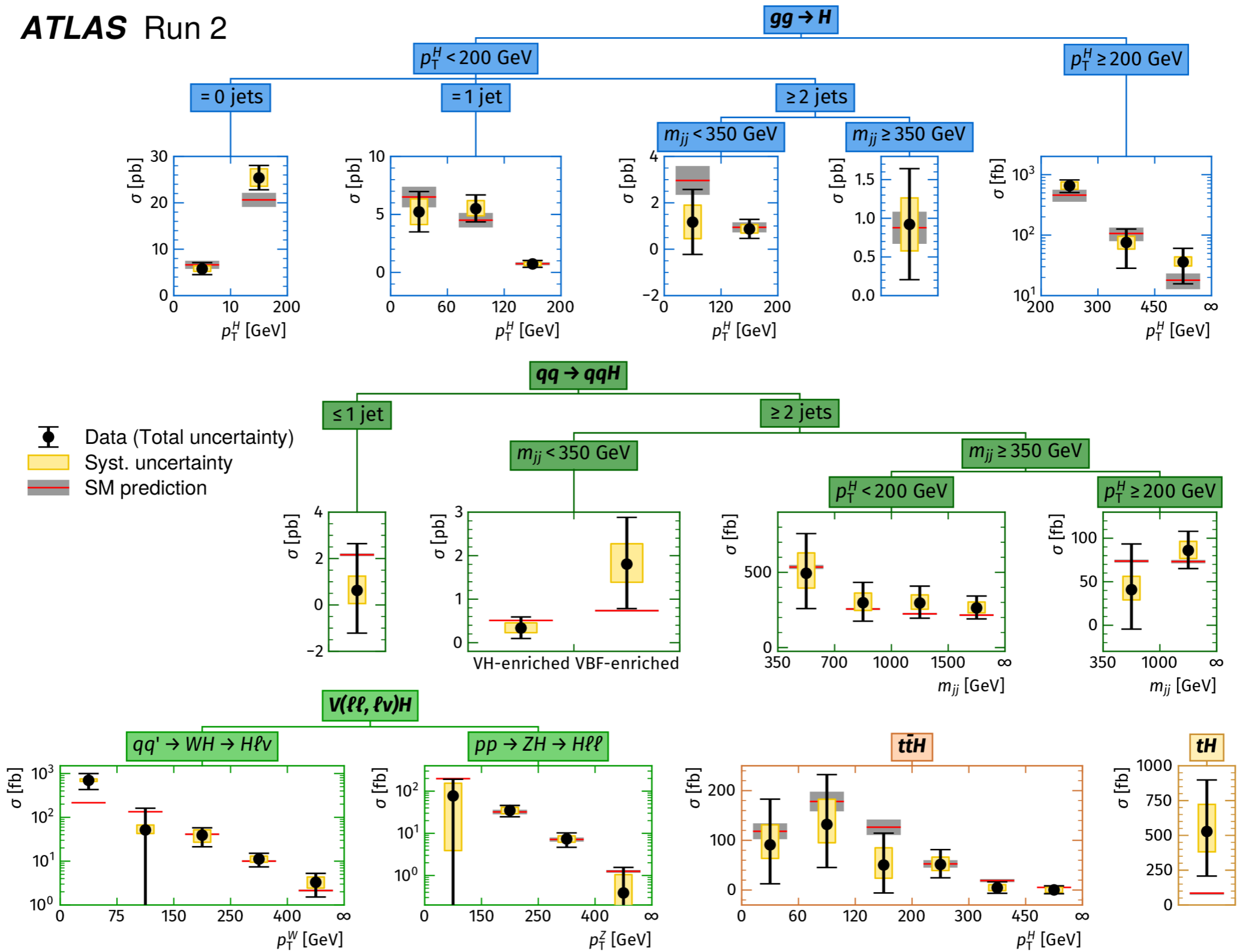
# Simplified template cross sections (STXS)

- STXS reveals the kinematic properties of Higgs production processes with associated jets to maximize the experimental sensitivities while at the same time minimizing their theory dependence.

LHCHSWG



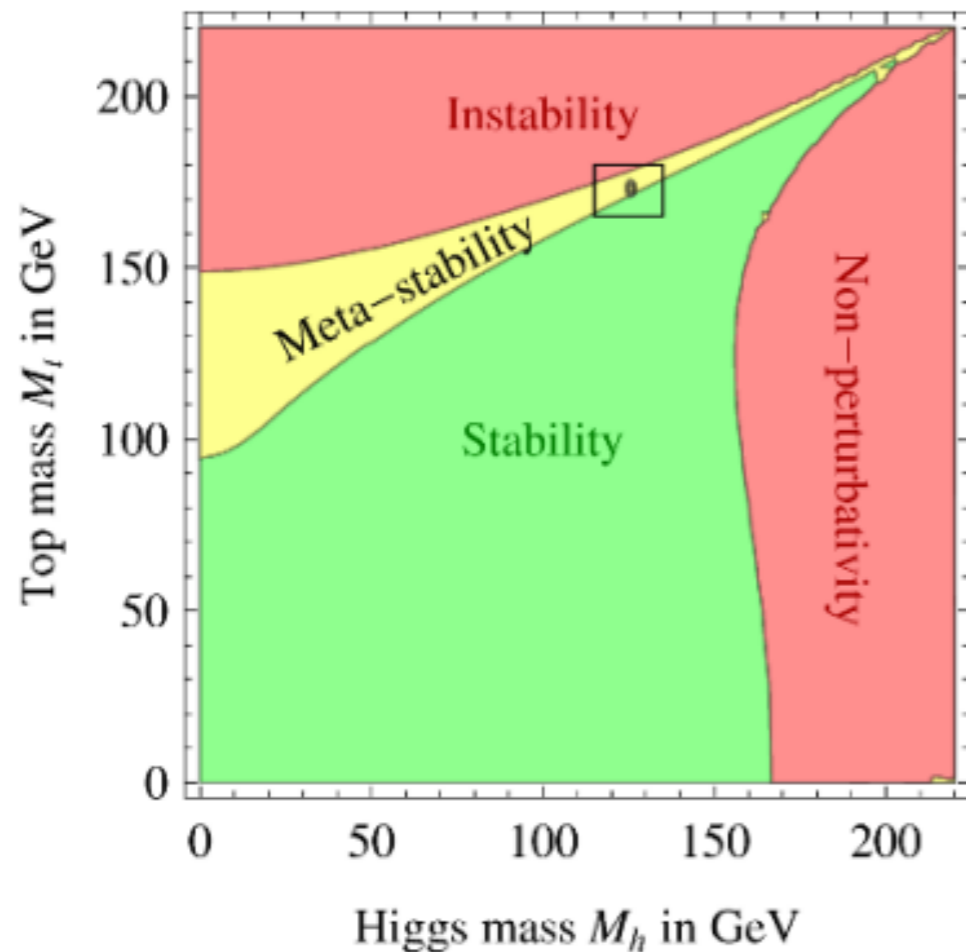
# Oltre le misure differenziali - STXS



# Il vuoto é stabile?

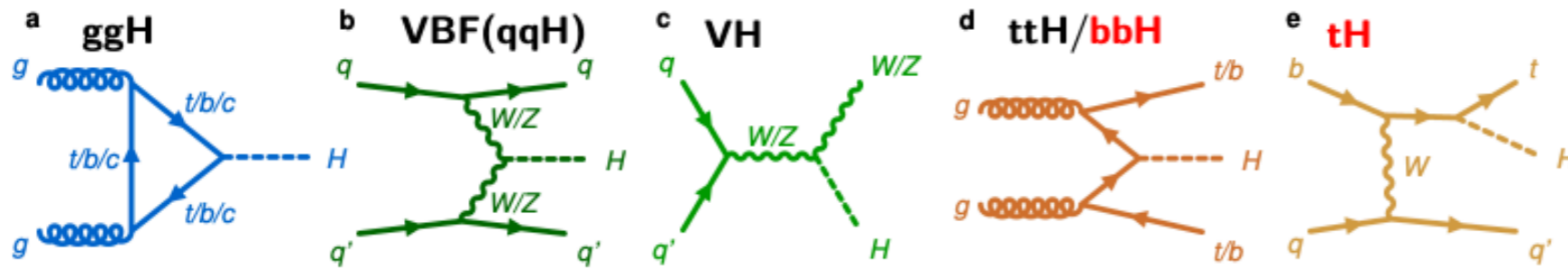
Sappiamo che il vuoto ha una sua energia (legata al campo di Higgs), e una sua dinamica.

Ma nel tempo é destinato a restare sempre cosí?



# Single Higgs production

Nature 607, 52 (2022)



● Global signal strength:

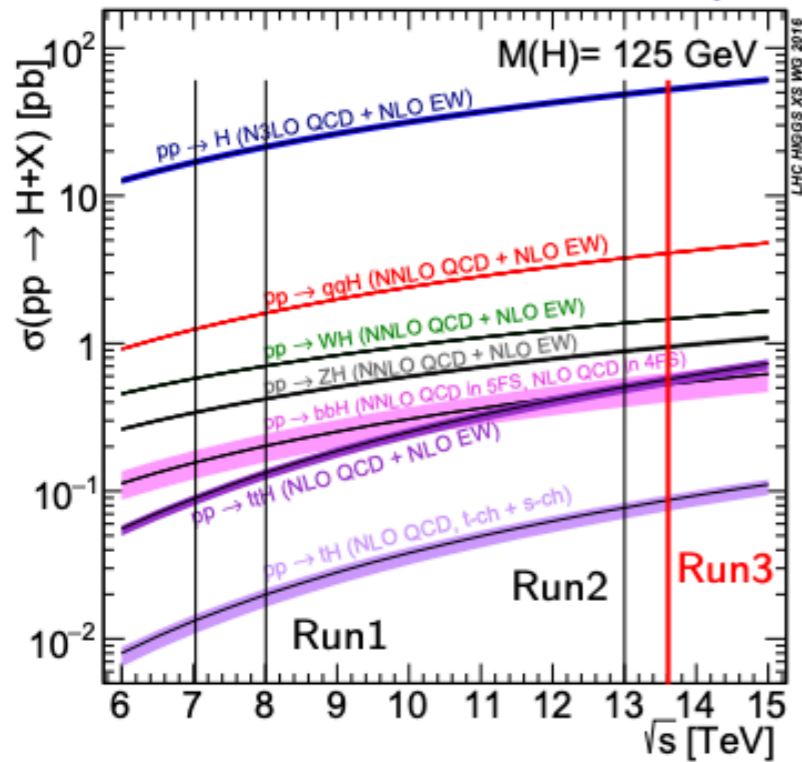
▶  $\mu = 1.05 \pm 0.06$  (ATLAS)

▶  $\mu = 1.002 \pm 0.057$  (CMS)

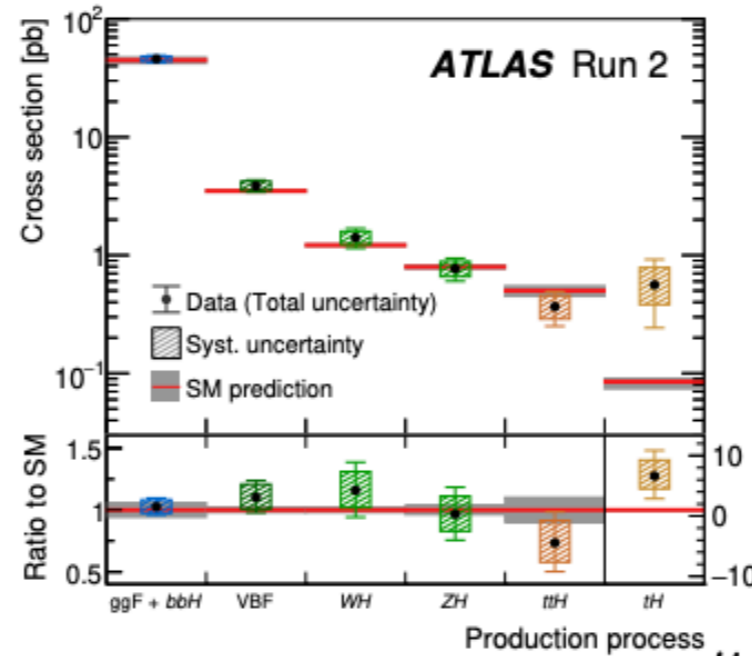
Nature 607 (2022) 60-68

● **bbH** and **tH** are not yet discovered.

CERN Yellow Report 4

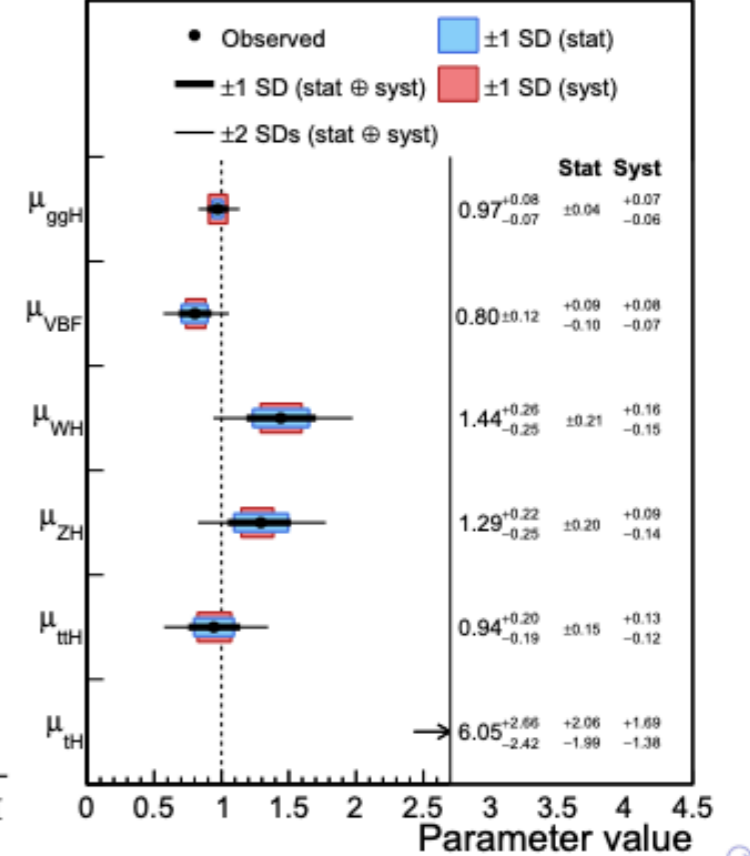


Nature 607, 52 (2022)



$$\mu_i = \frac{\sigma_{obs}}{\sigma_{SM}}$$

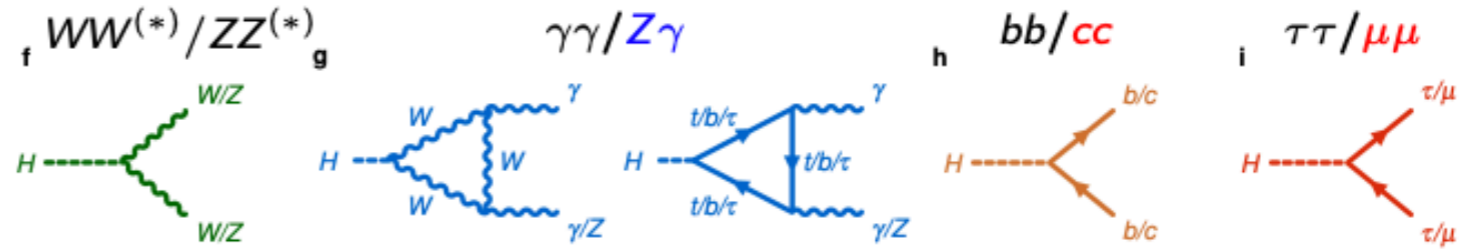
CMS 138 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)



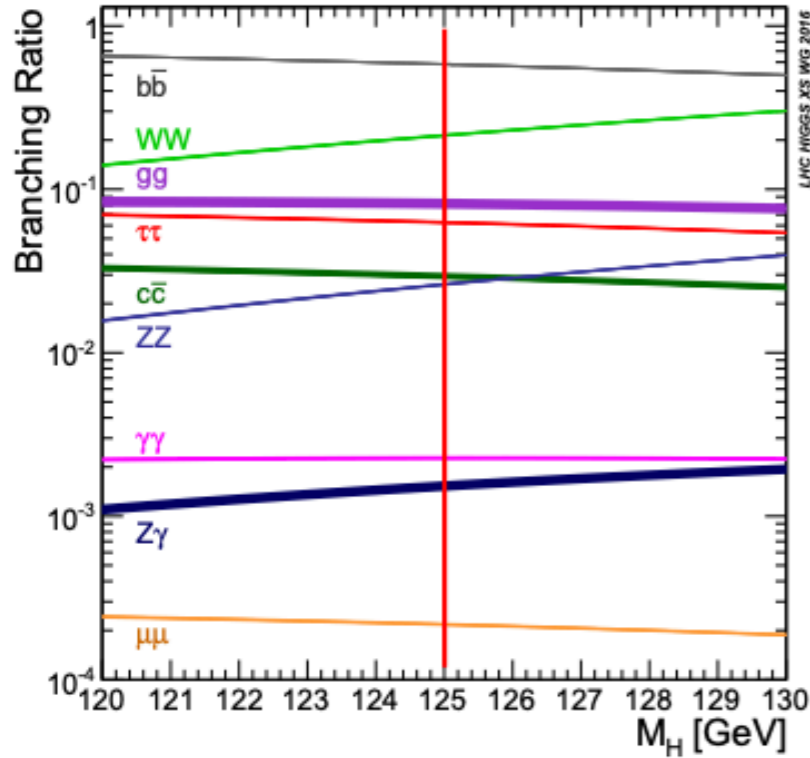
# Higgs decay

- $cc$  and  $\mu\mu$  are still under searching.
- $Z\gamma$  is above  $3\sigma$  in the combination of ATLAS and CMS.

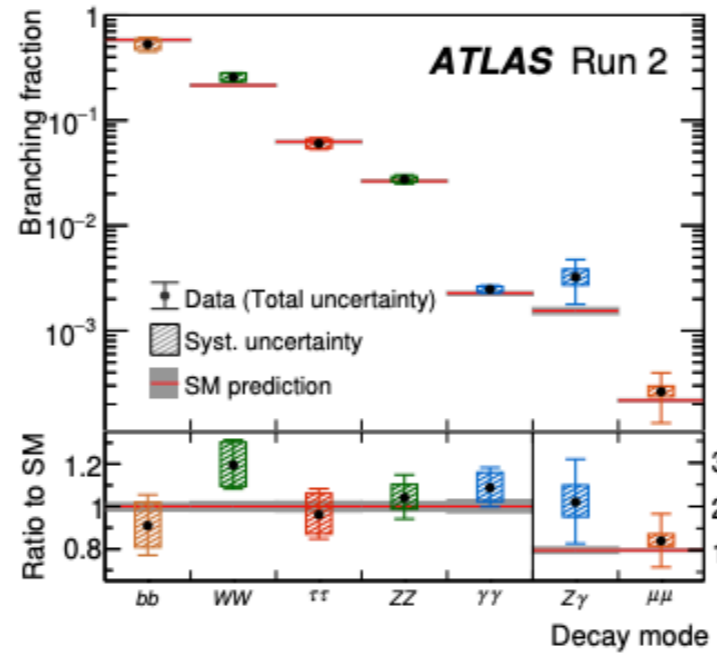
Nature 607, 52 (2022)



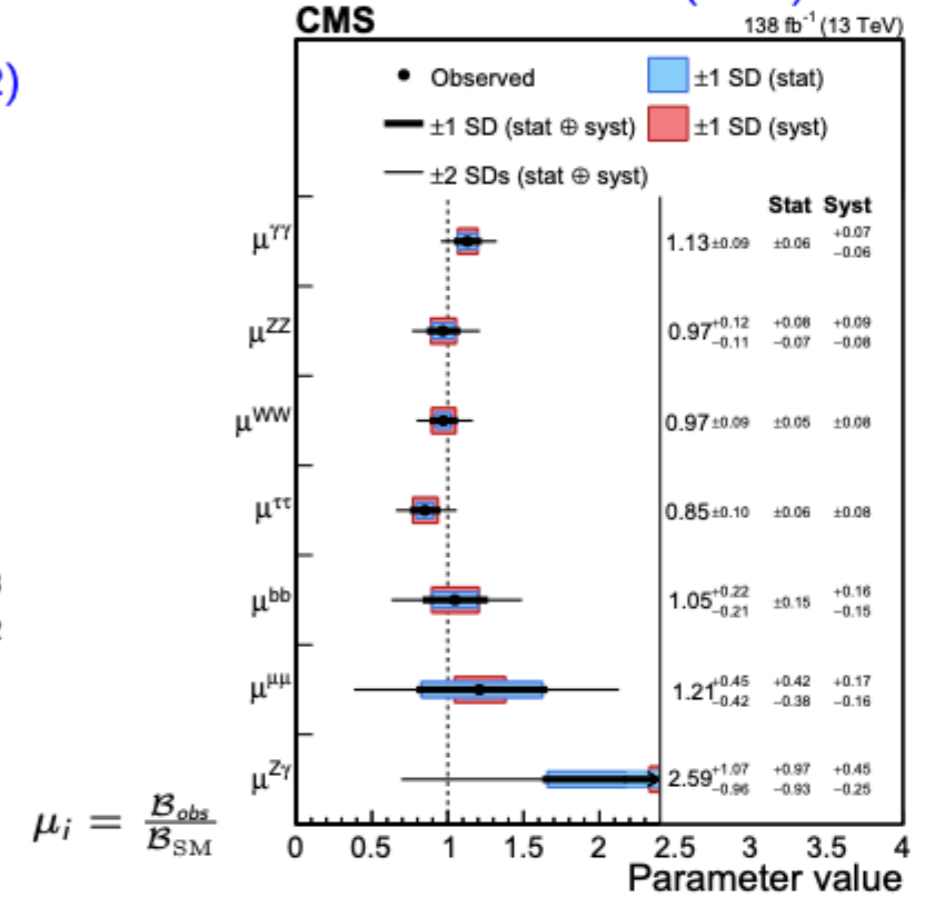
CERN Yellow Report 4



Nature 607, 52 (2022)



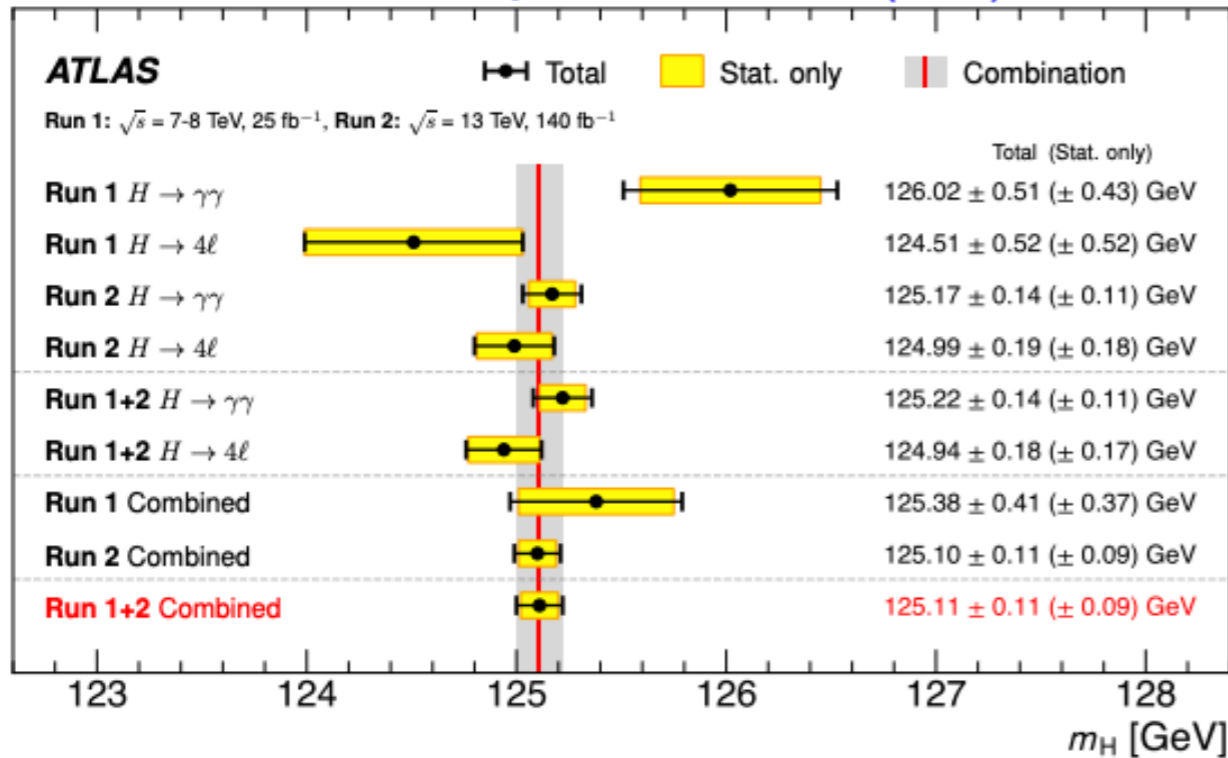
Nature 607 (2022) 60-68



# Higgs mass

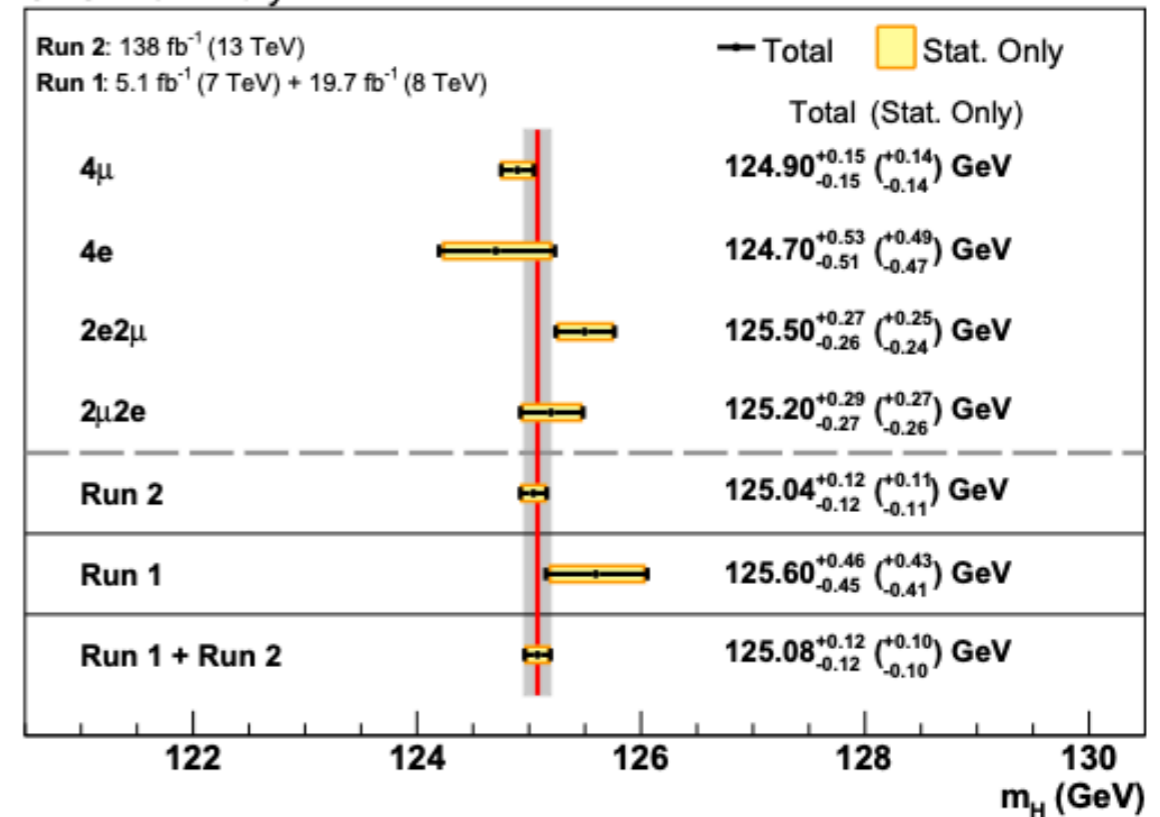
- ATLAS and CMS measured the Higgs mass with full Run2 data combined with the Run1 results, achieving an accuracy of less than 0.1%.
  - ▶  $125.11 \pm 0.09$  (stat.)  $\pm 0.06$  (syst.) =  **$125.11 \pm 0.11$**  GeV (ATLAS).
  - ▶  $125.08 \pm 0.10$  (stat.)  $\pm 0.07$  (syst.) =  **$125.08 \pm 0.12$**  GeV (CMS).

Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 251802



CMS Preliminary

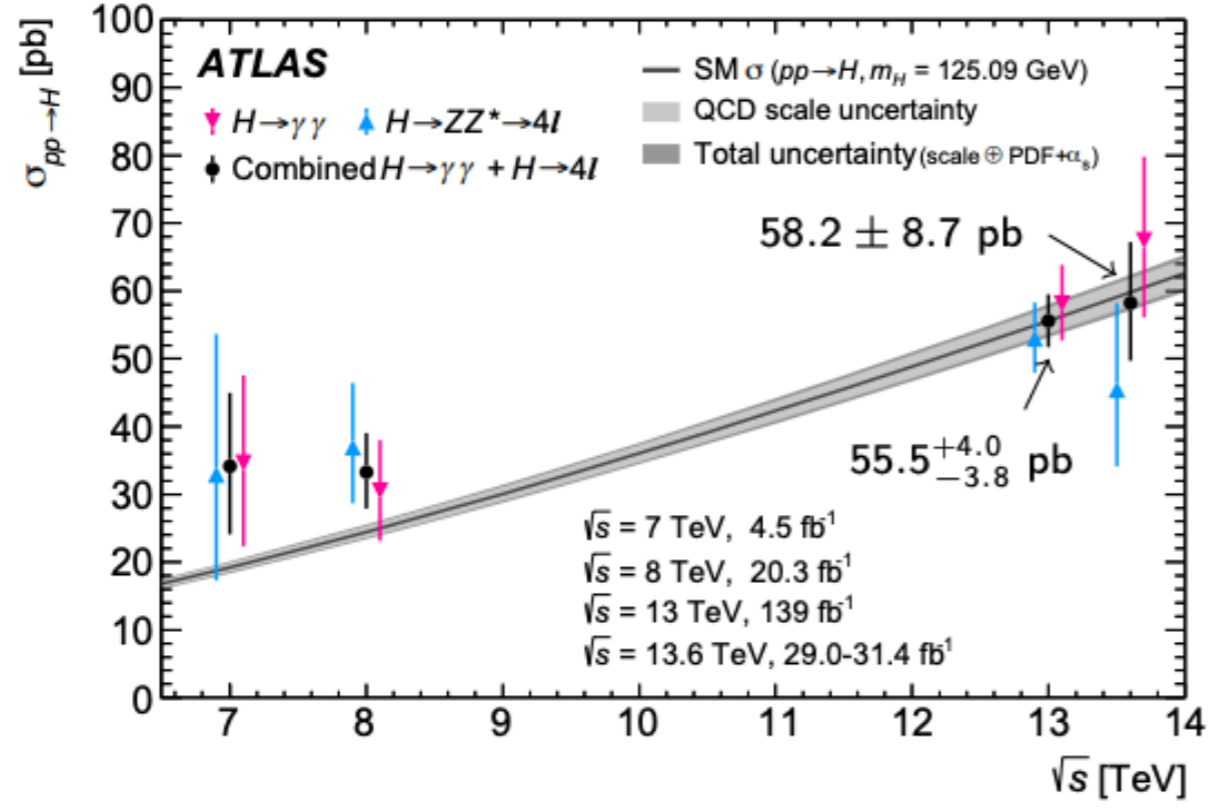
CMS-PAS-HIG-21-019



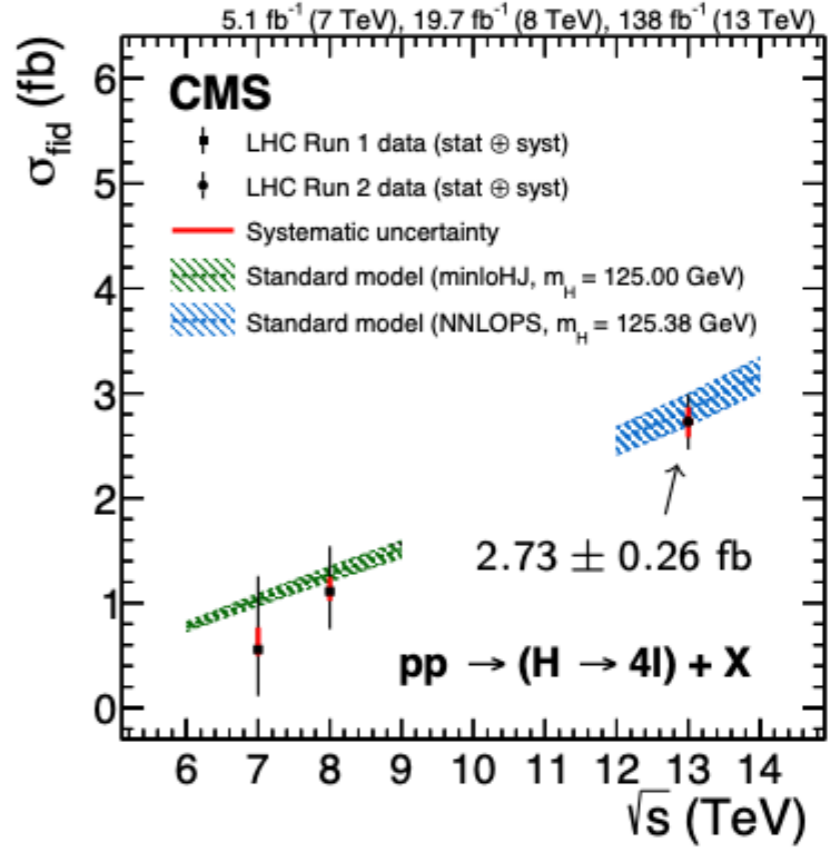
# Inclusive cross section measurement

- ATLAS published the measurements of the total cross section in  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  and  $H \rightarrow \gamma\gamma$  with Run1, Run2 and **Run3 (2022)** data.
  - ▶ Relative uncertainties:  **$\sim 7\%$  for Run2,  $\sim 15\%$  for Run3.**
- CMS has the results in  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  with Run1 and Run2 datasets.
  - ▶  $\sigma_{\text{fid}} = 73.4^{+5.4}_{-5.3}(\text{stat})^{+2.4}_{-2.2}(\text{syst})$  fb in agreement with  $75 \pm 4.1$  fb in  $H \rightarrow \gamma\gamma$  with Run2 data.

Eur. Phys. J. C 84 (2024) 78



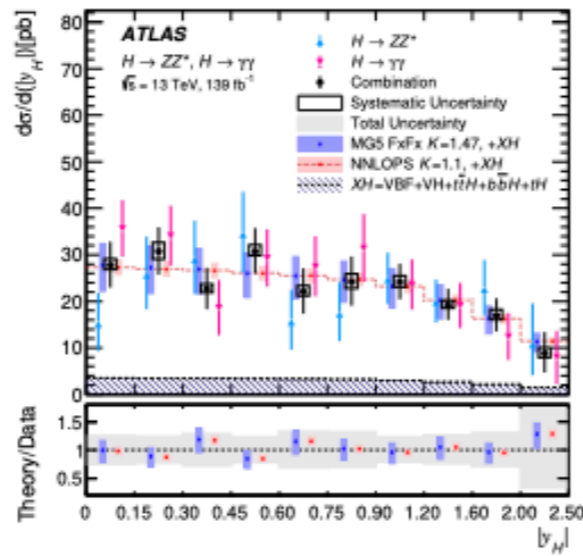
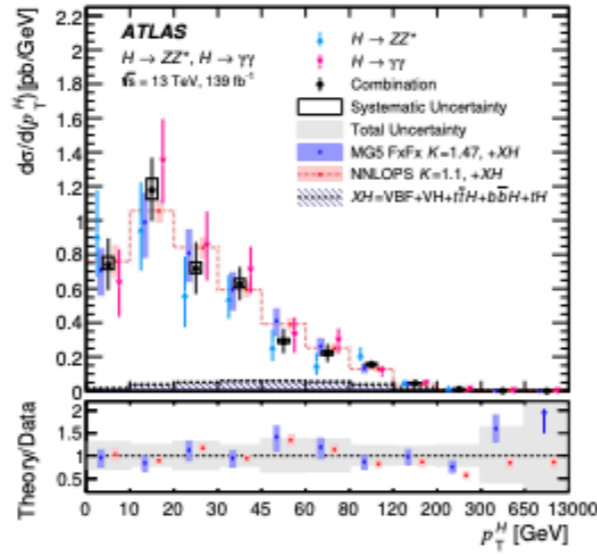
JHEP 08 (2023) 040



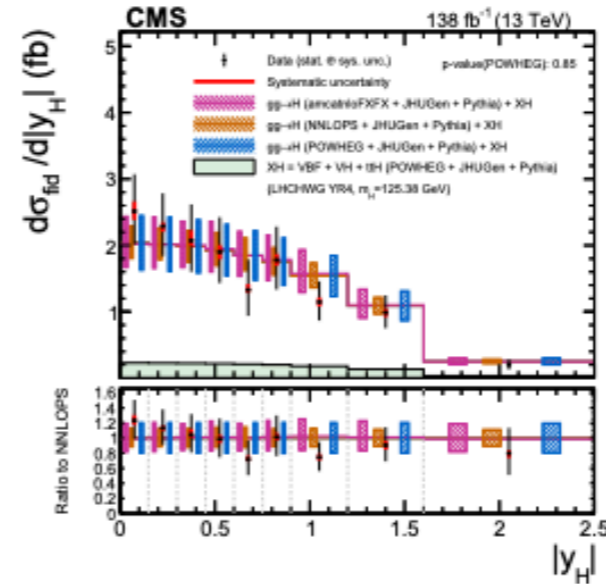
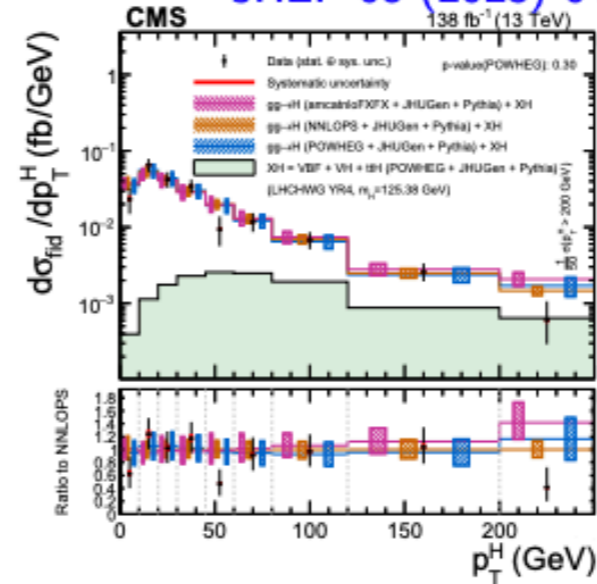
# Differential cross sections

- $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  and  $H \rightarrow \gamma\gamma$  show comparable results of Higgs kinematics with full Run2 data.
- ATLAS further combined the Run2 results of two channels.
- There are  $H \rightarrow WW^*$  results from ATLAS and CMS and  $H \rightarrow \tau\tau$  results from CMS.

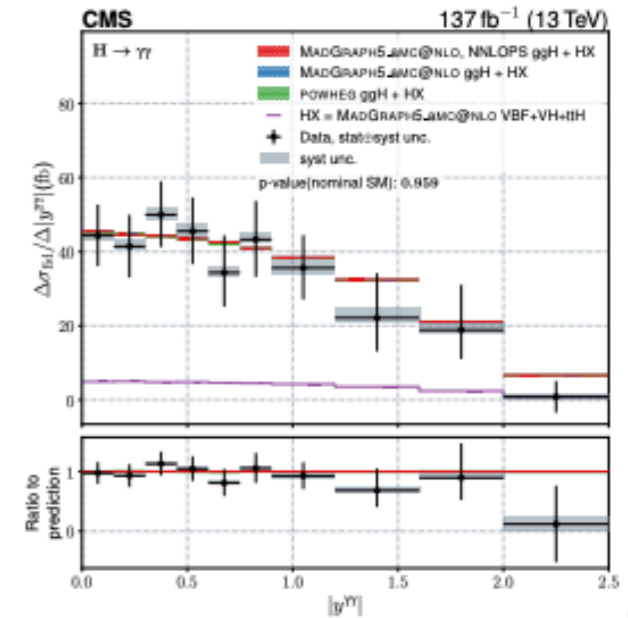
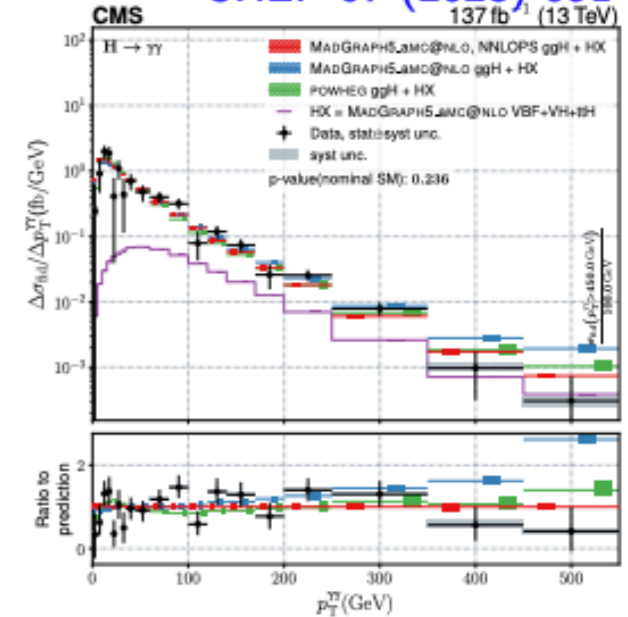
JHEP 05 (2023) 028



JHEP 08 (2023) 040



JHEP 07 (2023) 091

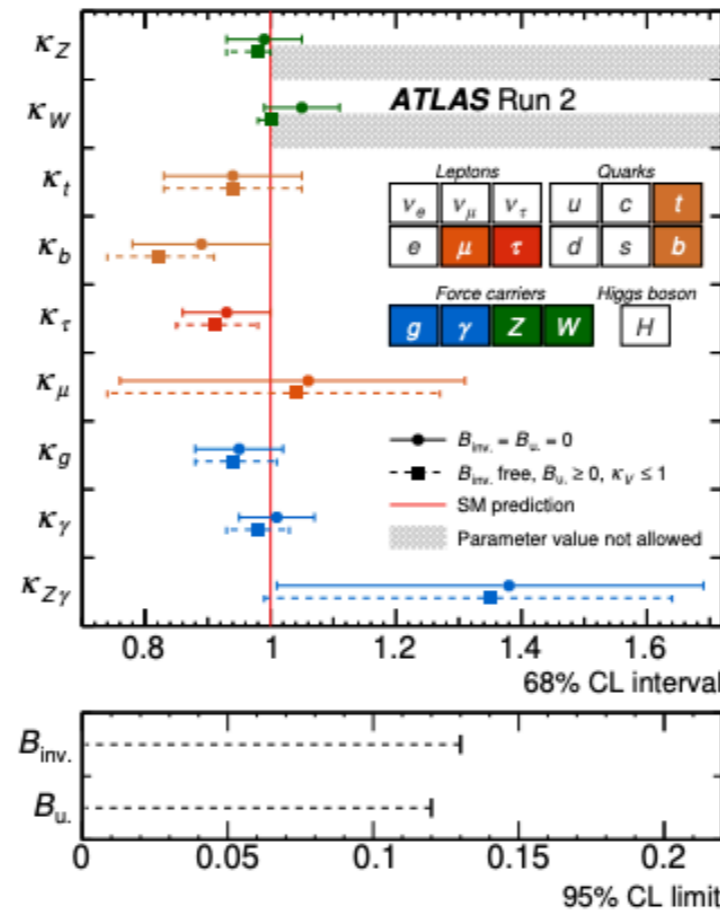
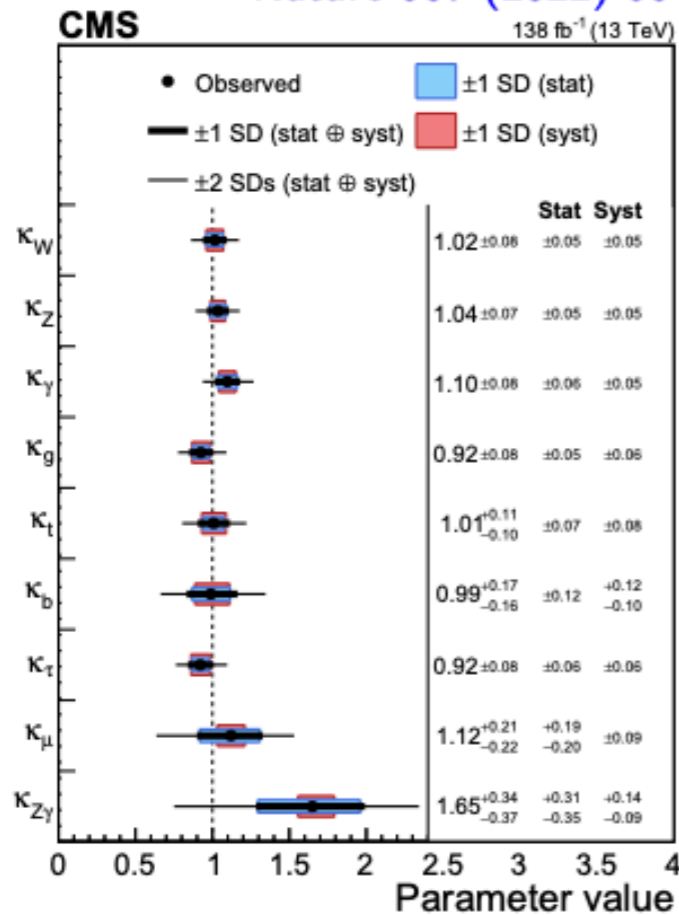




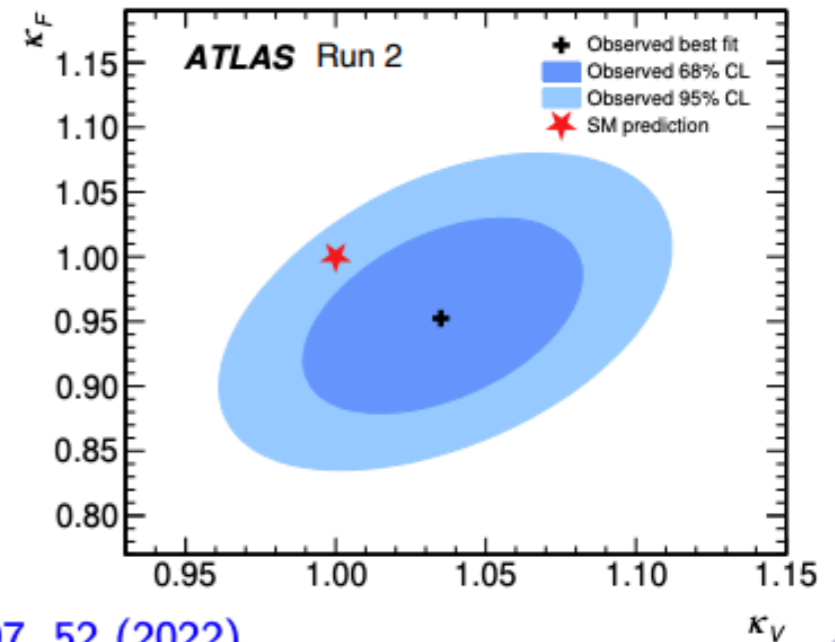
# Higgs coupling

- The loop-induced processes are treated using effective coupling strength modifiers ( $\kappa_g$ ,  $\kappa_\gamma$  and  $\kappa_{Z\gamma}$ ).
- $\mathcal{B}_{inv}$  and  $\mathcal{B}_u$  are the branching ratios of invisible particles and other decay which are undetected owing to a large background, respectively.

Nature 607 (2022) 60-68



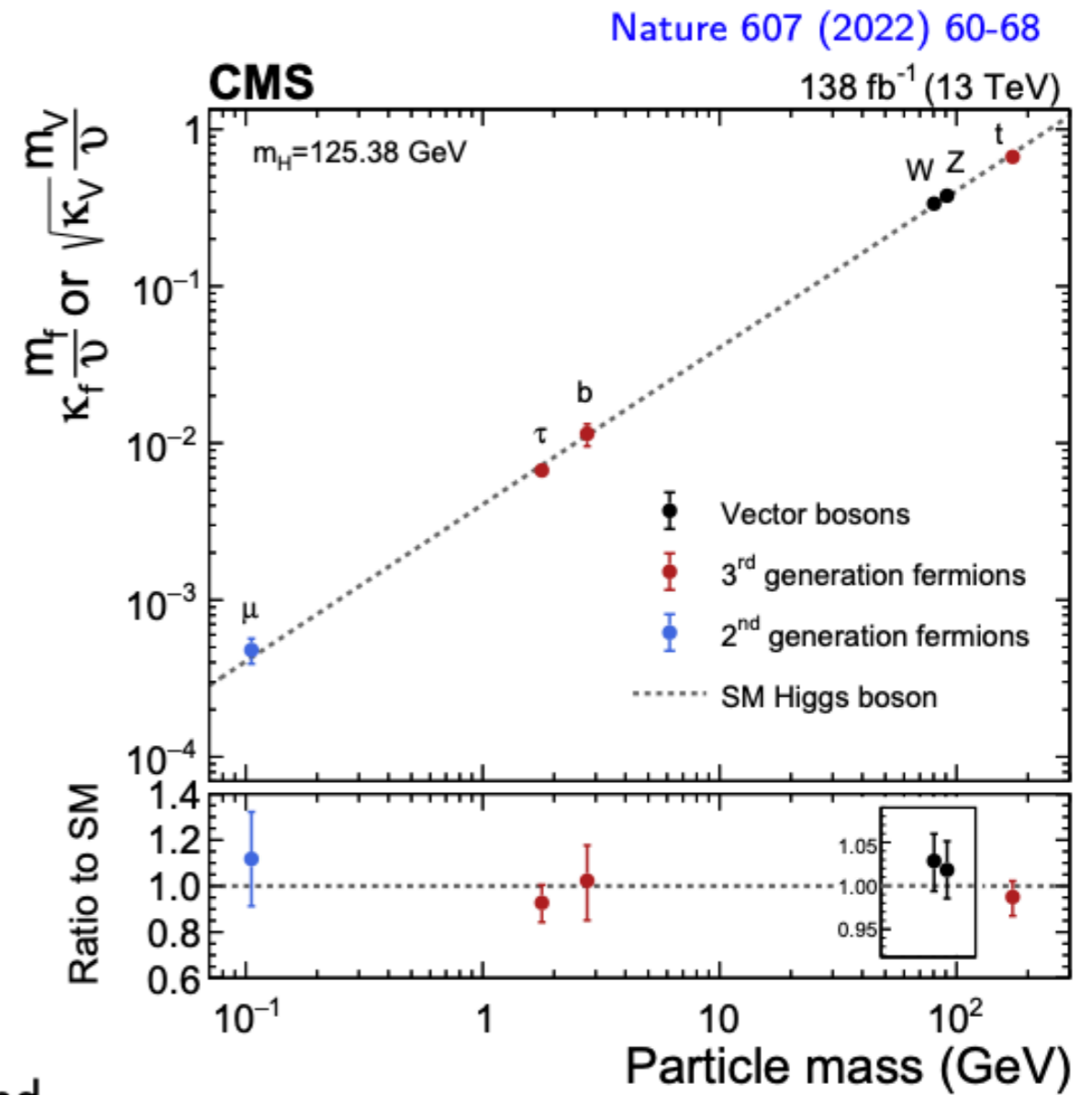
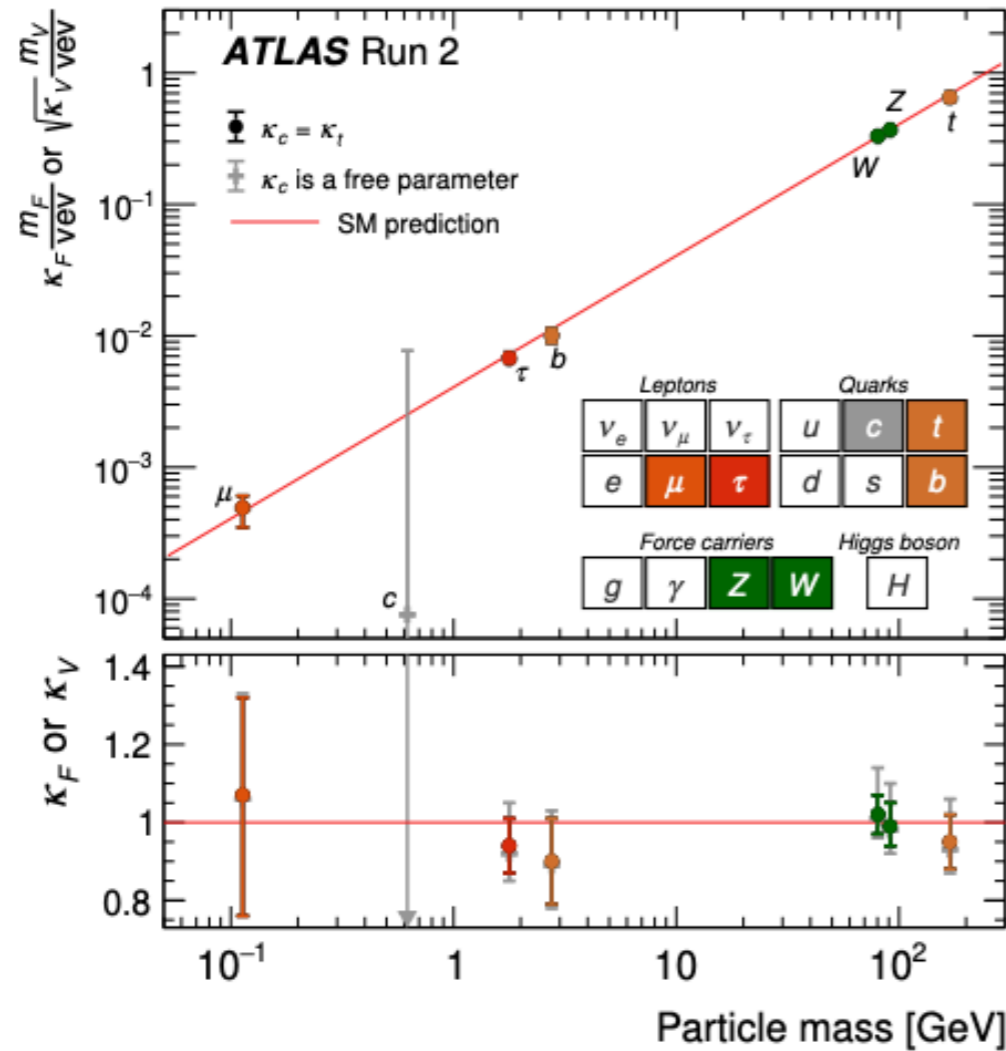
- ATLAS and CMS checked  $\kappa_F$  vs.  $\kappa_V$  with  $\kappa_V = \kappa_Z = \kappa_W$  and  $\kappa_F$  for all fermions.



Nature 607, 52 (2022)

# Higgs coupling strength

Nature 607, 52 (2022)



- $\kappa_c$  is obtained from the fit with floating  $\kappa_c$  and fixed the other  $\kappa$  parameters.

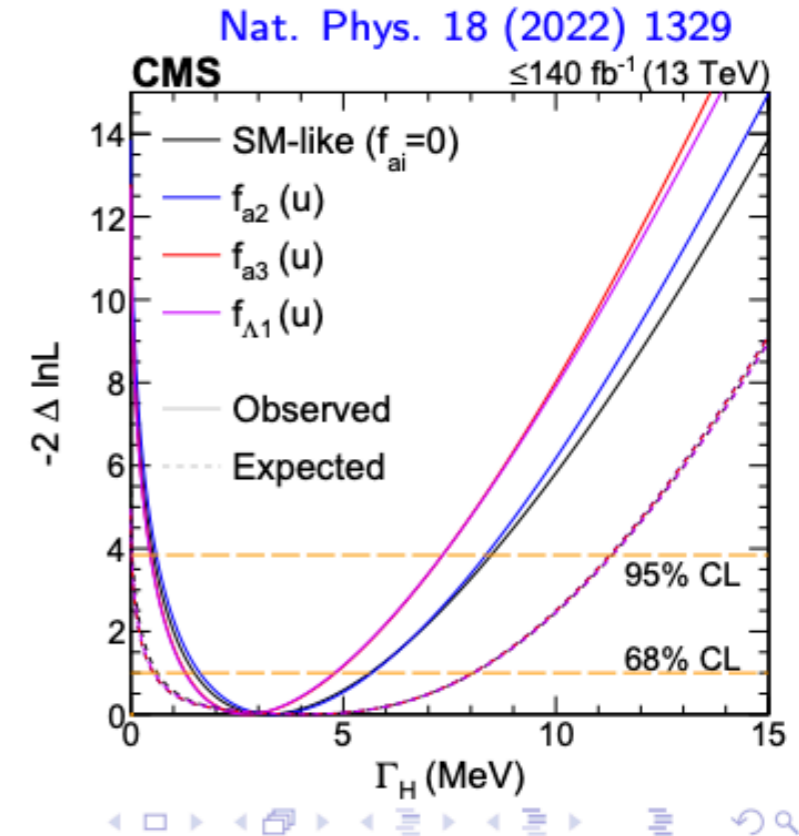
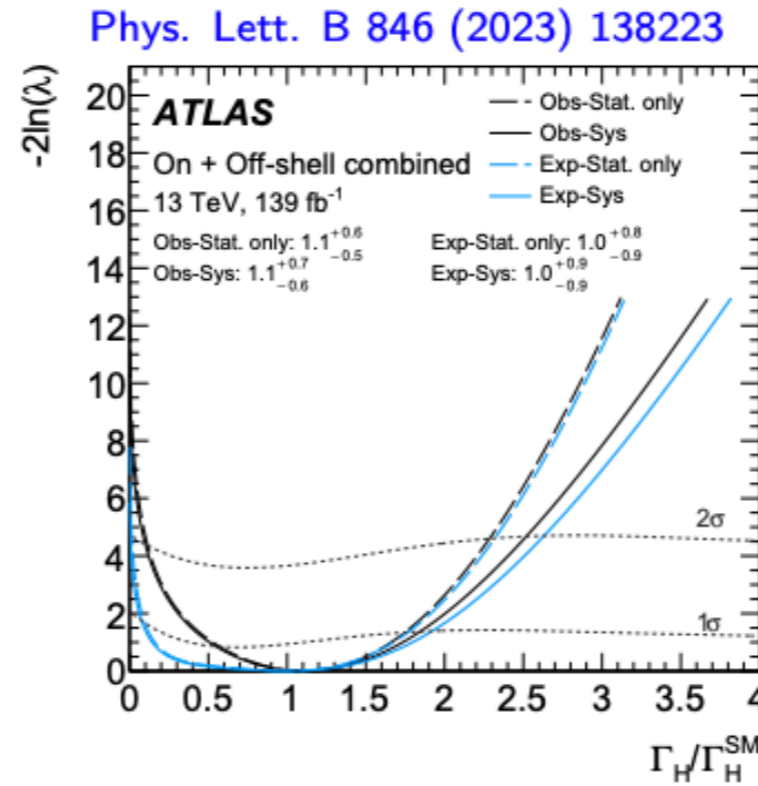
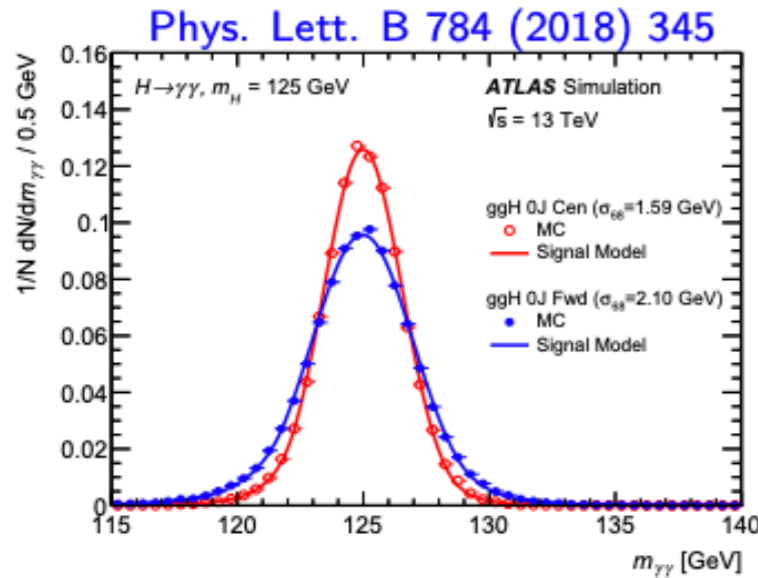
# Higgs width

- The SM prediction of total Higgs width is 4.1 MeV, which is inaccessible from direct measurements.
- The total width can be extracted from the ratios of yields of on-shell and off-shell Higgs boson events.
- $\Gamma_H = 4.5^{+3.3}_{-2.5}$  MeV (ATLAS) and  $3.2^{+2.4}_{-1.7}$  MeV (CMS)

$$\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ}^{\text{on-shell}} \sim \frac{g_{ggF}^2 g_{HZZ}^2}{m_H \Gamma_H}$$

$$\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ}^{\text{off-shell}} \sim \frac{g_{ggF}^2 g_{HZZ}^2}{m_{ZZ}^2}$$

$$\Gamma_H = \frac{\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ}^{\text{off-shell}}}{\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ}^{\text{on-shell}}}$$



# Anomalous couplings of $Hff$

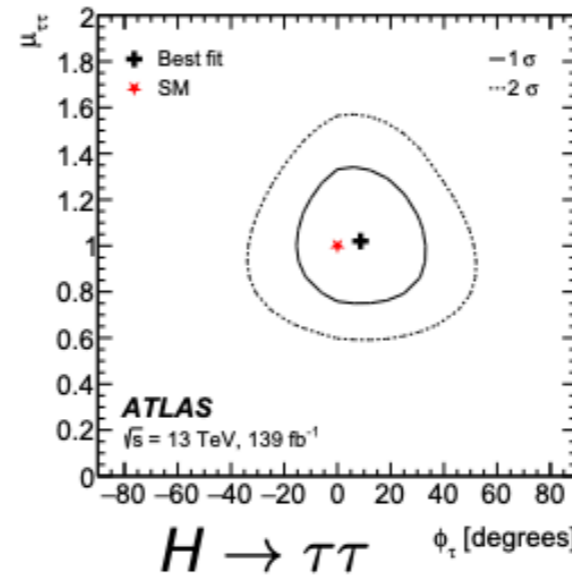
- The spin-parity quantum numbers of the Higgs boson are consistent with  $J^{PC} = 0^{++}$ .

- The anomalous effects of  $Hff$  can be parameterized with the amplitude as:

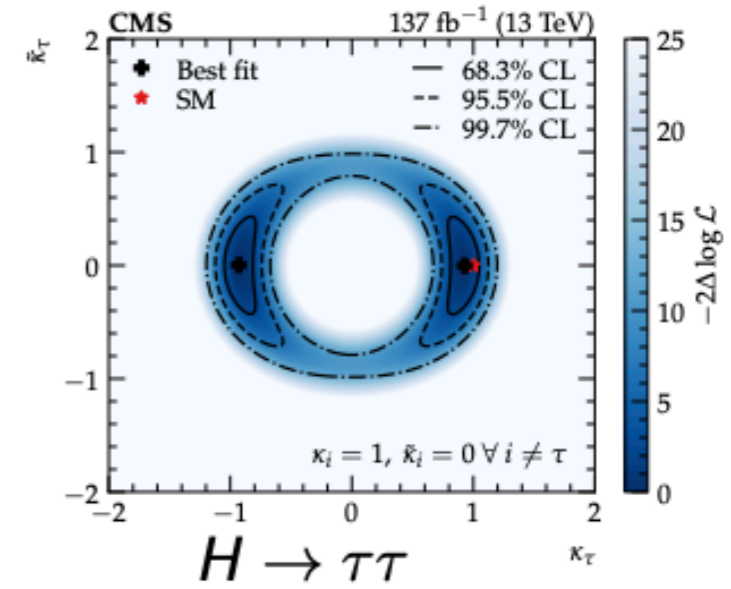
$$A(Hff) = -\frac{m_f}{v} \bar{\psi} (\kappa_f + i\tilde{\kappa}_f \gamma_5) \psi$$

- No deviation from SM has been found.

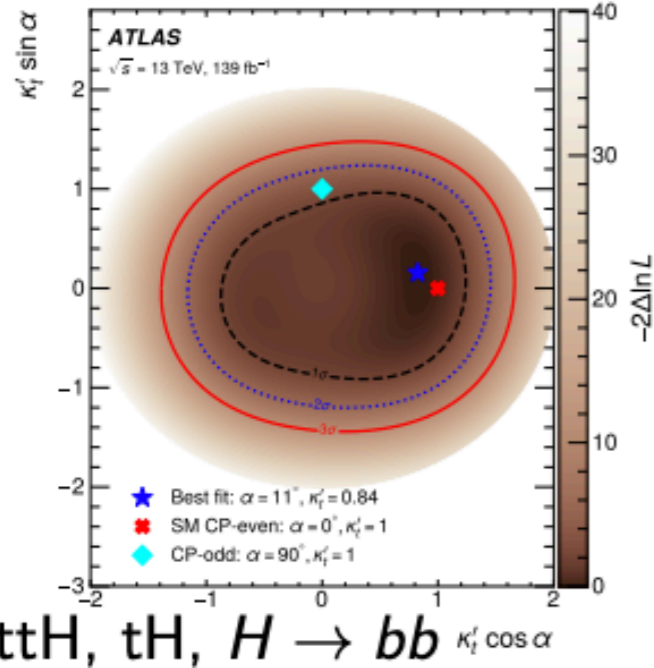
Eur. Phys. J. C 83 (2023) 563



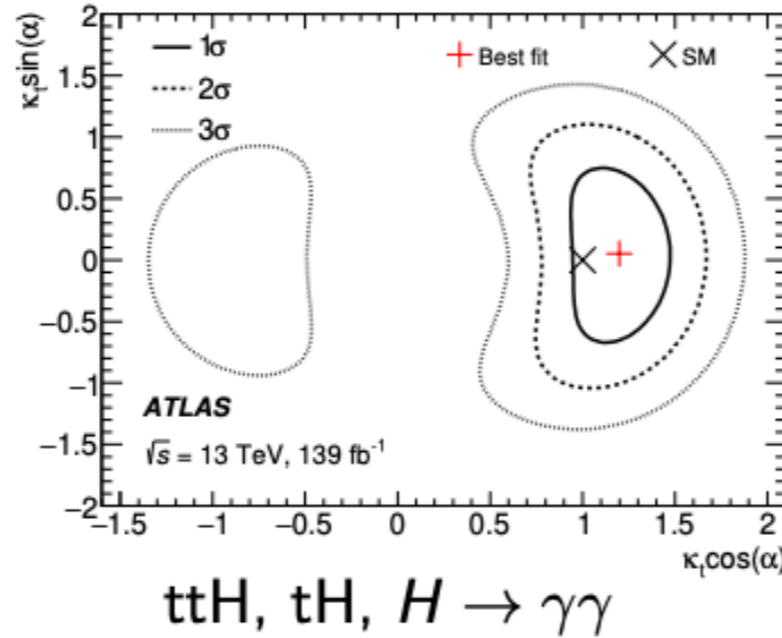
JHEP 06 (2022) 012



Phys. Lett. B 849 (2024) 138469



Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 061802



JHEP 07 (2023) 092

