



MISURA DELLE PROPRIETÀ CP E ACCOPPIAMENTI ANOMALI DEL BOSONE DI HIGGS

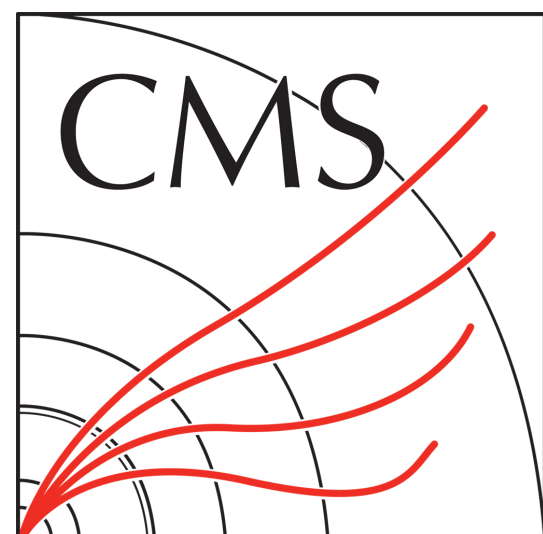
Federica De Raggi

¹INFN Roma-1, Roma, Italy
Sapienza, Università Roma1

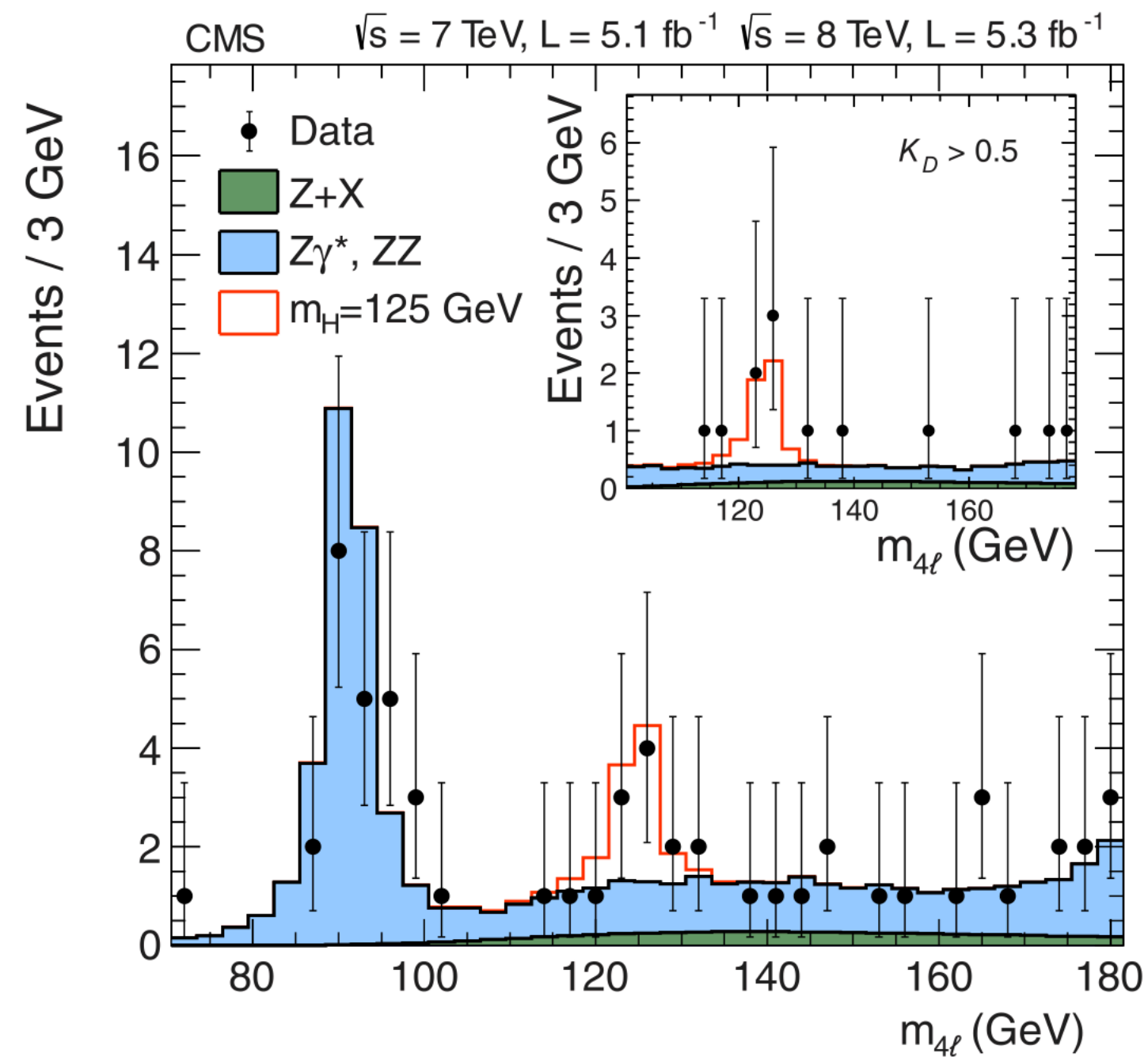
In rappresentanza della collaborazione CMS

**Incontri di fisica delle alte energie
Firenze - 2024**

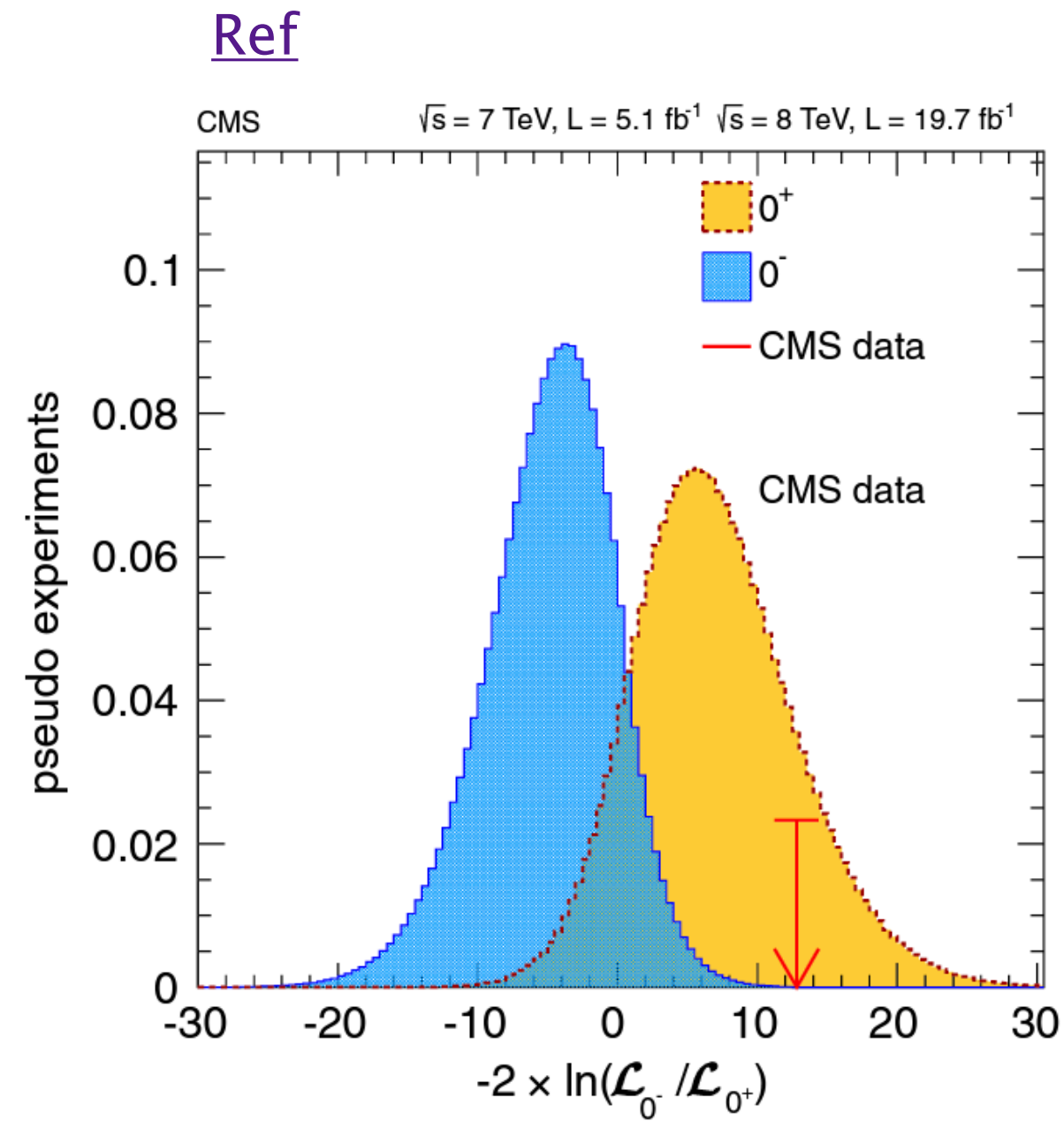
Florence
ITALY



PROPRIETÀ DEL BOSONE DI HIGGS



Ref

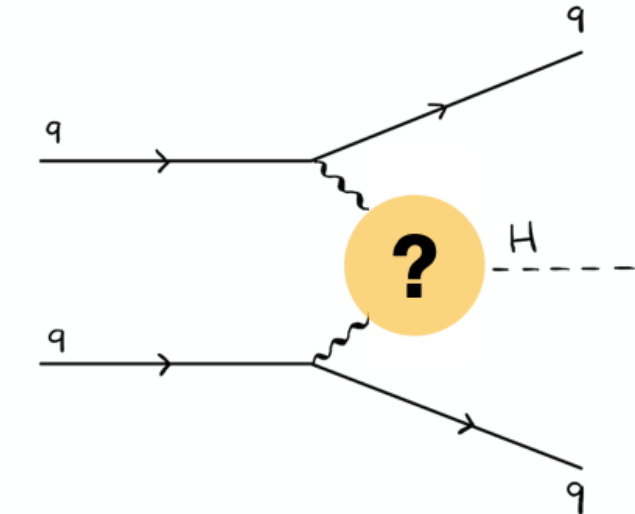


Particella scalare neutra

$$J^{PC} = 0^{++}$$

L'ipotesi di una particella pseudoscalare è stata esclusa al 99.95%

Obiettivo: essere sensibili ad accoppiamenti anomali BSM (Beyond Standard Model)



Che fine ha fatto l'antimateria?

L'asimmetria tra la materia e l'antimateria implica violazione CP. Lo Standard Model (SM) può spiegare solo parzialmente la violazione di CP necessaria → cerchiamo altre fonti di violazione

$$CP | \text{H} \rangle = | \text{H} \rangle$$

(Note: The diagram shows a Higgs boson with a question mark, indicating CP violation.)

PIÙ DATI



ACCOPPIAMENTI BSM | HVV

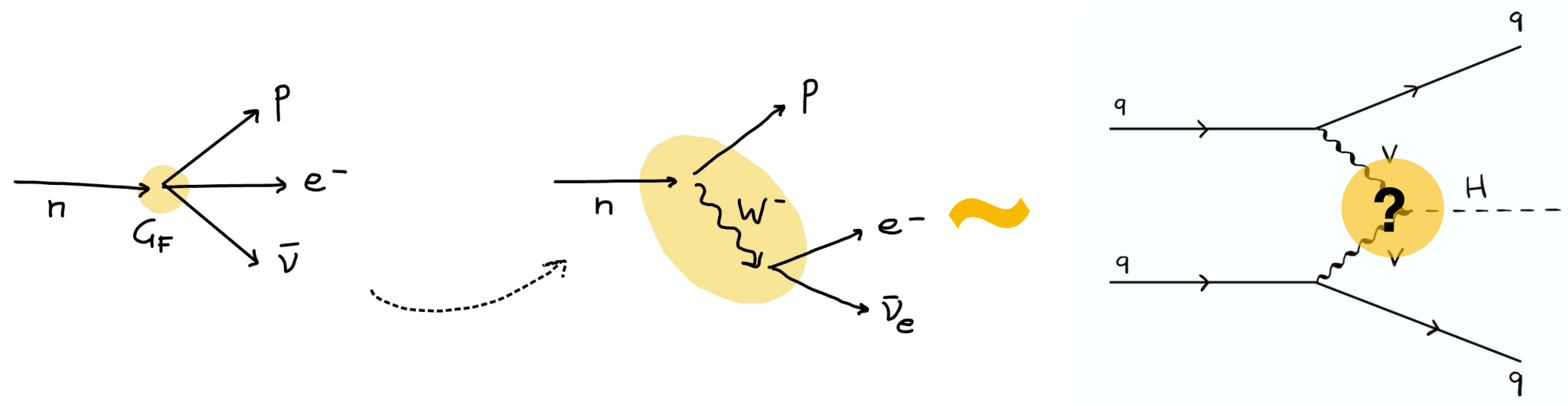
$$A(HVV) \sim \left[a_1^{VV} + \frac{k_1^{VV} q_{V1}^2 + k_2^{VV} q_{V2}^2}{(\Lambda_1^{VV})^2} \right] m_{V1}^2 \epsilon_{V1}^* \epsilon_{V2}^* + a_2^{VV} f_{\mu\nu}^{*(1)} f^{*\mu\nu(2)} + a_3^{VV} f_{\mu\nu}^{*(1)} \tilde{f}^{*\mu\nu(2)}$$

SM : $VV = ZZ, WW$
↑
↑
↑
↑

Tree level
||
Loop level

Scala di nuova fisica
($\Lambda_1 = 1TeV$)
CP pari
CP dispari

L'accoppiamento "puntuale" (G_F) diventa una teoria completa quando si sondano scale maggiori ($M_W \sim 100 GeV$)



Approccio AC (Anomalous Couplings)

$$a_i^{ZZ} = a_i^{WW}$$

4 accoppiamenti anomali

$$a_2(CP)$$

$$a_3(CP)$$

$$a_{\Lambda_1}(CP)$$

$$a_{\Lambda_1}^{Z\gamma}(CP)$$

ACCOPPIAMENTI BSM | HVV

$$A(HVV) \sim \left[a_1^{VV} + \frac{k_1^{VV} q_{V1}^2 + k_2^{VV} q_{V2}^2}{(\Lambda_1^{VV})^2} \right] m_{V1}^2 \epsilon_{V1}^* \epsilon_{V2}^* + a_2^{VV} f_{\mu\nu}^{*(1)} f^{*\mu\nu(2)} + a_3^{VV} f_{\mu\nu}^{*(1)} \tilde{f}^{*\mu\nu(2)}$$

Tree level
Loop level

SM : $VV = ZZ, WW$
Scala di nuova fisica
($\Lambda_1 = 1TeV$)
CP pari
CP dispari

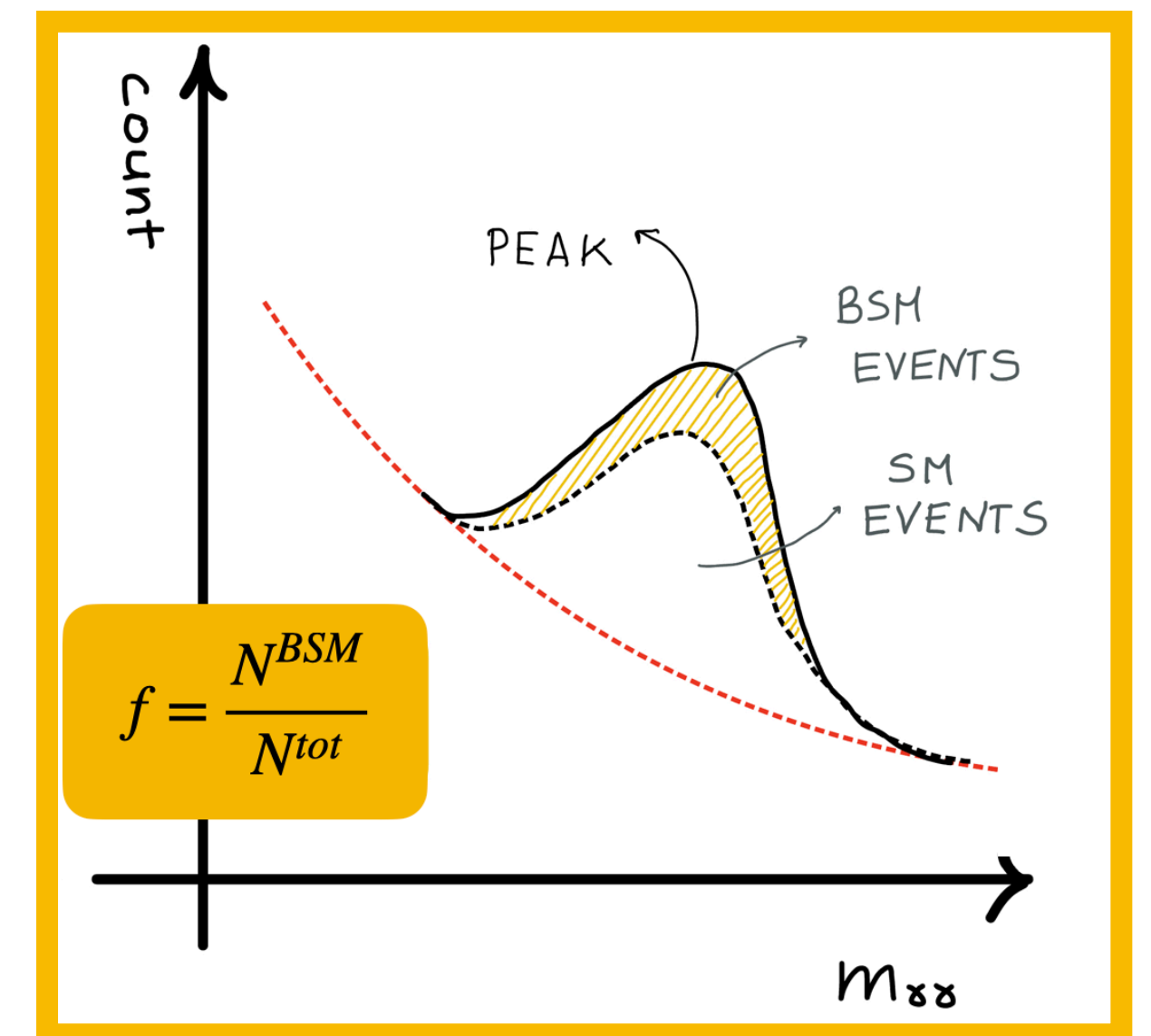
FRAZIONE SEZIONE D'URTO EFFETTIVA

$$f_{ai} = \frac{|a_i|^2 \sigma_i}{\sum_{j=1,2,3,\Lambda_1} |a_j|^2 \sigma_j} \quad \phi_{ai} = \arg\left(\frac{a_i}{a_1}\right)$$

- ▶ Indipendenti da Γ_H
- ▶ Limitato da $[-1,1]$

$$f_{ai} = f_{a2}, f_{a3}, f_{\Lambda_1}, f_{\Lambda_1}^{Z\gamma}$$

σ_i cross section dei processi con $a_i = 1$



▶ ACCOPPIAMENTI BSM | Hff

$\tilde{\psi}_f, \psi_f \rightarrow$ Spinori di Dirac

$m_f \rightarrow$ massa fermione

$v \rightarrow$ valore di aspettazione del vuoto

$k_f \rightarrow$ modificatore dell'accoppiamento di Yukawa CP pari (**SM** : $k_f = 1$)

$\tilde{k}_f \rightarrow$ modificatore dell'accoppiamento di Yukawa CP dispari (**SM** : $\tilde{k}_f = 0$)

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

SM CP dispari

FRAZIONE SEZIONE D'URTO EFFETTIVA

$$f_{CP}^{Hff} = \frac{|\tilde{k}_f|^2}{|k_f|^2 + |\tilde{k}_f|^2} \text{sign}\left(\frac{\tilde{k}_f}{k_f}\right)$$

$$\alpha^{Hff} = \tan^{-1}\left(\frac{\tilde{k}_f}{k_f}\right)$$

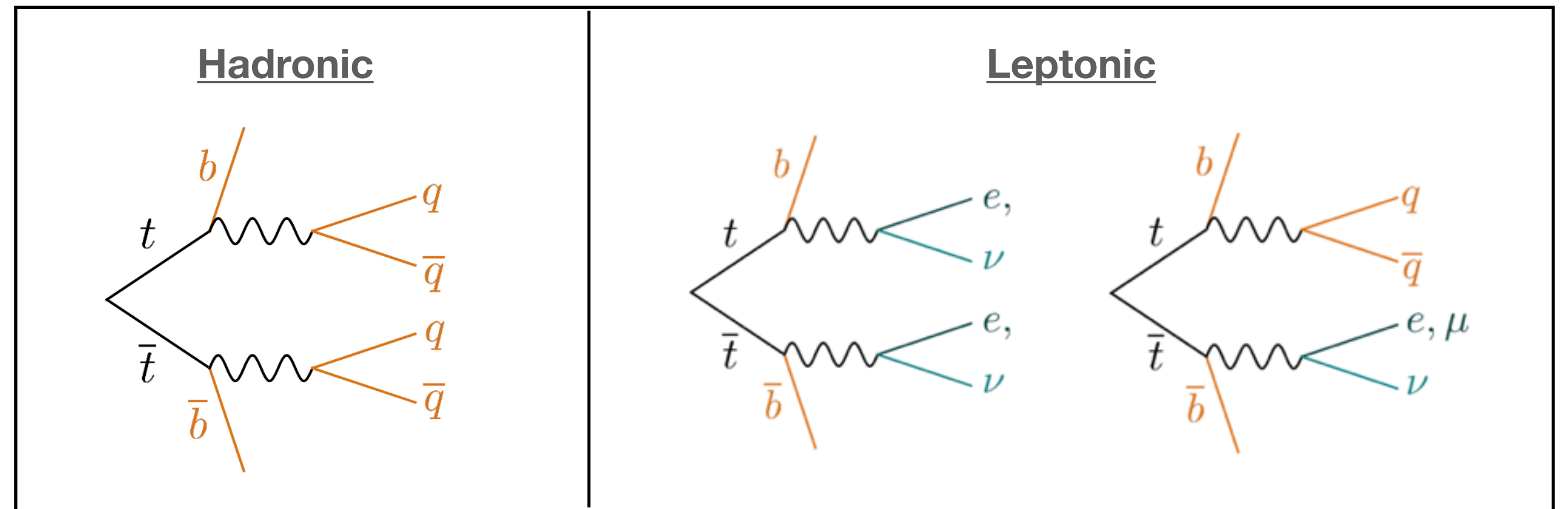
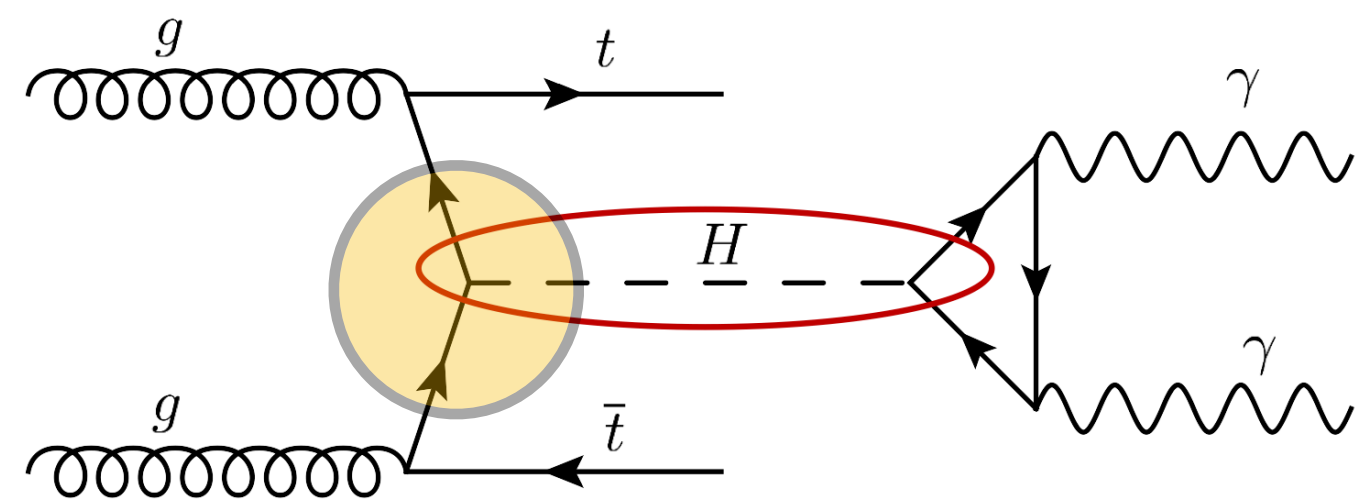
Canale	Misura	Combinato con	REF
$ttH [H] \rightarrow \gamma\gamma$	Hff		Phys. Rev. Lett. 125, 061801 (2020)
$H \rightarrow ZZ$	HVV, Hff	$H \rightarrow \gamma\gamma$	Phys.Rev.D 104 (2021) 5, 052004
$H \rightarrow \tau\tau$	HVV, Hff	$H \rightarrow ZZ + H \rightarrow \tau\tau$	Phys. Rev. D 108 (2023) 032013

Canale	Misura	Combinato con	REF
$ttH [H] \rightarrow \gamma\gamma$	Hff		Phys. Rev. Lett. 125, 061801 (2020)
$H \rightarrow ZZ$	HVV, Hff	$H \rightarrow \gamma\gamma$	Phys.Rev.D 104 (2021) 5, 052004
$H \rightarrow \tau\tau$	HVV, Hff	$H \rightarrow ZZ + H \rightarrow \tau\tau$	Phys. Rev. D 108 (2023) 032013

“Measurements of ttH production and the CP structure of the Yukawa interaction between the Higgs boson and the top quark in the diphoton decay channel”

▶ ttH [H] → γγ | accoppiamento Htt

- ▶ Prima osservazione dell'accoppiamento Htt in un singolo canale di decadimento
- ▶ Prima analisi della struttura CP in ttH



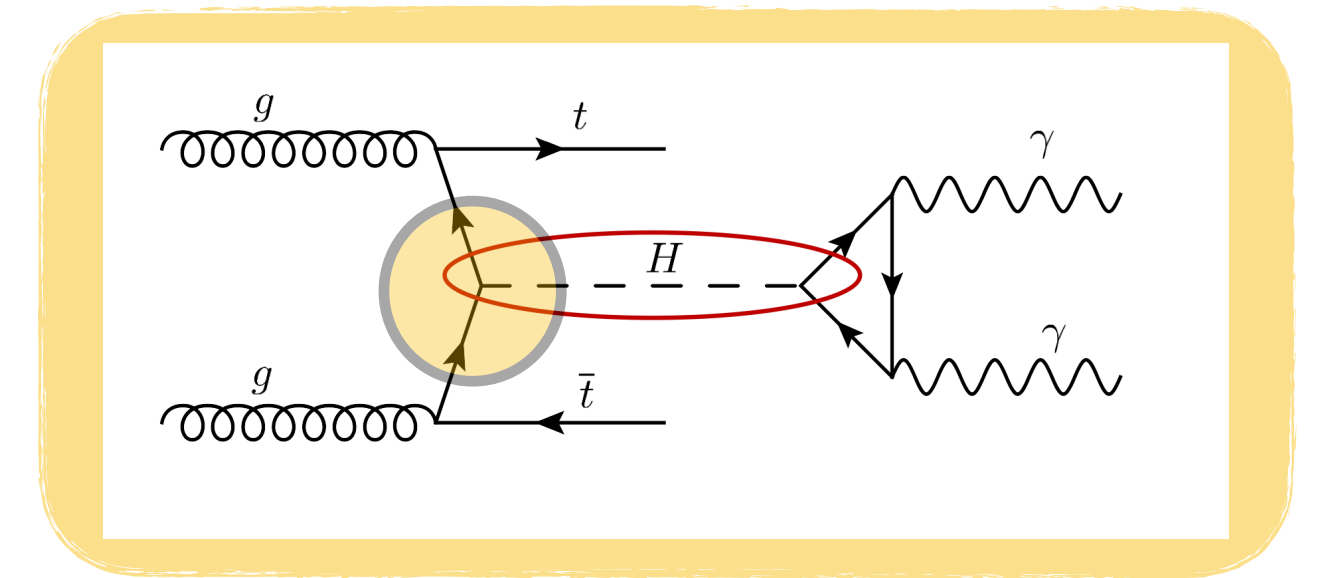
- ▶ BDT BKG per distinguere tra eventi ttH e fondo ($\gamma\gamma+j$ / $tt + \gamma\gamma$)
- ▶ Ulteriore categorizzazione usando variabili MELA (Matrix Element Likelihood Analysis)

$$D_{alt}(\Omega) = \frac{P_{SM}(\Omega)}{P_{SM}(\Omega) + P_{alt}(\Omega)}$$

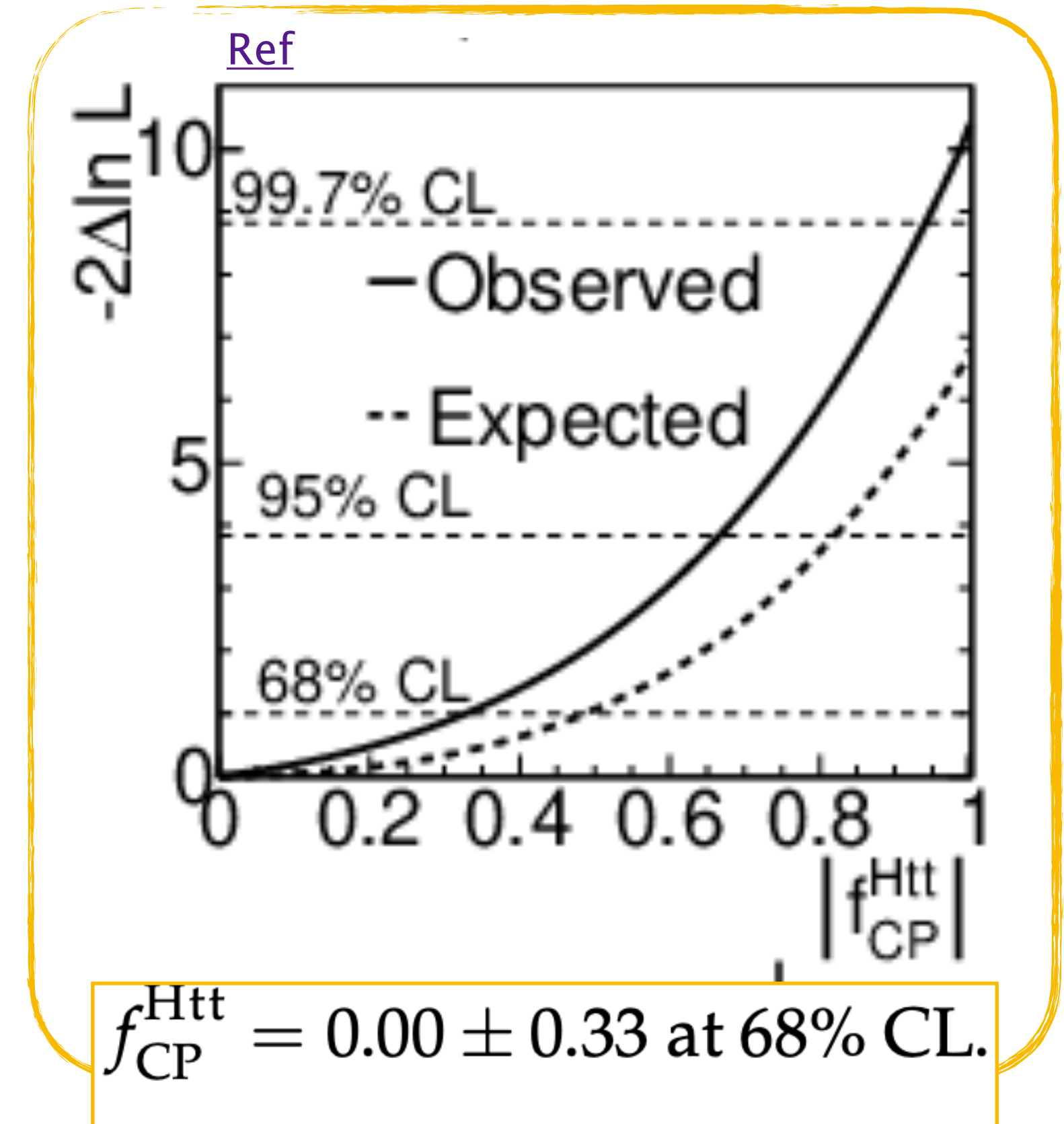
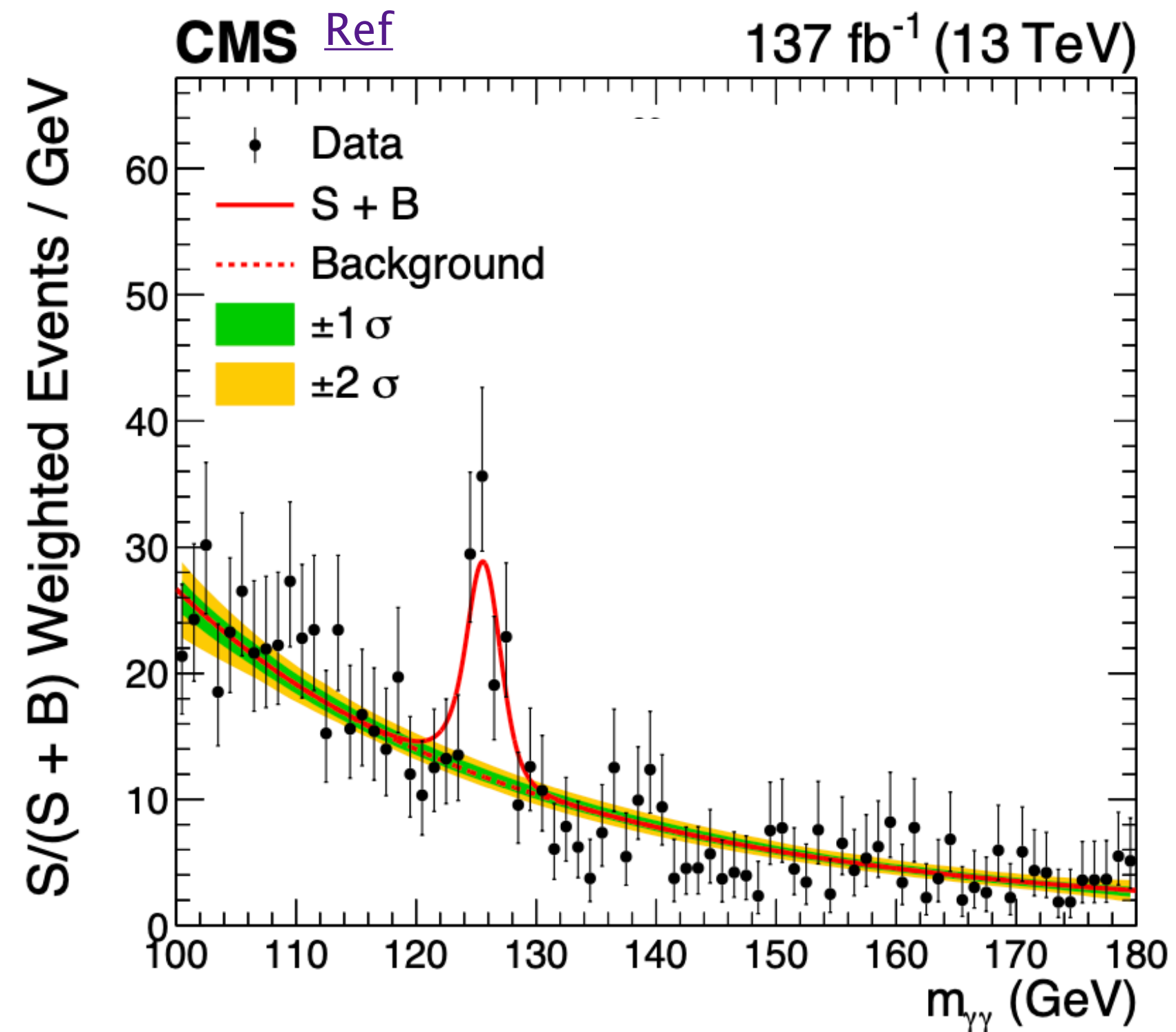
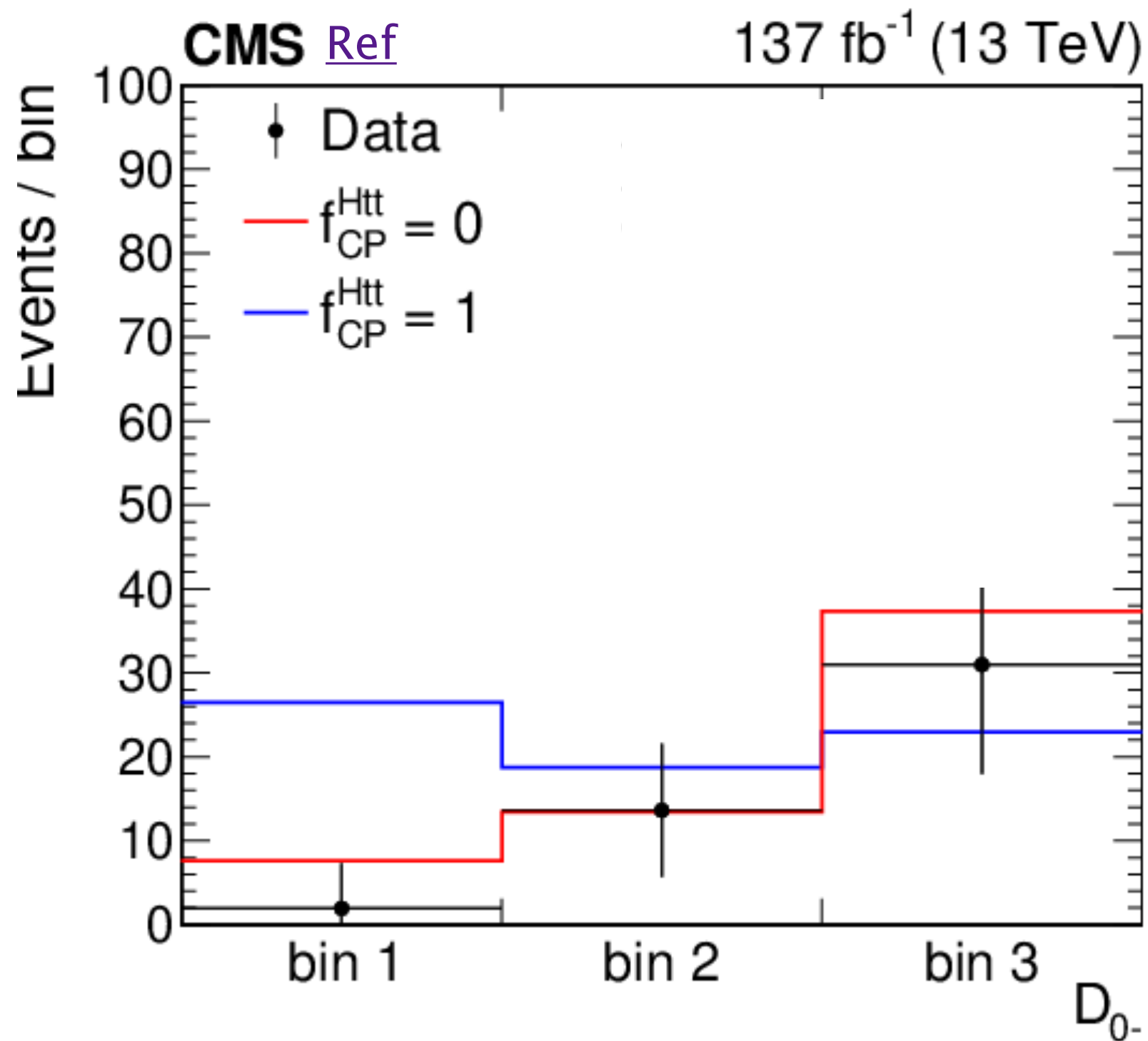
$$D_{0-}(\Omega) = \frac{P_{SM}(\Omega)}{P_{SM}(\Omega) + P_{0-}(\Omega)}$$

Ω = informazioni cinematiche
alt = ipotesi alternative

▶ $ttH [H] \rightarrow \gamma\gamma$ | accoppiamento $H\gamma\gamma$



Le categorie sono state definite usando l'output del BDT (BDT bkg) e D_0^- massimizzando a sensibilità dell'analisi a contributi anomali





ANALISI DI CMS

Canale	Misura	Combinato con	REF
$ttH [H] \rightarrow \gamma\gamma$	Hff		Phys. Rev. Lett. 125, 061801 (2020)
$H \rightarrow ZZ$	HVV, Hff	$H \rightarrow \gamma\gamma$	Phys.Rev.D 104 (2021) 5, 052004
$H \rightarrow \tau\tau$	HVV, Hff	$H \rightarrow ZZ + H \rightarrow \tau\tau$	Phys. Rev. D 108 (2023) 032013

“Constraints on anomalous Higgs boson couplings to vector bosons and fermions in its production and decay using the four-lepton final state”

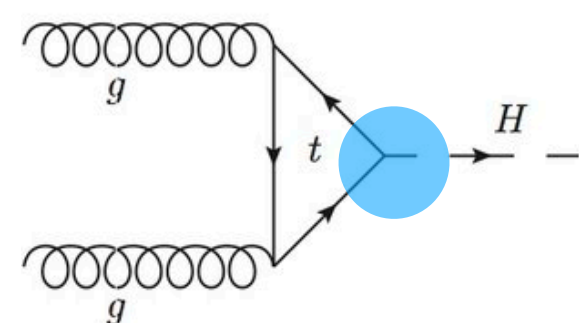
ON SHELL H-4l | accoppiamenti HVV, Hff

1. Canali considerati: $2e2\mu$, 4μ e $4e$ nel decadimento dell'Higgs
2. Variabili MELA per distinguere segnale da fondo
3. Definizione di categorie specifiche per diversi accoppiamenti anomali e diverse interazioni HVV e Hff

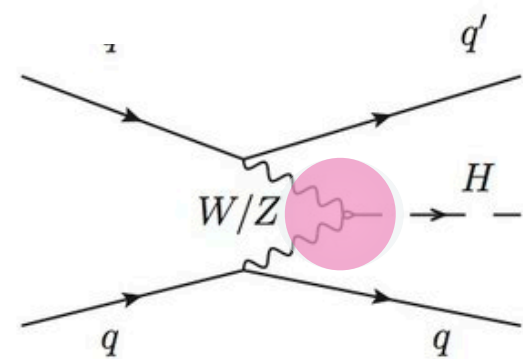
HVV : produzione e decadimento (V=ZZ,WW)

Htt : produzione

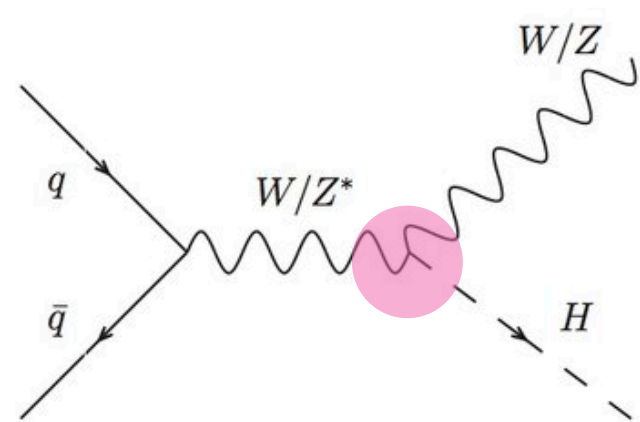
PRODUZIONE



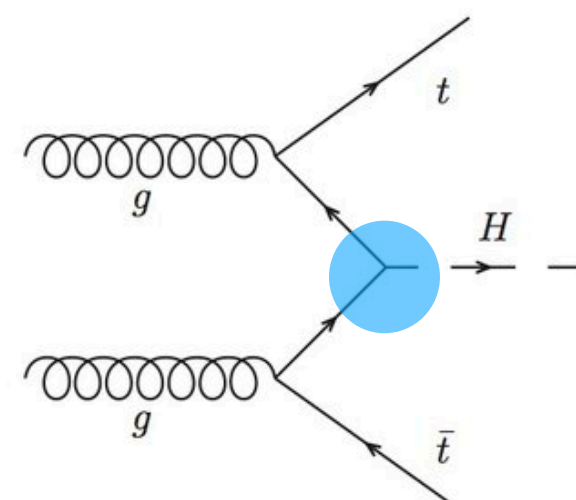
Fusione dei gluoni



Fusione dei bosoni vettori

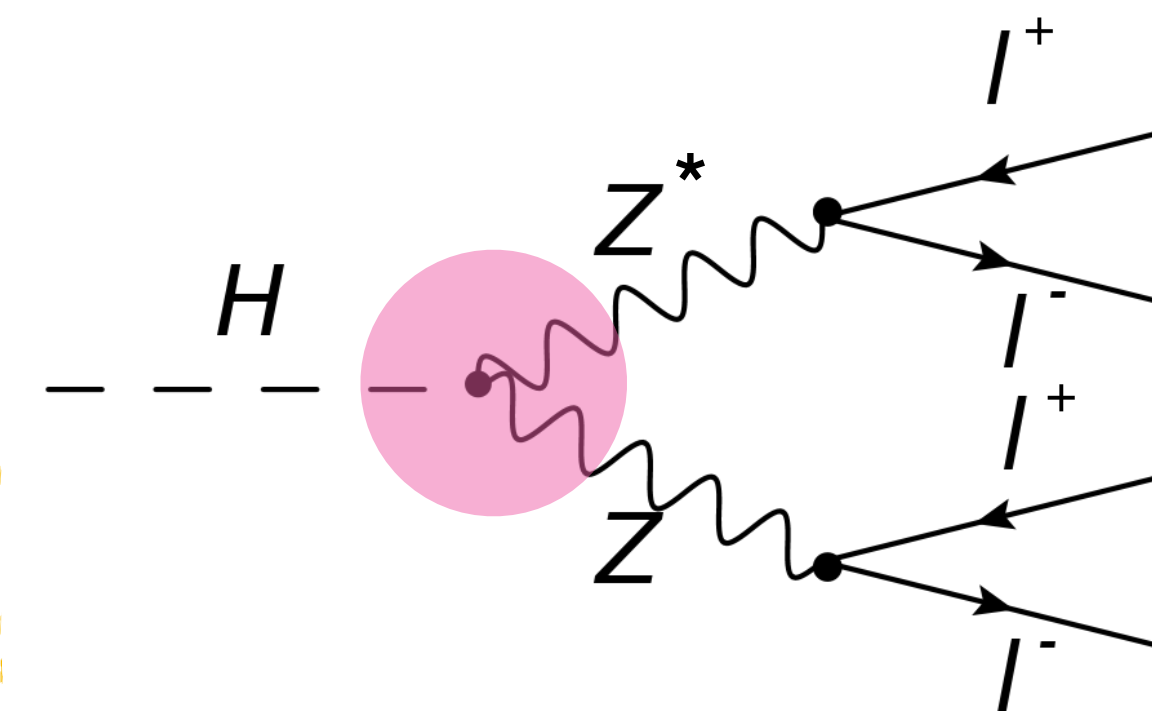


WW/ZZ bremsstrahlung



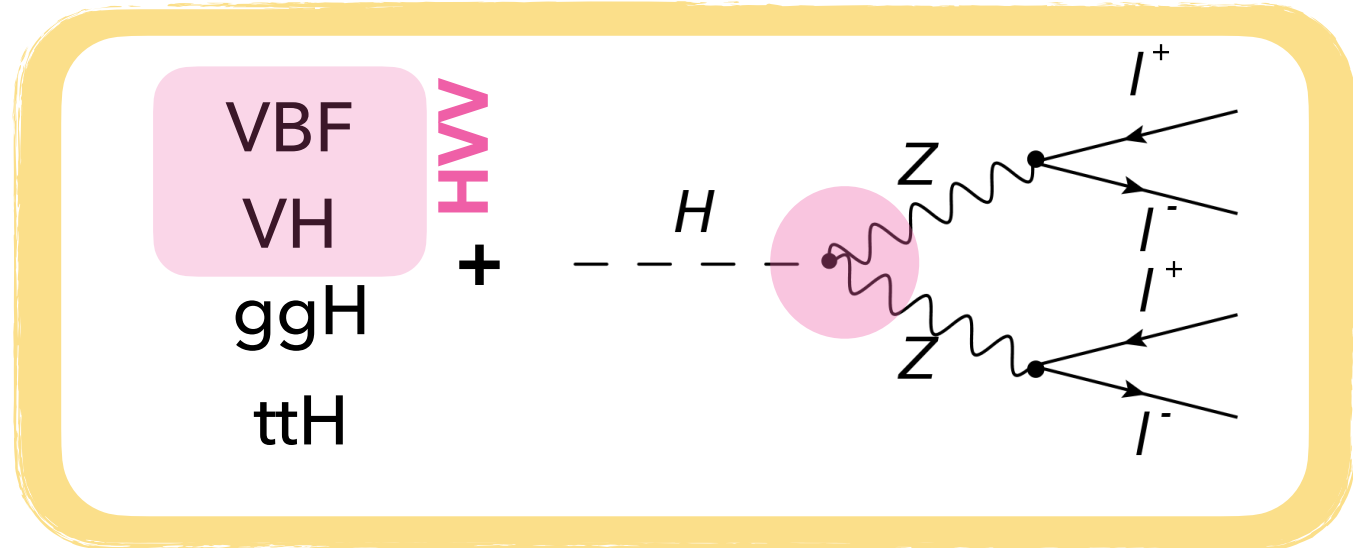
Fusione t-quark

DECADIMENTO





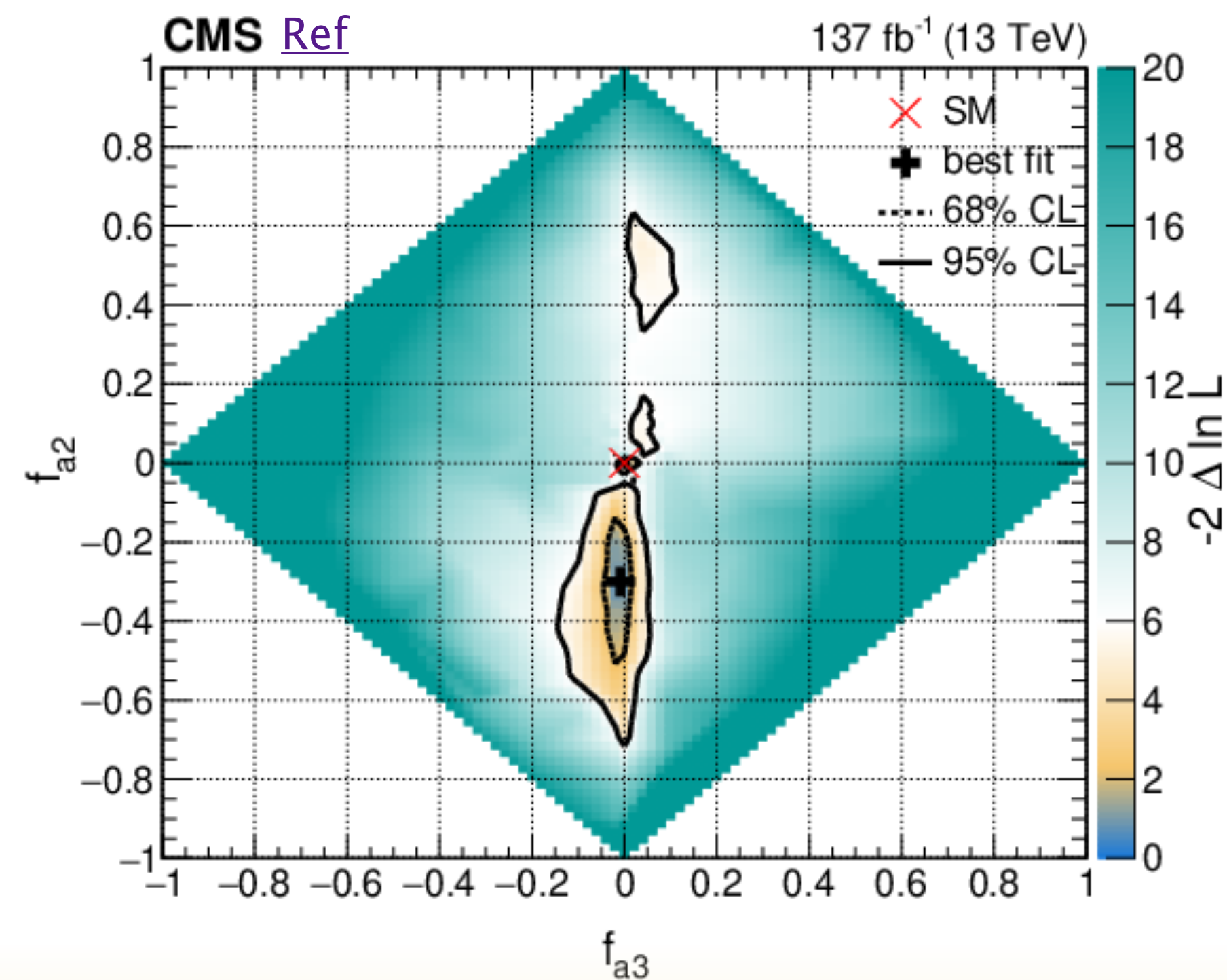
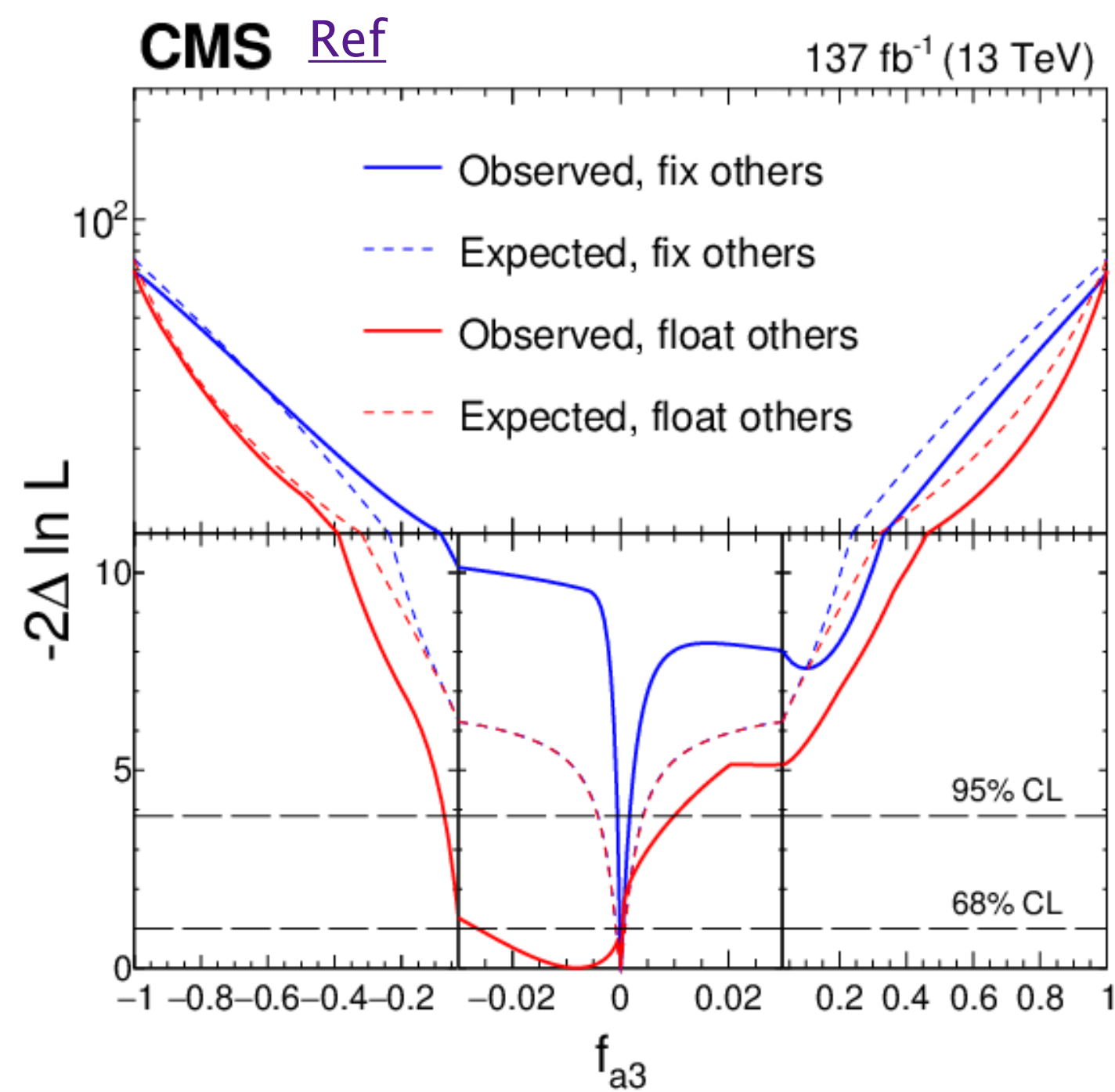
ON SHELL H-4l | accoppiamento HVV



Fix others: solo un $f_{ai} \neq 0$; gli altri fissati a 0

Floating others: $f_{ai} \neq 0$; gli altri liberi di variare

Scan 2D con 2 accoppiamenti anomali liberi



Expected

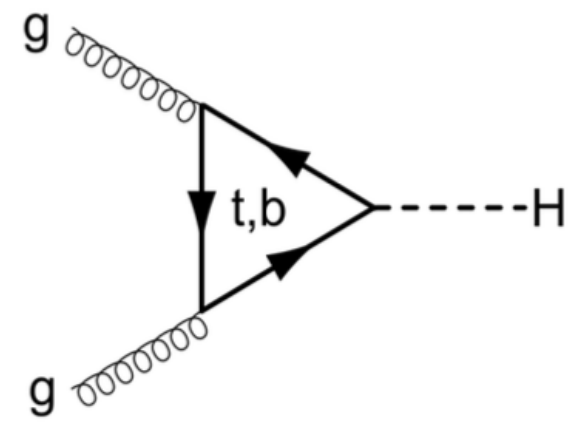
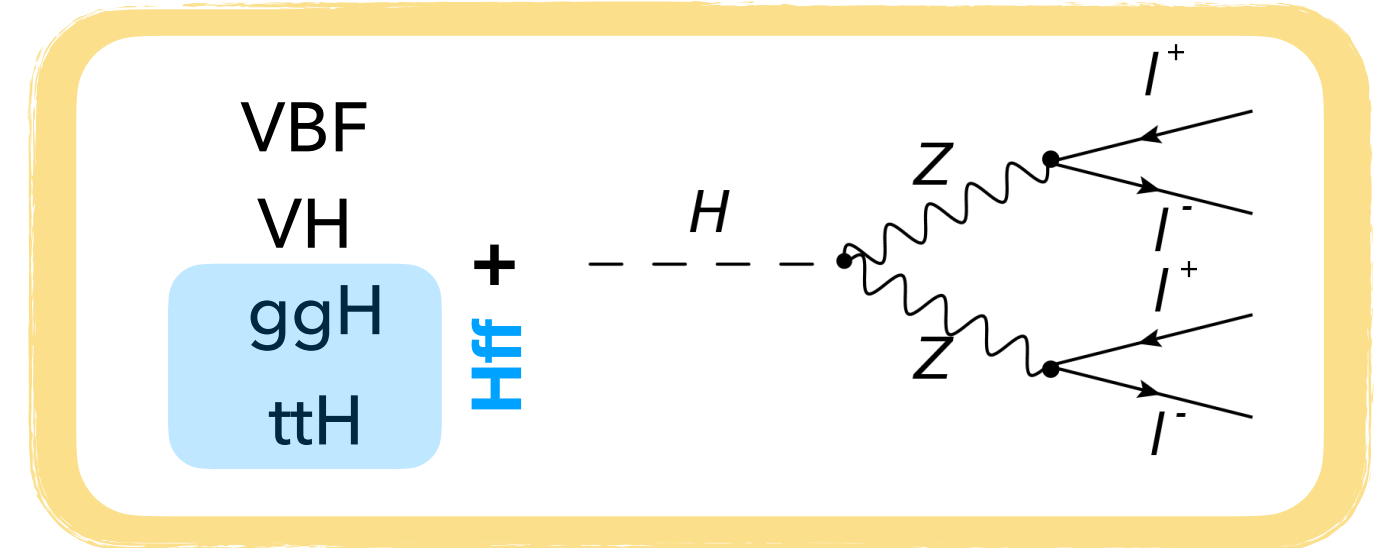
Observed

Fix Others : f_{a3}

$0.4^{+4.4}_{-0.7} \times 10^{-4}$

$(0 \pm 8) \times 10^{-4}$

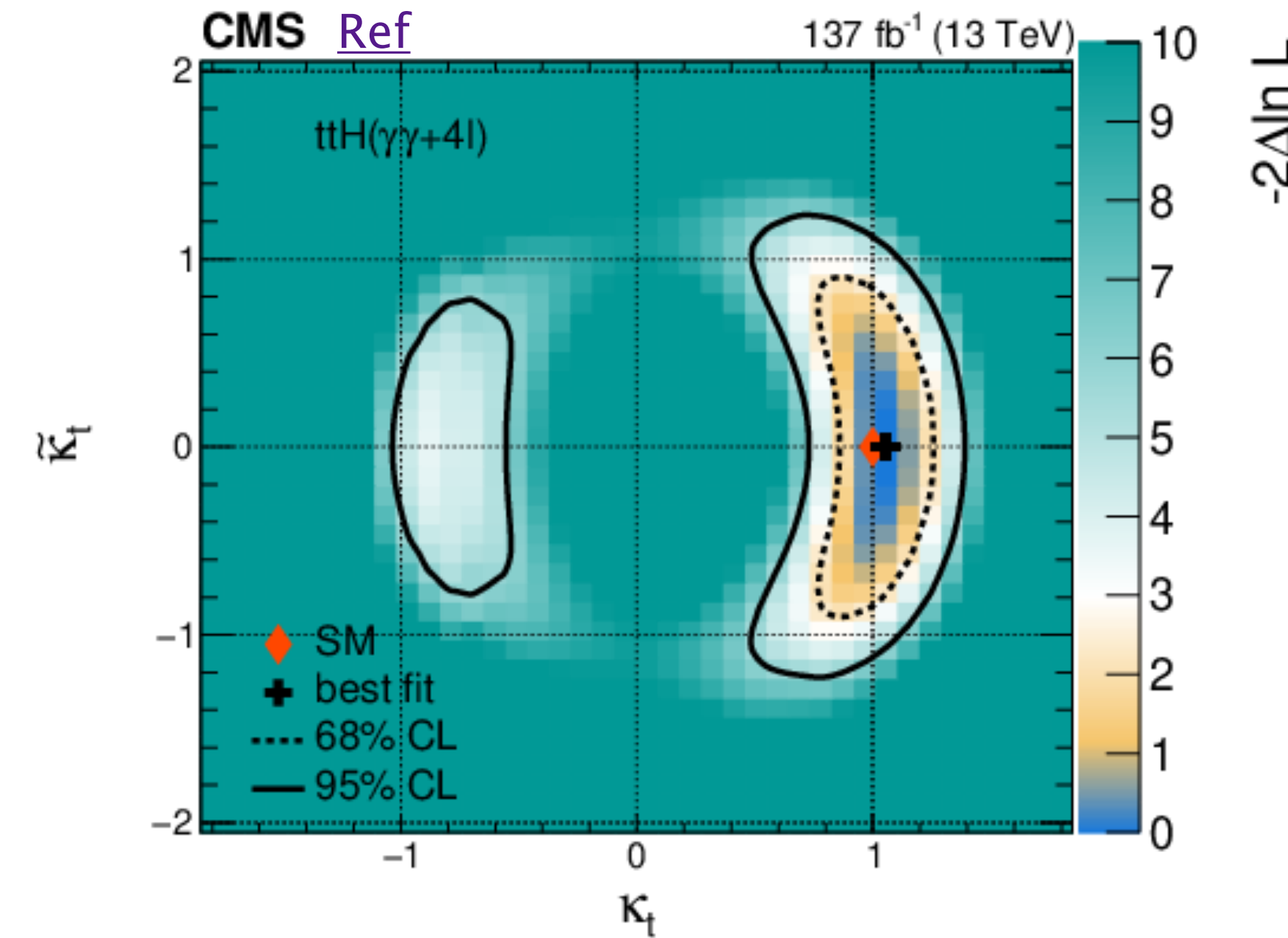
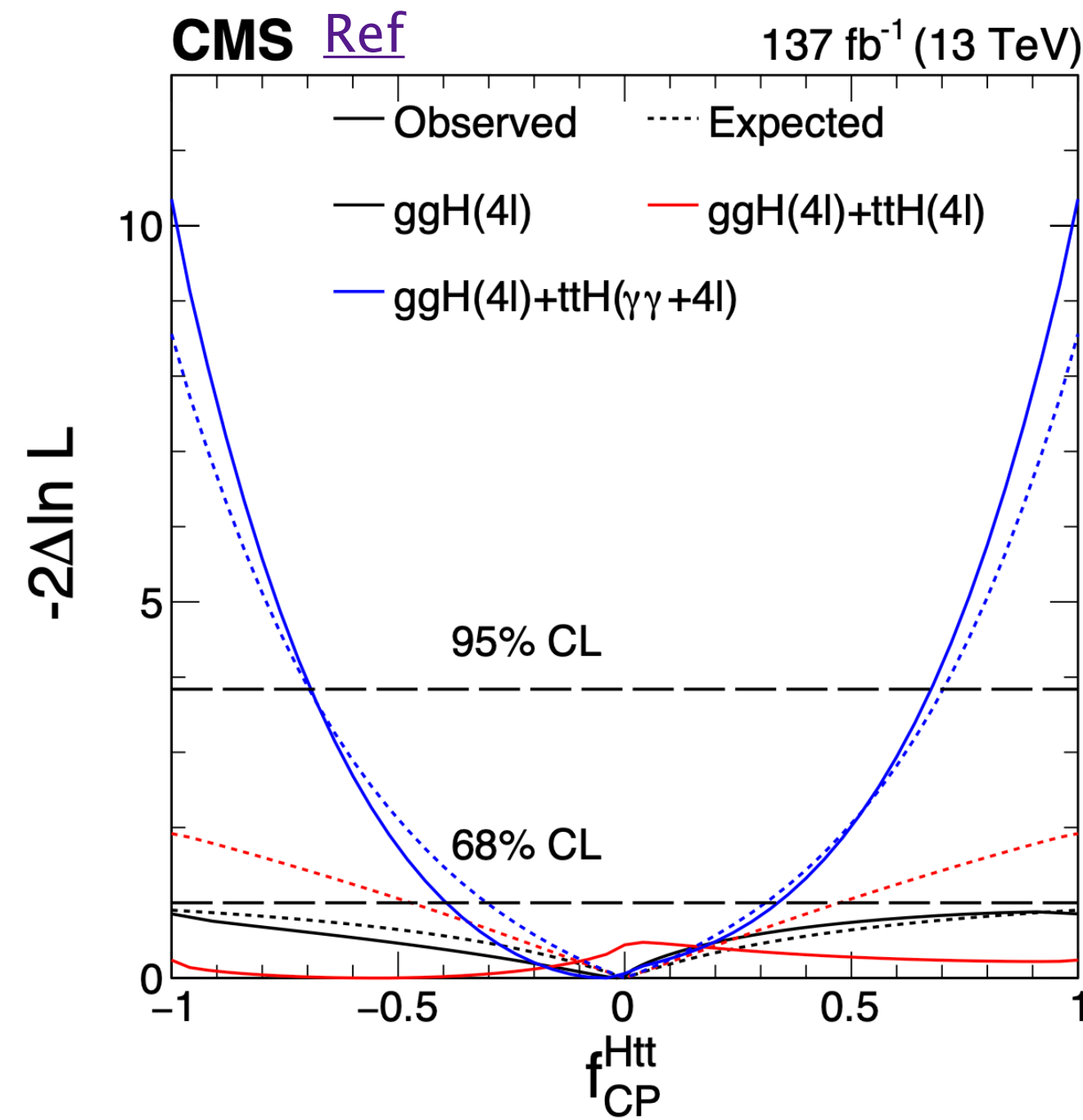
ON SHELL H-4l | accoppiamento Htt



Loop ggH dominato dal t-quark

$$|f_{CP}^{Hff}| = \left(1 + 2.38 \left[\frac{1}{|f_{a3}^{ggH}|} - 1 \right] \right)^{-1}$$

limite sull'accoppiamento Htt usando i metodi di produzione ttH & Hgg



f_{CP}^{Htt}	Channels	Expected	Observed
f_{CP}^{Htt}	ggH & tH & ttH (H → 4l & γγ)	$-0.04^{+0.38}_{-0.36}$	-0.0 ± 0.3



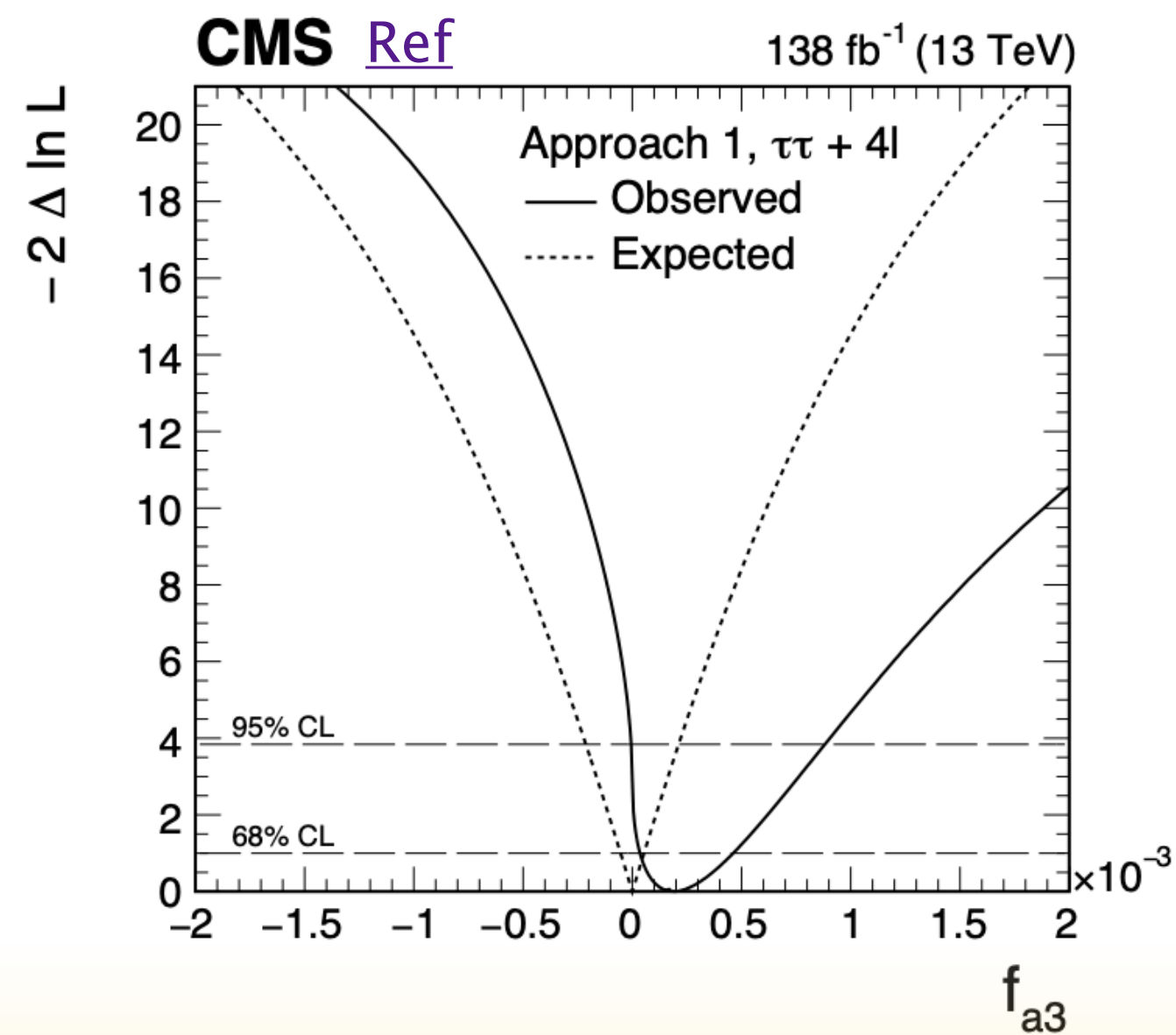
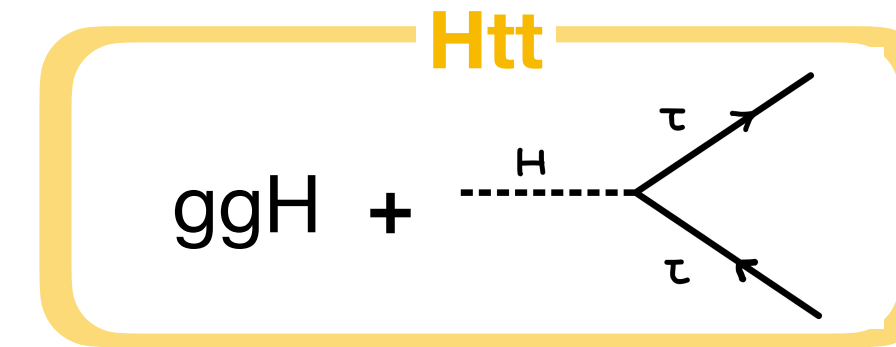
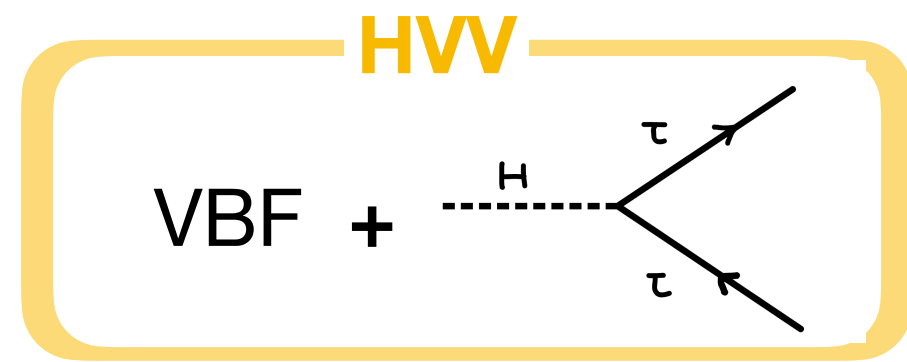
ANALISI DI CMS

Canale	Misura	Combinato con	REF
$ttH [H] \rightarrow \gamma\gamma$	Hff		Phys. Rev. Lett. 125, 061801 (2020)
$H \rightarrow ZZ$	HVV, Hff	$H \rightarrow \gamma\gamma$	Phys.Rev.D 104 (2021) 5, 052004
$H \rightarrow \tau\tau$	HVV, Hff	$H \rightarrow ZZ + H \rightarrow \tau\tau$	Phys. Rev. D 108 (2023) 032013

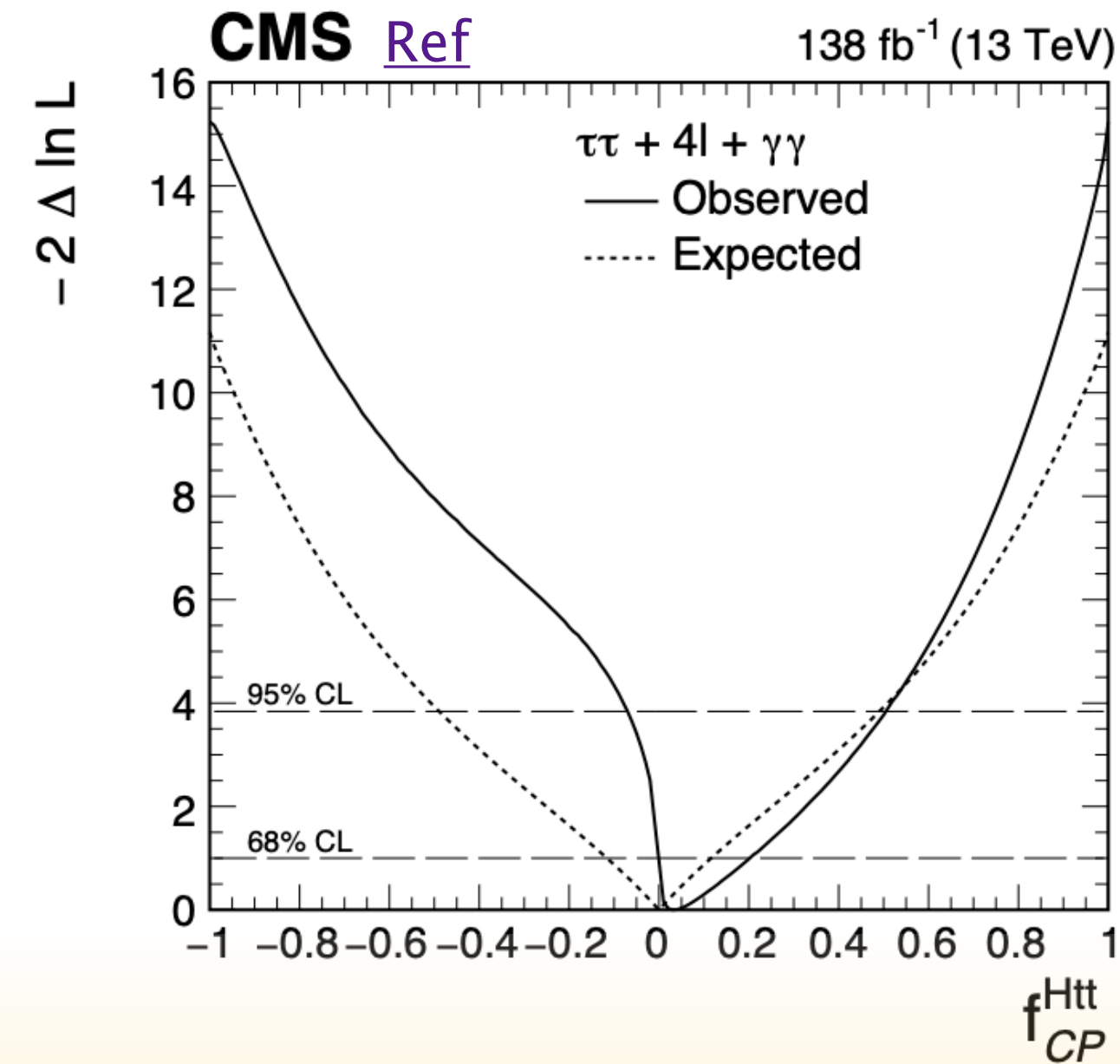
“Constraints on anomalous Higgs boson couplings to vector bosons and fermions from the production of Higgs bosons using the $\tau\tau$ final state”

ON SHELL H- $\tau\tau$ | accoppiamento HVV & Htt

Canali considerati: $\tau_h\tau_h, \mu\tau_h, e\tau_h, e\mu$



	Aspettato	Osservato
f_{a3}	$0.20^{+0.26}_{-0.16}$	0.00 ± 0.05



	Aspettato	Osservato
f_{CP}^{Htt}	$0.03^{+0.17}_{-0.03}$	0.00 ± 0.12

CONCLUSIONI

- ▶ Gli studi sugli accoppiamenti anomali sono fondamentali per capire la natura del bosone di Higgs
- ▶ Sono state trattate le analisi con i limiti più stringenti alla violazione CP e agli accoppiamenti anomali presentati dall'esperimento CMS
- ▶ Un campo in forte crescita con recenti novità e possibilità di nuove interpretazione
- ▶ Analisi limitate dalle incertezze statistiche perciò ci aspettiamo dei miglioramenti dall'aumento di dati

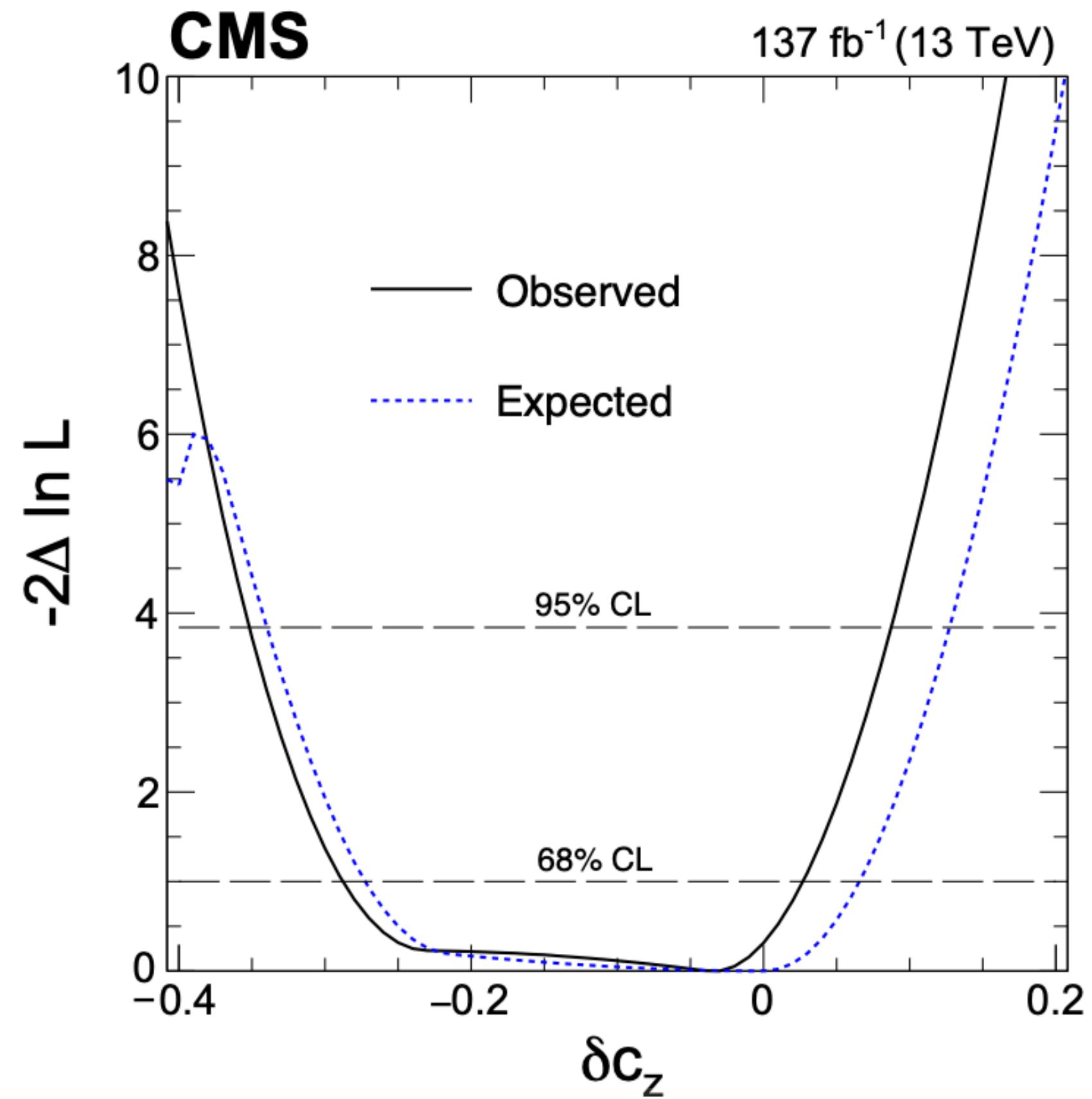
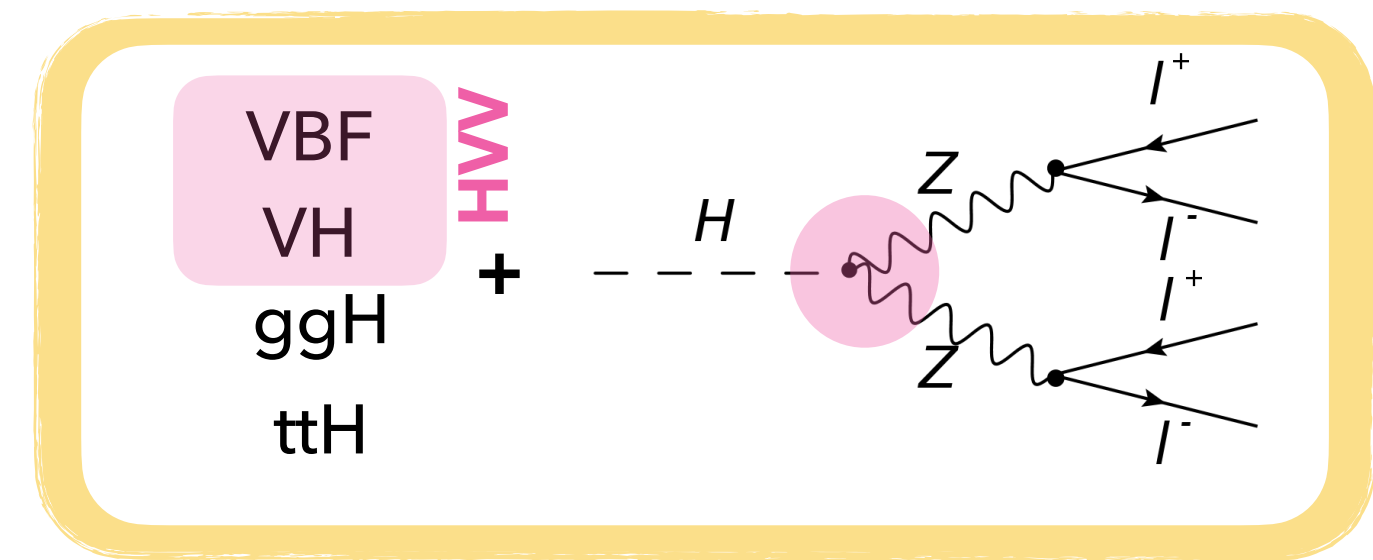
CONCLUSIONI

- ▶ Gli studi sugli accoppiamenti anomali sono fondamentali per capire la natura del bosone di Higgs
- ▶ Sono state trattate le analisi con i limiti più stringenti alla violazione CP e agli accoppiamenti anomali presentati dall'esperimento CMS
- ▶ Un campo in forte crescita con recenti novità e possibilità di nuove interpretazione
- ▶ Analisi limitate dalle incertezze statistiche perciò ci aspettiamo dei miglioramenti dall'aumento di dati

Grazie dell'attenzione



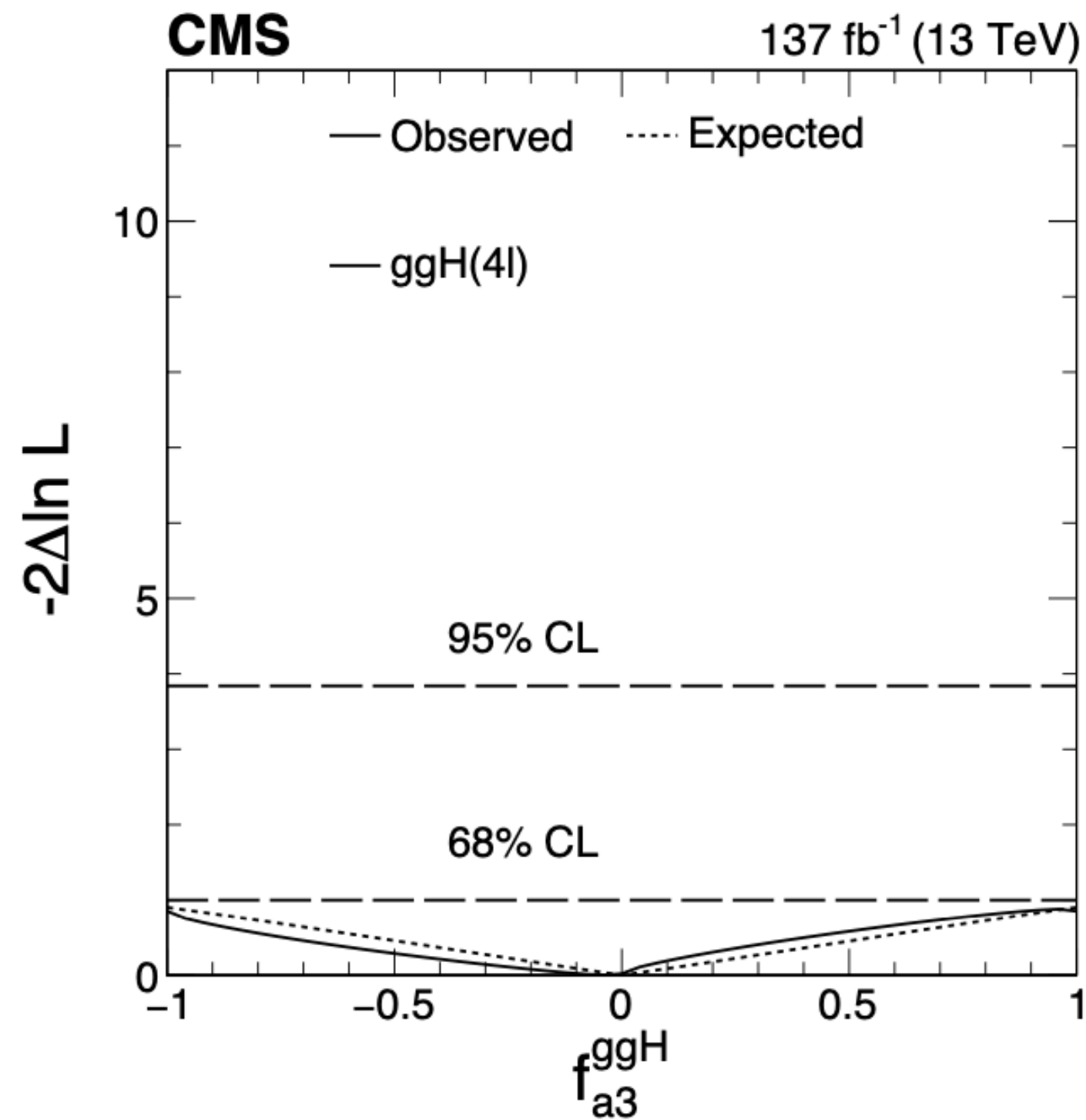
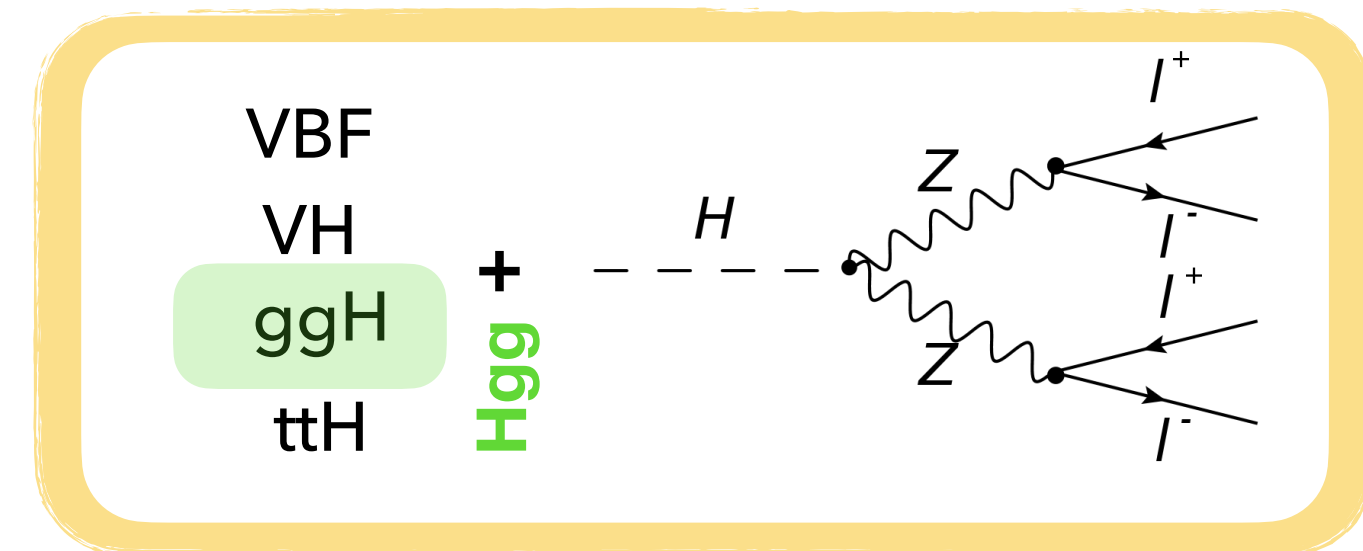
ON SHELL H-4l | accoppiamento HVV



interpretazione in termini di accoppiamento



ON SHELL H-4l | accoppiamento HVV



Il canale di produzione può essere sfruttato per l'analisi dell'accoppiamento Hgg

	Expected	Observed
f_{a3}^{ggH}	$-0.04^{+1.04}_{-0.96}$	0 ± 1

ACCOPPIAMENTI BSM | Hff

$\tilde{\psi}_f, \psi_f \rightarrow$ Dirac Spinors

$m_f \rightarrow$ massa

$v \rightarrow$ valore

$k_f \rightarrow$ accoppiamento

$\tilde{k}_f \rightarrow$ accoppiamento

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{hvv} = & \frac{h}{v} \left[(1 + \delta c_z) \frac{(g^2 + g'^2)v^2}{4} Z_\mu Z_\mu + c_{zz} \frac{g^2 + g'^2}{4} Z_{\mu\nu} Z_{\mu\nu} + c_{z\Box} g^2 Z_\mu \partial_\nu Z_{\mu\nu} + \tilde{c}_{zz} \frac{g^2 + g'^2}{4} Z_{\mu\nu} \tilde{Z}_{\mu\nu} \right. \\ & + (1 + \delta c_w) \frac{g^2 v^2}{2} W_\mu^+ W_\mu^- + c_{ww} \frac{g^2}{2} W_{\mu\nu}^+ W_{\mu\nu}^- + c_{w\Box} g^2 (W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+ + \text{H.c.}) + \tilde{c}_{ww} \frac{g^2}{2} W_{\mu\nu}^+ \tilde{W}_{\mu\nu}^- \\ & + c_{z\gamma} \frac{e\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} Z_{\mu\nu} A_{\mu\nu} + \tilde{c}_{z\gamma} \frac{e\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} Z_{\mu\nu} \tilde{A}_{\mu\nu} + c_{\gamma\Box} g g' Z_\mu \partial_\nu A_{\mu\nu} \\ & \left. + c_{\gamma\gamma} \frac{e^2}{4} A_{\mu\nu} A_{\mu\nu} + \tilde{c}_{\gamma\gamma} \frac{e^2}{4} A_{\mu\nu} \tilde{A}_{\mu\nu} + c_{gg} \frac{g_s^2}{4} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \tilde{c}_{gg} \frac{g_s^2}{4} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}_{\mu\nu}^a \right], \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \delta c_z &= \frac{1}{2} a_1 - 1, \\ c_{z\Box} &= \frac{m_Z^2 s_w^2}{4\pi\alpha} \frac{\kappa_1}{(\Lambda_1)^2}, \\ c_{zz} &= -\frac{s_w^2 c_w^2}{2\pi\alpha} a_2, \\ \tilde{c}_{zz} &= -\frac{s_w^2 c_w^2}{2\pi\alpha} a_3, \\ c_{gg} &= -\frac{1}{2\pi\alpha_s} a_2^{gg}, \\ \tilde{c}_{gg} &= -\frac{1}{2\pi\alpha_s} a_3^{gg}, \end{aligned}$$

Gli accoppiamenti possono essere reinterpretati in **coefficienti della Lagrangiana effettiva**

$$f_{CP}^{Hff} = \frac{1}{|k_f|^2 + |\tilde{k}_f|^2} \text{sign}\left(\frac{\tilde{k}_f}{k_f}\right) \alpha^{gg} = \tan\left(\frac{\tilde{k}_f}{k_f}\right)$$