

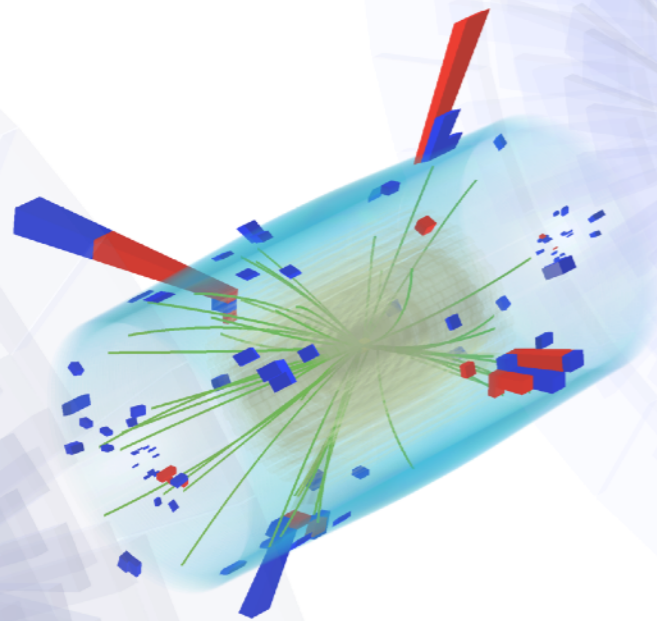
Il carattere del bosone di Higgs: il canale HH

Francesco Brivio,

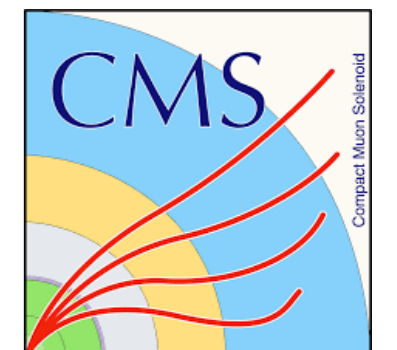
Fabio Monti

(INFN e Università Milano-Bicocca)

per il gruppo CMS MiB

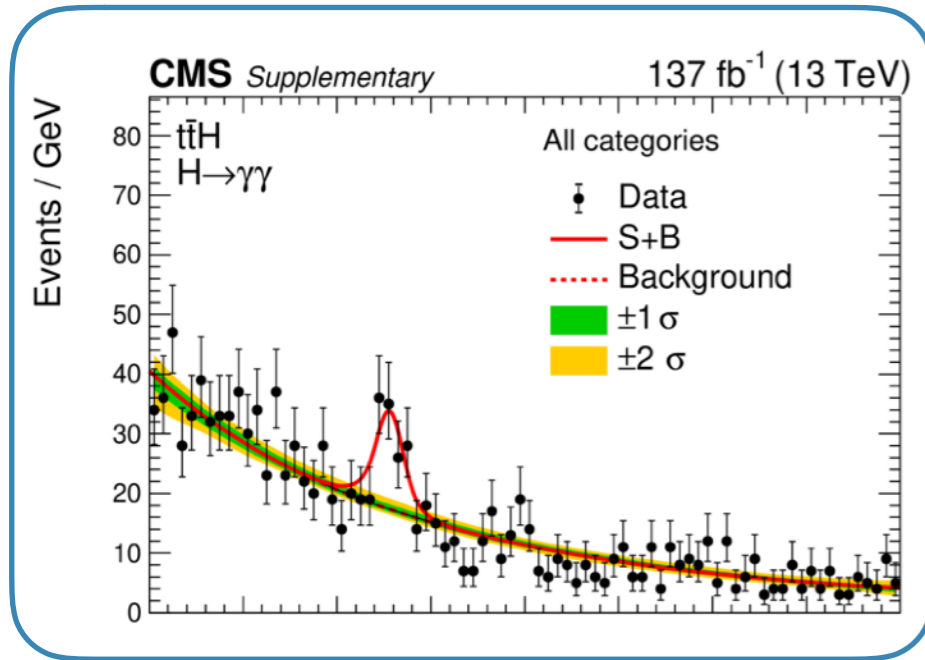


20 Maggio 2020

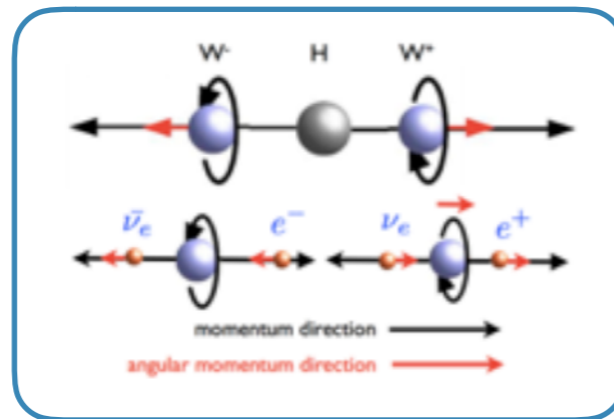


Il bosone di Higgs

Durante il RunII
(2016-2018) studio
intensivo del
bosone di Higgs



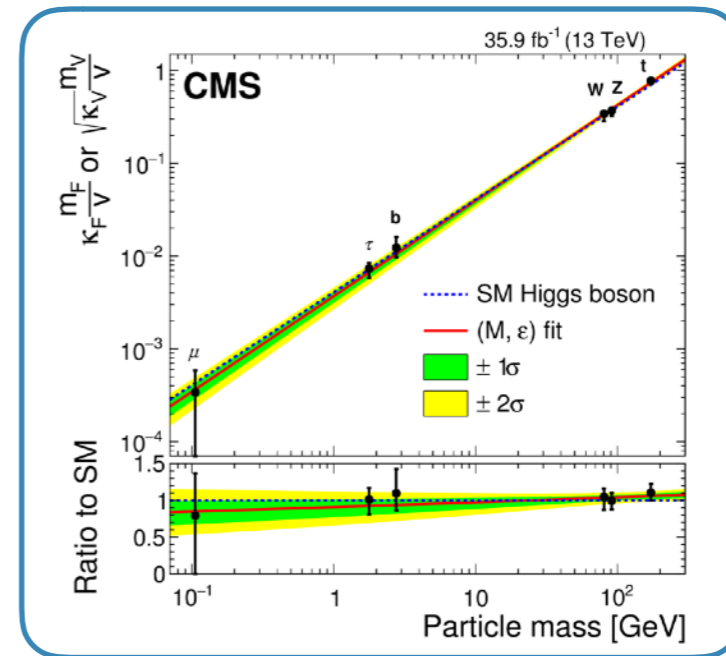
Processi di produzione



Spin/Parità

$$m_H = 125.38 \pm 0.14 \text{ GeV}/c^2$$

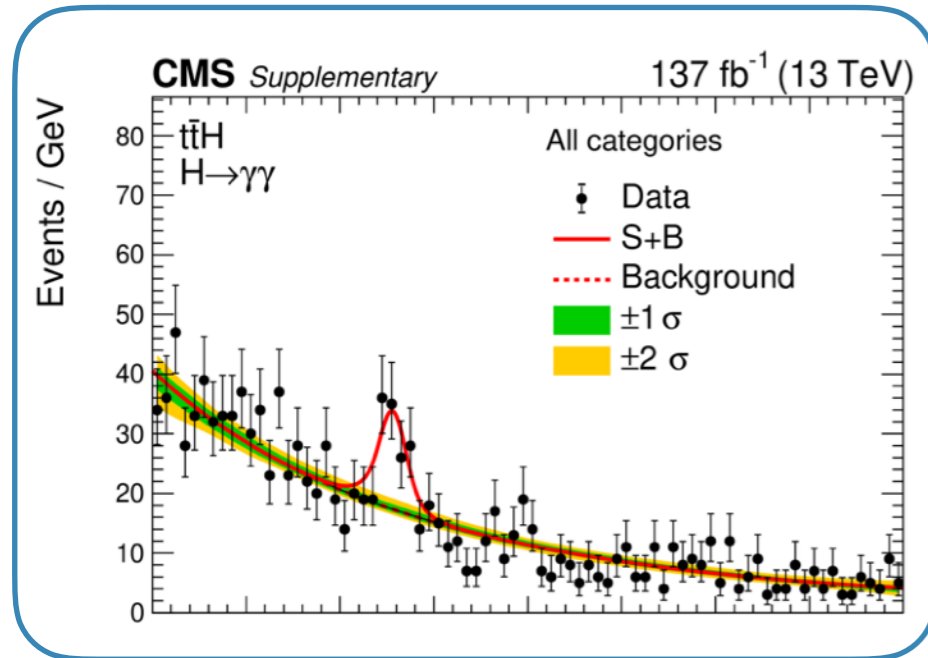
(Phys. Lett. B 805 (2020))



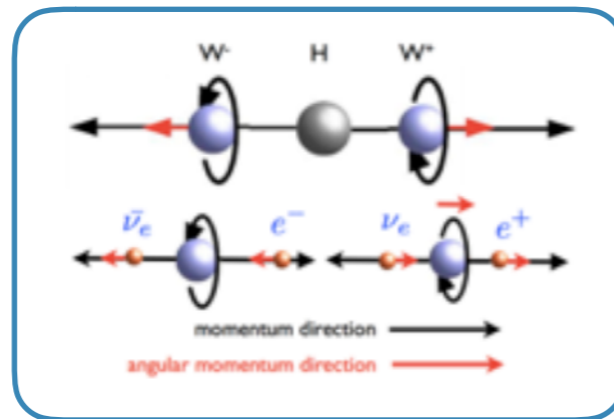
Accoppiamenti

Il bosone di Higgs

Durante il RunII
(2016-2018) studio
intensivo del
bosone di Higgs



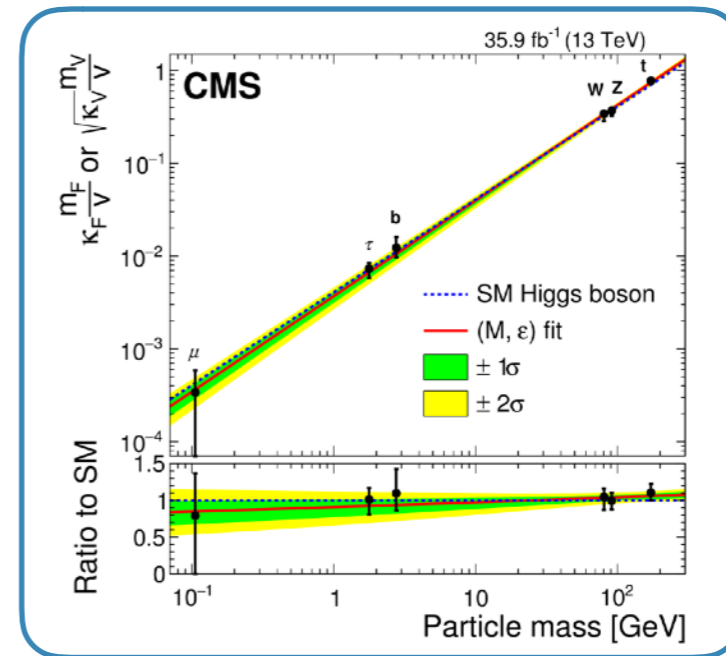
Processi di produzione



Spin/Parità

$$m_H = 125.38 \pm 0.14 \text{ GeV}/c^2$$

(Phys. Lett. B 805 (2020))

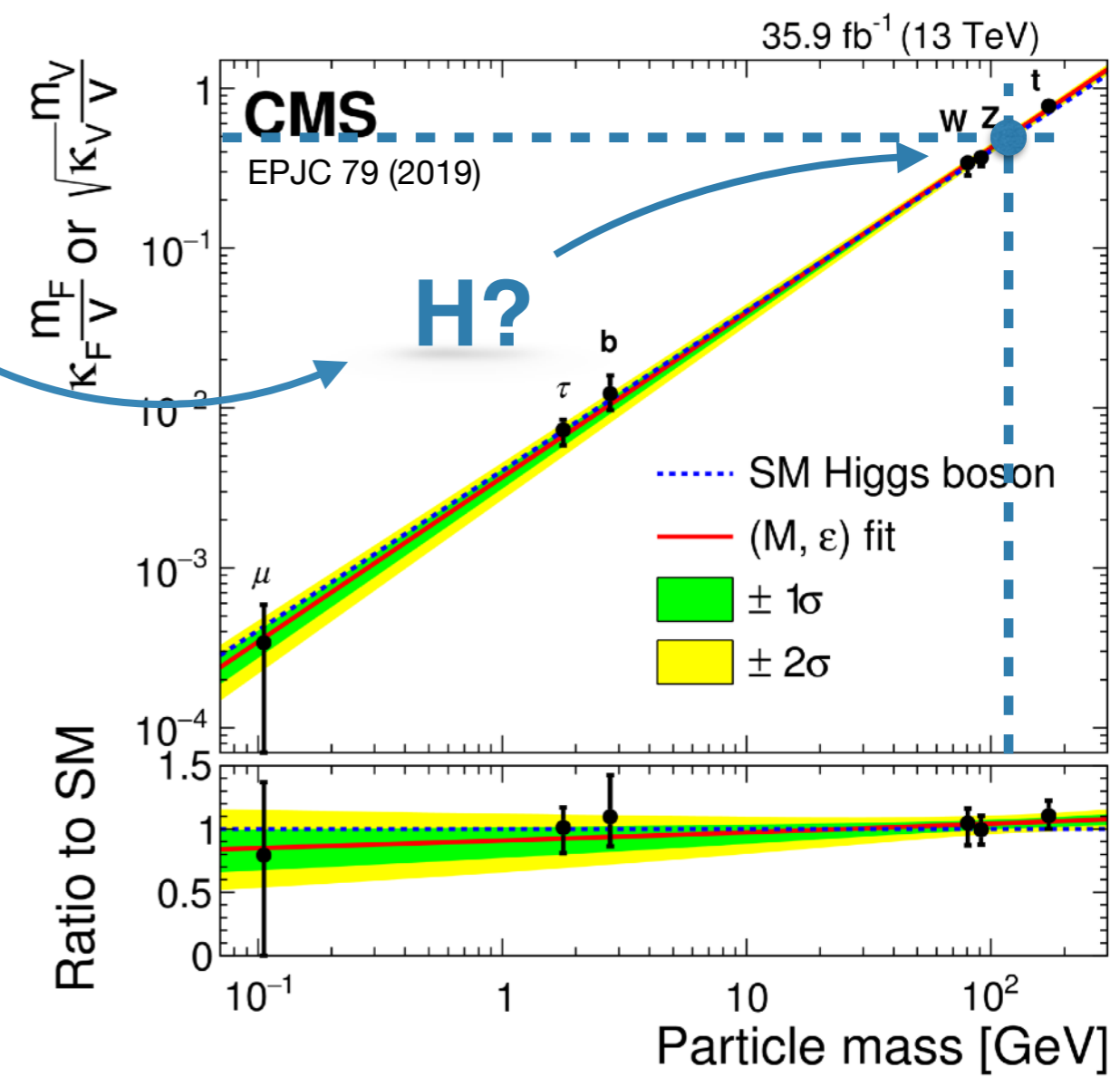


Accoppiamenti

**Allora perché studiare la produzione di
coppie di bosoni di Higgs?**

L'auto-accoppiamento dell'Higgs

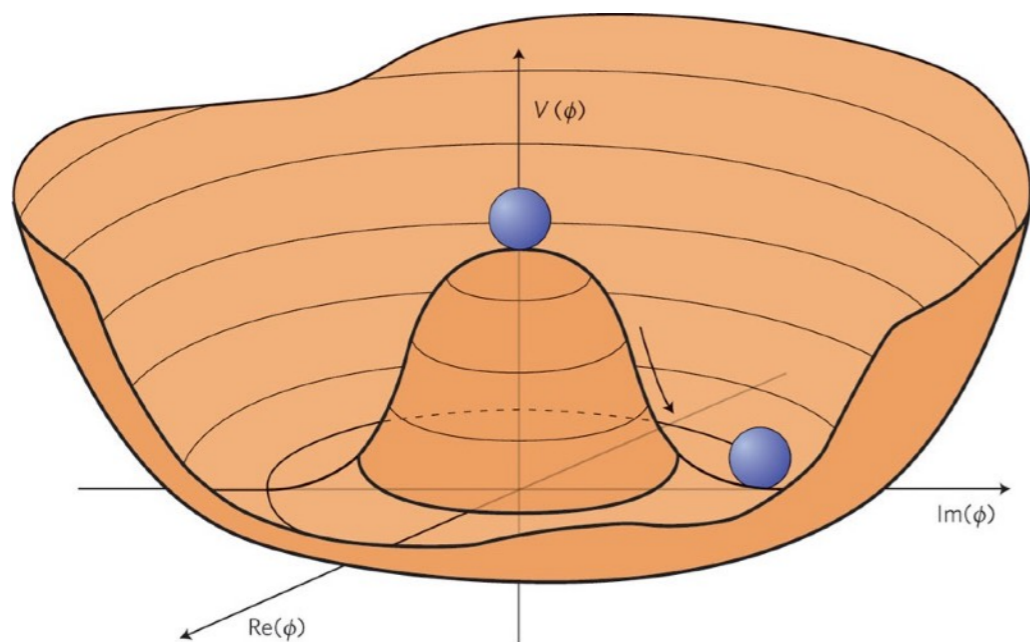
- L'interazione dell'Higgs con se stesso non è ancora stata misurata direttamente!



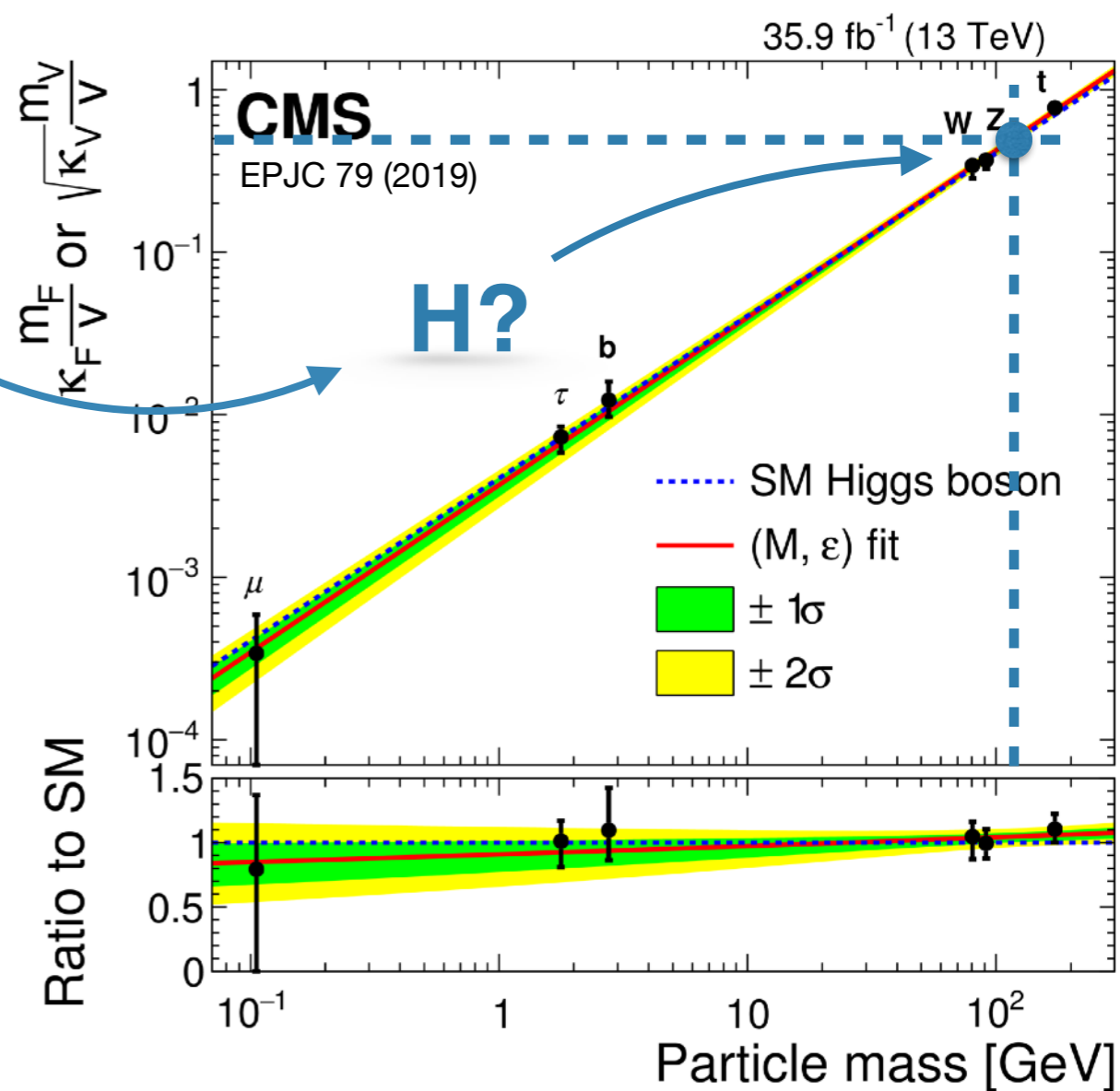
L'auto-accoppiamento dell'Higgs

- L'interazione dell'Higgs con se stesso non è ancora stata misurata direttamente!
- L'auto-accoppiamento dell'Higgs (λ) controlla direttamente la forma del potenziale di Higgs

$$V(H) = \frac{m_h^2}{2} H^2 + \lambda v H^3 + \frac{\lambda}{4} H^4$$



E permette di avere maggiore informazioni sulla rottura spontanea della simmetria che è alla base del meccanismo di Brout-Englert-Higgs.



Al momento abbiamo una stima indiretta del valore di λ :

$$\lambda = \frac{m_h^2}{2v^2} \approx 0.13$$

Ma lo studio dei processi HH permette la sua misura sperimentale diretta dell'auto-accoppiamento dell'Higgs

Quindi perché studiare HH?

I processi HH permettono di studiare tanti settori diversi:

- **Modello Standard**

Il parametro di auto-accoppiamento del bosone di Higgs è uno dei pochi dei quali ancora manca una **misura sperimentale diretta**

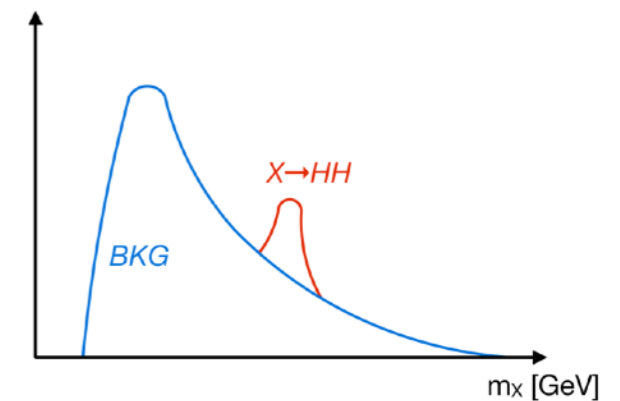
- **Oltre il Modello Standard**

- Coppie di bosoni di Higgs possono essere prodotte dal decadimento di particelle non previste dal Modello Standard:

- Radione
- Gravitone
- Modelli di Supersimmetria

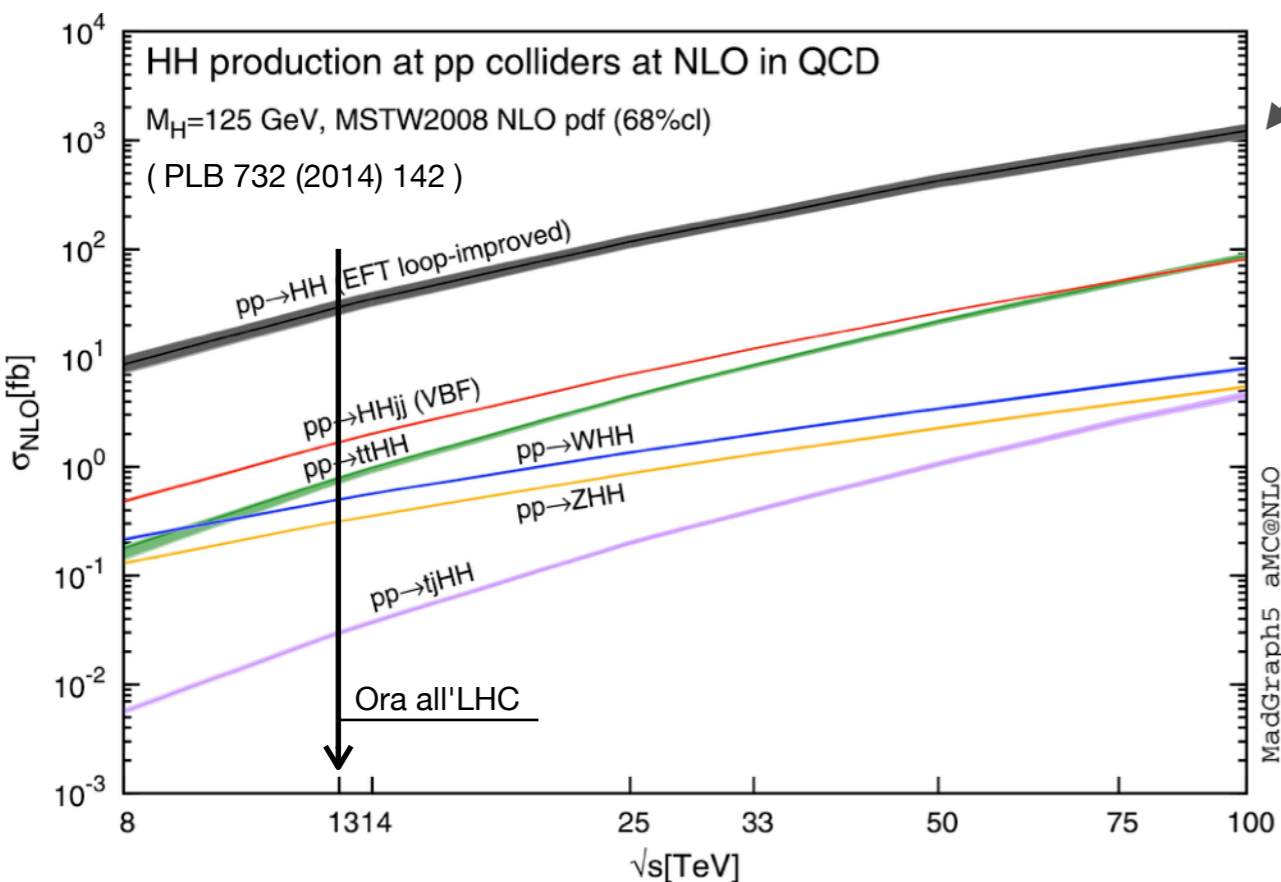
- E' anche possibile studiare fisica oltre il Modello Standard applicando una Effective Field Theory

- Viene modificato "il comportamento" di eventi con una coppia di bosoni di Higgs che interagisce con altre particelle in modi non previsti dal Modello Standard

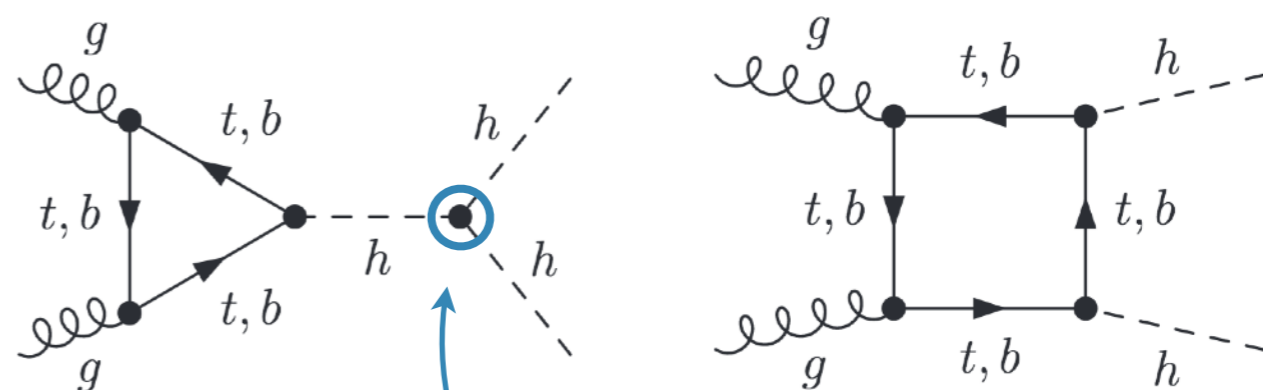


HH a LHC

Produzione HH: Gluon Fusion



Gluon Fusion: due gluoni si fondono attraverso un loop di quark e generano due bosoni di Higgs



Permette la misura diretta dell'accoppiamento del bosone di Higgs con se stesso (parametro λ)

- Sezione d'urto di produzione:

$$\sigma_{SM}^{ggHH} = 31.05^{+4.5\%}_{-6.4\%} \text{ fb @ } 13 \text{ TeV}$$

Per confronto, la sezione d'urto di produzione del singolo Higgs è:

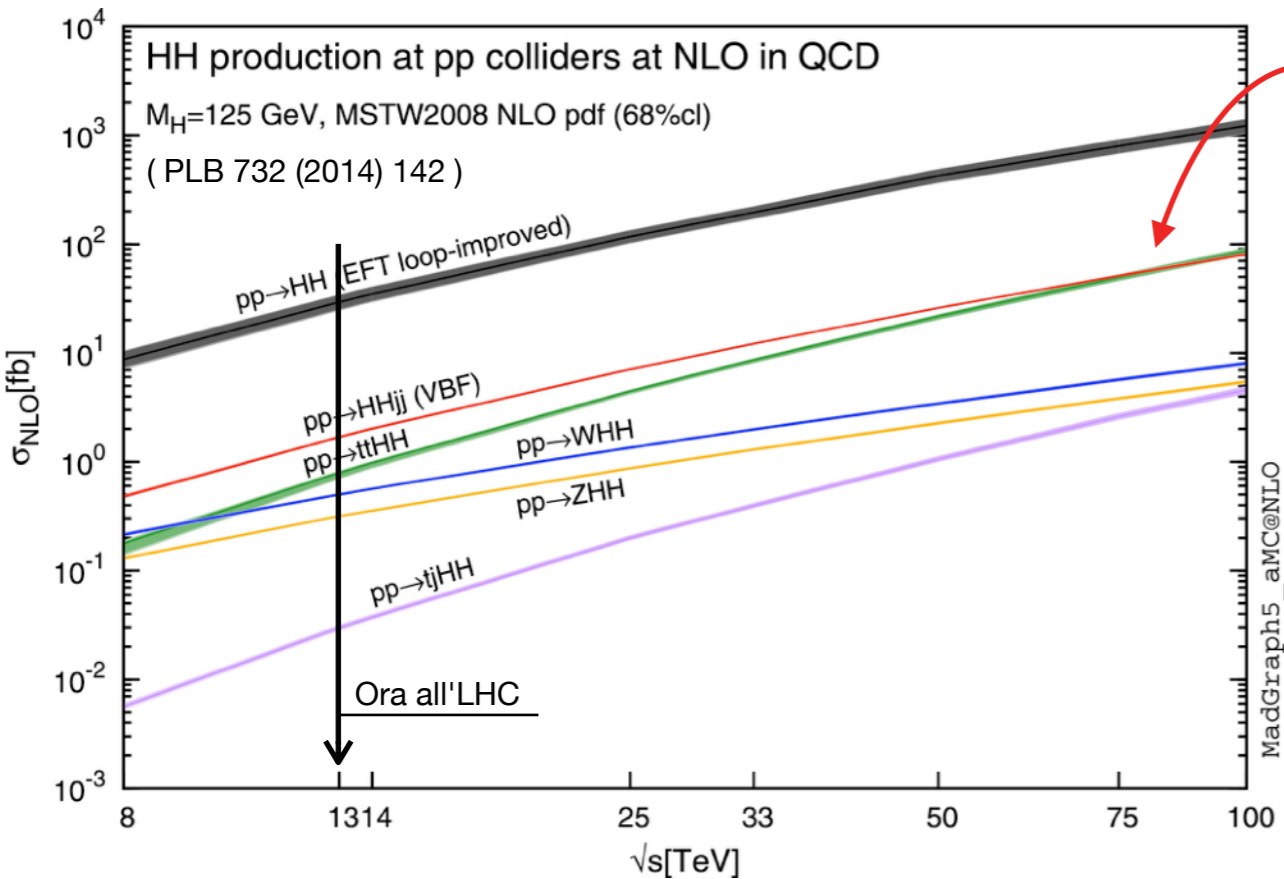
$$\sim 49 \text{ pb @ } 13 \text{ TeV}$$

Quindi il processo HH è quasi 1600 volte più raro del singolo Higgs!



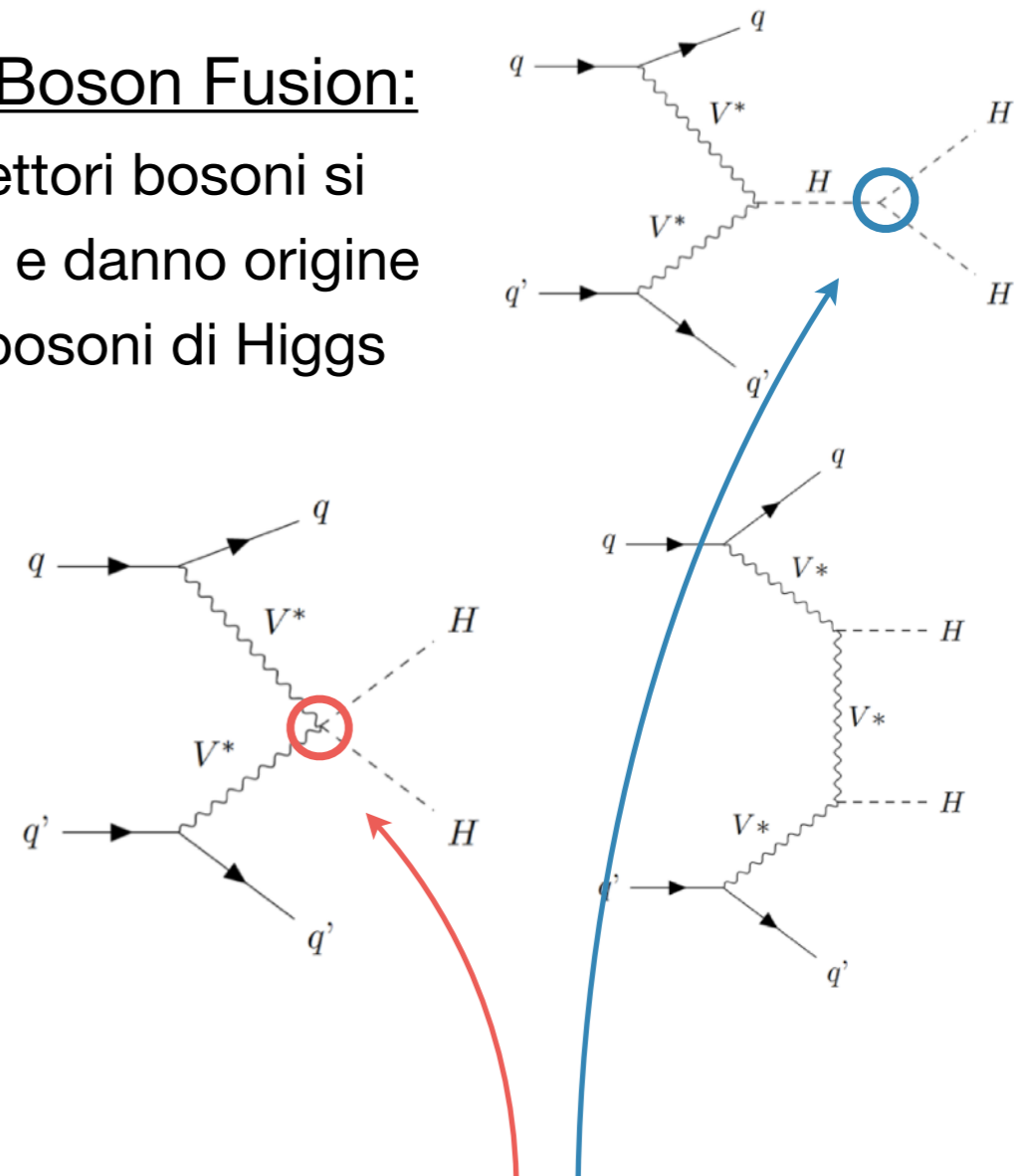
	N. di eventi prodotti	
Alla fine di	Eventi HH	Eventi Single H
Run I (2012)	~ 300	~ 100 000
Run II (2018)	~ 4 500	~ 7 500 000
HL-LHC (~2035)	~ 100 000	~ 150 000 000

Produzione HH: Vector Boson Fusion



Vector Boson Fusion:

due vettori bosoni si fondono e danno origine a due bosoni di Higgs



- Sezione d'urto di produzione:

$$\sigma_{SM}^{qqHH} = 1.73 \pm 2.1 \% fb @ 13 TeV$$

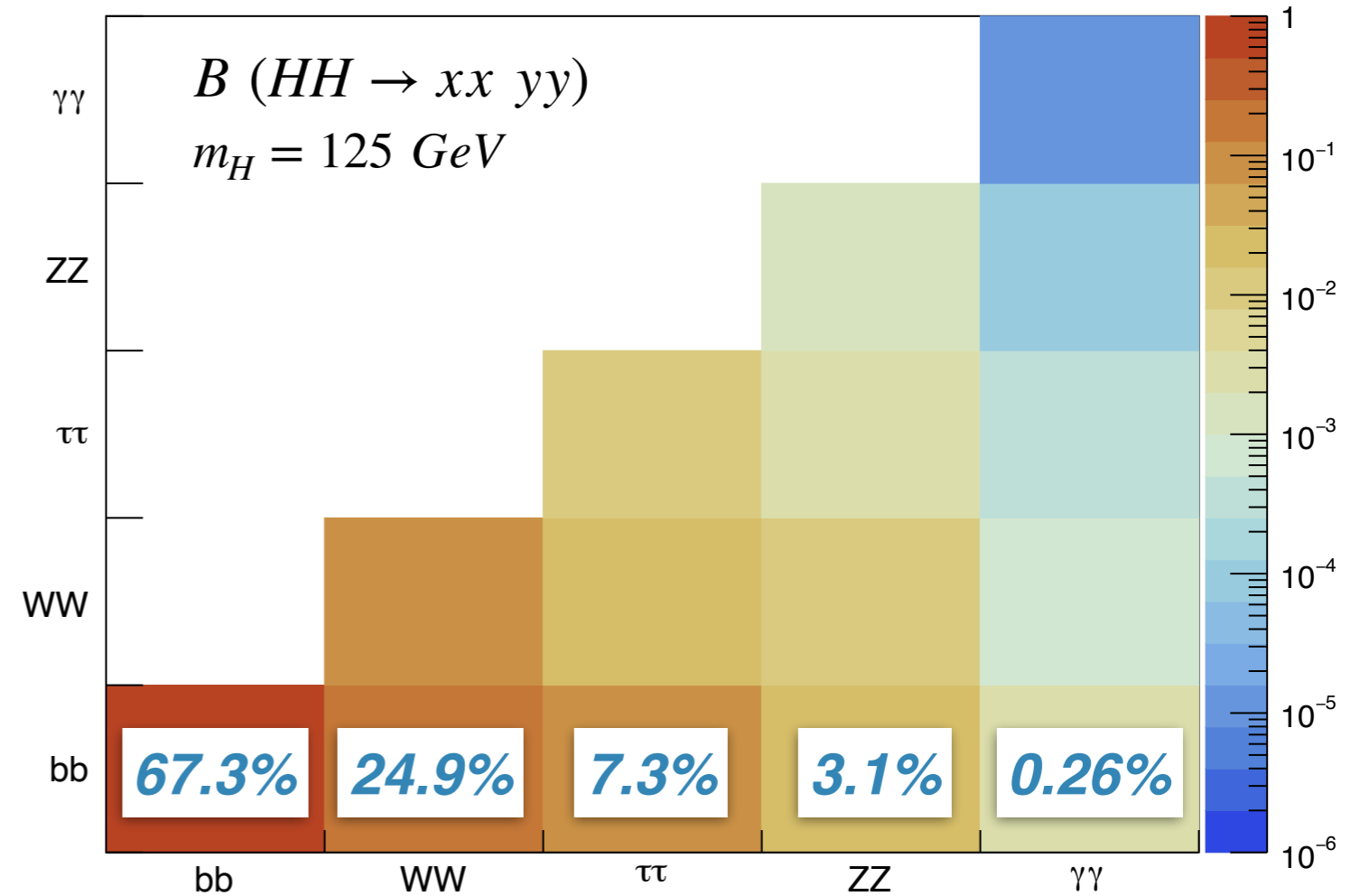
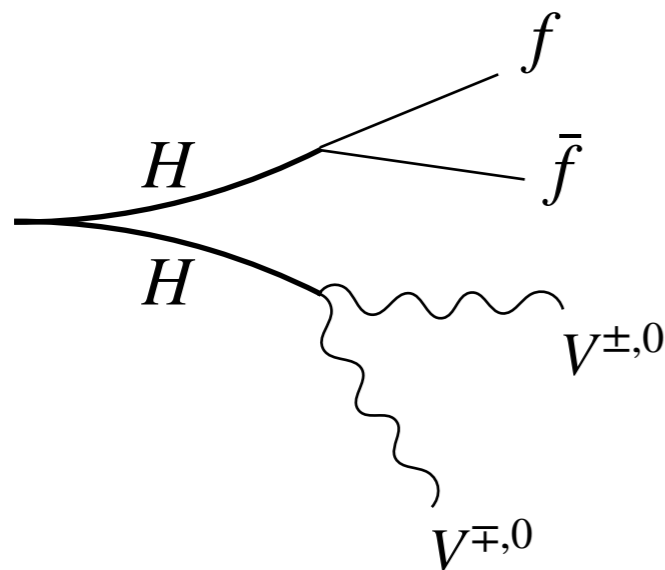
Circa 20 volte più piccola del processo di produzione Gluon Fusion

- Emissione di due quark che "scatterano" e caratterizzano gli eventi VBF

Oltre al parametro di auto-accoppiamento dell'Higgs (λ), lo studio VBF permette di studiare l'interazione tra una coppia di Higgs e una coppia di bosoni vettori (parametro C_{2V})

HH: Canali di decadimento

Il bosone di Higgs ha una vita media molto breve e decade in *fermioni o vettori bosoni*



La scelta del canale di decadimento è un compromesso tra:

- Purezza del segnale (S/B)
- *Branching Ratio*

Solitamente si scelgono i canali in cui uno dei due H decade in una coppia *bb*:

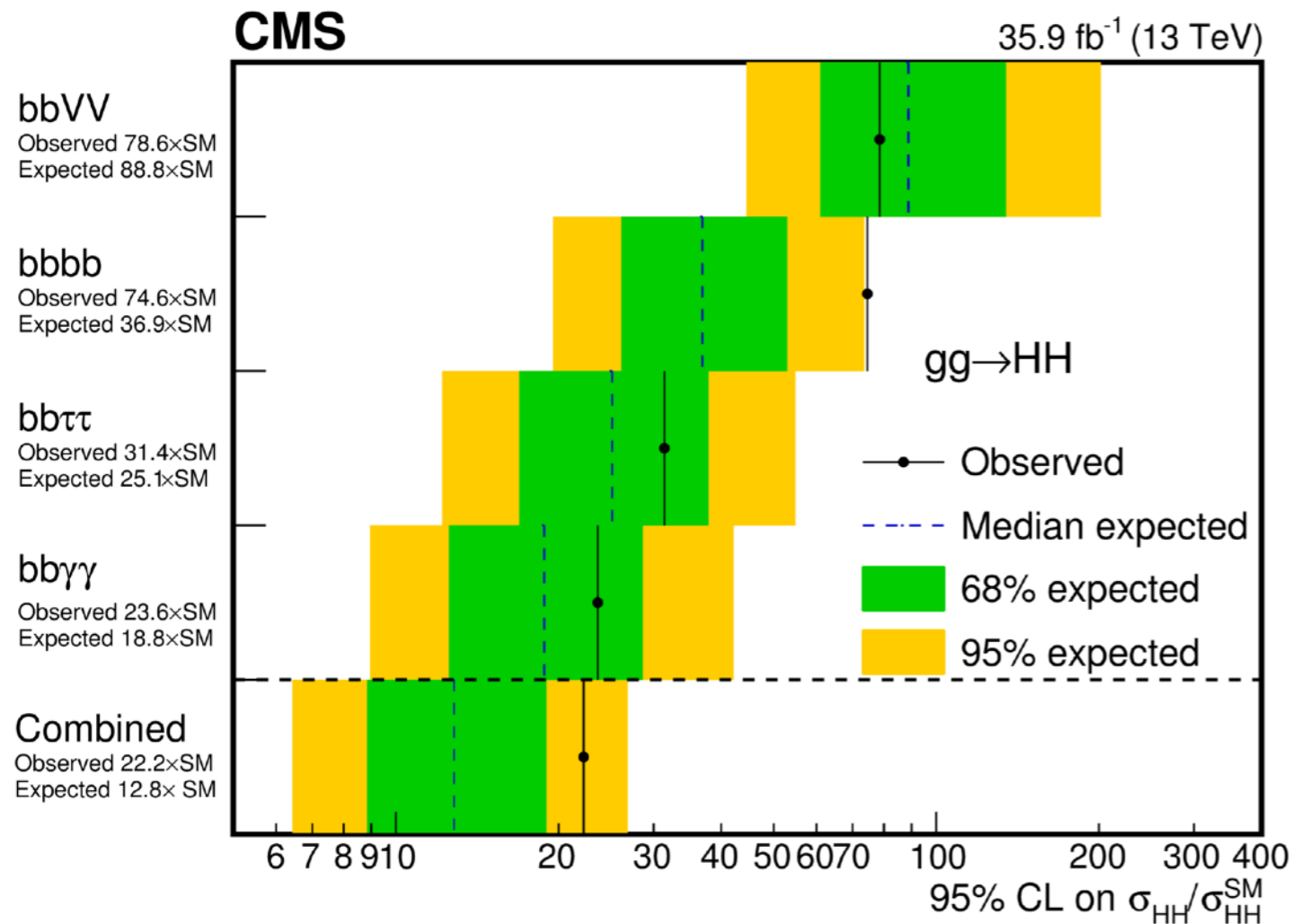
- *Rapporto di decadimento più alto* → maggior numero di eventi disponibile

Il canale di decadimento del secondo H è scelto in base alla caratteristica del canale stesso:

- *Ogni canale ha i suoi vantaggi e svantaggi*

HH: Risultati di CMS con i dati 2016

I risultati delle analisi sui vari canali vengono statisticamente combinati tra loro
Per sfruttare al massimo tutti i dati raccolti e ottenere un miglior risultato



Limite combinato di esclusione:
Obs. (Exp.) : $\sigma/\sigma_{SM} < 22.2$ (12.8)

Come si legge questo risultato?

"Escludo processi di produzione HH che hanno un sezione d'urto più grande di 22.2 volte quella predetta dal Modello Standard"

- Più un'analisi è sensibile, più questo rapporto diventa piccolo
- Fino a che si raggiunge $\sigma/\sigma_{SM} \sim 1$
 - A questo punto si iniziano ad **osservare direttamente** i processi HH

HH: Risultati di CMS con i dati 2016

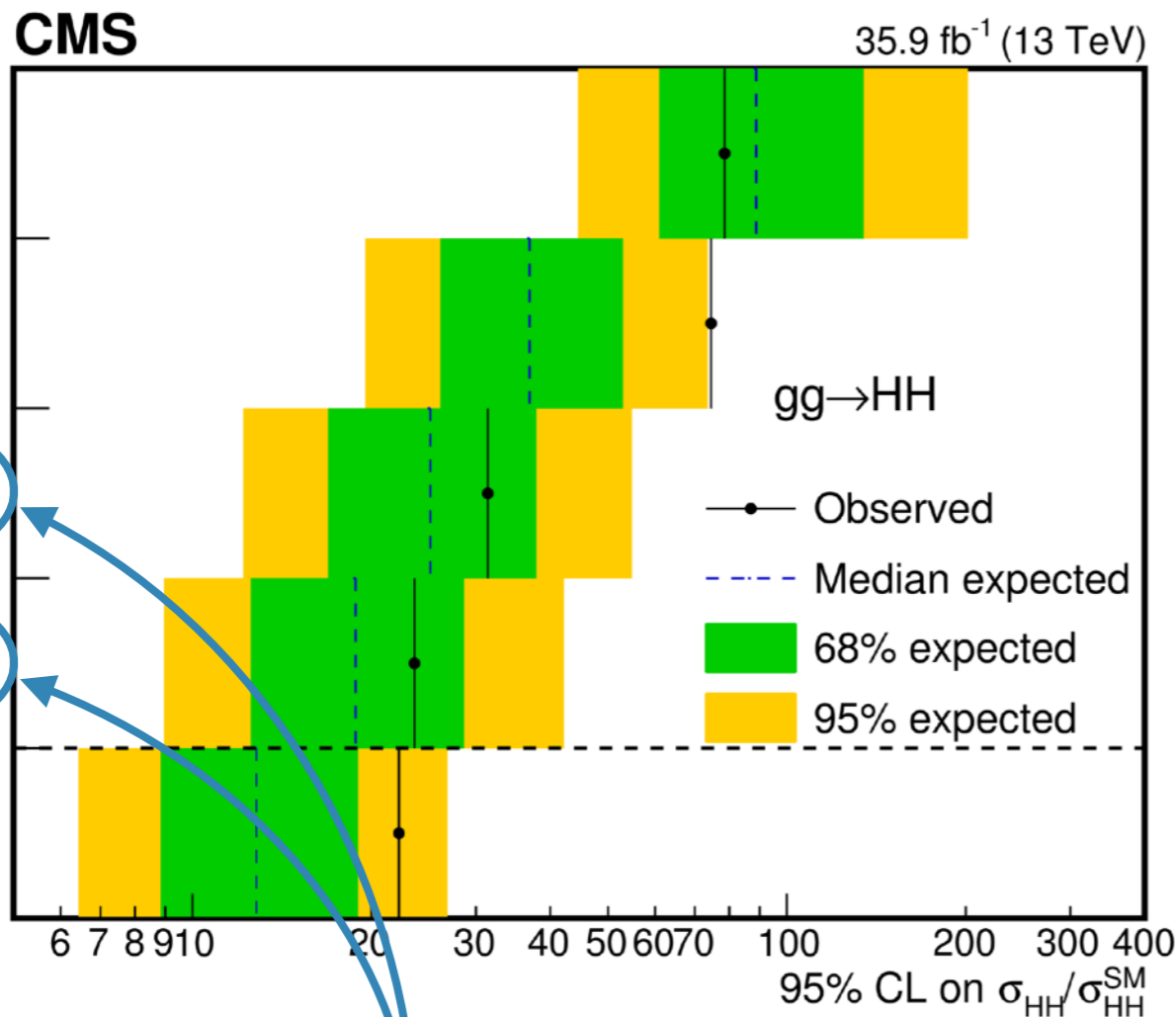
I risultati delle analisi sui vari canali vengono statisticamente combinati tra loro
Per sfruttare al massimo tutti i dati raccolti e ottenere un miglior risultato

Limite combinato di esclusione:
Obs. (Exp.) : $\sigma/\sigma_{SM} < 22.2$ (12.8)

Come si legge questo risultato?

"Escludo processi di produzione HH che hanno un sezione d'urto più grande di 22.2 volte quella predetta dal Modello Standard"

- Più un'analisi è sensibile, più questo rapporto diventa piccolo
- Fino a che si raggiunge $\sigma/\sigma_{SM} \sim 1$
 - A questo punto si iniziano ad **osservare direttamente** i processi HH



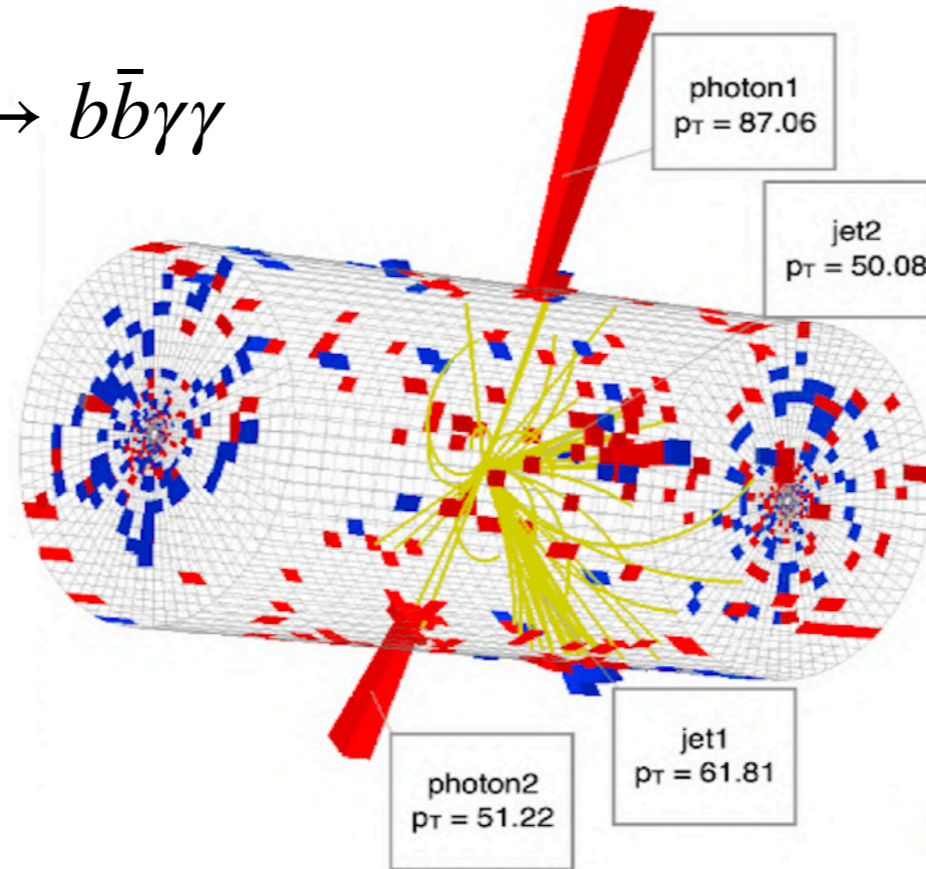
Le due analisi più sensibili sono **bbγγ** e **bbττ**

Entrambe hanno un contributo importante da Milano-Bicocca

HH in Bicocca

Strategie delle analisi HH

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



1. Ricostruzione Evento

Ricostruzione e selezione degli "oggetti" caratteristici dell'evento

2. Riduzione del Fondo

Tecniche (Machine Learning) per migliorare la separazione di eventi di segnale da eventi di fondo

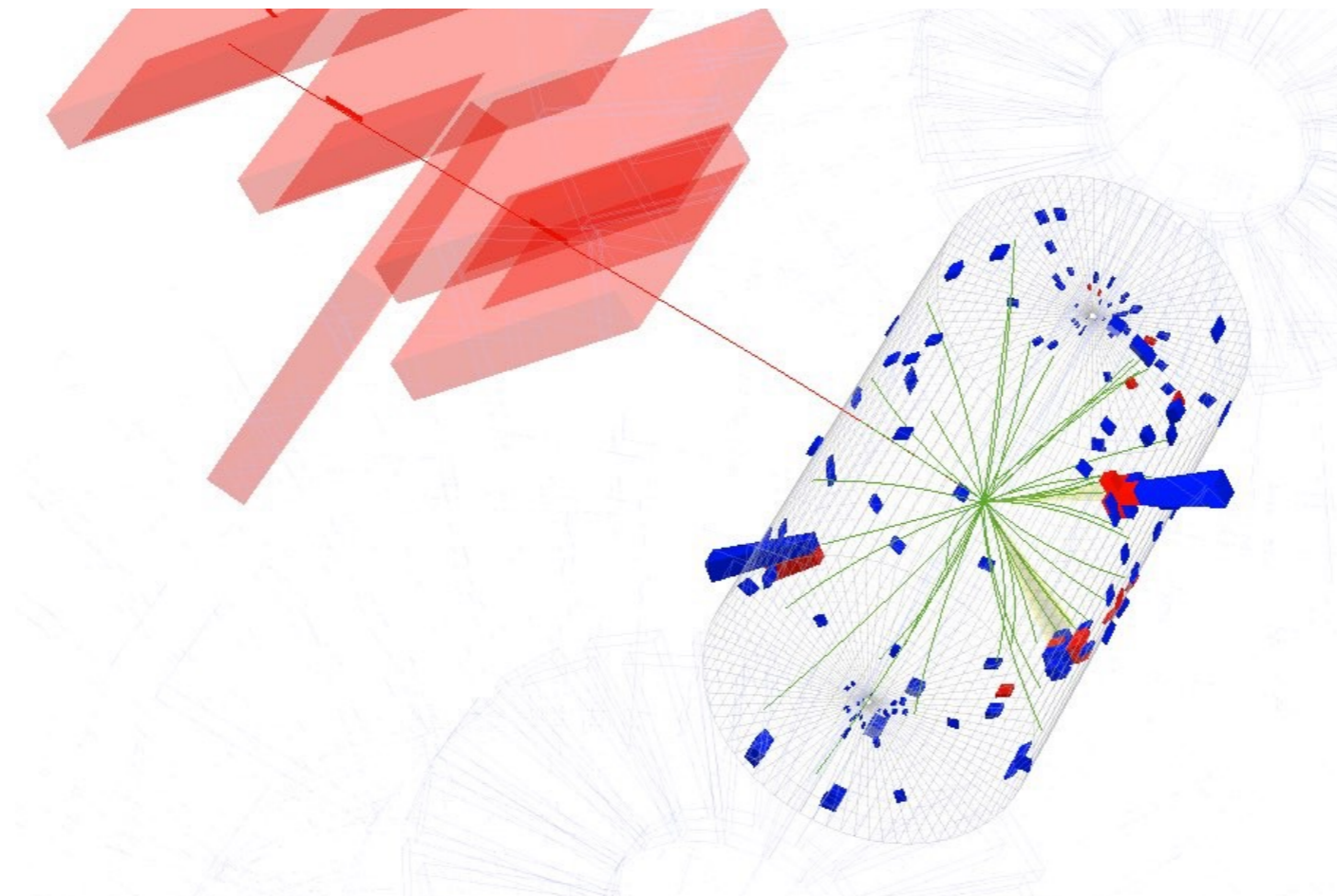
3. Categorizzazione

Gli eventi sono suddivisi in categorie con caratteristiche differenti per essere analizzati in modo specifico

1. Ricostruzione dell'Evento

Significa **identificare** e **ricostruire** tutti i prodotti della catena di decadimento del processo HH, sfruttando:

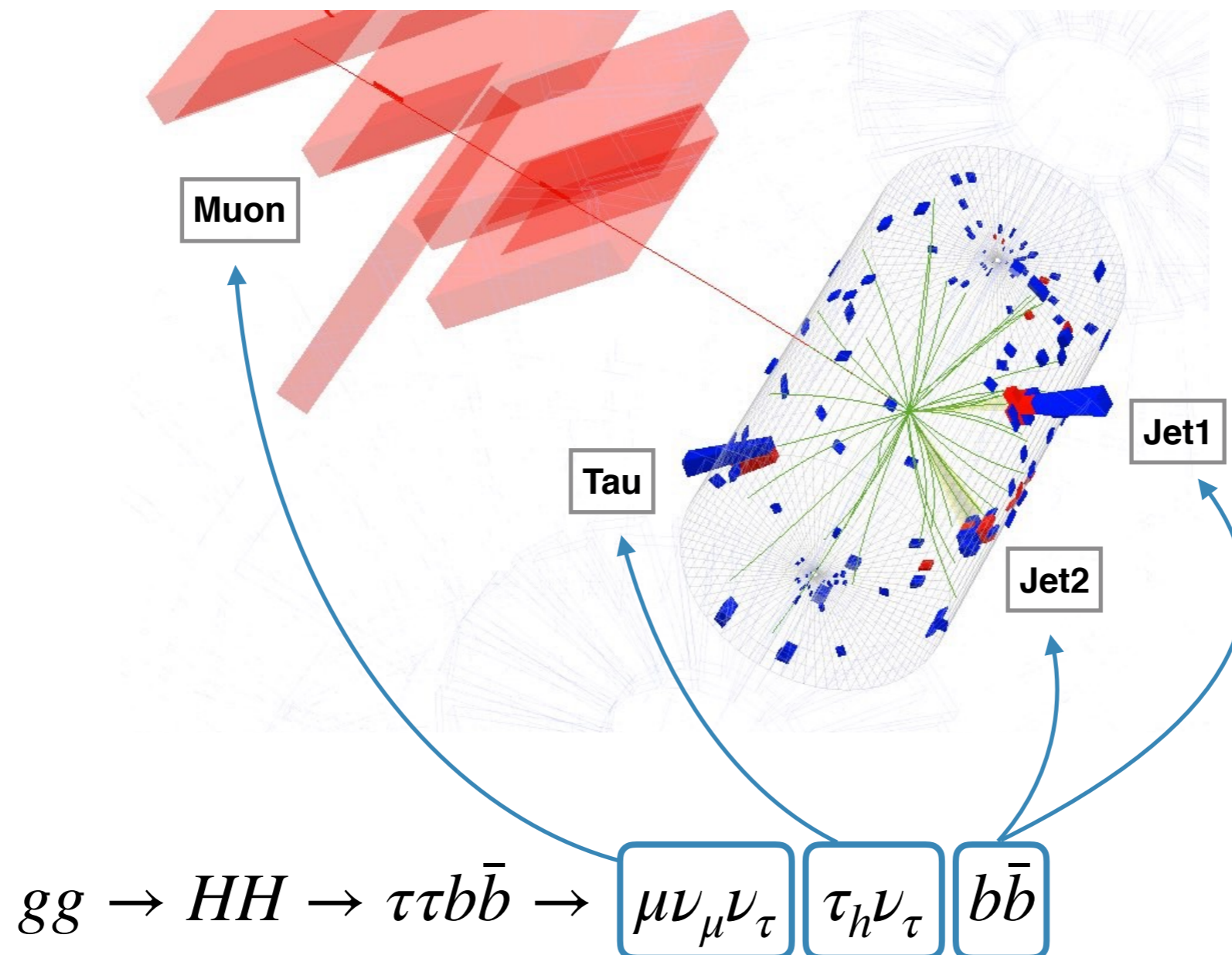
- L'informazione del rivelatore (CMS)
- Algoritmi di ricostruzioni (es. Neural Networks per l'identificazione di jet e tau)



1. Ricostruzione dell'Evento

Significa **identificare** e **ricostruire** tutti i prodotti della catena di decadimento del processo HH, sfruttando:

- L'informazione del rivelatore (CMS)
- Algoritmi di ricostruzioni (es. Neural Networks per l'identificazione di jet e tau)



2. Riduzione del Fondo

I fondi sono processi diversi dal segnale HH, ma che presentano lo stesso stato finale, per esempio:

Segnale: $HH \rightarrow (H \rightarrow b\bar{b}) + (H \rightarrow \gamma\gamma) \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$

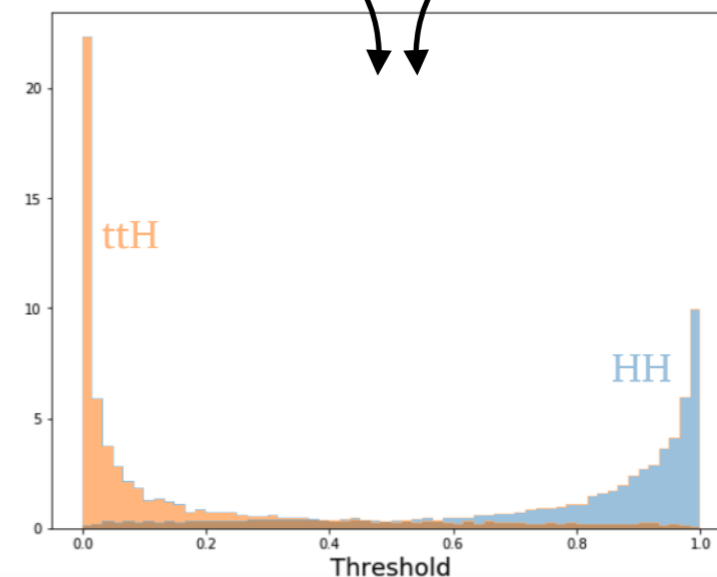
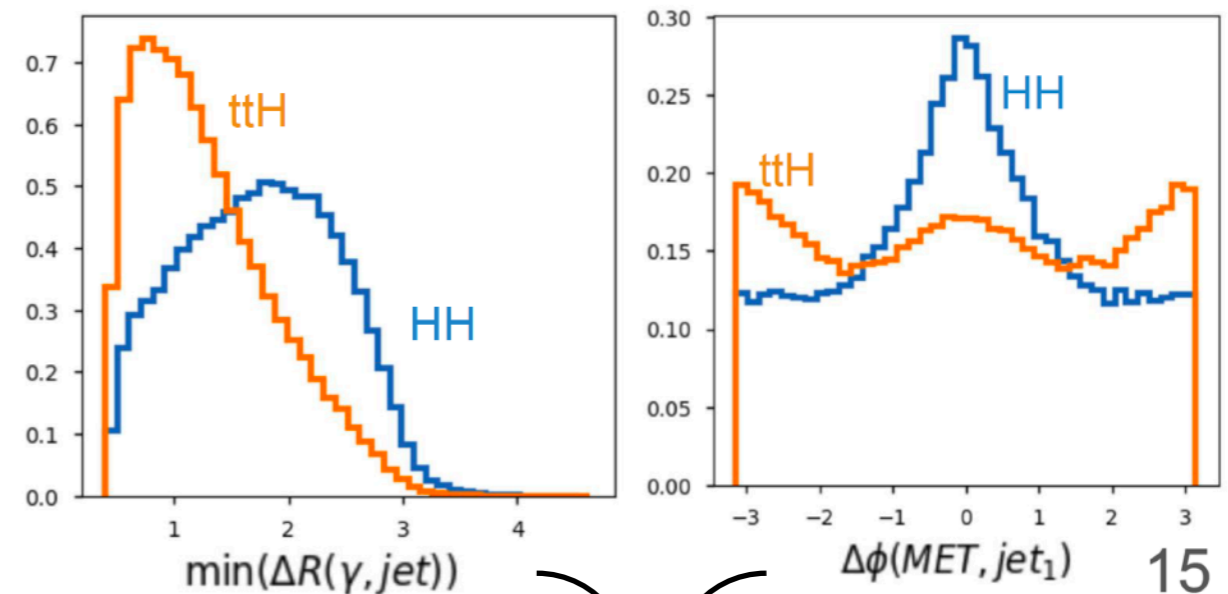
Fondo: $t\bar{t}H \rightarrow (t \rightarrow bW) + (\bar{t} \rightarrow \bar{b}W) + (H \rightarrow \gamma\gamma) \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma WW$

Per distinguere gli eventi di segnale dagli eventi di fondo si usano tecniche di **Machine Learning**

ttH-tagger

Deep Neural Network per distinguere eventi HH da eventi $ttH(\gamma\gamma)$ sfruttando variabili legate a:

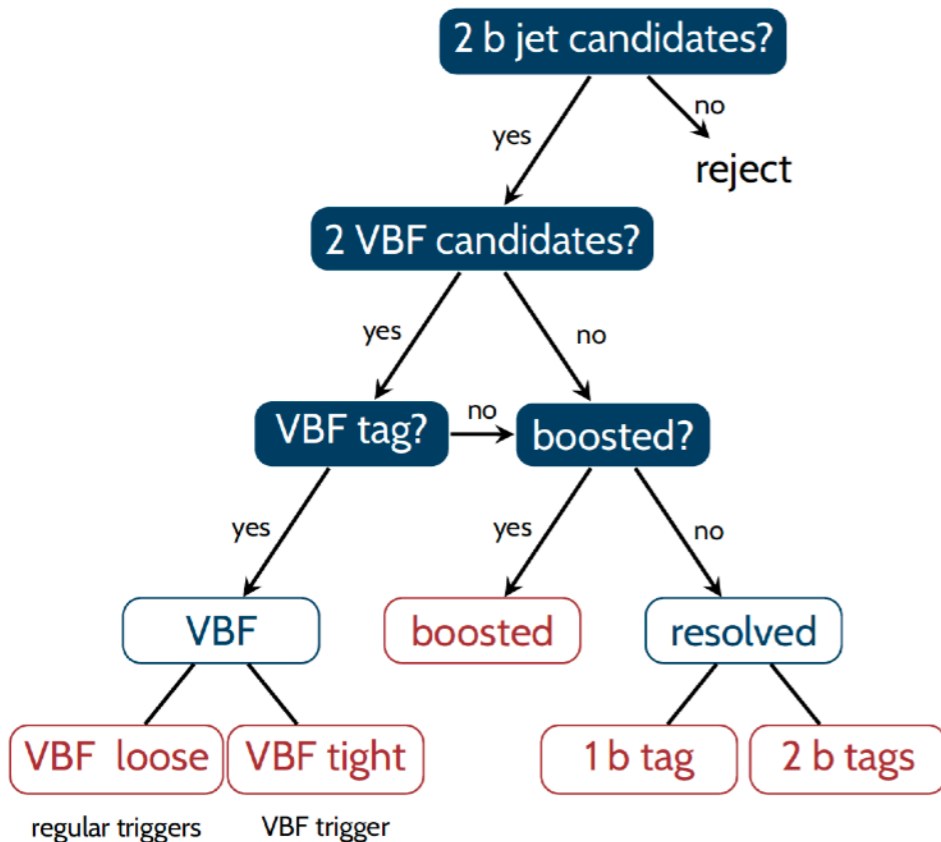
- Cinematica dell'evento
- Identificazione e risoluzione degli oggetti ricostruiti



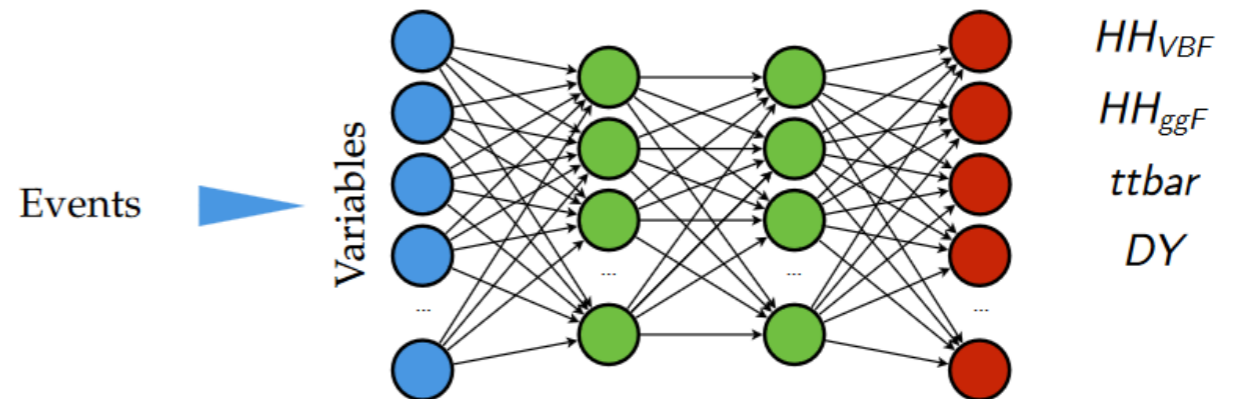
3. Categorizzazione

- Si identificano eventi con **caratteristiche differenti**:
 - Variabili cinematiche particolarmente significative (mass invariante dei 4 corpi)
 - Numero dei jet ricostruiti
 - Caratteristiche dei jet ricostruiti
 - ...
- Gli eventi sono divisi in **categorie con diversi valori di S/B**
- Le categorie sono analizzate singolarmente e combinate nel risultato finale

Categorizzazione ad albero



Categorizzazione con DNN



Permette di classificare gli eventi direttamente in base al processo che li ha generati

HH: un'analisi che guarda al futuro

Prospettive Future di HH

Stato attuale

Analisi dei dati raccolti nel Run2 (2016-2018)

- A differenza di altre analisi (per esempio *single Higgs*), i canali HH sono ancora dominati dall'incertezza statistica

Publicaz.
dati 2016

Analisi
dati
2016-18



Prospettive Future di HH

Stato attuale

Analisi dei dati raccolti nel Run2 (2016-2018)

- A differenza di altre analisi (per esempio *single Higgs*), i canali HH sono ancora dominati dall'incertezza statistica

Immediato futuro

Run3 di LHC (2021-2024)

- Raddoppio della statistica raccolta
- Opportunità per sviluppare tecniche all'avanguardia:
 - Machine Learning (BDT, DNN...)
 - Uso di GPU...

Publicaz.
dati 2016

Analisi
dati
2016-18

Run3
2021-24



Prospettive Future di HH

Stato attuale

Analisi dei dati raccolti nel Run2 (2016-2018)

- A differenza di altre analisi (per esempio *single Higgs*), i canali HH sono ancora dominati dall'incertezza statistica

Immediato futuro

Run3 di LHC (2021-2024)

- Raddoppio della statistica raccolta
- Opportunità per sviluppare tecniche all'avanguardia:
 - Machine Learning (BDT, DNN...)
 - Uso di GPU...

Prospettive a lungo termine:

Fase Alta ad Luminosità di LHC (~2027-2035)

- ~20 volte la statistica attuale
- Non si parla più di "ricerca", ma di "osservazione diretta" di eventi HH

Le analisi HH continueranno a giocare un ruolo cruciale fino (e oltre) la fase di HL-LHC

Publicaz.
dati 2016

Analisi
dati
2016-18

Run3
2021-24

HL-LHC
2027-35

Backup

Sfide sperimentali delle analisi HH

Oltre alle sfide sperimentali delle analisi a LHC già descritte per il caso del singolo Higgs, se ne aggiungono alcune relative alla ricerca di coppie di Higgs:

- Il numero limitato di eventi di segnale (nel Run2)

$$N(HH \rightarrow bb\gamma\gamma) = N(HH) \cdot B(bb\gamma\gamma) \simeq 15$$

$$N(HH \rightarrow bb\tau\tau) = N(HH) \cdot B(bb\tau\tau) \simeq 350$$

- Uno "stato finale" complesso

- 2 b-jet (strutture originate dall'adronizzazione dei quark b)

- 2 fotoni

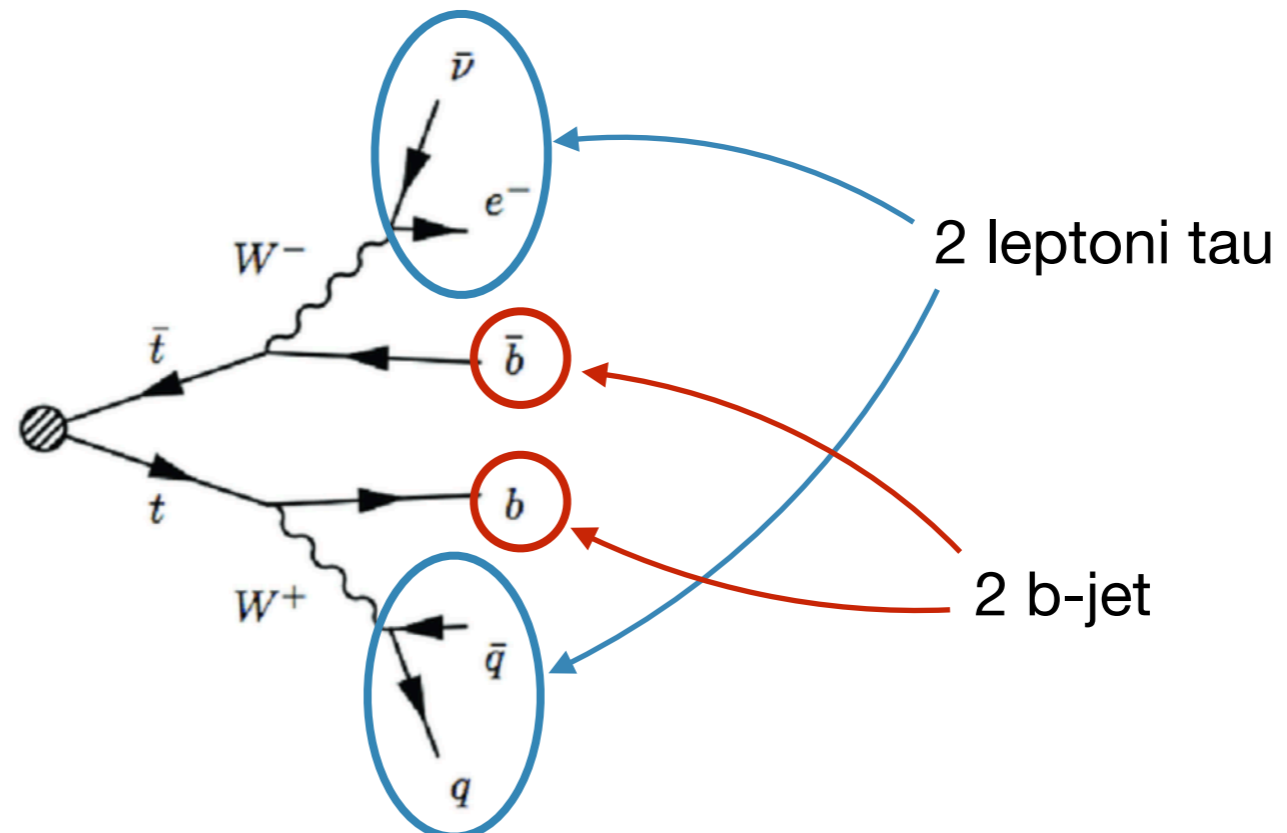
2 leptoni τ (che a loro volta decadono in altri leptoni e quark!)

- La presenza di "fondi":

processi diversi da HH che però nello stato finale presentano gli stessi

oggetti di HH

(per esempio 2 b e 2 τ)



Strategia dell'analisi $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$

Segnatura sperimentale:

- 2 fotoni con massa invariante ricostruita a ~ 125 GeV
- 2 b-jet con massa invariante ricostruita a ~ 125 GeV
- + 2 jet molto energetici nel caso dell'analisi VBF

Si sfrutta l'eccellente
risoluzione energetica
di ECAL

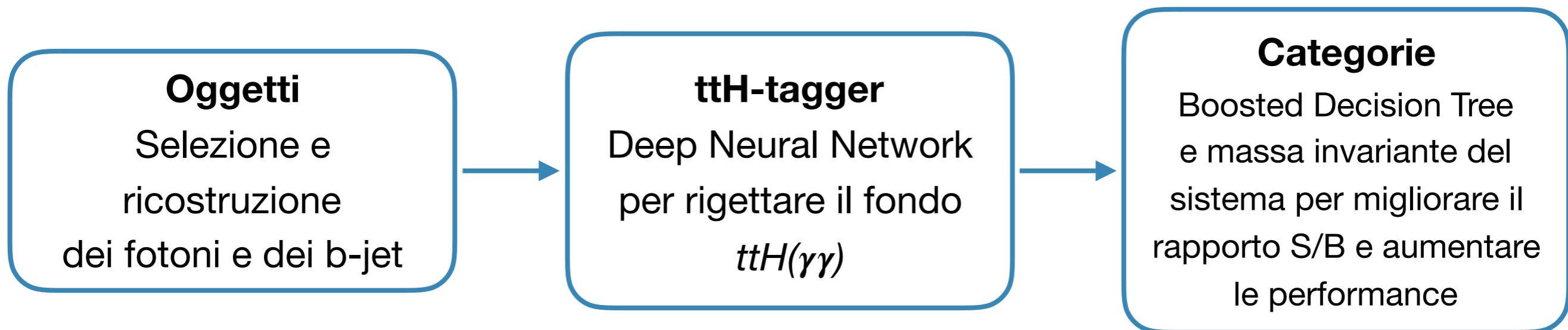
Algoritmi basati su DNN
per l'identificazione di jet
provenienti da quark b

Caratteristiche
cinematiche
dei "jet VBF"

Fondi principali:

- $\gamma\gamma + jets, tt + \gamma\gamma$
- singolo Higgs (ttH) che decade in $\gamma\gamma$

Workflow (semplificato) dell'analisi:



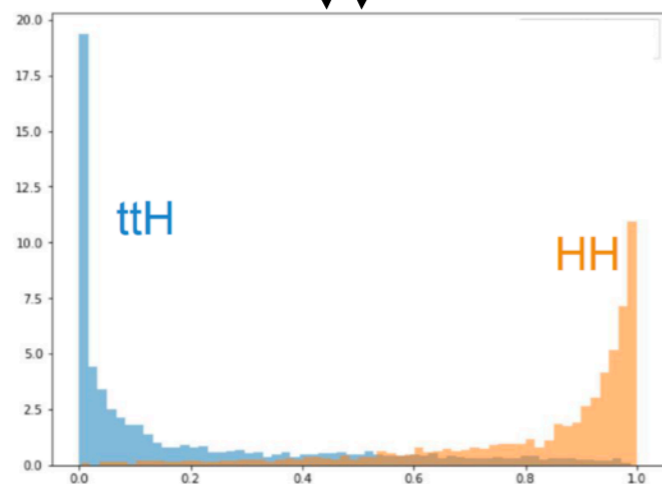
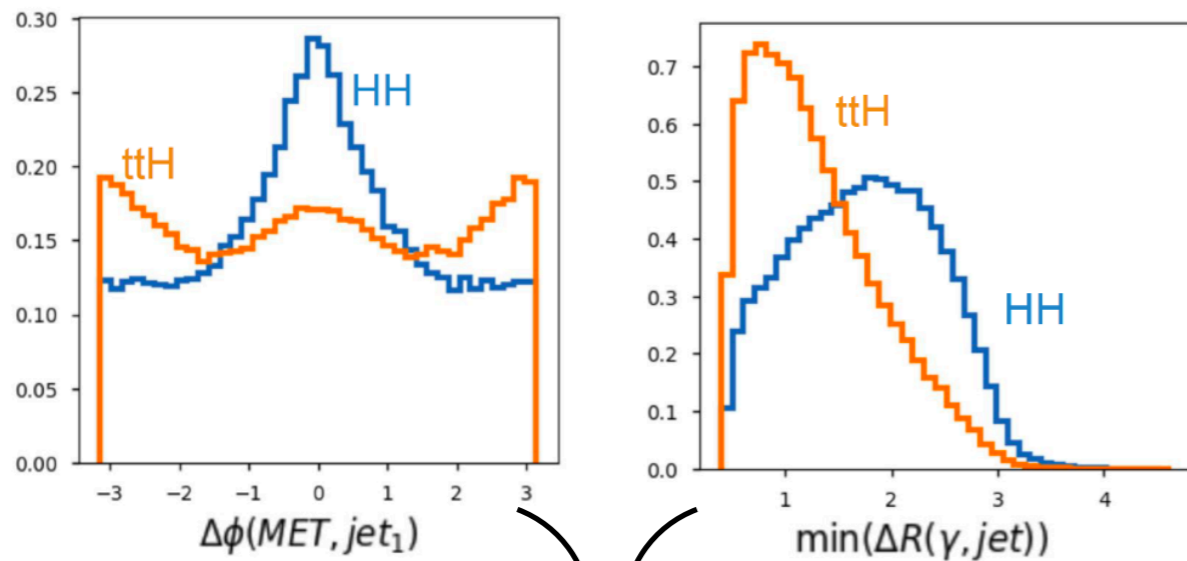
Machine Learning in $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$

Le tecniche di Machine Learning sfruttano al massimo le correlazioni tra le variabili al fine di ottimizzare la separazione tra eventi di segnale e di fondo. Le variabili utilizzate sono legate a:

- Cinematica dell'evento
- Identificazione e risoluzione degli oggetti ricostruiti

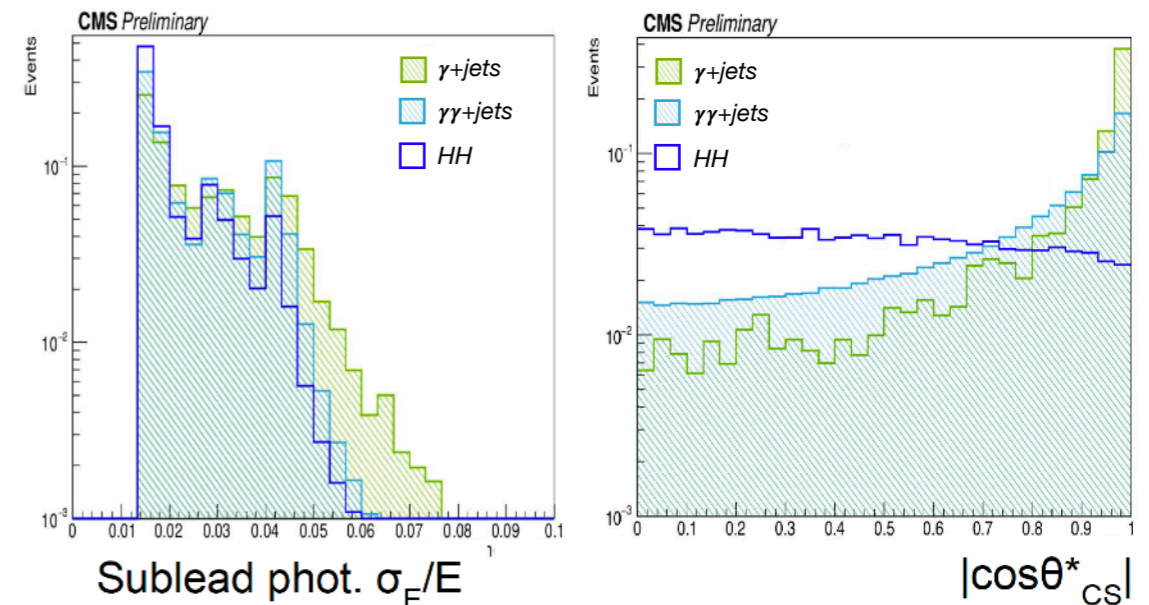
ttH-tagger

Deep Neural Network per distinguere eventi HH da eventi $ttH(\gamma\gamma)$



Classificazione

Boosted Decision Tree per distinguere eventi HH da eventi $\gamma\gamma+jets$ e $\gamma+jets$

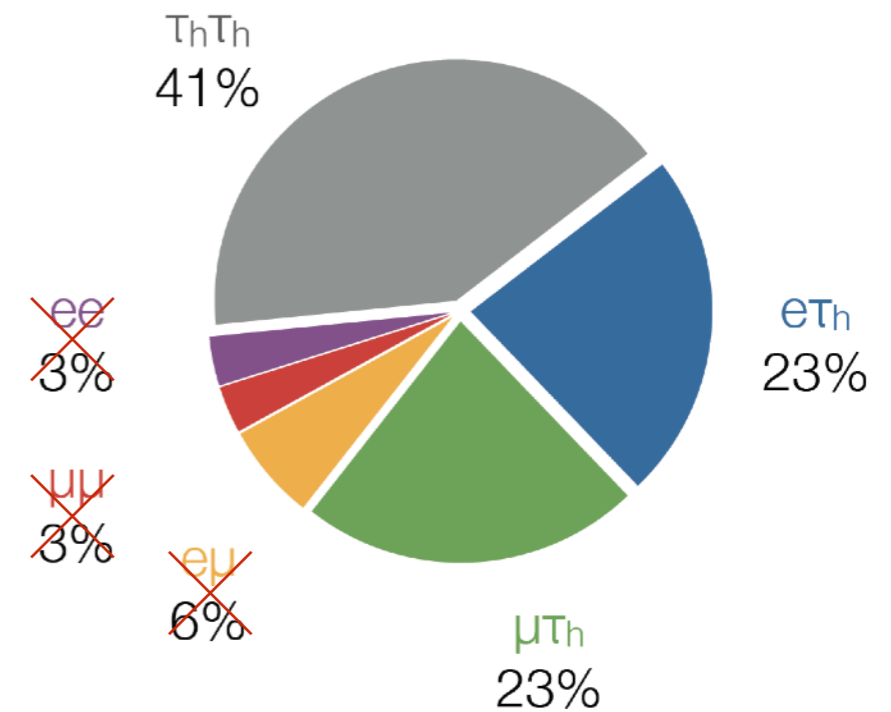


L'output del BDT è combinato con l'informazione della massa invariante del sistema dei 4 corpi per aumentare la purezza S/B e migliorare la sensibilità a valori anomali della massa

Strategia dell'analisi $HH \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-$

Segnatura sperimentale:

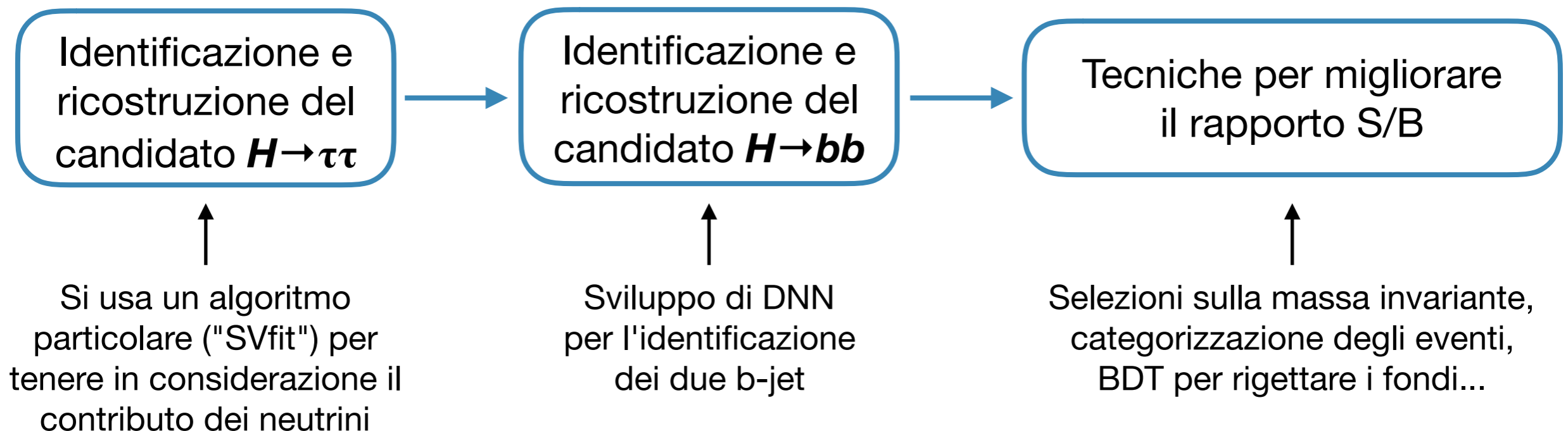
- 2 tau con massa invariante ricostruita a ~ 125 GeV (decadimenti semi-leptonici o hadronici)
- 2 b-jet con massa invariante ricostruita a ~ 125 GeV
- + 2 jet molto energetici nel caso dell'analisi VBF



Fondi principali:

- una coppia di quark-antiquark top
- $Z \rightarrow \tau\tau$ + jet

Workflow (semplificato) dell'analisi:



Ottimizzazione di S/B in $HH \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-$

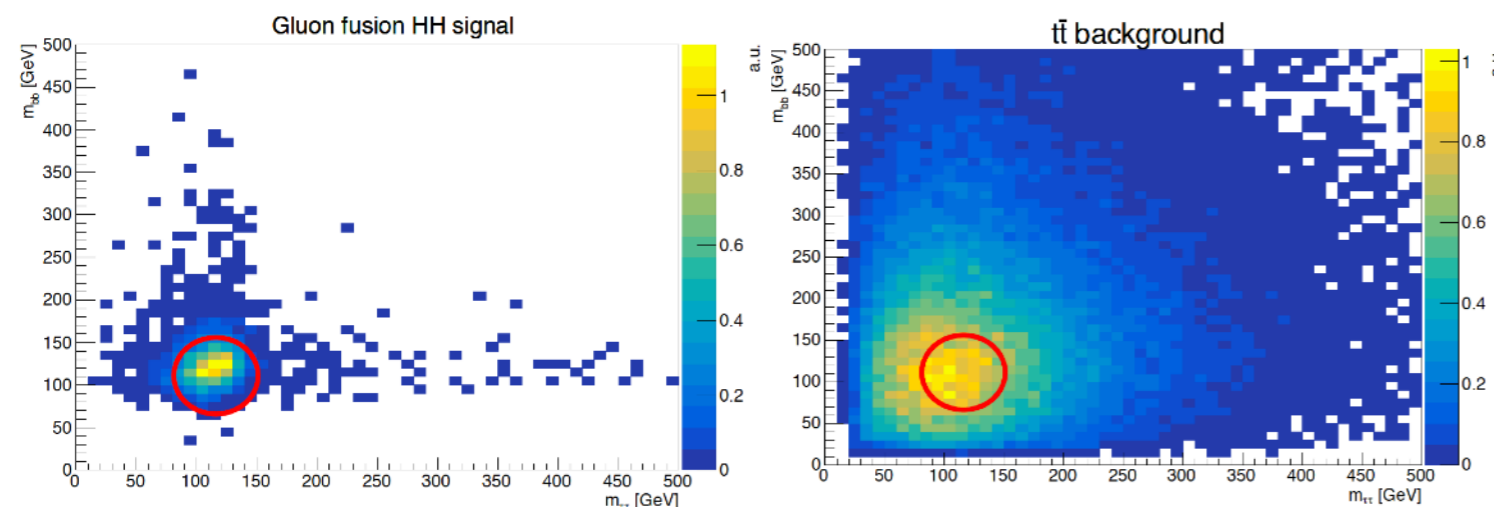
Massa Invariante

Una volta identificati i due candidati $H \rightarrow \tau\tau$ e $H \rightarrow b\bar{b}$, si applica una selezione sulla massa invariante dei due Higgs con il fine di:

- Mantenere la massima efficienza sugli eventi HH
- Rigettare più eventi di fondo possibile

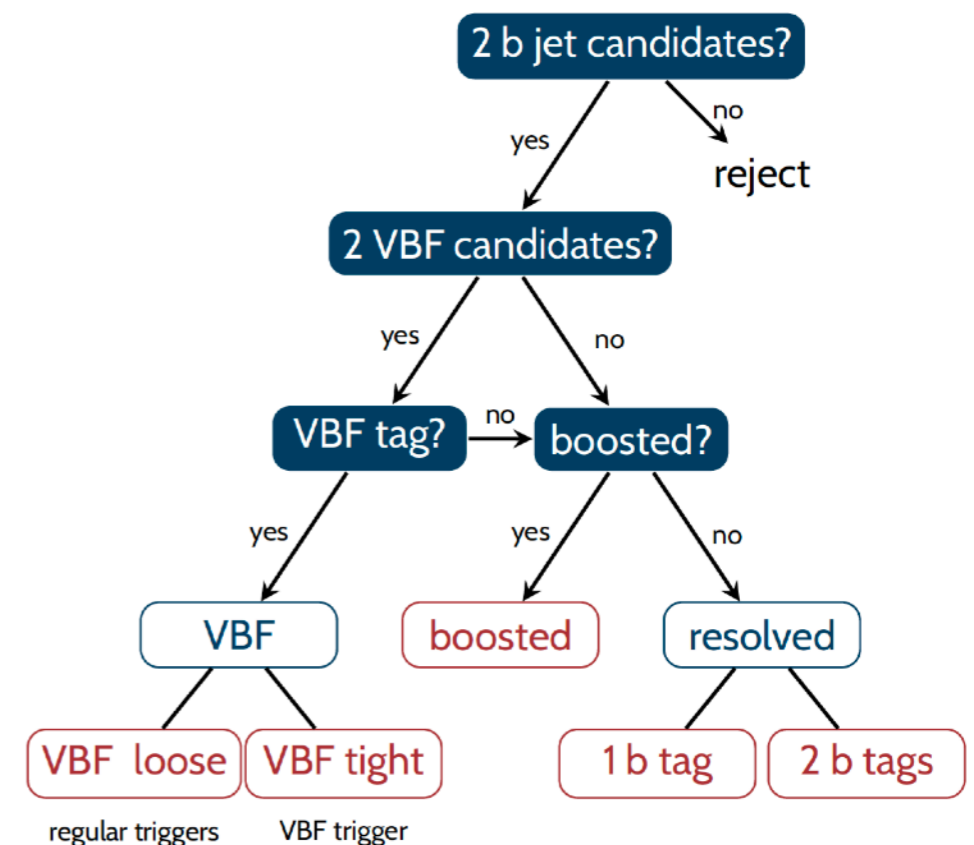
$$\frac{(m_{\tau\tau} - 116 \text{ GeV})^2}{(35 \text{ GeV})^2} + \frac{(m_{bb} - 111 \text{ GeV})^2}{(45 \text{ GeV})^2} < 1$$

Selezione "ellittica": i *centri* sono i valori medi delle distribuzioni di massa m_{bb} e $m_{\tau\tau}$, mentre i raggi sono dati dalle larghezze delle distribuzioni



Categorizzazione

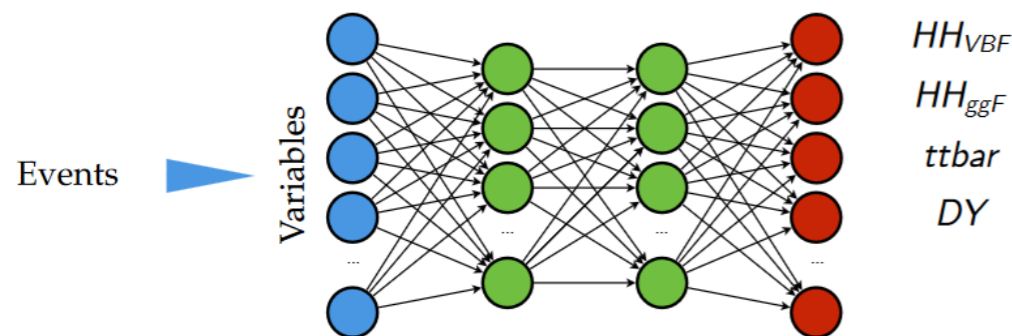
Gli eventi sono suddivisi in categorie che hanno diversi rapporti S/B: la combinazione statistica delle categorie porta al miglior risultato



Strategia delle analisi VBF

- La ricerca di eventi HH prodotti tramite VBF è **la più recente aggiunta** nelle analisi con due bosoni di Higgs in CMS
- Al momento, dato il limitato numero di eventi disponibili, siamo ancora all'inizio dello studio dei processi VBF
- Ma, in previsione della statistica futura, è un'**occasione ideale per sviluppare tecniche di analisi innovative** e migliorare quelle già esistenti
- Due approcci investigati da entrambe le analisi ($bb\tau\tau$ e $bb\gamma\gamma$)

Multi-classificazione



Permette di classificare gli eventi direttamente in base al processo che li ha generati (quindi dividere Gluon Fusion dalla VBF e dai fondi)

MVA1 + MVA2

MVA1: Per distinguere gli eventi di fondo dagli eventi HH

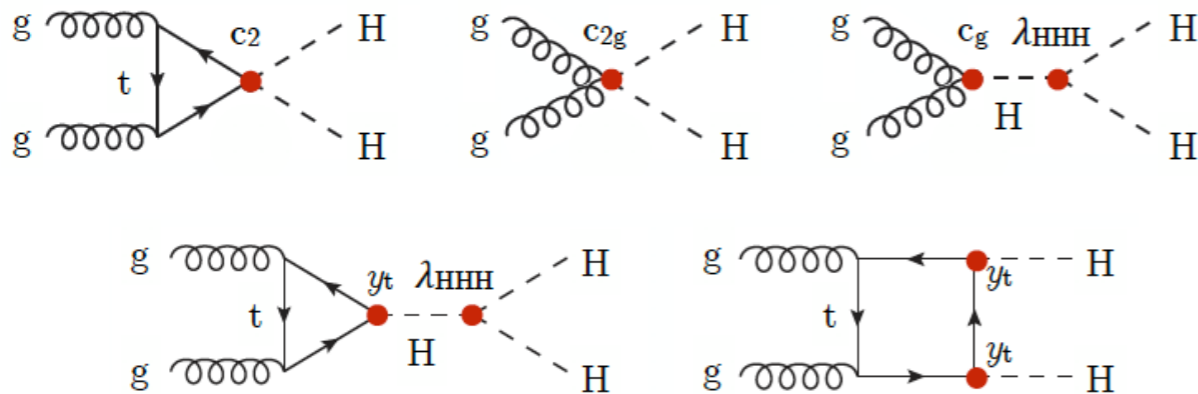
+

MVA2: Applicata agli eventi selezionati dalla prima MVA, permette di distinguere Gluon Fusion da VBF

Produzione HH oltre il Modello Standard

Produzione Non Risonante

- Si utilizza un approccio EFT

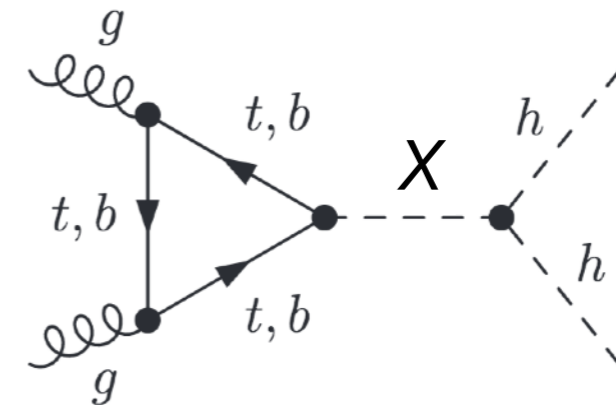


- Effetti molto evidenti sia sulla sezione d'urto di produzione, che sulla cinematica dell'evento

⇒ Incremento della sensibilità a processi oltre il Modello Standard

Produzione Risonante

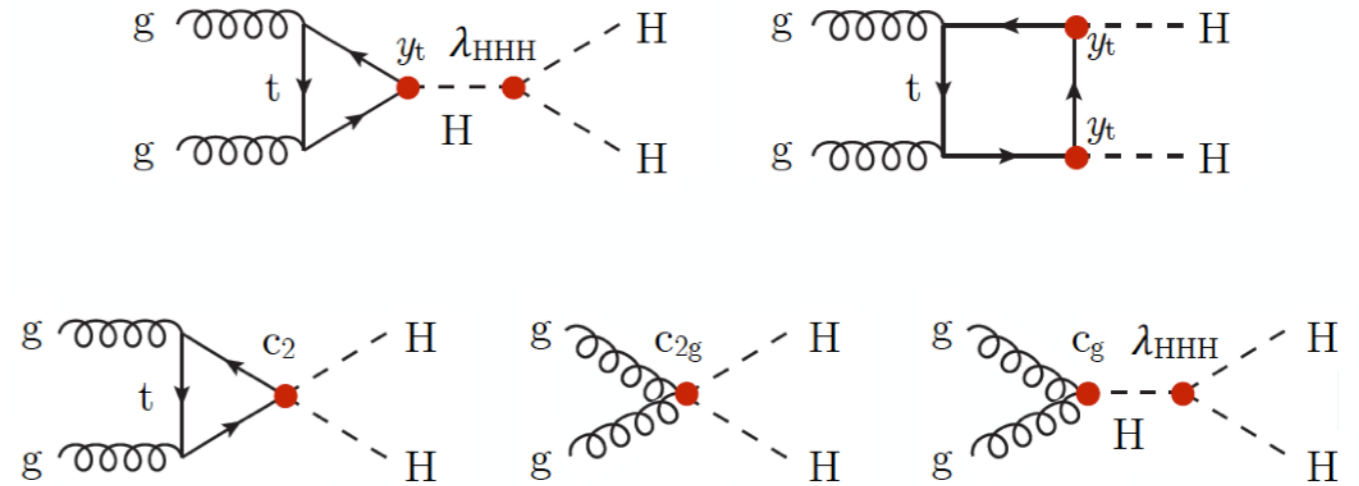
- Possibilità di studi su un settore molto ampio di teorie



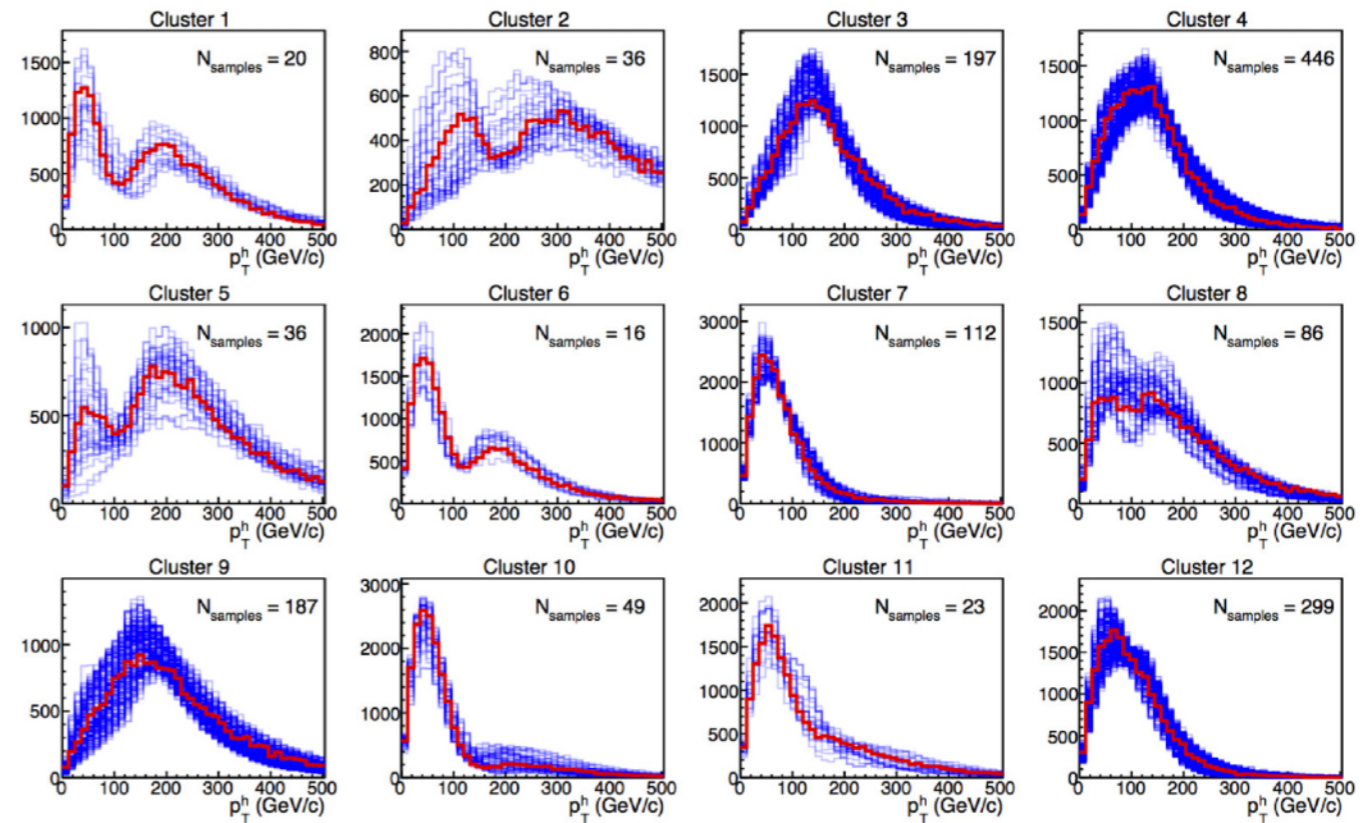
- Processo predetto da vari modelli:
 - MSSM/2HDM
 - Singlet model
 - Warped Extra Dimensions
 - Radione a spin-0
 - Gravitone a spin-2
 - ...

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i^6 + \dots$$

- La sezione d'urto HH può essere espressa in funzione di 5 parametri EFT
- Identificati 12 clusters in base alle caratteristiche cinematiche



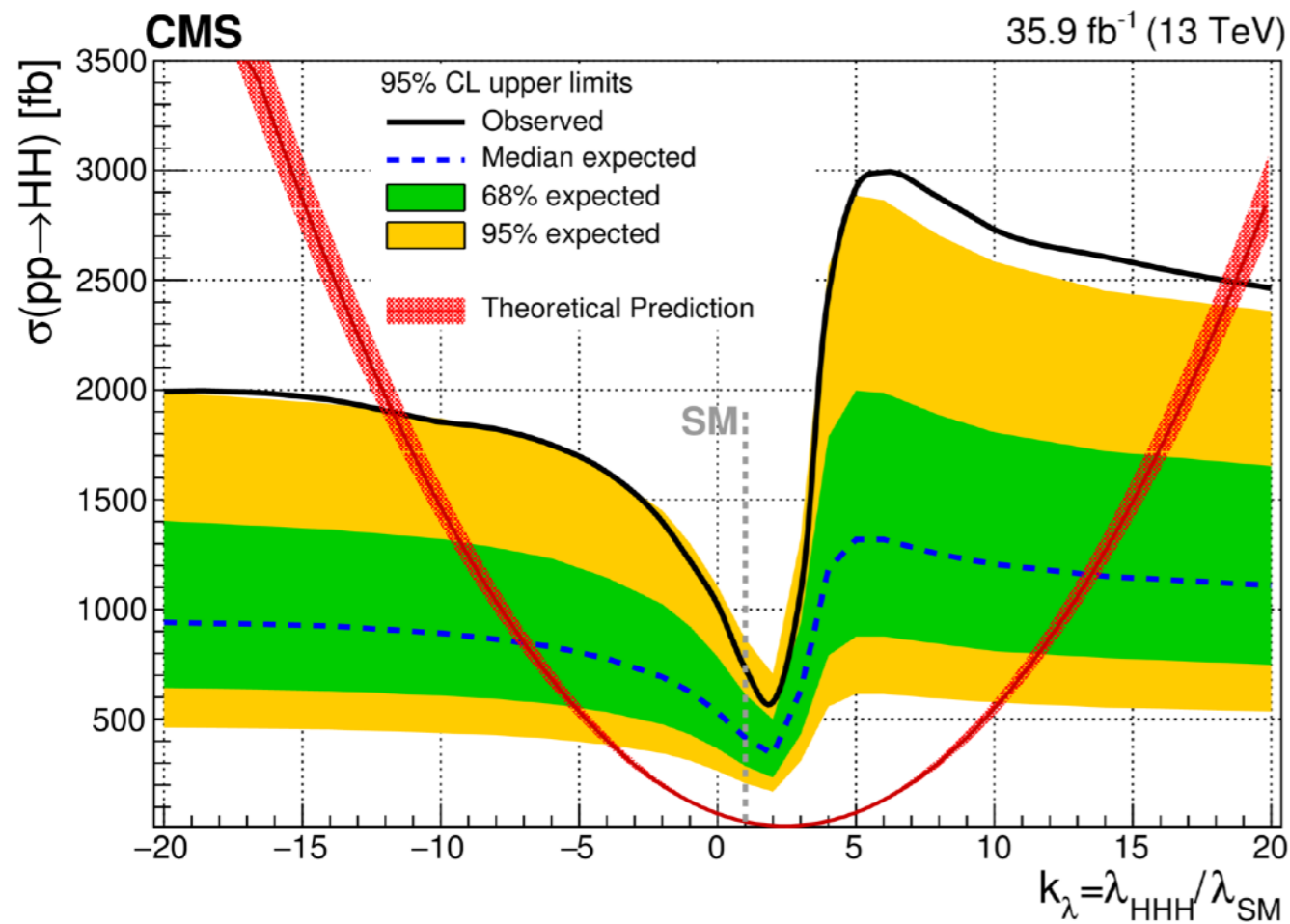
Benchmark	κ_λ	κ_t	c_2	c_g	c_{2g}
1	7.5	1.0	-1.0	0.0	0.0
2	1.0	1.0	0.5	-0.8	0.6
3	1.0	1.0	-1.5	0.0	-0.8
4	-3.5	1.5	-3.0	0.0	0.0
5	1.0	1.0	0.0	0.8	-1
6	2.4	1.0	0.0	0.2	-0.2
7	5.0	1.0	0.0	0.2	-0.2
8	15.0	1.0	0.0	-1	1
9	1.0	1.0	1.0	-0.6	0.6
10	10.0	1.5	-1.0	0.0	0.0
11	2.4	1.0	0.0	1	-1
12	15.0	1.0	1.0	0.0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



HH: Risultati di CMS con i dati 2016

I risultati delle analisi sui vari canali vengono statisticamente combinati tra loro:

- Per sfruttare al massimo tutti i dati raccolti
- Per ottenere un miglior risultato



Limiti Osservati ed Attesi:

$$-11.8 < k_\lambda < 18.8 \text{ (obs.)}$$

$$-7.1 < k_\lambda < 13.6 \text{ (exp.)}$$