

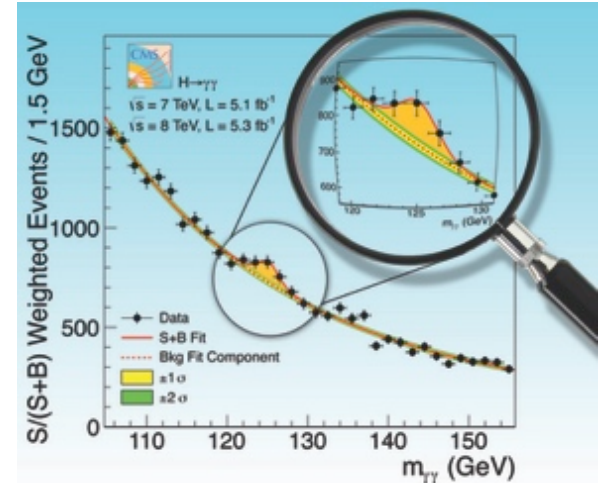
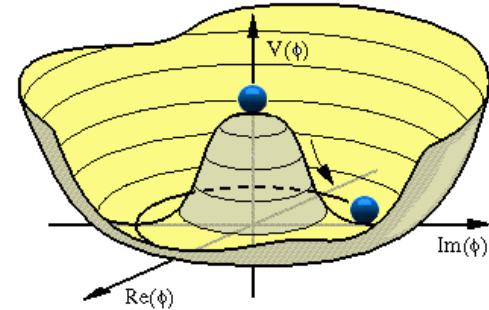
Il carattere del bosone di Higgs: una relazione da approfondire

M. Malberti, S. Gennai (INFN Milano Bicocca)
per il gruppo CMS MiB

20 Maggio 2020

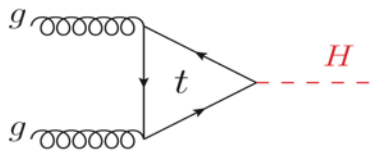
Il bosone di Higgs

- Meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole nel Modello Standard delle Interazioni Fondamentali - Brout, Englert, Higgs (1964)
 - spiegazione alle masse delle particelle
 - la teoria predice esistenza di un bosone massivo (bosone di Higgs)
- Scoperta nel 2012 al LHC del CERN particella compatibile con il bosone di Higgs del Modello Standard (MS)
- Fino ad ora, tutte le osservazioni sono in ottimo accordo, entro le incertezza sperimentali, con le previsioni del MS ma rimangono ancora molti interessanti aspetti da esplorare
- Misure di precisione delle proprietà dell'Higgs
 - costituiscono un test della validità della teoria
 - aprono una nuova finestra su possibili effetti oltre il MS (sappiamo che il MS non è una teoria completa)



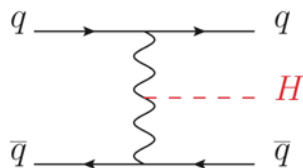
Come viene prodotto a LHC?

Principali meccanismi di produzione



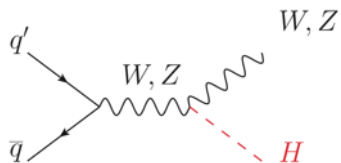
- **Fusione di gluoni** **87%**

$\sigma(\text{ggH}) \sim 49 \text{ pb}$ @ 13 TeV
 $\sim 50\text{k}$ eventi prodotti per fb^{-1}



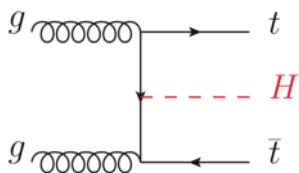
- **Fusione di bosoni vettori (W, Z)** **7%**

$\sigma(\text{VBF}) \sim 3.8 \text{ pb}$ @ 13 TeV



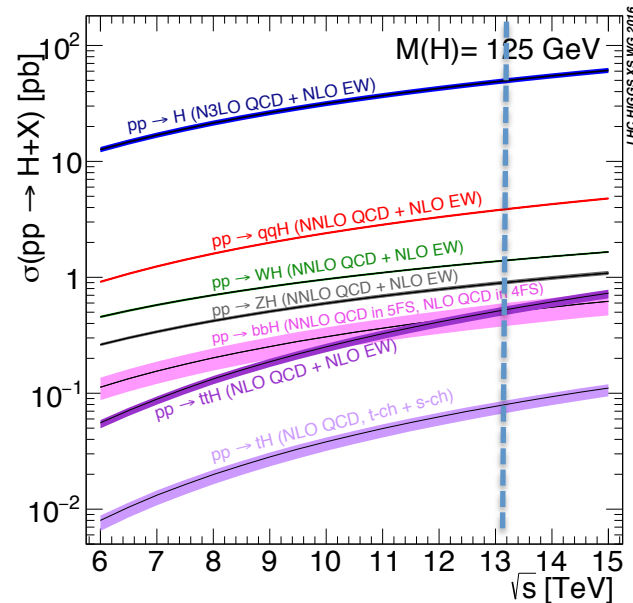
- **Produzione associata a W,Z** **4%**

$\sigma(\text{VH}) \sim 2.3 \text{ pb}$ @ 13 TeV

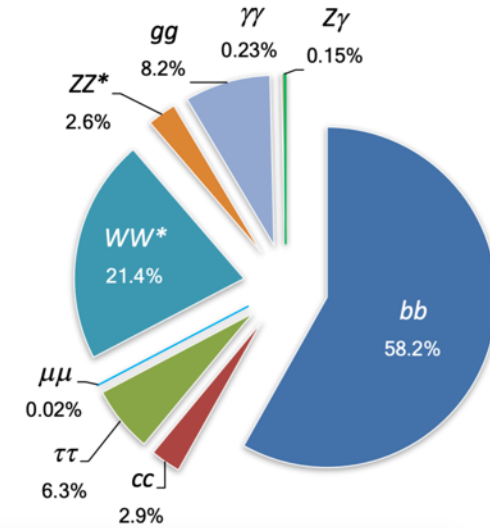
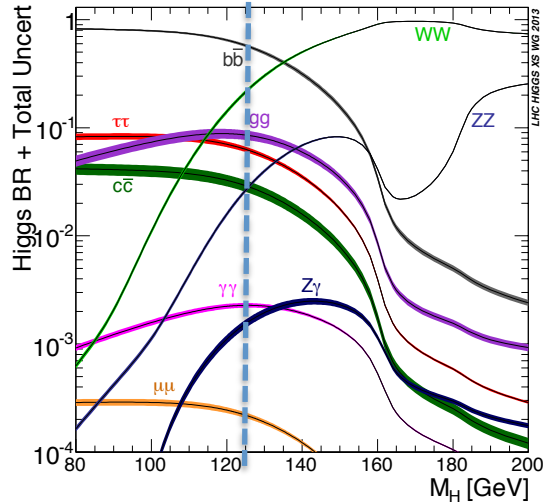


- **Produzione associata ttH** **1%**

$\sigma(\text{ttH}) \sim 0.5 \text{ pb}$ @ 13 TeV



Come decade?



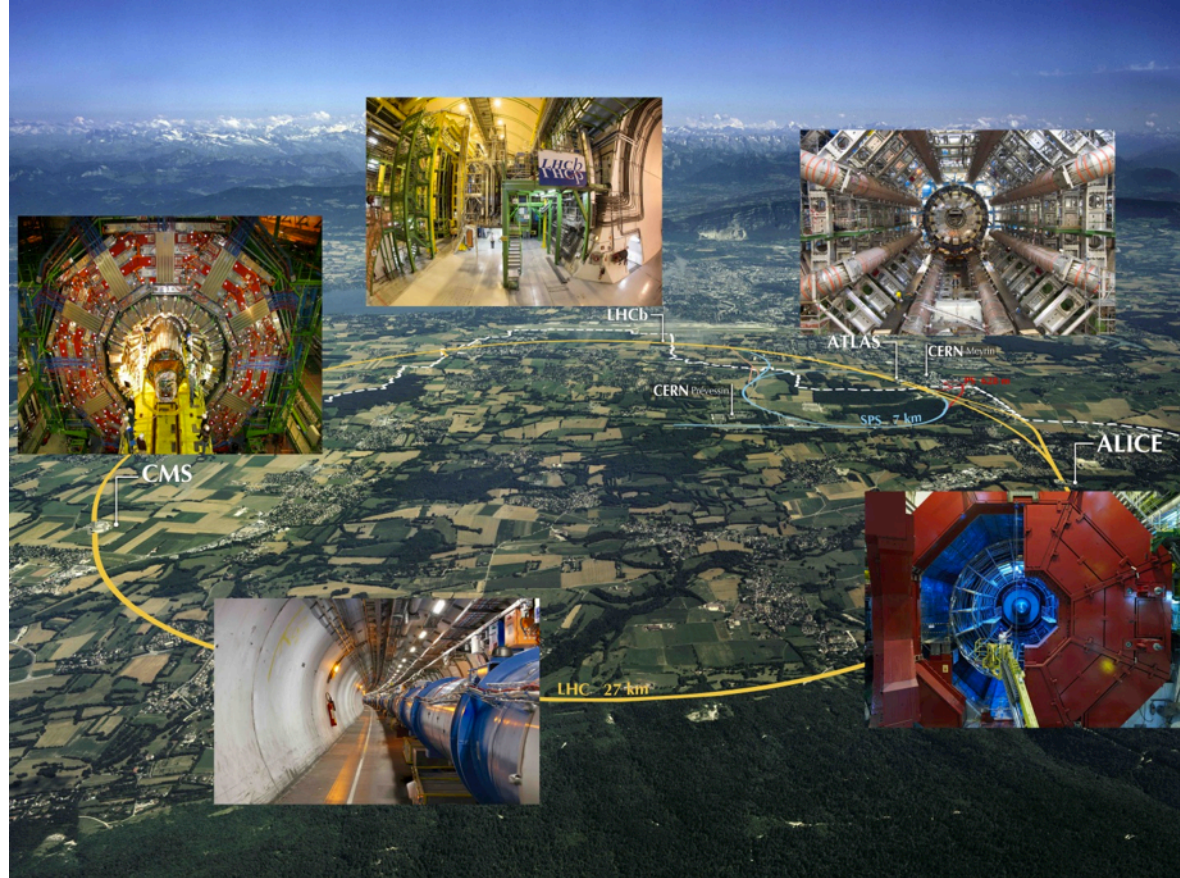
$$g_F = \sqrt{2} \frac{m_f}{v}$$

$$g_V = 2 \frac{m_V^2}{v}$$

- Per $m_H = 125$ GeV ampio range di canali di decadimento
- Costante di accoppiamento dipende dalle masse \rightarrow Higgs tende a decadere nella particella più pesante accessibile

Il Large Hadron Collider

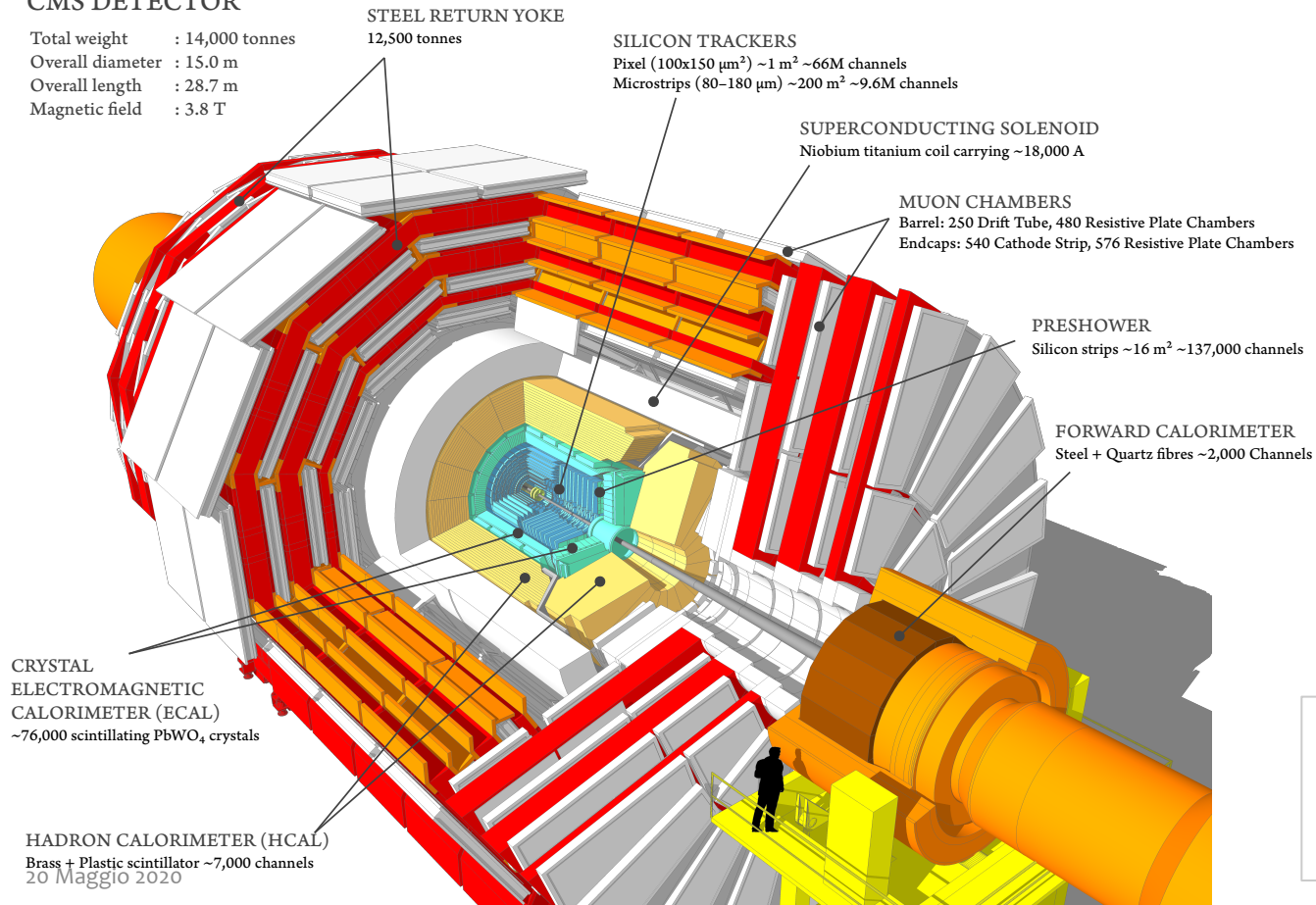
- Collisioni protone-protone a una energia nominale nel centro di massa di 14 TeV
- Run1 (2010-2012)
 - $L_{\text{int}} \sim 25 \text{ fb}^{-1}$, $E_{\text{c.m.}} = 7\text{-}8 \text{ TeV}$
- Run2 (2015-2018)
 - $L_{\text{int}} \sim 150 \text{ fb}^{-1}$, $E_{\text{c.m.}} = 13 \text{ TeV}$
- Run3 (dal 2021)
 - 300 fb^{-1} , 13-14 TeV
- High-Luminosity LHC (dal 2027)
 - 3000 fb^{-1} , 14 TeV



Il rivelatore CMS

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

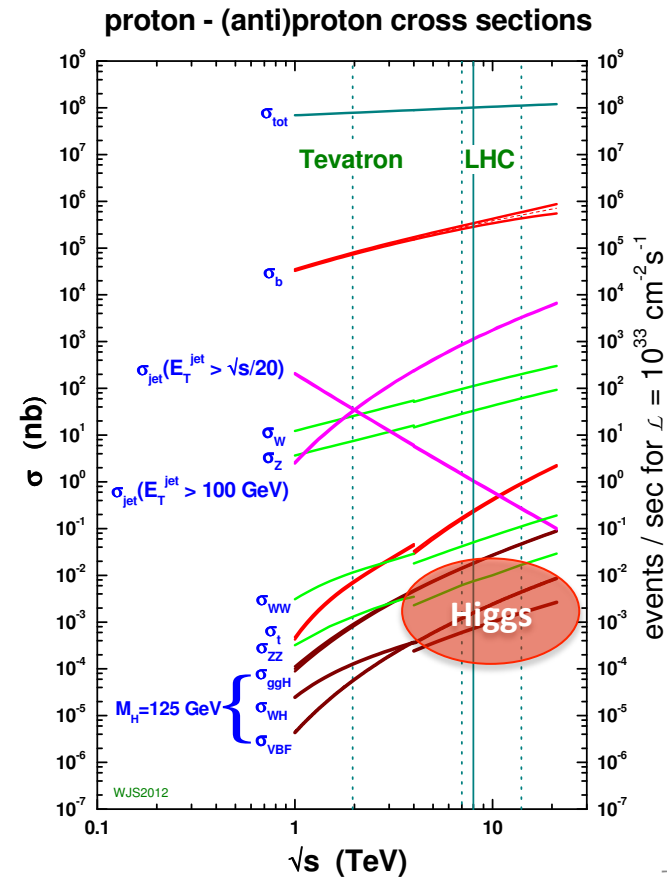
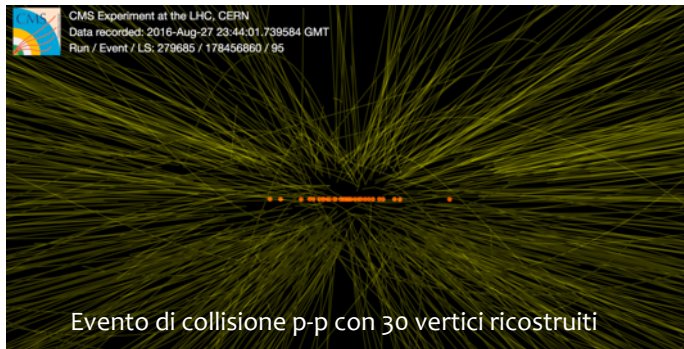


- Tracciatore a silicio per misura precisa di tracce, vertici, e tagging dei decadimenti del quark b
- Calorimetro elettromagnetico \rightarrow misura dell'energia di fotoni e elettroni con risoluzione $O(1\%)$
- Calorimetro adronico per misura del quadrimomento dei jet
- Camere a muoni

Il gruppo CMS MiB coinvolto nella costruzione e mantenimento del tracciatore (pixel) e calorimetro elettromagnetico

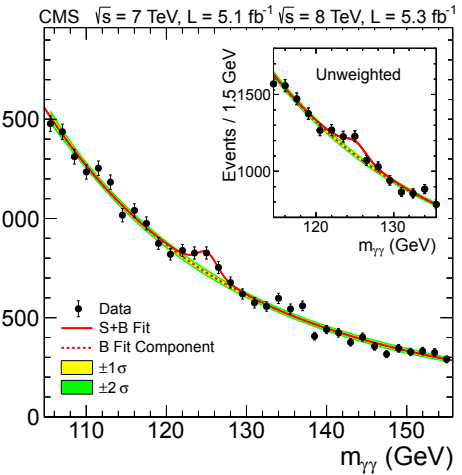
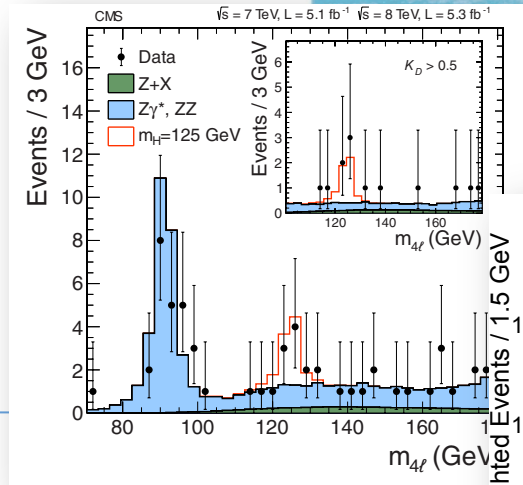
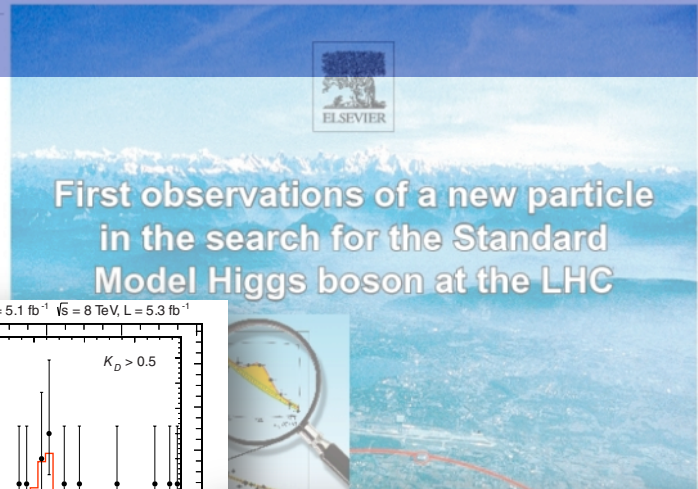
Sfide sperimentali a LHC

- Trigger
 - tasso di collisioni 40 MHz, capacità di storage ~1kHz
 - > necessario selezionare online in modo efficiente gli eventi di interesse
- Reiezione degli eventi di fondo
 - altri processi con grande sezione d'urto e stato finale simile a eventi con H
 - > uso di tecniche di analisi molto avanzate (spesso uso di Machine Learning)
- Pileup degli eventi :
 - in media ~ 40 interazioni simultanee per bunch crossing
 - può deteriorare ricostruzione degli oggetti, efficienza, misura energia
 - > necessari sofisticati algoritmi di ricostruzione



La scoperta

- 4 luglio 2012: annuncio della scoperta di una particella di massa ~ 125 GeV, compatibile con l'Higgs del MS
- Scoperta ottenuta combinando i risultati della ricerca in diversi canali: ZZ, $\gamma\gamma$, WW, bb, $\tau\tau$
- Guidata dai canali $H \rightarrow ZZ$ (4lept) e $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - ricostruzione completa dello stato finale
 - eccellente risoluzione in massa invariante
- Osservata da entrambi gli esperimenti (ATLAS, CMS)
- 2013: Premio Nobel per la fisica a P. Higgs e F. Englert



The Nobel Prize in Physics 2013

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2013 to

François Englert

Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

Peter W. Higgs

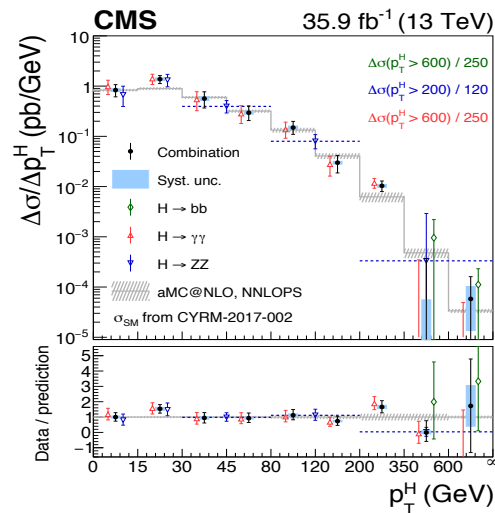
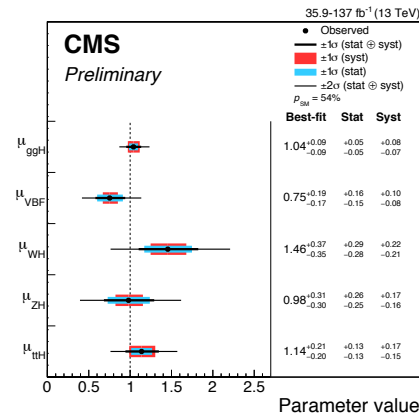
University of Edinburgh, UK

“for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider”

20 Maggio 2020

E' il bosone di Higgs del Modello Standard?

- Scoperta in Run1 con $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$ (7+8 TeV)
- Run2, accumulati $\sim 150 \text{ fb}^{-1}$ a 13 TeV
 - x15 luminosità integrata
 - x2-4 sezione d'urto di produzione dell'Higgs ($8 \rightarrow 13 \text{ TeV}$)
- Obiettivo del Run2: **misure sempre più precise per verificare compatibilità con previsioni del MS**
- Quali misure?
 - misura del rate di segnale per i singoli modi di decadimento ($\mu = \sigma_{\text{misurato}}/\sigma_{\text{SM}}$)
 - misure del rate di diversi meccanismi di produzione
 - misure differenziali (ad es. in p_T^H)
 - effetti di scenari alternativi
 - studiati come fattori moltiplicativi k_i alle costanti di accoppiamento dell'Higgs alle diverse particelle ($k_i=1$ per MS)

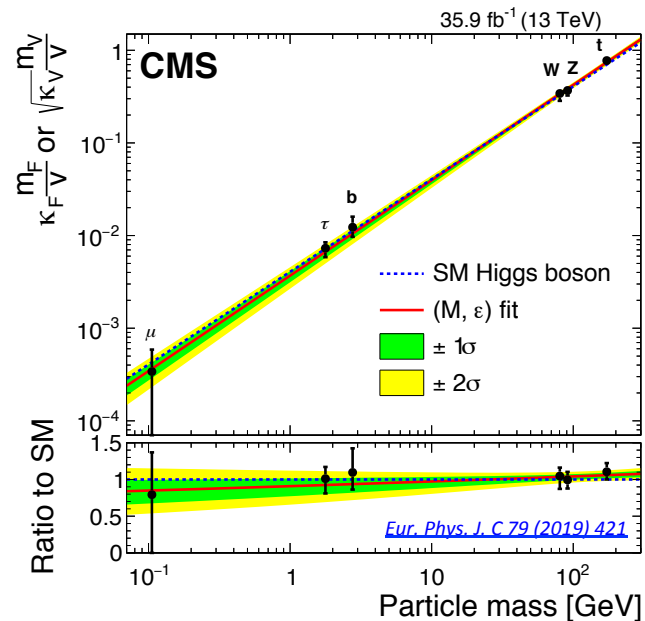


E' il bosone di Higgs del Modello Standard?

Principali risultati ottenuti :

- esplorati tutti i maggiori canali di produzione e decadimento
- massa misurata con precisione $\sim 0.1\%$
 - parametro importante: da esso dipendono tutte le previsioni del MS
 - precisione attuale comporta inaccuratezza trascurabile sulle previsioni
- spin/parità compatibile con ipotesi SM (0^+)
- precisione sugli accoppiamenti $\sim 10\text{-}15\%$ (eccetto con muoni, elettroni)
- completata osservazione dell'accoppiamento ai fermioni della terza generazione (τ , b, top)
- misure di sezione d'urto differenziali e in diverse regioni dello spazio delle fasi

Fino ad ora tutte le osservazioni sono in accordo, entro le incertezze sperimentali, con le previsioni del Modello Standard

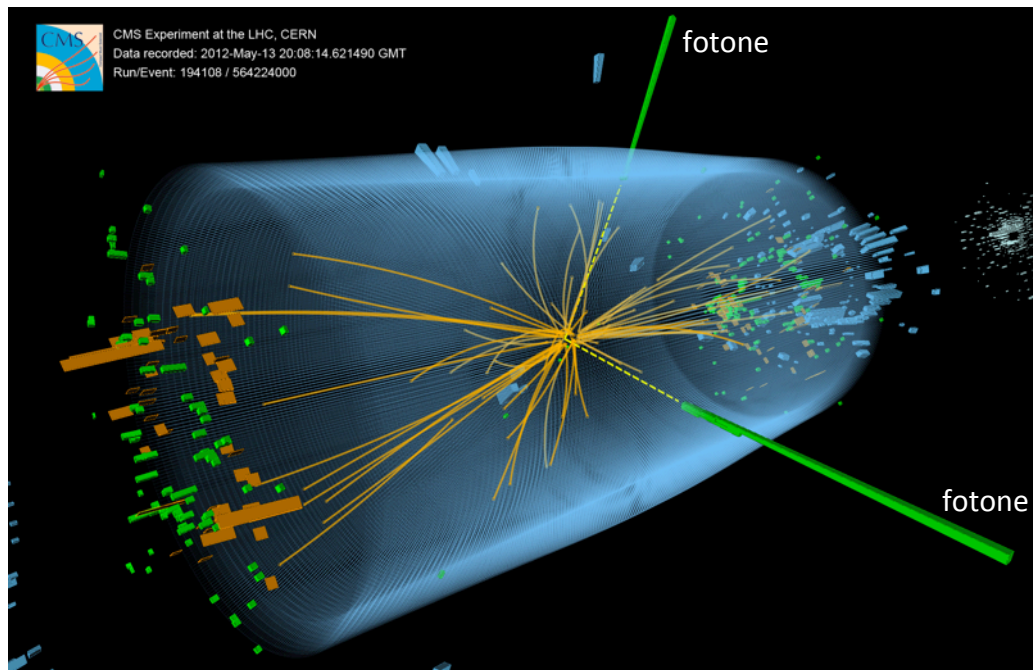


Ricerca e caratterizzazione del bosone di Higgs a Milano-Bicocca

Il gruppo di ricerca di Milano-Bicocca ha partecipato alla ricerca ed alla scoperta del bosone di Higgs in diversi canali di decadimento, legati alle esperienze di analisi dati e di competenza strumentale presenti, ricoprendo ruoli di primo piano all'interno della collaborazione sperimentale

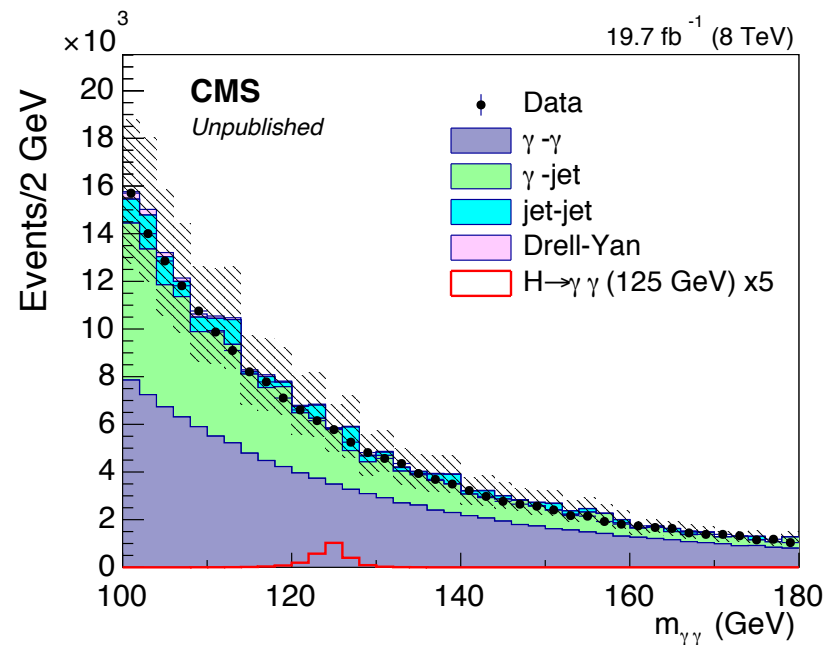
- $H \rightarrow \gamma\gamma$
- $H \rightarrow WW$
- $H \rightarrow \tau\tau$

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



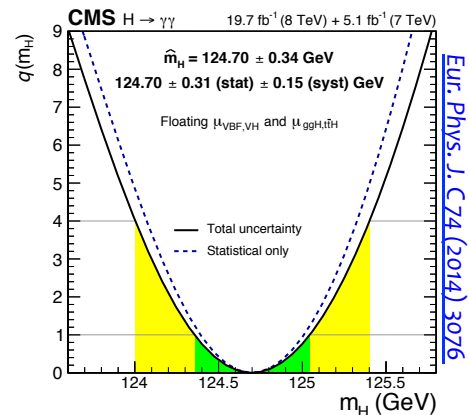
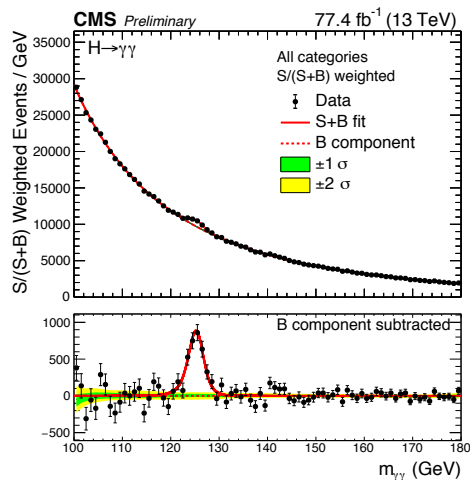
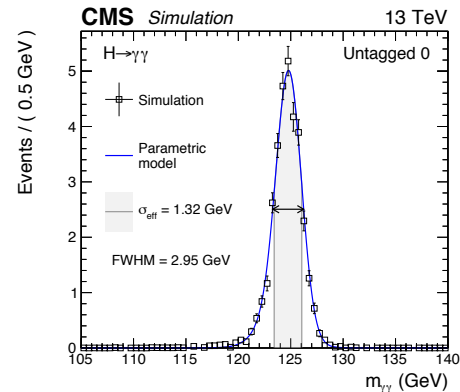
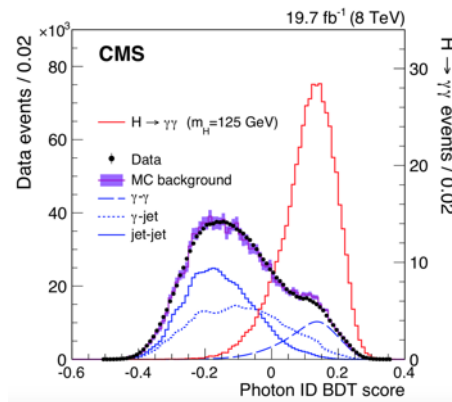
Proprietà

- BR solo $\sim 0.2\%$, ma segnatura sperimentale molto chiara: due fotoni isolati di alto momento trasverso
- Ricerca di un picco nello spettro di massa invariante dei due fotoni su un fondo continuo decrescente molto elevato
 - fondi principali: fotoni 'prompt' ($\gamma\gamma$) e fotoni 'fake' (γ +jets, jet+jet)
- Mediato da loop sia in produzione (ggH) che decadimento \rightarrow potenzialmente interessante per effetti di nuova fisica



Strategia di analisi

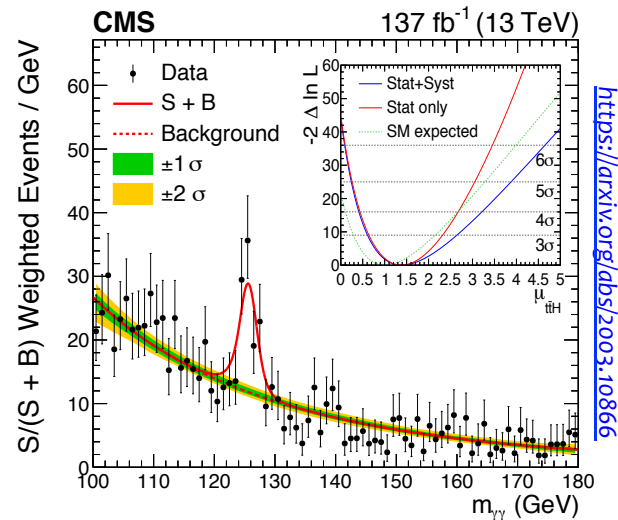
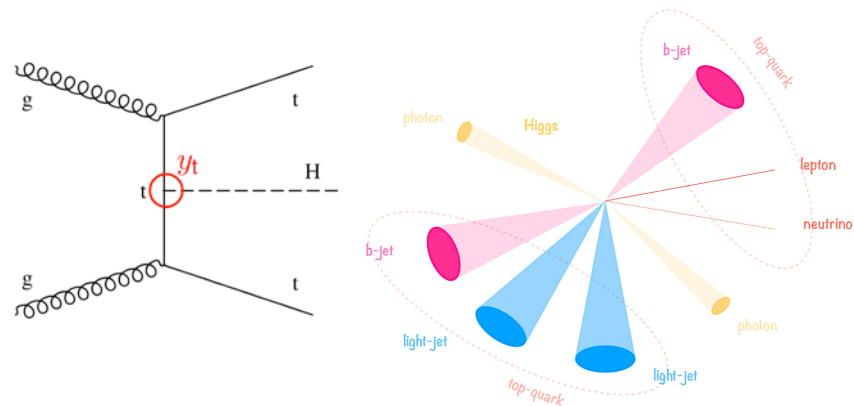
- **Cruciale la qualità della risposta del rivelatore e della ricostruzione dei fotoni → calorimetro elettromagnetico**
 - con alta granularità → discriminazione jet/ γ
 - con eccellente risoluzione energetica → picco stretto in $m_{\gamma\gamma}$, $\sigma_m/m \sim O(1\%)$
- La strategia di analisi sfrutta
 - variabili cinematiche, risoluzione in $m_{\gamma\gamma}$, qualità dei fotoni per discriminare eventi di segnale da fondo
 - selezioni dedicate per studiare meccanismi di produzione esclusivi VBF, VH, ttH
- Segnale estratto da fit di segnale+fondo, dove **il fondo modellato direttamente dai dati**
- Uno dei canali principali che ha contribuito alla **scoperta e alla misura della massa**



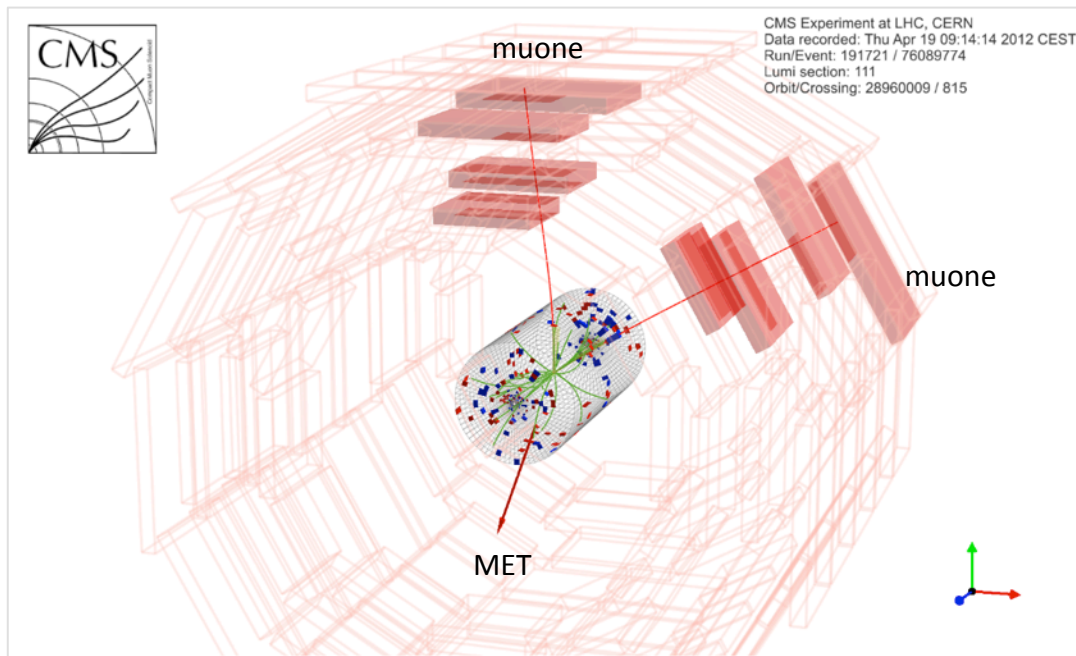
Eur. Phys. J. C74 (2014) 3076

Misura diretta dell'accoppiamento di Yukawa al top

- Misura accoppiamento al top è una delle più importanti dopo la scoperta del Higgs
- Perché interessante?
 - il top è la particella più pesante $\rightarrow y_{\text{top}} \sim 1$
- **Misura diretta** possibile solo studiando la **produzione ttH**
- Processo **raro**, prima osservazione nel 2018 combinando tutti i canali di decadimento dell'Higgs
- **Stato finale complesso**: prodotti di decadimento dell'Higgs + prodotti di decadimento del top (jets, b-jets, leptoni)
- Risultati principali del Run2 per $ttH(\rightarrow\gamma\gamma)$
 - prima osservazione di produzione ttH in singolo canale di decadimento
 - migliore precisione (20%) su $\sigma \times \text{BR}(H \rightarrow \gamma\gamma)$
 - primo test della struttura CP dell'accoppiamento di Yukawa al top: puro "CP-odd" escluso a $>3\sigma$

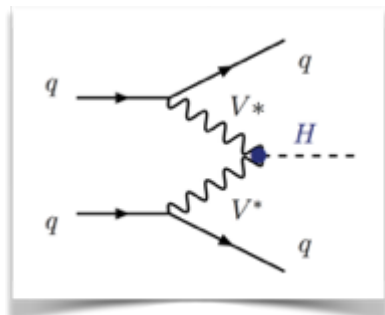
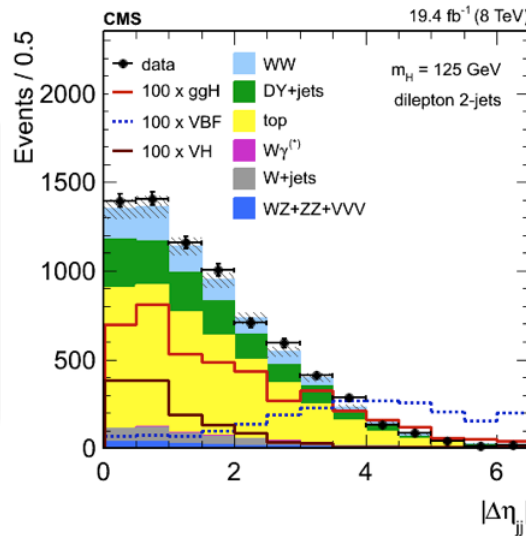
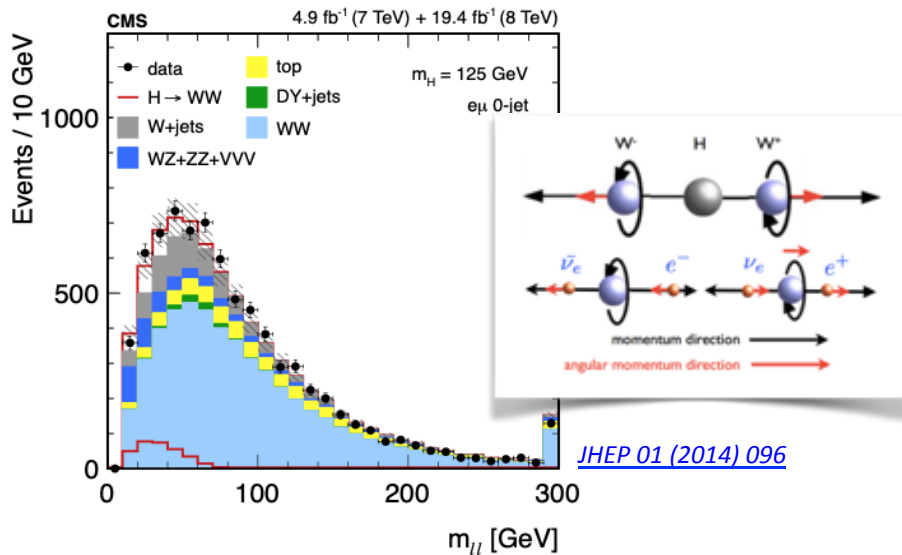
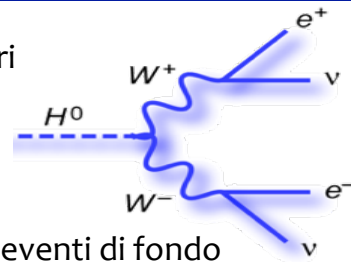


$H \rightarrow WW (2l2\nu)$



H → WW (2l2ν): proprietà, sfide e strategie di analisi

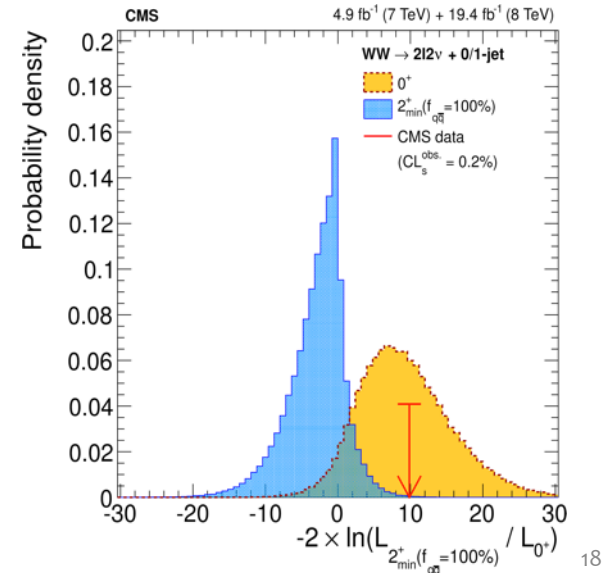
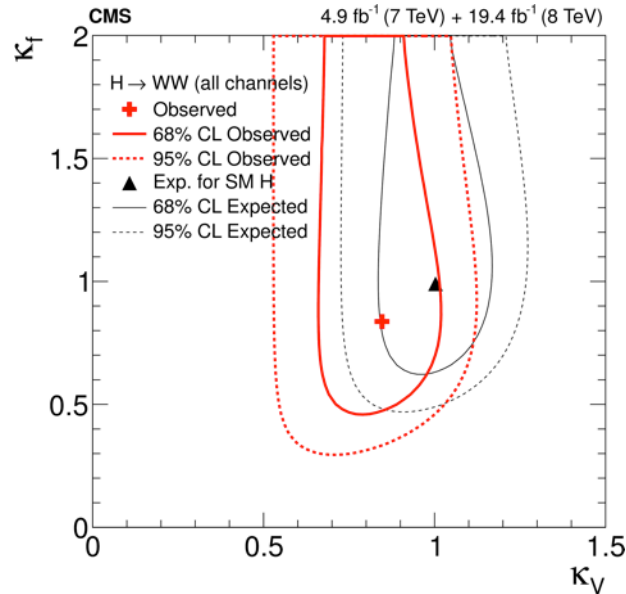
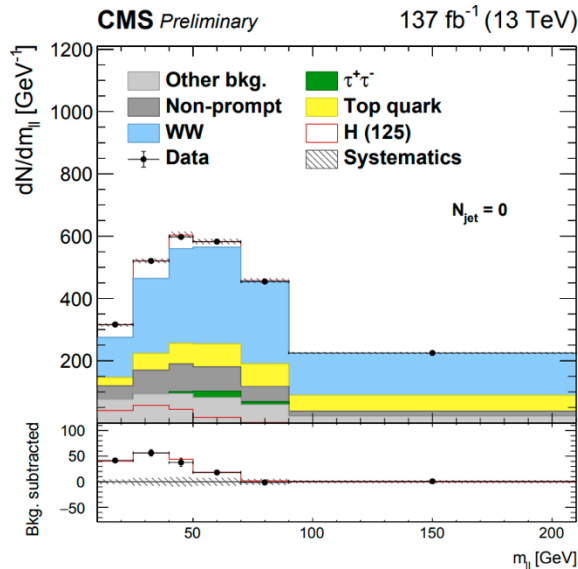
- Vantaggi: **largo BR** → ideale per misura precisa di sezione d'urto, studio di modi di produzione più rari
- Svantaggi:
 - molti eventi di fondo da diversi processi (WW, top, ...)
 - molta energia persa perché neutrini dello stato finale non sono rilevabili direttamente
- necessario identificare variabili discriminanti complesse e applicare selezioni stringenti per ridurre gli eventi di fondo
 - correlazioni angolari che derivano dalla conservazione del momento angolare nel decadimento del bosone di Higgs
 - massa invariante (trasversa) dei prodotti di decadimento
 - per meccanismi di produzione esclusivi, selezioni dedicate



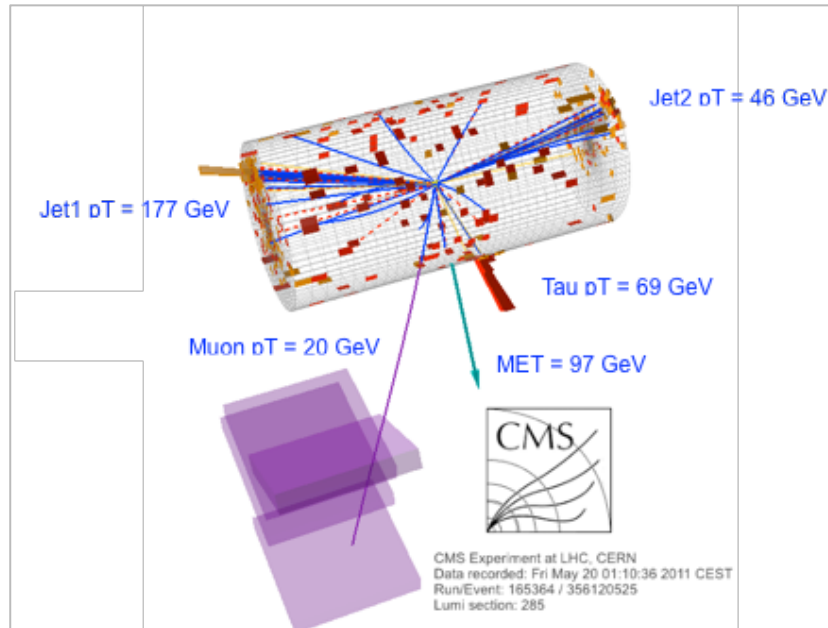
produzione VBF
due jet forward con grande separazione in pseudorapidità

Risultati principali

- Misura della sezione d'urto
- Misura del coefficiente di accoppiamento HWW (κ_V)
- Test dello spin
 - sfruttando correlazioni angolari, costruzione di distribuzioni sensibili ai diversi spin e test di ipotesi \rightarrow MS (0^+) favorito

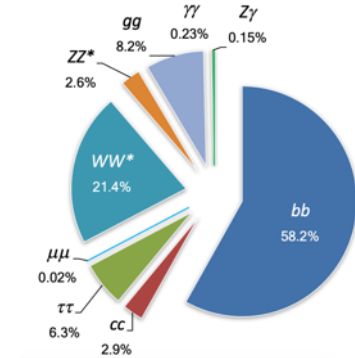


$H \rightarrow \tau\tau$

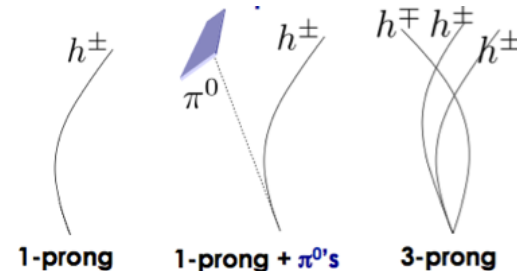


Perchè scegliere i τ ?

- Uno dei pochi canali che permette la **misura di accoppiamenti ai fermioni**
 - unico al momento che misura accoppiamento ai leptoni!
 - nonostante un BR minore rispetto a $H \rightarrow bb$, S/B paragonabile se non migliore
- Perché i decadimenti adronici?
 - maggiore statistica
 - maggiore energia visibile e quindi migliore risoluzione in massa invariante



| Decay Mode | Resonance | \mathcal{B} [%] |
|---|-------------|-------------------|
| $\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ | | 17.8 |
| $\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ | | 17.4 |
| $\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau$ | | 11.5 |
| $\tau^- \rightarrow h^- \pi^0 \nu_\tau$ | $\rho(770)$ | 26.0 |
| $\tau^- \rightarrow h^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ | $a_1(1260)$ | 10.8 |
| $\tau^- \rightarrow h^- h^+ h^- \nu_\tau$ | $a_1(1260)$ | 9.8 |
| $\tau^- \rightarrow h^- h^+ h^- \pi^0 \nu_\tau$ | | 4.8 |
| Other hadronic modes | | 1.8 |
| All hadronic modes | | 64.8 |

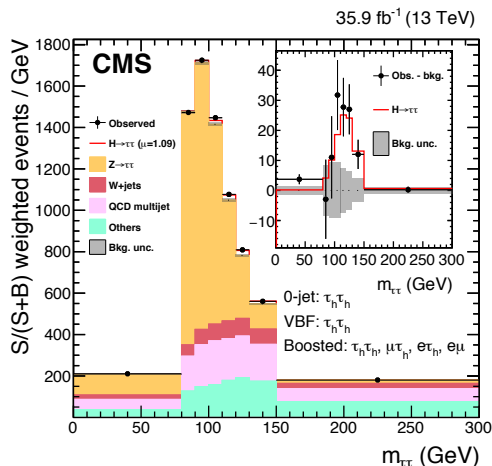


Possibilità di ricostruzione dei vari stati finali grazie a tecniche di particle flow.

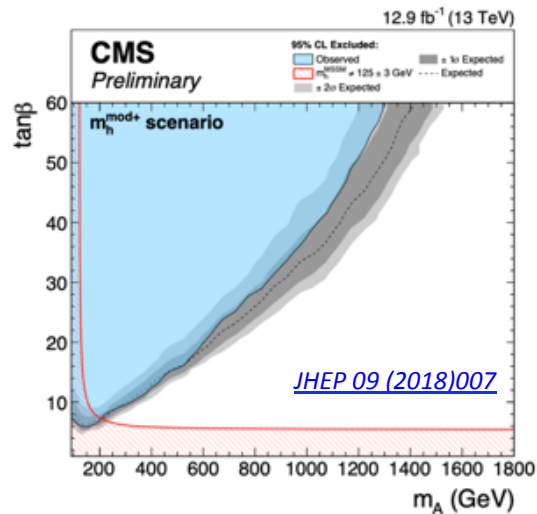
DNN usate per identificare i candidati maggiormente isolati

Strategia di analisi

- Campione di dati diviso in diverse categorie ottimizzate in funzione dei canali di produzione e S/B
 - tutti i possibili stati finali sono considerati: $e+\tau$, $\mu+\tau$, $e+\mu$, $\tau\tau$
- Segnale estratto tramite fit multidimensionali
 - variabile più importante è la massa invariante del sistema leptoni + energia trasversa mancante
 - metodo complesso per ricostruire a partire dalla MET e dalla direzione di volo dei τ il quadrimomento dei neutrini e poter risalire alla massa invariante dei due τ prima del loro decadimento
- L'analisi è anche stata la prima a porre limiti di esclusioni in modelli MSSM raggiungendo valori di m_A sopra il TeV



[Phys. Lett. B 779 \(2018\) 283](#)



A tree-level, MSSM può essere descritto da due parametri:
 m_A = massa dello stato pesante CP-dispari
 $\tan\beta$ = rapporto tra i valori di aspettazione sul vuoto dei due doppietti di Higgs del MSSM

Prospettive per il futuro: Run3 e oltre

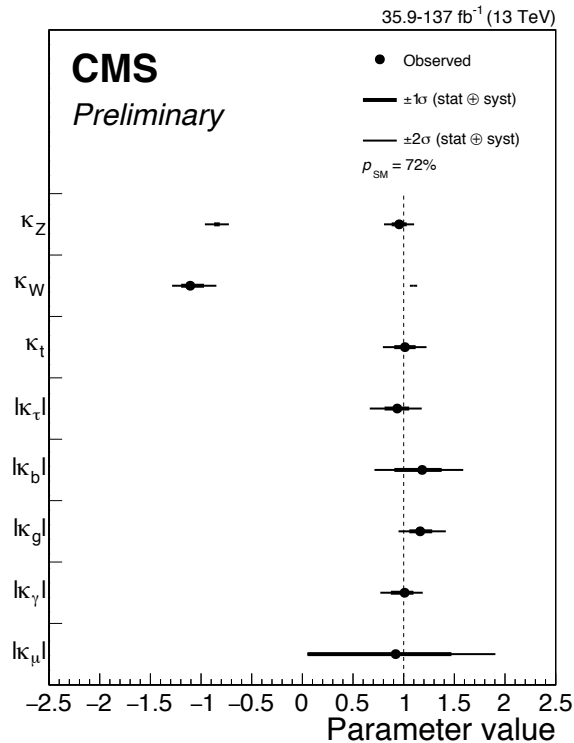
- Run3 di LHC a partire dal 2021 (300 fb^{-1}). High-Luminosity LHC (2027), 3000 fb^{-1} in 10 anni

Quali i principali obiettivi per il futuro?

- Continuare **misure di precisione** degli accoppiamenti
- Esplorare il più possibile tutte le regioni cinematiche alla ricerca di deviazioni dal SM
- Focus su **decadimenti rari e modi di produzione rari**
 - $H \rightarrow \mu\mu$, $H \rightarrow cc$ (\rightarrow accoppiamento a fermioni della seconda generazione)
 - $H \rightarrow Z\gamma$
 - **produzione di coppie di Higgs** e studio dell'**auto-accoppiamento**

Backup slides

Stato della misura degli accoppiamenti



| Parameters | Coupling modifiers κ_i | | |
|-----------------|---|-----------------------------|-----------------------------|
| | Best-fit | Uncertainty | |
| | | Stat. | Syst. |
| κ_Z | $0.96^{+0.07}_{-0.07}$ (+0.08) (-0.08) | +0.06 (+0.06) (-0.06) | +0.04 (+0.05) (-0.05) |
| κ_W | $-1.11^{+0.14}_{-0.09}$ (+0.09) (-0.09) | +0.13 (+0.07) (-0.07) | +0.05 (+0.06) (-0.06) |
| κ_t | $1.01^{+0.11}_{-0.11}$ (+0.10) (-0.10) | +0.06 (+0.06) (-0.06) | +0.09 (+0.08) (-0.08) |
| κ_τ | $0.94^{+0.12}_{-0.12}$ (+0.12) (-0.11) | +0.08 (+0.08) (-0.07) | +0.09 (+0.09) (-0.08) |
| κ_b | $1.18^{+0.19}_{-0.27}$ (+0.17) (-0.16) | +0.14 (+0.13) (-0.12) | +0.13 (+0.11) (-0.11) |
| κ_g | $1.16^{+0.12}_{-0.11}$ (+0.11) (-0.10) | +0.08 (+0.07) (-0.07) | +0.08 (+0.08) (-0.07) |
| κ_γ | $1.01^{+0.09}_{-0.14}$ (+0.09) (-0.08) | +0.07 (+0.07) (-0.07) | +0.06 (+0.05) (-0.05) |
| κ_μ | $0.92^{+0.55}_{-0.87}$ (+0.52) (-0.96) | +0.54 (+0.51) (-0.95) | +0.10 (+0.08) (-0.08) |

<http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/preliminary-results/HIG-19-005/index.html>

Proiezioni a HL-LHC

Effetti Beyond Standard Model possono manifestarsi come deviazioni a livello di qualche %

| Model | κ_V | κ_b | κ_γ |
|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|
| Singlet Mixing | $\sim 6\%$ | $\sim 6\%$ | $\sim 6\%$ |
| 2HDM | $\sim 1\%$ | $\sim 10\%$ | $\sim 1\%$ |
| Decoupling MSSM | $\sim -0.0013\%$ | $\sim 1.6\%$ | $\sim -0.4\%$ |
| Composite | $\sim -3\%$ | $\sim -(3 - 9)\%$ | $\sim -9\%$ |
| Top Partner | $\sim -2\%$ | $\sim -2\%$ | $\sim +1\%$ |

arXiv:1310.8361

CMS-PAS-FTR-18-011

3000 fb⁻¹ (13 TeV)

