

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI
Dipartimento Interateneo di Fisica “M. Merlin”
Scuola di dottorato di ricerca in Fisica XXIX Ciclo

Report sul I anno di dottorato

Claudio Caputo

Il collisionatore pp LHC ha consentito agli esperimenti ATLAS e CMS di raccogliere una grande quantità di dati. L'analisi di questi dati ha mostrato l'esistenza di una nuova particella, compatibile con l'ipotesi del bosone di Higgs predetto dal Modello Standard (MS), con un livello di significatività pari a 5.9σ . Sono stati osservati eccessi nei canali di decadimento $h \rightarrow \gamma\gamma$, $h \rightarrow ZZ$, $h \rightarrow WW$, $h \rightarrow b\bar{b}$ e $h \rightarrow \tau\tau$. Dal Gennaio del 2013 sino a metà 2015 LHC sarà spento per permettere sia la manutenzione dello stesso, sia di poter effettuare gli interventi necessari per raggiungere un'energia nel centro di massa pari a $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$.

La scoperta del bosone di Higgs e la recente misura delle sue proprietà (massa, spin, larghezza, accoppiamenti con bosoni e fermioni) hanno aperto nuovi scenari di ricerca nella fisica delle alte energie. Un bosone di Higgs leggero permette di poter considerare una parte dello spazio delle fasi relativo all'estensione quasi-Minimale del Modello Standard (NMSSM, *Next to Minimal Supersymmetric Standard Model*).

Nel corso di questo primo anno di attività di dottorato ho intrapreso la ricerca di un Higgs supersimmetrico che decade in una coppia risonante di Higgs del MS, elaborando la completa statistica raccolta dall'esperimento CMS con energia nel centro di massa $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, corrispondente a 19.7 fb^{-1} . La presa dati riprenderà nel 2015 con un'energia di 13 TeV , una luminosità che arriverà a $2 \times 10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ e condizione di operazione sempre più estreme. Questo aprirà la strada all'esplorazione di nuove particelle nella regione del TeV.

Ottimizzare l'analisi per le future fasi di operazione di LHC riveste un ruolo importante nella mia futura attività di ricerca. Gli upgrade successivi di LHC ad alta luminosità renderanno necessario l'upgrade dei vari rivelatori e ritengo di fondamentale importanza comprendere come questi potranno migliorare la significatività e sensibilità dell'analisi.

Ho iniziato ad affrontare questa problematica con lo studio relativo agli upgrade delle stazioni muoni di CMS nella regione ad alta pseudo-rapidità dell'esperimento. Questo intervento permetterà, grazie l'utilizzo di rivelatori basati su tecnologia GEM (Gaseous Electron Multiplier), di ottenere vantaggi sia sul piano del trigger, sia sul piano della ricostruzione dei muoni.

Studiare l'impatto del sistema GEM sui canali di fisica sopra descritti, in particolare quelli con muoni nello stato finale, farà parte della mia futura attività di ricerca.

1 Ricerca di un bosone di Higgs pesante che decade in due bosoni di Higgs con massa $125 \text{ GeV}/c^2$ nello stato finale con due b -jet e due τ

La scoperta di una nuova particella compatibile con il bosone di Higgs predetto dal MS conferma come il modello in esame sia consistente. Quest'ultimo tuttavia, non offre la spiegazione ad alcuni fenomeni fondamentali, come la divergenza della massa dell'Higgs quando si considerano le correzioni agli ordini superiori al livello albero. Un modello teorico che fornisce una spiegazione soddisfacente è l'Estensione Minimale del Modello Standard (MSSM). Tale modello prevede la presenza di due doppietti di campi di Higgs che portano ad avere cinque bosoni di Higgs, due carichi e tre neutri. I tre bosoni di Higgs neutri sono: uno scalare leggero h , uno scalare pesante H e uno pseudo-scalare A . Il settore dell'Higgs del MSSM prevede due parametri liberi: la massa dello pseudoscalare A e $\tan\beta$, il rapporto tra i valori di aspettazione nel vuoto dei due doppietti. Uno spazio delle fasi caratterizzato da bassi valori di $\tan\beta$ apre la soglia cinematica del decadimento $H \rightarrow hh$, con h caratterizzato da proprietà simili a quelle del bosone di Higgs di massa $125 \text{ GeV}/c^2$.

Abbiamo scelto di testare l'esistenza di H nell'intervallo di massa compreso tra $250 \text{ GeV}/c^2$ e $350 \text{ GeV}/c^2$, riuscendo ad essere al di sopra della soglia cinematica di produzione dei due Higgs leggeri e al di sotto della soglia di produzione associata $t\bar{t}$, la quale rappresenterebbe un fondo irriducibile molto elevato.

Il mio lavoro di ricerca si è concentrato sullo studio di questo processo nello stato finale in cui un Higgs leggero decade in una coppia di jet prodotti da frammentazione di b -quark (b -jet) e l'altro decade in due leptoni tau. Ho considerato i tre stati finali più sensibili del decadimento del leptone tau: $\mu\tau_h, e\tau_h, \tau_h\tau_h$.

1.1 Canali semi-leptonici

L'analisi è stata effettuata sui dati raccolti dall'esperimento CMS nel 2012 a $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ corrispondenti a una luminosità integrata di 19.7 fb^{-1} .

Il contributo del processo di fondo più importante, la produzione associata di quark top $t\bar{t}$, è stato stimato con le simulazioni Monte Carlo, così come la produzione associata di due bosoni vettori (WW, WZ, ZZ), che costituisce comunque un fondo minore. Gli eventi di QCD e produzione di bosone W in associazione con uno o più jet (W +jets) non sono descritti in maniera adeguata dalle simulazioni, quindi è stata effettuata una stima dai dati tramite la selezione opportuna di regioni di controllo. Gli eventi $Z \rightarrow \tau\tau$ sono stati stimati con la tecnica dell'*Embedding* che consiste nel selezionare eventi $Z \rightarrow \mu\mu$ nei dati e sostituire poi i muoni con i tau, i cui decadimenti sono simulati con il Monte Carlo.

In ciascuno di questi canali gli eventi sono stati selezionati richiedendo una completa identificazione dei leptoni di carica elettrica opposta. Inoltre, per rimuovere gli eventi $t\bar{t}$ e W +jets, è stato richiesto che la massa trasversa del sistema composto dal leptone e dall'energia mancante fosse maggiore di $30 \text{ GeV}/c^2$.

Per ogni evento è stata richiesta la presenza di almeno due jet, di cui almeno uno proveniente da frammentazione di quark b . Lo spazio delle fasi è stato suddiviso in tre possibili categorie di eventi: quelli con nessun b -jet, quelli con un b -jet e quelli con almeno due b -jet. Studi condotti a livello di generatore sugli eventi

simulati hanno confermato che questa categorizzazione degli eventi permette di ottenere una elevata efficienza di selezione del segnale e di reiezione del fondo.

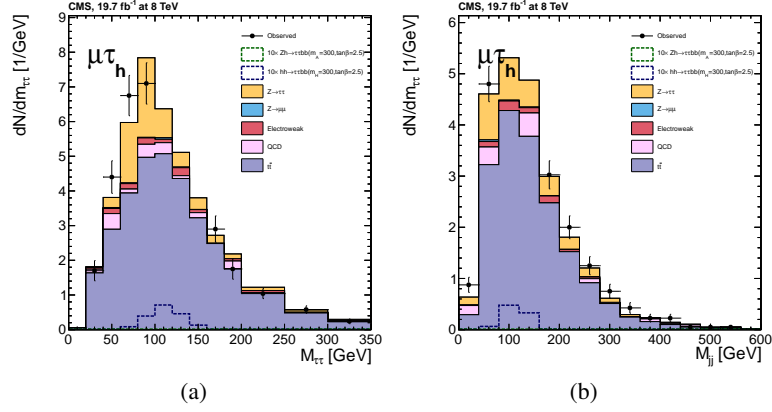


Figura 1: Distribuzioni della massa invariante del candidato higgs che decade in una coppia di leptoni tau (a) e della massa invariante del candidato higgs che decade in due b-jet nel canale $\mu\tau_h$ nella categoria $2jets\ 2btag$ dopo la selezione.

In figura 1 sono mostrate le distribuzioni della massa invariante della coppia di leptoni tau, ricostruita con un particolare algoritmo (SVFit) che tiene conto del contributo energetico dei neutrini. Inoltre è mostrata la massa invariante della coppia di b-jet ricostruita con un fit cinematico in cui si è posto come *constraint* $m_{bb}=125\text{ GeV}/c^2$. Si può notare come l'accordo tra le previsioni dei fondi e i dati raccolti risulta ottimo. Nella regione attorno a $125\text{ GeV}/c^2$, in cui si potrebbe eventualmente osservare un eccesso di segnale, i dati non sono mostrati perché l'analisi è ancora in corso di ottimizzazione per quanto concerne la procedura di estrazione del segnale. In quest'ambito sono state testate diverse opzioni:

- fit della massa del candidato Higgs leggero che decade in una coppia di leptoni tau
- fit della massa dei quattro corpi calcolata con il fit cinematico dopo aver applicato un ulteriore constraint sulla massa della coppia di b-jet: $90 < m_{bb} < 150\text{ GeV}/c^2$.
- fit dell'output di una rete neurale (fig. 2), allenata dopo aver rimosso il taglio sulla massa trasversa, con eventi simulati di $\bar{t}t$ e W +jets come fondo ed eventi simulati $gg \rightarrow H \rightarrow hh \rightarrow bb\tau\tau$ con $M_H = [260, 270, \dots, 350]$ come segnale. Le variabili date in input alla rete neurale utilizzate sono:
 - gli impulsi trasversi dei quattro prodotti di decadimento visibili,
 - le due masse trasverse del sistema leptone+ E_T^{miss} ,
 - la distanza tra i due b-jet e quella tra i due leptoni nel piano (η, ϕ) ,
 - l'energia mancante E_T^{miss} ,
 - l'impulso trasverso del bosone di higgs leggero che decade in due tau.

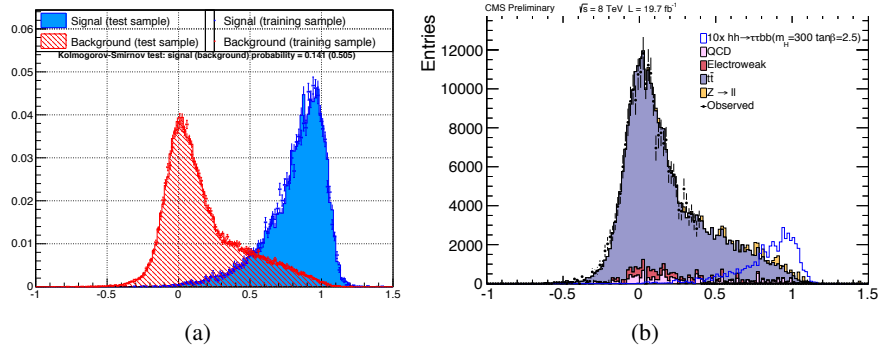


Figura 2: (a) Kolmogorov-Smirnov test per escludere la presenza di overtraining nel discriminatore multivariato. (b) Distribuzione del discriminatore multivariato.

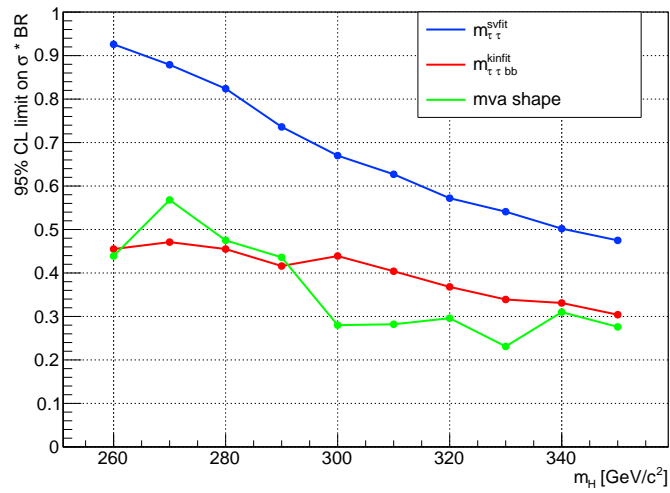


Figura 3: Limiti attesi al 95% CL sul prodotto della sezione d'urto di produzione del bosone di Higgs H moltiplicata per il BR di decadimento in una coppia di leptoni τ . Sono mostrate tutte le opzioni di estrazione del segnale descritte nel testo.

Le performance delle diverse opzioni sono state confrontate in termini di limiti di esclusione atteso con livello di confidenza pari al 95% sulla sezione d'urto di produzione di un bosone di Higgs pesante H moltiplicata per il BR di decadimento in una coppia di tau, tenendo conto dell'incertezza statistica e delle diverse incertezze sistematiche. Come si nota dalla figura 3, i limiti estratti usando la shape della massa invariante dei quattro corpi e quelli ottenuti usando il discriminatore $m_{\tau\tau}$, hanno performance molto simili. È utile notare come due approcci diversi all'analisi, quello *cut-based* e quello multivariato, diano risultati consistenti.

1.2 Canale adronico

Il canale adronico necessita di un trattamento differente rispetto ai canali semi-leptonici, data la bassa statistica raccolta, incontrato con l'alta probabilità di decadimento dei τ in padroni. La categorizzazione degli eventi in categorie di b-tag rimane identica, ciò che cambia è il metodo con cui alcuni fondi vengono stimati. Infatti è stato necessario riconsiderare le tecniche di stima dei fondi, che inizialmente sono state importate dall'analisi $h \rightarrow \tau\tau$. L'idea di base è stata quella di considerare le distribuzioni dei vari fondi sia nelle usuali categorie di b-tag, sia in categorie in cui la richiesta sul discriminatore di b-tag è stata abbassata. Dopo aver verificato che questo passaggio non modificava in modo sostanziale le distribuzioni, queste sono state rinormalizzate in modo da avere come integrale lo stesso presente nella categoria di b-tag iniziale.

Questo ha permesso di ottenere delle distribuzioni più continue e lisce, essenziali per potere sfruttare al meglio gli strumenti di estrazione dei limiti, basati su una analisi che tiene conto della distribuzione della variabile presa in considerazione.

In figura 4 è possibile valutare come il limite atteso sia migliorato notevolmente utilizzando una stima dei fondi mirata al canale di studio.

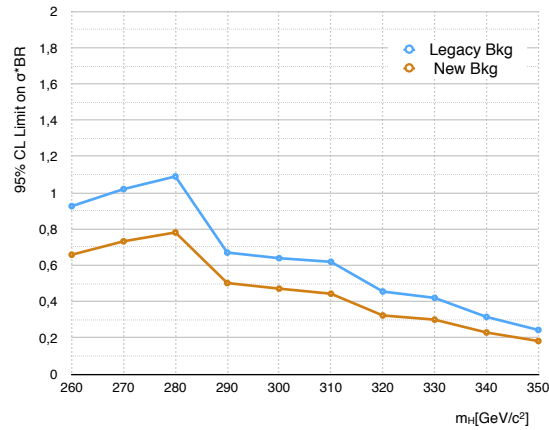


Figura 4: Limiti attesi al 95% CL sul prodotto della sezione d'urto di produzione del bosone di Higgs H moltiplicata per il BR di decadimento in una coppia di leptoni τ_h . Sono mostrate le due opzioni di stima del fondo, utilizzando la distribuzione $m_{\tau\tau}^{kinFit}$ per l'estrazione.

2 Studi di ricostruzione dei muoni per l'upgrade di CMS

I canali di fisica su cui mi sono precedentemente soffermato hanno stato finale in comune con altri canali di grande interesse, che però richiedono alta statistica. Un esempio è la misura del *self-coupling* del bosone di Higgs, che necessita un'altissima efficienza di ricostruzione di tutti gli eventi attesi; in questo modo si potrà raggiungere una buona significatività sulla misura.

Le fasi di miglioramento ed ampliamento dei rivelatori che compongono l'esperimento CMS permetteranno di poter sfruttare a pieno le potenzialità dell'acceleratore LHC. I rivelatori GEM andranno a rafforzare ed ampliare la regione ad alta pseudo-rapidità dell'esperimento. Gli interventi avverranno durante lo spegnimento di LHC nel 2019 e durante il 2023, fase che precederà la messa in funzione di HL-LHC (High Luminosity - LHC). L'alta luminosità che verrà raggiunta porterà ad un incremento notevole della molteplicità di traccia. Rivelatori capaci di gestire queste alte fluenze di particella, mantenendo costante la loro efficienza, saranno cruciali. Le GEM rappresentano un'ottima soluzione, sia come resistenza al flusso di particelle ($O(MHz)$), sia come risoluzione spaziale e temporale ($250 \mu m$ e $4 ns$).

Studi sulla ricostruzione dei muoni saranno effettuati, prendendo in esame i canali di fisica prima descritti. Sarà possibile valutare quale sarà l'impatto dei futuri interventi sul sistema muonico di CMS.

Esami

- *Fenomenologia delle interazioni fondamentali*, P. Colangelo - Crediti: **4**,
- *How to prepare a technical speech in English*, C. White - Crediti: **2**,
- *Sistemi operativi e linguaggi di programmazione per calcolo scientifico*, M. Lapegna - Crediti: **4**,
- *Ricerca in Europa*, L. Piccinetti - Crediti: **2**,
- *Rivelatori di particelle innovativi e loro applicazioni*, S. My, E. Radicioni, F. Loporco - Crediti: **4**,

Scuole

- *XI Seminar on Software for Nuclear, Subnuclear and Applied Physics*, 25-30 May, 2014, INFN, Alghero (Italy);
- *XXVI National Seminary of Nuclear and Subnuclear Physics*, 4-11 June, 2014, INFN, Otranto (Italy);
- *CMS GEM School*, 30 June - 4 July, 2014, CERN, Geneva (Switzerland).

CMS Analysis Notes

- The Higgs To Tau Tau Group, CMS AN -2014-234, *Search for a heavy Higgs decaying to two 125 GeV Higgs in the 2 taus + 2 b final state using data at $\sqrt{s} = 8$ TeV*.

Pubblicazioni

- D. Abbaneo et al. [The CMS GEM Collaboration], *Upgrade of the muon system in the high eta region of CMS experiment at LHC with the GEM*, International Conference On Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR14), submitted to Journal of Instrumentation (JINST).
- D. Abbaneo et al. [The CMS GEM Collaboration], *Large-size triple GEM detectors for the CMS forward muon upgrade*, 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2014), submitted to Nuclear Physics B.
- D. Abbaneo et al. [The CMS GEM Collaboration], *Motivation of the CMS Muon System Upgrade with Triple-GEM detectors*, 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2014), submitted to Nuclear Physics B.
- D. Abbaneo et al. [CMS GEM Collaboration], **C. Caputo** Corresponding Author, *Physics Studies for the CMS Muon System Upgrade with Triple-GEM detectors*, International Conference on Position Sensitive Detectors (PSD10), submitted to Journal of Instrumentation (JINST).

- D. Abbaneo et al. [CMS GEM Collaboration], **C. Caputo** Corresponding Author, *Upgrade of the CMS muon system with Triple-GEM detectors*, Incontri di Fisica delle Alte Energie (IFAE 2014), submitted to Nuovo Cimento C - Colloquia on Physics.

Presentazioni e conferenze nazionali ed internazionali

- IFAE 2014: Incontri di Fisica delle Alte Energie, 9-11 Apr 2014, INFN-LNGS, l'Aquila (Italy)– *Upgrade of the CMS Muon System with Triple-GEM detectors* (Poster).
- PSD10: 10th International Conference on Position Sensitive Detectors, 7-12 Sep 2014, University of Surrey, Guilford (London, UK)– *Physics Studies for the CMS Muon System Upgrade with Triple-GEM detectors* (Talk).
- SIF2014: 100° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, 22-26 Sep 2014, University of Pisa, Pisa (Italy)– *Muon System Upgrade with Triple-GEM detectors in the CMS experiment at LHC* (Talk).