

Università degli studi di Napoli "Federico II"
Dipartimento di Fisica



Measurements of the CKM matrix elements in single top events at CMS with machine learning techniques

Relatore:

Dott. Alberto Orso Maria Iorio

Correlatore:

Prof. Fabio Ambrosino

Candidato:

Valeria D'Amante

Introduzione

1. La matrice CKM nel Modello Standard e il quark top
2. L'esperimento CMS a LHC
3. Processi di interesse e selezione degli eventi
4. Selezione dei jet con tecniche di machine learning
5. Misura dei parametri della matrice CKM
6. Conclusioni e futuri sviluppi

Il Modello Standard della fisica delle particelle

Tre generazioni di quark

Tre generazioni di leptoni

Interazioni fra le particelle:

- elettromagnetica $\rightarrow \gamma$
- forte $\rightarrow g$
- debole $\rightarrow W^\pm, Z^0$

Le particelle acquistano massa tramite l'interazione con il bosone di Higgs.

QUARKS	UP	CHARM	TOP	GLUON	HIGGS BOSON
	mass 2,3 MeV/c ² charge 2/3 spin 1/2 u	1,275 GeV/c ² 2/3 1/2 c	173,07 GeV/c ² 2/3 1/2 t	0 0 1 g	126 GeV/c ² 0 0 H
	DOWN	STRANGE	BOTTOM	PHOTON	GAUGE BOSONS
	4,8 MeV/c ² -1/3 1/2 d	95 MeV/c ² -1/3 1/2 s	4,18 GeV/c ² -1/3 1/2 b	0 0 1 γ	
LEPTONS	ELECTRON	MUON	TAU	Z BOSON	GAUGE BOSONS
	0,511 MeV/c ² -1 1/2 e	105,7 MeV/c ² -1 1/2 μ	1,777 GeV/c ² -1 1/2 τ	91,2 GeV/c ² 0 1 Z	
	ELECTRON NEUTRINO	MUON NEUTRINO	TAU NEUTRINO	W BOSON	
	<2,2 eV/c ² 0 1/2 ν_e	<0,17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ	<15,5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ	80,4 GeV/c ² ±1 1 W	

Limite: 19 parametri liberi, come le masse delle particelle e le costanti di accoppiamento, che devono essere determinati sperimentalmente.

La matrice CKM

L'interazione debole tra i quark di tipo up e di tipo down avviene tramite lo scambio di un bosone W ed i loro accoppiamenti sono regolati dalla matrice CKM.

$$\mathcal{L}_{CC} = -\frac{g}{\sqrt{2}}(\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L)\gamma^\mu W_\mu^+ V_{CKM} \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} + h.c.,$$

dove

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

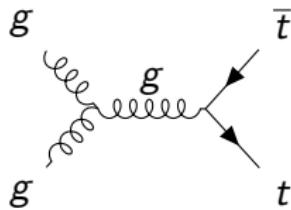
I valori degli elementi della matrice CKM non sono predetti dalla teoria, pertanto vanno misurati sperimentalmente.

Il quark top

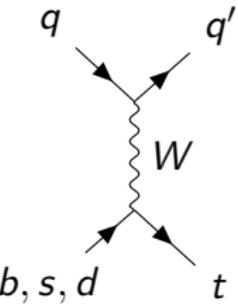
Proprietà del quark top

- particella elementare più massiva nel MS: $m \approx 173 \text{ GeV}/c^2$;
- non subisce il processo di adronizzazione;
- può decadere in un bosone W reale e un quark di tipo down;
- sensibile a processi di nuova fisica.

Principali canali di produzione del top ai collisori pp :



produzione top-antitop
tramite la fusione gg



produzione elettrodebole di top
singolo in canale t

Produzione elettrodebole di top singolo

Misura di $|V_{td}|$, $|V_{ts}|$ e $|V_{tb}|$

- diretta,
- indipendente dal modello,
- di precisione → test del MS.

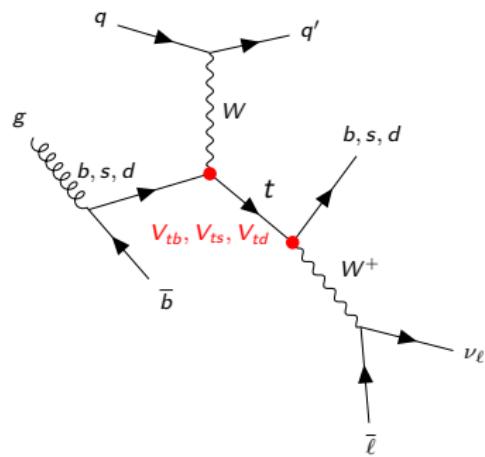
Analisi proposta

Tecniche di machine learning per:

- classificare degli oggetti all'interno dell'evento;
- riconoscere i segnali più rari.

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

$$|V_{td}| \sim 10^{-3} \quad |V_{ts}| \sim 10^{-2} \quad |V_{tb}| \sim 1$$



LHC

LINAC 2 → 50 MeV

BOOSTER → 1.4 GeV

PS → 25 GeV

SPS → 450 GeV

LHC → 13 TeV

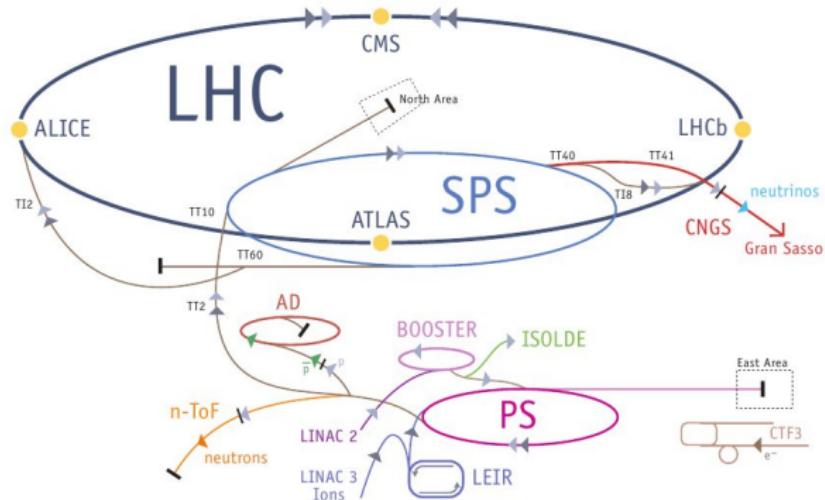
Attività di LHC

Run 1: 2009-2013;

LS 1: 2013-2015;

Run 2: 2015-2018;

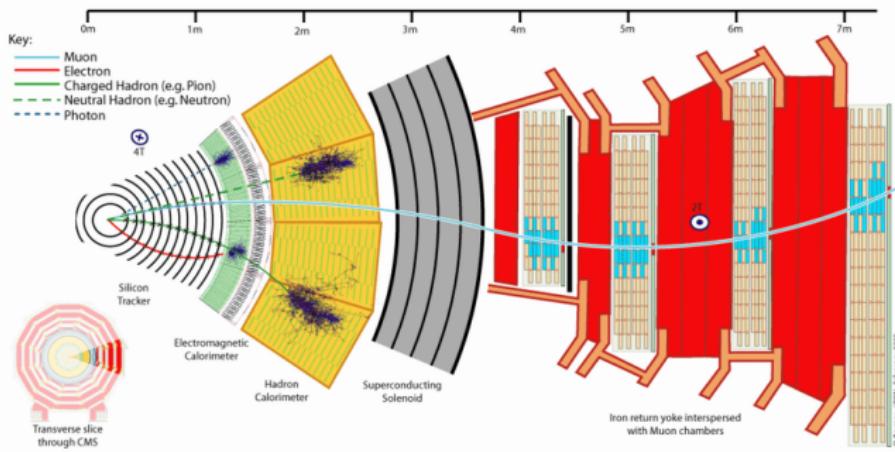
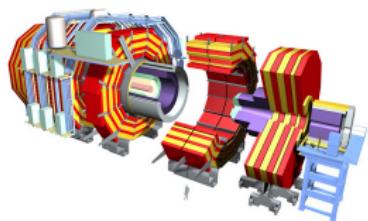
LS 2: 2018-2021.



CMS: Compact Muon Solenoid

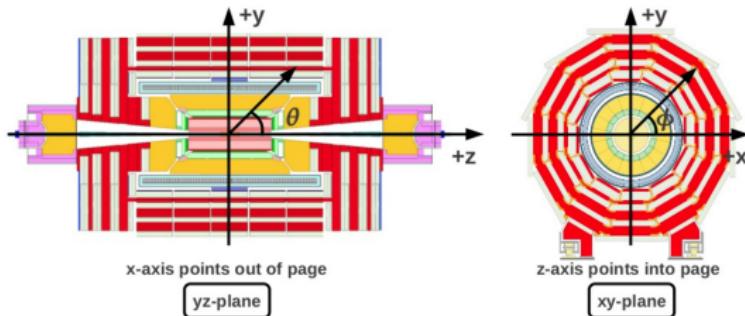
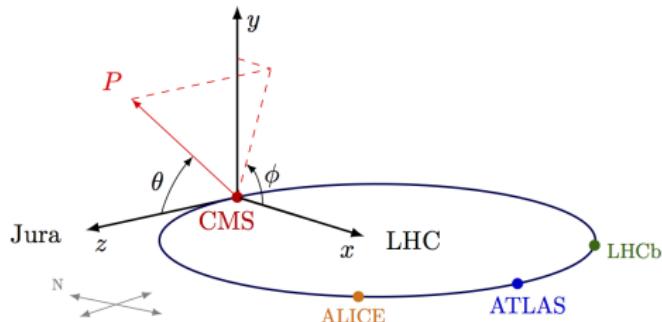
Sottorivelatori

- Tracciatore;
- ECAL;
- HCAL;
- Rivelatori di muoni.



Sistema di coordinate a CMS

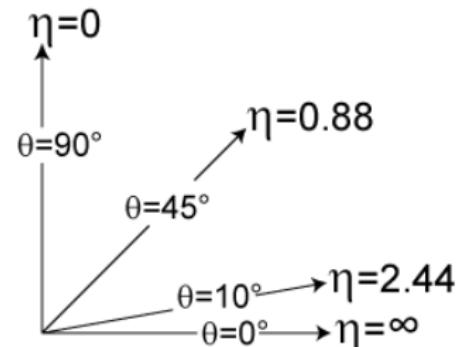
Coordinate cilindriche $\theta - \phi$



Invarianti per boost lungo
l'asse del fascio

$$\Delta\eta, \eta = -\ln(\tan(\theta/2))$$

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\eta)^2}$$



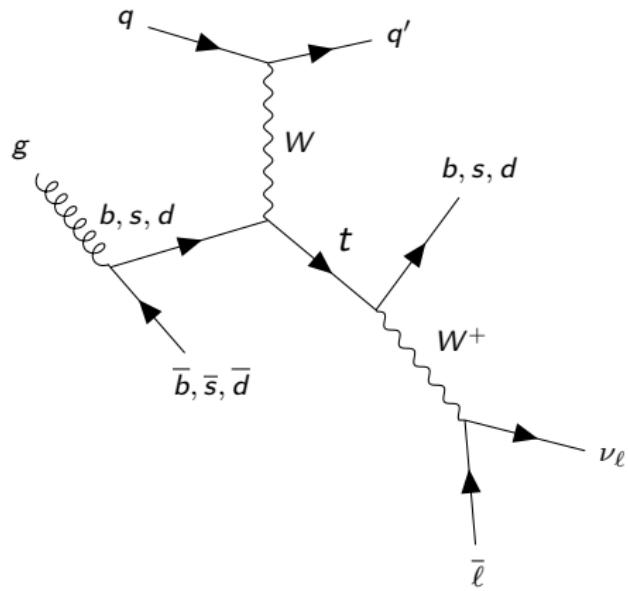
Stato finale dei processi di interesse

Collisione $pp \rightarrow$ interazione

elettrodebole di un quark q di valenza
con un quark di tipo down \rightarrow produzione
di un quark top.

Nello stato finale ci saranno:

- quark "spettatore": alto $|\eta|$, di qualsiasi sapore;
- quark dal gluone: tipo down;
- quark dal top: tipo down;
- lepton carico positivamente;
- neutrino.



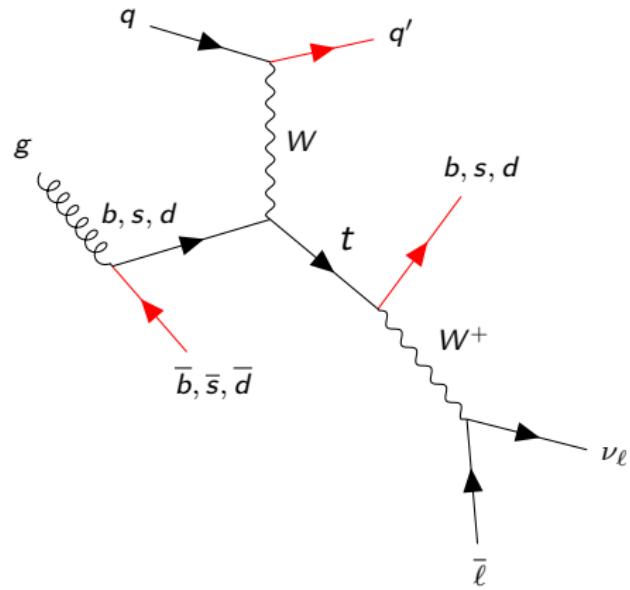
Rivelare il processo di interesse

Rivelare i quark:

I quark non esistono "liberi", ma si legano in adroni.

Sono ricostruiti *jet* di adroni provenienti dal quark sfruttando le informazioni dei sottorivelatori.

Nello stato finale sarà richiesta la presenza di **2 o 3 jet**.



Rivelare il processo di interesse

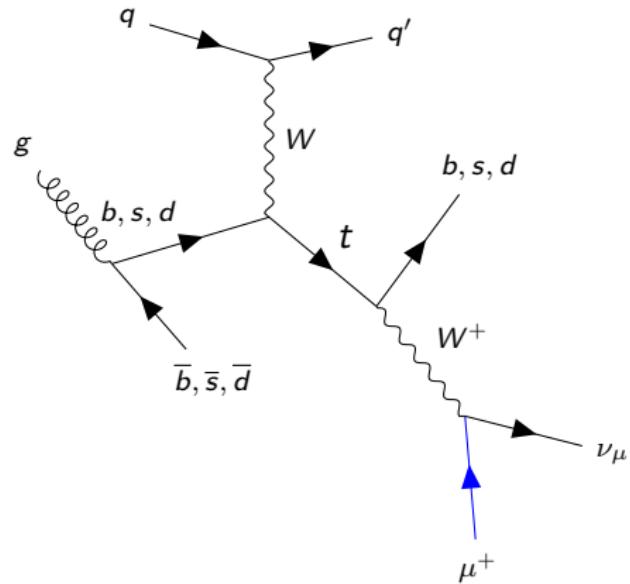
Rivelare il leptone:

Muoni: tracciatore e dei rivelatori di muoni.

Elettroni: tracciatore e del calorimetro elettromagnetico.

In questa analisi sono stati considerati i **muoni**.

Nello stato finale sarà richiesta la presenza di **1** muone.



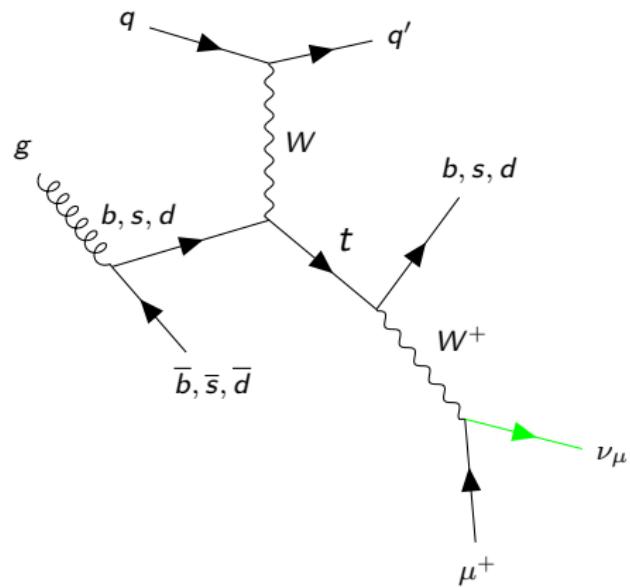
Rivelare il processo di interesse

Rivelare il neutrino:

Non possono essere fisicamente rivelati.

Informazioni cinematiche nell'energia trasversa mancante.

Nello stato finale sarà richiesta la presenza di energia mancante trasversa.



Preselezione e data sample utilizzato

Data sample utilizzato

Dati raccolti durante il Run 2, nel 2016:
 $E_{CM} = \sqrt{s} = 13 \text{ TeV} \rightarrow L = 35.9 \text{ fb}^{-1}$.

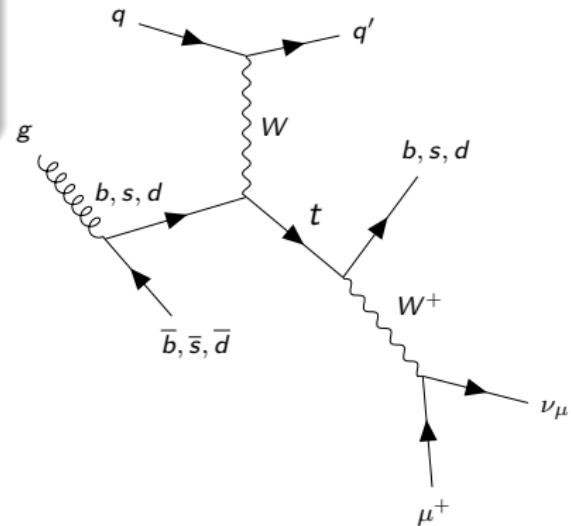
Simulazioni Monte Carlo di segnali e fondi.

Preselezione:

- Muoni: alto p_T , isolati, $|\eta| \leq 2.4$;
- Jet: alto p_T , ricostruiti in $\Delta R = 0.4$;
- Jet da un quark b, o b-jet: MVA.

Configurazioni di stato finale:

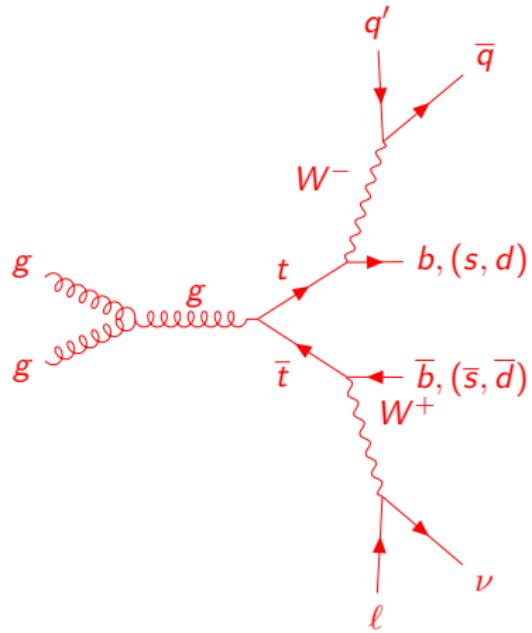
- eventi **3j1t**: 1 muone + 2 jet + 1 b-jet;
- eventi **2j1t**: 1 muone + 1 jet + 1 b-jet;



Processi di fondo

Principali sorgenti di fondo:

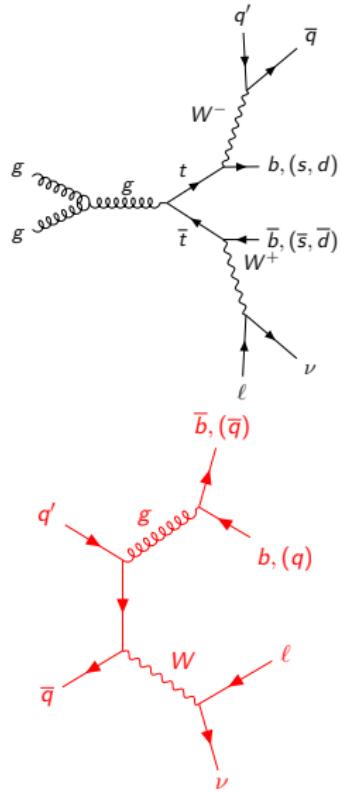
- processi $t\bar{t}$ in cui almeno uno dei top decade leptonicamente;



Processi di fondo

Principali sorgenti di fondo:

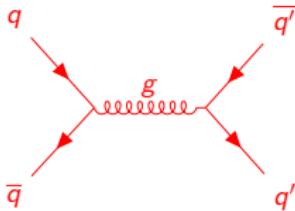
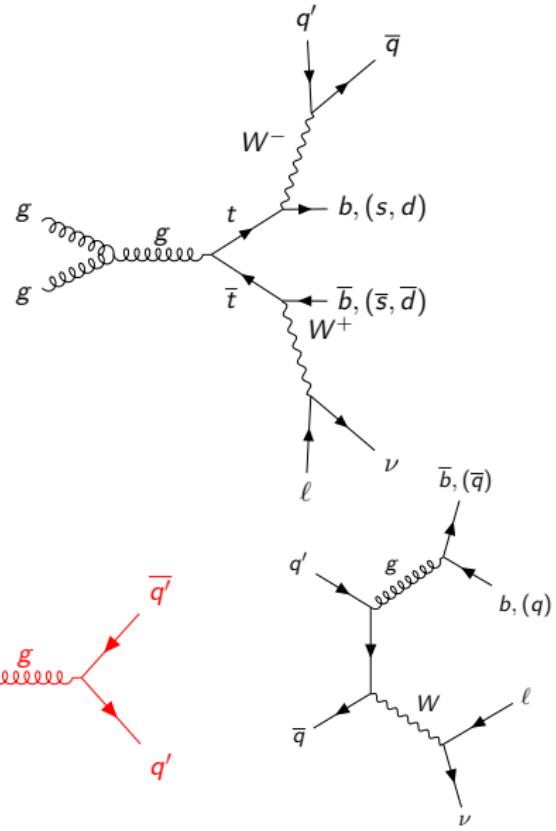
- processi $t\bar{t}$;
- processi $W/Z + \text{jets}$ in cui il bosone decade leptonicamente;



Processi di fondo

Principali sorgenti di fondo:

- processi $t\bar{t}$;
- processi $W/Z + \text{jets}$;
- processi QCD multi-jet.



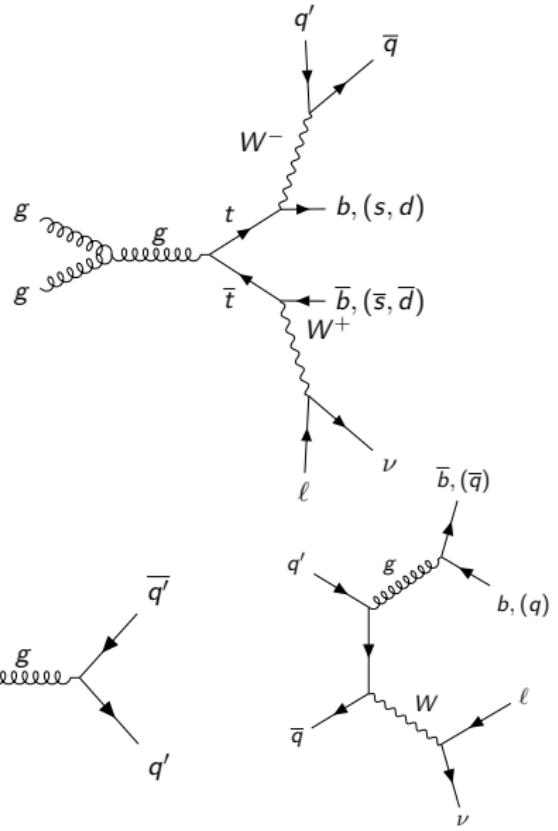
Processi di fondo

Principali sorgenti di fondo:

- processi $t\bar{t}$;
- processi $W/Z + \text{jets}$;
- processi QCD multi-jet.

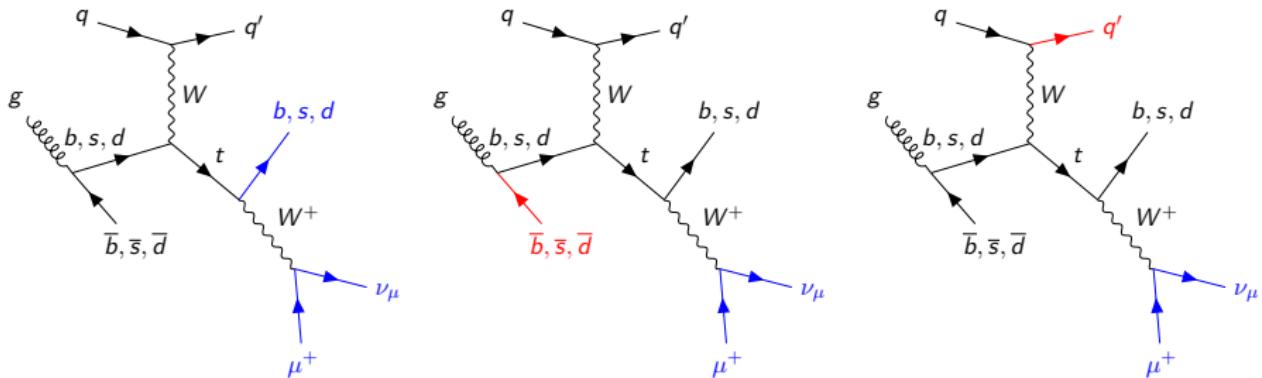
Sorgenti minori di fondo:

- processi di-bosonici;
- produzione di top singolo in canale s ;
- produzione associata tW .



Fondo combinatorio

Ordinamento dei jet secondo la probabilità che essi provengano da un decadimento del quark top.



Sono state considerate due strategie:

- La costruzione di un likelihood ratio basato sulla distribuzione 2D delle variabili che operano la separazione migliore;
- Tecniche di machine learning: Boosted Decision Trees e Artificial Neural Network.

Selezione dei jet con il likelihood ratio

1. Variabili di interesse:

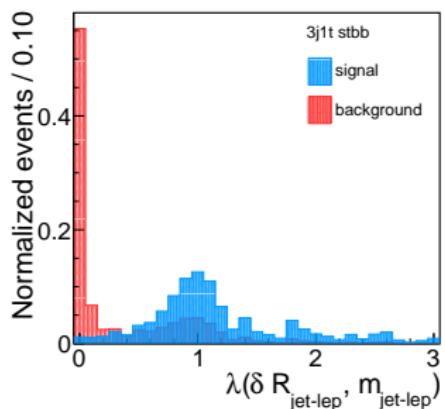
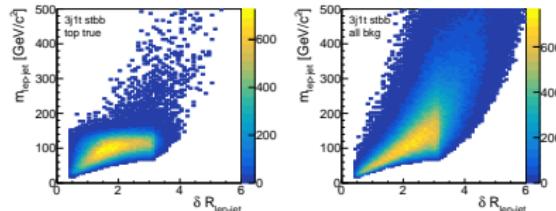
- ▶ $m_{lep-jet}$;
- ▶ $\delta R_{lep-jet}$;

2. Distribuzione 2D per segnali e fondi combinatori;

3. Valutazione del likelihood ratio:

$$\lambda(\delta R_{lep-jet}, m_{lep-jet}) = \frac{\mathcal{L}(\delta R_{lep-jet}, m_{lep-jet} | H_1)}{\mathcal{L}(\delta R_{lep-jet}, m_{lep-jet} | H_0)}$$

4. Assegnazione dello score, che sarebbe il likelihood ratio, a ciascun jet.



Problema della dimensionalità → metodi di che approssimano il likelihood ratio in più dimensioni per la classificazione.

Selezione dei jet con una ANN

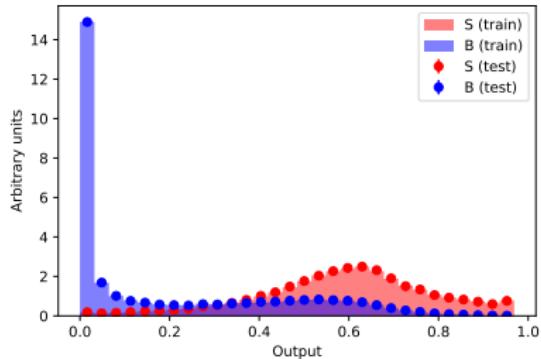
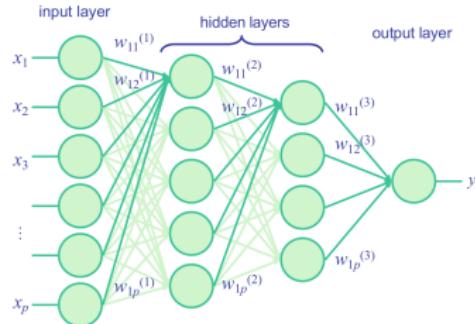
Artificial Neural Networks

Algoritmo di machine learning *supervised* ispirato alle reti neurali biologiche.

Input: $w_0 + \sum_{i=1}^m w_i x_i$.

Input ai "neuroni" che applicano la funzione di attivazione.

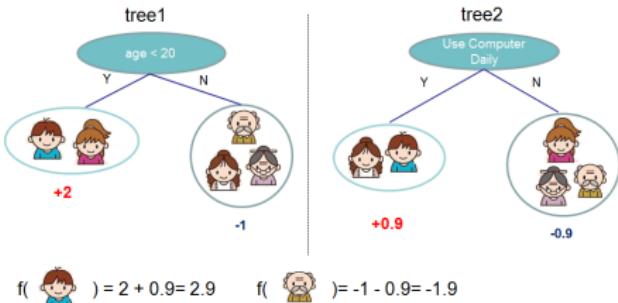
Ottimizzazione:
aggiornamento dei pesi.



Selezione dei jet con XGB Classifier

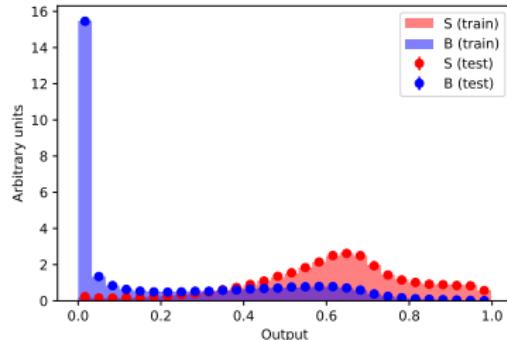
Boosted Decision Trees

Imparano le caratteristiche del training set facendogli delle "domande" e poi sfruttano quello che hanno imparato per la classificazione.

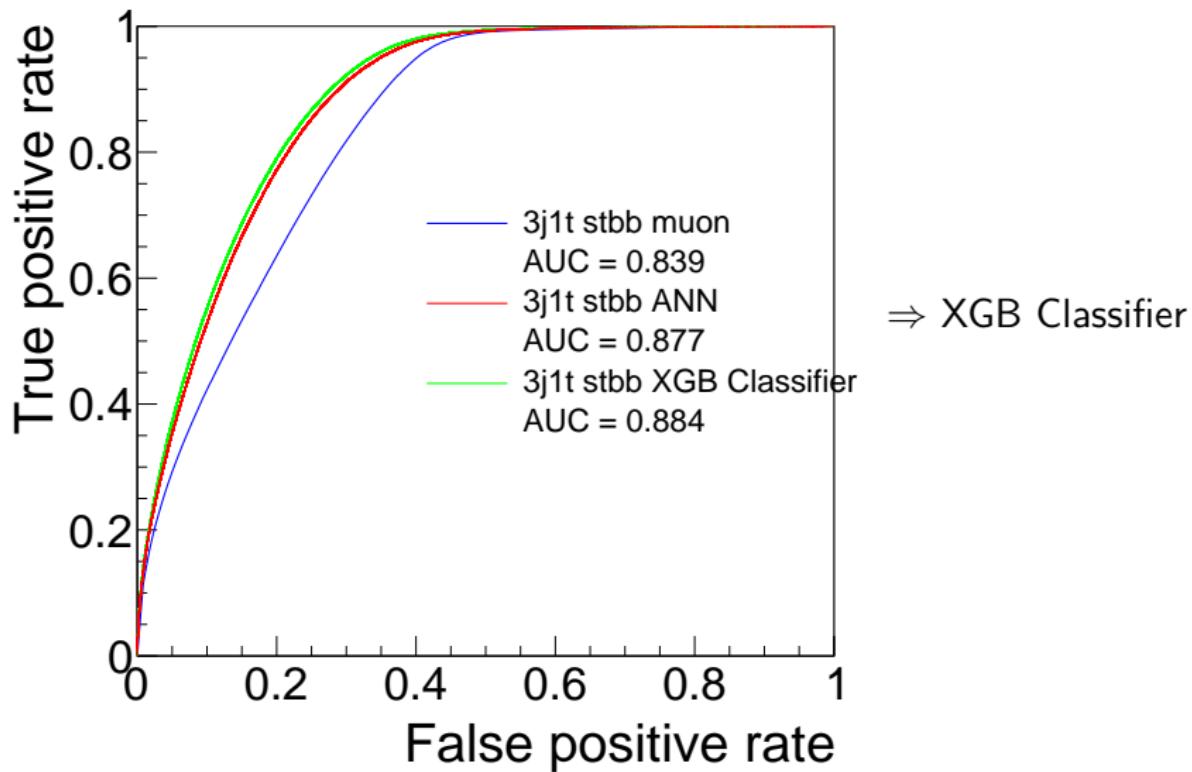


XGBoost Classifier

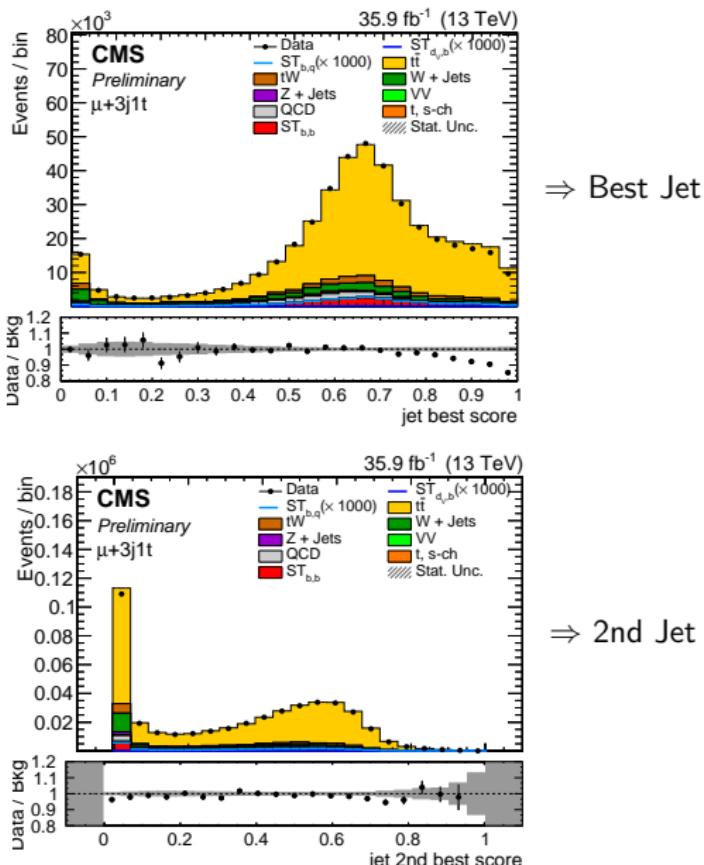
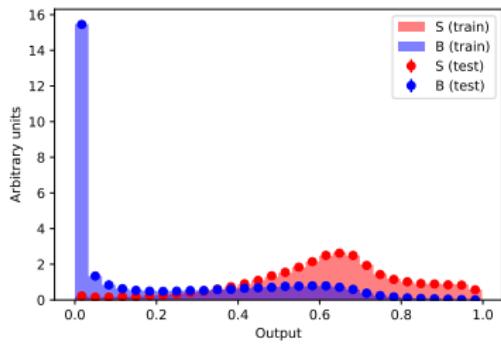
Classification And Regression Trees (CART): score associato ai nodi finali. L'output è una somma pesata delle diverse predizioni.



Confronto tra i metodi utilizzati



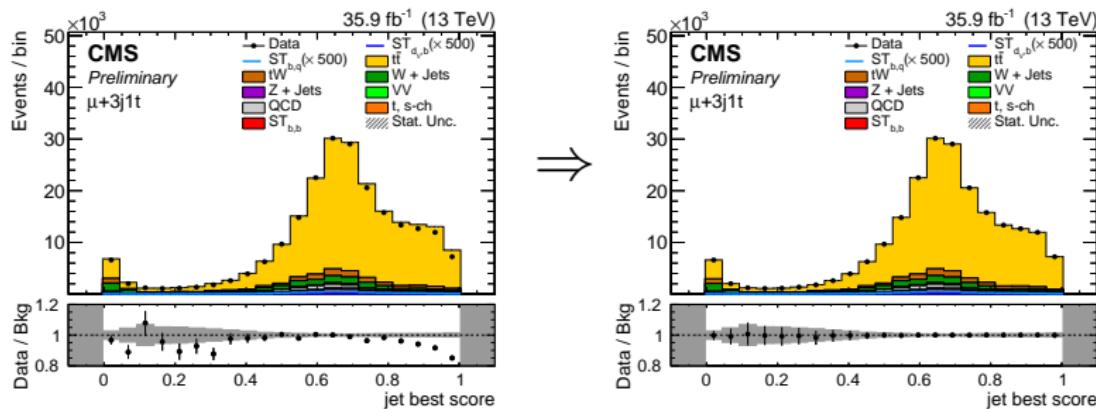
Risultati nella regione 3j1t



Ripesamento nella regione di controllo

Problema: differenza nelle distribuzioni Dati/MC → ripesamento in una regione dove il segnale è soppresso, detta *regione di controllo*, individuata da una variabile quasi del tutto scorrelata con il jet best score:

- regione di controllo in 3j1t: $|\eta_{forward}| < 2.5$;
- regione di controllo in 2j1t: $|\eta_{forward}| < 2$.

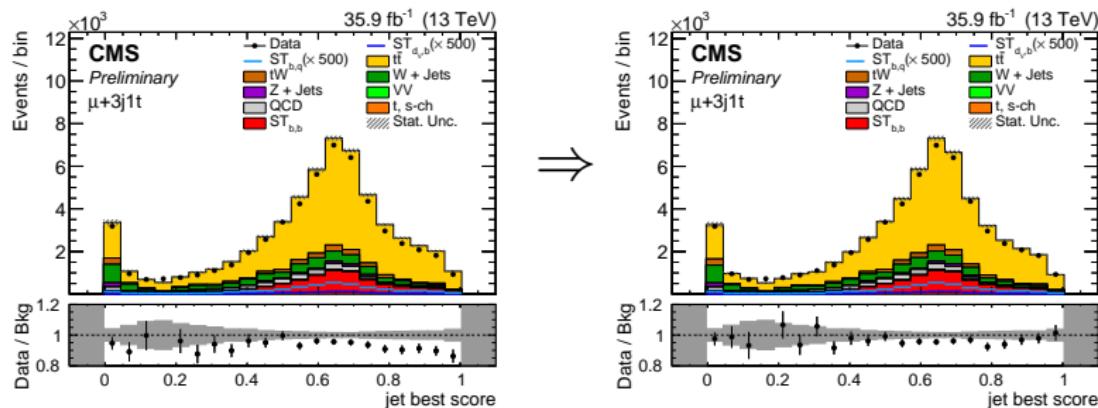


Regione di controllo

Ripesamento nella regione di segnale

Problema: differenza nelle distribuzioni Dati/MC → ripesamento in una regione dove il segnale è soppresso, detta *regione di controllo*, individuata da una variabile quasi del tutto scorrelata con il jet best score:

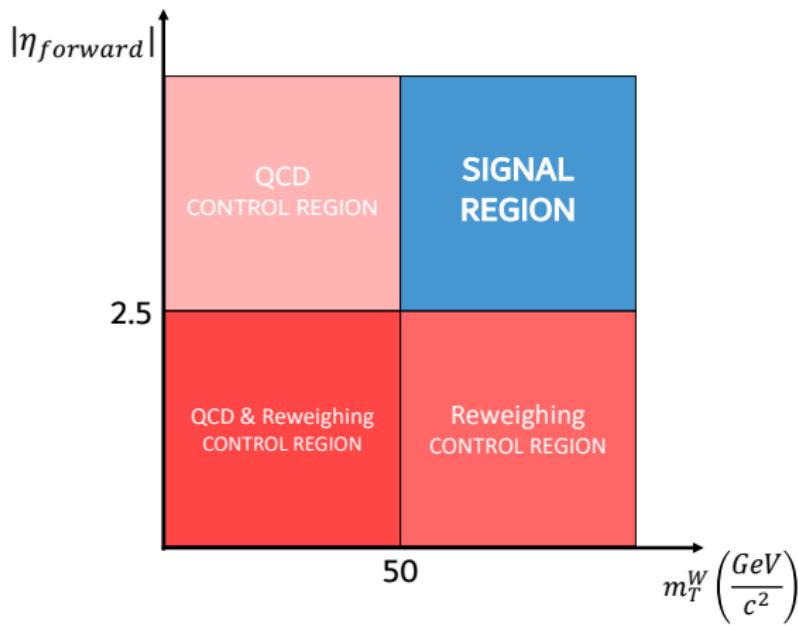
- regione di segnale in 3j1t: $|\eta_{\text{forward}}| > 2.5$;
- regione di segnale in 2j1t: $|\eta_{\text{forward}}| > 2$.



Regione di segnale

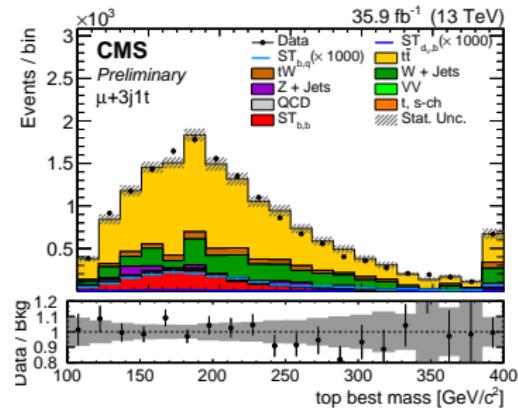
Selezione di base

- $m_T^W > 50 \text{ GeV}$: **QCD-soppresso**;
- $|\eta_{forward}| > 2.5$ per il **ripesamento** nella configurazione di stato finale 3j1t;

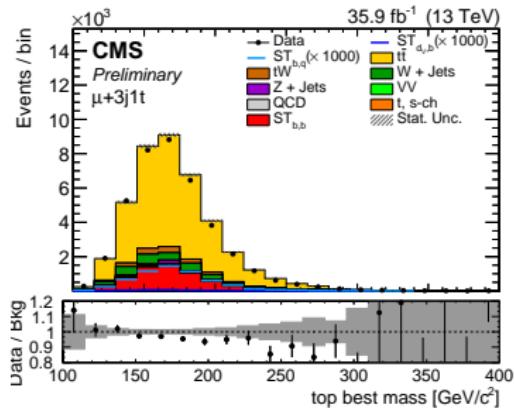


Selezione di base

- $m_T^W > 50 \text{ GeV}$: **QCD-soppresso**;
- $|\eta_{\text{forward}}| > 2.5$ per il **ripesamento** nella configurazione di stato finale 3j1t;
- jet best score > 0.5 per una regione arricchita di **eventi di top singolo**.



(a) Jet best score < 0.5

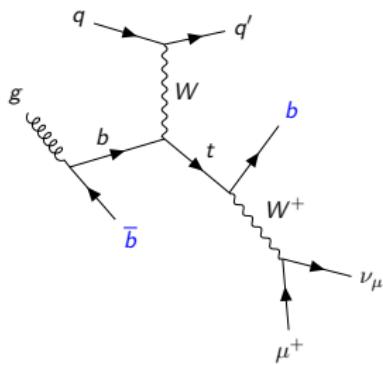


(b) Jet best score > 0.5

Caratteristiche dei segnali

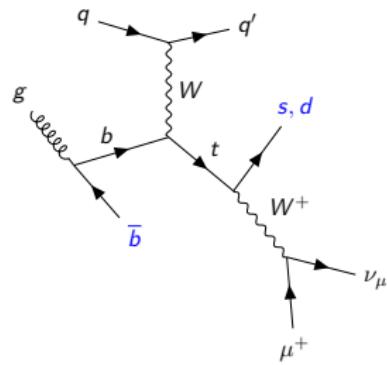
S1 o ST_{bb}

- Regione: 2j1t;
- Selezione di base;
- Variabile di fit: $|\eta_{forward}|$.



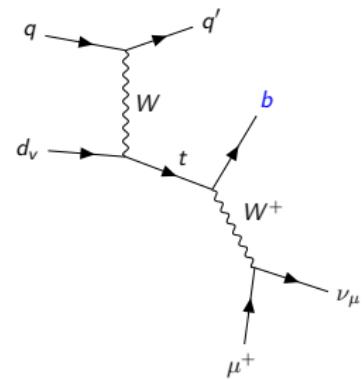
S2 o ST_{bq}

- Regione: 3j1t;
- Selezione di base;
- Best jet NON b -jet;
- Secondo jet b -jet;
- Variabile di fit: BDT output.



S3 o $ST_{d_\nu b}$

- Regione: 3j1t;
- Selezione di base;
- Best jet b -jet;
- Variabile di fit: BDT output.

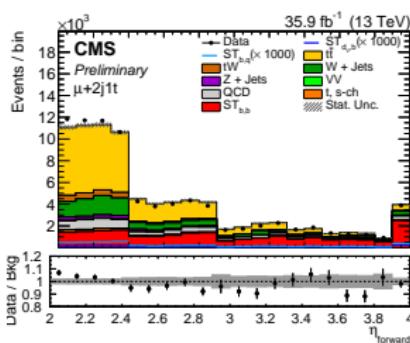


$$|V_{td}| \sim 10^{-3} \quad |V_{ts}| \sim 10^{-2} \quad |V_{tb}| \sim 1$$

Variabili di fit

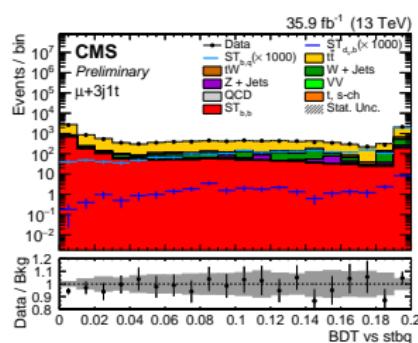
$S1 \circ ST_{bb}$

- Regione: 2j1t;
- Selezione di base;
- Variabile di fit: $|\eta_{forward}|$.



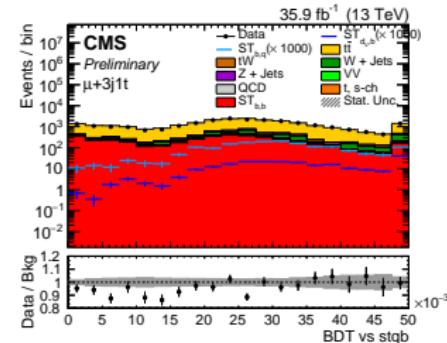
$S2 \circ ST_{bq}$

- Regione: 3j1t;
- Selezione di base;
- Best jet NON b -jet;
- Secondo jet b -jet;
- Variabile di fit: BDT output.



$S3 \circ ST_{d,b}$

- Regione: 3j1t;
- Selezione di base;
- Best jet b -jet;
- Variabile di fit: BDT output.



Procedura di fit

Si cercano i valori per cui la funzione *extended likelihood* raggiunge il massimo:

$$L_{s+b}(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_N; \mu_{sd}, \mu_b, \vec{\theta}) = \frac{e^{-\lambda}}{N!} \prod_{i=1}^N (\mu_{sd} s_{sd} f_{s_{sd}}(\vec{x}_i; \vec{\theta}) + \mu_b s_b f_{s_b}(\vec{x}_i; \vec{\theta}) + b f_b(\vec{x}_i; \vec{\theta})),$$

dove $\lambda = \mu_{sd} s_{sd}(\vec{\theta}) + \mu_b s_b(\vec{\theta}) + b(\vec{\theta})$.

Parametri di interesse

- μ_b → processo ST_{bb} ;
- μ_{sd} → processi $(ST_{d_v b} + ST_{bq})$.

Parametri di nuisance

- parametri di normalizzazione dei fondi principali (QCD, $t\bar{t}$ e W+jets);
- incertezze sistematiche con la tecnica del *profiling*.

Risultati del fit

$$|\mathbf{V}_{tb}| = 1.031 \pm 0.013$$

$$|\mathbf{V}_{td}|^2 + |\mathbf{V}_{ts}|^2 = 0.20 \pm 0.12$$

La somma $|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2$ è vicina al limite fisico. Pertanto è stato posto un limite superiore ad essa.

$$|\mathbf{V}_{td}|^2 + |\mathbf{V}_{ts}|^2 < 0.41 \text{ at } 84\% \text{ CL}$$

Conclusioni e futuri sviluppi

È stata effettuata una misura diretta degli elementi della matrice CKM legati al quark top sfruttando per la prima volta tecniche di machine learning per migliorare la reiezione del fondo combinatorio.

Dopo aver definito diverse regioni arricchite di segnale, è stato effettuato un fit per la prima volta su variabili ottenute allenando *ad hoc* un algoritmo di machine learning a riconoscere i segnali più rari.

Possibili miglioramenti all'analisi:

- estendere l'analisi su tutti i dati del Run 2, considerando oltre ai muoni anche gli elettroni nello stato finale;
- introdurre altre configurazioni di stato finale (ad esempio $3j2t$) per ottenere una migliore discriminazione dei segnali;
- migliorare l'algoritmo di machine learning per l'ordinamento dei jet e per il riconoscimento dei segnali.

Grazie per l'attenzione!

BACKUP

Autostati deboli e autostati di massa

Termine di interazione tra quark di tipo up e quark di tipo down, in termini degli autostati dell'interazione debole:

$$\mathcal{L}_{CC} = -\frac{g}{\sqrt{2}}(\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L)\gamma^\mu W_\mu^+ \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} + h.c.$$

L'espressione del medesimo termine in termini degli autostati di massa:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{CC} &= -\frac{g}{\sqrt{2}}(\bar{u}'_L, \bar{c}'_L, \bar{t}'_L)\gamma^\mu W_\mu^+ \begin{pmatrix} d'_L \\ s'_L \\ b'_L \end{pmatrix} + h.c. \\ &= -\frac{g}{\sqrt{2}}(\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L)\gamma^\mu W_\mu^+ V_{CKM} \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} + h.c. \end{aligned}$$

Stato dell'arte delle misure degli elementi della matrice CKM

$$|V_{CKM}| = \begin{pmatrix} 0.974410^{+0.000014}_{-0.000058} & 0.224745^{+0.000254}_{-0.000059} & 0.003746^{+0.000090}_{-0.000062} \\ 0.224608^{+0.000254}_{-0.000060} & 0.973526^{+0.000050}_{-0.000061} & 0.04240^{+0.00030}_{-0.00115} \\ 0.008710^{+0.000086}_{-0.000246} & 0.04169^{+0.00028}_{-0.00108} & 0.999093^{+0.000049}_{-0.000013} \end{pmatrix}.$$

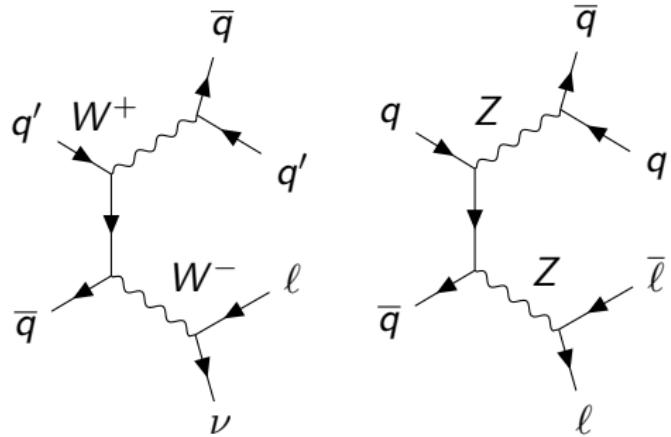
Quanto più lontano un elemento si trova dalla diagonale, tanto più piccolo è il suo valore.

Preselezione

- Selezione dei muoni:
 - ▶ richieste sul trigger di alto livello HLT;
 - ▶ selezione *tight*;
 - ▶ isolamento relativo $I_{\mu}^{rel} \leq 0.06$;
 - ▶ $p_T \geq 26 \text{ GeV}$;
 - ▶ $|\eta| \leq 2.4$.
- Selezione dei jet:
 - ▶ Particle Flow Charge Hadron Subtraction (PFCHS);
 - ▶ Algoritmo di ricostruzione anti-kt, with cone size $R > 0.4$;
 - ▶ $p_T \geq 40 \text{ GeV}$;
 - ▶ $\delta R \geq 0.4$ rispetto ad un leptone ricostruito.
- Jet da un quark b, o *b*-jet:
 - ▶ Combined Multivariate Analysis, output di una rete neurale.

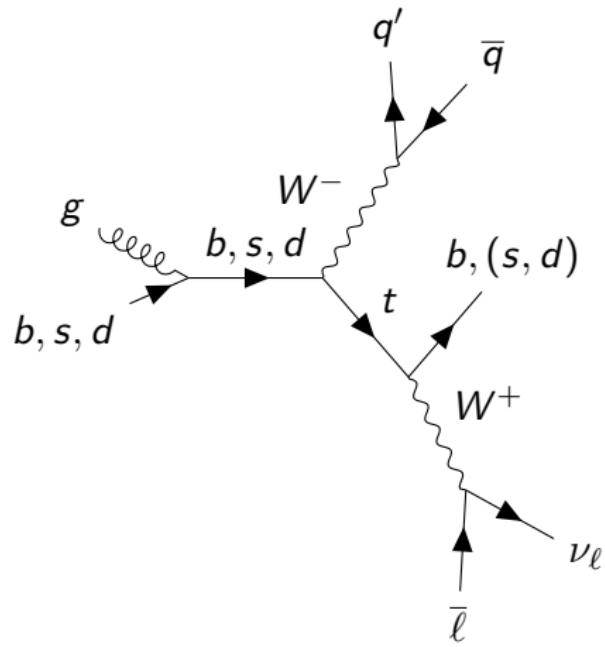
Diagrammi di Feynman di fondi minori

Eventi in cui sono prodotti
due bosoni vettori, uno dei
quali decade leptonicamente



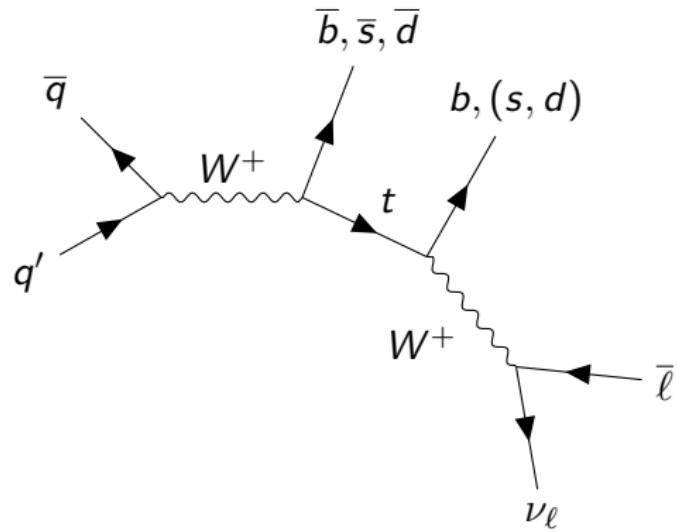
Diagrammi di Feynman di fondi minori

Produzione associata tW



Diagrammi di Feynman di fondi minori

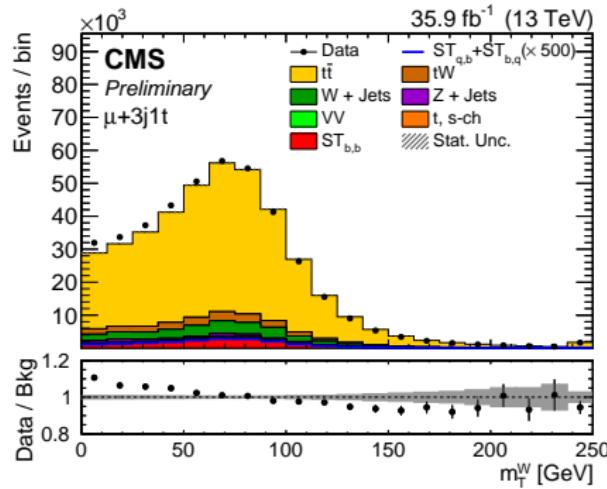
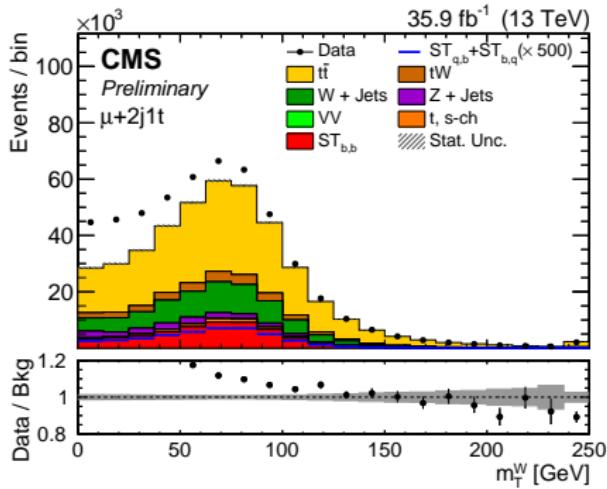
Produzione di top singolo in
canale s



Stima del contributo di QCD multi-jet

Tecnica data-driven:

- valutazione del contributo di QCD in una regione ortogonale a quella di interesse il cui muone non è isolato;

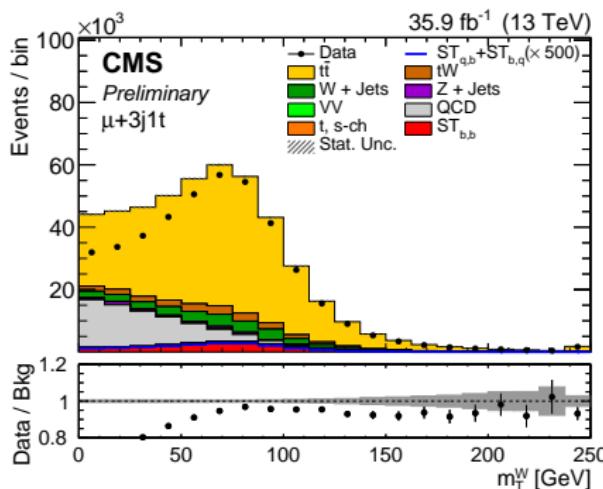
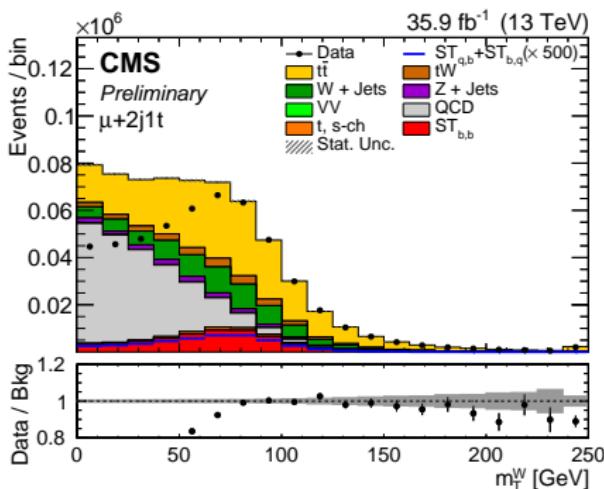


Senza contributo di QCD

Stima del contributo di QCD multi-jet

Tecnica data-driven:

- valutazione del contributo di QCD in una regione ortogonale a quella di interesse il cui muone non è isolato;
- applicazione alla regione di segnale;

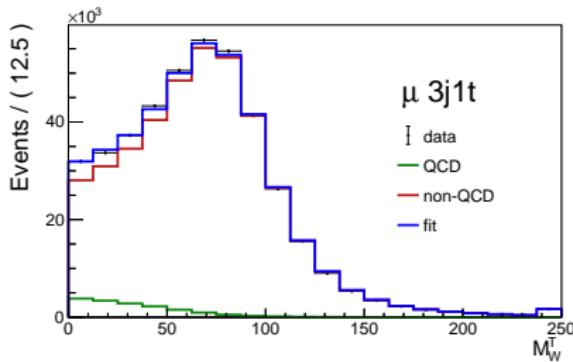
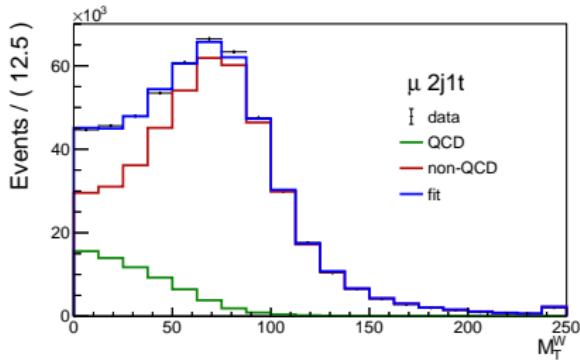


Dopo l'applicazione del contributo di QCD dalla regione anti-isolata

Stima del background QCD multi-jet

Tecnica data-driven:

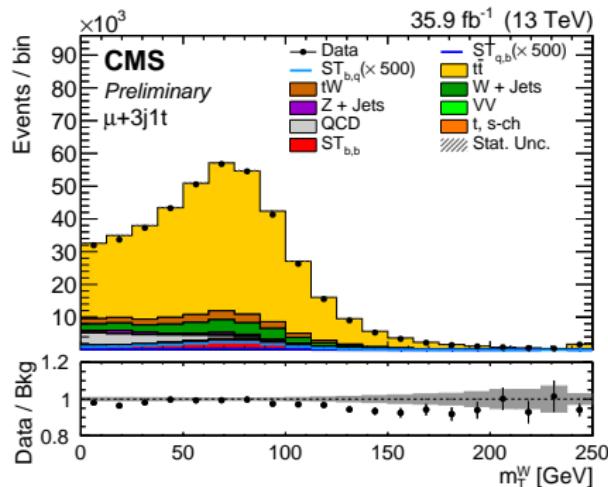
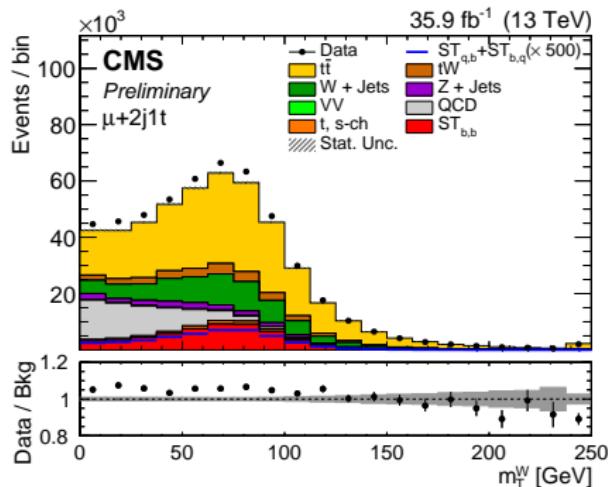
- valutazione del contributo di QCD in una regione ortogonale a quella di interesse il cui muone non è isolato;
- applicazione alla regione di segnale;
- fit di massima verosimiglianza per stimare la normalizzazione.



Stima del background QCD multi-jet

Tecnica data-driven:

- valutazione del contributo di QCD in una regione ortogonale a quella di interesse il cui muone non è isolato;
- applicazione alla regione di segnale;
- fit di massima verosimiglianza per stimare la normalizzazione.

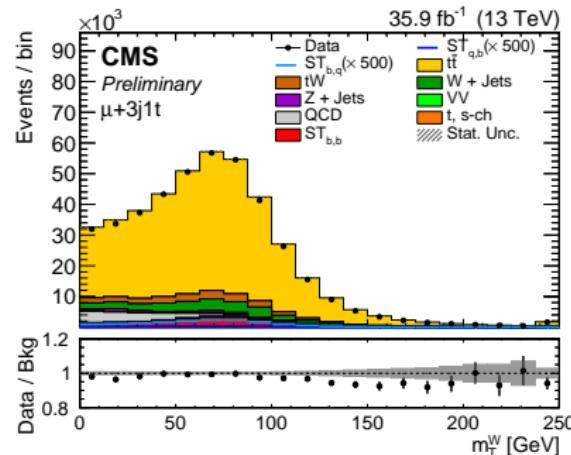
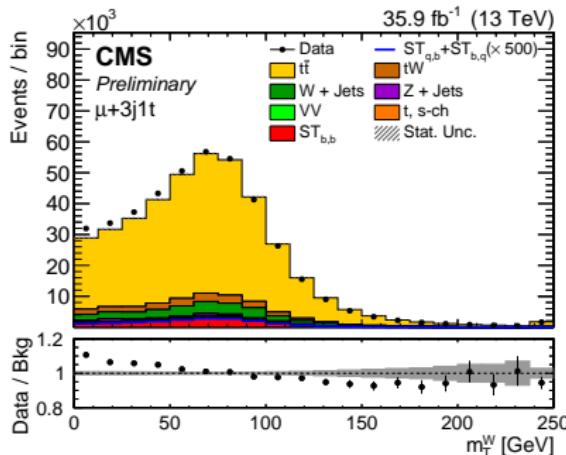


MC + dati dopo il fit.

Stima del background QCD multi-jet in 3j1t

Tecnica *data-driven*:

- valutazione del contributo di QCD in una regione ortogonale a quella di interesse in cui il muone non è isolato;
- applicazione alla regione di interesse;
- fit di massima verosimiglianza per la normalizzazione.

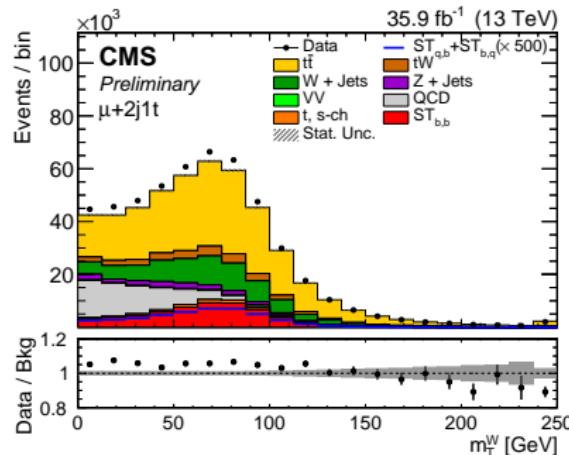
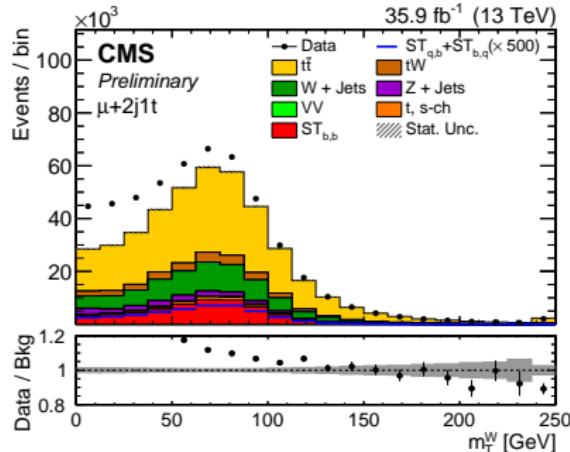


Per ridurre il contributo di QCD è stato richiesto: $m_T^W > 50 \text{ GeV}$

Stima del background QCD multi-jet in 2j1t

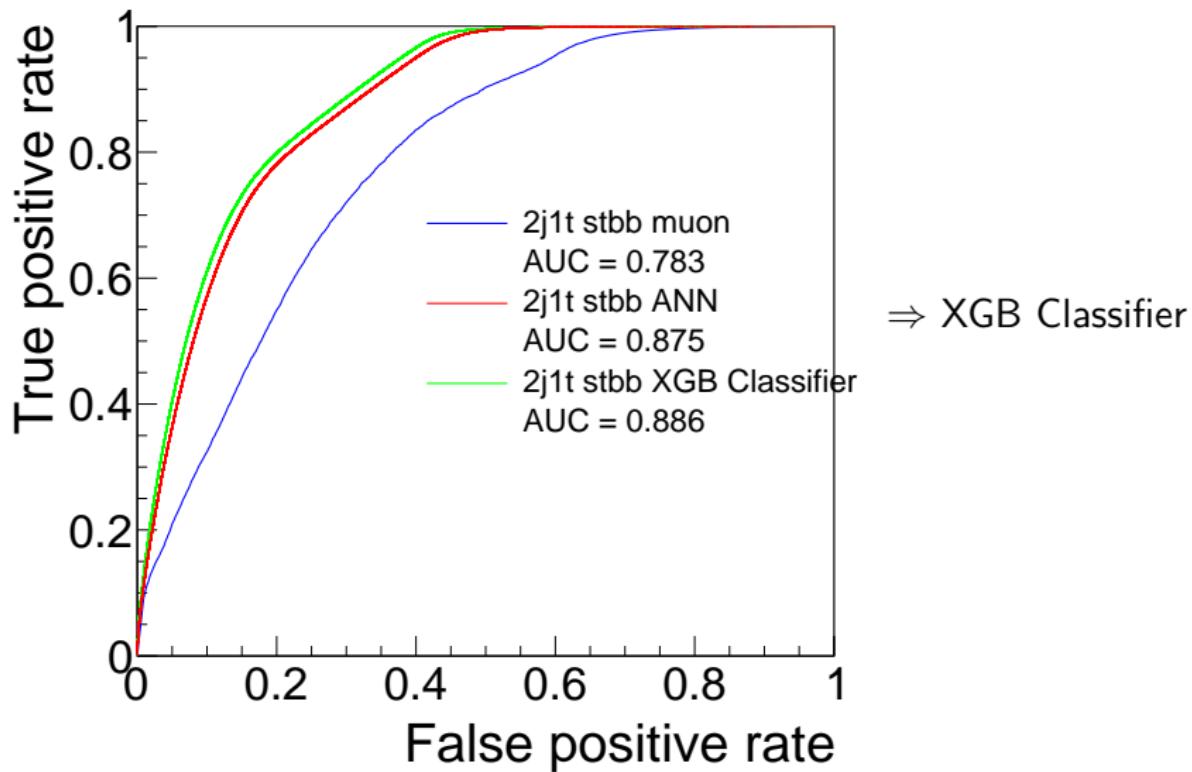
Tecnica *data-driven*:

- valutazione del contributo di QCD in una regione ortogonale a quella di interesse in cui il muone non è isolato;
- applicazione alla regione di interesse;
- fit di massima verosimiglianza per la normalizzazione.



Per ridurre il contributo di QCD è stato richiesto: $m_T^W > 50 \text{ GeV}$

Confronto tra i metodi utilizzati in 2j1t



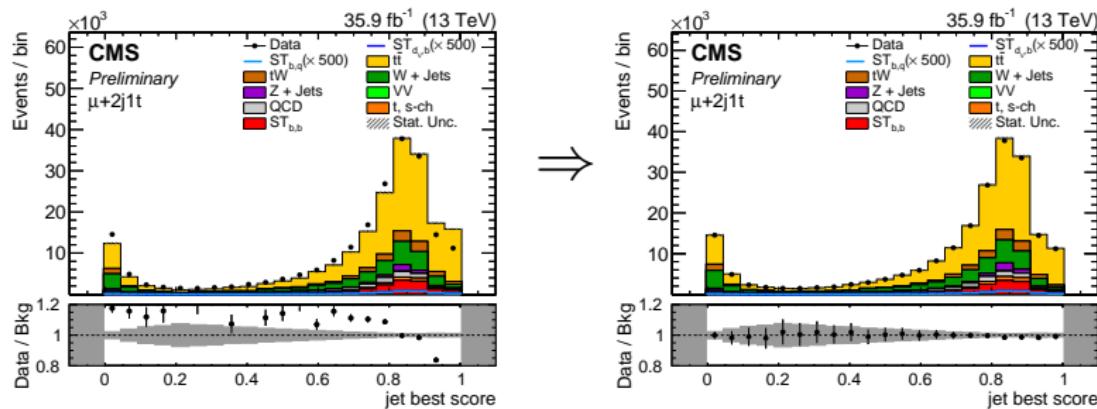
Variabili usate per classificare i jet

Variabile	Importanza
$m_{lep-jet}$	59.5%
Y_{lep}	9.3%
pT_{lep}	7.9%
η_{jet}	7.9%
pT_{jet}	6.4%
Y_{lep}	4.4%
$\Delta R_{lep-jet}$	2.5%
η_{lep}	1.9%
lepton Charge	0.2%

Ripesamento nella regione di controllo in 2j1t

Problema: differenza nelle distribuzioni Dati/MC a causa di discrepanze dell'output del classificatore \rightarrow ripesamento, o *reweighting* in una regione con poco segnale, individuata da una variabile quasi del tutto scorrelata con il jet best score:

- regione di controllo in 3j1t: $|\eta_{forward}| < 2.5$;
- regione di controllo in 2j1t: $|\eta_{forward}| < 2$.

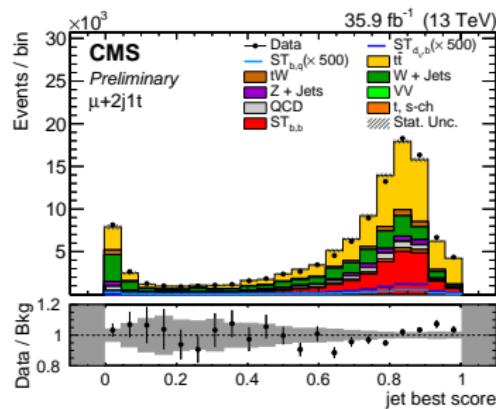
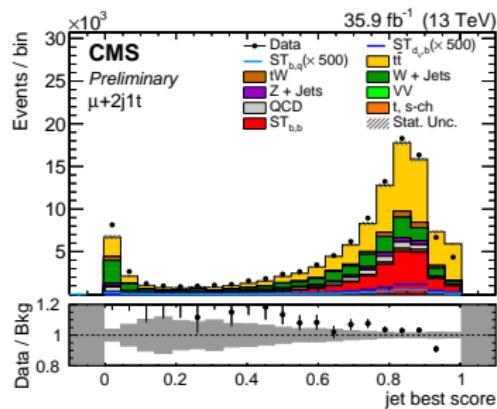


Regione di controllo

Ripesamento nella regione di segnale in 2j1t

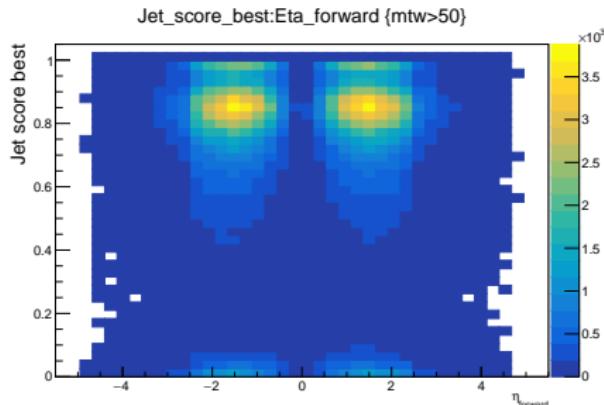
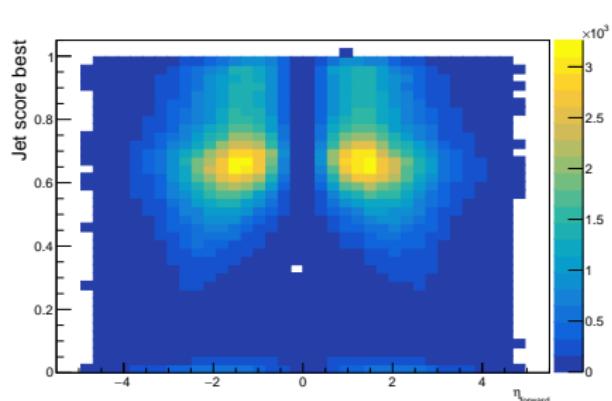
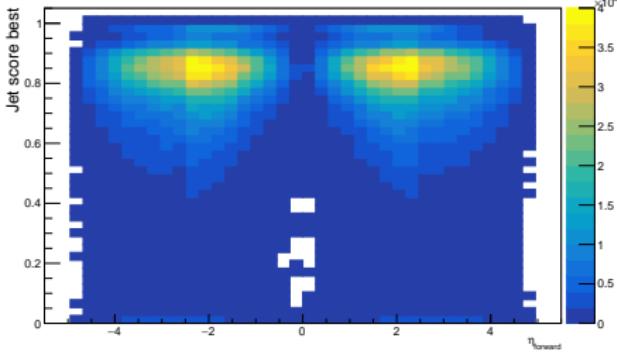
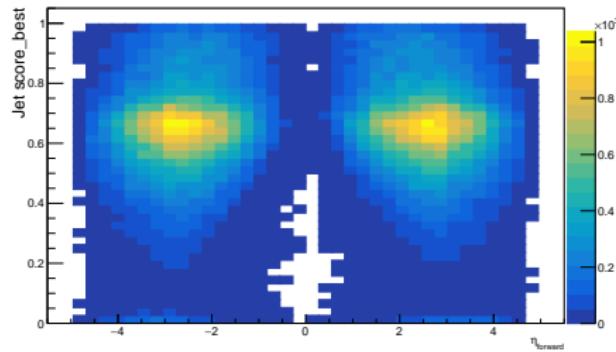
Problema: differenza nelle distribuzioni Dati/MC a causa di discrepanze dell'output del classificatore \rightarrow ripesamento, o *reweighting* in una regione con poco segnale, individuata da una variabile quasi del tutto scorrelata con il jet best score:

- regione di controllo in 3j1t: $|\eta_{forward}| > 2.5$;
- regione di controllo in 2j1t: $|\eta_{forward}| > 2$.



Regione di segnale

Distribuzione $\eta_{forward}$ VS jet best score per S1 e fondo $t\bar{t}$

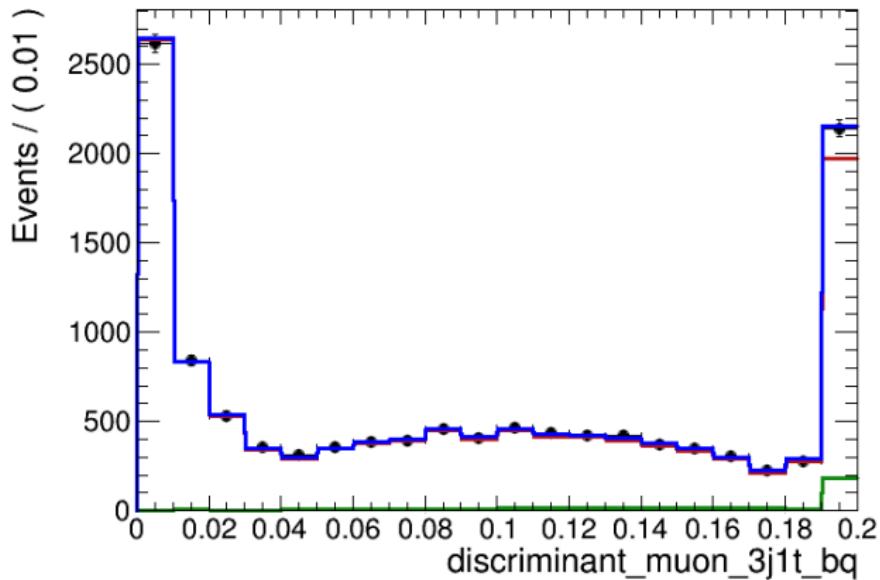


Variabili usate per calcolare l'output di XGB per S2 e S3

Variabile	Importanza nella discriminazione $ST_{d_{vb}}$ (%)	Importanza nella discriminazione ST_{bq} (%)
m_T^W	1.46	0.27
MET	3.6	1.34
η_{lep}	3.28	0.47
$p_{T,lep}$	1.75	3.82
$\eta_{forward}$	2.37	4.6
$p_T(\text{best top})$	3.07	1.61
$\cos \theta_{hel}(\text{best top})$	2.83	3.44
$\cos \theta_{pol}(\text{best top})$	2.39	2.96
$Y(\text{best top})$	1.44	1.09
$m(\text{best top})$	3.16	5.13
$M_T(\text{best top})$	4.68	2.96
$p_T(\text{2nd best top})$	1.78	3.53
$\cos \theta_{hel}(\text{2nd best top})$	4.17	1.49
$\cos \theta_{pol}(\text{2nd best top})$	3.17	5.24
$\eta(\text{2nd best top})$	1.79	2.77
$Y(\text{2nd best top})$	2.12	1.69
$m(\text{2nd best top})$	3.98	3.33
$M_T(\text{2nd best top})$	4.5	2.78
$p_T(\text{3rd best top})$	3.04	2.66
$\cos \theta_{hel}(\text{3rd best top})$	1.7	2.29
$\cos \theta_{pol}(\text{3rd best top})$	4.33	3.66
$\eta(\text{3rd best top})$	2.28	2.84
$Y(\text{3rd best top})$	5.07	3.61
$m(\text{3rd best top})$	1.91	2.62
$M_T(\text{3rd best top})$	3.46	3.09
jet best CMVA	3.33	19.94
jet best score	3.48	4.6
jet 2nd best CMVA	10.19	0.69
jet 2nd best score	3.31	3.56
jet 3rd best CMVA	3.45	0.58
jet 3rd best score	2.88	1.30

Procedura di fit

Il fit di massima verosimiglianza è stato applicato simultaneamente nelle tre regioni.



L'approccio del profiling

Tratta le incertezze sistematiche come parametri di nuisance, considerando tutti i templates corrispondenti alle variazione delle incertezze sistematiche, gli *scenari*, per definire una dipendenza della funzione di verosimiglianza da ciascuna delle incertezze sistematiche.

Questo approccio è statisticamente corretto anche se tende a sottostimare le incertezze teoriche, ad esempio sulle sezioni d'urto o sulle funzioni di distribuzioni partoniche (PDFs).

Incertezze sistematiche con la tecnica del profiling

- incertezza statistica dovuta alla **quantità limitata di eventi simulati**, valutata per ogni bin e per ogni processo con il metodo "light" Barlow-Beeston;
- **Efficienze di ricostruzione e di trigger per i leptoni;**
- incertezza sul numero medio atteso di **interazioni di pileup**;
- **incertezze di rinormalizzazione e di scala:** queste sono stimate separatamente per ogni processo;
- misure di efficienza di **b-tagging e mistagging**;
- **jet energy scale (JES)**: variazione nei quadrimomenti dovute alla dipendenza da p_T e η dell'energia dei jet;
- **separazione, in termini di dev.st., di valori attesi e osservati del rapporto $|\mathbf{V}_{ts}|^2 / |\mathbf{V}_{td}|^2$:** parametro gaussiano;
- incertezza sulla **luminosità integrata**: $\sigma_{lumi} = 2.7\%$.

Limite superiore a lla somma $|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2$

Statistica di test utilizzata: *modified profile likelihood*

$$\tilde{q}_\mu = \begin{cases} -2 \ln \frac{L(\vec{x}; \mu, \hat{\vec{\theta}}(\mu))}{L(\vec{x}; 0, \hat{\vec{\theta}})} & \hat{\mu} < 0, \\ -2 \ln \frac{L(\vec{x}; \mu, \hat{\vec{\theta}}(\mu))}{L(\vec{x}; \mu, \hat{\vec{\theta}})} & \hat{\mu} \geq 0. \end{cases}$$

Il limite superiore è stato valutato con il metodo CLs, in cui il llivello di confidenza è calcolato come segue: s

$$CL_s(\mu) = \frac{p_{s+b}(\mu)}{1 - p_b(\mu)},$$

dove:

$$\begin{aligned} p_{s+b}(\mu) &= P_{s+b}(t(\mu) > t_{\hat{\mu}}), \\ p_b(\mu) &= P_b(t(\mu) < t_{\hat{\mu}}). \end{aligned}$$