

Search for single VLQ T at CMS with machine learning techniques

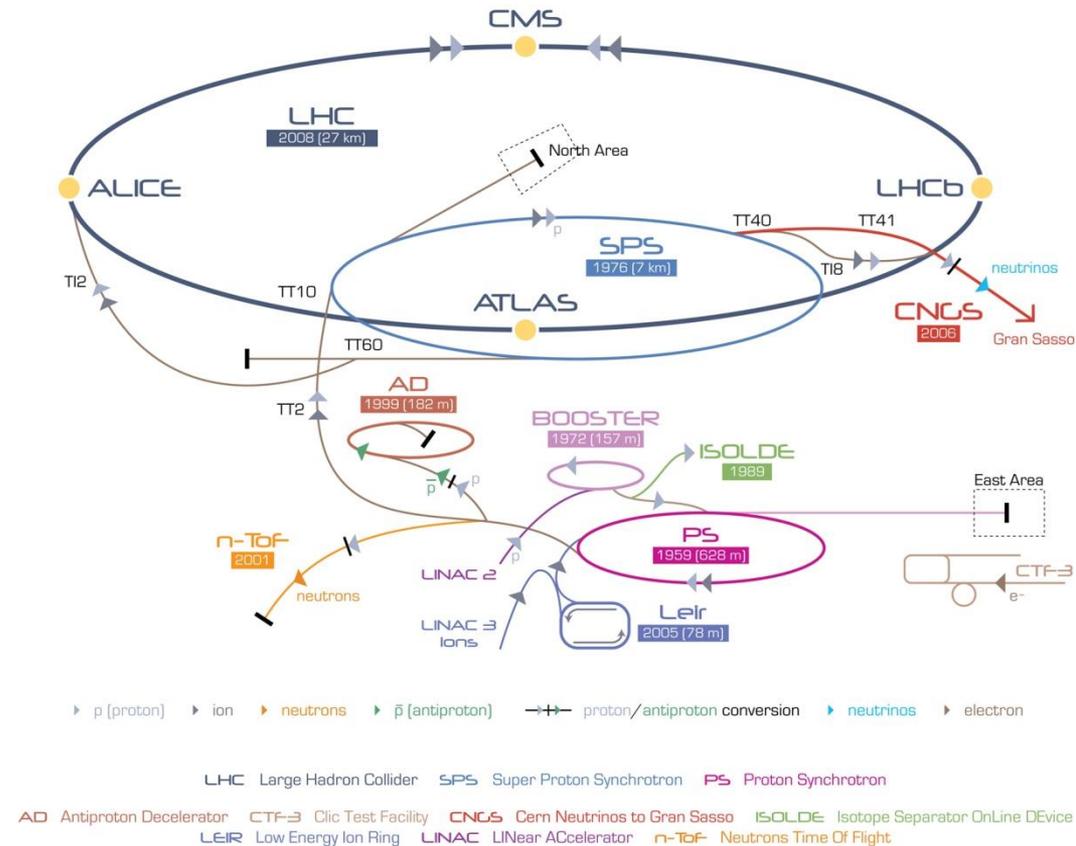
CMS Experiment

LHC:

- Acceleratore protone-protone;
- Energia 13 TeV;
- Luminosità $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$;

CMS (Compact Muon Solenoid):

- Rivelatore “general purpose” presso uni dei quattro punti di interazione.



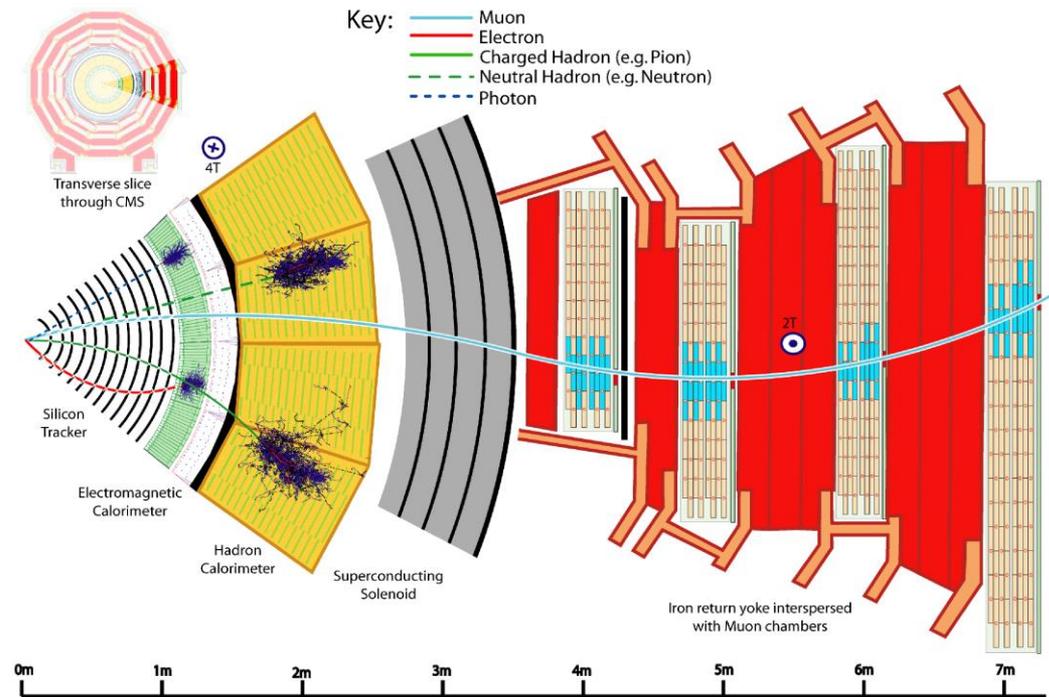
CMS Experiment

CMS è caratterizzato da:

- Campo magnetico di 4T

- Complesso sistema di sottorivelatori:

- Silicon Tracker
- ECAL
- HCAL
- Superconducting Solenoid
- Iron Return Yoke and Muon Chambers



CMS Experiment

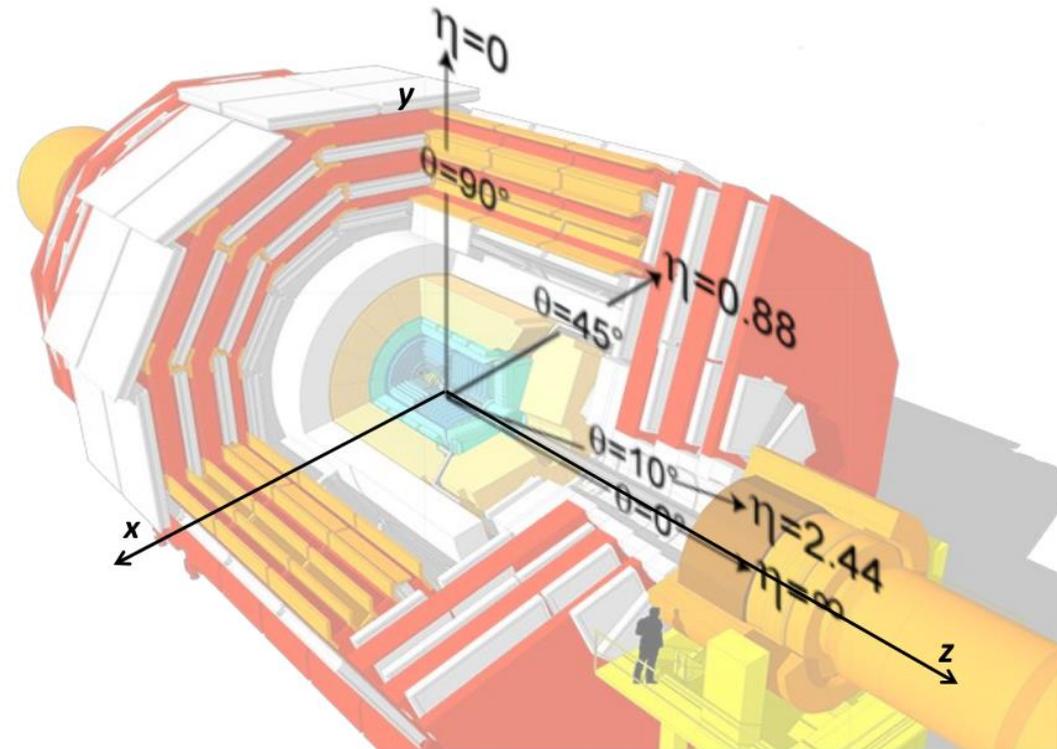
Sistema di coordinate utilizzato (φ, η)

$$\eta = -\ln[\text{tg}(\theta/2)]$$

$\Delta\eta$ è relativisticamente invariante per “boost” lungo l’asse Z.

La distanza tra due oggetti ricostruiti è data dall’invariante per “boost” lungo l’asse Z ΔR , definita come :

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



The Standard Model

Il Modello Standard delle particelle prevede:

- 3 famiglie di quark.
- 3 famiglie di leptoni.
- Bosoni di gauge, mediatori delle forze fondamentali.

Le interazioni fondamentali vengono rappresentate nel gruppo unitario :
 $SU(3)_c \times SU(2)_l \times U(1)_y$.

Il meccanismo di rottura spontanea della simmetria del sottogruppo $SU(2)_l \times U(1)_y$ introduce il bosone scalare massivo di Higgs, dando massa ai bosoni di gauge e ai fermioni.

	mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$ u up	mass → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$ c charm	mass → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$ t top	mass → 0 charge → 0 spin → 1 g gluon	mass → $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 0 H Higgs boson
QUARKS	mass → $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$ d down	mass → $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$ s strange	mass → $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$ b bottom	mass → 0 charge → 0 spin → 1 γ photon	
	mass → $0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$ e electron	mass → $105.7 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$ μ muon	mass → $1.777 \text{ GeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$ τ tau	mass → $91.2 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 1 Z Z boson	
LEPTONS	mass → $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$ ν_e electron neutrino	mass → $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$ ν_μ muon neutrino	mass → $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$ ν_τ tau neutrino	mass → $80.4 \text{ GeV}/c^2$ charge → ± 1 spin → 1 W W boson	GAUGE BOSONS

The Standard Model Limits

Il Modello Standard risulta incompleto, in particolare nei seguenti punti:

1. Gran numero di parametri liberi, tra i quali le costanti di accoppiamento e le masse delle particelle.
2. Non prevede massa per i neutrini, quindi non spiega fenomeni di oscillazione osservati.
3. Non comprende l'interazione gravitazionale.
4. Non prevede l'esistenza di materia oscura, che dovrebbe costituire la maggior parte della materia esistente nell'universo.

Vector Like Quarks

- Molti modelli di fisica oltre il Modello Standard prevedono l'esistenza di Vector Like Quarks (VLQs).
- I VLQs sono caratterizzati da una corrente debole carica del tipo vettoriale e non V-A come i quark del MS.

- Standard Model:

$$J^{\mu+} = J_L^{\mu+} + J_R^{\mu+} = J_L^{\mu+} = \bar{u}_L \gamma^\mu d_L = \bar{u} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) d = V - A$$

- Beyond Standard Model:

$$J^{\mu+} = J_L^{\mu+} + J_R^{\mu+} = \bar{u}_L \gamma^\mu d_L + \bar{u}_R \gamma^\mu d_R = \bar{u} \gamma^\mu d = V$$

- Pertanto nella lagrangiana un termine di massa del tipo $L_M = -M \bar{\psi} \psi$ risulta essere gauge invariante.
- Siamo interessati alla produzione del VLQ T tramite corrente debole carica e decadimento tramite corrente debole neutra. I termini della lagrangiana di tali interazioni sono rispettivamente:

$$\bar{T}_{L/R} W_\mu^+ \gamma^\mu d_{L/R}^i$$

$$\bar{T}_{L/R} Z_\mu \gamma^\mu u_{L/R}^i$$

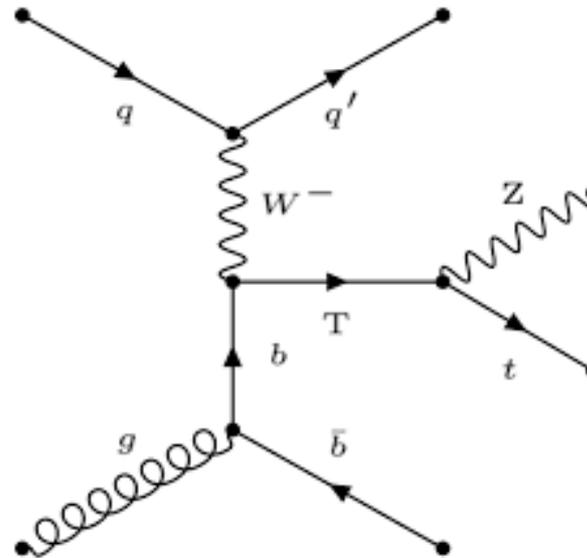
Search for VLQ T at CMS

Nella ricerca del VLQ T siamo interessati in particolare al suo accoppiamento tramite le due correnti con i quark di terza generazione:

$bW \rightarrow T$

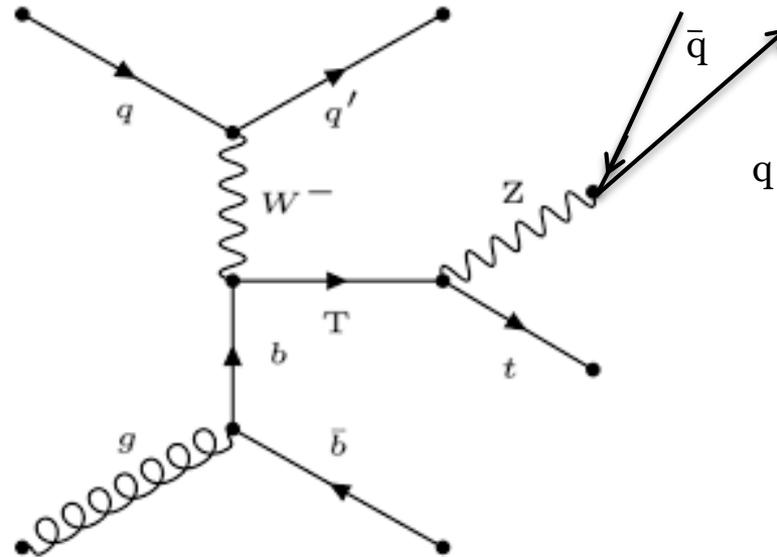
$T \rightarrow Zt$

In particolare ci si è focalizzati sul canale in cui la Z decade adronicamente e il quark top decade leptonicamente in muone e neutrino.



Search for VLQ T at CMS

I quark, provenienti dal decadimento del bosone Z, frammenteranno e adronizzeranno all'interno del sistema di rivelatori, fino ad arrivare al calorimetro adronico dove le particelle prodotte rilasceranno gran parte dell'energia.



Jet Reconstruction

I Jet, derivanti dalla produzione dei quark, sono ricostruiti tramite algoritmi di clustering.

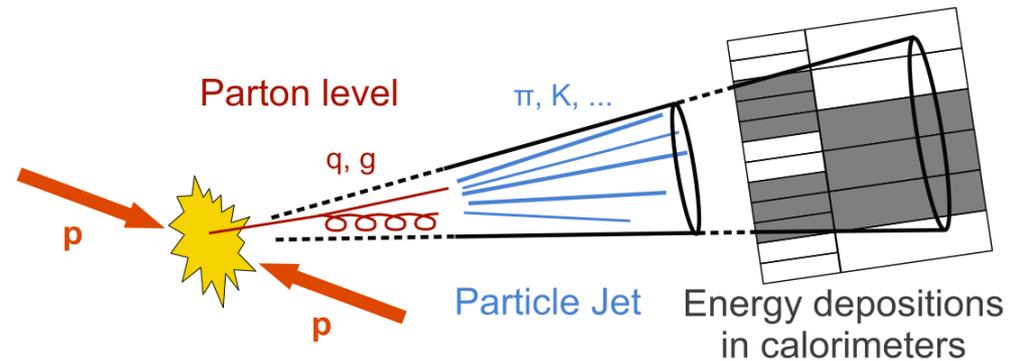
L'algoritmo utilizzato in questo caso è l'anti-kt:

$$d_{i,j} = \min(k_{ti}^{-2}, k_{tj}^{-2}) \frac{\Delta_{i,j}^2}{R^2}$$

$$d_{i,B} = k_{ti}^{-2}$$

$$\Delta_{i,j}^2 = (y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$$

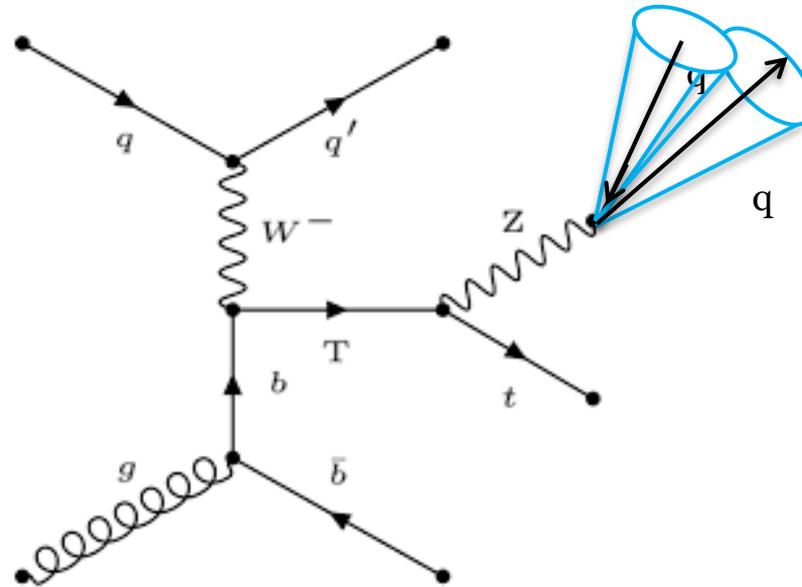
Dove R è un parametro di raggio nella metrica (η, ϕ) .



Search for VLQ T at CMS

I Jet ricostruiti sono di due differenti tipi:

- I Jet AK4, con parametro di raggio pari a $R=0.4$



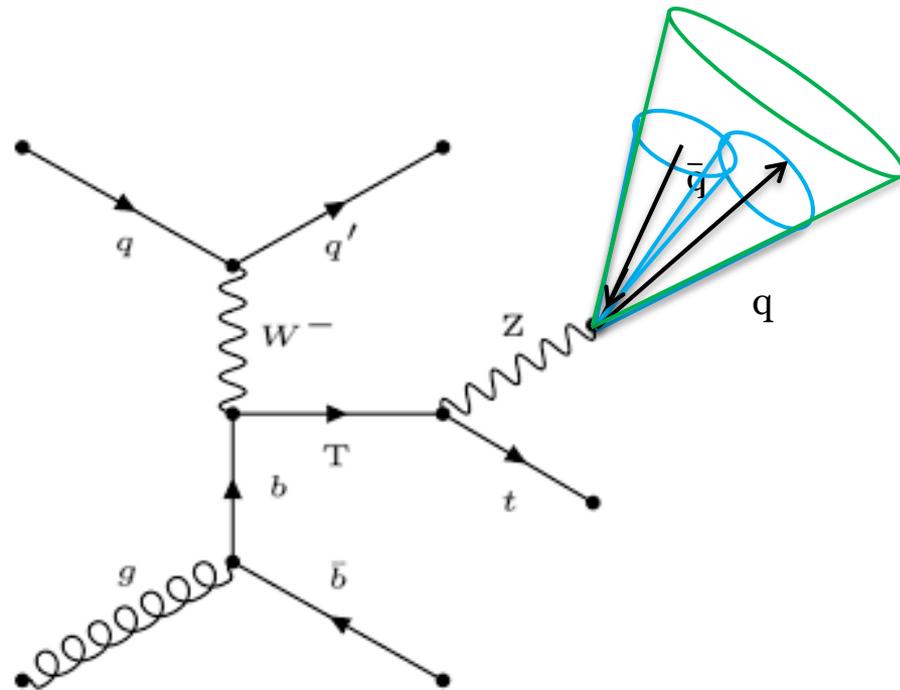
Search for T at CMS

I Jet ricostruiti sono di due differenti tipi:

- I Jet AK4, con parametro di raggio pari a $R=0.4$

- I Jet AK8, con parametro di raggio pari a $R=0.8$

Per il tagging della Z adronica è richiesto un Jet AK8 con una massa compresa tra 60 GeV e 105 GeV e un impulso trasverso maggiore di 200 GeV.



Z-tagging

Altre variabili estremamente importanti nel tagging della Z adronica sono le N-subjettiness definite come:

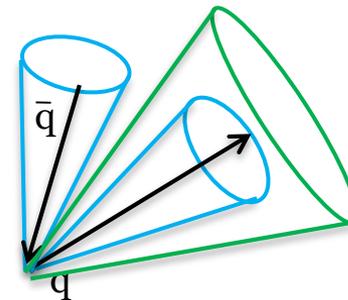
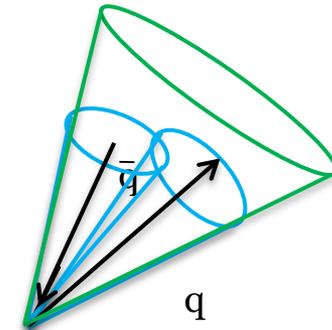
$$\tau_N = \frac{1}{d_0} \sum_k P_{t,k} \min\{\Delta R_{1,k}, \dots, \Delta R_{N,k}\}$$

Per un Jet proveniente dal decadimento adronico della Z ci si aspetta $\tau_2 < \tau_1$

Per un Jet di QCD invece ci si aspetta $\tau_2 > \tau_1$

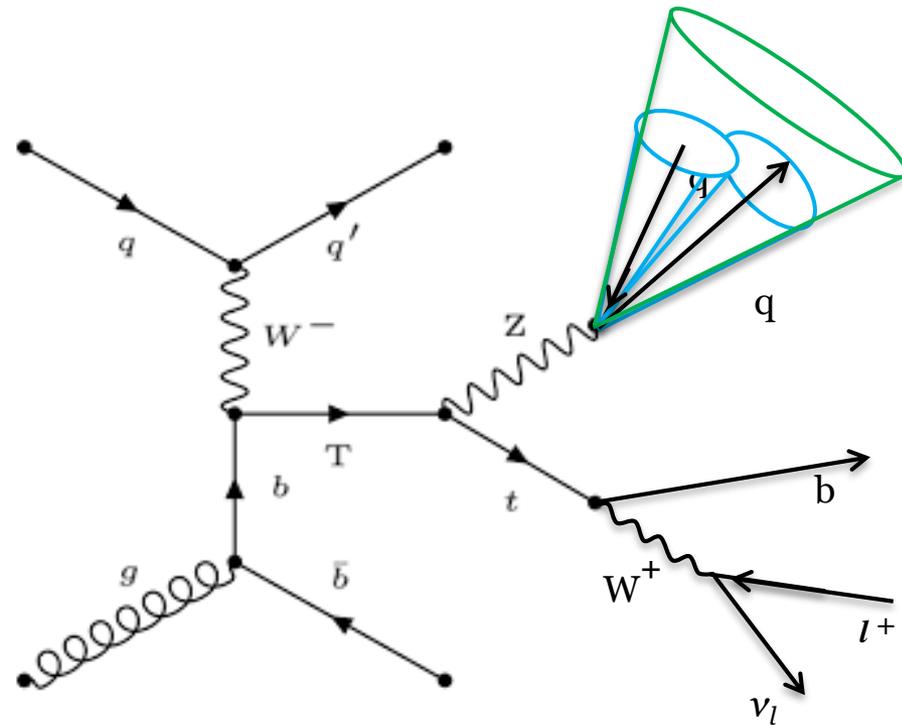
Pertanto per il tagging è stato richiesto anche

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} < 0.45$$



Search for VLQ T at CMS

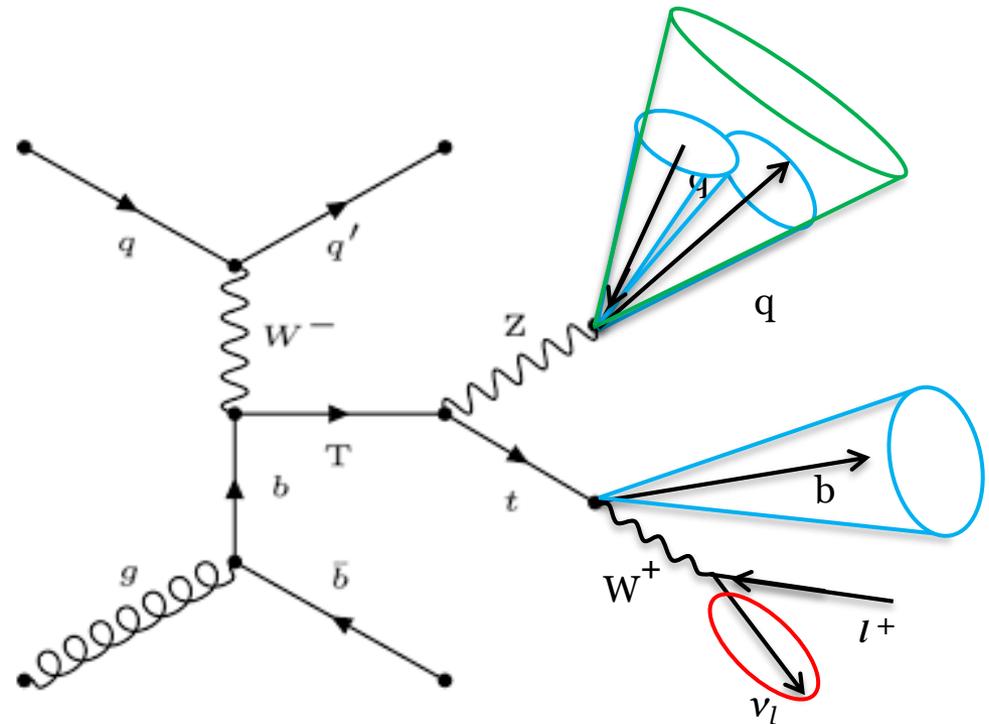
Il decadimento del quark top leptonico in muone e neutrino è caratterizzato dalla presenza di:



Search for VLQ T at CMS

Il decadimento del quark top leptonic in muone e neutrino è caratterizzato dalla presenza di:

1. Un Jet AK4 b-tagato
2. Un muone che soddisfi determinati requisiti di isolamento e con un momento trasverso maggiore di 10 GeV.
3. Un'energia mancante trasversa (MET), calcolata tramite la chiusura cinematica dell'evento, maggiore di 70 GeV.

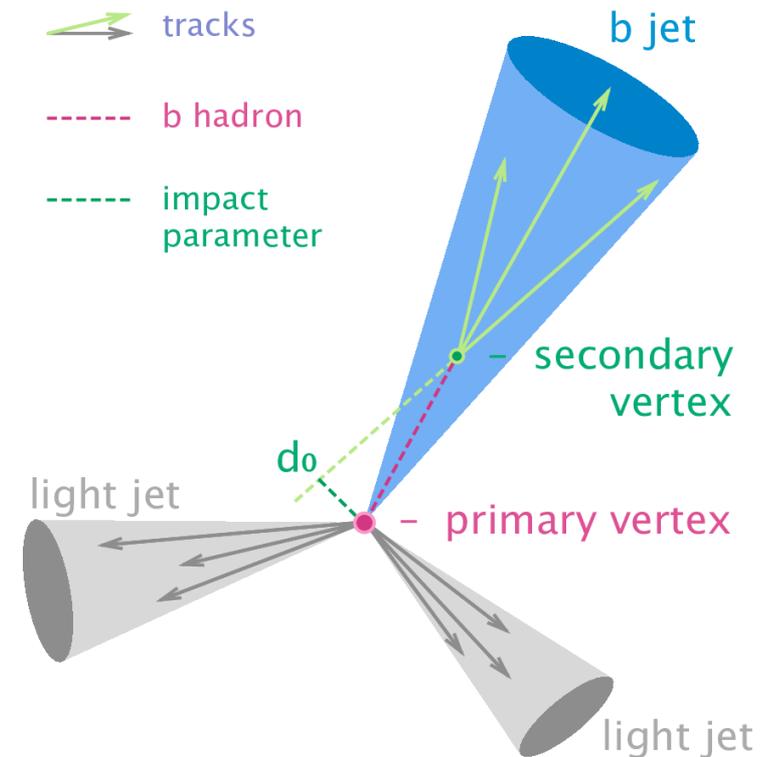


b-tagging

Per il b-tagging del Jet AK4 è stato ricostruito il vertice del Jet, avendo il vertice dei b-Jet caratteristiche differenti dal vertice dei quark leggeri.

Un algoritmo di Neural Network:
DeepCSV
Viene usato per discriminare i b-Jet da quelli di quark leggeri.

Inoltre solo i b-tagged Jet con un $\Delta R > 1.2$ con almeno uno dei Jet Z-tagged ricostruiti sono presi in considerazione.

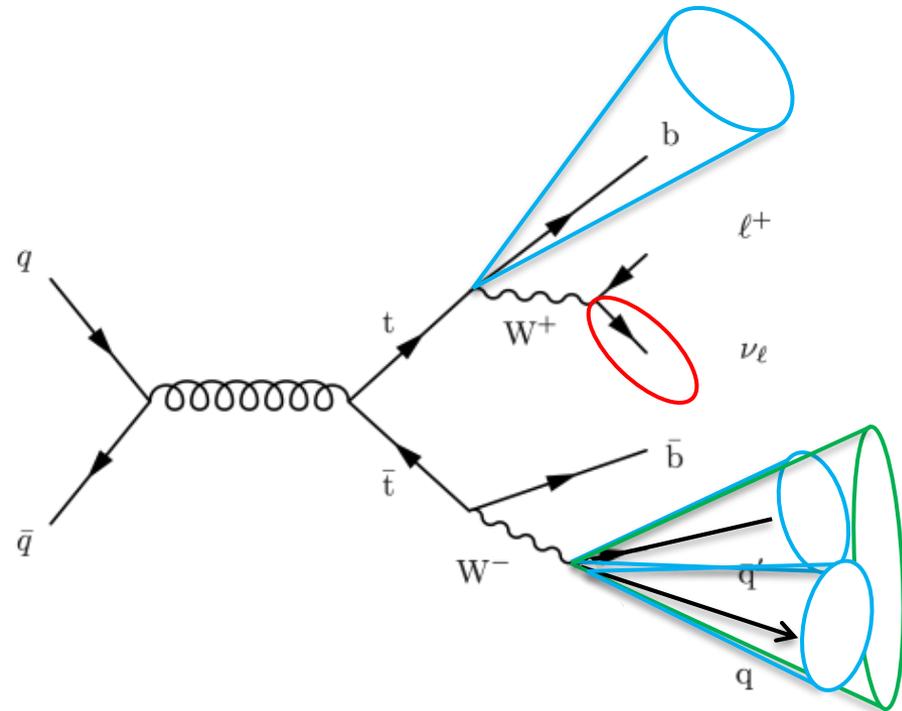


$t\bar{t}$ Background

Il primo fondo che è stato analizzato è il fondo di $t\bar{t}$.

Nel caso mostrato abbiamo un quark top che decade leptonicamente che ha caratteristiche simili al quark top proveniente dal segnale.

E il antiquark top decadendo andronicamente può mimare la presenza di un Jet Z-tagged tramite il decadimento della W.

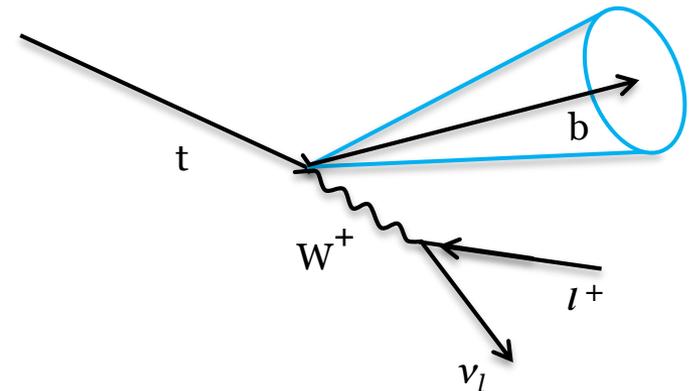


Quark Top Reconstruction

I requisiti di isolamento del muone sono molto differenti a seconda del ΔR tra il muone e il Jet b-tagged.

Se il ΔR è maggiore di 0.4 e minore di 2, il quark top ricostruito è classificato come:

Top Resolved.

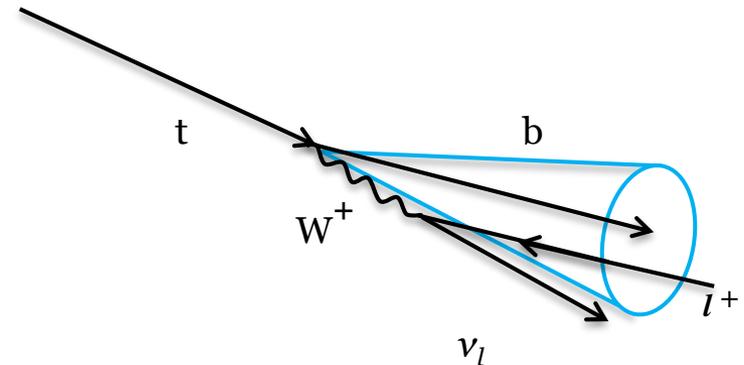


Quark Top Reconstruction

Mentre se il ΔR è minore di 0.4, il quark top ricostruito è classificato come:

Top Merged.

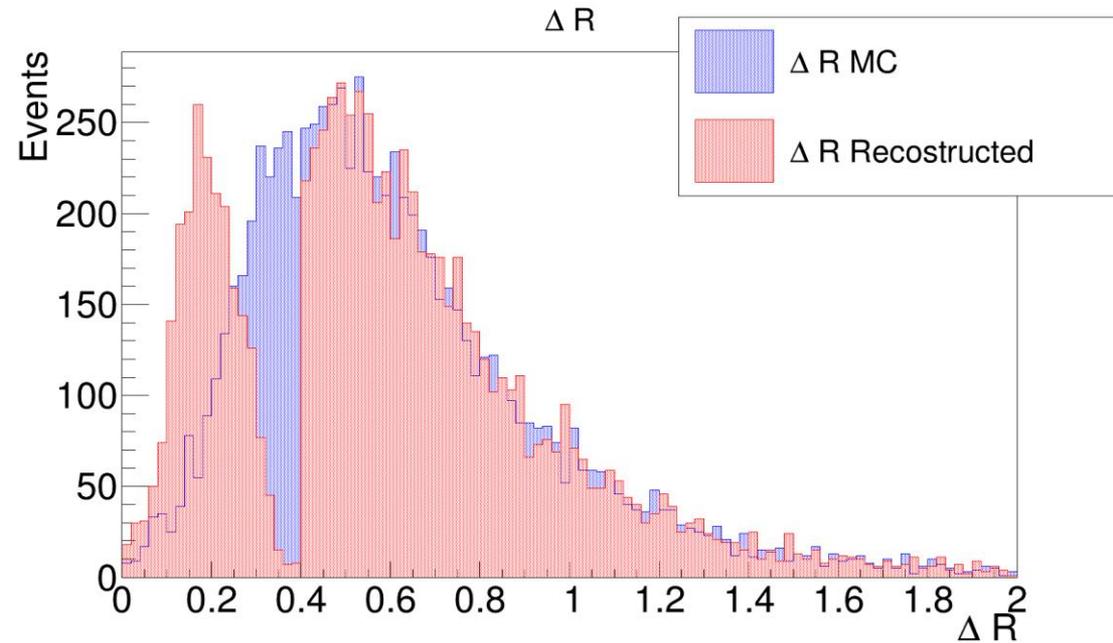
Ci si aspetta un quark top in configurazione Merged se esso è particolarmente “boosted”.



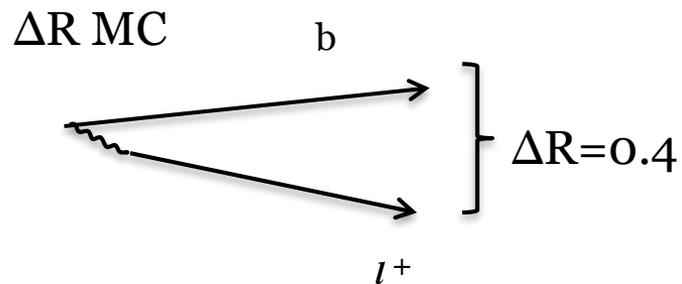
Muon-Jet Opening Angle

Comparando il ΔR dato dalla verità MC con il ΔR degli oggetti ricostruiti nel detector, si evince una discrepanza.

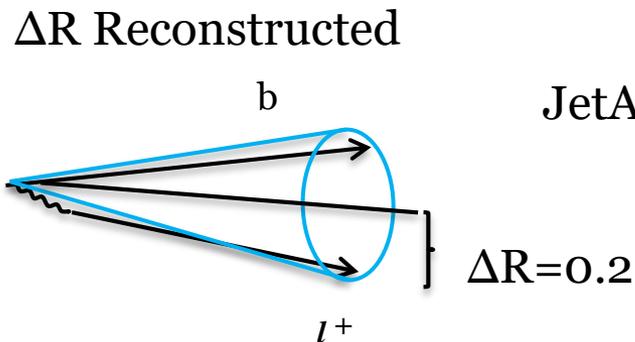
La discrepanza tra il ΔR del Monte Carlo e il ΔR ricostruito è esattamente a 0.4, raggio del Jet.



Muon-Jet Opening Angle

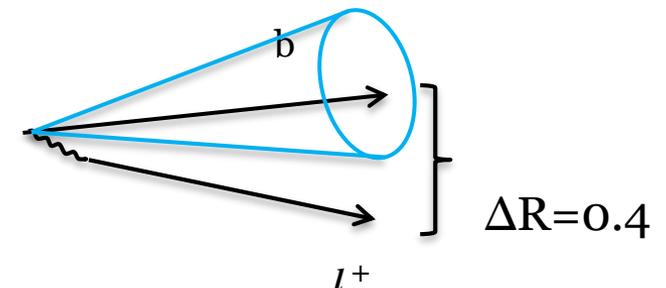


Si evince che nella ricostruzione del Jet b-tagged è stato considerato anche il muone proveniente dal decadimento della W.



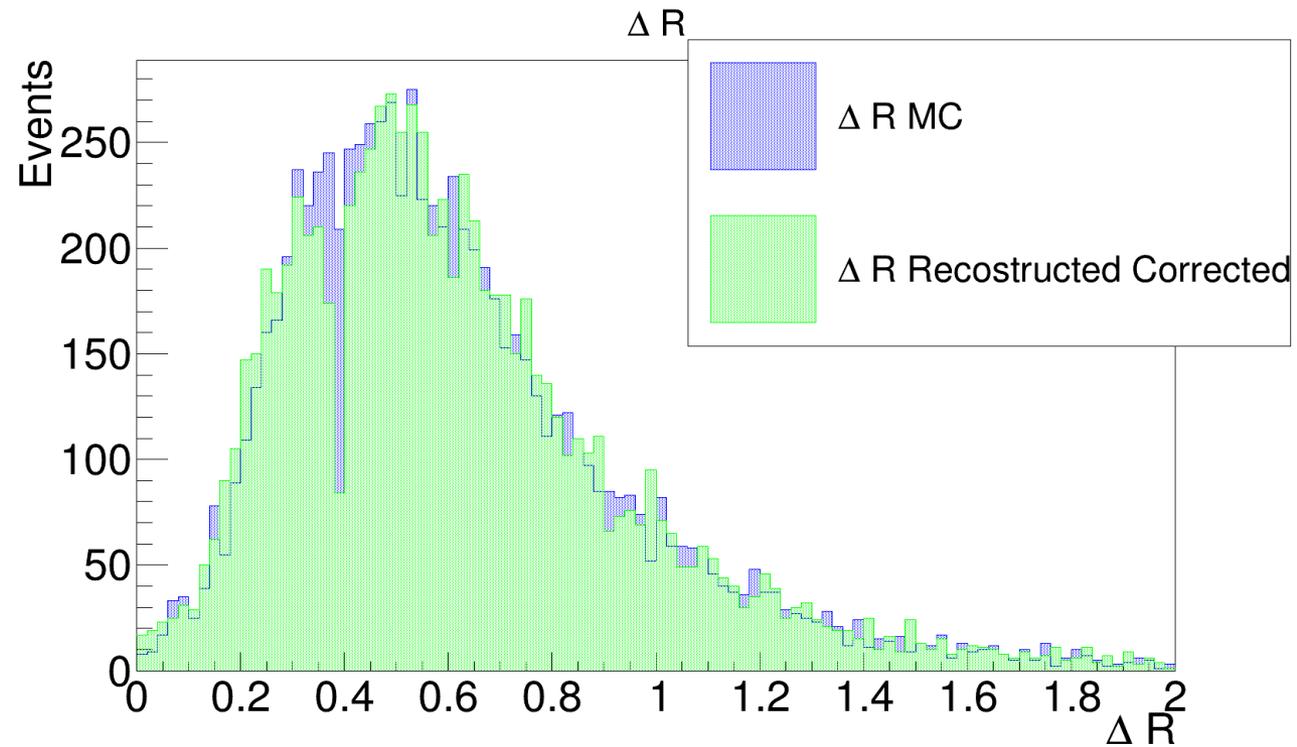
JetAK4 \longrightarrow JetAK4-Muone

ΔR Reconstructed Corrected



Muon-Jet Opening Angle

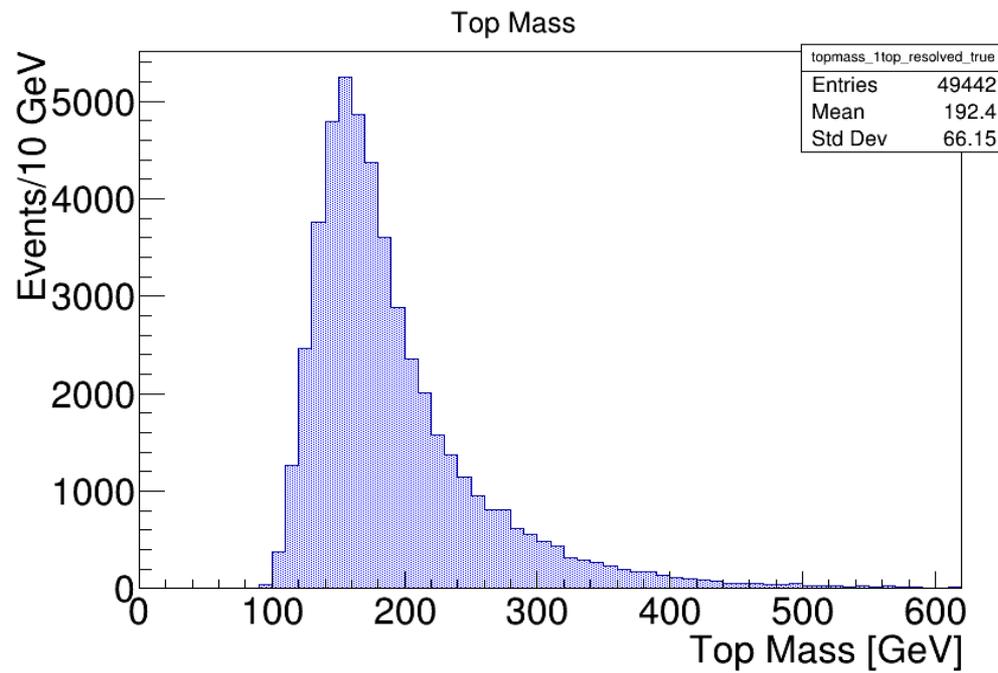
JetAK4 \longrightarrow JetAK4-Muone



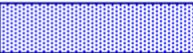
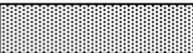
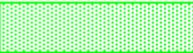
Quark Top Reconstruction

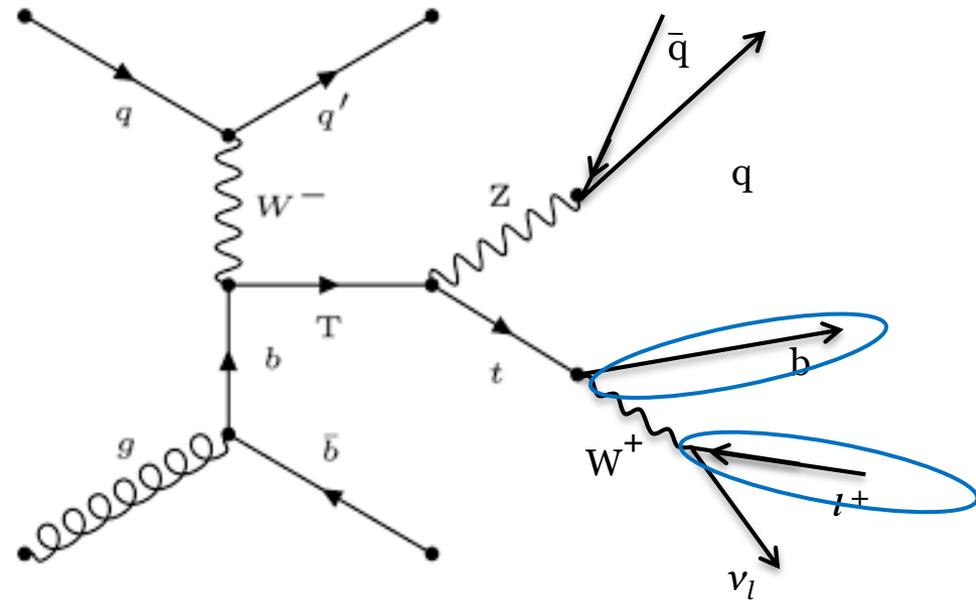
La ricostruzione della massa del quark top è stata effettuata considerando i JetAK4 b-tagged, i muoni e la MET.

Imponendo che $\sqrt{s}(\mu, MET) = 80,4$ GeV (Massa W) si è stimato l'impulso lungo l'asse del fascio del neutrino. Nella ricostruzione del t si è tenuto conto anche di tale contributo.

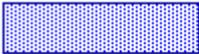


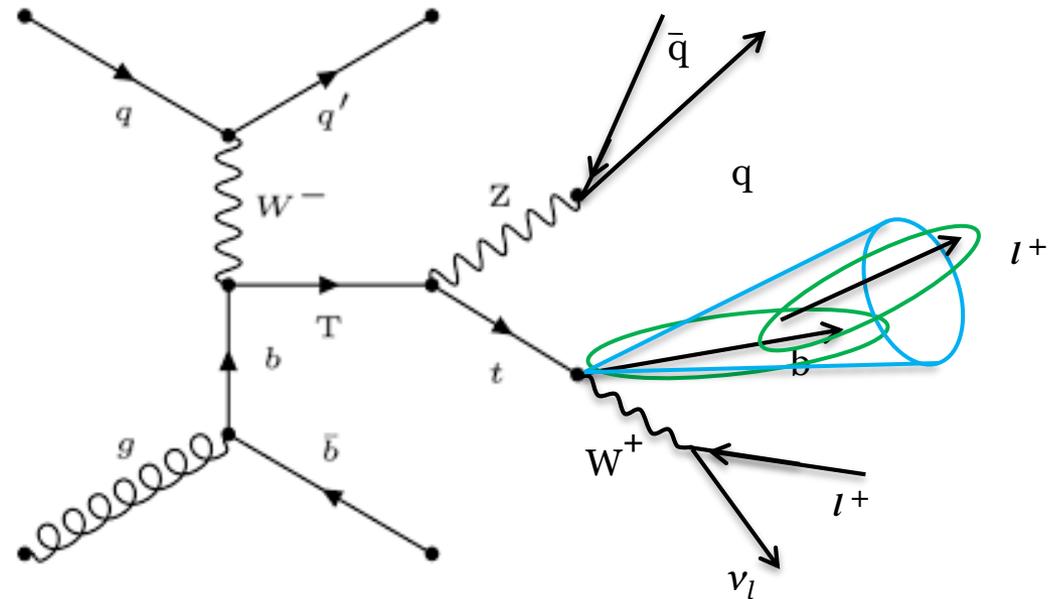
Top Quark Classification

-  Top True
-  Top False
-  Top Muon Match
-  Top Jet Match
-  Top Comb



Top Quark Classification

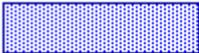
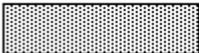
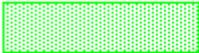
-  Top True
-  Top False
-  Top Muon Match
-  Top Jet Match
-  Top Comb

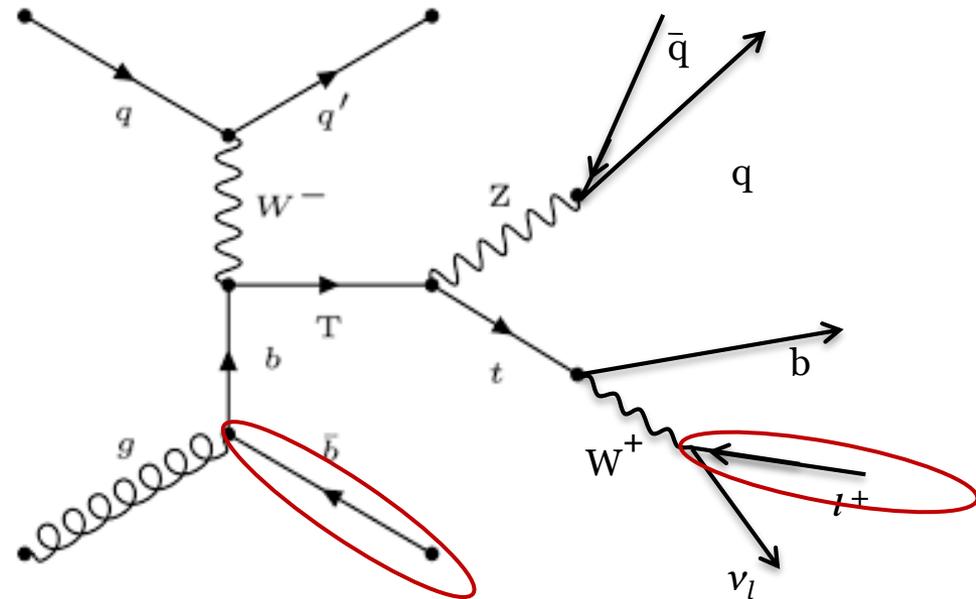


Top Merged: $b \rightarrow \dots + \pi \rightarrow \dots + \mu \nu$

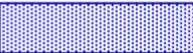
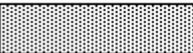
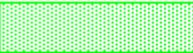
Top Resolved: $Z/\gamma \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $b \rightarrow \dots + \pi \rightarrow \dots + \mu \nu$

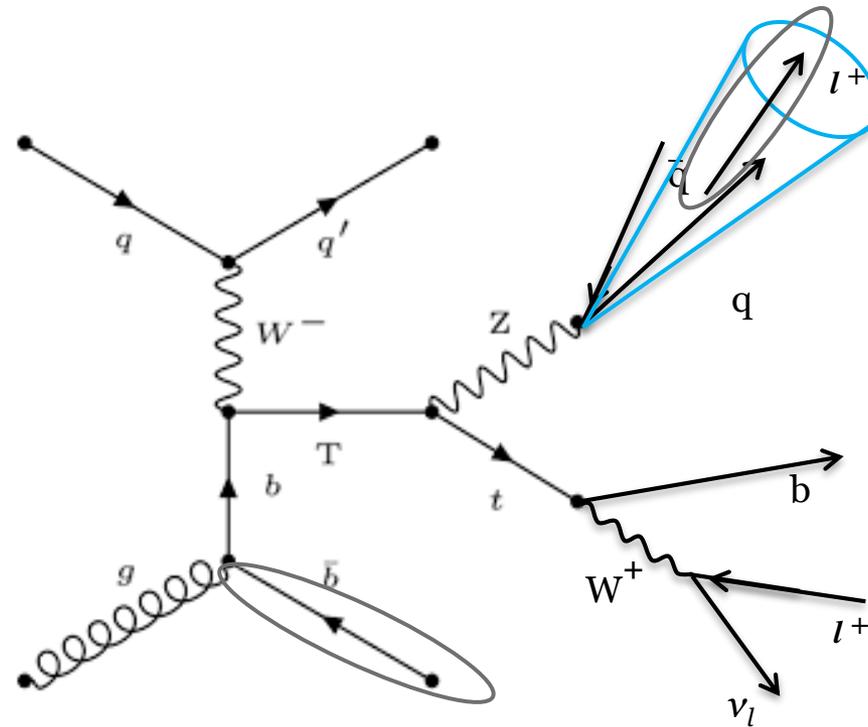
Top Quark Classification

-  Top True
-  Top False
-  Top Muon Match
-  Top Jet Match
-  Top Comb



Top Quark Classification

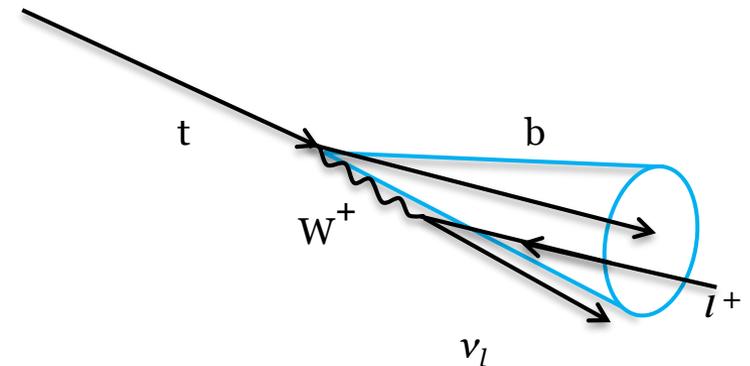
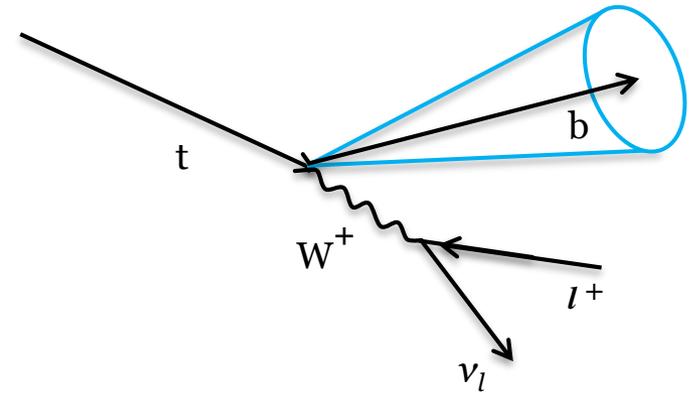
-  Top True
-  Top False
-  Top Muon Match
-  Top Jet Match
-  Top Comb



Quark Top Reconstruction

Gli eventi sono stati divisi in 5 categorie a seconda del numero e del tipo di quark top ricostruiti :

- 1 Top Resolved
- 1 Top Merged
- 2 Top Resolved
- 2 Top Mix
- Other Top



Selezione Top Resolved

Per la selezione del muone in configurazione Top Resolved è stato richiesto:

- Flag di qualità di ricostruzione del muone “HighPt”.

- Isolamento in un cono di $\Delta R=0.4$ (Iso04)

$$\sum \frac{p_{t_{Had+\gamma}}}{p_{t_\mu}} \text{ minore di } 0.1.$$

- Impulso trasverso relativo = $\frac{|\vec{p}_\mu \times \vec{p}_{Jet}|}{|p_{Jet}|}$ maggiore di 20.

Selezione Top Resolved

Per la selezione del muone in configurazione Top Resolved è stato richiesto:

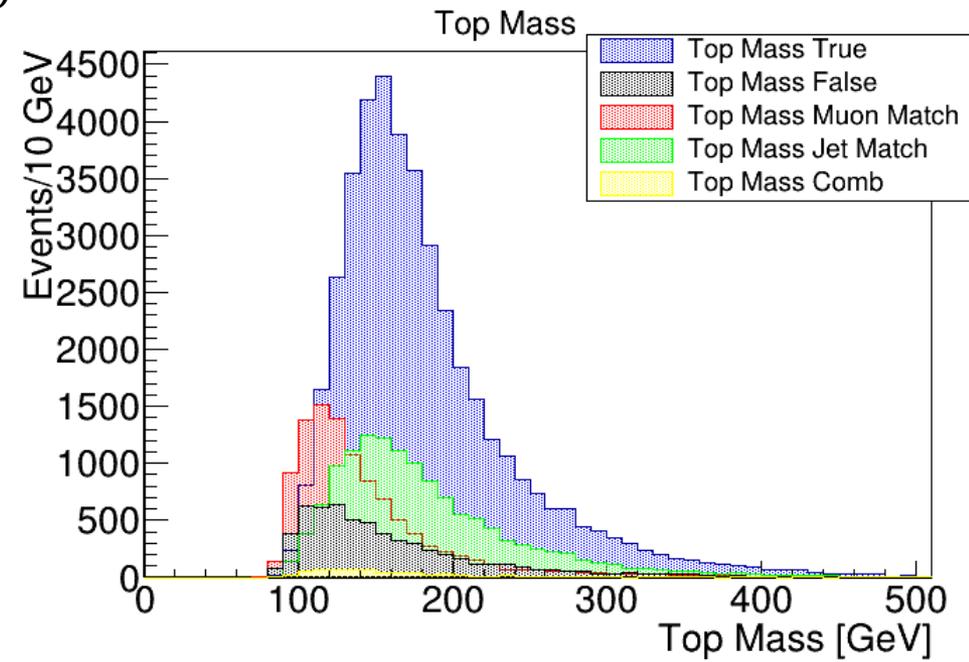
- Flag di qualità di ricostruzione del muone “HighPt”.

- Isolamento in un cono di $\Delta R=0.4$ (Iso04)

$$\sum \frac{p_{t_{Had+\gamma}}}{p_{t_{\mu}}} \text{ minore di } 0.1.$$

- Impulso trasverso relativo = $\frac{|\vec{p}_{\mu} \times \vec{p}_{Jet}|}{|p_{Jet}|}$ maggiore di 20.

I risultati mostrati si riferiscono ad un sample di background ttbar con Massa(tt) maggiore di 1 TeV.



Selezione Top Merged

Per la selezione del muone in configurazione Top Merged è stato richiesto:

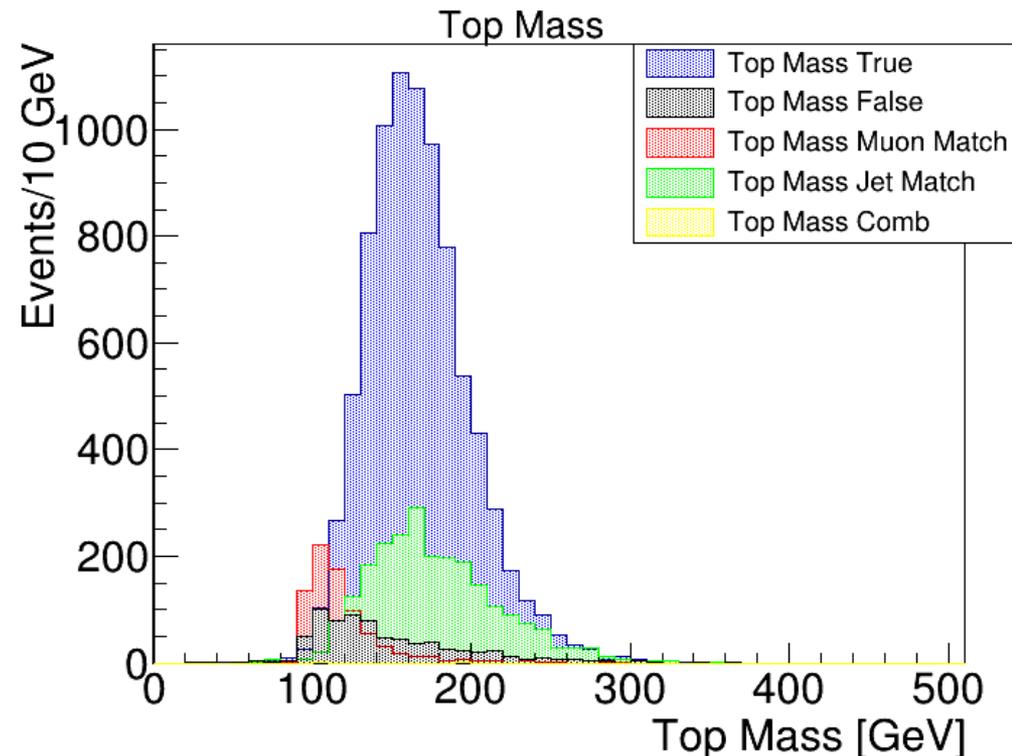
- Flag di qualità del muone “HighPt”.
- Rapporto tra il parametro di impatto (DB) e l'errore sul tale parametro (DBerr) minore di 2.5.
- Modulo del parametro di impatto sul piano xy (Dxy) minore di 0.002.
- Rapporto tra l'impulso trasverso del muone e l'impulso trasverso del Jet maggiore di 0.1
- Impulso trasverso relativo = $\frac{|\vec{p}_\mu \times \vec{p}_{Jet}|}{|p_{Jet}|}$ maggiore di 5.

Selezione Top Merged

Per la selezione del muone in configurazione Top Merged è stato richiesto:

- Flag di qualità del muone “HighPt”.
- Rapporto tra il parametro di impatto (DB) e l'errore sul tale parametro (DBerr) minore di 2.5.
- Modulo del parametro di impatto sul piano xy (Dxy) minore di 0.002.
- Rapporto tra l'impulso trasverso del muone e l'impulso trasverso del Jet maggiore di 0.1

• Impulso trasverso relativo $= \frac{|\vec{p}_\mu \times \vec{p}_{Jet}|}{|p_{Jet}|}$ maggiore di 5.



Risultati Quark Top Reconstruction

	True	False	Muon Match	Jet Match	Comb
1 Top Resolved	41814	6043	10517	13230	693
1 Top Merged	8440	727	783	2357	2
2 Top Resolved	13041	6329	15370	5511	866
2 Top Mix	481	110	254	138	3
Other Top	2697	2317	5109	1391	249

ML Techniques

Per migliorare la ricostruzione del quark top è stata utilizzata un algoritmo di machine learning, separatamente per le due categorie Resolved e Merged. Anche le variabili discriminanti utilizzate sono leggermente differenti in modo da massimizzare l'accuratezza in ciascuno dei due casi.

ML Techniques

Top Resolved

- Variabili cinematiche del muone e del Jet nel sistema del quark top ricostruito.
- Flag di ricostruzione , Muon Iso04 e MiniIso
- Muon DB, Muon DBerr, Muon Dz, Muon Dxy
- Top Mass (μ +Jet+ MET) ,Top Mass(μ +Jet).
- Muon Pt , Jet Pt.
- Impulso trasverso relativo = $\frac{|\vec{p}_\mu \times \vec{p}_{Jet}|}{|\vec{p}_{Jet}|}$
- Coseno dell'angolo tra il Jet e il μ nel sistema del quark top ricostruito.

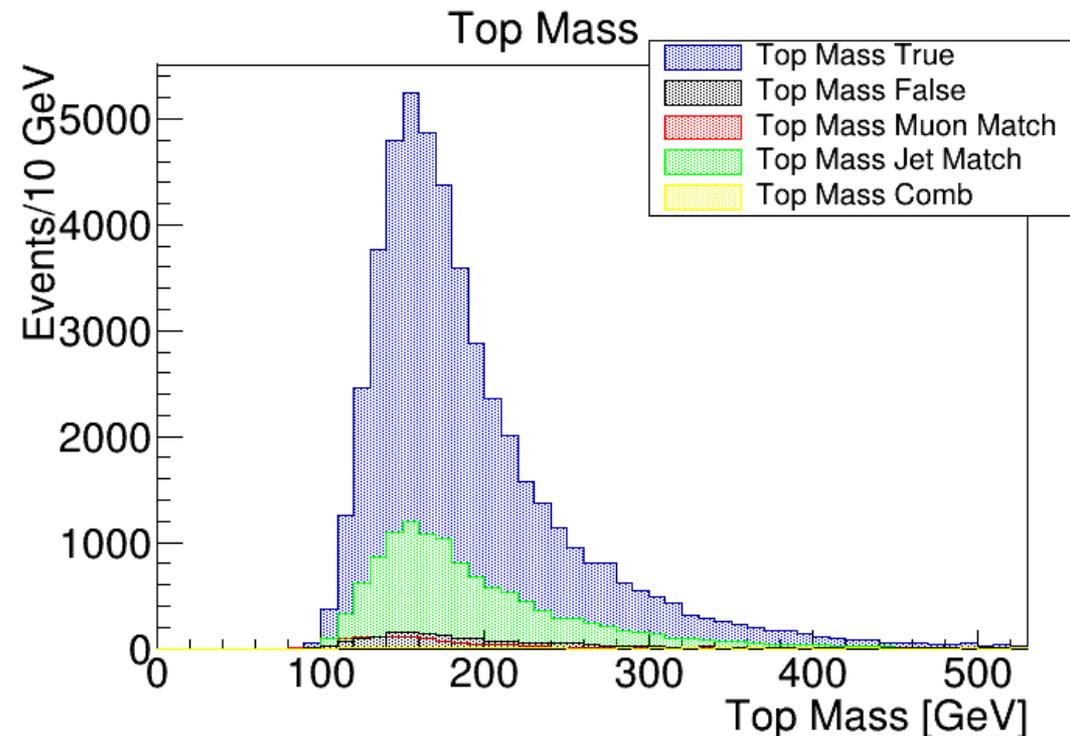
Top Merged

- Variabili cinematiche del muone e del Jet nel sistema del quark top ricostruito.
- MiniIso
- Muon DB, Muon DBerr, Muon Dz, Muon Dxy
- Top Mass (μ +Jet+ MET) ,Top Mass(μ +Jet).
- Variabili cinematiche Top Mass (μ +Jet+ MET) .
- Impulso trasverso relativo = $\frac{|\vec{p}_\mu \times \vec{p}_{Jet}|}{|\vec{p}_{Jet}|}$
- Coseno dell'angolo tra il Jet e il μ nel sistema del quark top ricostruito.

ML Top Resolved

A causa del gran numero di eventi di fondo, sono stati eseguiti dei tagli di preselezione per ottimizzare l'algoritmo di machine learning. In particolare nella configurazione Top Resolved è stato richiesto:

- Muon "TightPt".
- Muon $Iso04 < 0.2$.



ML Top Merged

Nella configurazione Top Merged tagli di preselezione richiesti sono:

- $|\text{Muon Dxy}| < 0.01$.
- Muon MiniIso < 6 .

Per migliorare la selezione i dati sono stati analizzati separatamente in tre diversi bin dell'impulso trasverso del quark top ricostruito (Top Pt):

1. Basso impulso trasverso: Top Pt $[0, 200]$ GeV.
2. Medio impulso trasverso: Top Pt $[200, 500]$ GeV.
3. Alto impulso trasverso: Top Pt $[500, \text{Inf}[$ GeV.

Inoltre sono stati effettuati due allenamenti differenti in ciascuno dei tre bin:

- True vs Jet Match
- True vs Muon Match

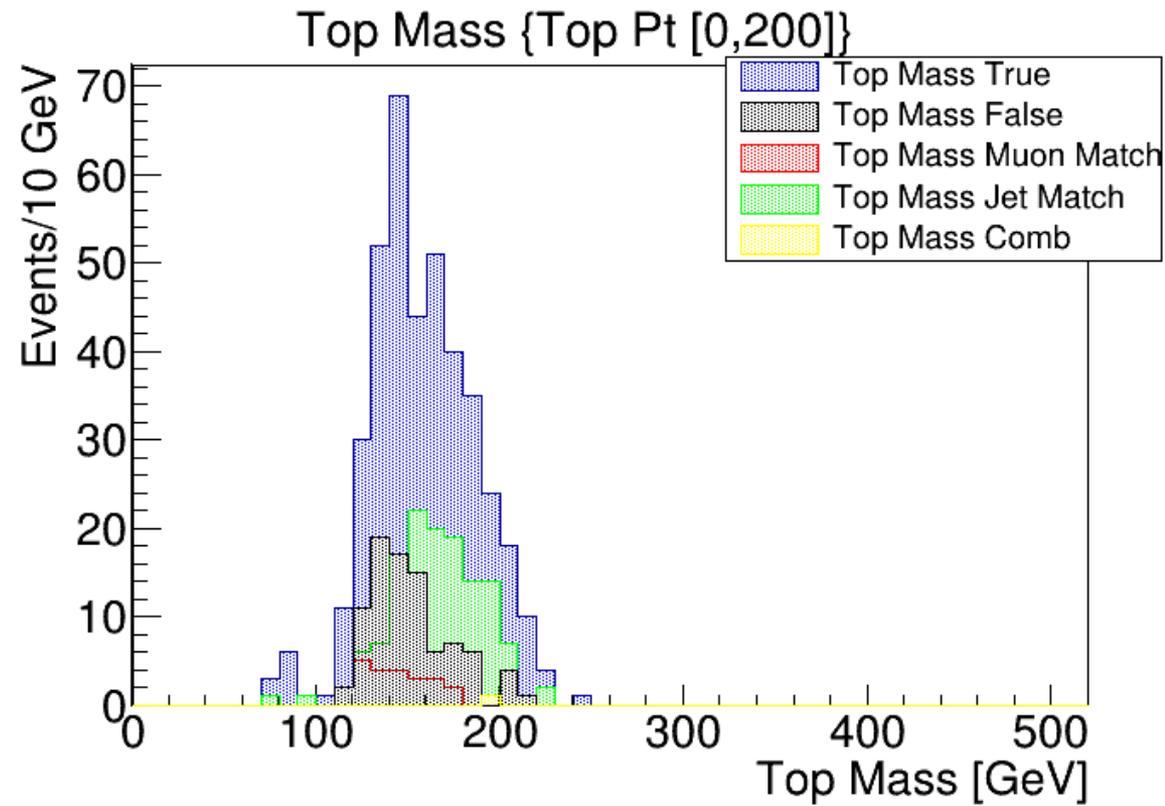
Solo i quark top ricostruiti che come segnale in entrambe le categorie sono stati selezionati. Nel caso True vs Muon Match è stato effettuato un unico allenamento per il secondo e il terzo bin di impulso trasverso per evitare l'Overtraining.

ML Top Merged Low

Nella configurazione Top Merged
tagli di preselezione richiesti
sono:

- $|\text{Muon Dxy}| < 0.01$.
- $\text{Muon MiniIso} < 6$.

Top Pt < 200 GeV



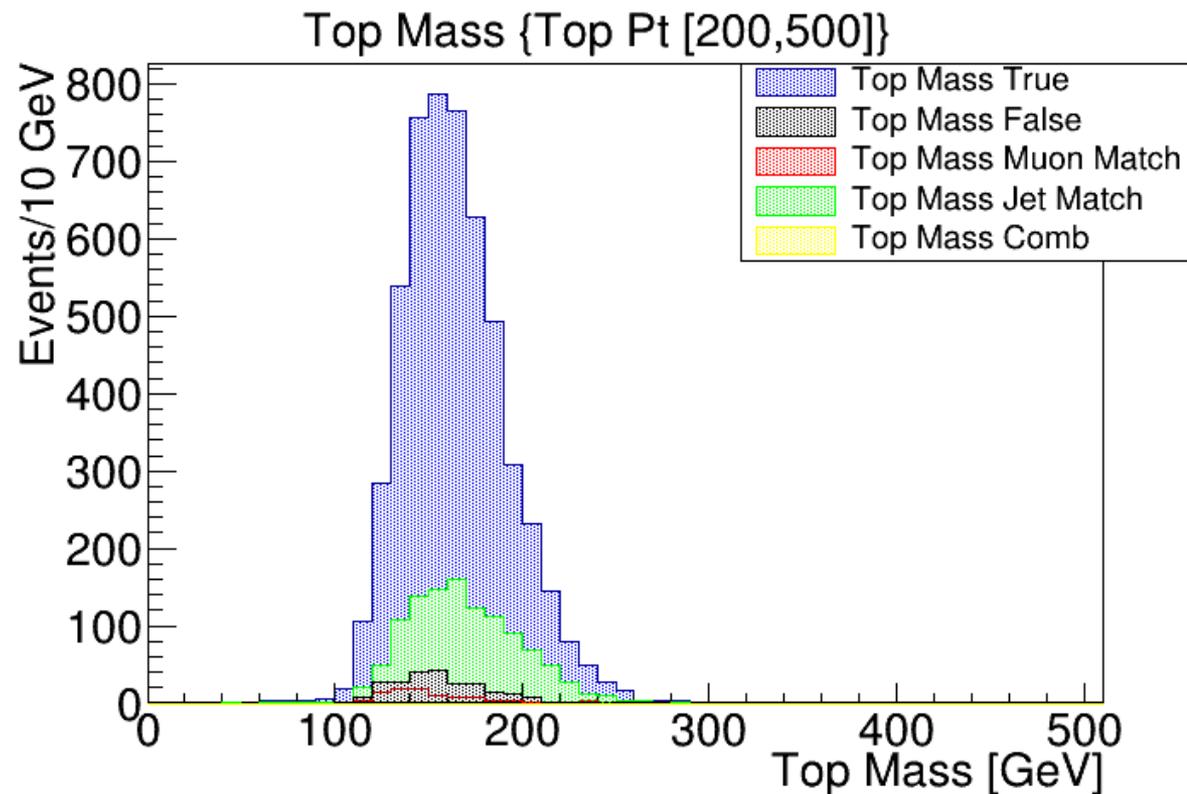
ML Top Merged Medium

Nella configurazione Top Merged
tagli di preselezione richiesti
sono:

- $|\text{Muon Dxy}| < 0.01$.

- $\text{Muon MiniIso} < 6$.

$200 \text{ GeV} < \text{Top Pt} < 500 \text{ GeV}$



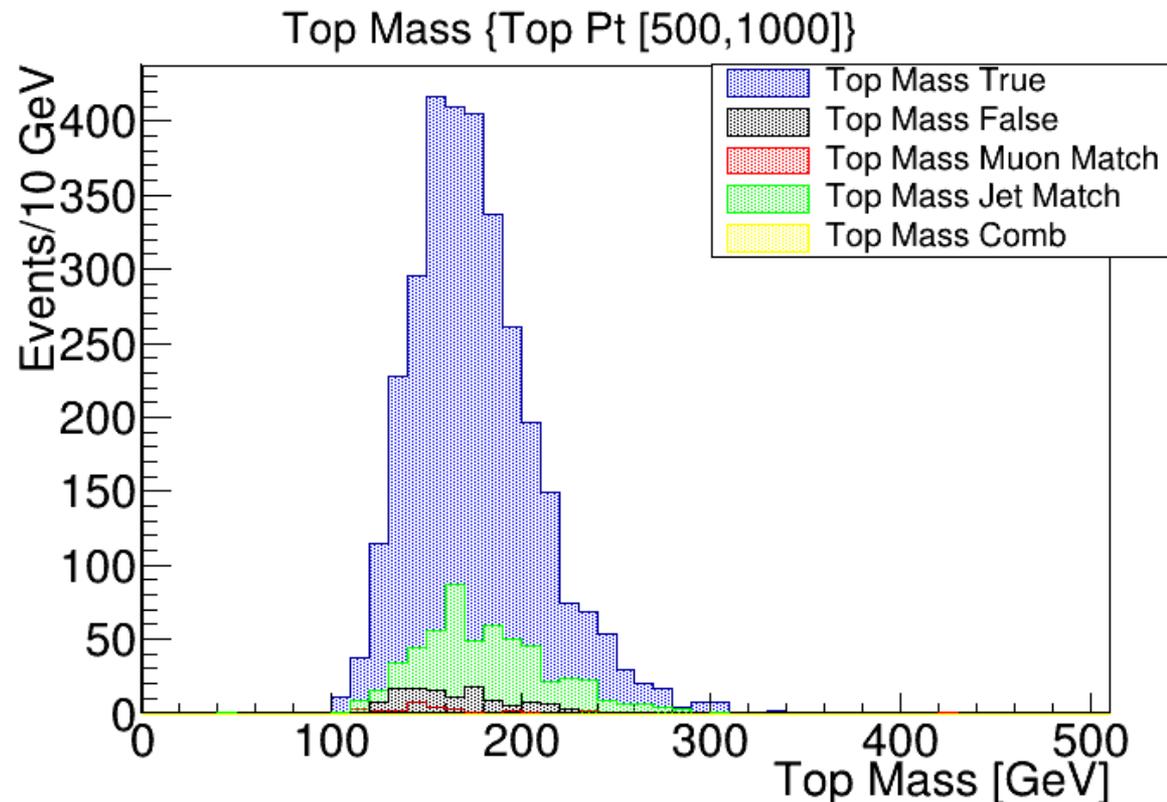
ML Top Merged High

Nella configurazione Top Merged
tagli di preselezione richiesti
sono:

- $|\text{Muon } D_{xy}| < 0.01$.

- $\text{Muon MiniIso} < 6$.

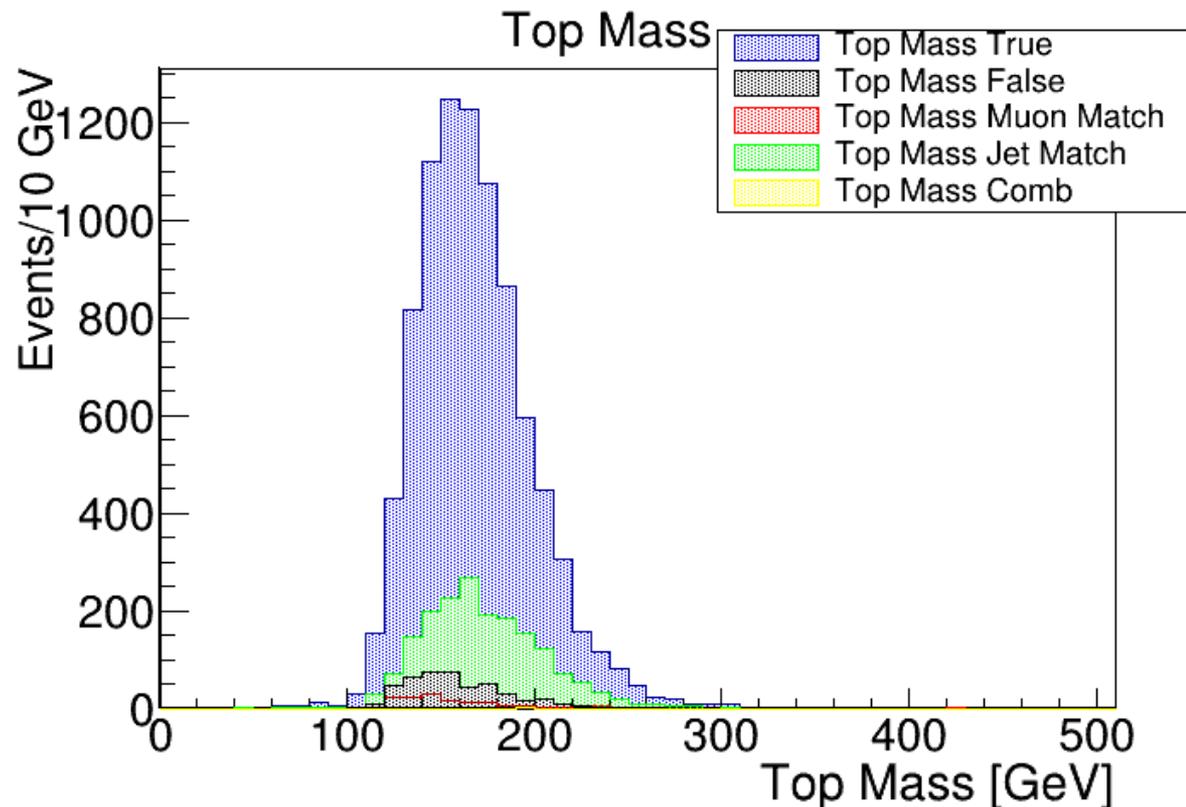
$500 \text{ GeV} < \text{Top Pt} < 1000 \text{ GeV}$



ML Top Merged

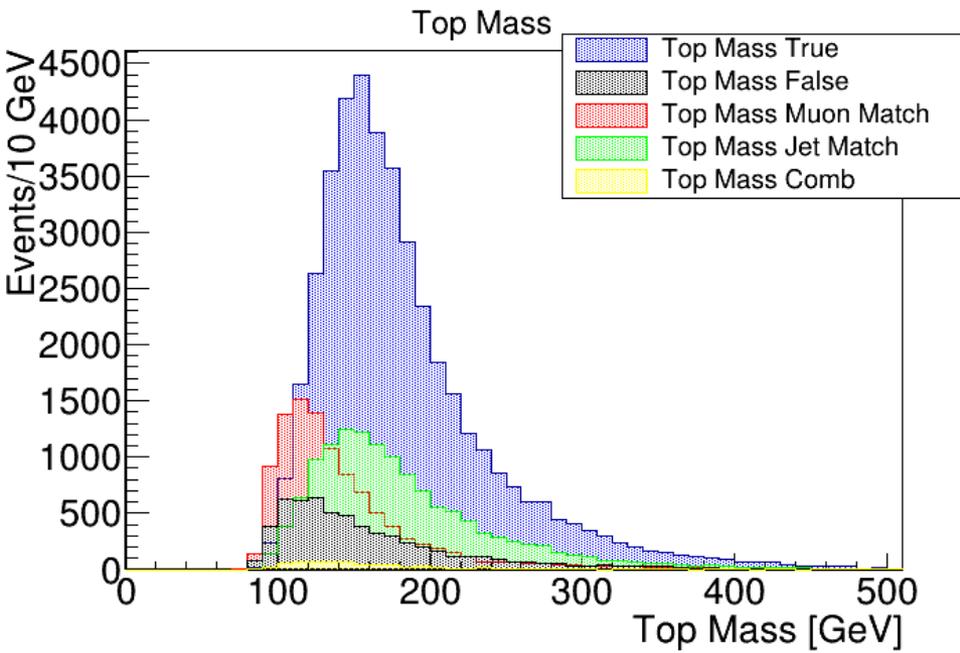
Nella configurazione Top Merged
tagli di preselezione richiesti
sono:

- $|\text{Muon } D_{xy}| < 0.01$.
- $\text{Muon MiniIso} < 6$.

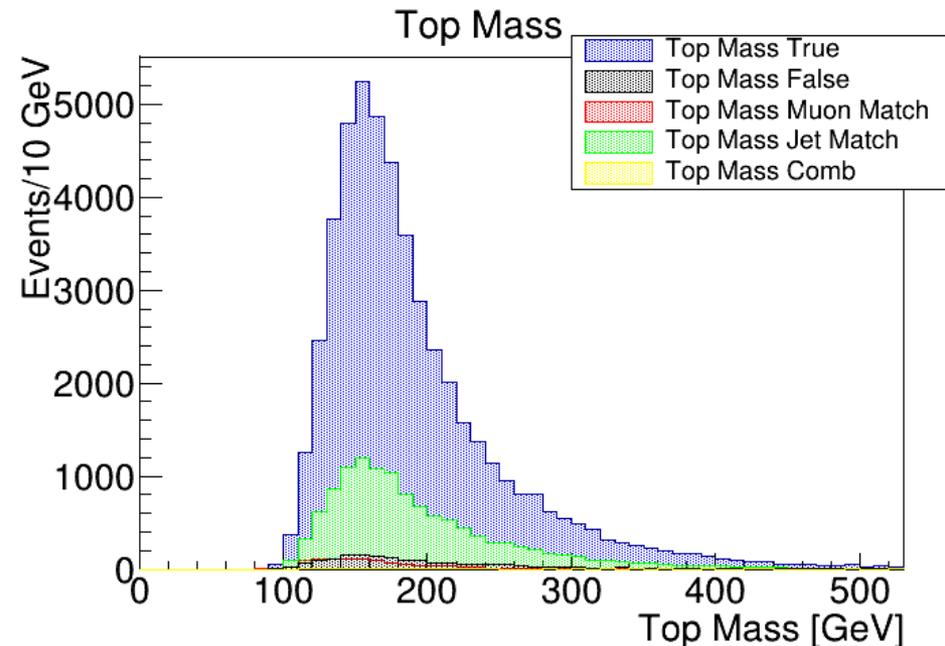


Risultati Quark Top Reconstruction

Old Resolved Selection

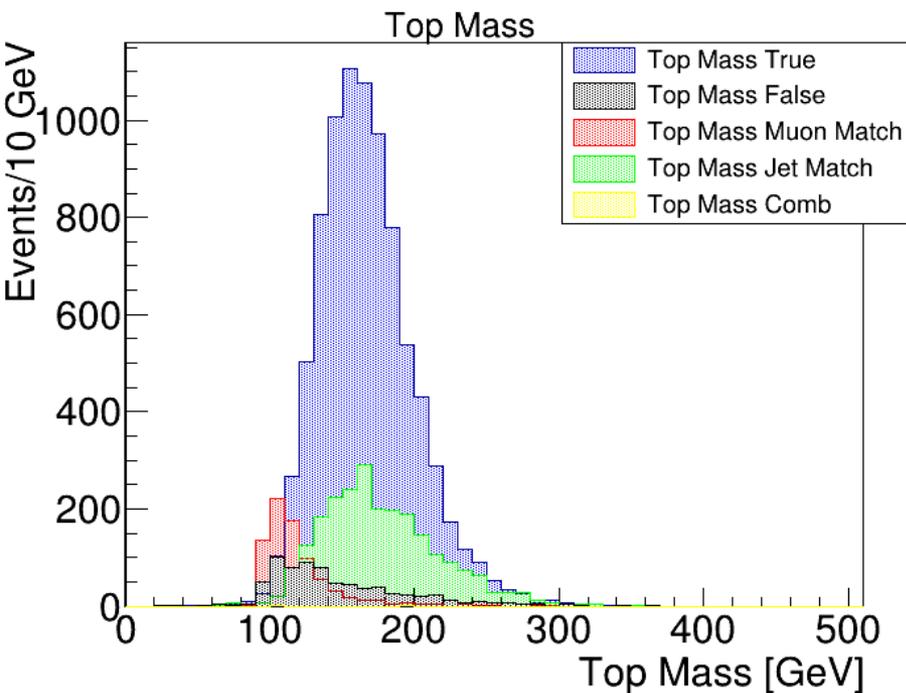


ML Resolved Selection

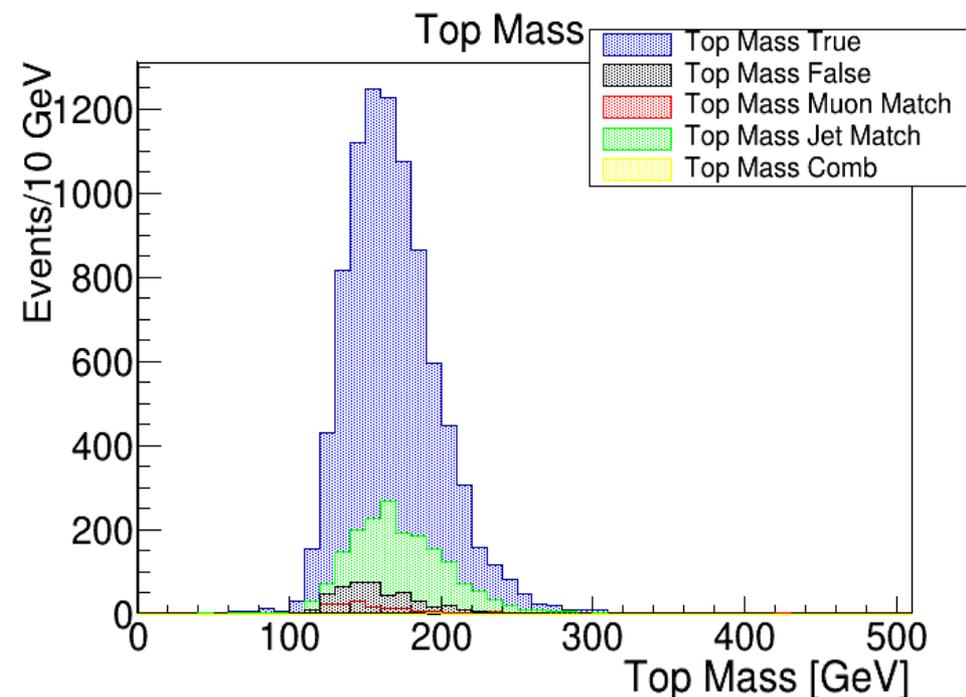


Risultati Quark Top Reconstruction

Old Merged Selection



ML Merged Selection



Risultati Quark Top Reconstruction

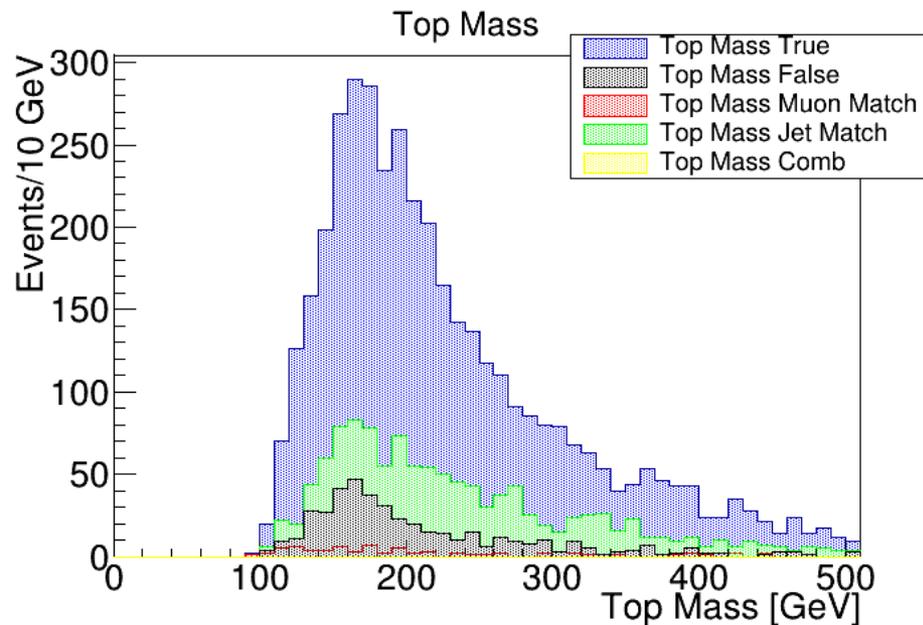
Old Selection	True	False	Muon Match	Jet Match	Comb
1 Top Resolved	41814	6043	10517	13230	693
1 Top Merged	8440	727	783	2357	2
2 Top Resolved	13041	6329	15370	5511	866
2 Top Mix	481	110	254	138	3
Other Top	2697	2317	5109	1391	249

ML	True	False	Muon Match	Jet Match	Comb
1 Top Resolved	49442	1608	1022	11923	46
1 Top Merged	8822	446	145	1812	1
2 Top Resolved	1638	560	785	699	24
2 Top Mix	388	29	24	81	0
Other Top	181	66	53	77	3

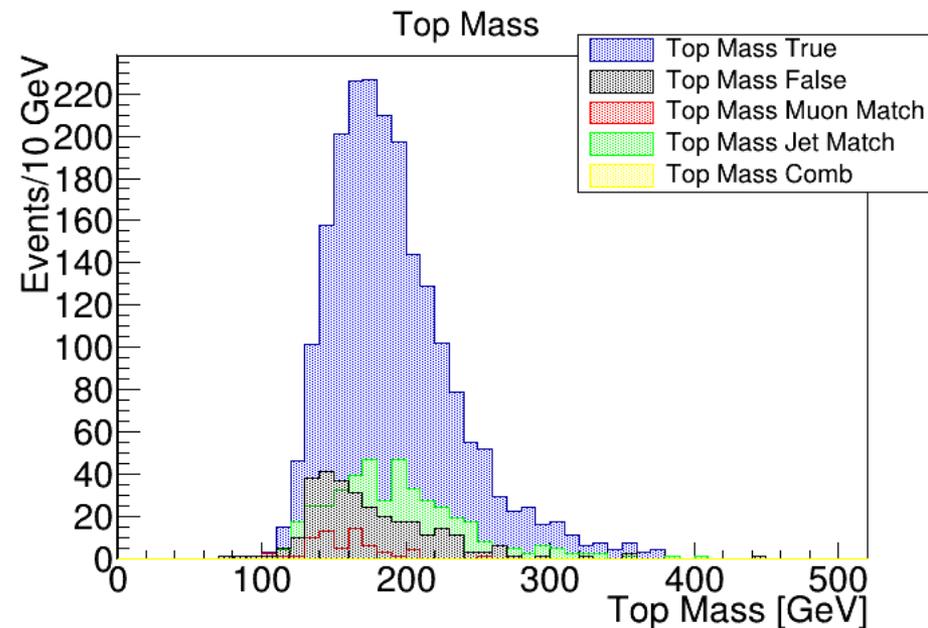
Signal Quark Top Reconstruction

Risultati simili si hanno anche per il segnale, in questo caso la simulazione prevede un segnale di VLQ T left handed con massa di 1800 GeV. Si sta investigando sul motivo per cui la composizione risulta differente rispetto al fondo.

1 Top Resolved



1 TopMerged



Next Steps

Next Steps:

- Ricostruzione VLQ T con il Top ricostruito e il JetAK8 Z-tagged.
- Allenamento e ricostruzione del Top per i samples di Dati del Run II di CMS.
- Valutazione dei differenti contributi a variabili discriminanti di segnale e di fondo (tra cui anche un fondo di QCD) rinormalizzati ai dati.