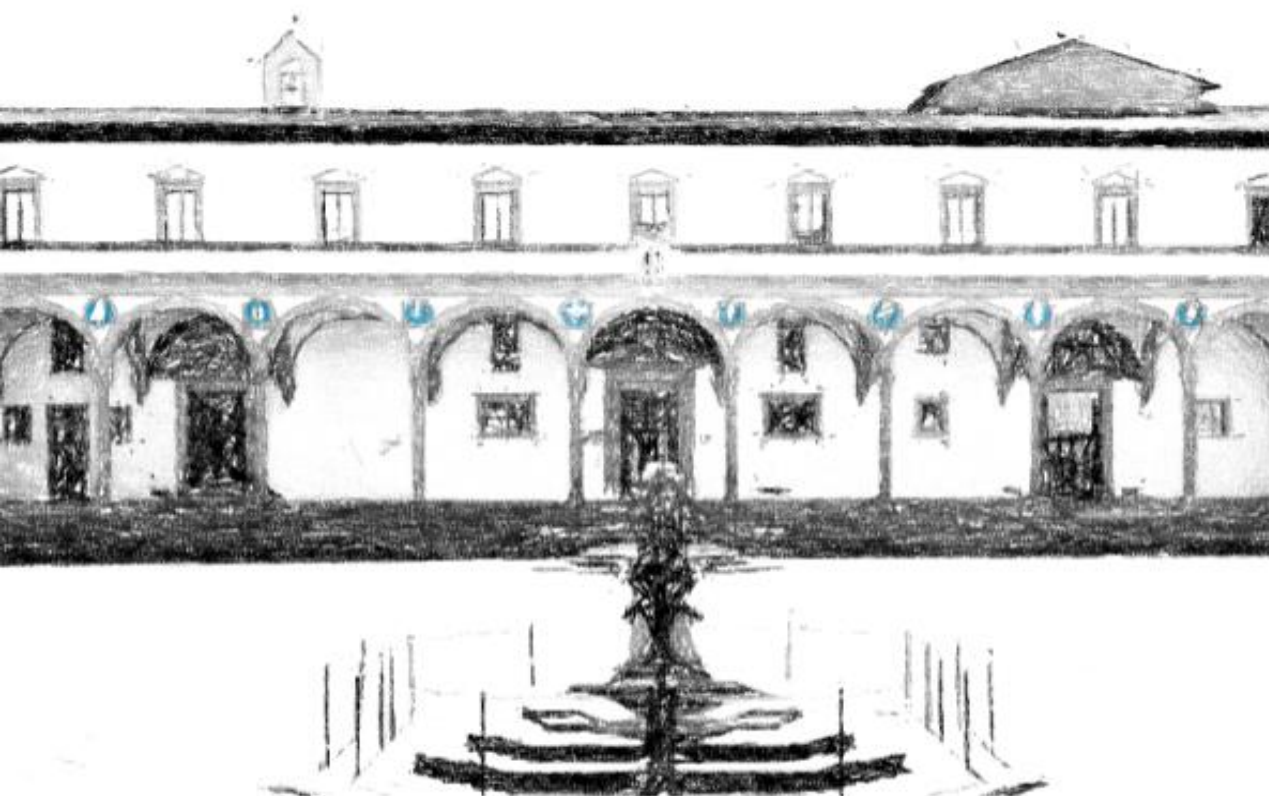


IFAE 2024

Incontri di Fisica delle Alte Energie



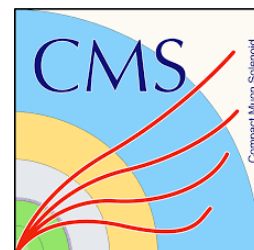
Ricerca di Vector-Like quark ad LHC con l'esperimento CMS

CARLO DI FRAIA¹, on behalf of the CMS Collaboration

¹ Università degli Studi di Napoli "Federico II" e INFN Napoli

Firenze, 3-5 Aprile 2024

Istituto degli Innocenti, Piazza SS Annunziata



Fisica **B**eyond **S**tandard **M**odel

□ Il **Modello Standard (MS)** si vanta di numerose conferme sperimentali, tra cui la scoperta del **Bosone di Higgs (H)** a LHC (2012)

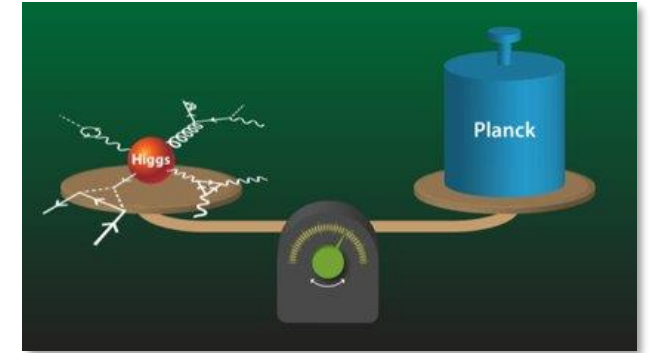
□ Restano ancora degli interrogativi, ad esempio **Gravità, Dark Matter, problema della gerarchia, fine-tuning**

□ Necessità di scenari di fisica **Beyond Standard Model (BSM)**:

• **Compositeness**: Higgs inteso non come particella elementare ma come oggetto **composito**.

• **Two-Higgs-Doublet Model (2HDM)**: più semplice estensione non triviale del settore dell'Higgs che prevede la presenza di cinque stati scalari (h, H^0, H^\pm, A)

➤ Una caratteristica che accomuna tali modelli è la presenza di ipotetici nuovi fermioni vettoriali, ovvero **Vector-Like Quark (VLQ)**



Vector-Like Quark

□ Fermioni **colorati** con **spin 1/2** e **massa** dell'ordine del **TeV**

□ Anche la componente right-handed è coinvolta nei processi di corrente debole **carica**:

Standard Model:

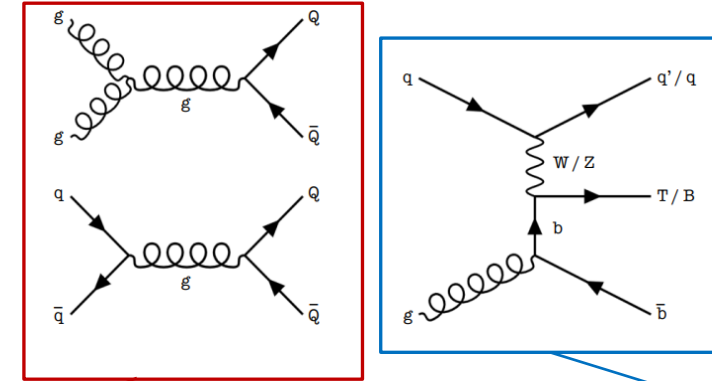
$$J^{\mu+} = J_L^{\mu+} + J_R^{\mu+} = \bar{u}_L \gamma^\mu d_L = \bar{u} \frac{1}{2} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) d \quad \rightarrow \quad (V - A)$$

Beyond Standard Model:

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

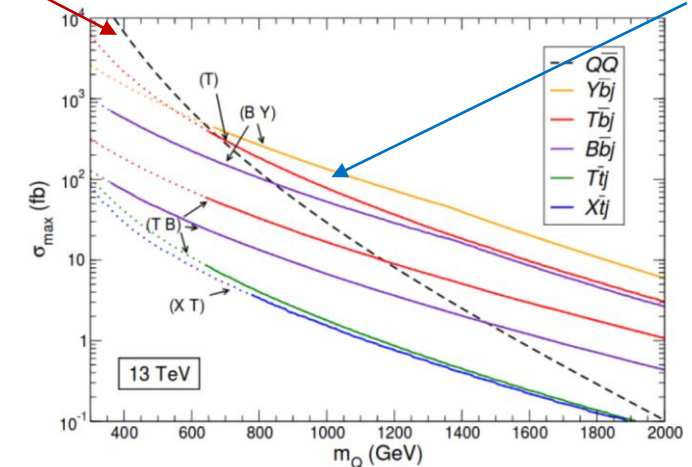
□ **Non** acquistano **massa** mediante *Yukawa coupling* con il campo di Higgs: la loro massa si presenta come un **parametro libero** della teoria, dunque $-M\bar{\psi}\psi$ è gauge invariante.

□ Ad LHC possono essere prodotti nelle collisioni **p-p** a **13 TeV**: produzione **singola** per via **elettrodebole** o **pair-production** per via **forte**



- Sezione d'urto puramente forte, la produzione è Model Independent
- Spazio delle fasi soppresso ad alte masse

- Sezione d'urto dipendente dal coupling
- Spazio delle fasi **meno** soppresso per le ipotesi di alta massa

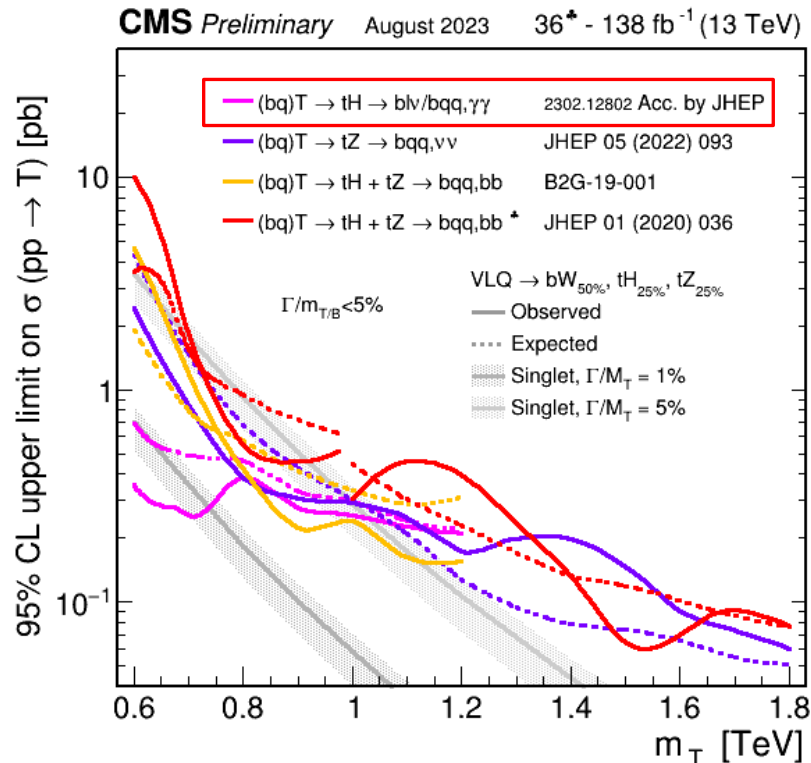


Searches

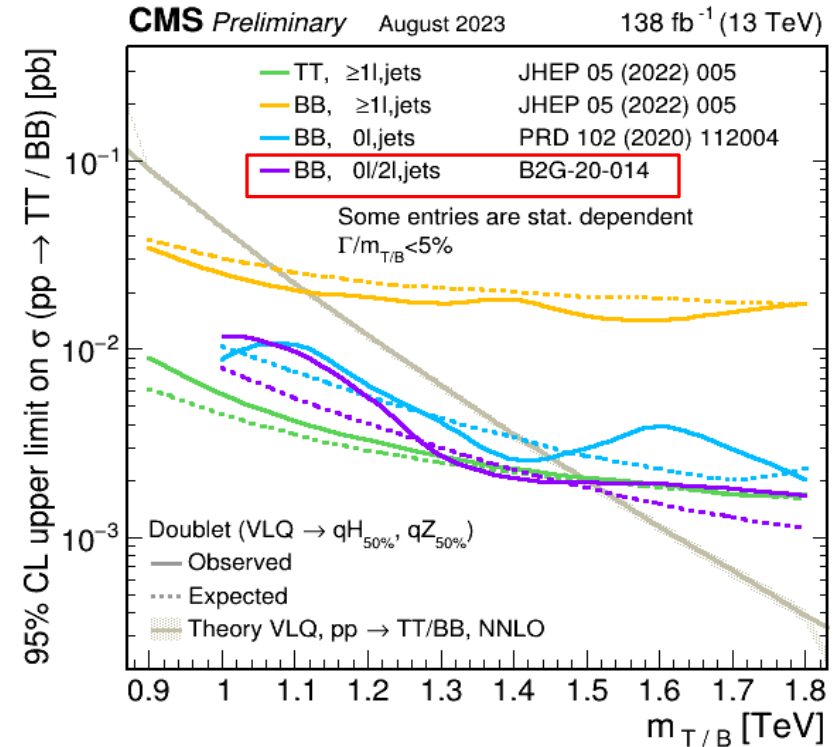
VLQ previsti in **singoletti** (T, B) o **doppietti** (T B), ammettono decadimenti in oggetti Standard Model

Canali di decadimento:

- **singoletto:** $BR(T \rightarrow bW) = BR(B \rightarrow tW) = 50\%$, $BR(T \rightarrow tH / tZ) = BR(B \rightarrow bW / bZ) = 25\%$
- **doppietto:** $BR(T \rightarrow tH / tZ) = BR(B \rightarrow bW / bZ) = 50\%$



B2G - single production VLQ T



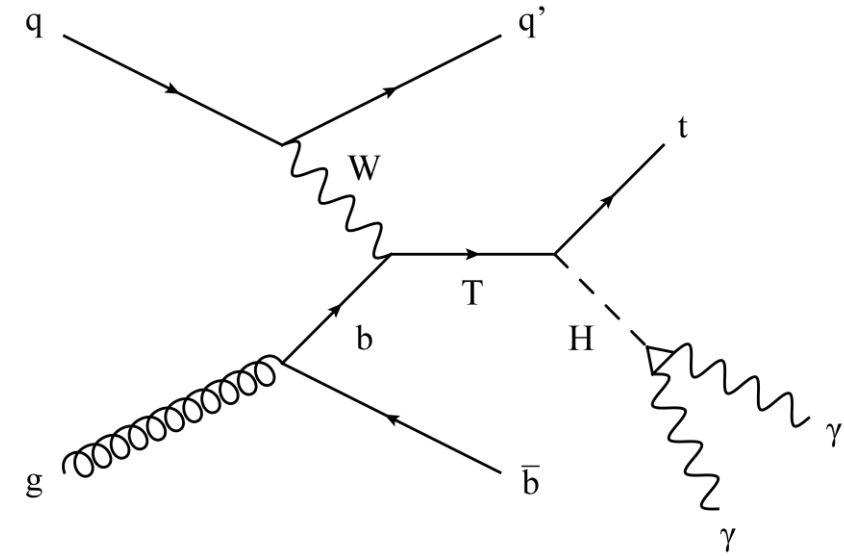
B2G - pair production QQ

$$T \rightarrow tH \rightarrow t\gamma\gamma$$

- Produzione **elettrodebole** di un singolo VLQ **T**
- Produzione e decadimento parametrizzati con **Narrow Width**
Approssimation $\frac{\Gamma}{M_T} \sim 1\%$

Event Selection

- Ricostruzione diphoton di **H**: 2 fotoni **prompt**
 - Quark **top** ricostruito sia nel suo decadimento **leptonico** ($t \rightarrow bW \rightarrow bl\nu$) sia nel **fully hadronic** ($t \rightarrow bW \rightarrow b\bar{q}q'$)
- **Evento leptonico**: 2 fotoni + 1 elettrone (o 1 muone) + 1 jet b-tagged
 - **Evento adronico**: 2 fotoni + no leptoni + 3 jet (di cui 1 b-tagged)



$$T \rightarrow tH \rightarrow t\gamma\gamma$$

Backgrounds:

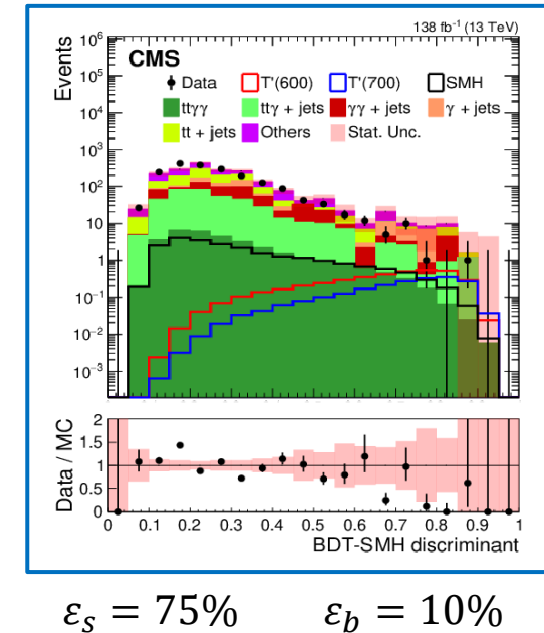
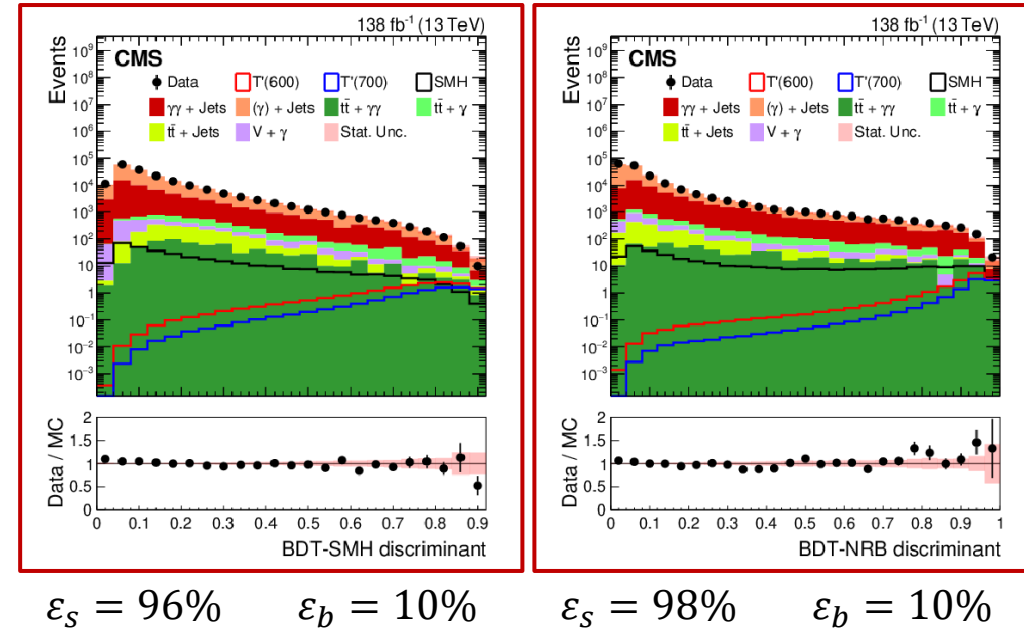
- Per eventi **leptonici**, il fondo maggioritario è costituito dai processi Drell-Yan
- Per eventi **adronici**, QCD e $\gamma(\gamma) + jets$ sono il 95% del Bkg
- Fondo comune: produzione SM di H, $t\bar{t}H$

Segnale:

- Ricerca di un picco risonante nello spettro $m_{\gamma\gamma}$

Tecniche Machine Learning:

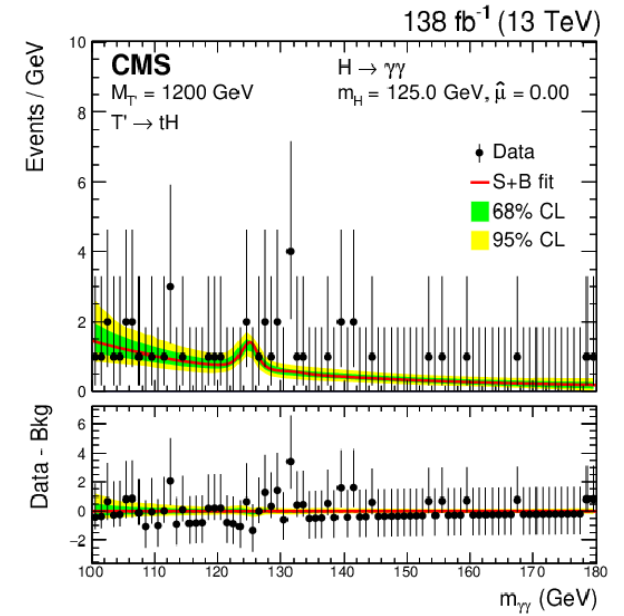
- **Boosted Decision Trees (BDT)** implementati separatamente per SMH **leptonico** e **adronico** (BDT-SMH).
- Ulteriore **BDT** nella selezione **adronica**, per gli eventi di **background non risonanti** (BDT-NRB)
- Proprietà cinematiche come variabili di allenamento



$$T \rightarrow tH \rightarrow t\gamma\gamma$$

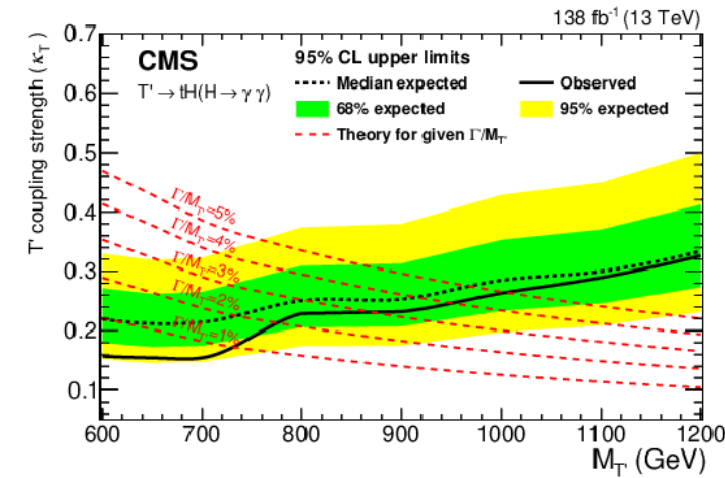
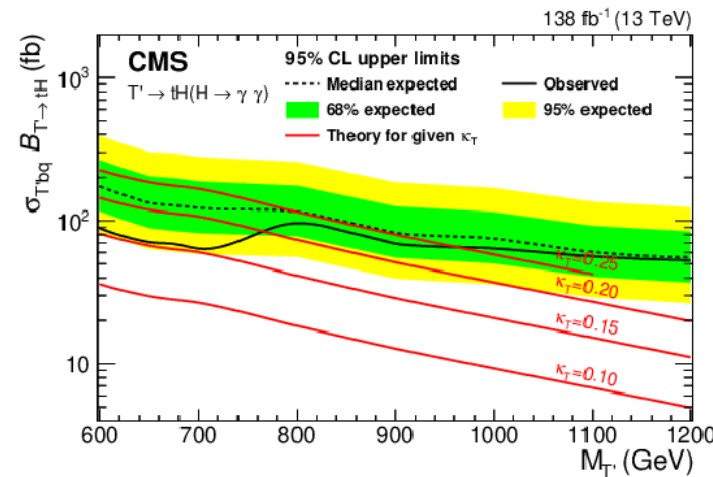
□ Risultati:

- Ricostruzione della massa invariante di $H \rightarrow \gamma\gamma$, con eccellente risoluzione (1-2%)
- Fit simultaneo (**leptonic** e **hadronic**) all'extended maximum likelihood di $m_{\gamma\gamma}$ a diverse ipotesi di massa $m_{T'}$
- Non è stata osservata **nessuna deviazione** significativa dal fondo SM



□ Esclusioni:

- L'analisi è riuscita ad **escludere** la presenza di T a masse inferiori di **960 GeV**, nell'ipotesi di **NWA** e coupling constant **$\kappa_T = 0,25$**

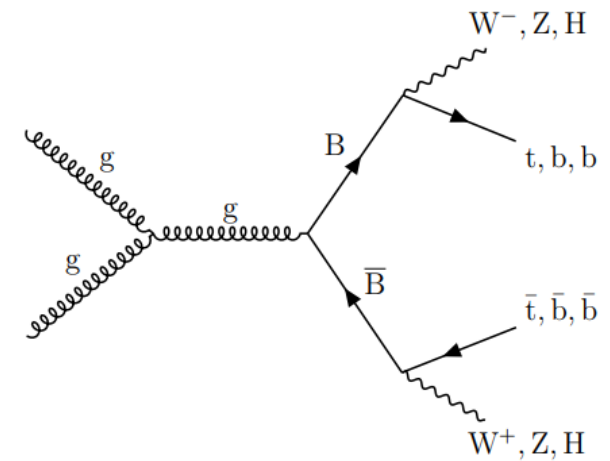
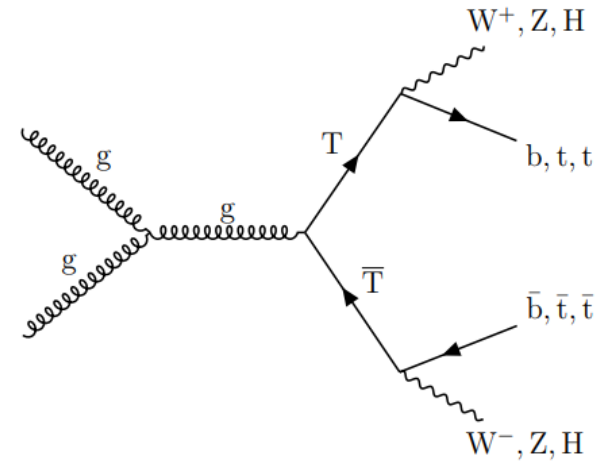


Pair-production $Q\bar{Q}$

□ Ricerca per la pair-production di T o B

□ Tre stati finali leptonici:

- **Single-lepton channel**, 1 leptone
- **Dilepton channel (same-sign)**, 2 leptoni
- **Multilepton channel**, almeno 3 leptoni



Pair-production $Q\bar{Q}$

Single-lepton channel:

- Ampia sensibilità a $T\bar{T}$ e $B \rightarrow tW$

- Scenario: $Q\bar{Q} \rightarrow \begin{cases} 2t \text{ o } 2b \\ 2W \text{ o } 2Z \text{ o } 2H \end{cases}$

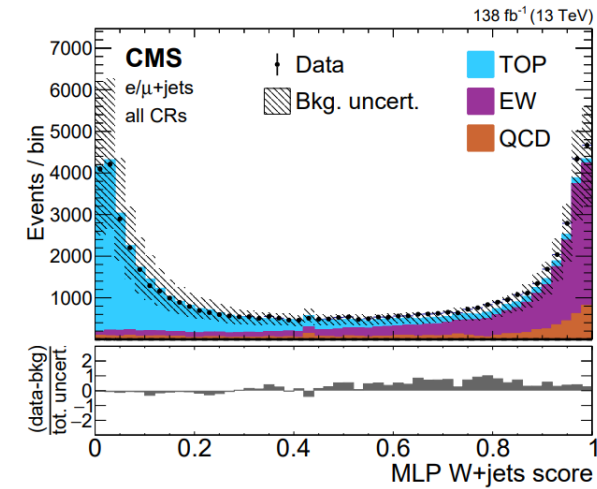
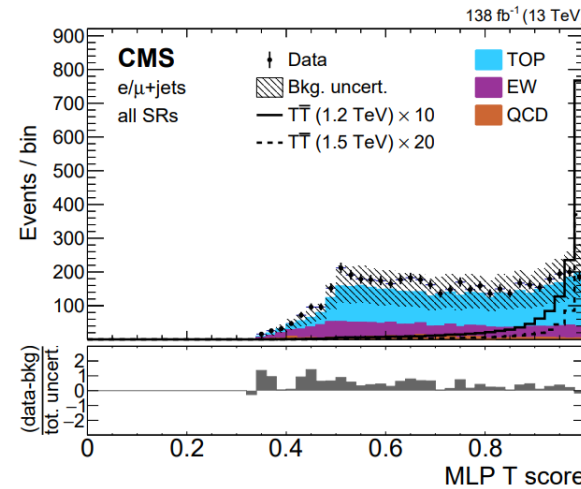
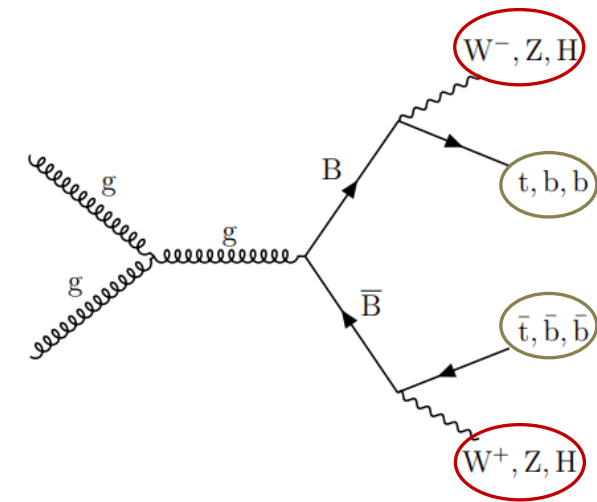
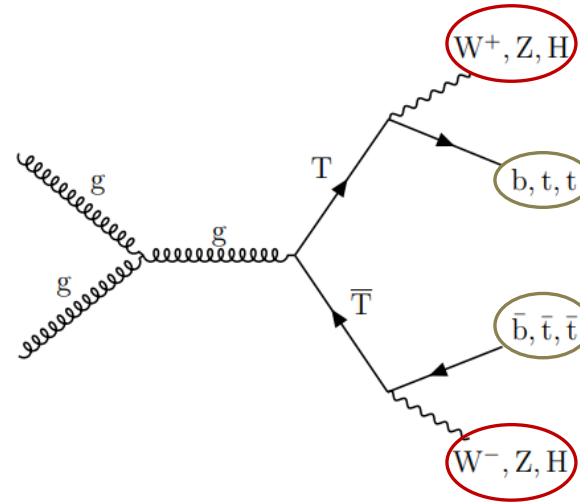
Stato finale:

- Decadimento **leptonico** di un t o W
- Decadimento **adronico** nello scenario **boosted** dei restanti oggetti, dunque ricostruiti da **jet** a grande raggio (almeno **3 jet AK8**)

$$Q\bar{Q} = (W/t + AK8) + (AK8 + AK8)$$

Machine Learning:

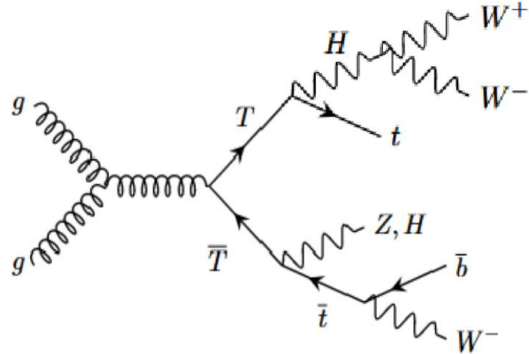
- Multi-layer perceptron per la distinzione di segnale e fondo



Pair-production $Q\bar{Q}$

□ Dilepton channel same-sign:

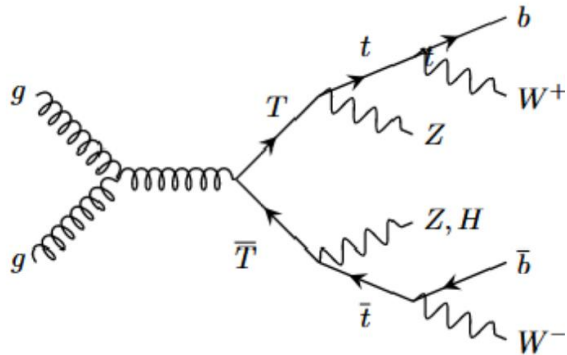
- Alta sensitivity per $T \rightarrow tH \rightarrow tWW$ e $B \rightarrow tW$



Leptoni same-sign da W same-sign

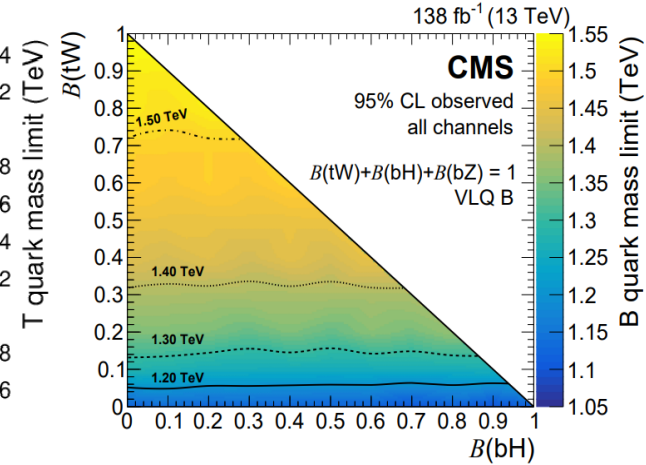
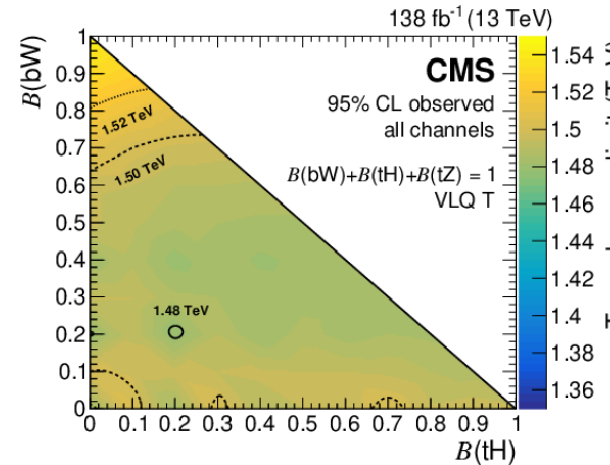
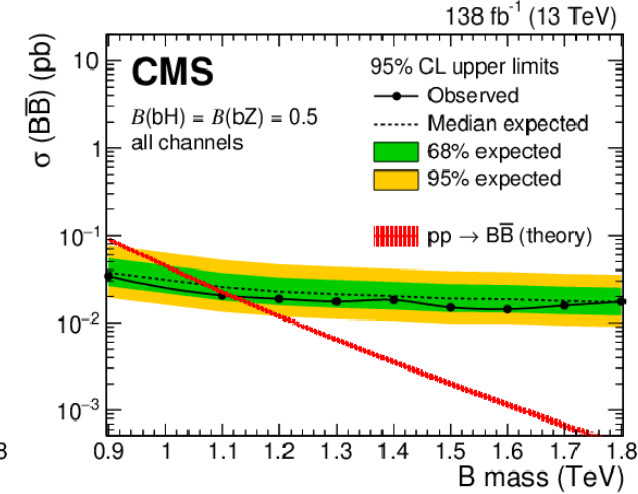
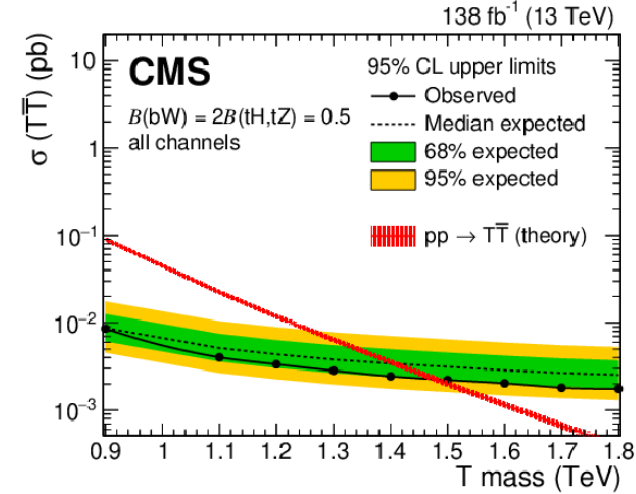
□ Multilepton channel:

- Principali contributi da $T \rightarrow tZ$ e $B \rightarrow tW$



Leptoni da Z associati a quelli delle W provenienti dai top
Stato finale raro per processi SM

□ **Results:** il fit simultaneo esclude al 95% T per $m_T < 1,48 \text{ TeV}$, mentre B per valori di $m_B < 1,12 \text{ TeV}$



Canali non minimali

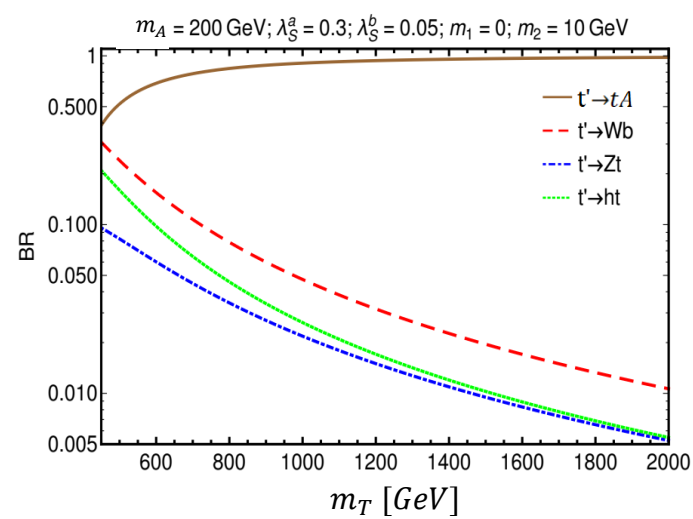
- Possibile ricerca di VLQ in canali di decadimento che prevedono ulteriori oggetti **non SM**
- **CMS-Na work in progress:** produzione di un singolo VLQ per via elettrodebole, con A ipotetico bosone Higgs-like

Minimal channel: $T \rightarrow tH \rightarrow bl\nu \quad b\bar{b}$

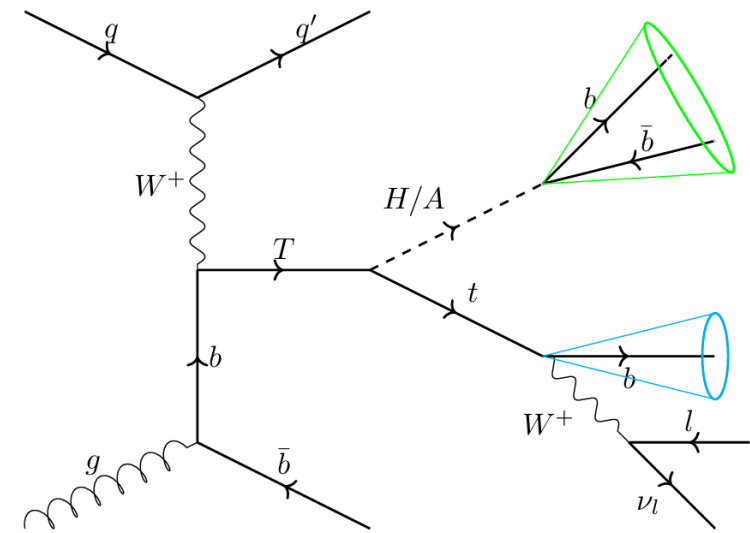
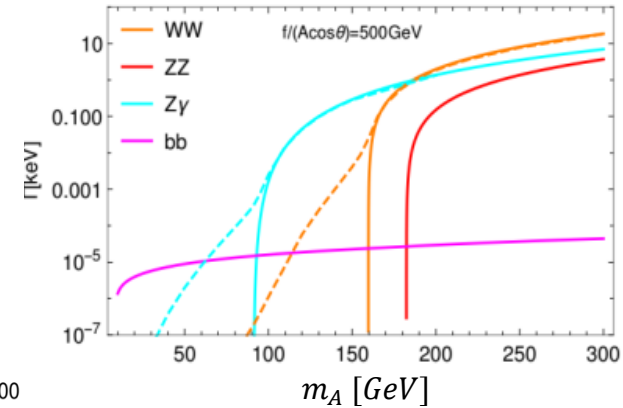
Non-Minimal channel: $T \rightarrow tA \rightarrow bl\nu \quad b\bar{b}$

- Quark **top** ricostruito nel canale leptonic dalla terna (jet AK4 b-tagged, leptone, MET) mediante **Boosted Decision Tree:** resolved o merged

- **Bosone H (o A)** ricostruito nello scenario boosted, **jet AK8**



[arXiv:1907.05929](https://arxiv.org/abs/1907.05929)

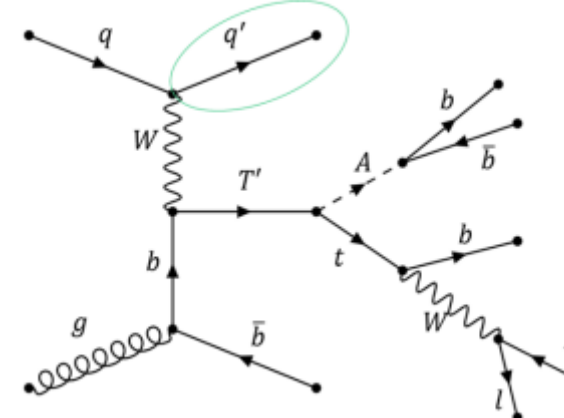


$$T \rightarrow tH/A \rightarrow bl\nu b\bar{b}$$

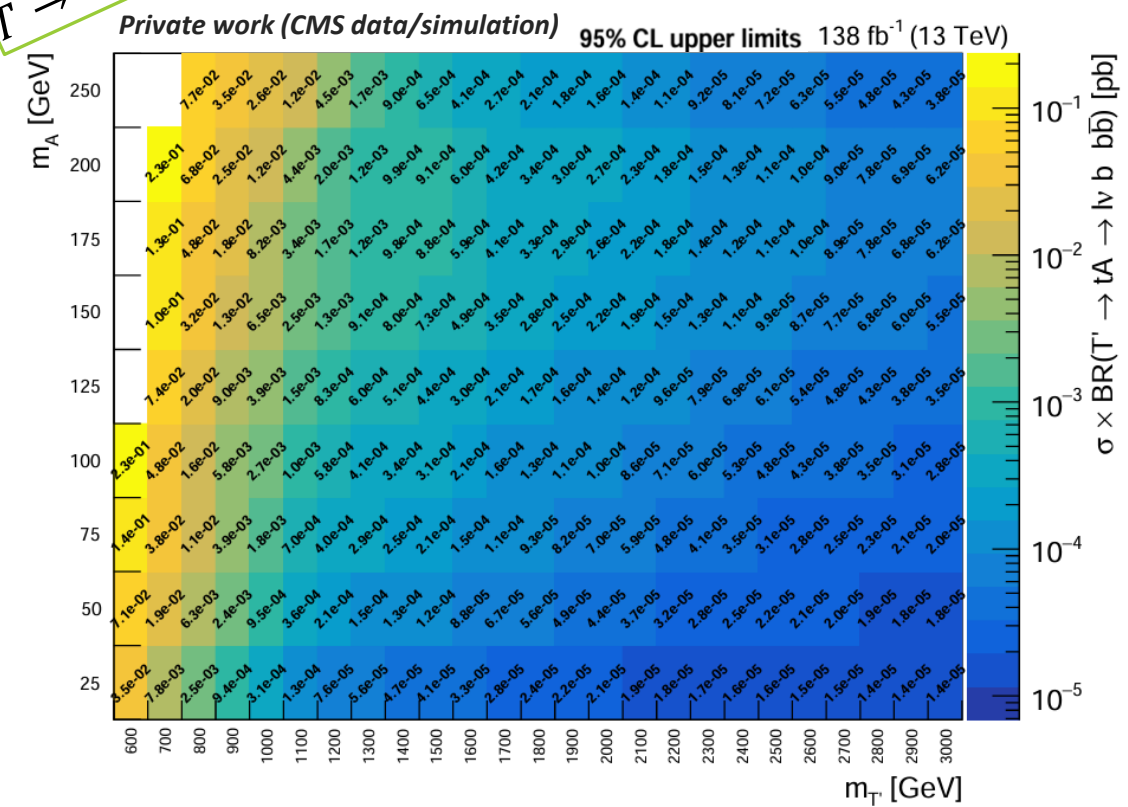
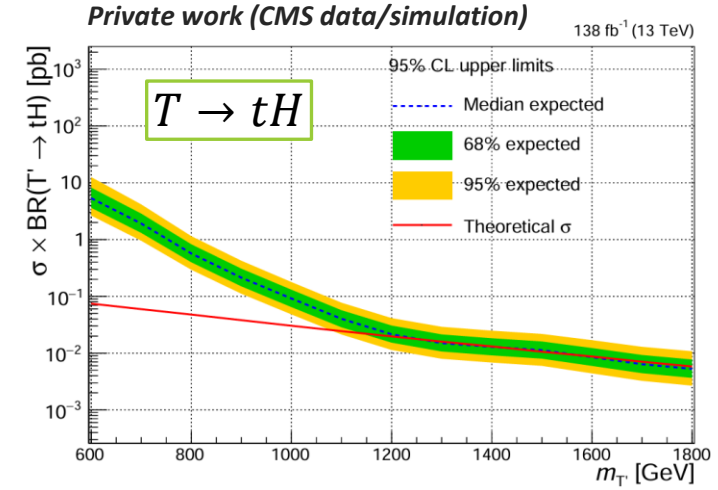
- Signal region: AK8 b-tagging Tight WP
- Validation region: AK8 b-tagging Loose WP
- Ulteriore suddivisione: Forward and NoForward, muon and electron

- $T \rightarrow tH$ channel:
 - AK8 in finestra di massa [110,140] GeV
 - $m_T \in [600,1800]$ GeV
- $T \rightarrow tA$ channel:
 - AK8 in finestre di massa attorno al valore nominale
 - $m_T \in [600,3000]$ GeV
 - $m_A \in [25,250]$ GeV

- Fit simultaneo alla massa del VLQ T ricostruito



$T \rightarrow tA$



Conclusioni

- Overview sullo stato attuale della ricerca di **Vector-Like Quark all'esperimento CMS**
- L'analisi $T \rightarrow tH \rightarrow t\gamma\gamma$ è la più sensibile fino ad oggi **per masse fino a 1.1 TeV** con questo meccanismo di produzione
- I limiti ottenuti nella ricerca di pair-production $T\bar{T}$ sono i più forti fino ad oggi per la produzione di coppie con tutte le modalità di decadimento del VLQ T
- **Work in progress:** Ricerca di un VLQ T prodotto singolarmente nel canale di decadimento **SM** ($T \rightarrow tH$) e non **SM** ($T \rightarrow tA$) in un ipotetico bosone Higgs-like

Grazie per l'attenzione

Backup

Vector-Like Quark

	SM	Singlets	Doublets	Triplets
	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t' \\ b' \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} X \\ t' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t' \\ b' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b' \\ Y \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} X \\ t' \\ b' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t' \\ b' \\ Y \end{pmatrix}$
$SU(2)_L$	2 and 1	1	2	3
$U(1)_Y$	$q_L = 1/6$ $u_R = 2/3$ $d_R = -1/3$	2/3 -1/3	7/6 1/6 -5/6	2/3 -1/3
\mathcal{L}_Y	$-\frac{y_u^i v}{\sqrt{2}} \bar{u}_L^i u_R^i$ $-\frac{y_d^i v}{\sqrt{2}} \bar{d}_L^i V_{CKM}^{ij} d_R^j$	$-\frac{\lambda_u^i v}{\sqrt{2}} \bar{u}_L^i U_R$ $-\frac{\lambda_d^i v}{\sqrt{2}} \bar{d}_L^i D_R$	$-\frac{\lambda_u^i v}{\sqrt{2}} U_L u_R^i$ $-\frac{\lambda_d^i v}{\sqrt{2}} D_L d_R^i$	$-\frac{\lambda v}{\sqrt{2}} \bar{u}_L^i U_R$ $-\lambda_i v \bar{d}_L^i D_R$

$$T \rightarrow tH \rightarrow t\gamma\gamma$$

☐ Fotoni (tools provenienti dalla ricostruzione standard $H \rightarrow \gamma\gamma$):

- Preselezione dei fotoni
- Almeno 2 fotoni passanti la soglia ID MVA
- $\frac{p_T(\gamma_1)}{m_{\gamma\gamma}} > \frac{1}{3}$ e $\frac{p_T(\gamma_2)}{m_{\gamma\gamma}} > \frac{1}{4}$
- $100 \text{ GeV} < m_{\gamma\gamma} < 180 \text{ GeV}$

☐ Jets:

- $p_T > 25 \text{ GeV}$ e $|\eta| < 4,5$
- $\Delta R(\text{jet}, \gamma \setminus l) > 0,4$
- Per b-jets: algoritmo di b-tagging $\beta = 10\%$ e $|\eta| < 2,5$

☐ Elettroni:

- $p_T > 10 \text{ GeV}$ e $|\eta| < 2,4$ (esclusi $1,44 < |\eta| < 1,57$)
- $\Delta R(\text{electron}, \gamma) > 0,4$
- Loose ID
- $\Delta M(\text{electron}, Z) > 5 \text{ GeV}$

☐ Muoni:

- $p_T > 10 \text{ GeV}$ e $|\eta| < 2,4$
- Isolation $< 0,25$
- Tight ID
- $\Delta R(\text{muon}, \gamma) > 0,4$
- $\Delta M(\text{electron}, Z) > 5 \text{ GeV}$

☐ Range di massa di T': [600,625,650,675,700], [800,900,1000], [1100,1200]

☐ Ricostruzione del top:

- Eventi leptonici: conservazione p_T e massa di W
- Eventi adronici: combinazione che minimizza χ^2 - in input alla BDT

Pair-production

Fit simultaneo alle seguenti variabili: $H_T = \sum p_T^{jet}$, $H_T^{lep} = H_T + \sum p_T^{tight lep}$, $S_T = H_T^{lep} + p_T^{miss}$

Queste grandezze stimano l'energia totale dell'evento, tipicamente più grande per processi con VLQ rispetto a fondo SM

Selection summary:

Channel	Overall	Event selection	
		CR	SR
1 ℓ	1 tight ℓ	—	—
	$p_T(\ell) > 55 \text{ GeV}$	—	—
	0 other loose ℓ , $p_T > 10 \text{ GeV}$	—	—
	$p_T^{miss} > 50 \text{ GeV}$	—	—
	≥ 3 large-radius jets	—	—
	—	max MLP not VLQ	max MLP is VLQ
	—	2 VLQ candidates	
SS 2 ℓ	2 tight SS ℓ	—	—
	$p_T(\ell) > 40 \text{ GeV}, 30 \text{ GeV}$	—	—
	≥ 4 small-radius jets	—	—
	$M(\ell\ell) > 20 \text{ GeV}$	—	—
	$M(ee)$ outside 76–106 GeV	—	—
	—	$H_T^{lep} < 1000 \text{ GeV}$	$H_T^{lep} > 1000 \text{ GeV}$
3 ℓ	$p_T(\ell) > 30 \text{ GeV}$	—	—
	$M(\text{OSSF } \ell\ell) > 20 \text{ GeV}$	—	—
	$p_T^{miss} > 20 \text{ GeV}$	—	—
	≥ 1 b-tagged jet	—	—
	$p_T(\text{b jet}) > 45 \text{ GeV}$	—	—
	—	3 loose ℓ	≥ 3 tight ℓ GeV
—	2 small-radius jets	≥ 3 small-radius jets	

Canale non minimale

□ Jets:

- almeno 1 AK4 con $p_T > 30 \text{ GeV}$
- Forward jet: tight id, $p_T > 30 \text{ GeV}$, $2,4 < |\eta| < 4$
- b-jet: DeepFlavour b – input alla BDT

□ MET > 25 GeV

□ Jet AK8:

- Almeno un jet Ak8 con $p_T > 500 \text{ GeV}$ e $60 \text{ GeV} < m < 220 \text{ GeV}$

□ Elettroni:

- **Tight:** Tight mva id, $p_T > 30 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2,5$
- **Loose:** loose mvs id, $p_T > 10 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2,5$, $|d_{xy}| < 0,05 \text{ cm}$

□ Muoni:

- **Tight:** TightId, $p_T > 30 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2,4$, Iso04 < 0,15
- **Loose:** Looseld, $p_T > 10 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2,4$, $|d_{xy}| < 0,05 \text{ cm}$