

VBS in CMS

Flavia Cetorelli¹, Davide Valsecchi²

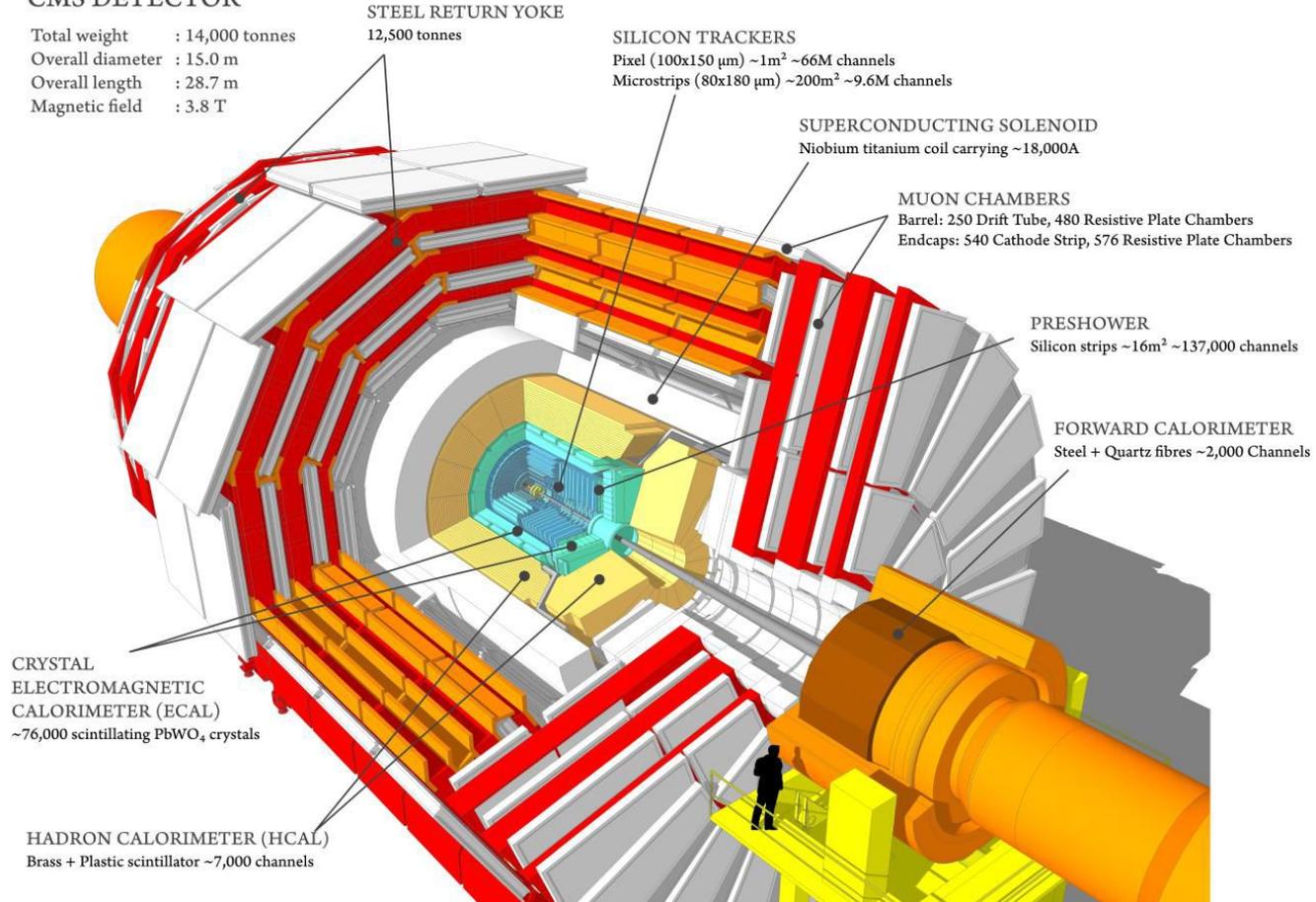
17-06-2020

1. Università ed INFN di Milano-Bicocca
2. Università ed INFN di Milano-Bicocca, CERN

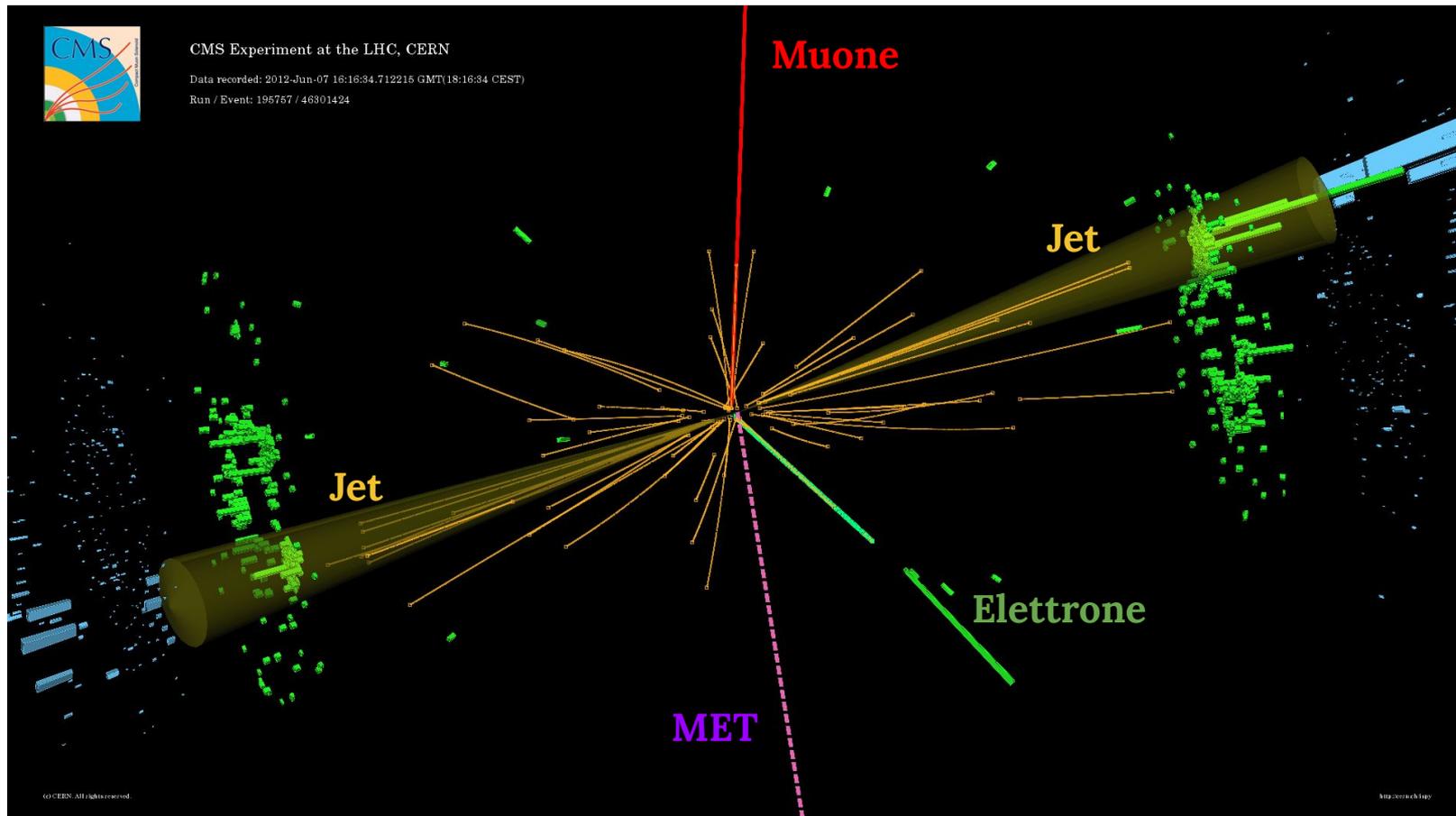
Compact Muon Solenoid (CMS) detector

CMS DETECTOR

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



Un candidato evento VBS visto da CMS



Gli oggetti della Fisica

Elettroni

Ricostruiti associando la traccia nel **tracker** ai depositi di energia nel **calorimetro elettromagnetico**.

Muoni

Particelle **molto penetranti**.
Ricostruiti associando la traccia nel **tracker** ai depositi di energia nel **rivelatore esterno per muoni**.

L'algoritmo **particle-flow** di CMS **combina** le informazioni dei **sotto rivelatori** per **ricostruire** gli oggetti della fisica (particelle, jet, energia trasversa mancante)

Jet

Ricostruiti come **cluster** di adroni carichi e neutri.
Possono essere **scambiati** per leptoni a causa di **errori nella ricostruzione**.

Energia trasversa mancante (MET)

Indica la presenza di **neutrini**.
Definita come l'**opposto** della somma vettoriale dei momenti trasversi di tutte le particelle ricostruite (sia cariche che neutre).
N.B: c'è **una** sola MET!

Scoperte VBS in CMS

★ W^+W^+ VBS Same Sign \rightarrow 2 leptoni di stesso segno e MET

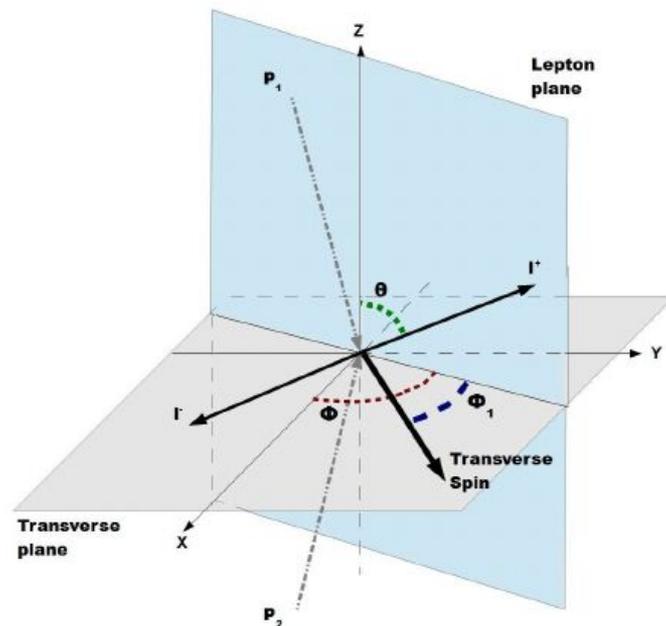
- ✓ Ottimo rapporto segnale su fondo.
- ✗ bassa sezione d'urto.

★ $W^+Z \rightarrow$ 3 leptoni e MET

- ✓ maggiore statistica (rispetto a ZZ);
- ✓ studi di **polarizzazione**;
- ✗ fondo dovuto a ZZ semileptonico.

★ $ZZ \rightarrow$ 4 leptoni

- ✓ canale molto pulito;
- ✓ ricostruzione completa dello stato finale;
- ✓ studi di **polarizzazione**;
- ✗ bassa statistica.



Dai leptoni ricostruiti nello stato finale si risale alla polarizzazione del bosone vettore.

Ed i loro risultati...

VBS $W^\pm W^\pm jj$:

Prima osservazione con i dati del 2016 a 5.5σ

arXiv:1709.05822, 2017.

VBS $WZjj$:

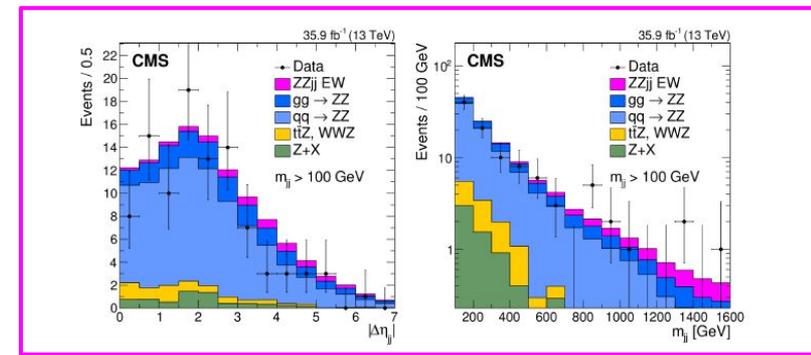
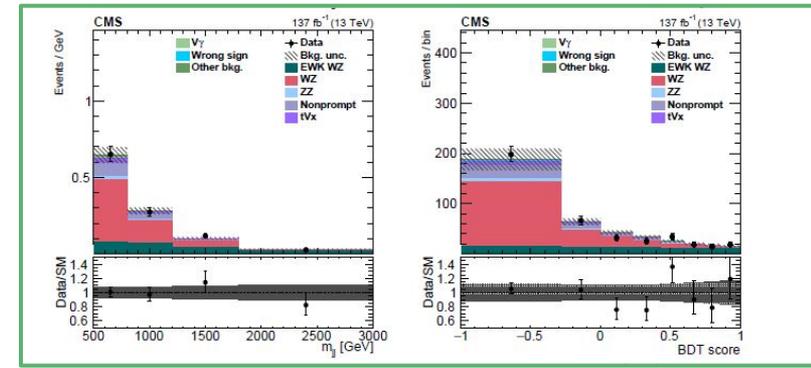
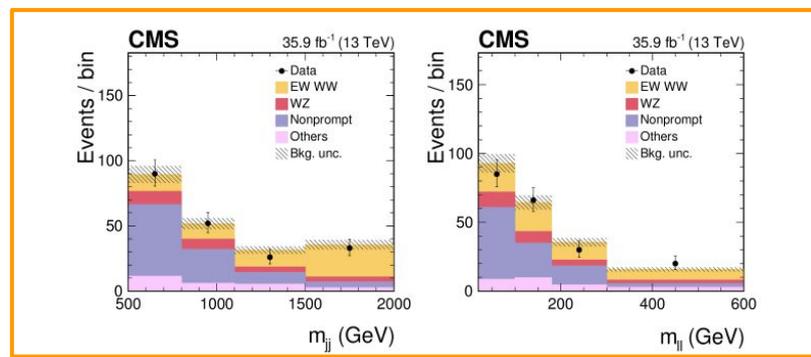
Osservazione a CMS con i dati del Run2 a 6.8σ , in combinazione con $W^\pm W^\pm jj$

arXiv:2005.01173v2, 2020

VBS $ZZjj$:

Primo segnale con i dati del 2016 a 2.7σ , servono **più dati!**

Phys. Lett., vol. B774, pp. 682705, 2017



... ma ci serve una mano...

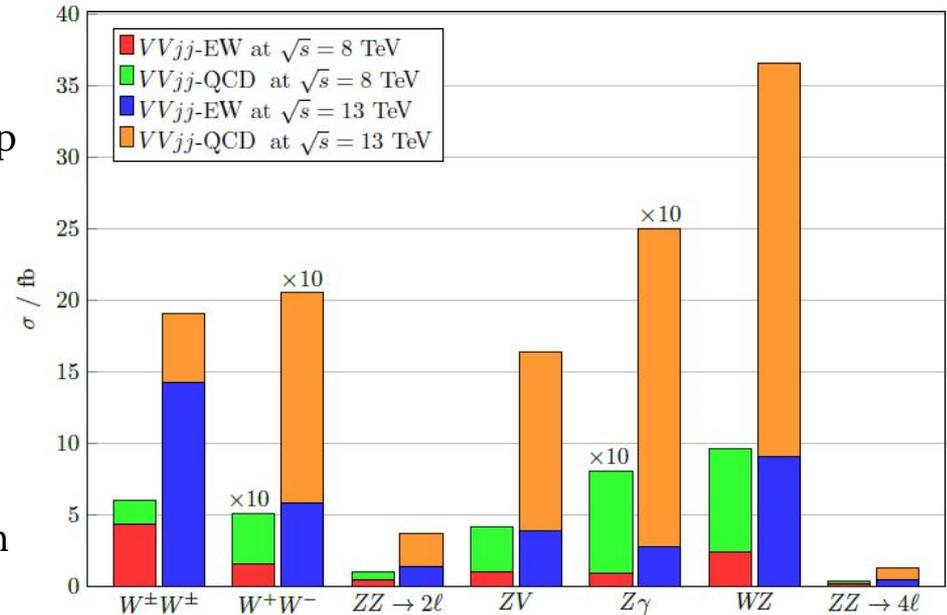
... per **osservarli tutti!**

I canali VBS presentano delle **sfide**:

- ★ Alcuni a causa di sezioni d'urto veramente piccole (es. ZZ)
- ★ Altri a causa di fondi molto elevati (es. il top nel W+W-)

La questione degli **stati finali**:

- ★ Gli stati finali **leptonici** sono privilegiati perché presentano una segnatura più **pulita**, ma soffrono a causa del **basso branching ratio**.
- ★ Gli stati finali **adronici** potrebbero aiutare con la **statistica**, ma sono deteriorati da un **fondo QCD** molto alto.
- ★ Gli stati finali **semileptonici** trovano un giusto **equilibrio** tra la necessità di aumentare la statistica e quella di sopprimere il fondo QCD.



Philipp Anger. "Probing Electroweak Gauge Boson Scattering with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider". Presented 01 Sep 2014. June 2014. <https://cds.cern.ch/record/1753849>

Segnatura del processo

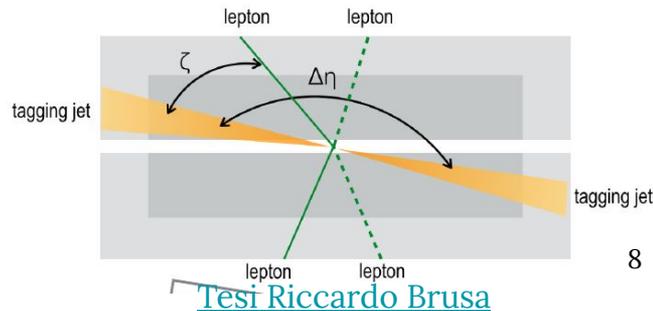
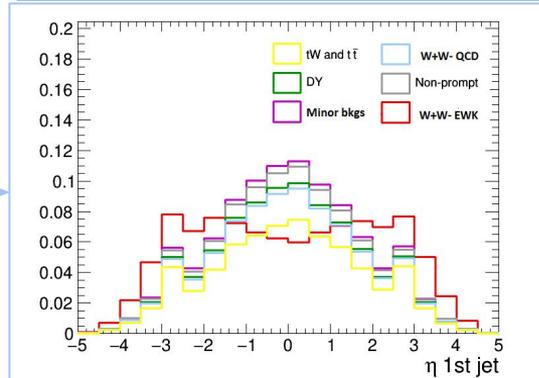
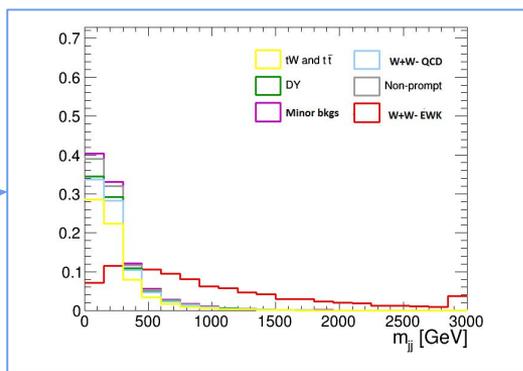
Nel processo VBS l'urto tra partoni è **mediato dall'interazione elettrodebole**, quindi:

- ★ i due **jet** che derivano dai quark dello stato finale:
 - hanno perso una piccola parte della loro energia, hanno una massa invariante m_{jj} elevata;
 - hanno subito una deviazione piccola, si trovano nelle parti anteriori del detector (**alto η**);
- ★ i due **bosoni vettori** emessi:
 - sono centrali rispetto ai due **jet di tag**;
 - se decadono leptonicamente, **non c'è attività adronica** tra i due jet di tag.

Tag del segnale VBS

Spazio fase VBS: selezionare eventi ad alto m_{jj} e $\Delta(\eta_1-\eta_2)$ migliora rapporto segnale fondo.

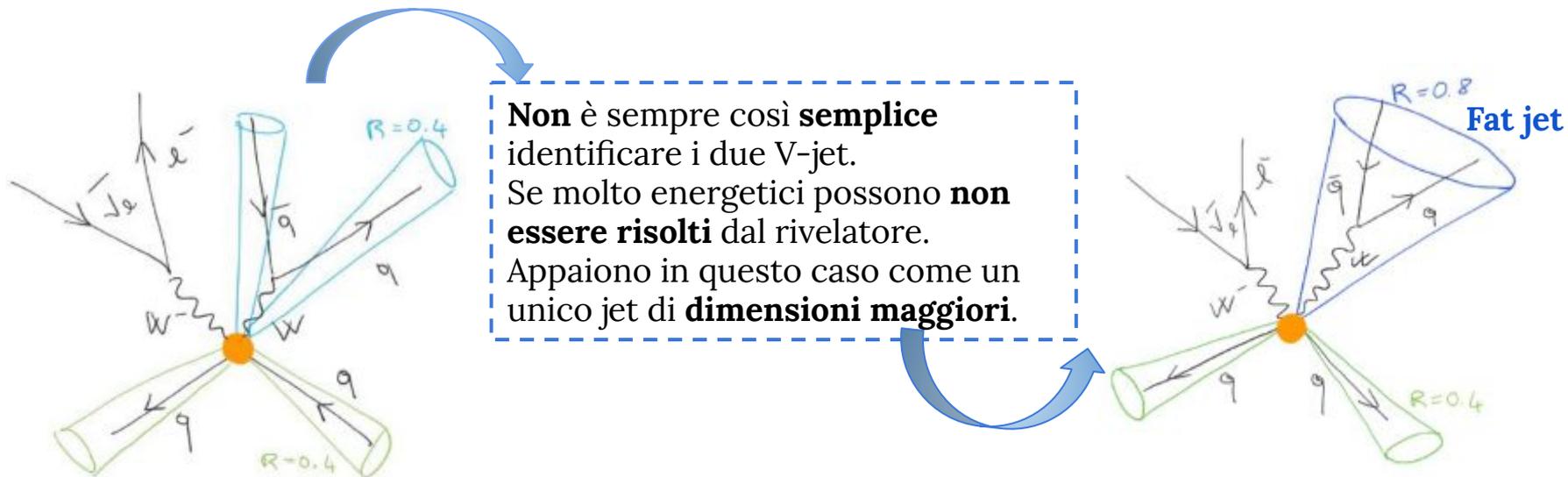
Selezionare eventi che **non hanno jet centrali** (nell'intervallo in η definito dai due tag jet) **sopprime** ulteriormente il **fondo**.



I V-jet

Nello stato finale **semileptonico** uno dei due bosoni vettori decade in **due quark**.

Ci aspettiamo quindi **due ulteriori jet (V-jet, con massa invariante vicina a quella del bosone V)** nello stato finale rispetto ai jet VBS.



Fondi principali

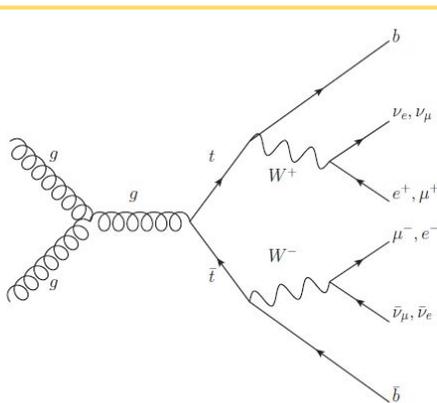
Processi che hanno uno **stato finale uguale** a quello del segnale, ma anche processi con stato finale differente che sono identificati come segnale a causa di **errori nella ricostruzione**.

Alcuni esempi di fondi principali per l'analisi **WW OS**:

tt e singolo t: $\sigma_{tt} \sim 1 \text{ nb}$

Fondo primario dell'analisi

Strategia: Vetare i b-jets

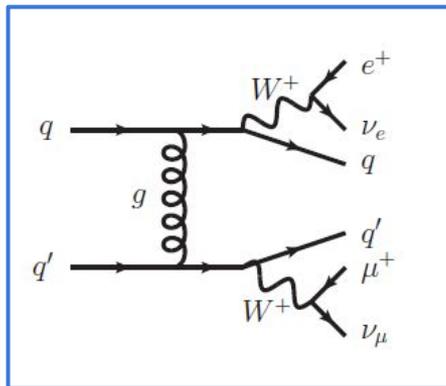


QCD WW:

L'interazione tra quark è **forte**.

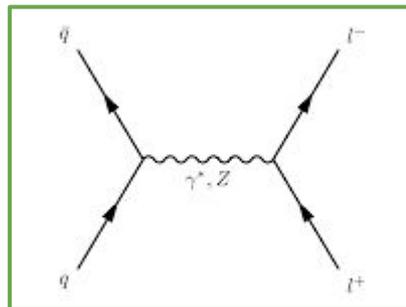
Stesso stato finale, ma cinematica differente.

Strategia: selezioni VBS.



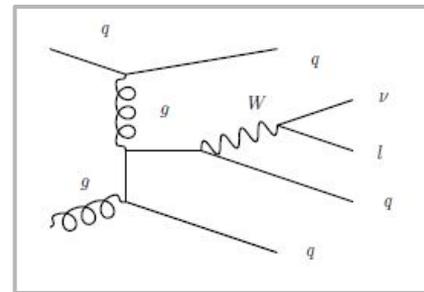
Drell-Yan:

Strategia: Selezioni sulla massa invariante e pT della coppia di leptoni, selezione sulla MET.



Fake

Principalmente W+Jet in cui **il jet è ricostruito come leptone**.



Stima del fondo

Regione di controllo:

- ✓ Segnale/fondo $\rightarrow 0$
- ✓ stesse selezioni della regione di segnale, tranne una che renda la regione **pura in uno dei fondi**.



Stima della normalizzazione del processo:

Riduzione delle **incertezze sistematiche**:

1. l'incertezza sulla luminosità (sperimentale)
2. l'incertezza sulla sezione d'urto (teorica)



Controllo dell'accordo dati - simulazioni.

Nell'analisi **WW OS** ad esempio la regione di controllo del **top** (fondo principale) è ottenuta invertendo il b-veto.

Regione di segnale:

- ✓ Segnale/fondo $\rightarrow 1$
- ✓ sono applicate tutte le selezioni per ridurre al minimo la presenza dei fondi.



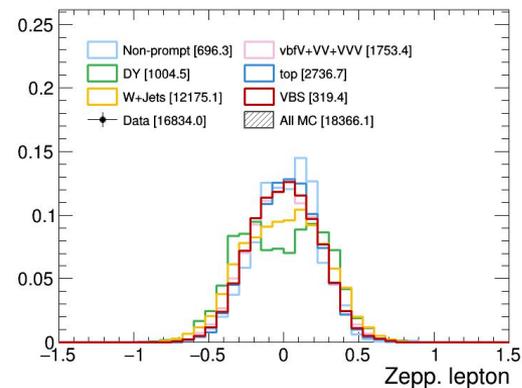
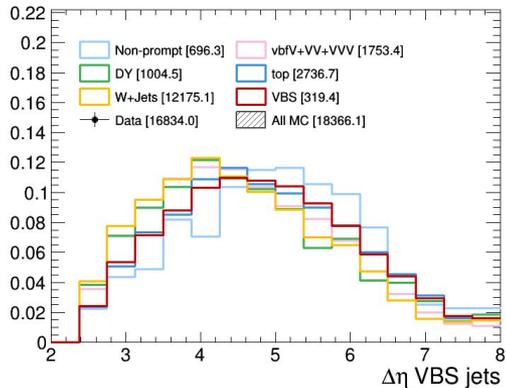
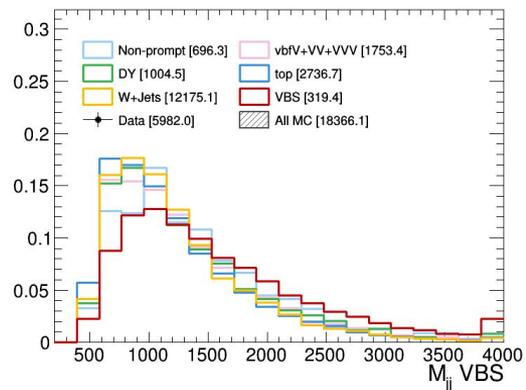
Estrazione del segnale.

E se i fondi diventano troppi, come i **W+jets** nell'analisi VBS **semileptonica**?

Isolare il segnale

Come scegliere le variabili?

★ **La forma:**
si scelgono variabili per cui il **segnale** ha distribuzioni **differenti dal fondo**.



Come si mettono insieme queste variabili?

Machine Learning

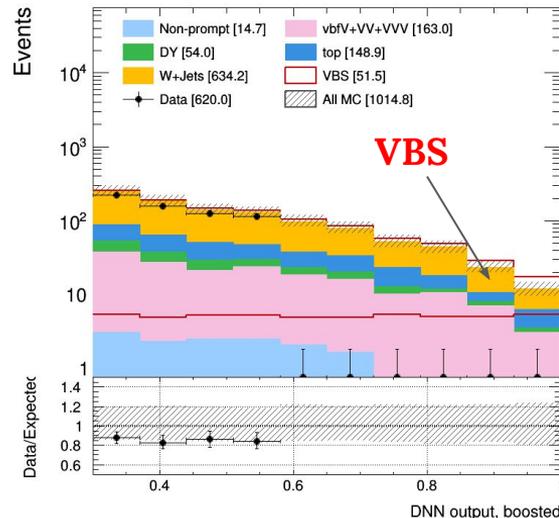
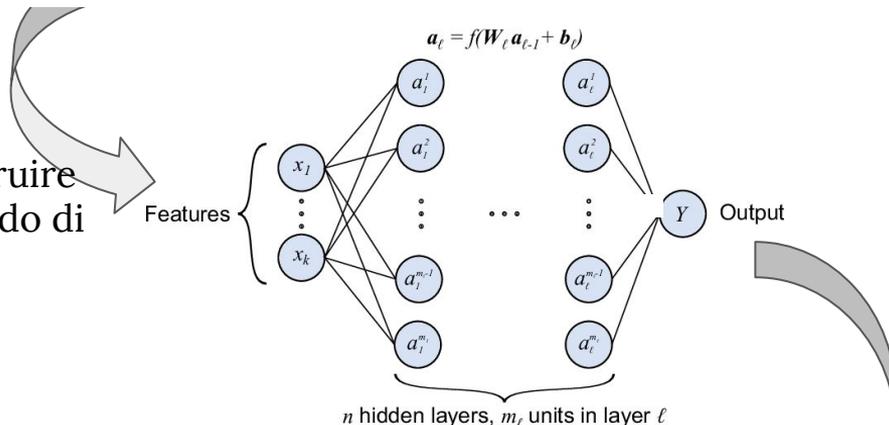
Le **variabili cinematiche** vengono utilizzate per costruire un **classificatore** più sofisticato e performante in grado di **separare segnale e fondi**.

Gli algoritmi di **Machine Learning**:

- ✓ hanno una **performance migliore** rispetto alle selezioni “manuali”:
 - ★ sfruttano al meglio le informazioni cinematiche;
 - ★ possono **imparare** da esempi (simulazioni).
- ✓ **Ma** bisogna **scegliere** con cura il **giusto algoritmo** che si adatti allo specifico problema da risolvere.

Le **Deep Neural Network (DNN)** sono uno degli algoritmi più semplici e diffusi per **discriminare il segnale dai fondi**.

Variabili cinematiche



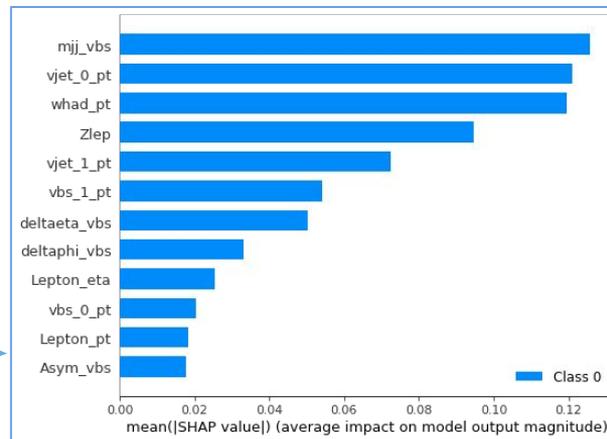
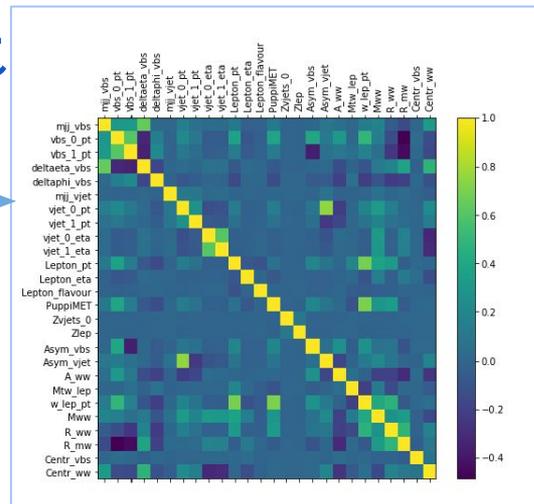
La scelta delle variabili di input

Come scegliere le variabili di input?

★ **La correlazione:** alcune variabili sono **altamente correlate** fra loro, quindi la loro presenza **non aggiunge** informazioni alla rete.

★ **L'impatto:** bisogna sempre valutare l'impatto delle variabili all'interno della DNN; esistono diversi algoritmi che sono in grado di farlo, ad esempio **SHAP**.

Siete interessati?
[tesi Dario Mapelli](#)
[tesi Davide Valsecchi](#)



La scelta delle variabili di input

Come scegliere le variabili di input?

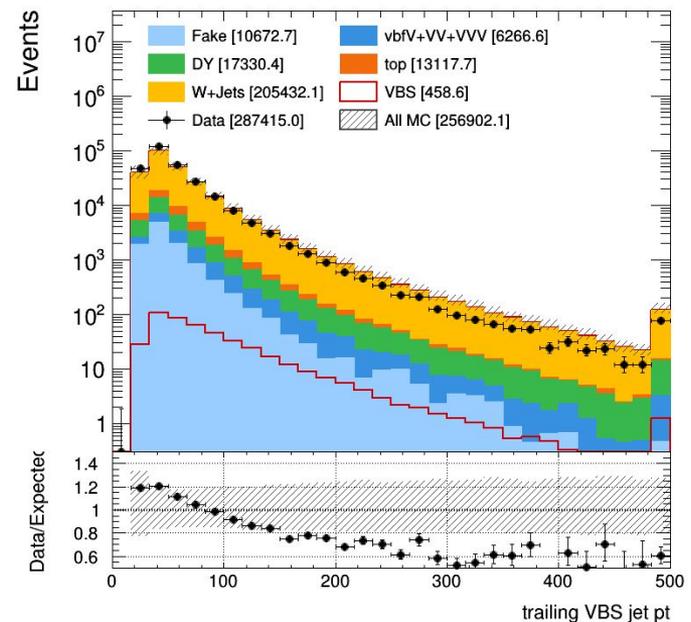
Non c'è una **ricetta unica**, ogni analisi ha bisogno della sua ottimizzazione.

Ci vuole equilibrio:

Troppe variabili → rischio overtrain.

Poche variabili → cattiva performance.

Attenzione: variabili devono essere ben descritte (buon accordo dati/MC).
Si usano regioni di controllo per aggiustare il disaccordo.



VBS a Milano-Bicocca

★ W^+W^- VBS Segno Opposto (VBS OS):

- ✓ Non ancora osservato: prima misura di sezione d'urto;
- ✓ Sensibile ai processi risonanti del canale **s-channel** → ricerca di nuove risonanze.
- ✗ grande fondo dovuto al top quark (riducibile)

★ WV semi-leptonico:

- ✓ statistica maggiore rispetto ai canali leptonici;
- ✓ possibilità di ricostruire la massa invariante;
- ✗ grande fondo dovuto a W +jets (riducibile);
- ✗ difficoltà a livello rivelatore nel distinguere i jet provenienti dal decadimento di un bosone vettore.

★ $W^\pm W^\pm$ VBS Stesso Segno (VBS SS)

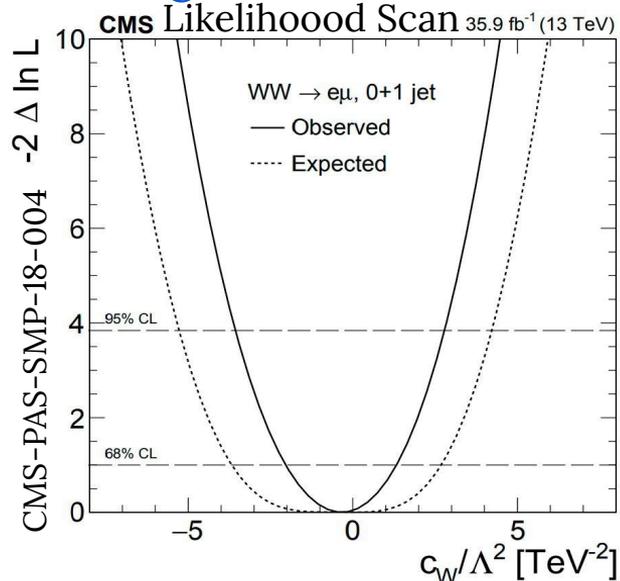
Oltre il modello standard:
Interpretazione in Effective Field Theory

Al di fuori dello standard model: EFT

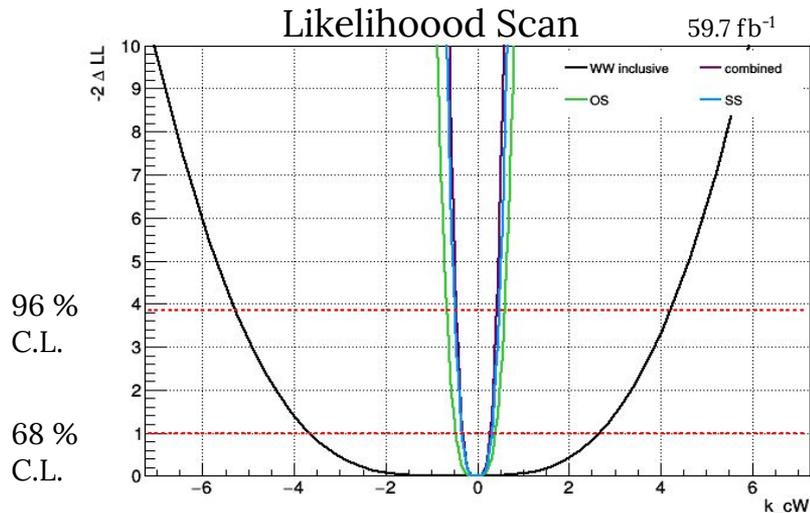
Si cercano effetti di rilevanti per la rottura di simmetria del **settore elettrodebole** con approccio da teoria **effettiva**.

I canali **VBS**, pur avendo bassa statistica, **sono competitivi** con studi di produzione di due bosoni inclusivi.

W+W- @√13 TeV with 2016 dataset



Combinazione di VBS OS e SS



EFT è la **moderna** frontiera per la ricerca di fisica oltre lo standard model (**BSM**).
Milano-Bicocca è la **prima** a portare avanti questi studi in CMS!

Conclusioni

- ★ I processi di urto tra bosoni vettori (**VBS**) sono processi puramente **elettrodeboli**, per questo **molto rari** (ordine fb).
- ★ I processi $VV \rightarrow VV$, con V un qualsiasi bosone vettore, hanno sezioni d'urto e fondi peculiari del singolo processo, ma sono accomunati dalla presenza di due jet molto energetici e con un grande gap in pseudorapidità (tag jet).
- ★ I canali VBS consentono di indagare il processo di **rottura spontanea di simmetria del settore elettrodebole**; oltre a testare il modello standard sono uno strumento per poter sondare la presenza di **nuova fisica** (grazie ad un'interpretazione in chiave EFT).
- ★ Gli studi di polarizzazione possono aprire una finestra su quale sia la vera **natura del bosone di Higgs**.
- ★ **Solo alcuni** di questi processi sono stati **osservati**, c'è ancora tanto da **scoprire!**



Backup

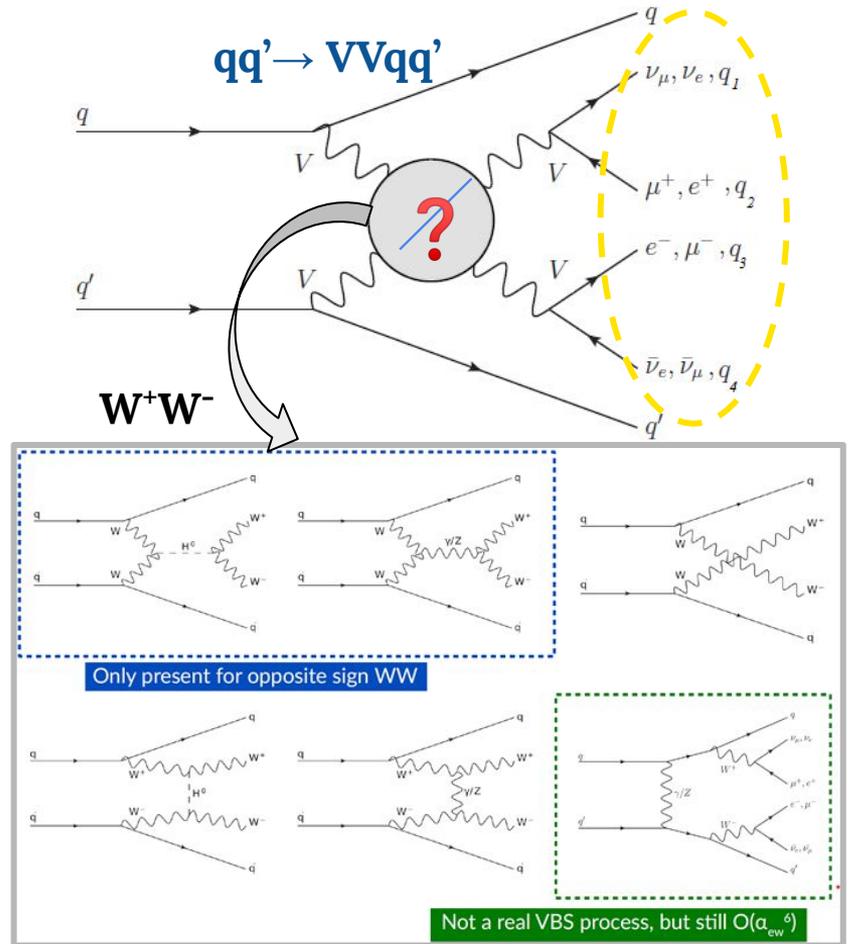
Vector Boson Scattering

- ★ L'emissione di una coppia di bosoni EWK (VV) da un processo scattering tra partoni tramite **scambio di bosoni EWK** ($V=W,Z,\gamma$).
- ★ E' un processo **puramente elettrodebole**, l'elemento di matrice VBS all'ordine più basso @LO è $O(\alpha_{EWK}^6 \alpha_S^0)$.
- ★ I due bosoni prodotti possono poi decadere adronicamente o leptonicamente, dando vita a **3** diversi stati finali:

1. **leptonico** $VV \rightarrow l\nu l\nu$
2. **semi-leptonico** $VV \rightarrow l\nu q'q''$
3. **adronico** $VV \rightarrow qq' q''q'''$

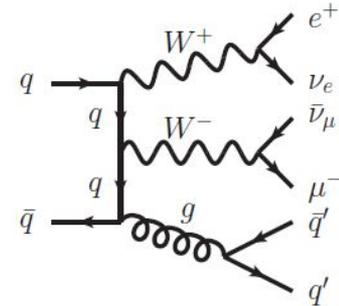
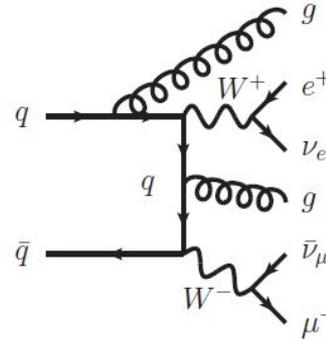
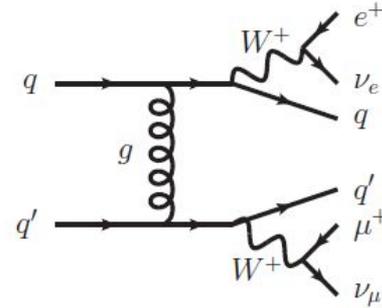
+statistica
↓

+purezza
↑



Produzione tramite QCD di VV con 2 jets

- ★ Da **non** confondere con processi **VBS**, anche se hanno lo **stesso stato finale**.
- ★ In questo caso i due (anti)quark si scambiano **un gluone** invece di un bosone V.
- ★ @LO l'elemento di matrice è $O(\alpha_{EWK}^4 \alpha_s^2)$
- ★ Il processo EWK VV e quello QCD interferiscono tra loro; il termine di interferenza è $O(\alpha_{EWK}^5 \alpha_s^1)$ e deve essere preso in considerazione.



Perchè studiare VBS?

1. I processi VBS sono stati osservati per la prima volta a 13 TeV, infatti
2. sono processi **molto rari**, anche **più** della del processo di produzione **dell'Higgs**.
3. Grazie a loro è possibile effettuare **misure di precisione** del settore elettrodebole; oltre a testare il modello standard sono uno strumento per poter sondare la presenza di **nuova fisica** (EFT).
4. L'unitarietà del processo di scattering VLVL è conseguenza della presenza del **bosone di Higgs**. Studi di polarizzazione consentono di verificare quale sia la vera **natura** di questa particella!

@13 TeV

$$\sigma_{W+W^-} \sim 15 \text{ fb}$$

$$\sigma_H \sim 50 \text{ pb}$$

Analisi dati: Test di verifica d'ipotesi

- ★ La **forza del segnale** μ è definita come: $\mu = \sigma_{\text{measured}} / \sigma_{\text{theory}}$
- ★ Si definiscono un'ipotesi nulla H_0 (ipotesi nulla, solo fondo $\mu=0$) ed un'ipotesi alternativa H_1 ($\mu=1$).

- ★ Dato un **test statistico** t , il **valore-p** è la probabilità che supposta vera l'ipotesi nulla si possa trovare un set di dati che mostri un'incompatibilità uguale o maggiore con l'ipotesi H (cioè che abbia un $t > t_{\text{obs}}$);

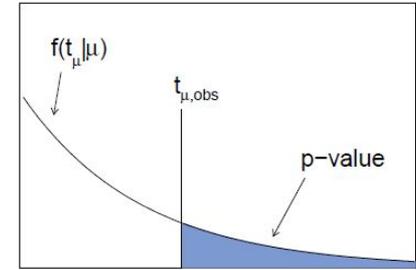
$$p = \int_{t_{\text{obs}}}^{\infty} f(t|H_0) dt$$

- ★ Il **valore-p** può essere espresso anche in termini deviazioni standard equivalenti (**significatività Z**).

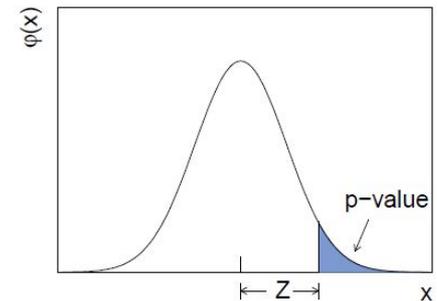
- ★ Dato un valore di **soglia** α :

- ✓ se $p < \alpha$, si rifiuta l'ipotesi nulla in favore dell'alternativa;
- ✗ se $p > \alpha$, fallire nel rifiutare l'ipotesi nulla.

Scoperta $\alpha = 2.87 \times 10^{-7}$ (5σ)



$f(t|H_0)$ è la pdf del test statistico t definita dall'ipotesi H_0



Test statistico: profile likelihood

Per ottenere un test statistico che dipenda solamente da parametri di interesse, si usa di solito prendere il rapporto

$$\lambda(\mu) = \frac{L(\mu, \hat{\theta})}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$

dove $\hat{\theta}$ è il valore di θ che massimizza la likelihood per il valore di μ da provare, mentre al denominatore i valori di θ e $\hat{\mu}$ sono quelli che massimizzano la likelihood.

Si definisce per la scoperta il test:

$$q_0 = \begin{cases} -2 \ln \lambda(0) & \hat{\mu} \geq 0, \\ 0 & \hat{\mu} < 0, \end{cases}$$

Fluttuazioni negative del segnale non sono a sfavore di H_0 .

Tramite le formule asintotiche si può mostrare che: → per la dimostrazione completa:

$$Z_0 = \Phi^{-1}(1 - p_0) = \sqrt{q_0}$$

Eur. Phys. J., vol. C71, p. 1554, 2011.

Analisi dati: Shape analysis

Per ottenere una stima di μ (**parametro di interesse**) si confrontano i dati con gli eventi attesi (simulati) tramite la massimizzazione della Likelihood $L(x, \mu, \theta)$

$$\mathcal{L}(n_1, \dots, n_m; \mu, \vec{\theta}) = p(\vec{\theta}) \cdot \prod_i \frac{(\mu s_i(\vec{\theta}) + b_i(\vec{\theta}))^{n_i}}{n_i!} e^{-\mu s_i(\vec{\theta}) - b_i(\vec{\theta})}$$



Distribuzioni a priori per le incertezze sistematiche.

Prodotto delle distribuzioni di Poisson di trovare ni eventi nell'i-esimo bin

Nella **shape analysis** gli istogrammi di segnale e fondo simulati sono fittati ai dati; l'uso di simulazioni è reso necessario dall'impossibilità di produrre espressioni analitiche delle variabili discriminanti.

Si costruisce un test statistico in grado di quantificare il disaccordo dei dati dall'ipotesi nulla.

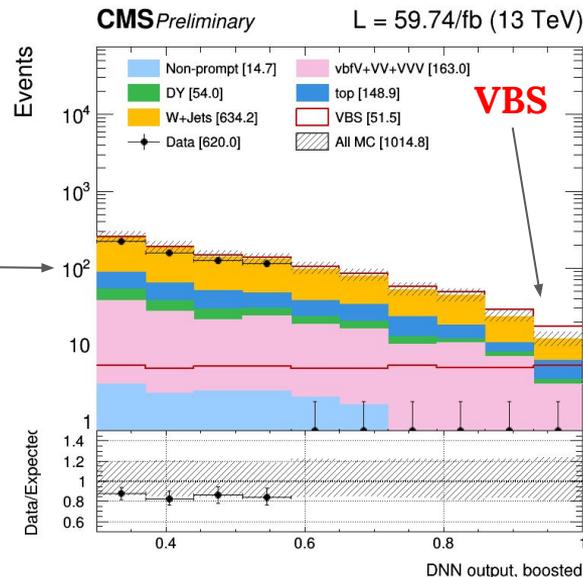
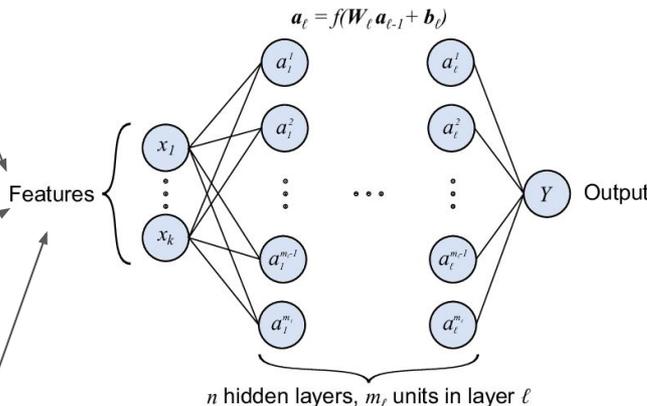
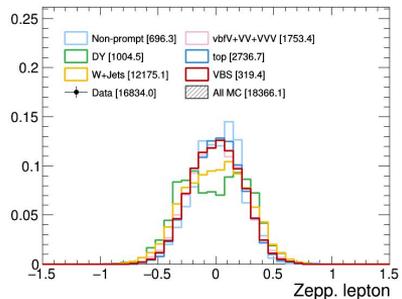
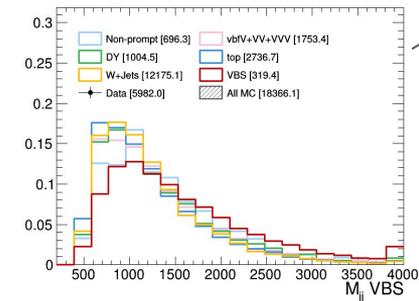
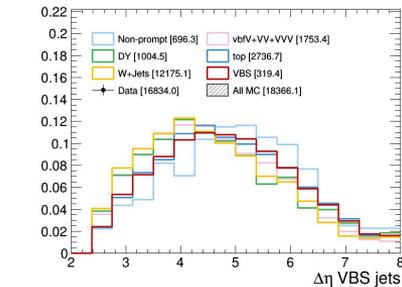


Se la significatività $Z > 5\sigma$



Scoperta!

Separare segnale dal fondo: Machine Learning



Il segnale ha distribuzioni a_ℓ leggermente differenti dal fondo (linea rossa a sinistra)

Le variabili cinematiche vengono utilizzate per costruire un classificatore più sofisticato e performante in grado di separare segnale e fondi.

Le Deep Neural Network DNN sono uno degli algoritmi più semplici e diffusi per questo task.

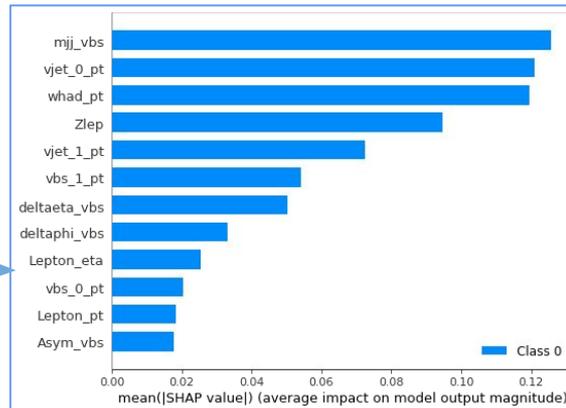
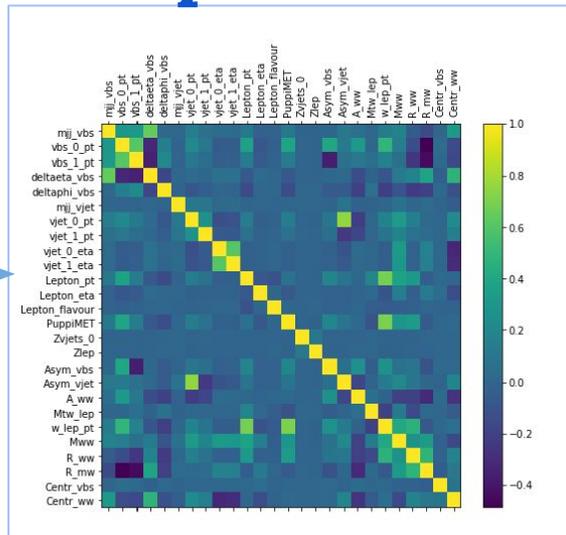
La scelta delle variabili di input

Come scegliere le variabili di input?

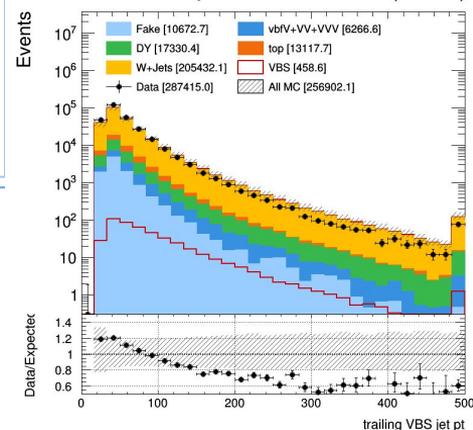
- ★ **La forma:**
si scelgono variabili per cui il **segnale** ha distribuzioni **differenti dal fondo**.
- ★ **La correlazione:**
alcune variabili sono **altamente correlate** fra loro, quindi la loro presenza **non aggiunge** informazioni alla rete.
- ★ **L'impatto:**
bisogna sempre valutare l'impatto delle variabili all'interno della DNN; esistono diversi algoritmi che sono in grado di farlo, ad esempio **SHAP**.

Equilibrio:

Troppe variabili → rischio overtrain.
Poche variabili → cattiva performance



Attenzione: variabili devono essere ben descritte (buon accordo dati/MC). Si usano regioni di controllo per aggiustare il disaccordo.



Siete interessati?

[tesi Dario Mapelli](#)
[tesi Davide Valsecchi](#)