

Un algoritmo basato su reti neurali ricorrenti per esplorare la topologia VBF/VBS

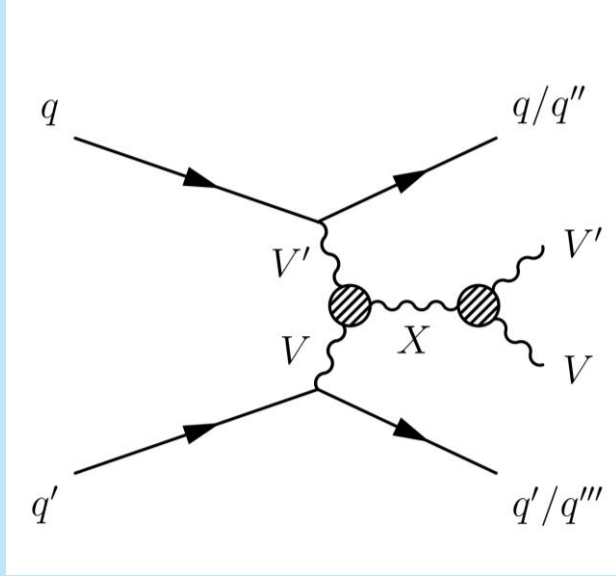


Vincenzo Del Piano | Università degli Studi di Napoli Federico II e INFN Sezione di Napoli

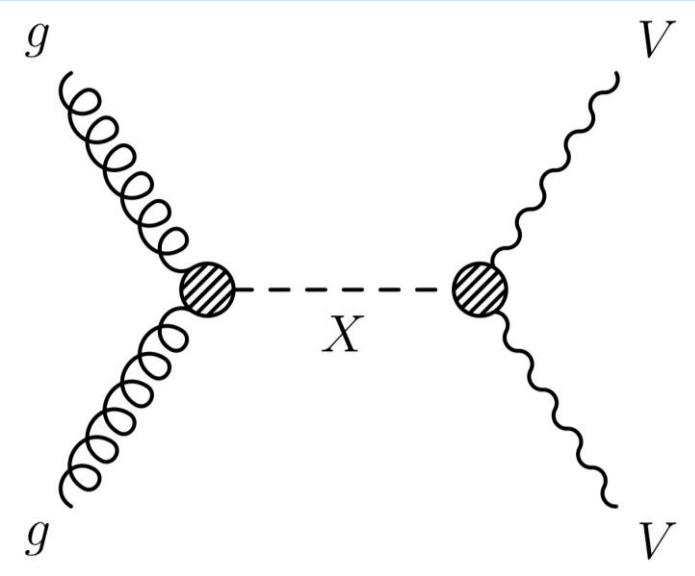


I processi di produzione di due bosoni, **Vector Boson Scattering** (VBS) e **Vector Boson Fusion** (VBF), permettono di studiare la struttura della fisica **Elettrodebole del Modello Standard** e l'eventuale presenza di nuova fisica **Oltre Modello Standard** (BSM). Questi processi possono essere classificati utilizzando informazioni dell'evento con un algoritmo basato su **Reti Neurali Ricorrenti** (RNN). Alcune applicazioni [1,2] hanno mostrato il successo di tale approccio in stati finali semileptonici e sono in corso studi per validare il modello su altri stati finali.

Vector Boson Fusion

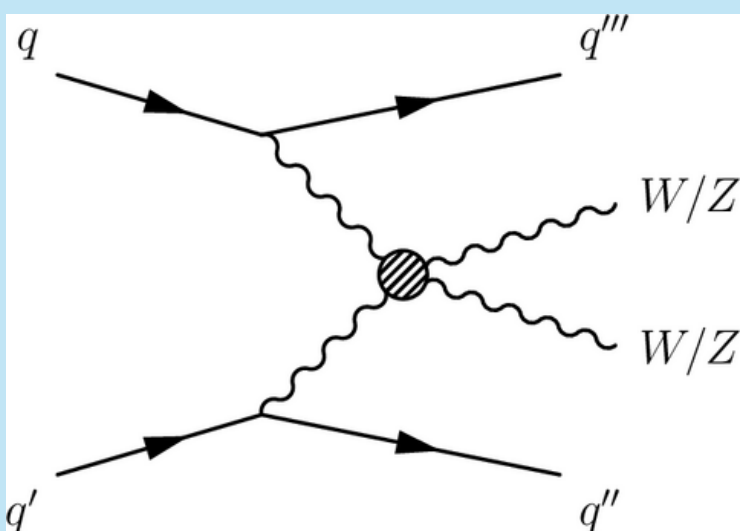


L'esistenza di una risonanza X ad alta massa può essere un chiaro segnale di nuova fisica. VBF è uno dei possibili meccanismi di produzione di una risonanza X attraverso la fusione di due bosoni vettori.

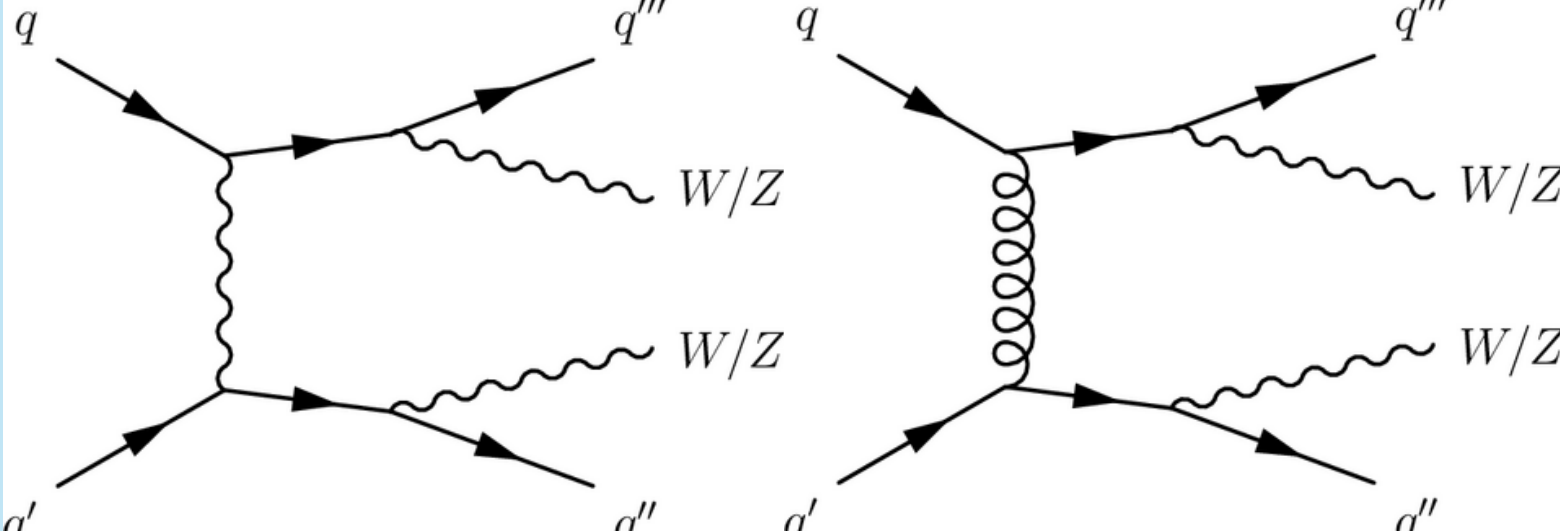


ggF è un meccanismo di produzione di una risonanza attraverso la fusione di due gluoni. È il meccanismo dominante per, ad esempio, la produzione del bosone di Higgs.

Vector Boson Scattering



Il processo VBS prevede la produzione di due bosoni attraverso lo scattering di due bosoni deboli. È un processo non risonante che ci permette di studiare gli accoppiamenti quartici anomali (aQGC).



La produzione elettrodebole di VV non VBS e la produzione QCD di VV rappresentano i fondi dominanti per il processo di produzione VBS.

I processi VBF/VBS sono caratterizzati da due bosoni vettori e due jet adronici con:

- grande separazione in **pseudo-rapidità η** ;
- elevata **massa invariante totale**.

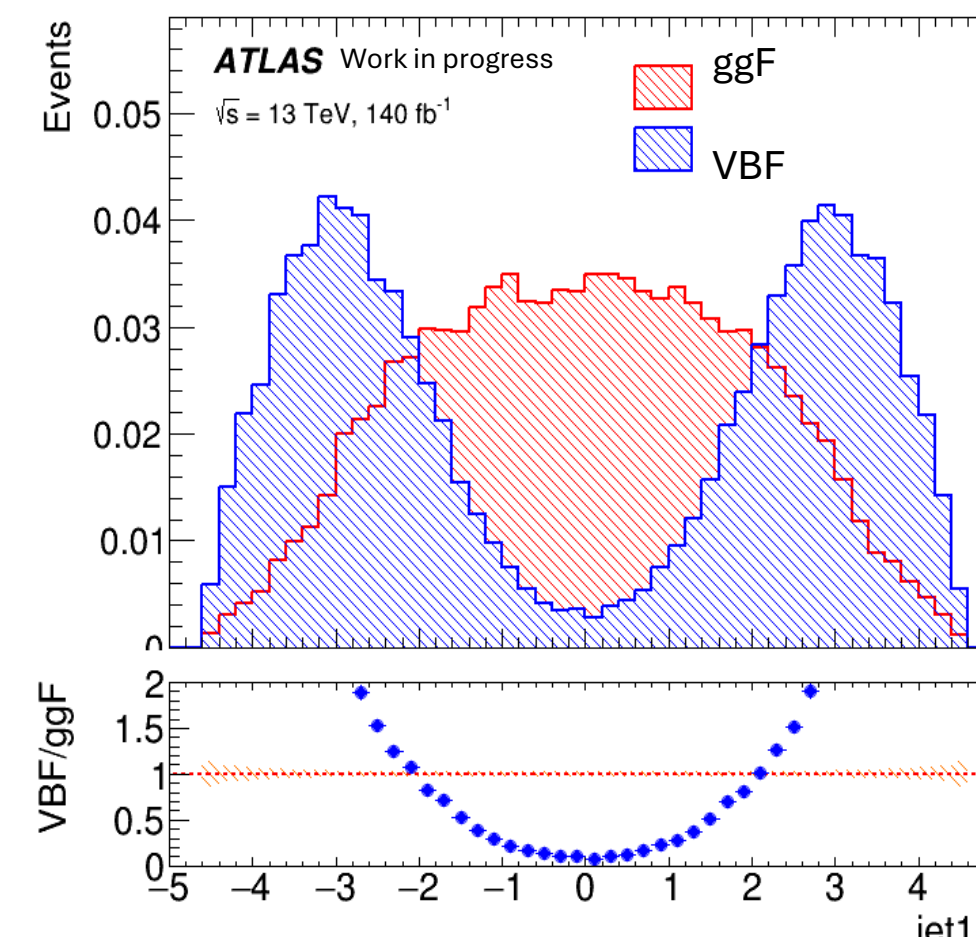


Figura 1: Distribuzione della pseudo-rapidità η del jet aggiuntivo con pt più alto, per segnali ggF e VBF con $X=H$ ed $m_H = 1 \text{ TeV}$.



COME CLASSIFICARE GLI EVENTI?

Una **Rete Neurale Ricorrente** (RNN) è un modello di deep learning progettato per elaborare **sequenze di dati di lunghezza variabile**, analizzando eventi con un numero diverso di input senza richiedere una dimensione fissa. Un aspetto fondamentale è che la rete utilizza come input variabili di **basso livello**, come i quadrimpulsi dei jets, rendendola **estremamente versatile**.

	VBF	VBS
Task	Categorizzazione VBF-ggF	Separazione segnale-fondo
Input	Quadrimpulso	Resolved regime Quadrimpulso+ n_{tracks} Merged regime Quadrimpulso+ n_{tracks} + Large-R Jet
Max Jet in input	2	5

Come funziona?

- Ogni evento è rappresentato da una **sequenza di Jet** (Small-R jets: Anti-kt con $R=0.4$);
- Il layer LongShortTimeMemory (LSTM) permette di **memorizzare informazioni** lungo la sequenza;
- Per l'analisi VBS [2] la rete è stata estesa, includendo un ramo basato su una **Deep Neural Network**, per sfruttare le informazioni dai Large-R Jets (Anti-kt con $R=1.0$) e separare gli eventi di segnale dal fondo.

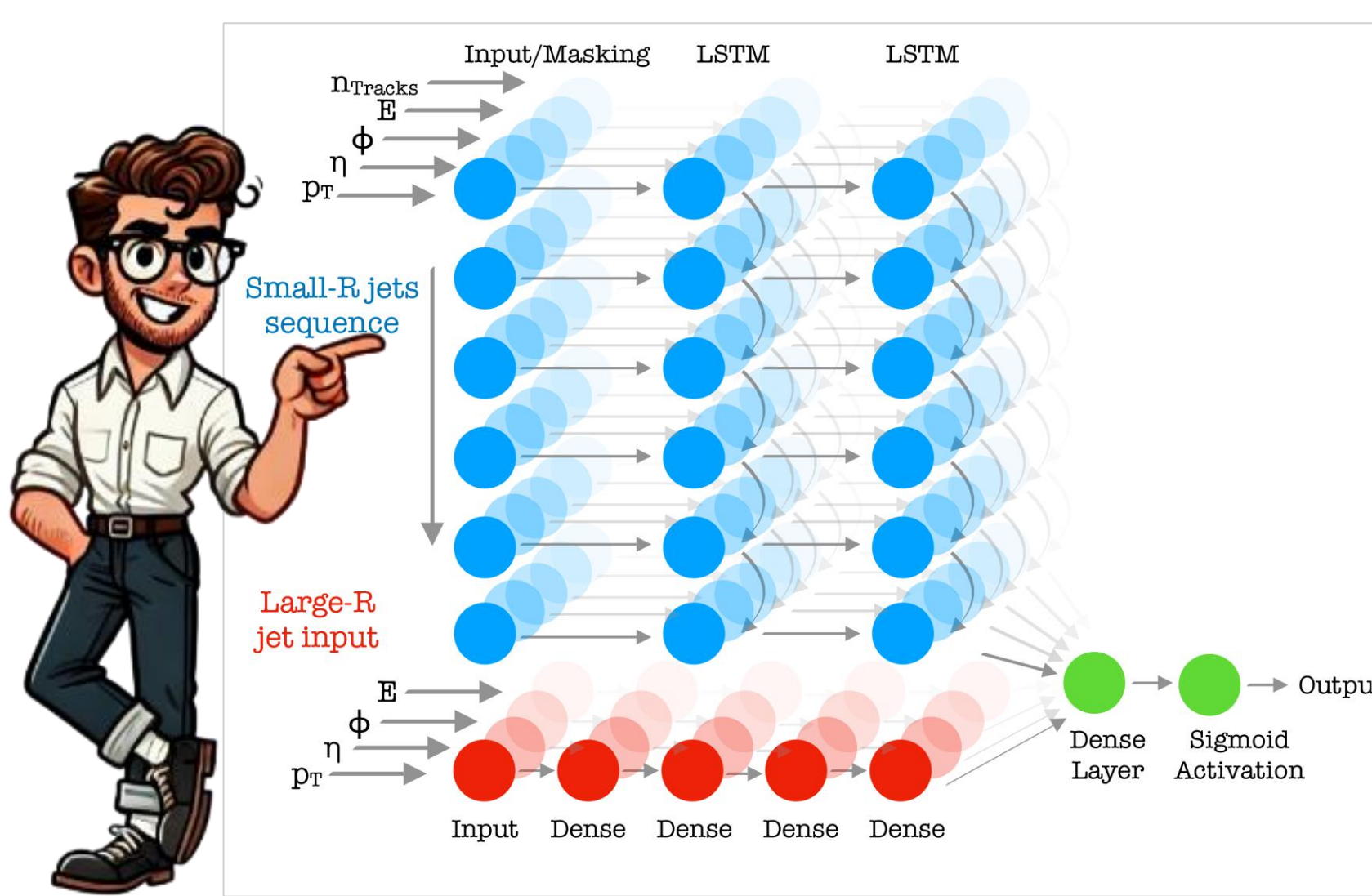


Figura 2: Rete utilizzata nell'analisi VBS [2], nel regime merged.

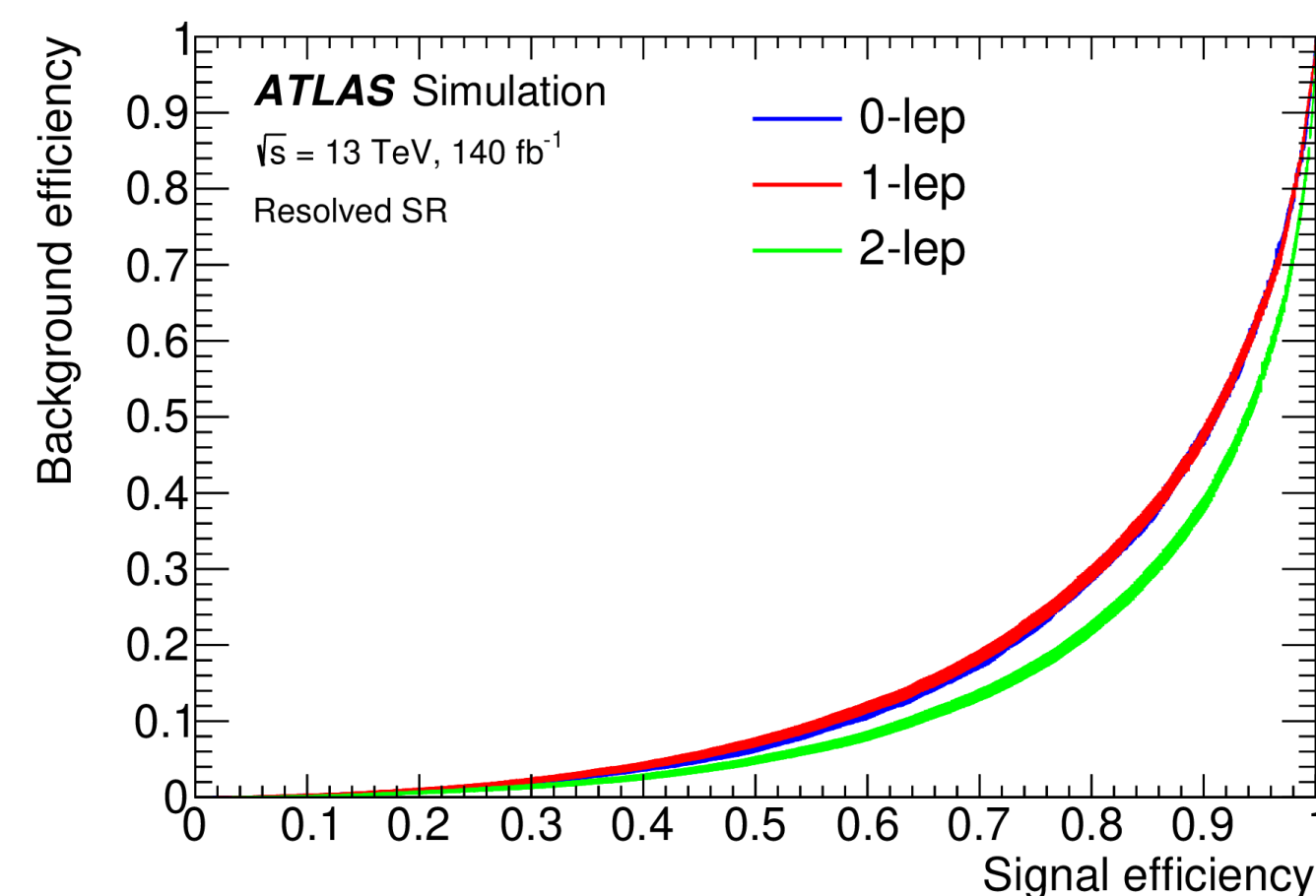


Figura 3: ROC (Receiver Operating Characteristic) curves per i campioni di segnale e fondo, applicate nell'analisi VBS [2].

MA FUNZIONA DAVVERO?

Vector Boson Fusion

La RNN è stata utilizzata nella ricerca di **risonanze ad alta massa** $X \rightarrow VV \rightarrow vv/lv/ll + qq$ [1]. Sono 3 i modelli considerati per la risonanza presante X:

- Randall-Sundrum (RS);
- Heavy Vector Triplet (HVT);
- Kaluza-Klein (KK).

La categorizzazione degli eventi VBF e ggF è stata fatta con la RNN, permettendo di recuperare eventi di segnale VBF con un solo jet aggiuntivo ricostruito (**~30% di eventi di segnale**) che non erano analizzati nella precedente selezione e migliorando le conoscenze sugli eventi con entrambi i jets aggiuntivi rispetto a precedenti metodi.

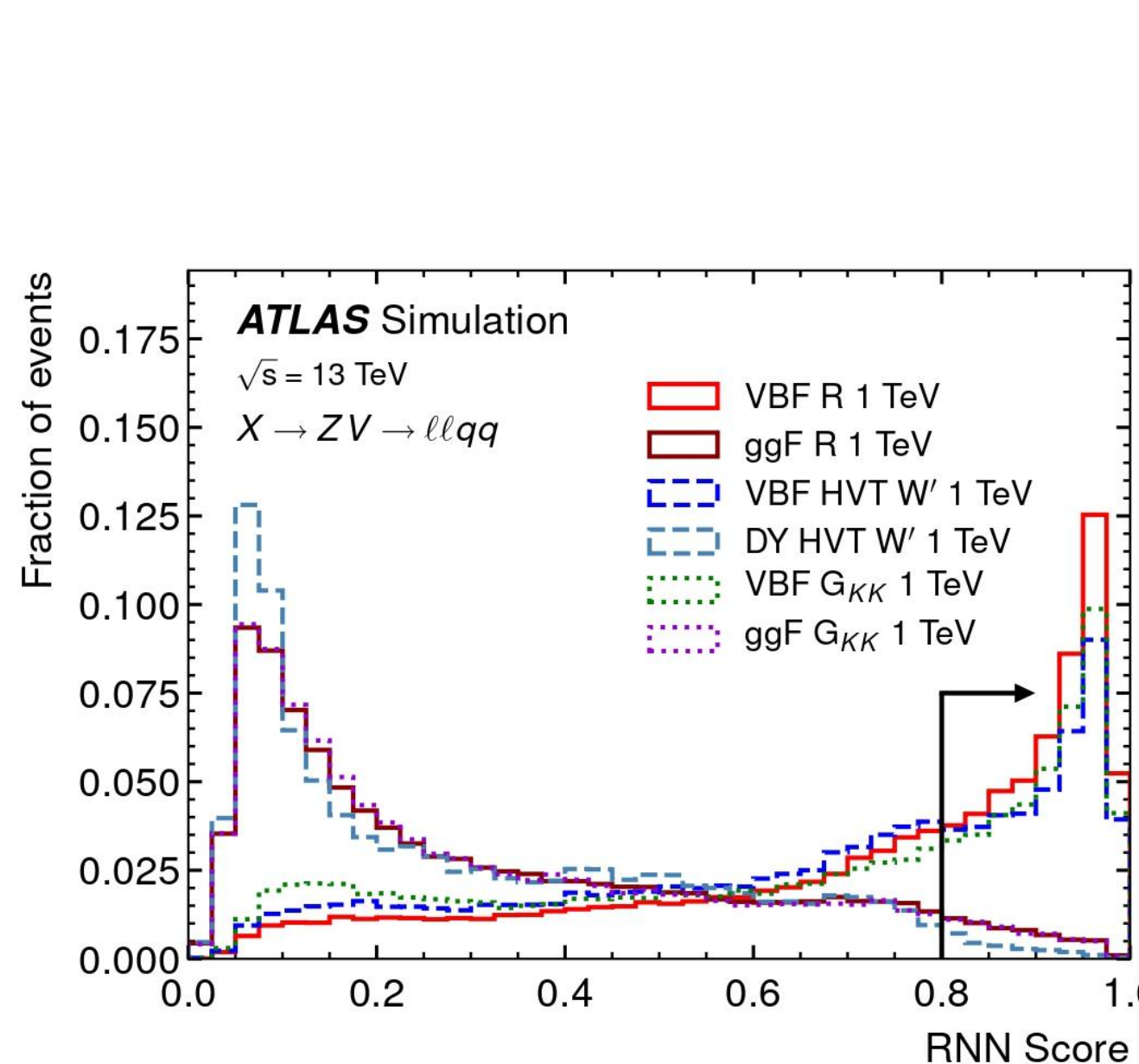


Figura 4: Distribuzione dello score RNN per la produzione di una risonanza ad 1 TeV al variare dei modelli considerati. [1]

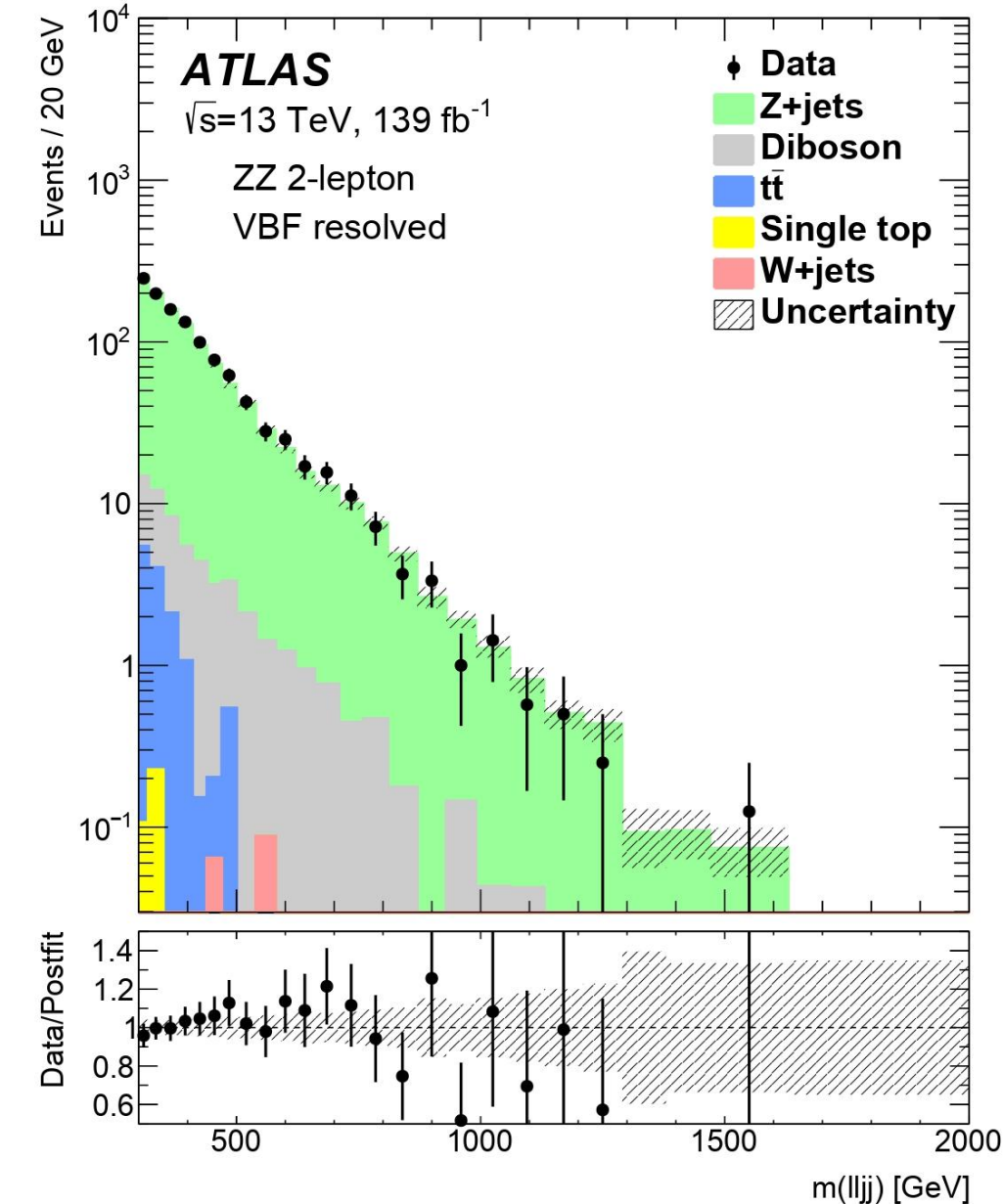


Figura 5: Confronto tra i dati e il fondo atteso della m_{lljj} . [1]

Vector Boson Scattering

La RNN è stata utilizzata per lo studio della produzione elettrodebole di due bosoni, associati a un sistema di due Jet ad alta massa, nello stato finale semileptonico [2] per separare il segnale dal fondo.

Inoltre l'output di questo strumento è anche utilizzato come variabile discriminante per ottimizzare la significatività del segnale sul fondo.

Con i dati raccolti, la significatività osservata è risultata essere di **7.4 σ** rispetto ai 6.1 σ attesi.

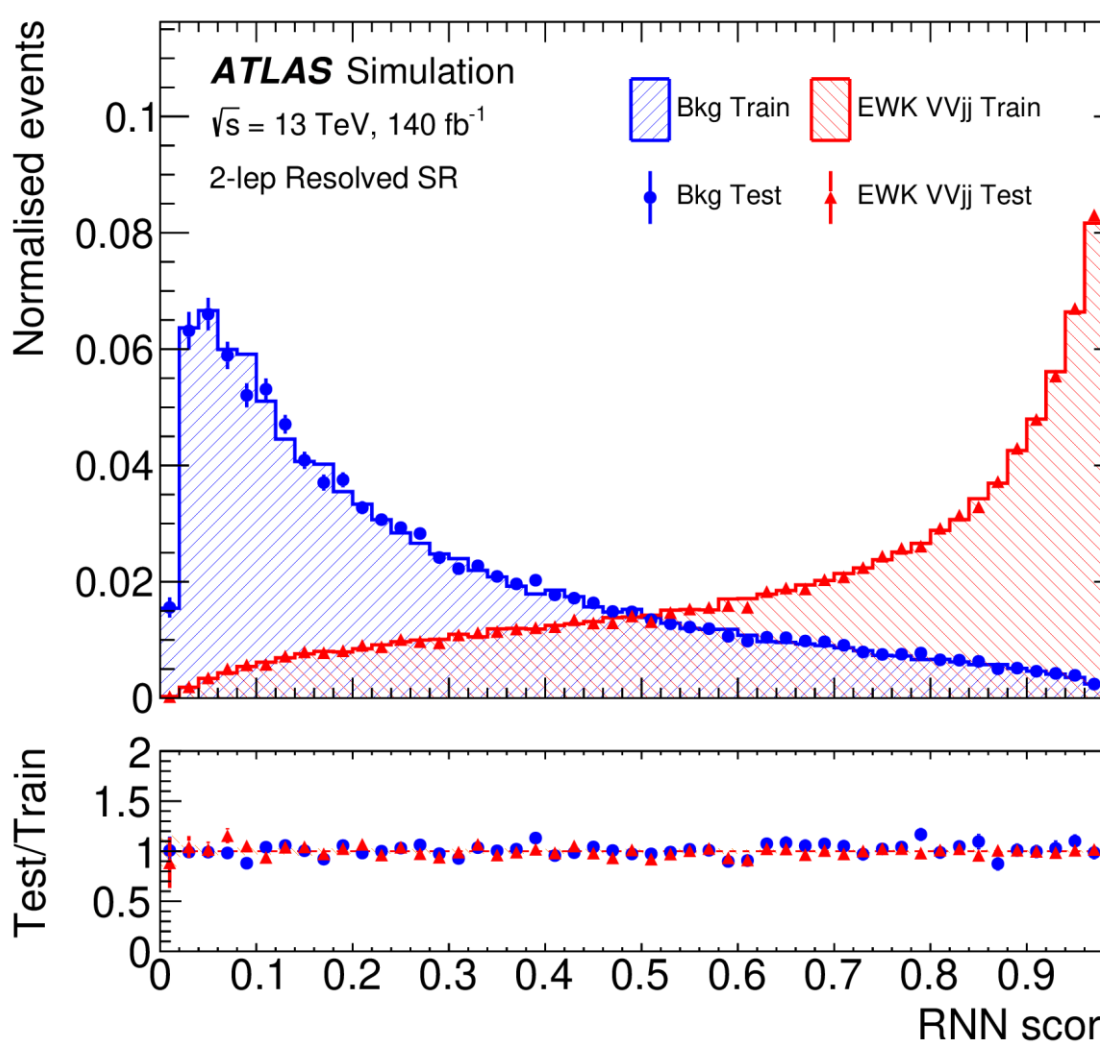


Figura 6: Distribuzione dello score RNN per i campioni di segnali e fondo. [2]

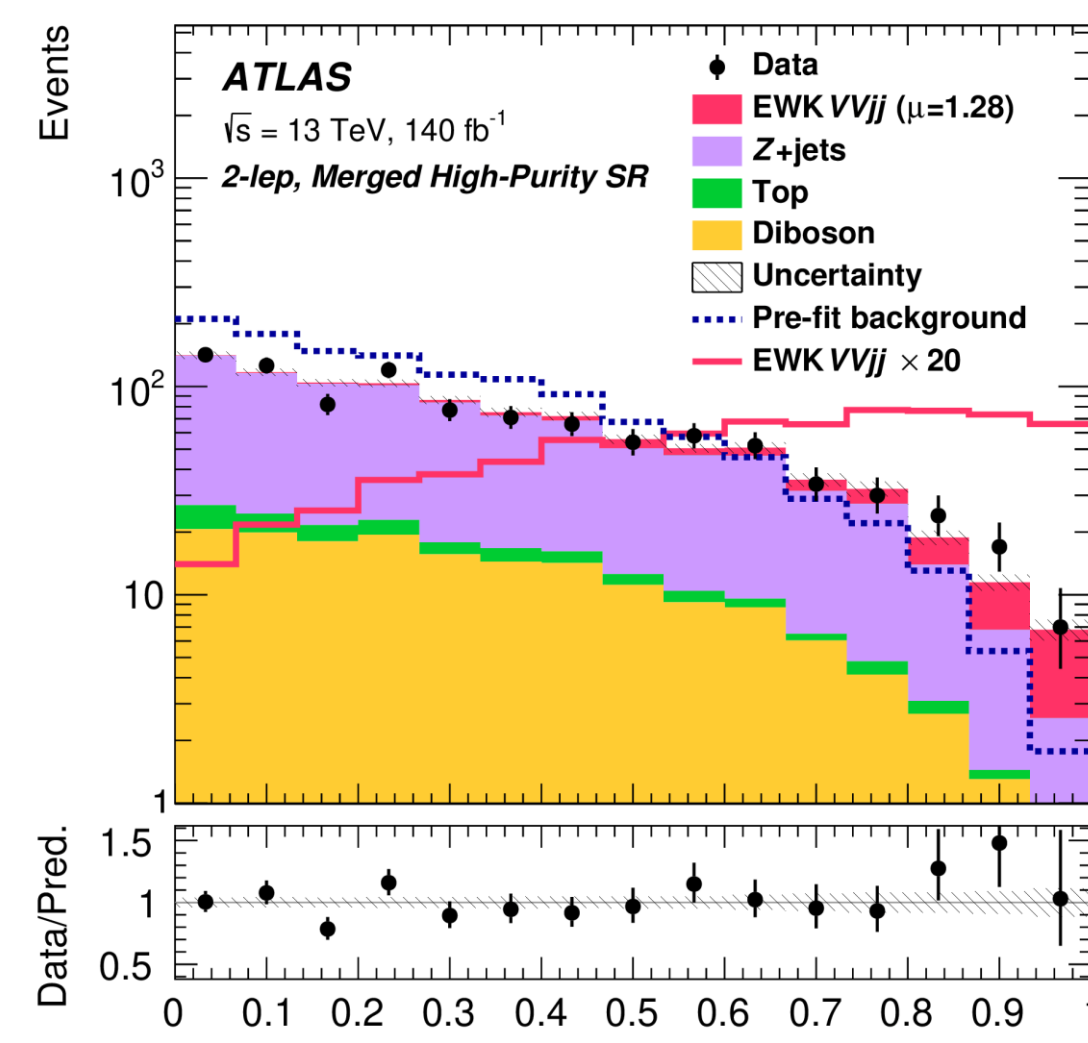


Figura 7: Confronto tra dati osservati e eventi attesi di segnale e fondo. [2]

IL PROSSIMO PASSO

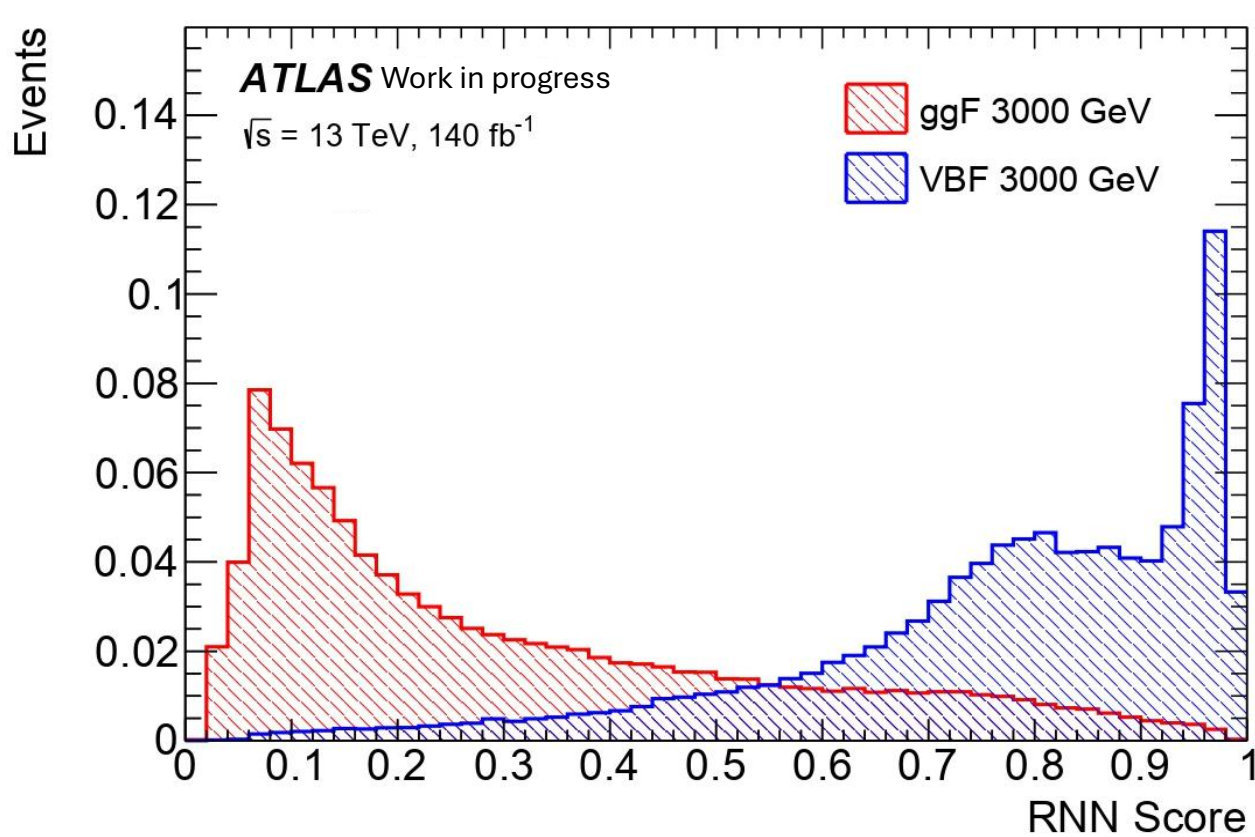


Figura 8: Distribuzione dello score della RNN per segnali ggF e VBF con $X=H$ ed $m_H = 3 \text{ TeV}$. La rete è allenata su un canale semileptonico e testata sul canale completamente adronico.

Studi in corso in altri canali VBF/VBS:

- Risonante, stati finali completamente leptonici o adronici:
 - $X \rightarrow WW/WZ \rightarrow l\nu l\nu/l\nu ll, ZZ \rightarrow \nu\nu ll/llll$
 - $X \rightarrow VV \rightarrow JJ$
 - $VBF h \rightarrow \nu\nu$
- Non-risonante, stati finali adronici e oltre la segnatura diboson:
 - $VBS VV \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$
 - $VBS VVh \rightarrow l\nu l\nu b\bar{b}$
 - $VBF hh$

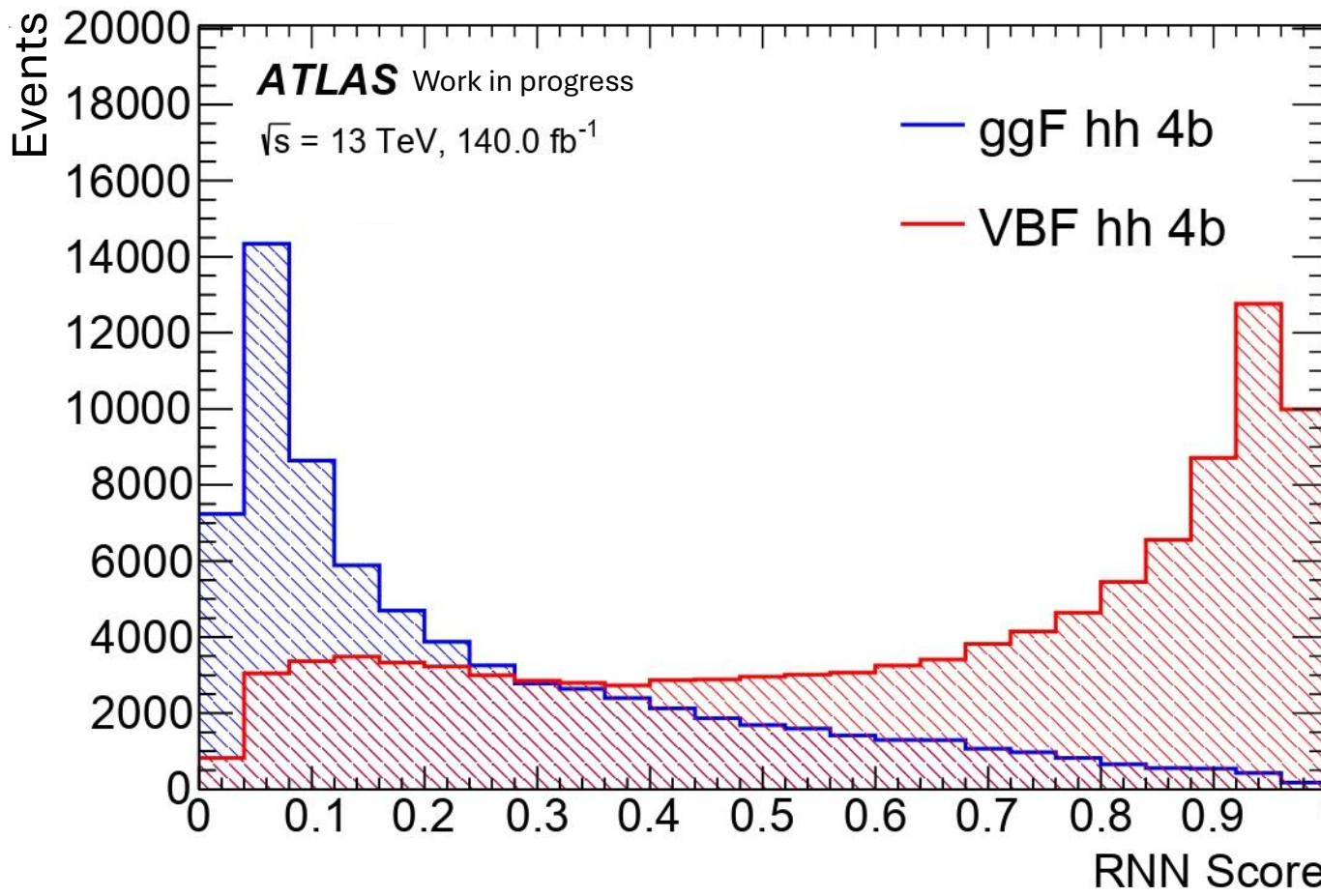


Figura 8: Distribuzione dello score della RNN per segnali ggF e VBF in hh. La rete è allenata su un canale semileptonico e testata sul canale completamente adronico.

Data la versatilità della RNN, questo approccio può essere utilizzato per qualsiasi analisi di eventi VBF/VBS. Uno dei prossimi utilizzi, in fase di test, è nello studio dei processi di produzione di **due bosoni di Higgs**. Lo studio di processi a bassa sezione d'urto può beneficiare di questo strumento rispetto all'attuale stato dell'arte [3].



Bibliografia:

- Eur. Phys. J. C (2020) 80:1165
- arXiv:2503.17461, Sottomesso ad EPJ 'Marzo 2025'
- Phys. Lett. B 858 (2024) 139007