Ricerche di particelle esotiche in stati finali multileptonici utilizzando i dati raccolti durante il Run 2 dall'Esperimento ATLAS

Gli stati **finali multileptonici** consentono di effettuare ricerche di fisica oltre il **Modello Standard** (**MS**) con sensibilità molto alte.
Il MS prevede pochi processi con stati finali ad alta molteplicità leptonica, favorendo lo studio di nuova fisica usando proprio questi stati finali.

Viene qui presentata la produzione di:
- **leptoni pesanti** previsti dal modello Type-III SeeSaw
- **bosoni di Higgs doppio carichi H++** previsti dal modello Type-II SeeSaw

Queste analisi hanno utilizzato i dati raccolti dal rivelatore **ATLAS** durante tutto il Run 2 (2015-2018) a $\sqrt{s} = 13$ TeV, per una luminosità integrata di $139\,\mathrm{fb}^{-1}$

I meccanismi SeeSaw Type-II e Type-III

I meccanismi SeeSaw introducono nuove particelle pesanti per generare una piccola massa di Majorana per i neutrini, fornendo l'accoppiamento con doppietti di leptoni e di Higgs. In questi meccanismi si introduce quindi:

- Nel **Type-II**: un tripletto scalare $\Delta = (\Delta^{++}, \Delta^{+}, \Delta^{0})$. Nel contesto del Left-Right Symmetric Model (LRSM), entro cui si può applicare il meccanismo di SeeSaw Type-II, i multipletti di Higgs contengono Higgs doppio carichi: $H^{\pm\pm}_{L,R}$
- Nel **Type-III**: un tripletto fermionico $\Sigma = (\Sigma^{+}, \Sigma^{0}, \Sigma^{-})$. Le particelle fisiche derivate sono lepton pesanti, detti $L^{\pm}$ e N_0

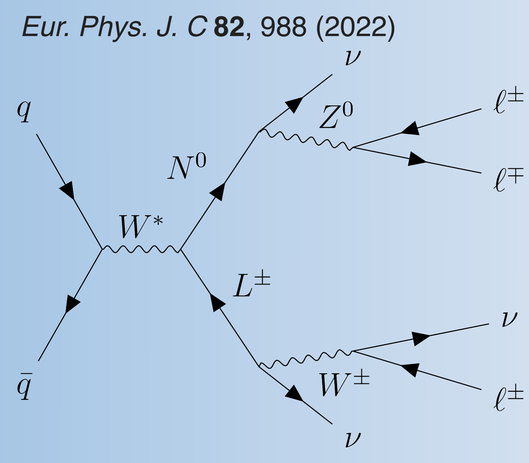
Strategia di analisi

Scopo dell'analisi: trovare **eccessi** di segnale rispetto alle predizioni del MS o, altrimenti, porre **limiti inferiori** sulla massa dei leptoni pesanti al 95% CL.
Attraverso lo studio e l'utilizzo di **variabili discriminanti** si definiscono le *regioni di analisi:*

- **Regioni di Segnale (SR)**: ricche di eventi di segnale. Da queste si estrae il segnale attraverso un 'likelihood fit', simultanea con le CR.
- **Regioni di Controllo (CR)**: dominate dal fondo. Usate per normalizzare i contributi dei fondi principali (dibosone, top e Drell-Yan).
- **Regioni di Validazione (VR)**: con prevalenza di fondo, sono utilizzate per validare la stima dei fondi ottenuta dalle CR.

Type-III SeeSaw

Eur. Phys. J. C **82**, 988 (2022)



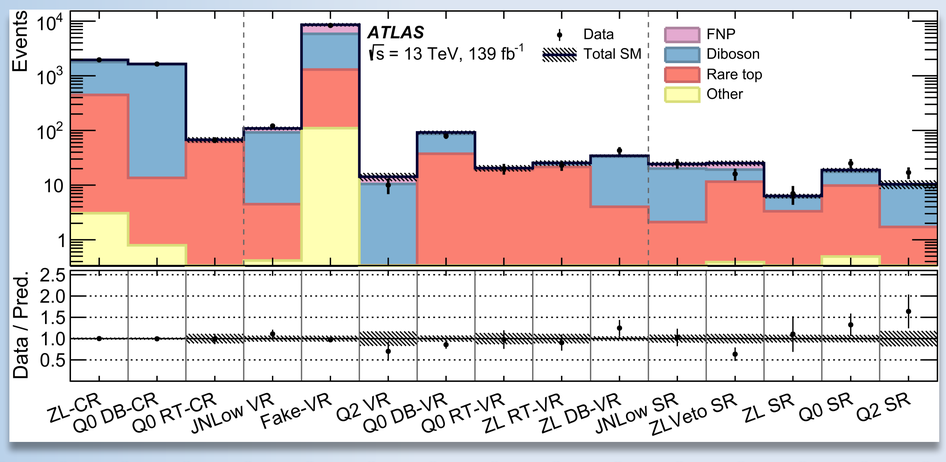
Segnale: produzione di coppia di leptoni pesanti, in stati finali con 3 o 4 leptoni. I decadimenti considerati sono:
$L^{\pm} \to H\ell^{\pm}, Z\ell^{\pm}, W^{\pm}\nu$ e
$N^0 \to Z\nu, H\nu, W^{\pm}\ell^{\mp}$

- $L^{\pm}$ e N_0 degeneri in massa
- Sistematiche principali: leptoni mal ricostruiti, inversione della carica del leptone ricostruito

SR, CR e VR per lo stato finale con 4 leptoni

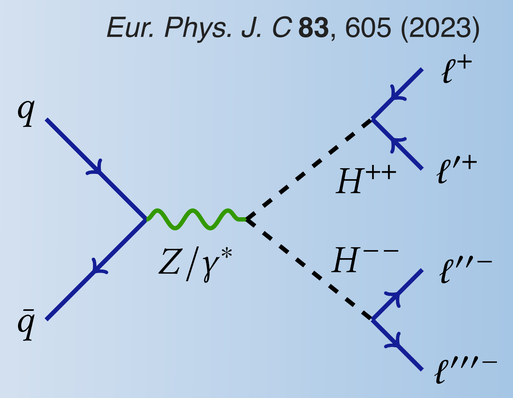
	Q0					Q2	
	DB-CR	RT-CR	DB-VR	RT-VR	SR	VR	SR
	$p_T(\ell_{1,2}) > 40$ GeV, $p_T(\ell_3) > 15$ GeV, $p_T(\ell_4) > 10$ GeV						
$\lvert\sum q_\ell\rvert$	0					2	
$N(b\text{-jet})$	0	≥ 2	1	1	0	-	-
$m_{\ell\ell\ell\ell}$ [GeV]	170–300	< 500	170–300	300–500	≥ 300	< 200 OR	≥ 300
$H_T + E_T^{miss}$ [GeV]	-	-	-	≥ 400	≥ 300	< 300	≥ 300
N_Z	-	-	-	-	≤ 1	-	-
$\mathcal{S}(E_T^{miss})$	-	-	-	≥ 5	≥ 5	-	-

Gli eventi con almeno un leptone mal ricostruito sono stati stimati utilizzando una tecnica 'data driven' detta 'fake factor'



Higgs doppio carico

Eur. Phys. J. C **83**, 605 (2023)

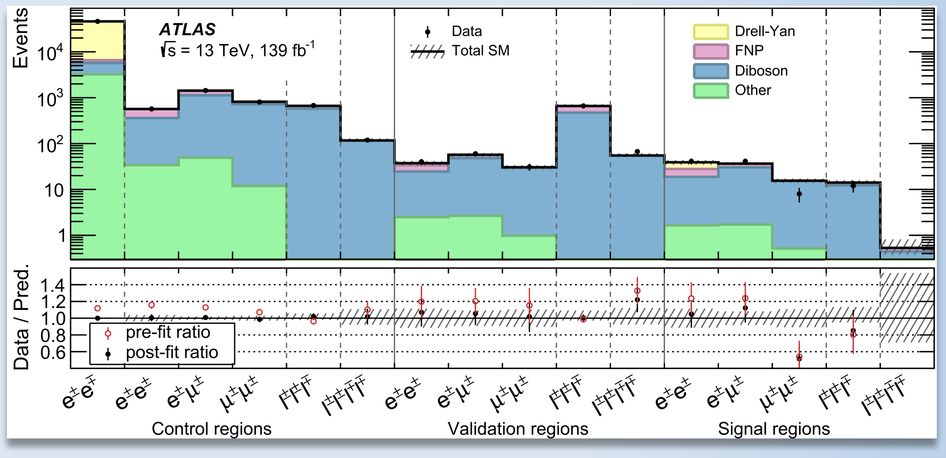


Segnale: produzione di coppia di $H^{\pm\pm}$, in stati finali con leptoni energetici in tutte le combinazioni di carica e sapore:
$H^{\pm\pm} \to \ell^{\pm}\ell^{\pm}, \ \ell = e, \mu, \tau$

- Sono permessi decadimenti con violazione di sapore leptonico
- Sistematiche principali: leptoni mal ricostruiti, inversione della carica del leptone ricostruito

SR, CR e VR per tutti gli stati finali con 2, 3 e 4 leptoni

	Control regions				Signal regions			Validation regions		
	DYCR	DBCR2L	DBCR3L	CR4L	SR2L	SR3L	SR4L	VR2L	VR3L	VR4L
Channel	e^+e^-	$e^{\pm}e^{\pm}$, $e^{\pm}\mu^{\pm}$, $\mu^{\pm}\mu^{\pm}$	$\ell^{\pm}\ell^{\pm}\ell^{\mp}$	$\ell^+\ell^+\ell^-\ell^-$	$e^{\pm}e^{\pm}$, $e^{\pm}\mu^{\pm}$, $\mu^{\pm}\mu^{\pm}$	$\ell^{\pm}\ell^{\pm}\ell^{\mp}$	$\ell^+\ell^+\ell^-\ell^-$	$e^{\pm}e^{\pm}$, $e^{\pm}\mu^{\pm}$, $\mu^{\pm}\mu^{\pm}$	$\ell^{\pm}\ell^{\pm}\ell^{\mp}$	$\ell^+\ell^+\ell^-\ell^-$
Number of leptons	2	2	3	4	2	3	4	2	3	4
$m(\ell^{\pm}, \ell'^{\mp})_{lead}$ [GeV]	≥ 300	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$m(\ell^{\pm}, \ell'^{\pm})_{lead}$ [GeV]	-	[200, 300)	≥ 300	[100, 200)	≥ 300	≥ 300	≥ 300	≥ 300	[100, 300)	[200, 300)
$p_T(\ell^{\pm}, \ell'^{\pm})_{lead}$ [GeV]	-	-	-	-	≥ 300	≥ 300	-	[200, 300)	-	-
$\Delta R(\ell^{\pm}, \ell'^{\pm})_{lead}$	-	-	-	-	< 3.5	-	-	< 3.5	-	-
$\overline{m}$ [GeV]	-	-	-	-	-	-	≥ 300	-	-	-
E_T^{miss} [GeV]	-	> 30	-	-	-	-	-	> 30	-	-
$\lvert\eta(\ell, \ell')\rvert$	-	< 3.0	-	-	-	-	-	< 3.0	-	-
Z-veto	-	-	inverted	-	-	✓	✓	-	✓	-

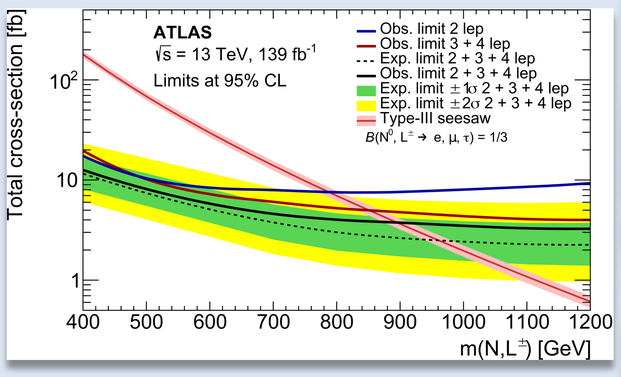


I fattori di normalizzazione dei fondi dominanti (Drell-Yan e dibosoni) sono estratti con un 'maximum likelihood' fit della distribuzione binnata di massa invariante dei leptoni 'leading', sia nelle SR che nelle CR

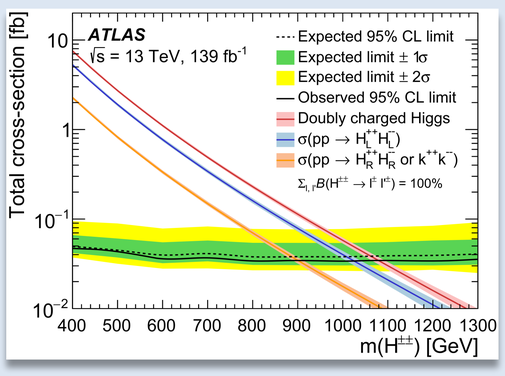
Risultati

Type-III SeeSaw

Utilizzando la procedura di fit, si è posto un limite inferiore sulla massa dei leptoni pesanti di **870 GeV** al 95% CL nei decadimenti a 3 e 4 leptoni.
Combinando i risultati con una precedente analisi ATLAS che considerava stati finali con due leptoni, si possono escludere leptoni pesanti con massa inferiore ai **910 GeV** al 95% CL (in figura).



Higgs doppio carico



Nessun evento è stato osservato nella regione di segnale con 4 leptoni, la più sensibile a possibili segnali di nuova fisica.
Il limite inferiore sulla massa di $H^{\pm\pm}$ varia **tra 520 e 1050 GeV** in base alla moltiplicità leptonica del canale considerato. Il limite inferiore ottenuto dalla combinazione dei canali è **1080 GeV** al 95% CL (in figura).

Elisa Sanzani - elisa.sanzani@cern.ch
Università e INFN Bologna

IFAE 2024 - Firenze
3 - 5 Aprile