

Sensitivity of FCC-ee to the parameter space of displaced decays of Heavy Neutral Leptons into a muon and two jets in a realistic neutrino oscillation model

Edoardo Vincenzo Spoto

Relatori: Dott.ssa Valentina Mariani
Dott. Matteo Presilla
Dott.ssa Sofia Giappichini

Università degli Studi di Perugia
Tesi di Laurea

AA 2024-2025



A.D. 1308

unipg

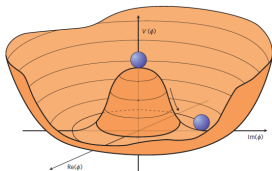
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA

Contenuti

1. Modelli a neutrini massivi
2. Modelli a neutrini massivi
3. FCC - Il Future Circular Collider
4. Discovery potential di FCC-ee

Masse delle particelle elementari nello SM

Nell'ambito dello SM le particelle acquisiscono una massa dopo la rottura spontanea della simmetria (SSB) $SU(2)_L \times U(1)_Y$



- **Fermioni:**

Masse derivate dall'accoppiamento di Yukawa richiedendo consistenza con simmetria di gauge e invarianza di Lorentz

$$\mathcal{L}_Y^\psi = - \left(\frac{v + H}{\sqrt{2}} \right) \bar{\psi}_L Y^\psi \psi_R + h.c.$$

- **Neutrini:**

- Masse non previste nello SM
- Oscillazione dei flavor osservata (KamiokaNDE & Super-KamiokaNDE)

ν_{MSM} estensione di SM con

$$\nu_R = \begin{pmatrix} \nu_{e,R} \\ \nu_{\mu,R} \\ \nu_{\tau,R} \end{pmatrix}$$

ν_R sterili $I = 0$ e $Y = 0$

Massa di Dirac: $-m_D \bar{\nu}_L \nu_R + h.c.$

Massa di Majorana: $-\frac{1}{2} M_R \bar{\nu}_R \nu_R^C + h.c.$

i - Meccanismo Seesaw di tipo I

Dirac-Majorana lagrangiana delle masse dei neutrini

$$\mathcal{L}_{mass}^{D+M} = \frac{1}{2} N_L^T C^\dagger M^{D+M} N_L + h.c.$$

$$N_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R^c \end{pmatrix} \quad \text{e} \quad M^{D+M} = \begin{pmatrix} 0 & (m^D)^T \\ m^D & M^R \end{pmatrix}$$

EW SSB Protegge $m_D \Rightarrow m_D \sim 10^2 \text{ GeV}$

Unknown SSB a scale di Nuova Fisica ($\Lambda \sim 10^{15} \text{ GeV}$ per GUT) protegge M_R ,
quindi $M_R \gg m_D$

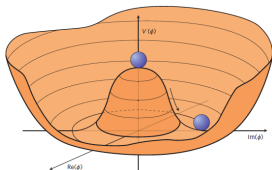
Matrice W Diagonalizza M^{D+M}

$$W^T M^{D+M} W \simeq \begin{pmatrix} M_{light} & 0 \\ 0 & M_{heavy} \end{pmatrix}$$

$$M_{light} \simeq - (m^D)^T (M^R)^{-1} m^D \quad \text{e} \quad M_{heavy} \simeq M^R$$

Masse delle particelle elementari nello SM

Nell'ambito dello SM le particelle acquisiscono una massa dopo la rottura spontanea della simmetria (SSB) $SU(2)_L \times U(1)_Y$



• Neutrini:

- Masse non previste nello SM
- Oscillazione dei flavor osservata (KamiokaNDE & Super-KamiokaNDE)

ν MSM estensione di SM con

$$\nu_R = \begin{pmatrix} \nu_{e,R} \\ \nu_{\mu,R} \\ \nu_{\tau,R} \end{pmatrix}$$

ν_R sterili $I = 0$ e $Y = 0$

Massa di Dirac: $-m_D \bar{\nu}_L \nu_R + h.c.$

Massa di Majorana: $-\frac{1}{2} M_R \bar{\nu}_R \nu_R^C + h.c.$

ii - Meccanismo Seesaw di tipo I

Il modello Seesaw (dondolo/altalena) deve il nome agli effetti che M^R e M^D hanno su M_{light} e M_{heavy}

Neutrini Particelle leggere

M_{light} sovrapposizione stati a predominanza attiva

HNL (Heavy Neutral Leptons) N particelle pesanti

M_{heavy} sovrapposizione stati a predominanza sterile

Modello Seesaw realistico descrive

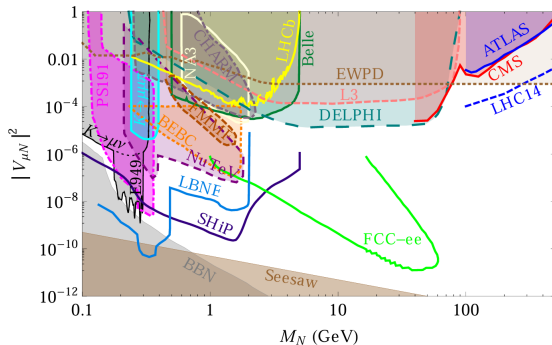
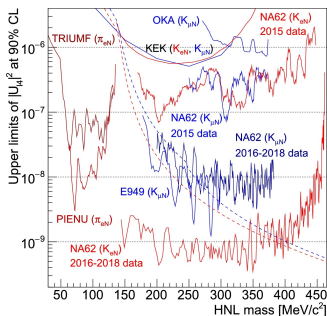
Baryon Asymmetry

- Riprodotta via leptogenesis con particelle di Majorana a masse $M_N \sim 10^{15} \text{ GeV}$
- Ipotesizzando almeno 2 particelle con $\Delta M \sim m_\nu \Rightarrow M_N \sim 1 \text{ TeV}$

Dark Matter

- HNL particelle elusive \Rightarrow Con $M_N \sim 1 \text{ keV}$ gli HNL sono dei candidati per DM

1-HNL a esperimenti attuali e futuri

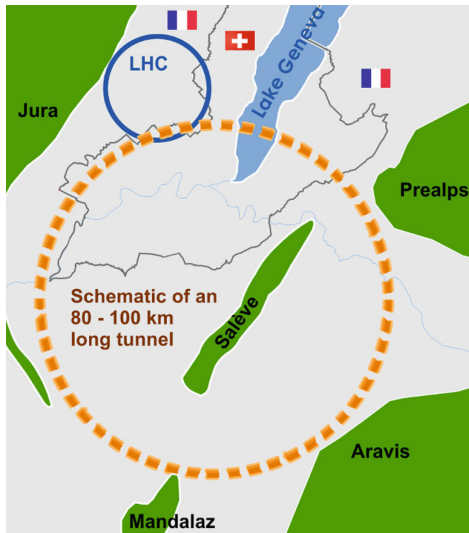


LEP & LHC Aree esplorate dagli esperimenti per modelli a 1-HNL

- Dettaglio di **NA62**

Potenziale di scoperta di **FCC-ee** e altri futuri esperimenti

FCC - II Future Circular Collider



Proposto al CERN come successore di LEP e LHC (Feasibility study report)

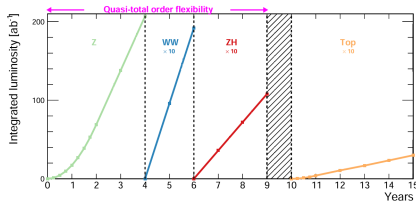
FCC-ee

- electron-positron collider
- Alta luminosità fino a $\sim 10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Misure di precisione per ricerca BSM o conferme di SM
- Attività: 2048 - 2063

Fcc-hh

- proton-proton collider
- energia di collisione fino a $\sim 100 \text{ TeV}$
- Abbattimento soglia di produzione particelle fino a $\sim 50 \text{ TeV}$
- Attività: 2070s - 2090s

FCC-ee - Energie di collisione e IDEA detector



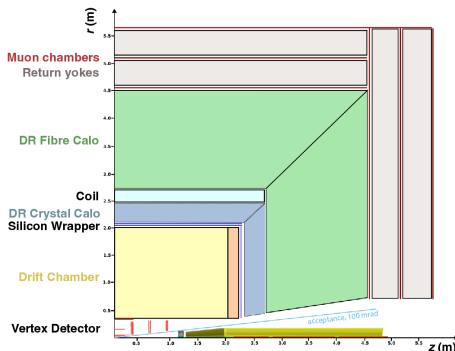
Energie di collisione

$$Z- \sqrt{s} \simeq 91.2 \text{ GeV}$$

$$WW- \sqrt{s} \simeq 160 \text{ GeV}$$

$$ZH- \sqrt{s} \simeq 240 \text{ GeV}$$

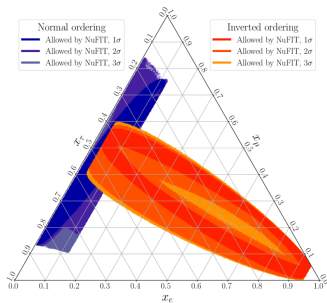
$$t\bar{t}- \sqrt{s} \simeq 365 \text{ GeV}$$



IDEA

- Vertex detector
- Drift Chamber
- DR Calorimeters
- μ -RWELL

Produzione di HNL a FCC-ee - Parametri di Mixing



- U matrice di mixing tra i flavor attivi e sterili per neutrini del Type I Seesaw mechanism
- Dalla definizione della matrice di rotazione W

$$U \simeq M_R^{-1} m_D$$

		U^2	U_e^2/U^2	U_μ^2/U^2	U_τ^2/U^2
Set 1:	Normal Hierarchy	1.04×10^{-8}	0	0.2	0.8
Set 2:	N/I Hierarchy	4×10^{-10}	0.1	0.5	0.4
Set 3:	Normal Hierarchy	6.67×10^{-10}	0	0.8	0.2
Set 4:	Inverted Hierarchy	8.35×10^{-10}	0.2	0.4	0.4
Set 5:	"	2.27×10^{-9}	0.4	0.2	0.4
Set 6:	"	3.17×10^{-11}	0.7	0.2	0.1

Produzione degli HNL alle energie di collisione di FCC-ee

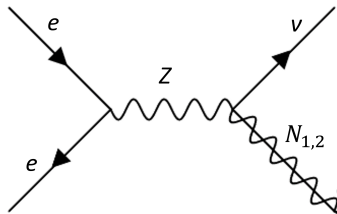
- Studio degli HNL prodotti ad ogni energia di collisione di FCC-ee

MadGraph5 Tool per generazione di eventi $e^+e^- \rightarrow \nu N_{1,2}$

M_N 10 GeV fino a $M_N \lesssim \sqrt{s}$

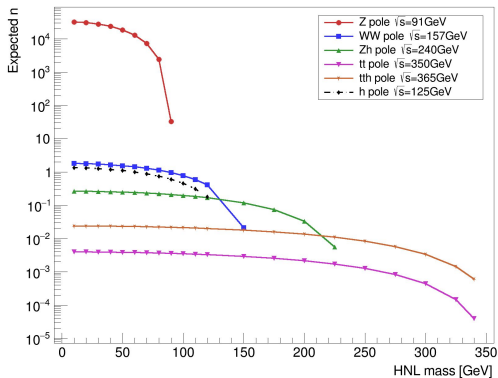
HNL prodotti $n = \sigma \mathcal{L}_{int}$

	\sqrt{s} (GeV)	\mathcal{L}_{int} (ab $^{-1}$)
Z-pole	91.18	200
H-pole	125	10
WW-thr.	157.16	19.2
ZH-thr.	240	10.8
$t\bar{t}$ -thr.	355	0.42
$t\bar{t}H$ -thr.	365	2.70



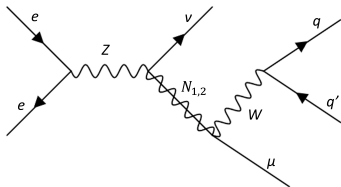
Generazione dei segnali - HNL prodotti

Expected n vs HNL mass at $U^2=1.04e-8$



- Produzione di HNL sensibilmente alta allo Z-Pole
- Bassa produzione alle altre energie di collisione
- Limite alla sensitività di FCC a $M_N \sim 80$ GeV
- Plot dei restanti set analoghi

Canale $\nu\mu q\bar{q}'$ e displaced analysis



- Z-pole $\sqrt{s} = 91.18 \text{ GeV}$
- $e^+e^- \rightarrow \nu N$, $N \rightarrow \mu q\bar{q}'$
- ricerca nello spazio dei parametri (U^2, M_N)

$$\lambda_{N_i} = \frac{\beta\gamma}{\Gamma_{N_i}} \simeq \frac{1.6}{U_i^2} \left(\frac{M_i}{\text{GeV}} \right)^{-6} \left(1 - \left(\frac{M_i}{m_z} \right)^2 \right) \text{ cm}$$

Prompt Analysis Vertice di decadimento di N non risolto dal tracking system

- $\lambda_{N_i} \lesssim 1 \mu\text{m}$
- SM Background atteso

Displaced Analysis Vertice di decadimento di N risolto dal tracking system

- $\lambda_{N_i} \gtrsim 1 \mu\text{m}$
- SM Background soppresso

Catena di simulazione e selection cuts

Madgraph

- Segnale hard-level
- LHE file come output



Pythia

- Adronizzazione



Delphes

- Fast simulation
- Detector IDEA

Background:

- $Z \rightarrow \nu \mu q \bar{q}'$
- $Z \rightarrow l \bar{l}, q \bar{q}$

Tagli

Un $p_{\mu,t} > 10 \text{ GeV}$

2 jet ricostruiti

$\cos(j, j) > -0.8$

$|\cos(j, \mu)| < 0.8$

$\cos(\mu, p_{miss}) < 0.8$

$M(\Sigma p_{reco} + p_{miss}) > 80 \text{ GeV}$

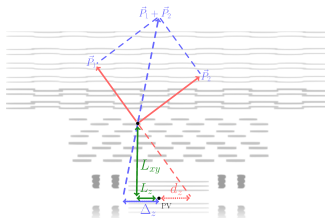
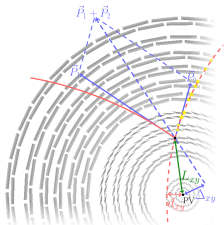
$E_{miss} > 15 \text{ GeV}$

$p_{t,miss} > 10 \text{ GeV}$

$M_j < 30 \text{ GeV}$

$E_j < 45 \text{ GeV}$

Regione displaced e parametro d'impatto d_0

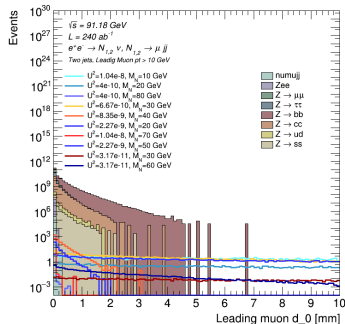


Parametro d'impatto

Grandezza chiave per distinguere regioni prompt/displaced

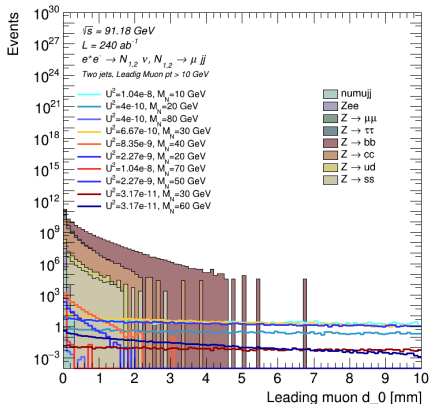
- Punto di una traccia a minima distanza dal PV
- Parametro usato per l'analisi displaced di LLPs

FCCAnalyses: FCC-ee Simulation (Delphes)



Scelta della soglia \tilde{d}_0

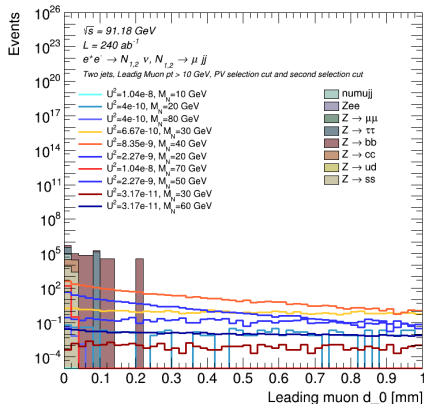
FCCAnalyses: FCC-ee Simulation (Delphes)



Background bassa statistica

- $n_{\text{entries}} \lesssim 10$
- $w \in [10^3, 10^5]$

FCCAnalyses: FCC-ee Simulation (Delphes)

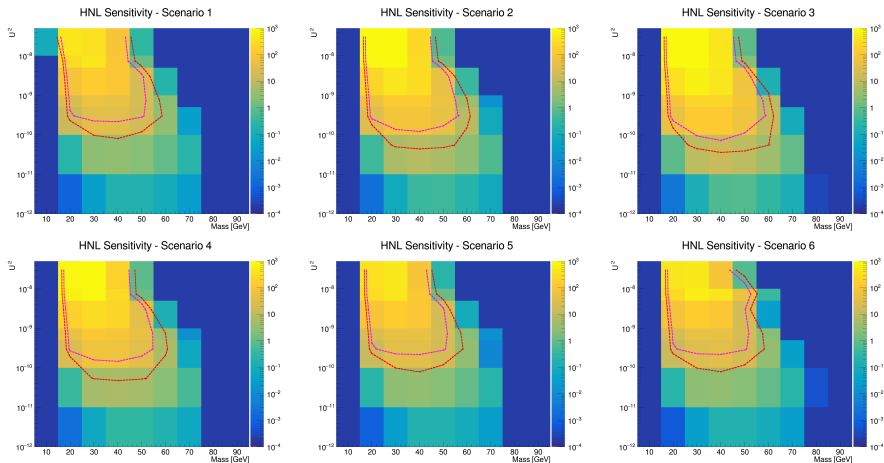


Soglia $\tilde{d}_0 = 0.3 \text{ mm}$

Significance

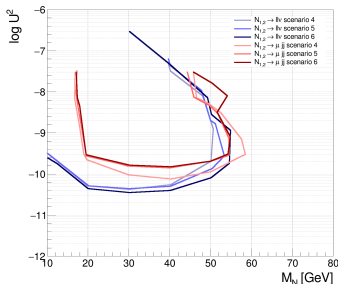
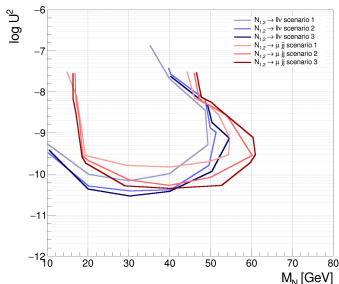
Significance per i sei scenari a $\mathcal{L}_{int} = 240 \text{ ab}^{-1}$

- Linea rossa $N = 3$ (95%CL)
- Linea Magenta $N = 15$ (5σ)



Confronto con 2-HNL e stato finale $\mu'\nu\nu$

"Searching for type I seesaw mechanism in a two Heavy Neutral Leptons scenario at FCC-ee", S. Ajmal, P. Azzi, S. Giappichini, X. Zuo, M. Klute, O. Panella, M. Presilla



$$\mathcal{L}_{int} = 125 \text{ ab}^{-1}$$

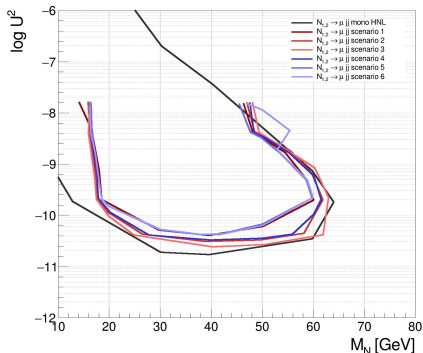
$$N = 4$$

- Bassa sensitività a $M_N \lesssim 20 \text{ GeV}$
- Alcuni scenari sono rivelabili fino a $M_N \gtrsim 60 \text{ GeV}$ per $-11 \lesssim \log U^2 \lesssim 8$

Confronto con 1-HNL e stato finale $jj\mu\nu$

"Searches for Heavy Neutral Leptons at FCC-ee in final states including a muon",

L Bellagamba, G Polesello, N. Valle



- Bassa sensibilità a $M_N \lesssim 20 \text{ GeV}$
- Generalmente il mixing tra più flavor porta a una sensibilità minore o circa uguale al caso 1-HNL

$$\mathcal{L}_{int} = 240 \text{ ab}^{-1}$$

$$N = 3$$

Conclusioni

Confronto 1-HNL $\nu\mu jj$

- Risultati sovrapponibili ad alte masse (~ 60 GeV)
- Mixing può ridurre l'area di scoperta potenziale

Confronto 2-HNL $\nu\nu ll'$

- dipendenza della soglia di significance dai diversi scenari di mixing più che dallo stato finale di decadimento degli HNL

Miglioramenti

- Conoscenza più approfondita degli algoritmi di ricostruzione dei jet per raggiungere sensitività a $M_N < 20$ GeV
- Tagli più accurati e ottimizzati per la displaced analysis

Next steps

- Prompt analysis di 2-HNL a stato finale $\nu\mu jj$
- Analisi congiunta di stati finali $\nu\mu jj$ e $\nu\nu ll'$

