

Riunione ENP,  
ROMA 15 Febbraio 2024.



---

# ENP (Exploring New Physics)

## Nodo di Perugia

Modelli Compositi e Teorie di Campo Efficaci ai  
collider presenti e futuri

Complementarità di esperimenti a basse energie

# Il gruppo di Perugia

Orlando Panella	(Ric. INFN: 100% CSN IV)
She-Sheng Xue	(Ric. Icranet Pescara: 100% CSN IV)
Matteo Presilla	(Assegn. INFN: 20% CSN IV, 80% CSN I - fino al 30/04/2022, ora post-doc presso KIT (Karlsruhe) con possibilità di associazione INFN nel 2024)
Sehar Ajmal	(Dottoranda XXXVI ciclo: 30% CSN IV, 70% CSN I) —> Assegno Ricerca CMS
Costanza Carrivale	(Dottoranda XXXVIII ciclo: 30% CSN IV, 70% CSN I)
Luca Pacioselli	(Borsista INFN) 100% CSN IV. Fino a Febbraio 2024 —> Assegno Ricerca ? PhD ?
Sofia Giappichini	(Tesisista magistrale) 100% CSN IV —> nel 2024 PhD @ KIT, Karlsruhe

## Collaborazioni del gruppo:

- “Storica” connessione con il **gruppo CMS** della ns. sezione, allargato più recentemente alla sezione di Padova
- F. Vissani (INFN LNGS), S.Dell’Oro (INFN MiBi) (Onubb), S.Biondini (Basel University), Onubb, modelli compositi
- Francesco Romeo, A. Gurrola, CMS Vanderblidt, USA, H.Sun (Dailan University)
- M. E. Gomez (Huelva Univeristy, Spain), M. Rehmann (Comsat University, Pakistan) osservabili elettrodeboli di precisione
- R. Franceschini (Uni. Roma 3), P. Azzi (INFN Pd) - attività di fenomenologia ad FCC-ee

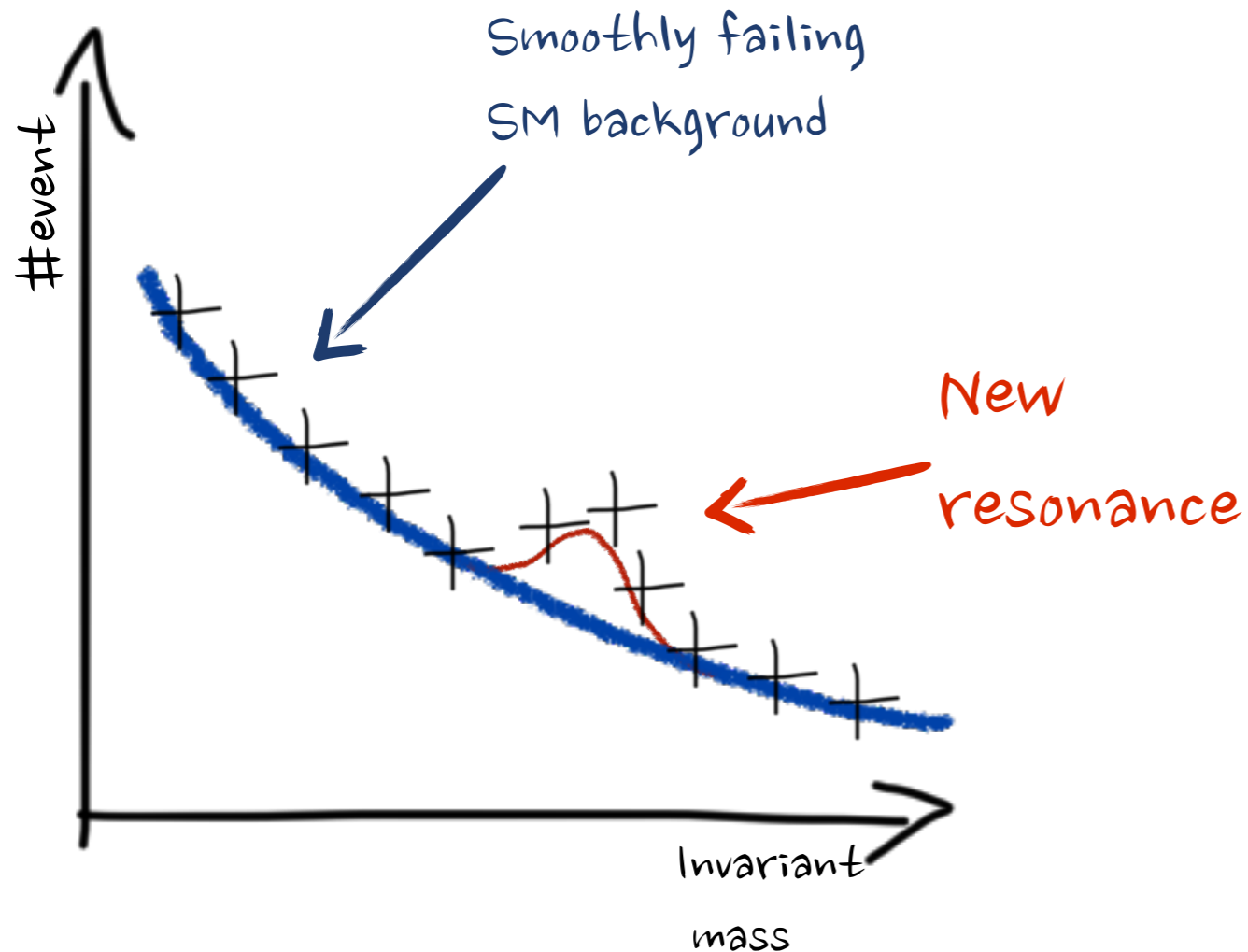
---

# Panoramica delle tematiche trattate

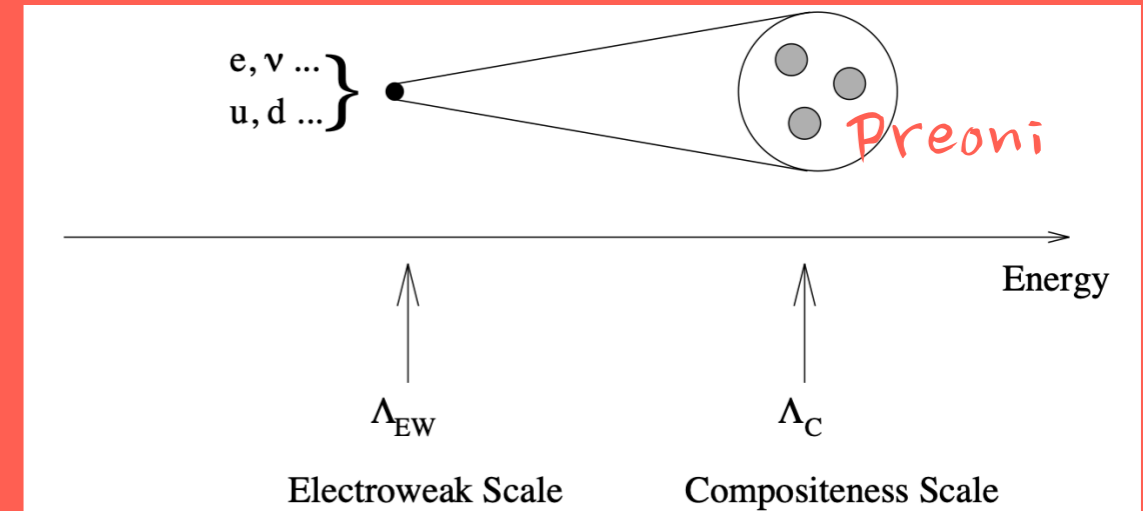
- **Definizione e sviluppo di modelli** che prevedano l'esistenza di fermioni compositi, studio della loro dinamica nell'ambito del Modello Standard e dei possibili segnali da osservare nei futuri esperimenti di LHC e HL-LHC.
- **Fenomenologia** ai collider del futuro, es. FCC-ee.
- **Supporto teorico alle analisi sperimentali** del gruppo CMS Perugia con interpretazioni/ricerche di nuova fisica.
- **Complementarità con esperimenti di bassa energia** ( $0\nu\beta\beta$ ).
- Approccio alle ricerche di nuova fisica in diverse realizzazioni
  - Teorie UV (**modelli compositi** a preoni, modelli compositi à-la Nambu Jona-Lasinio)
  - Teorie efficaci del modello standard (**SMEFT**)



# Ricerche dirette di nuova fisica in modelli compositi



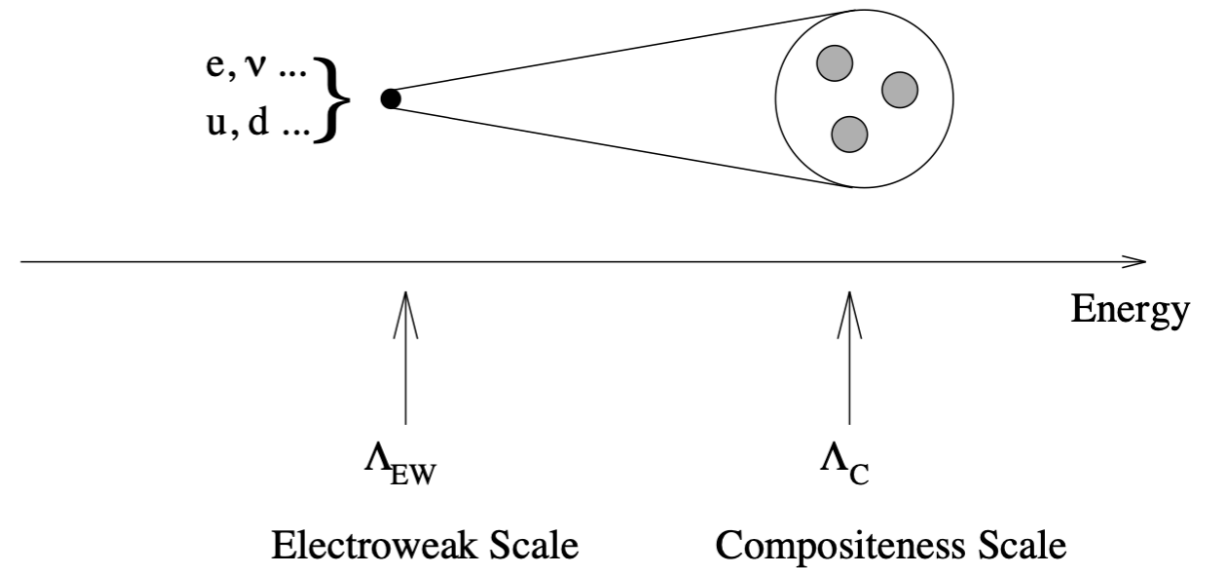
## MODELLI PREONICI



H. Terezawa (PRD 22, 1980); E. Eichten, K. D. Lane, M. E. Peskin (PRL 50, 1983); H. Harari (Phys. Rep., 1984); Cabibbo, Maiani, Srivastava (PLB, 1984)

- Stati finali con alta massa invariante/momento trasverso
- Accoppiamenti di tipo efficace con le particelle SM, con distinzioni in base al modello

# Composite Preonic Models



- ◆ The idea is that at some **high energy scale  $\Lambda$**  a further level of **compositeness** of the so called “elementary” particles **will show up**. It goes back quite some time.
- ◆ P.A.M Dirac, Sci. Am. 208,45 (1963); Terazawa et al., PRD 15, 480 (1977); Eichten, Lane, Peskin, PRL 50, 811 (1983); Cabibbo, Maiani, Srivastava, PLB 139, 459 (1984);
- ◆ Quite natural expectations in such framework are:
  - ◆ **excited states ( $e^*, q^*$  etc..)** of mass  **$m^*$** ;
  - ◆ **contact interactions** which are the residual forces stemming from the new and unknown dynamic of the ‘**preonic**’ constituents

- ◆ Over the years phenomenology and experimental searches concentrated to the isospin  $I_W = 0, \frac{1}{2}$  multiplets.
- ◆ Higher weak isospin multiplets ( $I_W = 1, \frac{3}{2}$ ) contain exotic states (doubly charged leptons, and quarks of charge  $Q = 5/3 e$ ) [Pancheri-Srivastava, *Phys.Lett.* 146B (1984) 87-94];
- ◆ Somehow the phenomenology of these exotic states remained mostly unexplored; All phenomenology concentrated with the doublet/scalar case.
- ◆ We have been filling the gap!

# Lepton sector

$I_W$	Multiplet	Q	Y	Coupled to
0	$E^-$	-1	-2	$e_R$ through $B_\mu$
$\frac{1}{2}$	$\begin{pmatrix} E^0 \\ E^- \end{pmatrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -1 \end{matrix}$	-1	$\ell_L = \begin{pmatrix} \nu_\ell \\ \ell^- \end{pmatrix}$ through $W^\mu$ and $B^\mu$
1	$\begin{pmatrix} E^0 \\ E^- \\ E^{--} \end{pmatrix}$	$\begin{matrix} 0 \\ -1 \\ -2 \end{matrix}$	-2	$e_R$ through $\mathbf{W}_\mu$
$\frac{3}{2}$	$\begin{pmatrix} E^+ \\ E^0 \\ E^- \\ E^{--} \end{pmatrix}$	$\begin{matrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ -2 \end{matrix}$	-1	$\ell_L = \begin{pmatrix} \nu_\ell \\ \ell^- \end{pmatrix}$ through $W^\mu$

# Quark sector

$I_W$	Multiplet	Q	Y	Coupled to
0	(i) $U$ (ii) $D$	$2/3$ $-1/3$	$4/3$ $-2/3$	$u_R$ through $B^\mu$ and $G^{\mu,a}$
$\frac{1}{2}$	$\begin{pmatrix} U \\ D \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$	$1/3$	$q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$ through $W^\mu$ $B^\mu$ and $G^{\mu,a}$
1	(i) $\begin{pmatrix} U^+ \\ U \\ D \end{pmatrix}$ (ii) $\begin{pmatrix} U \\ D \\ D^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 5/3 \\ 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \\ -4/3 \end{pmatrix}$	$4/3$ $-2/3$	$u_R$ through $W^\mu$ $d_R$ through $W^\mu$
$\frac{3}{2}$	$\begin{pmatrix} U^+ \\ U \\ D \\ D^- \end{pmatrix}$	$5/3$ $2/3$ $-1/3$ $-4/3$	$1/3$	$q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$ through $W^\mu$



# Magnetic type gauge Interactions

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{(I_W=3/2)} = \frac{gf_{3/2}}{\Lambda} \sum_{M,m,m'} C\left(\frac{3}{2}, M | 1, m; \frac{1}{2}, m'\right) \times$$

$$\left(\bar{\Psi}_M \sigma_{\mu\nu} q_{Lm'}\right) \partial^\nu (W^m)^\mu + h.c.$$

(dim=5 operators)

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{(I_W=1)} = \frac{gf_1}{\Lambda} \sum_{m=0,\pm 1} \left[ \left(\bar{U}_m \sigma_{\mu\nu} u_R\right) + \right.$$

$$\left. \left(\bar{D}_m \sigma_{\mu\nu} d_R\right) \right] \partial^\nu (W^m)^\mu + h.c.$$

⇒ Exotic states couple only to  $SU(2)$  gauge field ( $W^m$ )

⇒ Implementation in CalcHEP generator

⇒ Parameter Space:  $[\Lambda, m^*]$

# Contact interactions

$$\mathcal{L}_{\text{CI}} = \left( \frac{g_*^2}{2\Lambda^2} \right) j^\mu j_\mu,$$

$$j_\mu = (\eta \bar{f}_L \gamma_\mu f_L + \eta' \bar{f}_L \gamma_\mu f_L^* + \eta'' \bar{f}_L^* \gamma_\mu f_L^* + \text{H.c.}) \\ + (L \rightarrow R),$$

(dim=6 operators)

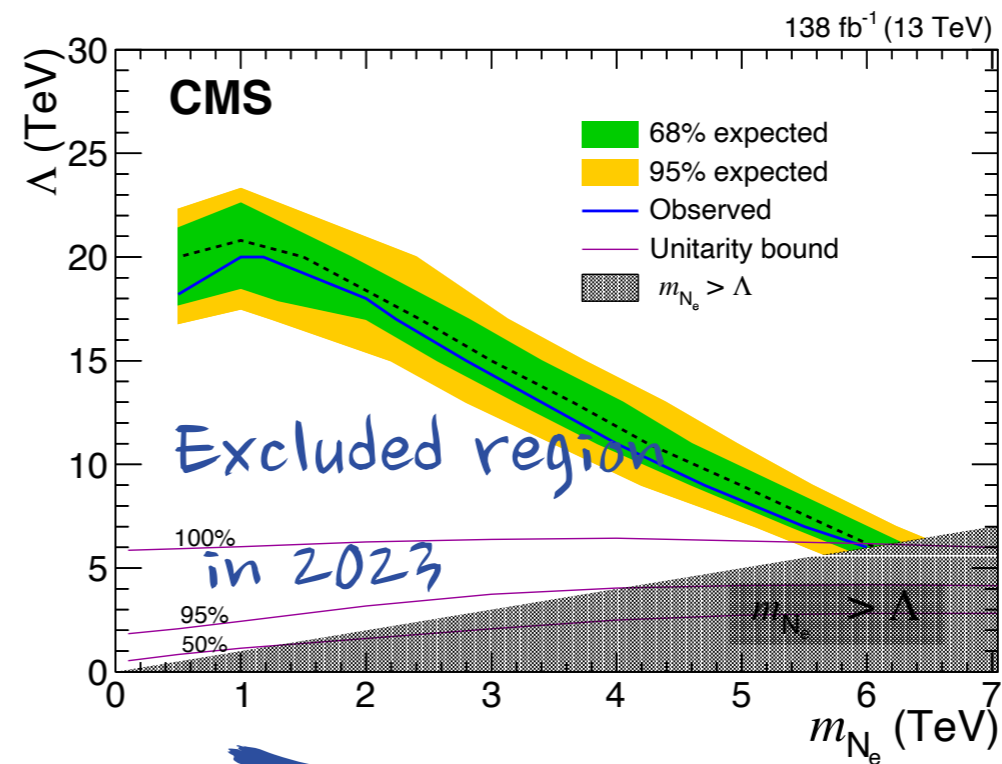
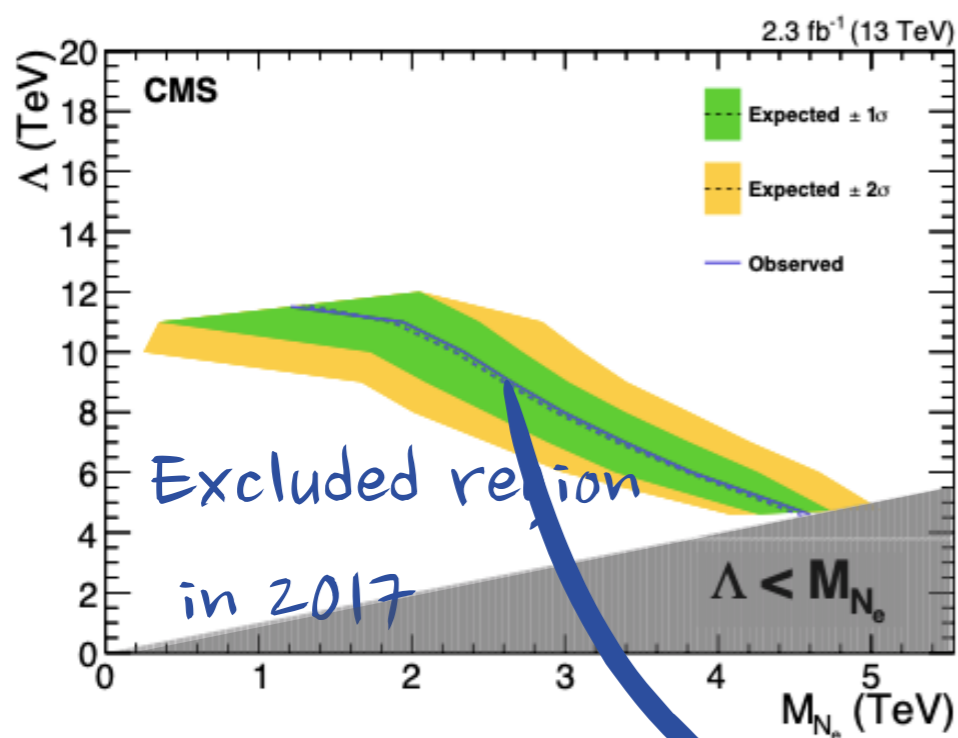
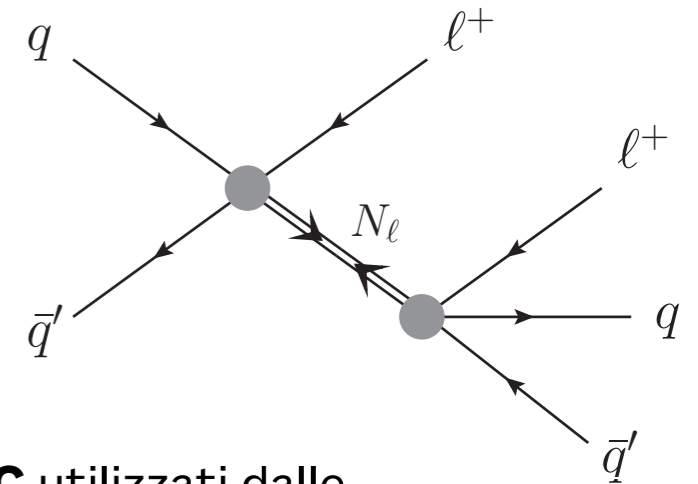
- ◆ Standard normalisation is:  $g_*^2 = 4\pi$
- ◆ Fermion interactions are obtained as an effective field theory after the high energy modes ( $\approx \Lambda$ ) have been integrated out
- ◆ Implementation in the CalcHEP generator

⇒ Parameter Space:  $[\Lambda, m^*]$

# Modelli compositi a preoni: ricerche sperimentali ad LHC

Modello teorico sviluppato all'interno del gruppo:  
neutrini di Majorana composti (arXiv.1706.08578, PLB 775 (2017) )

Ruolo del gruppo teorico: **“Model building”**, implementazione nei **generatori MC** utilizzati dalle collaborazioni sperimentali, **studi di sensitività**



Phys.Lett.B 843  
(2023). CMS  
collaboration, w. M.  
Presilla/S. Biondini

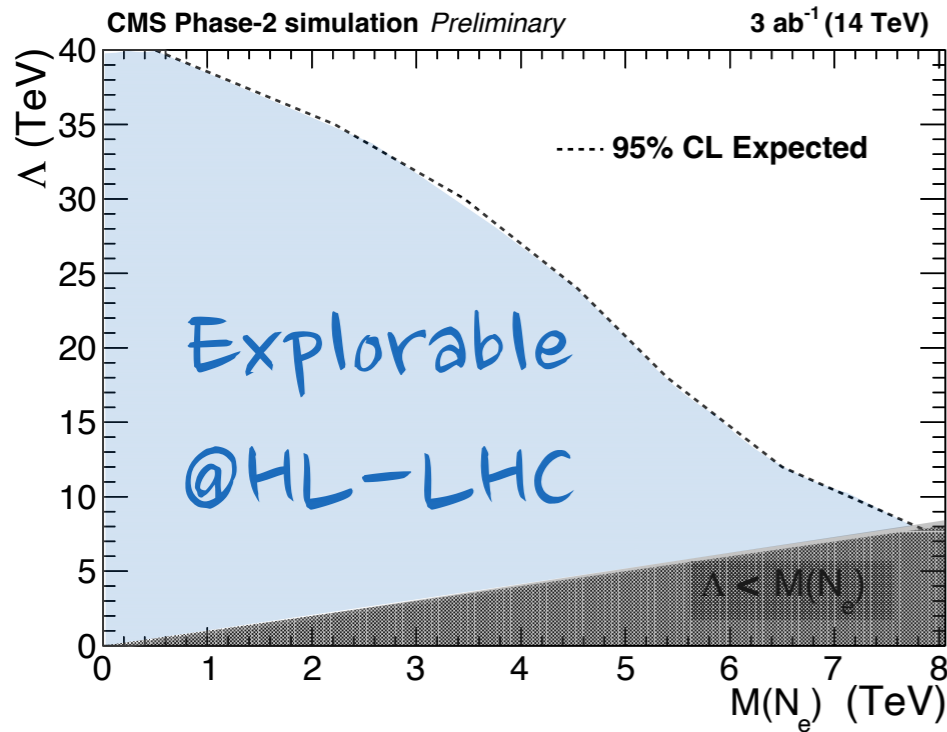
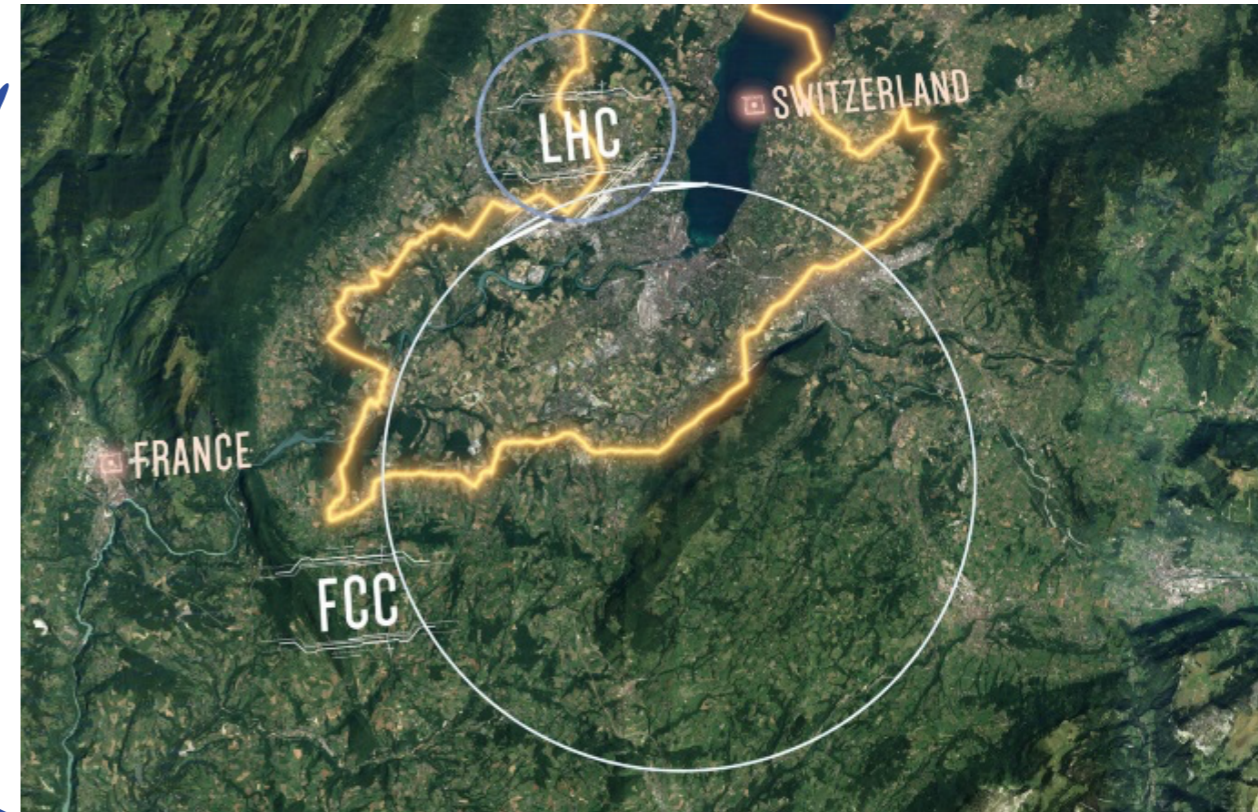
Validità delle  
interazioni efficaci  
del modello ad  
LHC\*

**Estensione a tutti i dati del RUN 2 di LHC**

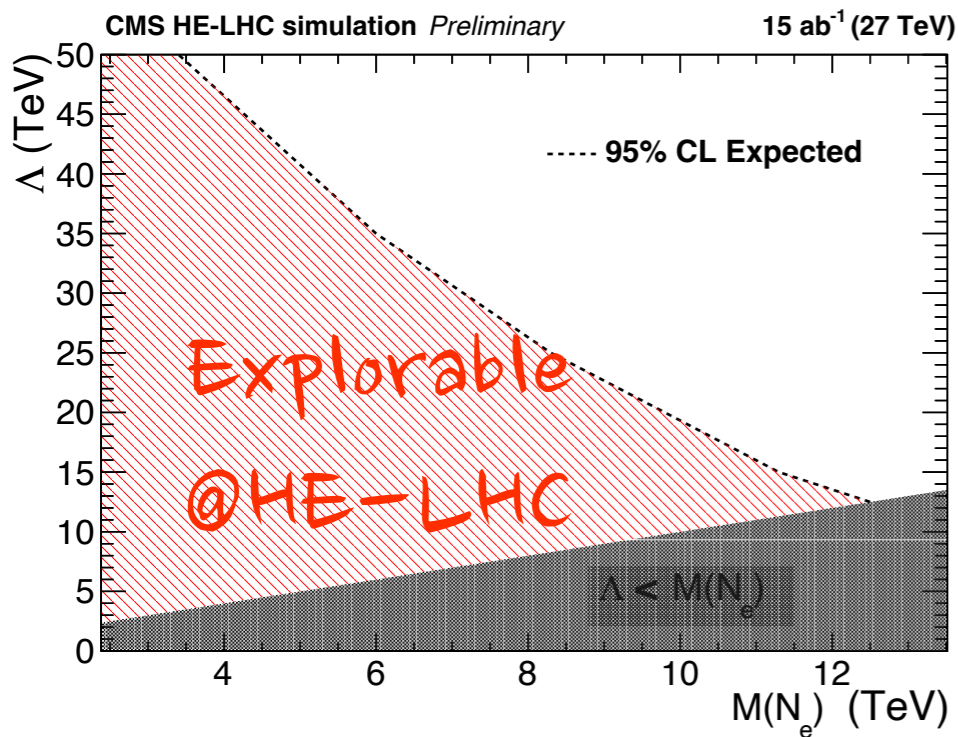
\* **“Perturbative unitarity bounds for effective composite models”, Biondini, Leonardi, Panella, Presilla (ArXiv.1903.12285, PLB)**

# Storico coinvolgimento del gruppo in studi di sensitività ai collider del futuro

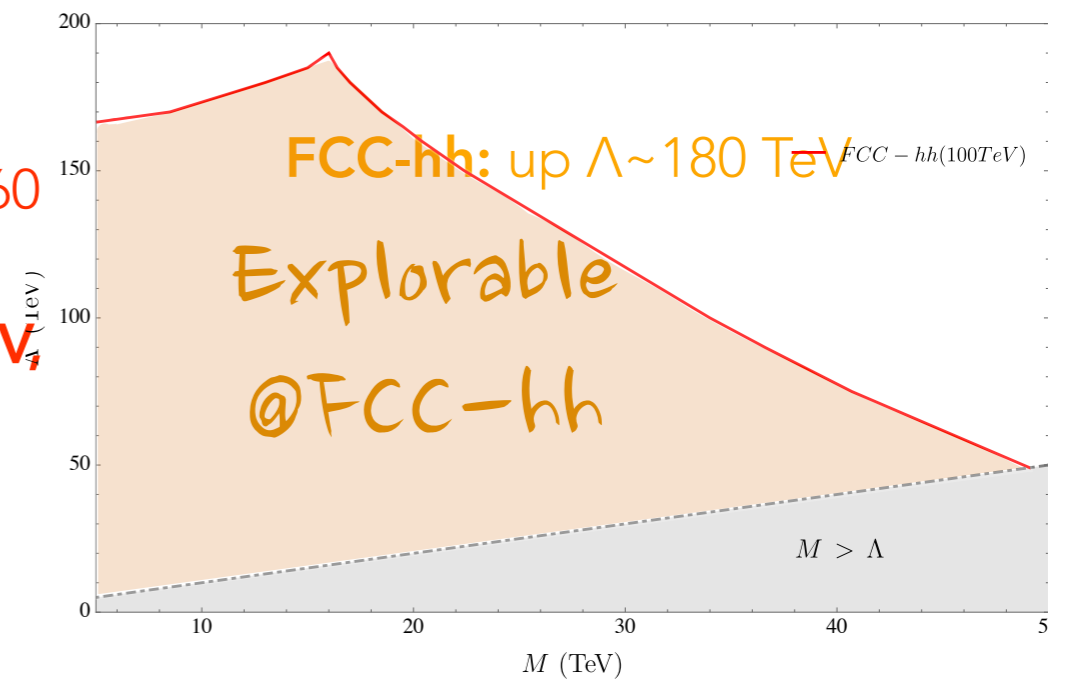
(CMS Padova, Perugia, Brown University)



**HL-LHC:** with 20 times statistics doubling  $\Delta$  reach



**HE-LHC:** twice energetic and 60 times more statistics  $\Rightarrow M(N)$  up to 12 TeV,  $\Delta$  up to 55 TeV



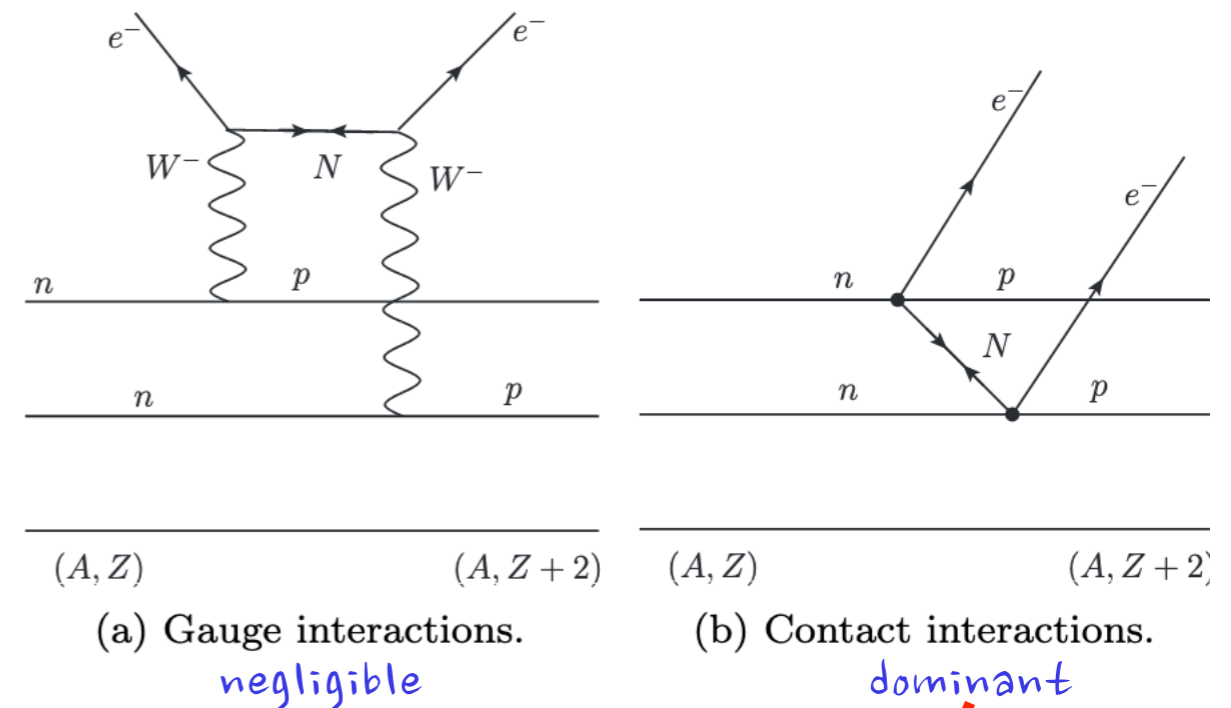
Parte del lavoro pubblicato in: CERN Yellow Rep.Monogr. 7 (2019).

# $(0\nu\beta\beta)$ and composite neutrinos

S. Biondini, S. Dell’Oro, R. Leonardi, S. Marcocci, O. Panella, M. Presilla, F. Vissani [arXiv:2111.01053](https://arxiv.org/abs/2111.01053)

Ricerche indirette di fisica nuova

- Lepton Number violating decay typically associated to massive Majorana neutrinos
- $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se} + 2e^-$  (PRL2020 KamLAND-Zen Collab.)  
 $T_{1/2}(90\% \text{ C. L.}) > 1.8 \times 10^{26} \text{ yr}$
- $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba} + 2e^-$  (PRL 2020 Gerda Collab.)  $T_{1/2}(90\% \text{ C. L.}) > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr}$
- Non observation of  $0\nu\beta\beta$  is converted in constraints on the BSM model



(O. Panella et al, PRD 1997)

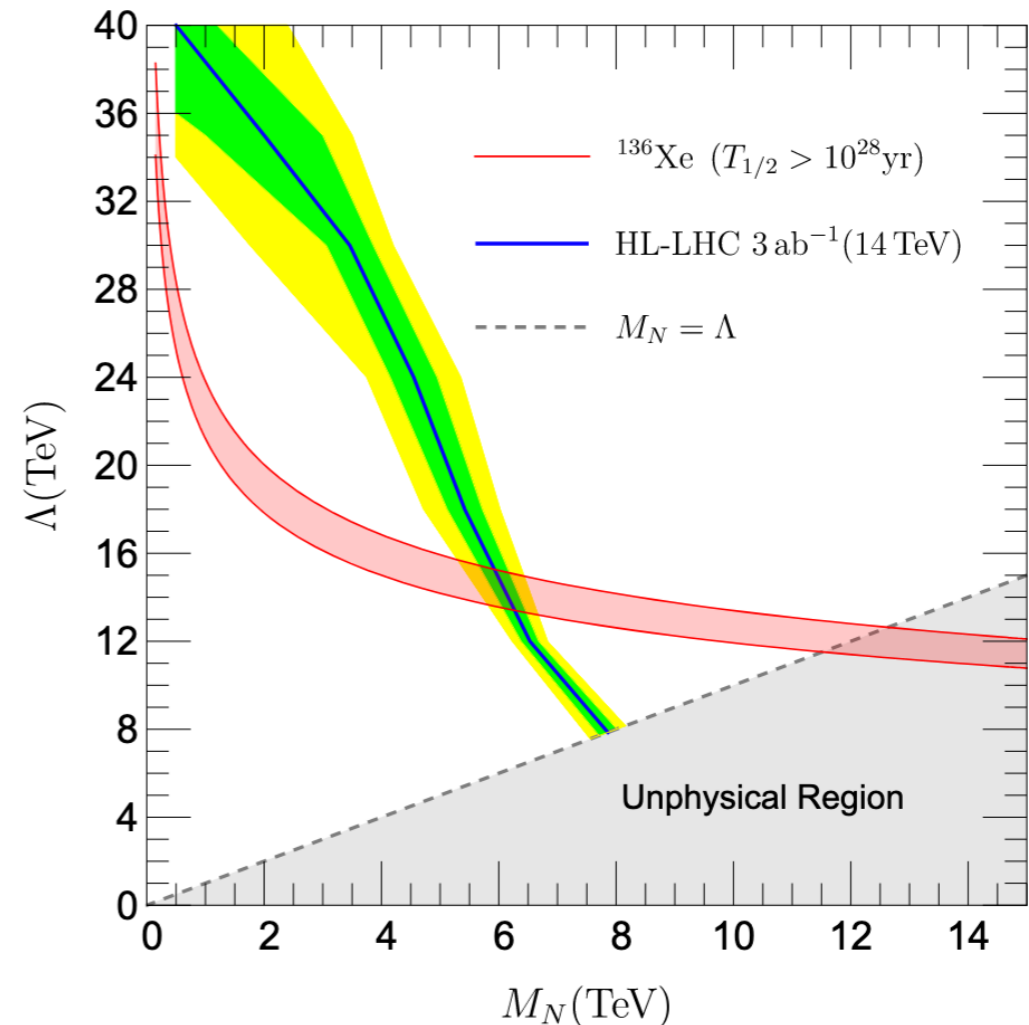
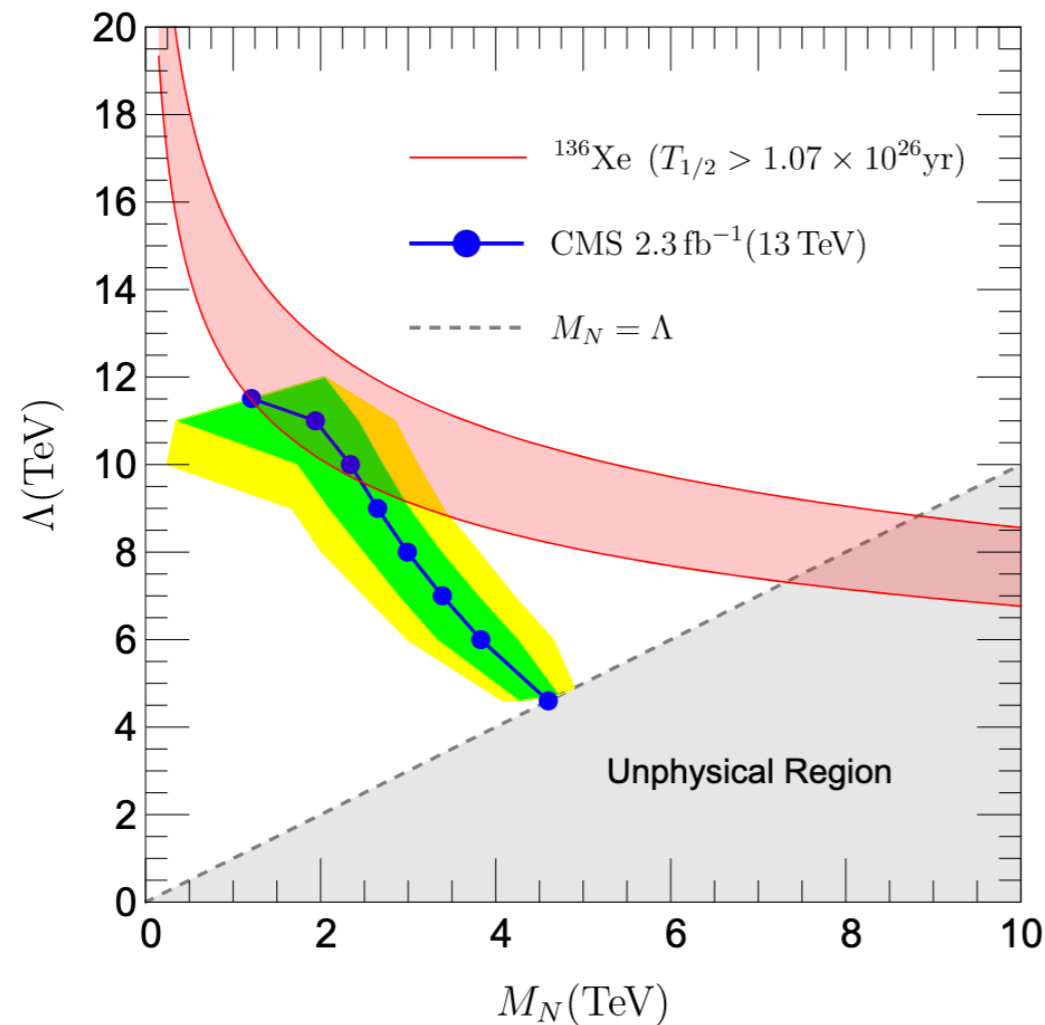
Nuclear Physics ↘ Phase Space

$$[T_{1/2}]^{-1} = \left( \frac{g_*^2}{\Lambda^2} \right)^4 \frac{\eta_L^4 g_A^4 m_p^2}{64 M_N^2} |\mathcal{M}^{0N}|^2 \frac{G_{01}}{(G_F \cos \theta_c)^4}$$

Constraints on model parameters

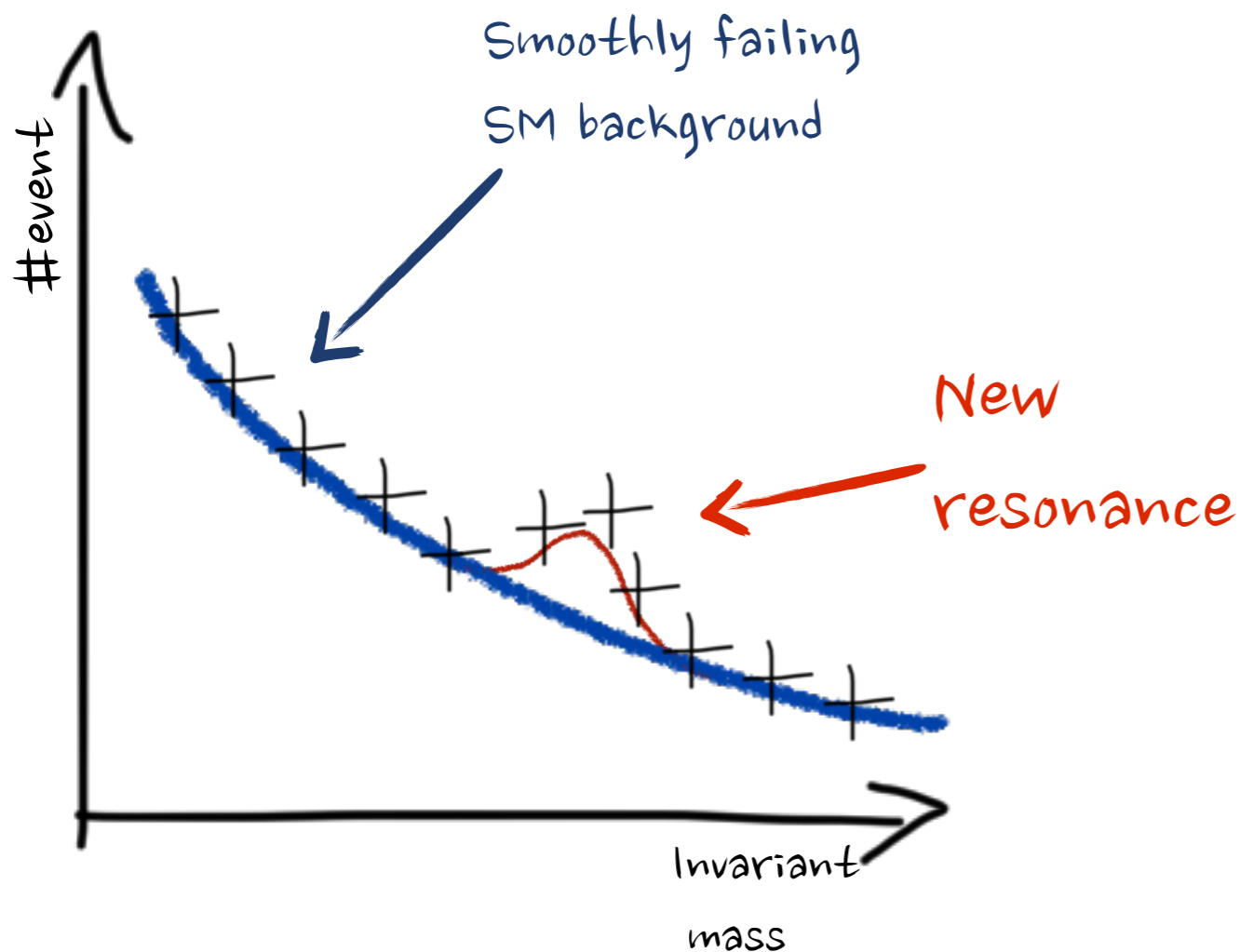
$$\Lambda \geq \frac{g_*}{2^{3/4}} \sqrt{\frac{\eta_L g_A}{G_F \cos \theta_c}} \left( \frac{m_p}{M_N} \right)^{1/4} \left( G_{01} |\mathcal{M}^{0N}|^2 T_{1/2}^{\text{exp.}} \right)^{1/8}$$

# Complementarity of low-energy and high-energy probes

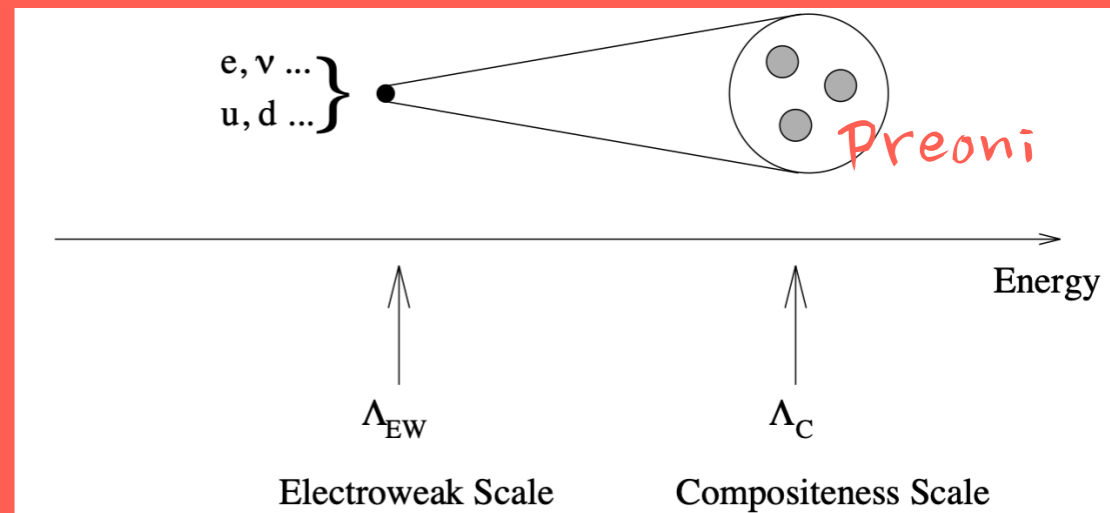


- $0\nu\beta\beta$  highly competitive with LHC (run II) and HL-LHC (large mass region)
- New results from CMS analysis of full run II data set available soon

# Ricerche dirette di nuova fisica in modelli compositi



## MODELLI PREONICI



H. Terezawa (PRD 22, 1980); E. Eichten, K. D. Lane, M. E. Peskin (PRL 50, 1983); H. Harari (Phys. Rep., 1984); Cabibbo, Maiani, Srivastava (PLB, 1984)

## MODELLI À LA NAMBU JONA LASINIO

$$\mathcal{L} \supset -G \sum_f (\bar{\psi}_L^f \psi_R^f \bar{\psi}_R^f \psi_L^f + \bar{\nu}_R^{fC} \psi_R^f \bar{\psi}_R^f \nu_R^{fC}) \quad G \sim \mathcal{O}(\Lambda_{cut}^{-2})$$

EFT di una teoria di gravità quantistica, scala energetica tipica  $\Lambda_{cut} \sim 10^{19} \text{GeV}$ .

Y. Nambu e G. Jona-Lasinio (Phys. Rev. 122 (1961).)

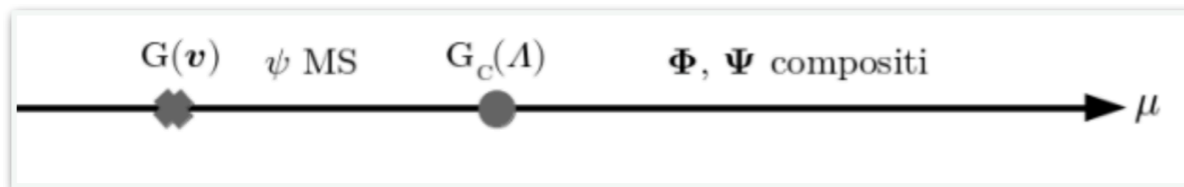
S.S.Xue PLB 737 (2014) 172-177

- Stati finali con alta massa invariante/momento trasverso
- Accoppiamenti di tipo efficace con le particelle SM, con distinzioni in base al modello

# Modello composito à la Nambu—Jona-Lasinio

Operatori a 4 fermioni à la NJL

$$\mathcal{L} \supset -G \sum_{ff'} (\bar{\psi}_L^f \psi_R^{f'} \bar{\psi}_R^{f'} \psi_L^f + \bar{\nu}_R^{cf} \psi_R^{f'} \bar{\psi}_R^{f'} \nu_R^{cf}) + h.c.$$



Costante dell'interazione quartica dell'Higgs diventa negativa a partire da  $\Lambda \sim 5.1$  TeV. Completamento UV: stati compositi. (S.-S. Xue [Physics Letters B737\(2014\)](#))

- **UV Gauge-symmetric phase** ( $\mu > \Lambda$ ): EFT di bosoni e fermioni compositi (masse  $M \gtrsim \Lambda$ ) formati dai fermioni del MS. Presenza di **Leptoquark** da interazioni del tipo  $G [(\bar{\ell}_L^i e_R)(\bar{d}_R^a \psi_{Lia}) + (\bar{\ell}_L^i \nu_R^e)(\bar{u}_R^a \psi_{Lia})] + (\dots) \longrightarrow$  studio segnali ad LHC
- **IR Symmetry-breaking phase** ( $\mu < \Lambda$ ): integrando gli stati compositi si entra nella dinamica del MS, con l'aggiunta di interazioni di contatto a 4 fermioni  $G \propto \mathcal{O}(\Lambda^{-2})$  e 3 **neutrini di Majorana right**  $\longrightarrow$  contributo allo  $0\nu\beta\beta$

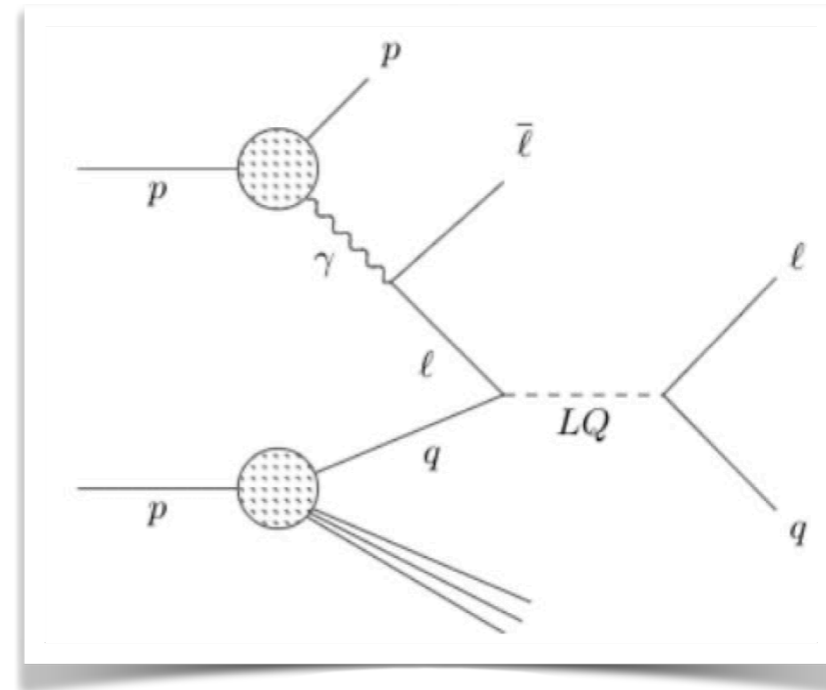


# Nuovi meccanismi di produzione dei LeptoQuarks

Nuove possibilità di produrre leptoquarks ai collider

Mediante **collisioni leptoni-protoni**.

**Miglioramento della sensibilità ad alte Masse/accoppiamenti**, in regioni inesplorate e compatibili con le anomalie in **fisica dei mesoni B**.



- Definizione e implementazione in **FeynRules** di un nuovo modello da scenari compositi NJL, studio di sensibilità
- Argomento parte del **progetto di dottorato di S. Ajmal**.  
In collaborazione con CMS Vanderbilt (Francesco Romeo, Alfredo Gurrola)

**NJL Composite model implementation in Feynrules homepage:**

<https://feynrules.irmp.ucl.ac.be/wiki/EffectiveModels>

# Nuovi meccanismi di produzione dei LeptoQuarks

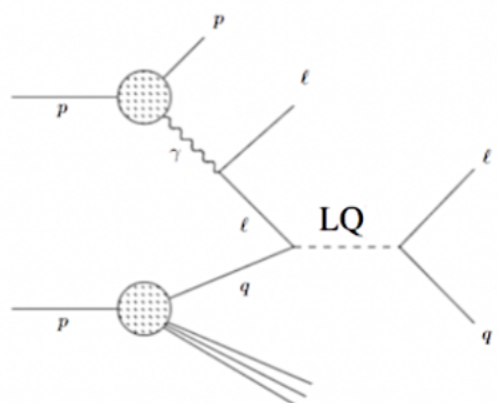
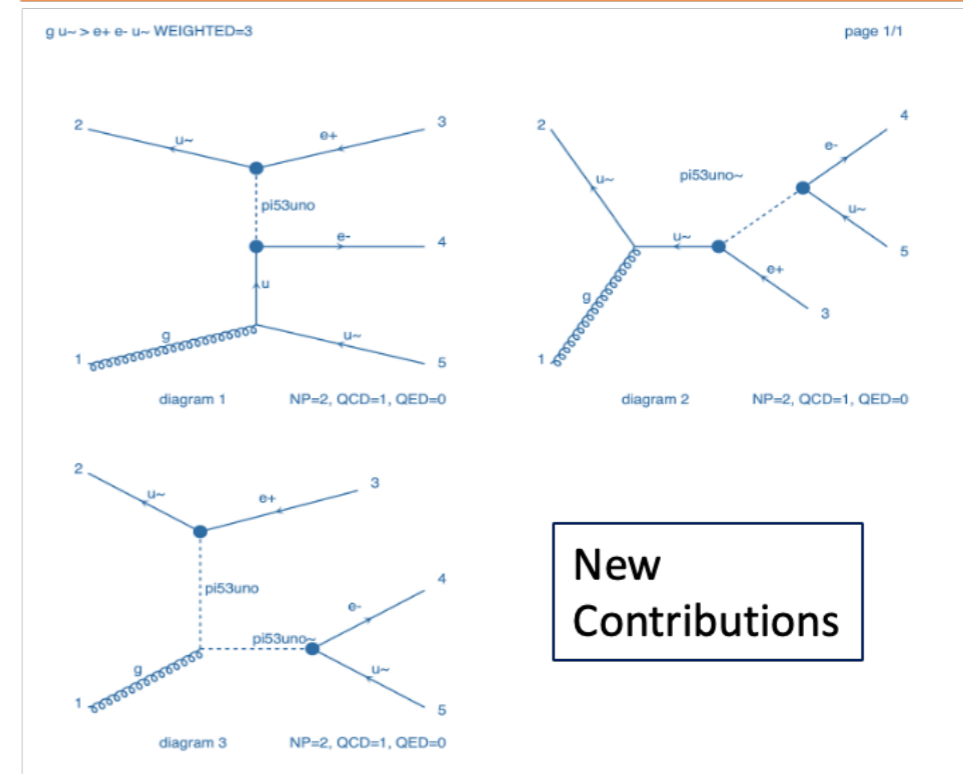
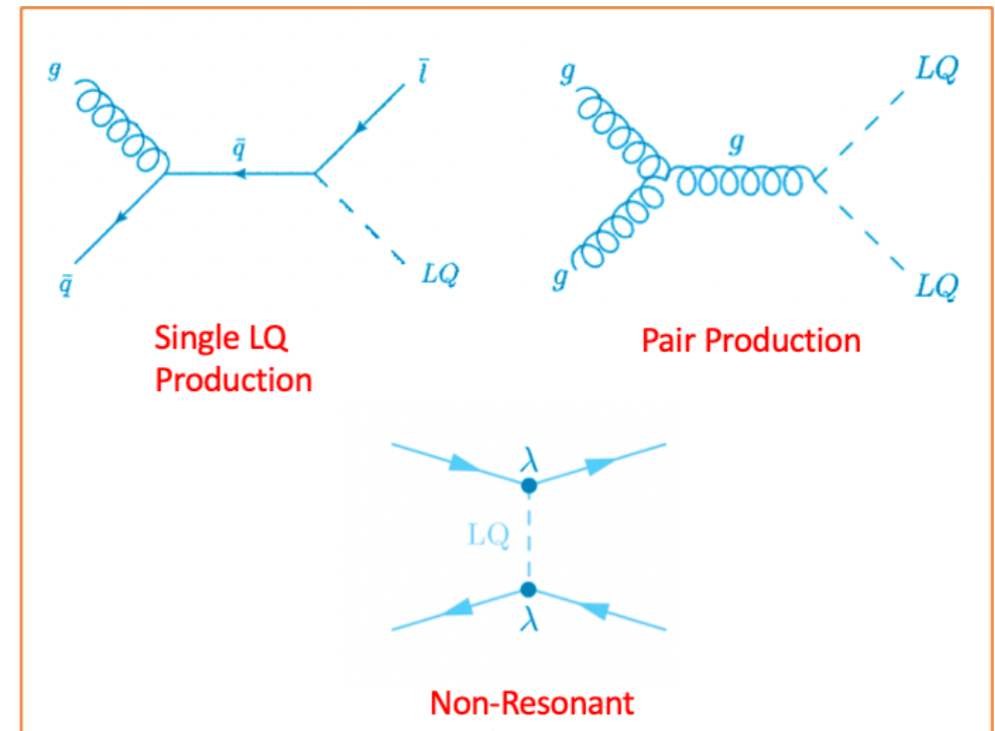
Analizzare diversi meccanismi di produzione.

Produzione singola, di coppia e t-channel (già discusso in letteratura)

Produzione inclusiva di segnali con  $0,1,2,3$  Jets fornisce nuovi contributi con  $pp \rightarrow \ell^+ \ell^- 0,1,2,3, J$  e  $\gamma p \rightarrow \ell^+ \ell^- 0,1,2,3, J$

Questi processi vengono analizzati con diverse scelte di PDF per  $p p$  collisioni e per  $\gamma p$  collisioni.

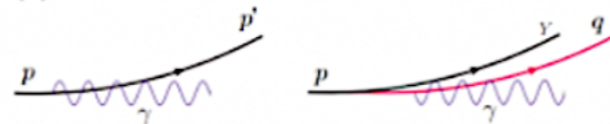
Analizzato il contributo elastico e anelastico in un nuovo processo con  $\gamma$  nello stato iniziale.



Exclusive LQ single production

(a) elastic

(b) inelastic



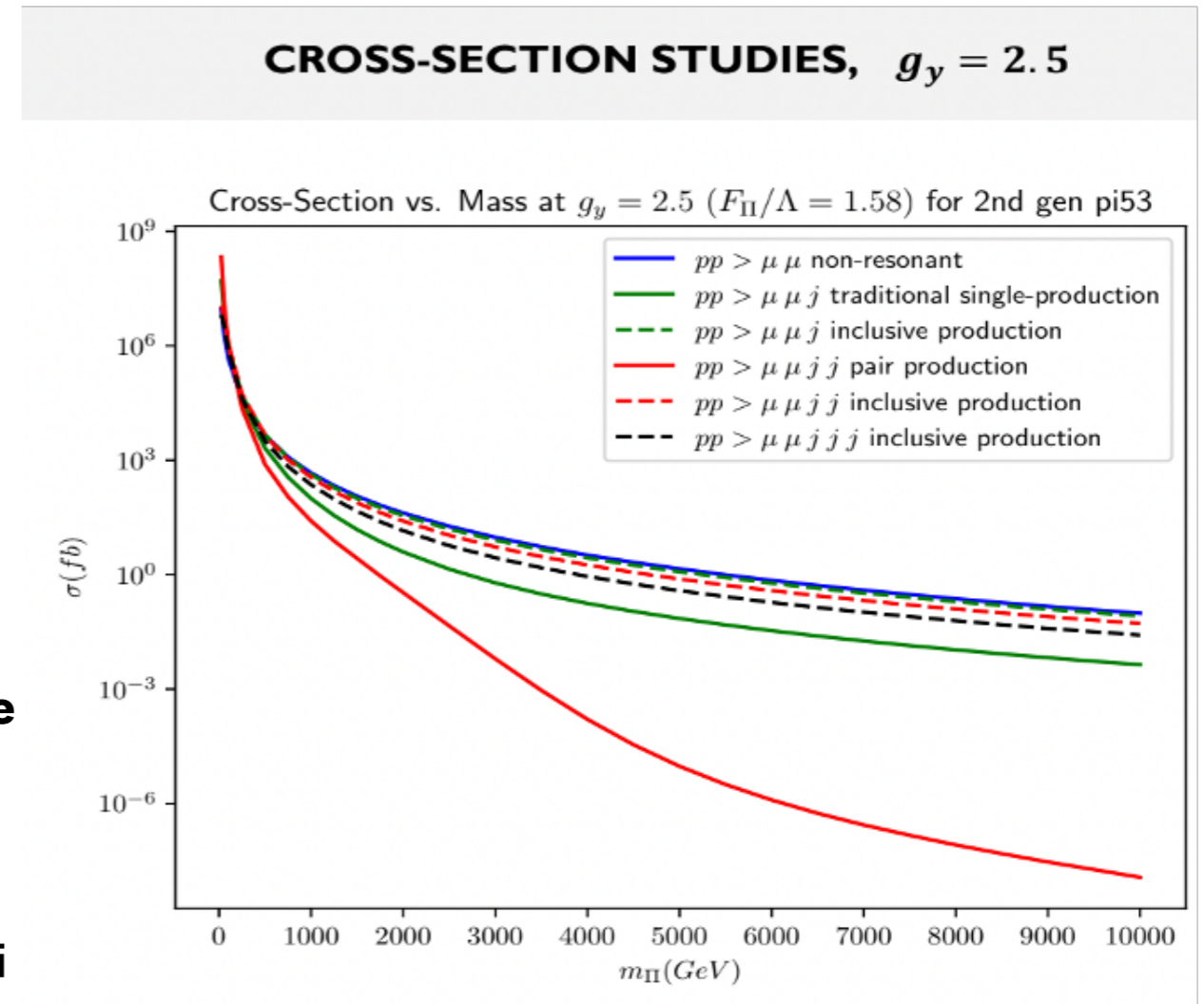
# Nuovi meccanismi di produzione dei LeptoQuarks

I nuovi canali proposti non stati studiati precedentemente in letteratura mostrano delle sezioni d'urto di produzione molto competitive.

Studi su xsec mostrano:

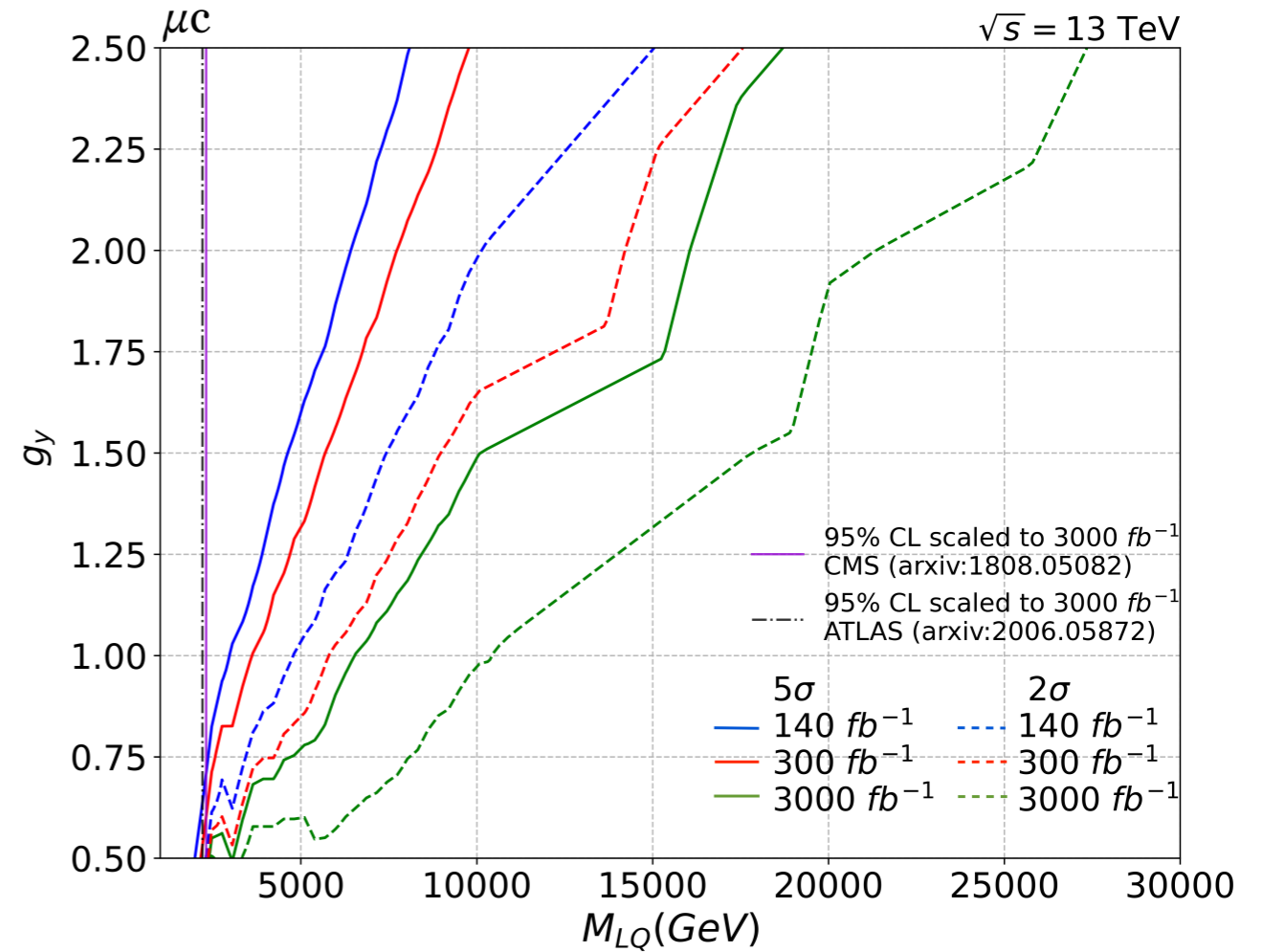
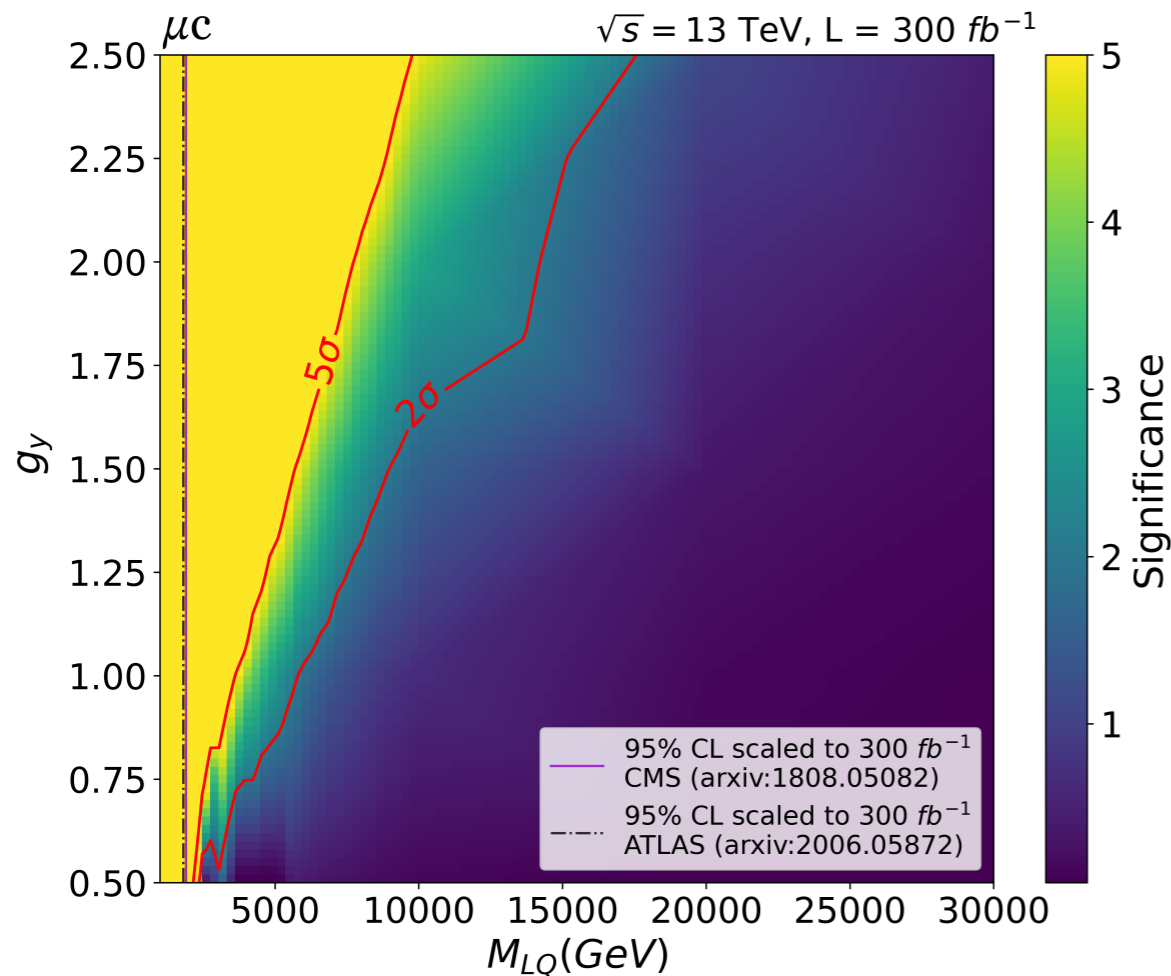
- $\sigma(pp \rightarrow \mu^+ \mu^- 0,1,2,3,J)$  è superiore alle tradizionali ricerche LQ (linea continua verde e rossa) di oltre il 20% in alcuni range di massa dei LQ.

Ottenute le curve di significatività a  $2$  e  $5\sigma$  per i vari tipi di processi accessibili ad LHC per quantificare l'impatto di questi nuovi meccanismi.



S. Ajmal, J. T. Gaglione, A. Gurrola, O. Panella, M. Presilla,<sup>4</sup> F. Romeo, H. Sun, and S. S. Xue  
e-Print: 2311.18472 [hep-ph]

# Sensitivity results



2 and 5 $\sigma$  Contour plots illustrating the relationship between the two variables,  $g_y$  and  $m_{LQ}$ , in a two-dimensional representation.

- Significance is computed via [CMS Combine Tool](#) (public software) by feeding the histograms of the discriminating variables for  $pp + \gamma p$

- Expected significance by profile-binned likelihood statistical test  $-2\ln\left(\frac{\mathcal{L}(\text{data} | r = 0, \theta_0)}{\mathcal{L}(\text{data} | r = \hat{r}, \theta_0)}\right)$

- Systematic uncertainties have been added in terms of nuisance parameters for  $r = \hat{r}$  and  $r = 0$

# $0\nu\beta\beta$ in modelli compositi a la NJL

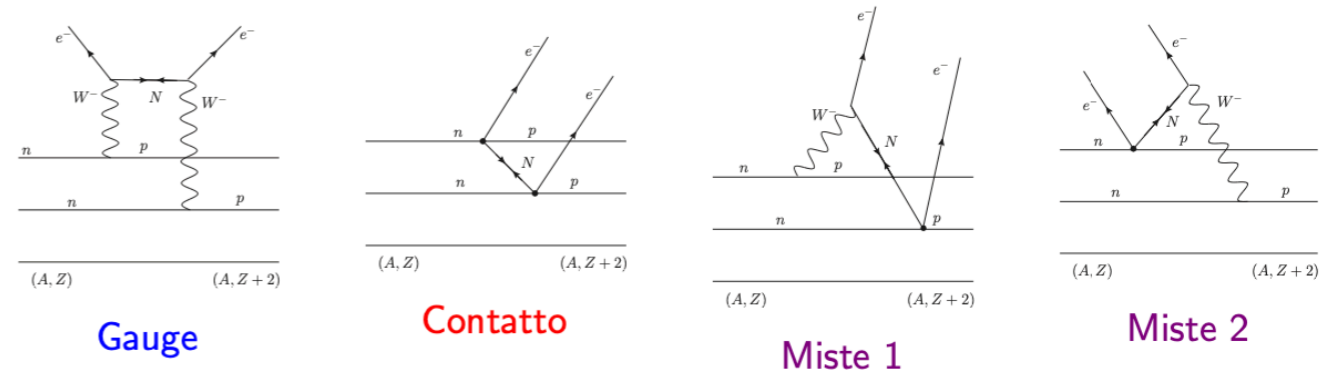
TESI Magistrale Luca Pacioselli (06/2022)

## Ricerche indirette di fisica nuova

- **Neutrini compositi di Majorana** possono mediare anche **eventi rari a bassa energia**, con violazione del numero leptonico
- La non osservazione del processo  $0\nu\beta\beta$  può essere convertita in limiti sui parametri del modello
- Esperimenti di riferimento:
  - $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se} + 2e^-$  PRL2020 KamLAND-Zen Collab.  
 $T_{1/2}(90\% \text{ C.L.}) > 1.8 \times 10^{26} \text{ yr}$
  - $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba} + 2e^-$  (PRL 2020 Gerda Collab.)  
 $T_{1/2}(90\% \text{ C.L.}) > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr}$

Interazioni efficaci che contribuiscono allo  $0\nu\beta\beta$ :

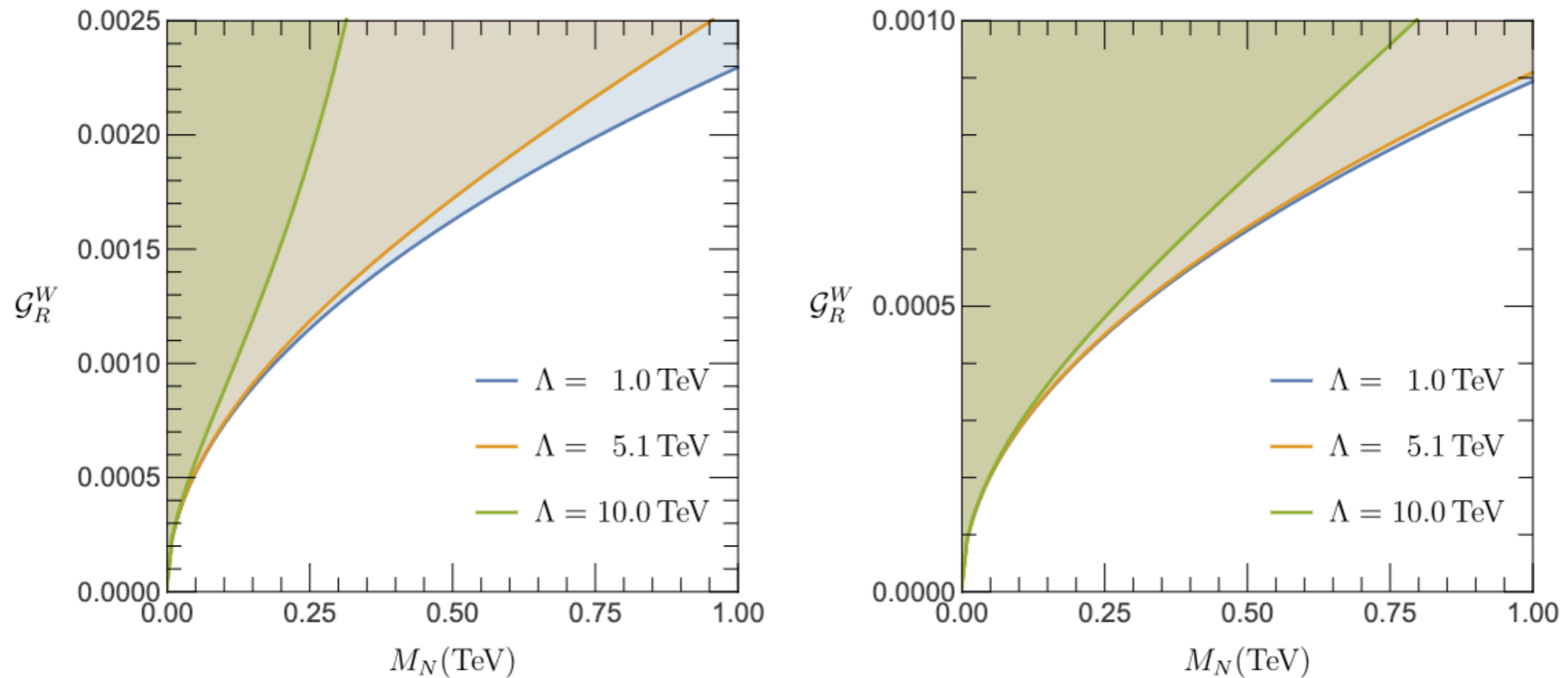
- **Gauge:**  $\mathcal{L}_{GI} = \frac{g_w}{\sqrt{2}} \left[ \mathcal{G}_R^W (\bar{e}\gamma^\mu P_R N^e W_\mu^-) + \frac{1}{2} \cos\theta_C (J_\mu^h W^{+\mu}) \right] + c.h.$ ;
- **Contatto:**  $\mathcal{L}_{CI} = \left(\frac{g_t^2}{\Lambda^2}\right) (\bar{e}P_R N^e) (\bar{u}^a P_L d_a) + c.h. \equiv \left(\frac{g_t^2}{2\Lambda^2}\right) j_R J^h + c.h.$ ;
- **Interazioni miste:** Gauge-Contatto e Contatto-Gauge.



$$(T_{1/2}^{0\nu})_{exp} \leq \frac{M_N^2}{(G_R^W)^4} \left( \frac{1}{m_p^2 |\mathcal{M}_{0\nu}|^2 G_{11}^{(0)}} \right) + \frac{\Lambda^4 M_N^2}{(G_R^W)^2} \times \\
 \times \left( \frac{2(G_F \cos\theta_C)^2}{m_p^2 |\mathcal{M}_5|^2 G_{66}^{(0)}} \right) + \Lambda^8 M_N^2 \left( \frac{64(G_F \cos\theta_C)^4}{m_p^2 |\mathcal{M}_1|^2 G_{11}^{(0)}} \right)$$

Gauge  
Miste  
Contatto

# Complementarità tra misure sperimentali a scale di energie differenti



- **Limiti sui parametri  $\mathcal{G}_R^W$ ,  $\Lambda$ ,  $M(N)$  del modello composito** di riferimento, ottenuti per tempi di dimezzamento misurati dalla collaborazione KamLAND (sinistra) e proiezioni sulle sensibilità dei futuri esperimenti  $0\nu\beta\beta$  (destra)
- **I limiti ottenuti sono compatibili con quelli trovati in letteratura**, che evidenzia la **complementarità** di questo tipo di studio fenomenologico con quello ad alta energia esperimenti

# Neutrini pesanti ad FCC-ee

## Long-Lived heavy neutral leptons

[Laurea Magistrale di S. Giappichini - settembre 2023]

Si studia la produzione di neutrini pesanti (HNL) ad FCC-ee seguendo un modello realistico di tipo see-saw I.

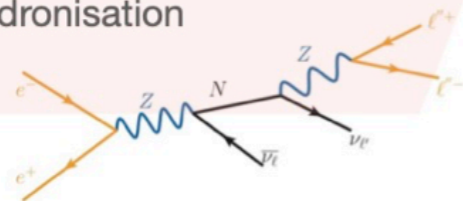
Stato finale analizzato caratterizzato da due neutrini e due leptoni carichi.

Tipico workflow:

Typical workflow

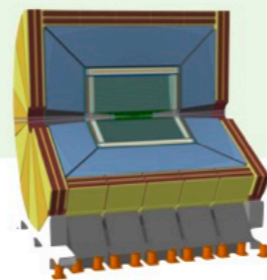
### Sample generation of models

- MadGraph5\_aMC@NLO for parton-level  $e^+e^-$
- PYTHIA for parton shower and hadronisation



### Parametrised detector simulation

- IDEA DELPHES card

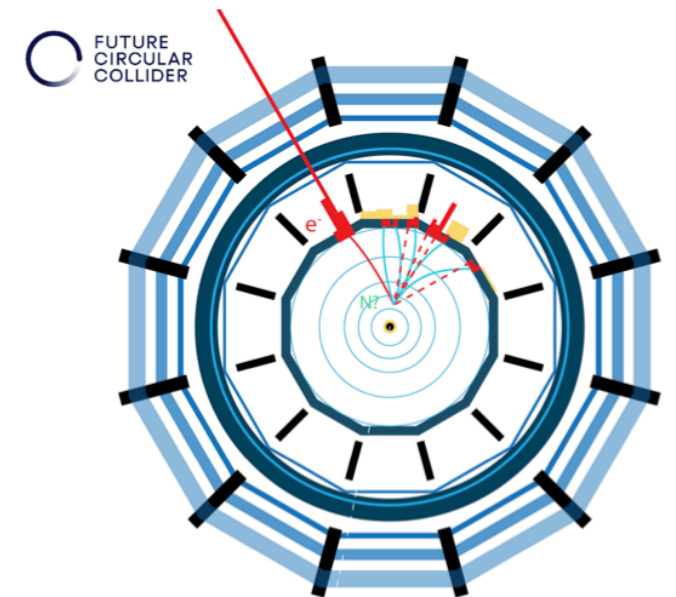


### Analysis tools

- FCC analysis

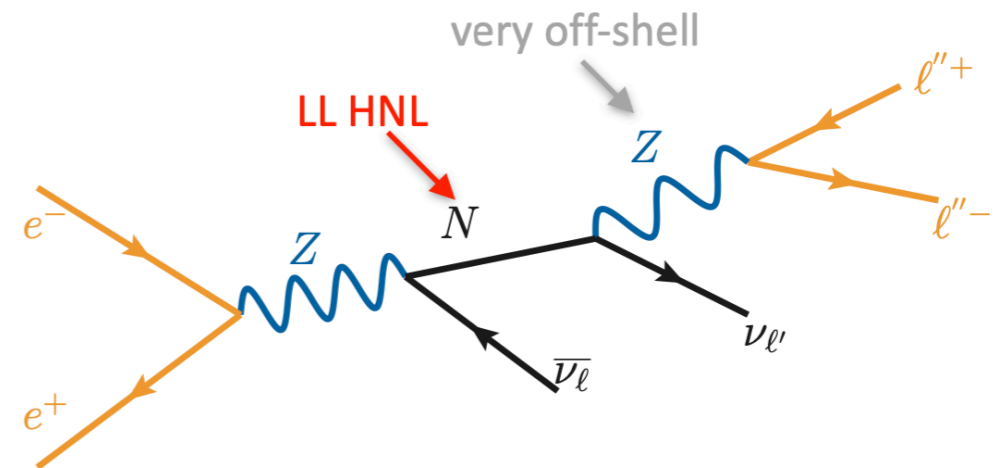
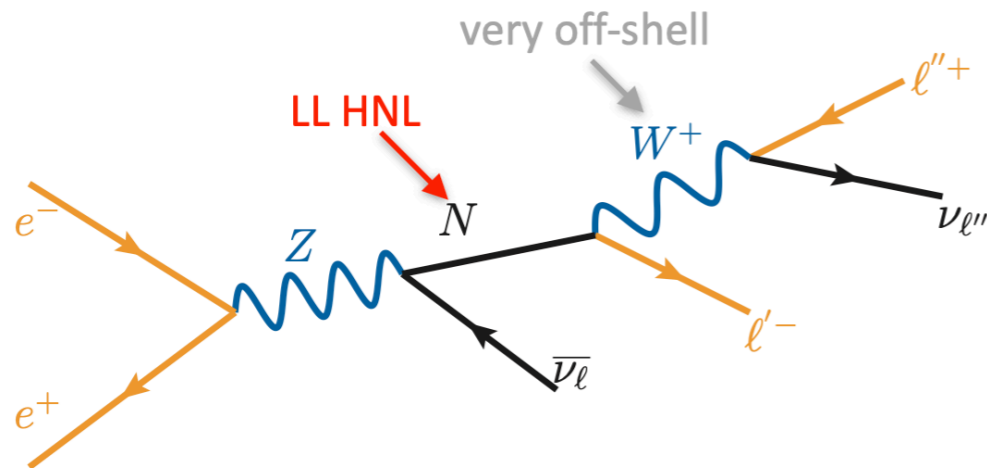


Sensitivity to studied model

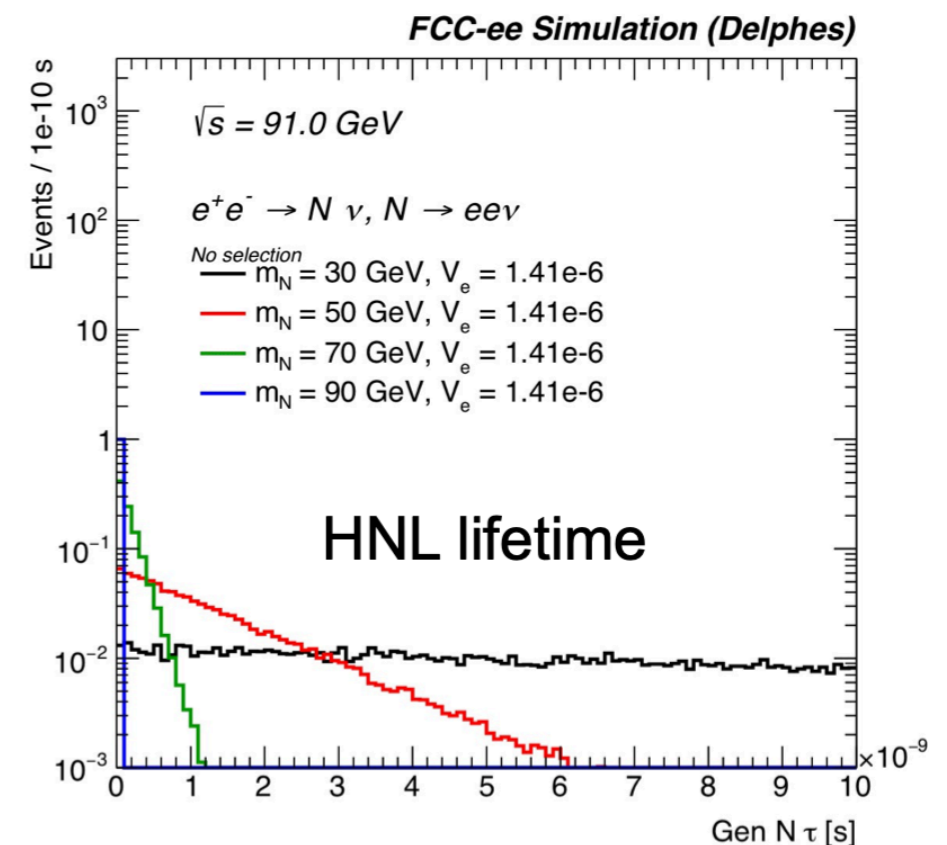


# Neutrini pesanti ad FCC-ee

## Long-Lived (LL) Heavy Neutral Leptons (HNL)



- Le esclusioni previste dai dati sperimentali per il valore del mixing tra HNL e leptoni permettono di considerare il regime long-lived (LL) in cui gli HNLs hanno lunghe vite medie.
- Generazione di HNLs di Majorana & Dirac con i modelli SM\_HeavyN\_CKM\_AllMasses\_LO, SM\_HeavyN\_Dirac\_CKM\_Masses\_LO (arXiv:1411.7305, arXiv:1602.06957)
- FCC-ee,  $\sqrt{s} = 91 \text{ GeV}$ . Madgraph5 v3.2.0 + Pythia8 + Delphes, con simulazione del detector "IDEA"





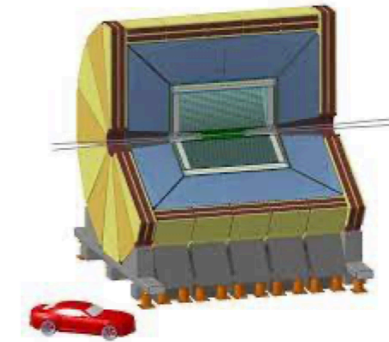
Software di simulazione di collisioni, — energia del centro di massa di 91 GeV—, per studiare la risposta del detector di tipo “IDEA” (uno dei possibili rivelatori proposti per FCC-ee).

Lavoro in fase di completamento:

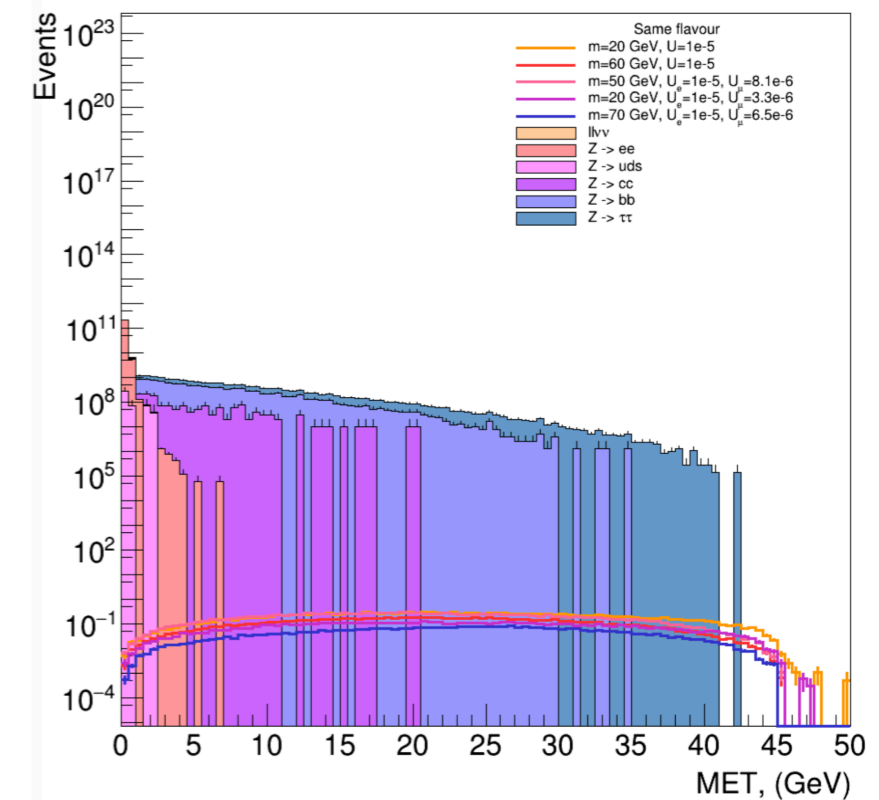
- Sono stati riprodotti i risultati ottenuti ([L. Rygaard MA thesis](#)) considerando un solo HNL da lavori precedenti (arXiv:2203.05502)
- Un modello con almeno più di un HNL permette di spiegare le oscillazioni dei neutrini e la Baryon Asymmetry of the Universe (BAU) [L. Canetti, M. Drewes, T. Frossard, M. Shaposhnikov, Phys. Rev. D 87 \(2013\)](#) [M. Drewes, Y. Georis, and J. Klaric', Phys. Rev. Lett. 128.5 \(2022\)](#)
- Si è analizzato lo spazio dei parametri di due HNLs che decadono in elettroni e muoni. Viene massimizzata la sezione d'urto se le masse sono quasi degeneri [K. Moffat, S. Pascoli, and C. Weiland, arXiv: 1712.07611 \[hep-ph\]](#)
- Si sono considerati i possibili fondi del segnale analizzando diverse variabili d'interesse per le particelle long-lived, selezionando signature con leptoni di stesso o diverso sapore
- Si è stimata la significatività statistica di questo tipo di processi ad FCC-ee

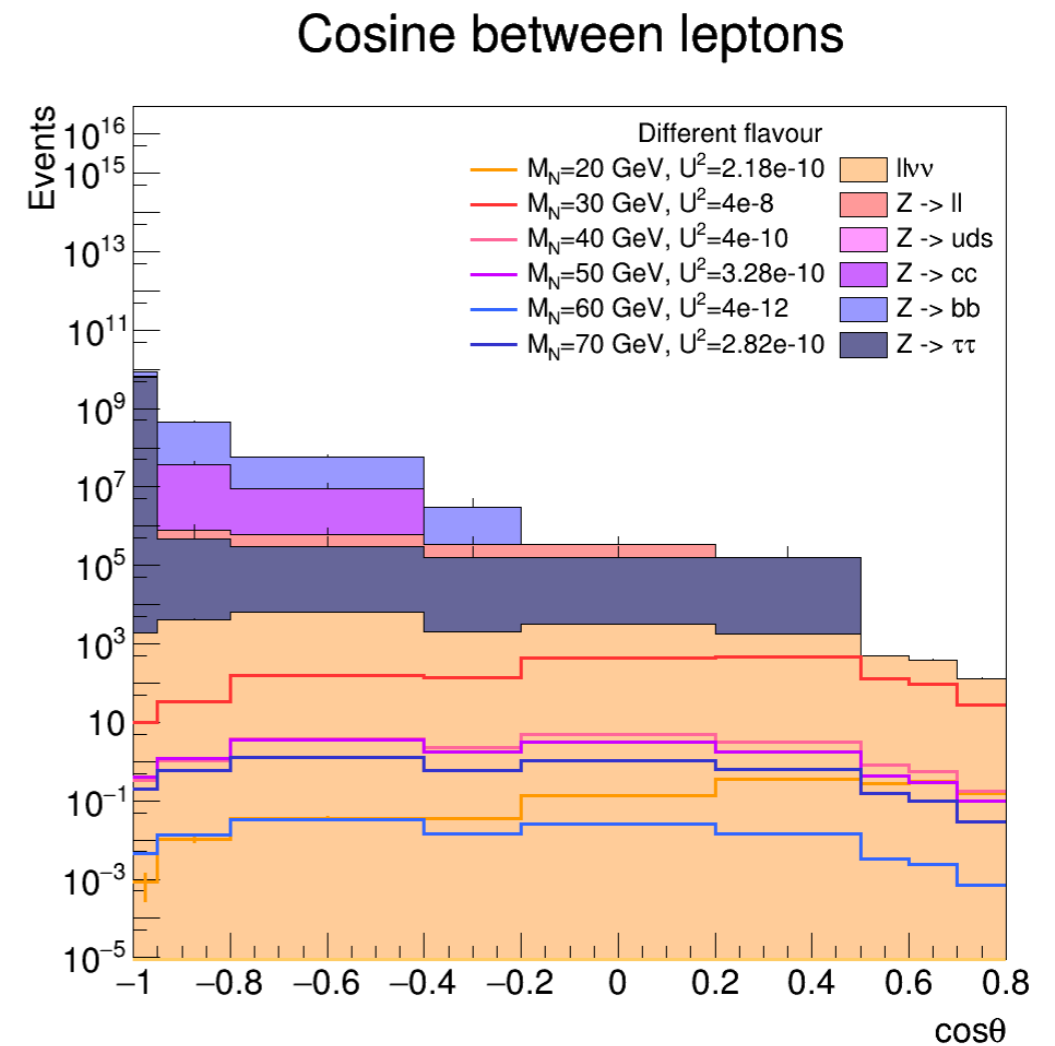
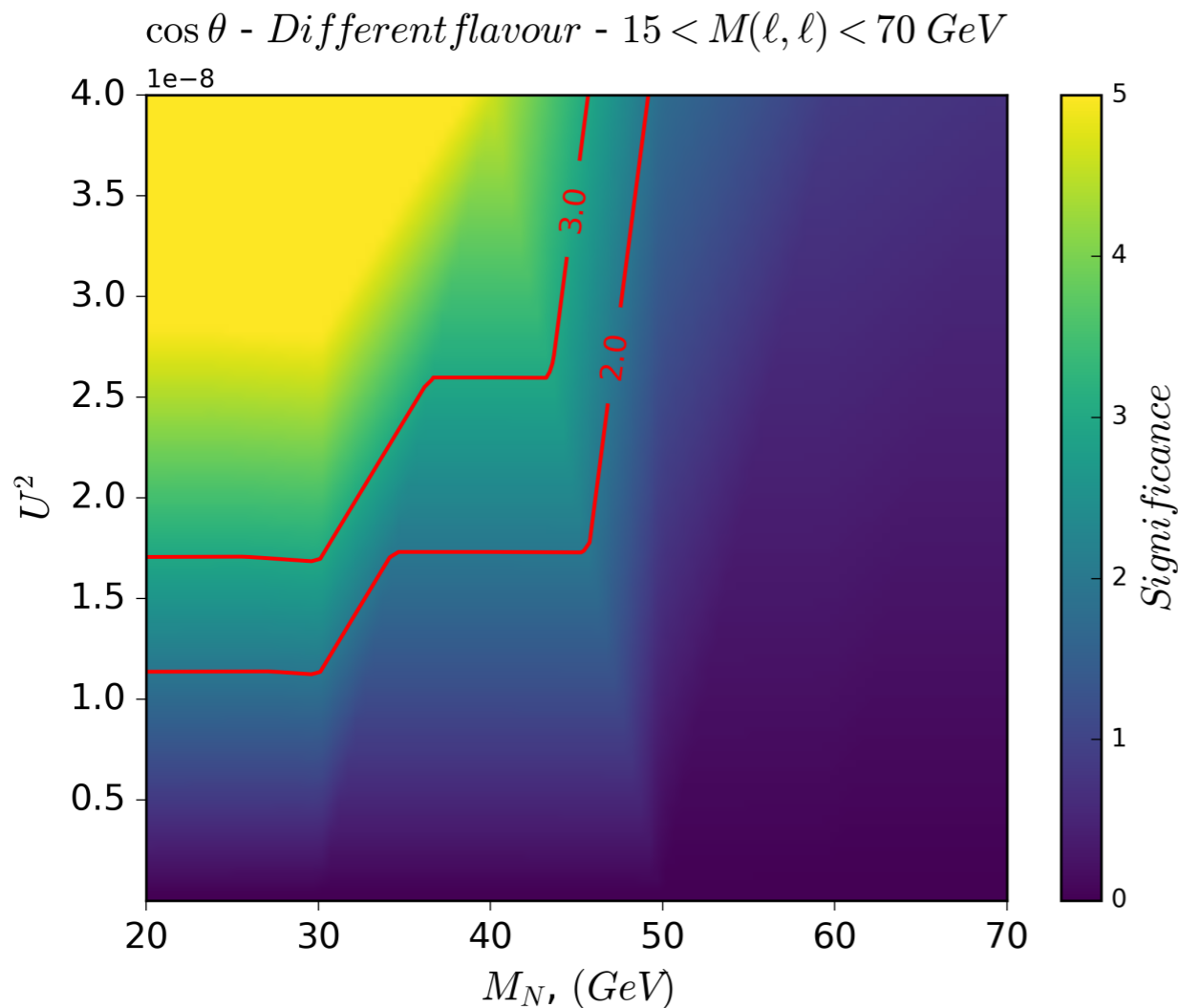
### Innovative Detector for an Electron-Positron Accelerator (IDEA)

- Silicon vertex detector
- Short-drift chamber tracker
- Dual-readout calorimeter (solenoid inside)



Total missing energy

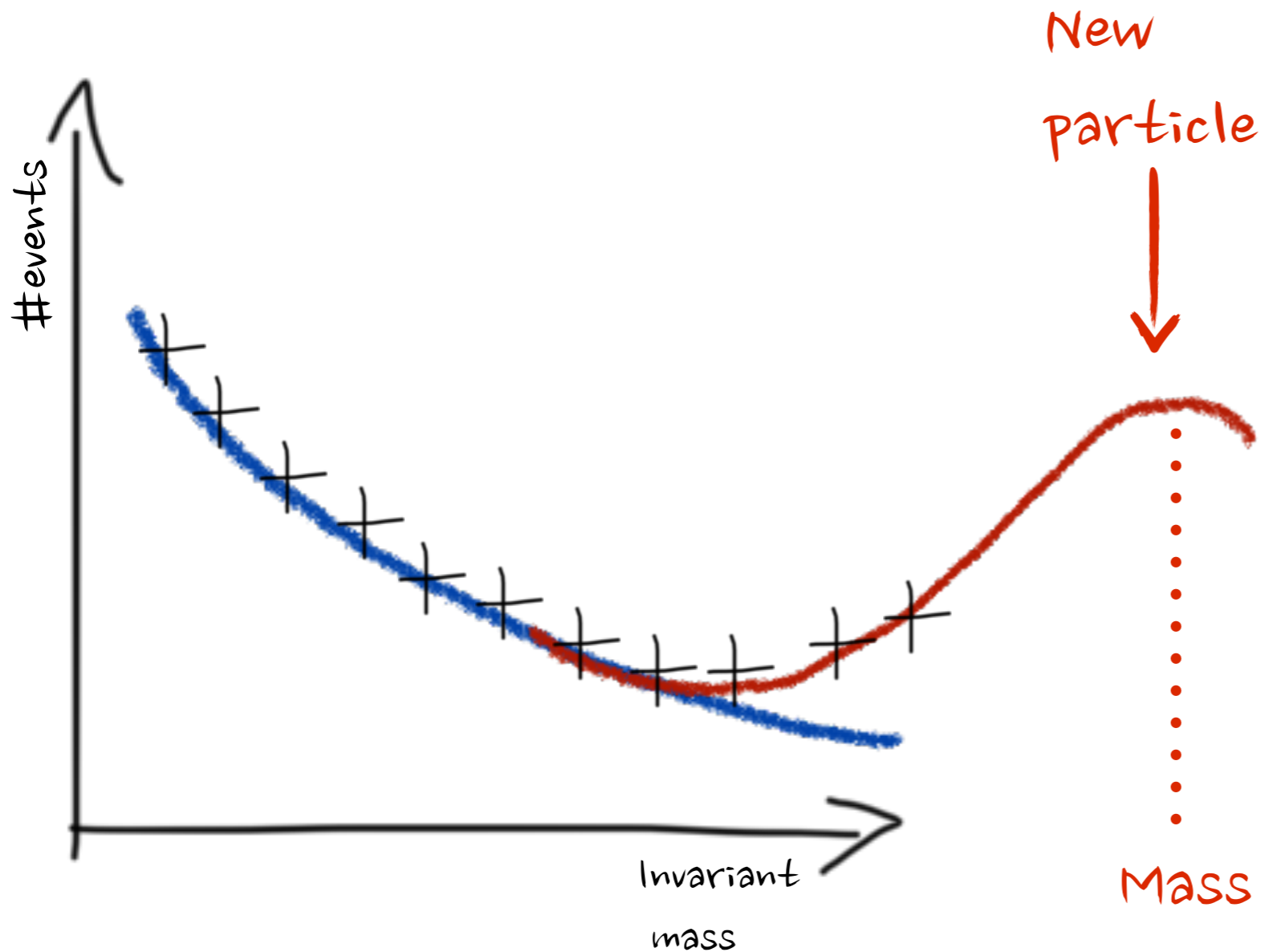




### Sviluppi futuri:

- Lo studio ha evidenziato come FCC-ee sia in grado di individuare eventi di HNLs nello spazio dei parametri disponibile
- Al momento si stanno replicando i risultati ottenuti nel software di analisi FCCAnalyses per poter far uso della maggiore statistica di eventi simulati centralmente
- Questo permetterà anche di includere l'accoppiamento tra tau e HNLs per studiare eventi che permettono leptogenesi sufficiente (arXiv:2307.07476)

# Misure di precisione a LHC e nuova fisica



**Ricerche indirette:** nuova fisica non accessibile ai collider

Campo di indagine: misure di precisione ai collider (e.g. processi di **Vector Boson Scattering VBS**, interazioni quartiche del modello standard)

Settore di interesse primario nelle prossime fasi dei collisori adronici

**(Run 3, HL-LHC)**

# Teorie di campo efficaci SMEFT

Si possono studiare gli effetti di nuova fisica, nel modo più agnostico possibile dal modello UltraVioletto che supponiamo

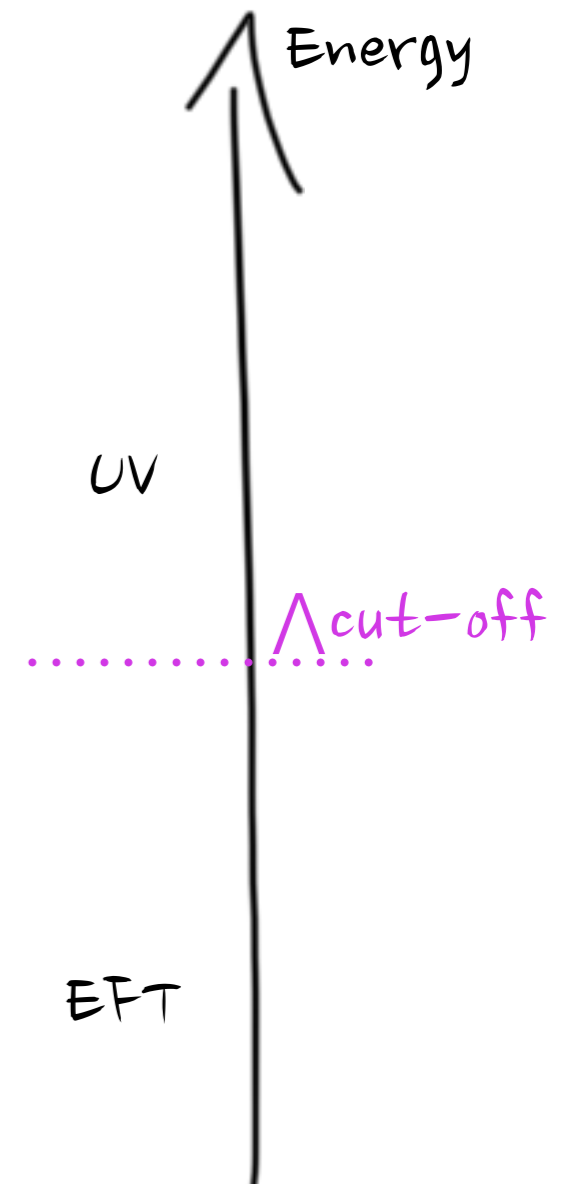
**Bottom-up approach:** espansione à la Taylor

$$\mathcal{L}_{BSM} \xrightarrow{(E \ll M)} \mathcal{L}_{\text{eft}} \simeq \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5 + \mathcal{L}_6 + \dots$$

New BSM couplings  
(Wilson coefficients)

$$\sum_i c_i \frac{\mathcal{O}_i}{\Lambda^2}$$

BSM scale

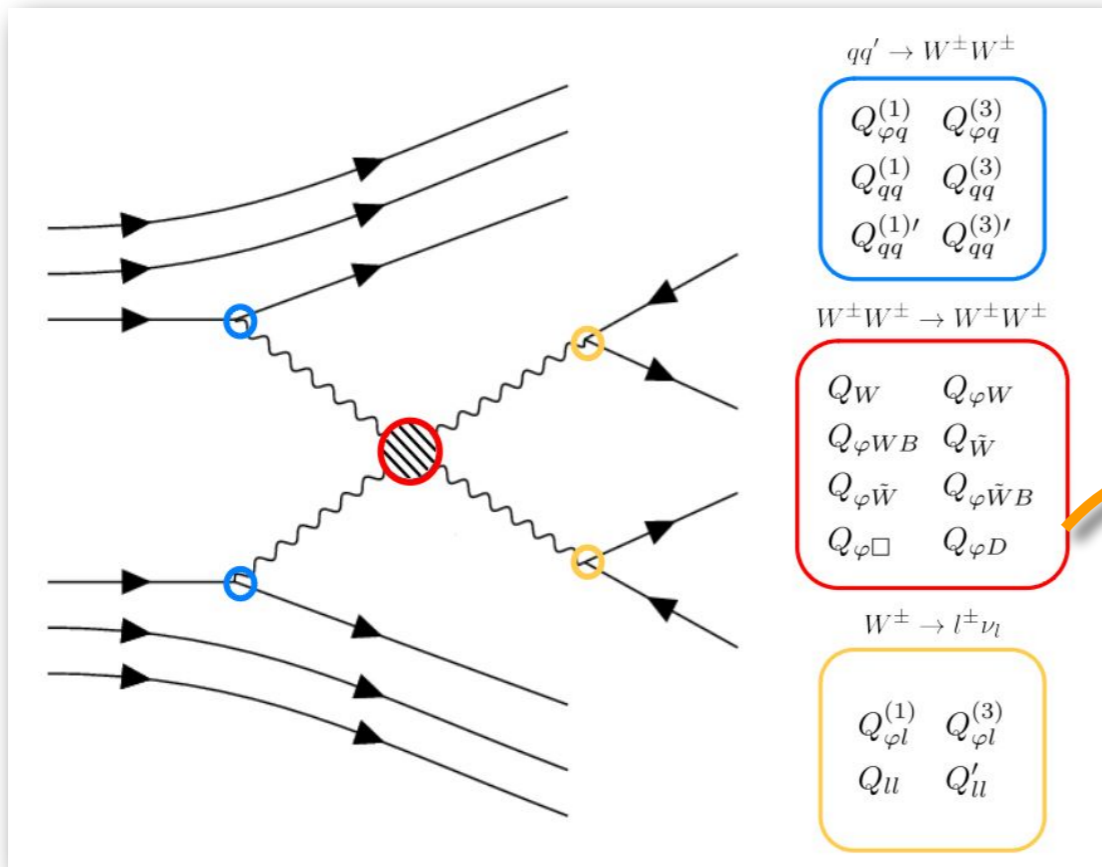


In pratica un'espansione nei campi e le loro derivate.

# VBS e unitarietà C. Carrivale LM UniPG, ora PhD XXXVIII ciclo

## Importanza dei processi VBS nella ricerca di Nuova Fisica a LHC:

- I canali di decadimento elettrodebole dei bosoni W presentano sia vertici a tre bosoni che a quattro bosoni.
- Nello SM i processi VBS portano alla violazione dell'unitarietà, ripristinata grazie alla presenza dei canali mediati dal bosone di Higgs → Processi utili per investigare il settore dell'**EWBS**



Same-sign WW VBS:  
 $qq' \rightarrow W^\pm W^\pm jj \rightarrow l\nu_l l'\nu_{l'} jj$

Nello SMEFT, operatori di dimensione-6 possono fornire ampiezze crescenti con  $\hat{s}$

$$\mathcal{M}(c_W) = 12\bar{g} \frac{c_W}{\Lambda^2} \hat{s} \rightarrow \infty \quad \text{for } \hat{s} \rightarrow \infty$$

	$X^3$	$\varphi^4 D^2$	$X^2 \varphi^2$
CPC	$Q_W = \epsilon^{ijk} W_\mu^{\nu i} W_\nu^{\rho j} W_\rho^{\mu k}$	$Q_{\varphi \square} = (\varphi^\dagger \varphi) \square (\varphi^\dagger \varphi)$ $Q_{\varphi D} = (\varphi^\dagger D^\mu \varphi)^* (\varphi^\dagger D_\mu \varphi)$	$Q_{\varphi W} = \varphi^\dagger \varphi W_{\mu\nu}^i W^{\mu\nu i}$ $Q_{\varphi WB} = \varphi^\dagger \tau^i \varphi W_{\mu\nu}^i B^{\mu\nu}$
CPV	$Q_{\tilde{W}} = \epsilon^{ijk} \tilde{W}_\mu^{\nu i} W_\nu^{\rho j} W_\rho^{\mu k}$		$Q_{\varphi \tilde{W}} = \varphi^\dagger \varphi \tilde{W}_{\mu\nu}^i W^{\mu\nu i}$ $Q_{\varphi \tilde{W} B} = \varphi^\dagger \tau^i \varphi \tilde{W}_{\mu\nu}^i B^{\mu\nu}$

Table 1. Bosonic operators in Warsaw basis which affect VBS ssWW processes.

- Il Teorema Ottico impone una condizione sull'ampiezza di scattering di un processo:

$$S^\dagger S = 1$$

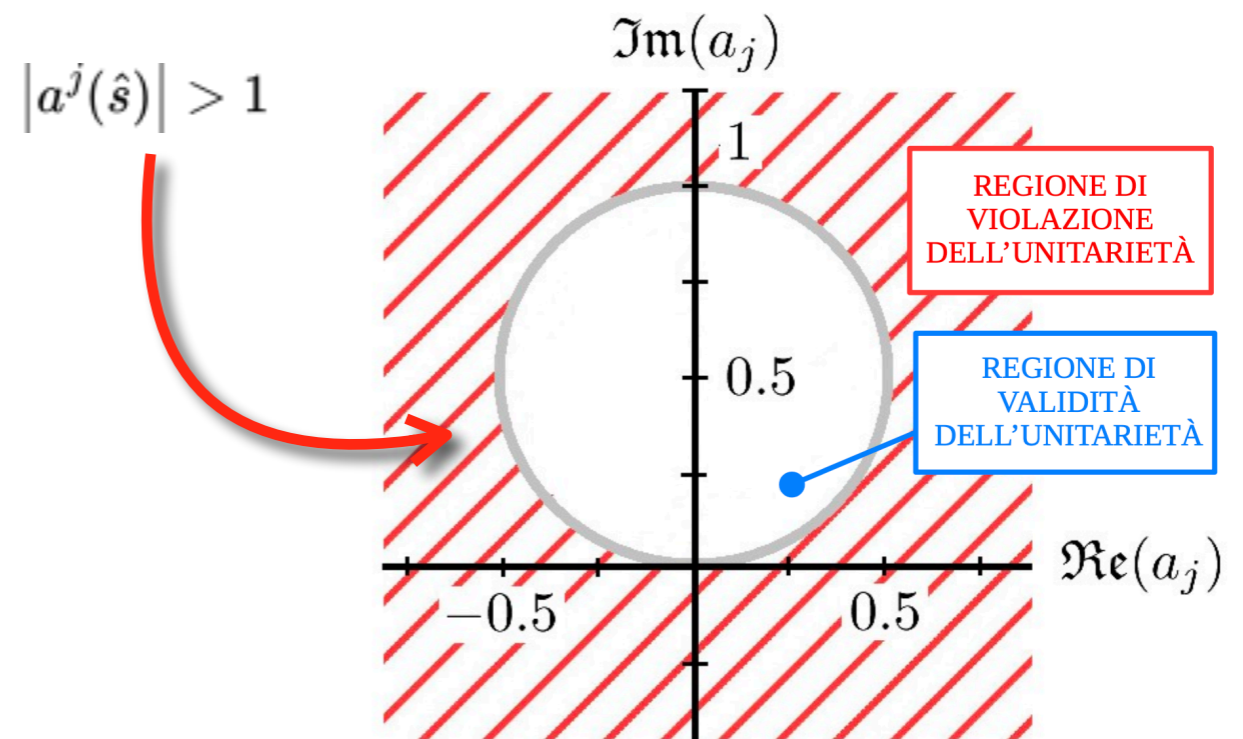
$$\Im(\mathcal{M}) \leq |\mathcal{M}|^2 \longrightarrow |\mathcal{M}| \leq 1 \longrightarrow |a^j| \leq 1$$

- Nello SM l'unitarietà della matrice di scattering di un processo non è mai violata, ma i contributi EFT all'ampiezza di scattering possono presentare una dipendenza dall'energia del CoM
- Al di sopra di un certo valore di  $s$ , l'unitarietà viene violata ed è necessario introdurre procedure di unitarizzazione per ripristinare il senso fisico dell'approccio EFT.

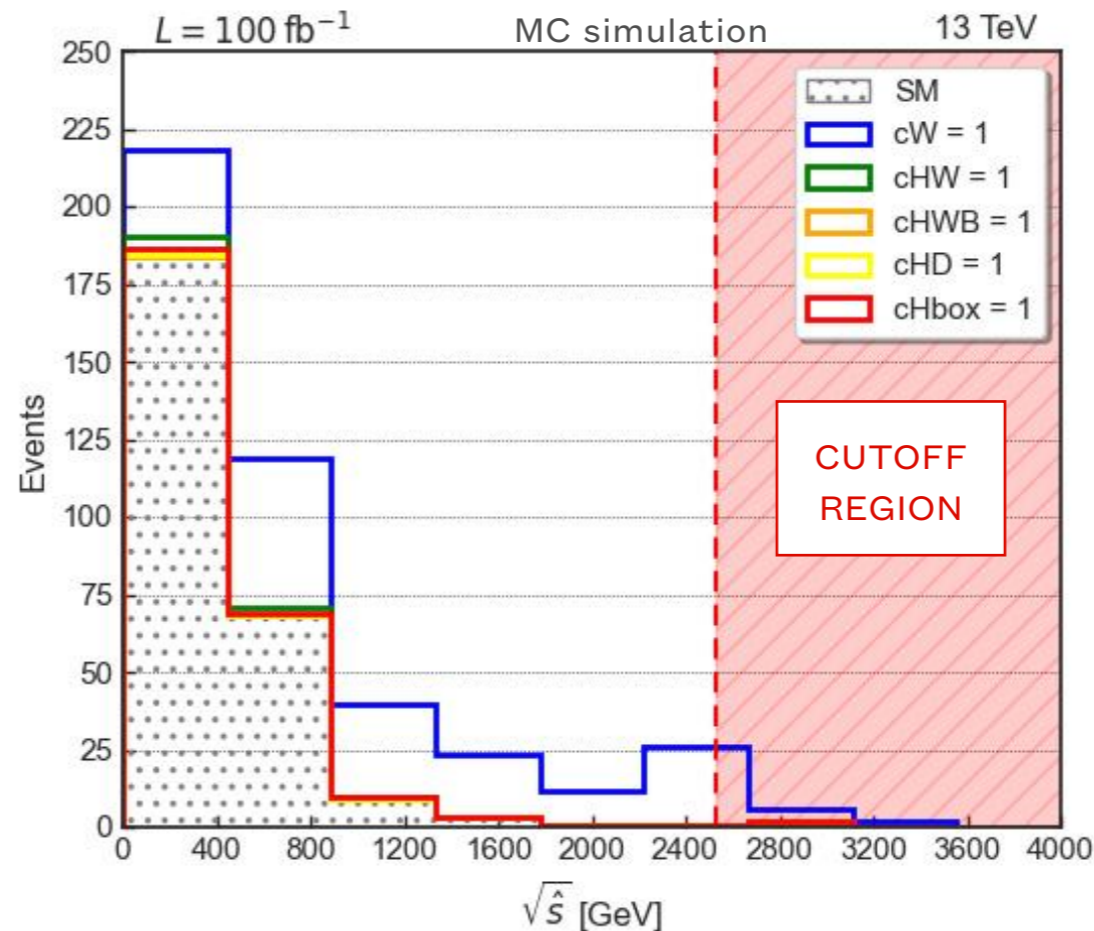
$$\mathcal{M}_{EFT} = \mathcal{M}_{SM} + \sum_i \frac{c_i^{(6)}}{\Lambda^2} \mathcal{M}_6^i + \sum_i \frac{c_i^{(8)}}{\Lambda^4} \mathcal{M}_8^i + \dots =$$

$$= 16\pi \sum_{j=0}^{\infty} a^j (2j+1) P_j(\cos \theta)$$

$$\mathcal{M}_{EFT} \sim \mathcal{O}(\hat{s}) \longrightarrow a^j \equiv a^j(\hat{s}) \sim \mathcal{O}(\hat{s})$$

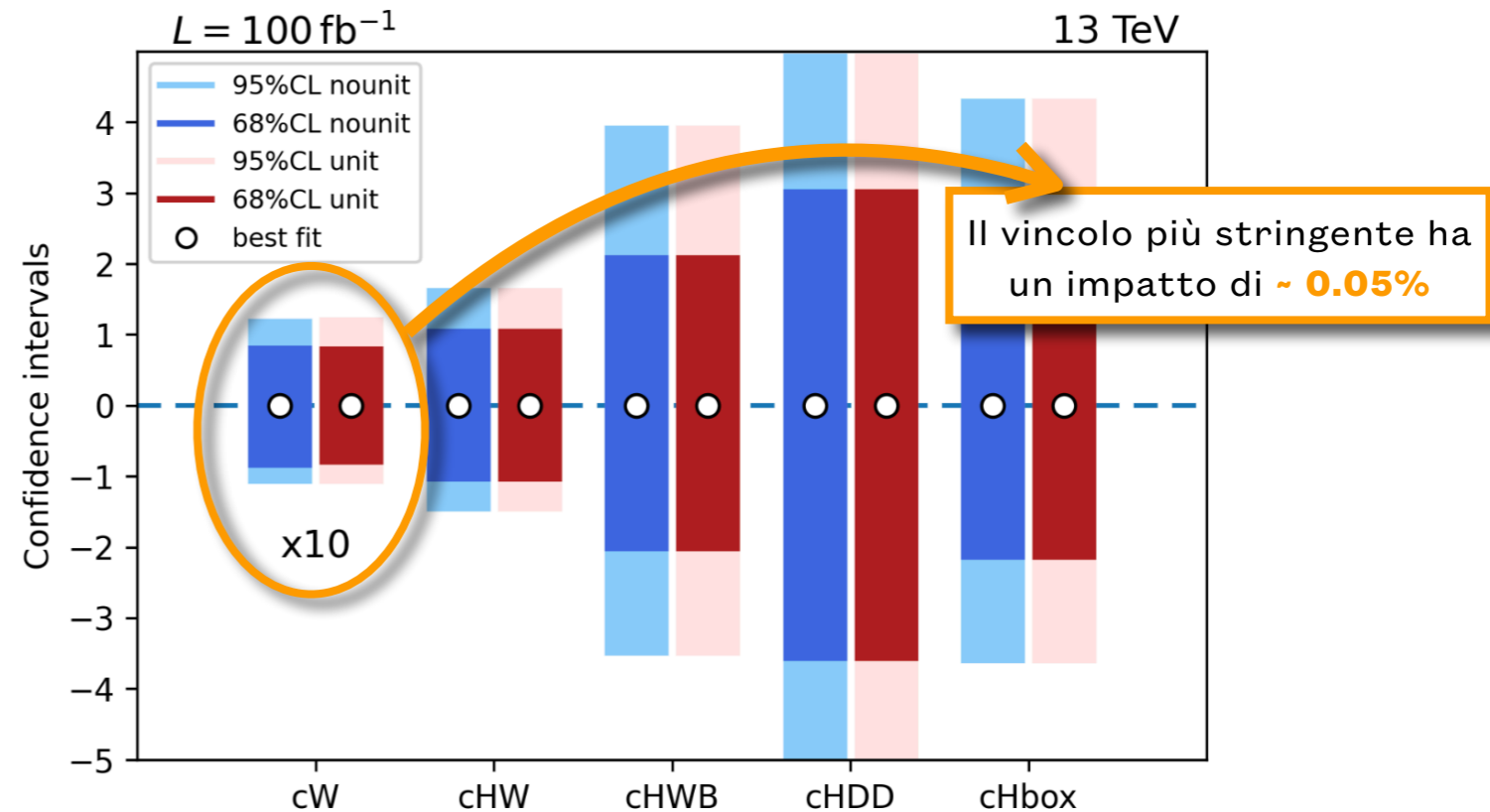
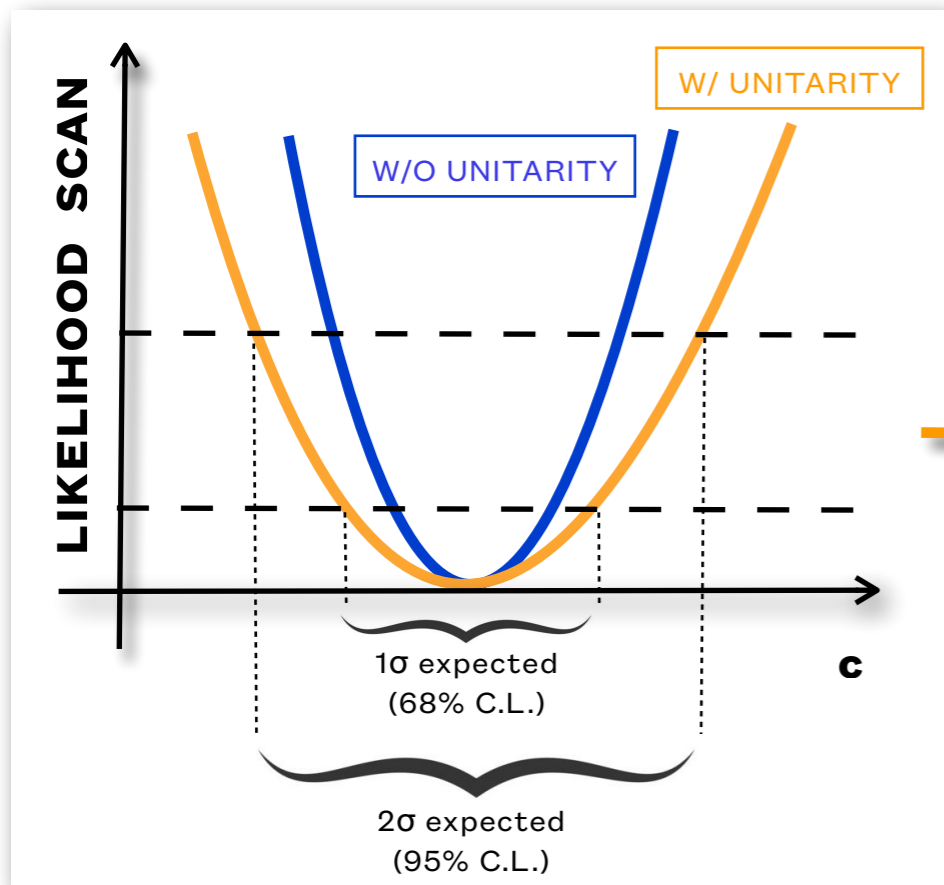


Operator	Bound on $\sqrt{\hat{s}}$
$Q_W$	$\leq 2.53 \text{ TeV}$
$Q_{\varphi W}$	$\leq 7.1 \text{ TeV}$
$Q_{\varphi WB}$	-
$Q_{\varphi \square}$	$\leq 5.01 \text{ TeV}$
$Q_{\varphi D}$	$\leq 7.1 \text{ TeV}$



### Impatto dei vincoli di unitarietà sulle misure sperimentali:

- Rigettare la percentuale di eventi EFT che ricade fuori dal limite di unitarietà (metodo del clipping) riduce la sensibilità sperimentale ad effetti di Nuova Fisica
- Viene ridotta l'accuratezza con cui possiamo determinare i parametri EFT (coefficienti di Wilson) → L'impatto viene stimato tramite l'estrazione degli **intervalli di confidenza**



C. Carrivale et al. To appear in Proceedings Congresso Nazionale SIF 2023

Si trova un impatto quasi nullo dei vincoli di unitarietà sulla sensibilità sperimentale ad effetti EFT per operatori a dim6,

Ci si aspetta un effetto maggiore per operatori a dim8.

All'ordine  $O(\Lambda^{-4})$  sono presenti entrambi i contributi.

### Sviluppo in corso del lavoro:

Primo studio EFT in presenza di operatori a dimensione 6 + dimensione 8

Estrazione dei limiti teorici sui coefficienti di Wilson@dim6&@dim8 in presenza di vincoli di unitarietà globali



# Studi Multiboson in EFT@dim8

[arXiv:2205.15959v2](https://arxiv.org/abs/2205.15959v2)

- Studio fenomenologico sulla produzione di bosoni di gauge e di Higgs multipli (VVHH).
- Sono stati estratti limiti su operatori@dim8 competitivi con altri canali a maggiore statistica anche tenendo in considerazione la violazione di unitarietà.

## Obiettivo del lavoro:

- Esplorare nuovi stati finali (es. VVV, ZZH, ZZZH) che non sono mai stati studiati nel contesto EFT@dim8
- Attualmente è in corso la selezione di processi da cui si possano estrarre limiti competitivi nello studio degli operatori dim8

## Sensitivity to New Physics in final states with multiple gauge and Higgs bosons

A. Cappati,<sup>a</sup> R. Covarelli,<sup>b,c</sup> P. Torrielli,<sup>b,c</sup> M. Zaro.<sup>d,e</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire Leprince-Ringuet, CNRS/IN2P3, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Av. Chasles, 91120 Palaiseau, France

<sup>b</sup>Dipartimento di Fisica, Università di Torino, Via P. Giuria 1, 10125 Turin, Italy

<sup>c</sup>INFN, Sezione di Torino, Via P. Giuria 1, 10125 Turin, Italy

<sup>d</sup>TIF Lab, Università di Milano, Via Celoria 16, 20133 Milan, Italy

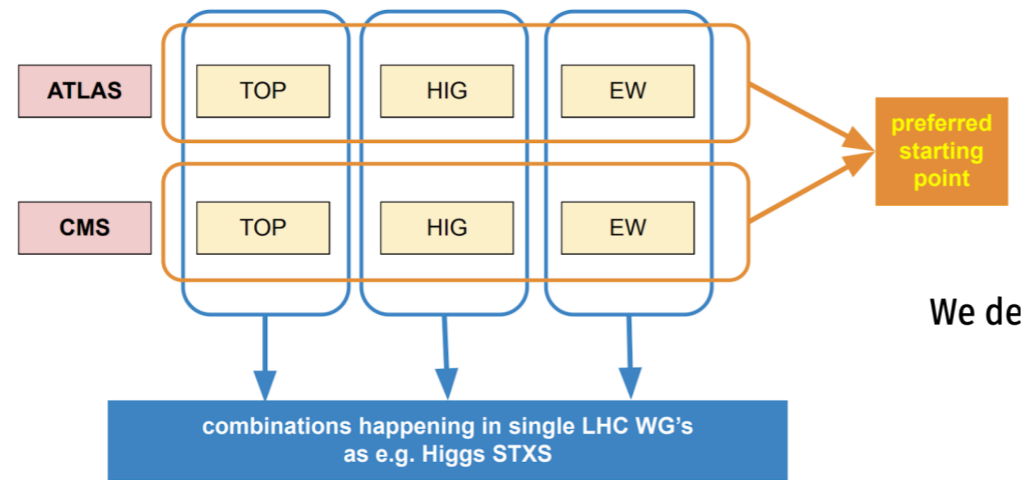
<sup>e</sup>INFN, Sezione di Milano, Via Celoria 16, 20133 Milan, Italy

E-mail: [alessandra.cappati@cern.ch](mailto:alessandra.cappati@cern.ch), [roberto.covarelli@cern.ch](mailto:roberto.covarelli@cern.ch), [paolo.torrielli@to.infn.it](mailto:paolo.torrielli@to.infn.it), [marco.zaro@mi.infn.it](mailto:marco.zaro@mi.infn.it)

ABSTRACT: We analyse the sensitivity to beyond-the-Standard-Model effects of hadron-collider processes involving the interaction of two electroweak and two Higgs bosons, VVHH, with V being either a W or a Z boson. We examine current experimental results by the CMS collaboration in the context of a dimension-8 extension of the Standard Model in an effective-field-theory formalism. We show that constraints from vector-boson-fusion Higgs-pair production on operators that modify the Standard Model VVHH interactions are already comparable with or more stringent than those quoted in the analysis of vector-boson-scattering final states. We study the modifications of such constraints when introducing unitarity bounds, and investigate the potential of new experimental final states, such as ZHH associated production. Finally, we show perspectives for the high-luminosity phase of the LHC.

# Attività di ricerca all'interno dell'LHC EFT WG

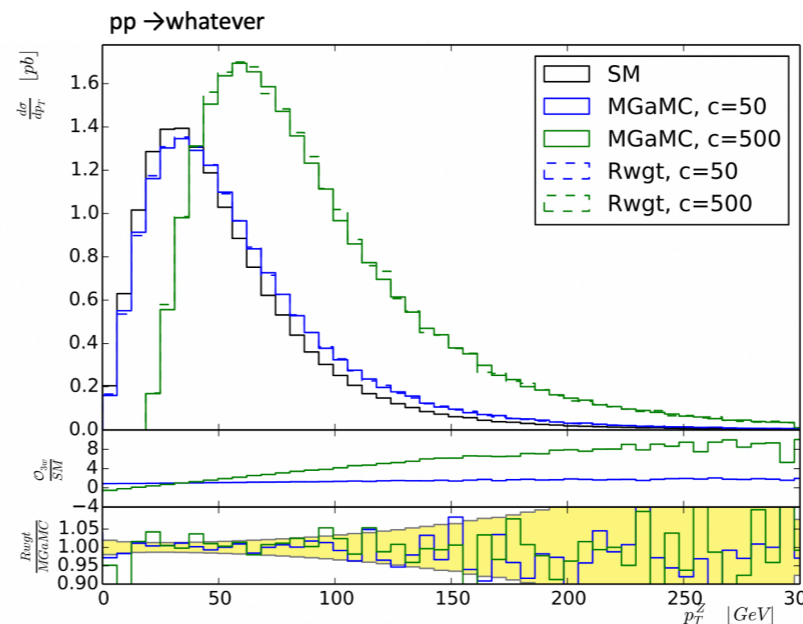
Attività dell'LHC EFT working group per la futura combinazione globale (ATLAS/CMS) delle misure di precisione del Run 2 di LHC ed interpretazione in termini del modello SMEFT



From A. Grohsjean [2nd General Meeting of the LHC EFT Working Group](#)

In particolare, C. Carrivale e M. Presilla si stanno occupando di studiare la validità del metodo di generazione dei campioni MC in EFT per processi VBS, basata sul “reweighting” dei campioni a partire dai processi SM:

$$W^{new} = \frac{|M_{new}|^2}{|M_{orig}|^2} W_{orig}$$



## Conveners:

### ATLAS:

- Nicolas Berger (Higgs WG contact)
- Jacob Kempster (Top WG contact)
- Kristin Lohwasser (EW WG contact)
- Sandra Kortner

### CMS:

- Matteo Presilla (EW WG contact)
- Nadjieh Jafari
- Robert Schoefbeck (Top WG contact)
- Nicholas Wardle (Higgs WG contact)

### LHCb:

- Greg Ciezarek and Christoph Langenbruch

### Theory:

- Ilaria Brivio
- Anke Biekötter (Higgs WG contact)
- Shankha Banerjee (EW WG contact)
- Gauthier Durieux
- Admir Greljo
- Ken Mimasu (Top WG contact)

---

# Conclusioni

- L'attività del gruppo è concentrata su ricerche di interazioni di fisica oltre il modello standard, in particolare nell'ambito di **teorie efficaci (SMEFT)** e **modelli compositi**
- Forte **sinergia con i gruppi sperimentali della collaborazione CMS** di Perugia e Padova, fornendo supporto alle ricerche sperimentali ad LHC:
  - **"Search for a heavy composite Majorana neutrino in the final state with two leptons and two quarks at 13 TeV"** (Phys. Lett. B 775 (2017) 315-337 with 2015 Run 1 data),
  - **"Search for heavy composite Majorana neutrino with full Run 2 data"** (<https://cds.cern.ch/record/2304305>, presentato a Moriond '22, pubblicato su PLB),
  - **"Vector Boson Scattering measurement of same-sign W boson pairs with hadronic taus in the final state"** CMS Perugia/LIP, argomento di tesi di dottorato di A. Piccinelli/T. Tedeschi (UniPG)
  - Studio dell'impatto dell'unitarietà nei processi VBS nel modello SMEFT e studi connessi alla futura combinazione sperimentale ATLAS/CMS dell'LHC EFT wg
- Collaborazioni con teorici e sperimentali di **fisica degli eventi rari ( $0\nu\beta\beta$ )**: F. Vissani (GSSI/L'Aquila), S. dell'Oro (Milano), Estrapolazione di limiti di nuova fisica da esperimenti di doppio decadimento beta senza neutrini
- Ricerche in corso per **fenomenologia di LQs** in modelli con interazioni a quattro fermioni di tipo NJL (Vanderbilt & IcrNet)
- Recente attività legata alle proiezioni di nuova fisica nei **collider del futuro FCC-ee** in modelli con neutrini pesanti di Majorana (Uni. Roma 3, INFN Padova)

---

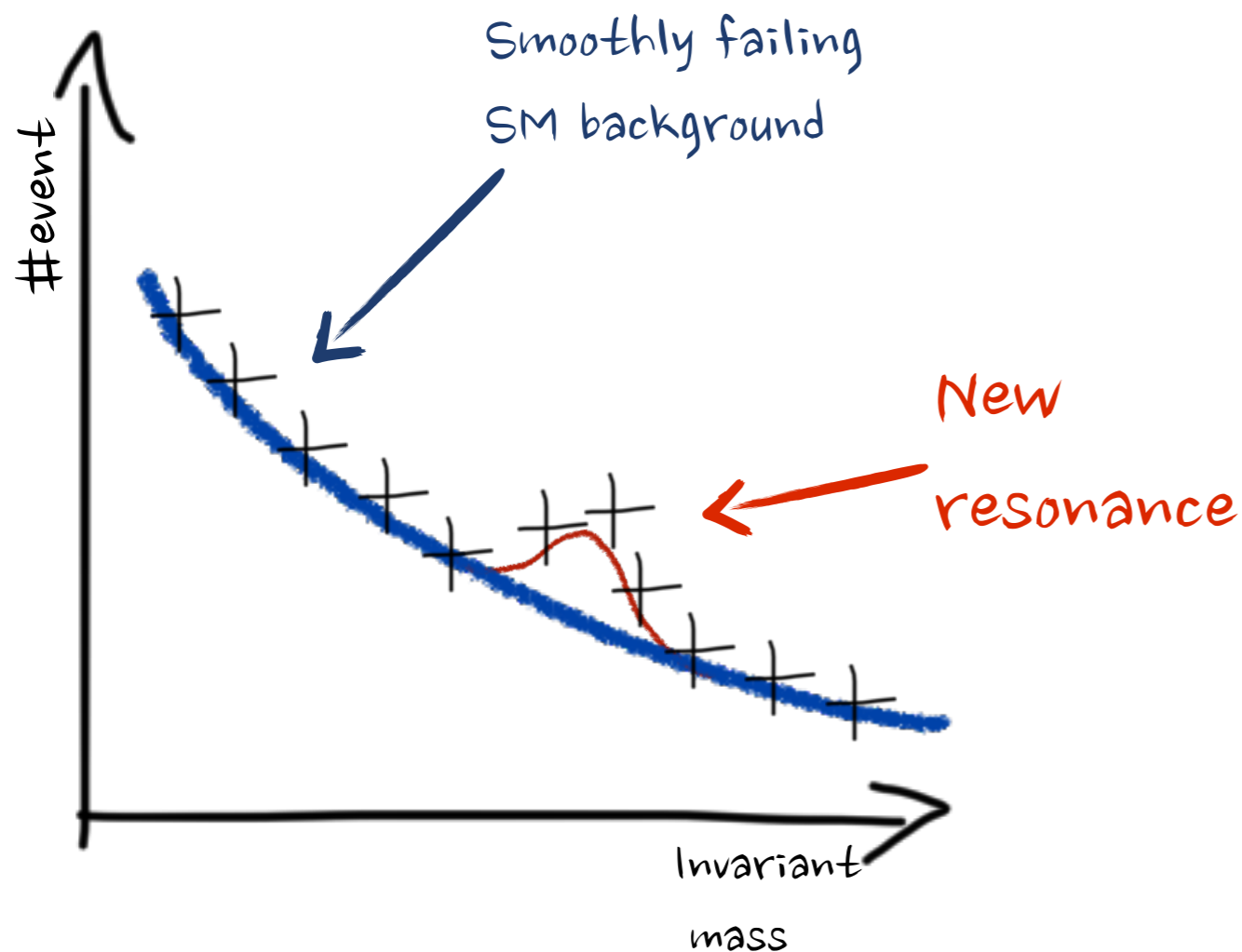
# Tesi di Laurea Magistrale/Dottorato

1. [S. Biondini](#) [LM-2011] “[Phenomenology of excited doubly charged heavy leptons at LHC](#)”, [[Physical Review D](#), 85, 095018], (2012)] e lavoro su “[Exotic leptons at future linear colliders](#)”, [[Physical Review D](#) 92 , 015023 (2015)] → PhD @ Monaco (TUM)
2. [R. Leonardi](#) [LM-2013] “[Doubly charged leptons with contact interactions](#)” [PRD 90, 035001 \(2014\)](#)
3. [R. Leonardi](#) ([gruppo IV+CMS](#)) e [L. Alunni](#) (CMS), dottorato XXIX ciclo. (Heavy Composite Majorana Neutrinos - HCMN-). [[Eur. Phys. J. C](#) (2016) 76:593, [CMS-PAS-16-026](#)]
4. [R. Leonardi](#) ([gruppo IV+CMS](#)) dottorato XXIX ciclo. “[Production of exotic quarks at the LHC](#)” - [[Phys. Rev. D](#) 96 (2017) 075034]- Collaborazione con Brown University.
5. [M. Presilla](#) [LM, Febbraio 2017], con R. Leonardi e O. Panella ([Like Sign dileptons with Mirror type composite neutrinos at the HL-LHC](#)) arXiv:1811.00374 (Working group 3, Xabier Vid Cidal et al. [CERN Yellow Report](#): CERN-LPCC-2018-05, Workshop on Physics at HL-LHC and perspectives at HE-LHC )
6. [C. Carrivale](#) [LM, Febbraio 2022] con M. Presilla e L. Fanò ([Study of the impact of unitarity bounds on VBS processes at LHC](#)) 109° Congresso Nazionale SIF – 11-15 settembre 2023 – Dipartimento di Fisica dell'Università di Salerno. Contributo selezionato per i proceedings (Nuovo Cimento).
7. [L. Pacioselli](#) [LM, Giugno 2022] con M. Presilla ([Constraints on NJL four-fermion effective interactions from neutrinoless double beta decay](#)) [JHEP 2023, 54 \(2023\)](#)
8. [S. Ajmal](#) dottorato XXXVI ciclo. Argomento: [Fenomenologia di Leptoquarks e nuovi bosoni in modelli compositi e studio dell'unitarietà in EFT in processi VBS](#). e-Print: [2311.18472](#) [hep-ph] Subite to JHEP
9. [C. Carrivale](#) dottorato XXXVIII ciclo. Argomento: [Combinazione SMEFT di misure sperimentali per processi di tipo VBS ad LHC con il rivelatore CMS](#)
10. [S. Giappichini](#) [LM, Settembre 2023] con M. Presilla ([Heavy Neutral Leptons Search in a Realistic Neutrino Oscillation Model at FCC-ee](#))

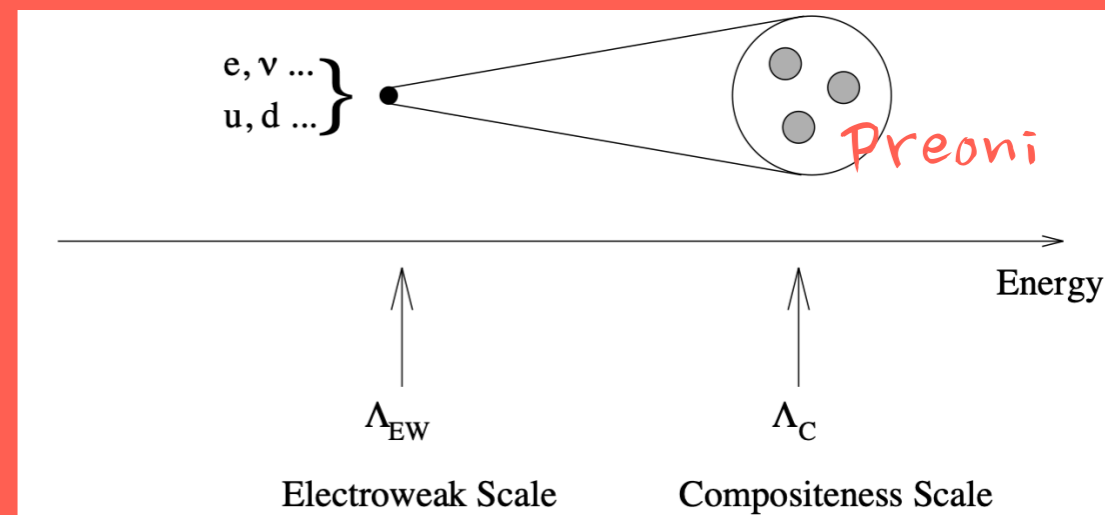
---

# Backup

# Ricerche dirette di nuova fisica in modelli compositi



## MODELLI PREONICI



H. Terezawa (PRD 22, 1980); E. Eichten, K. D. Lane, M. E. Peskin (PRL 50, 1983); H. Harari (Phys. Rep., 1984); Cabibbo, Maiani, Srivastava (PLB, 1984)

## MODELLI À LA NAMBU JONA LASINIO

$$\mathcal{L} \supset -G \sum_f (\bar{\psi}_L^f \psi_R^f \bar{\psi}_R^f \psi_L^f + \bar{\nu}_R^{fC} \psi_R^f \bar{\psi}_R^f \nu_R^{fC}) \quad G \sim \mathcal{O}(\Lambda_{cut}^{-2})$$

EFT di una teoria di gravità quantistica, scala energetica tipica  $\Lambda_{cut} \sim 10^{19} \text{GeV}$ .

Y. Nambu e G. Jona-Lasinio (Phys. Rev. 122 (1961).)

S.S.Xue PLB 737 (2014) 172-177

- Stati finali con alta massa invariante/momento trasverso
- Accoppiamenti di tipo efficace con le particelle SM, con distinzioni in base al modello