

Consiglio di Sezione,
INFN Perugia 2023.



ENP (Exploring New Physics)

Modelli Compositi e Teorie di Campo Efficaci ai
collider presenti e futuri ed esperimenti di bassa
energia

Il gruppo di Perugia

Orlando Panella	(Ric. INFN: 100% CSN IV)
Matteo Presilla	(Assegn. INFN: 20% CSN IV, 80% CSN I - fino al 30/04/2022, ora presso KIT (Germania) con possibilità di associazione INFN)
Sehar Ajmal	(Dottoranda XXXVI ciclo: 30% CSN IV, 70% CSN I)
Costanza Carrivale	(Dottoranda XXXVIII ciclo: 30% CSN IV, 70% CSN I)
Luca Pacioselli	(Borsista INFN) 100% CSN IV
Sofia Giappichini	(Tesisista magistrale) 100% CSN IV

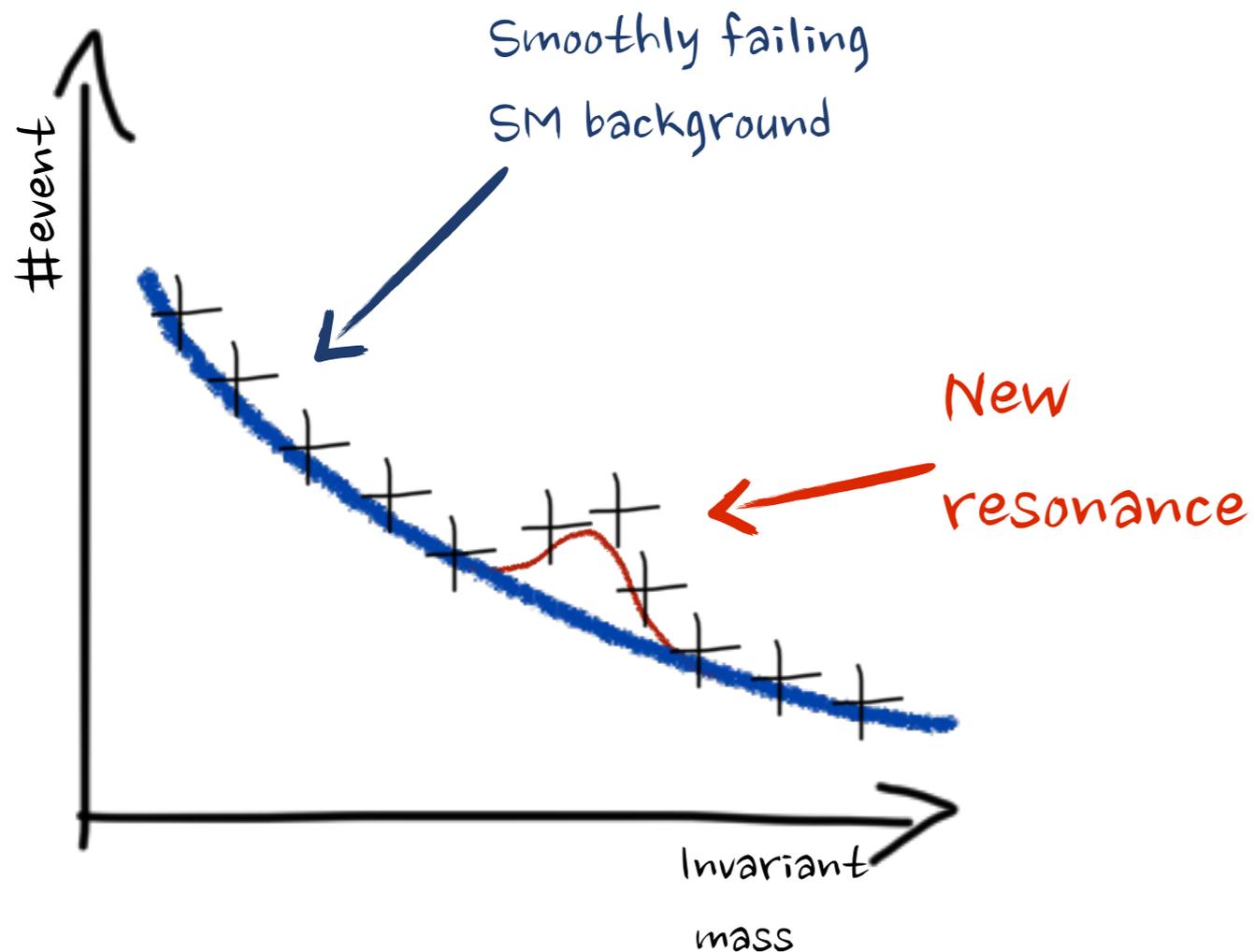
Altre collaborazioni del gruppo:

- “Storica” connessione con il **gruppo CMS** della ns. sezione, allargato più recentemente alla sezione di Padova (dettagli delle attività nel **contributo CSN1 CMS**)
- F.Vissani (INFN L’Aquila), S.Dell’Oro (INFN MiBi), S.Biondini (Basel)
- H.Sun (Dailan University), S. Xue (IcraNet, Sapienza), CMS Vanderblidt
- R. Franceschini (Uni. Roma 3), P. Azzi (INFN Pd) - attività di fenomenologia ad FCC-ee

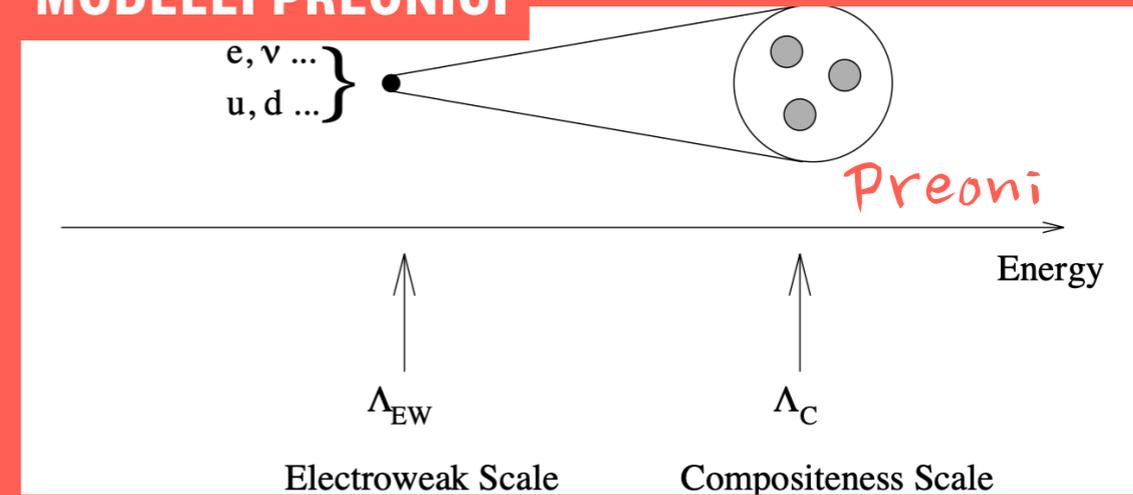
Panoramica delle tematiche trattate

- **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);

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 $\Lambda_{cut} \sim 10^{19} \text{GeV}$.

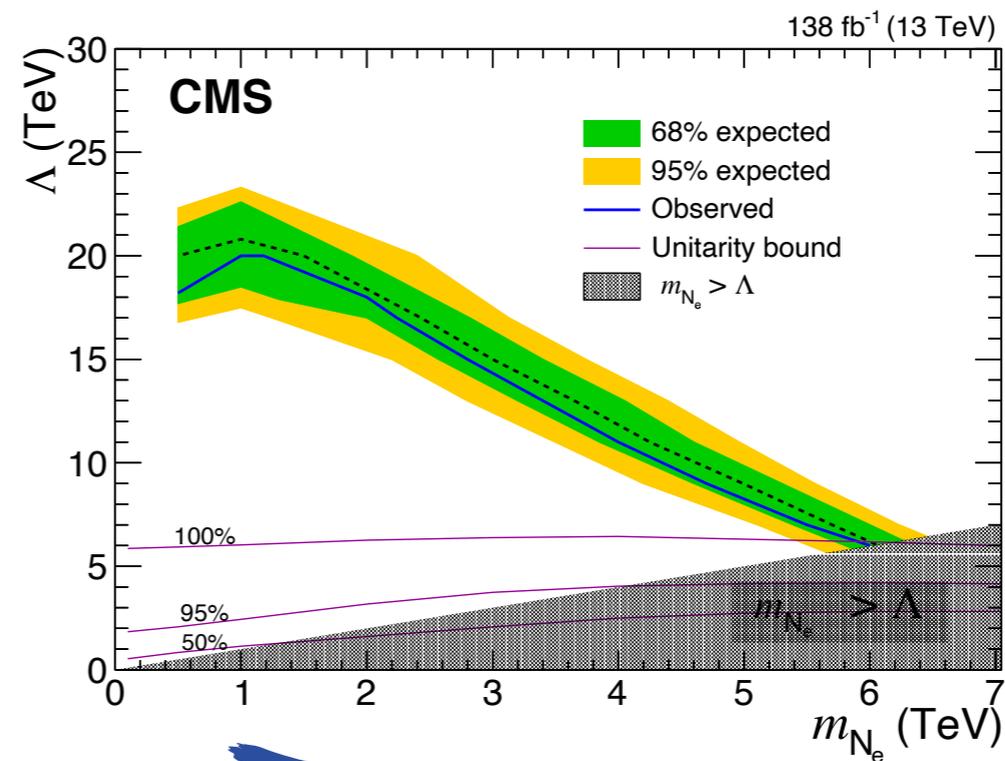
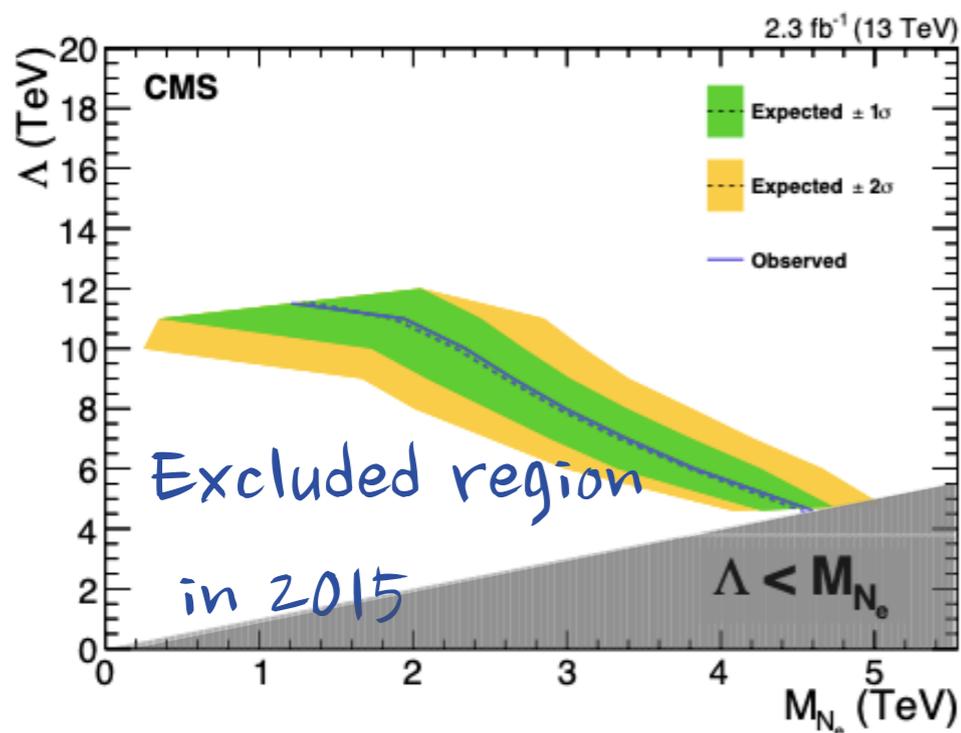
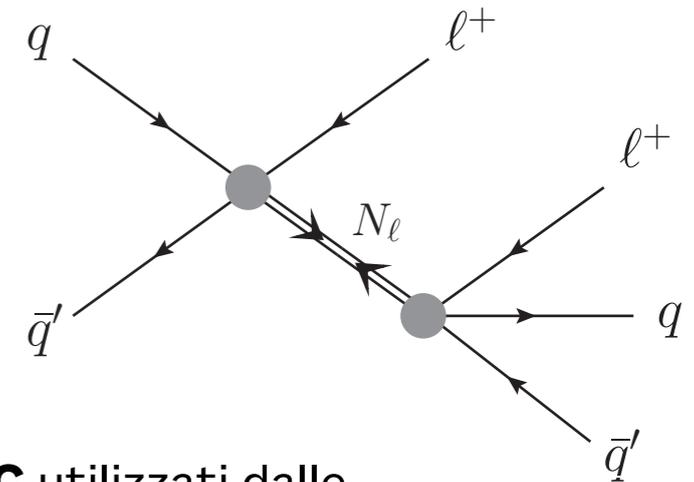
Y. Nambu e G. Jona-Lasinio (Phys. Rev. 122 (1961).)

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

Modelli compositi a preoni: ricerche sperimentali ad LHC

Modello teorico sviluppato all'interno del gruppo:
neutrini di Majorana compositi (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. O. Panella/S.Biondini

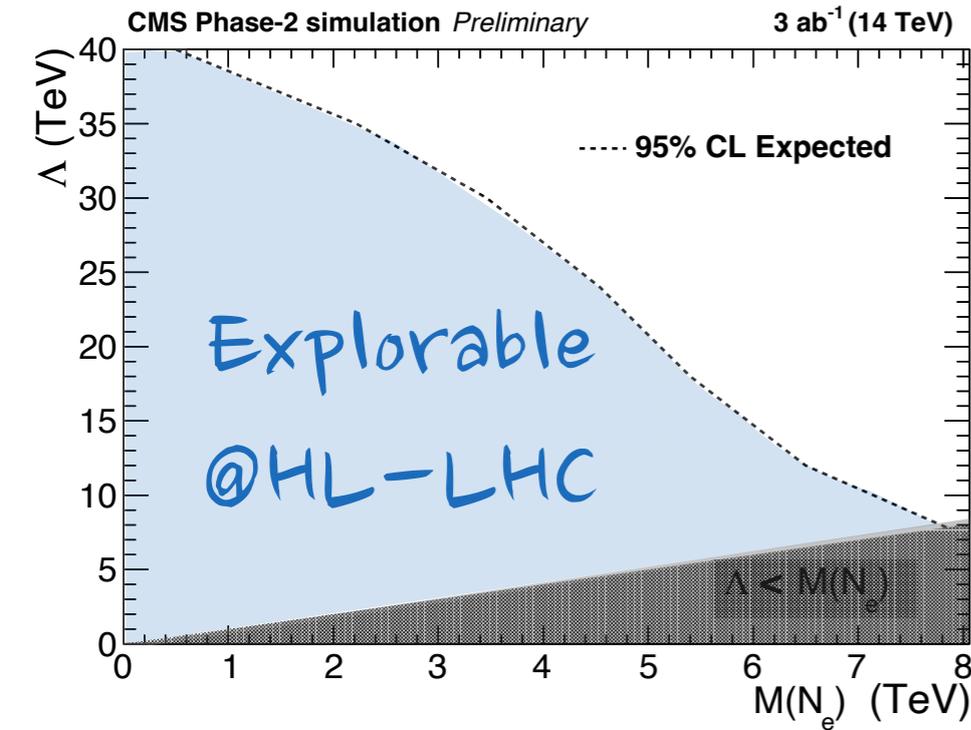
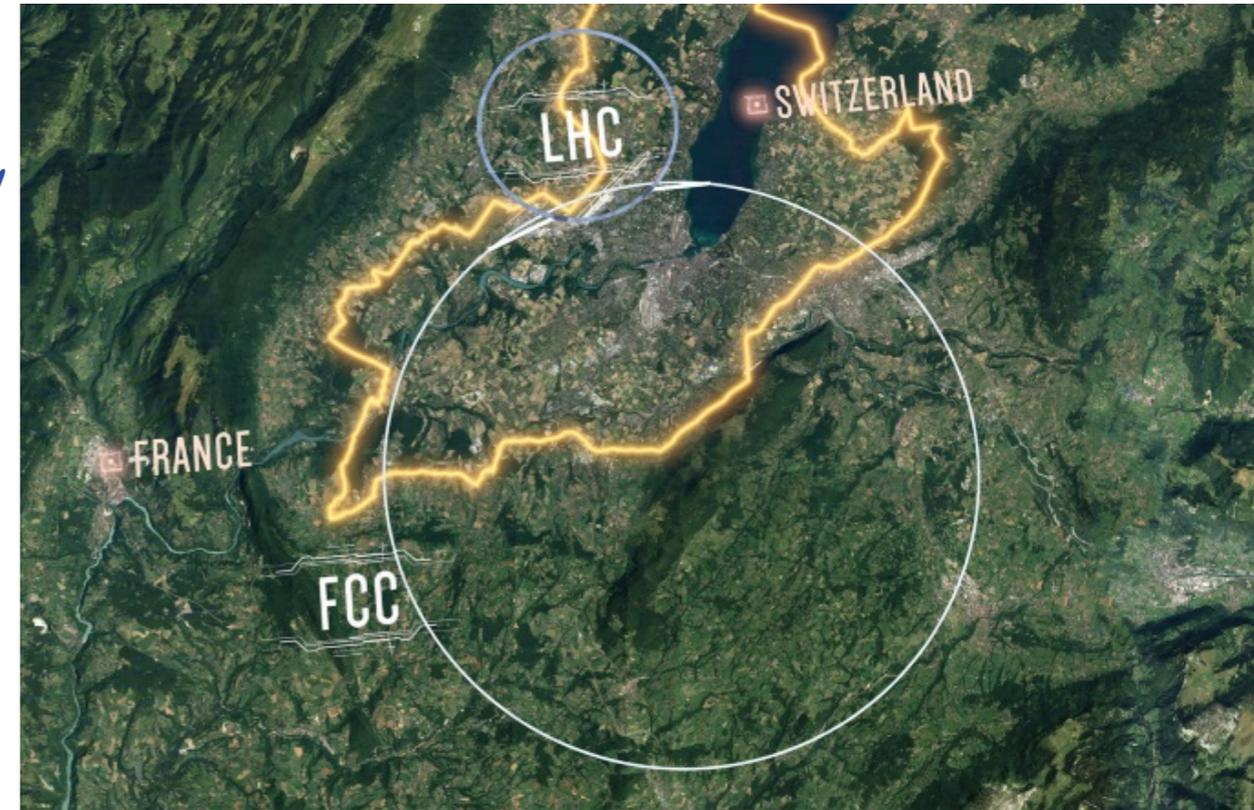
Validità delle interazioni efficaci del modello ad LHC*

Estensione a tutti i dati del RUN 2 di LHC

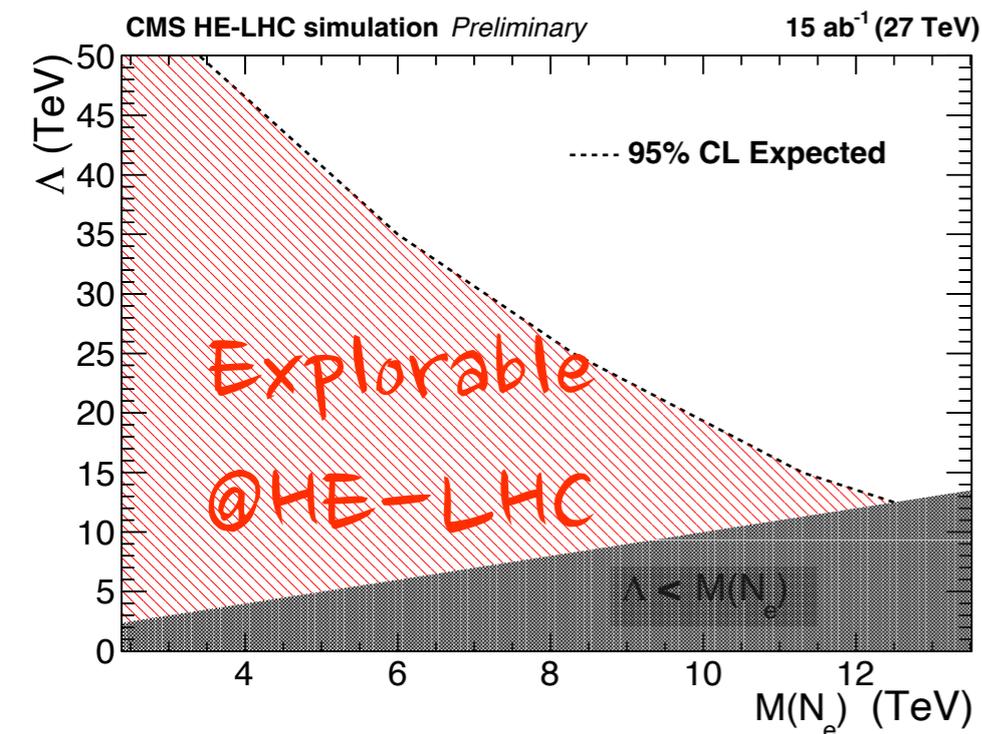
* “Perturbative unitarity bounds for effective composite models”, Biondini, Leonardi, Panella, Presilla (ArXiv.1903.12285, PLB)

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

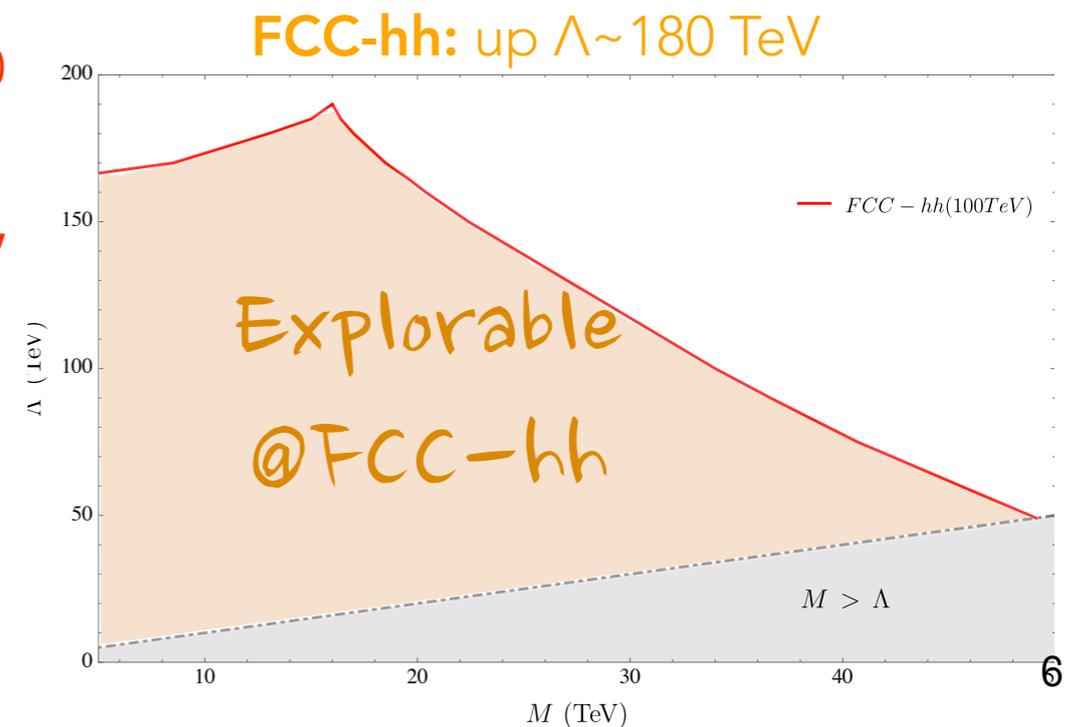
(CMS Padova, Perugia, Brown University)



HL-LHC: with 20 times statistics doubling Λ reach



HE-LHC: twice energetic and 60 times more statistics => $M(N)$ up to 12 TeV, Λ up to 55 TeV



Fenomenologia di neutrini pesanti ad FCC-ee

Long-Lived heavy neutral leptons

[tesi 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.

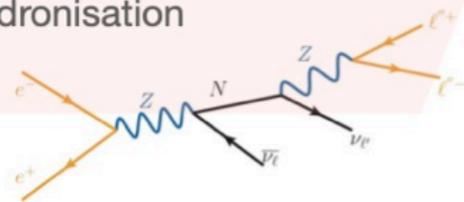
Stato finale analizzato caratterizzato da due neutrini e due leptoni carichi.

Tipico workflow:

Typical workflow

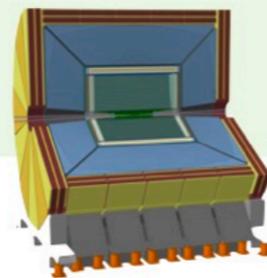
Sample generation of models

- MadGraph5_aMC@NLO for parton-level e^+e^-
- PYTHIA for parton shower and hadronisation



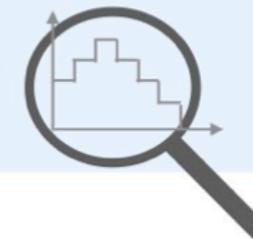
Parametrised detector simulation

- IDEA DELPHES card

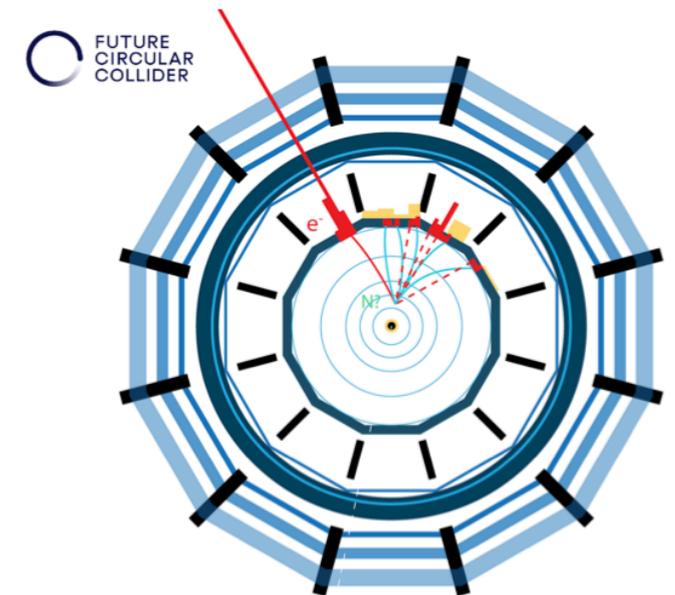


Analysis tools

- FCC analysis



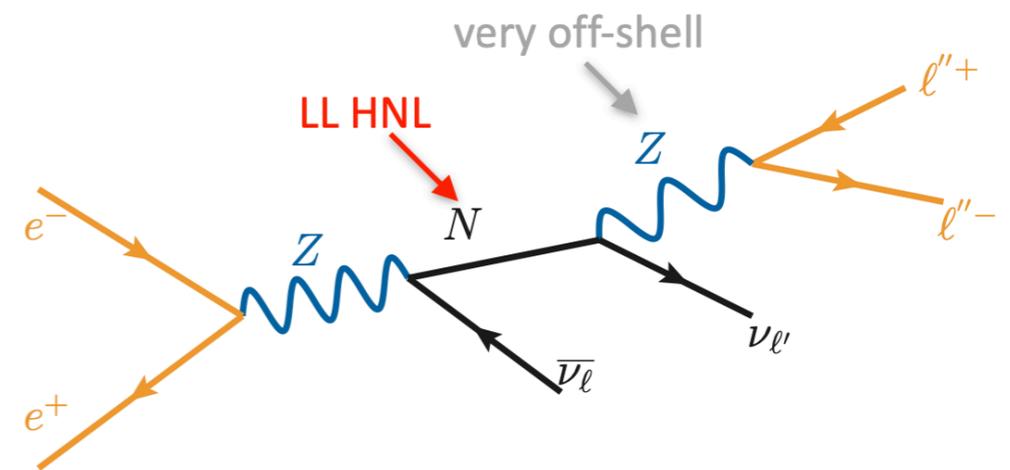
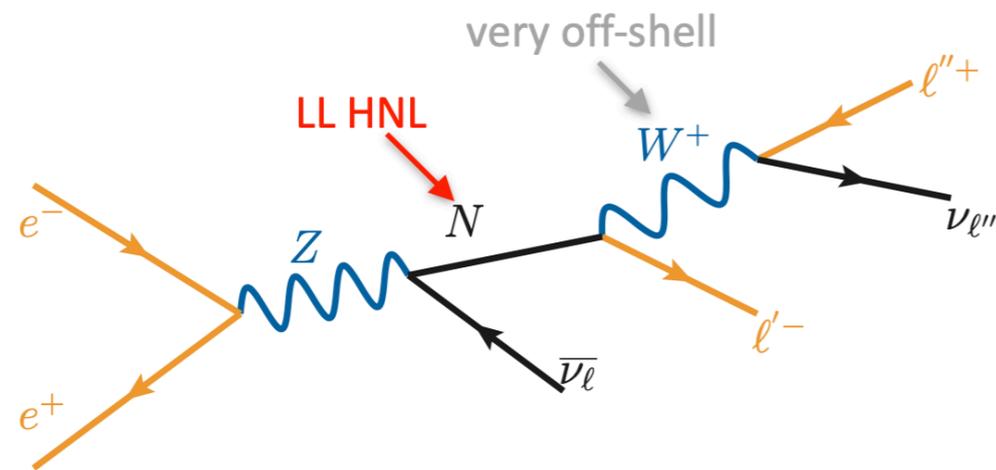
Sensitivity to studied model



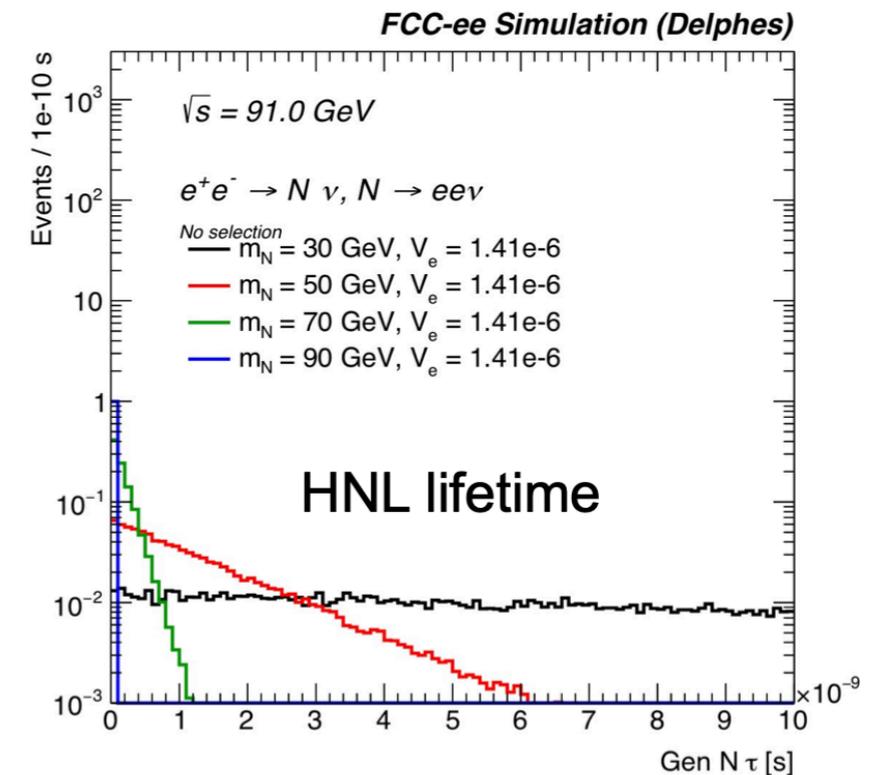
Fenomenologia di neutrini pesanti ad FCC-ee

Long-Lived heavy neutral leptons

[tesi magistrale di S. Giappichini - settembre 2023]



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



Fenomenologia di neutrini pesanti ad FCC-ee

Long-Lived heavy neutral leptons

[tesi magistrale di S. Giappichini - settembre 2023]

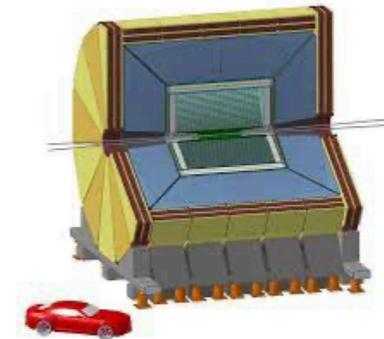
Si usano software di simulazione di collisioni, con energia del centro di massa di 91 GeV, per studiare la risposta del detector di tipo “IDEA” (uno dei possibili rivelatori proposti per FCC-ee).

Lavoro in fase di completamento:

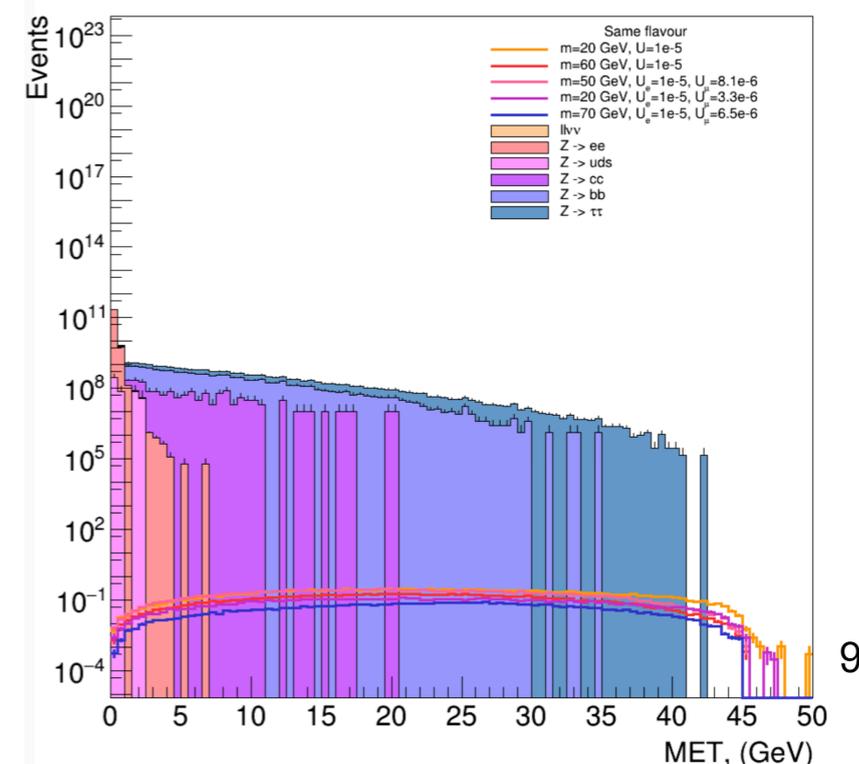
- Sono stati riprodotti i risultati ottenuti considerando un solo HNL da lavori precedenti
- Si è analizzato lo spazio dei parametri di due HNLs che decadono in elettroni e muoni, per massimizzare la sezione d’urto le masse sono quasi degeneri
- Si stanno considerando i possibili fondi del segnale analizzando diverse variabili d’interesse per le particelle long-lived, selezionando segnature con leptoni di stesso o diverso sapore
- Si vuole stimare 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



Doppio decadimento beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$) e modelli compositi

- Recente collaborazione con S. Xue (IcraNet, Sapienza) per argomento di tesi magistrale di L. Pacioselli, in fase di estensione e pubblicazione durante la sua attività di Borsista INFN.
- **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:



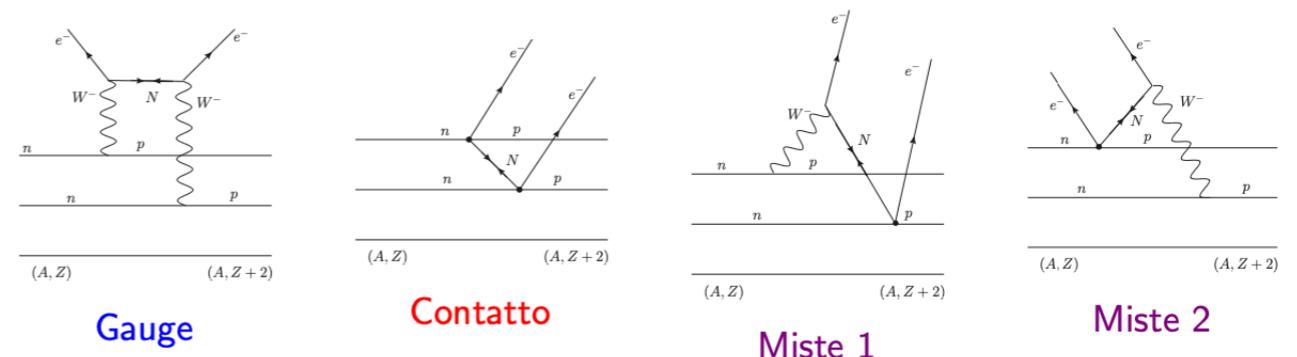
$T_{1/2}(90\% \text{ C. L.}) > 1.8 \times 10^{26} \text{ yr}$



$T_{1/2}(90\% \text{ C. L.}) > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr}$

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.



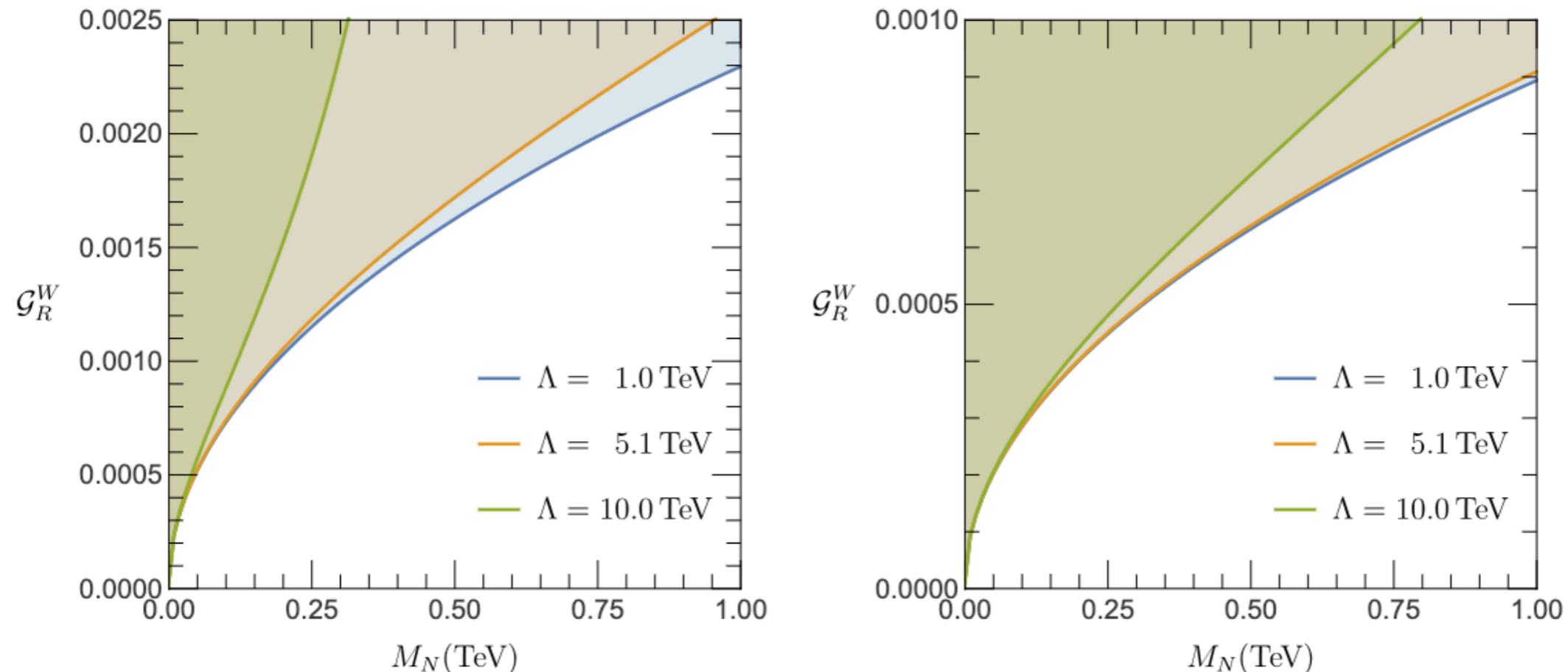
$$(T_{1/2}^{0\nu})_{exp} \leq \frac{M_N^2}{(G_R^W)^4} \left(\frac{1}{m_p^2 |\mathcal{M}_{0\nu}|^2 G_{11}^{(0)}} \right) + \frac{\Lambda^4 M_N^2}{(G_R^W)^2} \times \left(\frac{2(G_F \cos\theta_C)^2}{m_p^2 |\mathcal{M}_5|^2 G_{66}^{(0)}} \right) + \Lambda^8 M_N^2 \left(\frac{64(G_F \cos\theta_C)^4}{m_p^2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

Gauge

Miste

Contatto

Complementarità tra misure sperimentali a scale di energie differenti



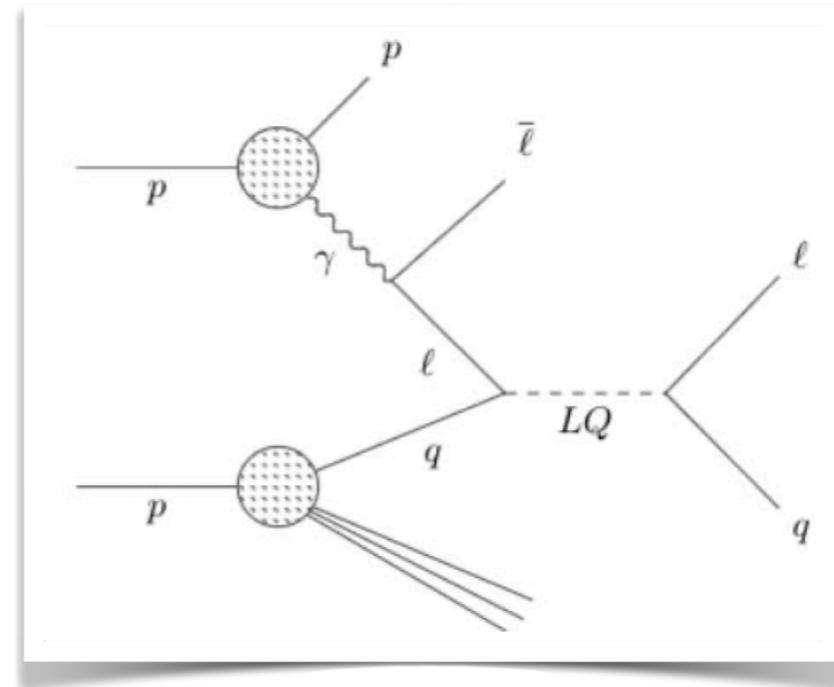
- **Limiti sui parametri \mathcal{G}_R^W , Λ , $M(N)$ del modello composito** di riferimento, ottenuti per tempi di dimezzamento misurati dalla collaborazione KamLAND (sinistra) e proiezioni sulle sensibilità dei futuri esperimenti $0\nu\beta\beta$ (destra)
- I **limiti ottenuti sono compatibili con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

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 di un nuovo modello da scenari compositi NJL, studio di sensitività
- Argomento parte del **progetto di dottorato di S. Ajmal**.
In collaborazione con IcrNet/Sapienza, CMS Vanderbilt.

Nuovi meccanismi di produzione dei LeptoQuarks

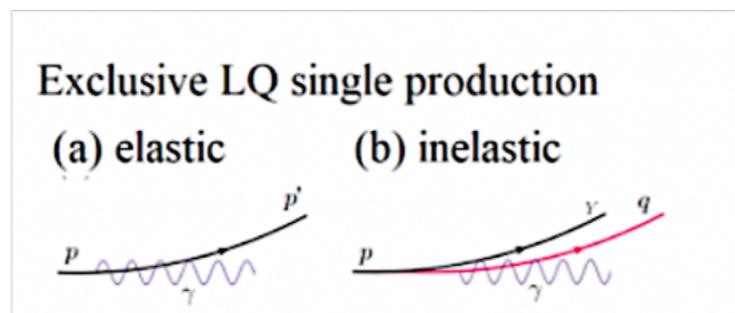
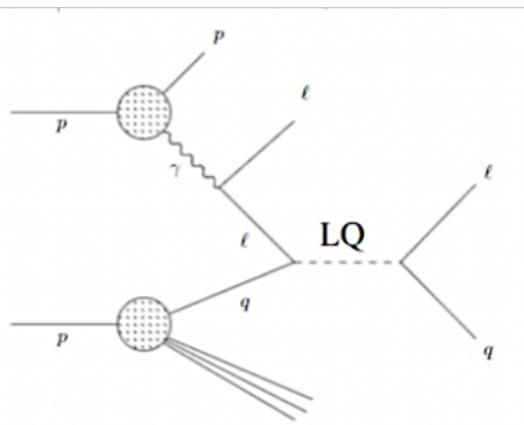
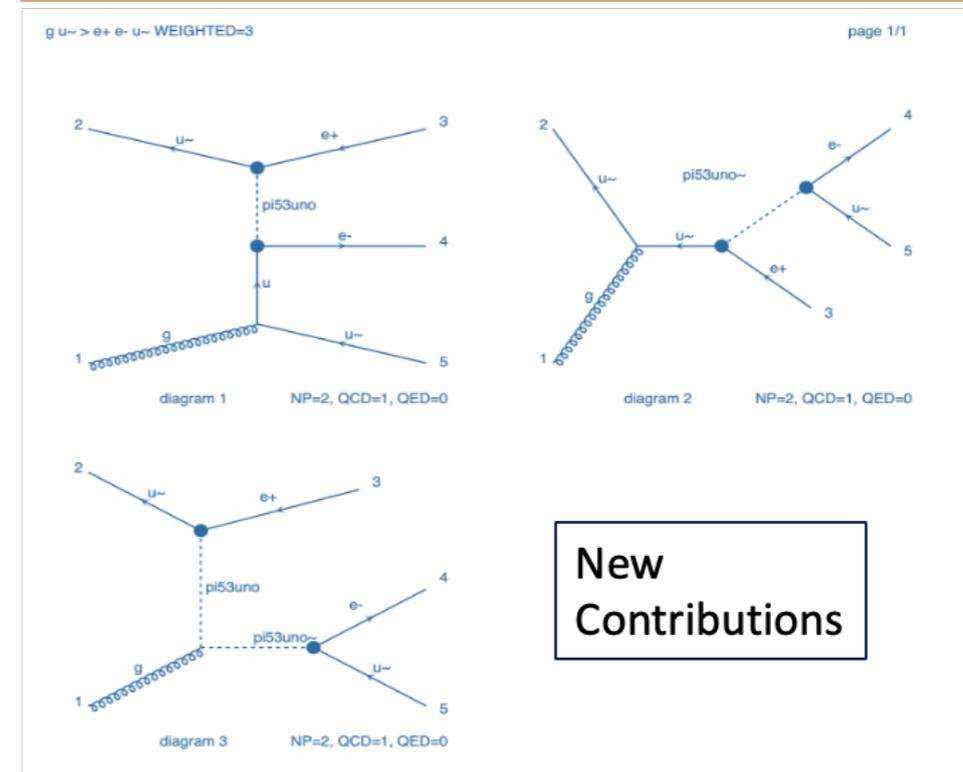
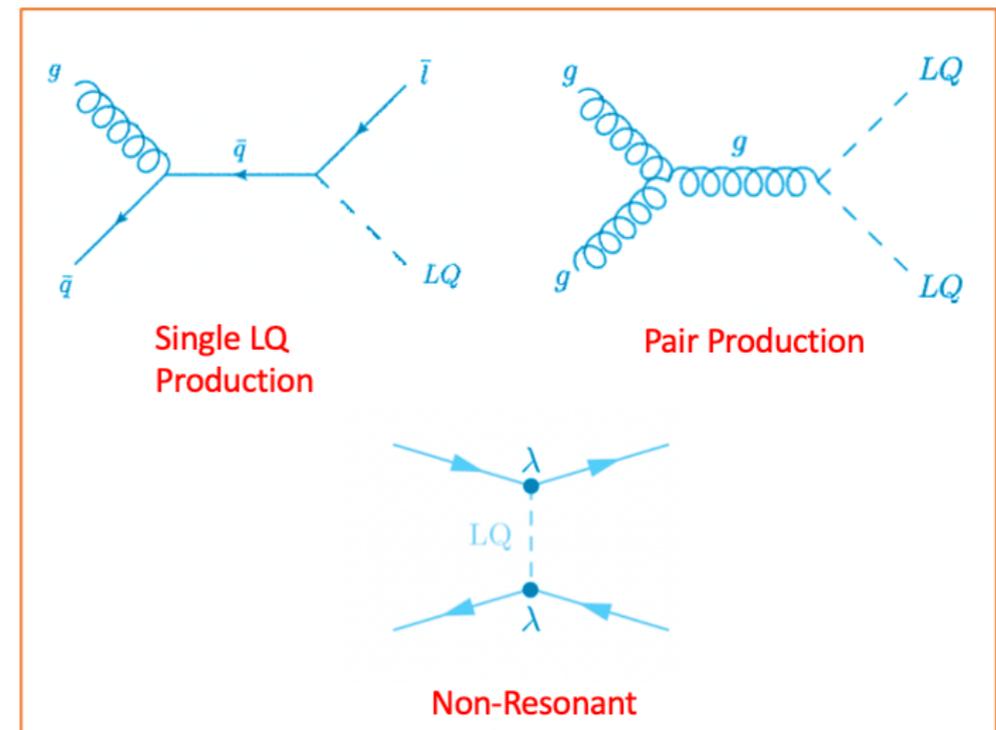
Analizzare diversi meccanismi di produzione.

Produzione esclusiva: canale singolo, coppia e t-channel (già discusso in letteratura)

Inoltre, la produzione inclusiva di segnali fornisce nuovi contributi con $p p \rightarrow \ell + l - 0123 j$ e $\gamma p \rightarrow \ell + l - 123 j$

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

Stiamo anche analizzando il contributo elastico e anelastico in un nuovo processo con fotone nello stato iniziale.



Nuovi meccanismi di produzione dei LeptoQuarks

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

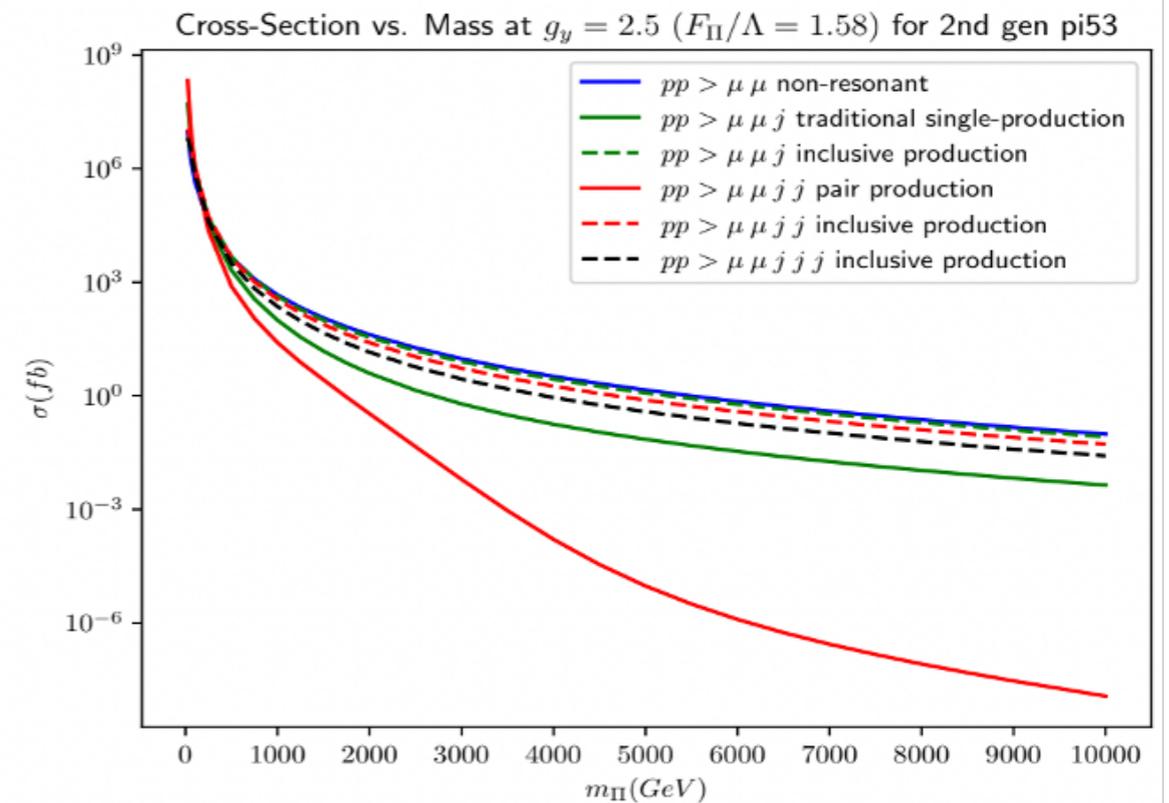
Studi preliminari su xsec mostrano:

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

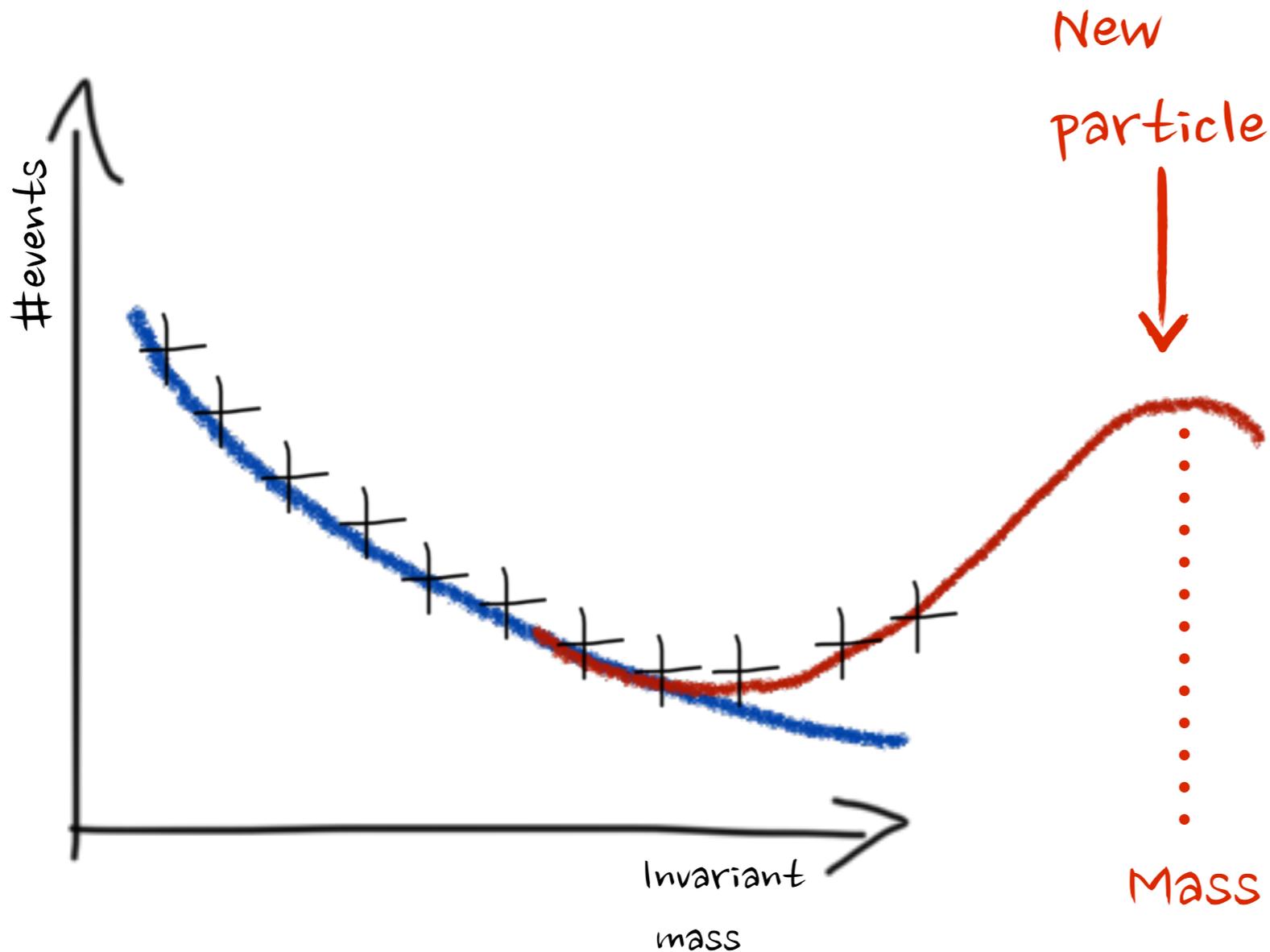
Stiamo ora calcolando le curve di significatività a 3 e 5σ per i vari tipi di processi accessibili ad LHC per quantificare l'impatto di questi nuovi meccanismi.

S. Ajmal, J. T. Gaglione, A. Gurrola, O. Panella, M. Presilla,⁴ F. Romeo, H. Sun, and S. S. Xue
[in fase di completamento]

CROSS-SECTION STUDIES, $g_y = 2.5$



Misure di precisione ad 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

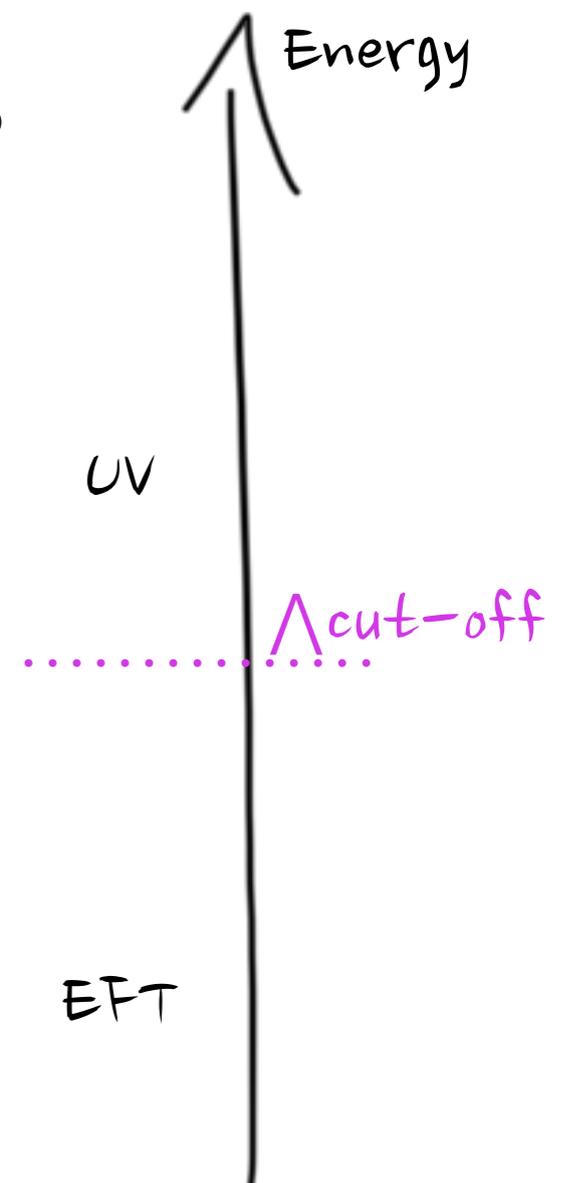
Bottom-up approach: espansione à la Taylor

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

New BSM couplings
(Wilson coefficients)

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

BSM scale

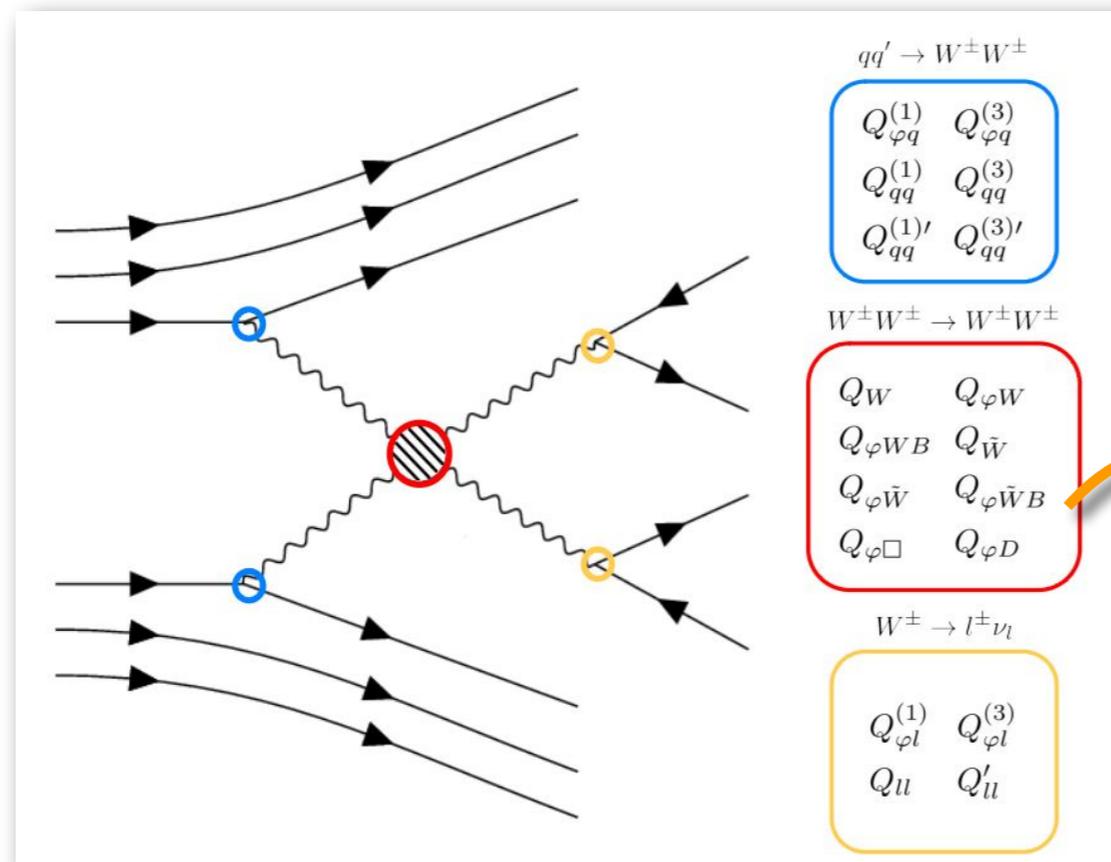


In pratica un'espansione nei campi e le loro derivate.

VBS e unitarietà nel precedente lavoro di C. Carrivale (ex-borsista INFN, ora PhD)

Importance of VBS processes in search of New Physics at LHC:

- Purely-EW decay channel of W s presents both **triple gauge couplings** and **quartic gauge couplings**
- VBS processes lead to **unitarity violation** in SM \rightarrow restored with the introduction of Higgs-mediated channels \rightarrow Strictly related to **EWBS sector**



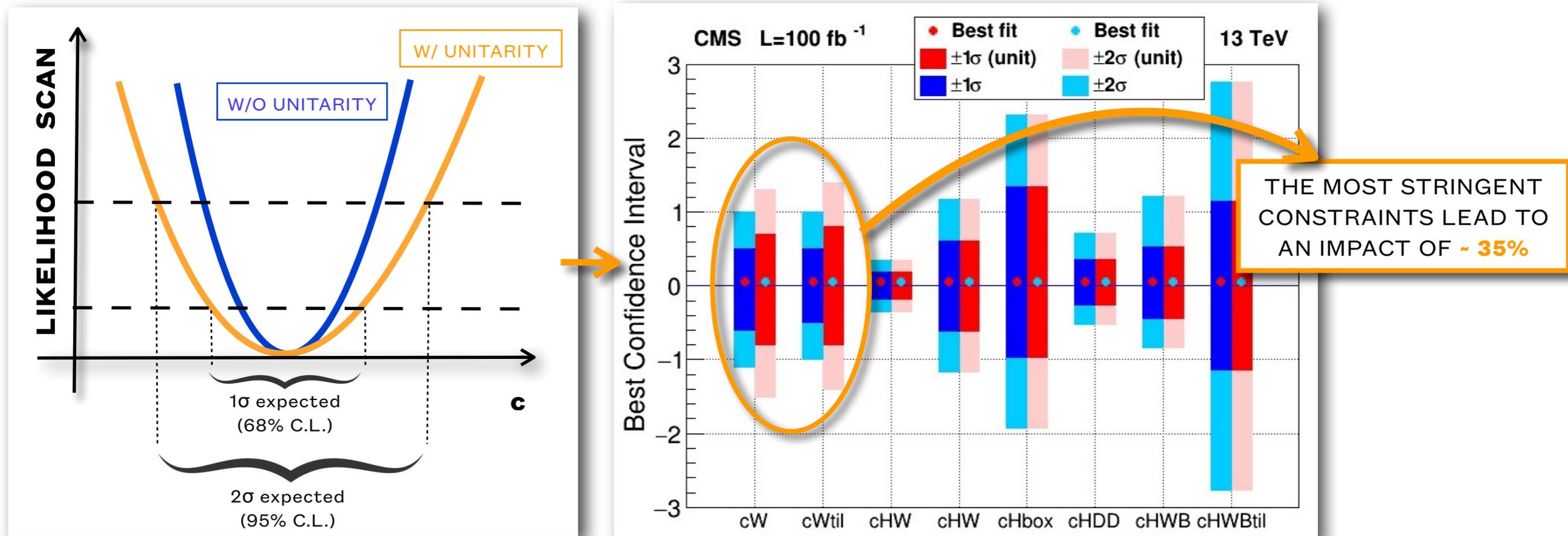
Same-sign WW VBS:
 $qq' \rightarrow W^\pm W^\pm jj \rightarrow l\nu_l l'\nu_{l'}$

Nello SMEFT, l'introduzione di operatori di dimensione-6 può portare ad **ampiezze divergenti**

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

*Argomento di tesi magistrale di C. Carrivale, in fase di pubblicazione durante la sua attività di borsista.

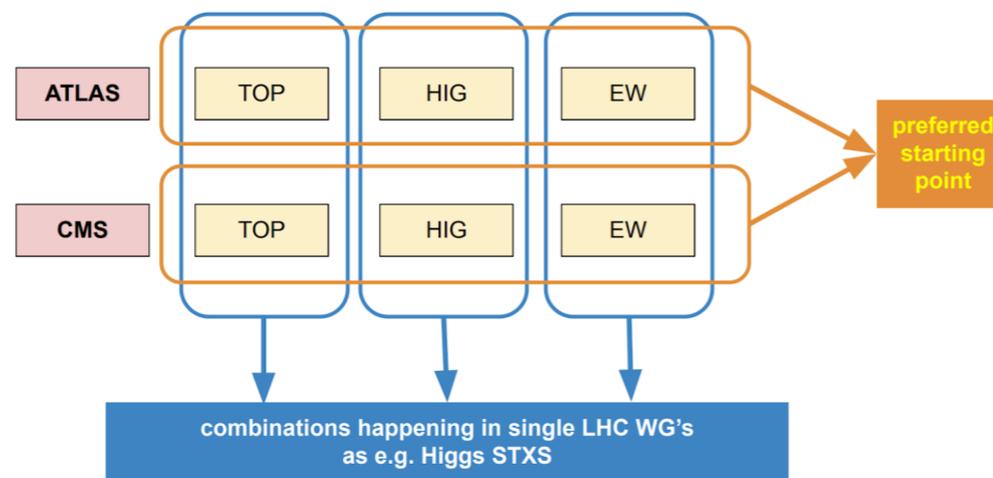
Impatto della ricerca



- Attività in sincrono con la misura sperimentale in corso
“Vector Boson Scattering measurement of same-sign W boson pairs with hadronic taus in the final state” CMS Perugia/LIP (si veda CSN 1 CMS)
- Impatto diretto sullo spazio dei parametri accessibile dalla misura sperimentale in un modello di teoria efficace consistente
=> ottimizzazione dell’analisi sperimentale

Attività di ricerca all'interno dell'LHC EFT WG

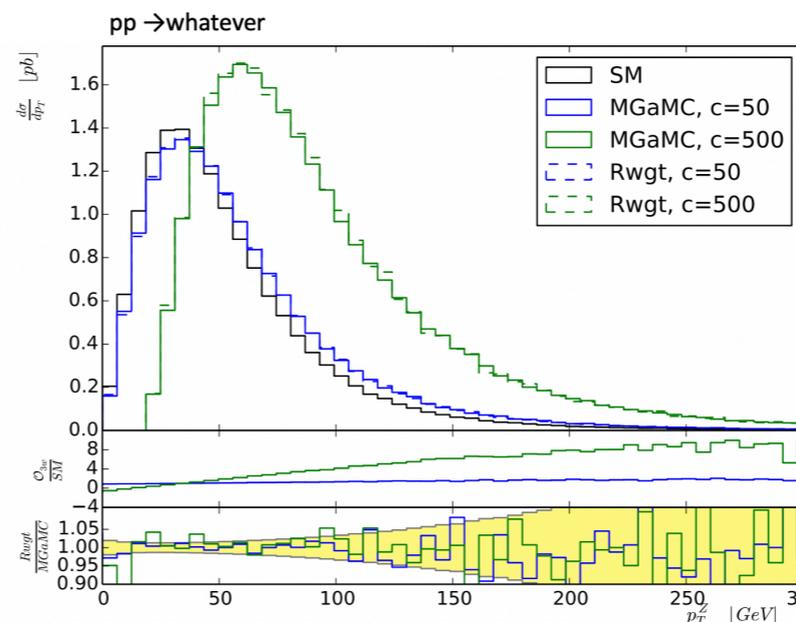
Attività dell'LHC EFT working group per la futura combinazione globale (ATLAS/CMS) delle misure di precisione del Run 2 di LHC ed interpretazione in termini del modello SMEFT



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 2 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), S. Xue in 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/Sapienza)
- 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)

Backup

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](#))
7. [L. Pacioselli](#) [LM, Aprile 2022] con [M. Presilla](#) ([Constraints on NJL four-fermion effective interactions from neutrinoless double beta decay](#))
8. [S. Ajmal](#) dottorato XXXVI ciclo. Argomento: [Fenomenologia di Leptoquarks e nuovi bosoni vettori in modelli compositi e teorie efficaci in misure di precisione](#)
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](#))