

Giornata di orientamento Tesi di Laurea  
Dipartimento di Fisica e Geologia, Università di Perugia  
Venerdì, 5 Aprile 2024.



---

# Exploring New Physics (ENP)

## Fisica oltre il Modello Standard

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

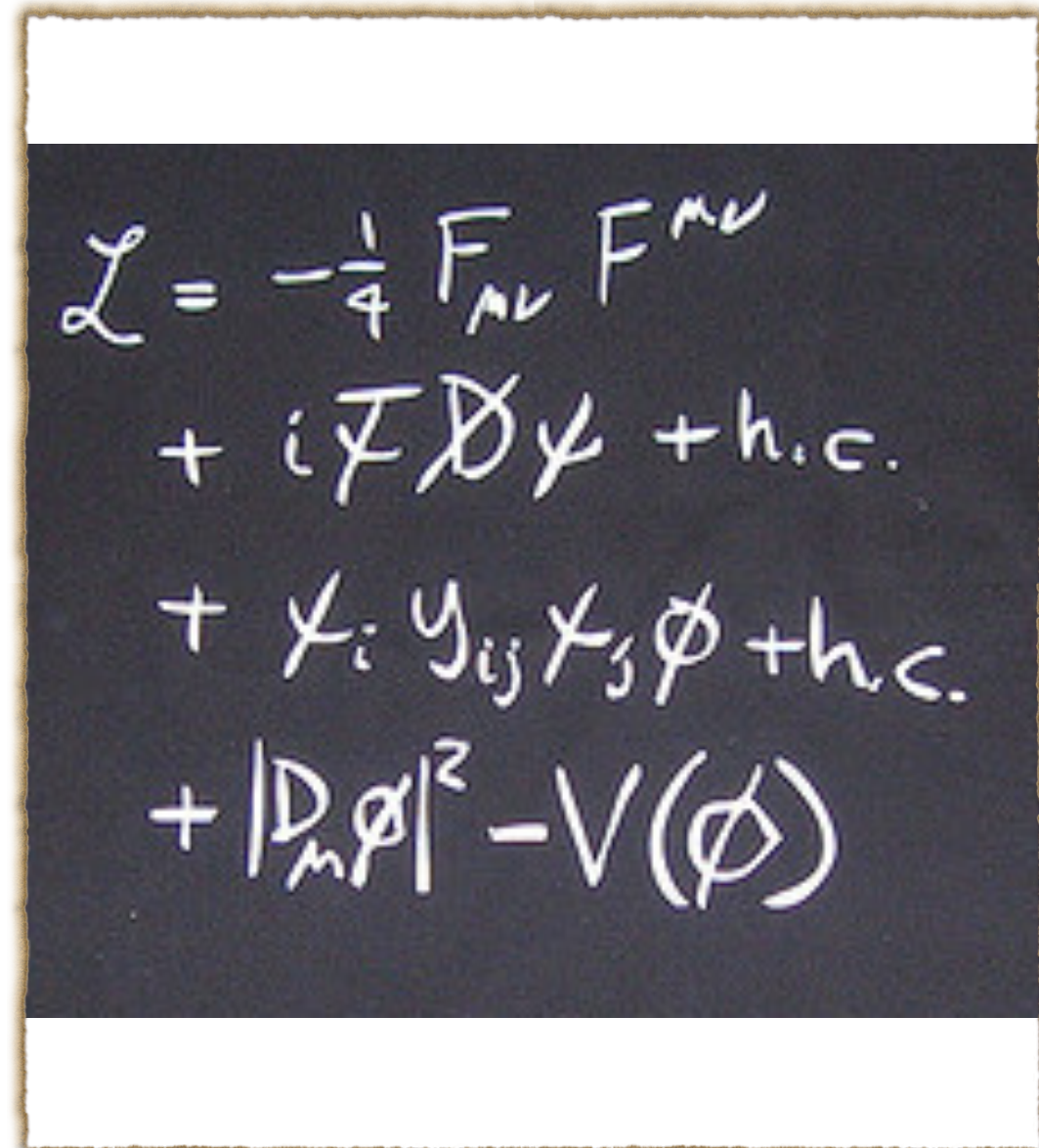
Complementarità di esperimenti a basse energie

# Scoperte fondamentali della Fisica Teorica delle Particelle

- ◆ 1934: Teoria efficace del **decadimento beta** (Enrico Fermi)
- ◆ anni 1940: Feynman, Schwinger e Tomonaga formulano la teoria di campo dell'elettromagnetismo (**elettrodinamica quantistica o QED**)
- ◆ anni 1960 Glashow, Weinberg e Salam formulano il **modello standard** unificando le interazioni elettro-deboli
- ◆ anni 1960-1970: scoperta dei quark costituenti del protone (formulazione della **cromo-dinamica quantistica QCD**)
- ◆ 1983: Rubbia e Van der Meer coordinano **l'osservazione sperimentale dei bosoni di gauge W,Z** che propagano le interazioni deboli e previsti dal modello standard.
- ◆ 1998: scoperta dell'oscillazione dei neutrini (**massa dei neutrini**) Esperimento Super-Kamiokande
- ◆ 2012 Scoperta del **bosone di Higgs** a LHC (CERN)

# Il Modello Standard descrive le interazioni fondamentali delle particelle elementari

- ◆ Accordo eccellente con moltitudine di dati empirici fino a scale di lunghezza molto "piccole"
- ◆ E' una teoria di campo basata sul principio dell'invarianza di Gauge che incorpora meccanica quantistica e relatività ristretta
- ◆ Coinvolge aspetti della teoria dei gruppi.
- ◆ Raggiunge in alcuni casi precisioni fantastiche, anche dell'ordine di una parte su  $10^{10}$


$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\chi}_i y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Lagrangiana del Modello Standard

# Fisica oltre il modello standard ?

- ◆ Pur se in accordo impressionante con gli esperimenti il Modello Standard è dal punto di vista teorico ritenuto non completamente soddisfacente.
- ◆ Dipende da molti parametri liberi (19) come masse delle particelle, costanti di accoppiamento etc..
- ◆ Non prevede la massa dei neutrini
- ◆ Non comprende le interazioni gravitazionali
- ◆ Non fornisce un candidato per la materia oscura

# Possibili estensioni del Modello Standard

- ◆ **Super-simmetria** (simmetria dello spazio tempo che collega fermioni e bosoni). Ogni particella di spin  $s$  è accompagnata da un super-partner di spin  $s-1/2$ )
- ◆ **Extra-dimensioni** (lo spazio tempo acquista dimensioni spaziali addizionali)
- ◆ **Modelli Compositi** (i quarks e i leptoni non sono puntiformi ma hanno una struttura interna)

---

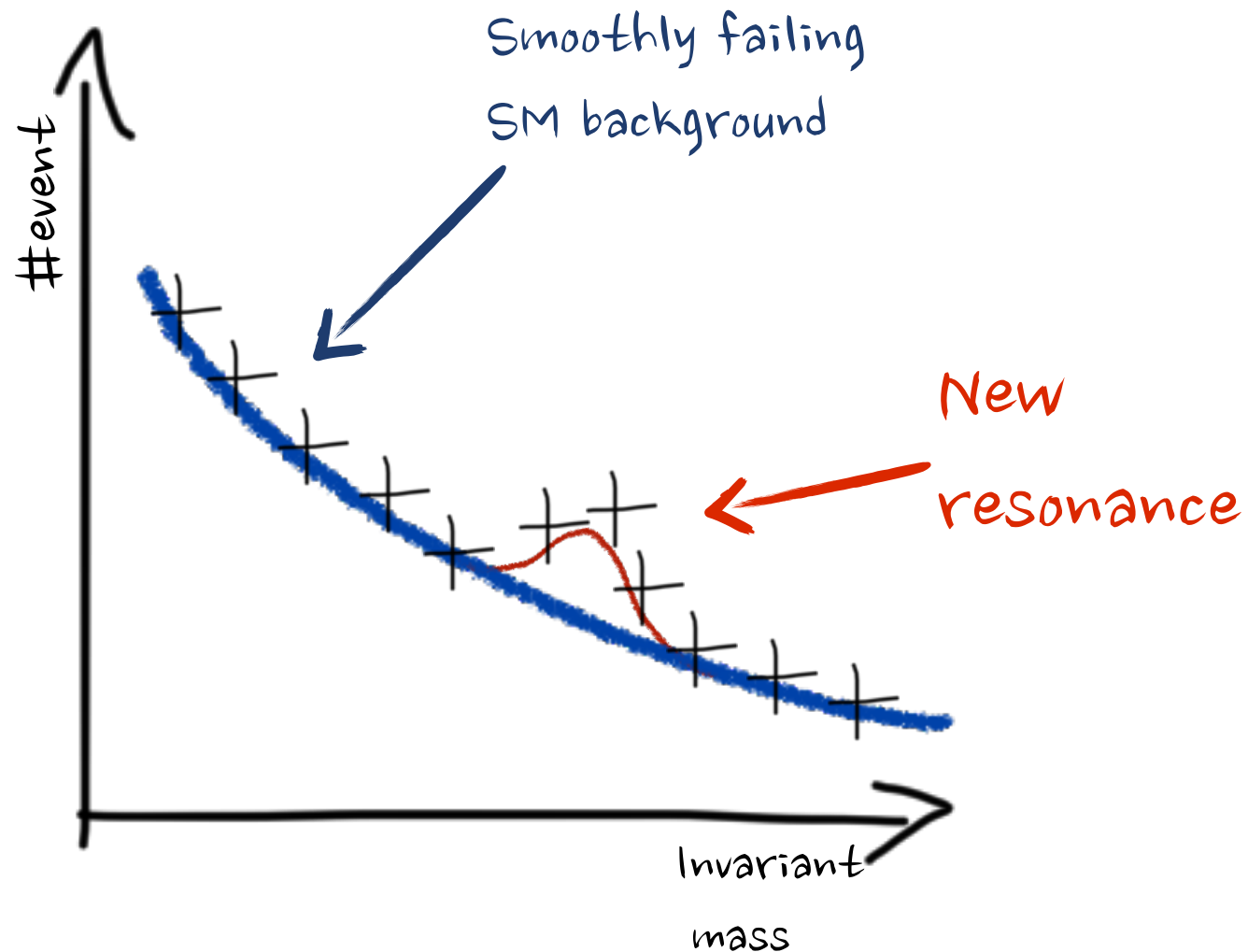
# Panoramica delle tematiche trattate

- **Definizione e sviluppo di modelli** che prevedano l'esistenza di fermioni compositi, studio delle loro interazioni con le particelle 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 alla Nambu Jona-Lasinio)
  - Teorie efficaci del modello standard (**SMEFT**)

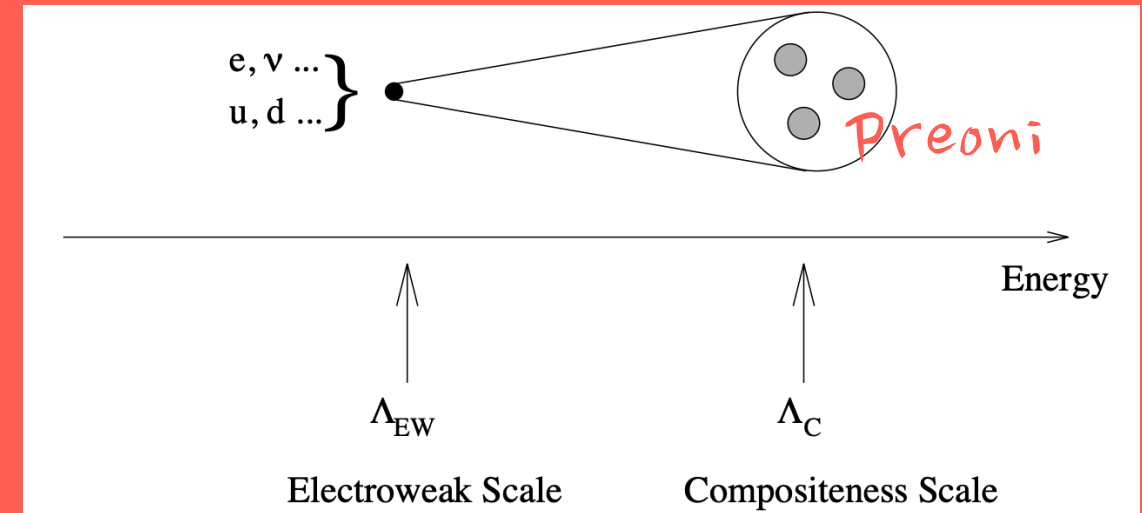




# Ricerche dirette di nuova fisica in modelli compositi



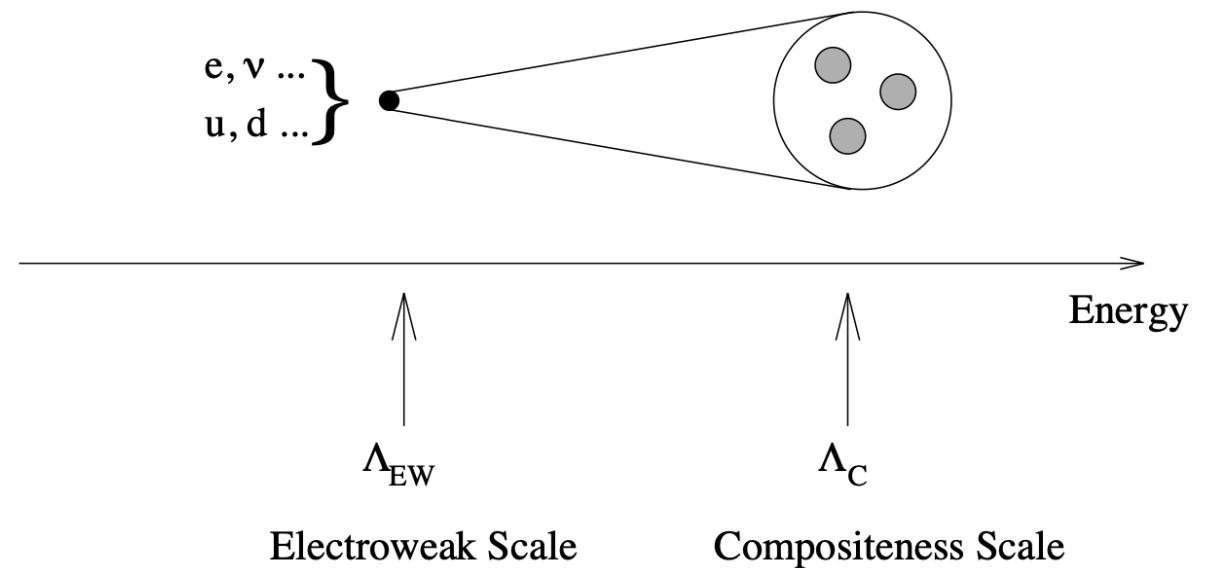
## MODELLI PREONICI



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)

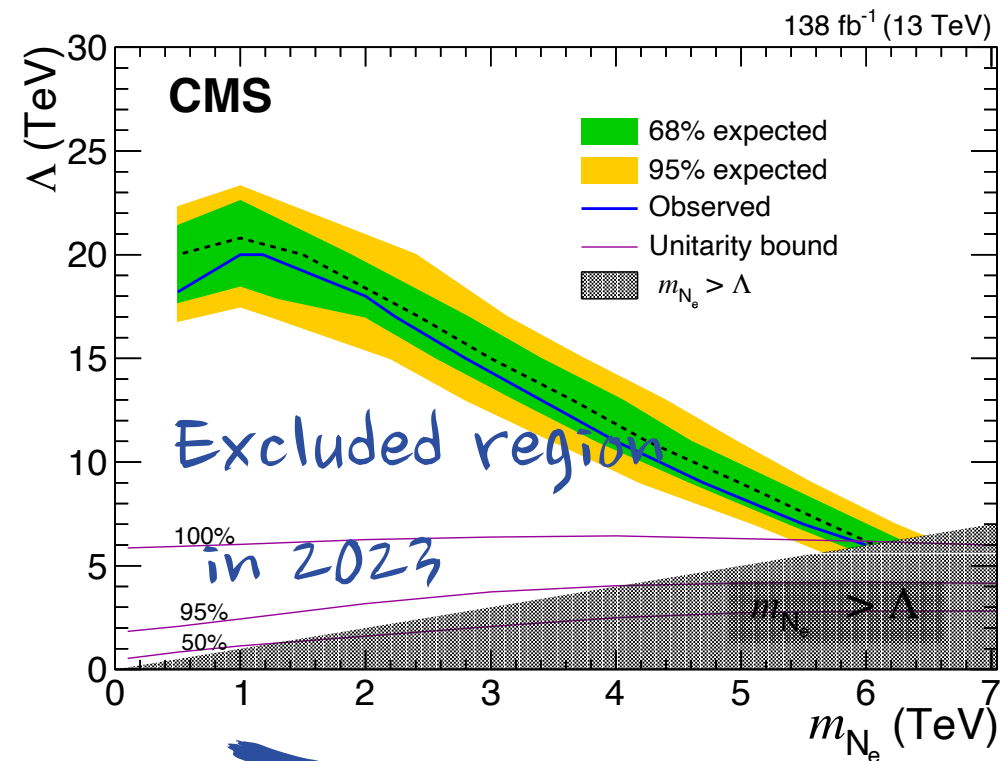
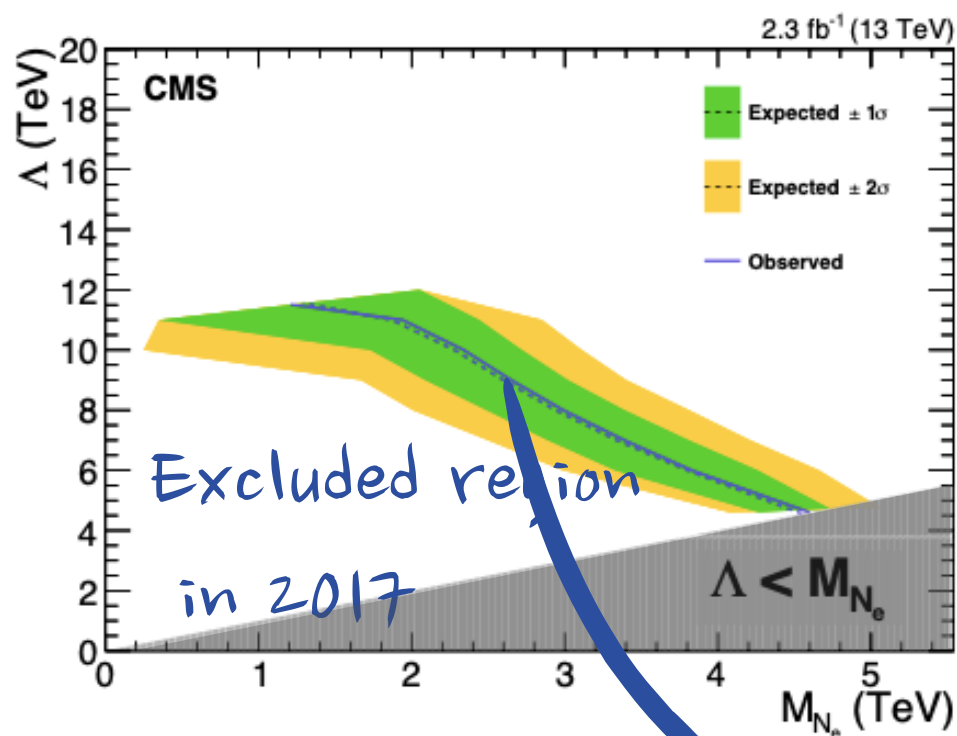
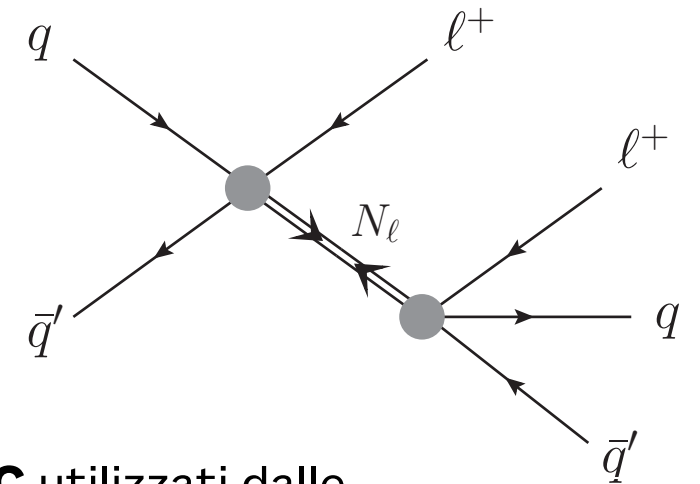
- ◆ Standard normalisation is:  $g_*^2 = 4\pi$
- ◆ Fermion interactions are obtained as an effective field theory after the high energy modes ( $\approx \Lambda$ ) have been integrated out
- ◆ Implementation in the CalcHEP generator

⇒ 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)**

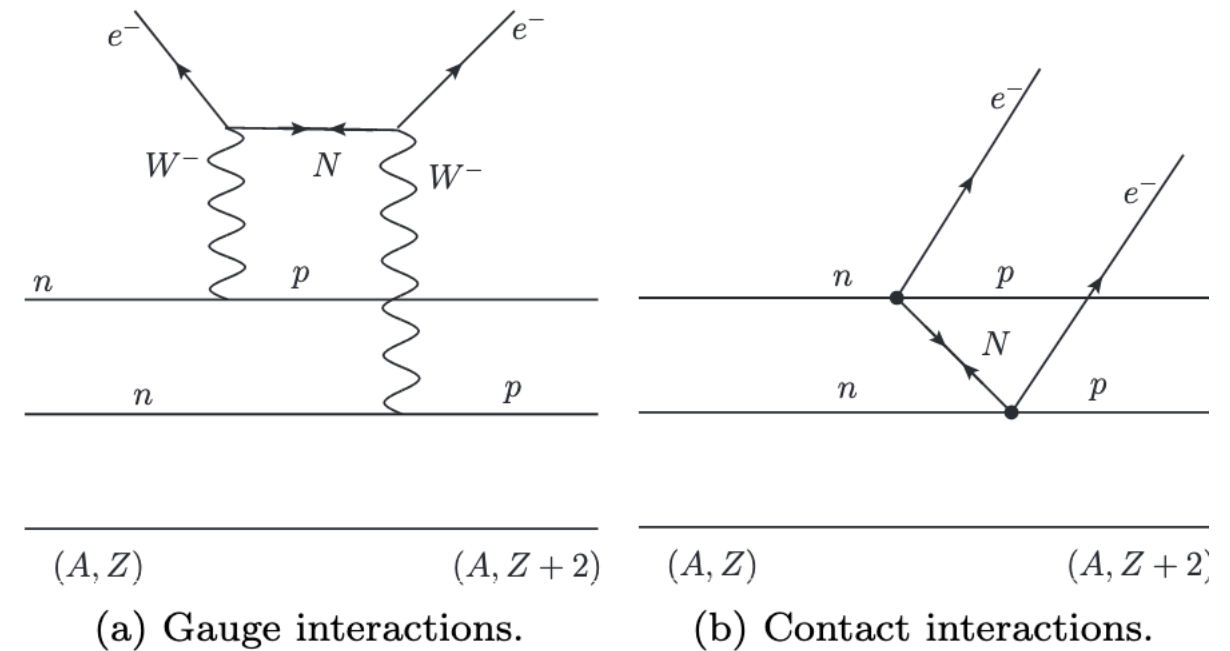


# Complementarità esperimenti di bassa energia ( $0\nu\beta\beta$ ) e neutrini compositi

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

- Decadimento Nucleare raro che **viola la conservazione del numero Leptonico**. Tipicamente associato a **neutrini di Majorana massivi**.
- $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se} + 2e^-$  (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.)  $T_{1/2}(90\% \text{ C. L.}) > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr}$
- La non osservazione dello  $0\nu\beta\beta$  è convertita in vincoli sui parametri del modello BSM.



(O. Panella et al, PRD 1997)

negligible dominant

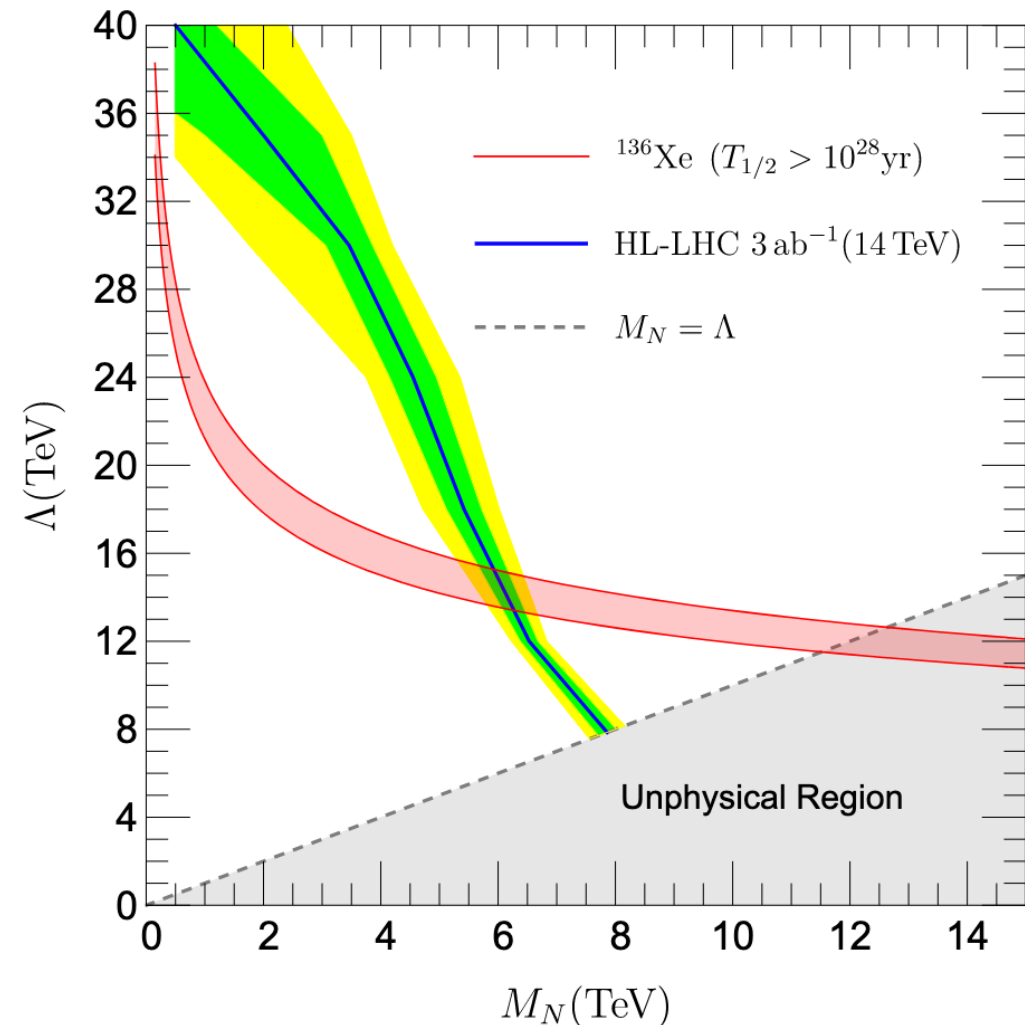
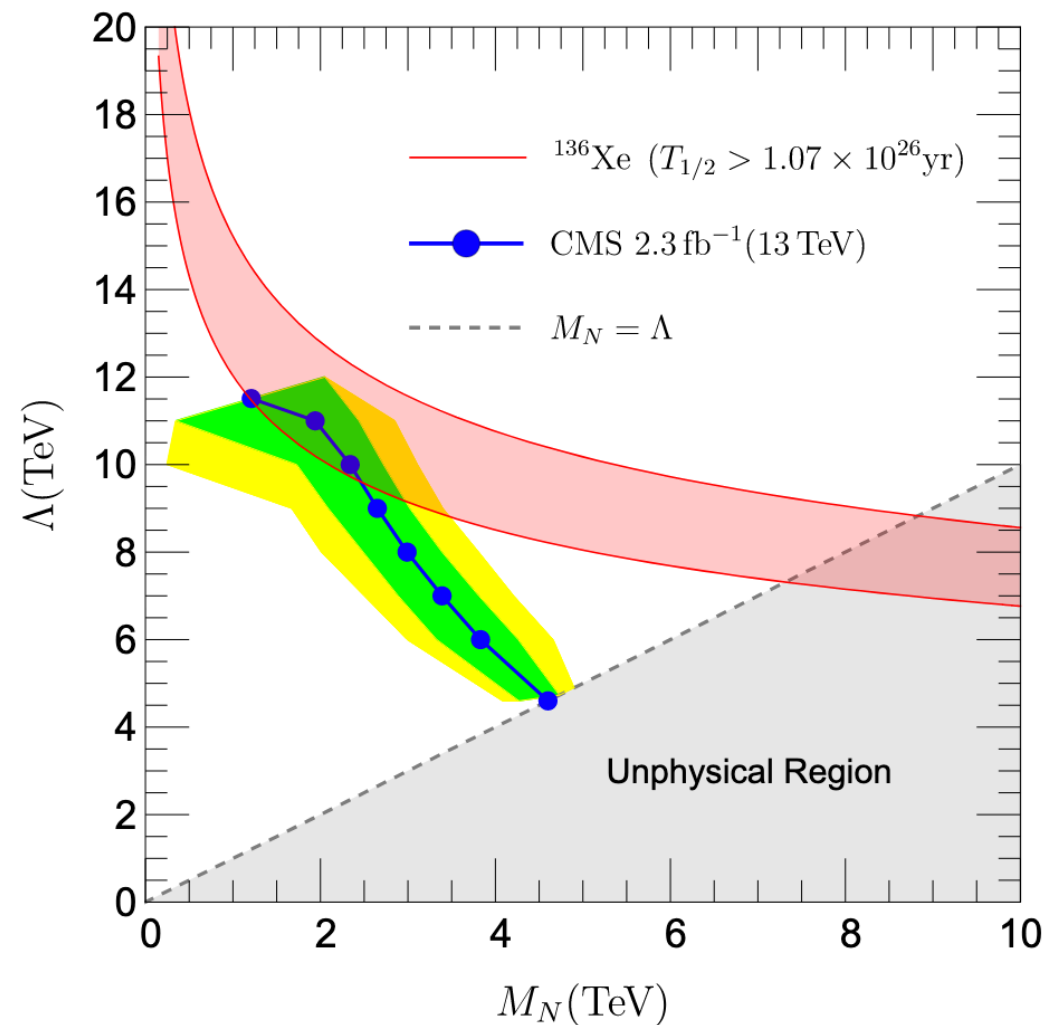
Nuclear Physics Phase Space

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

Constraints on model parameters

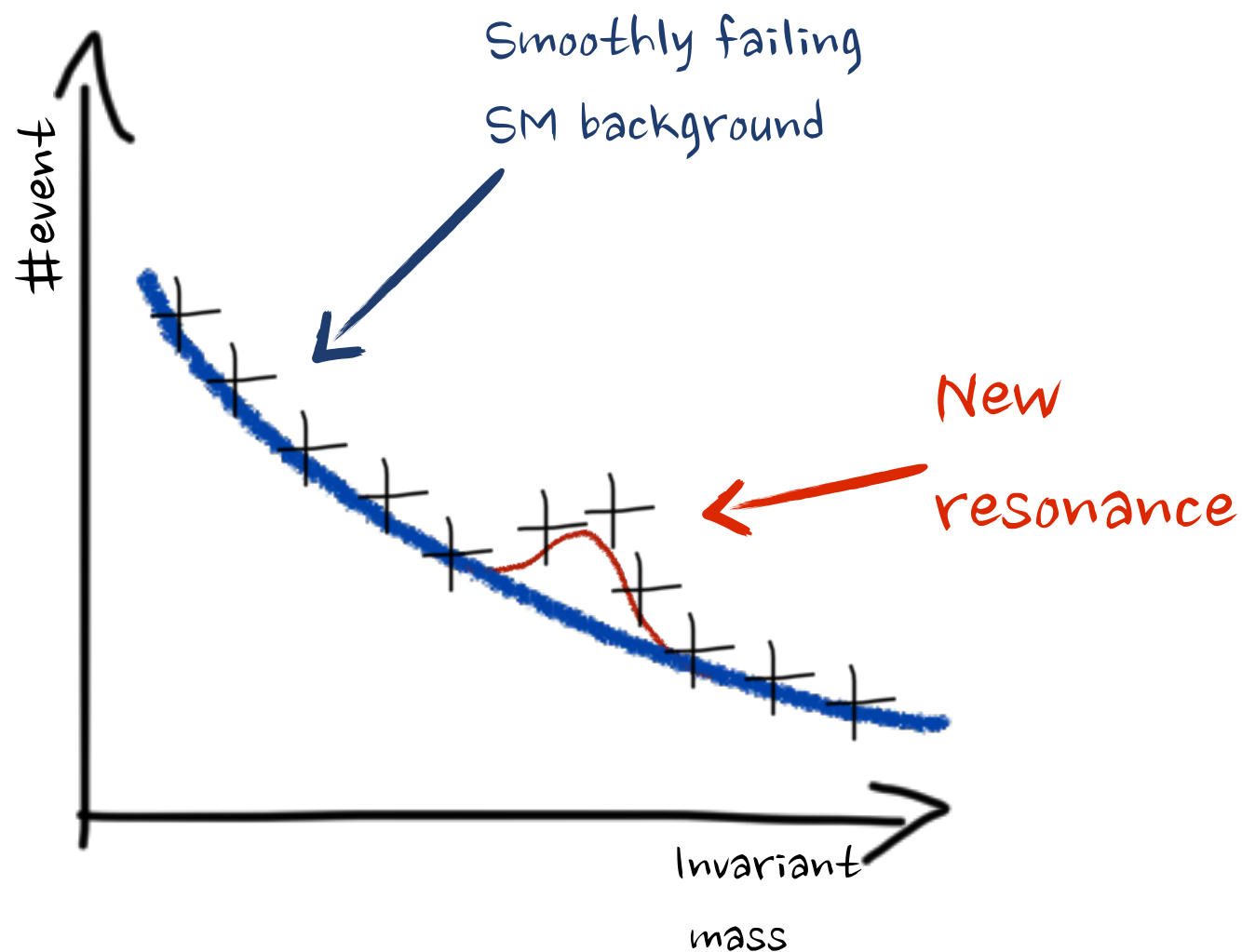
$$\Lambda \geq \frac{g_*}{2^{3/4}} \sqrt{\frac{\eta_L g_A}{G_F \cos \theta_c}} \left( \frac{m_p}{M_N} \right)^{1/4} \left( G_{01} |\mathcal{M}^{0N}|^2 T_{1/2}^{\text{exp.}} \right)^{1/8}$$

# Complementarità fra esperimenti di bassa energia e quelli di alte energia

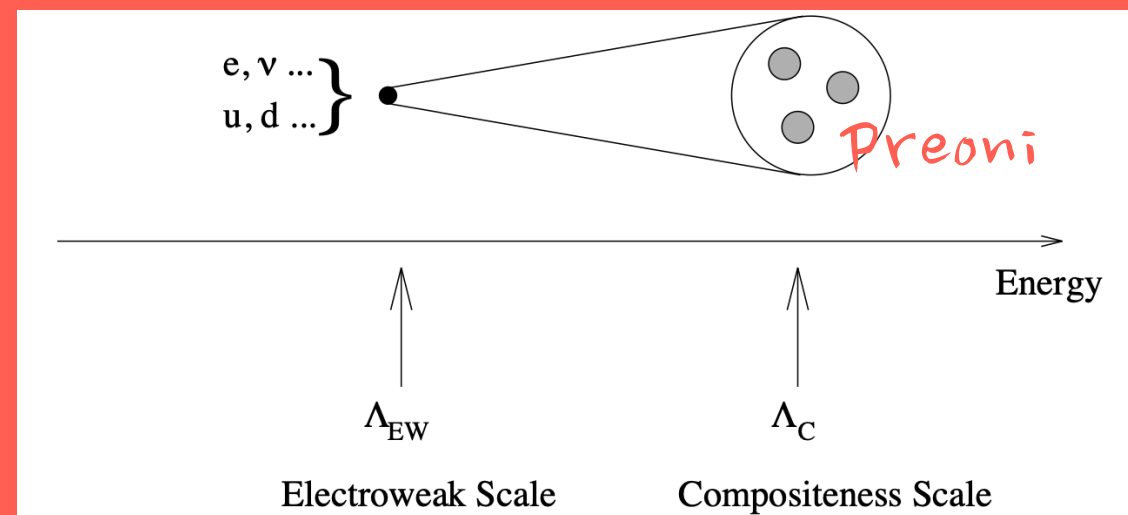


- $0\nu\beta\beta$  highly competitivo con LHC (run II) and HL-LHC (regione di grandi masse)

# 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).)

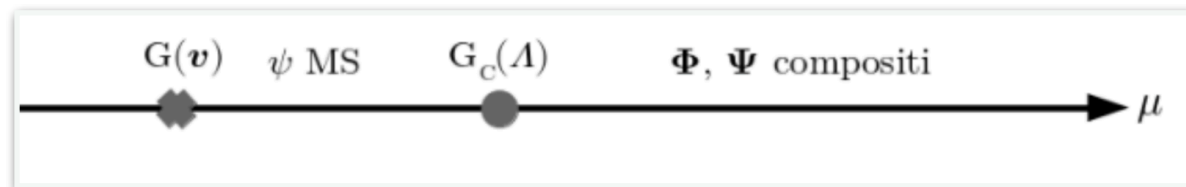
S.S.Xue PLB 737 (2014) 172-177

- 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  $0\nu\beta\beta$

---

## Altri Argomenti di Tesi di Laurea

### (Meccanica Quantistica fondamentale (LT e LM) e Applicazioni di Teoria dei campi (LM))

- Meccanica Quantistica fondamentale: Quantum Backflow in sistemi relativistici (anche LT)
- Soluzioni esatte dell'equazione di Dirac in teorie con lunghezza minima (LT, LM)
- Teorie di campo non locali, applicazione all'effetto Casimir per un campo vettoriale. (Tesi LM)
- Meccanica Quantistica Frazionaria: Eq. di Schroedinger con potenze frazionarie del laplaciano (anche LT).

---

# 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)
-



# Il gruppo ENP 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	(Tesiista 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
- F. Romeo, A. Gurrola, CMS Vanderblidt, USA, H.Sun (Dailan University)
- M. E. Gomez (Huelva University, 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
- A. Frassino, Università di Alcalà, UAH, Madrid.

---

# 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