

# Invarianza di Lorentz e Oscillazioni dei Neutrini

V. Antonelli, L. Miramonti, M.D.C. Torri

Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano e INFN Milano - vito.antonelli@mi.infn.it, lino.miramonti@mi.infn.it, marco.torri@unimi.it

## Abstract

La possibile violazione della invarianza di Lorentz (LIV) è considerata in diverse teorie e ricercata da vari esperimenti, che spesso riguardano i neutrini. In un recente lavoro [1], abbiamo considerato un modello nel quale la LIV è introdotta a partire da relazioni di dispersione modificate. Conseguenze che ad alte energie ogni particella sperimenti una diversa velocità limite, dipendente dalla propria energia. Abbiamo preservato una struttura metrica (nella geometria di Finsler) e costruito un modello in cui sono conservate le simmetrie di gauge del Modello Standard e l'invarianza di CPT, ma i termini di potenziale LIV influiscono sulla fenomenologia dei neutrini tramite una modifica delle probabilità di oscillazione tra i diversi sapori. Lo studio completo delle probabilità di oscillazione in presenza di LIV viene presentato con particolare attenzione alle situazioni di maggior interesse fenomenologico.

## Motivazioni dello studio

Cosa giustifica l'ipotesi di violazione della invarianza di Lorentz (LIV), simmetria alla base della Relatività Ristretta?

- Impossibile testare direttamente la struttura dello spazio-tempo fino alla scala di Planck (separazione tra teoria gravitazionale "standard" e quantizzata.)
- In presenza di anomalie (ad es. nei raggi cosmici ad altissima E) ipotizzabile che l'invarianza di Lorentz sia una simmetria effettiva a basse E, violata ad energie elevate da effetti quantistici, con piccole deviazioni rispetto allo "scenario standard".
- Studi su LIV in fisica del neutrino ( $\nu$ ) dal '99 ([2]), in vari contesti:  $\nu$  ultraluminali, generazione di massa in modelli di "relatività modificata", etc.

**Nel nostro modello: dalla LIV derivano solo correzioni "perturbative" allo schema d'oscillazione standard**

## Il modello

- Relazioni di dispersione modificate (MDR):

$$f_1^2 E^2 + f_2^2 |\vec{p}|^2 = m^2; f_i = f_i(E, \vec{p}) = 1 - h_i \simeq 1$$

Ogni leptone sperimenta  $\neq$  foliazione locale di spazio-tempo, parametrizzata da suo momento (energia). Possibile nella geometria di Finsler.

- LIV introdotta nel settore del  $\nu$  con MDR:

$$E^2 - \left(1 - f\left(\frac{|\vec{p}|}{E}\right) - g\left(\frac{\vec{p}}{E}\right)\right) |\vec{p}|^2 = m^2$$

- Con  $f\left(\frac{|\vec{p}|}{E}\right)$ ,  $g\left(\frac{\vec{p}}{E}\right)$  funzioni omogenee  $\rightarrow$

**Garantita struttura metrica:**  $\tilde{g}(p)^{\mu\nu} p_\mu p_\nu = m^2$ .

Scelta  $g\left(\frac{\vec{p}}{E}\right) = 0$  preserva l'isotropia spaziale; Per f, invece, espansione perturbativa, con:

$$\lim_{|\vec{p}| \rightarrow \infty} f(p) = f(1 + \delta) = \epsilon; \quad \delta, \epsilon \ll 1;$$

$v_{max} = c' = 1 - \epsilon$ . Il tensore metrico  $\tilde{g}(p)^{\mu\nu}$  è:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(1 - f(p)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1 - f(p)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(1 - f(p)) \end{pmatrix}$$

## Estensione del Modello Standard con LIV

- Ridefinizione di matrici  $\gamma$  di Dirac e funzioni d'onda di spinori in presenza di LIV  $\rightarrow$  Preservate correnti e.m. e deboli e simmetrie di gauge del Modello Standard ( $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ). **Estensione minimale del Modello Standard in presenza di massa dei neutrini e LIV.**
- Studio di impatto della LIV sulle oscillazioni, sia con approccio perturbativo (Hamiltoniano), sia con il calcolo delle "probabilità di oscillazione modificate".

## Oscillazioni dei neutrini in presenza di LIV

- Dati MDR,  $E^2 = \left(1 - f\left(\frac{|\vec{p}|}{E}\right)\right) |\vec{p}|^2 + m^2$ , e l'approssimazione di particella ultrarelativistica  $|\vec{p}| \simeq E \left(1 - \frac{1}{2} f\left(\frac{|\vec{p}|}{E}\right)\right) + \frac{m^2}{2E}$ , la probabilità di oscillazione (tra i sapori  $\nu_\alpha$  e  $\nu_\beta$ ) si modifica.
- Nel nostro modello l'effetto della LIV (che non viola CPT) è l'introduzione di termini aggiuntivi nelle "differenze di fase"  $\Delta\phi_{ij}$  presenti nelle probabilità di oscillazione.

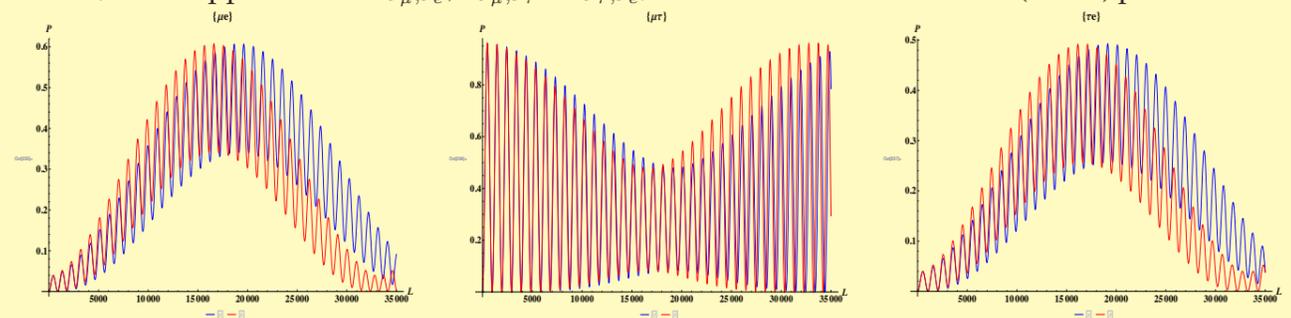
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j} \sin^2(\Delta\phi_{ij})) + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j} \sin^2(\Delta\phi_{ij}));$$

$$\Delta\phi_{kj} = \frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E} - \frac{f_k - f_j}{2} L E; \quad f_k \text{ e } f_j \text{ coefficienti di LIV degli autostati di massa } k \text{ e } j \text{ del neutrino}$$

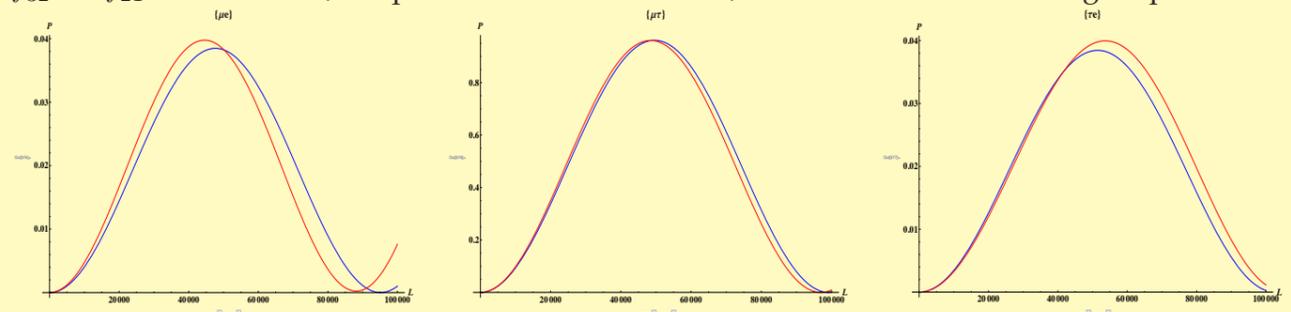
- $P_{\alpha,\beta}$  è modificata solo se i termini LIV sono diversi per diversi autostati di massa ( $\delta f_{kj} \neq 0$ ). Le nostre correzioni dovute alla LIV sono proporzionali ad  $L E$  (anziché  $\frac{L}{E}$ ) e, dunque, possono rappresentare solo "piccole" modifiche rispetto alla forma "standard" delle oscillazioni.

## Risultati dell'analisi

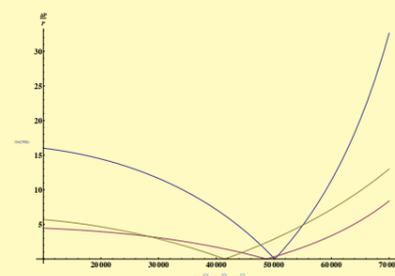
- Confronto di probabilità di oscillazione in "teoria standard" (curve rosse) e in nostro modello con LIV (blu), per  $E_\nu = 1 \text{ GeV}$  e coefficienti di LIV  $\delta f_{32} = \delta f_{21} = 1 \times 10^{-23}$ . Nei 3 grafici, da sinistra a destra, sono rappresentate  $P_{\nu_\mu, \nu_e}$ ,  $P_{\nu_\mu, \nu_\tau}$  e  $P_{\nu_\tau, \nu_e}$ , in funzione della baseline L (in km) per i neutrini.



- Per  $\delta f_{kj}$  più piccoli (come ottenuto da SuperK [3], in modello con LIV e violazione di CPT), gli effetti sulla oscillazione rimangono per  $\nu$  di alta E. I grafici seguenti riproducono, per  $E_\nu = 100 \text{ GeV}$  e  $\delta f_{32} = \delta f_{21} = 4.5 \times 10^{-27}$ , le 3 probabilità di oscillazione, nello stesso ordine delle figure precedenti.



- Nella figura seguente sono riportati sulle x la baseline L e sulle y la variazione percentuale delle probabilità di oscillazione indotta dalla LIV  $\left(\frac{\Delta P}{P}\right)\% = 2 \frac{|P_{LIV} - P_{NO-LIV}|}{P_{LIV} + P_{NO-LIV}} \times 100$ , per  $E_\nu = 100 \text{ GeV}$  e  $\delta f_{32} = \delta f_{21} = 4.5 \times 10^{-27}$ . Le 3 curve si riferiscono a  $P_{\nu_e, \nu_\mu}$  (blu),  $P_{\nu_\mu, \nu_\tau}$  (viola) e  $P_{\nu_e, \nu_\tau}$  (verde).



- **Analisi completa**, includendo flusso  $\nu$ , sezioni d'urto e caratteristiche rivelatori, è **in corso di svolgimento** [4] per neutrini di varie energie: atmosferici con  $E \simeq 100 \text{ GeV}$  a JUNO; con E tra TeV e PeV a "telescopi di neutrini" (ANTARES, KM3NET, IceCube);  $\nu$  cosmici di  $E > \text{EeV}$  studiati da Auger e di crescente interesse in **approccio multimessenger**, con sviluppo di studio di onde gravitazionali.

## Bibliografia

- [1] V. Antonelli, L. Miramonti e M. D. C. Torri, arXiv:1803.08570 [hep-ph], accettato per la pubblicazione (con minor revisions) apparirà su European Physics Journal C.
- [2] S. R. Coleman e S. L. Glashow, Phys. Rev. D **59** (1999) 116008.
- [3] K. Abe *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], Phys. Rev. D **91** (2015) no.5, 052003.
- [4] V. Antonelli, L. Miramonti e M. D. C. Torri, work in progress.