

Modelli geometrici con violazione della invarianza di Lorentz e oscillazioni dei neutrini

V. Antonelli, L. Miramonti, M.D.C. Torri
Dipartimento di Fisica, Università Studi di Milano e INFN Milano (vito.antonelli@mi.infn.it)

Riassunto

Diversi esperimenti cercano segnali di violazione della Lorentz invarianza (LIV) e in varie teorie questa eventualità ad alte energie è connessa con la struttura dello spazio-tempo. Nel modello da noi sviluppato la LIV è introdotta a partire da relazioni di dispersione modificate e con un'origine "geometrica". Si preserva una struttura metrica nella geometria di Finsler, usando funzioni omogenee (nel rapporto tra momento e energia) che violino l'invarianza di Lorentz. Il modello che si ottiene preserva le simmetrie del Modello Standard e la isotropia spaziale e prevede, però, sorgenti di LIV di origine cinematica (senza nuovi vertici di interazione). Dalle relazioni di dispersione modificate ogni particella acquisisce una propria velocità limite, funzione del suo momento. La conseguente modifica delle equazioni che regolano la propagazione dei neutrini introduce correzioni nelle probabilità di oscillazione del sapore proporzionali a LE , a differenza dai termini di oscillazione "standard" (che restano dominanti). L'impatto di queste modifiche è analizzato per diverse situazioni di interesse.

Violazione invarianza di Lorentz

- Impossibile testare struttura di spazio-tempo fino a scala di Planck. Anomalie in raggi cosmici di E ultra-elevata (possibile dilatazione di sfera GZK) potrebbero suggerire violazione parziale dell'invarianza di Lorentz.
- Invarianza di L. simmetria effettiva di bassa E , parzialmente violata ad alte E da effetti quantistici. Ipotesi di LIV in fisica neutrino dal '99 ([2])
- **In nostro modello: da LIV solo correzioni "perturbative" a schema oscillazione standard**

Il nostro modello "geometrico"

- **Origine cinematica di LIV \Rightarrow Relazioni di dispersione modificate (MDR) (\neq per \neq specie i):**

$$E_i^2 - |\vec{p}_i|^2 (1 - f_i(p_i)) = m_i^2$$

Ogni leptone sente \neq "foliazione" locale dello spazio-tempo, parametrizzata da suo momento (energia) \Rightarrow Possibile nella **geometria di Finsler LIV da funzioni omogenee**: $f(|\vec{p}|/E)$ e $g(\vec{p}/E)$

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

Struttura metrica preservata: $\tilde{g}(p)^{\mu\nu} p_\mu p_\nu = m^2$.

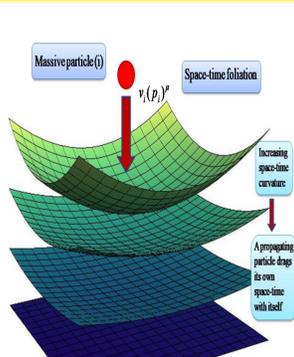
- **Scelta**: $g(\vec{p}/E) = 0$ **Isotropia spaziale**

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

Velocità massima $\neq c$ per ogni particella:

$$v_{\text{limit}} = \lim_{|\vec{p}| \rightarrow \infty} \sqrt{1 - f_i(p_i)} \rightarrow 1 - \frac{\epsilon}{2}. \quad \tilde{g}(p)^{\mu\nu}: \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(1 - f(p)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1 - f(p)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(1 - f(p)) \end{pmatrix}$$

Geometria di Finsler



Particella i con velocità \vec{v}_i modifica suo spazio-tempo definendo uno spazio-tempo "personale" di Finsler. Interazioni: proiezione su uno spazio-tempo comune piatto (Minkowski).

Estensione del Modello Standard e Oscillazioni dei Neutrini con LIV

- Le trasformazioni di isometria delle MDR definiscono anche le "trasformazioni di Lorentz modificate" sotto cui le variabili di Mandelstam modificate sono invarianti.

• **Ridefinizioni delle matrici di Dirac Γ** (che soddisfano l'algebra di Clifford modificata) **e di funzioni d'onda (w.f.) spinoriali (ψ) in presenza di LIV**. Le correzioni di LIV per w.f. e Γ si compensano. Si assume che i bosoni di gauge siano Lorentz invarianti \Rightarrow Correnti e simmetrie di gauge del Modello Standard ($SU(3) \times SU(2) \times U(1)$) **preservate**. Per esempio: $\mathcal{L}_{QED} = \sqrt{\det(g)} \bar{\psi} (i\Gamma^\mu D_\mu - m) \psi$. Non appaiono "interazioni esotiche" né nuove "particelle esotiche" \Rightarrow

Estensione minimale di Modello Standard in presenza di massa dei neutrini e LIV.

- In [1] abbiamo studiato **l'impatto della LIV sulle oscillazioni**, sia con un approccio perturbativo Hamiltoniano che calcolando le **probabilità di oscillazione modificate**.

Un analogo studio per le interazioni forti è in corso e sarà presto pubblicato (vedi la 2^a ref. di [1]).

- In approssimazione ultra-relativistica, le MDR (eq.(1)) diventano: $|\vec{p}| \simeq E \left(1 - \frac{1}{2} f\left(\frac{|\vec{p}|}{E}\right)\right) + \frac{m^2}{2E}$, e la **probabilità di oscillazione di sapore per ν ($\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$) si modifica**.

Nel nostro modello, che conserva la simmetria CPT, **l'effetto della LIV è semplicemente la presenza di termini aggiuntivi** nelle "differenze di fase" $\Delta\phi_{ij}$:

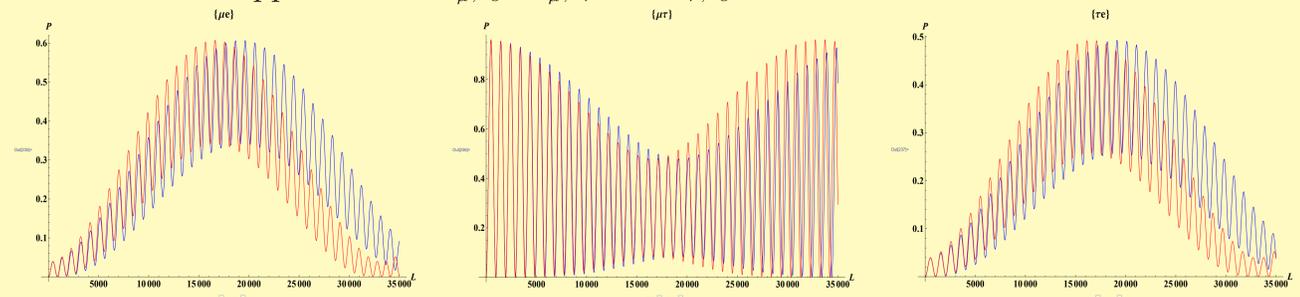
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j} \sin^2(\Delta\phi_{ij})) + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j} \sin^2(\Delta\phi_{ij}));$$

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

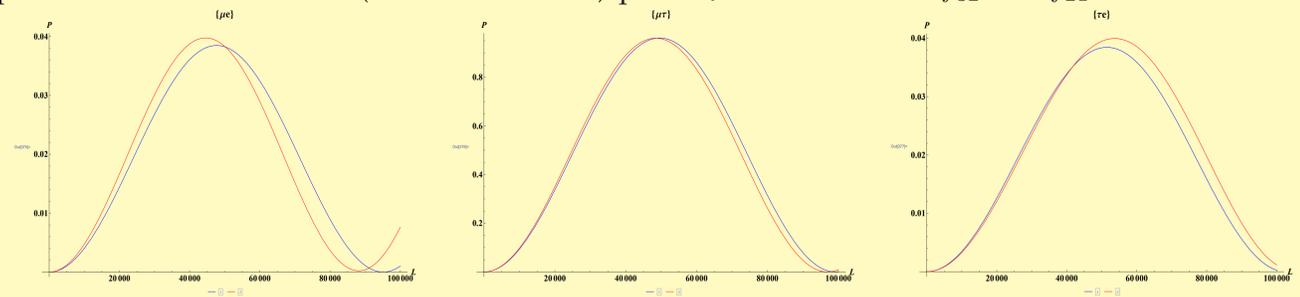
- **$P_{\alpha,\beta}$ è modificata solo se** le correzioni indotte dalla LIV sono differenti per differenti autostati di massa ($\delta f_{kj} \neq 0$). Le **correzioni introdotte dalla LIV** rappresenterebbero solo **"piccole" modifiche allo schema di oscillazione "standard"**, ma **proporzionali a LE** (invece di $\frac{L}{E}$)

I nostri risultati

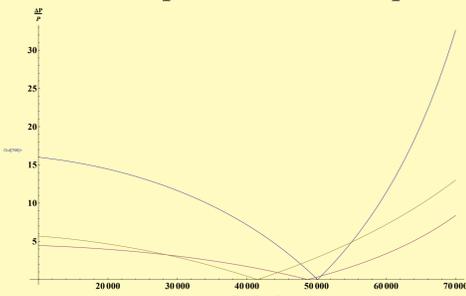
- Confronto delle probabilità di oscillazione nella "teoria standard" (rosse) e nel nostro modello con LIV (curve blu), per $E_\nu = 1 \text{ GeV}$ e coefficienti di LIV $\delta f_{32} = \delta f_{21} = 1 \times 10^{-23}$. I 3 grafici (da sinistra a destra), rappresentano P_{ν_μ, ν_e} , P_{ν_μ, ν_τ} and P_{ν_τ, ν_e} in funzione della "baseline" L (in km) del ν .



- Per δf_{kj} minori, come i valori derivati da SuperK [3] (in modelli di LIV che violano CPT), le correzioni all'oscillazione rimangono per neutrini di elevata E . I grafici seguenti riportano le 3 probabilità di oscillazione (nello stesso ordine) per: $E_\nu = 100 \text{ GeV}$ e $\delta f_{32} = \delta f_{21} = 4.5 \times 10^{-27}$.



- **Variazioni percentuali delle probabilità di oscillazione indotte dalla LIV.**



Sull'asse y riportiamo, in funzione della "baseline" L (asse x), le variazioni % indotte dalla LIV, definite come:

$$\left(\frac{\Delta P}{P}\right)\% = 2 \frac{|P_{LIV} - P_{NO-LIV}|}{P_{LIV} + P_{NO-LIV}} \times 100,$$

per P_{ν_e, ν_μ} (blu), P_{ν_μ, ν_τ} (viola) e P_{ν_e, ν_τ} (verde).

Parametri: $E_\nu = 100 \text{ GeV}$; $\delta f_{32} = \delta f_{21} = 4.5 \times 10^{-27}$.

- **Analisi completa**, inclusi il flusso dei ν , le sezioni d'urto e i rivelatori, **in corso [4] per diversi casi**:
 - **ν atmosferici a esperimento JUNO**. Interessante: massa e risoluzione energetica elevate di rivelatore. Punto chiave: capacità di studiare ν di elevata E (vicino a 100GeV) e discriminare il sapore;
 - **Neutrini con energie tra il TeV e il PeV ai "telescopi di neutrini"** (ANTARES, KM3NET, IceCube): opportunità molto interessante;
 - **Neutrini cosmici con energie $E > \text{EeV}$ studiati da Auger** e di crescente interesse, anche in un **approccio a multi-messaggeri, connesso con gli studi delle onde gravitazionali e delle emissioni γ** .

Bibliografia

- [1] V. Antonelli, L. Miramonti e M. D. C. Torri, EPJC 78 (2018) n.8, 667 ; Un secondo articolo sull'estensione del Modello Standard e lo studio delle interazioni forti in presenza di LIV apparirà presto.
- [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, in corso di svolgimento.