Efeitos de violação de CP de Física Além do Modelo Padrão para oscilações de neutrinos

Orlando L. G. Peres
UNICAMP

Em colaboração: M. E. Chaves e P. C. de Holanda

Apoio:

Violação CP à la Cabibbo-Kobaiashi-Maskawa no Modelo Padrão para quarks

Teoria Eletrofraca

$$SU(2)_L \times U(1)_Y \quad W^{\mu,a} \quad B^\mu \quad L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L \quad e_R^-$$

$$\downarrow$$

$$U(1)_{\text{em}} \quad W^\mu_\pm \quad Z^\mu \quad A^\mu \quad (\nu_\alpha)_L \quad e^- \quad \mu^- \quad \tau^- \quad u, d, c, s, b, t \quad H$$

$$\mathscr{L}_{CKM} = 2\sqrt{2}G_f\left(\bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}} \gamma^\mu P_L d_k \; \bar{l}_\alpha P_L \gamma_\mu \nu_\beta\right) = 2\sqrt{2}G_f\left(\bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}} \gamma^\mu P_L d_k \; \bar{l}_\alpha P_L \gamma_\mu \nu_i\right)$$

G_f é a constante de Fermi, P_L é o projetor de mão esquerda, V^{jk}_{CKM} é uma matriz complexa fonte da violação CP.
Não existe mistura no setor dos leptons

Fisica Além do Modelo padrão: de oscilação atual

????

$$\downarrow$$

$$U(1)_{\text{em}} \quad W^\mu_\pm \quad Z^\mu \quad A^\mu \quad (\nu_\alpha) = U_{\alpha i}\nu_i \quad e^- \quad \mu^- \quad \tau^- \quad u, d, c, s, b, t \quad H$$

$$\mathscr{L}_{PMNS} = 2\sqrt{2}G_f\left(\overline{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}}\gamma^\mu P_L d_k \; \bar{l}_\alpha P_L \gamma_\mu \nu_\beta\right) = 2\sqrt{2}G_f\left(\overline{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}}\gamma^\mu P_L d_k \; \bar{l}_\alpha P_L \gamma_\mu U^{\text{PMNS}}_{\beta i}\nu_i\right)$$

U^{PMNS} **(Pontecorvo, Maki, Nakagawa, Sakata) é uma matriz complexa, fonte da violação CP.**

Fisica Além do Modelo padrão: novas interações

$$\boxed{\quad ???? \quad}$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{U(1)_{\text{em}} \quad W^{\mu}_{\pm} \quad Z^{\mu} \quad A^{\mu} \quad (\nu_\alpha) = U_{\alpha i}\nu_i \quad e^- \quad \mu^- \quad \tau^- \quad u, d, c, s, b, t \quad H \quad X}$$

$$\mathscr{L}_{BSM} = 2\sqrt{2}G_f\left(\overbrace{\frac{1}{2}\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}\overline{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}} d_k \; \overline{l}_\alpha P_L \nu_\beta}^{\text{ESCALAR}} + \overbrace{\frac{1}{4}\left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta}\overline{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}} \sigma^{\mu\nu} P_L d_k \; \overline{l}_\alpha P_L \sigma_{\mu\nu}\nu_\beta}^{\text{TENSORIAL}}\right)$$

No Modelo de oscilação adotado hoje

$$\mathscr{L}_{PMNS} = 2\sqrt{2}G_f\left(\overline{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}}\gamma^\mu P_L d_k \; \overline{l}_\alpha P_L \gamma_\mu \nu_\beta\right) = 2\sqrt{2}G_f\left(\overline{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}}\gamma^\mu P_L d_k \; \overline{l}_\alpha P_L \gamma_\mu U^{\text{PMNS}}_{\beta i}\nu_i\right)$$

$\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}$ **(**$\left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta}$**) o acoplamento escalar (tensorial) carregado é uma matriz complexa, fonte da violação CP.**

Fisica Além do Modelo padrão: novas interações

????

$\downarrow$

$U(1)_{\text{em}} \quad W^{\mu}_{\pm} \quad Z^{\mu} \quad A^{\mu} \quad (\nu_\alpha) = U_{\alpha i}\nu_i \quad e^- \quad \mu^- \quad \tau^- \quad u, d, c, s, b, t \quad H \quad X$

Novas interações que não conservam sabor do neutrino.

$$\mathscr{L}_{BSM} = 2\sqrt{2}G_f\left(\frac{1}{2}\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}\bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}} d_k\ \bar{l}_\alpha P_L \nu_\beta + \frac{1}{4}\left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta}\bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}}\sigma^{\mu\nu} P_L d_k\ \bar{l}_\alpha P_L \sigma_{\mu\nu}\nu_\beta\right)$$

No Modelo de oscilação adotado hoje

$$\mathscr{L}_{PMNS} = 2\sqrt{2}G_f\left(\bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}}\gamma^{\mu} P_L d_k\ \bar{l}_\alpha P_L \gamma_\mu \nu_\beta\right) = 2\sqrt{2}G_f\left(\bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}}\gamma^{\mu} P_L d_k\ \bar{l}_\alpha P_L \gamma_\mu U^{\text{PMNS}}_{\beta i}\nu_i\right)$$

$\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}$ ($\left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta}$) o acoplamento escalar (tensorial) carregado é uma matriz complexa, fonte da violação CP.

Como incluir interações não padrões na fenomenologia ?

Modo usual

$$\mathscr{L}_{BSM} = 2\sqrt{2}G_f \left(\frac{1}{2} \left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta} \bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}} d_k \; \bar{l}_\alpha P_L \nu_\beta + \frac{1}{4} \left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta} \bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}} \sigma^{\mu\nu} P_L d_k \; \bar{l}_\alpha P_L \sigma_{\mu\nu} \nu_\beta \right)$$

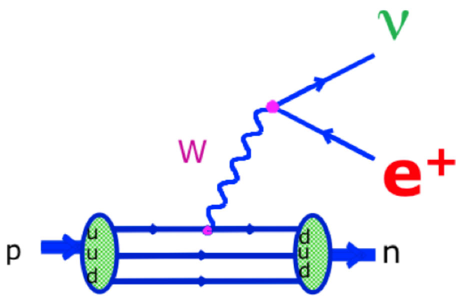
Assuma os parâmetros constantes (independente da energia) $\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}$ e $\left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta}$ e independente da reação de produção e de deteção dos neutrinos e compare com a fenomenologia.

No jargão de física de neutrinos são parâmetros que caraterizam NSI (Non-Standard Interactions) de produção e detecção.

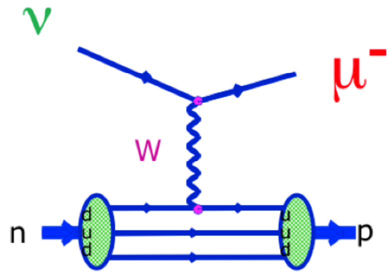
$\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}$ **(**$\left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta}$**) o acoplamento escalar (tensorial) carregado é uma matriz complexa, fonte da violação CP.**

Como incluir interações não padrões na fenomenologia ?

Oscilação usual



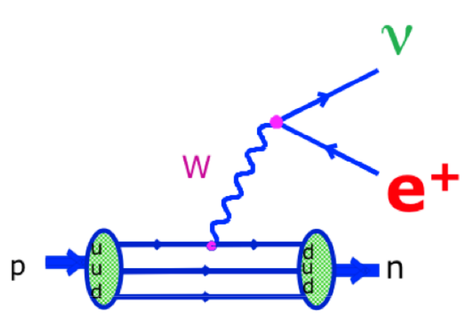
grande distancia



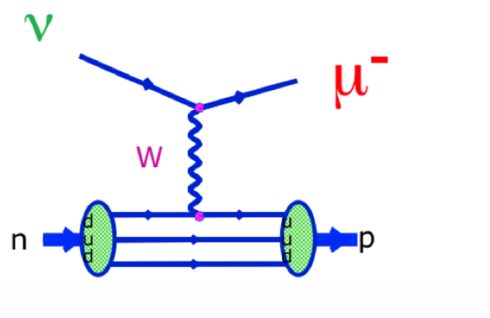
Quando observamos isto dizemos que o ν_e oscilou para ν_μ.

Como incluir interações não padrões na fenomenologia ?

Oscilação usual

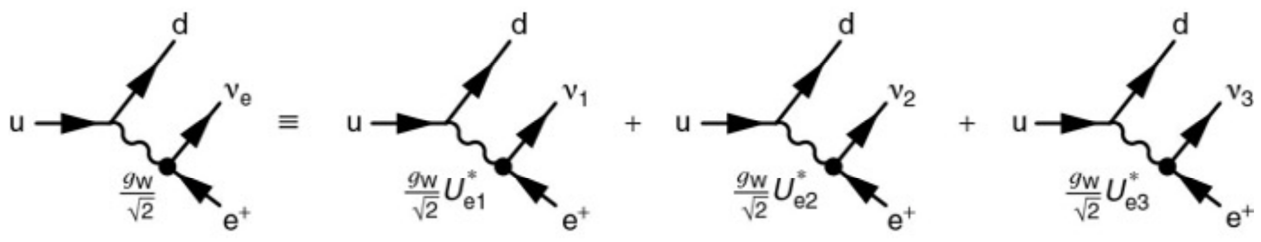


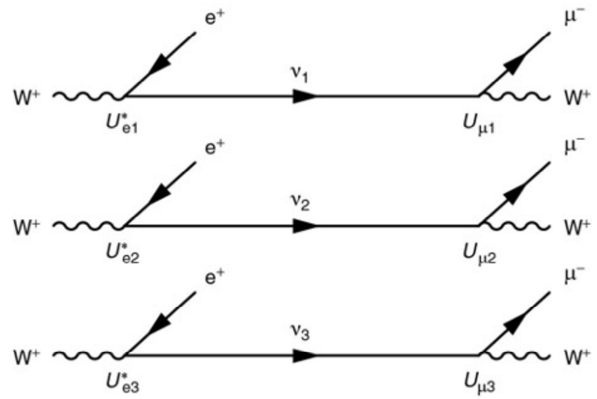
grande distancia



Quando observamos isto dizemos que o ν_e oscilou para ν_μ.

O processo pode ser descrito por





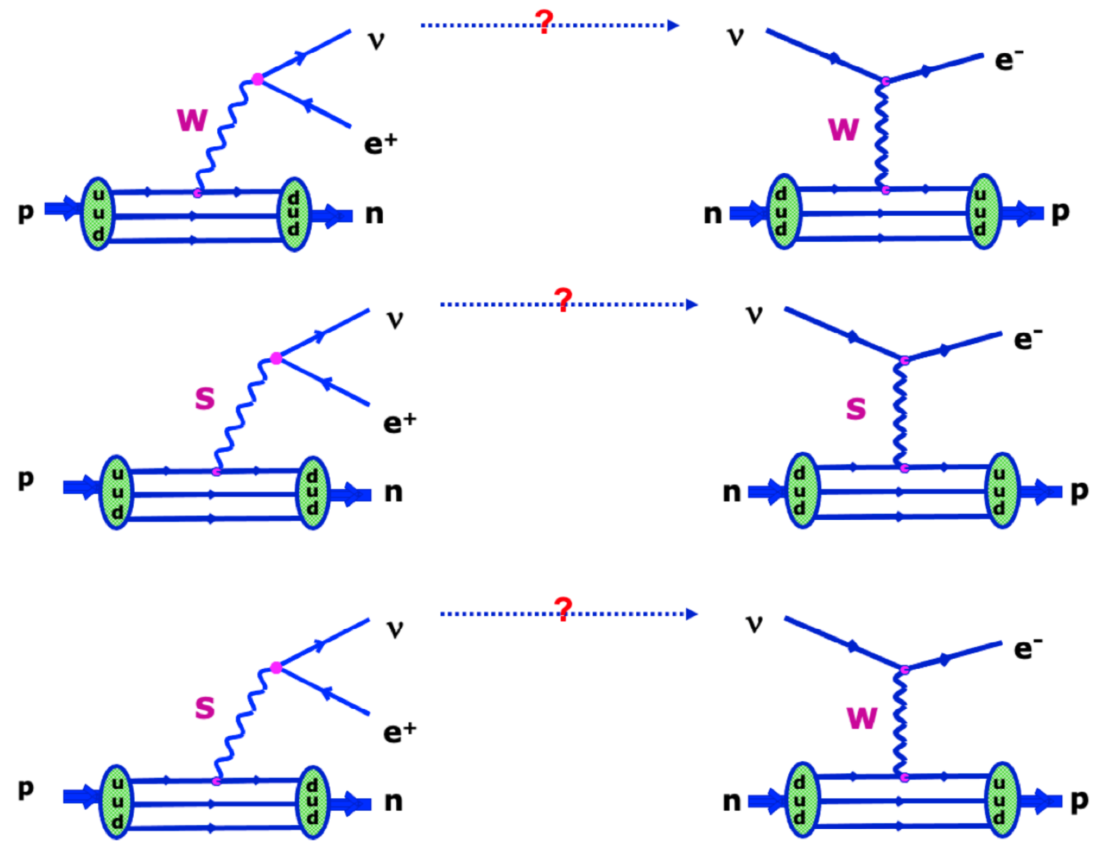
Como incluir interações não padrões na fenomenologia ?

Modo que adotamos (da Refs citadas abaixo)

$$\mathscr{L}_{\text{BSM}} = 2\sqrt{2}G_f\left(\frac{1}{2}\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}\bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}} d_k\ \bar{l}_\alpha P_L \nu_\beta + \frac{1}{4}\left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta}\bar{u}_j V^{jk}_{\text{CKM}} \sigma^{\mu\nu} P_L d_k\ \bar{l}_\alpha P_L \sigma_{\mu\nu}\nu_\beta\right)$$

Iremos seguir o procedimento de calcular as amplitudes dos processos, $\mathscr{A}_{\text{total}} = \mathscr{A}_{\text{PMNS}} + \mathscr{A}^{\text{BSM}}_{\text{Scalar}}$,

$$\left(\mathscr{A}^{\text{P,D}}_{\text{total}}\right)_{\alpha i} = \left(\mathscr{A}_{\text{PMNS}}\right)^{\text{P,D}}_{\alpha i} + \left(\mathscr{A}_{\text{BSM}}\right)^{\text{P,D}}_{\alpha i} = U_{\alpha i}(*)\,\mathscr{M}^{\text{P,D}}_W + \left[\epsilon_X U\right]_{\alpha i}(*)\,\mathscr{M}^{\text{P,D}}_X$$



$\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}$

A. A. Falkowski, M. Gonzalez-Alonso, and Z. Tabrizi, JHEP 05, 173, arXiv:1901.04553 316 [hep-ph]

B. A. Falkowski, M. Gonzalez-Alonso, and Z. Tabrizi, JHEP 11, 048, arXiv:1910.02971 [hep-ph]

Como incluir interações não padrões na fenomenologia ?

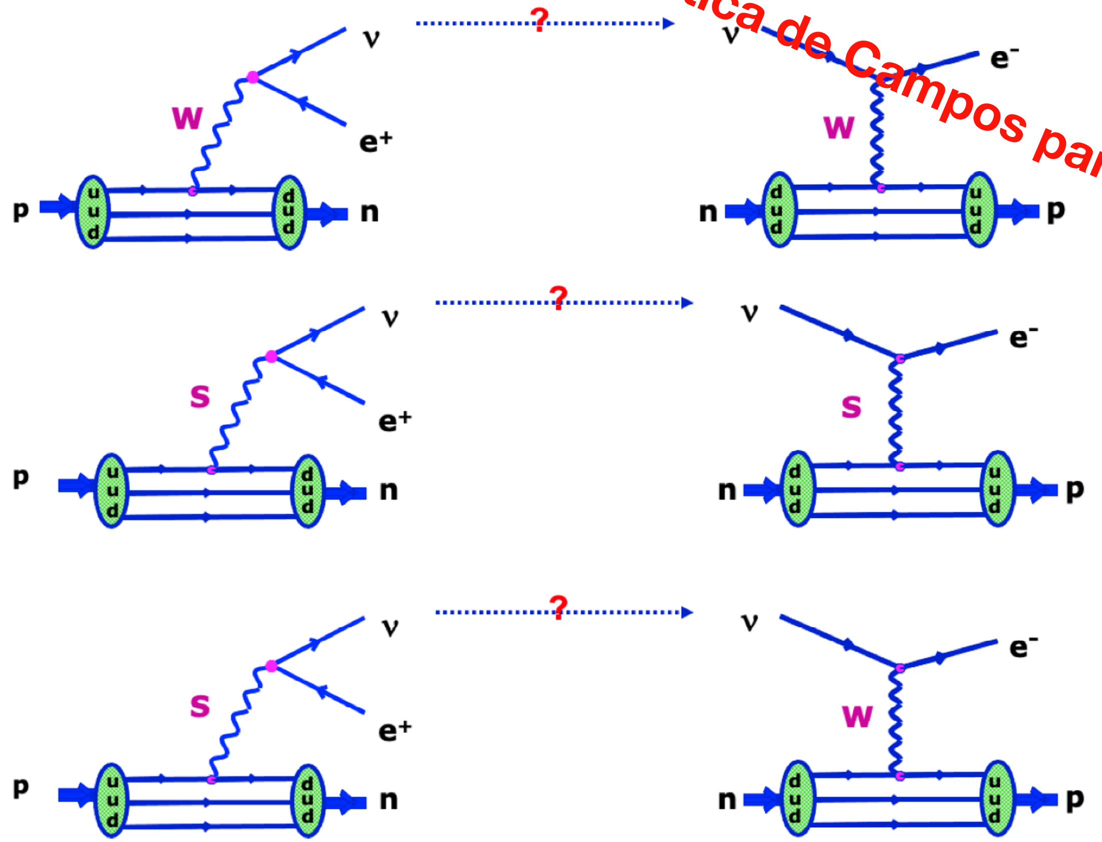
Modo que adotamos (da Refs citadas abaixo)

$$\mathscr{L}_{\rm BSM} = 2\sqrt{2}G_f\left(\frac{1}{2}\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}\bar{u}_j V^{jk}_{\rm CKM} d_k\ \bar{l}_\alpha P_L \nu_\beta + \frac{1}{4}\left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta}\bar{u}_j V^{jk}_{\rm CKM}\sigma^{\mu\nu}P_L d_k\ \bar{l}_\alpha P_L \sigma_{\mu\nu}\nu_\beta\right)$$

Estamos usando Teoria Quantica de Campos para calcular a oscilação de neutrinos

Iremos seguir o procedimento de calcular as amplitudes dos processos, $\mathscr{A}_{\rm total} = \mathscr{A}_{\rm PMNS} + \mathscr{A}^{\rm BSM}_{\rm Scalar}$,

$$\left(\mathscr{A}^{\rm P,D}_{\rm total}\right)_{\alpha i} = \left(\mathscr{A}_{\rm PMNS}\right)^{\rm P,D}_{\alpha i} + \left(\mathscr{A}_{\rm BSM}\right)^{\rm P,D}_{\alpha i} = U_{\alpha i}\,(*)\,\mathscr{M}^{\rm P,D}_W + \left[\epsilon_X U\right]_{\alpha i}(*)\mathscr{M}^{\rm P,D}_X$$



$\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}$

A. A. Falkowski, M. Gonzalez-Alonso, and Z. Tabrizi, JHEP 05, 173, arXiv:1901.04553 316 [hep-ph]

B. A. Falkowski, M. Gonzalez-Alonso, and Z. Tabrizi, JHEP 11, 048, arXiv:1910.02971 [hep-ph]

Como incluir interações não padrões na fenomenologia ?

Calculando a taxa de eventos teremos

$$\frac{R_{\alpha\beta}}{\phi_\alpha^{\mathrm{SM}}\sigma_\beta^{\mathrm{SM}}} = \sum_{k,l} e^{-i\phi_{kl}} \left[V_\alpha^{kl}(P_X)\right] \times \left[V_\beta^{kl}(D_X)\right]^*$$

com $V_\alpha^{kl}(p_X) = U_{\alpha k}^* U_{\alpha l} + p_{XL}(\epsilon_X U)_{\alpha k}^* U_{\alpha l} + p_{XL}^* U_{\alpha k}^* (\epsilon_X U)_{\alpha l} + p_{XX}(\epsilon_X U)_{\alpha k}^* (\epsilon_X U)_{\alpha l}$ **e**

$$\phi_{kl} = \frac{\Delta m_{kl}^2}{2E_\nu}$$

$$p_{\mathrm{XY}} = \frac{\int d\Pi_{\mathrm{P}} A_{\mathrm{X}}^{\mathrm{P}} \overline{A}_{\mathrm{Y}}^{\mathrm{P}}}{\int d\Pi_{\mathrm{P}} \left|A_{\mathrm{L}}^{\mathrm{P}}\right|^2} \qquad d_{\mathrm{XY}} = \frac{\int d\Pi_{\mathrm{D}} A_{\mathrm{X}}^{\mathrm{D}} \overline{A}_{\mathrm{Y}}^{\mathrm{D}}}{\int d\Pi_{\mathrm{D}} \left|A_{\mathrm{L}}^{\mathrm{D}}\right|^2},$$

Especificamente temos que com os termos em magenta dependente da energia

$$p_{\mathrm{SL}}^{\beta^\pm} = 0 \quad p_{\mathrm{SS}}^{\beta^\pm} = \frac{g_S^2}{3g_A^2} \qquad d_{\mathrm{SL}}^{\beta^\pm} = \frac{g_S g_V}{g_V^2 + 3g_A^2}\frac{m_e}{E_e} \quad d_{SS} = \frac{g_S^2}{g_V^2 + 3g_A^2}$$

$$p_{\mathrm{TL}}^{\beta^\pm} = -\frac{g_T}{g_A}\frac{m_e}{f(E_\nu)} \quad p_{\mathrm{TT}}^{\beta^\pm} = \frac{g_T^2}{g_A^2} \qquad d_{\mathrm{TL}}^{\beta^\pm} = \frac{3g_T g_A}{g_V^2 + 3g_A^2}\frac{m_e}{E_e} \quad d_{TT} = \frac{3g_T^2}{g_V^2 + 3g_A^2}$$

onde $E_e = E_\nu \mp m_e$ **e** $f(E_\nu)$ **é uma função obtida dos espectros** β^-**.**

A taxa de neutrinos com BSM é

$$\frac{R_{\alpha\beta}}{\phi_\alpha^{\mathrm{SM}}\sigma_\beta^{\mathrm{SM}}} = \sum_{k,l} e^{-i\phi_{kl}} \left[V_\alpha^{kl}(P_X)\right] \times \left[V_\beta^{kl}(D_X)\right]^* = = N^{\mathrm{non-osc}} - \sum_{k>l} N_{kl}^{\mathrm{osc}} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{kl}^2 L}{2E}\right) + \sum_{k>l} N_{kl}^{\mathrm{CP}} \sin\left(\frac{\Delta m_{kl}^2 L}{4E}\right)$$

com $V_\alpha^{kl}(p_X) = U_{\alpha k}^* U_{\alpha l} + p_{XL}(\epsilon_X U)_{\alpha k}^* U_{\alpha l} + p_{XL}^* U_{\alpha k}^* (\epsilon_X U)_{\alpha l} + p_{XX}(\epsilon_X U)_{\alpha k}^* (\epsilon_X U)_{\alpha l}$ **e**

No caso de oscilação de neutrinos devido a matrix PMNS,

$$N_{kl}^{\mathrm{CP}} \propto \Im\left(U_{\alpha k}^* U_{\alpha l} U_{\beta k} U_{\beta l}^*\right) \qquad N_{kl}^{\mathrm{CP}}\Big|_{\alpha\to\beta} \propto \Im\left(\left|U_{\alpha k}^*\right|^2 \left|U_{\alpha l}\right|^2\right) = 0$$

No caso de oscilação de neutrinos com BSM temos que

$$N_{\mathrm{solar}}^{\mathrm{CP}} \propto \left[(d_{\mathrm{XL}} - p_{\mathrm{XL}})\Im[\tilde{\epsilon}_X]_{e\mu}, \left|[\tilde{\epsilon}_X]_{e\mu}\right|^2 (d_{\mathrm{XX}} p_{\mathrm{XL}} - d_{\mathrm{XL}} p_{\mathrm{XX}})\right] \Im[\tilde{\epsilon}_X]_{e\mu}$$

a interação BSM pode induzir efeitos de violação CP em neutrinos.

Resumo da opera: podemos ter efeitos de violação de CP vindos da interação.

Isto é analogo a teoria Super-Fraca de Wolfenstein feita para os quarks. Para quarks foi rejeitada pelos dados experimentais que confirmava ser pelo mecanismo de CKM.

$\left[\epsilon_S\right]_{\alpha\beta}$ **(**$\left[\epsilon_T\right]_{\alpha\beta}$**) o acoplamento escalar (tensorial) carregado é uma matriz complexa, fonte da violação CP.**

Estratégia dos uso os experimentos de neutrinos

neutrinos solares, $\nu_e \to \nu_e$ **Super-Kamiokande, SNO, Gallex, SAGE, Borexino**

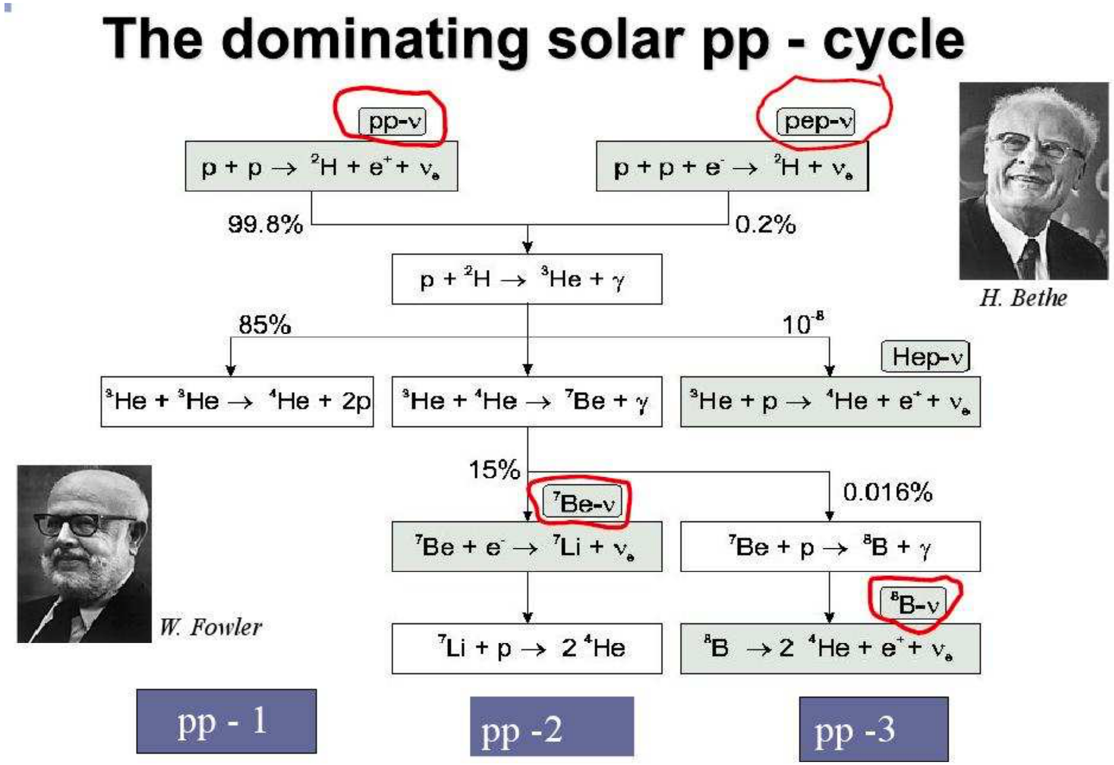
anti-neutrinos de reatores, $\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e$ **medium baseline (Daya Bay, RENO, Double Chooz)**

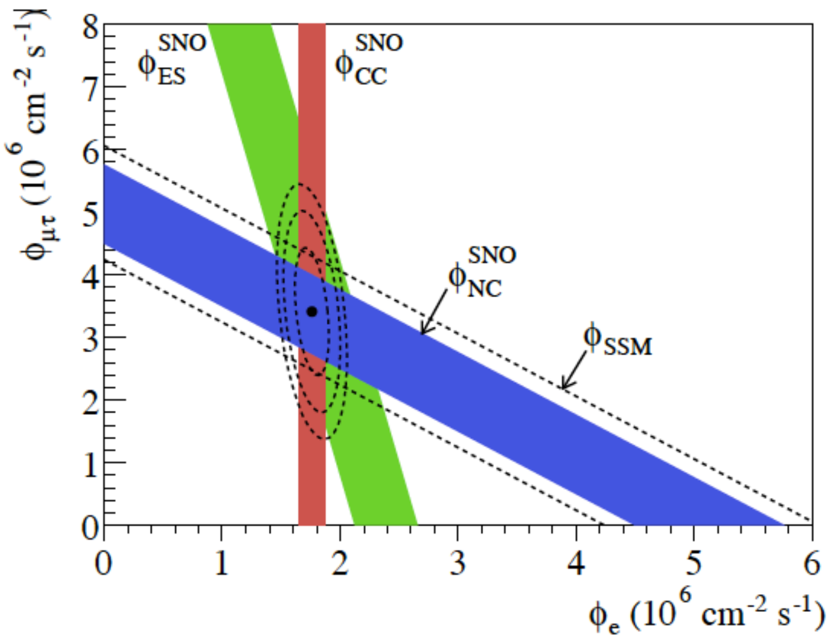
longbaseline (KamLand)

para terr os vínculos sobre a fisica BSM e ter vínculos sobre a violação CP.

Data dos experimentos de neutrinos

neutrinos solares, $\nu_e \to \nu_e$





com as reações

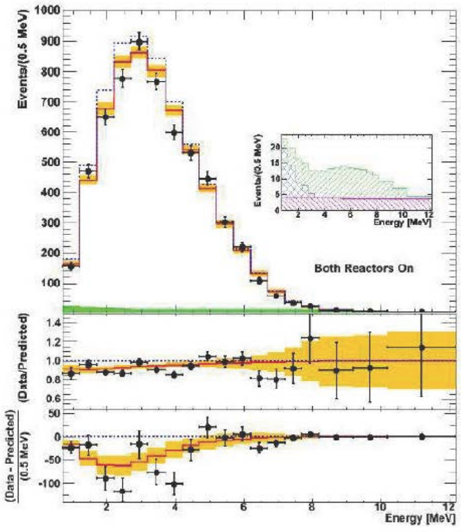
CC: $\nu_e + {}^2_1\mathrm{H} \to p + p + e^-$

NC: $\nu + {}^2_1\mathrm{H} \to p + n + \nu$

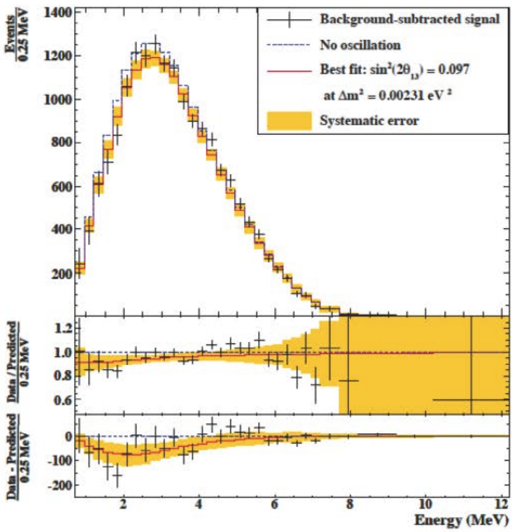
ES: $\nu + e^- \to \nu + e^-$

Data dos experimentos de neutrinos

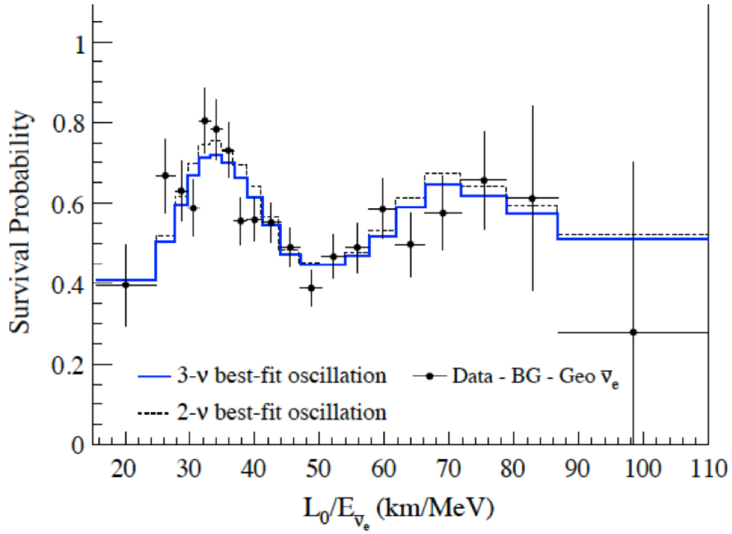
neutrinos de reatores, $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ medium baseline   longbaseline



Gd-capture



H-capture



usando dados dos experimentos Daya Bay, RENO e Double Chooz.

Data dos experimentos de neutrinos

Para cada experimento calculamos o ajuste aos dados experimentais.

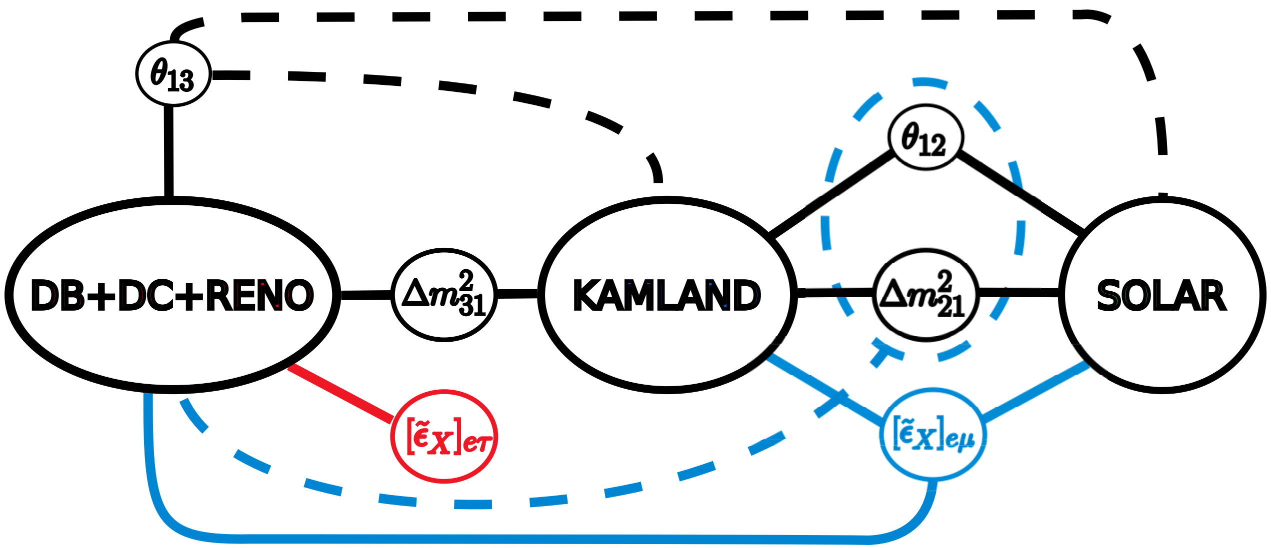
Temos que

$$\chi^2_{\rm KamLand} = \sum_i \frac{\left(d_i - n_i - b_i\right)^2}{d_i} + \frac{a_i^2}{\sigma_i^2} \qquad \chi^2_{\rm MBR} = \sum_{\rm exp=\{DB,DC,RENO\}} (\chi^{\rm shape}_{\rm exp})^2 + (\chi^{\rm rate}_{\rm exp})^2 + \frac{(1-\alpha)^2}{\sigma_a^2}$$

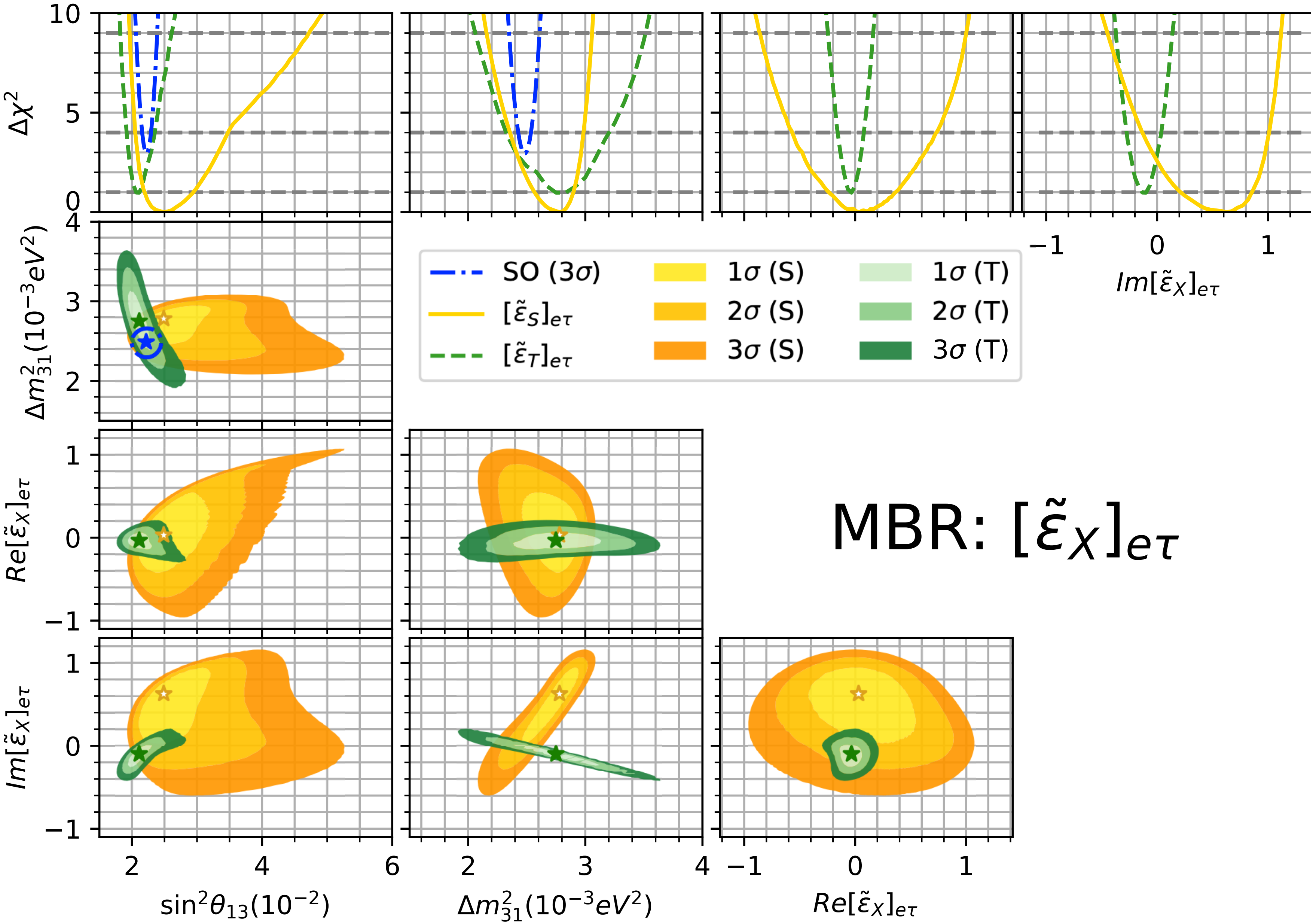
Juntando

$$\chi^2_{\rm global} = \chi^2_{\rm MBR} + \chi^2_{\rm Kamland} + \chi^2_{\rm Sun}\,.$$

temos os parâmetros $\theta_{12}, \theta_{13}, \Delta m^2_{21}, \Delta m^2_{31}$ **e os de BSM,** $\Re\left[\tilde{\epsilon}_S\right]_{\alpha\beta}, \Im\left[\tilde{\epsilon}_S\right]_{\alpha\beta}$. **Definimos** $\tilde{\epsilon}_X = \epsilon_X U_{23}(\theta_{23}, \delta)$.

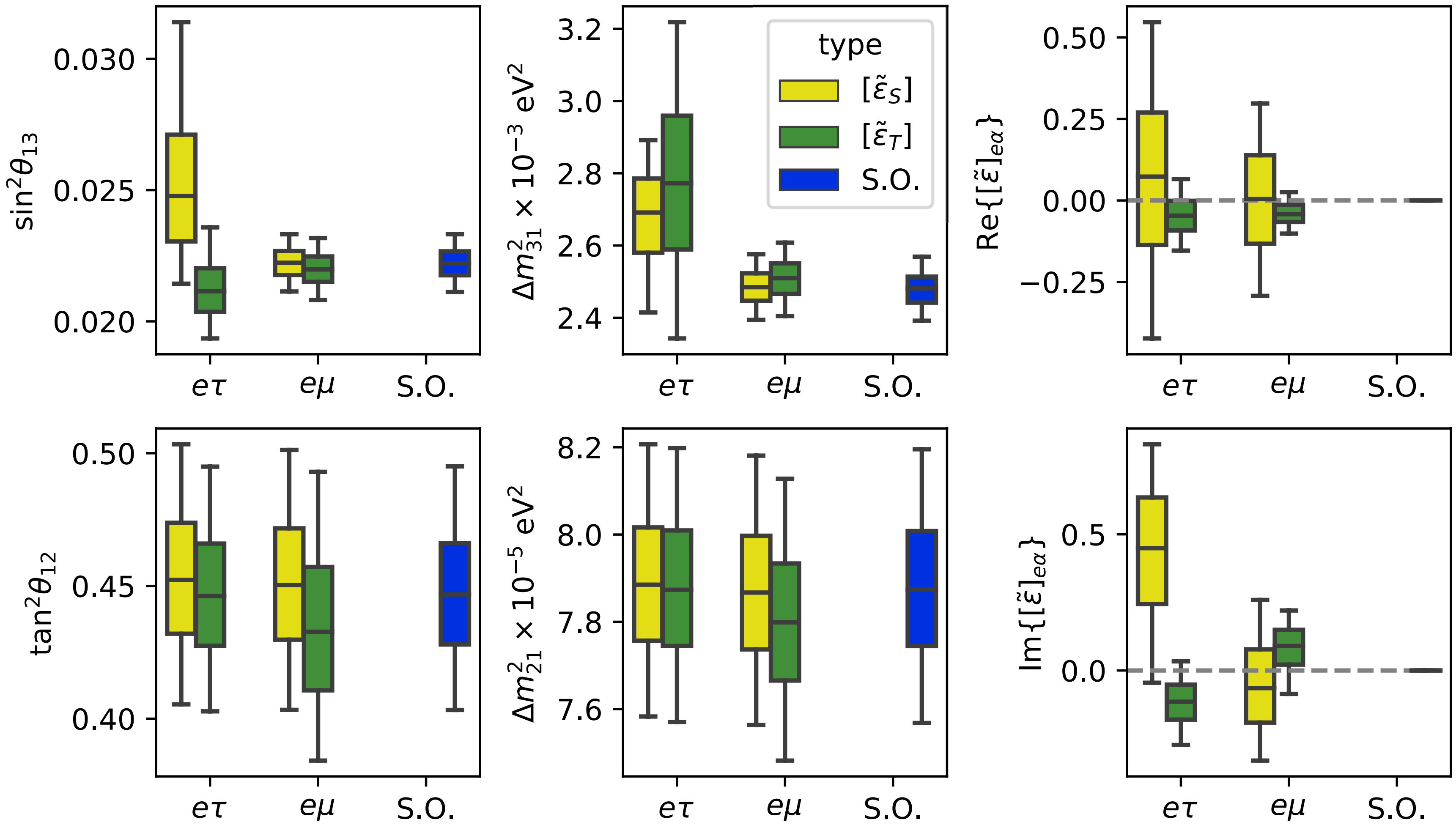


Resultados



Regiao permitida aumenta, signal de degenerescência entre $\Im\left[\tilde{\epsilon}_X\right]_{e\tau}$ e outros parâmetros.

Resultados



Valores de $\sin^2\theta_{13}$ e Δm^2_{31} são alterados dos valores padrões. Outros vínculos podem alterar isto. foi achado que a introdução de BSM melhora levemente o ajuste dos dados, devido a preferencia por um acoplamento imaginário não nulo.

Conclusões

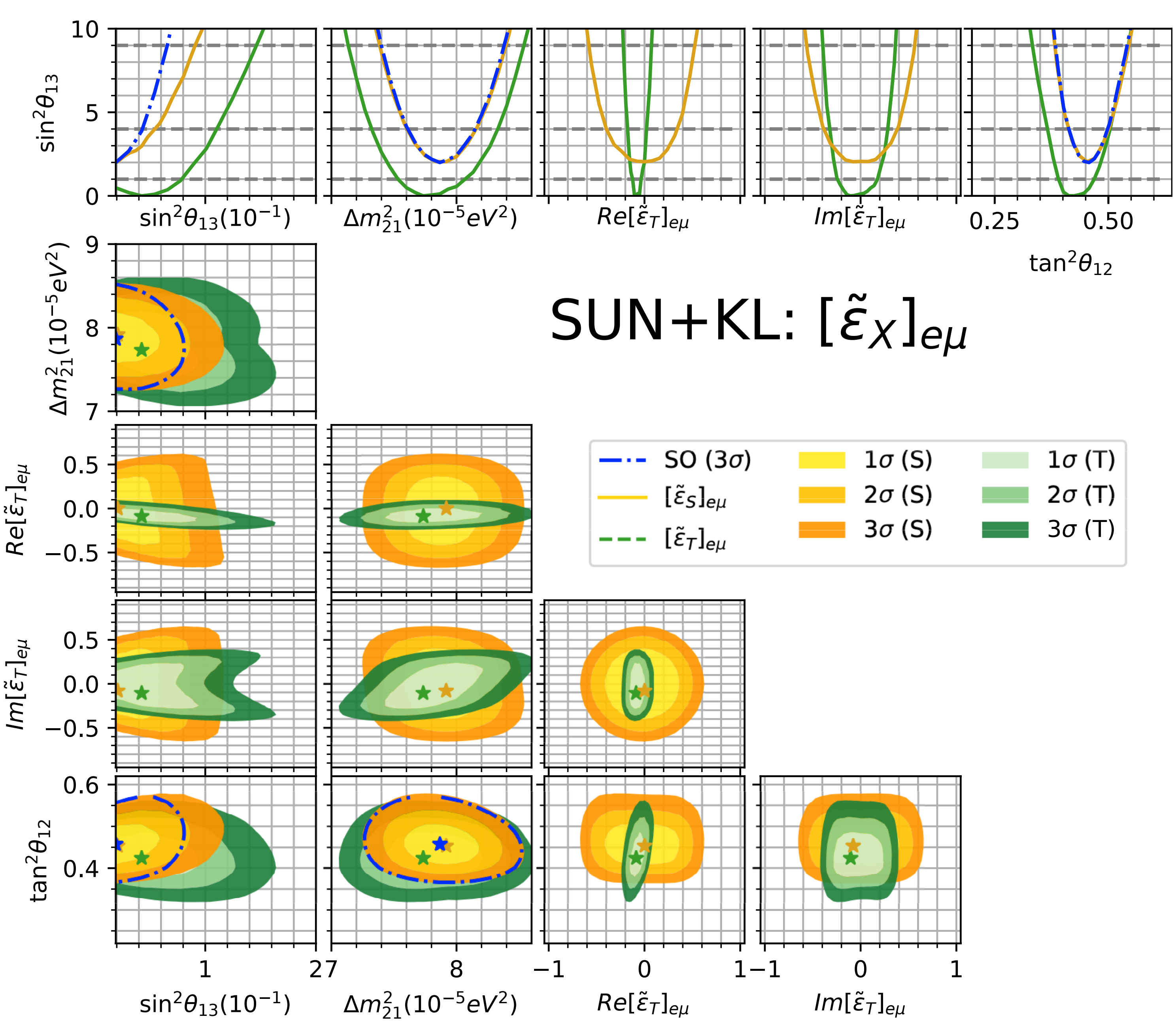
1) Fisica Além do Modelo Padrão (BSM) pode se manifestar em experimentos de neutrinos alterando o padrão de oscilação
2) Um dos efeitos possíveis é a existência de novas fontes de violação CP, devido a interações
3) Com analise de dados de neutrinos solares e de reatores obtemos que os valores possíveis a 1σ são da parte real e da parte imaginaria de acoplamentos escalares e tensoriais são

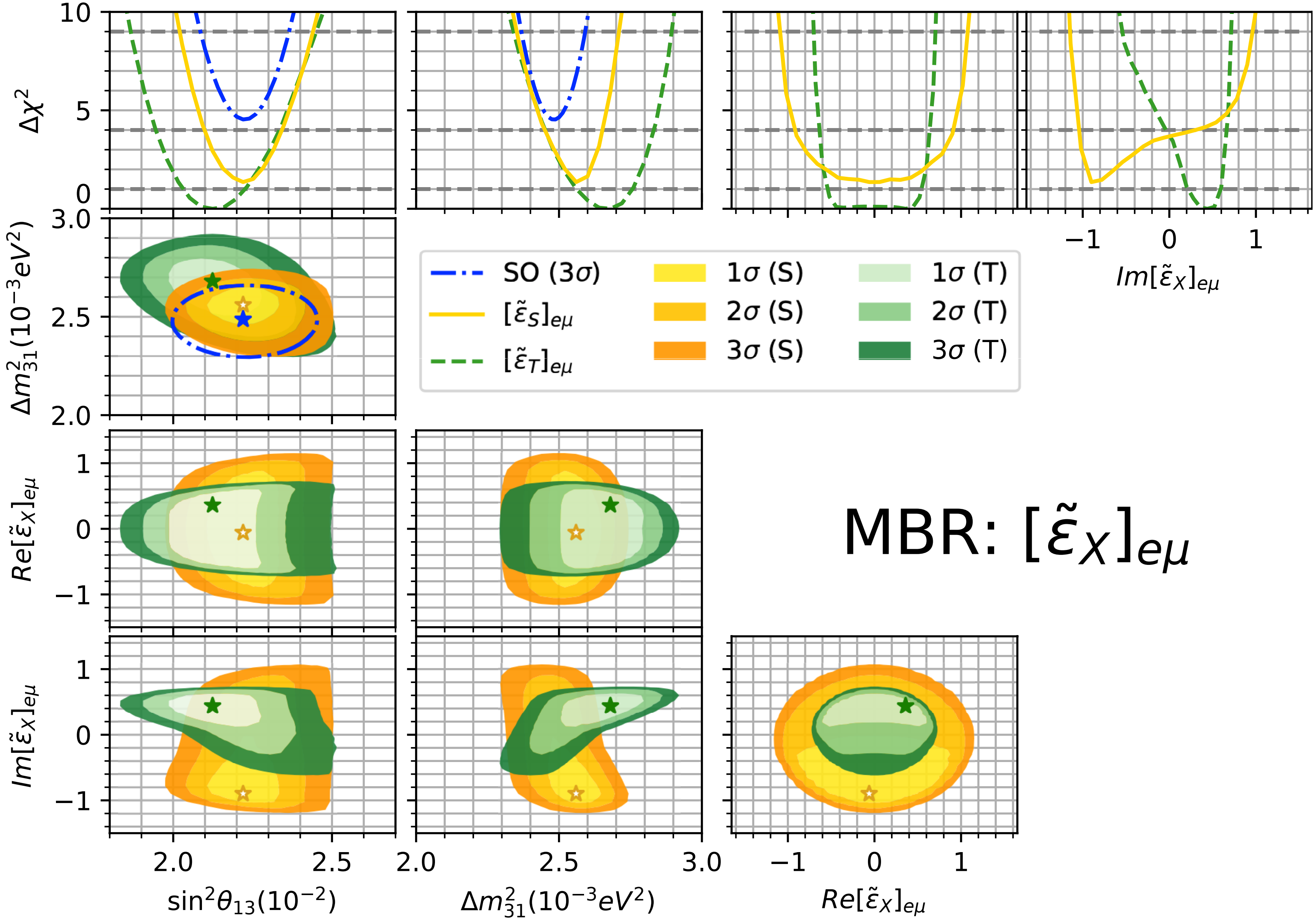
$$\Re[\tilde{\epsilon}_S]_{e\tau} = +\,0.03^{+0.40}_{-0.21} \qquad \Im[\tilde{\epsilon}_S]_{e\tau} = -\,0.62^{+0.41}_{-0.23} \qquad \Re[\tilde{\epsilon}_T]_{e\tau} = -\,0.03^{+0.06}_{-0.06} \quad \Im[\tilde{\epsilon}_T]_{e\tau} = +\,0.12^{+0.10}_{-0.08}\,.$$

A qualidade deste ajuste é igual ou levemente melhor do que a solução com oscilação devido a matriz PMNS

4) Podemos observar tais sinais de Fisica Além do Modelo Padrão em outros experimentos de neutrinos ? Certamente algo a tentar. Por exemplo estudar experimentos que tem violação de CP como T2K, NOVA com a medida de efeitos de transição $\nu_\mu \to \nu_e$.

Testar em experimentos que medidas a diferença de massas Δm^2_{31}.


SUN+KL: $[\tilde{\varepsilon}_X]_{e\mu}$
SO (3σ)
$[\tilde{\varepsilon}_S]_{e\mu}$
$[\tilde{\varepsilon}_T]_{e\mu}$
1σ (S)
2σ (S)
3σ (S)
1σ (T)
2σ (T)
3σ (T)
$\sin^2\theta_{13}$
$\Delta m^2_{21}(10^{-5}eV^2)$
$Re[\tilde{\varepsilon}_T]_{e\mu}$
$Im[\tilde{\varepsilon}_T]_{e\mu}$
$\tan^2\theta_{12}$
$\sin^2\theta_{13}(10^{-1})$



MBR: $[\tilde{\varepsilon}_X]_{e\mu}$
SO (3σ)
$[\tilde{\varepsilon}_S]_{e\mu}$
$[\tilde{\varepsilon}_T]_{e\mu}$
1σ (S)
2σ (S)
3σ (S)
1σ (T)
2σ (T)
3σ (T)
$\Delta\chi^2$
$\Delta m^2_{31}(10^{-3}eV^2)$
$Re[\tilde{\varepsilon}_X]_{e\mu}$
$Im[\tilde{\varepsilon}_X]_{e\mu}$
$\sin^2\theta_{13}(10^{-2})$