Julius-Maximilians-
UNIVERSITÄT
WÜRZBURG

Neutrino-Massenmatrizen, Mischungen und CP-Verletzung

Schule für Astroteilchenphysik 2008

Svenja Niehage

13. Oktober 2008

Neutrinos sind massiv

- Neutrinooszillationen
  - atmosphärische Oszillationen
  - solare Oszillationen
  - Reaktorexperimente
- CP-Verletzung
  - Relevant für Leptogenese

$$P_{\mu \to \mu} \approx 1 - \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{31} L}{4E}\right)$$

$$P_{e \to e} \approx 1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{21} L}{4E}\right)$$

$$P_{\bar{e} \to \bar{e}} \approx 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{21} L}{4E}\right)$$

Woher kommt die Mischungsmatrix

Flavor-Basis ⟷ Massen-Basis

$$j^{\mu} = 2\,\bar{\nu}_{L,\alpha}\,\gamma^{\mu}\,\ell_{L,\alpha}$$

$$L_m^{\ell} \sim m_i^{\ell}\,\bar{\ell}_{L,i}\,\ell_{R,i}$$

$$L_m^{\nu} \sim m_i^{\nu}\,\bar{\nu}_{L,i}\,\nu_{R,i}$$

Woher kommt die Mischungsmatrix

Flavor-Basis ⟷ Massen-Basis

$$j^{\mu} = 2\,\bar{\nu}_{L,\alpha}\,\gamma^{\mu}\,\ell_{L,\alpha}$$

$$L_m^{\ell} \sim \bar{\ell}_{L,\alpha}\,M_{\alpha\beta}^{\ell}\,\ell_{R,\beta}$$

$$L_m^{\nu} \sim \bar{\nu}_{L,\alpha}\,M_{\alpha\beta}^{\nu}\,\nu_{R,\beta}$$

$$\ell_{L,i} = U_{\ell,\alpha i}^{\dagger}\,\ell_{L,\alpha}$$

$$\nu_{L,i} = U_{\nu,\alpha i}^{\dagger}\,\nu_{L,\alpha}$$

$$L_m^{\ell} \sim m_i^{\ell}\,\bar{\ell}_{L,i}\,\ell_{R,i}$$

$$L_m^{\nu} \sim m_i^{\nu}\,\bar{\nu}_{L,i}\,\nu_{R,i}$$

$$M_{ij}^{\ell,diag} = U_{\ell,\alpha i}^{\dagger}\,M_{\alpha\beta}^{\ell}\,U_{\ell,\beta j}^{'} \qquad M_{ij}^{\nu,diag} = U_{\nu,\alpha i}^{\dagger}\,M_{\alpha\beta}^{\nu}\,U_{\nu,\beta j}^{'}$$

Woher kommt die Mischungsmatrix

Flavor-Basis ⟷ Massen-Basis

$$j^\mu = 2\,\bar{\nu}_{L,\alpha}\,\gamma^\mu\,\ell_{L,\alpha}$$

$$L_m^\ell \sim \bar{\ell}_{L,\alpha}\,M_{\alpha\beta}^\ell\,\ell_{R,\beta}$$

$$L_m^\nu \sim \bar{\nu}_{L,\alpha}\,M_{\alpha\beta}^\nu\,\nu_{R,\beta}$$

$$\ell_{L,i} = U_{\ell,\alpha i}^\dagger\,\ell_{L,\alpha}$$

$$\nu_{L,i} = U_{\nu,\alpha i}^\dagger\,\nu_{L,\alpha}$$

$$j^\mu = 2\,\bar{\nu}_{L,i}\,U_{\nu,\alpha i}^\dagger\,\gamma^\mu\,U_{\ell,\alpha j}\,\ell_{L,j}$$

$$L_m^\ell \sim m_i^\ell\,\bar{\ell}_{L,i}\,\ell_{R,i}$$

$$L_m^\nu \sim m_i^\nu\,\bar{\nu}_{L,i}\,\nu_{R,i}$$

Mischungsmatrix

$$U_{PMNS} = U_\ell^\dagger\,U_\nu$$

$$M_{ij}^{\ell,diag} = U_{\ell,\alpha i}^\dagger\,M_{\alpha\beta}^\ell\,U_{\ell,\beta j}^{'} \qquad M_{ij}^{\nu,diag} = U_{\nu,\alpha i}^\dagger\,M_{\alpha\beta}^\nu\,U_{\nu,\beta j}^{'}$$

Julius-Maximilians-
UNIVERSITÄT
WÜRZBURG

PMNS-Matrix (Pontecorvo 1957; Maki, Nakagawa, Sakata 1962)

- Unitäre 3x3-Matrix: 3² Parameter
- Lagrangedichte invariant unter Phasenrotationen der Felder: Eliminierung von 5 (3) Phasen
- 4 (6) physikalische Parameter:
  - 3 Winkel, 1 (3) Phase(n)

Standard-parametrisierung

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e^{i\varphi_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

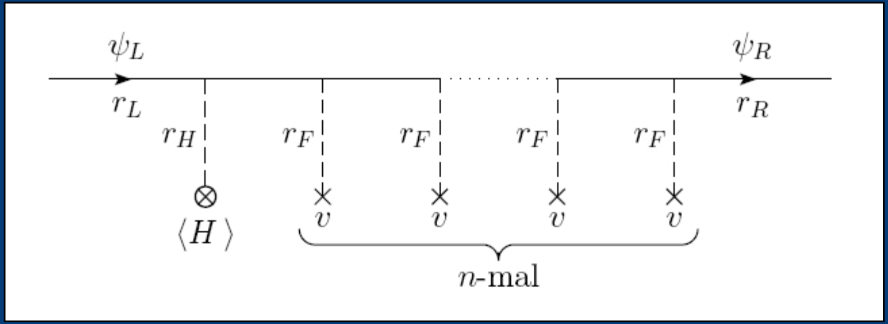
Ungefähre Werte

$$U_{PMNS} \approx \begin{pmatrix} \sqrt{2/3} & \sqrt{1/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/6} & -\sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \end{pmatrix}$$

Tribimaximale Mischung

Massenmatrizen

- korrekt zu erzeugen
  - Mischungsmatrix
  - Massen der Teilchen (Hierarchien)
- Flavor-Symmetrie
  - z.B. Froggatt-Nielsen-Mechanismus



$$L_{eff} \sim S_{\alpha\beta} \langle H \rangle \varepsilon^{n_{\alpha\beta}} \bar{\psi}^{\alpha}_{L} \psi^{\beta}_{R}$$

(Froggatt, Nielsen 1979)

Textur: Struktur der Massenmatrix

Mögliche Textur für Neutrino-Massenmatrix

$$\begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon^2 \\ \varepsilon & \varepsilon^2 & 1 \end{pmatrix}$$

Julius-Maximilians-
UNIVERSITÄT
WÜRZBURG

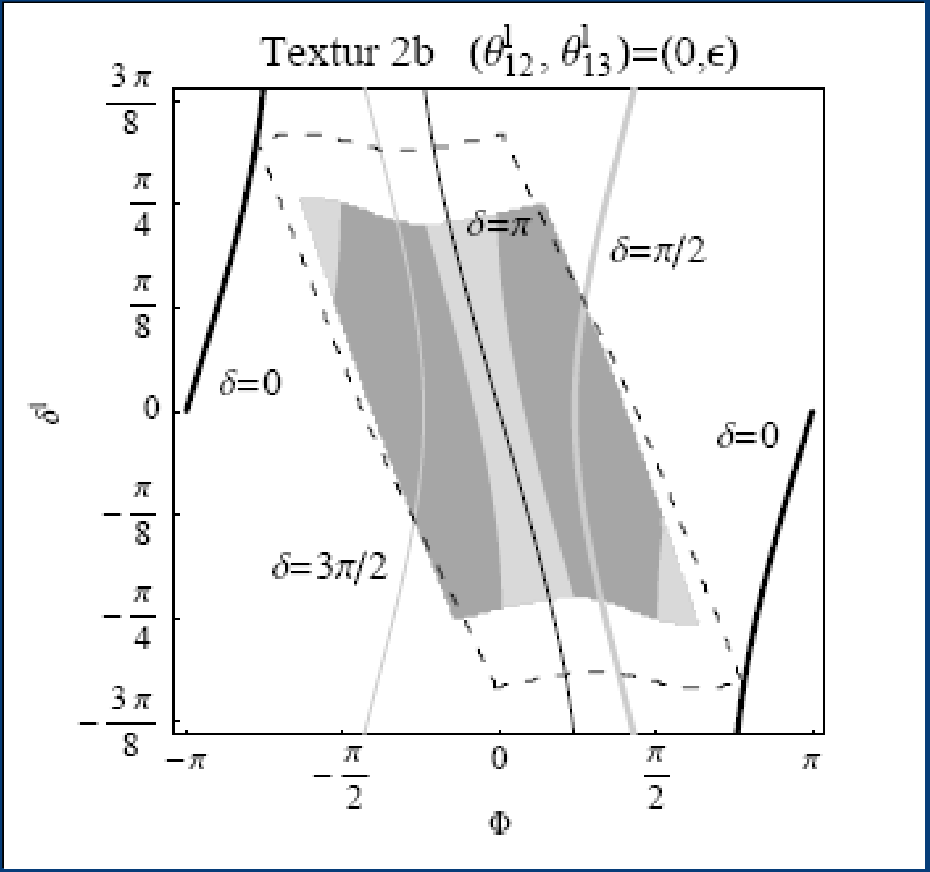
Beispiel für CP-Verletzung

- Bestimmte Konfiguration

$$\theta^{\nu}_{12} = \frac{\pi}{4} \qquad \theta^{\ell}_{23} = \frac{\pi}{4}$$

- Bestimmte Textur für Neutrino-Massenmatrix

$$\begin{pmatrix} \eta & \eta & \eta \\ \eta & \eta & \eta^2 \\ \eta & \eta^2 & 1 \end{pmatrix}$$



Zusammenfassung

- Massive Neutrinos
  - Massenmatrizen im Allgemeinen komplex und nicht diagonal
  - Mischungen
  - CP-Verletzung