Sviluppi Recenti nella Fisica del Neutrino

Davide Meloni

Dipartimento di Matematica e Fisica RomaTre

IFAE 2015

Roma Tor Vergata



Introduzione

- Nuovi dati sulle oscillazioni ci hanno permesso di determinare con buona precisione tutti i parametri di mixing
- La presenza o meno di violazione di CP nel settore leptonico sembra una domanda alla quale presto (<=5 y) sara' data una risposta (T2K, NoVA...)
- Tuttavia:

non esiste una chiara estensione del Modello Standard che ci permetta di capire:

- l'origine delle masse e degli angoli
- la differenza con il settore dei quark

Transizione con cambio di sapore

distanza sorgente-detector

$$P(\mathbf{v}_{\alpha} \rightarrow \mathbf{v}_{\beta}) = \left| \langle \mathbf{v}_{\beta} | \mathbf{v}_{\alpha}(t) \rangle \right|^{2} = \left| \sum_{j} U_{\beta j} e^{\frac{-im_{j}^{2}L}{2E_{v}}} U_{\alpha j}^{*} \right|^{2}$$

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

mixing atmosferico settore dei reattori mixing solare



Gli esperimenti determinano:



 Inoltre: non e' chiaro che esista violazione di CP leptonica e non si conosce l'ordinamento degli autostati di massa (gerarchia normale o inversa)

Fit globale sui dati



Gonzalez-Garcia et al. JHEP1212,(2012)123				
Parametro	Risultato			
θ_{12}	33.36 ^{+0.81} -0.78			
θ_{13}	8.66 ^{+0.44} -0.46			
θ ₂₃	40 .0 ⁺²⁻¹ -1.5			
δ	300 ⁺⁶⁶ -138			
Δm_{23}^2 (10 ⁻³ eV ²)	2.47 ^{+0.07} -0.07			
$\Delta m_{12}^2 (10^{-5} e^{V^2})$	7.50+0.18			

- Masse al 3%
- Angoli tra il 5% e il 10%

Fit globale sui dati



Gonzalez-Garcia et al. JHEP1212,(2012)123				
Parametro	Risultato			
θ ₁₂	33.36 ^{+0.81} _{-0.78}			
θ_{13}	8.66+0.44			
θ ₂₃	40.0 ⁺²⁻¹ -1.5			
δ	300 ⁺⁶⁶ -138			
Δm_{23}^2 (10 ⁻³ eV ²)	2.47 ^{+0.07} -0.07			
$\Delta m_{12}^2 (10^{-5} eV^2)$	7.50 ^{+0.18} -0.19			

	0.795 ightarrow 0.846	$0.513 \rightarrow 0.585$	$0.126 \rightarrow 0.178$
7 =	$0.205 \rightarrow 0.543$	$0.416 \rightarrow 0.730$	$0.579 \rightarrow 0.808$
	0.215 ightarrow 0.548	$0.409 \rightarrow 0.725$	$0.567 \rightarrow 0.800$

LSND

evidenza per oscillazione $\overline{v}_{\mu} \rightarrow \overline{v}_{e}$ con L/E~ 1 km/GeV (v_{e} appearance)

- <u>Anomalie in esperimenti che impiegano il Gallio (SAGE & GALLEX)</u>
 detector che tentano di rivelare i neutrini elettronici dal Sole e misurano un flusso consistentemente piu' basso del previsto (v disappearance)
- Anomalie dovute a nuovo calcolo di flussi da reattore

i flussi di neutrini da reattore sono circa il 3.5% piu' alti che in passato \rightarrow i risultati di esperimenti con L<= 100 m mostrano deficit di neutrini (v_e disappearance- Bugey, Rovno...)

Poi ci sono i *null results:* v_{μ} disappearance (CDHS,SK, MINOS) e v_e appearance (KARMEN, NOMAD, ICARUS, OPERA) che non hanno riportato nessuna evidenza di segnale



Kopp, Machado, Maltoni, Schwetz2013



Tensione tra appearance e disappearance e tra exp's con e senza segnale



Cosa deve spiegare un teorico



Sulle masse dei neutrini



Parte "facile": gli accoppiamenti di Yukawa dei neutrini sono molto piu' piccoli di quelli degli altri fermioni

neutrini: $Y_{\nu}\overline{\Psi}_{L}\widetilde{H}\nu_{R}$

elettroni: $Y_e \overline{\Psi}_L H e^c$

 $\frac{Y_{\nu}}{Y_e} \sim 10^{-5}$

andiamo oltre queste assunzioni

Termini di massa dei neutrini



numero	leptonico	1	-1

• <u>Termine di massa di Dirac</u> (lo stesso per quarks e leptoni) i neutrini right v_{R} devono essere inclusi; il numero leptonico L e' conservato

$$L_D = m_D \overline{\Psi}_L \widetilde{H} \nu_R$$

<u>Termine di massa di Majorana</u> se il numero leptonico L NON e' conservato

$$L_M = m_M \mathbf{v}_R^T \mathbf{v}_R$$

D.Meloni

•



Lagrangiana totale

$$L_m = m_D \overline{\psi}_L \widetilde{H} \mathbf{v}_R + m_M \mathbf{v}_R^T \mathbf{v}_R$$

Rottura della simmetria elettrodebole \rightarrow see-saw

Angoli di mixing

Due approcci differenti e ugualmente (non)promettenti

 Modelli con <u>dinamica non triviale</u>: significa che la struttura della matrice di mixing e'determinata da simmetrie discrete.

L'uso di tali simmetrie e' motivato dal fatto che i dati stessi suggeriscono rotazioni con angoli fissi speciali $(\frac{1}{2}, 1/3...)$

- gruppi permutazionali come A₄, S₄ ...

 Modelli la cui idea principale e' che non c'e' bisogno di nessuna simmetria discreta aggiuntiva per spiegare gli angoli di mixing
 In tali modelli, il caso gioca un ruolo fondamentale (modelli anarchici e sue varianti)

gli angoli di mixing si etraggono diagonalizzando la matrice di massa

$$m_{\nu}^{Diag} = U^T m_{\nu} U$$

 osservazione: si puo' considerare come <u>una buona approssimazione</u> dei dati sperimentali i seguenti valori degli angoli di mixing:

$$\sin^2 \theta_{23} = \frac{1}{2} \quad \sin^2 \theta_{13} = 0$$

$$\sin^2 \theta_{12} = \frac{1}{3} \quad (TBM)$$
$$\sin^2 \theta_{12} = \frac{1}{2} \quad (BM)$$
$$\sin^2 \theta_{12} = \frac{2}{5 + \sqrt{5}} \quad (GR)$$

Quanto sono buoni questi punti di partenza?



servono correzioni per cadere sui dati sperimentali

in modelli senza dinamiche barocche, tutti gli angoli di mixing ricevono correzioni dello stesso ordine

$$\underline{\text{TBM}} \qquad \sin^2 \theta_{12} = \frac{1}{3} + O(\lambda_C^2) \qquad \sin^2 \theta_{23} = \frac{1}{2} + O(\lambda_C^2) \qquad \sin \theta_{13} = O(\lambda_C^2)$$
ok
ok
sbagliato !

 $\sin^{2}\theta_{12} = \frac{1}{2} + O(\lambda_{C}) \quad \sin^{2}\theta_{23} = \frac{1}{2} + O(\lambda_{C}) \quad \sin\theta_{13} = O(\lambda_{C})$ ok
ok
ok
ok

D.Meloni

i dati sperimentali rendono questo pattern di mixing appetibile

Possibile origine delle correzioni:

• U_{PMNS} riceve contributi anche dalla *diagonalizzazione dei leptoni carichi*

$$\mathbf{v}_{\alpha} = U_{\alpha i}^{\mathbf{v}} \mathbf{v}_{i}$$

diagonalizza la matrice / di massa dei neutrini

$$l_{\alpha} = U_{\alpha i}^{l} l_{i}$$

diagonalizza la matrice di massa dei leptoni carichi

D.Meloni

corrente carico

Simmetrie aggiuntive

 I patterns "ordinati" sono spesso deducibili estendendo il Modello Standard con <u>simmetrie di sapore</u>



- le simmetrie di gauge agiscono tra gli elementi dei multipletti
- le simmetrie di sapore agiscono tra le famiglie di particelle

Vantaggio: forte correlazione tra gli elementi delle matrici di massa, e quindi *meno* parametri liberi nella teoria (predittivita')

Simmetrie aggiuntive

• Questa tipologia di modelli funziona cosi:

Altarelli-Feruglio2012



Rottura della simmetria in sottogruppi invarianti

simmetria residua nel settore dei neutrini G_v : U_v simmetria residua nel settore dei leptoni carichi G_I: U_I

 $U_{\rm PMNS}$ = $U_{\rm I}^+ U_{\rm v}$

Modelli senza simmetrie discrete

- Il *caso* e' alla base del successo di tali modelli
- Non c'e' una simmetria definita nella matrice di massa dei neutrini, soltanto una U(1) per generare i rapporti di massa dei fermioni
- supponiamo di avere un campo che trasforma come: $\psi
 ightarrow e^{i q_{\psi}} \psi$
- un termine di massa trasforma come:

$$y \overline{\psi}_L H \psi_R \rightarrow e^{i(-q_{\psi_R} + q_{\psi_L} + q_H)} y \overline{\psi}_L H \psi_R$$

Se $(-q_{\psi_R} + q_{\psi_L} + q_H) = 0$ il termine di massa e' ammissibile, altrimenti bisogna aggiungere un nuovo campo scalare θ con carica q_{θ} e vev v_{θ} :

$$y \overline{\psi}_L H \psi_R \left(\frac{\theta}{\Lambda}\right)^k \rightarrow e^{i(-q_{\psi_R} + q_{\psi_L} + q_H + k q_{\theta})} y \left(\frac{\nu_{\theta}}{\Lambda}\right)^k \overline{\psi}_L H \psi_R$$

D.Meloni

termine di soppressione

Modelli senza simmetrie discrete

Variando le cariche si possono ottenere le matrici di massa appropriate

Modelli anarchici (A)

Modelli gerarchici (H)

$$m_{l} = \begin{pmatrix} \lambda^{7} & \lambda^{6} & \lambda^{5} \\ \lambda^{5} & \lambda^{4} & \lambda^{3} \\ \lambda^{2} & \lambda & 1 \end{pmatrix}, \qquad m_{\nu} = \begin{pmatrix} \lambda^{4} & \lambda^{3} & \lambda^{2} \\ \lambda^{3} & \lambda^{2} & \lambda \\ \lambda^{2} & \lambda & 1 \end{pmatrix}$$

Modelli senza simmetrie discrete

no see-saw see-saw 0.05 0.15 0.04 0.10. D. A 0.03 0.0 0.05 0.0 0.00 10⁻³ 0.00^E 10⁻³ 10-2 10-1 10⁻¹ 10^{-2} $r = \Delta m_{12} / \Delta m_{23}$ $r = \Delta m_{12} / \Delta m_{23}$ 0.12 0.12 0.10 0.10 H PA 0.08 0.08 A 0.06 A 0.06 0.04 0.04 0.02 0.02 0.00 0.00 10⁻¹ 10-1 $sin\theta_{13}$ $sin\theta_{13}$

Messaggio: H e' piu' performante di A

Il futuro (visione personale)

settore delle oscillazioni

settore del flavor

settore cosmologico

- Migliore determinazione degli angoli e delle masse
- Stati sterili ?
- Ricerca di effetti di nuova fisica
- Studio dell'interplay tra simmetrie di flavor e GUT
- Comprensione della differenza tra quark e leptoni
- Questione della massa assoluta dei neutrini

4. 1. M. S. backup D.Meloni

Con gruppi permutazionali

S₄: gruppo di permutazione di 4 oggetti → 24 elementi
E' il gruppo di simmetria di un cubo



rotazione di 90° rispetto ad uno degli assi di simmetria

 Rappresentazioni irriducibili: singoletti, doppietti (utili per i doppietti del MS) e tripletti (per i leptoni carichi)

Nuovi risultati di Planck

Per T < me , il contenuto di radiazione dell'Universo e'

$$\varepsilon_R = \varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{\nu} + \varepsilon_x$$

Ninetta Saviano, talk a Moriond2015

Il contributo non elettromagnetico e' parametrizzato dal numero effettivo di specie di neutrino Neff

 $\varepsilon_{\nu} + \varepsilon_{x} = \frac{7}{8} \frac{\pi^{2}}{15} T_{\nu}^{4} N_{eff} = \frac{7}{8} \frac{\pi^{2}}{15} T_{\nu}^{4} (N_{eff}^{SM} + \Delta N)$ radiazione extra, ad
a.046
esempio neutrini sterili
(gradi di liberta' relativistici)
Planck 2015:
Neff = 3.15 ± 0.46
D.Meloni
poco spazio per
gli sterili

Commento sulla fase di violazione di CP

Esperimenti di Long Baseline
 (T2K) indicano δ ~ 3/2 π





Egidio Lisi, talk a Moriond2015

• I reattori modellano la forma dei CL per $\sin^2\theta_{13} \sim 0.02$

Joachim Kopp

August 21, Aspen

LSND

evidenza per oscillazione \overline{v}_e -> \overline{v}_μ con L/E~ 1 km/GeV

<u>MiniBooNE</u>

nessun eccesso significativo di v_e o \overline{v}_e nella regione preferita da LSND ma risultato in antineutrino consistente con LSND



Limitiamoci allo schema 3+1

$$P_{\substack{(-) \ \nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}}} = \delta_{\alpha\beta} - 4|U_{\alpha4}|^2 \left(\delta_{\alpha\beta} - |U_{\beta4}|^2\right) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{41}^2 L}{4E}\right)$$

D.Meloni

 $\sin^2 2\vartheta_{e\mu} = 4|U_{e4}|^2|U_{\mu4}|^2 \text{ of } \overset{(-)}{\nu_{\mu}} \rightarrow \overset{(-)}{\nu_e} \text{ transitions}$

 $\sin^2 2\vartheta_{ee} = 4|U_{e4}|^2 \left(1 - |U_{e4}|^2\right) \text{ of } \overset{(-)}{\nu_e} \text{ disappearance}$

 $\sin^2 2\vartheta_{\mu\mu} = 4|U_{\mu4}|^2 \left(1 - |U_{\mu4}|^2\right) \text{ of } \overset{(-)}{\nu_{\mu}} \text{ disappearance}$

fit globale di tutti i dati di <u>nue</u> <u>appearance</u> sono consistenti

 $\sin^2 2\theta = 0.013$ $\Delta m^2_{41} = 0.42 \text{ eV}^2$ $\chi^2_{\text{min}}/\text{dof} = 87.9/66$



Giunti Laveder arXiv:1005.4599 arXiv:1006.3244

• Anomalie in esperimenti che impiegano il <u>Gallio</u>

 $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$

detector che tentano di rivelare i neutrini elettronici dal Sole e misurano un flusso consistentemente piu' basso del previsto

 Anomalia dovuta a nuovo calcolo di <u>flussi da reattore</u>

i flussi di neutrini da reattore sono circa il 3.5% piu' alti che in passato \rightarrow i risultati di esperimenti con L<= 100 m mostrano deficit di neutrini



Parliamo di dati di <u>nue</u> <u>disappearance</u>

 fit globale di tutti i dati di nue disappearance sono <u>consistenti</u> tra di loro

 $\sin^2 2\theta = 0.09$ $\Delta m^2_{41} = 1.78 \text{ eV}^2$ $\chi^2_{\text{min}}/\text{dof} = 403/427$ Kopp, Machado, Maltoni, Schwetz2013



Osservazione: nel caso di appearance l'angolo di best fit e' <u>piu' grande</u> Tensione tra i due D.Meloni

 Esperimenti che impiegano neutrini muonici come "sorgente"

contrariamente al caso dei neutrini elettronici, disapperance di numu non hanno riportato evidenze di oscillazione

→ si parla di *null results*





Typical predictions of A4 models



main message = TM stille LO approximation

Fit globale sui dati



(f,g) long baseline accelerator (and, in part, atmospheric).
(a) KamLAND [plot]; (b) Borexino [plot], Homestake, Super-K, SAGE, GALLEX/GNO, SNO; (c) Super-K atmosph. [plot], MACRO, MINOS etc.; (d) T2K (plot), MINOS, K2K; (e) Daya Bay [plot], RENO, Double Chooz; (f) T2K [plot], MINOS; (g) OPERA [plot],

Super-K atmospheric.

BIM BIM BIM BIM

(differenza con il settore dei quarks)

U_{CKM} riceve contributi dalla diagonalizzazione dei quark up e down

 $u_{\alpha} = U_{\alpha i}^{u} u_{i} \qquad d_{\alpha} = U_{\alpha i}^{d} d_{i}$ $\bar{d}_{\alpha} \gamma_{\mu} u_{\alpha} W^{\mu} \rightarrow U_{\alpha i}^{+d} U_{\alpha j}^{u} \bar{d}_{i} \gamma_{\mu} u_{j} W^{\mu}$ \bigcup_{CKM}



matrice praticamente diagonale

Con gruppi permutazionali

• Al LO si produce la seguente matrice di massa dei neutrini:

$$m = \begin{pmatrix} x & y & y \\ y & z & x-z \\ y & x-z & z \end{pmatrix}$$

x, y, z numeri complessi

diagonalizzata dalla matrice BM:

$$U_{BM} = \begin{pmatrix} \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} & 0\\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2}\\ \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/2} \end{pmatrix}$$

• Al NLO (dai leptoni carichi, ad esempio):

 $U_{PMNS} = U_{BM} + O(\lambda_C)$

Transizione con cambio di sapore

$$P(\mathbf{v}_{\alpha} \rightarrow \mathbf{v}_{\beta}) = \left| \langle \mathbf{v}_{\beta} | \mathbf{v}_{\alpha}(t) \rangle \right|^{2} = \left| \sum_{j} U_{\beta j} e^{\frac{-im_{j}^{2}L}{2E_{v}}} U_{\alpha j}^{*} \right|^{2}$$

• Nel caso (semplice) di due soli neutrini

$$P(v_e \rightarrow v_{\mu}) = \sin^2 2\theta \quad \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4 E_v}\right) \rightarrow distanza \text{ sorgente-detector}$$

angolo di mixing
$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad U = \text{matrice unitaria}$$

Nel caso di tre neutrini

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

mixing atmosferico settore dei reattori mixing solare

 Ossia: una relazione tra le due basi un po' piu' complicata

I neutrini possono essere descritti in termini di autostati di massa vi

 $|\mathbf{v}_{\alpha}\rangle = \sum_{i=1}^{3} U_{\alpha i} \langle \mathbf{v}_{i} \rangle$

matrice di mixing

At passare del tempo il vettore $v(t) = (v_e(t), v_{\mu}(t), v_{\tau}(t))$ evolve secondo:

$$i \frac{d}{dt} |\mathbf{v}(t)\rangle = H |\mathbf{v}(t)\rangle$$

$$H = \frac{1}{2E_{v}} U Diag[0, m_{2}^{2} - m_{1}^{2}, m_{3}^{2} - m_{1}^{2}]U^{+}$$

Esiste una probabilita' per il cambiamento di sapore

A GUT example

• Standard Model particles in the 10 and $\overline{5}$ representations

$$\overline{\mathbf{5}} = \begin{pmatrix} d_1^c \\ d_2^c \\ d_3^c \\ e \\ -\nu \end{pmatrix}_L, \qquad \mathbf{10} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & u_3^c & -u_2^c & u_1 & d_1 \\ -u_3^c & 0 & u_1^c & u_2 & d_2 \\ u_2^c & -u_1^c & 0 & u_3 & d_3 \\ -u_1 & -u_2 & -u_3 & 0 & e^c \\ -d_1 & -d_2 & -d_3 & -e^c & 0 \end{pmatrix}_L$$

- SU(5) mass terms:
 - 1 = right-handed neutrino

$$m_{up} \sim 10 \times 10$$

$$m_{d} \sim m_{e} \sim 10 \times \overline{5}$$

$$m_{v_{D}} \sim \overline{5} \times 1$$
D.Meloni
$$m_{M} = 1 \times 1$$

• A_4 is the discrete group of even permutations of 4 objects (4!/2 = 12 elements) generated by S and T

S²=T³=(ST)³=1

A4

take this as an

example

The action of the generators S and T can be assigned as follows: **5**: (1234) \rightarrow (4321) **T**:(1234) \rightarrow (2314)

• irreducible representations:

a triplet and 3 different singlets 3, 1, 1', 1" (promising for 3 generations)

• invariance under S and T is automatic while A_{23} is not contained in A_4 (2-3 symmetry happens in A_4 if 1' and 1" symm. breaking flavons are absent or have equal VEV's)