

# Journées de Prospective IN2P3-IRFU

Presqu'île de Giens, 2-5 avril 2012

## G4 – Neutrinos: masses, oscillations. Désintégration du proton

- Introduction: physique du neutrino et signaux de Grande Unification  
*Stéphane Lavignac (IPhT Saclay)*
- Les anomalies dans les recherche d'oscillations: au-delà des 3 saveurs ?  
*Guillaume Mention (IRFU/SPP)*
- Les expériences futures pour les oscillations de neutrinos, la désintégration du proton et l'astrophysique  
*Alessandra Tonazzo (APC)*
- La désintégration double bêta sans émission de neutrino: un test de la violation du nombre leptonique global  
*Laurent Simard (LAL)*

# Journées de Prospective IN2P3-IRFU

Presqu'île de Giens, 2-5 avril 2012

G4 – Neutrinos: masses, oscillations. Désintégration du proton

Introduction: physique du neutrino  
et signaux de Grande Unification

Stéphane Lavignac (IPhT Saclay)

# Les neutrinos sont des fermions à part

- beaucoup plus légers que les quarks et leptons chargés

$$m_\nu \lesssim 1 \text{ eV}$$

$$m_e = 511 \text{ keV}$$

- grand mélange leptonique versus petits angles de mélange quarks (CKM)

générations 1–2	$ V_{us}  = 0.2253 \pm 0.0007$	$ U_{e2} ^2 = 0.308_{-0.017}^{+0.018}$
-----------------	--------------------------------	--

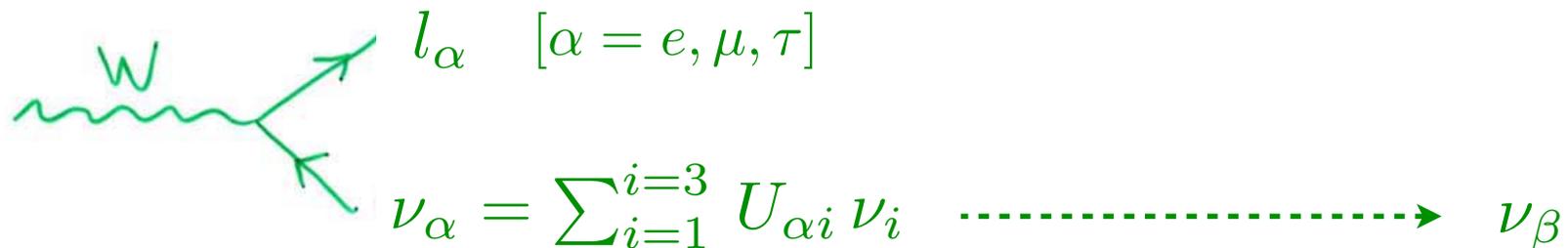
générations 2–3	$ V_{cb}  = 0.0410_{-0.0007}^{+0.0011}$	$ U_{\mu 3} ^2 = 0.51_{-0.07}^{+0.06}$
-----------------	---	--

générations 1–3	$ V_{ub}  = 0.00347_{-0.00012}^{+0.00016}$	$ U_{e3} ^2 = 0.013_{-0.005}^{+0.007}$
-----------------	--	--

fit global PDG (2010)

Schwetz, Tortola, Valle, 1108.1376 (HN)

- produits comme superposition cohérente d'états propres de masse dans les désintégrations faibles  $\Rightarrow$  oscillations de saveur



# Les neutrinos sont des fermions à part (suite)

- pas de charge électrique

⇒ peuvent être leur propre antiparticule

$\bar{\nu} \neq \nu$       Dirac      nombre leptonique conservé

$\bar{\nu} = \nu$       Majorana      nombre leptonique violé

⇒ peuvent se mélanger (osciller) avec des fermions sans interactions (neutrinos stériles)

$$\nu_{e,\mu,\tau} \rightleftharpoons \nu_s$$

- interagissent faiblement et difficiles à détecter

⇒ malgré les progrès expérimentaux, leurs propriétés sont moins bien testées que celles des quarks et des leptons chargés

# Les neutrinos, fenêtre sur la nouvelle physique

... à très haute échelle

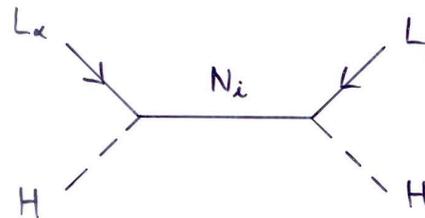
Théorie effective :  $\frac{1}{\Lambda} LLHH \longrightarrow m_\nu = \frac{v^2}{\Lambda}$   
 (si Majorana)

$m_\nu \sim 0.05 \text{ eV}$  suggère  $\Lambda \sim 10^{15} \text{ GeV}$

proche de l'échelle d'unification des couplages de jauge

→ théorie de Grande Unification?

e.g. SO(10) – contient des neutrinos droits superlourds qui engendrent l'opérateur LLHH (mécanisme de seesaw)

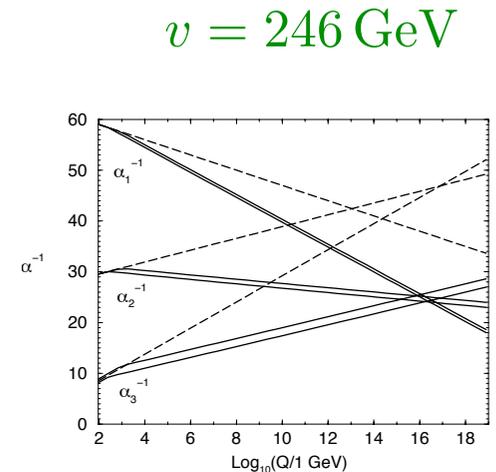


$\Lambda \sim M_R$

Seul signal observable (sauf scénario particulier): désintégration du proton

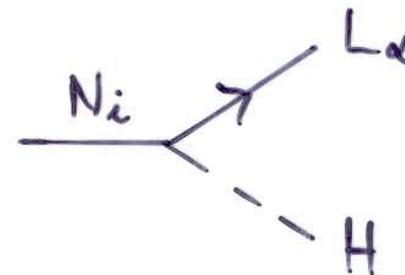
$\frac{1}{\Lambda^2} qqql$  (échange de bosons de jauge / triplets de couleur superlourds)

$\Rightarrow p \rightarrow \pi^0 e^+, \quad p \rightarrow K^+ \bar{\nu}, \dots$



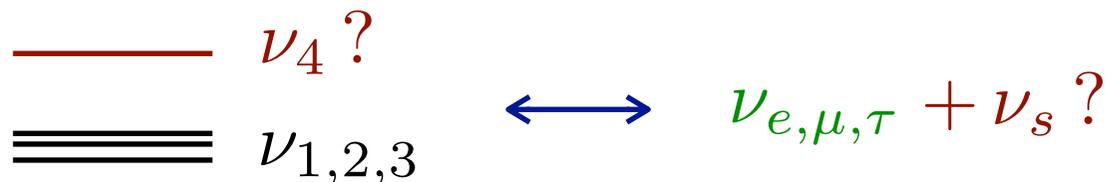
... à très haute échelle (suite)

Les neutrinos droits superlourds peuvent aussi engendrer l'asymétrie baryonique de l'Univers via le mécanisme de la leptogenèse



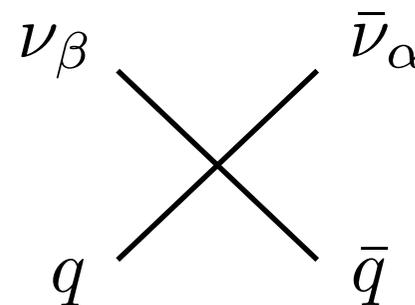
... à basse énergie

Neutrinos stériles?



Interactions non standard?

$$G_F \epsilon_{\alpha\beta} \bar{q}q \bar{\nu}_\alpha \nu_\beta$$



... possibilité de tester

La symétrie CPT

$$\Delta m^2 = \Delta \bar{m}^2 ? \quad \theta = \bar{\theta} ?$$

L'invariance de Lorentz: mesure de la vitesse des neutrinos

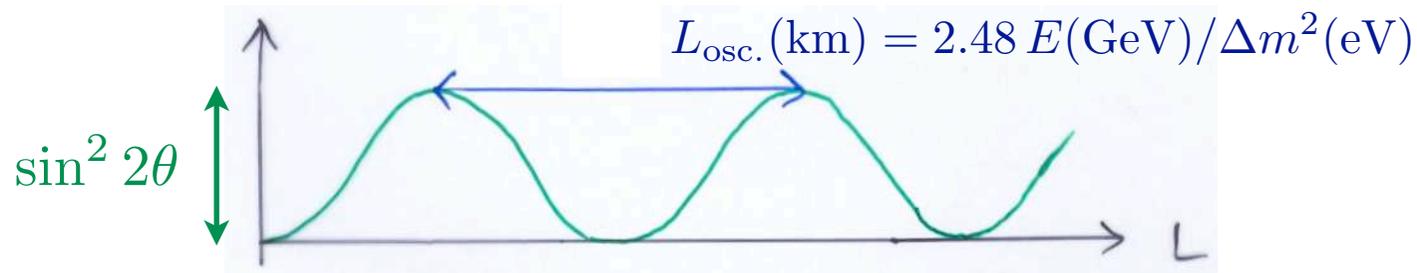
→ même si le résultat d'OPERA n'est pas confirmé, l'invariance de Lorentz restera moins bien testée dans le secteur des neutrinos que dans celui des leptons chargés

# Oscillations de neutrinos

oscillations à 2 saveurs (dans le vide)

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

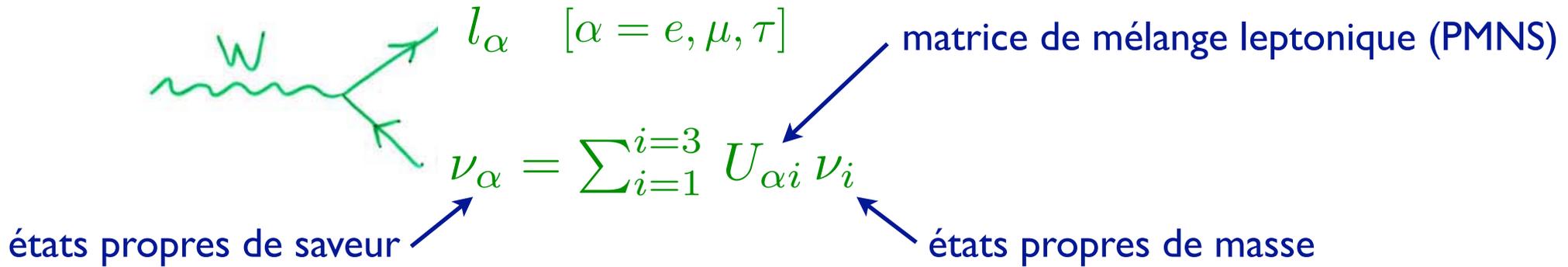
$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad \Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$



effets de matière

les diffusions élastiques vers l'avant créent un potentiel différent pour les  $\nu_e, \nu_{\mu, \tau}$  ( $\nu_s$ ) et pour les neutrinos vs les antineutrinos  
 $\Rightarrow$  oscillations modifiées dans la matière, résonances possibles...

## oscillations à 3 saveurs (dans le vide)



$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} (\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) = -4 \sum_{i < j} \text{Re} (U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{4E} \right) \pm 2J \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \sum_{i < j} \epsilon^{ijk} \sin \left( \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{4E} \right)$$

$$J = \frac{1}{8} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin \delta \quad \Delta m_{ji}^2 \equiv m_j^2 - m_i^2$$

2  $\Delta m^2$  indépendants:  $\Delta m_{32}^2$  (« atmosphérique ») et  $\Delta m_{21}^2$  (« solaire »)

U contient 3 angles de mélange  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$  et une phase  $\delta$  [+2 si Majorana]

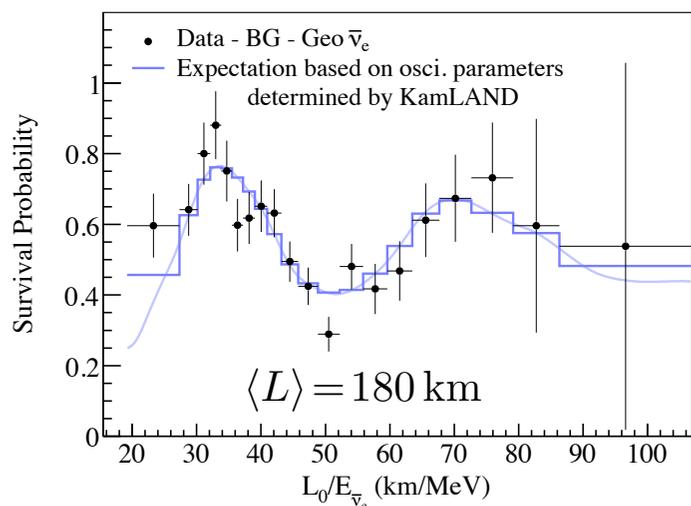
$$U \equiv U_{23} U_{13} U_{12} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\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

$\delta \neq 0, \pi \Rightarrow$  violation de CP dans les oscillations:  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$

# Une période récente riche en succès expérimentaux...

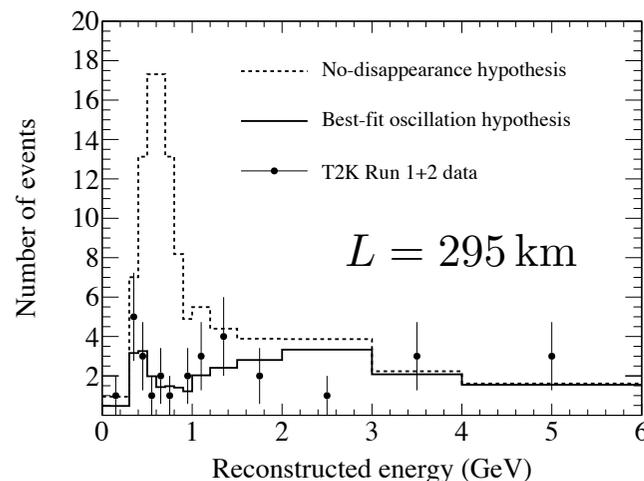
Observations d'oscillations de saveur avec des sources (neutrinos solaires, atmosphériques, d'accélérateurs, de réacteurs) et des techniques (détecteurs Cerenkov, scintillateurs liquides...) indépendantes

Disparition de  $\bar{\nu}_e$  (KamLAND)



Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 221803

Disparition de  $\nu_\mu$  (T2K)

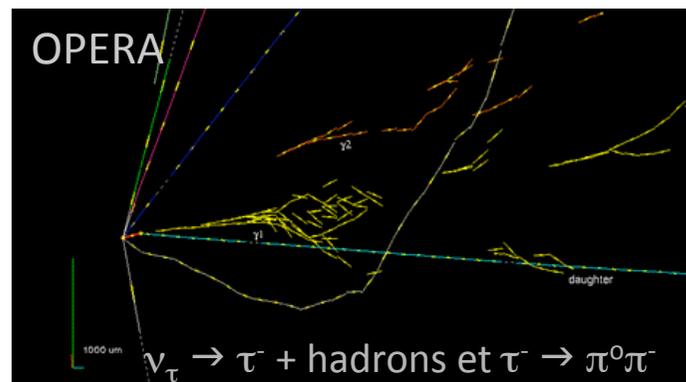


Phys. Rev. D85 (2012) 031103

## Expériences d'apparition en cours:

OPERA ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ,  $L = 730$  km)

T2K ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ,  $L = 295$  km)



PLB 691 (2010) 138

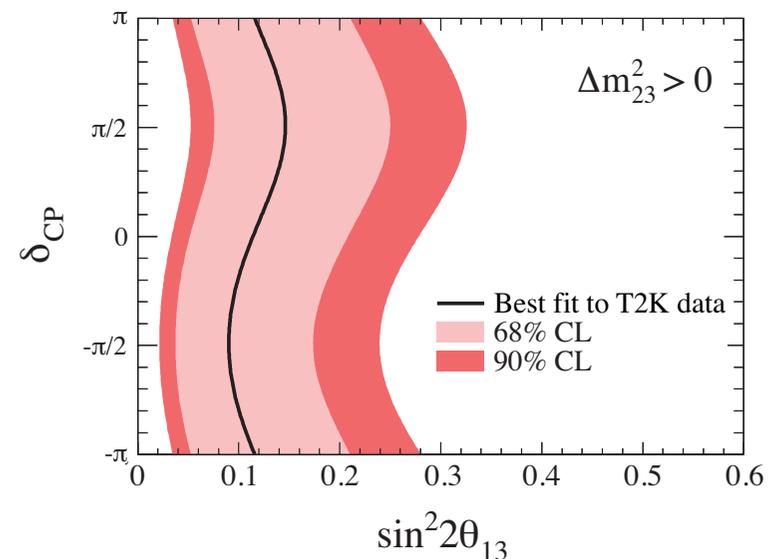
# Une période récente riche en succès expérimentaux... (suite)

Mesure de deux angles de mélange ( $\theta_{12}$  et  $\theta_{23}$ ) et des deux différences de masses au carré  $\Delta m_{32}^2$  et  $\Delta m_{21}^2$

Confirmation des oscillations comme source principale des transitions de saveur observées: autres effets (stériles, interactions non standard, moments magnétiques...) sous-dominants

Sensibilité aux effets d'oscillations à 3 saveurs:

- effet de  $\theta_{13} \neq 0$  dans les oscillations de neutrinos solaires et atmosphériques,
- effet de  $\theta_{13}$  dans les expériences de disparition à grande distance (KamLAND, MINOS, T2K);
- effet de  $\delta$  dans les expériences d'apparition  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  (T2K, MINOS)

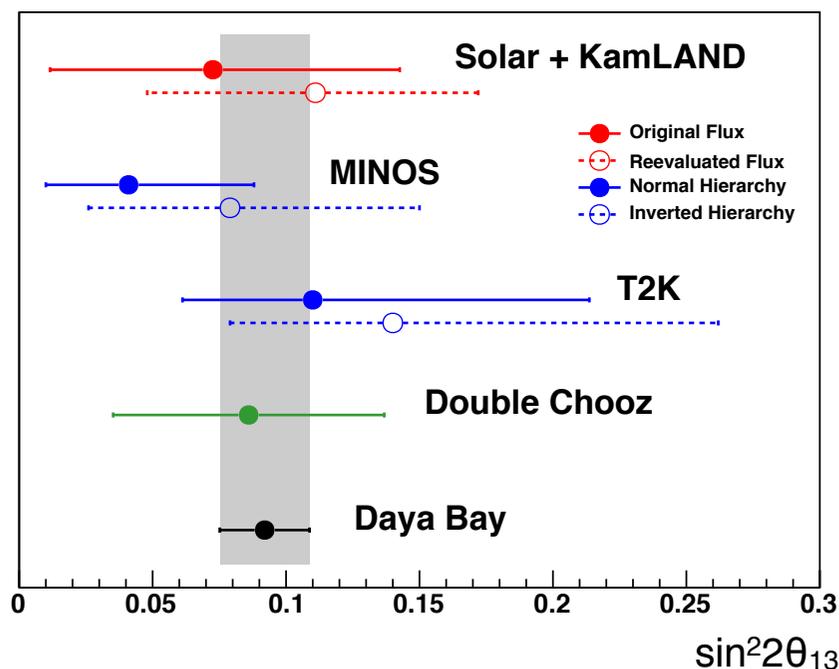


# Une période récente riche en succès expérimentaux... (suite)

Premières indications que  $\theta_{13} \neq 0$  en juin 2011 (T2K, MINOS)

Confirmation des indications par Double Chooz en décembre 2011

Mesure de  $\theta_{13} \neq 0$  à  $5\sigma$  par Daya Bay en mars 2012



Phys. Rev. D83 (2011) 052002

Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 181802

Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 041801

Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 131801

arXiv:1203.1669

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016 \text{ (stat.)} \pm 0.005 \text{ (syst.)} \quad [\text{arXiv:1203.1669}]$$

$\theta_{13}$  grand  $\Rightarrow$  important pour détermination de la hiérarchie de masse et pour la recherche de la violation de CP

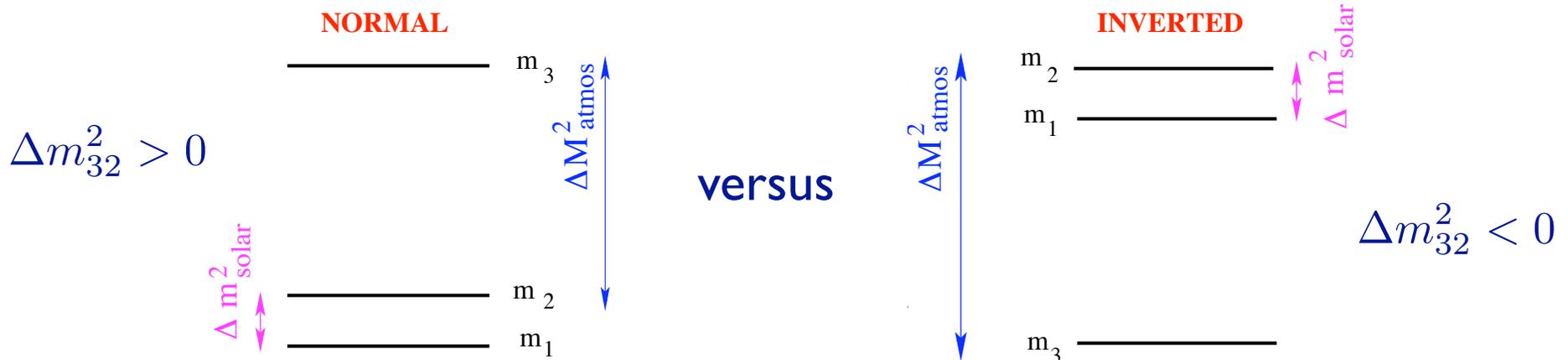
# ... mais encore de nombreuses questions ouvertes

1) Le mélange leptonique reflète-t-il une symétrie sous-jacente?

e.g. l'angle  $\theta_{23}$  est-il maximal? ( $\sin^2 2\theta_{23} = 1$ )

→ mesures de précision (expériences long baseline)

2) Quelle est la hiérarchie de masse?



→ distinguées par effets de matière (expériences long baseline)

3) Quelle est l'échelle absolue de masse des neutrinos?

→ désintégration bêta tritium, cosmologie, (double désintégration bêta)

4) La symétrie CP est-elle violée dans le secteur des leptons?

i.e. a-t-on  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$  dans le vide?

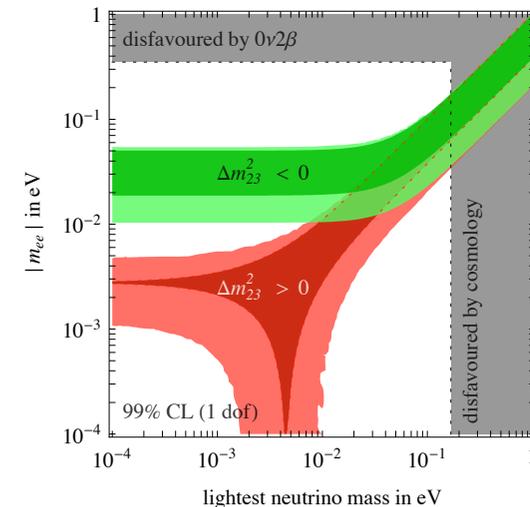
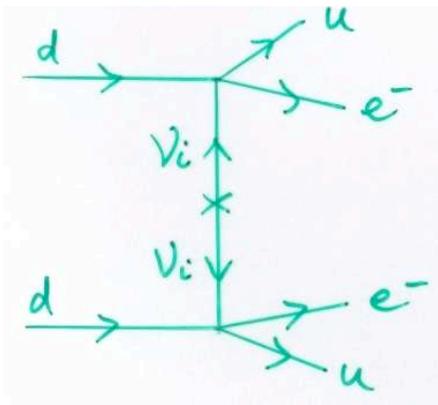
condition nécessaire pour la leptogenèse

→ expériences long baseline car ~~CP~~ due à termes d'oscillation sous-dominant

5) Les neutrinos sont-ils des fermions de Dirac ou de Majorana?

Majorana: double désintégration bêta sans émission de neutrino

Aussi information sur la hiérarchie et l'échelle absolue de masse



Feruglio, Strumia, Vissani  
(hep-ph/0201291)

Majorana ⇒ violation du nombre leptonique

⇒ importantes conséquences théoriques (leptogenèse, GUT...)

## 6) Existe-t-il plus de 3 neutrinos?

Certaines données expérimentales ne peuvent s'expliquer avec 3 neutrinos (LSND, anomalie des réacteurs...)  $\Rightarrow$  suggèrent neutrino(s) stérile(s) de masse de l'ordre d' 1eV

$N_\nu = 4$  compatible avec nucléosynthèse

## 7) Le proton est-il stable?

Test de l'hypothèse d'unification – une sensibilité de  $10^{35}$  années sur certains modes ( $p \rightarrow \pi^0 e^+$ ,  $K^+ \bar{\nu}$ ) permettrait de tester les modèles SU(5) non minimaux, ainsi que d'autres groupes d'unification comme SO(10)

# Programme de recherche proposé par la communauté française

- exploration des anomalies / recherche de neutrinos stériles  
→ *Guillaume Mention*
- mesures de précision, détermination de la hiérarchie de masse, recherche de la violation de CP dans le secteur leptonique, désintégration du proton  
→ *Alessandra Tonazzo*
- nature des neutrinos / recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrino  
→ *Laurent Simard*