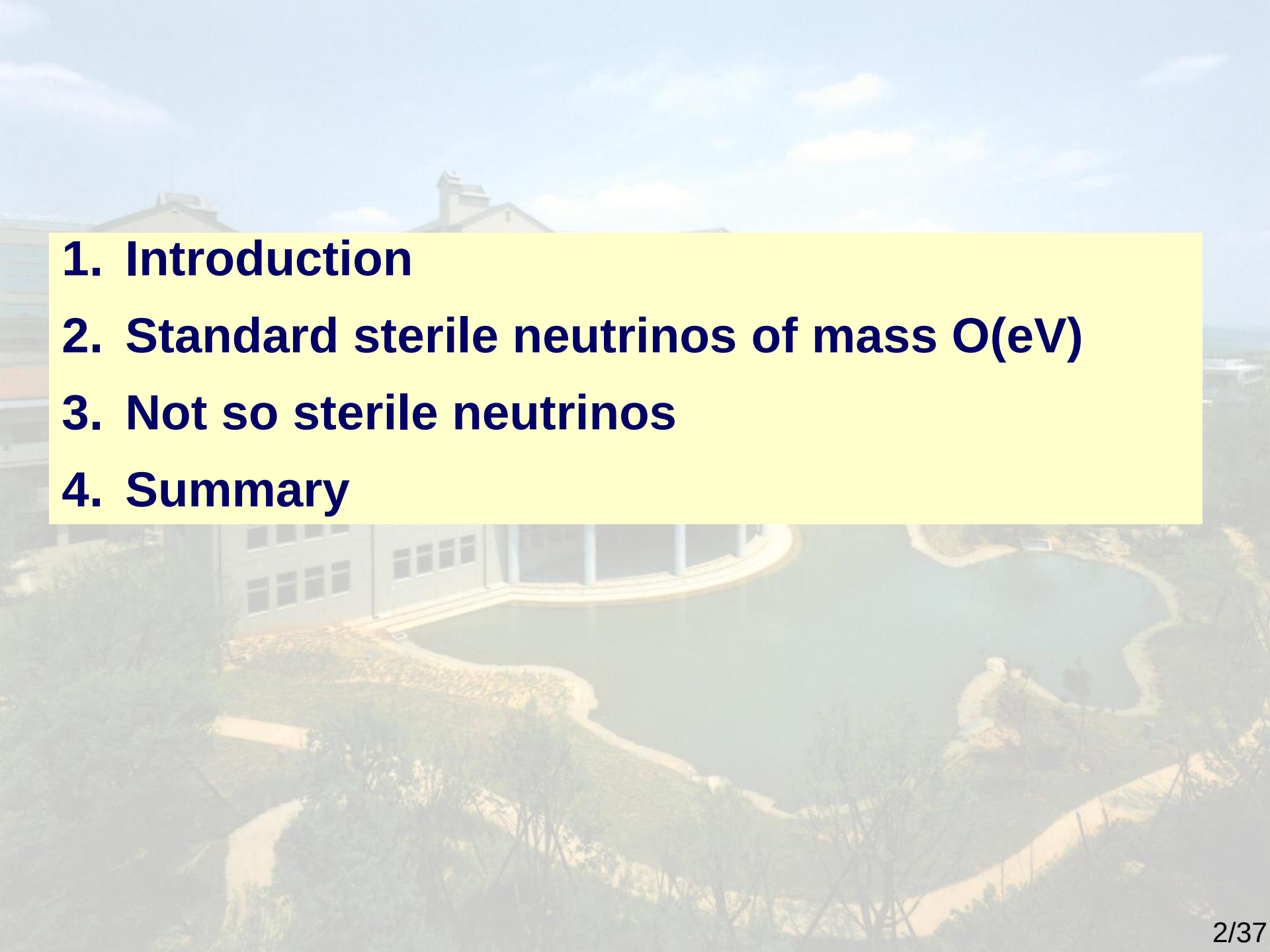


ステライルニュートリノの現象論

首都大学東京・理工・物理
安田修

第28回ニュートリノ研究会
2015年2月21日 @ 宇宙線研

- 
- The background of the slide is a photograph of a modern building with a curved facade and a large pond in the foreground. The building has multiple windows and a prominent curved section. The pond is surrounded by greenery and a path. The sky is blue with some clouds.
- 1. Introduction**
 - 2. Standard sterile neutrinos of mass $O(\text{eV})$**
 - 3. Not so sterile neutrinos**
 - 4. Summary**

1. Introduction

標準的3世代混合νの枠組の現状

- 大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ⇒

$$\theta_{23} \doteq 45^\circ ; |\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

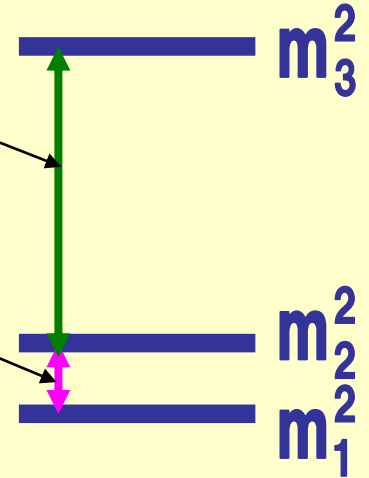
- 太陽ニュートリノ・長基線原子炉ニュートリノ⇒

$$\theta_{12} \doteq 30^\circ ; \Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

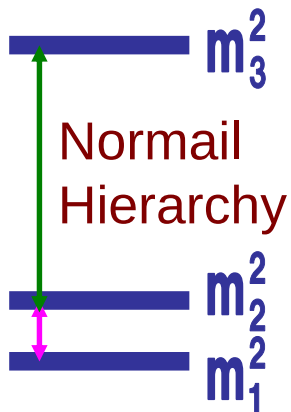
- 短基線原子炉ニュートリノ・加速器ニュートリノ⇒

$$\theta_{13} \doteq 10^\circ$$

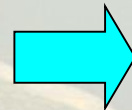
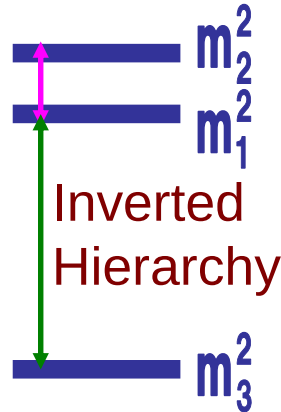
という結果が得られ、ニュートリノに質量・混合があることが確定



実は質量のパターンは現在の所、下図の
どちらの可能性も残っている



又は



現時点で未定なものは

- CP非保存位相 δ
- 質量パターン
- $\theta_{23} - \pi/4$ の符号

一方、非標準的3世代混合 ν の枠組では説明できない結果も報告されている

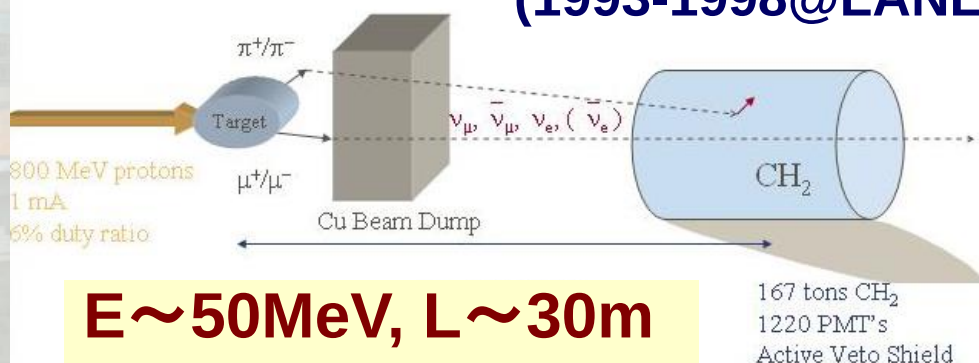
- LSND anomaly → 質量 $O(eV)$ の ν 混合
- Reactor anomaly → 質量 $O(eV)$ の ν 混合
- Galium anomaly → 質量 $O(eV)$ の ν 混合
- 銀河団のX線観測における $E \sim 3.5 \text{ keV}$ の輝線の発見
→ 光子に崩壊する質量 $O(\text{keV})$ の中性フェルミオン存在の可能性 → 浅賀氏・小山氏のトーク

ここでは質量 $O(eV)$ の ν 混合について議論する

● LSND anomaly

$$\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$$

The LSND Experiment (1993-1998@LANL)

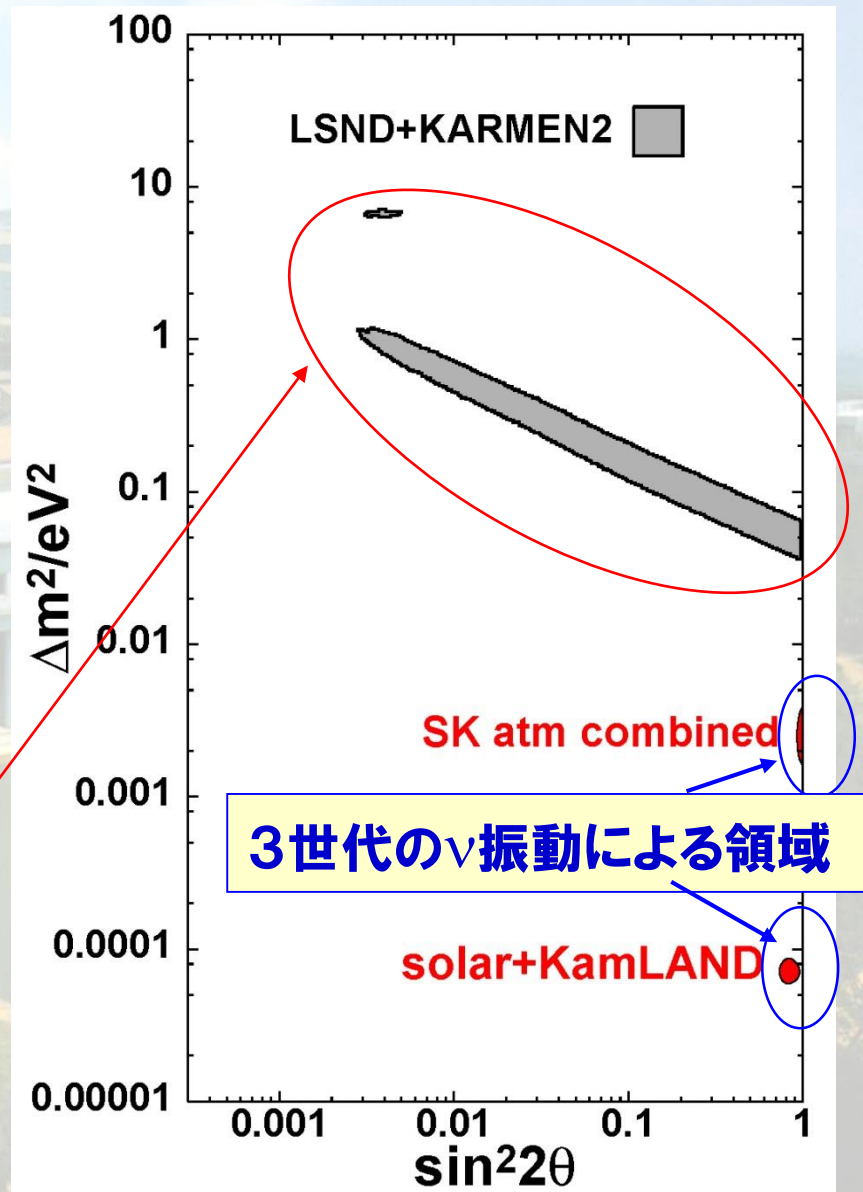


$E \sim 50 \text{ MeV}, L \sim 30 \text{ m}$

$$\Delta m^2 \cong O(1) \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta \cong O(10^{-2})$$

これは3世代間の ν 振動
では説明不可能



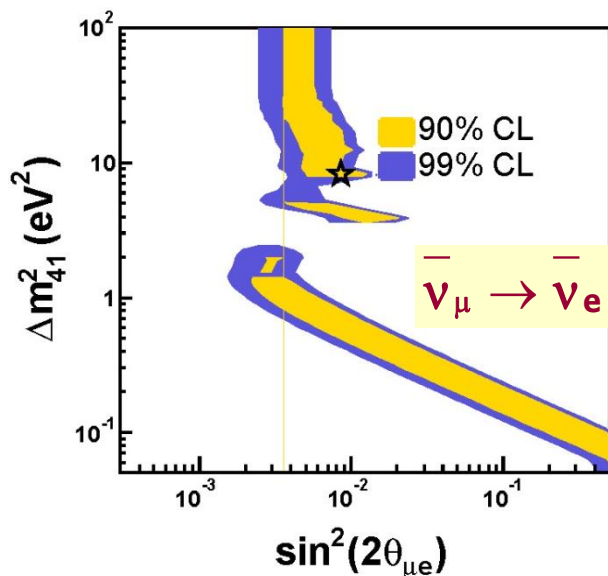
● MiniBooNE(2002-, FNAL) LSNDを追試するための実験

$E \sim 1\text{GeV}$, $L \sim 1\text{km}$, $(L/E)_{\text{MB}} = (L/E)_{\text{LSND}}$

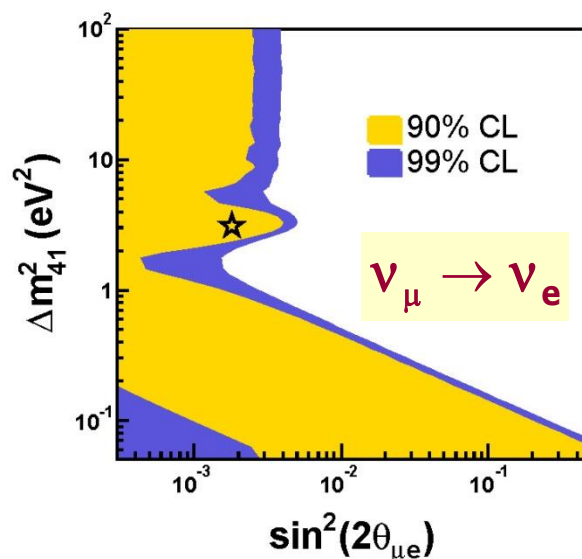
ニュートリノモード (2007)
(否定的)

反ニュートリノモード (2010)
(肯定的)

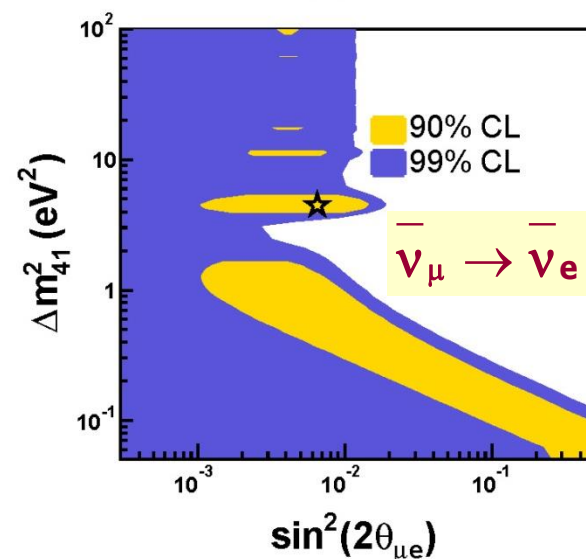
LSND



MB(ν)



MB($\bar{\nu}$)



1995
LSNDは本当か？

2007
LSNDは間違っていた！

2010
LSNDはあっていた？

ν モードには否定的な結果が出ているが反 ν モードには肯定的な結果が出ている

● 原子炉ニュートリノ異常

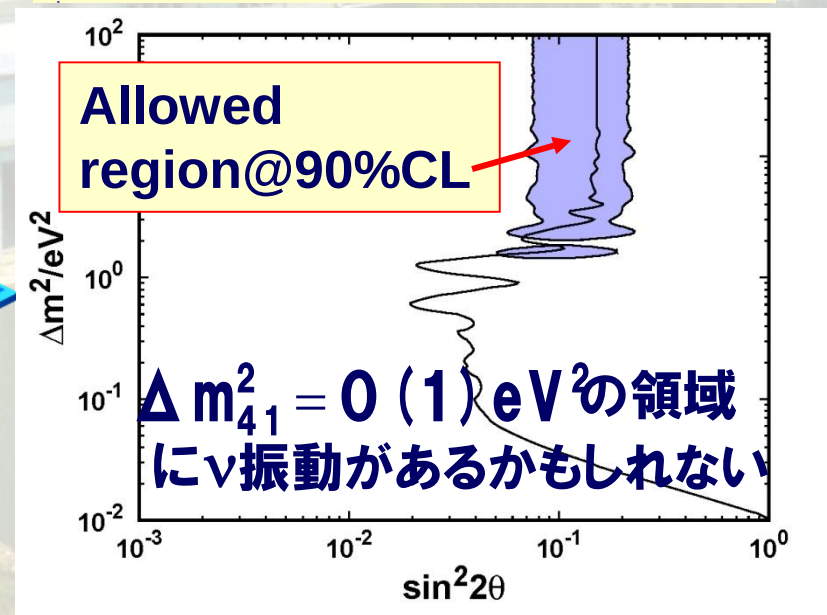
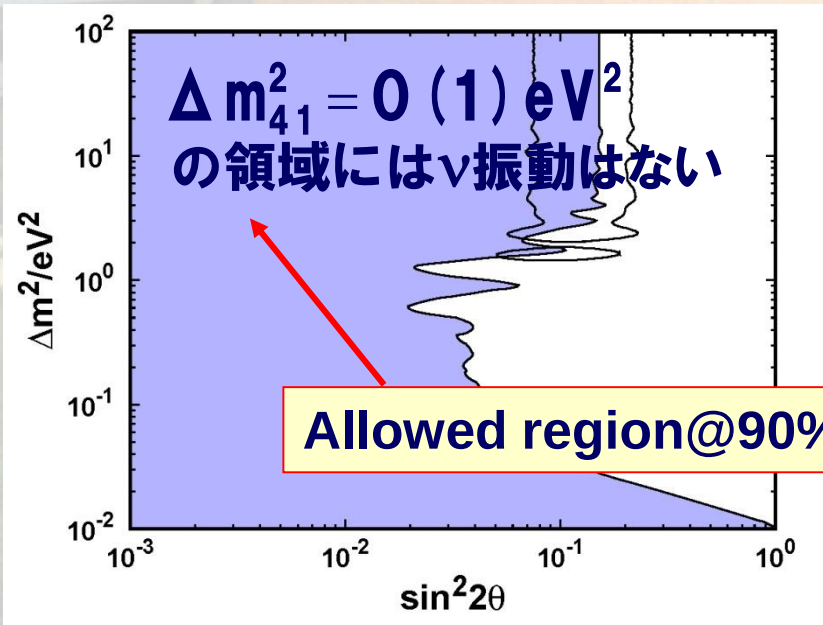
Mueller et al. 1101.2663, Huber 1106.0687

最近原子炉 $\bar{\nu}_e$ のフラックスに対する再評価が出て、これまでのデータがむしろ $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ の欠損を示唆していると解釈されるようになった

(新フラックス) = (旧フラックス) × 1.03

Bugey(原子炉 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$):
否定的 with old flux

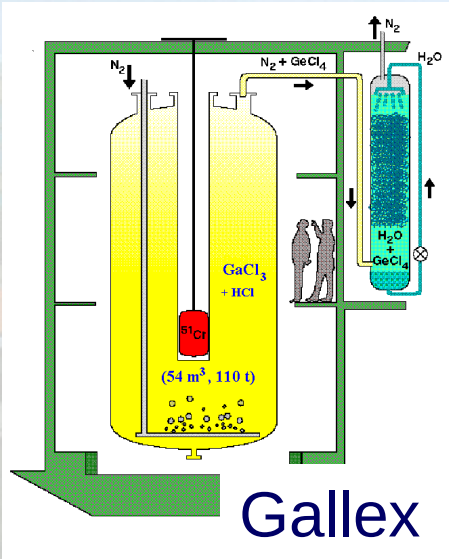
Bugey(原子炉)+etc :
肯定的 with new flux ?



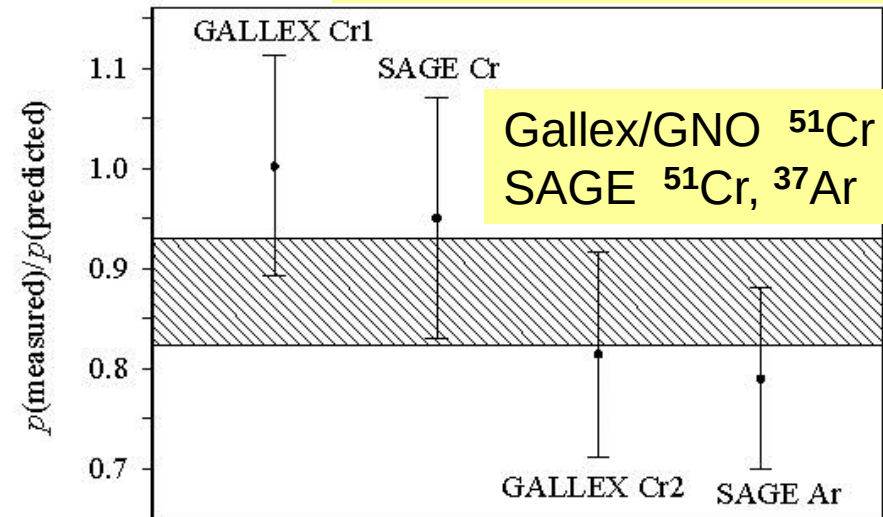
Hayes et al. 1309.4146: 実はfluxの不定性大？

● ガリウム異常

ガリウム太陽 ν 実験の較正



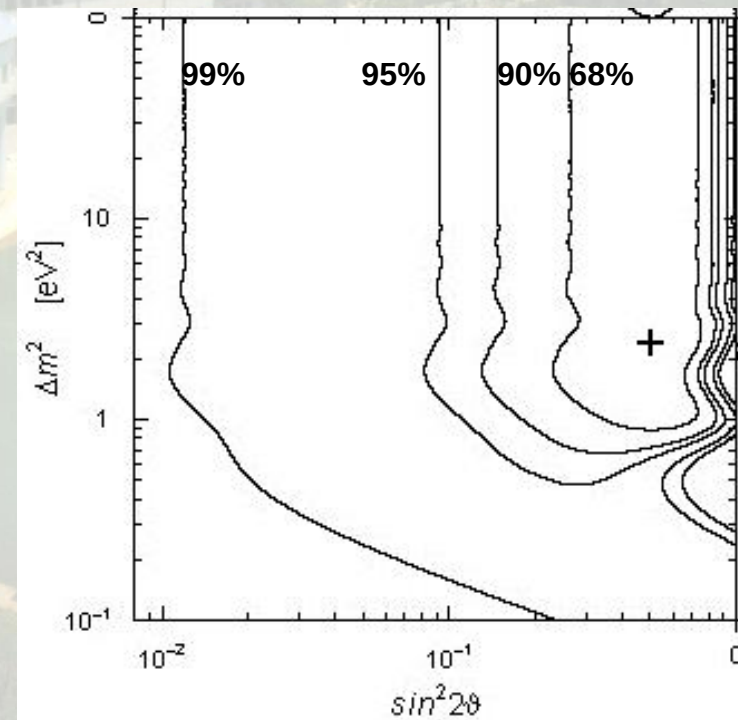
SAGE, nucl-ex/0512041



$$R \equiv \frac{p(\text{measured})}{p(\text{predicted})} = 0.88 \pm 0.05(1\sigma)$$

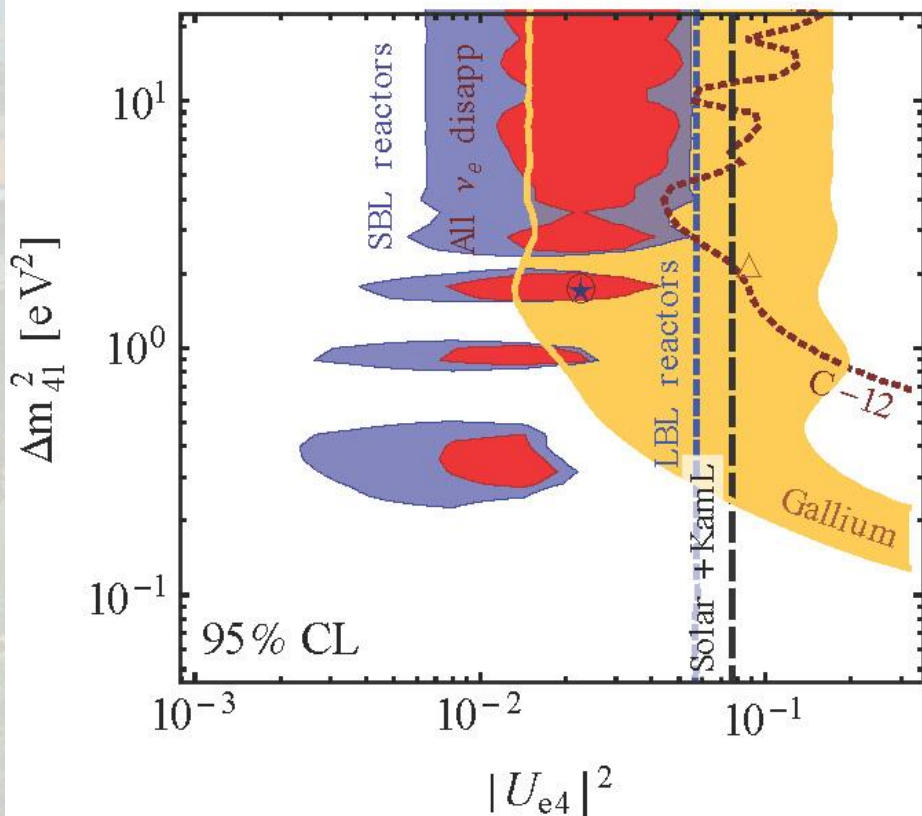
Giunti-Laveder, 1006.3244v3 [hep-ph]

ガリウム太陽 ν 実験の較正の結果は $\Delta m^2 = O(1 \text{ eV}^2)$ の ν 振動による ν_e の消失の兆候と解釈することが可能

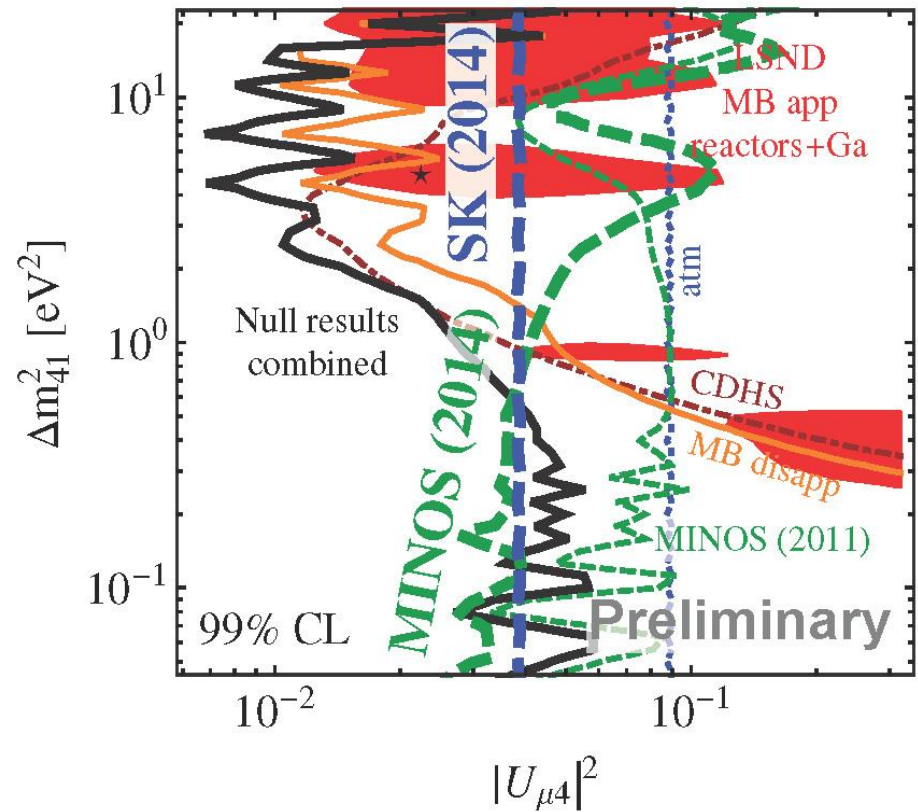


● 短基線実験のまとめ(1)

$\bar{\nu}_e$ disappearance: 振動は存在(New fluxを仮定)



ν_μ disappearance: 振動は不在



Kopp, Machado, Maltoni,
Schwetz, arXiv:1303.3011v3

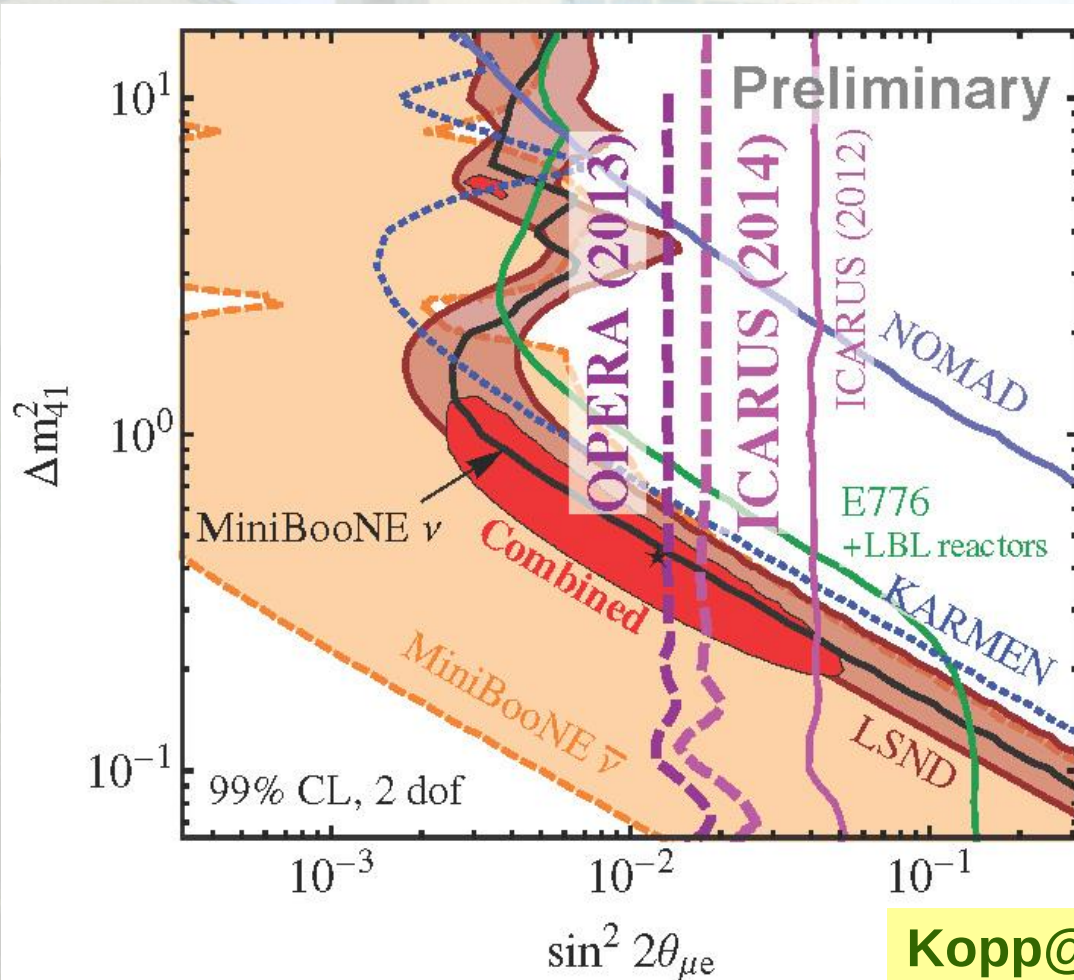
● 短基線実験のまとめ(2)

ν_e appearance: 振動は不在 (MB, OPERA, ICARUS)

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

$\bar{\nu}_e$ appearance: 振動は存在 (LSND, MB)

$$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$$



Kopp@ν2014

2. Standard sterile neutrinos

4 世代ニュートリノ混合の現象論

● 太陽 ν ・ KamLAND (原子炉 ν)

$$\Rightarrow \Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

● 大気 ν ・ K2K (加速器 ν)

$$\Rightarrow |\Delta m_{32}^2| = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

● LSND/MB、原子炉 ν 異常、Ga 異常

$$\Rightarrow \Delta m_{41}^2 \cong 1 \text{ eV}^2$$

CERNのLEP実験('89-'00) から弱い相互作用をする軽いニュートリノは3つしかない

→ 第四のニュートリノは**ステライルニュートリノ**(SMのgauge groupに関してsinglet fermion; ν_s)とせざるを得ない

$$(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \nu_s)$$

理論から必然的にステライル ν が予言されている訳ではない

ν 伝播中の物質効果 (MSW効果)

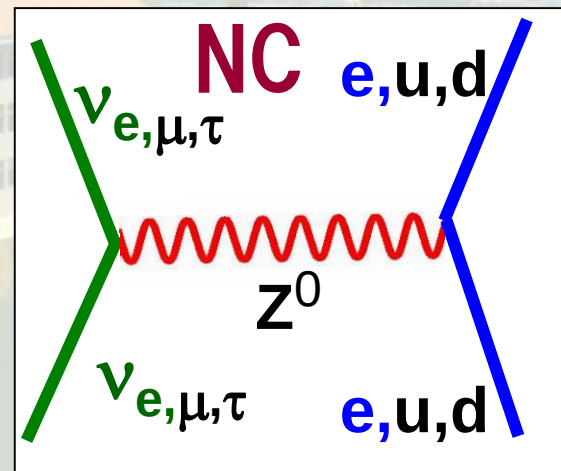
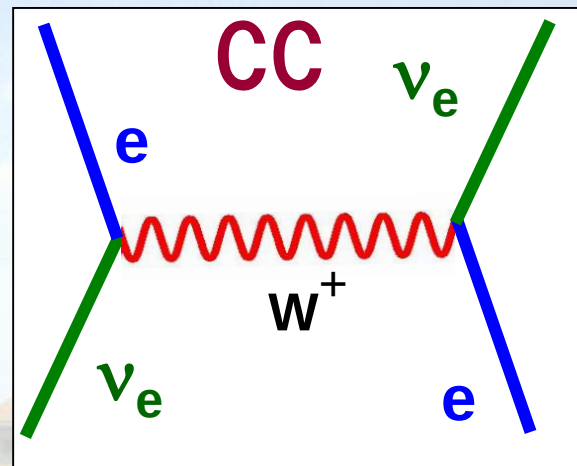
	ν_e	ν_μ, ν_τ	ν_s
CC	○	×	×
NC	○	○	×
V	$\mathbf{V_{CC} + V_{NC}}$	$\mathbf{V_{NC}}$	$\mathbf{0}$

$$\mathbf{V_{CC}} = \sqrt{2}\mathbf{G_F N_e}$$

$$\mathbf{V_{NC}} = -(\mathbf{1/\sqrt{2}})\mathbf{G_F N_n}$$

N_e, N_n : 電子(中性子)の密度

$$-\mathcal{L}_{\nu_\ell}^{\text{mat}} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \nu_\ell^\dagger (1 - \gamma_5) \nu_\ell \sum_f N_f (\delta_{\ell f} + T_{3fL} - 2 \sin^2 \theta_W Q_f)$$



v伝播中の物質効果 (MSW効果)

$$i \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \\ v_\tau \\ v_s \end{pmatrix} = \left[U \begin{pmatrix} E_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_4 \end{pmatrix} U^{-1} + \begin{pmatrix} V_{CC} + V_{NC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{NC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{NC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \\ v_\tau \\ v_s \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \left[U \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta E_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta E_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta E_{41} \end{pmatrix} U^{-1} + \begin{pmatrix} V_{CC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -V_{NC} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} v_e \\ v_\mu \\ v_\tau \\ v_s \end{pmatrix}$$

フレーバー固有状態について単位行列に比例する項は
確率振幅の位相にしか効かないので差し引いた

大気 ν が主として ν_μ $\leftrightarrow$ ν_s でない理由

ν_μ $\leftrightarrow$ ν_τ : 真空振動

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta E L}{2} \right)$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 \cong \frac{m_2^2 - m_1^2}{2E} = \frac{\Delta m^2}{2E}$$

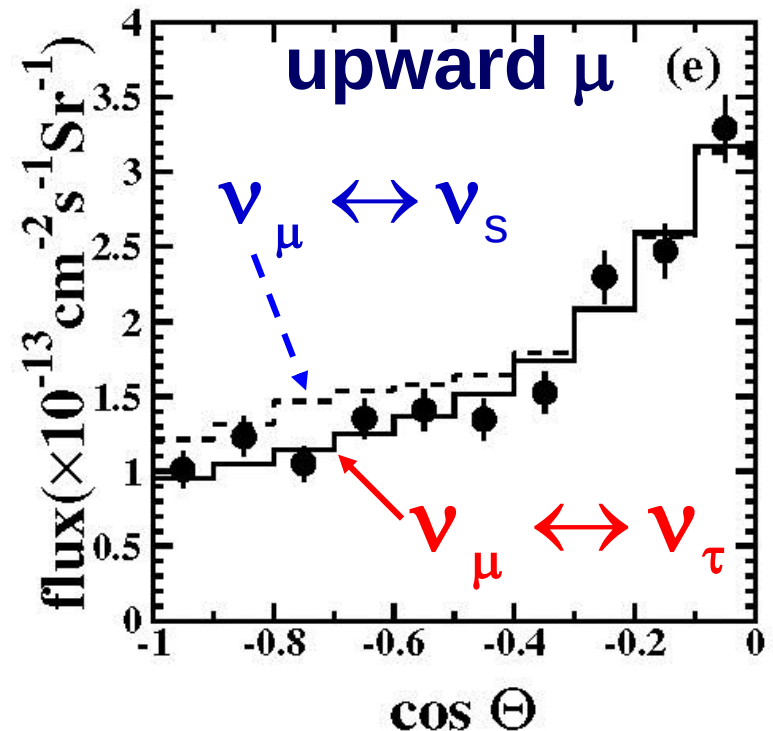
ν_μ $\leftrightarrow$ ν_s : 物質中振動

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\tilde{\theta} \sin^2 \left(\frac{\Delta \tilde{E} L}{2} \right)$$

$$\Delta \tilde{E} \equiv \left[(\Delta E \cos 2\theta + V_{NC})^2 + (\Delta E \sin 2\theta)^2 \right]^{1/2}$$

$$\tan 2\tilde{\theta} = \frac{\Delta E \sin 2\theta}{\Delta E \cos 2\theta + V_{NC}}$$

$\theta = \pi/4$ ならば物質中の混合
角度は $\tilde{\theta} = \pi/4$ とはならない



SK collaboration, PRL 85('00)3999

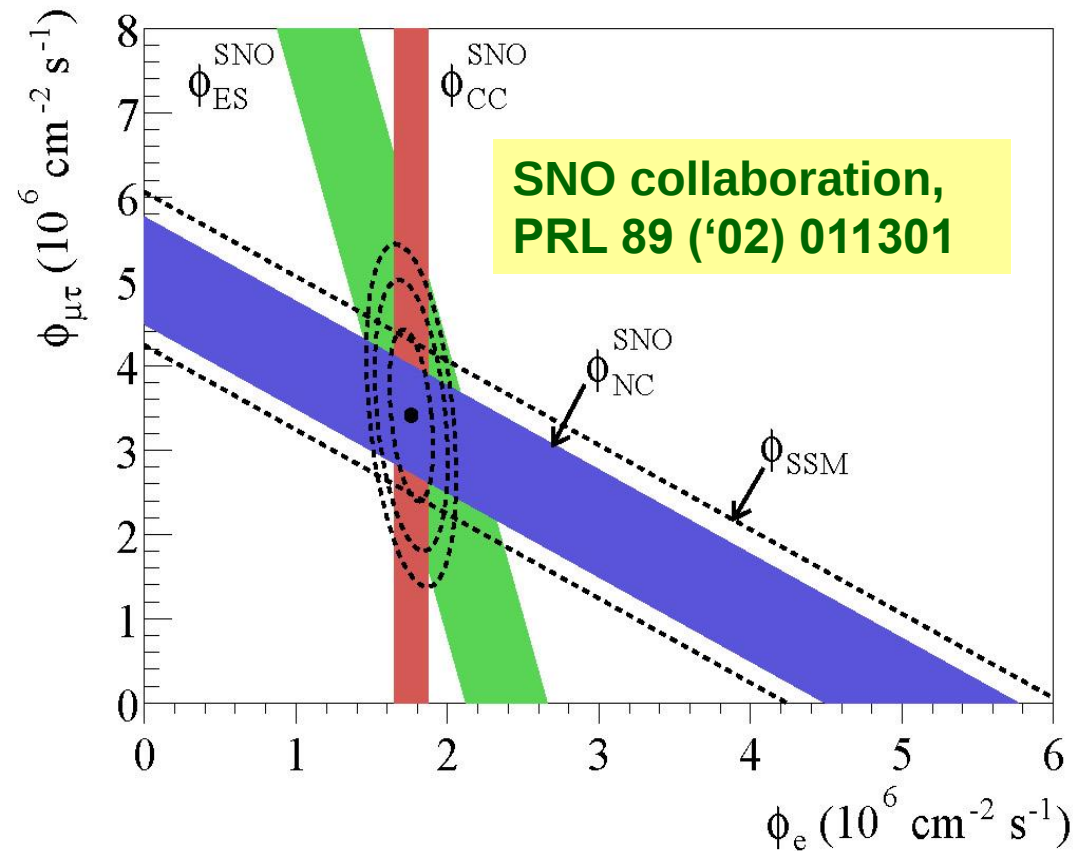
太陽 ν が主として ν_μ $\rightarrow$ ν_s でない理由

SNOでは**N**eutral
Current reaction



$x = e, \mu, \tau$

で ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ のfluxの和
の観測が可能

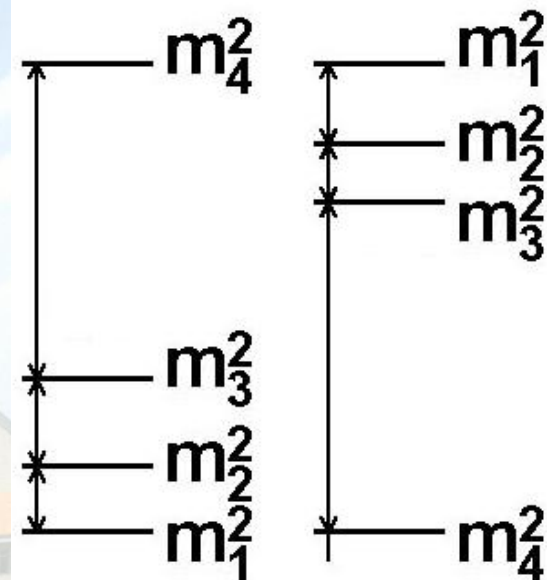


$$[\phi(\nu_e) + \phi(\nu_\mu) + \phi(\nu_\tau)]_{\text{data}} = 5.09 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$[\phi(\nu_e) + \phi(\nu_\mu) + \phi(\nu_\tau)]_{\text{SSM}} = 5.05 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$N_\nu=4$ の枠組

scheme	accelerator + reactor	solar + atmospheric
(3+1)	tension	✓
(2+2)	✓	excluded



(3+1)-scheme



(2+2)-scheme

全てをうまく説明できるシナリオはない

(2+2)-scheme

$$\eta_s \equiv |\mathbf{U}_{s1}|^2 + |\mathbf{U}_{s2}|^2 \rightarrow 0$$

$$\mathbf{v}_{\text{atm}} : \mathbf{v}_{\mu} \rightarrow \mathbf{v}_s (100\%)$$

Strongly disfavored
by SK ν_{atm} data

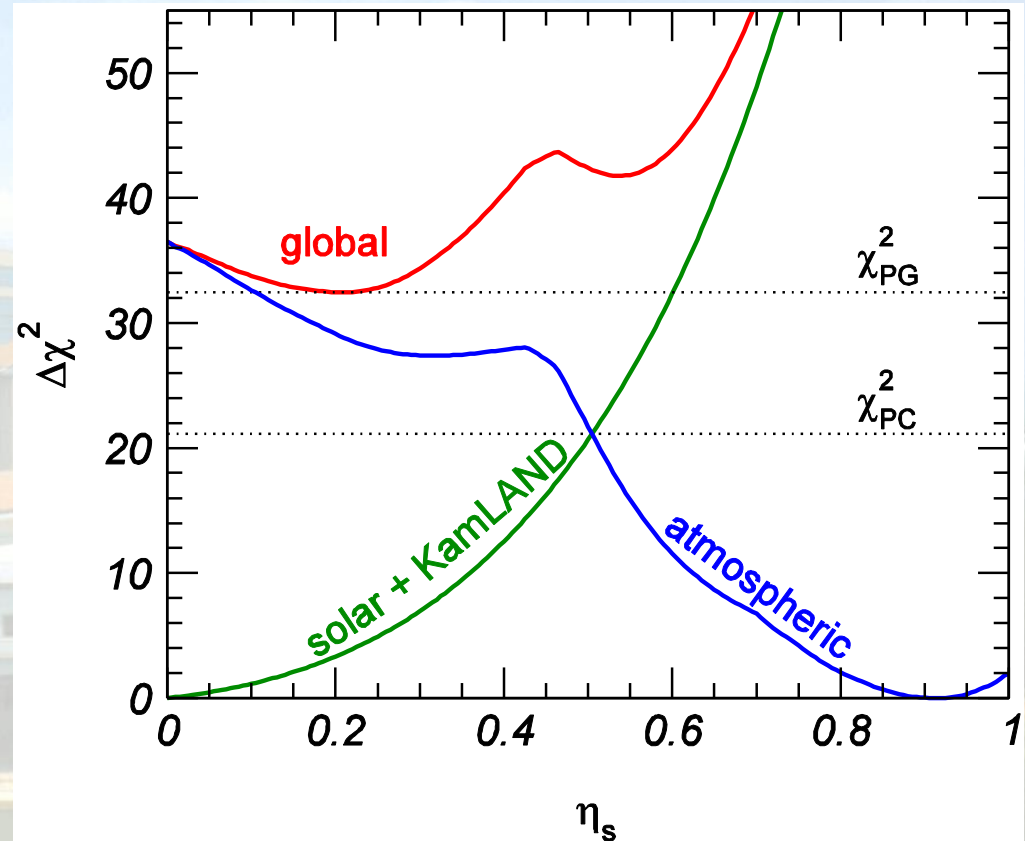
$$\eta_s \equiv |\mathbf{U}_{s1}|^2 + |\mathbf{U}_{s2}|^2 \rightarrow 1$$

$$\mathbf{v}_{\text{sol}} : \mathbf{v}_e \rightarrow \mathbf{v}_s (100\%)$$

Strongly disfavored
by SNO ν_{sol} data

For any value of $|\mathbf{U}_{s1}|^2 + |\mathbf{U}_{s2}|^2$, fit to sol+atm data is bad.
→excluded at 5.7σ

Schwetz, hep-ph/0311217



PC: parameter consistency test
PG: parameter goodness-of-fit test

(3+1)-scheme

Bugey他(原子炉)+new flux : 肯定的

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - 4|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2) \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E)$$

$$\sin^2 2\theta_{\text{reactor}} = 4|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2) \cong 4|U_{e4}|^2$$

CDHSW(加速器)他 : 否定的

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - 4|U_{\mu 4}|^2(1 - |U_{\mu 4}|^2) \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E)$$

$$\sin^2 2\theta_{\nu(\mu) \text{ disappear}} > 4|U_{\mu 4}|^2(1 - |U_{\mu 4}|^2) \cong 4|U_{\mu 4}|^2$$

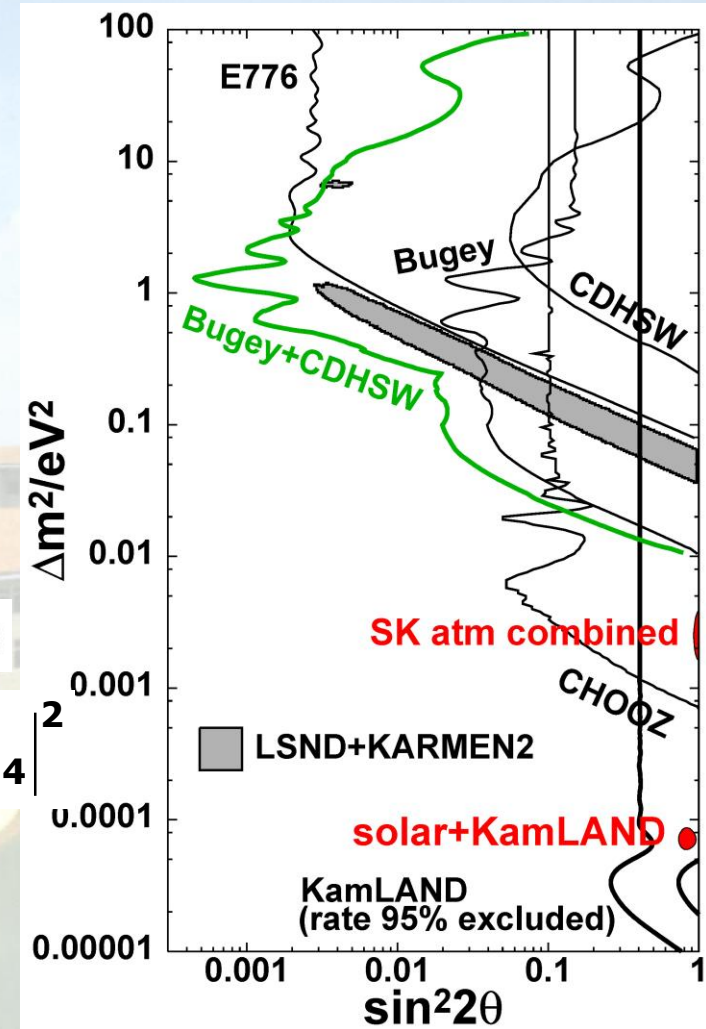
LSND
(加速器) :
肯定的

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = 4|U_{e4}|^2|U_{\mu 4}|^2 \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E)$$

$$\sin^2 2\theta_{\nu(e) \text{ appear}} = 4|U_{e4}|^2|U_{\mu 4}|^2$$

$$\sin^2 2\theta_{\nu(e) \text{ appear}} (\Delta m^2) < \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{\text{reactor}} (\Delta m^2) \sin^2 2\theta_{\nu(\mu) \text{ disappear}} (\Delta m^2)$$

を満たす必要があるがBugey+CDHSWの左側とLSNDの内側の重複は殆どない(Okada-OY Int.J.Mod.Phys.A12:3669,1997):tension



(3+1)-schemeの問題点

1. $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ のチャンネルで肯定的結果が出ていないので、たとえ原子炉で振動の肯定的結果が出ていても、以下の不等式が成り立ち、 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の肯定的結果とかなり矛盾：

$$\sin^2 2\theta_{\nu(e)\text{appear}}(\Delta m^2) < \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{\text{reactor}}(\Delta m^2) \sin^2 2\theta_{\nu(\mu)\text{disappear}}(\Delta m^2)$$

2. $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ のチャンネルでは否定的結果が出ているのに
 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ のチャンネルでは肯定的結果が出ている違いを説明するのはむずかしい

1.の問題は解決できないが、2.の問題は(3+2)-schemeなら解決できる可能性がある

(3+2)-scheme

LSND($\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$): affirmative
 MiniBOONE($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$): negative

difference between ν
 & anti- ν may offer a
 promising fit

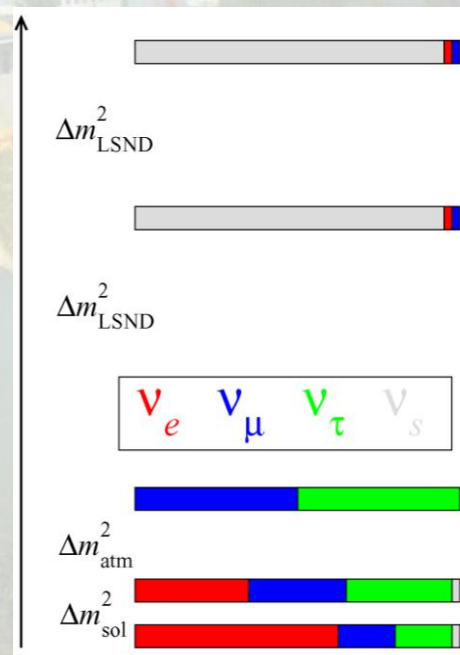
(3+2)-scheme w/ CP phase δ

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} &= 4 |U_{e4}|^2 |U_{\mu 4}|^2 \sin^2 \phi_{41} \\
 &+ 4 |U_{e5}|^2 |U_{\mu 5}|^2 \sin^2 \phi_{51} \\
 &+ 8 |U_{e4} U_{\mu 4} U_{e5} U_{\mu 5}| \sin \phi_{41} \sin \phi_{51} \cos(\phi_{54} - \delta)
 \end{aligned}$$

with the definitions

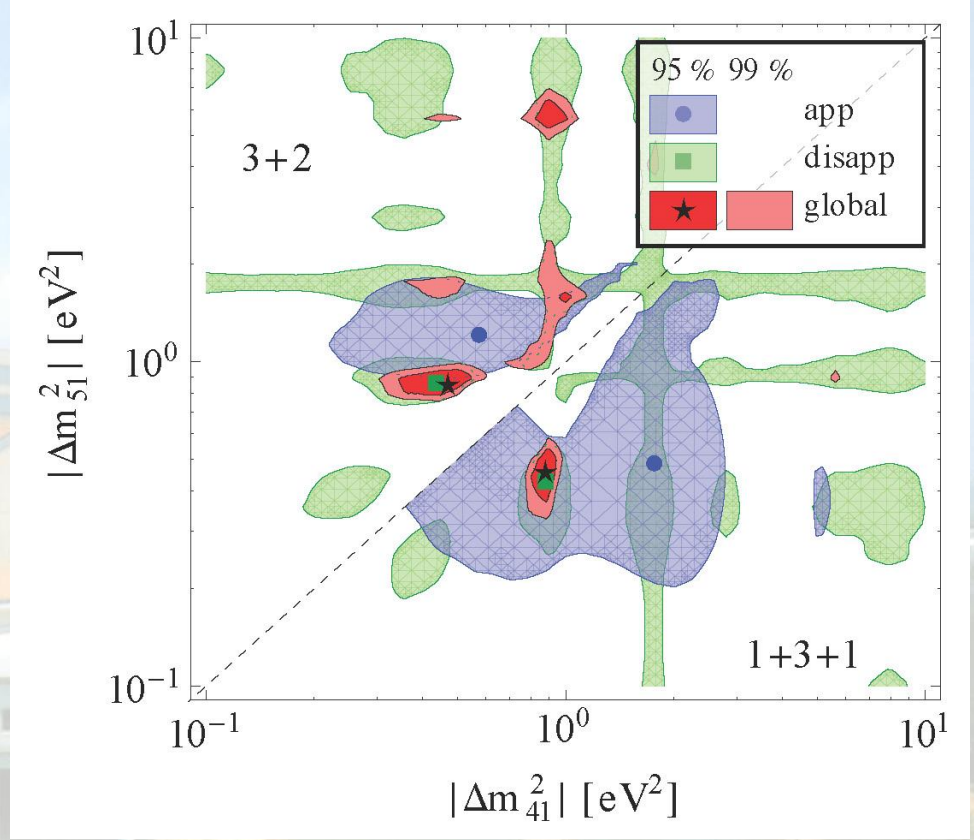
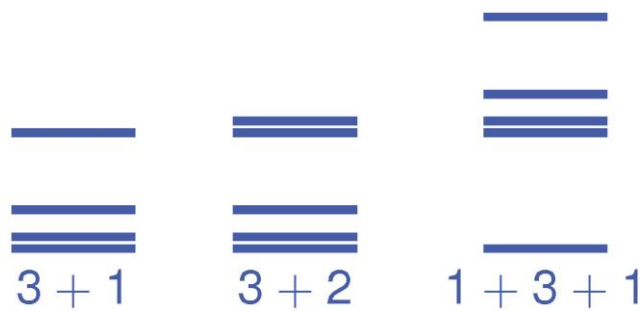
$$\phi_{ij} \equiv \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E},$$

$$\delta \equiv \arg(U_{e4}^* U_{\mu 4} U_{e5} U_{\mu 5}^*).$$



(3+2)-schemeの フィットの結果

Kopp, Machado, Maltoni,
Schwetz, arXiv:1303.3011v3



	$\chi^2_{\min}/\text{dof}$	GOF	$\chi^2_{\text{PG}}/\text{dof}$	PG	$\chi^2_{\text{app, glob}}$	$\Delta\chi^2_{\text{app}}$	$\chi^2_{\text{dis, glob}}$	$\Delta\chi^2_{\text{dis}}$
3+1	712/(689 - 9)	19%	18.0/2	1.2×10^{-4}	95.8/68	7.9	616/621	10.1
3+2	701/(689 - 14)	23%	25.8/4	3.4×10^{-5}	92.4/68	19.7	609/621	6.1
1+3+1	694/(689 - 14)	30%	16.8/4	2.1×10^{-3}	82.4/68	7.8	611/621	9.0

(3+2)-schemeでは ν と反 ν のappearanceに関してはフィットが良くなるが、 ν_μ appearanceとの矛盾は解決しない (3+3も同様)

3. Not so sterile neutrinos

(Nonstandard sterile neutrinos)

動機: (3+2)-scheme以外でMiniBooNEの ν と反 ν の appearanceに違いの出るシナリオを考えたい

ν と反 ν で違いが出る可能性: 物質効果

→ そのためには $\Delta E = \Delta m^2 / (2E) \sim V \sim G_F N_f$ が必要

→ $V \sim 0.1 \text{eV}^2 / 1 \text{GeV} = 10^{-8} \text{eV} = V_{\text{CC}} \times 1000$

通常の**1千倍**の物質効果

Karagiorgi Shaevitz Conrad, arXiv:1202.1024

Not so sterile modelによるMiniBooNEでの物質効果

$$i \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \left[U \begin{pmatrix} E_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_4 \end{pmatrix} U^{-1} + \begin{pmatrix} V_{CC} + V_{NC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{NC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{NC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_X \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \left[U \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta E_{41} \end{pmatrix} U^{-1} + \begin{pmatrix} V_{CC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_X - V_{NC} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix}$$

短基線実験では、太陽 ν と大気 ν の質量二乗差は効かないので無視する

$$A_S = V_X - V_{NC}$$

物質効果@MiniBooNE

$$U_{e4}^M = \Delta m^2 U_{e4} U_{s4}^* \sqrt{\frac{1+4\Delta m^2 |U_{s4}|^2 (1-|U_{s4}|^2) / (2EV_s - \Delta m^2 (1-2|U_{s4}|^2) + \sqrt{(\Delta m^2 - 2EV_s)^2 + 8EV_s \Delta m^2 |U_{s4}|^2})^2}{(\Delta m^2 - 2EV_s)^2 + 8EV_s \Delta m^2 |U_{s4}|^2}}$$

$$U_{\mu 4}^M = \Delta m^2 U_{\mu 4} U_{s4}^* \sqrt{\frac{1+4\Delta m^2 |U_{s4}|^2 (1-|U_{s4}|^2) / (2EV_s - \Delta m^2 (1-2|U_{s4}|^2) + \sqrt{(\Delta m^2 - 2EV_s)^2 + 8EV_s \Delta m^2 |U_{s4}|^2})^2}{(\Delta m^2 - 2EV_s)^2 + 8EV_s \Delta m^2 |U_{s4}|^2}}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4|U_{e4}^M|^2 |U_{\mu 4}^M|^2 \sin^2(1.27 \Delta m_M^2 L/E)$$

G. Karagiorgiらが与えた式

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & \frac{8\Delta E_{41}^2 |U_{e4}|^2 |U_{\mu 4}|^2 (\Delta E_{41} - A_s (1 - 2|U_{s4}|^2) + \sqrt{(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2})}{(1 - |U_{s4}|^2) \sqrt{(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2} (\Delta E_{41} + A_s + \sqrt{(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2})^2} \\ & \times \sin^2 \left(\frac{(\Delta E_{41} + A_s + \sqrt{(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2}) L}{4} \right) \\ & - \frac{4\Delta E_{41}^2 |U_{e4}|^2 |U_{\mu 4}|^2 |U_{s4}|^2}{(1 - |U_{s4}|^2) [(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2]} \sin^2 \left(\frac{\sqrt{(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2} L}{2} \right) \\ & - \frac{8\Delta E_{41}^2 |U_{e4}|^2 |U_{\mu 4}|^2 (\Delta E_{41} - A_s (1 - 2|U_{s4}|^2) - \sqrt{(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2})}{(1 - |U_{s4}|^2) \sqrt{(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2} (\Delta E_{41} + A_s - \sqrt{(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2})^2} \\ & \times \sin^2 \left(\frac{(\Delta E_{41} + A_s - \sqrt{(\Delta E_{41} - A_s)^2 + 4\Delta E_{41} A_s |U_{s4}|^2}) L}{4} \right) \end{aligned}$$

$$A_s = V_{\chi^-}$$

$$V_{NC}$$

G. Karagiorgiらが与えたものとは異なり、振動確率は3つのモードから成る。

模型的にはZとレプトンに結合せず、隠れたU(1)ゲージ場Xとクォークにだけ結合する状況を考えることは可能

Pospelov, arXiv:1103.3261

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4}F_{X,\mu\nu}F_X^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_X^2 X_\mu X^\mu + \bar{\nu}_b \gamma_\mu (i\partial^\mu + g'_b X^\mu) \nu_b + \sum_q \bar{q} \left(i\not{D}_{\text{SM}} + \frac{1}{3}g_b \gamma_\mu X^\mu \right) q + \mathcal{L}_m$$

$$\mathcal{L}_m = -\sum_{\alpha,j} m_D^{\alpha j} \bar{\nu}_L^\alpha N_R^j - \sum_j m_b^j \bar{\nu}_{bL} N_R^j - \frac{1}{2} \sum_{i,j} m_R^{ij} \overline{(N_R^i)^C} N_R^j + h.c.$$

$$\mathcal{L}_{b,\text{eff}} = \frac{G_B}{2} [\bar{\nu}_b \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \nu_b] [\bar{p} \gamma^\mu p + \bar{n} \gamma^\mu n]$$

$$V_b = G_B N_{\text{nucl.}}$$

$$\epsilon \equiv \frac{G_B}{\sqrt{2}G_F}$$

$$V_b = V_{\text{CC}} \cdot G_B / (\sqrt{2}G_F Y_e) = \epsilon V_{\text{CC}} / Y_e \\ = \epsilon \cdot 7.56 \cdot 10^{-14} \text{ eV} \cdot \left(\frac{\rho}{\text{g/cm}^3} \right)$$

Not so sterile modelに対する ν 振動実験からの制限

MiniBooNE

Kopp, Welter, arXiv:1408.0289

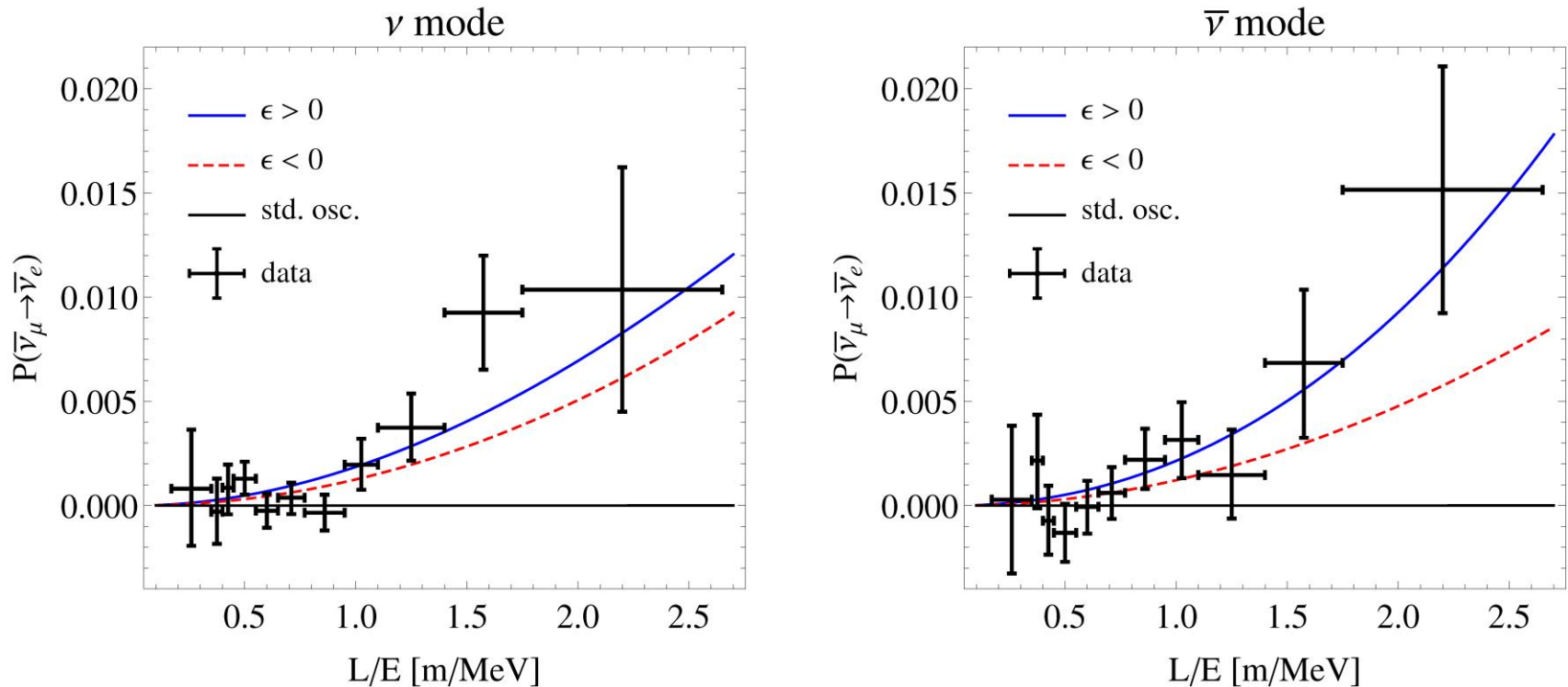


Figure 4: The measured MiniBooNE $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (left) and $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ (right) appearance probabilities compared to the predictions of the baryonic sterile neutrino scenario for $\epsilon > 0$ (blue line) and $\epsilon < 0$ (dashed red line) at the MiniBooNE best fit points from table II. Without sterile neutrinos, the appearance probability at the MiniBooNE baseline is approximately zero (solid black line).

MiniBooNEに関しては ν と反 ν の違いを説明出来ている

Not so sterile modelに対する ν 振動実験からの制限

MINOS

Kopp, Welter, arXiv:1408.0289

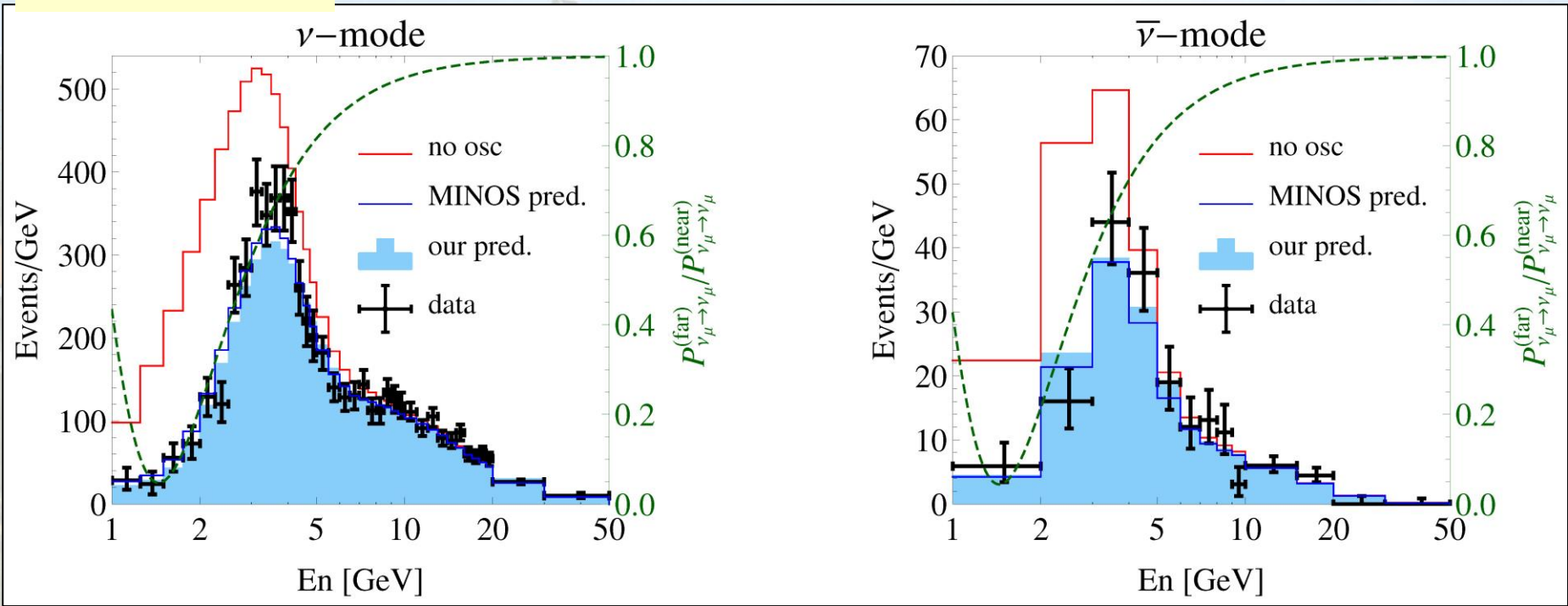
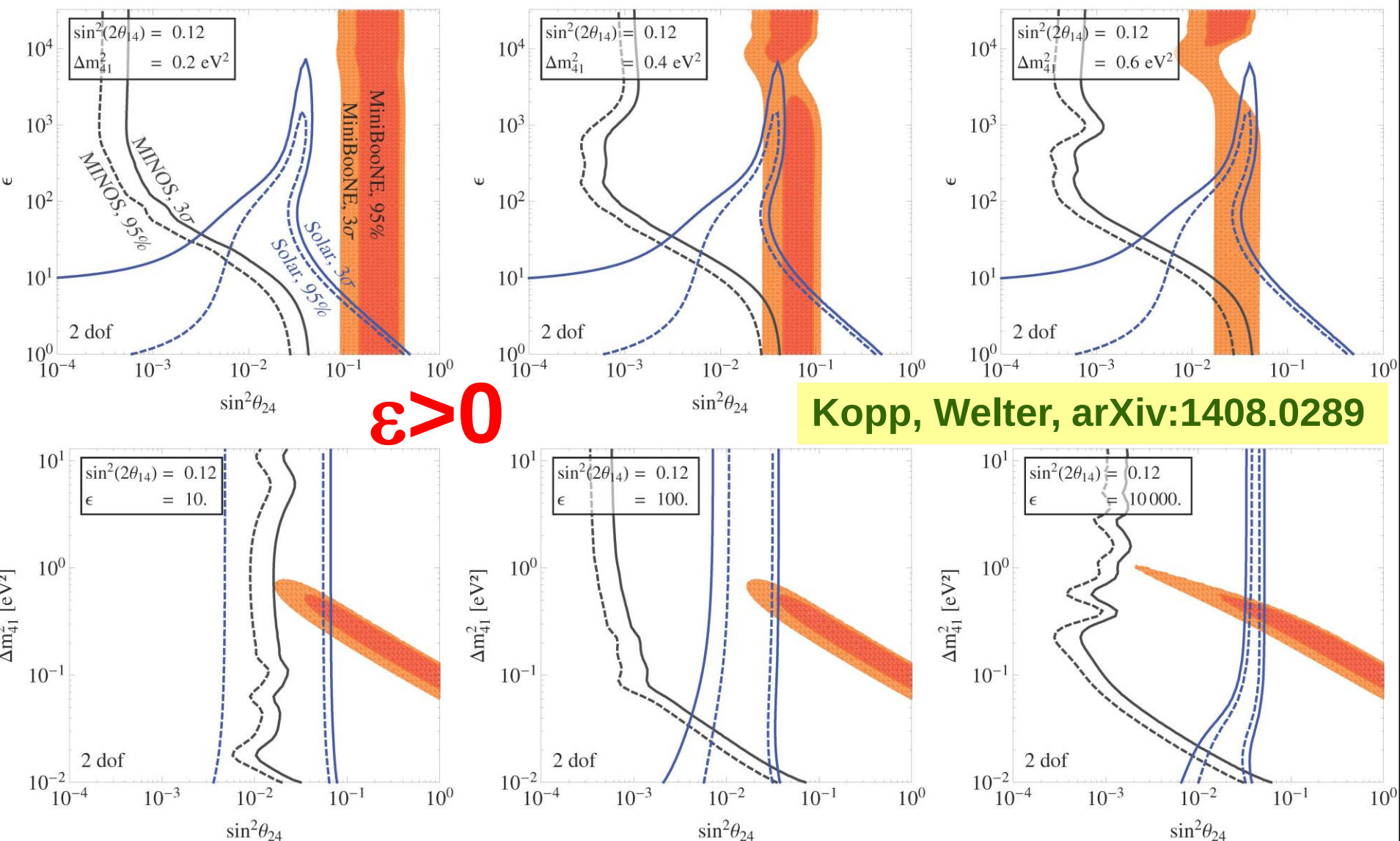


Figure 3: The measured and predicted event spectra for the MINOS ν_μ (left) and $\bar{\nu}_\mu$ (right) disappearance measurements. The red histogram is the MINOS prediction assuming no neutrino oscillation [45]. In blue, we show the predicted event spectrum including oscillations according to equation (27), assuming standard three flavour oscillations with the parameters listed in table I. The blue shaded histogram is our prediction, the unshaded histogram is the prediction by the MINOS collaboration. We overlay the survival probability $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}$ (dashed green curve and vertical scale on the right).

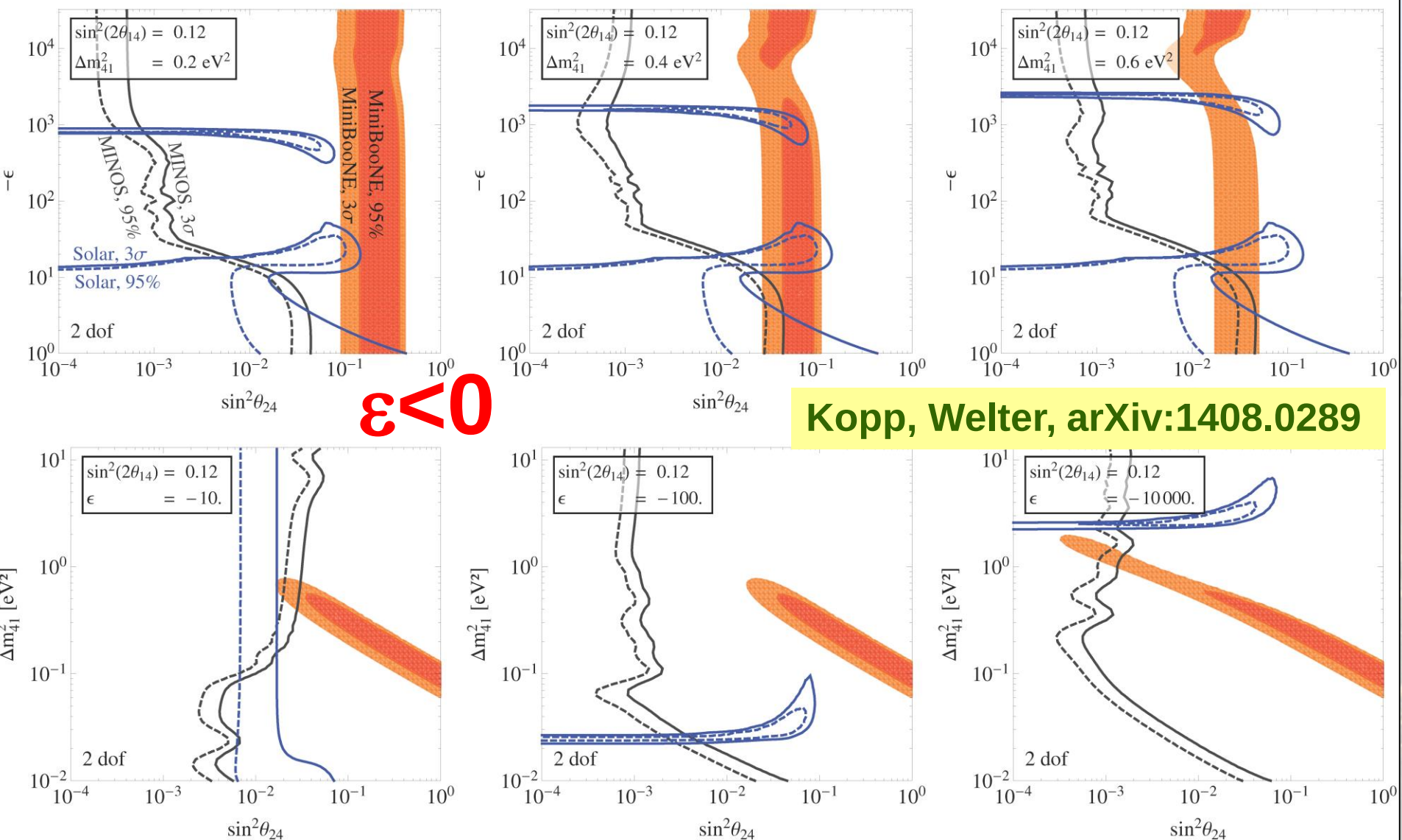
MINOSに関しては ν と反 ν の違いが大きすぎて矛盾が生じている

Not so sterile modelに対する ν 振動実験からの制限



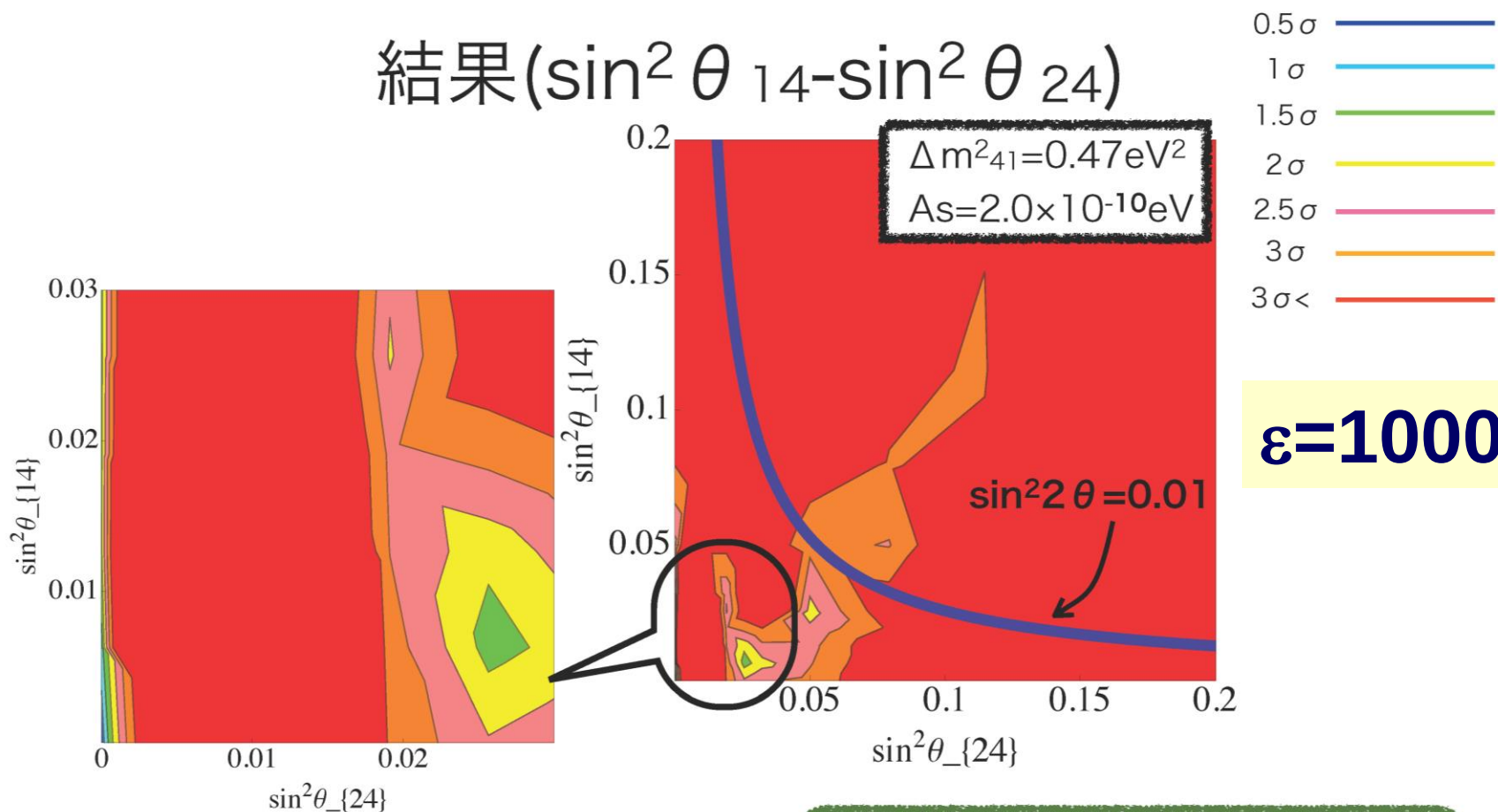
MiniBooNEとMINOSに都合の良い領域はほとんど存在しない

Not so sterile modelに対する ν 振動実験からの制限



MiniBooNEとMINOSに都合の良い領域はほとんど存在しない

結果($\sin^2 \theta_{14} - \sin^2 \theta_{24}$)



大気νと矛盾がない混合角では
 振幅が小さすぎてMiniBooNE
 でイベント数の超過が見込めない

Karagiorgiらのシナリオ

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4|U_{e4}^M|^2|U_{\mu 4}^M|^2 \sin^2(1.27\Delta m_M^2 L/E)$$

↘ = $\sin^2 2\theta = 0.01$

大気νと3σの矛盾

$\varepsilon=1$ のnot so sterile ν model

MiniBooNEの ν と反 ν の違いは出せないが、現象論を考える価値はある

$$i \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \left[U \begin{pmatrix} E_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_4 \end{pmatrix} U^{-1} + \begin{pmatrix} V_{CC} + V_{NC} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{NC} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{NC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_{NC} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix}$$

物質効果なし

- ☐ $\nu_\mu^{\text{TM}} \nu_\tau$ も $\nu_\mu^{\text{TM}} \nu_s$ も真空振動
- ☐ 大気 ν は $\nu_\mu^{\text{TM}} \nu_s$ でもOK
- ☐ (2+2)-schemeでもOK? (2+2)ならdisappearanceとの矛盾はない

$\varepsilon=1$ のnot so sterile ν model

(2+2)-schemeの場合

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の矛盾はOK

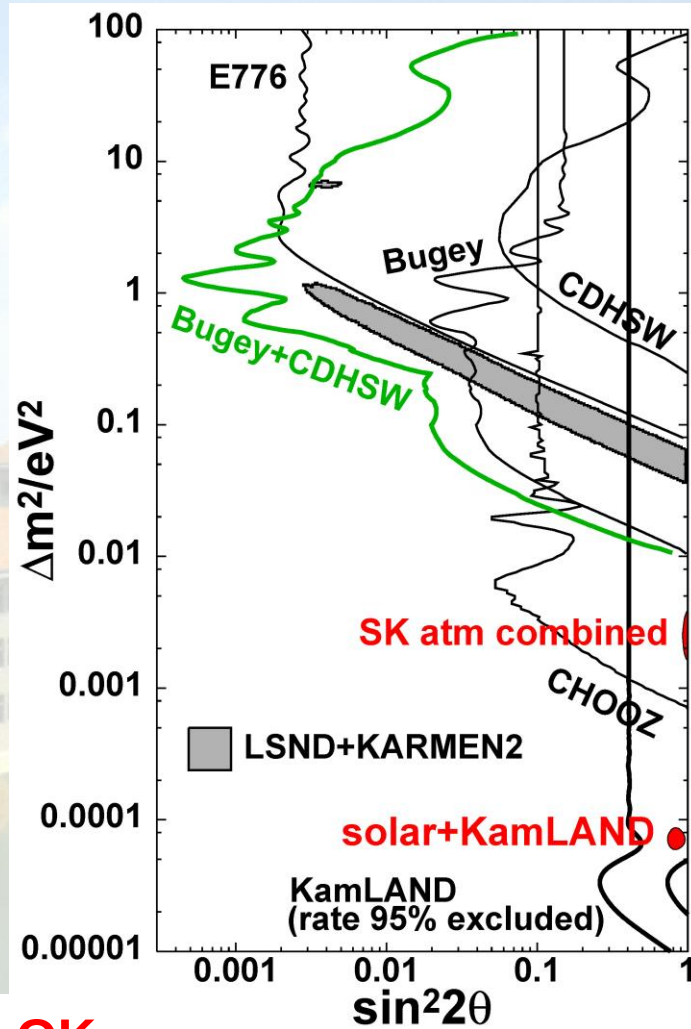
$$\begin{aligned}
 & P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)_{\text{SBL}} \\
 &= 4|U_{\mu 3}U_{e 3}^* + U_{\mu 4}U_{e 4}^*|^2 \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\text{SBL}}^2 L}{4E} \right) \\
 &\simeq 4 \left| \frac{1}{\sqrt{2}}U_{e 3}^* + \frac{1}{\sqrt{2}}U_{e 4}^* \right|^2 \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\text{SBL}}^2 L}{4E} \right) \\
 &= \underbrace{2|s_{13} + s_{14}e^{i\phi}|^2}_{\sin^2 2\theta_{\nu(e)\text{appear}}} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\text{SBL}}^2 L}{4E} \right)
 \end{aligned}$$

$$\sin^2 2\theta_{\nu(e)\text{appear}} < \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{\text{reactor}} \quad \text{ならOK}$$

$$\begin{aligned}
 & [1 - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)]_{\text{atm}} \\
 &= 4|U_{\mu 3}|^2|U_{\mu 4}|^2 \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\text{atm}}^2 L}{4E} \right) \\
 &\quad + 2(|U_{\mu 3}|^2 + |U_{\mu 4}|^2)(1 - |U_{\mu 3}|^2 - |U_{\mu 4}|^2)
 \end{aligned}$$

$$\simeq 1 \times \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\text{atm}}^2 L}{4E} \right)$$

$$\rightarrow |U_{\mu 3}|^2 \simeq |U_{\mu 4}|^2 \simeq \frac{1}{2}$$



$\varepsilon=1$ のnot so sterile ν model

(2+2)-schemeの場合

太陽 ν ・大気 ν の矛盾もOK(←物質効果なし)

しかし原子炉に問題が出る:

~ 0.1

$$\begin{aligned} & 1 - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \\ &= \boxed{4|U_{e3}|^2|U_{e4}|^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\text{atm}}^2 L}{4E} \right) \\ & \quad + 4(|U_{e3}|^2 + |U_{e4}|^2)(1 - |U_{e3}|^2 - |U_{e4}|^2) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\text{SBL}}^2 L}{4E} \right) \end{aligned}$$

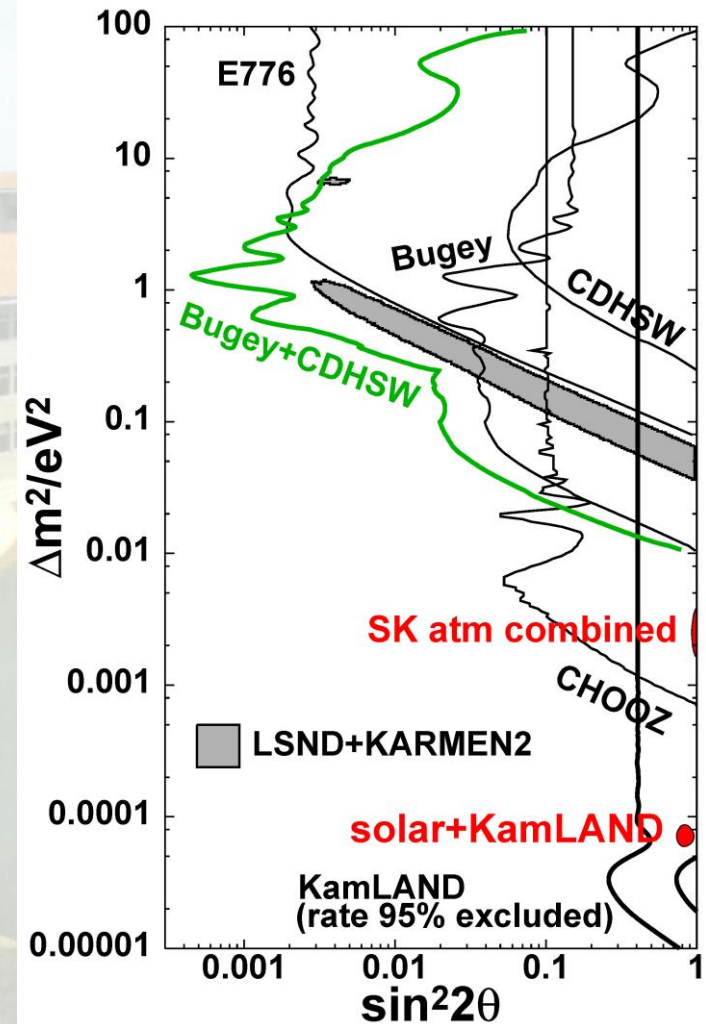
> 0.6

Daya Bay・Renoの前置検出器でfluxがほぼ理論通りであることと矛盾→(2+2)-schemeはうまく行かない

$\varepsilon=1$ のnot so sterile ν model

(3+1)-schemeの場合

standard sterile ν と同様 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$
と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の矛盾が存在



Not so sterile ν modelに対する問題点

1. $\varepsilon = G_B/G_F$ の絶対値の大きな場合には $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ のチャンネルと $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ のチャンネルの違いを説明できるが、その他の実験結果(MINOS、大気 ν 、太陽 ν)と矛盾
2. $\varepsilon \sim 1$ の場合には標準的な ν_S と同様(3+1)-schemeしか可能性はなく、やはりappearanceとdisappearanceの矛盾は解消しない
3. 隠れたU(1)ゲージ場Xへのより強い制限がLHC等から出ないか？

4. Summary(1)

質量O(eV)の ν 混合に関して議論した:

1. 標準的sterile ν model

- 4種類の ν 混合では(3+1)-schemeのみが可能だが $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ の否定的結果と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の肯定的結果の説明が困難
- 5種類 ν 混合の(3+2)-schemeでは $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の違いを説明できるがappearanceとdisappearanceの矛盾は解消しない

2. Not so sterile ν model ($\epsilon = G_B/G_F$)

- $\epsilon \sim 1000$ 程度の巨大な物資効果があれば $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の違いを出すことはできるが、その他の実験結果(MINOS、大気 ν 、太陽 ν)と矛盾
- $\epsilon \sim 1$ 程度の場合には標準的 ν_s と同様に(3+1)-schemeのみが可能で状況は改善しない

4. Summary(2)

今後の ν 実験に期待したいこと

- いずれにしても一つの仮説で説明できない矛盾した実験結果がある場合には、どれかの(または全部の)実験結果が間違っているはずである
→ それら全部を一つ一つ検証することに意味がある
- OPERA・SK大気 ν における τ appearanceの測定
地味な研究であるが、not so sterile ν modelに対する制限を与えるのに役立つ
→ 金さえあれば加速器でのOPERA型の τ appearanceの実験をもっと大々的にやって頂きたい
- 中性カレント反応についての測定
精度が高くなればsterile ν modelに対する制限を与えるのに役立つ

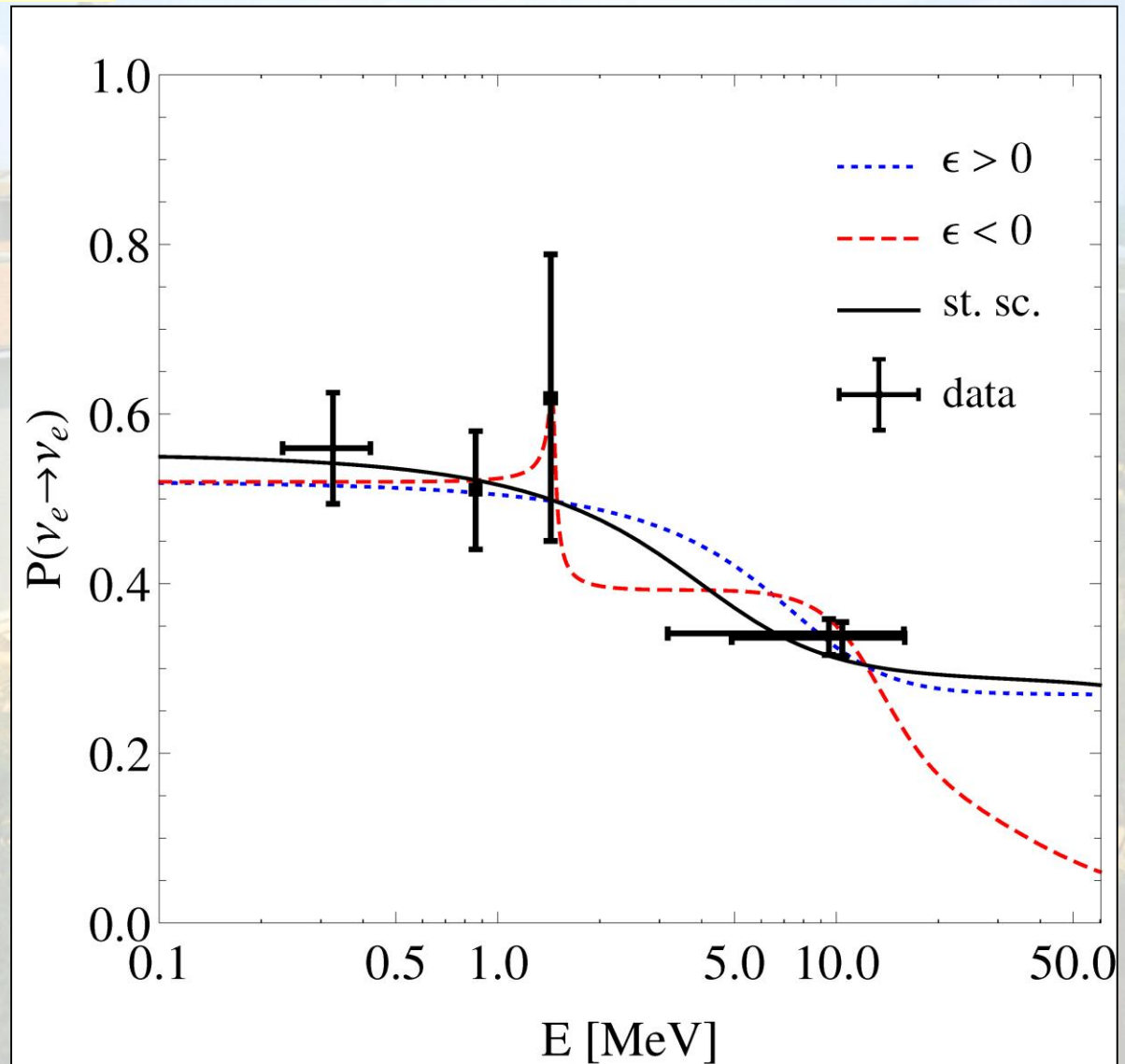
An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, light-colored building with a curved facade and a semi-circular portico stands next to a dark, irregularly shaped pond. The building has multiple windows and a red-tiled roof. Behind it, several other buildings of varying heights and styles are visible, some with red roofs and others with more modern, glass-fronted designs. The campus is surrounded by green trees and grassy areas. In the background, rolling hills and a clear blue sky with some clouds are visible.

Backup slides

Not so sterile modelに対する ν 振動実験からの制限

Solar neutrino

Kopp, Welter, arXiv:1408.0289



Not so sterile modelに対する ν 振動実験からの制限

Kopp, Welter, arXiv:1408.0289

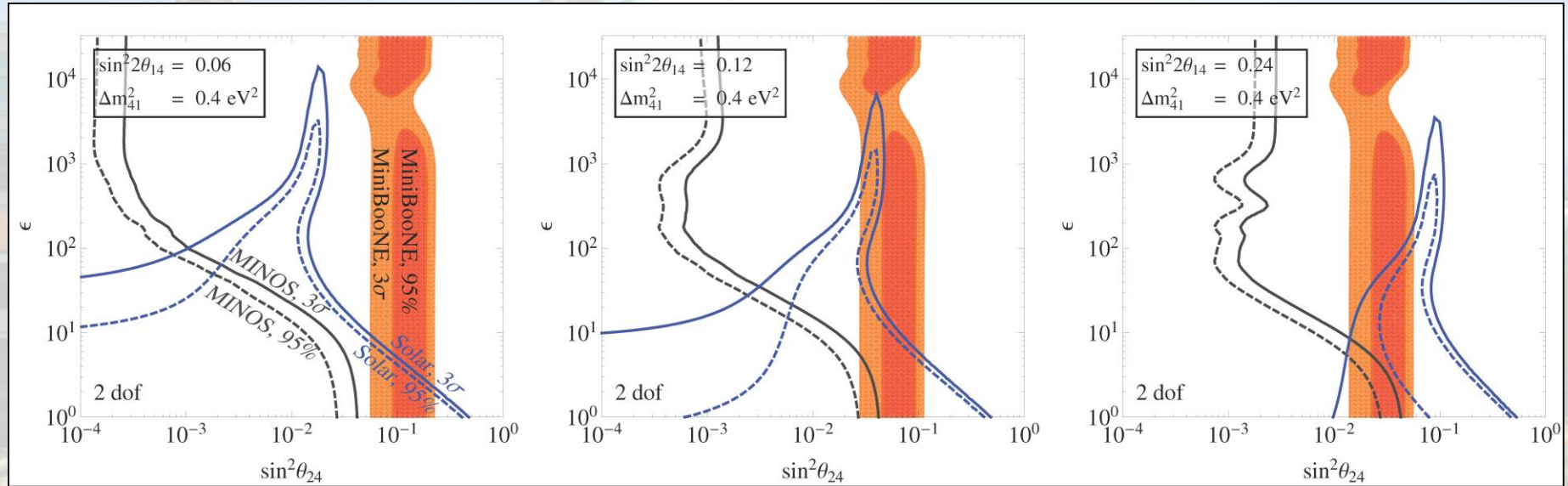


Figure 9: The effect of varying θ_{14} on the constraints in the $\sin^2 \theta_{24}$ - ϵ plane. The plot in the center reproduces middle panel in the upper row of figure 6, while the left and right panels show similar constraints for smaller and larger θ_{14} , respectively.

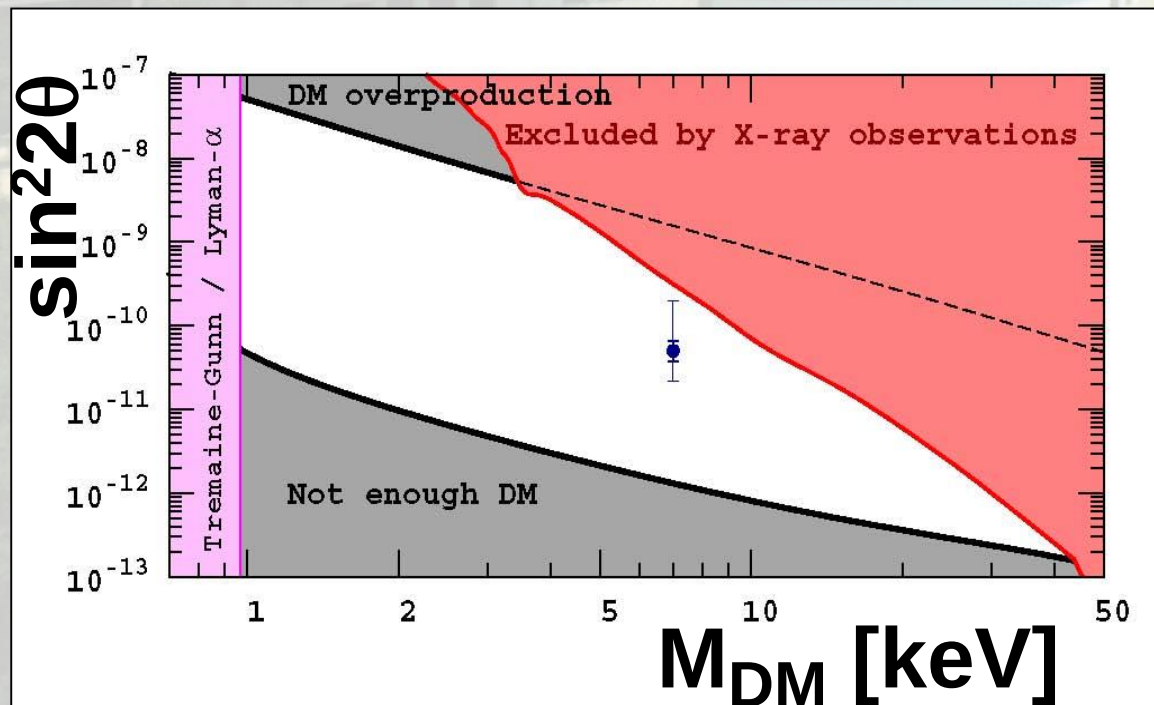
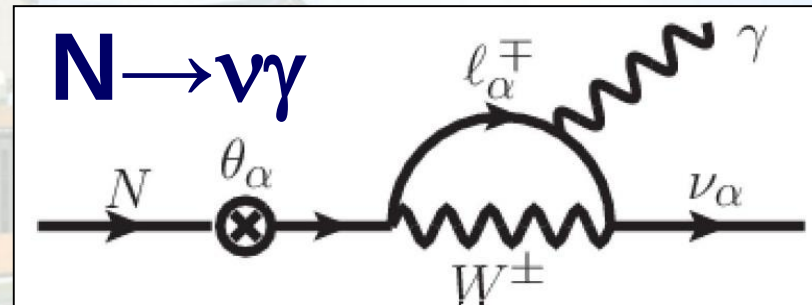
●銀河団のX線観測

$E \sim 3.5$ keVの輝線が報告されている

Bulbul et al., arXiv:1402.2301

Boyarsky et al., arXiv:1402.4119

もしかしてRH ν ($= \nu_s$)が
通常の ν との混合を通して
崩壊したものか？



Boyarsky,
Ruchayskiy,
Iakubovskyi,
Franse,
arXiv:1402.4119