

ニュートリノの現象論

首都大学東京理工学研究科物理学専攻

安田修

2014年7月12日(土)@名古屋大学

CRCタウンミーティング

1. 序

- ν 振動
- パラメーター縮退

2. 標準的3世代シナリオ

- 混合角度
- 質量パターン
- CP位相

3. 非標準的シナリオ

- ステライル ν
- 非標準的相互作用
- ユニタリー性の破れ

4. まとめ



1. 序 1.1 ニュートリノ振動(真空中の2世代の場合)

フレーバー
固有状態

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

質量固有状態

$$U \equiv \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

真空中の混合角

L : 基線長、 E : エネルギー

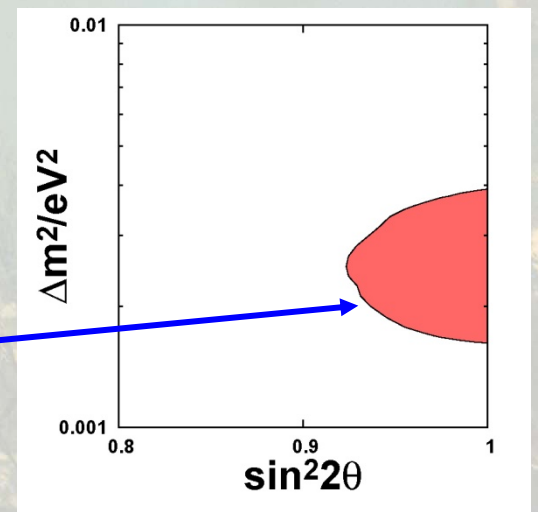
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$
$$= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 (\Delta m^2 / \text{eV}^2) (L / \text{km})}{(E / \text{GeV})} \right)$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

Lに関して振動的振る舞い

$(\Delta m^2, \sin^2 2\theta)$: 振動パラメーター

2次元平面で振動パラメーター
の許容領域を表すのが慣例



1.2 ニュートリノ振動(3世代の場合)

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_\mu \\ \mathbf{v}_\tau \end{pmatrix} = \mathbf{U} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{pmatrix}$$

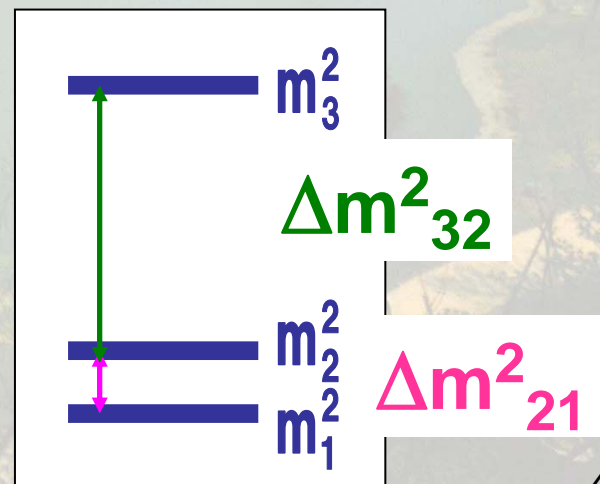
$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \mathbf{D} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \mathbf{D}^{-1} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D} \equiv \text{diag}(e^{i\delta/2}, 1, e^{-i\delta/2}), \quad s_{jk} \equiv \sin\theta_{jk}, \quad c_{jk} \equiv \cos\theta_{jk}$$

3×3直交行列の3つの回転角

θ_{12} 、 θ_{13} 、 θ_{23} とCP非保存位相 δ 、

Δm^2_{21} 、 Δm^2_{32} がパラメーター



1.3 現在までのニュートリノ振動実験でわかった事

● 大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ⇒

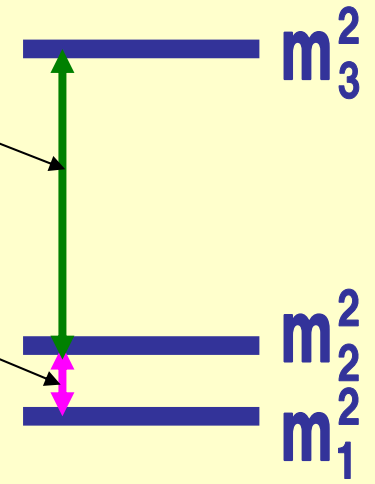
$$\theta_{23} \cong 45^\circ ; |\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

● 太陽ニュートリノ・長基線原子炉ニュートリノ⇒

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

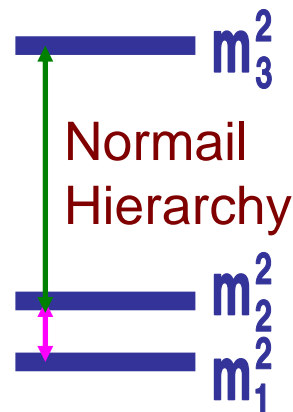
● 短基線原子炉ニュートリノ・加速器ニュートリノ⇒

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

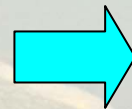
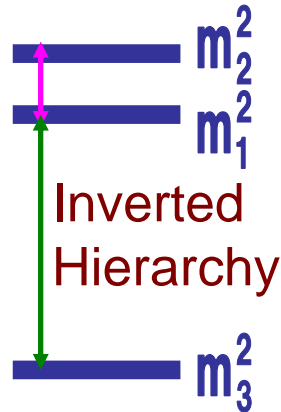


という結果が得られ、ニュートリノに質量・混合があることが確定

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

1.4 パラメータ－縮退

CP非保存位相 δ を決定するためにE,L一定の長基線 ν 実験で

$$P \equiv P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e), \bar{P} \equiv P(\overline{\nu_\mu} \rightarrow \overline{\nu_e})$$

の両方を決定しても一般に δ は一意的に決まらない

→ 2^3 重縮退

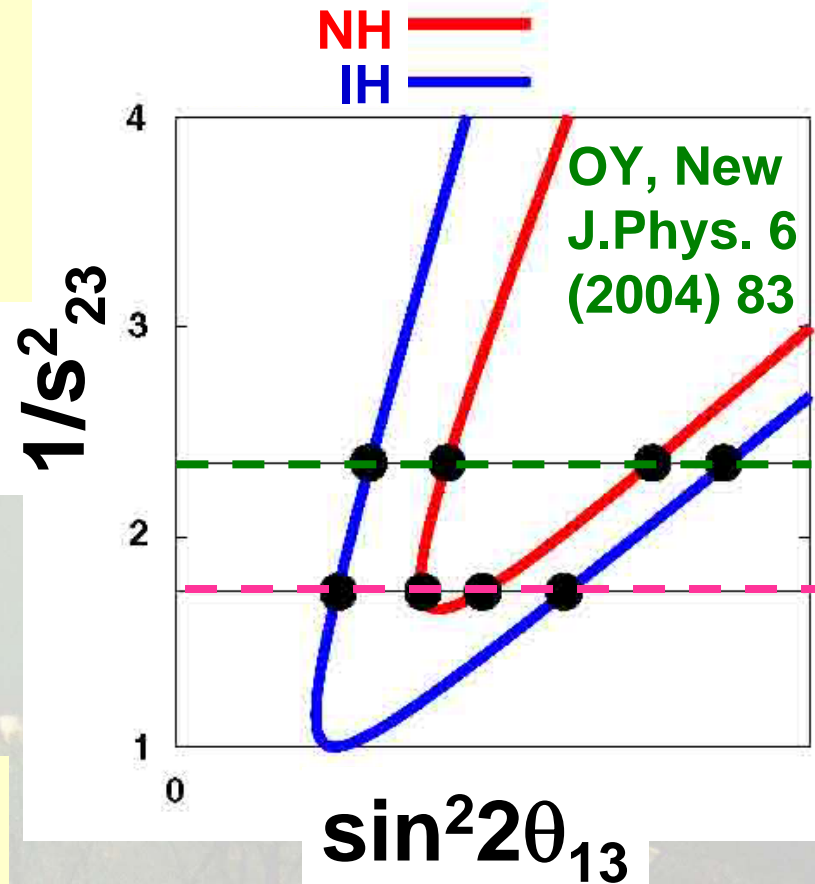
● octant degeneracy

$$\theta_{23} \leftrightarrow \pi/2 - \theta_{23} \text{ (Fogli-Lisi, '96)}$$

● intrinsic degeneracy (δ, θ_{13})
(Burguet-Castell et al, '01)

● sign degeneracy $\Delta m^2_{31} \leftrightarrow -\Delta m^2_{31}$ (Minakata-Nunokawa, '01)

($\sin^2 2\theta_{13}, 1/s^2_{23}$)
平面の図(P=一定&
 \bar{P} =一定で与えられ
る線は2次曲線)



1.5ニュートリノ振動以外の実験

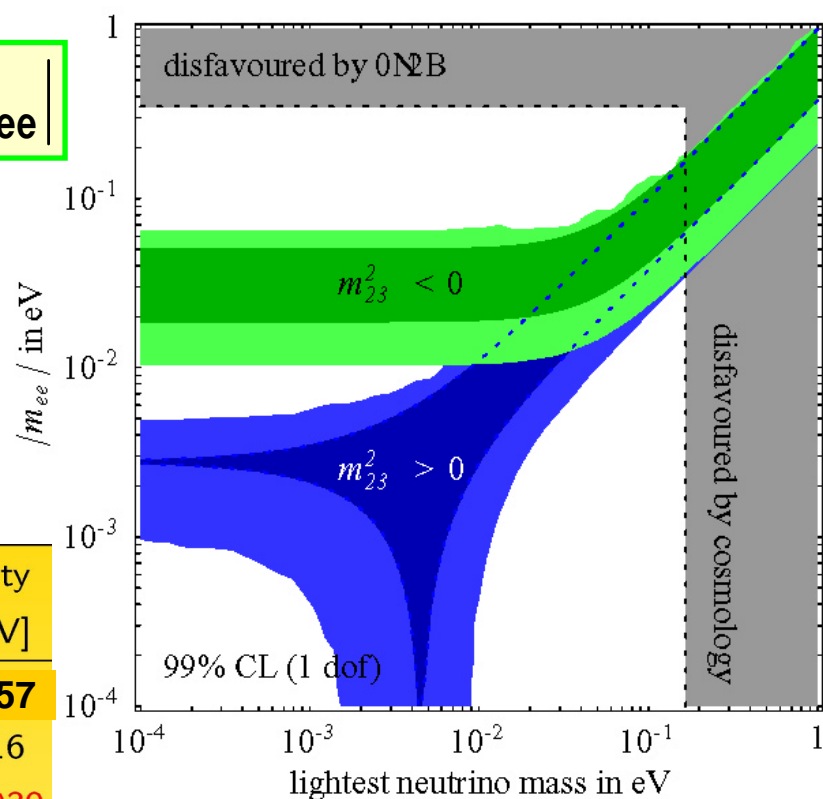
(i) 無 ν 二重 β 崩壊実験

$$m_{ee} = |\sum (U_{ej})^2 m_j \exp(i\phi_j)|$$

Rodejohann@NOW2012

Experiment	Isotope	Status	Start of data-taking	Sensitivity $\langle m_\nu \rangle$ [eV]
GERDA	^{76}Ge	v2014		0.29 - 0.57
		in progress	~ 2012	0.06-0.16
		R&D	~ 2015	0.012-0.030
CUORE	^{130}Te	in progress	~ 2013	0.018-0.037 0.03-0.066
MAJORANA	^{76}Ge	in progress	~ 2013	0.06-0.16
		R&D	~ 2015	0.012-0.030
EXO	^{136}Xe	v2014		0.19 - 0.45
		R&D	~ 2015	0.02-0.05
SuperNEMO	^{82}Se	R&D	$\sim 2013-15$	0.04-0.096
KamLAND-Zen	^{136}Xe	v2014		0.14 - 0.28
		R&D	$\sim 2013-15$	0.02-0.046
SNO+	^{150}Nd	in progress	~ 2014	0.09-0.18

$$|m_{ee}|$$



$$\min(m_j)$$

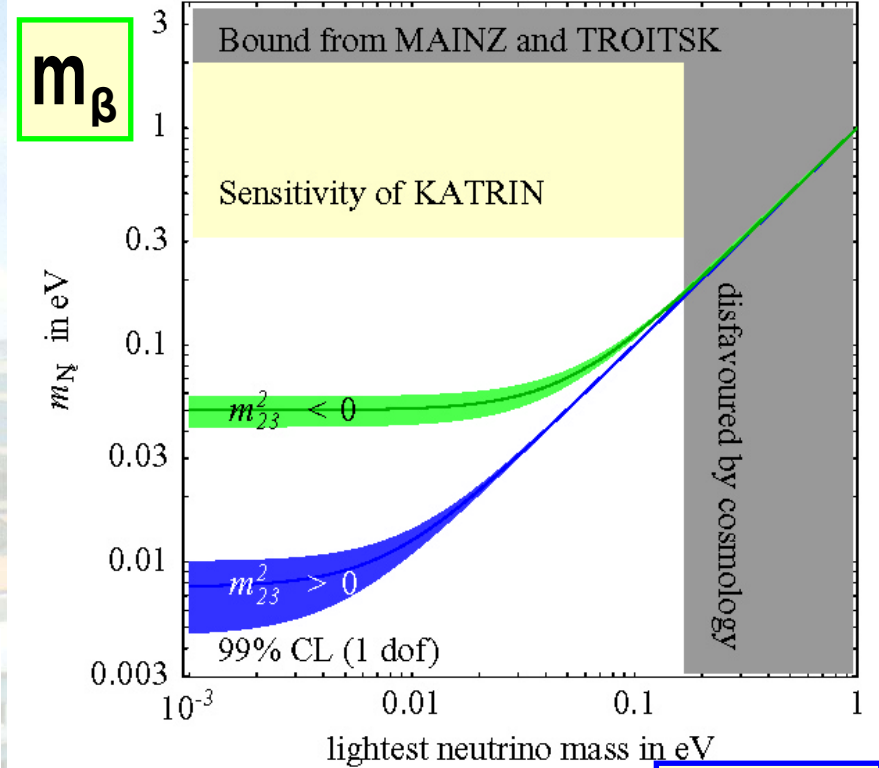
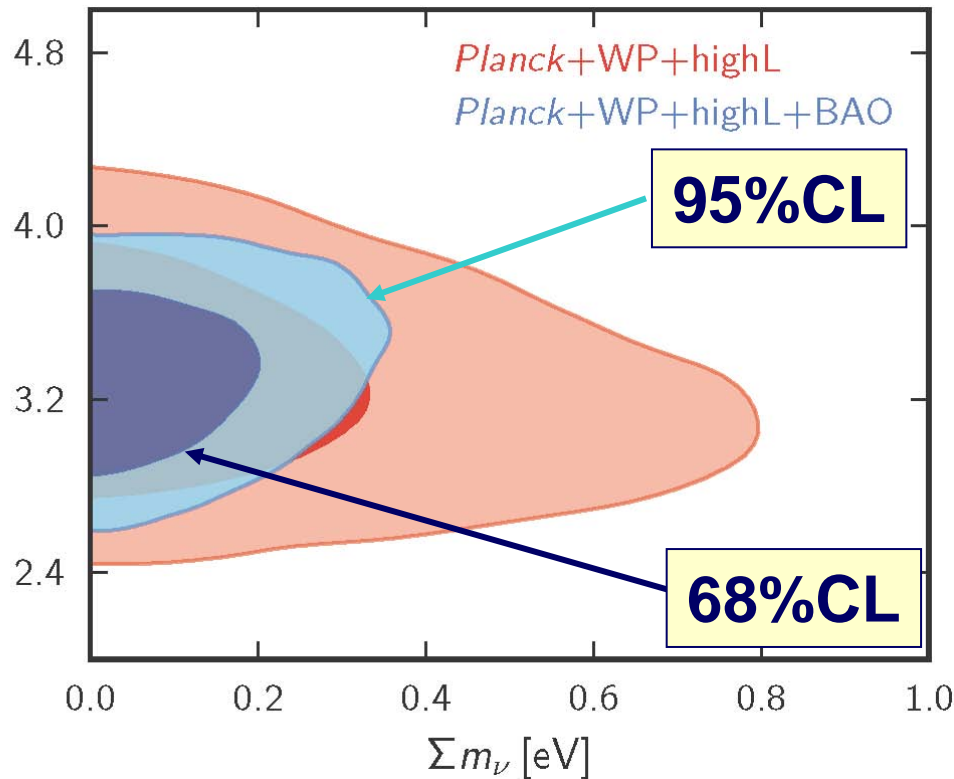
Strumia-Vissani:
hep-ph/0606054

(ii) トリチウムによる直接観測

$$m_\beta = (\sum |U_{ej}|^2 m_j^2)^{1/2}$$

Strumia-Vissani:
hep-ph/0606054

(iii) 宇宙論 Σm_j



Planck 2013 results. XVI,
Cosmological parameters,
arXiv:1303.5076v1

● Planckの結果(2013/3)

2013年3月20日に
Planckの結果(CMB+銀
河団)から $\Sigma m_\nu > 0$ という
主張が出てはいるが、他
のパラメーターを調節す
れば $\Sigma m_\nu = 0$ でも観測値
の説明は可能なはず
→慎重に解釈すべき

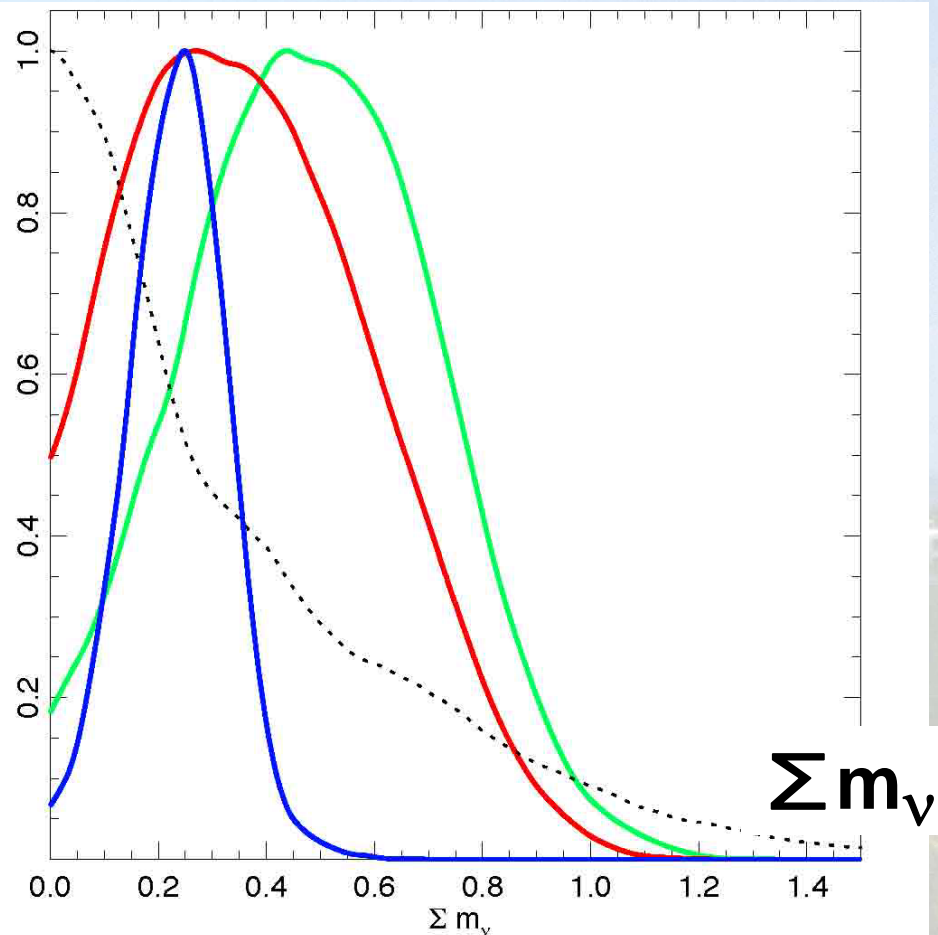


Fig. 12. Cosmological constraints when including neutrino masses Σm_ν from: *Planck* CMB data alone (black dotted line); *Planck* CMB + SZ with $1 - b$ in $[0.7, 1]$ (red); *Planck* CMB + SZ + BAO with $1 - b$ in $[0.7, 1]$ (blue); and *Planck* CMB + SZ with $1 - b = 0.8$ (green).

Planck 2013 results. XX, Cosmology from Sunyaev–Zeldovich cluster counts, arXiv:1303.5080v1

2. 標準的3世代シナリオ

2.1 混合角

対称性の議論から、レプトン混合角の間、或はクォーク・レプトン混合角の間にさまざまな予言がなされている

◆ Quark-lepton complementarity

Minakata, Smirnov, PR D70 (2004) 073009

$$\theta_{12} + \theta_c = \pi/4$$

◆ T' symmetry

Eby, Frampton, arXiv:1112.2675v4 [hep-ph]

$$\pi/4 - \theta_{23} = 2^{-1/2} \theta_{13}$$

クォークの混合角は $O(0.1^\circ)$ の精度で測定されている

CKM angles @90%CL (PDG)

$$\theta_{12} = 12.57 \pm 0.12 \text{ deg}$$

$$\theta_{23} = 2.36 \pm 0.11 \text{ deg}$$

$$\theta_{13} = 0.21 \pm 0.04 \text{ deg}$$

レプトンの混合角の測定値 @90%CL

Tortola@ICHEP2014

$$\theta_{12} = 34.6 \pm 1.0 \text{ deg}$$

$$\theta_{23} = 49 +1.9-6.6 \text{ deg}$$
$$= 49 +1.5-2.2 \text{ deg}$$

$$\theta_{13} = 8.3 +0.3-0.2 \text{ deg}$$

$\sin^2 \theta_{12}/10^{-1}$	3.23 ± 0.16	5%
$\sin^2 \theta_{23}/10^{-1}$ (NH)	$5.67^{+0.32}_{-1.15}$	7.3%
$\sin^2 \theta_{23}/10^{-1}$ (IH)	$5.73^{+0.25}_{-0.38}$	6.8%
$\sin^2 \theta_{13}/10^{-2}$ (NH)	$2.10^{+0.14}_{-0.09}$	5.4%
$\sin^2 \theta_{13}/10^{-2}$ (IH)	$2.16^{+0.10}_{-0.12}$	5.2%

→ $\theta_{12} + \theta_c = \pi/4$ のような仮説をテストするにはレプトンの混合角を $O(0.1^\circ)$ の精度で測定する必要あり

特に θ_{23} の精度が今後の課題

→ Sign & octant degeneracy の解決が重要

L=50kmの原子炉 ν 実験(JUNO, Reno-50)では
精密な測定が可能であると期待されている

Zhan @ ICHEP2014

	Current	JUNO
Δm^2_{12}	3%	0.6%
Δm^2_{23}	5%	0.6%
$\sin^2\theta_{12}$	6%	0.7%
$\sin^2\theta_{23}$	10%	N/A
$\sin^2\theta_{13}$	14% \rightarrow 4%	\sim 15%

At T2K

$$\delta \sin^2 2\theta_{23} = 1\% \rightarrow \delta \sin^2 \theta_{23} = 10\% \text{ for } \theta_{23} = \pi/4$$

2.2 質量パターン

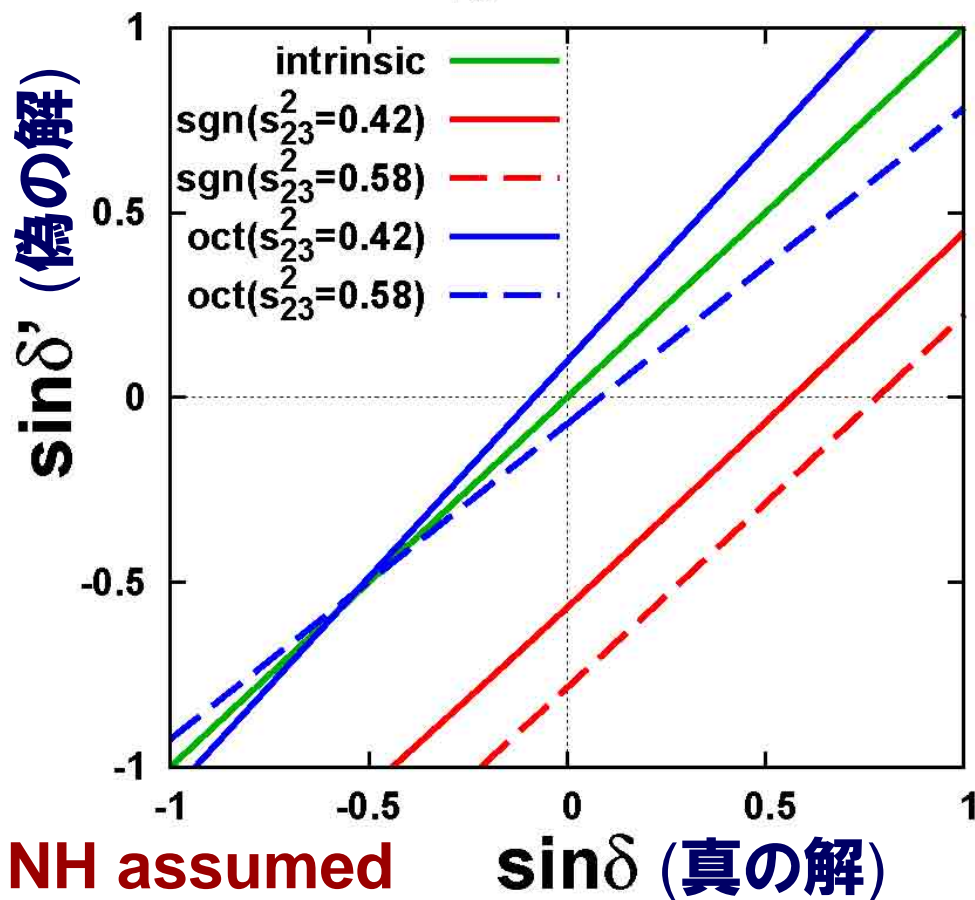
(i) GUT等の模型構築への指針

(ii) CP非保存測定への影響: T2HKでCP非保存を測定するには(非常に幸運な場合を除き)質量パターンを決定しておくことが必要

(iii) 無 ν 二重 β 崩壊実験への影響: IHならば近未来にシグナルの観測が可能

(ii) CP非保存測定への影響: T2HK でCP非保存を測定するには(非常に幸運な場合を除き)質量パターンを決定しておくことが必要

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092$ at T2K



T2K では

$$|\Delta m_{31}^2|L/4E = \pi/2 \Rightarrow \sin \delta(\text{intrinsic}) = \sin \delta'(\text{intrinsic})$$

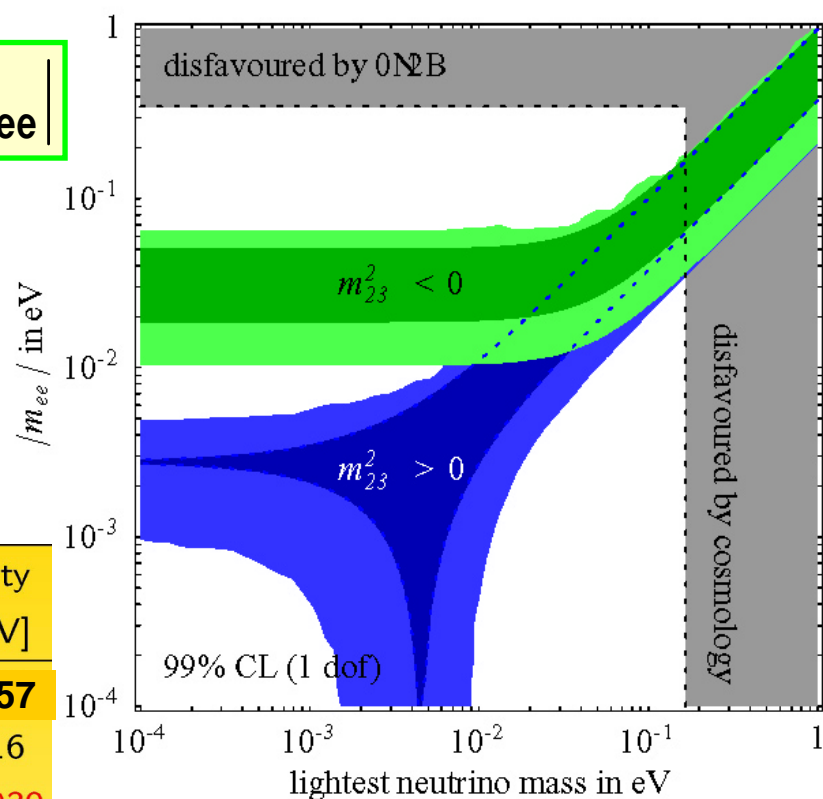
T2K では sign degeneracy が一番深刻: $\sin \delta = 0 \Rightarrow \sin \delta'(\text{sign}) = O(1) \neq 0$

(iii) 無 ν 二重 β 崩壊実験への影響: IHならば近未来にシグナルの観測が可能

$$|m_{ee}|$$

$$m_{ee} = |\sum (U_{ej})^2 m_j \exp(i\phi_j)|$$

Rodejohann@NOW2012



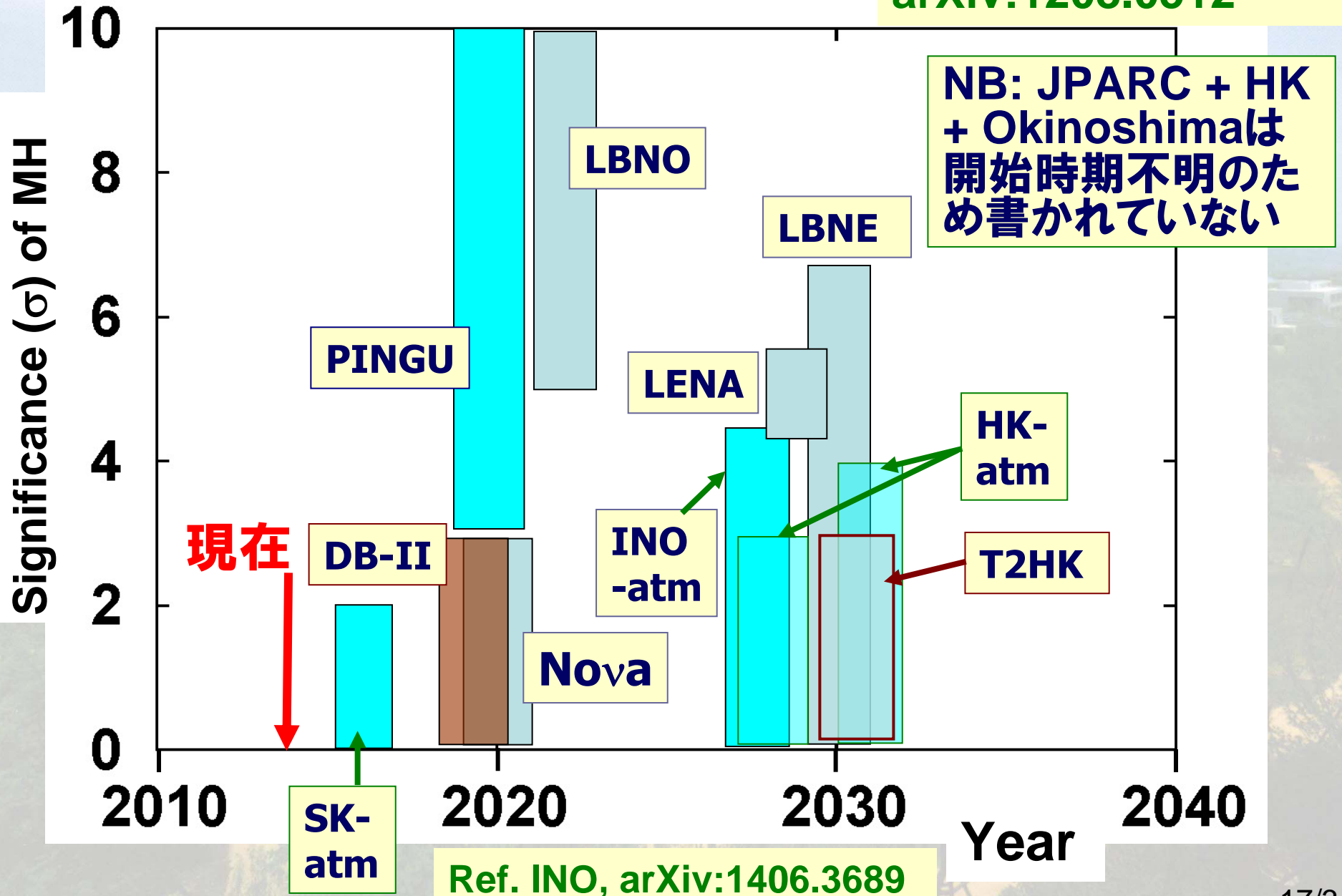
$$\min(m_j)$$

Strumia-Vissani:
hep-ph/0606054

Experiment	Isotope	Status	Start of data-taking	Sensitivity $\langle m_\nu \rangle$ [eV]
GERDA	^{76}Ge	v2014		0.29 - 0.57
		in progress	~ 2012	0.06-0.16
		R&D	~ 2015	0.012-0.030
CUORE	^{130}Te	in progress	~ 2013	0.018-0.037
				0.03-0.066
MAJORANA	^{76}Ge	in progress	~ 2013	0.06-0.16
		R&D	~ 2015	0.012-0.030
EXO	^{136}Xe	v2014		0.19 - 0.45
		R&D	~ 2015	0.02-0.05
SuperNEMO	^{82}Se	R&D	$\sim 2013-15$	0.04-0.096
KamLAND-Zen	^{136}Xe	v2014		0.14 - 0.28
		R&D	$\sim 2013-15$	0.02-0.046
SNO+	^{150}Nd	in progress	~ 2014	0.09-0.18

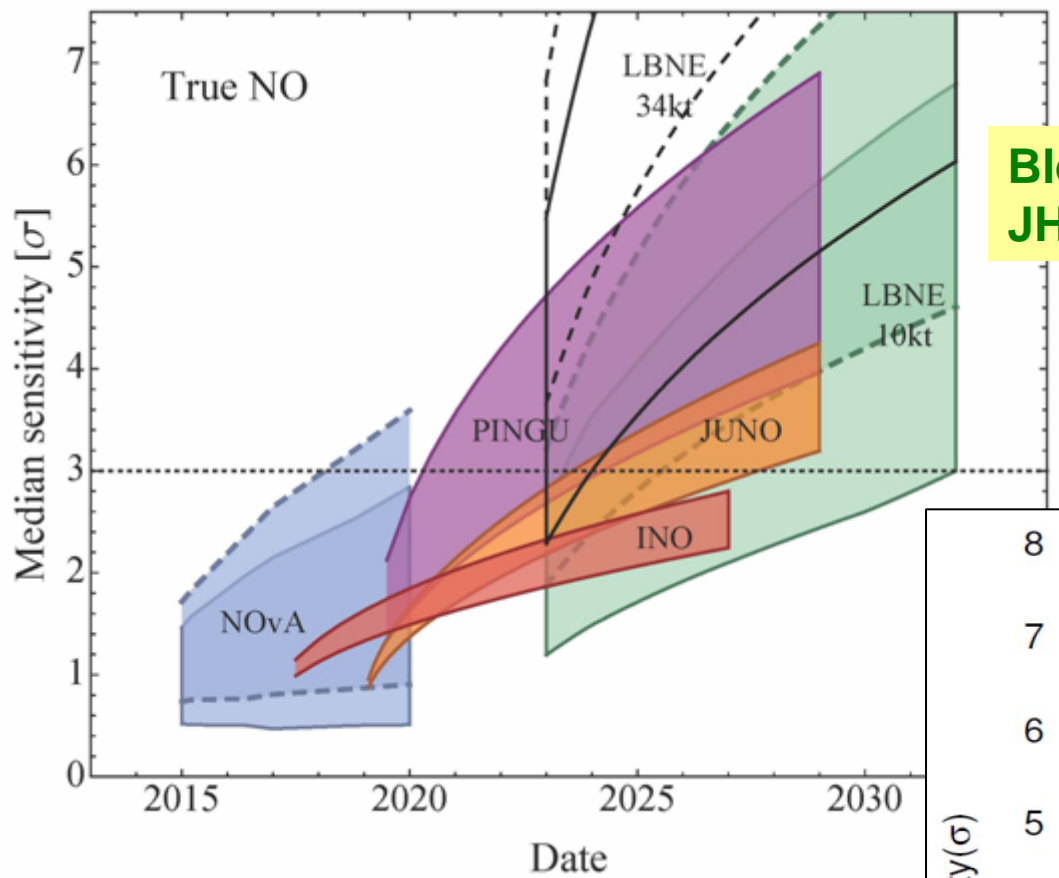
将来における質量パターン決定の見通し

Ref. Bertolucci et al,
arXiv:1208.0512

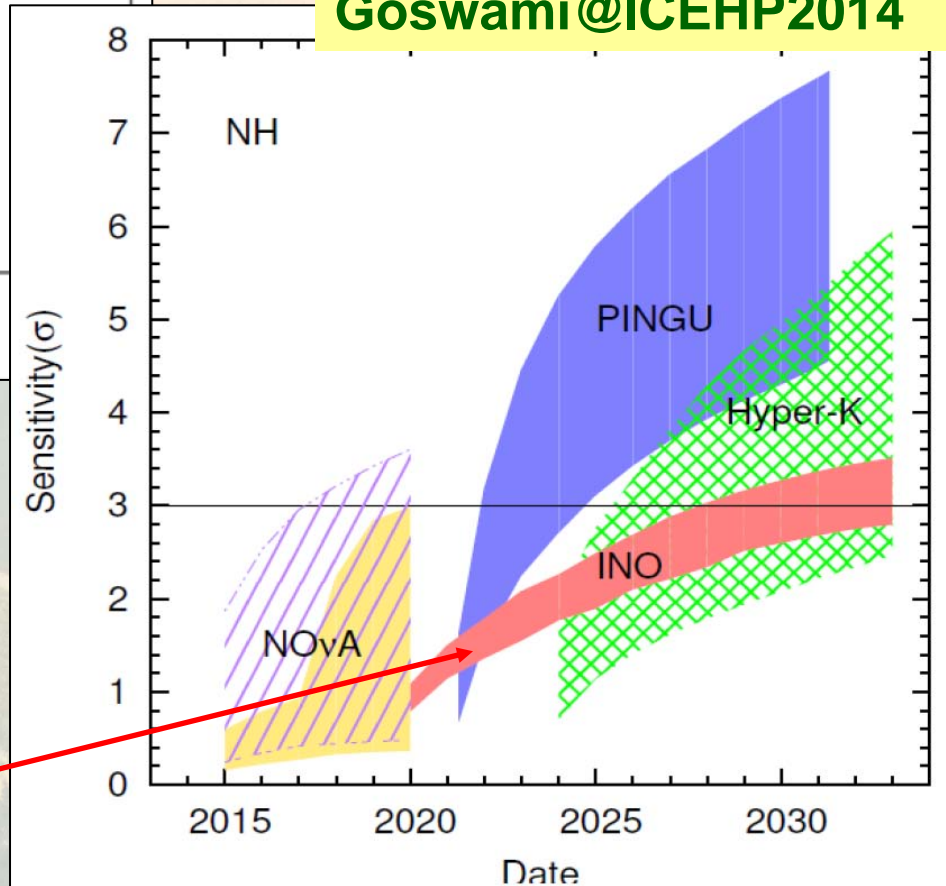


将来における質量パターン 決定の見通し

Blennow, Coloma, Huber, Schwetz,
JHEP 1403 (2014) 028



Goswami@ICEHP2014



各実験の感度の評価には
さまざまな仮定があり、お
おざっぱな参考として見る
必要がある

Ref. INO, arXiv:1406.3689

2.3 CP位相 δ

→ 模型構築への指針

- Examples based on $G_f \times CP$
- Should have 3-dimensional rep. to fit 3 gen.
- Predict CP phases: one class → $\theta_{23} = 45^0; \delta_{CP} = \pi/2$

($Z_2 \times CP$; Grimus, Lavoura; $S_4 \times CP$; R. N. M., Nishi; $Z_2 \times Z_2 \times CP$; Gupta, Joshipura, Patel;
 $S_4 \times CP$: Feruglio, Hagedorn, Ziegler; Antusch, Gross, Maurer, Sluka'12)

- Other examples:
- A_4 : $\delta_{CP} \simeq 26^0 - 68^0$ (Ishimori, Ma)
- $SU(5) \times T'$: 84^0 (Meroni, Petcov,...); 227^0 (Chen, Mahanthappa);
- A_4 : 270^0 (Branco et al'12); 70^0 (Hernandez, Smirnov'12)

3. 非標準的シナリオ

将来の大強度 ν 長基線実験では、標準的シナリオからの
のずれの探索が可能 \rightarrow ずれの発見は**標準的枠組を超える
物理のヒントを与える**

- ステライル ν 探索の動機

\rightarrow ステライル ν 存在を示唆する実験結果がある

- 非標準的相互作用探索の動機

- ユニタリー性の破れ探索の動機

肯定的実験結果は
ないが、その発見
は標準的枠組を
超える物理のヒント
を与える

3.1.1 質量 $O(\text{eV})$ のステライル ν (ν_s)

質量 $O(\text{eV})$ のステライル ν 探索の動機は
主として現象論的

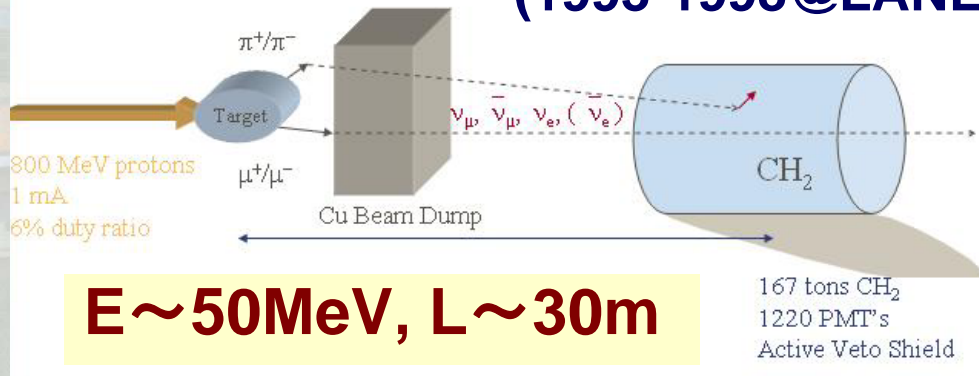
- LSND anomalyの検証
- Reactor anomalyの検証
- Gallium anomalyの検証
- 宇宙論的観測におけるステライル ν 示唆の可能性

理論的に必然的にステライル ν が予言されて
いる訳ではない

● LSND anomaly

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

The LSND Experiment
(1993-1998@LANL)

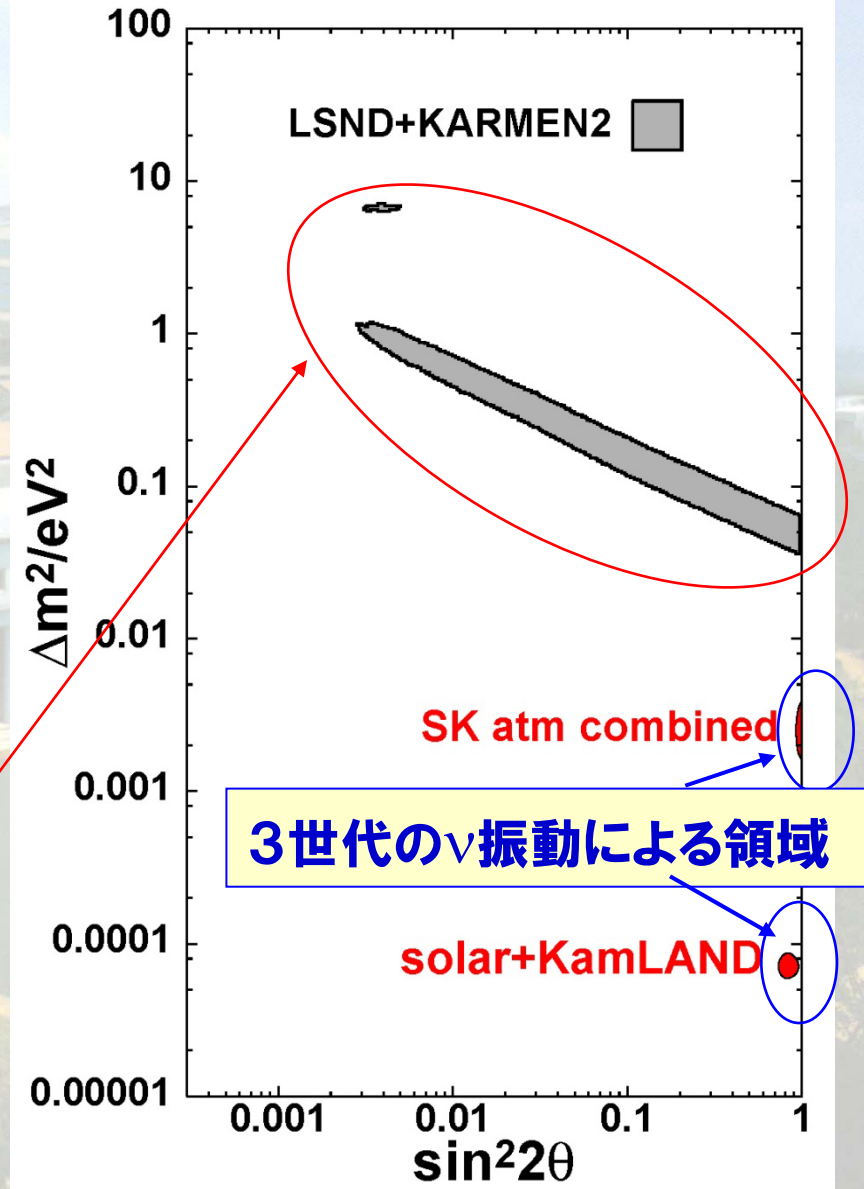


$E \sim 50\text{MeV}, L \sim 30\text{m}$

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

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

これは3世代間の ν 振動
では説明不可能



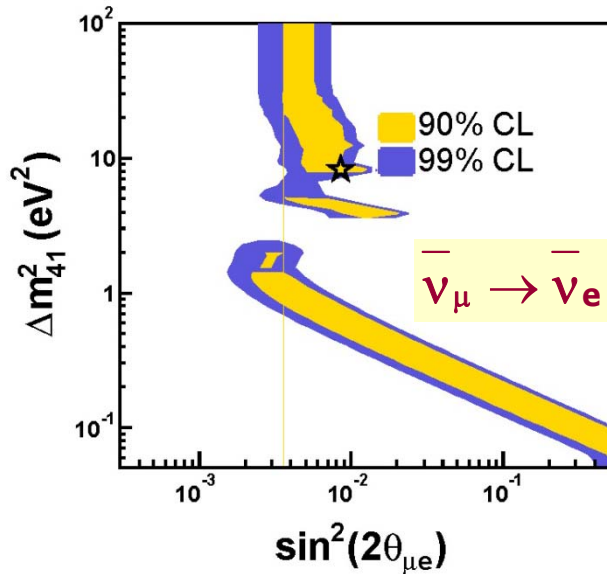
● MiniBooNE(2002-, FNAL) LSNDを追試するための実験

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

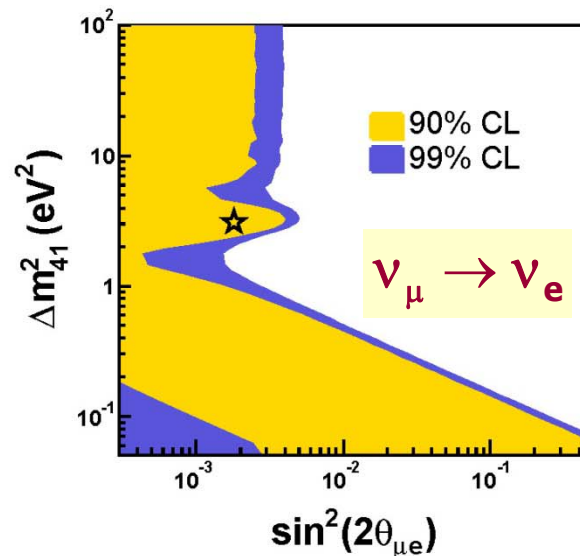
ニュートリノモード (2007)
(否定的)

反ニュートリノモード (2010)
(肯定的)

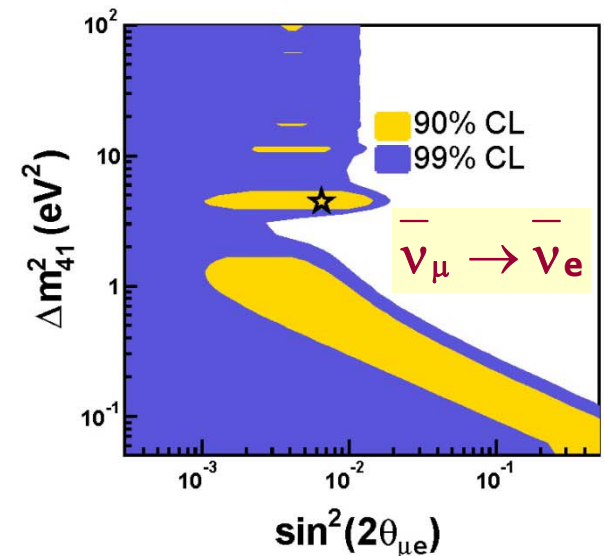
LSND



MB(ν)



MB($\bar{\nu}$)



1995
LSNDは本当か？

2007
LSNDは間違っていた！

2010
LSNDはあったか？

ステライルニュートリノ振動！？

● 原子炉ニュートリノ異常

Mention et al, 2011

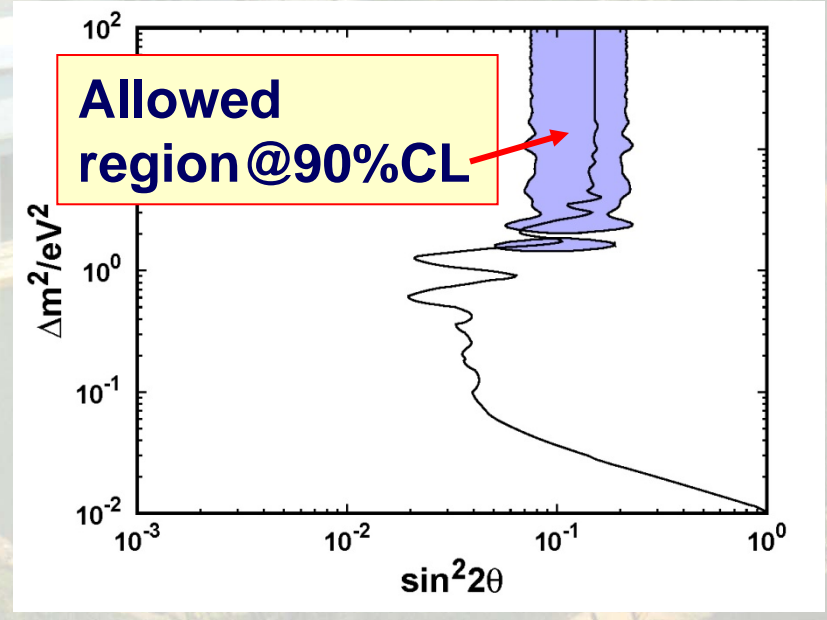
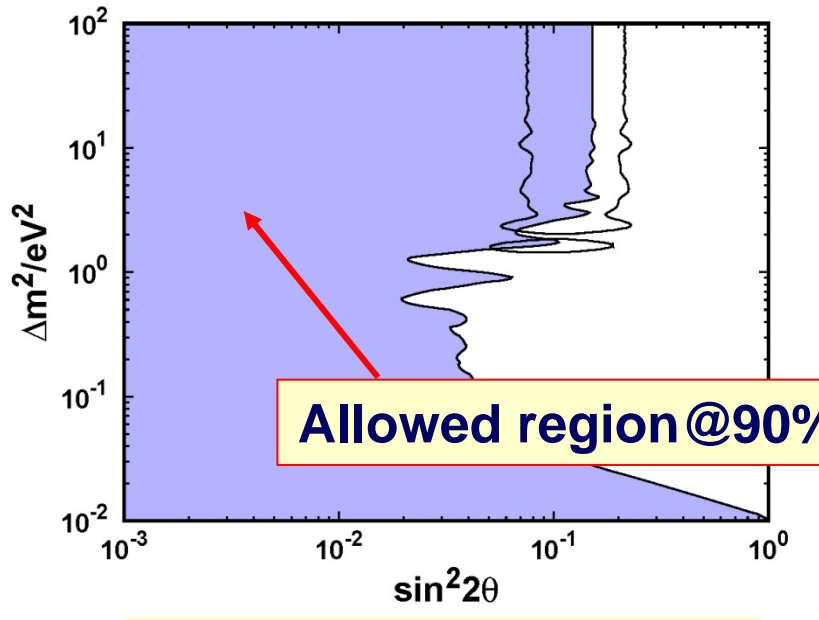
最近原子炉 $\bar{\nu}_e$ のフラックスに対する再評価が出て、これまでのデータがむしろ $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ の欠損を示唆していると解釈されるようになった

$$\text{(新フラックス)} = \text{(旧フラックス)} \times 1.03$$

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 ?



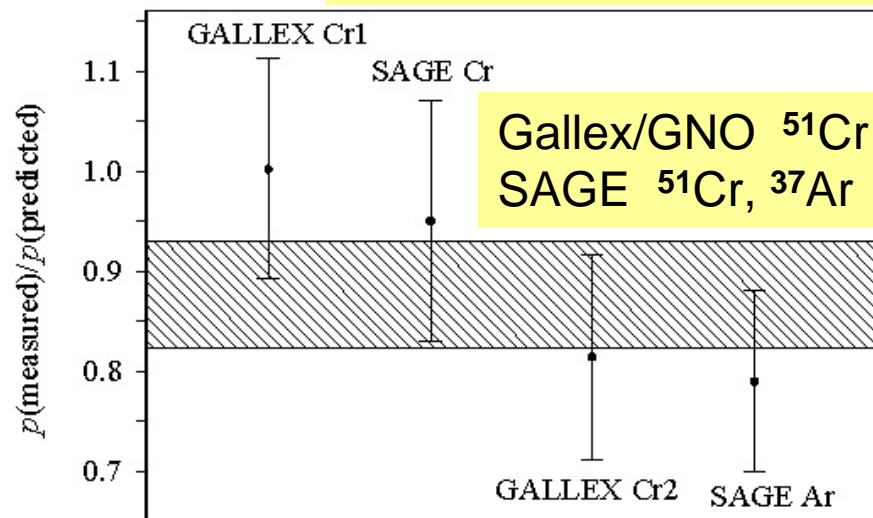
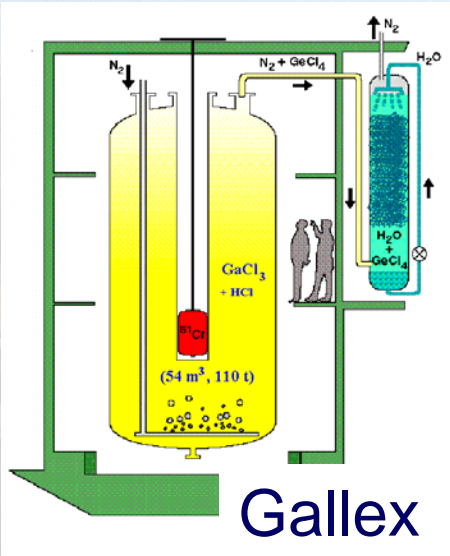
$\Delta m_{41}^2 = 0 (1) \text{ eV}^2$
の領域には ν 振動はない



$\Delta m_{41}^2 = 0 (1) \text{ eV}^2$ の領域に ν 振動
があるかもしれない

● ガリウム異常

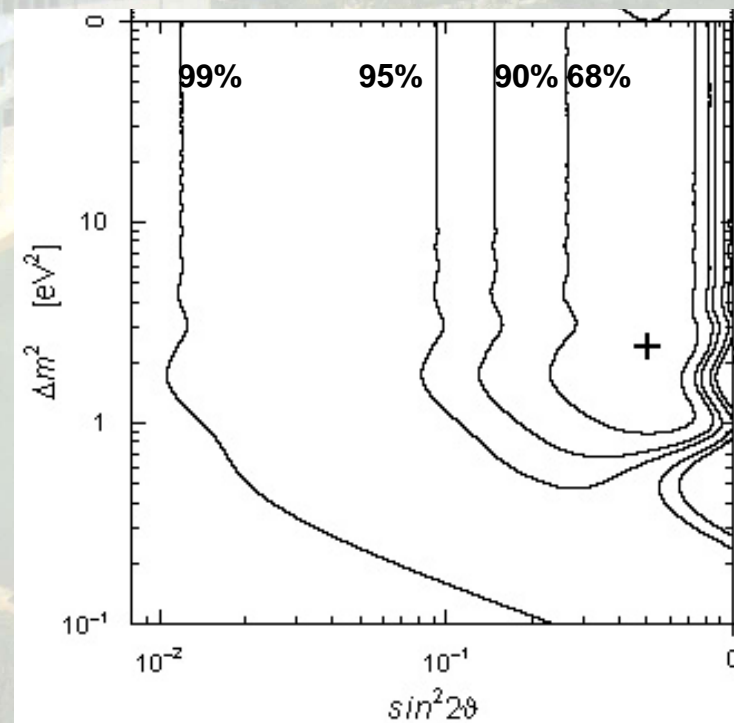
ガリウム太陽 ν 実験の較正



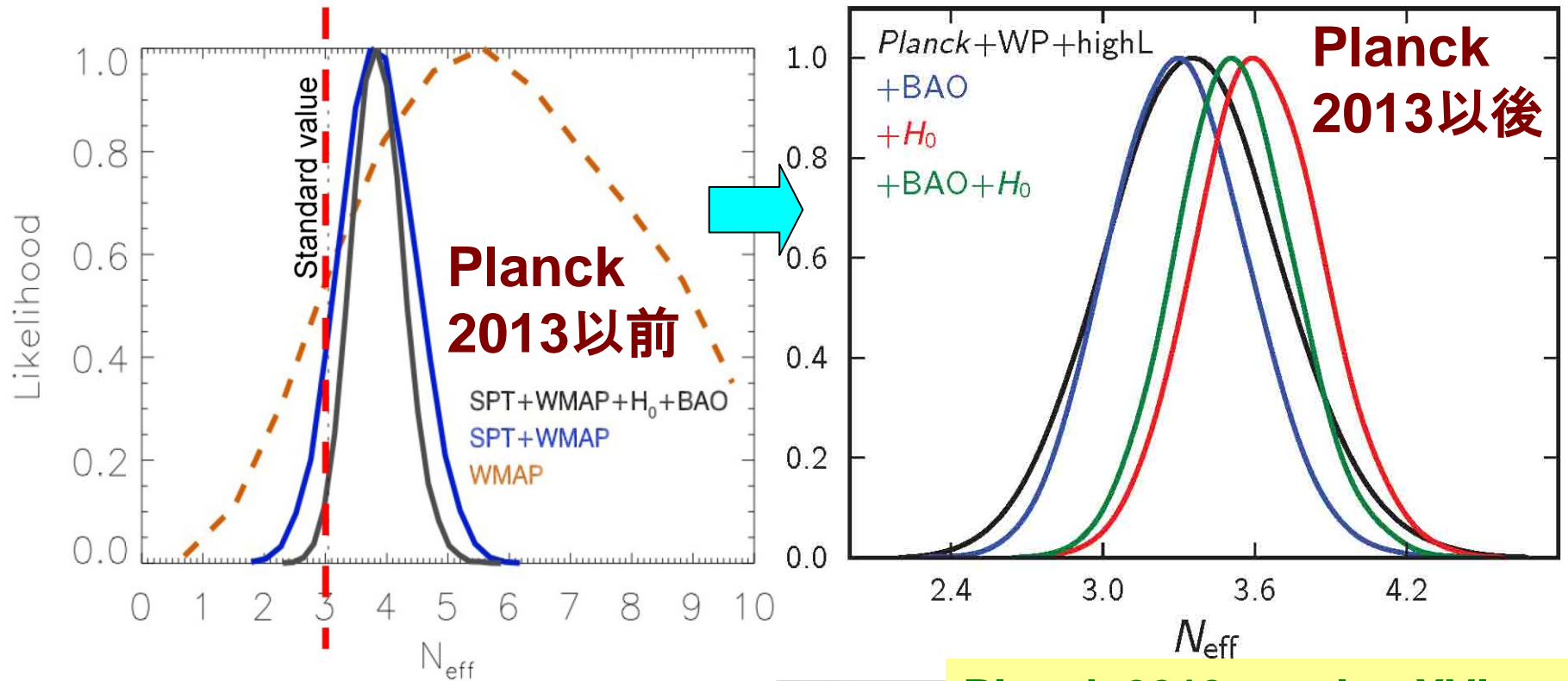
$$R \equiv \frac{p(\text{measured})}{p(\text{predicted})} = 0.88 \pm 0.05(1\sigma)$$

Giunti-Laveder, 1006.3244v3 [hep-ph]

ガリウム太陽 ν 実験の較正の結果
は active-sterile ν 振動による ν_e の
消失の兆候と解釈することが可能



●最近の宇宙の観測(CMB+LSS)→ニュートリノの数 > 3 ?



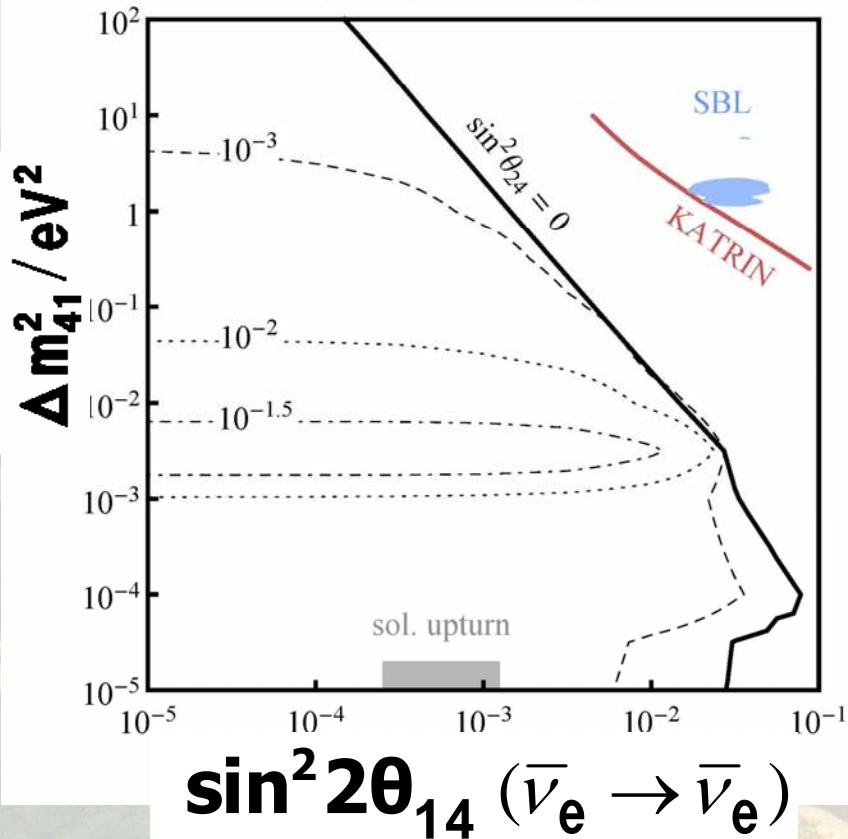
Keisler et al. [South Pole Telescope] 2011

Planck 2013 results. XVI,
Cosmological parameters,
arXiv:1303.5076v1

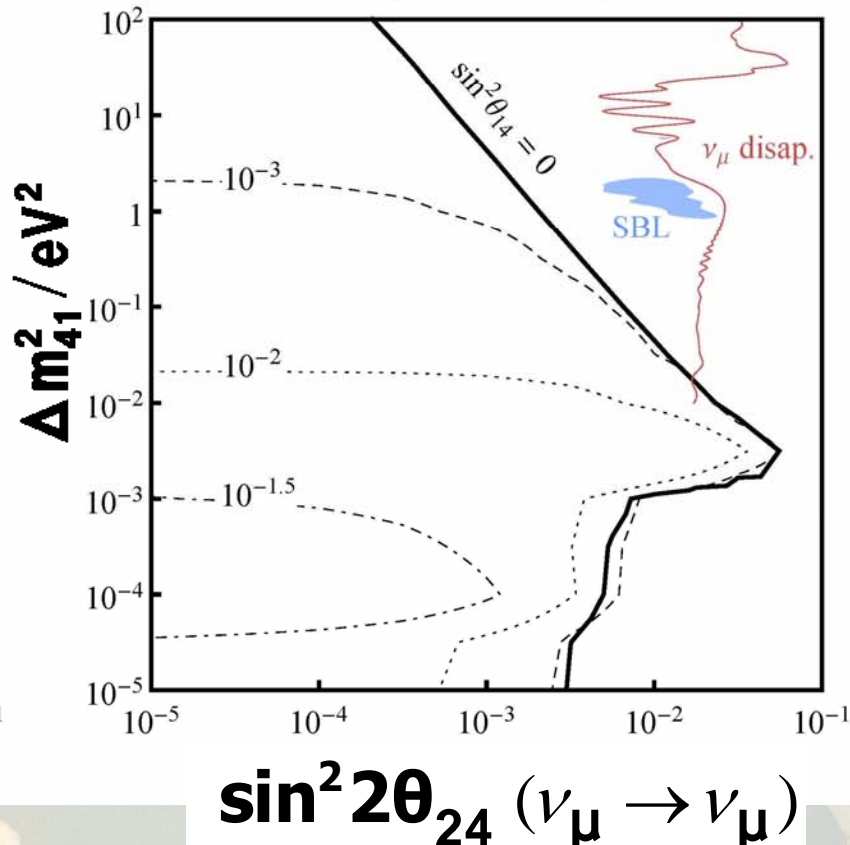
現時点では観測結果同志の間で矛盾があり、ニュートリノの数 $= 3$ (or > 3) を結論するのは時期尚早のように思われる

● 最近の宇宙の観測(Planck2013)→ ν_S 振動は死んだか？

a) $\Delta m_{41}^2 > 0, \sin^2 \theta_{34} = 0$



b) $\Delta m_{41}^2 > 0, \sin^2 \theta_{34} = 0$

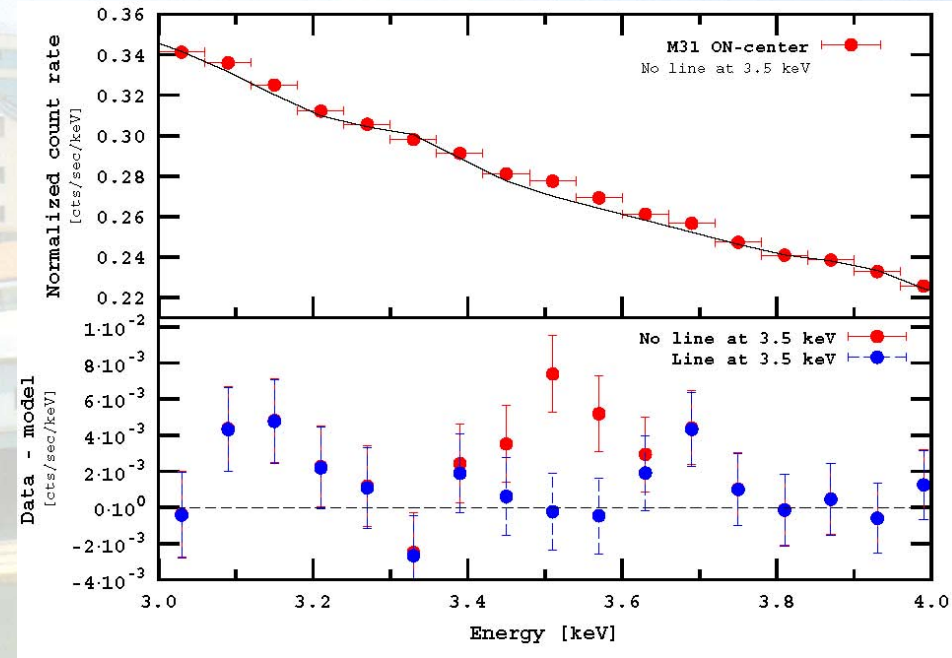
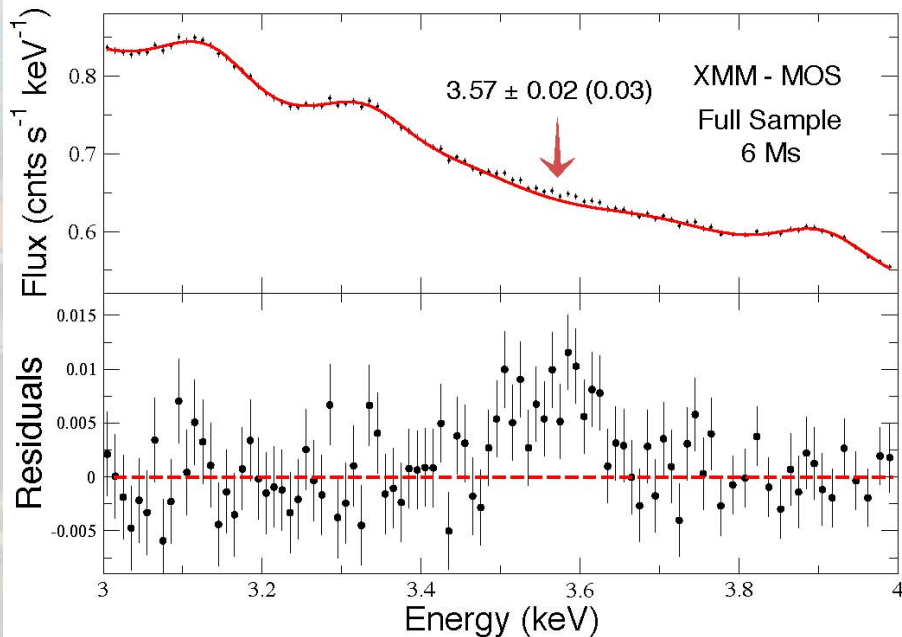


Mirizzi, Mangano, Saviano, Borriello, Giunti, Miele, Pisanti, arXiv:1303.5368

→ 仮にPlanckの否定的結果が最終的に確定しても、レプトンの非対称性等のため ν_S が熱平衡に達していない可能性は残っている

3.1.2 質量 O (keV)のステライル ν (ν_s)

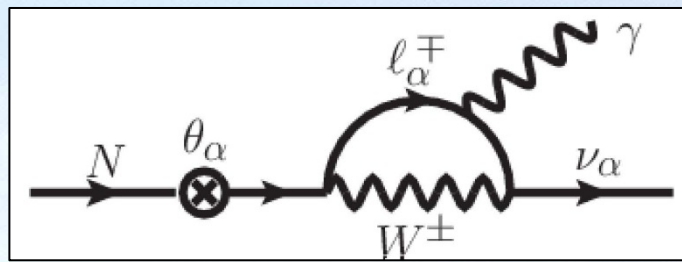
銀河団のX線観測で $E \sim 3.5$ keVの輝線が見つかった



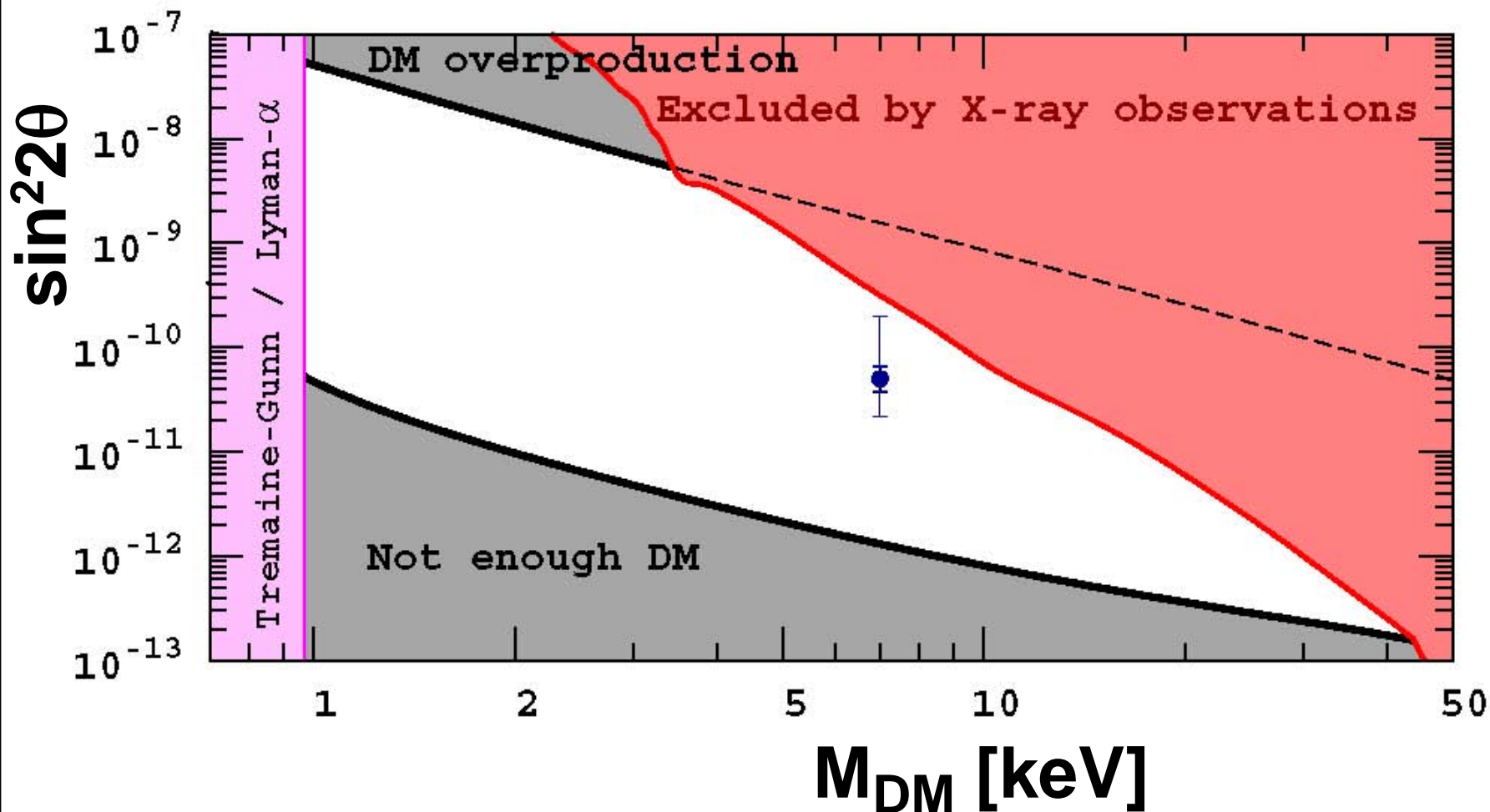
Bulbul, Markevitch, Foster,
Loewenstein, Randall, arXiv:1402.2301

Boyarsky, Ruchayskiy, Iakubovskiy,
Franse, 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のか？



$N \rightarrow \nu \gamma$



Boyarsky, Ruchayskiy, Iakubovskyi, Franse, arXiv:1402.4119

理論的に必要だと思われるRH ν がステライル ν ならば経済的

**“The ν MSM, Dark Matter and Neutrino Masses”,
Asaka, Blanchet, Shaposhnikov, PL B631 (2005) 151**

$$\delta\mathcal{L} = \bar{N}_I i\partial_\mu \gamma^\mu N_I - f_{I\alpha}^\nu \Phi \bar{N}_I L_\alpha - \frac{M_I}{2} \bar{N}_I^c N_I + h.c.$$

しかし、模型構築の際、以下の問題を解決する必要がある：

- (i) この場合のRH ν が通常想定されている質量スケール ($\sim 10^{10}\text{GeV}$) に比べてなぜそんなに軽いのか？**
- (ii) 通常の ν との混合がなぜ小さいか？**
- (iii) DMとして通用するだけの長寿命を持てるか？**

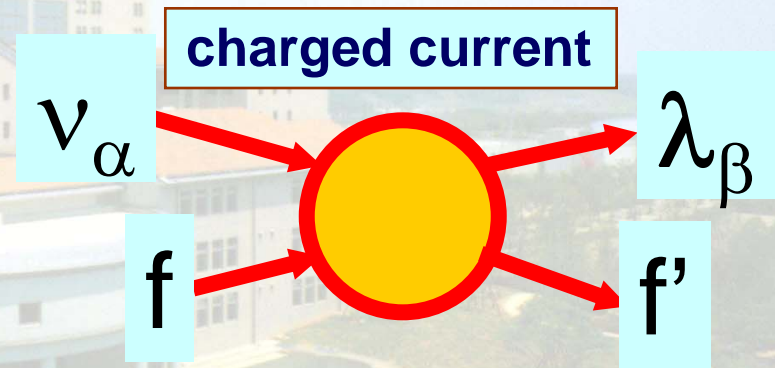
→上記を解決する模型は提案されている：

Ishida, Jeong, Takahashi, Phys.Lett. B732 (2014) 196

3.2 非標準的相互作用

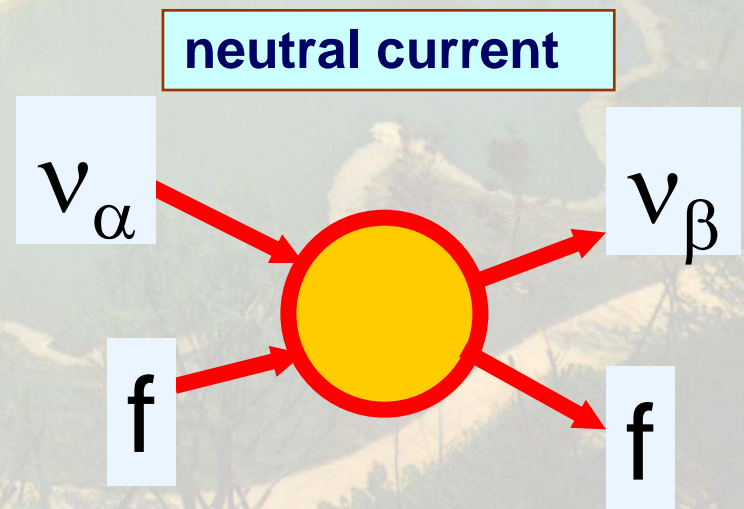
●生成・検出中の非標準的相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = G_F \epsilon_{\alpha\beta}^{ff'} \bar{\nu}_\alpha \gamma^\rho \ell_\beta \bar{f} \gamma_\rho f'$$



●伝播中の非標準的相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = G_{NP}^{\alpha\beta} \bar{\nu}_\alpha \gamma^\mu \nu_\beta \bar{f} \gamma_\mu f'$$



3.3 ユニタリー性の破れ

Violation of unitarity (Minimal Unitarity Violation)

ある種のシーソーモデルでは右巻 ν_R の効果が無視できるほど小さくならず、ユニタリー性の破れが測定可能になる場合もある:

$$L = \frac{1}{2} \left(i \bar{\nu}_\alpha \not{\partial} K_{\alpha\beta} \nu_\beta - \bar{\nu}^c_\alpha M_{\alpha\beta} \nu_\beta \right) - \frac{g}{\sqrt{2}} \left(W_\mu^+ \bar{l}_\alpha \gamma^\mu P_L \nu_\alpha + h.c. \right) + \dots$$

rescaling ν
→

$$L = \frac{1}{2} \left(i \bar{\nu}_i \not{\partial} \nu_i - \bar{\nu}^c_i m_{ii} \nu_i \right) - \frac{g}{\sqrt{2}} \left(W_\mu^+ \bar{l}_\alpha \gamma^\mu P_L N_{\alpha i} \nu_i \right) + \dots$$

N : 非ユニタリー混合行列

シナリオ	3世代 ユニタ リー性	効果の大きさの現象論 的制約(標準的効果との 比)
軽いステライル ν	×	$O(10\%)$
生成・検出中の非標 準的相互作用	×	$O(1\%)$
伝播中の非標準的相 互作用	○	$e-\tau: O(100\%)$ それ以外: $O(1\%)$
重い粒子に起因する ユニタリー性の破れ	×	$O(0.1\%)$

**T2Kを始めとする将来の ν 実験でこれらのシナリオに
対する発見・制限の改善の可能性がまだまだある。**

4. まとめ

標準的3世代シナリオと非標準的なシナリオに対する現象論について概観した。

標準的3世代シナリオ

- **混合角度**
- **質量パターン**
- **CP位相**

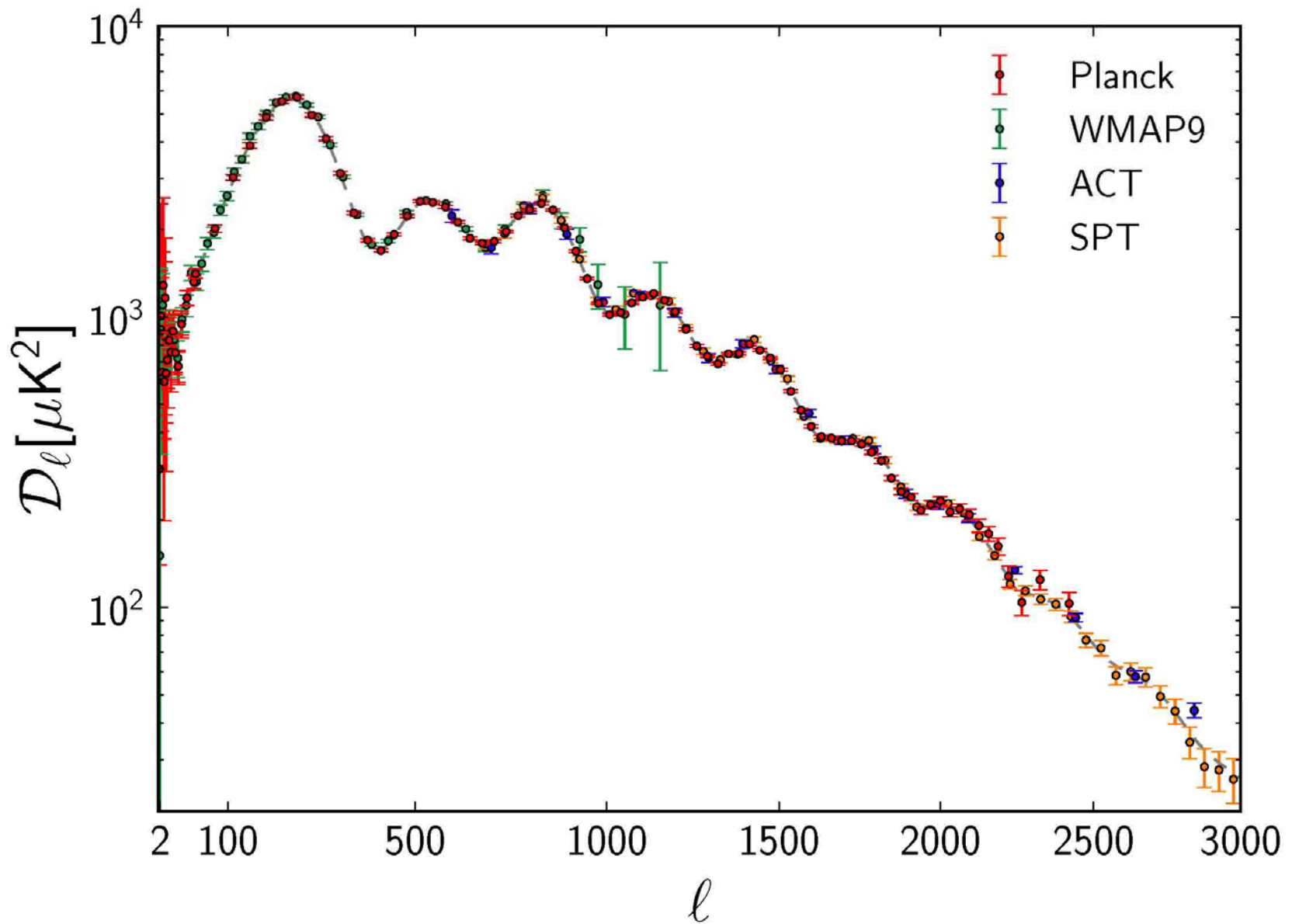
非標準的シナリオ

- **ステライル ν**
- **非標準的相互作用**
- **ユニタリー性の破れ**

T2Kを始めとする実験で非標準的シナリオに対する発見・制限の改善の可能性がまだまだある。

An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, light-colored building with a curved facade and a prominent entrance with columns is situated on a hillside. A large, irregularly shaped pond is located in front of the building. The campus is surrounded by greenery and other buildings in the background under a blue sky with scattered clouds.

Backup slides



Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results, arXiv:1303.5062v1

Differences in values of CP phases

$$\theta_{13} := \theta_{13}(\text{true}), \quad \theta_{13}' := \theta_{13}(\text{false})$$

$$\delta := \delta(\text{true}), \quad \delta' := \delta(\text{false})$$

intrinsic degeneracy

$$x' \sin \delta' = x \sin \delta - \frac{(f - \bar{f})(x^2 - x'^2)}{4yg \sin \Delta}$$

$$x' \cos \delta' = x \cos \delta + \frac{(f + \bar{f})(x^2 - x'^2)}{4yg \cos \Delta}$$

$$x'^2 - x^2 = \frac{4yg \sin 2\Delta [yg \sin 2\Delta + xf \sin(\Delta - \delta) + x\bar{f} \sin(\Delta + \delta)]}{f^2 + \bar{f}^2 - 2f\bar{f} \cos 2\Delta}$$

Barger Marfatia Whisnant Phys.Rev.D65:073023,2002

sign degeneracy

$$\sin^2 2\theta'_{13} = \sin^2 2\theta_{13} \tan^2 \theta_{23} + \frac{\alpha^2 g^2 \sin^2 2\theta_{12}}{f \bar{f}} (1 - \tan^2 \theta_{23}),$$
$$\sin 2\theta'_{13} \sin \delta' = \sin 2\theta_{13} \sin \delta + \frac{\alpha g (f - \bar{f}) \sin 2\theta_{12} \cot 2\theta_{23}}{f \bar{f} \sin \Delta},$$

octant degeneracy

$$x'^2 = \frac{x^2 (f^2 + \bar{f}^2 - f \bar{f}) - 2yg (f - \bar{f}) x \sin \delta \sin \Delta}{f \bar{f}},$$
$$x' \sin \delta' = x \sin \delta \frac{f^2 + \bar{f}^2 - f \bar{f}}{f \bar{f}} - \frac{x^2}{\sin \Delta} \frac{f^2 + \bar{f}^2}{f \bar{f}} \frac{f - \bar{f}}{2yg}.$$

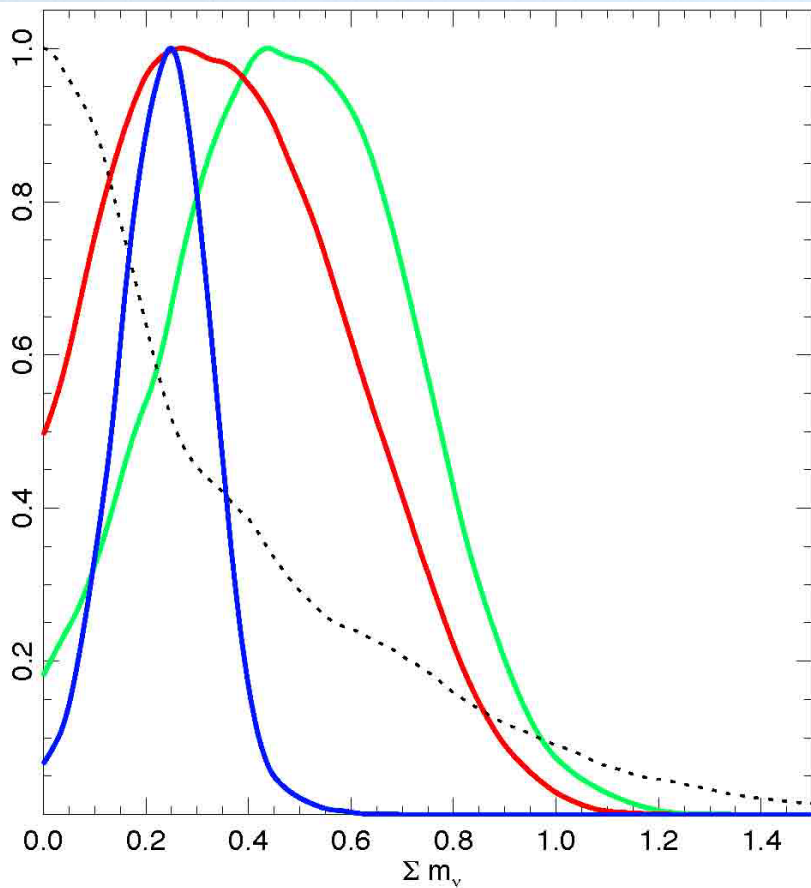
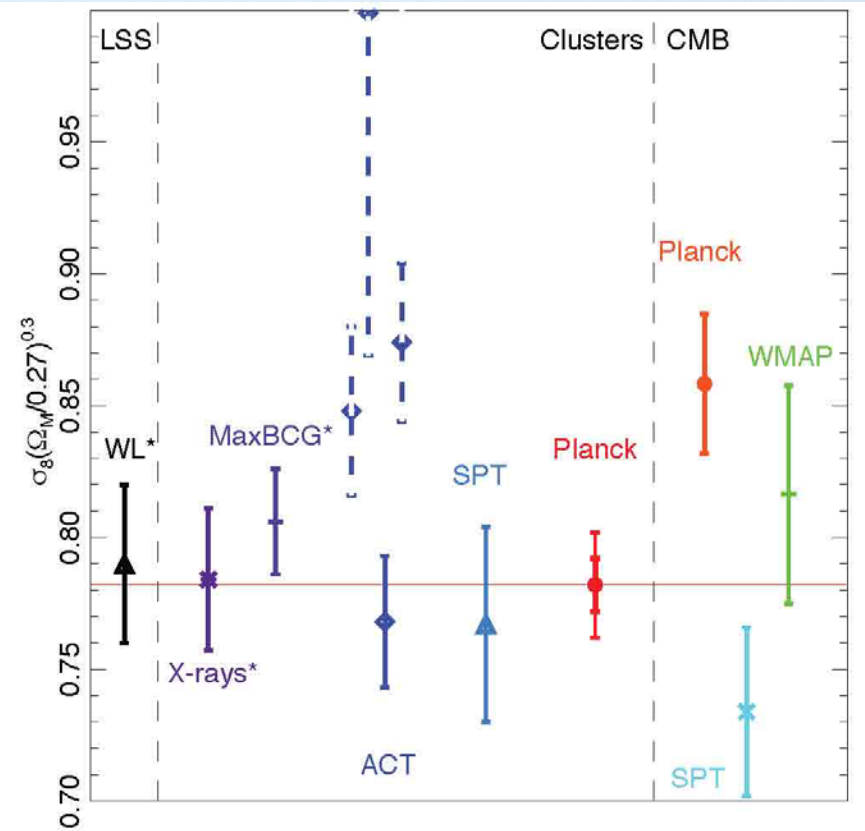
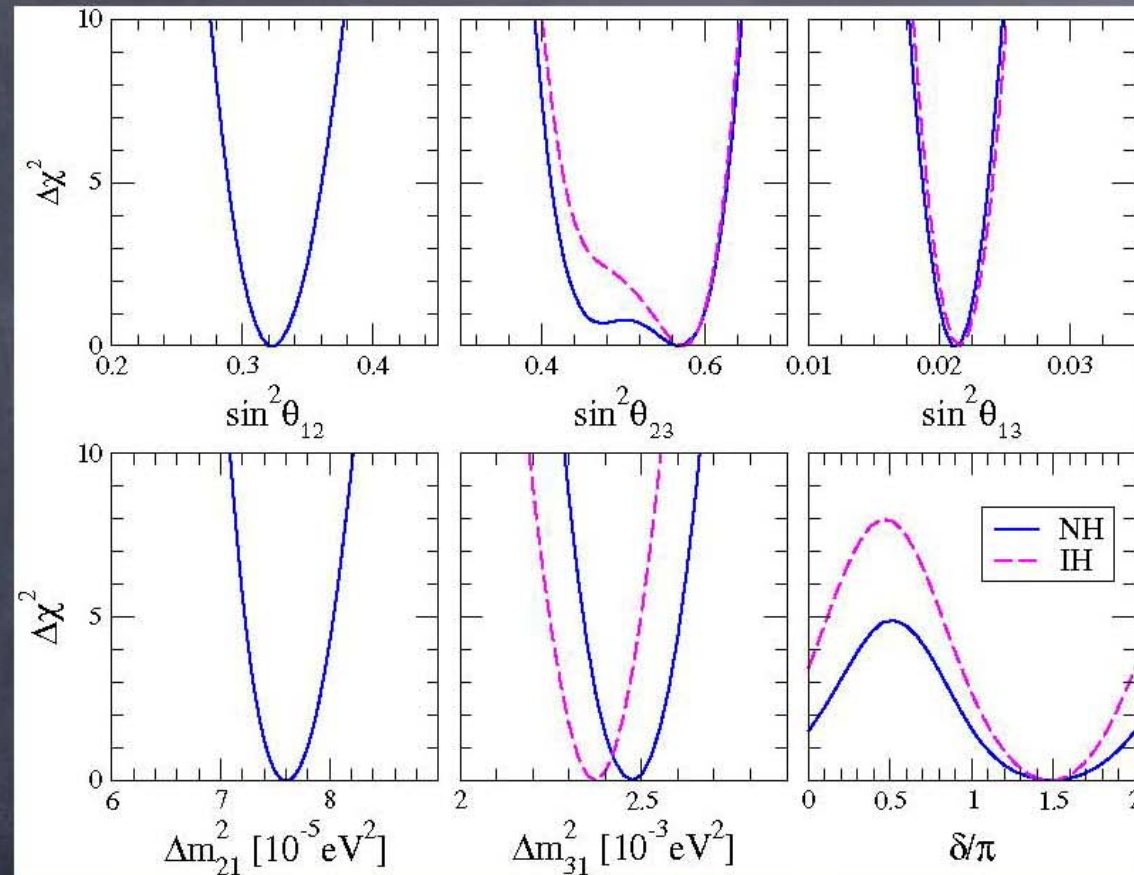


Fig. 12. Cosmological constraints when including neutrino masses Σm_ν from: *Planck* CMB data alone (black dotted line); *Planck* CMB + SZ with $1 - b$ in $[0.7, 1]$ (red); *Planck* CMB + SZ + BAO with $1 - b$ in $[0.7, 1]$ (blue); and *Planck* CMB + SZ with $1 - b = 0.8$ (green).



Planck 2013 results. XX. Cosmology from Sunyaev–Zeldovich cluster counts, 1303.5080v1

Updated global fit summary



parameter	best fit $\pm 1\sigma$	
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{eV}^2]$	$7.60^{+0.19}_{-0.18}$	2.3%
$ \Delta m_{31}^2 [10^{-3} \text{eV}^2]$ (NH)	$2.48^{+0.05}_{-0.07}$	2.4%
$ \Delta m_{31}^2 [10^{-3} \text{eV}^2]$ (IH)	$2.38^{+0.05}_{-0.06}$	
$\sin^2\theta_{12}/10^{-1}$	3.23 ± 0.16	5%
$\sin^2\theta_{23}/10^{-1}$ (NH)	$5.67^{+0.32}_{-1.15}$	7.3%
$\sin^2\theta_{23}/10^{-1}$ (IH)	$5.73^{+0.25}_{-0.38}$	
$\sin^2\theta_{13}/10^{-2}$ (NH)	$2.10^{+0.14}_{-0.09}$	5.4%
$\sin^2\theta_{13}/10^{-2}$ (IH)	$2.16^{+0.10}_{-0.12}$	
δ/π (NH)	$1.48^{+0.43}_{-0.39}$	5.2%
δ/π (IH)	$1.48^{+0.28}_{-0.29}$	

• No indication for correct mass ordering: $\Delta\chi^2(\text{IH} - \text{NH}) = -0.6$

Tortola@ICHEP2014

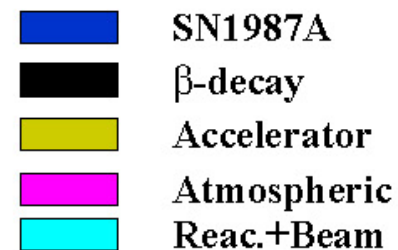
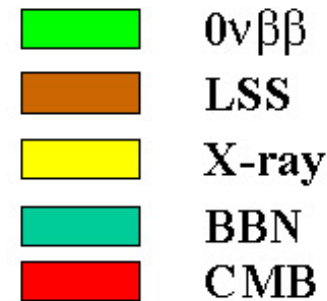
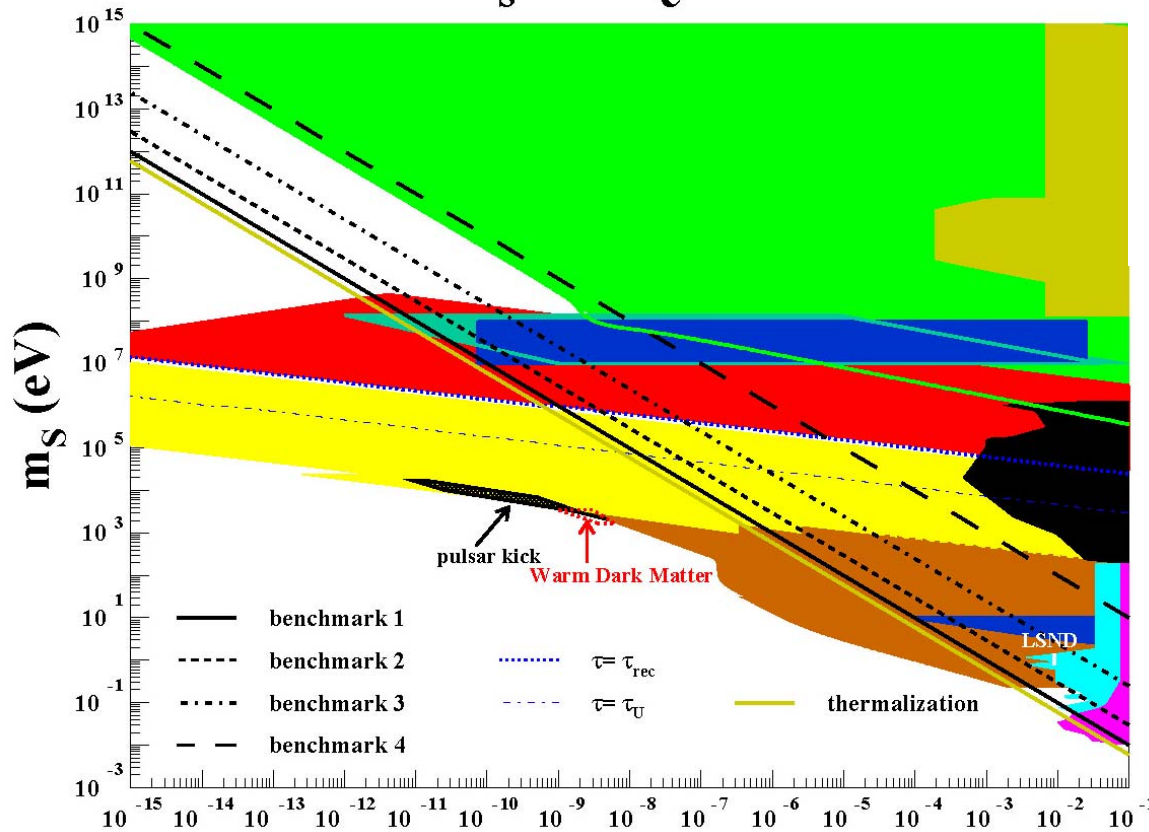
Cosmological constraints on light sterile neutrinos ($s \leftrightarrow e$)

Smirnov & Zukanovich -Funchal, Phys.Rev.D74:013001,2006

$$\nu_s \leftrightarrow \nu_e$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_s)$$

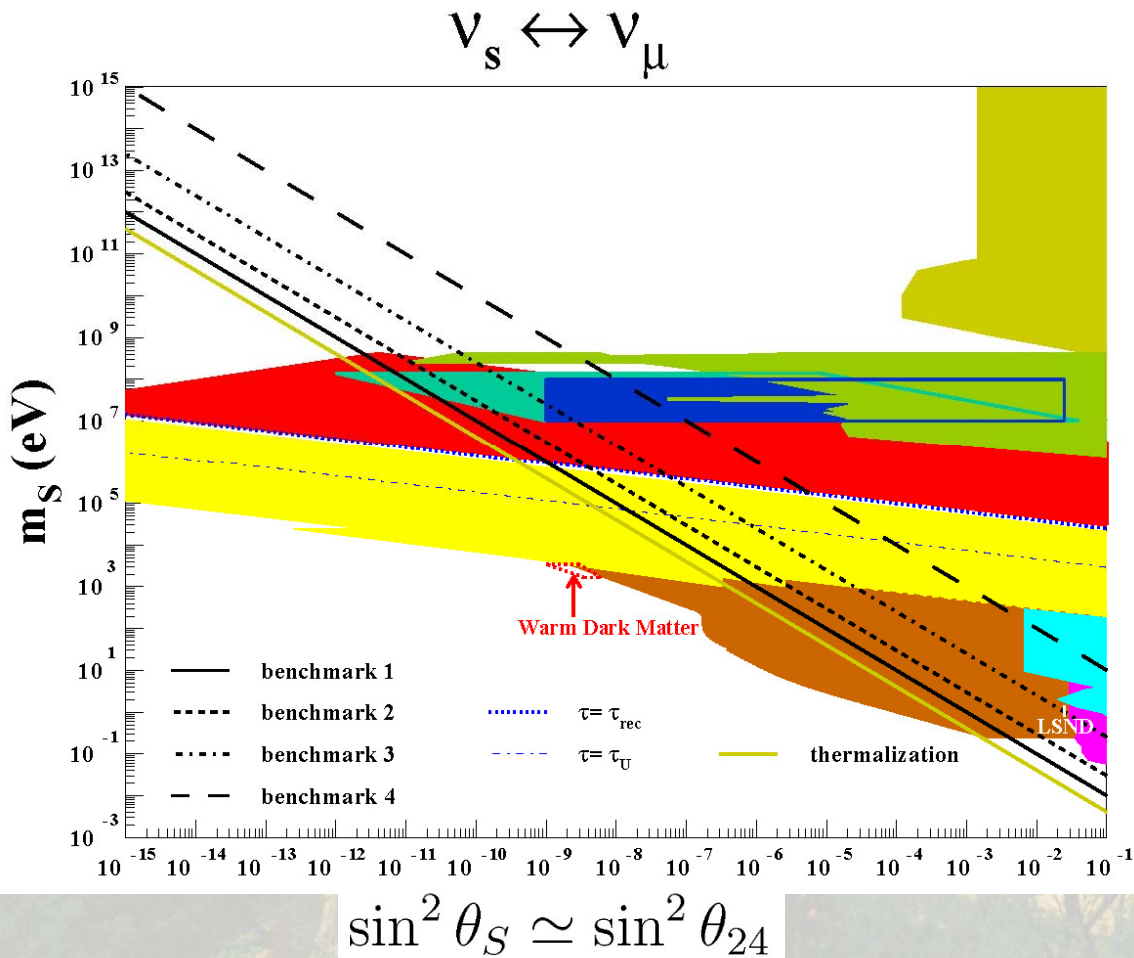
$$\begin{aligned} &\simeq 4|U_{e4}U_{s4}|^2 \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E) \\ &= c_{24}^2 c_{34}^2 \sin^2 2\theta_{14} \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E) \\ &\simeq \sin^2 2\theta_{14} \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E) \end{aligned}$$



$$\sin^2 \theta_S \simeq \sin^2 \theta_{14}$$

Cosmological constraints on light sterile neutrinos ($s \leftrightarrow \mu$)

Smirnov & Zukanovich -Funchal, Phys.Rev.D74:013001,2006

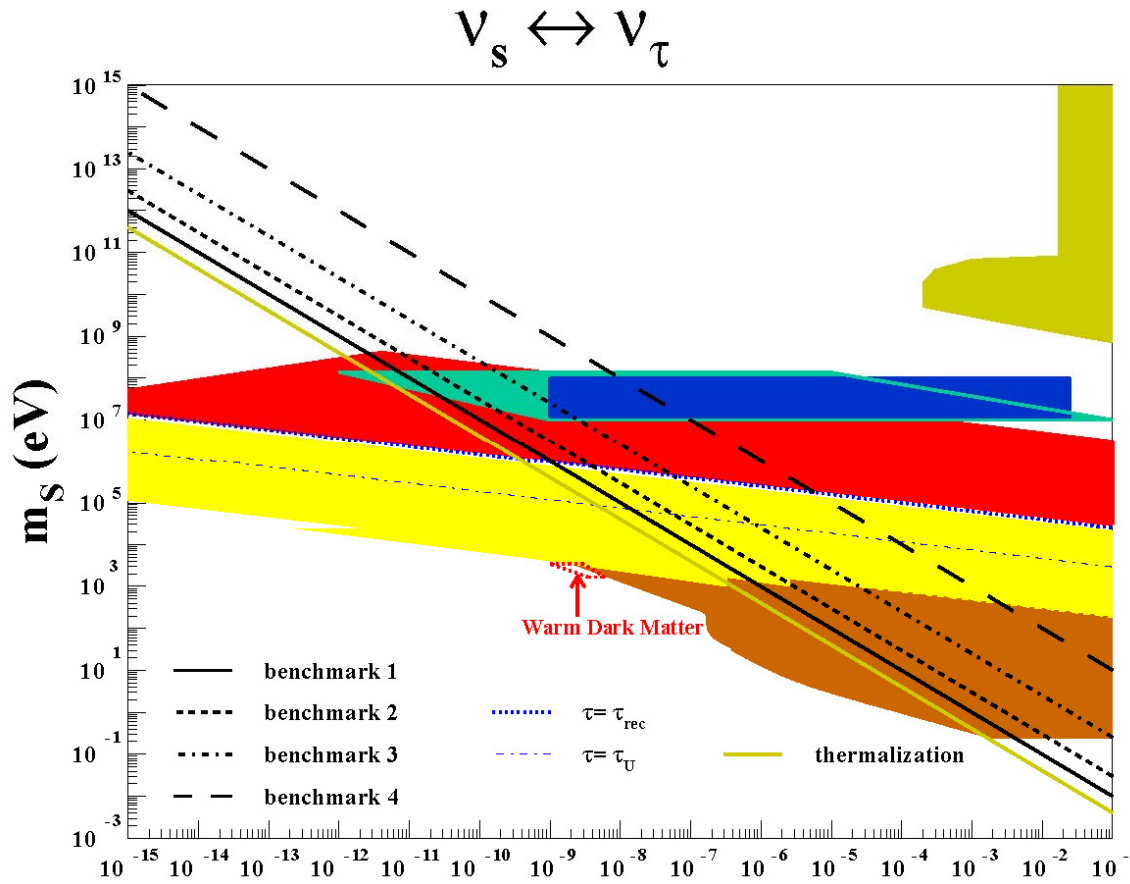


$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_s) &\simeq 4|U_{\mu 4} U_{s 4}|^2 \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E) \\
 &= c_{14}^4 c_{34}^2 \sin^2 2\theta_{24} \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E) \\
 &\simeq \sin^2 2\theta_{24} \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E)
 \end{aligned}$$

- | | |
|--|--------------------|
| | LSS |
| | X-ray |
| | BBN |
| | CMB |
| | SN1987A |
| | Accelerator |
| | Decays |
| | Atmospheric |
| | Beam |

Cosmological constraints on light sterile neutrinos ($s \leftrightarrow \tau$)

Smirnov & Zukanovich -Funchal, Phys.Rev.D74:013001,2006



$$P(\nu_\tau \rightarrow \nu_s)$$

$$\begin{aligned} &\simeq 4|U_{\tau 4} U_{s 4}|^2 \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E) \\ &= c_{24}^4 \sin^2 2\theta_{34} \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E) \\ &\simeq \sin^2 2\theta_{34} \sin^2(\Delta m_{41}^2 L/4E) \end{aligned}$$

