ニュートリノ振動研究の現状と研究用原子炉によるステライルニュートリノ探索の可能性

都立大物理・安田修

FPUR2022@RCNP

2022年5月30日

1. 序

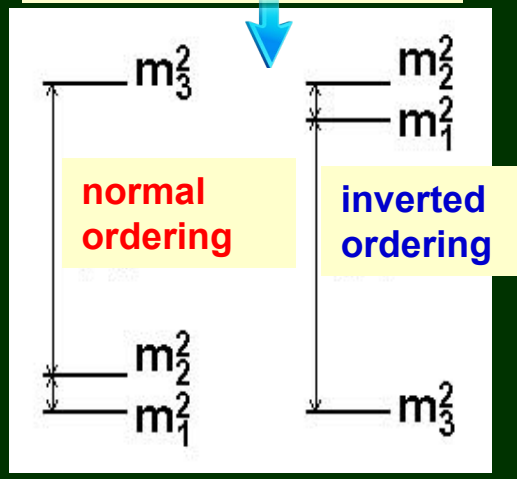
1.1 3世代ν 振動の枠組み

混合行列

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

混合角 θ_{12}, θ_{23}, θ_{13}と CP 位相 δに依存

両方の質量パターンが許容されている



1.2 現時点までにわかっていること(1)

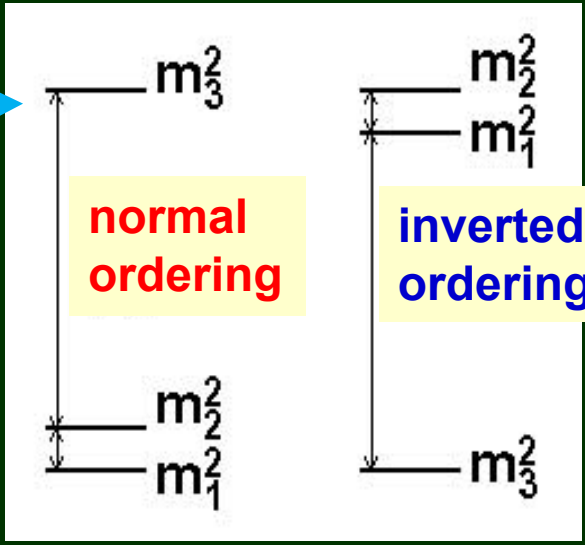
ν_{solar}+KamLAND (原子炉) → $\theta_{12} \cong \frac{\pi}{6}, \Delta m_{21}^2 \cong 8 \times 10^{-5} eV^2$

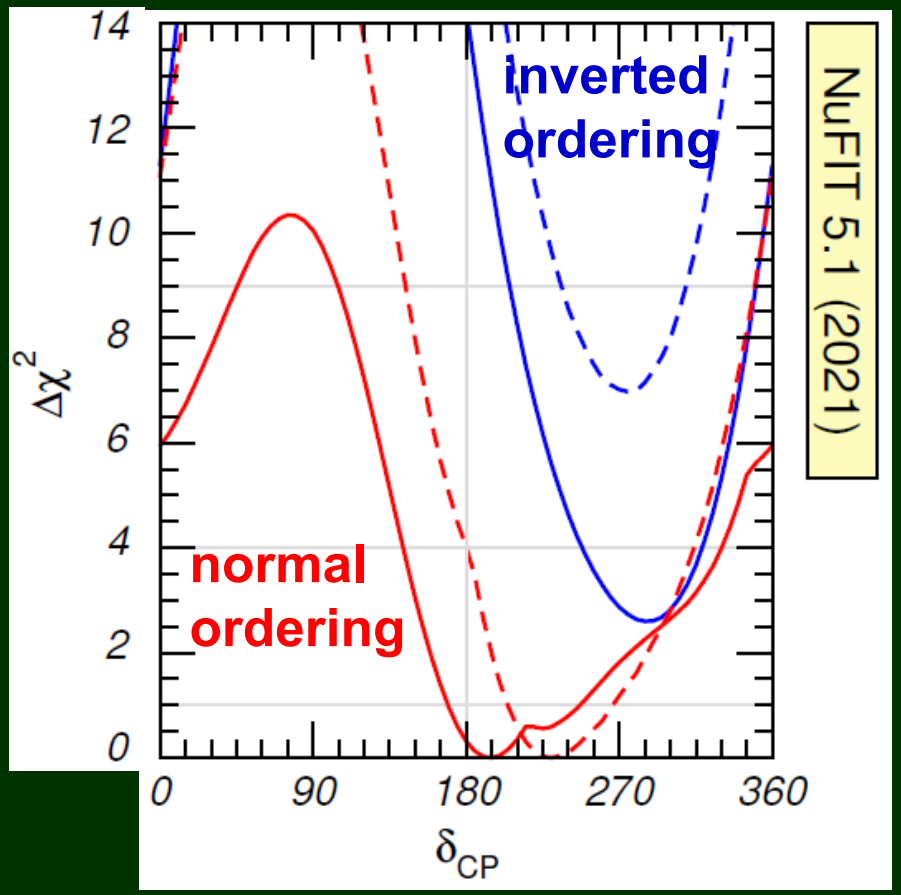
ν_{atm}+T2K+NOvA(加速器) → $\theta_{23} \cong \frac{\pi}{4}, |\Delta m_{32}^2| \cong 2.5 \times 10^{-3} eV^2$

Daya Bay+DCHOOZ+Reno(原子炉)+T2K+NOvA(加速器)+others → $\theta_{13} \cong 0.15 \pm 0.01$

1.2 現時点までにわかっていること(2)

- 両方の質量パターンが許容されている
- δ～-π/2がbest-fitになっているがまだ確定した訳ではない



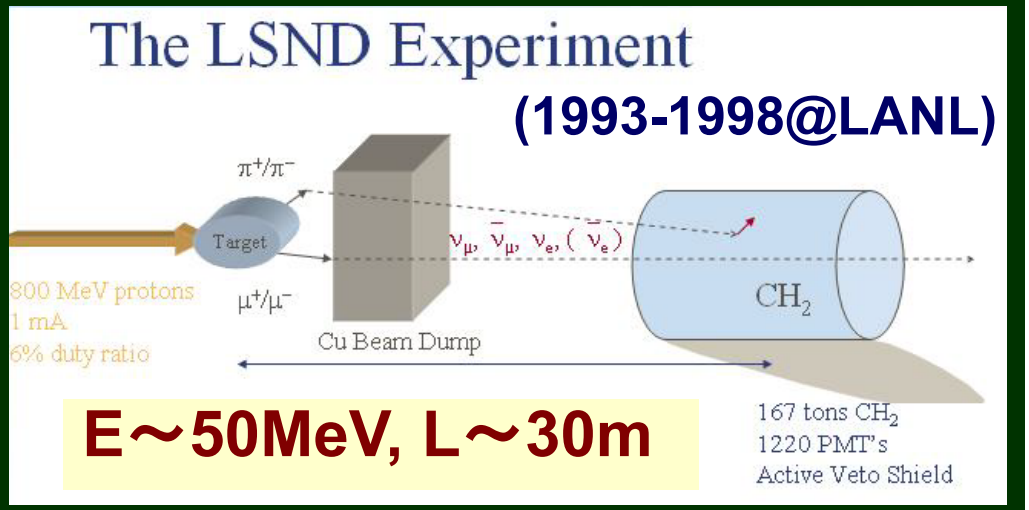


Gonzalez-Garcia, Maltoni, Schwetz, arXiv:2111.03086v2 [hep-ph]

1.3 3世代間のν振動を拡張する可能性

● LSND実験の結果

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

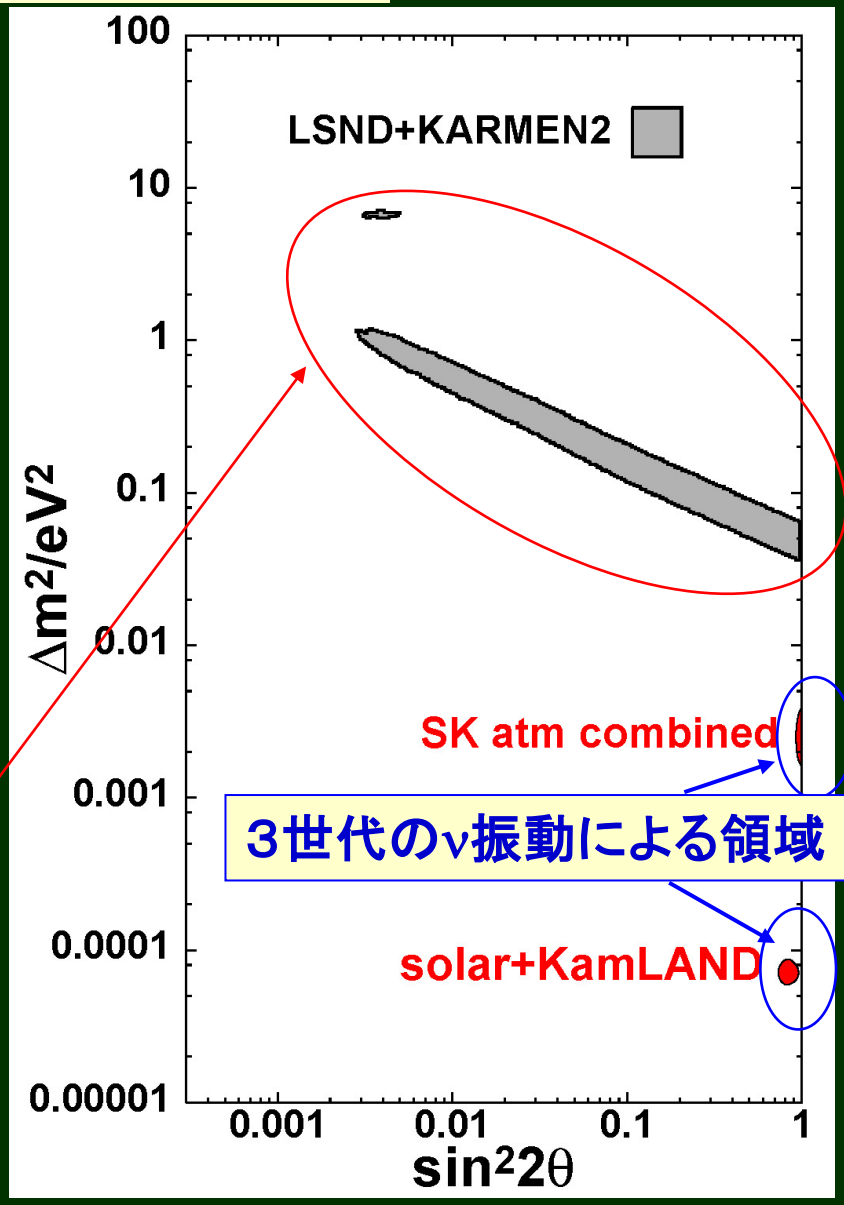


E～50MeV, L～30m

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

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

これは3世代間のν振動では説明不可能



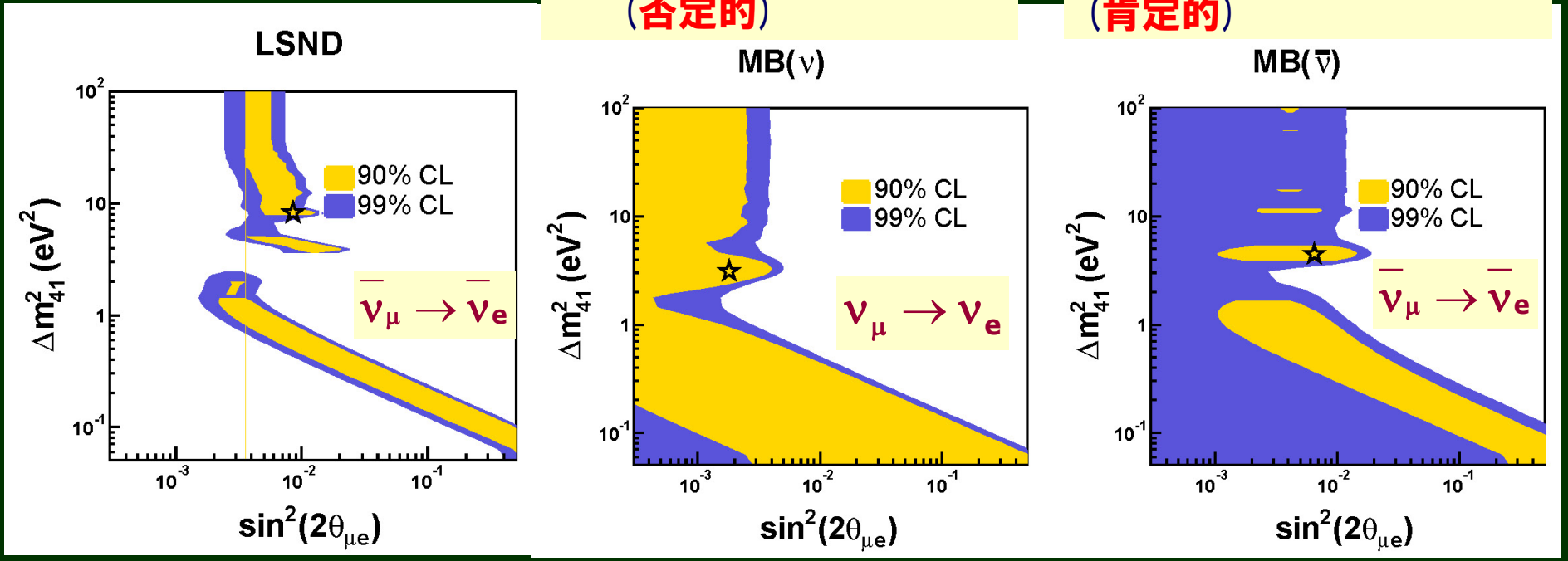
● MiniBooNE実験

LSNDを追試するための実験なはずだったが、
結論はどっちつかずになっている

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

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）



1995
LSNDは本当か？

2007
LSNDは間違っていた！

2010
LSNDはあっていた？

● 原子炉ニュートリノ異常(RAA)

Mueller et al, 2011; Huber 2011

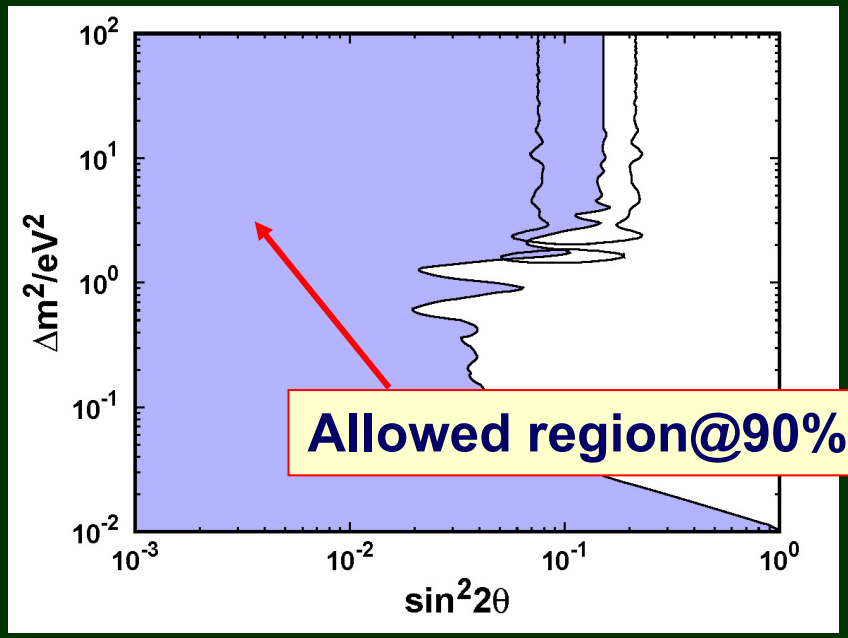
2011年に原子炉νフラックスの再評価が出て、過去のデータはむしろ $\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e$ の欠損を示唆しているという解釈が現れた

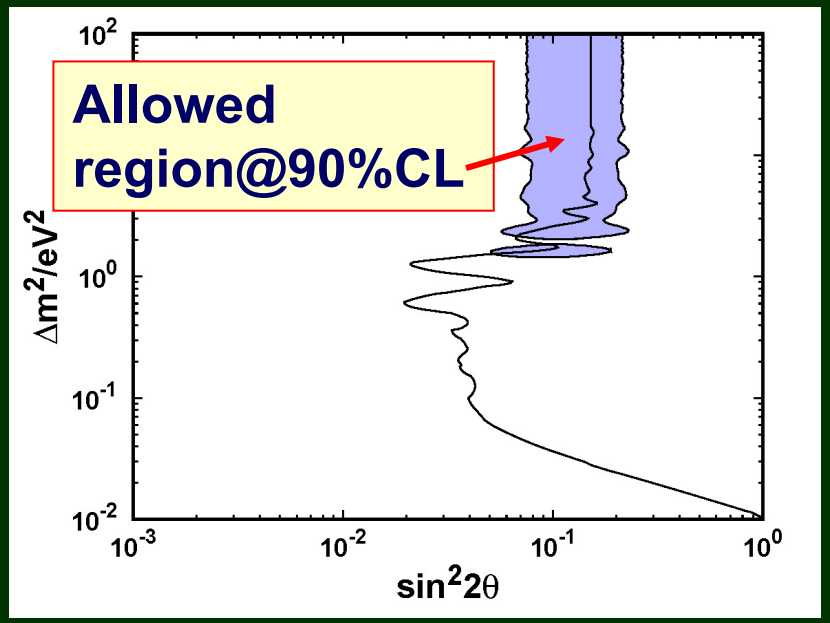
Cf. フラックス規格化の不定性は3%以上
Hayes et al, arXiv:1309.4146 [nucl-th]

(新フラックス)＝ (旧フラックス)×1.03

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

Bugey(原子炉)+etc：
肯定的 with new flux？



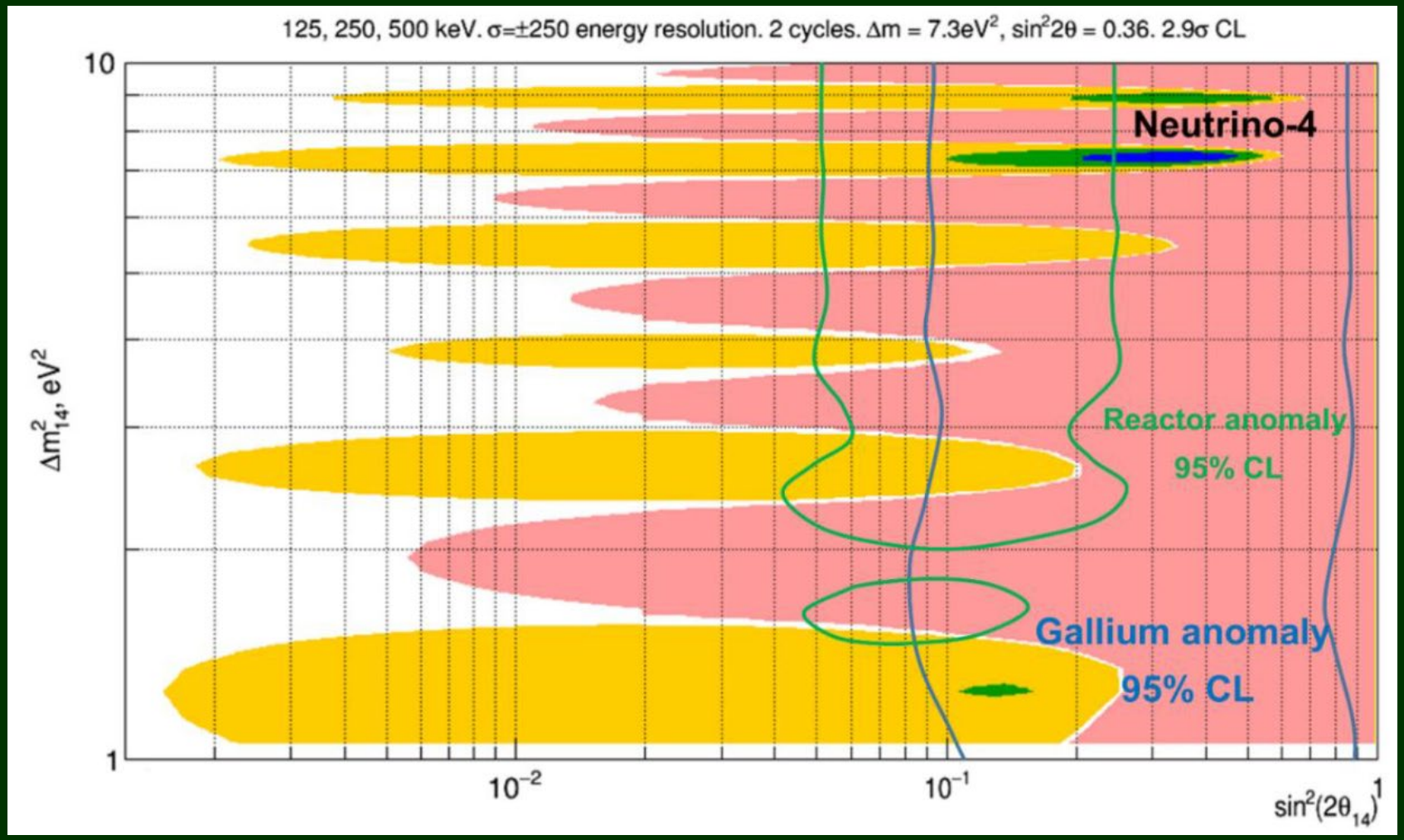


$\Delta m^2_{41} = O(1)\,eV^2$
の領域にはν振動はない

$\Delta m^2_{41} = O(1)\,eV^2$ の領域
にν振動があるかもしれない

近年Neutrino-4実験が肯定的結果を出している

Neutrino-4, arXiv: 2005.05301 [hep-ex]



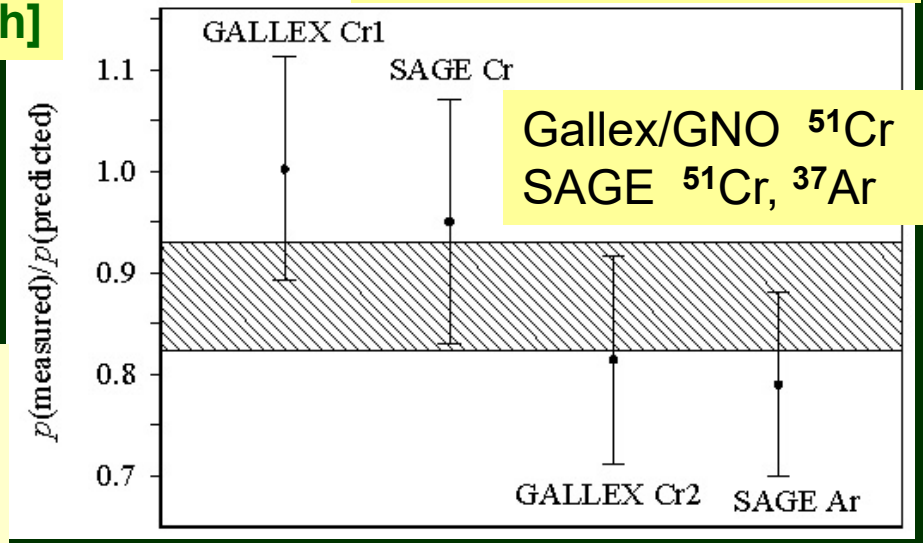
● ガリウム異常

Giunti-Laveder, 1006.3244v3 [hep-ph]

SAGE, nucl-ex/0512041

ガリウム太陽 ν 実験の較正

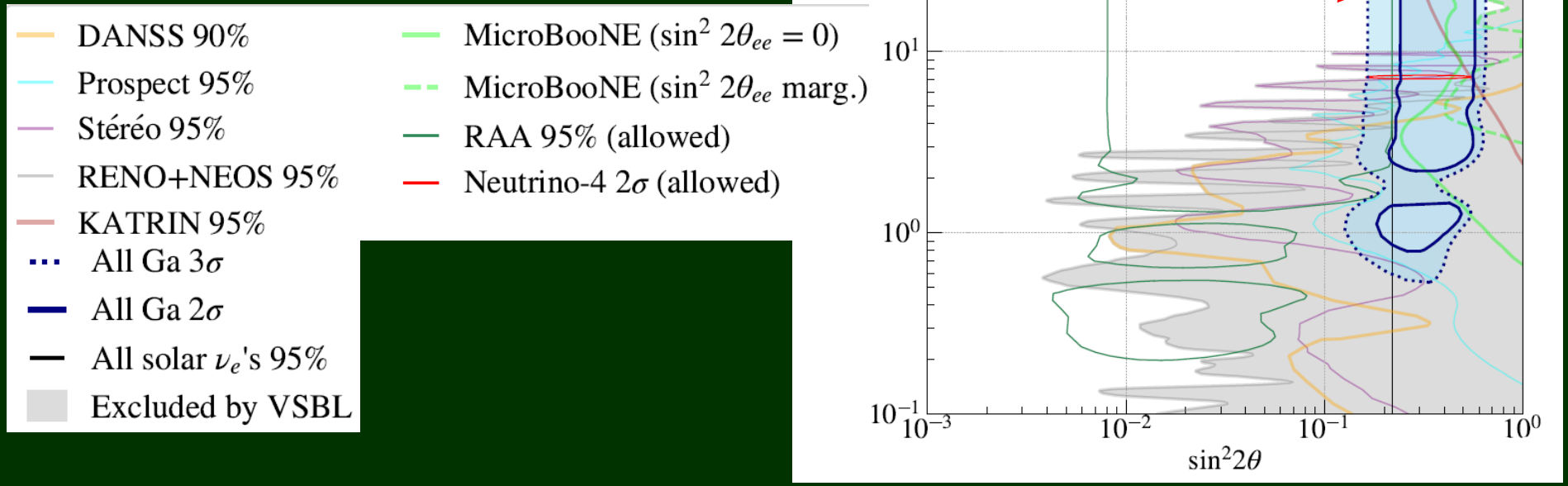
$$R \equiv \frac{\mathrm{p(measured)}}{\mathrm{p(predicted)}} = 0.88 \pm 0.05(1\sigma)$$



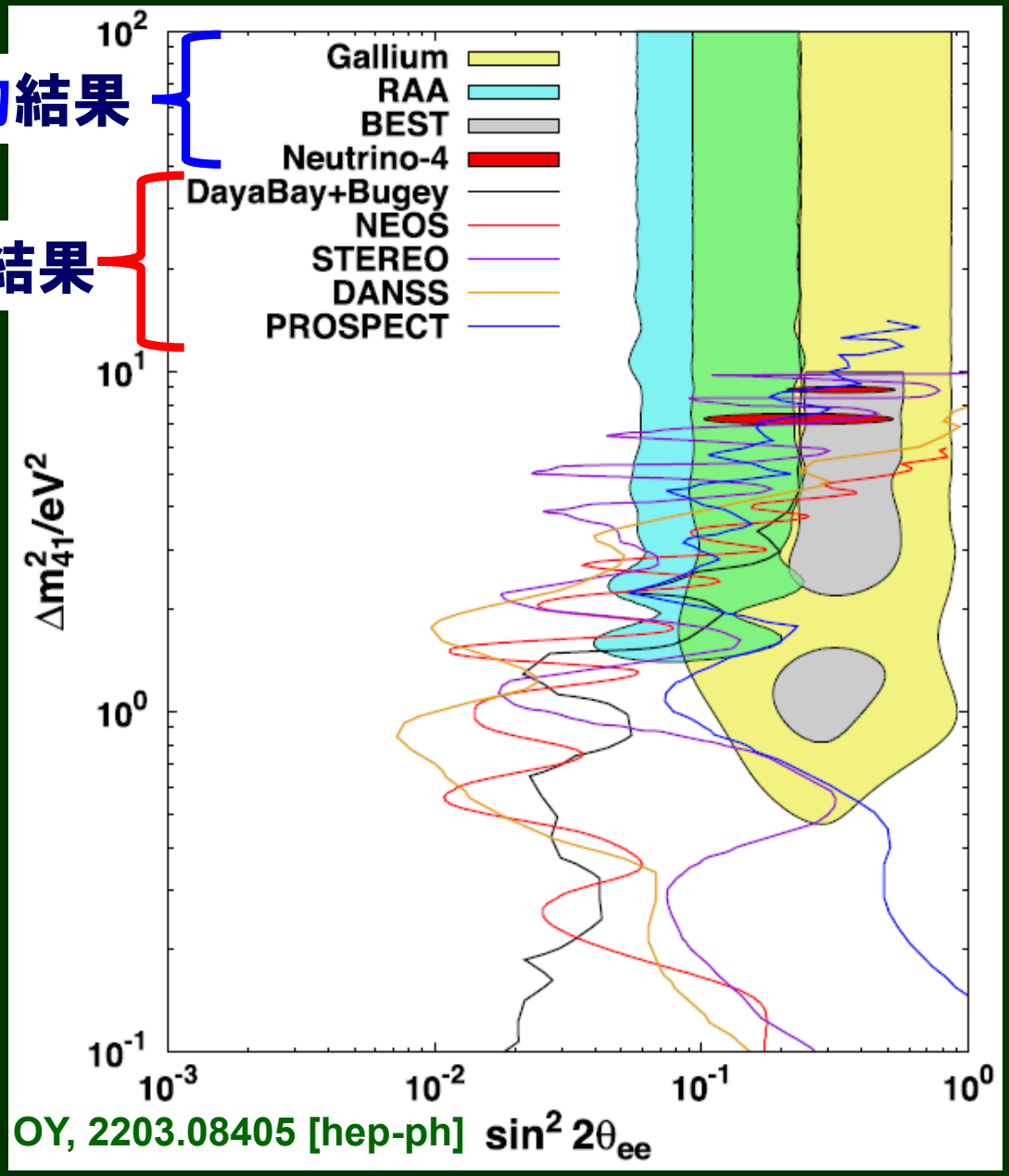
ガリウム太陽 ν 実験の較正の結果はactive-sterile ν振動によるν_eの消失の兆候と解釈することが可能

BEST, arXiv:2109.11482v2 [nucl-ex]

近年BEST実験が肯定的結果を出している

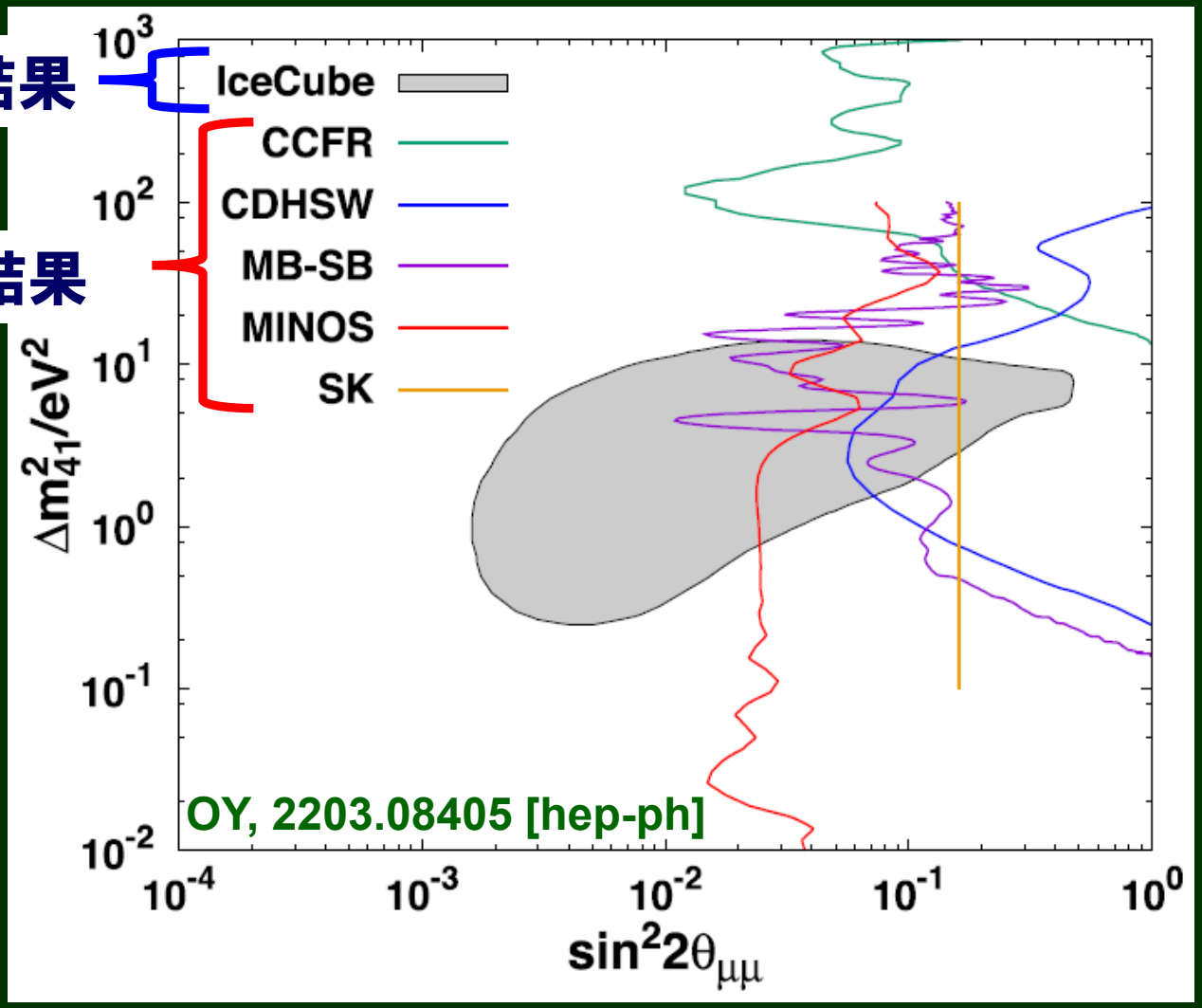


$\overset{(-)}{\nu}_e \to \overset{(-)}{\nu}_e$ の現状



OY, 2203.08405 [hep-ph]

$\overset{(-)}{\nu}_\mu \to \overset{(-)}{\nu}_\mu$ の現状

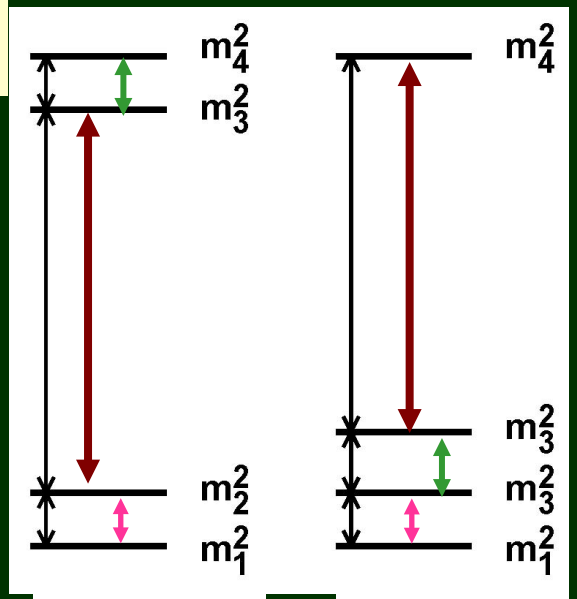


IceCube実験が1.7σで肯定的結果を出してはいるが、強い証拠とは考えられていない

1.5 ４世代ニュートリノ混合の現象論

- 太陽ν・KamLAND（原子炉ν）
  $\Rightarrow \Delta m^2_{21} = 8\times10^{-5}\,\mathrm{eV}$
- 大気ν・K2K（加速器ν）
  $\Rightarrow |\Delta m^2_{32}| = 2.5\times10^{-3}\,\mathrm{eV}^2$
- LSND/MB、原子炉ν異常、Ga異常
  $\Rightarrow \Delta m^2_{41} \cong 1\,\mathrm{eV}^2$

Δm^2が3つある4世代パターン



(2+2) - スキーム

(3+1) - スキーム

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（ν_s)とせざるを得ない

(ν_e, ν_μ, ν_τ, ν_s)

現在では太陽ν＋大気νから完全に排除されている

この講演では(3+1)スキームを仮定する

短距離では振動確率は近似的に最大の質量二乗差$\Delta m_{41}{}^2$のみで表される

$$P(\nu_\alpha \to \nu_\beta) \simeq P(\bar{\nu}_\alpha \to \bar{\nu}_\beta) \simeq \left|\delta_{\alpha\beta} - \sin^2 2\theta_{\alpha\beta}\,\sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{41} L}{4E}\right)\right|$$

(3+1)-scheme

Bugey他(原子炉)：否定的

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

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

CDHSW(加速器)他：否定的

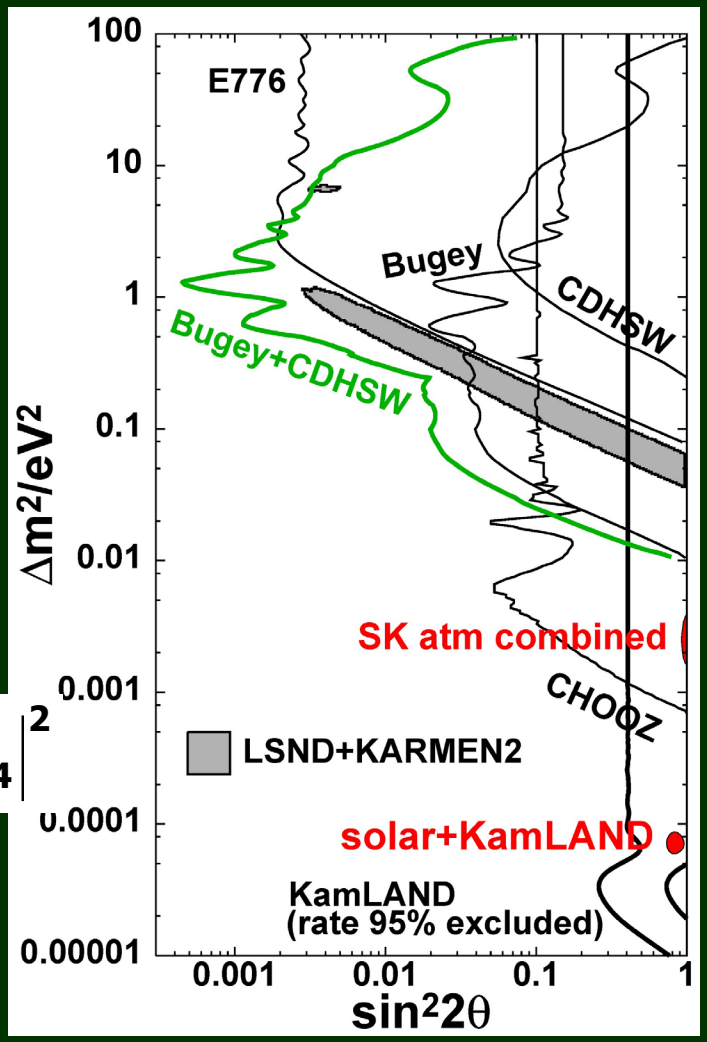
$$P(\nu_\mu \to \nu_\mu) = 1 - 4|U_{\mu 4}|^2(1 - |U_{\mu 4}|^2)\sin^2(\Delta m^2_{41}L/4E)$$

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

LSND 加速器)：肯定的

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

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



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

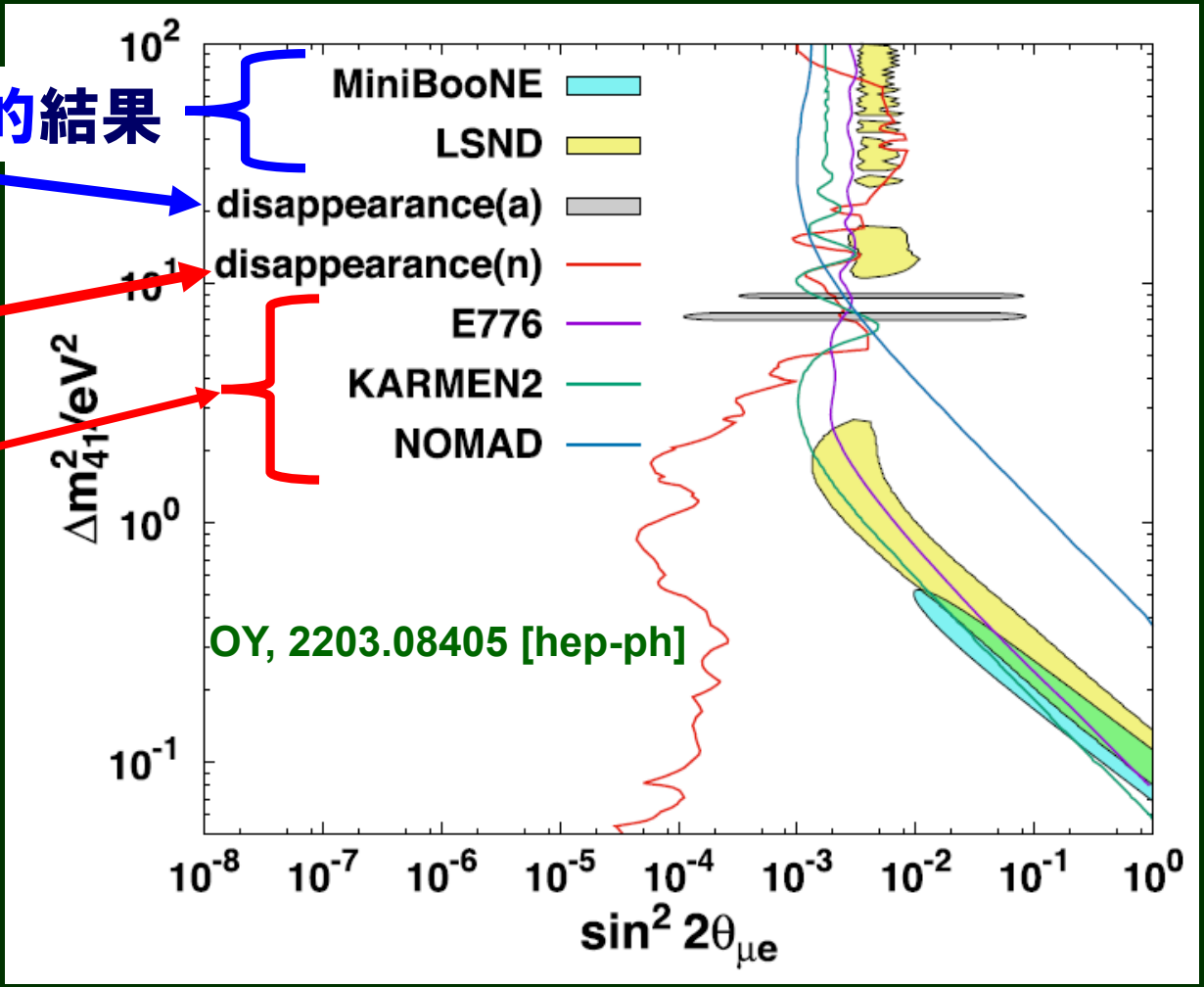
を満たす必要があるがBugey+CDHSWの左側とLSNDの内側の重複は殆どない(Okada-OY Int.J.Mod.Phys.A12:3669,1997)：tension

$\overset{(-)}{\nu}_\mu \to \overset{(-)}{\nu}_e$の現状

$\overset{(-)}{\nu}_e \to \overset{(-)}{\nu}_e$ の肯定的結果と $\overset{(-)}{\nu}_\mu \to \overset{(-)}{\nu}_\mu$ の肯定的結果を組み合わせた領域

肯定的結果

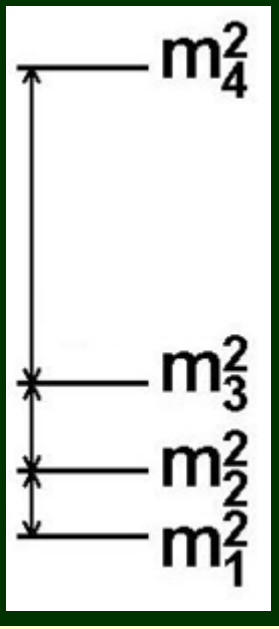
否定的結果



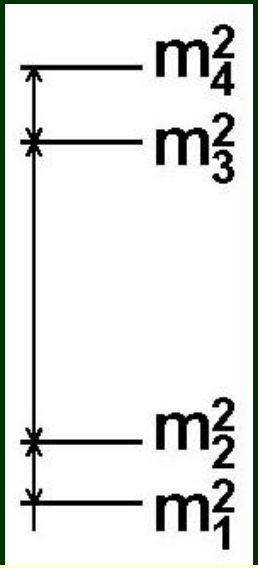
$\overset{(-)}{\nu}_e \to \overset{(-)}{\nu}_e$ の否定的結果と $\overset{(-)}{\nu}_\mu \to \overset{(-)}{\nu}_\mu$ の否定的結果を組み合わせた上限

N_ν=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

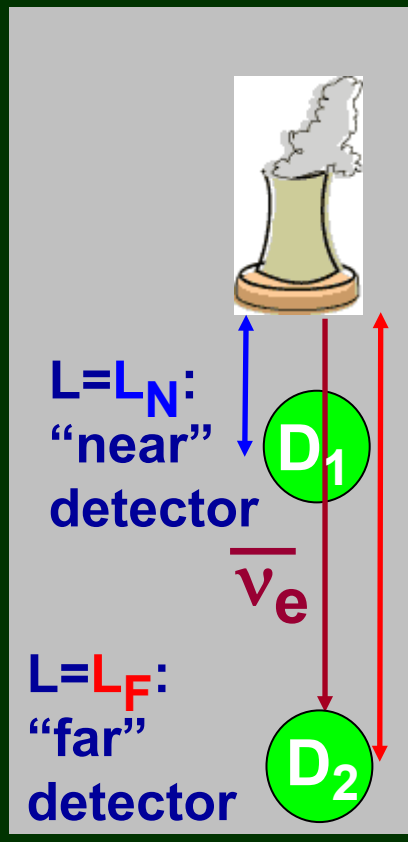
原子炉ν実験を動機付けるにはLSND/MBをとりあえず忘れて $\overset{(-)}{\nu}_e \rightarrow \overset{(-)}{\nu}_e$ の肯定的結果の検証を目指す

2. 実験原子炉ニュートリノの混合角度θ_{14}への感度

$$P(\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14}\ \sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{41} L}{4E}\right)$$

至近距離の近距離L_Nと遠距離L_Fに測定器を置き、 L_NとL_Fについて感度を最適化

<E>～4MeV, L=10m→ナイーブには
Δm^2～1eV^{2}程度の感度は期待できる



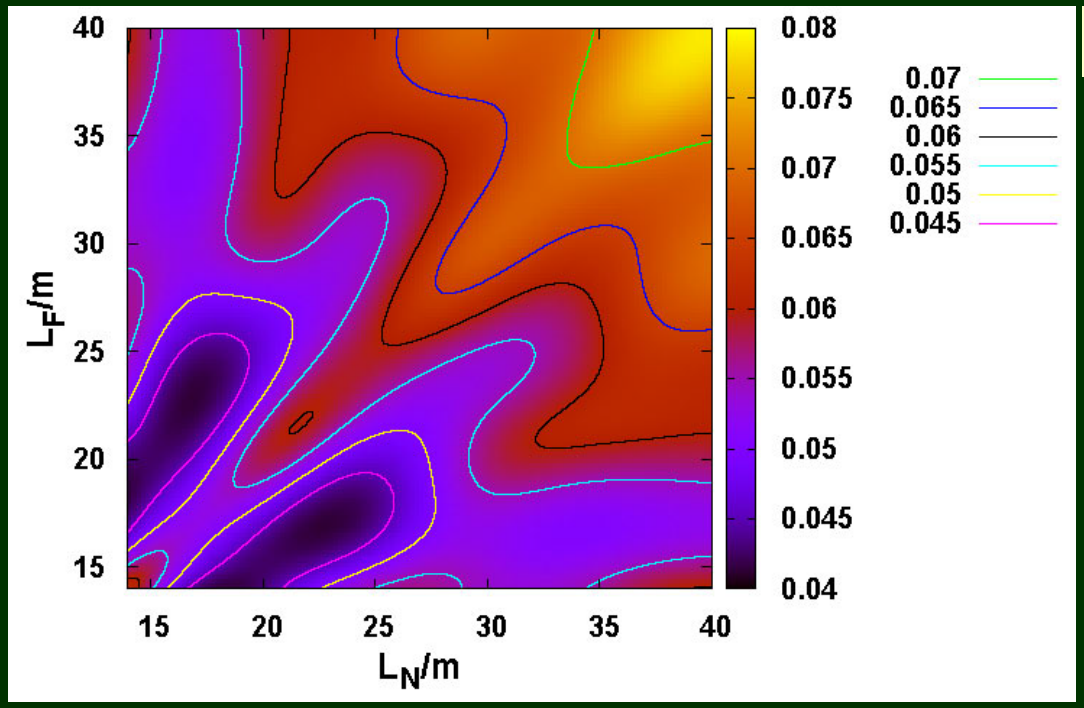
2.1 商業炉の場合 (D=4m, h=4mの円筒形を仮定)

Assumed parameters (a la Bugey)

- Power: 2.8 GW
- Size of the core: Diameter=4m, Height=4m

Power density~50MW/m^3

Optimization w.r.t. baseline lengths L_N, L_F for Δm^2=1eV^2



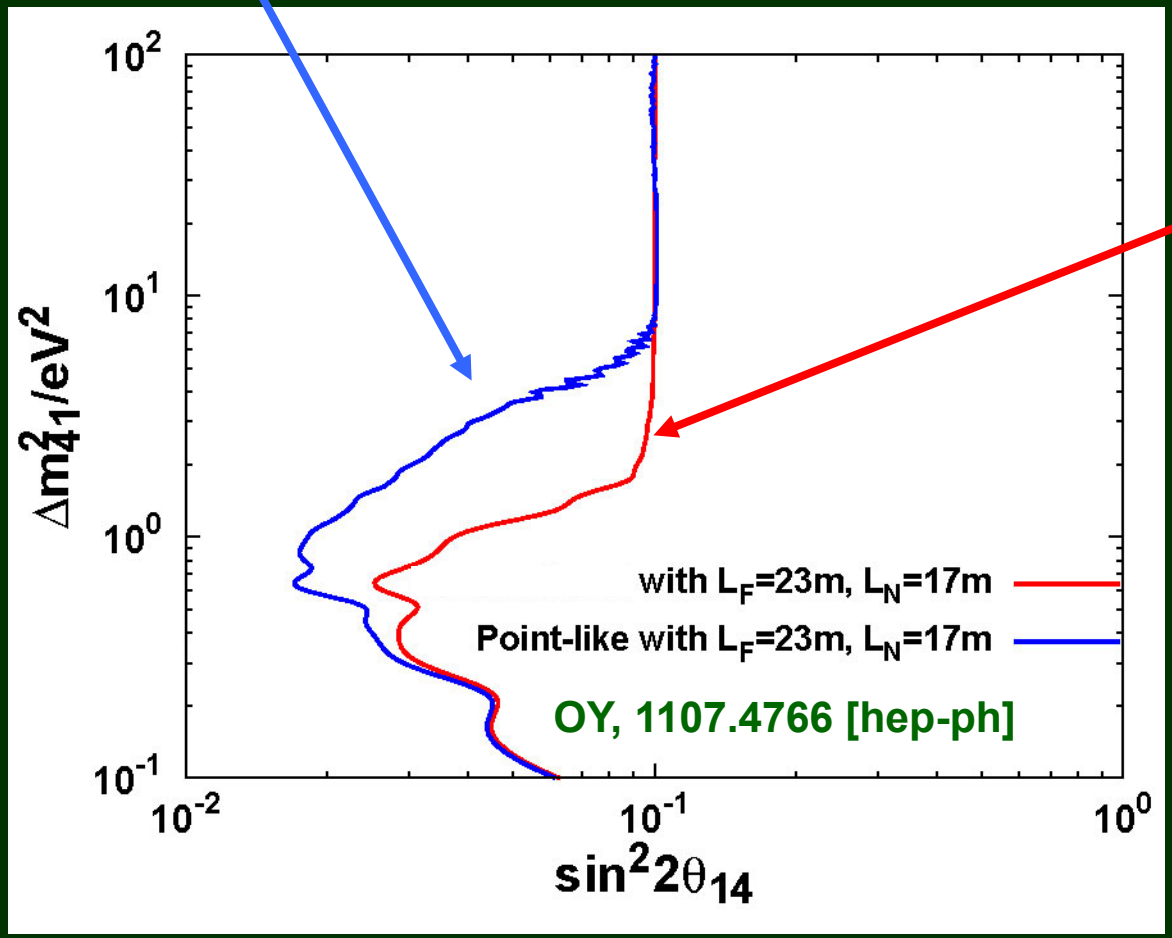
OY, 1107.4766 [hep-ph]

最適な距離の組み合わせは
L_N=17m,
L_F=23m

2.1 商業炉の場合 (D=4m, h=4mの円筒形を仮定)

最適な距離の組み合わせは L_N=17m, L_F=23m

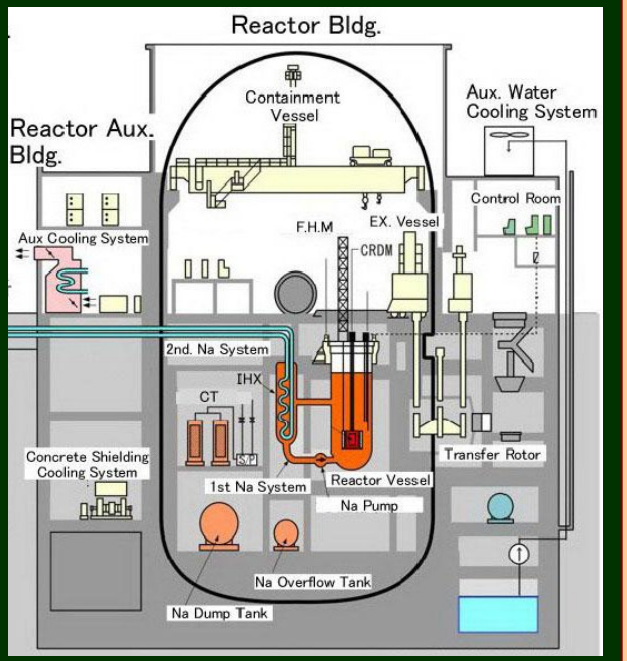
青線: point-likeな炉心を持つと仮定した仮想的な場合
→ 感度は実際の場合より良い



赤線:実際の商業炉
→炉心の拡がりが無視できず、
Δm^2~2eV^{2}の場合、
感度が劣化

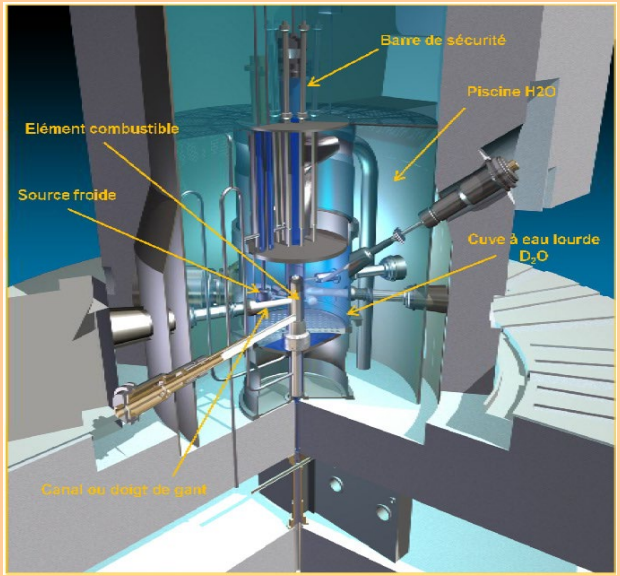
2.2 小さな炉心を持つ実験炉

● 常陽(茨城県大洗): D=0.8m, h=0.5m, P_{th}=140MW

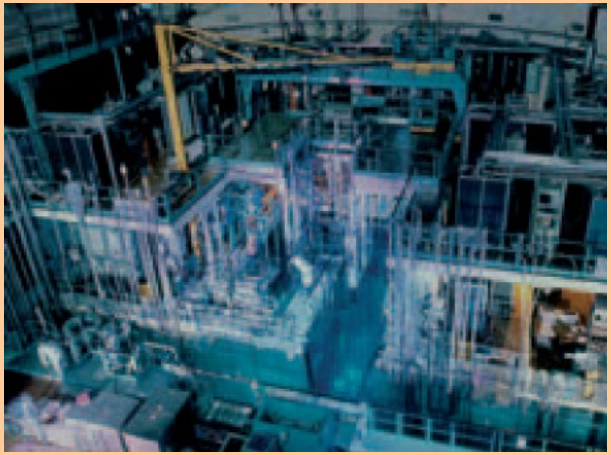


Nucifer project

●ILL reactor (Grenoble, France):D=0.4m, h=0.8m, P_{th}=58MW



●Osiris reactor (Saclay, France): 0.57m×0.57m×0.6m, P_{th}=70MW



Power density~500MW/m^3

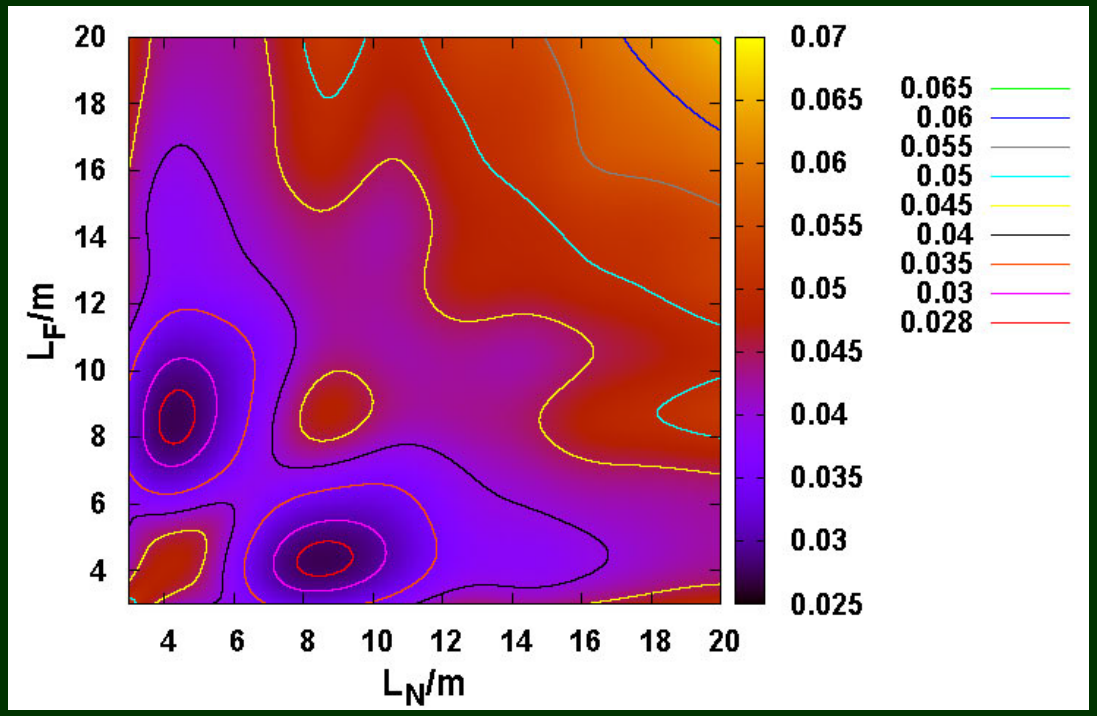
cf. ~50MW/m^3 for commercial reactors

- **Joyo (A fast neutron reactor)**

Assumed parameters

- **Power: 0.14 GW**
- **Size of the core: Diameter=0.8m, Height=0.5m**

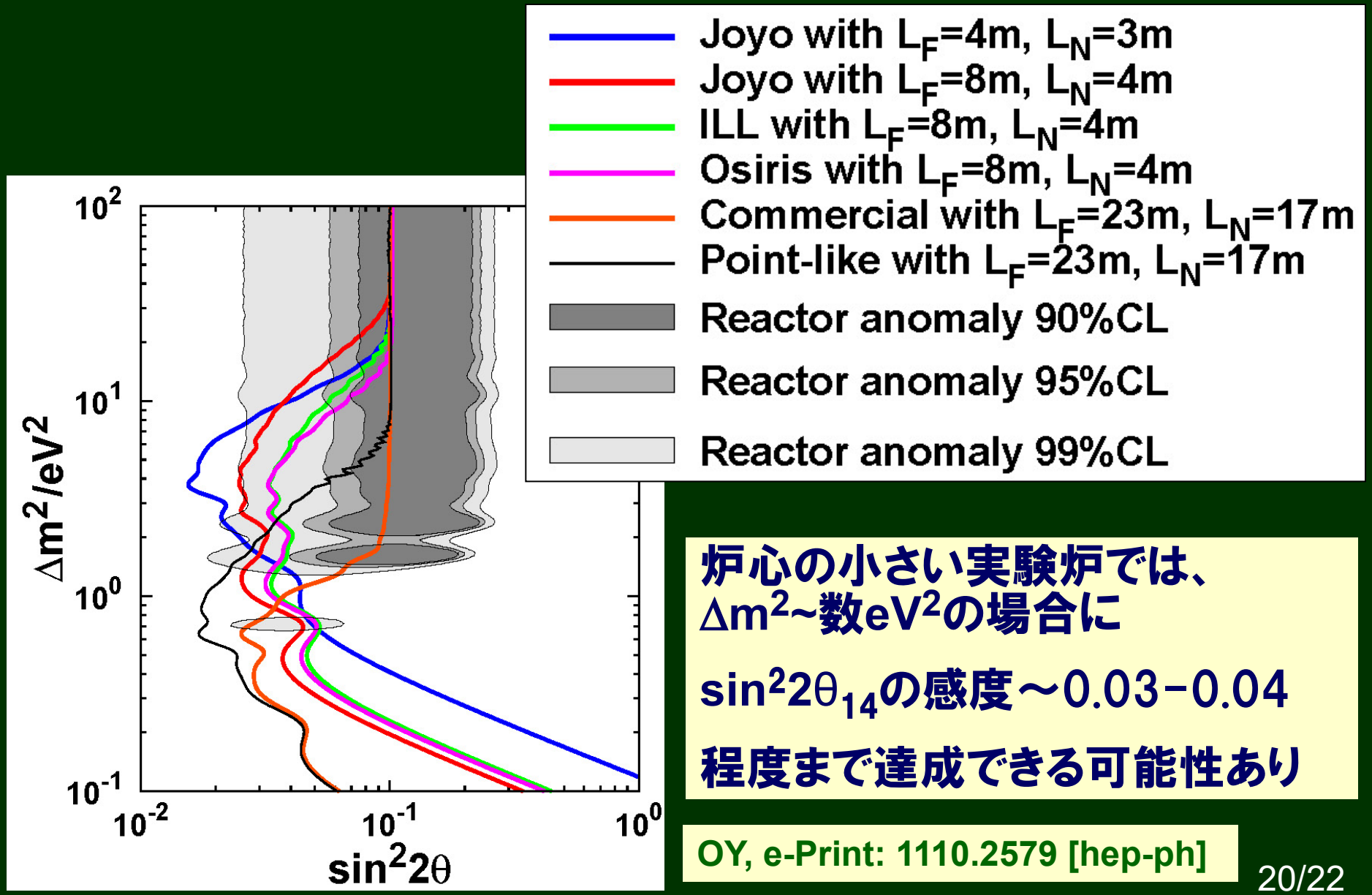
Optimization w.r.t. baseline lengths L_N, L_F for $\Delta m^2=1eV^2$



OY, 1107.4766 [hep-ph]

最適な距離の組み合わせは L_N=4m, L_F=8m

小さな炉心を持つ実験炉における感度



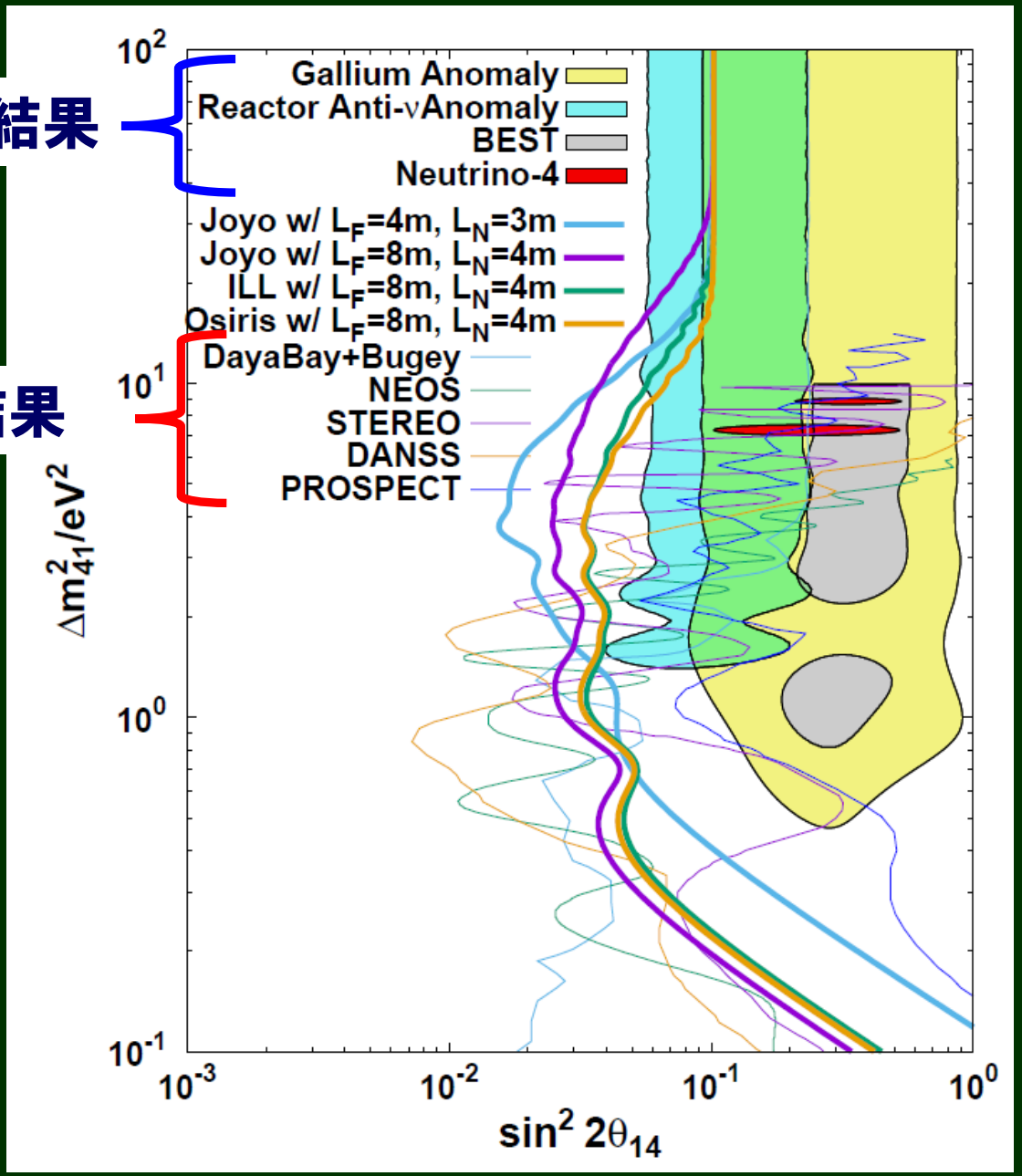
炉心の小さい実験炉では、
Δm^2~数eV^2の場合に

$\sin^2 2\theta_{14}$の感度～0.03−0.04

程度まで達成できる可能性あり

OY, e-Print: 1110.2579 [hep-ph]

小さな炉心を持つ実験炉：近年の原子炉ν実験と比較しても遜色なし



3. まとめ

- 原子炉ν フラックスの再評価により, 質量二乗差 $\Delta m^2 \sim O(1eV^2)$ のステライルν振動のシナリオが再度注目されている。

- $\overset{(-)}{\nu}_\mu \rightarrow \overset{(-)}{\nu}_e$ のLSND/MiniBooNEは、$\overset{(-)}{\nu}_e \rightarrow \overset{(-)}{\nu}_e$ の原子炉νの否定的結果と $\overset{(-)}{\nu}_\mu \rightarrow \overset{(-)}{\nu}_\mu$ の加速器νの否定的結果を組み合わせた上限値と矛盾しており、一部(あるいは全部)を無視しないとν振動と解釈できない。

- 研究炉は一般的に炉心が小さく、それらの施設におけるνの測定により、原子炉ν異常、ガリウム異常のテストができる可能性がある。

- $\Delta m^2 > 1eV^2$ に対して原子炉ν実験から質量二乗差の情報を得るには、炉心の拡がりの効果を避けるため、小さな炉心の強力な出力の原子炉を使う必要がある。

Backup slides

2. Analysis of a reactor neutrino oscillation experiment with one reactor & two detectors

$$\chi^2 = \min_{\alpha's} \left\{ \sum_{A=N,F} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{(t_i^A \sigma_i^A)^2} \left[m_i^A - t_i^A (1 + \alpha + \alpha^A + \alpha_i) - \alpha_{\rm cal}^A t_i^A v_i^A \right]^2 + \sum_{A=N,F} \left[\left(\frac{\alpha^A}{\sigma_{\rm dB}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_{\rm cal}^A}{\sigma_{\rm cal}} \right)^2 \right] + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\alpha_i}{\sigma_{\rm Db}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha}{\sigma_{\rm DB}} \right)^2 \right\}.$$

n=#(bin)=32

OY, arXiv: 1107.4766 [hep-ph]

m^A_i : Measured numbers of events

t^A_i : Theoretical prediction

v^A_i : Variation due to energy calibration error

$$(t_i^A \sigma_i^A)^2 = \boxed{t_i^A} + \boxed{(t_i^A \sigma_{\rm db}^A)^2}$$

statistical errors

systematic errors

In the present case $\sigma_{stat} > \sigma_{sys}$:
statistical errors are more important

A=N: "near" detector D_1

$\bar{\nu}_e$

A=F: "far" detector D_2

Assumed systematic errors: those of Bugey experiment

σ_{DB}: correlated wrt detectors, correlated wrt bins = 3%

σ_{Db} :correlated wrt detectors, uncorrelated wrt bins = 2%

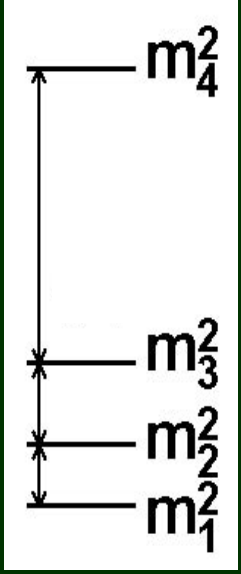
σ_{dB} :uncorrelated wrt detectors, correlated wrt bins = 0.5%

σ_{db} :uncorrelated wrt detectors, uncorrelated wrt bins = 0.5%

σ_{cal} :energy calibration error for each bin = 0.6%

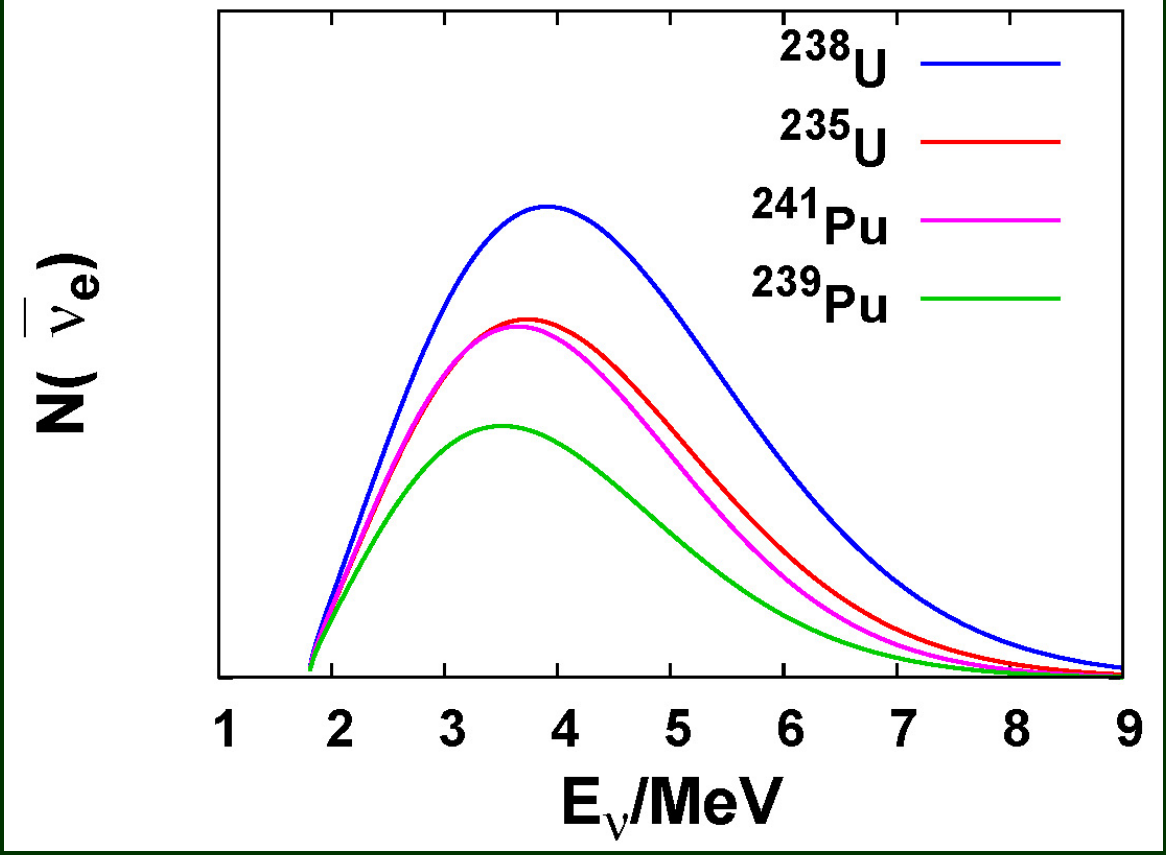
Formula for oscillation probability

$$P(\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \, \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2_{41} L}{4E} \right)$$



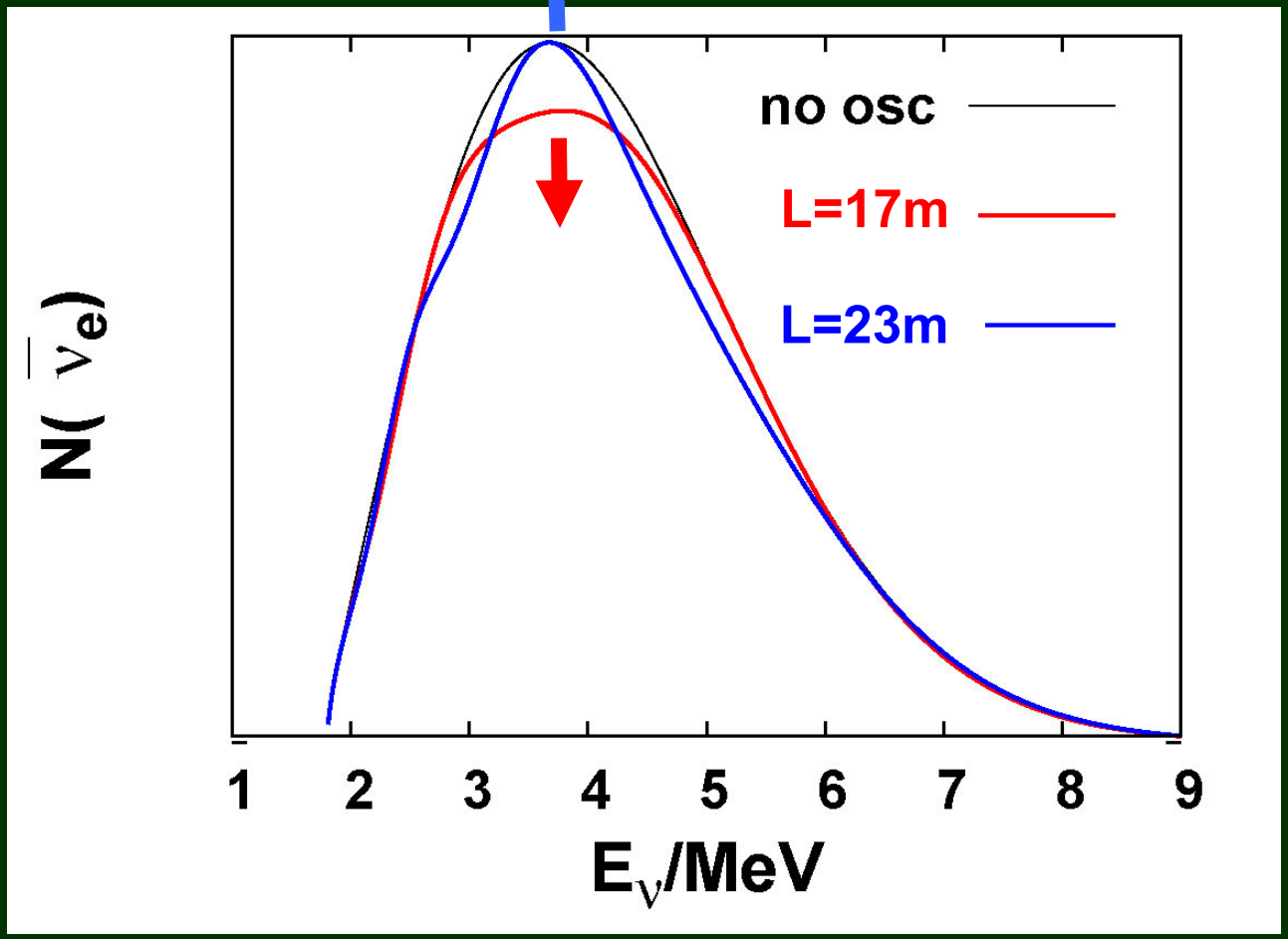
Composition of Thermal Neutron Reactor & Fast Neutron Reactor

	^{235}U	^{239}Pu	^{238}U	^{241}Pu
Thermal Neutron Reactor (w/ H_2O)	53.8%	32.8%	7.8%	5.6%
Fast Neutron Reactor	37.1%	51.3%	7.3%	4.3%



The role of a "near" detecor in the energy spectrum analysis for $\Delta m^2=1eV^2$

The difference at <E> ~ 4MeV is most significant for L_N,=17m L_F=23m



A Study of Reactor ν Monitoring at Experimental Fast Reactor JOYO

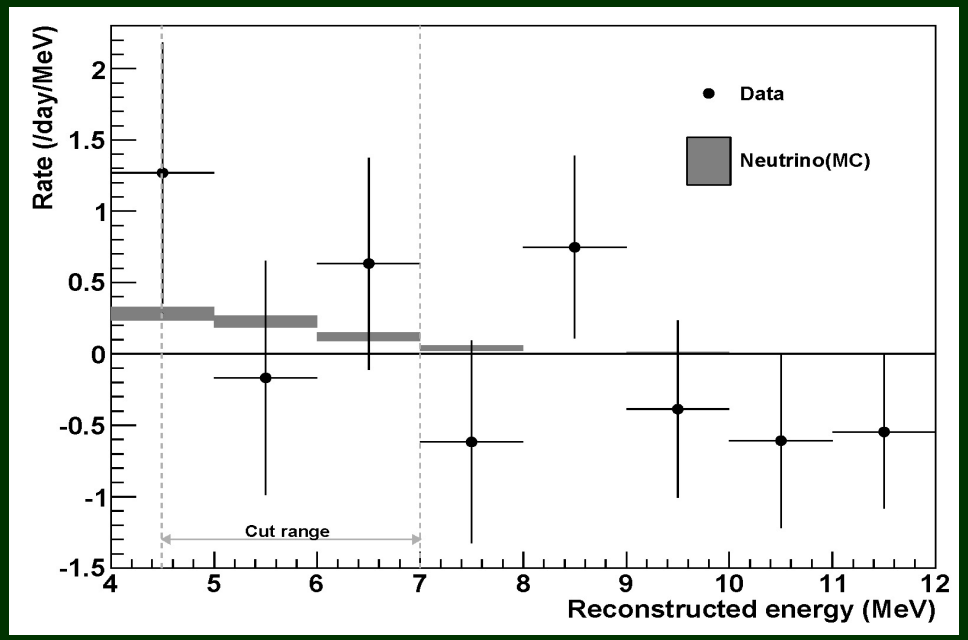
H.Furuta et al., arXiv:1108.2910v1 [hep-ex]

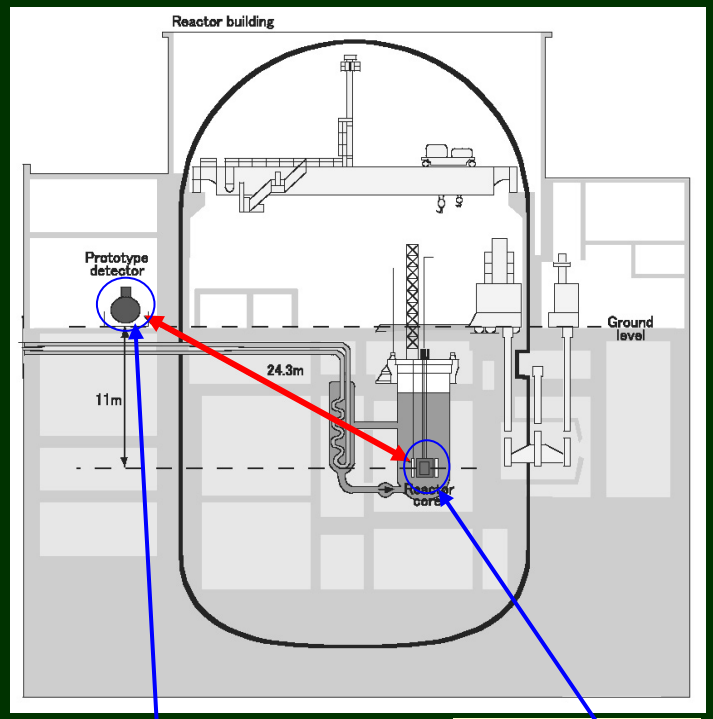
L=24.3m; about 150 $\nu p \rightarrow e^{+}n$ reactions/day

The measured ν event rate from reactor on-off comparison was 1.11±1.24(stat.)±0.46(syst.) events/day.

The statistical significance of the measurement was not enough.

Their motivation: to detect ν from a fast reactor (not motivated by ν_s)



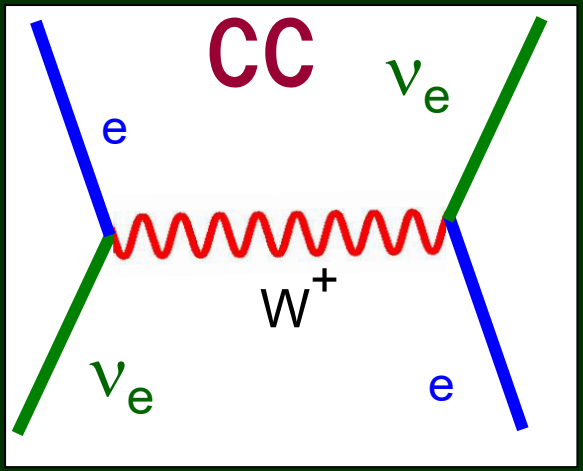


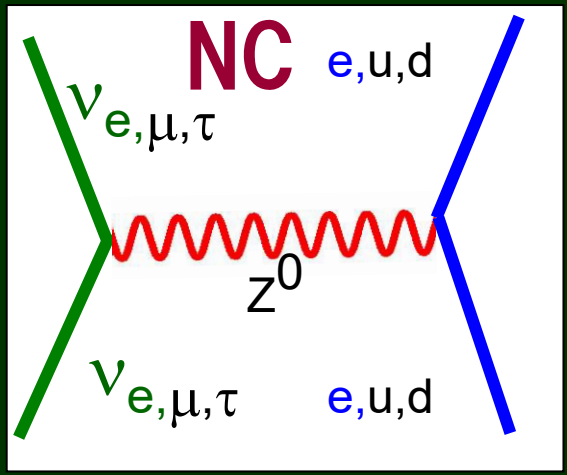
Prototype detector

Reactor core

ν伝播中の物質効果（MSW効果）

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





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

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

N_e, N_n: 電子(中性子)の密度

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

ν伝播中の物質効果（MSW効果）

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

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

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$\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_s$でない理由

$\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$：真空振動

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

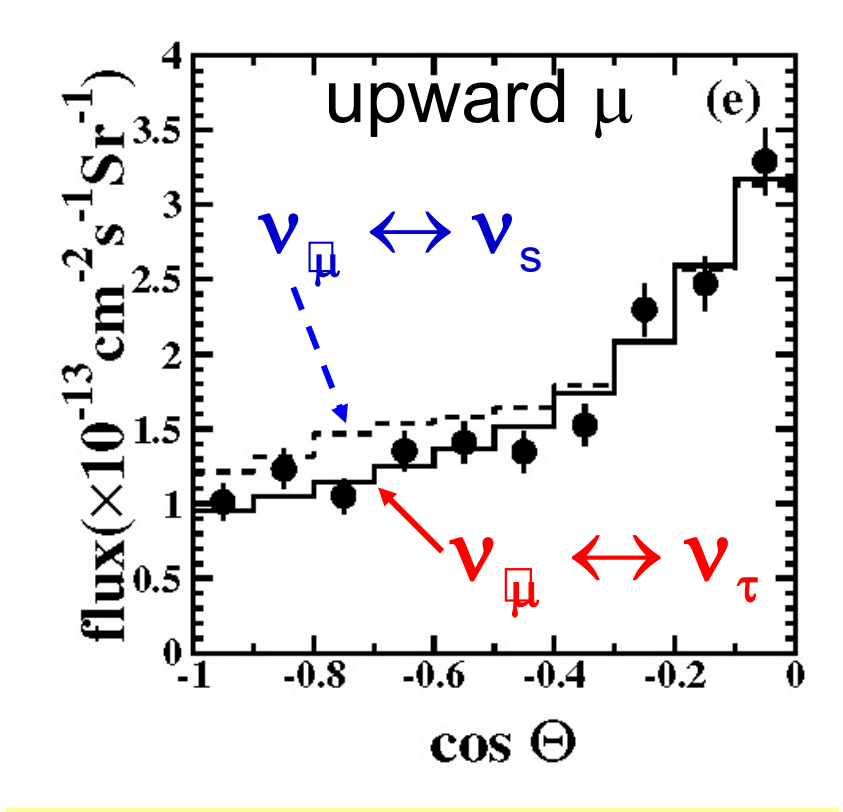
$$\Delta E = E_2 - E_1 \cong \frac{m_2^2 - m_1^2}{2E} = \frac{\Delta m^2}{2E}$$

$\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_s$ ：物質中振動

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

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

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



SK collaboration, PRL 85('00)3999

$\theta = \pi/4$ならば物質中の混合角度は

$\tilde{\theta} = \pi/4$とはならない

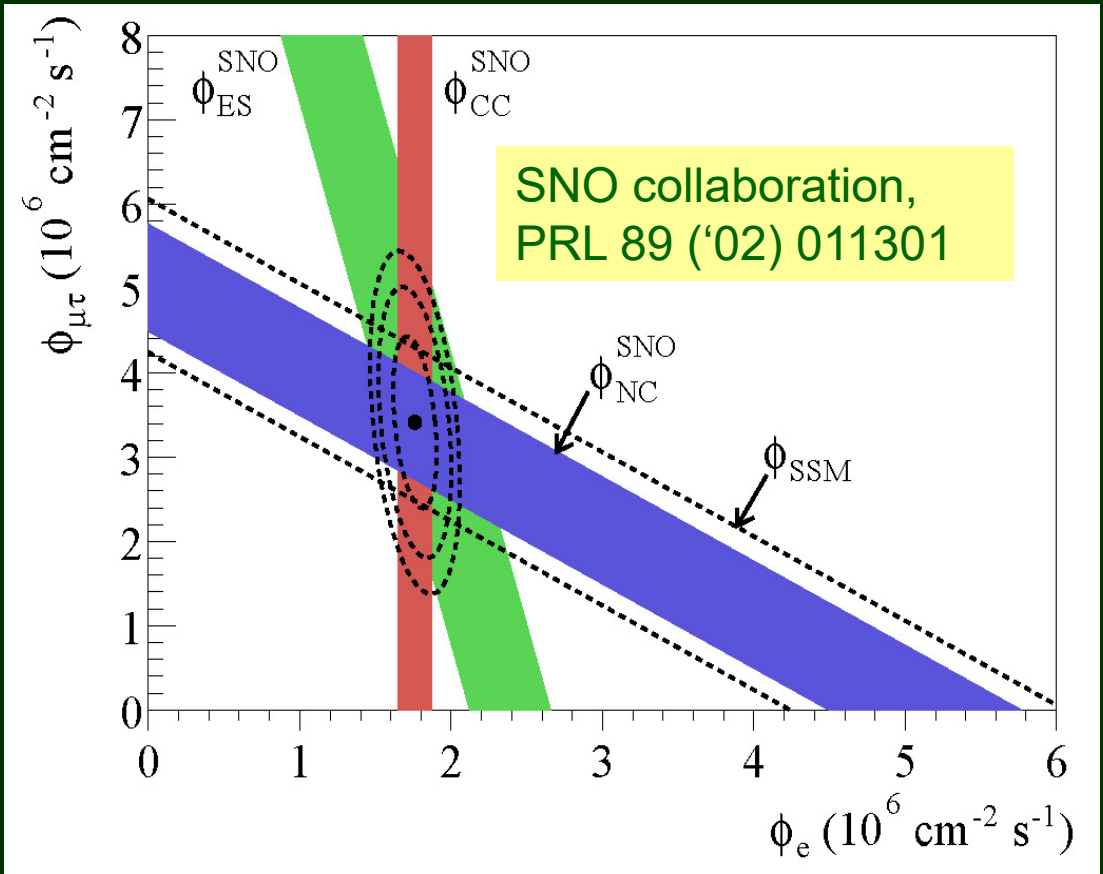
太陽νが主として$\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_s$でない理由

SNOではNeutral Current reaction

$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$$

x=e,μ,τ

でν_e、ν_μ、ν_τのfluxの和の観測が可能



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

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

(2+2)-scheme

$$\eta_s \equiv |U_{s1}|^2 + |U_{s2}|^2 \to 0$$

$$\nu_{atm} : \nu_\mu \to \nu_s (100\%)$$

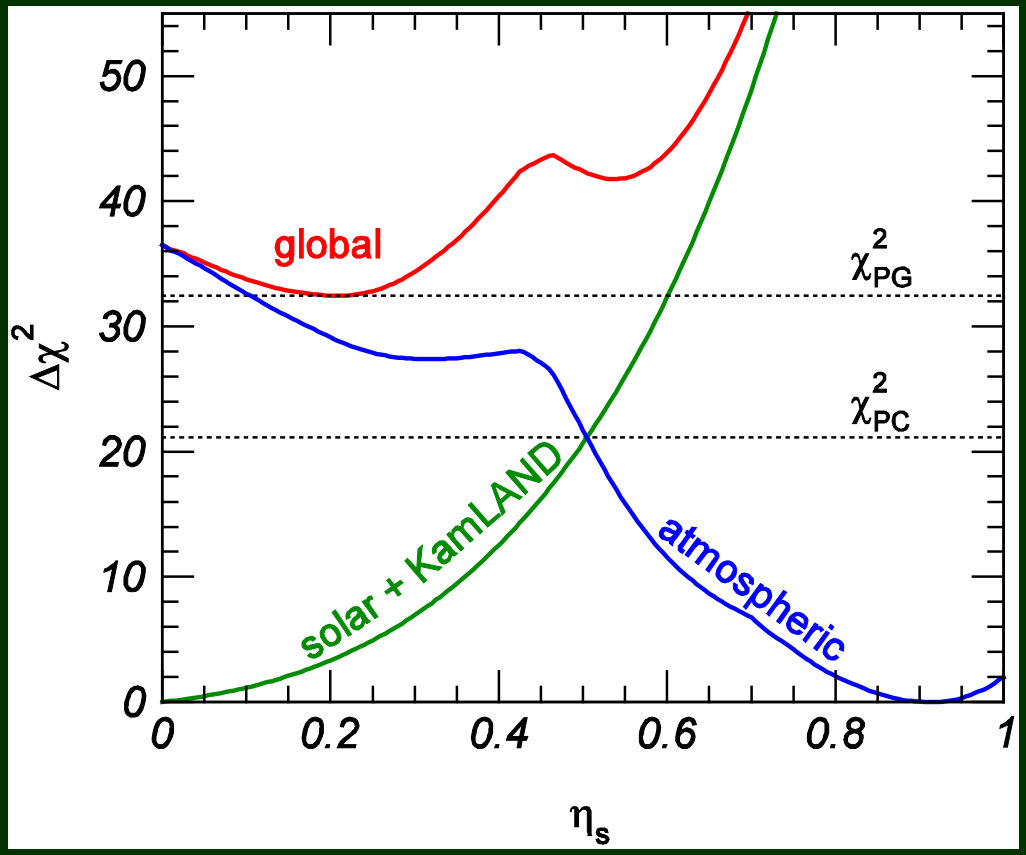
Strongly disfavored by SK ν_{atm} data

$$\eta_s \equiv |U_{s1}|^2 + |U_{s2}|^2 \to 1$$

$$\nu_{sol} : \nu_e \to \nu_s (100\%)$$

Strongly disfavored by SNO ν_{sol} data

Schwetz, hep-ph/0311217



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

For any value of $|U_{s1}|^2 + |U_{s2}|^2$, fit to sol+atm data is bad.

→excluded at 5.7σ