

# 太陽ニュートリノ + KamLAND の現状と $\theta_{13}$

東大ICRR

池田一得

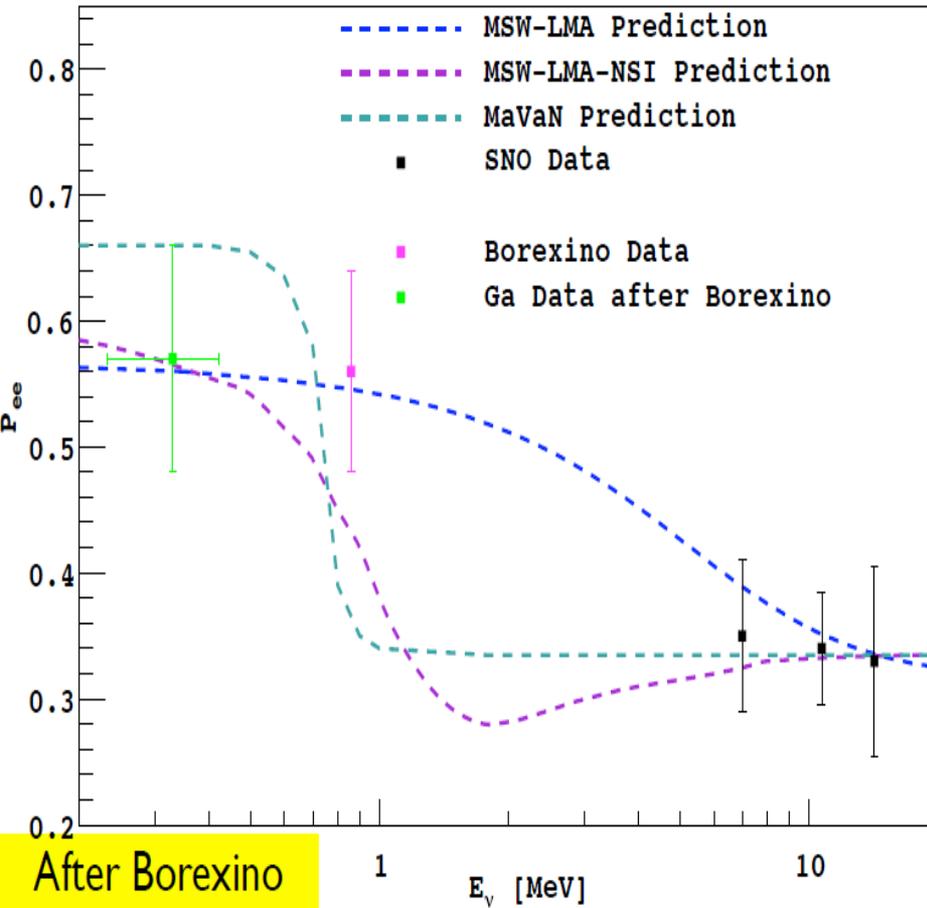
2010/2/9

# もくじ

- 2008年の研究会のおさらい
- それ以降の新しい結果
- 太陽ニュートリノ3世代解析
- 太陽 $\nu$ +カムランド3世代解析
- 今後の展望

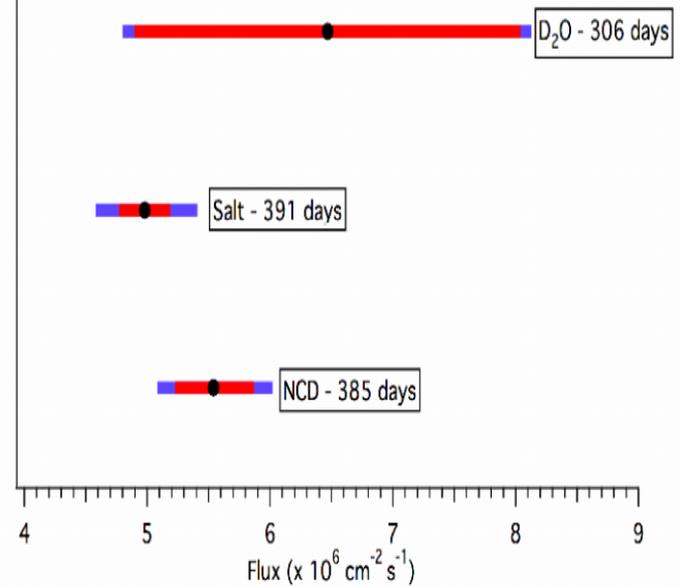
# 前回(2008年)のおさらい

## Solar Neutrino Survival Probability



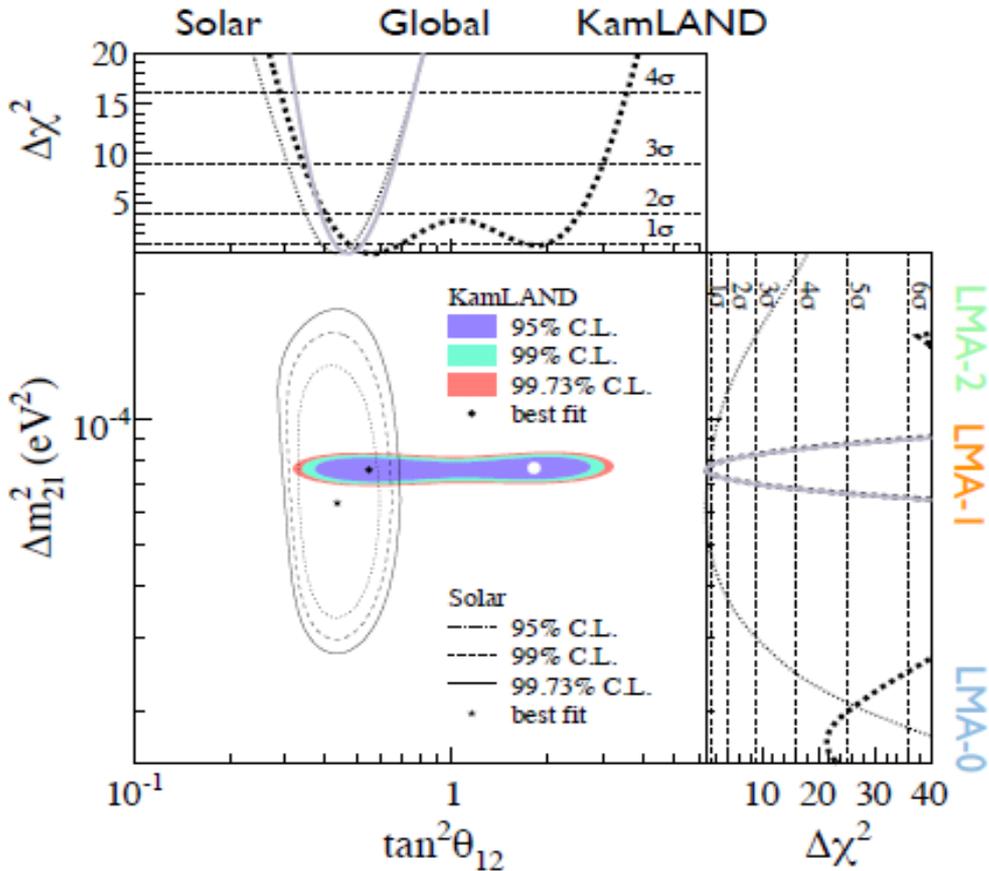
## SNO NC Flux: 3 Phases

NC Flux (corrected to  $^8\text{B}$  spectrum of Winter *et al.*)  
 CC spectrum shape not constrained to  $^8\text{B}$  shape.



# 前回のおさらい

## Neutrino Oscillation Parameters



Best-fit light side:

$$\Delta m^2 = 7.58^{+0.21}_{-0.20} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta = 0.56^{+0.14}_{-0.09}$$

Best-fit dark side:

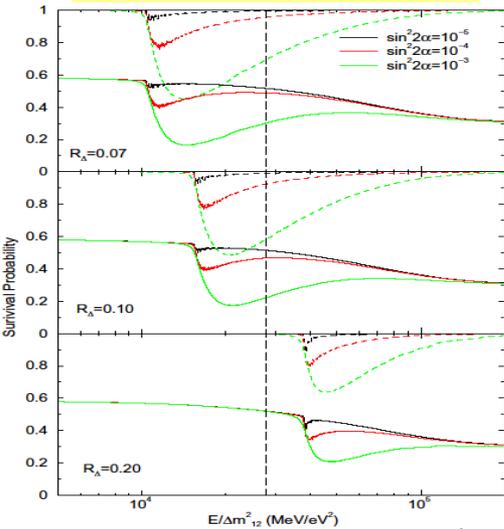
$$\Delta m^2 = 7.64 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta = 1.84$$

2008年 精密測定化宣言

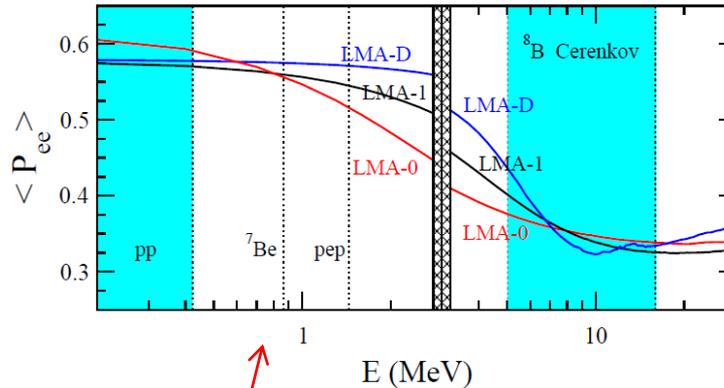
# スペクトルの歪み測定的重要性

## Sterile neutrino



$$R_\Delta \equiv \frac{\Delta m_{01}^2}{\Delta m_{21}^2}$$

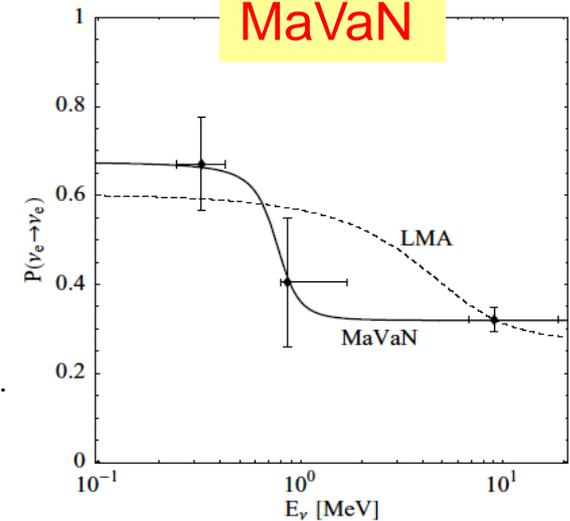
Holanda and Smirnov, Phys.Rev.D69(2004)113002. (hep-ph/0307266)



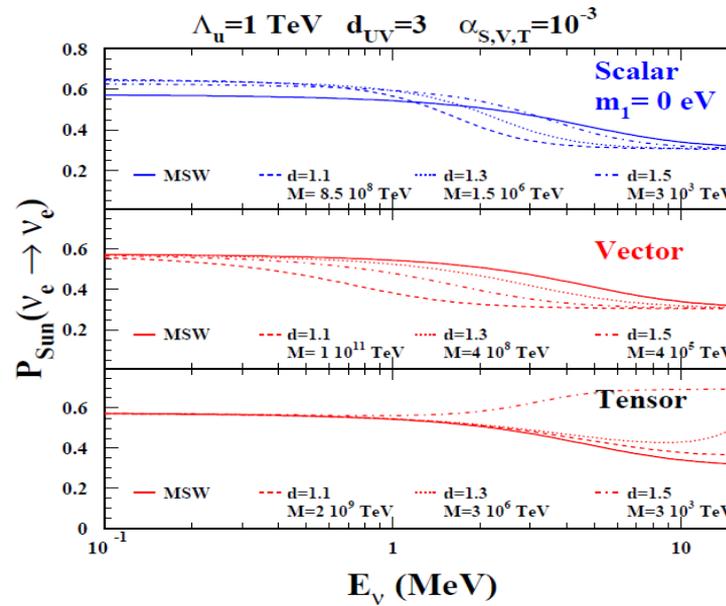
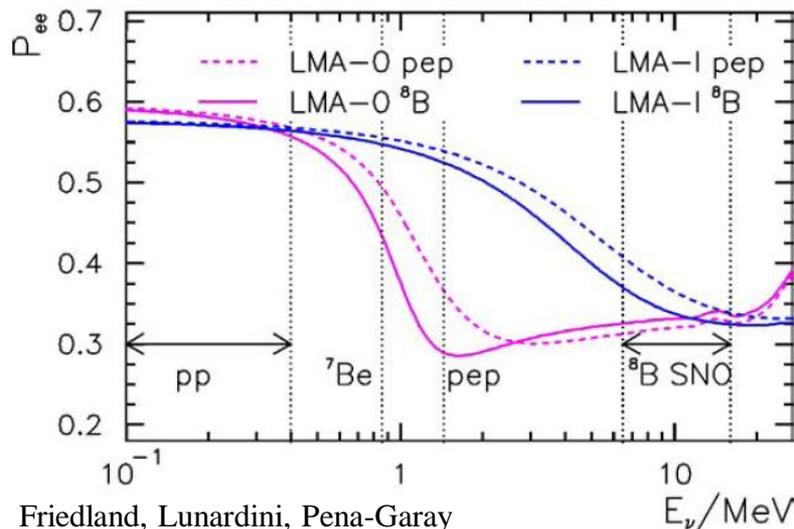
Miranda, Tortola and Valle, JHEP 0610:008,2006. (hep-ph/0406280)

## Non standard Interaction

## MaVaN



Barger, Huber and Marfatia, Phys.Rev.Lett.95:211802,2005 (hep-ph/0502196)



Gonzalez-Garcia, Holanda, Zukanovich, Funchal, JCAP 0806:019,2008. (hep-ph/0803.1180)

## Unparticle

Friedland, Lunardini, Pena-Garay PLB594(2004)347(hep-ph/0402266)

$E_\nu$  (MeV)

# 2008年からのアップデート 新しい実験及び解析結果

- Borexino 8Bニュートリノの観測 2008年8月
- SNO Phase-I,IIの再解析 2009年9月
- SK-III の結果 2009年12月

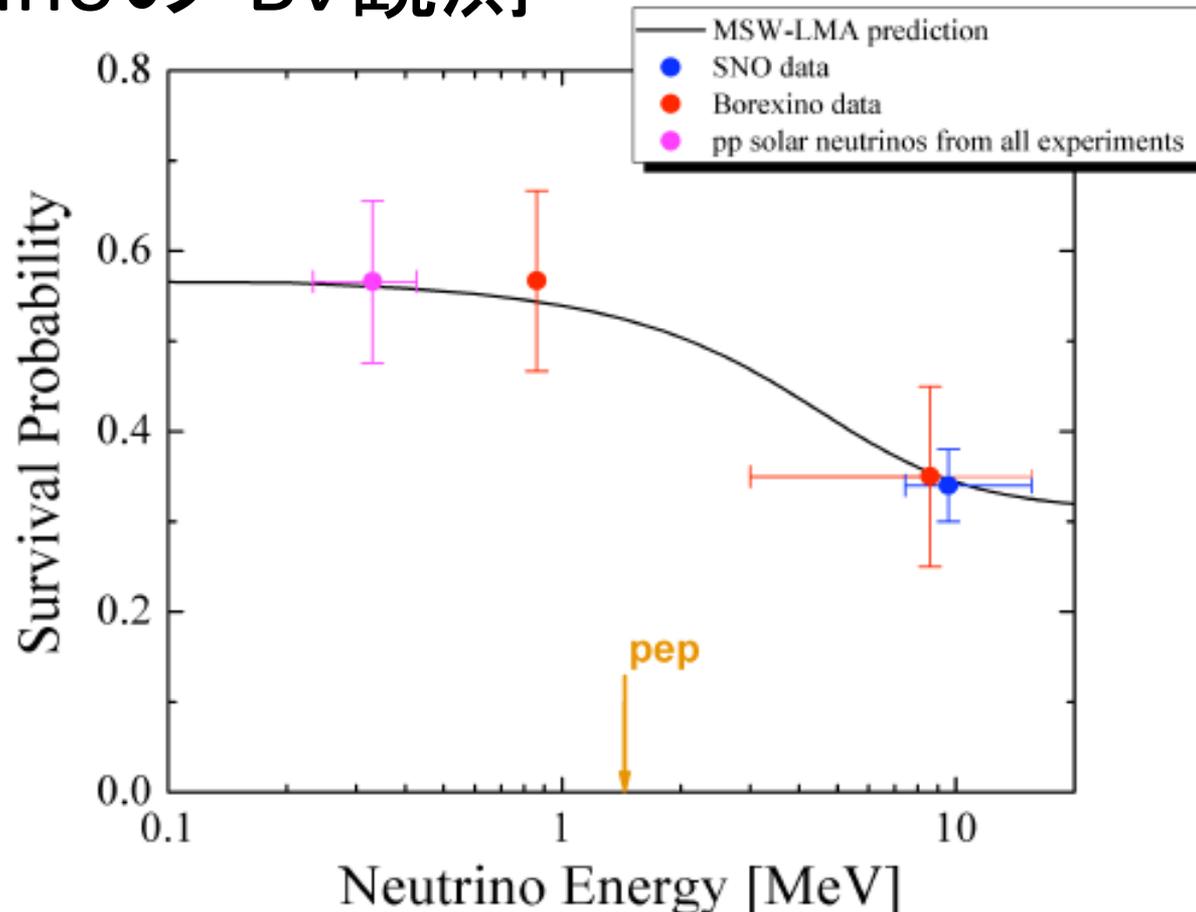
## $\theta_{13}$ を考慮したグローバル解析

- T Schwetz et al. 2008年
- G. L. Fogli, E. Lisi 2009年
- SNO group 2009年9月
- SK group 2009年12月
- などなど。。

} 今日のメイン

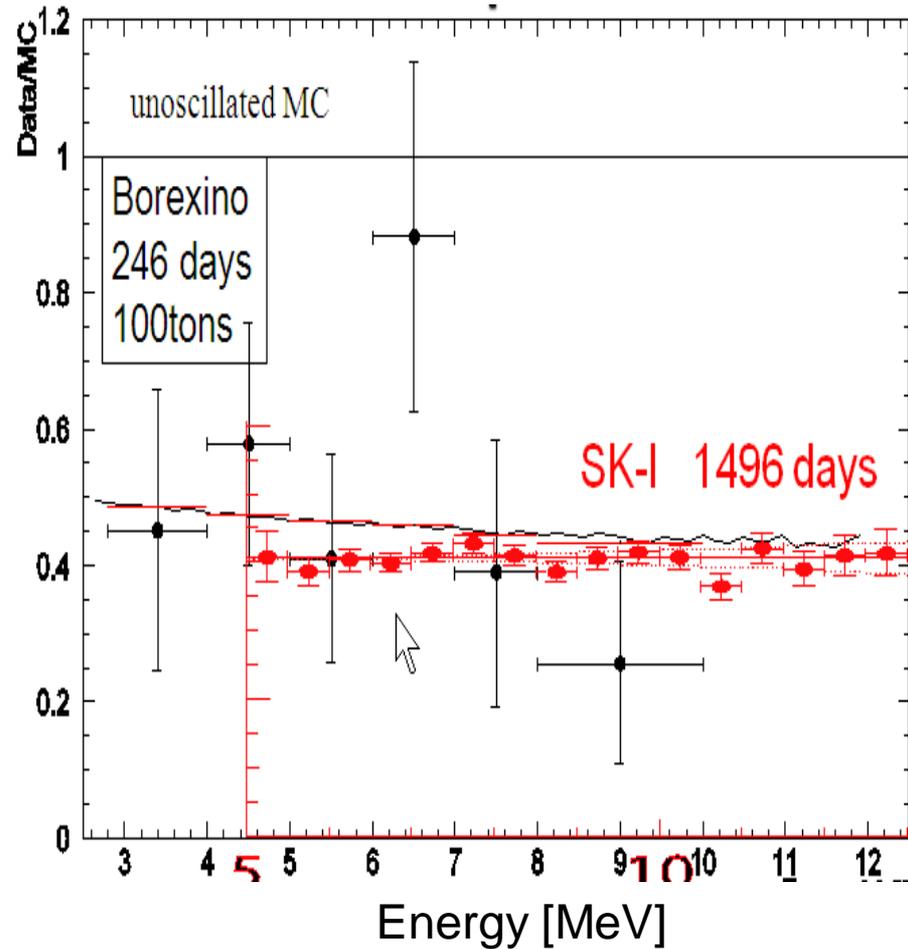
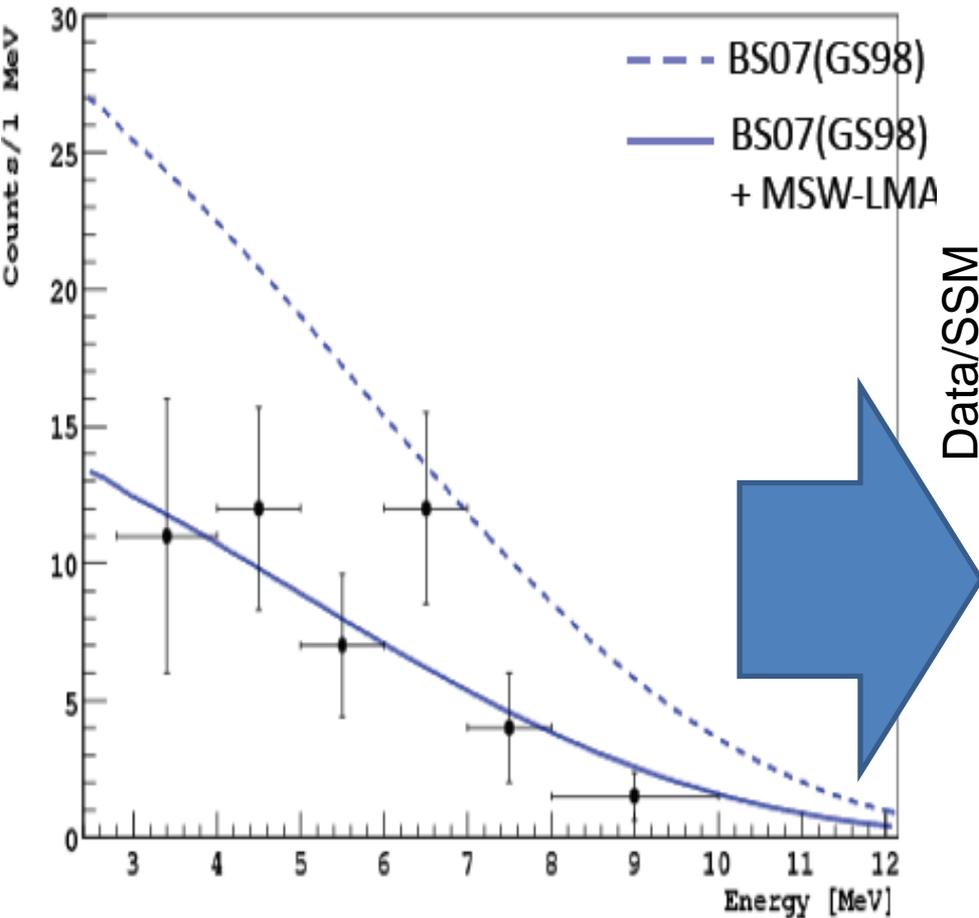
# Measurement of the Electron Neutrino Survival probability

## Borexinoの $^8\text{B}\nu$ 観測



Slide from A.Ianni@ PHYSUN workshop at GranSasso

# Borexino のつづき



## Borexino の今後

${}^7\text{Be}$ : 5%の精度を目指す(較正の改良)

CNO:  ${}^{11}\text{C}$ のバックグラウンドのタグがポイント

${}^8\text{B}$ : 統計をためる(5年の統計量で $3\sigma$ )

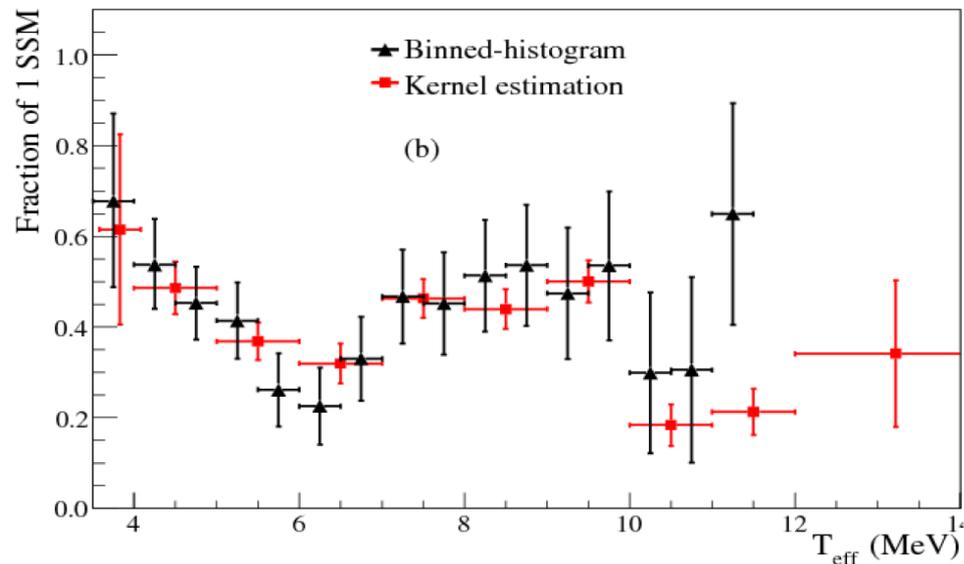
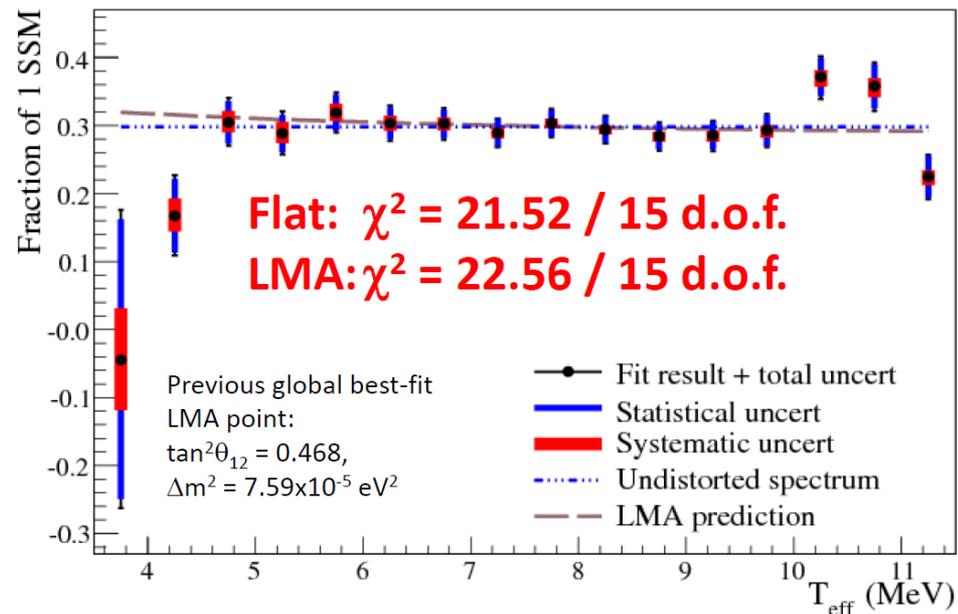
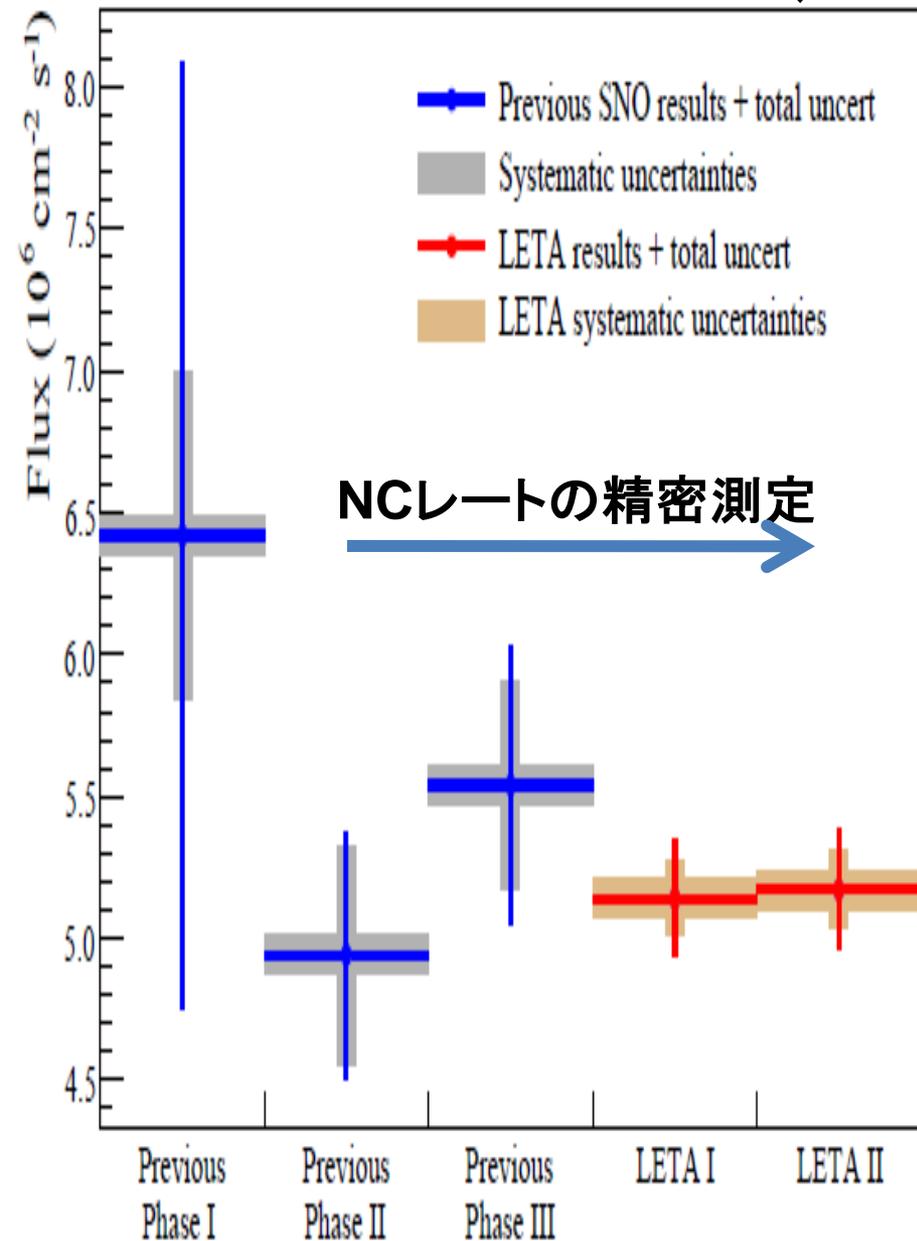
# SNO再解析



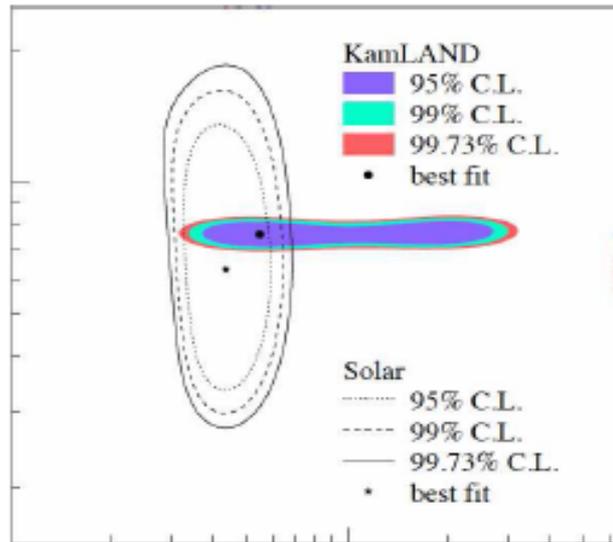
# Reduction in Systematics

Systematic	Old Uncertainty	New
Energy scale	1.2%	< 0.5%
Energy resolution	4.5% (D <sub>2</sub> O)	< 2%
	3.4% (salt)	< 2%
$\beta_{14}$ (isotropy)	0.85% (electrons)	0.25%
$R^3$ fiducial volume	3%	1%
$\cos \theta_{sun}$ (angular resolution)	16%	11%
Neutron capture efficiency	2.1%	1.4%

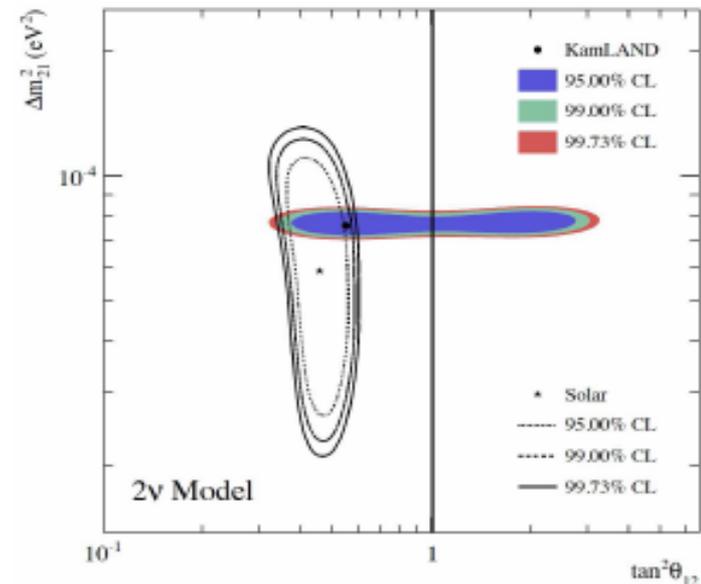
# Nレートの精密測定、CC ES スペクトル



A global fit of all solar + KamLAND data for a two-flavor oscillation model:



Old contours (KamLAND collab.,  
PRL 100, 221803 (2008))



New contours after LETA

Best-fit-oscillation parameters ( $\pm 1\sigma$  limits of 2-D parameter region)

$$\Delta m^2 = 7.59_{-0.21}^{+0.20} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2\theta_{12} = 0.457_{-0.029}^{+0.040}$$

$^8\text{B}$  uncertainty from global fit: +2.38%, -2.95%

# SK-III最新結果

# SK-III太陽ニュートリノ観測

SK-I(1996年～2001年実測時間1496日までの観測)と違う点

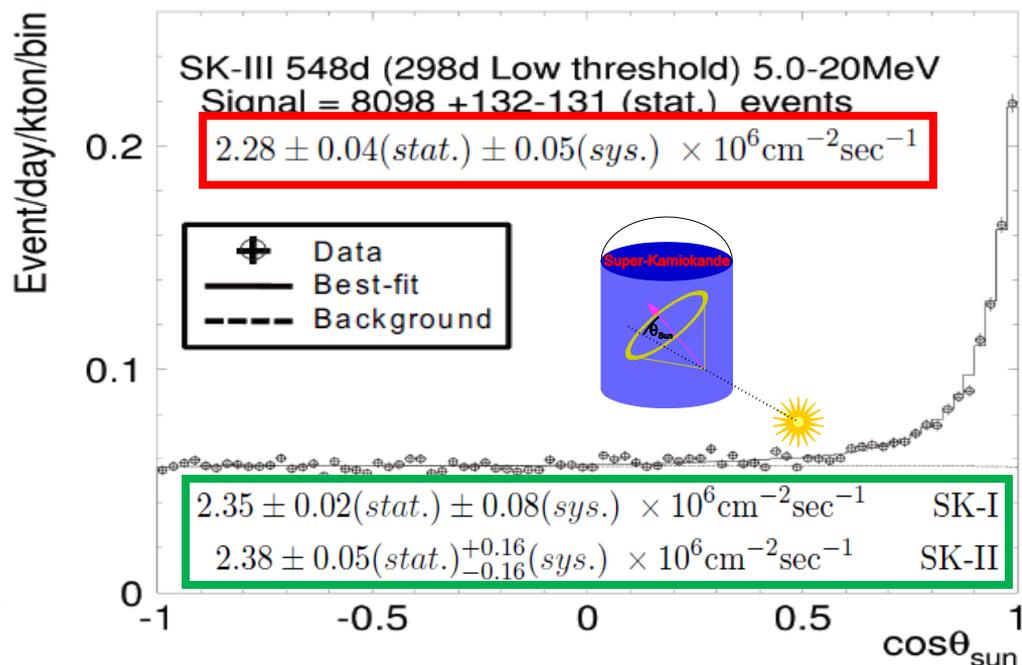
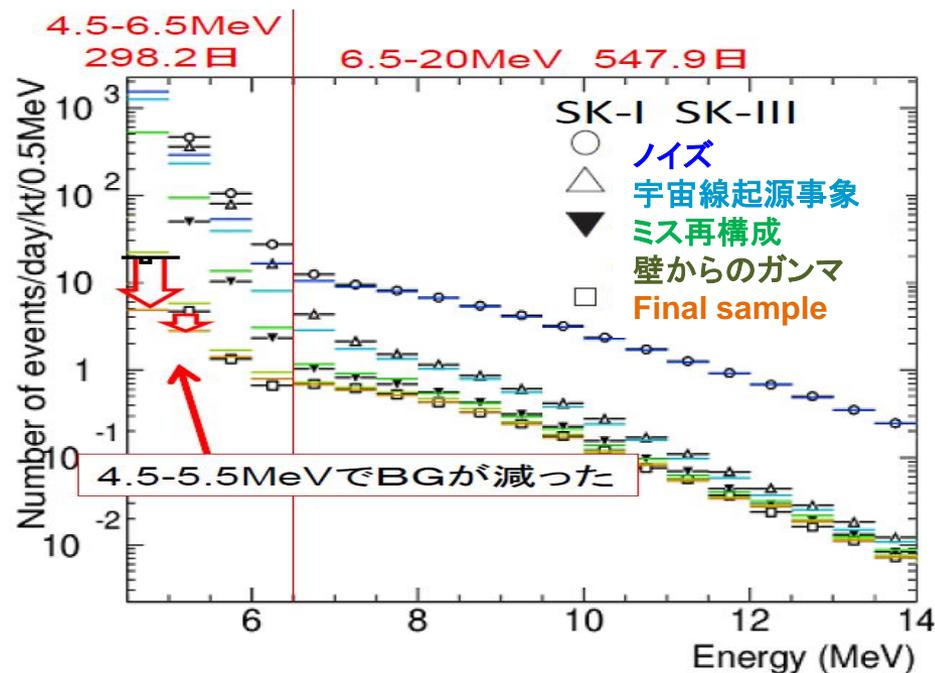
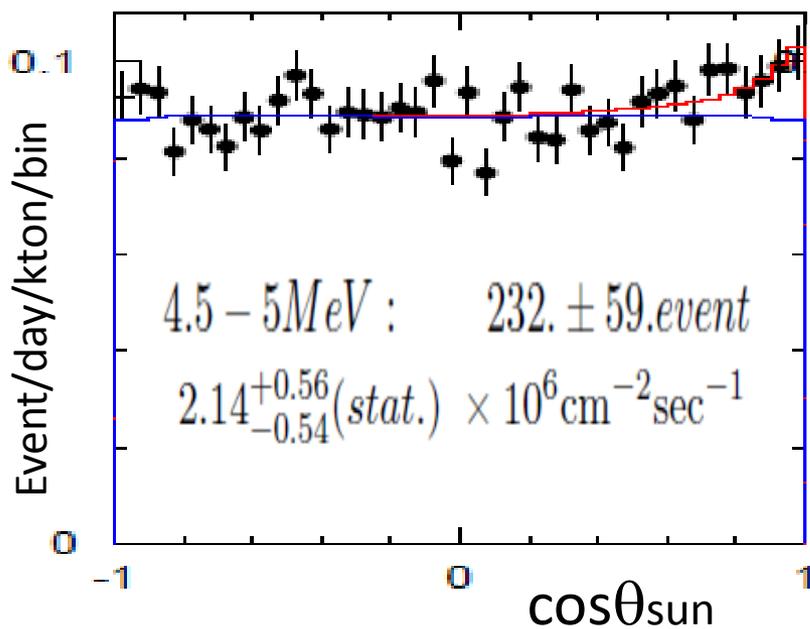
- FRP+アクリルカバー  
が全PMTに取り付けられた☺
- 検出器校正の改良☺  
新しい短パルスレーザーを用いた全PMTの応答時間校正システムの構築
- リダクションツールの改良☺  
カット条件、及び系統誤差の見積もり直し
- 方向再構成方法☺  
反跳電子のエネルギーを考慮した再構成方法を考案 約10%分解能が良くなる
- 検出器シミュレーション☺  
検出器のZ位置によって異なる水の透過率を導入  
エネルギースケールの不定性が0.64%から0.53%になる
- FRPによるBG増☺  
→水循環システムの改良  
不純物除去効率を上げる。水流の制御で検出器内部BGを削減  
→PMT時間校正及び新リダクションツールで削減。  
4.5-5MeVで1/4、5-5.5MeVで2/3程度になる。
- 統計量が約3分の1(2006年8月から2008年8月 実測時間548日)☺  
→系統誤差を小さくして勝負する=2.3%  
全フラックスに対する系統誤差が2/3になる

# SK-III 実験結果

➡ 各リダクションステップでの事象数  
: 低エネルギーでBG削減

➡ 5-20MeV 太陽角分布  
: 系統誤差がSK-Iの2/3

➡ 4.5-5MeV 太陽角分布  
:  $\sim 4\sigma$ レベルで信号を観測。  
誤差(統計) の範囲内で  
5-20MeVのフラックスと一致。

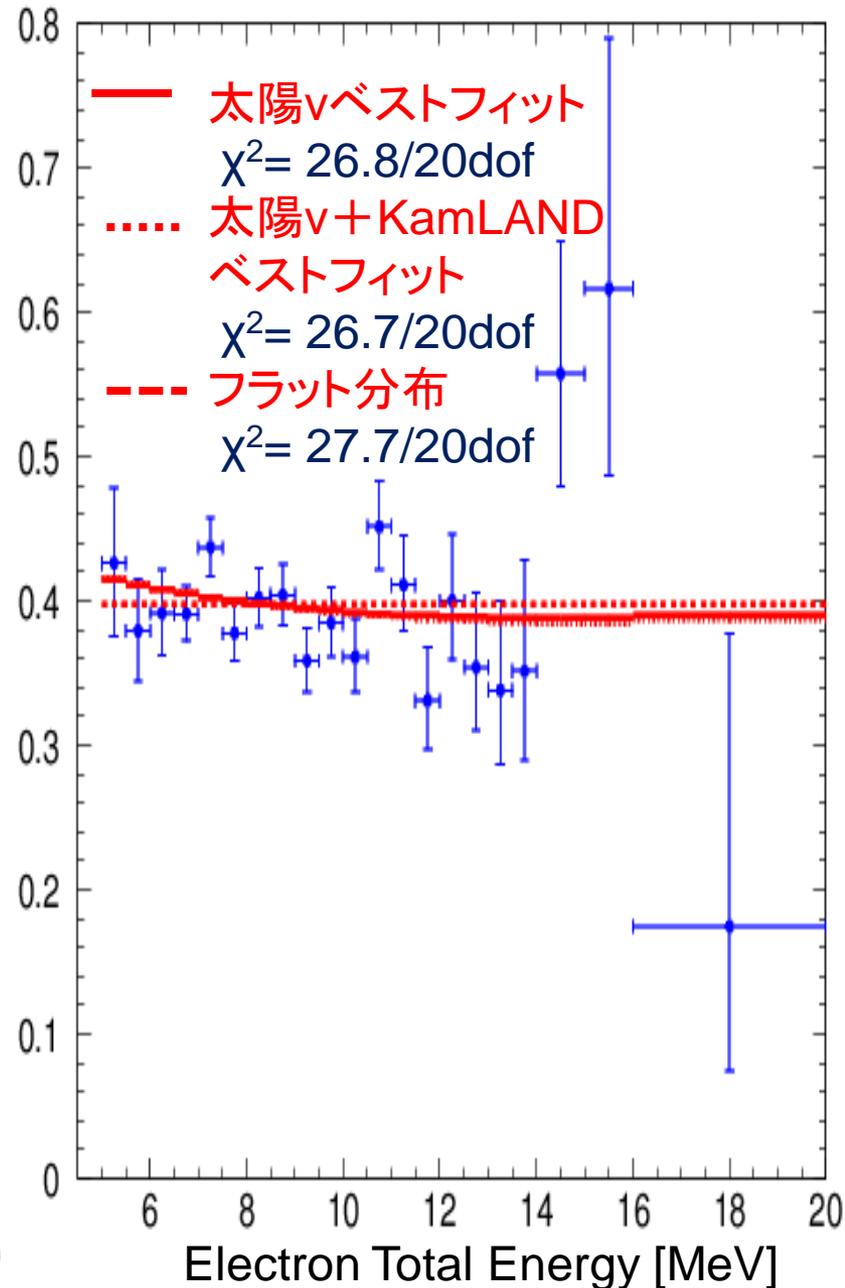
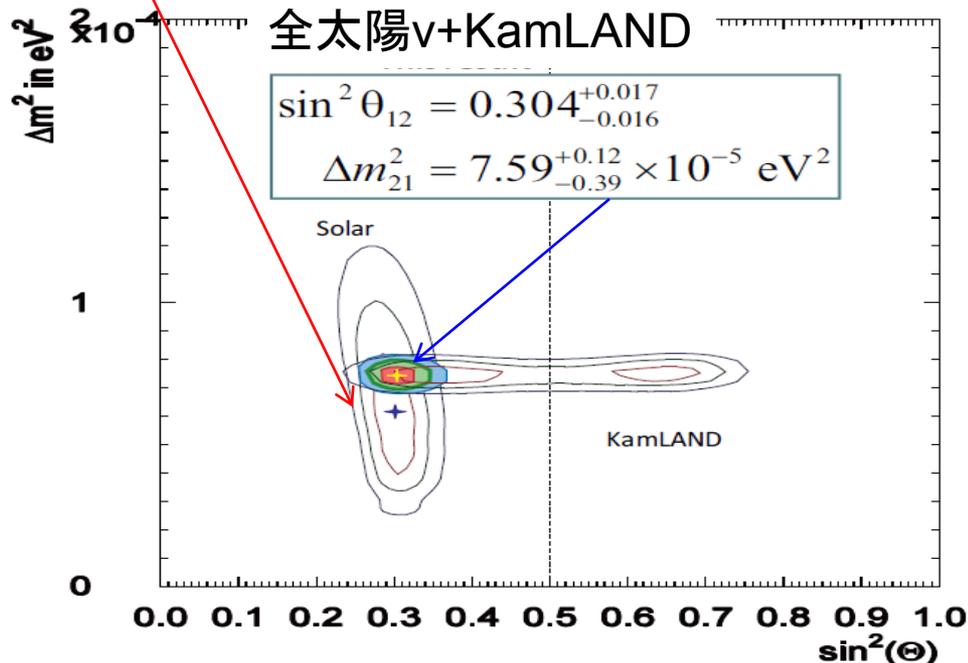


# 振動解析結果とまとめ

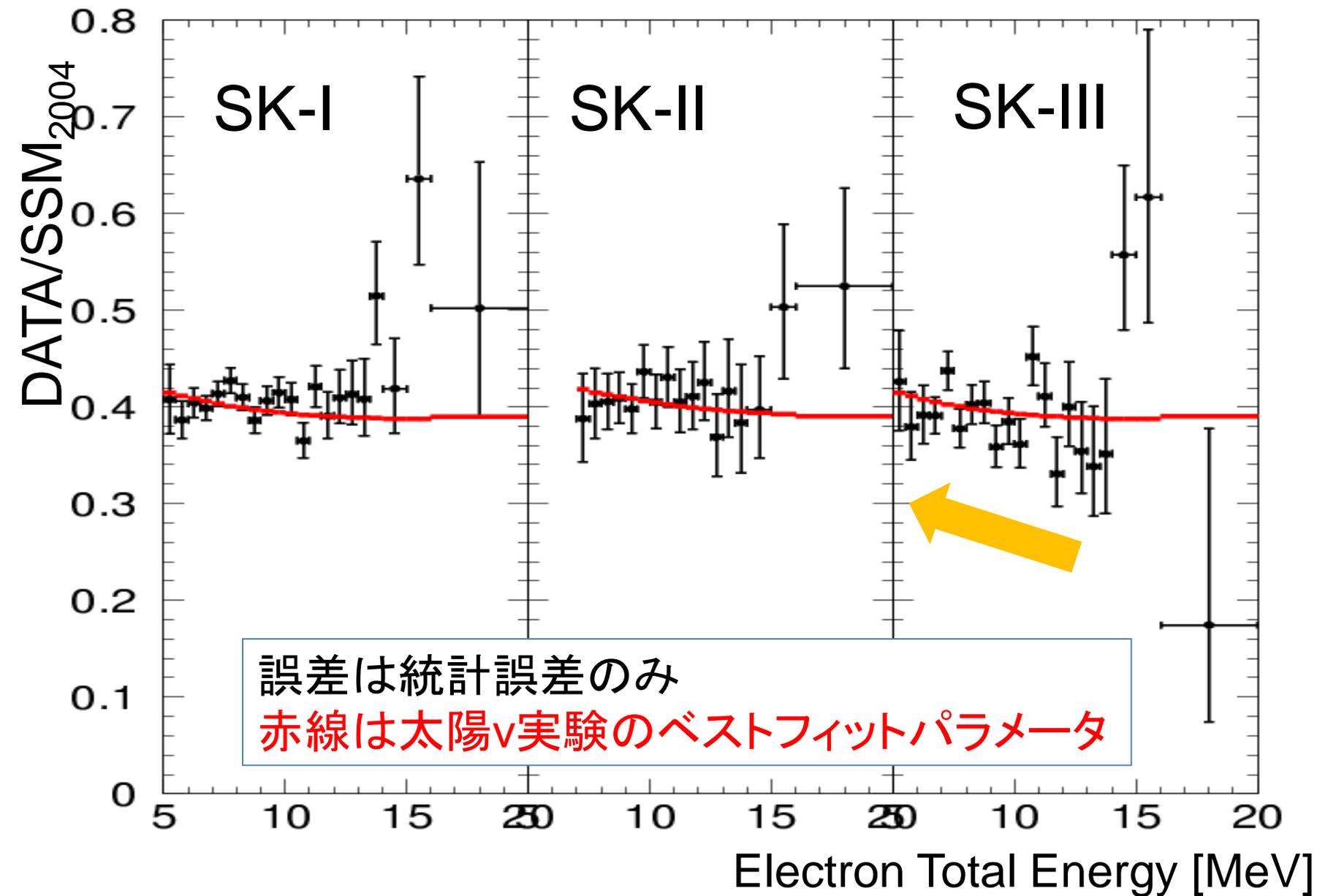
SK-IIIで得られた結果とその他全ての太陽ニュートリノ観測実験の結果と合わせることで、これまでで一番精度よくパラメータを決定することができた。  
スペクトルの歪みは統計的に有意ではない。

## 全太陽ν実験からの結果

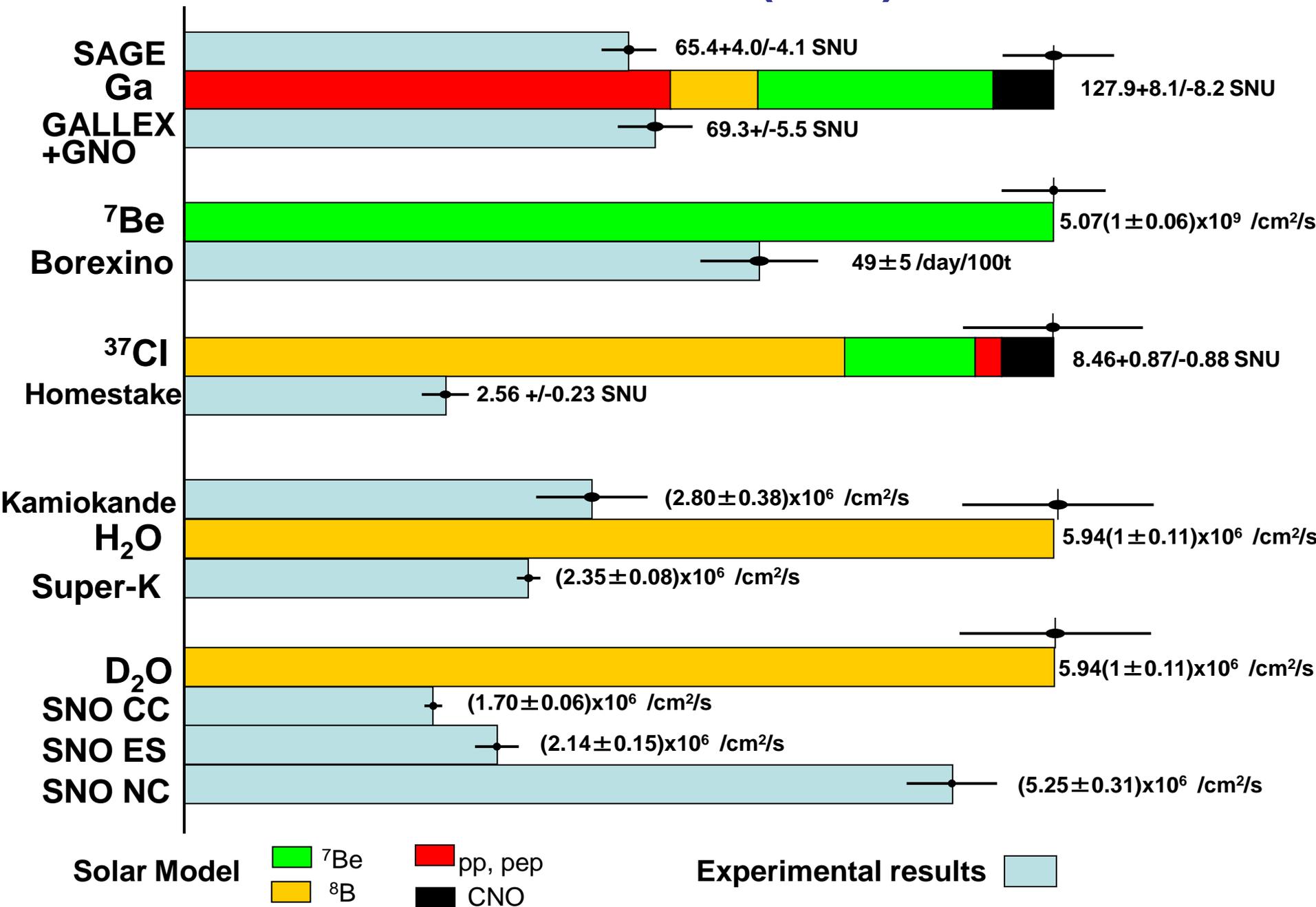
$$\sin^2 \theta_{12} = 0.29^{+0.024}_{-0.011}$$
$$\Delta m_{12}^2 = 6.03^{+1.21}_{-1.67} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$



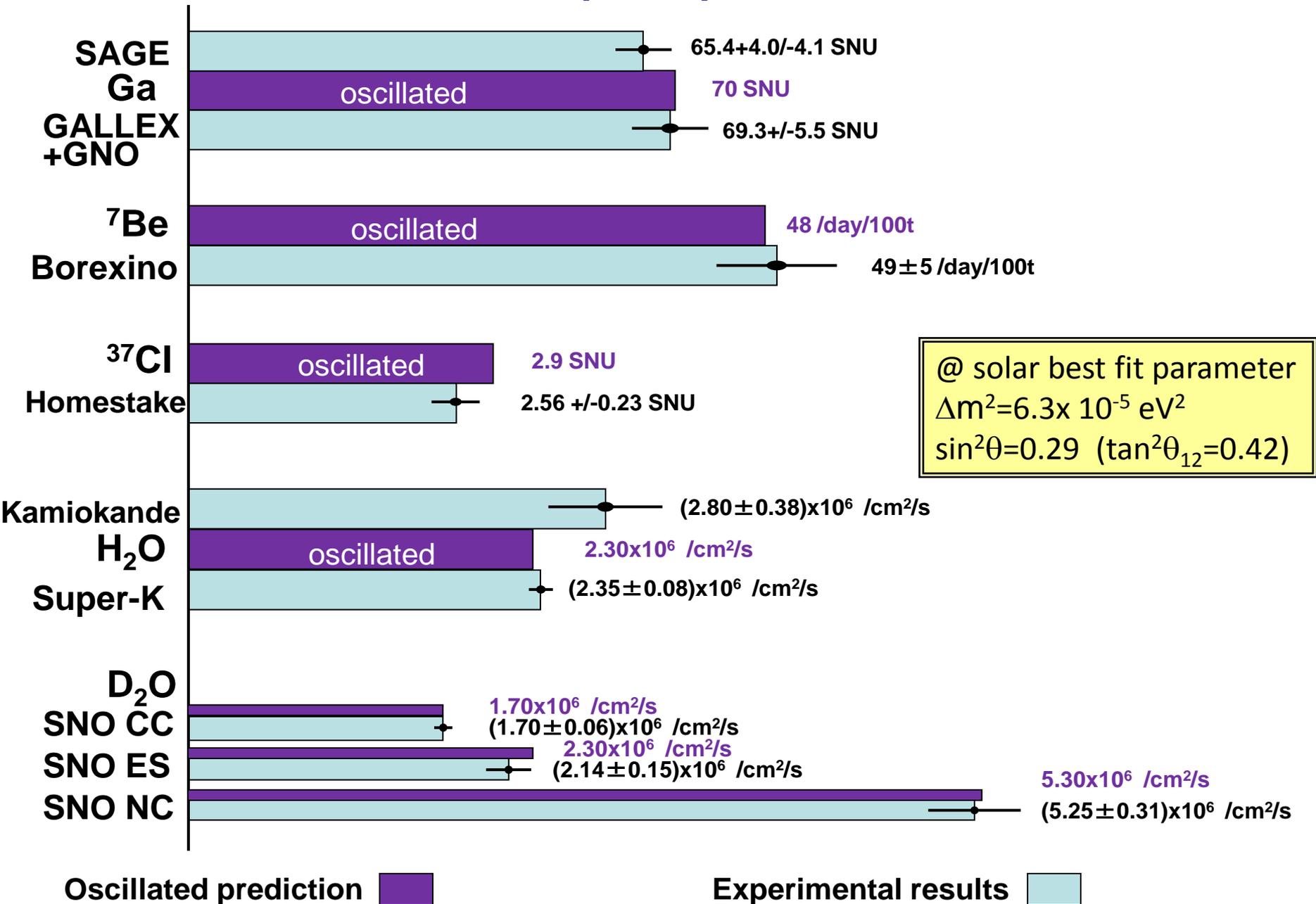
# SK-I,II,IIIスペクトルと振動解析からの期待値



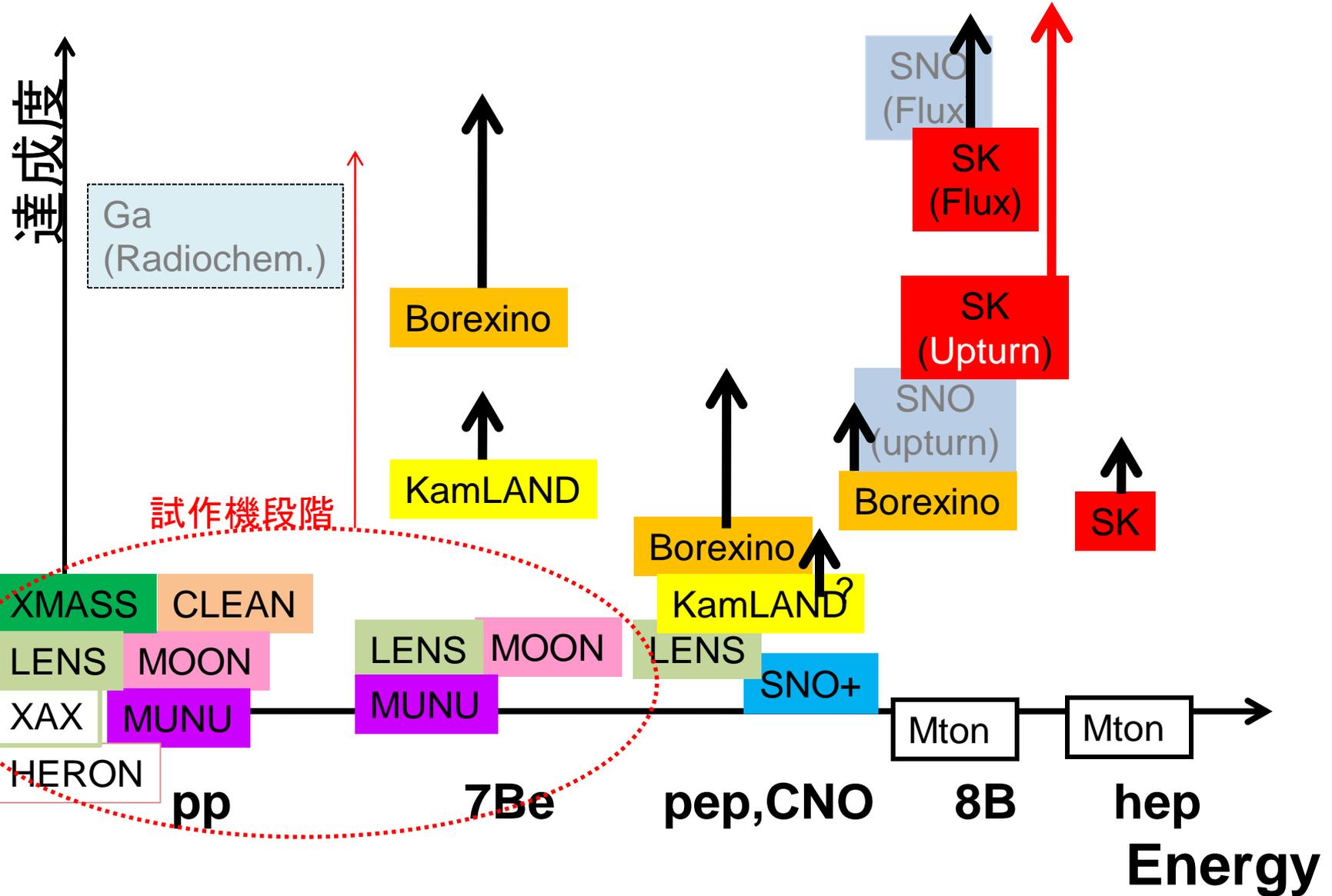
# 太陽ν観測の現状(+old)



# 太陽ν観測の現状(+old) その2(振動あり)

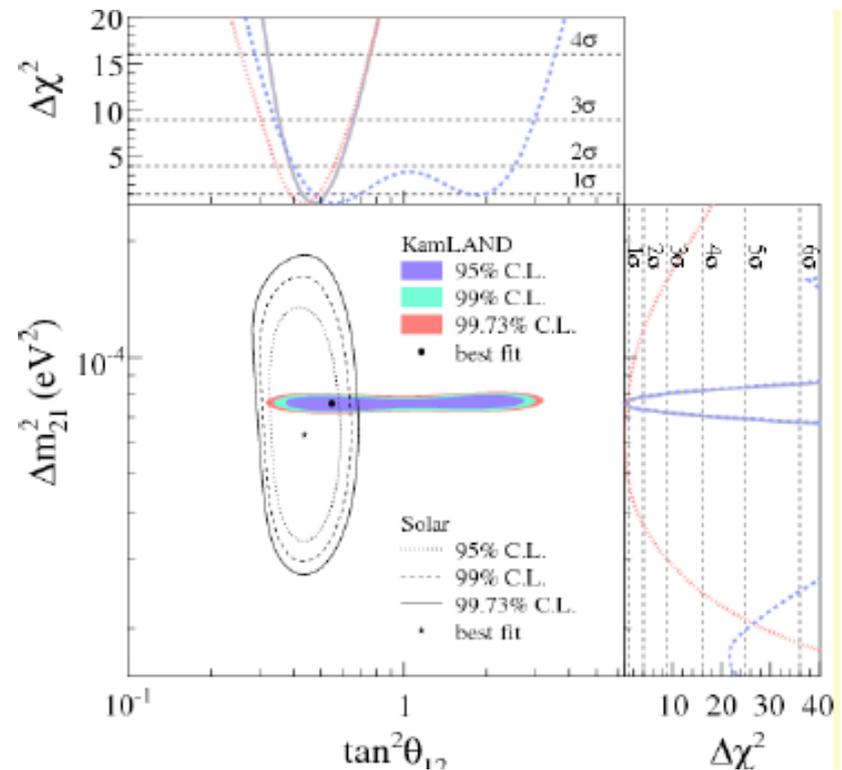


# 太陽ν観測マップ



# 太陽 $\nu$ + KamLAND における $\theta_{13}$ の測定

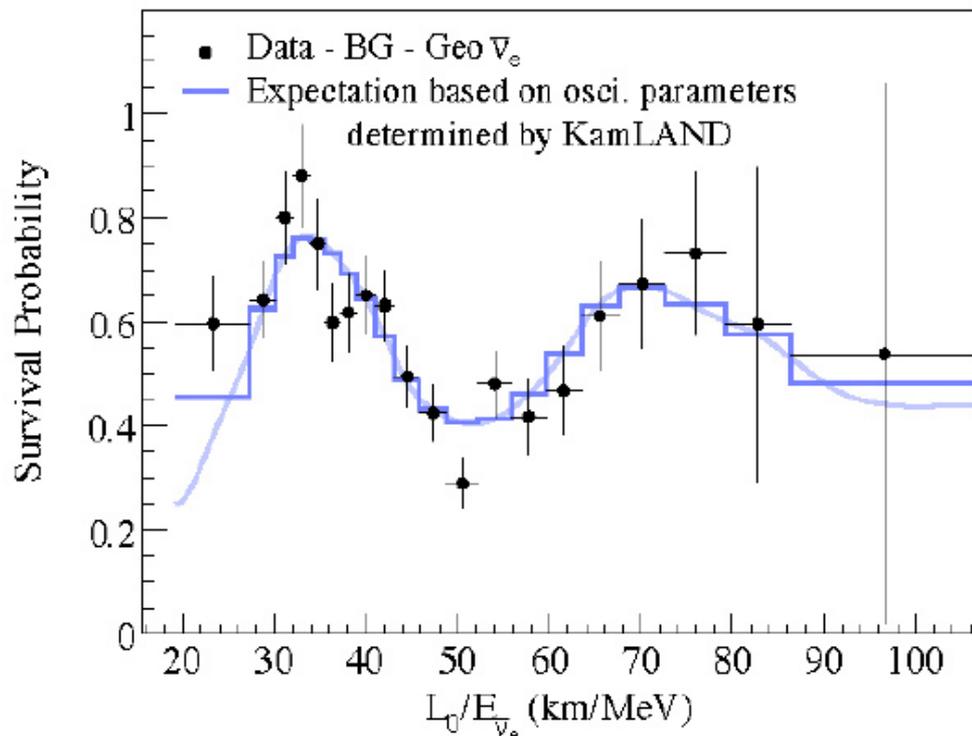
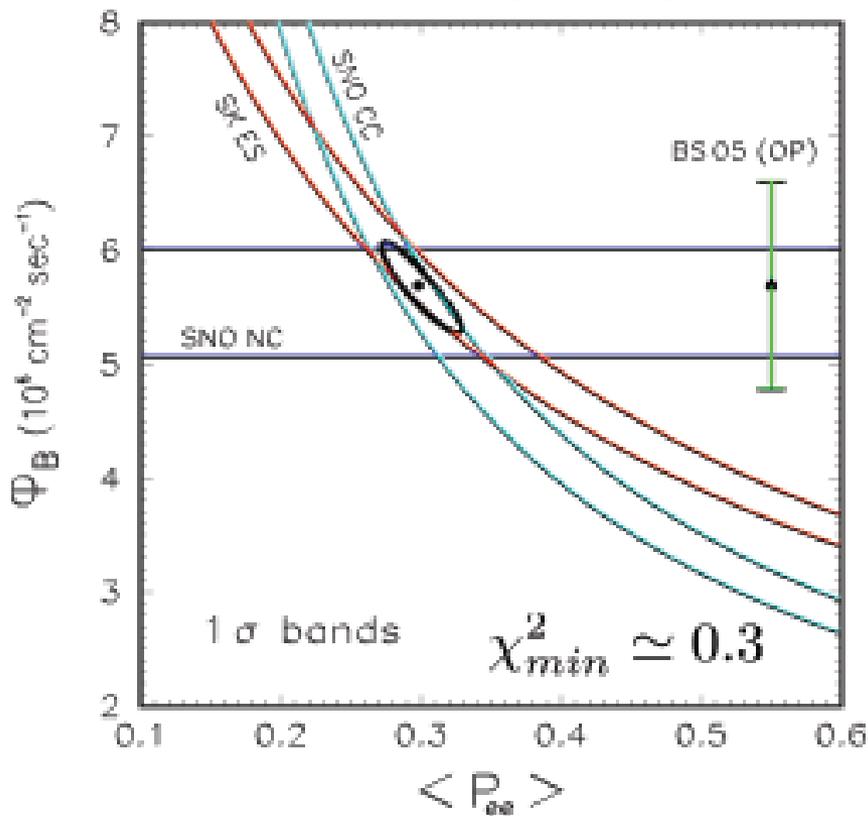
- イントロ
- 方法
- 測定結果
- 展望



KamLAND (2008) from official site

# 太陽ν、KamLAND 大丈夫？

## SNO-III (2008)



KamLAND L/E精密測定

Fogli et.al arXiv:0905.3549v2

例えば、SK-ES, SNO-CCからの8BFflux,  
SNO-NCの8BFflux,  
SSMの予想する8BFflux  
はエラーの範囲で一致

大丈夫です。  
太陽ν観測もKamLANDも  
結果に十分自信を持っています  
(エラーの範囲内で)

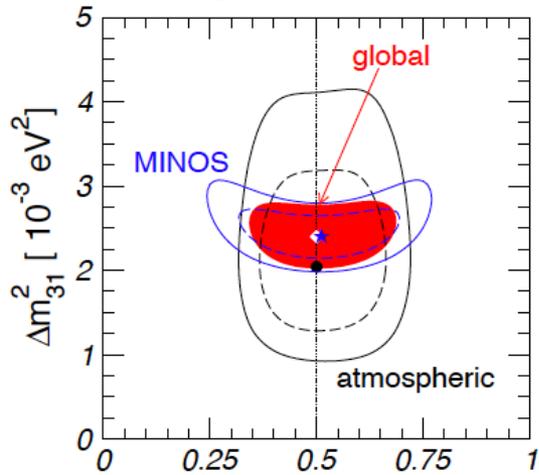
# 三世代解析

$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{rotation around x-axis with angle } \theta_{23}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{rotation around y-axis with angle } \theta_{13}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{rotation around z-axis with angle } \theta_{12}}$$

atmospheric,  
accelerators  
 $\theta_{23} \sim 45^\circ$

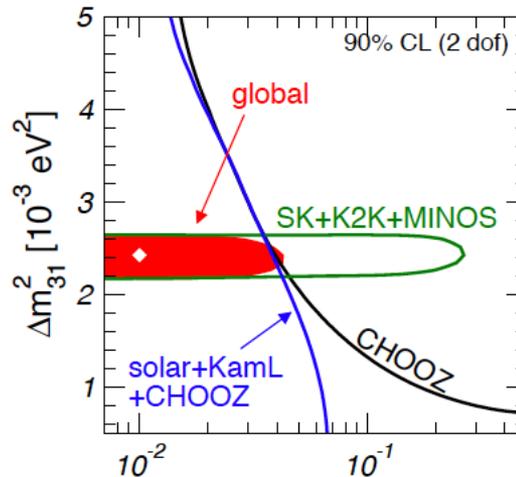
CP violation can be observed  
if  $\theta_{13} > 0$

solar,  
reactors  
 $\theta_{12} \sim 34^\circ$



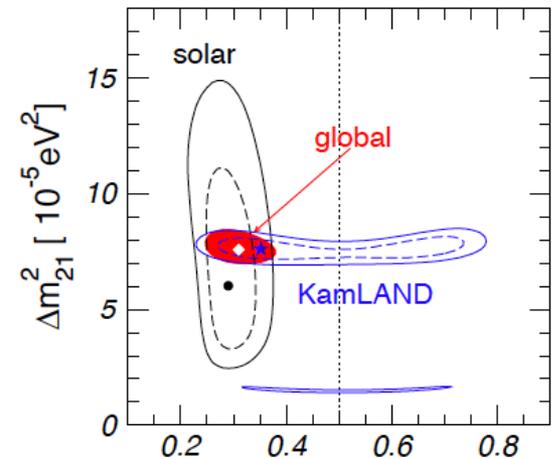
$$\sin^2 \theta_{23} = 0.50^{+0.07}_{-0.06}$$

$$\Delta m_{23}^2 = 2.40^{+0.12}_{-0.11} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$



$$\sin^2 \theta_{13} < 0.035, 90\% \text{ CL}$$

$$< 0.056, 3\sigma$$



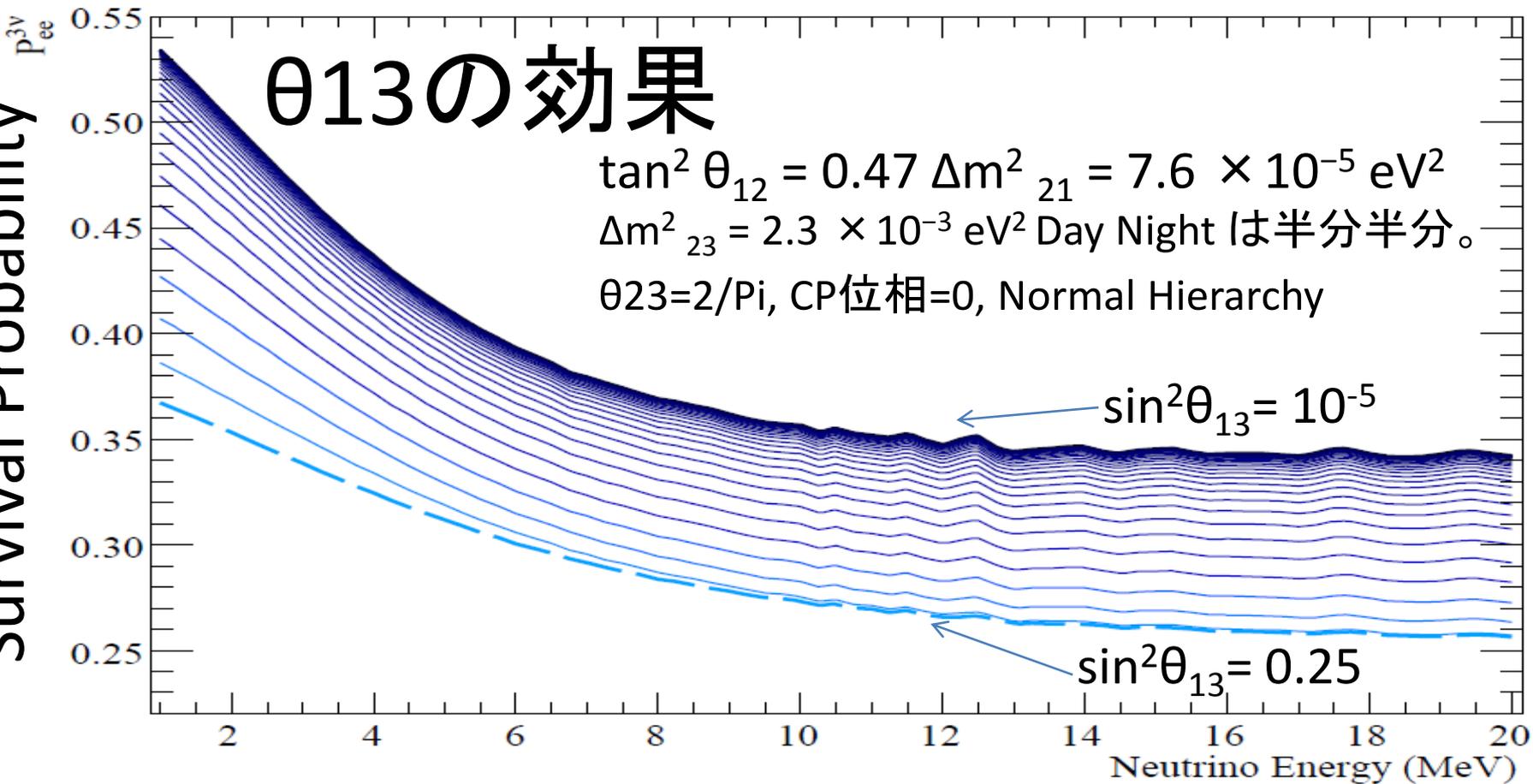
$$\sin^2 \theta_{12} = 0.304^{+0.022}_{-0.016}$$

$$\Delta m_{21}^2 = 7.65^{+0.23}_{-0.20} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

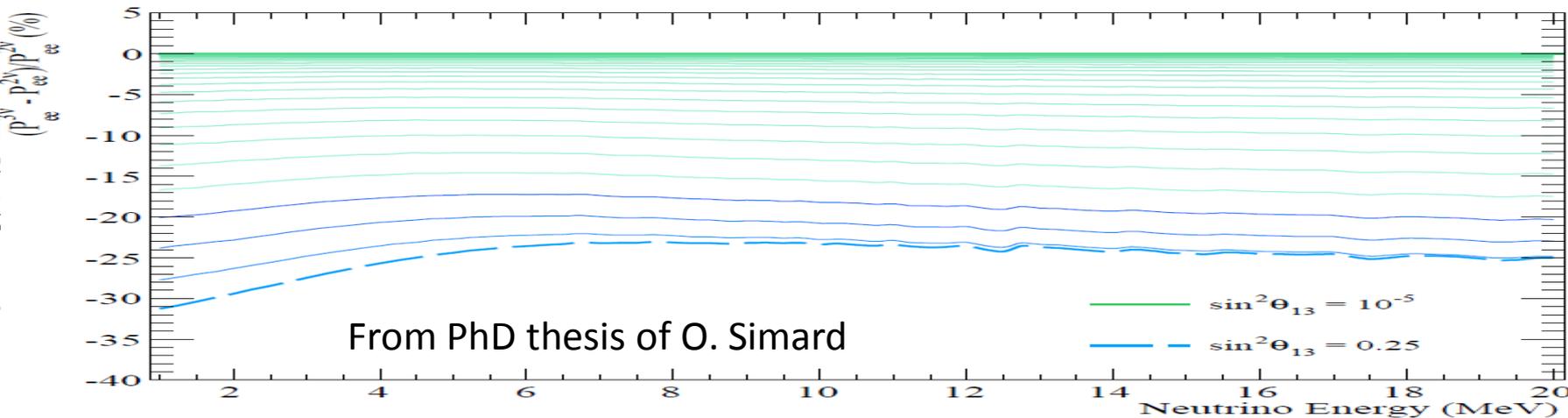
# $\theta_{13}$ の効果

$\tan^2 \theta_{12} = 0.47$   $\Delta m^2_{21} = 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$   
 $\Delta m^2_{23} = 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  Day Night は半分半分。  
 $\theta_{23} = 2/\text{Pi}$ , CP位相=0, Normal Hierarchy

Survival Probability

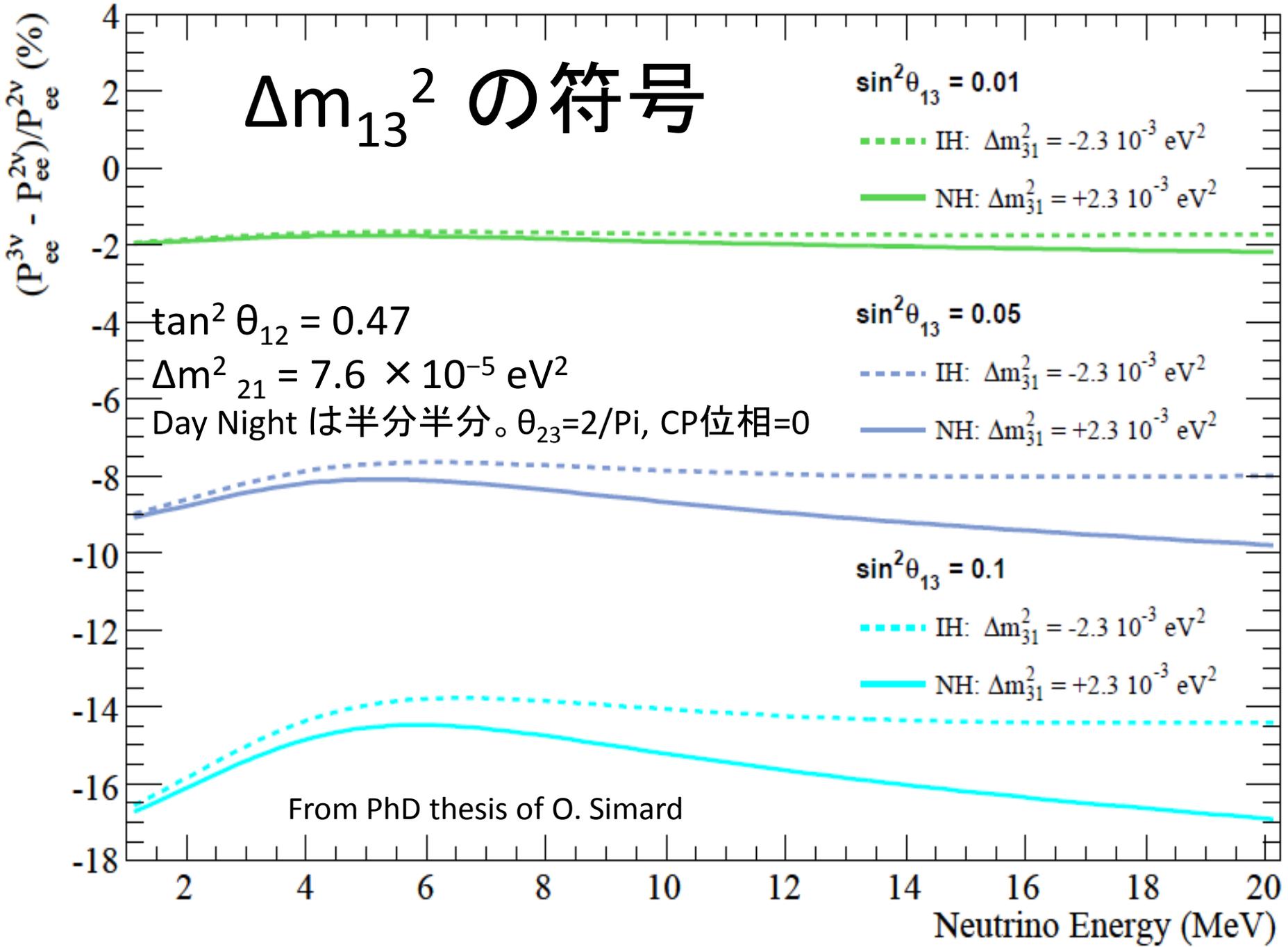


2世代振動との差



From PhD thesis of O. Simard

# $\Delta m_{13}^2$ の符号



# $\theta_{13}$ の項の確認

Low E, vacuum

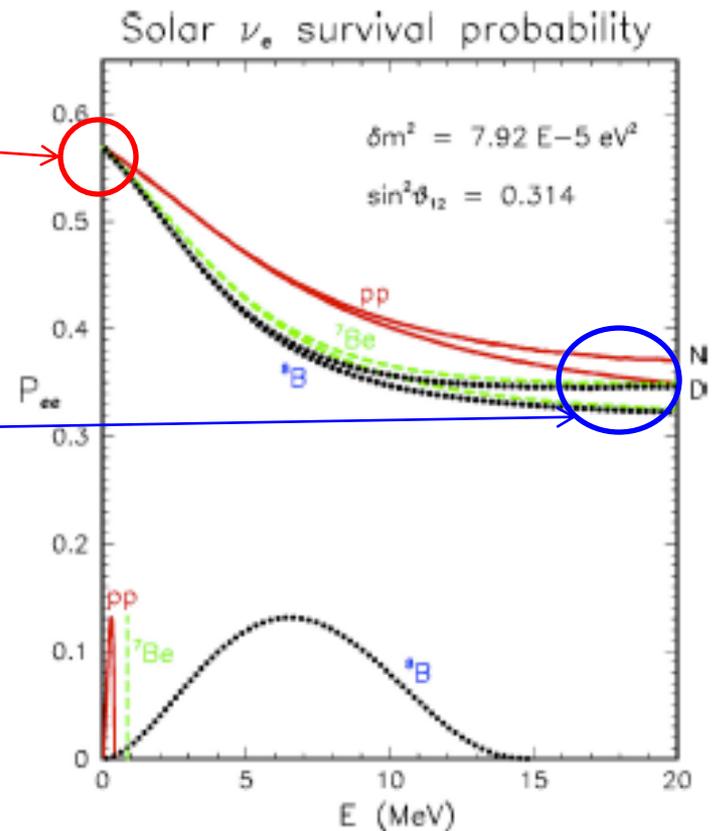
$$P_{ee} \simeq (1 - 2s_{13}^2)(1 - 2s_{12}^2 c_{12}^2)$$

High E, adiabatic MSW

$$P_{ee} \simeq (1 - 2s_{13}^2)(+s_{12}^2)$$

KamLAND, vacuum

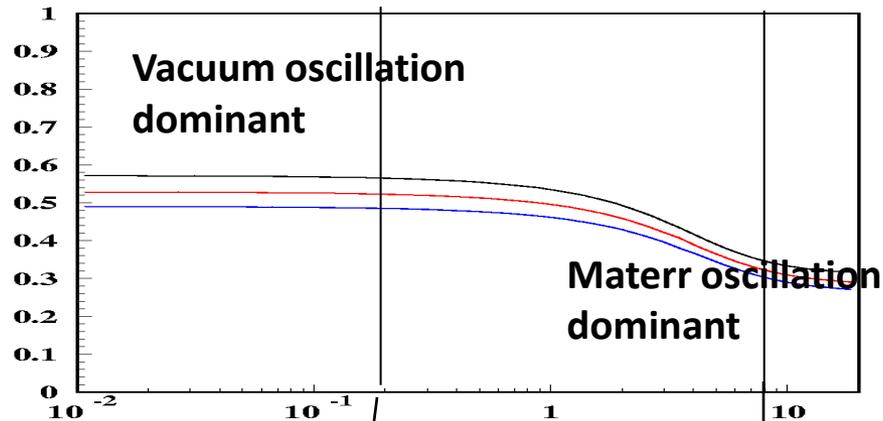
$$P_{ee} \simeq (1 - 2s_{13}^2)(1 - 4s_{12}^2 c_{12}^2 \sin^2(\delta m^2 L / 4E))$$



Fogli @ Neutrino Telescopes 2009

※物質効果から真空振動へのtransitionは上の式に含まれていません。

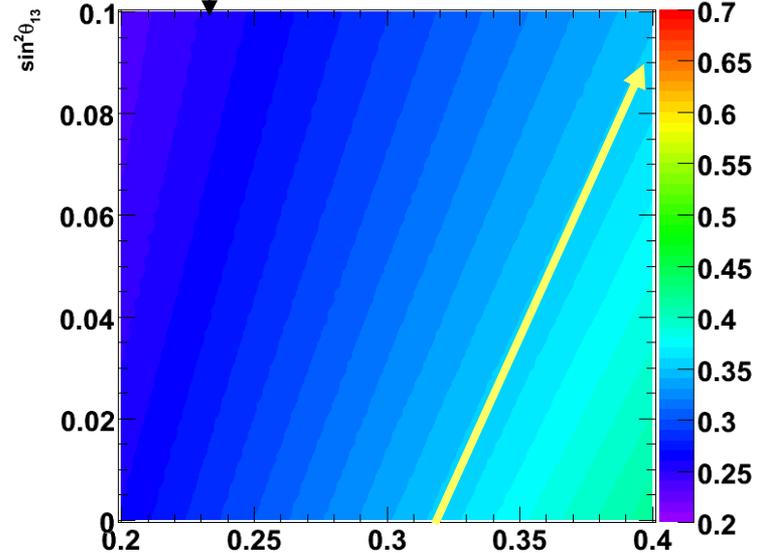
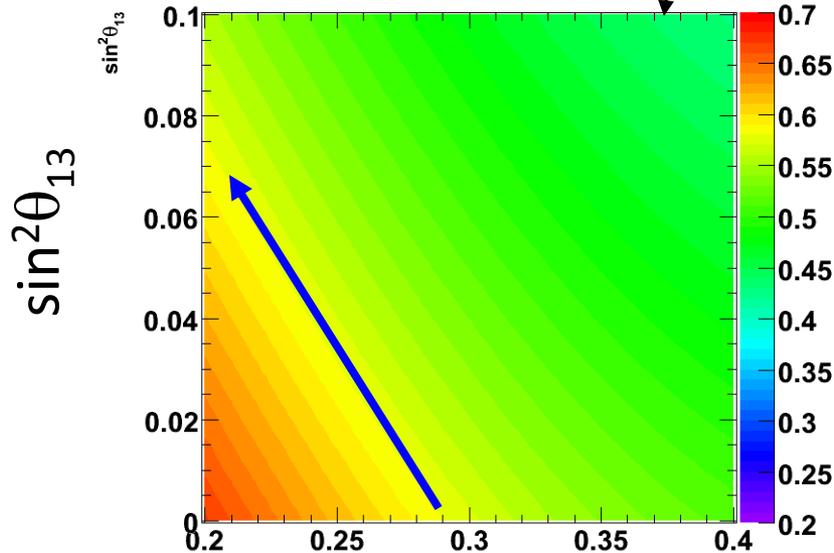
# 太陽ニュートリノにおける $\theta_{13}$



$\Delta m_{12}^2 = 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$   
 $\sin^2 \theta_{12} = 0.31$  ( $\tan^2 \theta_{12} = 0.45$ )  
 $\sin^2 \theta_{13} = 0.0$   
 $\sin^2 \theta_{13} = 0.04$   
 $\sin^2 \theta_{13} = 0.08$

$$P_{ee} \sim (1 - 2\sin^2 \theta_{13})(1 - (1/2)\sin^2 2\theta_{12})$$

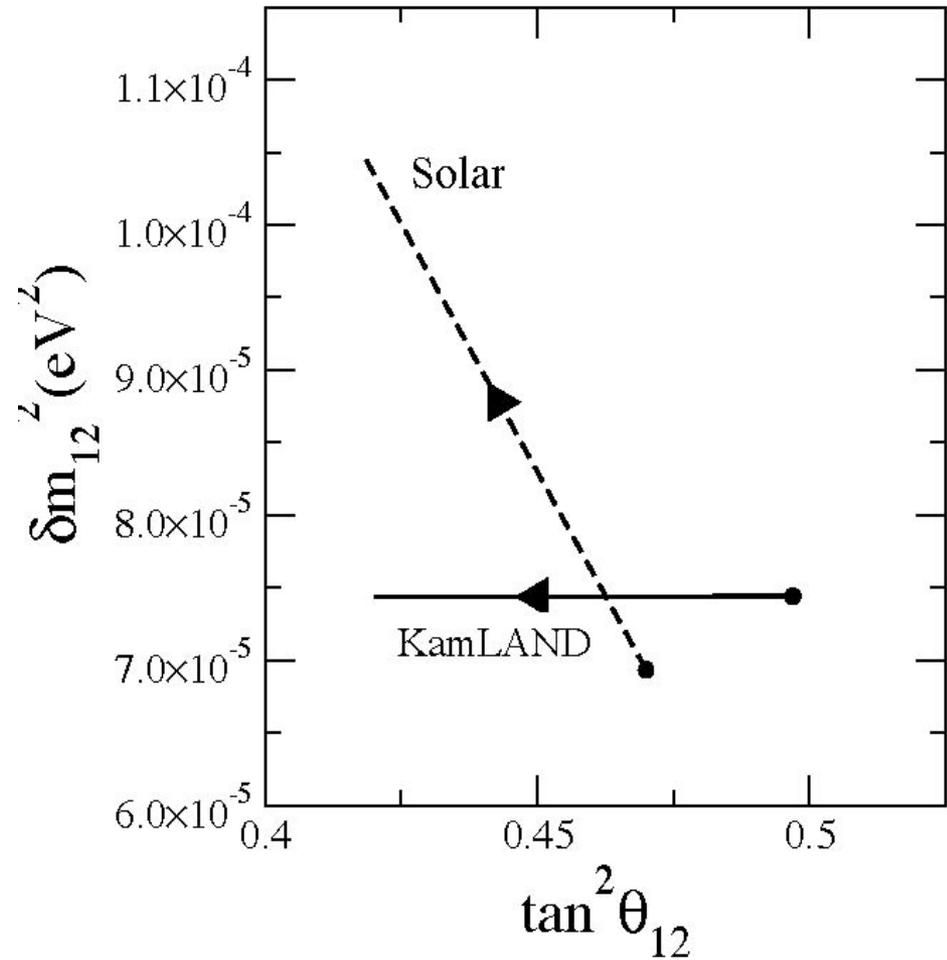
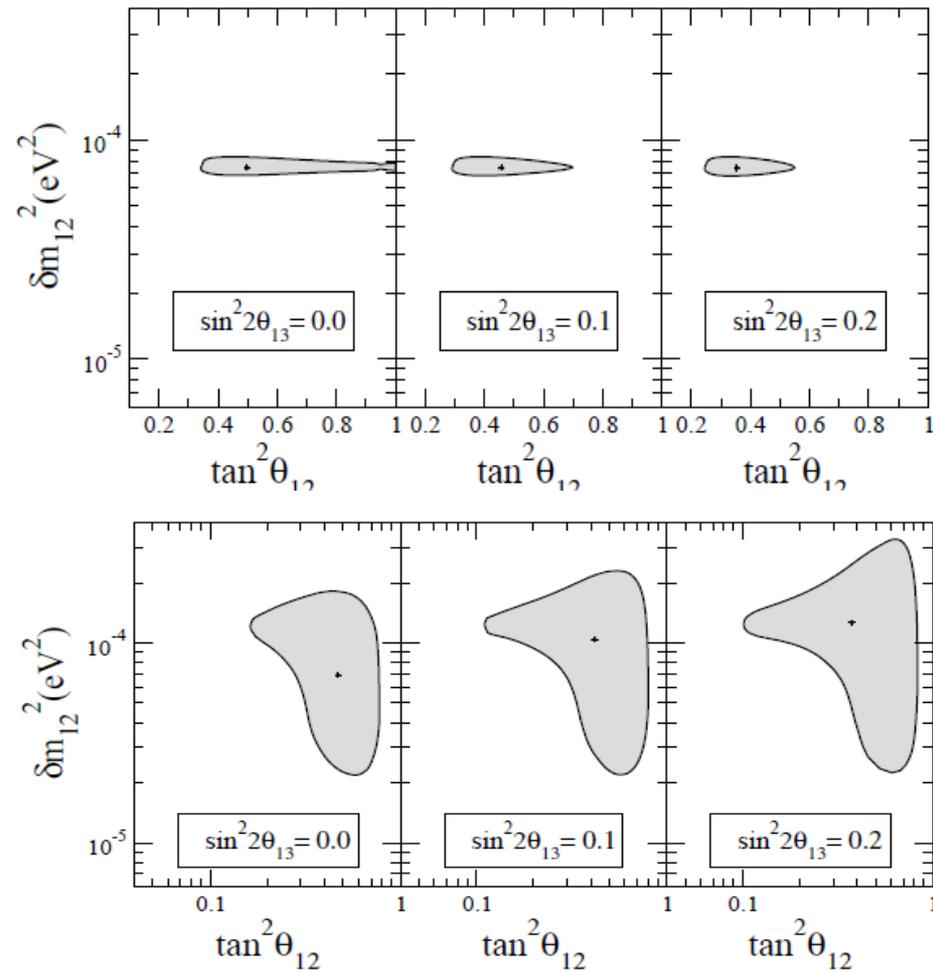
$$P_{ee} \sim (1 - 2\sin^2 \theta_{13})(\sin^2 \theta_{12})$$



$\sin^2 \theta_{12}$

$\sin^2 \theta_{12}$

# 太陽ν観測とKamLAND観測の関係



- Balantekin & Yilmaz [arXiv:0804.3345, J.Phys. G 35, 075007 (2008)]

# $\theta_{13}$ の効果

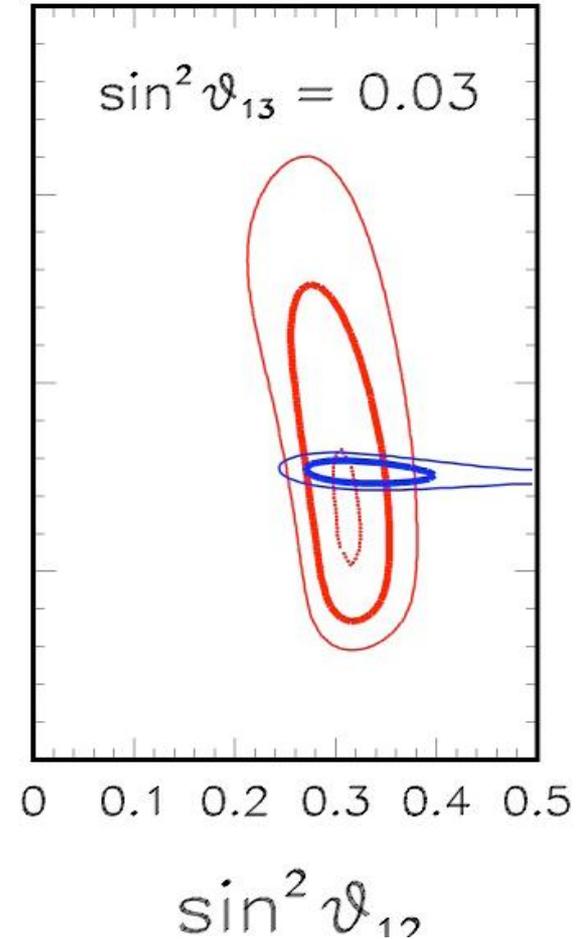
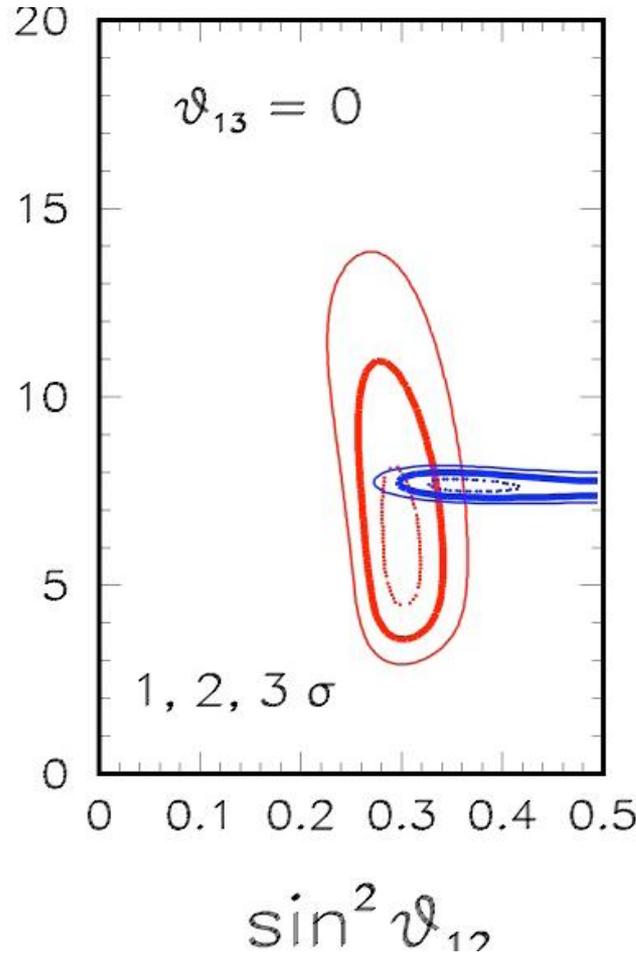
赤 ; 太陽 $\nu$

Radiochemical  
SNO-I,II,III  
SK ES

青 : KamLAND  
2008

$\theta_{13} > 0$  の場合  
Solar が予想する  $\theta_{12}$   
と KamLAND の予想する  $\theta_{12}$   
とが近くなる。

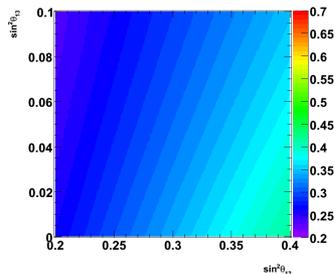
$\delta m^2 \text{ (} 10^{-5} \text{ eV}^2 \text{)}$



# Global解析

- SK-I,II,III Spectrum and time variation (2006,2007,2009)
- SNO : CC flux(2002+2005)  
NC flux(2007+2009),  
Day/Night asymmetry(2002)
- Radiochemical : Cl, Ga
  - New Ga rate:  $66.1 \pm 3.1$  SNU (All Ga global) From Phys.Rev.C80:015807,2009.
- Borexino
  - ${}^7\text{Be}$  rate:  $48 \pm 4$  cpd/100tons  
PRL 101: 091302, 2008
- KamLAND 3<sup>rd</sup> results PRL 100, 221803(2008) (1600 day )
- 実際に動かす振動パラメータ
  - $\theta_{12}$ 、 $\theta_{13}$ 、 $\Delta m_{12}$  ( $\theta_{12}$   $\Delta m_{12}$ :LMA,  $\sin^2\theta_{13}=0-0.1$ )
- $\Delta m_{23}=2.4 \times 10^{-3}\text{eV}^2$
- $\theta_{23}=2/\text{Pi}$ , CP位相=0, Normal Hierarchy

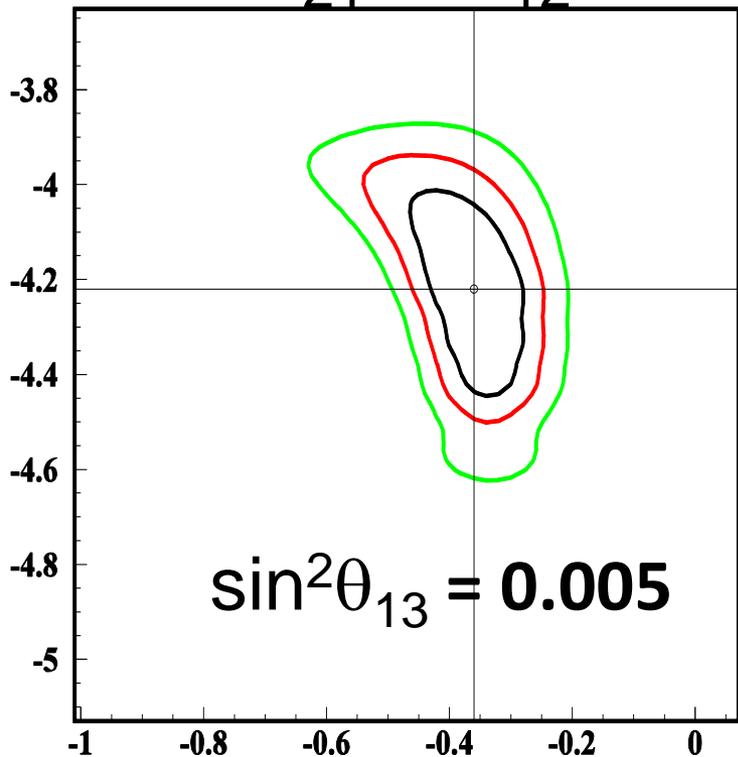
# SK+SNO



# による制限

$\log(\Delta m^2_{21})$

$\Delta m^2_{21}$  &  $\theta_{12}$

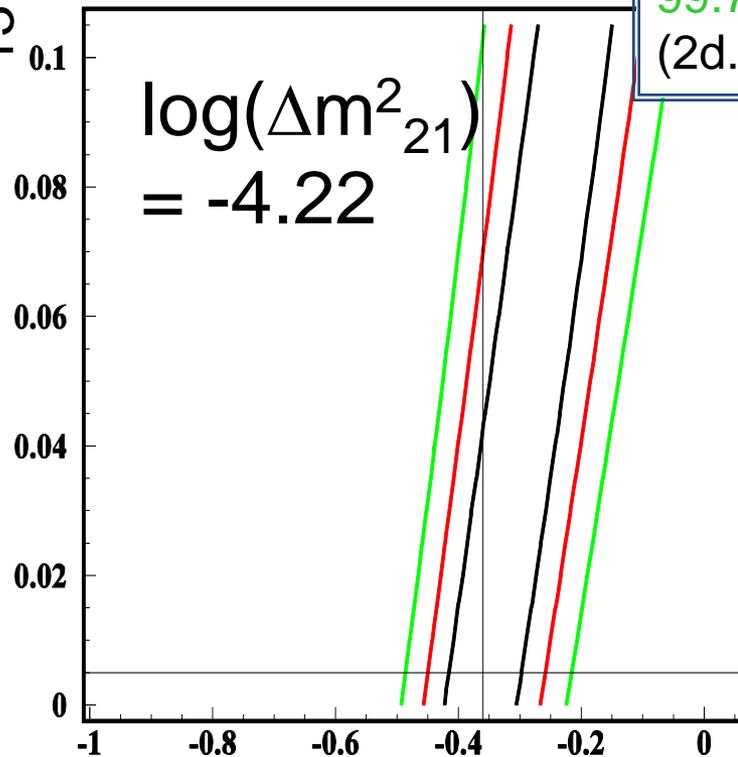


$$\sin^2\theta_{13} = 0.005$$

$\log_{10}(\tan^2\theta_{12})$

$\theta_{13}$  &  $\theta_{12}$

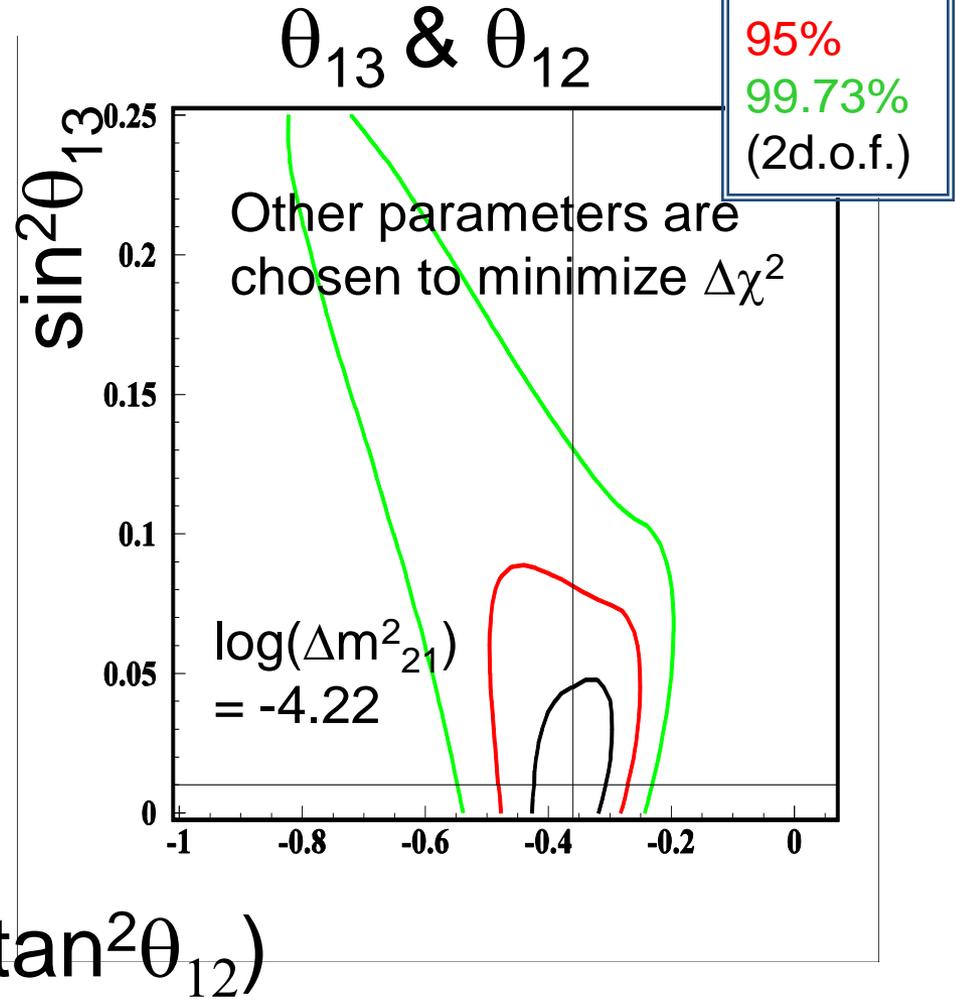
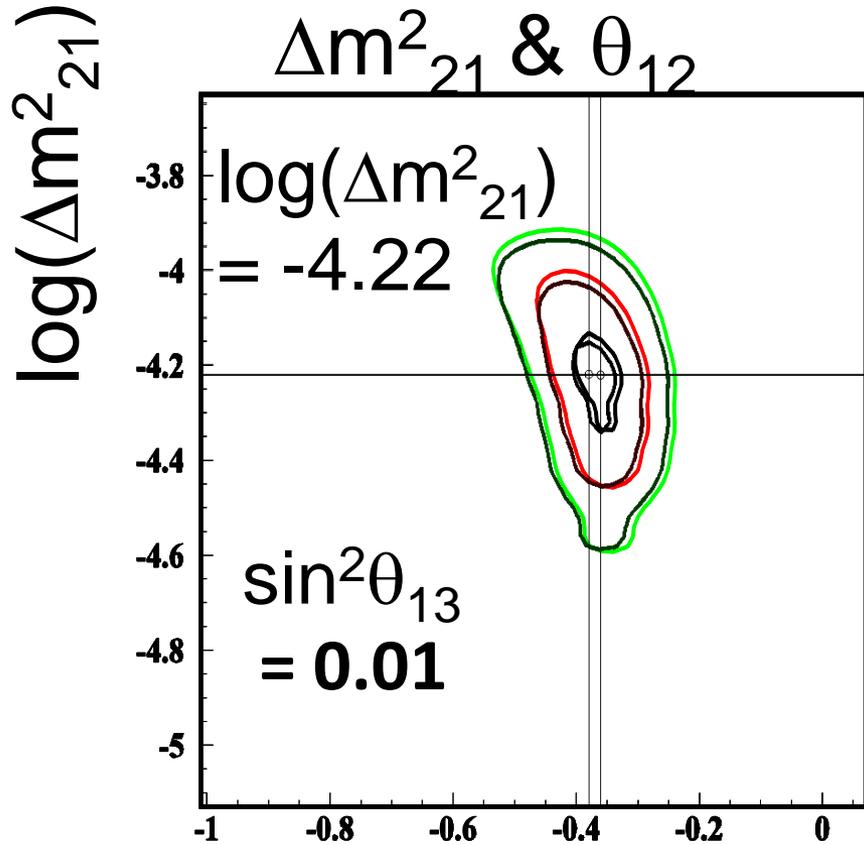
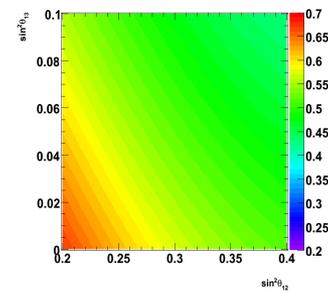
$\sin^2\theta_{13}$



$$\log(\Delta m^2_{21}) = -4.22$$

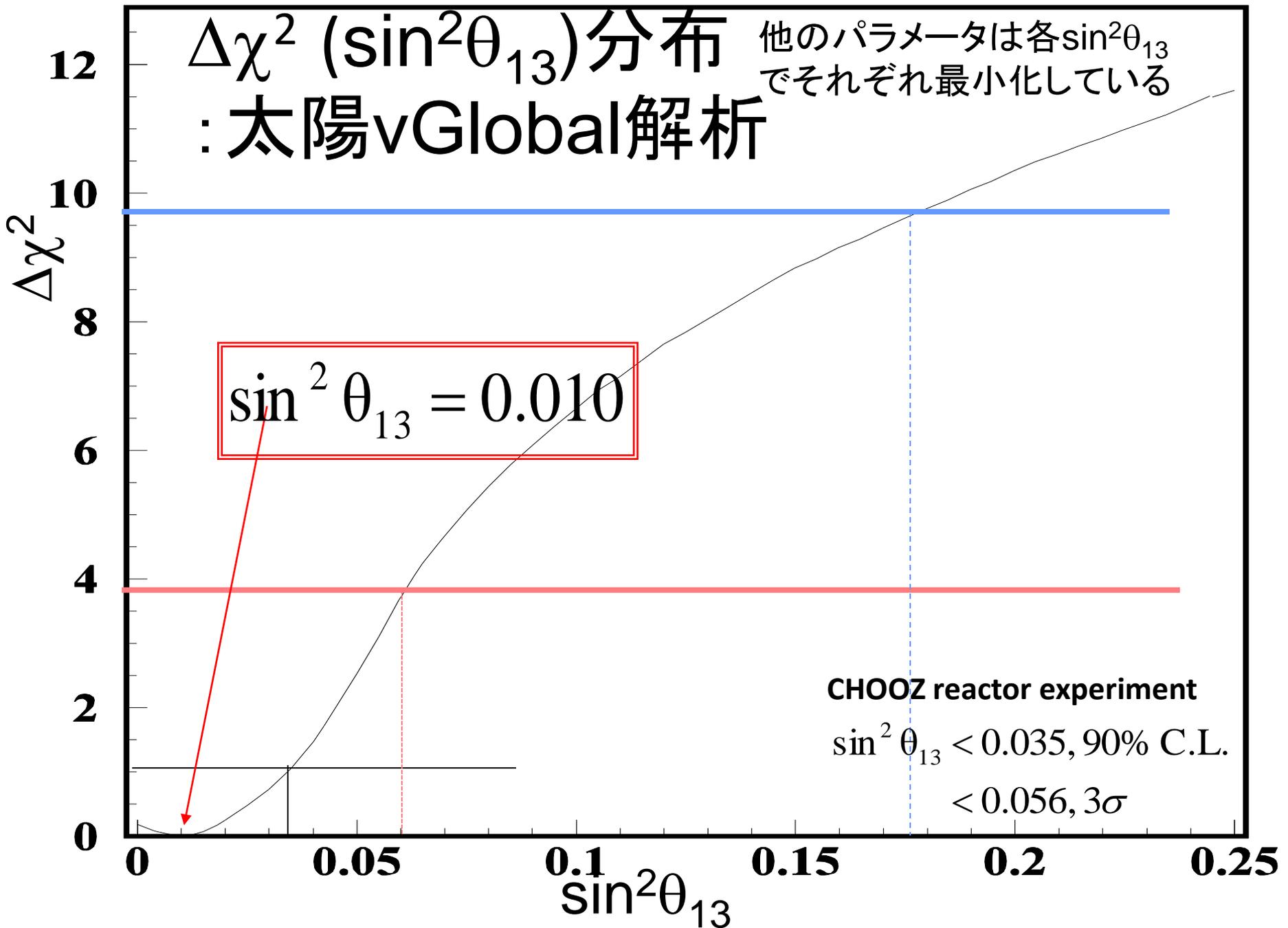
68.3%  
95%  
99.73%  
(2d.o.f.)

# SK+SNO+Radiochemical+Borexino



# $\Delta\chi^2 (\sin^2\theta_{13})$ 分布 : 太陽νGlobal解析

他のパラメータは各 $\sin^2\theta_{13}$   
でそれぞれ最小化している

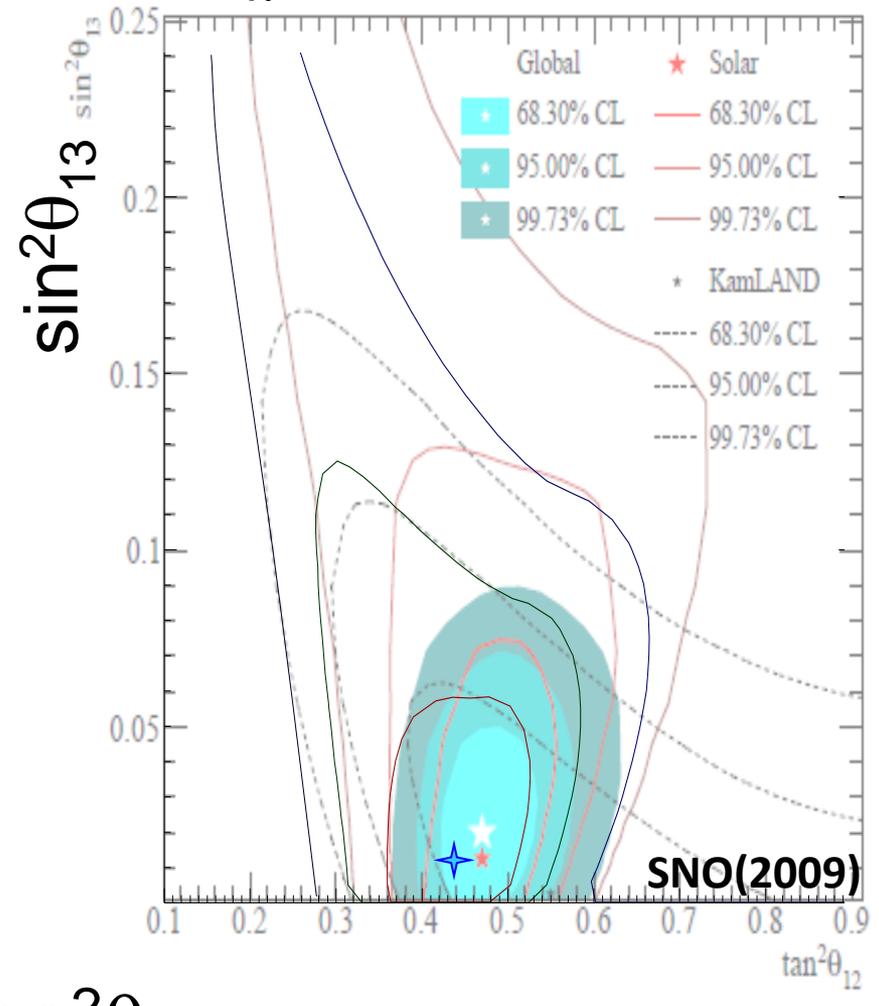
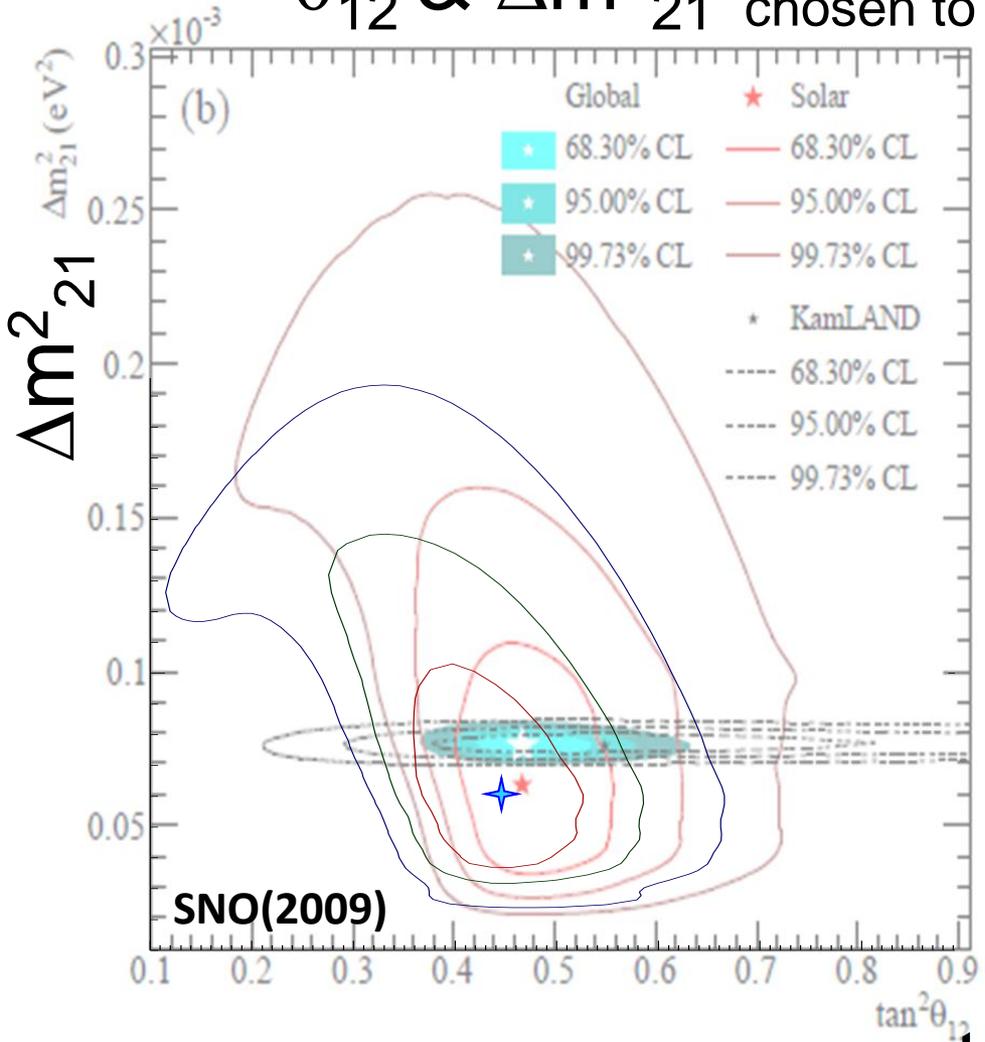


# 太陽ν + KamLAND

## SNOグループの解析(2009)との比較

68%  
95%  
99.73%  
(2d.o.f.)

$\theta_{12}$  &  $\Delta m^2_{21}$  Other parameters are chosen to minimize  $\Delta\chi^2$   $\theta_{13}$  &  $\theta_{12}$



$\tan^2\theta_{12}$

# 得られた結果

SNOの解析

$$\sin^2 \theta_{13} (\times 10^{-2})$$

Solar

$$< 8.10 \text{ (95\% C.L.)}$$

Solar+KamLAND

$$2.00^{+2.09}_{-1.63}$$

SK: SK-I zenith spectra, SK-II day/night spectra

SNO: SNO-III, LETA

1.2 $\sigma$

SKの解析

$$\sin^2 \theta_{13} (\times 10^{-2})$$

Solar

$$< 6.1 \text{ (95\% C.L.)}$$

SK: SK-I, II, III spectrum and time variation

SNO: SNO-III+LETA (only NC rate), SNO-I, II (only CCrate)

FogliやSchwetzの解析とconsistentな結果がえられた。

1.2 $\sigma$ ~1.5 $\sigma$  の有意性で $\theta_{13} > 0$

# まとめ

- 太陽 $\nu$ とKamLANDの精密測定により  
それらの実験による $\theta_{13}$ 観測が可能になった。
- 太陽 $\nu$ +KamLANDによる $\theta_{13}$ の現状は  
 $1.2\sigma \sim 1.5\sigma$  の有意性で $\theta_{13} > 0$
- 今後KamLAND とSKのupdateで感度向上