



Summer camp on ILC  
accelerator and physics /  
detectors 2013

富山呉羽ハイツ  
2013年7月21日

# Neutrino Physics

東京大学宇宙線研究所  
神岡宇宙素粒子研究施設/  
Kavli IPMU

中畑 雅行

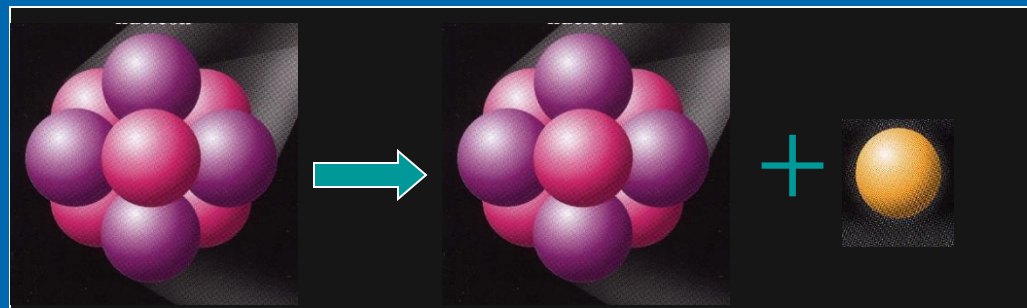
# 目次

- ニュートリノとは何か？
- ニュートリノ振動とは？
- 最近のニュートリノ研究の動向
- 将来のニュートリノ研究

# ニュートリノの存在の予言



W.パウリ



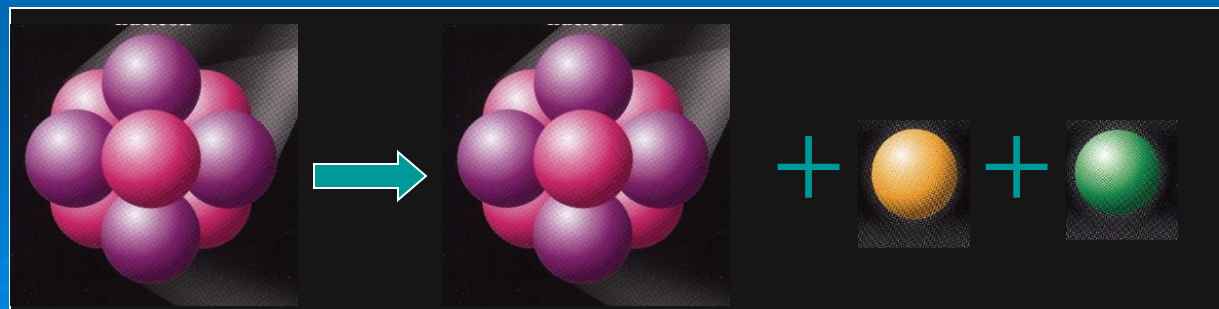
原子核

別な原子核

電子

なぜか、この反応ではエネルギーが保存していない ????

Pauli (1930年)



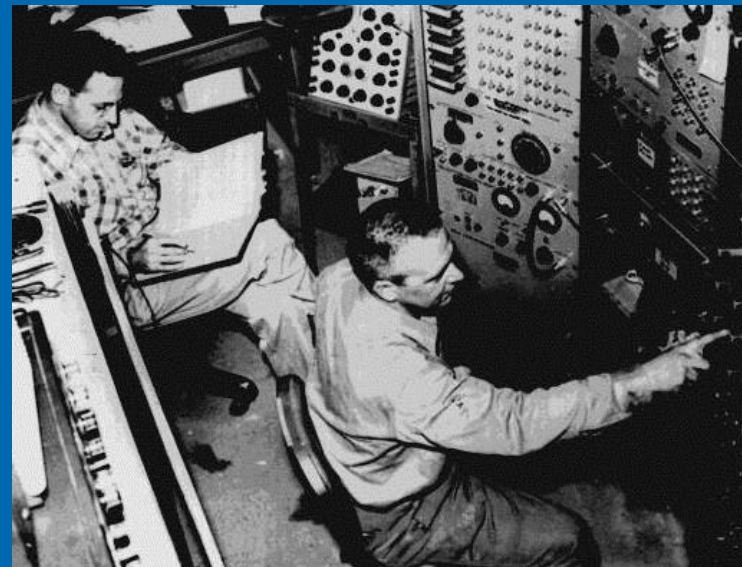
原子核

別な原子核

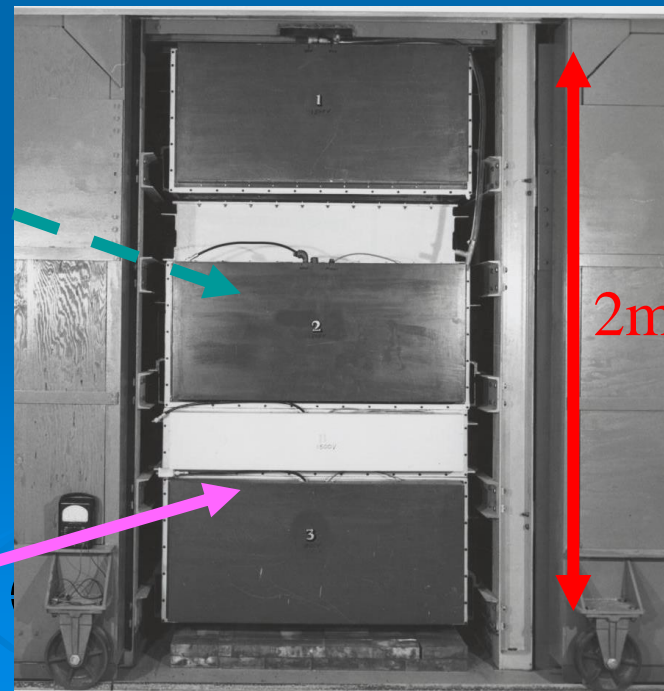
電子

$\nu$

# ニュートリノの発見(1950年代、アメリカ)

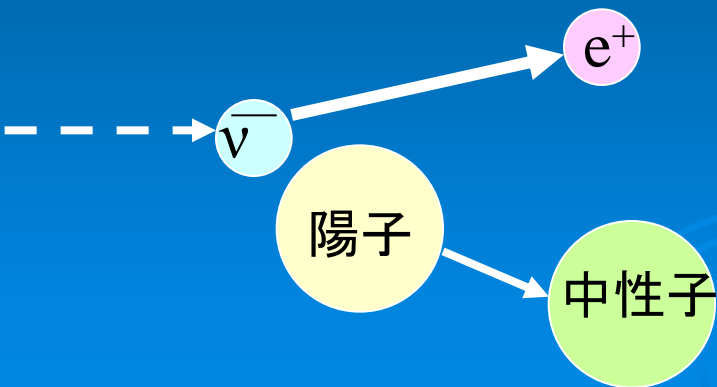


F.Reines とC.Cowen



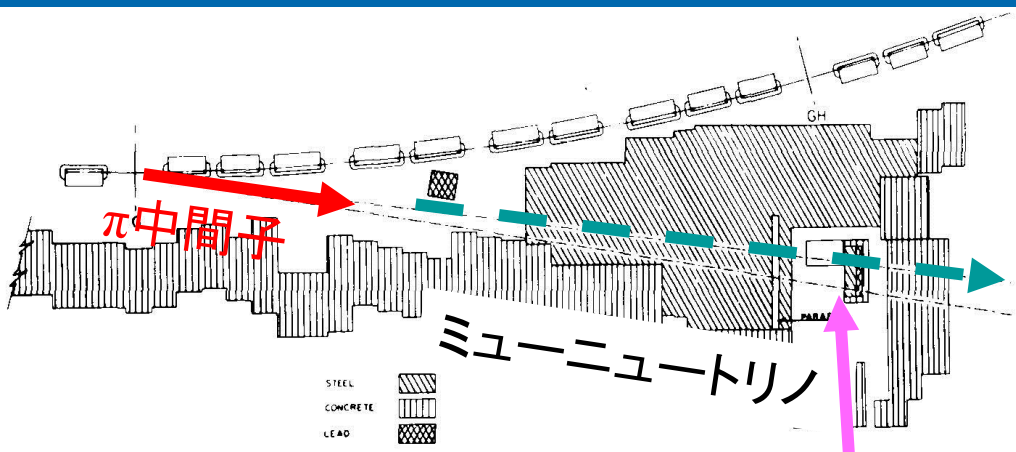
反ニュートリノ

ニュートリノ  
測定器





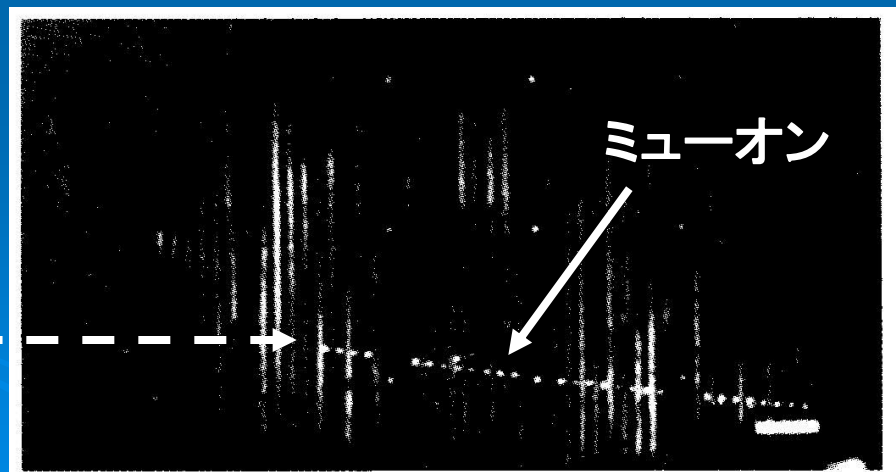
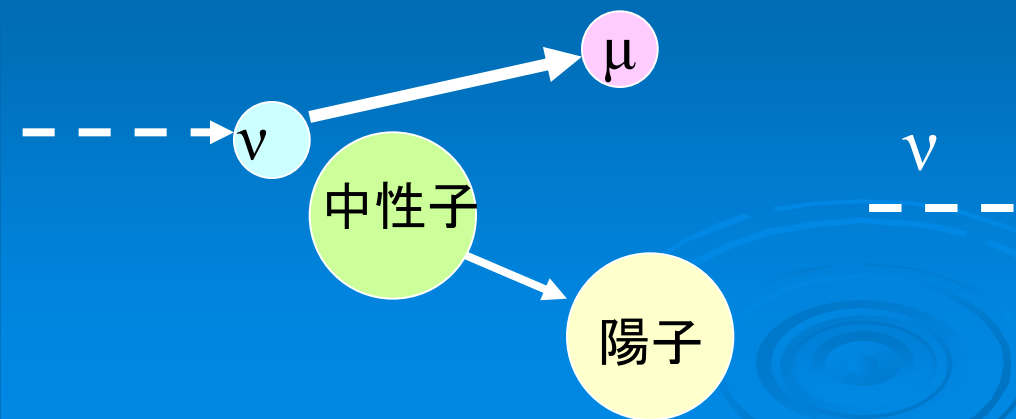
# ミューニュートリノの発見(1962年、アメリカ)



J.Steinberger, M.Schwartz and L.Lederman

加速器でミューニュートリノを大量に生成する。

ニュートリノ測定器



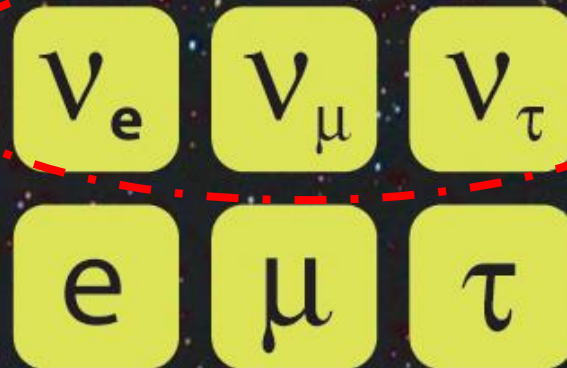
観測された事象の1例

# 素粒子と標準モデル

物質



クォーク



レプトン

力を媒介



ゲージボゾン



ヒッグス粒子

標準モデルではニュートリノが質量を持たないとされている。

# ニュートリノ振動

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

弱い相互作用の固有状態 ← 質量の固有状態  
ユニタリ行列

## 2つのニュートリノの場合

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

## $\nu_\alpha$ が $\nu_\beta$ に変わる確率

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$

$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$  (eV<sup>2</sup>): 質量の2乗の差

L (km): ニュートリノの飛行距離

E (GeV): ニュートリノのエネルギー

# 牧-中川-坂田-Pontecorvo(MNSP) 行列

$U =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +C_{23} & +S_{23} \\ 0 & -S_{23} & +C_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +C_{13} & 0 & +S_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_{13}e^{-i\delta} & 0 & +C_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +C_{12} & +S_{12} & 0 \\ -S_{12} & +C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} C_{12}C_{13} & S_{12}C_{13} & S_{13}e^{-i\delta} \\ -S_{12}C_{23}-C_{12}S_{13}S_{23}e^{-i\delta} & C_{12}C_{23}-S_{12}S_{13}S_{23}e^{-i\delta} & C_{13}S_{23} \\ S_{12}S_{23}-C_{12}S_{13}C_{23}e^{-i\delta} & -C_{12}S_{23}-S_{12}S_{13}C_{23}e^{-i\delta} & C_{13}C_{23} \end{pmatrix}$$

$s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ 、 $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$

$\delta$  : Dirac CP phase

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2 ; \Delta m_{12}^2, \Delta m_{23}^2, \Delta m_{31}^2$$



# ニュートリノ振動パラメータと実験の種類

$$U = \begin{pmatrix} C_{12}C_{13} & S_{12}C_{13} & S_{13}e^{-i\delta} \\ -S_{12}C_{23}-C_{12}S_{13}S_{23}e^{-i\delta} & C_{12}C_{23}-S_{12}S_{13}S_{23}e^{-i\delta} & C_{13}S_{23} \\ S_{12}S_{23}-C_{12}S_{13}C_{23}e^{-i\delta} & -C_{12}S_{23}-S_{12}S_{13}C_{23}e^{-i\delta} & C_{13}C_{23} \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} = \sin\theta_{ij}, \quad c_{ij} = \cos\theta_{ij}$$

Primarily sensitive to

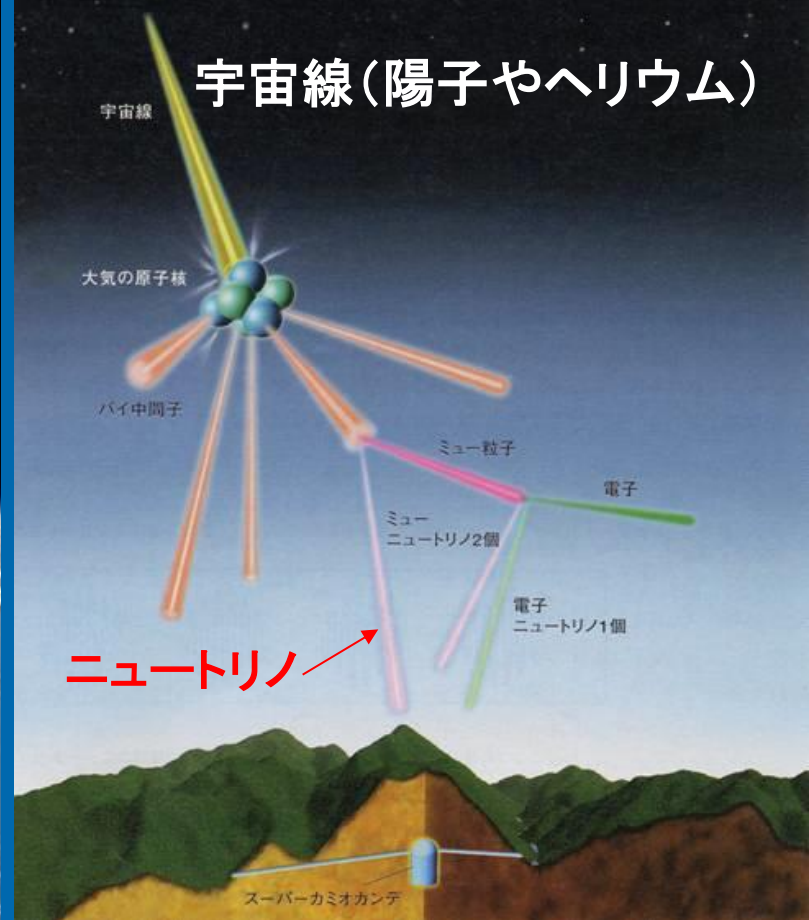
	$\Delta m_{12}^2$	$\Delta m_{23}^2$	$\theta_{12}$	$\theta_{23}$	$\theta_{13}$	$\delta$
太陽 $\nu$ , 長基線原子炉 $\nu$	○		○			
大気 $\nu$ , 長基線加速器 $\nu$		○		○	○	
短基線原子炉 $\nu$					○	
将来の長基線加速器 $\nu$		○		○		○

(符号)

(=, > or < 45°)

# 大気ニュートリノ

大気

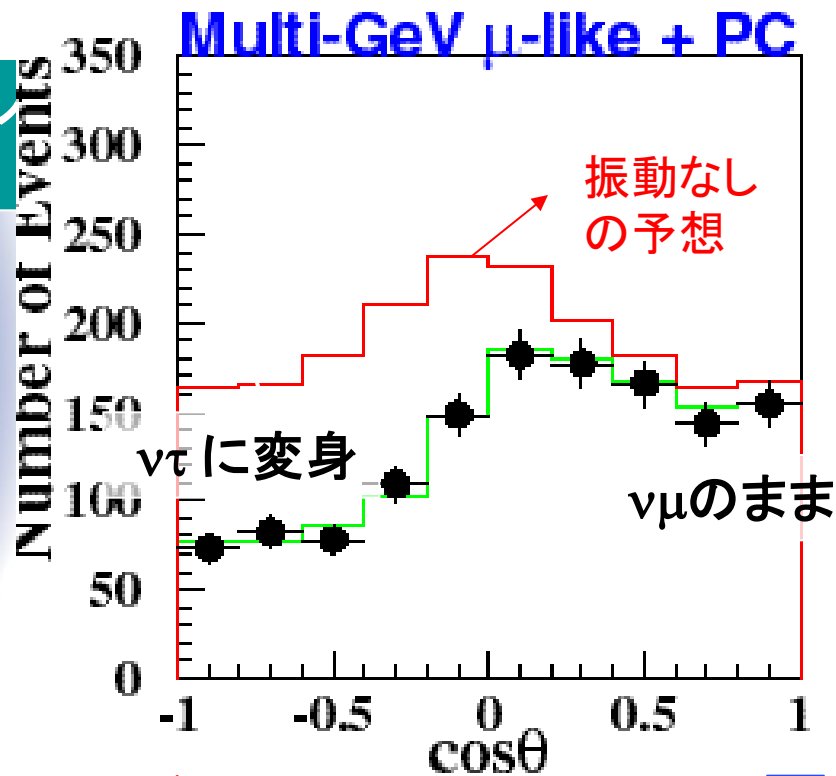
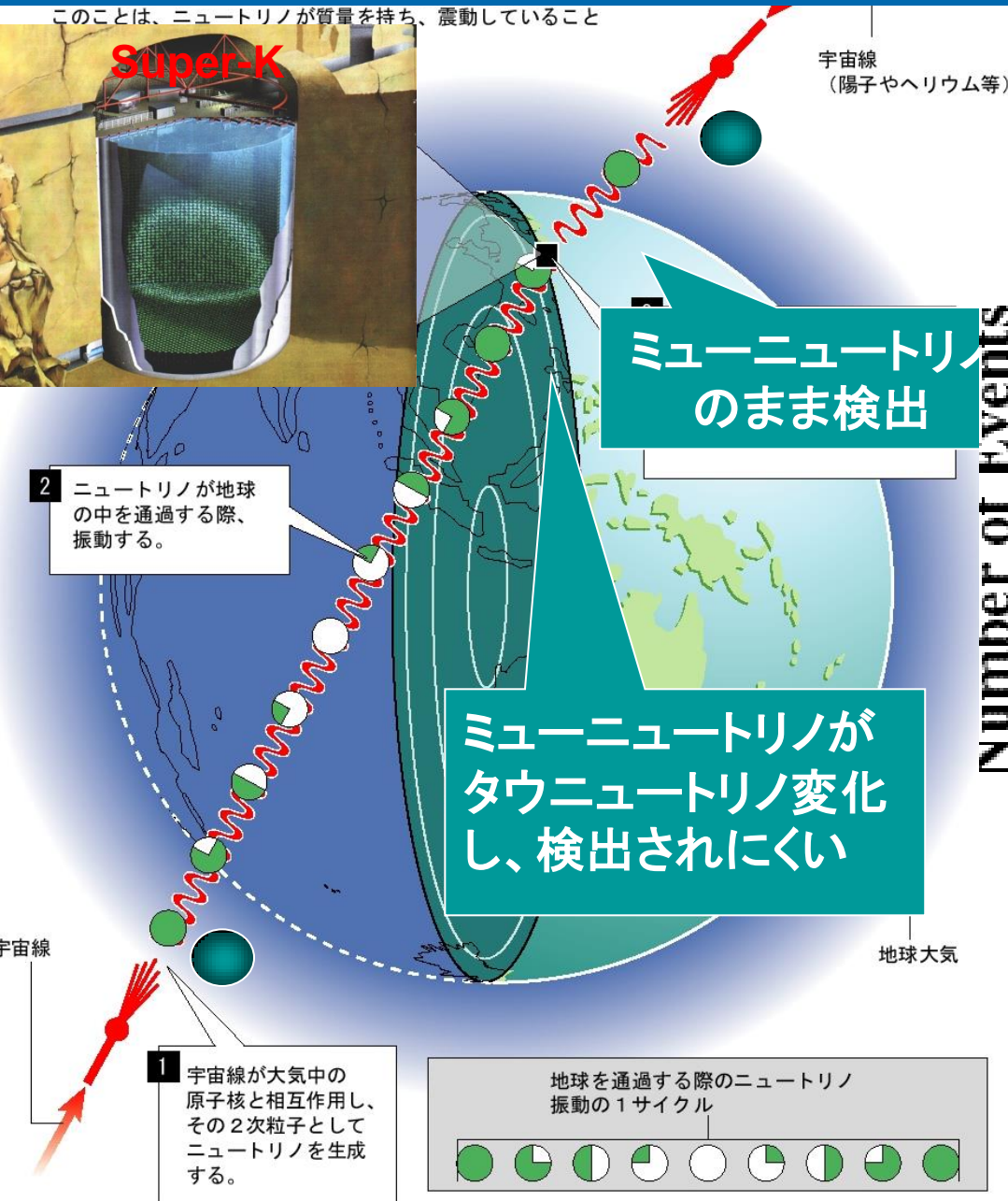


地球の反対側でも同じことがおこっているので、下からもニュートリノが来る。

# 大気ニュートリノの上下非対称性の発見

(1998年 by Super-K)

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  振動の証拠



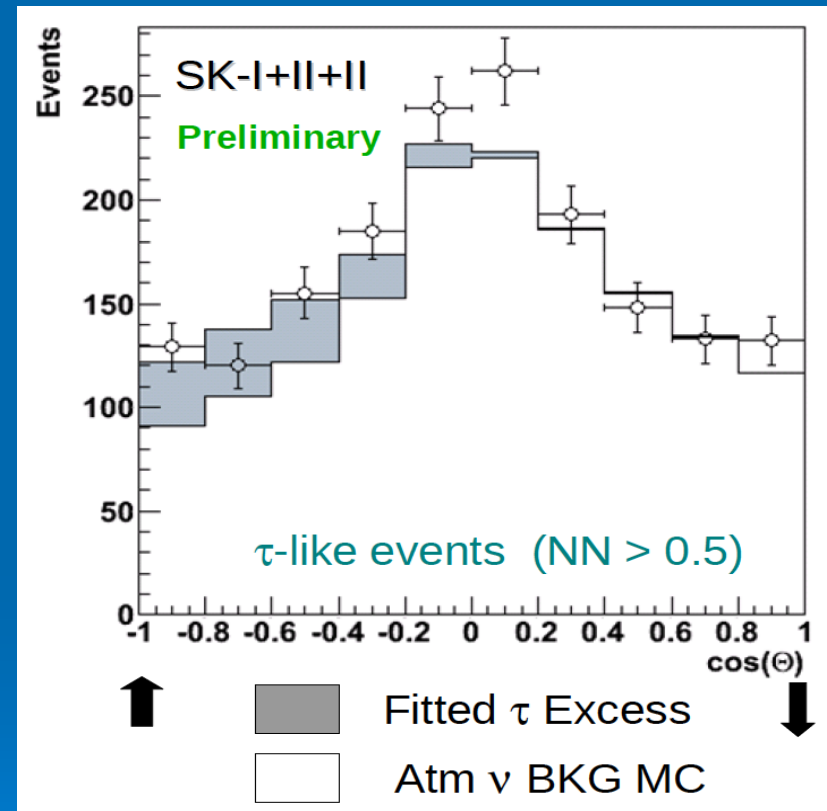
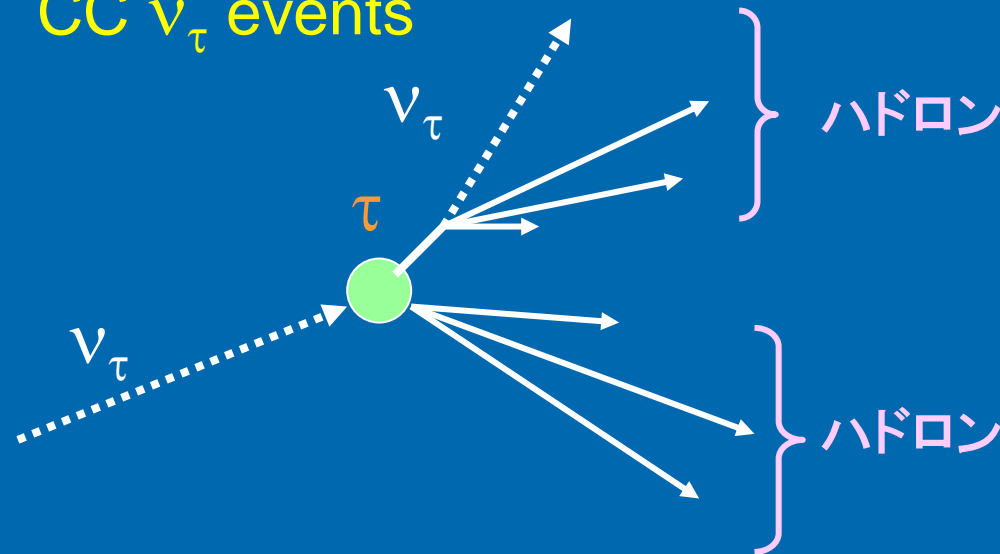
上向き

下向き

# 最近のSKの結果から ( $\nu_\tau$ 事象の発見)

CC  $\nu_\tau$ らしいイベントを選んだ後の天頂角分布

CC  $\nu_\tau$  events



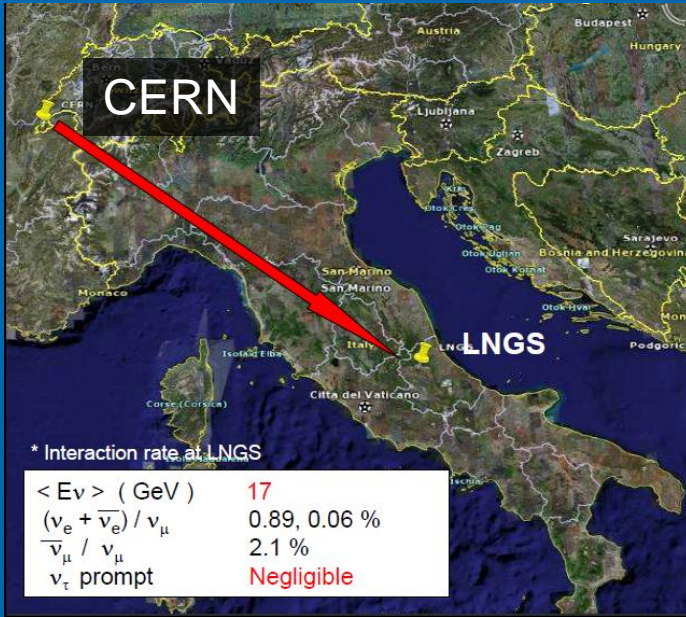
タウニュートリノありと分布は良く合っている。

$$\frac{N_t}{N_{\text{exp}}} = 1.42 \pm 0.35(\text{stat.}) \begin{matrix} +0.14 \\ -0.12 \end{matrix} (\text{syst.})$$

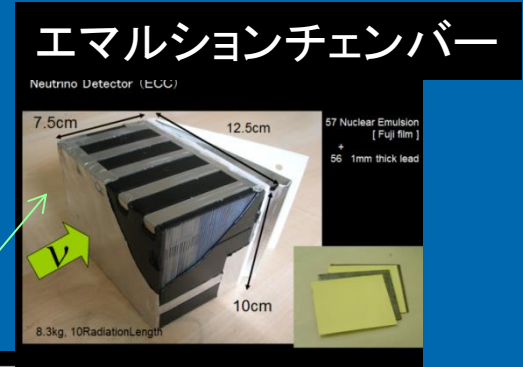


# OPERA実験

基線長: 732km、 $\langle E_\nu \rangle = 17$  GeV



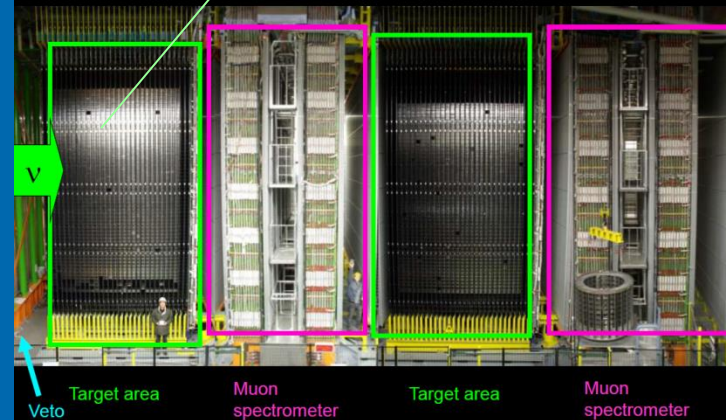
$\tau$ の崩壊をエマルジョン  
チェンバーで捉える。



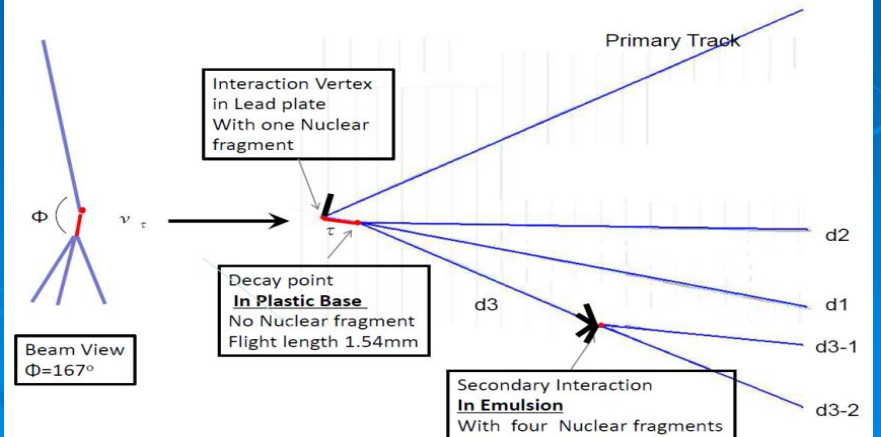
## OPERA detector

Gran Sasso Underground Lab, Italy

~150000 ECC Bricks = Weight ~1250 ton



## Schematics of the event



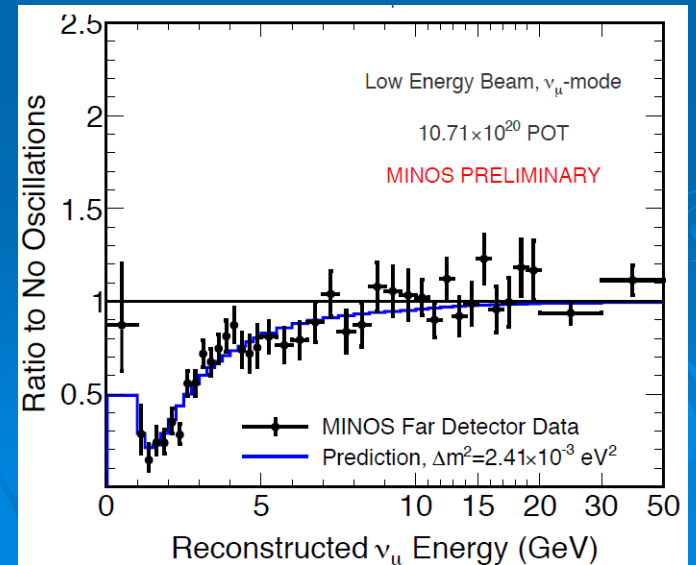
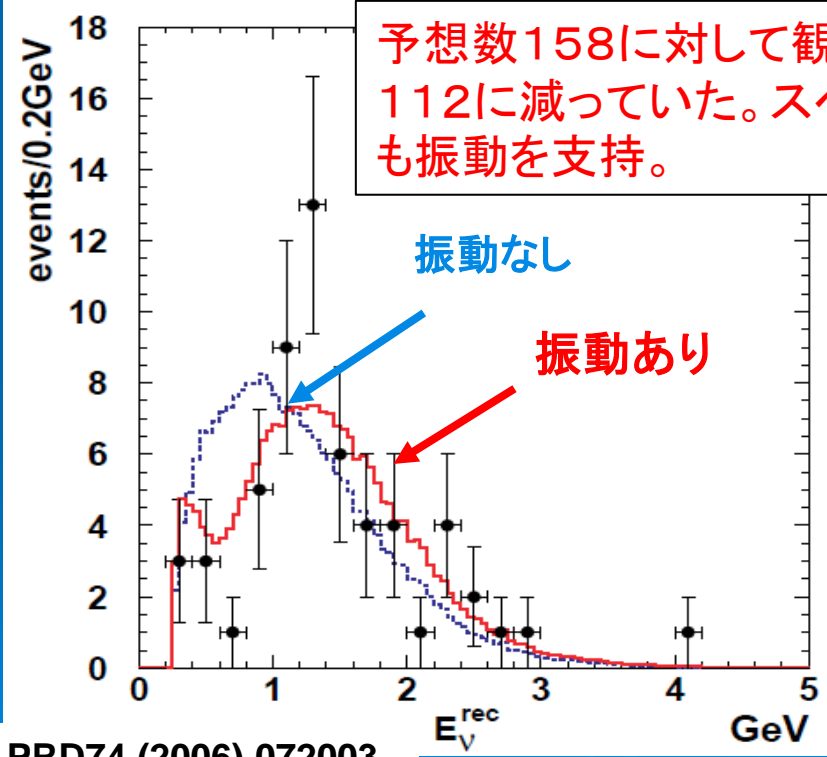
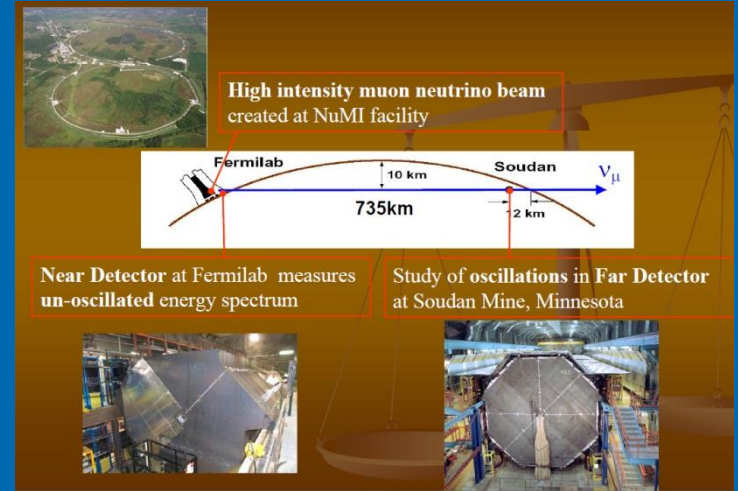
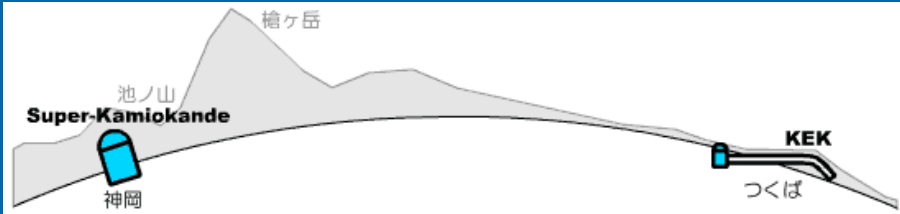
M. Nakamura (Neutrino 2012)

Years	Status	# of events for Decay search	Expected $\nu_\tau$ (Preliminary)	Observed $\nu_\tau$ Candidate Events	Expected BG for $\nu_\tau$ (Preliminary)
2008-2009	Finished	2783		1	
2010-2011	In analysis	1343		1	
2012	Started				
Total		4126	2.1	2	0.2

# 長基線ニュートリノ実験 ( $\nu_\mu$ からの振動)

K2K実験(日): 1999 - 2004

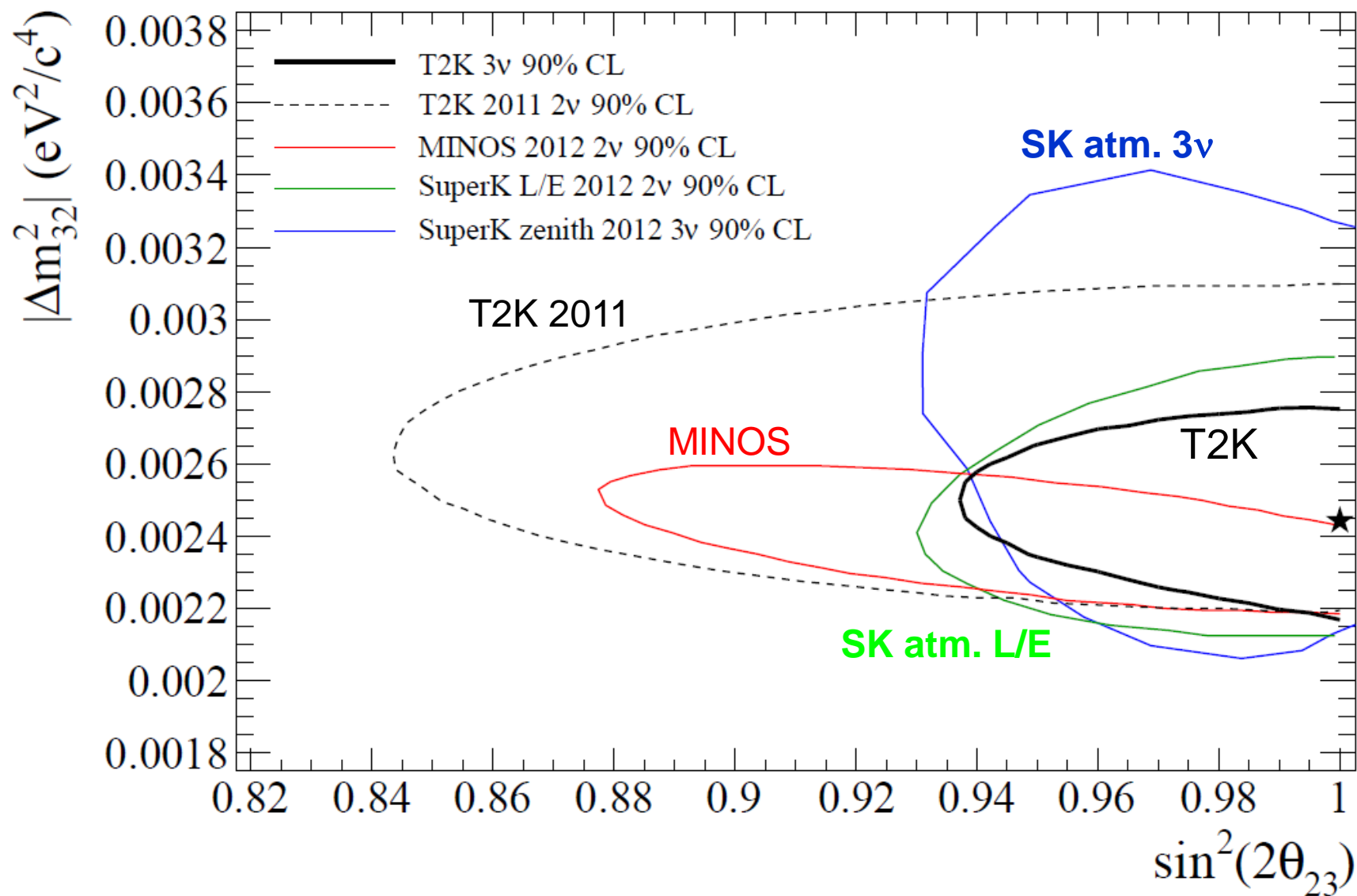
MINOS実験(米): 2005~



「大気ニュートリノ振動」を確認

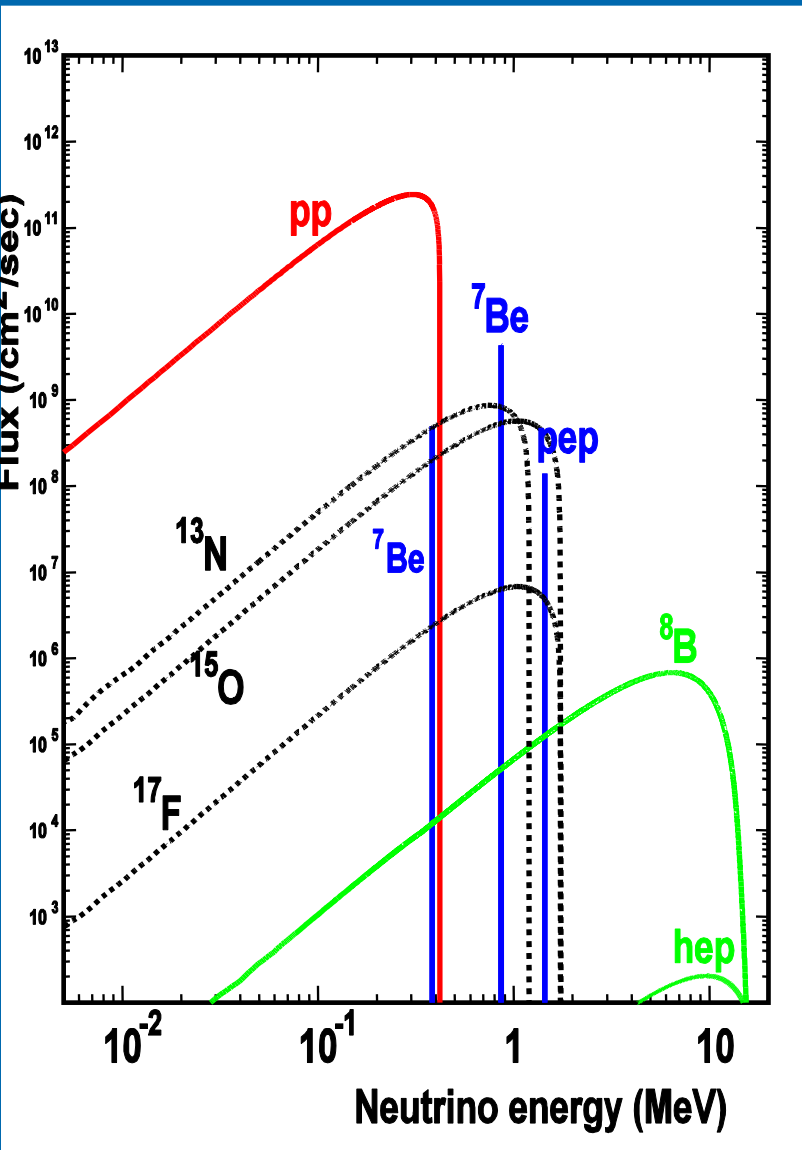
R.Nichol (Neutrino 2012)

# $\theta_{23} - |\Delta m_{32}^2|$ : SK大気 $\nu$ , 加速器 $\nu$

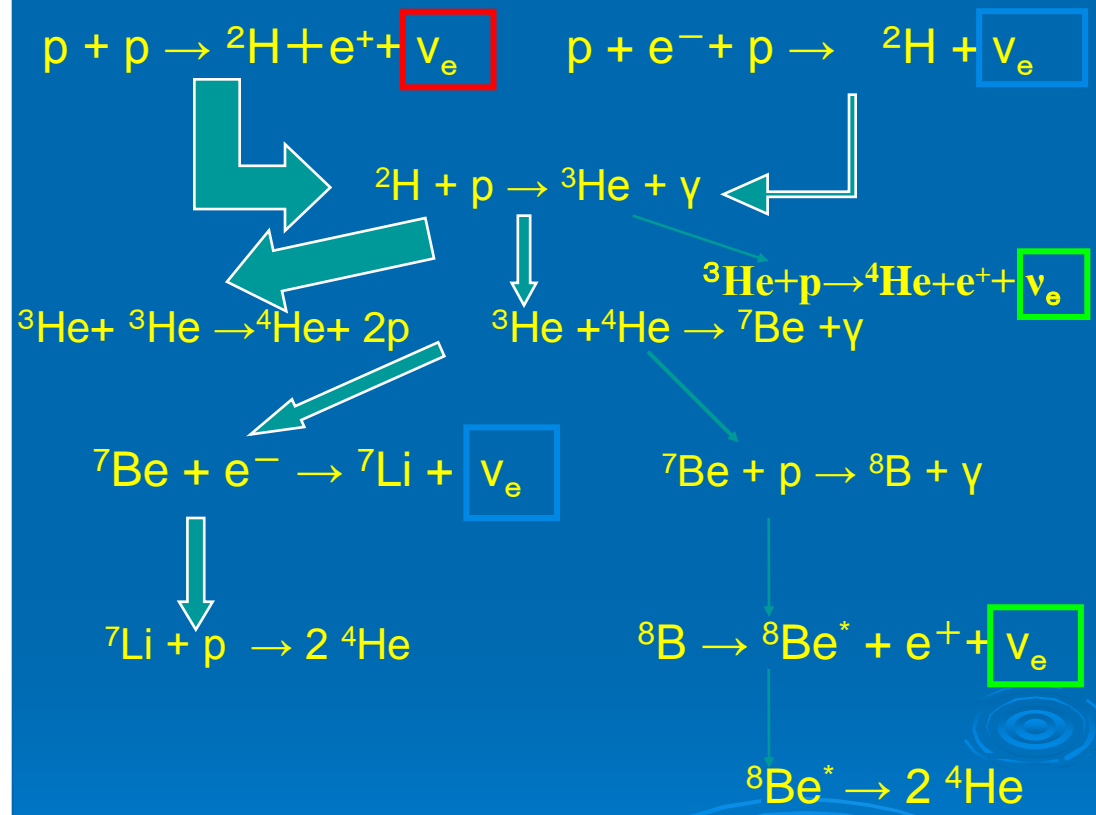


将来: T2K実験は  $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) = 0.01$ 、 $\delta(\Delta m_{32}^2) = 0.0001 \text{eV}^2$ の精度で測定できる。

# 太陽ニュートリノ( $\nu_e$ からの振動)



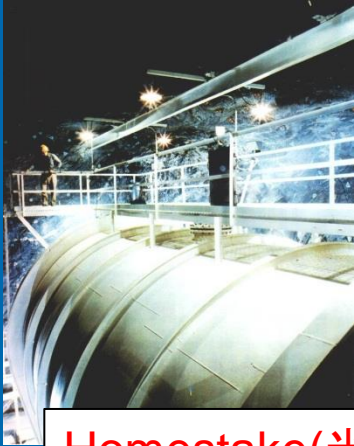
## pp-連鎖反応



全太陽ニュートリノ強度は、660億  $\nu_e/\text{sec}/\text{cm}^2$

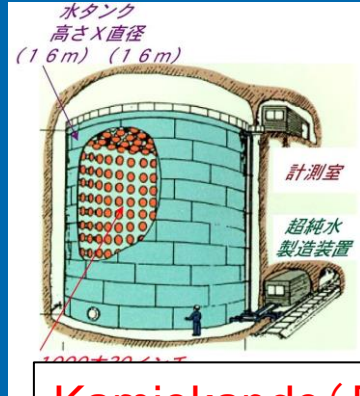


# 太陽ニュートリノ実験



Homestake(米)

~1970: 太陽 $\nu$ 問題 (SNP)



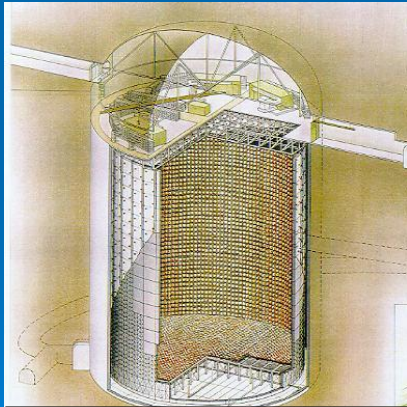
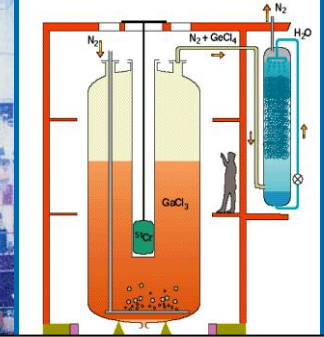
Kamiokande(日)

1989: SNPを確認。初めてのリアルタイム検出器



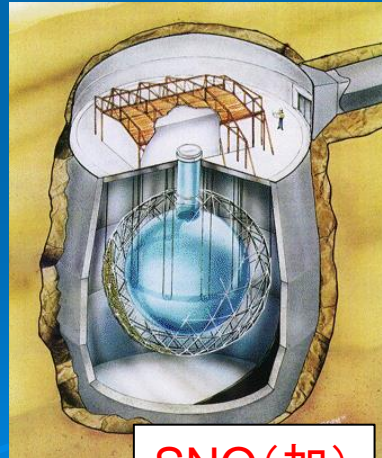
SAGE(露)、GALLEX/GNO(伊)

1990's: SNPをppvでも確認



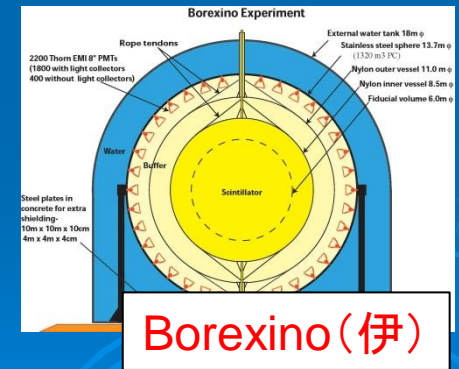
Super-Kamiokande(日)

1996~:  $^8\text{B}$   $\nu$ の精密観測 (50000トン純水)



SNO(加)

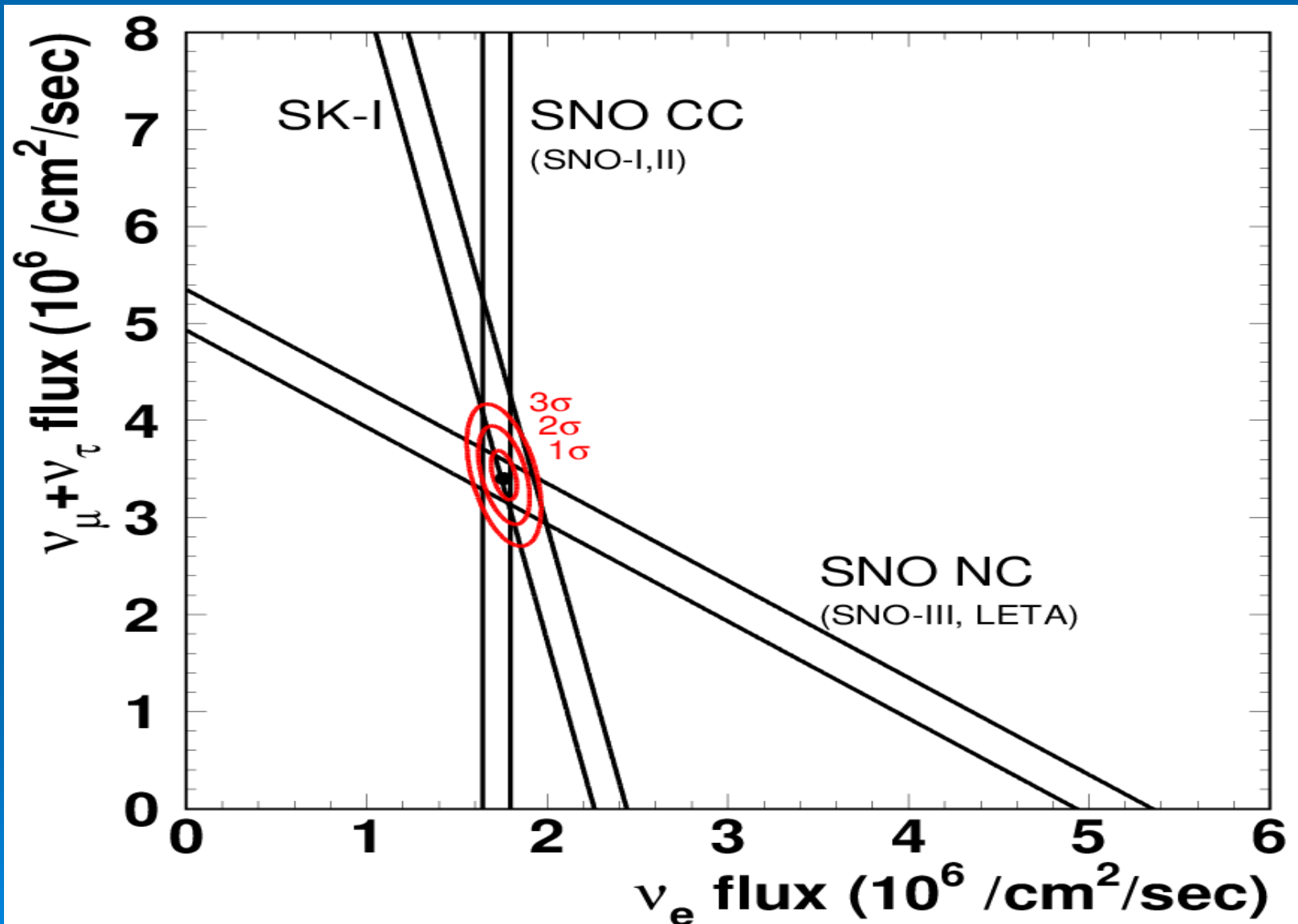
1999-2006:  $^8\text{B}$   $\nu$ のNC/CC測定 (1000トン重水)



Borexino(伊)

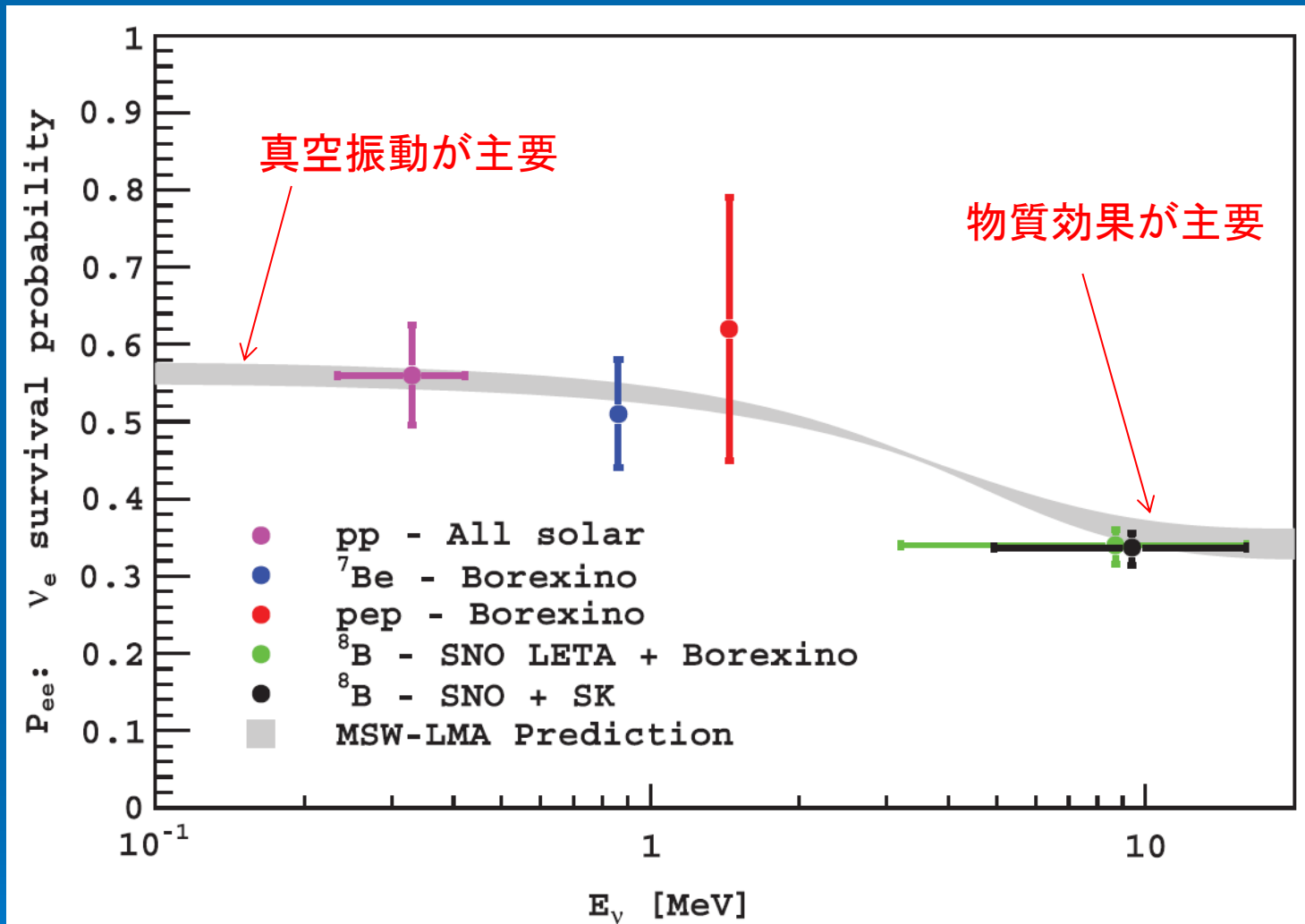
2007~:  $^7\text{Be}$   $^8\text{B}$   $\nu$ の観測。(300トン液体シンチレータ)

# 太陽ニュートリノ振動の直接的証拠



最初の発見は2001年6月。その時は、SKとSNO CCで $\nu_\mu + \nu_\tau$  fluxが $3.3\sigma$ レベルでゼロでないことがわかった。

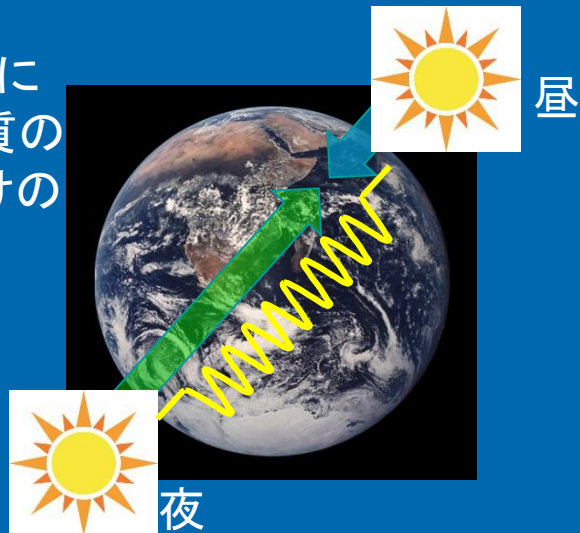
# 太陽ニュートリノの振動確率



真空中での振動確率  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$  は、 $L$ が十分長い場合、 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - 1/2 \times \sin^2 2\theta$  になり、0.5以下にはならないはず。高エネルギー側では物質効果が効いて、0.5以下になっている。

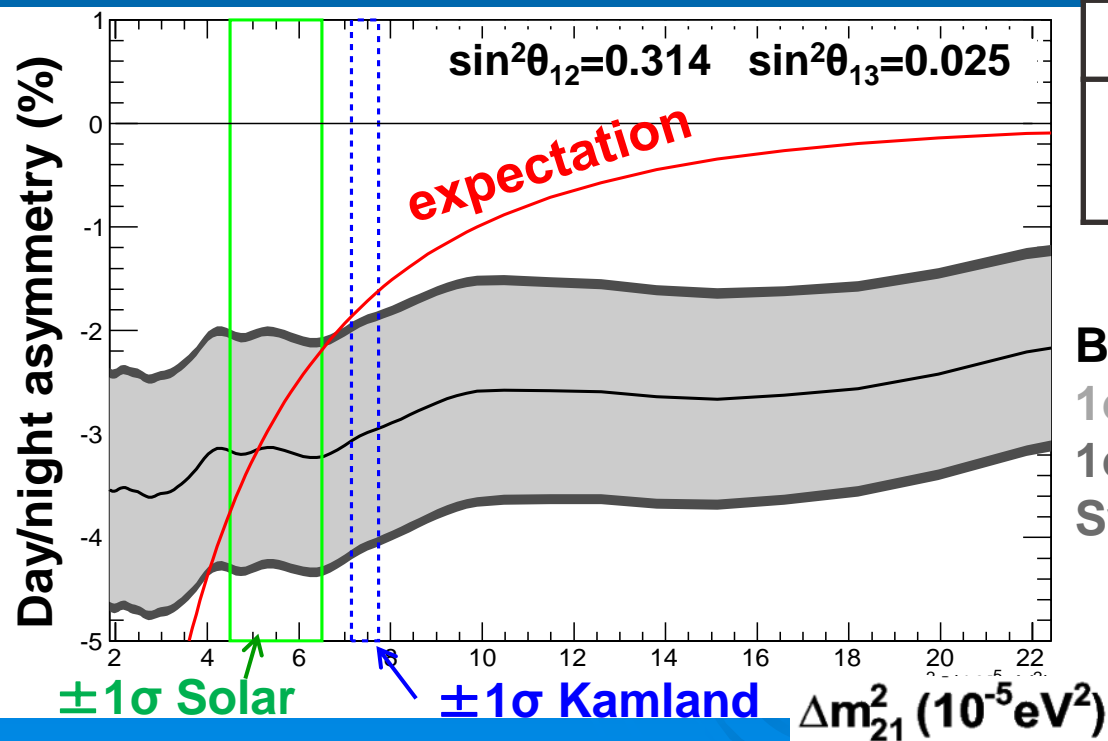
# 物質効果による昼夜の違い(Super-K)

太陽が地球の反対にある夜は、地球物質の影響を受け、見かけの強度が増す。



$$A_{DN} = \frac{\text{Day flux} - \text{Night flux}}{0.5 (\text{Day flux} + \text{Night flux})}$$

	$A_{DN}$ ( $\pm$ stat. $\pm$ sys.)
SK-I	$-2.0 \pm 1.7 \pm 1.0$ %
SK-II	$-4.3 \pm 3.8 \pm 1.0$ %
SK-III	$-4.3 \pm 2.7 \pm 0.7$ %
SK-IV	$-3.4 \pm 1.8 \pm 0.6$ %
<b>SK combined</b>	<b><math>-3.2 \pm 1.1 \pm 0.5</math> %</b>

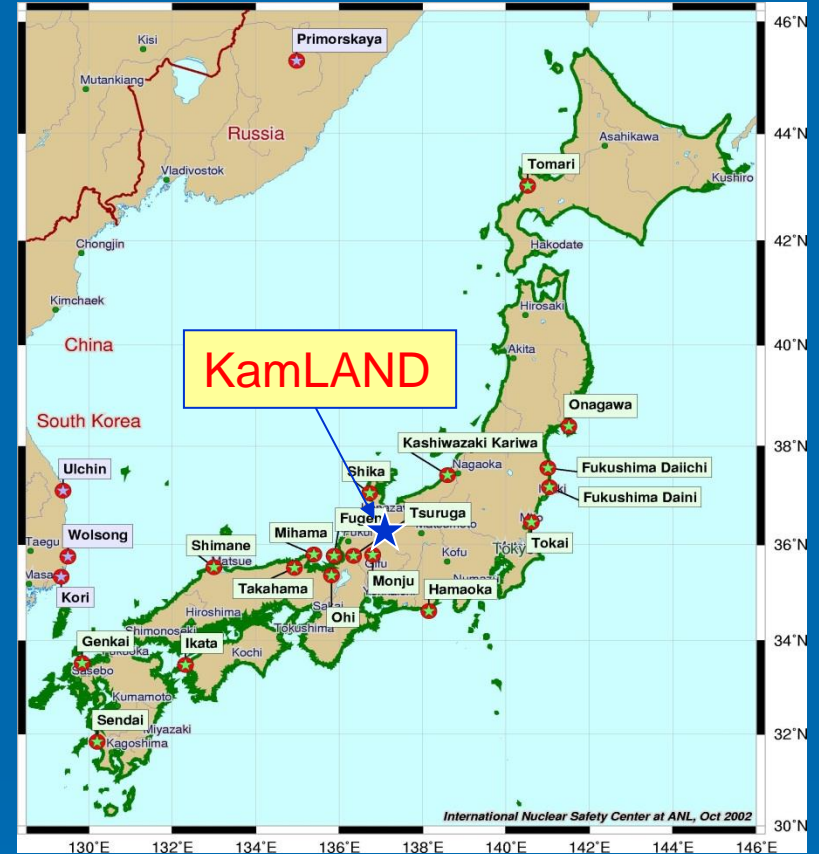
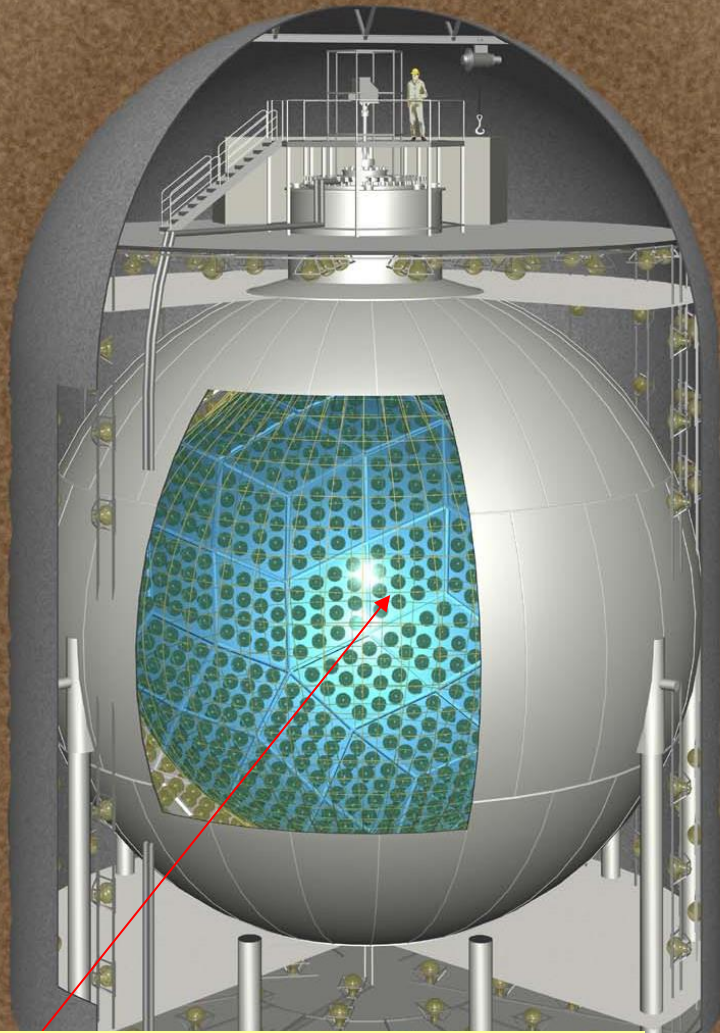


**Best Fit**  
 1 $\sigma$  Stat.  
 1 $\sigma$  Stat. +  
 Sys.

2.7  $\sigma$ レベルで  
 ゼロからずれて  
 いる。



# KamLAND実験



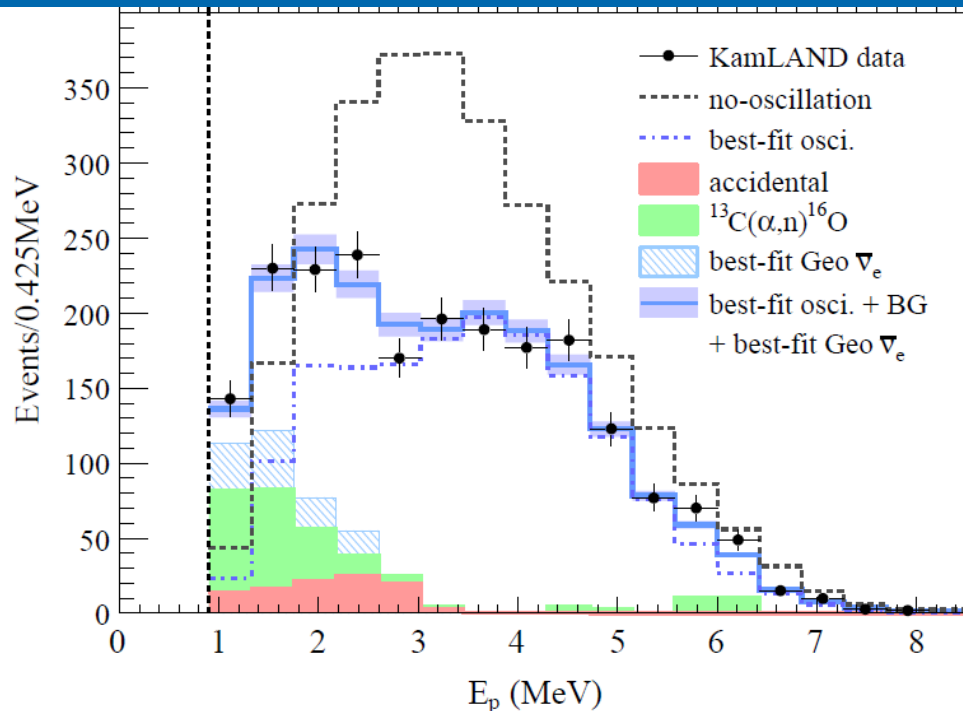
700億ワットの発電量(世界の7%)が神岡から140から210 kmの距離にあった。

1000トン液体シンチレータ

旧カミオカンデ跡地に建設

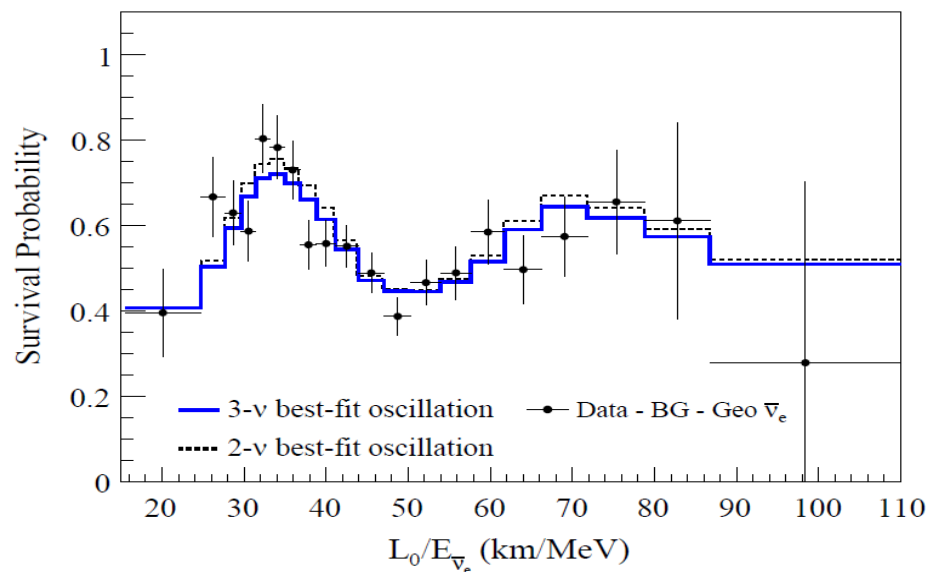
$\bar{\nu}_e$ からの振動

# KamLAND 原子炉ニュートリノデータ



2002年3月から2009年11月までのデータ

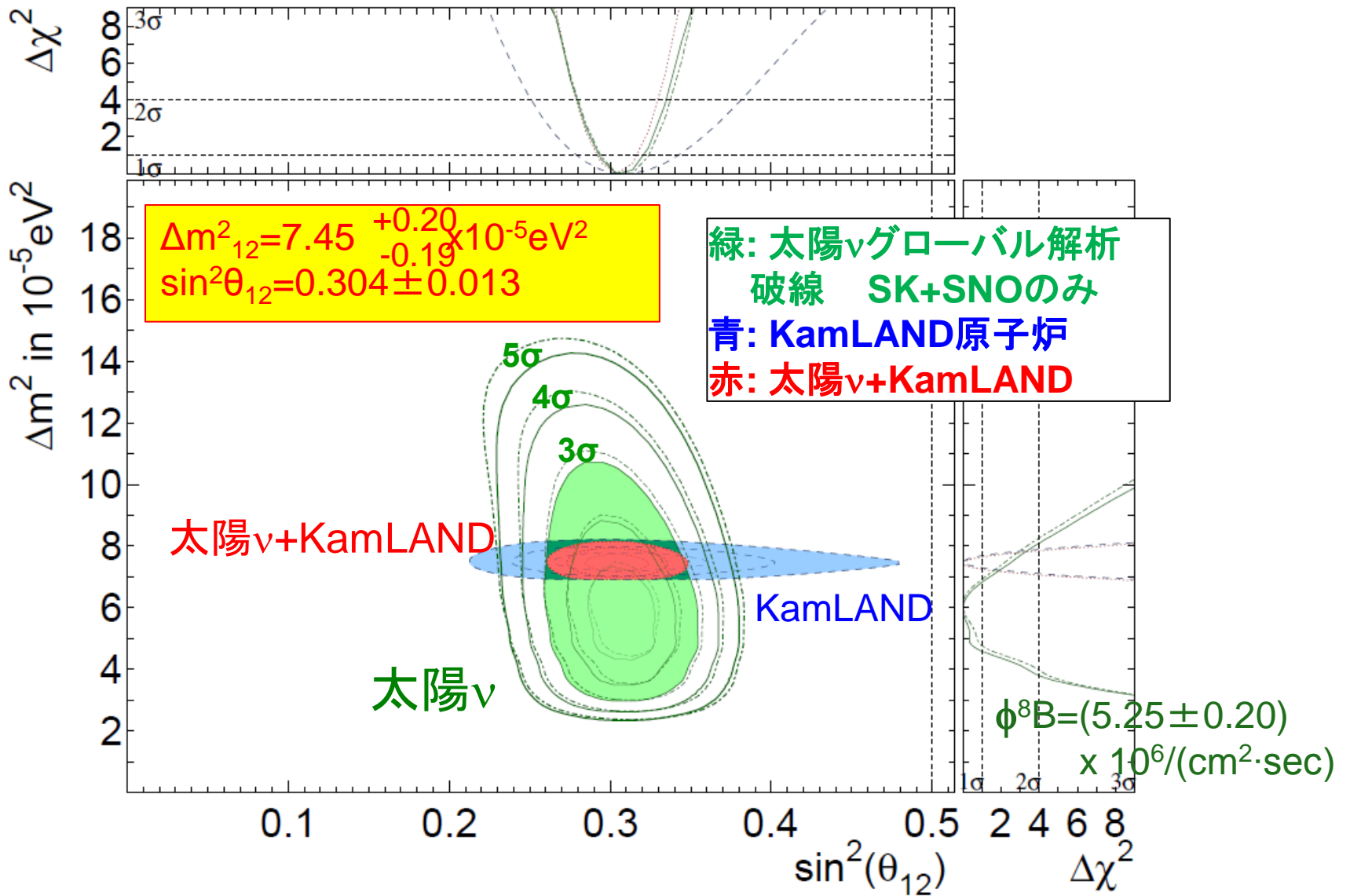
ニュートリノ振動によるデータの減りがみられる。



ニュートリノ振動による「振動パターン」も見えている。

**「太陽ニュートリノ振動」の確認  
(反電子ニュートリノによる)**

# $\theta_{12} - \Delta m_{21}^2$ : 太陽 $\nu$ とKamLAND-原子炉



# $\theta_{13}$ の測定

- 短基線原子炉ニュートリノ実験:  $\bar{\nu}_e$  消失

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{31}^2 L(m)}{E_\nu(MeV)}\right) \quad \theta_{13} \text{ のみによる}$$

- 長基線加速器ニュートリノ実験:  $\nu_e$  出現

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 \theta_{23} \sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_{31}^2 L(km)}{E_\nu(GeV)}\right) \quad \text{主要項}$$

非主要項

$\delta \rightarrow -\delta$   
 $a \rightarrow -a$   
 for  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$

$$\begin{aligned} &+ 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos\delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cos\Phi_{32} \cdot \sin\Phi_{31} \cdot \sin\Phi_{21} \\ &- 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin\delta \sin\Phi_{32} \cdot \sin\Phi_{31} \cdot \sin\Phi_{21} \\ &+ 4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos\delta) \sin^2\Phi_{21} \\ &- 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 (1 - 2S_{13}^2) \frac{aL}{4E_\nu} \cos\Phi_{32} \sin\Phi_{31}. \end{aligned}$$

CP保存

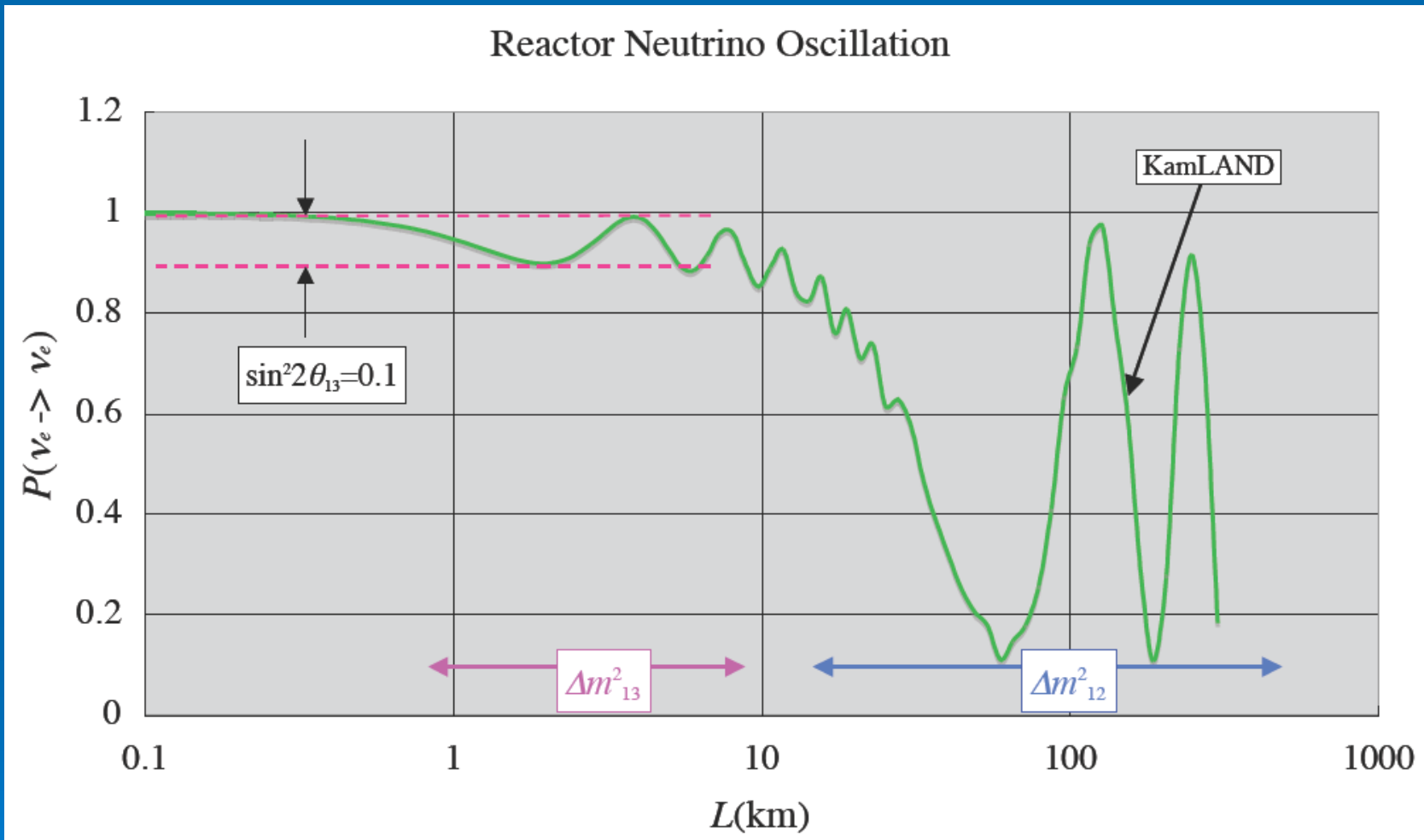
CP非保存

“太陽”

物質効果

$\nu_e$  出現:  $\delta$  や 質量階層性にも感度

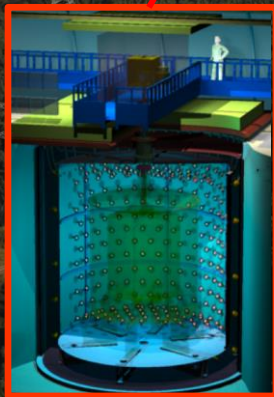
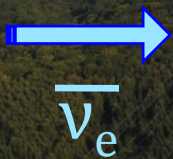
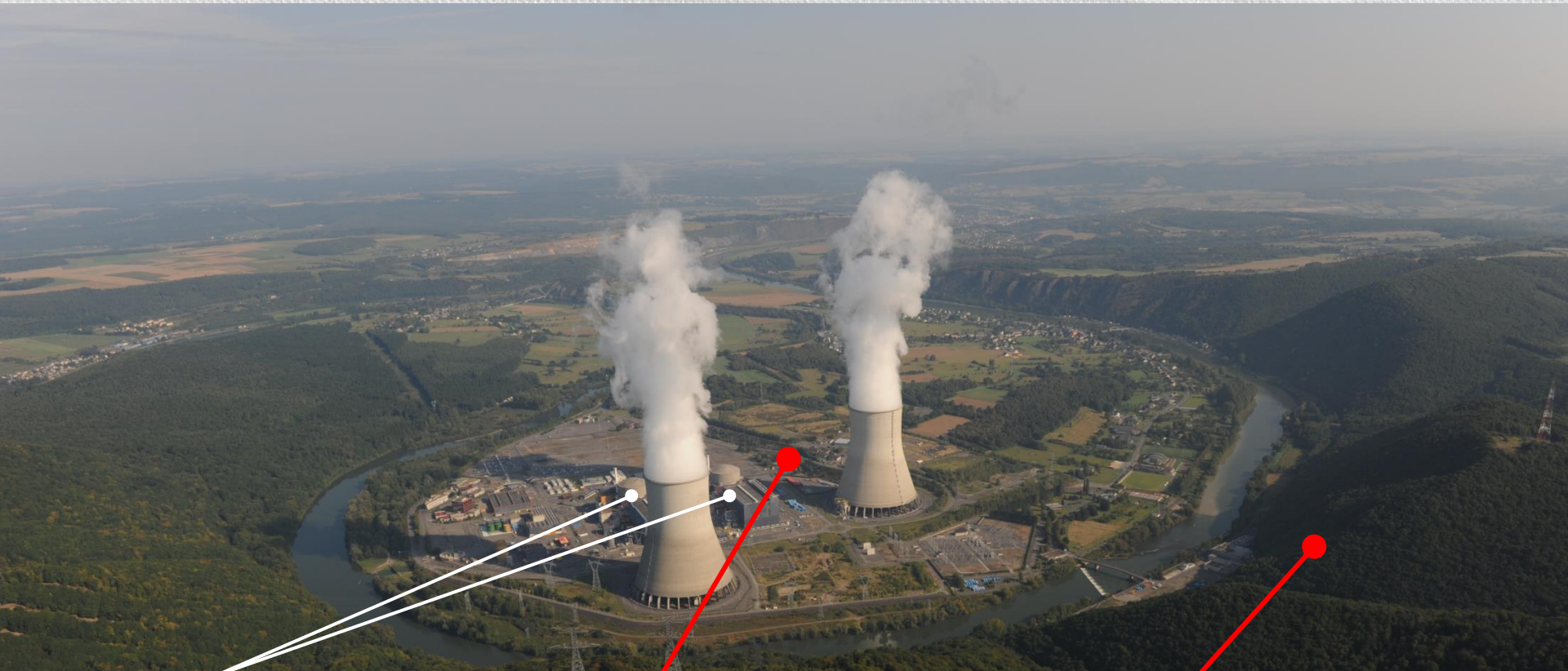
# 短基線原子炉ニュートリノ実験



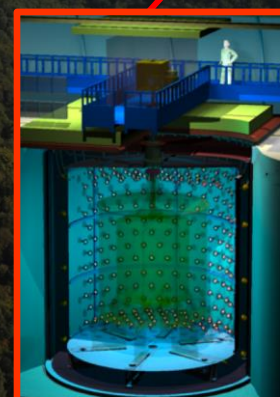
原子炉から数kmの場所で反電子ニュートリノの減り方を  
はかると $\theta_{13}$ が探れる。



# Double Chooz experiment



**Near Detector**  
 L = 400m  
 10m<sup>3</sup> target  
 120m.w.e.  
 2013 ~



**Far Detector**  
 L = 1050m  
 10m<sup>3</sup> target  
 300m.w.e.  
 April 2011 ~

**Chooz Reactors**  
 4.27GW<sub>th</sub> x 2 cores





# The Daya Bay Experiment



Adjacent mountains with horizontal access provide 860 (250) m.w.e cosmic shielding.

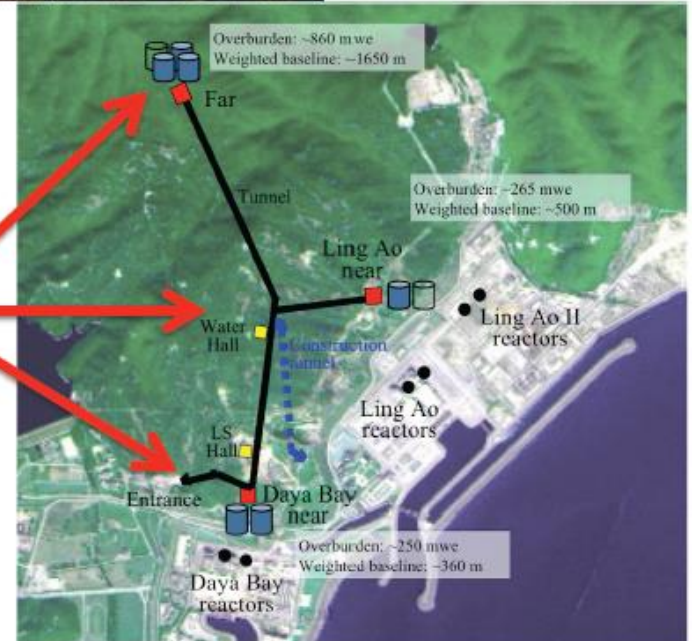
Daya Bay

Ling Ao I + II

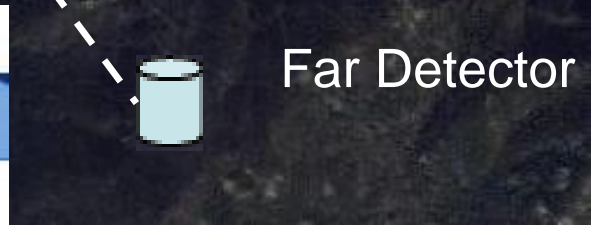
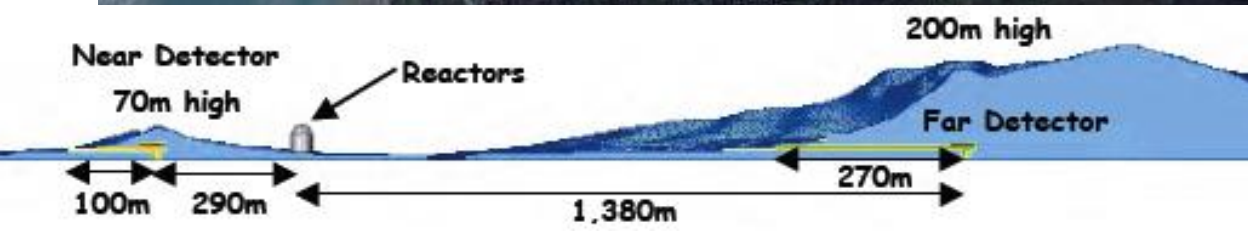
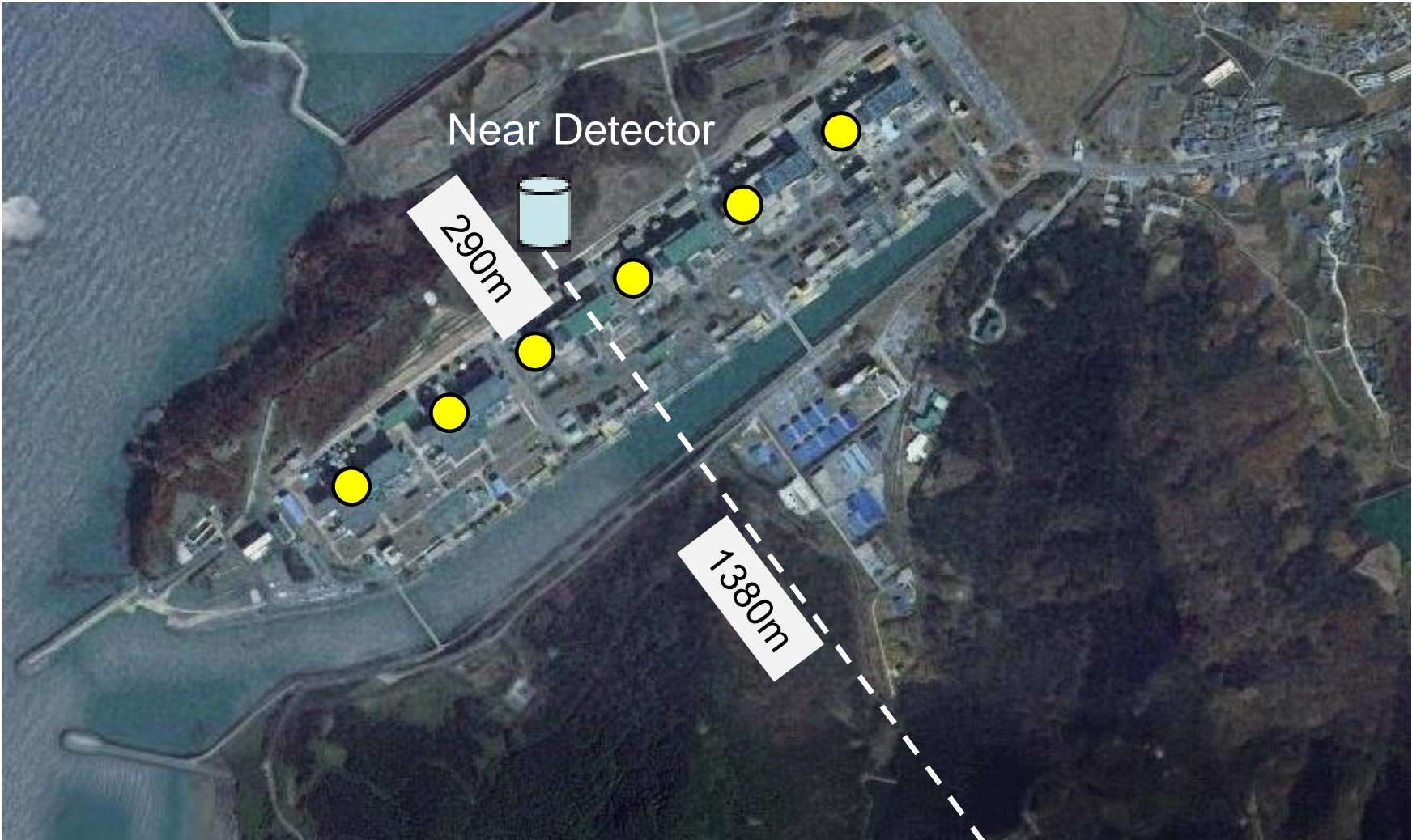
6 commercial reactor cores with 17.4 GW<sub>th</sub> total power.

6 Antineutrino Detectors (ADs) give 120 tons total target mass.

Via GPS and modern theodolites, relative detector-core positions known to 3 cm.



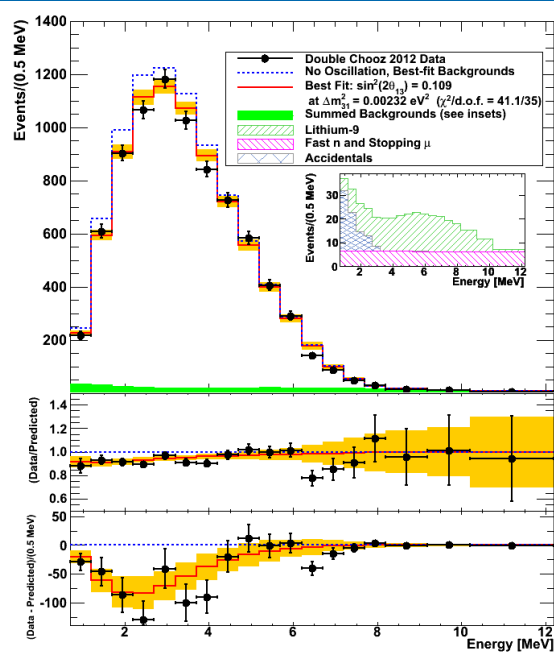
# RENO Experimental Setup





# Reactor $\theta_{13}$ 実験の結果

Double Chooz  
(Jun. 2012)

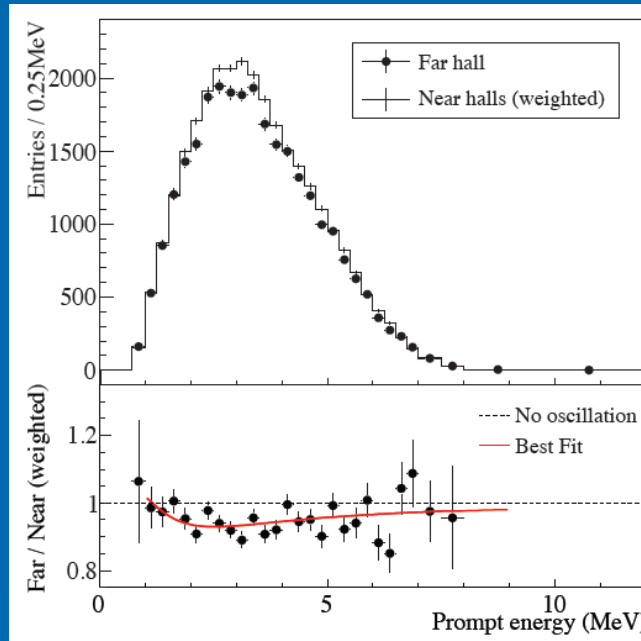


$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.109 \pm 0.030 \pm 0.025$$

(2.8 $\sigma$  level)

PRD 86, 052008 (2012)

Daya Bay  
(Jun. 2012)

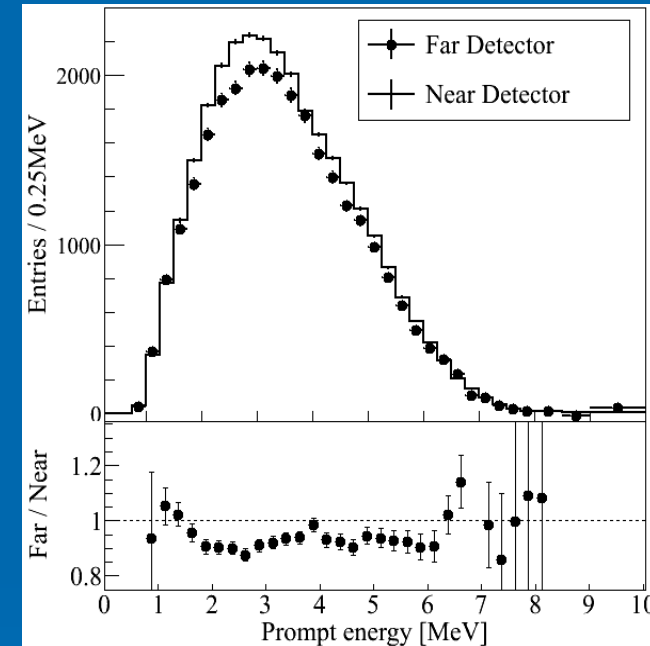


$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010 \pm 0.005$$

(8 $\sigma$  level)

: arXiv:1210.6327 [hep-ex]

Reno  
(March 2013)



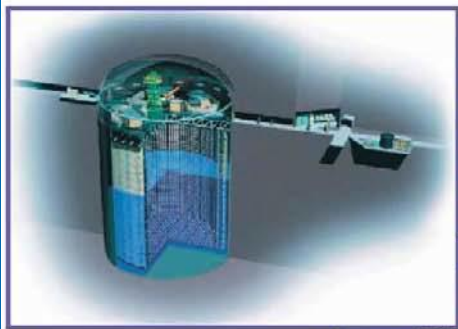
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.100 \pm 0.010 \pm 0.015$$

(5.6 $\sigma$  level)

Neutrino telescope 2013



# T2K (Tokai-to-Kamioka) 実験



Super-Kamiokande  
(ICRR, Univ. Tokyo)

SK, Super-K  
(略称)



J-PARC Main Ring  
(KEK-JAEA, Tokai)



## ➤ 最初の目標

- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  振動による  $\nu_e$  の出現 (appearance) をとらえ  $\theta_{13}$  を測定。

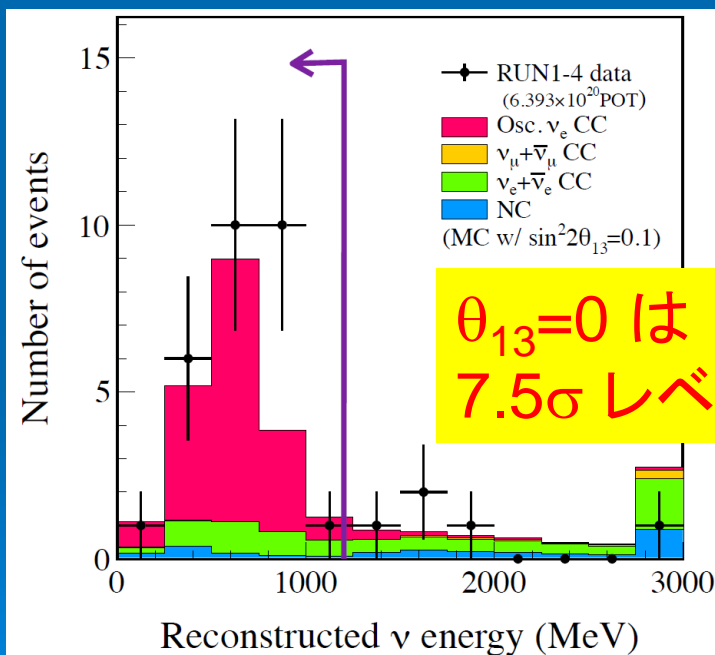
# T2K実験の最新結果(Run 1+2+3+4)

(2010年-2013年4月までのデータ)  
electron neutrino候補の探索

28 事象が観測された。

バックグラウンド期待値は  
 $4.64 \pm 0.52$  for  $\sin^2(2\theta_{13})=0$

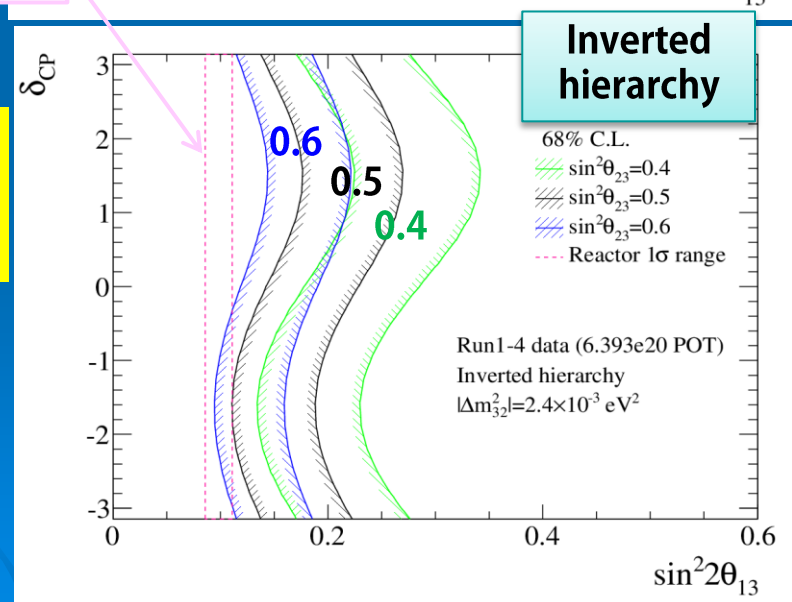
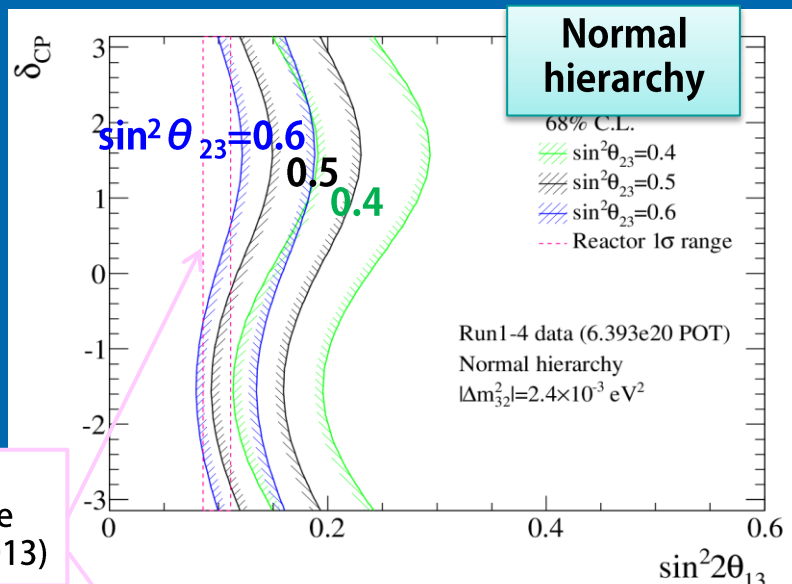
Reconstructed  $\nu$  energy



PDG2012  
reactor average  
value ( $0.098 \pm 0.013$ )

$\theta_{13}=0$  は  
 $7.5\sigma$  レベルで排除

$\sin^2 2\theta_{13}$  for  $\delta_{CP}$  の許される領域

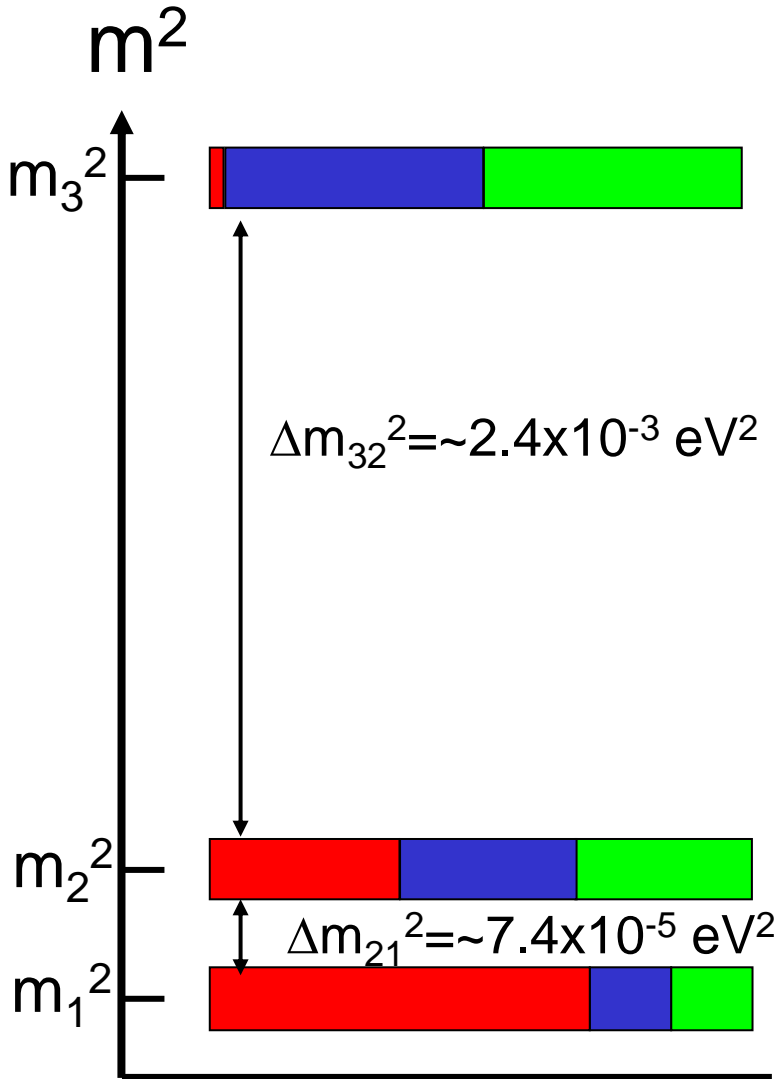


$0.097 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.218$  (90% CL)

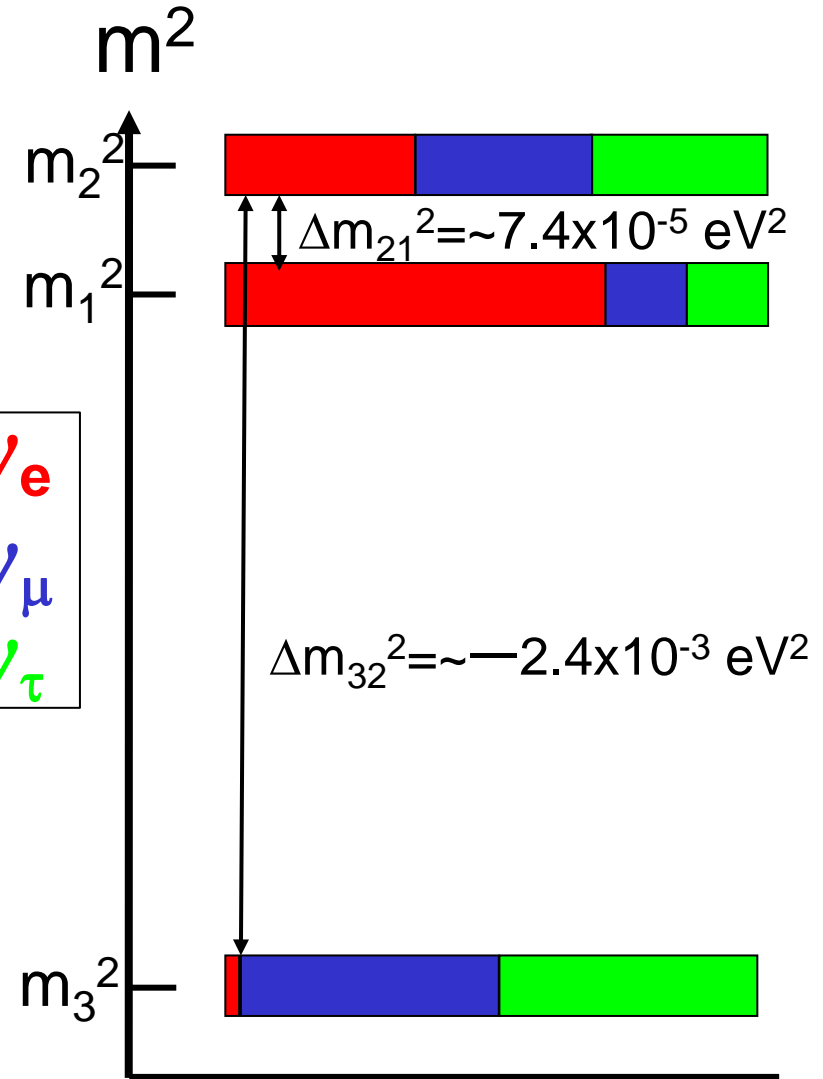
Best fit :  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.15$  (for  $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} eV^2, \delta_{CP} = 0$ )

# ニュートリノ質量と混合のまとめ

## 正の階層性



## 反転の階層性



# ニュートリノ研究の現状と今後

ニュートリノ混合行列

現状

(3 $\sigma$ の範囲)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0.80\sim 0.85 & 0.51\sim 0.59 & 0.13\sim 0.18 \\ 0.21\sim 0.54 & 0.42\sim 0.73 & 0.58\sim 0.81 \\ 0.22\sim 0.55 & 0.41\sim 0.73 & 0.57\sim 0.80 \end{pmatrix}$$

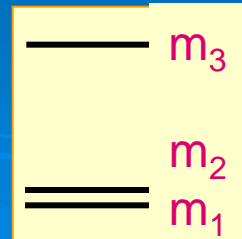
クォーク:

$$\begin{pmatrix} 0.974\sim 0.976 & 0.219\sim 0.226 & 0.002\sim 0.005 \\ 0.219\sim 0.225 & 0.973\sim 0.975 & 0.037\sim 0.043 \\ 0.004\sim 0.014 & 0.035\sim 0.043 & 0.999\sim 0.999 \end{pmatrix}$$

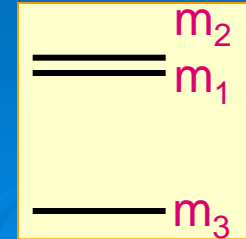
M.C.Gonzalez-Garcia et al. (arXiv:1209.3023[hep-ph])

## 今後の課題

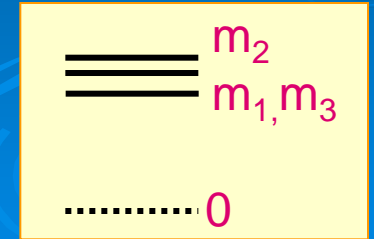
- CP phaseはあるか？
- パラメータの精密決定。特に $\theta_{23}$ は full mixing ( $45^\circ$ ) なのか？
- 質量の階層性は？
- 質量の絶対値は？
- ニュートリノはマヨラナ粒子か？
- LSND etc. anomaly ?



正？



反転？



縮退？



# CP非保存の測定

手法は加速器ニュートリノ実験による $\nu_e$ 出現

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 \theta_{23} \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{31}^2 L(\text{km})}{E_\nu(\text{GeV})}\right)$$

主要項

非主要項

$$\begin{aligned} &+ 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos\delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cos\Phi_{32} \cdot \sin\Phi_{31} \cdot \sin\Phi_{21} \\ &- 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin\delta \sin\Phi_{32} \cdot \sin\Phi_{31} \cdot \sin\Phi_{21} \\ &+ 4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos\delta) \sin^2\Phi_{21} \\ &- 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 (1 - 2S_{13}^2) \frac{aL}{4E_\nu} \cos\Phi_{32} \sin\Phi_{31}. \end{aligned}$$

CP保存

CP非保存

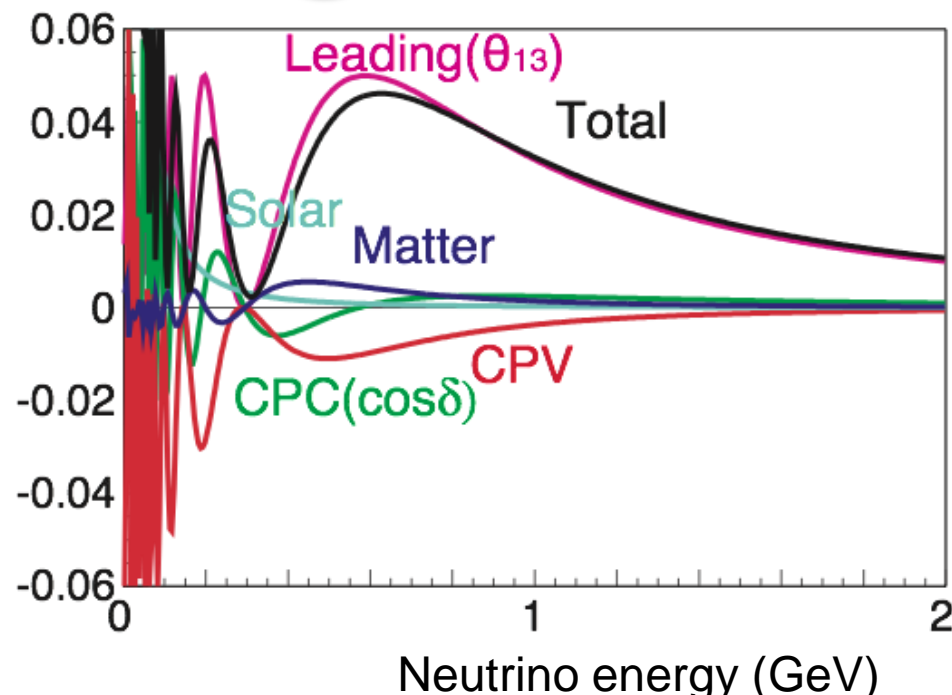
“太陽”

物質効果

$\delta \rightarrow -\delta$

$a \rightarrow -a$

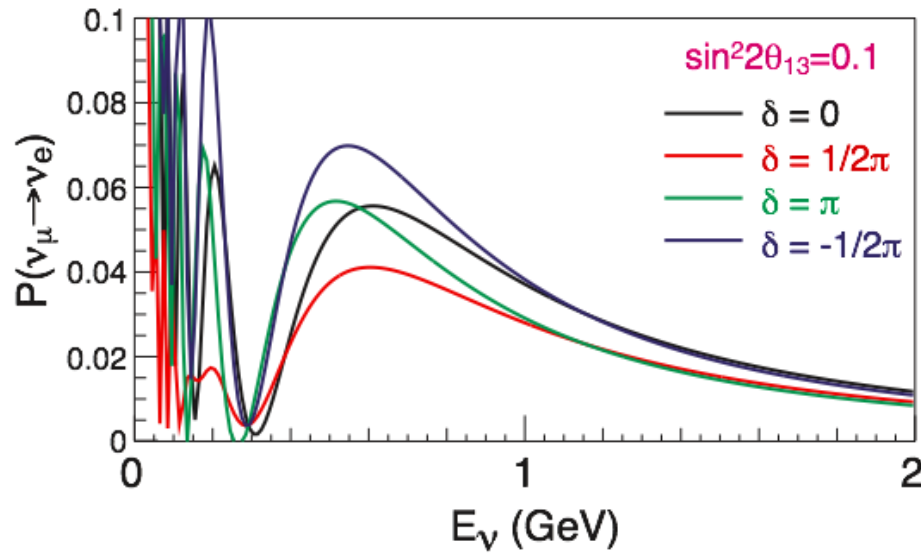
for  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$



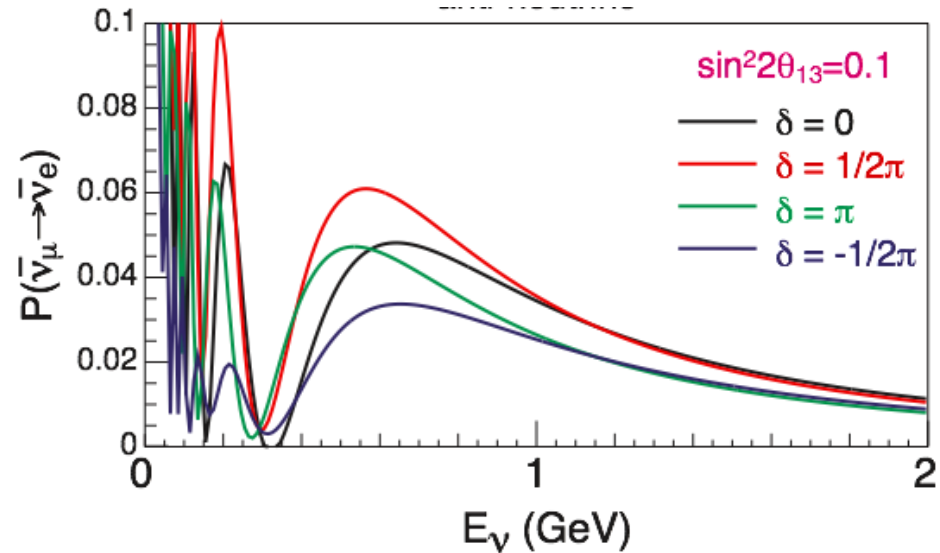
# $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動確率 (L=295km)

Normal hierarchy

Neutrino case



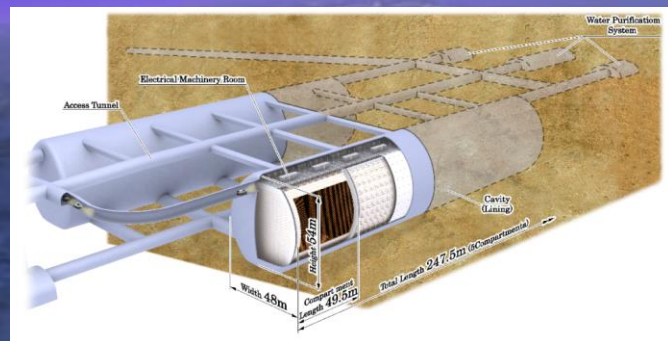
Anti-neutrino case



$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  と  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$  の比較  
CP  $\delta$  により  $\pm 25\%$  の違い。

# CP測定のためには、

メガトンクラスの標的が必要: Hyper-Kamiokande



Hyper-K

Super-K



~0.6 GeV  $\nu_\mu$   
295 km baseline

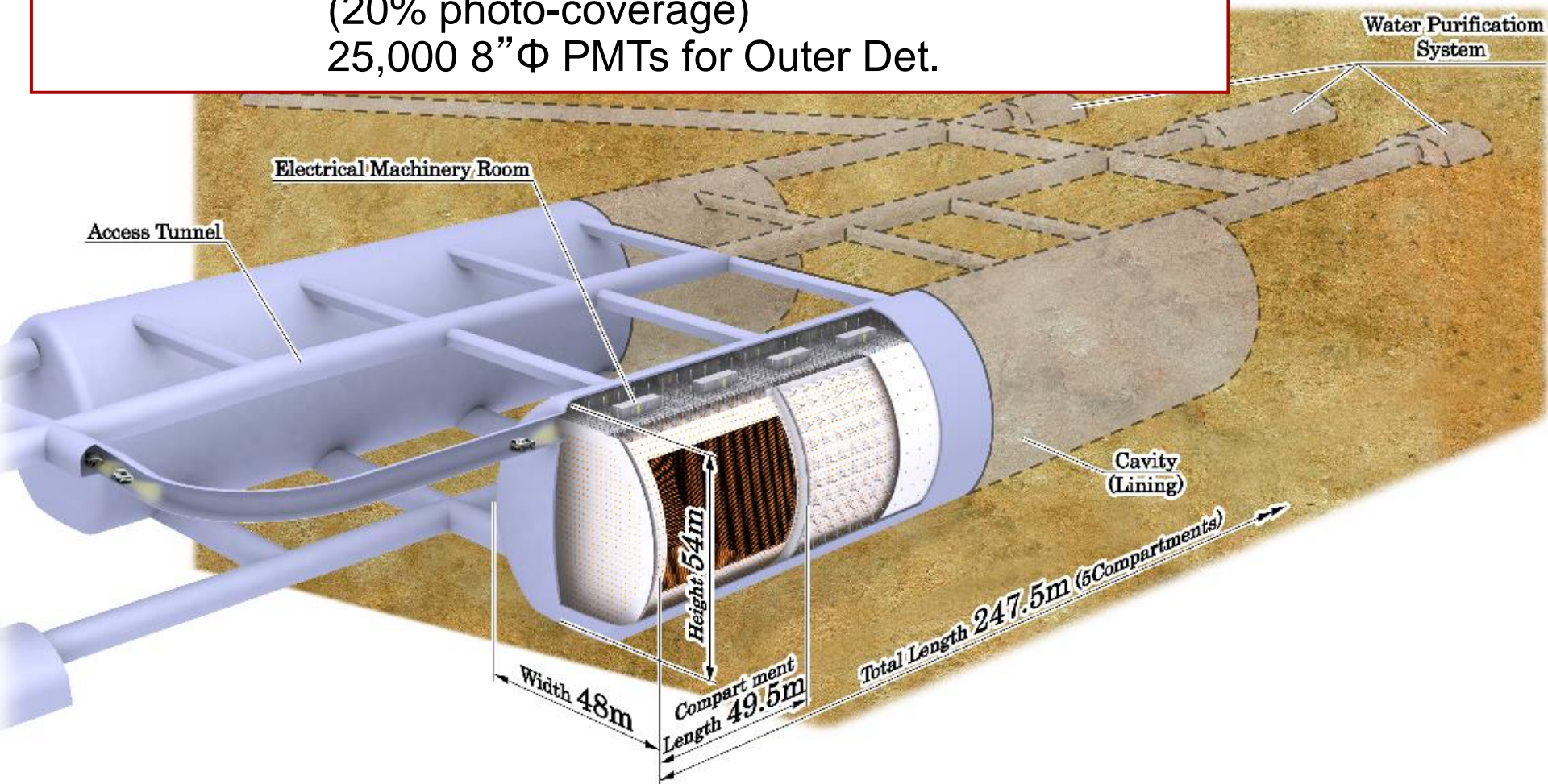
J-PARC





# Hyper-Kamiokandeの構造図

全体積	0.99 Megaton
内水槽	0.74 Mton
有効体積	0.56 Mton (0.056 Mton × 10 compartments)
外水槽	0.2 Megaton
光検出器	99,000 20"Φ PMTs for Inner Det. (20% photo-coverage) 25,000 8"Φ PMTs for Outer Det.





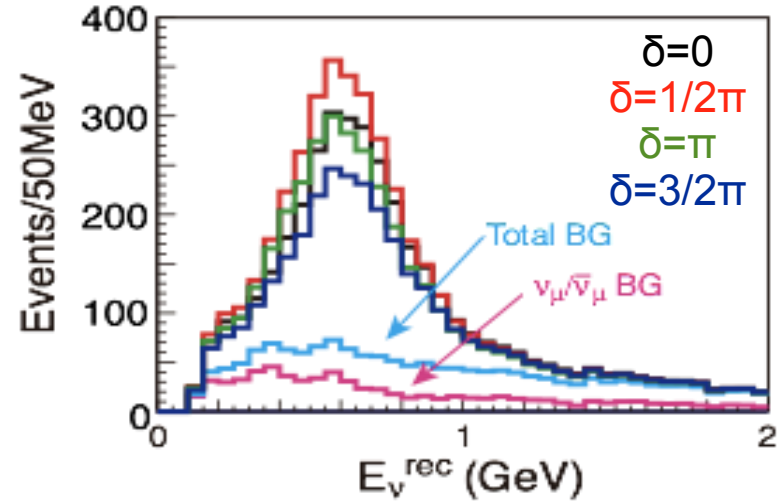
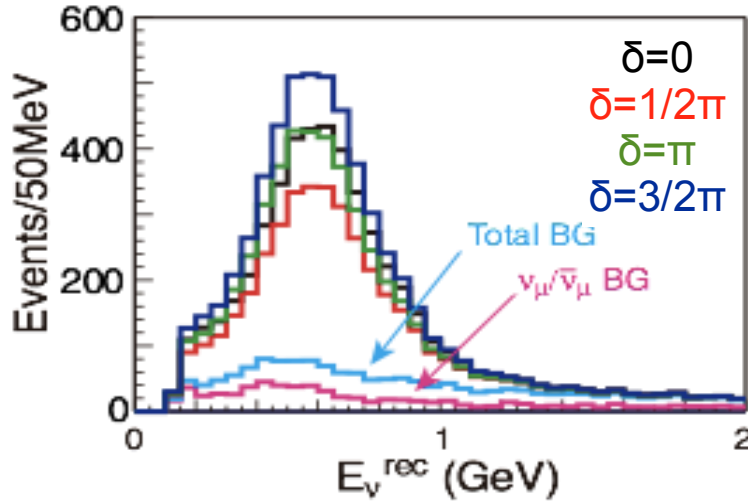
# 期待される $\nu_e$ 出現事象数

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$

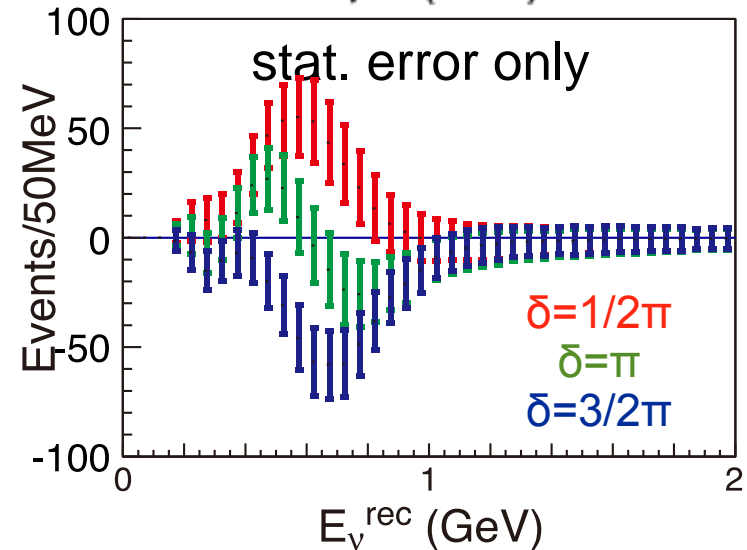
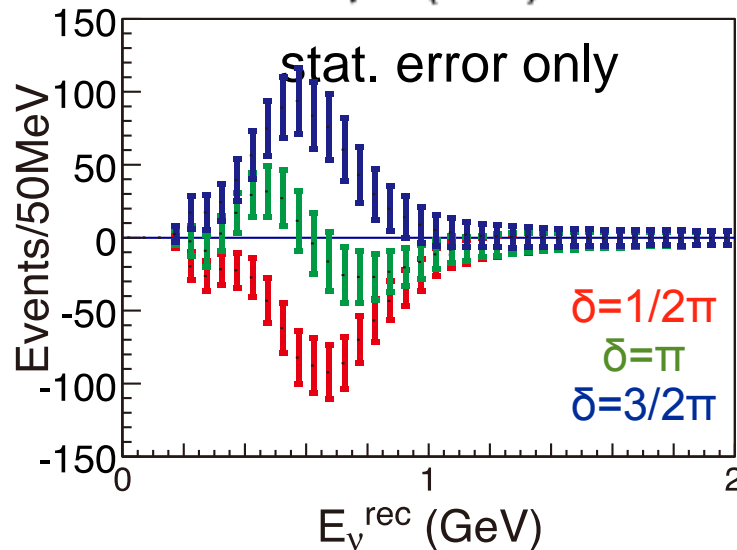
$\nu$  mode 0.75MW  $\times$  3yrs

$\bar{\nu}$  mode 0.75MW  $\times$  7yrs

$\nu_e$  候補数



$\delta = 0$ からのずれ



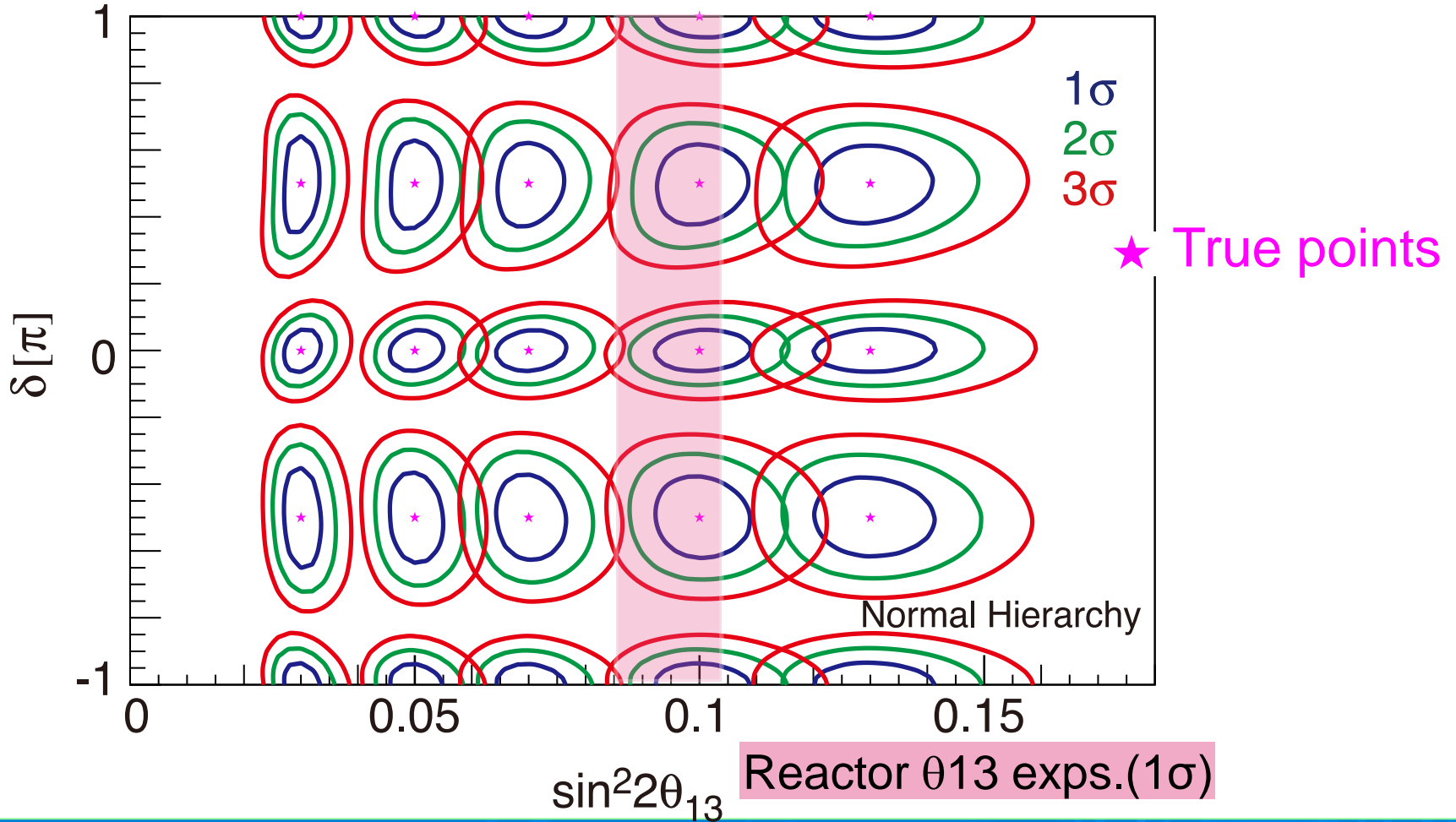
事象数と分布の形を使ってCP非保存を測定

# 予想感度

7.5MW·years

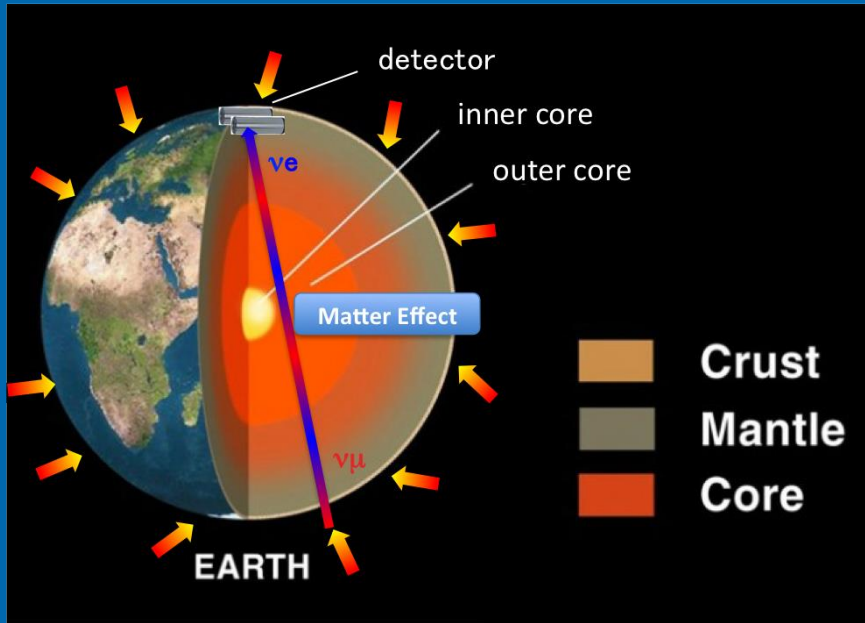
Normal mass hierarchy (known)

5% systematics on signal,  $\nu_\mu$  BG,  $\nu_e$  BG,  $\nu/\bar{\nu}$



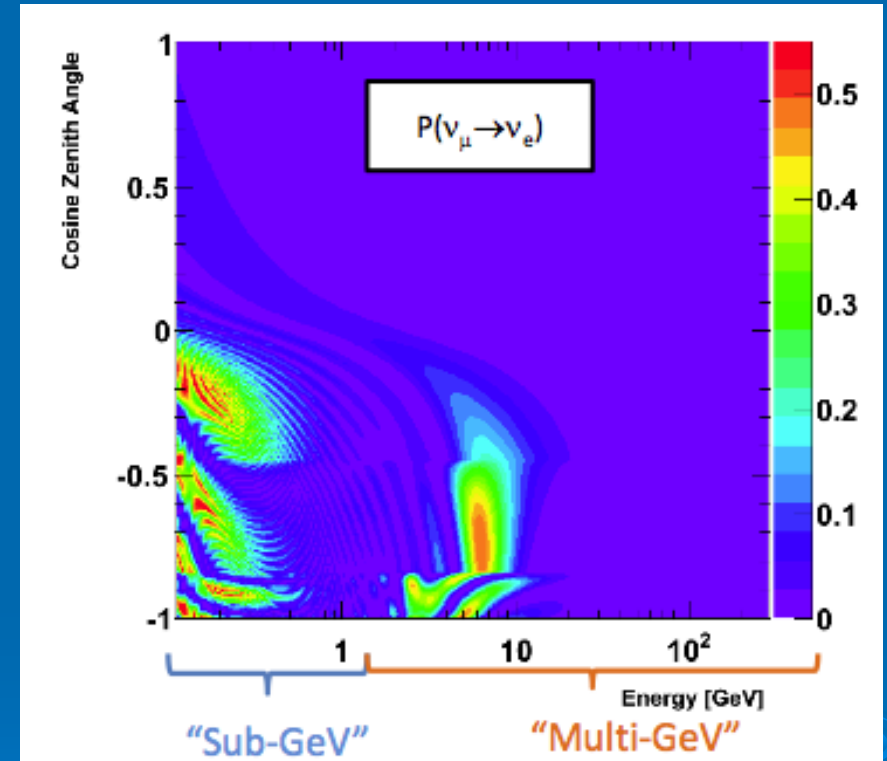
- CP非保存測定に良い感度

# 高統計大気ニュートリノ観測による階層性の決定

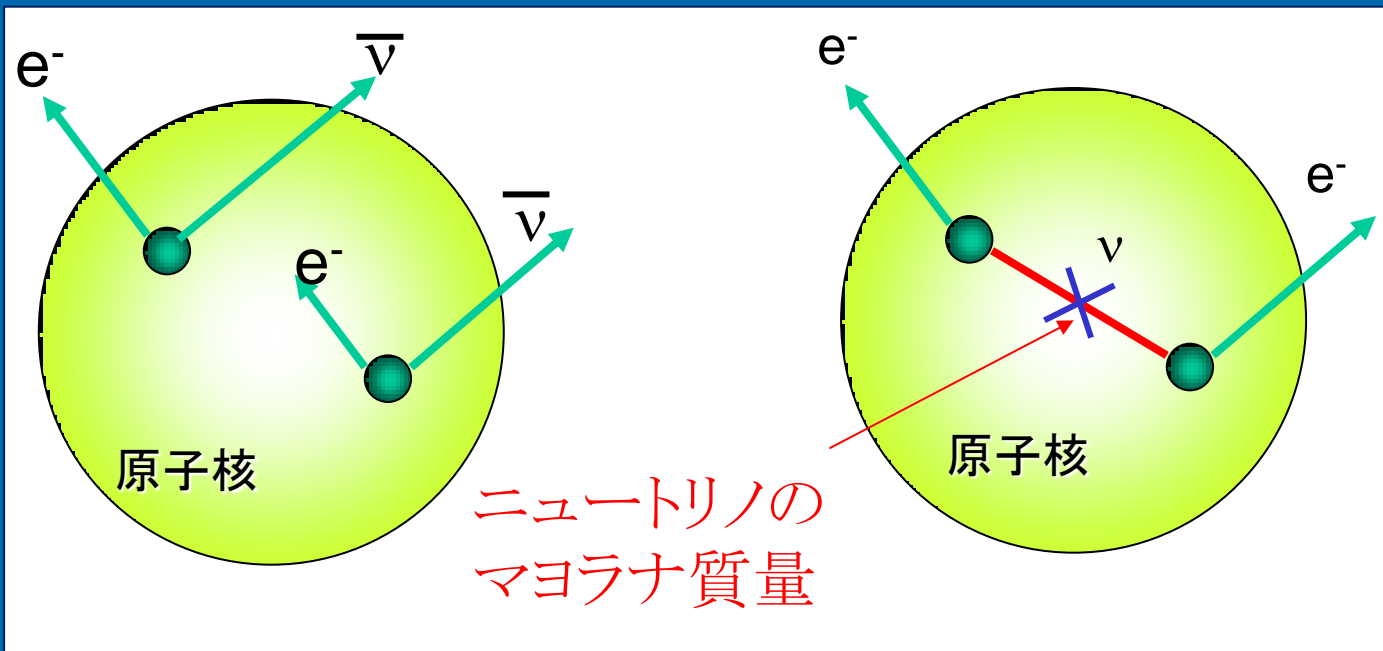


地球の物質(コア)の効果により電子ニュートリノ出現が起こる。  
標準階層性の場合、ニュートリノが、  
逆階層性の場合、反ニュートリノが、  
増大される。

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動確率のエネルギーと天頂角依存性



# $0\nu\beta\beta$ 崩壊



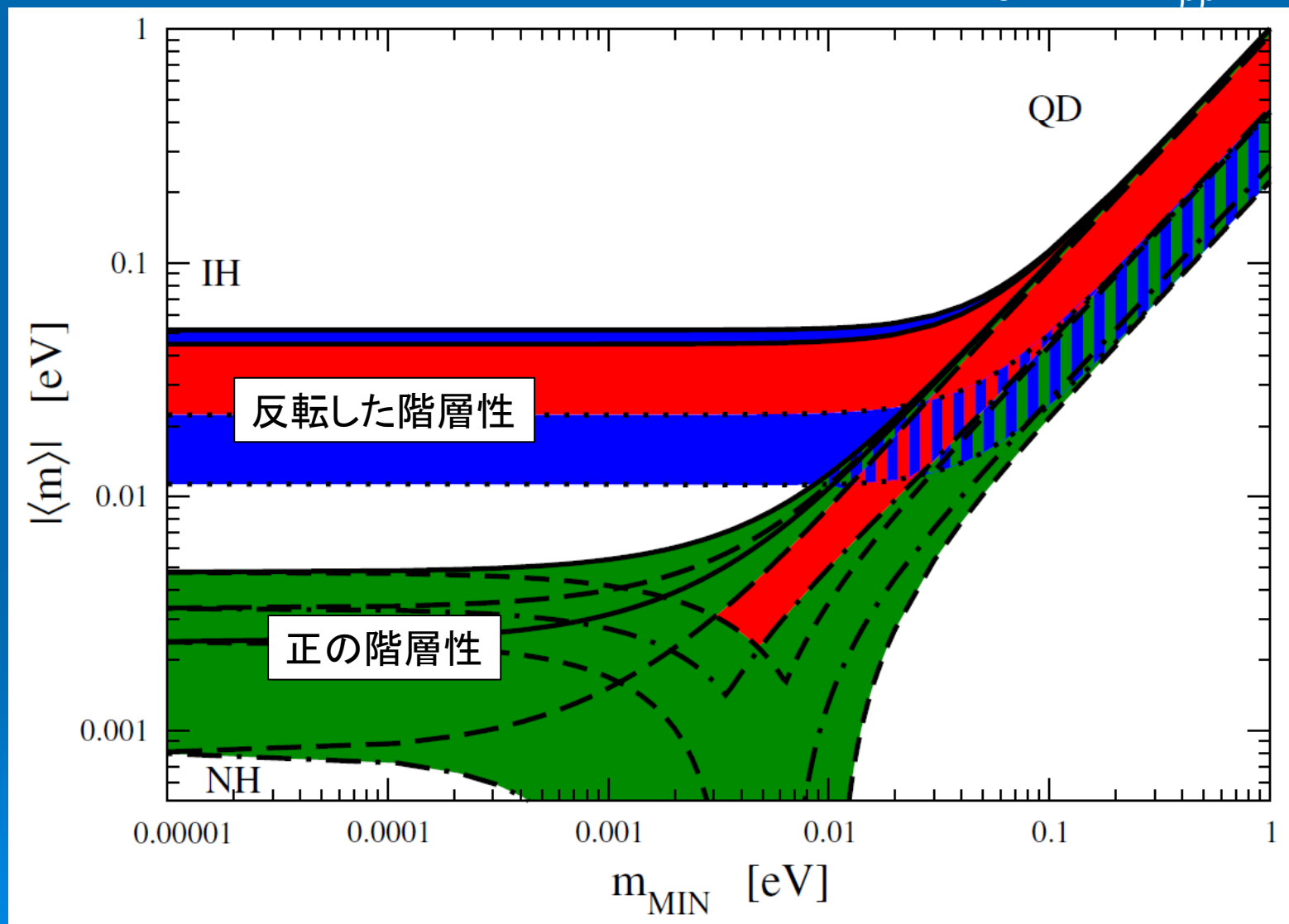
ニュートリノがマヨラナ質量を持つ場合には、ニュートリノの出ない二重ベータ崩壊(右側)が起こる。

二重ベータ崩壊に関する質量は、

$$|\langle m \rangle| = |m_1 |U_{e1}|^2 + m_2 |U_{e2}|^2 e^{i\alpha_{21}} + m_3 |U_{e3}|^2 e^{i\alpha_{31}}|$$

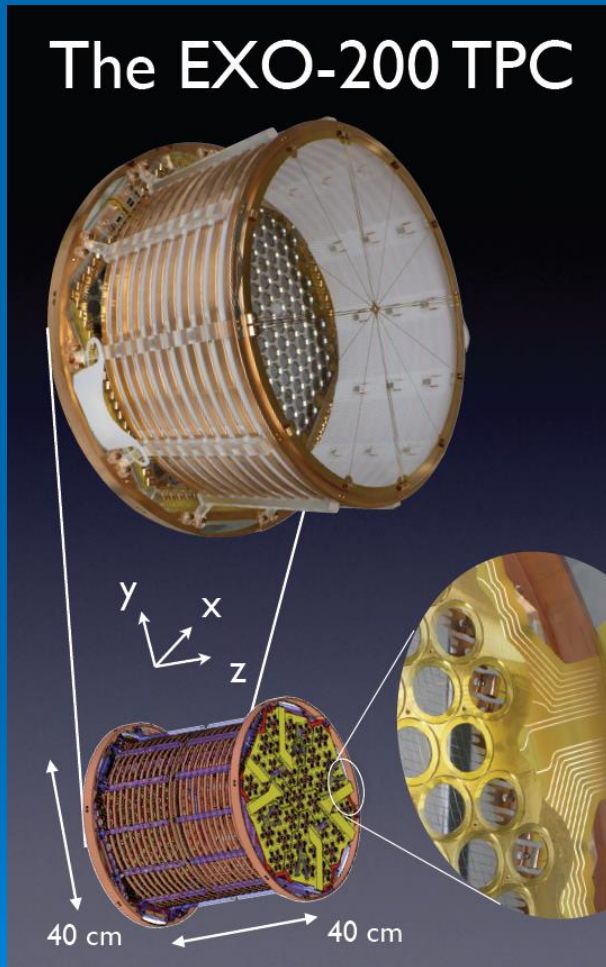
# $\beta\beta$ で測られる有効質量( $\langle m \rangle_{\beta\beta}$ )

Minimum neutrino mass(NHでは $m_1$ ,IHでは $m_3$ )と $\langle m \rangle_{\beta\beta}$  の関係

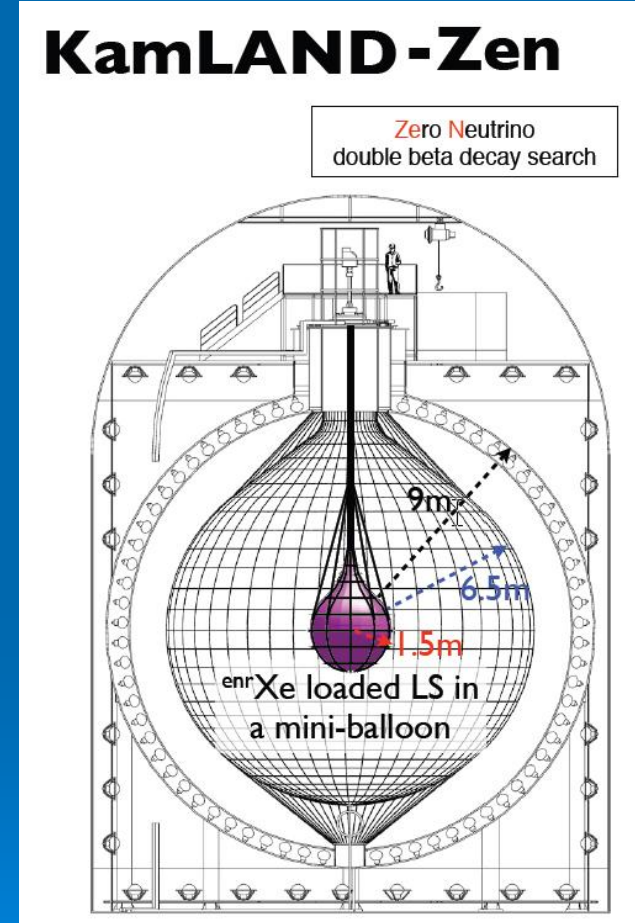




# 現在世界で最も感度のある $\beta\beta$ 実験



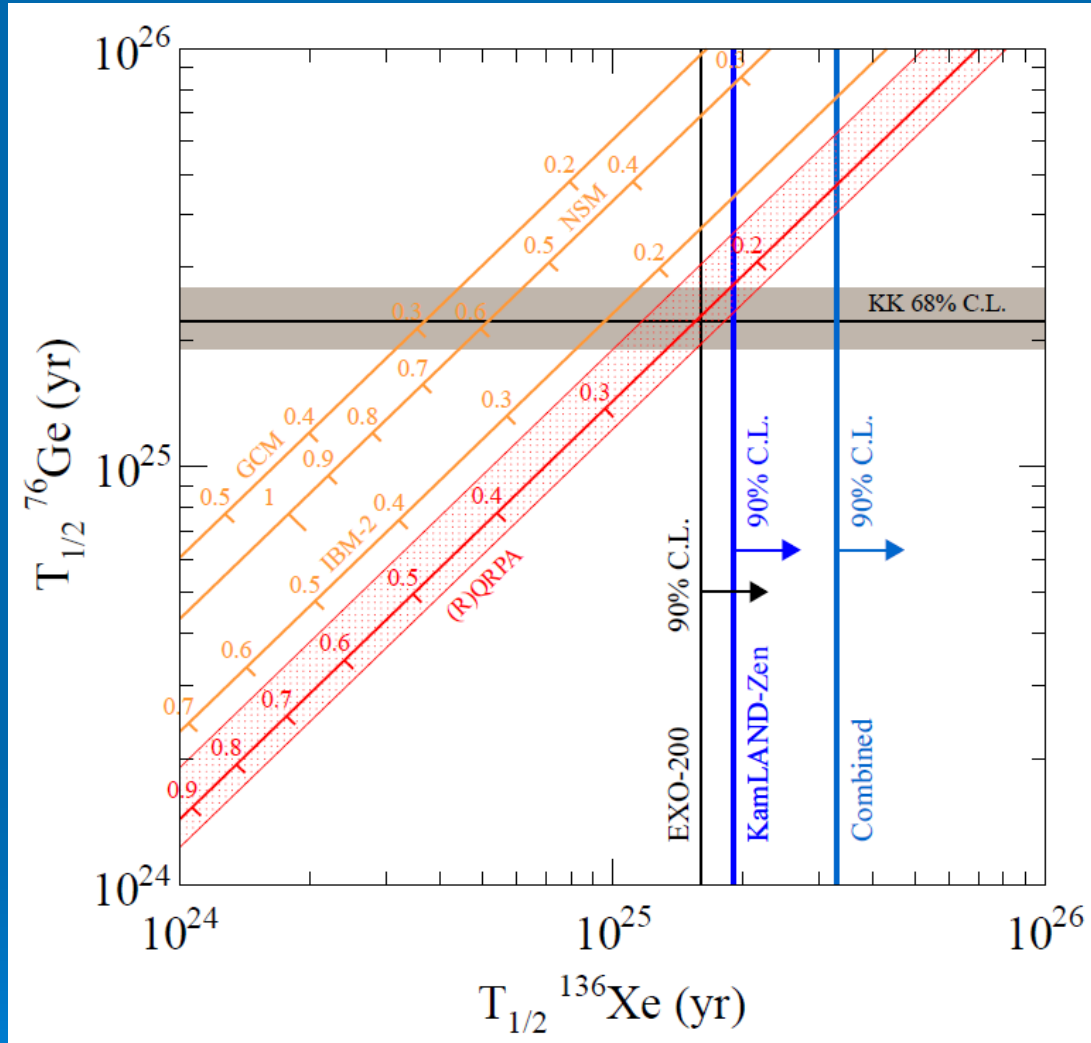
140kg液体キセノン( $^{136}\text{Xe}$ )TPC



320kgのキセノン( $^{136}\text{Xe}$ )を  
溶かした液体シンチレータ

# EXO, KamLANDの結果

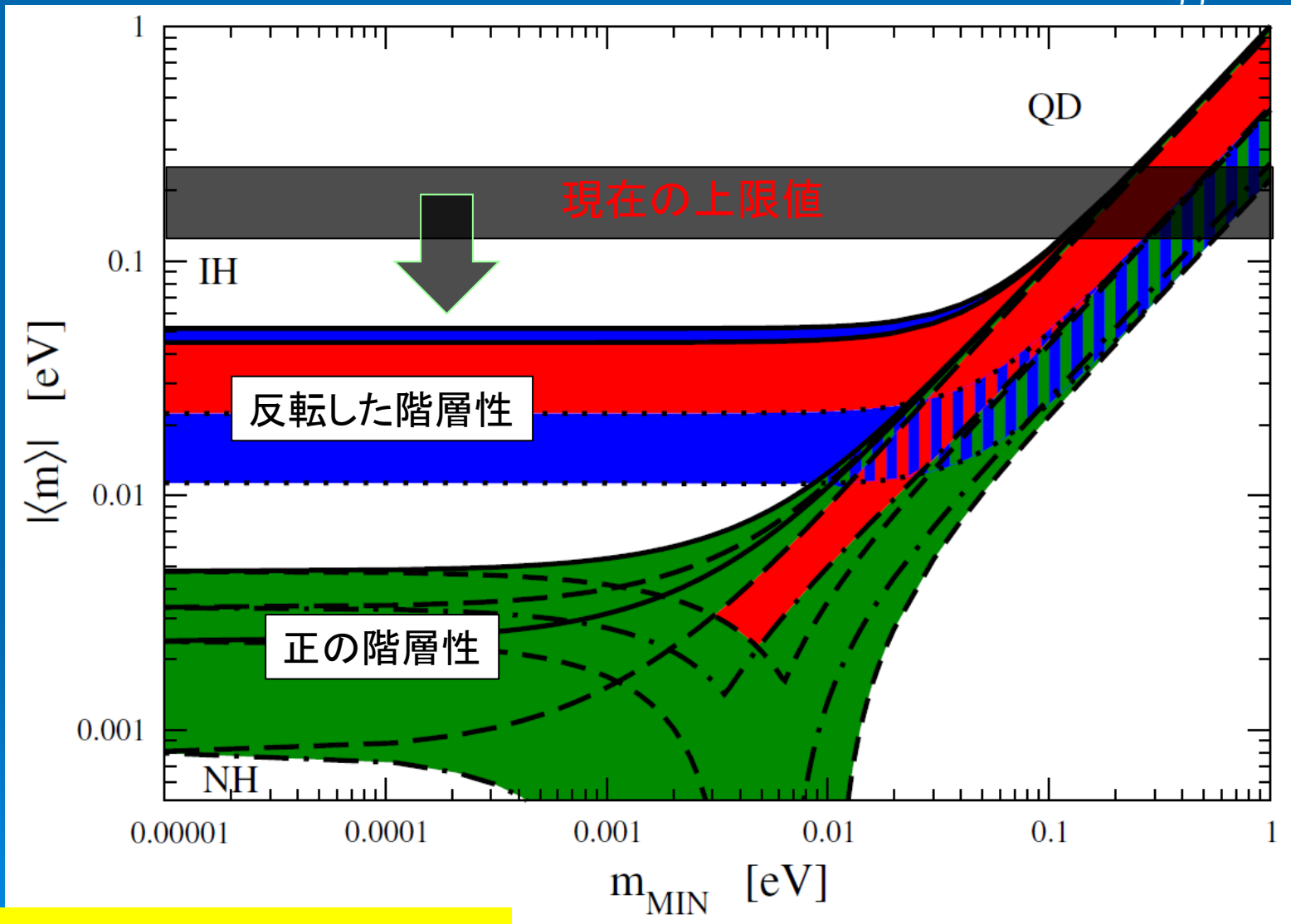
arXiv:1211.3863[hep-ex]



$$T_{1/2}^{0\nu} > 3.4 \times 10^{25} \text{ yr}$$
$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < (0.12 - 0.25) \text{ eV} \quad (90\% \text{ CL})$$

# 現在の上限値と予想の比較

Minimum neutrino mass(NHでは $m_1$ ,IHでは $m_3$ )と $\langle m \rangle_{\beta\beta}$ の関係



今後の改善が必要。

# まとめ

- ニュートリノ振動の研究により、ニュートリノが質量を持ち、また混合を持つことがわかった。
- CP角以外のすべての混合角および質量差が解明された。(近年の成果としては $\theta_{13}$ )。
- 今後の課題は、
  - CPの破れ
  - 質量の階層性
  - ニュートリノ質量の絶対値
  - ニュートリノ質量はマヨラナ質量か？ ( $0\nu\beta\beta$ はあるか?)
- Hyper-Kamiokandeでは、CP非保存の測定、質量階層性の決定が期待できる。