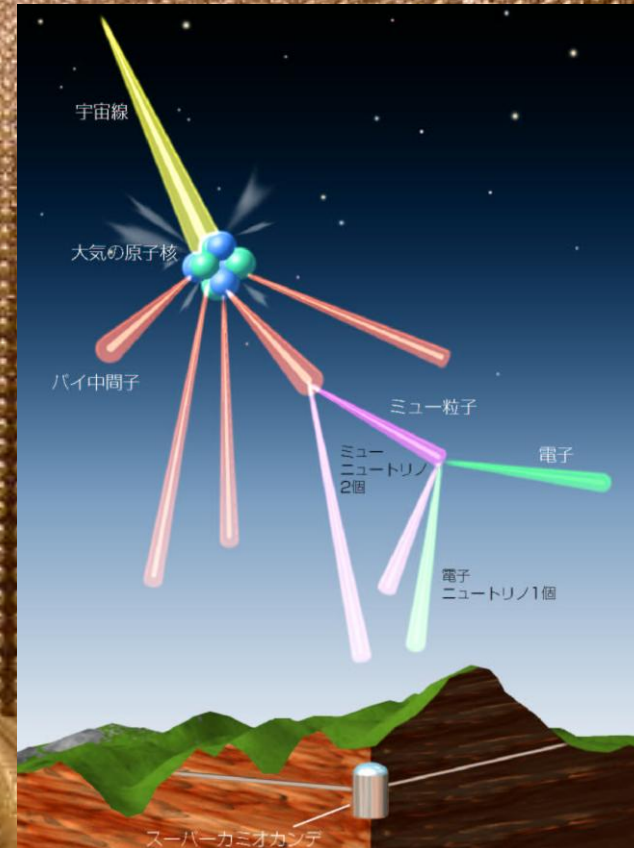
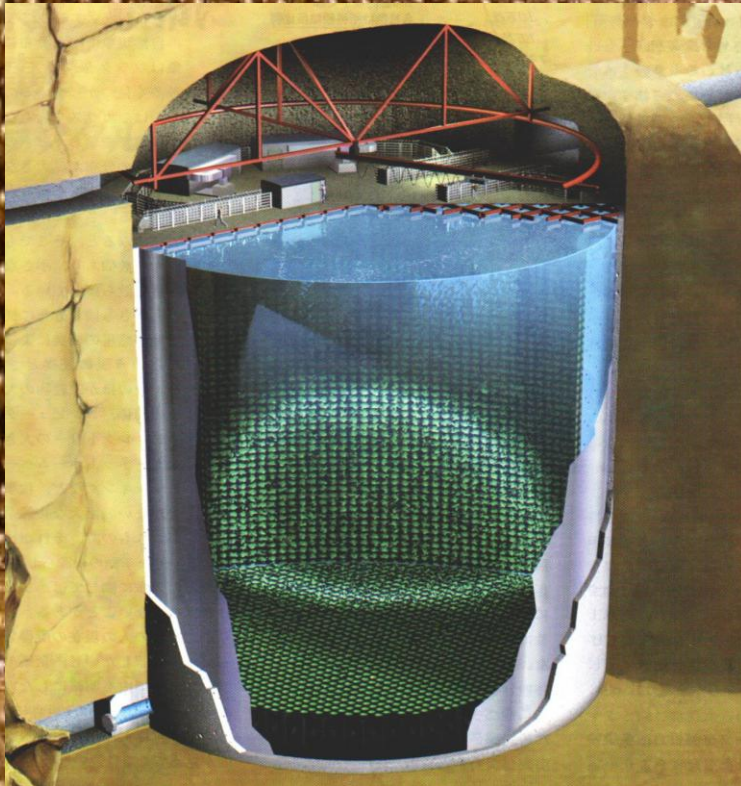


スーパーカミオカンデ (大気ニュートリノ、陽子崩壊)

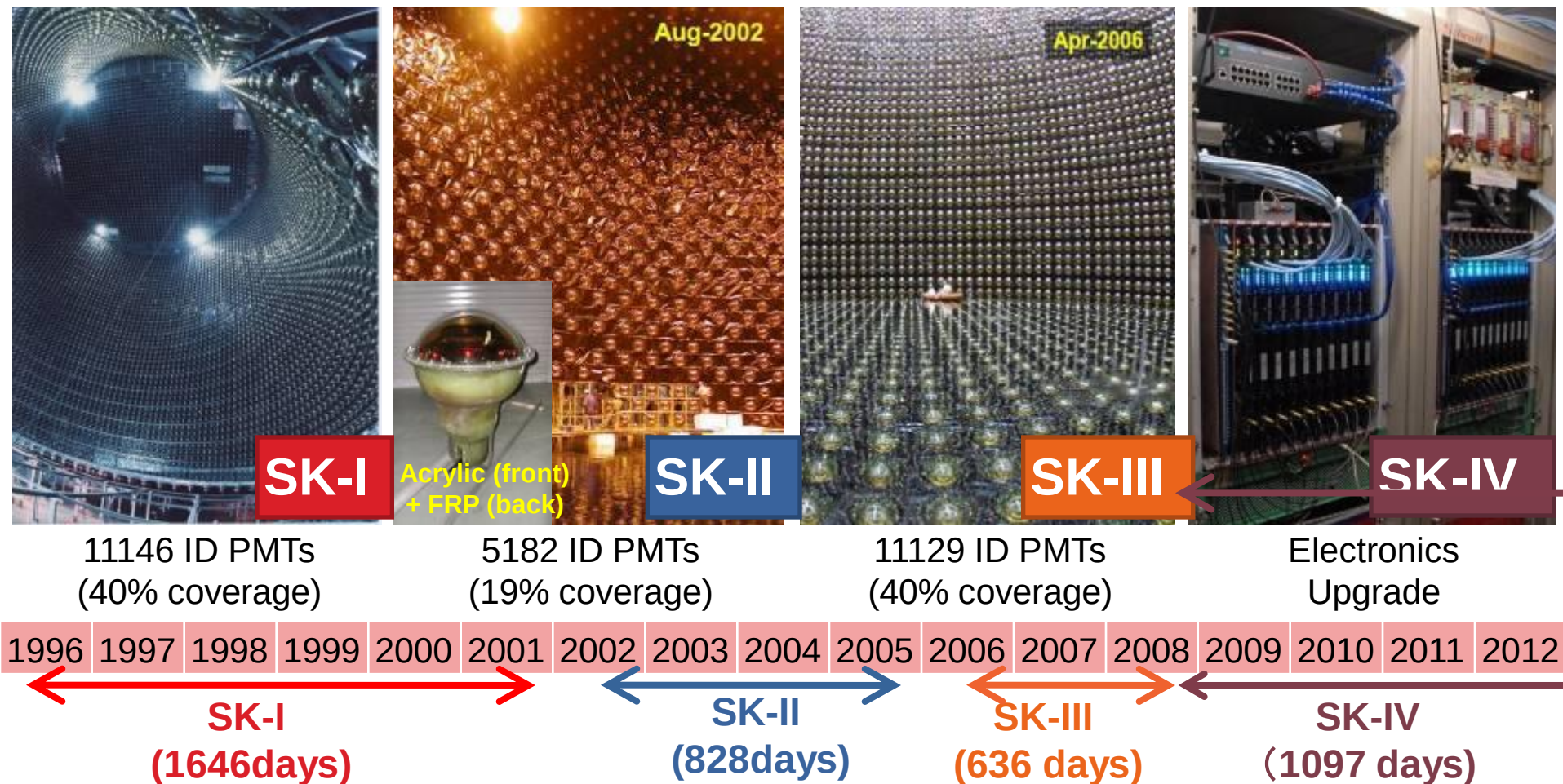


奥村公宏（東大宇宙線研）
スーパーカミオカンデコラボレーション
共同利用発表会（平成24年度）

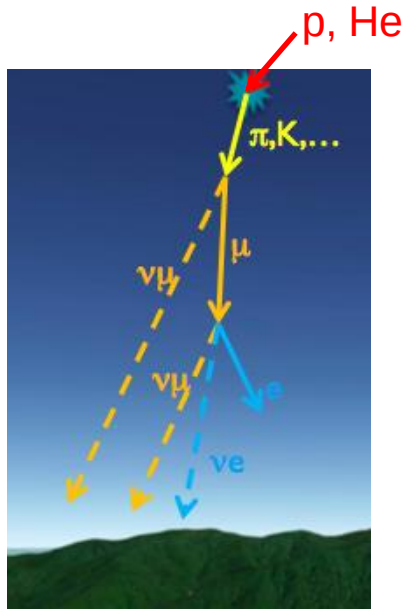
内容

- 大気ニュートリノ
 - 3世代ニュートリノ振動、質量階層性の探索
- 陽子崩壊

スーパーカミオカンデ検出器



大気ニュートリノ



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

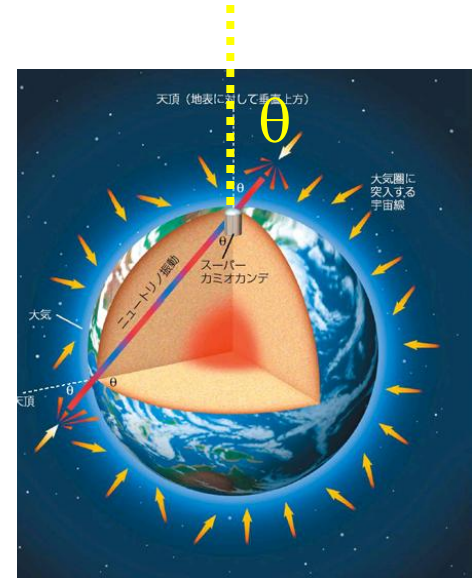
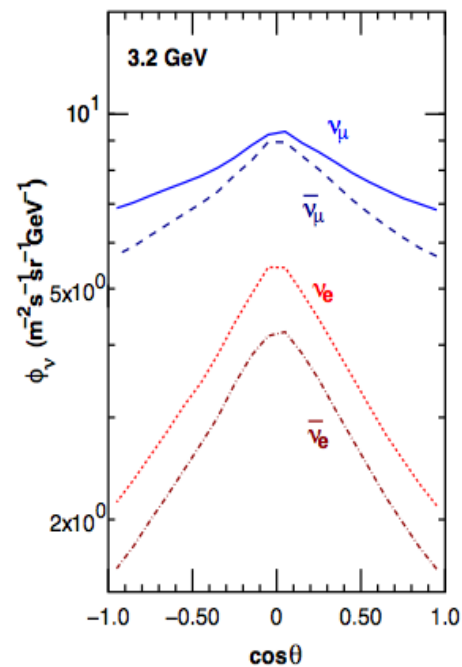
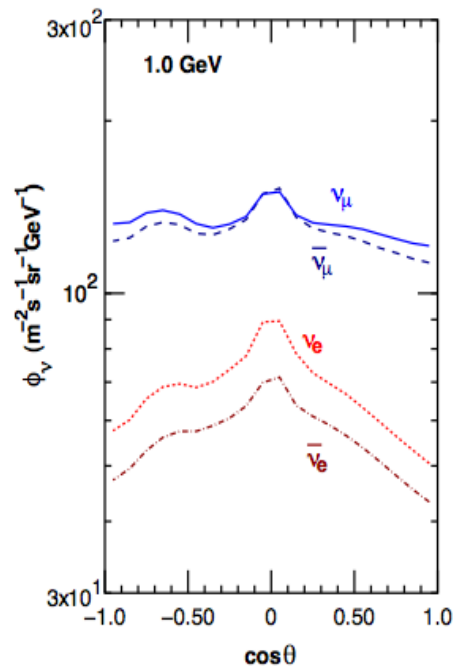
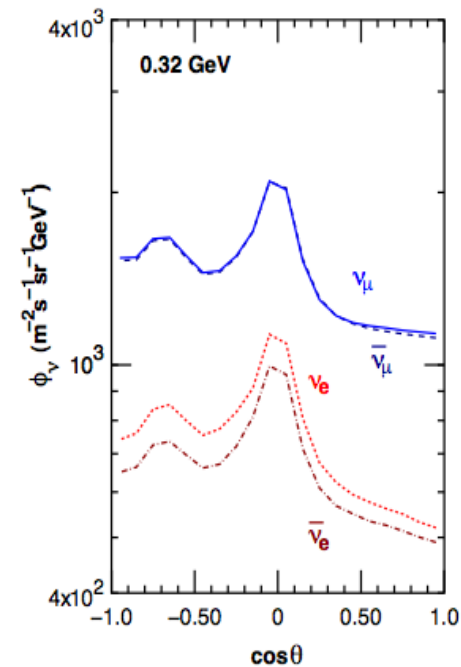
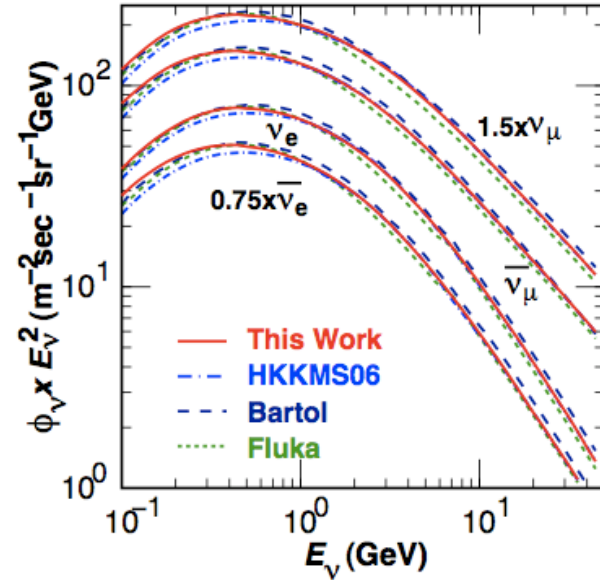
$$\quad \quad \quad \searrow$$

$$\quad \quad \quad e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

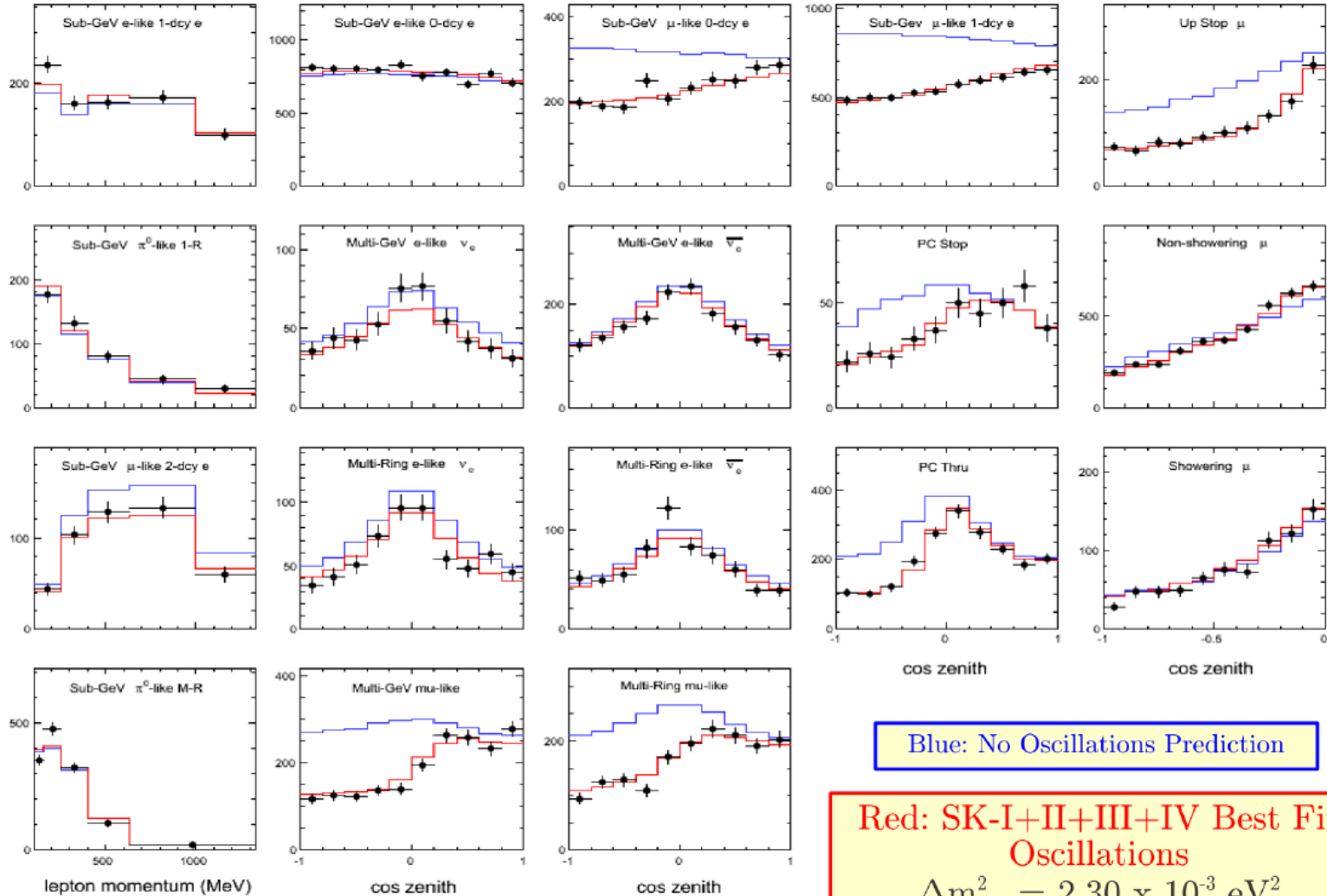
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\quad \quad \quad \searrow$$

$$\quad \quad \quad e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$



$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 2世代振動によるfit



Blue: No Oscillations Prediction

Red: SK-I+II+III+IV Best Fit
Oscillations

$$\Delta m_{23}^2 = 2.30 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta_{23} = 0.99$$

3世代ニュートリノ振動

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

大気ニュートリノ
加速器ニュートリノ

加速器ニュートリノ
原子炉ニュートリノ
大気ニュートリノ

太陽ニュートリノ
原子炉ニュートリノ

$$2.24 \times 10^{-3} < \Delta m_{23}^2 < 2.44 \times 10^{-3} eV^2$$

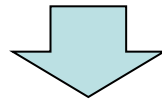
$$\sin^2(2\theta_{23}) > 0.90$$

$$7.4 \times 10^{-5} < \Delta m_{12}^2 < 7.8 \times 10^{-5} eV^2$$

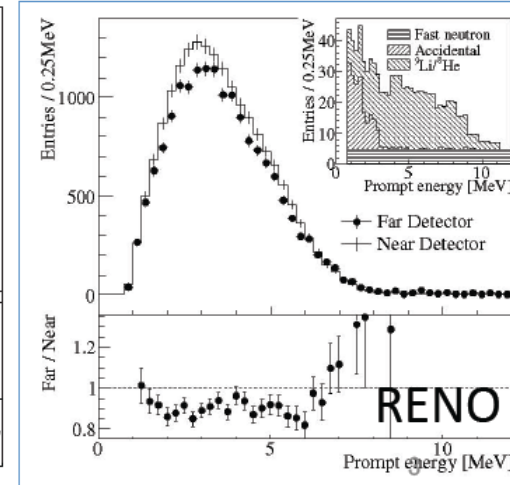
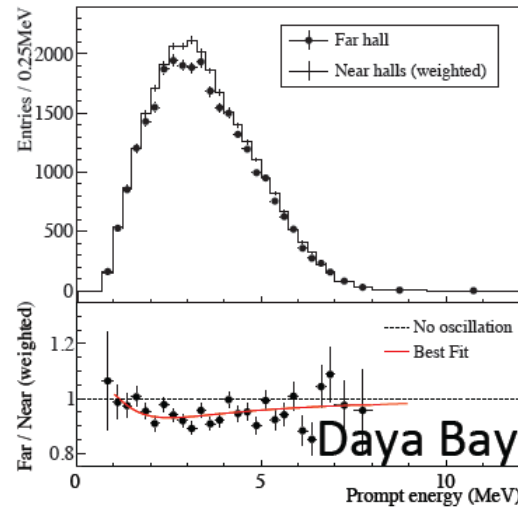
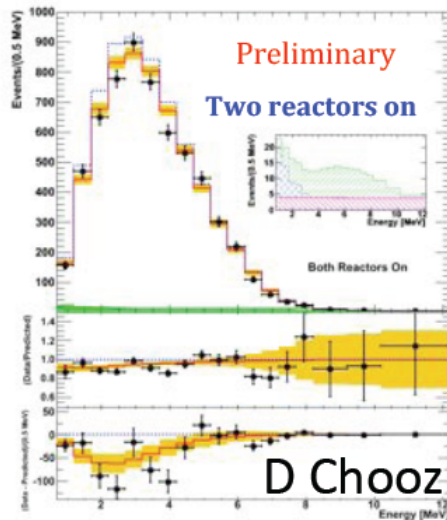
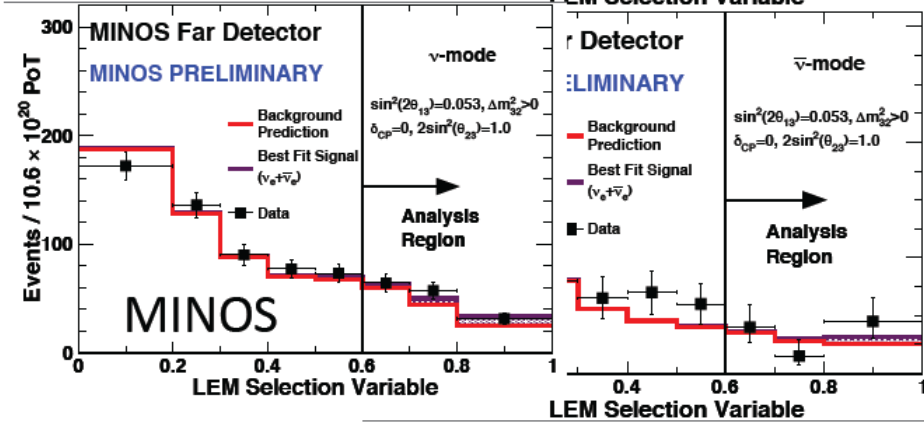
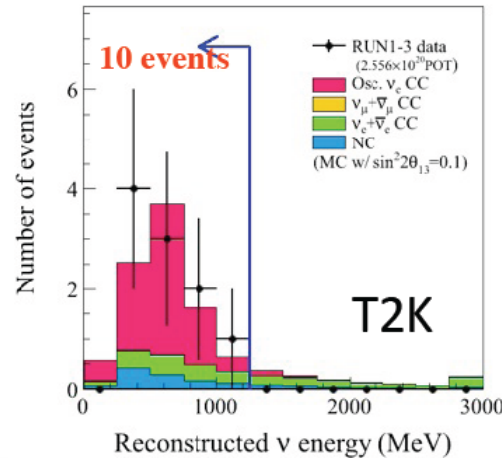
$$0.30 < \sin^2 \theta_{12} < 0.32$$



$$\nu_\mu \longleftrightarrow \nu_\tau$$



$$\nu_\mu, \nu_\tau \longleftrightarrow \nu_e$$



加速器(T2K)実験での ν_μ から ν_e への振動
原子炉ニュートリノでの anti- ν_e 消失



$$\sin^2(2\theta_{13}) \sim 0.1$$

今後のニュートリノ振動物理の課題

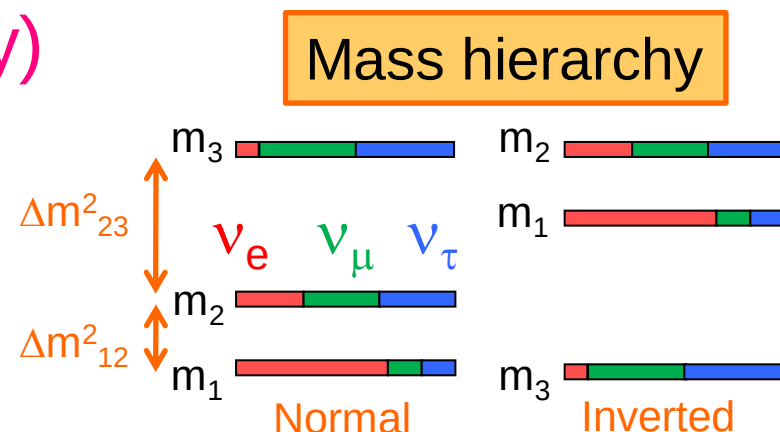
- CP violation (δ_{cp}) 探索
 - 加速器ニュートリノ (e.g. J-PARC to Hyper-K)

- 質量階層性 (Mass hierarchy)

- Normal or Inverted

- MHを解明する方法

- double-beta崩壊 (KamLAND他)
 - 物質効果を用いた測定
 - 加速器 ν による長距離 ($\sim 1000\text{km}$) $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動測定
 - 大気ニュートリノ

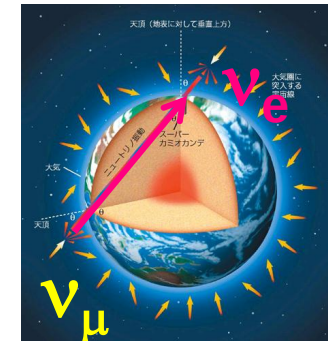
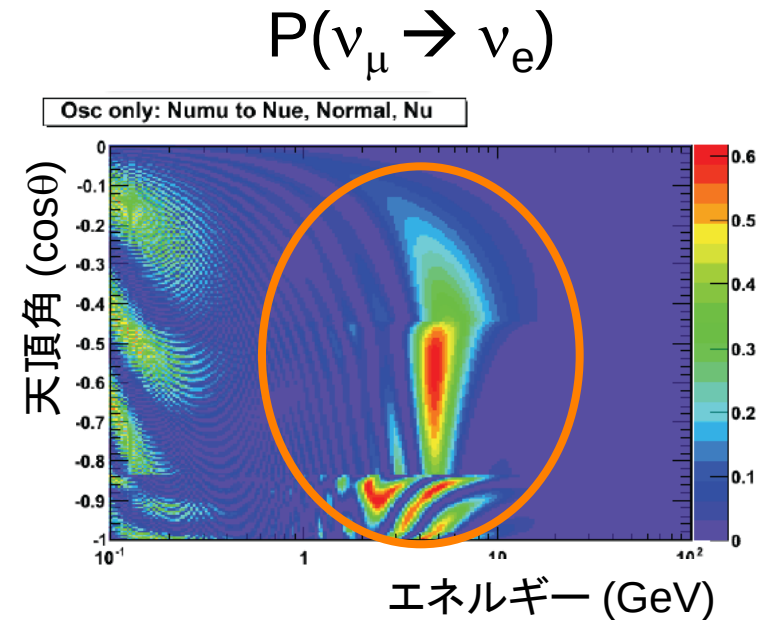


物質効果による $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の増幅

加速器および原子炉ニュートリノで13角が比較的大きいことが証明され、大気ニュートリノでも $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動が生じているはず

大気ニュートリノでは、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ および $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 両方の振動が相殺してその効果を見るのが難しい。

しかし地球内部をニュートリノが通過する物質効果によって、エネルギーが数GeVの領域で ν_e 振動が増幅される。



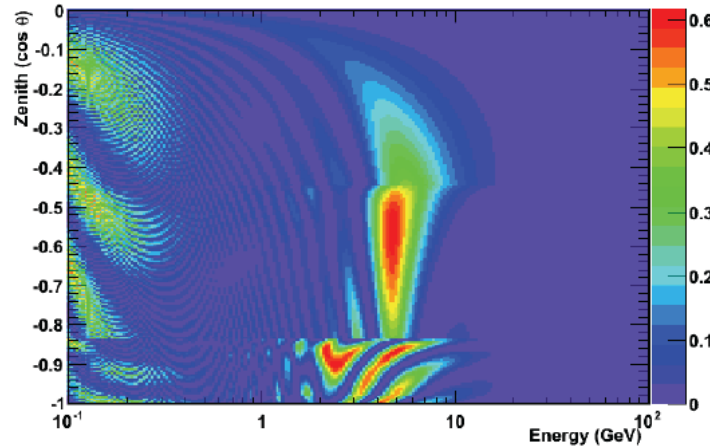
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の階層性依存性

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

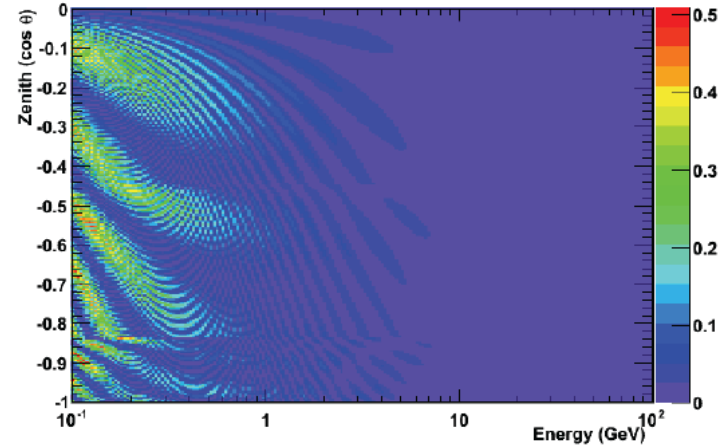
$$\text{anti-}\nu_\mu \rightarrow \text{anti-}\nu_e$$

Normal hierarchy

Osc only: Numu to Nue, Normal, Nu

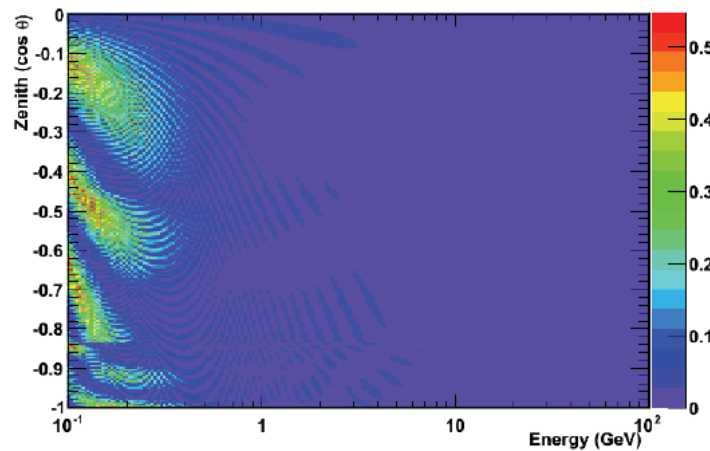


Osc only: Numu to Nue, Normal, antiNu

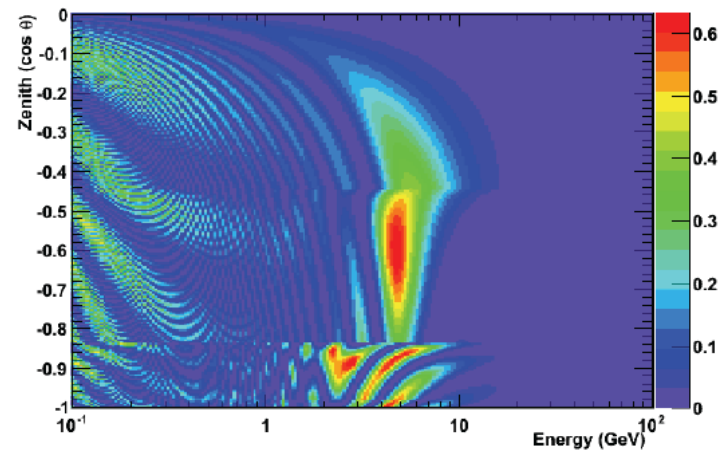


Inverted hierarchy

Osc only: Numu to Nue, Inverted, Nu



Osc only: Numu to Nue, Inverted, antiNu



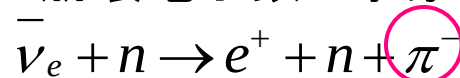
ν / anti- ν 事象選別

水チェレンコフ検出器ではニュートリノの符号
(レプトン荷電の正負)を識別は難しい

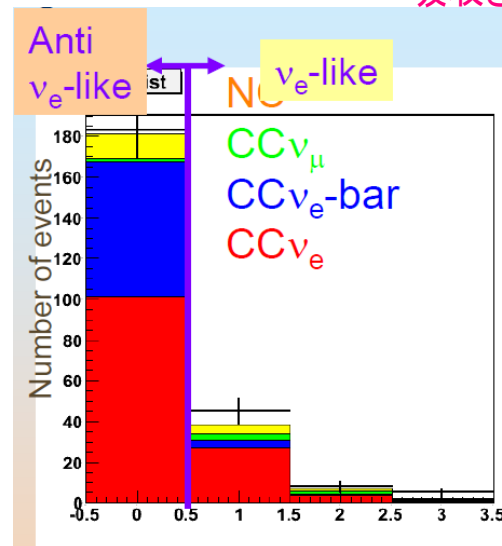
→ kinematics から ν / anti- ν を統計的に測定

1リング数事象の場合:

崩壊電子数で事象分け

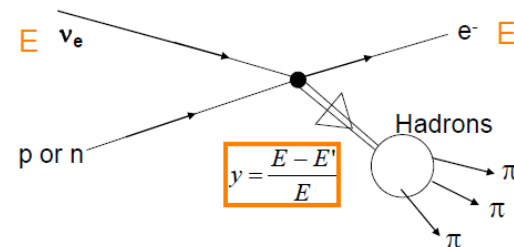


吸収され崩壊電子なし



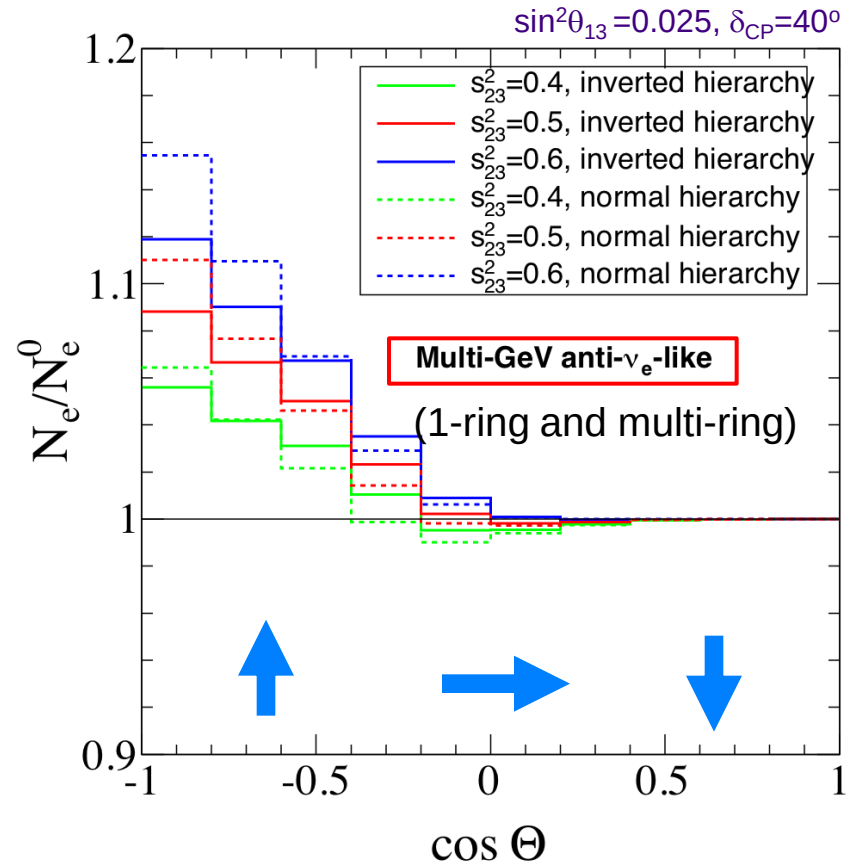
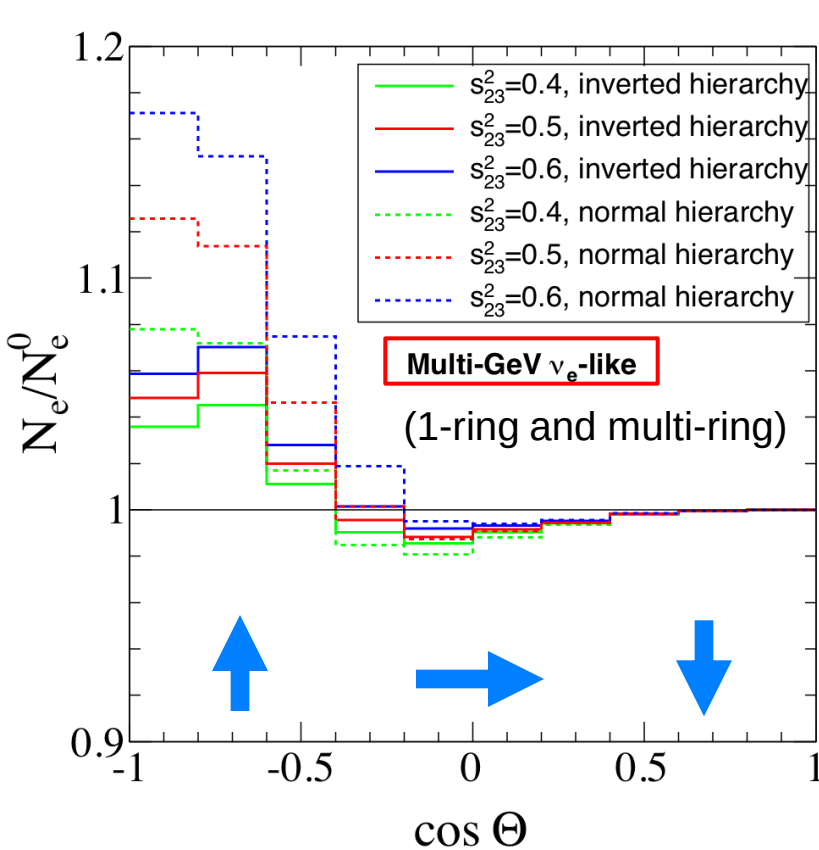
複数リング数事象の場合:

再構成パラメータからLikelihoodを構成



	CC ν_e	CC anti- ν_e
レプトンエネルギーの割合	小	大
チェレンコフリング数	多	少
横方向運動量	大	小
崩壊電子数	多	少

質量階層性による ν_e 事象の効果

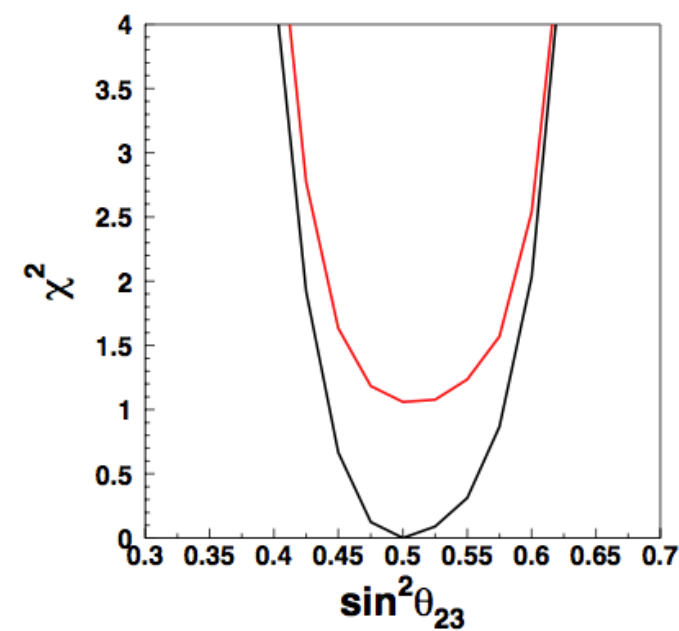


Normal、Invertedとも上向き方向に電子事象の超過が見られるが、 ν_e -likeとanti- ν_e -likeでは増加量に違いがみられる。

質量階層性の感度予想

	Assumed
Δm^2_{23}	$2.66 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
$\sin^2 \theta_{23}$	0.5
δCP	300 deg
	Normal hierarchy

$\sin^2 \theta_{13} = 0.025$ fixed
($\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$)

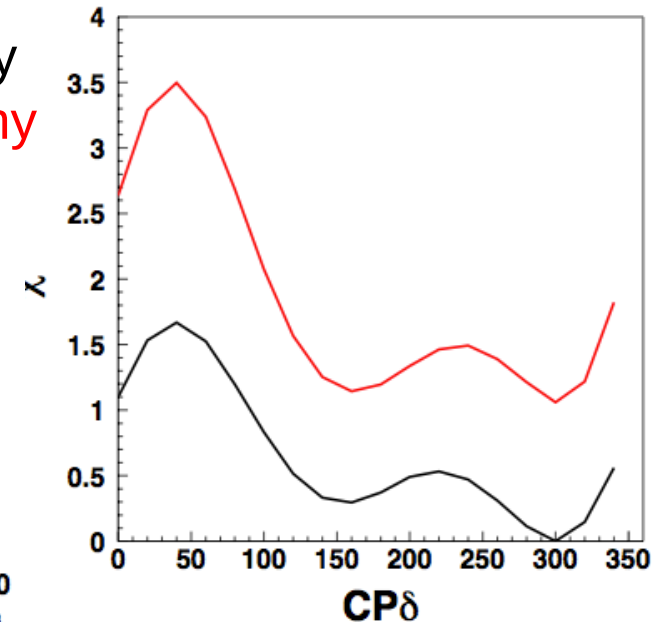
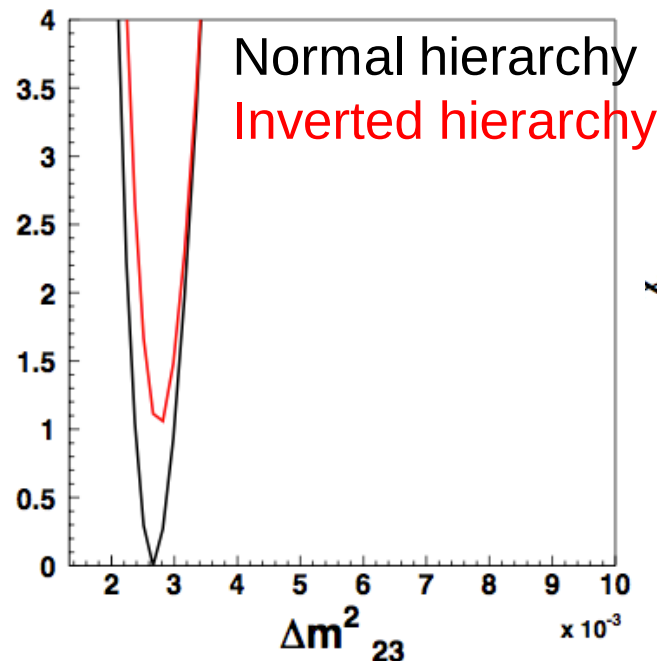


Normalが答えである
場合:

$$\chi^2(\text{IH}) - \chi^2(\text{NH}) = 1.06$$

Invertedが答えである場合:

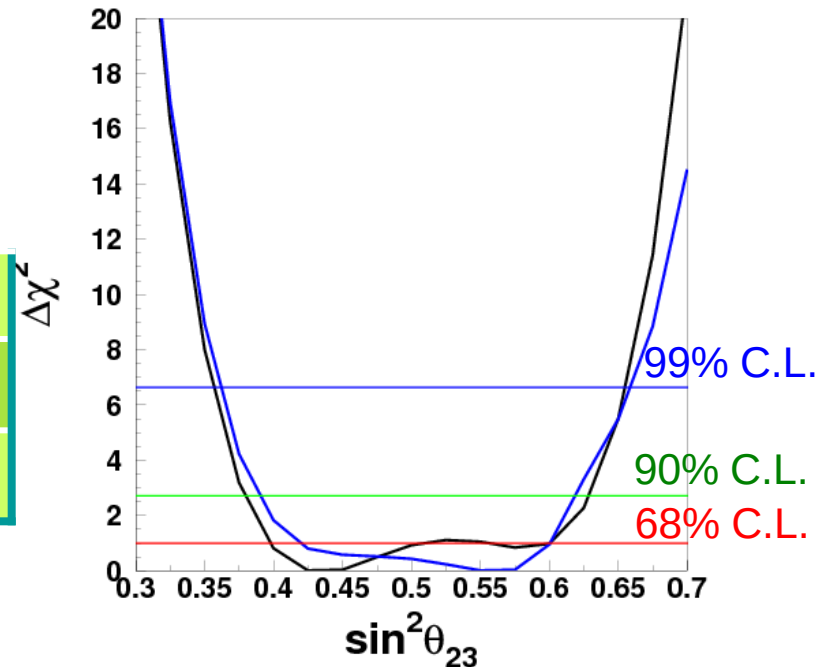
$$\chi^2(\text{NH}) - \chi^2(\text{IH}) = 0.90$$



Normal hierarchy を仮定したfit

* $\sin^2\theta_{13}$ fixed to be 0.025 (reactor)

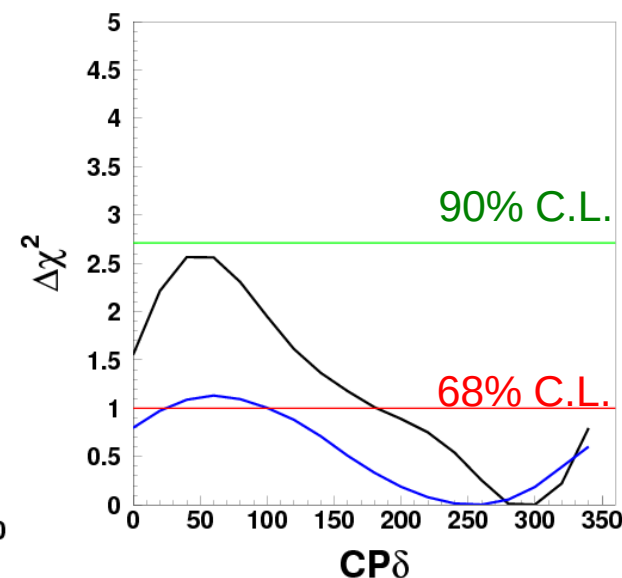
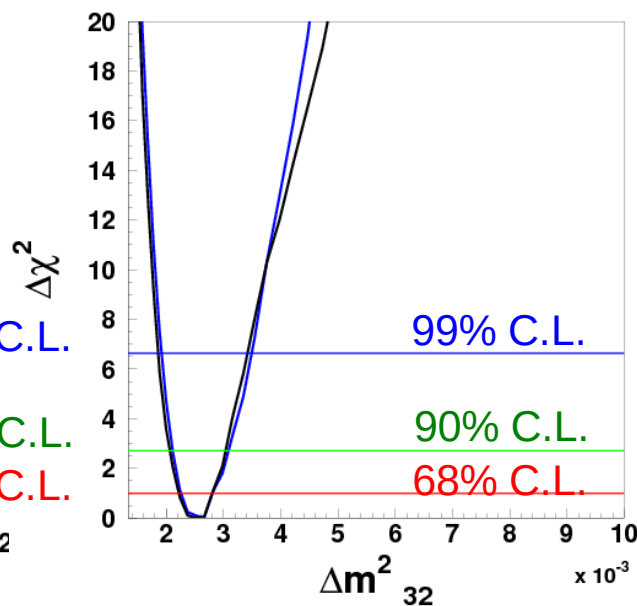
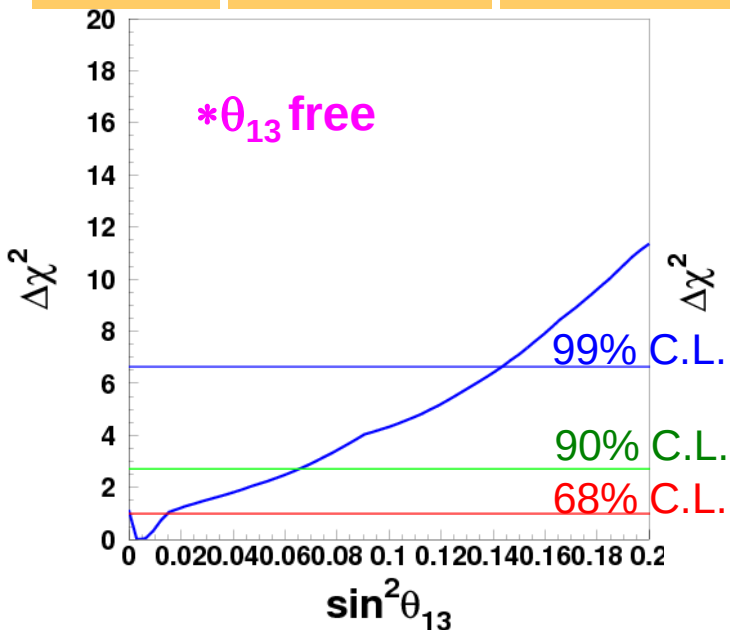
Δm^2_{32}	$\Delta m^2_{32} = 2.66 \pm_{0.40}^{0.15} \times 10^{-3} eV^2 (1\sigma)$	
$\sin^2\theta_{23}$	0.425	0.380 - 0.628 (90%CL)
δCP	300°	All allowed at 90% C.L.



$\chi^2_{\min} = 556.7 / 477 \text{ dof}$

$\sin^2\theta_{13}$	0.003	0 - 0.0655
---------------------	-------	------------

Free θ_{13}
Fixed reactor θ_{13}



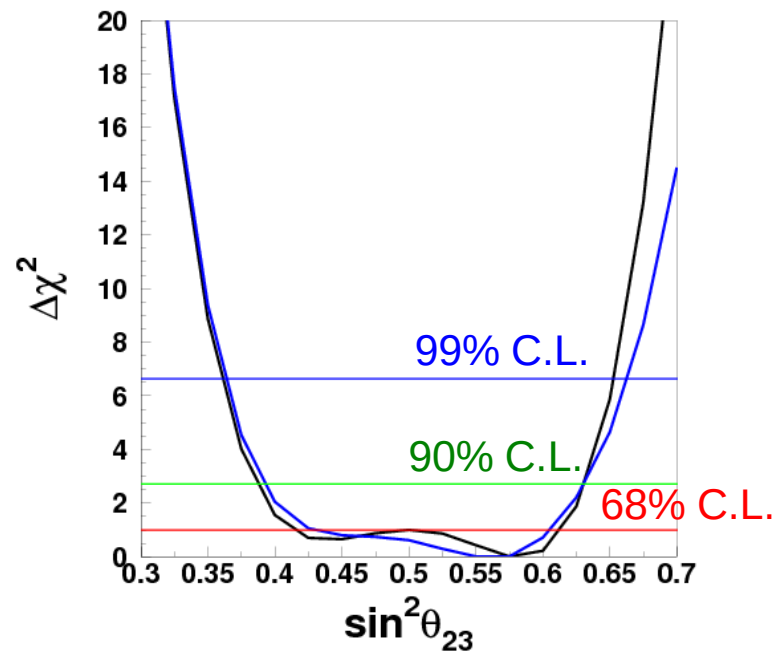
Inverted hierarchy を仮定したfit

* $\sin^2\theta_{13}$ fixed to be 0.025 (reactor)

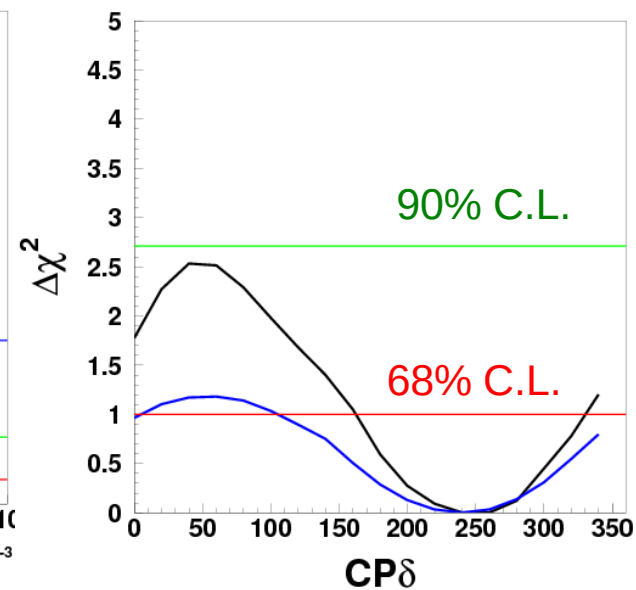
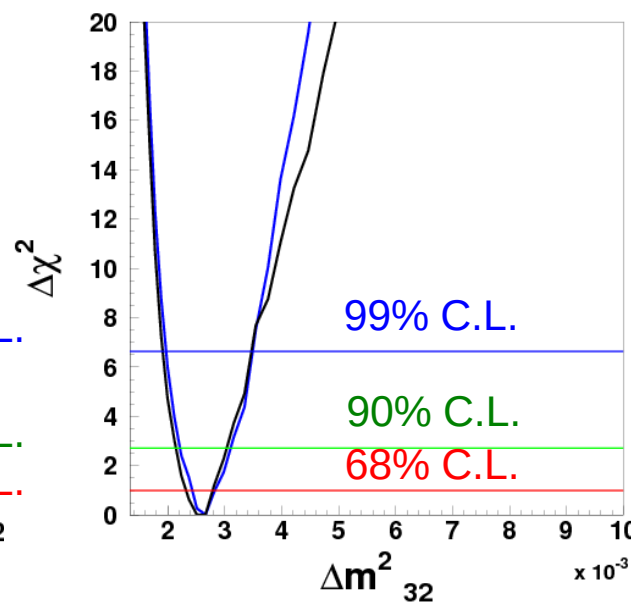
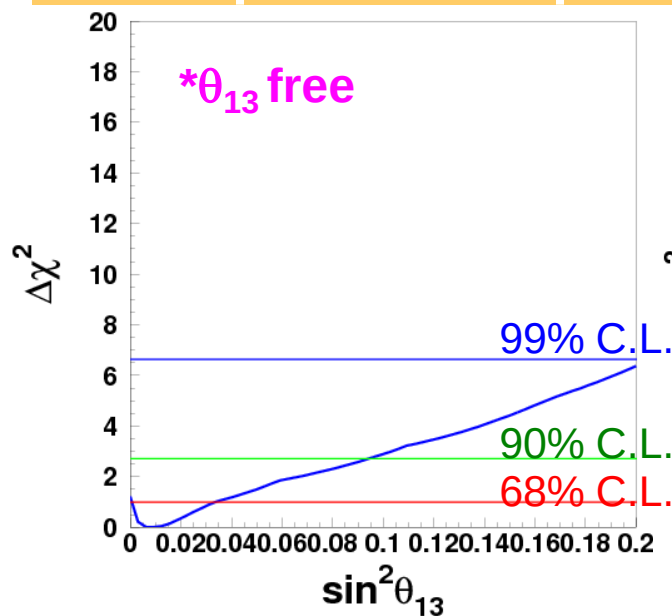
Δm^2_{32}	$\Delta m^2_{32} = 2.66 \pm_{0.23}^{0.17} \times 10^{-3} eV^2 (1\sigma)$	
$\sin^2\theta_{23}$	0.575	0.388 - 0.630 (90%CL)
δCP	260°	All allowed at 90% C.L.

$$\chi^2_{\min} = 555.5 / 477 \text{ dof}$$

$\sin^2\theta_{13}$	0.006	0 - 0.0944
---------------------	-------	------------



Free θ_{13}
Fixed reactor θ_{13}



Normal hierarchy: $\chi^2_{\min} = 556.7 / 477 \text{ dof}$

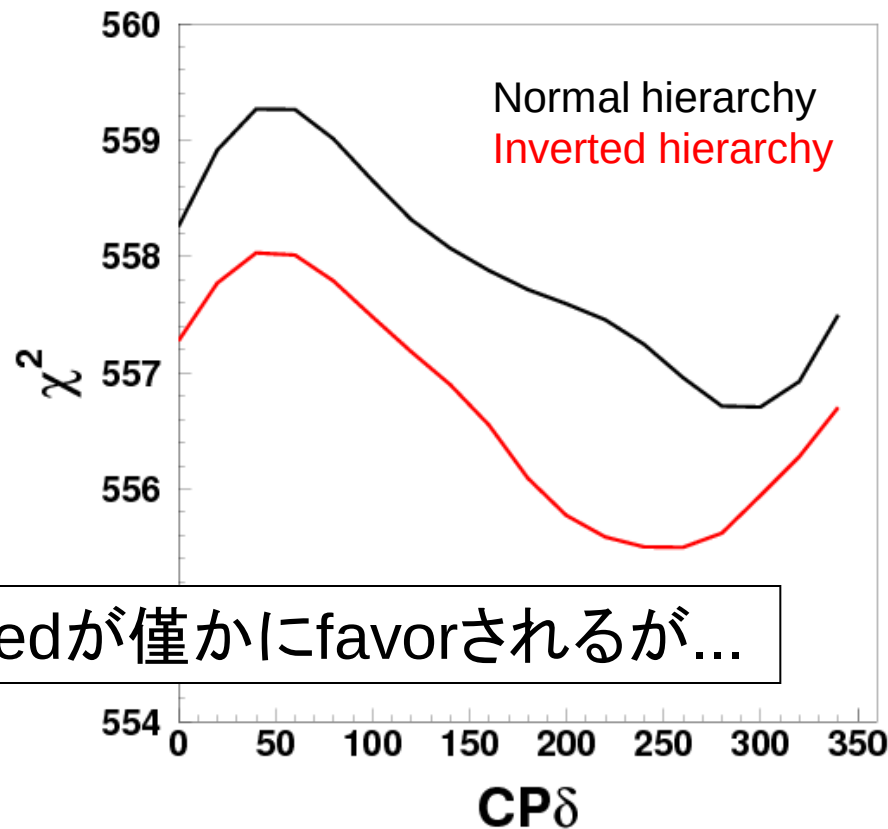
Inverted hierarchy: $\chi^2_{\min} = 555.5 / 477 \text{ dof}$

$$c_{\min}^2(NH) - c_{\min}^2(IH) = 1.2$$

(Sensitivity for mass hierarchy:

$$\chi^2(IH) - \chi^2(NH) = 1.06$$

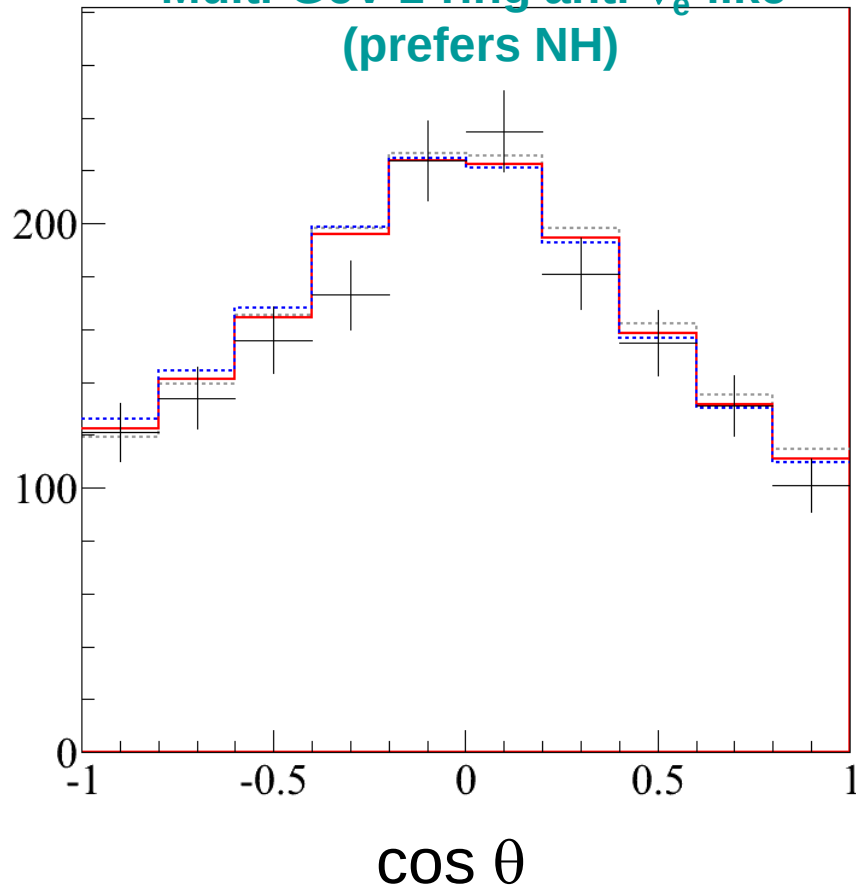
$$\chi^2(NH) - \chi^2(IH) = 0.90)$$



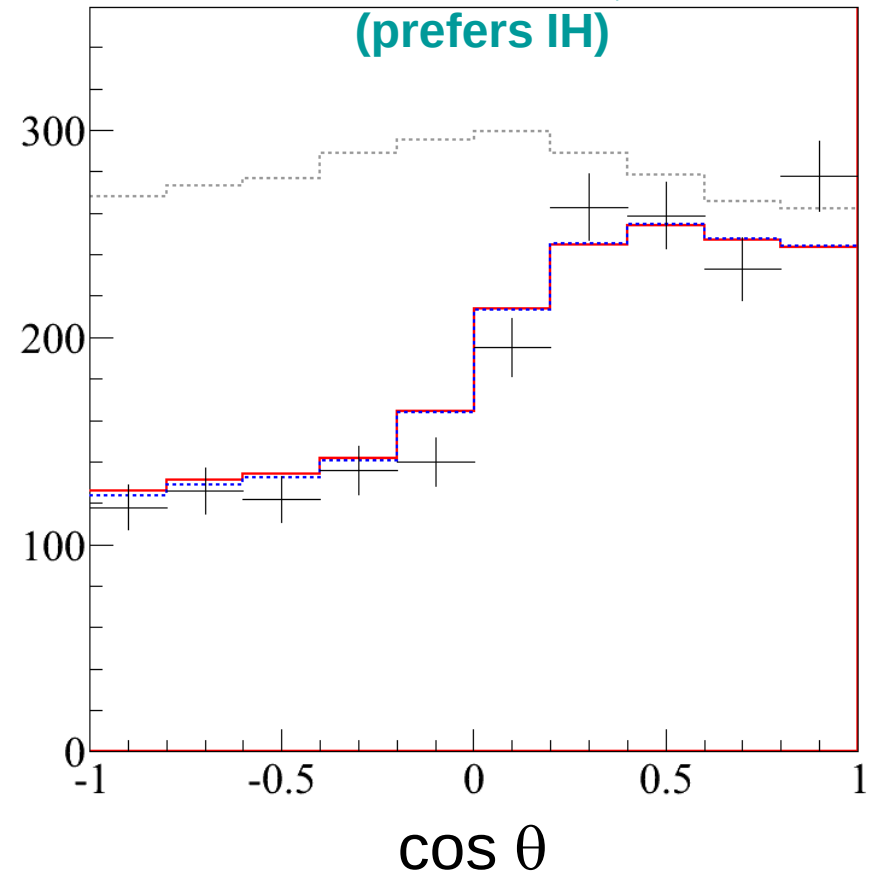
Invertedが僅かにfavorされるが...

samples to provide large $\Delta\chi^2$ for MH

Multi-GeV 1-ring anti- ν_e -like
(prefers NH)



Multi-GeV 1-ring μ -like
(prefers IH)



+

data

—

Normal hierarchy

⋯

Inverted hierarchy

⋯

No osc

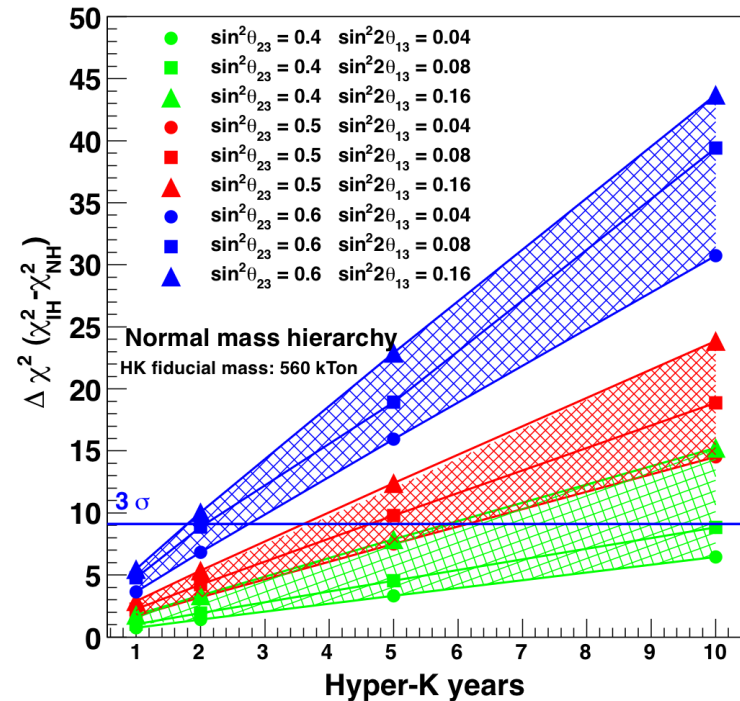
NH: $\sin^2\theta_{23} = 0.425$ (best fit)

IH: $\sin^2\theta_{23} = 0.575$ (best fit)

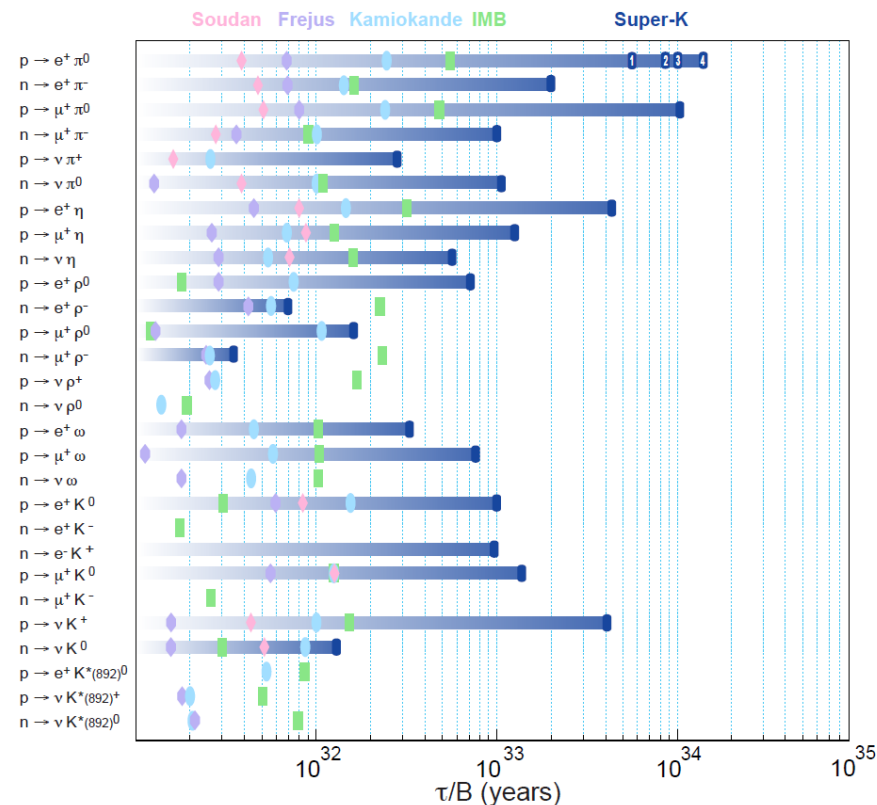
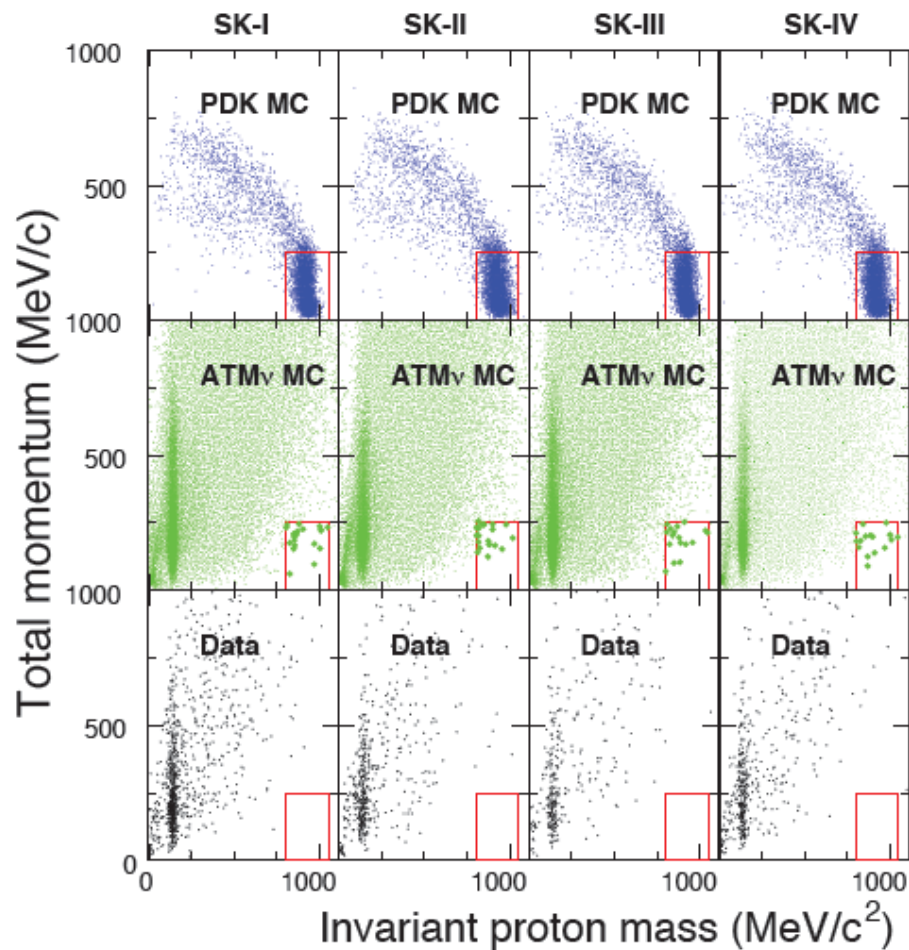
*SK1+2+3+4 data

今後の方針

- さらなるデータ量が必要
 - Hyper-Kに期待
- 他実験の振動測定とのcombined解析
 - with T2K, MINOS, Reactor
 - θ_{13} , θ_{23} の制限によりMH感度向上が期待
- 遅延中性子捕獲によるanti- ν 事象の特定
 - 2.2MeV γ 、 $\tau \sim 200 \mu\text{sec}$ 、 $\text{eff} \sim 20\%$
 - GeV領域では難しい



陽子崩壊: $p \rightarrow e^+ \pi^0$



SK 1+2+3+4

$\tau/B > 1.3 \times 10^{34} \text{yr}$

PhysRevD.85.112001

SK1~4 で解析

efficiency ~45%

バックグラウンド ~1.6 イベント/Mtonyr

まとめ

- 13角 (θ_{13})の確定により、大気ニュートリノにおける ν_e 振動の物質効果により、質量階層性の解明が期待されている
 - さらなるアプローチ(データ増、解析手法の改良、HKでの観測など)が求められる
- 陽子崩壊： $p \rightarrow e^+ \pi^0$ $\tau > 1.3 \times 10^{34}$ 年