

# 100万トン水チェレンコフ検出器 (ハイパーカミオカンデ:HK) の開発研究

京都大学  
池田一得



# 進捗状況

- 基本設計を作成

(これをたたき台として、最適化が必要)

- 候補地の地質調査
- 水槽の位置、方向、間隔。ずり廃棄、掘削方法
- 水槽設計(壁、構造、センサー支持体、工期)
- 光センサー

- • **物理感度のStudy**

- 以上をまとめて、外部に発信

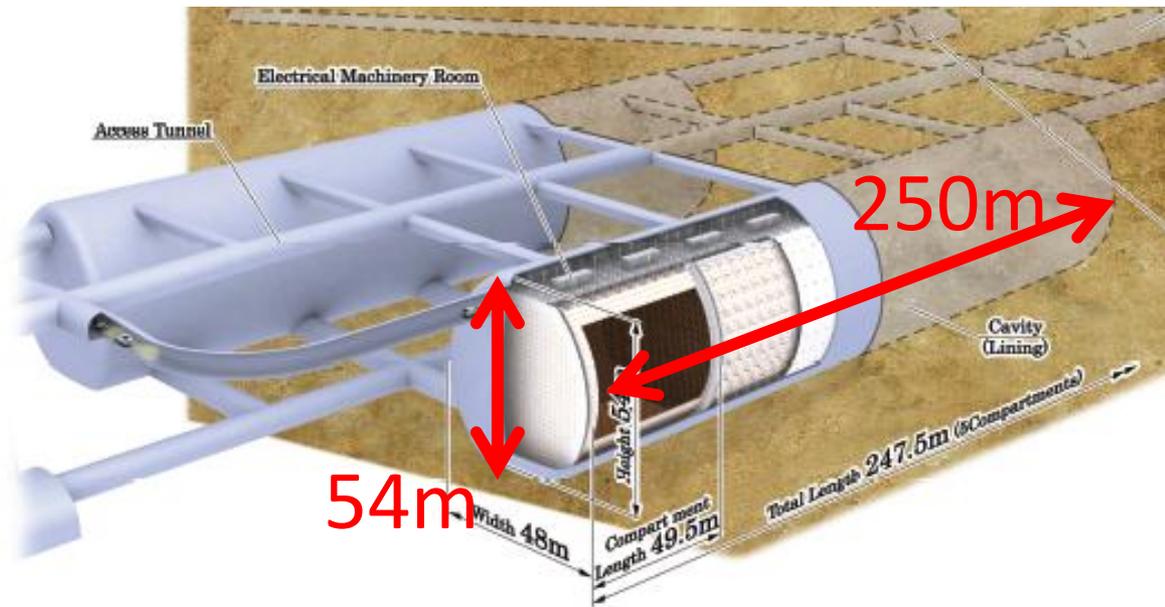
- 国際会議: TIPP, NNN, etc..

- **提案書(LOI)のプレプリ投稿**

<http://arxiv.org/abs/1109.3262v1>

# HKの基本設計

- 全体積 : 1Mt
- 有効体積 : 0.56Mt (SKの25倍)
- 光センサー : 20インチPMT、102000本  
(20%光電面被覆率 : SK-IIと同等)
- 土被り : 648m  
(1750m.w.e)
- T2Kのoff axis角 : 2.5度 (SKと同じ)



# Hyper-Kの物理

- ニュートリノ振動パラメータ測定
- 核子崩壊探索
  - 陽子の寿命:  $10^{34} \sim 10^{35}$ 年
- ニュートリノ天文
  - 太陽 $\nu$ : 200 $\nu$ /day (太陽モデル $\cdot \nu$ 振動)
  - 銀河中心の超新星爆発: 250000 $\nu$   
アンドロメダでも50 $\nu$
  - 超新星爆発残骸ニュートリノ: 830 $\nu$ /10year
  - WIMP間接観測  $\sigma_{SD} < 10^{-39} \sim 10^{-40} \text{cm}^2$

# ニュートリノ振動パラメータの主な課題

ニュートリノ混合行列における6つのパラメータ(2011年以前)

$\theta_{12}, \Delta m_{12}^2$  : 太陽・原子炉 $\nu$ ( $34^\circ, 7.6 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ ) 不定性は数%  
 $\theta_{23}, |\Delta m_{23}|^2$ : 大気・加速器 $\nu$  ( $45^\circ, 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ ) 不定性は $\sim 10\%$   
 $\theta_{13}$ : 原子炉 $\nu$   $< 14^\circ$  上限のみ。  $\delta_{CP}$ : 未発見

1.  $\theta_{13}$ の測定 $\rightarrow$ 精密測定
2.  $\delta_{CP}$ の発見
3.  $\Delta m_{23}$ の符号、質量階層の決定
4.  $\theta_{23}$ はぴったり $\pi/4$ なのか?  
もし $\pi/4$ からずれていたら、 $\theta_{23} < \pi/4$ ?  $\theta_{23} > \pi/4$ ?

HKのターゲット?

# ニュートリノ振動パラメータの主な課題

ニュートリノ混合行列における6つのパラメータ(2011年以前)

$\theta_{12}, \Delta m_{12}^2$  : 太陽・原子炉 $\nu$  ( $34^\circ, 7.6 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ ) 不定性は数%  
 $\theta_{23}, |\Delta m_{23}|^2$  : 大気・加速器 $\nu$  ( $45^\circ, 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ ) 不定性は $\sim 10\%$   
 $\theta_{13}$ : 原子炉 $\nu$   $< 14^\circ$  上限のみ。  $\delta_{CP}$ : 未発見

1.  $\theta_{13}$ の測定 $\rightarrow$ 精密測定

2.  $\delta_{CP}$ の発見

3.  $\Delta m_{23}$ の符号、質量階層の決定

4.  $\theta_{23}$ はぴったり $\pi/4$ なのか？

もし $\pi/4$ からずれていたら、 $\theta_{23} < \pi/4$ ?  $\theta_{23} > \pi/4$ ?

HKのターゲット=これら全て

そして、全ての実験結果をきちんと説明したい！

# ニュートリノ振動パラメータの主な課題

ニュートリノ混合行列における6つのパラメータ(2011年以前)

$\theta_{12}, \Delta m_{12}^2$  : 太陽・原子炉 $\nu$  ( $34^\circ, 7.6 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ ) 不定性は数%  
 $\theta_{23}, |\Delta m_{23}|^2$  : 大気・加速器 $\nu$  ( $45^\circ, 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ ) 不定性は $\sim 10\%$   
 $\theta_{13}$  : 原子炉 $\nu$   $< 14^\circ$  上限のみ。

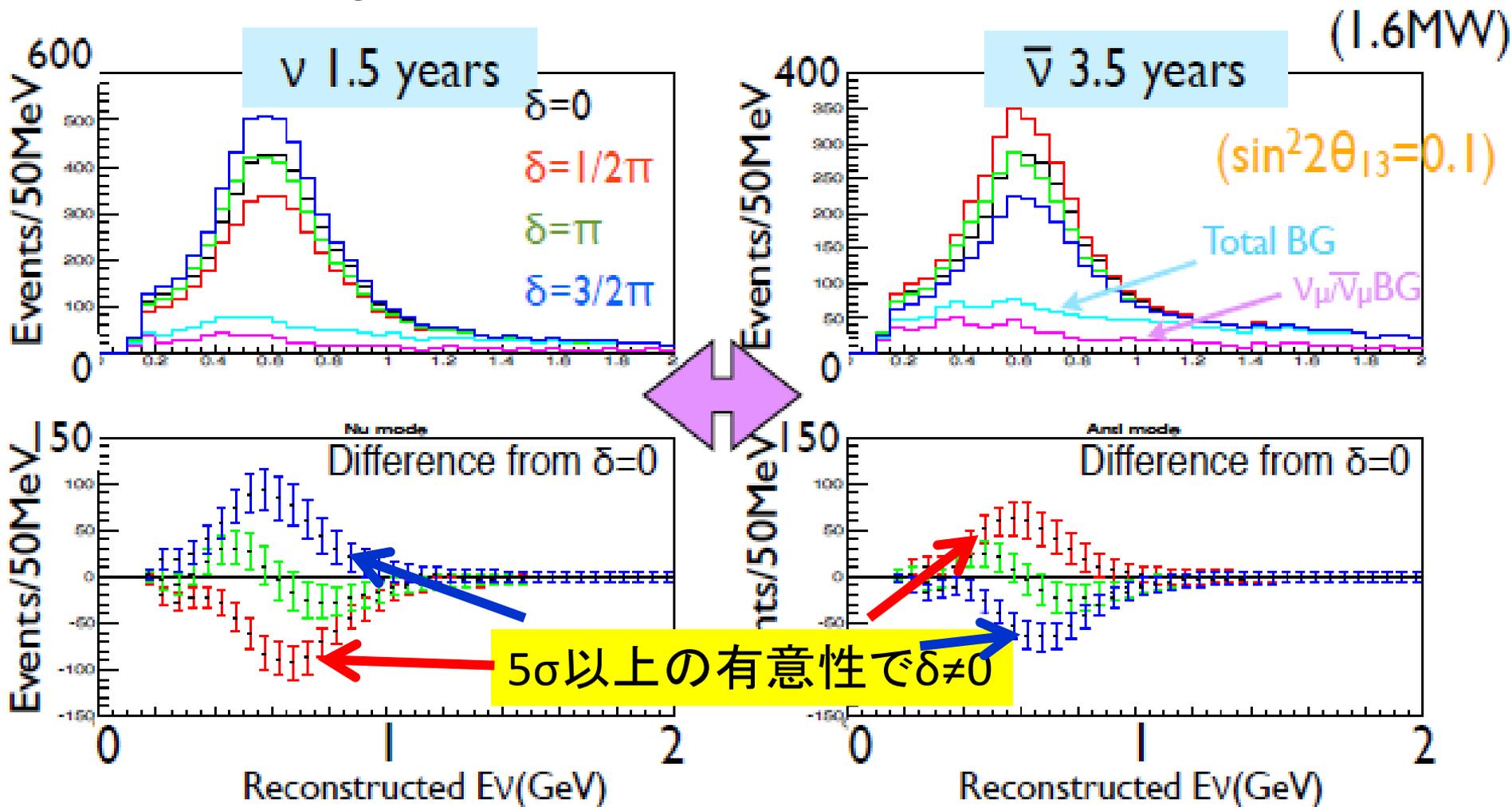
- $\theta_{13}$  が大きければ  
HK 10年観測で解決できる！  
一粒注1でいろいろおいしい。**
1.  $\theta_{13}$  の測定
  2.  $\delta_{CP}$  の発見
  3.  $\Delta m_{23}$  の符号、質量階層の決定
  4.  $\theta_{23}$  はぴったり $\pi/4$ なのか？  
もし $\pi/4$ からずれていたら、 $\theta_{23} < \pi/4$ ?  $\theta_{23} > \pi/4$ ?
- 注1) 一粒=1Mton

HKのターゲット=これら全て

そして、全ての実験結果をきちんと説明したい！

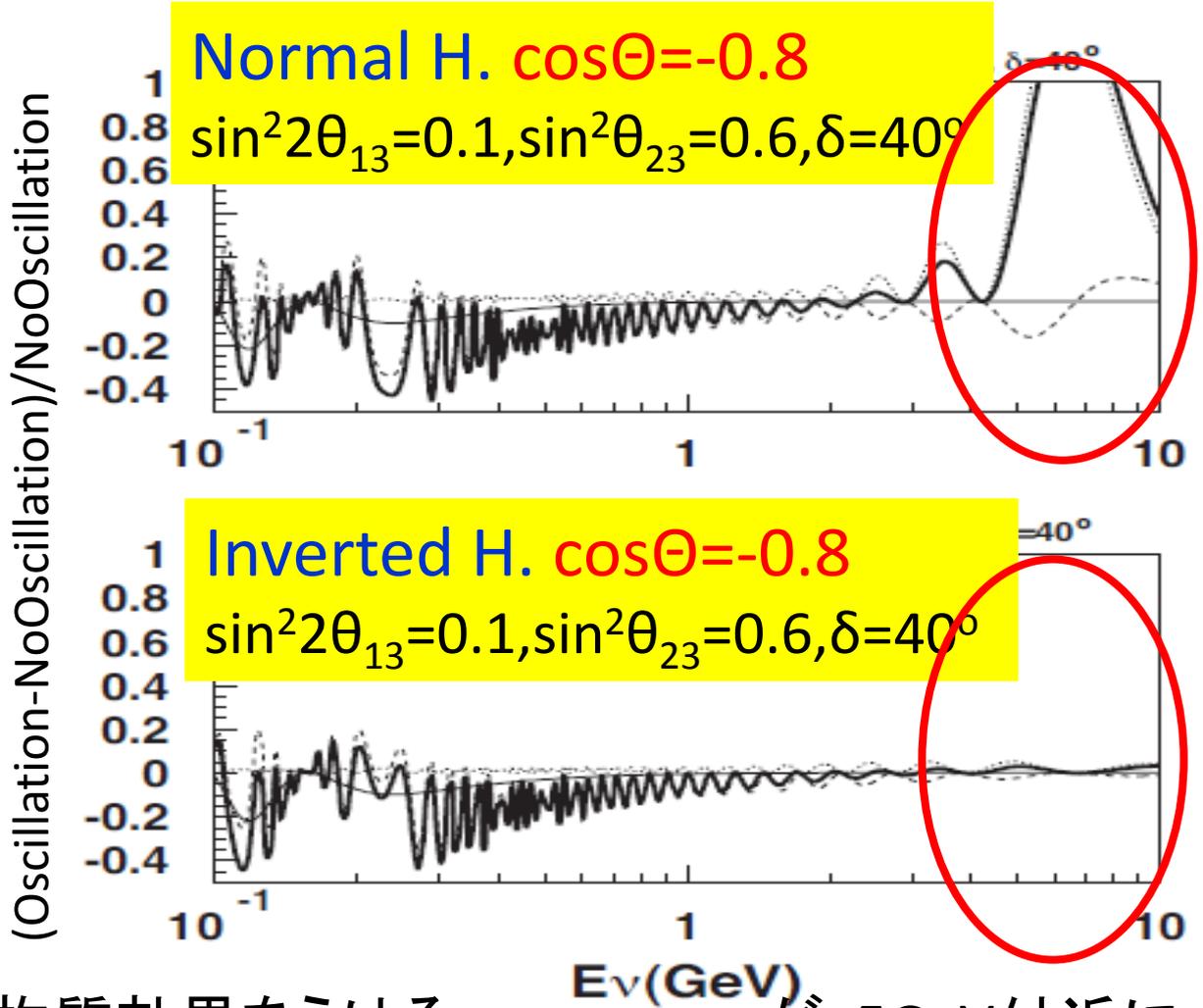
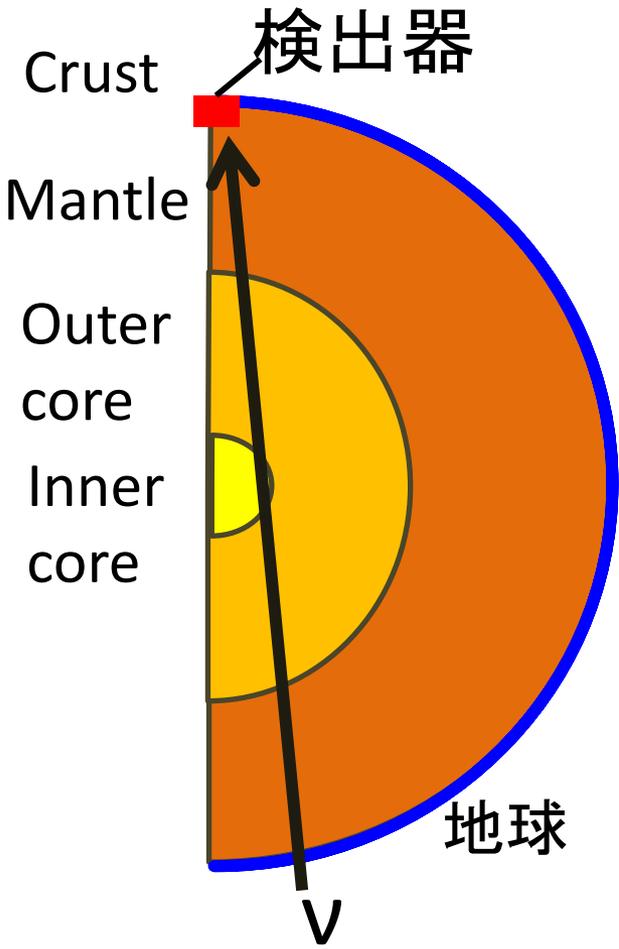
# T2K: 加速器ニュートリノ振動でCP位相

5年測定での $\bar{\nu}_e$ 事象再構成エネルギー分布



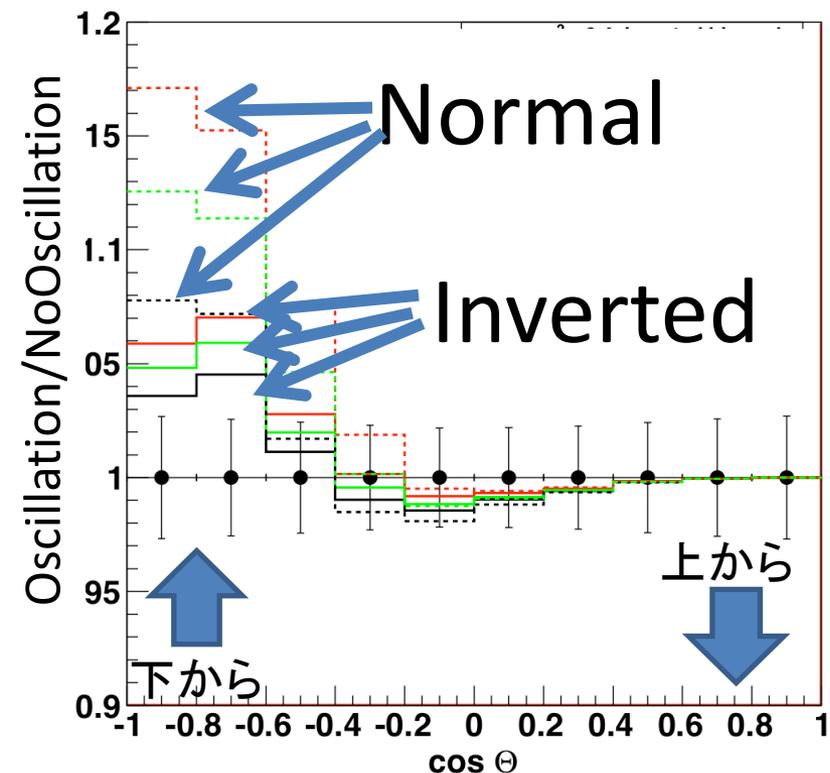
5年でも再構成エネルギー分布に $\delta_{CP}$ の効果がみえる。

# 大気ニュートリノで質量階層 & $\theta_{23}$ の縮退を決定



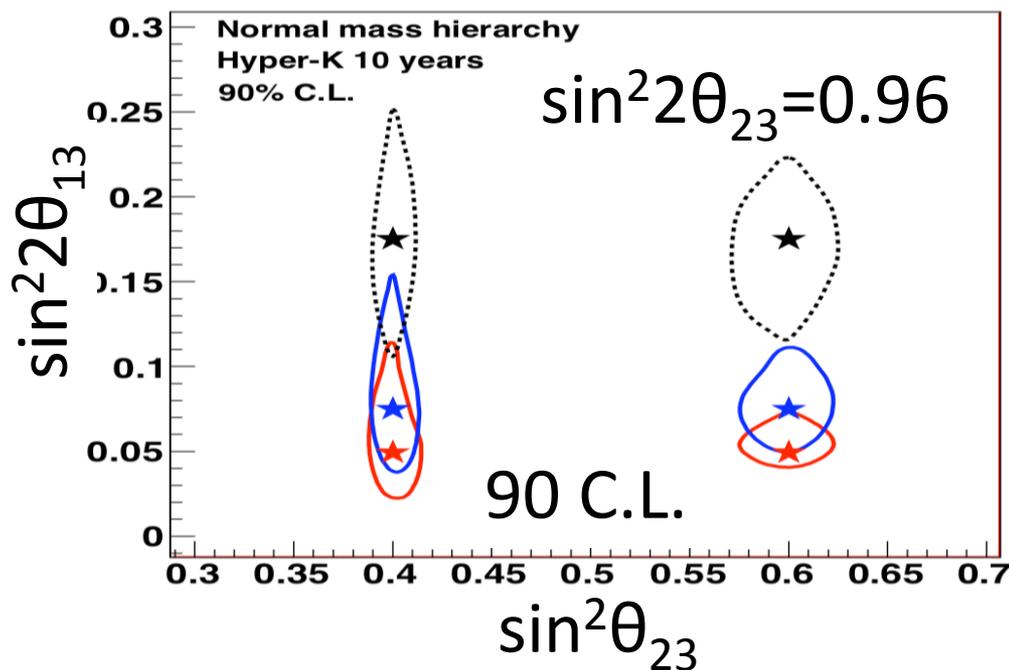
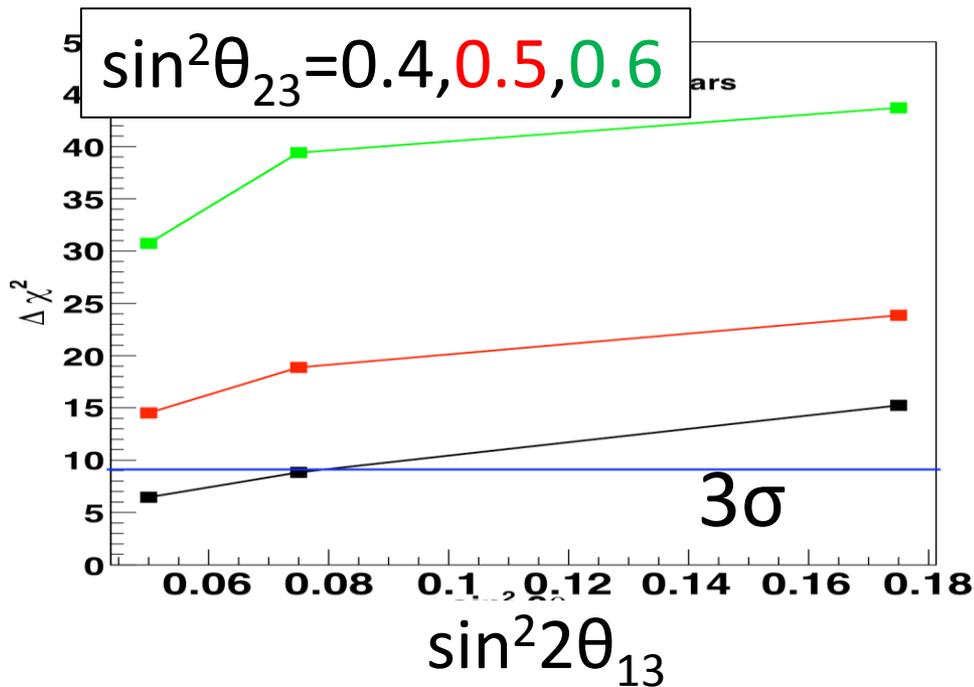
下からくる $\nu$ は、地球の物質効果をうける。resonanceが $\sim 5\text{GeV}$ 付近に現れるのは $\nu_e$ に対してはnormalのときのみ( $\bar{\nu}_e$ に対してはその逆)  
 ※ $\sin^2\theta_{23}$ の値で振幅が変わる

# 10年観測で解決



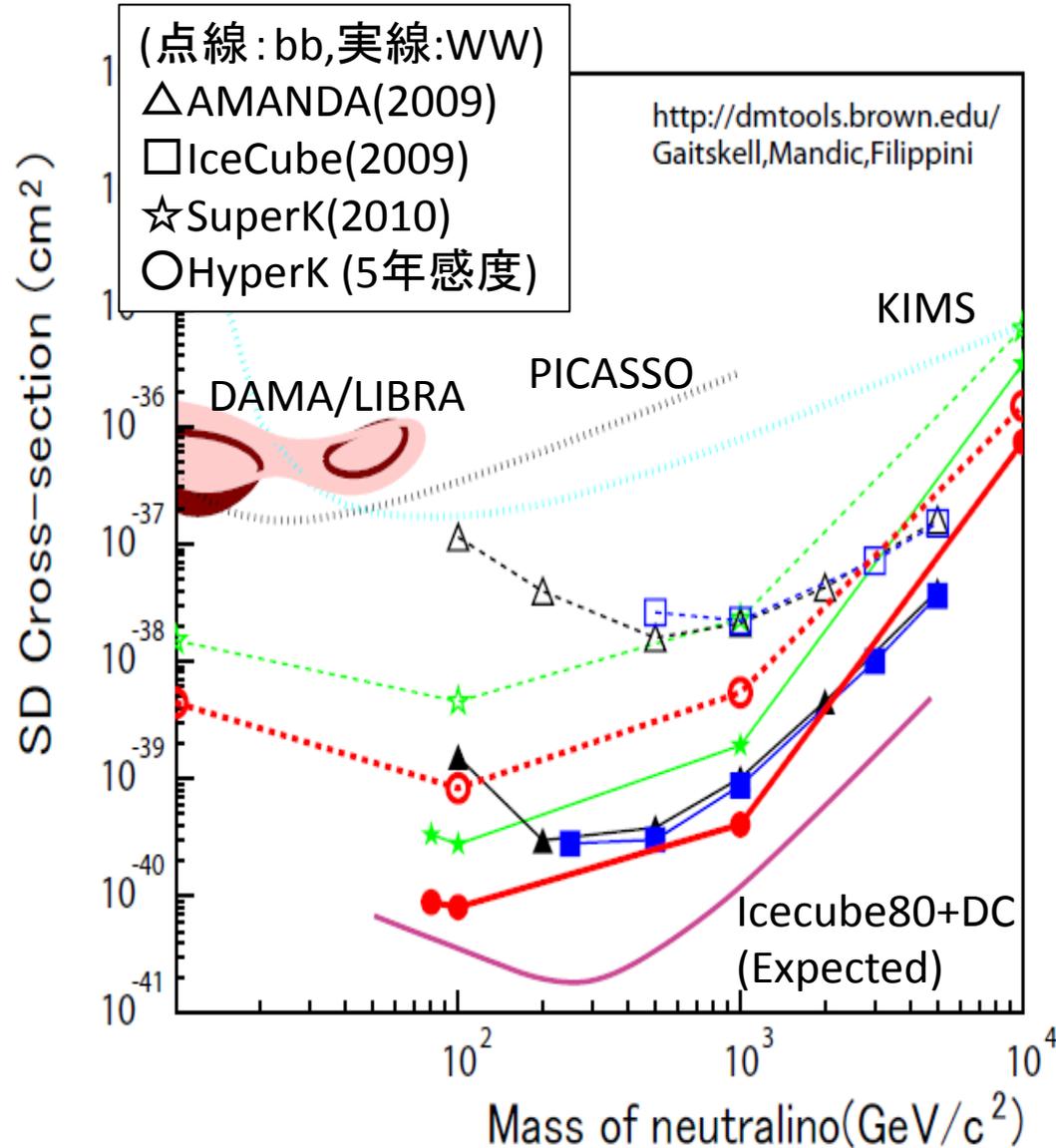
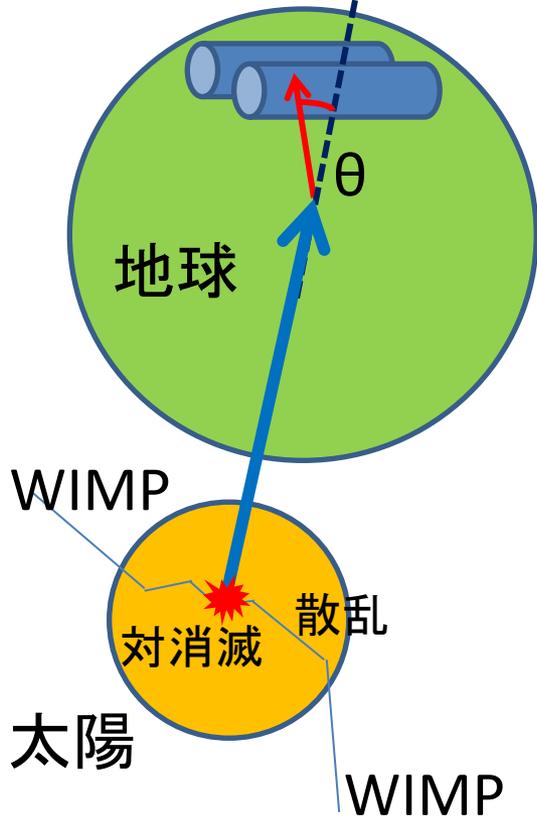
MultiGeVで $\nu_e$  like事象の天頂角分布  
 誤差は10年観測の統計誤差

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.4, 0.5, 0.6$$



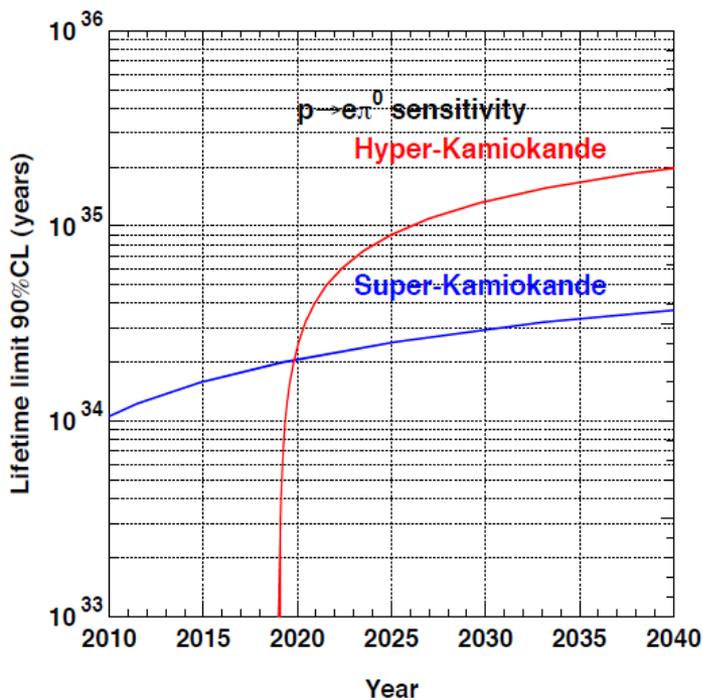
# WIMP の間接測定

- 検出器の断面積:  
22000m<sup>2</sup> (SKの18倍)
- 5年観測での感度を計算。  
HK 5年 = SK 90年



# 核子崩壊探索

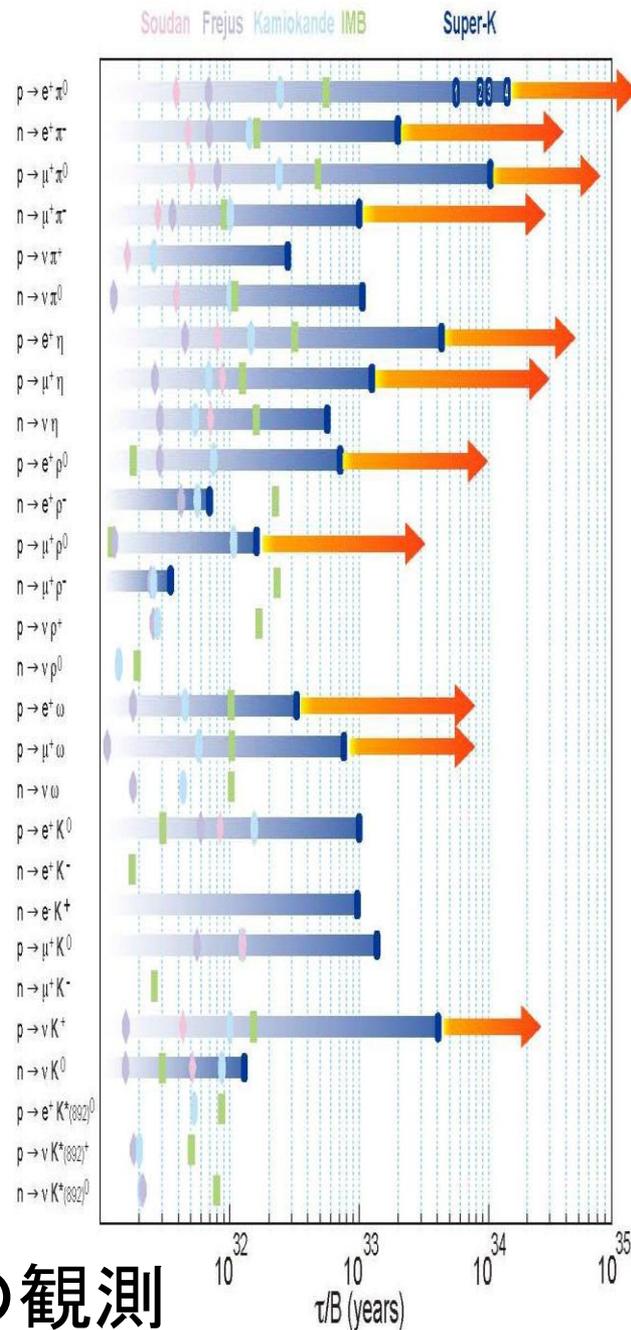
## ↓ $p \rightarrow e\pi^0$ の感度



1年でSKの結果を追い越す

### Hyper-K sensitivities

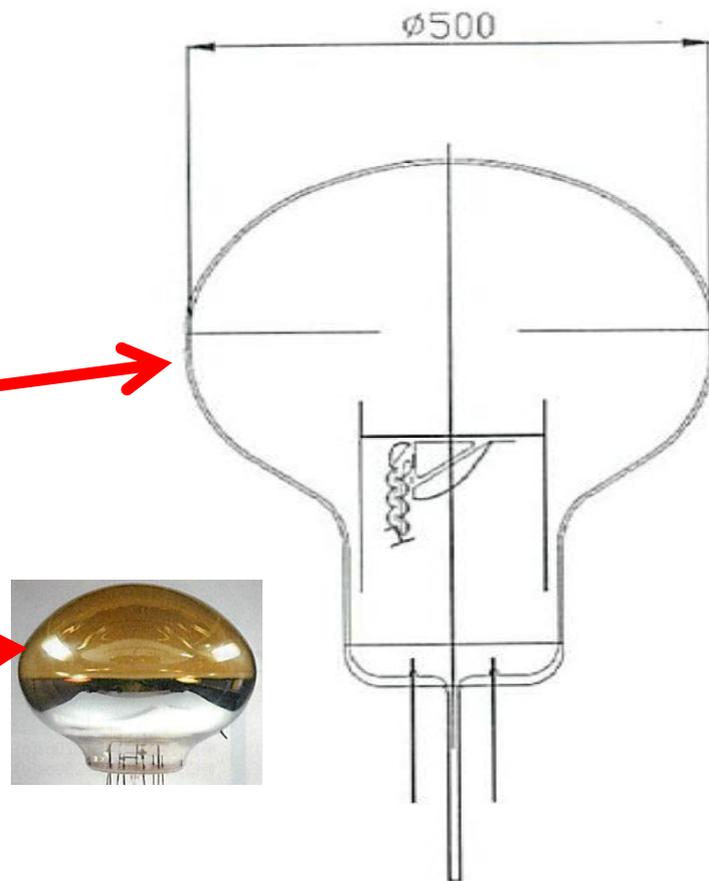
- ▶  $p \rightarrow e^+\pi^0$ 
  - ▶  $\tau_{\text{proton}}/\text{Br} > 1.3 \times 10^{35}$  years @90%CL
  - ▶ 5.6Mton×years (10 Hyper-K years)
- ▶  $p, n \rightarrow (e^+, \mu^+) + (\pi, \rho, \omega, \eta)$ 
  - ▶  $O(10^{34-35})$  years
- ▶ SUSY favored  $p \rightarrow \nu + K^+$ 
  - ▶  $2.5 \times 10^{34}$  years
- ▶  $K^0$  modes,  $\nu\pi^0, \nu\pi^+$  possible
- ▶ Other various decay modes.
  - ▶ (B-L) violated modes
  - ▶ radiative decays  $p \rightarrow e^+\gamma, \mu^+\gamma$
  - ▶ neutron-antineutron oscillation ( $|\Delta B|=2$ )
  - ▶ di-nucleon decays ( $|\Delta B|=2$ )
    - ▶  $pp \rightarrow XX\dots, nn \rightarrow XX\dots$



HK10年の観測

# R&D

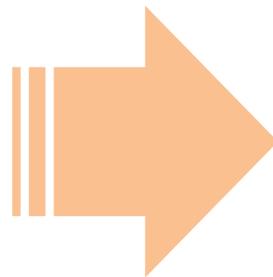
- タンク・構造体の最適化
- 光センサー
  - 20 inchPMT
    - **実績**のあるSK 20インチ
    - QE 30%の**新20インチ**
    - QE 30%の12インチ(**安く多く?**)
  - HPD
    - 8インチのHPDは神岡のテストタンクにて試験予定
- エレクトロニクス
  - ケーブリングの手間を考えると、センサーと一体型がよい
  - 設計を始める



Box&Line

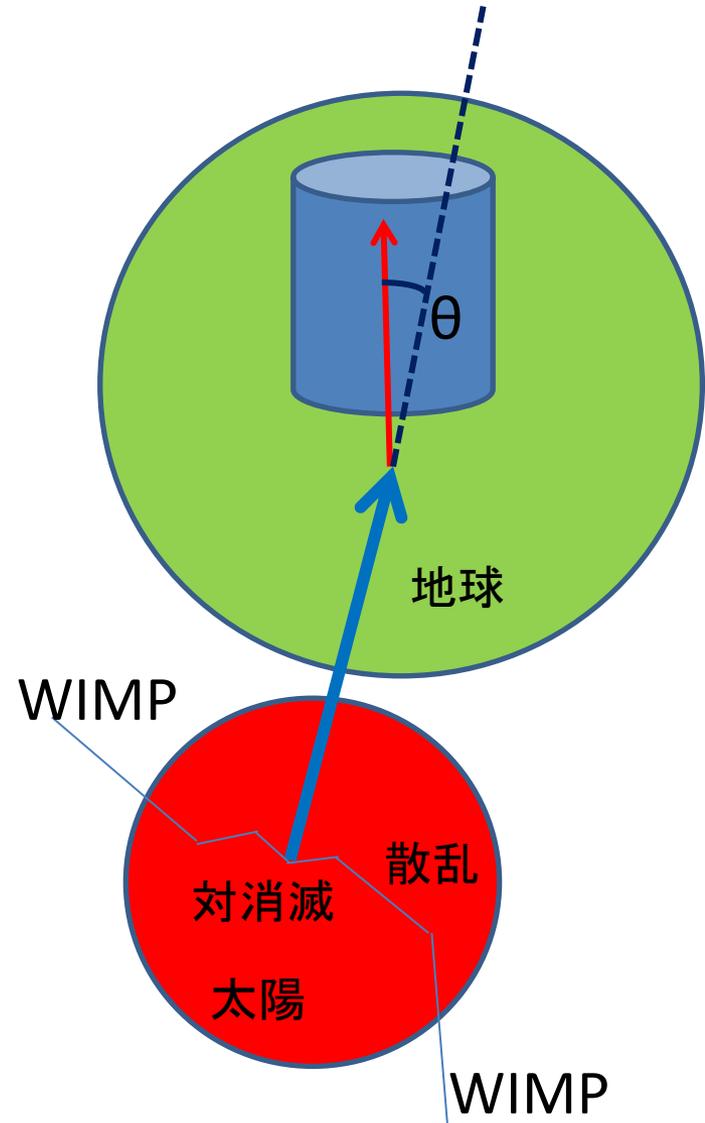
# まとめ

- 基本となる設計ができた。
- 物理感度の見積もりが(ほぼ)できた。
  - ニュートリノ振動パラメータについては  
T2K5年、大気ニュートリノ10年で  
CP位相、質量階層、 $\theta_{23}$ 縮退を解決できる。
- R&Dも進行中



# 太陽内部でのWIMP対消滅探索

- 太陽内部で捕獲されたWIMPの対消滅からのニュートリノ起源上向き $\mu$ を探索する。
- 太陽の年齢が十分長いとして、平衡状態にあるとき、対消滅レートは捕獲レートに依存。
- → WIMP-原子核  
散乱断面積が測れる



# アクティビティ

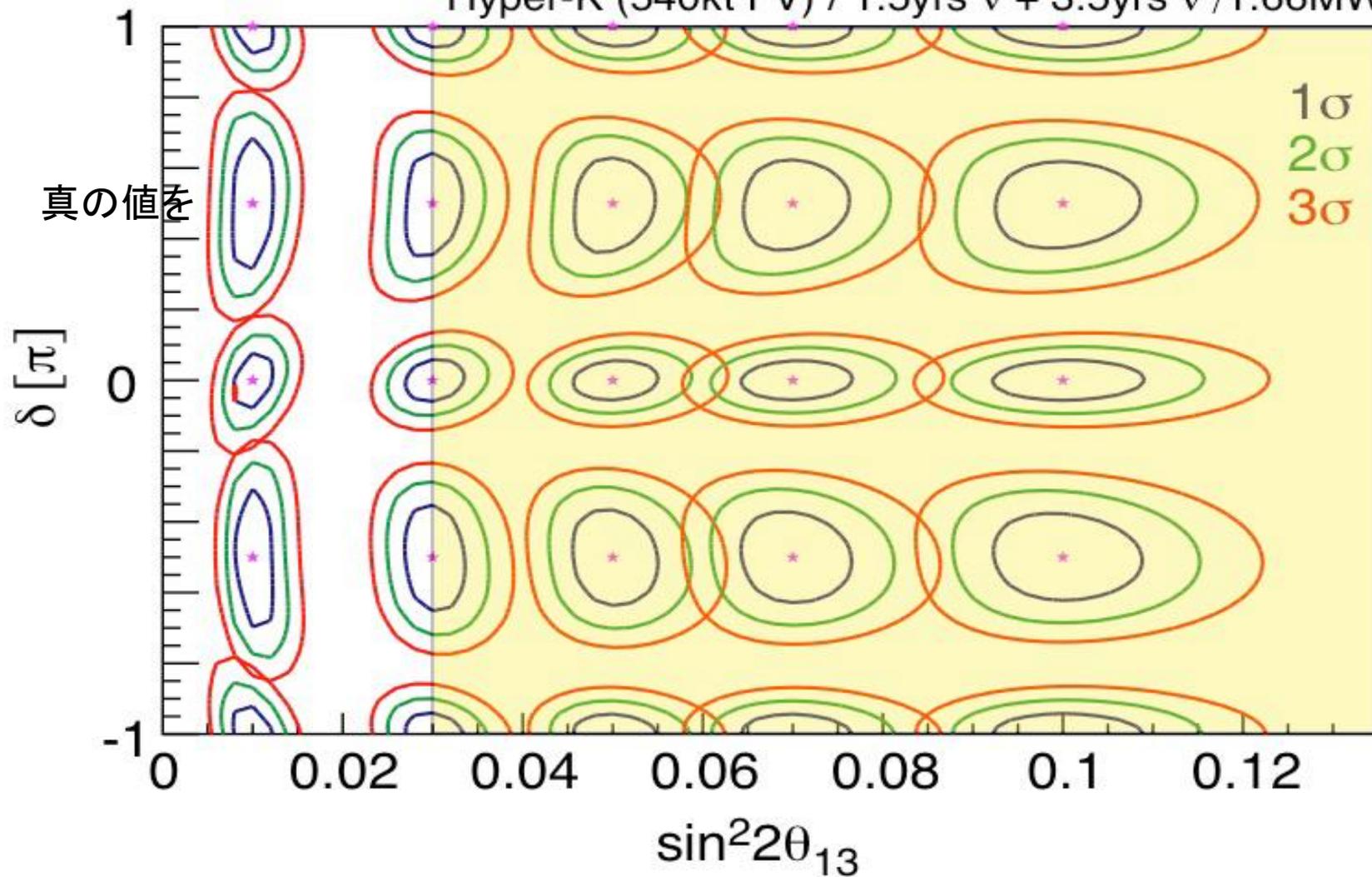
- 基本設計、物理感度をまとめて実験提案書をアーカイブに投稿

<http://arxiv.org/abs/1109.3262v1>

- 実働動員>10人  
ICRR、東京、名古屋、京都、神戸
- 国際会議：TIPP, NNN, 等、、
- R&D @ 浜ホト、神岡、東京、京都

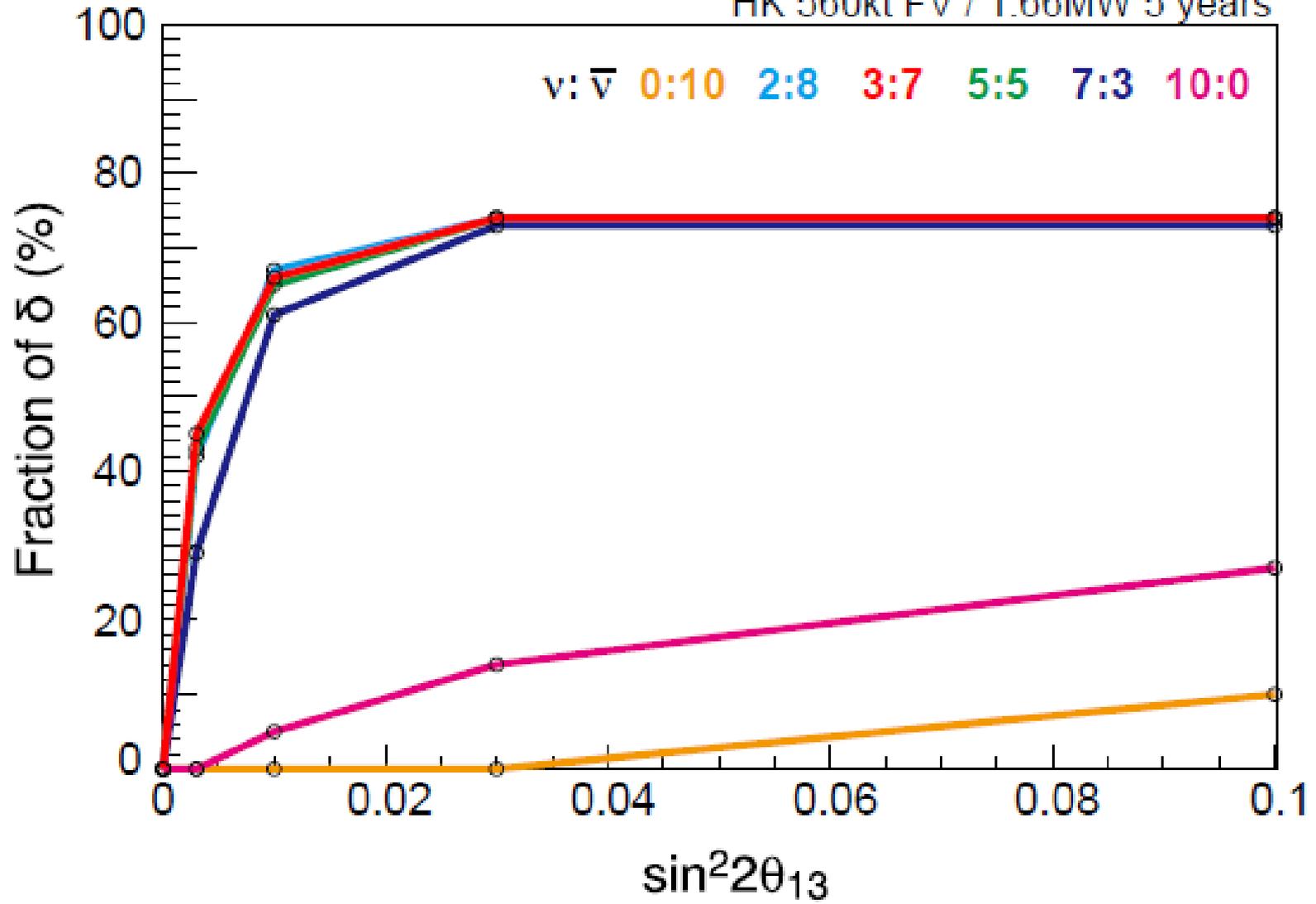
# 5年観測における $\delta$ の感度

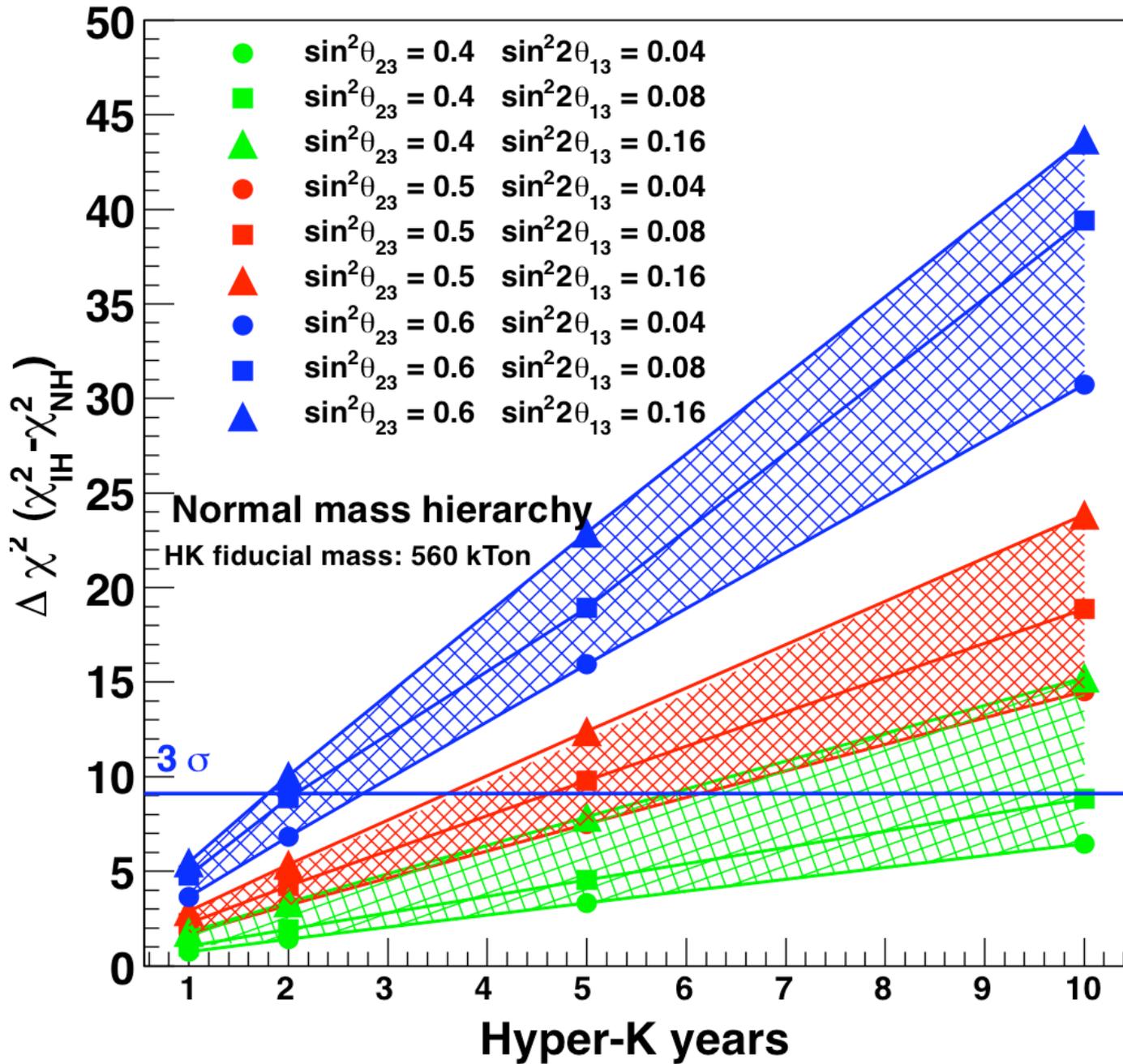
Hyper-K (540kt FV) / 1.5yrs  $\nu$  + 3.5yrs  $\bar{\nu}$  / 1.66MW



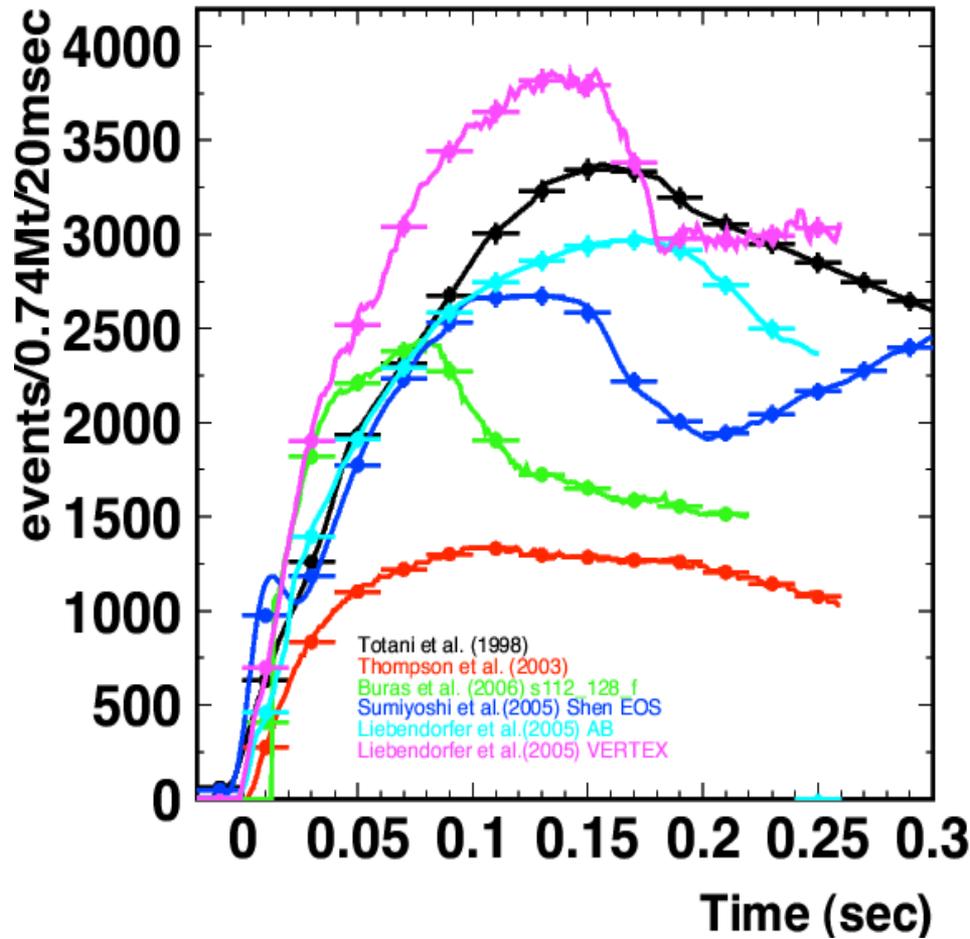
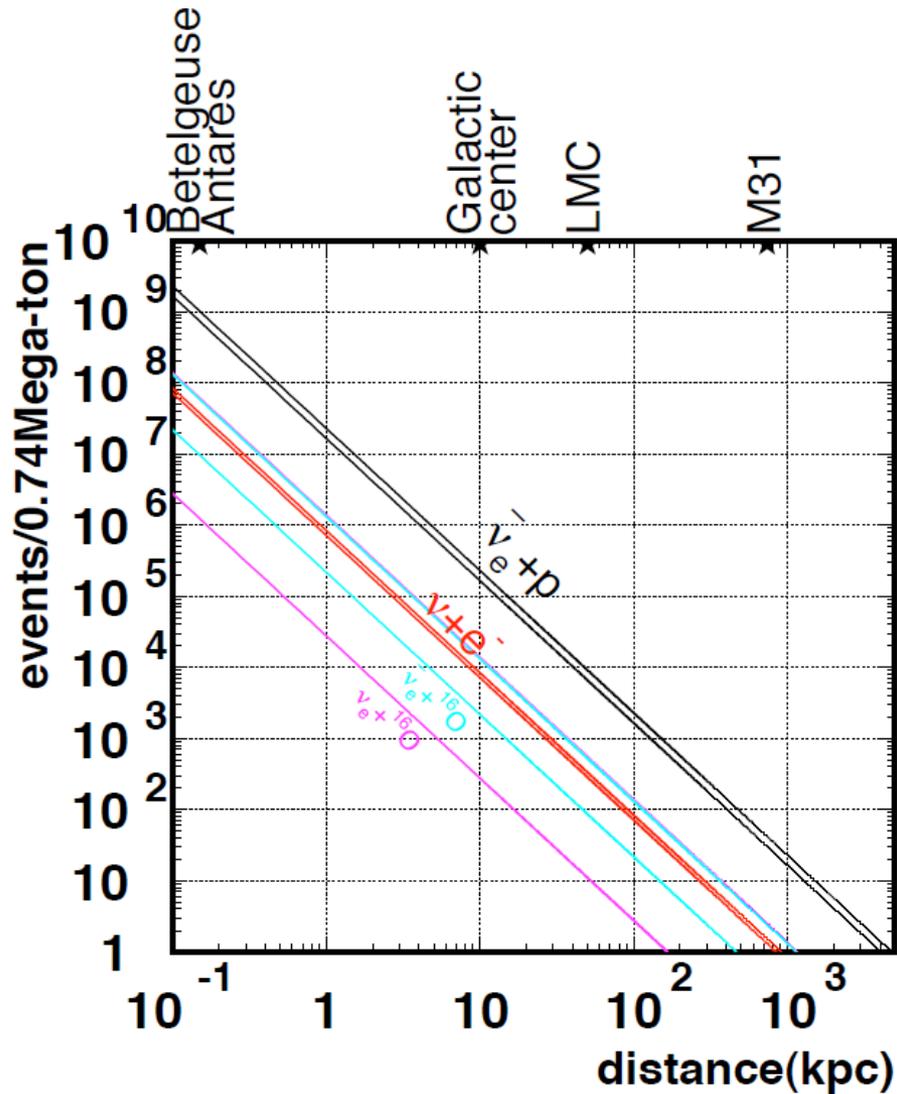
HK 560kt FV / 1.66MW 5 years

$\nu : \bar{\nu}$  0:10 2:8 3:7 5:5 7:3 10:0





# 超新星爆発ニュートリノ



# 大気ニュートリノ

$$\begin{aligned} \frac{\Phi(\nu_e)}{\Phi_0(\nu_e)} - 1 &\approx P_2 \cdot (r \cdot \cos^2 \theta_{23} - 1) \\ &\quad - r \cdot \sin \tilde{\theta}_{13} \cdot \cos^2 \tilde{\theta}_{13} \cdot \sin 2\theta_{23} \cdot (\cos \delta \cdot R_2 - \sin \delta \cdot I_2) \\ &\quad + 2 \sin^2 \tilde{\theta}_{13} \cdot (r \cdot \sin^2 \theta_{23} - 1) \end{aligned}$$

# Norm. Inv. sensitivity

