

# スーパーカミオカンデにおける 大気ニュートリノ振動と 核子崩壊探索の最新結果

田中秀和

東京大学宇宙線研究所

東京大学宇宙線研究所共同利用発表会

2018年12月21日

# Super-K publications in 2018

Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV,

Phys. Rev. D 97, 072001 (2018)

Measurement of the tau neutrino cross section in atmospheric neutrino oscillations with Super-Kamiokande,

Phys. Rev. D 98, 052006 (2018)

Search for Boosted Dark Matter Interacting With Electrons in Super-Kamiokande,

Phys. Rev. Lett. 120, 221301 (2018)

Dinucleon and nucleon decay to two-body final states with no hadrons in Super-Kamiokande

arXiv:1811.12430 (submitted to PRL)

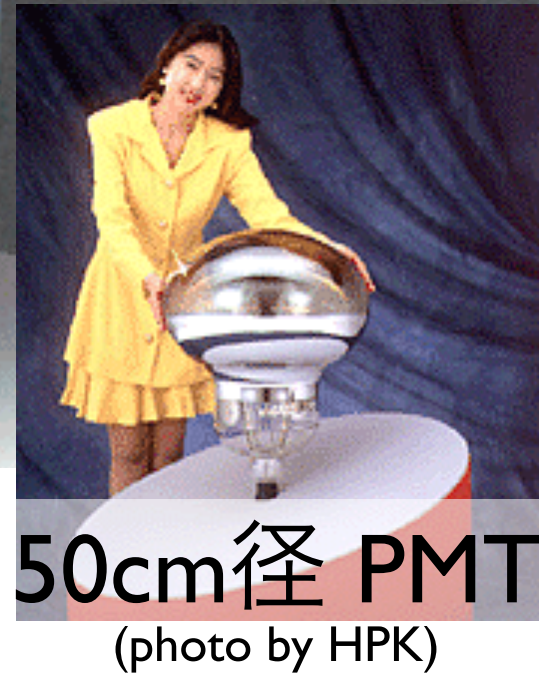
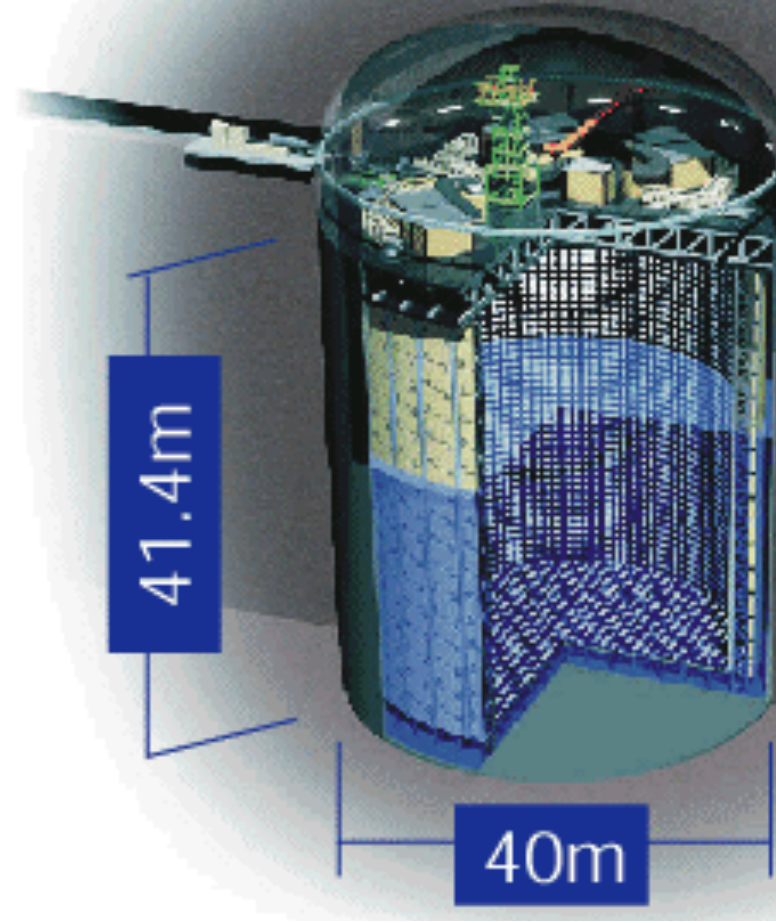
Paper in preparation:

Search for neutrinos from dark matter annihilation in the earth's core with the Super-Kamiokande detector

Atmospheric neutrino oscillation analysis with improved event reconstruction in Super-Kamiokande IV

# スーパーカミオカンデ

- 1996年~現在
- 体積 50,000 tonの超純水チェレンコフ検出器
- 岐阜県神岡鉱山の地下1kmに設置
- 内水槽検出器 (32kton)
  - 11,129本の50cm径 PMT
- 外水槽検出器 (18kton)
  - 1885本の20cm径 PMT



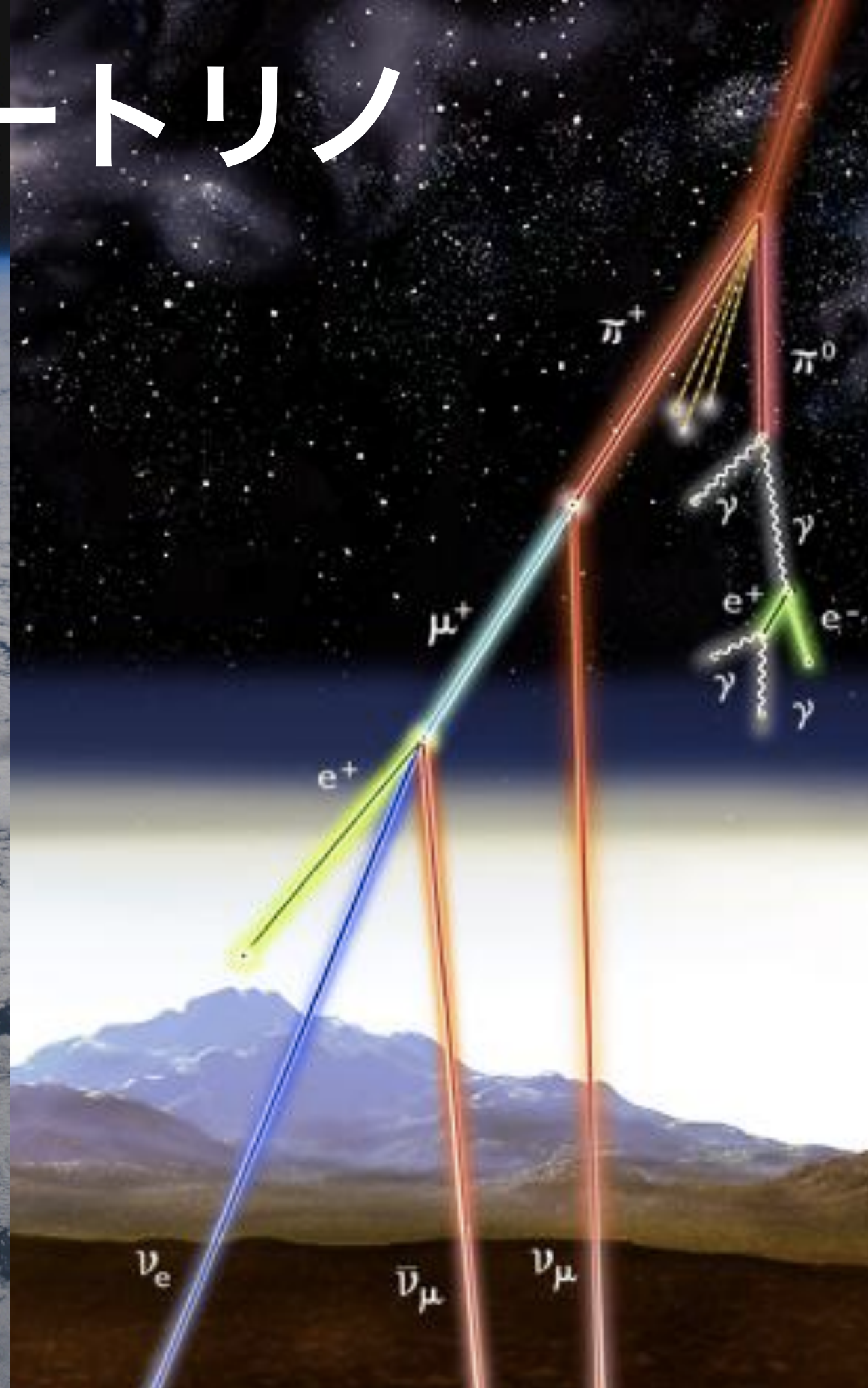
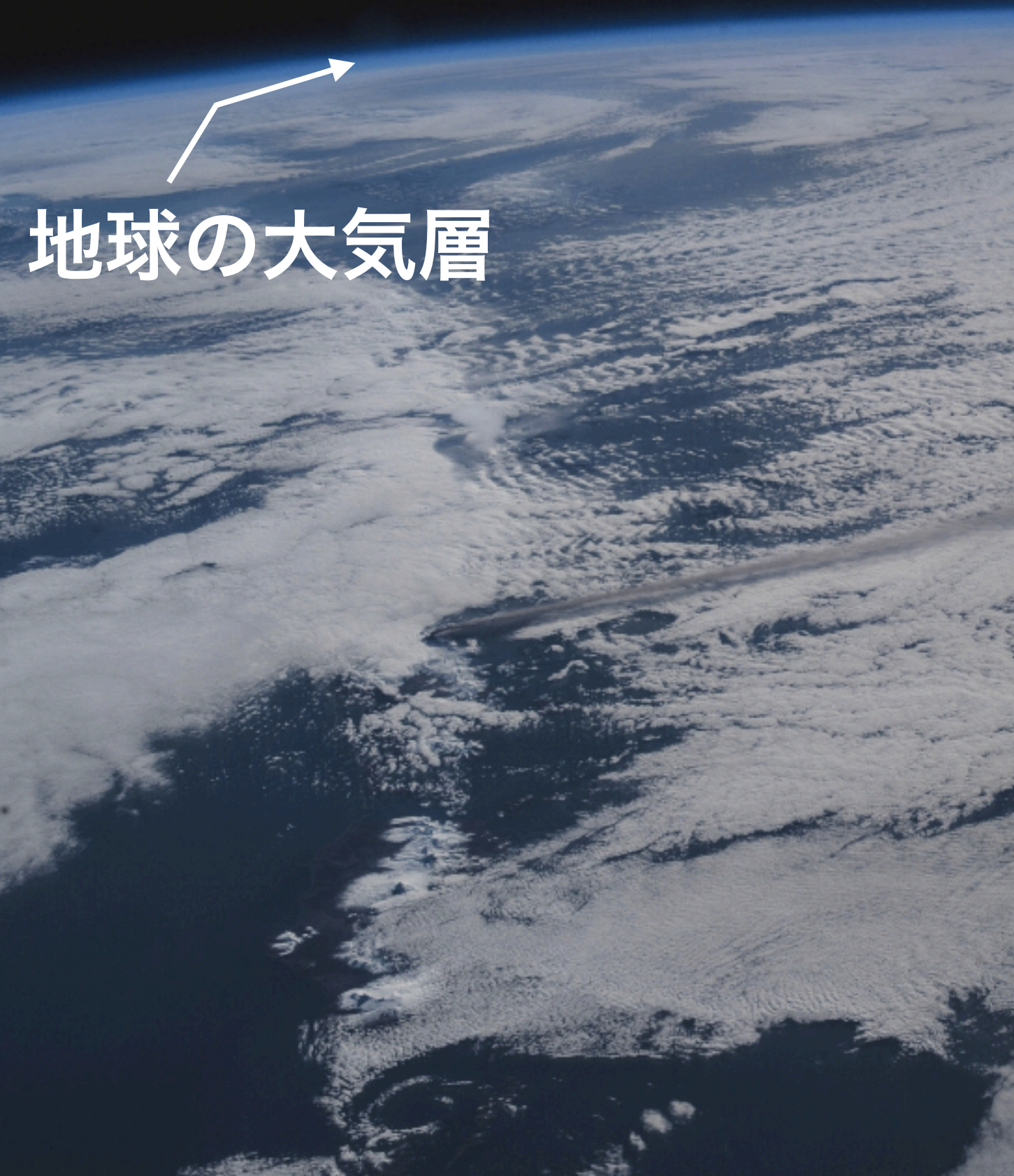
広いエネルギーにある様々な物理を  
一つの検出器で同時に研究できる

## Super-K Physics Targets





# 大気ニュートリノ





# ニュートリノ 3世代混合

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

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

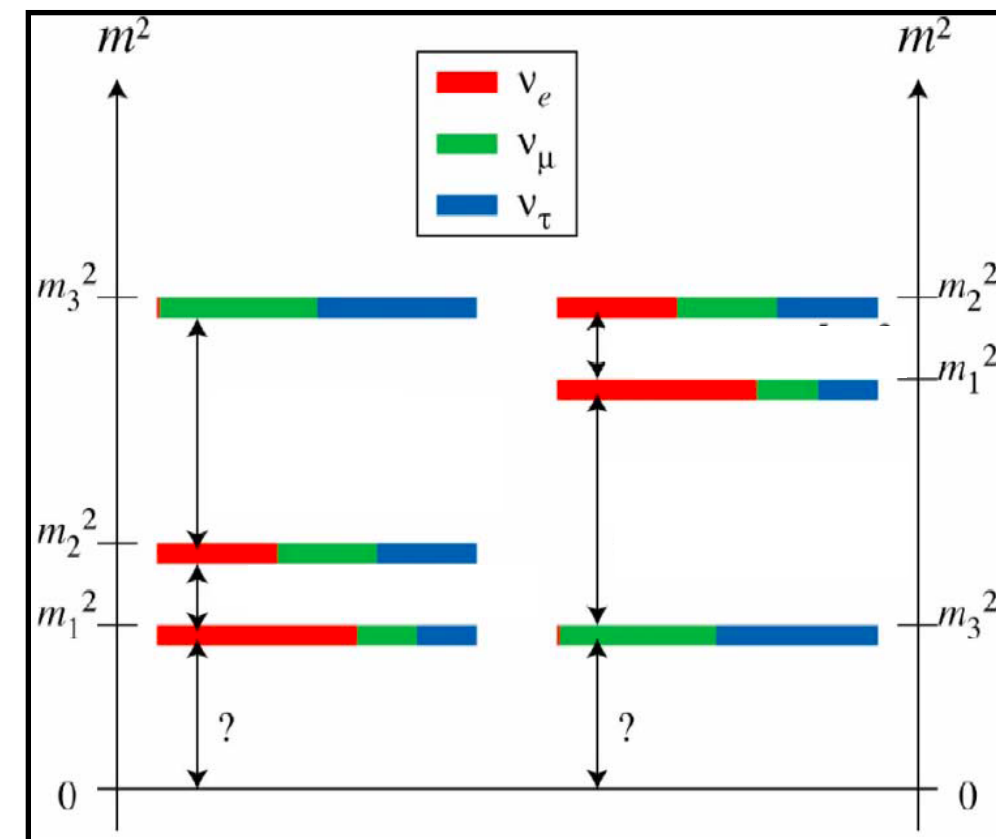
- 現在までに 3 つの全ての混合角が有限の値として測定されている

- $\theta_{12} = 33.6 \pm 1.0^\circ$
- $\theta_{13} = 9.1 \pm 0.6^\circ$
- $\theta_{23} = 45 \pm 6^\circ$  (最大混合? ( $\theta_{23}=45^\circ$ ?))

- 2 つの質量二乗差

- $\Delta m_{12}^2 \sim 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- $|\Delta m_{32}^2| \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  ( $\Delta m_{23}^2$  の正負)

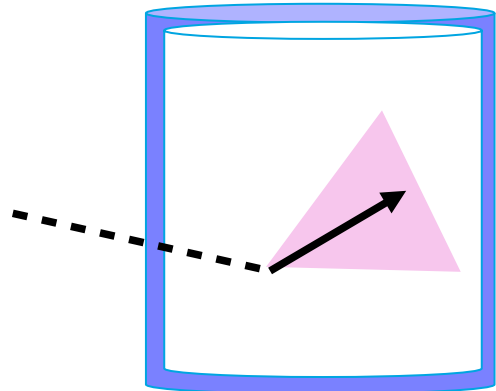
- CP位相  $\delta_{CP}$  はまだ決定されていない



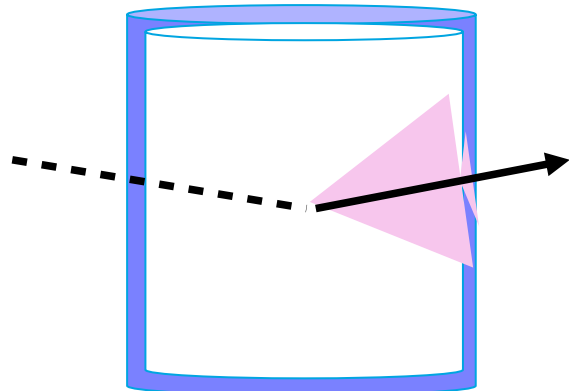
順質量階層 逆質量階層  
 $(\Delta m_{32}^2 > 0)$   $(\Delta m_{32}^2 < 0)$

# SKでの大気 $\nu$ を用いた $\nu$ 振動解析

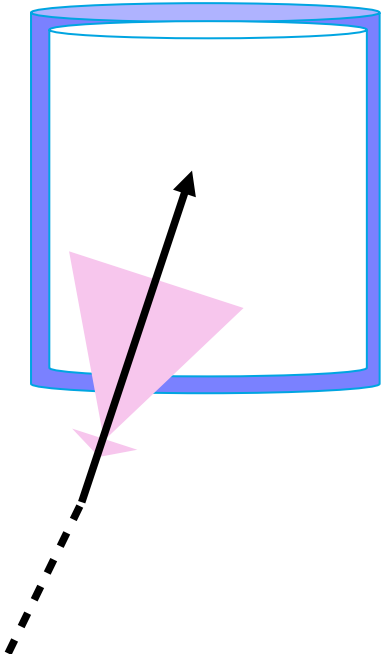
Fully Contained (FC)



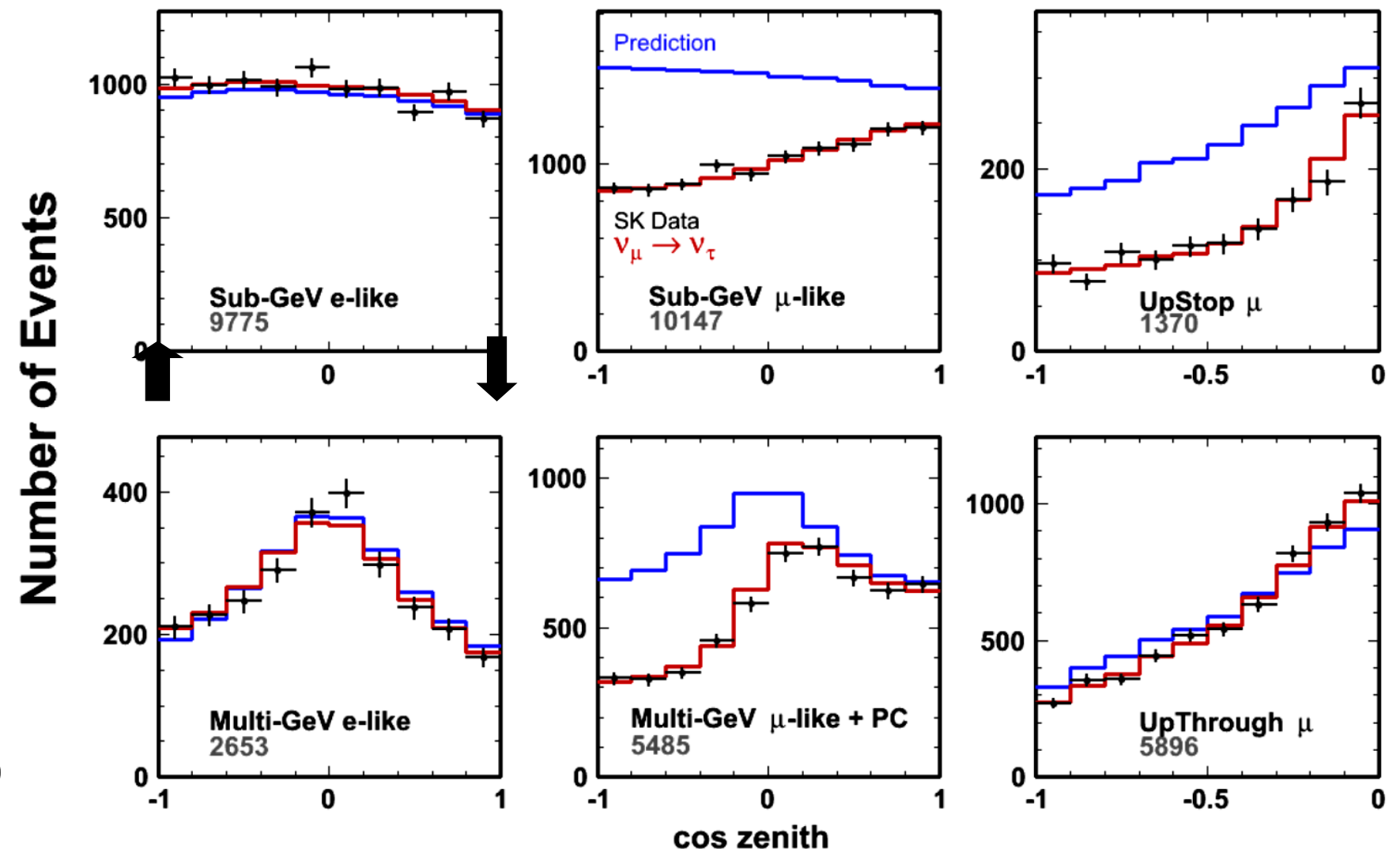
Partially Contained (PC)



Upward-going Muons (Up- $\mu$ )



各サンプルの天頂角分布

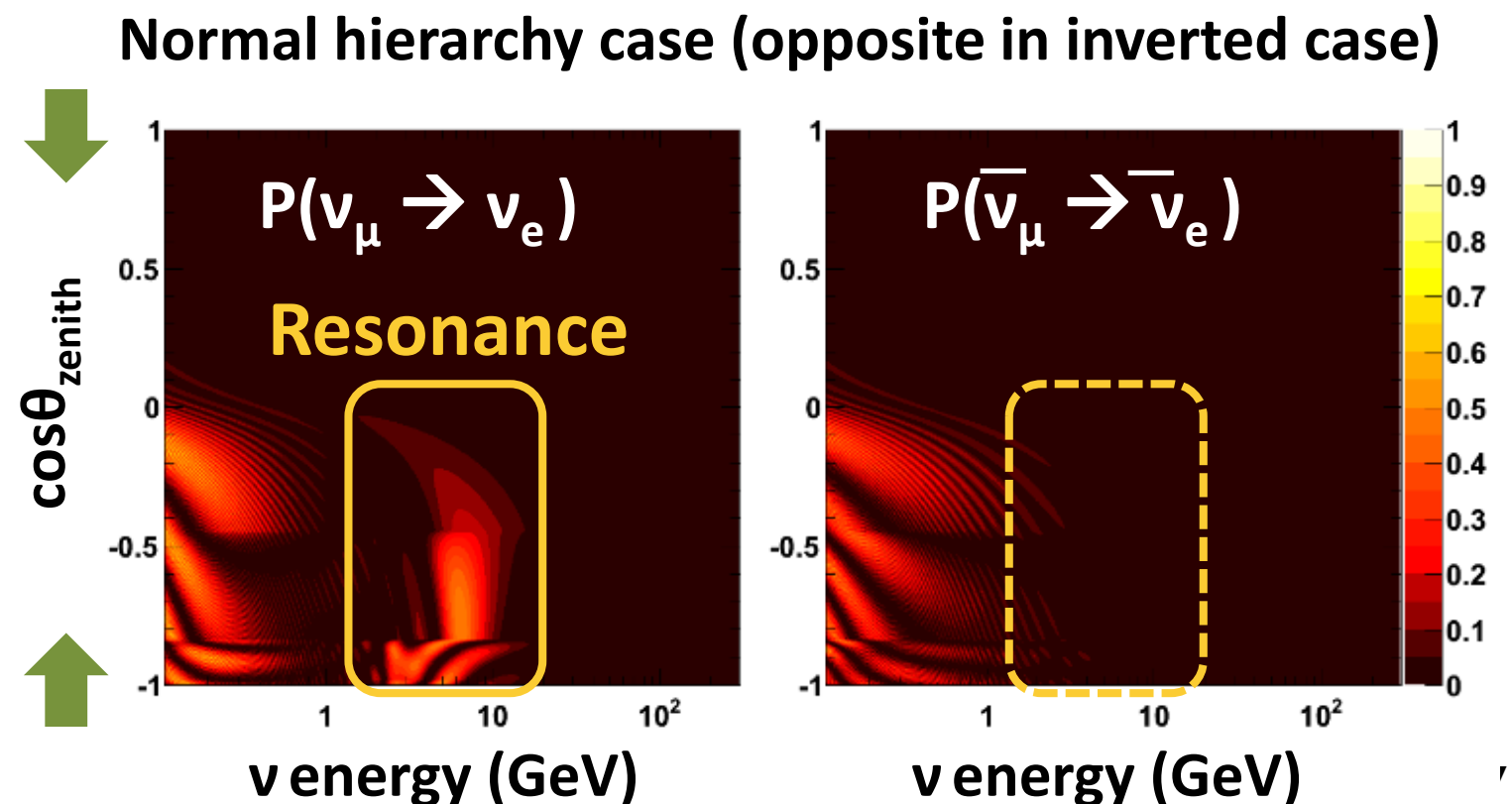
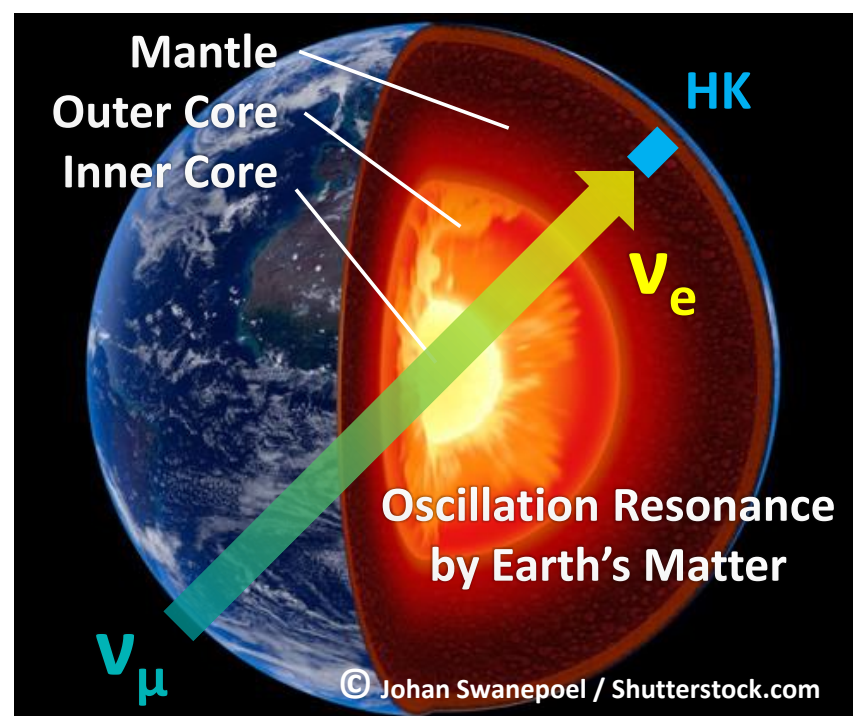


- SK 大気 $\nu$ データを19種類のサンプルに分割する
  - ニュートリノの種類 ( $\nu_e, \nu_\mu$ )、エネルギー、トポロジーなど
  - サンプルごとに各振動パラメータへの感度が異なる
- 3世代ニュートリノ振動を仮定して同時フィットする



# ニュートリノ質量階層性の決定

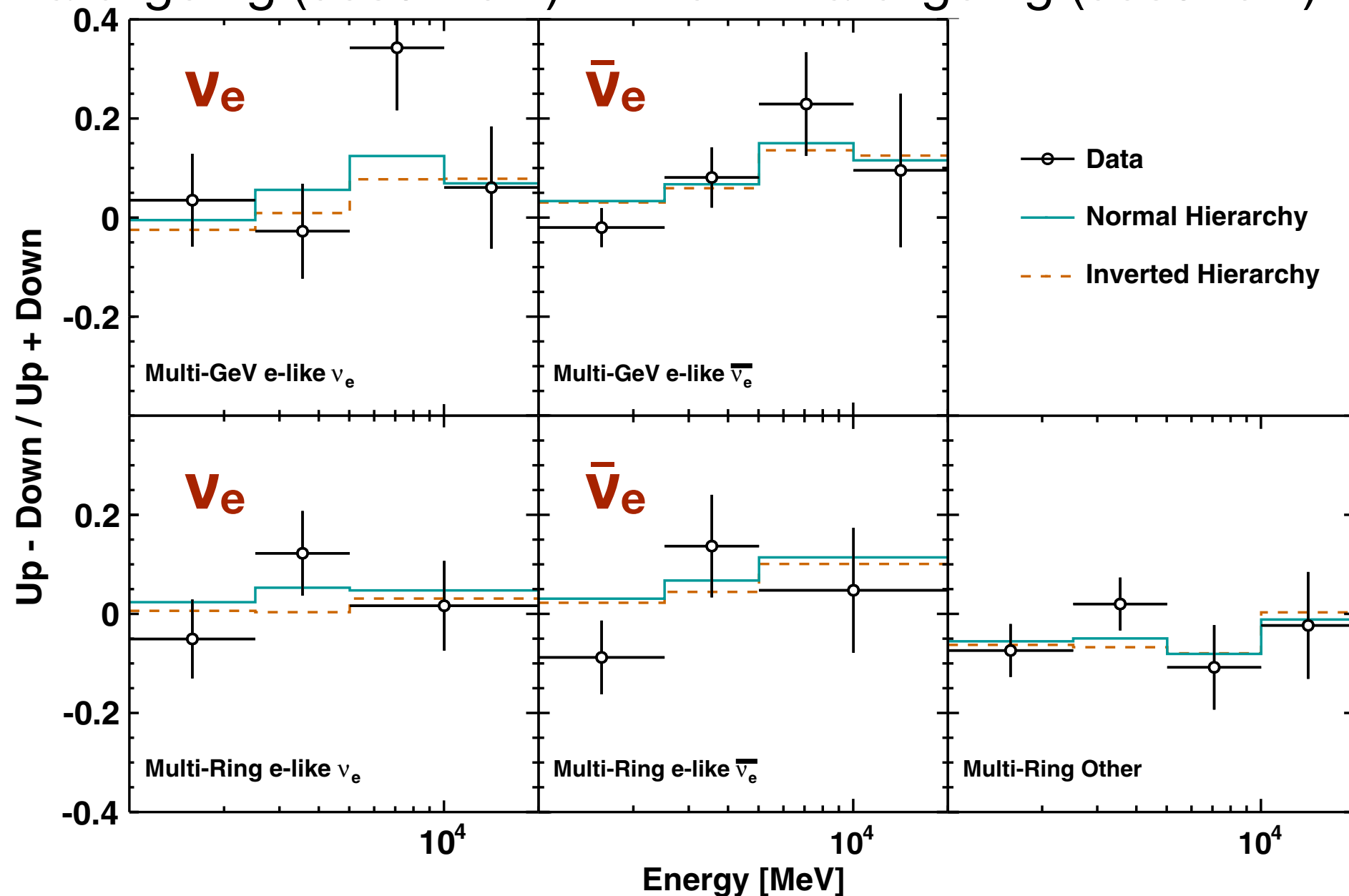
- 大気 $\nu$  観測は質量階層性の測定感度が高い
- 地球コアでの物質効果(共鳴)によって質量階層性に依存して  $\nu_e / \bar{\nu}_e$  出現現象確率に差が生じる
  - Normal Hierarchy:  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動が enhance
  - Inverted Hierarchy:  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  振動が enhance
- →  **$\sim 2\text{-}10\text{GeV}$  前後の上むき  $\nu_e$  と  $\bar{\nu}_e$  を比較**



# SKでの質量階層性の測定

Phys. Rev. D 97, 072001 (2018)

Upward-going ( $\cos\theta < -0.4$ ) と Downward-going ( $\cos\theta > 0.4$ ) の比



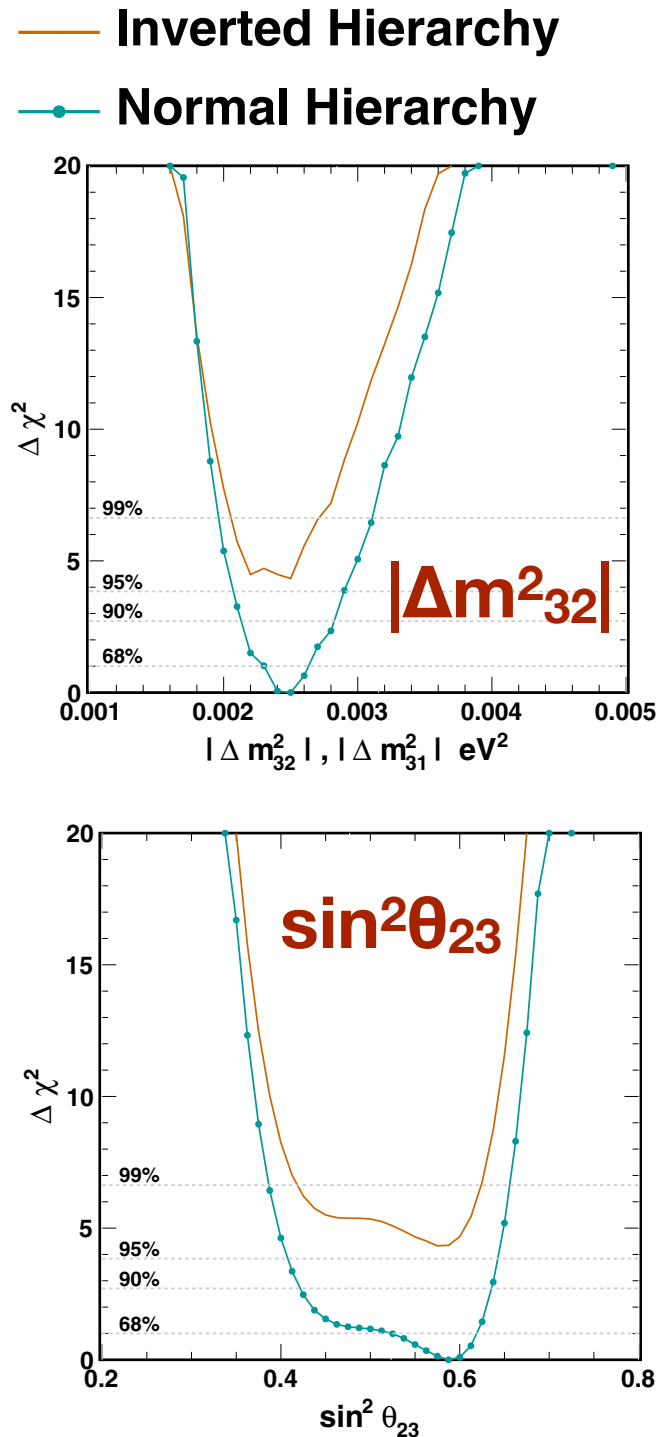
Observables	$\nu_e$ CC	$\bar{\nu}_e$ CC
Number of rings	More	Fewer
Transverse momentum	Larger	Smaller
# of decay electrons	More	Fewer
Signal efficiency	52.9%	71%
Purity	58.4%	27.5%

- $\nu_e$ -like,  $\bar{\nu}_e$ -like サンプル: Event topology を使って統計的に  $\nu_e$ ,  $\bar{\nu}_e$  を分離



# $\theta_{23}$

Phys. Rev. D 97, 072001 (2018)

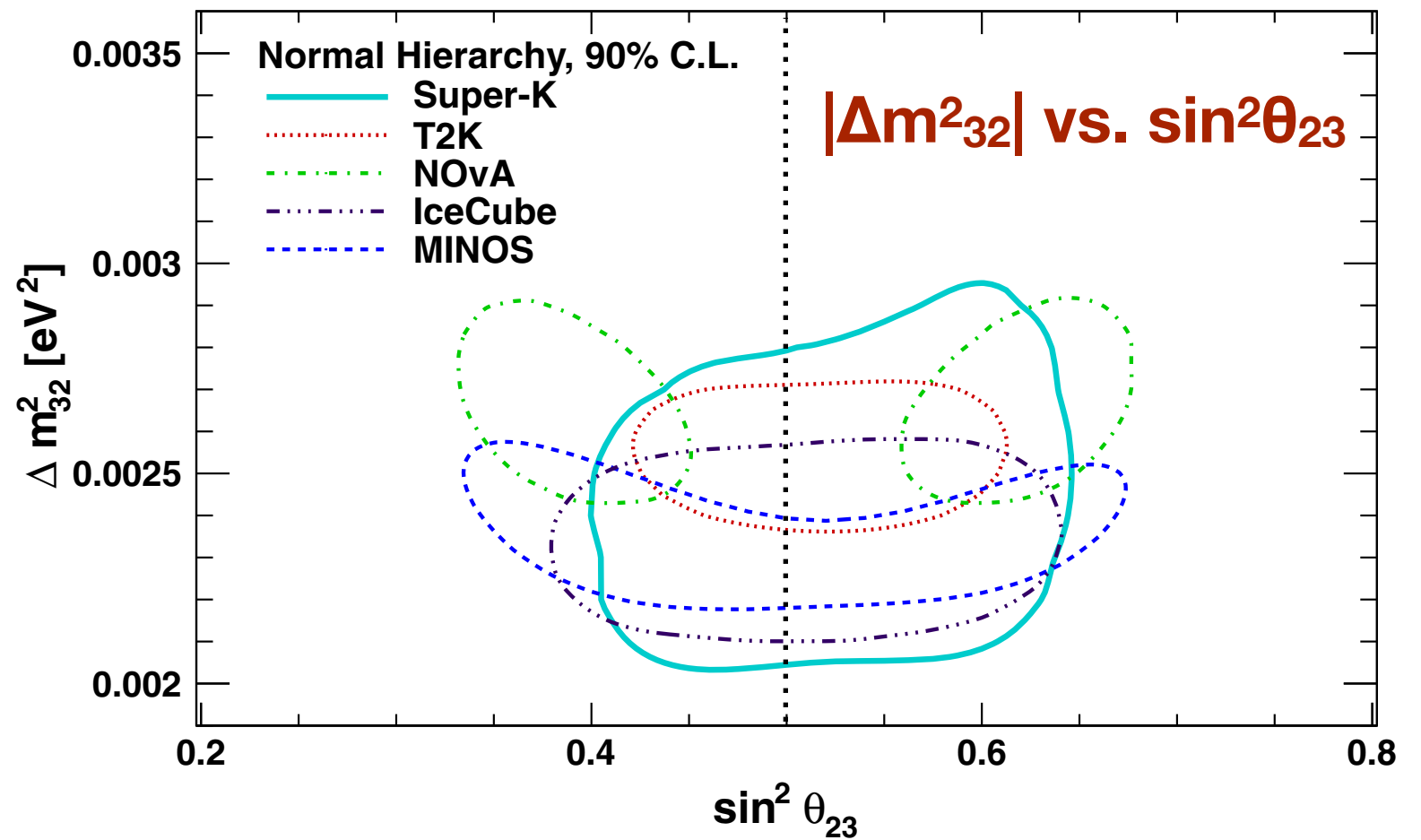


SKのほぼ全データを使った結果  
(SK-I~IV, 5326 days, 328kt·year)

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{eV}^2,$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.304 \pm 0.014,$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.0219 \pm 0.012$$



• Normal Hierarchy を支持

•  $\chi^2_{\text{NH}} - \chi^2_{\text{IH}} = -4.34$

• Best fit point:  $\theta_{23} > 45^\circ$

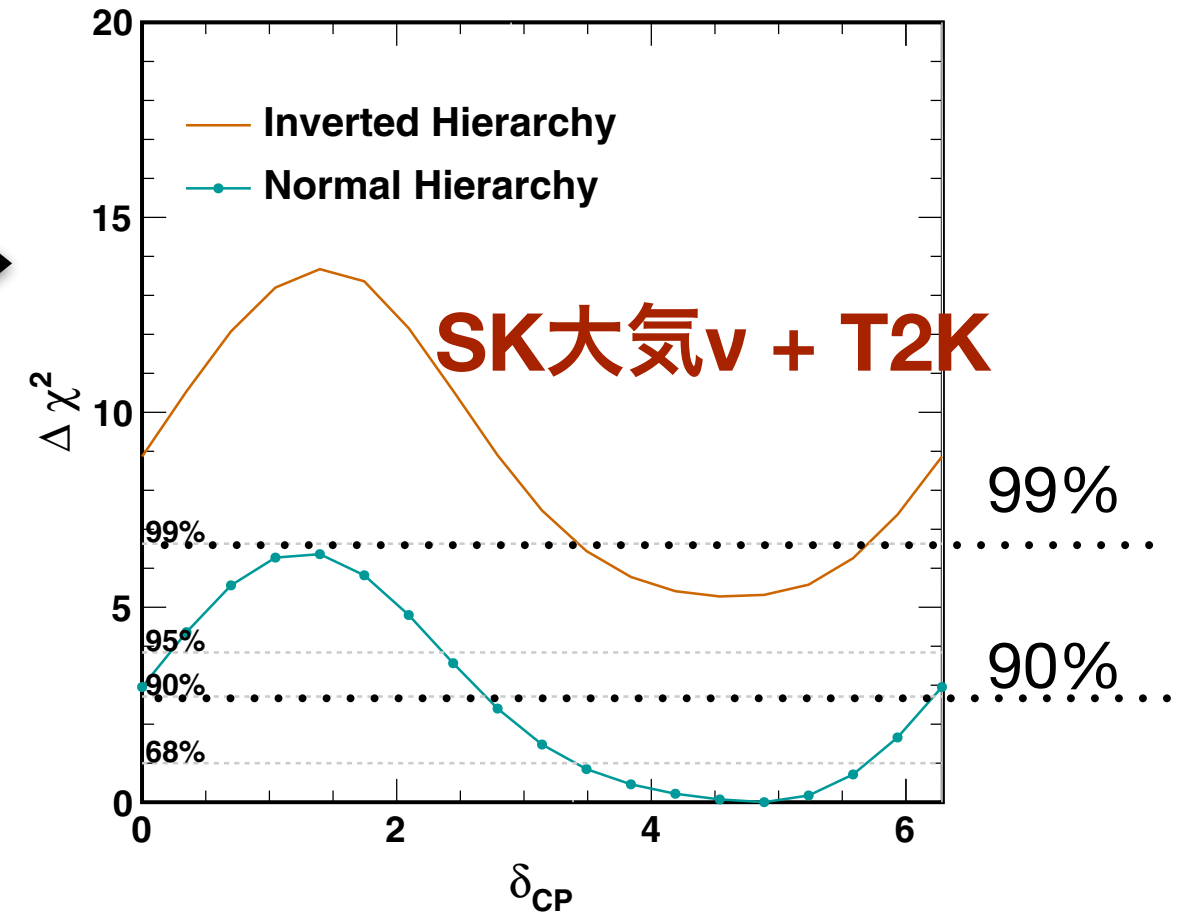
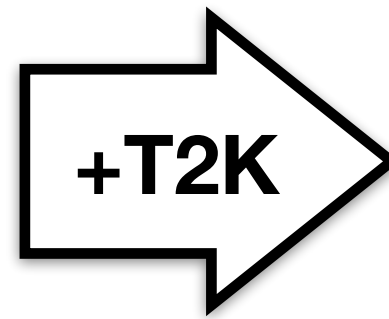
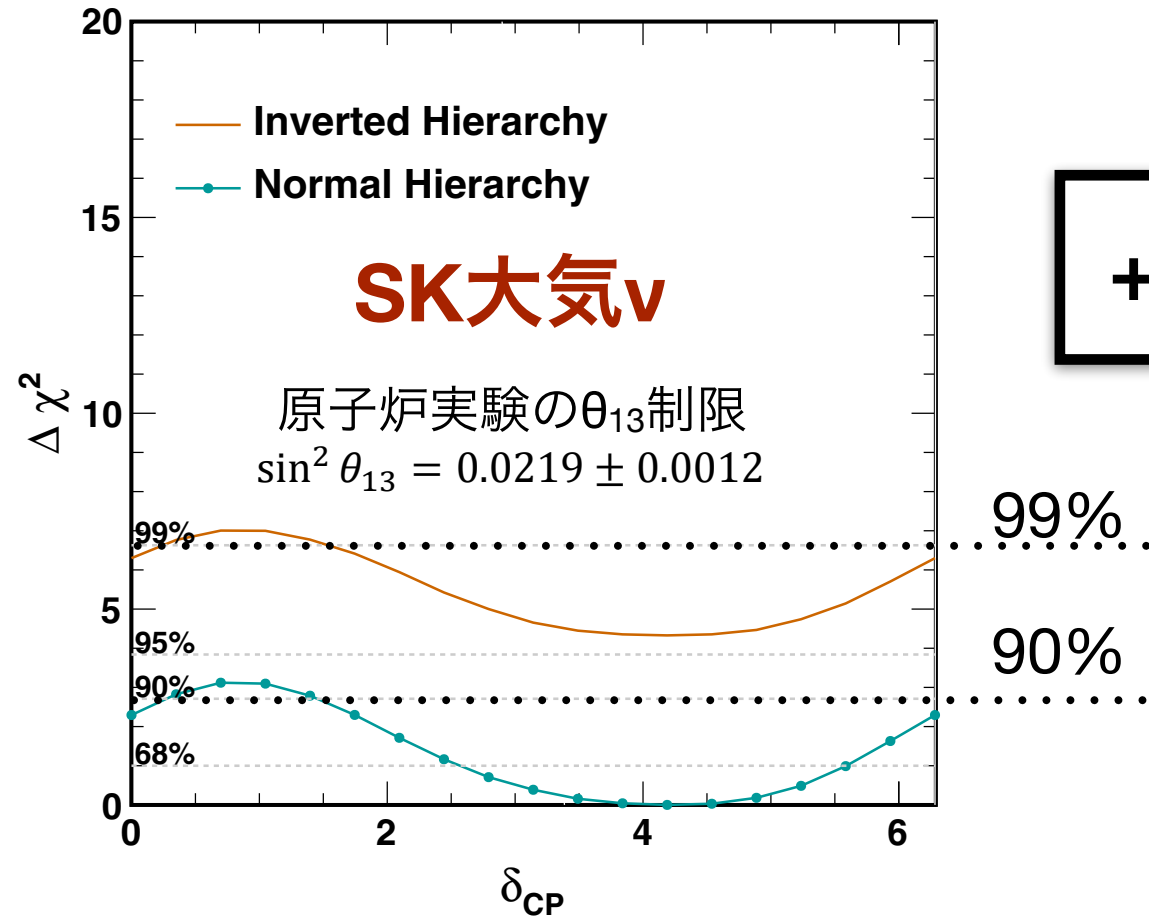
• ただし 90% C.L. で  $\theta_{23} = 45^\circ$  許容

$$|\Delta m_{32}^2| = 2.50^{+0.13}_{-0.20} \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.588 \pm_{0.064}^{0.031}$$

# $\delta_{CP}$ と質量階層性

Phys. Rev. D 97,  
072001 (2018)



SKのほぼ全データを使った結果  
(SK-I~IV, 5326 days, 328kt·year)

	$\sin^2 \theta_{23}$	$ \Delta m_{32,31}^2 (\text{eV}^2)$	$\delta_{CP}$
Normal	$0.550 \pm_{0.057}^{0.039}$	$2.50_{-0.12}^{+0.05} \times 10^{-3}$	$4.88 \pm_{1.48}^{0.81}$
Inverted	$0.550 \pm_{0.051}^{0.035}$	$2.40_{-0.05}^{+0.13} \times 10^{-3}$	$4.54 \pm_{0.97}^{1.05}$

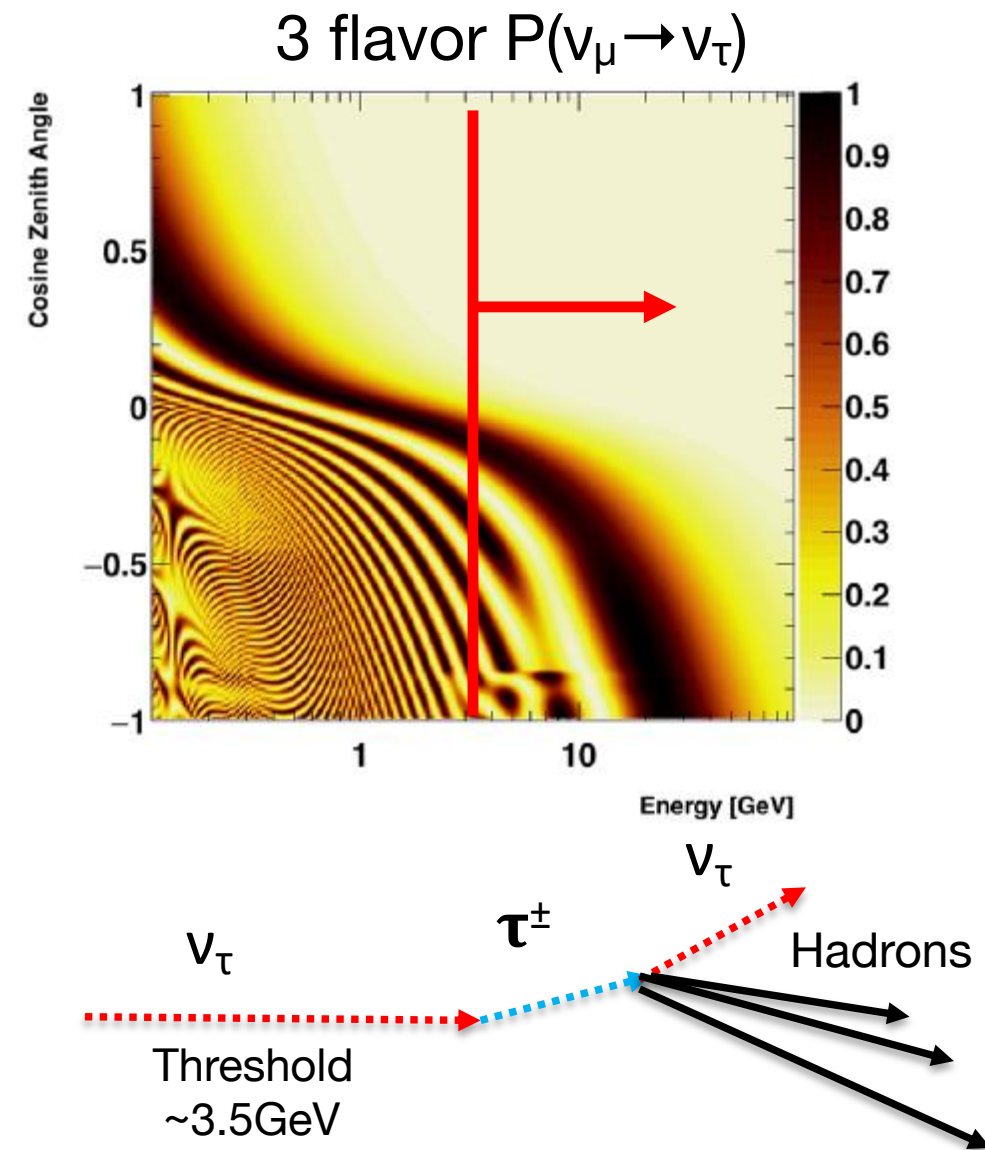
- **SK大気ν  $\delta_{CP} \sim 270^\circ$  (最大限のCPの破れ) を示唆**
- 公開されている情報のみを用い、T2K実験による制限を導入
  - 例： $\theta_{23}$  に制限（質量階層性決定感度は $\theta_{23}$ に依存する）
- **Normal Hierarchy &  $\delta_{CP} \sim 270^\circ$  の示唆が強まる**
  - IH rej. CLs test: SK only 80.6~96.7% → SK+T2K 91.5~94.5%



# $\nu_\tau$ 出現現象探索

Pays. Rev. D98,  
052006 (2018)

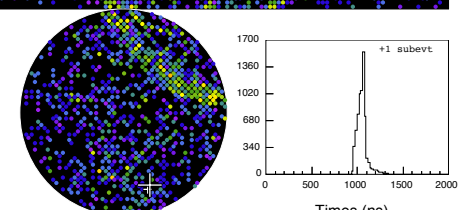
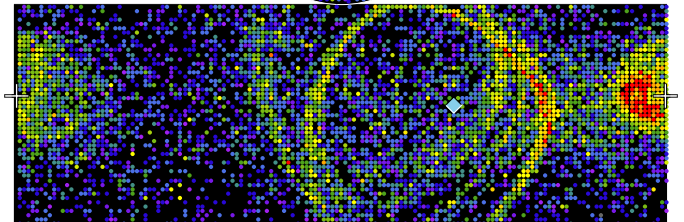
- $\nu_\tau$  出現現象 ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  振動) 探索
  - タウは CC- $\nu_\tau$  相互作用から生成
    - CC- $\nu_\tau$  閾値: 3.5GeV
  - “Upward-going” 事象として観測される
    - “Downward-going” 事象は背景事象コントロールサンプル
    - (Primary  $\nu_\tau$  flux は無視できるほど小さい)
  - タウの hadronic decay から生成される **Multi-ring 事象を選択** (Neural Network)
    - 主な背景事象： 深非弾性散乱事象



Super-Kamiokande I  
Run 999999 Sub 1 Event 192  
16-04-13:06:07:16  
Inner: 6838 hits, 23957 pe  
Outer: 0 hits, 0 pe  
Trigger: 0x03  
D.Wall: 431.5 cm  
Evis: 2.6 GeV

Charge (pe)

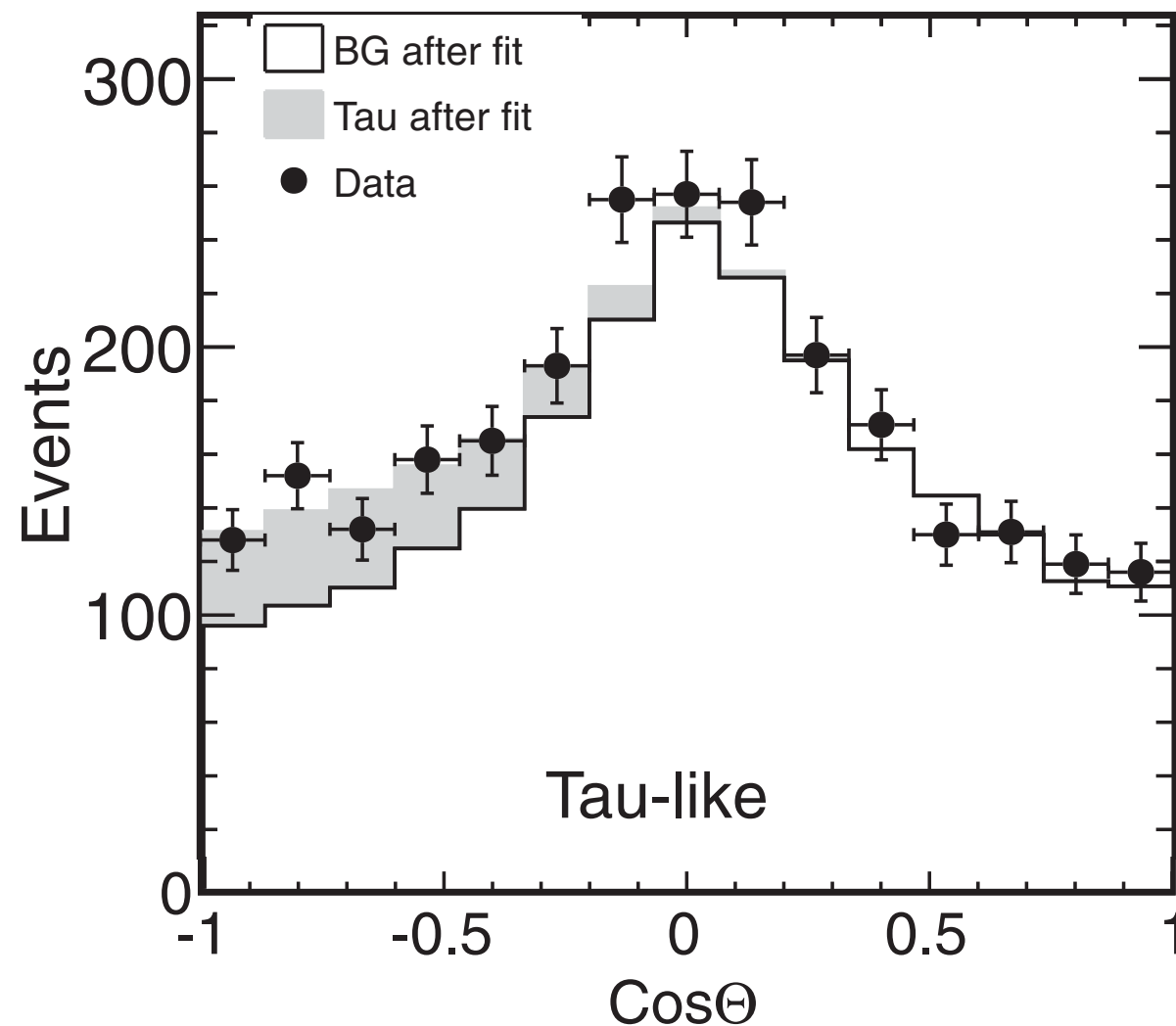
• >26.7  
• 23.3-26.7  
• 20.2-23.3  
• 17.3-20.2  
• 14.7-17.3  
• 12.2-14.7  
• 10.0-12.2  
• 8.0-10.0  
• 6.2- 8.0  
• 4.7- 6.2  
• 3.3- 4.7  
• 2.2- 3.3  
• 1.3- 2.2  
• 0.7- 1.3  
• 0.2- 0.7  
• < 0.2



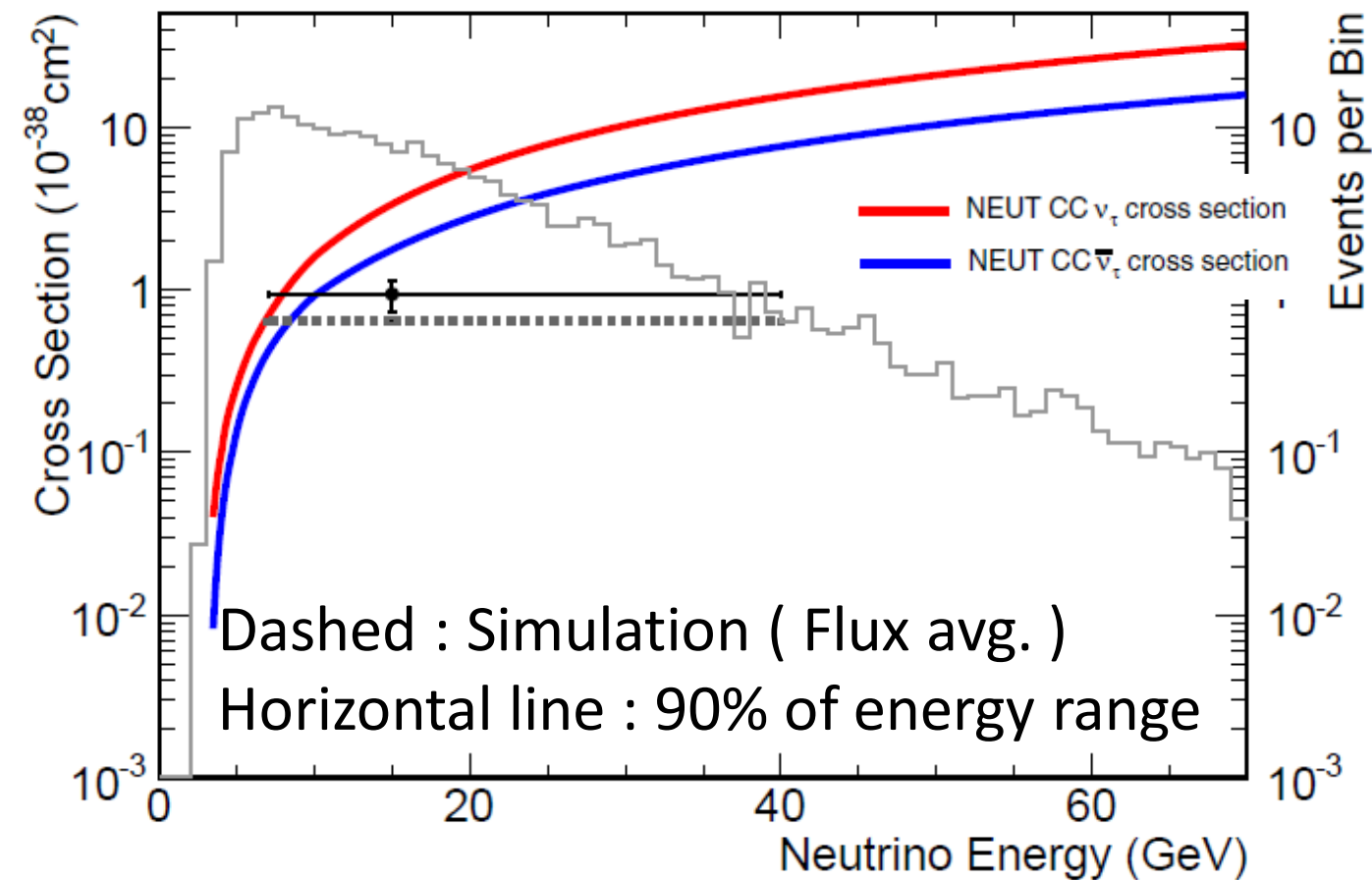
# SKでの $\nu_\tau$ 出現現象探索

Pays. Rev. D98,  
052006 (2018)

天頂角分布



観測したタウ事象から  $\text{CC-}\nu_\tau$   
散乱断面積を抽出



タウ信号：上向き背景事象からの data  
excess

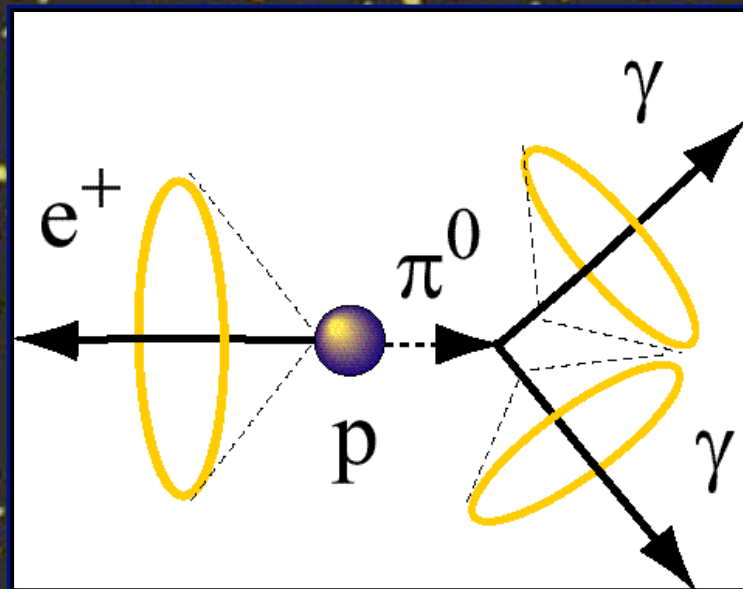
タウ事象数： $338.1 \pm 72.7$  (stat.+syst.)  
 $\nu_\tau$  出現現象がない仮説を  $4.6\sigma$  で棄却

散乱断面積 (3.5~70GeV で平均)  
 $= (0.94 \pm 0.20) \times 10^{-38} \text{ cm}^2$

理論で予測される断面積と  $1.5\sigma$   
程度で一致



# 核子崩壞探索

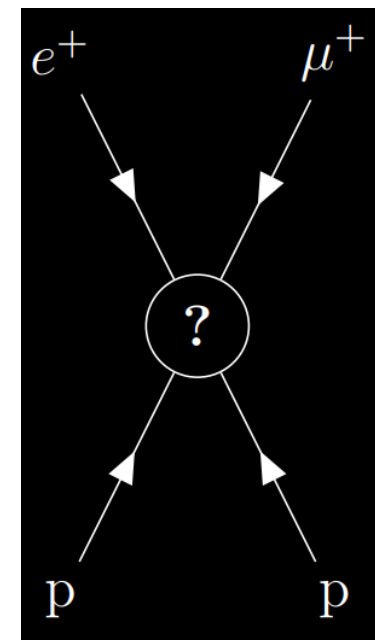
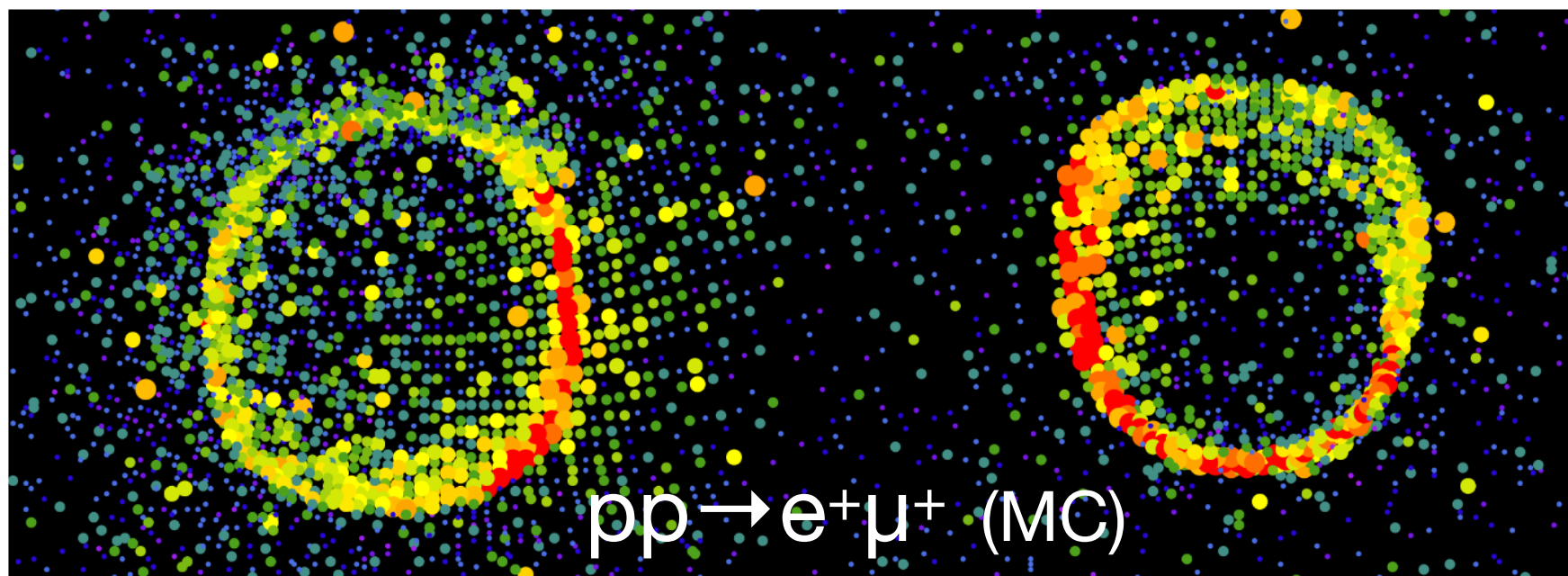




# 2核子崩壊・1核子崩壊探索

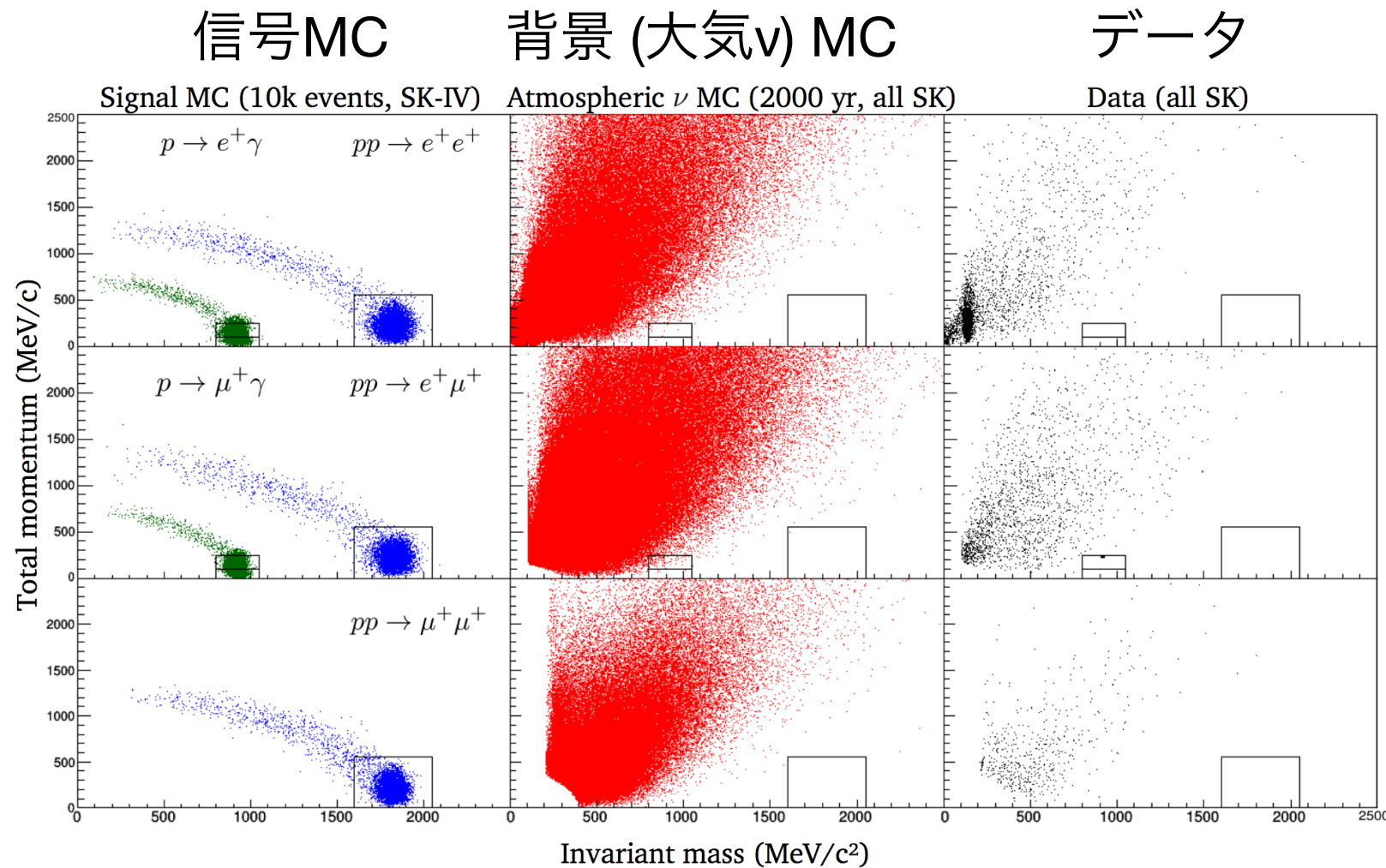
arXiv:1811.12430 (submitted to PRL)

- Dinucleon and nucleon decay into two-body final state without any hadrons:  
 $pp \rightarrow e^+e^+, \mu^+\mu^+, e^+\mu^+, nn \rightarrow e^\pm e^\mp, \mu^\pm \mu^\mp, \gamma\gamma \dots$ , and  $p \rightarrow e^+\gamma, p \rightarrow \mu^+\gamma$ 
  - 2核子崩壊：8探索モード，1核子崩壊：2探索モード
- バリオン数・レプトン数が保存しない様々な崩壊モード
  - ex.  $\Delta(B-L)=2$
- 実験的に背景事象が少なく、信号が非常にクリーン
- $p \rightarrow e^+ / \mu^+ \pi^0$  探索と同様の探索手法（事象選択など）を使うことができる

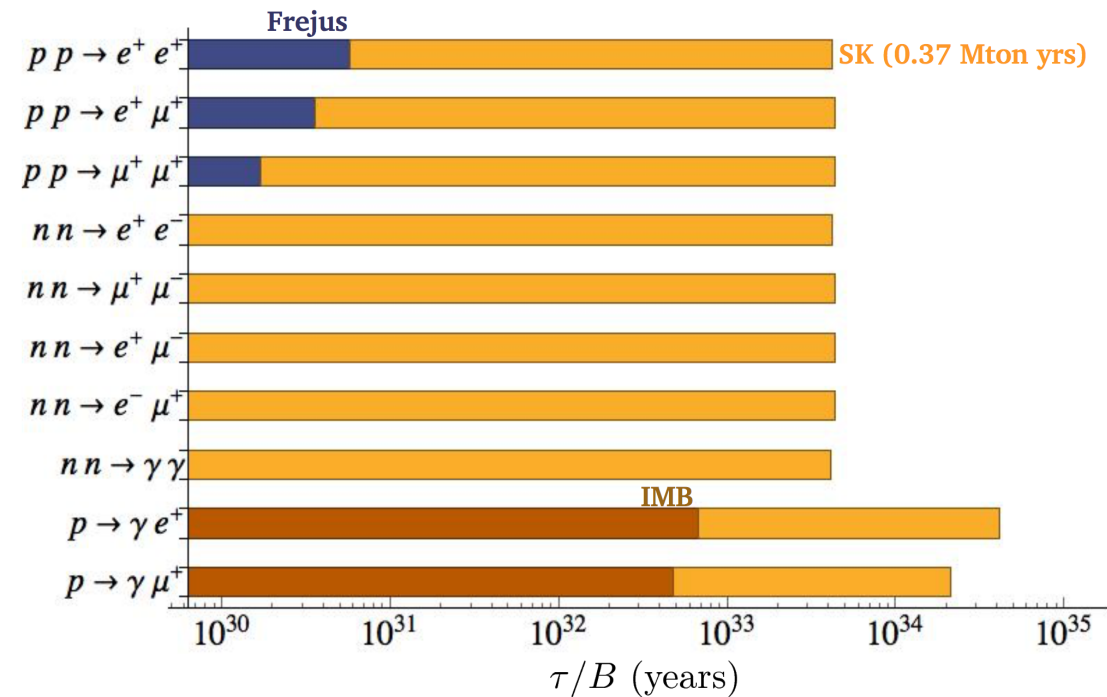


# 2核子崩壊・1核子崩壊探索

arXiv:1811.12430 (submitted to PRL)



## 核子寿命の制限



2核子崩壊の8探索モードおよび  $p \rightarrow e^+\gamma$  で候補事象なし

$p \rightarrow \mu^+\gamma$  モードでは2候補事象。ただし Bkg expectation:  $\sim 0.7$

- 信号事象の証拠は見つかっていない
- 過去の実験の探索から1~2桁以上高い核子寿命への制限



# まとめ

- **SK大気 $\nu$ は Normal Hierarchy を 80.6~96.7% で示唆**
  - T2Kの制限を加えて 91.5~94.5% に強まる
  - CP対称性が最大限に破れている( $\delta_{CP} \sim 270^\circ$ )可能性を示唆  
Phys. Rev. D 97, 072001 (2018)
- **$\nu_\tau$  出現現象がない仮説を $4.6\sigma$  で排除**
  - CC- $\nu_\tau$  散乱断面積:  $(0.94 \pm 0.20) \times 10^{-38} \text{cm}^2$   
Phys. Rev. D 98, 052006 (2018)
- **2核子・1核子崩壊探索 → 核子崩壊の証拠は見つかっていない**
  - 過去実験の制限より1~2桁上回る強い核子寿命の制限  
arXiv:1811.12430 (submitted to PRL)

# Future prospect

- SKでの大気 $\nu$ ・核子崩壊探索の感度向上に向けた取り組み
  - 有効質量の拡大
    - ex. 22.5kton  $\rightarrow$   $\sim$ 27kton (+20%統計量, SK全期間)
  - 事象再構成アルゴリズムの改良
    - Vertex, momentum, PID
    - 核子崩壊  $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ : 脱励起  $\gamma$  (6.3MeV) 検出効率の改良
  - 中性子水素捕獲信号(SK-IV, 効率 $\sim$ 20%)を用いた  $\nu/\bar{\nu}$  分離
- SK-Gd
  - 中性子捕獲信号効率の飛躍的向上 ( $\geq 80\%$ )  
 $\rightarrow$   $\nu/\bar{\nu}$  の分離効率の向上
  - 核子崩壊探索の背景事象をさらに半減  $\rightarrow$  発見感度向上

大気 $\nu$ 解析  
(SK-IV)  
paper in  
preparation