

# スーパーカミオカンデにおける 大気ニュートリノと陽子崩壊の最新結果

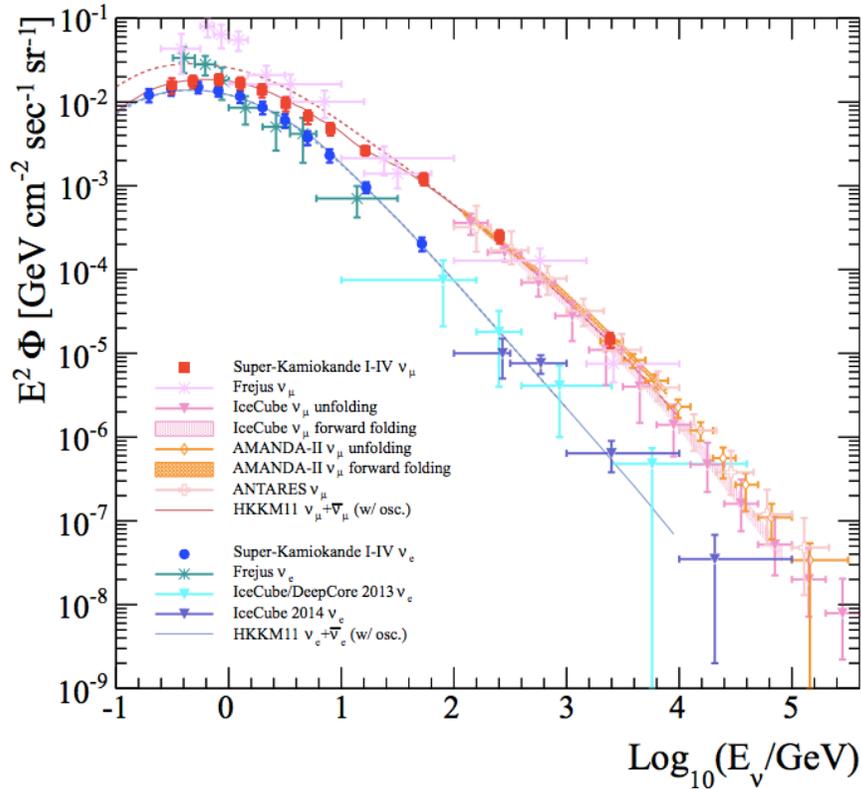
Roger Wendell

京都大学

東京大学宇宙線研究所共同利用発表会

2017.12.07

# Introduction

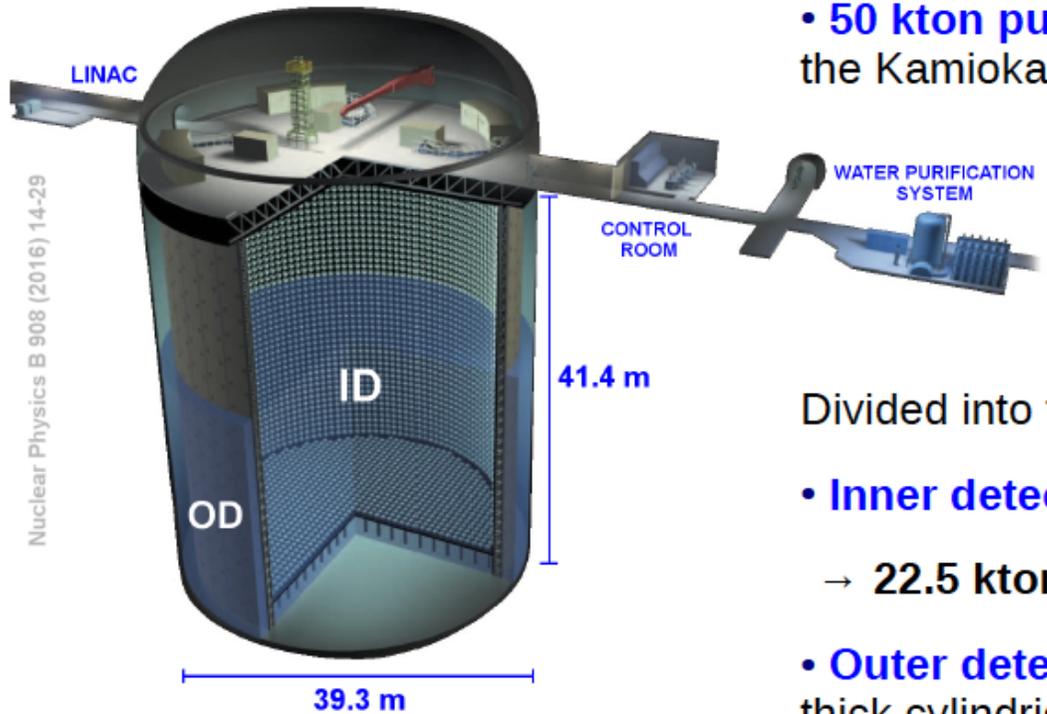


- 大気ニュートリノ振動解析
  - SKのみ
  - SK+T2Kモデル
- タウニュートリノ探索と断面積測定
- 間接的な暗黒物質探索
  - 銀河中心におけるWIMP対消滅
  - 地球内部におけるWIMP対消滅
- 陽子崩壊の最新結果
  - $\nu K^+$  モード

- 今日の話は328(以上)kton-yrのデータ
- 100MeVから1TeVのエネルギー領域を渡る19解析サンプル

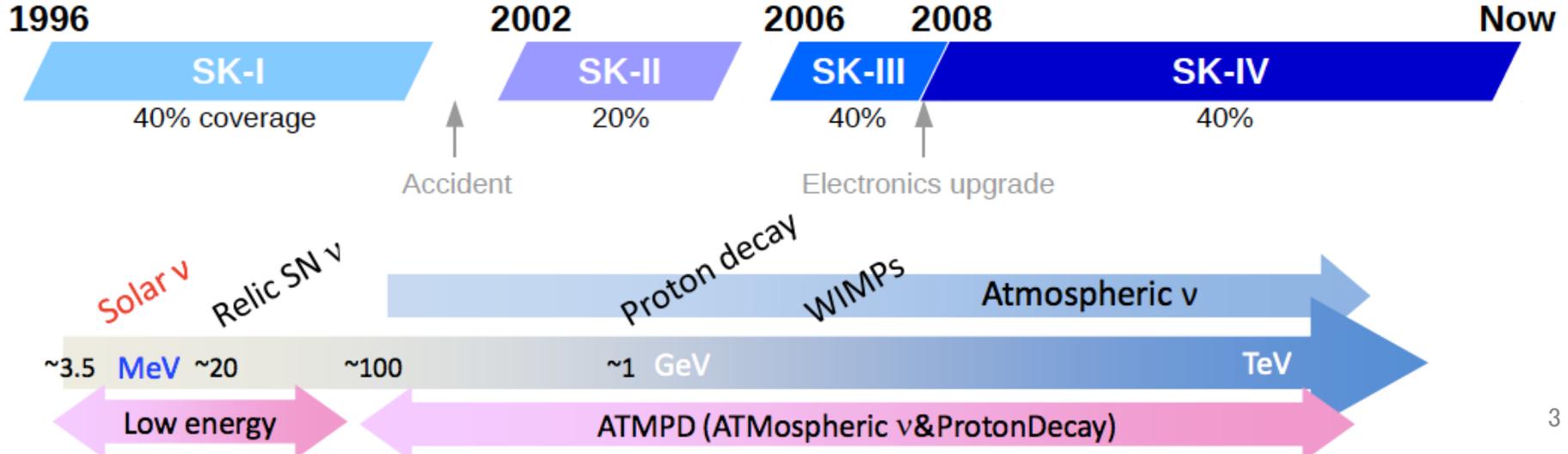
# Super-Kamiokande Detector

- 50 kton pure water Cherenkov detector inside the Kamioka mine in Gifu, Japan.



Divided into two volumes:

- **Inner detector (ID):** 11 126 x 20 inch PMTs, → 22.5 kton fiducial volume
- **Outer detector (OD):** 1 885 x 8 inch PMTs, 2m thick cylindrical shell around ID



# Super-Kamiokande: Publications in 2017

平成28年度共同利用発表会で発表済み

[Phys. Rev. D 96, 012003 \(2017\)](#)

Search for nucleon decay into charged antilepton plus meson in 0.316 megaton · years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector

[Phys. Rev. D 95, 012004 \(2017\)](#)

Search for proton decay via  $p \rightarrow e + \pi^0$  and  $p \rightarrow \mu + \pi^0$  in 0.31 megaton·years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector,

[arXiv:1711.09436](#)

A Measurement of the Tau Neutrino Cross Section in Atmospheric Neutrino Oscillations with Super-Kamiokande

[arXiv:1711.05278](#)

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

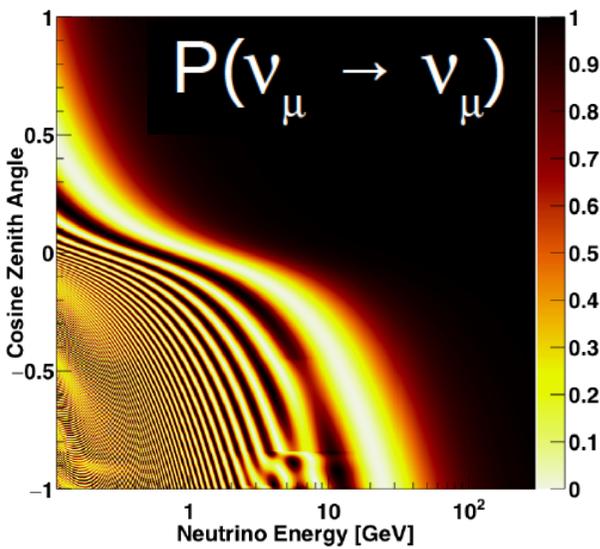
[arXiv:1710.09126](#)

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

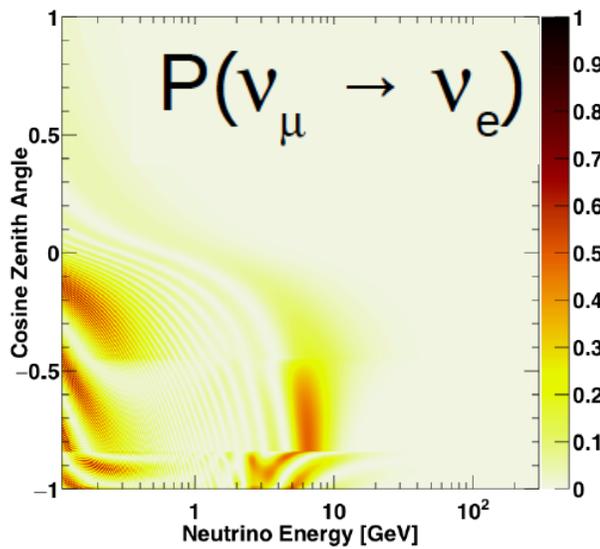
提出中

# 物質効果を使用し，質量階層性を測定

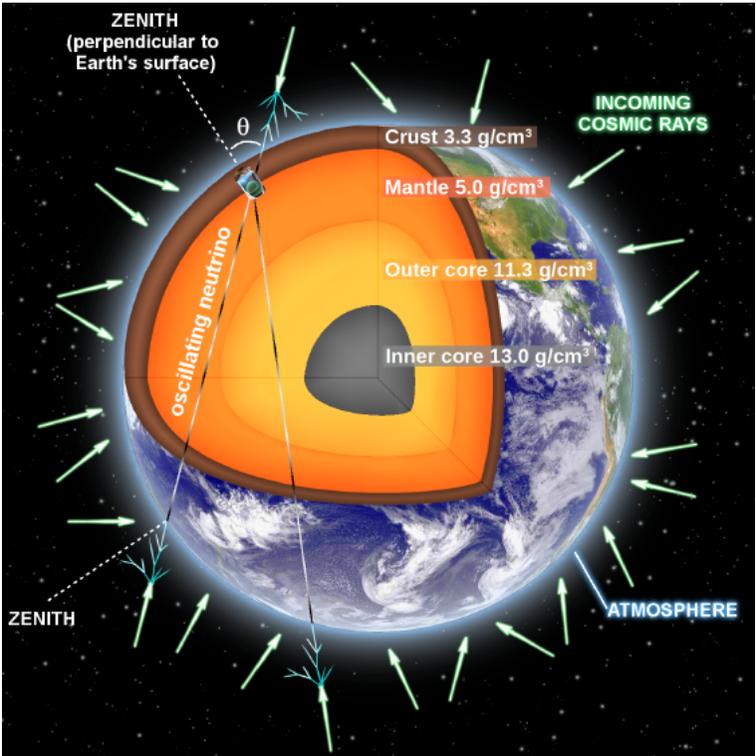
## Normal Hierarchy



(a)  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$



(b)  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

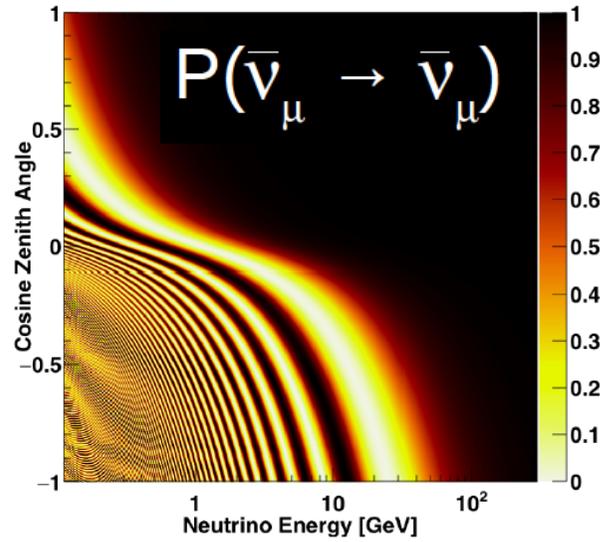


### ニュートリノの場合

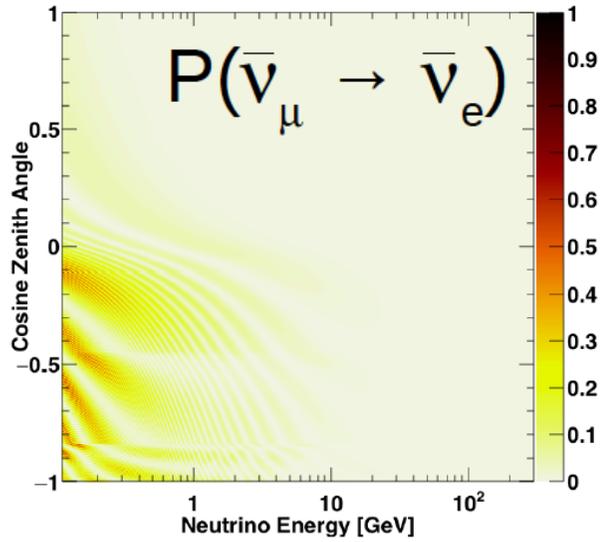
- 地球内の共鳴的な振動による上向き $\nu_e$ 事象のレートが質量階層性の情報を持っている
- NHの場合：ニュートリノが共鳴的振動
- IHの場合：反ニュートリノが共鳴的振動
- ただし，共鳴の大きさが  $\theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{cp}$  と電子濃度に依存

# 物質効果を使用し、質量階層性を測定

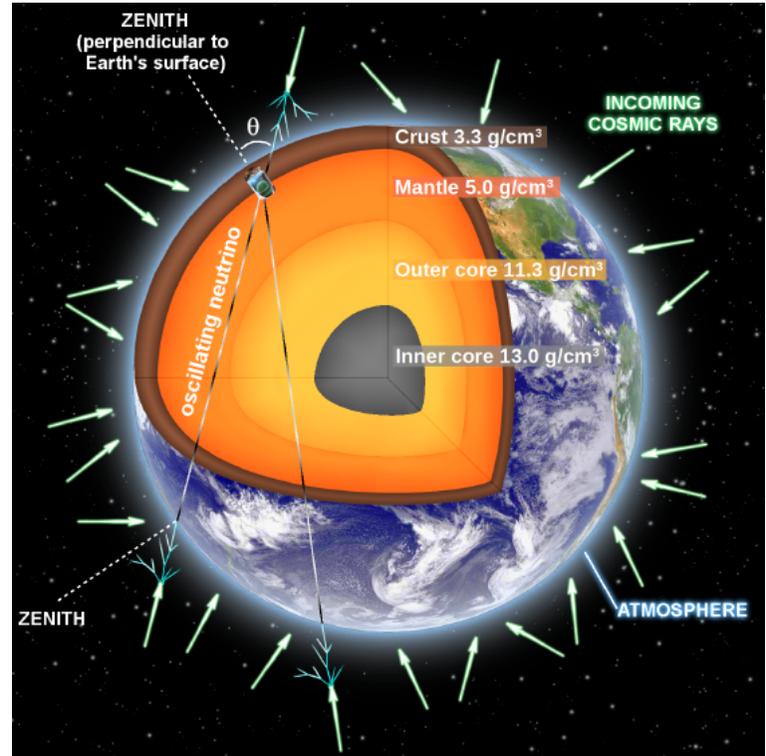
## Normal Hierarchy



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



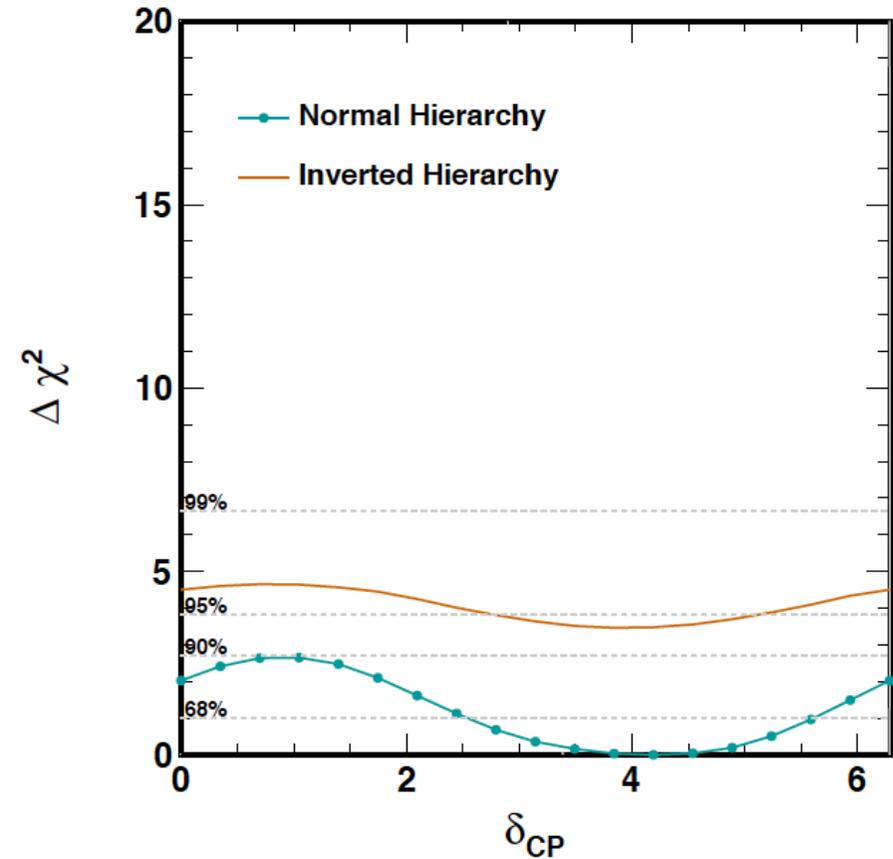
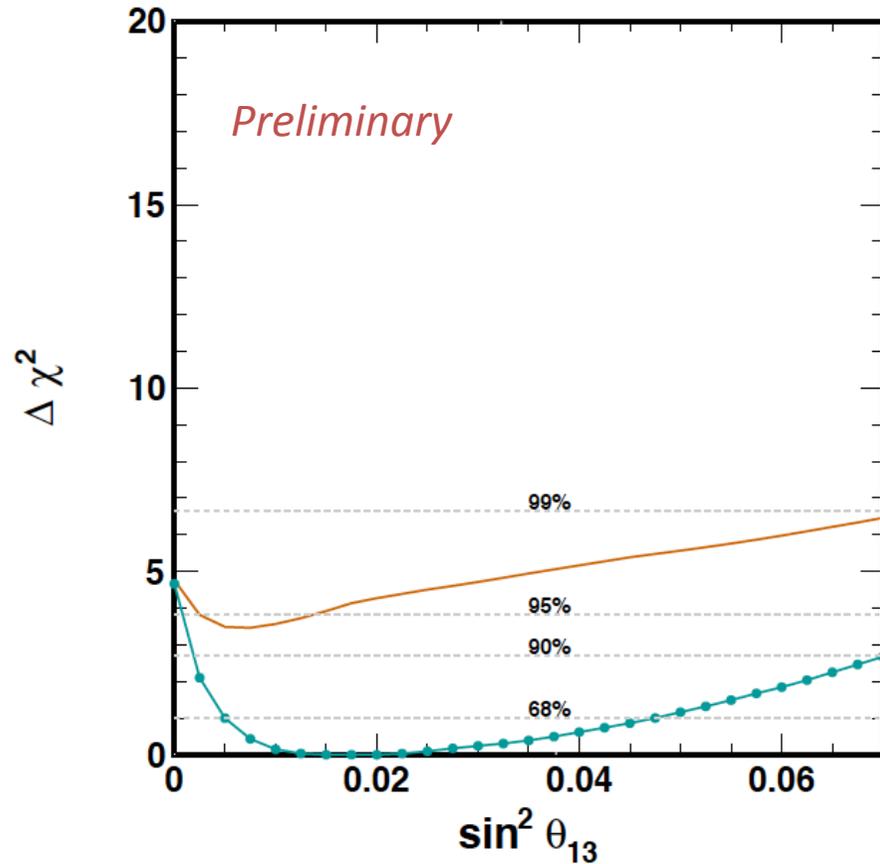
(d)  $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$



## 反ニュートリノの場合

- 地球内の共鳴的な振動による上向き $\nu_e$ 事象のレートが質量階層性の情報を持っている
- NHの場合：ニュートリノが共鳴的振動
- IHの場合：反ニュートリノが共鳴的振動
- ただし、共鳴の大きさが  $\theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{cp}$  と電子濃度に依存

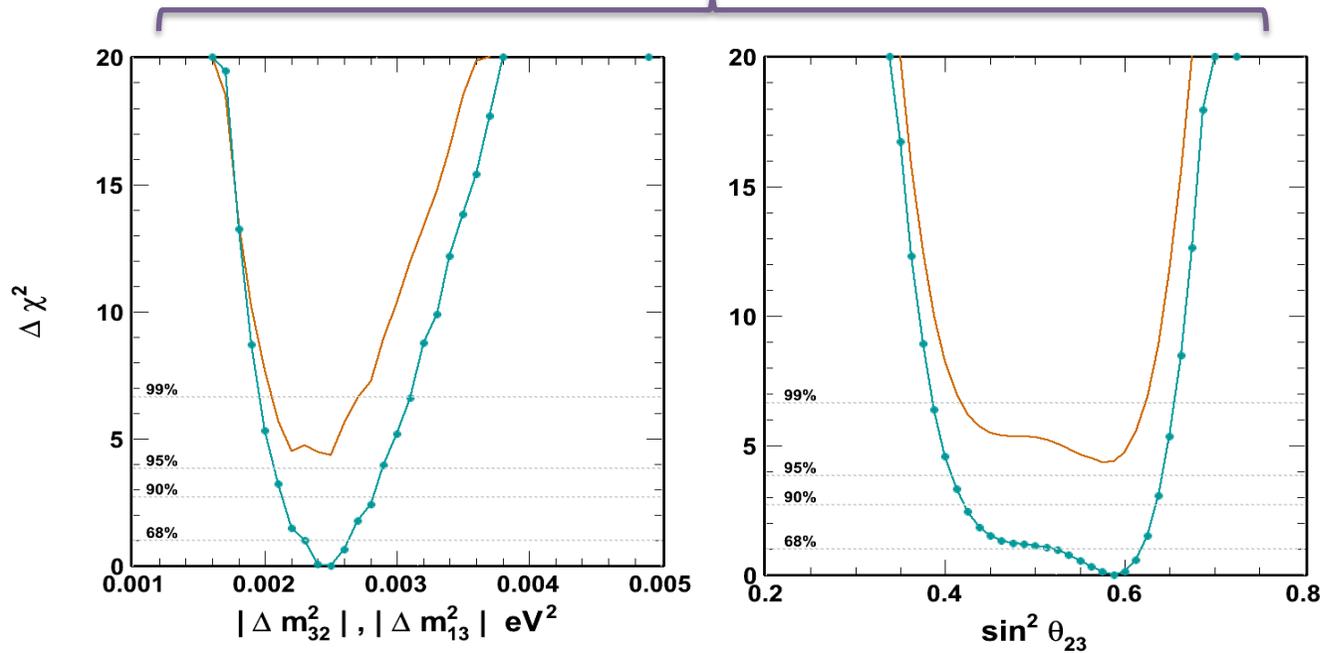
# $\sin^2\theta_{13} + \delta_{cp}$ : Super-Kamiokande (only)



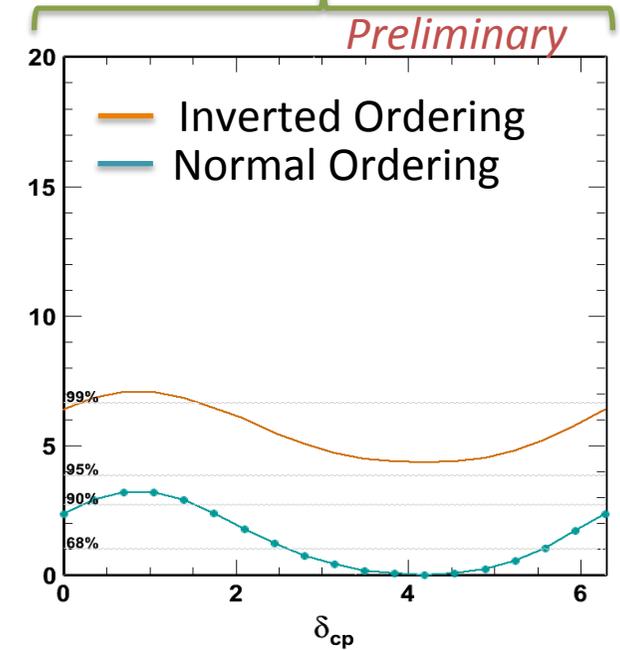
- 全振動パラメーター(太陽混合以外)をフィッティング
- $\sin^2\theta_{13} = 0$  を $2\sigma$ で棄却
- 原子炉実験の測定(=0.0219)とconsistentだが, 制限が弱い
- $\Delta\chi^2$  (NH - IH) = -3.5, NHを示唆

# Atmospheric Mixing + $\delta_{cp}$ : Super-Kamiokande

Muon Samples

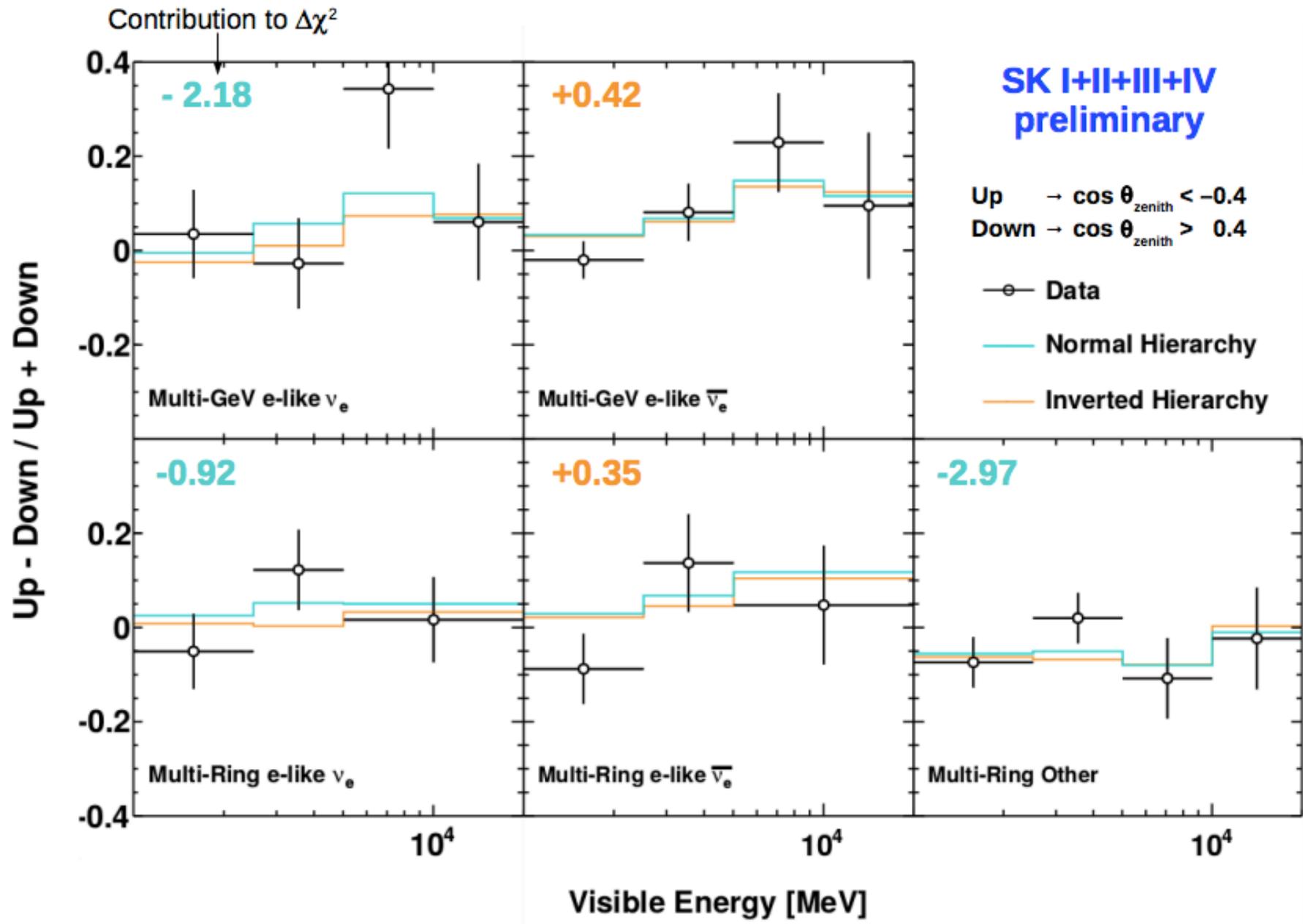


Electron Samples

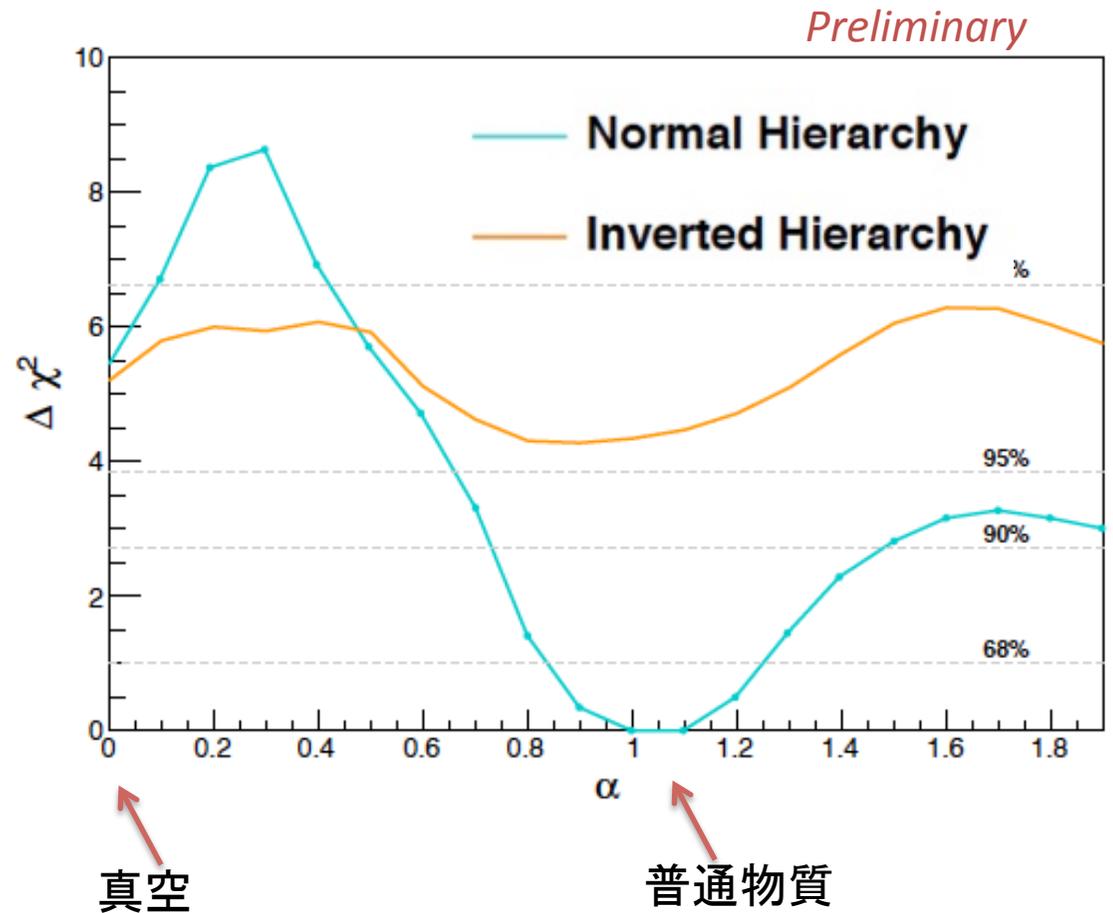
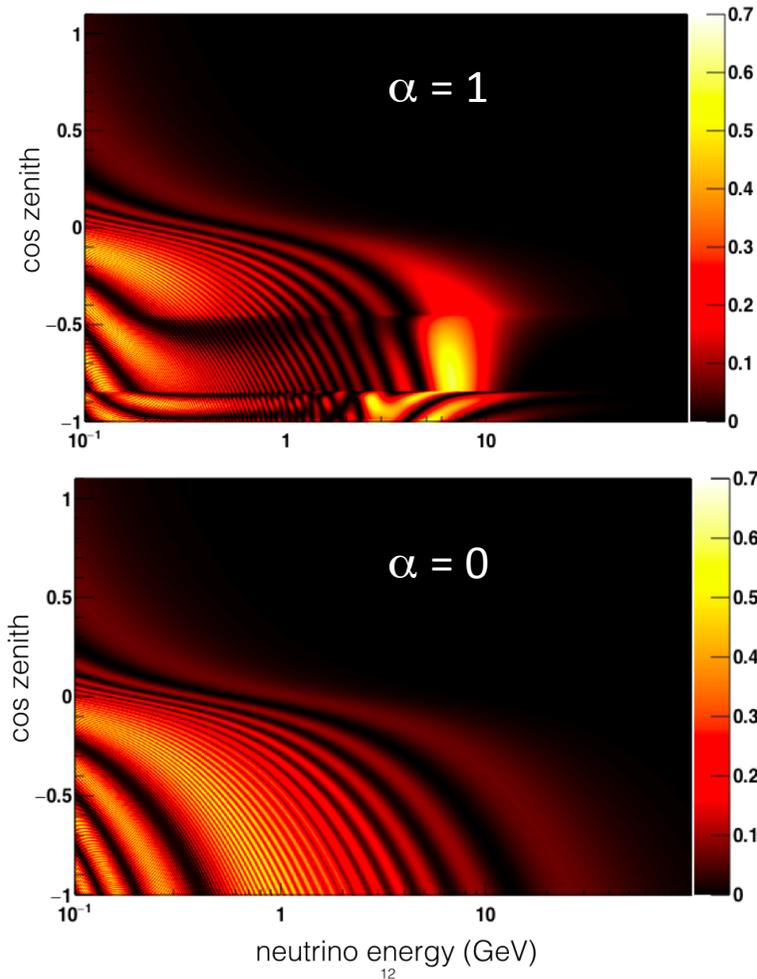


- 原子炉実験を参照:  $\sin^2\theta_{13} = 0.0219 \pm 0.0012$  で制限
- E-likeサンプルでは, 上向き事象のExcessにより *normal hierarchy* の示唆を得た
  - $\Delta\chi^2 (\text{NH} - \text{IH}) = -4.3$
- $\delta_{cp} \sim 1.33\pi$  を若干favorしている

# 質量階層性の証拠？



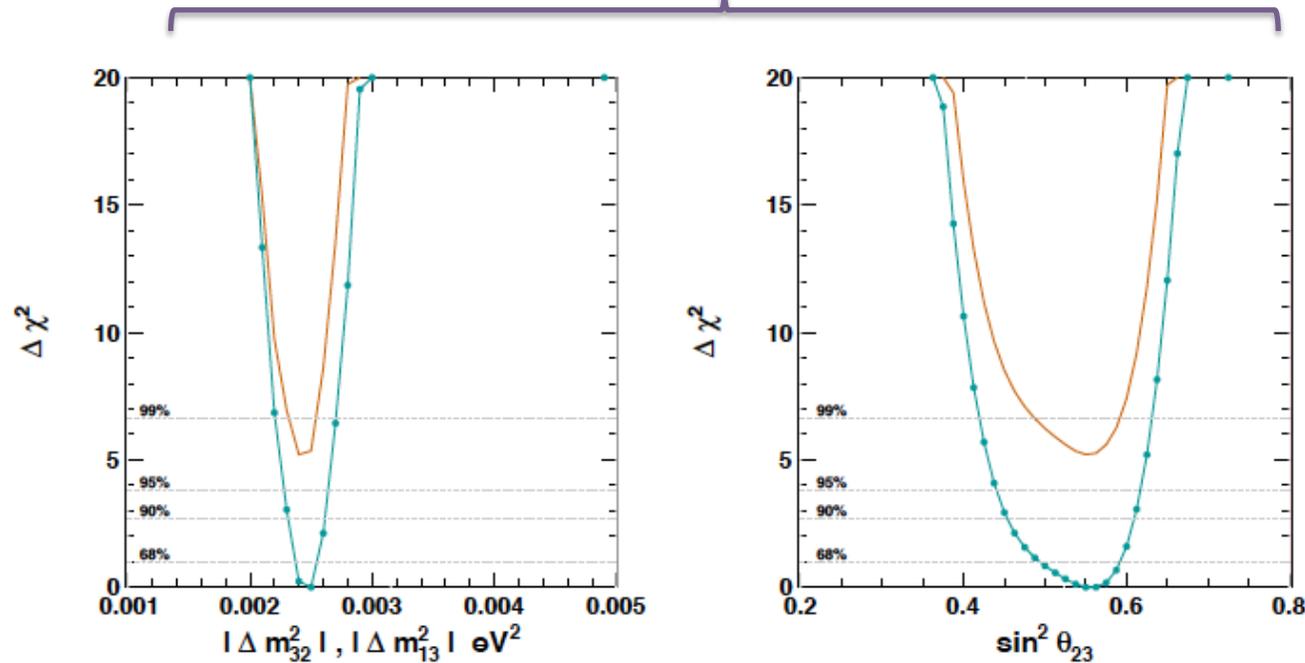
# 物質効果とconsistency



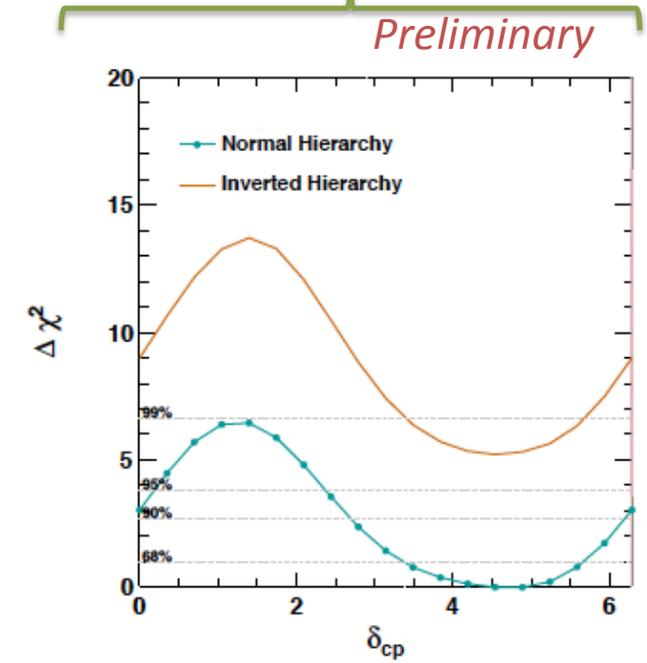
- 原子炉実験を参照:  $\sin^2 \theta_{13} = 0.0219 \pm 0.0012$  で制限
- 地球内部が真空である仮説を1.6シグマで棄却

# Atmospheric Mixing + $\delta_{cp}$ : Super-Kamiokande+T2K Model

Muon Samples (beam+atm)

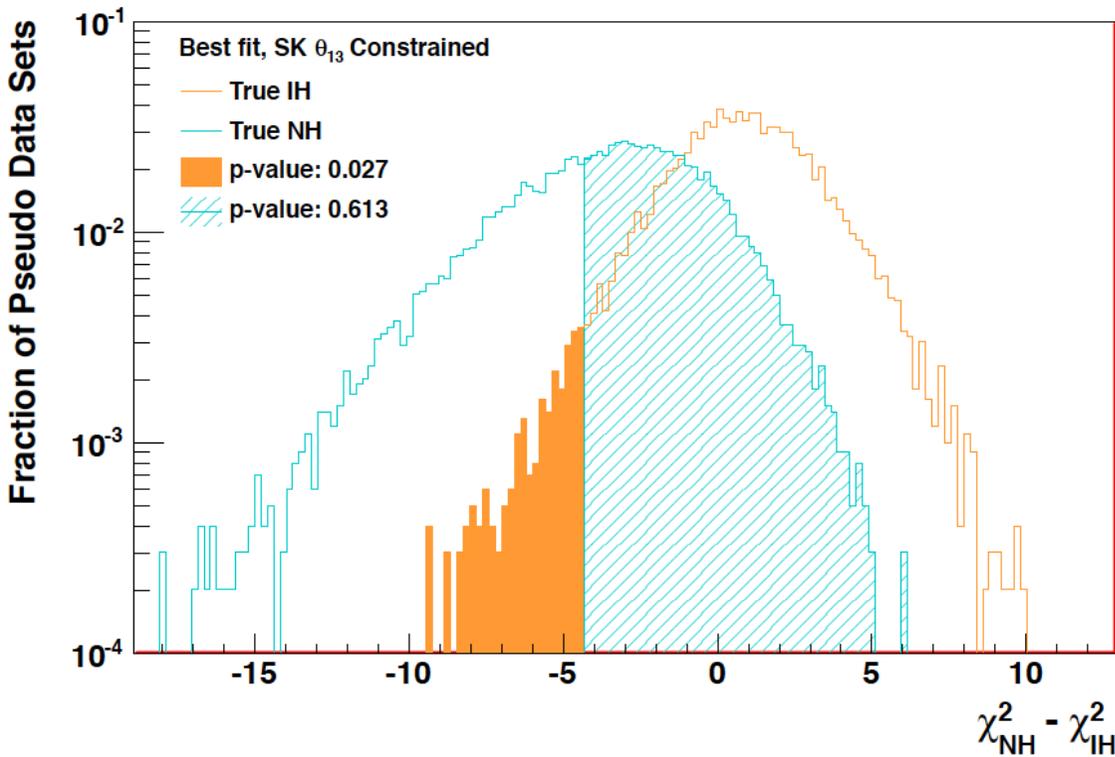


Electron Samples (beam+atm)



- 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
- E-likeサンプルの優位度が高まる
- *normal hierarchy*の示唆が強まる
  - $\Delta\chi^2$  ( NH - IH ) = -5.2 (SK only: -4.3)
- $\delta_{cp} \sim 1.33\pi$ の示唆も残る

# 質量階層性測定 of 優位度について



大気混合角の仮定:

Fit	CL <sub>s</sub>		
	Lower 90% C.L.	Best Fit	Upper 90% C.L.
SK $\theta_{13}$ Constrained	0.194	0.070	0.033
SK+T2K $\theta_{13}$ Constrained	0.085	0.074	0.055

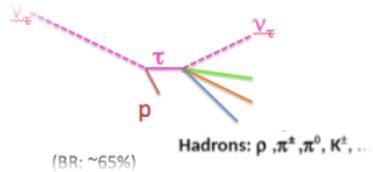
- 優位度は、仮定した振動パラメーターに依存
- 統計不足しているため、感度が低い
- CLs方法を導入

$$CL_s = \frac{p_0(IH)}{1 - p_0(NH)}$$

- **Inverted Hierarchy**の棄却:
  - 80.6% - 96.7% (SKのみ)
  - 91.5% - 94.5% (SK+T2K)

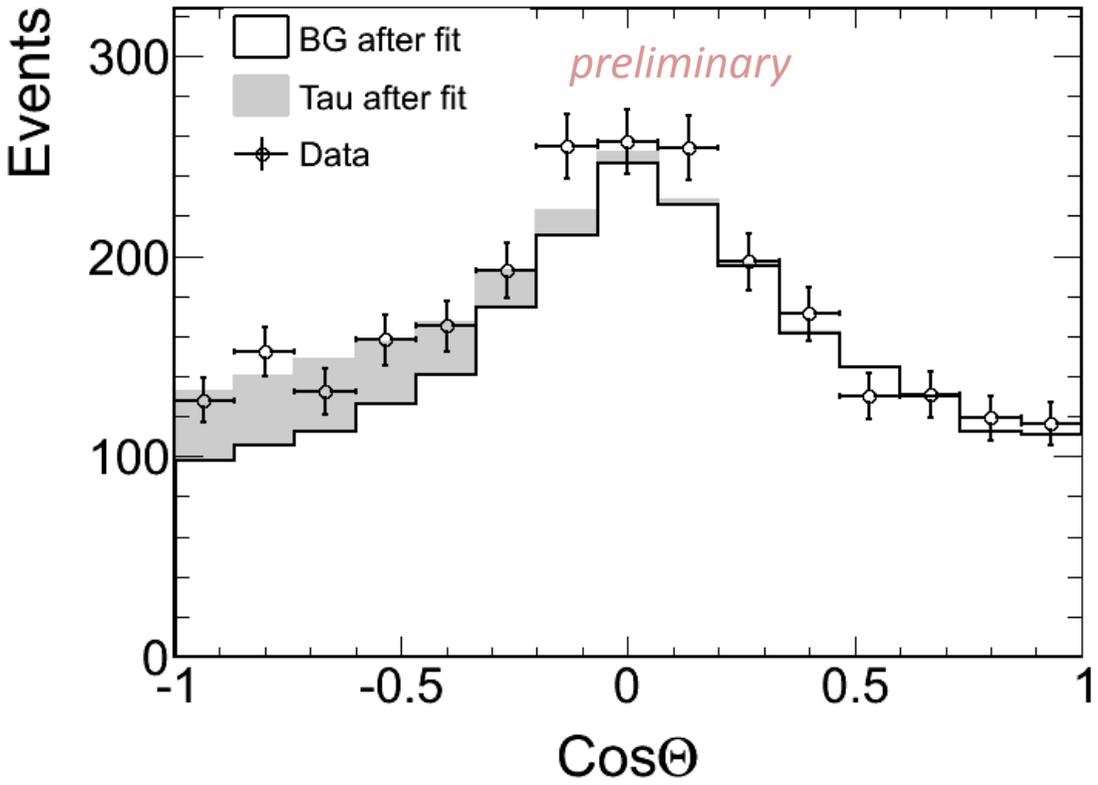
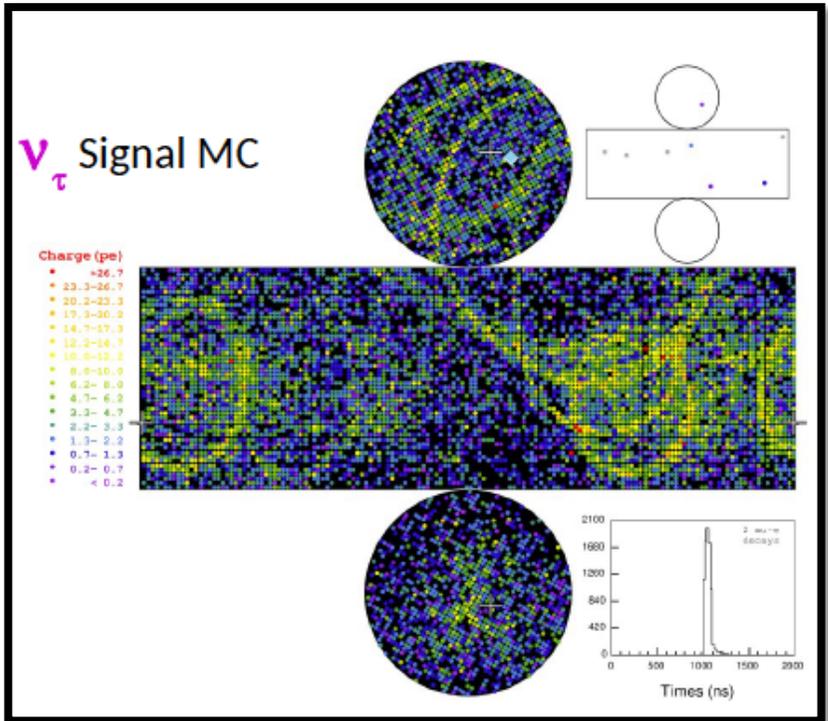
# Evidence for $\nu_\tau$ Appearance at Super-K

Simultaneous fit of systematic errors



$\alpha = 0$ , no  $\nu_\tau$

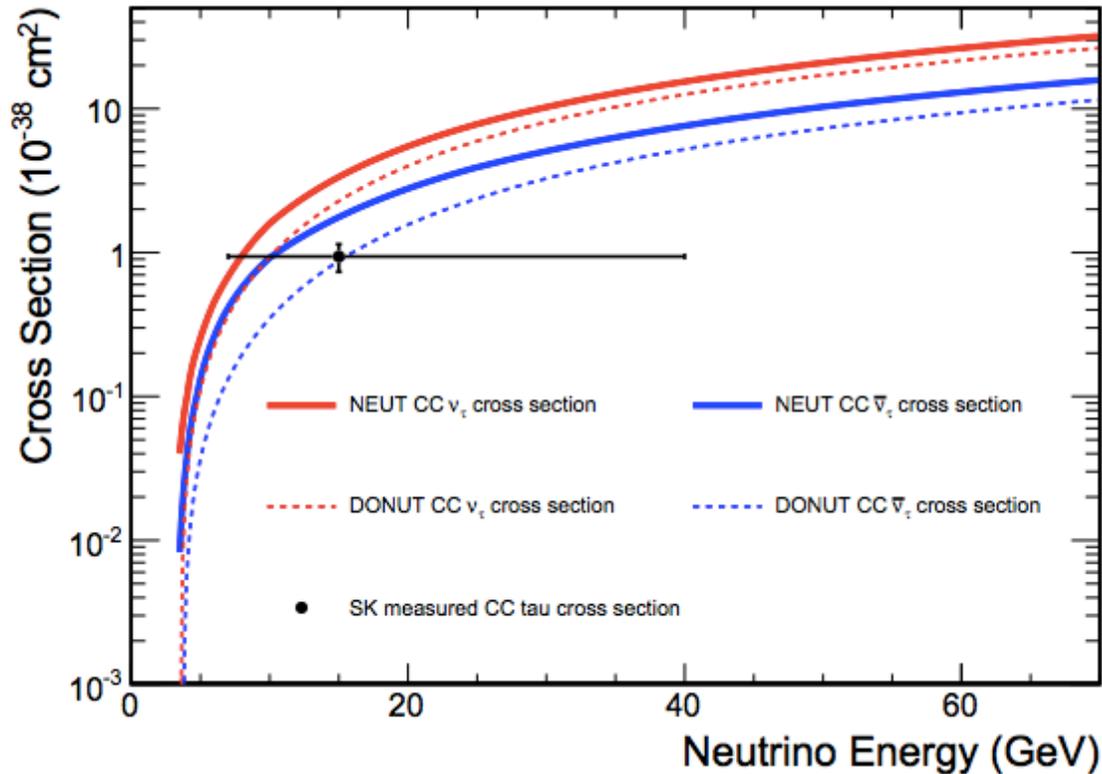
$$Data = PDF_{BG} + \alpha \times PDF_{tau} + \sum \epsilon_i \times PDF_i$$



Best fit  $\alpha = 1.47 \pm 0.32$  (tot.)

This corresponds to a significance of  $4.6\sigma$  for rejecting the no-tau hypothesis

# Flux-Averaged $\nu_\tau$ Cross Section Measurement



$$\sigma_{measured} = S_\tau \times \langle \sigma_{theory} \rangle$$

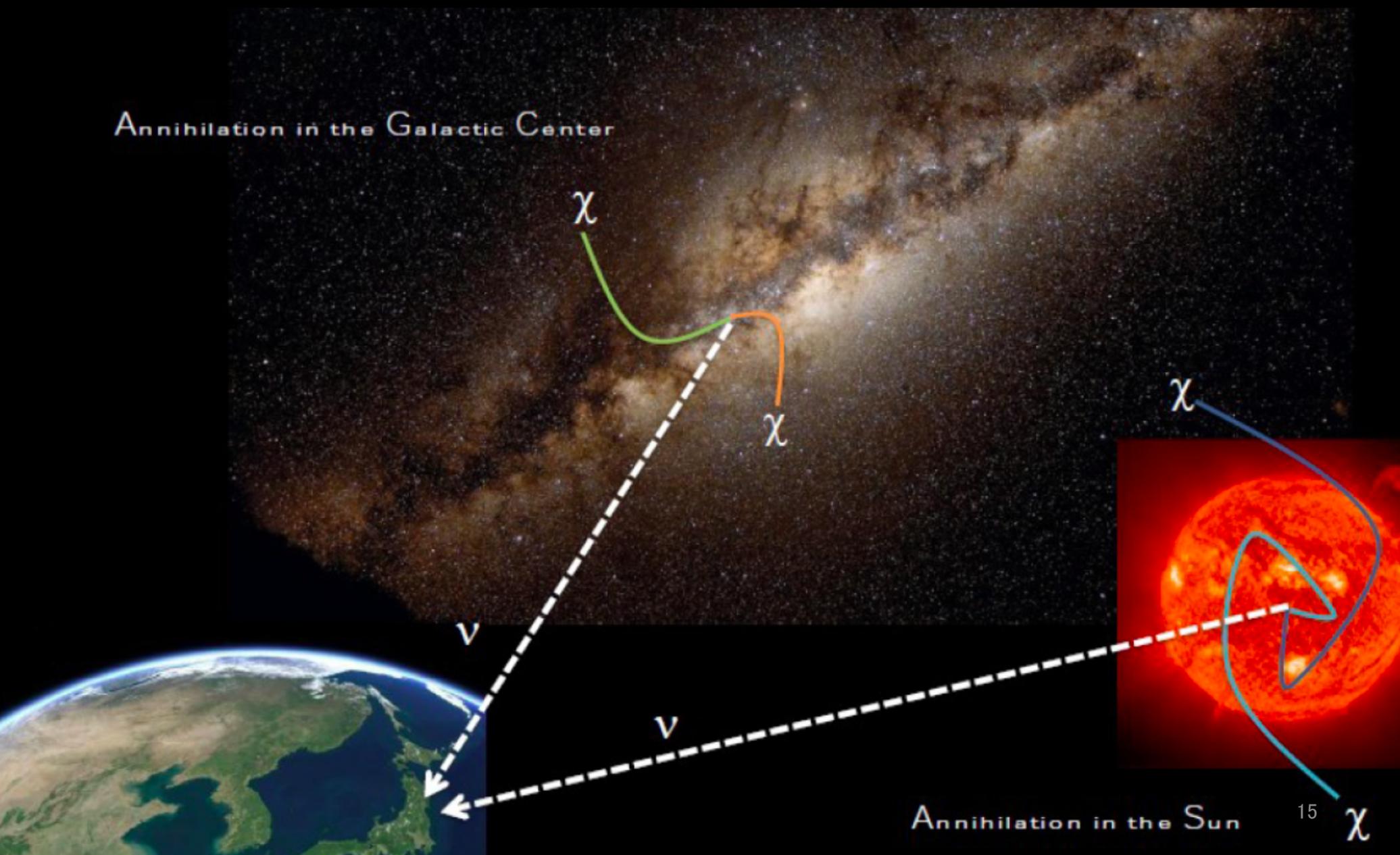
- $S_\tau$  is a scaling factor and  $\langle \sigma_{theory} \rangle$  is the flux-averaged theoretical CC  $\nu_\tau$  cross-section used in NEUT
- In this case  $S_\tau = \alpha$  so

$$\sigma_{measured} = (1.47 \pm 0.32) \times \langle \sigma_{theory} \rangle$$

- The flux-averaged theoretical cross-section is calculated to be  **$0.64 \times 10^{-38} \text{ cm}^2$  between 3.5 GeV and 70 GeV**

- フラックスで平均した断面積測定が $1.5\sigma$ 程度で理論値と一致
  - 理論値:  $0.64 \times 10^{-38} \text{ cm}^2$  (3.5-70 GeV)
  - データ:  $0.94 \pm 0.2 \times 10^{-38} \text{ cm}^2$  (3.5-70 GeV)
- DONUT実験の測定(DISのみと仮定)ともconsistent

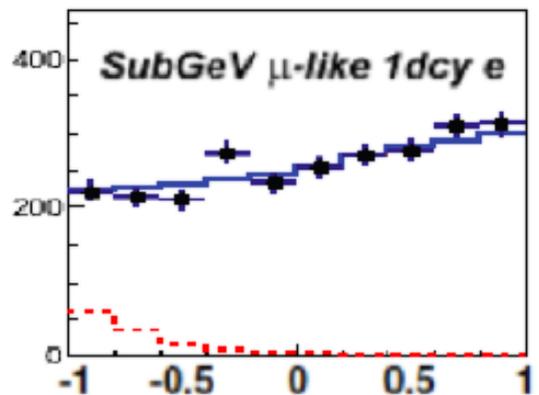
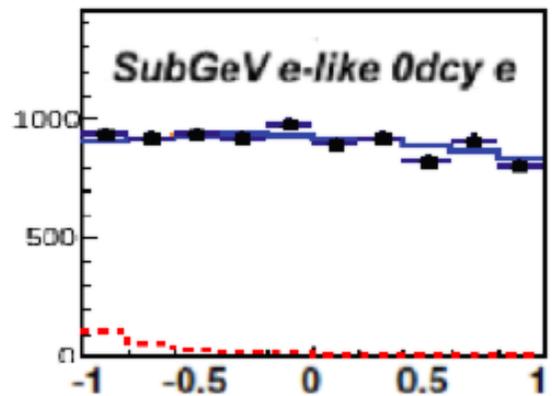
# 間接的暗黑物質探索



# 間接的暗黑物質探索

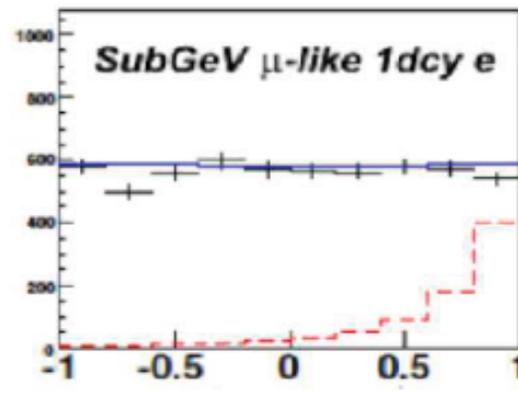
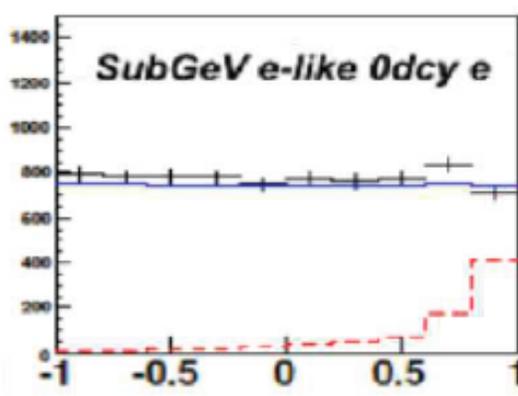
A

**Earth WIMP search**  
diffuse search



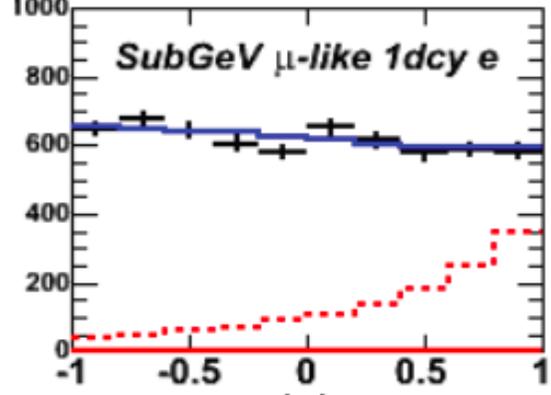
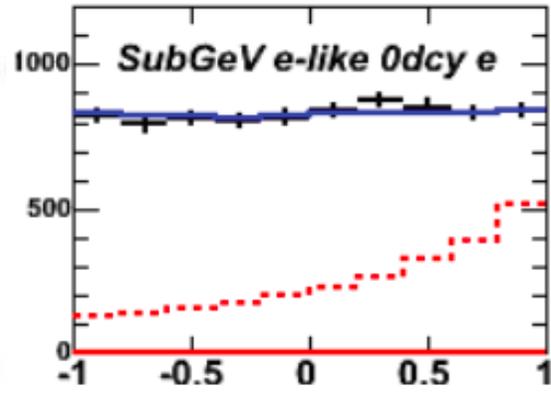
↑  $\cos\theta_{\text{zenith}}$  ↓

**Solar WIMP search**  
point-like search



$\cos\theta_{\text{sun}}$

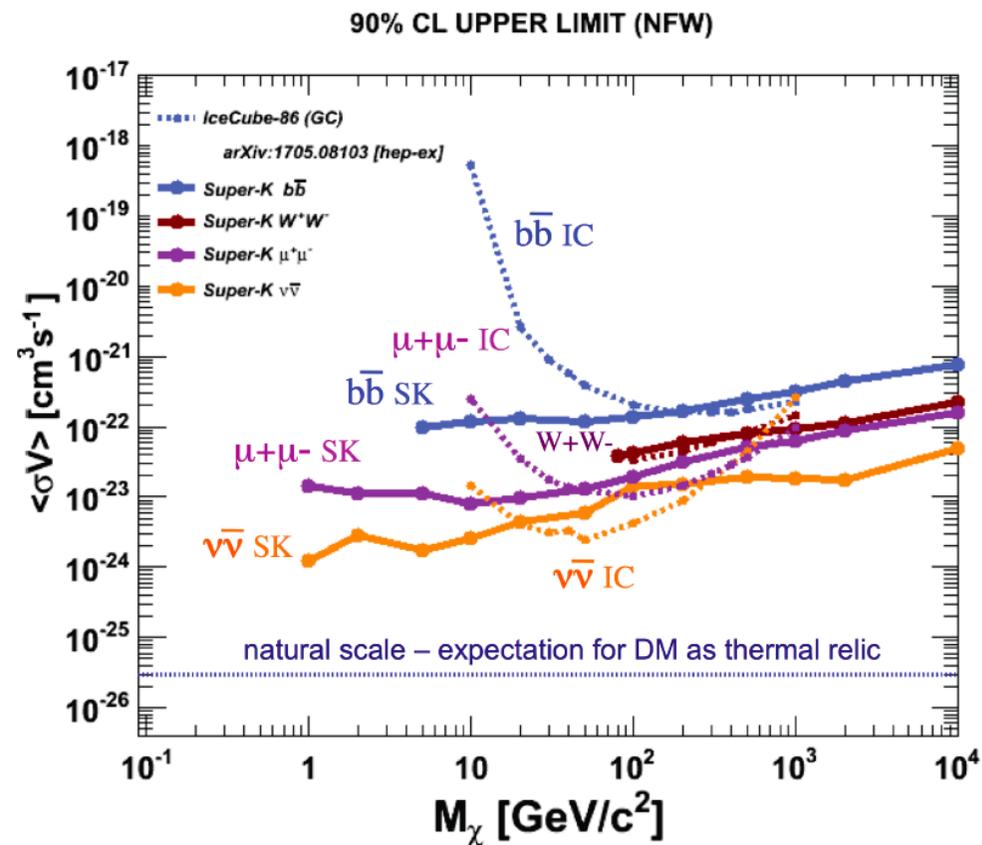
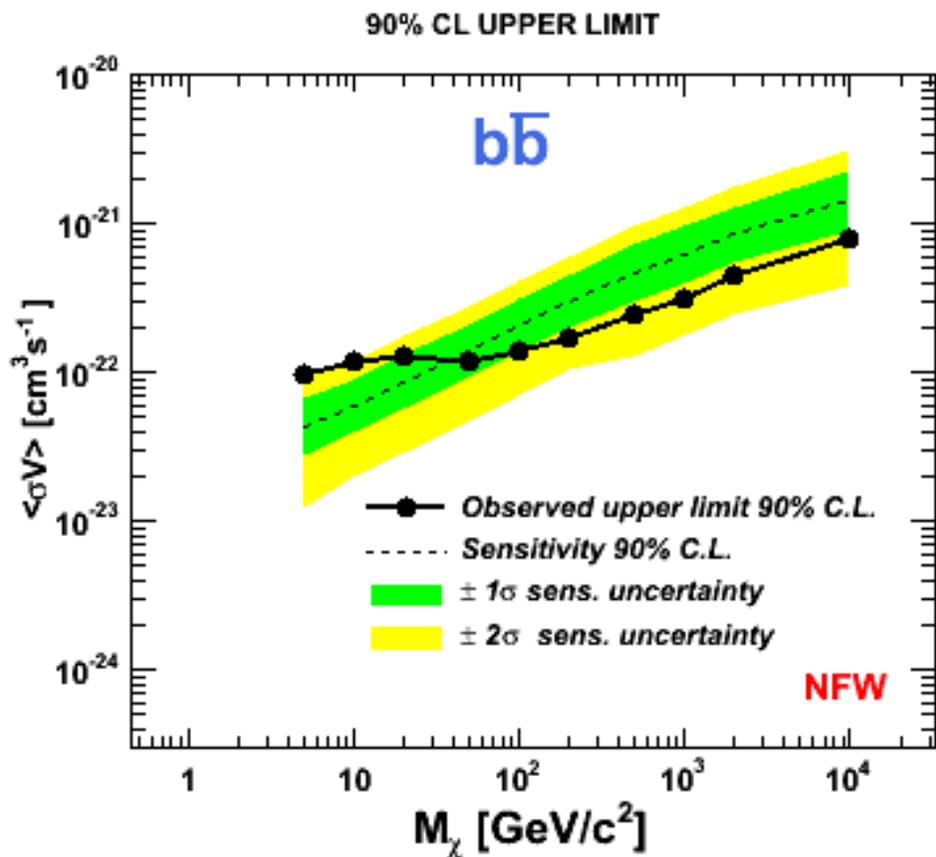
**Galactic WIMP search**  
diffuse search



↑  $\cos\theta_{\text{GC}}$  ↓

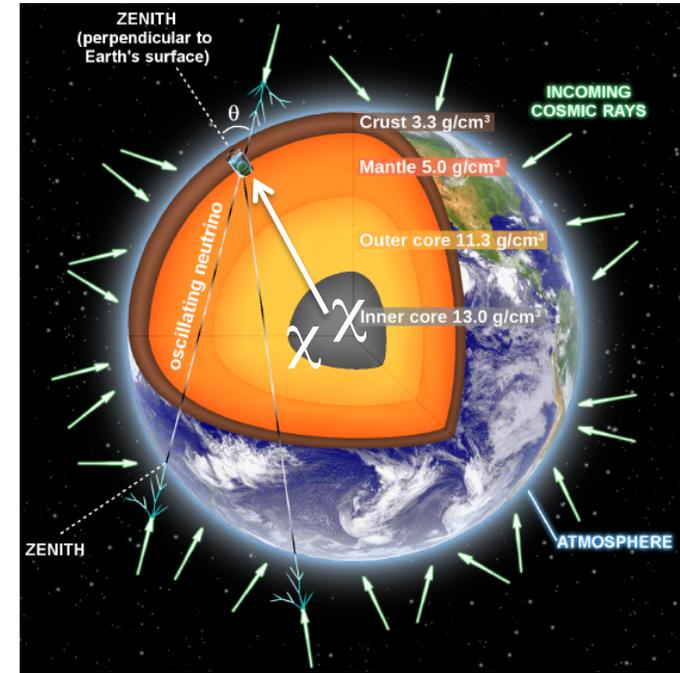
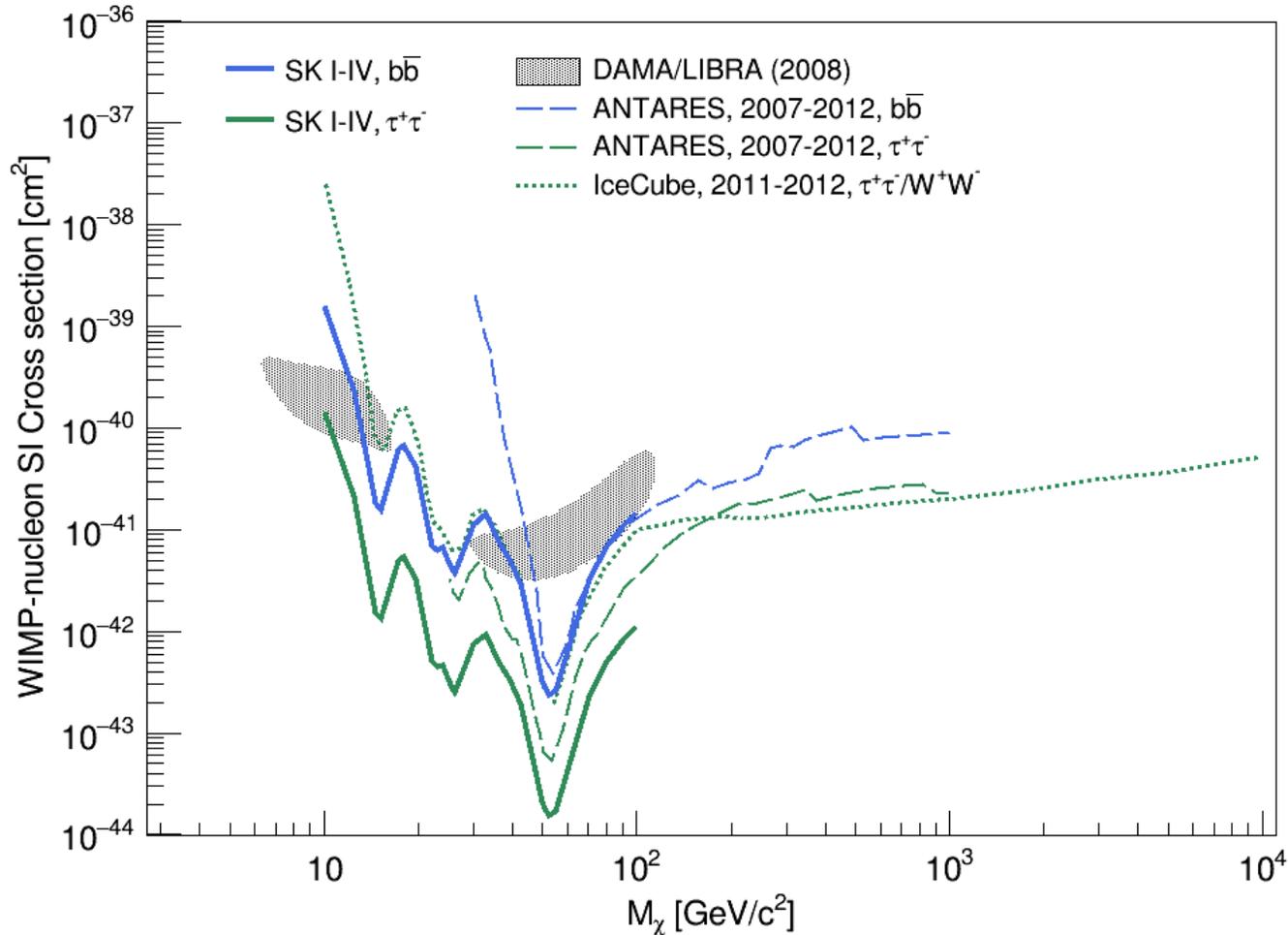
Annihilation in the Sun

# 銀河中心における対消滅するWIMP由来



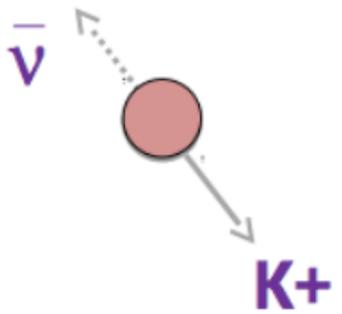
- 大気ニュートリノBGをうわまるデータの証拠なし
- 低質量領域では、もっとも厳しい制限

# 地球内部における対消滅するWIMP由来



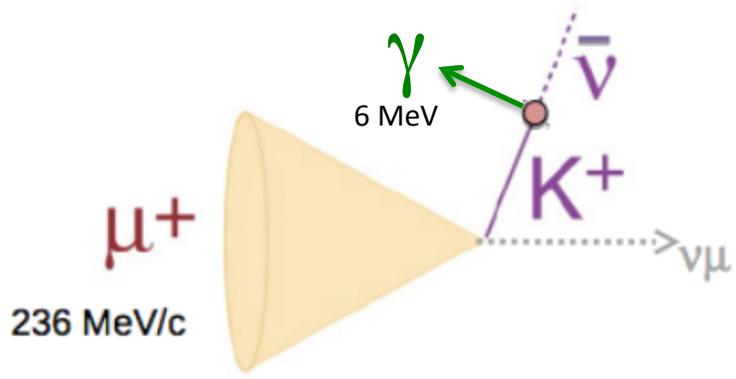
- 大気ニュートリノBGをうわまるデータの証拠なし
- 低質量領域では、もっとも厳しい制限

# 陽子崩壊： $\nu K^+$



- $K^+$  momentum is 340 MeV/c
  - Below Cherenkov threshold (749 MeV/c)
- However,  $K^+$  experiences no nuclear interactions and escapes
- Strategy: search for evidence of isolated  $K^+$  via its decays
- Cannot reconstruct the original proton mass

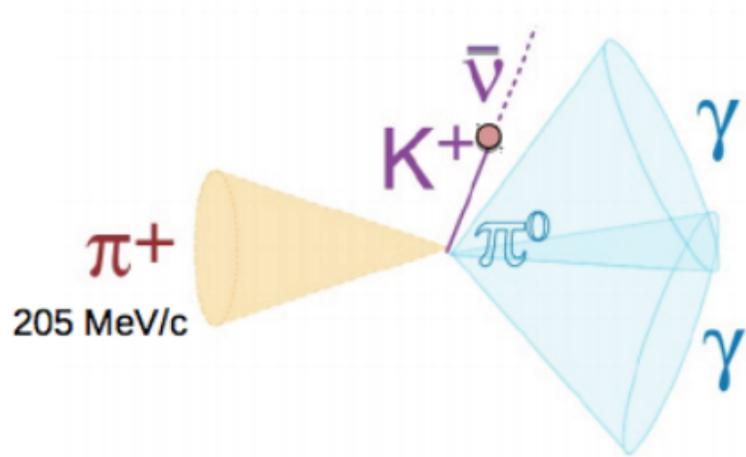
$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  BR: 65%



**Search Methods**

- 1) Nuclear deexcitation  $\gamma$ ,  $\mu$ , and decay  $e^+$
- 2) Monochromatic  $\mu$  from  $K^+$  decay

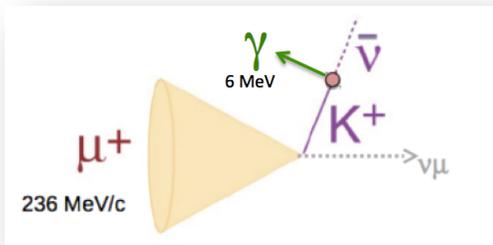
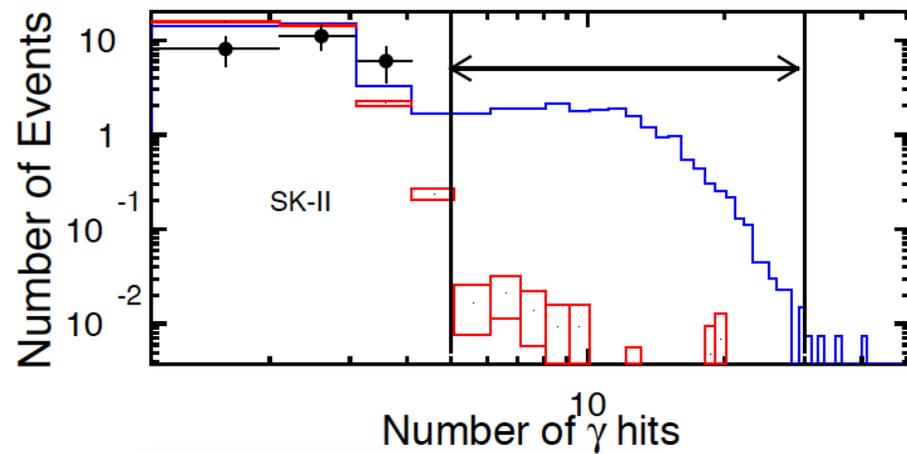
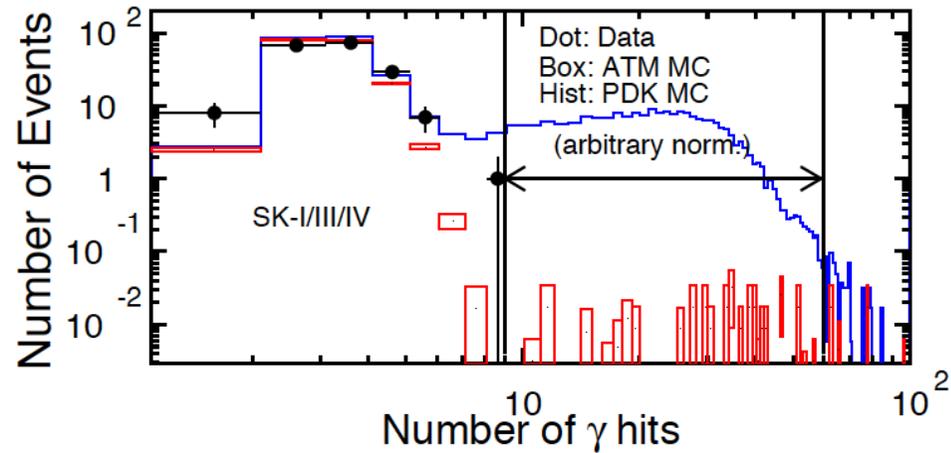
$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$  BR: 21%



**Search Method**

- 3)  $\pi^+$  and two  $\gamma$  from  $\pi^0$  decay

# 陽子崩壊: $\nu K^+$ : 結果



SK4			
	Eff (%)	BG (ev)	Obs (ev)
Pr.g	$9.4 \pm 0.1$	0.112	0
$p^+p^0$	$9.6 \pm 0.1$	0.13	0

- どのチャンネルでも候補事象なく
- 陽子寿命下限を更新:

$$\tau > 8.0 \times 10^{33} \text{ years}$$

(349kton-yr exposure)

- $e+\pi^0$  の場合:  $1.6 \times 10^{34}$  years

# まとめ

- SKの大気ニュートリノがNormal Hierarchyを 80.6% – 96.7%で示唆
  - T2Kの制限を加え： 91.5% - 94.5%に
- $\nu_\tau$  を4.6 $\sigma$ で見えて、始めて flux-averaged CC断面積を測定
  - $0.94 \pm 0.2 \times 10^{-38} \text{ cm}^2$  (3.5-70 GeV)
- 間接的WIMP探索を行った結果、銀河中心由来のexcessも地球内部由来のexcessもない
- 陽子崩壊モード  $p \rightarrow nK^+$ を探索し、候補事象が無い
  - 寿命下限を更新：  $\tau > 8.0 \times 10^{33} \text{ years}$