

スーパー・カミオカンデ実験

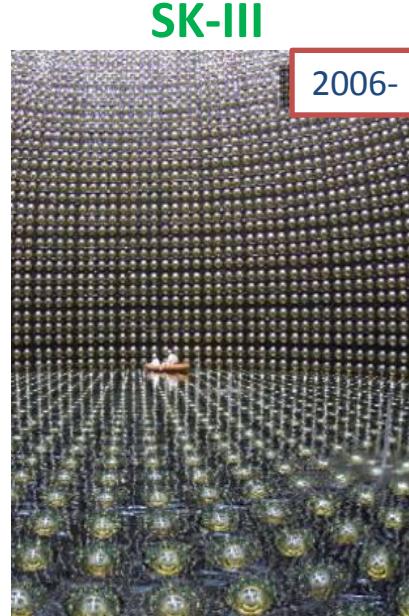
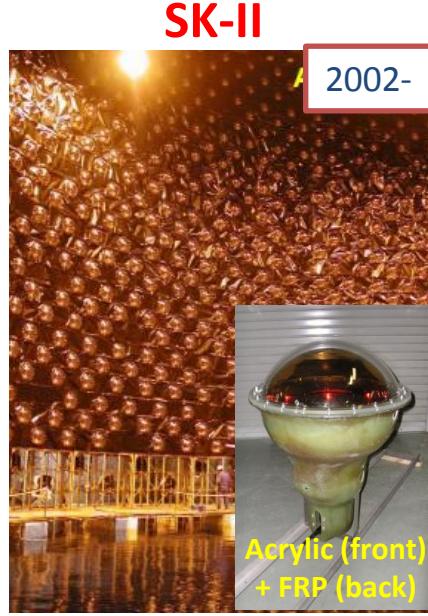
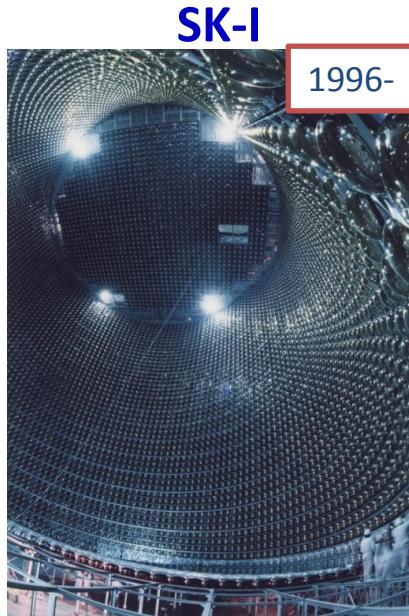


梶 裕志
東京大学宇宙線研究所
宇宙ニュートリノ観測情報融合センター

今年の動向

SK-IV dataで最初の結果を発表
 SK-I,II,III dataでも多数の解析結果を発表
 T2K実験のphysics runが1月から始まった

SK history



Threshold E>5.0 MeV

E>7.0 MeV

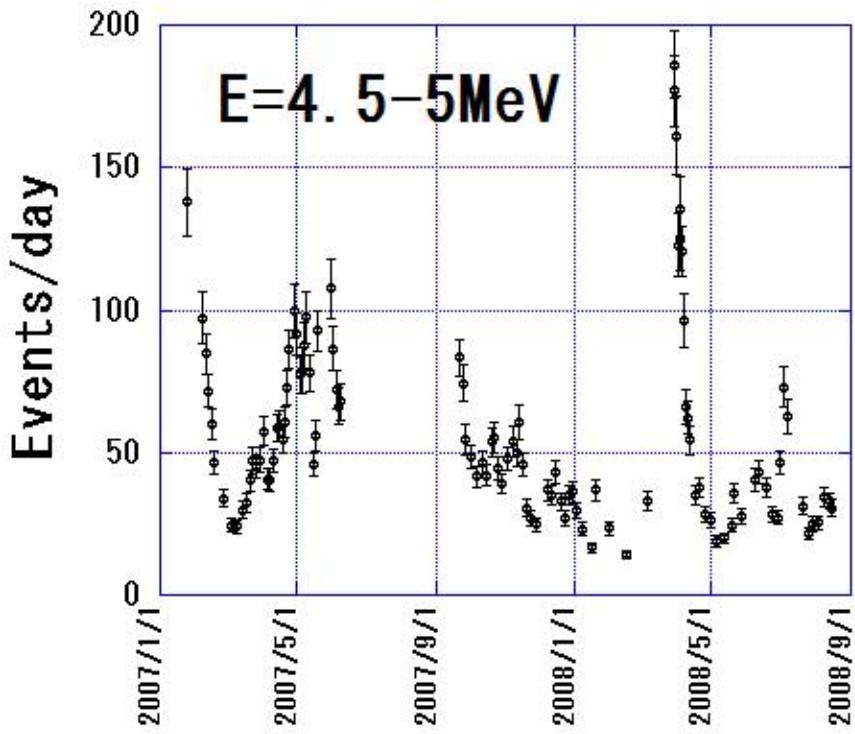
E>4.5 MeV

Water temperature

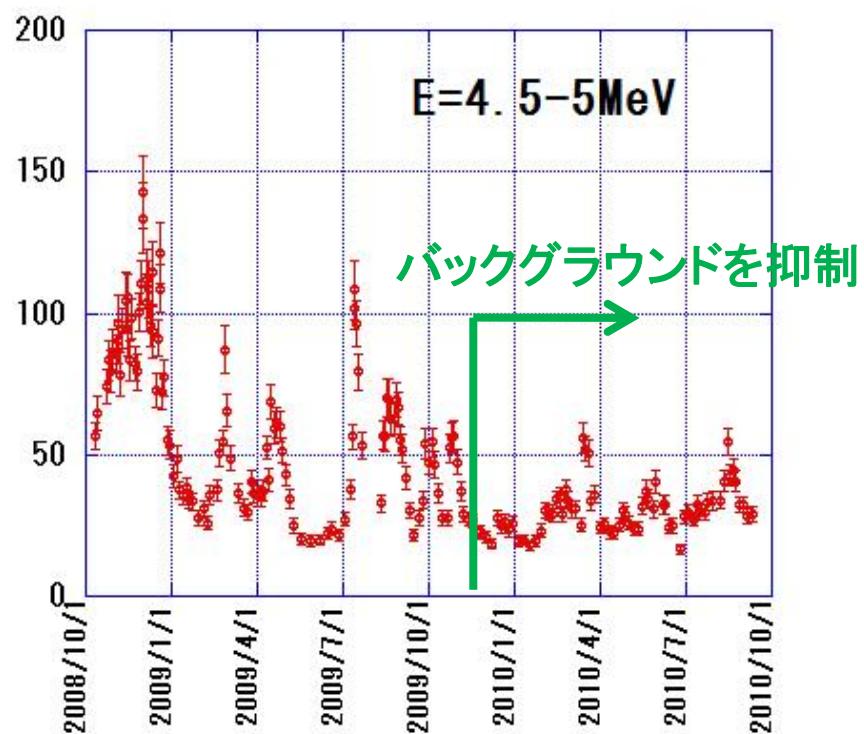
Rnなど不純物はタンク底に沈殿
対流を防ぐために水温コントロールが大事

Feedback systemを2009年11月に導入
タンクに流れる水温により
冷却水量をコントロール

SK3

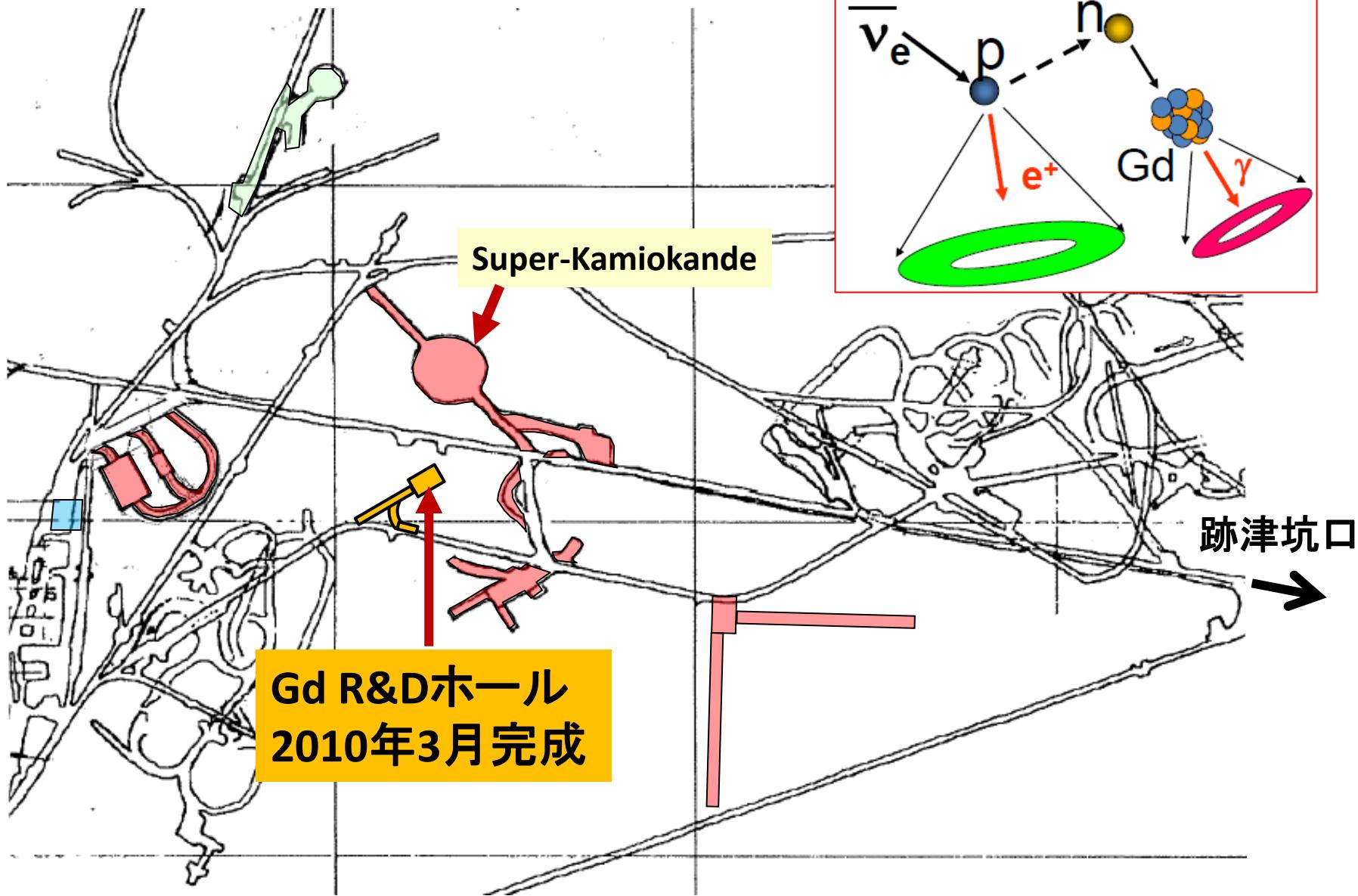


SK4



SK-IVの中でもこの1年は低バックグラウンド

GADZOOKS!

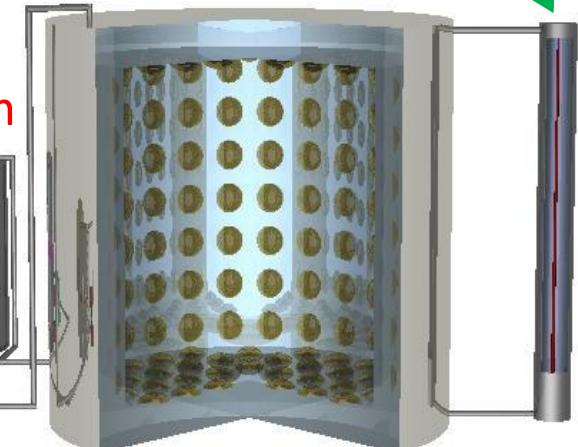
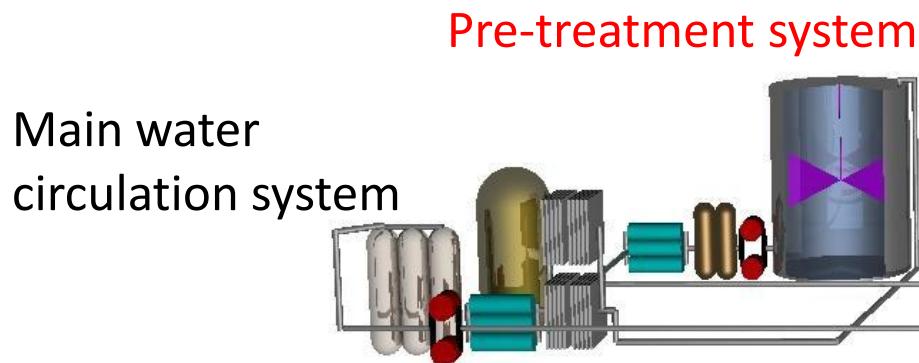




Gd R&D hall

Transparency measurement
by UDEAL

0.2% Gd water in
200 ton water tank
with 240 PMTs



すべての機器がインストール済み (先週金曜日終了)

来年は本格的な活動を予定

UDEALの動作試験(純水)終了

メインタンク純水循環試験



Gd除去システム設置



メインタンクGd水循環試験



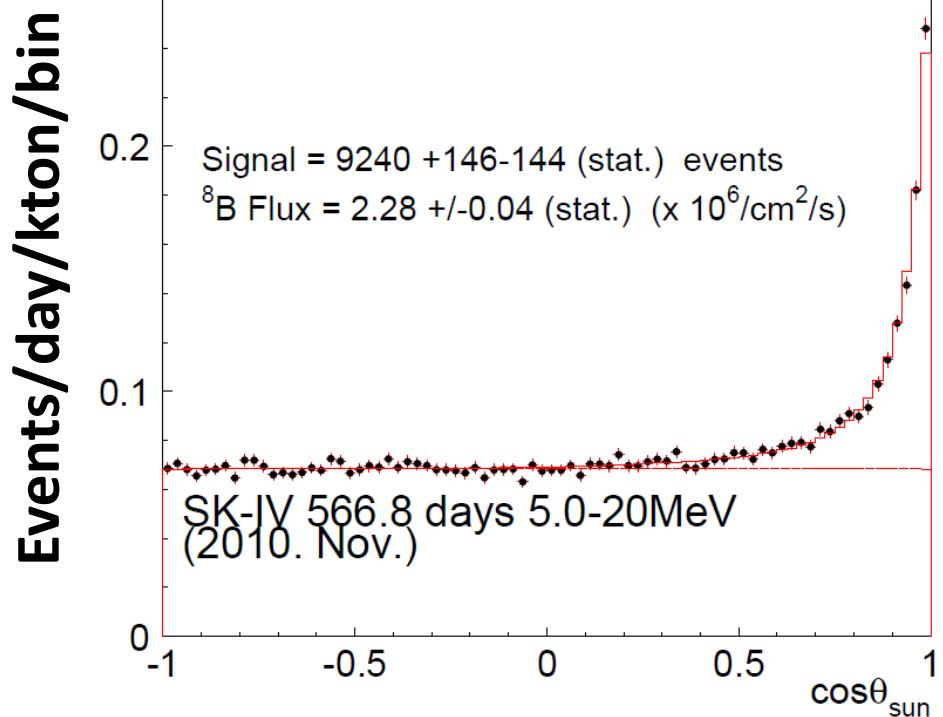
メインタンクPMT取りつけ

2011年夏にここまで終了予定
秋から実験開始?

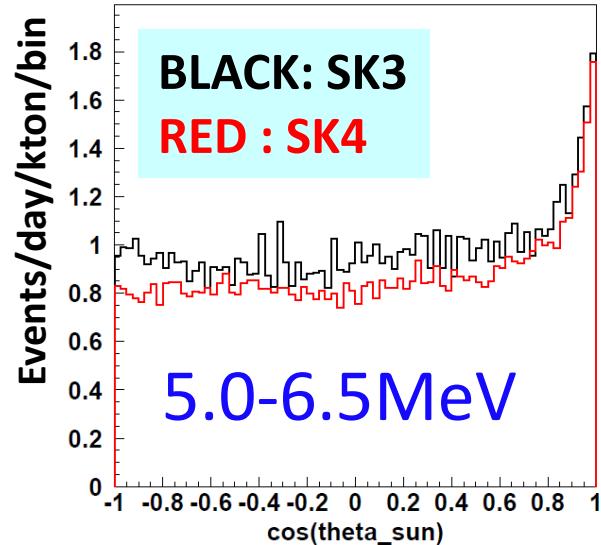
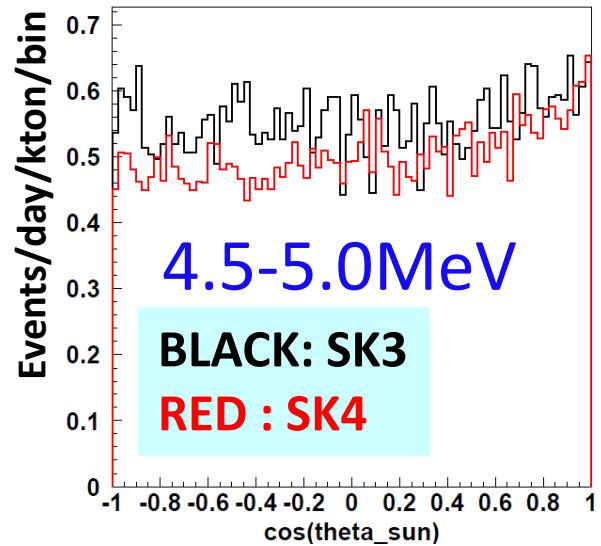
物理解析

- 太陽、大気ニュートリノ解析
 - 最新結果 (SK-IV)
 - ニュートリノ振動解析 (SK-I,II,III)
dominant効果 \Rightarrow sub-dominant効果
- Tau appearance
- Super nova relic
- Nucleon decays and others

SK-IV solar neutrino ${}^8\text{B}$ flux



	${}^8\text{B}$ flux ($10^6/\text{cm}^2/\text{s}$)	Comments
SK-I	$2.38 \pm 0.02 \pm 0.08$	
SK-II	$2.41 \pm 0.05 + 0.16 / -0.15$	
SK-III	$2.32 \pm 0.04 \pm 0.05$	Submitted to PRD
SK-IV	2.28 ± 0.04	Preliminary with 567 days

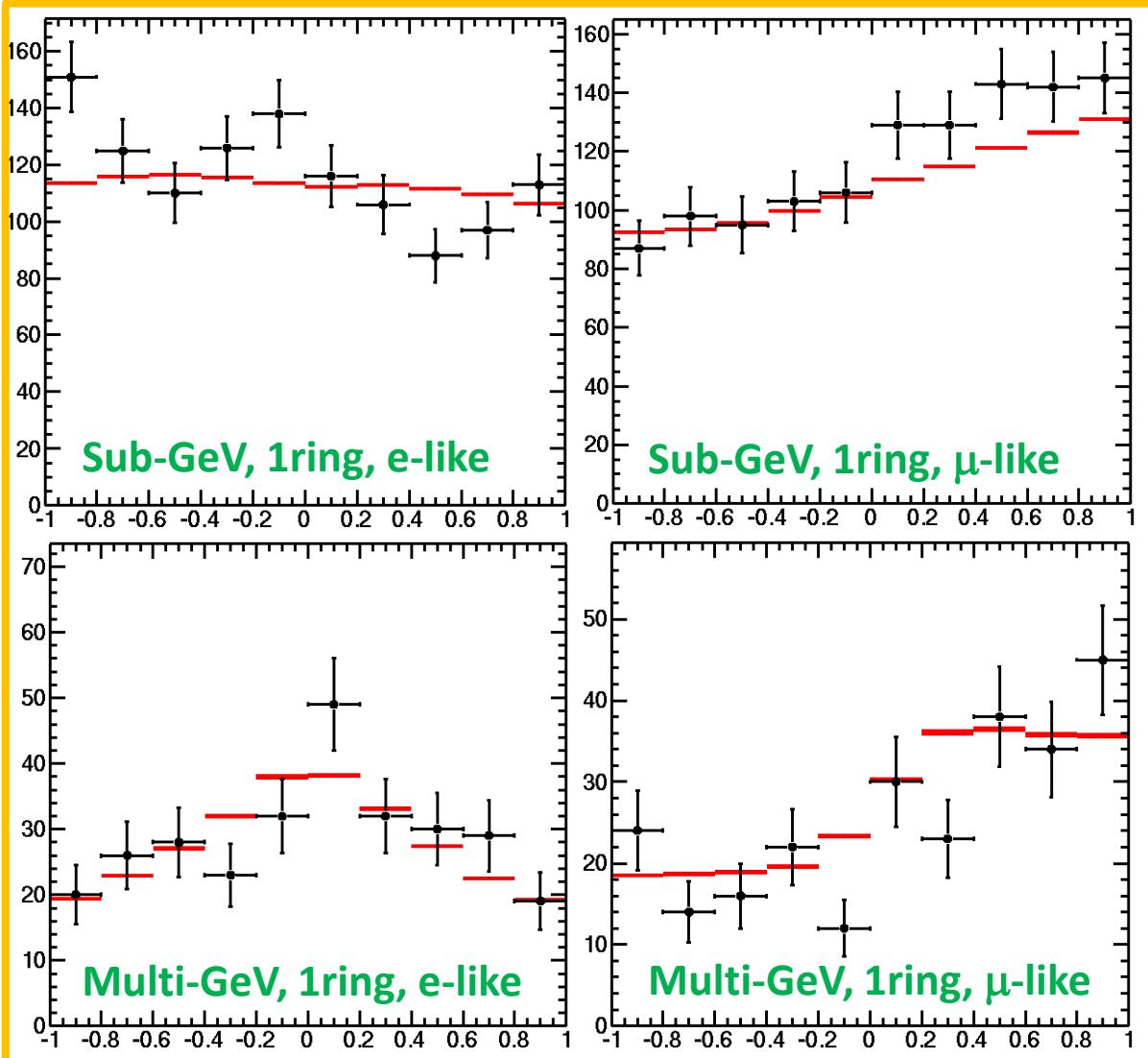


SK-IVにおいてBGが改善

SK-IV大気ニュートリノ

SK-IV data (535.15 days)

SK-IV MC $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動



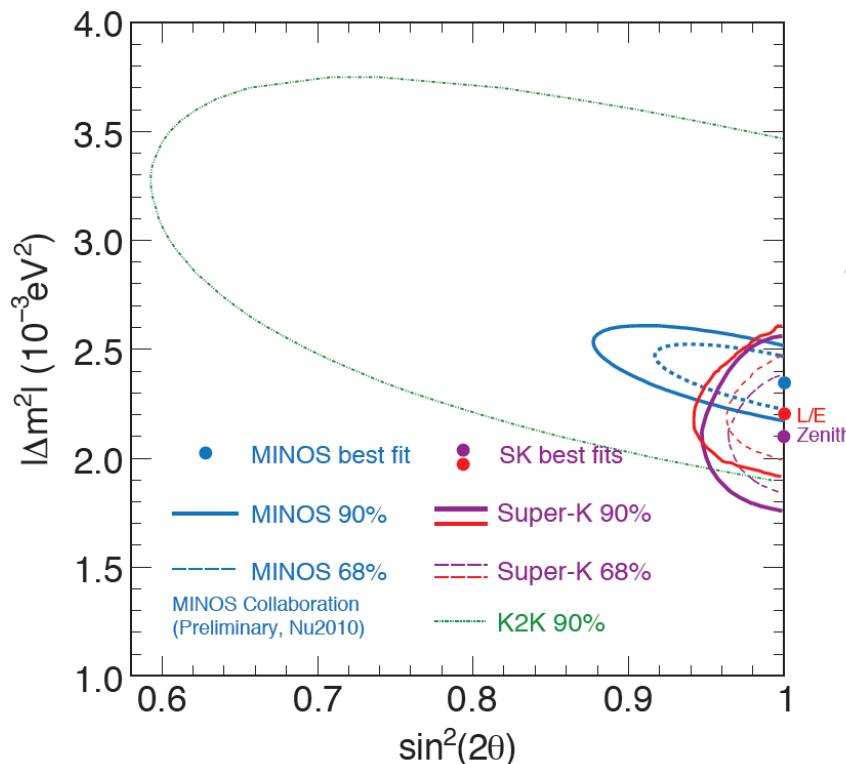
$\cos\theta_{\text{zenith}}$

SK-IV dataは問題なし。振動解析は現在進行中。

ニュートリノ振動dominant効果

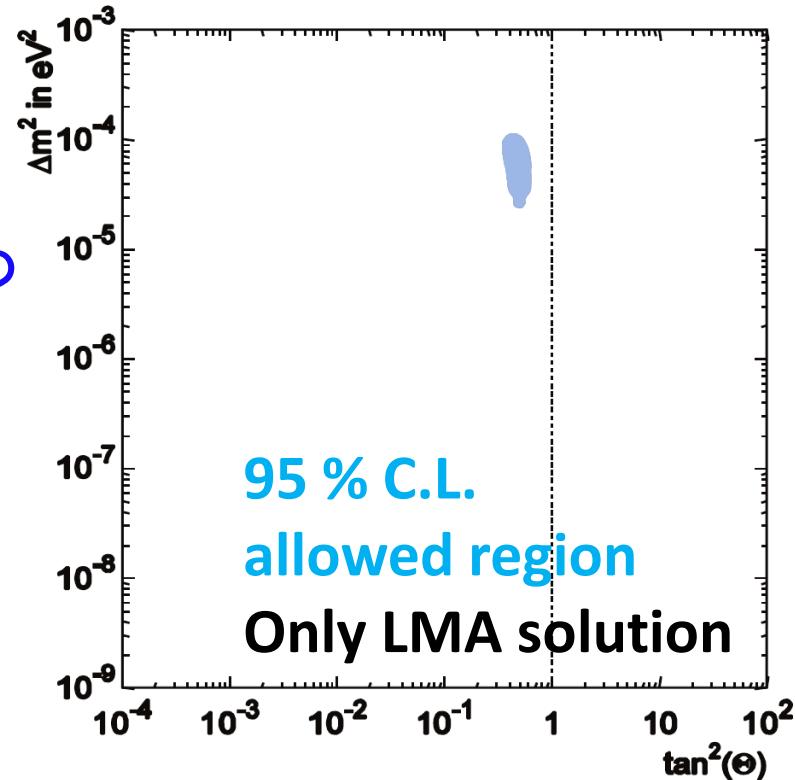
$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & -s_{13}e^{i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Atmospheric ν 2-flavor analysis (θ_{23} , Δm^2_{23})



どちらも
SK-I,II,IIIの
解析結果

Solar ν 2-flavor analysis (θ_{12} , Δm^2_{12})

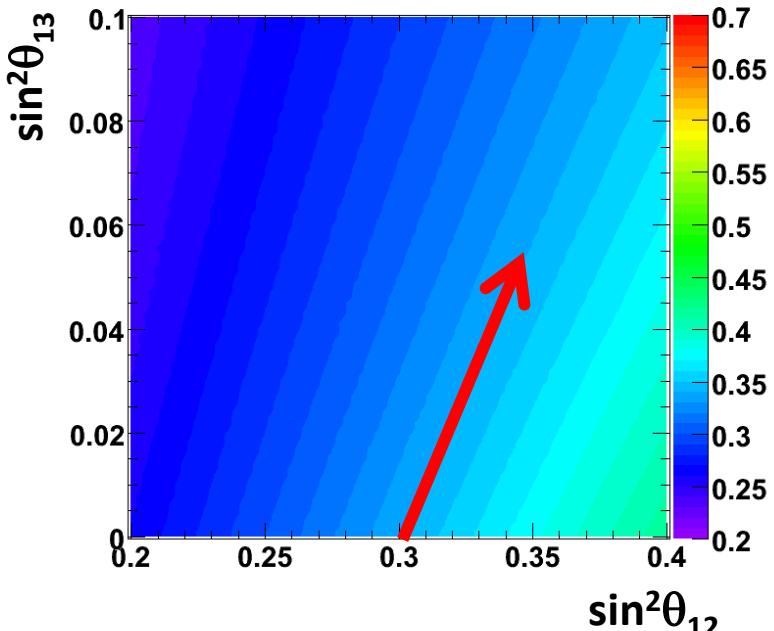


太陽ニュートリノsub-dominant効果

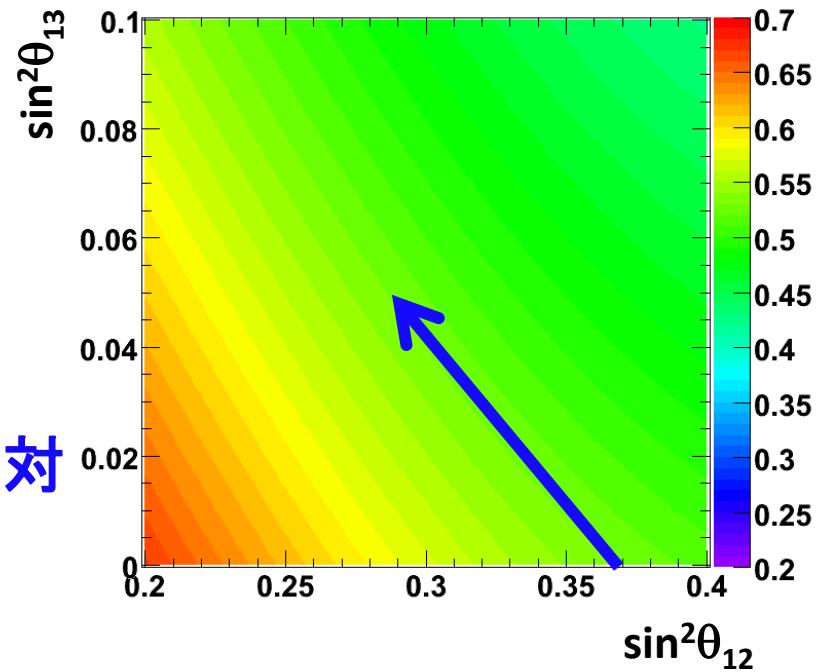
Solar 3-flavor

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = (1 - \sin^2 \theta_{13}) \cdot \sin^2 \theta_{12}$$

物質効果により θ_{13} 項が現れる



線上の($\sin^2 \theta_{12}, \sin^2 \theta_{13}$)の組み合わせに同じprobabilityが許される



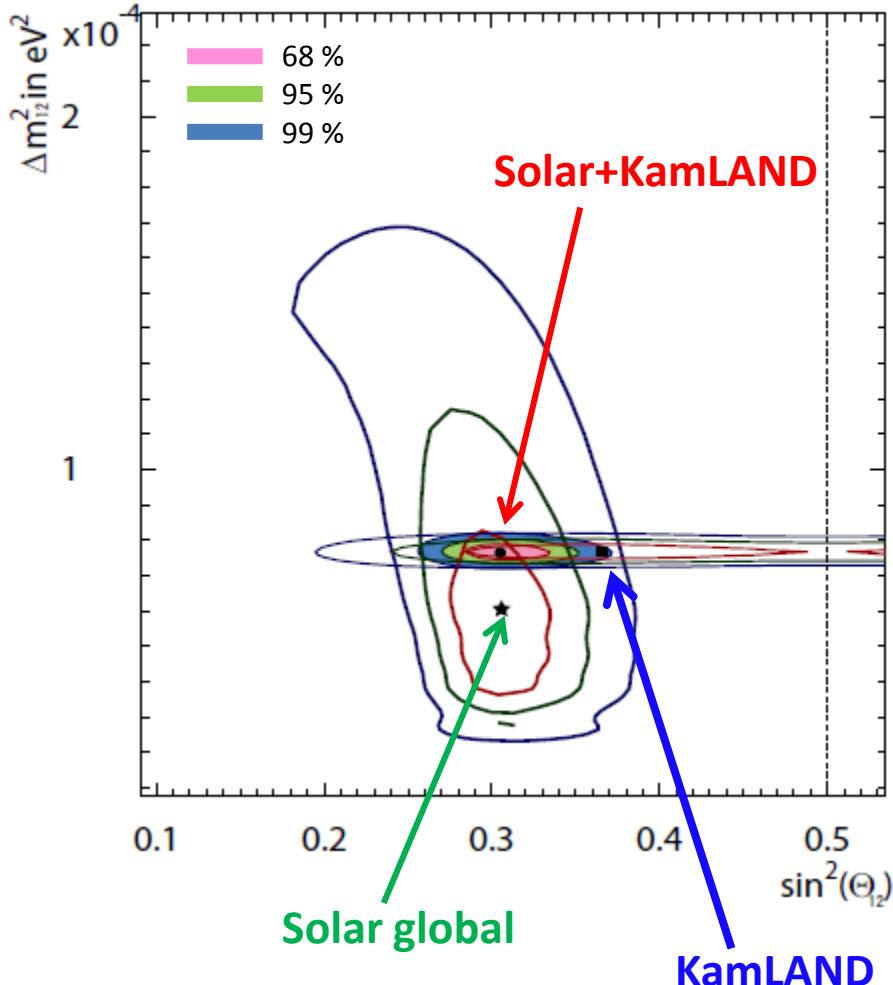
Correlationの方向はsolarと反対

KamLAND 3-flavor

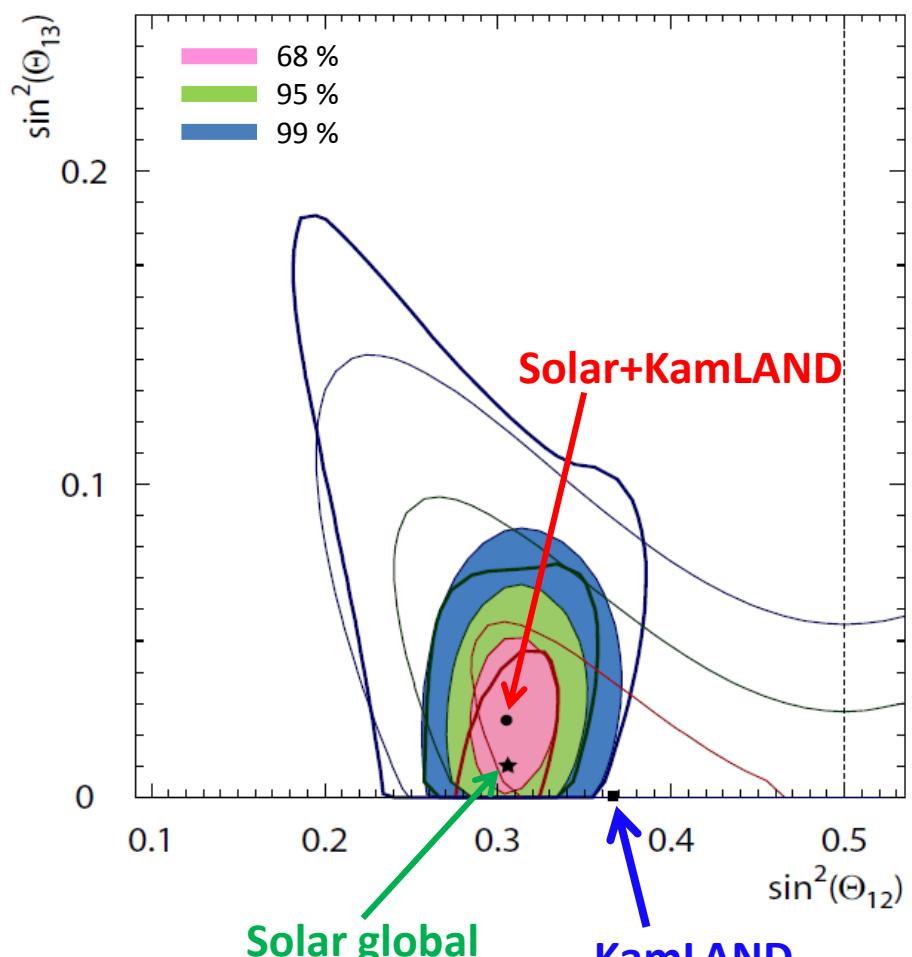
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = (1 - \sin^2 \theta_{13}) \cdot (1 - 4 \sin^2 \theta_{12} \cdot \cos^2 \theta_{12} \cdot \sin^2 (\Delta m^2 L / 4E))$$

Solar+KamLAND analysis

SK-I,II,III result
Submitted to PRD



Solarの $\sin^2\theta_{12}$, KamLANDの Δm_{12}^2 付近にBest-fit point



Non-zero θ_{13} がfavor

Best fit: $\sin^2 \theta_{13} = 0.025^{+0.018}_{-0.016} \Rightarrow <0.059$ at 95% C.L.

大気ニュートリノsub-dominant効果

Difference in # of electron events:

$$\Delta_e \equiv \frac{N_e}{N_e^0} \cong \Delta_1(\theta_{13}) \leftarrow \theta_{13} \text{ term (high energy)}$$

$$+ \Delta_2(\Delta m_{12}^2) \leftarrow \text{Solar term (low energy)}$$

$$+ \Delta_3(\theta_{13}, \Delta m_{12}^2, \delta) \leftarrow \text{Interference}$$

同じく物質効果で
(θ_{13} , θ_{12} , Δm_{12}^2 , δ_{CP})
を含む項が現れる

Full three flavor analysis

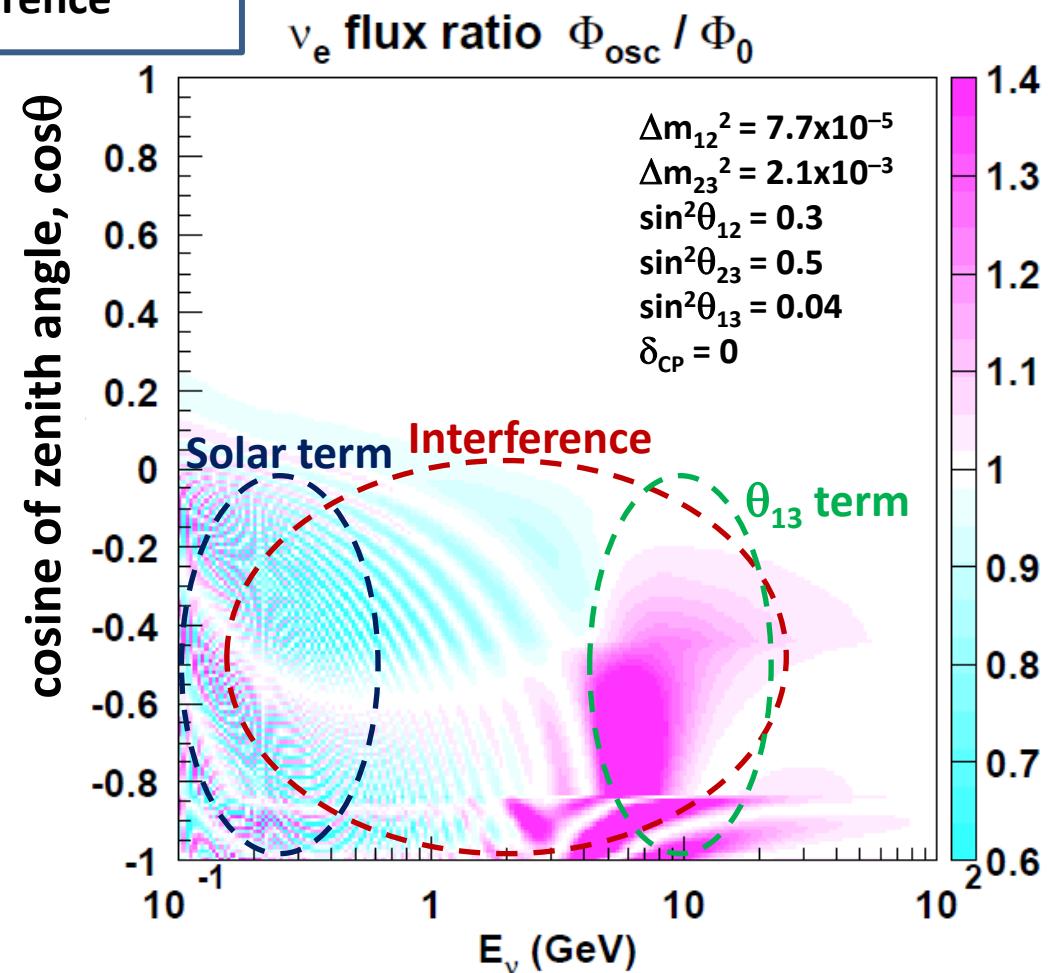
θ_{13} とCP phase δ_{CP} の効果を解析

Solar parameterは以下に固定

$$- \sin^2\theta_{12} = 0.304$$

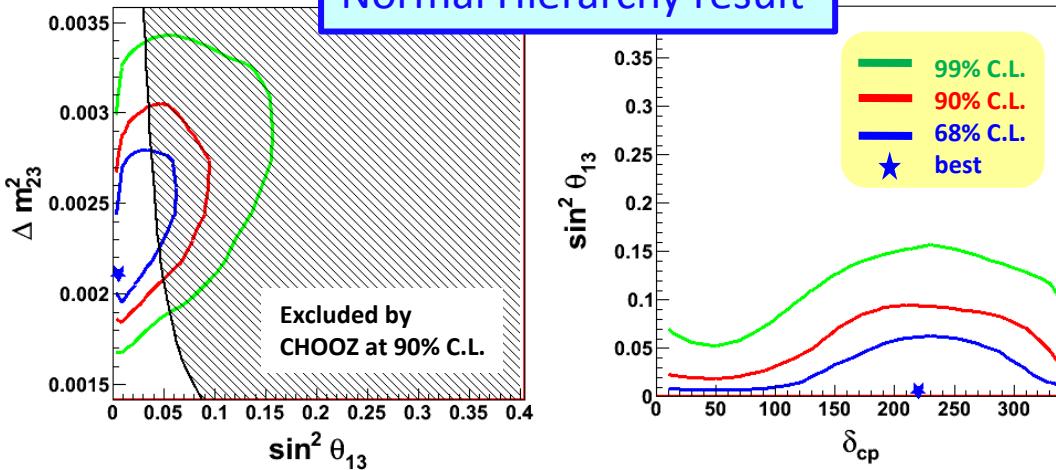
$$- \Delta m_{12}^2 = 7.66 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

4 parameter fitting
(θ_{23} , Δm_{23}^2 , θ_{13} , δ_{CP})



大気ニュートリノfull three flavor analysis

Normal Hierarchy result

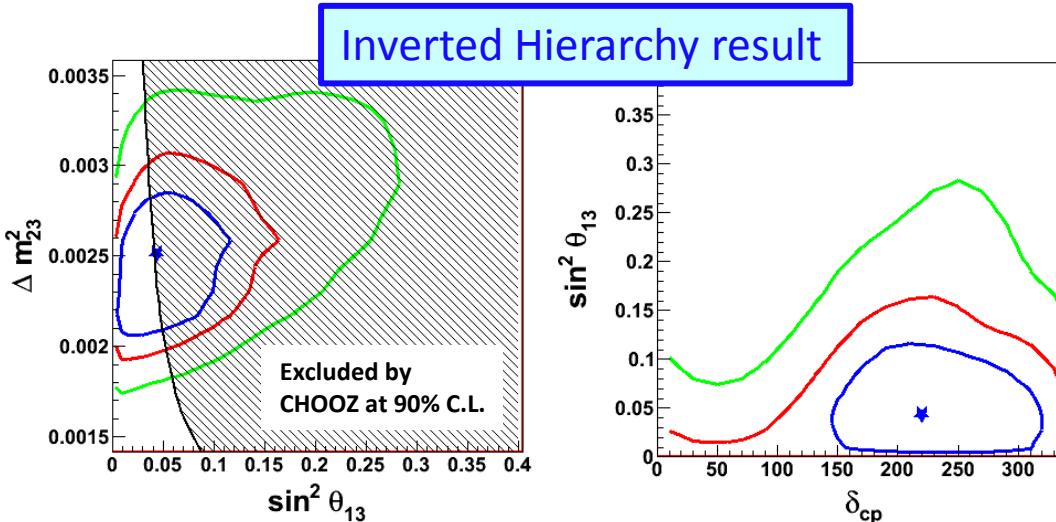


SK-I,II,III result
Preliminary

Normal hierarchy

	Best	90% C.L.
$\sin^2 \theta_{13}$	0.006	< 0.066
CP- δ	220°	-

Inverted Hierarchy result



Inverted hierarchy

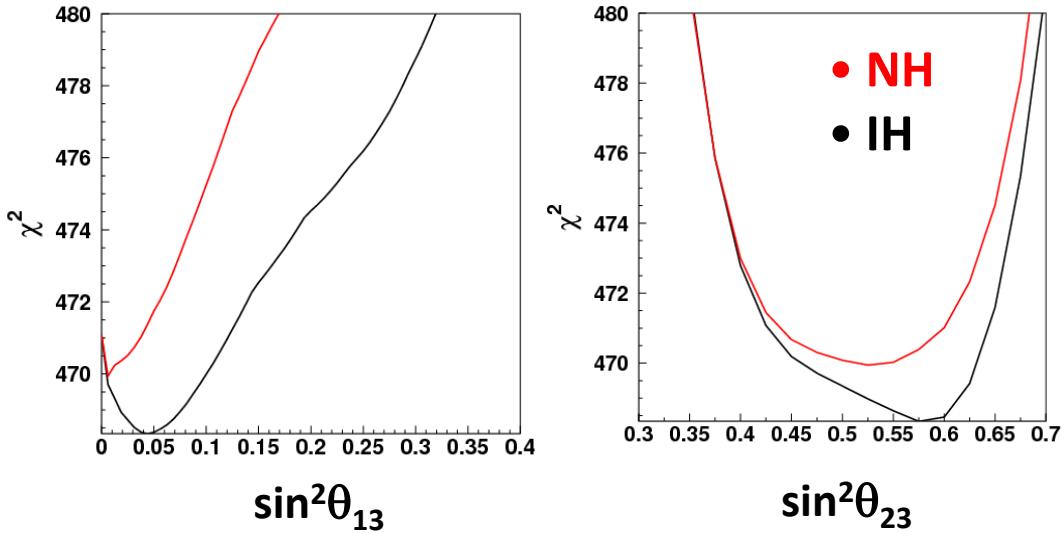
	Best	90% C.L.
$\sin^2 \theta_{13}$	0.044	< 0.122
CP- δ	220°	121.4 - 319.1°

θ_{13}, δ_{CP} ともに有限値は得られず。
 θ_{13} limitはSolar+KamLANDや
CHOOZの結果と矛盾しない。

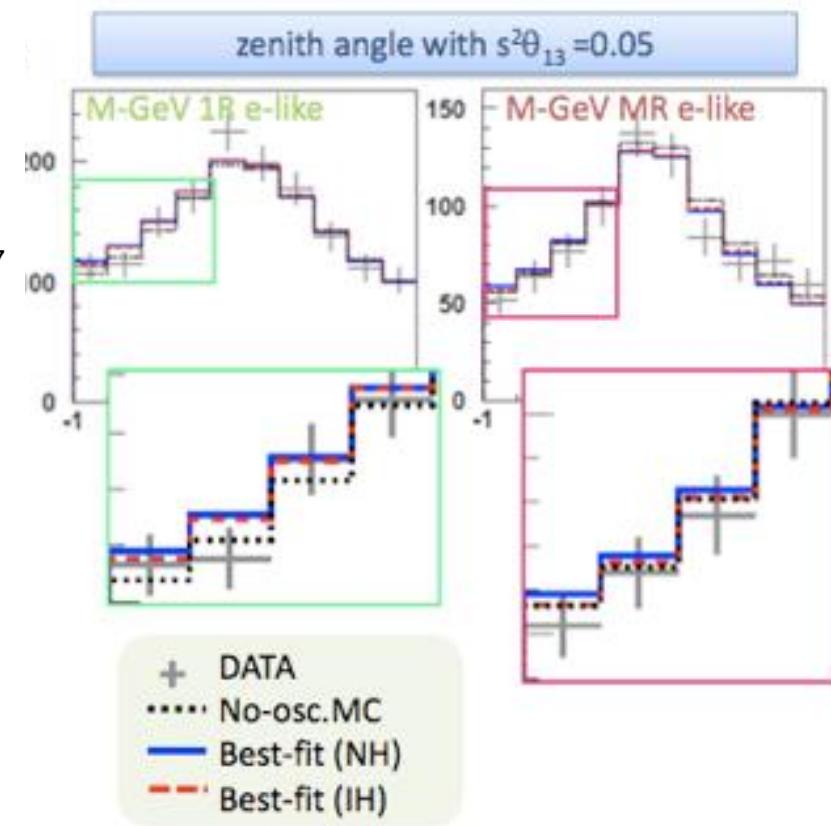
SKの大気ν sampleはCP phase δ_{CP} に感度を持っている

Mass hierarchy test

Normal, Inverted両方の場合の χ^2 を比較



$E > \sim 1\text{GeV}$ samples tend to favor inverted hierarchy.



Normal hierarchy (NH):

$$\chi^2_{\min}/\text{dof} = 469.94/416$$

Inverted hierarchy (IH):

$$\chi^2_{\min}/\text{dof} = 468.34/416$$

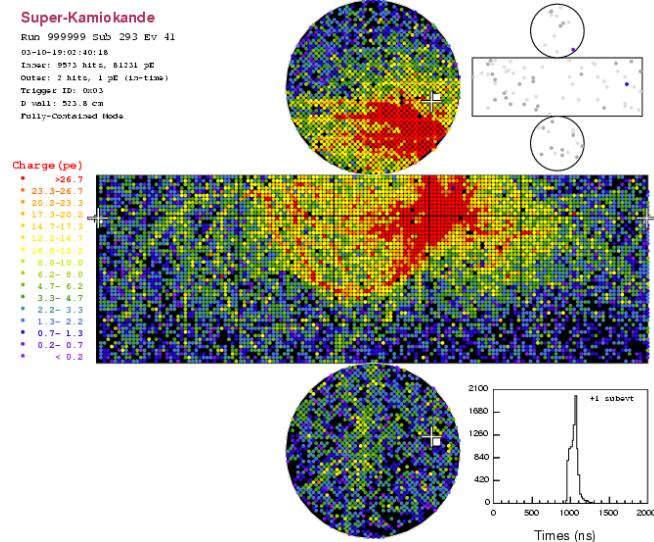
$$\rightarrow \Delta\chi^2 = 1.6$$

inverted hierarchy やや favorされている。
しかし優位な差ではない。

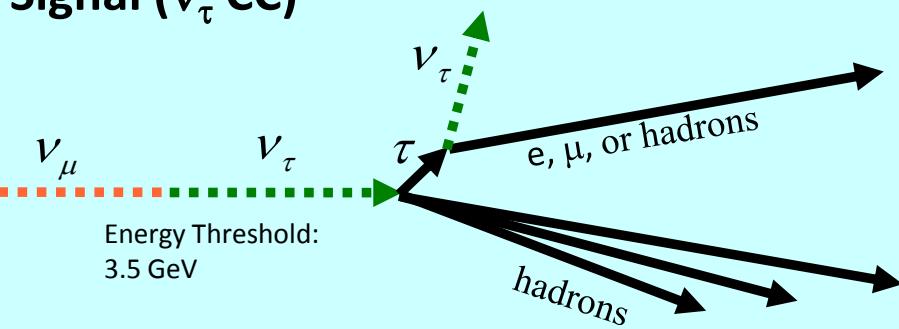
Tau appearance analysis

FCFV, $E_{\text{vis}} > 1330 \text{ GeV}$ sample

7つのvariableからNeural Networkを用いて
「tau candidate \leftrightarrow DIS」を判断

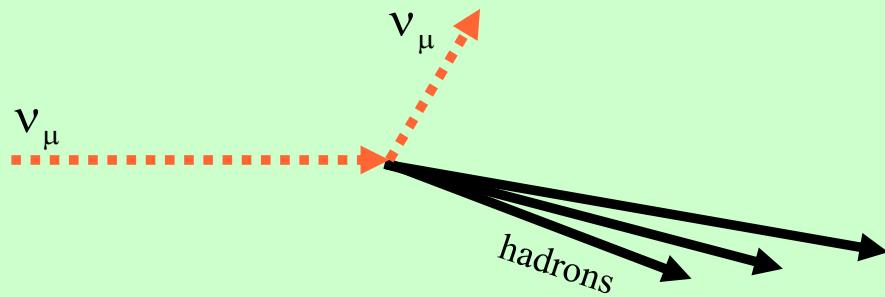


Signal (ν_τ CC)



運動量の低い多数の粒子
DISよりは等方的な散乱

Deep Inelastic Scattering (DIS)



核子内のPartonと散乱
解析のメインバックグラウンド

新たにSK-I,II,IIIを解析

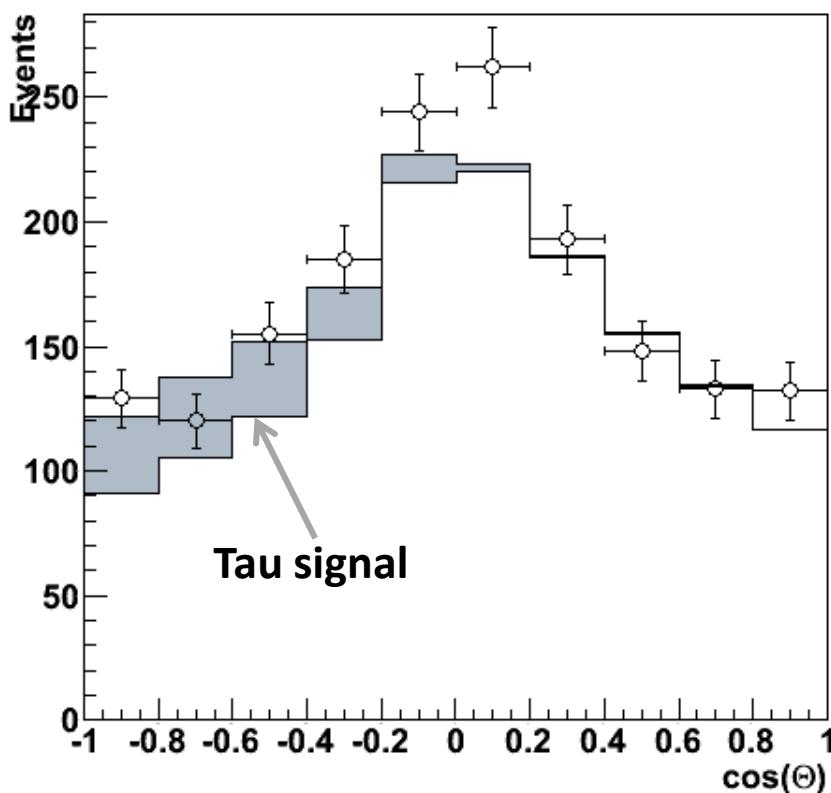
Fitting result

$$N_\tau = 213.6 \pm 45.9^{+13.4}_{-30.7}$$

SK-I,II,III are analyzed.
Expectation: $124.3^{+34.7}_{-35.7}$ events

3.8 σ signal \Rightarrow First evidence for tau appearance!

Zenith Distribution



SK-I result: PRL 97, 171801 (2006)

$$N_\tau = 138 \pm 48(\text{stat})^{+15}_{-32}(\text{syst})$$

2.4 σ signal

「BG rejectionを改善+統計増加」により
過去の結果より優位な信号を測定

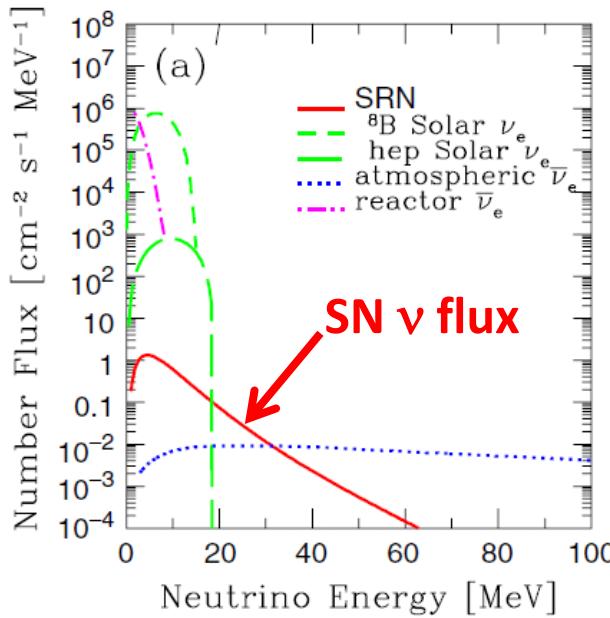
OPERA 2010 preliminary:

One event observed.

2.4 σ signal

他実験に比べても優位

超新星背景ニュートリノ探索



Improved analysis

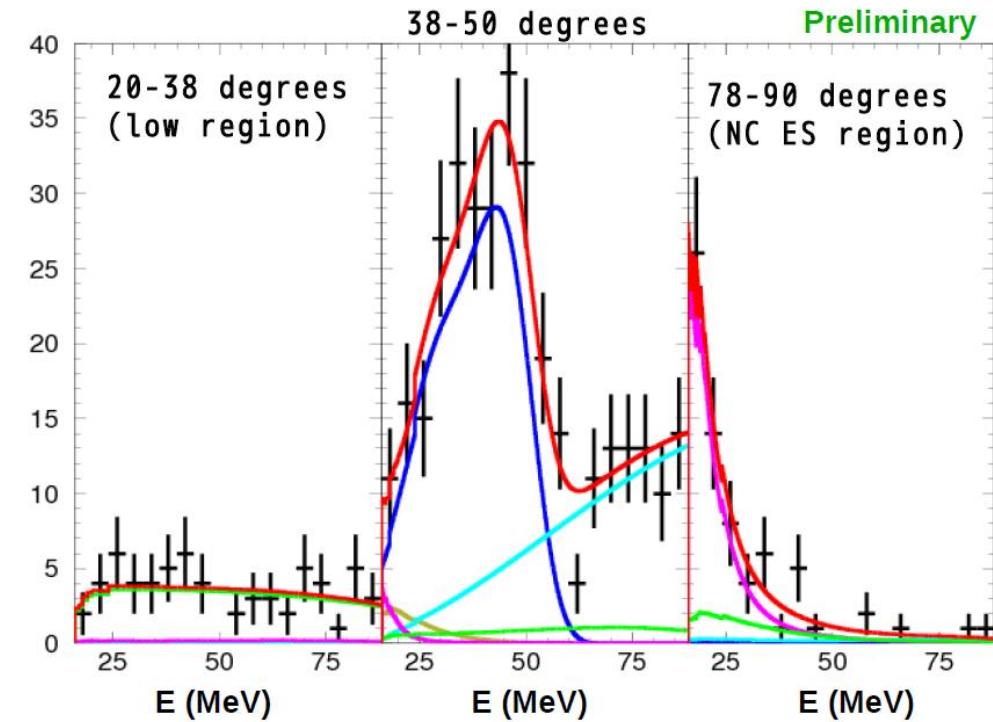
- SK-I,II,IIIを解析
- E>16←18 MeV ($\varepsilon=78\leftarrow52\%$)
- fitの中でNC backgroundも考慮
- EとCherenkov angleに2D fit
- Cross-sectionも最新値を使用

Published result with SK-I:

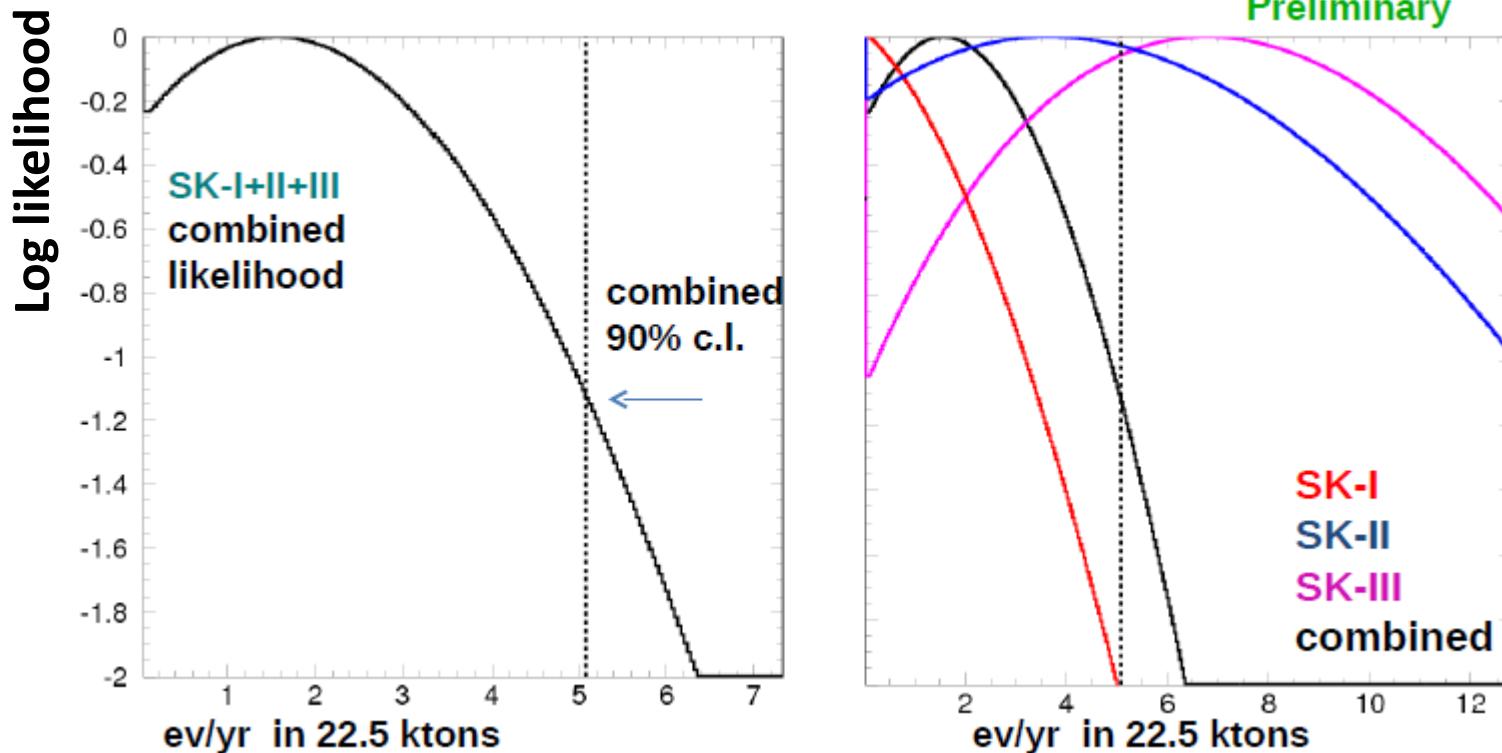
PRL 90, 061101 (2003)

<1.2 /cm²/s @90% C.L.

これが世界で最も厳しい制限



SK-I,II,III analysis



N<5.1 event/year @ 90 % C.L.

Published result (SK-I):

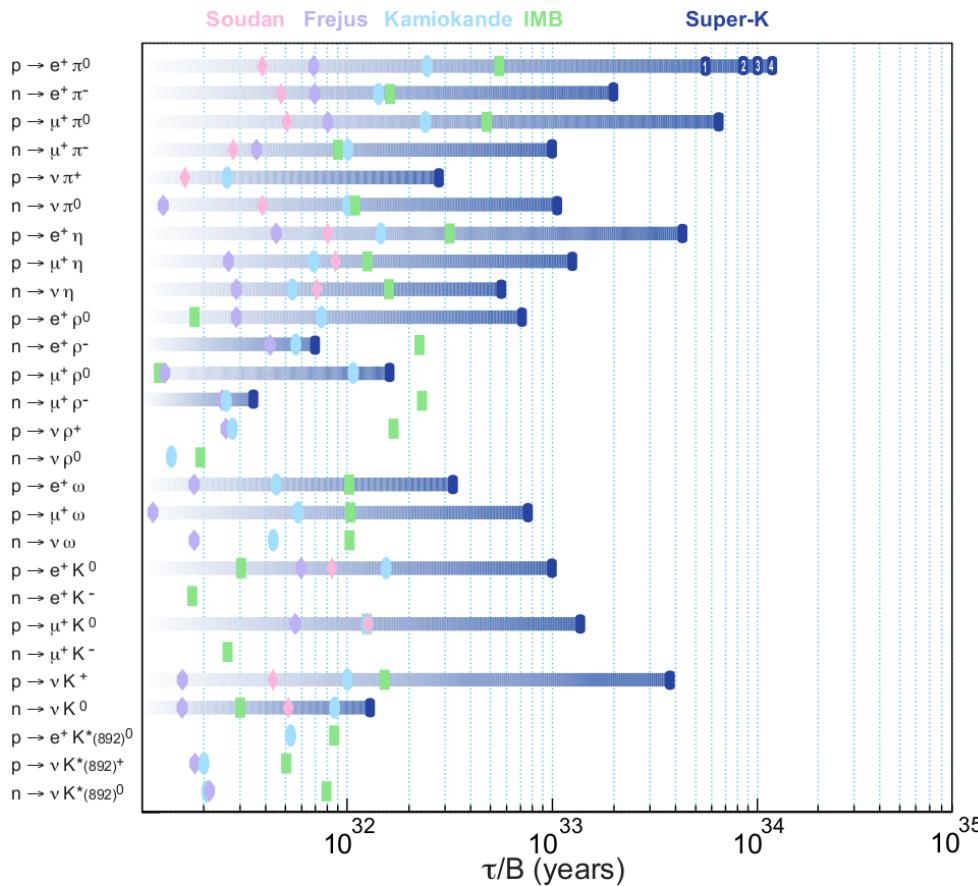
<1.2 /cm²/s @90% C.L.

New preliminary result (SK-I,II,III)

< 2.7 /cm²/s @90% C.L. (E>16 MeV)

< 1.9 /cm²/s (scaled to E>18 MeV)

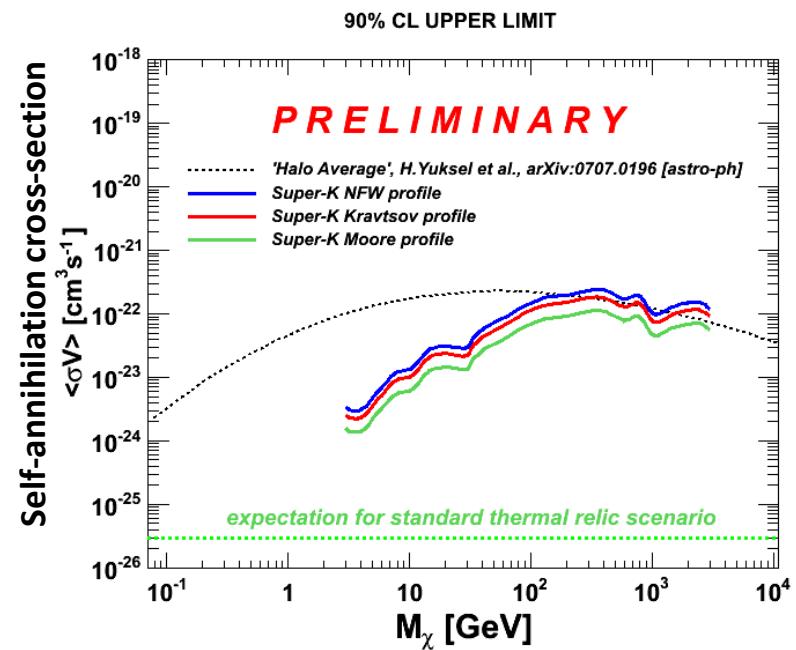
Nucleon decay and others



$p \rightarrow e^+ \pi^0$: (SK-I,II,III,**IV**)
 $\tau/Br = 1.2 \times 10^{34}$ years

CPT violation: (I,II,III)
No evidence in $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

WIMP search: (I,II,III)
Limit to annihilation x-sec



まとめ

SK-IVが始まって2年が経過

- Stable operation + SK検出器のパフォーマンス向上
- 最初の結果を発表

SK-I,II,IIIニュートリノ振動解析

- 太陽 ν 、大気 ν ともsub-dominant効果を考慮した解析
- 未測定の振動パラメータ θ_{13} , δ_{CP} がターゲット
- どちらの解析も θ_{13} へ制限を与えた。
- 「大気 ν sampleは δ_{CP} に感度がある」ことを確認
 $\Rightarrow \delta_{CP}$ 測定はもはやFuture Planではない。

SK-I,II,III tau appearance解析

- 大気 ν sampleで 3.8σ の ν_τ 信号を観測
- Tau appearanceのfirst evidence!

この他にもたくさんの結果とactivityがありました。来年もご期待下さい。

参考文献

- Precise Measurement of Solar Neutrinos with Super-Kamiokande III
Motoyasu Ikeda, PhD Thesis, University of Tokyo, Feb. 2010
- Search for Supernova Relic Neutrino at Super-Kamiokande
Takashi Iida, PhD Thesis, University of Tokyo, Feb. 2010
- Full three flavor oscillation analysis of atmospheric neutrino data observed in Super-Kamiokande
Chizue Ishihara, PhD Thesis, University of Tokyo, Feb. 2010