

スーパーカミオカンデ

石野宏和

岡山大学

2009年12月19日

平成21年度共同利用研究成果発表研究会

目次

- SK IV の現状
- SK I + II + III のデータ解析結果・現状
 - 大気ニュートリノ
 - 陽子崩壊
 - モノポール探索
 - 太陽ニュートリノ
- SK with Gd (GADZOOKS!)
 - R&Dの現状
 - 新実験室へのバーチャルツアー
- まとめ

査定金額

- A01-A03, A05, A07, A09-A13, A16, A18-21, B01 まとめて執行
 - 研究費： 0、旅費 300千円
 - 代表：中畑雅行（東大宇宙線研）
 - 使途：共同利用者の旅費

SKの歴史

1996

1997

1998

1999

2000

2001

2002

2003

2004

2005

2006

2007

2008

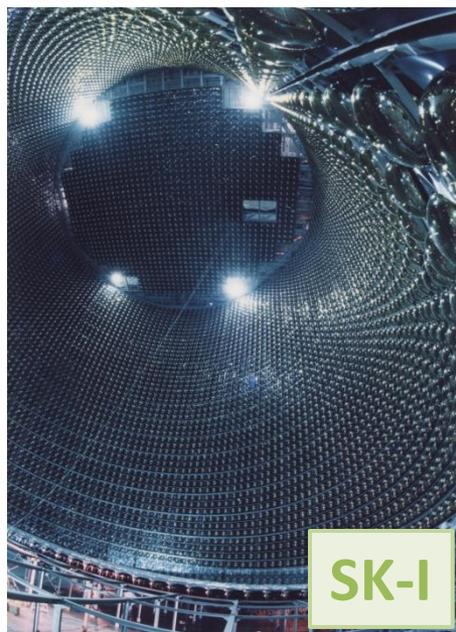
2009

SK-I

SK-II

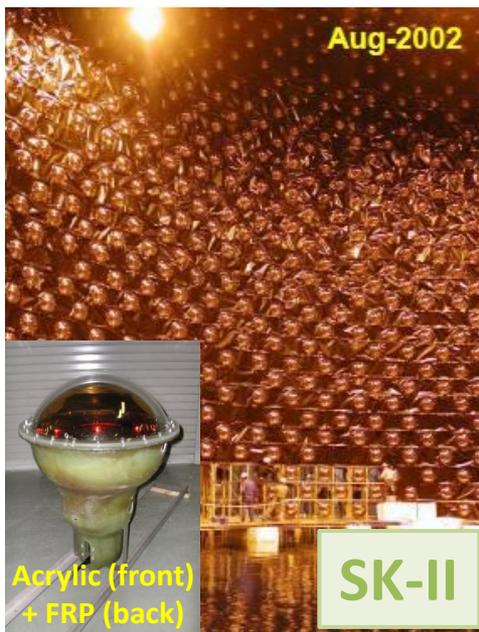
SK-III

SK-IV



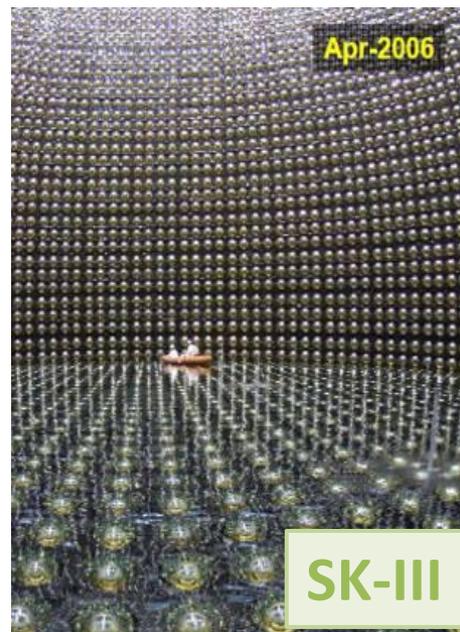
11146 ID PMTs
(40% coverage)

Energy
Threshold **5.0 MeV**
(total electron energy)



5182 ID PMTs
(19% coverage)

7.0 MeV



11129 ID PMTs
(40% coverage)

4.5 MeV
work in progress

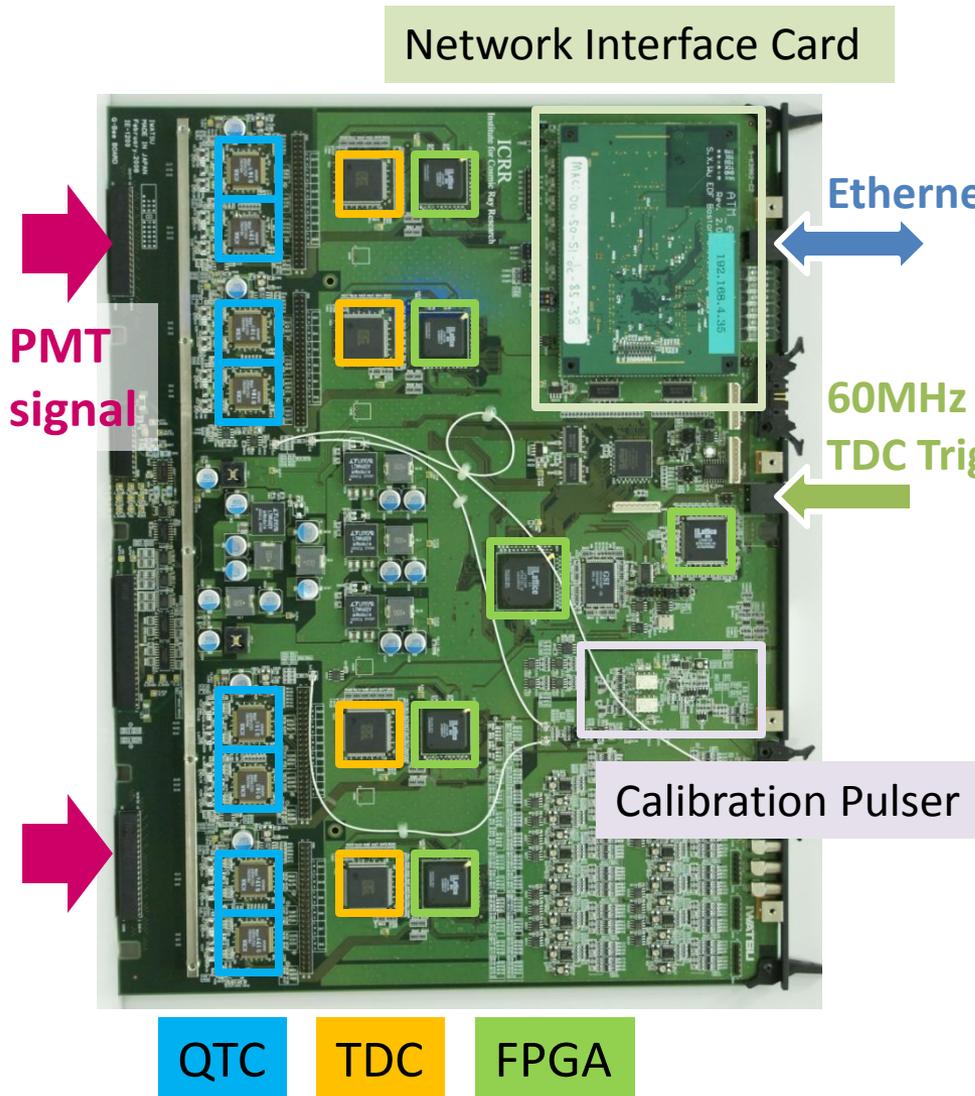


Electronics
Upgrade

< 4.0 MeV
target

S. Nakayama

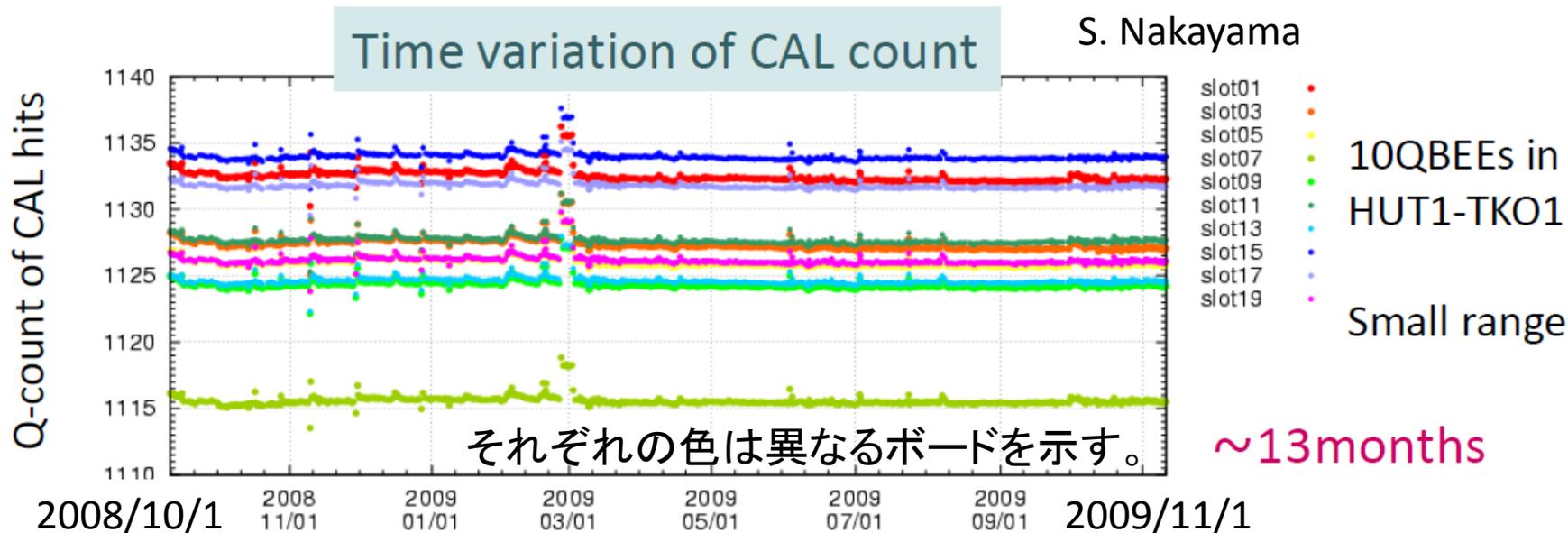
SK IV の新電子回路(QBEE)



QTC-Based Electronics with Ethernet (QBEE)

- 24チャンネル入力
 - QTC (custom ASIC)
 - 60MHz Clock – 3段のゲインステージ
 - TDC Trigger – 広いダイナミックレンジ (>2000pC)
- H. Nishino *et al.*, NIMA 610, 710 (2009)
- パイプライン処理
 - multi-hit TDC (AMT3)
 - FPGA
 - イーサネット読み出し
 - 60MHzシステムクロック入力
 - 内蔵キャリブレーションパルサー
 - 低消費電力 (< 1W/ch)

QBEE の安定性

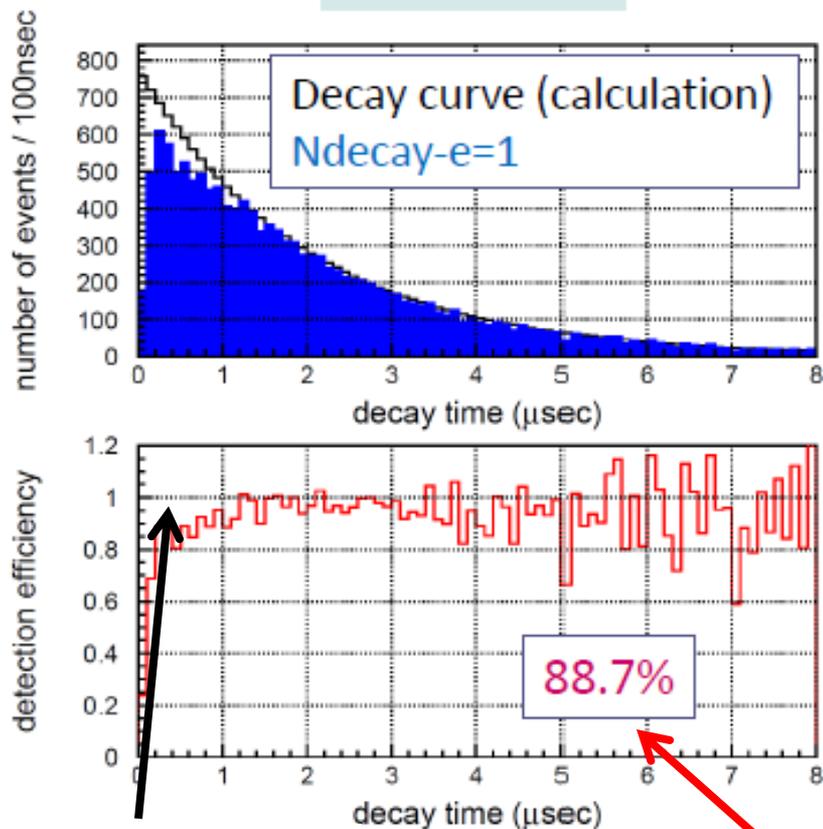


- 較正パルスによる QBEE のゲインの安定性
 - ペDESTAL補正無しでも $\pm 0.5\%$ で一定。
- QBEE 自体の安定性
 - SK 内層部検出器読み出し(全472枚)は一年間で故障0。
 - SK 外層部検出器読み出し(全80枚)のうち1枚故障。電源のリサイクル時に。

QBEEは安定に問題なく稼働し、順調にSK IV のデータを収集している。

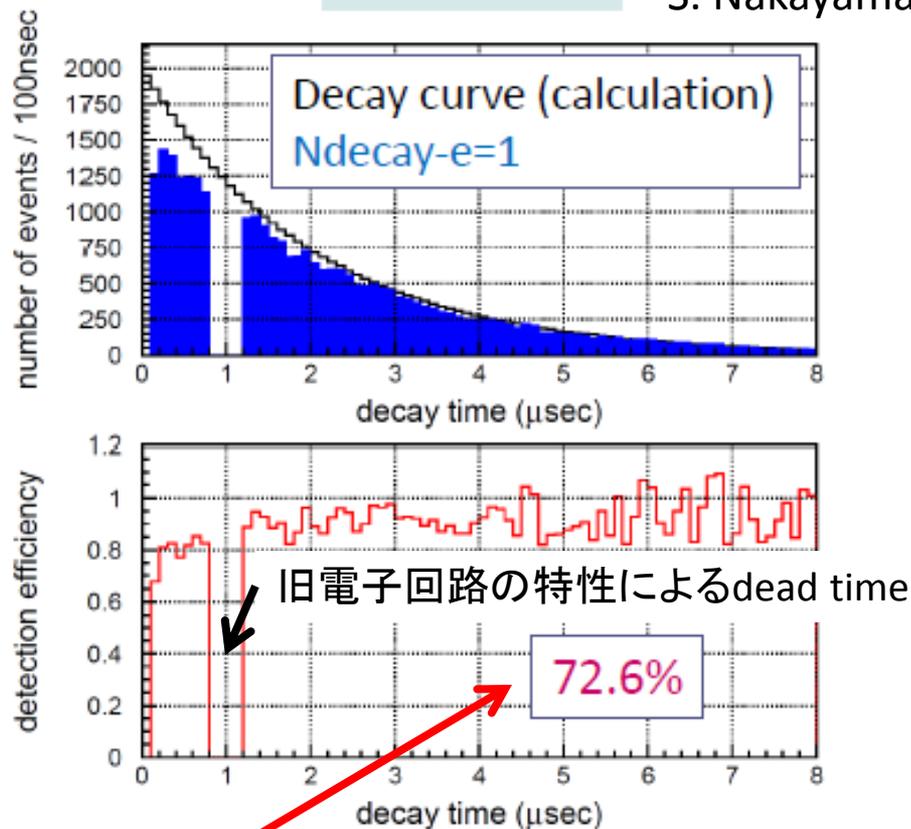
ミュオン崩壊電子の検出効率改善

SK-IV data



SK-III data

S. Nakayama



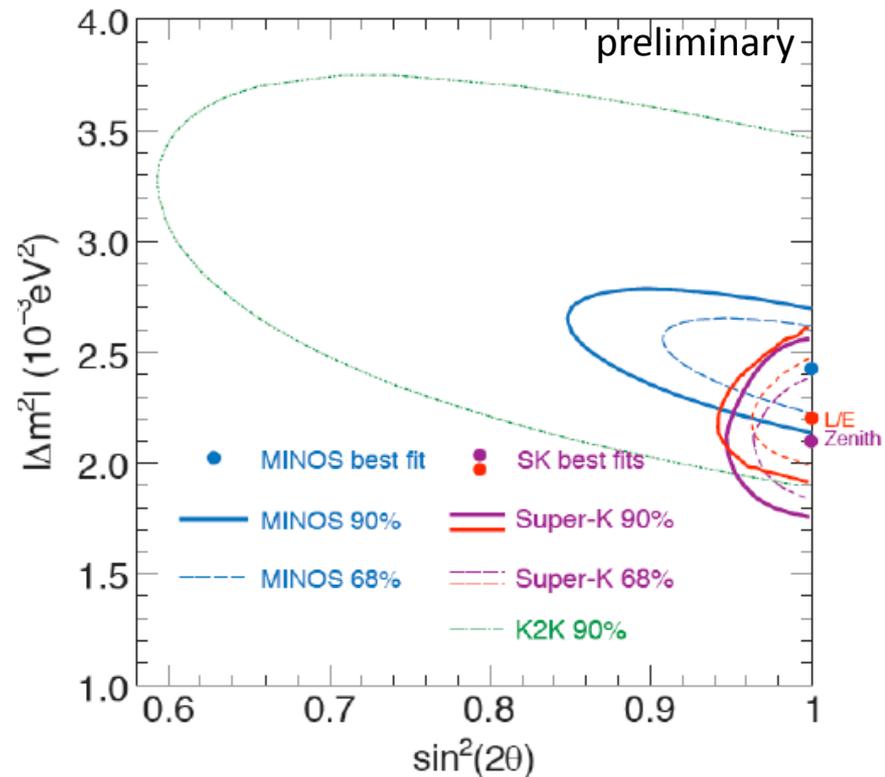
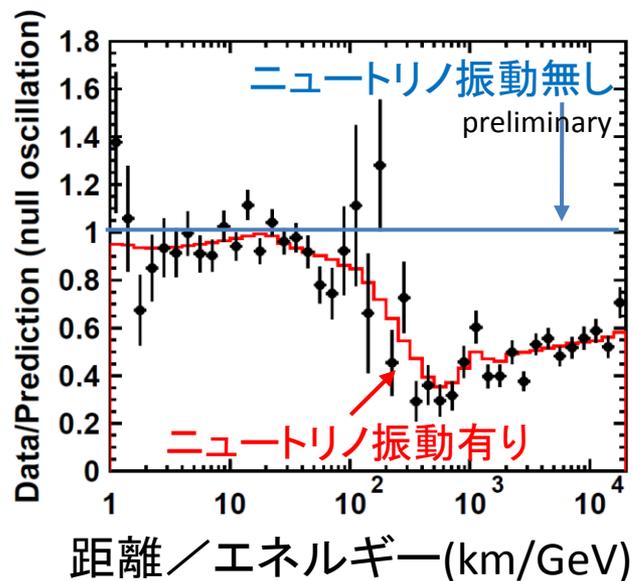
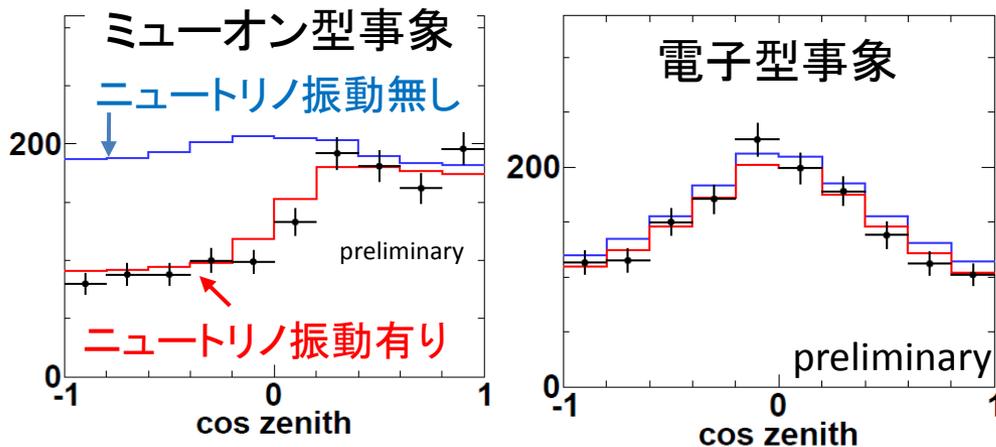
前ストップミュオンとの事象重なりにより落ちている。

電子回路のアップグレードおよび解析方法の進展により、22%の検出効率の改善。
SK IVのMCによる見積りは89%で、データと一致。

SK I + II + III のデータ解析結果・現状

大気ニュートリノ振動結果

天頂角分布 $E_{\text{vis}} > 1.33\text{GeV}$



L/E解析結果

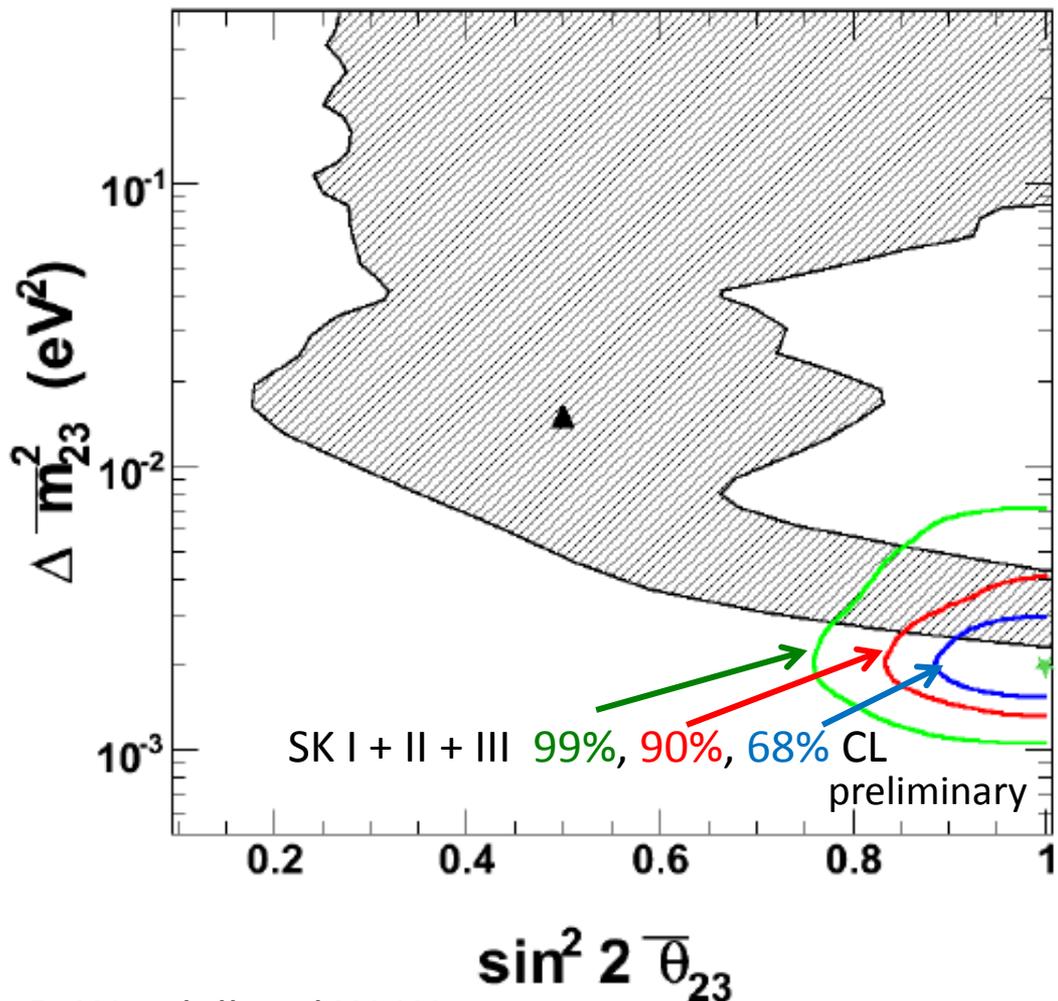
$$\sin^2(2\theta) > 0.94$$

$$1.9 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 < \Delta m^2 < 2.6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

@90% C.L.

CPTの破れの探索

ニュートリノと反ニュートリノが別々の振動パラメータを持つと仮定して
大気ニュートリノ事象の天頂角分布をフィット。



 MINOS $\bar{\nu}$ 90% CL

最適値

ニュートリノのパラメータ

$$\Delta m_{23}^2 : 2.2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) : 1.0$$

反ニュートリノのパラメータ

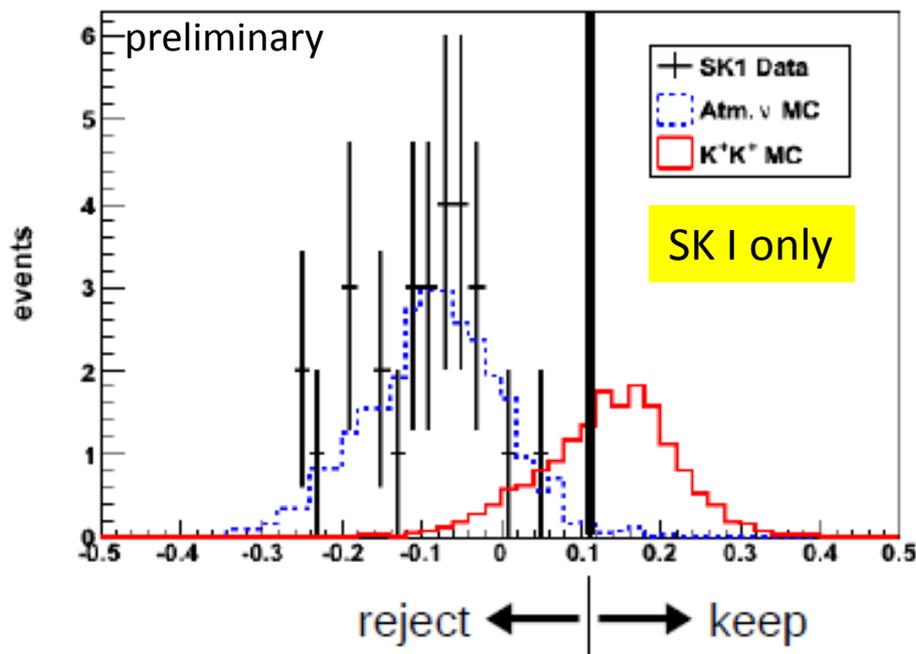
$$\Delta m_{23}^2 : 2.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) : 1.0$$

ニュートリノと反ニュートリノの
間に違いは見つからなかった。

pp→K⁺K⁺ の探索

Mike Litos BDT Output



0 candidate events found in the data.
(expected background: 0.3 events)

Boosted Decision Tree を用いた
解析。

$$\tau / BR > 1.4 \times 10^{32} \text{ 年}$$

$$BR : {}^{16}\text{O}(pp) \rightarrow {}^{14}\text{C} K^+K^+$$

これまでの cut base な解析手法の
2倍の改善。

cf. Frejus の結果 :

$$\tau/BR(pp \rightarrow \pi^+\pi^+) > 0.7 \times 10^{30} \text{ 年}$$

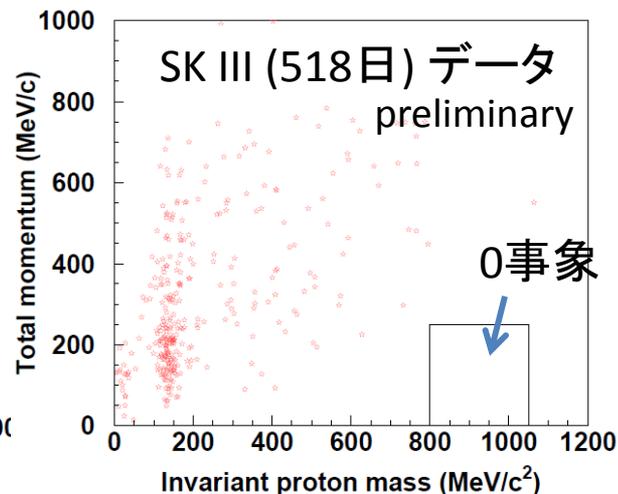
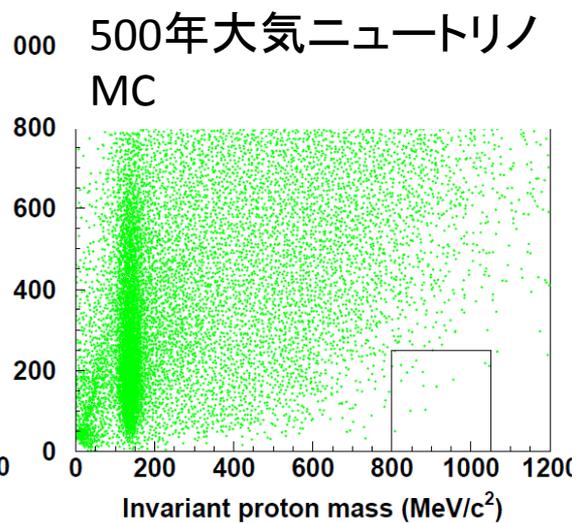
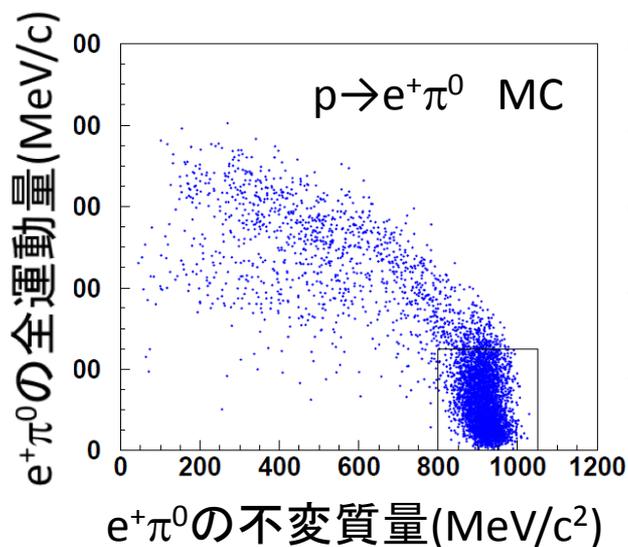
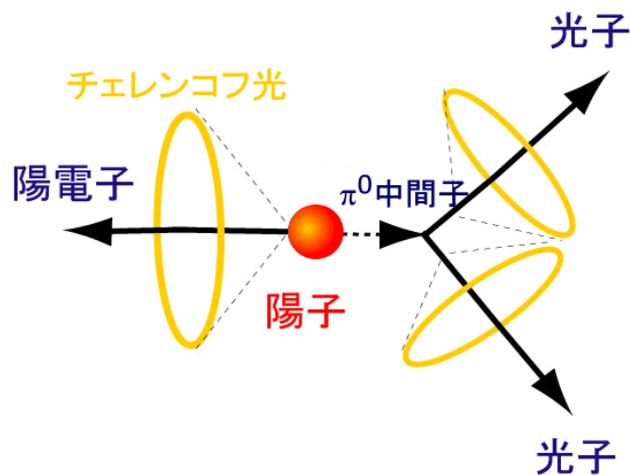
C. Berger *et al.*, PLB 269, 227 (1991)

陽子崩壊の探索

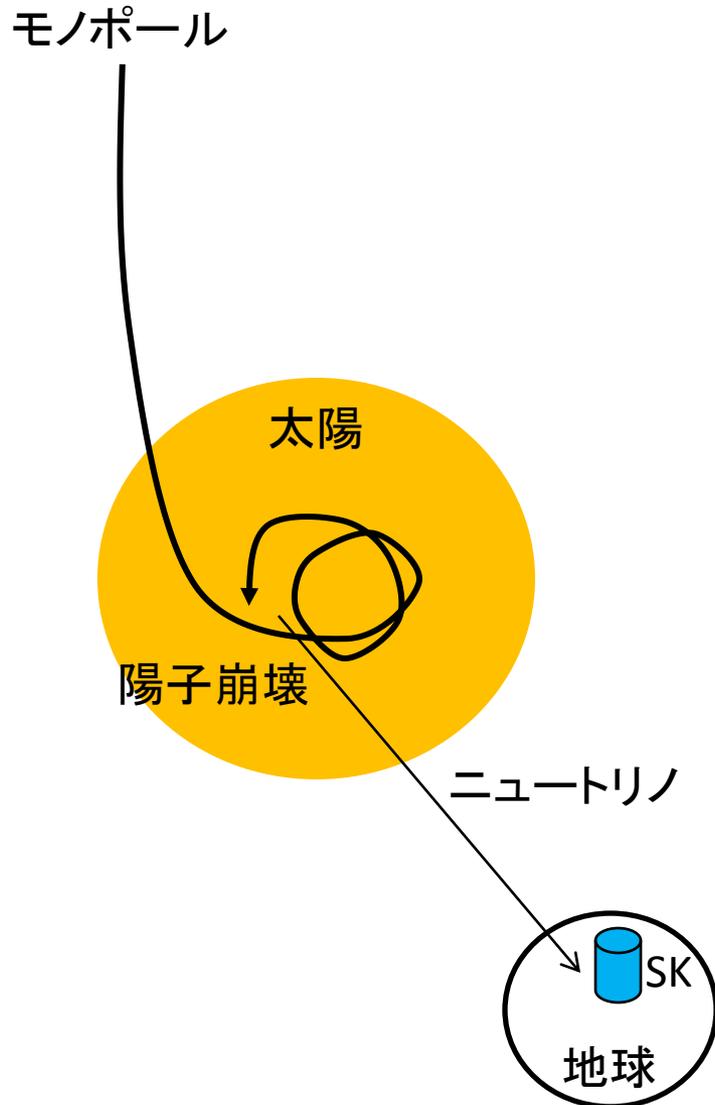
SK I + II + III のデータ(173kton・year)
の解析結果

$$\tau/\text{BR}(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 1.0 \times 10^{34} \text{ 年}$$

$$\tau/\text{BR}(p \rightarrow K^+ \nu) > 3.3 \times 10^{33} \text{ 年}$$

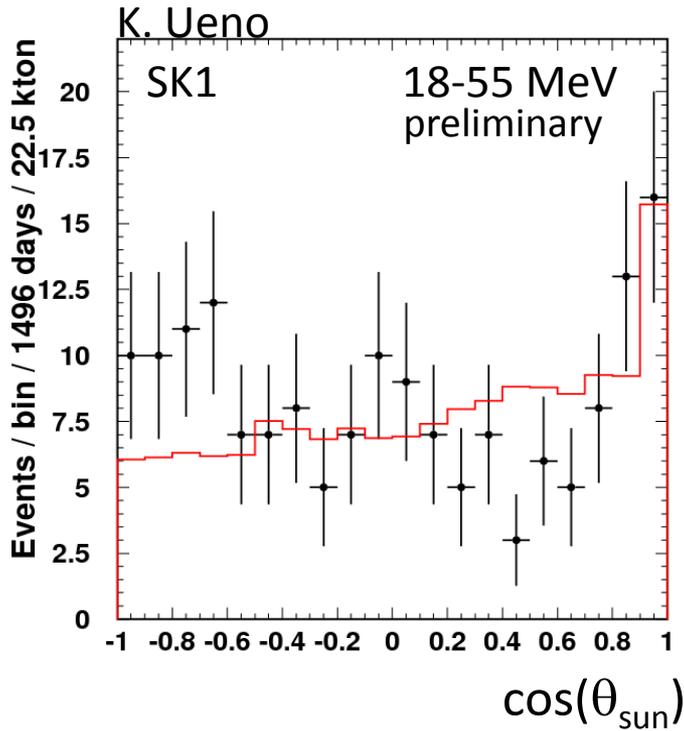


モノポールの探索



- モノポールが太陽の重力によってトラップ。
- モノポールがルバコフ効果により陽子崩壊を促進。
- π 、 μ 崩壊からニュートリノが生成される。
$$p \rightarrow (\rho^0, \omega, \eta, K^+, \dots) + e^+ \text{ (or } \mu^+),$$
$$(\rho^0, \omega, \eta, K^+, \dots) \rightarrow \pi^+$$
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$
$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu$$
- 太陽方向からのニュートリノ(18MeV~55MeV)の検出を試みる。

モノポールの探索



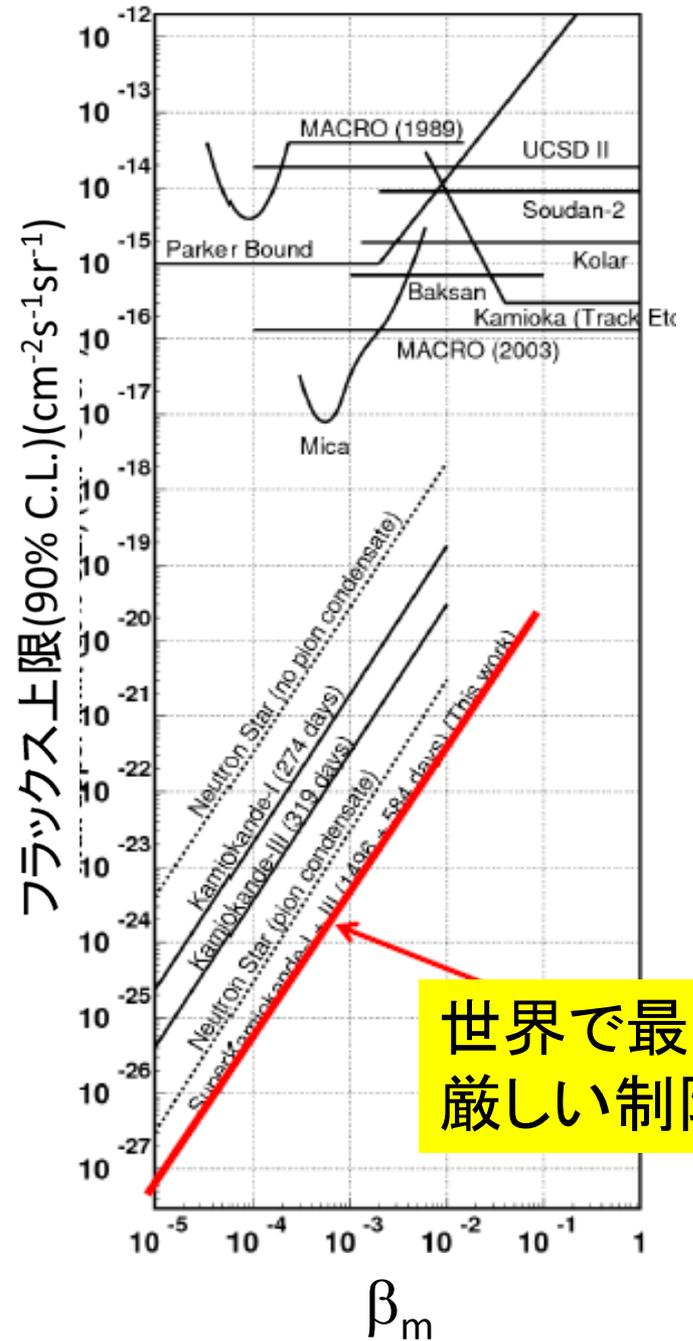
SK I + III combined preliminary

$$F_M \left(\frac{\sigma_0}{1\text{mb}} \right) < 7.3 \times 10^{-24} \left(\frac{\beta_M}{10^{-3}} \right)^2 [\text{cm}^{-2}]$$

σ_0 : ルバコフ効果の断面積

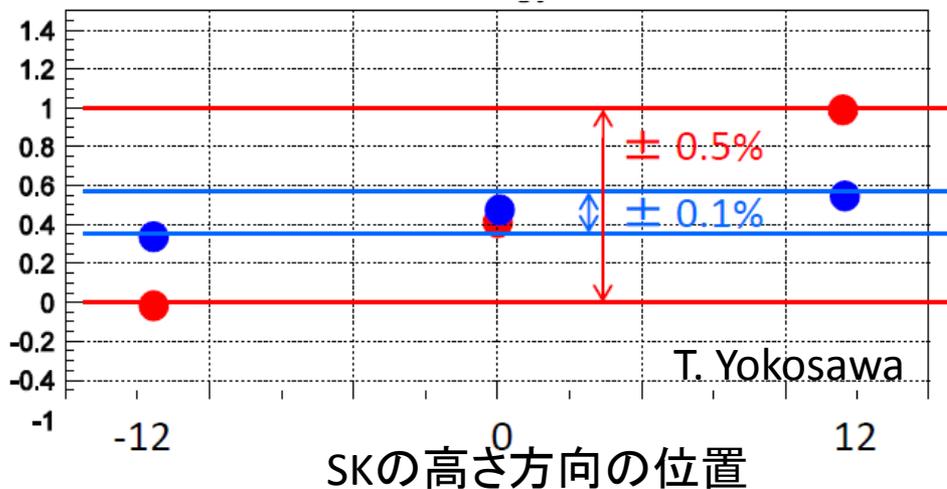
β_m : モノポールの速さ

at 90% C.L.

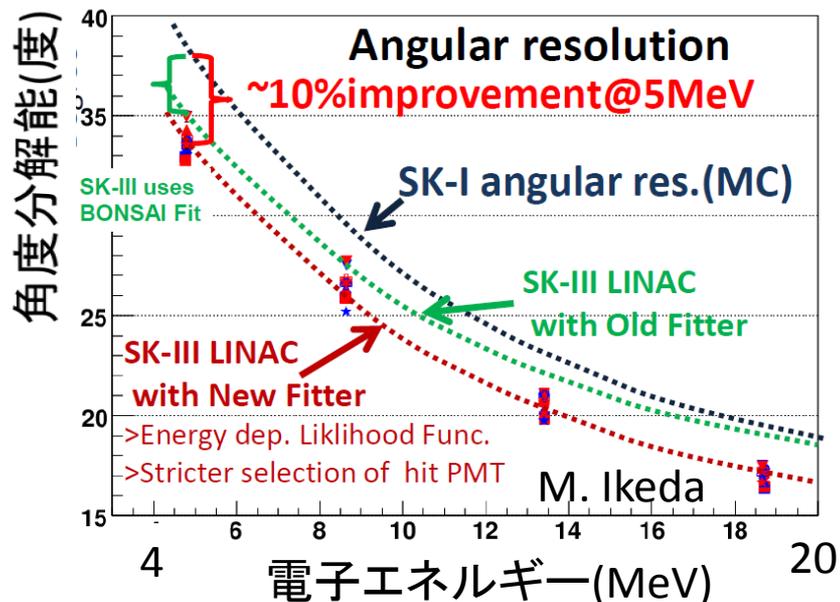


世界で最も
厳しい制限

太陽ニュートリノ精密測定に向けてのSK検出器の較正

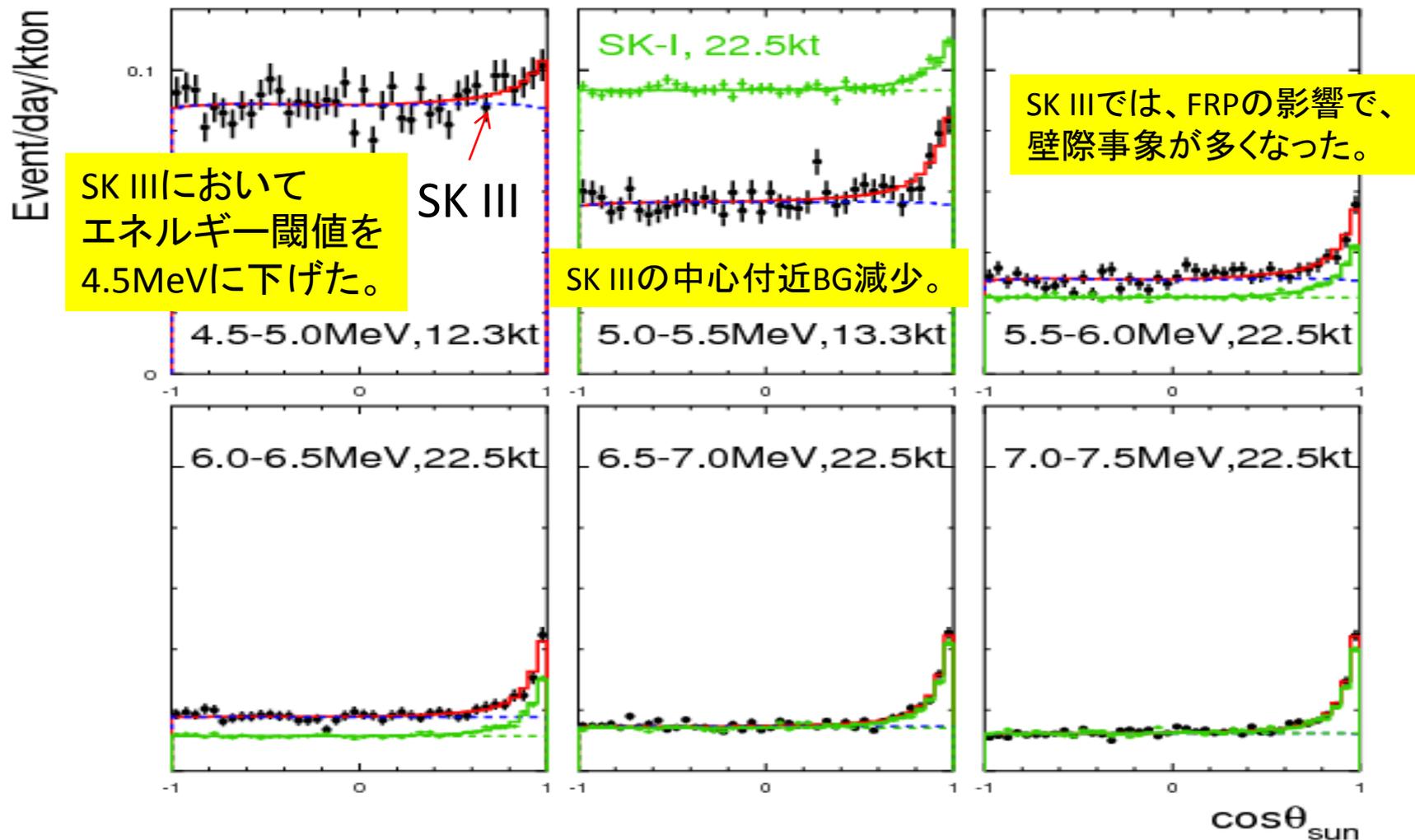


エネルギースケールの位置依存性：
MCにおいて、水中でのチェレンコフ光の吸収係数に高さ方向の依存性を導入。±0.5%の系統誤差を±0.1%に。



電子の方向再構成プログラムの改良：
エネルギーに依存したライクリフッド関数を導入。
5MeVのエネルギーで10%の角度分解能の改善。
電子線形加速器を使った精密較正により、
系統誤差を±2%から±0.5%へ改善。

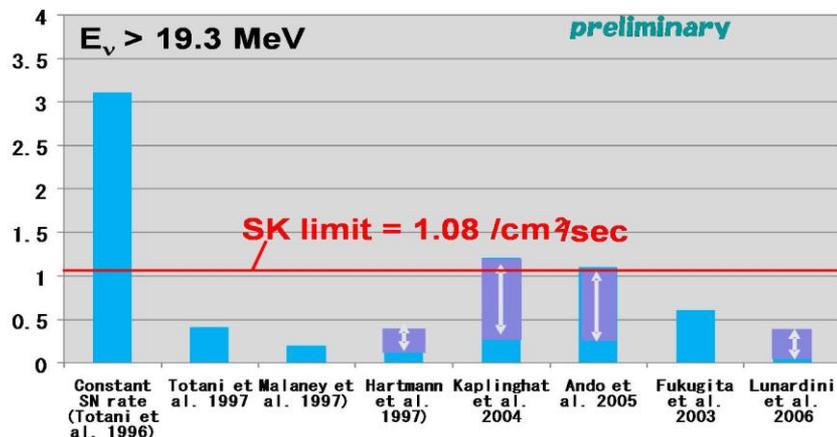
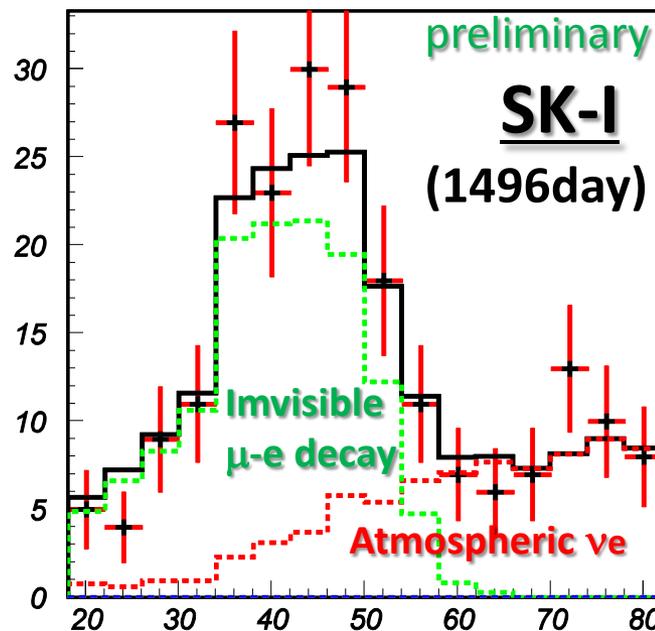
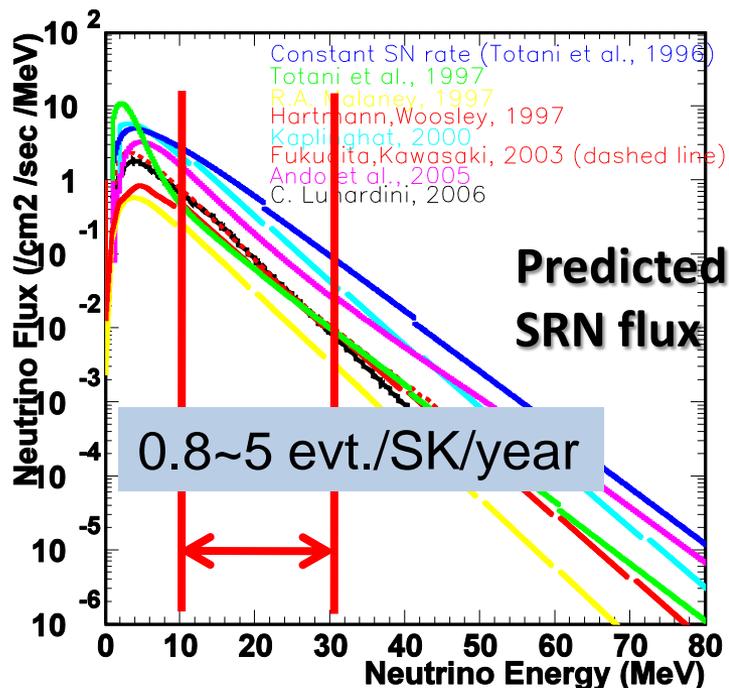
太陽ニュートリノの観測



SK I + II + III の太陽ニュートリノ解析はもうすぐ公表。

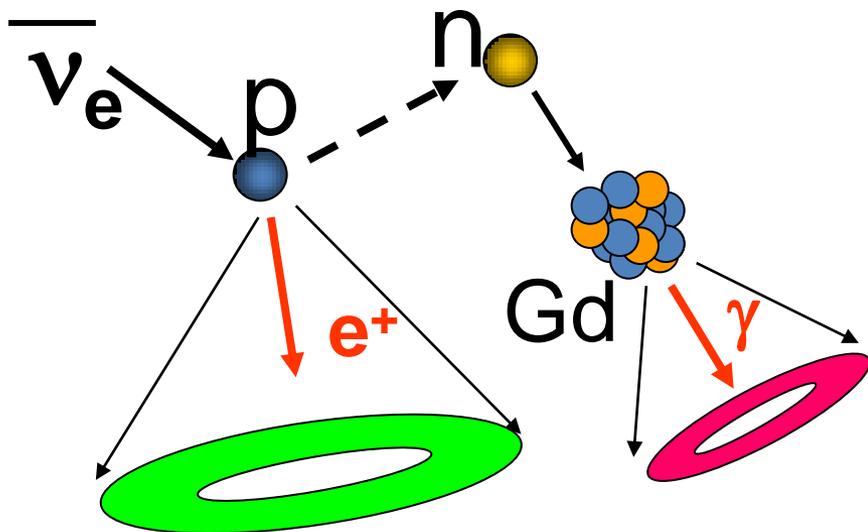
Gd in SK (GADZOOKS!)

超新星背景ニュートリノ



- 宇宙開闢以降起きた超新星爆発により、ニュートリノが宇宙に蓄積。
 - 超新星背景ニュートリノ (Supernova Relic Neutrinos, SRN)
- SK Iが世界で最も厳しい制限
 - 1.08 /cm²/s @90%C.L.
 - 理論的予想値の約3倍。

Gd入りSK (GADZOOKS!)



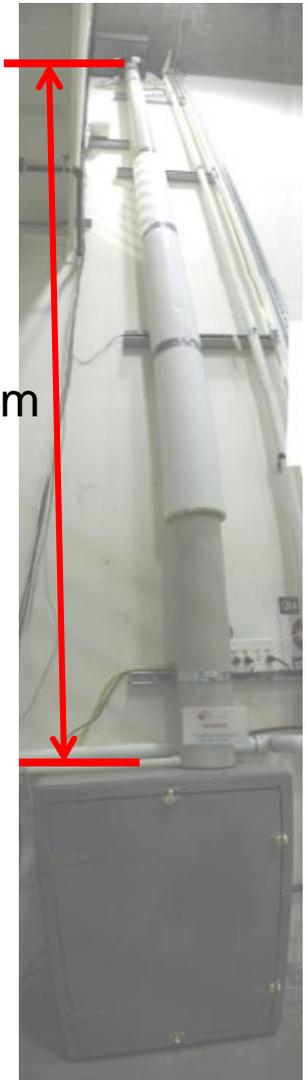
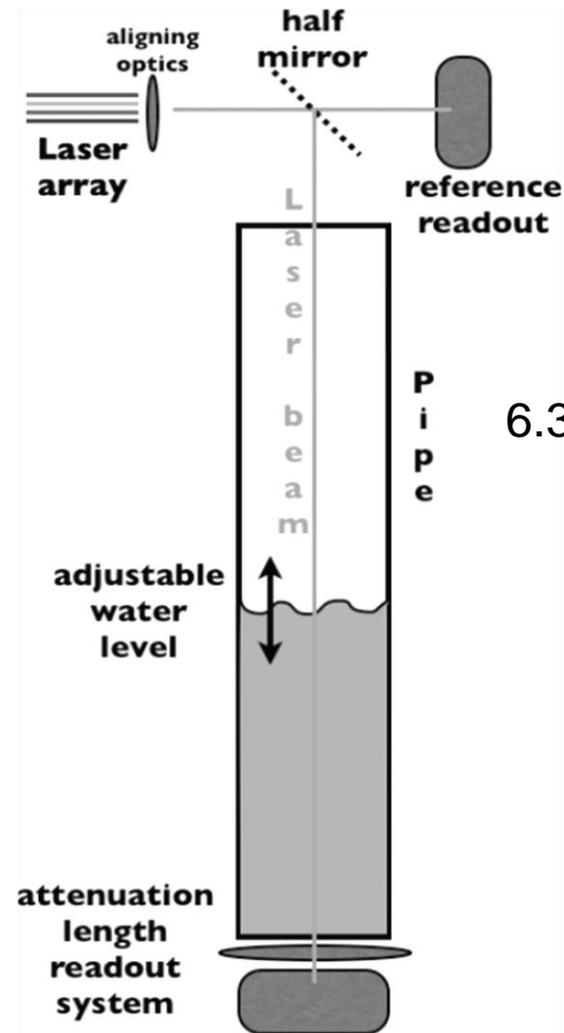
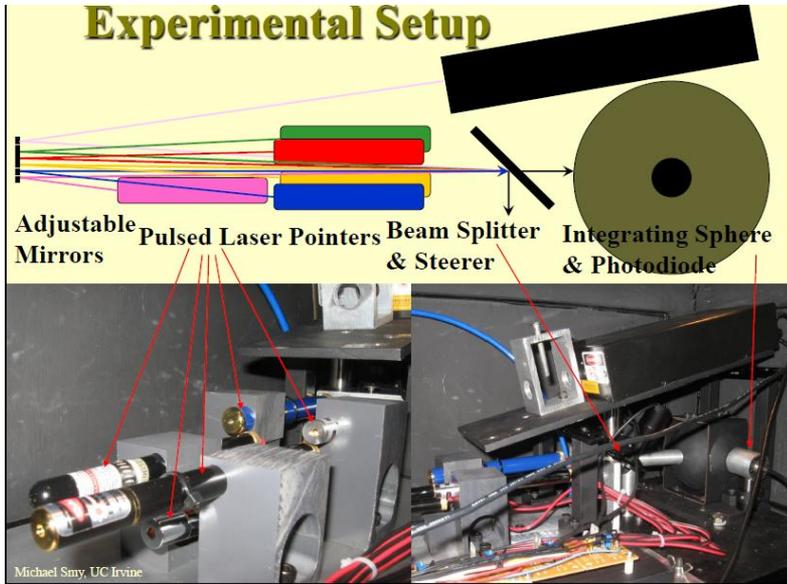
- SKでGdを使って、陽電子と遅延ガンマ線によるコインシデンス
 - J.F. Beacom and M.R. Vagins, PRL 93, 171101 (2004).
- Gdが中性子を吸収すると、3-4個計8MeVのガンマ線を放出。
- SKでGdを入れることにより、5年間でSRNの理論的予言に到達可能。
 - スパレーション事象の抑制により、10MeVに閾値を下げる事が可能。
 - 「見えないミューオン」事象を1/5にすることが可能。

Gd 化合物

Gd compound	corrosion	light attenuation
GdCl_3	X	O
$\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$	O	X
$\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$	O	O

- 硫酸ガドリニウムが現在考えられている候補。
- SKの構成物質の腐食テストを実施中。
 - ステンレス、ガラス、ゴム等。

透過率の測定 @UCI

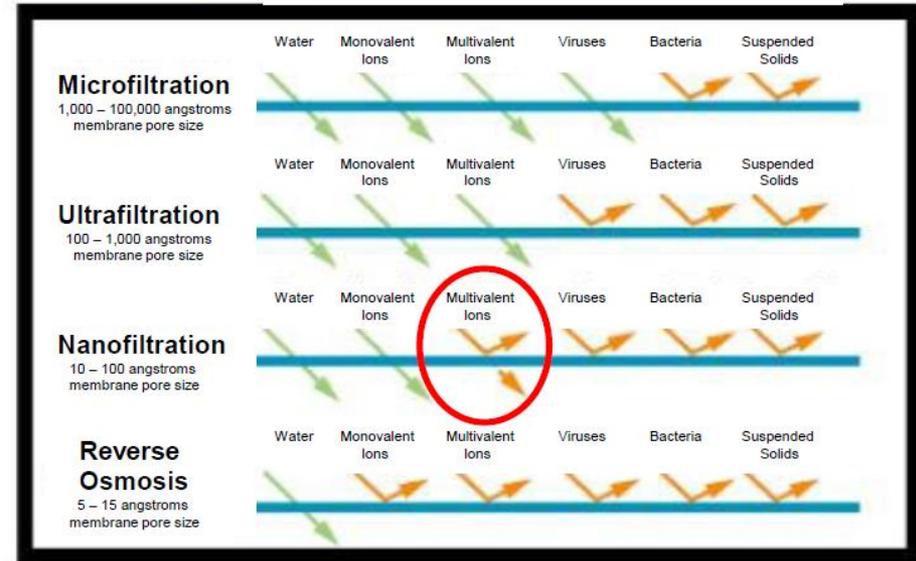
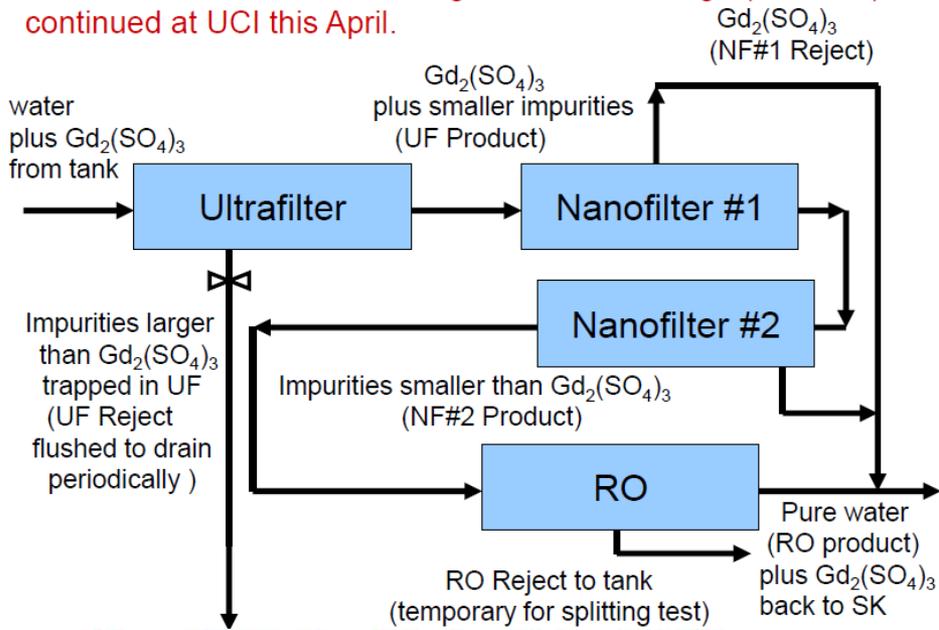


- 上部からレーザー光を入射
 - 波長:337~650nm
- 水位を変えることにより、光の減衰長を測定。

by M. Smy

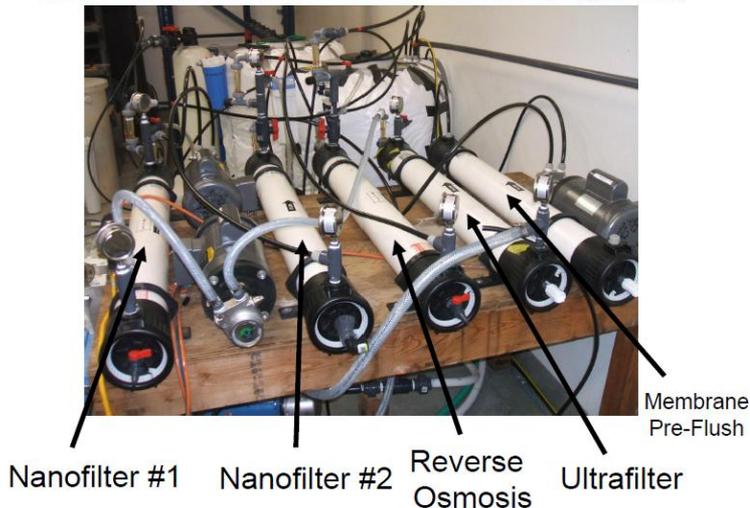
Gd溶液選択的純化装置 @UCI

Selective filtration studies using a double NF stage (in series) continued at UCI this April.



by M.R. Vagins

Current Selective Filtration Setup @ UCI

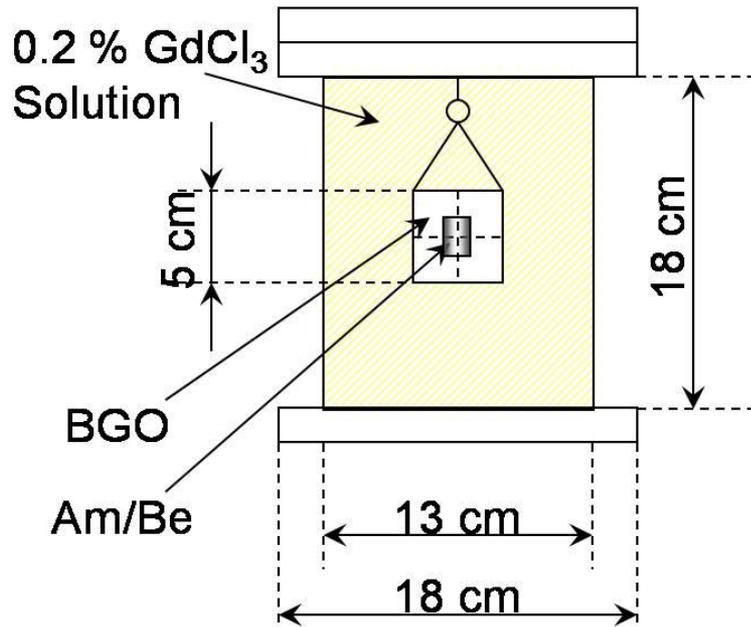


- Gd水溶液選択的純化装置のプロトタイプがUCIで構築中。
- ナノフィルタで99.99%の効率で硫酸ガドリニウムを除去し、ROからの送水は、0.05ppm以下の濃度。

SKでの中性子検出効率の測定

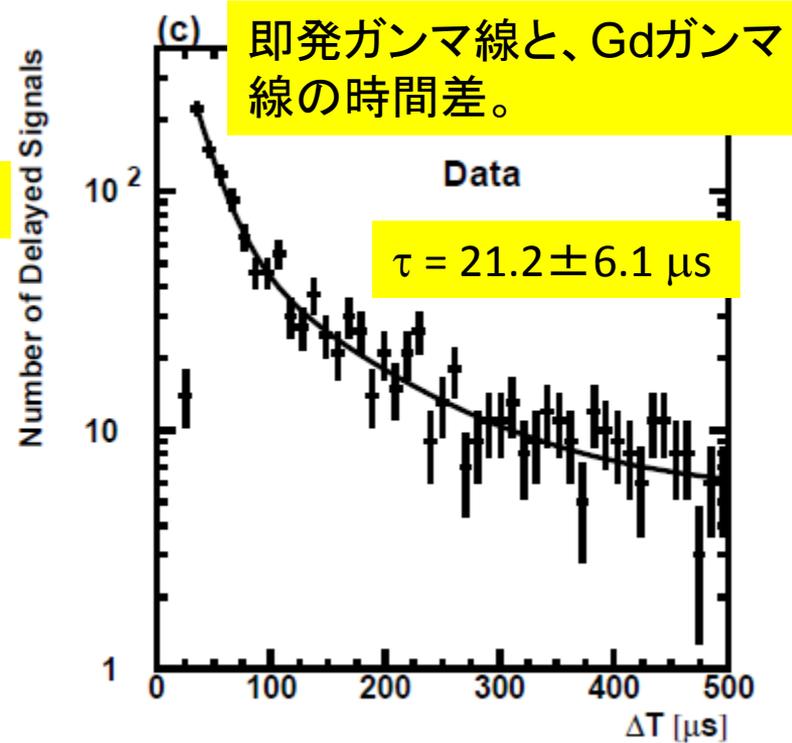
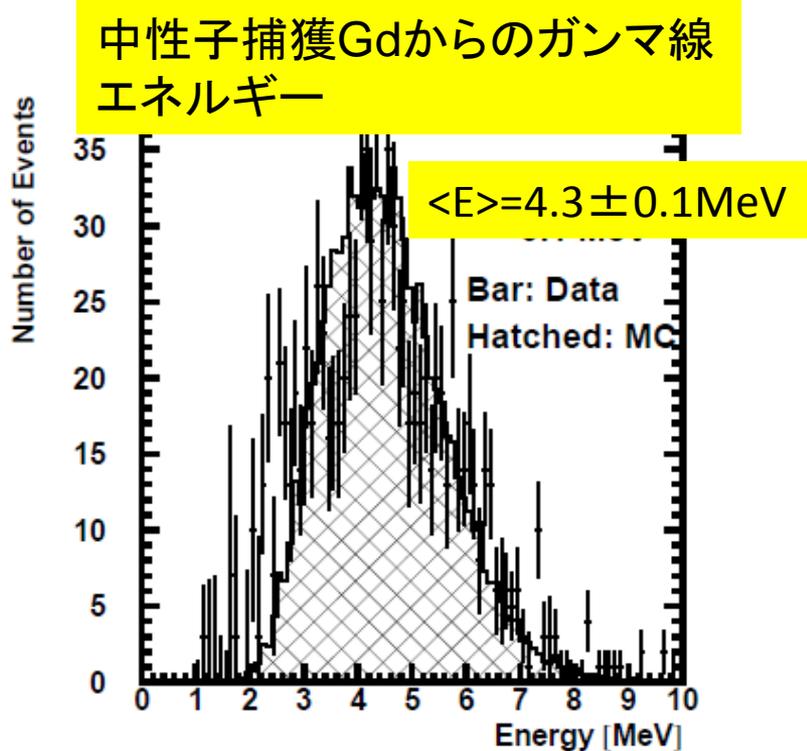
H. Watanabe et al., Astropart., Phys. 31, 320 (2009)

GdCl₃ test vessel



- Am/Be ソースは 4.43MeV のガンマ線と中性子を放出。
 - 4.43MeVガンマ線は、BGOによって検出。
 - 中性子は、容器の中のGd水溶液で吸収され、エネルギーが計8MeVガンマ線を放出。
- この容器をSKの中に配置して、SKでデータ収集。

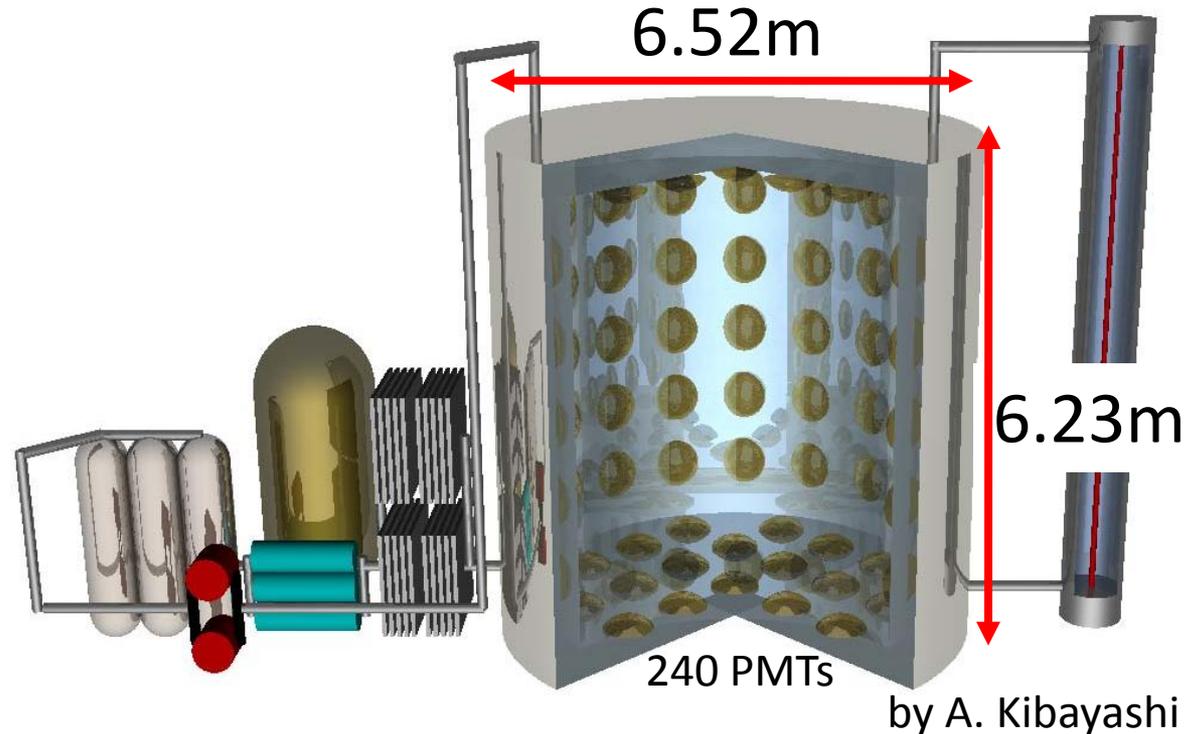
SKでの中性子検出効率の測定



- エネルギー分布はMCと一致。
- 遅延時間分布は、Gd溶液中での中性子の自由行程時間と一致。
- 中性子タグの効率 66.7%.
 - 偶発バックグラウンドは、即発事象のエネルギーが10MeV以上で、 2×10^{-4} 以下。

EGADS

Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems



- 評価用200トンGd溶液チェレンコフ装置
 - 水の透過率、腐食、環境中性子線、純化装置の試験等
- 平成21年度に予算が認められた。
 - 基盤S (代表：中畑雅行)
 - EGADSメインタンク、透過率測定他
 - 補正予算
 - 実験室、純水・純空気ユーティリティ、前段純化タンク

Schedule of GADZOOKS! R&D



Cavity excavation



Filtration and Transparency Tests @ UCI



EGADS Test Tank Construction @ Kamioka



EGADS Water System Construction



IDEAL Construction @ Kamioka



Add Gadolinium



Selective Filtration Tests w/o PMT's/PMT prep



Gd Removal Trials & Draining of EGADS Tank



PMT Mounting in EGADS Tank/DAQ Assembly



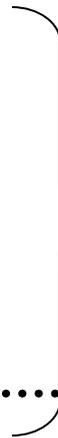
Add Gadolinium



Data Taking and Selective Filtration Tests with PMT's



Main EGADS Results



Corrosion Tests



by M. Nakahata

12月13日



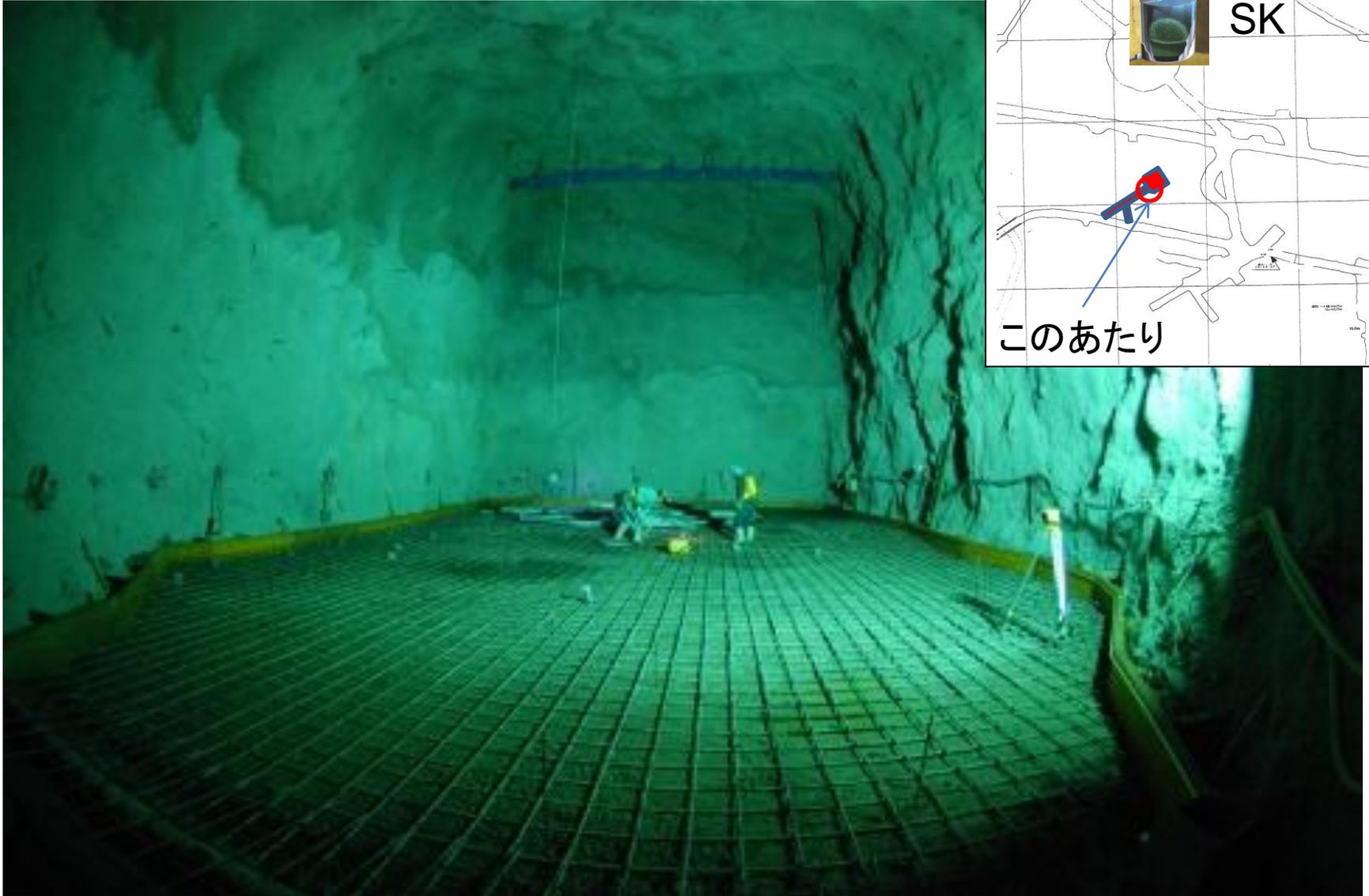
courtesy of M. Nakahata

12月13日



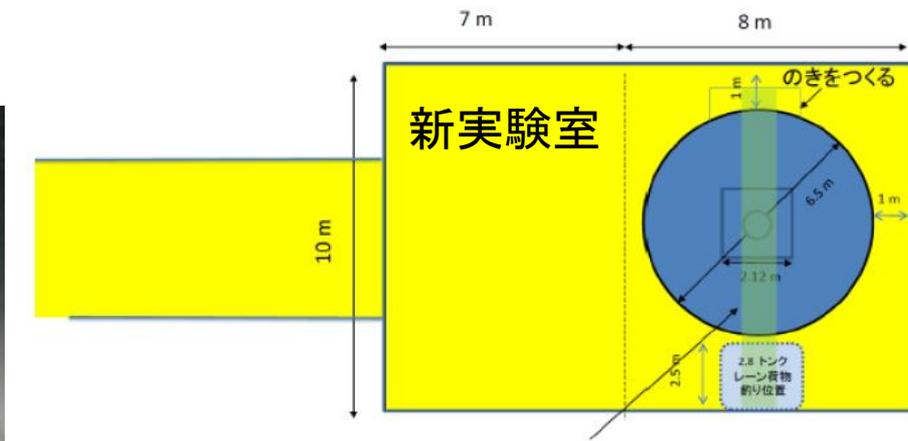
courtesy of M. Nakahata

12月13日



courtesy of M. Nakahata

12月13日



courtesy of M. Nakahata

12月13日



courtesy of M. Nakahata

まとめ

- SK4は順調に稼働
- SK I + II + IIIのデータ解析結果
 - 大気ニュートリノ
 - 天頂角・L/Eの新しい結果、CPTの破れ探索。
 - 陽子崩壊
 - $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 崩壊モードで 10^{34} 年の下限制限。
 - モノポール探索
 - 世界最高感度。
 - 太陽ニュートリノ
 - 閾値4.5MeV, 解析・較正方法の改善。
- Gd in SKのR&Dが本格化
 - EGADS の建設が始まった。

backup slides

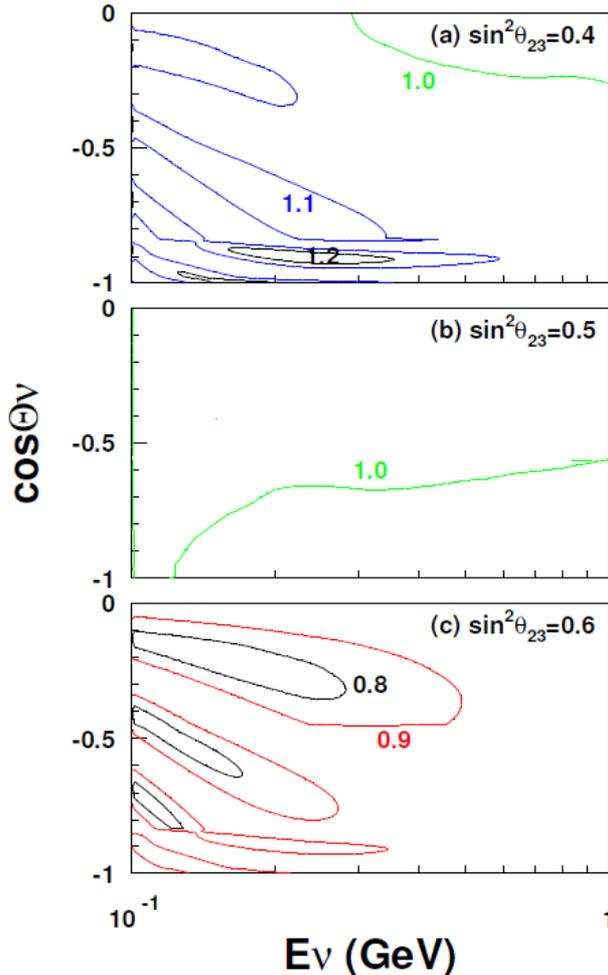
θ_{23} は $\pi/4$ より大きい小さいか

$$\Phi_e / \Phi_e^0$$

$$\Phi_e = \Phi_e^0 [1 + P_{ex} (r \cos^2 \theta_{23} - 1)]$$

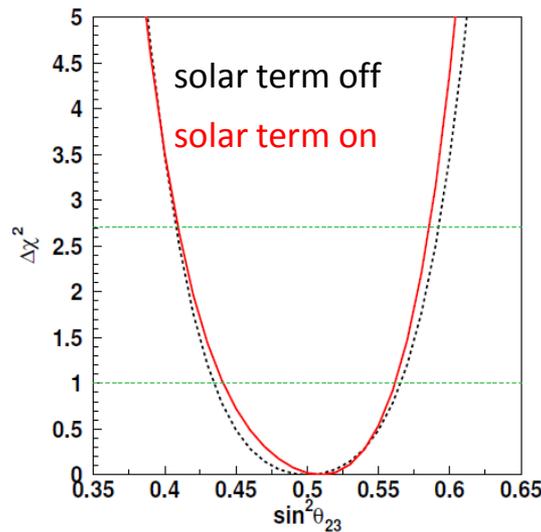
$$r = \Phi_\mu^0 / \Phi_e^0$$

sub-GeV 領域での電子ニュートリノ流量のエネルギーと天頂角分布は θ_{23} が $\pi/4$ より大きい小さいかに感度がある。

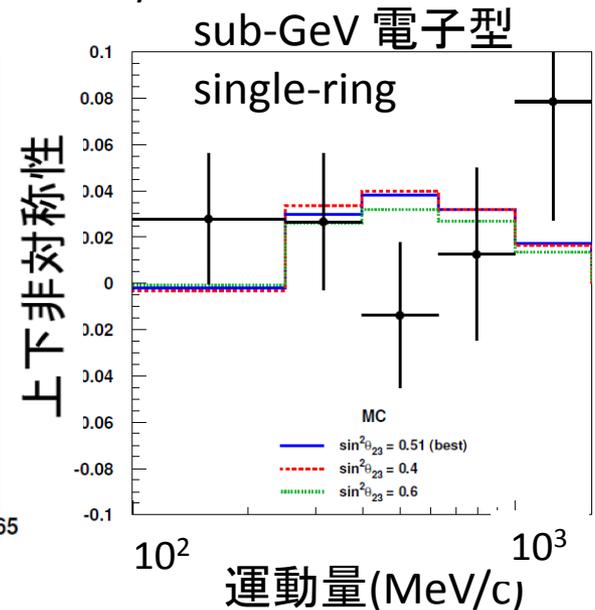


assume $\Delta m_{12}^2 = 7.7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
 $\sin^2 \theta_{12} = 0.30$

SK I + II + III の結果 preliminary



$0.41 < \sin^2 \theta_{23} < 0.585$
 @90% C.L.



大気ニュートリノを用いた θ_{13} の測定

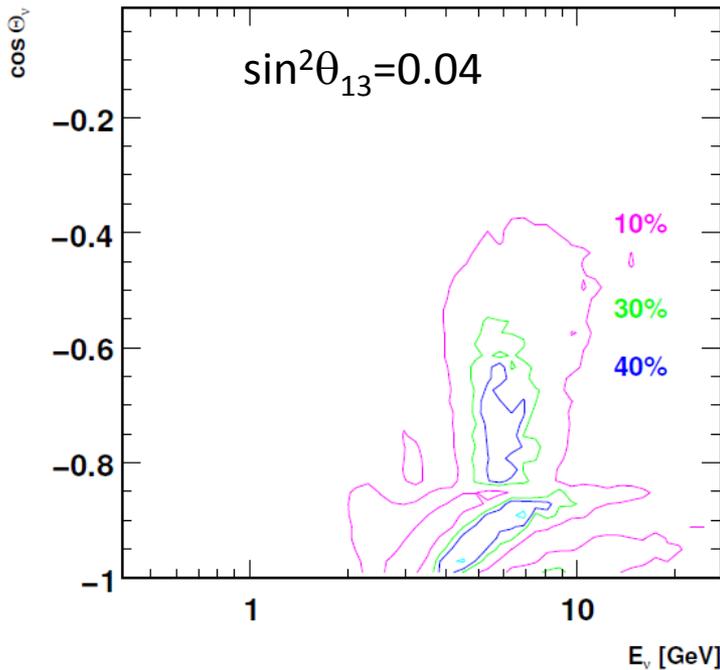
$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e) = \sin^2\theta_{23}\sin^22\theta_{13}^M\sin^2\left(\frac{1.27\Delta m_M^2 L}{E}\right)$$

$$\Delta m_M^2 = \Delta m^2\sqrt{\sin^22\theta_{13} + (\Gamma - \cos 2\theta_{13})^2}$$

$$\sin^22\theta_{13}^M = \frac{\sin^22\theta_{13}}{\sin^22\theta_{13} + (\Gamma - \cos 2\theta_{13})^2},$$

$$\Gamma = \pm 2\sqrt{2}G_f n_e E / \Delta m^2$$

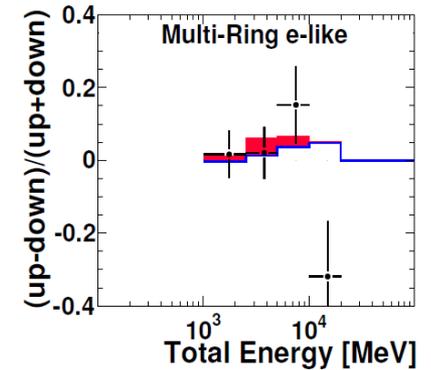
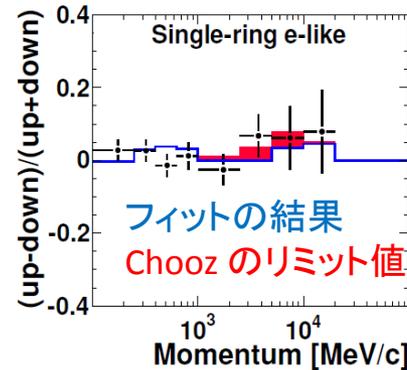
$$\Phi_e^{\text{Chooz}} / \Phi_e^0 - 1$$



Multi-GeVエネルギーの電子ニュートリノの天頂角分布は、 θ_{13} に感度がある。

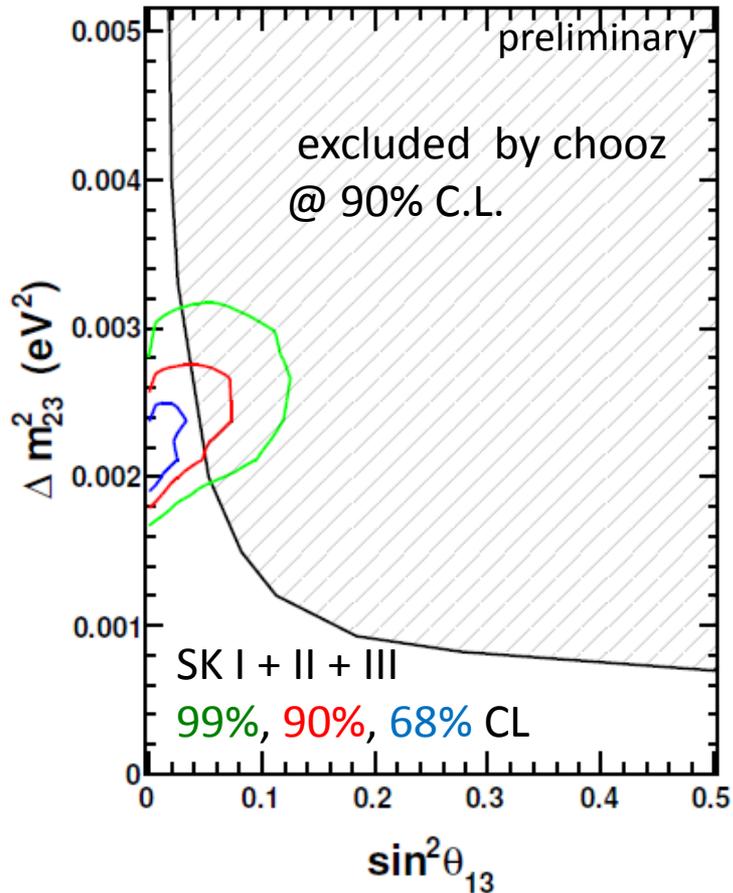
SK I + II + III の結果 preliminary

Multi-GeV 電子型事象



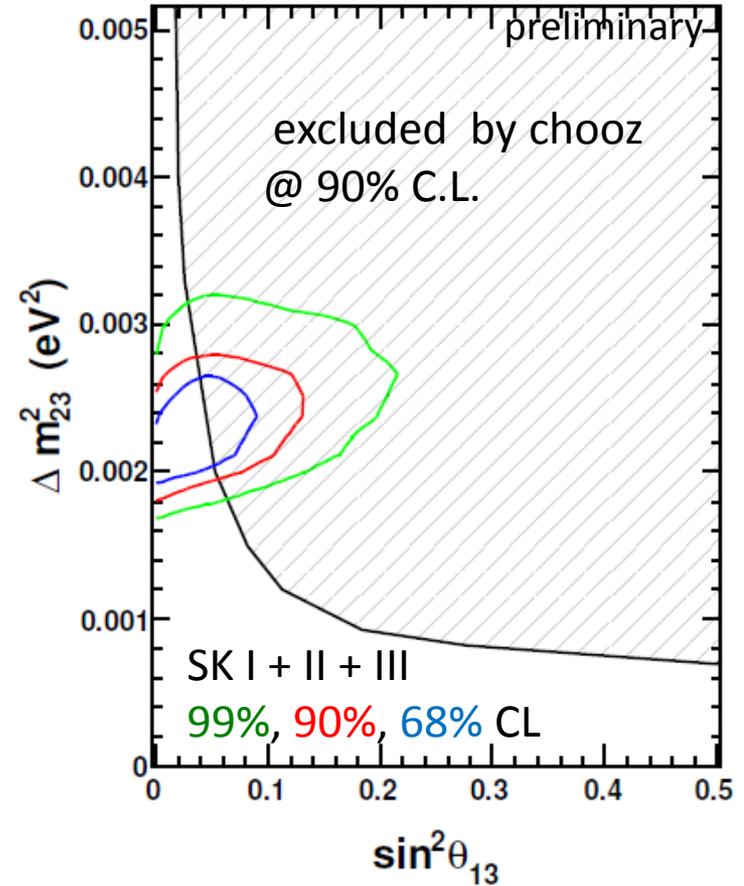
大気ニュートリノを用いた θ_{13} の測定

normal hierarchy



$\sin^2\theta_{13} < 0.072$
@90%C.L.

inverted hierarchy



$\sin^2\theta_{13} < 0.13$
@90%C.L.