

スーパーカミオカンデ実験

中山 祥英 (東京大学宇宙線研究所)

2008年12月19日

平成20年度共同利用研究成果発表研究会

History of Super-Kamiokande



SK-I



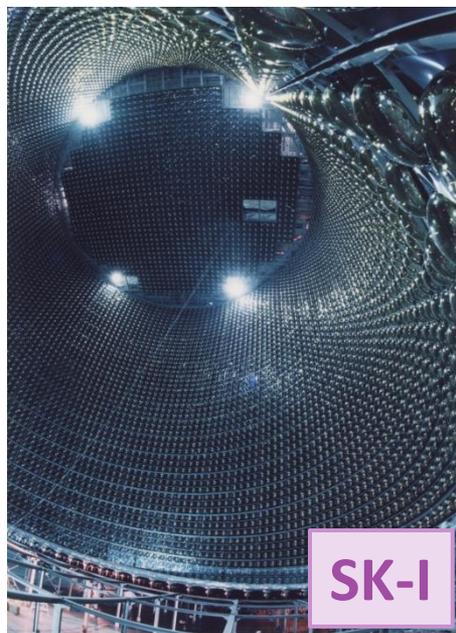
SK-II



SK-III



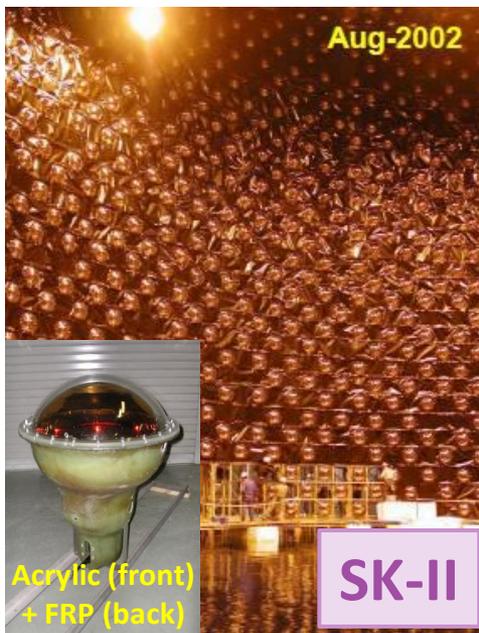
SK-IV



SK-I

11146 ID PMTs
(40% coverage)

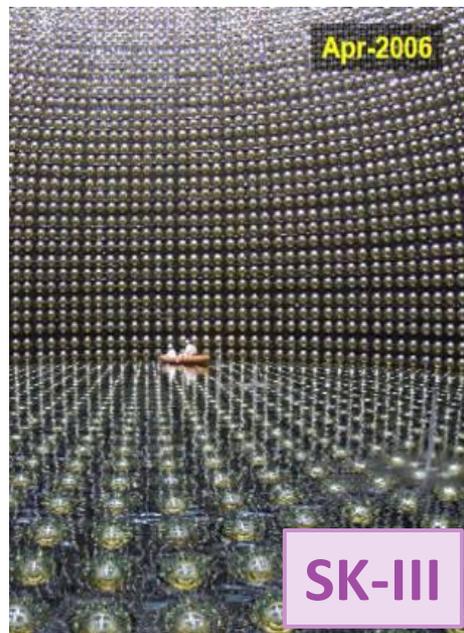
Energy
Threshold **5.0 MeV**
(total electron energy)



SK-II

5182 ID PMTs
(19% coverage)

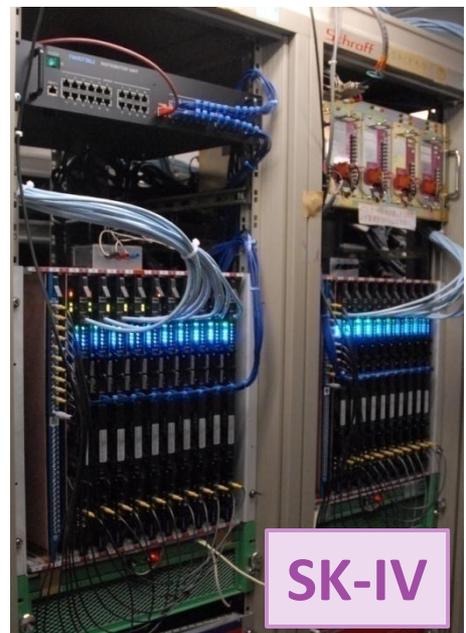
7.0 MeV



SK-III

11129 ID PMTs
(40% coverage)

4.5 MeV
work in progress



SK-IV

Electronics
Upgrade

< 4.0 MeV
target

Electronics Upgrade

新エレクトロニクスシステム開発の動機

□ 今後10年以上の安定したデータ収集

- 従来の研究対象の長期安定観測、T2Kニュートリノの安定測定
- 内水槽検出器と外水槽検出器で統一されたシステム
- 消費電力を低く抑える

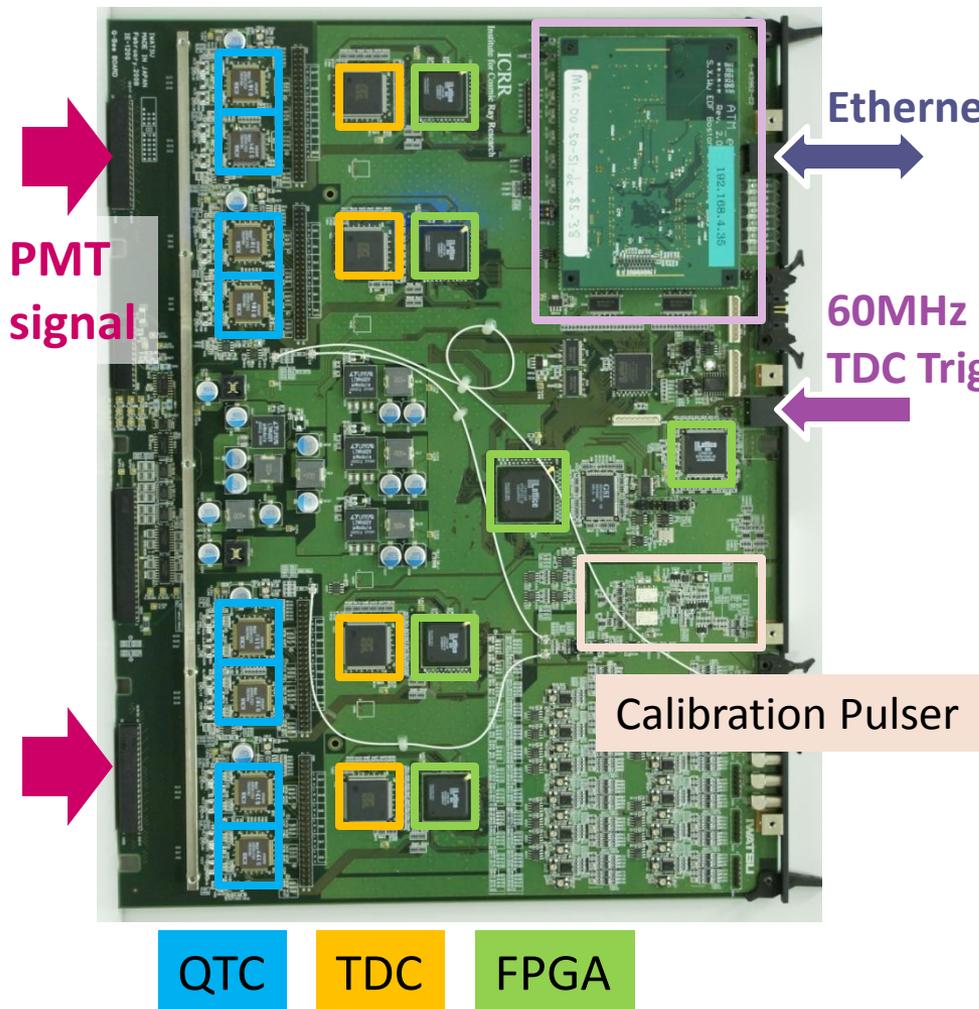
□ 観測領域の拡大、観測性能の向上

- 高エネルギー(> 数GeV)大気ニュートリノ事象のエネルギー分解能向上
- 太陽ニュートリノ観測のエネルギー閾値を下げる(< 5MeV)
- 近傍超新星爆発ニュートリノ事象の検出効率向上
- 反電子ニュートリノ反応からの中性子検出
(超新星背景ニュートリノ等の観測)

New front-end electronics, QBEE

Network Interface Card

QTC-Based Electronics with Ethernet
(QBEE)



Ethernet Readout

- 24チャンネル入力
- QTC (custom ASIC)
 - 3段のゲインステージ
 - 広いダイナミックレンジ (>2000pC)
- 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)

60MHz Clock
TDC Trigger

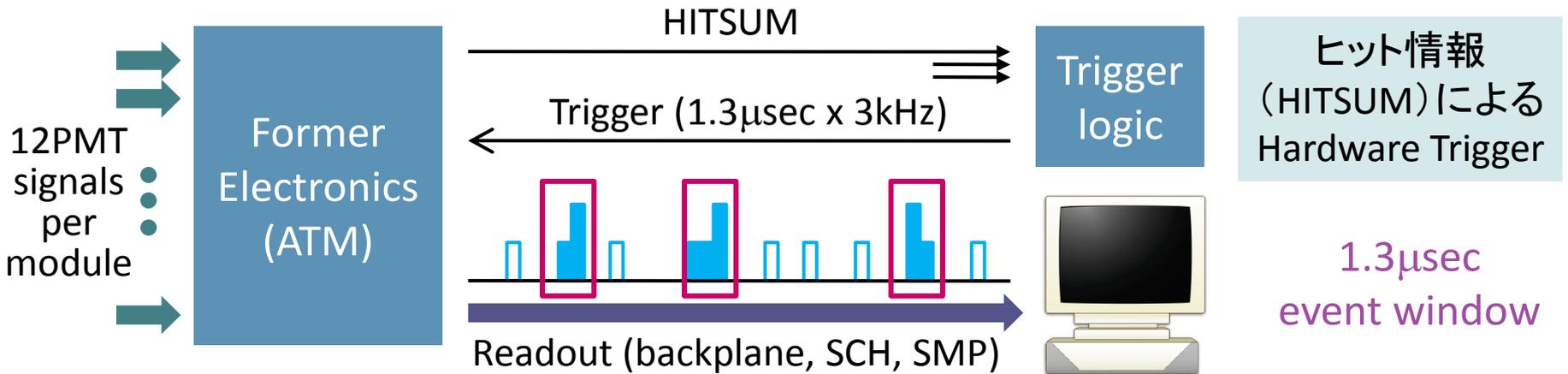
Calibration Pulser

QTC

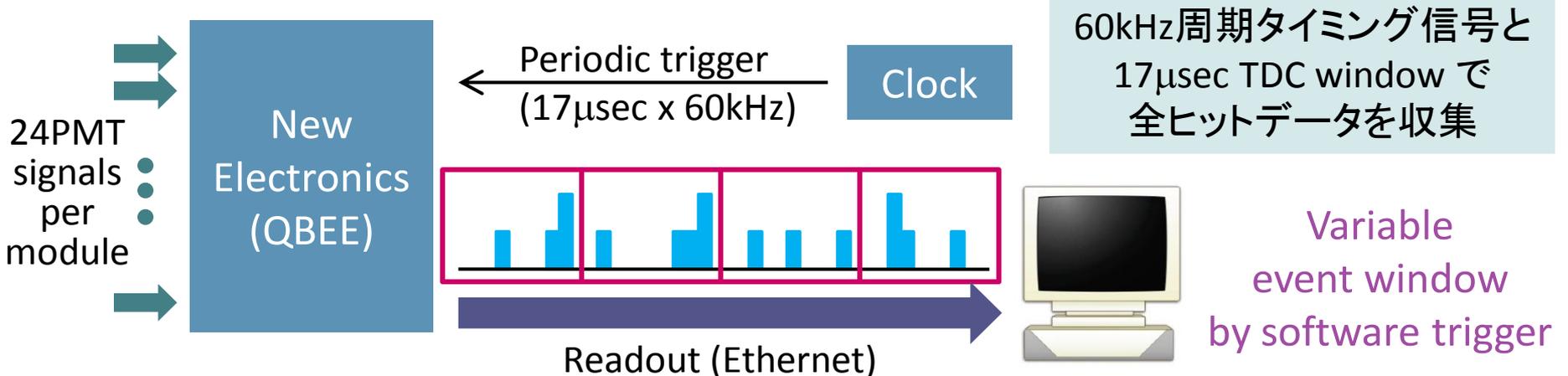
TDC

FPGA

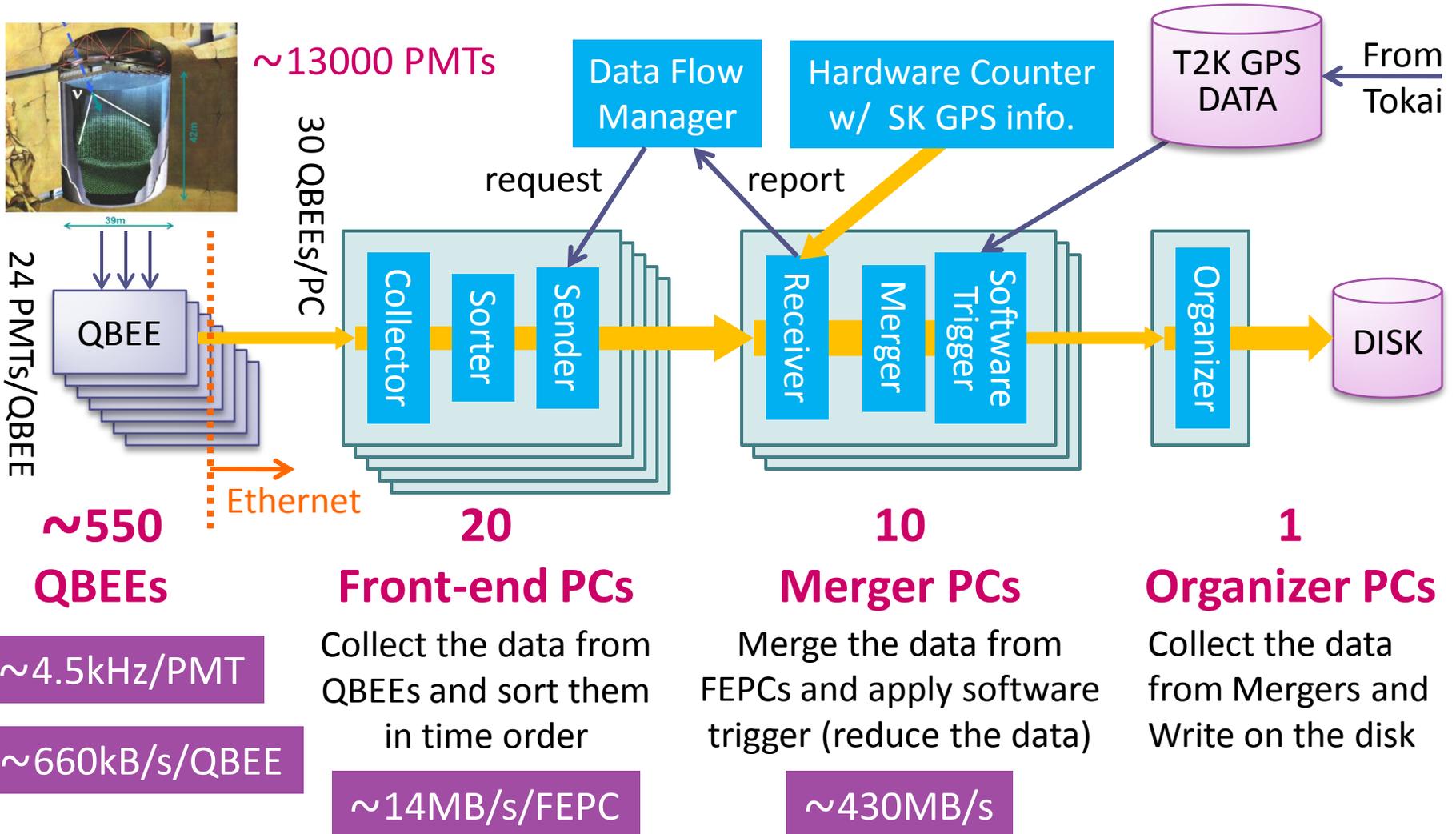
New DAQ readout scheme



No hardware trigger. Instead record all hits and apply software triggers.



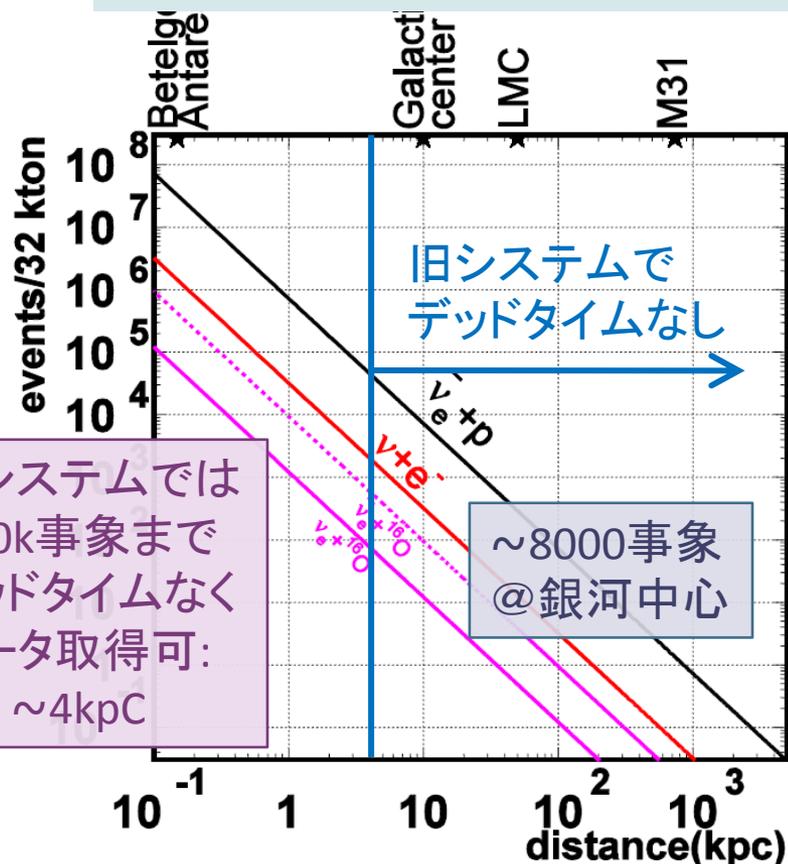
Block diagram of the new online DAQ



Achieved by Gigabit Ethernet, 10GbE + Distributed Processing

新エレキシステム導入による検出器性能向上(1)

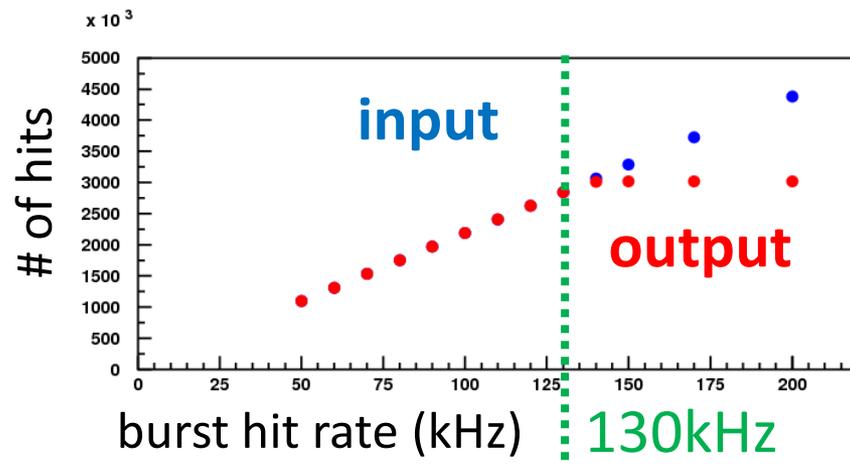
超新星爆発までの距離とSKで観測される事象数の関係



旧システムでは
~60k事象まで
デッドタイムなく
データ取得可:
~4kpc

~8000事象
@ 銀河中心

QBEEのバーストスループット

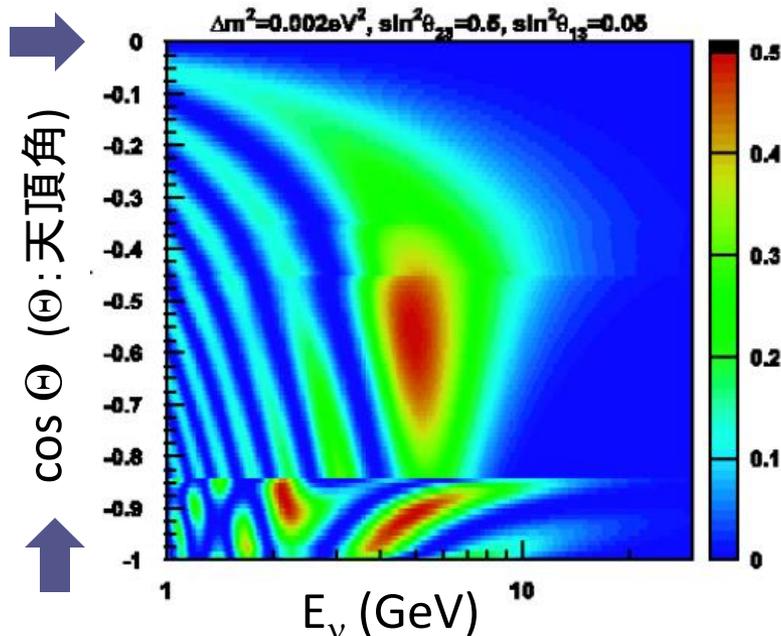


- バースト事象 (24ch hit, 1秒間) に対するQBEEのスループットを測定
- 130kHzまでefficiencyが100%
- 銀河中心の超新星爆発事象の約1000倍に相当 (現エレクトロニクスの100倍以上の性能)

→ 0.3kpcの距離でもデッドタイムなしで取れるようになる

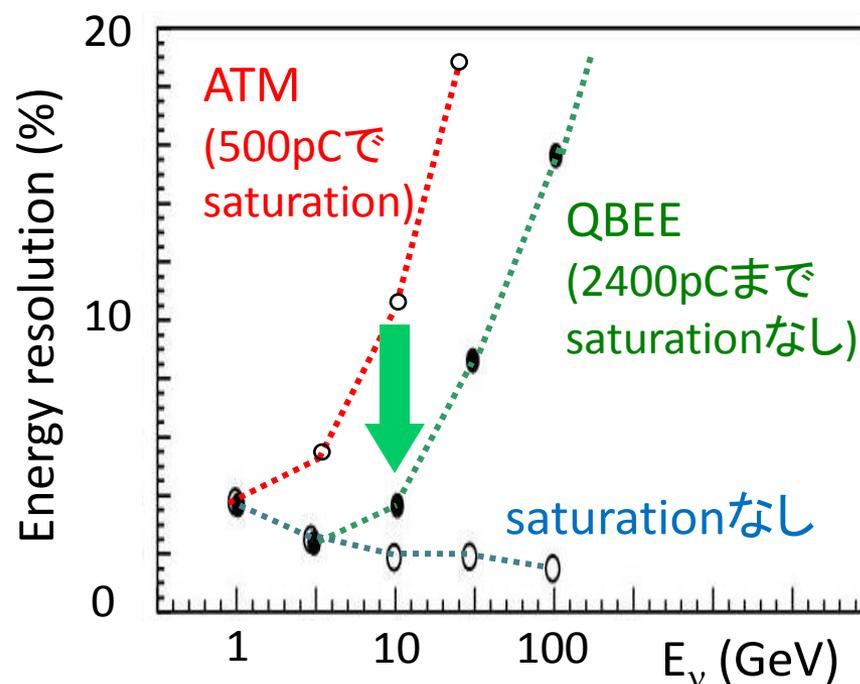
新エレキシステム導入による検出器性能向上(2)

θ_{13} が有限な値をもつときの
大気 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動確率 @SK



物質効果により、振動確率が
レゾナンス的に大きい部分が
2~10GeVのあたりに現れる

Multi-GeV e-like事象の
エネルギー分解能



3世代振動解析による θ_{13} の探索で重要となる、10GeV付近の大気ニュートリノ事象のエネルギー分解能が、大幅に良くなる

エレクトロニクス入れ替え作業(8/25~9/6)



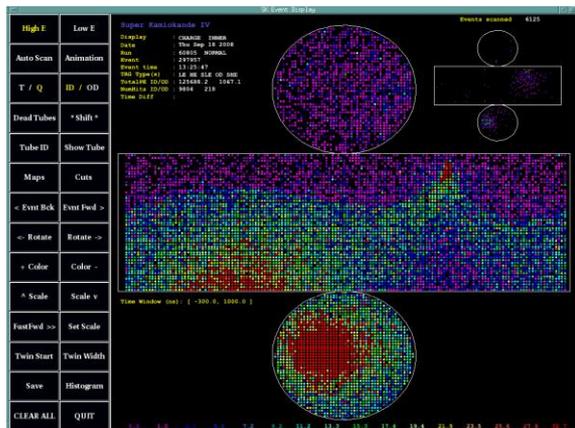
New electronics installation completed !



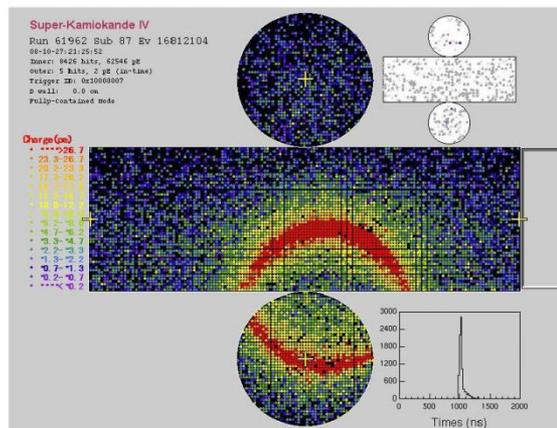
- 2008年9月6日、Super-Kamiokande IV 開始
- エレクトロニクスの詳細なチェック、オンラインプログラムのコミッショニング、基本的な検出器キャリブレーションを約2か月かけておこなった
- SK-IVの開始以来、順調に観測データを収集している
データ解析も始まっている

SK-IV events, startup calibrations, etc.

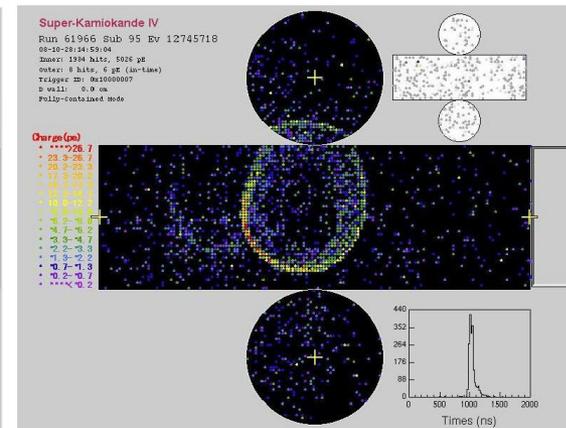
Cosmic-ray muon



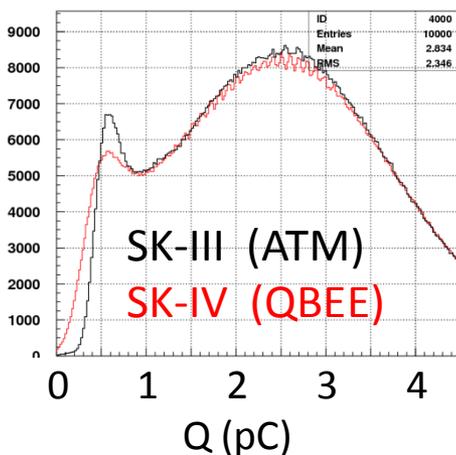
Atmospheric ν (e-like)



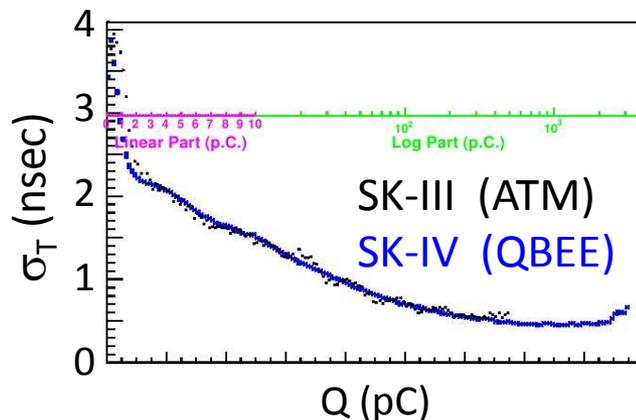
Atmospheric ν (μ -like)



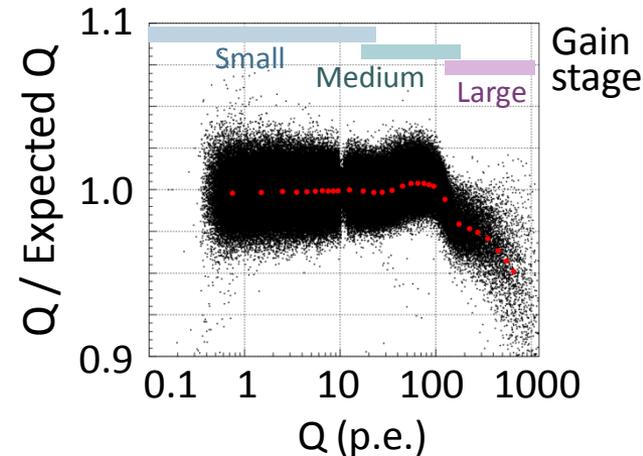
Single p.e. distribution (by Ni)



Timing resolution (by Laser)



Charge linearity (by Laser)



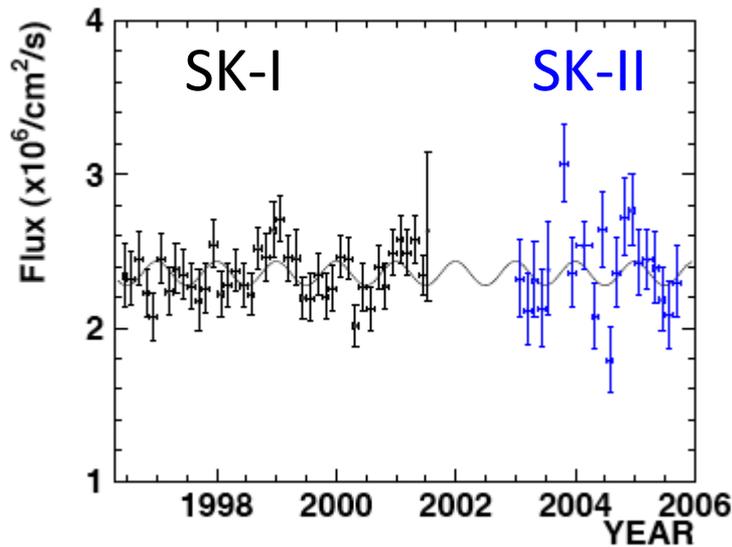
他にも、SN burst試験などがおこなわれている

Solar Neutrinos

SK-I + SK-II : Solar Neutrino Flux

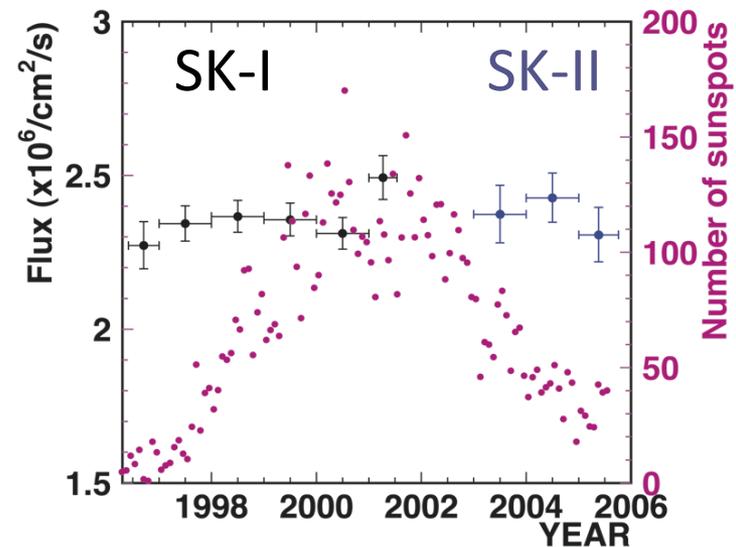
	Livetime (days)	Energy range (MeV)	Number of signal events	Flux ($\times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$)
SK-I	1496	5.0-20.0	22404 ± 226 (stat) $^{+784}_{-717}$ (sys)	2.35 ± 0.02 (stat) ± 0.08 (sys)
SK-II	791	7.0-20.0	$7212.8^{+152.9}_{-150.9}$ (stat) $^{+483.3}_{-461.6}$ (sys)	2.38 ± 0.05 (stat) $^{+0.16}_{-0.15}$ (sys)

Seasonal Variation



Consistent with expected variations due to eccentricity of Earth's orbit

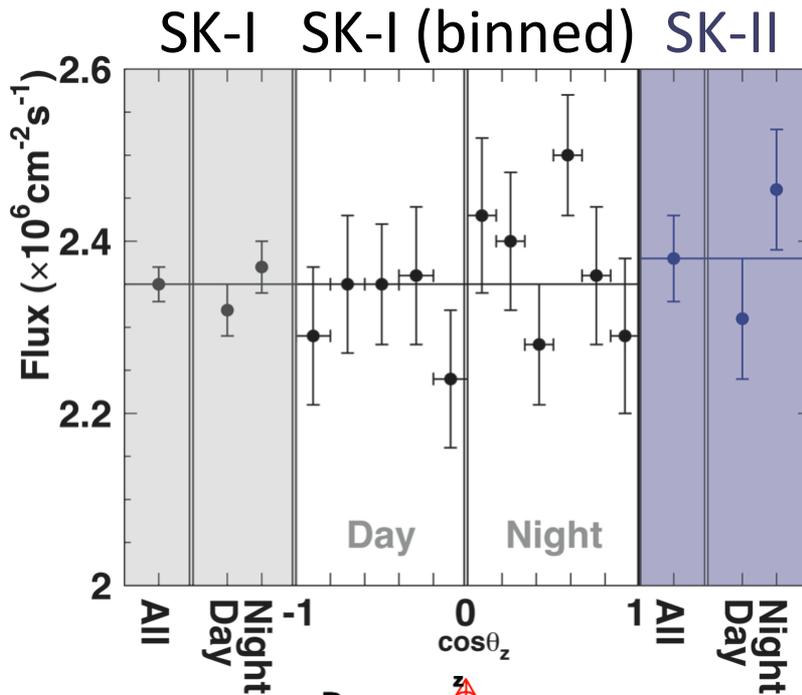
Correlation with Solar Activity



No correlation with solar cycle minima or maximum seen

SK-I + SK-II : Solar Neutrino Flux (cont'd)

Day/Night Asymmetry



$$\mathcal{A} = \frac{\Phi_{day} - \Phi_{night}}{\frac{1}{2}(\Phi_{day} + \Phi_{night})}$$

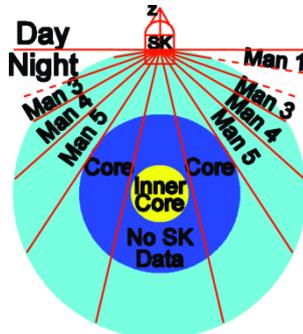
SK-I day-night asymmetry:

$$-0.021 \pm 0.020 \text{ (stat)}_{-0.012}^{+0.013} \text{ (sys)}$$

SK-II day-night asymmetry:

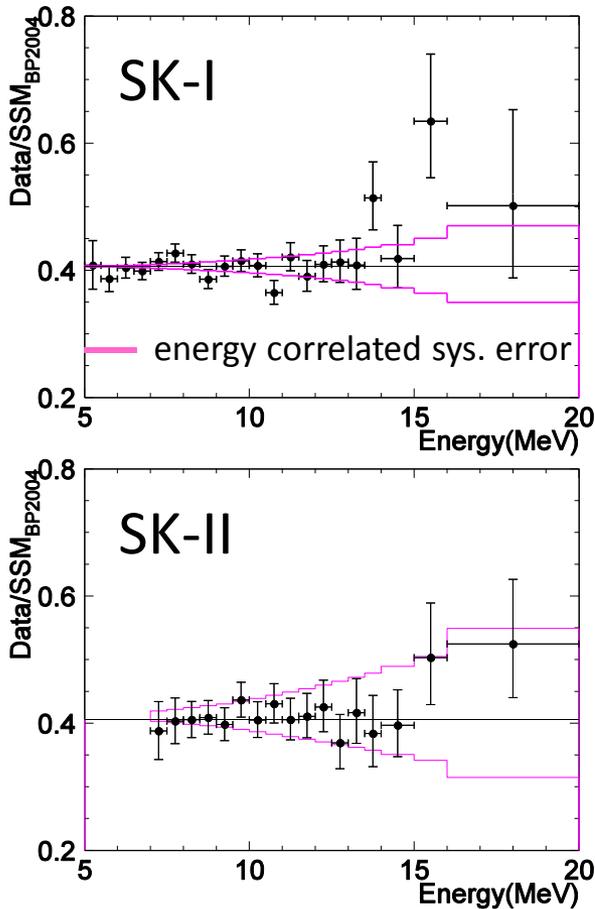
$$-0.063 \pm 0.042 \text{ (stat)} \pm 0.037 \text{ (sys)}$$

Consistent with zero



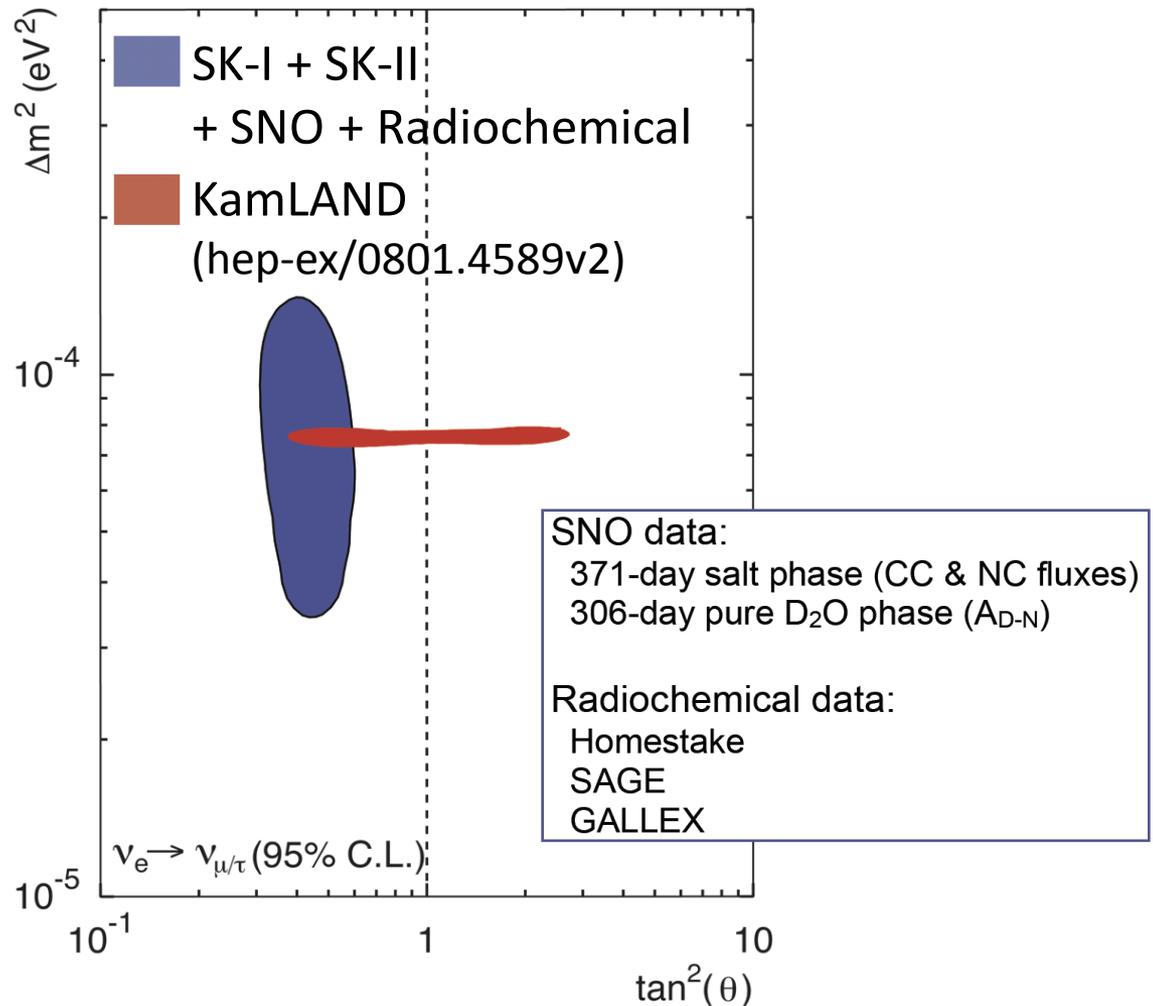
SK-I + SK-II : Energy Spectrum / Oscillation Analysis

Energy Spectrum

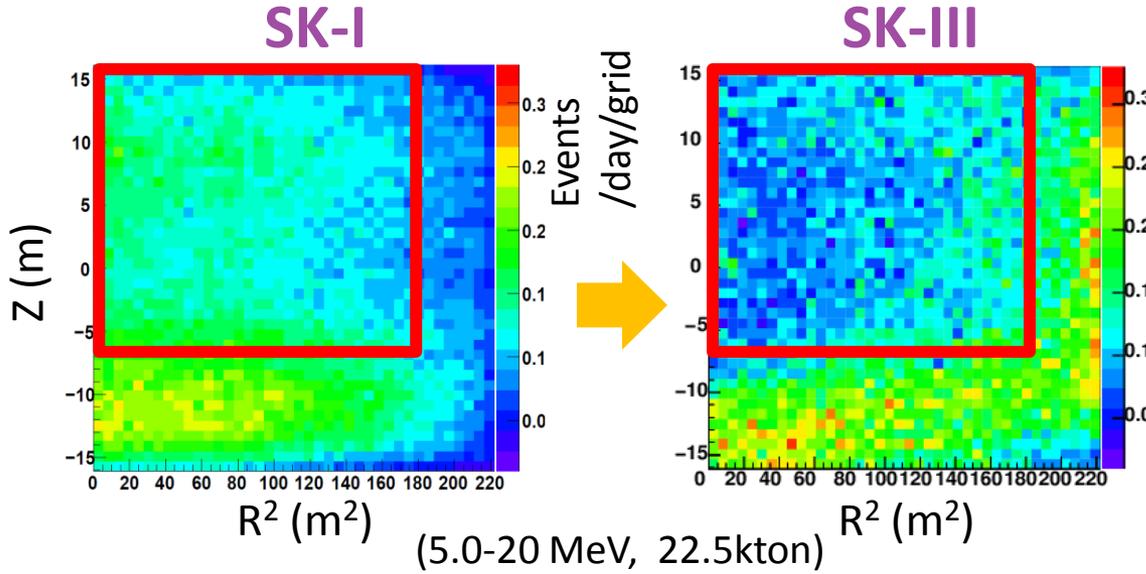


No significant distortion can be seen

Allowed Oscillation Parameter Region

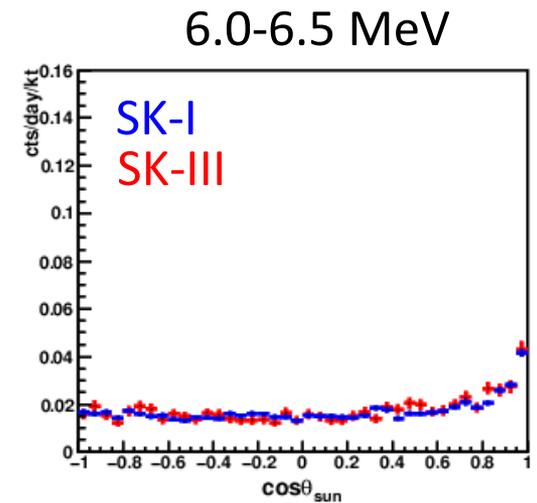
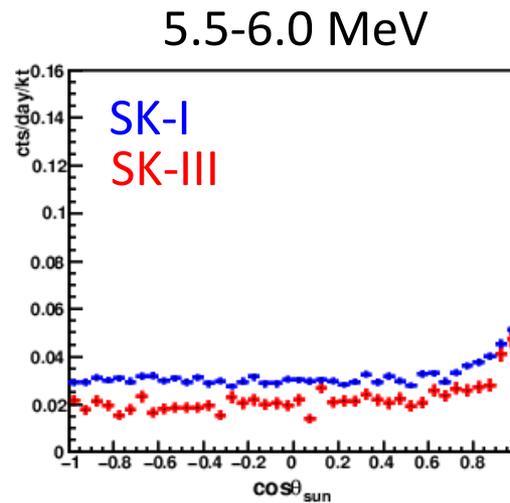
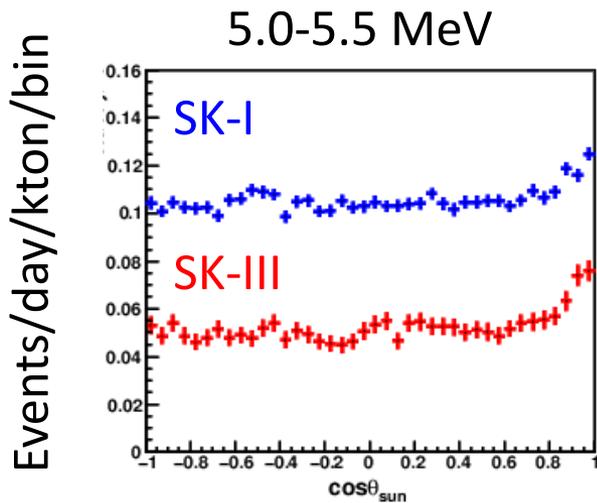


SK-III : Background in the central region

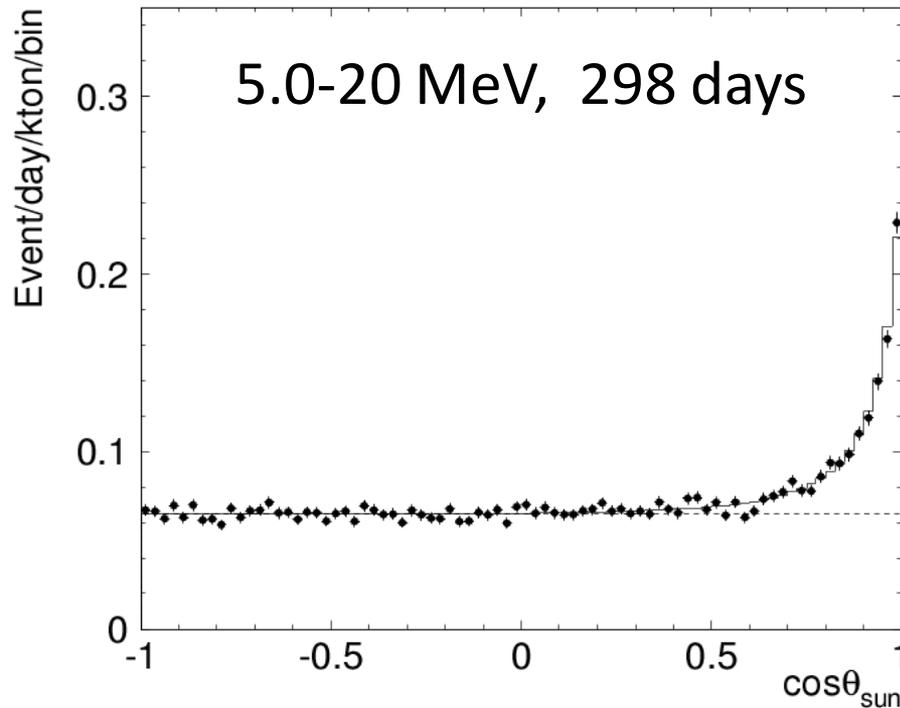


SK-III background rate lower than SK-I in central region (water system improvement)

By a better timing calibration, the low BG region extended from the previous report (8.9kton → 13.3kton)



SK-III : Solar Neutrino Measurement



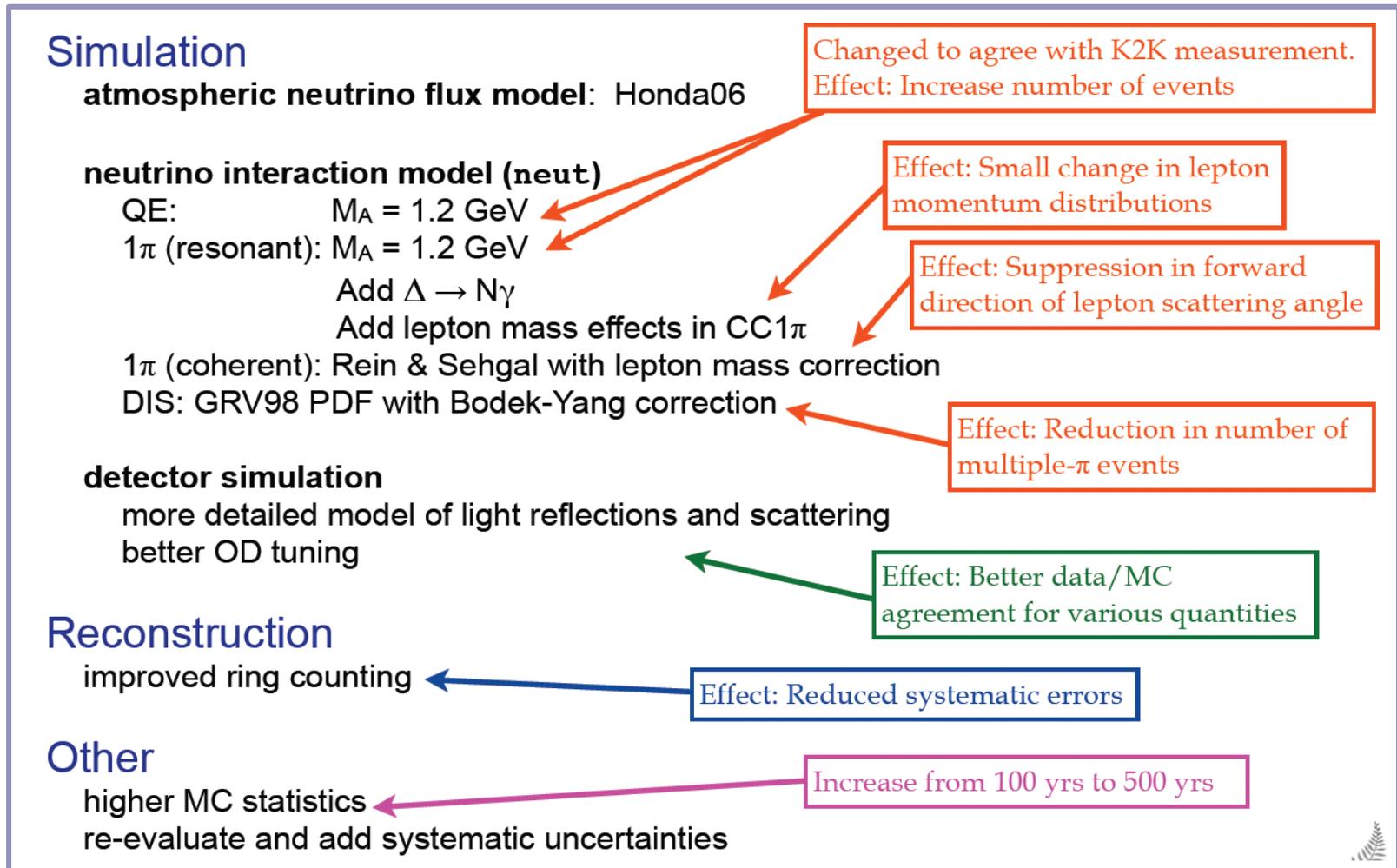
Signal :
4563.1^{+103.1}_{-101.4} (stat. error only)

- SK-IIIの最終期間 (Livetime: 86days) は、trigger thresholdを下げてデータをとった (4.5 MeVでefficiency 100%)
- 4.5-5.0 MeVは現在解析中
- SK-IVでは、まずエネルギー閾値4.0 MeVを目指す

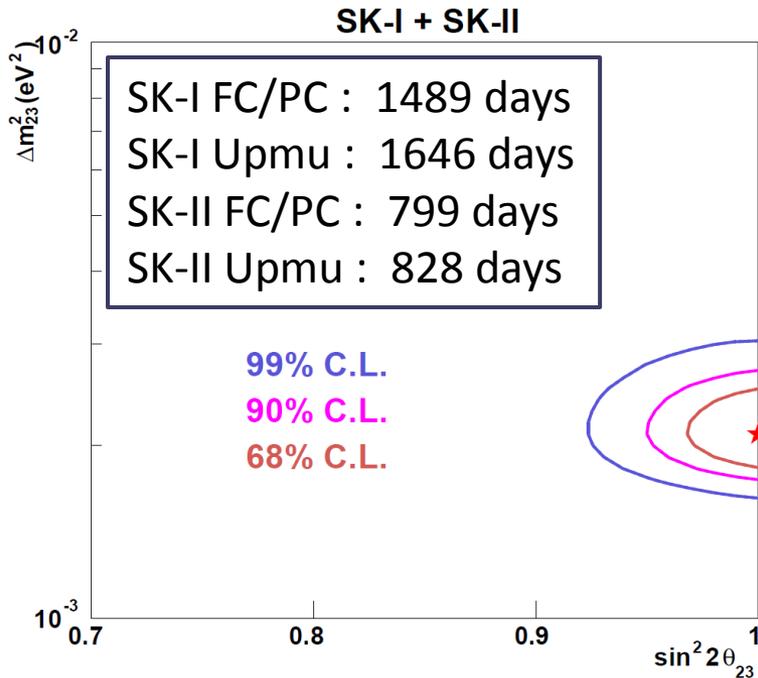
Atmospheric Neutrinos

Simulation/Reconstruction Updates

Re-analysis of SK-I and SK-II data due to many changes/improvements



SK-I + SK-II : Zenith Angle Analysis (2-flavor)

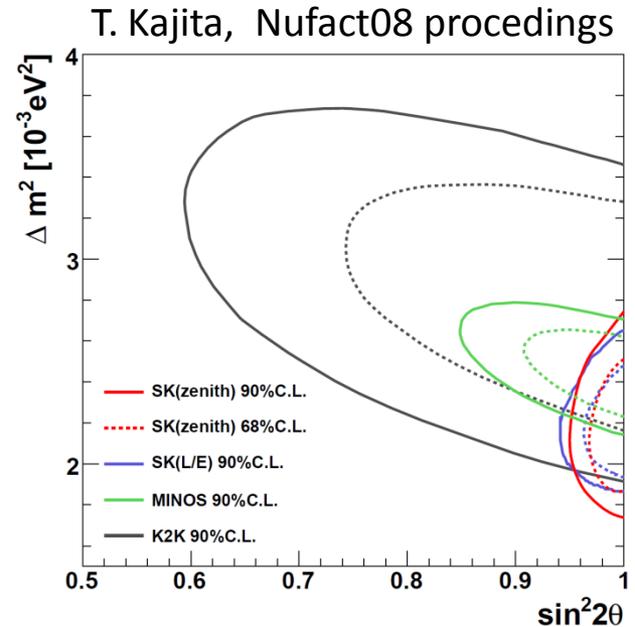


Best fit:

$\chi^2_{\min} = 834.3/745$ d.o.f (physical region)
 at $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1.00, 2.1 \times 10^{-3} \text{eV}^2)$

$\chi^2_{\min} = 832.8/745$ d.o.f (including unphysical region)
 at $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1.02, 2.1 \times 10^{-3} \text{eV}^2)$

90% confidence level allowed region:
 $\sin^2 2\theta > 0.95$
 $1.7 \times 10^{-3} \text{eV}^2 < \Delta m^2 < 2.7 \times 10^{-3} \text{eV}^2$



MINOSの結果

$2.1 \times 10^{-3} \text{eV}^2 < \Delta m^2 < 2.7 \times 10^{-3} \text{eV}^2$
 $\sin^2 2\theta > 0.85$ (90% C.L.)
 と相補的(混合角については
 SK大気νからより強い制限)

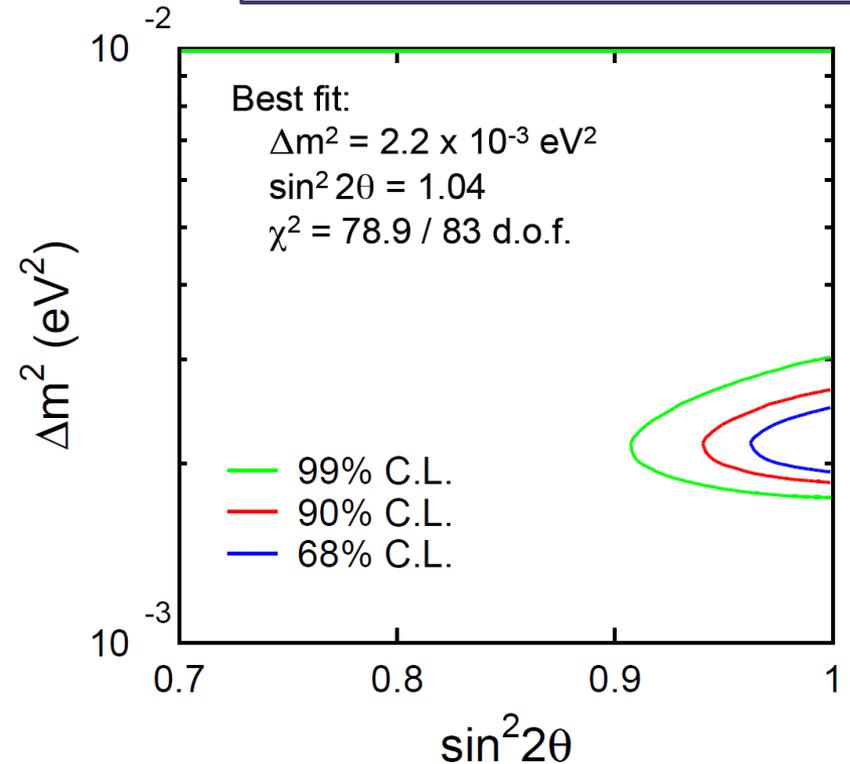
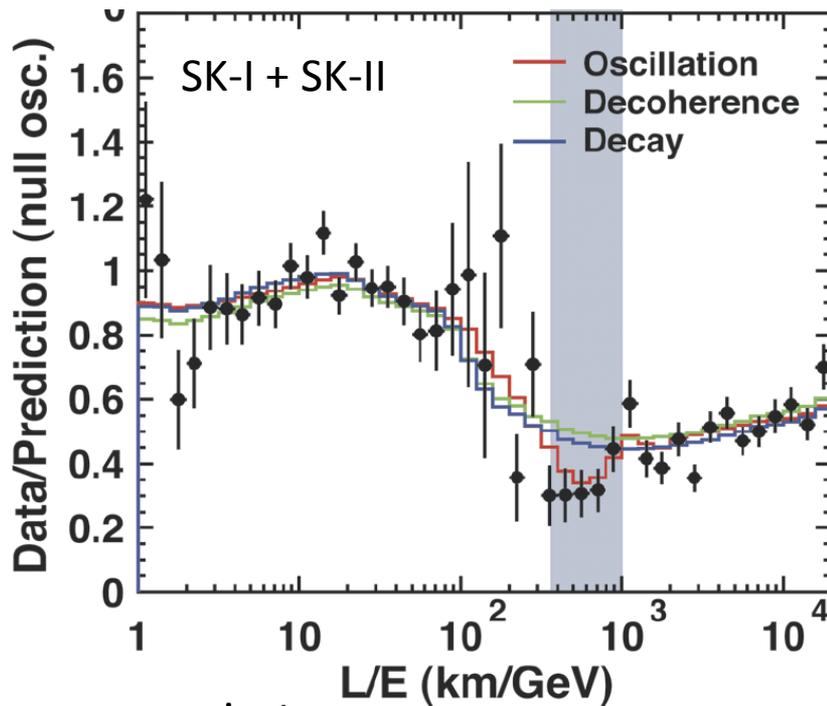
Preliminary

SK-I + SK-II : L/E analysis

Select good L/E resolution (<70%) events
Perform oscillation analysis with a L/E binning

Datasets

SK-I FC/PC μ -like: 1489 days
SK-II FC/PC μ -like: 799 days



Compare against

Neutrino Decoherence (5σ)

Neutrino Decay (4.1σ)

90% C.L. allowed region
 $\sin^2 2\theta > 0.94$
 $1.85 \times 10^{-3} < \Delta m^2 < 2.65 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

Grossman and Worah: hep-ph/9807511
Lisi *et al.*: PRL85 (2000) 1166
Barger *et al.*: PRD54 (1996) 1, PLB462 (1999) 462

SK-I + SK-II : Oscillation + NSI Hybrid Analysis

Non-standard neutrino-matter interaction (NSI)

$$H = \frac{1}{2E} U_{\alpha j} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta m_{21}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta m_{31}^2 \end{pmatrix}_{jk} (U^\dagger)_{k\beta} + V_{MSW} + \sqrt{2} G_F N_f \begin{pmatrix} \epsilon_{ee} & \epsilon_{e\mu} & \epsilon_{e\tau} \\ \epsilon_{e\mu}^* & \epsilon_{\mu\mu} & \epsilon_{\mu\tau} \\ \epsilon_{e\tau}^* & \epsilon_{\mu\tau}^* & \epsilon_{\tau\tau} \end{pmatrix}$$

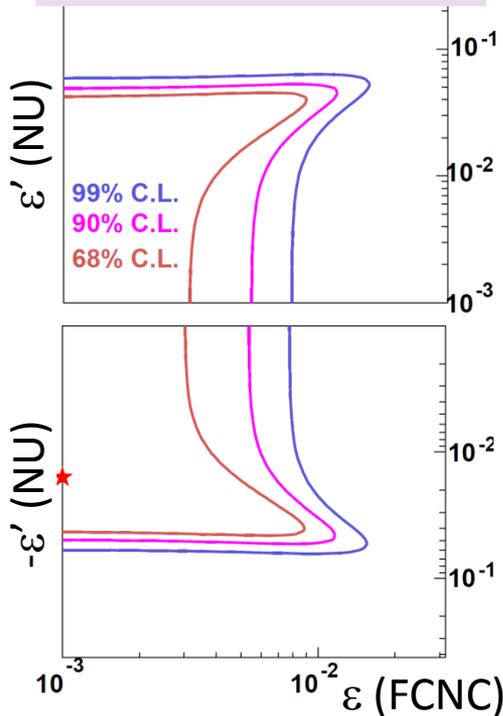
Standard oscillation

Matter effect

NSI

- Flavor changing neutral current (FCNC)
- Lepton non-universality (NU)

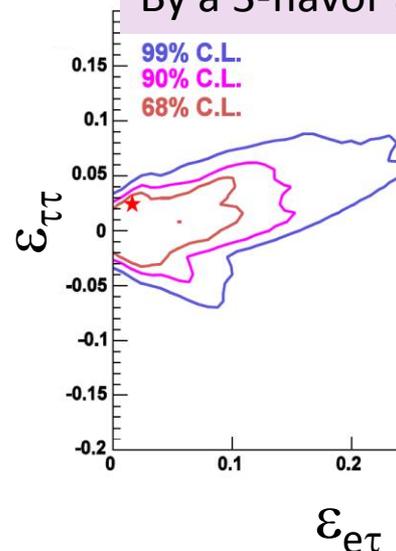
By a 2-flavor analysis



Limit at 90% C.L.

ϵ (FCNC) =
 $|\epsilon_{\mu\tau}| < 0.011$
 ※これまでのリミットはNuTeVによる0.05
 ϵ' (NU) =
 $|\epsilon_{\mu\mu} - \epsilon_{\tau\tau}| < 0.052$

By a 3-flavor analysis

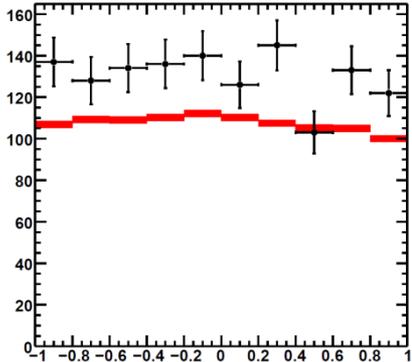


Limit at 90% C.L.

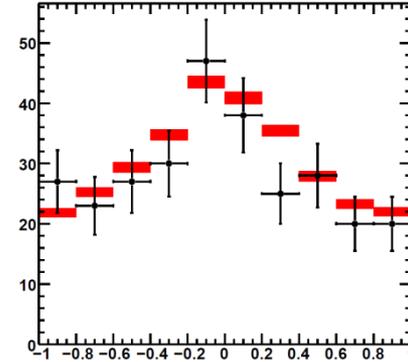
$|\epsilon_{e\tau}| < 0.16$
 ※これまでのリミットはCHARMによる0.5
 $-0.05 < \epsilon_{\tau\tau} < 0.06$
 ※これまでのリミットはZ→ννによる1.1

SK-III : Zenith Angle Distributions / Future

sub-GeV 1ring e-like



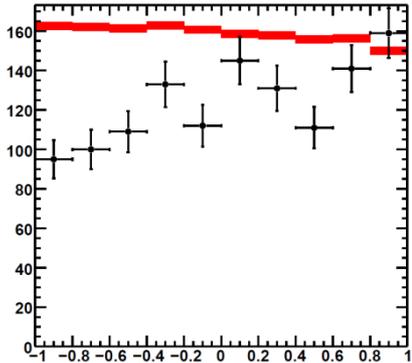
multi-GeV 1ring e-like



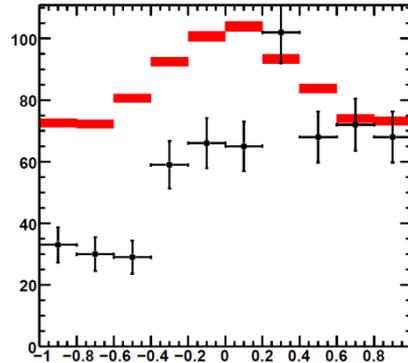
- FC/PC \blackstar SK-III data (550 days)
- Monte Carlo (no oscillation) █
- Upmu \blackstar SK-III data (636 days)
- Monte Carlo (no oscillation) ▭
- Monte Carlo (oscillation) ▭

No oscillation analysis yet, but zenith angle distortion clearly visible

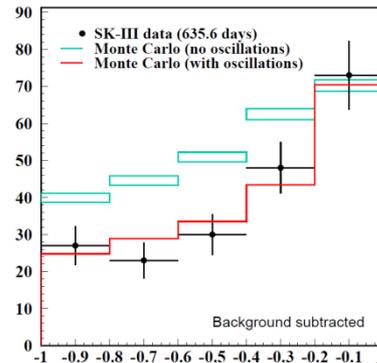
sub-GeV 1ring μ -like



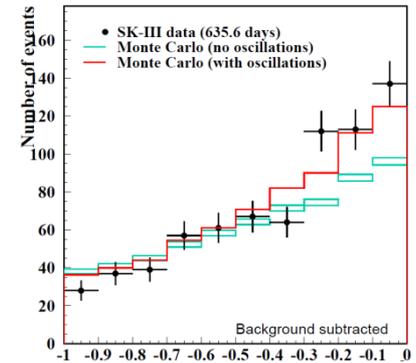
multi-GeV μ -like + PC



Upward stopping μ



Upward through-going μ



SK大気ニュートリノ解析の今後の予定

- ν_τ appearance解析のupdate \rightarrow significance $> 3\sigma$ を目指す
- sub-dominant effect (non-zero θ_{13} , octant of θ_{23}) のstudy

など

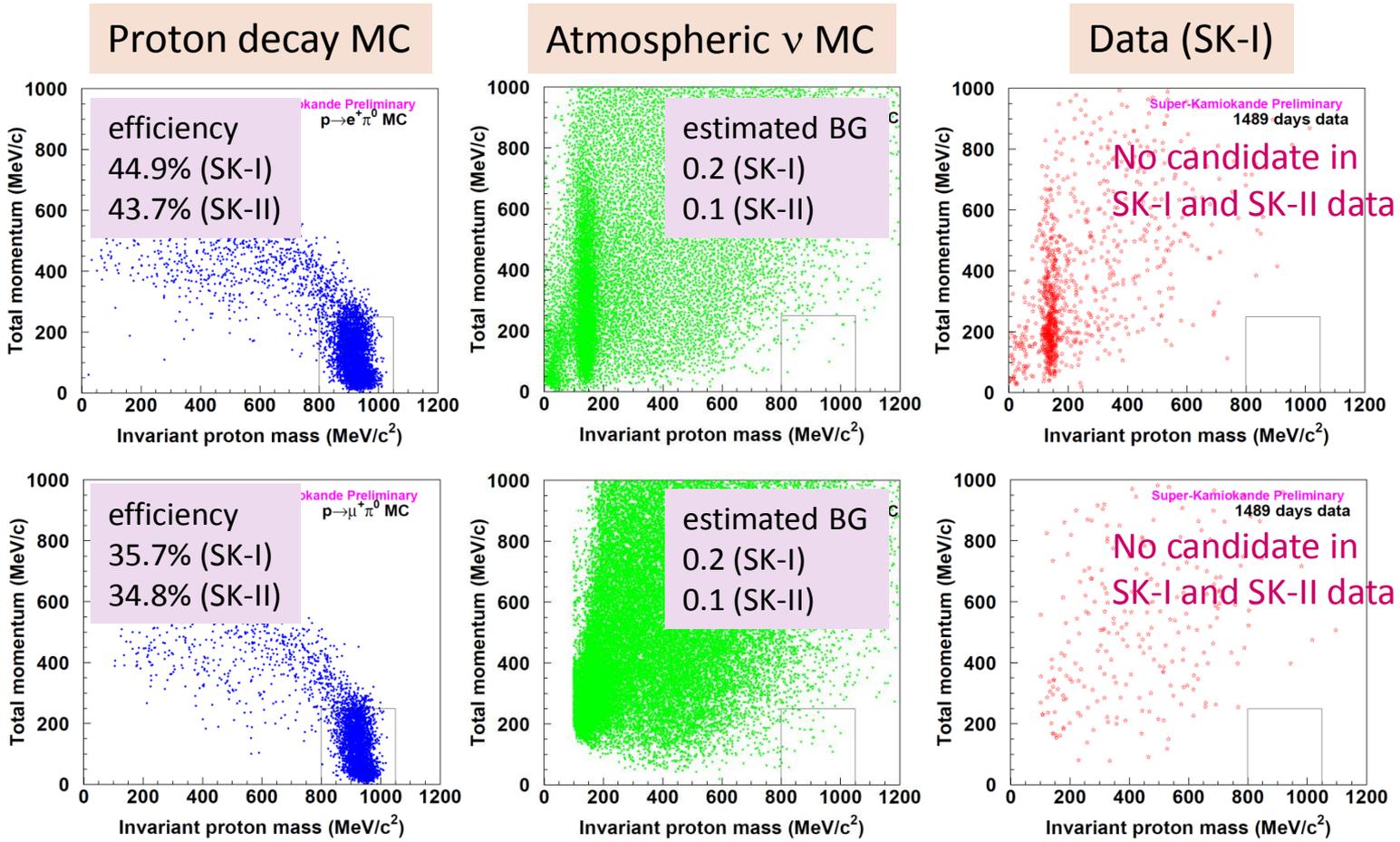
Nucleon Decays

Preliminary

SK-I + SK-II : $p \rightarrow e^+\pi^0$ & $p \rightarrow \mu^+\pi^0$

$p \rightarrow e^+\pi^0$

$p \rightarrow \mu^+\pi^0$

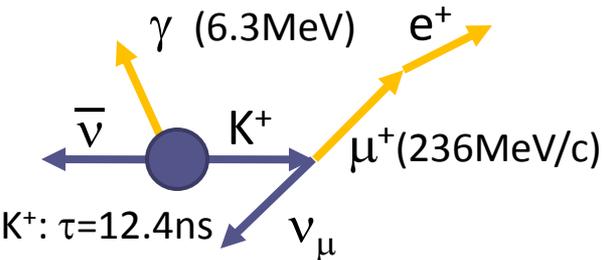


SK-I + SK-II Combined Limit : $\tau/B_{e+\pi^0} > 8.2 \times 10^{33}$ years (90% C.L.)
 $\tau/B_{\mu+\pi^0} > 6.6 \times 10^{33}$ years (90% C.L.)

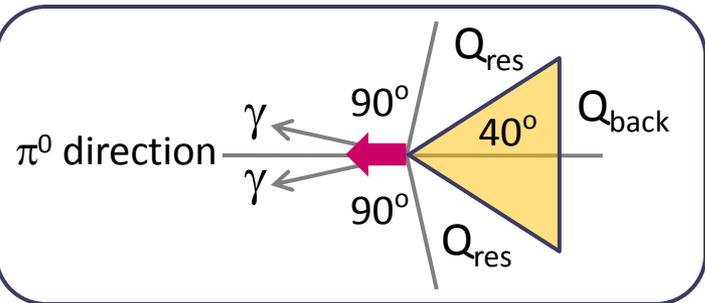
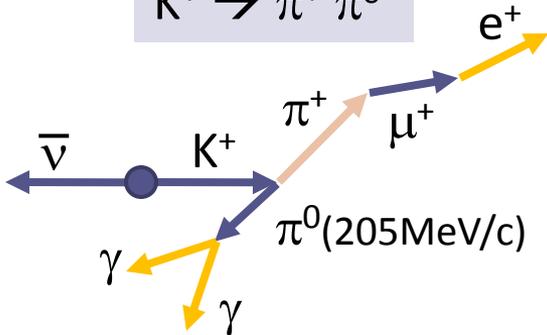
Preliminary

SK-I + SK-II : $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$

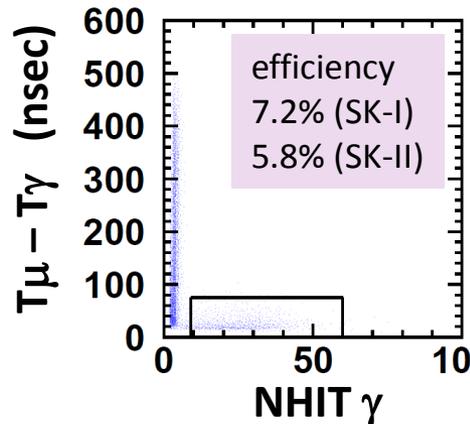
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ w/ prompt γ



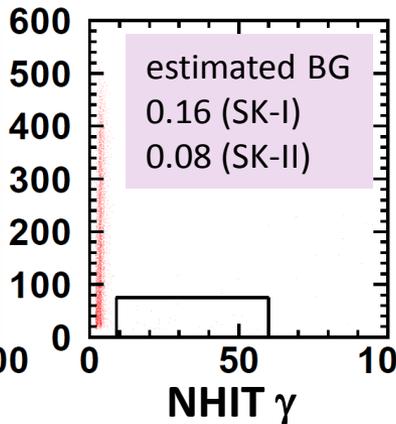
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$



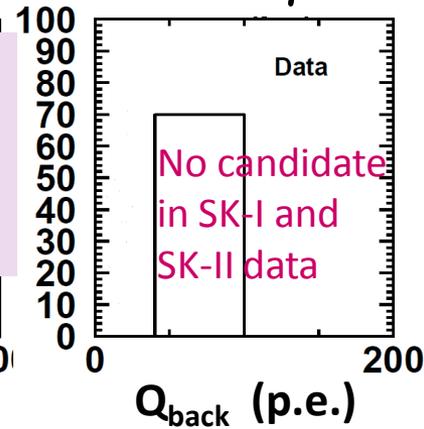
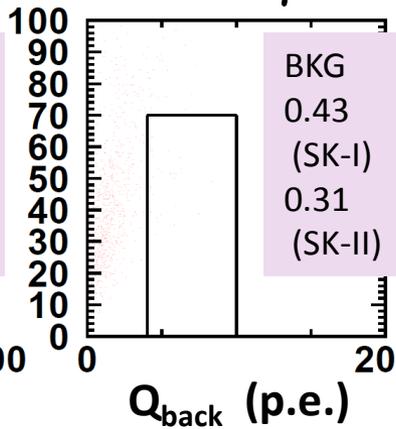
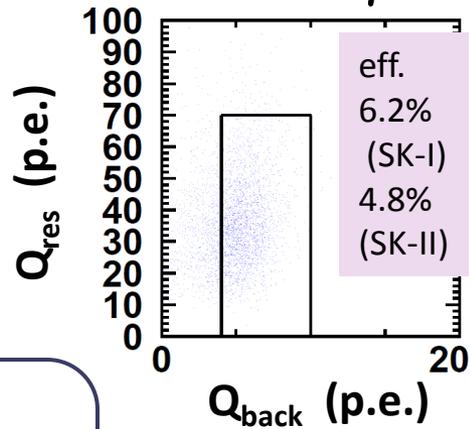
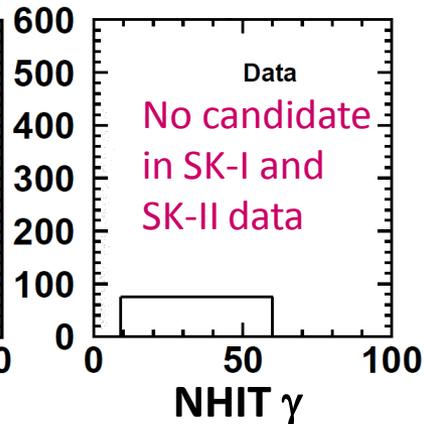
Proton decay MC



Atm. ν MC



Data (SK-I)



SK-I + SK-II Combined Limit :

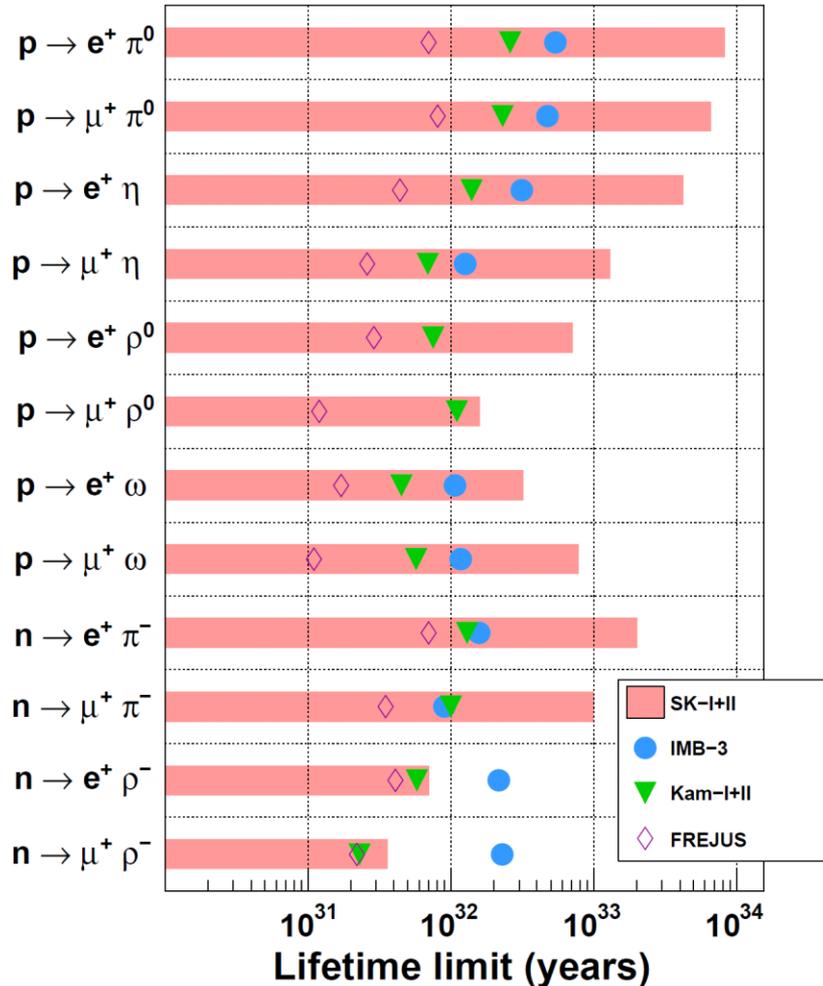
$$\tau / B_{\nu K} > 2.8 \times 10^{33} \text{ years (90\% C.L.)}$$

SK-I + SK-II : Other modes

$p(n) \rightarrow \text{lepton} + \text{meson}$

□ Many other decay-modes are under study

- $n \rightarrow \pi^0 \nu$
- $pp \rightarrow K^+K^+$
- $pp \rightarrow \ell^+\ell^-$ etc.
- $p \rightarrow \pi\mu K$
- $p \rightarrow \mu K^0_{\text{long}}$



Summary

□ Electronics Upgrade

- 長期にわたる安定した高速・高精度観測を実現するために開発
- 2008年9月6日 Super-Kamiokande IV スタート、順調にデータ収集

□ Solar Neutrinos

- SK-II太陽ニュートリノ観測の論文publish、SK-Iの結果とconsistent
- SK-IIIでは検出器中心のBG低減に成功、4.5-5.0MeVも解析中

□ Atmospheric Neutrinos

- Simulation/Reconstruction/MC statisticsの改良を受けてSK-I + SK-IIデータの再解析、振動パラメータをより精度良く測定
- SK-III/SK-IVデータも加えてさらに精密な測定へ (sub-dominant effect)

□ Nucleon Decays

- 幅広いdecay modeについて、これまでのLifetime limitを更新