

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

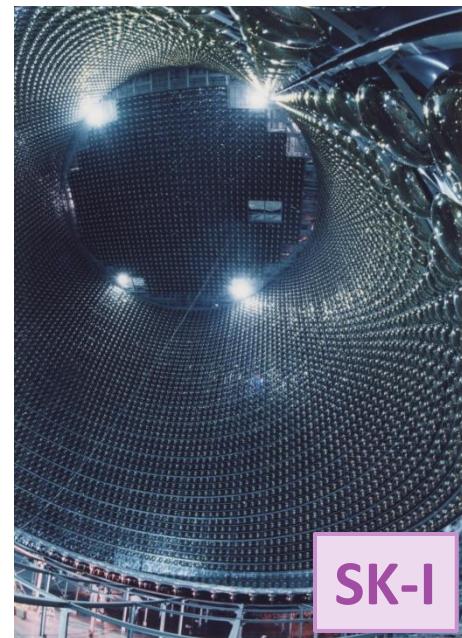


SK-I

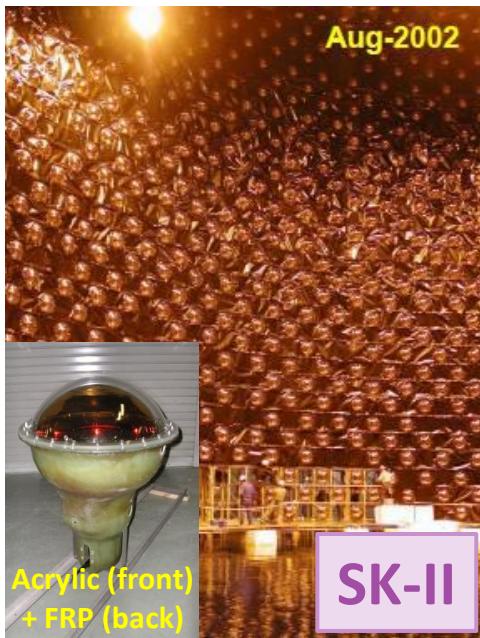
SK-II

SK-III

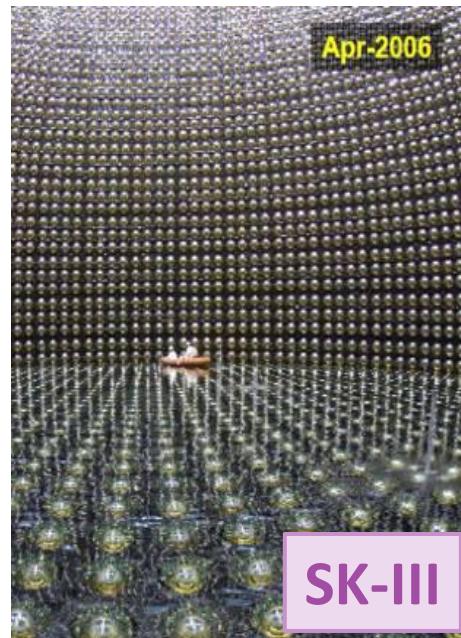
SK-IV



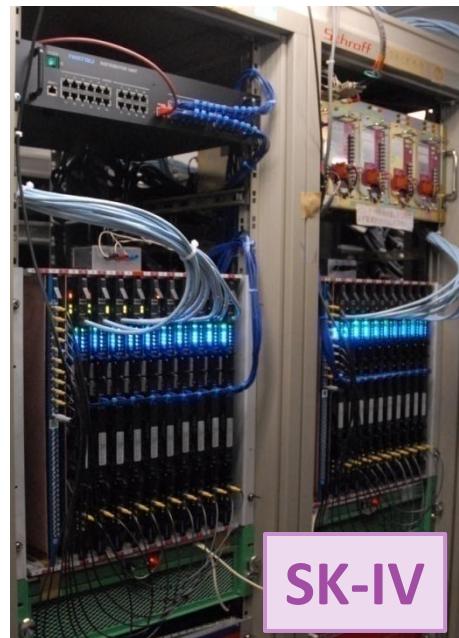
SK-I



Acrylic (front)
+ FRP (back)



SK-III



SK-IV

11146 ID PMTs
(40% coverage)

Energy
Threshold
(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

Electronics Upgrade

新エレクトロニクスシステム開発の動機

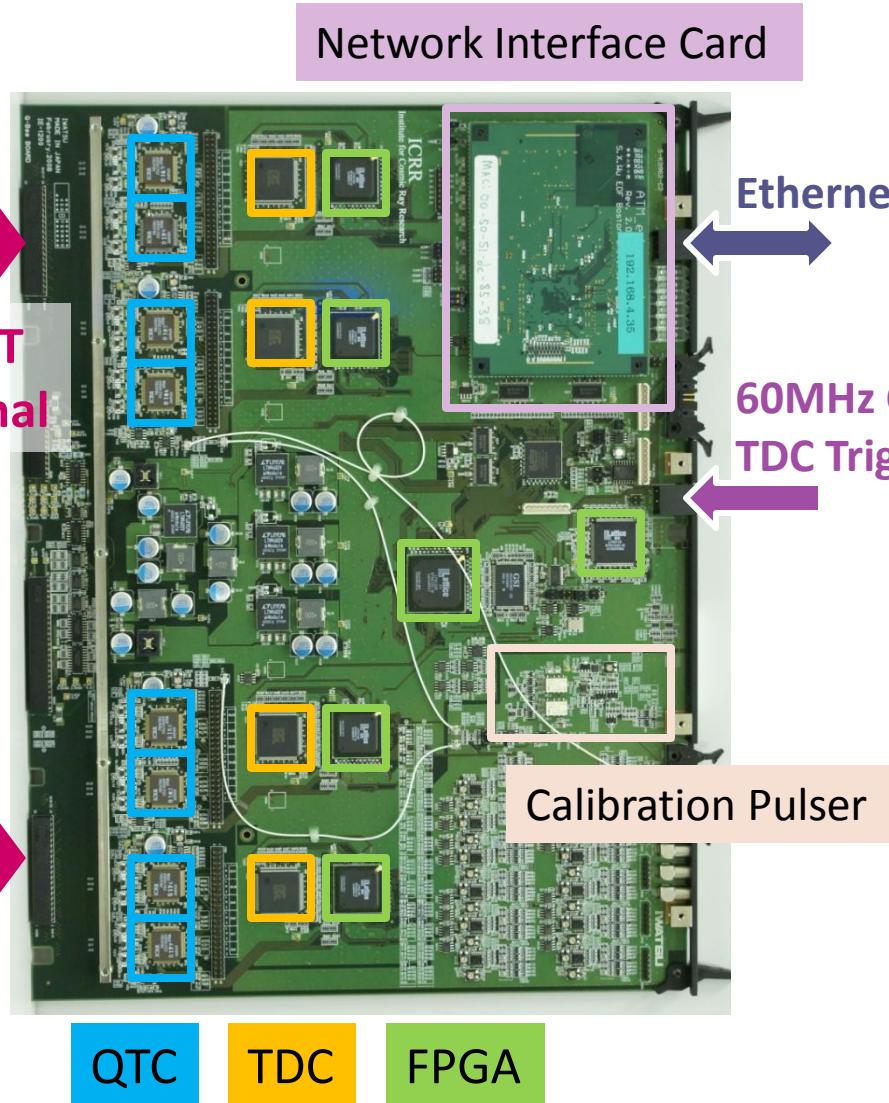
□ 今後10年以上の安定したデータ収集

- 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)

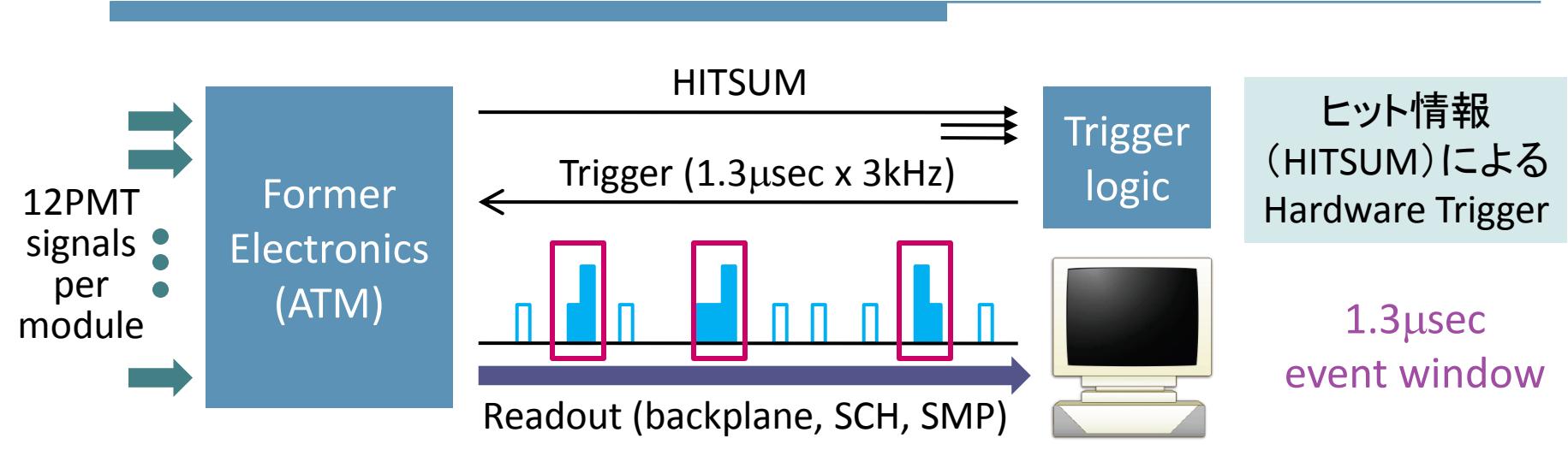
New front-end electronics, QBEE



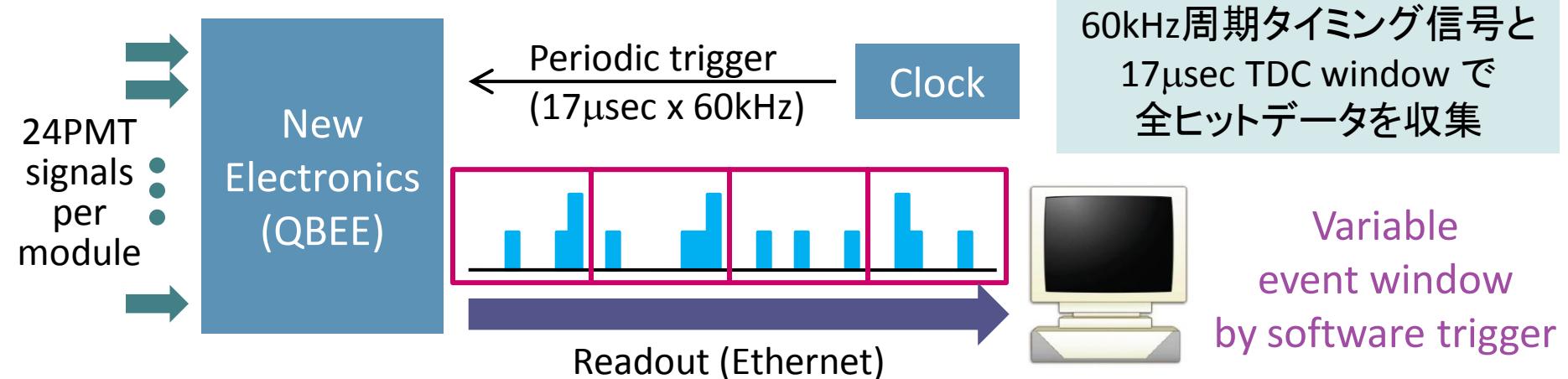
QTC-Based Electronics with Ethernet (QBEE)

- 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)

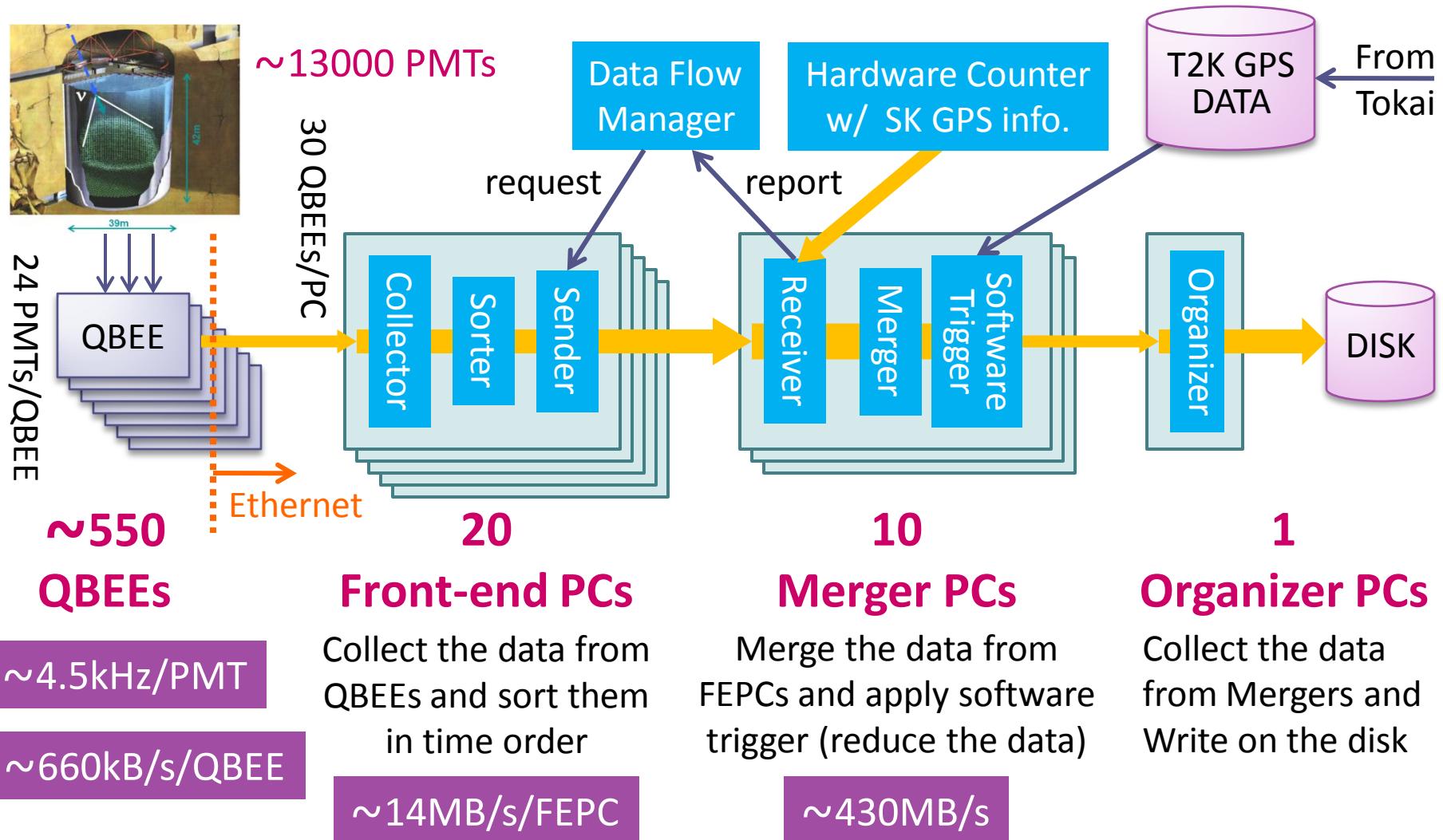
New DAQ readout scheme



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



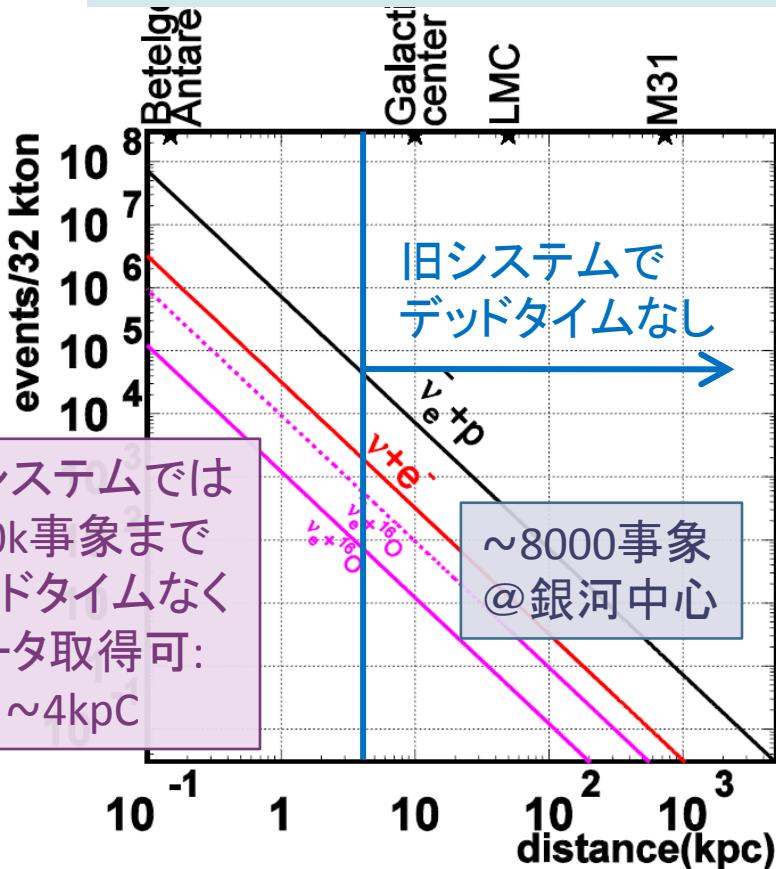
Block diagram of the new online DAQ



Achieved by Gigabit Ethernet, 10GbE + Distributed Processing

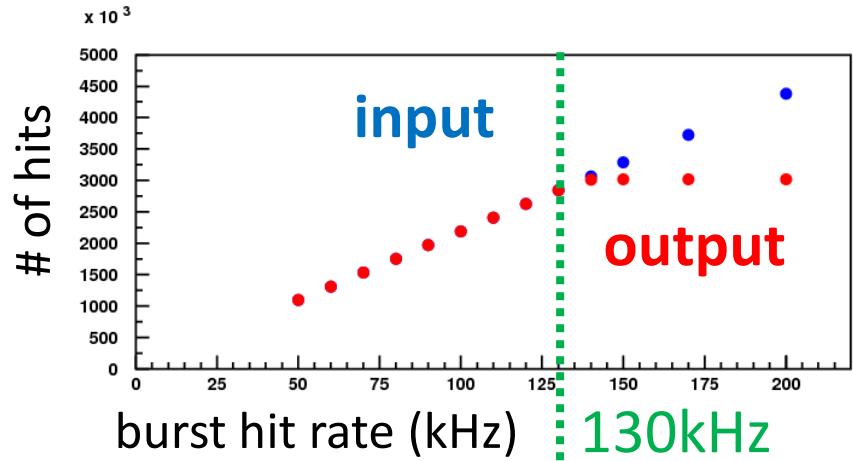
新エレキシステム導入による検出器性能向上(1)

超新星爆発までの距離と
SKで観測される事象数の関係



→ 0.3kpcの距離でもデッドタイムなしで取れるようになる

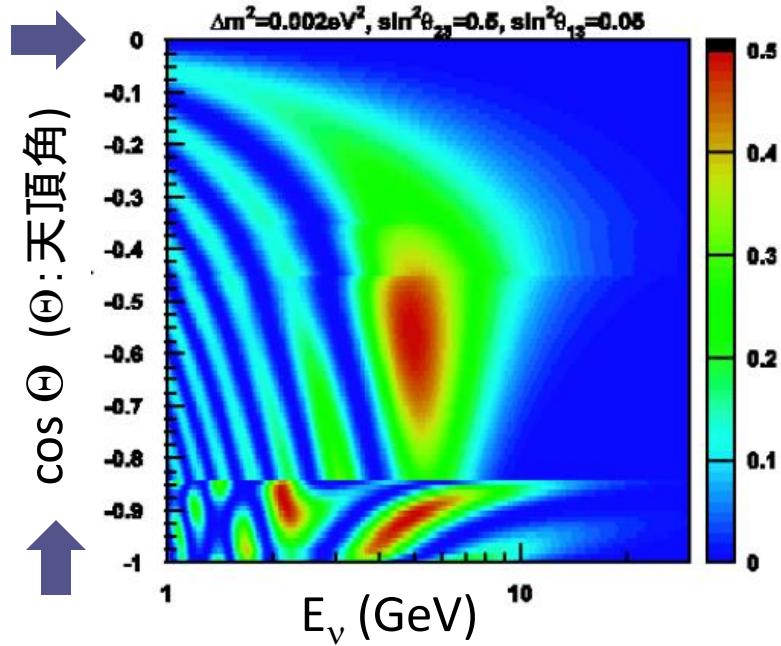
QBEEのバーストスループット



- 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)

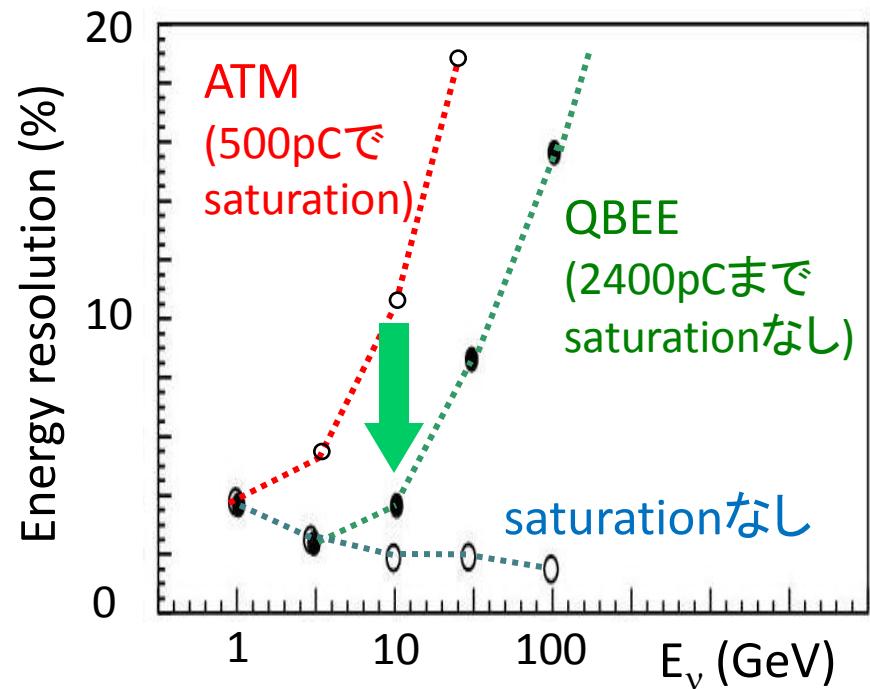
新エレキシステム導入による検出器性能向上(2)

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



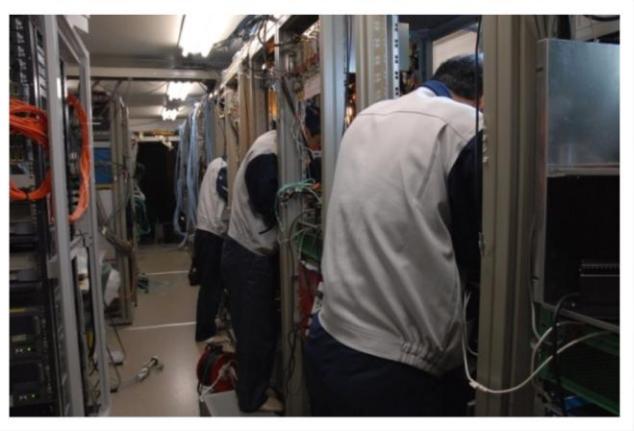
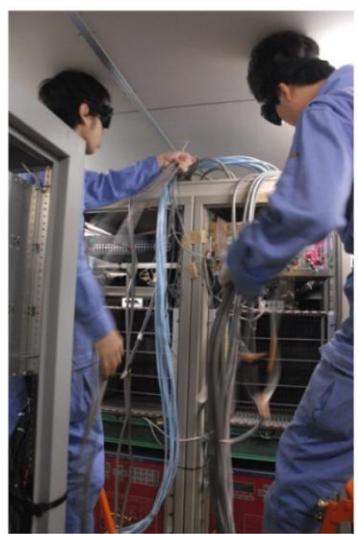
物質効果により、振動確率が
レゾナンス的に大きい部分が
2~10GeVのあたりに現れる

Multi-GeV e-like事象の
エネルギー分解能

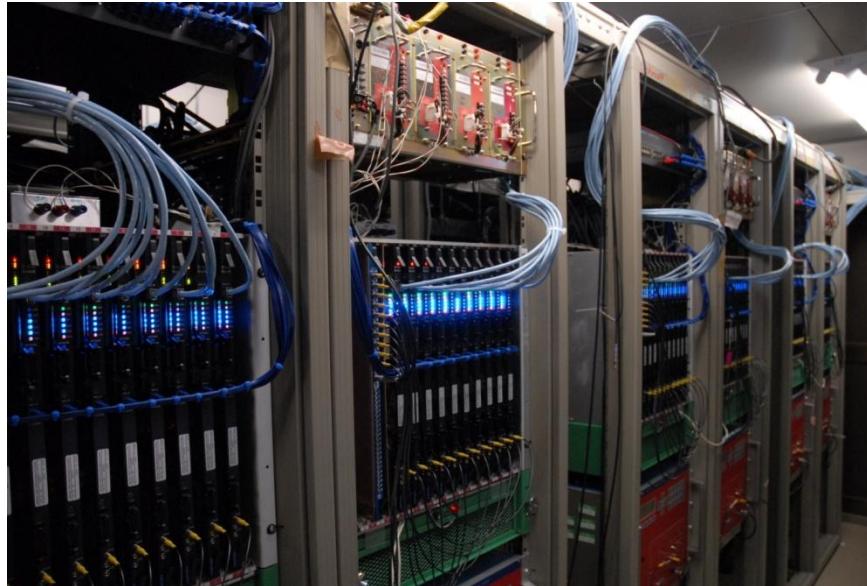


3世代振動解析による θ_{13} の探索で重要となる、10GeV付近の大気ニュートリノ事象のエネルギー分解能が、大幅に良くなる

エレクトロニクス入れ替え作業(8/25~9/6)



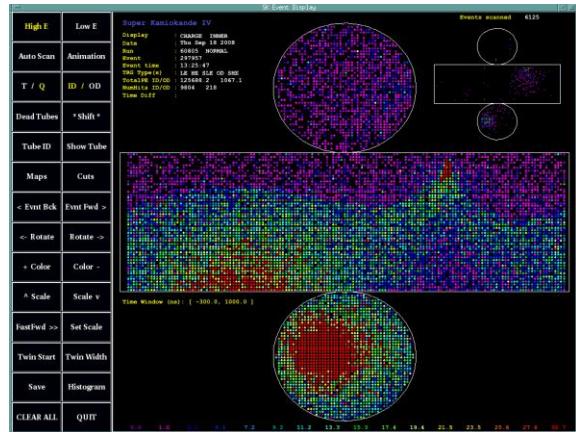
New electronics installation completed !



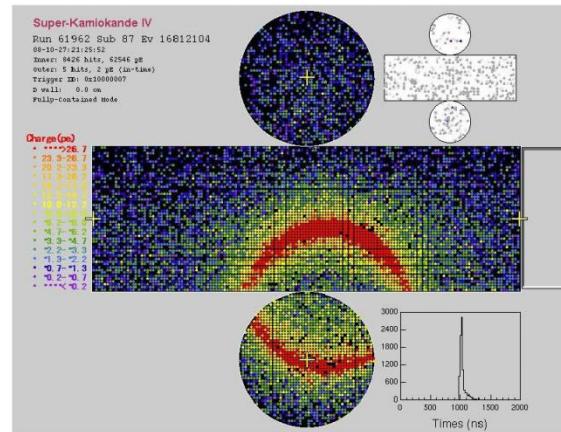
- 2008年9月6日、Super-Kamiokande IV 開始
- エレクトロニクスの詳細なチェック、オンラインプログラムのコミッショニング、基本的な検出器キャリブレーションを約2か月かけておこなった
- SK-IVの開始以来、順調に観測データを収集している
データ解析も始まっている

SK-IV events, startup calibrations, etc.

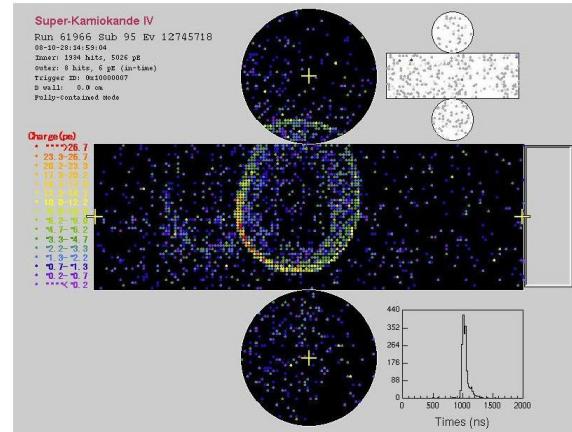
Cosmic-ray muon



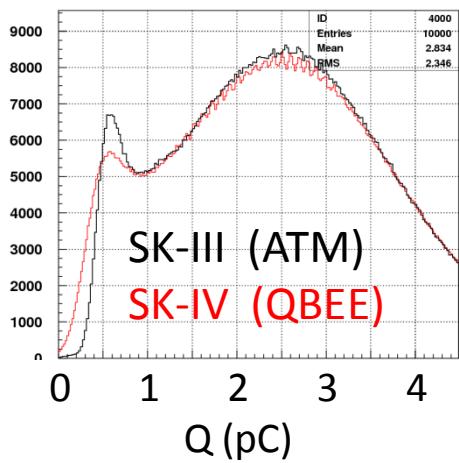
Atmospheric ν (e-like)



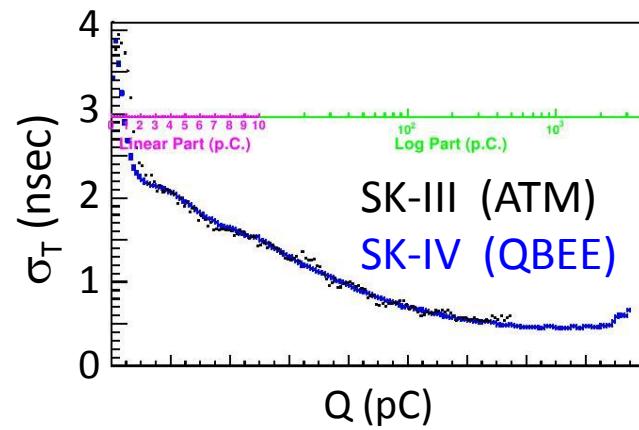
Atmospheric ν (μ -like)



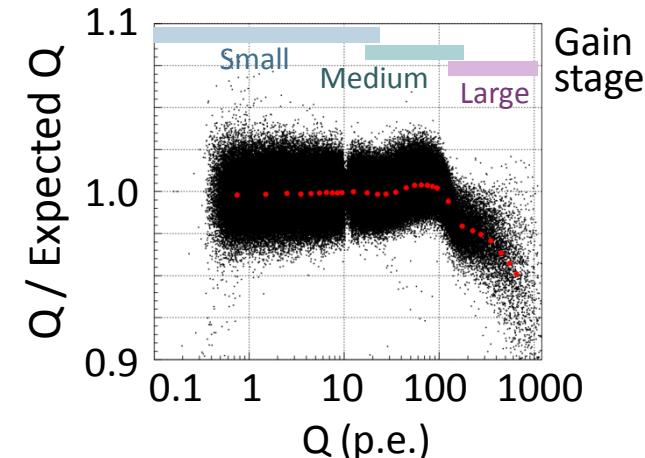
Single p.e. distribution (by Ni)



Timing resolution (by Laser)



Charge linearity (by Laser)



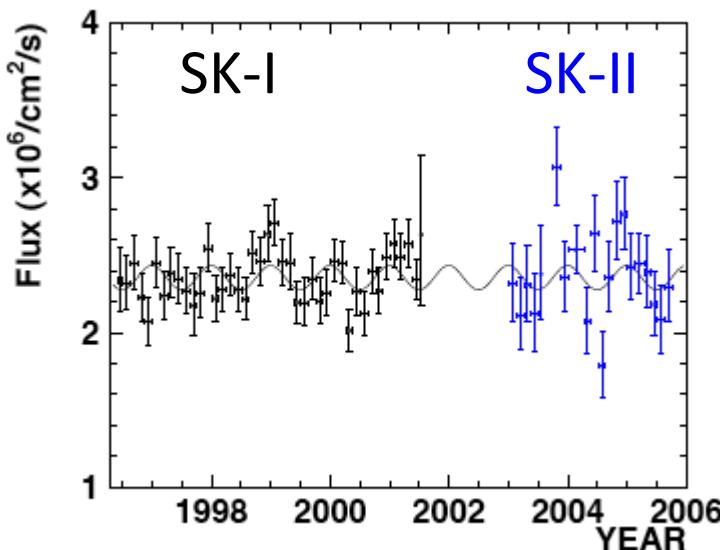
他にも、SN burst試験などがおこなわれている

Solar Neutrinos

SK-I + SK-II : Solar Neutrino Flux

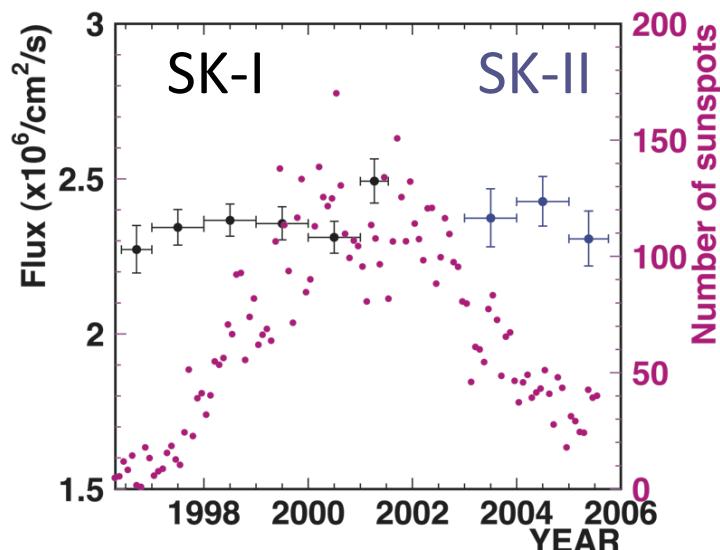
	Livetime (days)	Energy range (MeV)	Number of signal events	Flux ($\times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$)
SK-I	1496	5.0-20.0	$22404 \pm 226 \text{ (stat)}^{+784}_{-717} \text{ (sys)}$	$2.35 \pm 0.02 \text{ (stat)} \pm 0.08 \text{ (sys)}$
SK-II	791	7.0-20.0	$7212.8^{+152.9}_{-150.9} \text{ (stat)}^{+483.3}_{-461.6}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

Seasonal Variation



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

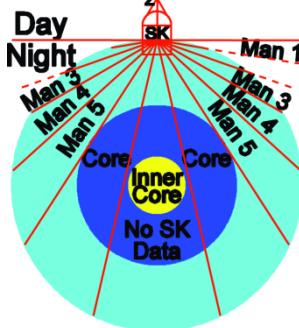
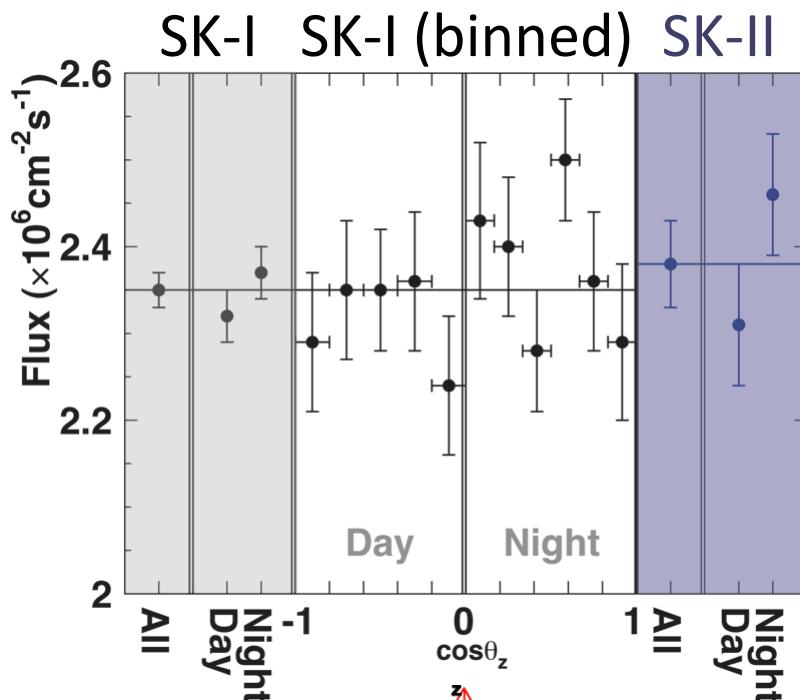
Correlation with Solar Activity



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:

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

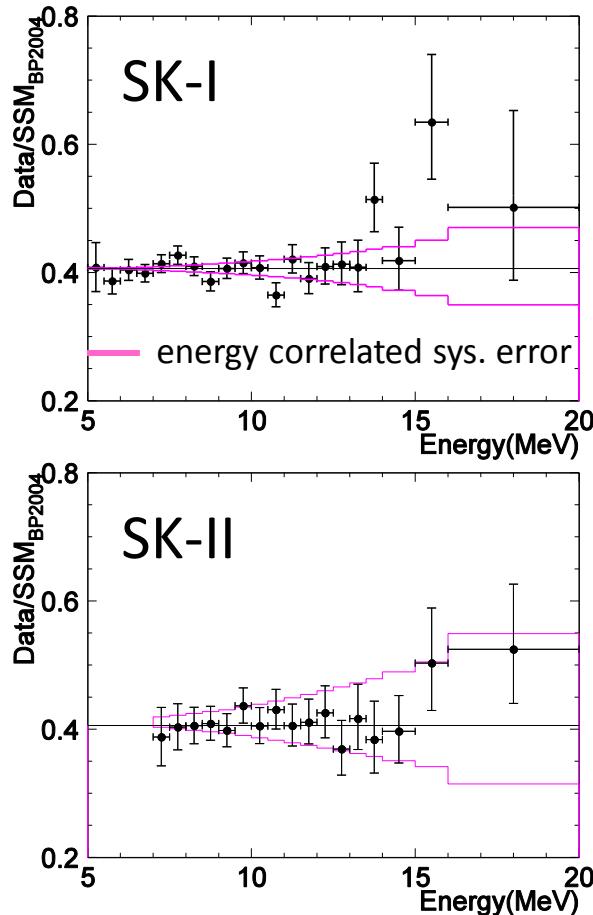
SK-II day-night asymmetry:

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

Consistent with zero

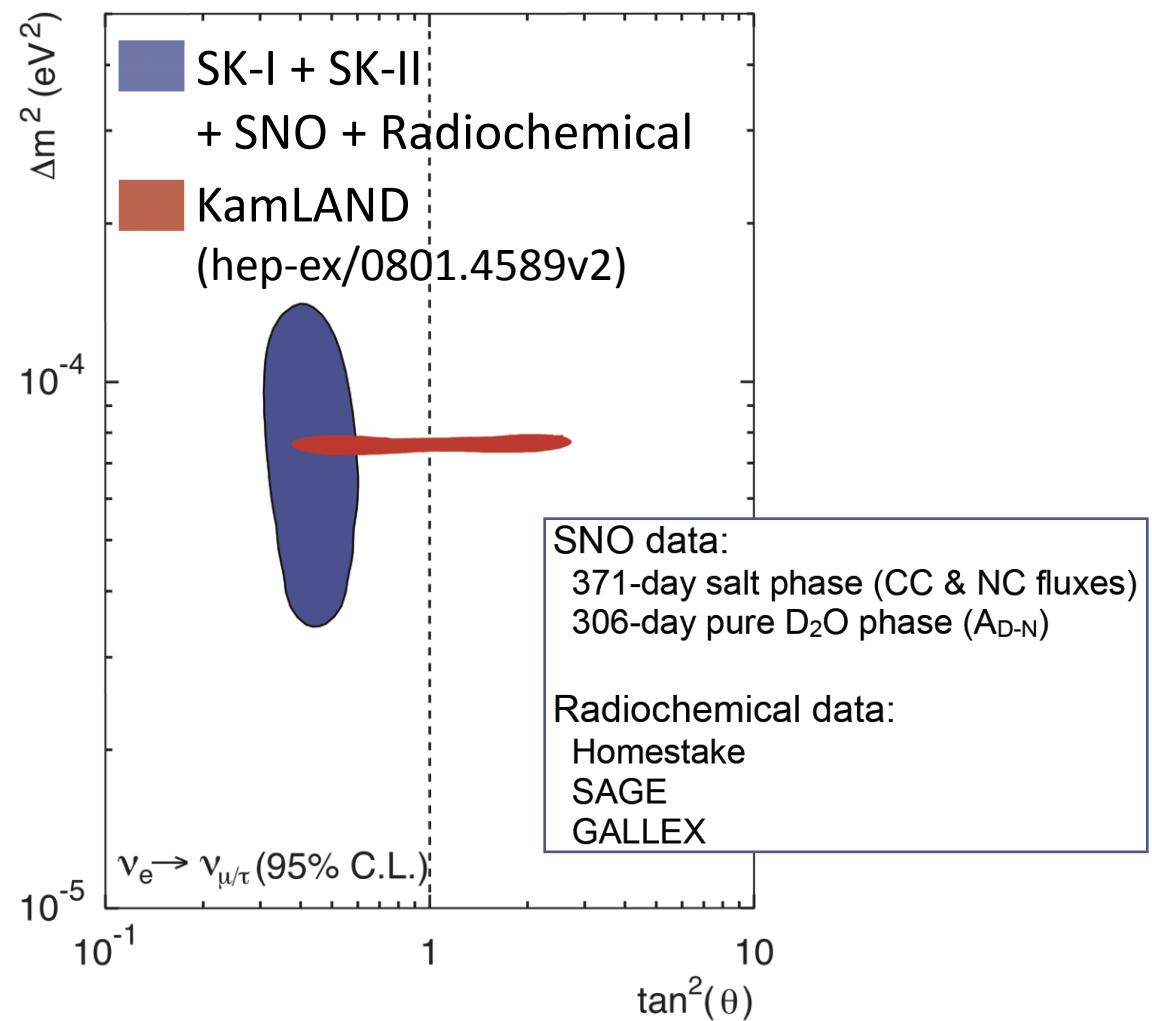
SK-I + SK-II : Energy Spectrum / Oscillation Analysis

Energy Spectrum



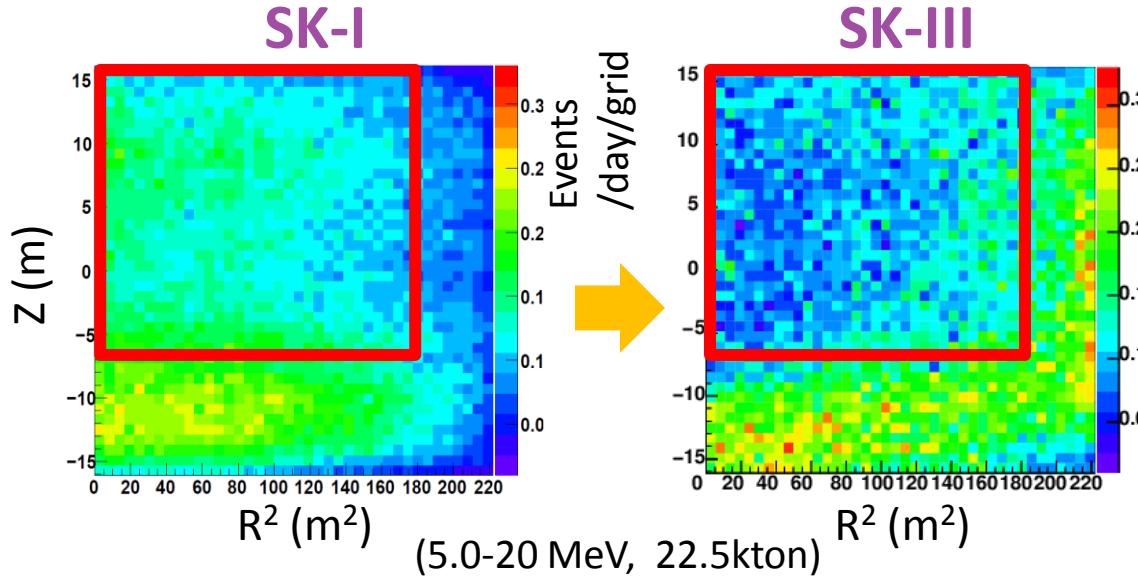
No significant distortion
can be seen

Allowed Oscillation Parameter Region



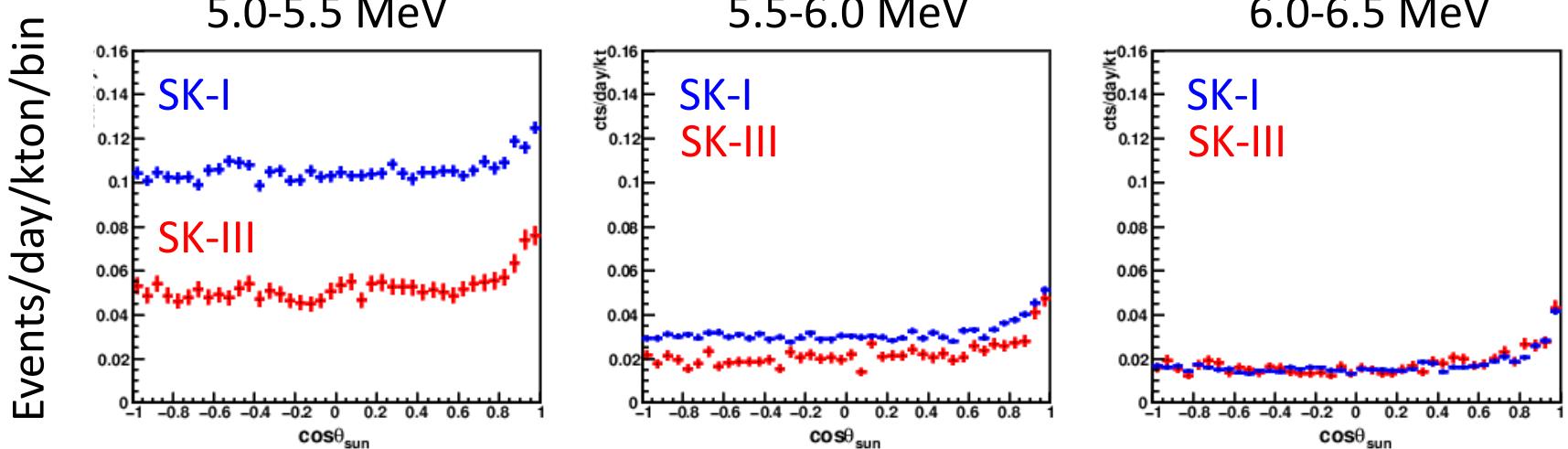
SK-III : Background in the central region

Preliminary



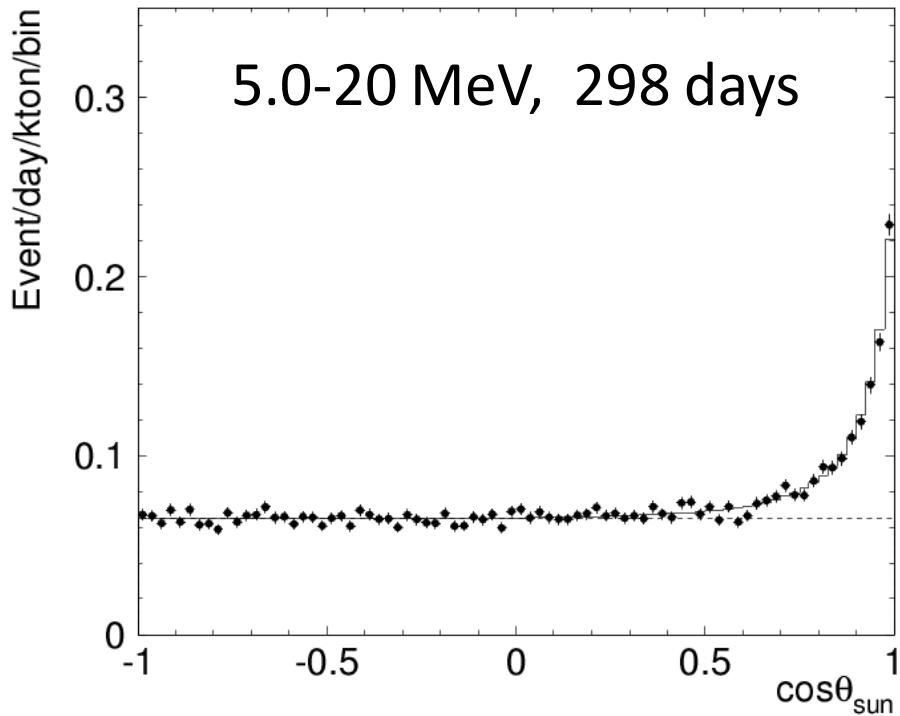
SK-III background rate lower than SK-I in central region
(water system improvement)

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



SK-III : Solar Neutrino Measurement

Preliminary



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

- SK-IIIの最終期間(Livetime: 86days)は、trigger thresholdを下げるデータをとった(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

Simulation

atmospheric neutrino flux model: Honda06

Changed to agree with K2K measurement.
Effect: Increase number of events

neutrino interaction model (neut)

QE: $M_A = 1.2 \text{ GeV}$

Effect: Small change in lepton momentum distributions

1π (resonant): $M_A = 1.2 \text{ GeV}$

Effect: Suppression in forward direction of lepton scattering angle

Add $\Delta \rightarrow N\gamma$

Add lepton mass effects in CC 1π

1π (coherent): Rein & Sehgal with lepton mass correction

DIS: GRV98 PDF with Bodek-Yang correction

Effect: Reduction in number of multiple- π events

detector simulation

more detailed model of light reflections and scattering

better OD tuning

Effect: Better data/MC agreement for various quantities

Reconstruction

improved ring counting

Effect: Reduced systematic errors

Other

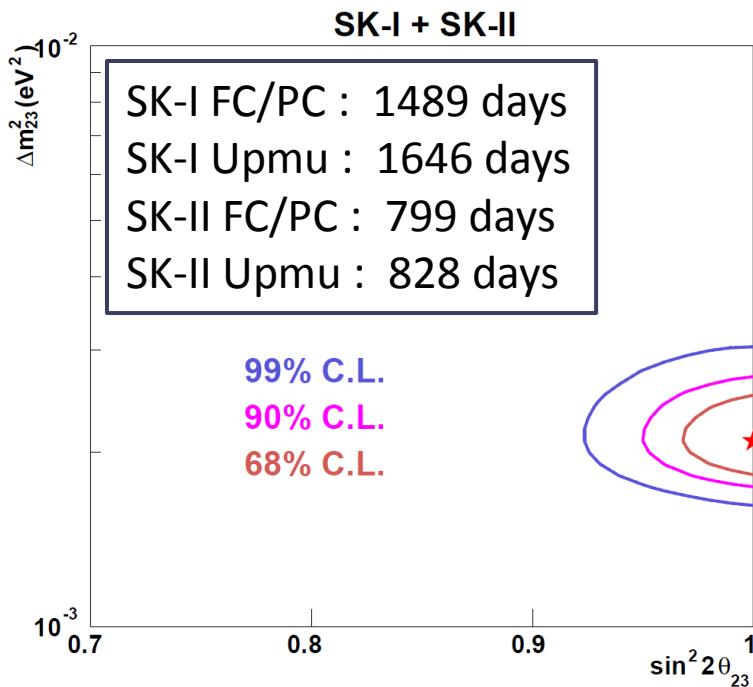
higher MC statistics

Increase from 100 yrs to 500 yrs

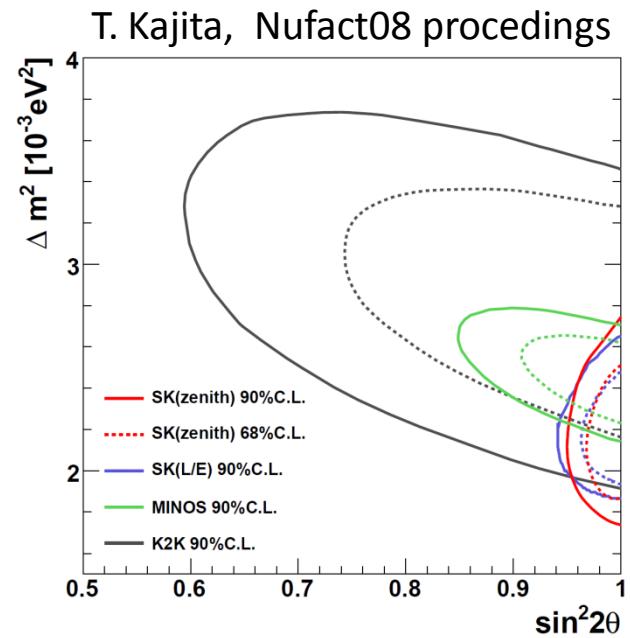
re-evaluate and add systematic uncertainties



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



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

$$2.1 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 < \Delta m^2 < 2.7 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

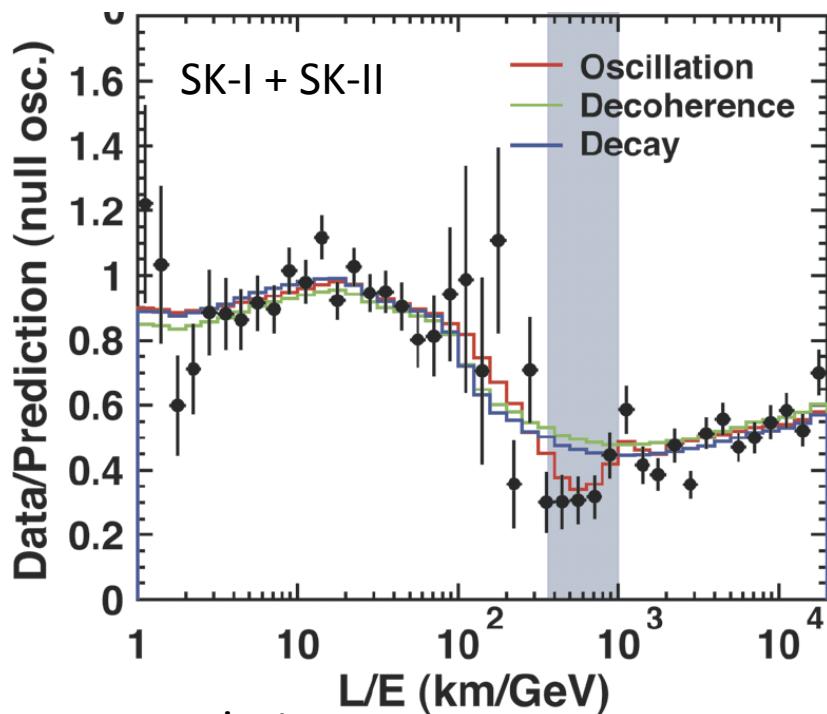
$$\sin^2 2\theta > 0.85 \quad (90\% \text{ C.L.})$$

と相補的(混合角については
SK大気νからより強い制限)

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

Preliminary

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



Compare against

Neutrino Decoherence (5σ)

Neutrino Decay (4.1σ)

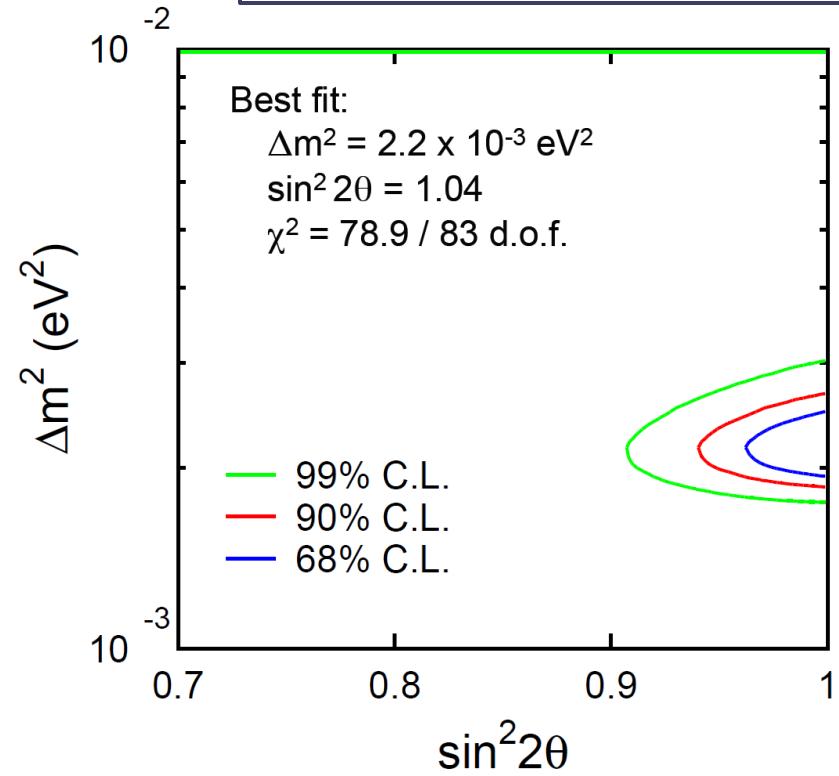
Grossman and Worah: hep-ph/9807511

Lisi *et al.*: PRL85 (2000) 1166

Barger *et al.*: PRD54 (1996) 1, PLB462 (1999) 462

Datasets

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



90% C.L. allowed region

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

$$1.85 \times 10^{-3} < \Delta m^2 < 2.65 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

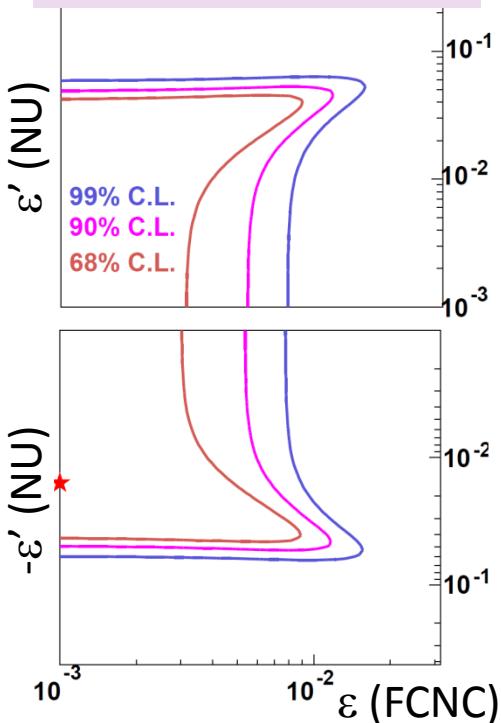
SK-I + SK-II : Oscillation + NSI Hybrid Analysis

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

By a 2-flavor analysis



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

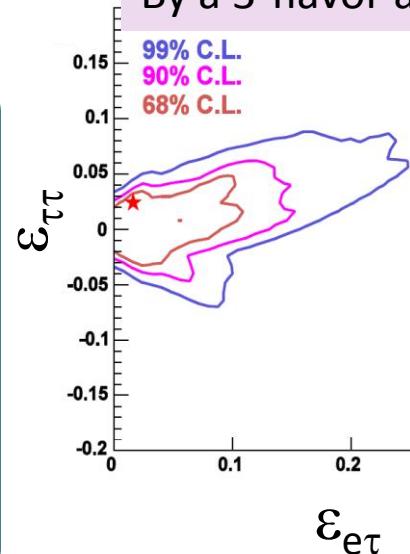
Limit at 90% C.L.

$$\epsilon \text{ (FCNC)} = |\epsilon_{\mu\tau}| < 0.011$$

※これまでのリミット
はNuTeVによる0.05

$$\epsilon' \text{ (NU)} = |\epsilon_{\mu\mu} - \epsilon_{\tau\tau}| < 0.052$$

By a 3-flavor analysis



Limit at 90% C.L.

$$|\epsilon_{e\tau}| < 0.16$$

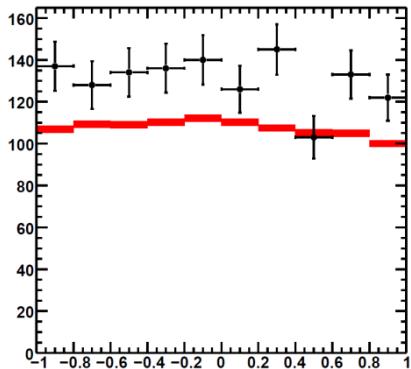
※これまでのリミット
はCHARMによる0.5

$$-0.05 < \epsilon_{\tau\tau} < 0.06$$

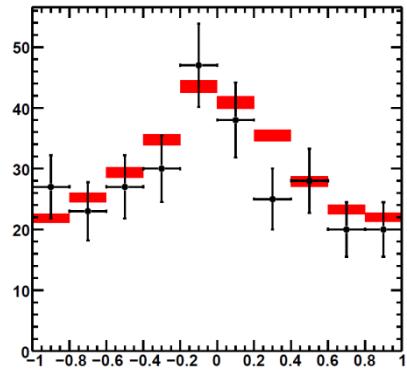
※これまでのリミット
はZ → nu nuによる1.1

SK-III : Zenith Angle Distributions / Future

sub-GeV 1ring e-like

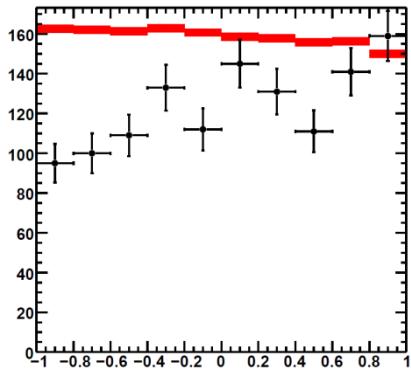


multi-GeV 1ring e-like

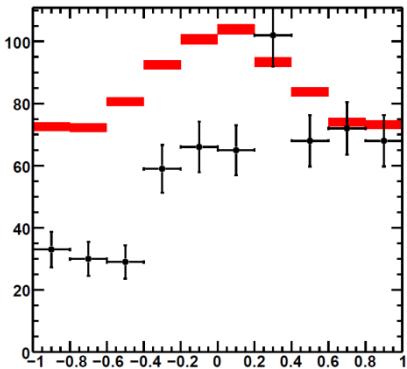


No oscillation analysis yet, but zenith angle distortion clearly visible

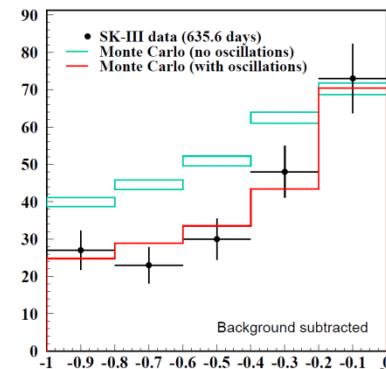
sub-GeV 1ring μ -like



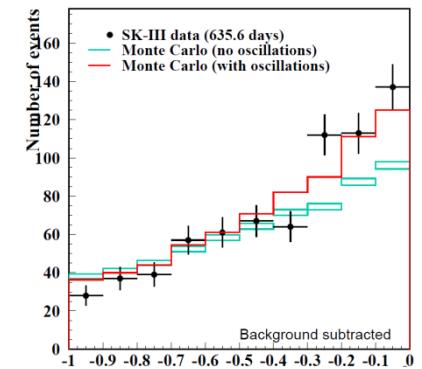
multi-GeV μ -like + PC



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 → significance $> 3\sigma$ を目指す
- sub-dominant effect (non-zero θ_{13} , octant of θ_{23}) の study

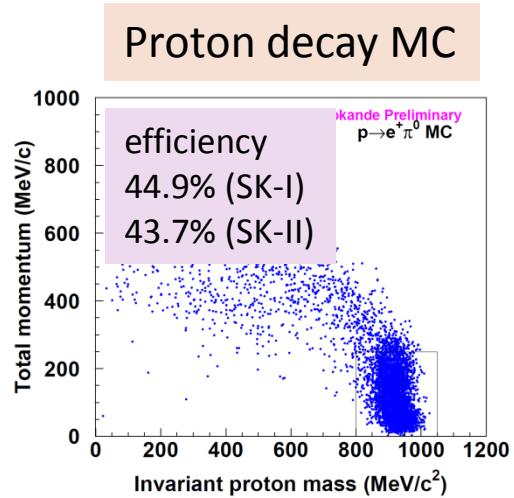
など

Nucleon Decays

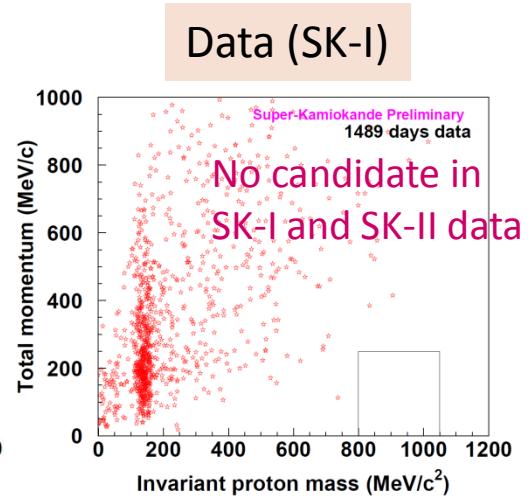
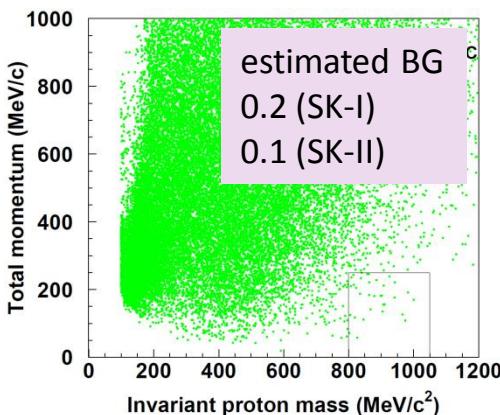
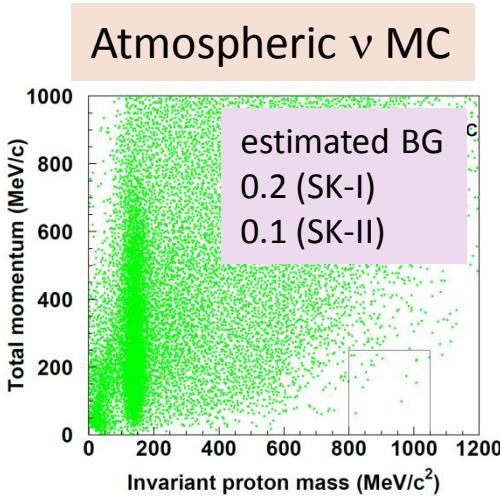
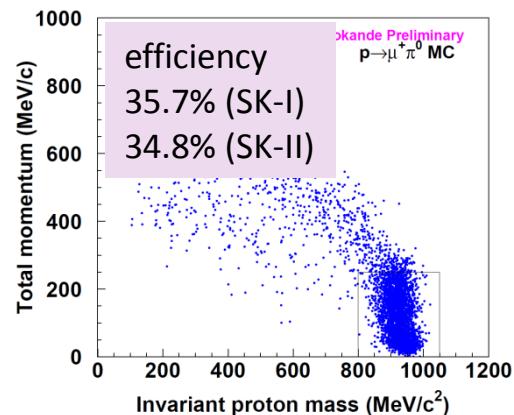
SK-I + SK-II : $p \rightarrow e^+\pi^0$ & $p \rightarrow \mu^+\pi^0$

Preliminary

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



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



SK-I + SK-II Combined Limit :

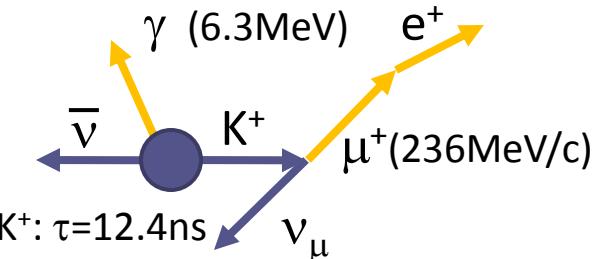
$$\tau/B_{e^+\pi^0} > 8.2 \times 10^{33} \text{ years (90\% C.L.)}$$

$$\tau/B_{\mu^+\pi^0} > 6.6 \times 10^{33} \text{ years (90\% C.L.)}$$

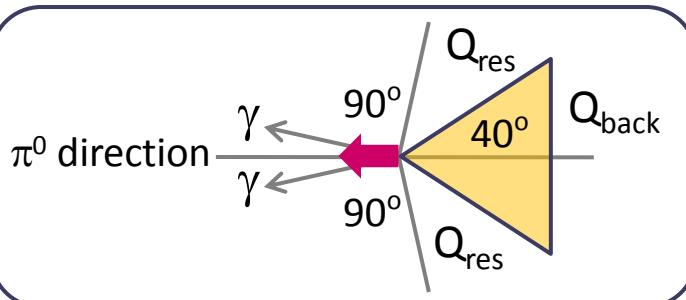
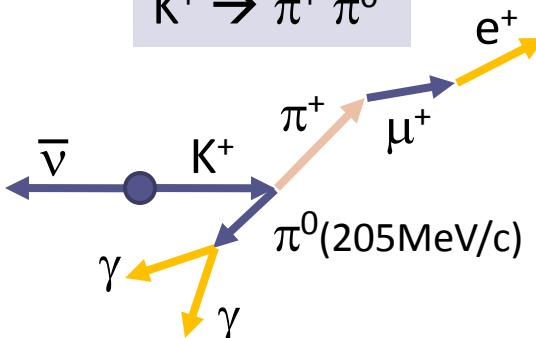
SK-I + SK-II : $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$

Preliminary

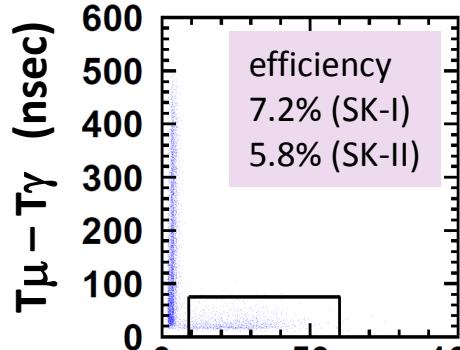
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ w/ prompt γ



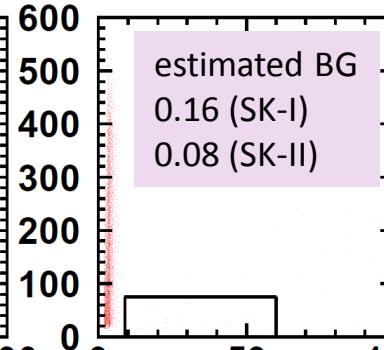
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$



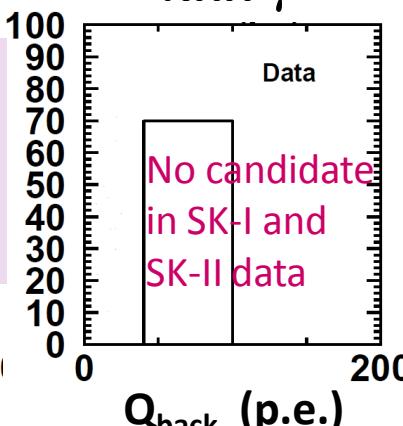
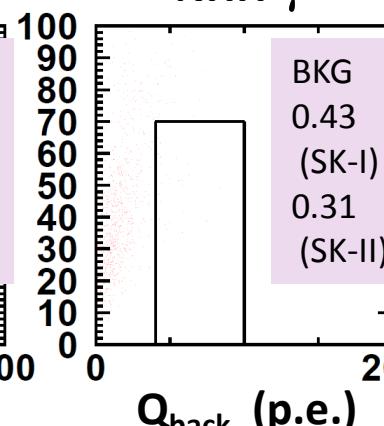
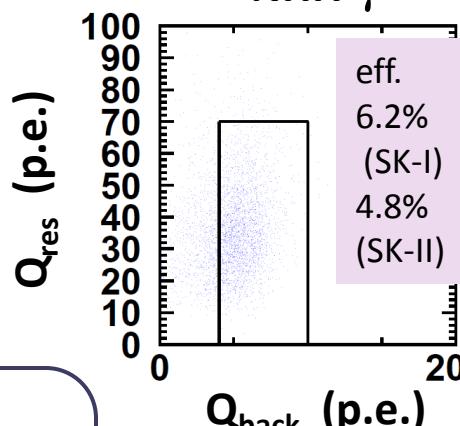
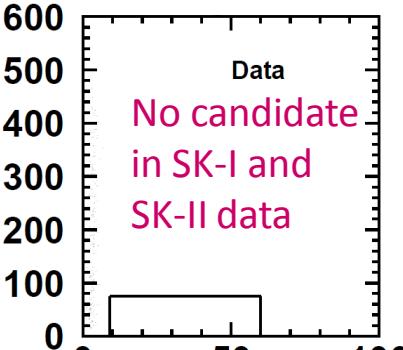
Proton decay MC



Atm. ν MC



Data (SK-I)



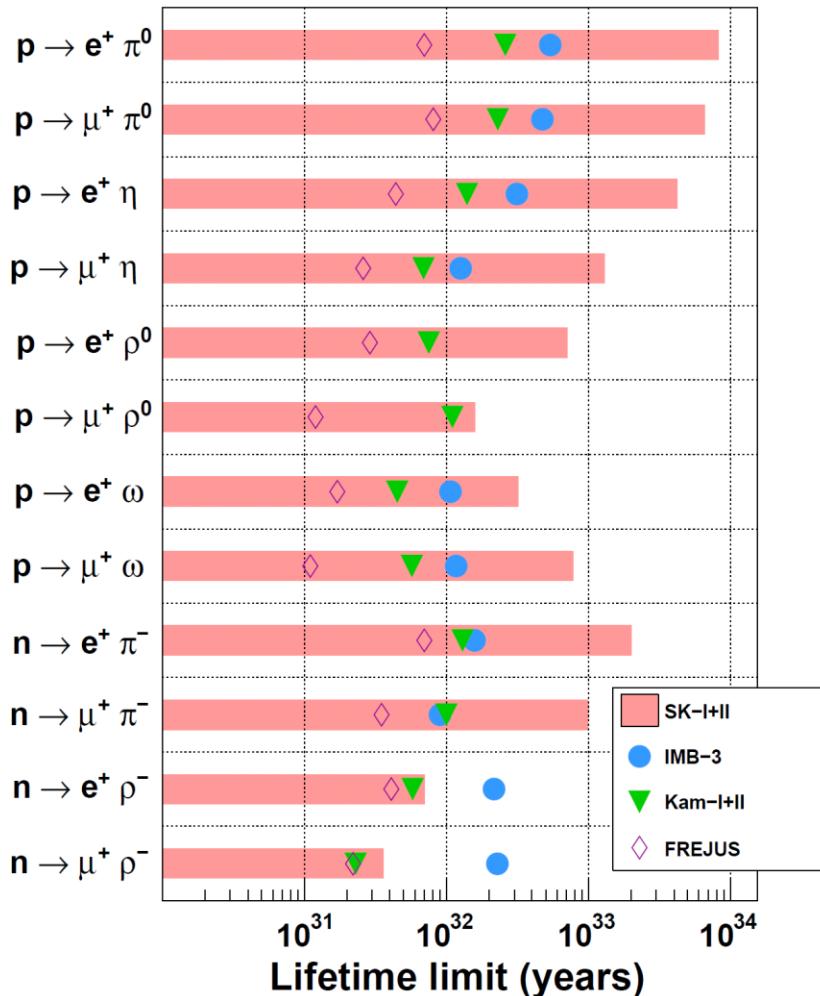
SK-I + SK-II Combined Limit :

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

SK-I + SK-II : Other modes

Preliminary

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



- 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