

スーパーカミオカンデ実験における 大気ニュートリノ解析の現状

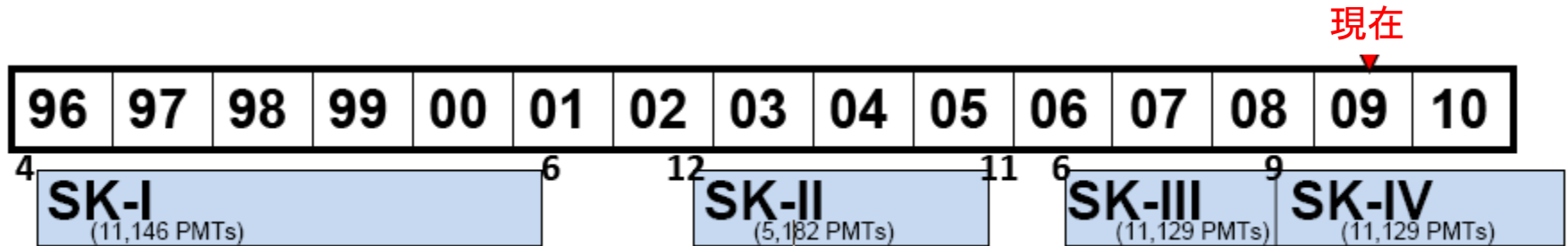


梶 裕志
東京大学宇宙線研究所
宇宙ニュートリノ観測情報融合センター



Introduction

スーパーカミオカンデ実験



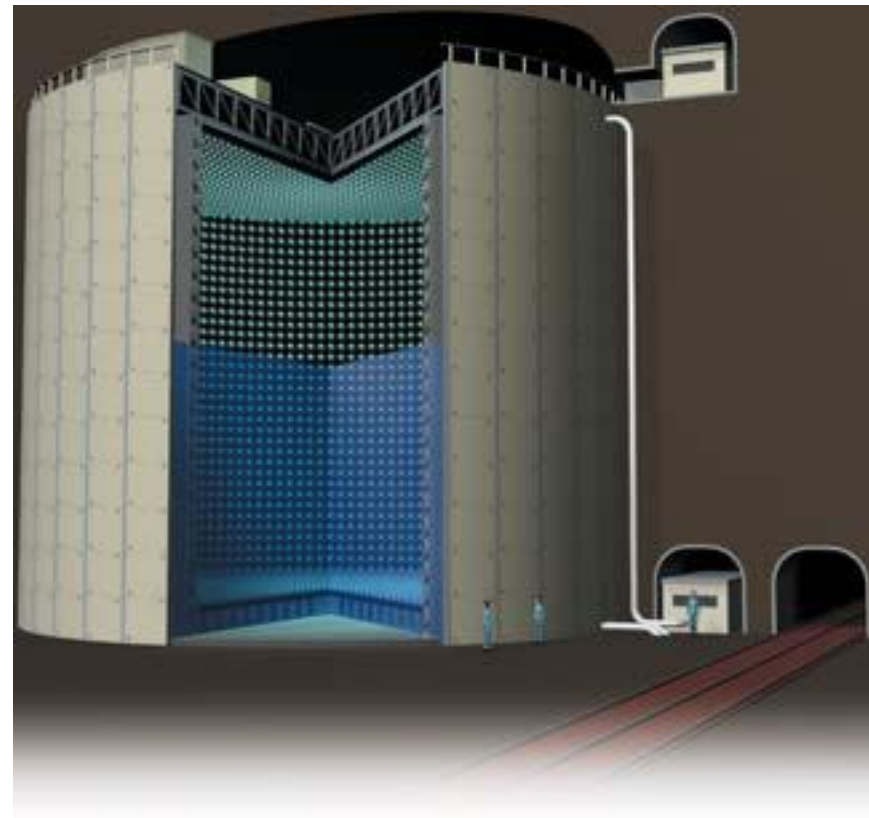
- 世界最大の水チェレンコフ検出器によるニュートリノ実験
- 東大宇宙線研、神岡宇宙素粒子研究施設
(岐阜県飛騨市神岡町)
- 1996年、実験開始
 - 大気ニュートリノ研究により**ニュートリノ振動現象を発見**(1998)
 - SNO実験の結果と合わせて太陽ニュートリノ問題を解決(2001)
- 2008年、SK-IV実験開始(現在継続中)
 - 読み出しシステムを一新
 - T2K実験と同じセットアップ

スーパーカミオカンデ検出器

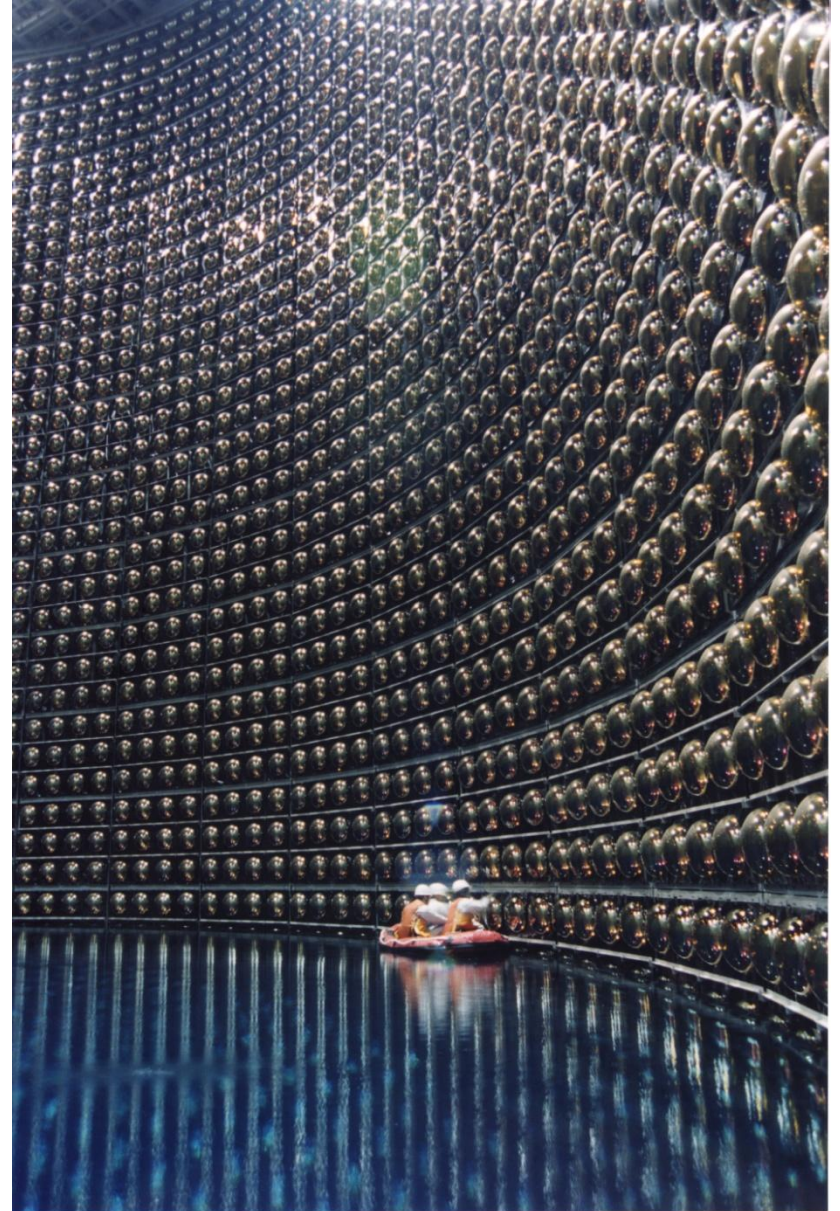
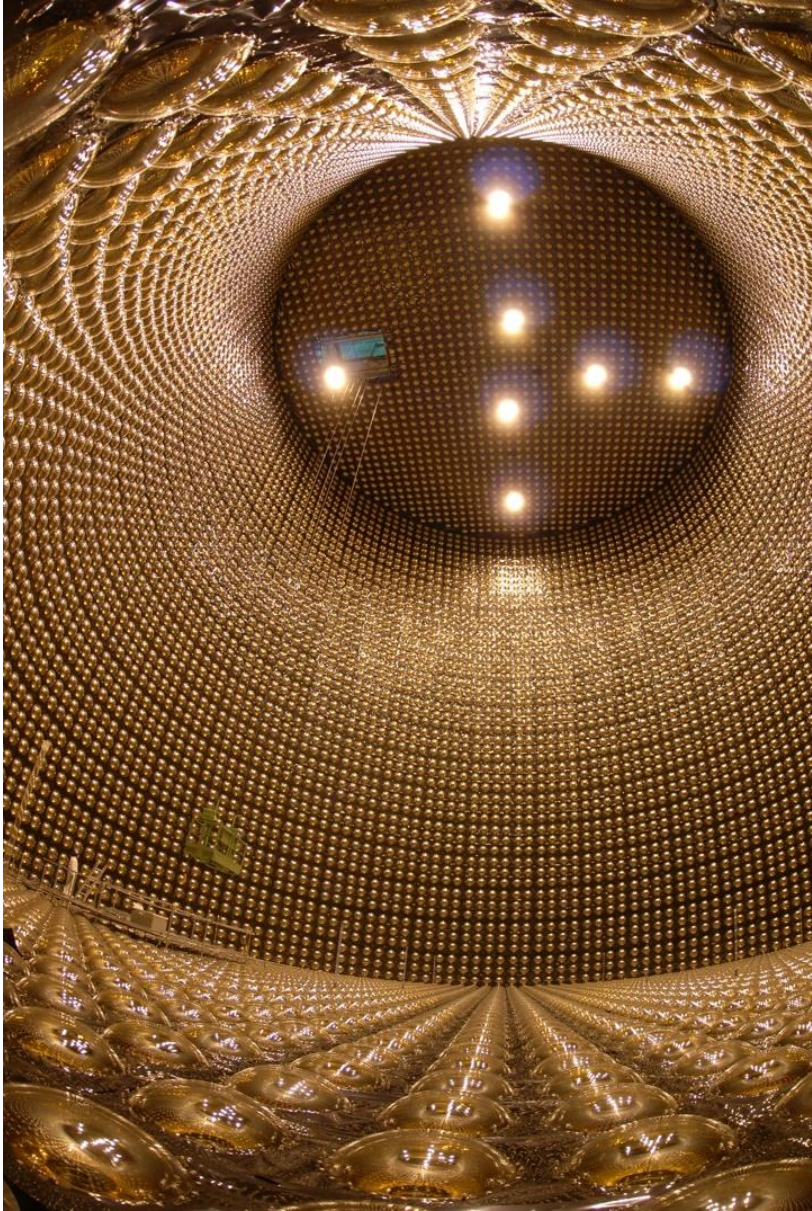
- 水チェレンコフ型汎用ニュートリノ検出器
 - 大気ニュートリノ (本講演はこれに限定)
 - 太陽ニュートリノ
 - 超新星ニュートリノ
 - 加速器ニュートリノ ← T2K実験
 - (陽子崩壊探索も継続中)

} SK実験

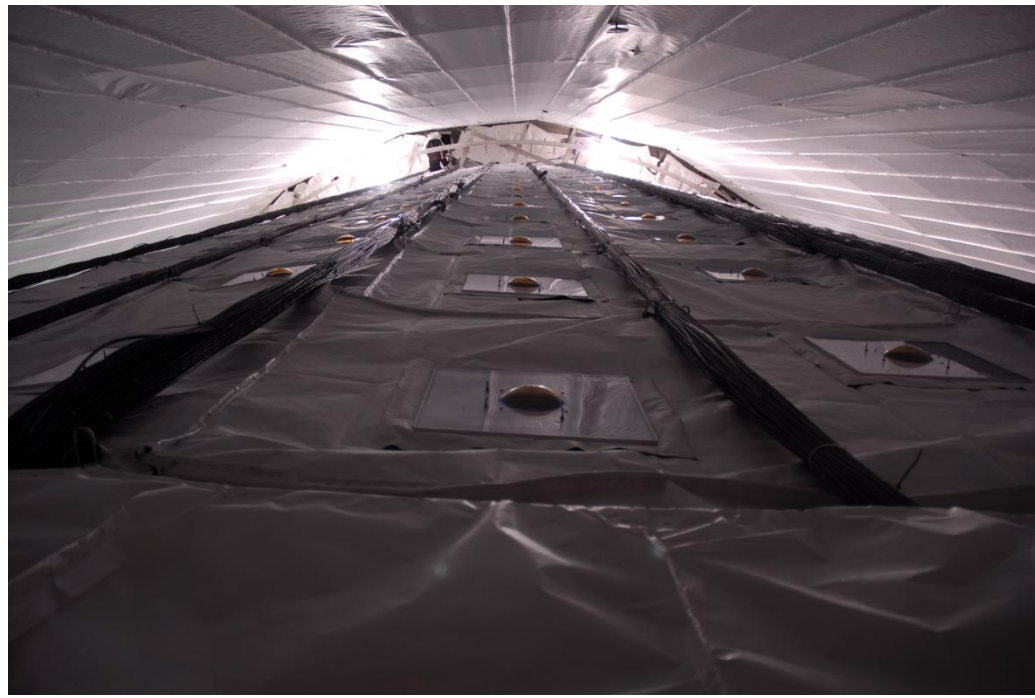
- 円筒型タンク
 - 直径39.3m、高さ41.4m
- Inner detector(ID)とouter detector(OD)の2層構造
 - 11000本の20インチPMT (ID)
 - 2000本の8インチPMT (OD)
- 純水(22.5kton)がニュートリノターゲット
 - 散乱粒子のチェレンコフ光を観測
- カロリメータであり粒子識別装置



ID写真



OD写真

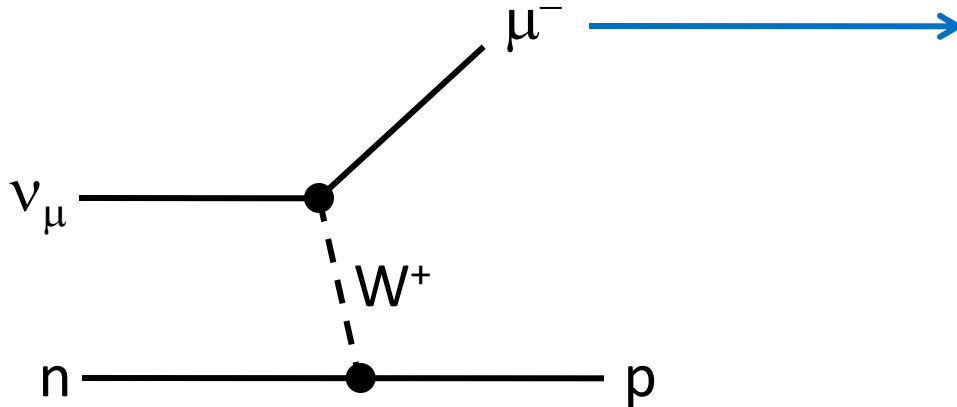


Neutrino interaction

運動学変数がわかるCharged Current Quasi Elastic (CCQE) 反応が一番重要

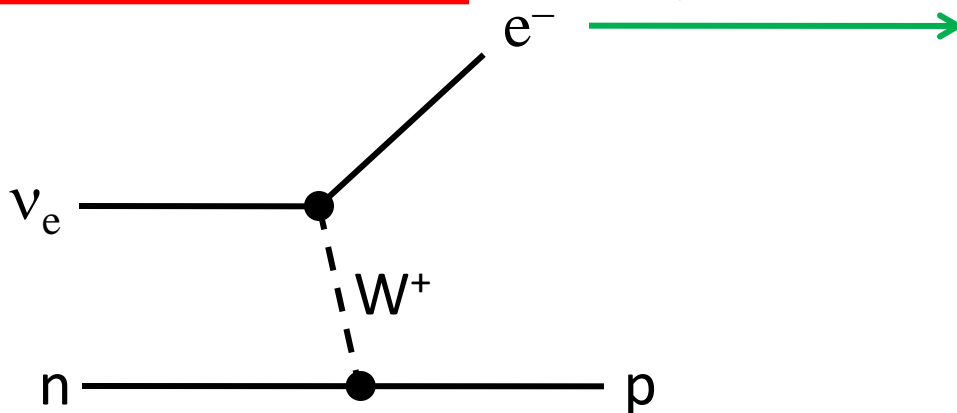
ミュオンニュートリノの場合

ミュオンは
きれいなリングを作る



電子ニュートリノの場合

電子は電磁シャワーとなり、
リングはぼやける



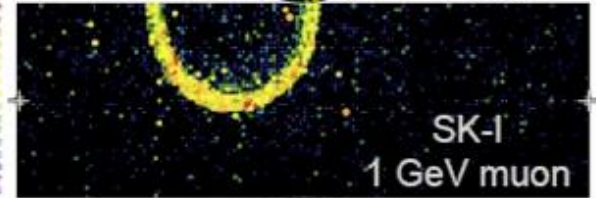
Super-Kamiokande I

Run 5: 2003.9.29 - 2
90-90-14000-04100
Trigger: 2552 bits, 4180 ps
Address: 0 bits, 0 ps (no-time)
Trigger: 001 bits
0 walls: 0000.0 ps
Full-resolution mode



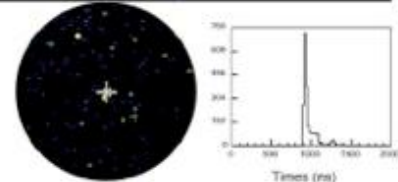
Charge [pe]

+34.7
23.3-24.7
20.0-21.1
17.0-18.1
15.0-16.1
13.0-14.1
11.0-12.1
9.0-10.1
7.0-8.1
5.0-6.1
3.0-4.1
1.3-2.1
0.7-1.1
0.3-0.7
0.2



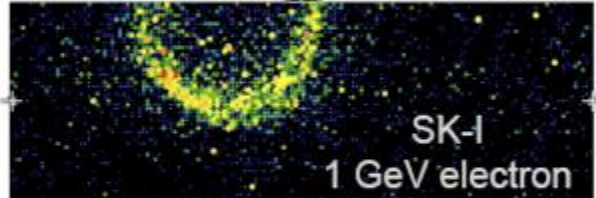
Super-Kamiokande I

Run 5: 2003.9.29 - 2
90-90-14000-04100
Trigger: 2552 bits, 4180 ps
Address: 0 bits, 0 ps (no-time)
Trigger: 001 bits
0 walls: 0000.0 ps
Full-resolution mode



Charge [pe]

+34.7
23.3-24.7
20.0-21.1
17.0-18.1
15.0-16.1
13.0-14.1
11.0-12.1
9.0-10.1
7.0-8.1
5.0-6.1
3.0-4.1
1.3-2.1
0.7-1.1
0.3-0.7
0.2





SK-IVの現状

QTC-Based Electronics Ethernet (QBEE)



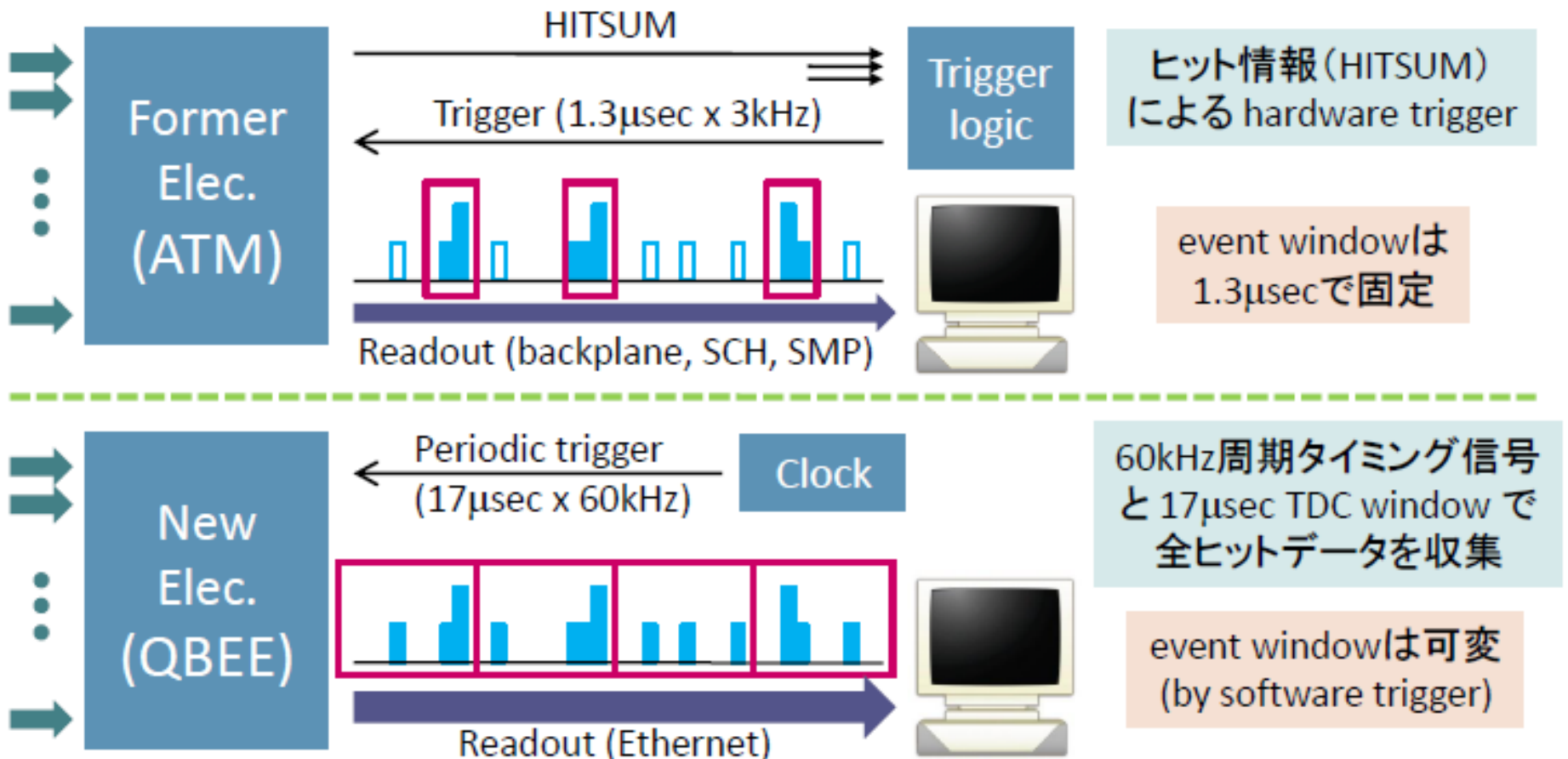
- 2008年9月、
新front-end electronics, QBEEを設置
 - これ以降がSuper Kamiokande-IV
 - T2K実験もこのセットアップ
- High speed QTC(Charge to time converter)
 - Super Kamiokandeが開発
- PMT信号のtiming, chargeを矩形波化
 - Timing => 矩形波の先頭のtiming
 - Charge=> 矩形波の長さ

広いダイナミックレンジを確保
- High speed化によりdead timeを無くすことに成功

Trigger performance

高速安定なシステムにより、high rate現象（超新星爆発など）の観測性能向上

SK-I, II, III ヒット情報によるhardware trigger



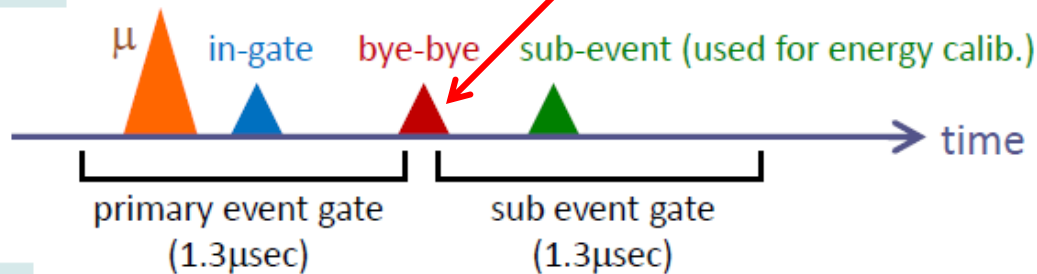
SK-IV 全PMTヒットデータを収集した後、software triggerで事象選別

ミューオン崩壊からの電子測定

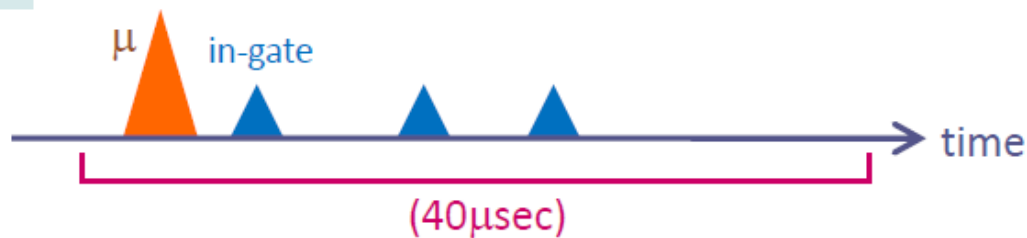
- μ 識別のための大切な情報
- 「Non shower type ring発生直後にshower type ringがないか?」を調べる

電子からのPMT hitがこのタイミングだと
それらをうまく見つけられない

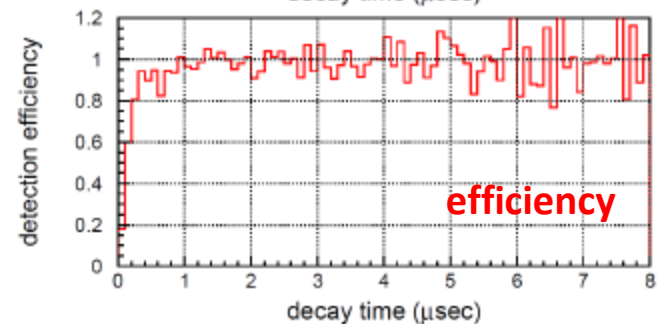
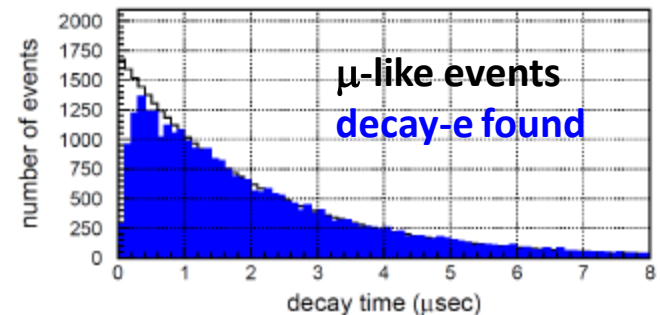
SK-I ~ III



SK-IV

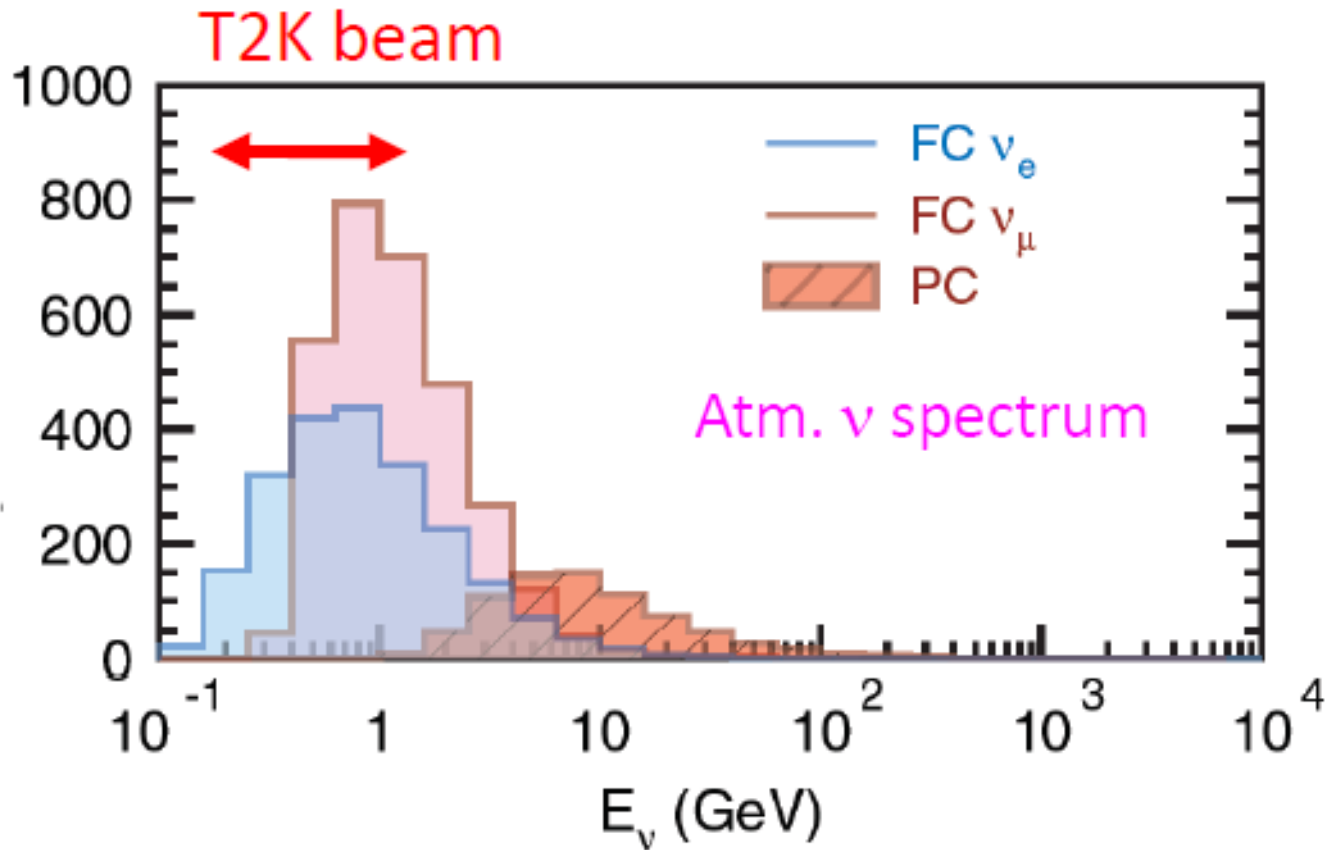


SK-IV MC



decay-electron検出効率 : 74.4 % (SK-I,II,III)から90.3 % (SK-IV)に向上

Neutrino flux



SK fully contained (FC) event用reconstruction algorithmはT2K実験でも用いられます。

大気ニュートリノのFC event reconstruction

Flow chart of apfit

Auto fit

TOF情報でvertexの位置を決定
最大energy ring(散乱レプトン)を再構成

Ring counting

さらにringがないかを探す
これによりelastic or non-elasticを判定

Particle ID

Ringをe-like or μ -likeに分割
初期ニュートリノが ν_e or ν_μ を判定

Ms-fit

PMTのcharge情報を用いてvertex位置をより正確に決定
(この時散乱レプトンの種類track lengthも考慮)
電子ring($E \sim 1$ GeV) vertex resolution:
 ~ 100 cm (Auto fit) and 30 cm (Ms-fit)

Decay-e search

μ 崩壊の電子を探す:
(New front-end electronicsによりefficiencyが15%向上)

Momentum reconstruction

最後に物理解析で用いる運動量をreconstruction

Momentum reconstruction in PID

以下の2つの情報からringを

e-like or μ -likeに識別

- shower or non-shower

- Cherenkov角

そのためには運動量が不可欠



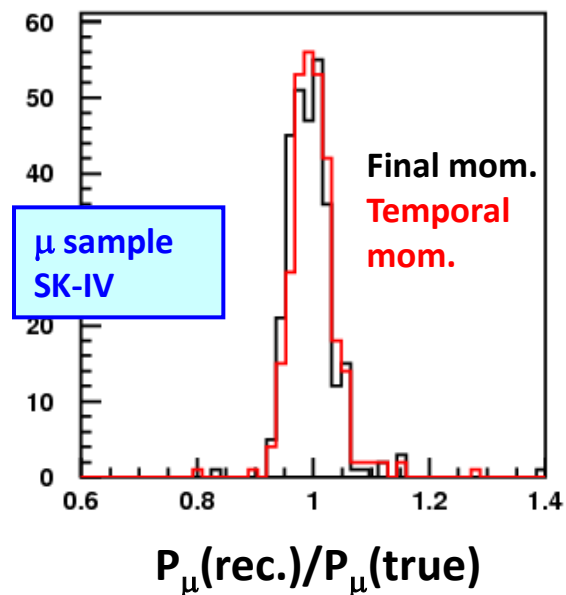
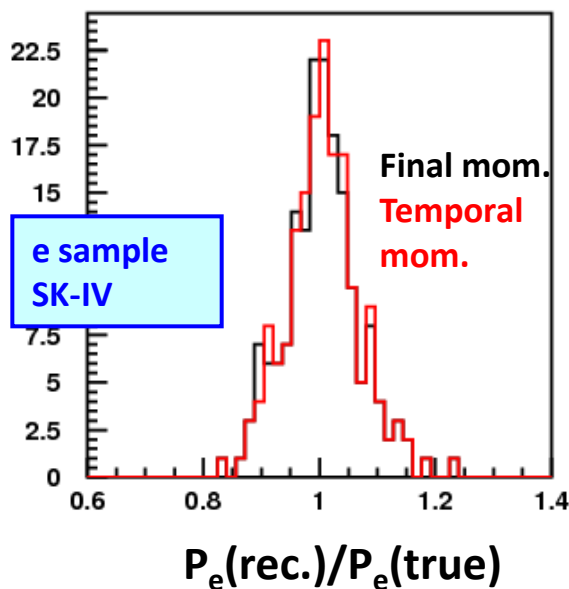
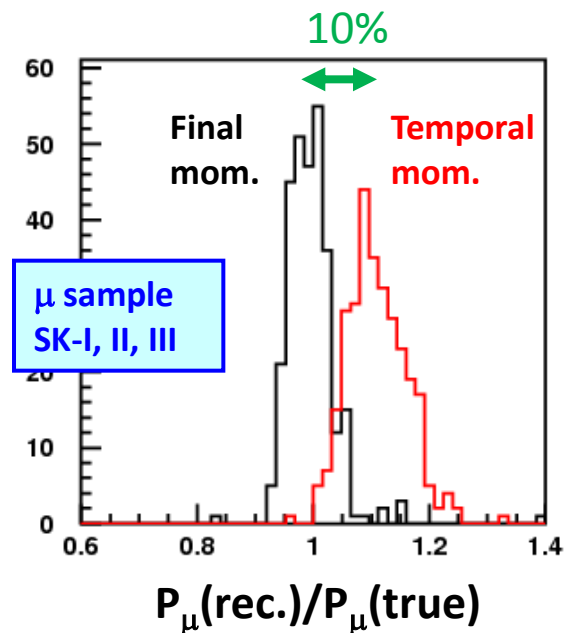
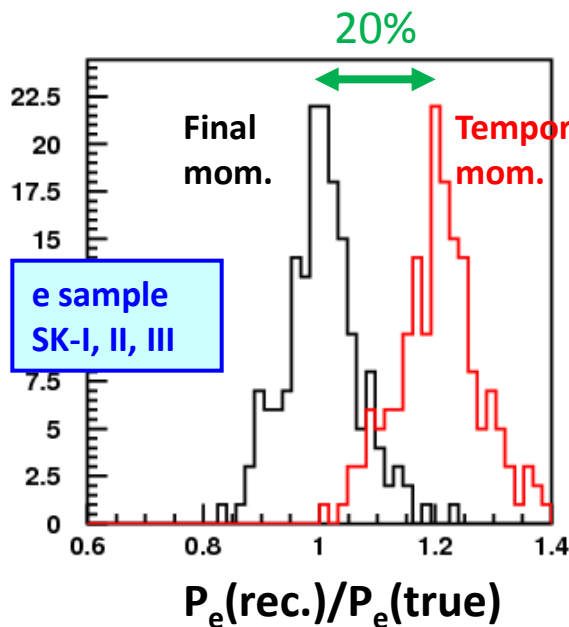
SK-IVからはより正確な運動量を使うことにした

SK-I, II, III

測定photon数をそのまま運動量に換算

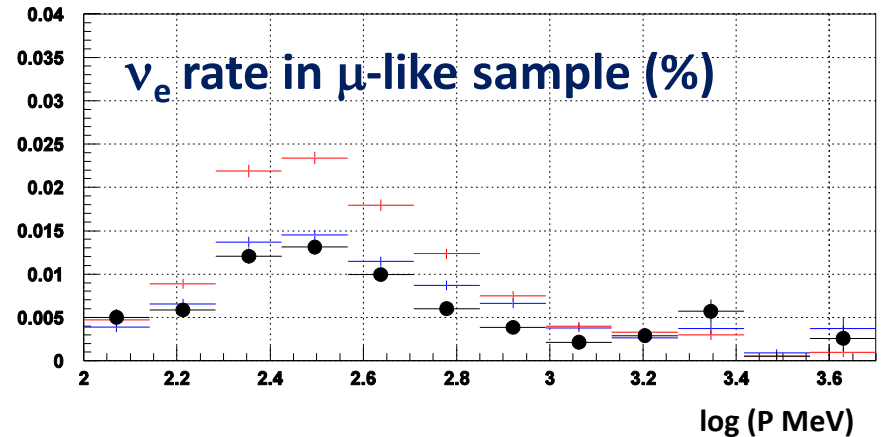
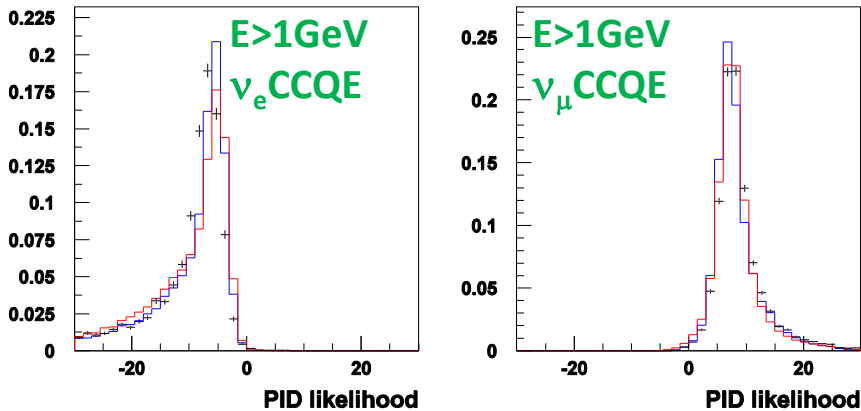
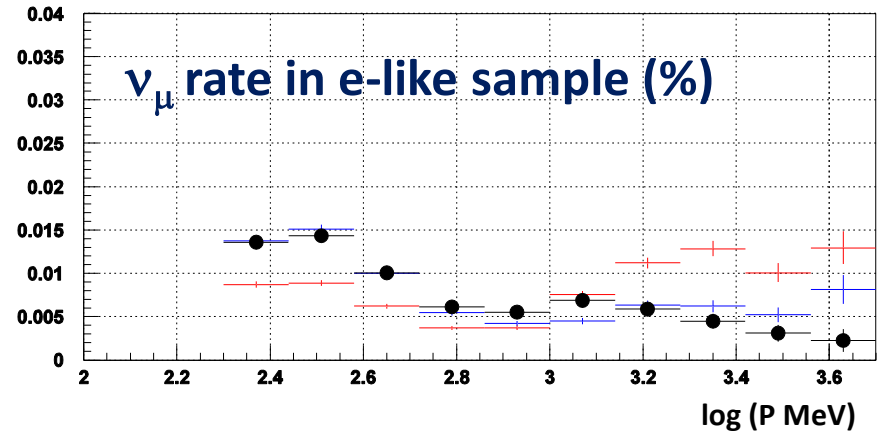
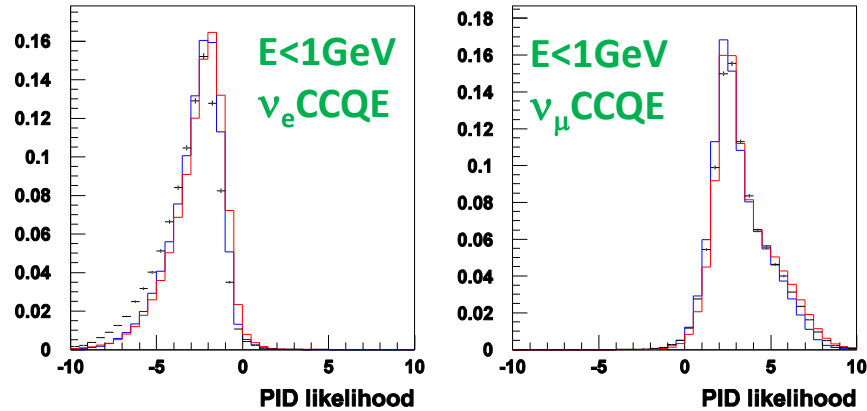
SK-IV

測定photon数を水中での散乱、吸収考慮して校正
⇒運動量



PID performance

Comparison of SK1, SK3, and new SK4



SK-IVでは $E < 1 \text{ GeV}$ μ -likeにおけるe background数が減少した
SKはmis-PID event rateを1%程度に保っている。

Update of photon density (PD) table in ms-fit

リングのphoton数から運動量を計算(PIDの結果も考慮)



その時の予想PD分布を実際のPMT charge分布にフィット(この時vertex位置を動かす)



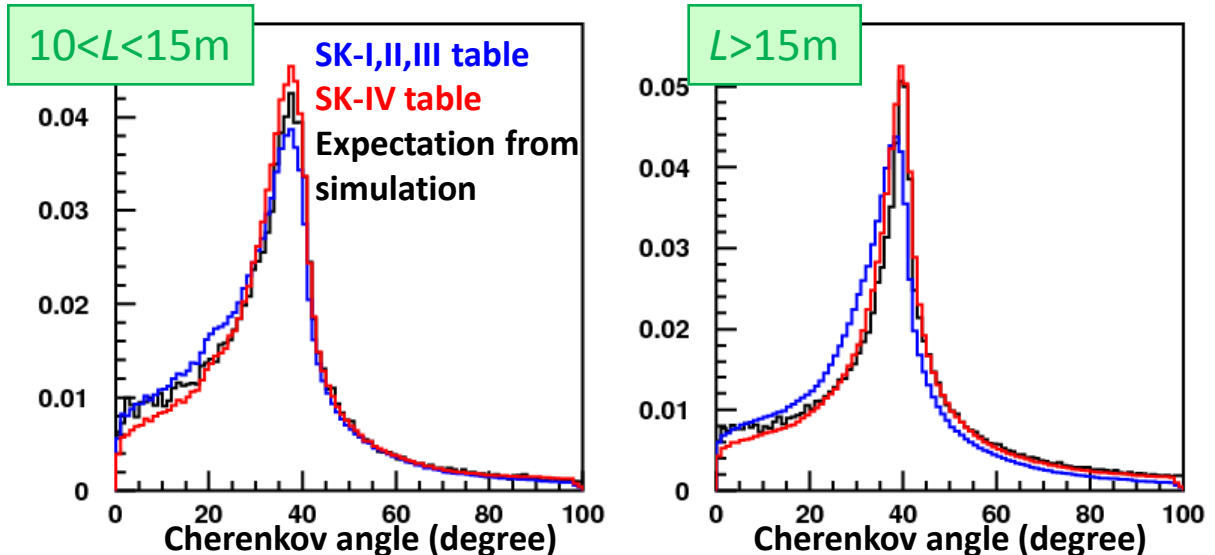
Vertex位置をより正確に再構成

PD tableは運動量P、粒子の種類、vertexからのPMTまでの距離Lごとに用意

SK-I, II, IIIは $L=15\text{m}$ までしか用意しておらず、 $L>15\text{m}$ の時は $L=15\text{m}$ のtableを使っていた。

SK-IV tableは $L=40\text{m}$ まで用意した

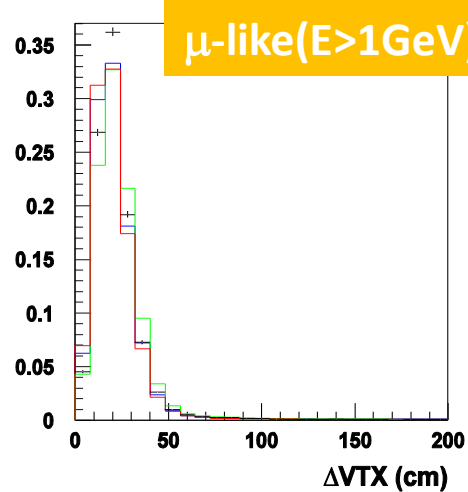
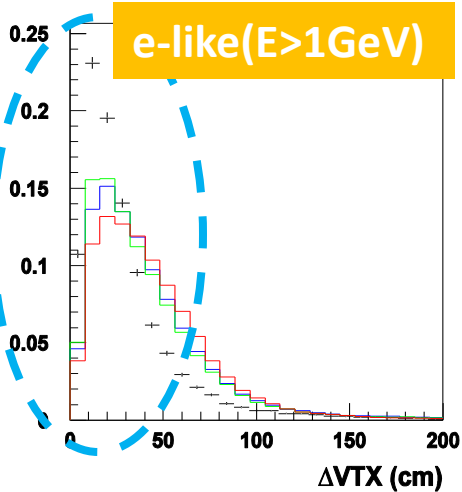
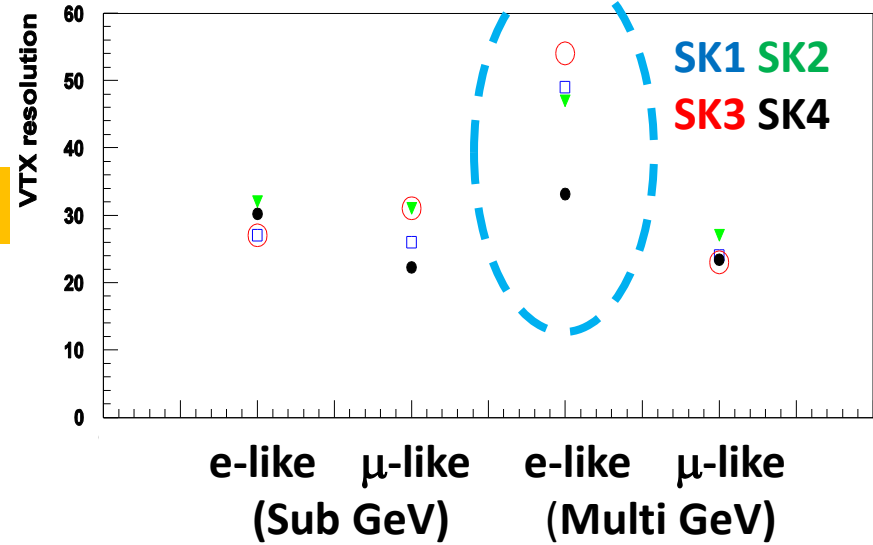
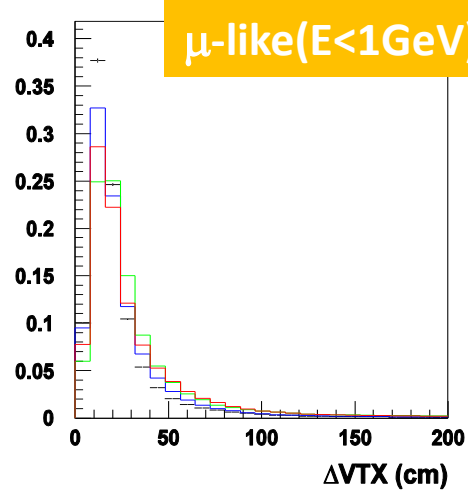
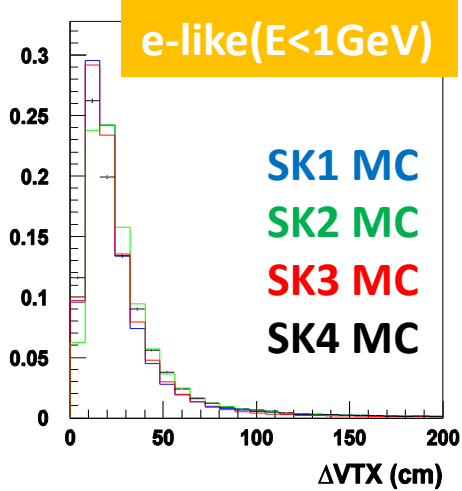
Electron ($5 < P < 10 \text{ GeV}$)



Event selection:
FCFV, $N_{\text{ring}}=1$
CCQE

ΔVTX distribution

$$\Delta\text{VTX} = \text{VTX}(\text{rec.}) - \text{VTX}(\text{true})$$



$E > 1\text{ GeV}$ のe-like sampleで
resolutionが向上

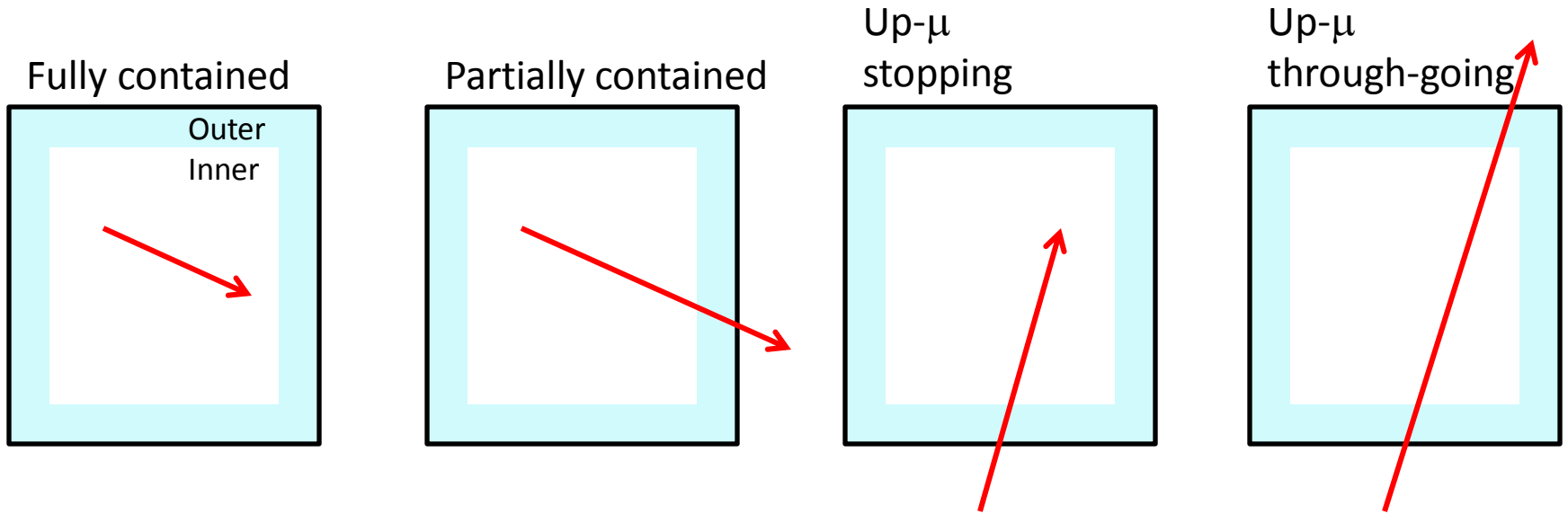
SK-IV summary

- 新しいFront-end electronicsをインストール!
- Event reconstruction softwareをimprove!
- SK-IV performanceはSK-IIIより良い!
- SK-IV実験は順調!
 - 289日間分データの解析準備が完了
 - 173 years MCを準備
- 物理解析を開始!
- SK4 softwareはT2K実験に近日リリース!



SK-I, SK-II, SK-III物理解析

Atmospheric neutrinos



	SK-I (1489 days)	SK-II (798 days)	SK-III (518 days)
Fully contained 0.1-10 GeV	8.18 ± 0.07 (events/day)	8.22 ± 0.10	8.31 ± 0.22
Partially contained 1-100 GeV	0.61 ± 0.02	0.54 ± 0.03	0.66 ± 0.04
Up-μ stopping 3-100 GeV	0.25 ± 0.01	0.28 ± 0.02	0.24 ± 0.03
Up-μ through-going 5-1000 GeV	1.12 ± 0.03	1.07 ± 0.04	1.11 ± 0.06

FC+PC:
24841 events
Up-μ:
4238 events

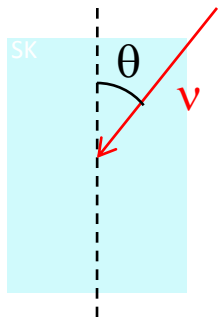
Two flavor analysis

- 大気ニュートリノフラックスは、2世代振動で良く記述される

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin\left(\frac{1.27\Delta m^2 L}{E}\right)$$

- 振動パラメータ $\sin^2 2\theta_{23}$, Δm^2_{23} を測定
- SKでは、2種類の解析法を用いる
 - Zenith angle analysis
 - L/E analysis

Zenith angle analysis

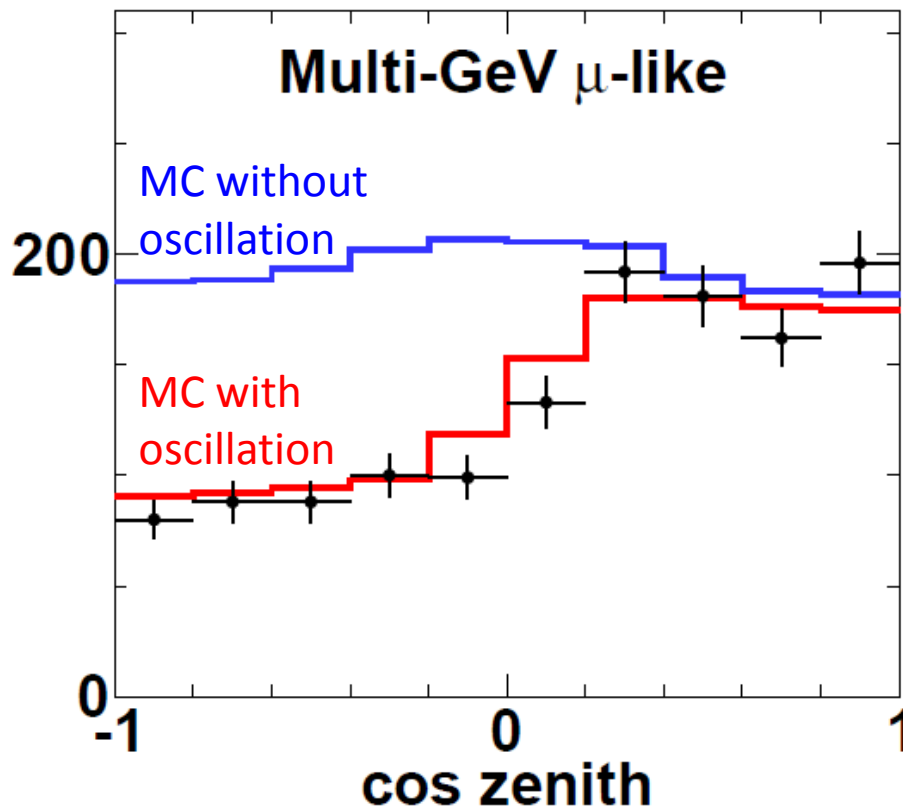
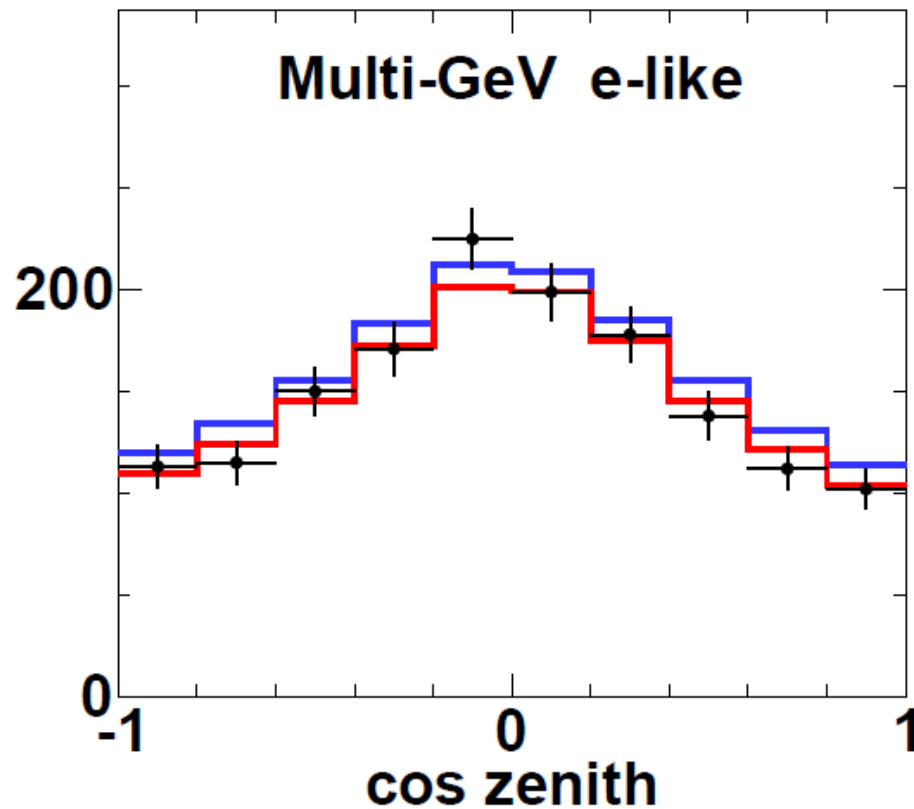
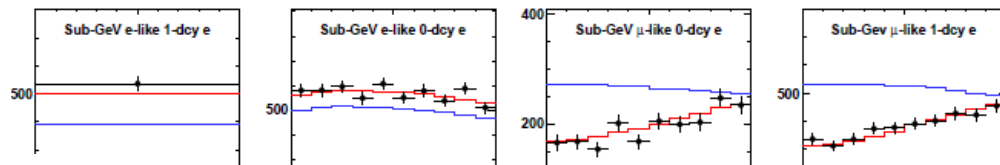


16 sub-sampleに分割

single ring or multi ring, e-like or μ -like, sub GeV ($E < \sim 1\text{GeV}$) or multi GeV

FC or PC

それぞれのsub sampleの



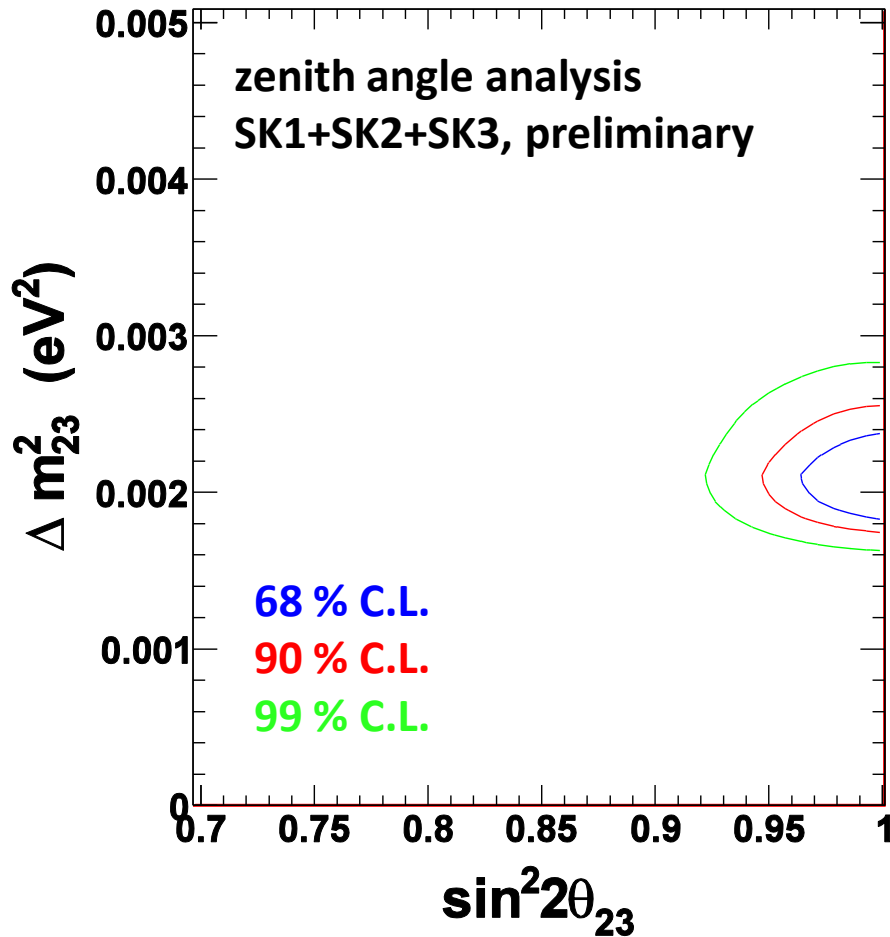
cos zenith

cos zenith

cos zenith

cos zenith

Result (zenith angle)



Physical Region (1σ)

$$\Delta m_{23}^2 = 2.11_{-0.19}^{+0.11} \times 10^{-3}$$

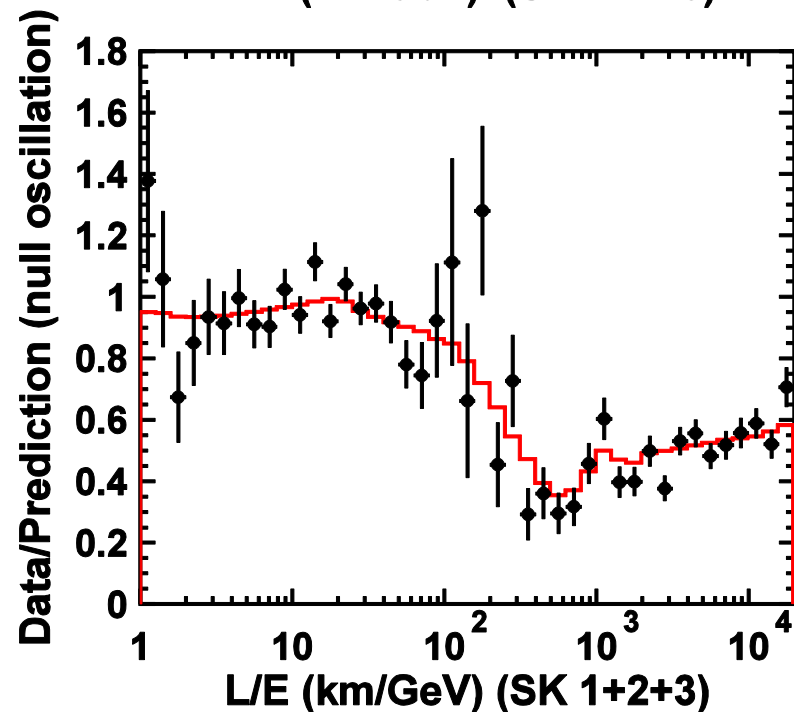
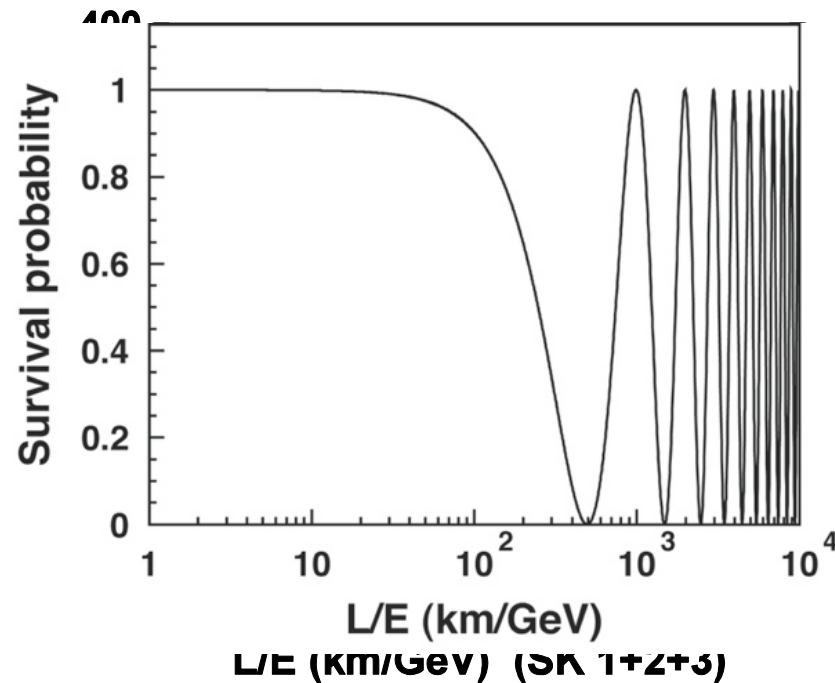
$$\sin^2 2\theta_{23} > 0.96 \text{ (90\% C.L.)}$$

L/E analysis

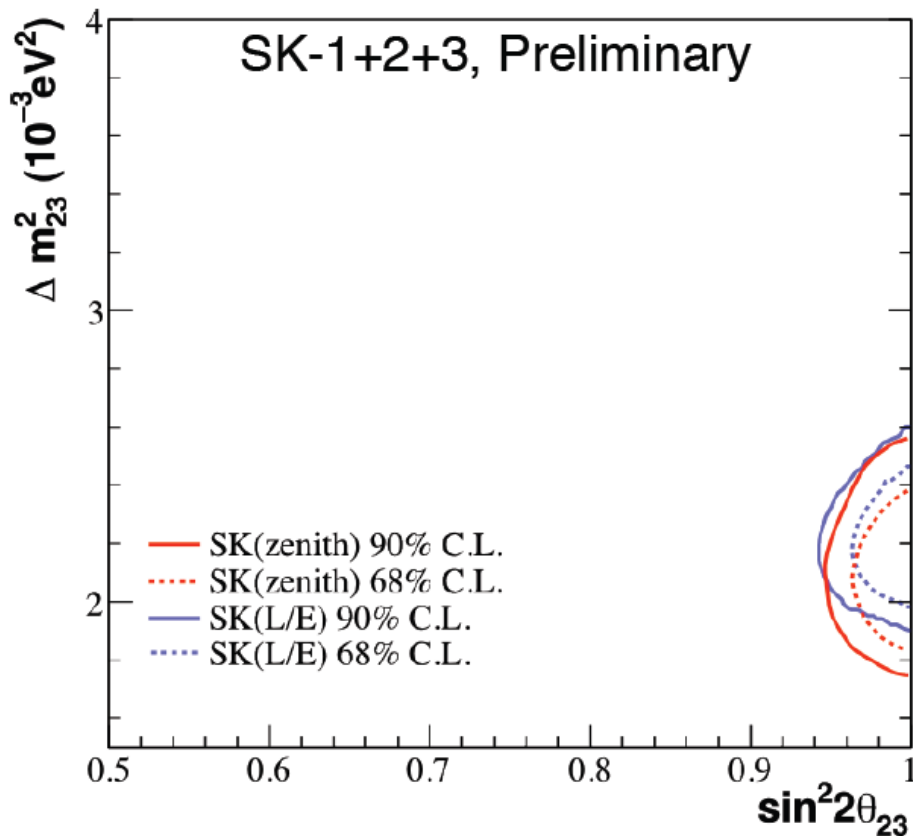


zenith angleによりLを決定

- μ -like sub-samplesだけを解析
- $\theta \sim 0$ 方向はL分解能が悪いので除く
(全体の70%を使用)
- Δm^2 に対して高感度



Zenith vs L/E



Zenith Physical Region (1σ)

$$\Delta m_{23}^2 = 2.11_{-0.19}^{+0.11} \times 10^{-3}$$

$$\sin^2 2\theta_{23} > 0.96 \text{ (90\% C.L.)}$$

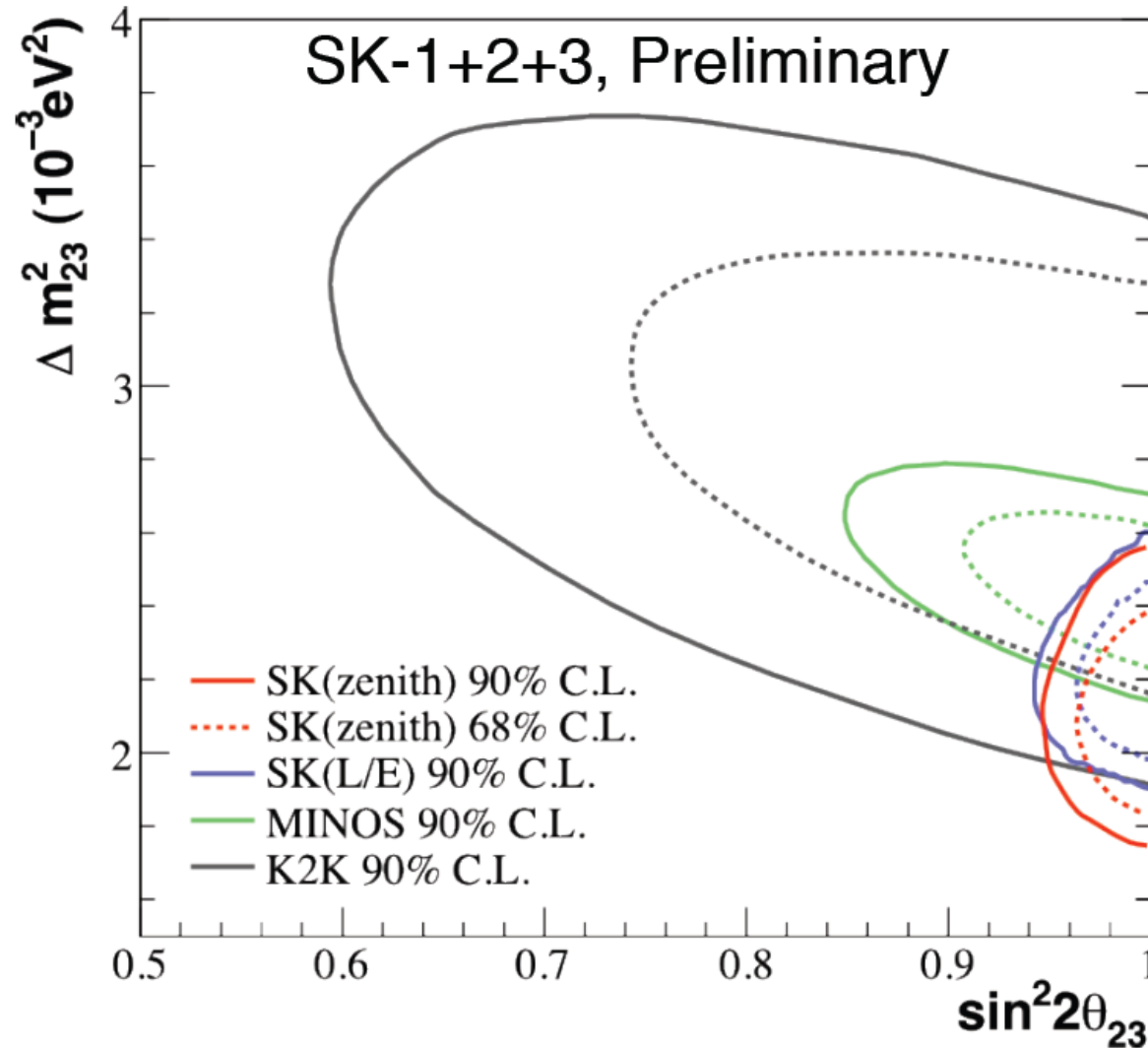
L/E Physical Region (1σ)

$$\Delta m_{23}^2 = 2.19_{-0.13}^{+0.14} \times 10^{-3}$$

$$\sin^2 2\theta_{23} > 0.96 \text{ (90\% C.L.)}$$

2つの結果はconsistent

Comparison with other experiments



$\sin^2 2\theta_{23}$ 測定においてはSKの結果が世界最高感度

Three flavor analysis

$\Delta m_{23}^2 \gg \Delta m_{12}^2$ という条件のもと3世代振動を考える ← θ_{13} 測定のための最小限の拡張

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \right)$$

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

$$= \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \right)$$

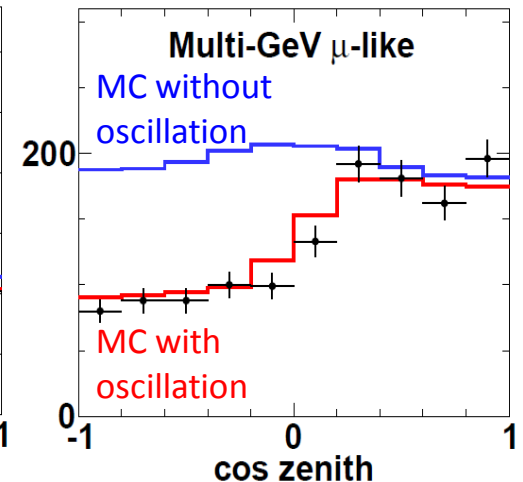
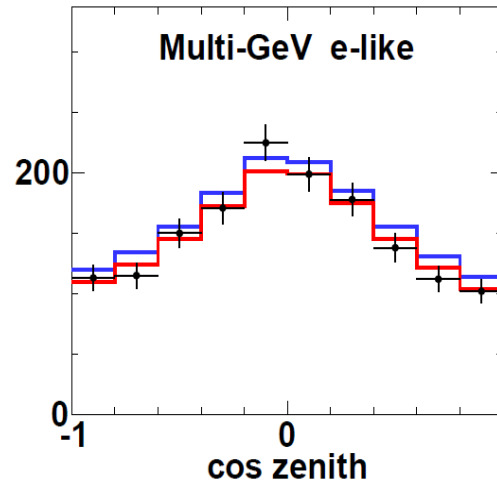
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - 4 \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23} (1 - \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \\ \times \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \right) \quad (5)$$

大気ニュートリノの振動は $\sin^2 \theta_{13}$, $\sin^2 \theta_{23}$, Δm_{23}^2 の
3パラメータで記述 \Rightarrow zenith angle analysis

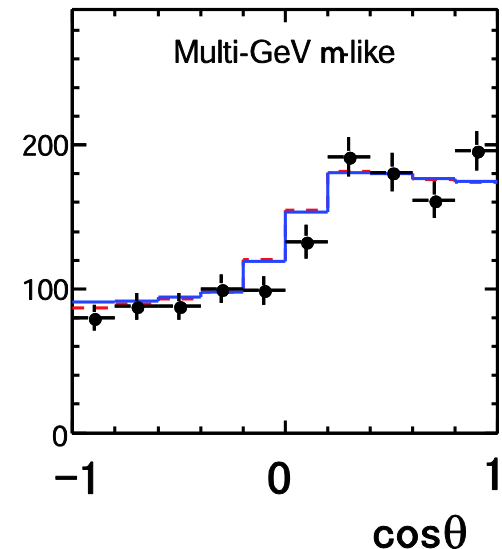
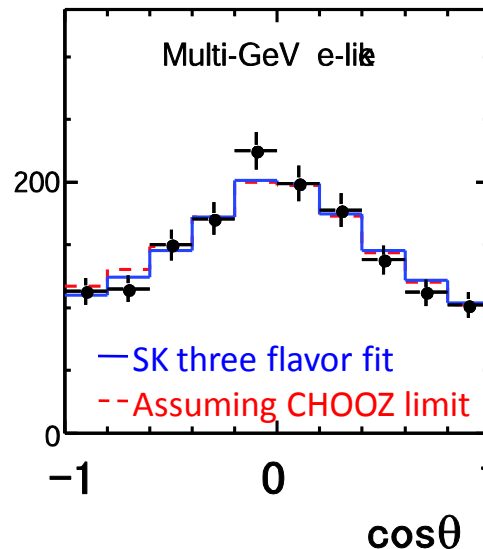
Zenith angle distribution

- Zenith angle analysis
- Two flavor analysisと同じ sample, binning, etc...
- $\sin^2\theta_{13}$, $\sin^2\theta_{23}$, Δm^2_{23} の 3振動パラメータでフィット
- フィット結果の分布は two flavor とほぼ同じ

Two flavor fit



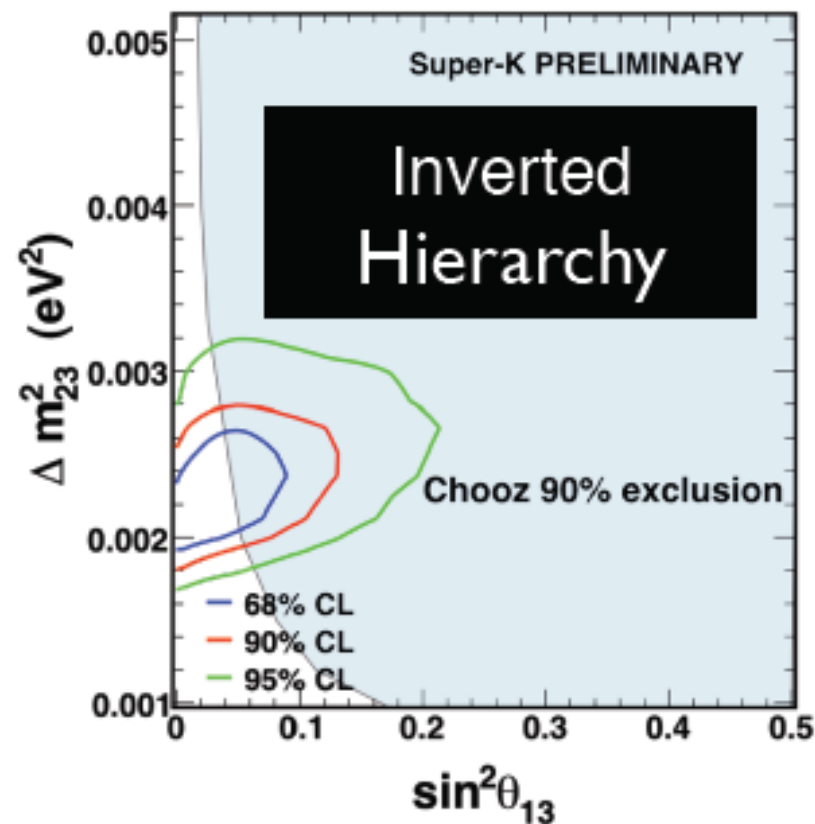
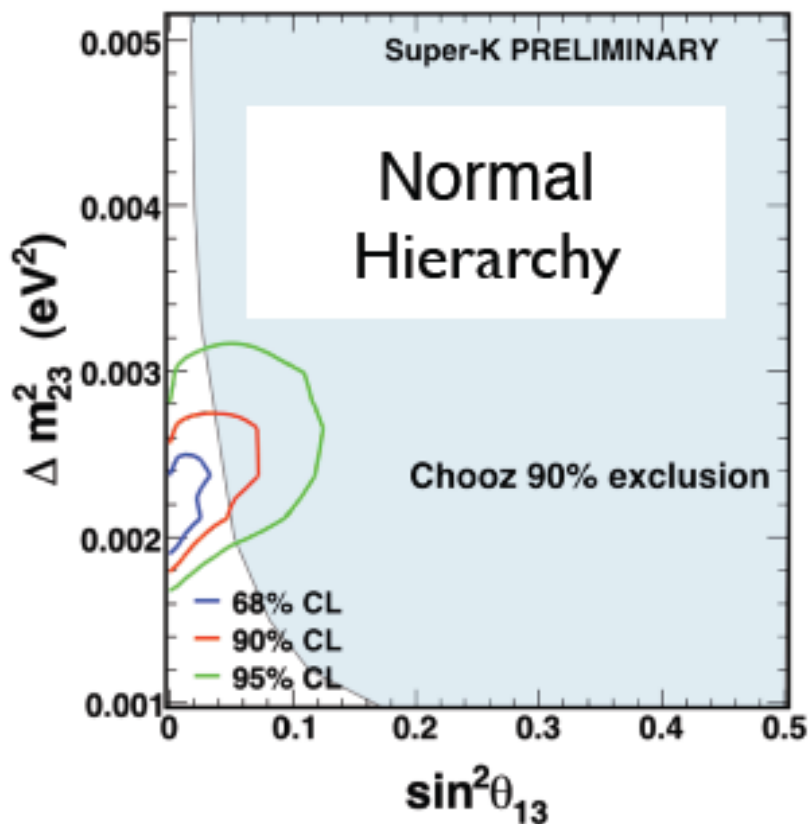
Three flavor fit



$\sin^2\theta_{13}$ result

	χ^2/dof	Δm_{23}^2	$\sin^2\theta_{23}$	$\sin^2\theta_{13}$
Normal	469/417	2.1×10^{-3}	0.50	0
Inverted	468/417	2.1×10^{-3}	0.55	0.01

$\sin^2\theta_{13}$ はゼロとconsistent



Other analysis

- Solar term analysis
 - 今度は $\theta_{13}=0$ と仮定し $\sin^2\theta_{12}$, Δm^2_{12} を測定できるように拡張
- Full three flavor analysis
 - θ_{13} , $\sin^2\theta_{12}$, Δm^2_{12} , δ の全てをfree parameter
 - 現在進行中
- Non standard interaction
- CPT violation
- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ analysis
- Proton decay

Summary

- スーパーカミオカンデ実験は、ニュートリノ振動現象を発見し、現在もその研究を行っている。
- 検出器はT2K実験の後置検出器としても用いられる。
- SK-IVではhardware, softwareとも改善され、事象再構成のパフォーマンスが向上した。
- SK-IV実験は順調！
 - 289日間のデータが解析可能
- SK-I, II, III大気ニュートリノデータの解析結果を発表
 - $\sin^2 2\theta_{23}$ の測定精度は世界最高
 - sub dominant項(θ_{13} など)の研究も進行中