スーパーカミオカンデ実験 →

作田　誠（岡大）

ICRR共同利用研究発表会、2007年12月15日

1. 検出器現状（SK-III）
2. 最近の物理結果
3. Electronics Upgrade (2008）
4. まとめ

共同研究機関 (2007年4月)

（日本、米国、韓国、中国、ポーランド、約150名）

- 東大宇宙線研究所
- 神岡宇宙素粒子観測施設
- ニュートリノ観測情報融合センター
- 数物連携宇宙研究機構
- 宮城教育大学
- 新潟大学
- KEK
- 東海大学
- 神奈川大学
- 静岡大学
- 静岡福祉大学
- 名古屋大学
- 岐阜大学
- 京都大学
- 大阪大学
- 神戸大学
- 岡山大学

- Boston U
- UC Irvine
- BNL
- LANL
- Duke U
- LSU
- SUNY, Stony Brook
- CSU, Dominguez Hills
- U. Hawaii
- Indiana U
- U. Minnesota
- U. Washington
- Chonnam
- SNU
- SungKyunkwan U
- Tsinghua U
- Warsaw U

1. SK-III
検出器(Super-Kamiokande)

現在

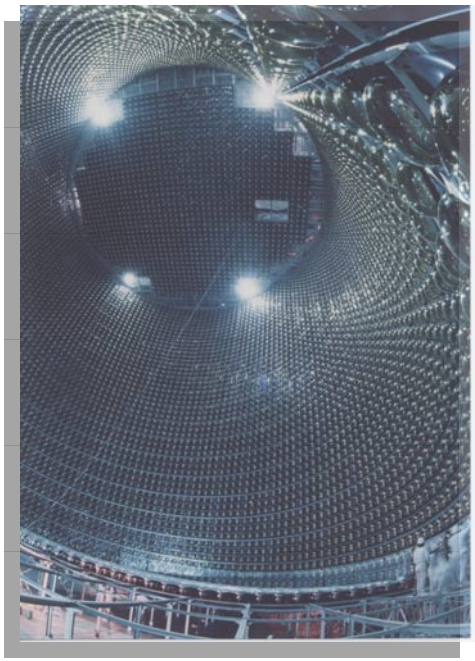
1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007

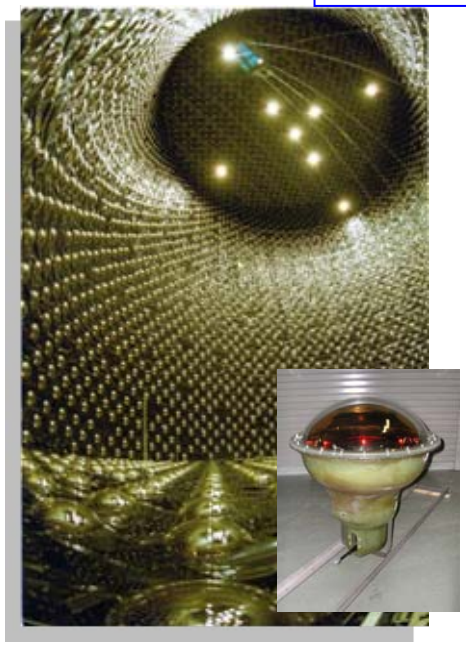
SK-I　　事故　部分再建　SK-II　　完全再建　SK-III

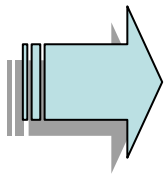
大気ニュートリノ振動の発見

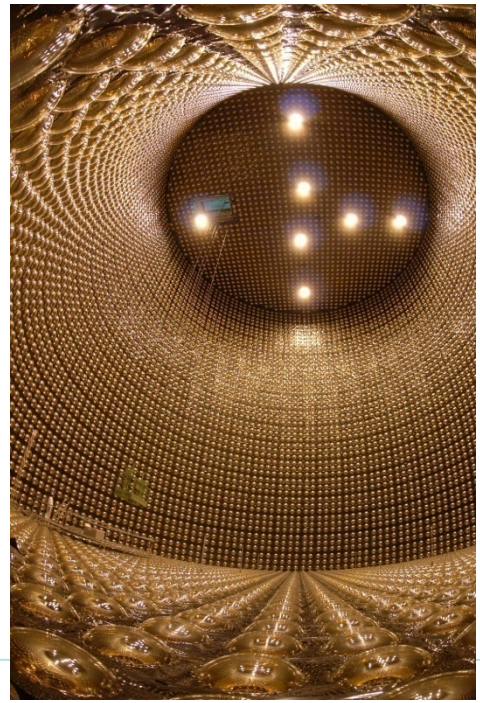
太陽ニュートリノ振動の発見

加速器でのニュートリノ振動の確認









内水槽増倍管数(光電面被覆率)

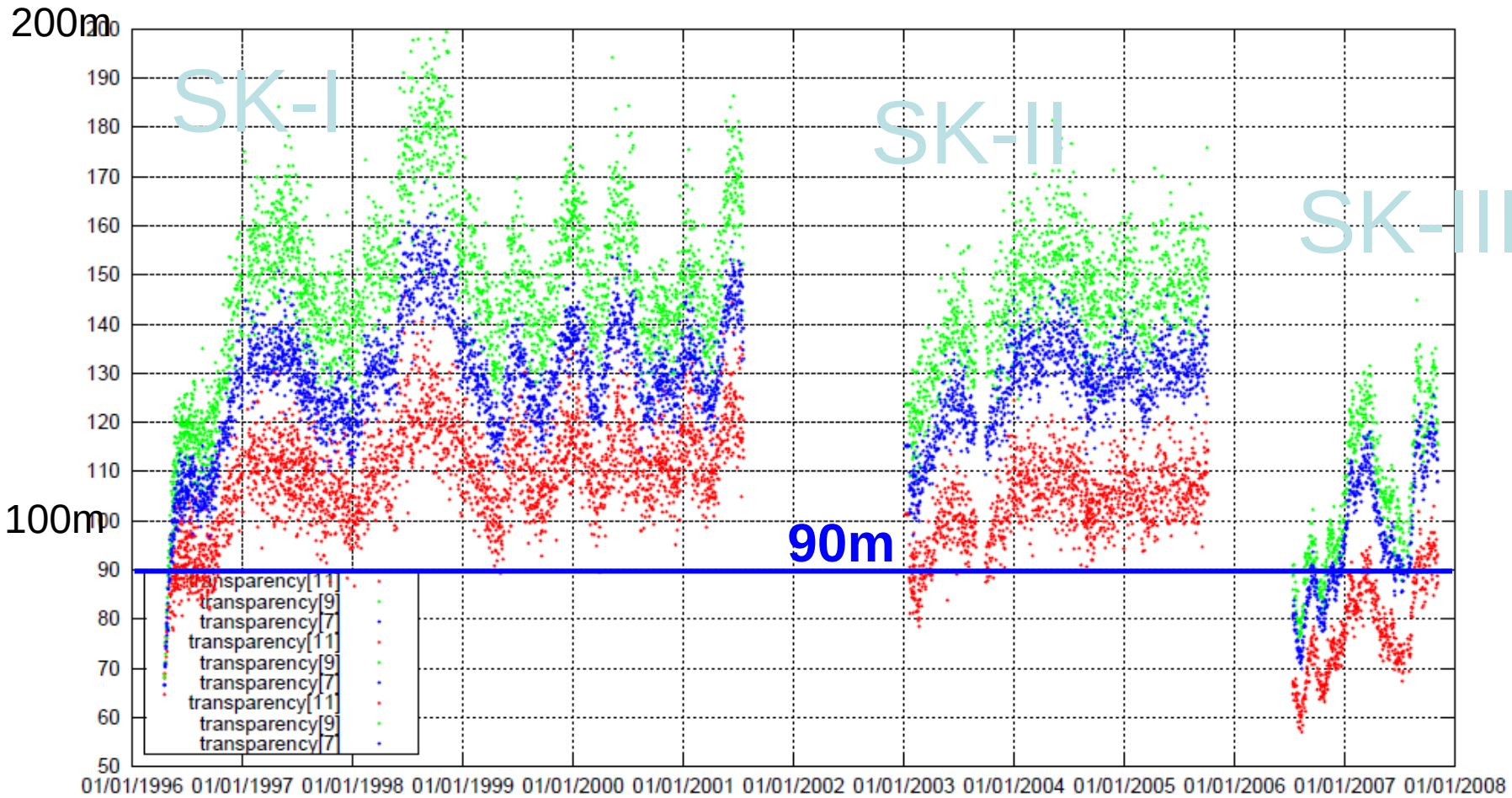
SK-I: 11,146 (40%)　　SK-II: 5,182 (19%)　　SK-III: 11,129 (40%)

1. SK-III検出器現状

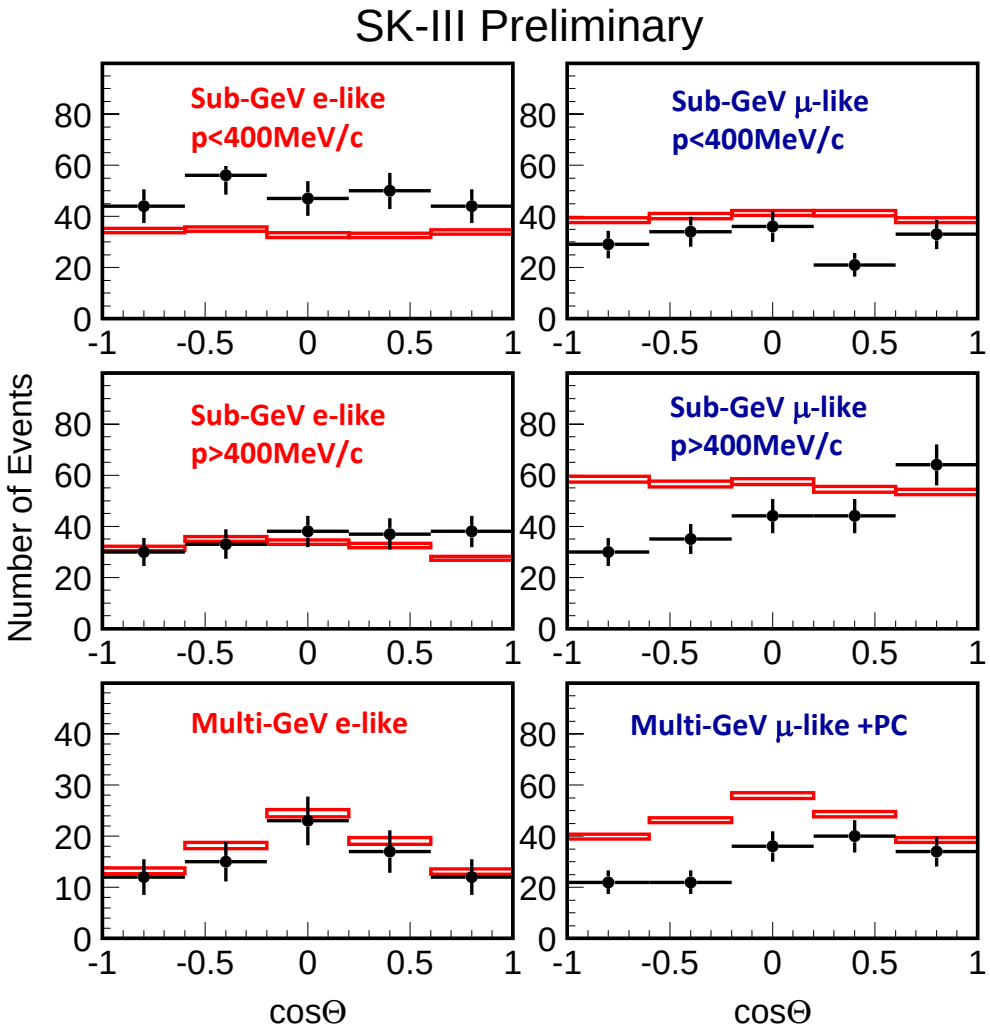
- 水の透過度：90m以上（SK-II 並みになった。）
- 大気ニュートリノ解析―順調
- 太陽ニュートリノ解析
  - 検出器の中央部分についてはバックグランドはSK-Iのそれより少ない。信号の量はSK-Iと合っている。
  - 水を一様に循環させる工夫でラドンバックグランドを減少させたり、さらに低エネルギーイベントの壁際バックグランドの減少の努力がなされている。

水の透過度に関して:
SK-III ～ SK-II level

Using Barrel PMTs/ ALL PMTs/ Bottom PMTs



SK-III (大気ニュートリノ)



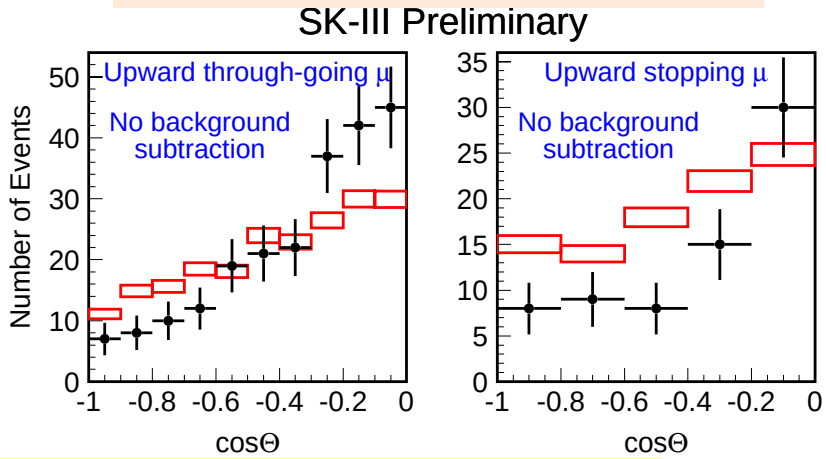
—奥村@NuFact07

MC w/o oscillation

SK-III data

Event rate (ev./day)

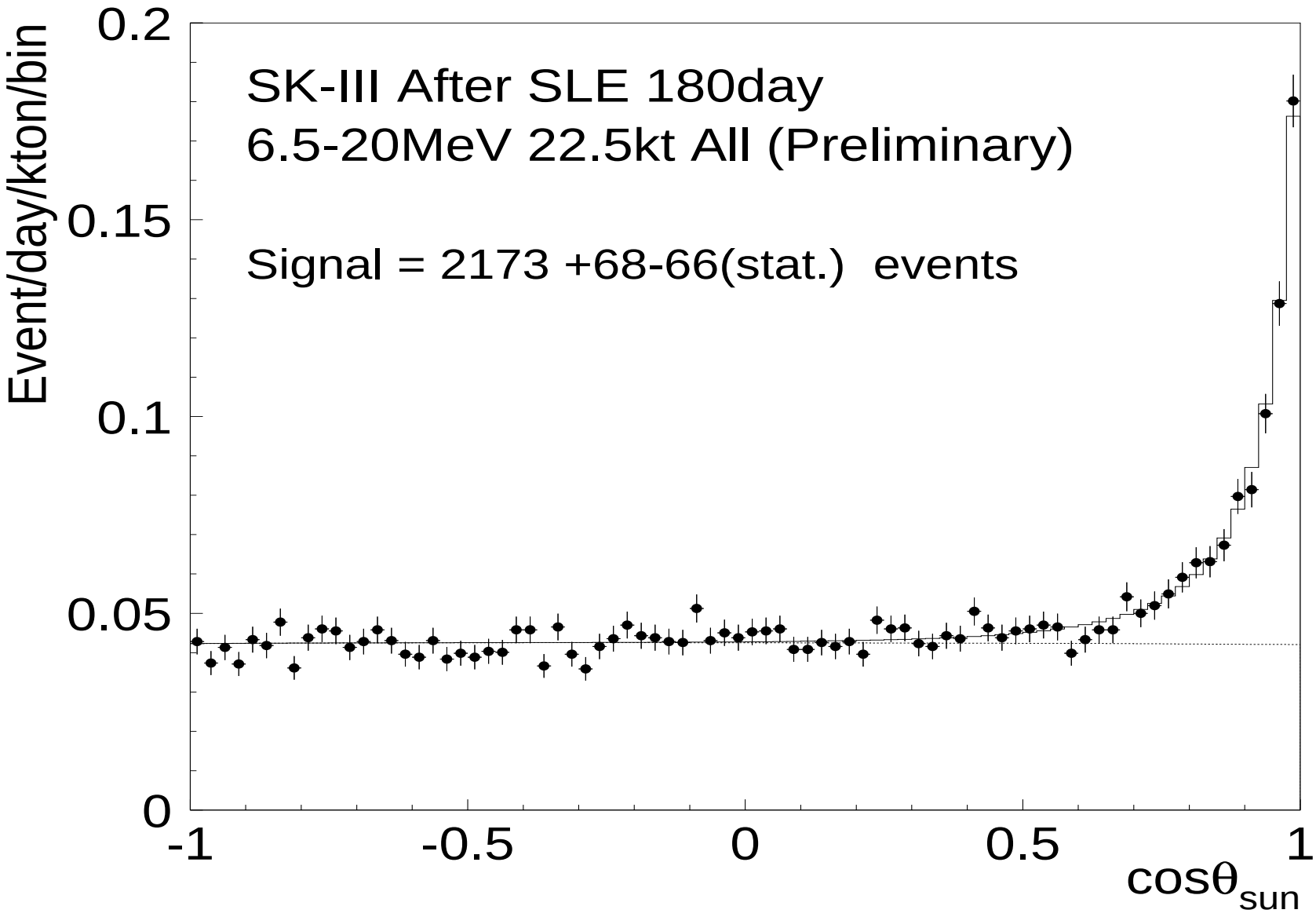
	SK-III	SK-II
FC	8.31±0.22	8.22±0.10
PC	0.57±0.06	0.54±0.03



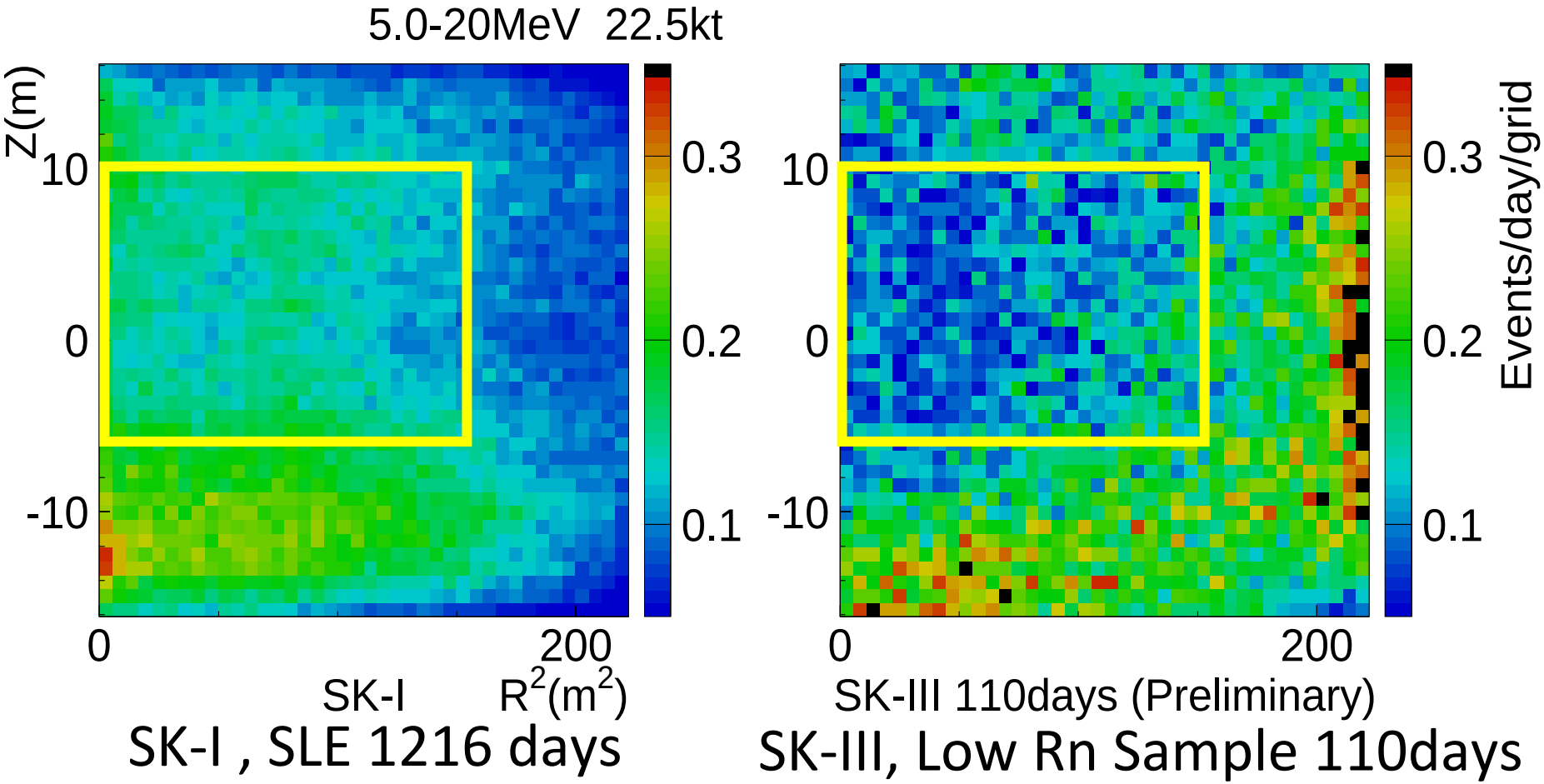
Event rates are consistent with previous SK-II

Zenith angle dependence is also observed in SK-III

太陽ニュートリノ方向分布



Vertex Distribution(5.0-20MeV)



SK-I , SLE 1216 days

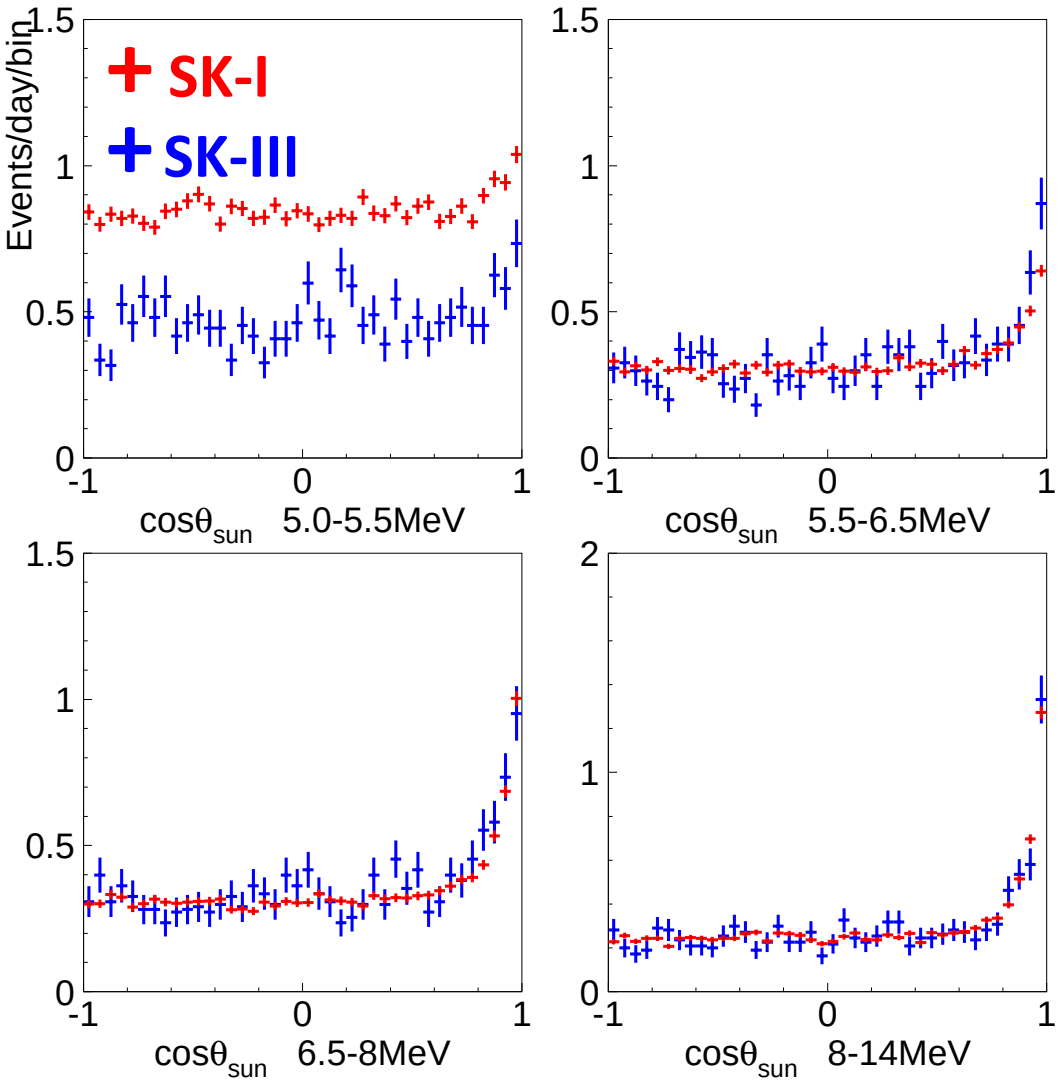
SK-III, Low Rn Sample 110days

＞SK-IIIでは壁際と底面によりおおくの事象が発生している。

＞SK-IIIではタンク中心ではバックグランドが少ない。

太陽ニュートリノ方向分布

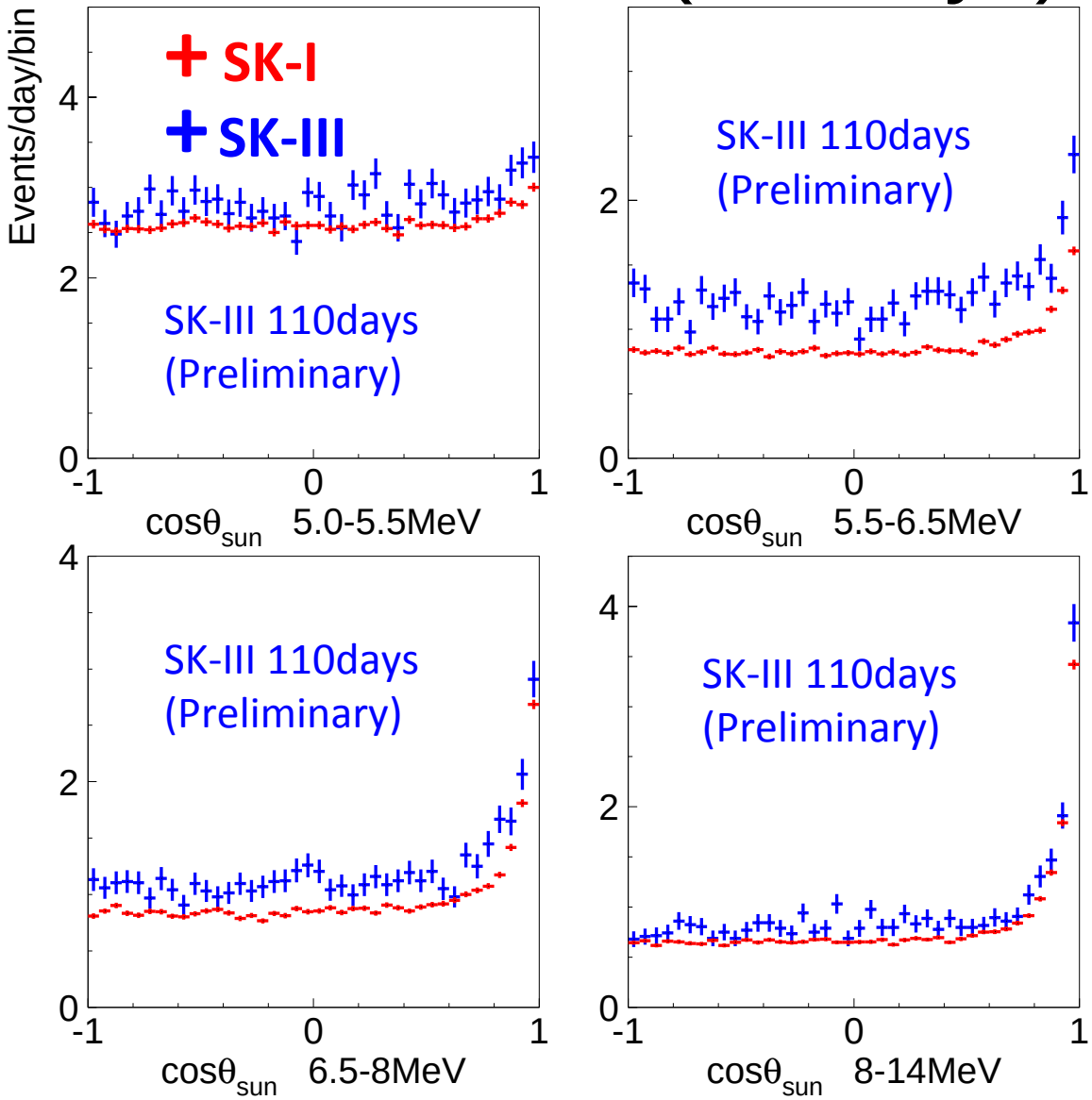
検出器中央のみ(-6m<Z<10m, R^2<150m^2)



- SK-III BG rate is lower than SK-I by factor 2.
- SK-IIIの信号の大きさはSK-Iと合っている

太陽ニュートリノ方向分布

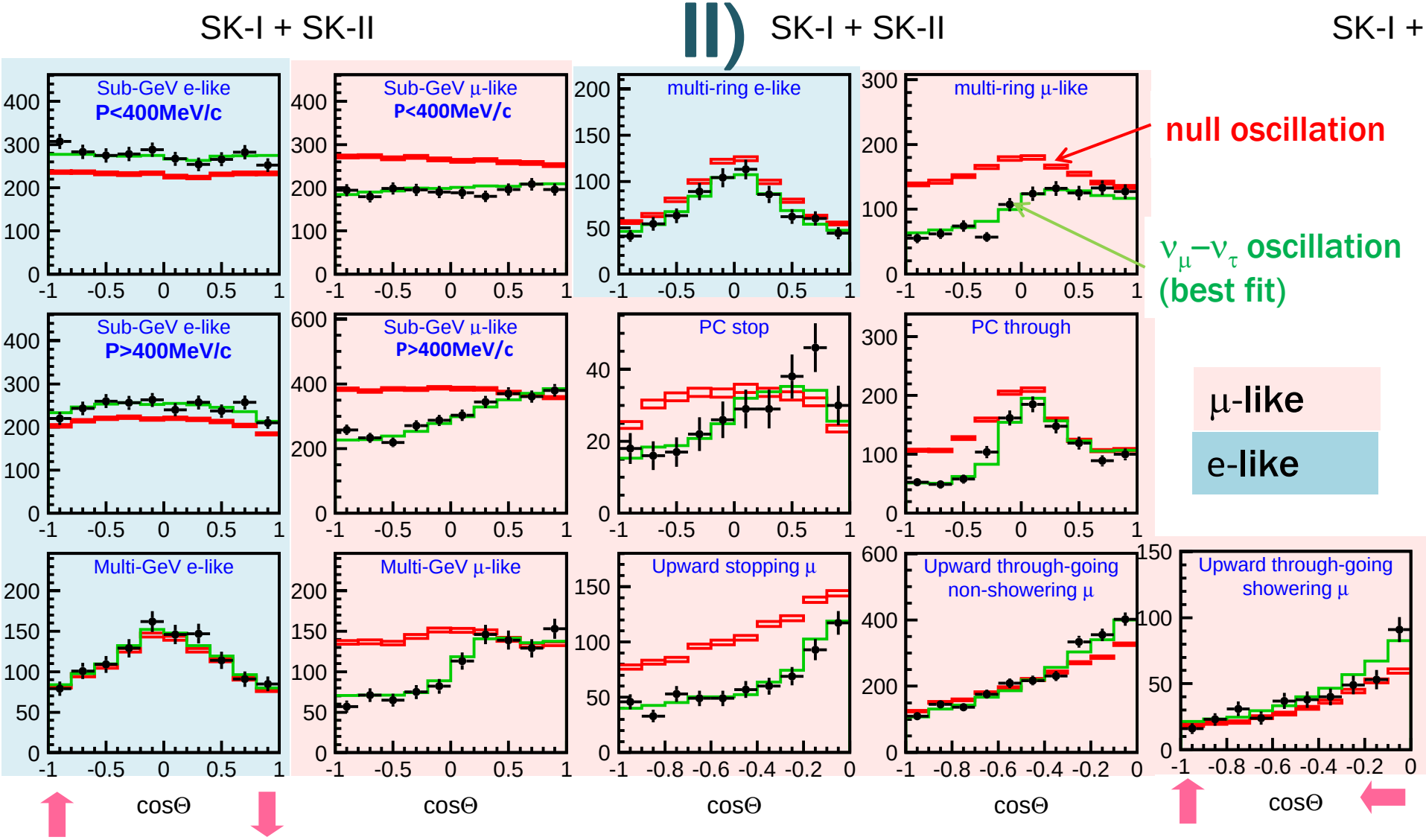
SK-I & SK-III(110days)



2. 最近の物理結果

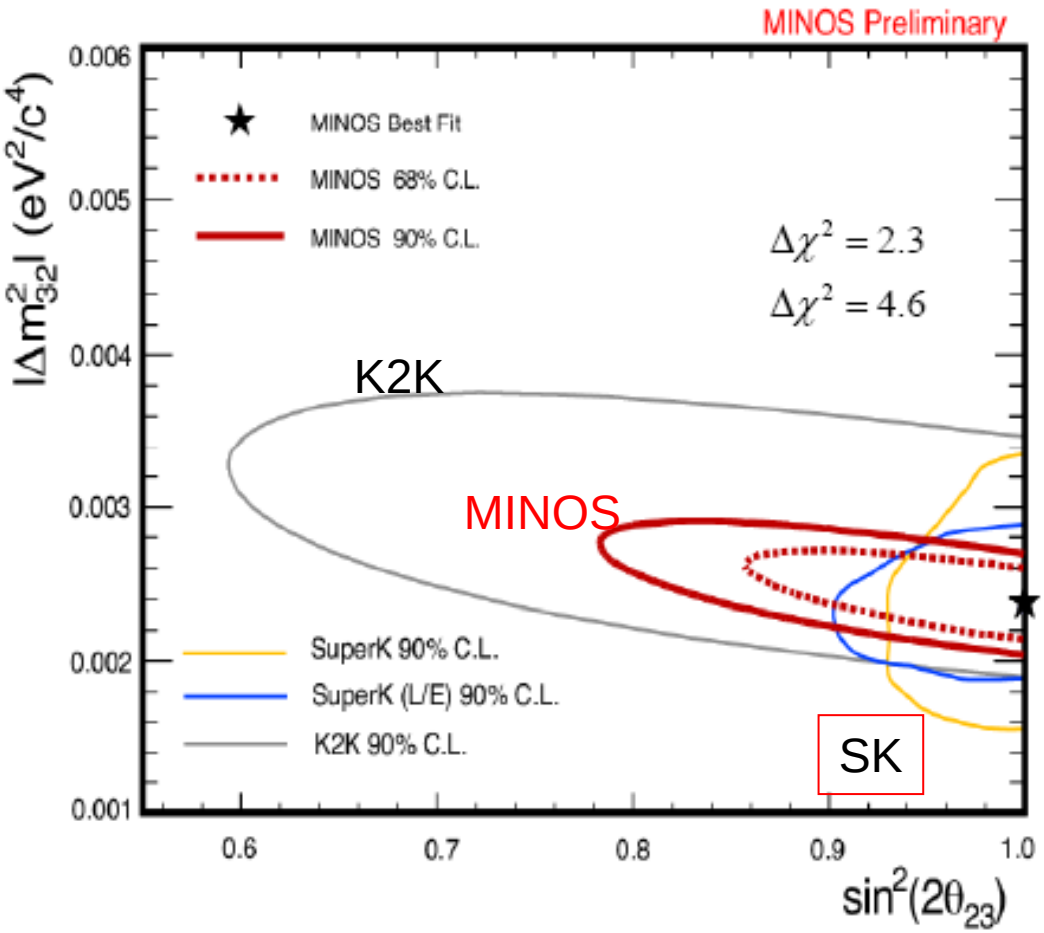
1. Search for Supernova Neutrino Bursts at Super-Kamiokande.
   M.Ikeda et al. (SK Collab.), Astrophysical Journal 669 (2007) 519-529.
2. Search for neutral Q-balls in super-Kamiokande II.
   Y.Takenaga et al., Phys.Lett.B647 (2007)18-22.
3. Three flavor neutrino oscillation analysis of atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande I, J.Hosaka et al. Phys.Rev.D**74** (2006) 032002-1-10.
4. Solar neutrino measurements in super-Kamiokande-I.
   J.Hosaka et al., Phys.Rev.D**73** (2006) 112001-1-33.
5. A Measurement of atmospheric neutrino flux consistent with tau neutrino appearance, K.Abe et al., Phys.Rev.Lett.**97** (2006) 0607059-1-6.
6. High energy neutrino astronomy using upward-going muons in Super-Kamiokande-I, K.Abe et al., Astrophys.J.**652** (2006) 198-216.
7. Search for Diffuse Astrophysical Neutrino Flux Using Ultrahigh Energy Upward-Going Muons in Super-Kamiokande I,
   Molly E.C. Swanson et al. Astrophys.J.**652** (2006) 206-215.

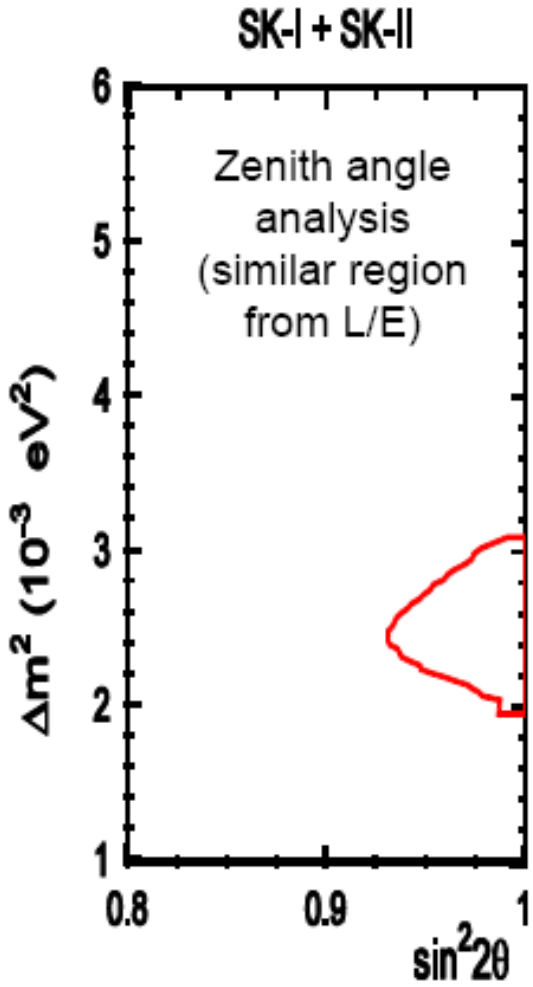
Zenith Angle Distributions (SK-I + SK-II)



All distributions agree with oscillated expectations

Allowed Parameter Space





Accuracy: Δm^2: Atm →LBL, $\sin^2 2\theta$: still atm.

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ appearance 解析

- Best fit Tau appearance

138±48(stat)+15-32(sys)

- No tau appearance

disfavored by 2.4σ

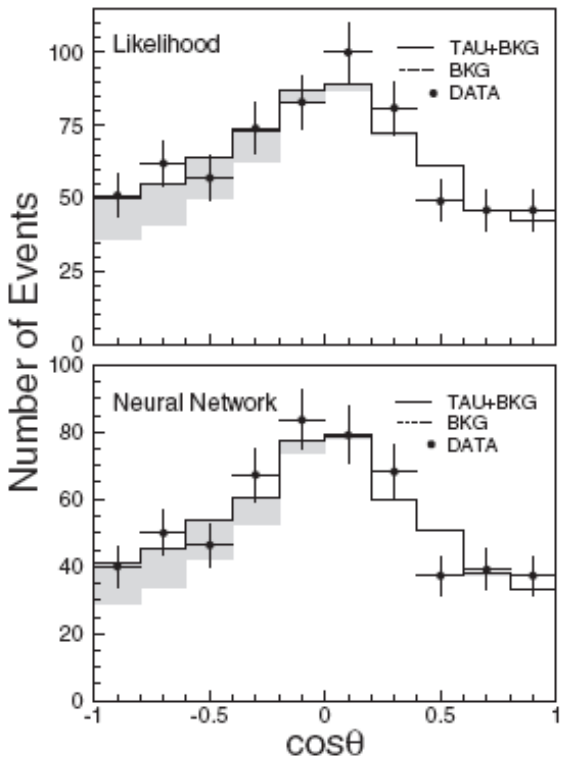
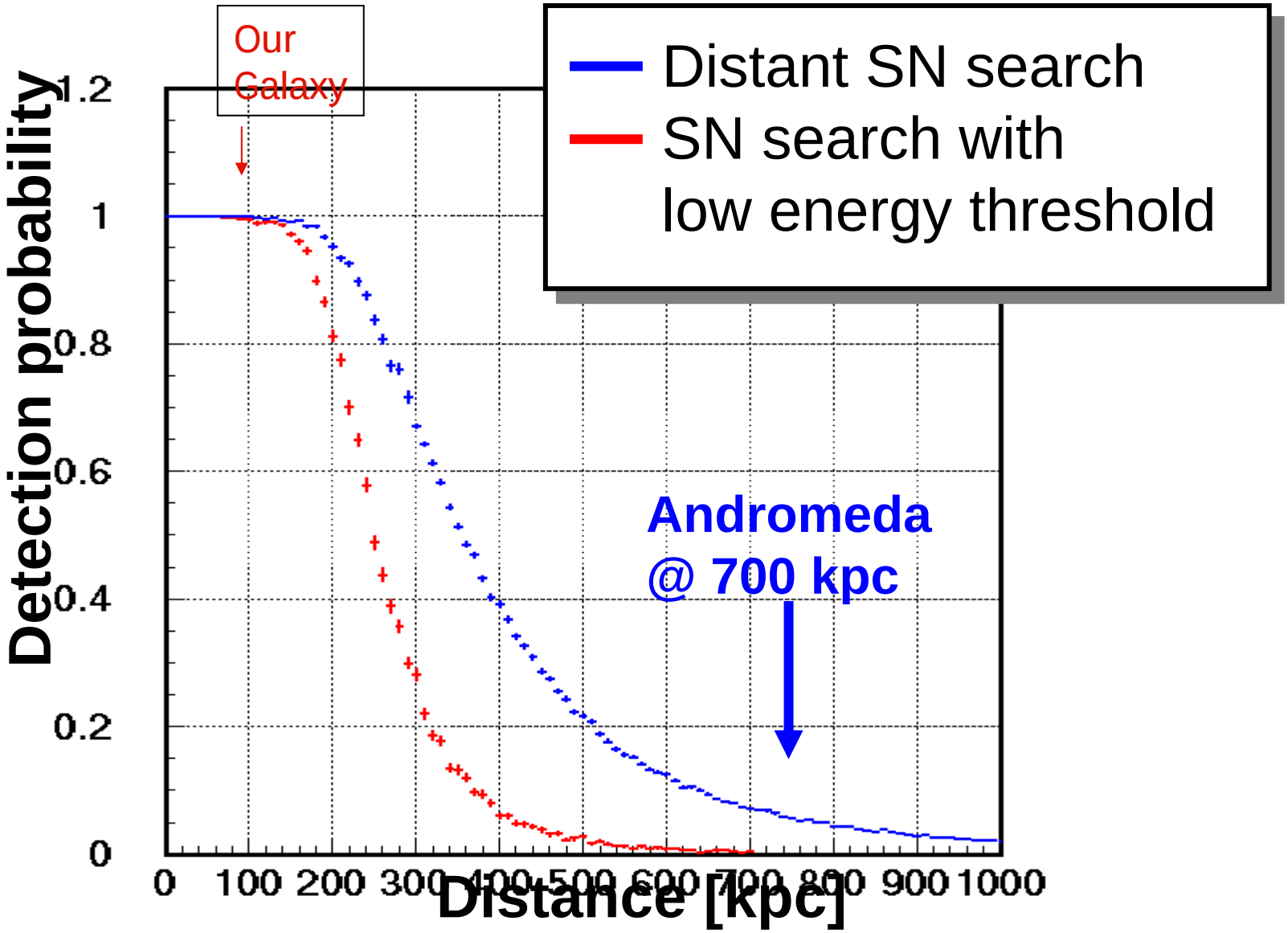


FIG. 3. The zenith angle distributions for the likelihood (top) and neural network (bottom) analyses. Zenith angle $\cos\theta = -1$ ($\cos\theta = +1$) indicates upward-going (downward-going) direction. The data sample is fitted after ν_τ event selection criteria are applied. The solid histogram shows the best fit including ν_τ, and the dashed histogram shows the backgrounds from atmospheric neutrinos (ν_e and ν_μ). A fitted excess of taulike events in the upward-going direction is shown in the shaded area.

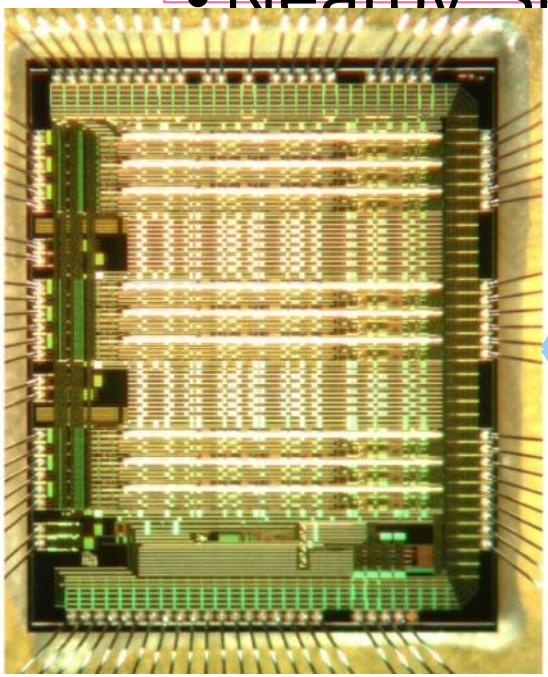
SK-I, SK-IIでの超新星ニュートリノ探索

Delayed explosion & Neutronization burst search, M.Ikeda et al. APJ (2007)669

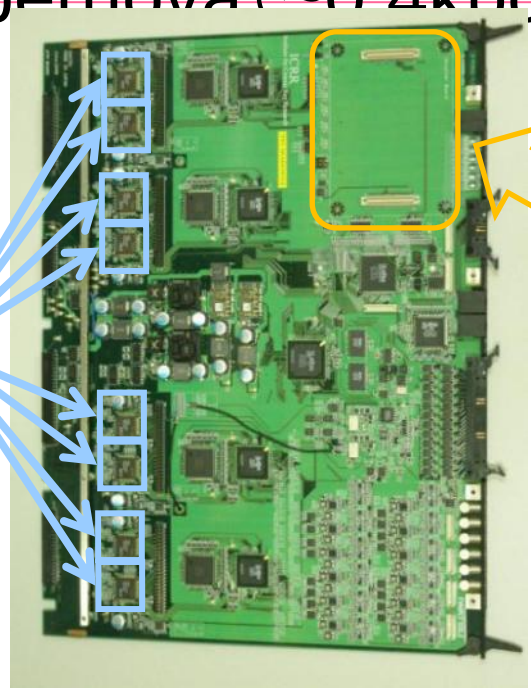


3. SKにおける新エレクトロニクス開発

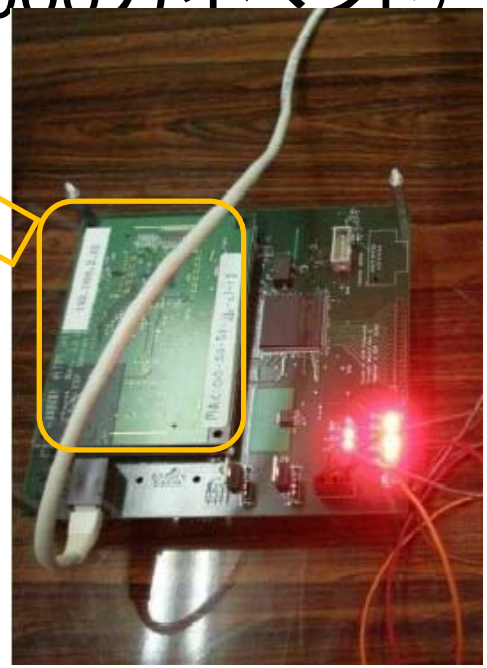
- 今後10年以上の安定したデータ収集
- Trigger-less system（Record Every Hit）
- Nearby Supernova（~0.4kpc,1000万イベント）



Custom ASICとして
QTCを開発



フロントエンドボード開発
Q-bee
= Qtc-based Electronics
with Ethernet



Ethernet読み出し
用カードの開発

2008年9－10月にinstall予定

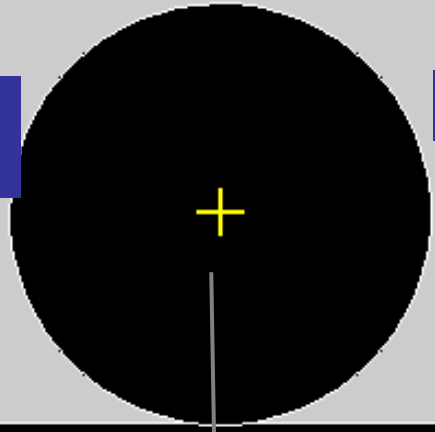
prototype board test at Super-K (July 17-27)

Super-Kamiokande III

Run 40510
07-07-20:21:05:
Inner: 168 hits
Outer: 0 hits,
Trigger ID: 0x100
D wall: 0.0 cm
Fully-Contained M

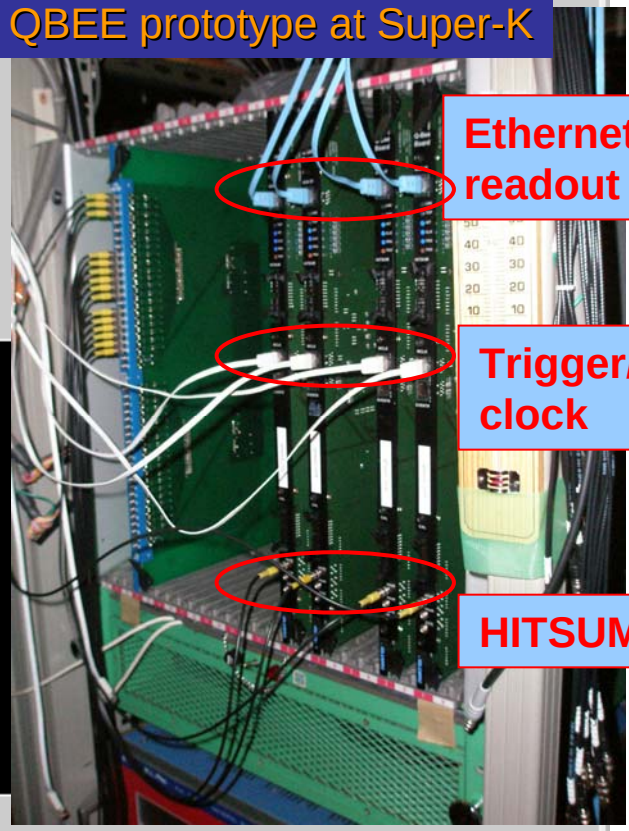
Master clock & serial trigger generator

Charge(pe)
- > 240
- 210- 240
- 182- 210
- 156- 182
- 132- 156
- 110- 132
- 90- 110
- 72- 90
- 56- 72
- 42- 56
- 30- 42
- 20- 30
- 12- 20
- 6- 12
- 2- 6
- < 2



Light source
(laser, LED)

QBEE prototype at Super-K

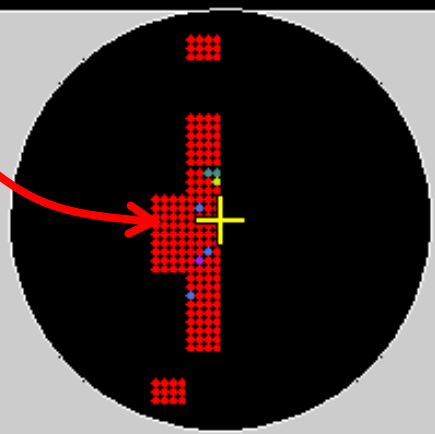


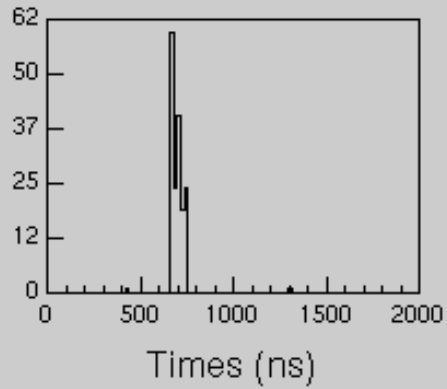
Ethernet readout

Trigger/ clock

HITSUM

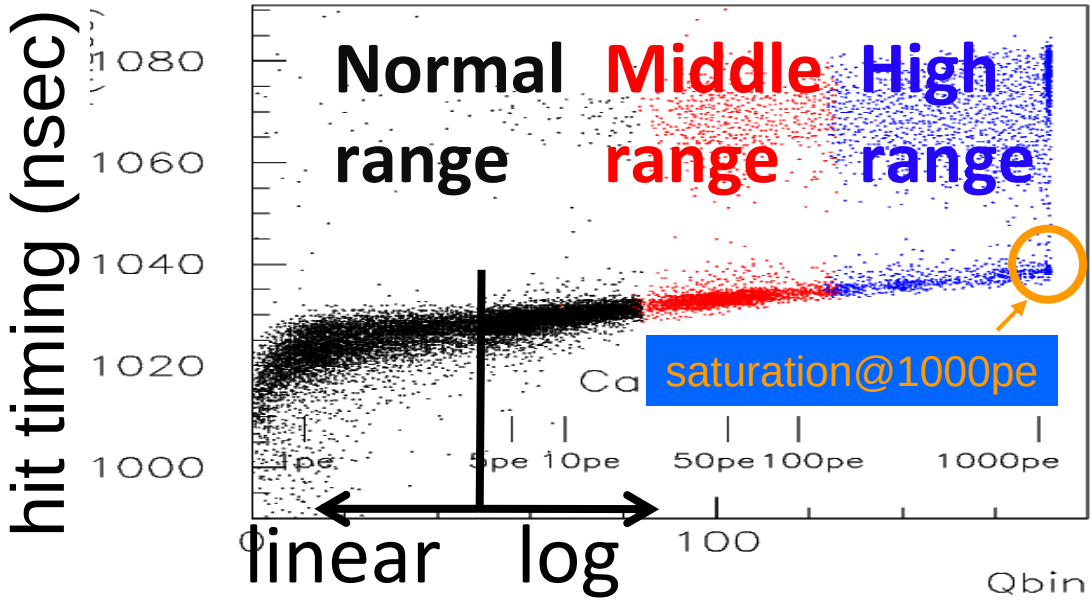
Laser light observed by QBEE
(168 ID PMTs/11100)
(24 OD PMTs/1880 in addition)

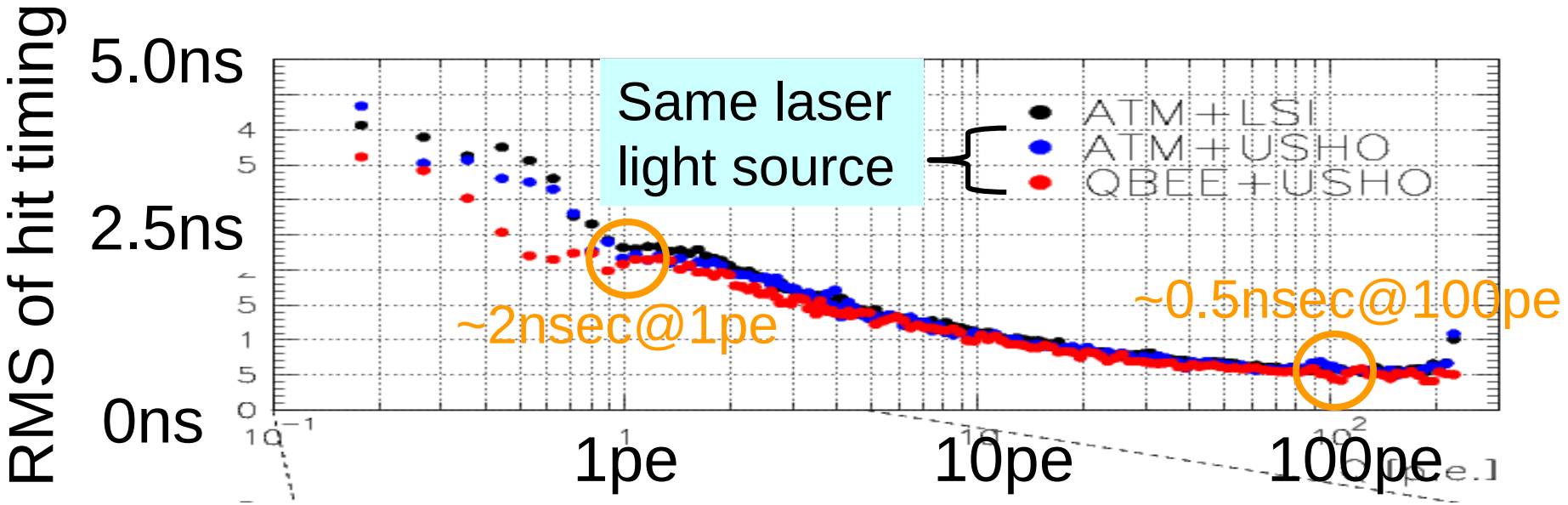




Timing response (laser data)

Timing resolution up to ~220p.e. was calculated to be compared with that by ATM.





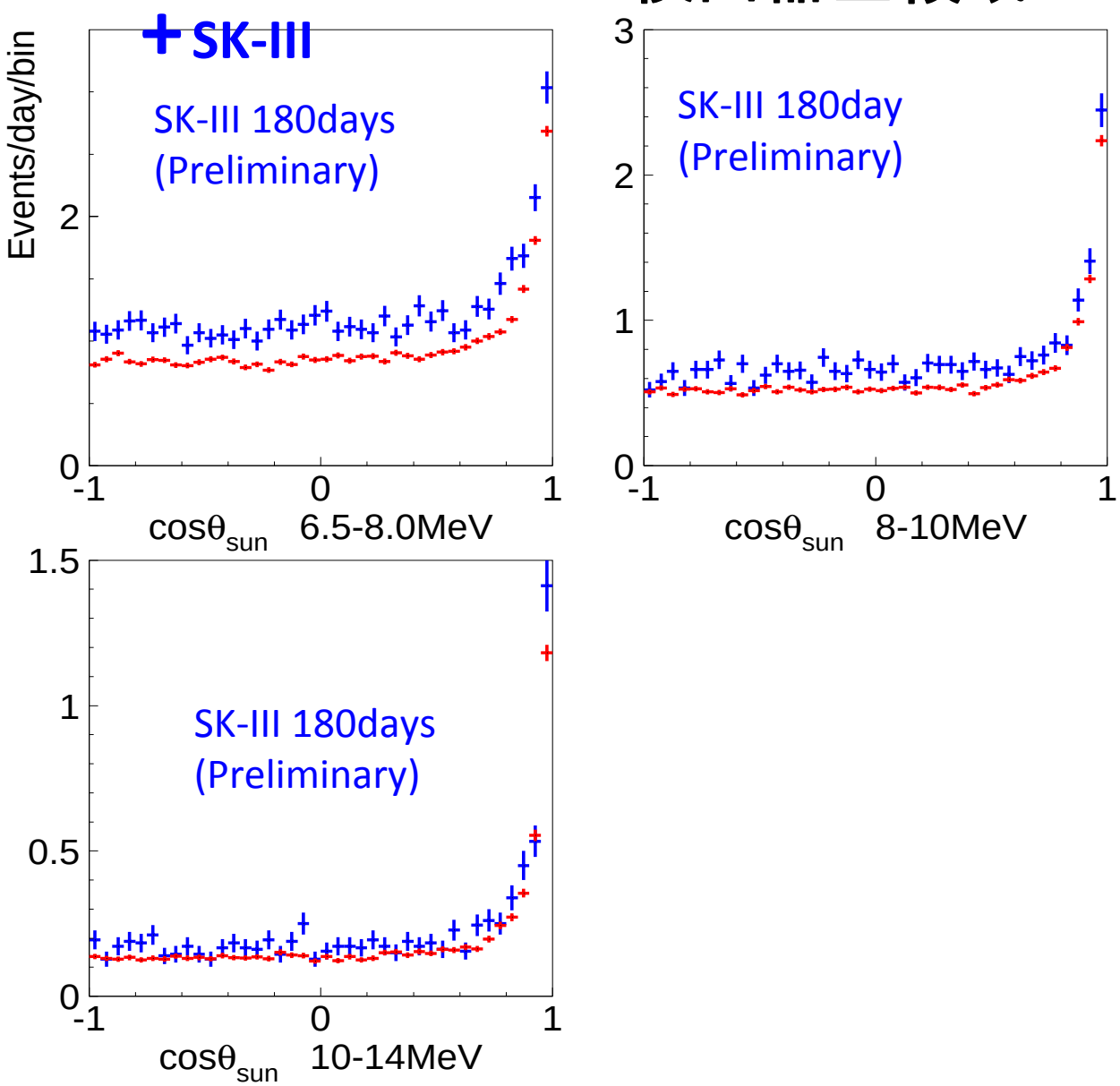
QBEE(red) resolution is comparable with ATM(blue)

4. まとめ

1. SK-III は順調に立ち上がった。
   - 大気ニュートリノ解析ー順調
   - 太陽ニュートリノ解析
     - 検出器の中央部分についてはバックグランドはSK-Iのそれより少ない。信号の量はSK-Iと合っている。
     - 水を一様に循環させる工夫でラドンバックグランドを減少させたり、さらに低エネルギーイベントの壁際バックグランドの減少の努力がなされている。
2. 物理結果ー3 flavor, tau apeparance, SN, ..
3. SN 爆発やT2K実験のためのElectronics 改良作業や解析ソフト改良の準備順調。

太陽ニュートリノ方向分布

検出器全領域



More BG can be reduced by ^{16}N cut which was used in SK-I.

Expected events
7 ev./day/22.5kt

1. SK-III検出器現状

- 水の透過度：90m以上（SK-II 並みになった。）
- 大気ニュートリノ解析―順調
- 太陽ニュートリノ解析
  - 検出器の中央部分についてはバックグランドはSK-Iのそれより少ない。信号の量はSK-Iと合っている。
  - 水を一様に循環させる工夫でラドンバックグランドを減少させたり、さらに低エネルギーイベントの壁際バックグランドの減少の努力がなされている。

Electronics schedule

QTC, QBEE production schedule

	2007年度						2008年度								12	1	2	3	4	5
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
入札関連	公告 10/17 以降		開札 12/27 以降				中間検査 4/E			納入期限 7/E										
Case1 当初の線表 + QTC小変更 ：部品発注は開札前に開始した場合																				
部品購入		部品 購入			部品	終結														
QTC量産	量産 準備	マスク 修正	CMOS	量産		実装	選別													
インサータ							インサータ													
調整・検査							後 工程	200枚 納入	200枚 納入	200枚 納入										

Super-K

QBEE calibration

Commissioning of online, offline

Installation to SK

Normal run

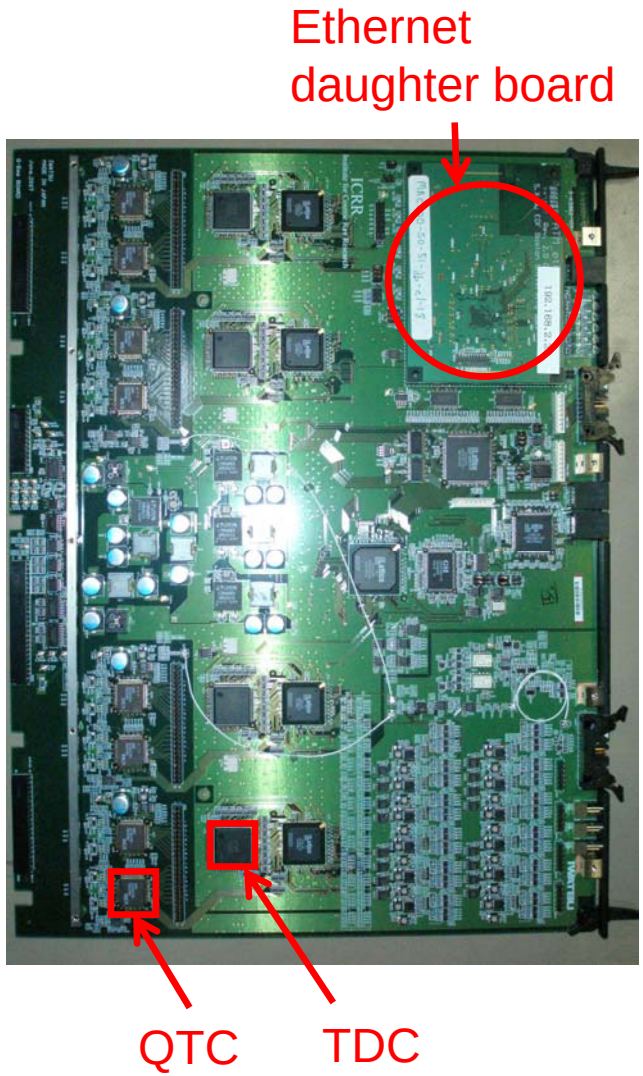
SK calibration w/ ATM (linac, DT, Ni, laser, decay-e…)

SK calibration w/ QBEE (linac, DT, Ni, laser, decay-e…)

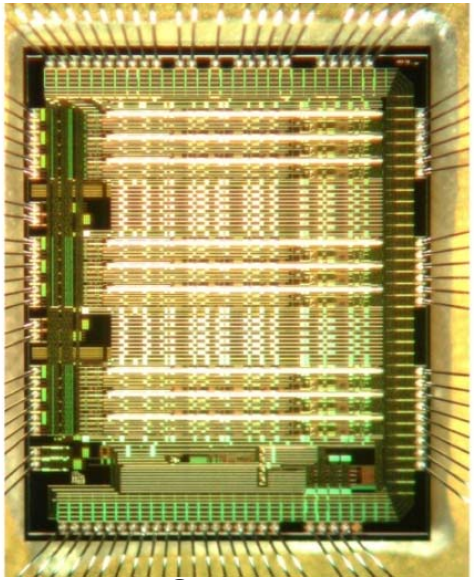
T2K beam (from April 2009)

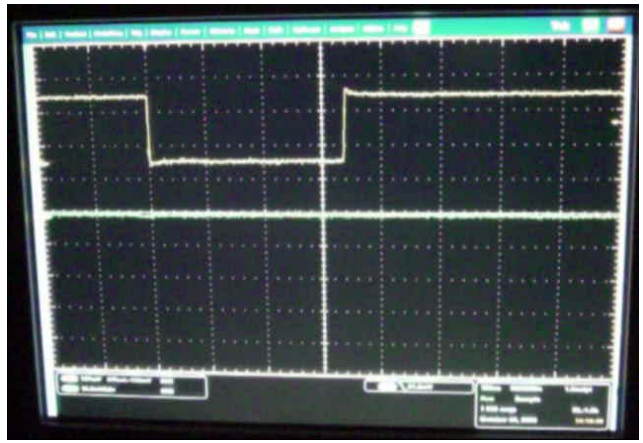
New electronics development

- **Will be installed in 2008 (before T2K)**
  - Based on QTC + TDC chip
  - Wide dynamic range (<1000p.e.) and few dead time
  - Record all hits (dark rate a few kHz) into PC memory via fast Ethernet readout
  - Possible complicated and intelligent trigger by software
  - Possible to make trigger by beam spill timing
- **Impact for physics**
  - lowering energy threshold in solar ν
  - significant improvement in supernova burst DAQ performance
  - increase μ-e decay tagging efficiency



QTCの開発





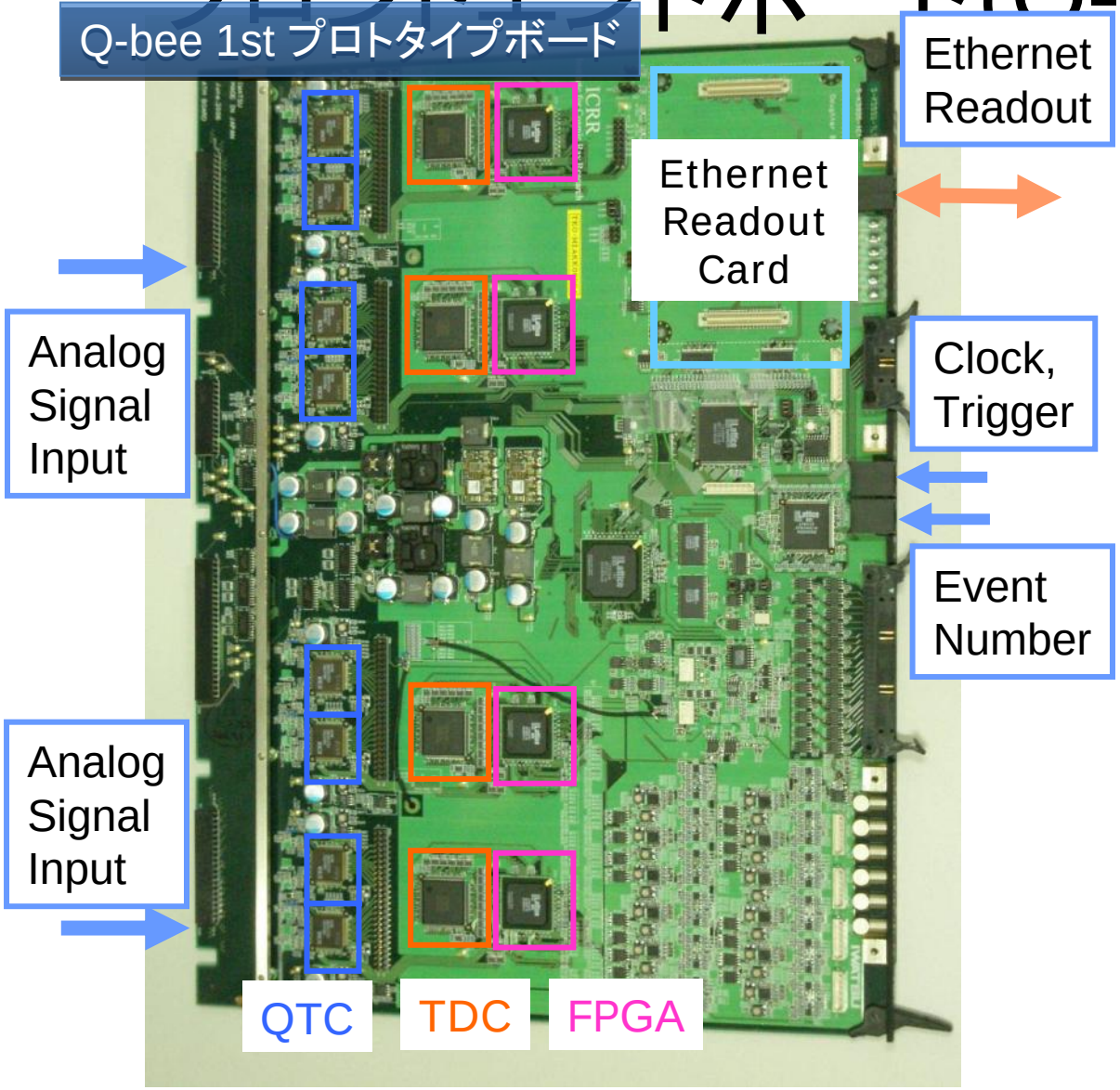
- カスタムASICとして開発
- これまでに4th プロトタイプまで開発し、主要な問題点は解消した
- さらにクロストークや微小な電荷での測定精度を上げるなどの改善のため、最終版の設計中

- セルフトリガー：ディスクリミネータ内蔵
- 入力チャンネル数：3
- 処理速度: ~500nsec/cycle
- レンジの数：3 (ゲイン比 1:7:49)
- ダイナミックレンジ：0.2~2500pC
- 電荷分解能: ~ 0.1pC (for <50pC)

- 時間分解能:
  - 0.3ns (1p.e.⇔ -3mV)
  - 0.2ns (>10pC)
- 消費電力< 200mW/ch
- 0.35um CMOS, 100pin CQFP

（設定、外部回路構成による）

フロントエンドボード(Q-bee)の開発



仕様

- 24 channel input
- 8 QTC
- 4 Multi-hit TDC
  - –AMT3 (Atlas Muon TDC)
- external clock input (60MHz)
- TCP Readout (SiTCP)
- TKO Bus Protocol

Electronics schedule

QTC, QBEE production schedule

	2007年度						2008年度								12	1	2	3	4	5
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
入札関連	公告 10/17 以降		開札 12/27 以降				中間検査 4/E			納入期限 7/E										
Case1 当初の線表 + QTC小変更 ：部品発注は開札前に開始した場合																				
部品購入		部品 購入			部品	終結														
QTC量産	量産 準備	マスク 修正	CMOS	量産		実装	選別													
インサータ							インサータ													
調整・検査							後 工程	200枚 納入	200枚 納入	200枚 納入										

Super-K

QBEE calibration

Commissioning of online, offline

Installation to SK

Normal run

SK calibration w/ ATM (linac, DT, Ni, laser, decay-e…)

SK calibration w/ QBEE (linac, DT, Ni, laser, decay-e…)

T2K beam (from April 2009)