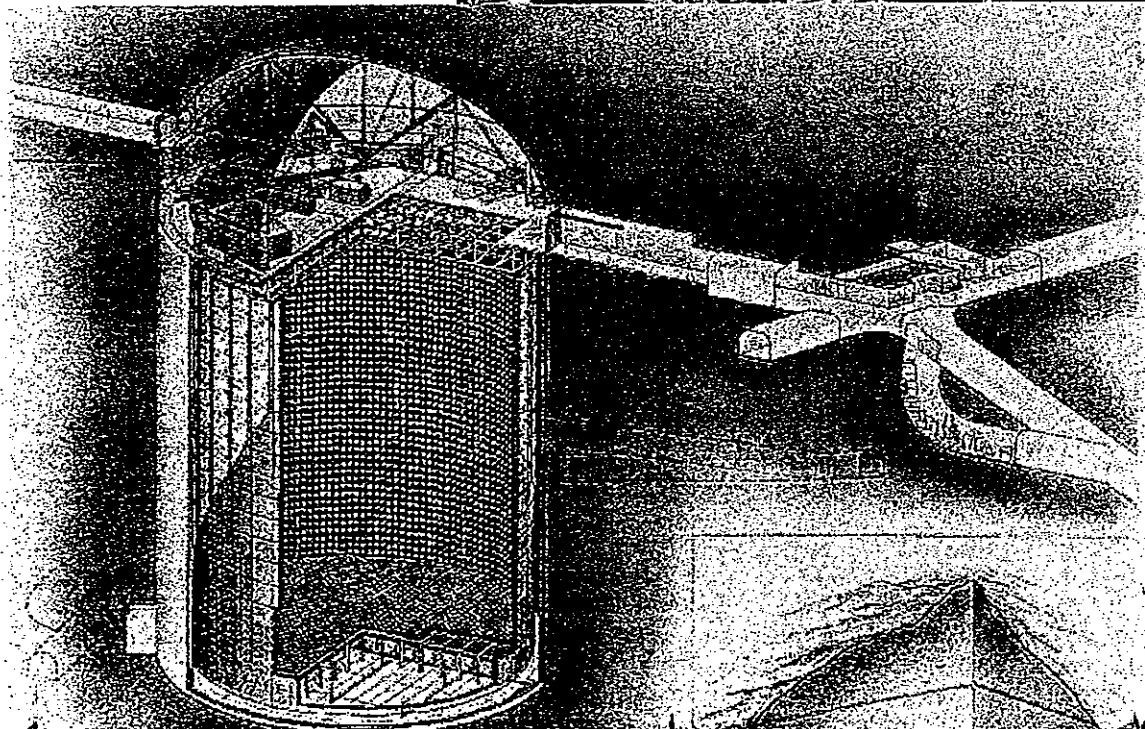


Super-Kamiokandeにおける θ_{13} 探索の現状 と JHF-SK Neutrino 実験における探索の可能性



51



大林 由尚 (KEK-IPNS)

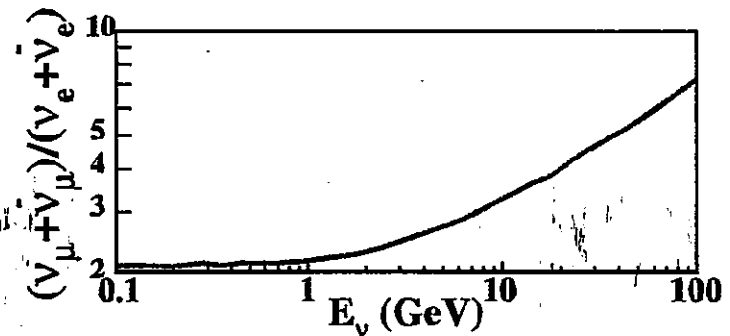
Nov. 09, 2001

Y.Obayashi 特定・宇宙ニュートリノ第8回研究会

大気ニュートリノによる θ_{13} search

- ν_e の excess $\Psi = \sin^2(1.27\Delta m^2 L/E)$ Neutrino flavor ratio

$$\begin{aligned} \Phi(\nu_e) &= \Phi_0(\nu_e) \cdot \{1 - \sin^2(2\theta_{13}) \cdot \Psi\} \\ &\quad + \Phi_0(\nu_\mu) \cdot \{\sin^2(2\theta_{13}) \cdot \sin^2(\theta_{23}) \cdot \Psi\} \\ &= \Phi_0(\nu_e) \cdot \{1 + \sin^2(2\theta_{13}) \underbrace{(\sin^2 \theta_{23} \frac{\Phi_0(\nu_\mu)}{\Phi_0(\nu_e)} - 1)}_{\sim 0.5} \cdot \Psi\} \end{aligned}$$



$$\frac{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{(\nu_e + \bar{\nu}_e)} \sim 2 \text{ @ } E_\nu < 1 \text{ GeV}$$

- Matter Effect:

$$\sin^2 2\theta_M = \frac{\sin^2 2\theta}{[\xi - \cos 2\theta]^2 + \sin^2 2\theta}$$

$$(\xi = 2\sqrt{2}G_F N_e \frac{E}{\Delta m^2})$$

- Resonance:

$$\frac{E(\text{GeV})}{|\Delta m^2|(eV^2)} = \frac{6.55 \times 10^3}{\frac{Z}{A} \rho(g/cm^3)} \cos 2\theta$$

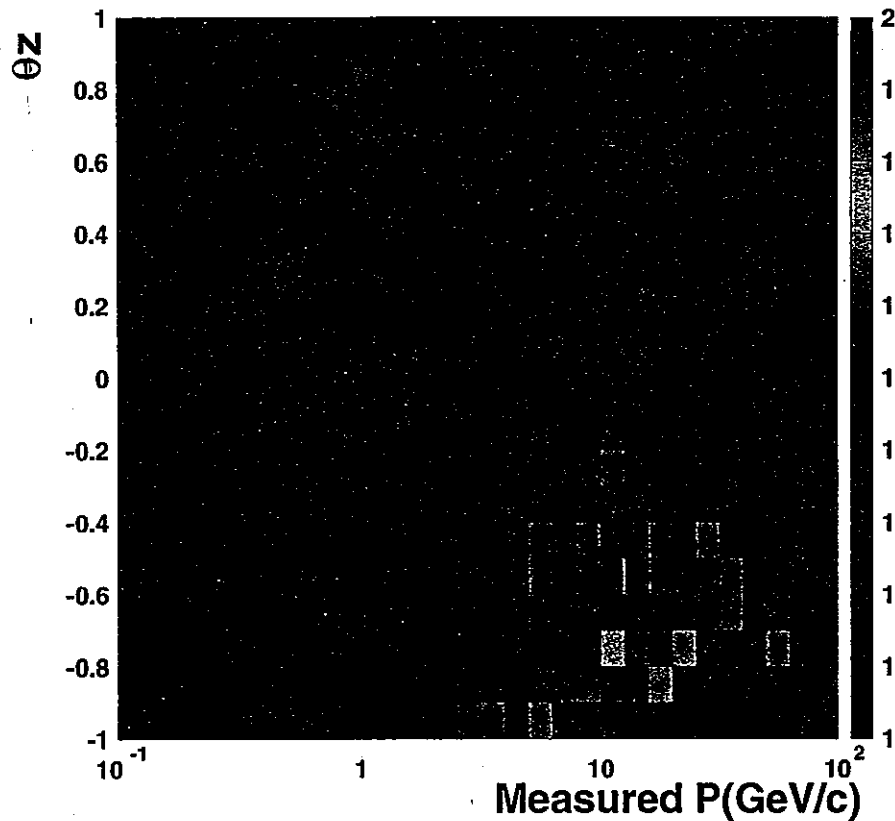
▶ Mantle ($\rho \sim 5$): $E \sim 12 \text{ GeV}$

▶ Core ($\rho \sim 13$): $E \sim 5 \text{ GeV}$

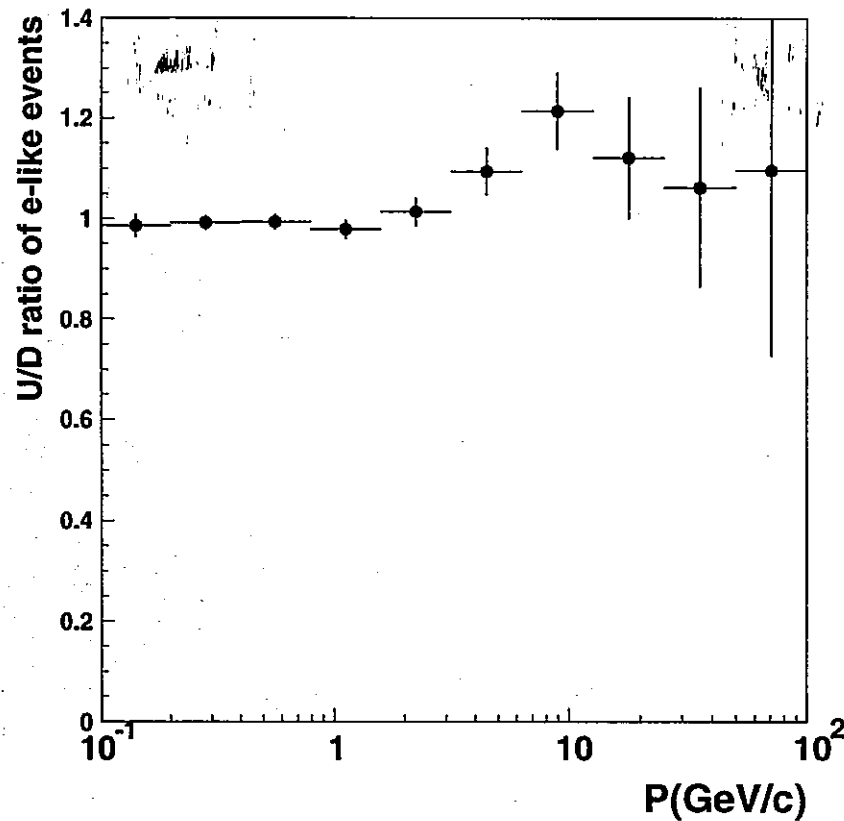
- $\sim 10 \text{ GeV}$ のニュートリノに注目

Expected Oscillation Signals

• e-like事象の増加量 ($N_{osc.} / N_{no_osc.}$)

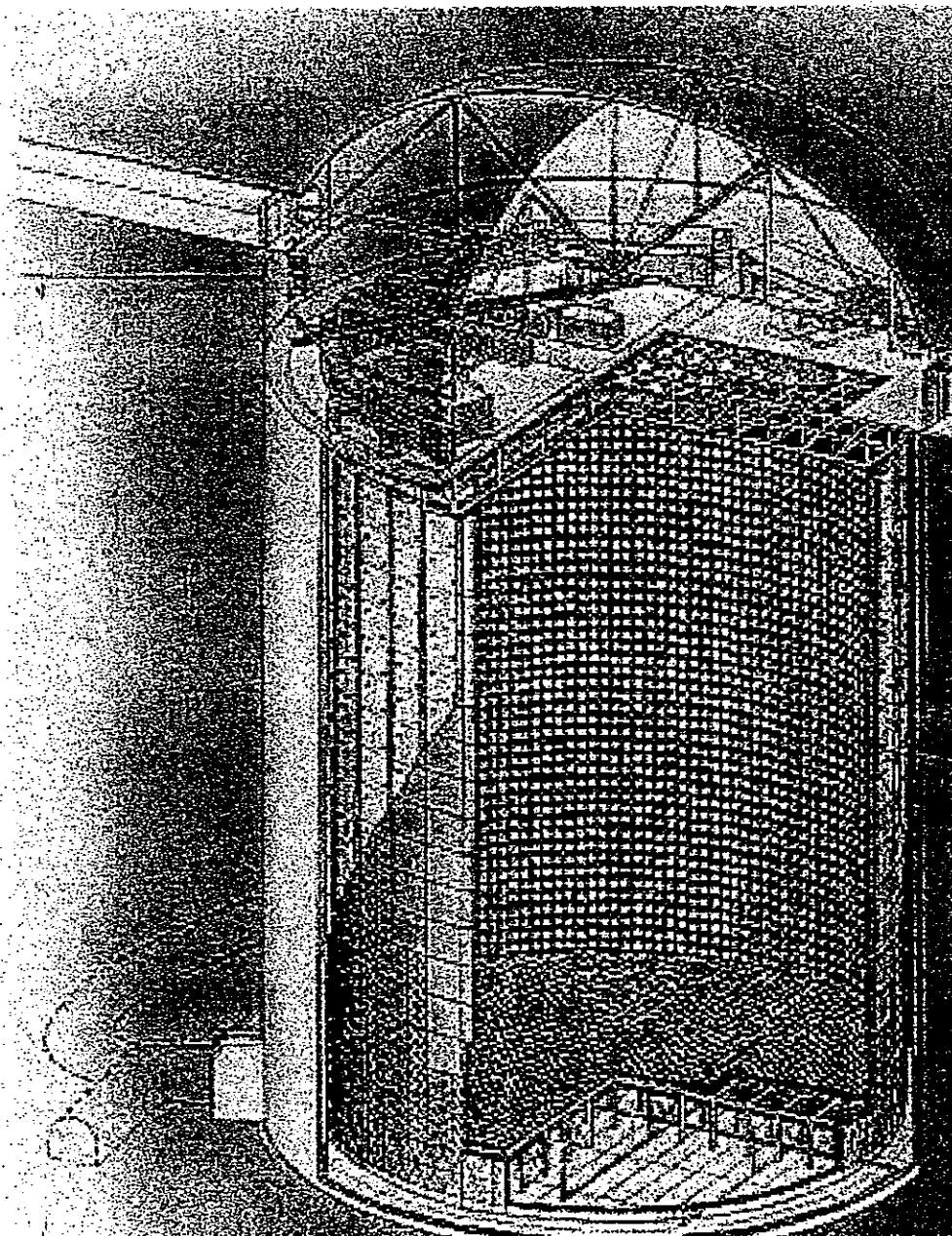


• 上向きe-like事象の増減 (N_{up} / N_{down})



$$\begin{aligned} \sin^2 2\theta_{23} &= 1.0 \\ \sin^2 2\theta_{13} &= 0.1 \\ \Delta m^2 &= 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2 \end{aligned}$$

スーパーカミオカンデ



- 50,000トン水チェレンコフ検出器

- ▶ 有効体積22,500トン

- ▶ 光電子増倍管

- 内水槽 11,146本の 20インチPMT

- 外水槽 1,857本の 8インチPMT

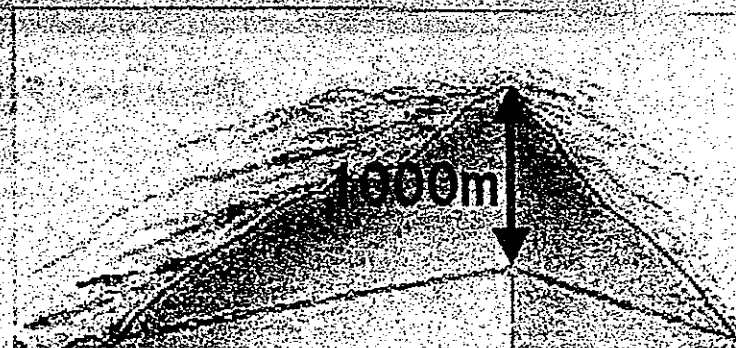
- ▶ リングイメージで粒子識別

- μ 、 e 、 π^+ 、 π^0

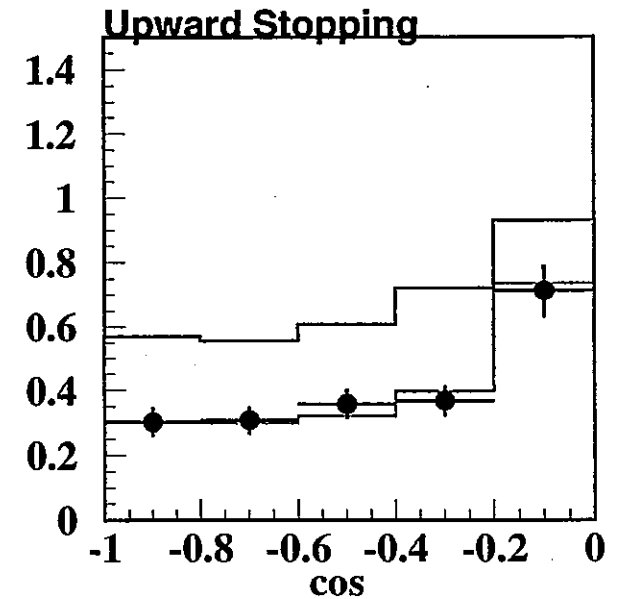
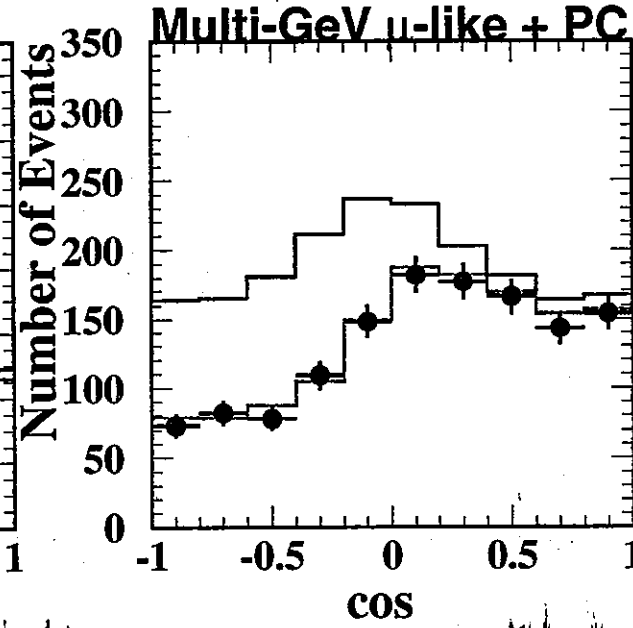
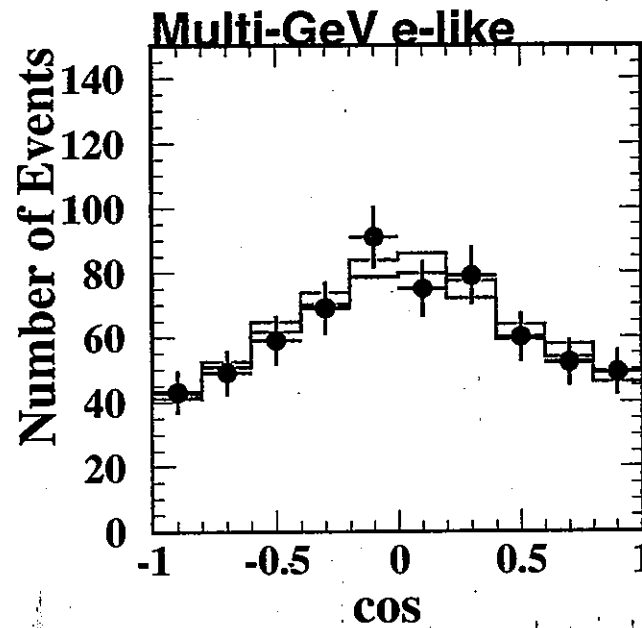
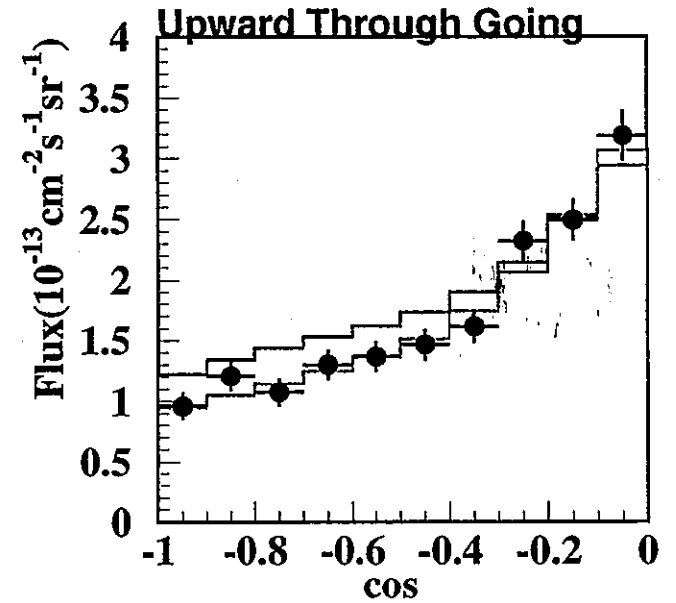
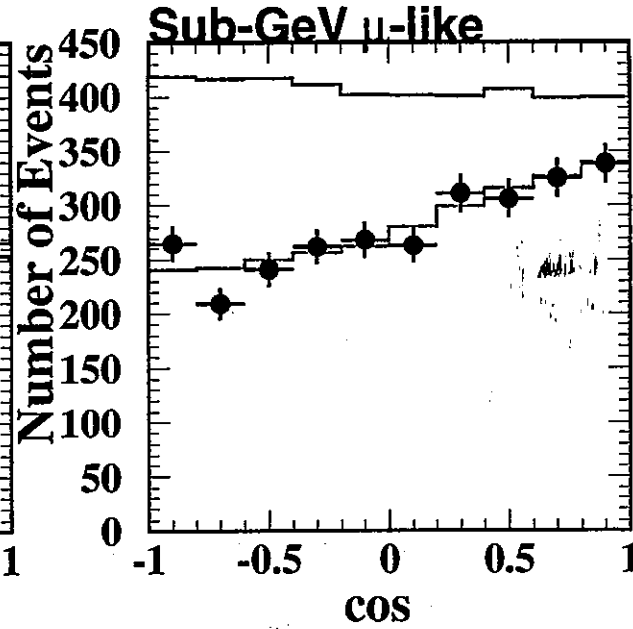
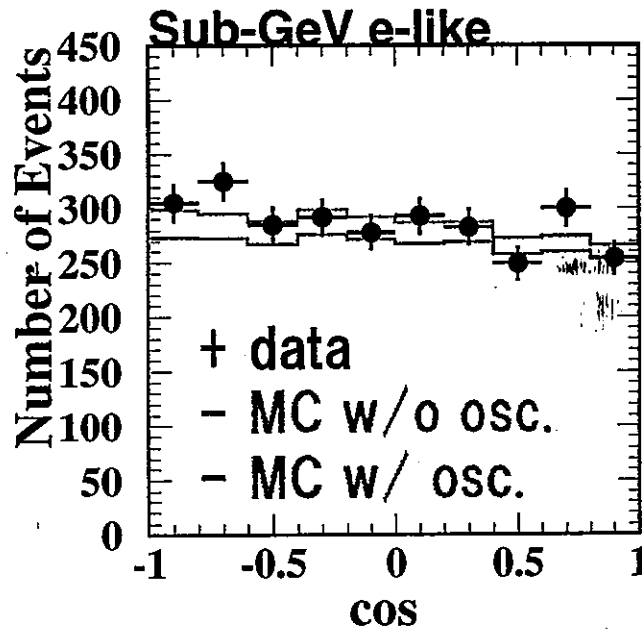
- ▶ チェレンコフ光量、リングの方向を用いて運動量を測定

- 1996年から稼動中

- ▶ 今年(2001年)は稼動開始後初めてのオーバーホール、数百本のPMTを交換した。

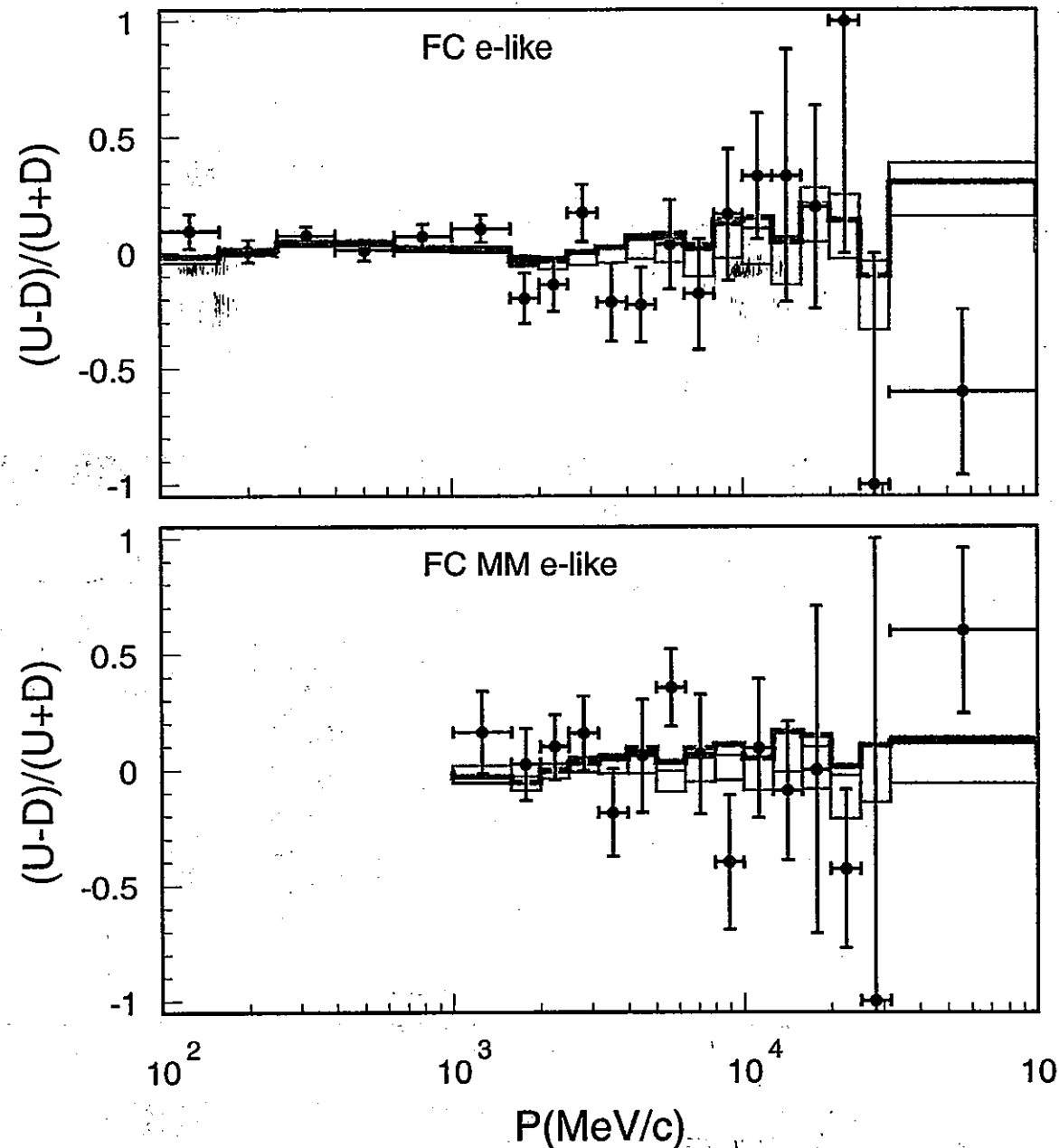


Super-Kamiokande 1280日の大気ニュートリノデータ



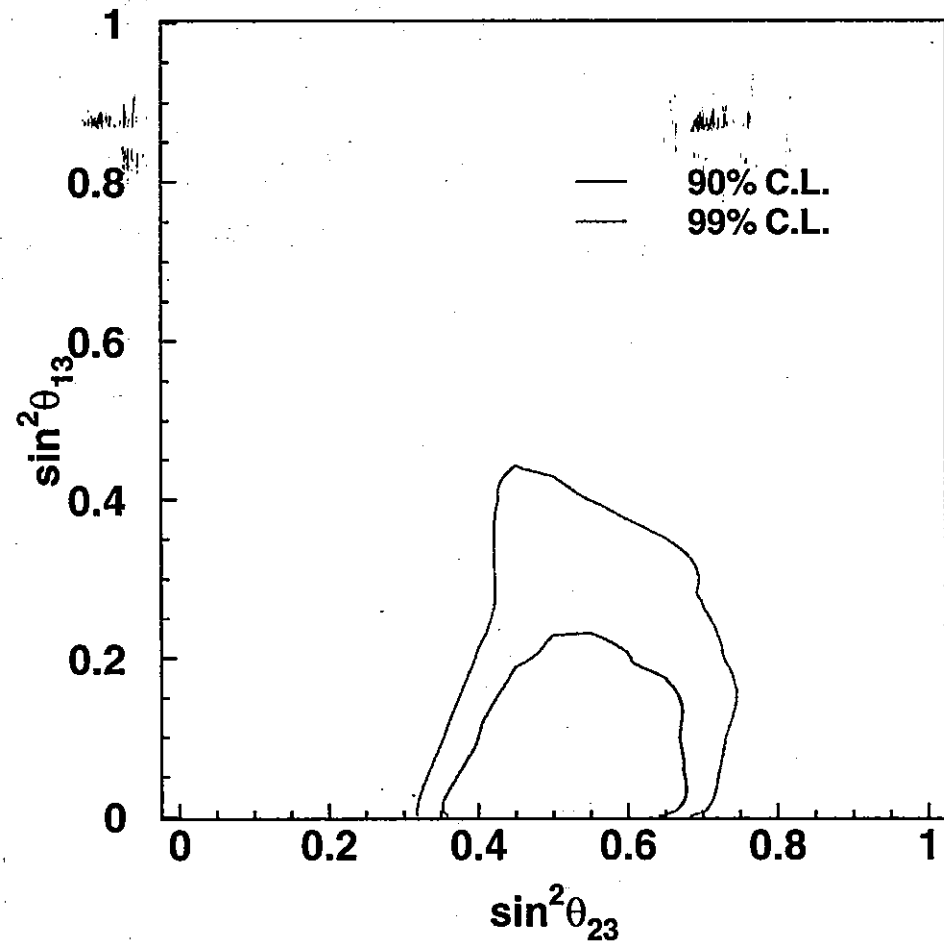
55

e-like 事象の U/D ratio



+ data
- MC w/o osc.
- MC w/ osc.

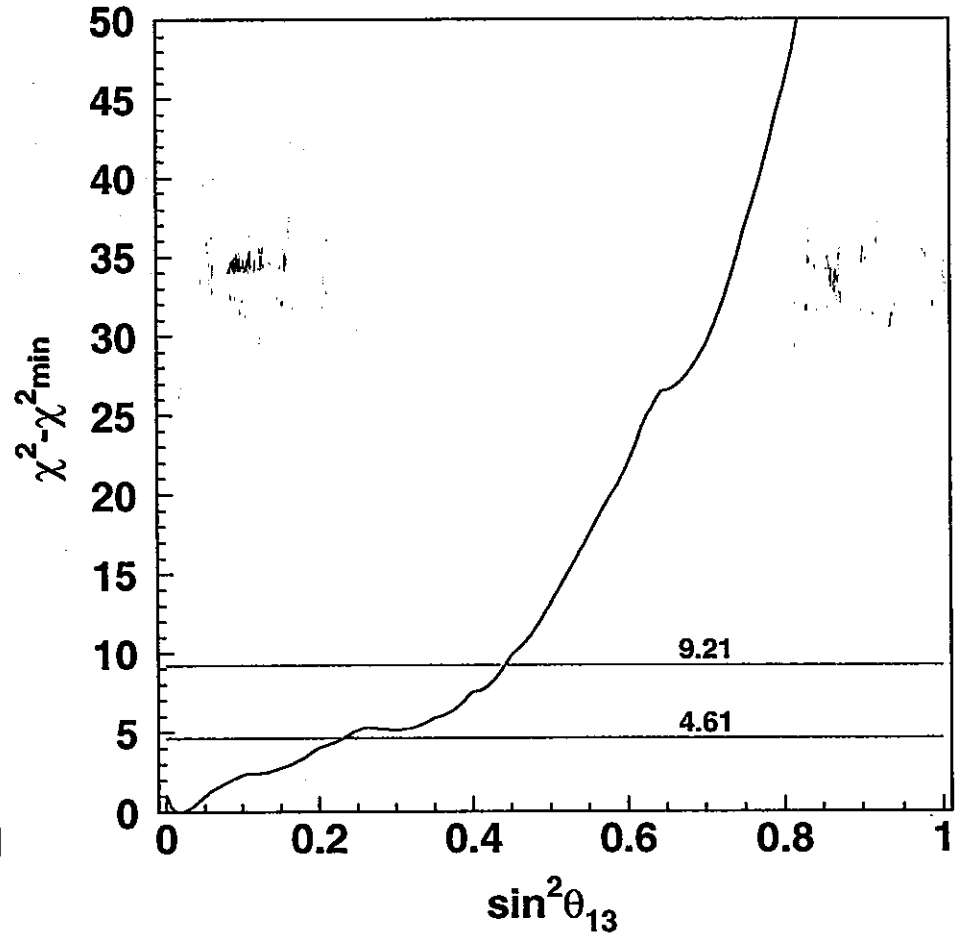
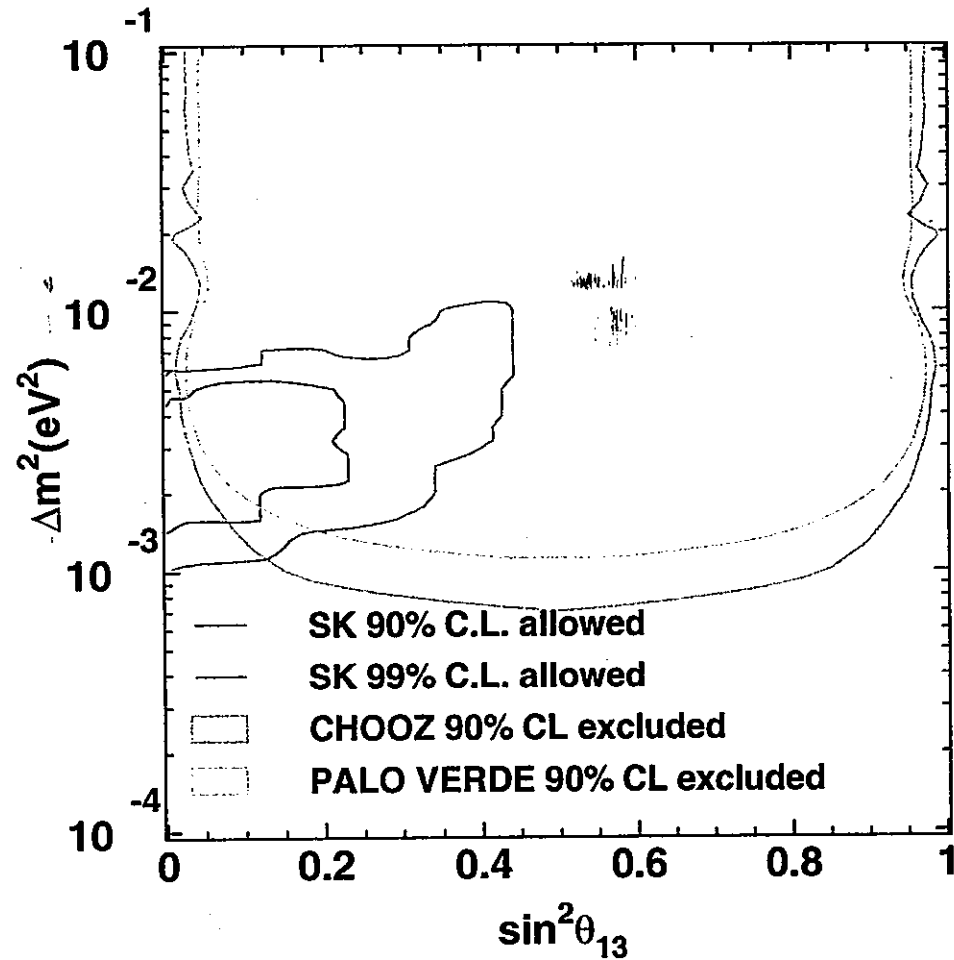
Allowed Regions for Oscillation Parameters



57

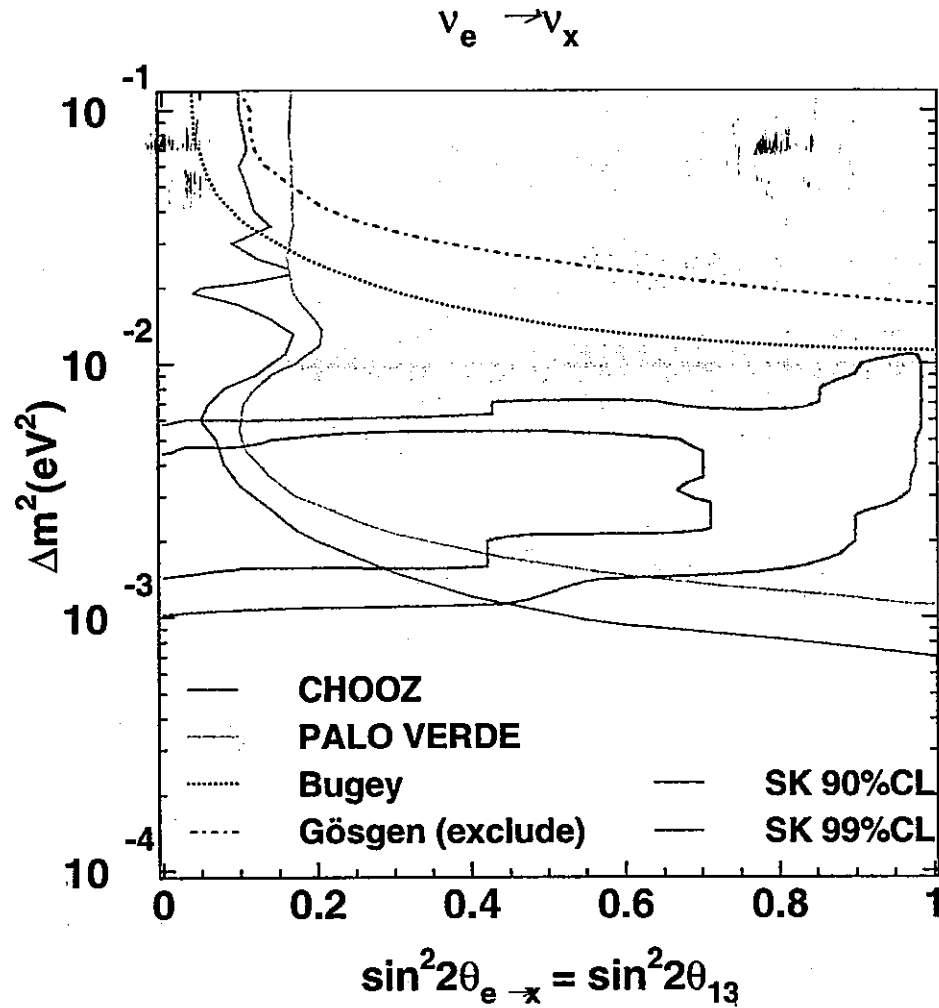
θ_{13} について

58



- $\sin^2 \theta_{13} < 0.25$ @90%CL ($\sin^2 2\theta_{13} < 0.7$)
- χ^2 minimum @ $\sin^2 \theta_{13} \sim 0.02$

他の実験との比較 ($\sin^2 2\theta_{13}$)

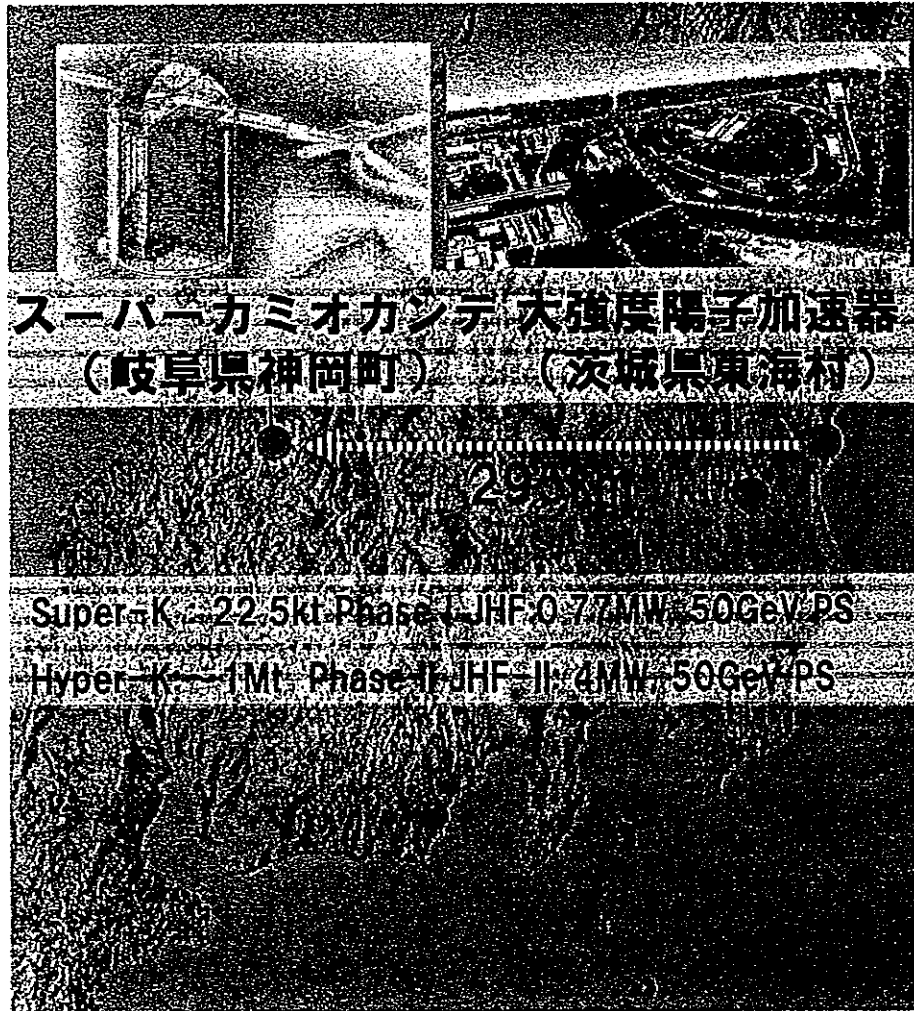


大気ニュートリノによる θ_{13} search まとめ

- Super-Kamiokande 1280日の大気ニュートリノデータ(Fully Contained events および Partially Contained events) を用いた3世代解析を行った。
- $\sin^2\theta_{13} < 0.25$ @90%CL ($\sin^2 2\theta_{13} < 0.7$)
- Pure $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ 振動と Consistent
- 原子炉実験(CHOOZ,Palo Verde)と Consistent

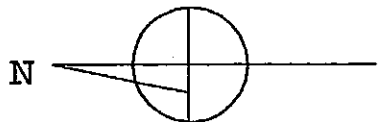
JHF-SK nu 実験の θ_{13} search

大強度陽子加速器 (JHF) -SK ニュートリノ実験の概要



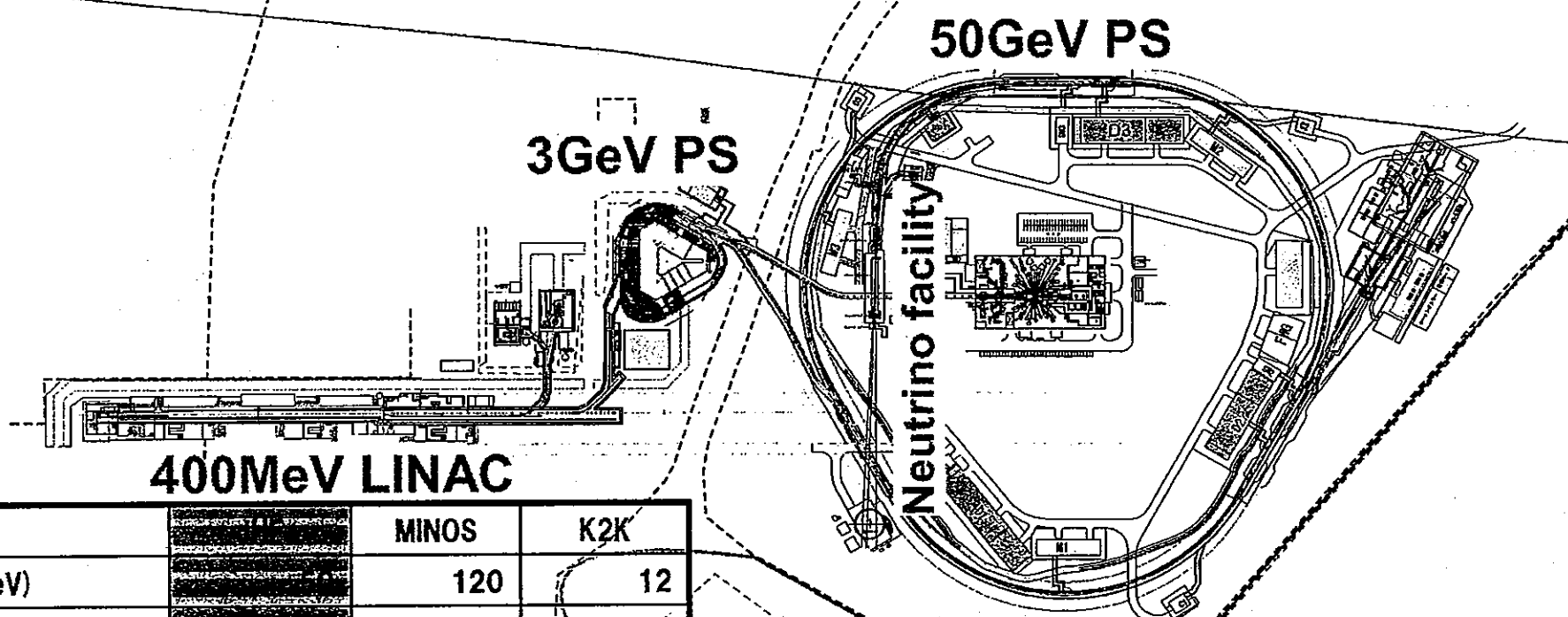
- 基線長 $L=295\text{km}$
- ニュートリノ源:
 - ▶ 大強度陽子加速器(JHF)
 - 50GeV, 0.77MW PS
 - approved, 建設開始
 - 2007年ニュートリノビーム発射
- $E_\nu=0.5\sim 2\text{ GeV}$
 - ▶ 水チェレンコフ検出器に最適
 - Particle ID しやすい
 - QE散乱が主
 - π^0 バックグラウンド
- 遠方検出器:
 - ▶ スーパーカミオカンデ
 - 22.5kt 水チェレンコフ検出器
 - 稼動中

大強度陽子加速器



Pacific Ocean

茨城県東海村。日本原子力研究所内に建設開始、2007年完成予定



		MINOS	K2K
E (GeV)		120	12
Int. (10^{12} ppp)		40	6
Rate (Hz)		0.53	0.45
Power (MW)		0.41	0.0052

ニュートリノビーム

● 3種のビームラインを考慮中

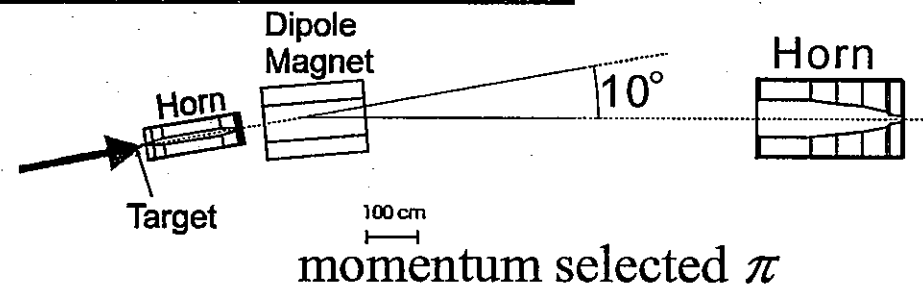
▶ Wide Band Beam (WBB)

- 大強度
- Δm^2 に対して広い領域をカバー
- HE tail からのバックグラウンドが大きい
- Near/Far のエネルギースペクトラムの違いに由来する系統誤差が大きい



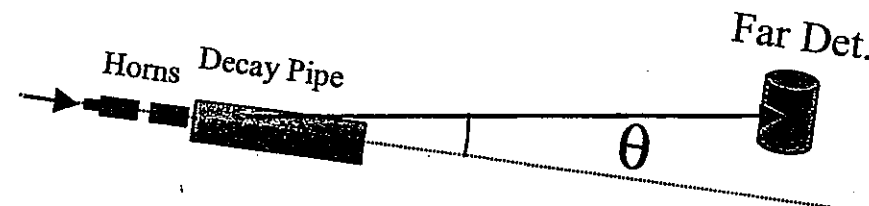
▶ Narrow Band Beam (NBB)

- エネルギースペクトラム由来の系統誤差が小さい
- ニュートリノエネルギーを調整可



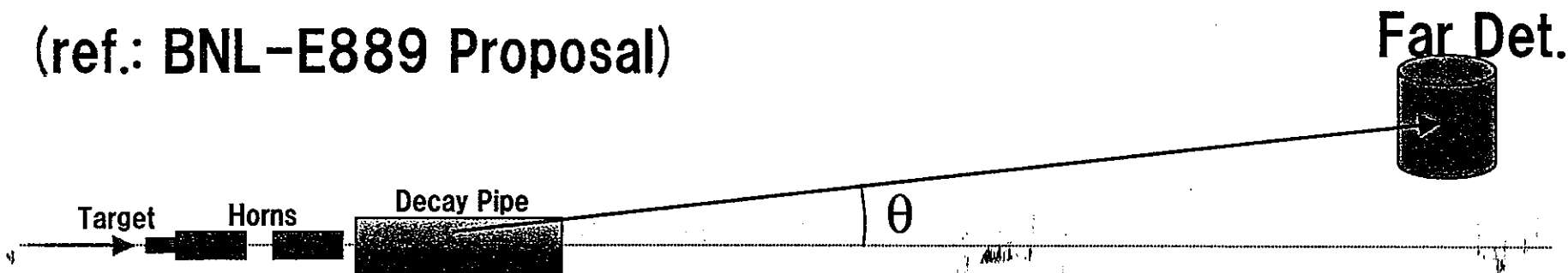
▶ Off Axis Beam (OAB)

- 大強度のナロウバンドビーム
- HE tail が NBBよりも多い
- ニュートリノエネルギーの調整は難しい



Off Axis Beam (another NBB option)

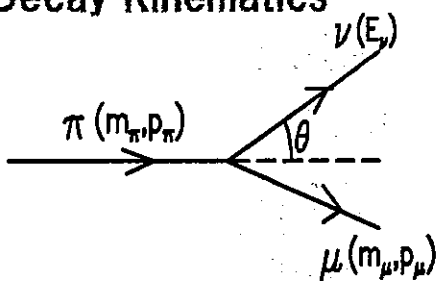
(ref.: BNL-E889 Proposal)



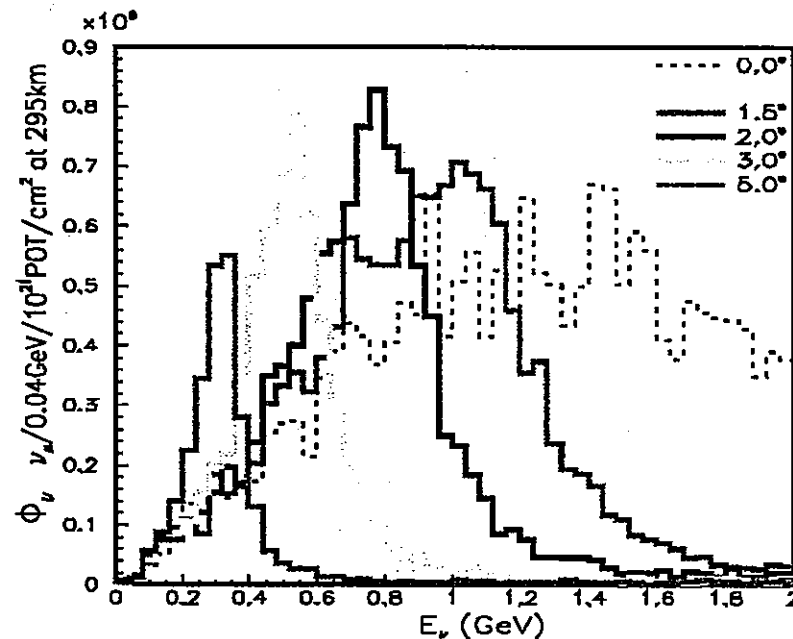
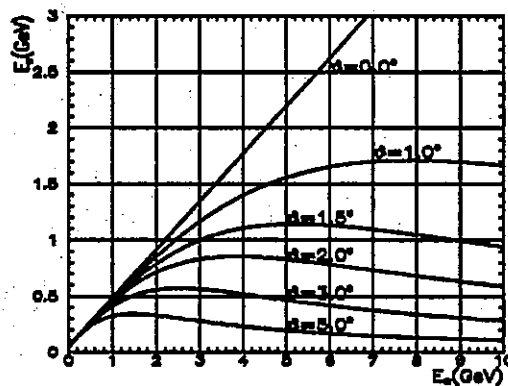
ビームライン自身はWBB。検出器をビーム中心から数度ずらす。

65

Decay Kinematics



$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos\theta)}$$



(ほぼ)monochromaticなビームが得られる。

期待されるSKでのニュートリノ反応数

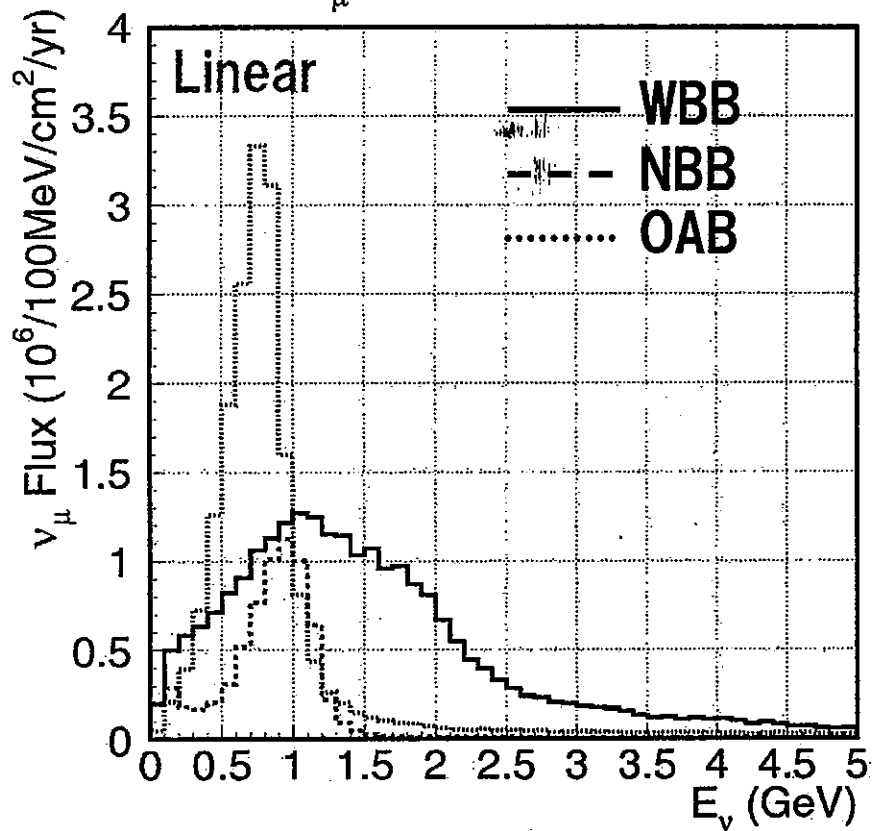
Beam	(GeV)	Flux		ν_e/ν_μ (%)		# of interactions		
	E_{peak}	ν_μ	ν_e	total	E_{peak}	ν_μ	ν_e	
WBE	WIDE	1.1	25.5	0.19	0.74	0.34	7000(5200)	78(59)
	LE1.5 π	0.7	5.3	0.05	1.00	0.39	510(360)	5.7(4.2)
NBE	LE2 π	0.95	7.0	0.05	0.73	0.15	870(620)	6.8(5.0)
	LE3 π	1.4	8.0	0.05	0.65	0.16	1400(1000)	9.3(6.9)
OAB	OA2°	0.7	19.2	0.19	1.00	0.21	3100(2200)	60(45)
	OA3°	0.55	10.6	0.13	1.21	0.20	1100(800)	29(22)

($10^6/\text{cm}^2/10^{21}\text{POT}$)

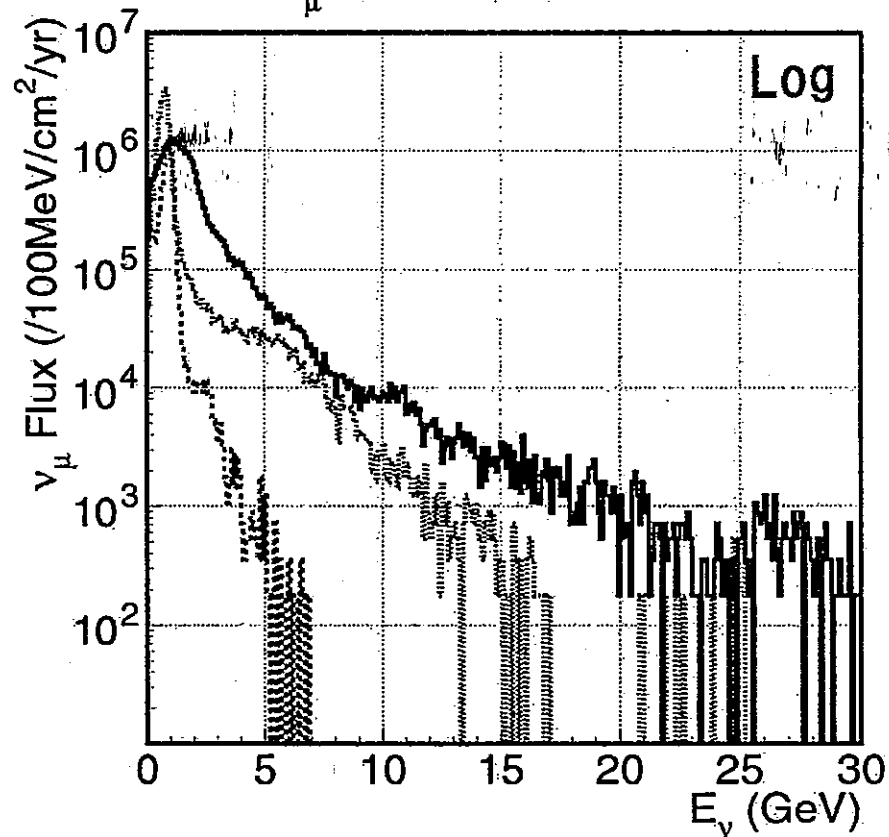
↑ ↑
Tot. (CC)

エネルギースペクトルの比較

ν_μ WBB/NBB/OAB

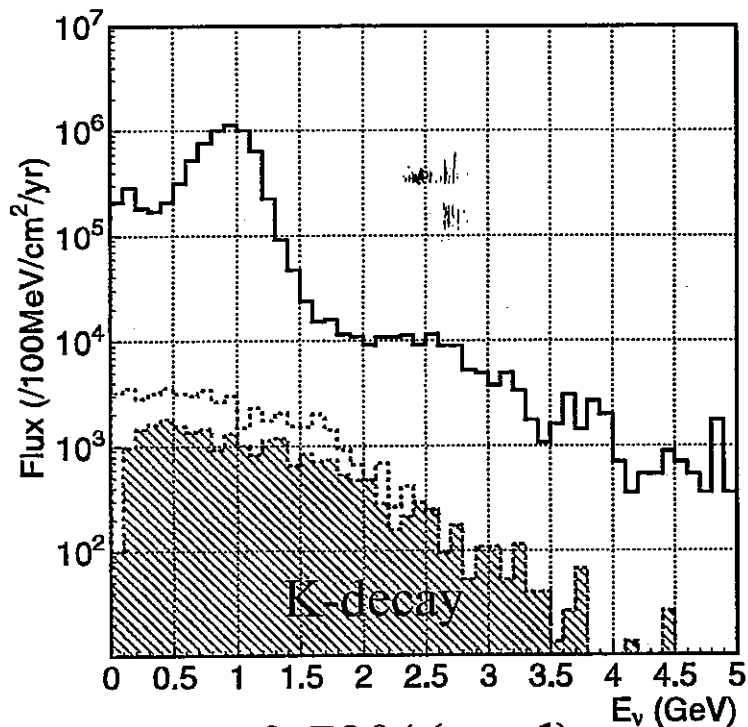


ν_μ WBB/NBB/OAB



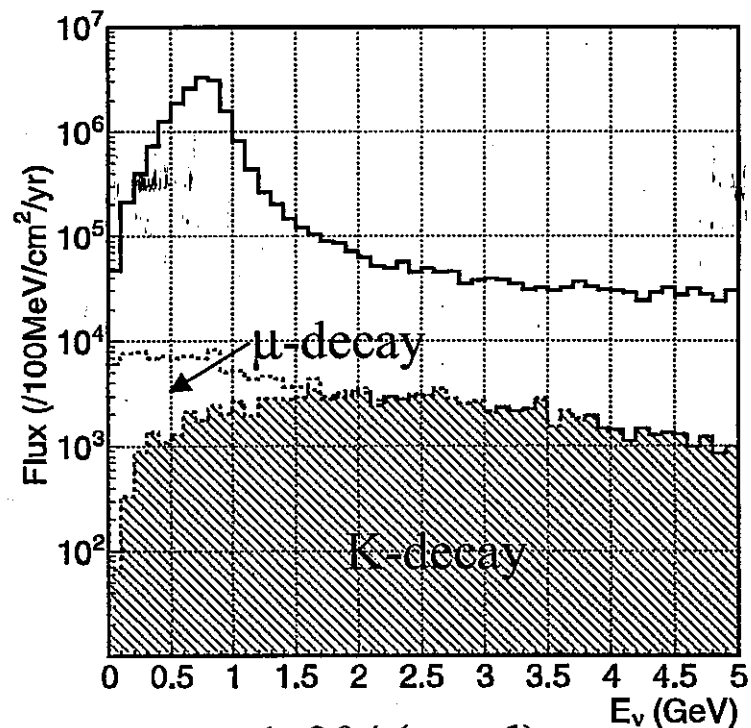
ν_e の混入率

NBB (LE2π)



0.73%(total)
(0.15% @ peak)

OAB (2degree)

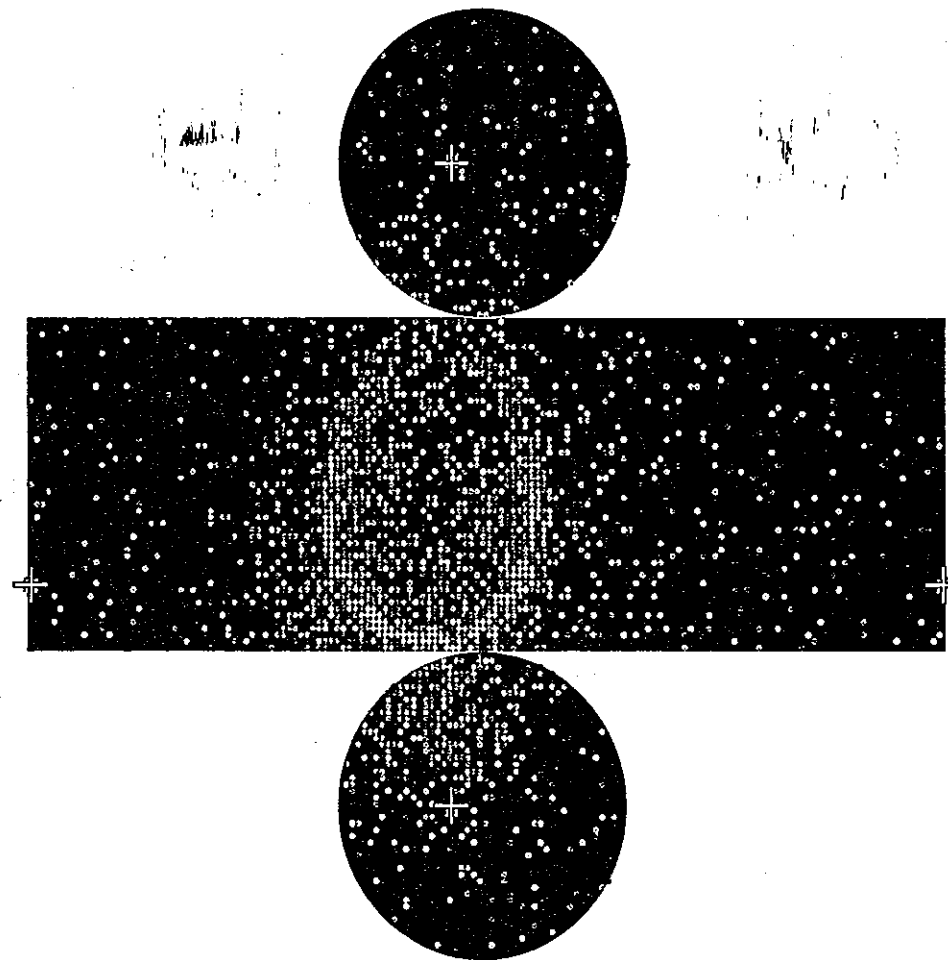
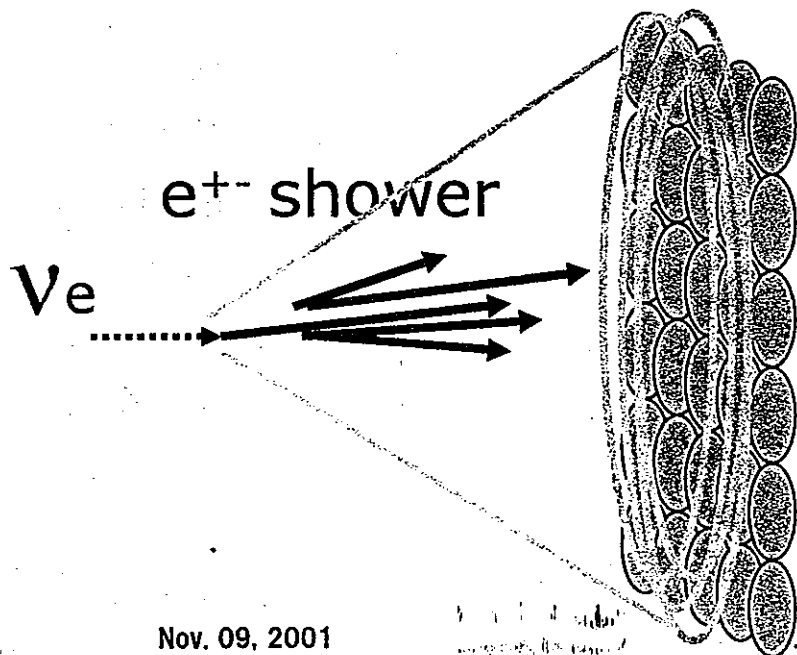


1.0%(total)
(0.21% @ peak)

ν_e のシグナル

● ν_e Q.E. C.C. interaction

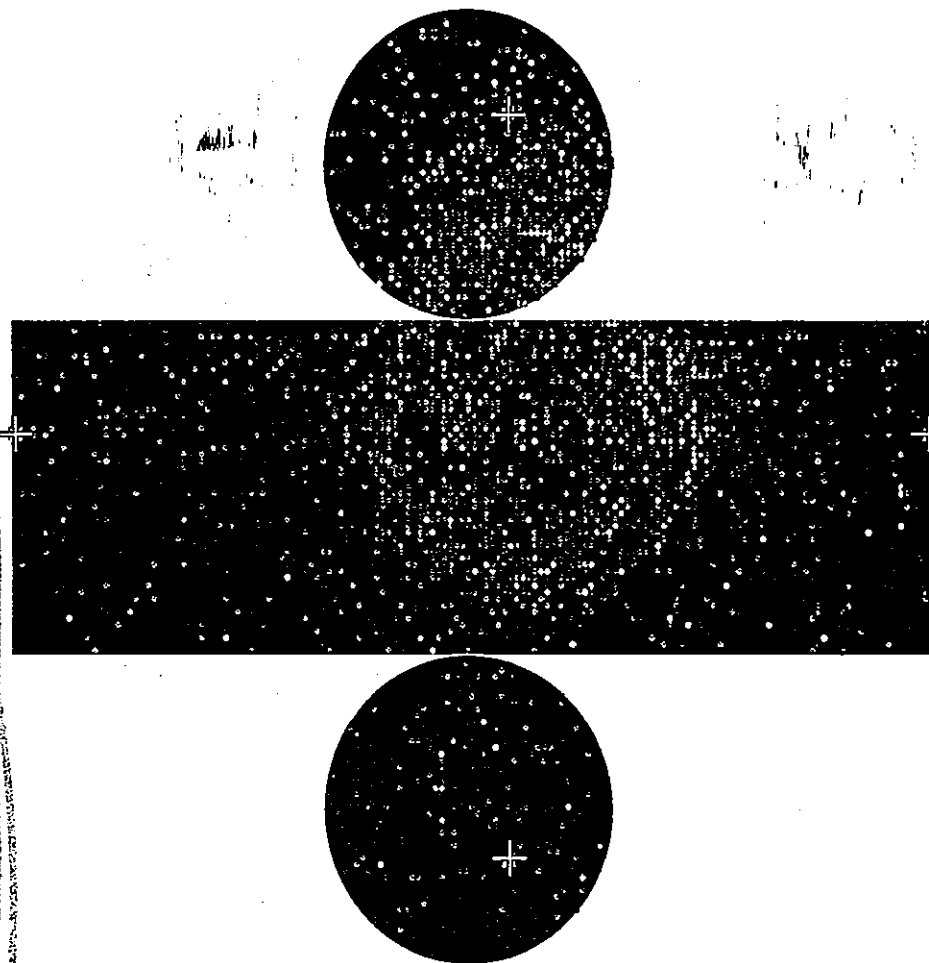
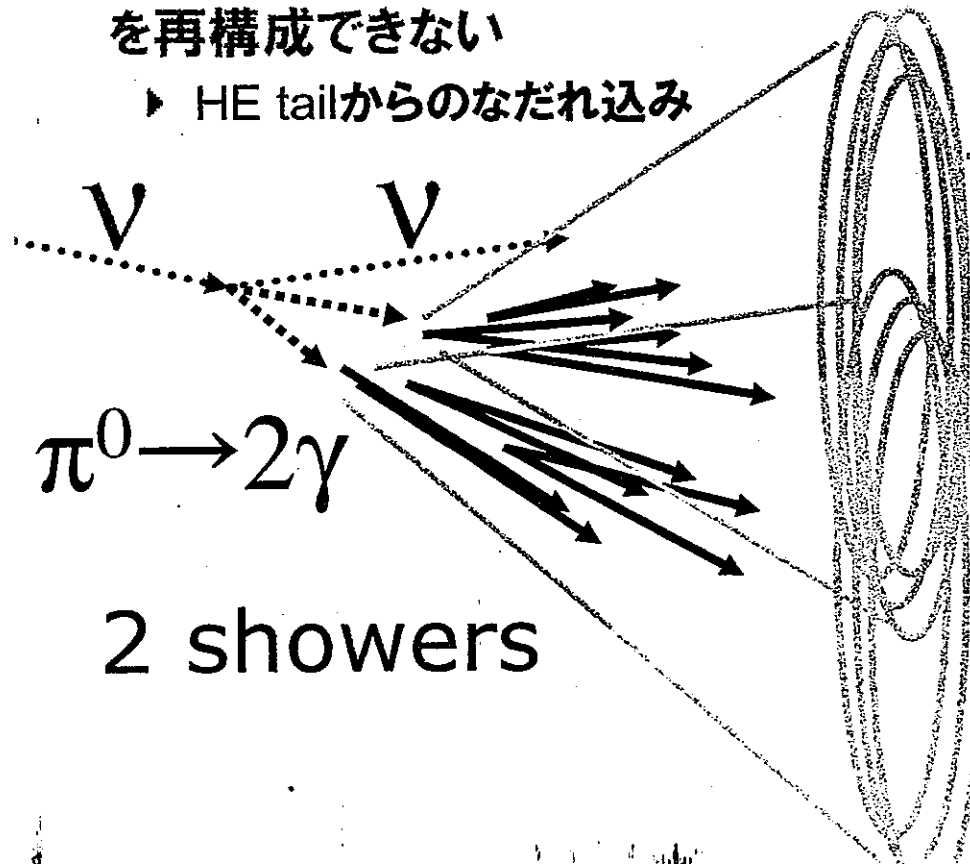
- ▶ ハドロンなし
- ▶ 電子シャワー
 - single e-like ring
 - Cherenkov Angle $\sim 42^\circ$
- ▶ ニュートリノエネルギーを再構成可能



バックグラウンド: N.C. π^0 production

- $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
 - ▶ 2つのシャワー
 - ▶ 2ringが重なったり片方が非常に暗い場合:
 - single ring に見えてしまう
- NC反応のためニュートリノエネルギーを再構成できない
 - ▶ HE tailからのなだれ込み

70



ν_e selection

- SK 大気 ν official selection (single-ring e-like):

- ▶ Fully Contained (No Anti-counter Activity)
- ▶ Single e-like ring
- ▶ $E_{vis} > 100\text{MeV}$
- ▶ No Muon Decay Electron

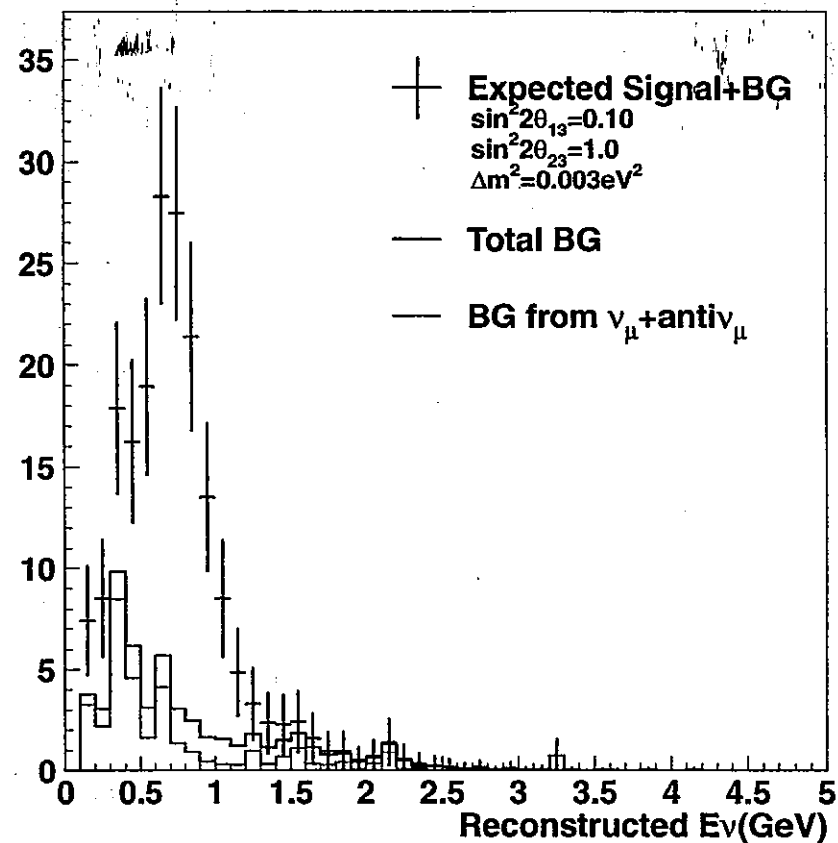
- Tight e/π^0 separation

- ▶ ビームに対するシャワーの方向
 - $\cos\theta_{\nu_e}$: π^0 からの γ の場合,超前方に出やすい
- ▶ 2つめのリングを強制的に探す
 - $E(\gamma_2)/E(\gamma_1+\gamma_2)$: BGでは大
 - 1-ring like と 2-ring like のlikelihood値の違い
 - Invariant mass: BGでは π^0 mass、 ν_e では小

71

BG、シグナルのエネルギースペクトラム

- Quasi-Elastic 散乱としてニュートリノ エネルギーを再構成
- Oscillation maximum 前後でエネルギー カット
 - ▶ $0.4\text{GeV} < E < 1.2\text{GeV}$ ($0\text{AB}2^\circ$)



BG,シグナルの期待値

OAB 2deg.

Number of events for JHF (0.77MW) 5yr exposure to Super-Kamiokande (22.5kt)

$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$,
 $\sin^2 2\theta_{\mu e} = 0.05$

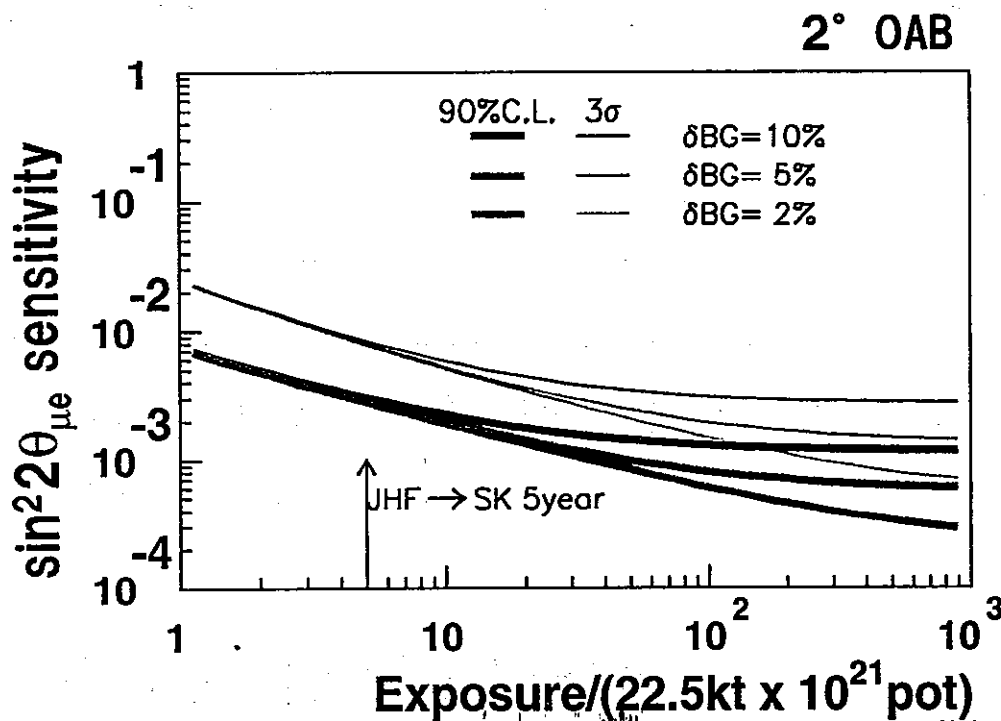
	ν_{μ}	ν_e	anti ν	Signal
Generated	15340	297.0	1275	308.1
Survived	12.0	10.7	2.1	114.6
Red. eff.	0.08%	3.6%	0.16%	37.2%
(With π^0)	11.1	0.6	1.4	0.0

73

θ_{13} に対する感度、測定精度

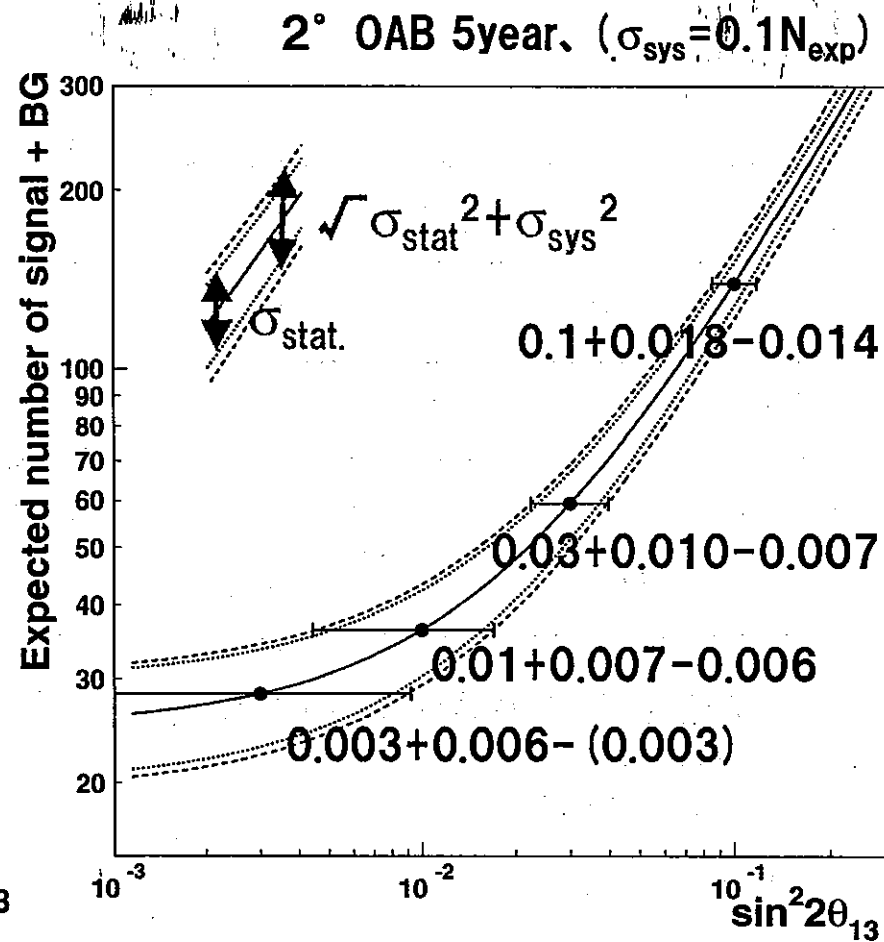
- 5年間のビーム照射により
- 感度
 - ▶ sensitive down to $\sin^2 2\theta_{\mu e} \sim 0.003$ ($\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.006$) @90% C.L.
- 測定精度
 - ▶ $\sim 15\%$ @ $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.1$
 - ▶ $\sim 70\%$ @ $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.01$

74



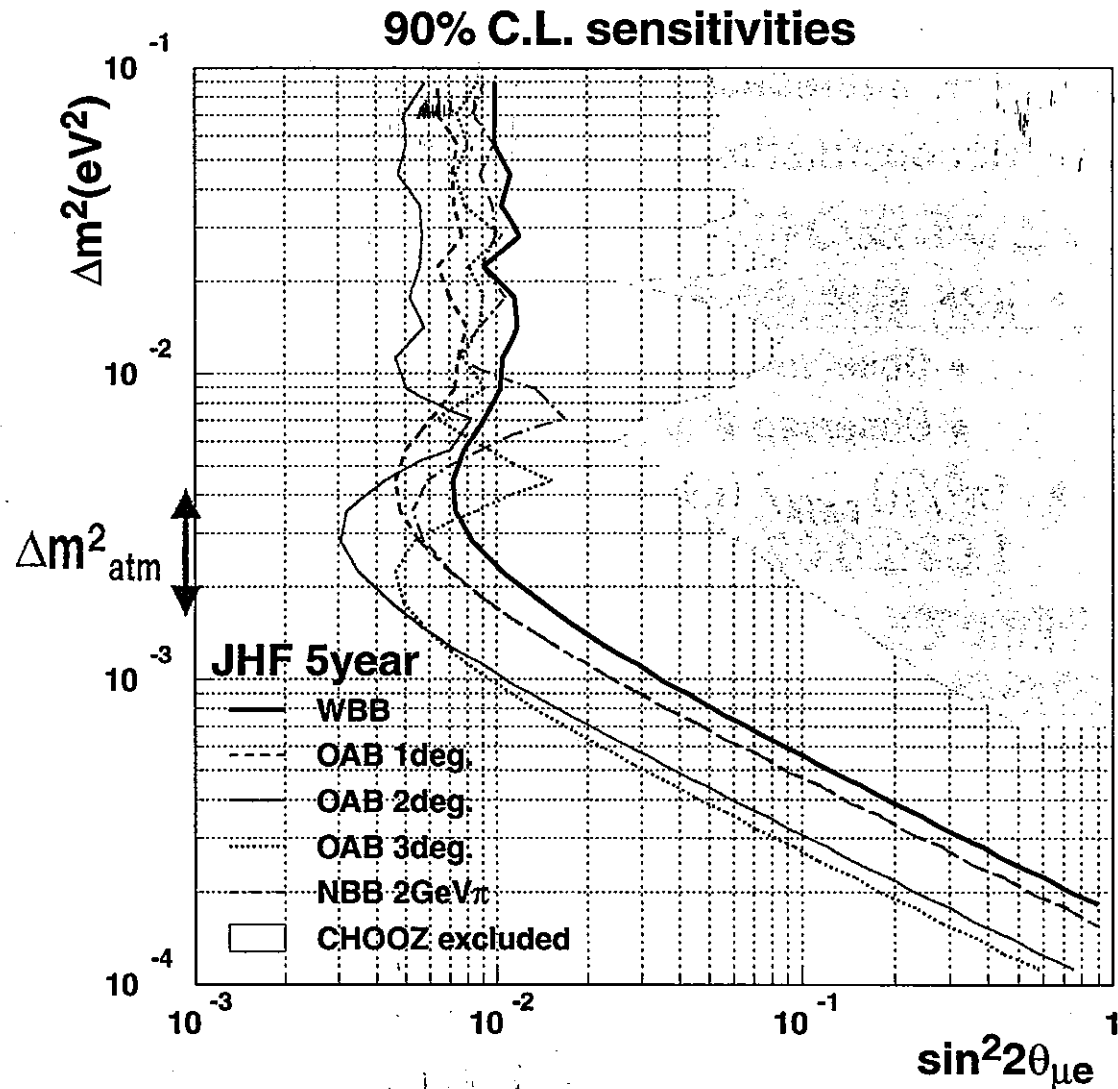
Nov. 09, 2001

Y. Obayashi 特定・宇宙ニュートリノ第8回研究会



$\Delta m^2_{13} = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 以外では:

- $\sin^2 2\theta_{\mu e} \sim 3 \times 10^{-3}$
@ $\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$
- $E\nu$ の調整により大気ニュートリノで許される Δm^2 全体に対し $\sin^2 2\theta_{\mu e} \sim 5 \times 10^{-3}$ まで感度を持つ。
- $\sin^2 2\theta_{13} = 2 \sin^2 2\theta_{\mu e} \sim 1 \times 10^{-2}$
@ 90% C.L.



75

$\sigma_{\text{sys.}} = 10\% \times N_{\text{exp}}$ と言っているが...

- 達成するためにはかなり高精度な測定が必要

- ▶ p-N interaction → HARP
- ▶ ν -N interaction → NuInt W.S.
- ▶ Reconstruction etc. . .

- ひとつの安心材料

- ▶ K2K 前置検出器 (1kt 水チェレンコフ)

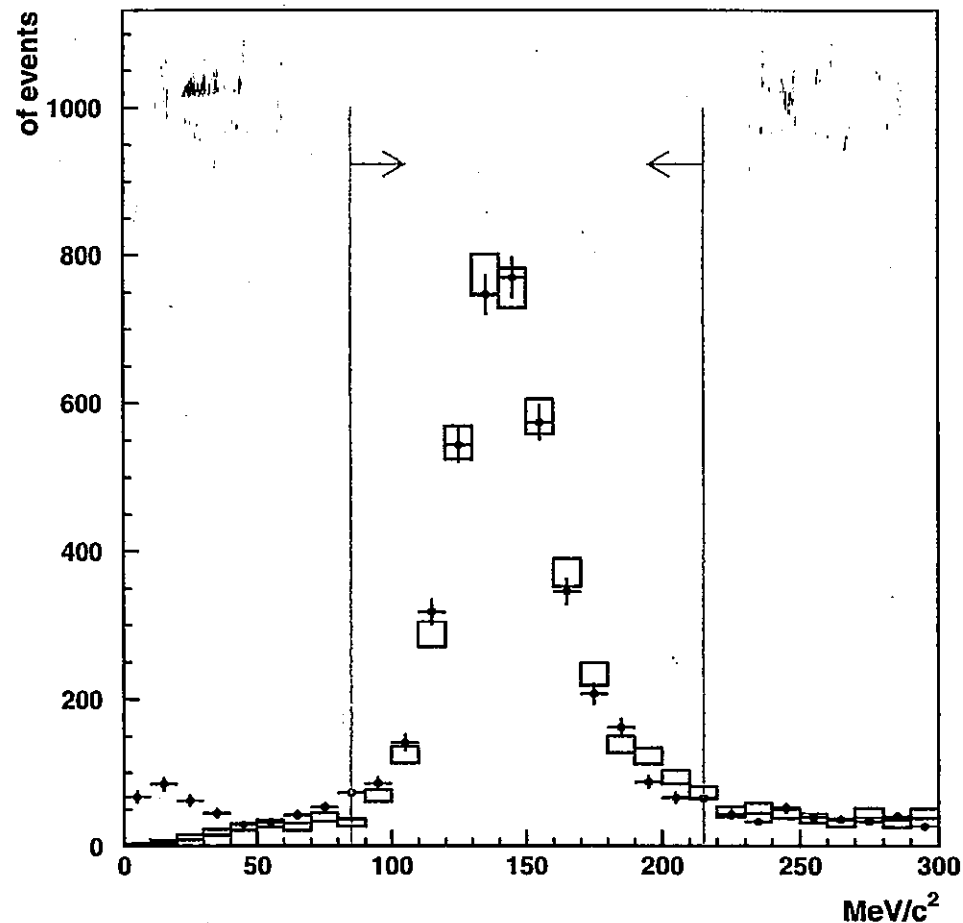
- Observed # of π^0 : 4120

- Observed # of μ : 16487

- ▶ $(\pi^0/\mu)_{\text{DATA}} / (\pi^0/\mu)_{\text{MC}} = 1.03 \pm 0.02 \pm 0.02 \pm 0.09$

- JHFnuでもさらに高性能な前置検出器が必要

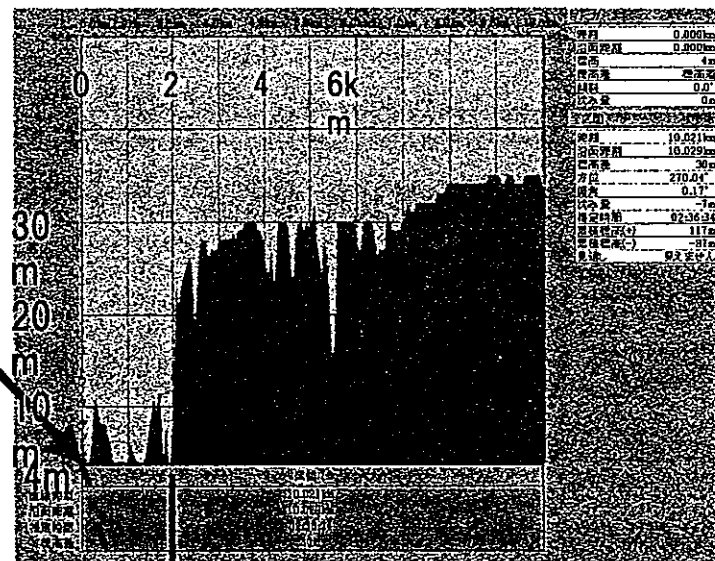
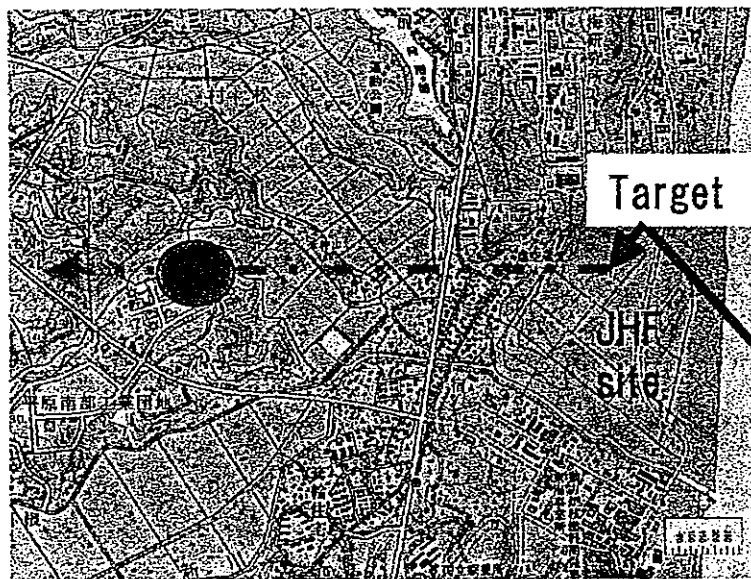
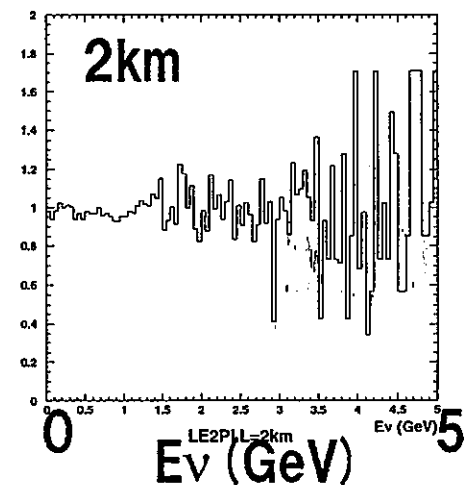
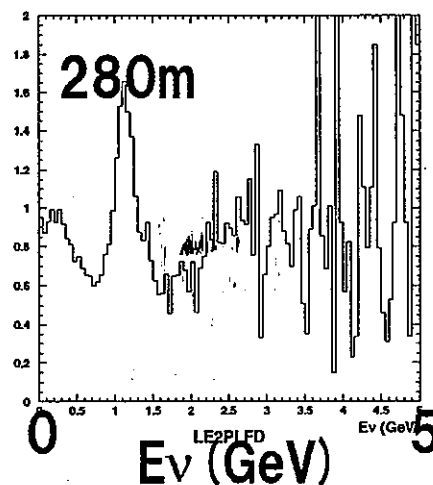
Invariant Mass cut (50t fiducial, FC, 2rings, e-like)



2km 前置検出器

- 280mではfar/near ratioが十分flatではない
 - ▶ 2km離れるとほぼflat
- 水チェレンコフ検出器はhigh event rateにあまり強くない
- 原研から約2kmの場所に検出器を置くことを検討中

Far/Near ratio



40m @2km

77

SUMMARY

- JHF-SK Neutrino 実験: 2007年開始予定
- 5年間($\sim 5 \times 10^{21}$ pot)のニュートリノビームで:
 - ▶ sensitivity: $\sin^2 2\theta_{13} \sim .01$ @ 90% C.L.
 - ▶ resolution: $\sim 15\%$ for $\sin^2 2\theta_{13} \sim .1$, $\sim 70\%$ for $\sin^2 2\theta_{13} \sim .01$
- CP 測定については午後の小林さんのトークに乞うご期待。

大気ニュートリノによる θ_{13} 探索:

- Super-Kamiokande 1280日の大気ニュートリノデータ(Fully Contained events および Partially Contained events)を用いた3世代解析を行った。
- $\sin^2 \theta_{13} < 0.25$ @ 90% CL ($\sin^2 2\theta_{13} < 0.7$)
- Pure $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ 振動と Consistent
- 原子炉実験(CHOOZ, Palo Verde)と Consistent