

大型核子崩壊・ ニュートリノ実験計画

塩澤 真人

東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

東京大学 数物連携機構 神岡サテライト

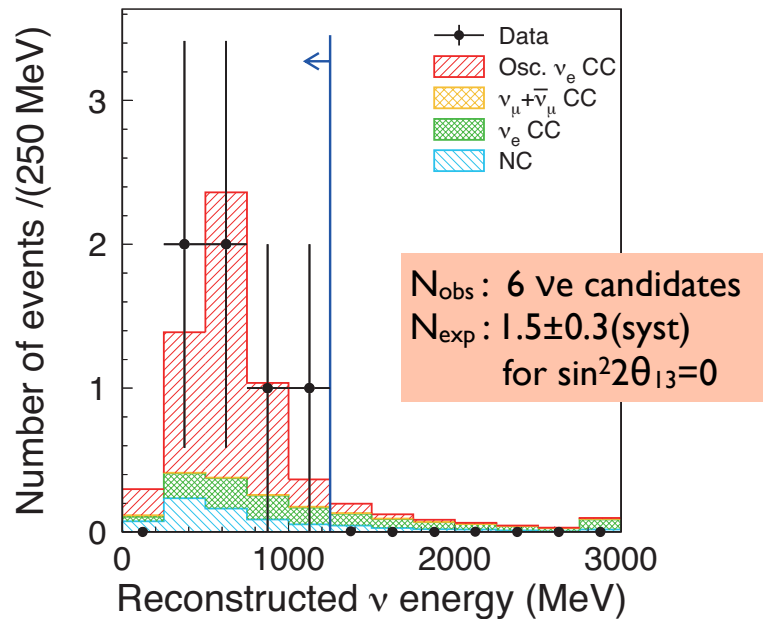
2011年7月29日

高エネルギー物理将来計画タウンミーティング

θ_{13} の確立、そしてCPの破れへ

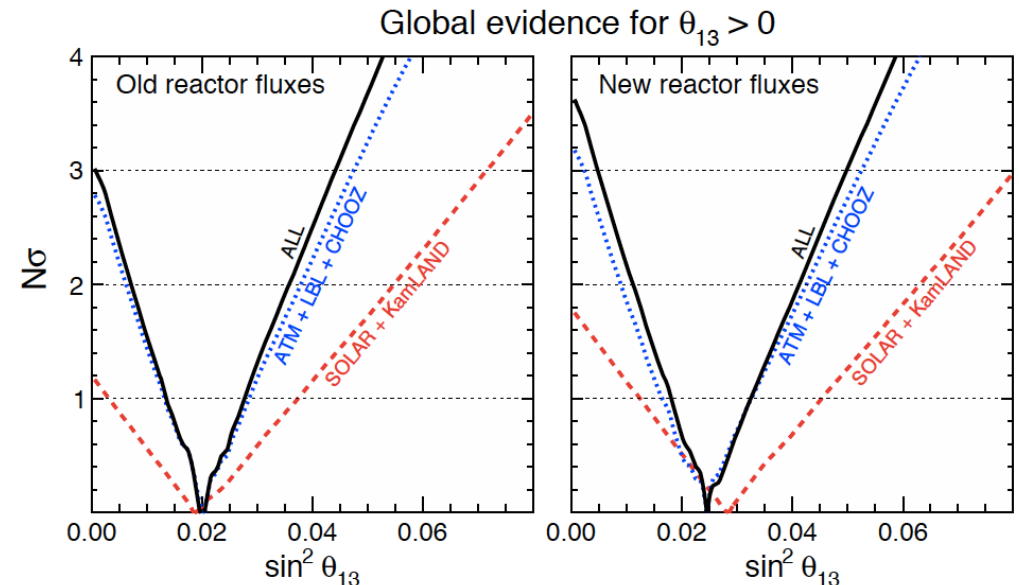
T2K collaboration, PRL107,041801(2011)

T2K observed indication of $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



Fogli et al., arXiv1106.6028

titled “Evidence of $\theta_{13} > 0$ from global ν analysis”



太陽 ν とKamLANDをあわせて 3σ 以上で $\theta_{13} > 0$

▶ T2Kは統計を上げて、確立&測定へ

▶ reactor実験も稼働開始中 (Double CHOOZ, RENO, Daya Bay)

$\theta_{13} \neq 0$ ($\sin^2 \theta_{13} = \text{a few \%}$ と大きい)として真剣に
次期計画を考える時が来た。

CP δ の測定条件

$${}^t(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau) = U_{\alpha i}^{MNS} {}^t(\nu_1, \nu_2, \nu_3)$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j>i} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}) \sin^2 \frac{(m_j^2 - m_i^2)L}{4E_\nu}$$

$$\boxed{\nu, \text{反}\nu} \longrightarrow \mp 2 \sum_{j>i} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}) \sin \frac{(m_j^2 - m_i^2)L}{2E_\nu}$$

$$\text{CPV term} \propto \sin \vartheta_{12} \cdot \sin \vartheta_{13} \cdot \sin \vartheta_{23} \cdot \sin \delta \cdot \Delta m_{12}^2$$

$$\checkmark \sin \theta_{23} \sim 1/\sqrt{2}$$

1998 大気 ν 、加速器 ν

$$\checkmark \sin \theta_{12} \sim 0.5, \Delta m_{12}^2 \sim 7.6 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

2001 太陽 ν (LMA)、原子炉

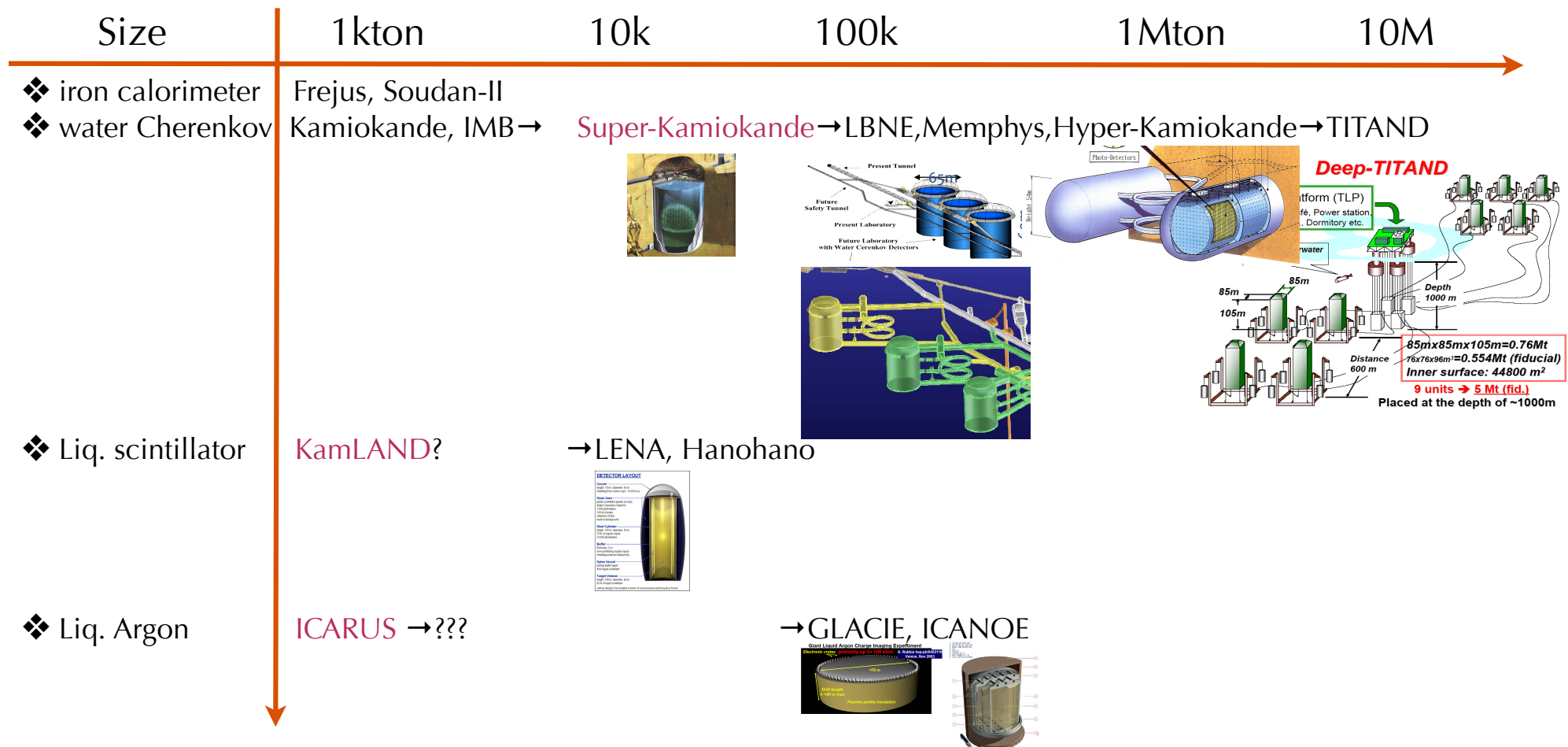
$$\blacktriangleright \sin \theta_{13} > 0.1$$

2011 (2 σ 、T2K他)

CPV測定のための自然条件は揃いつつある。
次世代実験準備が急務。

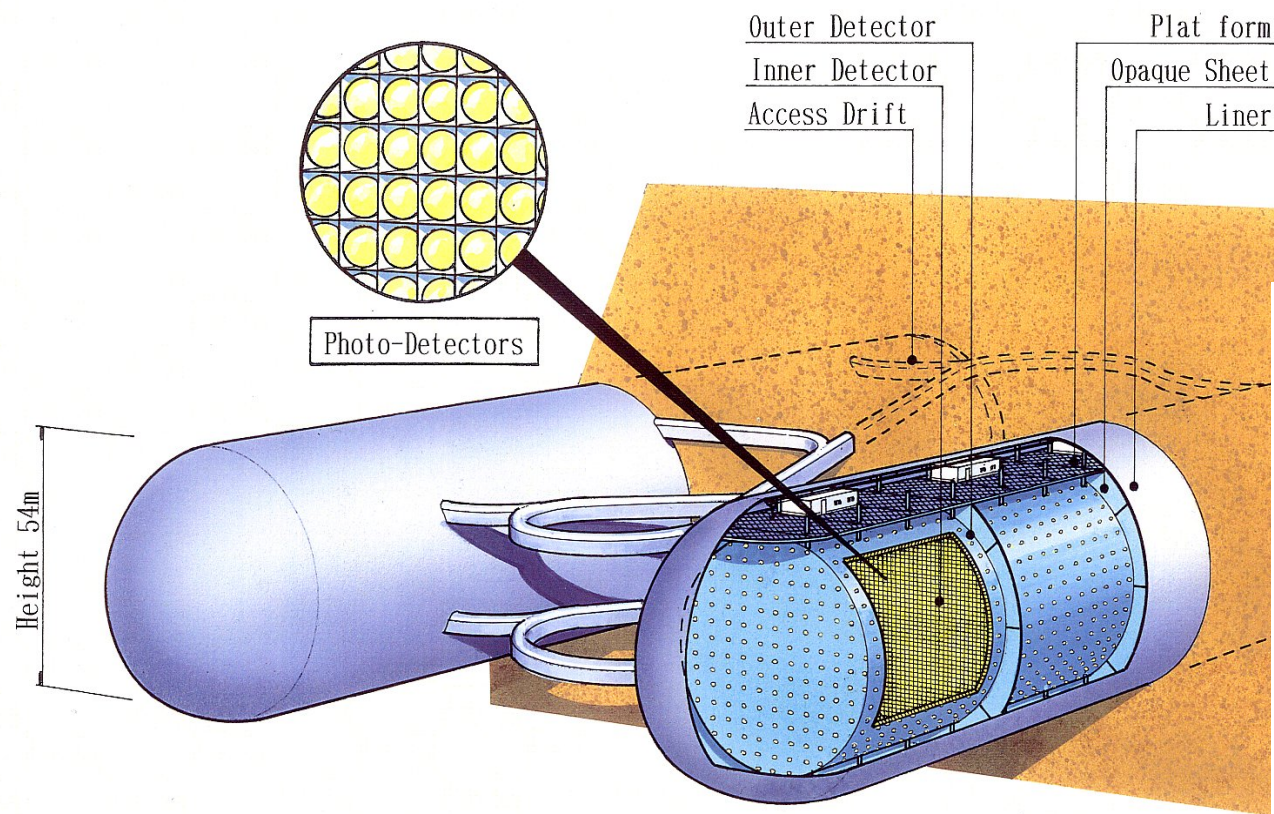
ニュートリノ・核子崩壊検出器 への要請

1. 大きい (w/ reasonable cost)
2. 低BG (high resolution, tracking capability)

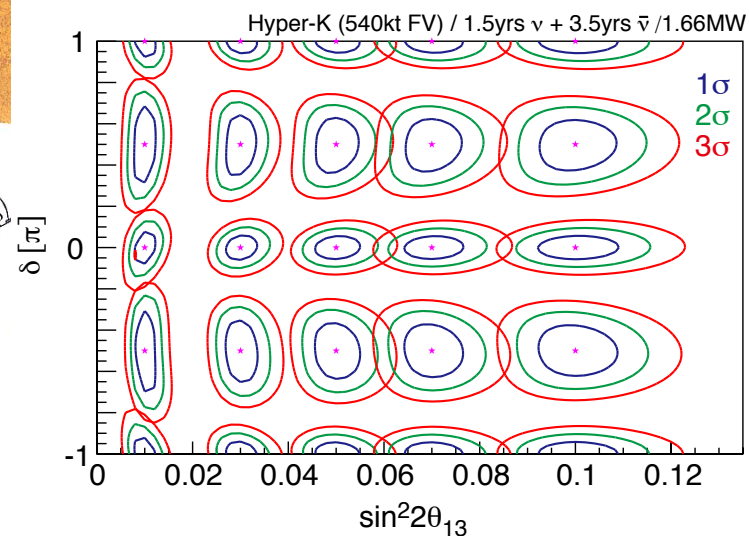
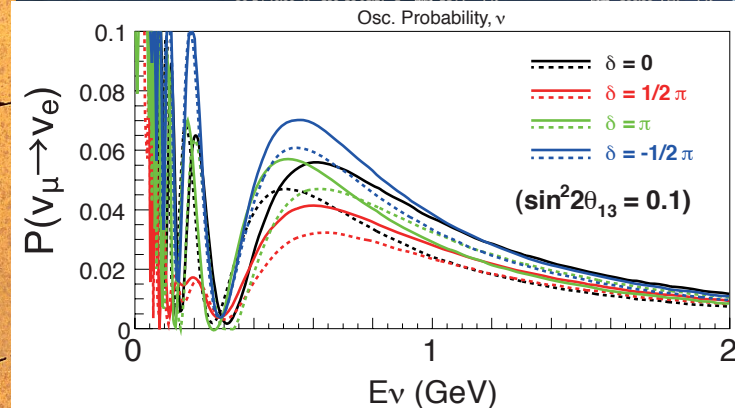
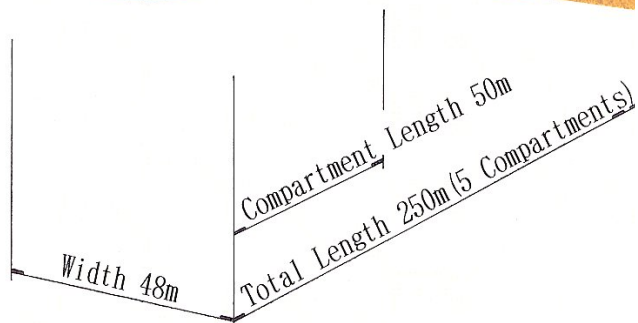


Modern, High resolution,
Expensive

ハイパーカミオカンデ (水チェレンコフ検出器)



- ▶ 100万トン水チェレンコフ実験
 - ▶ Fiducial Volume 56万トン
 - ▶ SKの20倍
- ▶ 内水槽 43mΦ×250mL×2
- ▶ 外水槽 幅2m

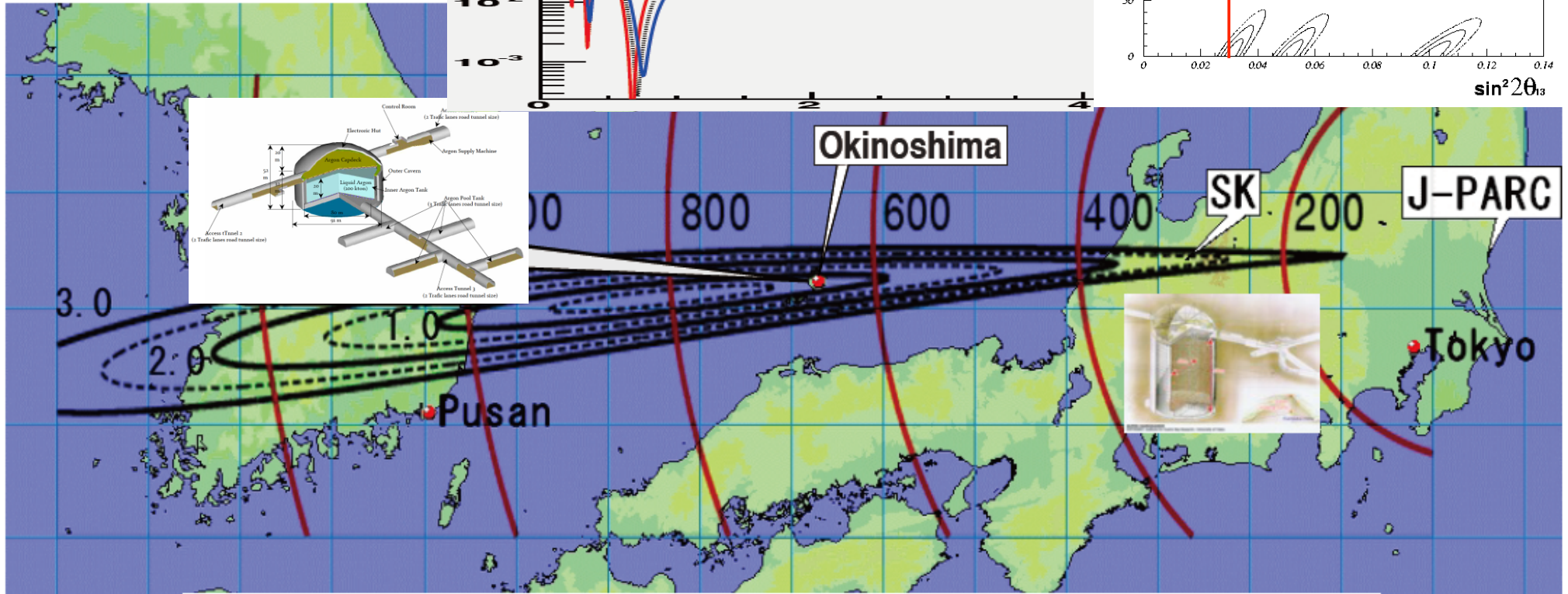
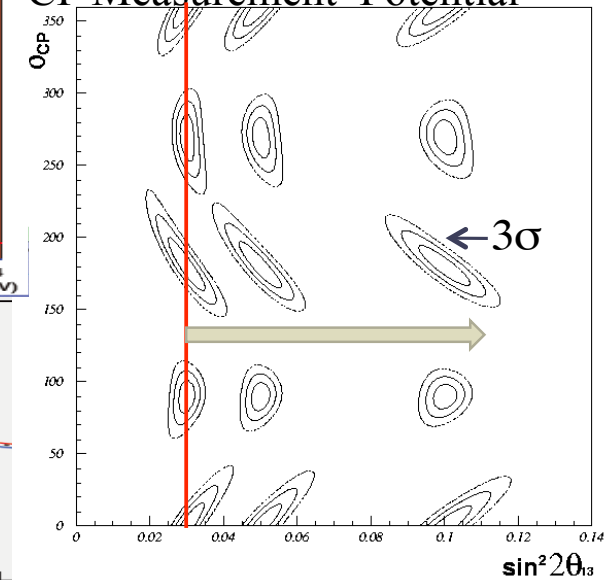
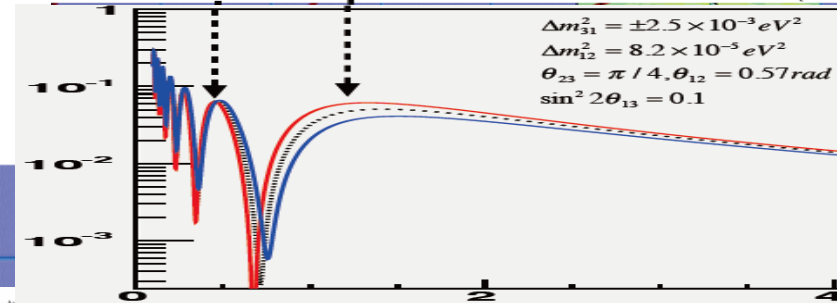
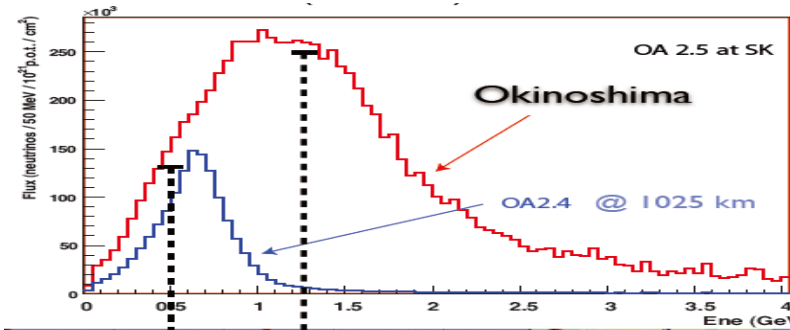


液体アルゴンTPC

On-axis
($\theta=0.76^\circ$)
(2.5° @SK)
L=658km

P32 proposal (Lar TPC R&D)
Recommended by J-PARC PAC
(Jan 2010), arXiv:0804.2111

CP Measurement Potential



→ Extract δ_{CP} from fit of 1st & 2nd maximum

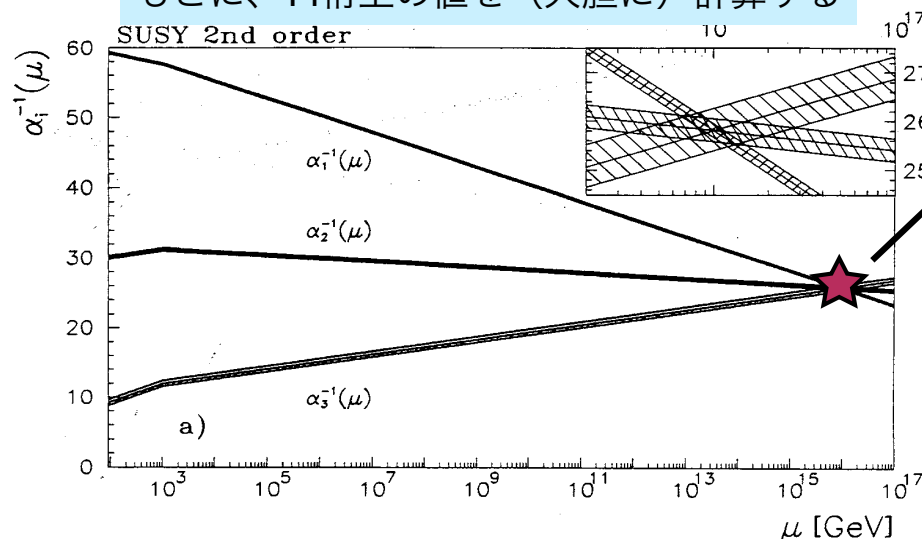
研究課題

- ▶陽子崩壊探索
- ▶加速器ニュートリノ振動実験
- ▶大気ニュートリノ振動実験
- ▶超新星爆発ニュートリノ
- ▶太陽ニュートリノ
- ▶その他ニュートリノ源

核子崩壊

核子崩壊を探す理由

3つの相互作用の強さパラメータ実験値をもとに、14桁上の値を（大胆に）計算する



大統一理論の証拠？

相互作用と素粒子の統一

$G \supset SU_C(3) \otimes SU_L(2) \otimes U_Y(1)$
(クォーク、レプトン) 多重項

予言

↓
核子が自発的に崩壊する

核子崩壊探索実験:

▶ $O(10^{16})$ GeVに高感度の実験（エネルギーフロンティア）

目指すゴール:

▶ 大統一の直接的証拠をとらえる

▶ 標準模型のゲージ対称性 $SU_C(3) \otimes SU_L(2) \otimes U_Y(1)$ の由来

▶ レプトン・クォーク構造の由来

標準模型では答えられない問い

理論背景

1929 バリオン数保存則の提案 (Weyl)

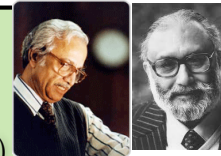
1973 左右対称模型 $SU(4) \otimes SU(2) \otimes SU(2)$ での陽子崩壊議論 (Pati and Salam)

1974 $SU(5)$ 模型での陽子崩壊 (Georgi and Glashow)

1976 弱相互作用の非摂動効果による $\Delta B = \Delta L = 3$, rate $\sim 10^{-165}$ ('t Hooft)

重力による大局的対称性 (B) の破れ, $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) \sim 10^{48}$ years

1980~ 超対称性模型による陽子崩壊 (Yanagida, Sakai, Weinberg, Ellisほか)

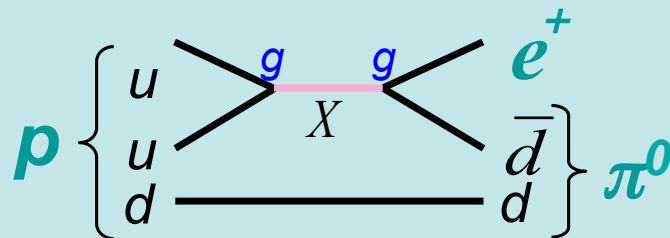


quarks and leptons
in same multiplets

$$\psi_{5L} = \begin{pmatrix} d_1^c \\ d_2^c \\ d_3^c \\ e^- \\ -\nu_e \end{pmatrix}_L$$

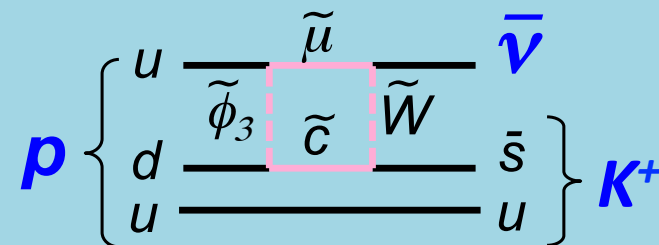
$$\psi_{10L} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & u_3^c & -u_2^c & -u^1 & -d^1 \\ -u_3^c & 0 & u_1^c & -u^2 & -d^2 \\ u_2^c & -u_1^c & 0 & -u^3 & -d^3 \\ u^1 & u^2 & u^3 & 0 & -e^+ \\ d^1 & d^2 & d^3 & e^+ & 0 \end{pmatrix}_L$$

超重ゲージボソン媒介による
陽子崩壊



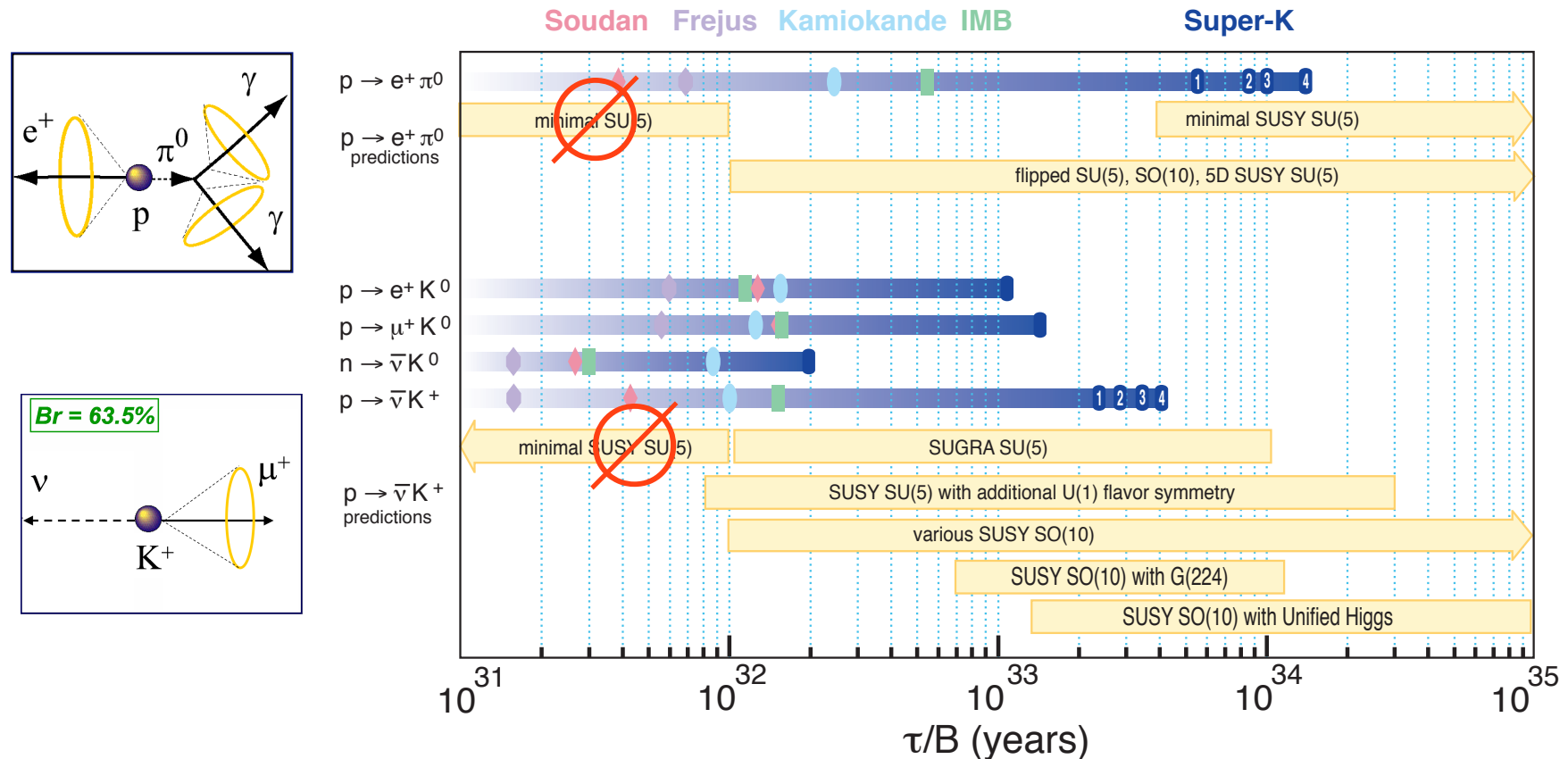
$$\Gamma(p \rightarrow e^+ \pi^0) \sim \frac{g^4 m_p^5}{M_X^4}$$

カラードヒッグス粒子媒介による
陽子崩壊



$$\Gamma(p \rightarrow \bar{\nu} K^+) \sim \frac{\tan^2 \beta \times m_p^5}{M_{\tilde{q}}^2 \times M_3^2}$$

これまでの実験結果



- ▶ スーパーカミオカンデ実験が多くのモードで世界最高感度を持つ。
 - ▶ $\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 1.3 \times 10^{34}$ 年 (90%信頼度、220キロトン年)
 - ▶ $\tau(p \rightarrow \nu K^+) > 4.0 \times 10^{33}$ 年 (90%信頼度、220キロトン年)
- ▶ 有意な核子崩壊信号は発見されず ➡ 大統一模型に対する制限を与えている。
 - ▶ SUSY模型に対する制限を与えている (例: R-parity保存)
 - ▶ minimal SU(5)、minimal SUSY SU(5)の棄却。SUSY SO(10)に注目?

class of SUSY $SO(10)$ GUT

Babu et al. JHEP06(2010)084

▶ 特徴

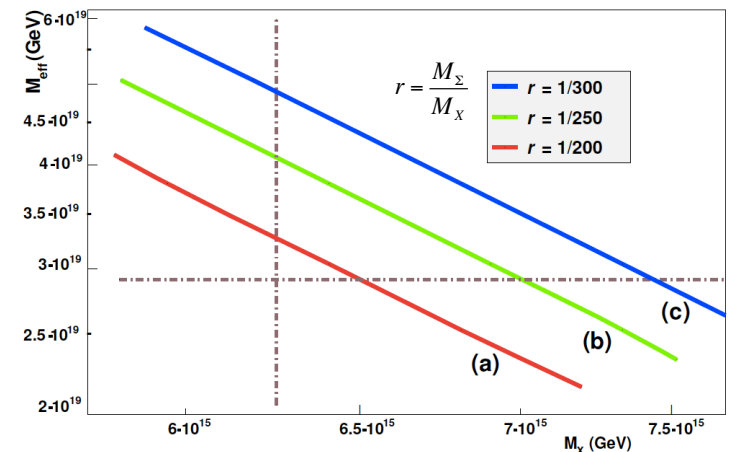
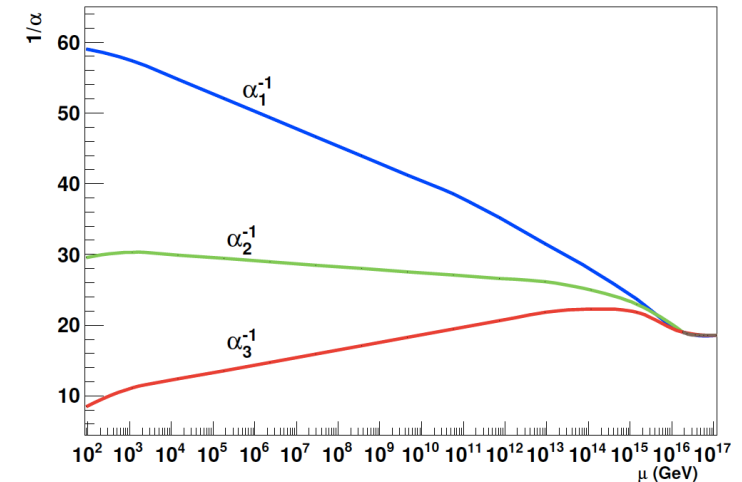
- ▶ 低次元Higgs: $\{45+16+16^*+10\}$
- ▶ 軽いヒッグス質量安定 (Triplet-Doublet問題回避)
- ▶ クォーク・レプトンの質量と混合角を説明
 - ▶ 極微ニュートリノ質量 ← シーソー機構から
 - ▶ 混合角 ← $Q4$ フレーバー対称性から

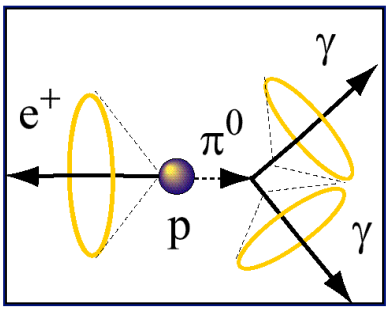
▶ 核子崩壊レート

$$\Gamma_{d=6}^{-1}(p \rightarrow e^+ \pi^0) \lesssim 5.3 \times 10^{34} \text{ yrs}$$

$$\Gamma^{-1}(p \rightarrow \bar{\nu} K^+) \lesssim (3.1 \times 10^{34} \text{ yrs}) \times \left(\frac{m_{\tilde{q}}}{1.5 \text{ TeV}} \right)^4 \left(\frac{130 \text{ GeV}}{m_{\tilde{W}}} \right)^2 (3/\tan \beta)^2$$

どちらもスーパーカミオカンデの
制限値の5倍以下。



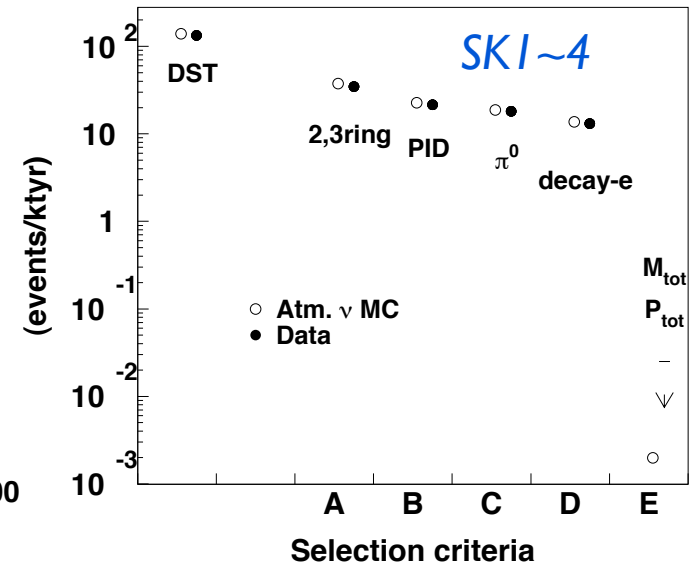
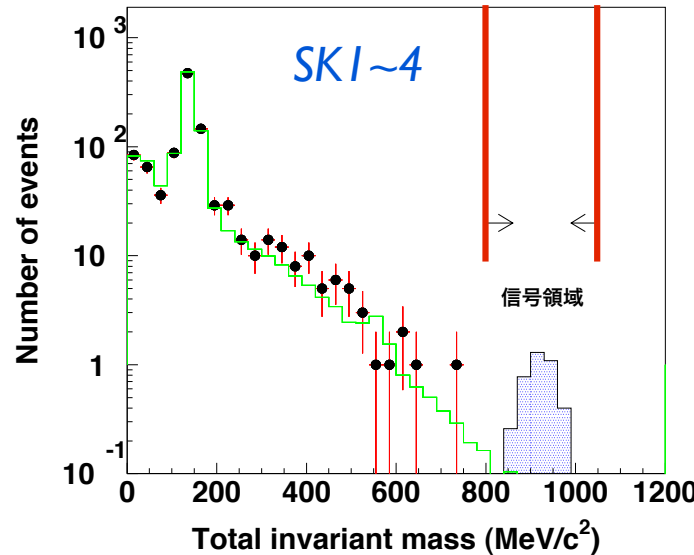
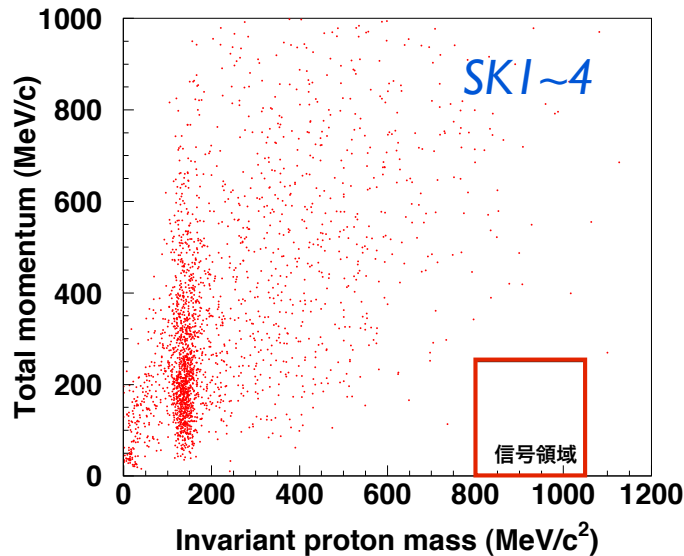


$p \rightarrow e^+ + \pi^0$ searches

Super-K cut

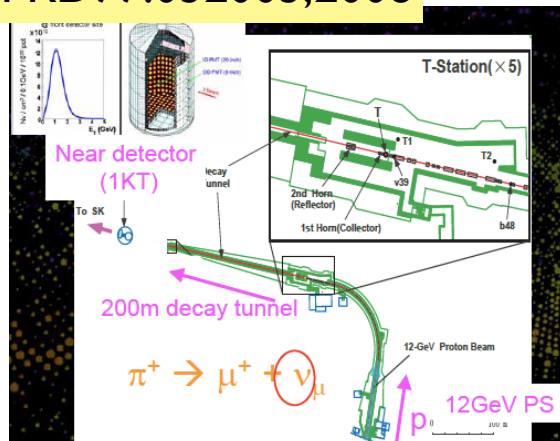
- 2 or 3 Cherenkov rings
- All rings are showering
- $85 < M_{\pi^0} < 185 \text{ MeV}/c^2$ (3-ring)
- No decay electron
- $800 < M_{\text{proton}} < 1050 \text{ MeV}/c^2$
- $P_{\text{total}} < 250 \text{ MeV}/c$

データは良く再現されている



- detection efficiency = 45%
- atmospheric ν BG = $2.1 \pm 0.3(\text{stat.}) \pm 0.8(\text{syst.}) (\text{Mton} \times \text{years})^{-1}$
- $\tau_{\text{proton}}/\text{Br} > 1.3 \times 10^{34} \text{ years @ 90\%CL}$

PRD77:032003,2008



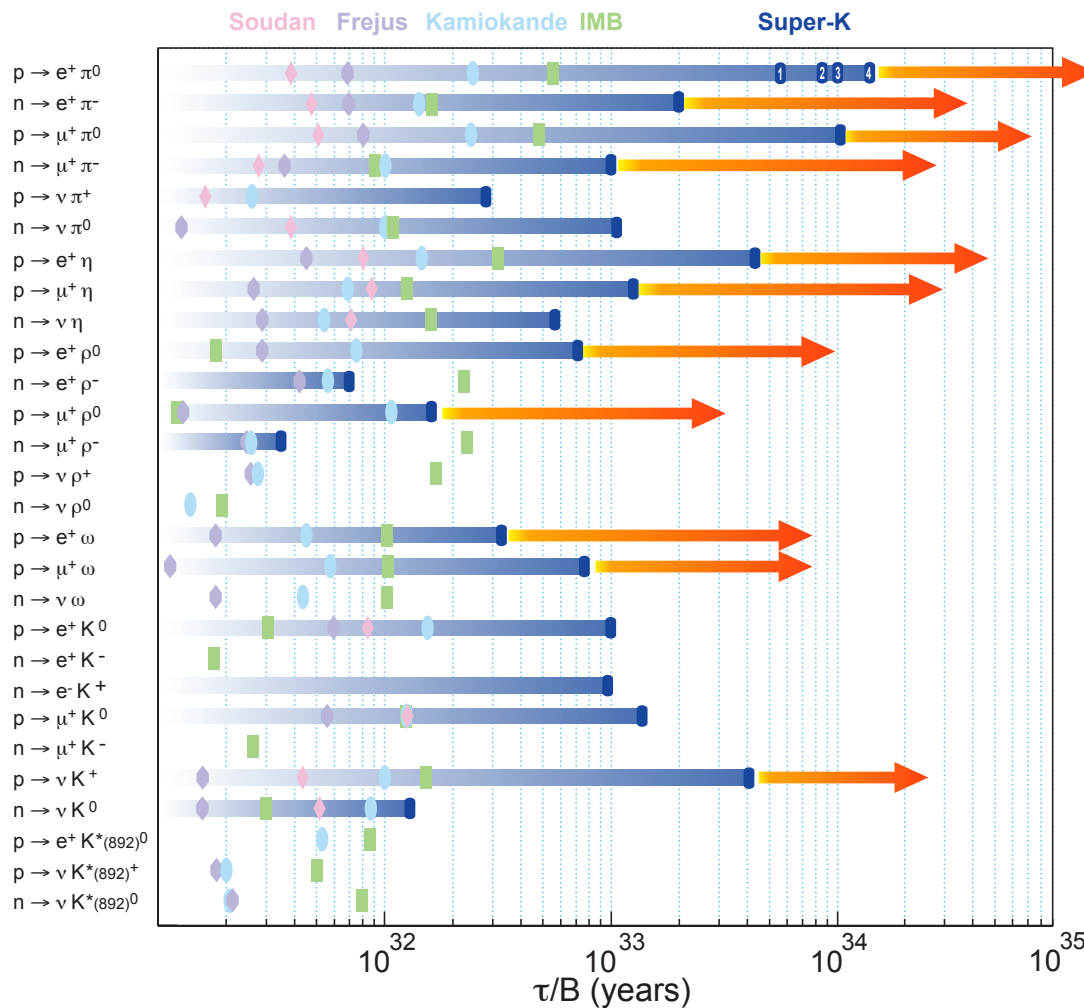
▶ 加速器ニュートリノ (K2K) によるBGの検証

- ▶ BG = $1.63 \pm 0.42/-0.33(\text{stat.}) + 0.45/-0.51(\text{syst.}) (\text{Mt} \times \text{yrs})^{-1} (\text{E} \nu < 3 \text{ GeV})$
- ▶ Consistent w/ simulation $1.8 \pm 0.3(\text{stat.})$

次世代実験のqualityは保証されている

多くの崩壊モードの探索可能

- many models predicts braching ratio of $p \rightarrow e^+ \eta$, $e^+ \rho$, $e^+ \omega$ are 10~20%
- Flipped SU(5) (Ellis) predicts $\text{Br}(p \rightarrow e^+ \pi^0) \sim \text{Br}(p \rightarrow \mu^+ \pi^0)$
- (B-L)非保存モード、 $|\Delta B|=2$ など。バリオジェネシスとの関係？



Hyper-K sensitivities

- ▶ $p \rightarrow e^+ \pi^0$
 - ▶ $\tau_{\text{proton}}/\text{Br} > 1.3 \times 10^{35}$ years @90%CL
 - ▶ 5Mton×years (9 Hyper-K years)
- ▶ $p, n \rightarrow (e^+, \mu^+) + (\pi, \rho, \omega, \eta)$
 - ▶ $O(10^{34 \sim 35})$ years
- ▶ SUSY favored $p \rightarrow \nu + K^+$
 - ▶ 2.4×10^{34} years
- ▶ K^0 modes, $\nu \pi^0$, $\nu \pi^+$ possible
- ▶ その他多くの崩壊モードの探索可能
 - ▶ (B-L) violated modes
 - ▶ radiative decays $p \rightarrow e^+ \gamma$, $\mu^+ \gamma$
 - ▶ neutron-antineutron振動 ($|\Delta B|=2$)
 - ▶ di-nucleon decays ($|\Delta B|=2$)
 - ▶ $pp \rightarrow XX...$, $nn \rightarrow XX...$

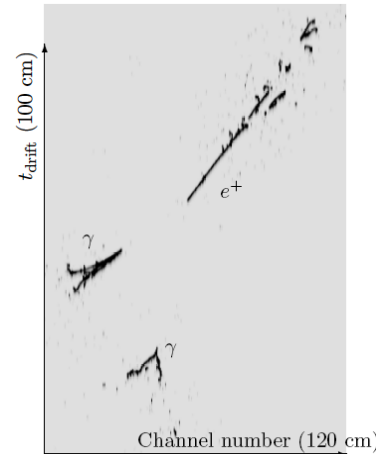
アルゴン検出器での核子崩壊探索

Detector Performance

- ▶ high granularity
- ▶ high tracking capability
- ▶ good E resolution
- ▶ good PID performance

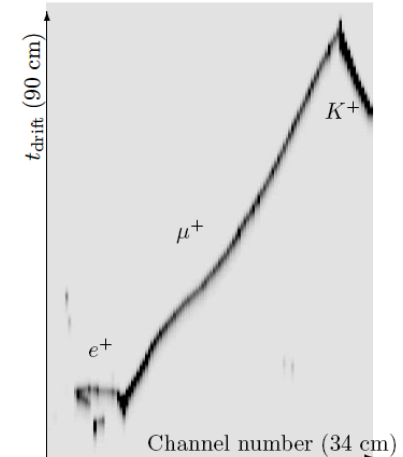
0.4ton R&D to check PID performance in JPARC

ICARUS T600 in operation



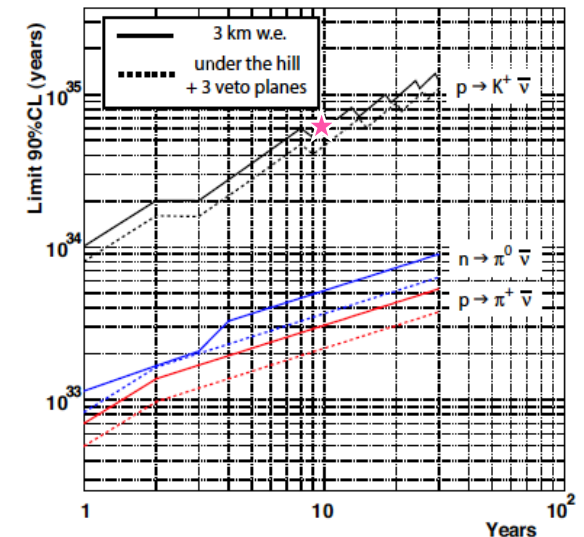
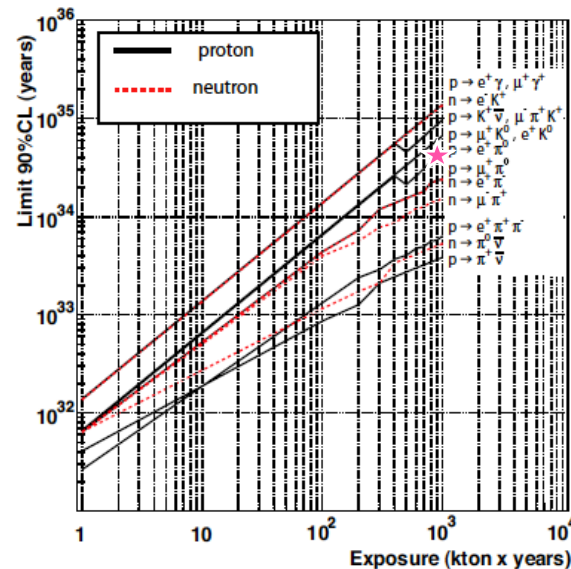
$p \rightarrow e^+ + \pi^0$

- efficiency = 45%, 1BG/Mtyr
- 4×10^{34} years w/ 10yrs exposure



$p \rightarrow \nu + K^+$

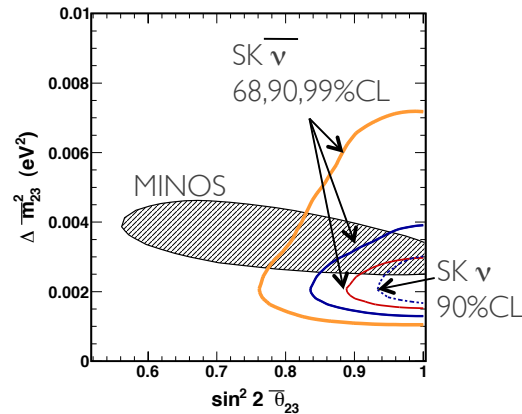
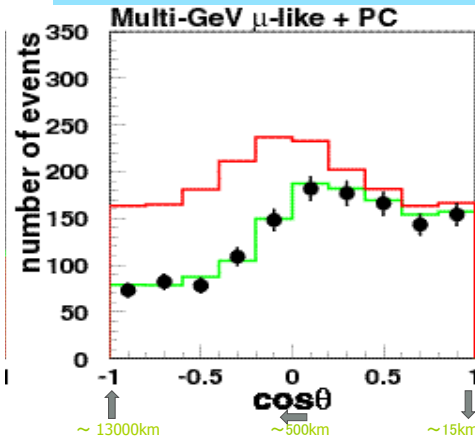
- efficiency = 97%, 2BG/Mtyr
- 6×10^{34} years w/ 10yrs exposure



大気ニュートリノ

大気ν研究のこれまで

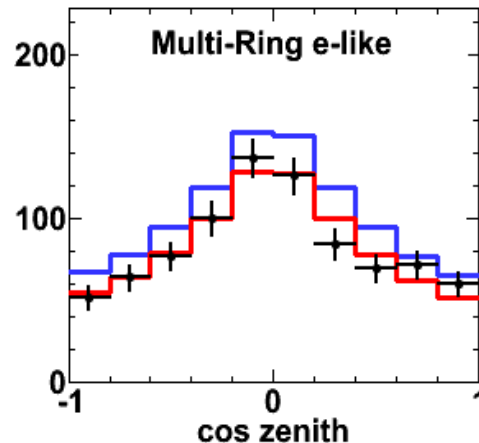
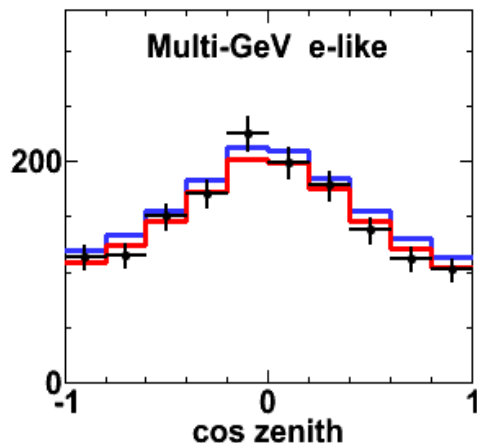
ミューオンニュートリノ



- ▶ ミューオンニュートリノの振動による欠損
 - ▶ θ_{23} , Δm^2_{23} の測定（タウのappearance）
- ▶ モデルの検証
 - ▶ ニュートリノ崩壊、FCNC、lepton universalityの破れ、CPTの破れ他

次世代実験で感度改善の期待

電子ニュートリノ



- ▶ 電子ニュートリノの振動は未観測
- ▶ $\sin^2 \theta_{13} \sim \text{a few \%}$ → 高統計観測により、電子ニュートリノ振動が観測できる！
- ▶ ニュートリノに対する新しい知見が得られる可能性がでてきた。

新しい振動チャンネルによる
ニュートリノ研究

電子ニュートリノ振動

NuclPhysB680,479(2004)

$$\frac{\Phi(\nu_e)}{\Phi_0(\nu_e)} - 1 \approx P_2(r \cdot \cos^2 \theta_{23} - 1) \quad \text{Solar term}$$

$$-r \cdot \sin \tilde{\theta}_{13} \cdot \cos^2 \tilde{\theta}_{13} \cdot \sin 2\theta_{23} (\cos \delta \cdot R_2 - \sin \delta \cdot I_2)$$

$$+ 2 \sin^2 \tilde{\theta}_{13} (r \cdot \sin^2 \theta_{23} - 1)$$

Interference term (δ CP)
(3)
 θ_{13} resonance term

r : μ/e flux ratio (~ 2 at low energy)

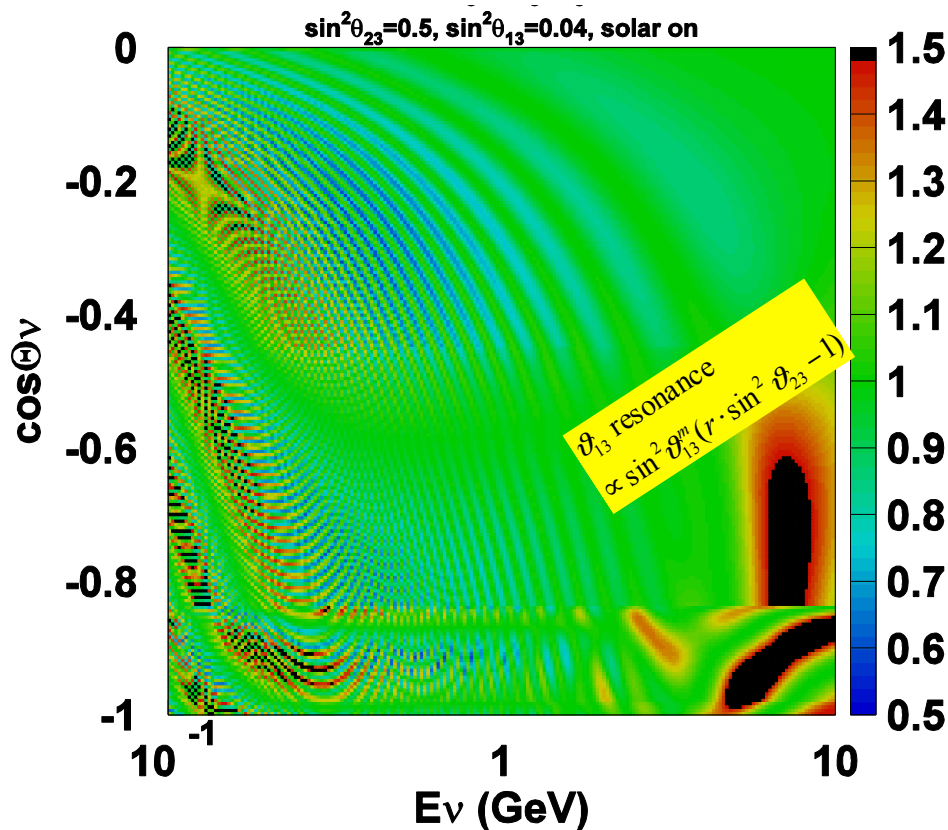
$P_2 = |A_{e\mu}|^2$: 2ν transition probability $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu\tau}$ in matter

$R_2 = \text{Re}(A_{ee}^* A_{e\mu})$

$I_2 = \text{Im}(A_{ee}^* A_{e\mu})$

A_{ee} : survival amplitude of the 2ν system

$A_{e\mu}$: transition amplitude of the 2ν system



関係する振動パラメータ

▶ Solar term

▶ $\sin^2 \theta_{23}$

▶ Interference term

▶ δ 、matter effect (θ_{13} , 質量階層性)

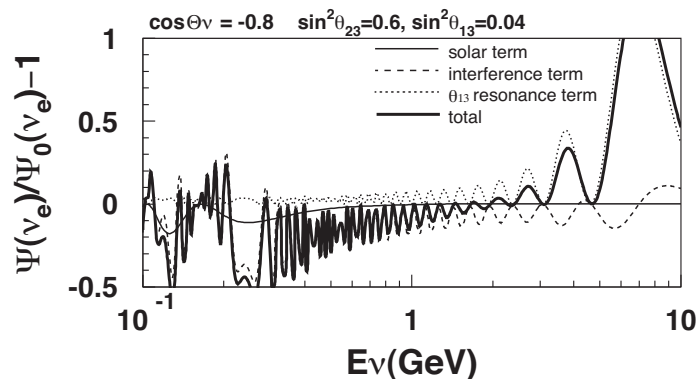
▶ θ_{13} resonance term

▶ $\sin^2 \theta_{23}$ 、matter effect (θ_{13} , 質量階層性)

電子ニュートリノ振動 (+ ミューオン振動)

→ 上記パラメータの情報を引き出す

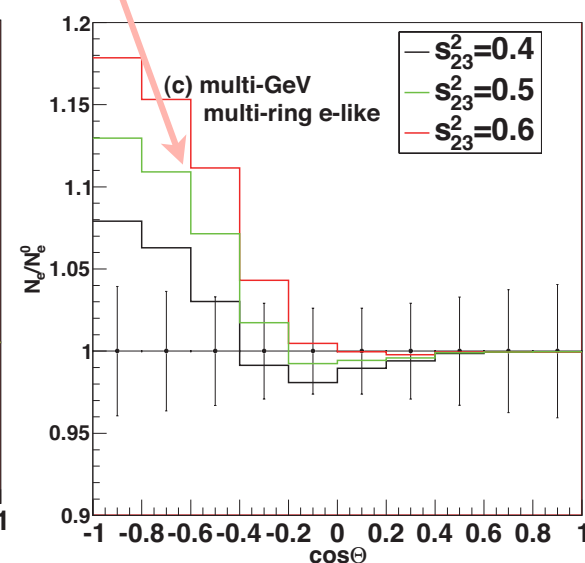
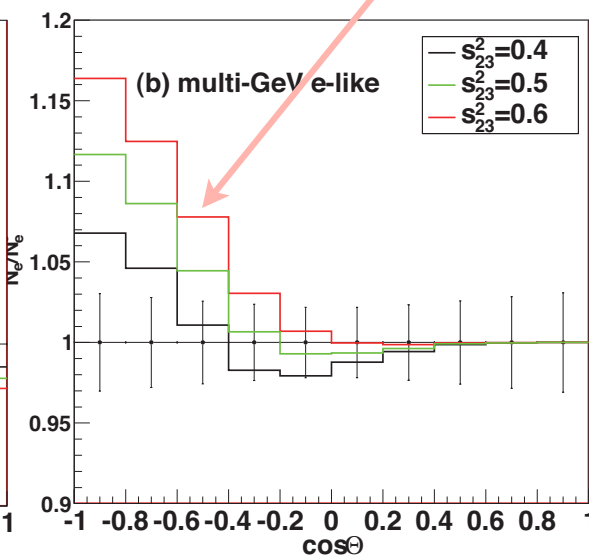
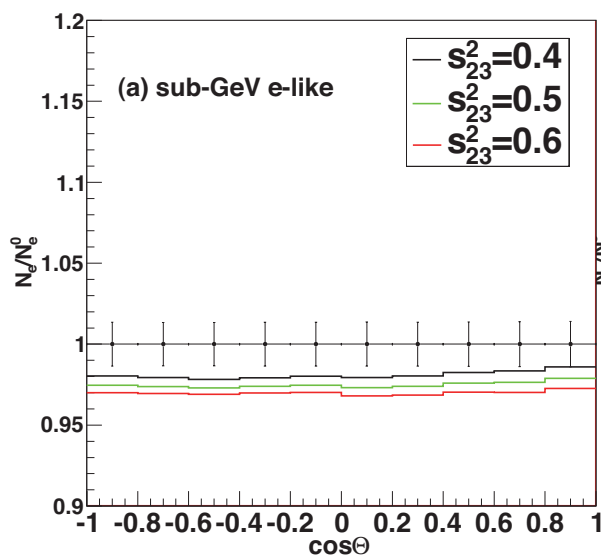
電子ニュートリノの振動効果



上向き電子ニュートリノ
appearance

電子イベント数

振動なし期待値



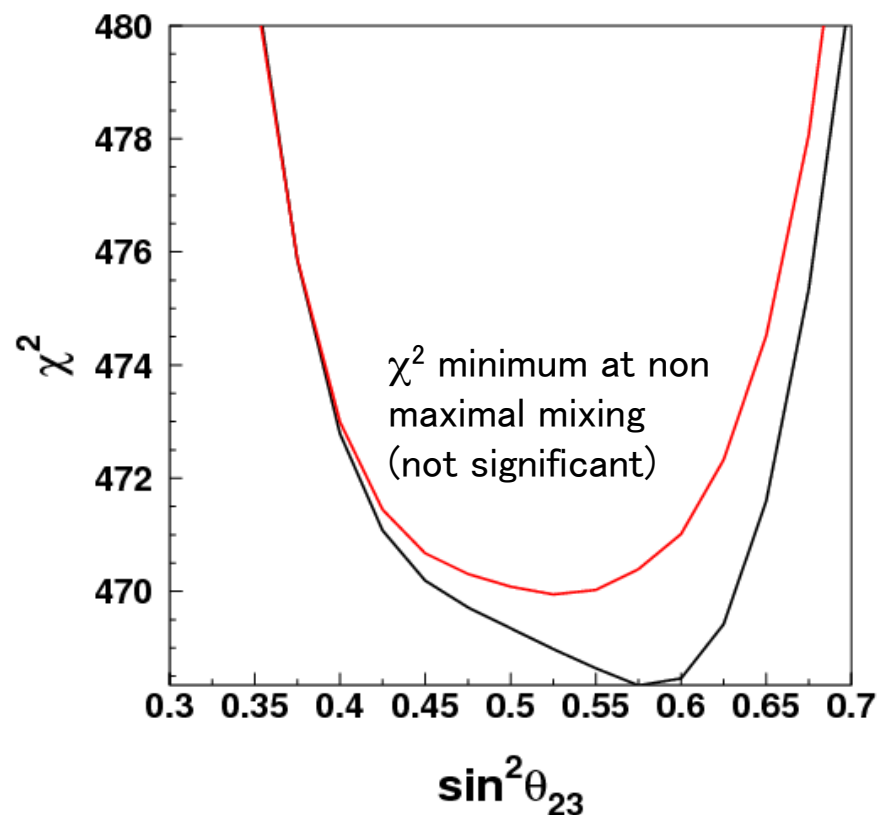
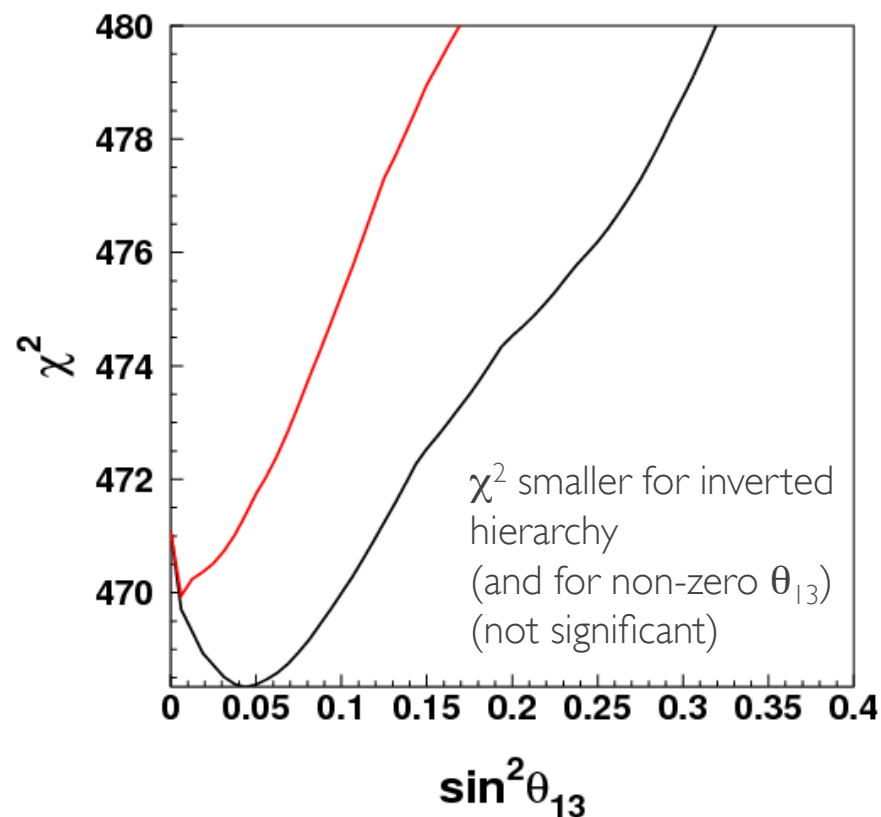
天頂角 ($\cos\Theta$)

Super-Kにおける結果

標準階層構造(Normal Hierarchy)

逆階層構造(Inverted Hierarchy)

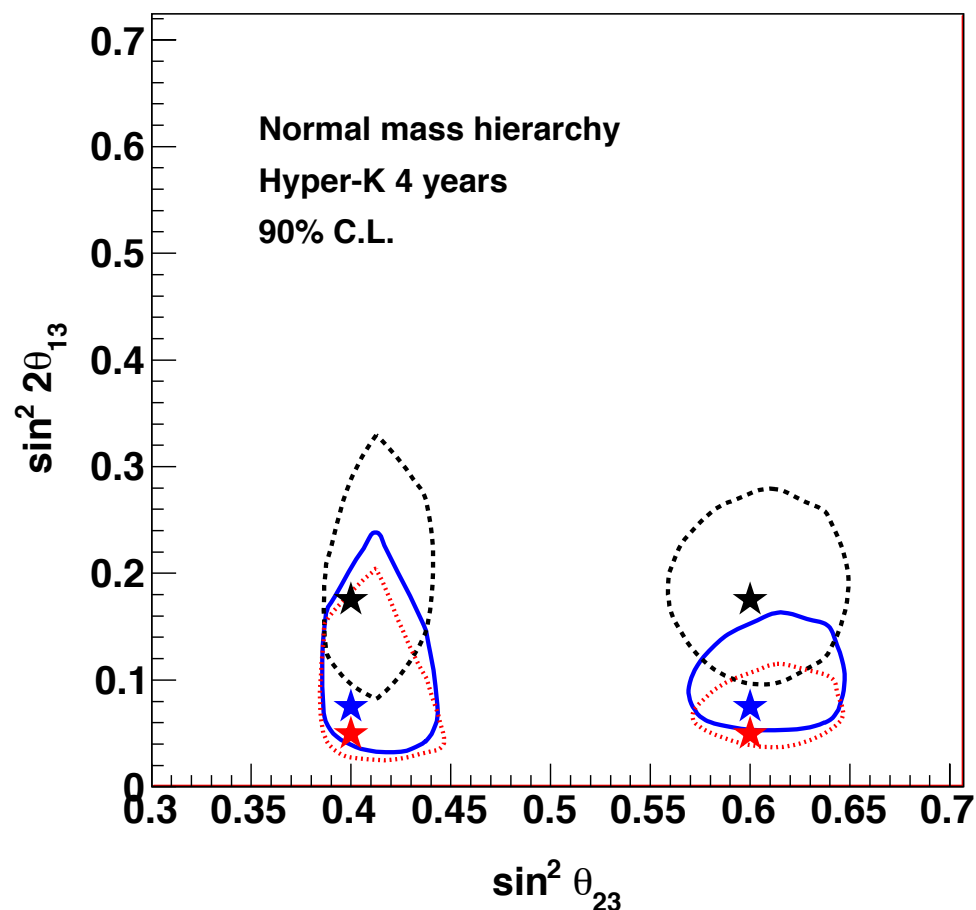
Normal hierarchy (NH): $\chi^2_{\min} = 469.94/416\text{dof}$
Inverted hierarchy (IH): $\chi^2_{\min} = 468.34/416\text{dof}$
 $\rightarrow \Delta\chi^2 = 1.6$



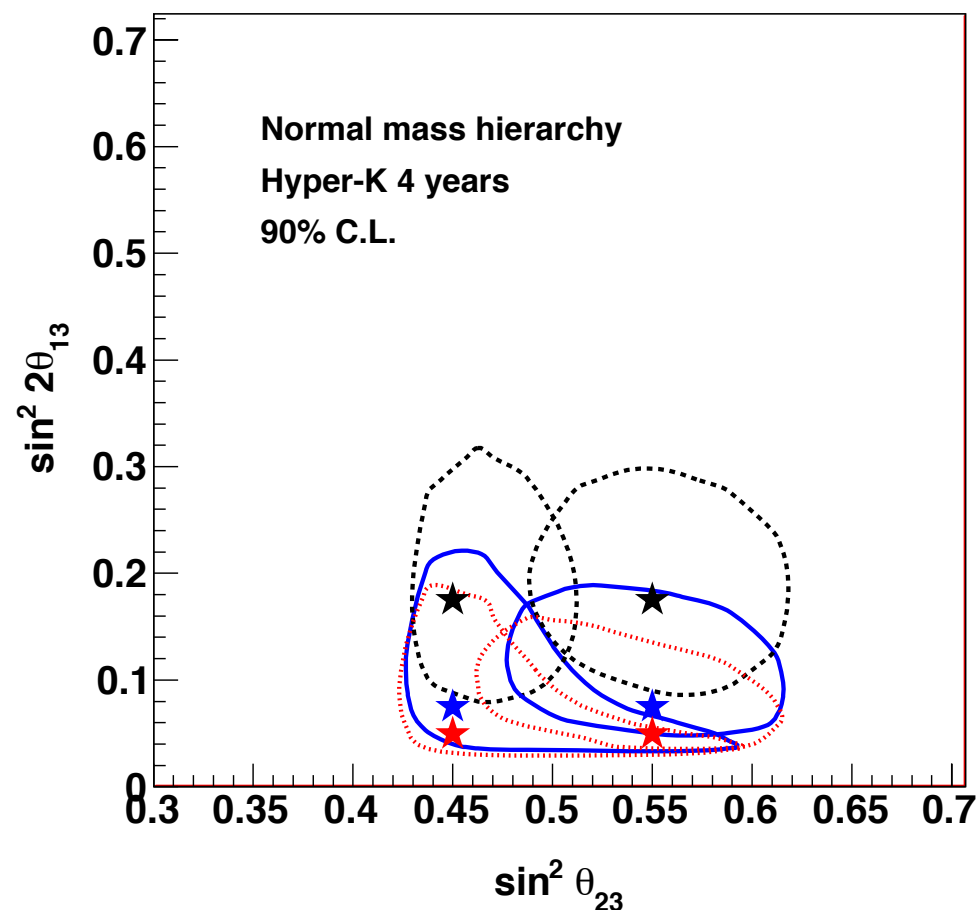
- ▶ 有意な結果はまだ得られていない.
- ▶ 大気ニュートリノに感度があることはわかる.

Hyper-Kにおける θ_{23} octant

$$\sin^2 2\theta_{23} = 0.96$$
$$\downarrow$$
$$\sin^2 \theta_{23} = 0.4 \text{ または } 0.6$$

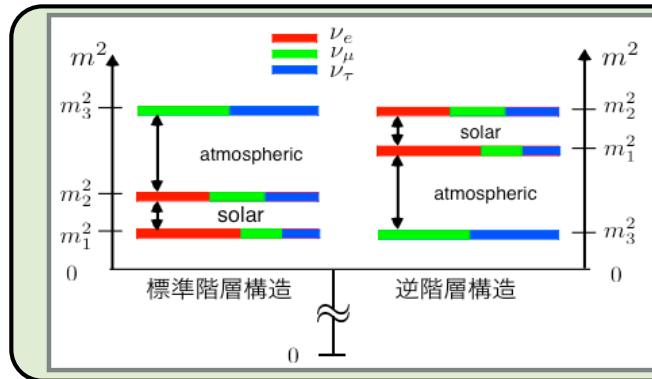


$$\sin^2 2\theta_{23} = 0.99$$
$$\downarrow$$
$$\sin^2 \theta_{23} = 0.45 \text{ または } 0.55$$



$\sin^2 2\theta_{23} < 0.99$ の場合、octant の区別が可能

ニュートリノの質量階層構造

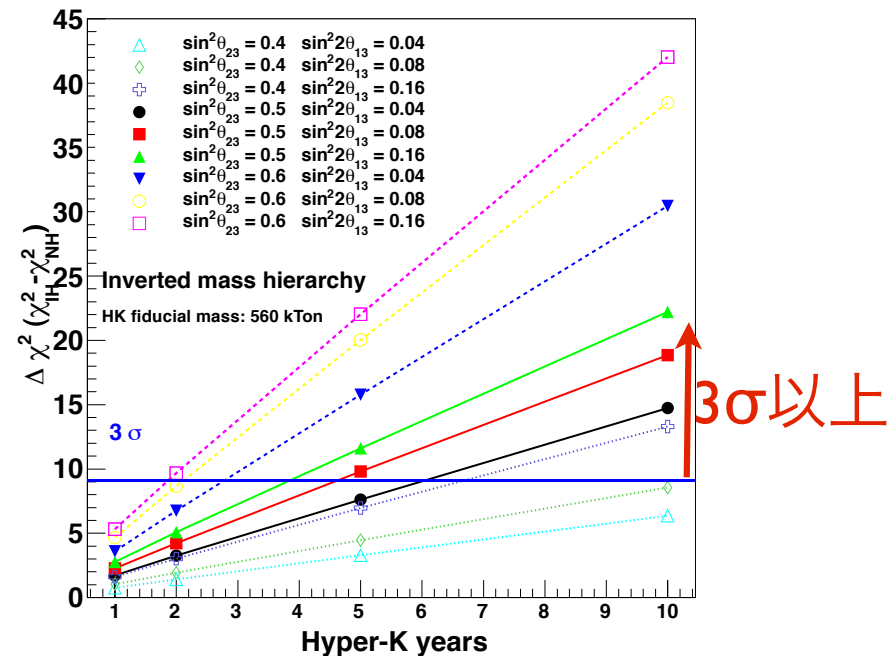
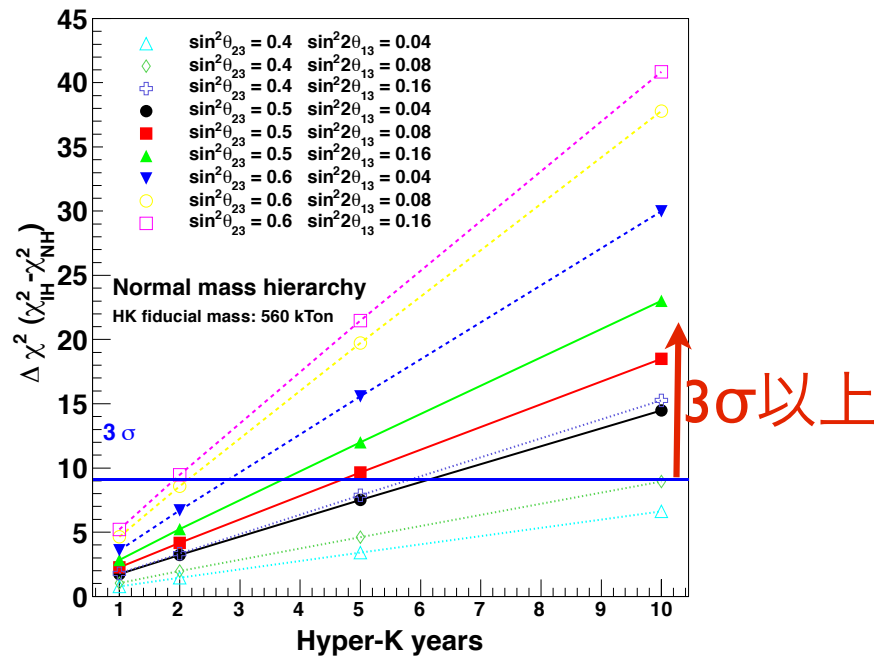


▶ 標準階層性(normal hierarchy)

▶ m_3 が最も重い

▶ 逆階層構造(inverted hierarchy)

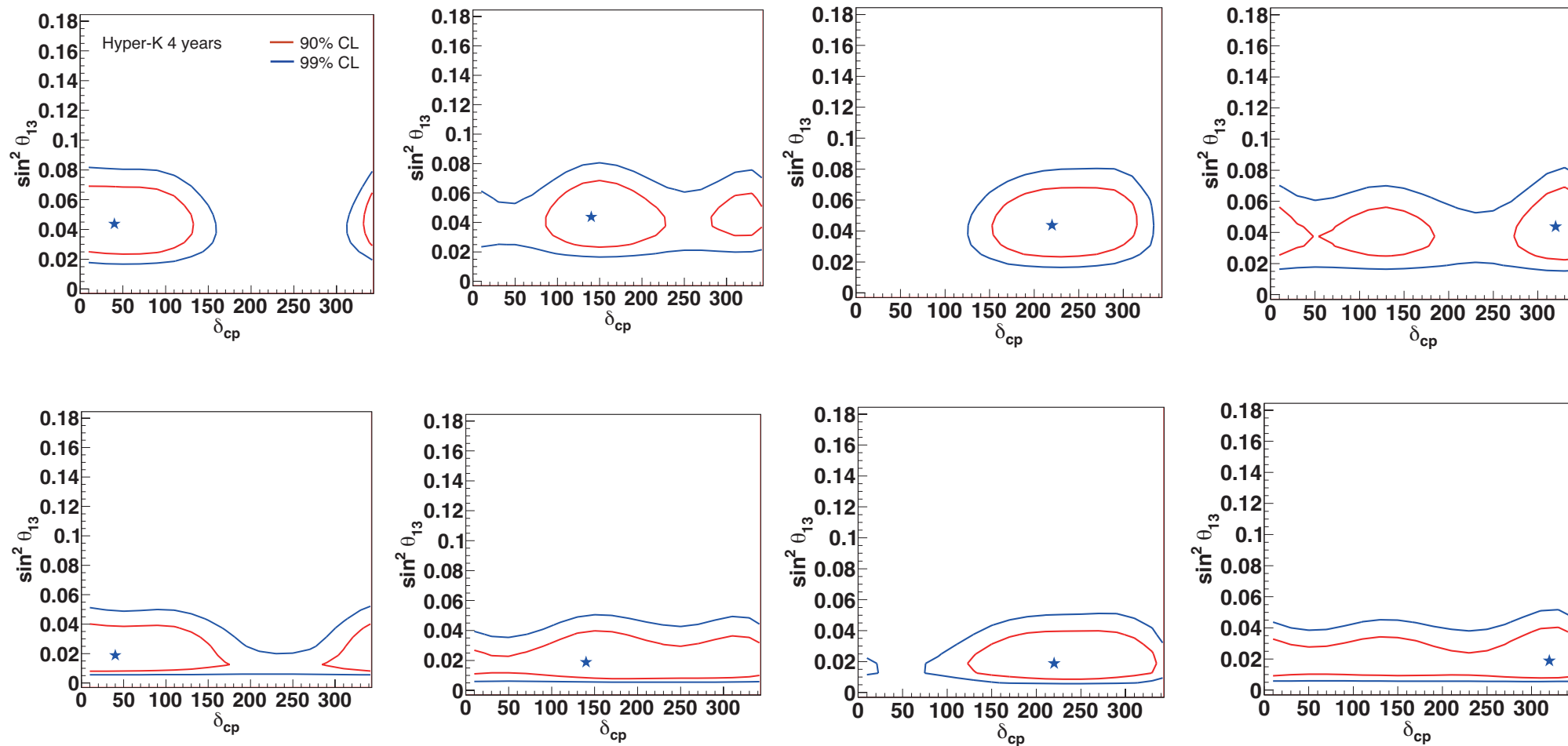
▶ m_3 が最も軽い



▶ 5年程度で3σレベルの区別を期待

▶ θ_{23} が小さいと10年以上かかる可能性もある

δ_{CP}



加速器ニュートリノ研究との比較？

まとめ

▶ nonzero θ_{13}

- ▶ CPV測定が揃いつつある.
- ▶ 次期計画準備が急務.

▶ 核子崩壊探索

- ▶ 大統一の直接的証拠をとらえる、モデルの詳細に迫る.
- ▶ $\Gamma^{-1} \sim O(10^{34 \sim 35})$ 年

▶ 大気ニュートリノ

- ▶ 電子ニュートリノアピアランスに注目
- ▶ 質量階層性構造、 $\sin^2 \theta_{23}$ 等ニュートリノの情報を引き出す可能性