

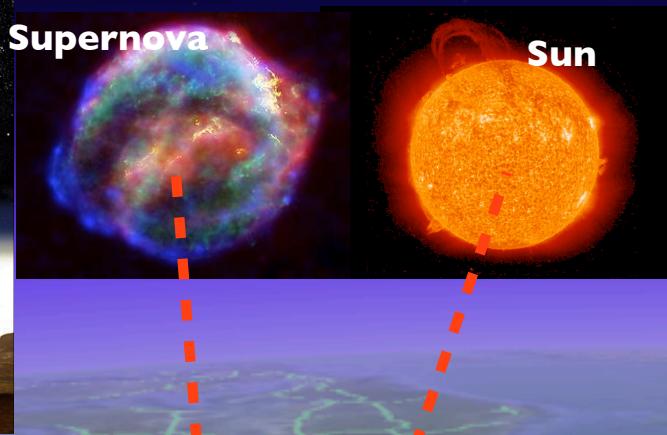
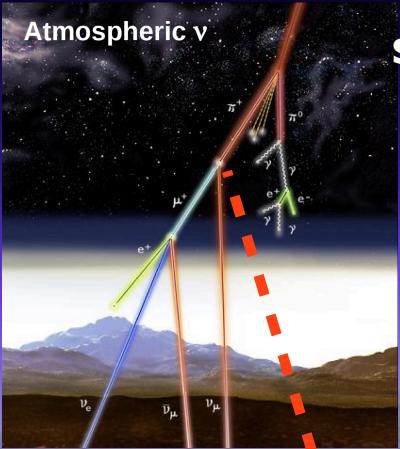
Hyper-Kamiokande

実験計画

塩澤 真人

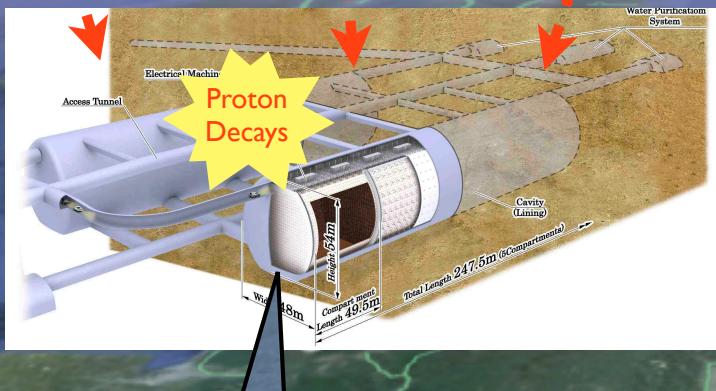
東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設
東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構 神岡サテライト

2012年7月22日
第4回CRCタウンミーティング



ハイパーカミオカンデ実験

- ▶ レプトンのCP非保存探索
- ▶ 核子崩壊探索
- ▶ 宇宙素粒子物理学



x25 Larger ν Target
& Proton Decay Source

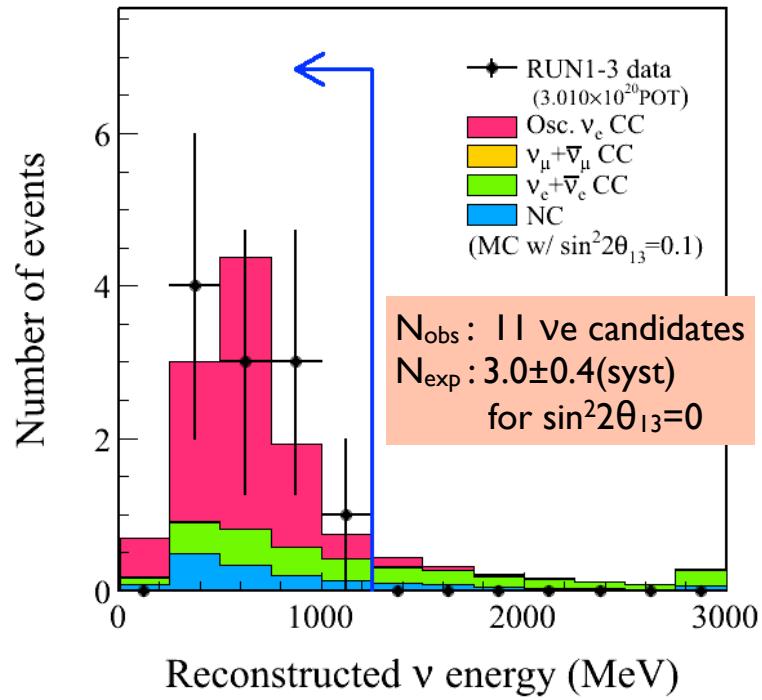


higher intensity ν by
upgraded J-PARC

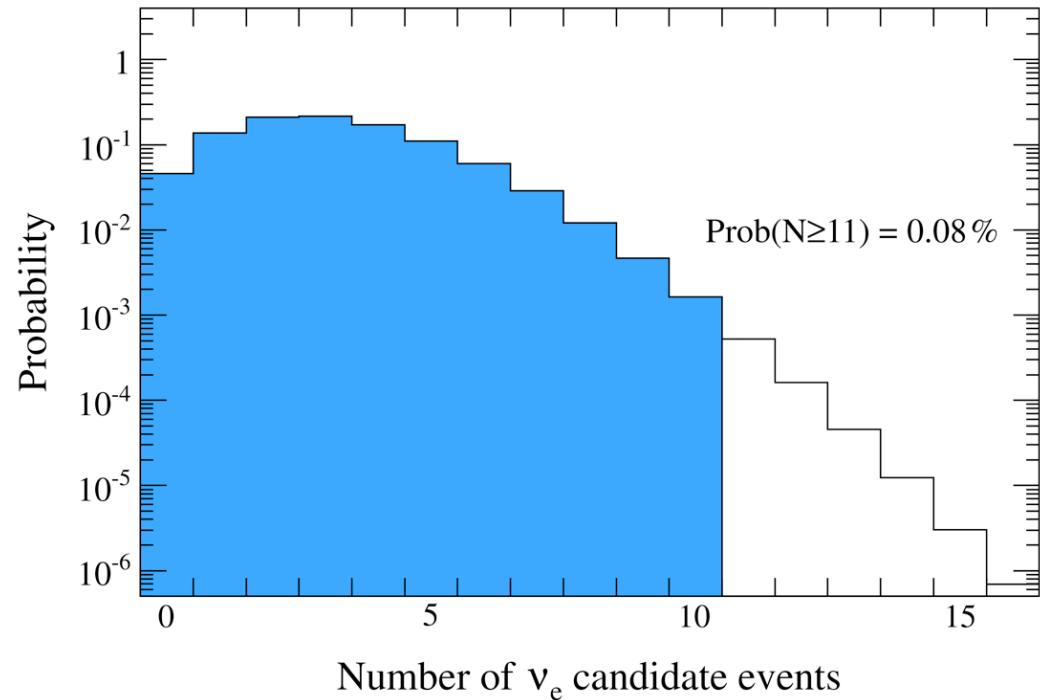


ν_e 出現現象の存在と $\theta_{13} \sim 0.1$ の確立

T2K collaboration (2012)の結果



$\theta_{13}=0$ で $N \geq 11$ が起きる確率は0.08%
 → Evidence for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ appearance



- ▶ ν_e appearanceの存在はより確実な物となった！
- ▶ また、原子炉 ν 実験とconsistent.

(Daya Bay $\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010 (\text{stat.}) \pm 0.005 (\text{syst.}), > 5\sigma$)

CP δ の測定条件

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

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

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

$$\text{CPV term} \propto \sin \vartheta_{12} \cdot \sin \vartheta_{13} \cdot \sin \vartheta_{23} \cdot \sin \delta \cdot \Delta m_{21}^2$$

✓ $\sin \theta_{23} \sim 1/\sqrt{2}$

1998 大気 ν 、 加速器 ν

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

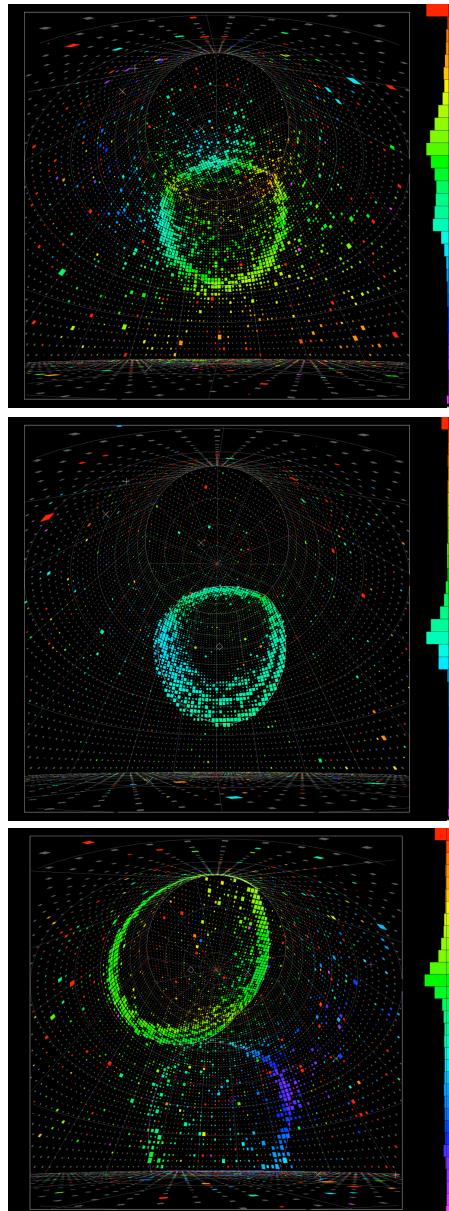
2001 太陽 ν (LMA)、原子炉

✓ $\sin \theta_{13} \sim 0.3$

2012 (T2K、Daya Bay 他)

レプトンセクターのCPV測定実験は可能！
次世代実験実現が急務。

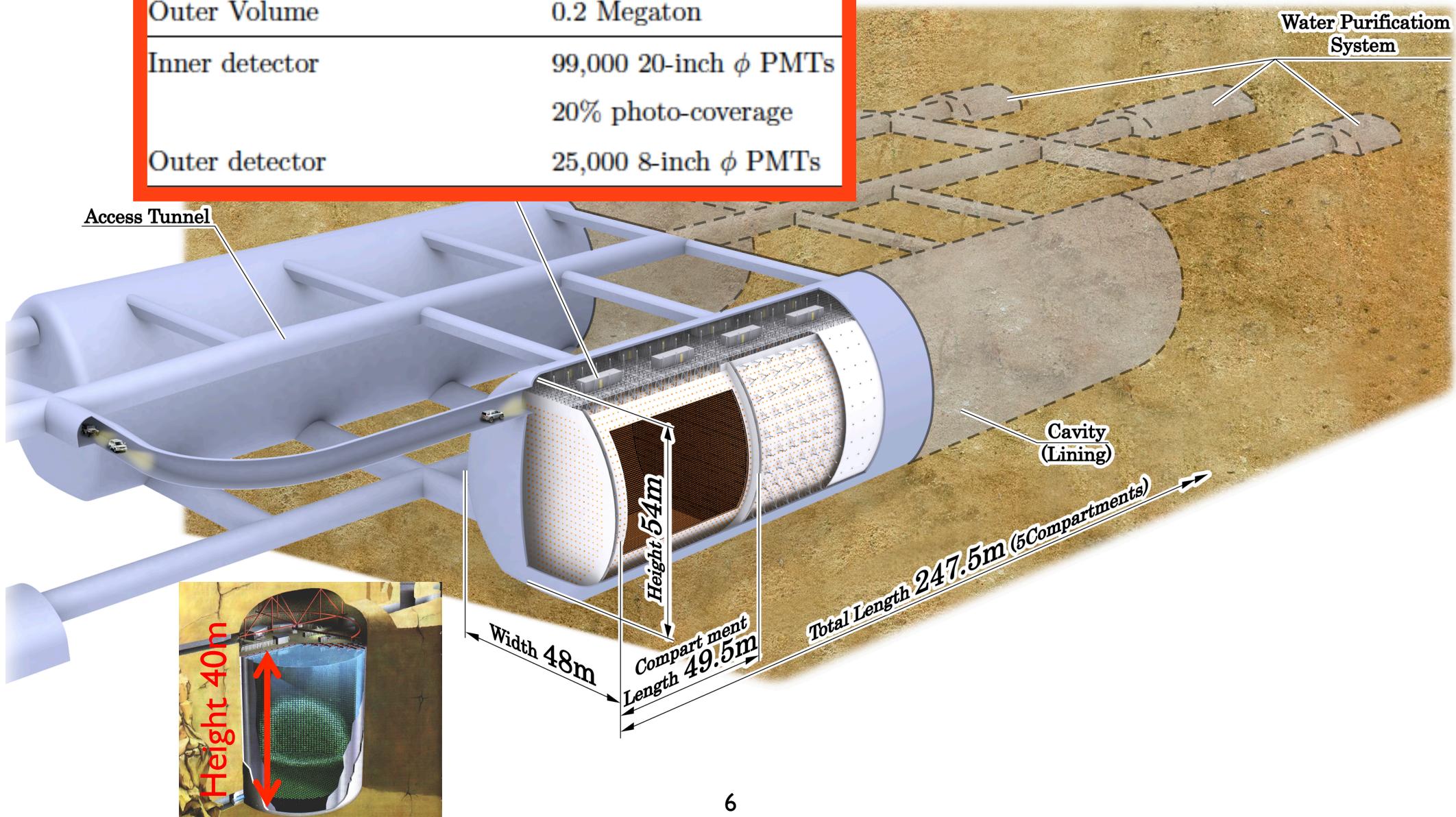
Hyper-Kの要点



- 水チェレンコフ技術
 - 実証された技術と高い性能.
 - スケーラビリティー（大型化が可能）.
- 豊富な物理（発見の可能性）
 - discovery potential of CPV、質量階層性、他パラメータ精密測定
 - 核子崩壊探索の世界一の感度、大統一描像の直接検証
 - 超新星爆発によるニュートリノ天文学、素粒子実験
 - 他天体ニュートリノ探索
- 日本でやる必然性がある.
 - 既存の加速器（J-PARC）の存在とパワー増強プラン.
 - 水チェレンコフの経験（Super-K）.

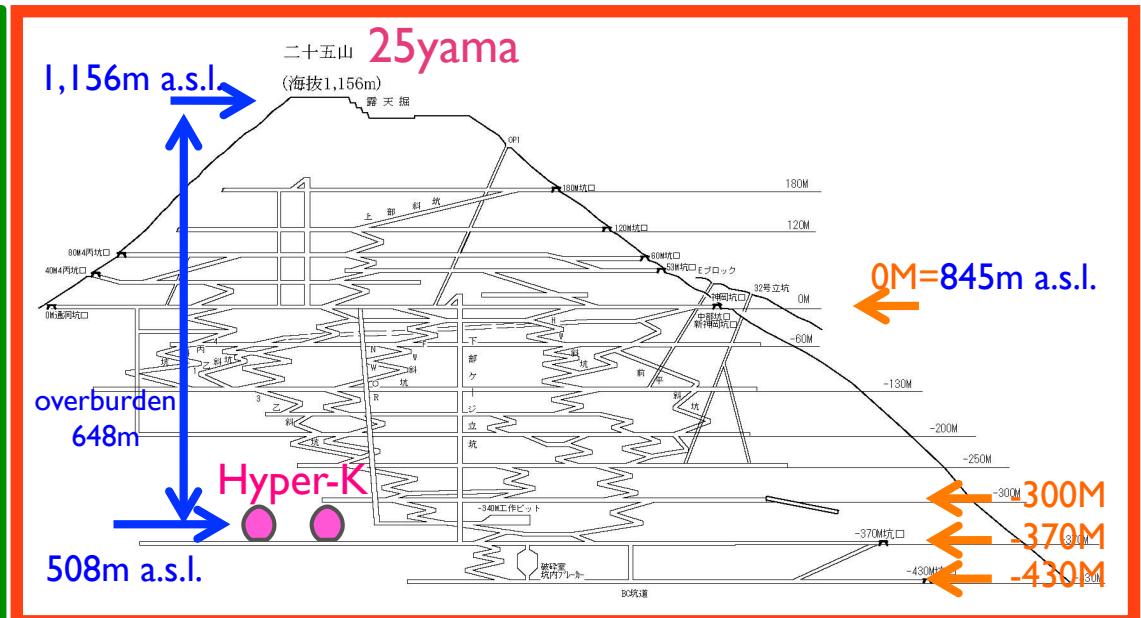
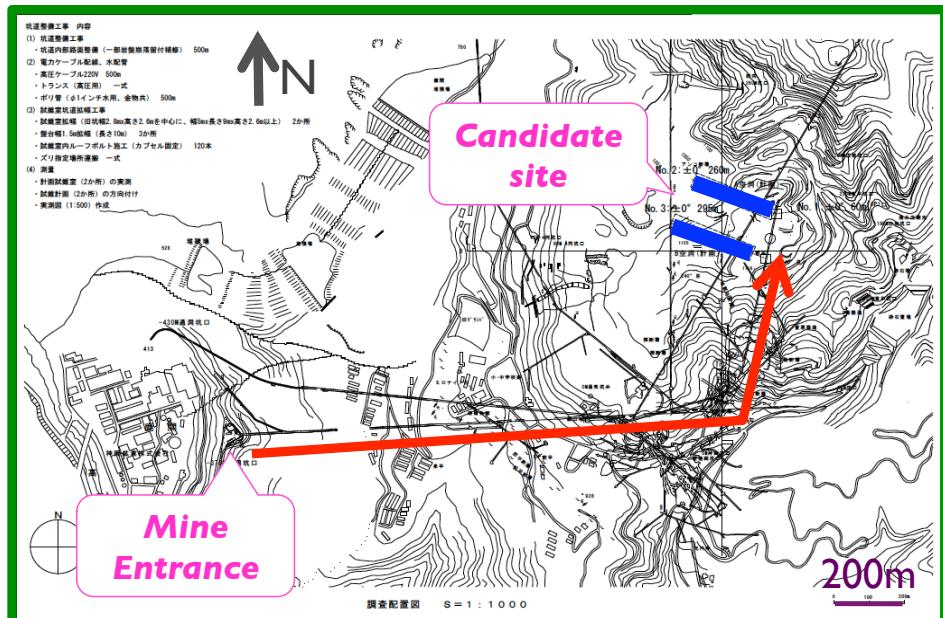
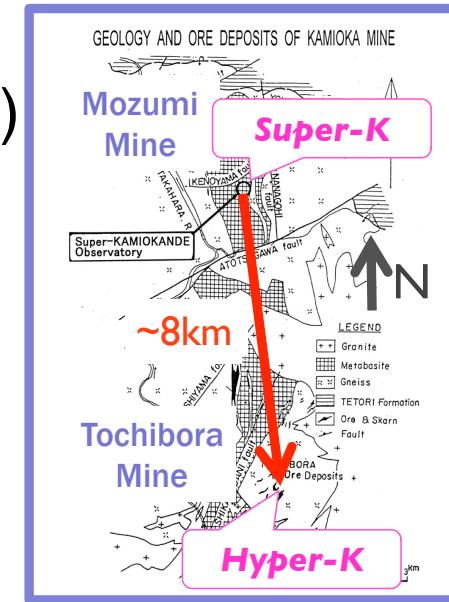
Schematic view of Hyper-K

Total Volume	0.99 Megaton
Inner Volume (Fiducial Volume)	0.74 (0.56) Megaton
Outer Volume	0.2 Megaton
Inner detector	99,000 20-inch ϕ PMTs
	20% photo-coverage
Outer detector	25,000 8-inch ϕ PMTs

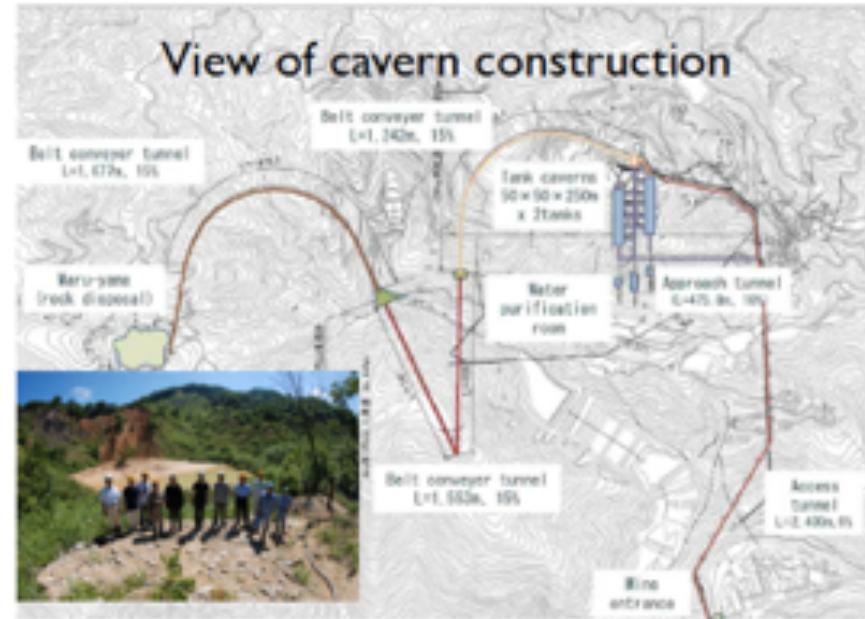


Hyper-Kamiokande candidate site

- ◆ 8km south from Super-K
- ◆ same T2K beam off-axis angle (2.5 degree)
- ◆ same baseline length (295km)
- ◆ 2.6km horizontal drive from entrance
- ◆ under the peak of Nijuugo-yama
- ◆ 648m of rock or 1,750 m.w.e. overburden
- ◆ 13,000 m³/day or 1megaton/80days natural water



Cavern excavation



- geological survey, in-situ rock stress tests
- scheduling & costing ongoing

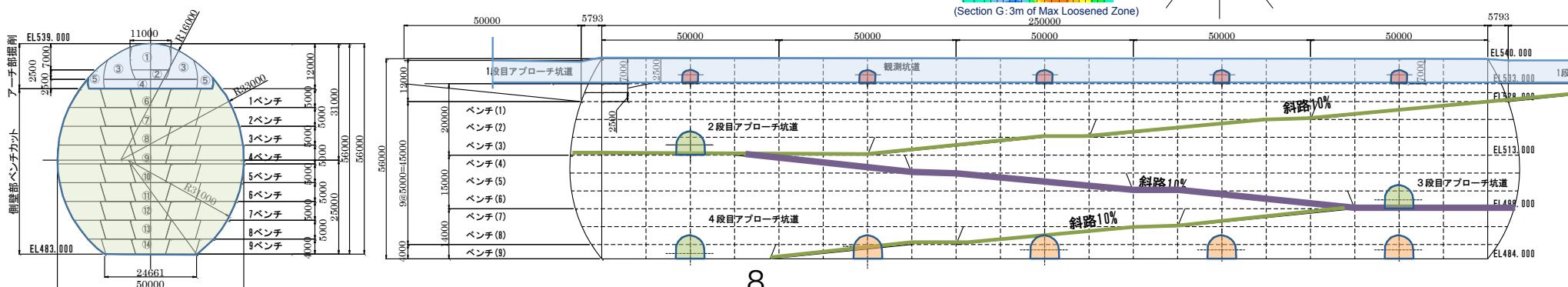
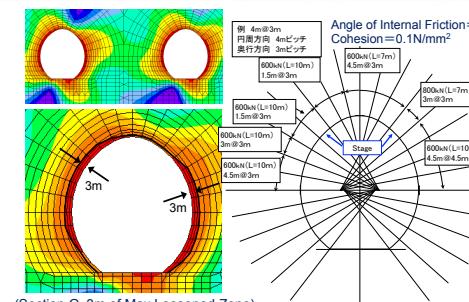
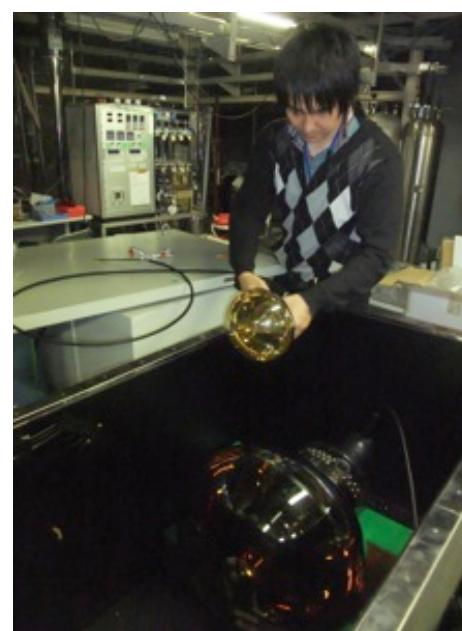
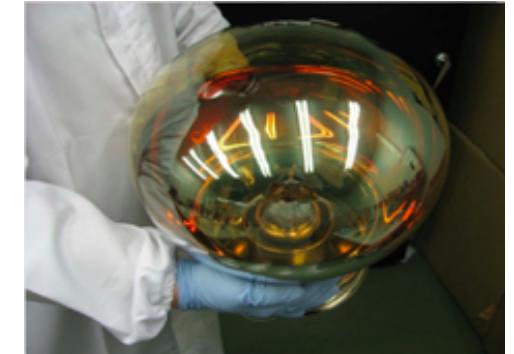


Photo-sensor

- Candidates for ID sensor
 - 20" Hybrid Photo Detector (HPD)
 - Improved 20" PMT
- Proof test of 8" HPD in water tank from this winter
- 20" HPD prototype expected in ~a year



Preparation @ Kamioka



研究課題

- ▶ 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
- ▶ 陽子崩壊探索

ニュートリノ振動研究

加速器ニュートリノ

+ 大気ニュートリノ

ν physics targets of Hyper-K

- ▶ レプトンセクターのCPの破れ

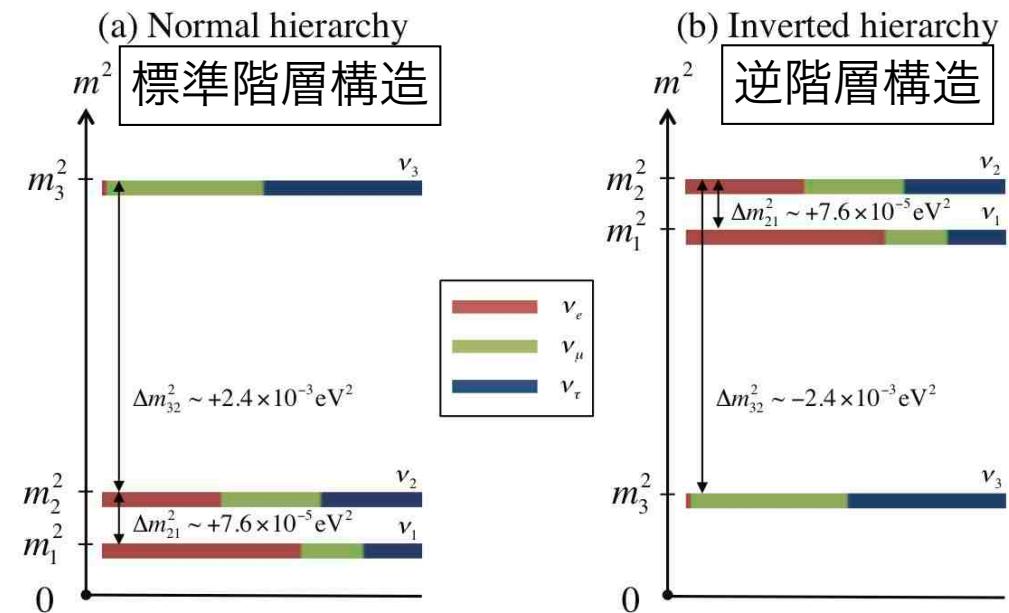
Dirac phase δ

- ▶ ν 質量階層構造

$\Delta m^2_{32} > 0$ or $\Delta m^2_{32} < 0$

- ▶ θ_{23} octant,

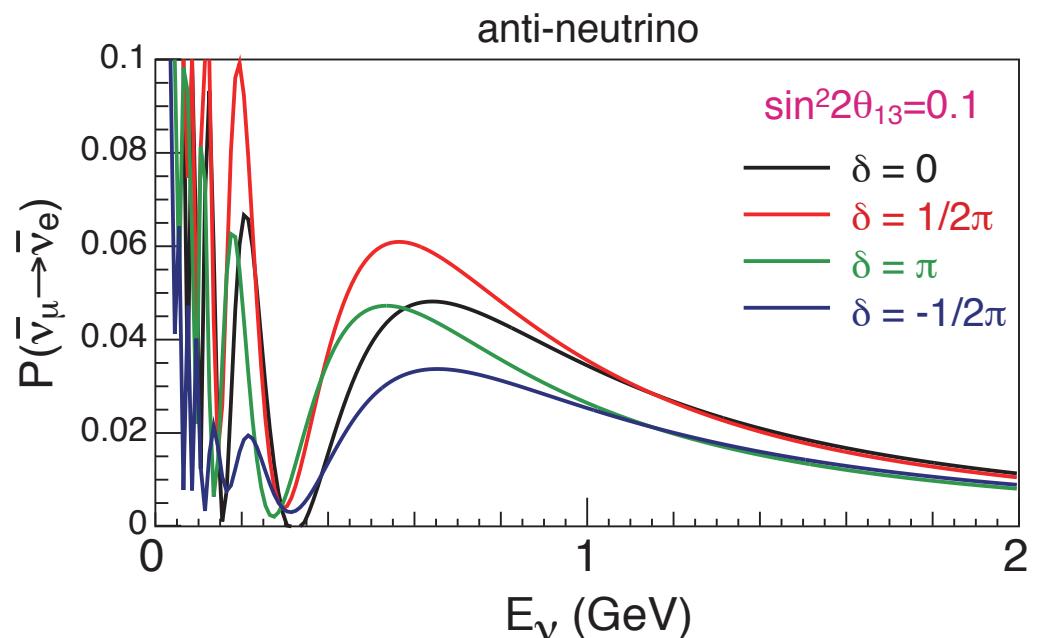
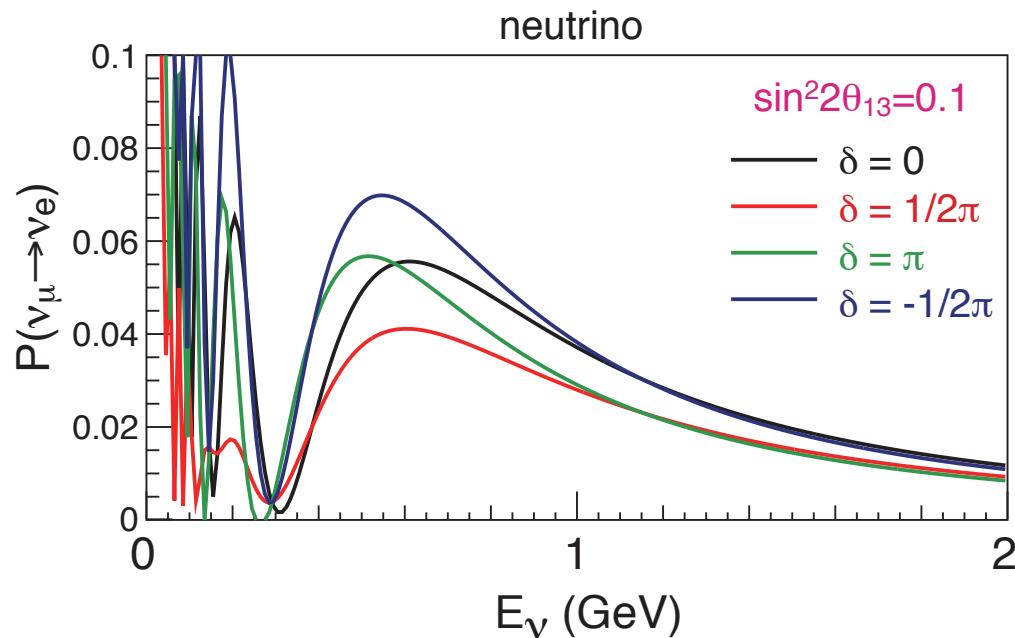
$\theta_{23} < \pi/4$ or $\theta_{23} > \pi/4$



加速器 ν と大気 ν を用いて、振動パラメータの全容解明を目指す。

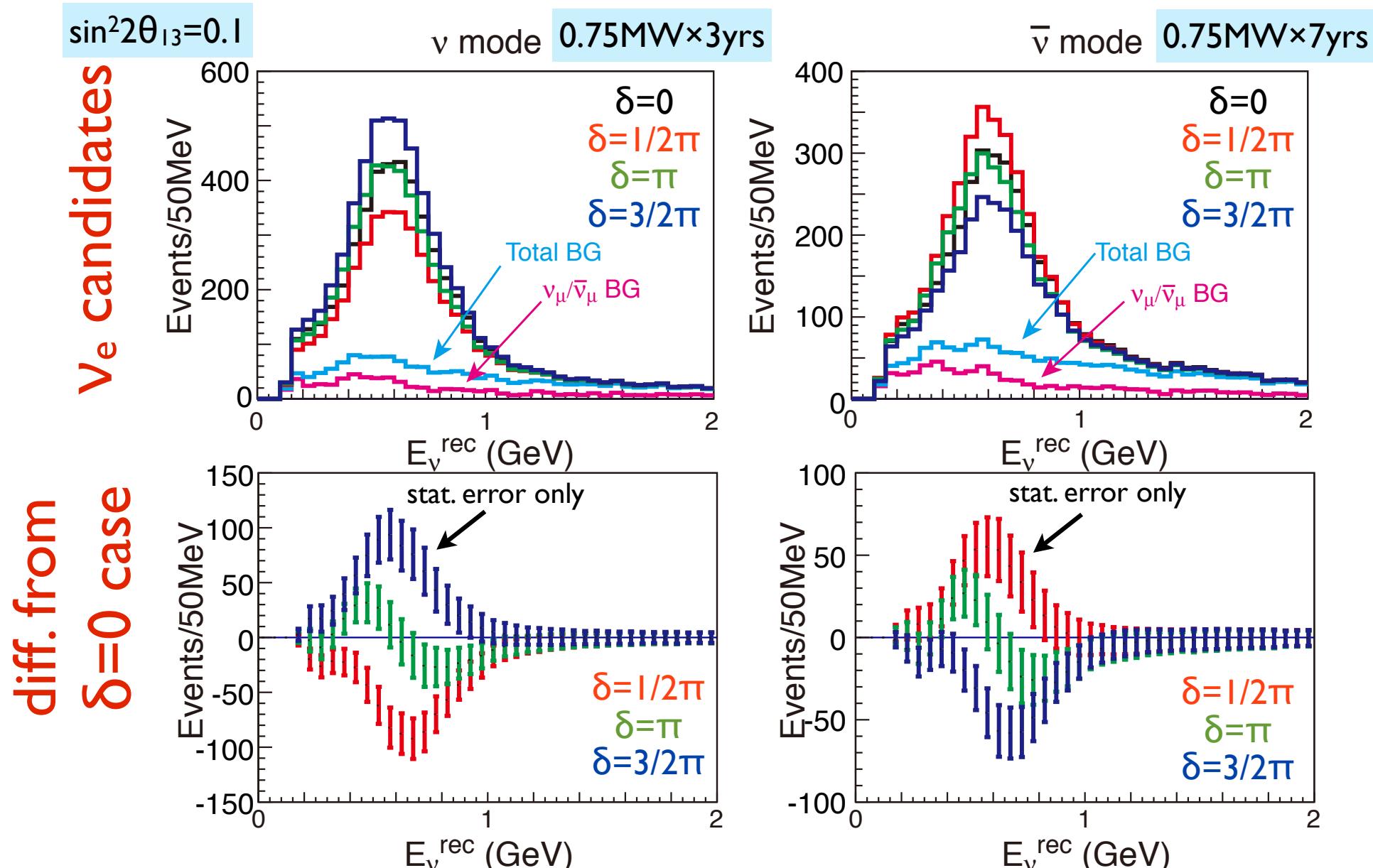
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ probability ($L=295\text{km}$)

Normal hierarchy



- CPV test by comparing $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ and $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$
- sensitive to exotic CPV (non MNS matrix origin)

Expected ν_e CC candidates



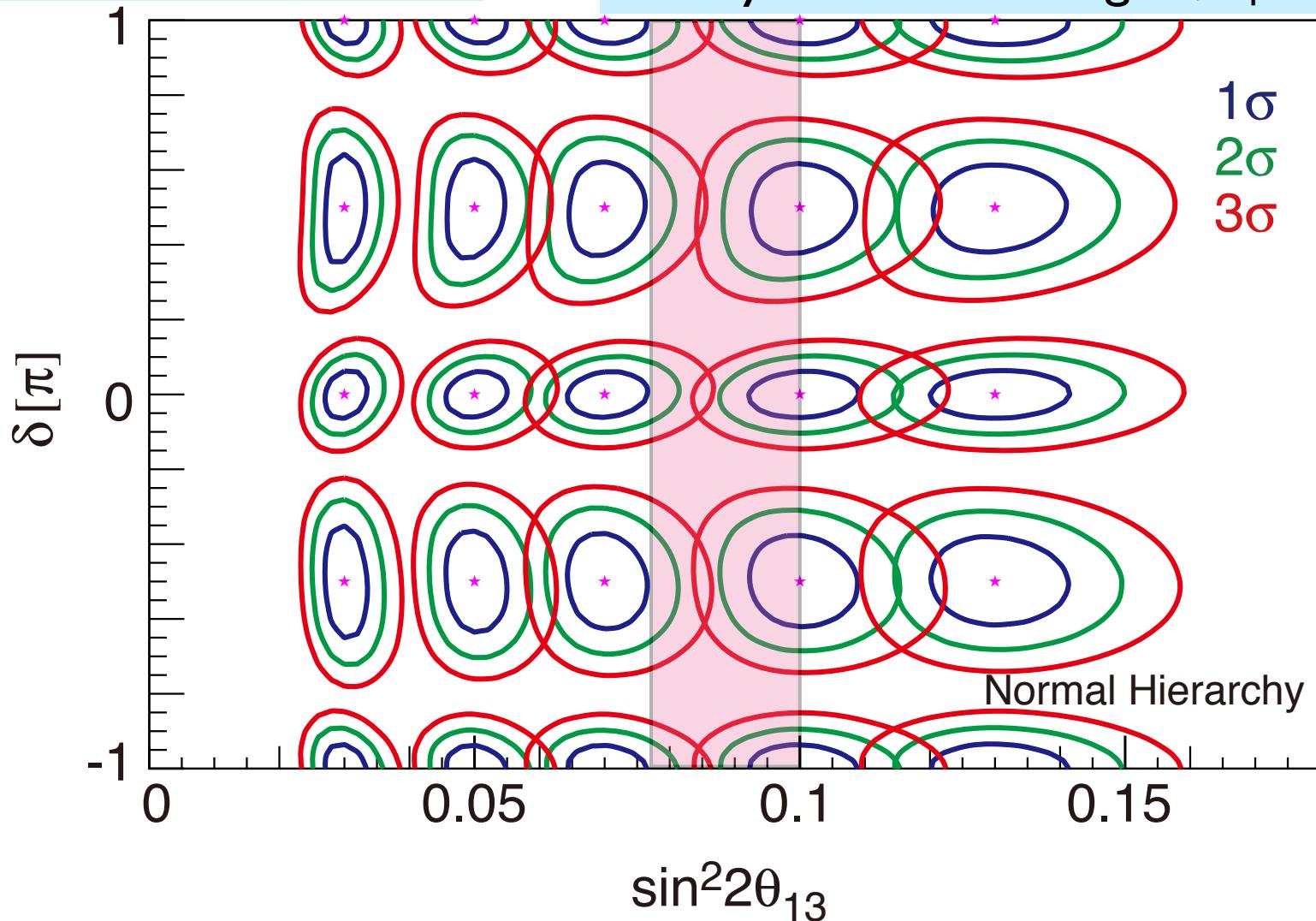
Numbers and shape for CP measurement

Contours

7.5MW · years

Normal mass hierarchy (known)

5% systematics on signal, ν_μ BG, ν_e BG, $\nu/\bar{\nu}$



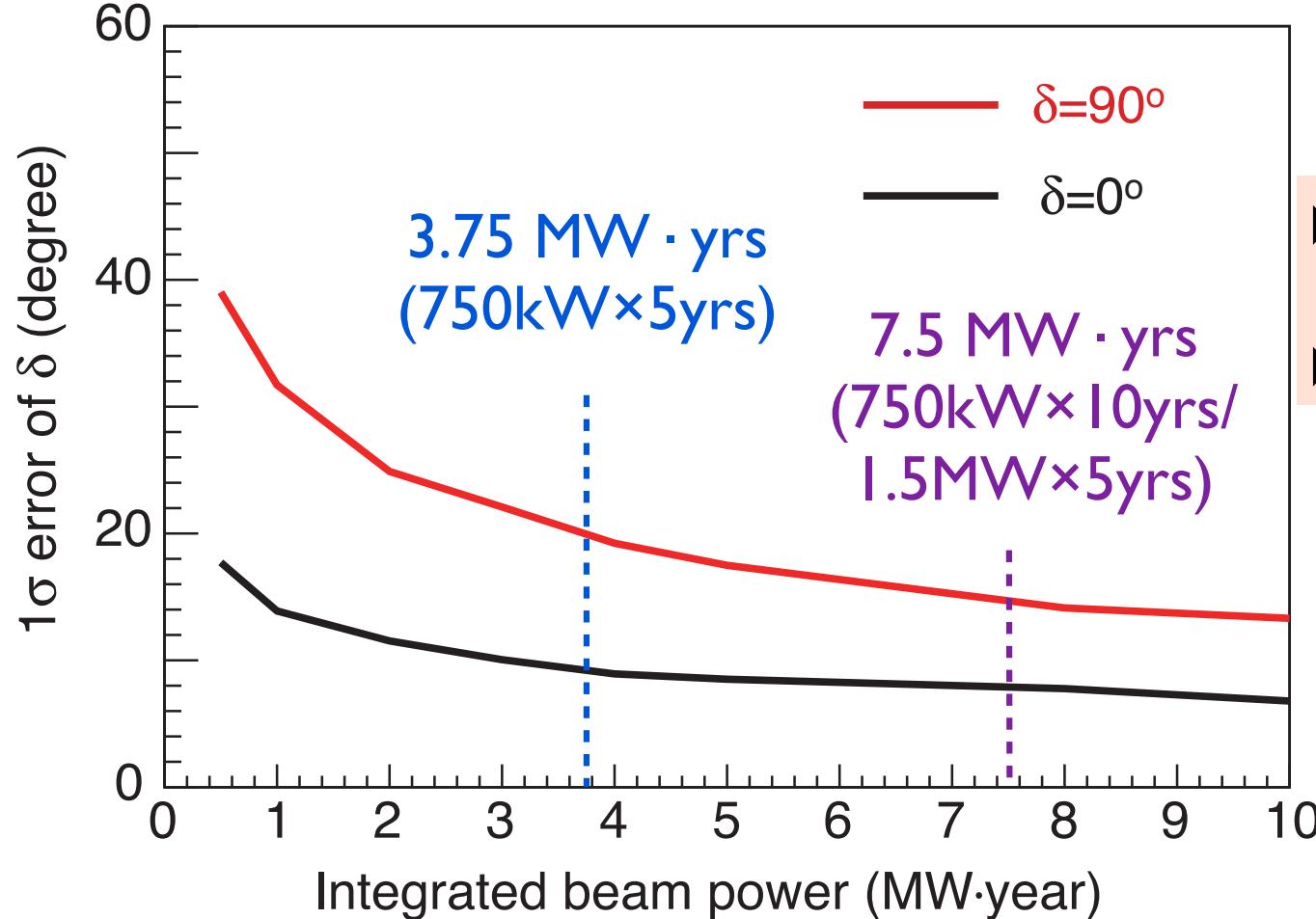
DayaBay 1 σ CL

- Good sensitivity for CPV
- modest dependence on θ_{13} value

δ resolution

Normal mass hierarchy (known)

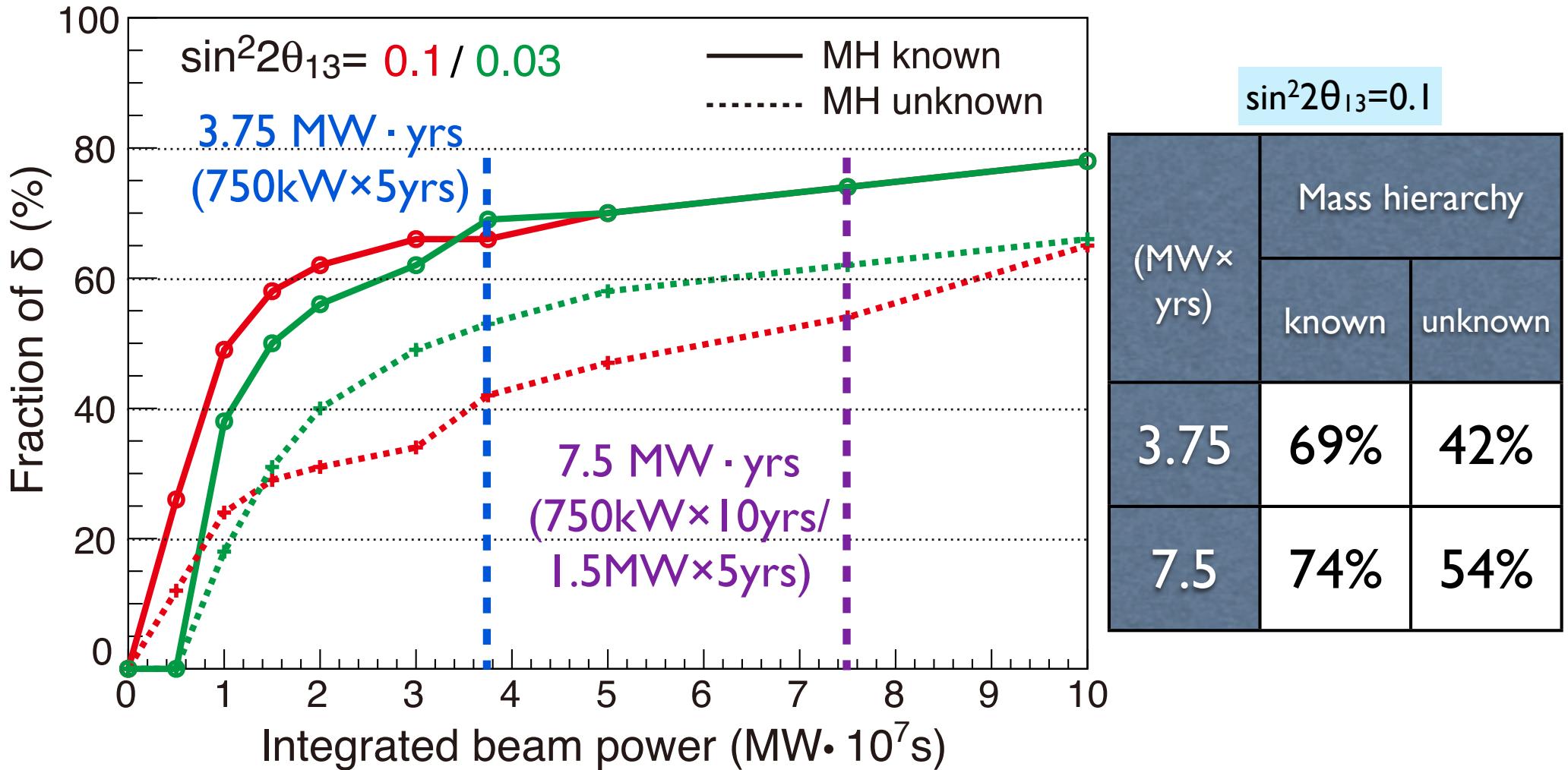
$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$



- δ precision $< 20^\circ$ ($\delta=90^\circ$)
- $< 10^\circ$ ($\delta=0^\circ$)
- modest dependence on θ_{13}

Fraction of δ (%) for CPV discovery

Fraction of δ in % for which expected CPV ($\sin\delta \neq 0$) significance is $>3\sigma$



- Effect of unknown mass hierarchy is limited
- Input from atm ν and other experiments also expected for MH

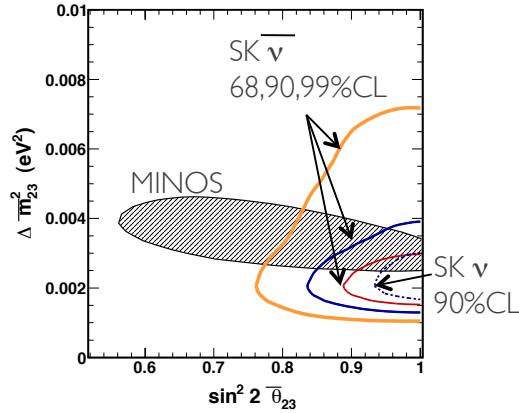
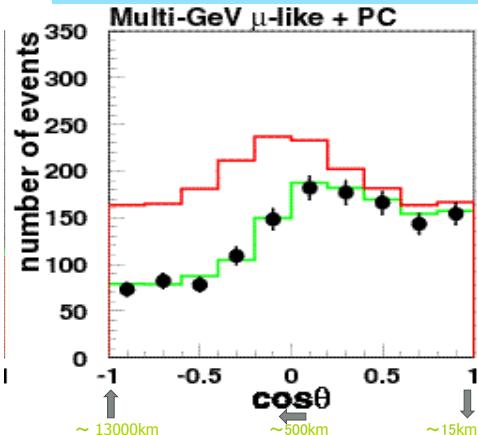
ニュートリノ振動研究

加速器ニュートリノ

+ 大気ニュートリノ

大気ν研究のこれまで

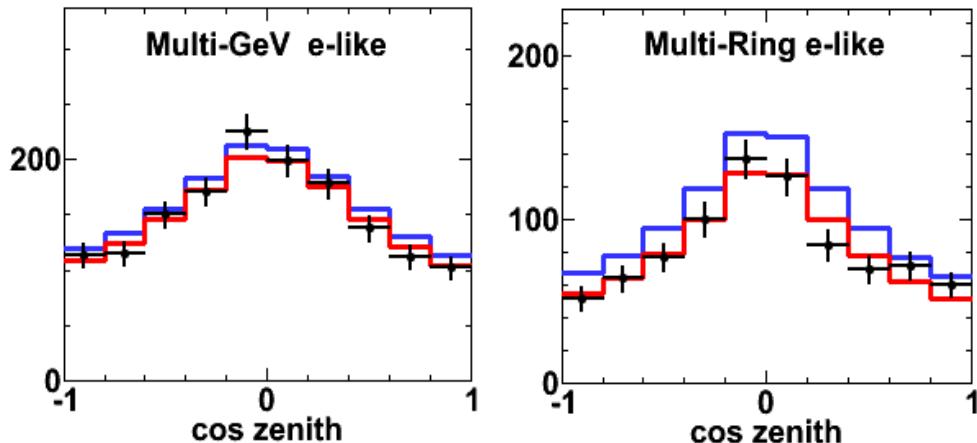
ミューオンニュートリノ



- ▶ ミューオンニュートリノの振動による欠損
 - ▶ $\theta_{23}, \Delta m^2_{32}$ の測定、 τ 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
- ▶ $\sin^2 2 \theta_{13} \sim 0.1 \rightarrow$ 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てきた。

電子ν振動チャンネルによるニュー
トリノ研究

大気電子ニュートリノ振動

NuclPhysB669,255(2003)

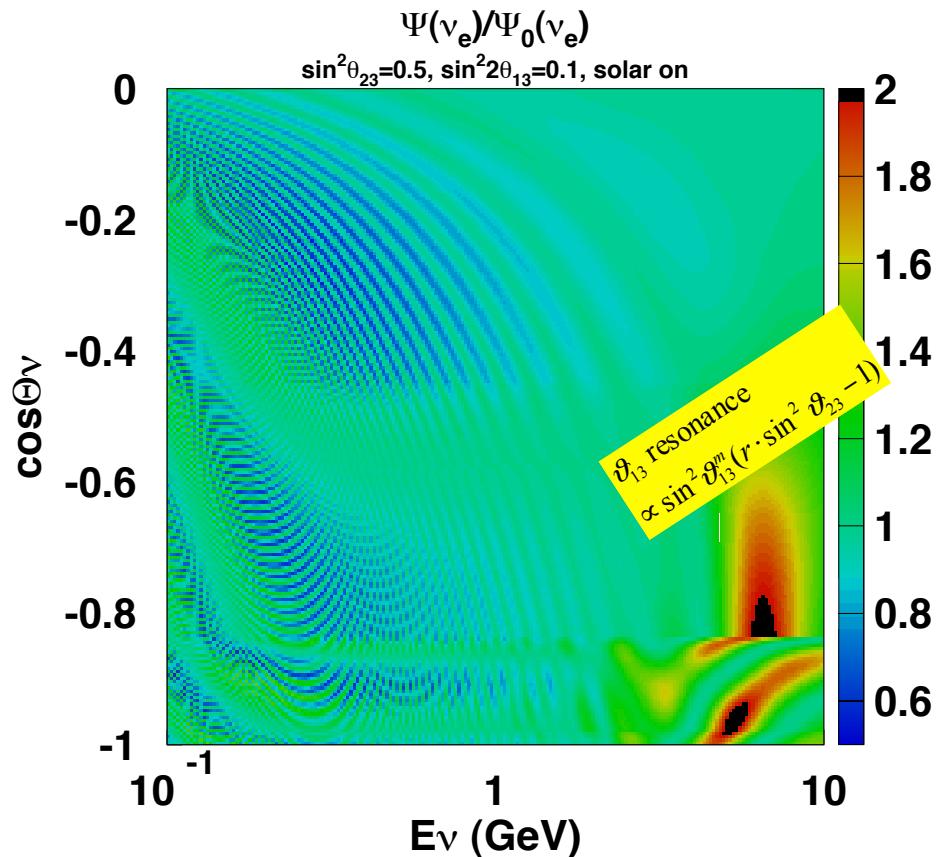
NuclPhysB680,479(2004)

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

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

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

$$\theta_{13} \text{ resonance term}$$



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

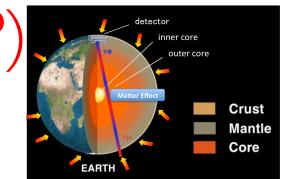
$P_2 = |\mathcal{A}_{e\mu}|^2 : 2\nu$ transition probability $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu\tau}$ in matter

$R_2 = \text{Re}(\mathcal{A}_{ee}^* \mathcal{A}_{e\mu})$

$I_2 = \text{Im}(\mathcal{A}_{ee}^* \mathcal{A}_{e\mu})$

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

$\mathcal{A}_{e\mu}$: transition amplitude of the 2ν system



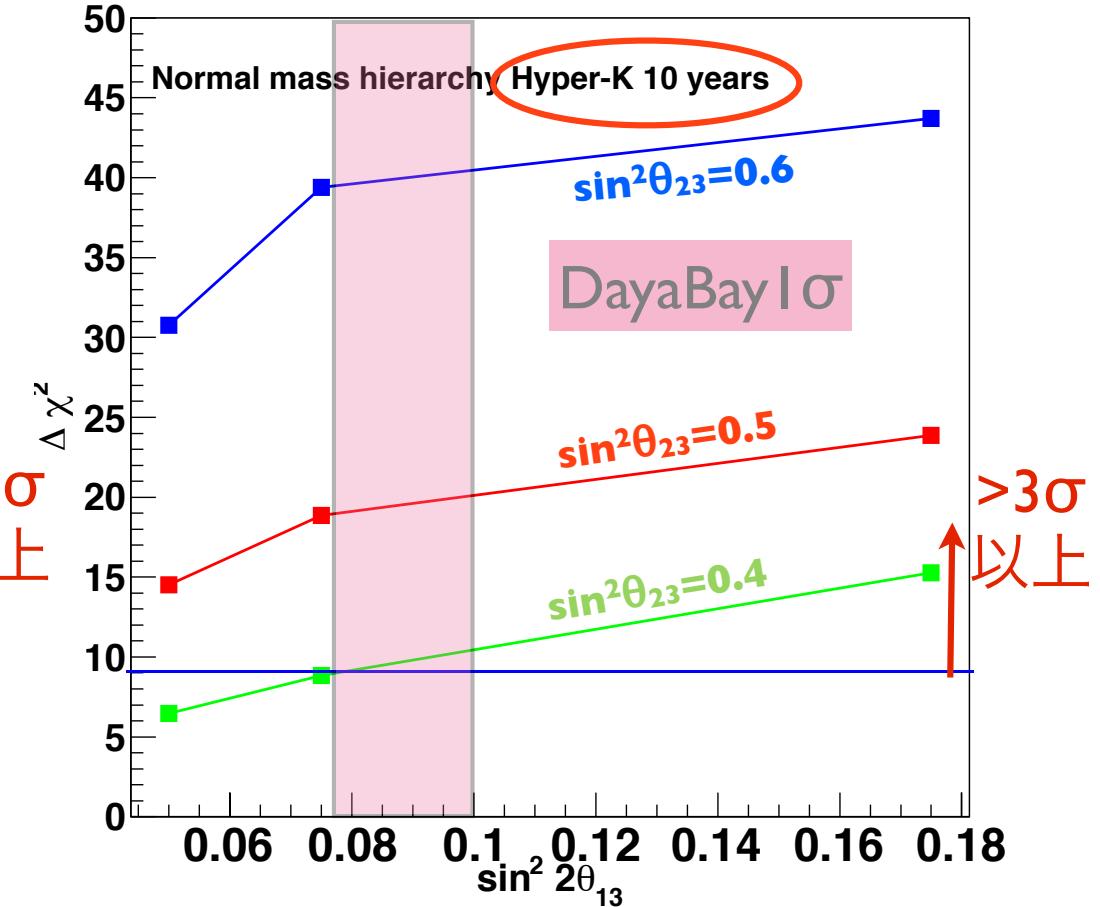
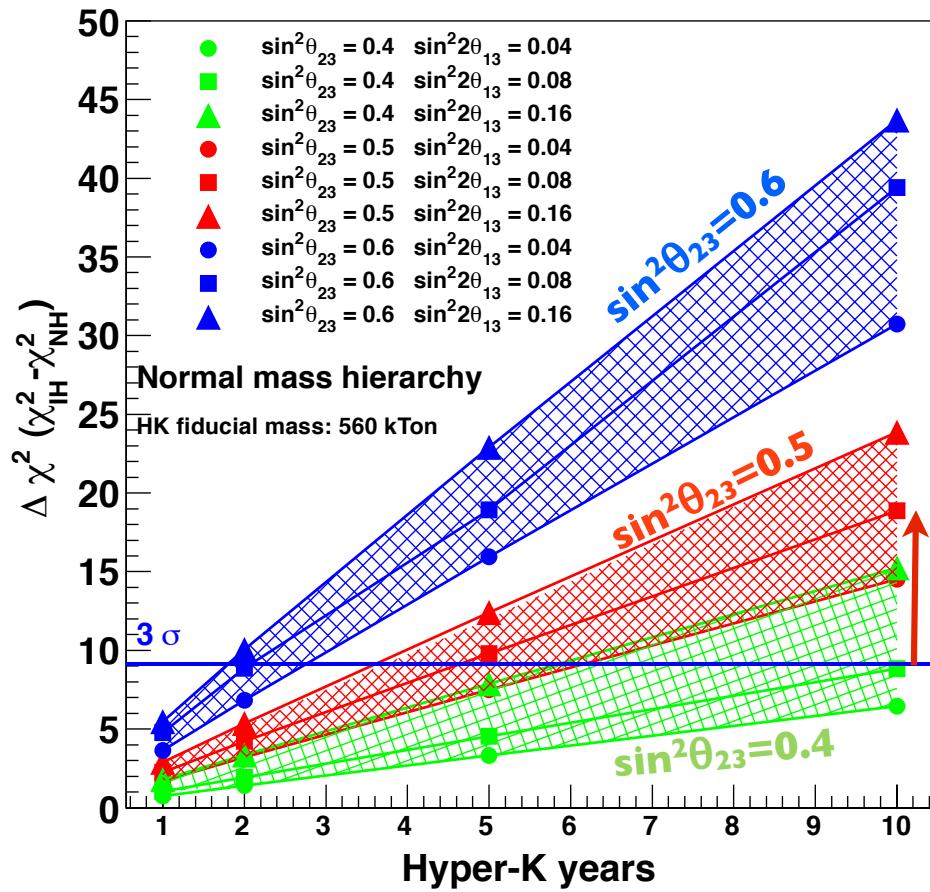
地球の物質効果 (MSW効果) による
 ν_e 出現現象.

- 質量標準階層構造の場合電子ν出現
- 逆階層構造の場合反電子ν出現

大きな θ_{13} 値により、質量階層性の決定の機会ができた.

(θ_{23} octant, CPδの感度も)

ニュートリノの質量階層構造決定

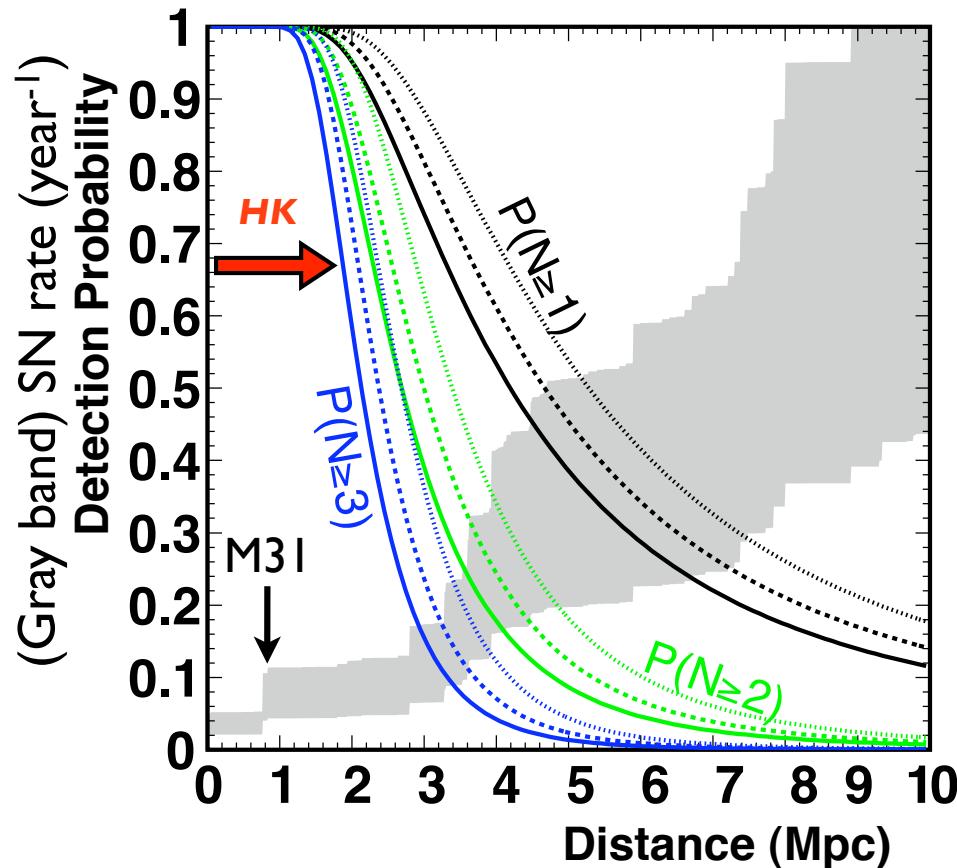


- ▶ 5年程度で3σレベルが期待される。
- ▶ θ_{23} が小さい場合10年程度必要。

宇宙素粒子物理学

- 超新星爆発ニュートリノ
 - ~20万イベント@10kpc (ν バースト)
 - 300~800ev/10年 (SN Relic ν)
- 太陽 ν
 - 200ev/day、短期間での時間変動検証
 - 地球の物質効果 (昼夜変化)
- Indirect WIMP search
 - $\sigma_{\text{SpinDep.}} < 10^{-39 \sim -40} \text{cm}^2$ (SK 90年相当)
- Solar Flare ν 探索
- 地球コアのニュートリノトモグラフィー

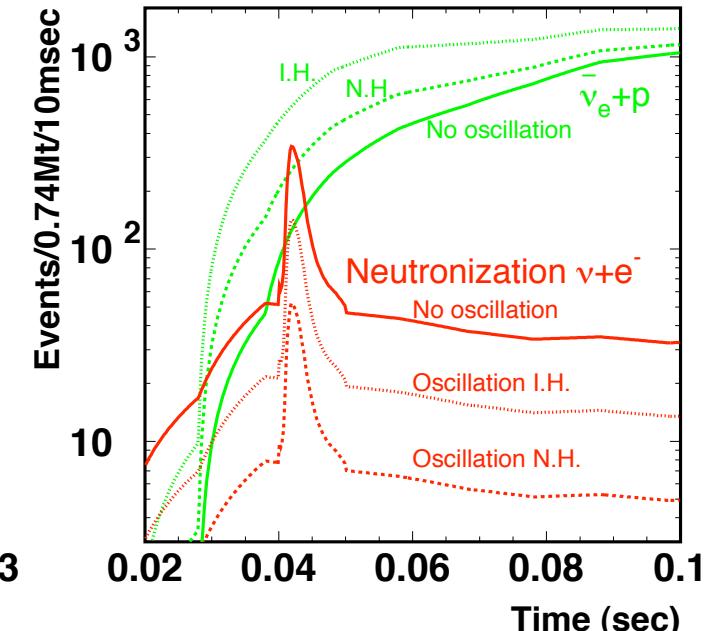
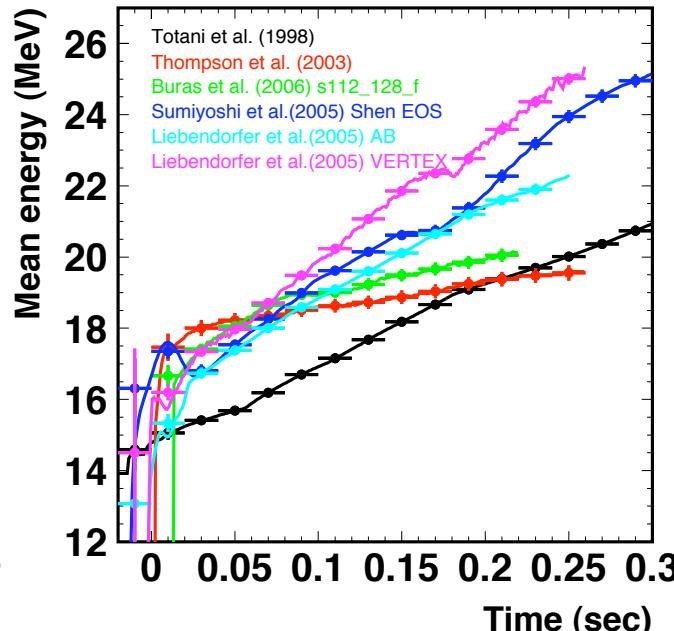
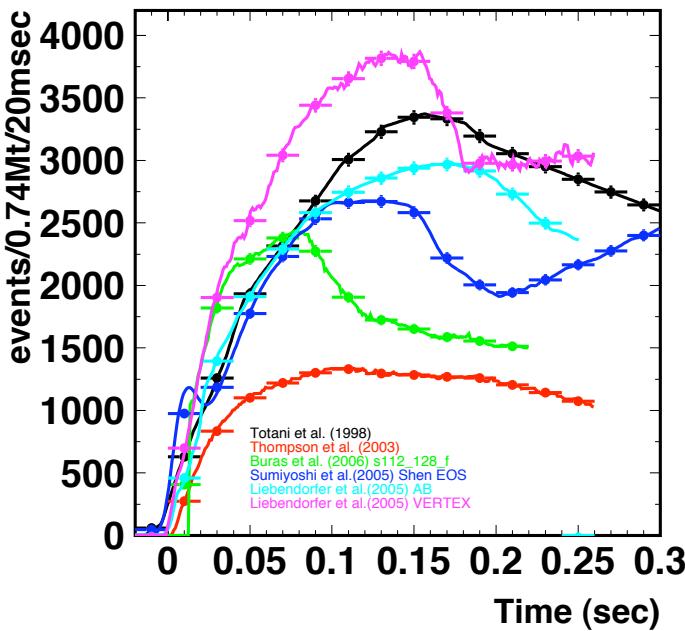
Supernova Observatory



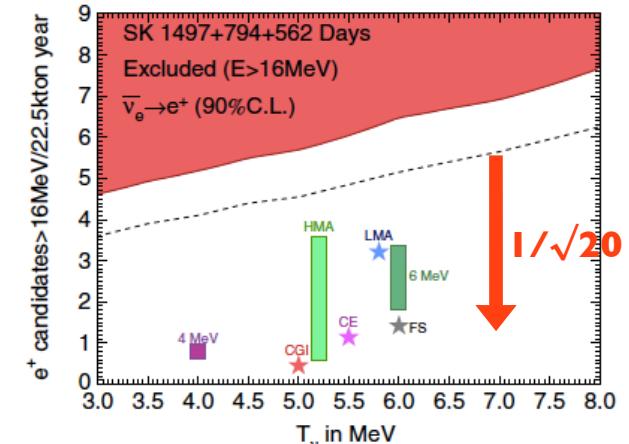
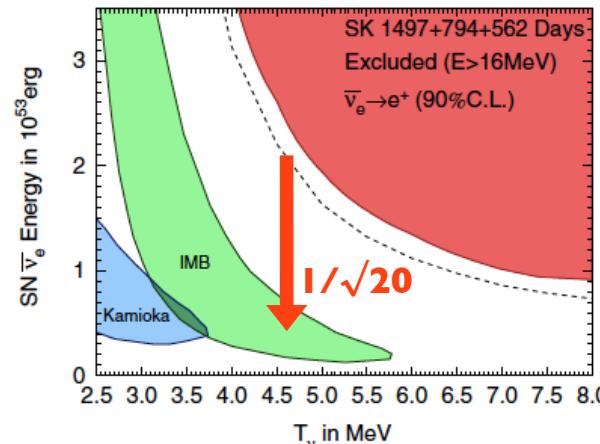
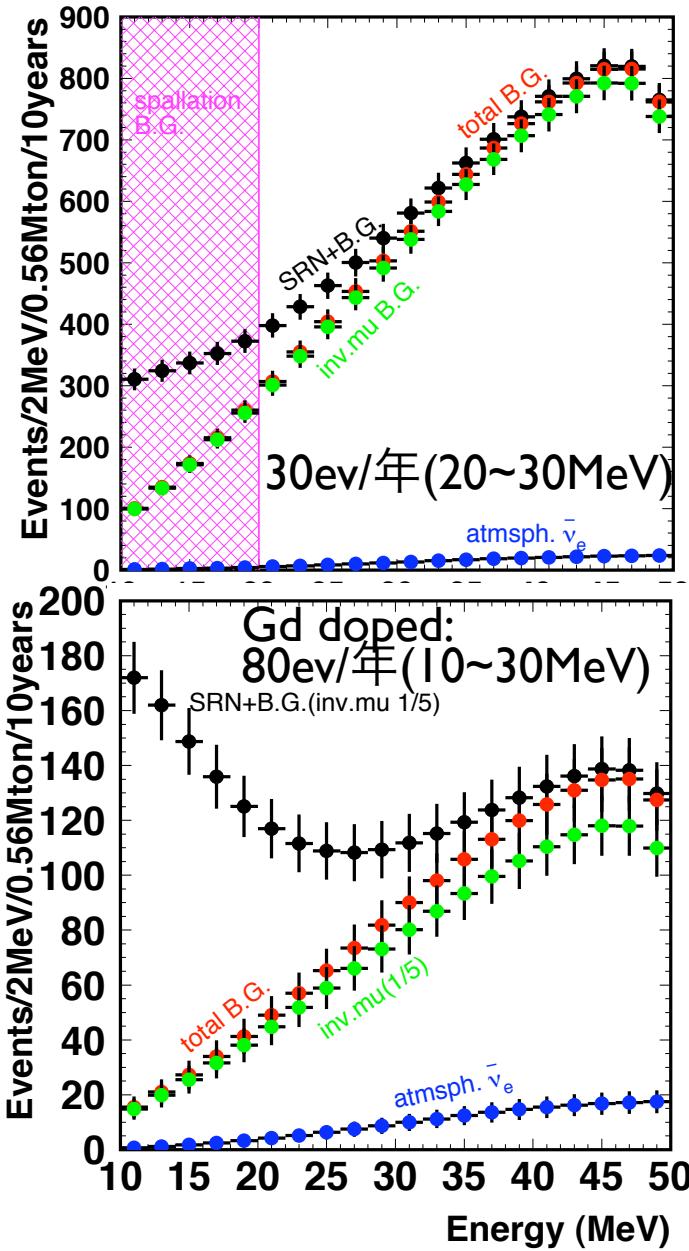
- 30~50v's @ M3I
 - 10~20年に一度
- 20万v @ Our Galaxy
 - 20~50年に一度

ν burst @ Milky way (10kpc)

- 20万 ν による詳細な情報.
 - 時刻毎の(ν luminosity, temperature, flavor)
 - 星崩壊過程（モデル）の解明
 - 開始時刻決定精度~1m秒→光、重力波との比較
 - ν の質量 (ν TOF) →0.3~1.3eV/c²
 - ν 質量階層性の解明



SN Relic ν (diffuse ν)

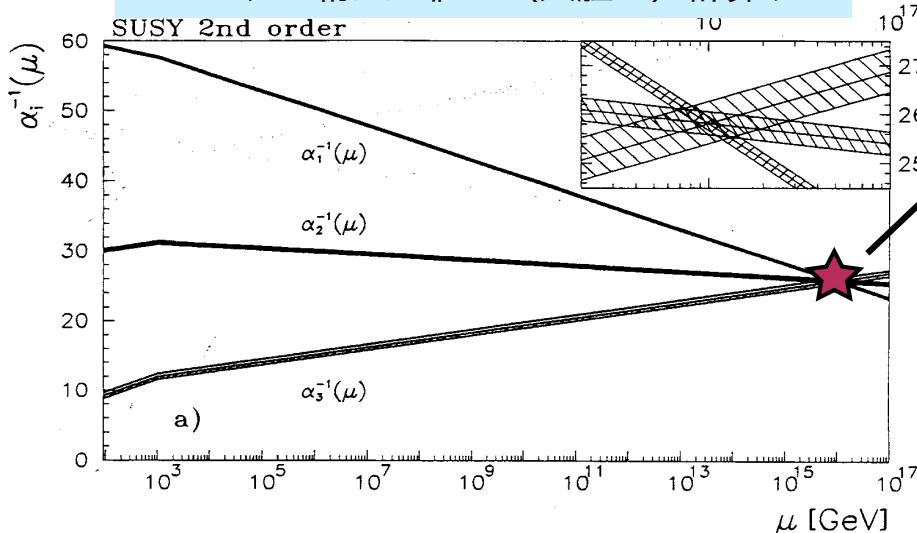


- SKの体積倍で決まるところと感度は $I/\sqrt{20}$.
- spallation BG, 大気νBGはstudy中.
- Gd optionはSKでstudy中.
- SN burstと同様、モデルに制限を付ける.

核子崩壞

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:

▶ $O(10^{16})\text{GeV}$ の物理に感度を持つ実験

目指すゴール:

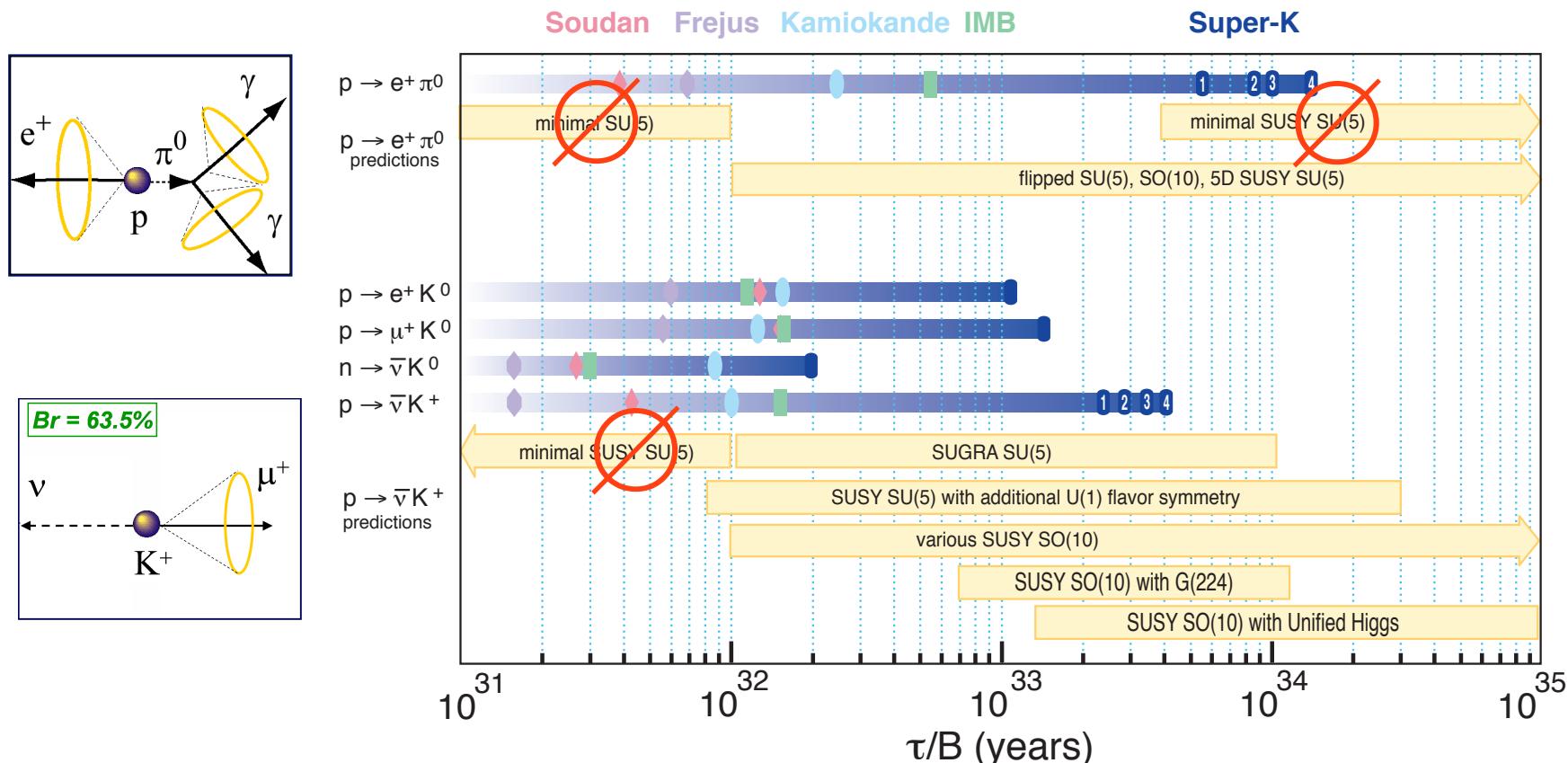
▶ 大統一の直接的証拠をとらえる

▶ 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合わせ

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)
- ▶ $\tau(p \rightarrow \bar{\nu} K^+) > 4.0 \times 10^{33}$ 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る。
 - ▶ SUSY模型に対する制限を与えてる (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

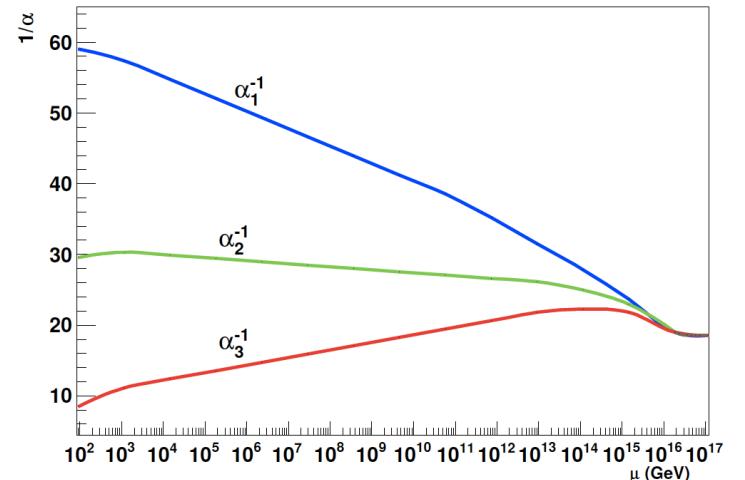
Babu et al. JHEP06(2010)084

▶ 特徴

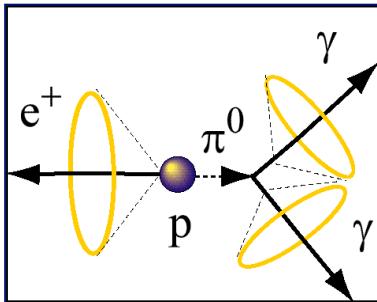
- ▶ 低次元Higgs: {45+16+16*+10}
- ▶ 軽いヒッグス質量安定 (Triplet-Doublet問題回避)
- ▶ クォーク・レプトンの質量と混合角を説明
 - ▶ 極微ニュートリノ質量←シーソー機構から
 - ▶ 混合角←Q4フレーバー対称性から

▶ 核子崩壊レート

- ▶ $\Gamma_{d=6}^{-1}(p \rightarrow e^+ \pi^0) \lesssim 5.3 \times 10^{34} \text{ yrs}$
- ▶ $\Gamma^{-1}(p \rightarrow \bar{\nu} K^+) \lesssim (3.1 \times 10^{34} \text{ yrs}) \times \left(\frac{m_{\tilde{q}}}{1.5 \text{ TeV}}\right)^4 \left(\frac{130 \text{ GeV}}{m_{\tilde{W}}}\right)^2 (3/\tan \beta)^2$

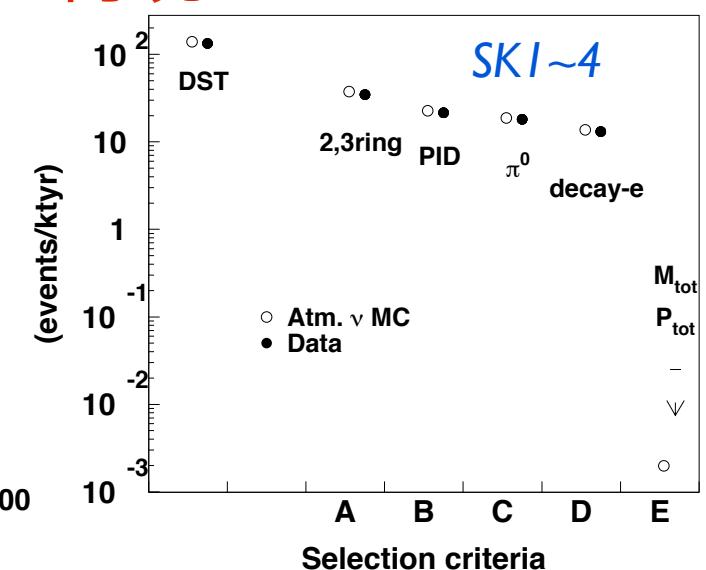
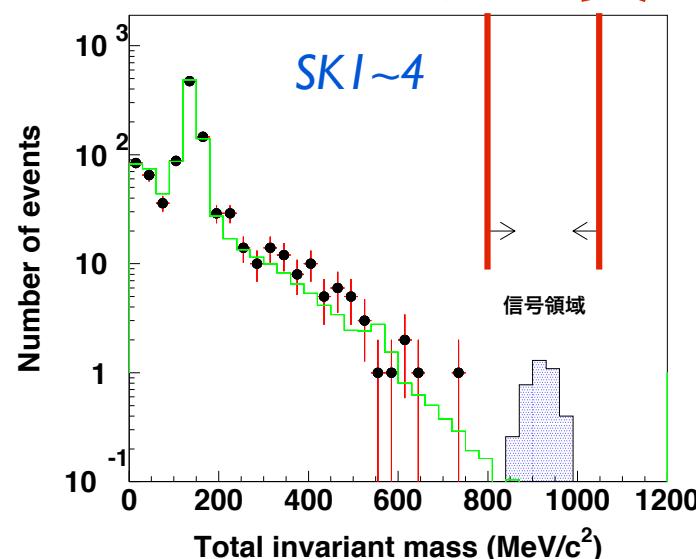
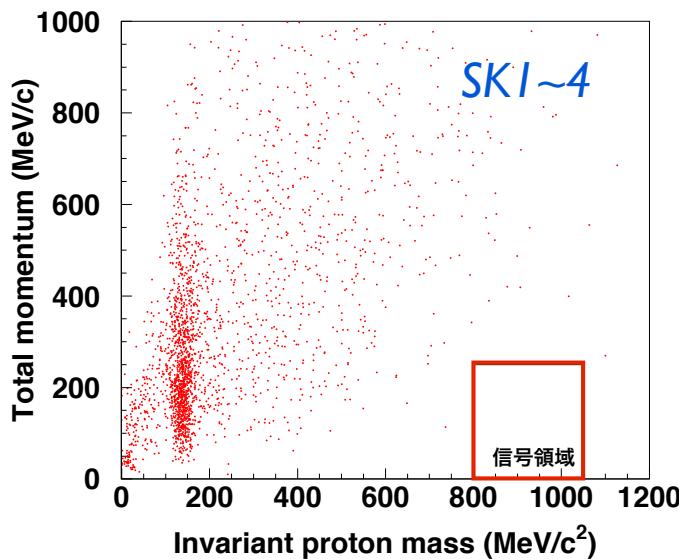


どちらもハイパーカミオカンデで
検証可能。

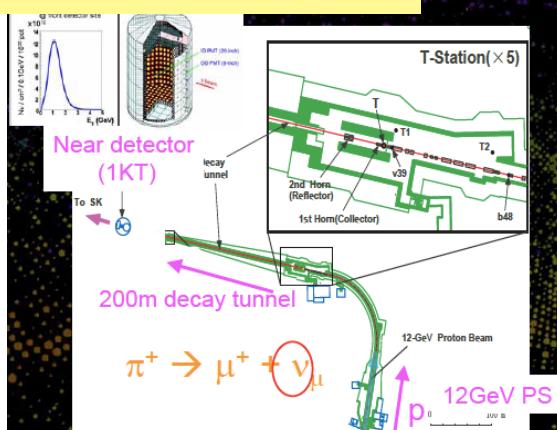


$p \rightarrow e^+ + \pi^0$ searches

- 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
 - $800 < M_{\text{proton}} < 1050 \text{ MeV}/c^2$
 $P_{\text{total}} < 250 \text{ MeV}/c$



PRD77:032003, 2008



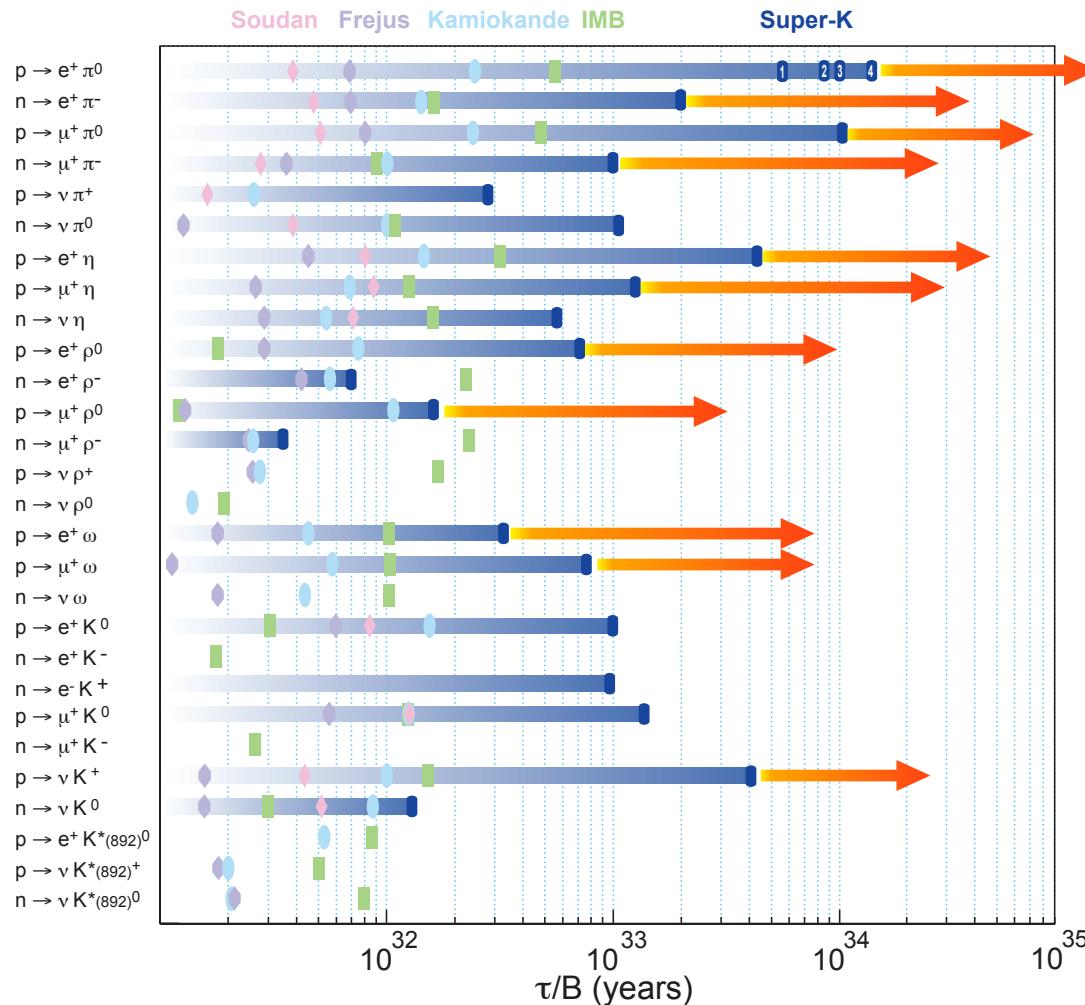
- detection efficiency = 45%
- atmospheric v BG = $2.1 \pm 0.3(\text{stat.}) \pm 0.8(\text{syst.}) (\text{Mton} \times \text{years})^{-1}$
- $T_{\text{proton}}/\text{Br} > 1.3 \times 10^{34} \text{ years} @ 90\% \text{CL}$

- ▶ 加速器ニュートリノ (K2K) によるBGの検証
- ▶ $\text{BG} = 1.63 + 0.42/-0.33(\text{stat.}) + 0.45/-0.51(\text{syst.}) (\text{Mt} \times \text{yrs})^{-1} (\text{Ev} < 3\text{GeV})$
- ▶ 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 branching 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？

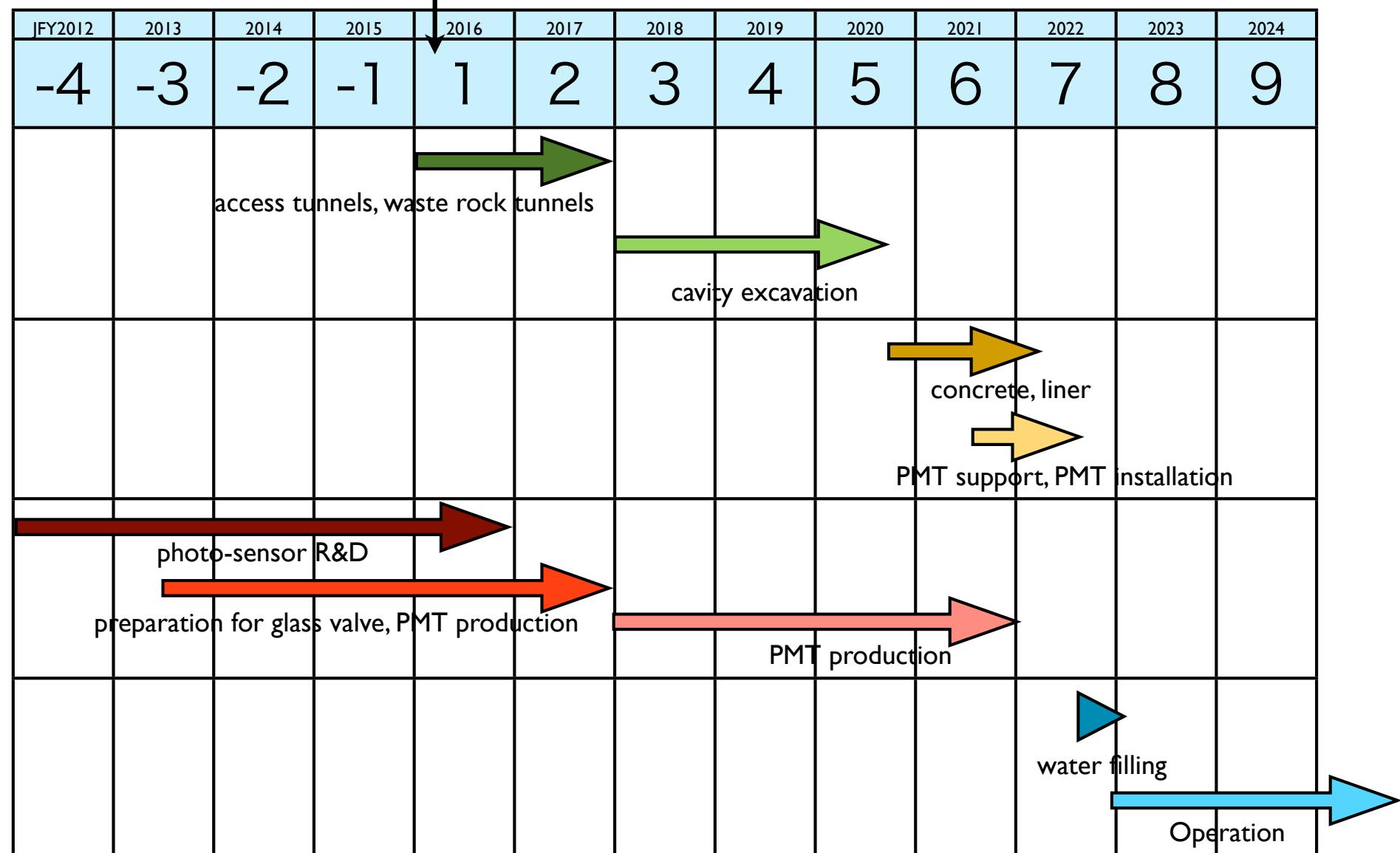


Hyper-K sensitivities

- ▶ $p \rightarrow e^+ + \pi^0$
 - ▶ $\tau_{\text{proton}}/\text{Br} > 1.3 \times 10^{35}$ years @90%CL
 - ▶ 5Mton×years (9 Hyper-K years)
- ▶ $p, n \rightarrow (e^+, \mu^+) + (\pi, \rho, \omega, \eta)$
 - ▶ $\mathcal{O}(10^{34 \sim 35})$ years
- ▶ SUSY favored $p \rightarrow v + K^+$
 - ▶ 2.4×10^{34} years
- ▶ K^0 modes, $v \pi^0, v \pi^+$ 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 ($|\Delta B|=2$)
 - ▶ $pp \rightarrow XX\dots, nn \rightarrow XX\dots$

Schedule

Construction start



assuming budget being approved from JPY2016

Letter of Intent:

The Hyper-Kamiokande Experiment

— Detector Design and Physics Potential —

K. Abe,^{12, 14} T. Abe,¹⁰ H. Aihara,^{10, 14} Y. Fukuda,⁵ Y. Hayato,^{12, 14} K. Huang,⁴
A. K. Ichikawa,⁴ M. Ikeda,⁴ K. Inoue,^{8, 14} H. Ishino,⁷ Y. Itow,⁶ T. Kajita,^{13, 14} J. Kameda,^{12, 14}
Y. Kishimoto,^{12, 14} M. Koga,^{8, 14} Y. Koshio,^{12, 14} K. P. Lee,¹³ A. Minamino,⁴ M. Miura,^{12, 14}
S. Moriyama,^{12, 14} M. Nakahata,^{12, 14} K. Nakamura,^{2, 14} T. Nakaya,^{4, 14} S. Nakayama,^{12, 14}
K. Nishijima,⁹ Y. Nishimura,¹² Y. Obayashi,^{12, 14} K. Okumura,¹³ M. Sakuda,⁷ H. Sekiya,^{12, 14}
M. Shiozawa,^{12, 14, *} A. T. Suzuki,³ Y. Suzuki,^{12, 14} A. Takeda,^{12, 14} Y. Takeuchi,^{3, 14}
H. K. M. Tanaka,¹¹ S. Tasaka,¹ T. Tomura,¹² M. R. Vagins,¹⁴ J. Wang,¹⁰ and M. Yokoyama^{10, 14}

(Hyper-Kamiokande working group)

¹*Gifu University, Department of Physics, Gifu, Gifu 501-1193, Japan*

²*High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki, Japan*

³*Kobe University, Department of Physics, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan*

⁴*Kyoto University, Department of Physics, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan*

⁵*Miyagi University of Education, Department of Physics, Sendai, Miyagi 980-0845, Japan*

Open Meeting for the Hyper-Kamiokande project, Kashiwa city, JAPAN (Indico test) (21-23 August 2012)

リーダー [hyper-kamiokande](#)

アップル Google Google マップ YouTube Wikipedia ニュース (756) お役立ち

iCal export More | [Restricted](#) Japan English Login

Open Meeting for the Hyper-Kamiokande project, Kashiwa city, JAPAN (Indico test)

21-23 August 2012 Kavli IPMU (Kashiwa, Japan)

オープンミーティング：関心のある方の参加歓迎。

レジストレーション締め切り7月31日。

Visit http://db.ipmu.jp/seminar/?conference_id=66 for more info.

Overview

- Important Dates
- Meeting Program
- Call for Abstracts
 - View my abstracts
 - Submit a new abstract
- Contribution List
- Registration
 - Registration Form
- List of registrants
- Access
- Accommodation

Overview

We will hold the International Open Working Group Meeting for the Hyper-Kamiokande project. The Hyper-K is the flagship experiment in the next decade for neutrino oscillation and nucleon decays that we are developing.

The goal of the meeting is to discuss the detector design and necessary R&D items covering

- cavern excavation
- tank liner material and its design
- photo-sensors and their support structure
- DAQ electronics and computers
- calibration system
- water purification system
- software development, and so on.

Physics potentials of Hyper-K are also within the scope of the meeting. Workshop participants are expected to guide the discussions to achieve optimal detector design and maximum physics potentials. Participants are encouraged to submit abstracts for their talks to present their individual interests and possible future contributions to the project.

Moreover, we'd like to start discussion to form an international Hyper-K working group that could become a seed for a formal Hyper-K collaboration in future. We expect that those who are interested in joining the project will show up in this meeting.

This meeting will be open for all interested scientists and community members. However, prior registration is required to participate the meeting.

We are looking forward to seeing you in Kashiwa,

まとめ

- Hyper-Kamiokandeの豊富な物理.
 - レプトンセクターのCPの破れの発見.
 - 質量階層構造の決定.
 - ~10倍良い核子崩壊探索感度. $\Gamma^{-1} \sim O(10^{34\sim 35})$ 年.
 - 超新星ν他様々な天体ニュートリノ.
- HKの概念設計は完了. デザイン最適化、開発(HPD等) 進行中.
- 早期実現を目指す.