



ハイパーカミオカンデ 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 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構

2016年3月20日、

日本物理学会「2015年ノーベル物理学賞ニュートリノ振動の発見と将来への展望」シンポジウム

ハイパーカミオカンデグループ会議@柏、2016年2月 1

Hyper-Kamiokande

ハイパーカミオカンデ

超大型水チェレンコフ観測装置で挑戦する素粒子の統一
理論と宇宙の進化史の謎

スーパーカミオカンデ（SK）を大きさ・
光感度の双方で凌駕し、全ての物理感度を
向上させる。

- 大強度陽子加速器ニュートリノビーム
- 大気・太陽・超新星爆発ニュートリノ
- 陽子崩壊の探索

超大型地下水槽

- 26万トン×2基
- 有効体積18万トン×2基
- 2026年度の1タンク目の実現を目指す。その後2タンク目の追加。

スーパーカミオカンデ

39mΦ
×40mH

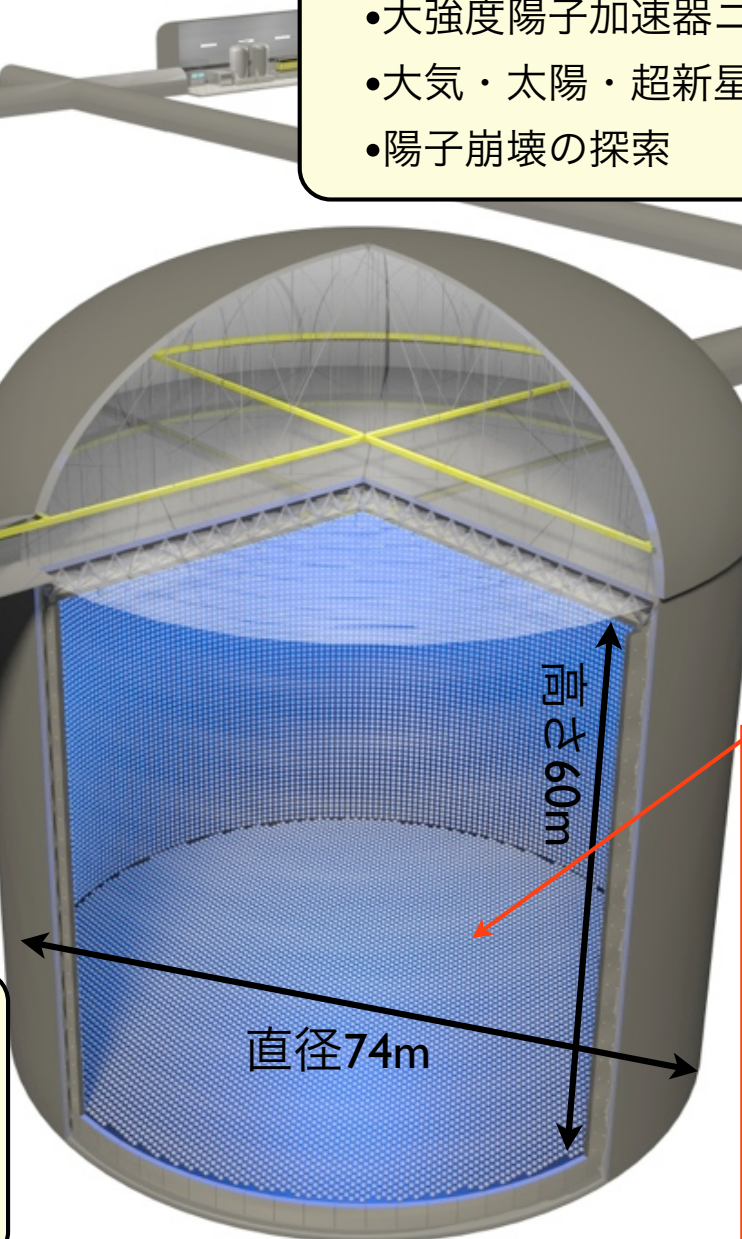


74mΦ×60mH

74mΦ×60mH

有効体積~20倍

ハイパーカミオカンデ

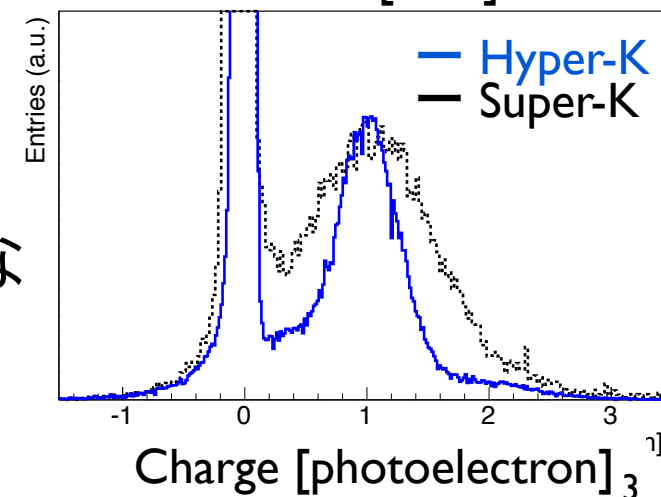
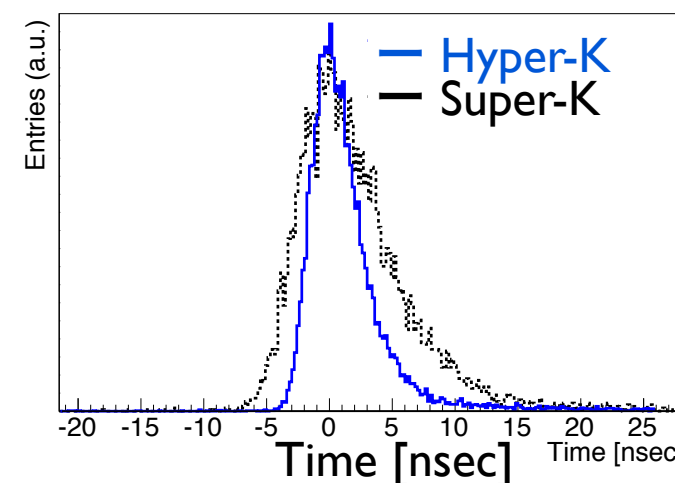
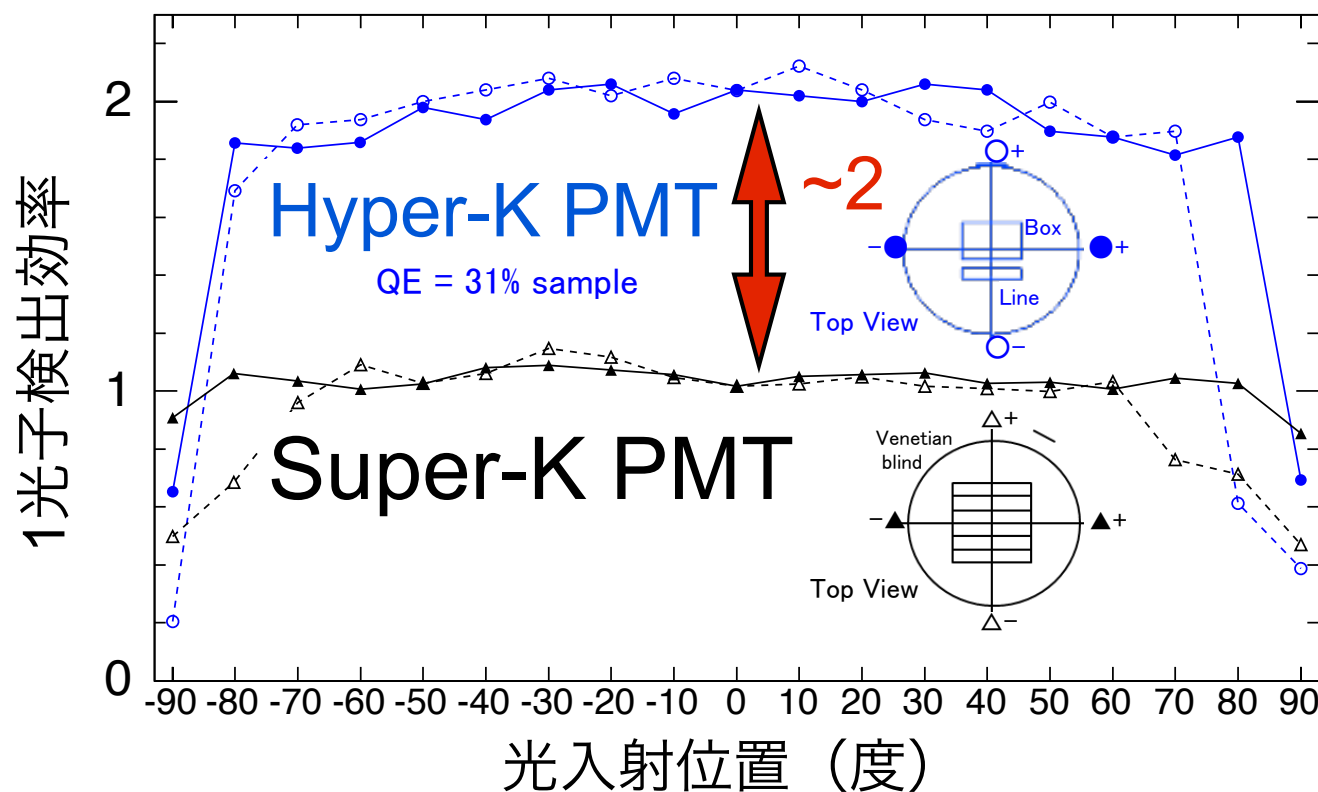


超高感度光センサー

- 光子感度SKの2倍
- 時間精度SKの2倍
- 40,000本×2基



新型光センサー



- 1光子感度 2 倍、時間精度 2 倍を達成
- 耐水压性能も ~ 2 倍 (>100m相当)
- 検出器の性能・物理感度に非常に大きなインパクト→検出器デザインの最適化

なぜニュートリノ研究？

- **その性質は標準理論を超える物理の証拠**

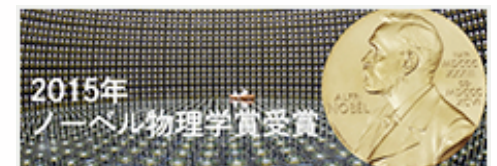
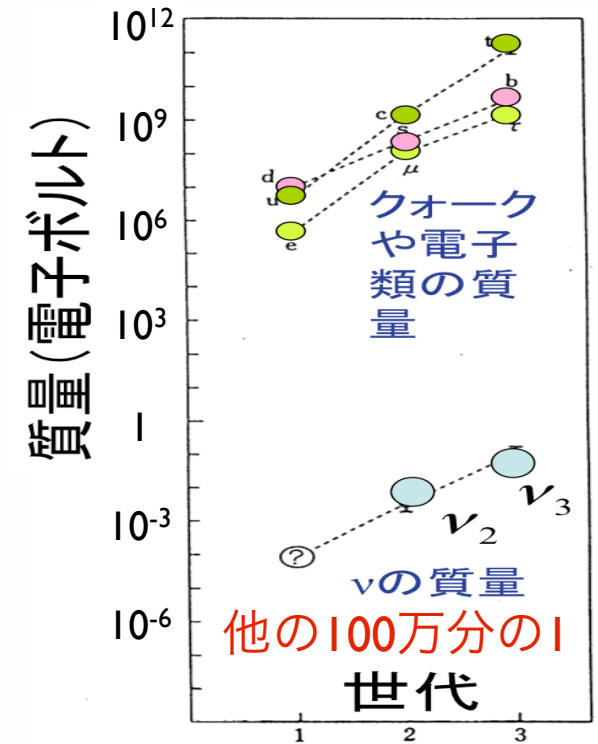
- **極端に軽い質量** → 標準模型ヒッグス以外の未知の質量生成機構の存在を示す。
- **大きな世代間混合** → 未知の対称性。クォーク混合と統一的な理解が必要。

- **振動全容の解明へ（世界共通の認識）、ニュートリノ振動を発見した日本が世界を主導できる分野**

- **CP非保存 δ_{CP} 、三世代質量の順番の決定、 θ_{23} 他の精密測定**
- δ_{CP} は物質優勢宇宙誕生の理解の鍵

- **ニュートリノは天体を見るプローブ**

- 光では見えない太陽内部、超新星爆発内部など



Copyright © Nobel Media AB 2015
Photo: Pi Frisk

新たな課題

ニュートリノ

レプトン (ν) のCP対称性の破れ？

我々が知る唯一のCP非保存

=クォークの小林益川フェーズ

物質優勢宇宙を説明するには他のCP非保存が必要

→ **レプトンセクターでのCPVの探索**

- Dirac CP phaseだけで物質優勢宇宙を説明する可能性

S. Pascoli et al., PRD 75, 083511 (2007) PDG review 2014

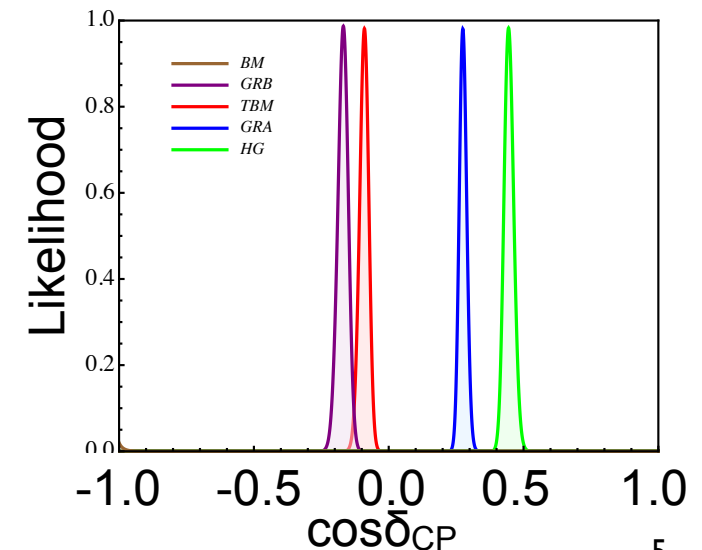
$$|\sin\delta_{CP}| > \sim 0.6$$

- 未知の対称性からの δ_{CP} の予言

例えば右図 (Petcov 1504.02402v1)

「ニュートリノのCPの破れ

(δ_{CP})」の測定が緊急課題

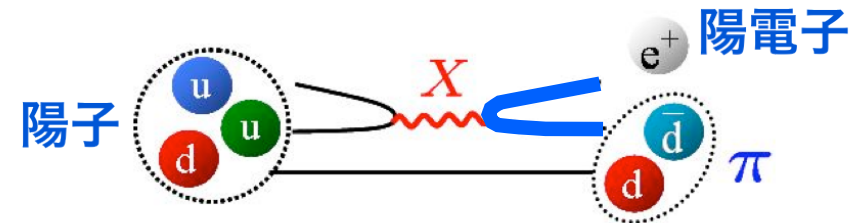


核子崩壊探索

● 次世代の素粒子理論（大統一理論）を検証する

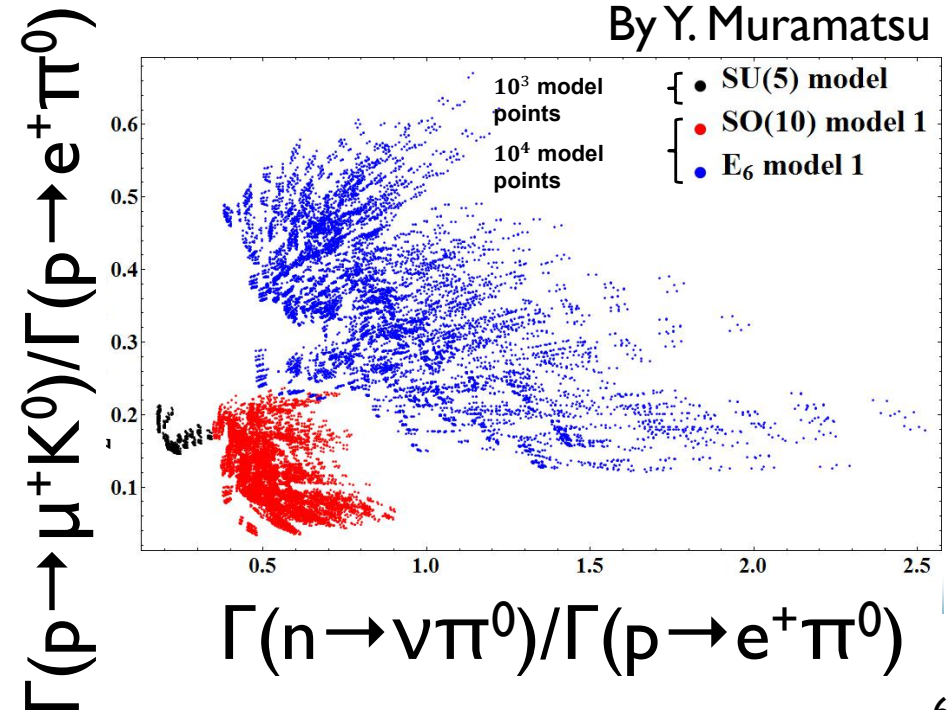
- レプトン・クォーク間の直接遷移を見る→大統一の直接検証
- 衝突型加速器実験で代用できない
- $p \rightarrow e^+ \pi^0$: 多くのモデルで支配的な崩壊モード
- 大型水チェレンコフ実験技術が日本にはある！
- 様々な崩壊モードの探索
 - 大統一の根幹（エネルギースケール、ゲージ対称性）を引き出す可能性

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



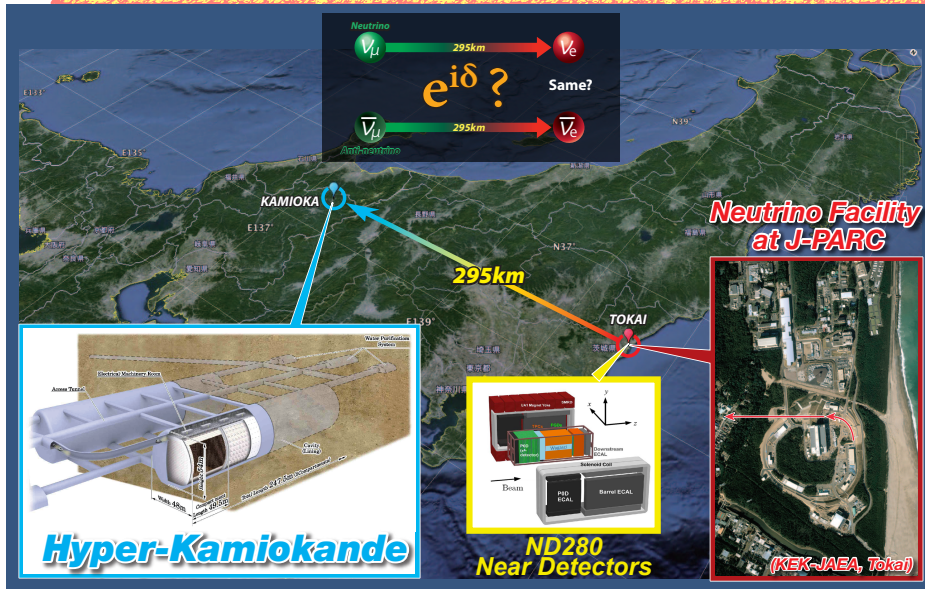
$$\Gamma(p \rightarrow e^+ \pi^0) \sim \frac{g^4 m_p^5}{M_X^4}$$

By Y. Muramatsu



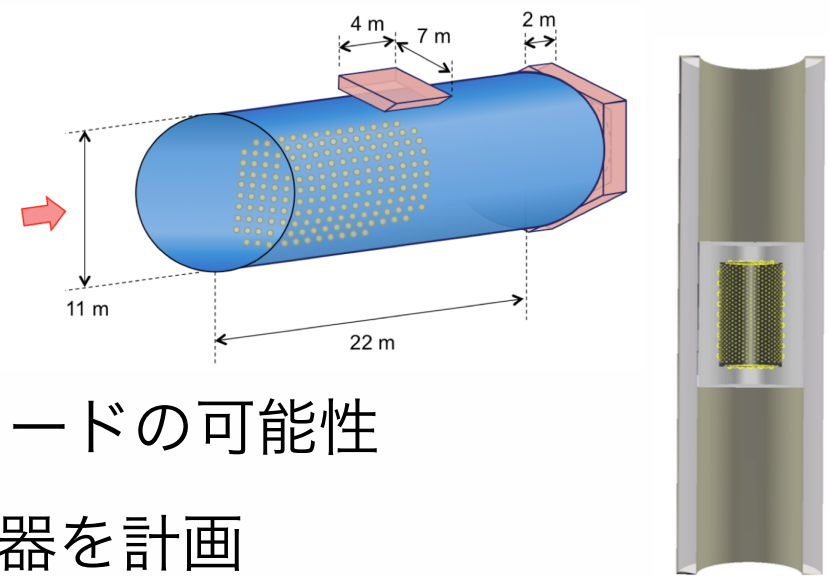
加速器ニュートリノ振動実験

CP対称性の破れや混合・質量の精密測定による
ニュートリノ振動の全容解明



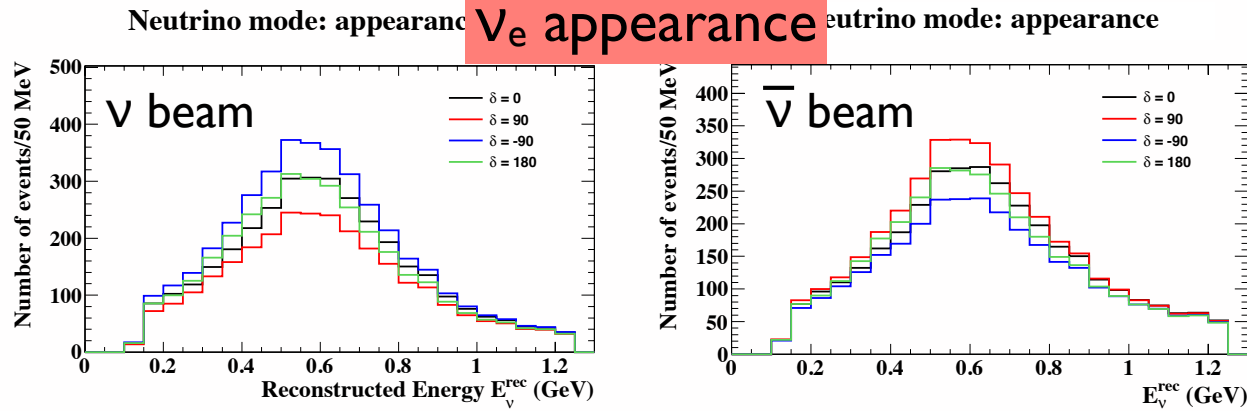
- 高統計、高品質ビーム、高精度観測
- T2K/Super-Kにより確立した技術
- 系統誤差も既知。さらなる改善計画。

- J-PARCニュートリノビーム
 - 1.3MW（達成値の3倍）に大強度化
- 前置検出器
 - 既存の280m検出器の運転、アップグレードの可能性
 - kmスケールに新規水チェレンコフ検出器を計画

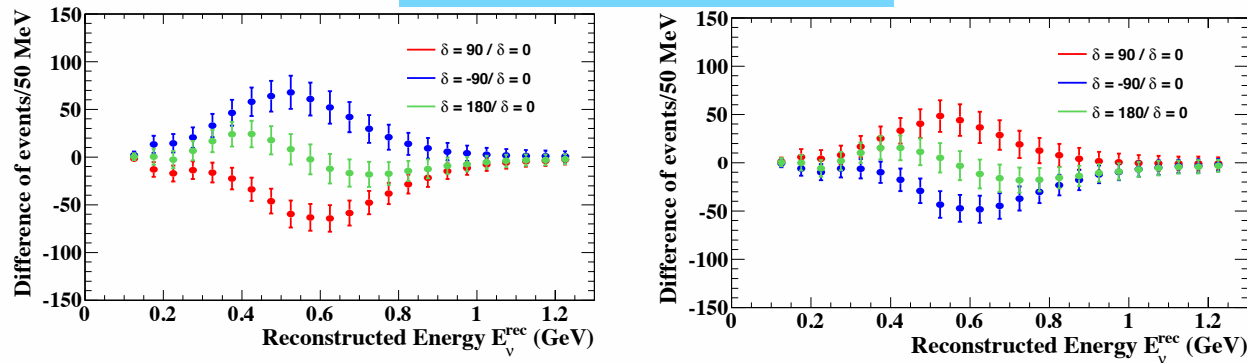


期待観測数

10 years ($13\text{MW} \times 10^7\text{s}$)

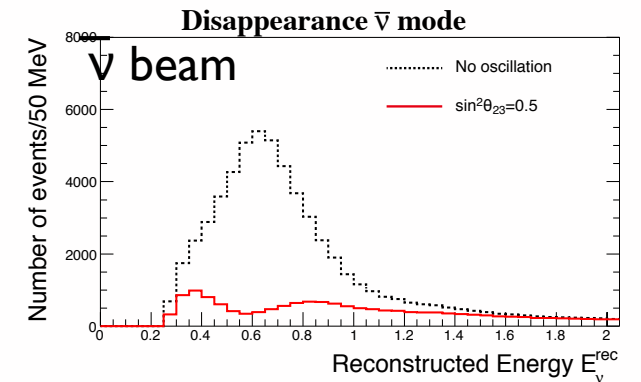
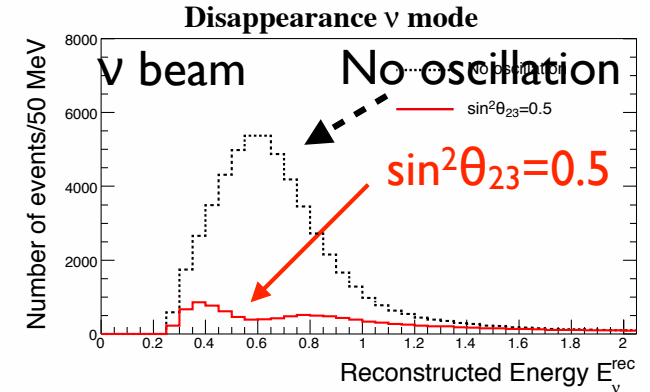


Difference from $\delta_{\text{CP}}=0$



for $\delta=0$	Signal ($\nu\mu \rightarrow \nu_e \text{ CC}$)	Wrong sign appearance	$\nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu}$ CC	beam $\nu_e/\bar{\nu}_e$ contamination	NC
ν beam	2,300	21	10	362	188
$\bar{\nu}$ beam	1,656	289	6	444	274

ν_{μ} disappearance



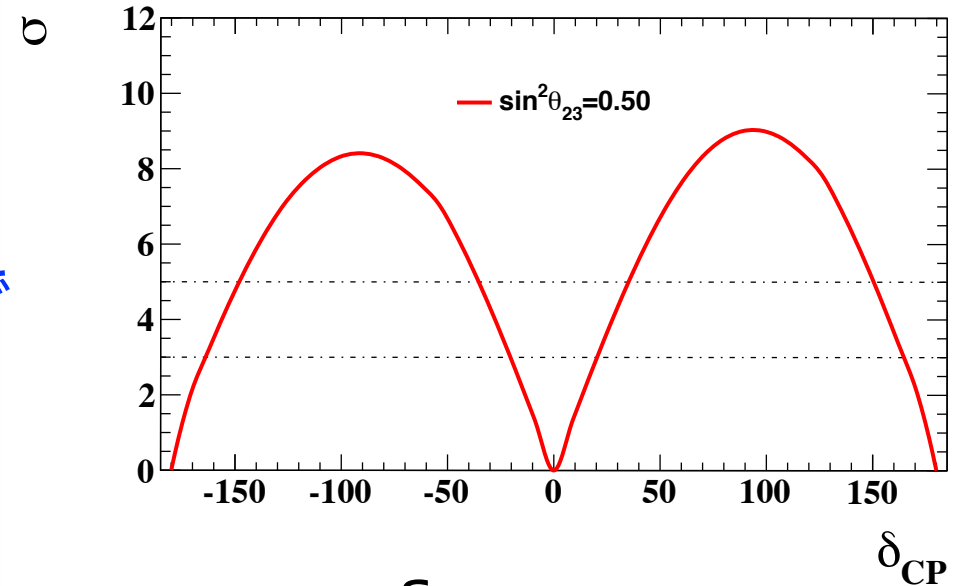
	$\nu_{\mu}+\bar{\nu}_{\mu}$ CCQE	ν_{μ} CC nonQE	Others
ν beam	8,947	4444	721
$\bar{\nu}$ beam	12317	6040	859

CPの破れ (δ_{CP}) 期待感度

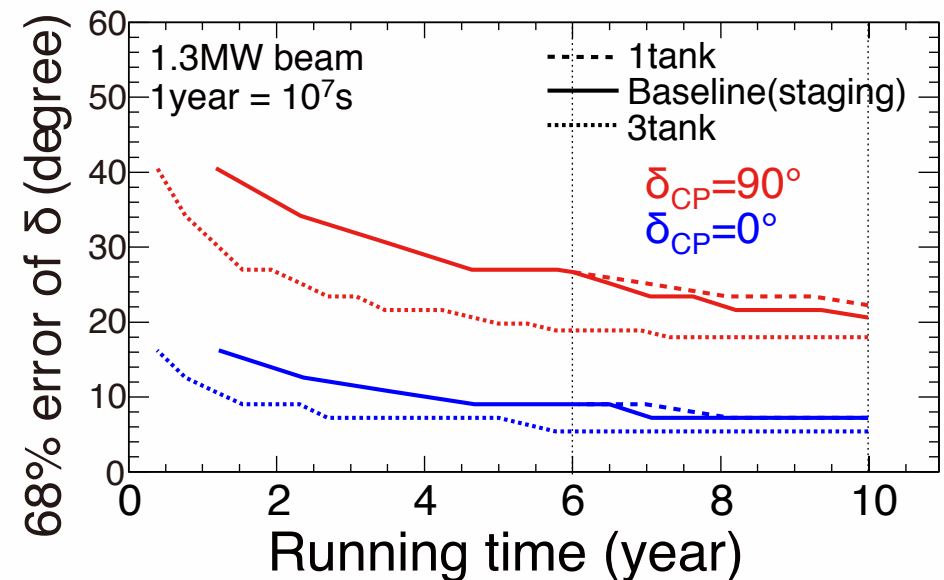
大強度J-PARCニュートリノビーム + ハイパーカミオカンデ

$\sin\delta_{CP}=0$ exclusion

- CP保存 ($\sin\delta_{CP}=0$) 棄却
 - 8σ for $\delta=-90^\circ$
 - δ parameter spaceの80%でCPV発見が可能 ($>3\sigma$)
- δ_{CP} 測定精度
 - 20° for $\delta=-90^\circ$
 - 7° for $\delta=0^\circ$



δ_{CP} 1σ error



Precision measurements

NEW x 9 years ($11.25\text{MW} \times 10^7\text{s}$)

- Atmospheric parameters

$$\delta(\Delta m_{32}^2) \sim 1.4 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

→ Mass hierarchy sensitivity
in combination with reactor

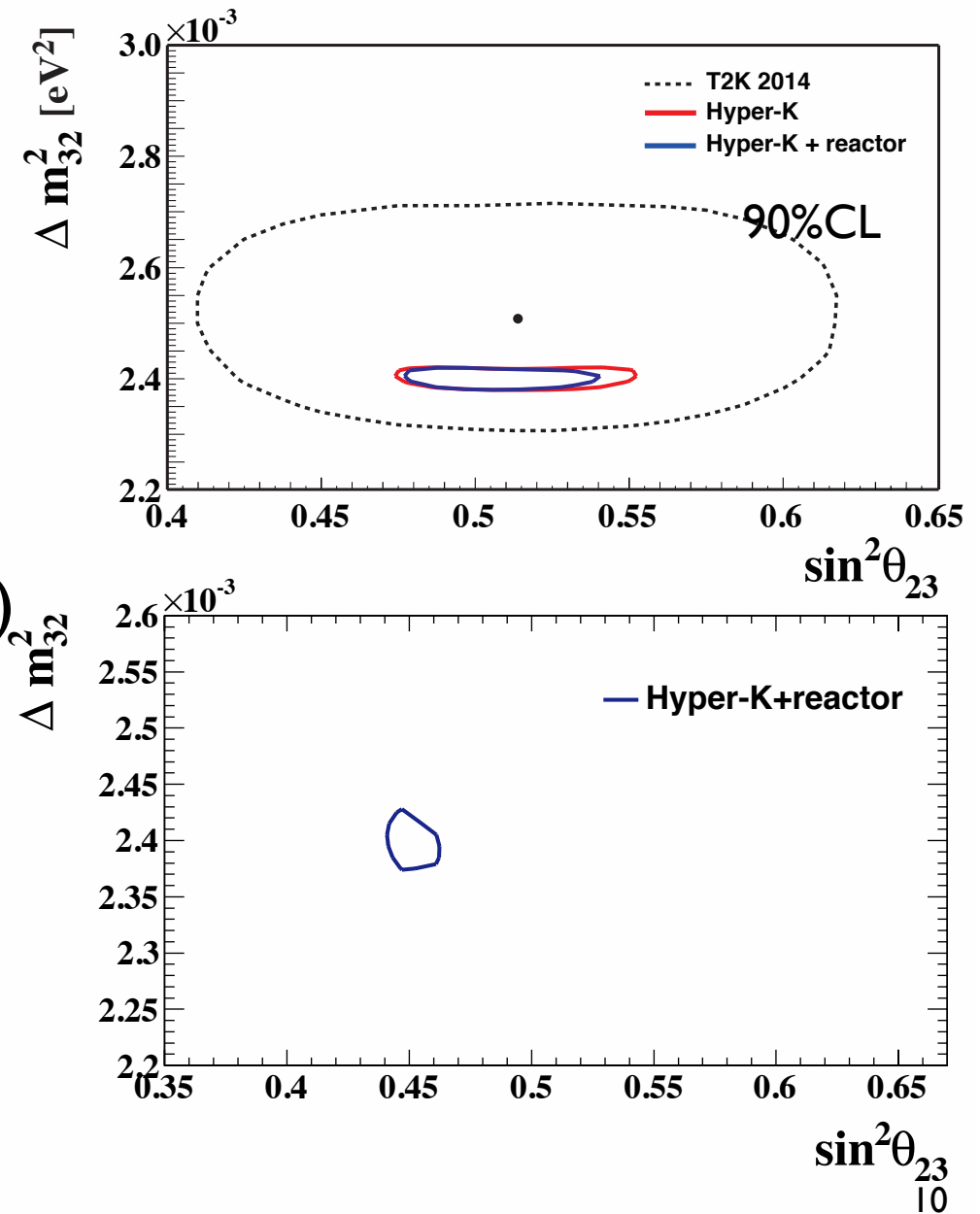
$$\delta(\sin^2 \theta_{23}) \sim 0.015 \text{ (for } \sin^2 \theta_{23} = 0.5)$$

$$\sim 0.006 \text{ (for } \sin^2 \theta_{23} = 0.45)$$

- Near detector measurements

- Cross sections

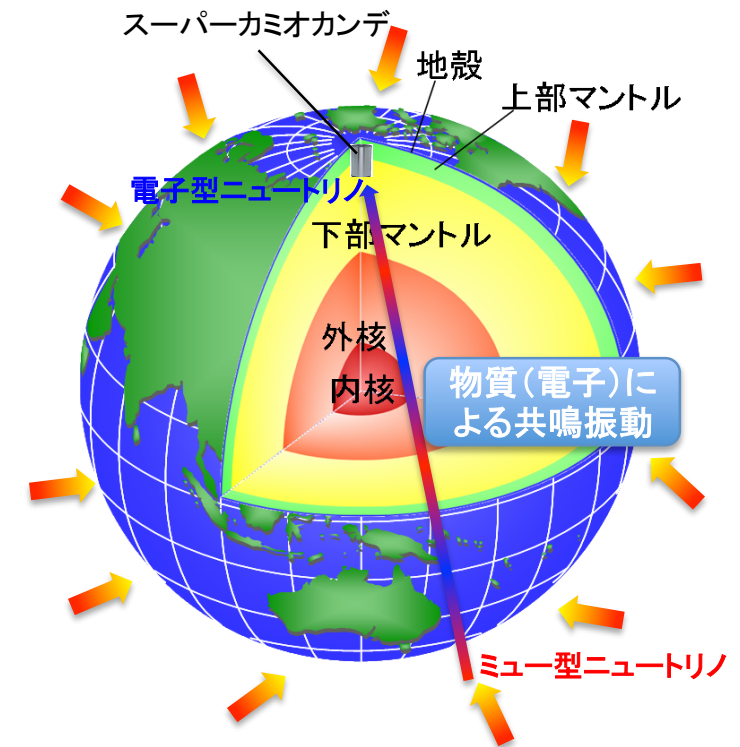
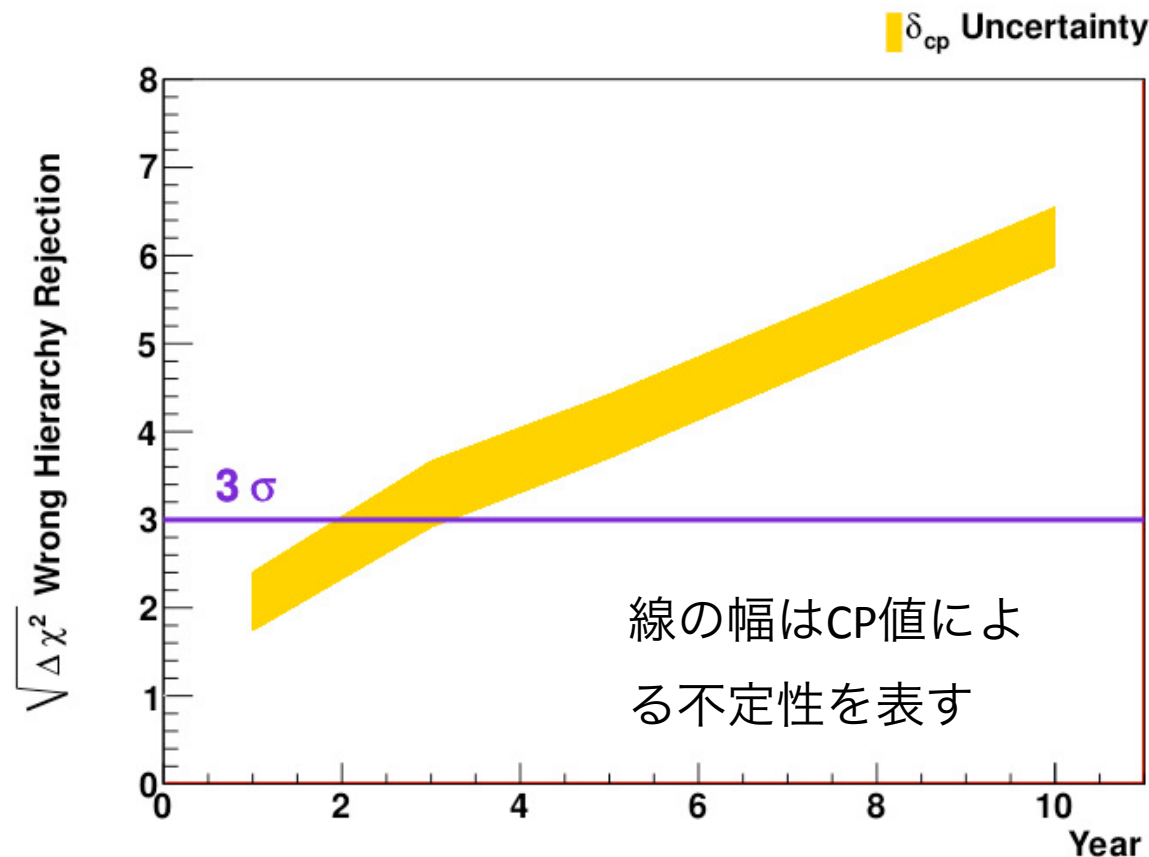
- Exotic physics searches



ニュートリノの3つの質量の順番 (質量階層性) の決定

大気ニュートリノ+ビーム

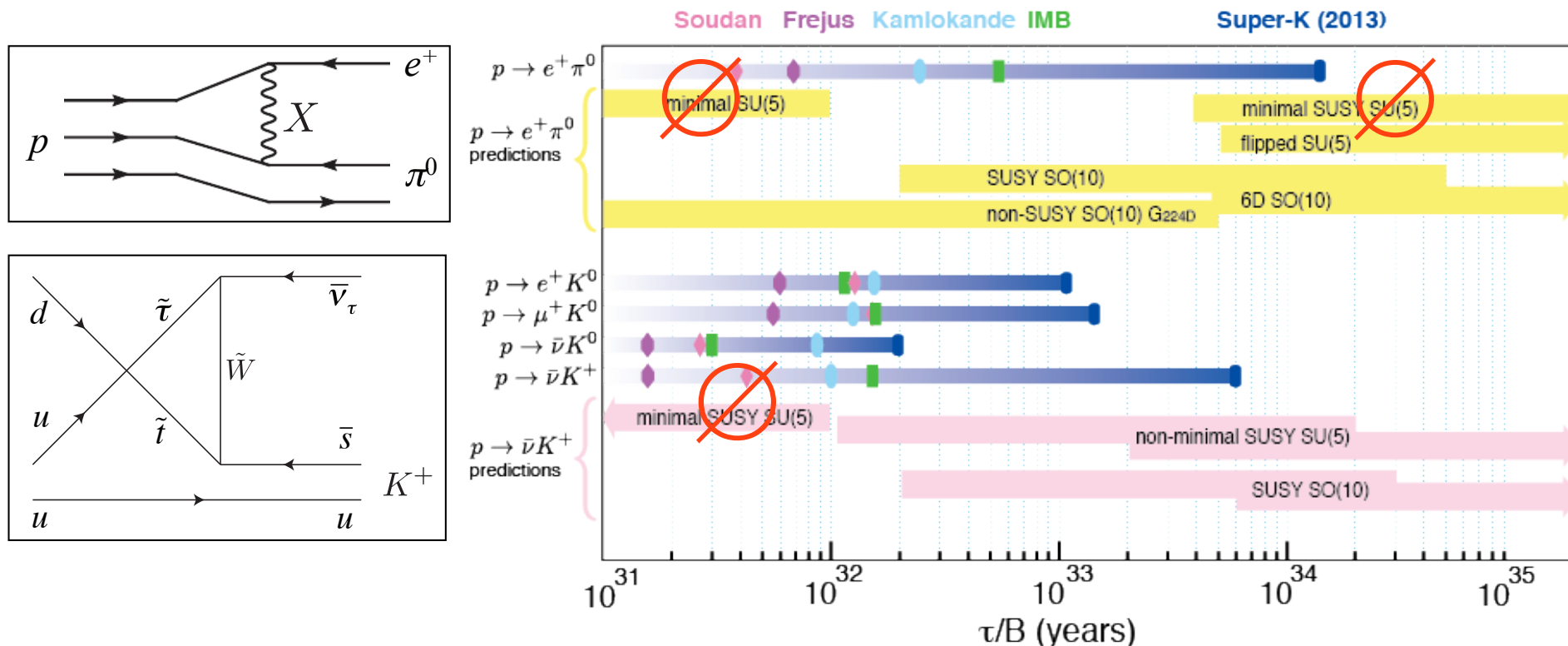
2~3年で質量階層性決定 ($\sin^2\theta_{23}=0.5$)



地球の物質効果 (MSW効果) の共鳴による 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

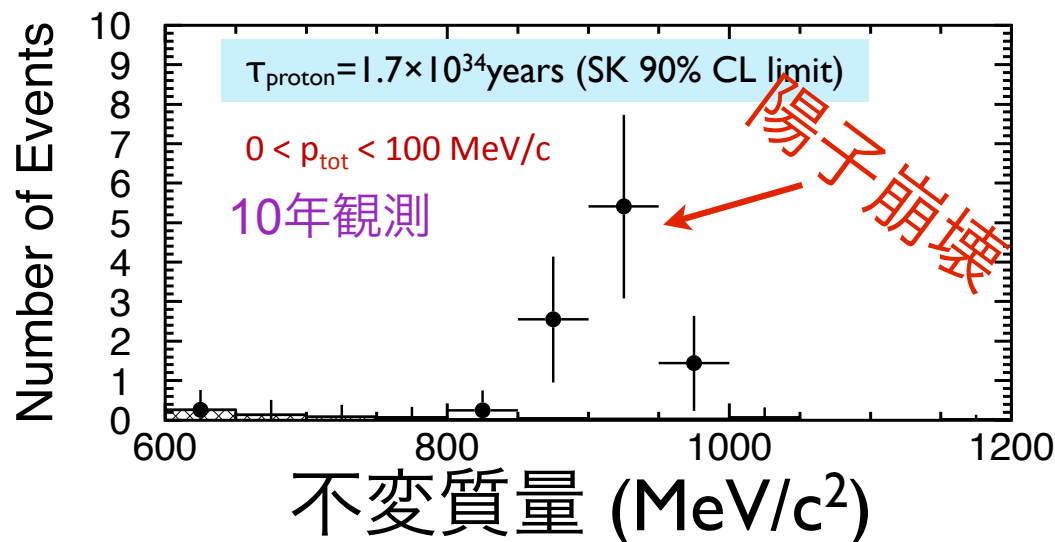
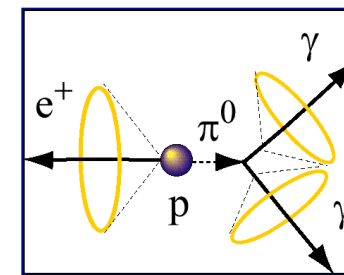
これまでの実験結果



- ▶ 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。
- ▶ $\tau/B(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 1.4 \times 10^{34}$ 年 (90%信頼度、260キロトン年)
- ▶ $\tau/B(p \rightarrow \bar{\nu} K^+) > 5.9 \times 10^{33}$ 年 (90%信頼度、260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?

陽子崩壊探索： $p \rightarrow e^+ \pi^0$

次世代の素粒子理論（大統一理論）を「直接」調べる

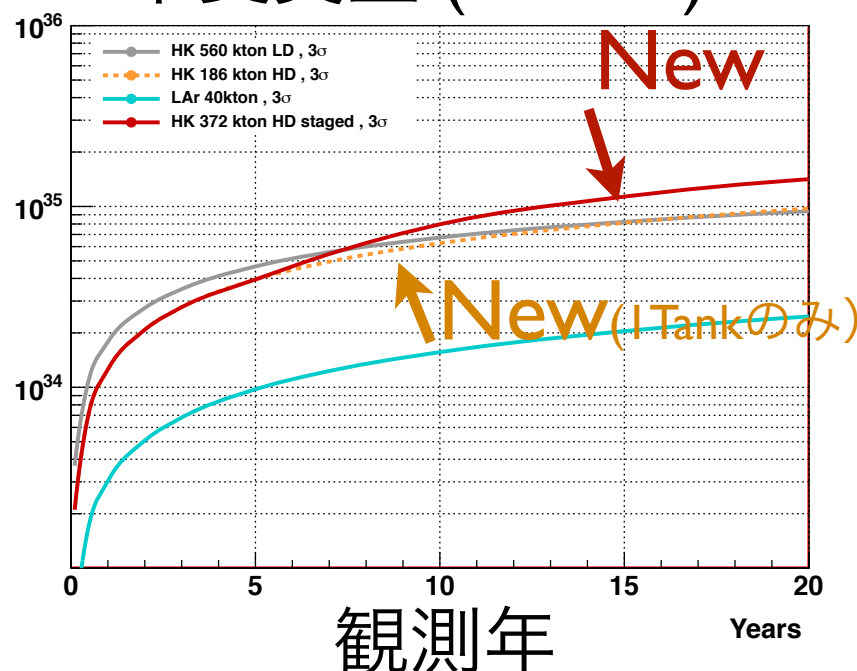


光高感度化によりBGフリーを実現

$T_{\text{proton}} = 1.4 \times 10^{34} \text{ years}$,
Super-Kの制限値の場合

~9 σ discoveryが可能

発見感度
陽子寿命 (3σ)



陽子寿命 10^{35} 年で 3σ 発見が可能

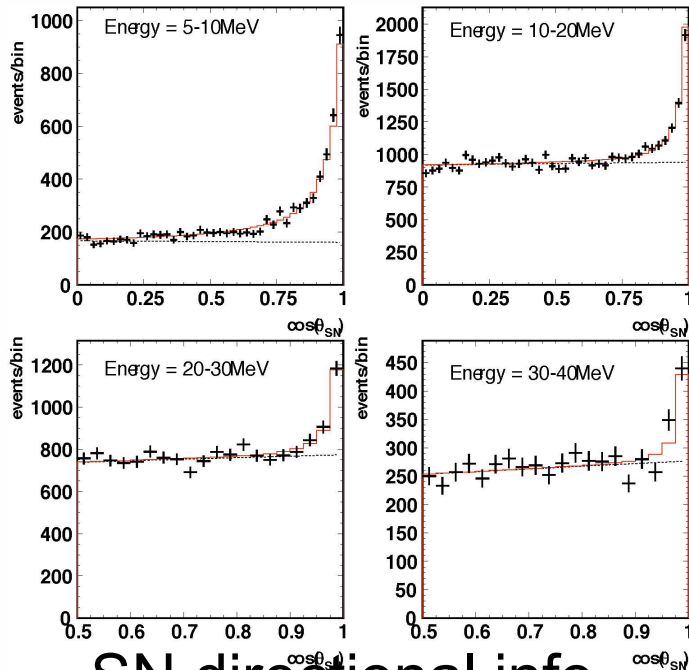
他の崩壊モードもスーパーカミオカンデに比べて~10倍の感度向上

Supernova Burst Neutrinos

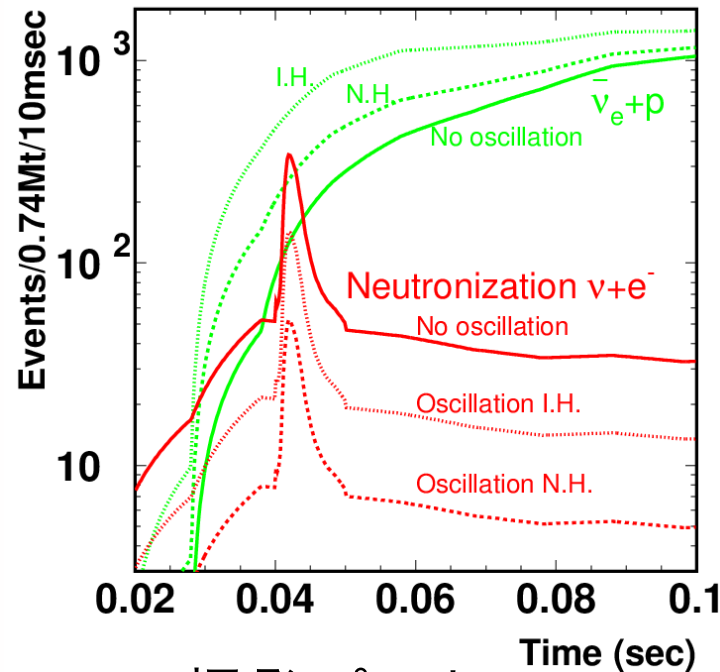
100,000~160,000 ev
(2HD 440kt, 10kpc)

ν_e from neutronization:
12~80 ev

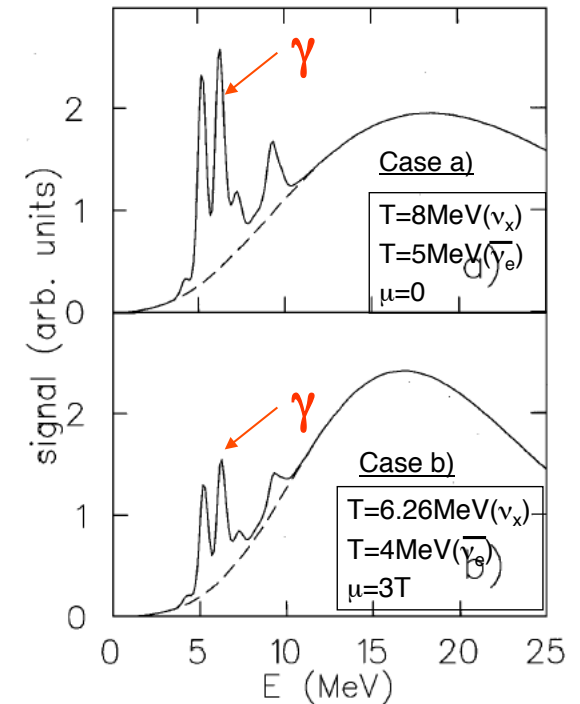
NC: 3,000~5,000 ev
 $\nu + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu + {}^{16}\text{O}^* \rightarrow \gamma$



SN directional info.
by $\nu+e$ scattering
方向精度1~2°

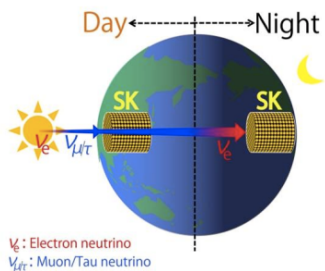


爆発プロセスの
直接観測

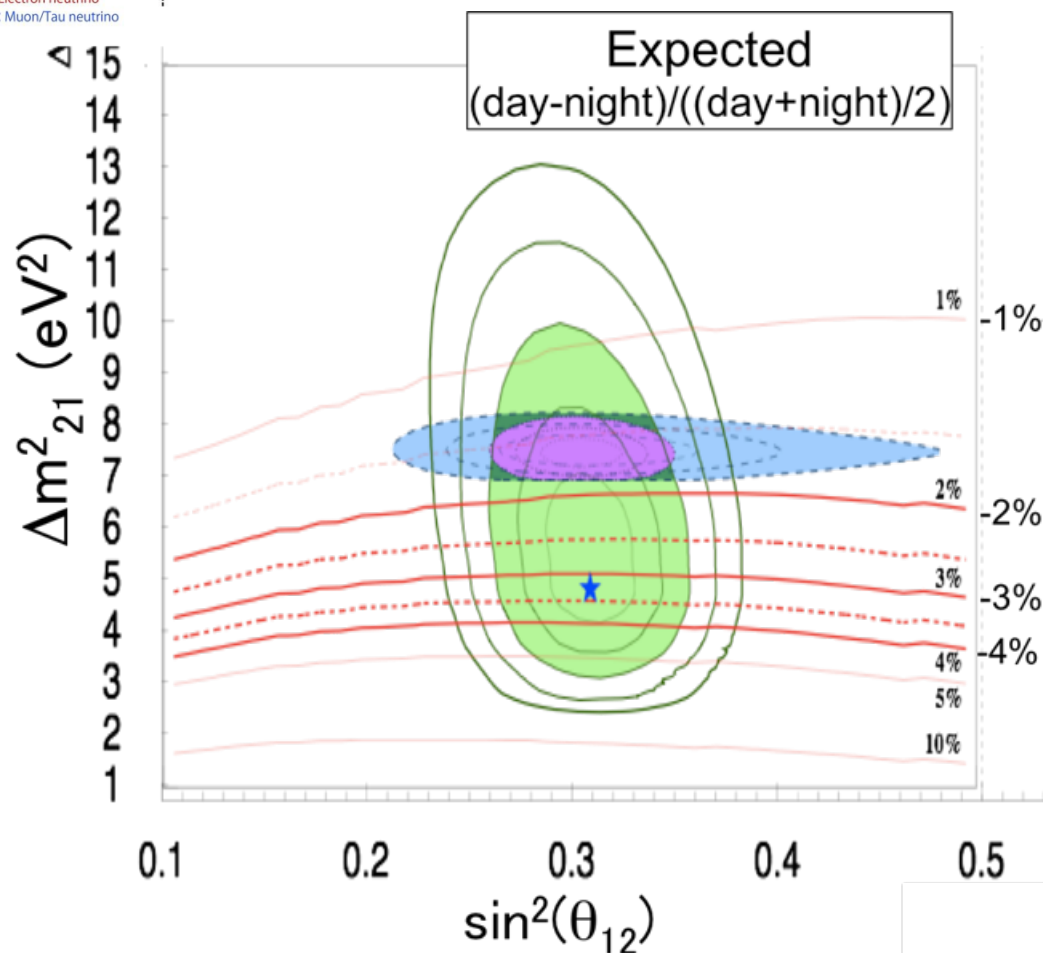


天体内部の温度情報

- SNの方向、中性子化バースト、天体内部温度の観測
- 将来の重力波・光学望遠鏡などとの協力により、近傍銀河の超新星爆発ニュートリノの距離も拡大
- 超新星背景ニュートリノによる天文学：100イベント／10年



ハイパーKによる昼夜効果

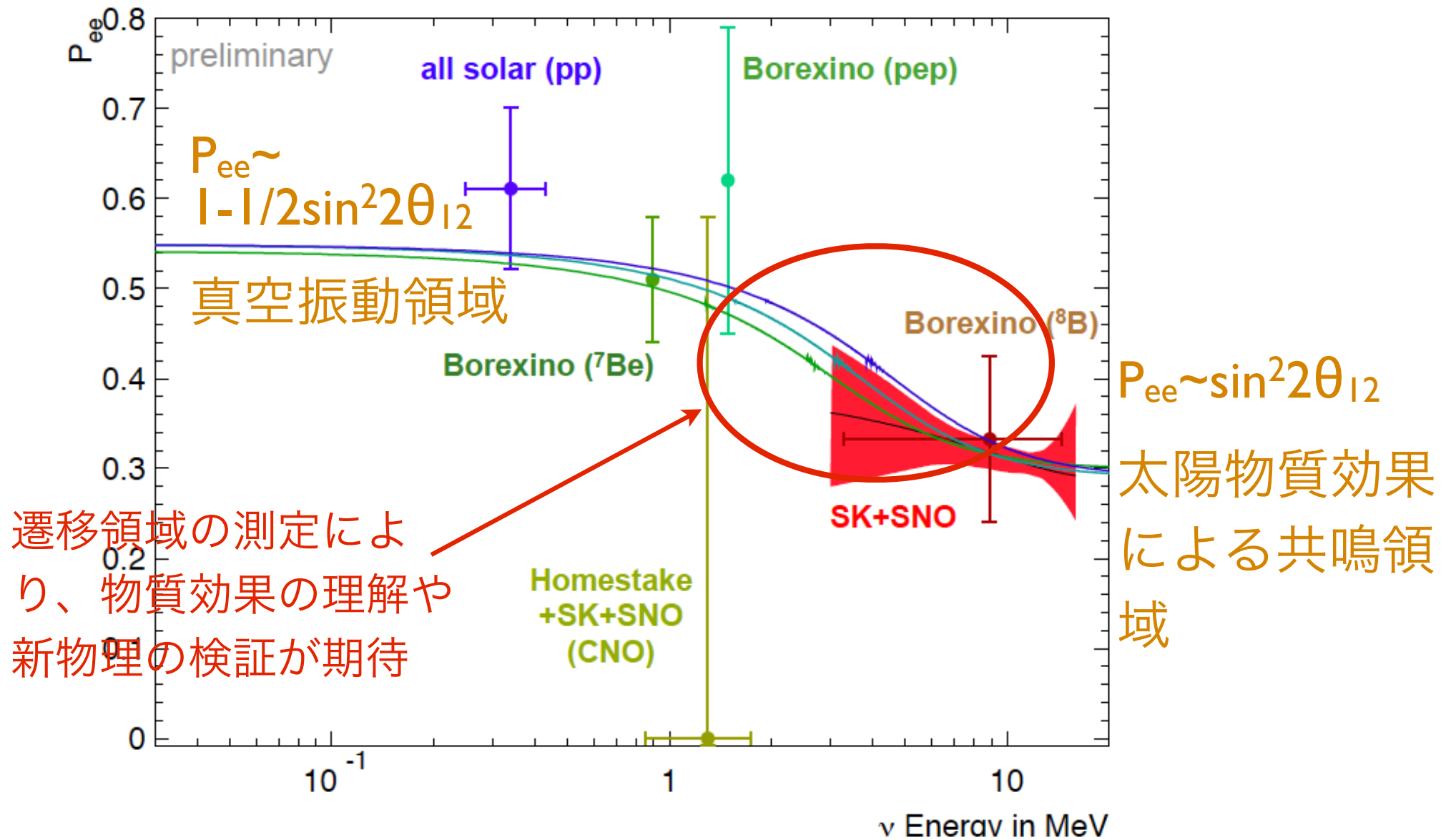


- 太陽ニュートリノ (ν_e) による振動パラメータ測定値とカムランドの原子炉ニュートリノ (反 ν_e) 間で $\sim 2\sigma$ のずれ
- 統計のゆらぎ？新物理？
→ ν_e (太陽ニュートリノ) による精密測定が理解の鍵
→ 昼夜効果 (Δm^2_{21}) の精密測定が必要

ハイパーカミオカンデ (10年観測)

- 昼夜効果の観測感度 12σ
- カムランドとのずれの優位性 6σ

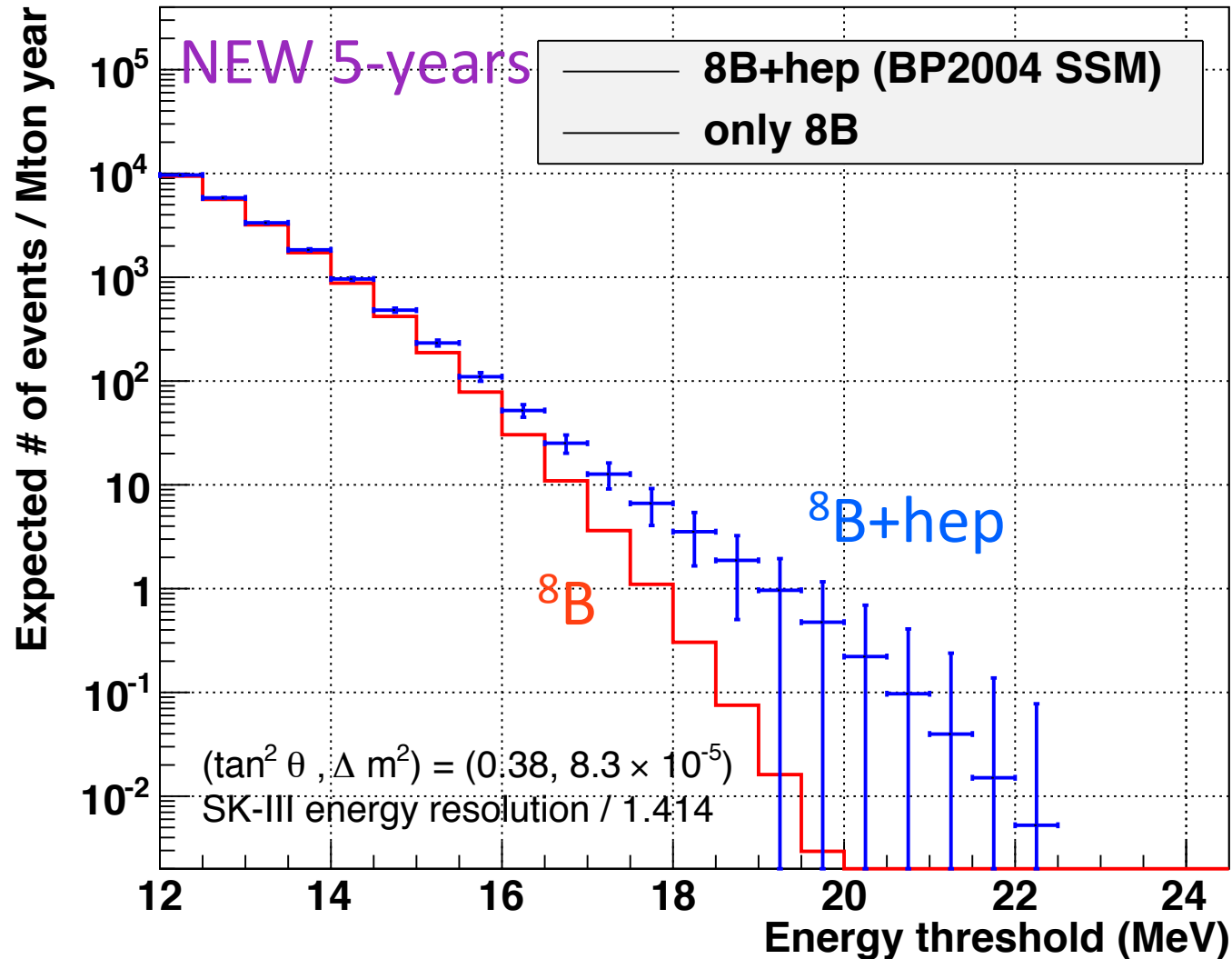
太陽ニュートリノスペクトル



ハイパーカミオカンデ（10年観測）

• アップターンの期待有意度 5.3σ

太陽ニュートリノ天文学



ハイパーカミオカンデ：

- ${}^8\text{B}$ ニュートリノの精密監視（200イベント/日）
- Hepニュートリノの初観測→太陽モデルの検証

国際共同研究グループ結成

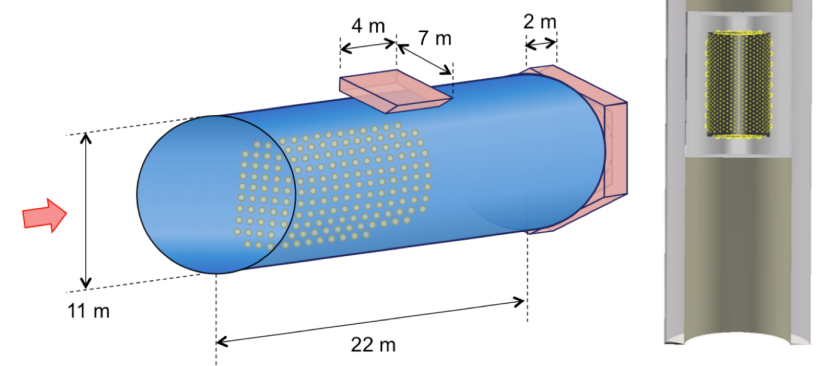
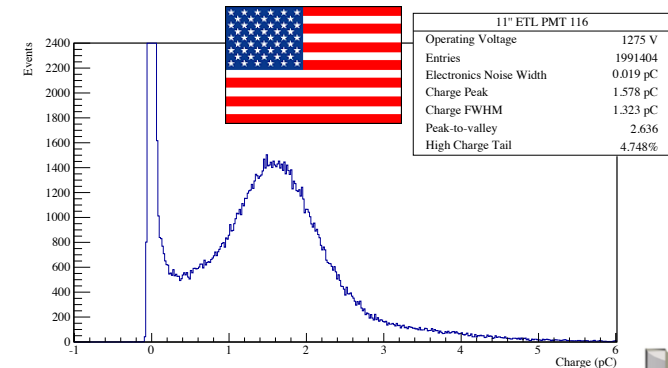
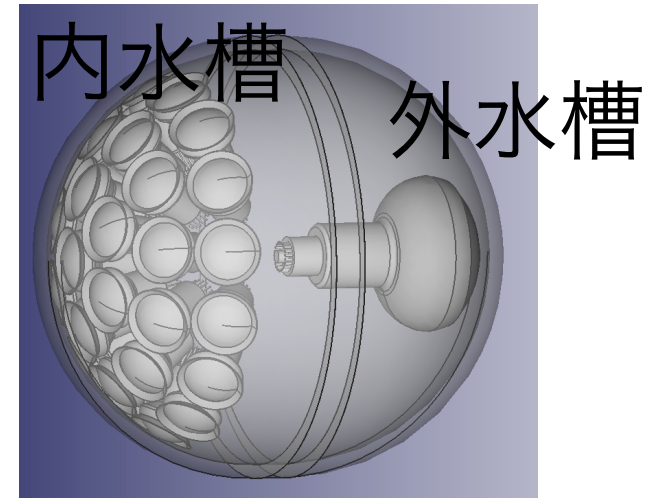
結成記念シンポジウム@柏の葉、2015年1月



- **国際共同研究グループ正式発足**（2015年1月）
 - ~250名、内日本メンバー3割
 - 日本：地下空洞、水槽、光検出システムの半分を担当
 - 海外：光検出システムの半分、前置検出器他を分担
- 東大宇宙線研とKEK素核研間での協力についての覚書
- 国際諮問委員会による定期的な評価

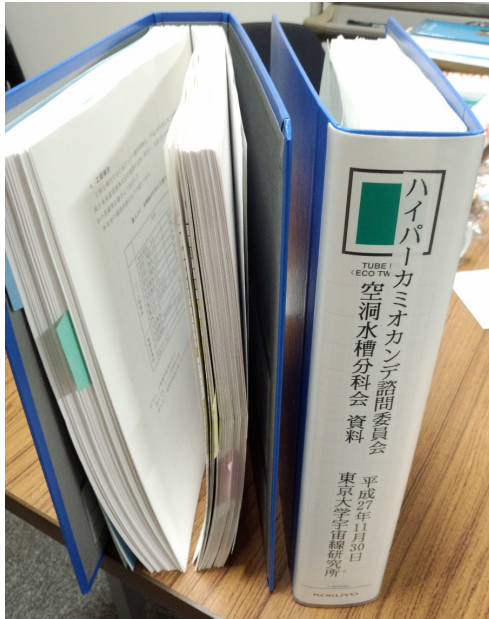
国際分担

- 半分の光検出器システム
 - Multi-PMT module (for ID/OD)
 - 方向情報、高耐圧、ラドン閉じ込め
 - KM3NeTグループと協力の協定
 - 複数の製造会社の競争を期待
 - Texas 11" PMT by ETL (for OD)
 - プロトタイプの性能確認
 - 外水槽の候補
 - 電子回路、DAQなど
- 前置検出器
 - 280m検出器アップグレード
 - ~1km中間水検出器



国際諮問委員会による評価

国際諮問委員会、空洞水槽分科会にデザインレポートを提出. 12月から2月にかけて、検出器の全ての要素と研究課題に関する最初の評価が行われた。



委員会の最後の講評

- 日本はニュートリノで世界を牽引
- 強い国際協力体制
- HKは複数の最重要課題に取り組む計画
- 既存加速器、SK、T2Kなどの利点
- HKの新設計は物理を妥協せずにコスト低減に成功
- 空洞掘削計画、系統誤差理解の更なる進展に期待
- 所長への提言を執筆中
 - HK計画の強力な推進
 - 設計最適化や国際協力強化を推奨
 - 米国計画や欧州共同体との強力な推奨
 - 大強度陽子加速器の増強の早期実現

NOT FOR DISTRIBUTION
ONLY FOR INTERNAL USE



Design Report
Version 2 (Dated: February 7, 2016)

これまでの大型計画の議論

- 高エネルギー物理学研究者会議では国際リニアコライダーと並び **核子崩壊・ニュートリノ実験**が**トッププライオリティー**で推奨されている。
- 宇宙線研究者会議では、KAGRA建設終了後の次期超大型計画として、**ハイパーカミオカンデ**を**最重要かつ緊急の課題**と位置づけている。
- 日本学術会議、第22期学術の大型計画に関するマスタープラン（マスタープラン2014）
 - 「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ振動実験」
 - 特に速やかに実施すべき「**重点大型研究計画**」の27計画の内の一つ
- 早期実現のためには、**文部科学省の次期ロードマップに掲載される必要**がある。マスタープラン2017への提案準備中（提出期限3月末）。



ハイパーカミオカンデ計画まとめ

- 次世代素粒子理論の開拓のためのフラグシップ実験
- ニュートリノ天文学の展開も
- 実績をもとに今後も日本が世界を主導できる分野
- 計画のアップデート
 - 高感度光検出器の開発、水槽形状・大きさの最適化
 - 国際研究グループ正式結成、責任・費用分担計画作成
 - 東大宇宙線研・KEK素核研の協力の協定締結

期を逃さず早期実現を！