

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

2017年5月23日、岡山大学

新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」領域研究会

ニュートリノ振動の発見の意義

● 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。

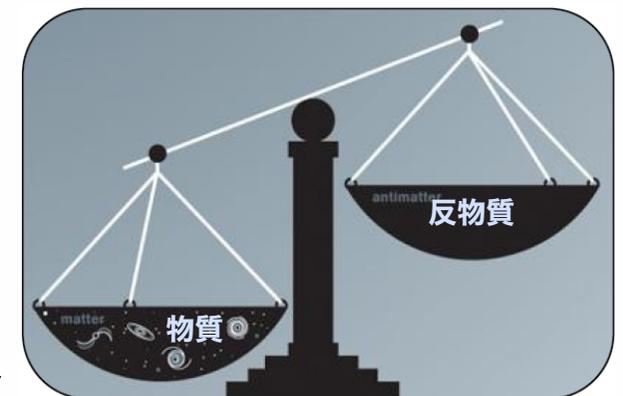


● ニュートリノ振動 = 実験手法

- 未知パラメータ：CP非保存 δ_{CP} 、三世代質量の順番の決定、 $\sin 2\theta_{23}$ は最大か？
- $0\nu\beta\beta$ 実験と相補的

● 自然の中で、ニュートリノが大きな役割を果たしている可能性

- 物質優勢宇宙（我々）誕生の謎がニュートリノで解ける可能性。 δ_{CP} はその理解の鍵。



ハイパーカミオカンデ計画

スーパーカミオカンデ (SK) を

- 観測質量 (10倍)
- 光感度 (2倍)

の双方で向上し、SKを凌駕する物理課題と発見感度を持つ。

J-PARC

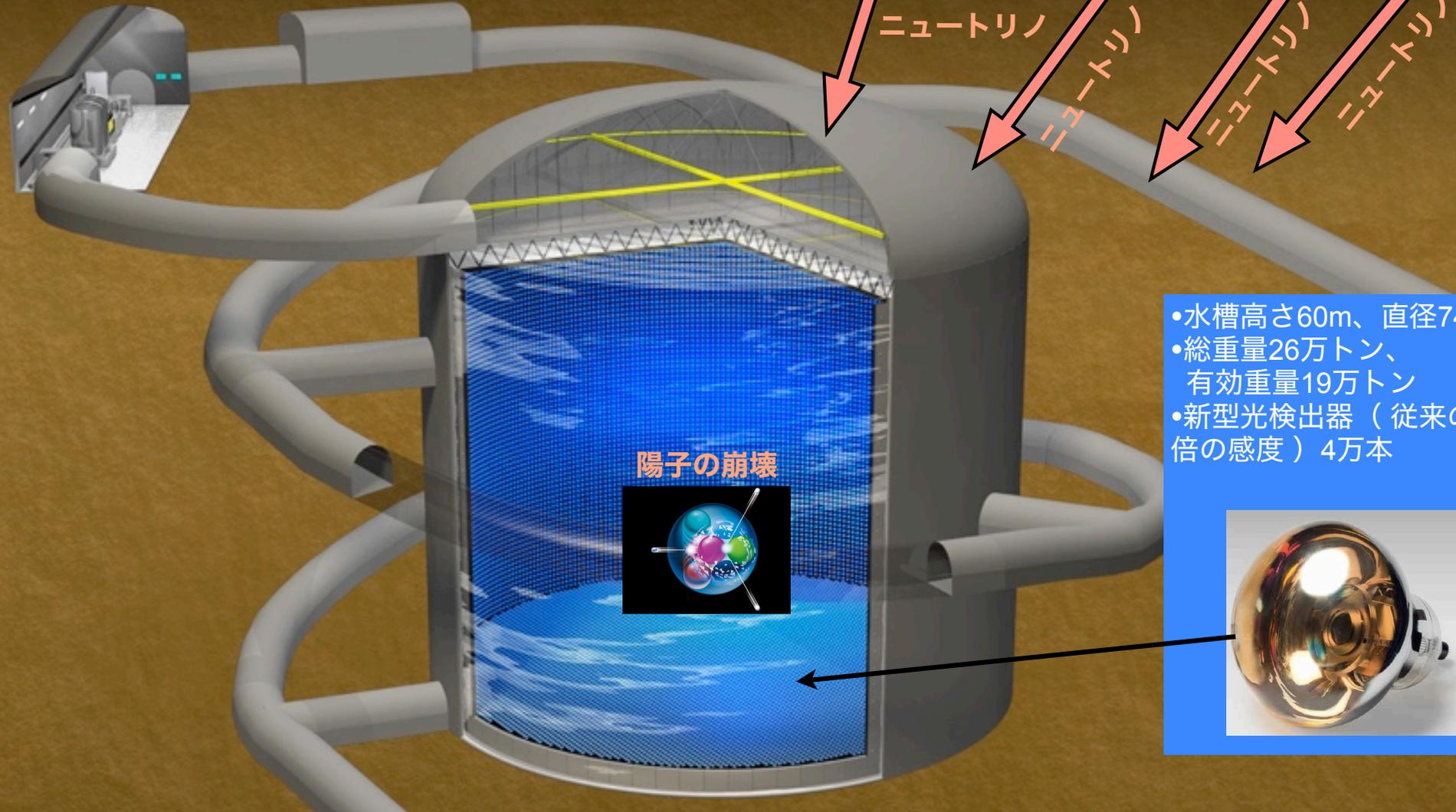


大気



超新星
爆発

太陽



- 水槽高さ60m、直径74m
- 総重量26万トン、有効重量19万トン
- 新型光検出器 (従来の2倍の感度) 4万本



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

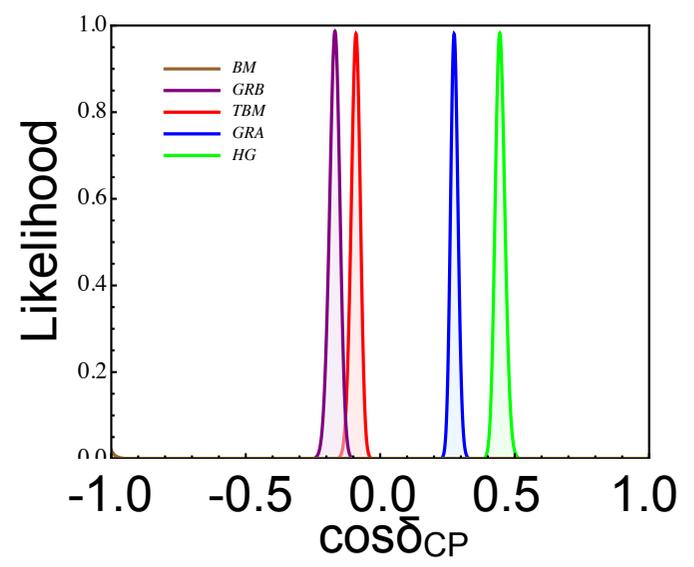
物質優勢宇宙を説明するには他のCP非保存が必要

→ **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**

T2K's latest results on CPV

T2K実験 PRL118,151801(2017)

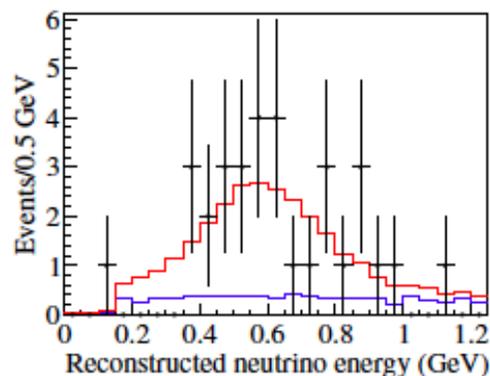
- $(\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu)$ -beam x (appearance, disappearance)
- 7.5×10^{20} pot for both beam mode

ν_e candidate

32 事象観測

(24 期待 for

$\delta_{CP}=0$)

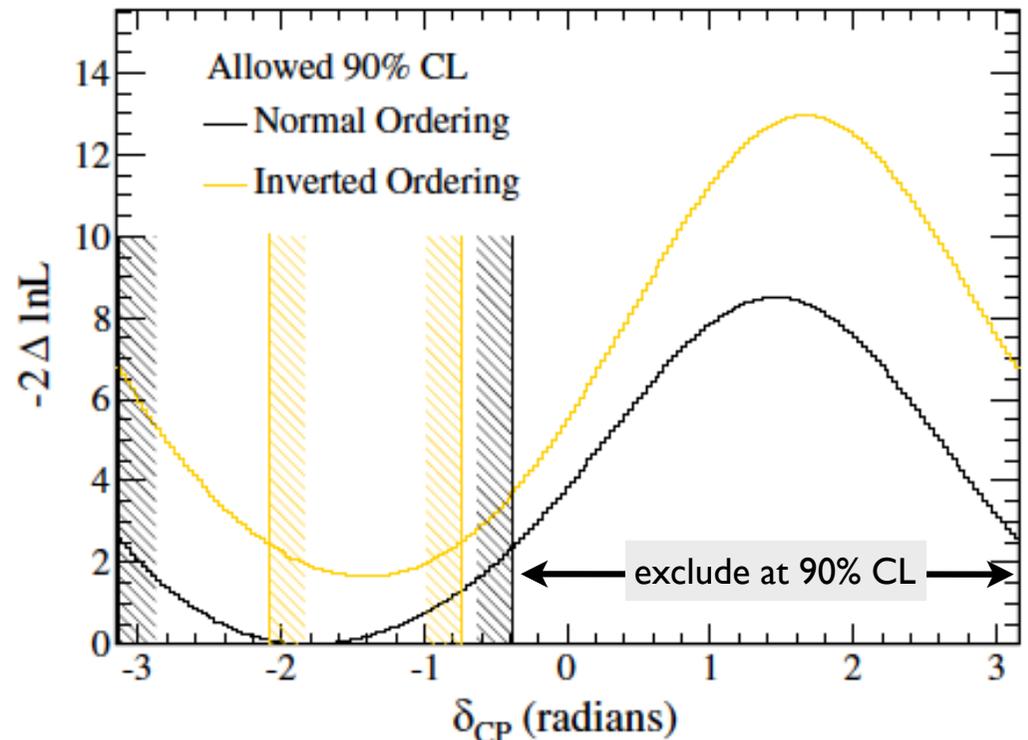
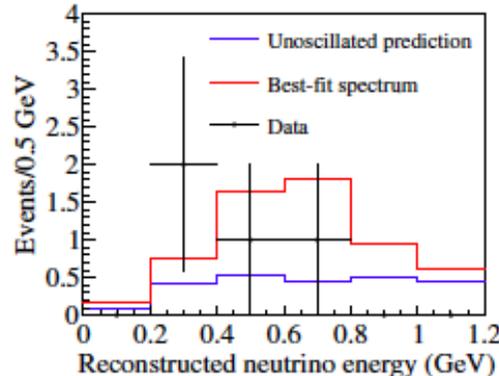


$\bar{\nu}_e$ candidate

4 事象観測

(7 期待 for

$\delta_{CP}=0$)



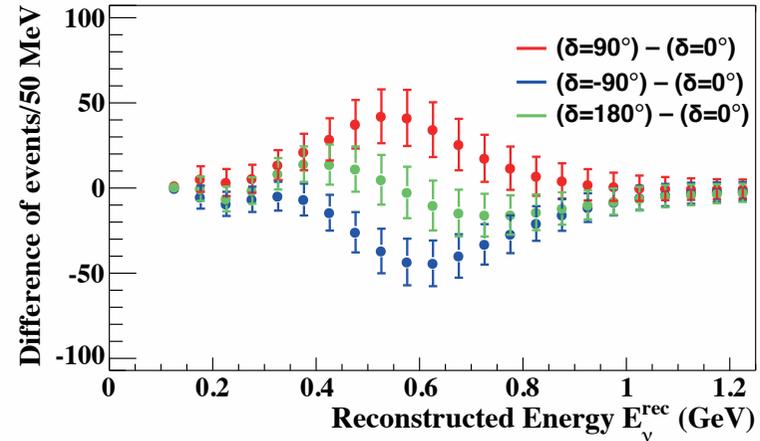
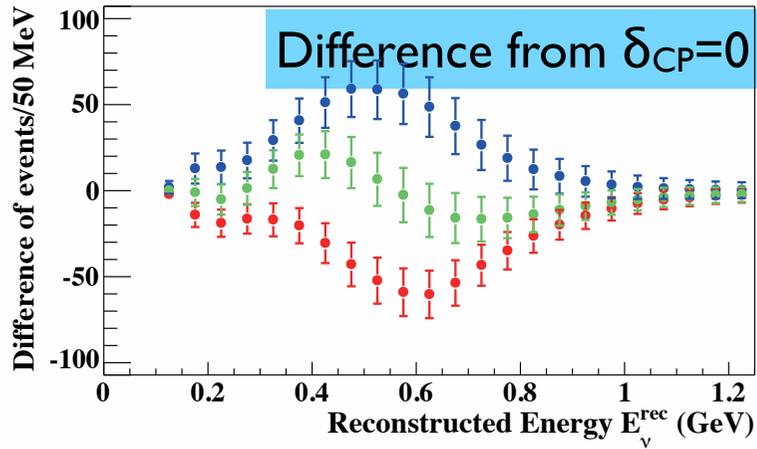
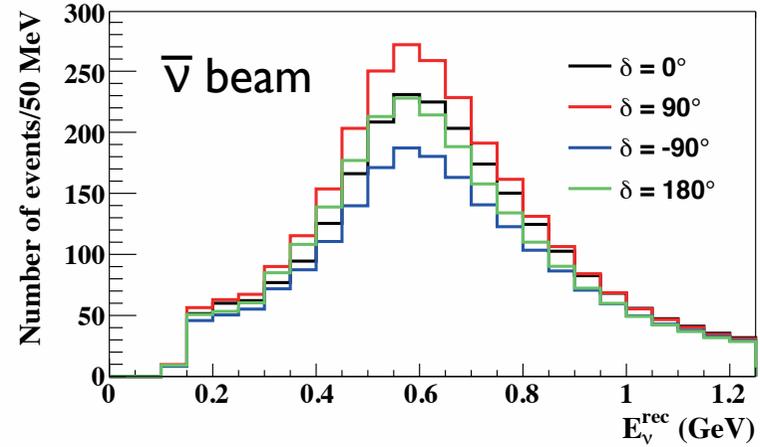
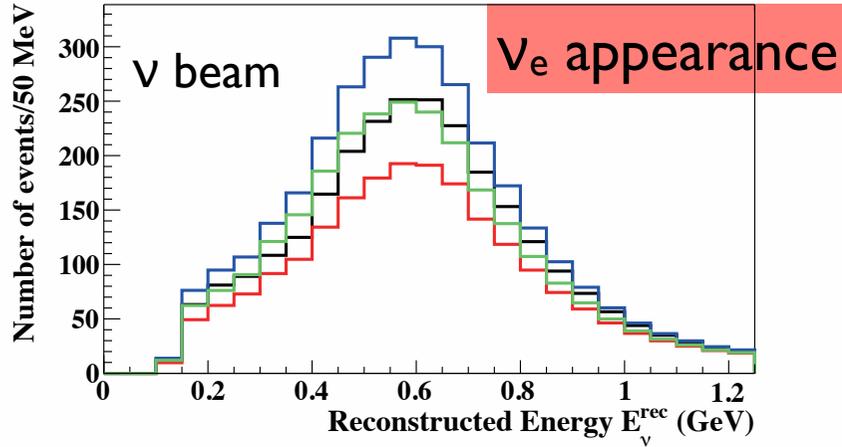
- $\delta_{CP}=(0, \pi)$ を90%CLで棄却
- $\delta_{CP} \sim -\pi/2$ ($|\sin \delta_{CP}| \sim 1$) を示唆、大気 ν も支持
- 発見は近いかもしれない、その後 δ_{CP} 測定フェーズへ

ハイパーカミオカンデでのCPV

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

Neutrino mode: Appearance

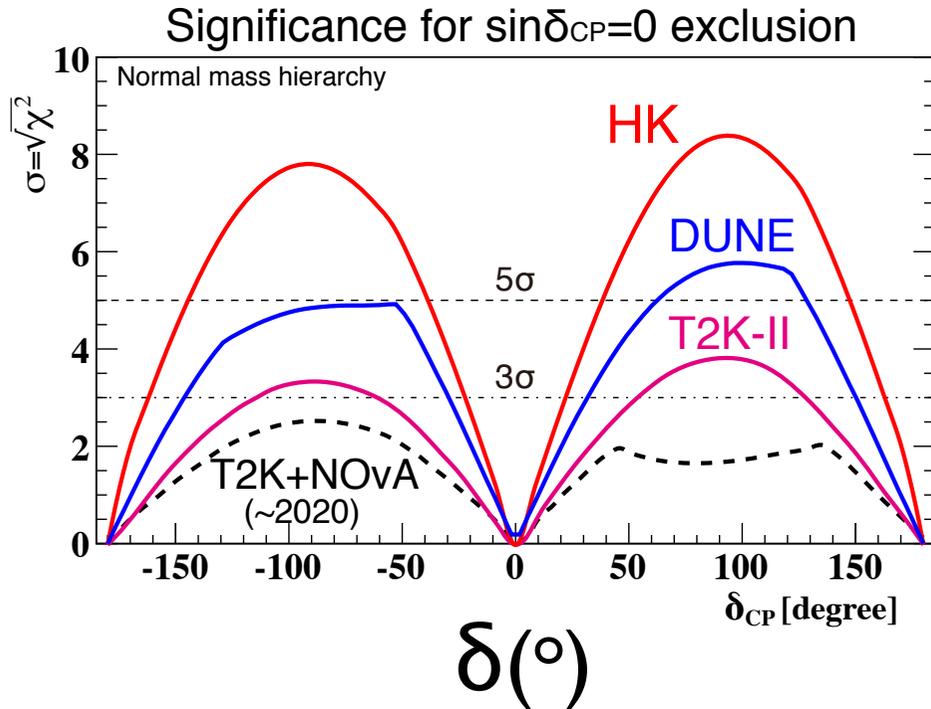
Antineutrino mode: Appearance



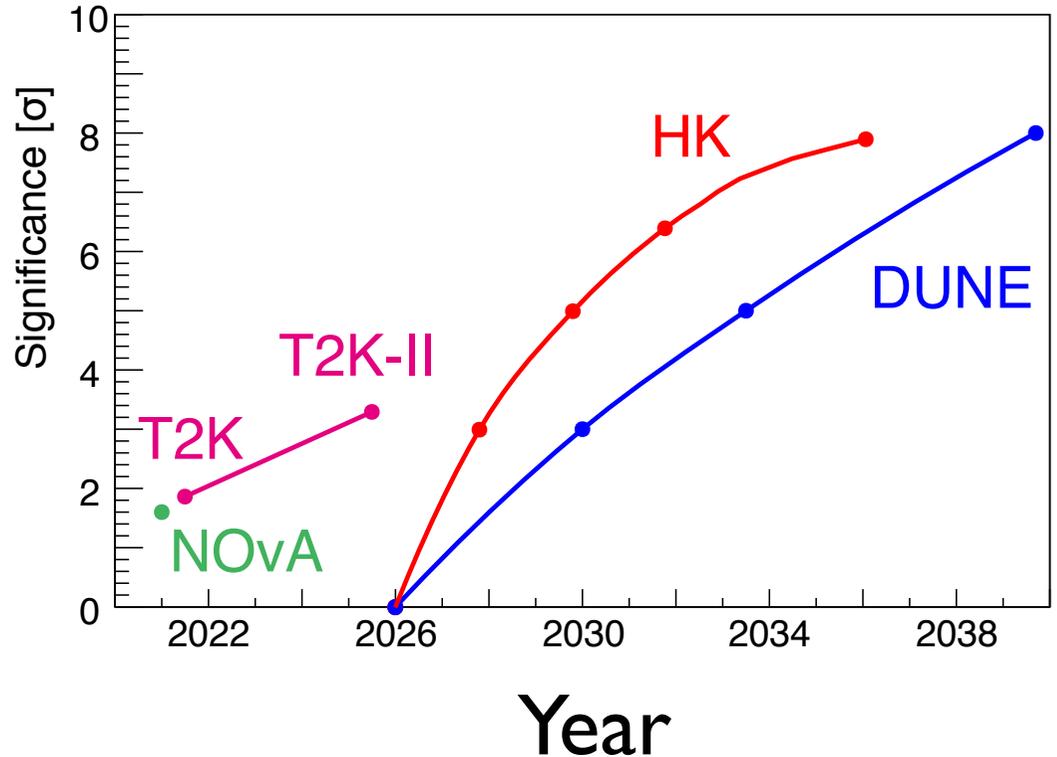
for $\delta=0$	Signal ($\nu\mu \rightarrow \nu_e$ CC)	Wrong sign appearance	$\nu\mu/\bar{\nu}\mu$ CC	beam $\nu e/\bar{\nu}e$ contamination	NC
ν beam	1,643	15	7	259	134
$\bar{\nu}$ beam	1,183	206	4	317	196

CP研究の競争力と緊急性

高い競争力



CPV significance for $\delta_{CP}=-90^{\circ}$, normal hierarchy



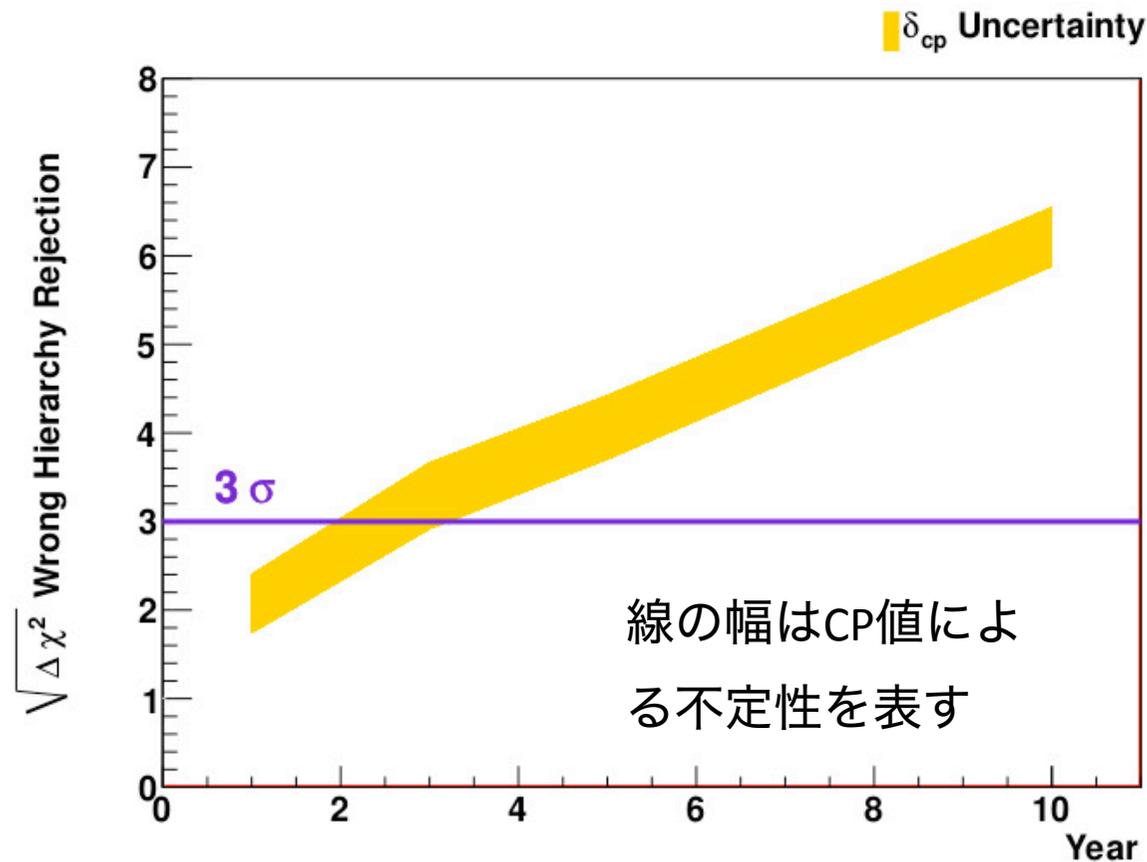
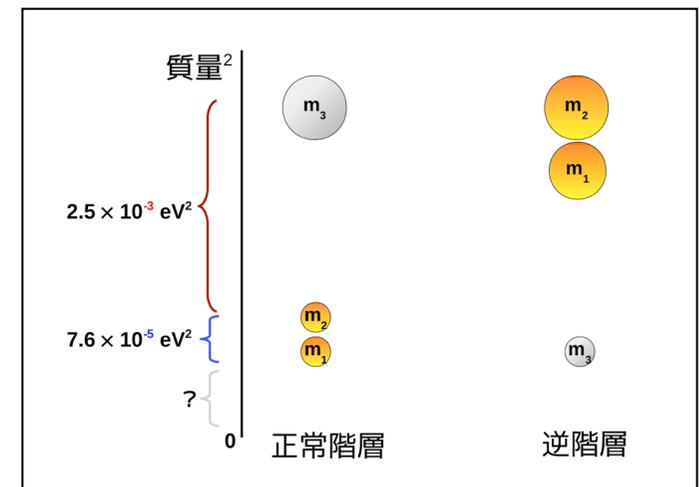
- ハイパーK、米国計画 (DUNE) 共に**2026年**ビーム実験開始予定.
- 遅れがなければ (**2018年建設開始**) 世界をリードする研究が可能.

高い緊急性

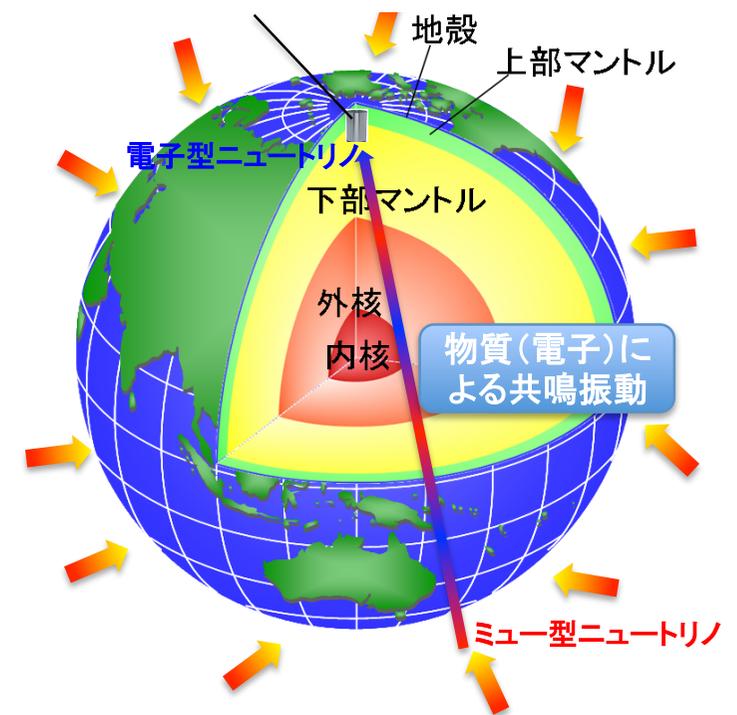
- CPが最大に破れている兆候 (T2K) → 先行実験が発見する可能性.
- 米国計画では、DOEが空洞掘削の予算が措置

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 ($\sin^2\theta_{23}=0.5$)
- $0\nu\beta\beta$ 実験の解釈・計画へのインプット



ハイパーカミオカンデ

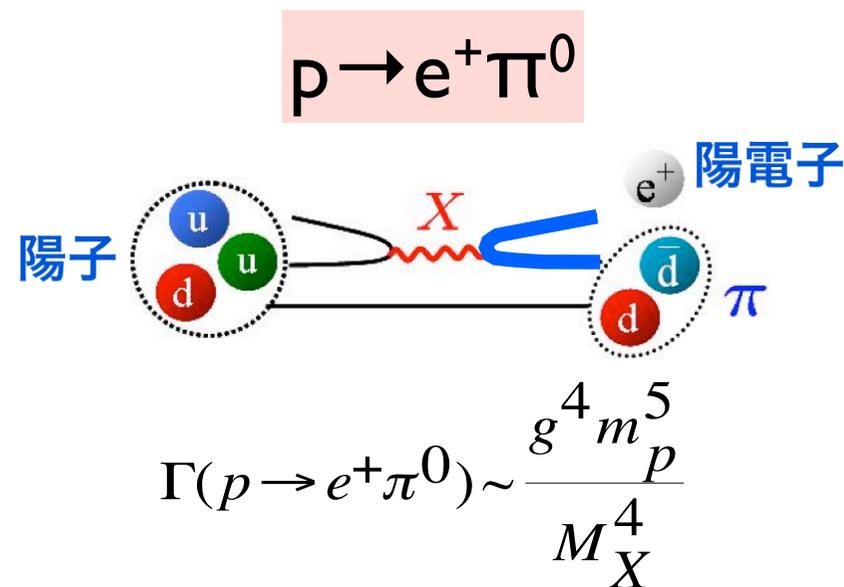
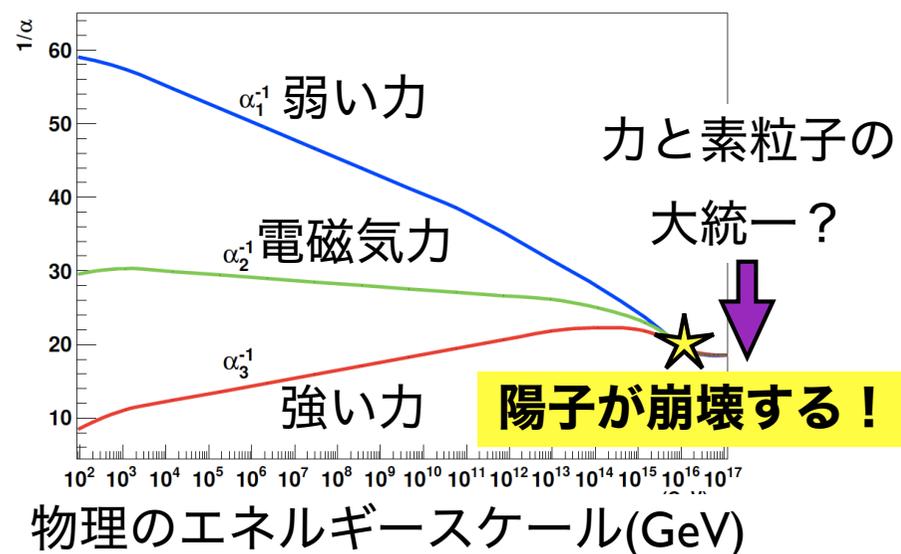


地球の物質効果（MSW効果）の共鳴による ν_e 出現現象。

- 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

核子崩壊探索

- **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
 - HKの発見感度は $(\tau_{\text{proton}} / \text{Br}) \sim 10^{35}$ 年
 - $M_X \sim 10^{16}$ GeVなら発見の可能性大
- 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）に迫る

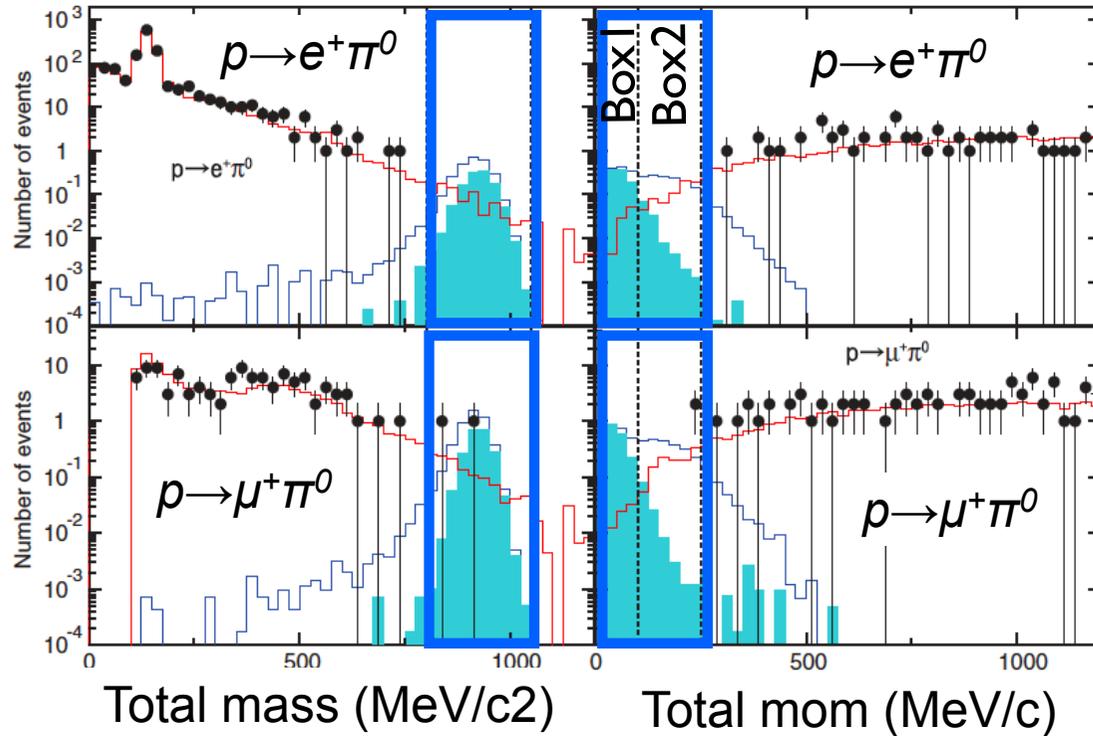


スーパーカミオカンデ最新結果

スーパーカミオカンデ PRD 95, 012004 (2017)

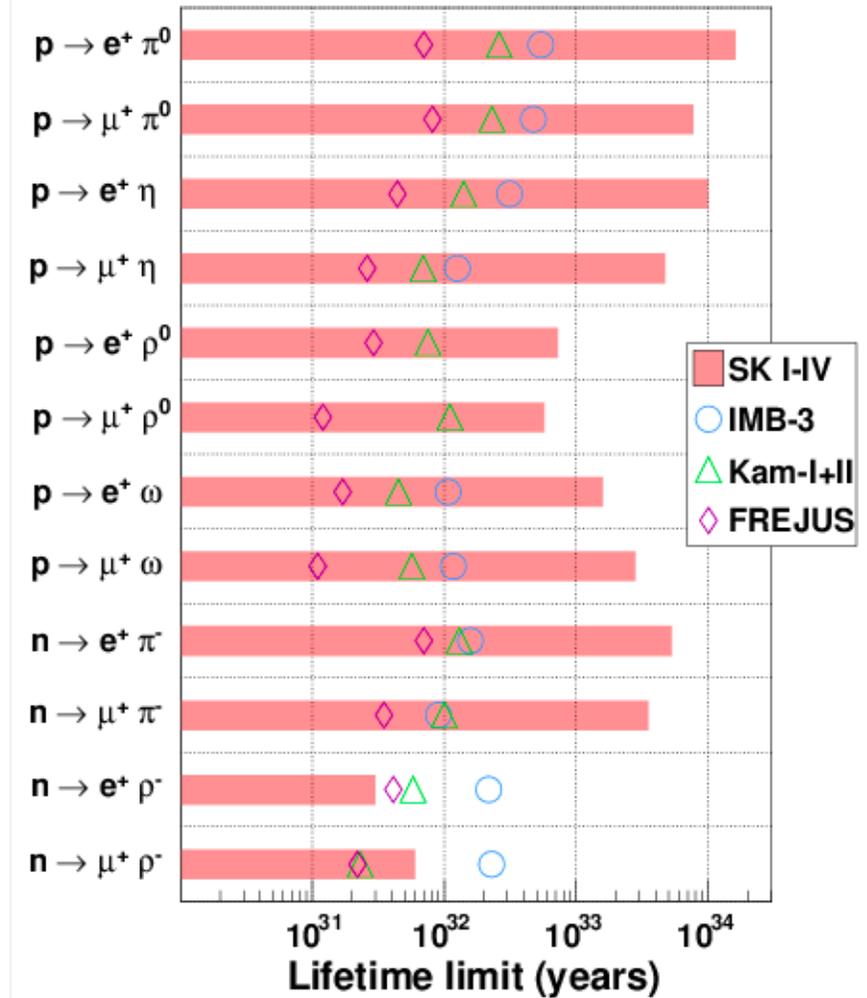
signal MC (free proton)

BG MC

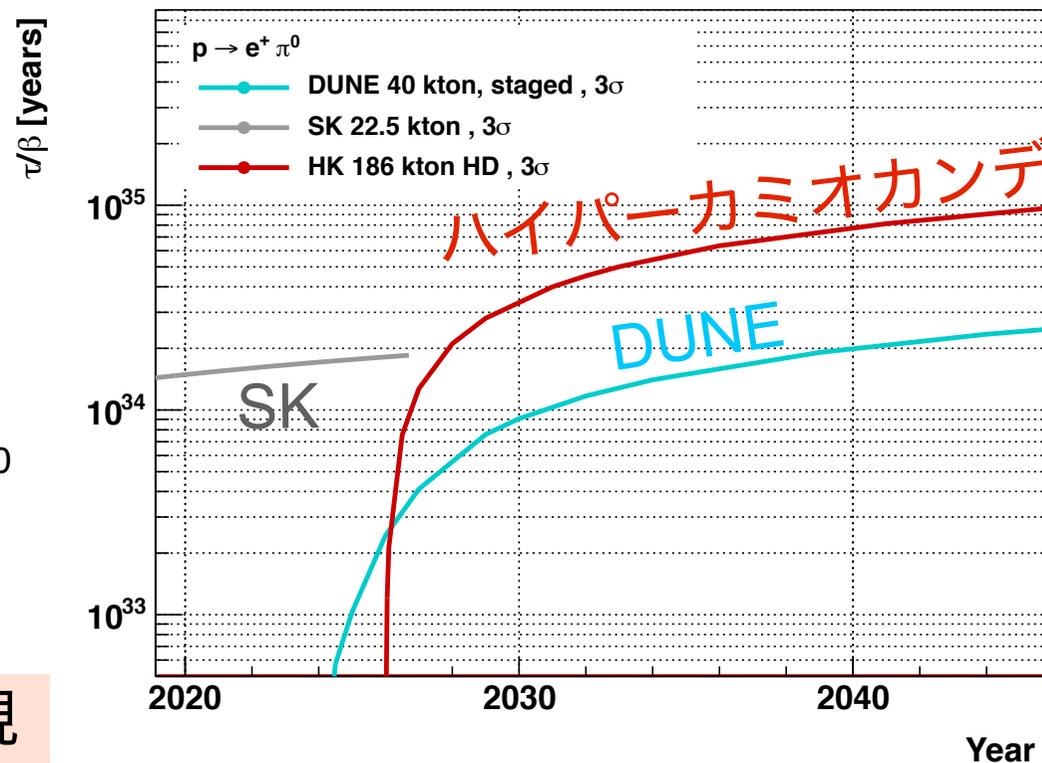
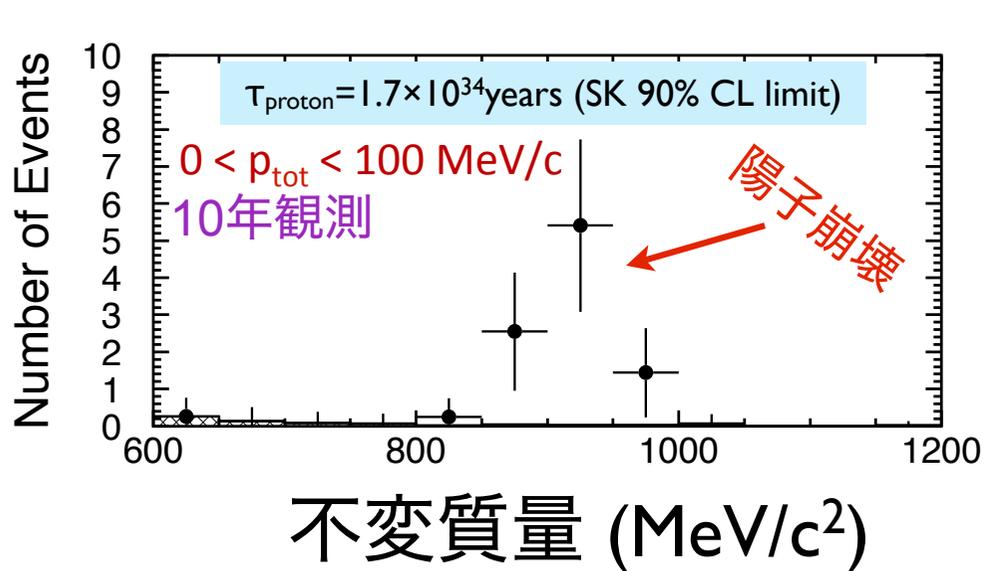
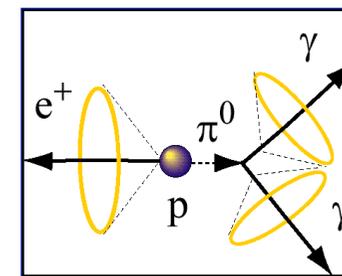


- $p \rightarrow e^+ \pi^0$
 - 0 candidates (40% eff. & 0.61BG)
 - $\tau_p / Br > 1.6 \times 10^{34}$ yrs
- $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$
 - 2 candidates (40% eff. & 0.87BG), one is rejected after energy re-calibration
 - $\tau_p / Br > 7.7 \times 10^{33}$ yrs

paper under preparation



ハイパーカミオカンデ 陽子崩壊探索： $p \rightarrow e^+ \pi^0$



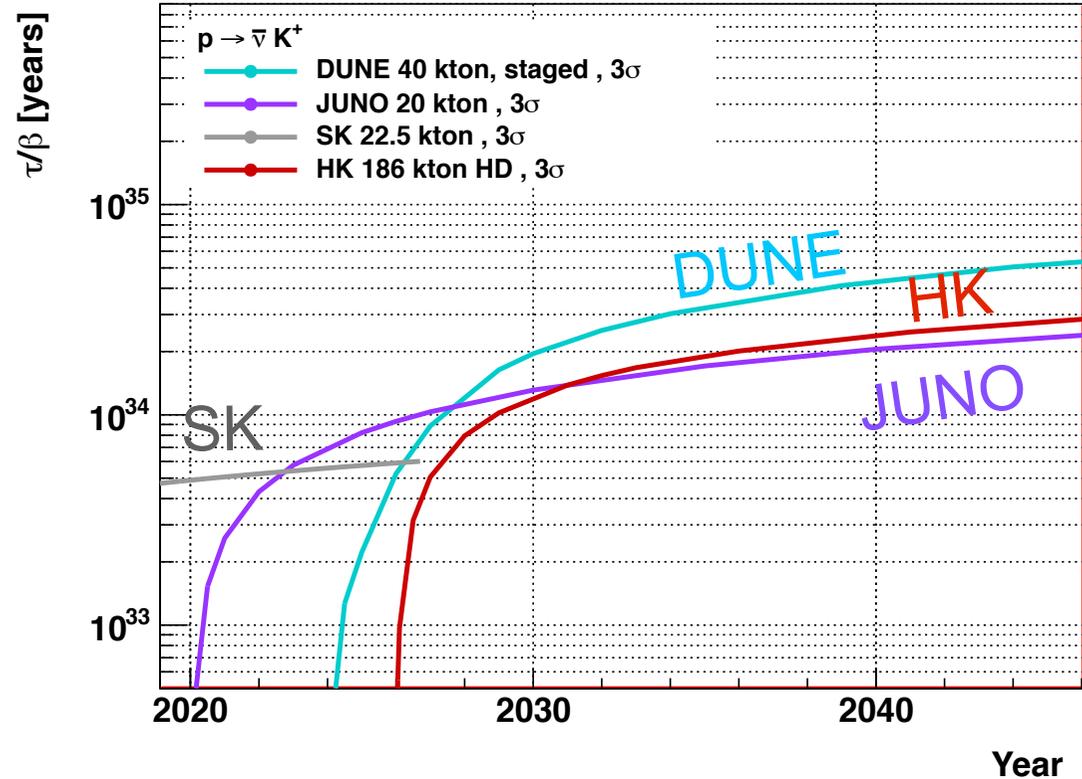
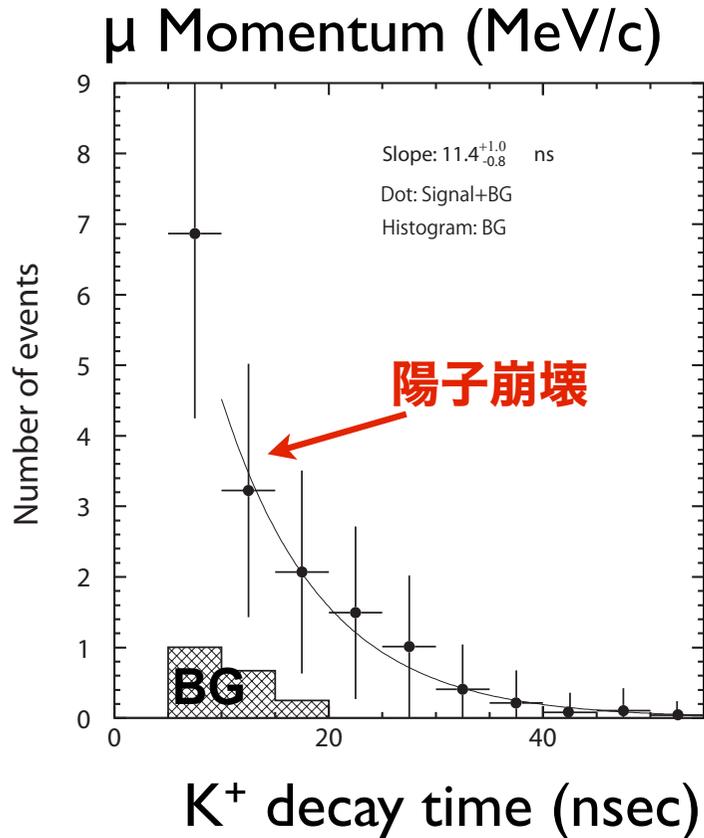
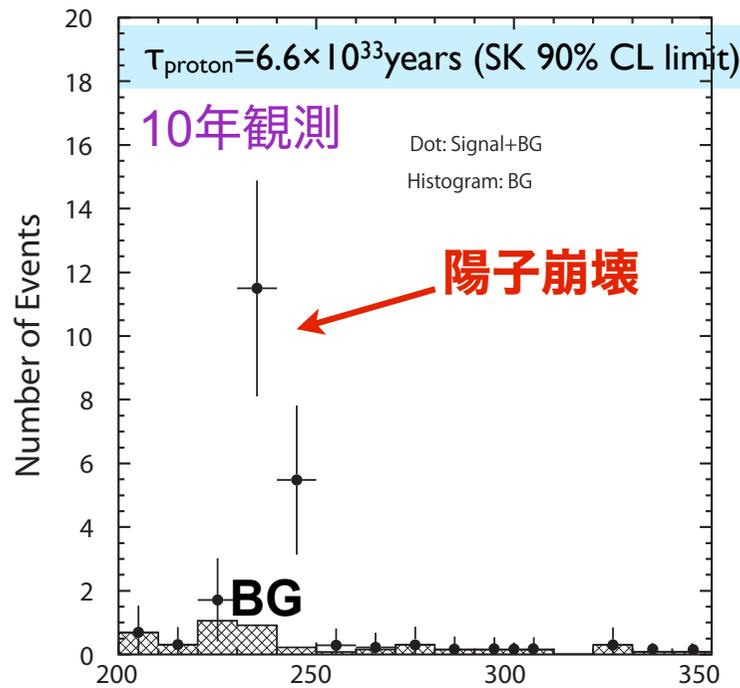
光高感度化によりBGフリーを実現

$T_{\text{proton}} = 1.7 \times 10^{34} \text{ years}$,
Super-Kの制限値の場合

~9 σ discoveryが可能

- 陽子寿命 10^{35} 年で 3σ 発見が可能
- 米国計画 (DUNE/LBNF) を感度で凌駕する

ハイパーカミオカンデ $p \rightarrow \nu K^+$

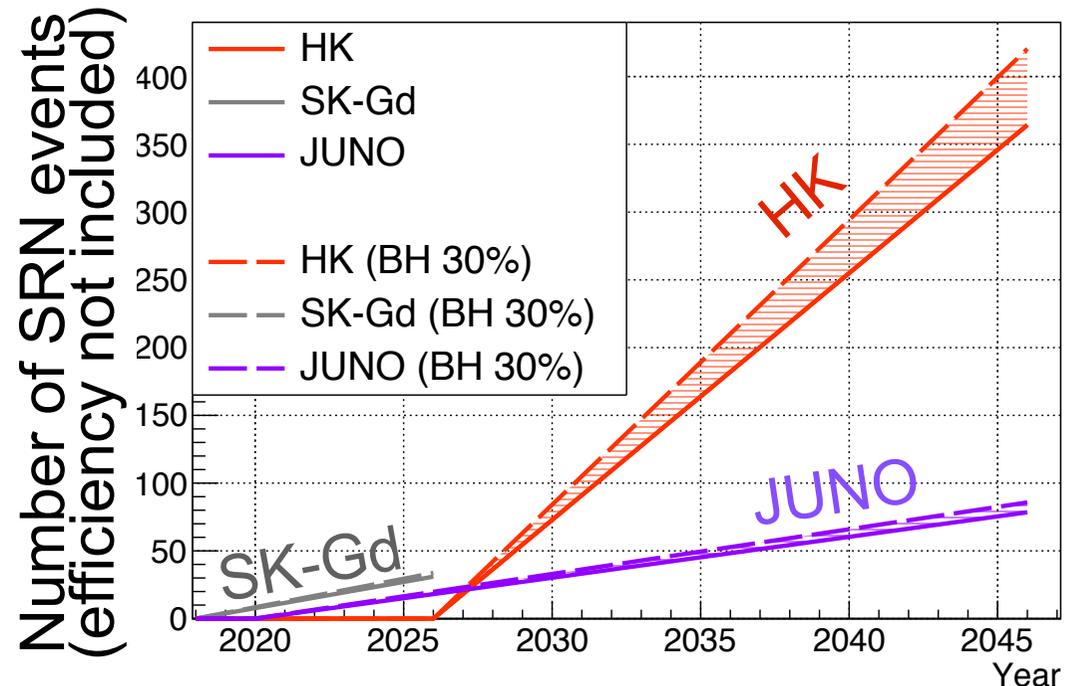
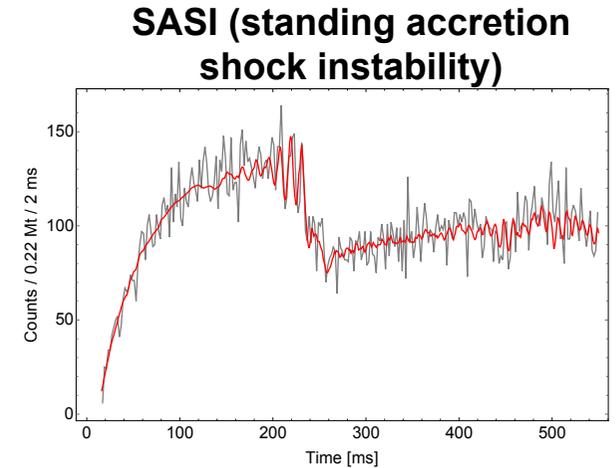
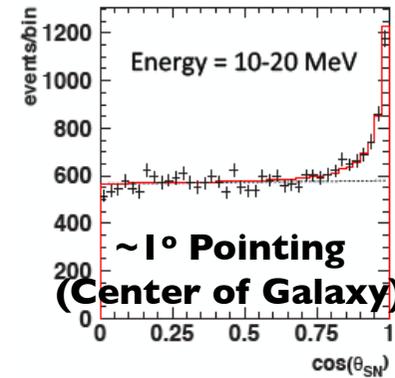


- SUSYの検証
- DUNE, JUNOと同等の感度

ニュートリノ天体素粒子物理学

- ~10MeVのニュートリノ観測：(1)v方向, (2)vエネルギー, (3)時刻, (4)大質量 (22kt→190kt)

- 太陽 $\nu_e \rightarrow$ reactor $\bar{\nu}_e$ との $\sim 2\sigma$ tension 解決or発見, Hep v
- ~Mpc までの超新星爆発v
 - 爆発の仕組み (vがKey)
 - BH/NS formation
 - $\sim 1^\circ$ 方向精度 \rightarrow 光学, UV, γ , GW望遠鏡へのアラート
- SN diffuse v
 - 暗い SN's と BH formation
 - SK-Gd で発見 \rightarrow Hyper-K で測定.



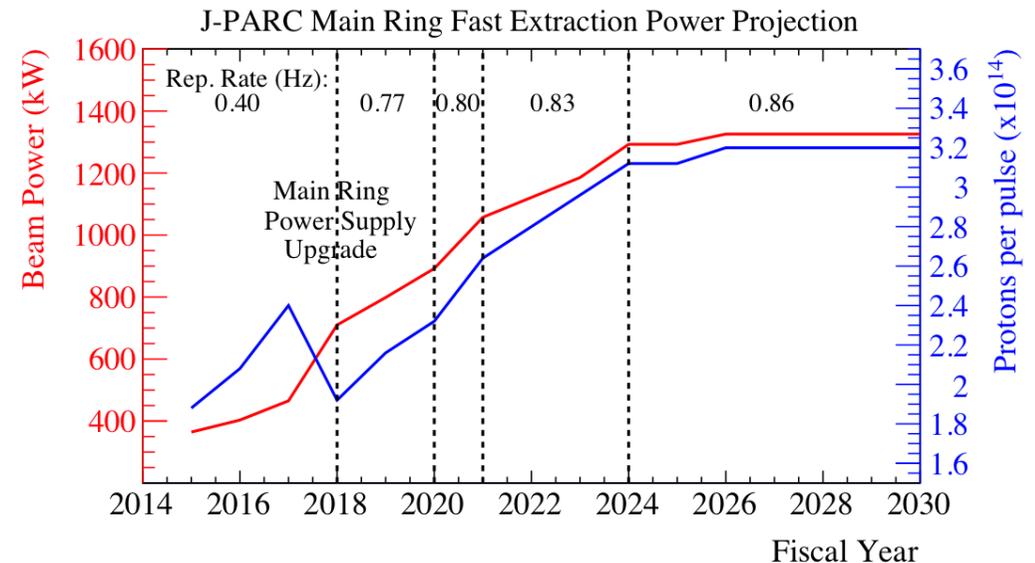
プロジェクト近況

- 宇宙線研究所将来計画検討委員会による中間報告「**ICRRの次期主要プロジェクト**として適切な計画と認め、**速やかに実現を目指すべき**」
- KEKプロジェクト実施計画（KEK-PIP）「新規予算が必要なプロジェクト」の中で、「**ハイパーカミオカンデのためのJ-PARC加速器高強度化**」を**最優先課題**としている
- 日本学術会議、第23期学術の大型計画に関するマスタープラン(2017)
 - 「**重点大型研究計画**」の一つ
- 文科省による予算措置に係るロードマップ2017の審査中
- 東京大学内で概算要求の準備中．準備・推進機構の設置準備中．

2018年度着工、2026年度観測開始を目指す

J-PARC加速器施設の高強度化

- ~0.47MW (達成) から 0.75MW (T2Kの設計値) へ
- ~60億円/3年の予算措置開始
- MR電源交換により rep rate を 0.4Hz から 0.77 Hz へ
- #proton/pulse も増強
- ~2026年までに rep rate ~ 0.86Hz (1.3MW) を計画.
- 1MW相当の実証試験成功
- HK物理感度のbaseline

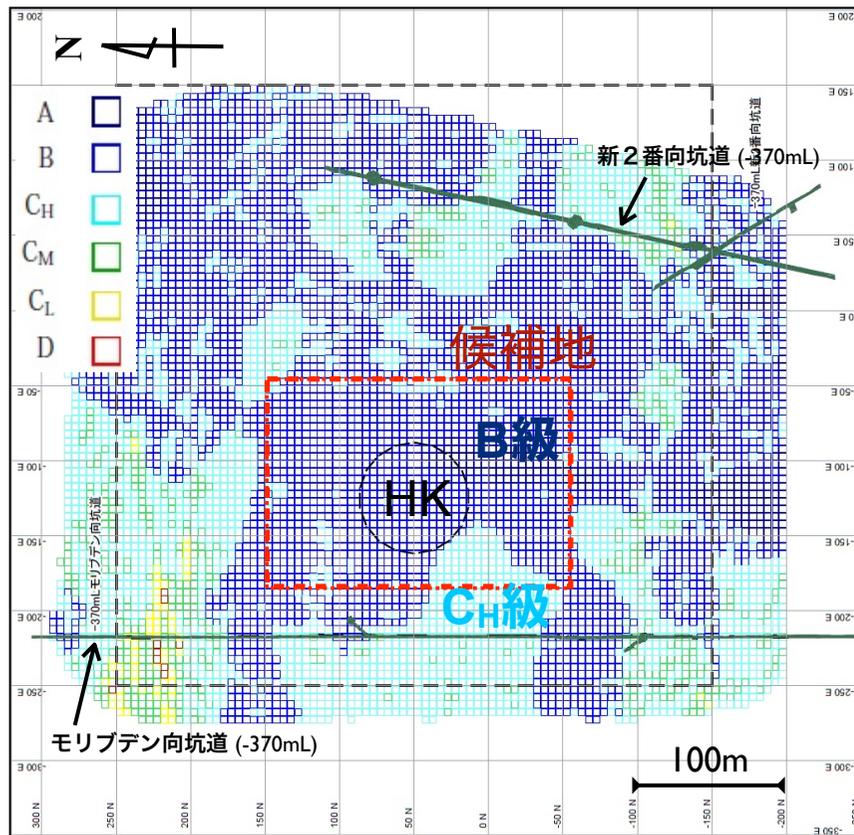


KEKの研究実施計画 (KEK-PIP) では、ハイパーカミオカンデのための J-PARC高強度化が最優先課題に位置づけられている。

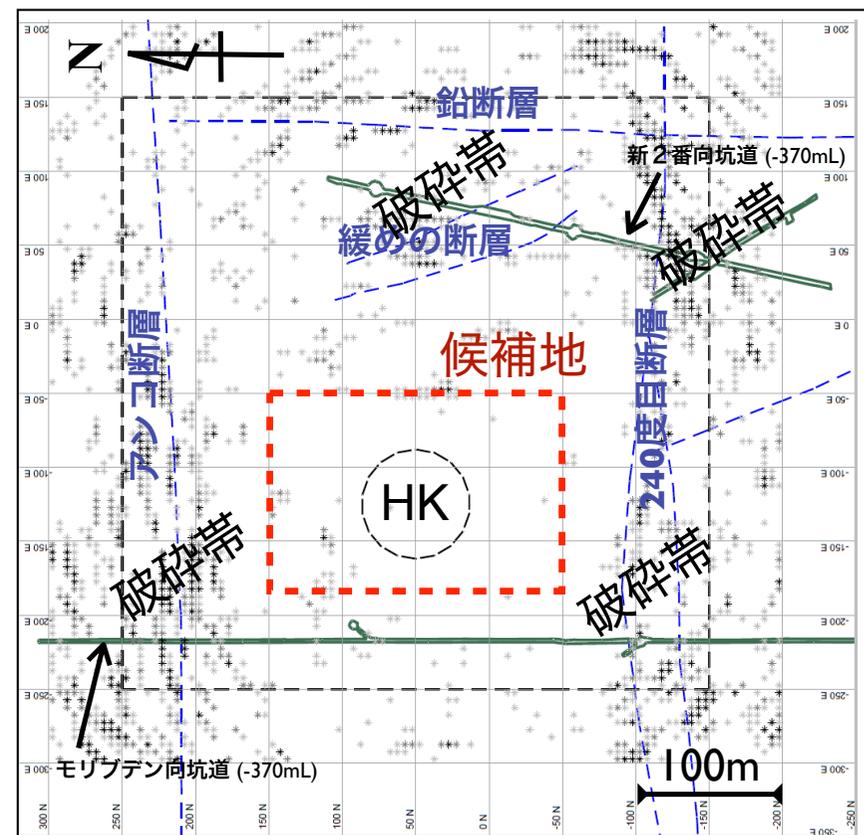
地下大空洞の掘削

- 弾性波トモグラフィ調査より岩盤等級の3Dマップを作成
 - $(400\text{ m})^3$ の広域、発振点837点、受信器111個
- 破砕帯を避けた、岩質の良好な場所 (200m x 150m) を特定

岩盤等級分布

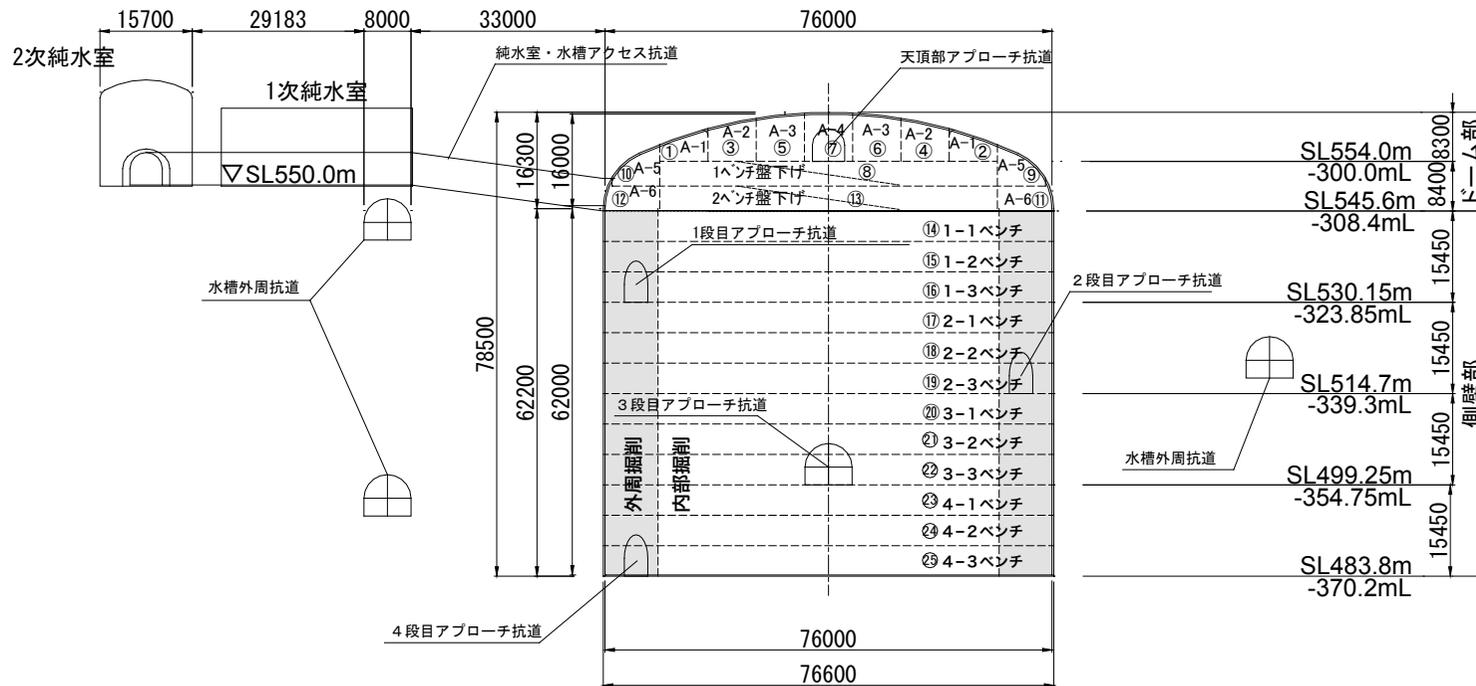
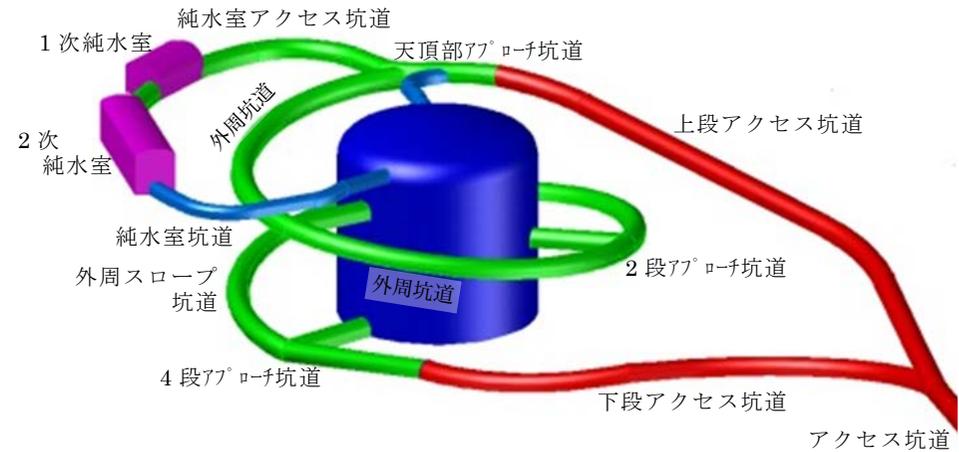
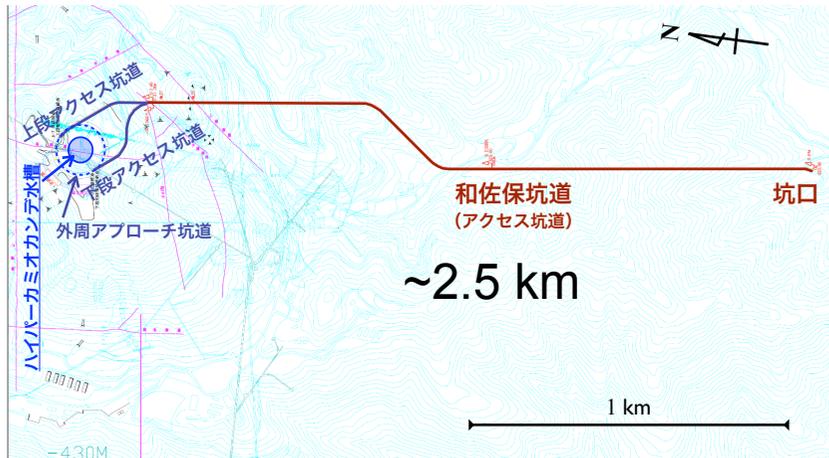


破砕帯分布



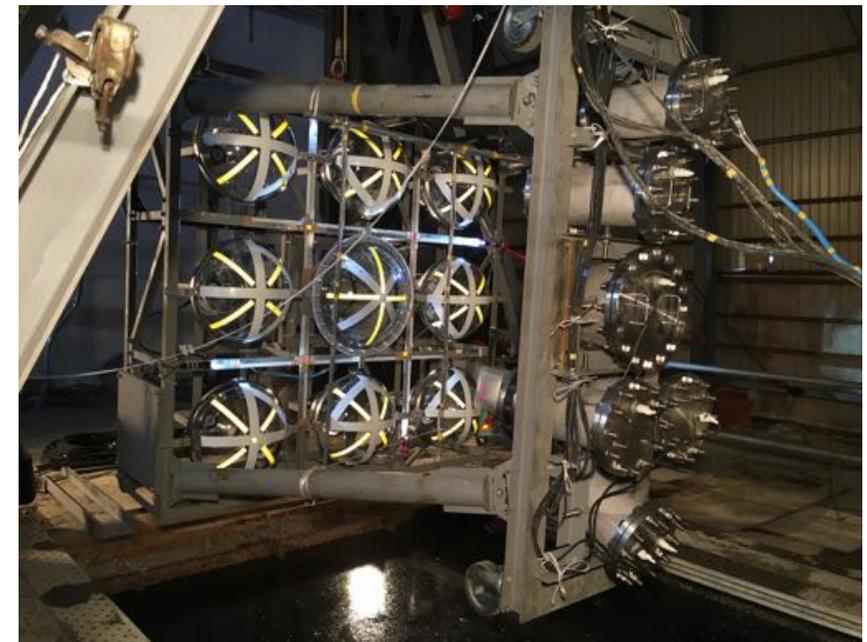
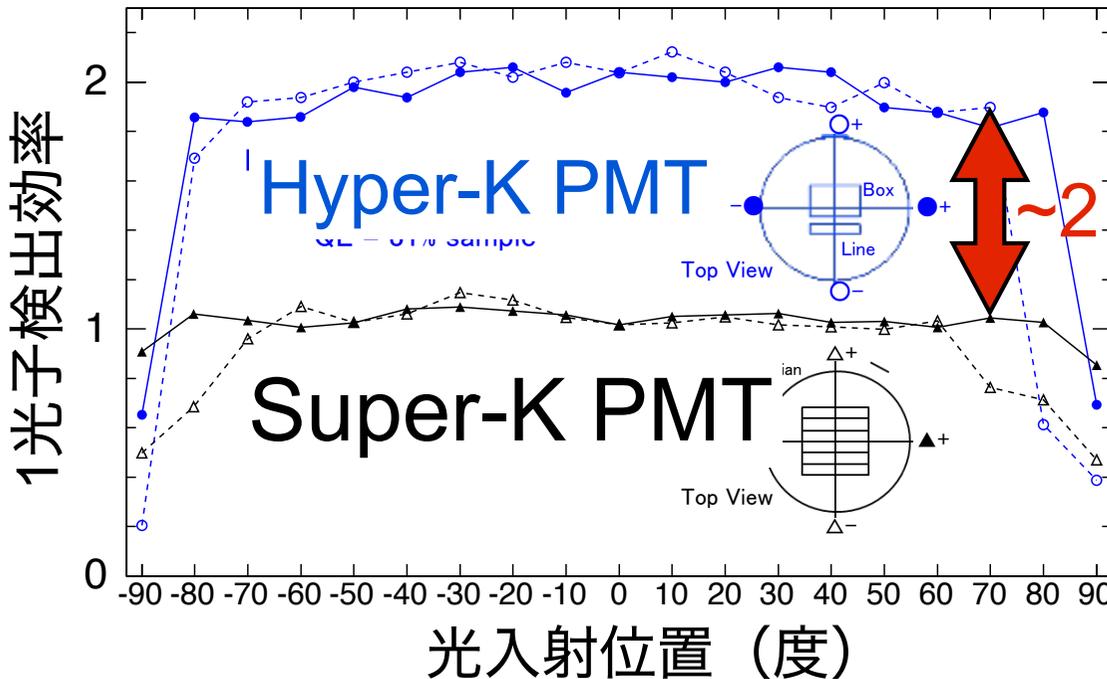
候補地を絞り込んだ

地下大空洞の掘削



工期8年 (2018~2025年)

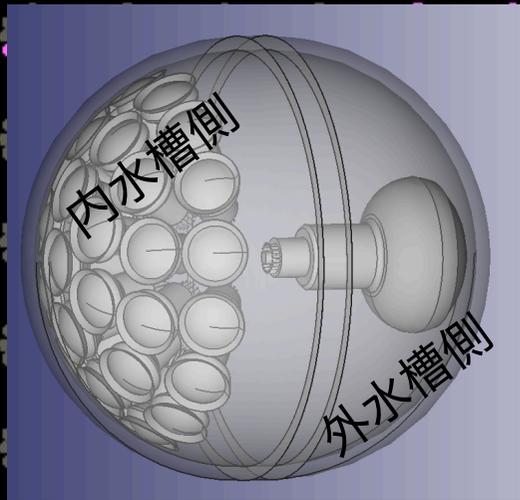
新型光センサー



- 1光子感度 2 倍、時間精度 2 倍を達成
- 耐水圧性能も ~ 2 倍 (>100m相当)
- 防爆ケースの基本設計と防爆試験 (@80 m) OK

国際分担

Multi-PMT



- 内水槽光検出器の半分と全ての外水槽光検出器

- Multi-PMT module

- 方向情報、耐圧、ラドン閉じ込め
- 複数の製造会社の競争を期待

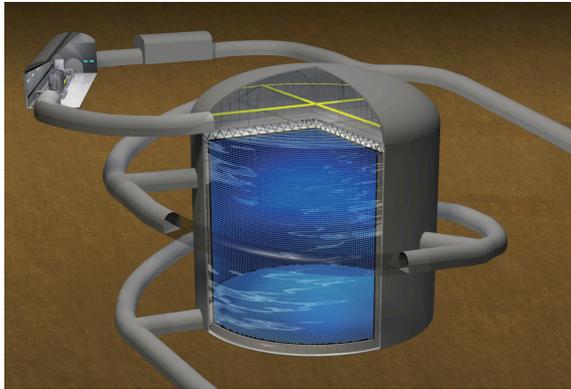
- 電子回路、DAQ、地磁気補償コイル

- 水チェレンコフ前置検出器（イベントディスプレイ）

まとめ

ハイパーカミオカンデ計画書
(本日完成)

ハイパーカミオカンデ計画



2017年5月

ハイパーカミオカンデ日本グループ

- 突破口（ ν 振動発見）の先の新たなステージに
 - 豊富な研究課題と発見能力
 - 振動に関わる ν 性質の全容解明
 - ニュートリノ天体素粒子物理学
 - 陽子崩壊の発見を目指す
 - 実績をベースに着実に推進
- 予算要求を開始する