

T2K実験, ハイパーカミオカンデ



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



T2K experiment

J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



Hyper-Kamiokande

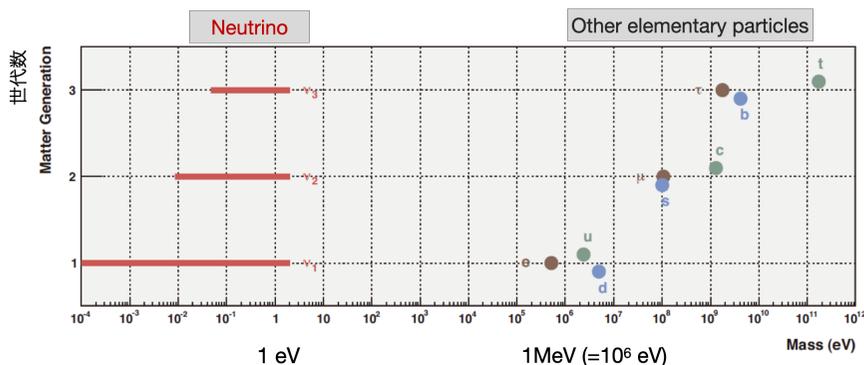
研究テーマ：
大気・加速器ニュートリノ実験
陽子崩壊探索

宇宙線研究所 奥村公宏

2022.06.04 大学院ガイダンス

ニュートリノの謎

素粒子の質量スケール



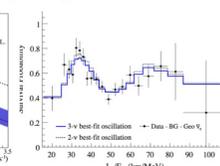
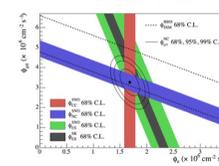
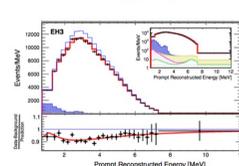
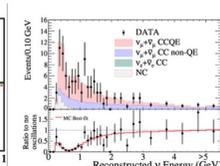
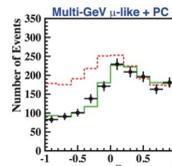
ニュートリノ混合行列

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

大気・加速器 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

原子炉 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$
加速器 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

太陽 $\nu_e \rightarrow \nu_e$
原子炉 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$



PDG2014 (Normal hierarchy):

$$\Delta m_{32}^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

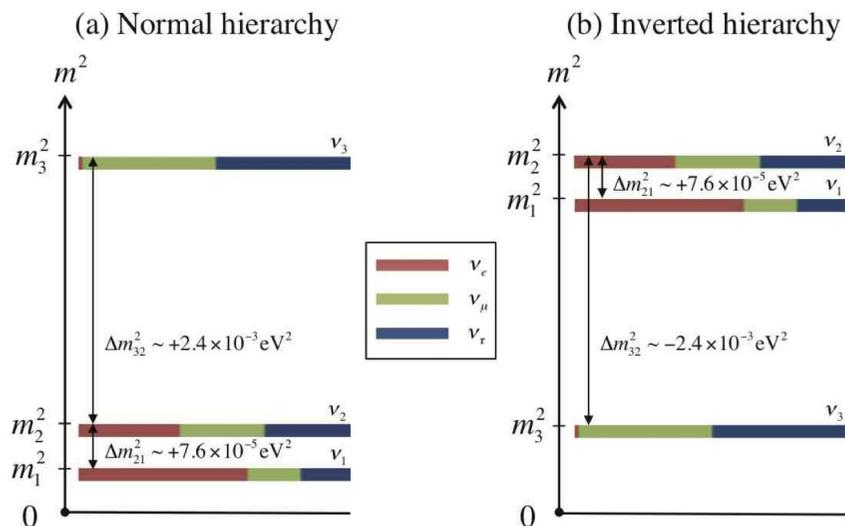
$$\sin^2 \theta_{23} = 0.437_{-0.023}^{+0.033}$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.0234_{-0.0019}^{+0.0020}$$

$$\Delta m_{21}^2 = 7.54_{-0.22}^{+0.26} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.308 \pm 0.017$$

質量階層性



- 他の素粒子と比べて非常に小さい質量
- フレーバーと質量の間の大きな混合角
→ 大きなニュートリノ振動効果
- CP対称性は破れている？ 大きさは？
- 質量階層性は他と同じか？
- 右巻きニュートリノは存在するか？
マヨナラ粒子？

レプトンCP対称性の破れ



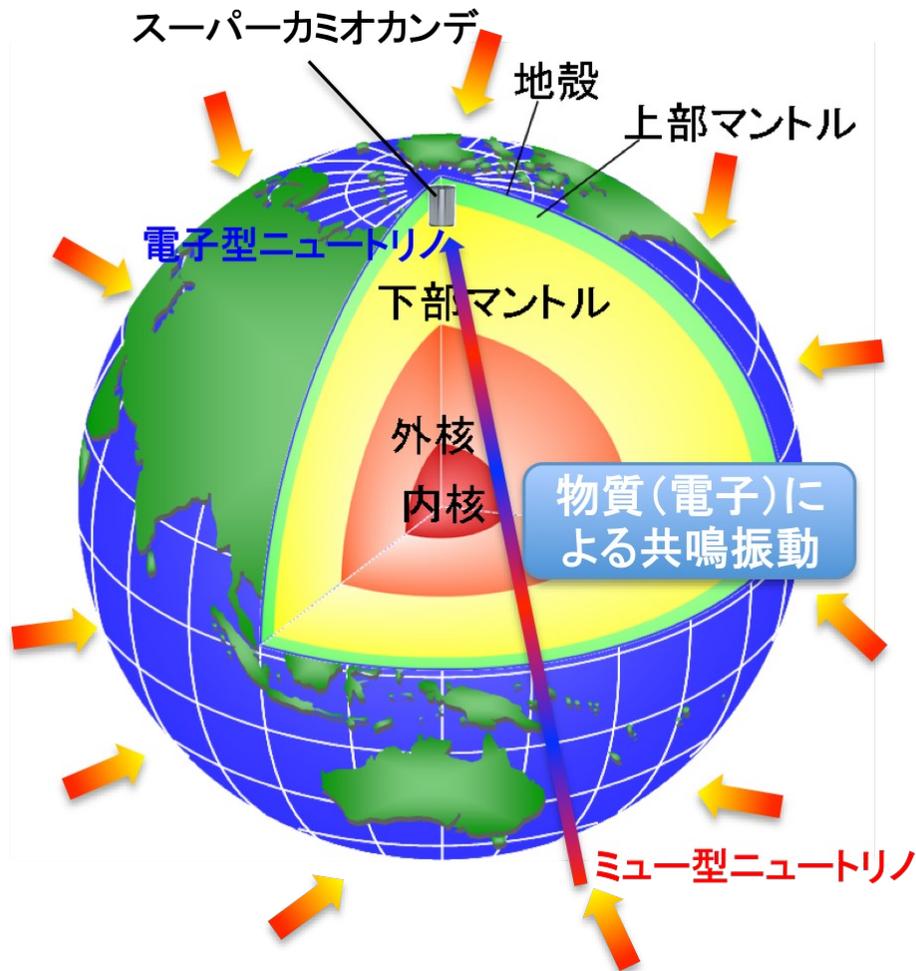
- 宇宙の始まり：ビッグバンで同数の粒子・反粒子が生成
→ 現在では物質（粒子）のみが生き残り、反粒子は消滅、なぜ？
- CP対称性の破れは物質優勢宇宙の条件（サハロフの条件）の一つ
- ニュートリノのCP（レプトンCP）の破れの大きさは、クォークに比べて3桁大きい可能性がある
 - 宇宙の物質起源を説明できるか？

T2K実験 (Tokai-to-Kamioka)



- 長期線ニュートリノ振動実験
 - J-PARCからSKへニュートリノビームを照射し、ニュートリノ振動を測定
- ν ビーム・反 ν ビームの振動確率の差異からCP非対称性を測定
 - 世界最高感度の測定、レプトンCP非対称性の兆候が見えている
- 将来 (ハイパーカミオカンデ) にむけてアップグレード
 - ビームパワー増強プラン (300kW→500kW→1MW超へ)

大気ニュートリノ



• ニュートリノ質量階層性を決定する

- ニュートリノが地球中心の高密度領域を通過するとニュートリノ振動に“ゆがみ”が生じる
- “ゆがみ”の程度を $\nu \cdot \bar{\nu}$ で測定することで、質量階層性の決定が可能

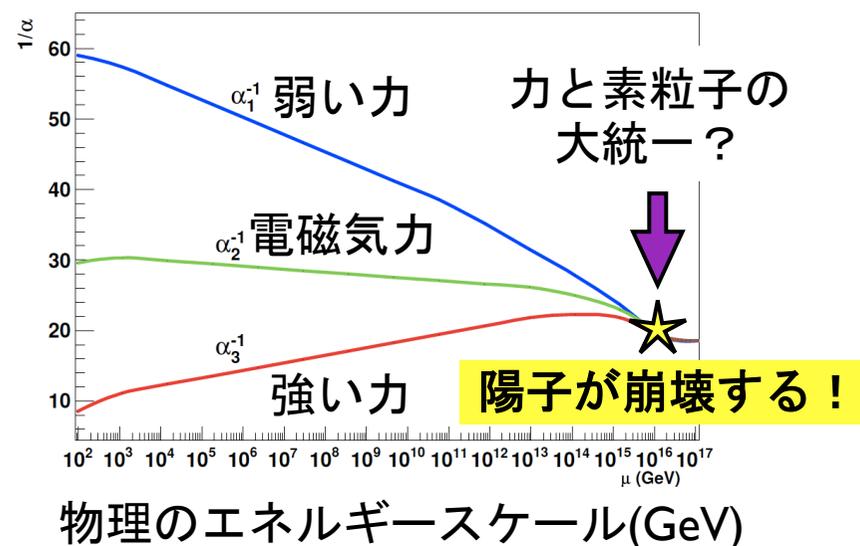
• 観測の高度化が鍵になる

- SK-Gdでガドリニウム（中性子）を活用
- 中性子の情報が加わることにより、ニュートリノエネルギーや方向、 $\nu \cdot \bar{\nu}$ の識別能力がアップ
- より感度を向上したデータ解析が期待される

陽子（核子）崩壊の探索

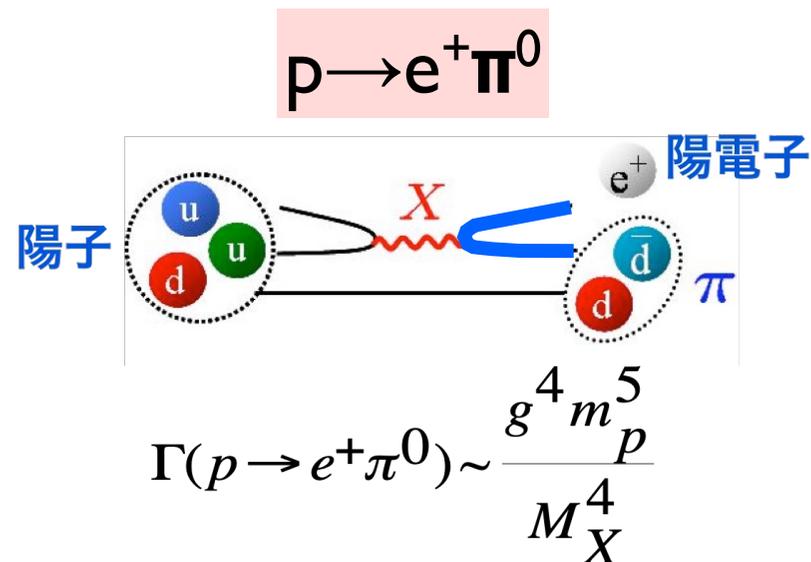
● 大統一理論

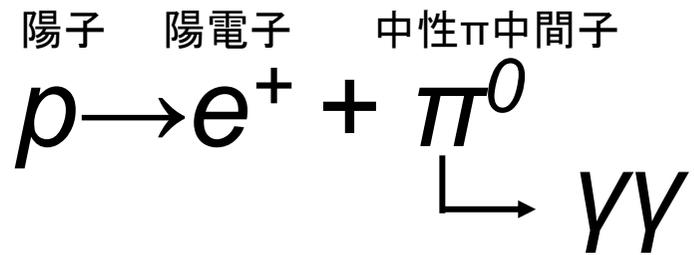
- 3つの力、物質素粒子（レプトン・クォーク）を統一して記述
- 陽子の崩壊を予言。バリオン数非保存（サハロフ条件の一つ）



● 陽子崩壊の発見→測定へ

- レプトン・クォーク間の直接遷移を見る→大統一の**直接証拠**



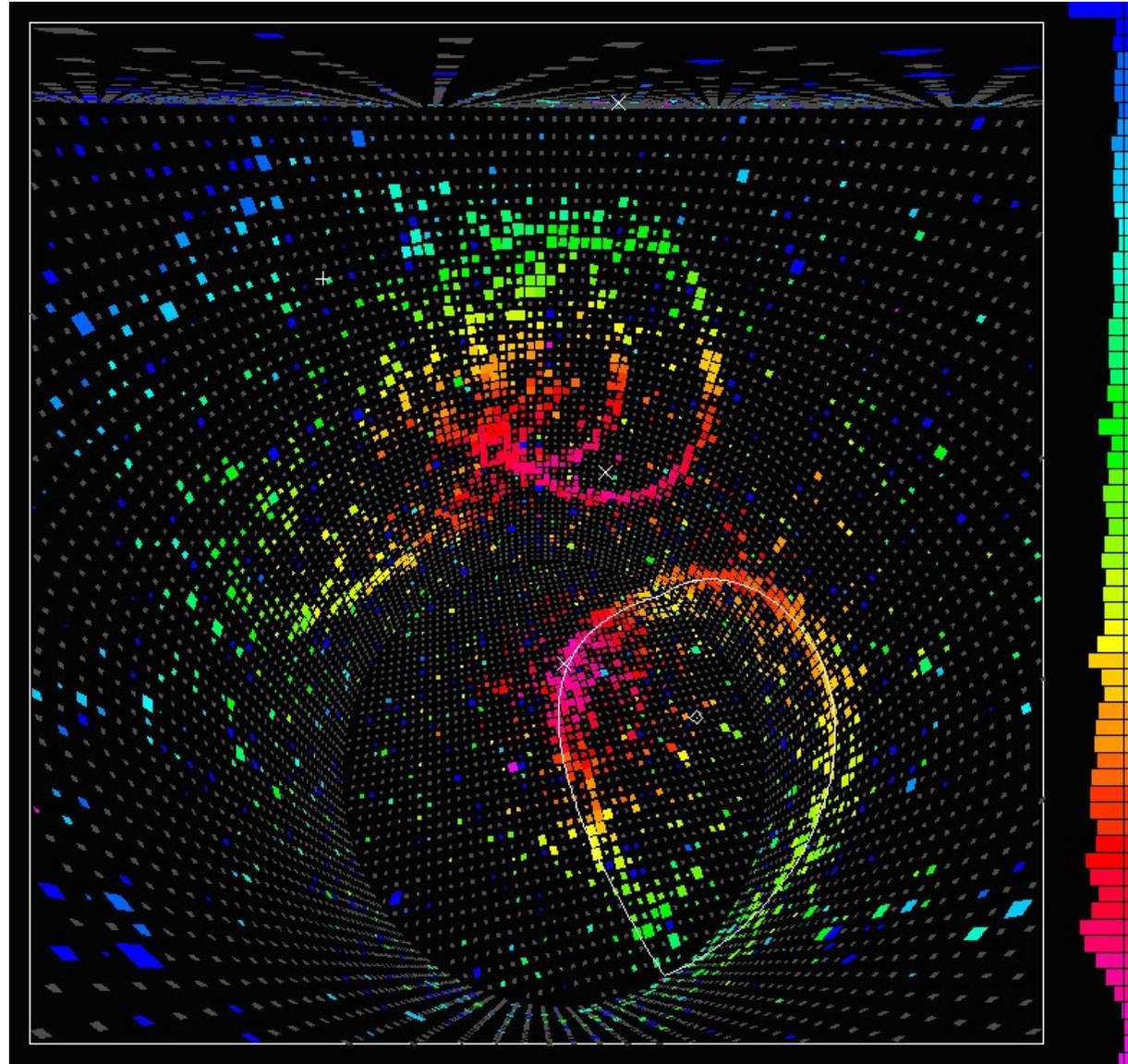


スーパーカミオカンデ：
2.2万トンの水～ **10^{34} 個**
の陽子を監視する世界最
高感度の装置。

今後の課題

- 2020年からガドリニウム導入→バックグラウンド低減により発見能力向上.
- まだ解析していない崩壊モードの探索も.

ハイパーカミオカンデ：
陽子寿命 **10^{35} 年**への探索

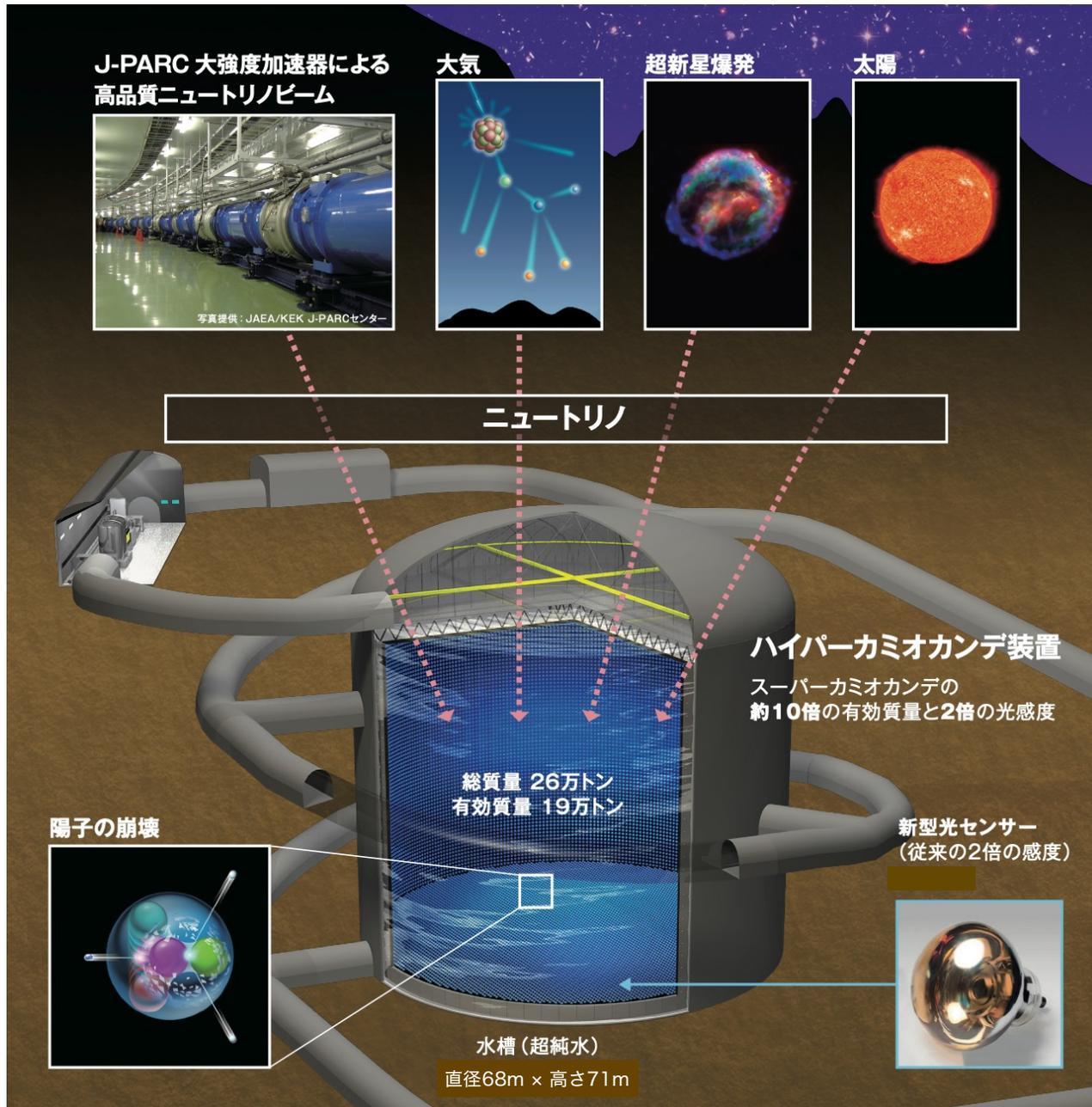


スーパーカミオカンデ

- ガドリニウムを導入したスーパーカミオカンデ (2020年～)
- ハイパーカミオカンデ (2020年～建設、2027年観測開始予定)



次期計画：ハイパーカミオカンデ



有効質量19万トン
(SKの8.4倍)

J-PRCニュートリノビーム強度も約2.5倍

多様な研究が可能：

- ・ CP非対称性の精密測定
- ・ 大気ニュートリノ
- ・ 陽子崩壊の探索
- ・ ニュートリノ天文学

国際共同実験

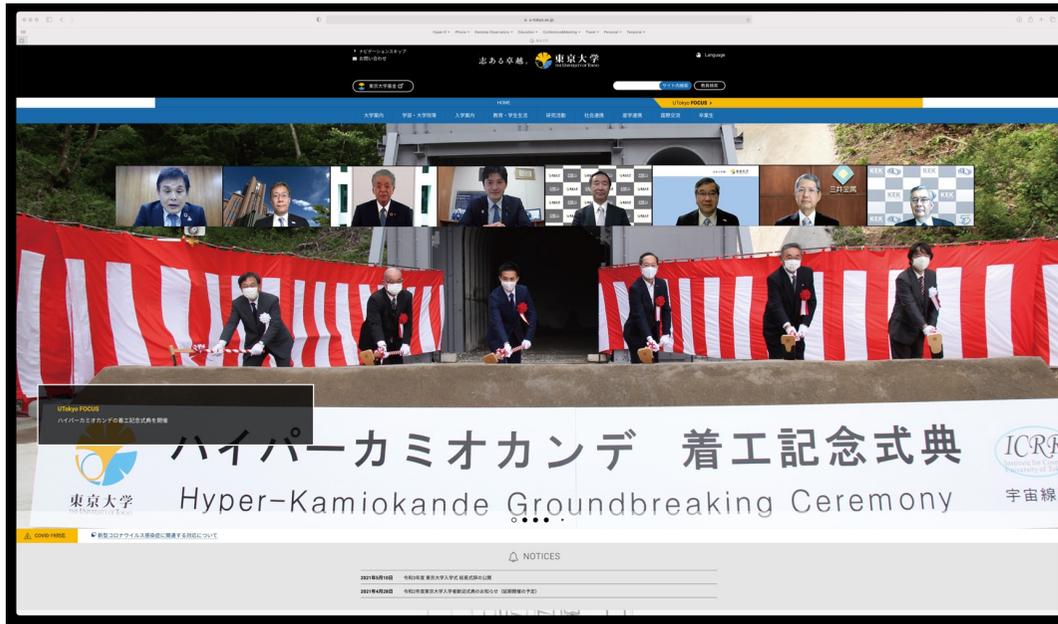
19カ国、93研究機関

400人以上の研究者が参加

2020~2026年建設

2027年観測開始

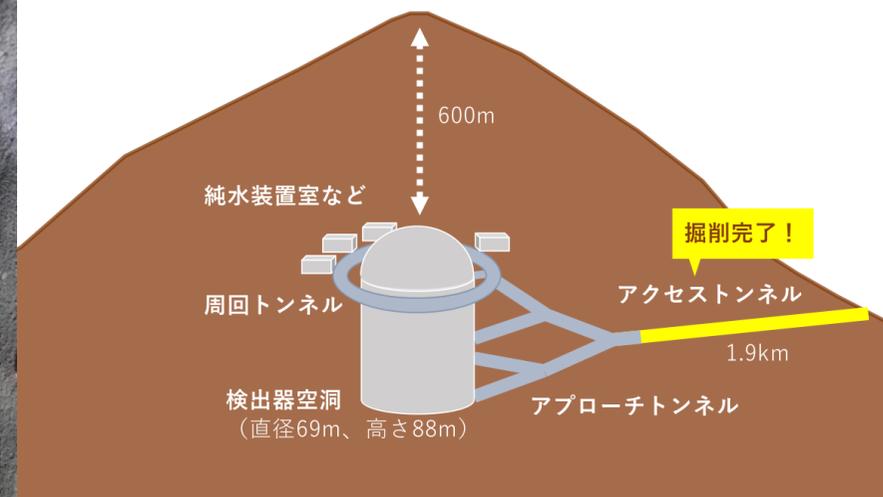
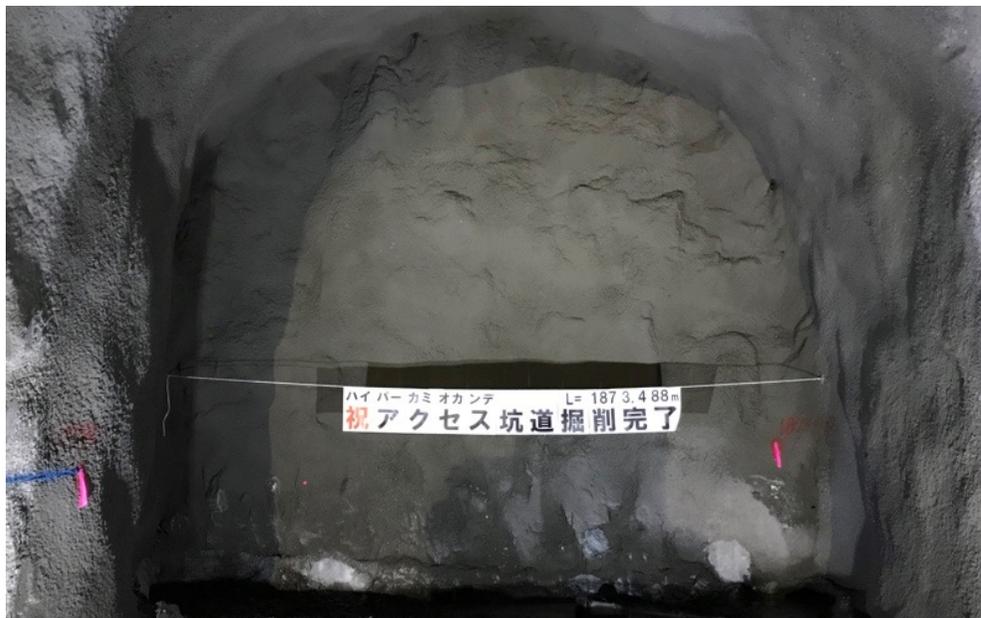
パイパーカミオカンデ：建設状況



2021年5月28日 着工式

2022年2月25日
アクセストンネル掘削完了

現在
アプローチトンネル掘削中



高感度光電子増倍管 (PMT)

挑戦：SKをサイズ・性能で超える検出器の実現

日本中心：
50cm口径PMT約20,000本
SKPMTの2倍の性能を持つ

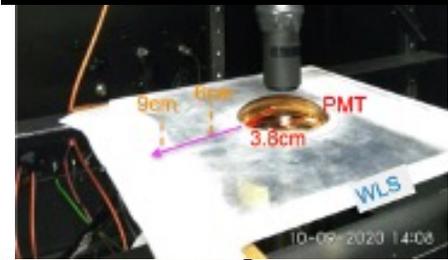
海外中心：
PMTカバー
外水槽用PMT、マルチPMTモジュールなど



PMTカバー (スペイン)



外水槽 (英国)



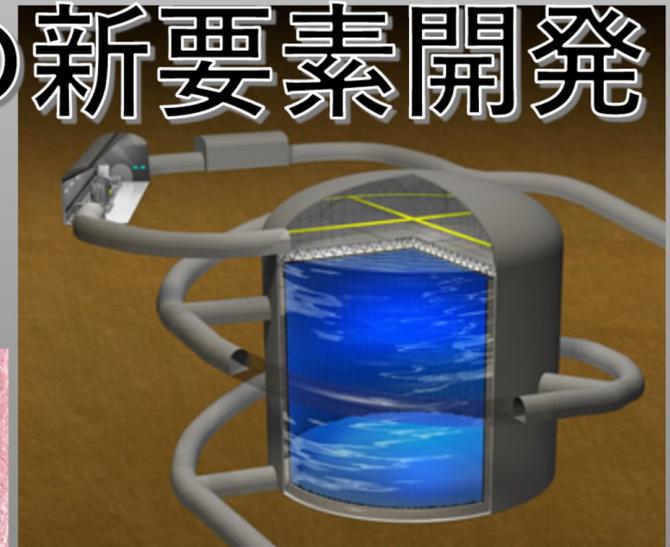
Hyper-K DAQ – 多くの新要素開発



2万～4万本の超高感度, 高速
光電子増倍管 (PMT)

1ナノ秒の時間分解能
超高性能PMTを活かす

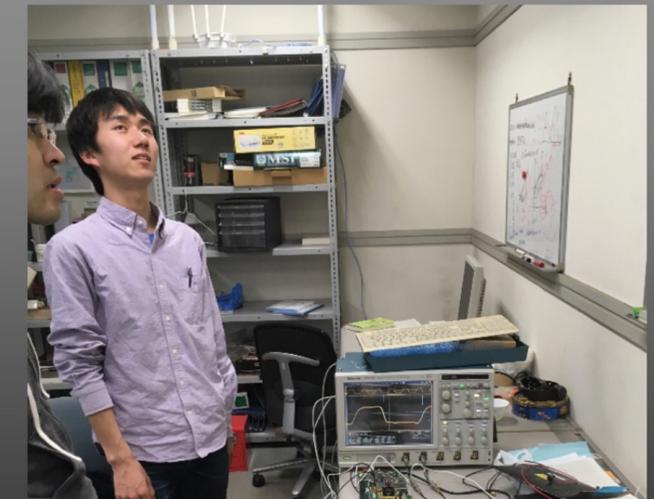
水中近接 電荷時間 観測回路
PMTを駆動する2千V電圧生成回路



水中電子回路を保護する
高耐圧水密ハウジングや
ケーブルフィードスルー開発

学生, 教員, 大学, 国を超えた開発
システムデザイン議論,
デジタルロジック開発, 測定, 評価など
(例)

10ピコ秒の高精度で
100mの範囲に分散する
千以上の回路を同期する
クロック回路の開発, 評価の様子



まとめ

- ニュートリノ振動測定、陽子崩壊探索を通して、ニュートリノの性質（レプトンCP対称性、ニュートリノ質量階層性）や大統一理論を研究
- 標準理論を超えた素粒子物理を探り、宇宙創生の謎に迫る
- スーパーカミオカンデで世界最高感度を達成
- SK-Gdで中性子を利用してさらに詳細な測定が期待
- ハイパーカミオカンデで高統計・高精度の実験を行い、ニュートリノ・陽子崩壊研究の飛躍を目指す

宇宙ニュートリノ部門・大学院担当教員

神岡宇宙素粒子研究施設（神岡）

宇宙ニュートリノ 観測情報融合センター（柏）



Masayuki NAKAHATA

中畑 雅行

教授（所長）



Masato SHIOZAWA

塩澤 真人

教授



Takaaki KAJITA

梶田 隆章

(来年度からは大学院学生
の受け入れができません)

教授



Shigetaka MORIYAMA

森山 茂栄

教授



Yoshinari HAYATO

早戸 良成

准教授



Kimihiro OKUMURA

奥村 公宏

准教授



Hiroyuki SEKIYA

関谷 洋之

准教授



Shohei NAKAYAMA

中山 祥英

准教授