

スーパーカミオカンデ・T2Kから ハイパーカミオカンデへ ~ニュートリノ振動実験と陽子崩壊探索を極める~

東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設長
ハイパーカミオカンデグループ共同代表
塩澤 真人

2025年6月7日
大学院ガイダンス@柏キャンパス



この自然はなにからできているのだろうか？

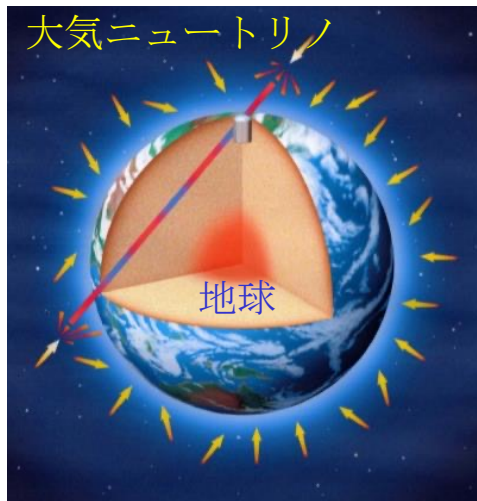
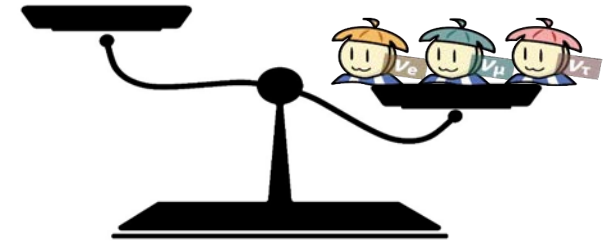
我々はどこから来て、どこに行くのだろうか？

「ニュートリノ」と「陽子崩壊」の理解は、素粒子物理学にとって重要であるばかりでなく、現在の宇宙が物質で支配されている（ビッグバン時に同数生まれた反物質が消えている）謎に深く関わっていると考えられている。

ニュートリノが種類を変えることを発見。
質量を持つことがわかった。

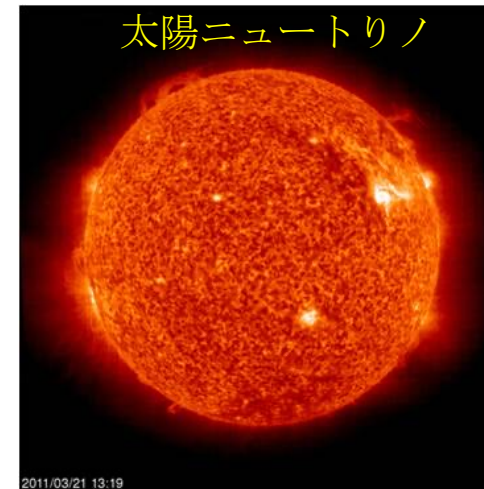


2015年ノーベル物理学賞



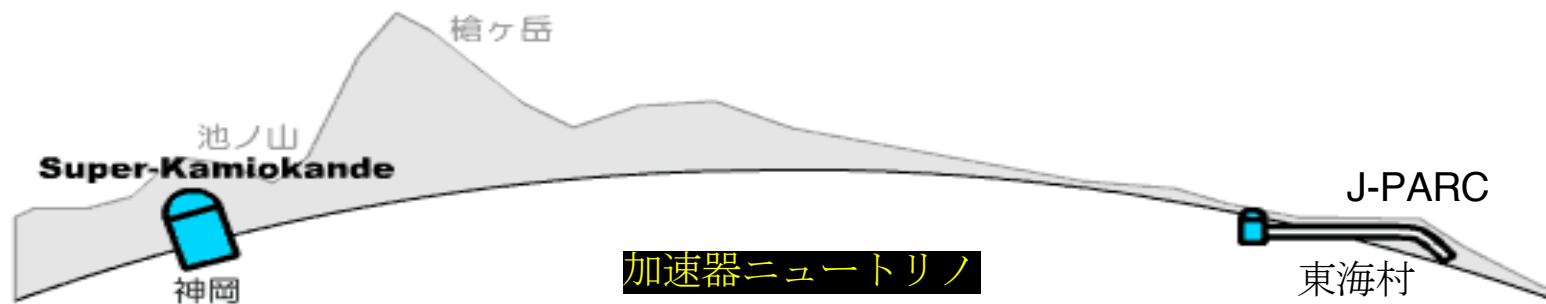
1998年：大気ニュートリノ
の振動を発見。

(ミューニュートリノがタ
ウニュートリノへ振動。)



2001年：太陽ニュートリノの観測
結果をSKとSNOとで比較し、振動
を発見。

(電子ニュートリノとミュー/タウ



2011年：T2K（東海から神岡へ）実験により、ミューニュートリノ
ビームから電子ニュートリノ発現を発見。

ニュートリノ振動（厳密解）

Flavor eigenstate Mass eigenstate

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

U^{MNS} : Maki-Nakagawa-Sakata Matrix

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

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

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

実験で調べるパラメータは：

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \delta, \theta_{23}, m_1, m_2, m_3$$

今後の研究課題

- ニュートリノの豊かな、不思議な性質

- － 極端に軽い質量 ← 電子の100万分の1以下
- － 3種類のニュートリノが理論で許されるほぼ最大の大きさで混じりあっている
- － 未知の法則が存在するはず

- 素粒子の統一的理解

- － レプトン（ニュートリノ含む）とクォークの構造・性質をまとめて理解したい
- － 陽子崩壊はクォークとレプトンの統一を直接「見る」手法

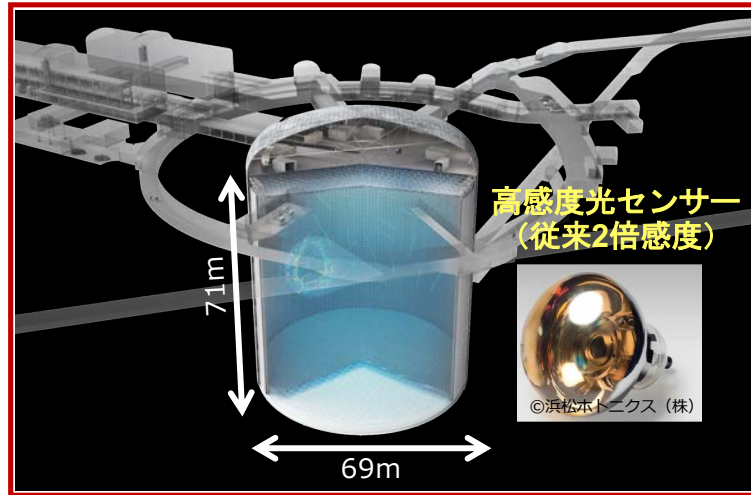
- 宇宙の非対称性（サハロフの3条件）

- － バリオン数（陽子や中性子）の保存則の破れ → 陽子崩壊があるか？
- － CおよびCP対称性の破れ → ニュートリノのCP対称性が破れているか？ 大きいのか？
- － 熱的平衡からの逸脱



ハイパーカミオカンデ計画

2020年建設開始, 2028年観測開始



ハイパーカミオカンデ検出器
(東京大学が中心)



大強度陽子加速器 J-PARC
と近中距離検出器
(高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が中心)

1. 新規建設中

- 世界最大のニュートリノ・核子崩壊検出器

(東大担当) ハイパーカミオカンデ検出器: スーパーカミオカンデの約8倍の有効質量19万トンの純水 (総質量26万トン) の水槽に新型光電子増倍管 (光センサー) ほかを設置する.

- 世界最大強度のニュートリノビーム

(KEK担当) J-PARC大強度陽子加速器の増強: 約2.5倍(2019年から) となる1.3MWビームパワー

- 世界22カ国 (欧米アジア) から約600名のコラボレータによる国際協力プロジェクト.

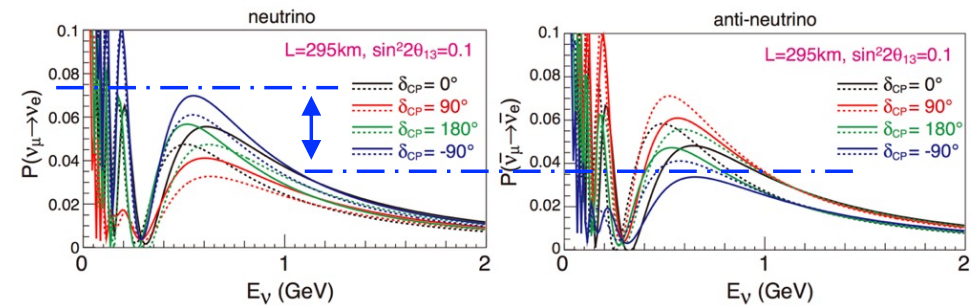
2. 大強度化中



J-PARCとハイパーカミオカンデ

- 大強度ビーム (1.3 MW x 6 months/yr x 10 yrs) X 大質量検出器 (190 kiloton)
- Pure ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$ beam peaked at 0.6 GeV (oscillation maximum at the Hyper-K location, 295km away).

- Measure CP asymmetry in neutrino by comparison of $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ and $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$



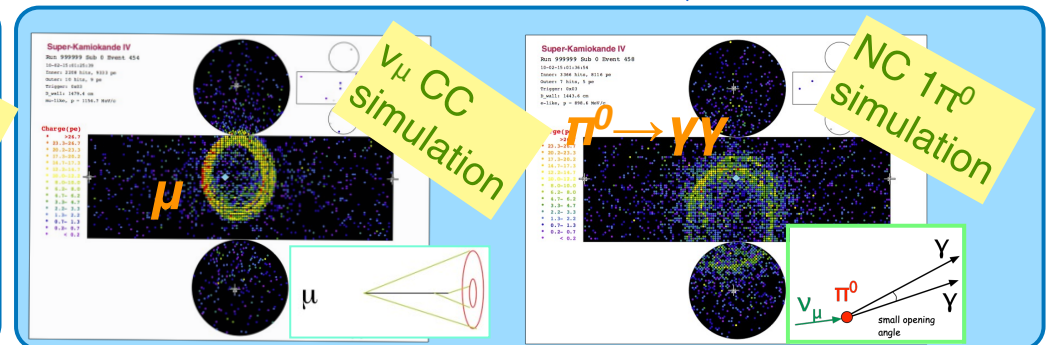
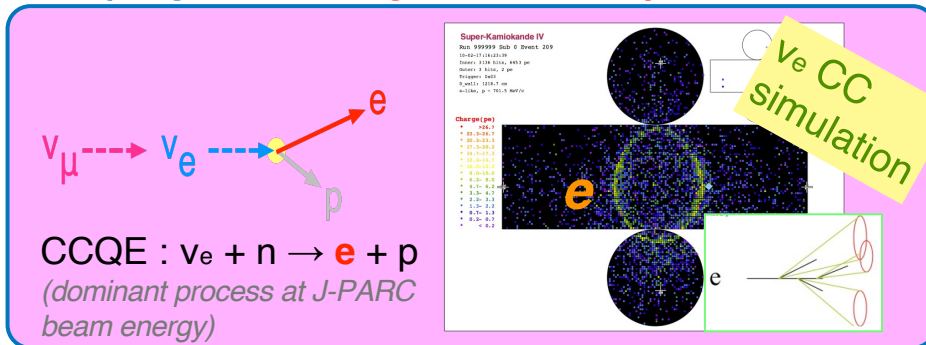
- 高い信号検出効率とバックグラウンド除去効率

ν_e appearance signal = 電子 1 つの事象

バックグラウンド事象

keeping 60% ν_e signal efficiency

>99.9% ν_μ CC, 99% NC π^0 rejection



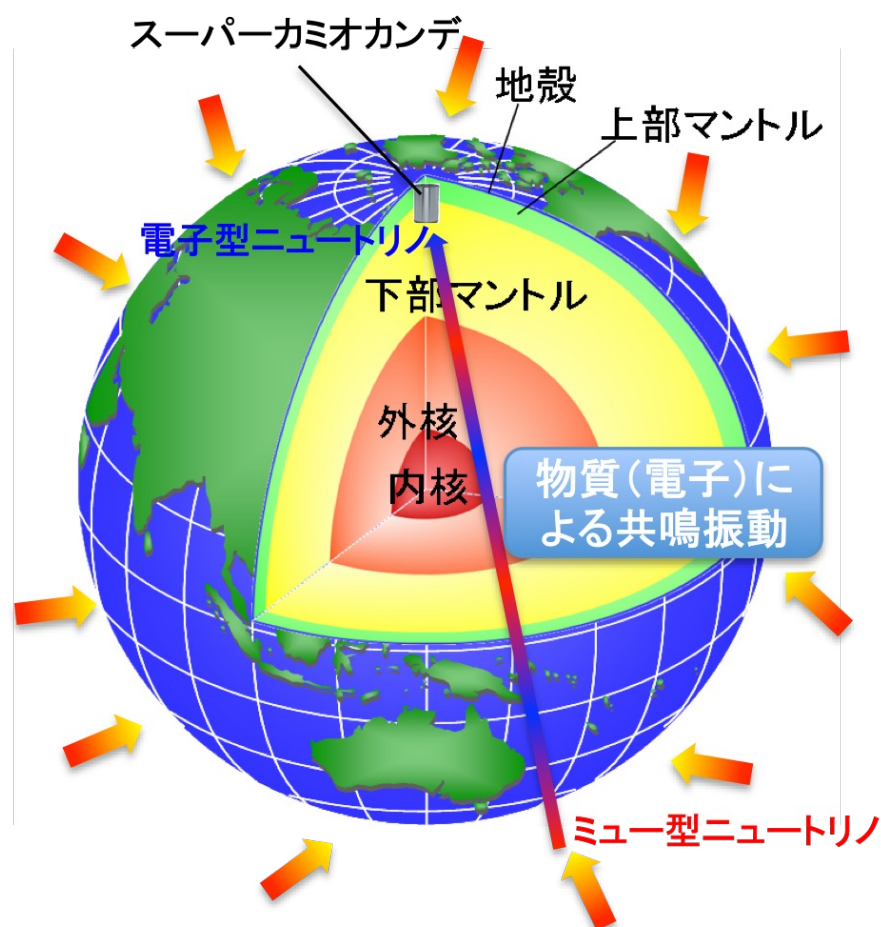
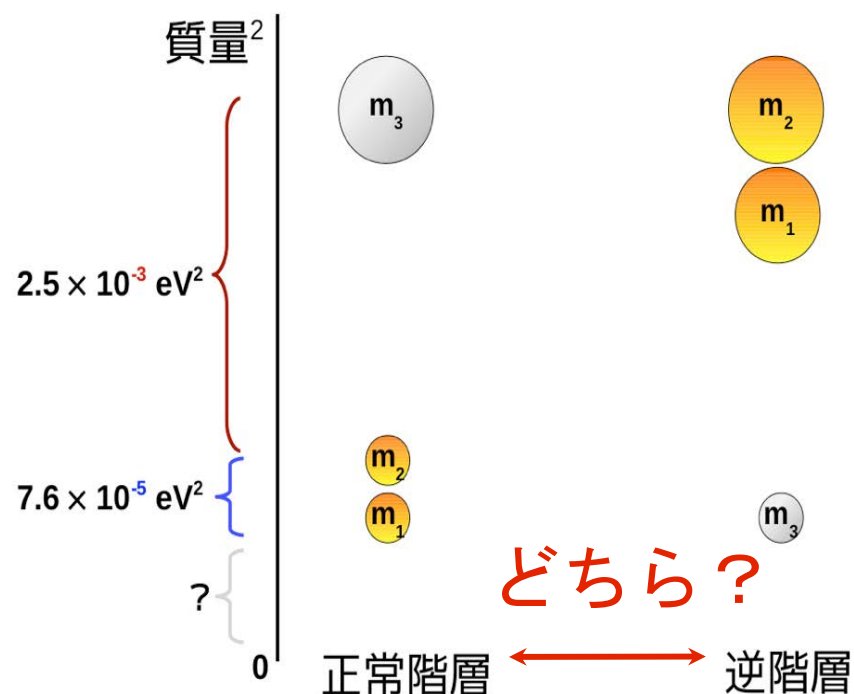
大気ニュートリノと質量階層性

- 質量の順番が未決定

- 質量の起源の理解へ
- 世代の起源、大統一理論にも関係するはず

- 観測の高度化が鍵になる

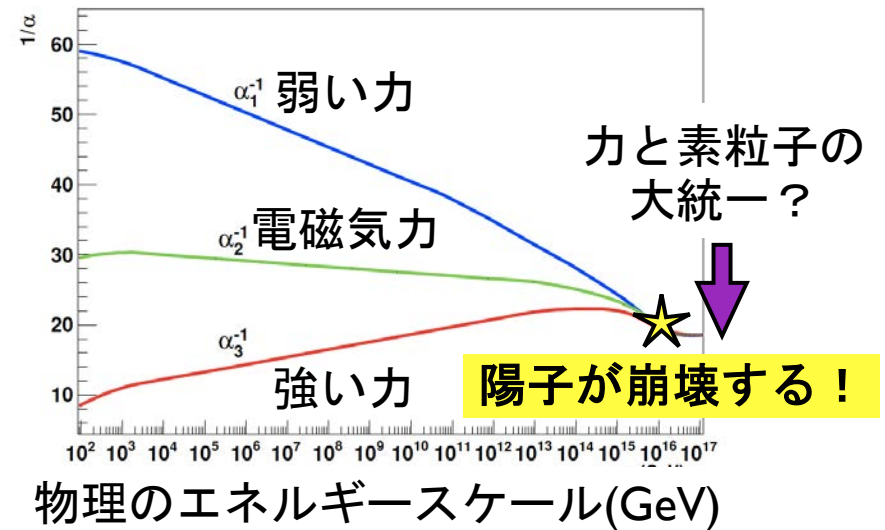
- 地球の高密度物質によるニュートリノ振動の変調を調べる
- 大統計データが必要



陽子（核子）崩壊の探索

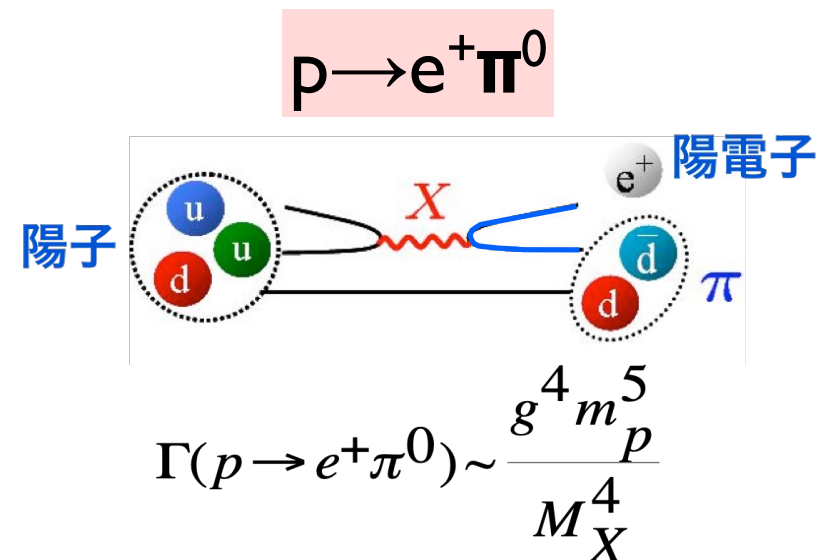
● 大統一理論（仮説）

- 3つの力の統一 & 物質素粒子（レプトン・クォーク）の統一
- 間接的証拠：結合定数が $\sim 10^{16}\text{GeV}$ で一点に集まる、中性水素元素、軽いニュートリノ質量を自然に説明できる



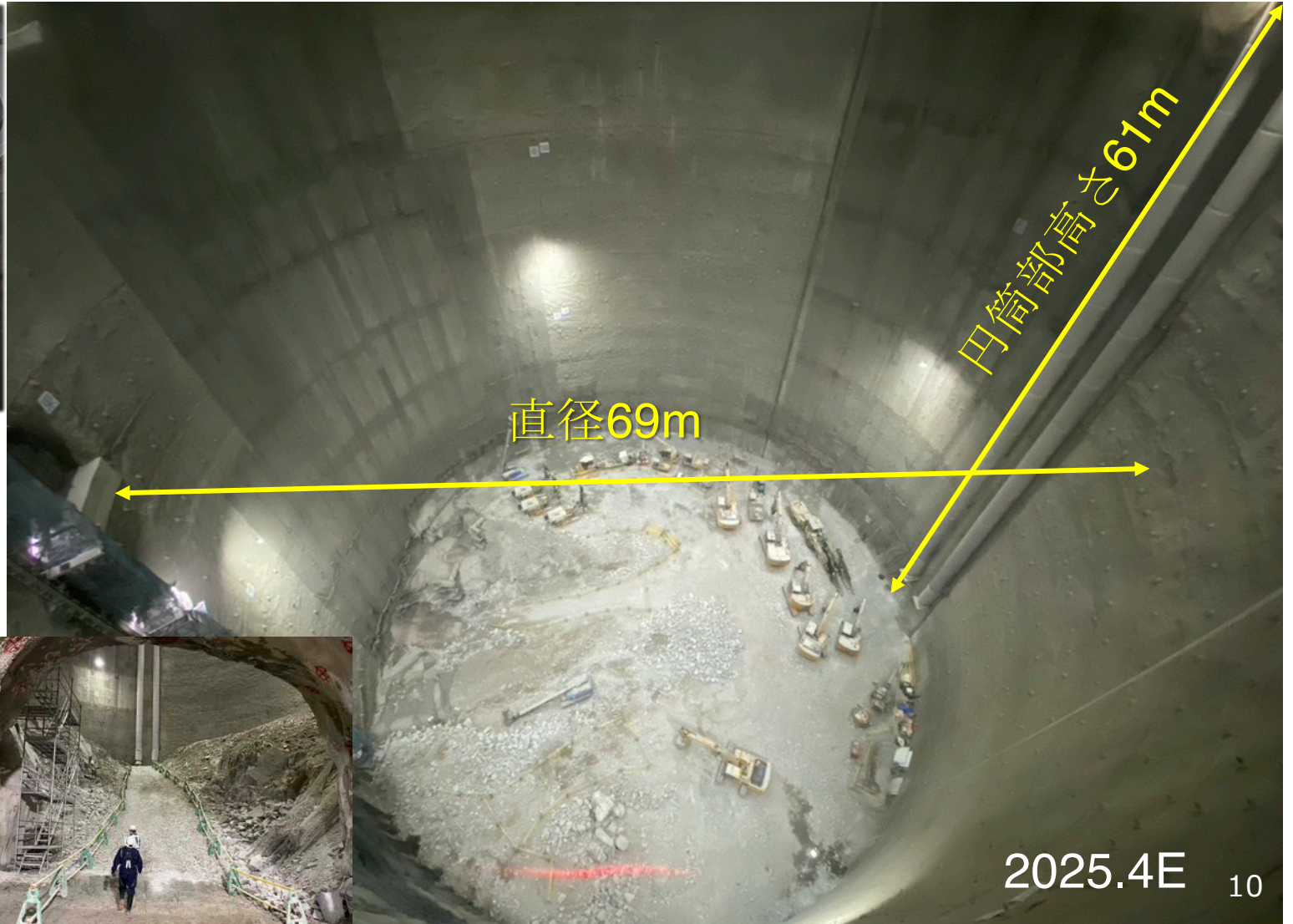
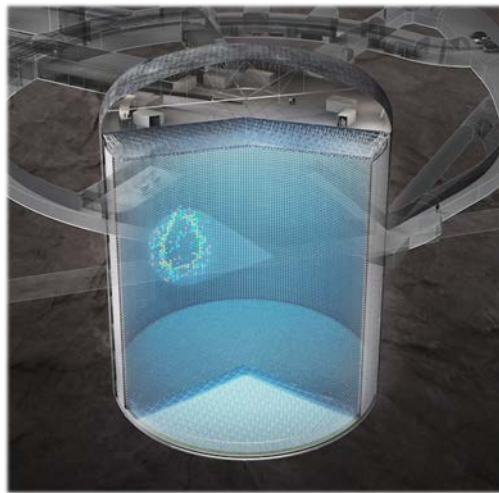
● 陽子崩壊の発見→測定へ

- 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
- SKは 10^{34} 年の感度に到達、いつ発見されてもおかしくない。HK $\sim 10^{35}$ 年。



建設状況

- 検出器空洞：世界最大規模の人工空洞．7月に完成予定．6月末に報道、関係者、一般に公開予定．
- 後に続く水槽設置工事, 純水システム設置工事の契約済．



水槽内機器の開発と生産

国際協力により開発,生産し水槽内に設置

日本担当の例：50cm口径光電子増倍管

- 量産中（1万5千本超納入済み）。

国際協力の例：電子回路

- 8か国（フランス,イタリア,日本,韓国,ポーランド,スペイン,スイス,英国）で分担して開発,製造,設置,運転予定。
- 設計ほぼ完了, プロトタイプによる実証試験中。検証を完了した機器については既に製造契約済。
- 組み立ては欧州原子核研究機構（CERN）で行う予定。

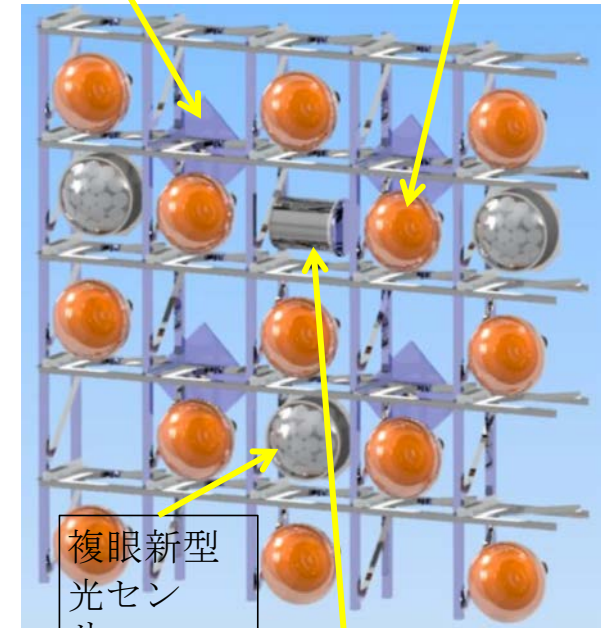
水槽内機器	担当国	進捗状況
50cm口径光電子増倍管	日本	量産中（1万5千本超納入済み）。
防爆ケース	スペイン	設計完了, プロトタイプによる実証試験中。
複眼新型光センサー	イタリア,カナダ,ポーランド,チェコ,メキシコ	設計完了, プロトタイプによる実証試験中。
外水槽用光電子増倍管	英国,韓国,オーストラリア	設計完了, プロトタイプによる実証試験中。
電子回路	日本,フランス,イタリア,韓国,ポーランド,スペイン,スイス,英国	設計ほぼ完了, プロトタイプによる実証試験中。検証を完了した機器については既に製造契約済。



©浜松ホトニクス（株）

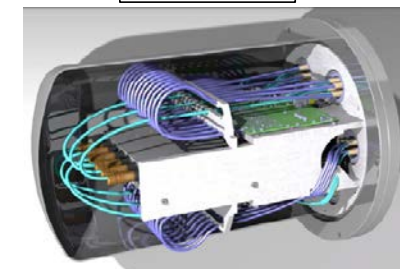
外水槽用
光電子増倍管

50cm口径光電子増倍管
+ 防爆ケース



複眼新型
光セン
サー

電子回路



水槽内機器の組み立てと設置準備

国際協力により開発,生産し水槽内に設置

PMTとカバーの組み立て

神岡町内にスペースを確保済.
2026年から本番.

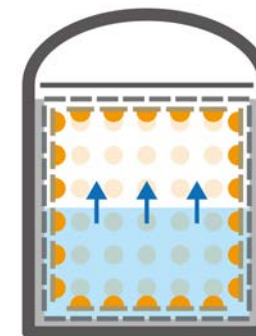
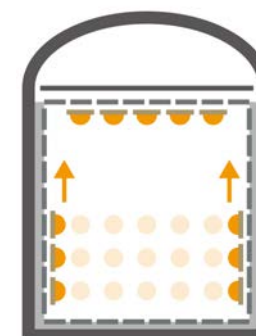
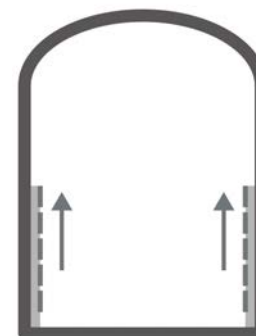


PMT設置試験



スケジュール

- 2025(R7)~
水槽建設：ライナー設置、PMT・電子回路
などの生産と調整など
- 2026(R8)/8~2027/11
水槽建設：PMT取り付け+支持構造体建設
- 2027(R9)/11~ 注水、試運転
- 2028(R10)/6~ ニュートリノ観測



**「実験装置建設」と最初の「サイエンスの導出」に
挑戦したい方を歓迎します。**

学生例

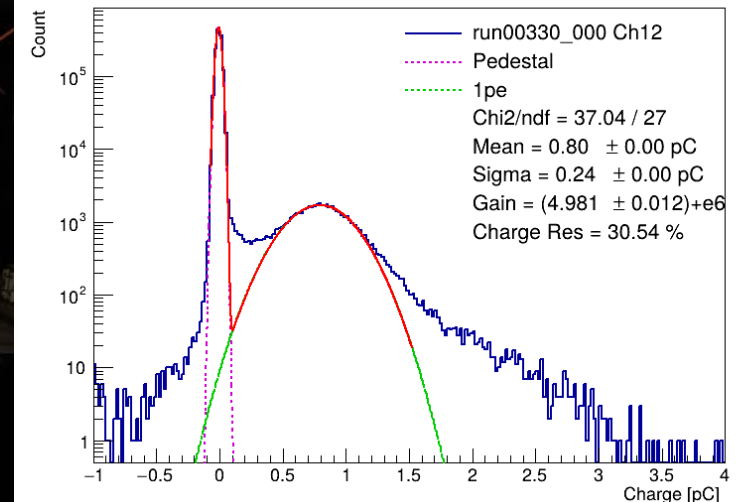


篠田遼太郎

東京大学大学院理学系研究科 修士課程2年
(2025年4月)

研究課題

- ハイパーカミオカンデの外水槽用に製造された光センサーの試験；自分の手でセットアップを構築し、信号取得系の整備や測定条件の調整から、データ解析まで
- 陽子崩壊の背景事象の低減の研究



学生例

金島遼太

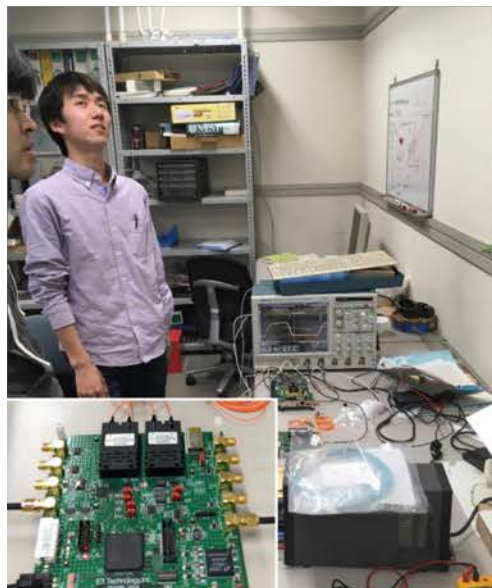
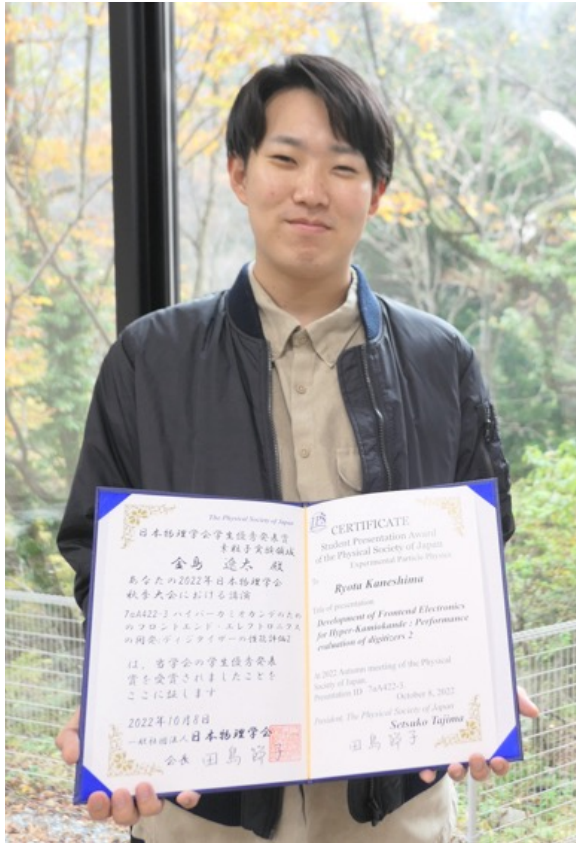
東京大学大学院理学系研究科 修士課程2年修了
(2023年3月)

研究課題

- 修士論文

「ハイパーカミオカンデ用データ収集エレクトロニクス開発に向けた50cm 光電子増倍管の性能評価」

- 2022年9月 日本物理学会 学生優秀発表賞



学生例

富谷卓矢

東京大学大学院理学系研究科 博士課程3年
(2025年4月)

研究課題

- 修士論文
「ハイパーカミオカンデ用50センチ口径光電子増倍管の磁場による影響調査」
- 博士課程の研究として、SUSY GUTで予言されている $p \rightarrow \nu K$ モードの陽子崩壊事象を機械学習を用いて探索を進めている。



学生例

三木信太郎

東京大学大学院理学系研究科 博士課程修了
(2025年3月)



日本物理学会学生優秀発表賞
(2024年9月)



研究課題

- ・ ハイパーカミオカンデ用に製造された光センサーの試験
- ・ スーパーカミオカンデ（ガドリニウム）の中性子情報を用いた、大気ニュートリノ再構成の精度向上と、質量階層構造の決定

修士論文

- ・ SK-Gd における中性子検出を用いたニュートリノ事象再構成手法

博士論文

- ・ Neutrino mass ordering determination using atmospheric neutrinos with neutron detection in Super-Kamiokande

学術論文

- ・ Neutron multiplicity measurement in muon capture on oxygen nuclei in the Gd-loaded Super-Kamiokande detector, [arXiv:2502.17002](https://arxiv.org/abs/2502.17002)

教員紹介

https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/taxo_rp/neutrino-and-astroparticle-division/



Kimihiro OKUMURA

奥村 公宏

准教授



Masato SHIOZAWA

塩澤 真人

教授



Hiroyuki SEKIYA

関谷 洋之

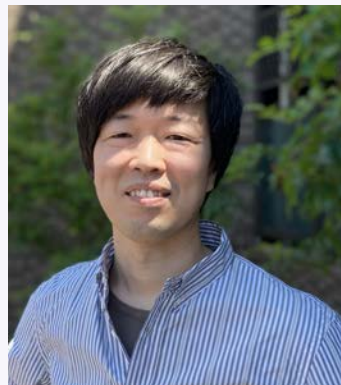
准教授



Atsushi TAKEDA

竹田 敦

准教授



Shoei NAKAYAMA

中山 祥英

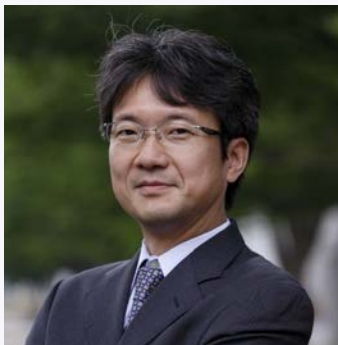
准教授



Yoshinari HAYATO

早戸 良成

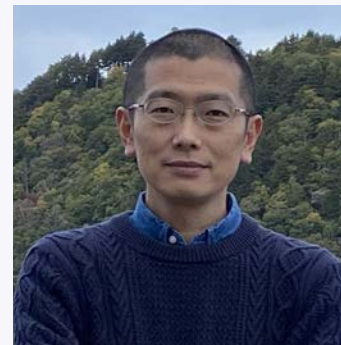
教授



Shigetaka MORIYAMA

森山 茂栄

教授 (副所長)



Yoichi ASAOKA

浅岡 陽一

准教授

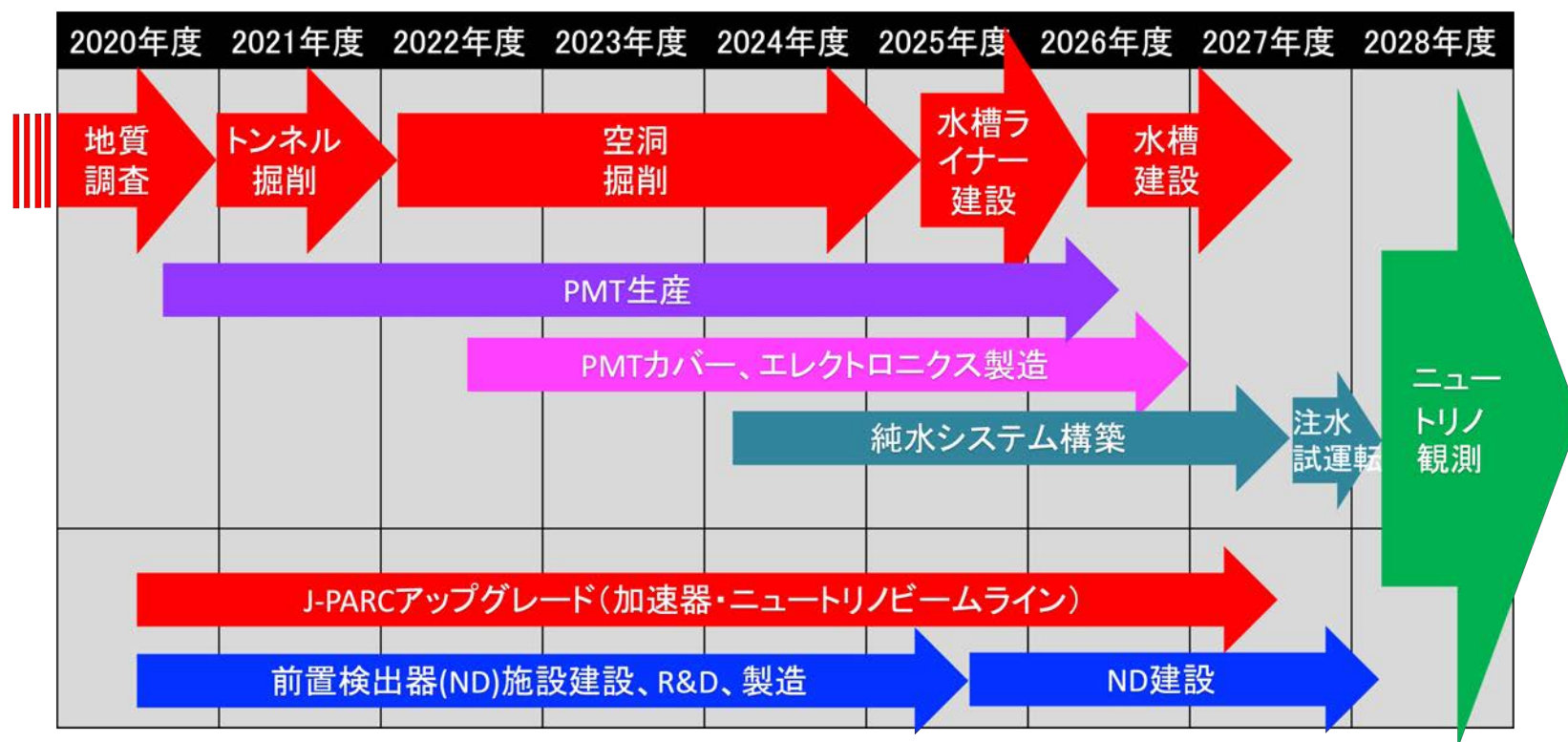


Yoshitaka ITOW

伊藤 好孝

教授

スケジュール



- 2026(R8)/8~2027/11 水槽建設：PMT取り付け+支持構造体建設
- 2027(R9)/11~ 注水、試運転
- 2028(R10)/6~ ニュートリノ観測

装置建設と最初のサイエンスの導出に挑戦しませんか？