

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

早戸 良成

2026年5月30日

大学院ガイダンス@柏キャンパス



教員紹介

[https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/taxo rp/neutrino-and-astroparticle-division/](https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/taxo_rp/neutrino-and-astroparticle-division/)



Masato SHIOZAWA

塩澤 真人

教授



Hiroyuki SEKIYA

関谷 洋之

准教授



Atsushi TAKEDA

竹田 敦

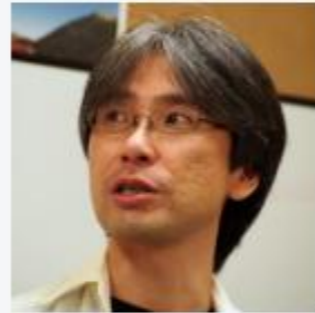
准教授



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



Yoichi ASAOKA

浅岡 陽一

准教授



Yoshitaka ITOW

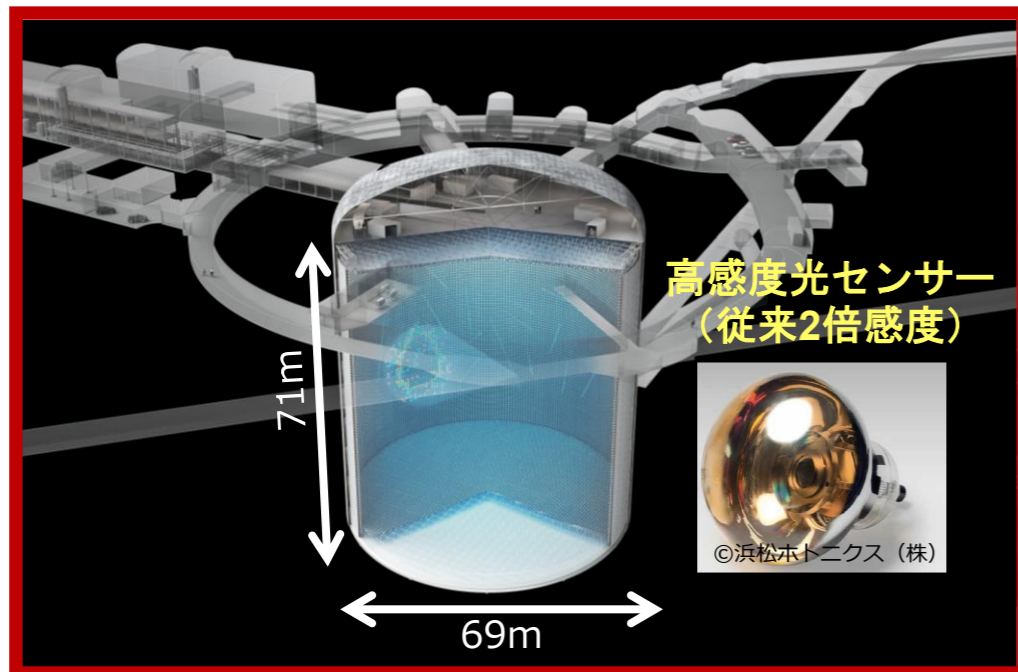
伊藤 好孝

(R9年度 修士合格者を博士
修了まで指導不可)

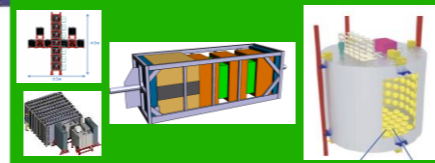
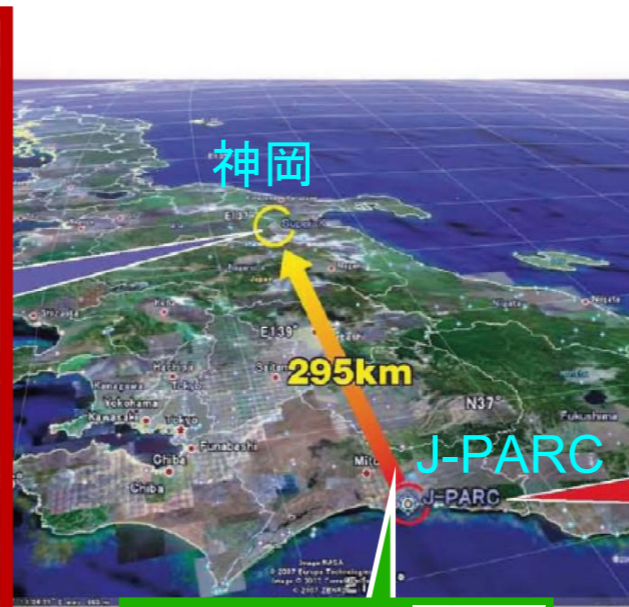
教授 (副所長)

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)



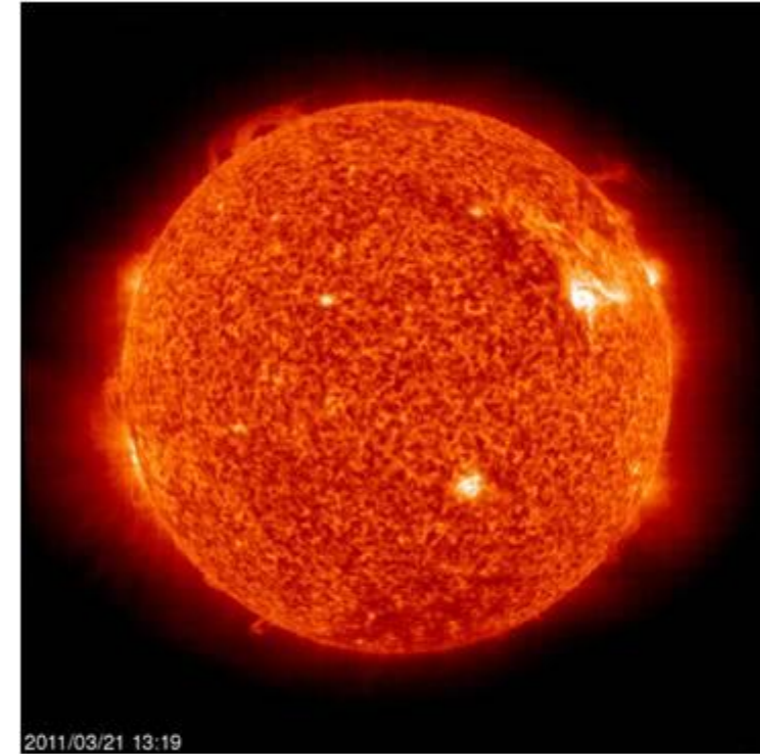
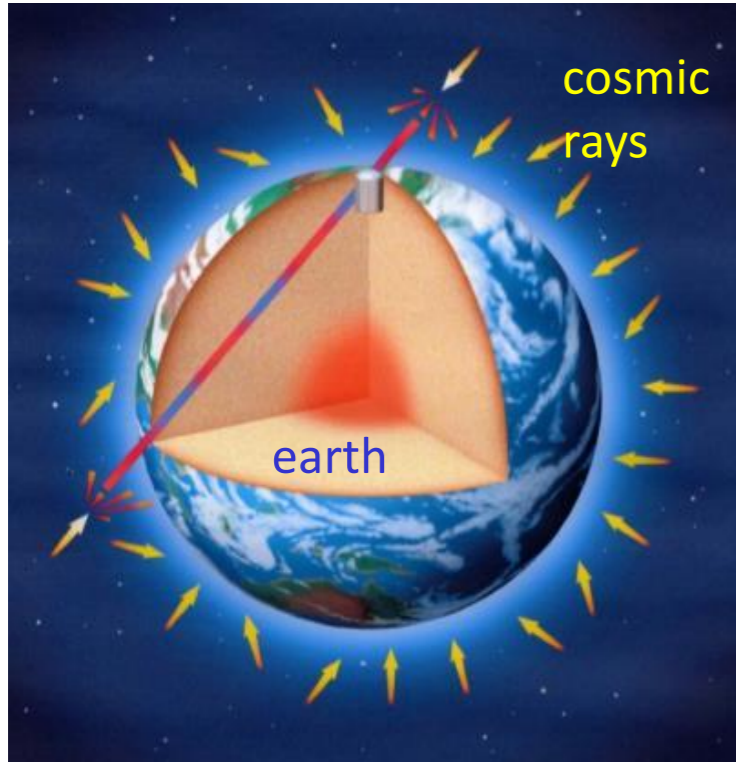
大強度陽子加速器 J-PARC
と近中距離検出器
(高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が中心)

1. 新規建設中

2. 大強度化中

- 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名のコラボレーターによる国際協カプロジェクト。

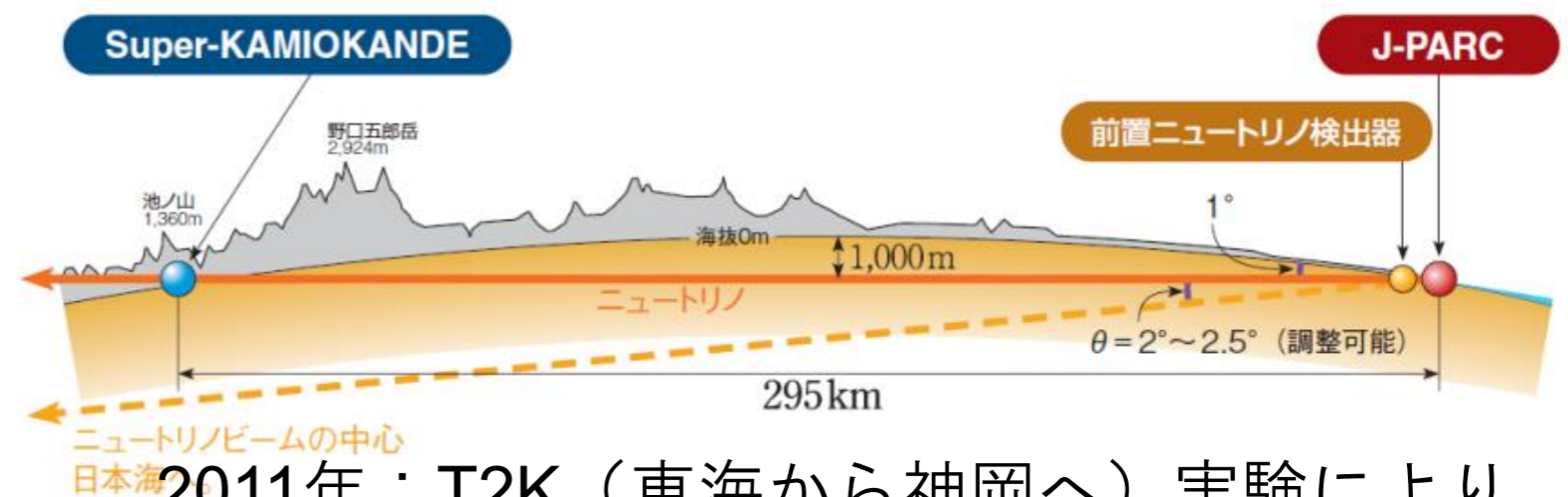
スーパーカミオカンデにおけるニュートリノ振動研究



1998年：大気ニュートリノ振動発見。
(ミューニュートリノが
タウニュートリノへ振動。)

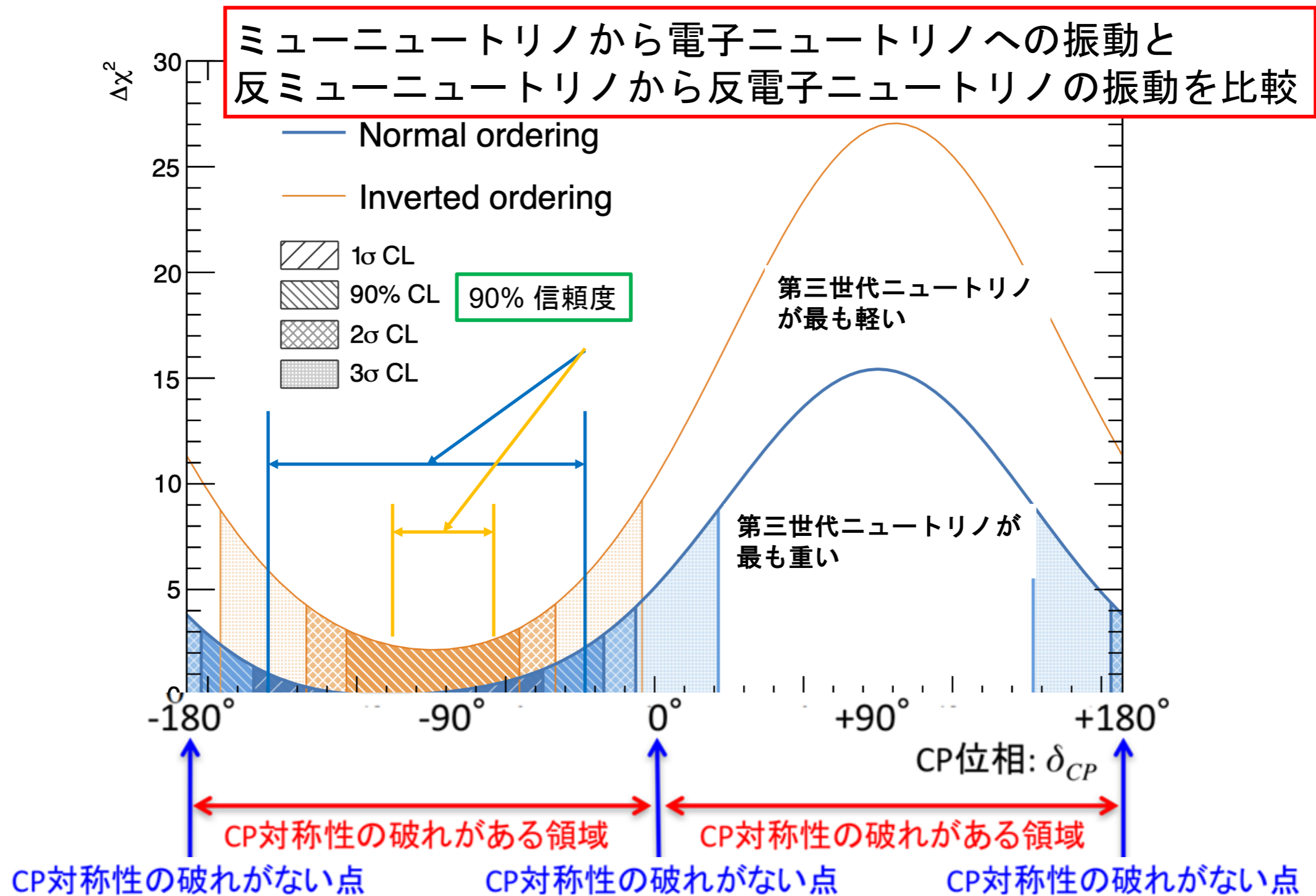
2001年：太陽ニュートリノの観測結果を
SKとSNOとで比較し、振動を発見。
(電子ニュートリノと
ミュー/タウニュートリノの振動。)

2015年 梶田先生ノーベル物理学賞受賞
「ニュートリノ振動、それによる
ニュートリノ質量の発見」



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
電子ニュートリノへの振動を発見。

T2Kにおけるニュートリノ振動研究



T2K実験はCP対称性が破れている可能性を示唆。(統計的有意性不足)
一方、米国の実験では少し異なる結果

→ ハイパーカミオカンデの主要テーマ

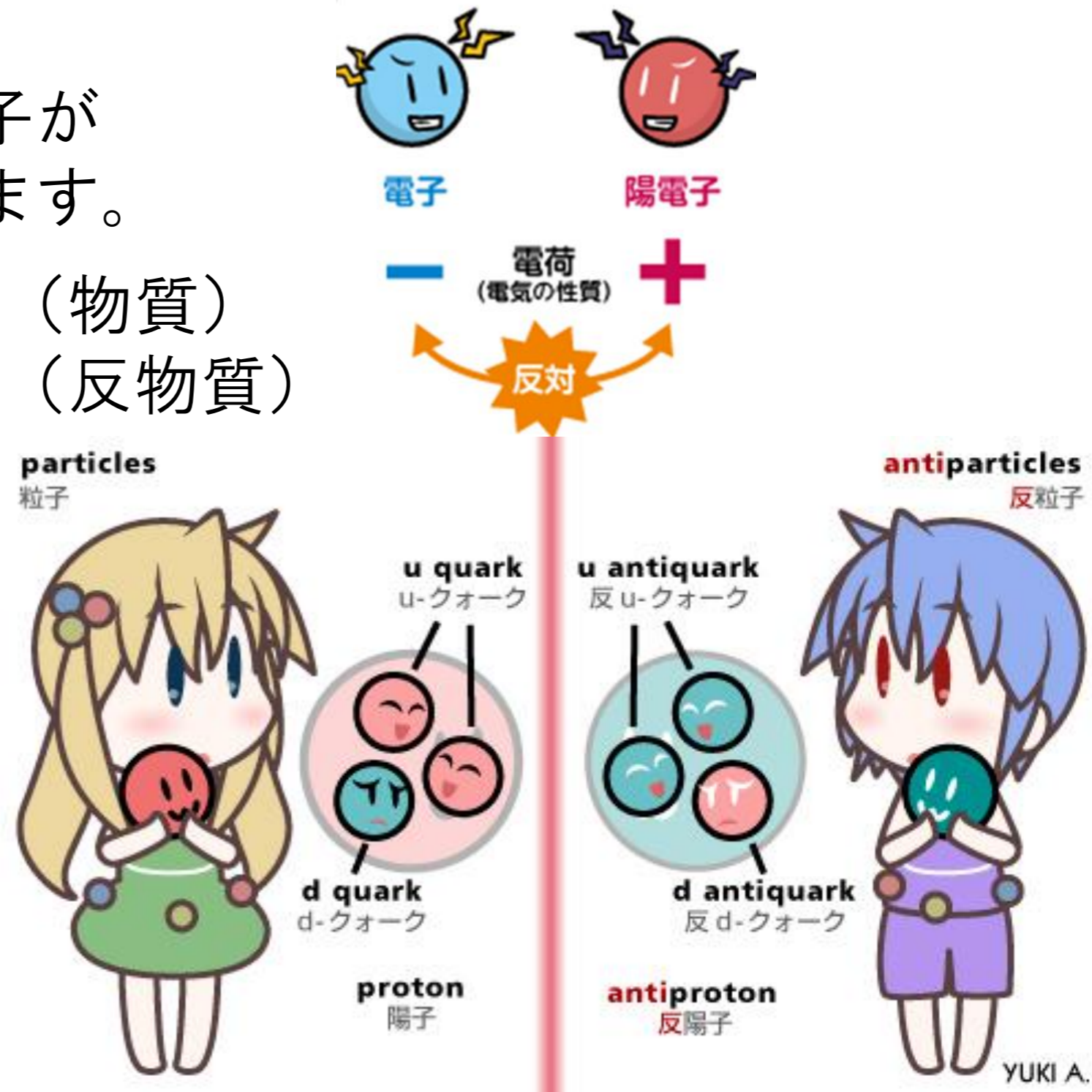
スーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデの研究 素粒子と宇宙の研究

「宇宙はどのように生まれ、この先どうなるのか」

宇宙ができて100秒頃、
ほぼ同数の粒子と反粒子が
生成したとされています。

でも、いまの宇宙には粒子（物質）
ばかり残っていて、反粒子（反物質）
はほとんどありません。

↓
粒子と反粒子には
微妙な違いがあり、
なぜか粒子だけ残った？



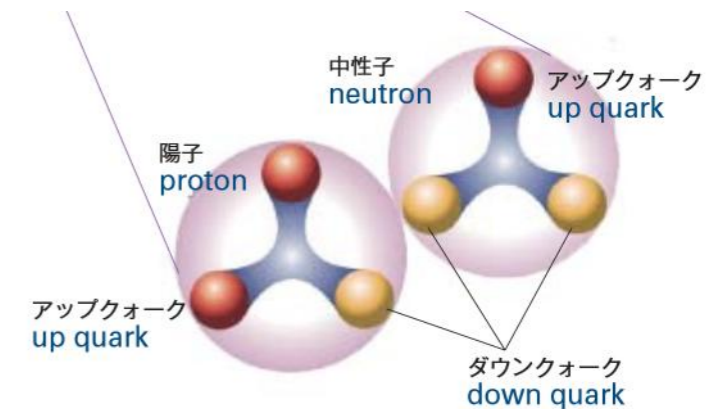
スーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデの研究 素粒子と宇宙の研究

「宇宙はどのように生まれ、この先どうなるのか」

～粒子と反粒子の違い～

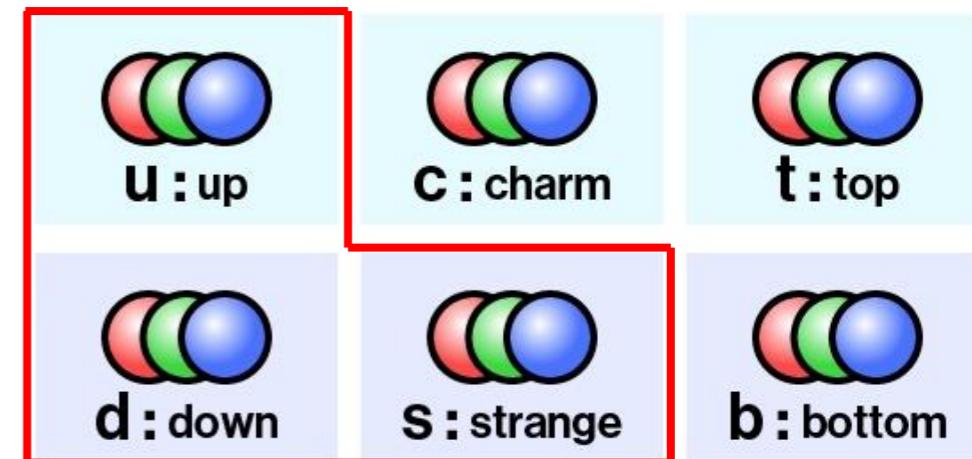
クォークと反クォークの違い

(CP対称性が破れている)



小林・益川理論 2008年ノーベル物理学賞
3種類(u,d,s)しかクォークが見つかっていなかった時代に6種類の存在を予言

CP対称性の破れをうまく説明



しかし、これまでにわかったクォークと反クォークの違いは今の宇宙を説明するには 10^{-12} くらい小さい。

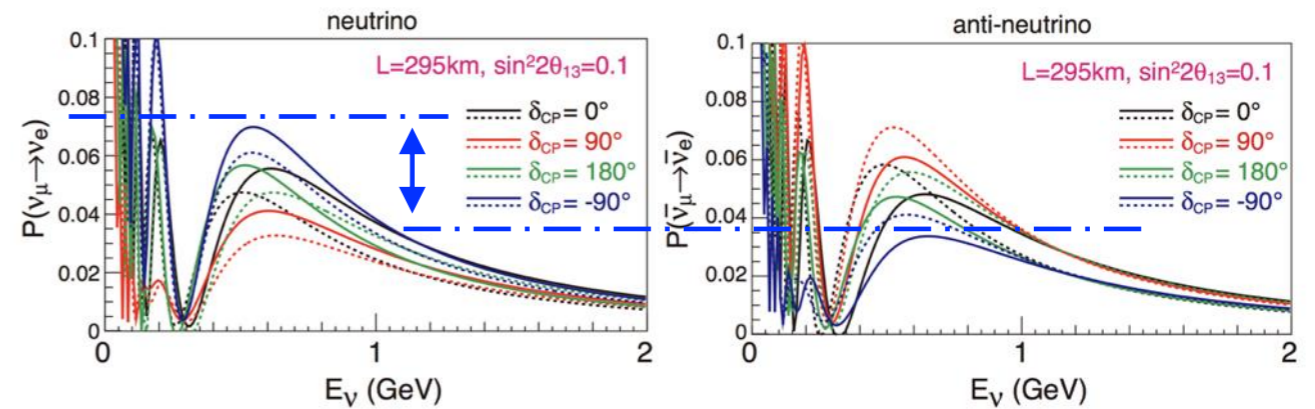
ニュートリノと反ニュートリノに大きな違いがあれば説明できる？



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

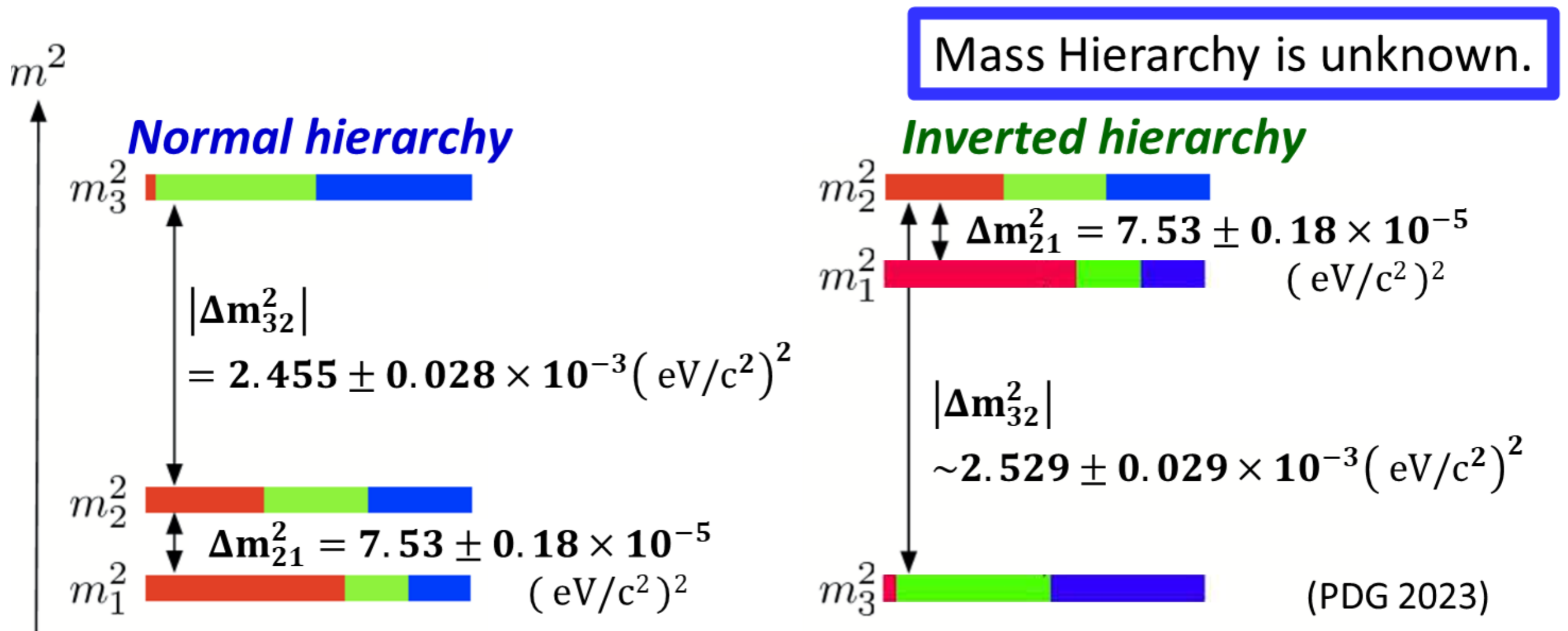
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (dashed blue arrow) \rightarrow e (red arrow) + p (grey arrow)
 CCQE : $\nu_e + n \rightarrow e + p$
 (dominant process at J-PARC beam energy)

ν_μ CC simulation (yellow label)
 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (orange text)
 NC $1\pi^0$ simulation (yellow label)

質量階層性の謎

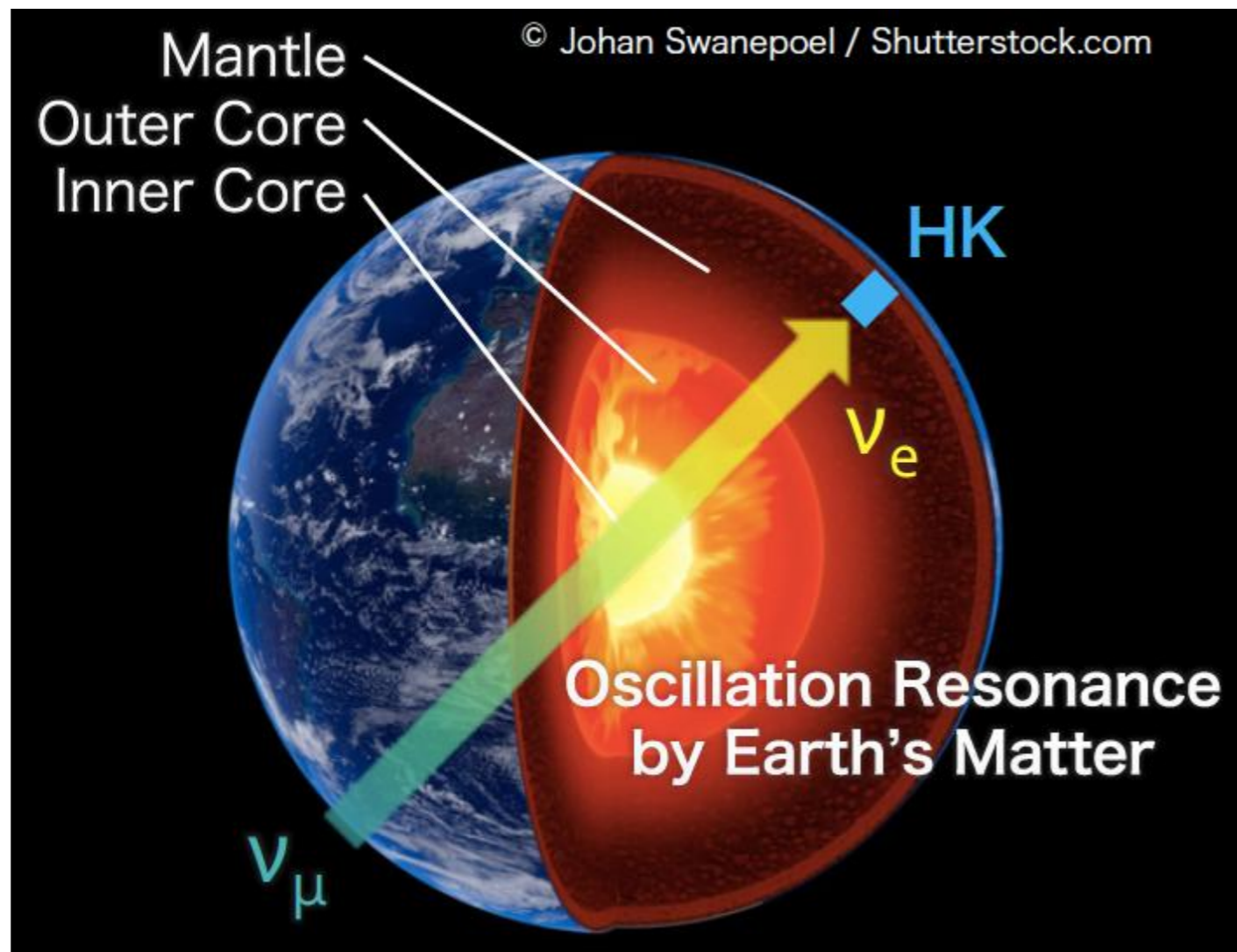
一番重いニュートリノはどちら？（質量階層性問題）

どのニュートリノが一番重いか、いまだわからない



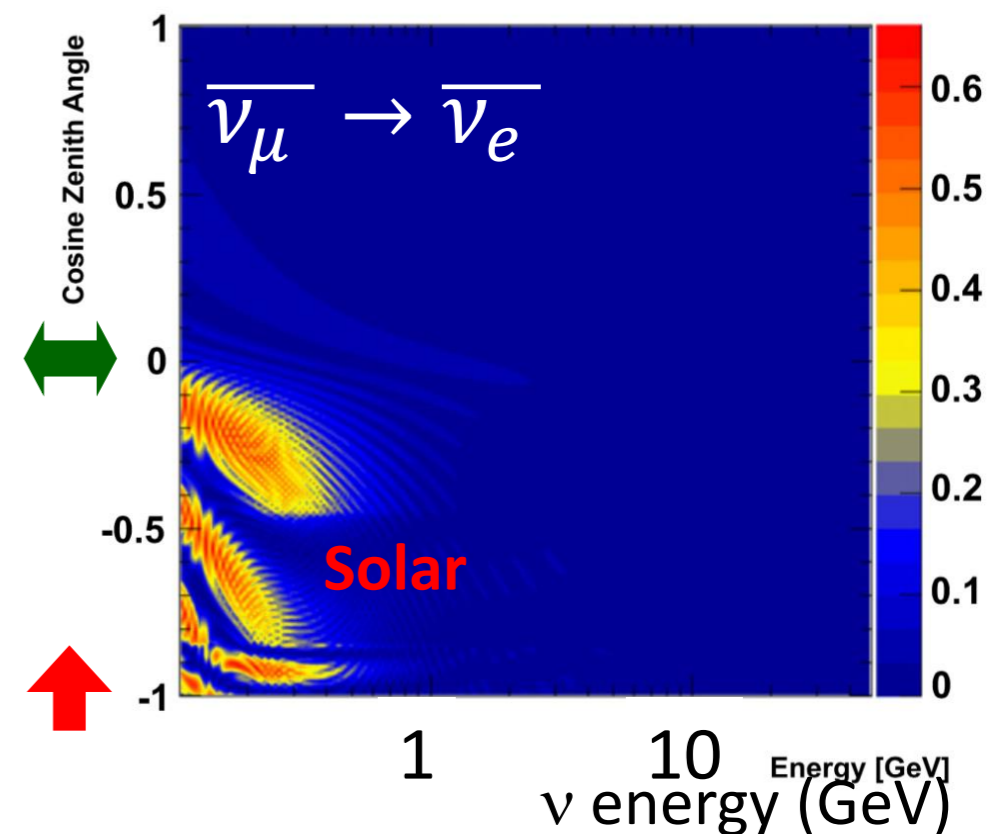
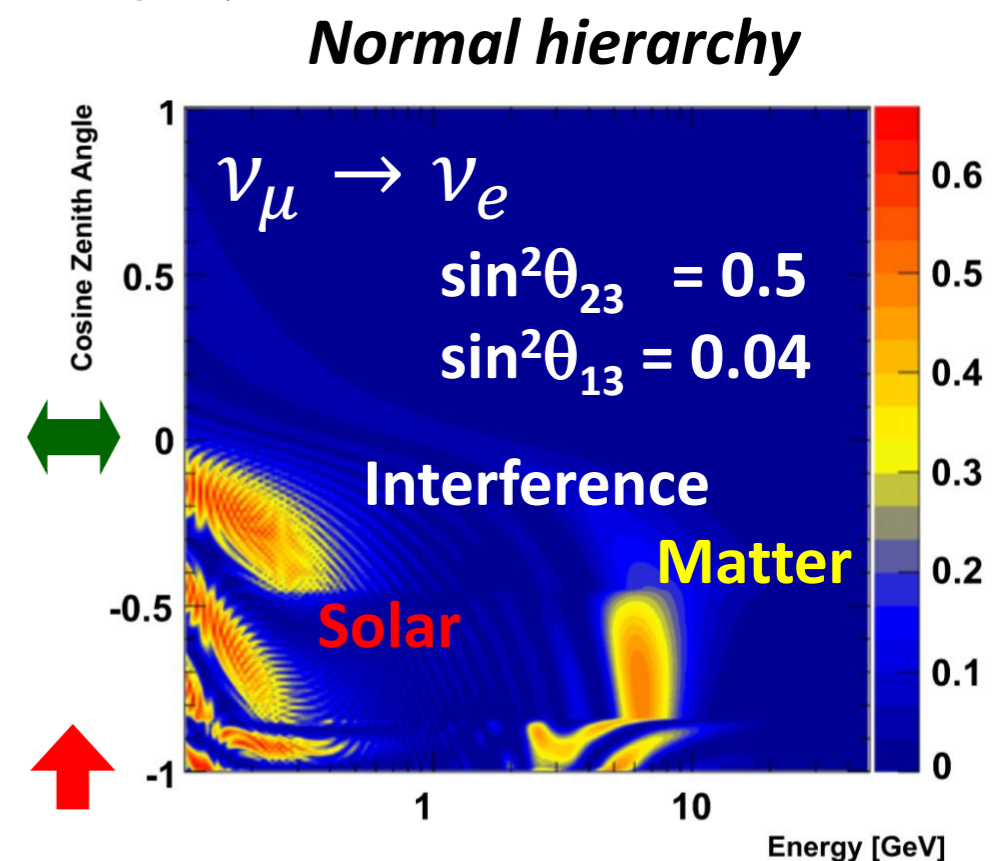
質量階層性の謎解明

地球を通過するニュートリノと反ニュートリノは
その振動に「質量階層性に依存した」
小さな違いがみられる。



質量階層性を決めるには多くの事象数
と高い観測精度が求められる。

→ **ハイパーカミオカンデのテーマ**



スーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデの研究 素粒子と宇宙の研究

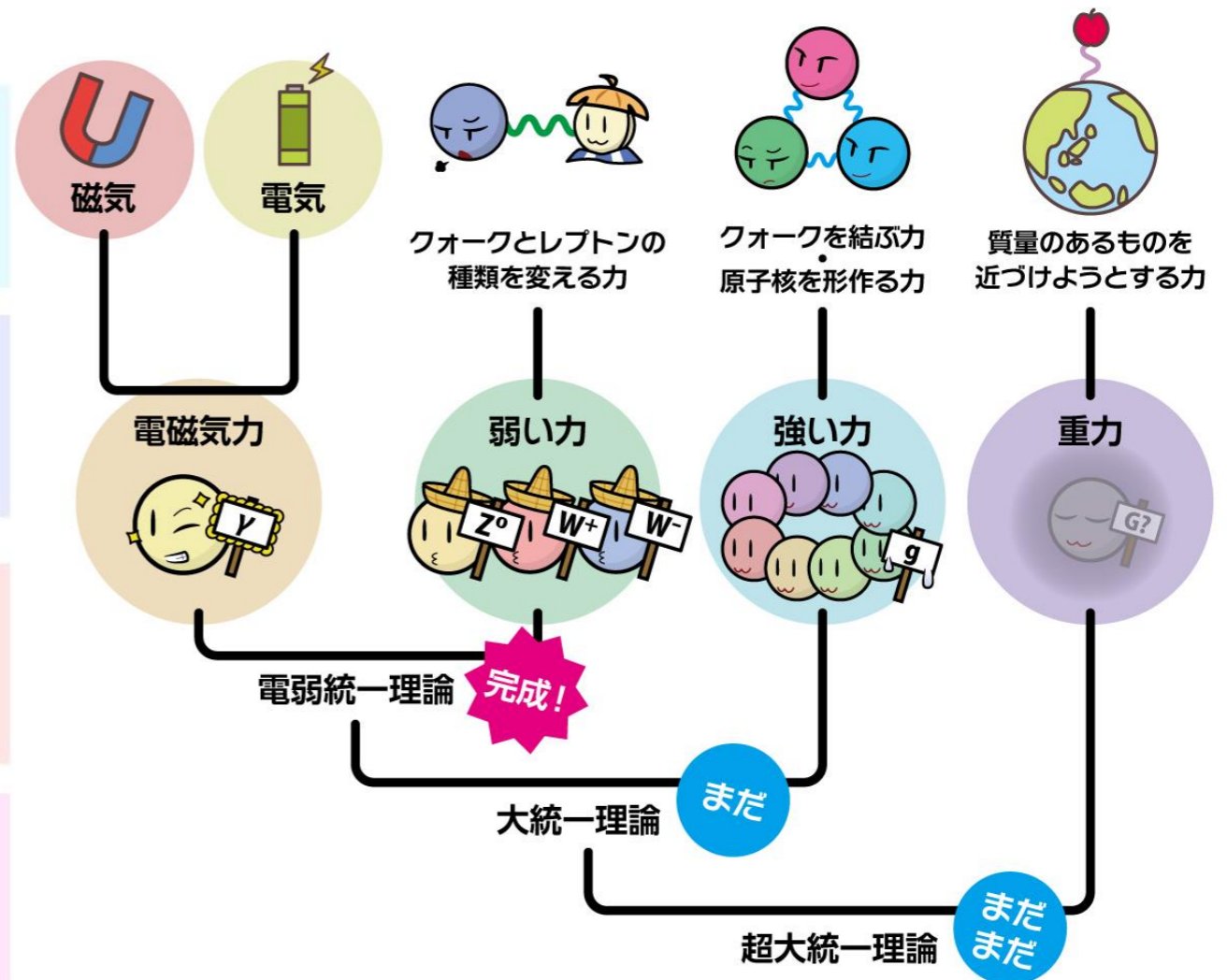
陽子がこわれるかもしれない～大統一理論

陽子を作るクォークと電子やニュートリノなどのレプトンは別種の粒子。

クォークとレプトンの関係性にはわからない点が多い。

物質粒子 matter (fermions)

	I	II	III
クォーク quarks	 u : up	 c : charm	 t : top
	 d : down	 s : strange	 b : bottom
レプトン leptons	 e : electron	 μ : muon	 τ : tau
	 ν_e : electron neutrino	 ν_μ : muon neutrino	 ν_τ : tau neutrino



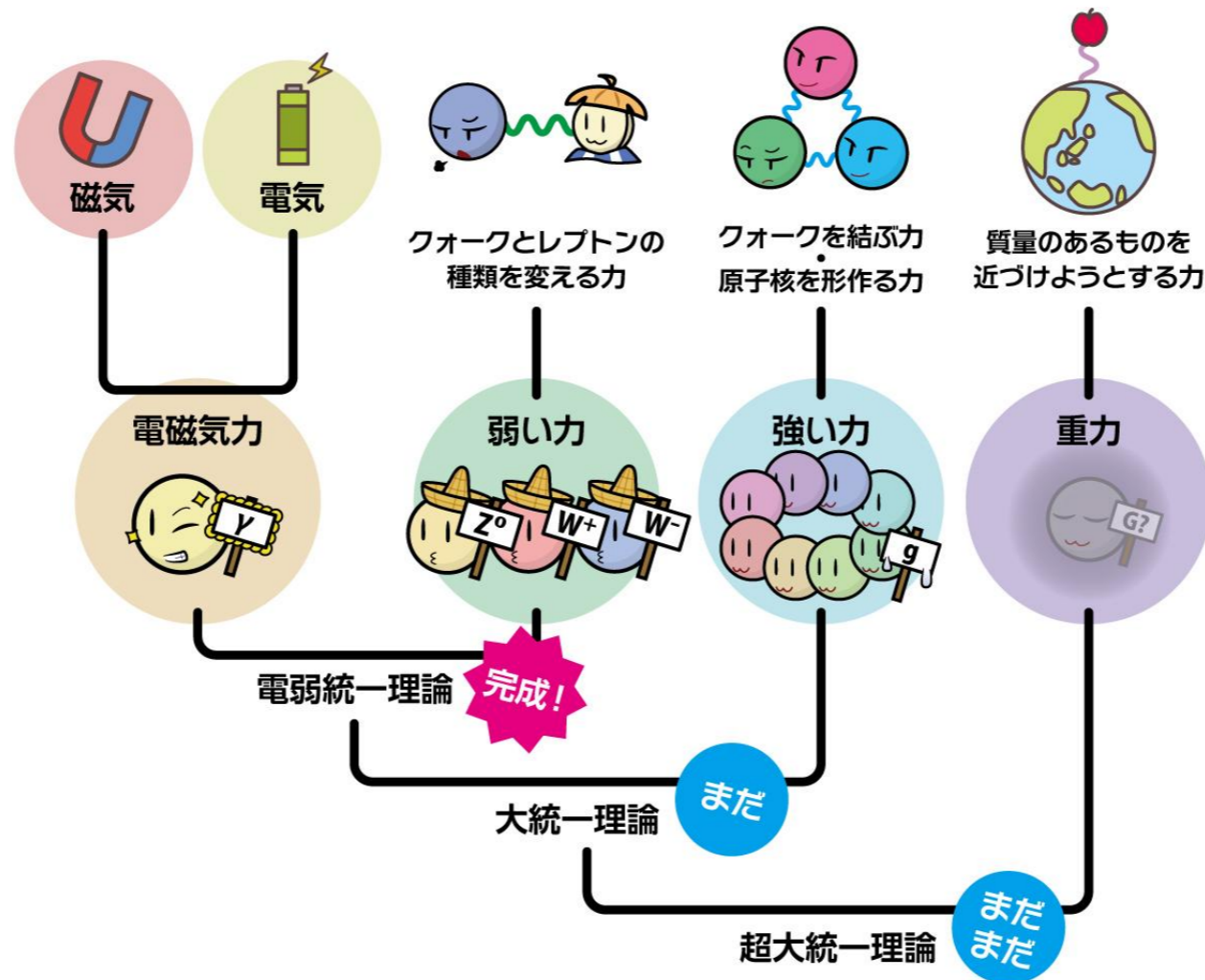
スーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデの研究 素粒子と宇宙の研究

陽子がこわれるかもしれない～大統一理論

大統一理論

クォークとレプトンにつながりがある。

陽子（クォーク）がレプトンに変わる可能性がある。



予言された崩壊 陽子 → 陽電子 + 中性 π 粒子

陽子崩壊

陽子はとても安定（壊れたところを見た人はいない）

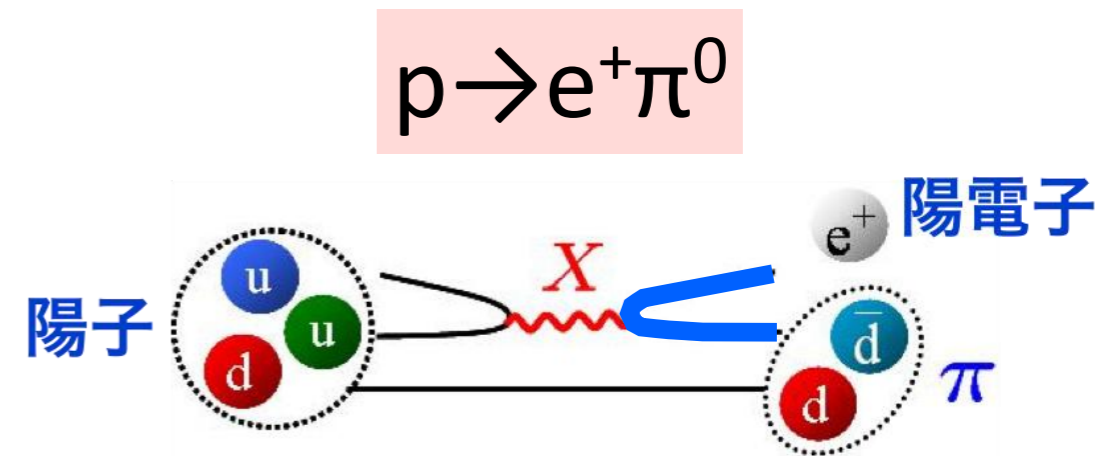
「大統一理論」が「陽子崩壊」を予言。

陽子崩壊の観測が「大統一理論」の検証につながる。

陽子崩壊の発見・測定

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。



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

スーパーカミオカンデが世界最高感度を持つが、未発見
より大量の核子（陽子）を集めて、崩壊を探す
→ ハイパーカミオカンデの主要課題

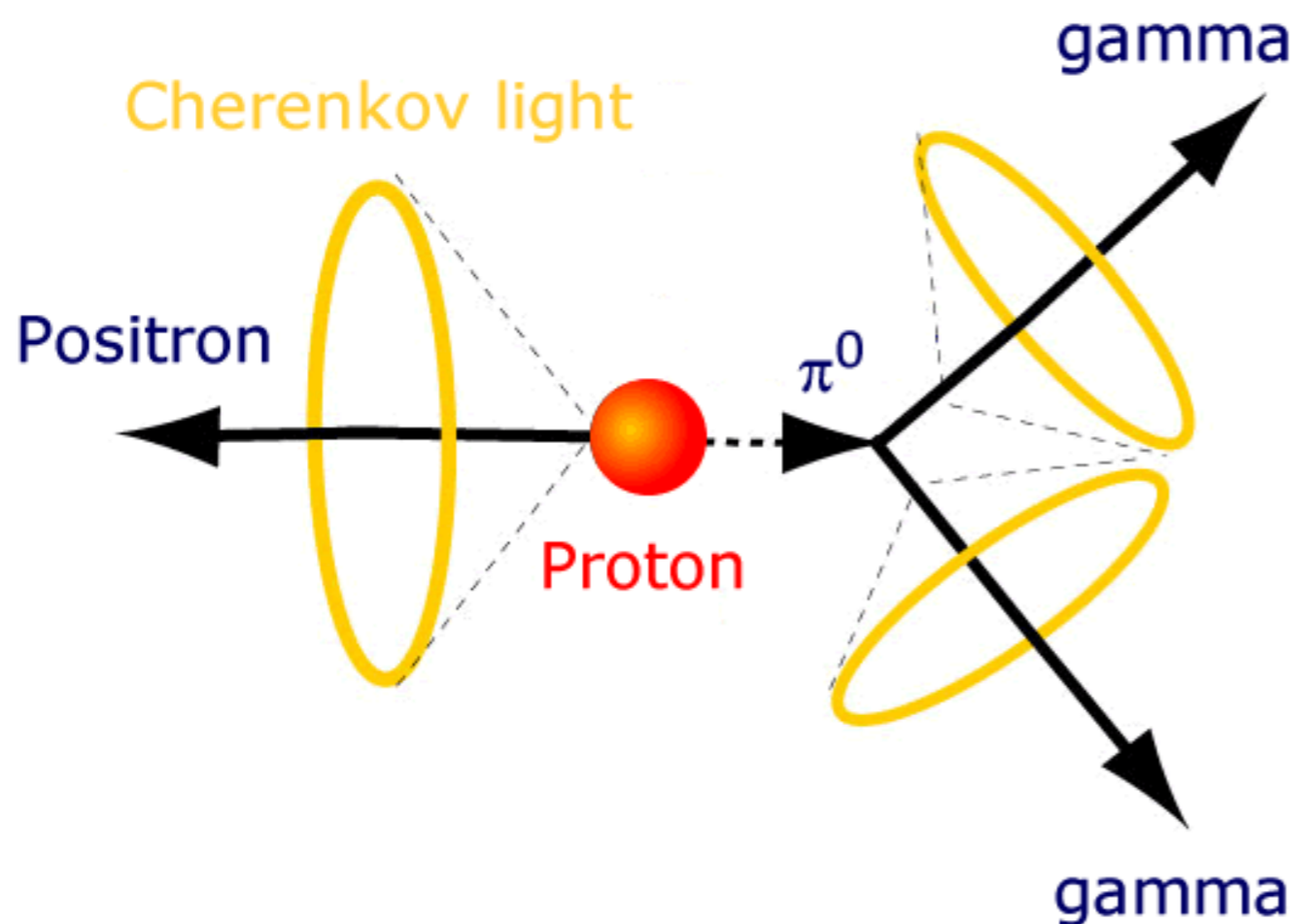
核子崩壊探索

Grand Unification Theory (GUT) によれば、
陽子が壊れてもよい

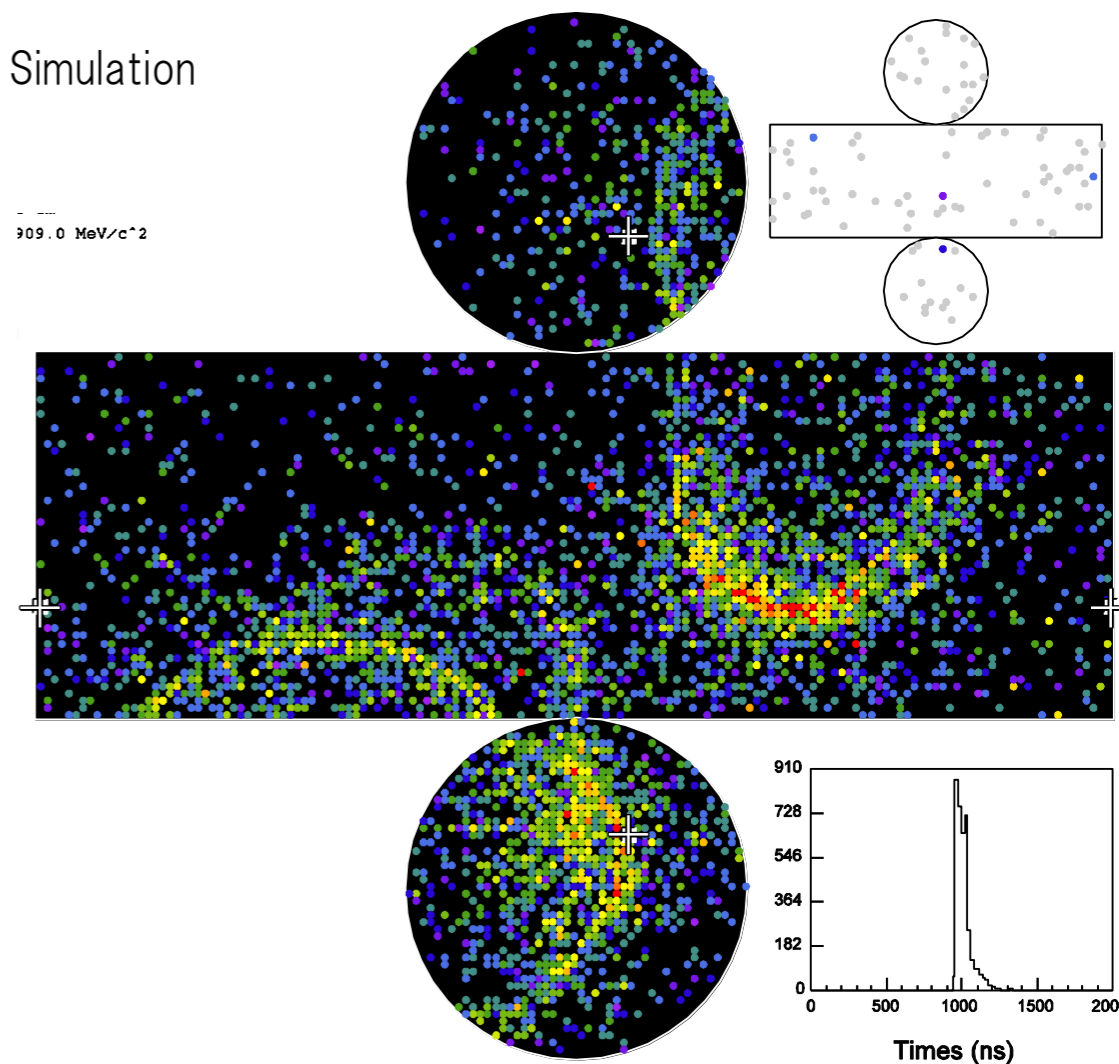
予言される崩壊モード $p \rightarrow e^+ + \pi^0$

水チェレンコフ型検出器は、陽電子や中性 π 粒子に対して非常に高い検出効率を持つ。

きれいな3リング事象が見えると期待される。

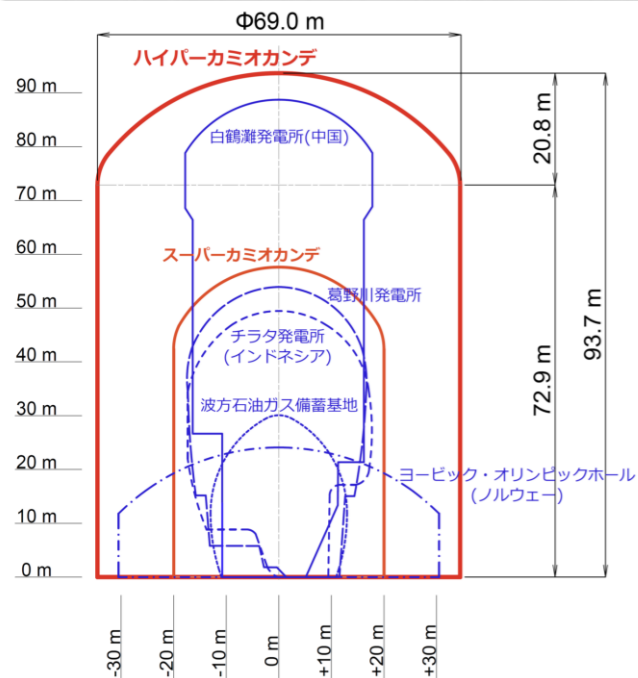
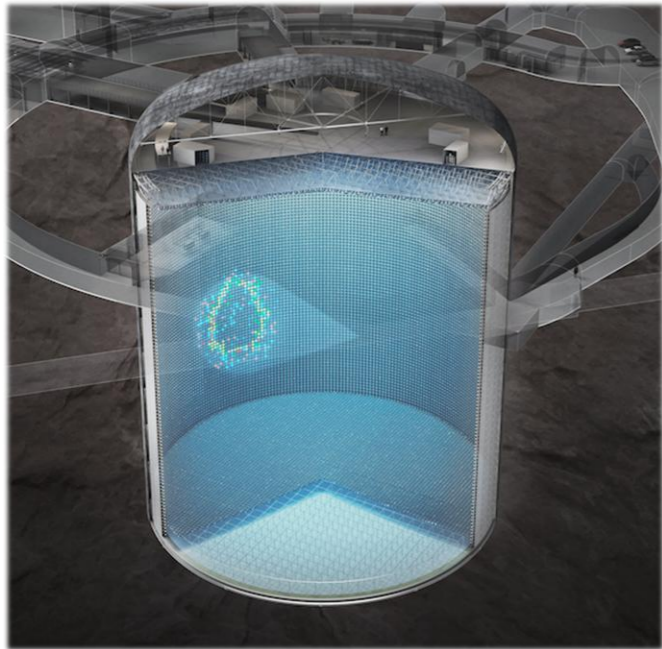


Simulation



ハイパーカミオカンデの建設状況

- 検出器空洞：世界最大規模の人工空洞の掘削完了
- 現在、壁にステンレスの板を張り付け、水槽とする工事中
- 2027年から、光センサー・エレクトロニクス等取り付け



出典
【白鶴発電所】 J. Rock Mech. Geotech. Eng. 14 (3), pp.731-745 (2022年)
【葛野川発電所】 『トンネルと地下』 29(11), pp.69-81 (1998年)
【チラタ発電所】 土木学会論文集 第403号/VI-10, pp.75-84 (1989年)
【波方備蓄基地】 第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.308-313 (2014年)
【ヨービック】 Tunn. Undergr. Space Technol. 61, pp.122-133 (1996年)

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（1万8千本超納入済み）。

国際協力の例：電子回路

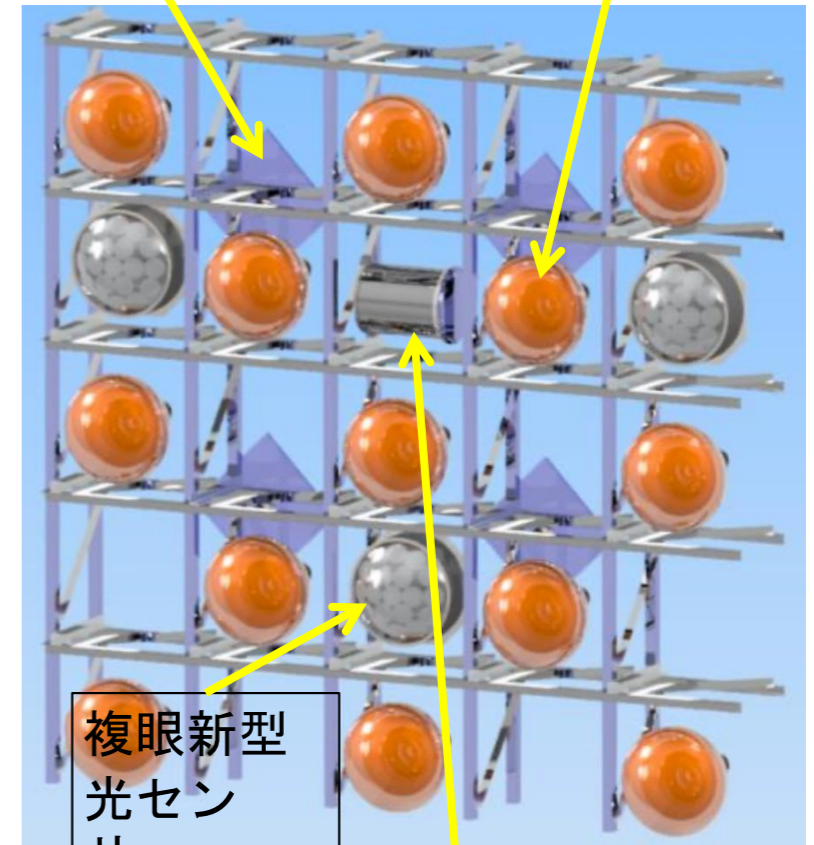
- 8か国（フランス,イタリア,日本,韓国,ポーランド,スペイン,スイス,英国）で分担して開発,製造,設置,運転予定。
- 設計ほぼ完了,プロトタイプによる実証試験中。検証を完了した機器については既に製造契約済。
- 組み立ては欧州原子核研究機構（CERN）で行う予定。



©浜松ホトニクス（株）

外水槽用
光電子増倍管

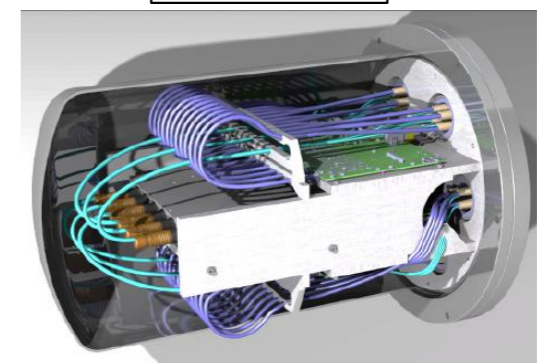
50cm口径光電子増倍管
+防爆ケース



複眼新型
光セン
サー

電子回路

水槽内機器	担当国	進捗状況
50cm口径光電子増倍管	日本	量産中（1万8千本超納入済み）。
防爆ケース	スペイン	設計完了,製造中。
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, 製造準備中。
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, 製造中。
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	設計完了, 大量生産準備中。



水槽内機器の組み立てと設置準備

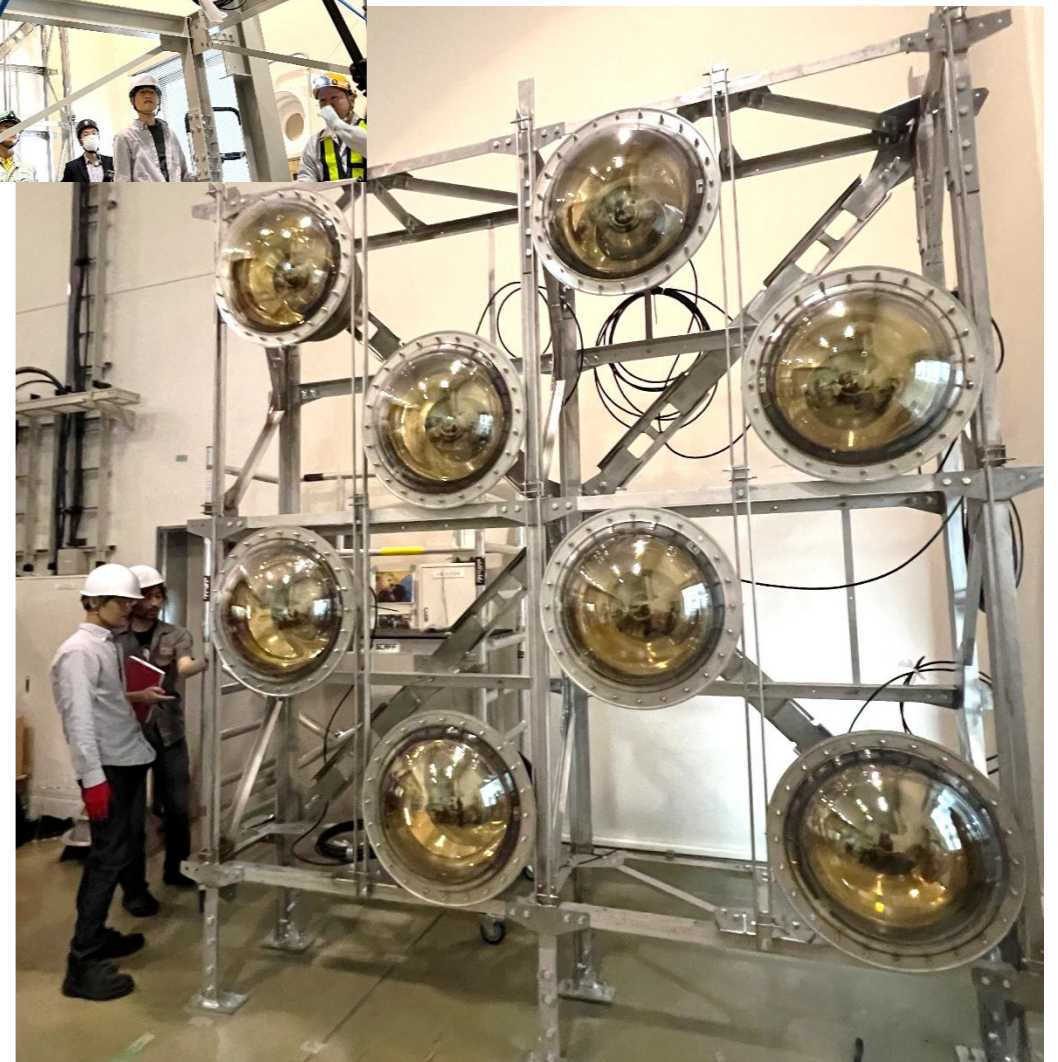
国際協力により開発,生産し水槽内に設置

PMTとカバーの組み立て

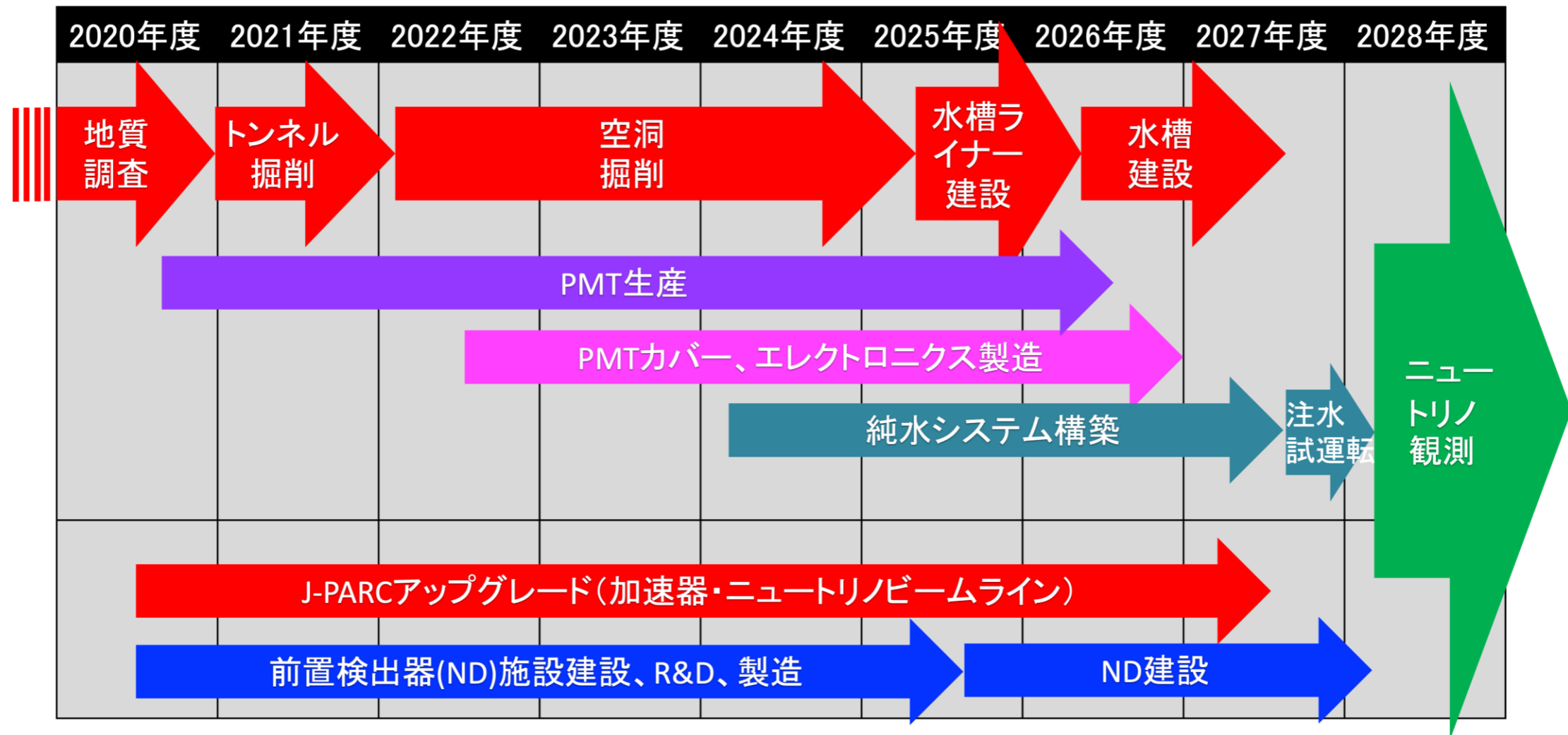
神岡町内にスペースを確保済.
2026年から本番.



PMT設置試験



スケジュール



- 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？

教員紹介

[https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/taxo rp/neutrino-and-astroparticle-division/](https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/taxo_rp/neutrino-and-astroparticle-division/)



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



Yoichi ASAOKA

浅岡 陽一

准教授



Yoshitaka ITOW

伊藤 好孝

(R9年度 修士合格者を博士
修了まで指導不可)

教授 (副所長)