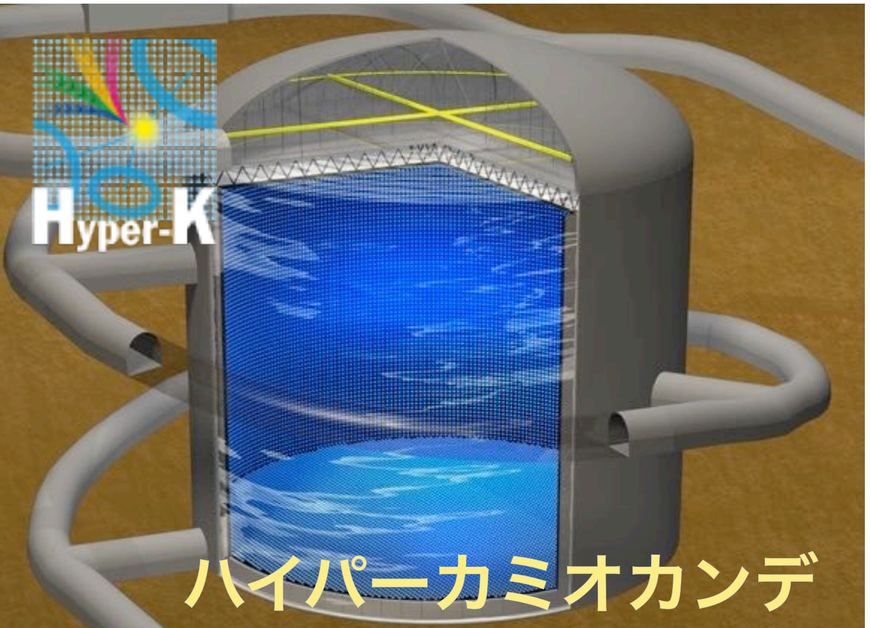
T2K実験、ハイパーカミオカンデ



2024.06.01 宇宙線研究所大学院ガイダンス

宇宙ニュートリノ研究部門　奥村 公宏

宇宙はニュートリノだらけ！

138億年前、宇宙が生まれた時にたくさん生まれたニュートリノが、今も私たちの周りを飛び回っています。

太陽や、夜空に光る星の中でも日々ニュートリノは生まれています。また、星の寿命が尽きて超新星爆発を起こすときも、たくさん生まれます。

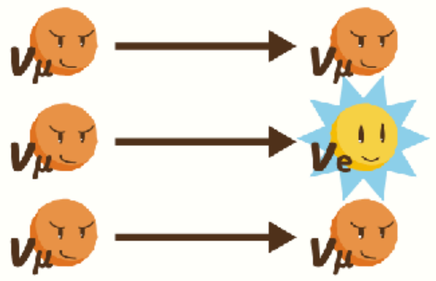
宇宙から飛んできた高速の粒子（宇宙線）が、地球の大気と衝突したときにもニュートリノが生まれます。

そのほかにも、地球の内部や、人間が作った原子炉、加速器などからもニュートリノは生まれています。

宇宙は、ニュートリノだらけといってもよいでしょう。現在、宇宙は平均的には1ccあたり300個くらいのニュートリノで満たされています。太陽に近い地球上では、その太陽で生まれたニュートリノが、私たちの体を1秒間で数百兆個も通り抜けています。

ニュートリノは3兄弟！

ニュートリノの親戚ともいえる電子の仲間が3種類（電子、ミュー粒子、タウ粒子）あることに対応して、ニュートリノも電子型、ミュー型、タウ型の3種類あります。電子の仲間は電荷を持つのに対して、ニュートリノは電荷を持ちません。ニュートリノの反粒子、反ニュートリノにも同様の3種類があります。



ニュートリノは変身する！

ニュートリノは、誰にも見られていない間に、こっそり自分の種類を変えてしまうという、不思議な性質を持っています。例えば、生まれた時はミュー型に違いなかったのに、遠くまで旅しているうちに電子型に変わってしまうことがあるのです。

ニュートリノがあちらの型とこちらの型との間を揺れ動いているようにふるまう様子から、この現象は「ニュートリノ振動」と呼ばれます。

この不思議な現象は、ニュートリノに重さがある場合（正確には質量に違いがある場合）にしか起こりません。

ニュートリノは何でも通り抜ける！

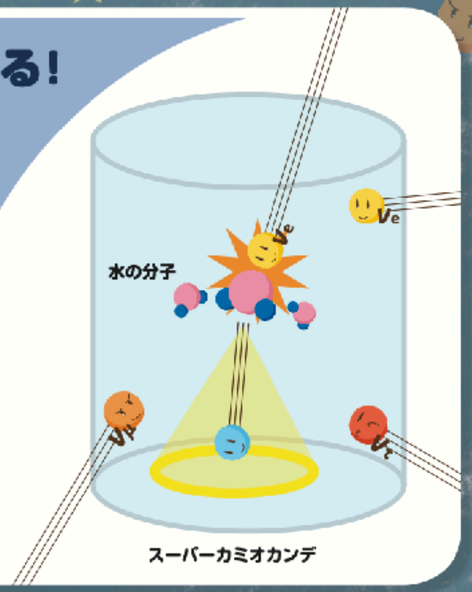
ニュートリノは、どんなものでも、なんの影響も与えずに簡単に通り抜けてしまいます。例えば、太陽で生まれたニュートリノは、地球500個分の厚さの壁があったとしても、半分以上は通り抜けます。こんな幽霊のようなニュートリノは、膨大に飛び回っているのに、人間の目はもちろん、専用の測定装置でもなかなか見る（観測する）ことができません。

ニュートリノは軽い！

ニュートリノは捕まえるのが難しく、その性質は謎だらけです。いまでも、正確な重さは測られておらず、よく知られた物質の中でも特に軽い電子の100万分の1よりも軽いであろうということしかわかっていません。

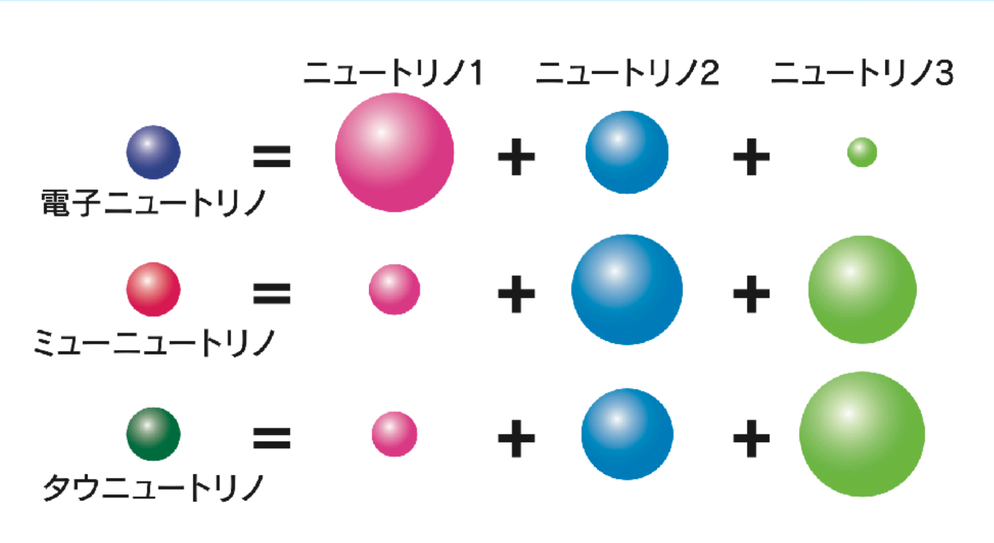
ニュートリノをつかまえる！

なんでも簡単に通り抜けるニュートリノですが、ごくごくまれに、通り道にある物質に衝突して、観測しやすい粒子を叩き出すことがあります。スーパーカミオカンデでは、5万トンという大量の水をたくさんの光センサーで監視していて、水の分子にニュートリノが衝突して飛び出た粒子が放つ弱い光を捕まえます。現在、スーパーカミオカンデでは1日あたり太陽からのニュートリノを約20個、大気中でできたニュートリノを約10個見つけています。また、東海村の加速器で作ったミュー型ニュートリノや、それが変化した電子型ニュートリノを捕まえています。スーパーカミオカンデは、見つけたニュートリノの種類や飛んできた方向、速さ（エネルギー）などを見極めることができるすぐれものです。

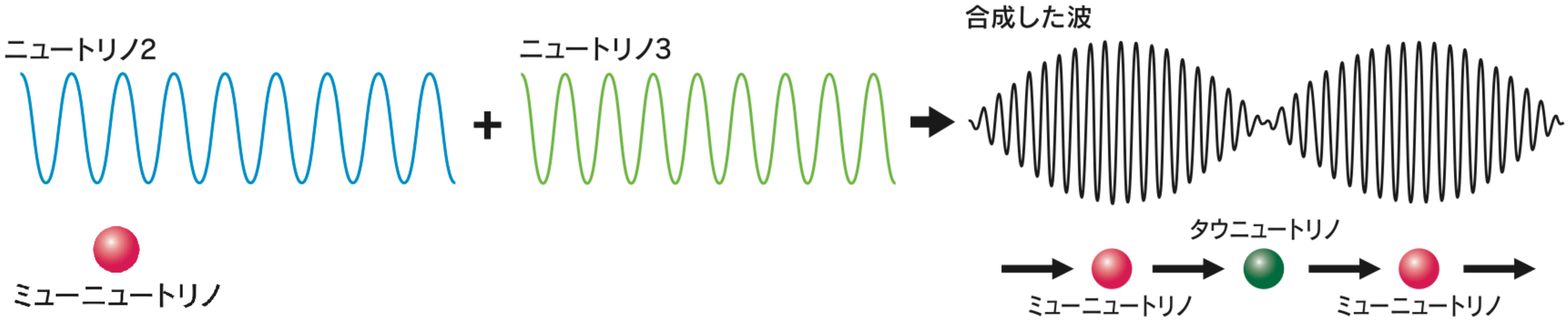


ニュートリノ振動

フレーバーの固有状態

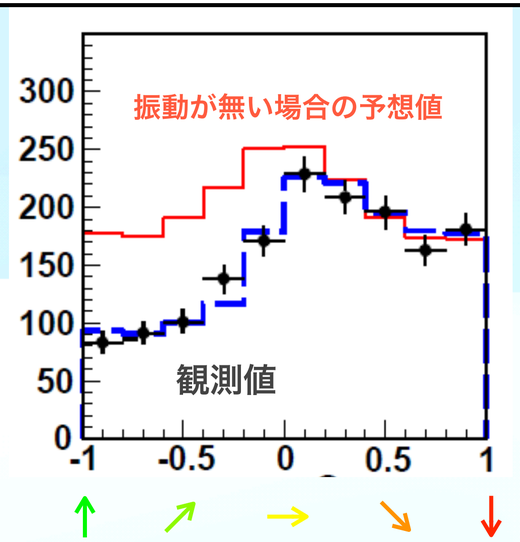


質量の固有状態



ニュートリノ振動：発見から測定へ

大気ニュートリノ振動の発見（1998年）



梶田隆章 卓越教授

2015年
ノーベル物理学賞

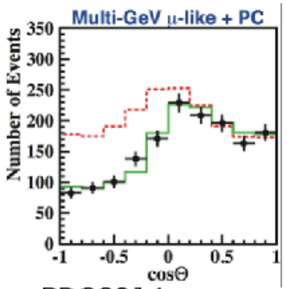
ニュートリノ混合行列（PMNS行列）

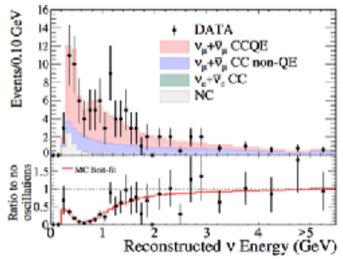
$$\begin{pmatrix}\nu_e\\ \nu_\mu\\ \nu_\tau\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&\cos\theta_{23}&\sin\theta_{23}\\0&-\sin\theta_{23}&\cos\theta_{23}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\theta_{13}&0&\sin\theta_{13}e^{i\delta}\\0&1&0\\-\sin\theta_{13}e^{i\delta}&0&\cos\theta_{13}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\theta_{12}&\sin\theta_{12}&0\\-\sin\theta_{12}&\cos\theta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

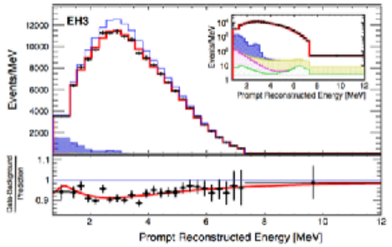
大気・加速器 $\nu_\mu \to \nu_\tau$

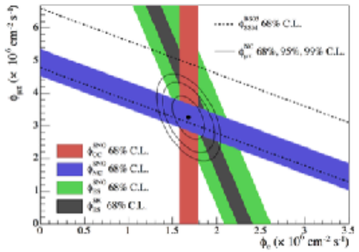
原子炉 $\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e$
加速器 $\nu_\mu \to \nu_e$

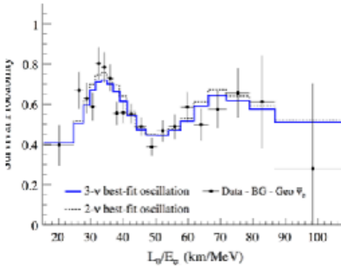
太陽 $\nu_e \to \nu_e$
原子炉 $\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e$











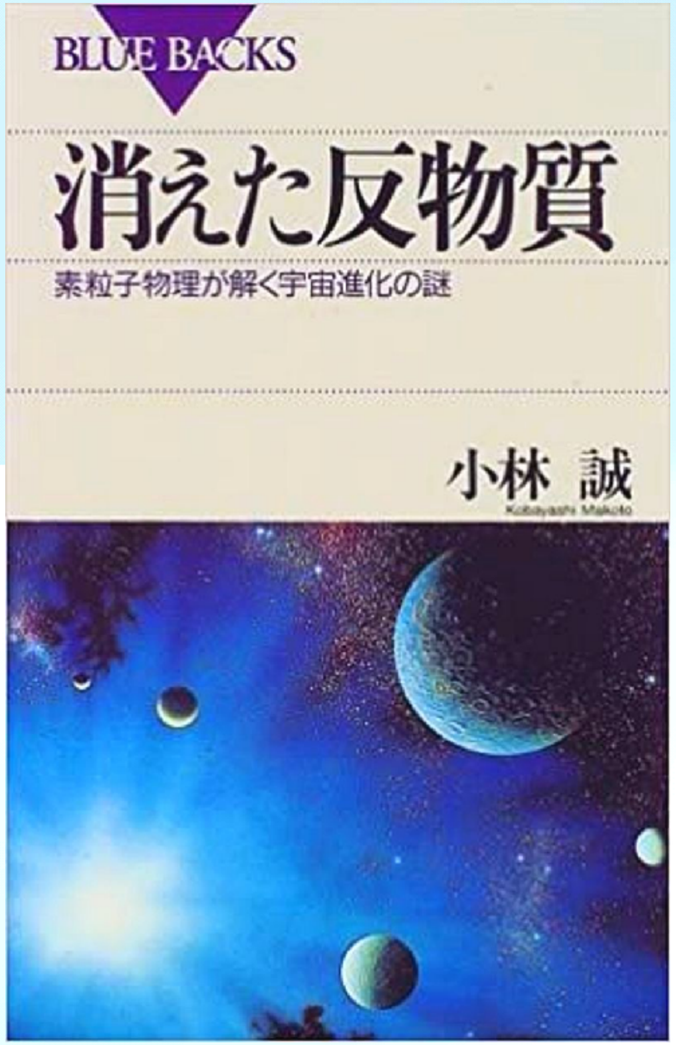
PDG2014 (Normal hierarchy) :

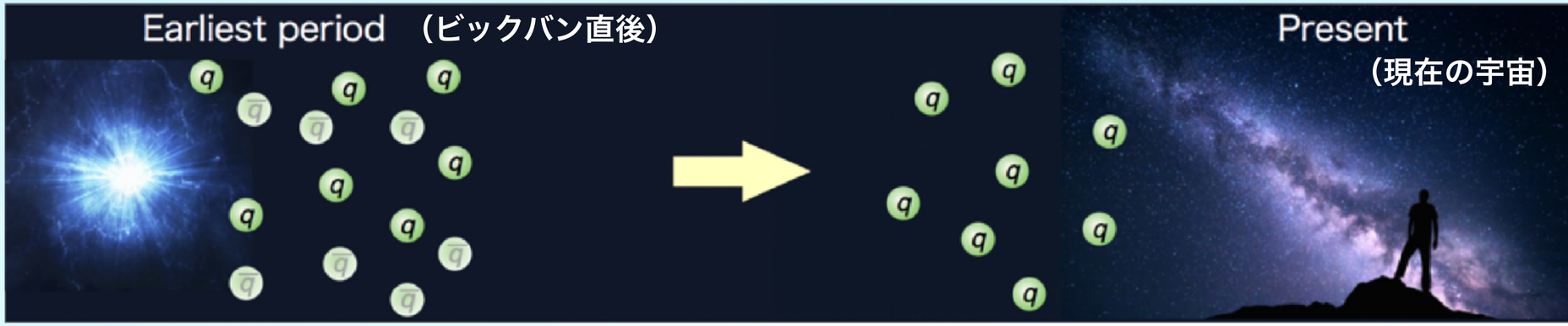
$$\Delta m^2_{32} = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3}\mathrm{eV}^2$$
$$\sin^2\theta_{23} = 0.437^{+0.033}_{-0.023}$$

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

$$\Delta m^2_{21} = 7.54^{+0.26}_{-0.22} \times 10^{-5}\mathrm{eV}^2$$
$$\sin^2\theta_{12} = 0.308 \pm 0.017$$

CP対称性（物質・反物質）の破れ





粒子（物質）と反粒子（反物質）が同数生成

粒子（物質）しか見当たらない

→　物質と反物質の物理法則に非対称性が必要（CP対称性の破れ）

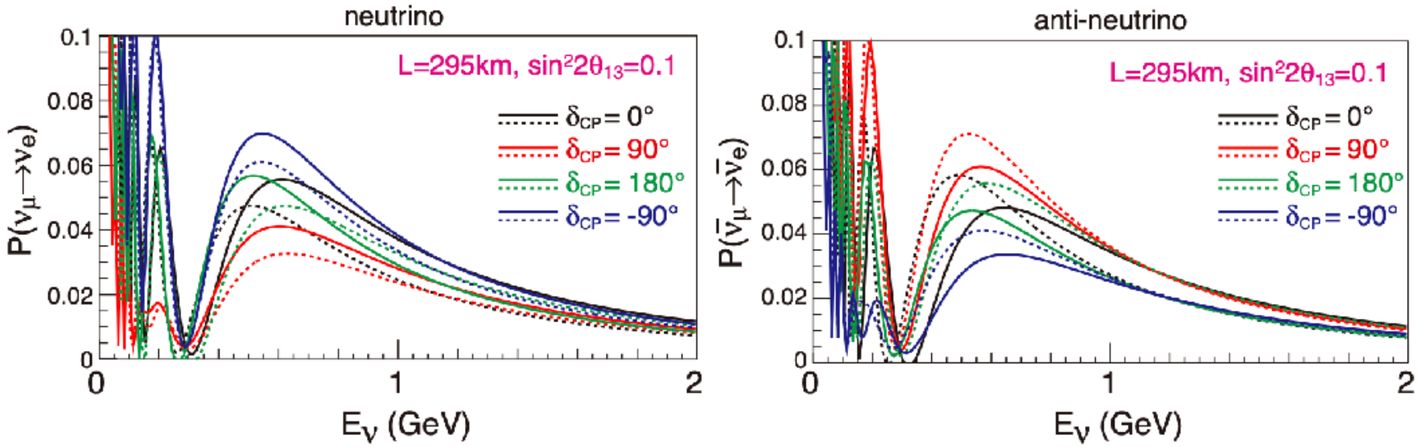
サハロフ3条件の1つ

ニュートリノ混合行列（PMNS行列）

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

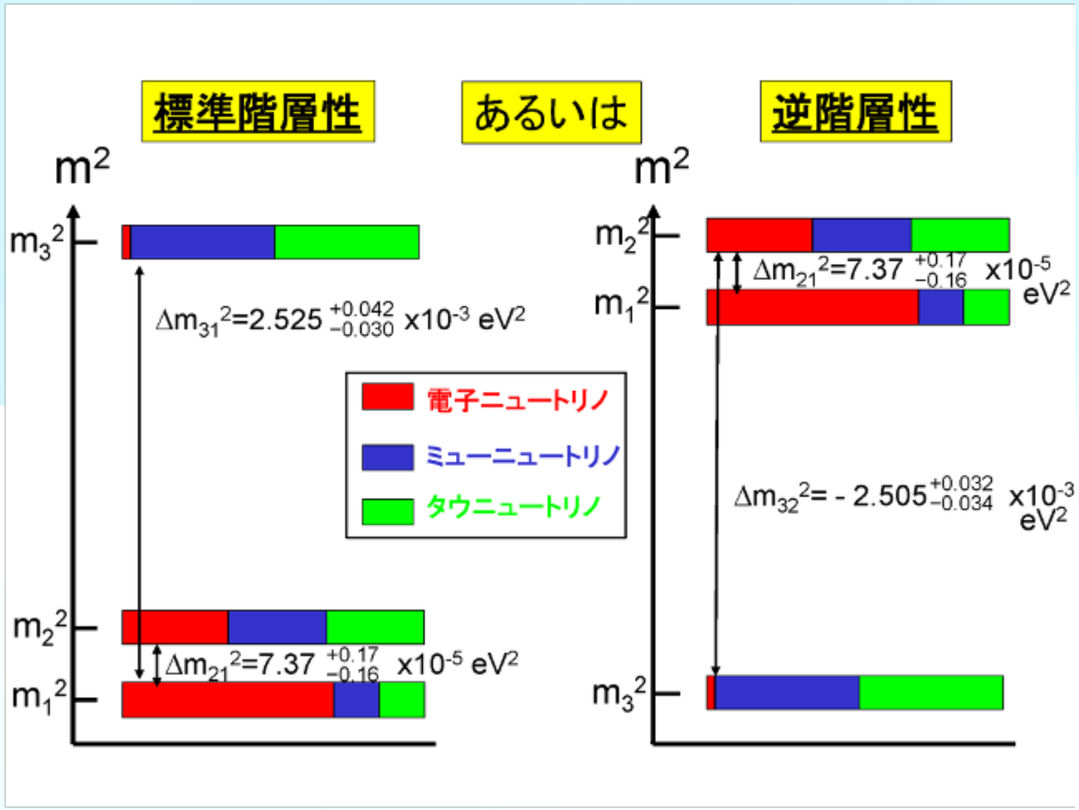
δ：CPパラメータ　　sinδ≠0→CP対称性が破れている

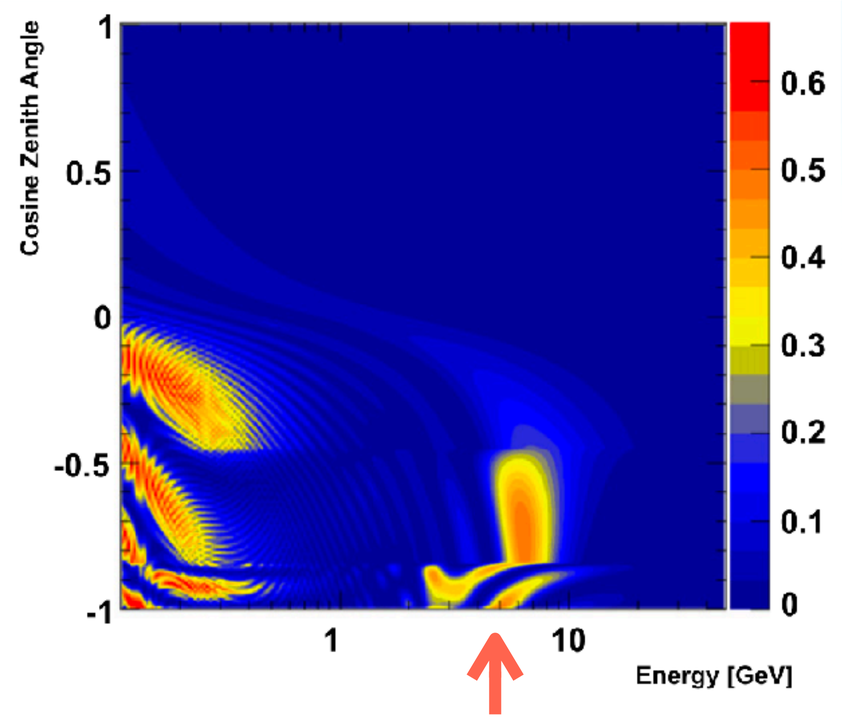
T2K実験 (Tokai-to-Kamioka)

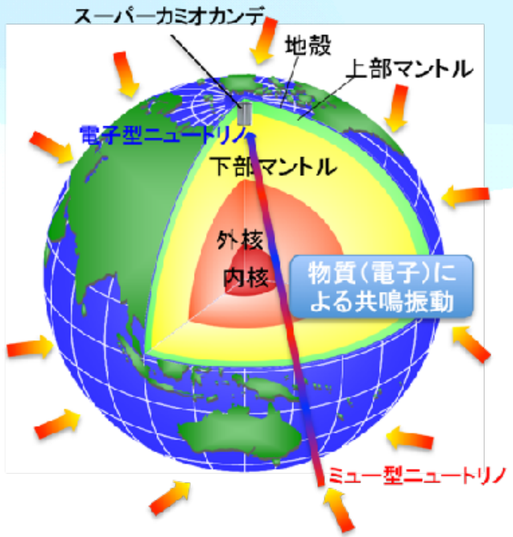


ν・ν̄ 振動の差の測定（CP対称性の測定）にはビーム増強とより大きな検出器が必要

大気ニュートリノでの質量階層性測定





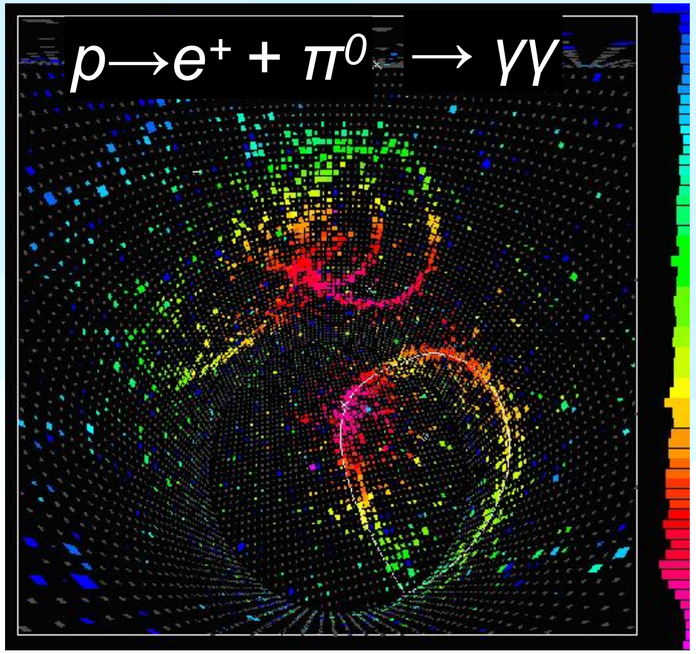


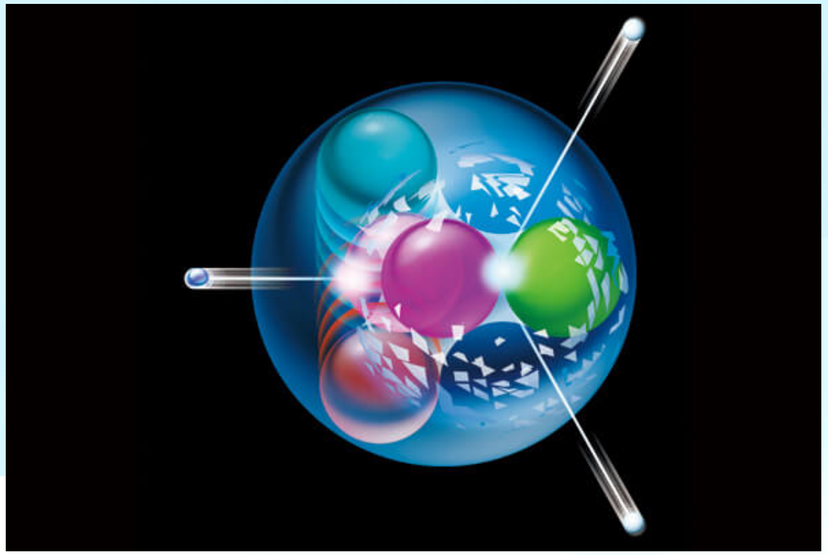
これまでのニュートリノ質量の理解
どちらの階層性かは未解決

大気νが地球を通過する際に受ける物質効果でν振動にゆがみ
→ 質量階層性を測定測ることが可能

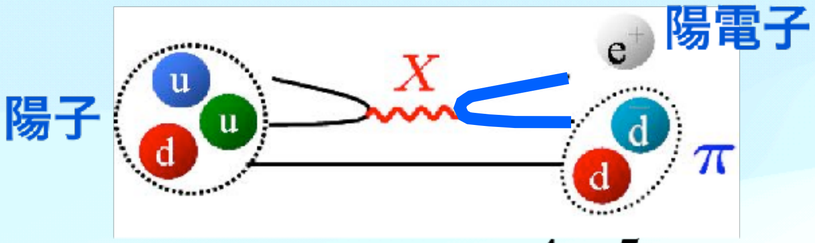
陽子（核子）崩壊の探索

スーパーカミオカンデで見た
陽子崩壊事象（シミュレーション）

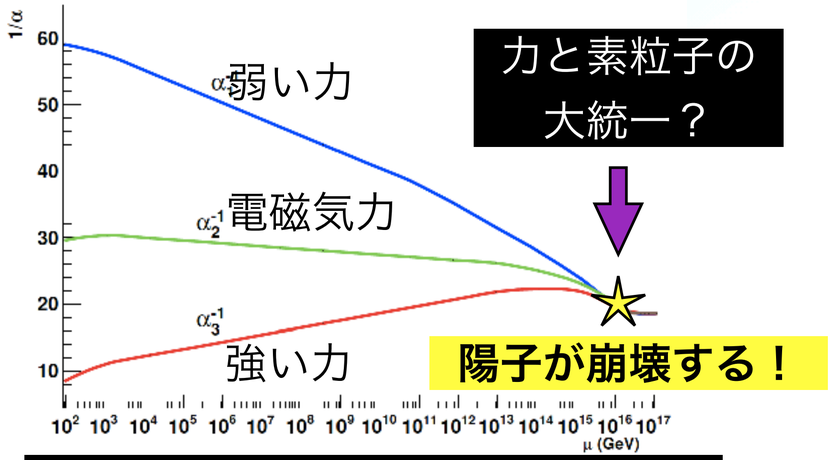




$p \to e^+\pi^0$



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

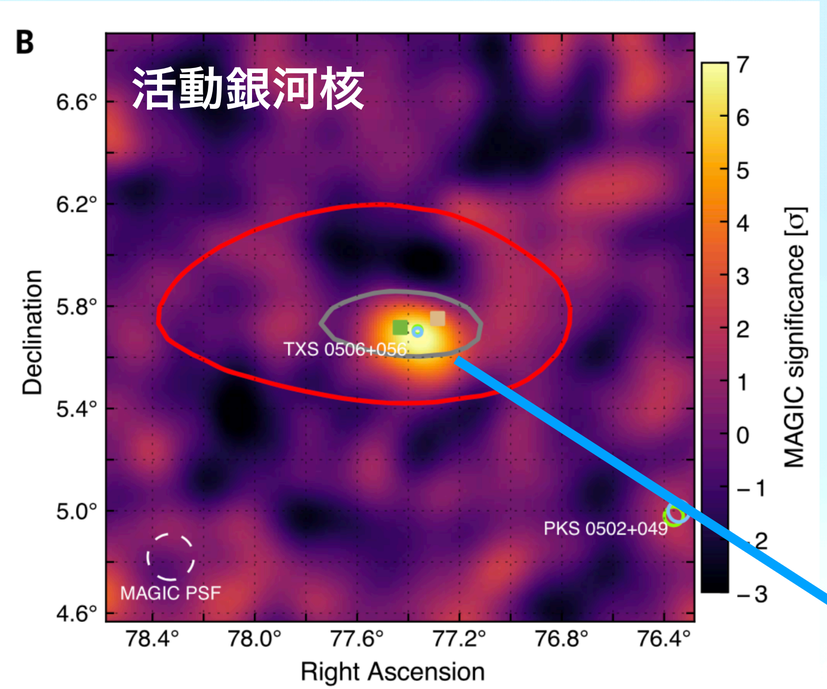


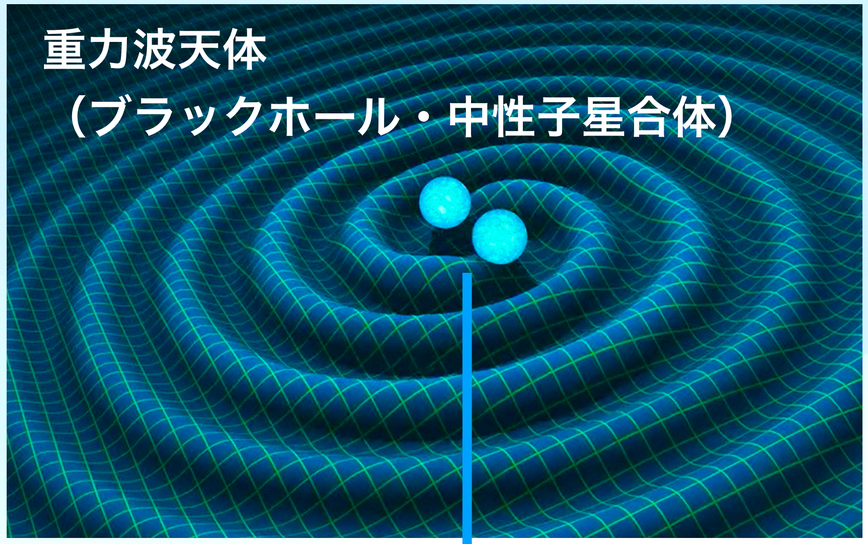
力と素粒子の
大統一？

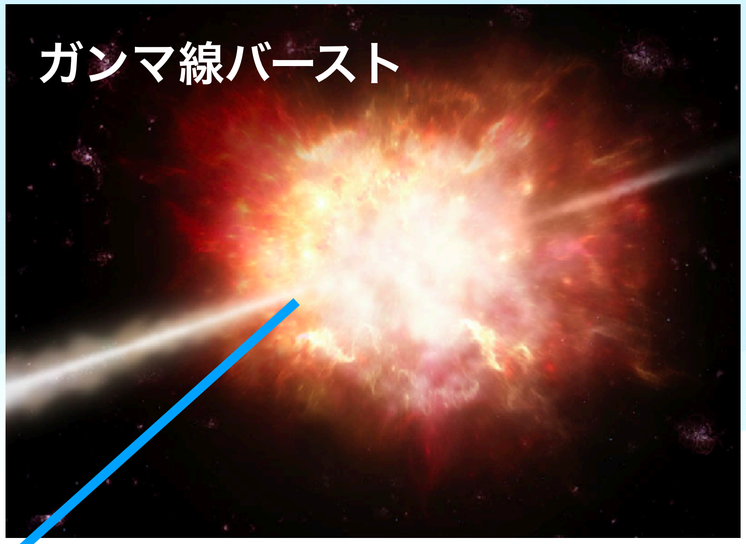
陽子が崩壊する！

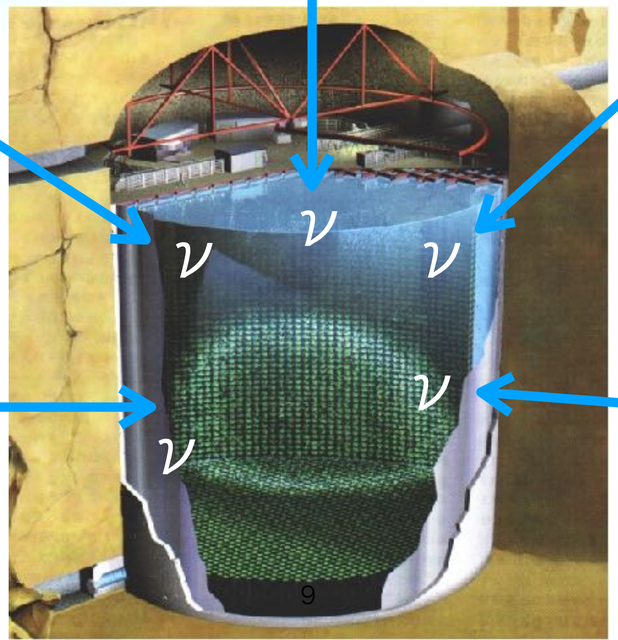
- 大統一理論
  - ３つの力、物質素粒子（レプトン・ クォーク）を統一して記述
  - 陽子の崩壊を予言
  - バリオン（核子）数の非保存はサハロフ３条件の１つ
- 陽子崩壊の発見→測定へ
  - レプトン・ クォーク間の直接遷移を見る　→大統一理論の直接証拠

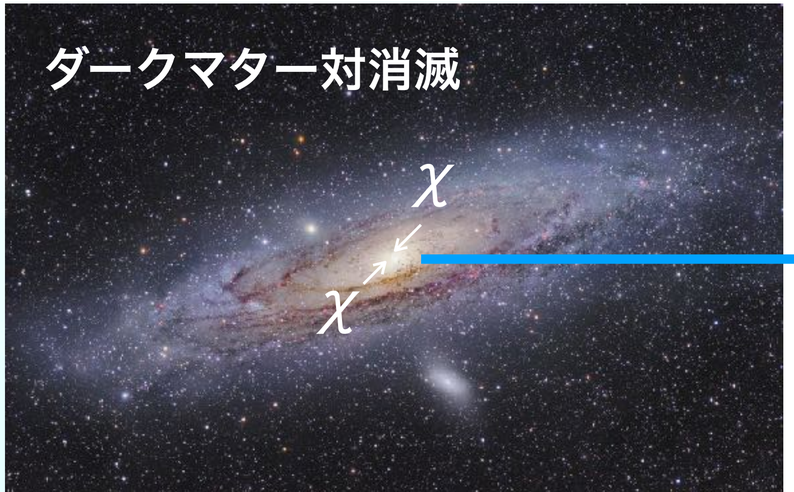
高エネルギー天体からのニュートリノ探索

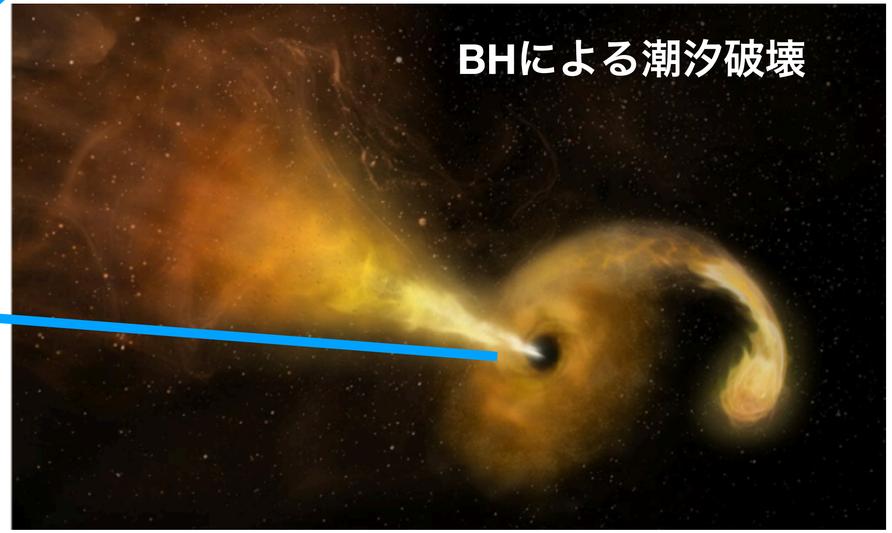




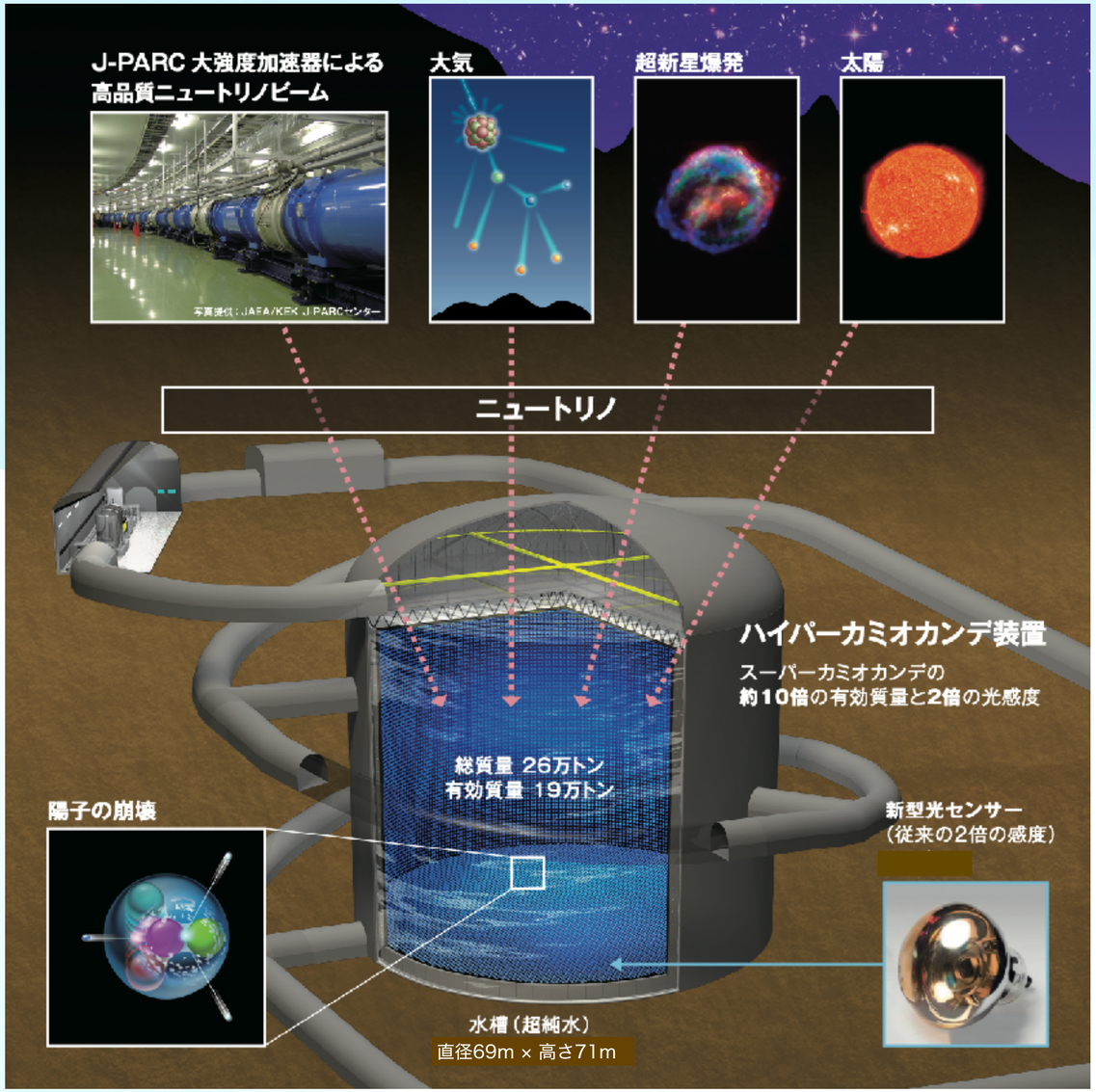






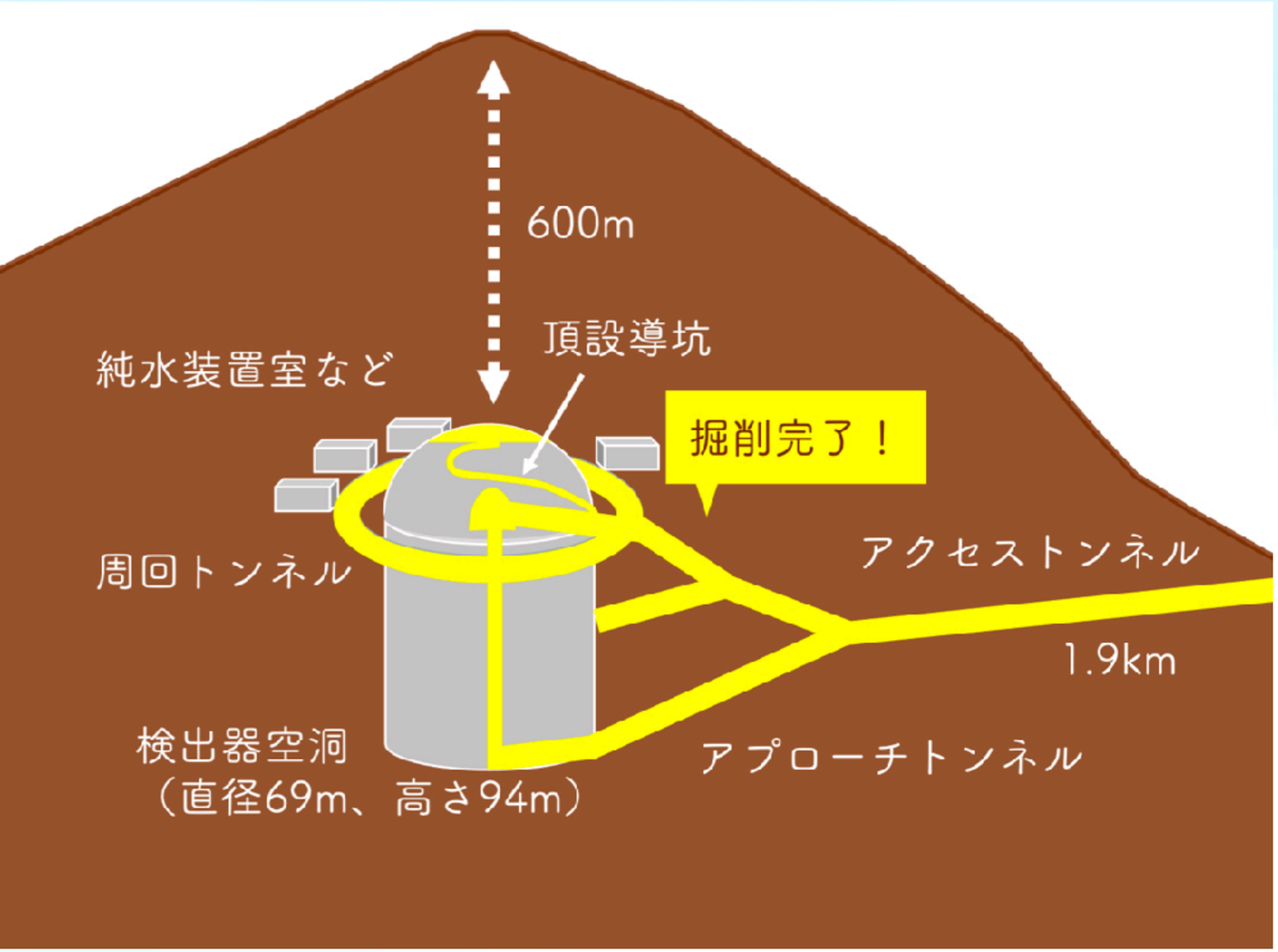


ハイパーカミオカンデ



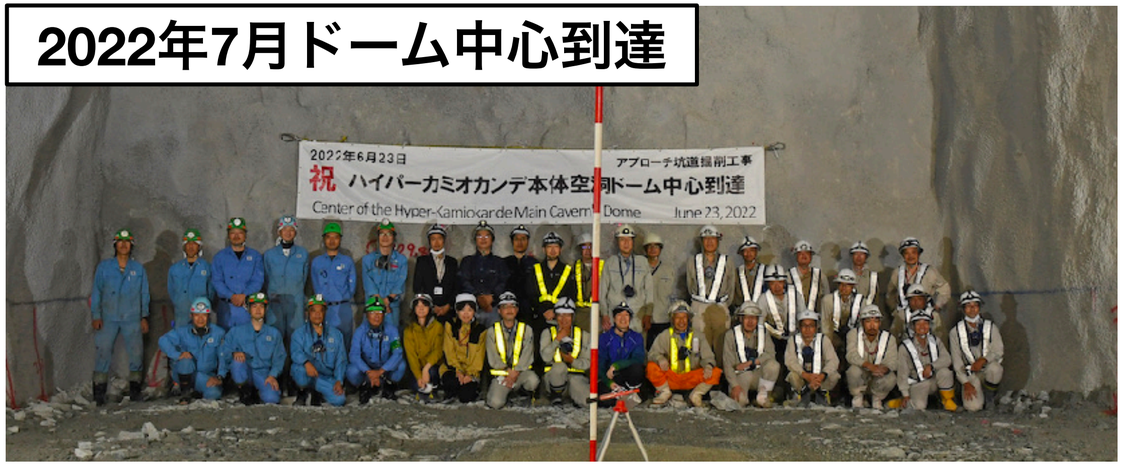
- 有効質量19万トン（SKの8.4倍）
- 多様な物理が可能：
  - ・ニュートリノ振動（CP、質量階層性）、陽子崩壊探索、ニュートリノ天文学
- 2026年検出器設置、2027年観測開始予定

パイパーカミオカンデ：建設状況



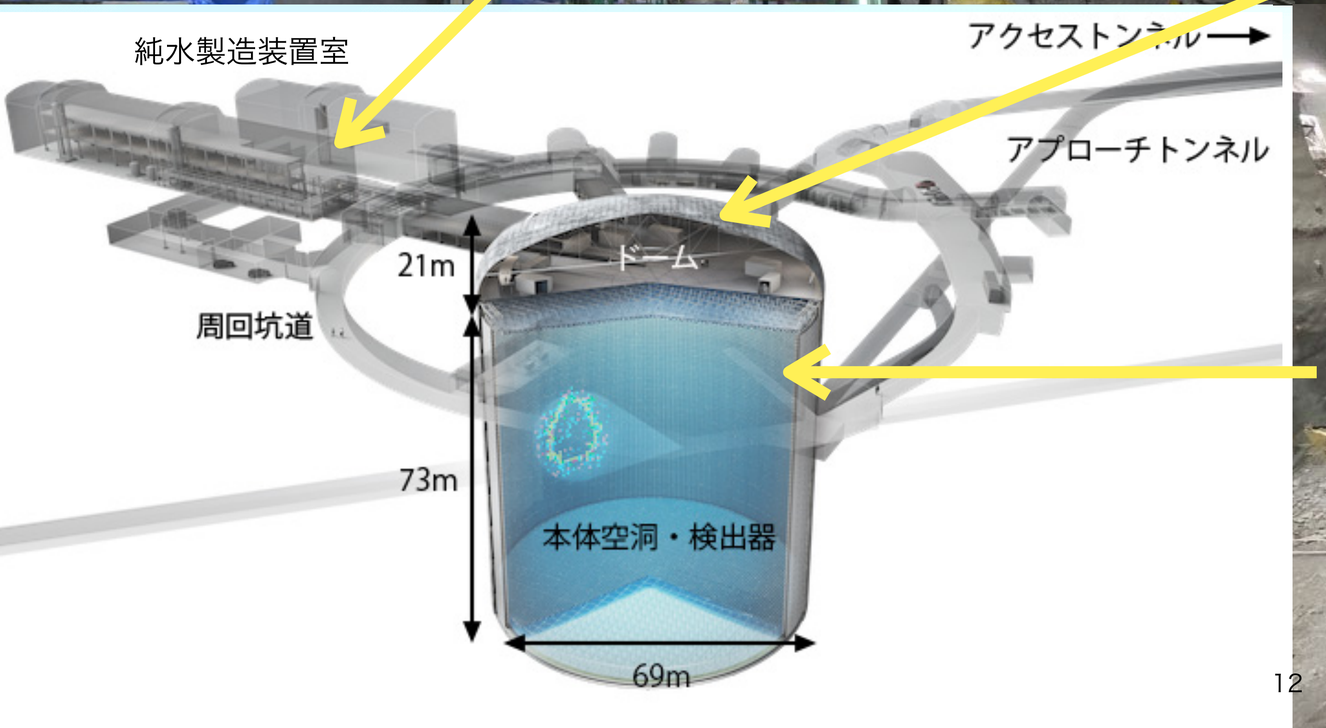
2021年5月着工式

2022年7月ドーム中心到達



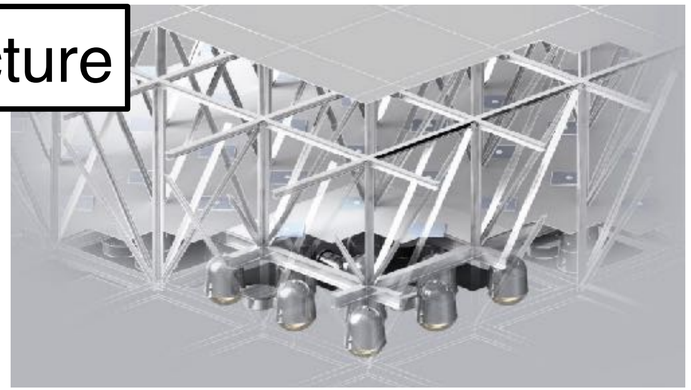
2023年7月純水製造装置室空洞

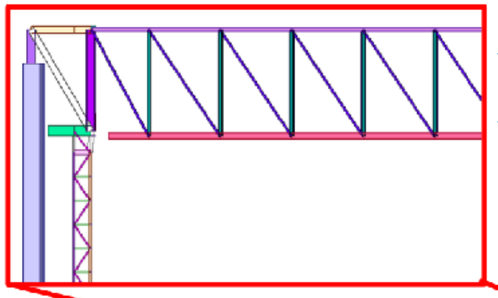
2023年10月本体空洞ドーム完成


純水製造装置室
アクセストンネル
アプローチトンネル
ドーム
21m
周回坑道
73m
本体空洞・検出器
69m

現在

TOP structure

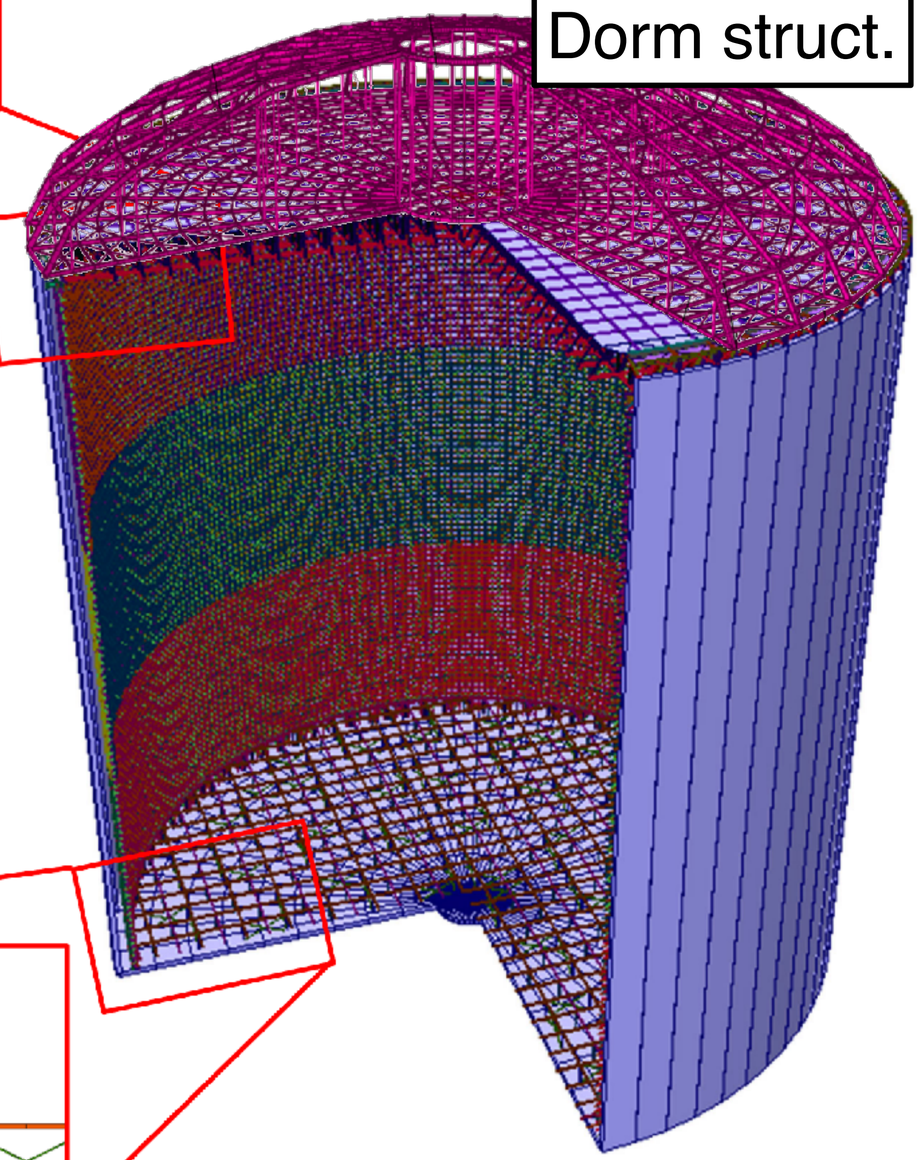




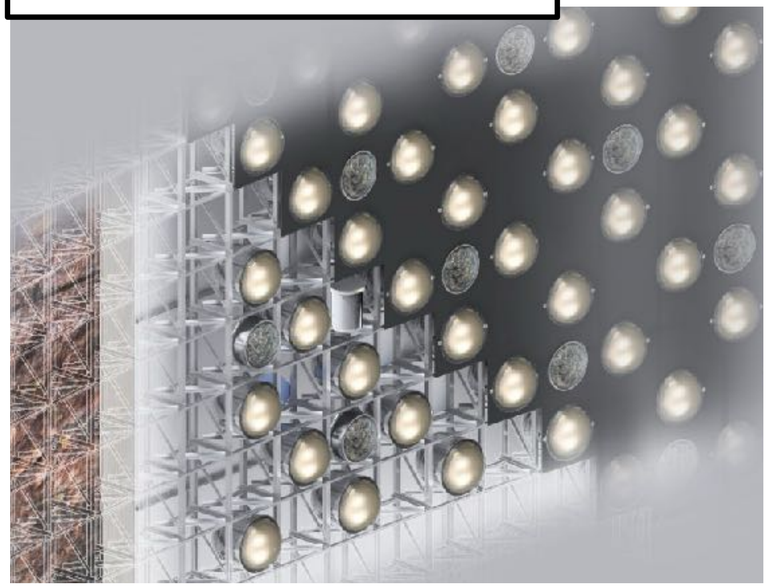
Top outer detector (top OD)
(3 meter height (2 meter water))

Barrel OD
(1 meter width)

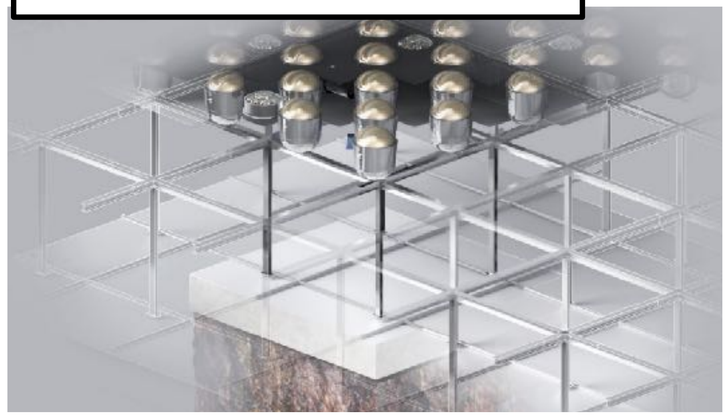
Dorm struct.

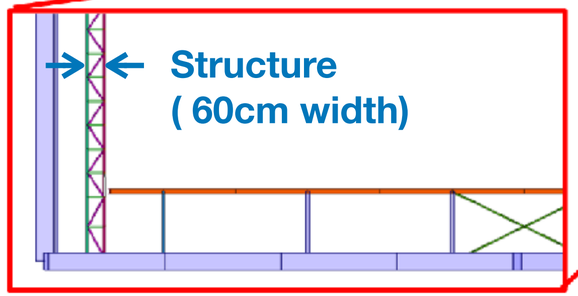


BARREL structure



BOTTOM structure

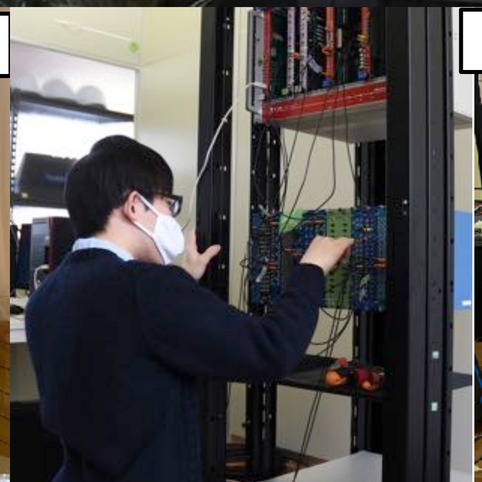


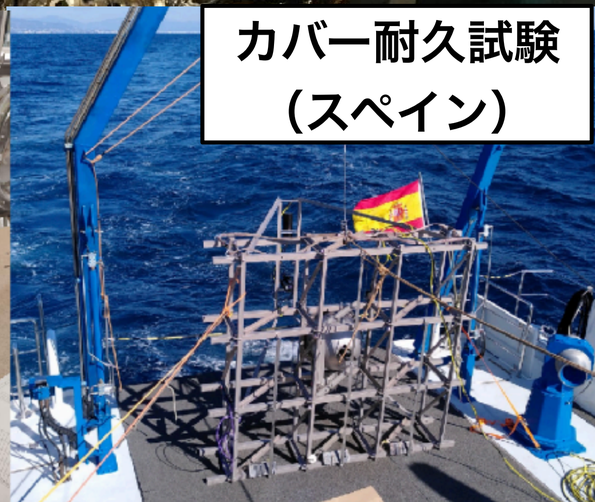


Structure
(60cm width)

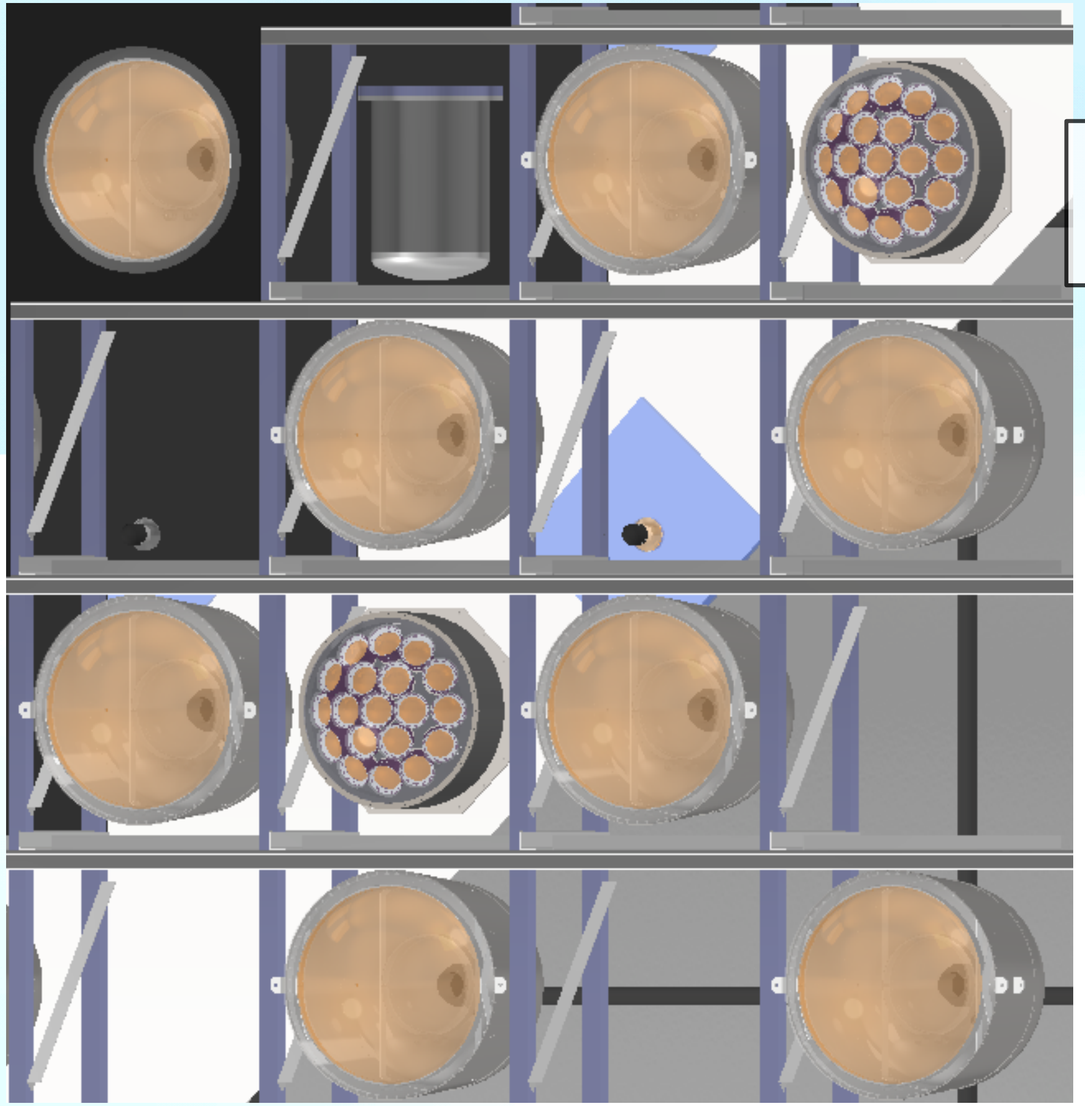
Bottom OD
(2 meter height)

50センチ口径光電子増倍管（PMT）





その他の検出器

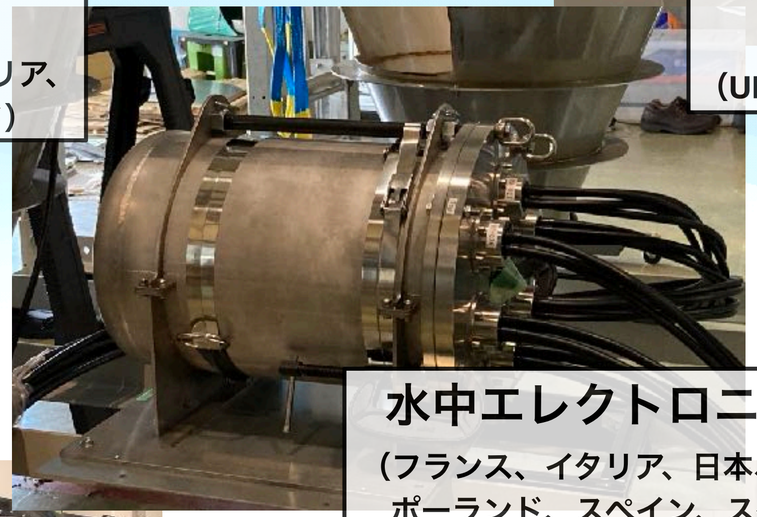


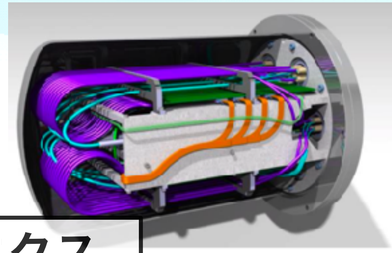
マルチPMT

（チェコ、カナダ、イタリア、メキシコ、ポーランド）

外水槽PMT

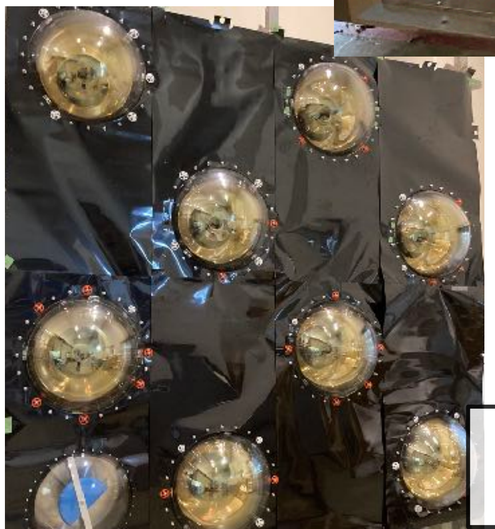
（UK、韓国、オーストラリア）

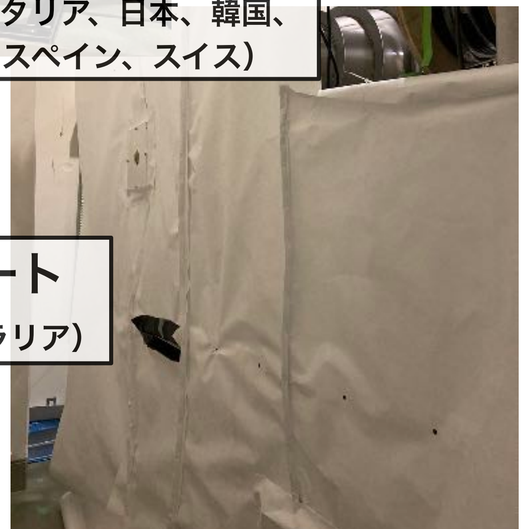




水中エレクトロニクス

（フランス、イタリア、日本、韓国、ポーランド、スペイン、スイス）





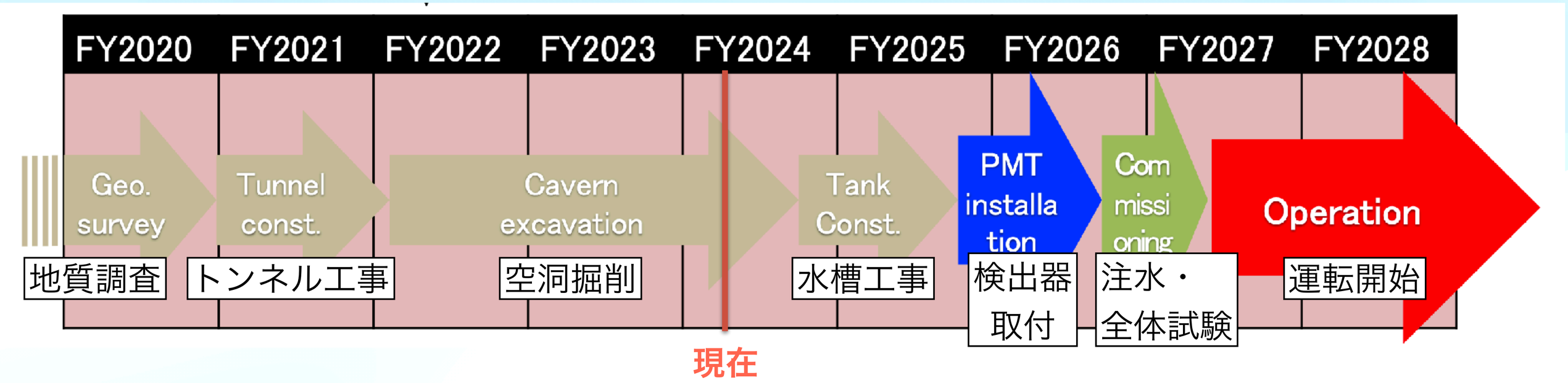
タイベックシート

（UK、韓国、オーストラリア）

ブラックシート

（日本、スペイン）

開発・試験・建設・実験開始へ



宇宙ニュートリノ部門・大学院担当教員

塩澤真人 教授

森山茂栄 教授

早戸良成 准教授

関谷洋之 准教授

中山祥英 准教授

奥村公宏 准教授（柏）