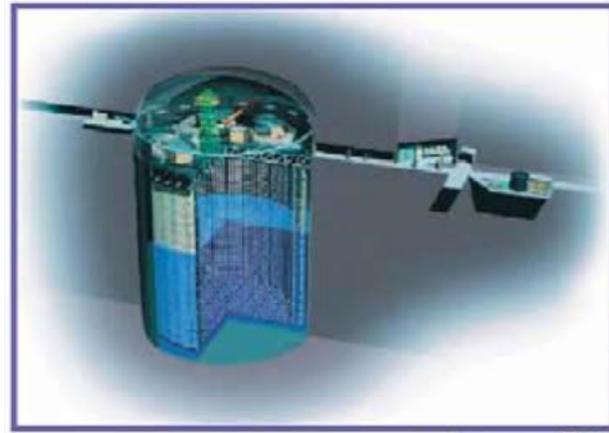


T2K実験, ハイパーカミオカンデ

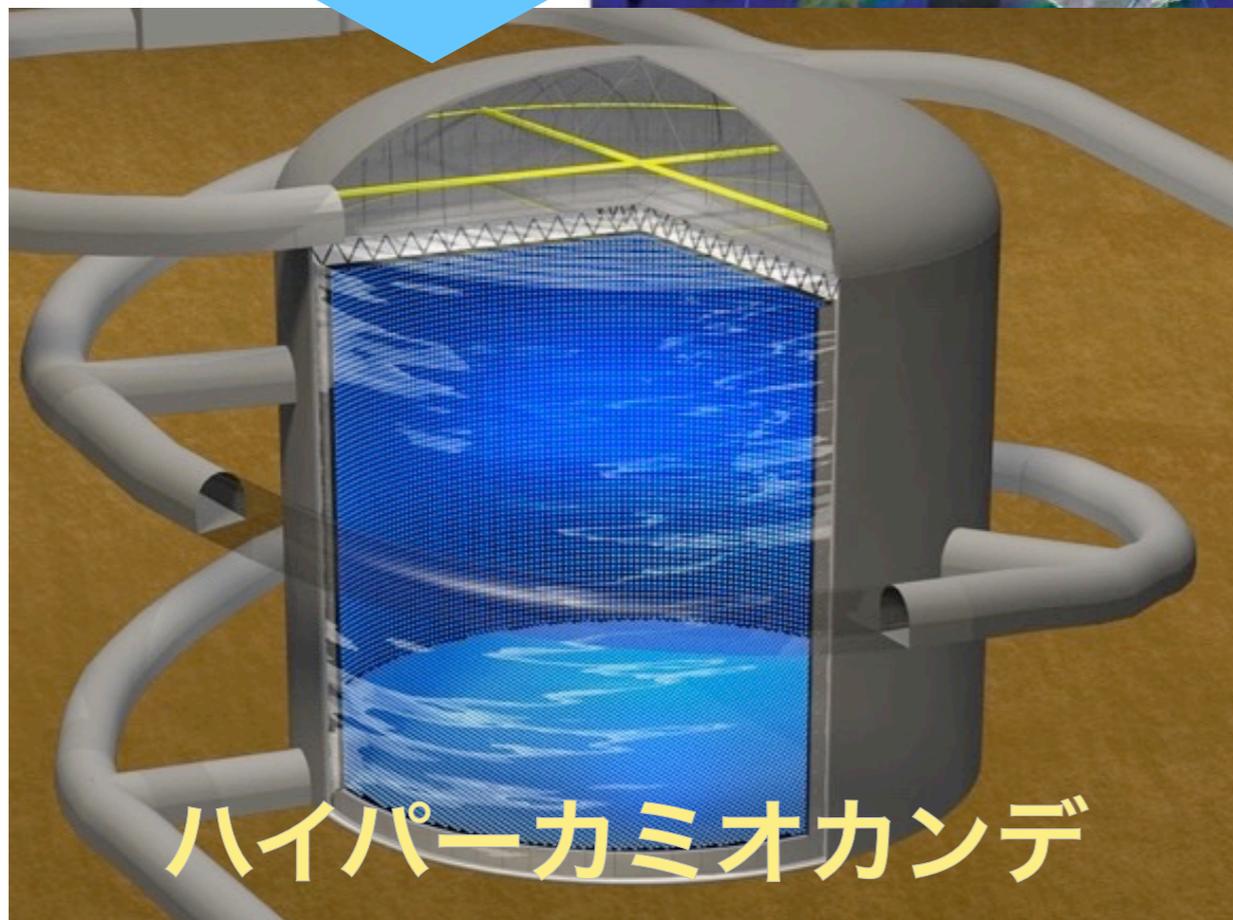


Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



T2K実験

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



ハイパーカミオカンデ

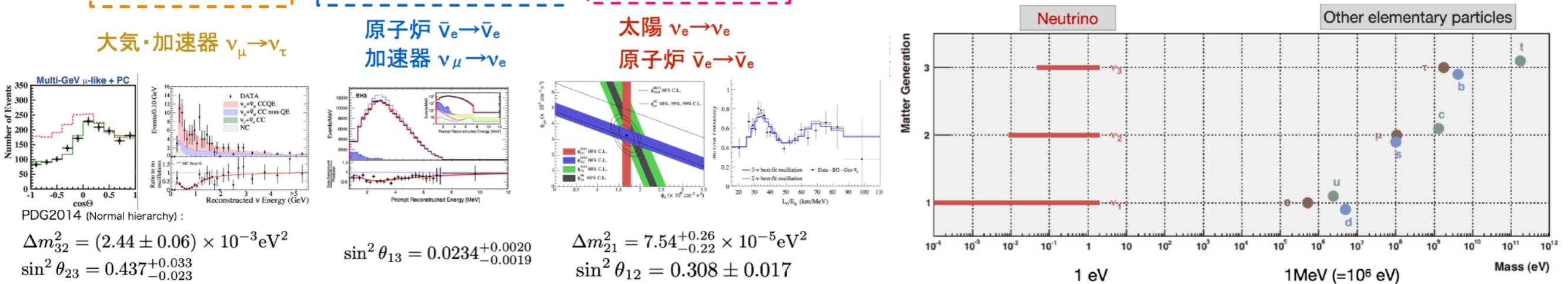
宇宙ニュートリノ研究部門
2023.06.10 大学院ガイダンス
奥村 公宏

ニュートリノの謎

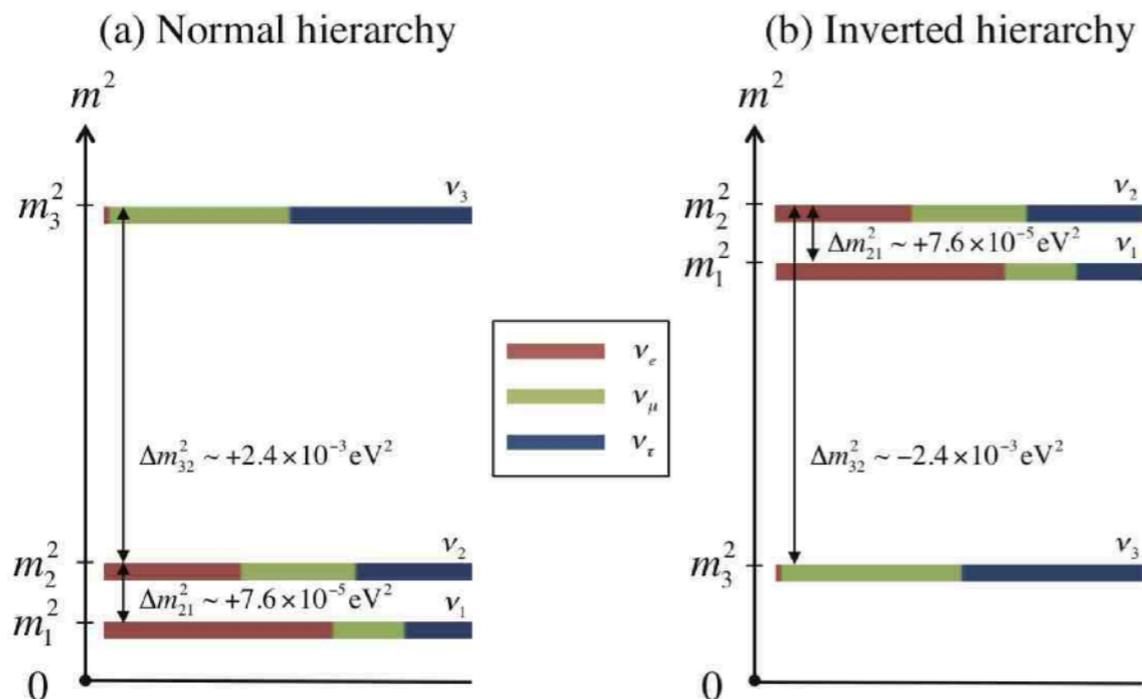
ニュートリノ混合行列

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

素粒子の質量スケール

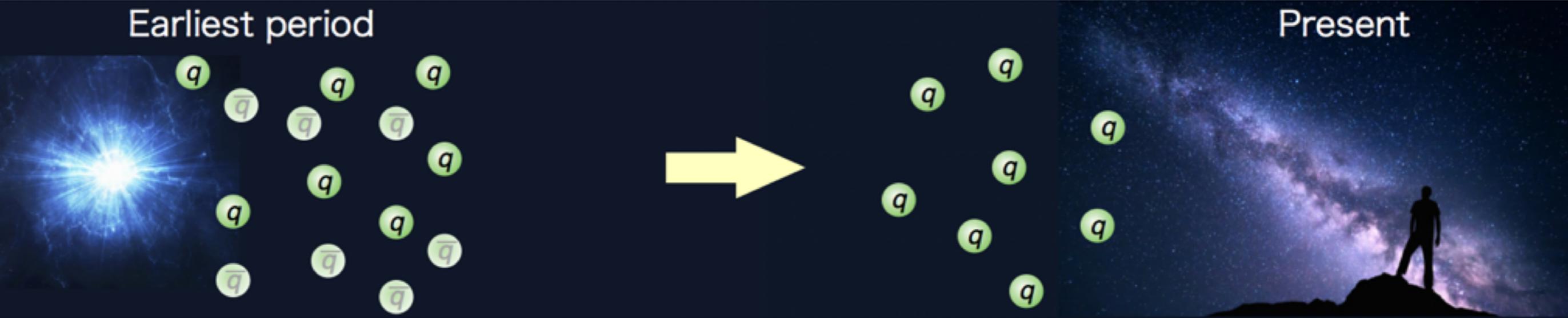


質量階層性



- 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



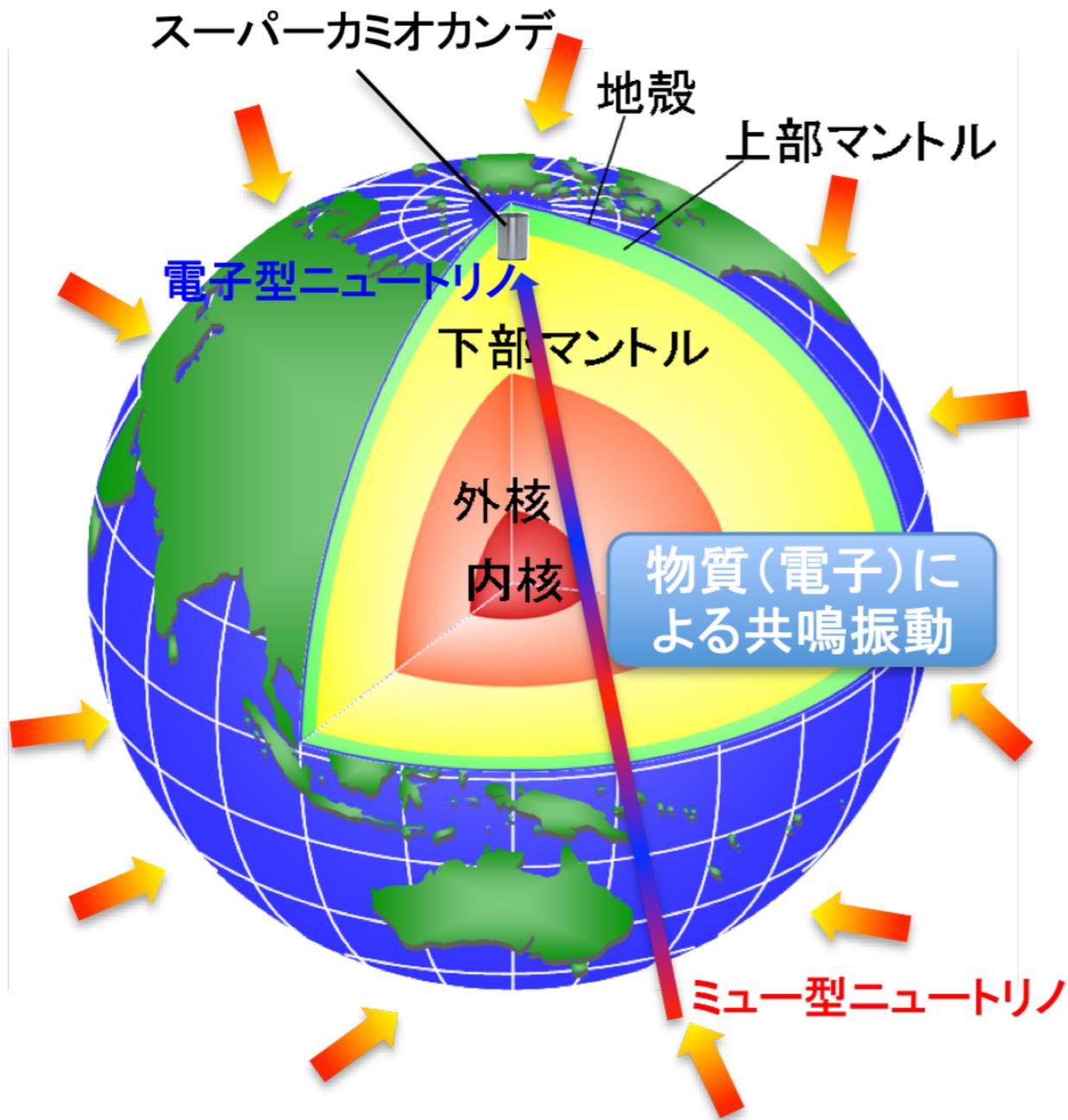
- 宇宙の始まり：ビッグバンで同数の粒子・反粒子が生成
→ 現在では物質（粒子）のみが生き残り、反粒子は消滅、なぜ？
- CP対称性の破れは物質優勢宇宙の条件（サハロフの条件）の一つ
- ニュートリノCP（レプトンCP）の破れは、クォークに比べて3桁大きい可能性がある
 - 宇宙の物質起源を説明できるか？

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
 - 3番目の混合角 θ_{13} を発見し、ニュートリノの三世代振動を確立した
- 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

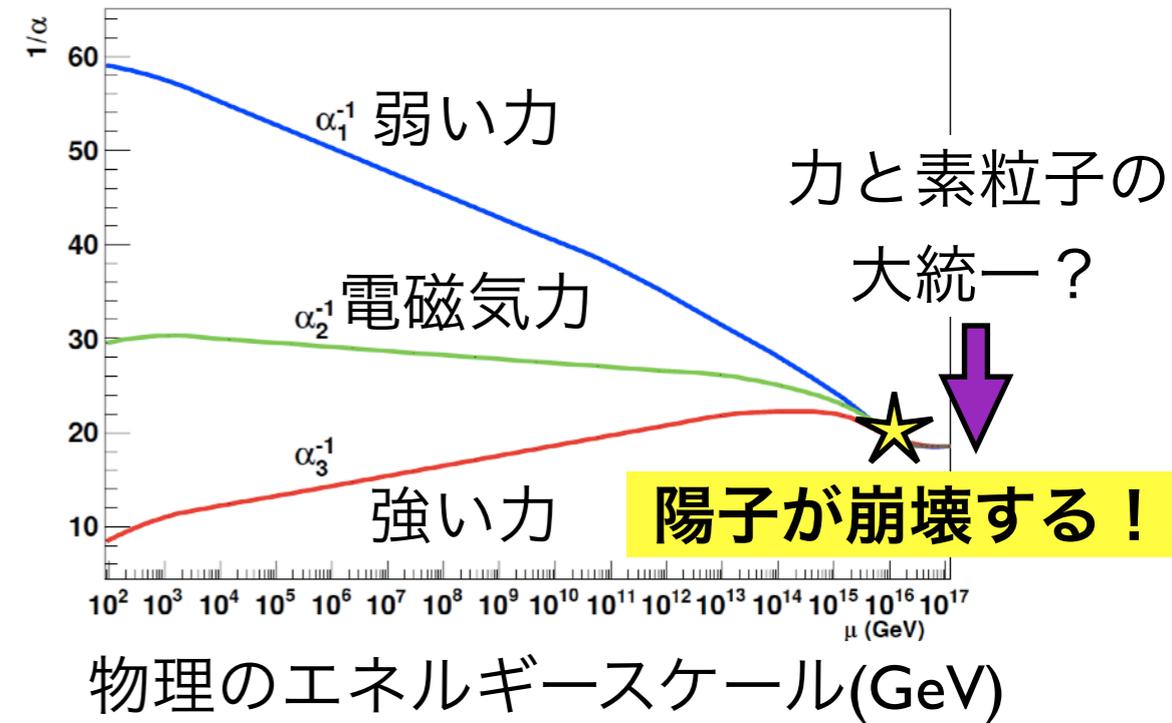
- SK-Gdでガドリニウム（中性子）を活用

- 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、 $\nu \cdot \bar{\nu}$ の識別能力がより感度を向上した解析が期待

陽子（核子）崩壊の探索

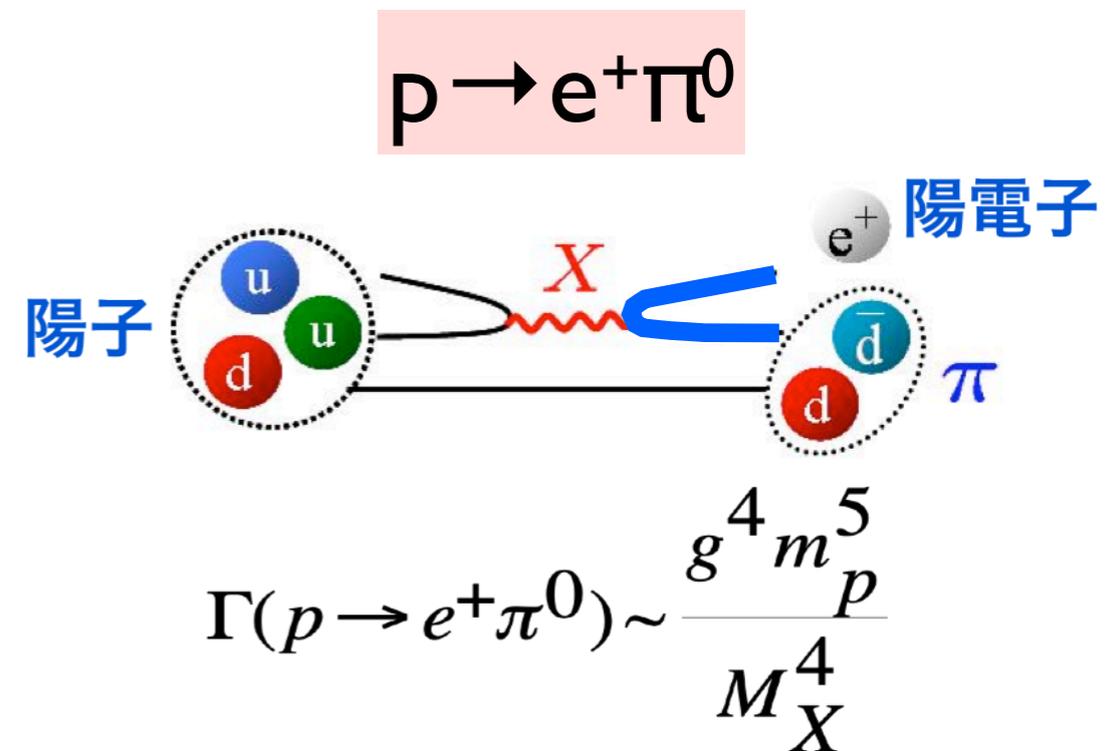
- 大統一理論

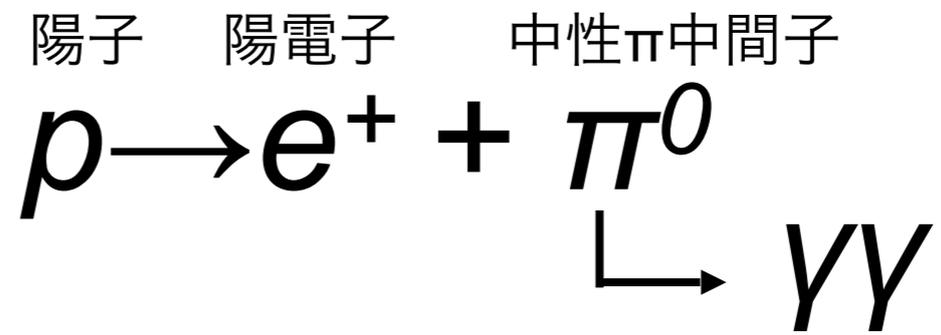
- 3つの力、物質素粒子（レプトン・クォーク）を統一して記述
- 陽子の崩壊を予言。バリオン数非保存（サハロフ条件の一つ）



- 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：

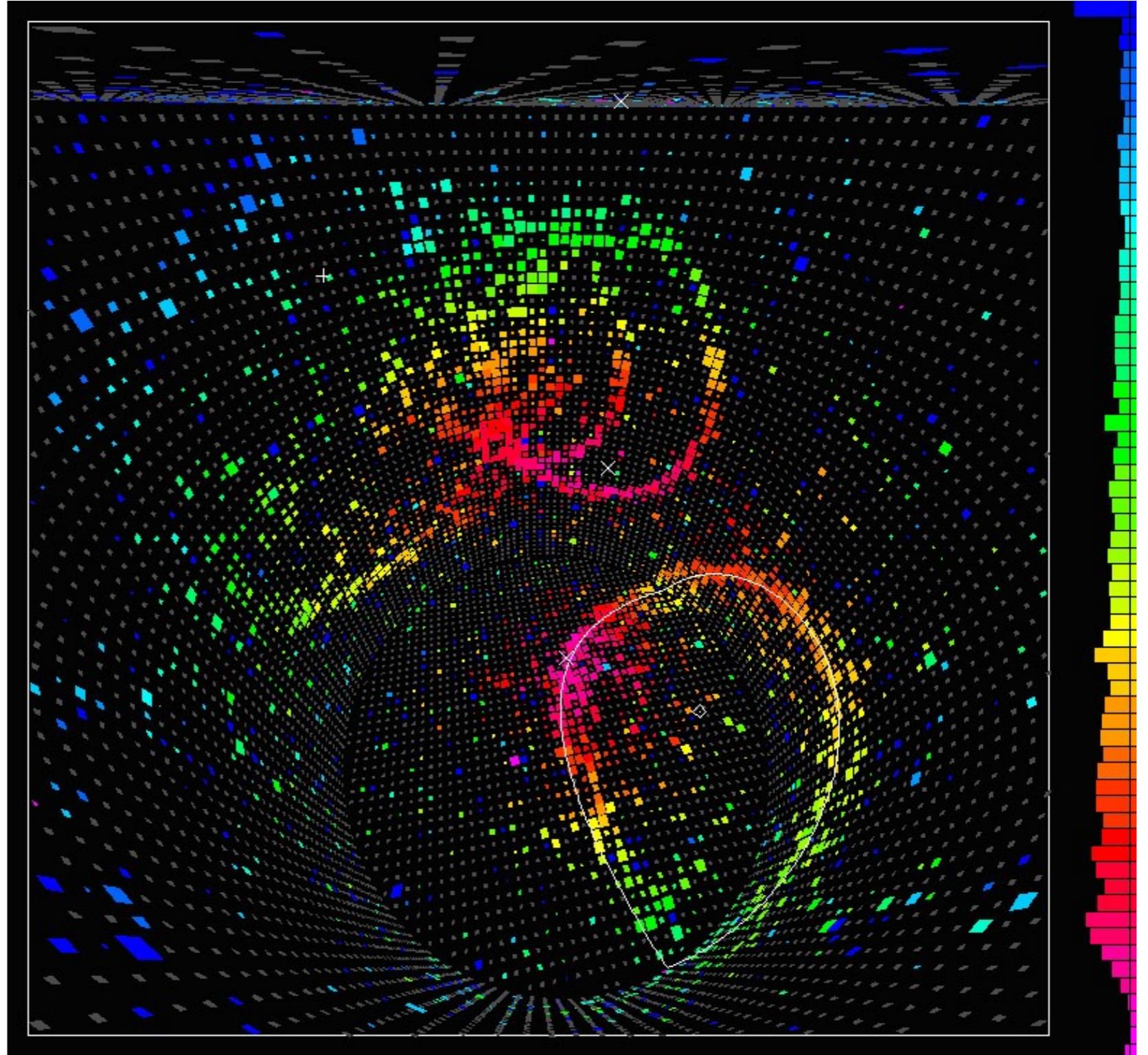
2.2万トンの水～**10³⁴個の陽子**を監視する世界最高感度の装置。

今後の課題

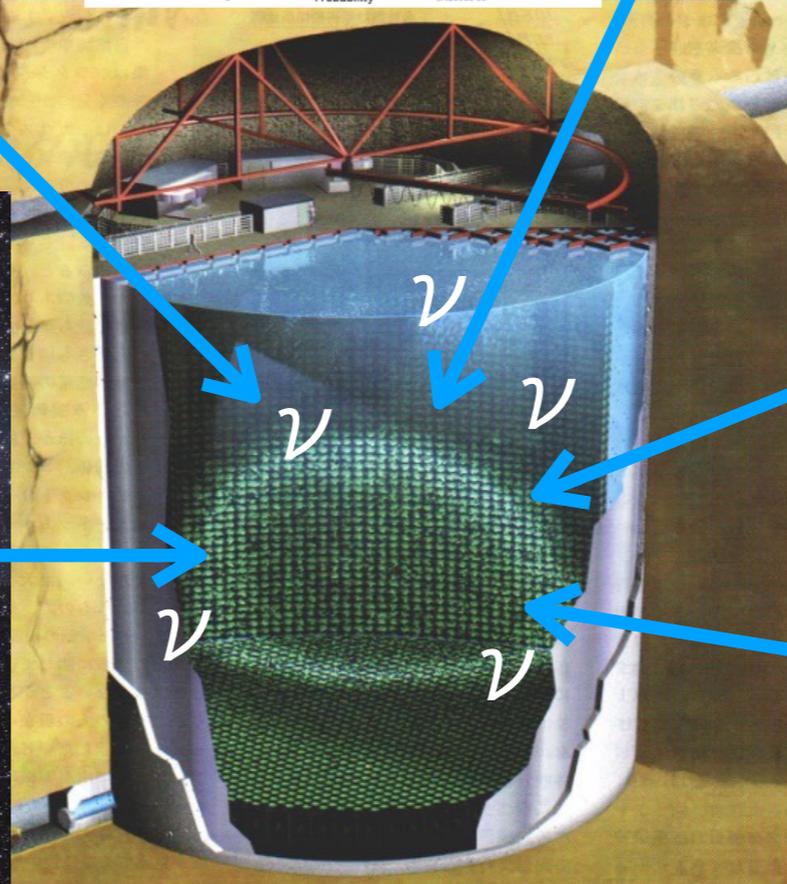
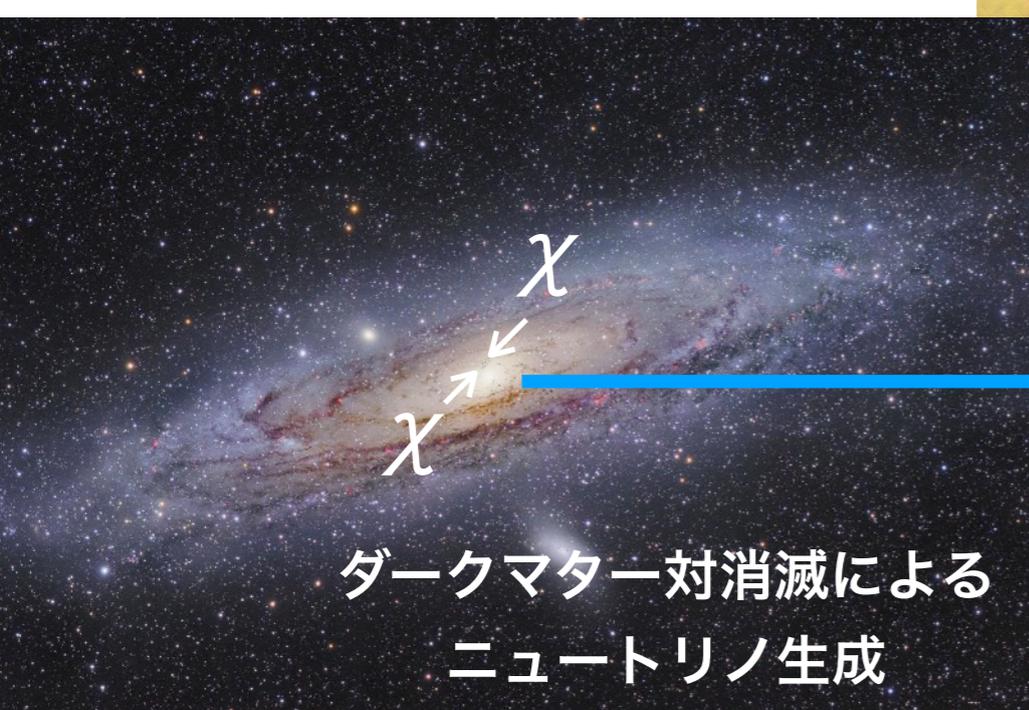
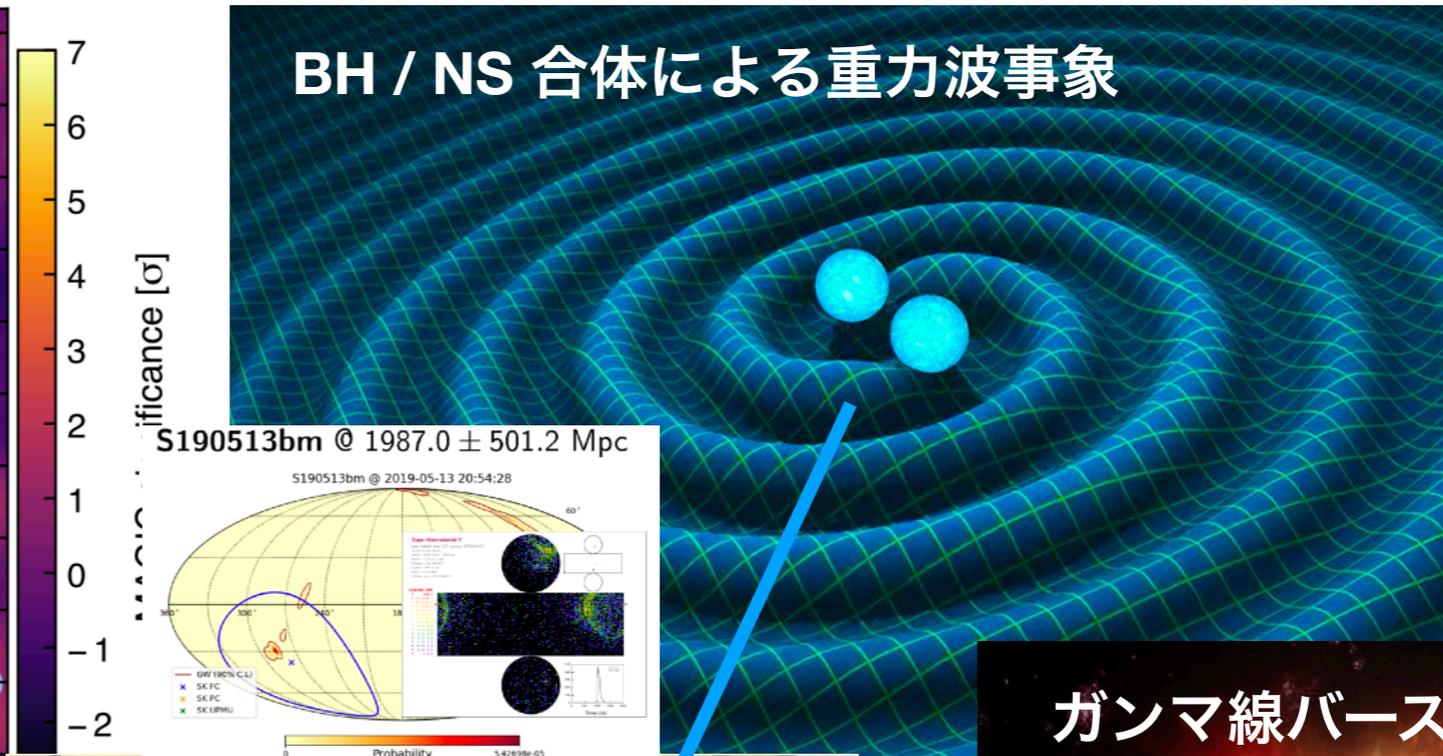
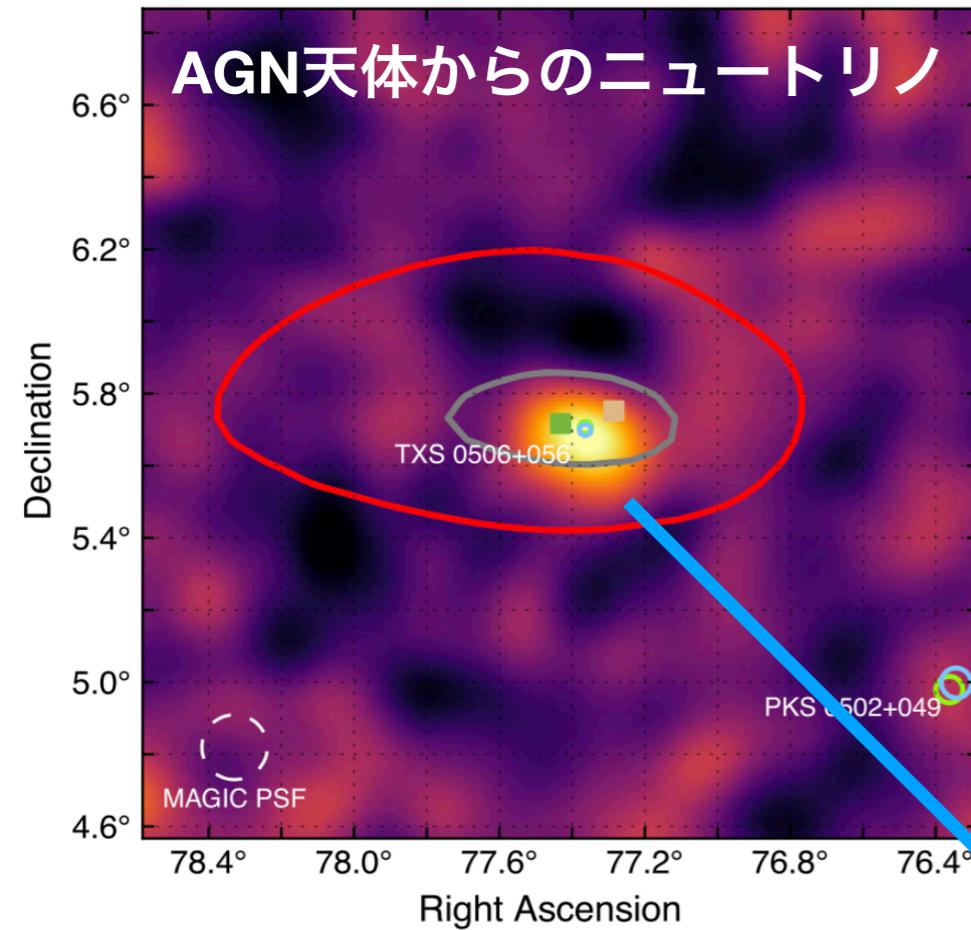
- 2020年からガドリニウム導入→バックグラウンド低減により発見能力向上。
- まだ解析していない崩壊モードの探索も。

ハイパーカミオカンデ：

陽子寿命10³⁵年への探索



高エネルギー天体からのニュートリノ探索

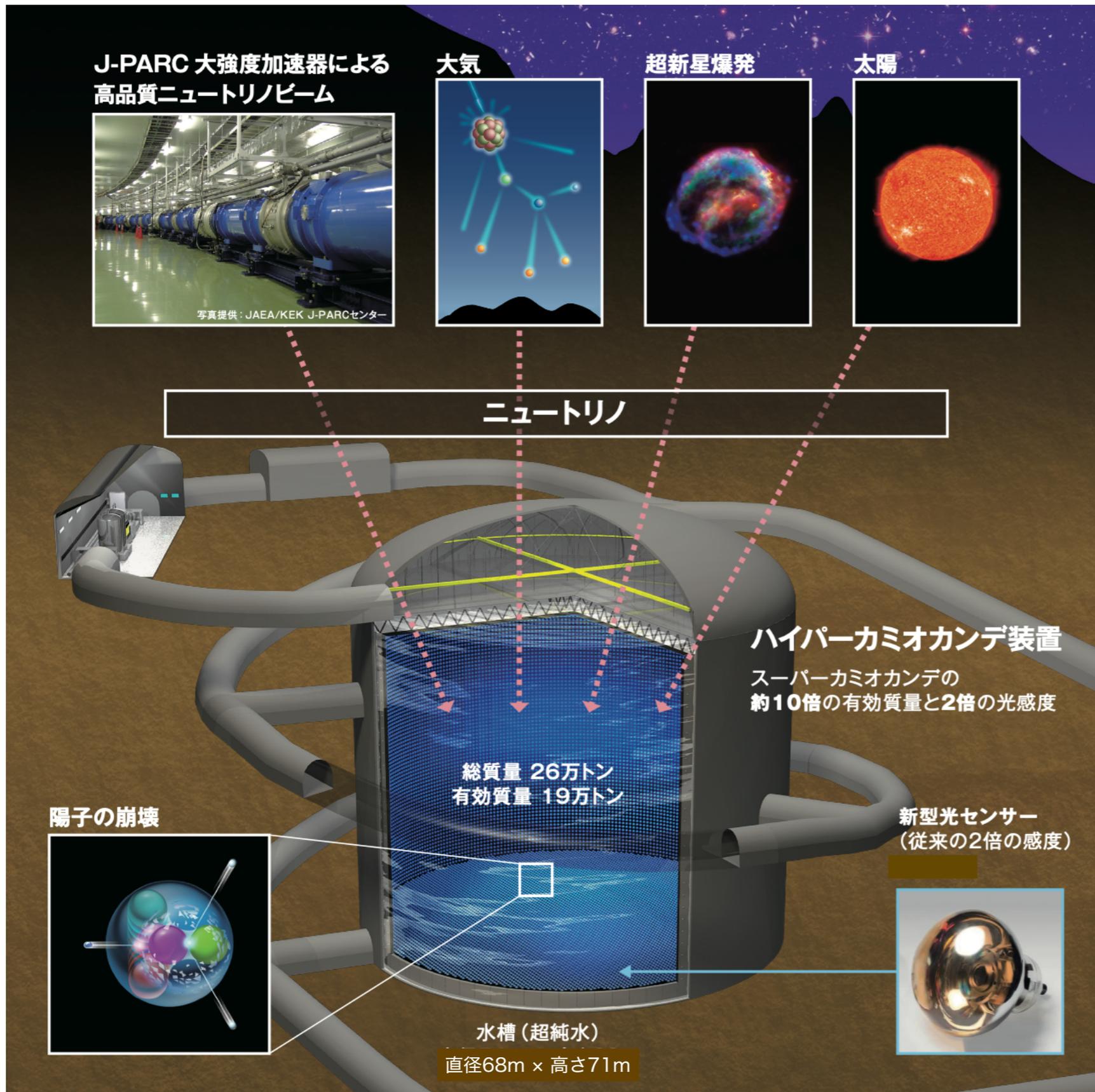


スーパーカミオカンデ

- 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)

JPARCニュートリノビーム強度も約2.5倍

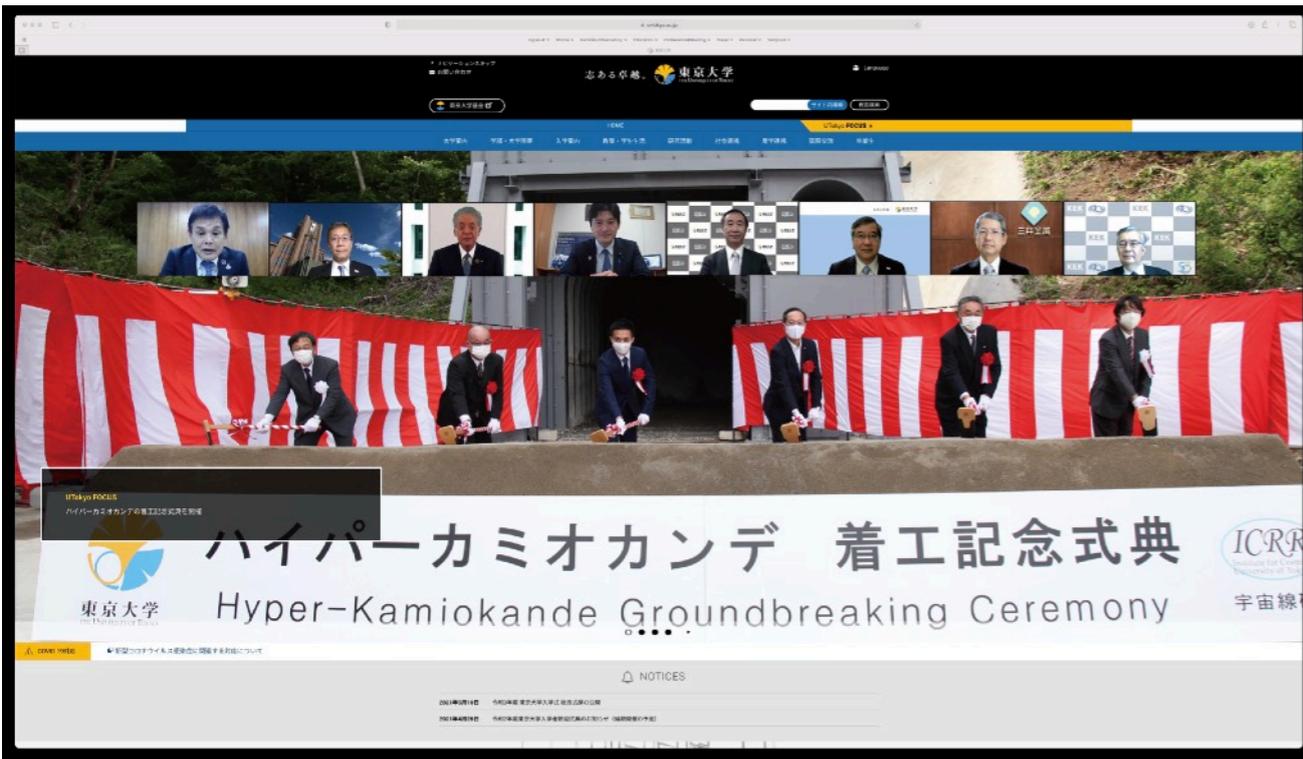
多目的な物理が可能：

- ・ CP非対称性の精密測定
- ・ 陽子崩壊の発見
- ・ ニュートリノ天文学

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



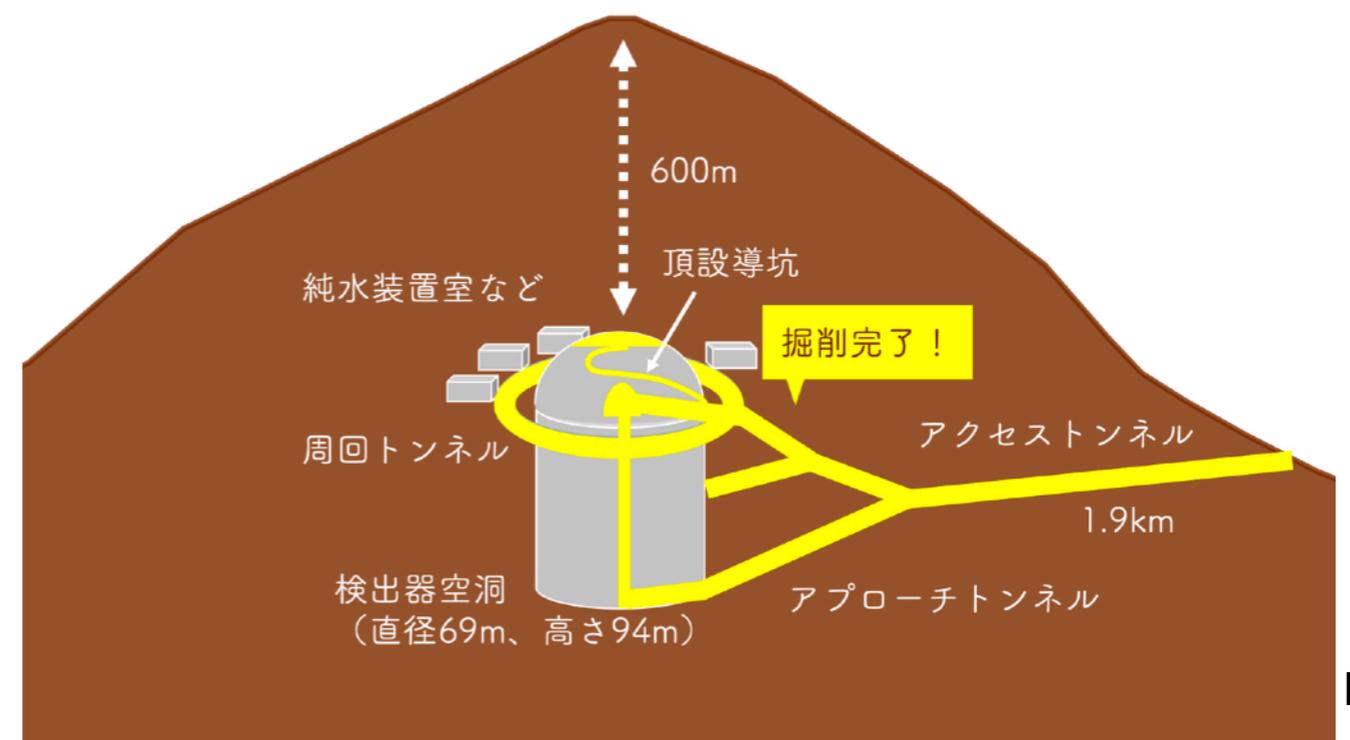
2021年5月28日 着工式

2022年7月25日 ドーム中心到達

2022年11月5日 外周坑道完了

現在 ドーム部を掘削

順調に建設進行中！



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



外観検査



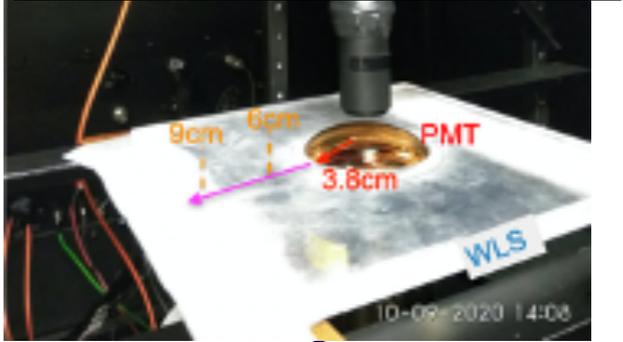
信号検査



PMTカバー (スペイン)

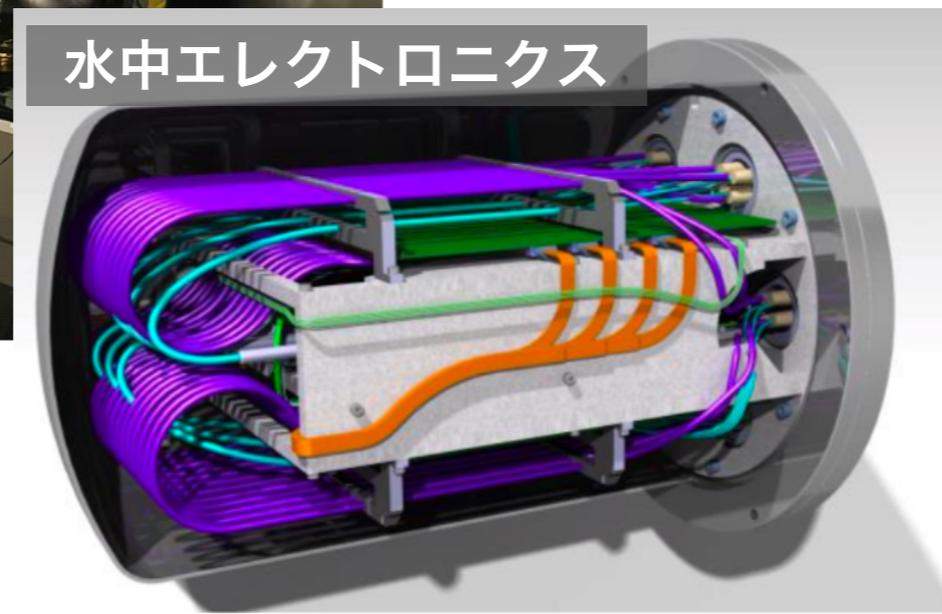
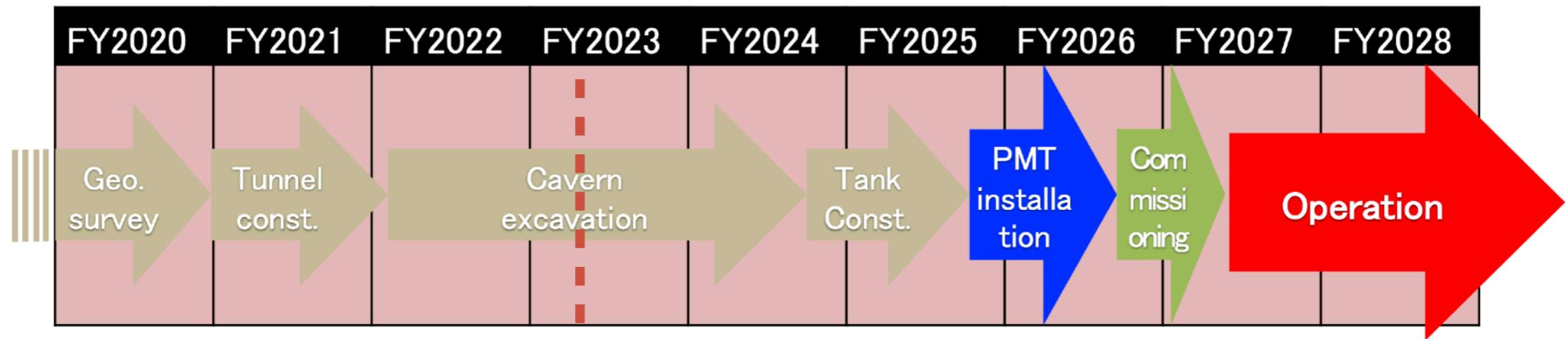


外水槽 (英国)



マルチPMT
(カナダ、ポーランド、イタリア、
チェコ、メキシコ)

開発・試験・建設・実験開始へ



まとめ

- ニュートリノ振動、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

宇宙ニュートリノ 観測情報融合センター（柏）

神岡宇宙素粒子研究施設（神岡）



Kimihiro OKUMURA
奥村 公宏
准教授



Takaaki KAJITA
梶田 隆章
(来年度からは大学院学
生の受け入れがしま
せん)
教授



Masato SHIOZAWA
塩澤 真人
教授



Hiroyuki SEKIYA
関谷 洋之
准教授



Masayuki NAKAHATA
中畑 雅行
(来年度からは大学院学
生の受け入れがしま
せん)
教授（所長）



Shoei NAKAYAMA
中山 祥英
准教授



Yoshinari HAYATO
早戸 良成
准教授



Shigetaka MORIYAMA
森山 茂栄
教授