

ハイパーカミオカンデ計画

中山 祥英

東京大学宇宙線研究所

次世代ニュートリノ科学連携研究機構／国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構

平成29年度 東京大学宇宙線研究所 共同利用研究成果発表会

2017年12月8日

共同利用研究課題

100万トン水チェレンコフ検出器（ハイパーカミオカンデ）の開発研究

- 代表者：塩澤 真人（宇宙線研）
- 査定額：10万円 → 共同研究者の神岡への旅費

次世代ニュートリノ検出器のための大口径光検出器の開発と運用

- 代表者：西村 康宏（宇宙線研）

次世代ニュートリノ検出器のためのソフトウェア開発

- 代表者：三浦 真（宇宙線研）

ハイパーカミオカンデ国際共同研究グループ



Queen Mary University
of London, July 2016

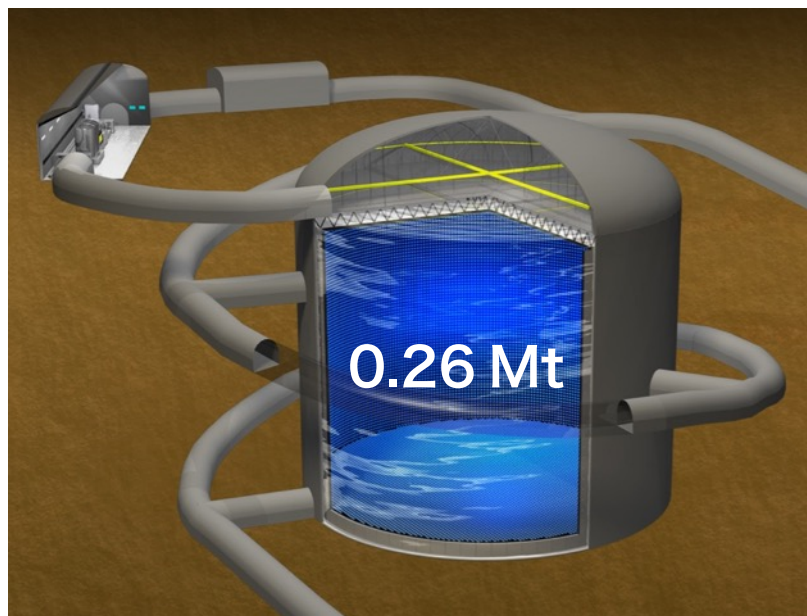
2015年1月に Hyper-K proto-collaboration を結成

- 15か国から300名を超えるメンバー（2017年4月現在） → 70%は海外からの参加
- グループ全体でのミーティングを年2回のペースで開催

国際的な役割分担を確立

- 海外分担： 内水槽光検出システム半分、外水槽光検出システム全部、DAQシステム、地磁気補償システム、検出器較正システム、前置検出器
- 各種R&Dを国際共同で進めている

ハイパーカミオカンデ検出器



水槽サイズ：深さ 60m × 直径 74m

超純水 26万トン

有効体積 19万トン → SKの有効体積の約10倍

内水槽に 4 万本の新型50cm径PMT

SKの2倍の光検出感度

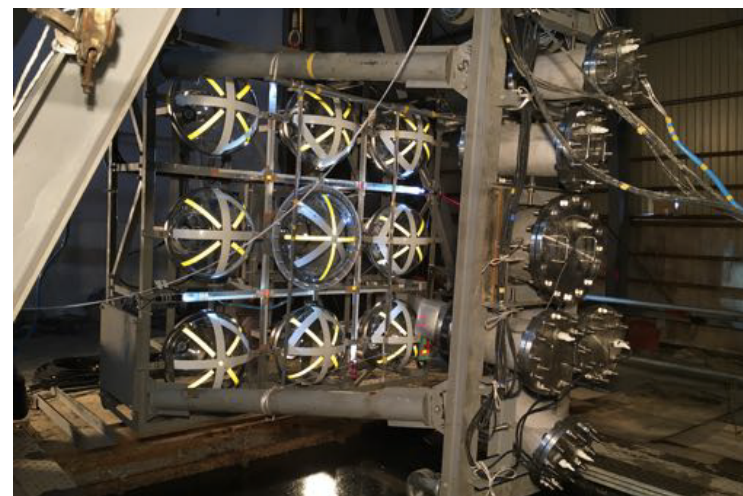
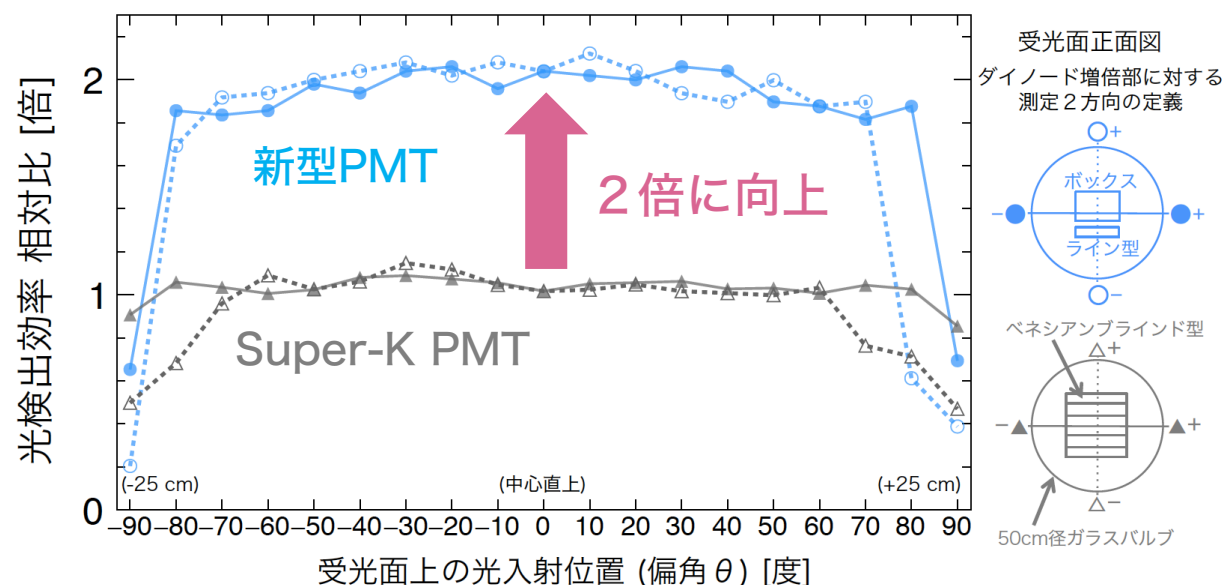
水槽 1 基での早期観測開始が最優先事項

- 来年度の建設着工をめざして、予算要求中
- この報告で紹介する物理感度は、すべて水槽 1 基の場合のもの

遅れて 2 基目の建設をめざす

- 韓国に設置することによる物理感度向上の研究なども進行中

新型50cm径光センサと衝撃波防止カバー



上砂川町（北海道）の縦坑でカバーの性能試験

HKに新規開発した50cm径PMTが完成

- 光子検出効率：SK PMTの2倍 (QE 22→30%, CE 67→95%)
- 時間分解能：SK PMTの2倍 (2.1 ns → 1.1 ns, upper σ)
- 耐水压性能：SK PMTの2倍 (0.65 MPa → 1.25 MPa)

爆縮連鎖破壊を防止するためのPMTカバーも開発、水深80mにおいて十分な性能を確認
現在、PMTダークレートの低減とカバーの改良（軽量化・低コスト化）に取り組んでいる

ハイパーカミオカンデの物理

人類の根源的な問いへの挑戦

ニュートリノ振動の全容解明

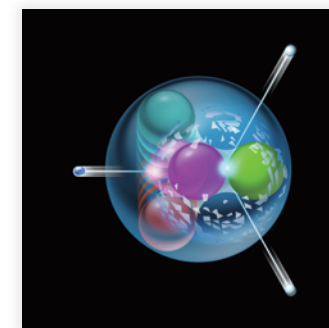
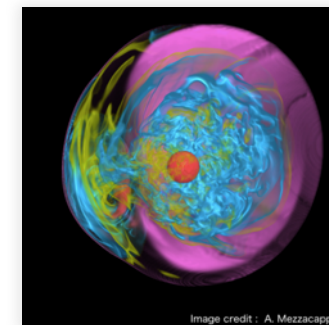
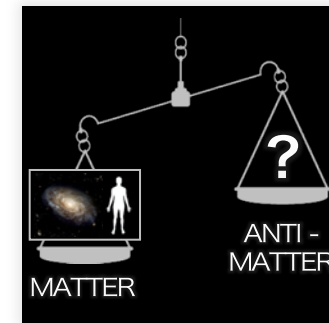
- CP対称性の破れの発見、CP位相の測定
→ 我々の宇宙はなぜ物質でできていて反物質がないのか？
- 質量階層性の解明、振動パラメータの精密測定
→ 素粒子の世代の起源は？未知の対称性が存在？

ニュートリノ宇宙物理のさらなる発展

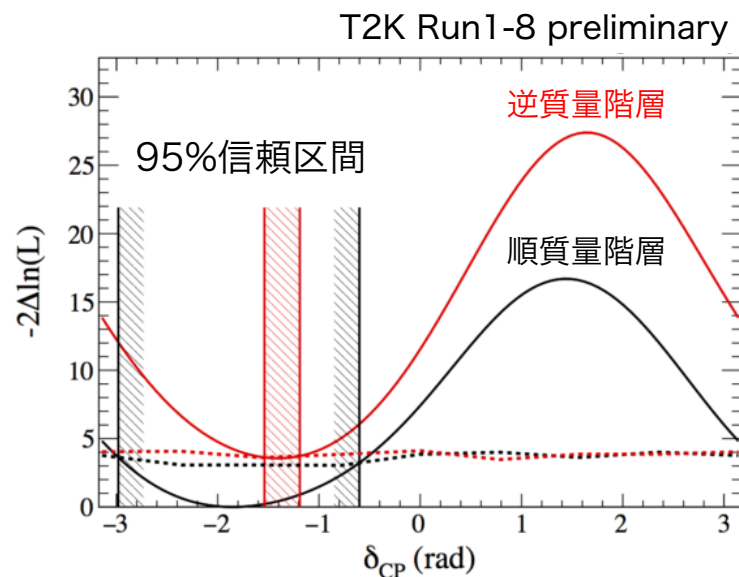
- 超新星爆発ニュートリノの観測
→ 超新星の爆発メカニズム、ブラックホール形成の検出
- 超新星背景ニュートリノの測定（フラックス・スペクトル）
→ 宇宙の進化（星形成・重元素合成）の歴史

核子崩壊の探索

- “発見”の大きな可能性 → 大統一理論の直接検証



レプトンCP対称性の破れ



T2K実験の最新結果

- CP対称性の破れ ($\sin \delta_{CP} \neq 0$) を95%の信頼度で確認
- CP対称性が最大に破れる $\delta_{CP} = -90^\circ$ の予測と良く一致
 - SKの大気ニュートリノデータでも同様

→ 現行実験でCPVを発見 ($>3\sigma$) する可能性は小さい

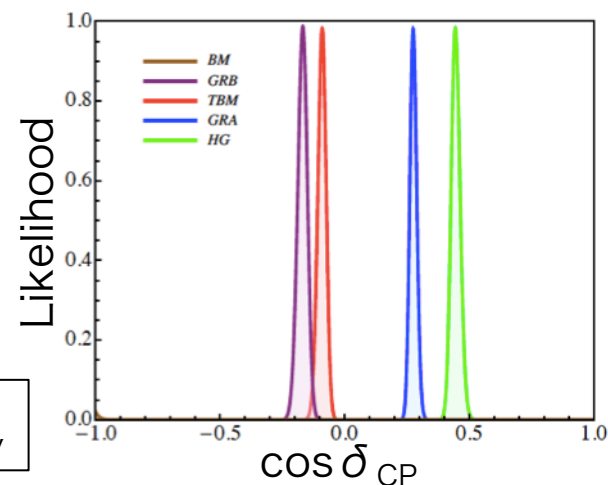
発見にとどまらずCP位相を測定することが重要！

- Leptogenesisにおけるバリオン非対称性を Dirac δ_{CP} のみで説明できる可能性
| $\sin \delta_{CP}$ | $> \sim 0.6$

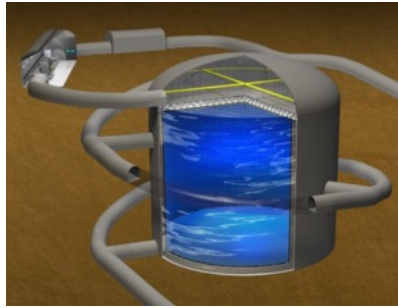
PRD 75, 083511 (2007)
S. Pascoli, S.T. Petkov, and A. Riotto

- 未知の対称性による δ_{CP} の予測

arXiv:1504.02402v1
S. T. Petcov, I. Girardi, and A. V. Titov



Hyper-Kの長基線ニュートリノビーム実験計画



Hyper-K



J-PARC
Accelerator Complex



- δ_{CP} の測定に適した実験コンフィグレーション
 - 適度に短い基線長 → 物質効果の影響が小さい
- 大統計量（約3000におよぶ ν_e 出現事象数） + 優れたS/N比
- 現行実験（SK/T2K）によって裏打ちされた実験性能予測
 - 共通のビームライン、同タイプの後置検出器
 - 現実的な系統誤差の仮定（予測 ν_e 事象数の誤差：T2K 5-6% → HK 3-4%）

J-PARCニュートリノビームの増強計画

1.3 MW : HKの始まる2026年までに到達

750 kW : T2K実験の設計ビーム強度

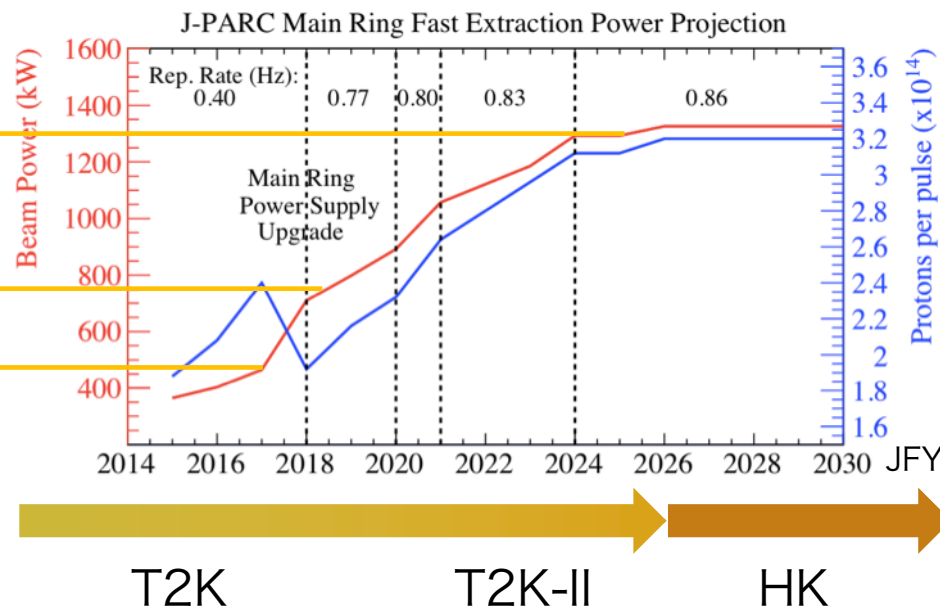
470 kW : T2K実験ですでに達成

→ 750 kW 取り出し周期 1.3秒

- ビーム取り出し周期短縮に向けた電磁石電源アップグレードの予算措置・製作中

→ 1.3 MW 取り出し周期 1.16秒

- 1MW相当のビーム試験に成功
- KEKの研究実施計画（KEK Project Implementation Plan）において、
「ハイパーカミオカンデのためのJ-PARC高強度化」を最優先課題に位置付け

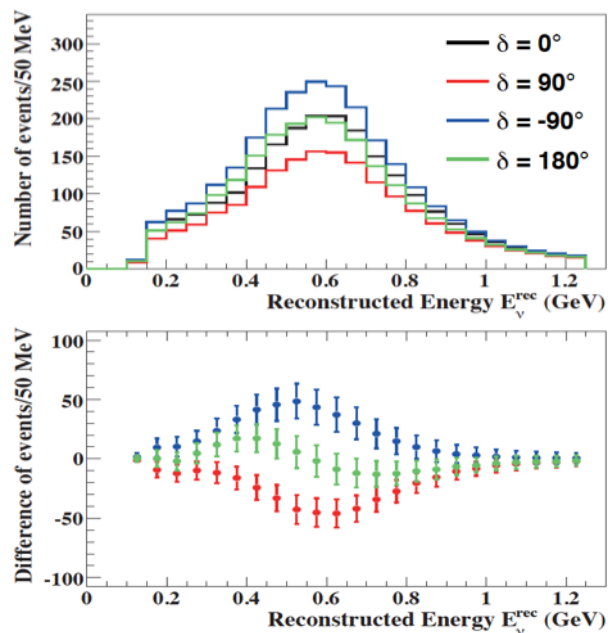


Hyper-Kで観測するビームニュートリノ事象予測

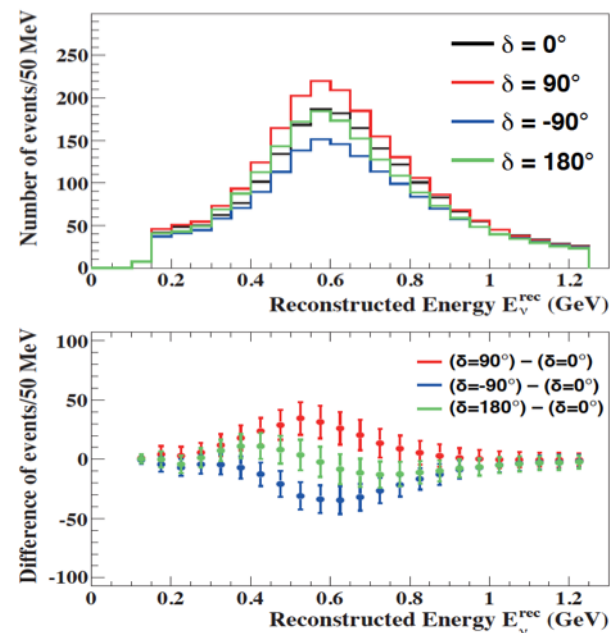
信号候補事象の数, 1.3 MW $\times$ 10 years (10^8 sec), $\nu:\bar{\nu} = 1:3$

for $\delta_{\text{CP}} = 0$	Signal $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ CC	Wrong sign appearance	$\nu_{\mu}/\bar{\nu}_{\mu}$ CC	Beam $\nu_e/\bar{\nu}_e$ contamination	NC
ν beam	1,643	15	7	259	134
$\bar{\nu}$ beam	1,183	206	4	317	196

ニュートリノビーム (ν_e 出現)



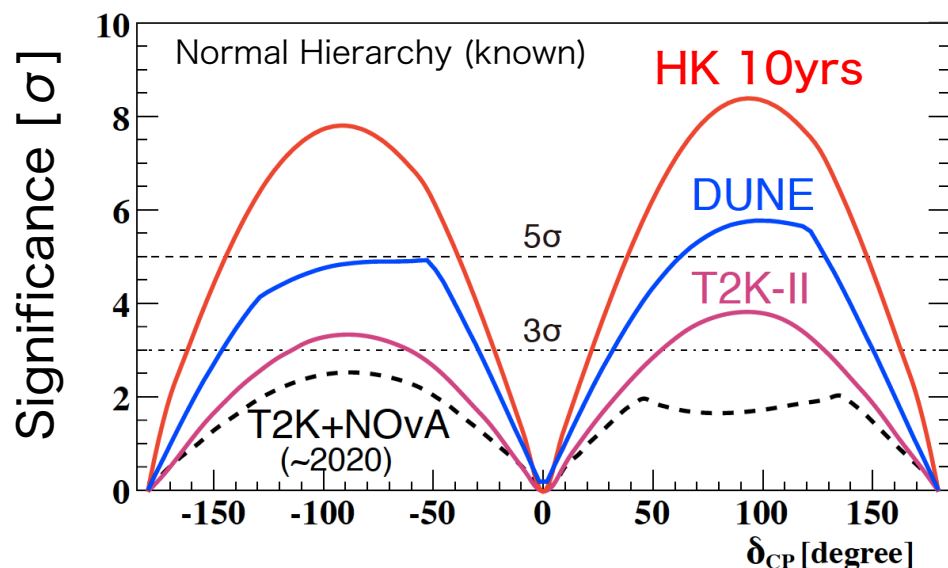
反ニュートリノビーム ($\bar{\nu}_e$ 出現)



CP対称性の破れ 測定の感度

1.3 MW $\times$ 10 years (10^8 sec), $\nu:\bar{\nu} = 1:3$

$\sin \delta_{CP} = 0$ (CP対称性保存) 棄却の有意度

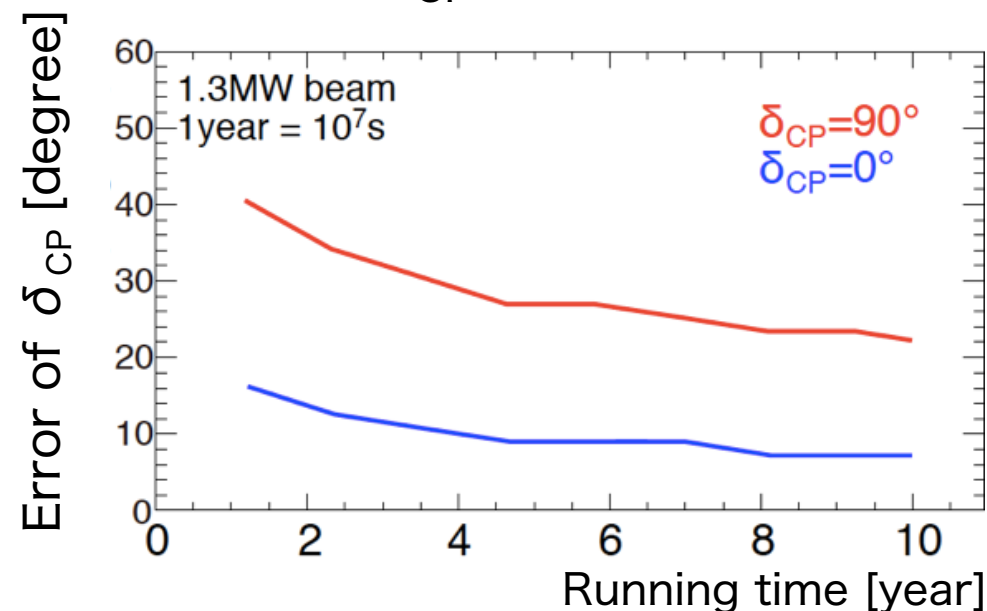


$\delta_{CP} = \pm 90^\circ$ なら、約 8σ でCPVを発見

$\delta_{CP} = \pm 45^\circ$ なら、約 6σ でCPVを発見

δ_{CP} が取りうる値の範囲の約60%において
 5σ 以上の有意度でCPVを発見できる

δ_{CP} の測定精度

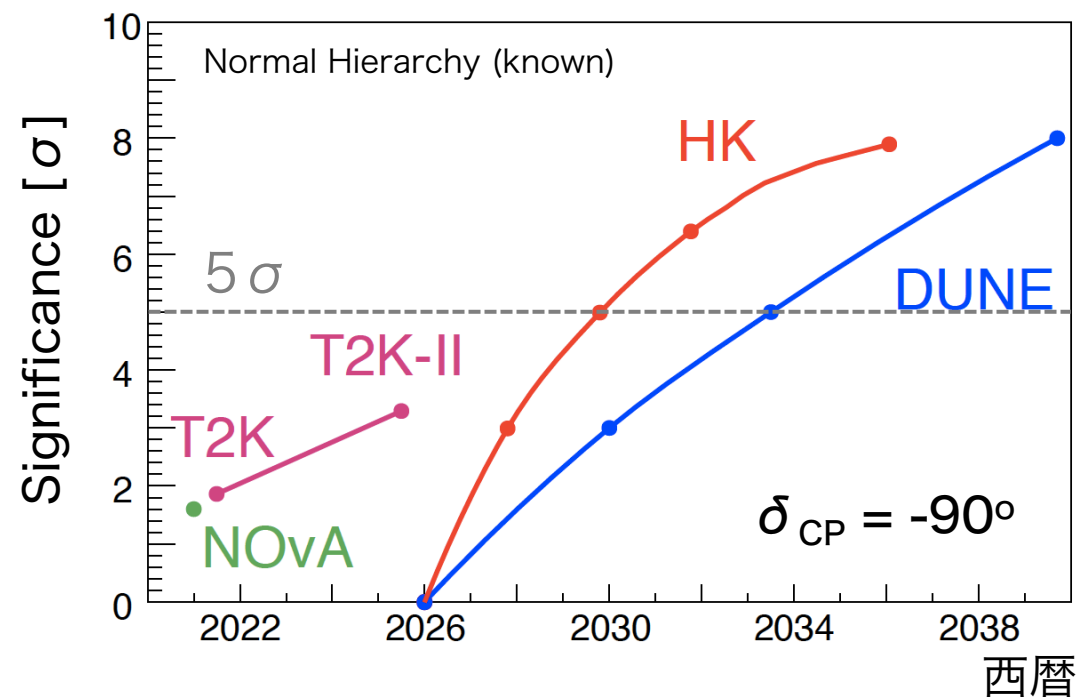


$\delta_{CP} = \pm 90^\circ$ なら、 22° (1σ)

$\delta_{CP} = 0^\circ/180^\circ$ なら、 7° (1σ)

計画の緊急性

$\sin \delta_{CP} = 0$ 棄却の有意度



■ Hyper-KのCPV感度・ δ_{CP} 測定精度は競合実験を凌駕するもの

■ しかも、HKの感度見積もりでは現実的な検出性能・系統誤差を仮定

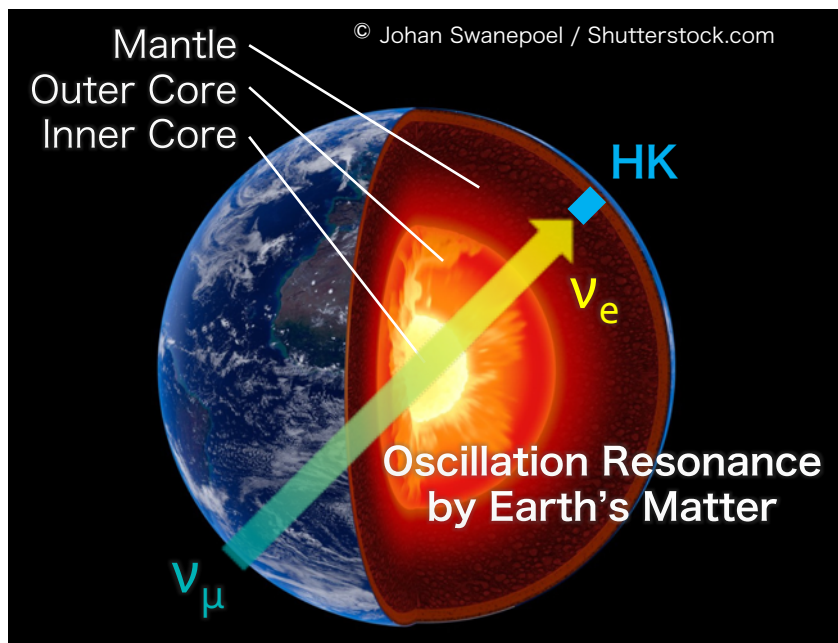
■ ただ、T2Kが示唆するように答えが簡単な（破れが大きな）ところにある場合、競合実験も十分な発見能力をもつ可能性

■ DUNE（米国）は後置検出器の地下空洞掘削予算が承認され、掘削をすでに開始

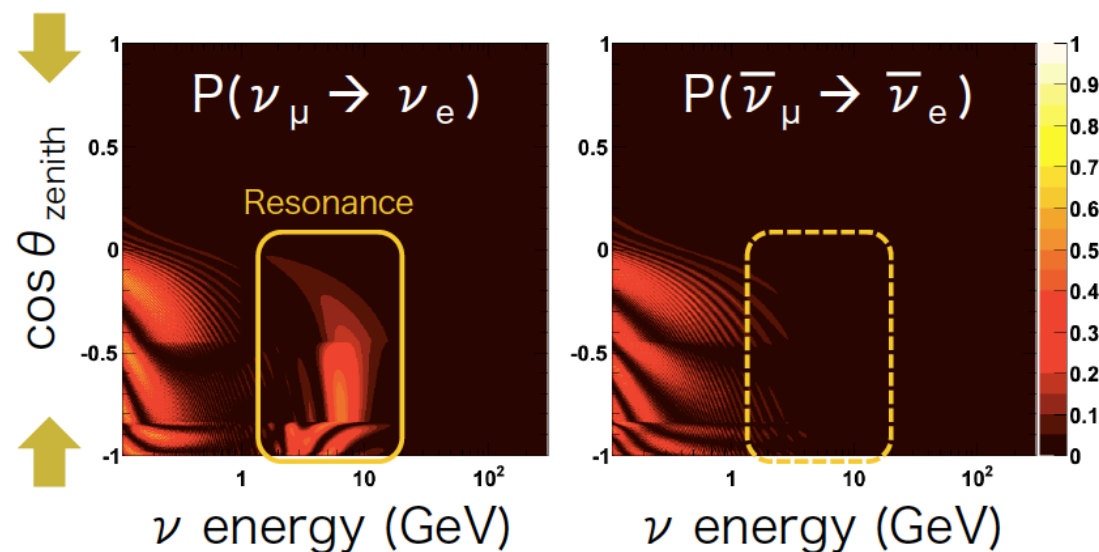
■ ビーム実験開始を2026年に予定

日本ベースのシームレスな実験計画でCPV検証においても世界をリードし続けるには、
ハイパーカミオカンデ計画実現の遅れは許されない状況

ニュートリノ質量階層性の決定



順質量階層 ($m_3^2 \gg m_2^2, m_1^2$) の場合



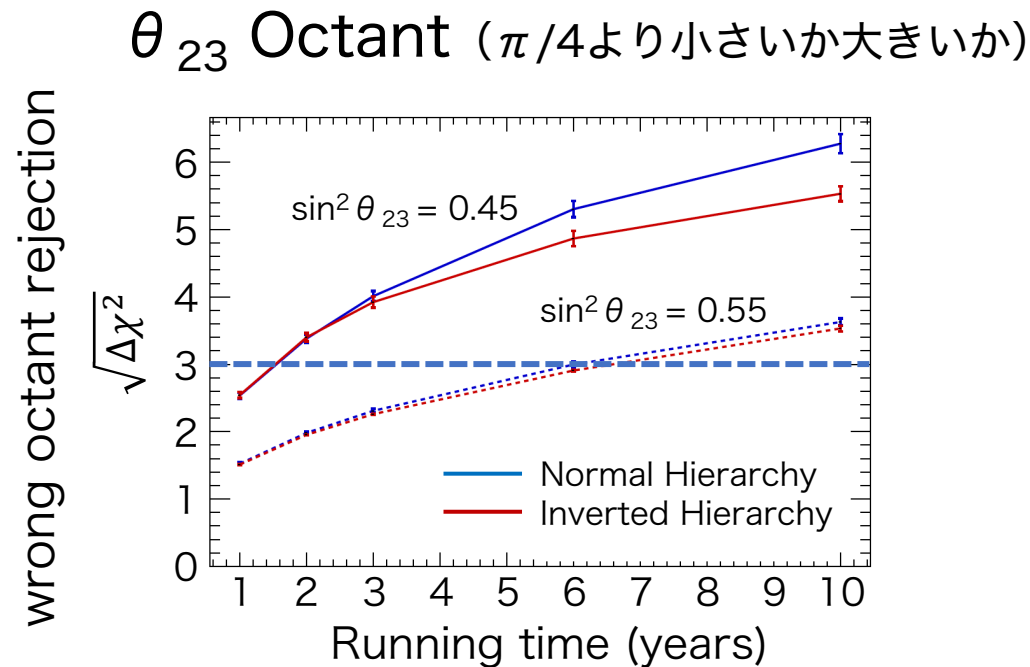
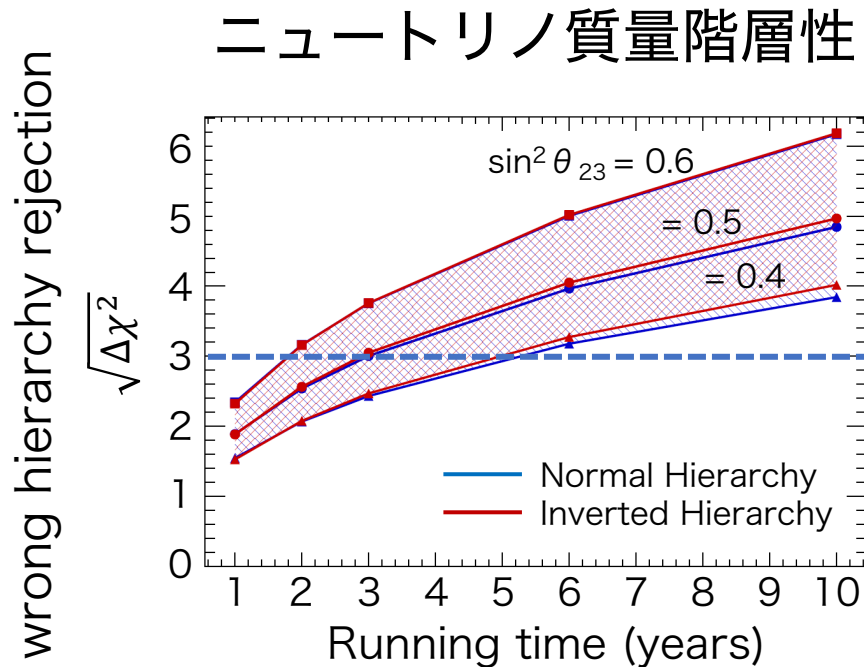
地球の物質効果により、数GeV領域の上向き ν_e 事象の出現確率が共鳴的に大きくなる

順質量階層 ($m_3^2 \gg m_2^2, m_1^2$) が答えの場合は、 ν_e 事象出現において共鳴が起こる
逆質量階層 ($m_3^2 \ll m_2^2, m_1^2$) が答えの場合は、 $\bar{\nu}_e$ 事象出現において共鳴が起こる

→ 大気ニュートリノデータは質量階層性に感度がある

※ HKでは感度を上げるためビームデータも組み合わせて使う

Hyper-K 大気 ν + ビーム ν データ解析による感度



- 大気 ν データとビーム ν データからは、相補的な情報が得られる
 - 両者を組み合わせることで、測定感度を高めることができる
- 質量階層性 / θ_{23} Octant とともに、2~5年程度の観測で決定可能

Hyper-Kによる宇宙ニュートリノ観測

近傍超新星爆発ニュートリノバースト

- 銀河系中心 (10 kpc) で起これば5~8万事象観測
- バースト中の事象数やエネルギー分布の時間変化を測定
→ 爆発のメカニズムの理解、BH形成の観測
- 視野角1°で方向を、1msで開始の瞬間を、同定 (10 kpcの場合)
→ マルチメッセンジャー観測 (光学、重力波)

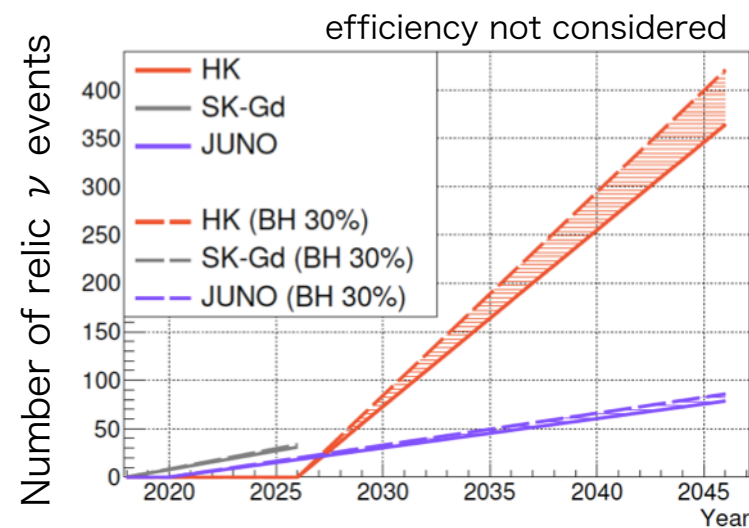
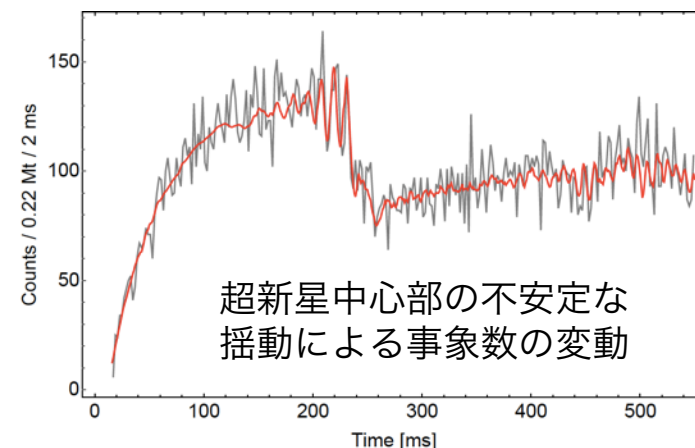
超新星背景ニュートリノ (DSNB)

- SK-Gdで初観測を狙っている
- HKではスペクトルの測定をめざす
→ 星形成の歴史、BH形成の頻度の理解

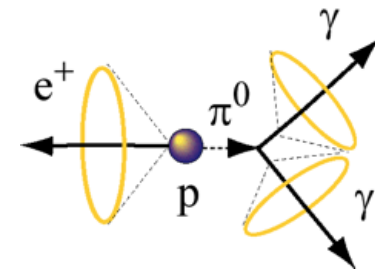
他にもいろいろ

- 太陽 ν (昼夜変動・upturn)、WIMP対消滅 ν 、...

SASI (Standing Accretion Shock Instability)

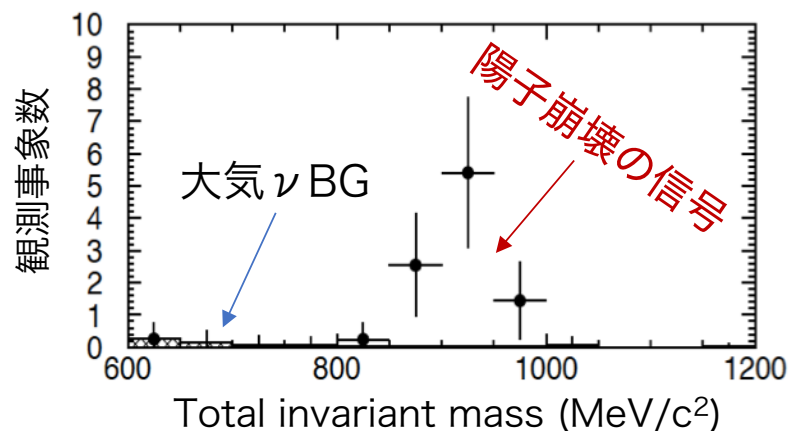


Hyper-Kでの陽子崩壊探索： $p \rightarrow e^+ \pi^0$



10年観測の期待データ

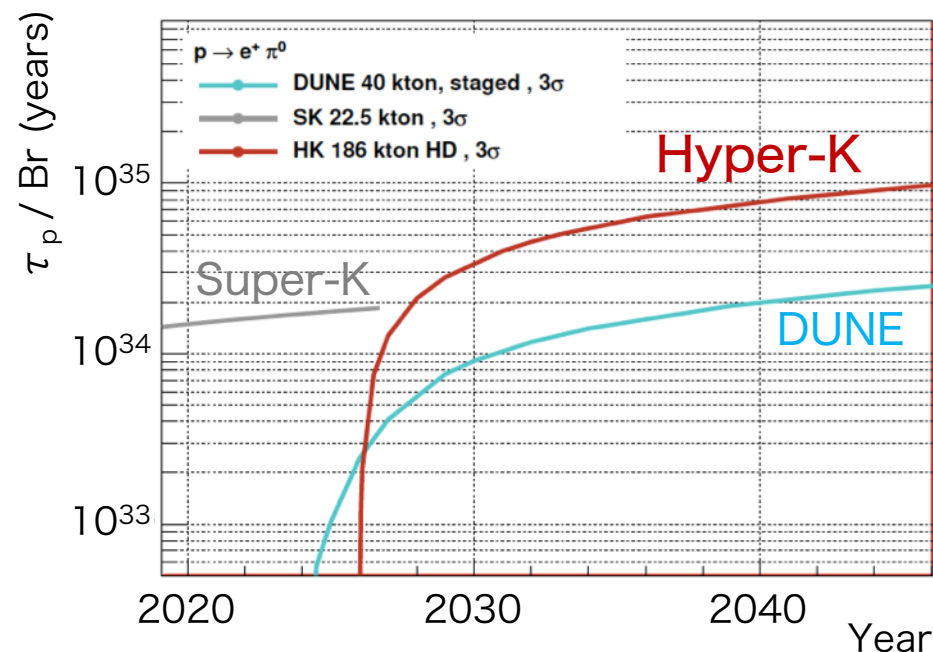
陽子寿命がSKによる90%CL下限値
 $\tau / \text{Br} = 1.7 \times 10^{34}$ yrsの場合



バックグラウンドフリーな探索

- わずか 0.06 BG events/Mton·year
- SKの2倍の光検出性能で中性子をタグして大気 ν BGをさらに低減
 - $np \rightarrow d \gamma$ の2.2MeV γ をタグ

陽子崩壊発見感度 (3σ)



発見の大きな可能性

多くの大統一理論モデルが预言する寿命
 10^{35} 年の陽子崩壊を発見する能力を持つ

Hyper-Kでの陽子崩壊探索： $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$

HKでは崩壊生成粒子により K^+ を同定

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ (Br : 64 %)

- 236 MeV/c μ^+ , decay electron
- de-excitation γ from $^{15}\text{O}^*$ (6 MeV)

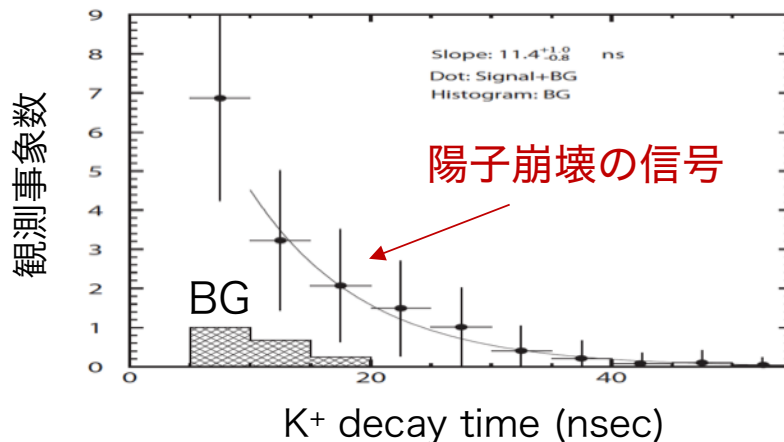
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ (Br : 21 %)

- 205 MeV/c π^0 & π^+ back-to-back

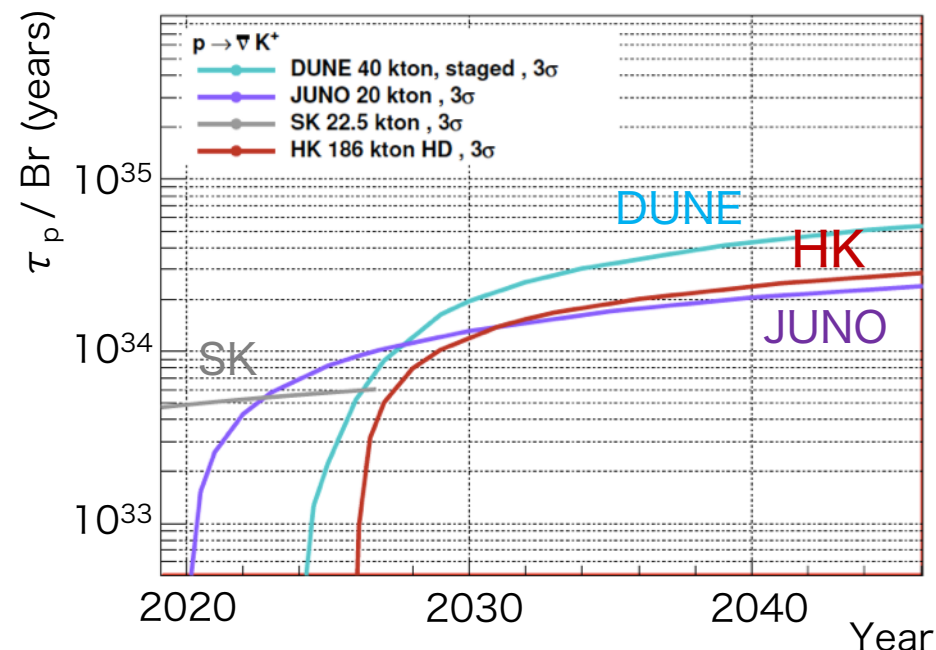
高感度／高分解能な新型光センサの採用により、
信号検出効率が向上

10年観測の 期待データ

陽子寿命がSKによる
90%CL下限値 $\tau/\text{Br} =$
 6.6×10^{33} yrsの場合



陽子崩壊発見感度 (3σ)



発見感度は $\tau_p / \text{Br} = 3 \times 10^{34}$ 年に達する

- K^+ を直接検出できる他の実験と同水準の感度
- 検出原理の異なる装置で相補的

建設予定地

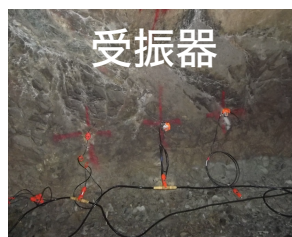
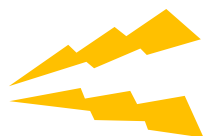


- Super-Kから南に約8km
- 二十五山の地下650m
神岡鉱業・枋洞坑内
- 和佐保堆積場にヤードを整備
空洞予定地まで2kmあまりの
アクセストンネルを新規掘削
- トンネルおよび空洞の掘削で
出て来るズリ（57万 m^3 ）は、
最終処分地である円山陥没地
までトラックで搬送

水槽建設予定地の地質調査

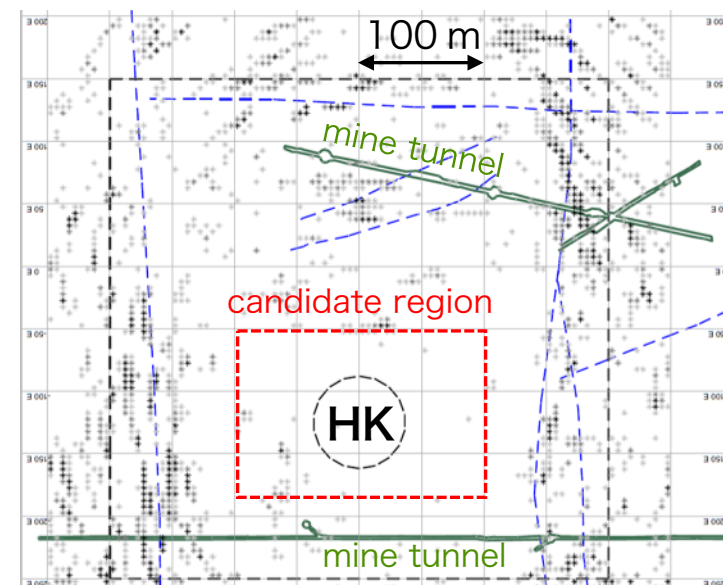
これまで進めてきた坑道調査・ボーリング調査に加えて
弾性波を用いた地質調査を実施

- 硬い岩盤 → 大きな伝播速度
不連続面（断層など） → 弾性波の反射
- 6つの坑道に受振器を設置（20m間隔、全111点）
発振点を変えながら（2.5m間隔、全837点）
そのつど弾性波受振データを記録
- 坑道は5つの異なるレベルに位置 → 3Dの地質情報

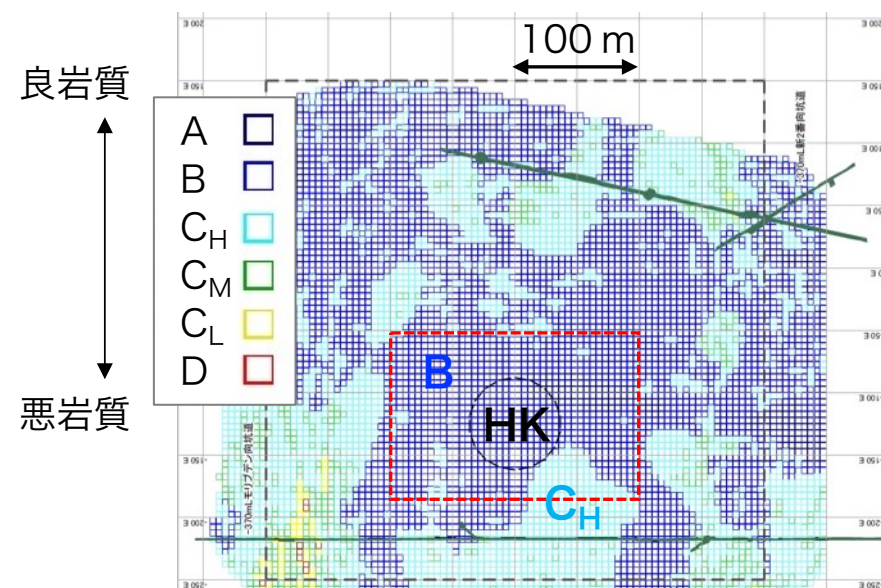


候補地の岩質が優れていることを確認し、
そのなかで**HK空洞掘削に最適な位置を同定**した

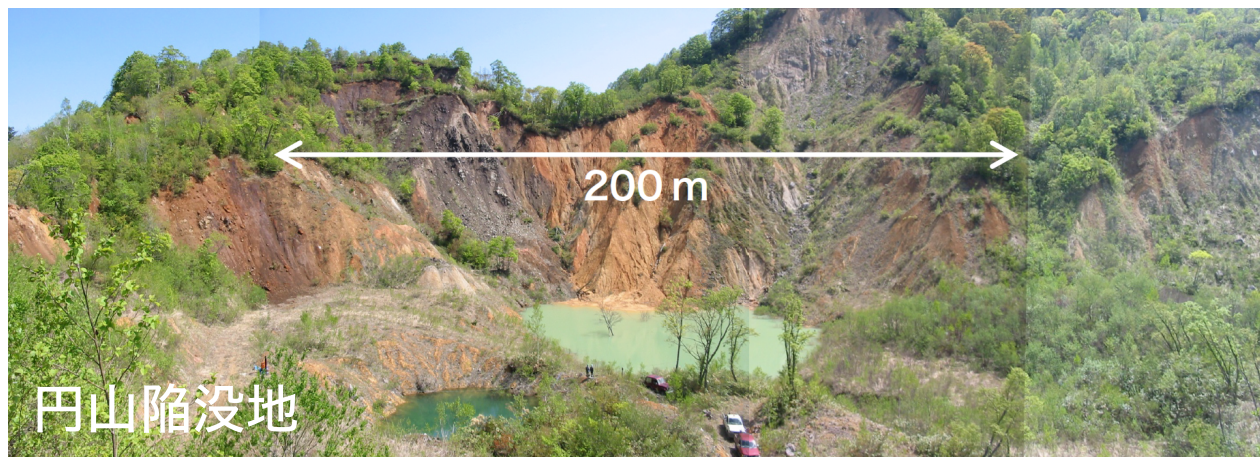
反射振幅分布（灰色の点）



推定岩盤等級分布

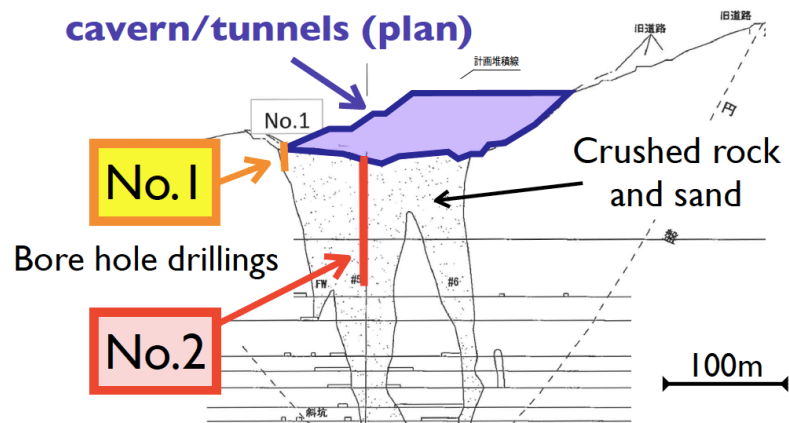


ずり処分地（円山）の調査



安定解析のためのボーリング調査

Waste rock from HK cavern/tunnels (plan)



自然環境調査



- トンネル・空洞掘削で57万 m^3 のずり発生
- 過去の採掘で生まれた陥没地を埋める形で、ずりを堆積予定
- 陥没地地盤には、採掘によって崩壊した表土や岩石が埋まっている
- 陥没地のボーリング調査結果に基づき、ずり堆積の安定性評価を行った
 - 大きな問題がないことを確認できた
- 工事は自然環境保全条例の認可対象となるため、環境調査（通年）を進めている

我が国における本計画の位置付け

研究者コミュニティによる強力なサポート

- CRC 「KAGRA建設完了以降の超大型将来計画の最重要課題」
- JAHEP 「ILCと並ぶ基幹大規模将来計画、早期実現を推進すべき」

ホスト研究機関（ICRR, KEK）による強力なコミットメント

- ICRR将来計画検討委員会 「ICRRの次期主要プロジェクトとして適切な計画と認め、速やかに実現を目指すべきと判断」
- KEK研究実施計画 「Hyper-KのためのJ-PARC高強度化が最優先課題」

日本学術会議：学術の大型研究計画に関するマスタープラン2017

- 特に速やかに推進すべき重点大型計画28件のうちの1つ

文科省ロードマップ2017

- 学術研究の大型プロジェクトのうち
「特に計画の着手、具体化に向けて緊急性及び
戦略性が高いと認められる7計画」を厳選し記載
- 「大型先端検出器による核子崩壊・ニュートリノ
振動実験」（ハイパーカミオカンデ計画のこと）
がそのうちの1つに選ばれた
- 2つの評価項目
「コミュニティ合意・実施主体・共同利用体制・妥当性」
「緊急性・戦略性・国民の支持」
のどちらも最高評価（7計画 中 5計画）

予算要求の地盤が確立した

学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想
ロードマップの策定

ー ロードマップ2017 ー

平成29年7月28日

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

Hyper-K国際諮問委員会による評価

- 外部の専門家による諮問委員会
- 2017年8月～9月に第2回の委員会を開催
 - 第1回は、2015年12月～2016年2月
 - 前回からのアップデートを説明（弾性波地質調査、ずり処分場安定性評価、ライニングシート強度試験、推進体制の強化、国際分担の明確化、などなど）
- 空洞水槽分科委員会（2017年8月）：国内の工学専門家で構成
 - 「ハイパーカミオカンデの空洞・水槽工事の実現可能性が確かなレベルに達した」
- 本委員会（2017年9月）
 - “endorses HK as a very important experiment for Japan and for the world-wide program of fundamental science”
 - いくつかの課題を指摘（組織体制の強化、光センサ選択条件の明確化、など）

次世代ニュートリノ科学連携研究機構

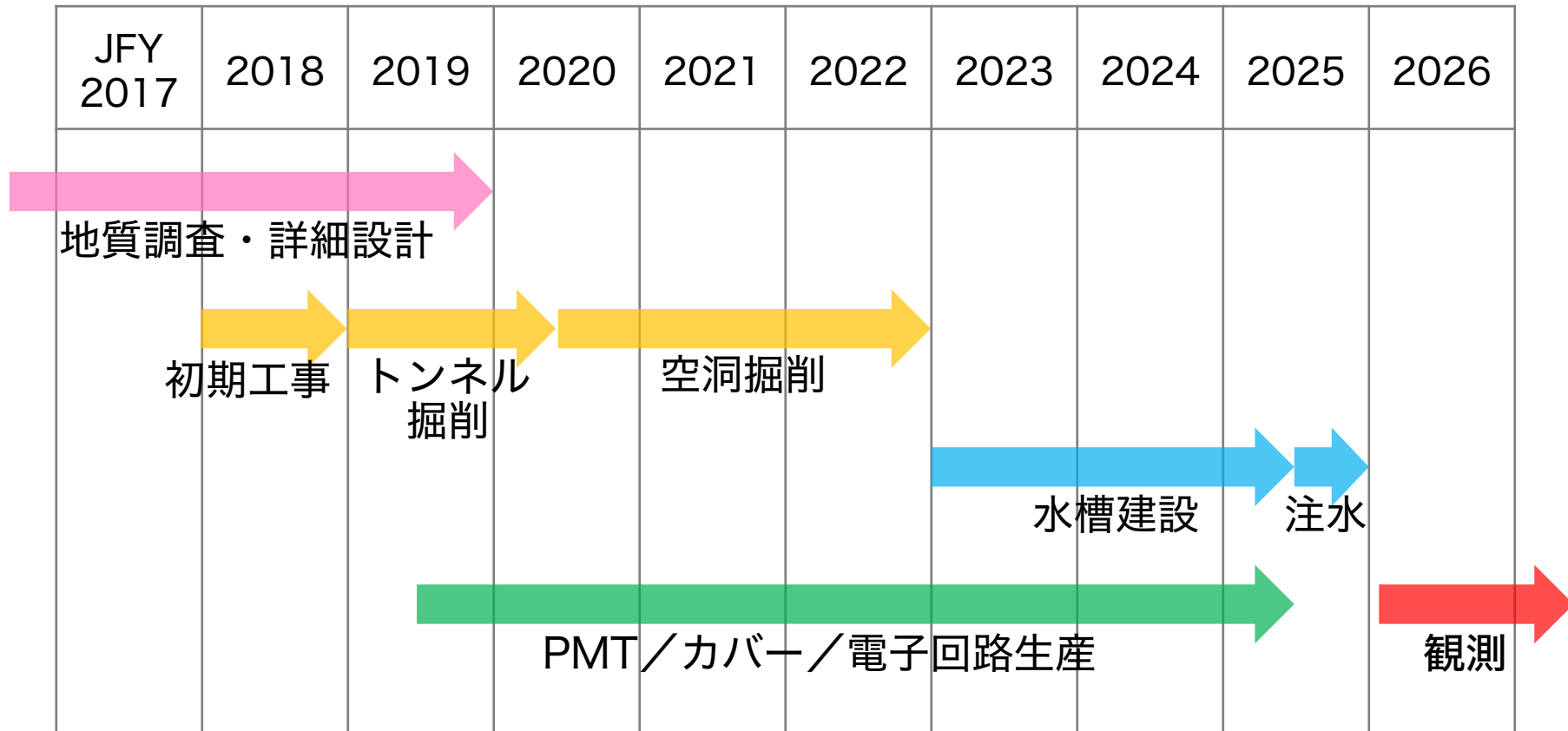
<http://nnso.jp/>

- Hyper-K計画の推進を目的として、10月1日に東京大学に発足
- 「宇宙線研究所」「カブリ数物連携宇宙研究機構」「大学院理学系研究科」
3つの部局による
緊密な協力体制
- 機構長は梶田先生
- HK検出器建設の中心
となる組織



建設予算措置に即応できる体制の構築

建設タイムライン



2026年の観測開始を実現するには、早期着工が急務

まとめ

- ハイパーカミオカンデ計画は、人類の根源的な問いの数々に挑む豊富な研究課題を可能にする
- 地質調査によりベストな建設位置を決定、実現可能性が確かなレベルに到達したと工学の専門家から評価
- 研究者コミュニティやホスト機関による強力なサポートもあり、文科省の「ロードマップ2017」に最高評価で記載、予算要求の基盤が確立
- 建設の中心となる新たな組織（NNSO）が発足
- CP対称性の破れが大きいことが示唆されるなか、米国の競合実験DUNEはすでにサイトの掘削を開始しており、Hyper-K計画実現の遅れは許されない状況