

T2K実験・HK実験 (東海編) + NINJA実験 + J-PARC加速器

木河達也

高エネルギー物理学研究室実験紹介

2025年4月30日

ニュートリノの歴史

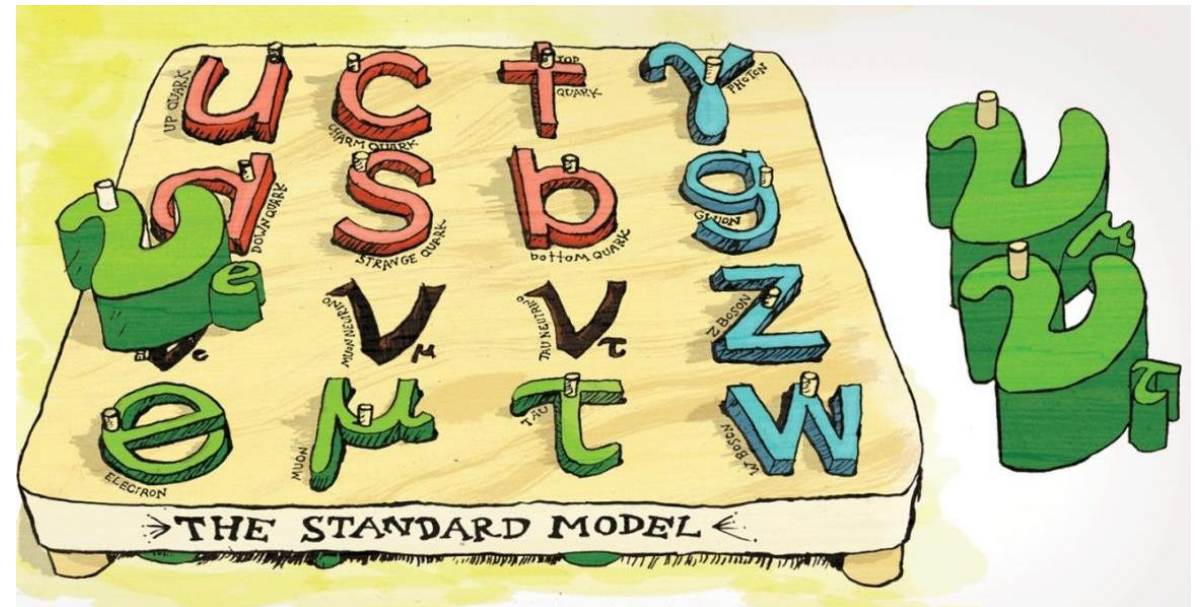
- 1930年: ニュートリノの存在の予言 (Pauli)
- 1932年: ベータ崩壊の理論化 (Fermi)
- 1956年: ニュートリノの発見 (Reines, Cowan) 
- 1962年: ミューニュートリノの発見 (Lederman, Schwartz, Steinberger) 
- 1962年: フレーバー間ニュートリノ振動の予言 (Maki, Nakagawa, Sakata)
- 1970年: 太陽ニュートリノ問題 (Davis) 
- 1987年: 超新星爆発ニュートリノの検出 (Koshiba) 
- 1998年: ニュートリノ振動の発見 (Super-K, SNO) 
- 2000年: タウニュートリノの発見 (DONUT)
- 2006年: 弱い相互作用をするニュートリノが3世代 (LEP)
- 2012年: 混合角 θ_{13} が0でない (Day Bay, RENO, DC, T2K)

標準模型におけるニュートリノ

- 電荷と質量を持たない。
- 3つの荷電レプトンに対応した3つのニュートリノがある。 $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$
- ニュートリノと反ニュートリノは異なる。
- スピン1/2でニュートリノはすべて左巻き、反ニュートリノはすべて右巻き。
- 弱い相互作用しかしない。
→ 反応断面積が非常に小さい。

しかし

- ニュートリノ振動の発見により質量が0でないことが分かった。
- 標準模型の修正が必要。



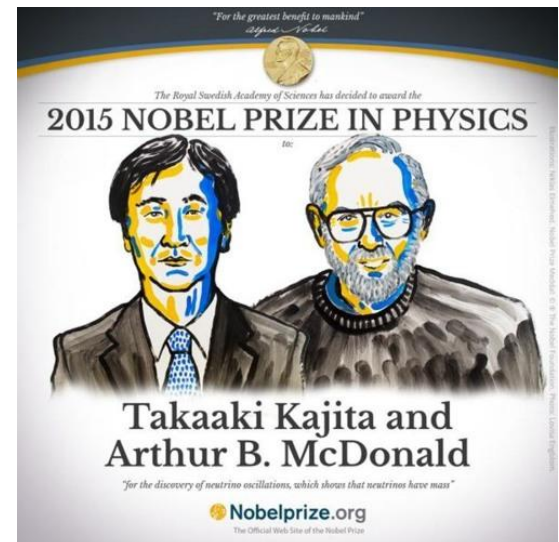
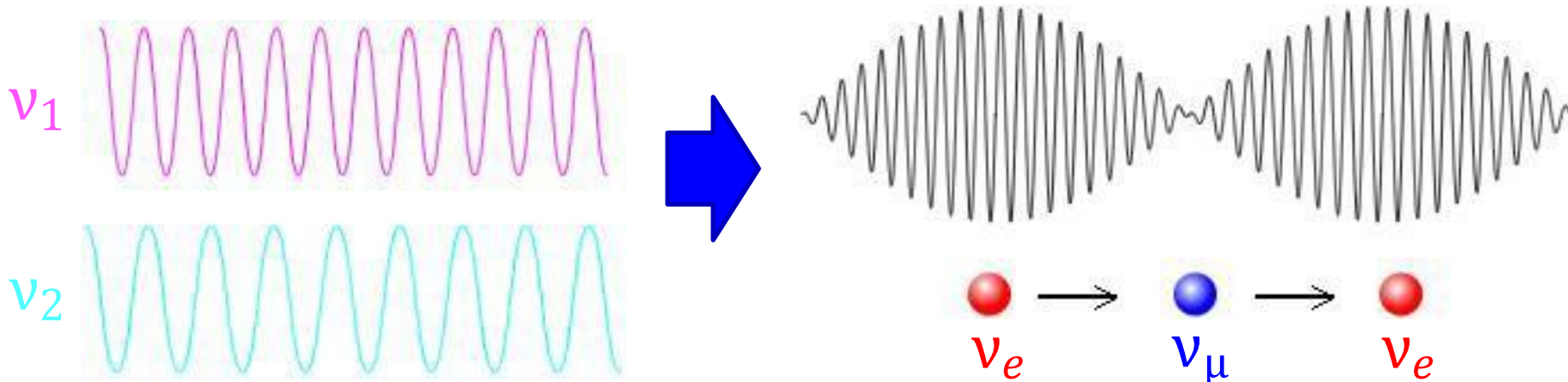
ニュートリノ振動

- ニュートリノのフレーバー固有状態は質量固有状態の混合で表される。

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

フレーバー固有状態 ポンテコルボ・牧・中川・坂田行列 質量固有状態

- 飛行中に波のうねりの効果でフレーバーが周期的に変化。
- ニュートリノ振動を通して混合角やCP対称性を測定。

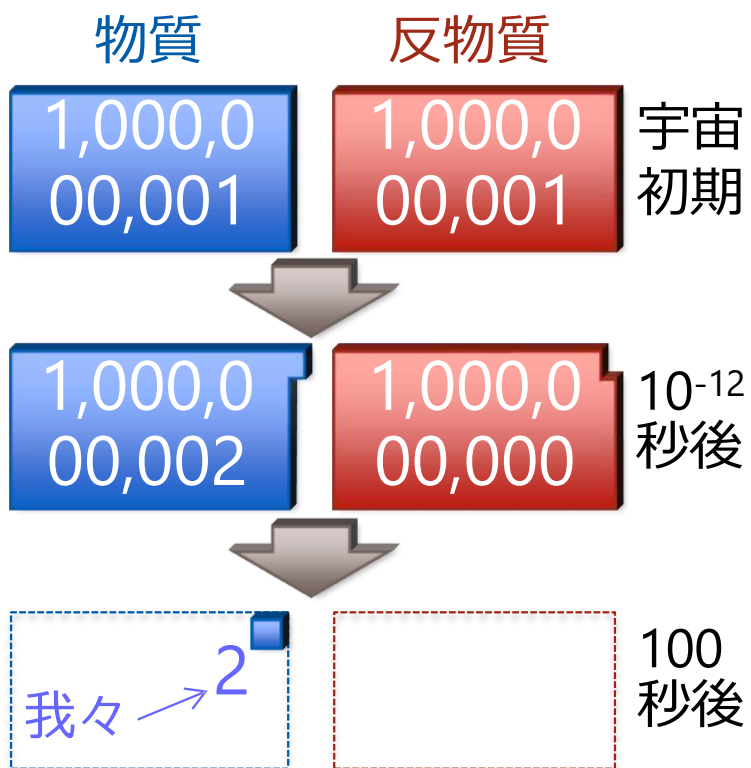
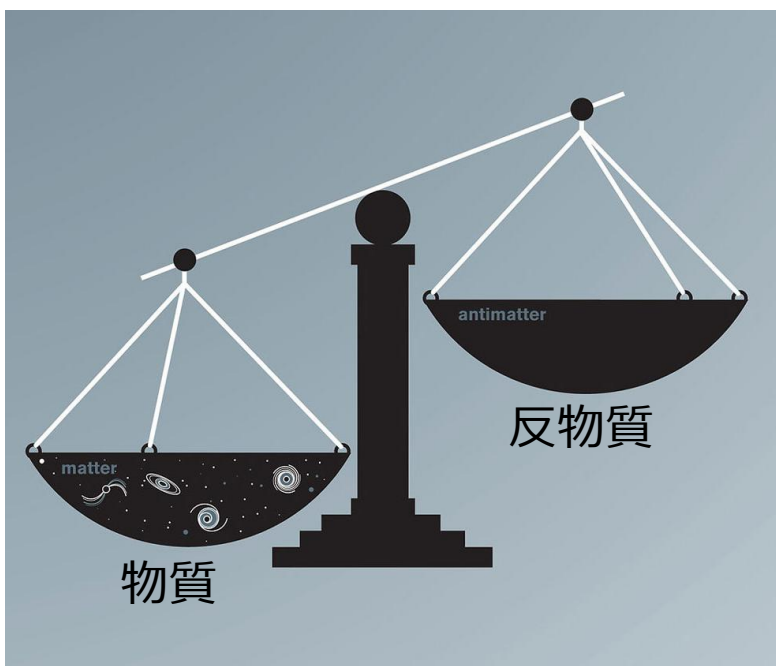


Nobelprize.org

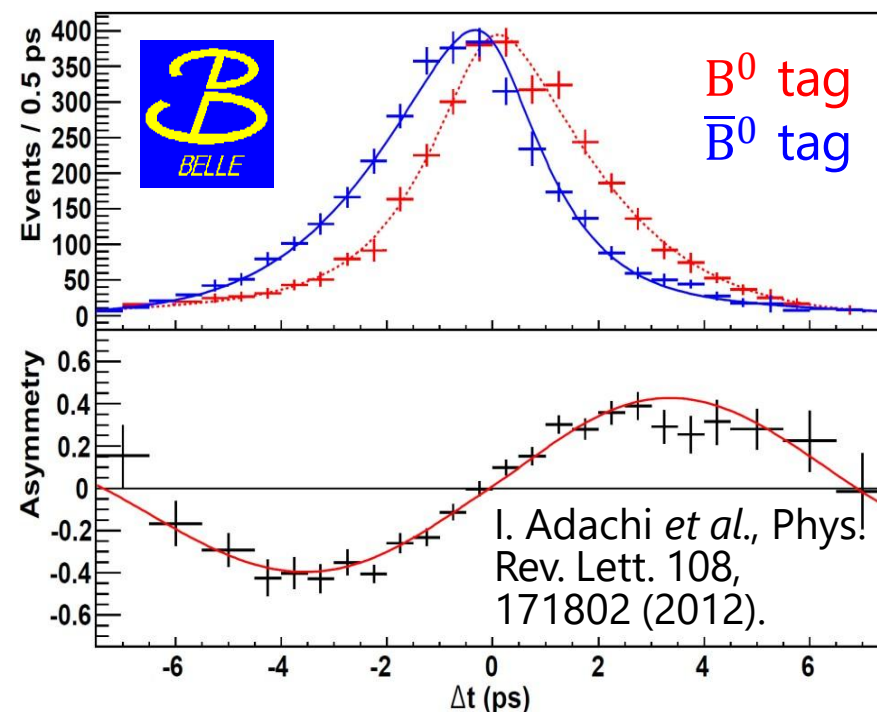
CP対称性の破れ

- 現在のほとんど物質でできた宇宙を説明するためにはCP対称性の破れが必要。
- 小林益川理論におけるクォークのCP対称性の破れだけでは小さすぎるため、新たなCP対称性の破れが必要。→ ニュートリノのCP対称性の破れが原因？

現在の宇宙

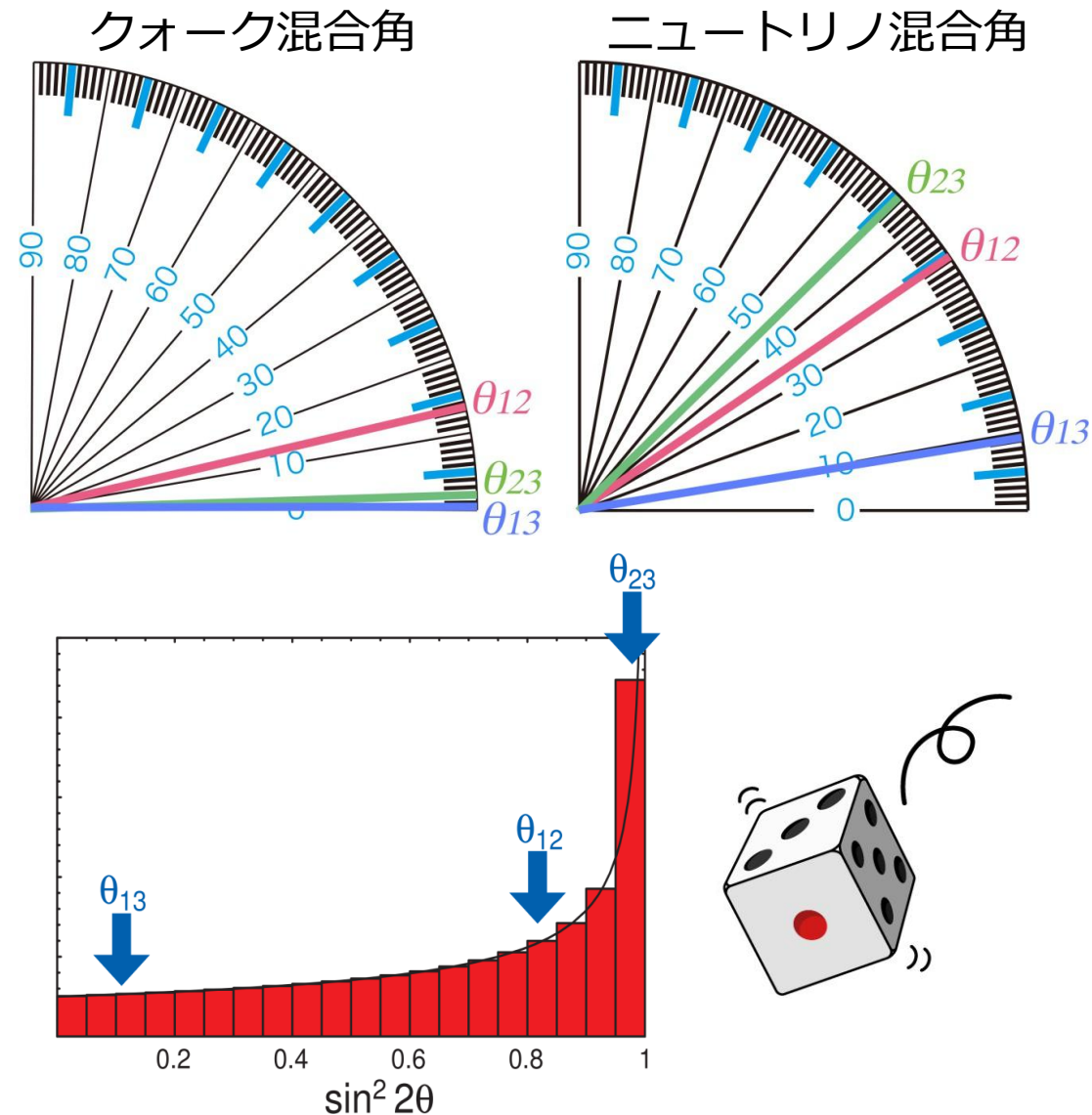


Belle実験が精密測定したクォークにおけるCP対称性の破れ



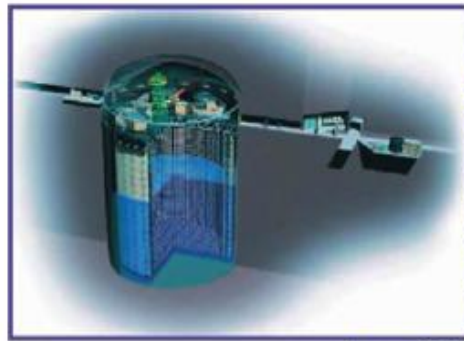
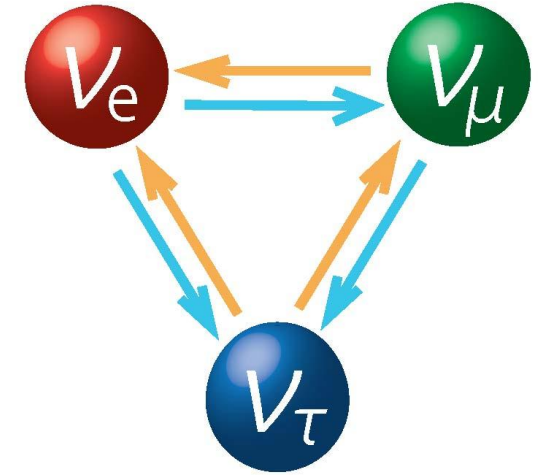
ニュートリノ混合角のもつ意味

- ニュートリノの混合角はクォークの混合角と比べて大きい。
- 混合角はどのように決まっているのか。
- Anarchy model
 - 混合角はすべてランダムに決まってる。
 - ぴったり45°とか0ということはない。
- クォークの混合角と関係している？
 - $\theta_{12}(\text{ニュートリノ}) + \theta_c(\text{カビボ角}) = 45^\circ$?
 - $\sin \theta_{13}(\text{ニュートリノ}) = \sin \theta_c(\text{カビボ角}) / 2$?
- 混合角の精密測定が鍵になる。



T2K実験

- J-PARCで ν_μ または $\bar{\nu}_\mu$ ビームを生成。
- 直後の前置検出器で振動前のニュートリノの精密測定。
- 295km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノ観測。
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率の違いからCP対称性の破れを探索。



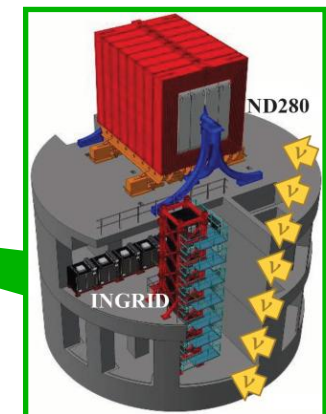
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



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

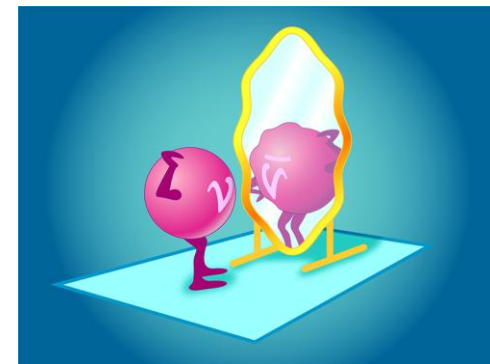


Near detector

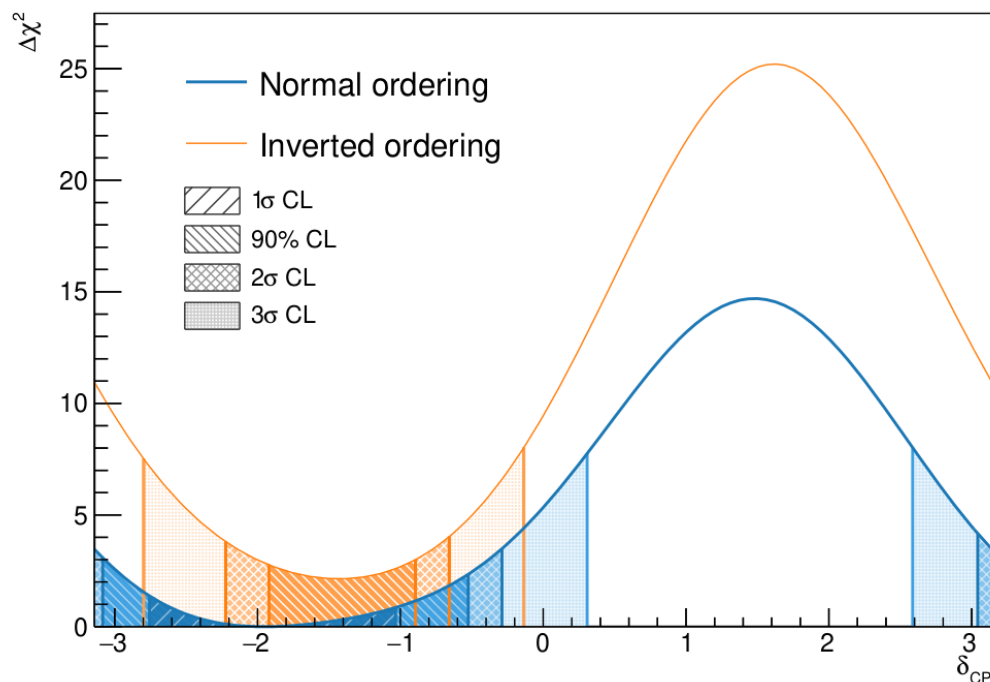


T2K実験の結果

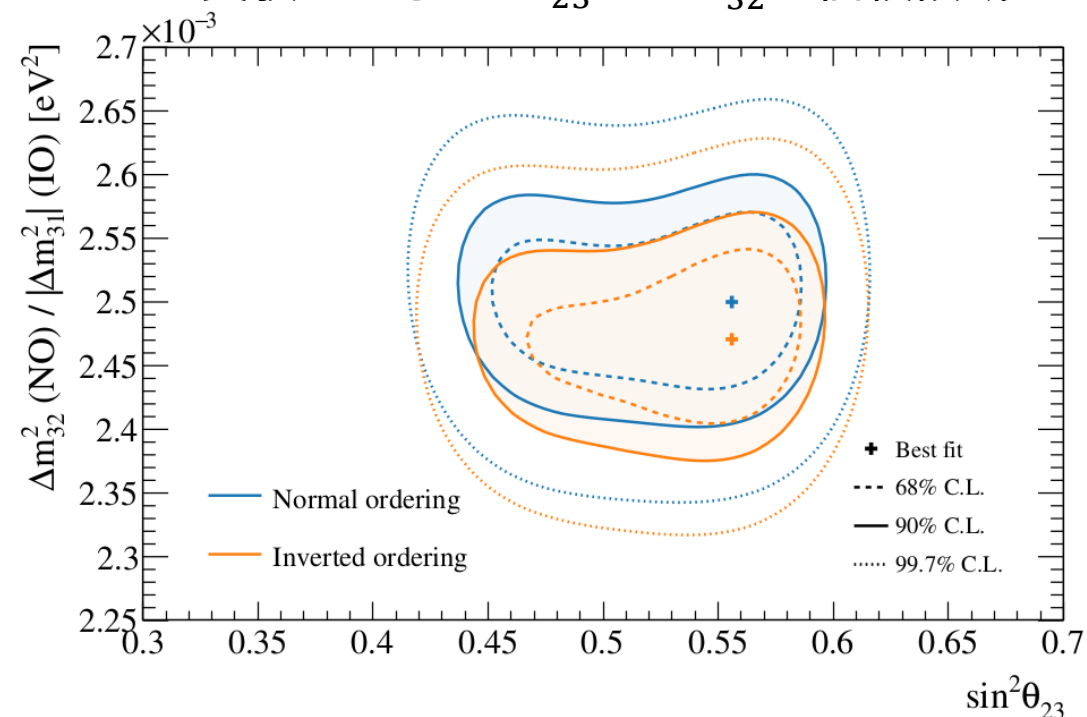
- CP対称性の破れを90%の信頼度で示唆。
- 混合角 θ_{23} を世界最高精度で測定。(45度とも無矛盾。)
- いずれも測定精度がまだ不十分。



T2K実験による δ_{CP} の信頼領域

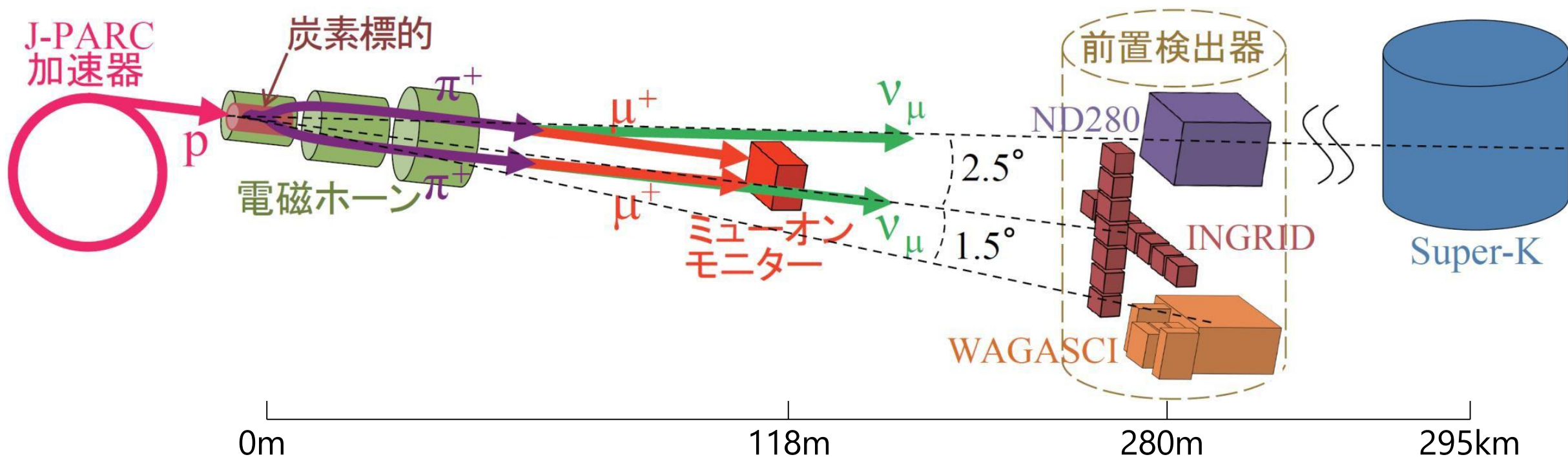


T2K実験による $\sin^2\theta_{23} - \Delta m_{32}^2$ の信頼領域



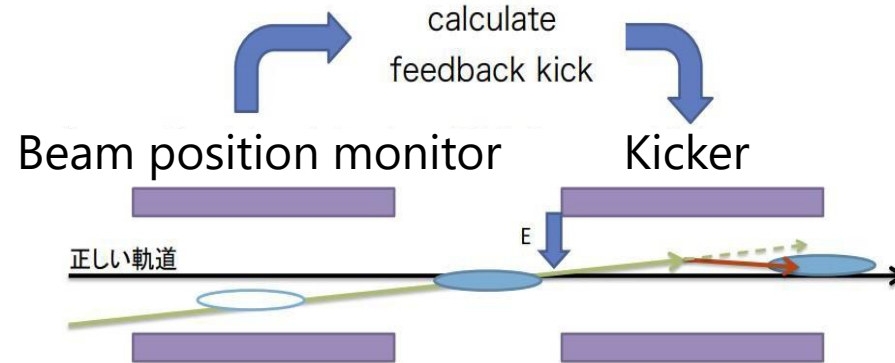
T2K実験の今後の戦略

- 現在は統計誤差が支配的。
→ 加速器を増強してデータを取り続ける。
- ニュートリノビームとニュートリノ反応の不定性由来の系統誤差が大きい。
→ 前置検出器でニュートリノビームとニュートリノ反応の精密測定を行う。

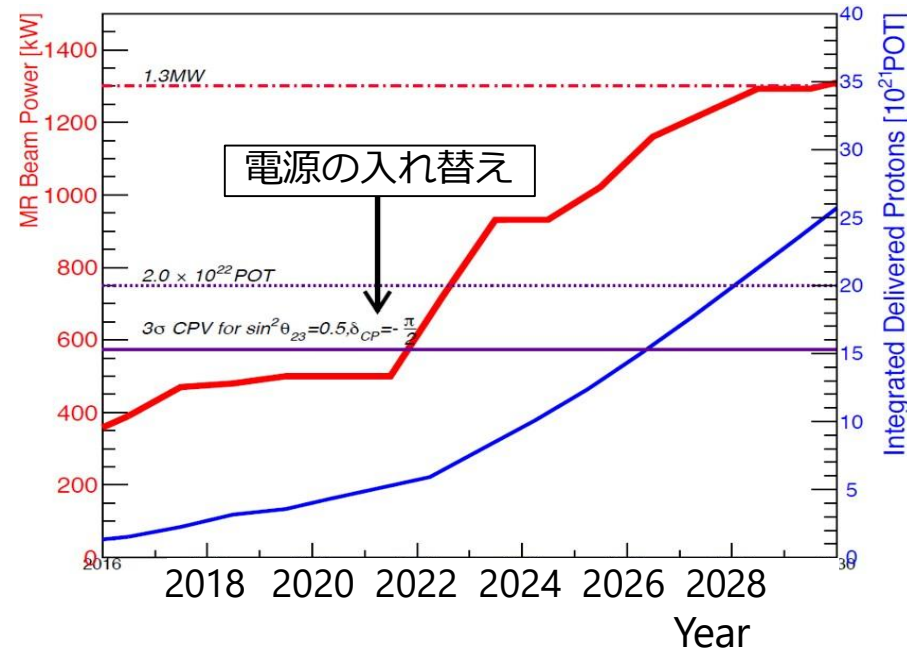


J-PARC加速器の増強

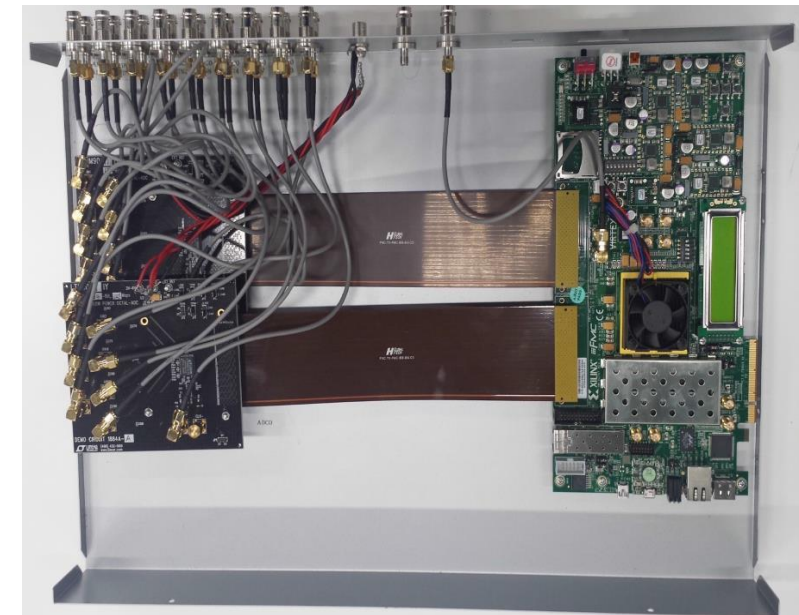
- 電源の入れ替えによる増強に成功。
- さらなる増強には周回中に不安定になり失われるビーム (ビームロス) の削減が必要。
- ビームの位置ずれを検知し、周回ごとにフィードバックをかけてビームロスを削減。
- ビーム内における空間電荷効果の影響を評価。



今後のビーム増強の計画

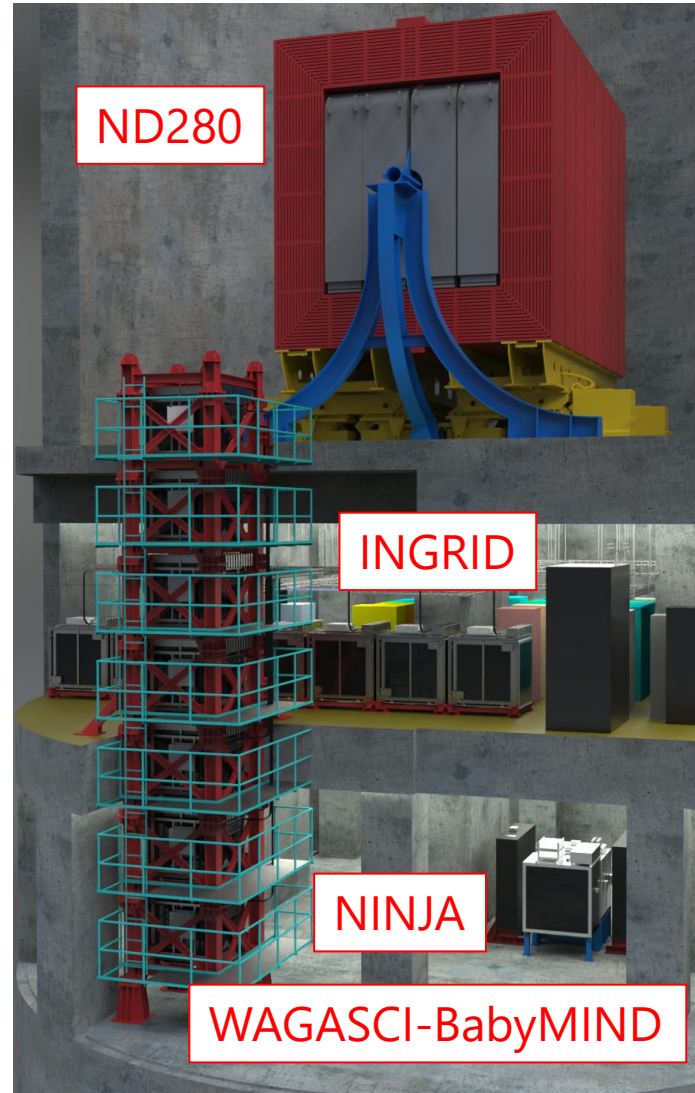


フィードバックシステム用回路



T2K前置検出器+NINJA実験による測定

- 3種類のT2K実験の前置検出器
 - INGRID検出器
 - ND280検出器
 - WAGASCI-BabyMIND検出器
- NINJA実験
- すべてを京都大学が中心となって、開発、運転、解析を行っている。



ND280検出器



INGRID検出器

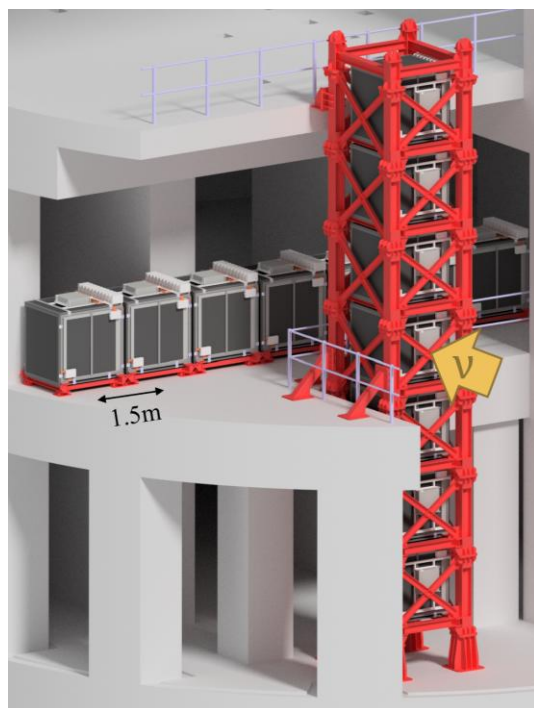


INGRIDによるニュートリノビームの測定

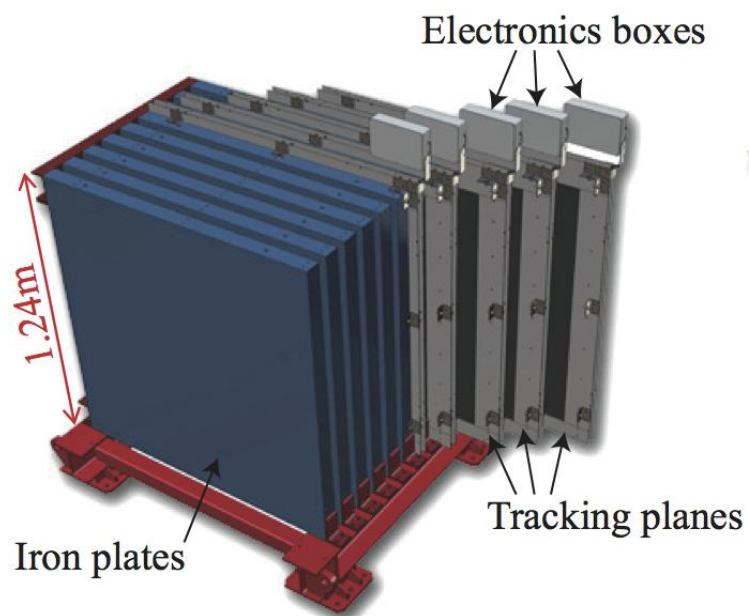
- 十字型に配置された14台の同一の検出器。
- ニュートリノビームの方向と強度の安定性を測定。
- 解析を改良しニュートリノビームの不定性を低減。



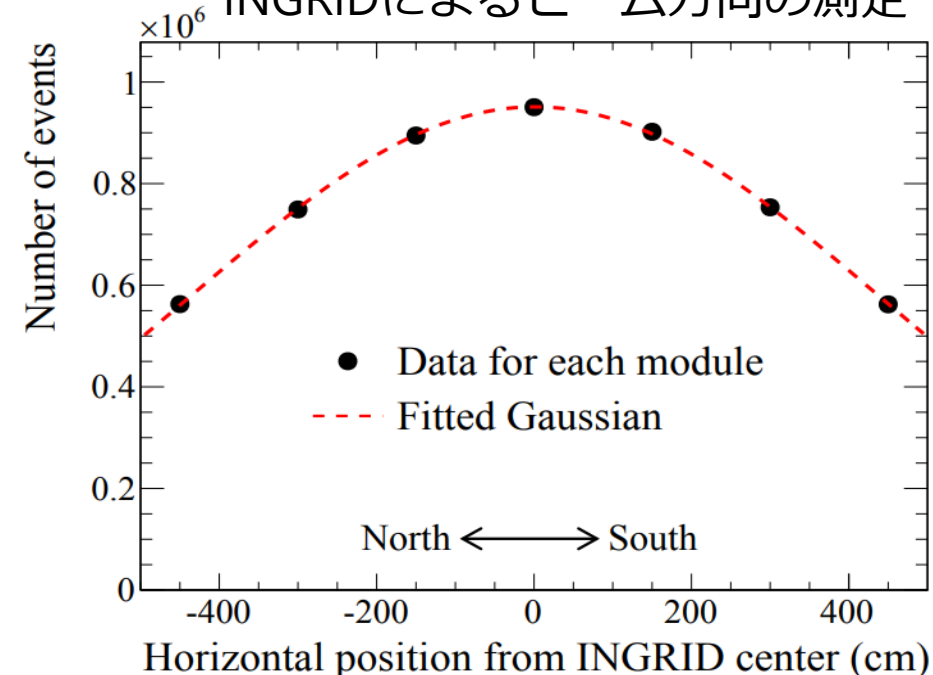
INGRIDの14モジュール



INGRID検出器の構造



INGRIDによるビーム方向の測定

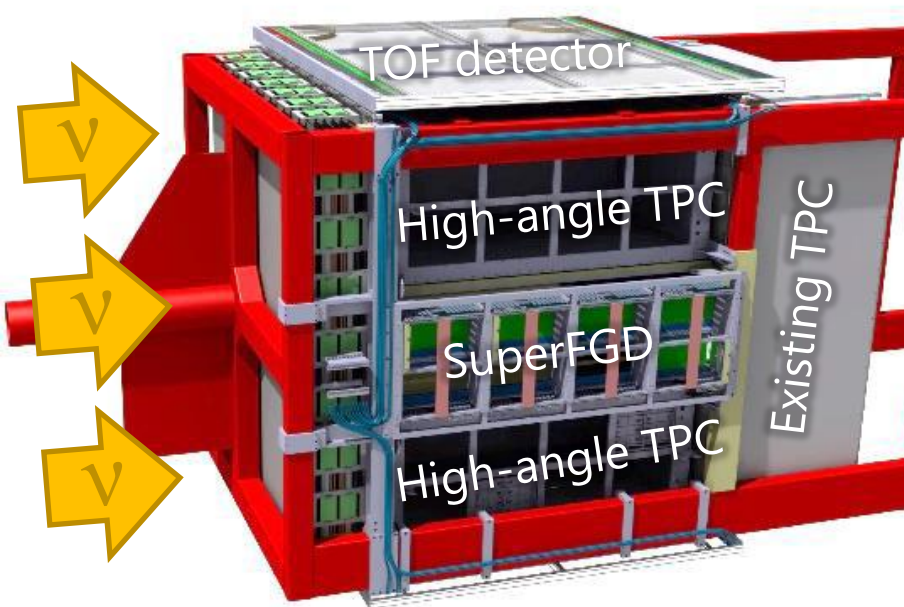


ND280検出器

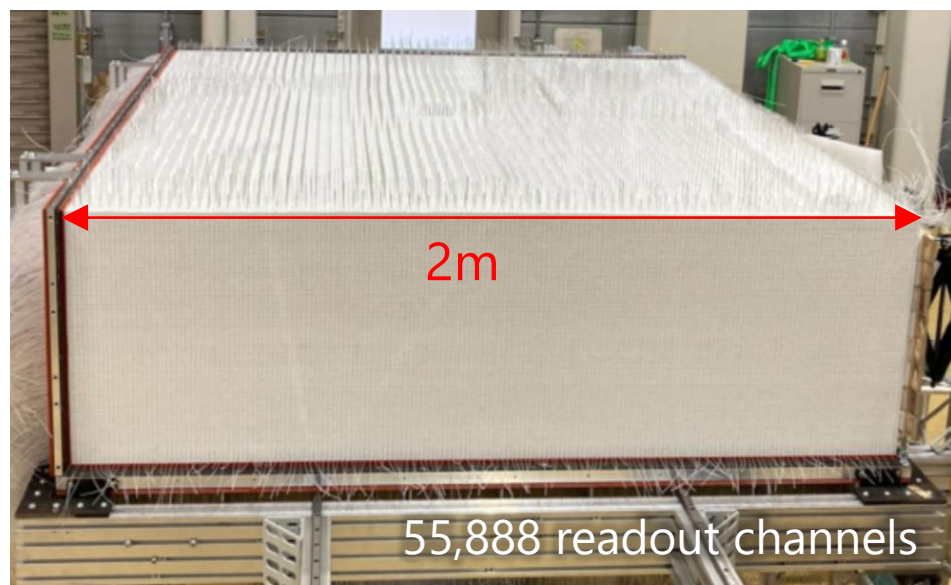
- 昨年に大規模なアップグレードが完了。
- $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ の立方体のシンチレータを約200万個並べて3方向から波長変換ファイバーとMPPCで読み出す新しい飛跡検出器 (Super-FGD)を開発。



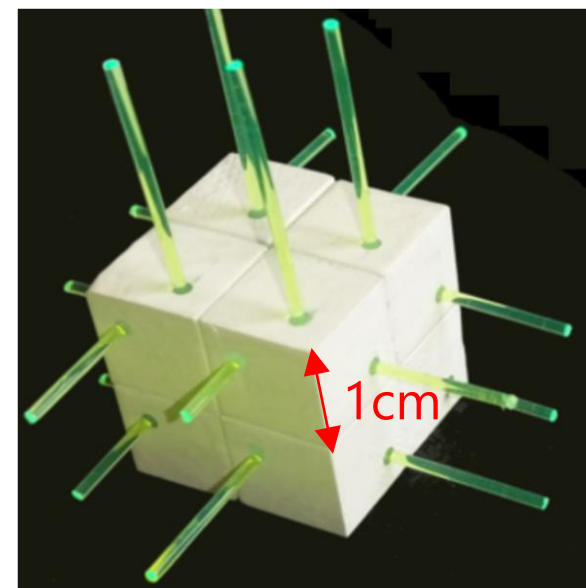
アップグレードされたND280検出器



組み立て中のSuperFGD検出器



SuperFGDの基本構造

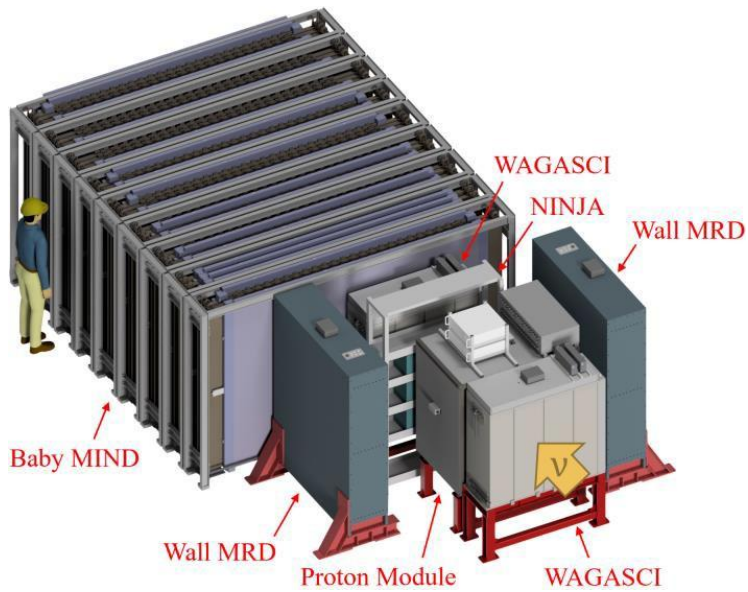


WAGASCI-BabyMIND検出器

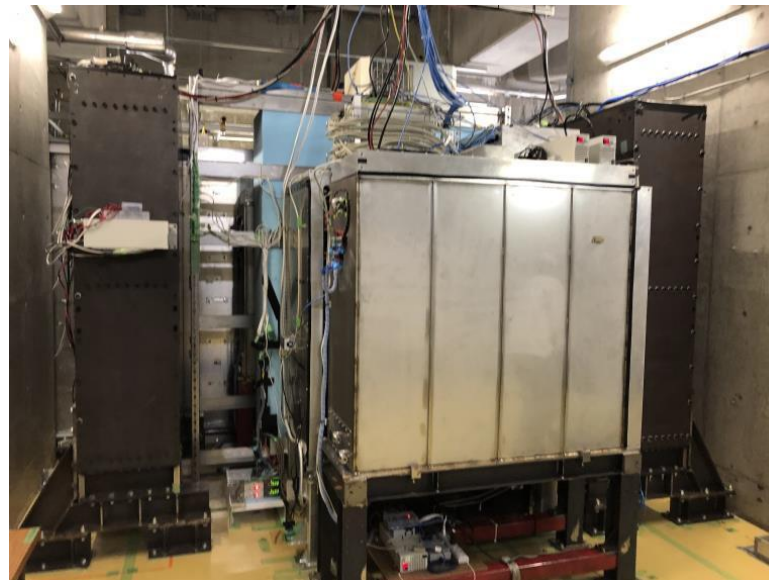
- ビーム軸からの角度によってニュートリノのエネルギー分布が変化。
- ND280とは異なるビーム角度に設置し、異なったエネルギーのニュートリノに対するニュートリノ反応を測定。



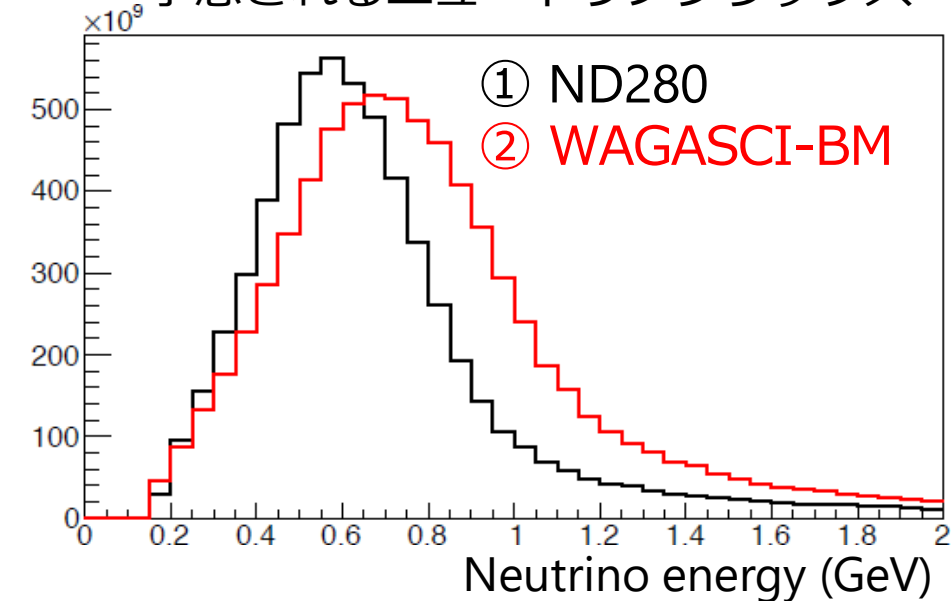
検出器の概要図



検出器の写真



予想されるニュートリノフラックス

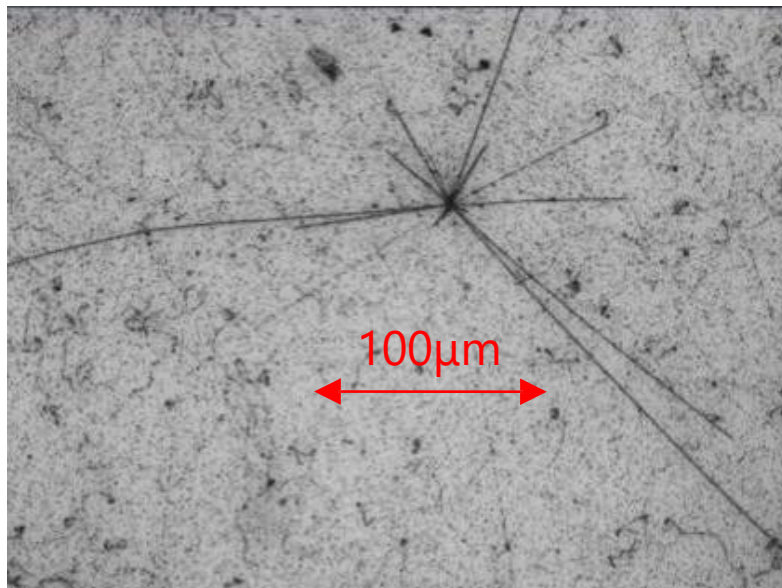


NINJA実験

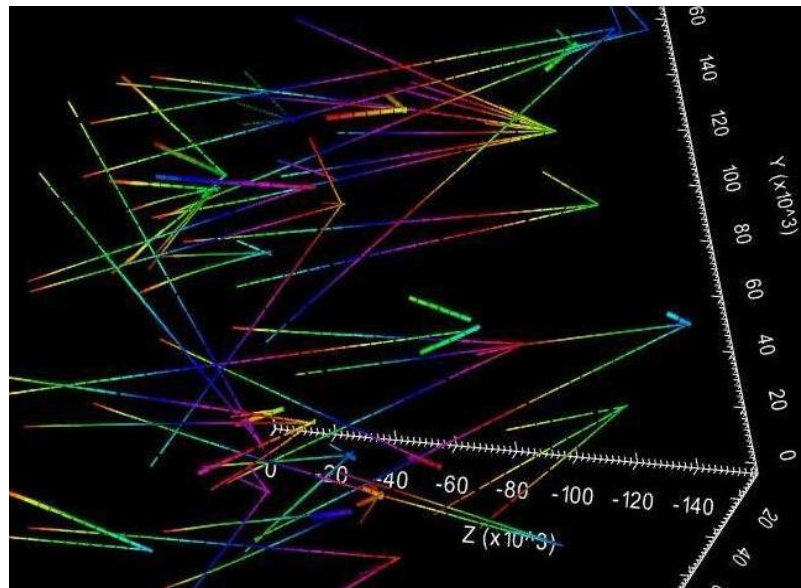
- 究極の位置分解能を持つ原子核乾板を使用したニュートリノ反応測定実験。
→ ニュートリノ反応からの低運動量の陽子も検出可能。
- 原子核乾板に時間情報を与えるための新型シンチレータ検出器を開発し、今年の後半からデータ取得。



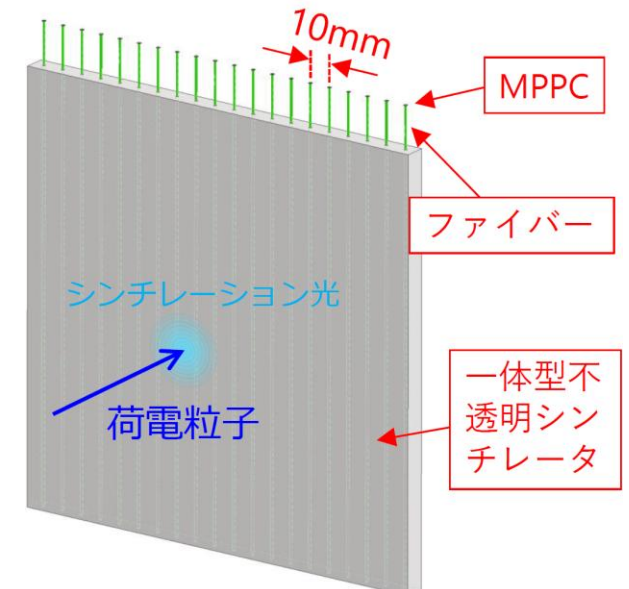
原子核乾板におけるニュートリノ反応



再構成された3次元飛跡

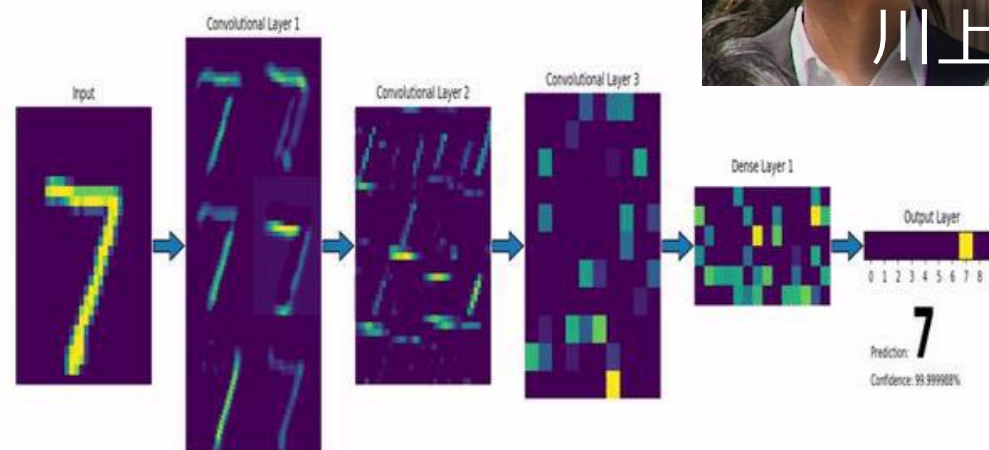
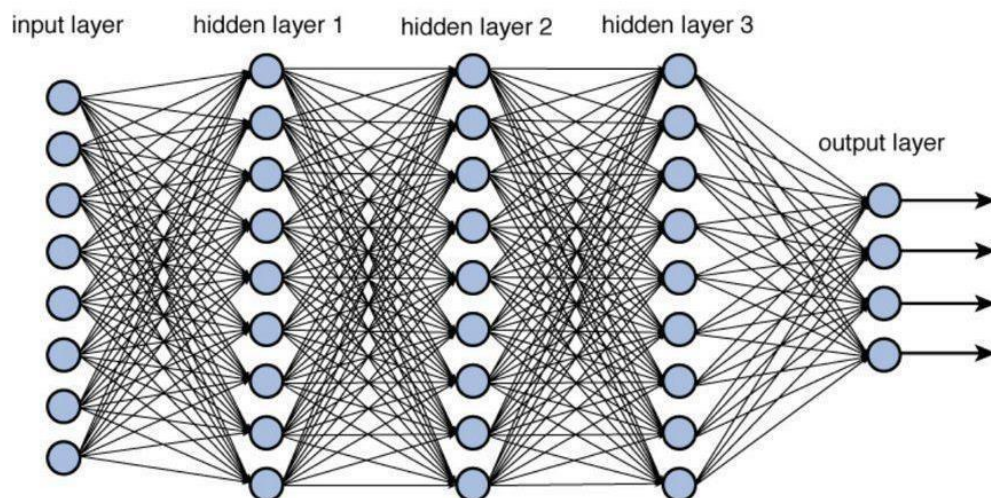
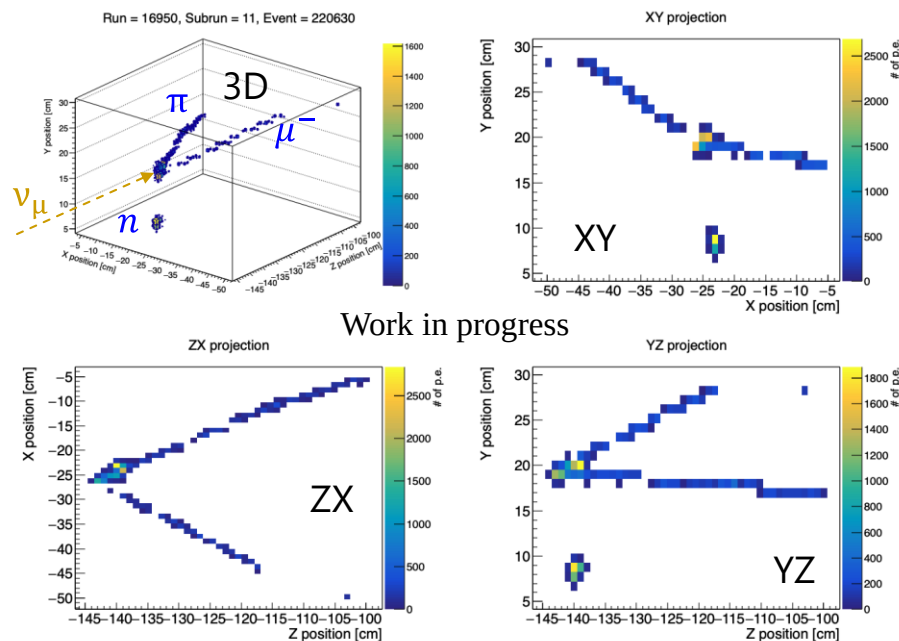


新型シンチレータ検出器の概念図



物理解析

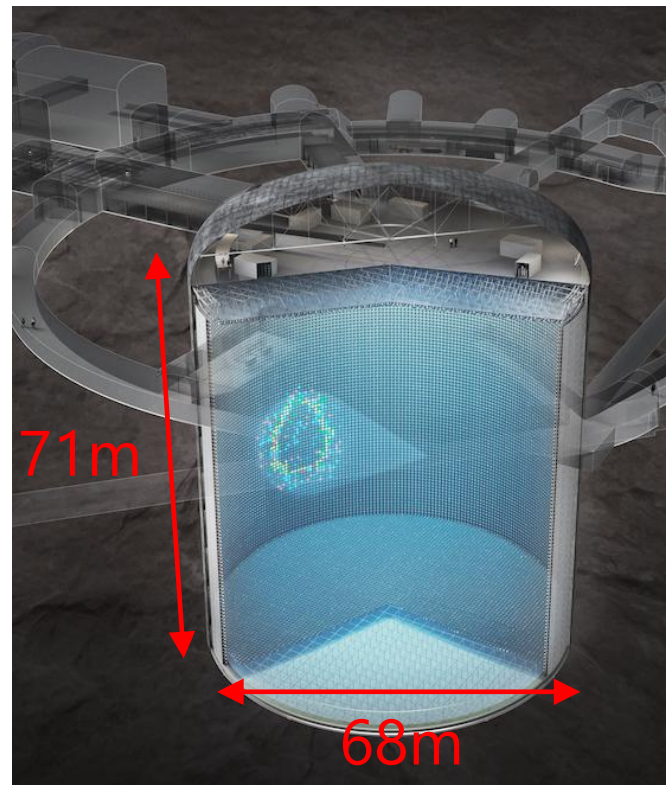
- ニュートリノ振動やニュートリノ反応、新粒子探索などの物理解析。
- 新型検出器の解析や機械学習の応用がホット。



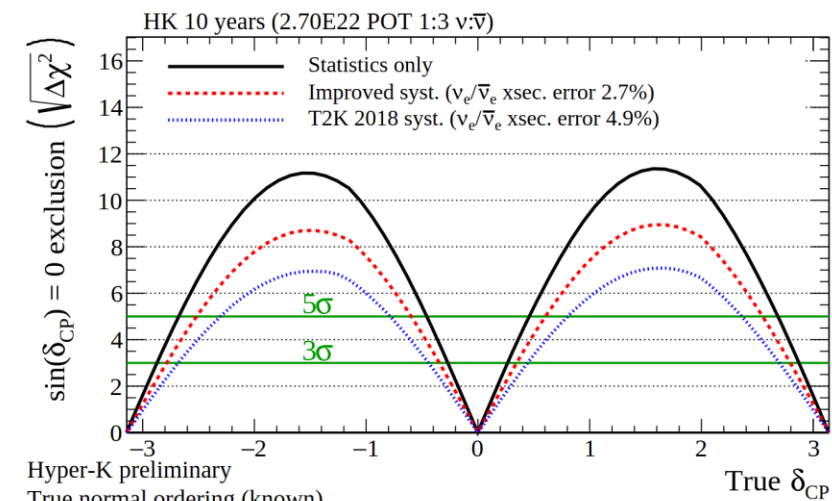
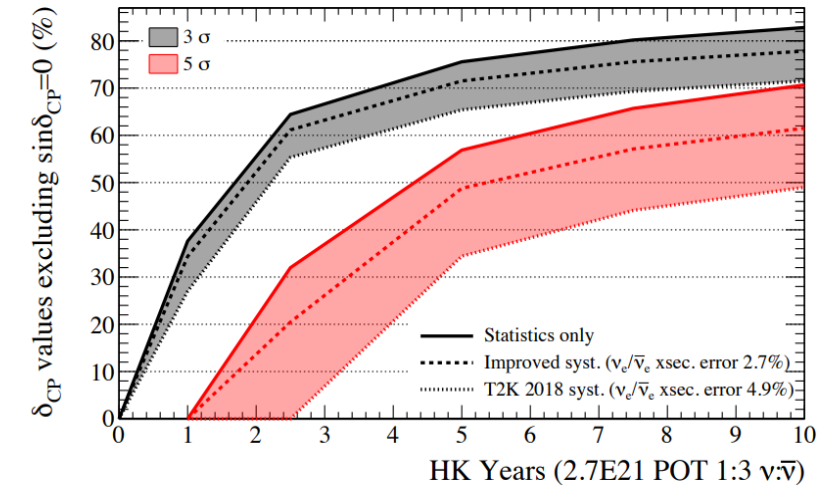
ハイパーカミオカンデ実験

- スーパーカミオカンデの8.4倍の有効質量をもつハイパーカミオカンデを建設中。
- 陽子崩壊や超新星ニュートリノの探索に加えてJ-PARCからの加速器ニュートリノを用いたニュートリノ振動の精密測定が最重要課題。
- 数年のデータ取得で系統誤差が支配的に。
- ニュートリノ反応の精密測定による系統誤差削減がより重要。

ハイパーカミオカンデ検出器



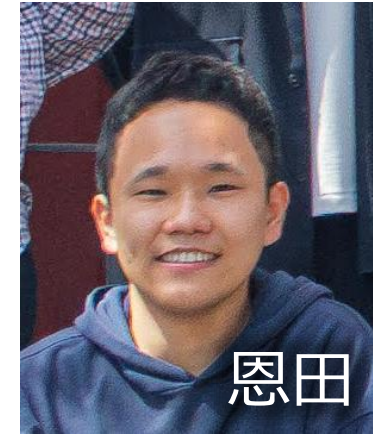
ハイパーカミオカンデ実験の期待感度



Hyper-K preliminary
 True normal ordering (known)
 $\sin^2(\theta_{13}) = 0.0218$ $\sin^2(\theta_{23}) = 0.528$ $|\Delta m_{32}^2| = 2.509E-3 \text{ eV}^2/c^4$

水ベース液体シンチレータ検出器

- SKやHKは水標的だがSuper-FGDはプラスチック標的。
→ 標的原子核の違いの影響が残ってしまう。
- 前置検出器で水標的で高精度の検出器が必要。
- 水をベースとした液体シンチレータを開発中。



恩田

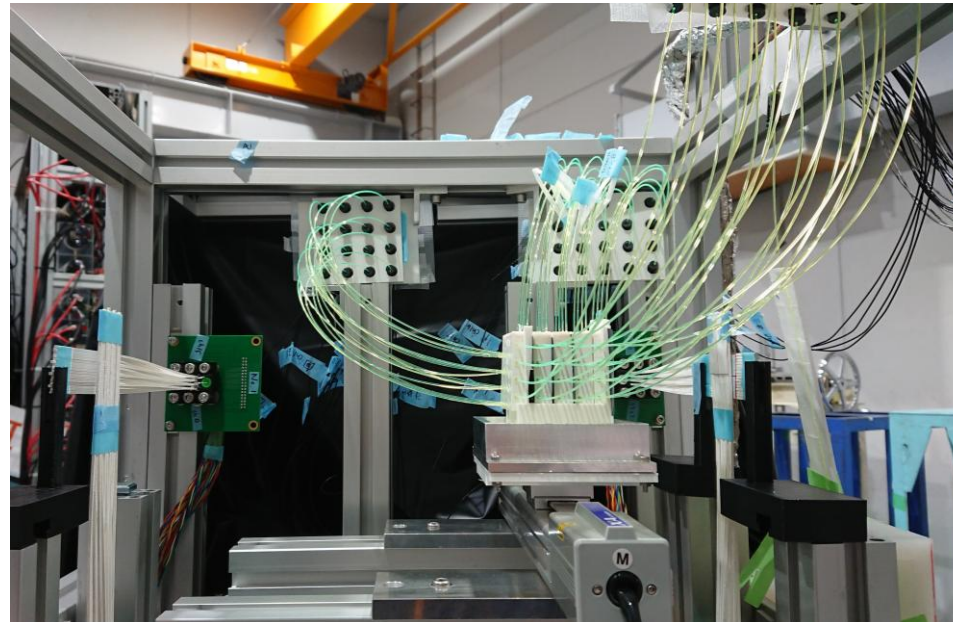


林

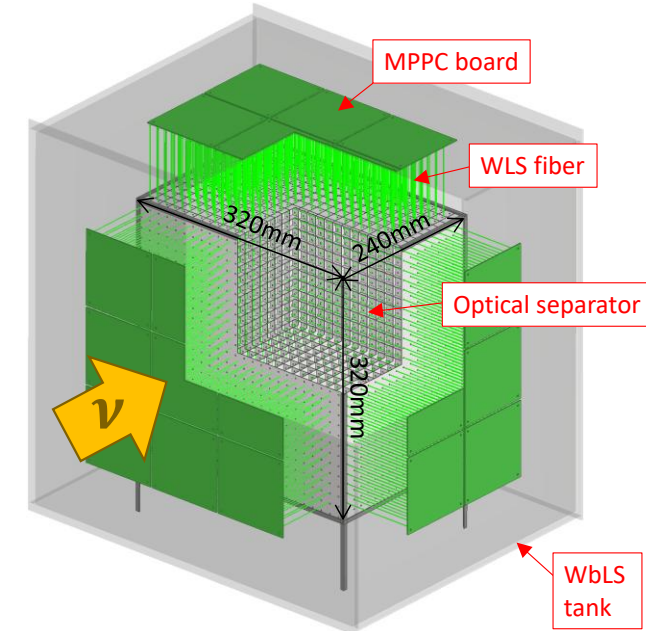
自作した水ベースの液体シンチレータ



小型試作機の陽電子ビーム試験

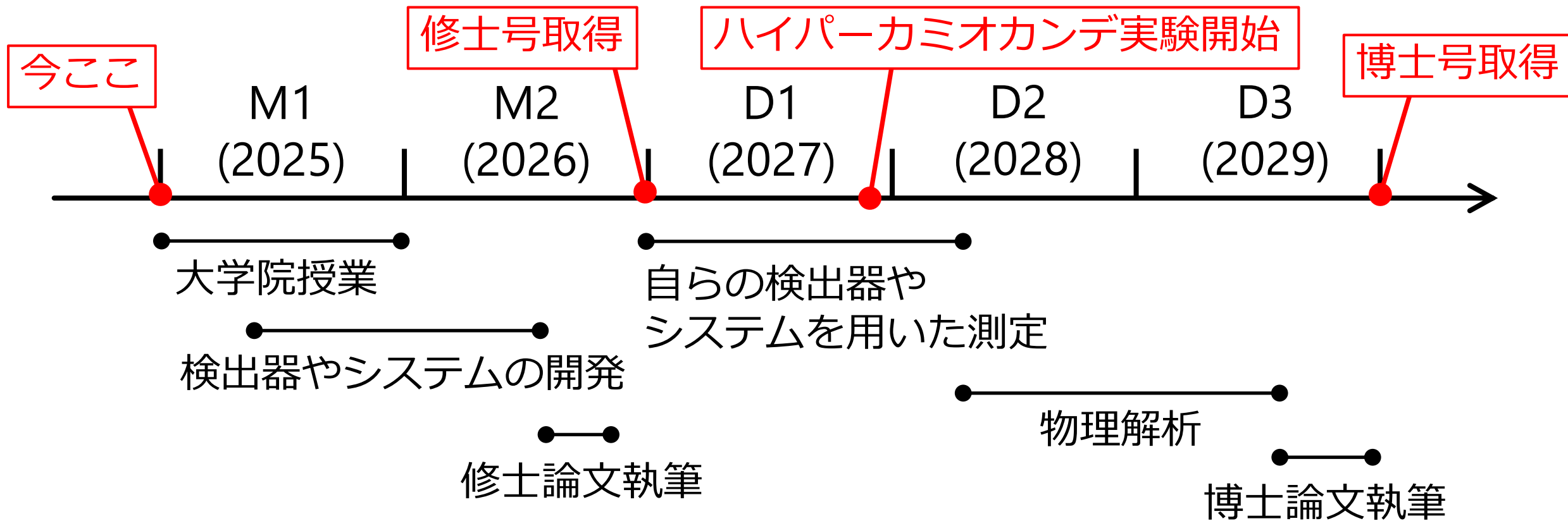


次期試作機的设计



研究の流れ

- まずは修士課程のうちに、自分の手と頭を動かして装置を設計、開発、製作、運転することを経験する。
- 博士課程では主に実験データの解析を行い、世界最高精度での物理測定を行う。

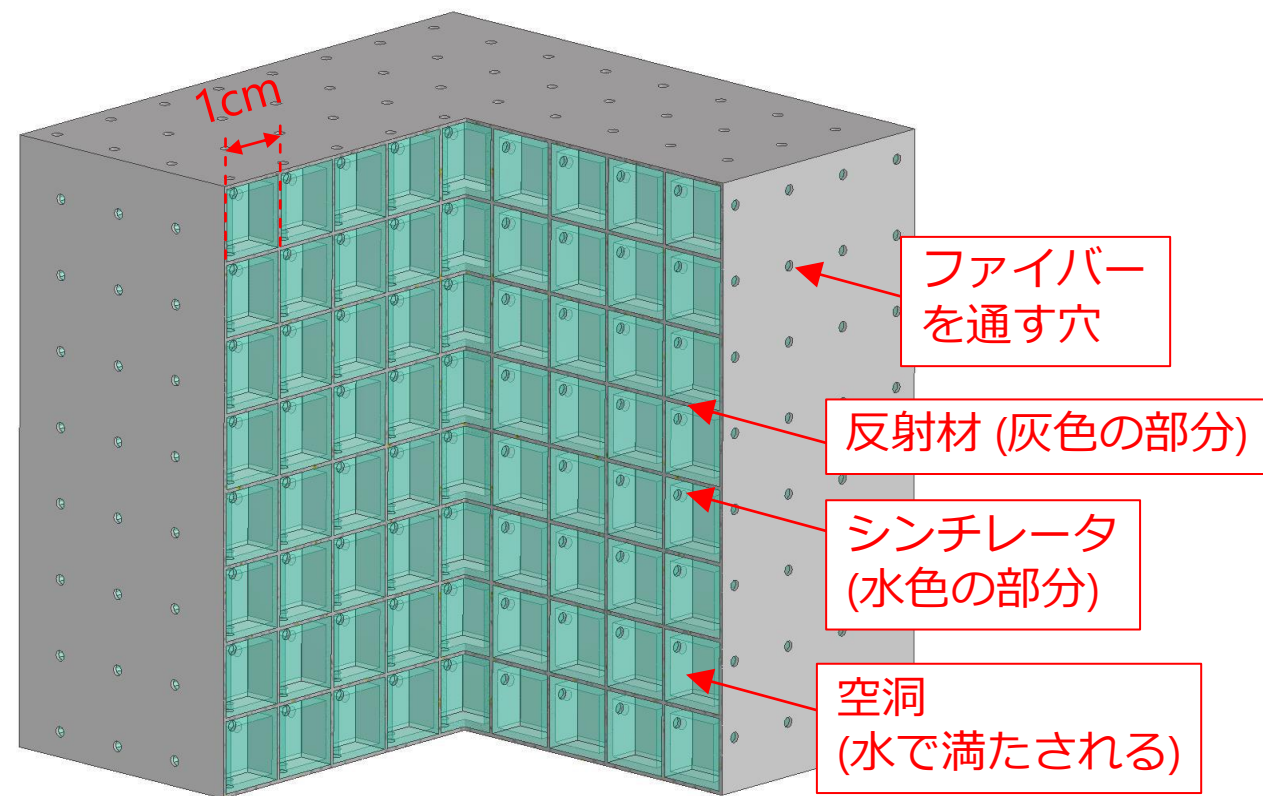


新型ニュートリノ検出器の開発

- やはり水でのニュートリノ反応の測定が重要。
- デュアルヘッド3Dプリンタでシンチレータと反射材をまとめて印刷して、水中に沈める新しい検出器ができないか。

こんなものを作りたい

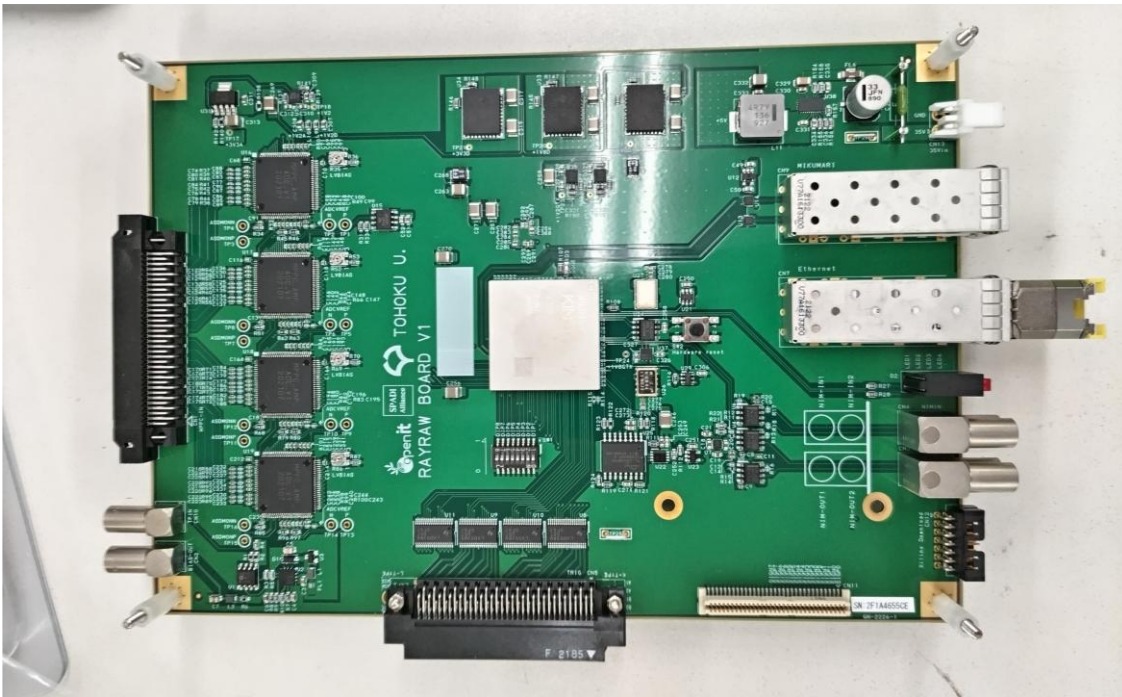
3Dプリンタ用シンチレータフィラメント



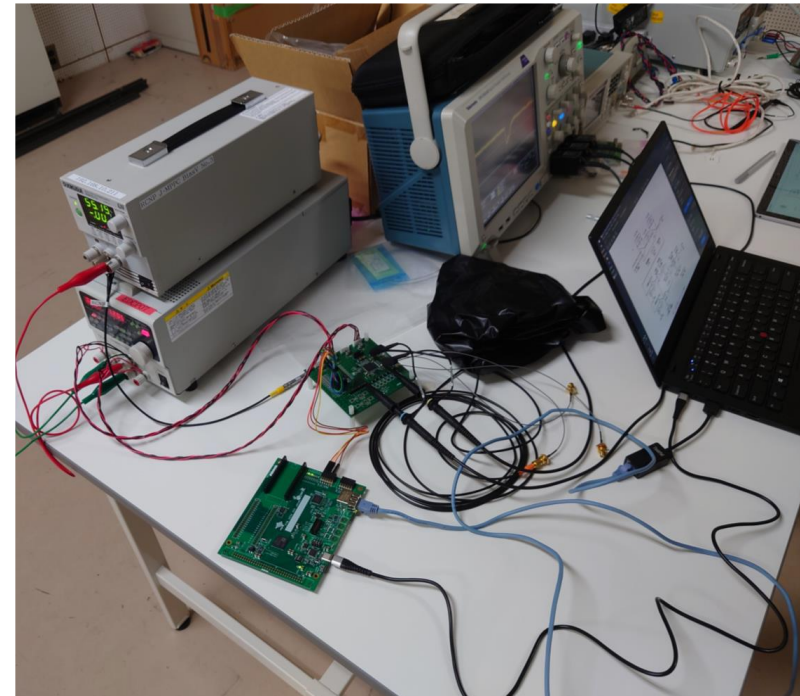
新型MPPC読み出しエレクトロニクスの開発

- 将来実験で多チャンネル読み出しが鍵。
- 開発した新しいエレクトロニクスのファームウェアの開発、NINJA実験での運用、次期ボードの設計などやることだらけ。

新しいMPPC読み出しエレクトロニクス



エレクトロニクスの試験



16電極陽子ビームモニター

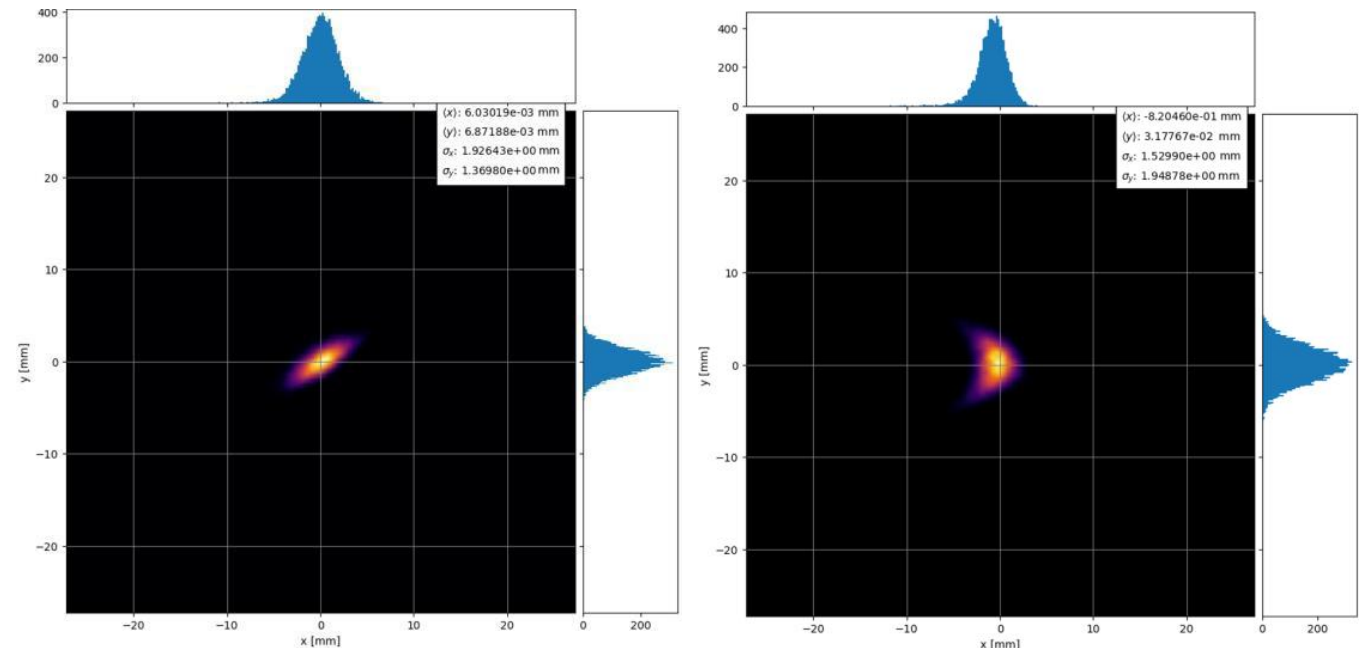
- ビームロスの原因となる陽子ビームの広がりを理解するために16電極モニターを開発。
- 高速化のためにファームウェア、データ取得システムの改良。
- 実際のビーム運転において運用し、データ解析。



16電極モニター



遺伝的アルゴリズムを用いた解析のテスト



まとめ

- T2K実験はニュートリノ振動測定やニュートリノ反応の測定で世界のトップを走っている。
- 京都大学の学生はユニークで重要な研究をして実験をリードしている。
- ハイパーカミオカンデの建設によりニュートリノ実験は本当の意味での精密測定フェーズに入ろうとしている。
- 高統計、高精度を達成した暁には予想外の物理が見えてくるかもしれない。
- 毎週、火曜日10:00から418号室+Zoomでミーティングをやっています。
- 聞きたいことがあれば、中家さん、ロジャーさん、木河かT2K実験の学生さんに気軽に聞いてください。