

T2K実験 (東海編) + NINJA実験 + J-PARC加速器

木河達也

2024年4月17日

高エネルギー物理学研究室実験紹介

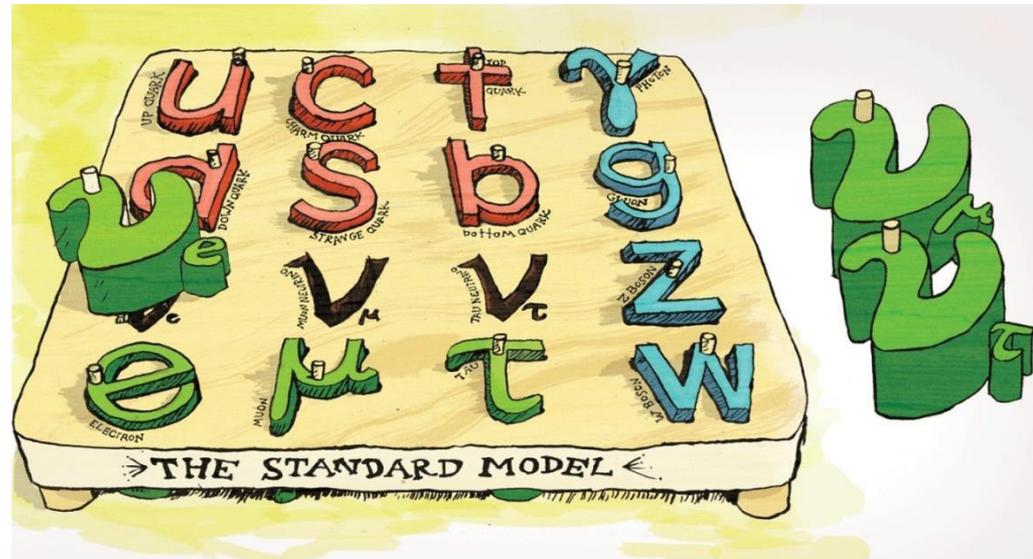
- 1930年: ニュートリノの存在の予言 (Pauli)
- 1932年: ベータ崩壊の理論化 (Fermi)
- 1956年: ニュートリノの発見 (Reines, Cowan) 
- 1962年: ミューニュートリノの発見 (Lederman, Schwartz, Steinberger) 
- 1962年: フレーバー間ニュートリノ振動の予言 (Maki, Nakagawa, Sakata)
- 1970年: 太陽ニュートリノ問題 (Davis) 
- 1987年: 超新星爆発ニュートリノの検出 (Koshiba) 
- 1998年: ニュートリノ振動の発見 (Super-K, SNO) 
- 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、 $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$ 3つのニュートリノがある。
- 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。



- 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。



ニュートリノについての謎や課題

- 近傍超新星爆発ニュートリノ。
- 超新星背景ニュートリノ。
- 太陽ニュートリノの精密測定。
- CP対称性は破れているのか。
- 混合角は何か意味を持つのか。
- 質量の順序。
- ニュートリノ-原子核反応の理解。
- 3世代だけか。
- 質量の絶対値。
- なぜ他の素粒子よりずっと軽いのか。
- ディラック粒子かマヨラナ粒子か。

スーパーカミオカンデ実験で探索
(この後、ロジャーさんが紹介)

T2K実験で探索
(東海パートをここで紹介、神岡パートはロジャーさんが紹介)

CMB実験で探索
(来週、鈴木さんが紹介)

AXEL実験で探索
(この後、中家さんが紹介)

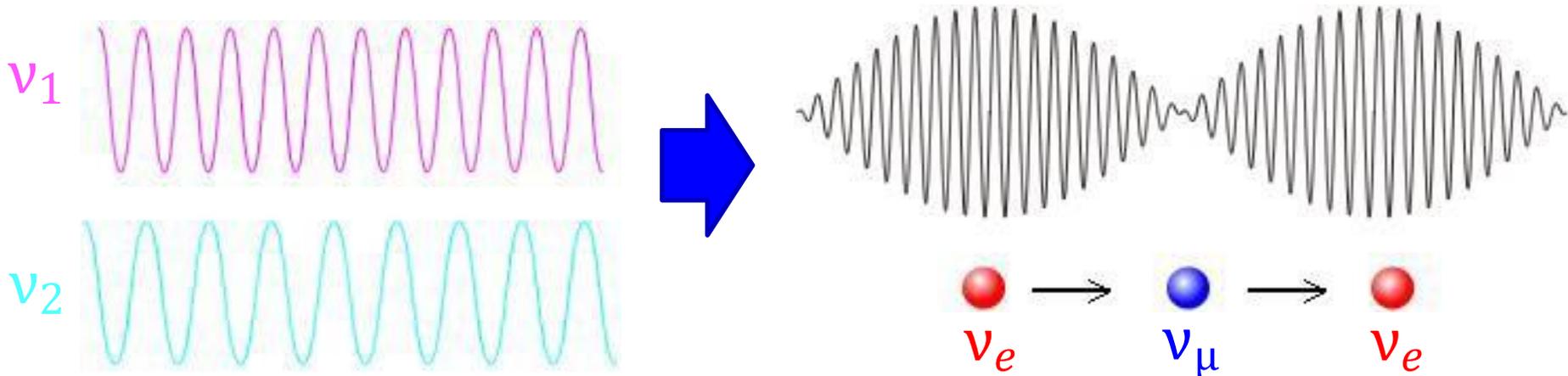
ニュートリノ振動

- ニュートリノが質量を持っていて、フレーバー(ν_e, ν_μ, ν_τ)と質量の固有状態が異なる場合を考える。
- フレーバー固有状態は質量固有状態の混合で表される。

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

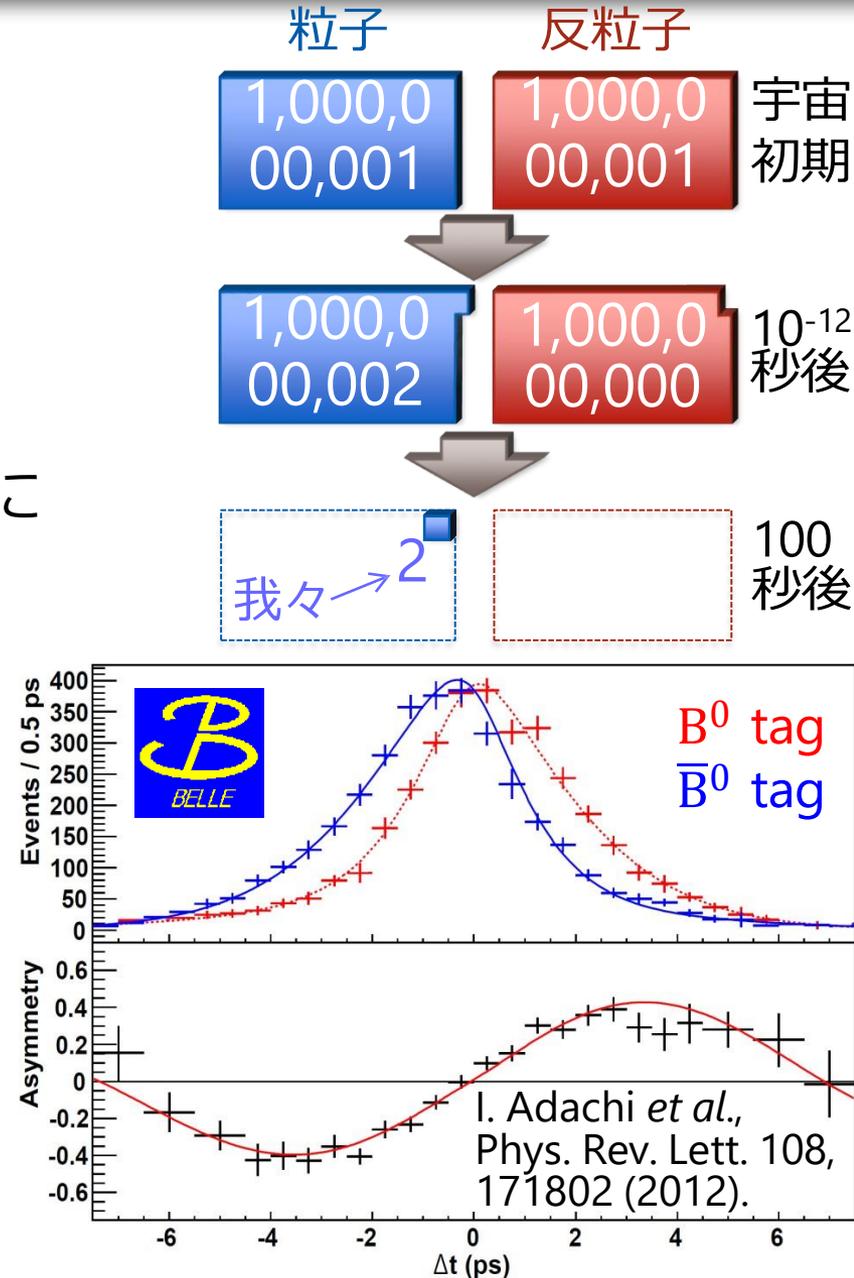
フレーバー固有状態
牧・中川・坂田行列
質量固有状態

- 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。



CP対称性の破れ

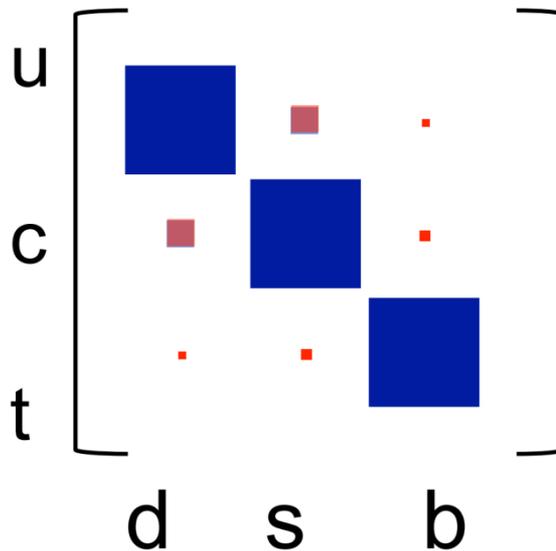
- 物質優勢宇宙を説明するサハロフ3条件。
 - バリオン数の破れ。
 - 非熱平衡状態。
 - C, CP対称性の破れ。
- クローニン、フィッチが K^0 崩壊におけるCP対称性の破れを発見。
- 小林、益川がCP対称性の破れを理論的に説明。
- B^0 崩壊により理論を検証。
- しかし物質優勢宇宙を説明するにはCP対称性の破れは小さすぎる。
- 新たなCP対称性の破れが必要。
→ ニュートリノが原因?



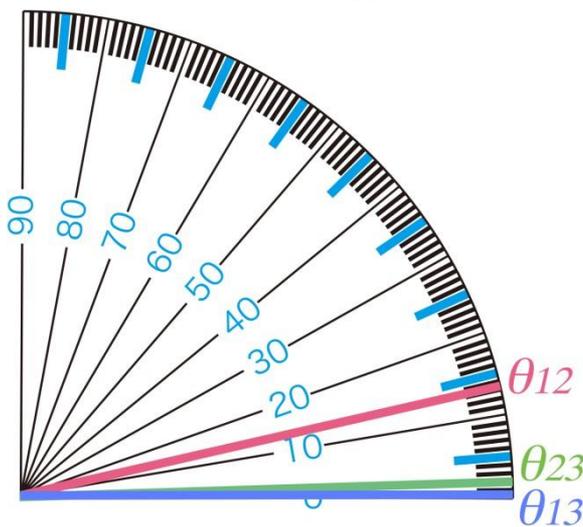
クォークとニュートリノの混合行列

- クォークの混合行列はほぼ対角。(混合角は小さい)
- ニュートリノの混合行列は非対角成分が大きい。(混合角が大きい)
- そもそも混合角はどのようにして決まっているのか。
- 今後の精密測定が鍵になる。(特に θ_{23})

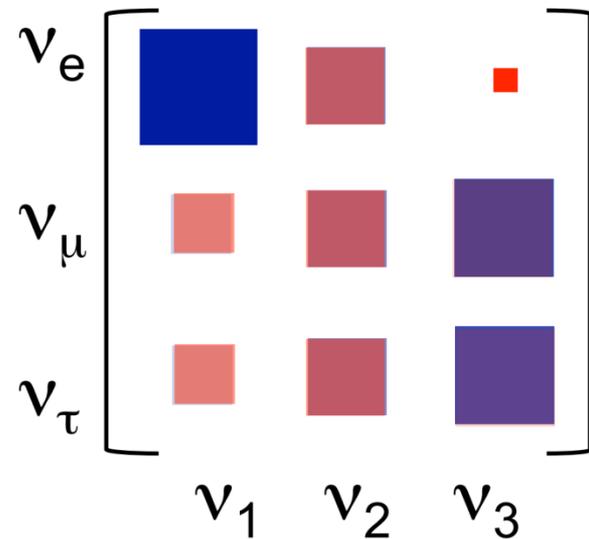
クォークの混合行列
(小林・益川行列)



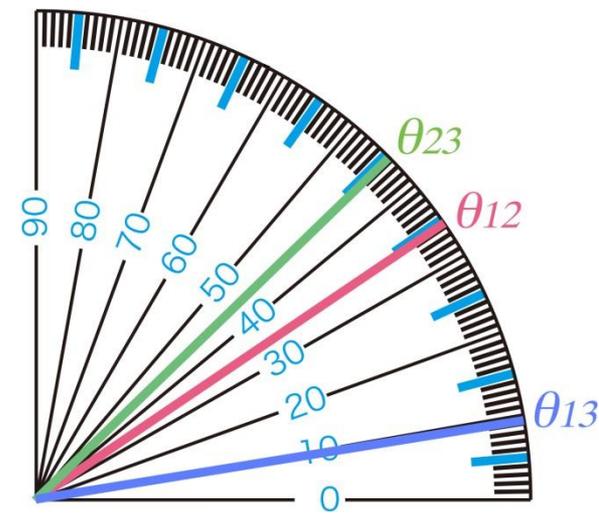
クォークの混合角



ニュートリノの混合行列
(牧・中川・坂田行列)



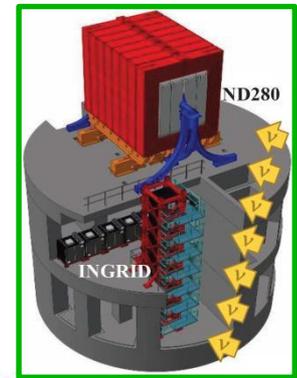
ニュートリノの混合角



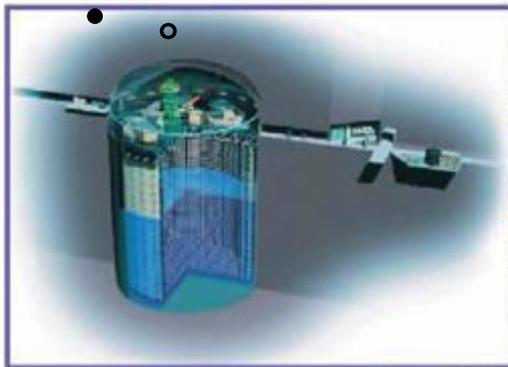
T2K実験

- 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。
- ν_μ や $\bar{\nu}_\mu$ の消失確率から混合角 θ_{23} を精密測定。

Near detector



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



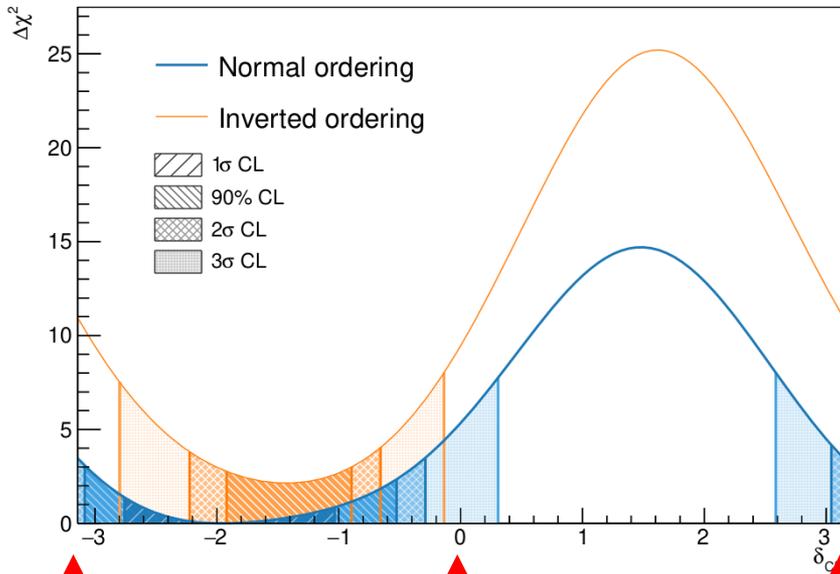
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



T2K実験の物理結果

- CP対称性の破れを表す位相に 3σ (99.7%)の制限。
- 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度より大きいことをわずかにprefer。
しかし45度とも無矛盾。)

T2K実験による δ_{CP} の信頼領域

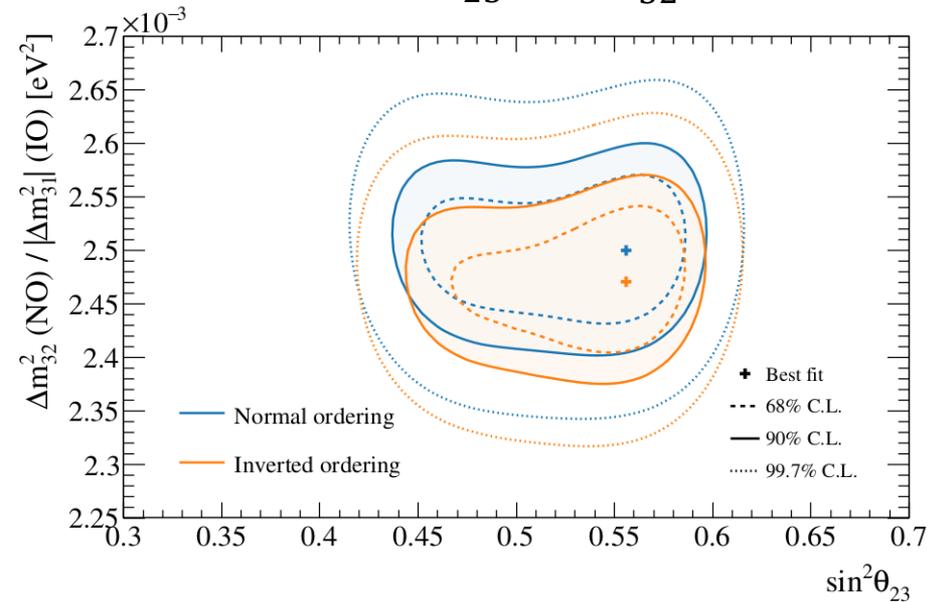


CP保存

CP保存

CP保存

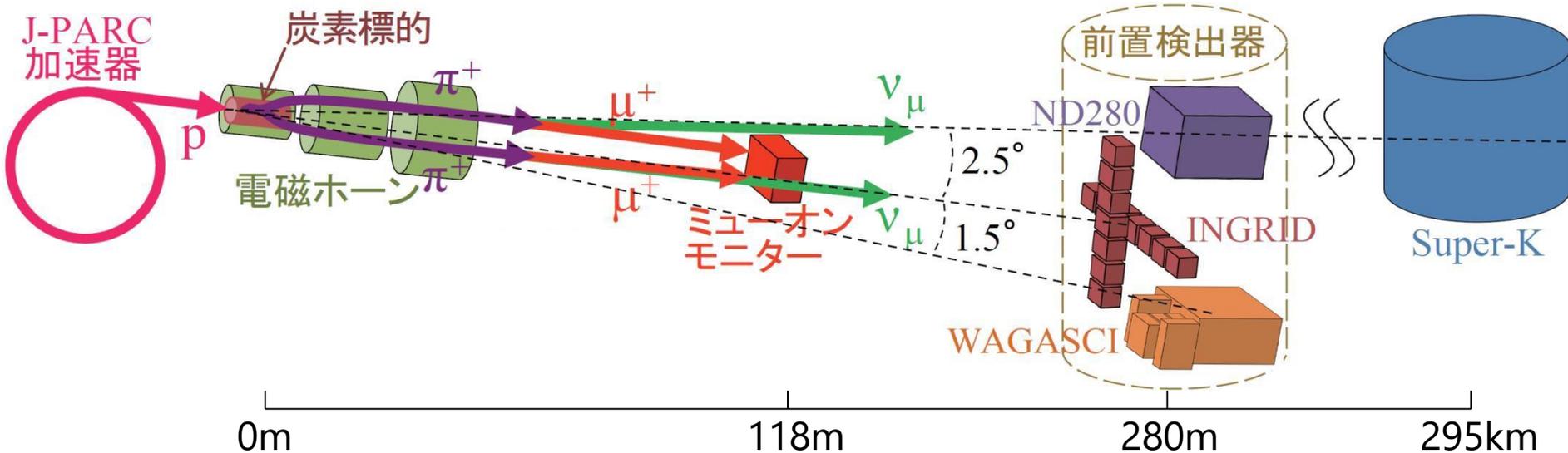
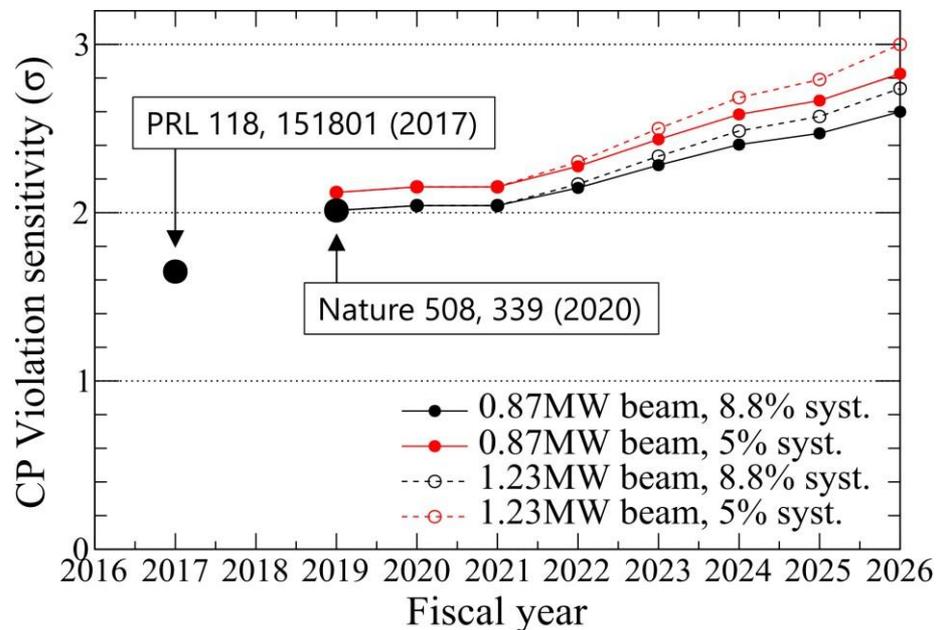
T2K実験による $\sin^2\theta_{23} - \Delta m_{32}^2$ の信頼領域



T2K実験の今後の戦略

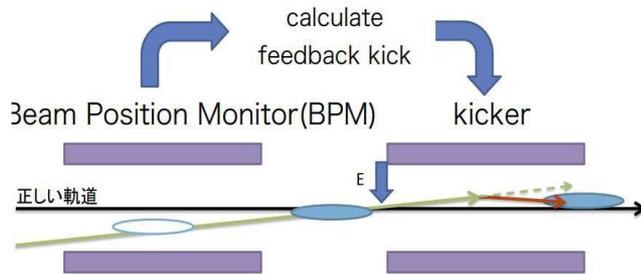
- まだ測定精度は不十分。
- 現在は統計誤差が支配的。
→ **ビームを増強してデータを取り続ける。**
- ニュートリノ反応の不定性由来の系統誤差が大きい。
→ **様々なニュートリノ反応の精密測定が必要。**

ニュートリノCP対称性破れの探索感度

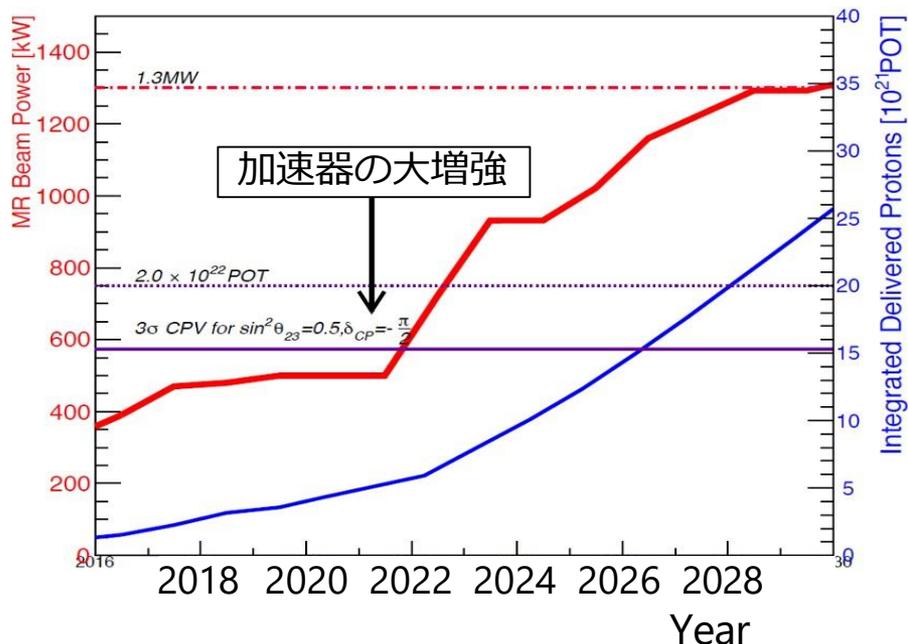


J-PARC加速器の増強

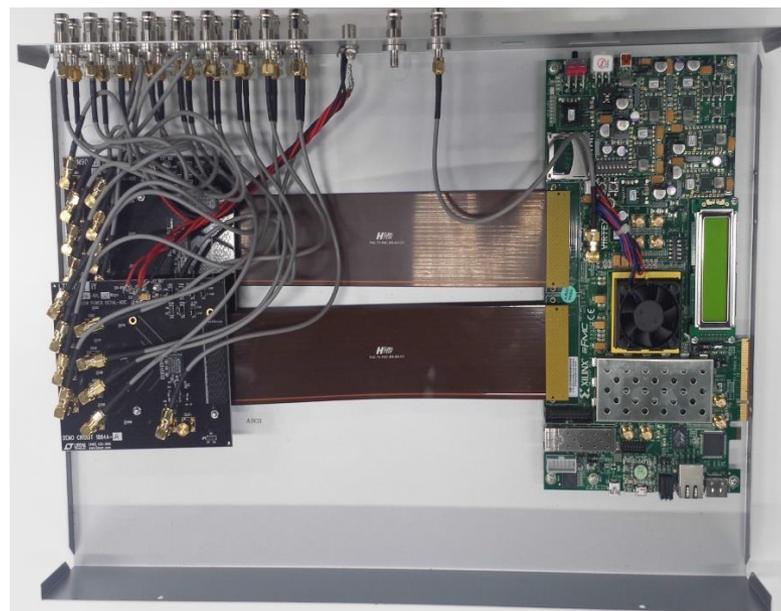
- 昨年度に加速器を大増強
- 増強には周回中に不安定になり失われるビーム(ビームロス)の削減が必要。
- ビームの位置ずれを検知し、周回ごとにフィードバックをかけてビームロスを削減。



今後のビーム増強の計画

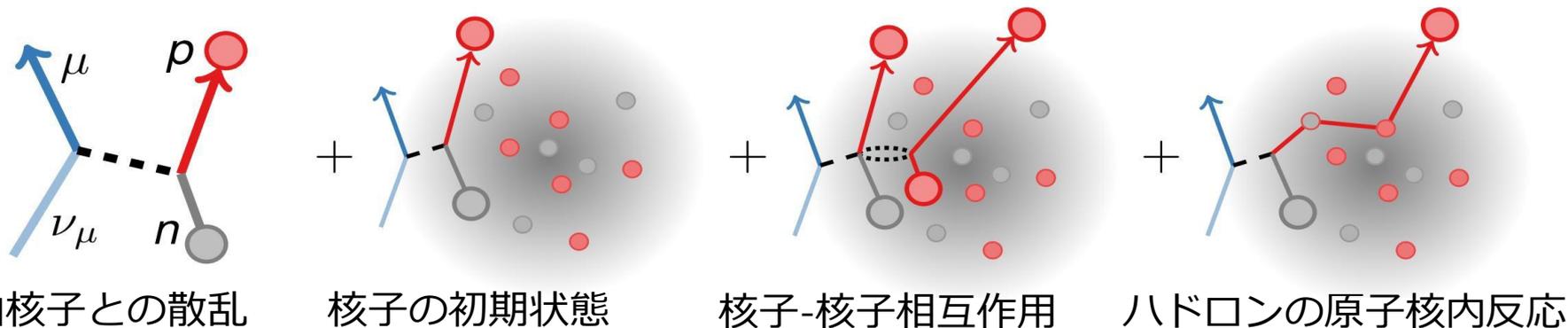


フィードバックシステム用回路

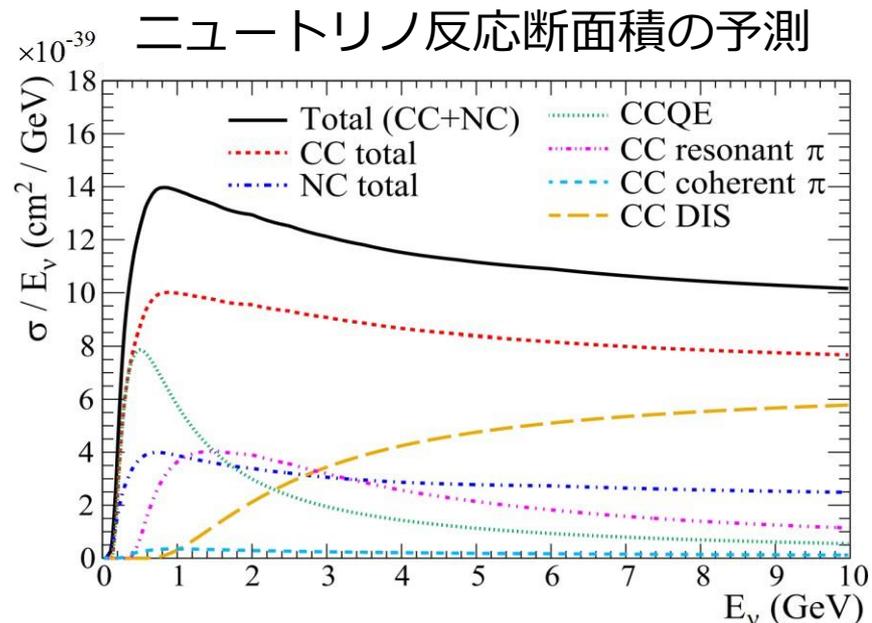


ニュートリノ反応の精密測定

- 様々な原子核効果により複雑な反応をするので、一部の粒子を検出するだけでは何が起きているのかわからない。
→ 終状態の全粒子を高効率で検出することが必要。

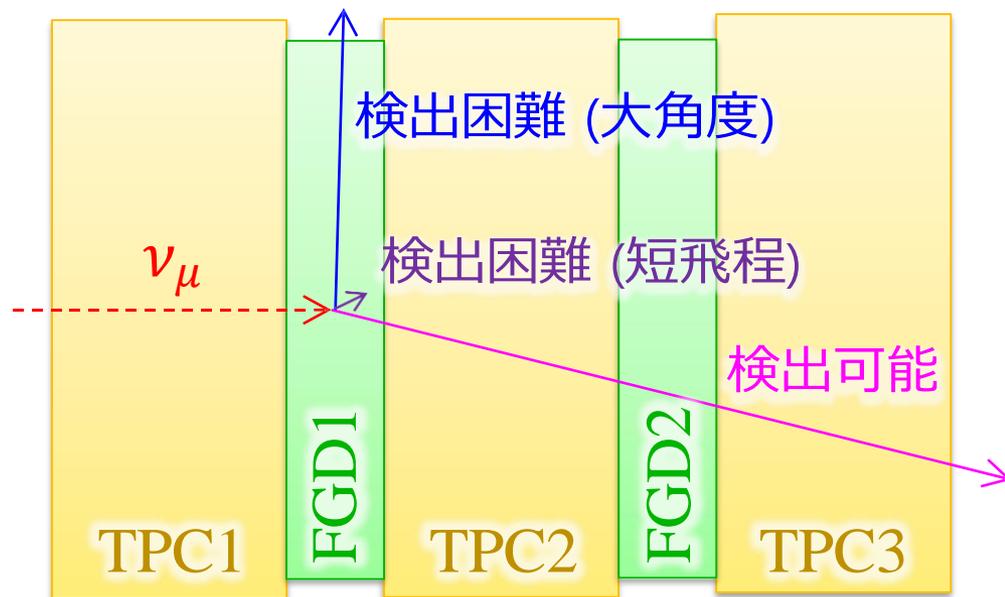
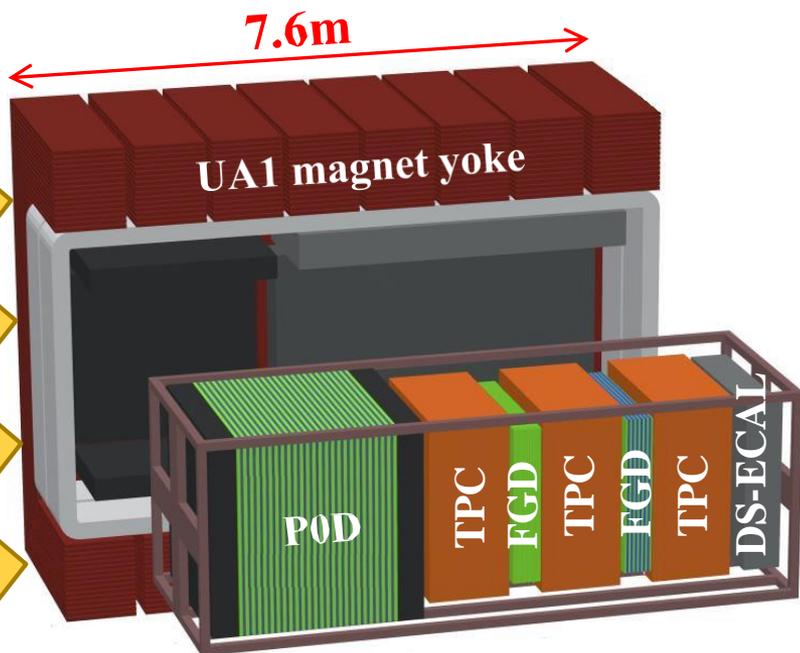
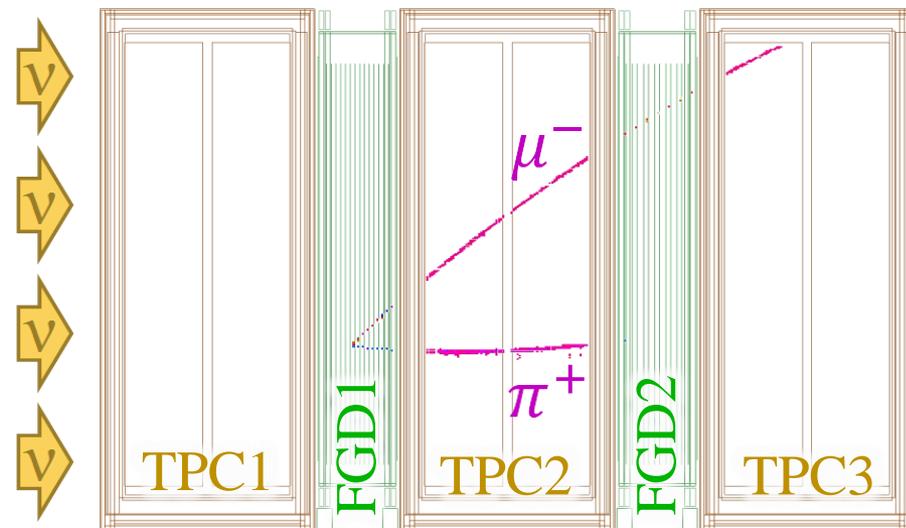


- ニュートリノ反応はエネルギーに依存する
→ 様々なエネルギーのニュートリノビームによる測定が必要。



- スーパーカミオカンデ方向に向かう振動前のニュートリノを精密測定。
- 棒状シンチレータを並べた飛跡検出器(FGD)とTPC。
- 大角度の飛跡や短い飛跡の検出効率の低さが課題。

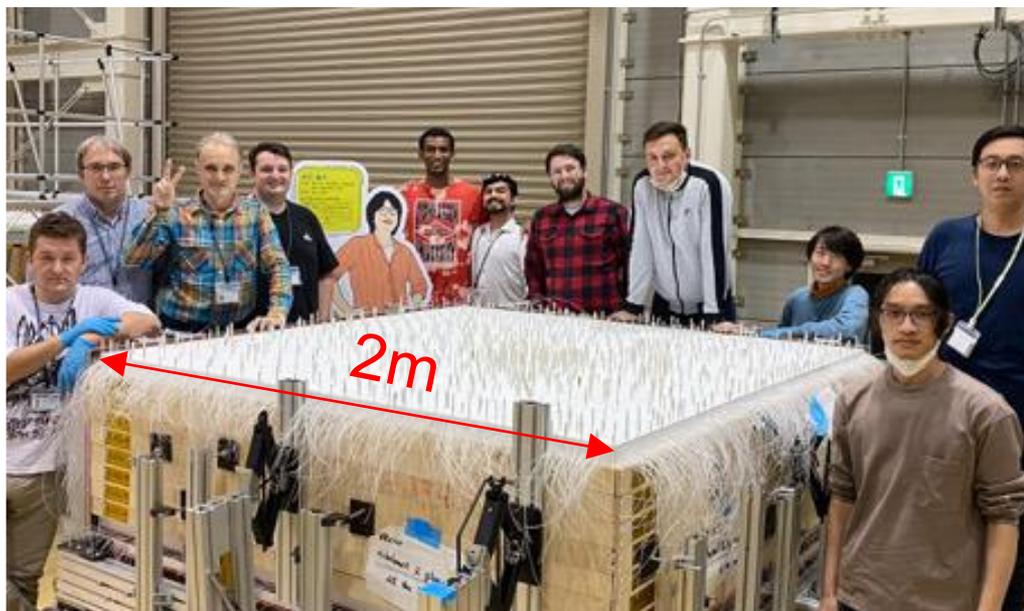
ND280におけるニュートリノ事象



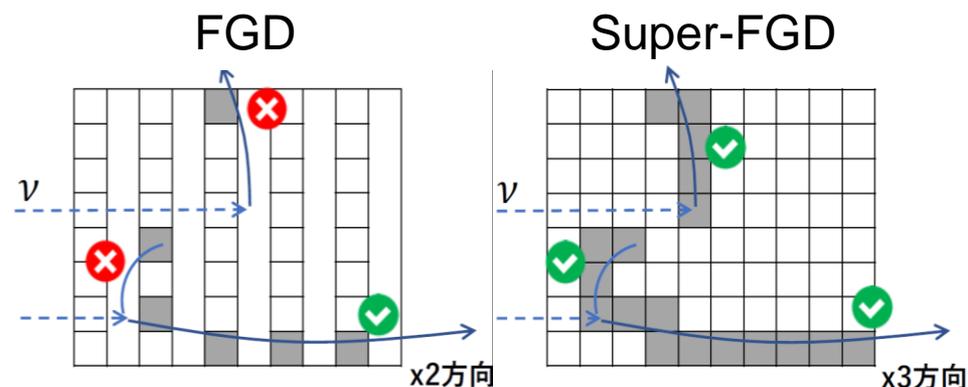
ND280検出器のアップグレード

- $1 \times 1 \times 1 \text{cm}^3$ 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で読み出す新しい飛跡検出器 (Super-FGD)。
 → 全方向への粒子に感度。
 → 短い飛跡も検出可能。

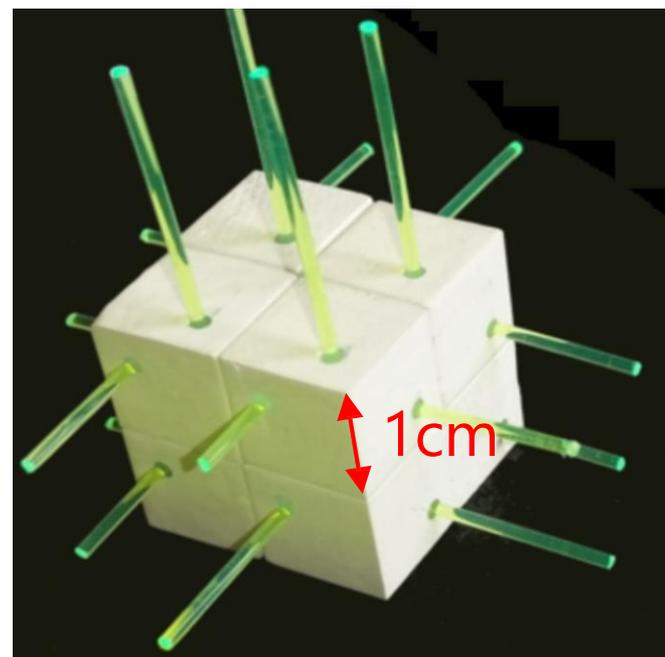
組み立て中のSuper-FGD検出器



既存の検出器と新型検出器の違い

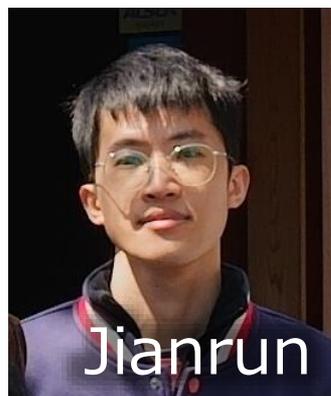


シンチレータとファイバーの構造

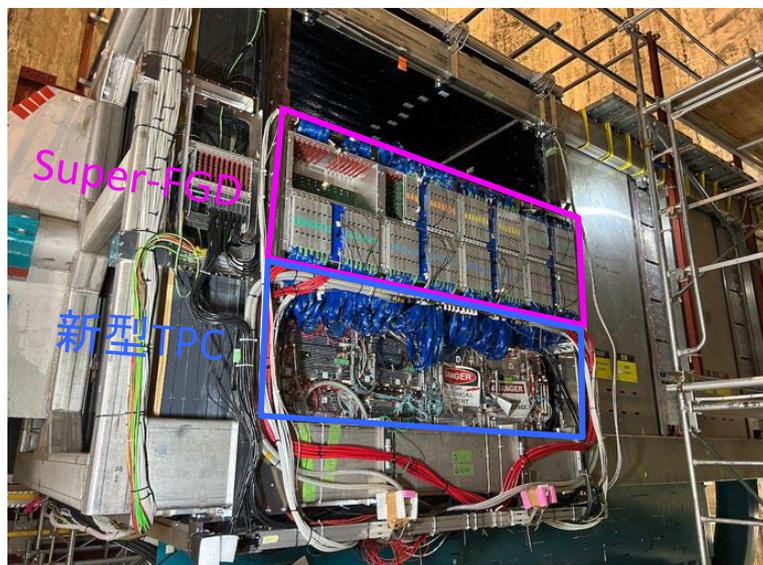


ND280検出器のアップグレード

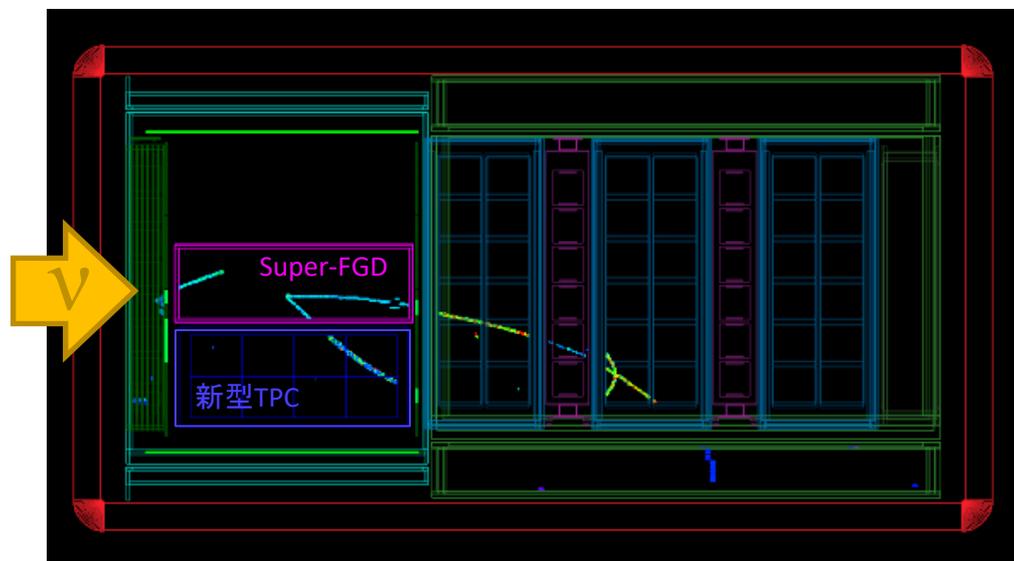
- 検出器の組み立て、試験、性能評価、データ取得システムの開発、データ解析を主導。
- 昨年11月に初ニュートリノ事象を観測。
- 6月から物理データ取得開始。



インストール後の新型前置検出器



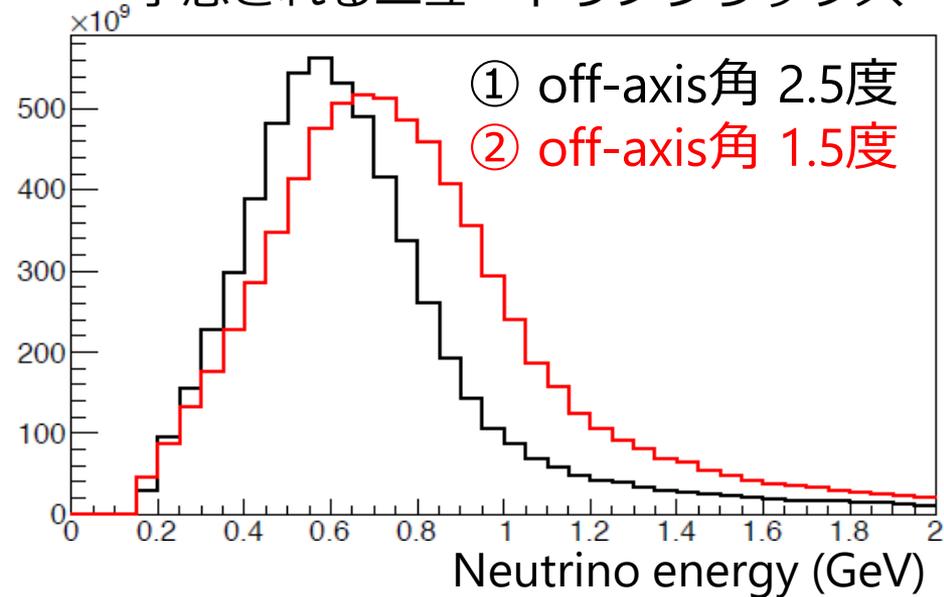
観測されたニュートリノ事象のイベントディスプレイ



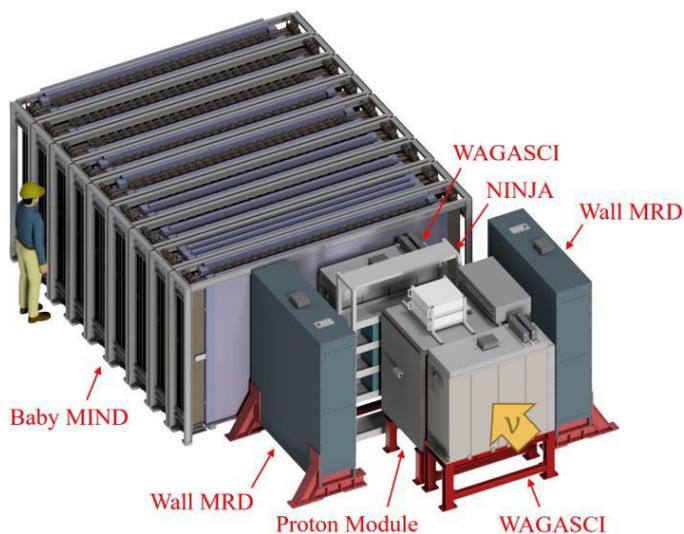
WAGASCI-BabyMIND検出器

- 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新検出器を設置。
- 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。

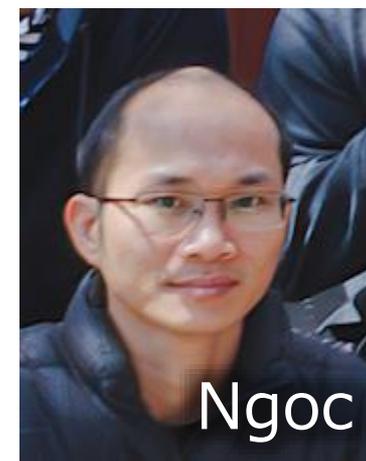
予想されるニュートリノフラックス



検出器の概要図



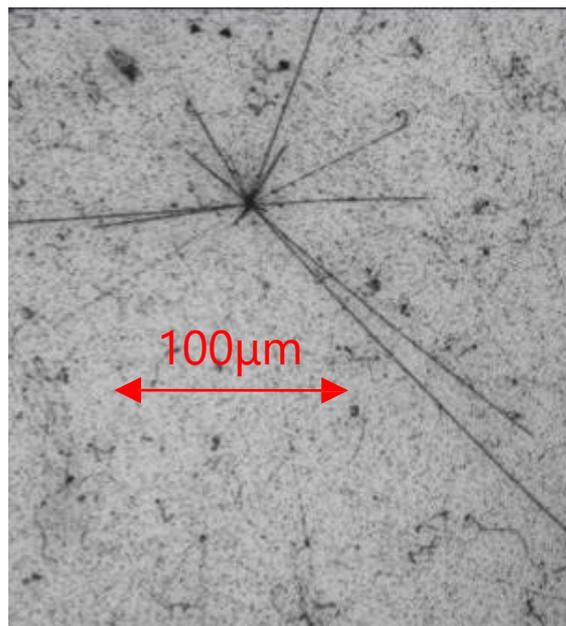
検出器の写真



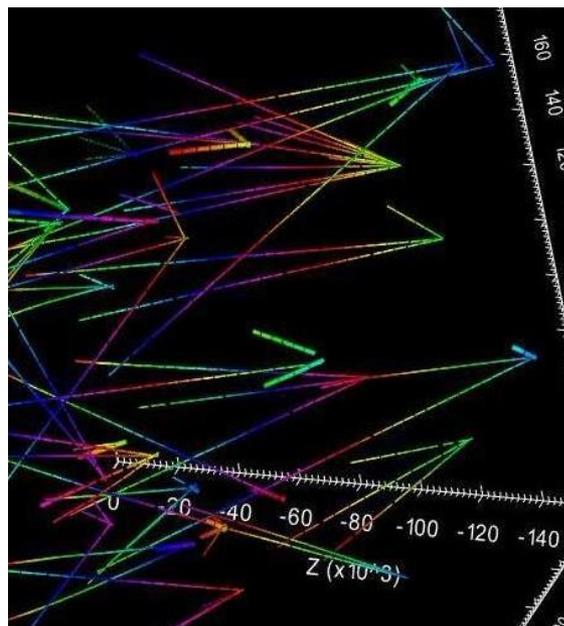
- 究極の位置分解能を持つ原子核乾板を使用したニュートリノ反応測定実験。
→ ニュートリノ反応から出てくる低運動量の陽子も検出可能。
- 原子核乾板に時間情報を与えるための新型シンチレータ検出器を開発。



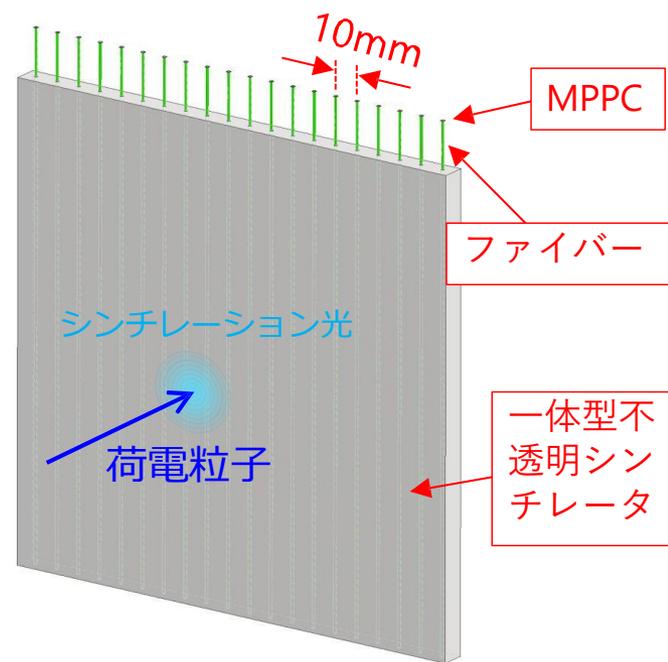
原子核乾板における飛跡



原子核乾板で観測されたニュートリノ事象



開発中の新型シンチレータ検出器



物理解析

- 機械学習を用いた新しいニュートリノ反応断面積解析。(川上)
- Super-FGDを用いた初のニュートリノ反応断面積測定。(Jianrun, 有元)
- T2K実験の加速器ニュートリノとスーパーカミオカンデの大気ニュートリノのデータの統合振動解析。(Jianrun)



川上



Jianrun

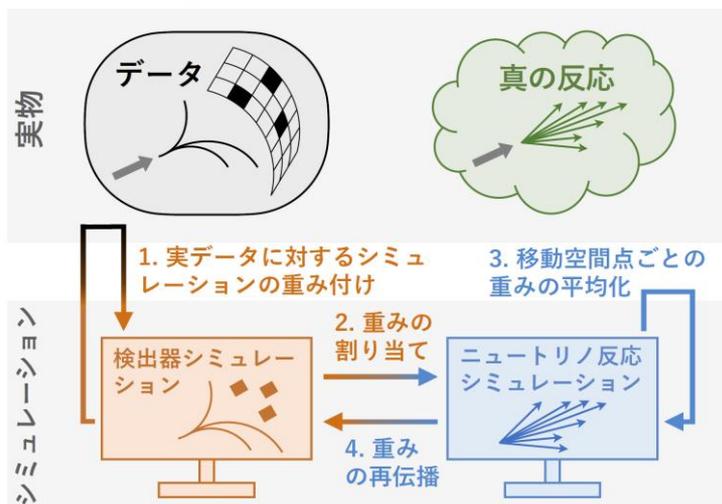


有元

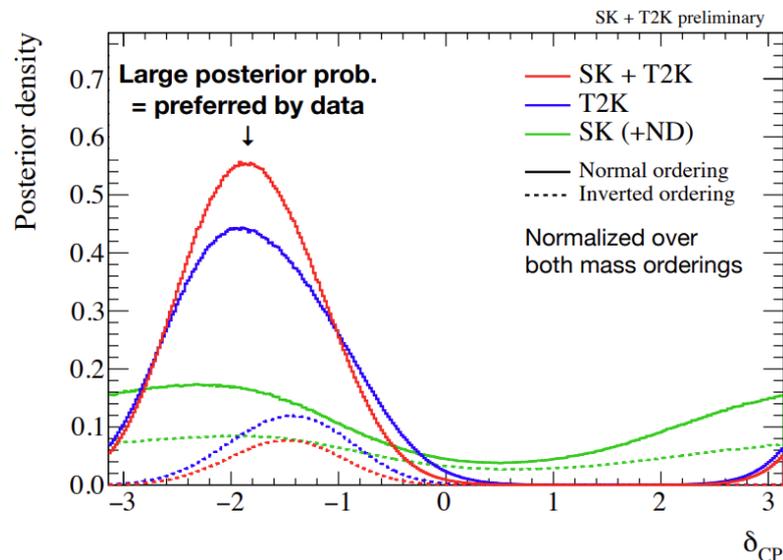
機械学習のニュートリノ反応断面積測定への応用

検出器レベル

粒子レベル



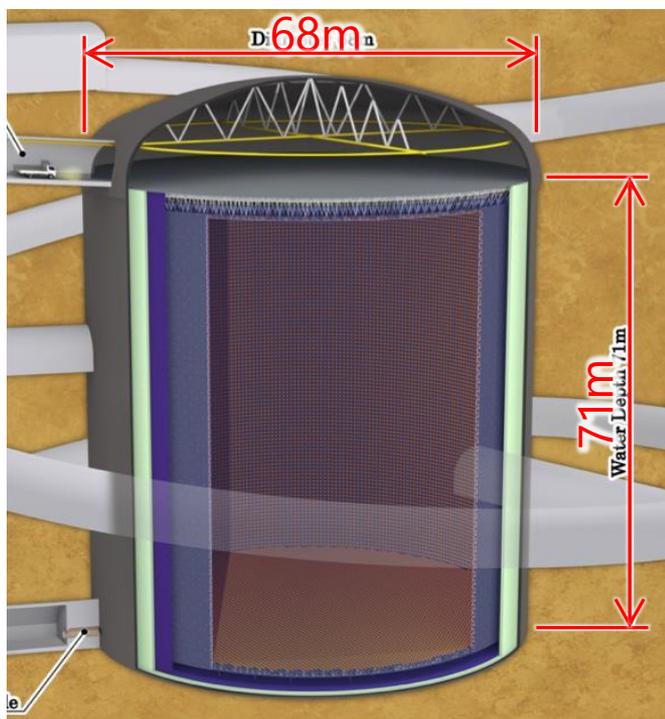
T2K実験とスーパーカミオカンデ実験の統合振動解析



ハイパーカミオカンデ

- 建設中の次世代大型水チェレンコフ検出器。
(有効体積はスーパーカミオカンデの8.4倍。)
- 2027年度に稼働開始予定。
- 統計量が劇的に増えるので、系統誤差の削減がより重要。
- 前置検出器によるさらに高精度の測定が必要。

ハイパーカミオカンデ検出器



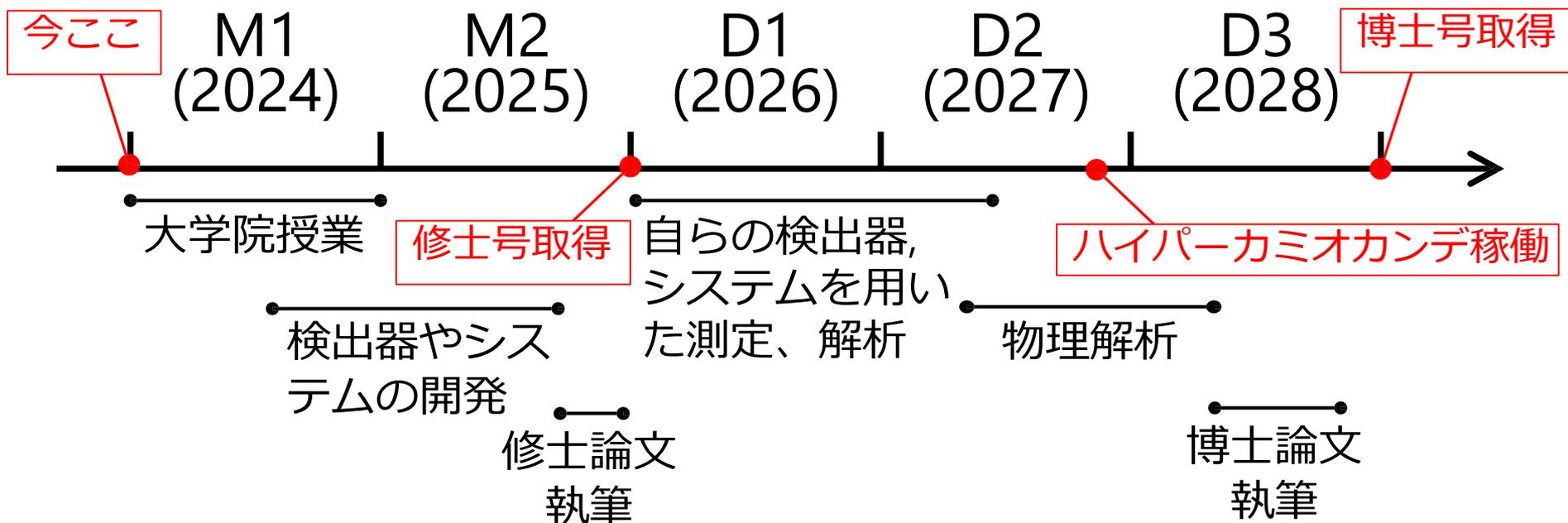
J-PARC加速器



研究の流れ

- まずは修士課程のうちに、物理の勉強と自分の手と頭を動かして装置を設計、開発、製作することを経験する。
→ 次のページから紹介
- 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。

博士号までの道のりの一例

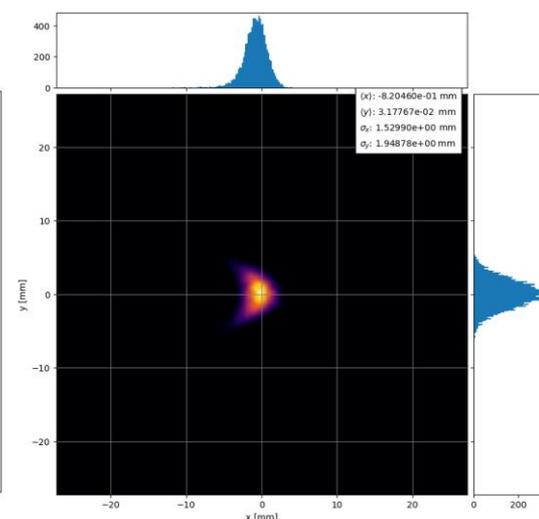
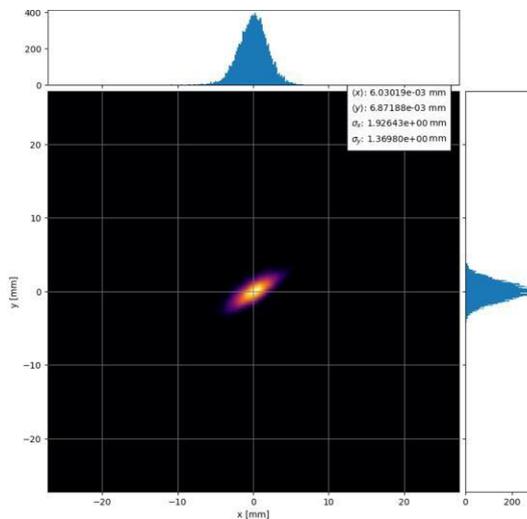


- ビームロスの原因となる陽子ビームの広がりを理解するために16電極モニターを開発。
- 高速化のためにファームウェア、データ取得システムの改良。
- 実際のビーム運転において運用し、データ解析。



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



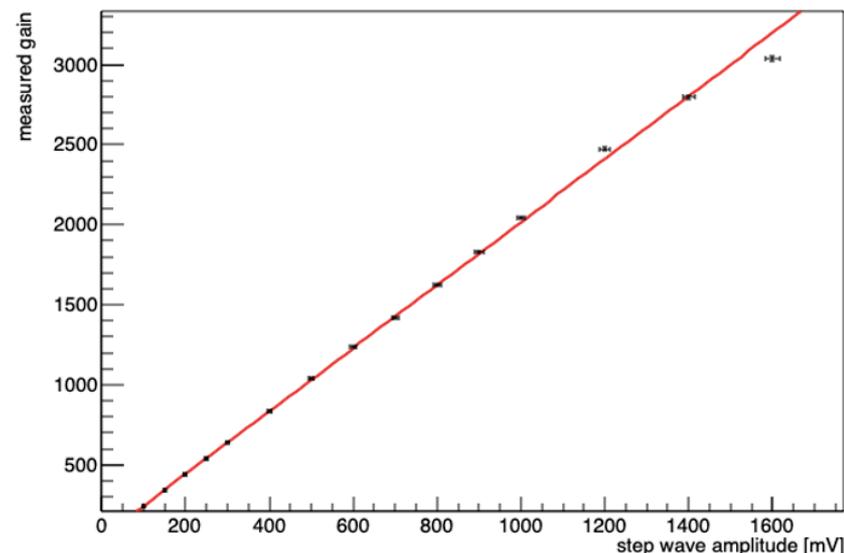
- 前置検出器のエレクトロニクスの経年劣化による故障が心配。
- 多チャンネルMPPC読み出しASICとエレクトロニクスをKEKと開発、性能評価。
- 今年度にASICの大量生産。
- 新しい基板の設計、試作、性能評価。



新しいMPPC読み出しエレクトロニクス



応答の線形性の評価



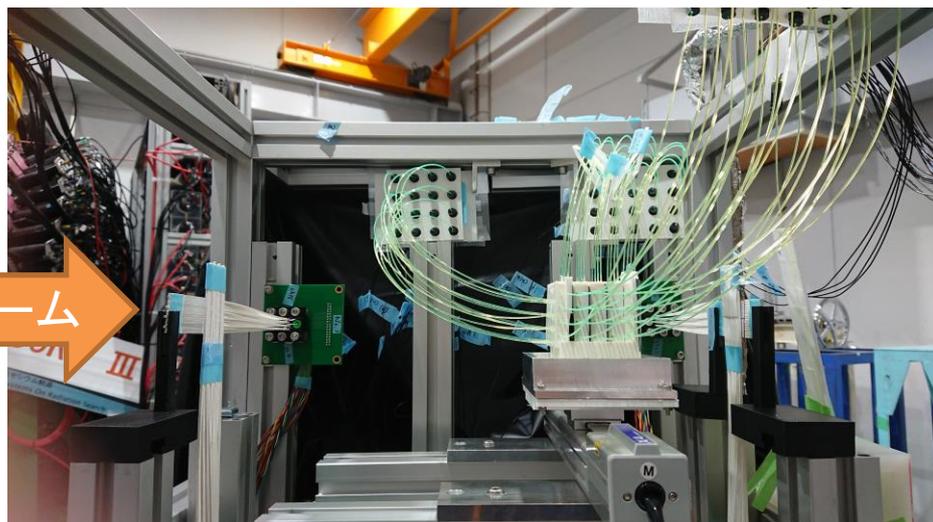
水標的のSuper-FGD

- スーパーカミオカンデは水標的だが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。
- 光量の向上が必要。
- 2000ch程度の試作機の製作を計画。



自作した水ベースの
液体シンチレータ

東北大学における陽電子ビーム試験



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T2K実験の中で非常に重要でユニークな研究をしている。
- 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。
- T2K実験は新たなフェーズを迎えていて若い力が必要。
- 最先端実験の最前線で一緒に物理を楽しみましょう。
- 毎週、木曜日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。