

# T2K実験 (東海編)

木河達也

2023年4月26日

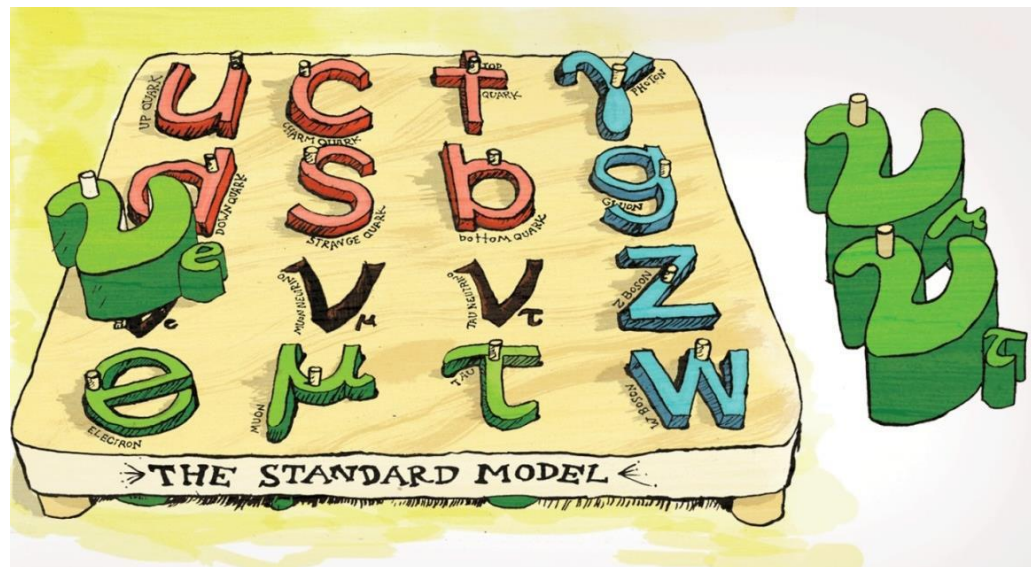
高エネルギー物理学研究室実験紹介

- 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 $\theta_{13}$ が0でない (Day Bay, RENO, DC, T2K)

- 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  
(先週、鈴木君が紹介)

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( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )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。

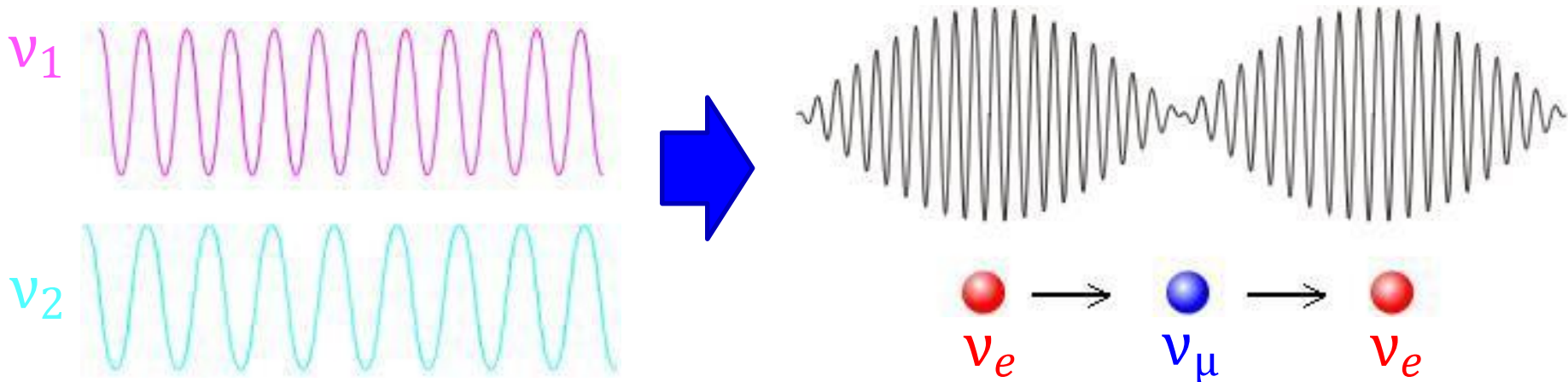
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}}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

フレーバー  
固有状態

牧・中川・坂田行列

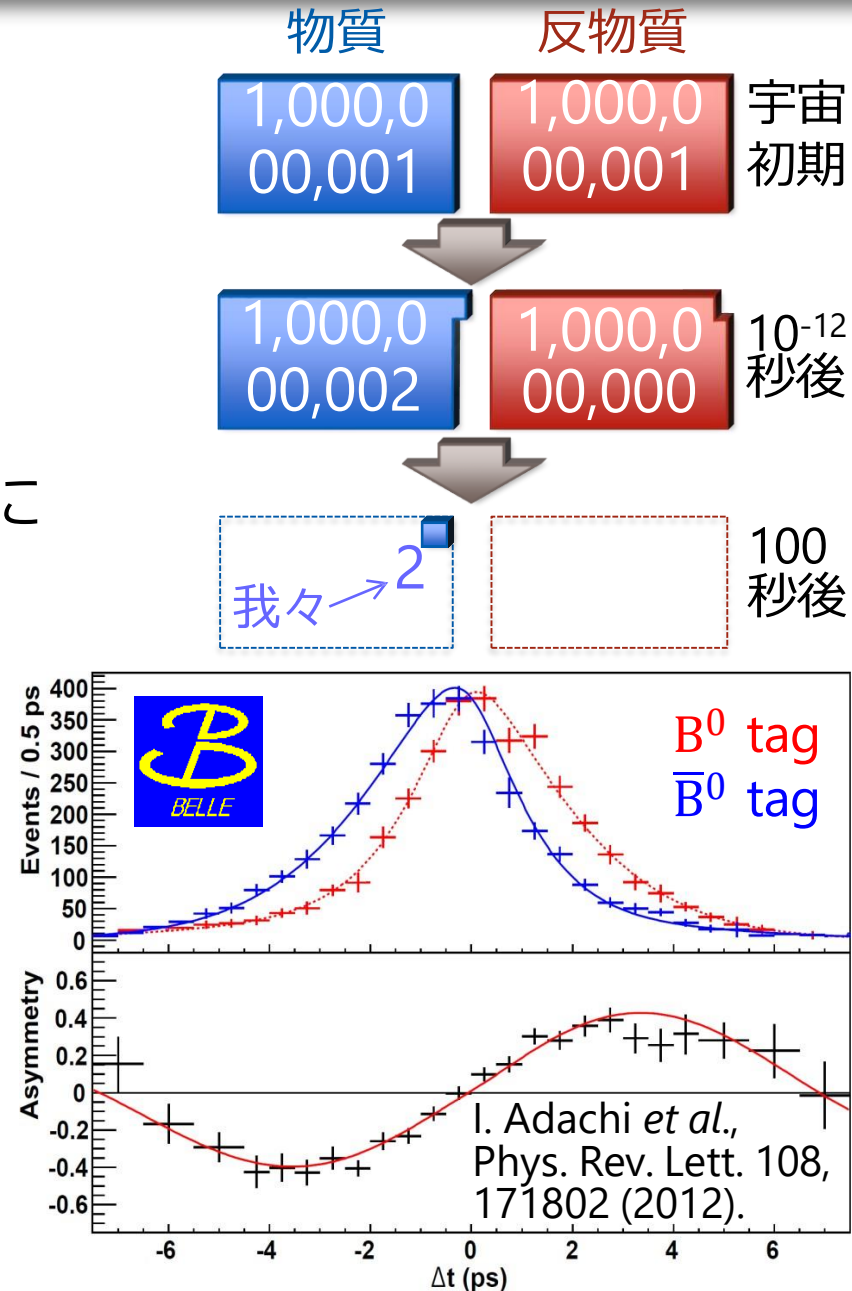
質量  
固有状態

- 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

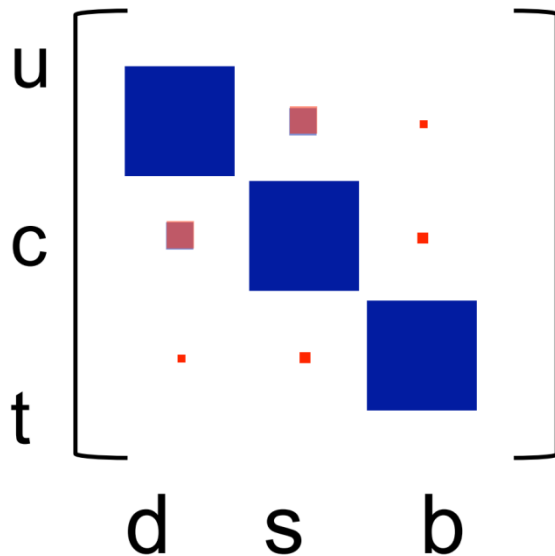
- 物質優勢宇宙を説明するサハロフ3条件。
  - バリオン数の破れ。
  - 非熱平衡状態。
  - C, CP対称性の破れ。
- クローニン、フィッチが $K^0$ 崩壊におけるCP対称性の破れを発見。
- 小林、益川がCP対称性の破れを理論的に説明。
- $B^0$ 崩壊により理論を検証。
- しかし物質優勢宇宙を説明するにはCP対称性の破れは小さすぎる。
- 新たなCP対称性の破れが必要。  
→ ニュートリノが原因?



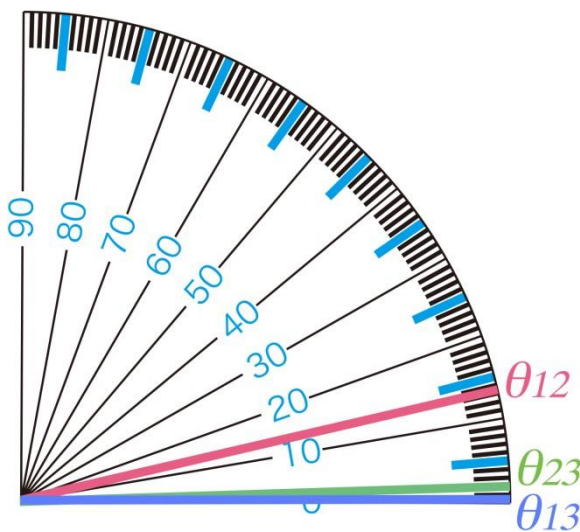
# クォークとニュートリノの混合行列

- 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 $\theta_{23}$ )

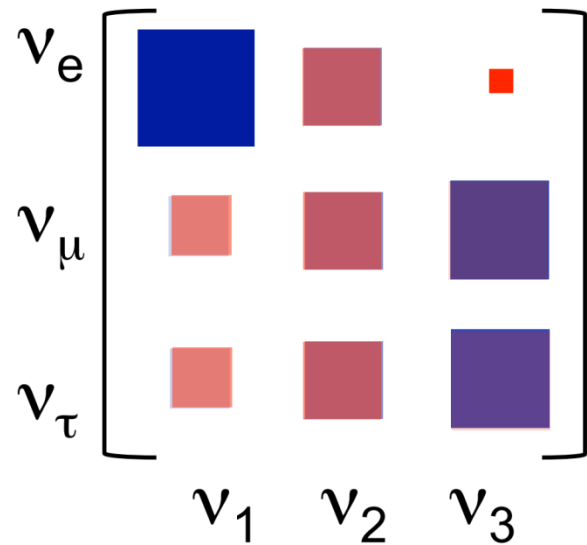
クォークの混合行列  
(小林・益川行列)



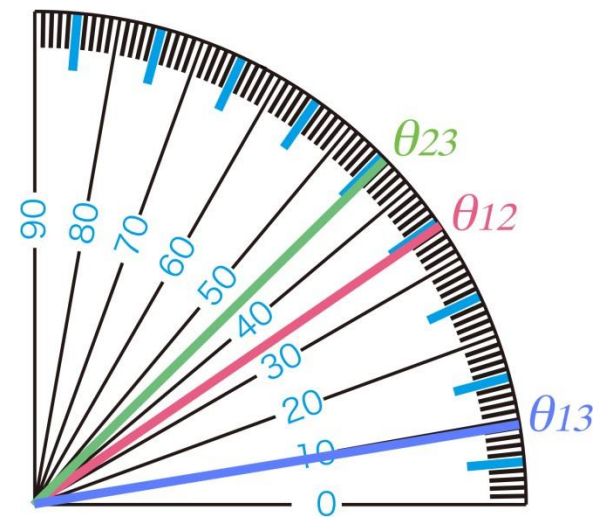
クォークの混合角



ニュートリノの混合行列  
(牧・中川・坂田行列)

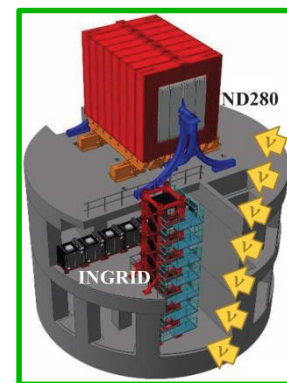


ニュートリノの混合角

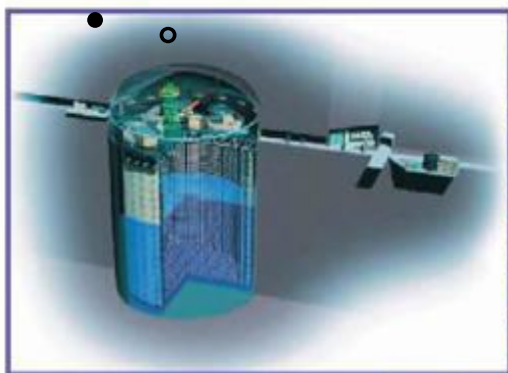


- J-PARCで $\nu_\mu$ または $\bar{\nu}_\mu$ ビームを生成。
- 直後の前置検出器で振動前のニュートリノの精密測定。
- 295km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノ観測。
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率の違いからCP対称性の破れを探索。
- $\nu_\mu$ や $\bar{\nu}_\mu$ の消失確率から混合角 $\theta_{23}$ を精密測定。

Near detector



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



Super-Kamiokande  
(ICRR, Univ. Tokyo)

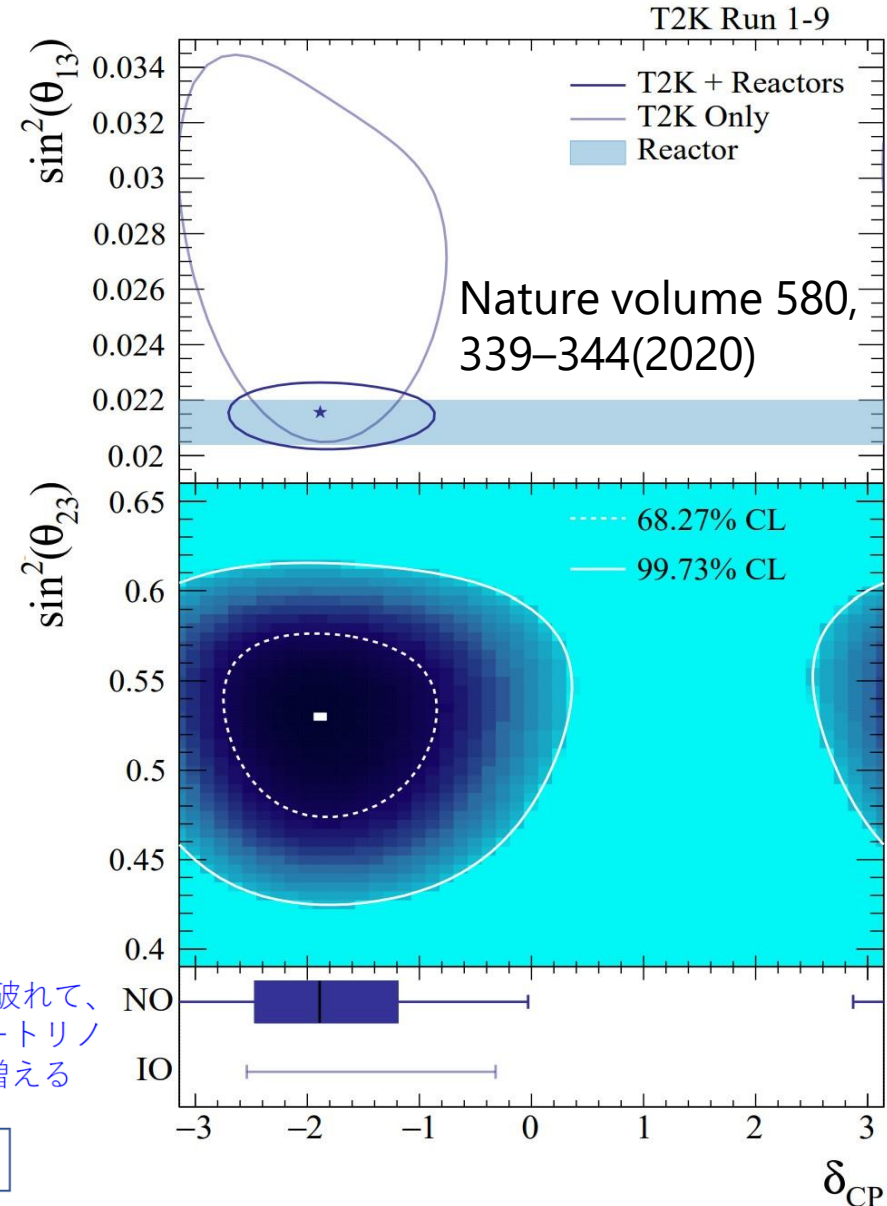




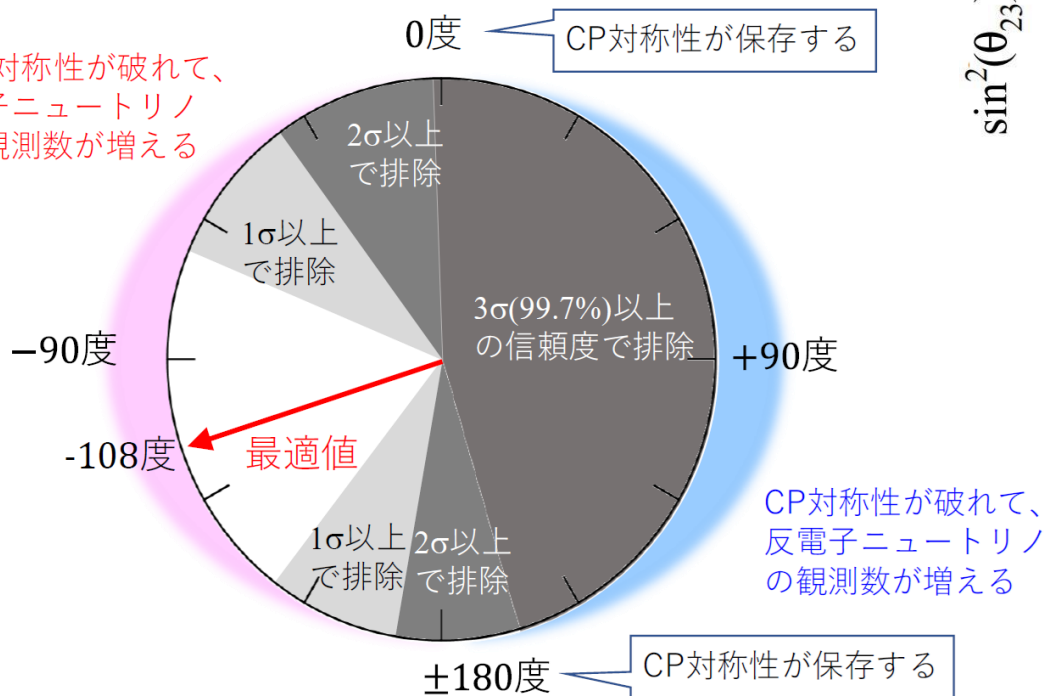
# T2K実験の物理結果

- CP対称性の破れを表す位相に $3\sigma$ (99.7%)の制限。
- CP対称性の破れを $2\sigma$ で示唆。
- 混合角 $\theta_{23}$ を世界最高精度で測定。(45度と無矛盾)
- Nature誌に掲載。

## T2K実験による振動パラメータの信頼領域



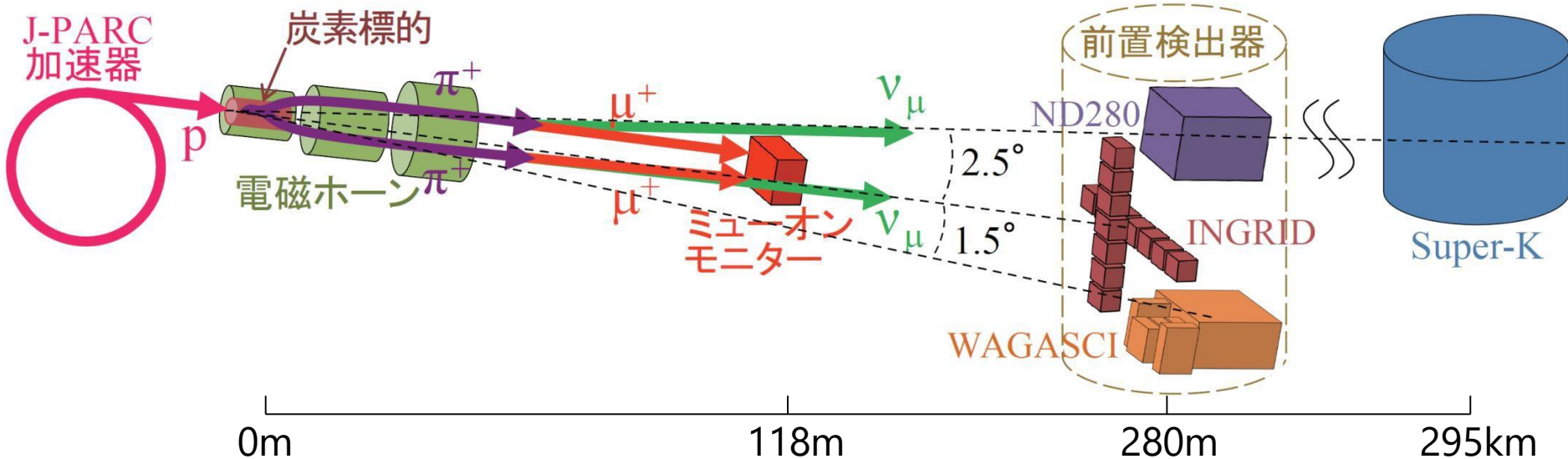
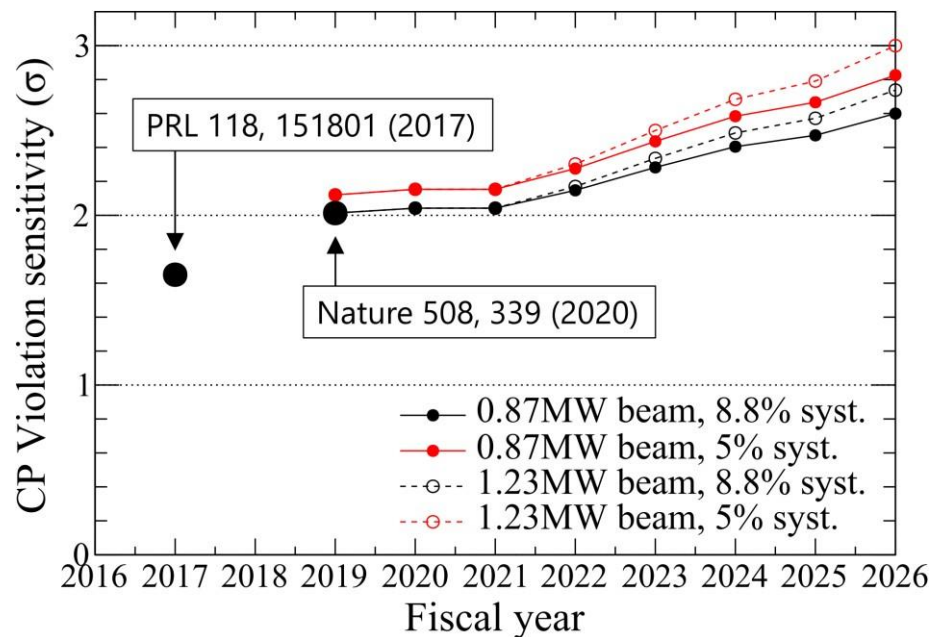
CP対称性が破れて、  
電子ニュートリノ  
の観測数が増える



# 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。**

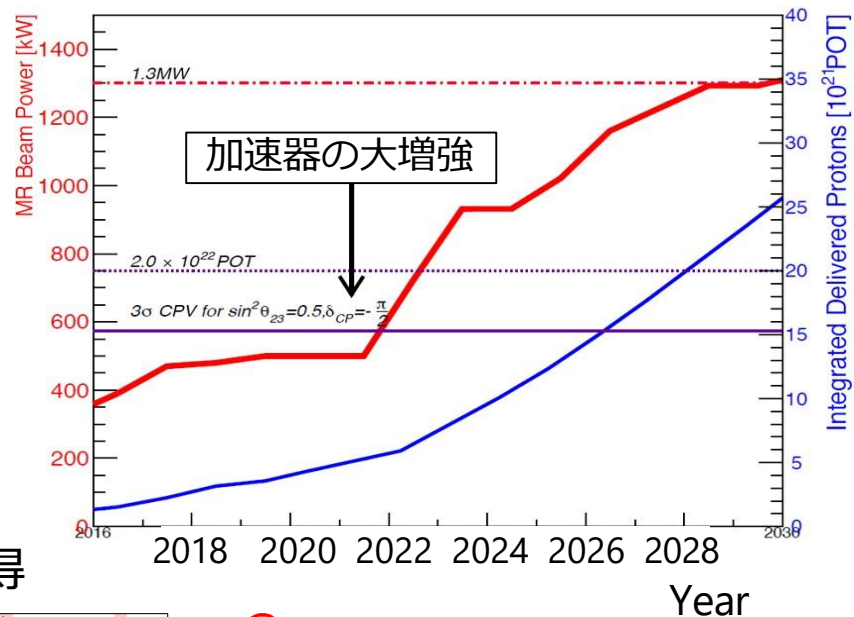
## ニュートリノCP対称性破れの探索感度



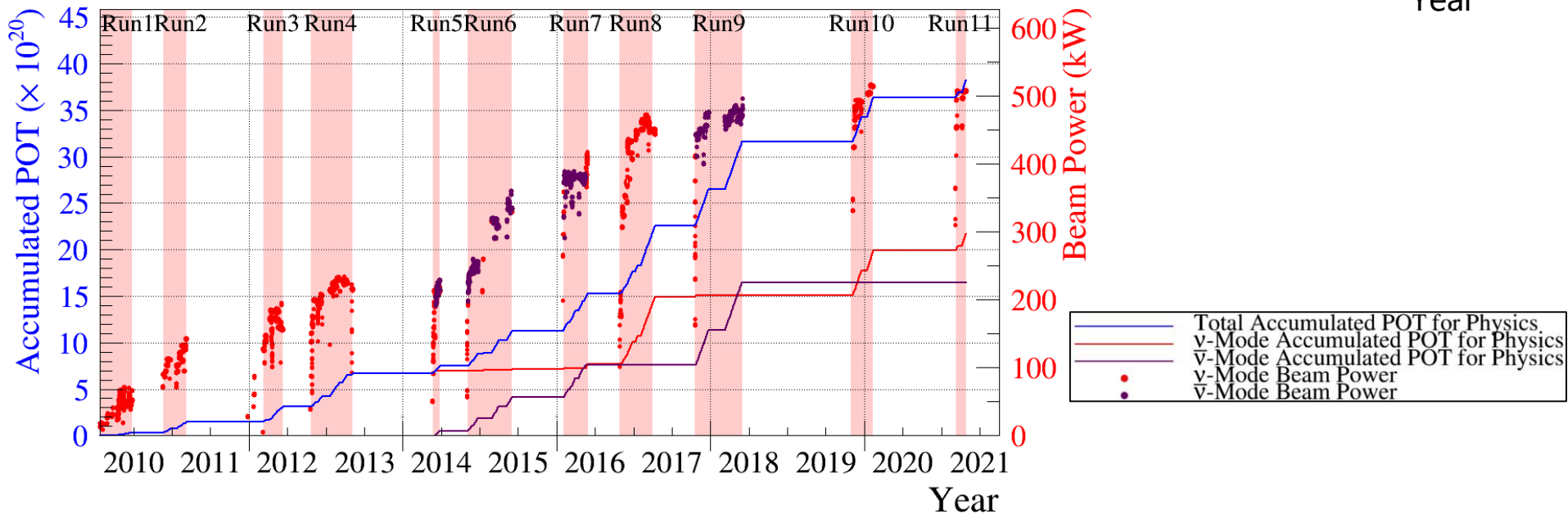
# J-PARC加速器の増強

- ビーム強度を徐々に上げてきた。
- 昨年度に加速器の電源を大増強。
- ビームの増強には加速器中のビームロスの削減が不可欠。

## 今後のビーム増強の計画



## T2K実験のこれまでのデータ取得



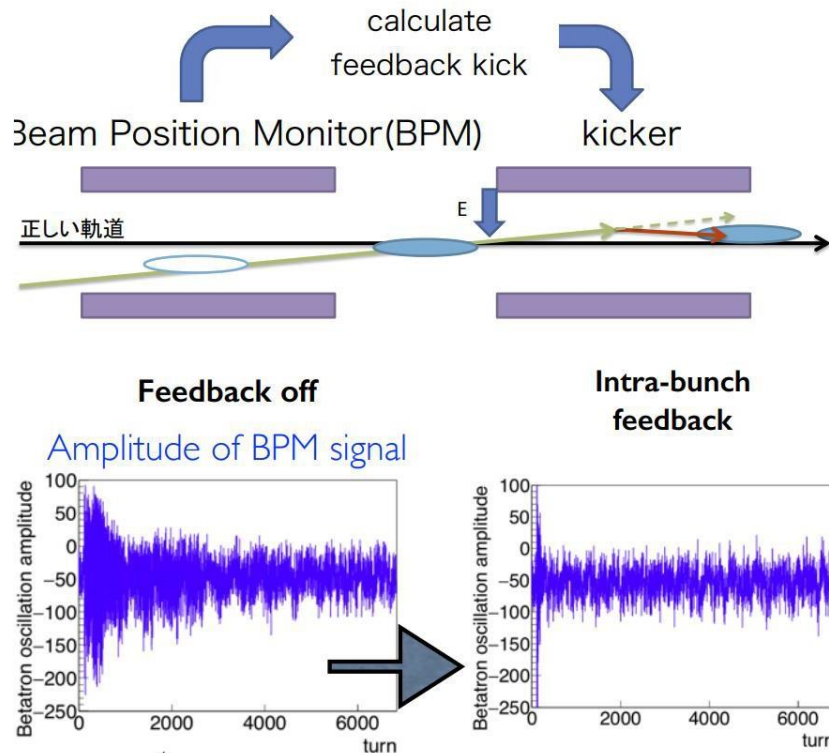
# フィードバックシステム

- ビームの振動(位置のずれ)を検知し、周回ごとに補正をかけてビームロスを削減。
- システムを改良し、性能評価、運用。

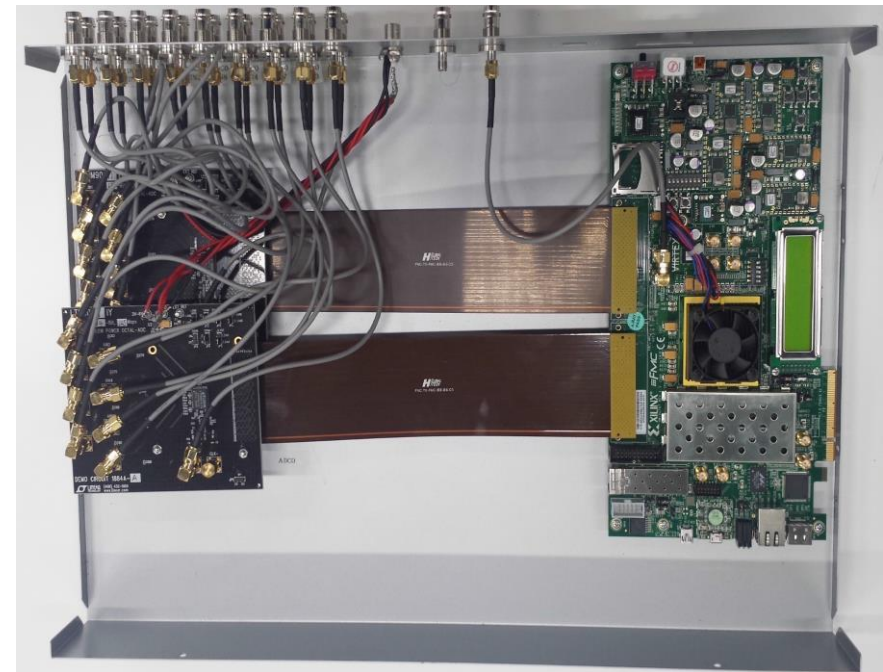


吉村

## フィードバックシステムの概念図

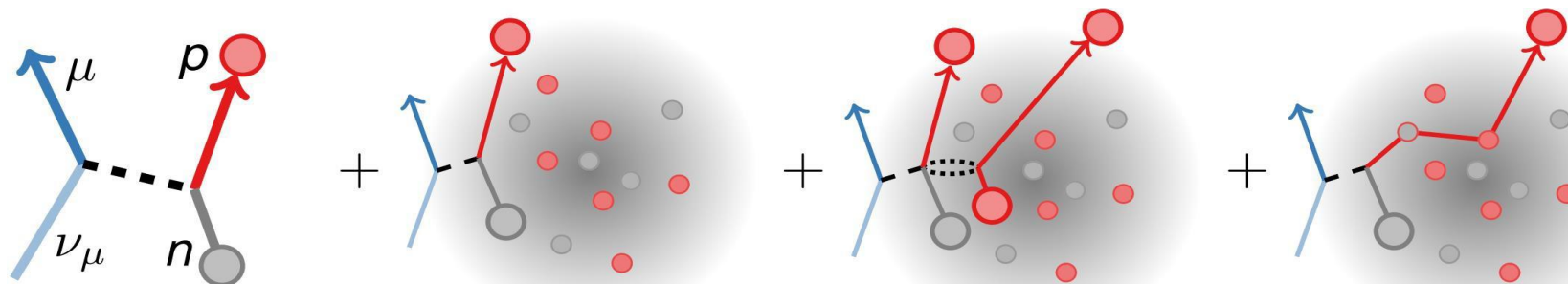


## フィードバックシステム用回路



# 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。



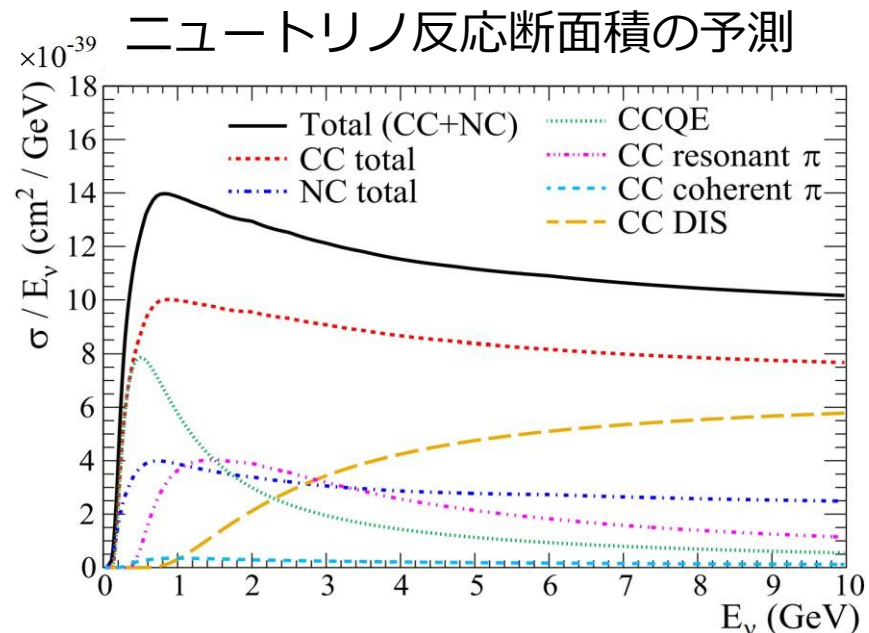
自由核子との散乱

核子の初期状態

核子-核子相互作用

ハドロンの原子核内反応

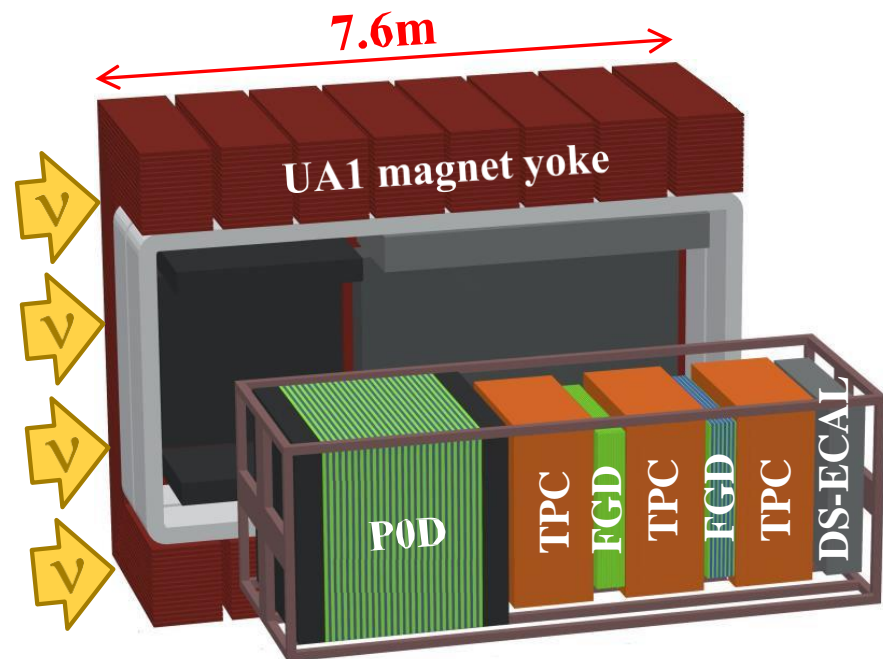
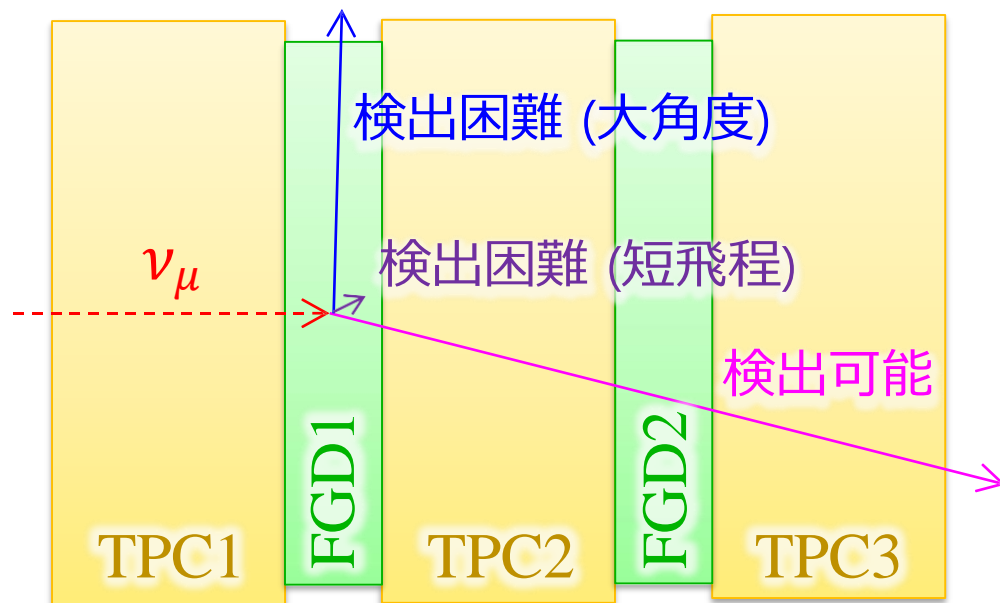
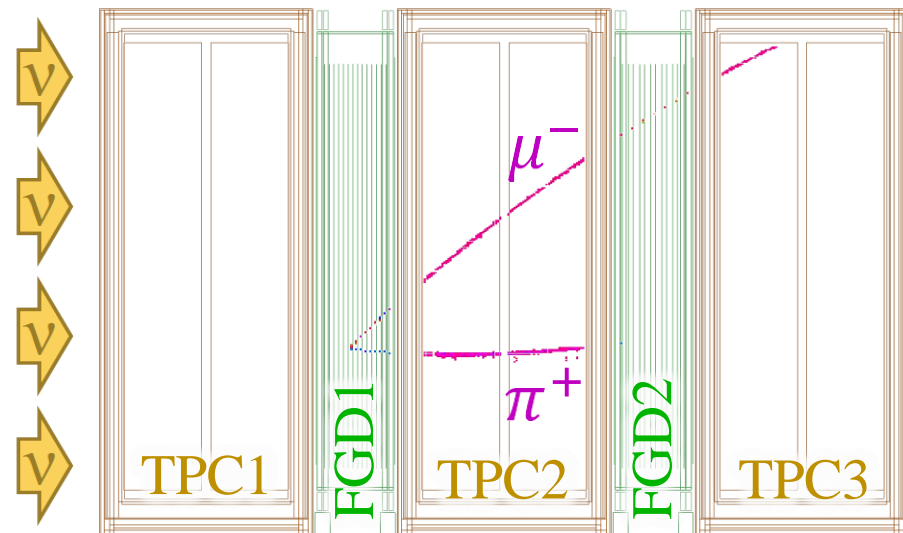
- ニュートリノ反応はエネルギーに依存するが、ニュートリノビームのエネルギー幅は広く、エネルギーを特定不可。  
→ 様々なエネルギー、できるだけエネルギー幅の狭いニュートリノビームによる測定。



# ND280検出器

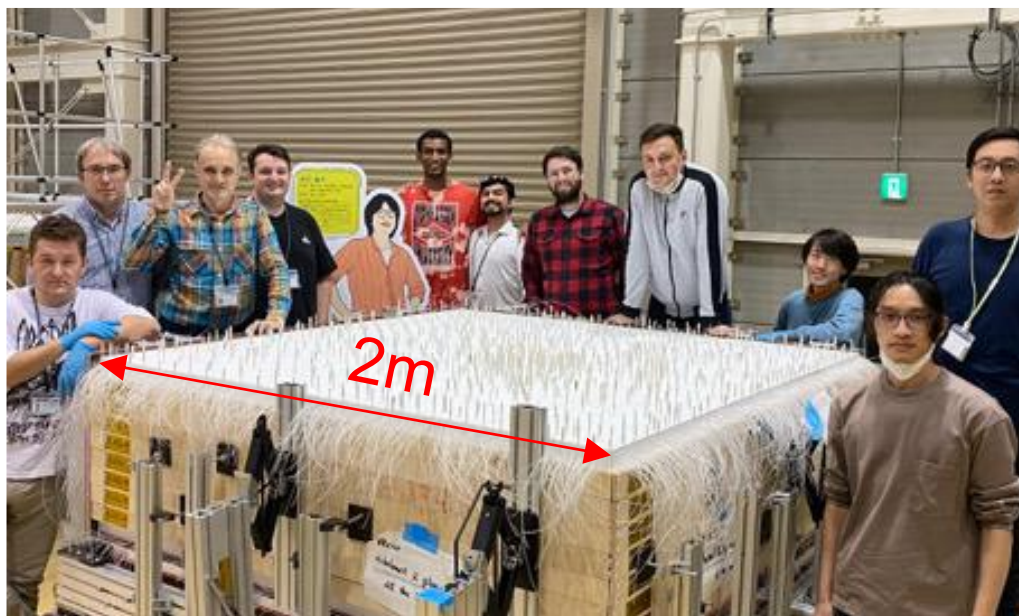
- スーパーカミオカンデ方向に向かう振動前のニュートリノを精密測定。
- 棒状シンチレータを並べた飛跡検出器(FGD)とTPC。
- 大角度の飛跡や短い飛跡の検出効率の低さが課題。

ND280におけるニュートリノ事象

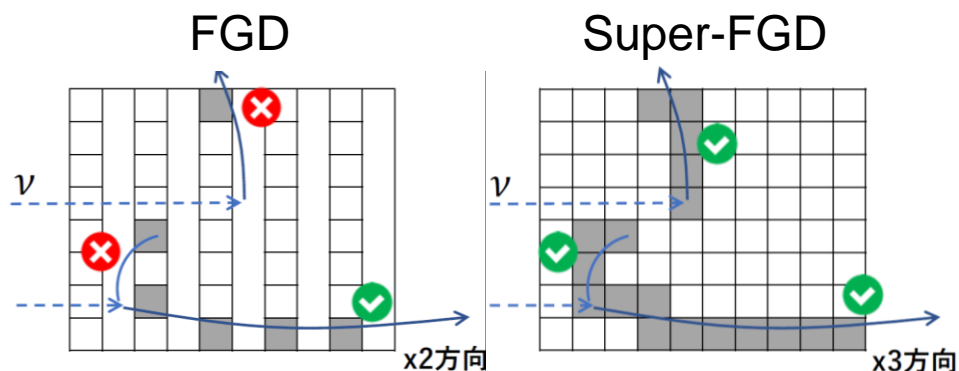


- $1 \times 1 \times 1 \text{cm}^3$ の立方体のシンチレータを約200万個並べて3方向から波長変換ファイバーで読み出す新しい飛跡検出器 (Super-FGD)。  
→ 全方向への粒子に感度。  
→ 短い飛跡も検出可能。

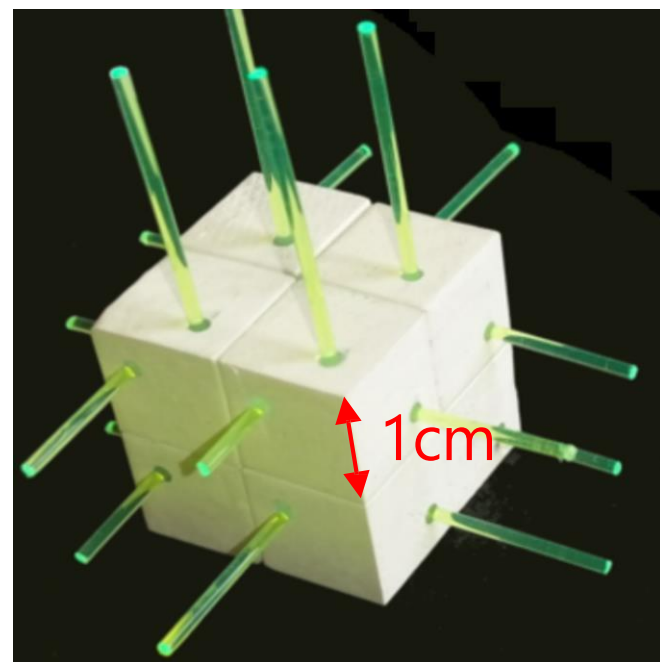
組み立て中のSuper-FGD検出器



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

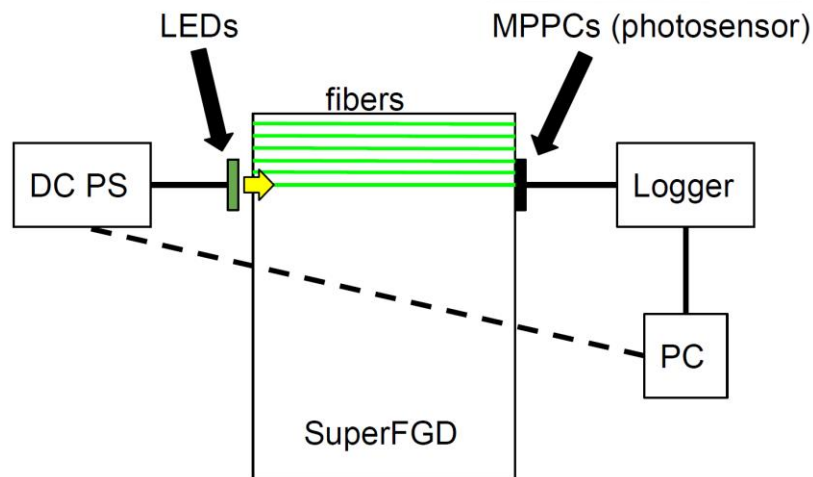
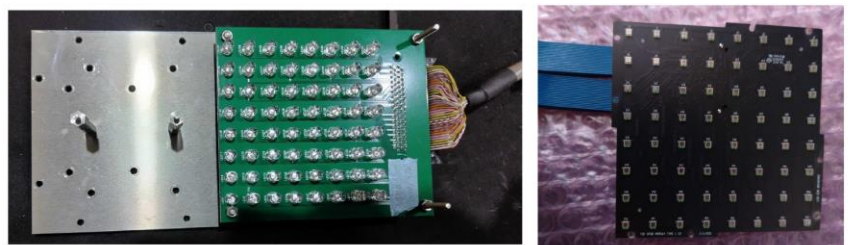


- ファイバーの品質は検出器の性能に直結。
- 組立中に並行してファイバーを迅速に検査できるシステムを開発中。
- 光センサーへの電圧をあえて下げて低ゲインモードで動作させることで遮光なしに試験。

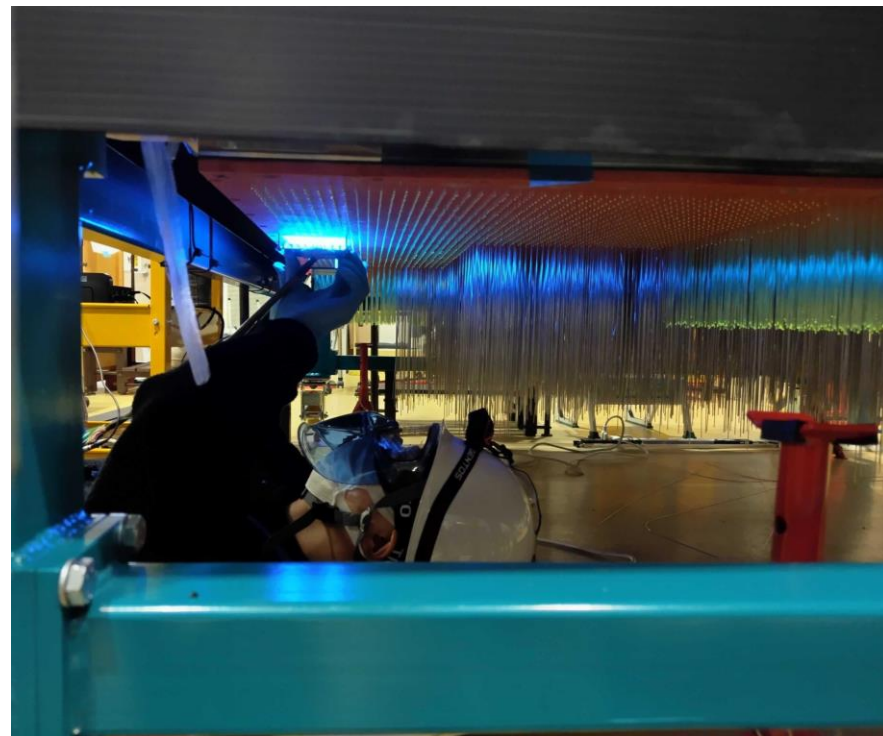


川上

開発したファイバー検査システム



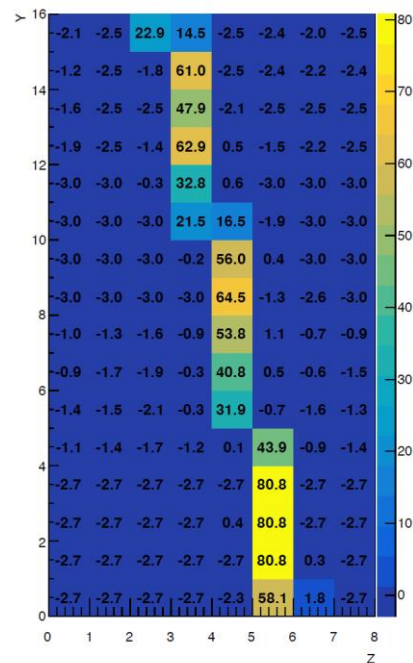
検査システムを使った組み立て時の試験



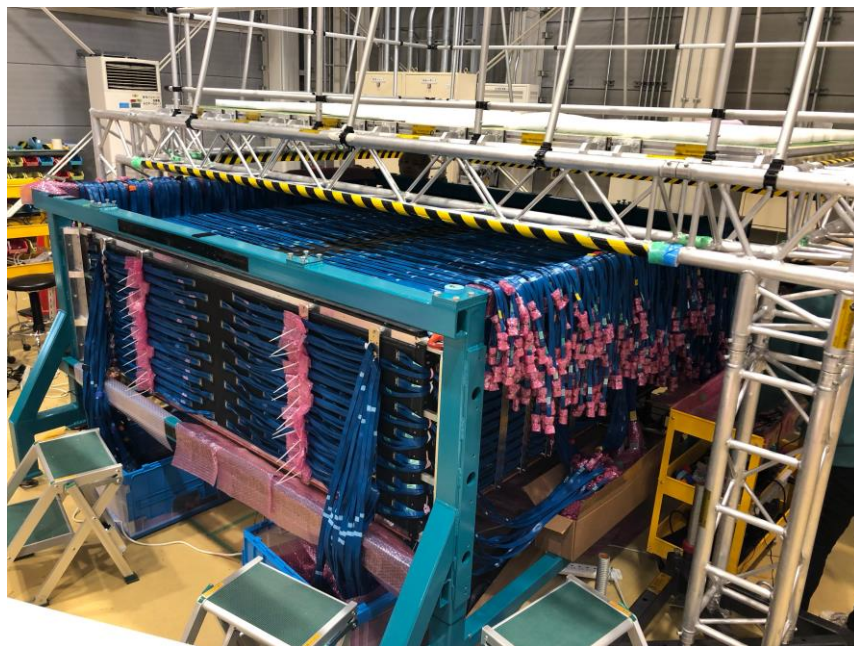


- 組み立て時に5万チャンネルの遮光とケーブル接続を同時に検査できるシステムを開発し、建設時に運用。
- 初の宇宙線イベントを観測。

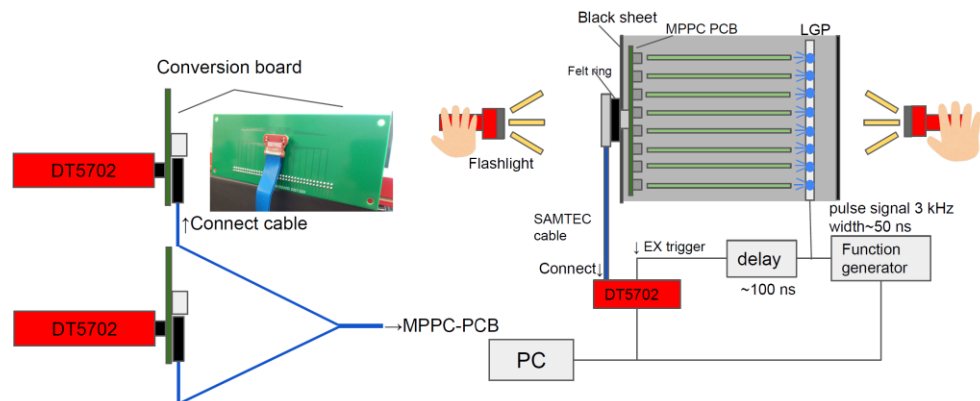
## 宇宙線イベント



## ケーブル接続後のSuper-FGD



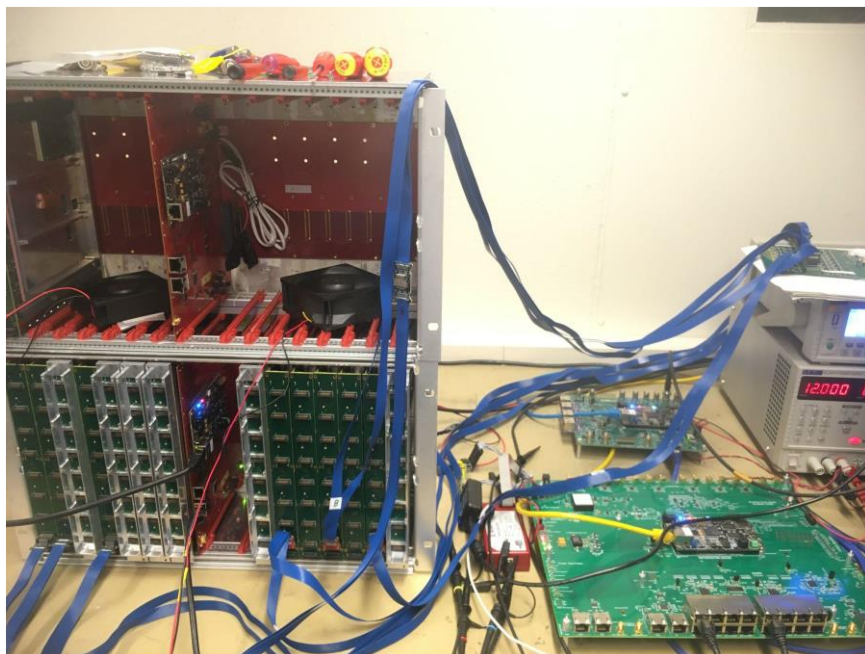
## 開発した接続・遮光検査システム



- 5万チャンネルの読み出しができ、既存のND280検出器と統合できるデータ取得システムを開発。
- ジュネーブ大学で実際の実機のエレクトロニクスを用いて評価試験。
- J-PARCでの統合試験が進行中。



ジュネーブ大学での評価試験



ウェブブラウザからのデータ取得の制御

### Run Status

Run 10 Stopped	Start: Fri Jan 20 13:20:23 2023	Stop: Fri Jan 20 13:20:35 2023
Start	Alarms: On	runStatusSequencer
		Data dir: /home/hep/online/data

1675611968 16:46:08.709 2023/02/05 [Analyzer,LOG] Program Analyzer on host hep-NUC11PAHi7 started

### Equipment

Equipment +	Status	Events	Events[s]	Data[MB/s]
Trigger	Frontend stopped	1090	0.0	0.000
Periodic	Frontend stopped	12	0.0	0.000
Scaler	Disabled		0.0	0.000

### Logging Channels

Channel	Events	MB written	Compr.	Disk Level
#0: run00010.mid.lz4	1104	0.061	22.0%	22.4%

Lazy Label	Progress	File Name	# Files	Total
------------	----------	-----------	---------	-------

### Clients

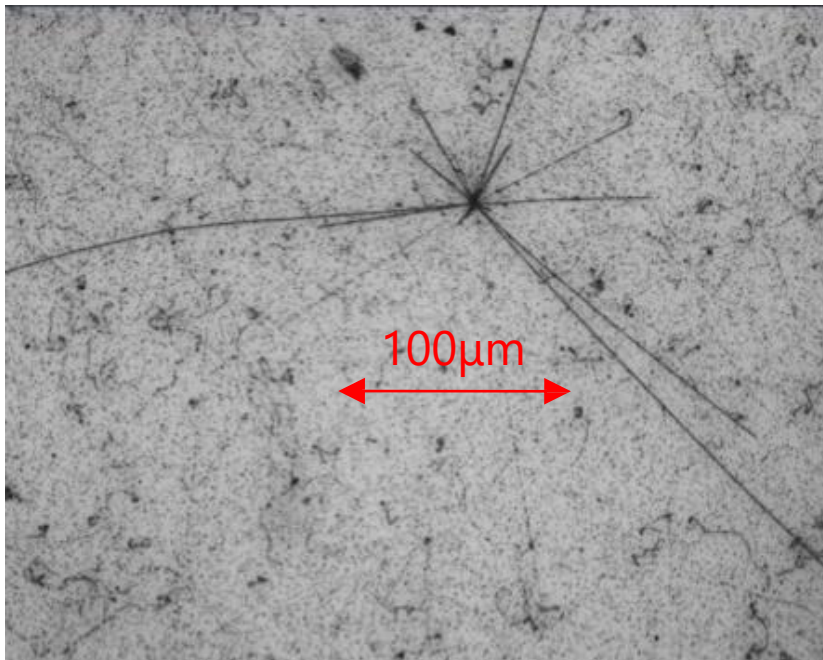
mhttpd [hep-NUC11PAHi7]	mserver [hep-NUC11PAHi7]	Analyzer [hep-NUC11PAHi7]
Logger [hep-NUC11PAHi7]		

# NINJA実験

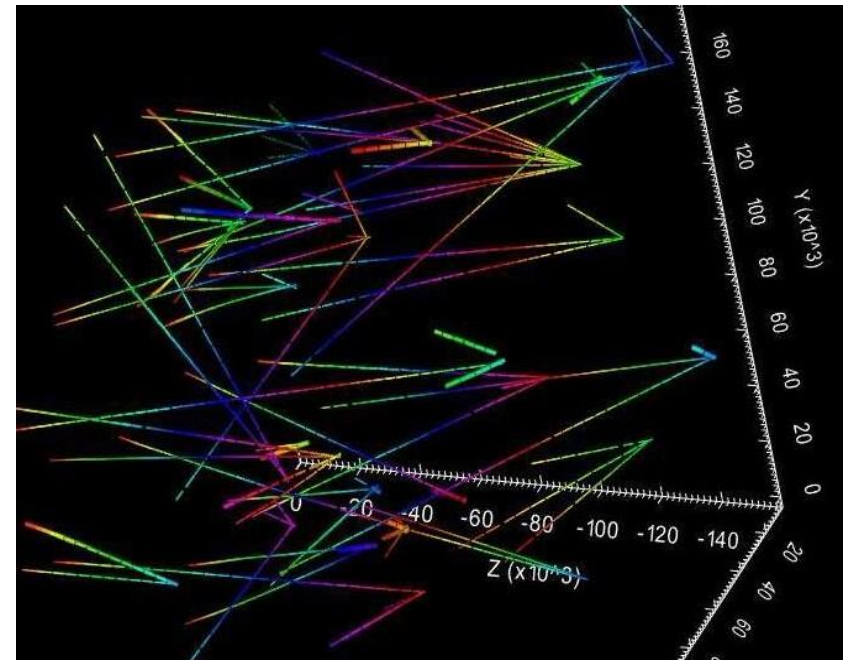
- 究極の位置分解能を持つ原子核乾板を使用したニュートリノ反応測定実験。  
→ ニュートリノ反応から出てくる低運動量の陽子も検出可能。



原子核乾板における飛跡



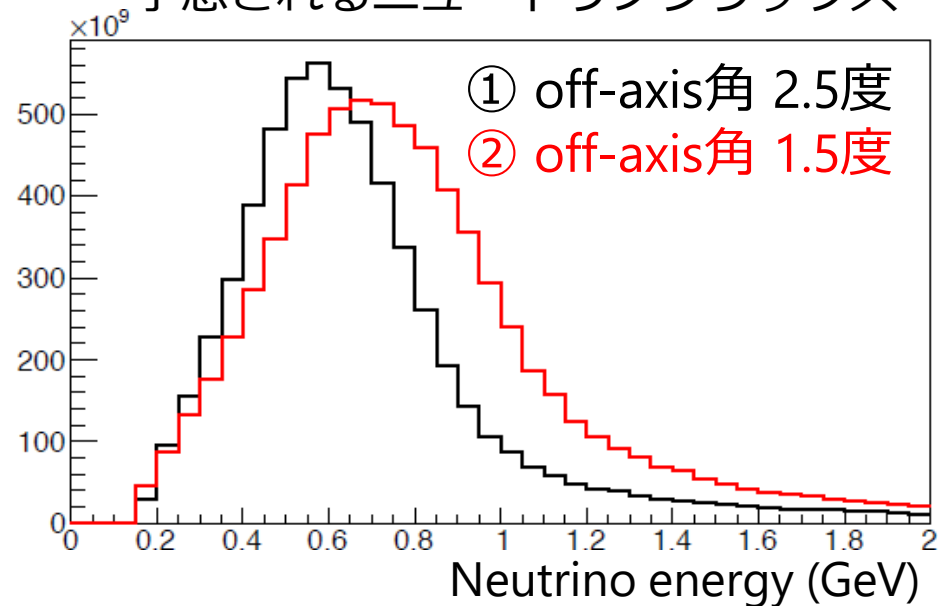
原子核乾板で観測されたニュートリノ事象



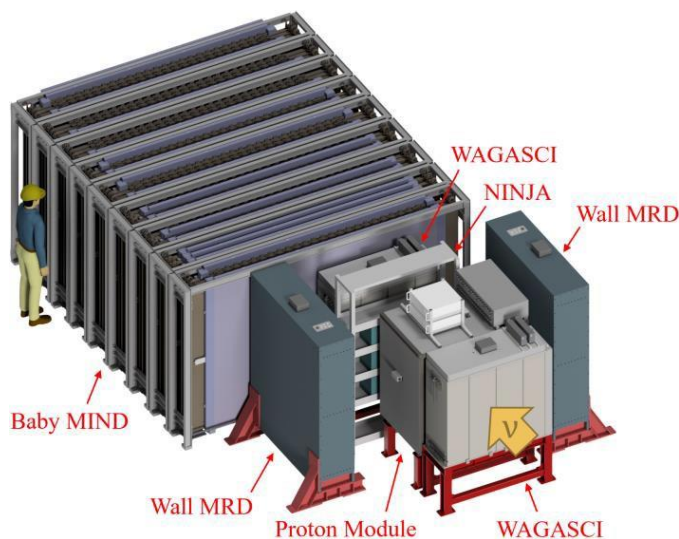
# WAGASCI-BabyMIND検出器

- 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とは異なった角度に新しい検出器を設置。
- 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



設置完了後の写真

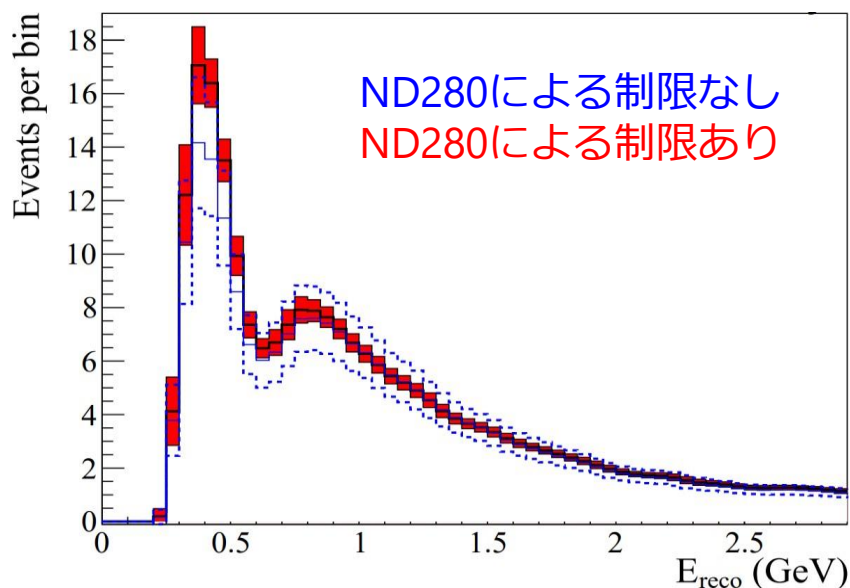


# ニュートリノ振動解析

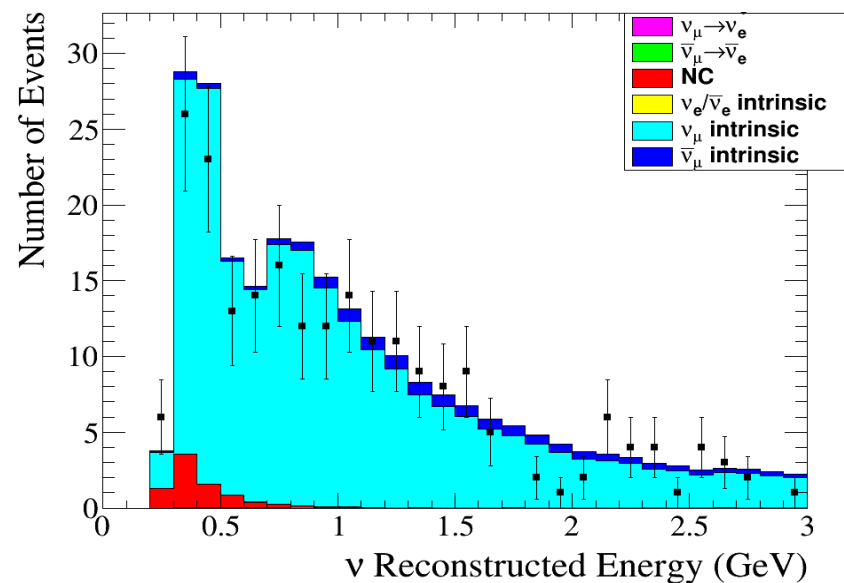
- ND280の測定をもとにスーパーカミオカンデのニュートリノイベントを予測。
- 実際の観測はニュートリノ振動の効果で予測とは異なる。
- 観測と予測が合うように、振動パラメータを決定。



Super-Kにおける予測

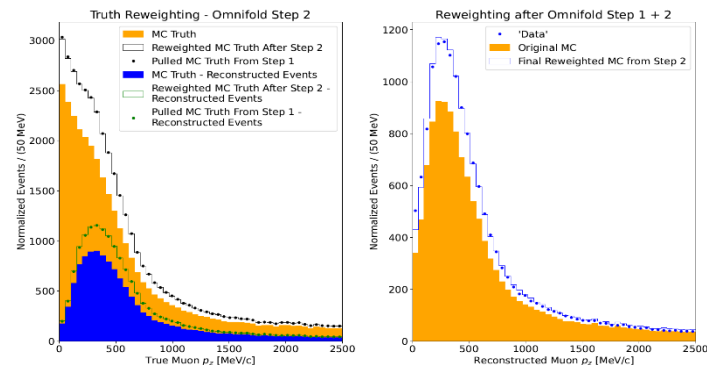
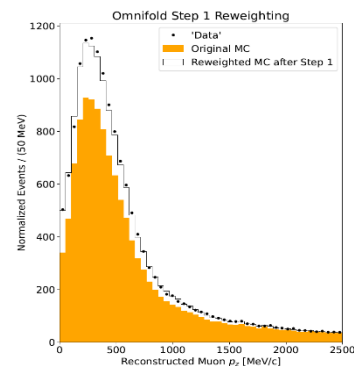
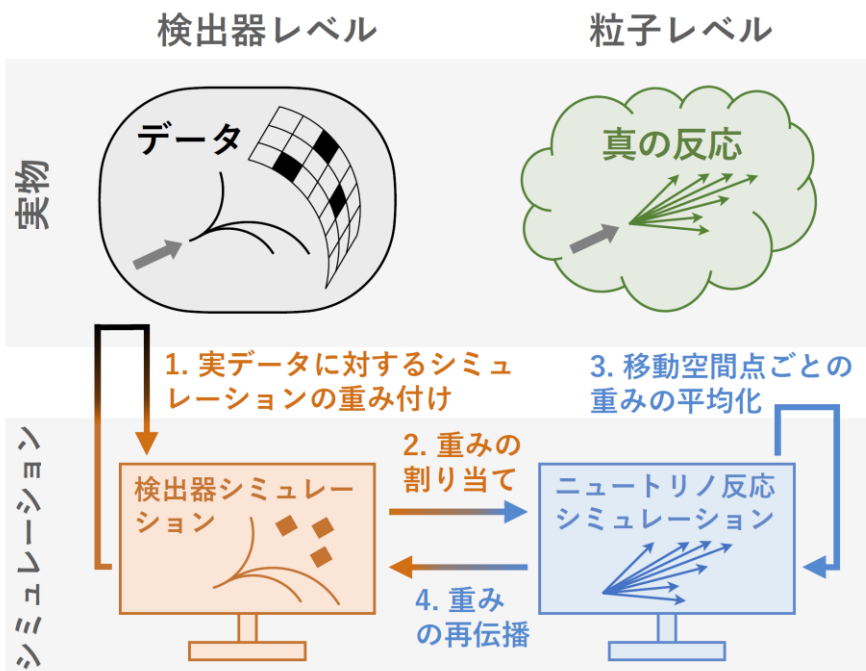


Super-Kにデータのフィット



# 解析への機械学習の導入

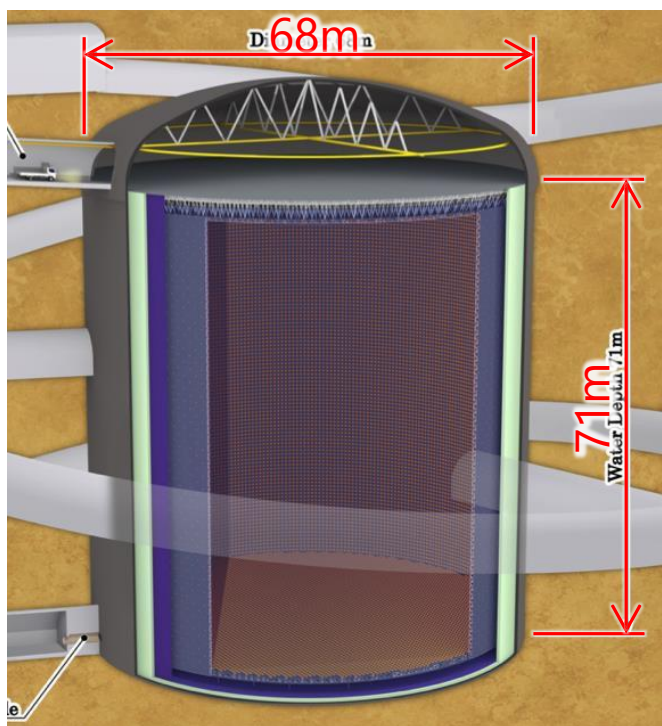
- Super-FGDのイベントの正確な再構成な多数の粒子の運動学的情報を正確に扱うのは既存の解析方法では困難。
- 米国のローレンスバークレイ研究所でデータサイエンティストと共同で機械学習を用いた解析を開発、評価。



# 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

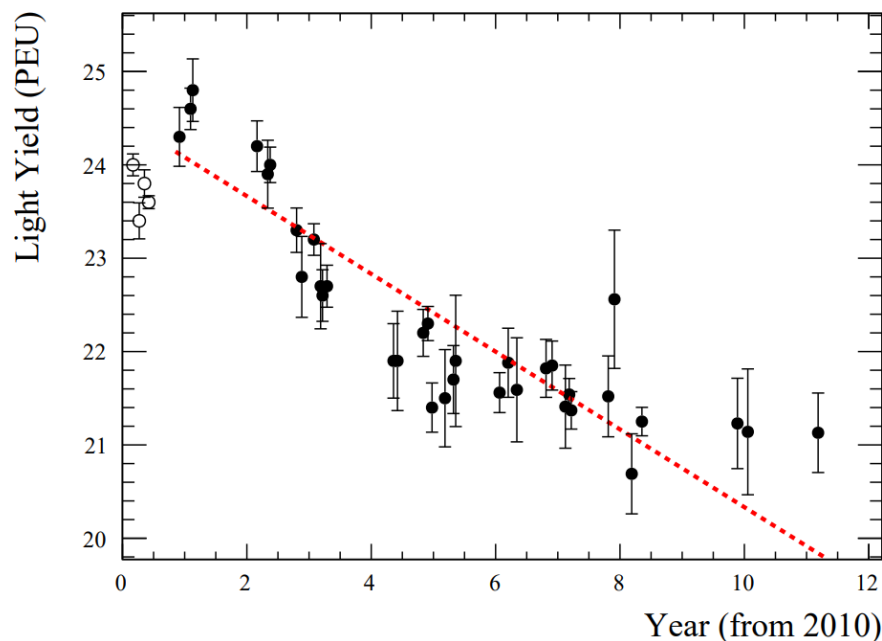


# 経年劣化の影響の評価

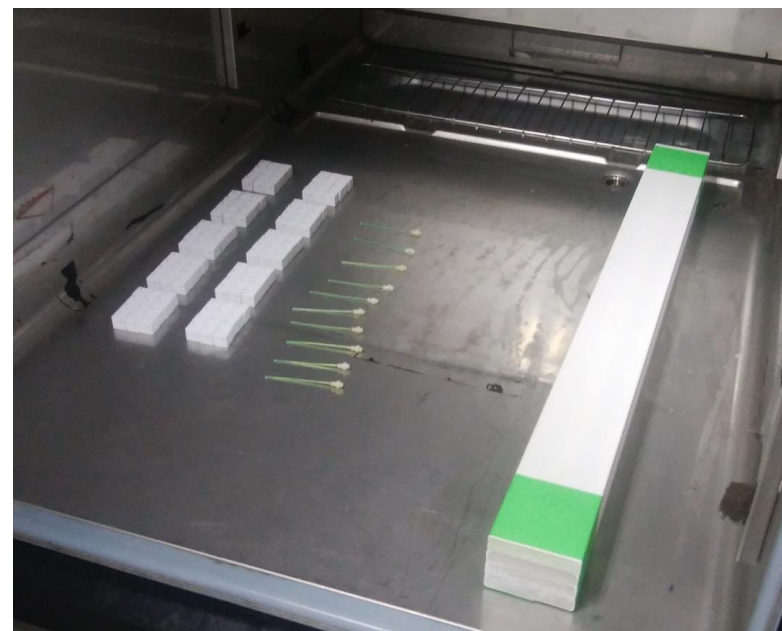
- ハイパーカミオカンデは2027年から10年以上稼働予定。
- シンチレータを高温下で化学反応を促進させて20年分の経年劣化を1か月で再現。
- シミュレーションと合わせて経年劣化が問題にならないことを実証。



前置検出器の光量の変化



加速劣化試験のために恒温槽に  
入れたシンチレータ

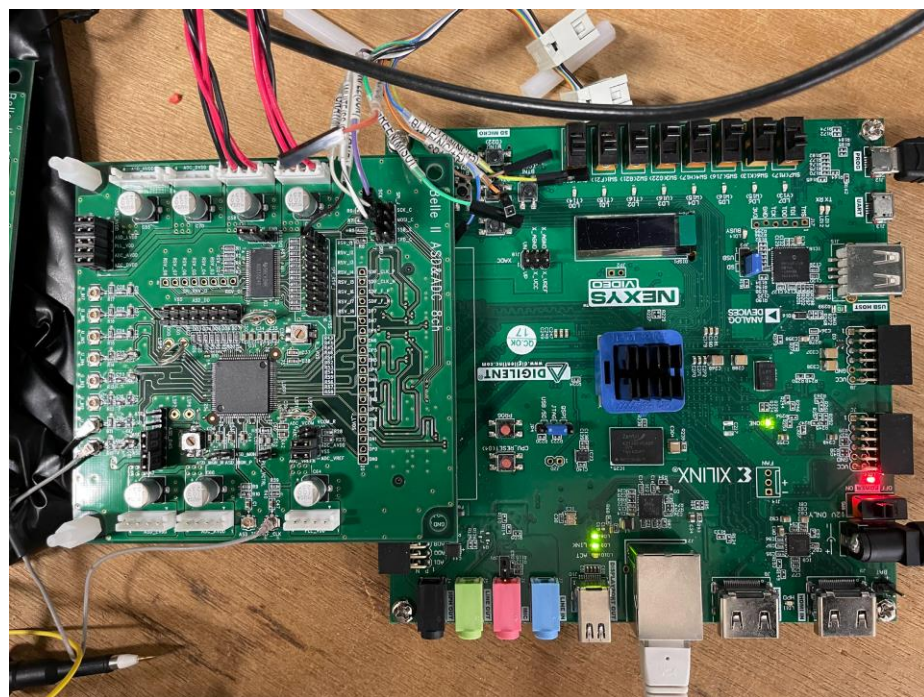




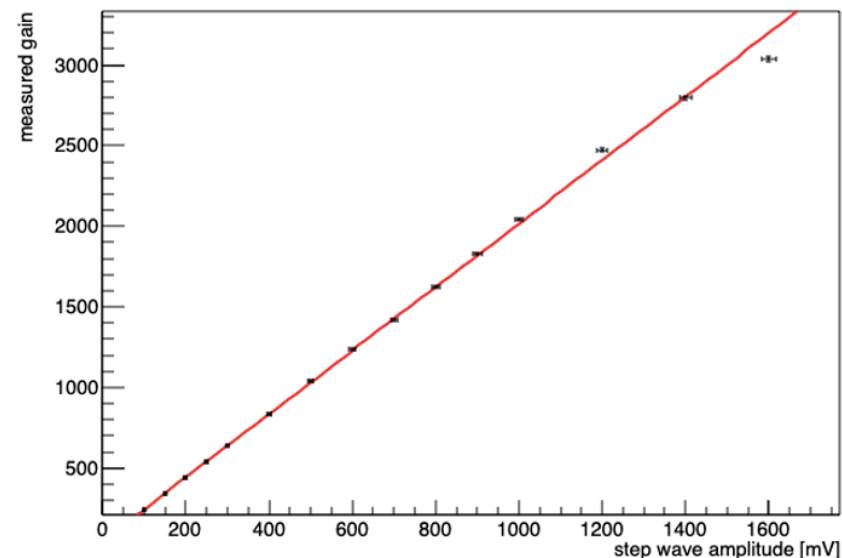
- 前置検出器のエレクトロニクスの経年劣化による故障が心配。
- 多チャンネルMPPC読み出しASICとエレクトロニクスをKEKと開発、性能評価。
- TDCの機能を実装。



新しいMPPC読み出しASICと評価基板



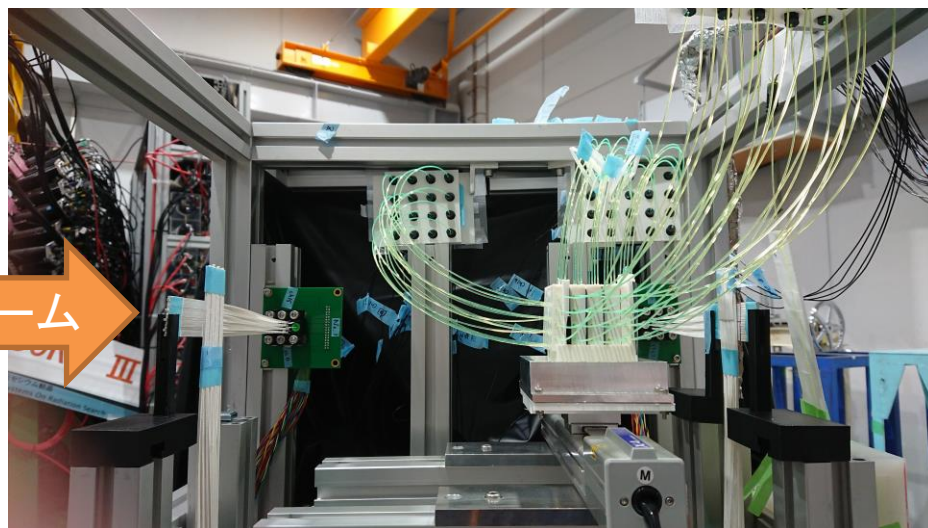
応答の線形性の評価



# 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し陽電子ビームで評価。

東北大学における陽電子ビーム試験



恩田



浅野 (OG)

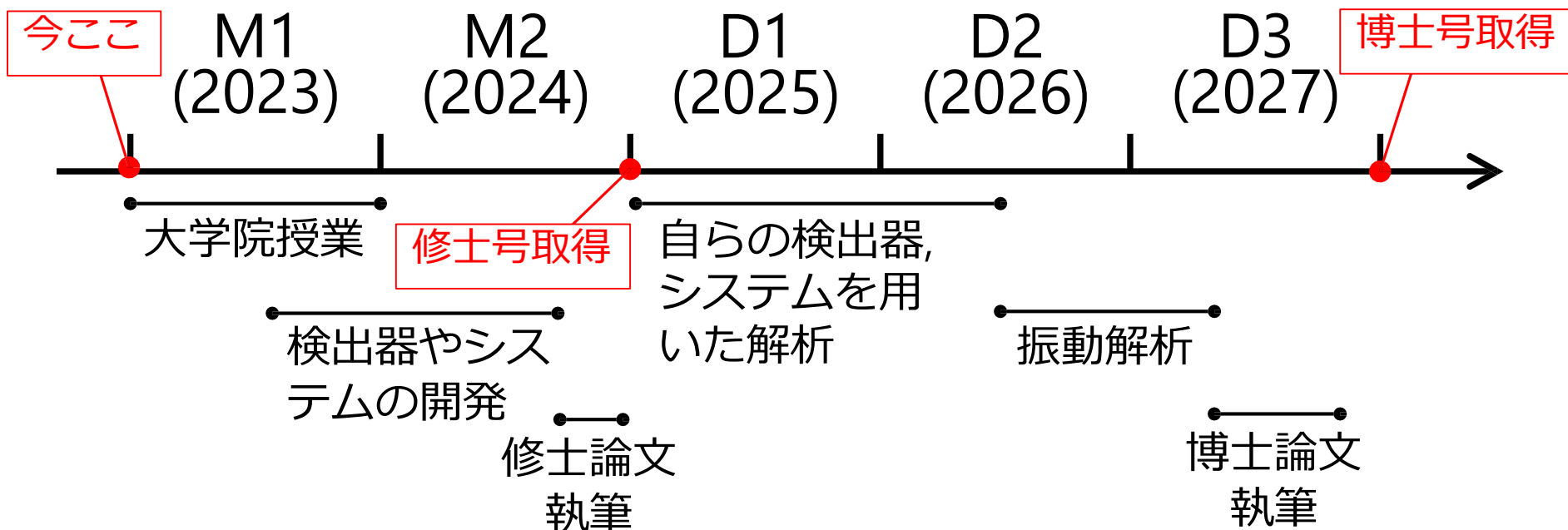
自作した水ベースの  
液体シンチレータ



# 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



# 16電極陽子ビームモニター

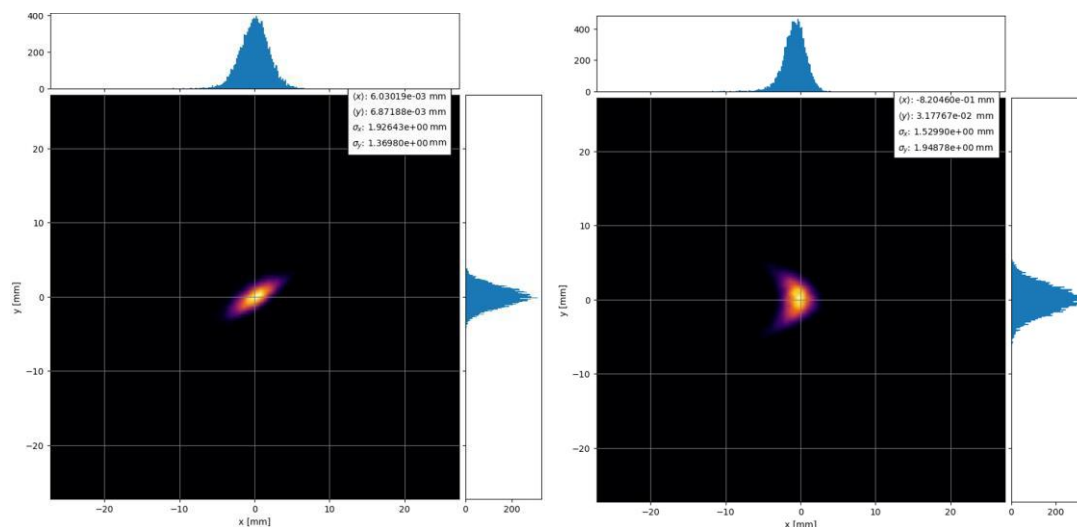
- ビームロスの原因となる陽子ビームの広がりを理解するために16電極モニターを開発。
- 高速化のためにファームウェア、データ取得システムの改良。
- 実際のビーム運転において運用し、データ解析。



16電極モニター

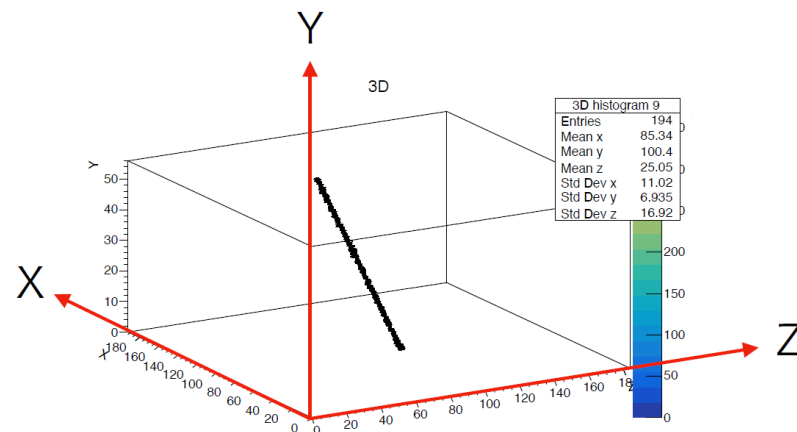


遺伝的アルゴリズムを用いた解析のテスト

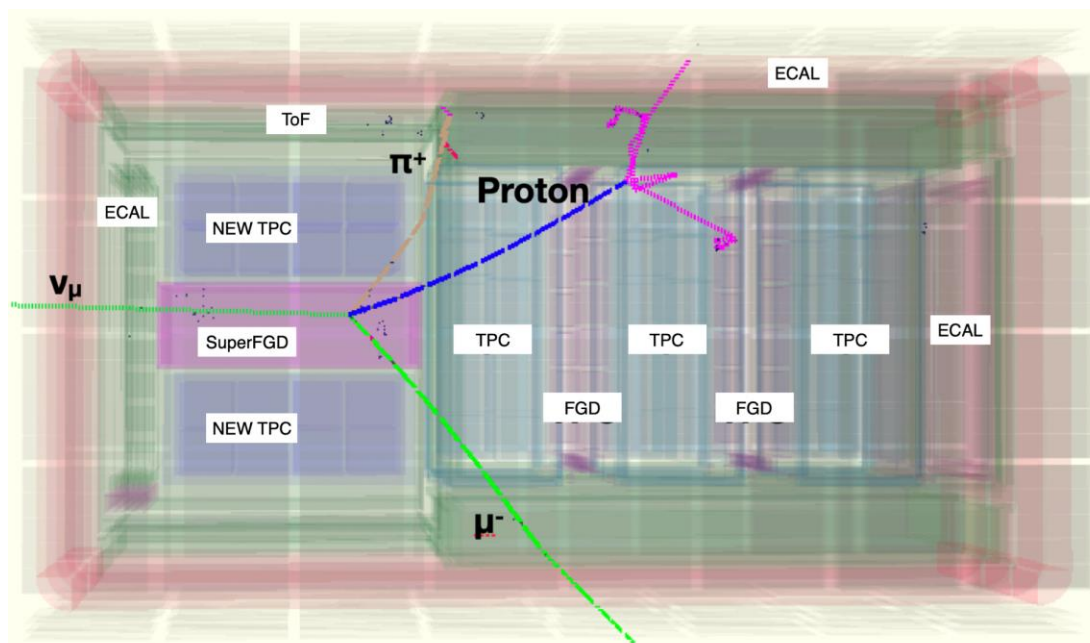


- Super-FGD検出器は地上で試運転中。
- 2023年7月にインストールされ、地下での試運転、2023年11月からビームデータを取得する。
- 現地での試運転や較正 (宇宙線、LEDを使って)、初期のデータ解析、検出器の性能評価。

期待される宇宙線イベント



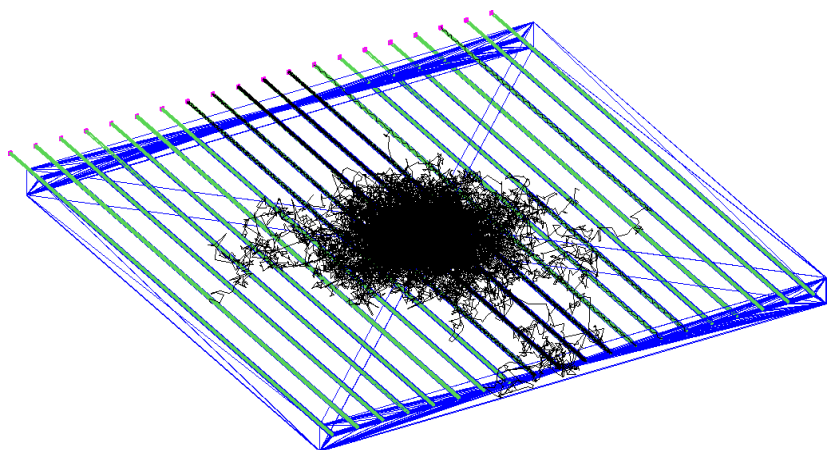
期待されるニュートリノ反応イベント



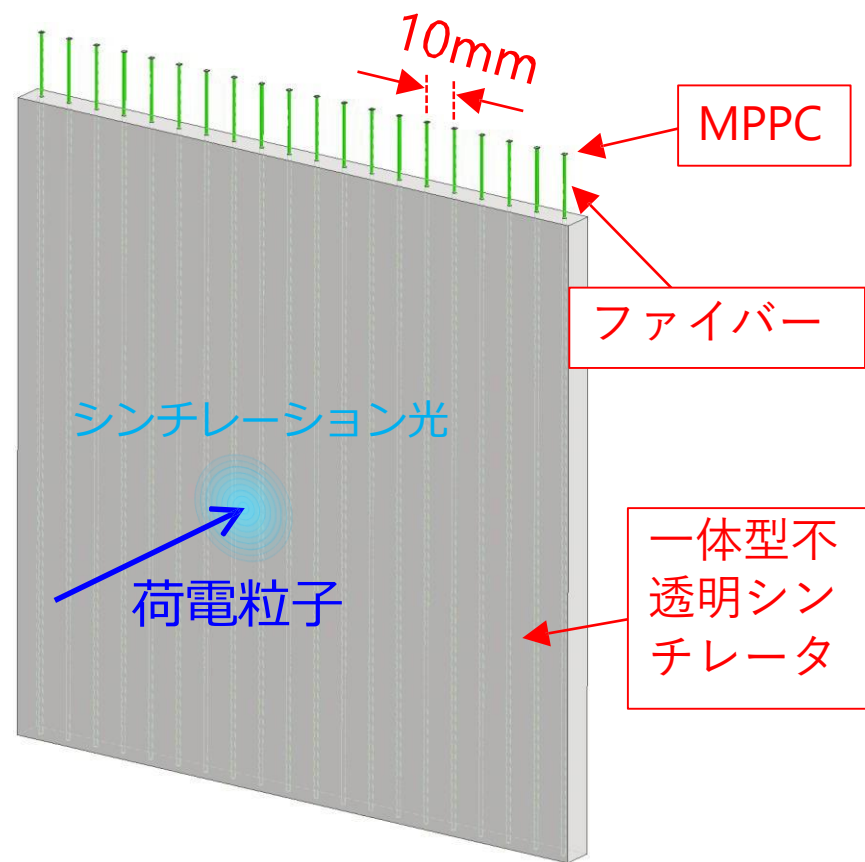
# 新型NINJA用シンチレータ検出器

- NINJA検出器を大型化予定。
- 原子核乾板は時間情報がないので、位置分解能のいいシンチレータ検出器と飛跡をマッチングし、時間を取得。
- 一体型のシンチレータにファイバーを多数挿入し、光量の比から位置を予測することができないか。
- まずは原理実証が必要。

光学シミュレーション



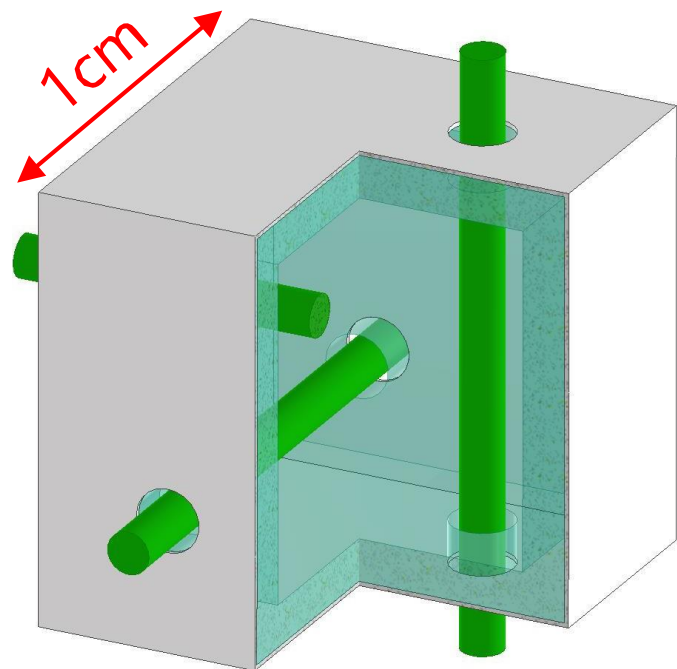
新トラックのアイデアの概念図



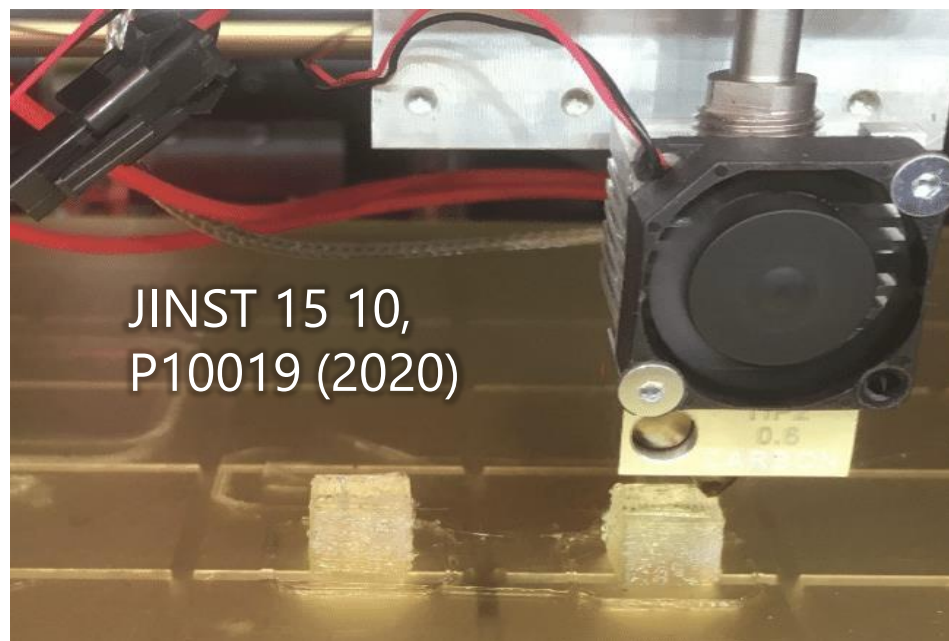
# 水標的のSuper-FGD

- ハイパーカミオカンデに向けて前置検出器はアイデアを出し合っている段階。
- 内側が空洞の立方体シンチレータを大量に並べて水槽に沈めれば水標的ニュートリノ反応を精密に測れるのでは。
- 3Dプリンタを使えば内側が空洞のシンチレータを大量に作れるのでは。

内側が空洞の立方体シンチレータ



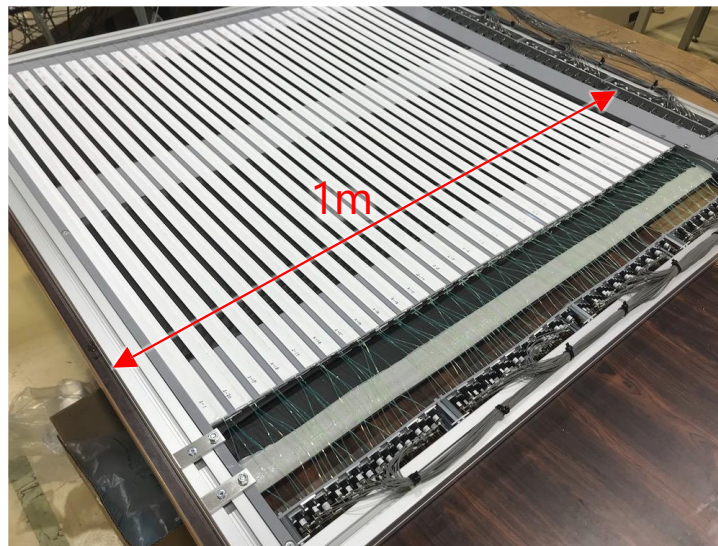
3Dプリンタによるシンチレータ形成



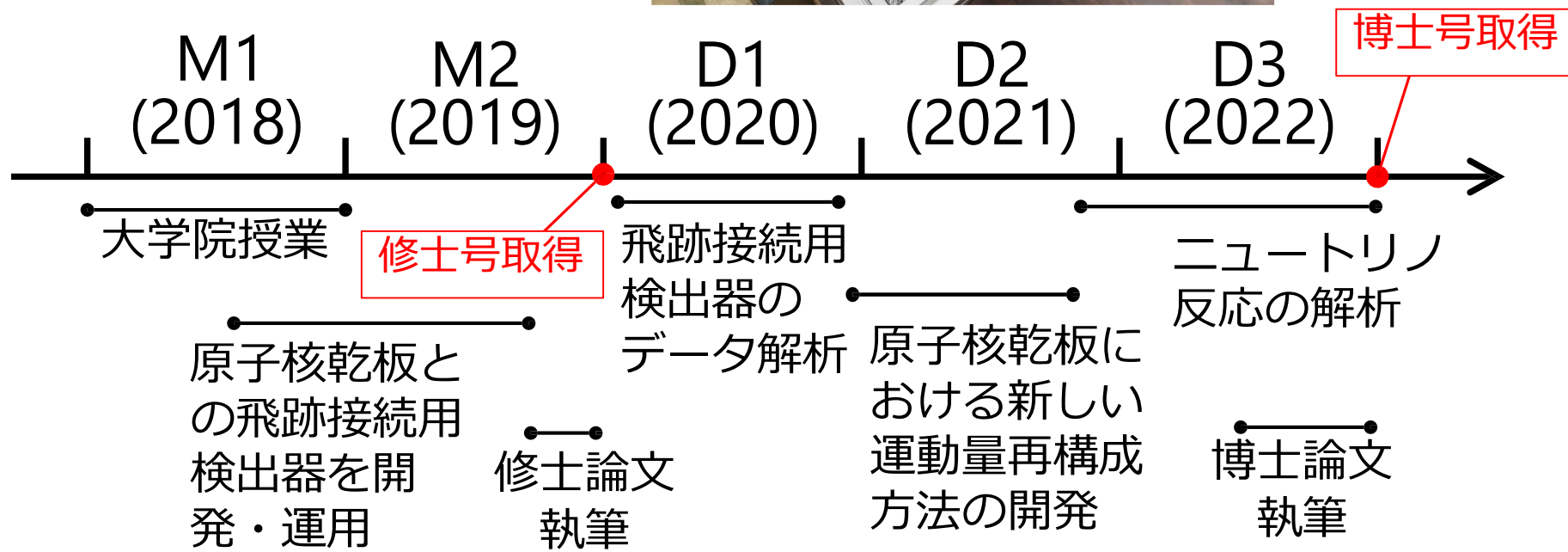
# 先輩の例 (去年卒業した小田川さん)

- 修士課程で原子核乾板との飛跡接続用のシンチレータ検出器を開発。
- 博士課程でそれを用いたニュートリノ反応の精密測定。

開発したシンチレータ検出器



小田川  
(OB)





- 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、火曜日9:00からミーティングをやっています。
- 有元君・恩田君の実験装置は311 / 313号室で見られるので興味があれば教えてください。
- 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。