






# T2K実験 (東海編)

木河達也

2020年4月21日

高エネルギー物理学研究室実験紹介

# ニュートリノの歴史

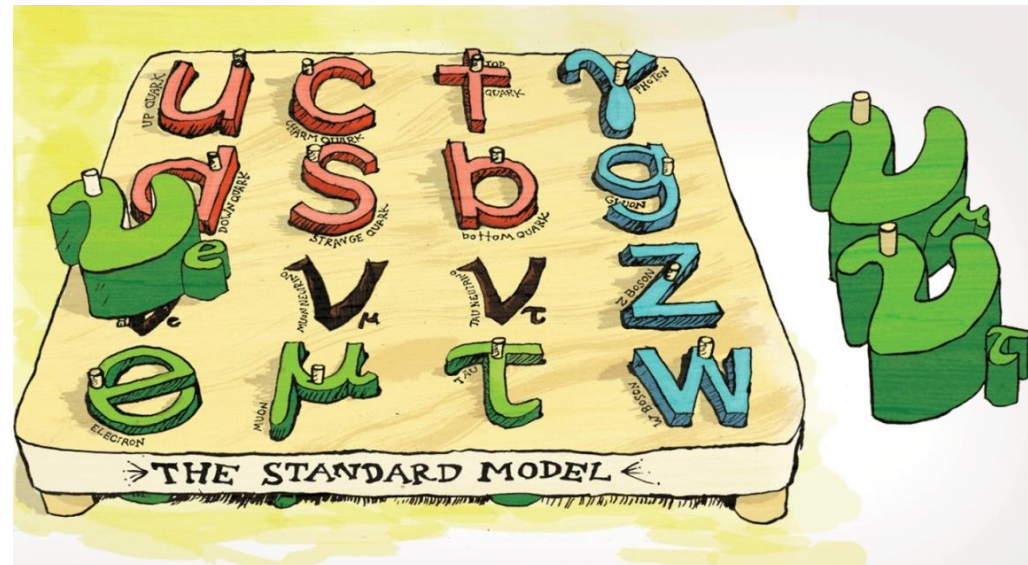
- 1930年: ニュートリノの存在の予言 (Pauli)
- 1932年: ベータ崩壊の理論化 (Fermi)
- 1956年: ニュートリノの発見 (Reines, Cowan) 
- 1962年: ミューニュートリノの発見 (Lederman, Schwartz, Steinberger) 
- 1962年: フレーバー間ニュートリノ振動の予言 (Maki, Nakagawa, Sakata)
- 1970年: 太陽ニュートリノ問題 (Davis) 
- 1987年: 超新星爆発ニュートリノの検出 (Koshiba) 
- 1998年: ニュートリノ振動の発見 (Super-K, SNO) 
- 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 $\theta_{13}$ 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。

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。

スーパーカミオカンデ  
実験で探索

- 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。

T2K実験で探索

- ニュートリノ-原子核反応の理解。
- 3世代だけか。

CMB実験で探索

- 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。

AXEL実験で探索

- スタッフ (4人)  
中家、市川、Wendell、木河
- 研究員 (3人)  
Ali、潘、芦田
- 博士課程 (7人)  
平本、中村、森、吉田、  
安留、小田川、栗林
- 修士課程 (4人)  
菅島、谷、馮、李



今回の紹介 → T2K(東海側)+ $\alpha$ がメインの人たち

Rogerさんが紹介 → T2K(神岡側), SK, HKがメインの人たち

市川さんが紹介 → AXELがメインの人たち

# ニュートリノ振動

- ニュートリノが飛行時にフレーバー( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )が変化。
- 混合角 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ と質量二乗差 $\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$ とCP位相 $\delta_{CP}$ により表される。

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

フレーバー固有状態
牧・中川・坂田行列
質量固有状態

2フレーバーでのニュートリノ振動

$$\begin{aligned}
 |\nu_\alpha\rangle &= |\nu_1\rangle \cos \theta + |\nu_2\rangle \sin \theta \quad \Leftrightarrow \quad |\nu_1\rangle e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E}} \cos \theta + |\nu_2\rangle e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E}} \sin \theta \\
 P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \Delta m^2 \frac{L}{4E} \right) \quad \Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2
 \end{aligned}$$

## これまでの測定状況

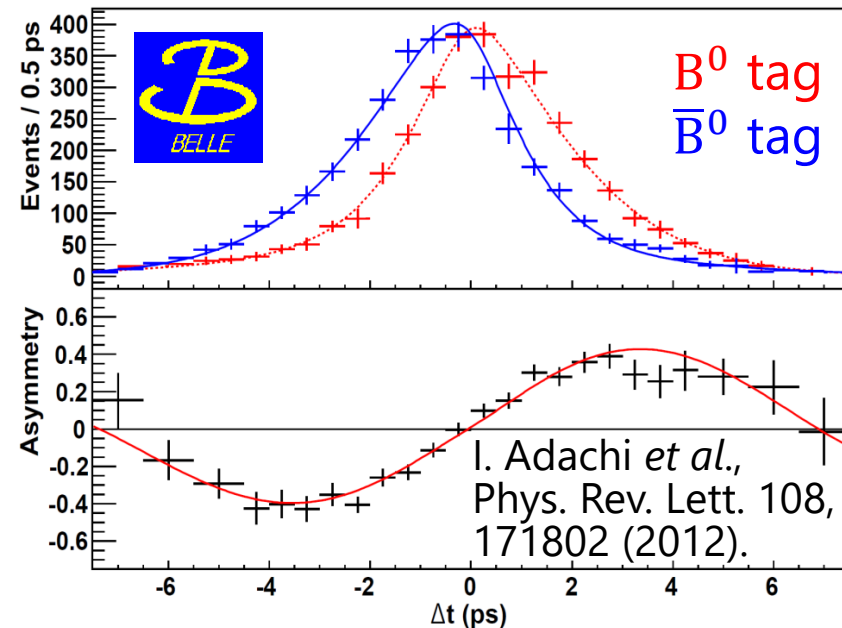
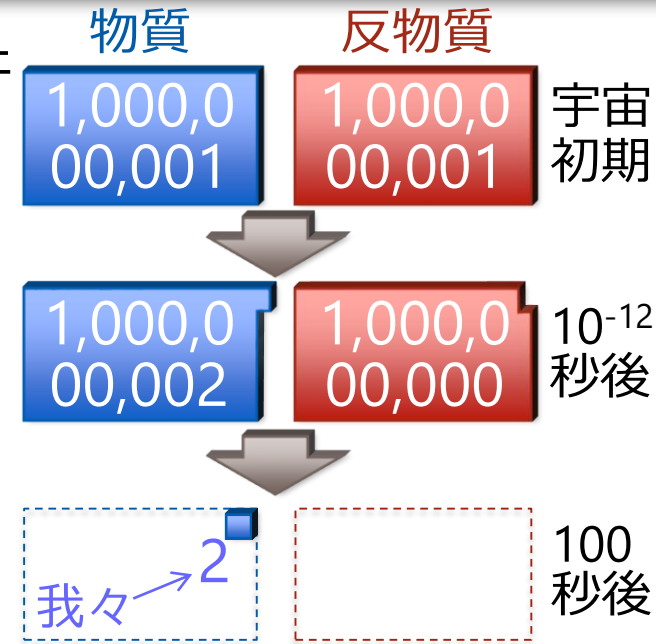
$$\begin{aligned}
 \theta_{12} &= 33.8 \pm 0.8^\circ \quad (\text{太陽}\nu, \text{原子炉}\nu) \\
 \theta_{13} &= 8.6 \pm 0.1^\circ \quad (\text{原子炉}\nu, \text{加速器}\nu) \\
 \theta_{23} &= 48.6_{-1.4}^{+1.0} \quad (\text{大気}\nu, \text{加速器}\nu) \\
 \Delta m_{21}^2 &= (7.39_{-0.20}^{+0.21}) \times 10^{-5} \text{eV}^2 \\
 |\Delta m_{32}^2| &= (2.45 \pm 0.03) \times 10^{-3} \text{eV}^2
 \end{aligned}$$

## 残っている謎

- CP対称性は破れているか。
- $\theta_{23}$ は $45^\circ$ (最大混合)か。
- 質量階層は順階層( $\Delta m_{32}^2 > 0$ )か逆階層( $\Delta m_{32}^2 < 0$ )か。

# CP対称性の破れ

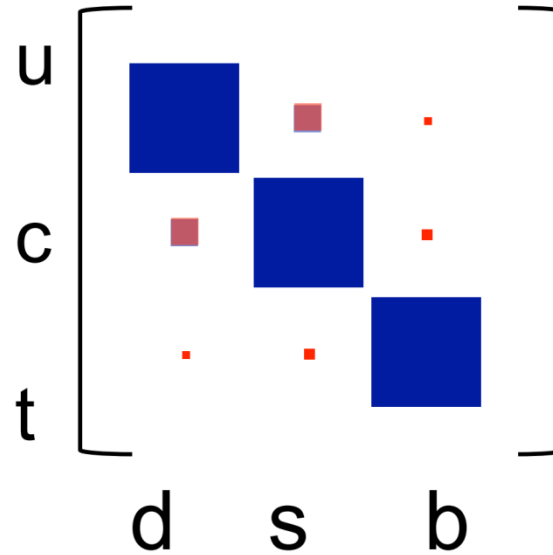
- 物質優勢宇宙を説明するサハロフ3条件
  - バリオン数の破れ。
  - 非熱平衡状態。
  - C, CP対称性の破れ。
- クローニン、フィッチが $K^0$ 崩壊におけるCP対称性の破れを発見 (1964年)。
- 小林、益川がCP対称性の破れを理論的に説明 (1973年)。
- Belle, BaBar実験において $B^0$ 崩壊により理論を検証。
- しかし物質優勢宇宙を説明するにはCP対称性の破れは小さすぎる。
- 新たなCP対称性の破れが必要。  
→ ニュートリノが原因?



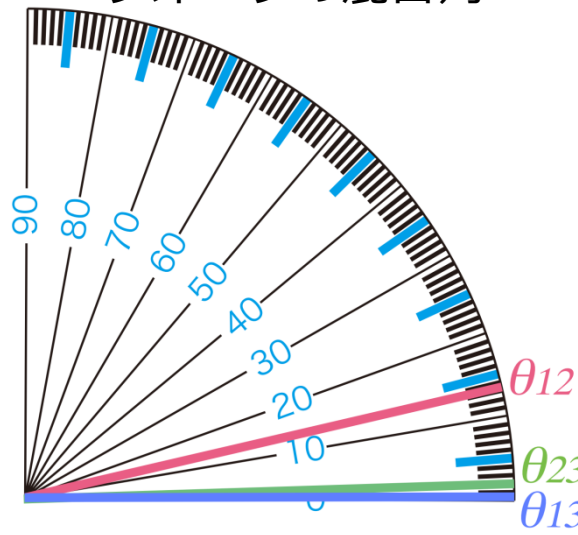
# クォークとニュートリノの混合行列

- 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 $\theta_{23}$ )

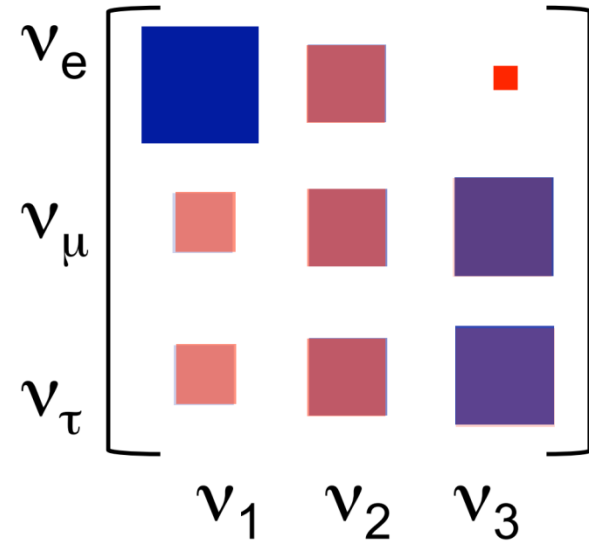
クォークの混合行列  
(小林・益川行列)



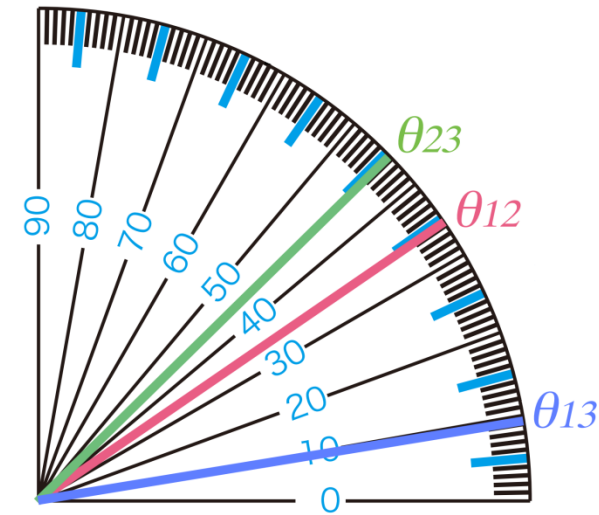
クォークの混合角



ニュートリノの混合行列  
(牧・中川・坂田行列)



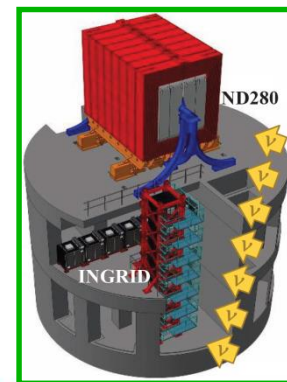
ニュートリノの混合角



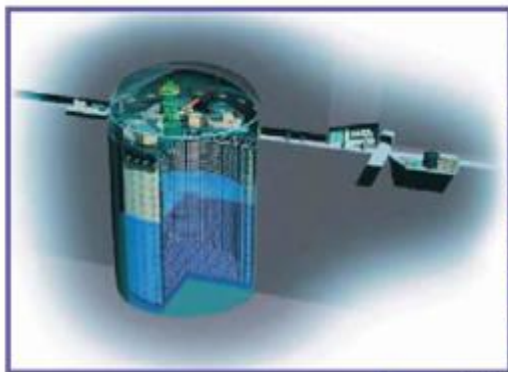


- J-PARCで $\nu_\mu$ または $\bar{\nu}_\mu$ ビームを生成。
- 直後の前置検出器で振動前のニュートリノの精密測定。
- 295km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノ観測。
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  と  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  の確率の違いからCP対称性の破れを探索。
- $\nu_\mu$  や  $\bar{\nu}_\mu$  の消失確率から混合角 $\theta_{23}$ を精密測定。

Near detector



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



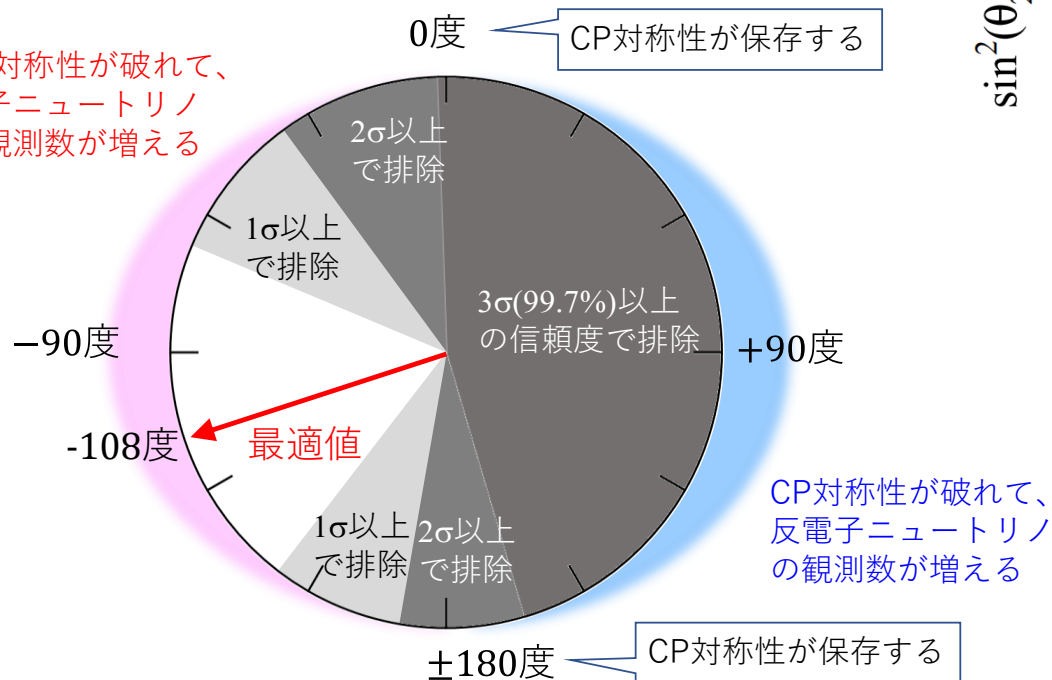
Super-Kamiokande  
(ICRR, Univ. Tokyo)



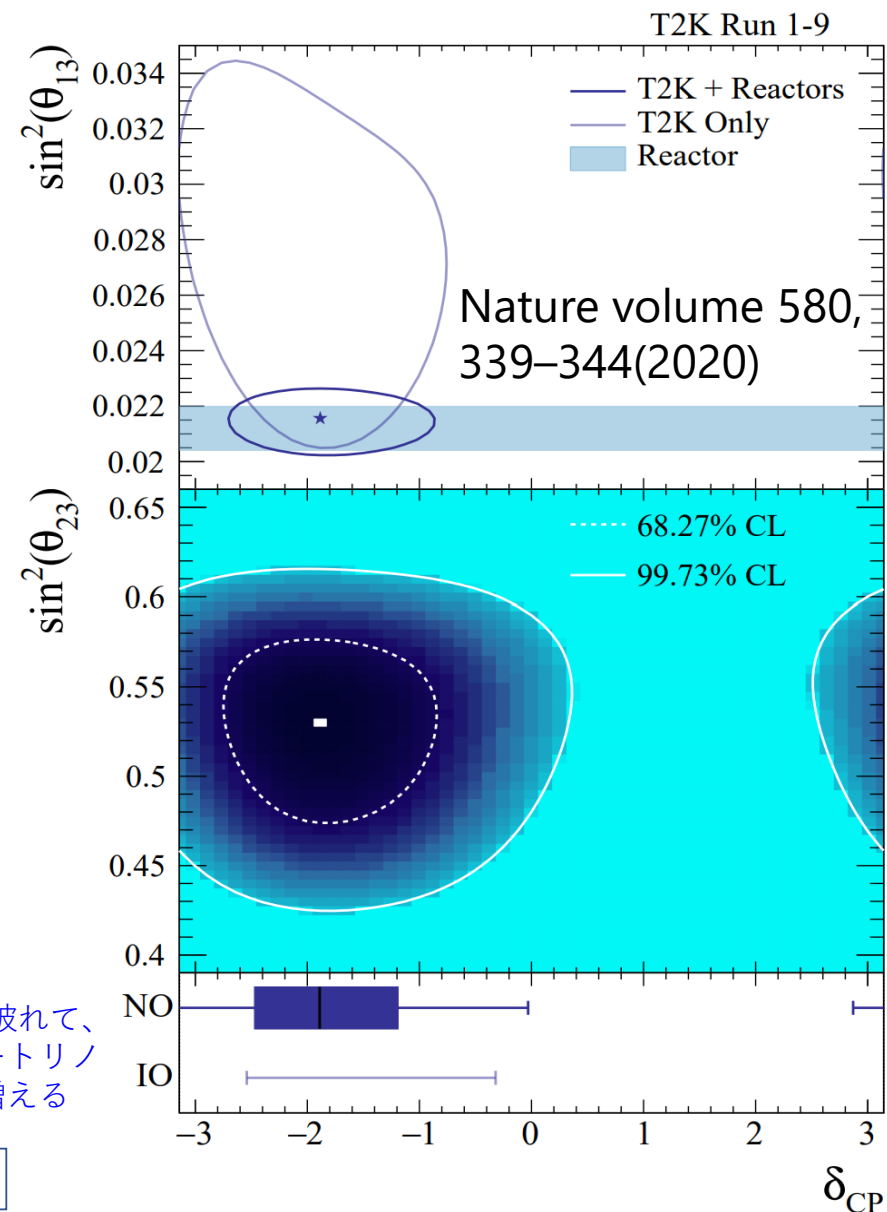
# T2K実験の最新結果

- 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)
- 先週、Nature誌に掲載。

CP対称性が破れて、  
電子ニュートリノ  
の観測数が増える

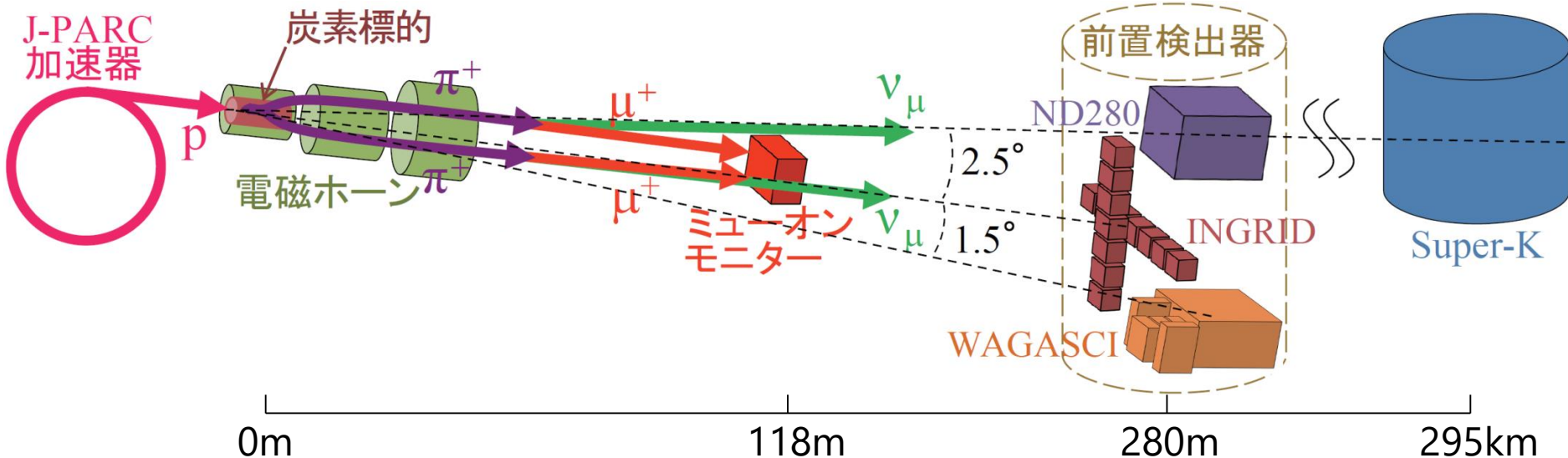
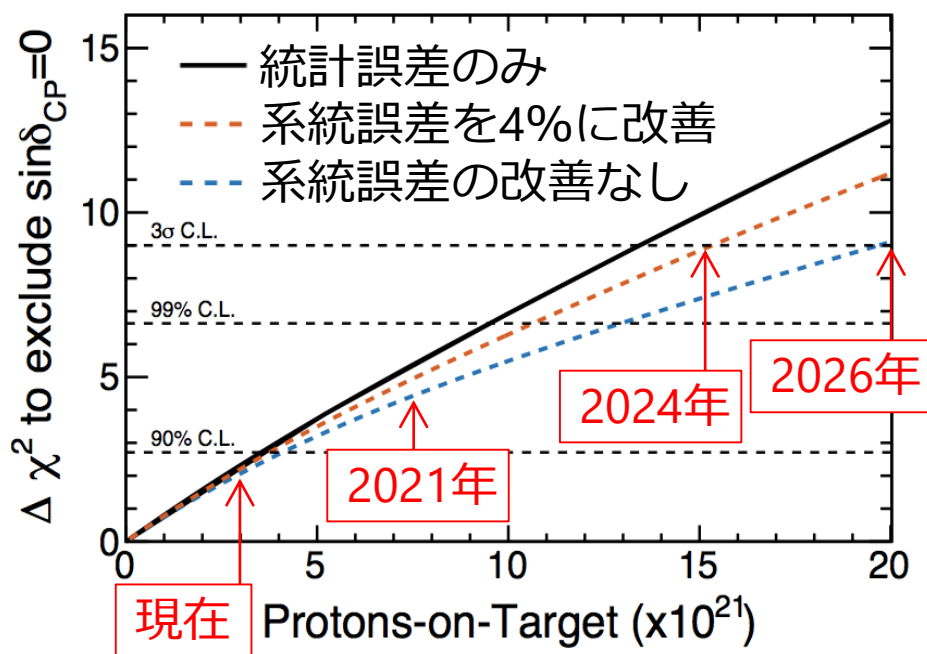


T2K実験による振動パラメータの信頼領域



- 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。**

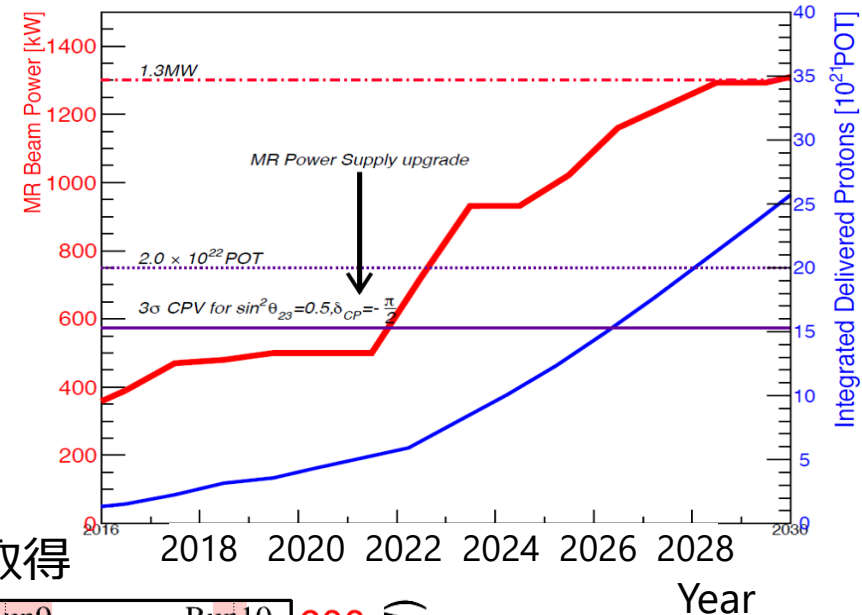
ニュートリノCP対称性破れの探索感度



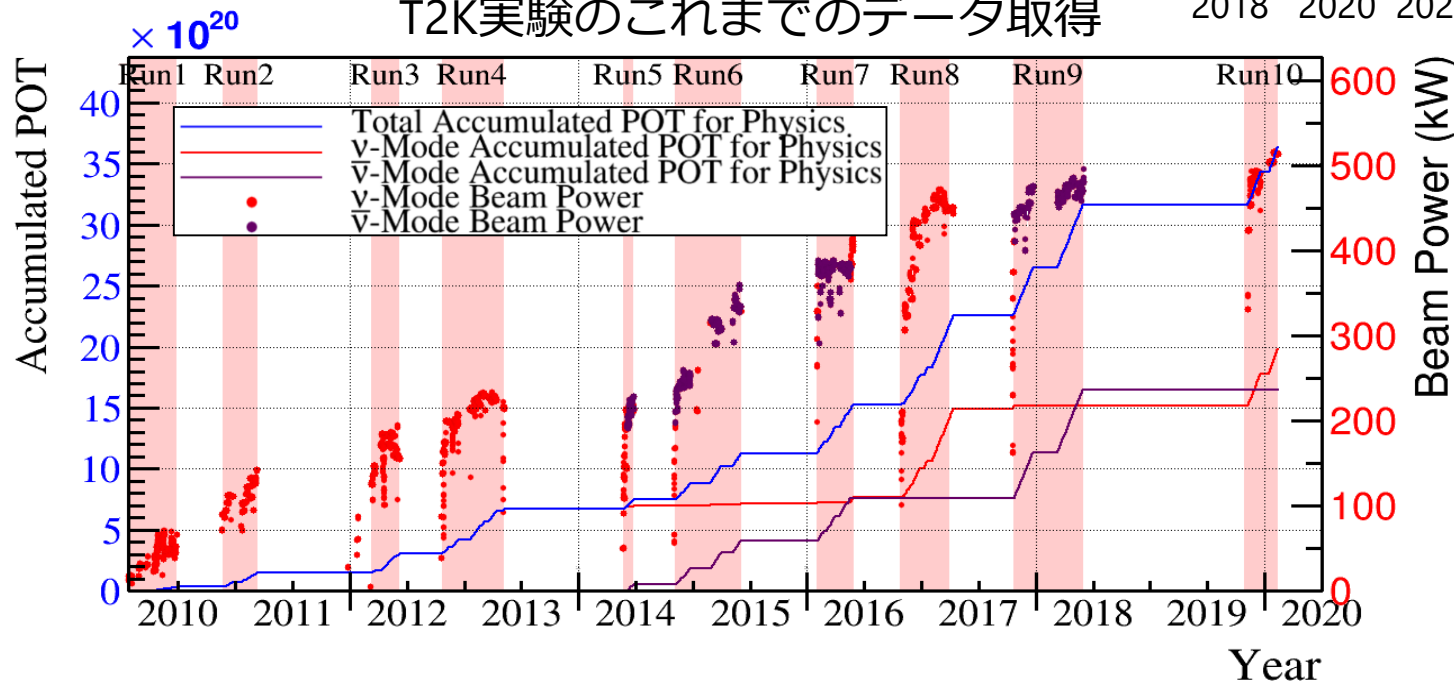
# J-PARC加速器の増強

- これまでビーム強度を徐々に上げてきた。
- さらに増強するには加速器中のビームロスの削減が不可欠。
- 大強度におけるビームの精密測定も課題。

## 今後のビーム増強の計画

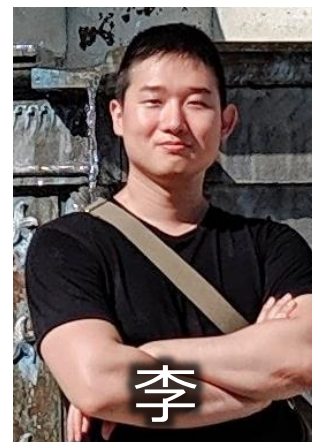


## T2K実験のこれまでのデータ取得

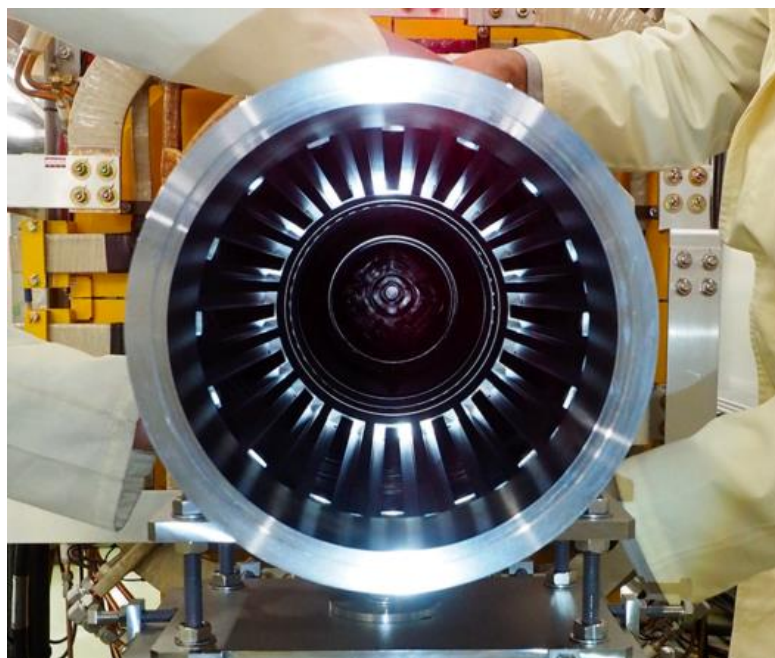


# 16電極陽子ビームモニター

- 陽子ビームが加速器を周回中に不安定になり真空ダクトなどに衝突して失われてしまう。(ビームロス)
- 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電極モニタを開発。



16電極モニター

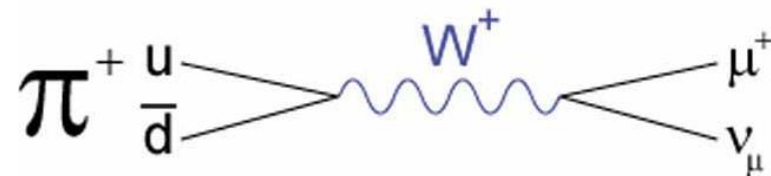


ワイヤーを使った校正

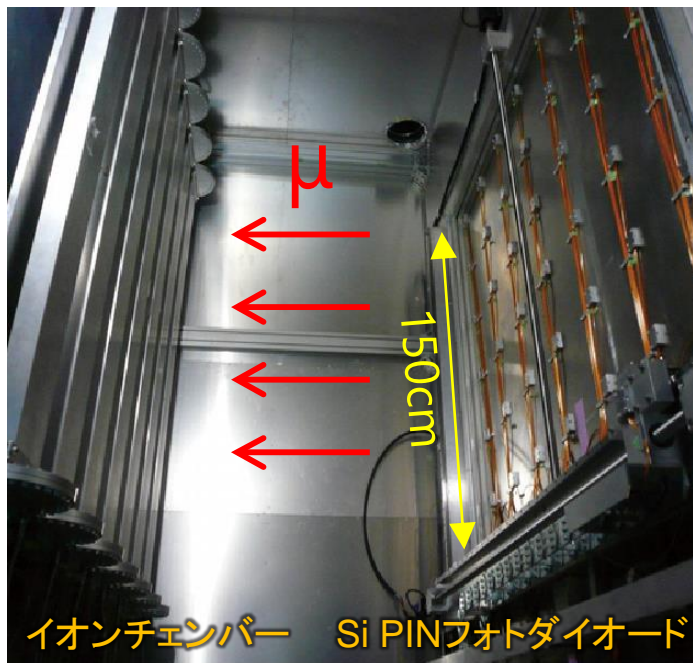


# ミュオンモニターによるビーム測定

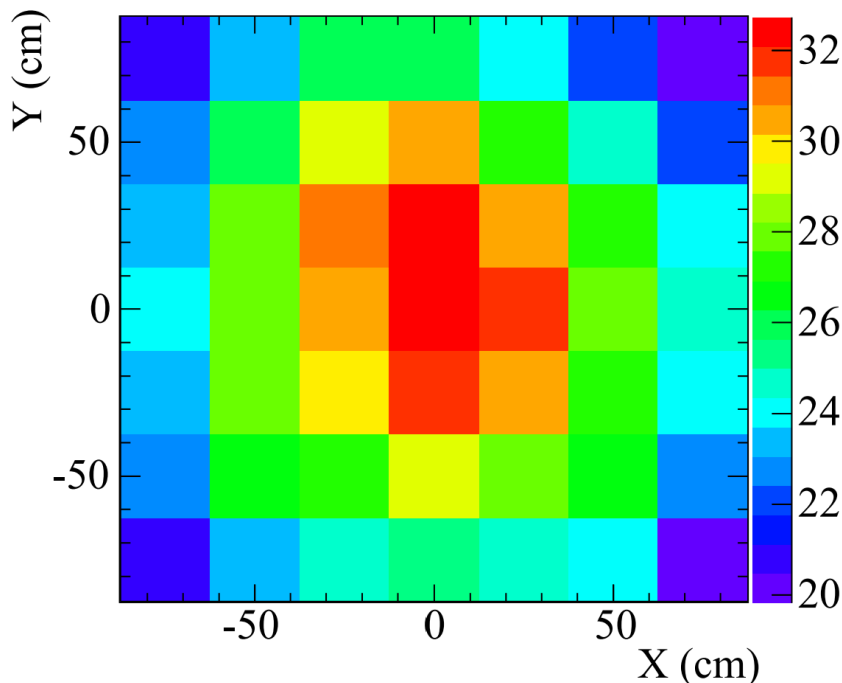
- ニュートリノが $\pi^\pm$ 中間子の崩壊から生成される際にミュオンも同時生成される。
- これを測定することでリアルタイムにビームを監視できる。
- 既存のミュオンモニターは大強度ビーム運転における問題が見え始めてきた。→ **新しい検出器が必要。**



ミュオンモニター



測定されたミュオン分布

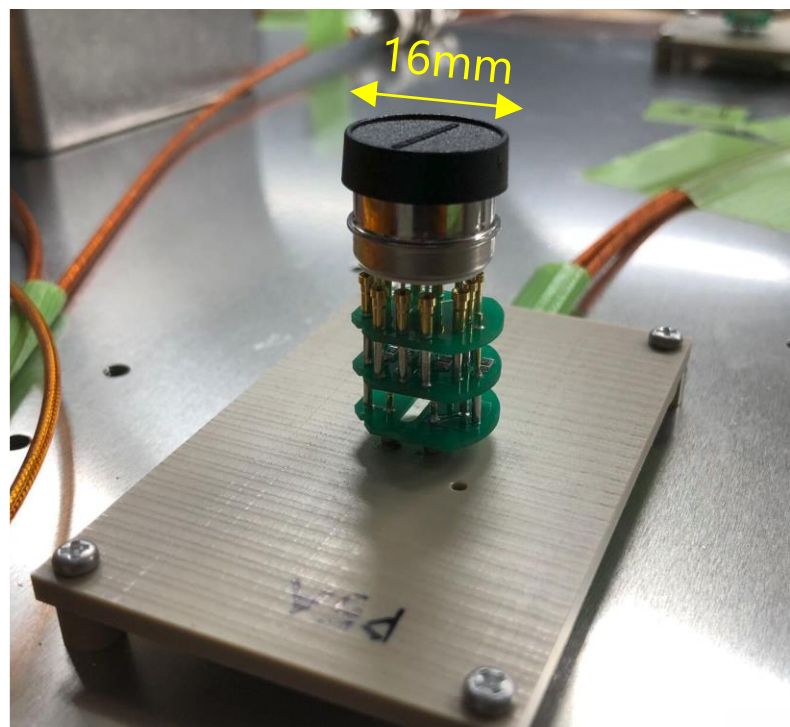


# 新ミュオンモニターの開発

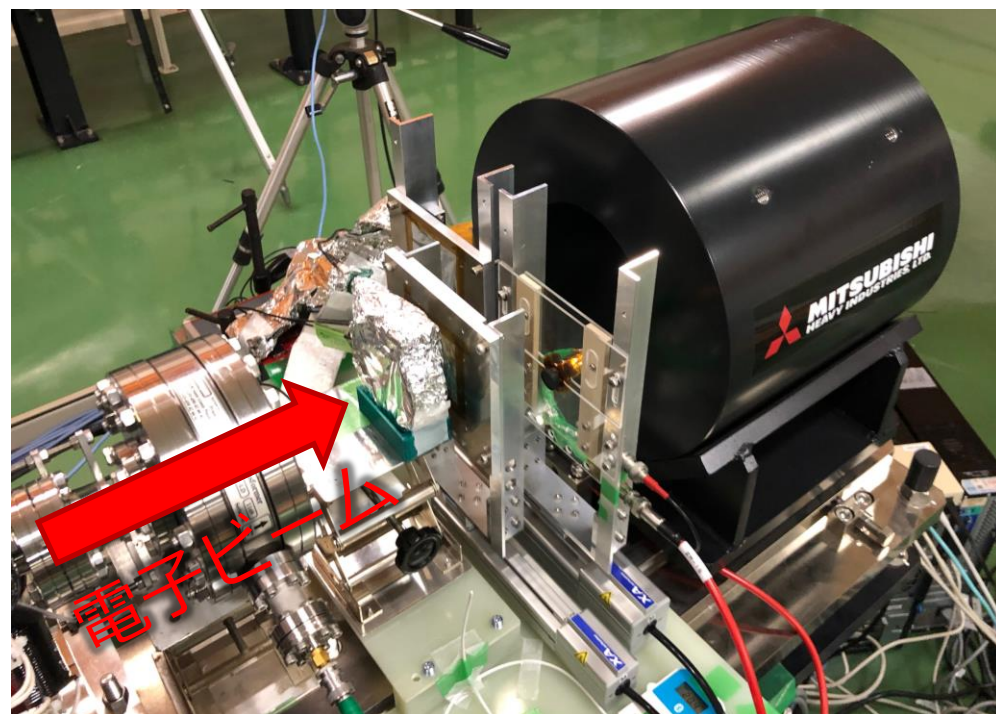
- 新しいミュオンモニターとして電子増倍管による検出器を開発、試験中。
- 昨年の電子ビーム試験で性能評価。
- 今年の9月のビーム試験でさらに詳細に評価して、実用性を決定。



電子増倍管検出器



昨年の電子ビーム試験



# INGRIDによるビーム測定

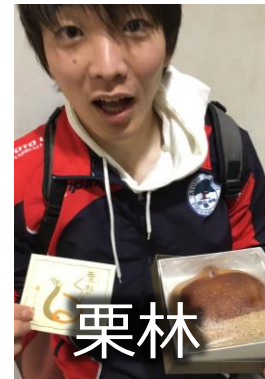
- 十字に配置された14台の同一検出器。(鉄とシンチレータのサンドイッチ構造)
- ニュートリノビームの強度と方向を精密に測定。



平本

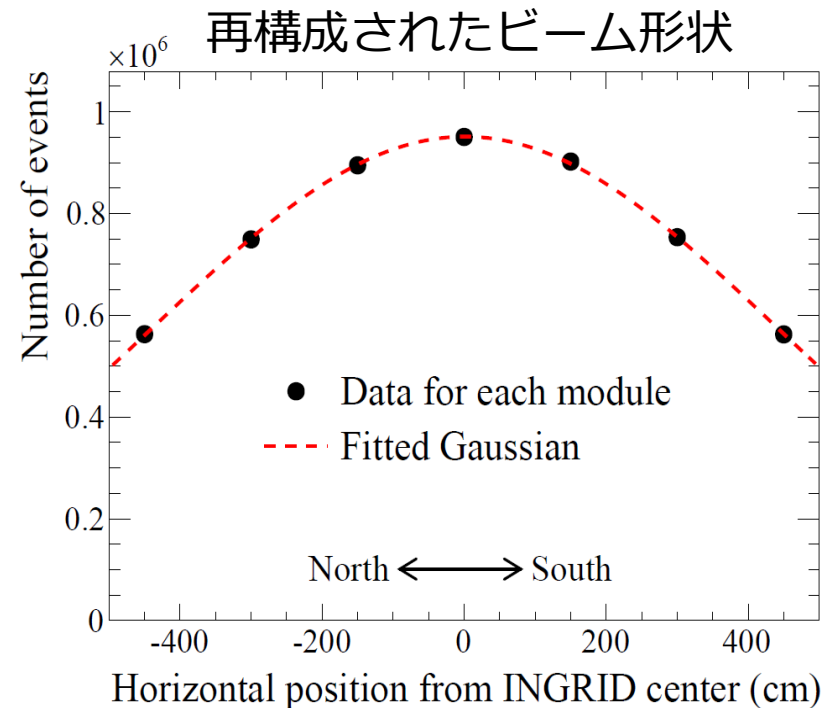
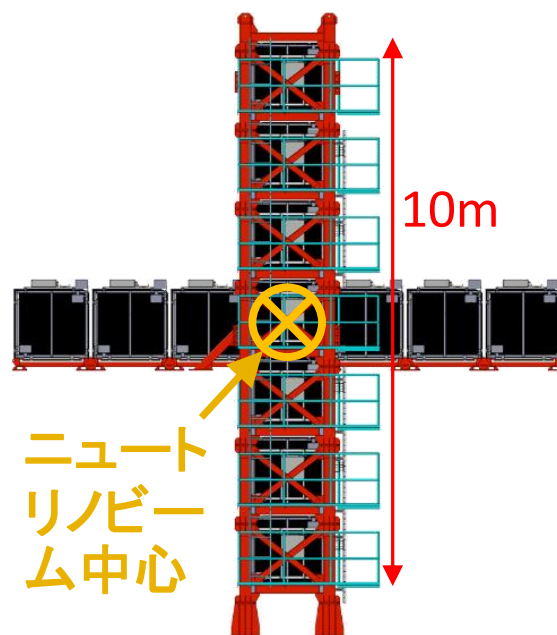


小田川



栗林

+ Ali

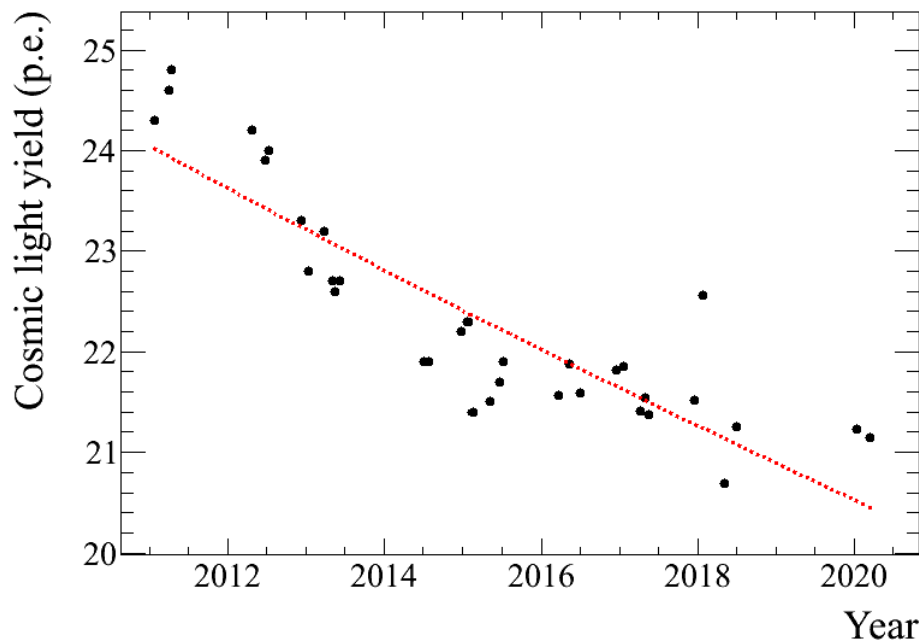




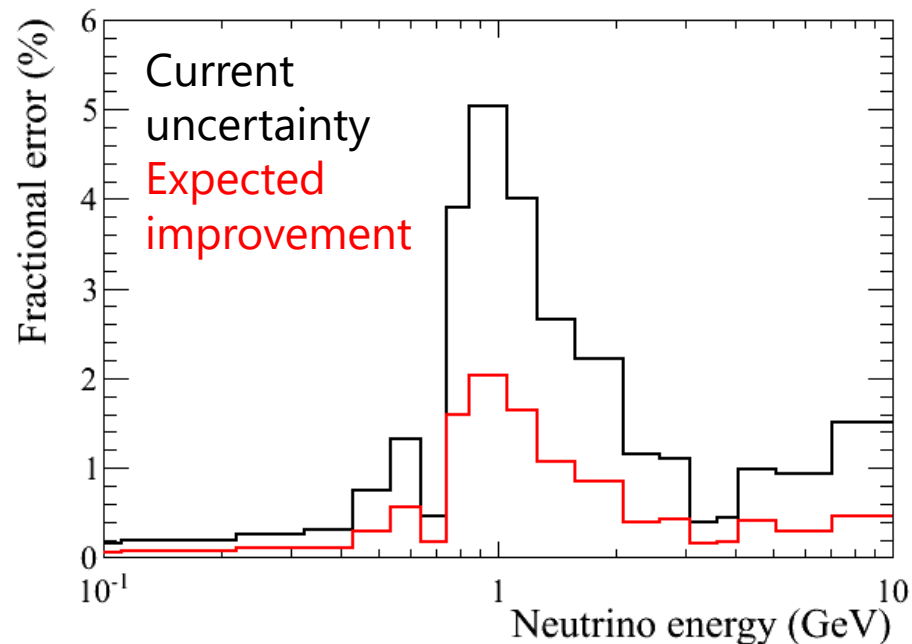
# INGRIDによるビーム測定

- シンチレータの経年劣化の影響が見えている。  
→ 劣化の影響の正確な評価と解析への導入。
- INGRIDの測定が1GeV付近のニュートリノビームの不定性の最大の原因になっている。  
→ 解析の改良による不定性の削減。

宇宙線による光量の変化



解析の改良により期待される  
ニュートリノビームの不定性の削減



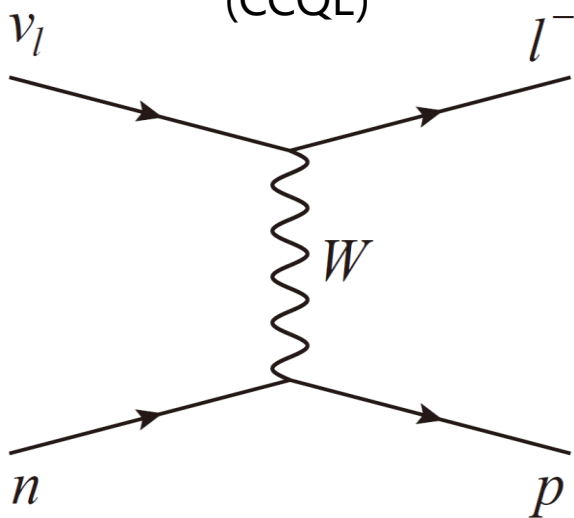
# ニュートリノ反応

- 様々なニュートリノ反応モードがある

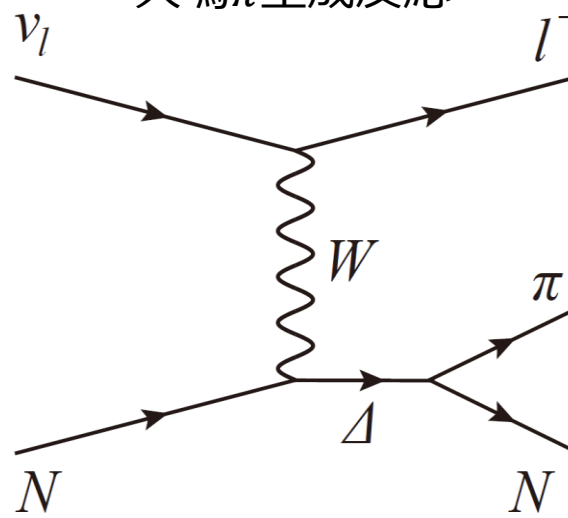
- 荷電カレント準弾性散乱 (CCQE)  $\nu_l + n \rightarrow l^- + p$
- 中性カレント弾性散乱 (NCE)  $\nu_l + N \rightarrow \nu_l + N$
- 共鳴 $\pi$ 生成反応  $\nu_l + N \rightarrow l + N' + \pi$
- コヒーレント $\pi$ 生成反応  $\nu_l + A \rightarrow l + A + \pi$
- 深非弾性散乱 (DIS)  $\nu_l + N \rightarrow l + N' + m\pi$
- 複数核子反応 (2p2h)  $\nu_l + n + N \rightarrow l^- + p + N$

$l$ : レプトン  
 $N$ : 核子  
 $A$ : 原子核

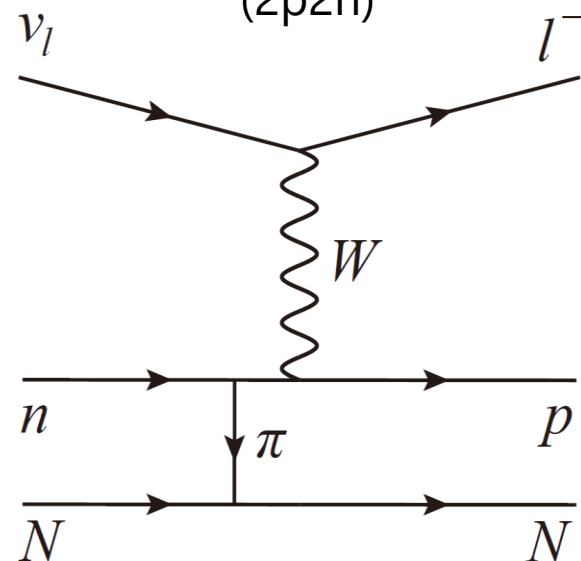
荷電カレント準弾性散乱  
(CCQE)



荷電カレント  
共鳴 $\pi$ 生成反応

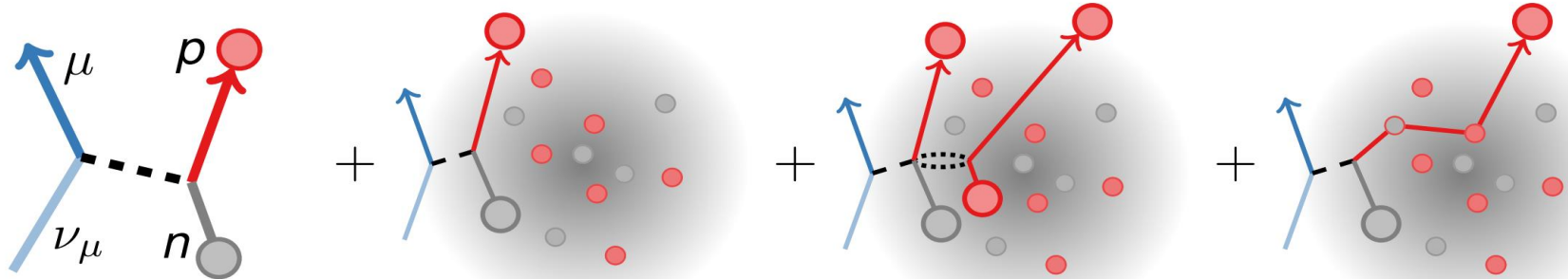


荷電カレント複数核子反応  
(2p2h)



# 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。



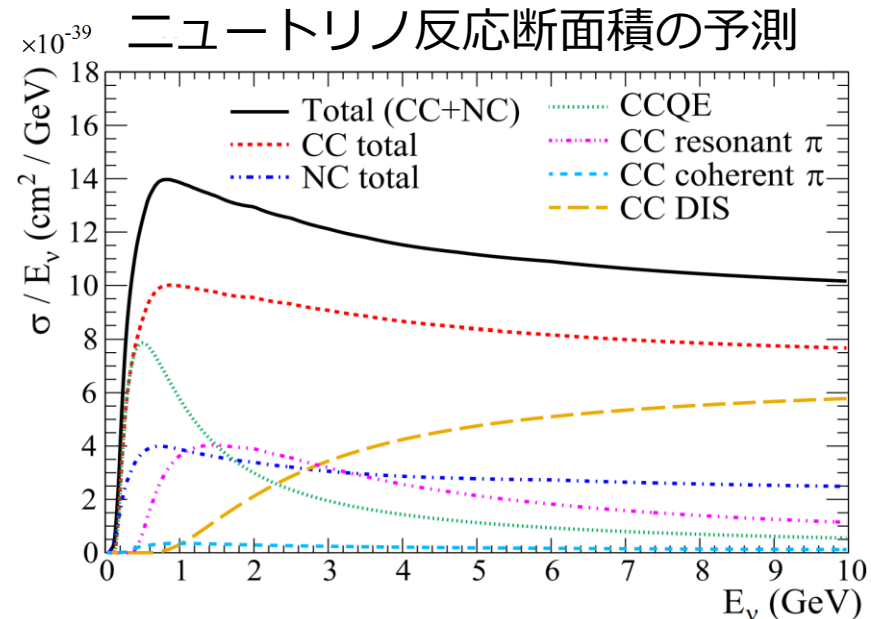
自由核子との散乱

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

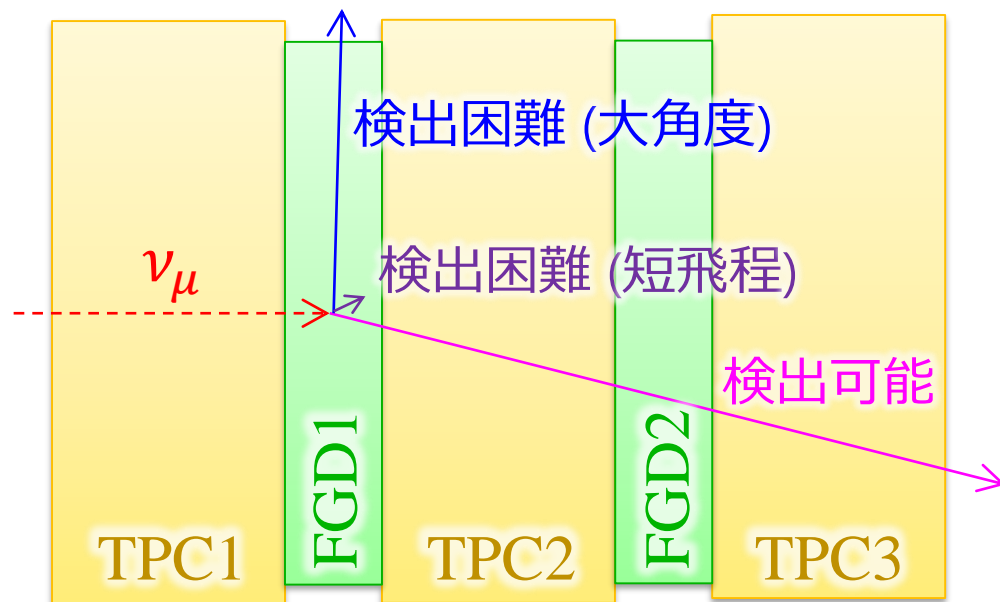
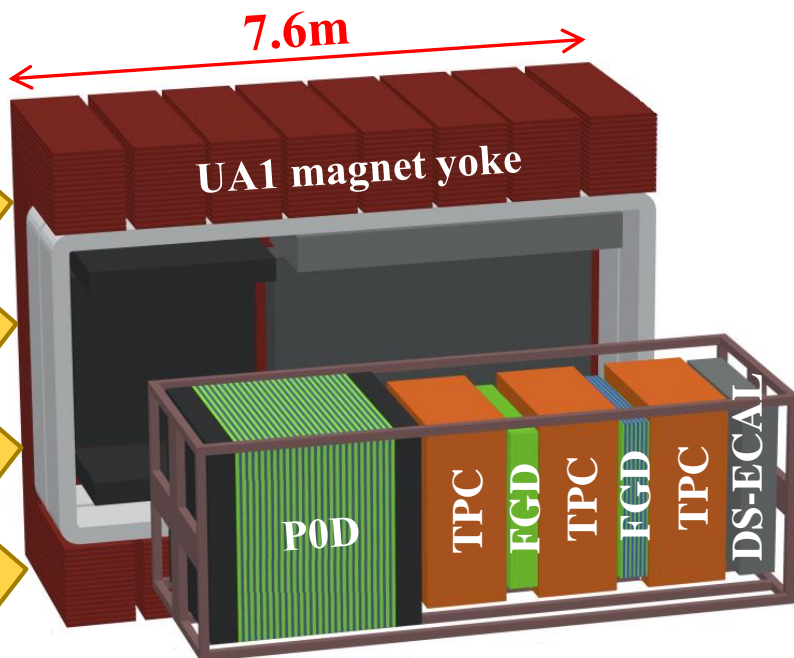
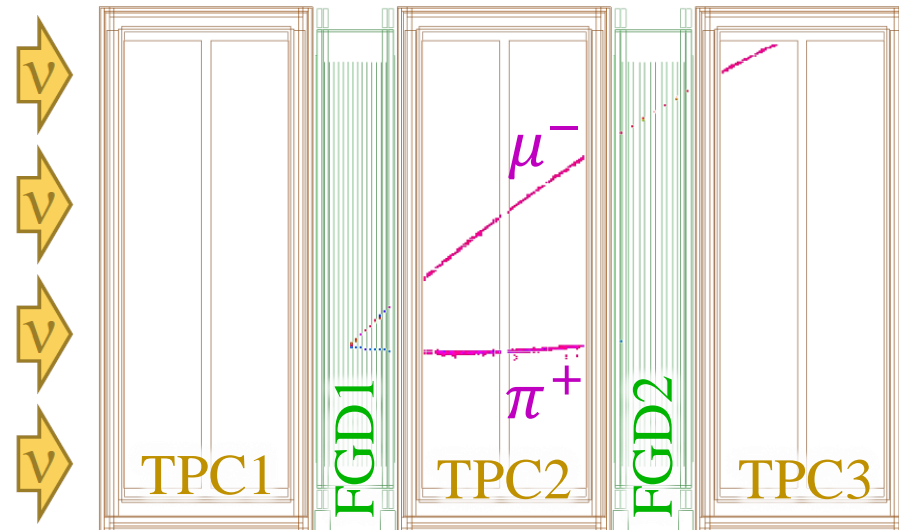
- ニュートリノ反応はエネルギーに依存するが、ニュートリノビームのエネルギー幅は広く、エネルギーを特定不可。  
→ 様々なエネルギー、できるだけエネルギー幅の狭いニュートリノビームによる測定。



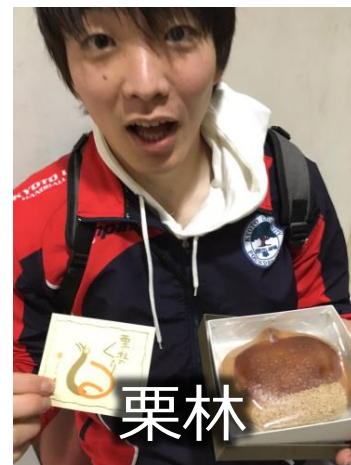
# ND280検出器

- 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。

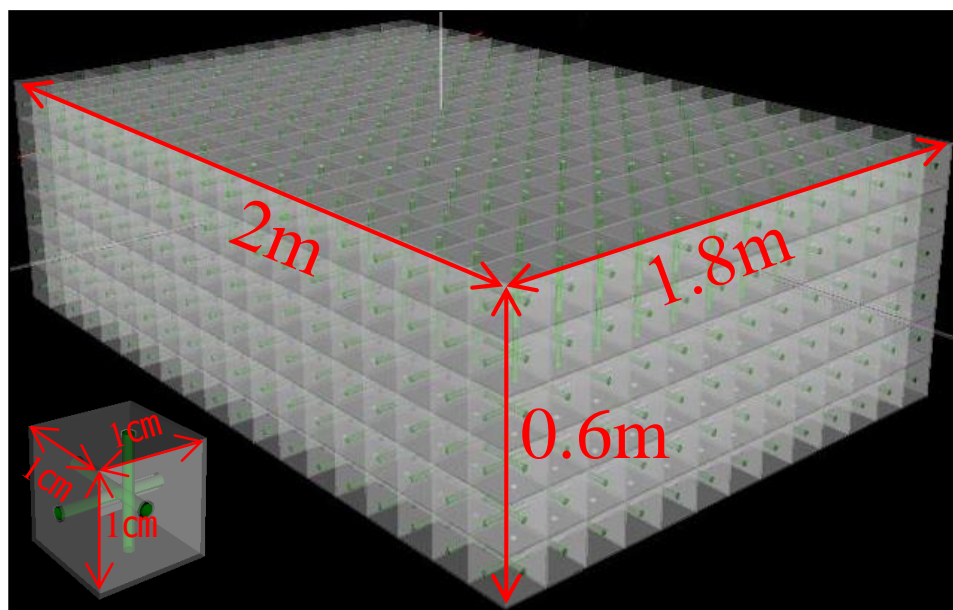
ND280におけるニュートリノ事象



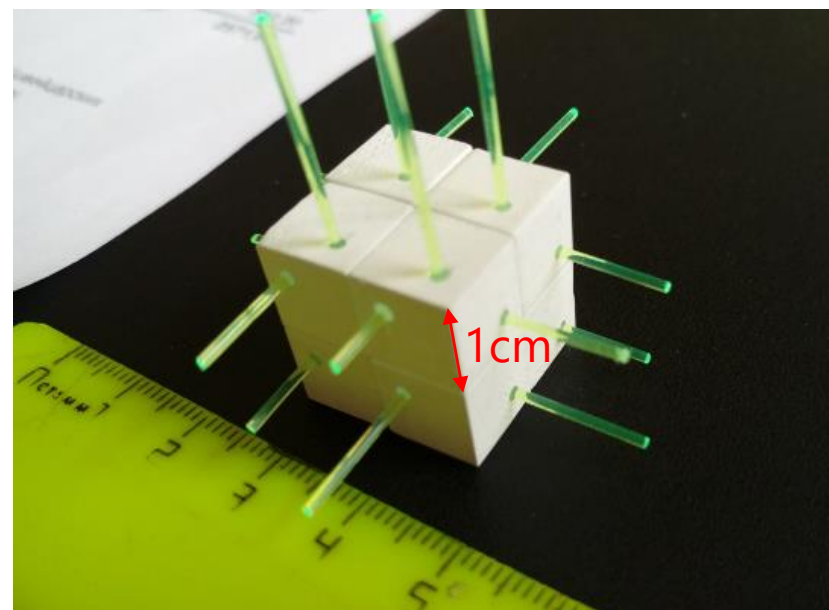
- $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ の立方体のシンチレータを約200万個並べて3方向から波長変換ファイバーで読み出す新しい飛跡検出器 (Super-FGD)。  
→ 全方向への荷電粒子の3次元飛跡を再構成。  
→ 短い飛跡の検出効率も向上。



Super-FGDの概念図



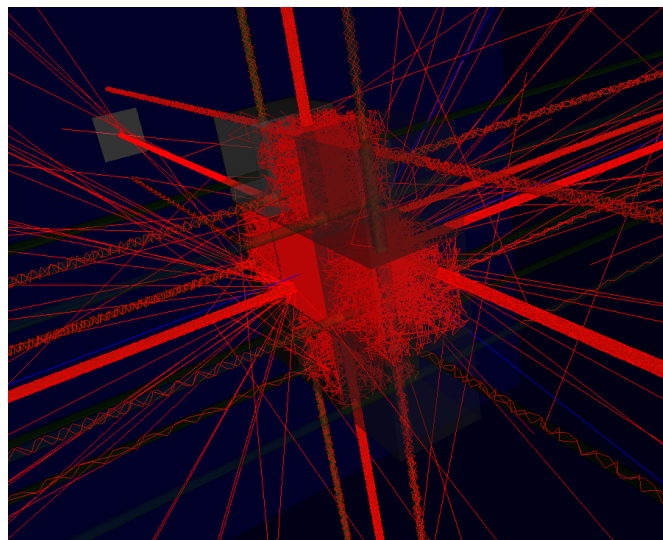
Super-FGDのシンチレータとファイバー



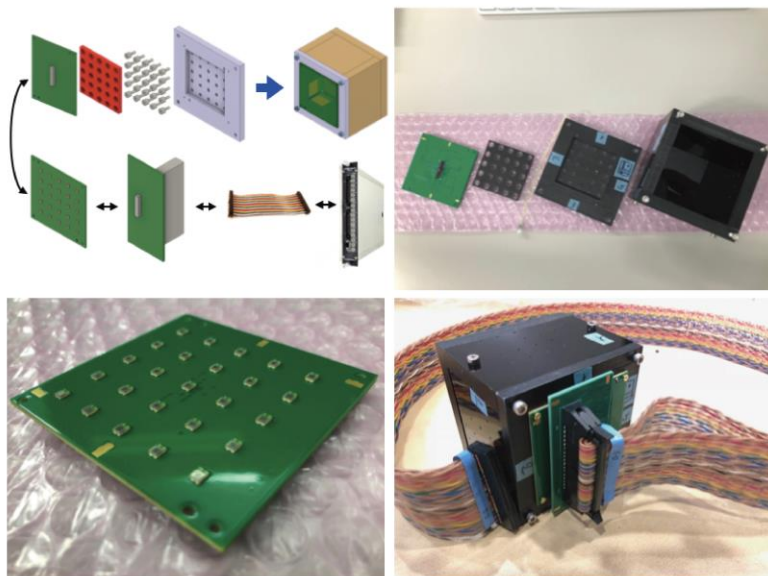
# ND280検出器のアップグレード

- ビーム試験やプロトタイプを用いた測定、シミュレーションによる光学インタフェイスの開発や光学的振る舞いの理解。

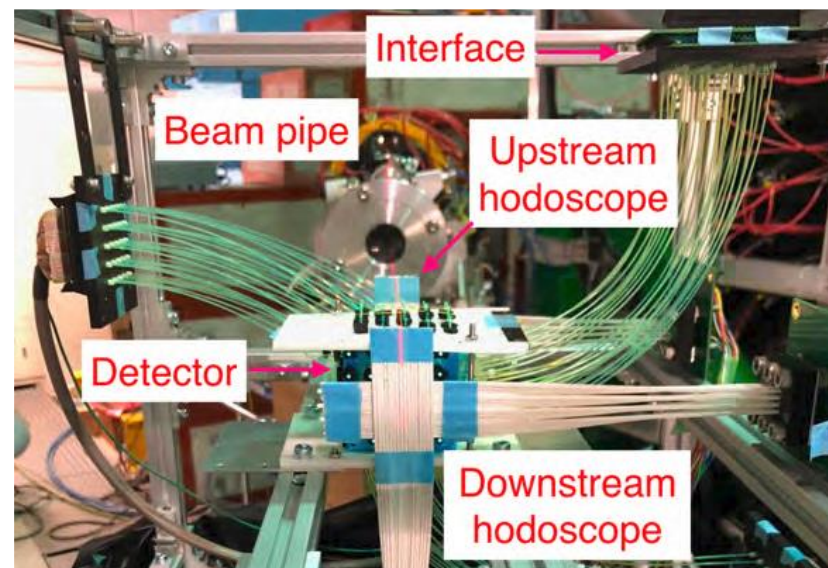
光学シミュレーション



光学インタフェイスのプロトタイプ

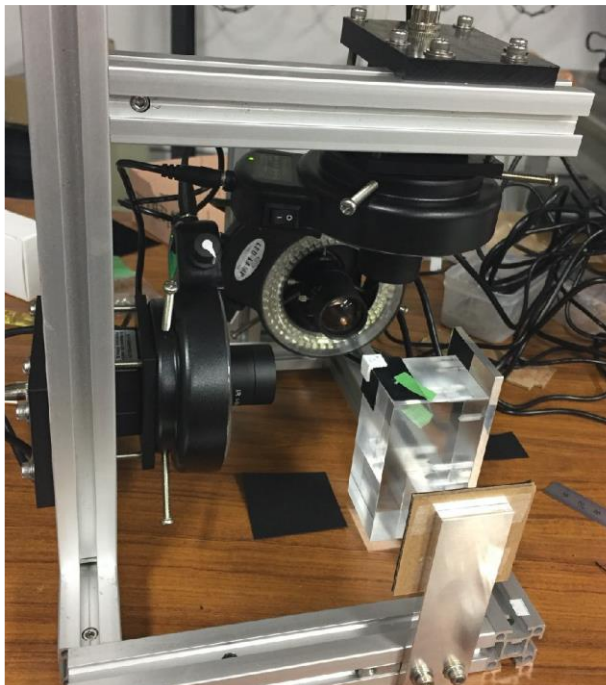


東北大学におけるビーム試験

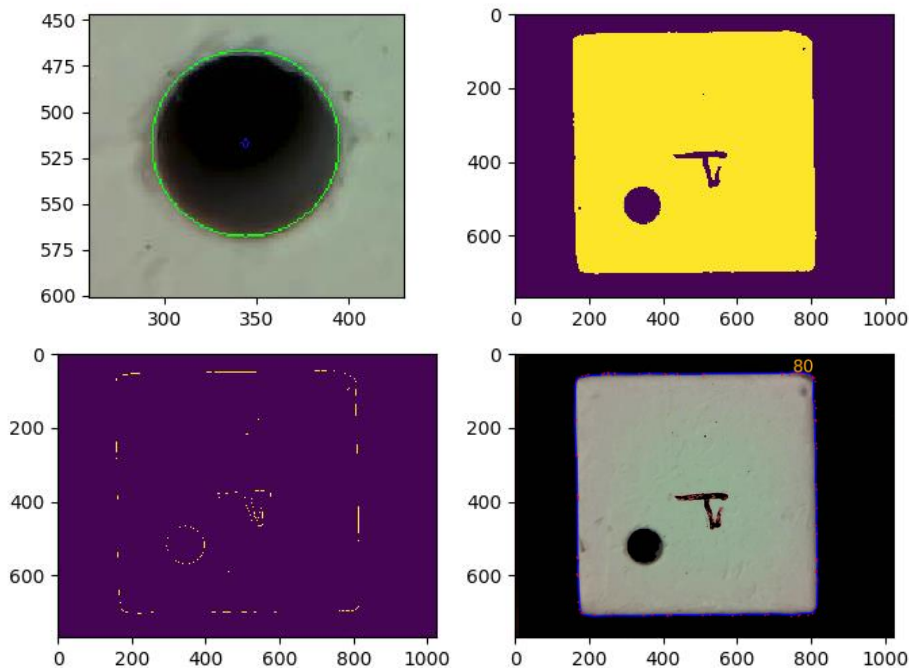


- シンチレータのわずかな大きさやファイバー穴の位置の誤差が200万個並べると非常に大きくなってしまいます。
- 画像解析でシンチレータを検査できるシステムを開発中。
- **まだ開発項目が多数。**
  - 組み立て時の検出器試験。
  - エレクトロニクス。
  - データ取得システム
  - シミュレーション。
  - 再構成アルゴリズム。

## 3方向同時撮影システム

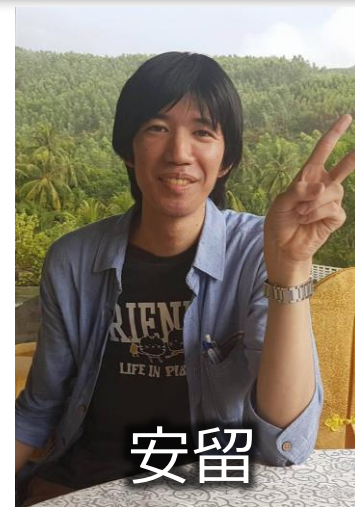


## 画像解析による品質検査



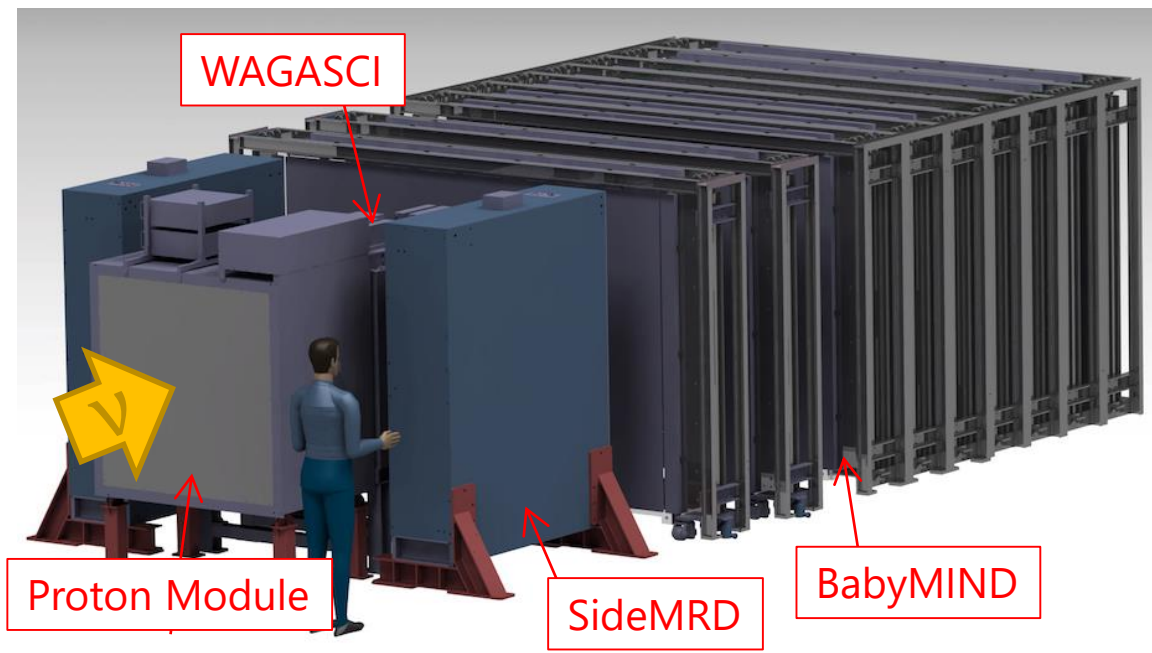
# WAGASCI-BabyMIND検出器

- 水とシンチレータ標的のニュートリノ検出器 (WAGASCI, Proton Module)とそれらを囲む ミューオン検出器(Side MRD, BabyMIND)。
- BabyMINDは1.5Tの磁場により電荷、運動量を測定できる。
- 昨年2月に前置検出器ホールに設置完了。



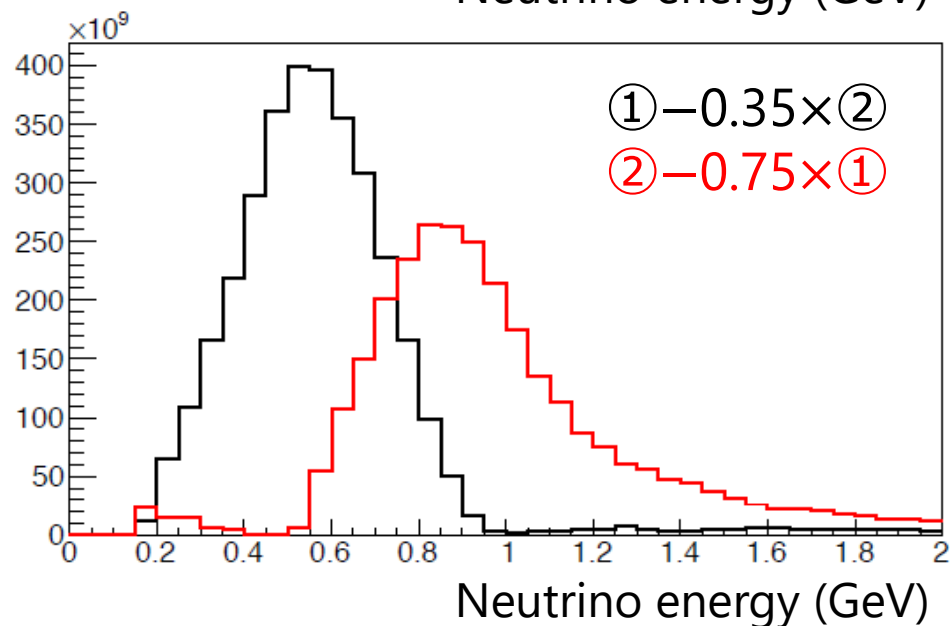
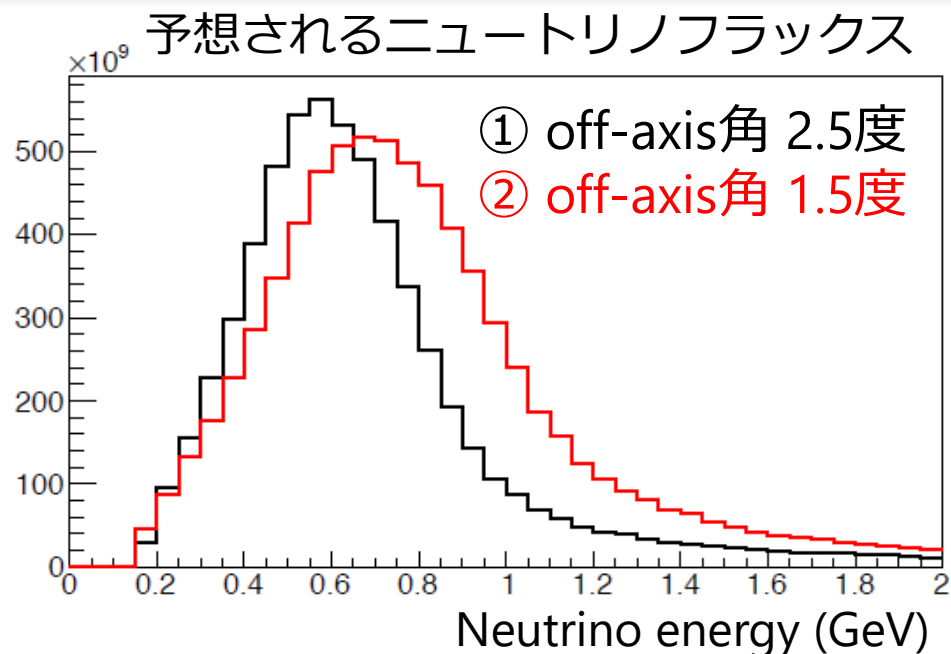
WAGASCI-BabyMIND検出器の概要図

インストール完了時 (昨年2月)





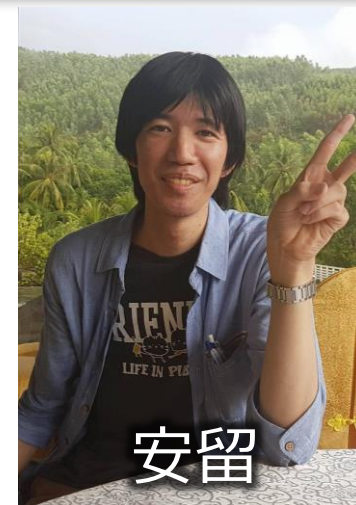
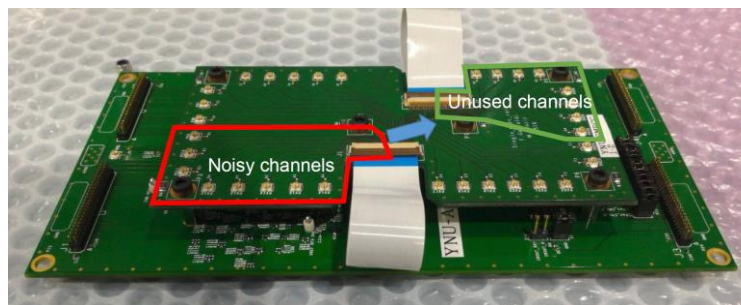
- 前置検出器ホール最下階のoff-axis角1.5度の場所に設置。
- Off-axis角2.5度のND280とはニュートリノのエネルギー分布が異なる。
- 異なったエネルギーのニュートリノに対するニュートリノ反応を測定。
- さらにND280とデータの差し引きをすることで、シャープなエネルギー分布のニュートリノに対するニュートリノ反応を測定。



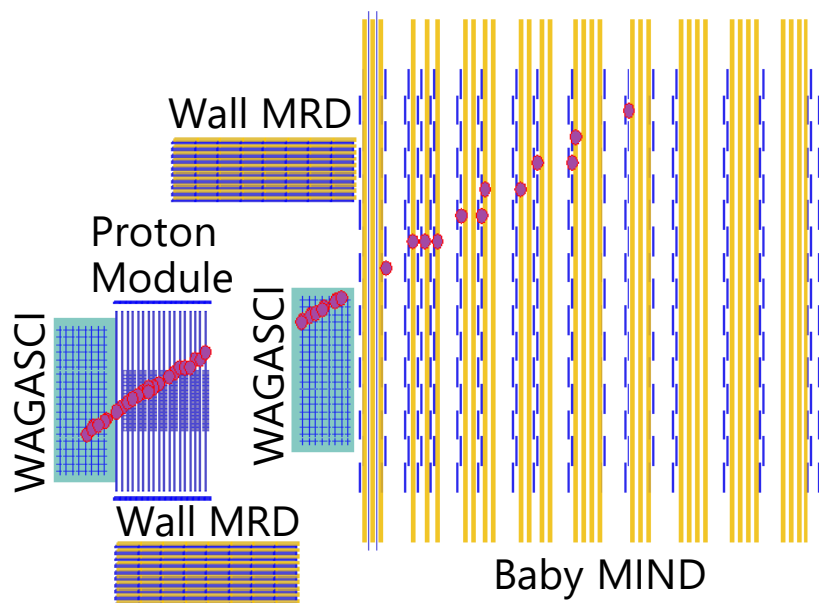
# WAGASCI-BabyMIND検出器

- 昨年11月から初ビームデータを取得。
- ノイズ低減のための試行錯誤。
- ニュートリノイベントを観測。
- 安定性を評価。
- 解析を進行中。

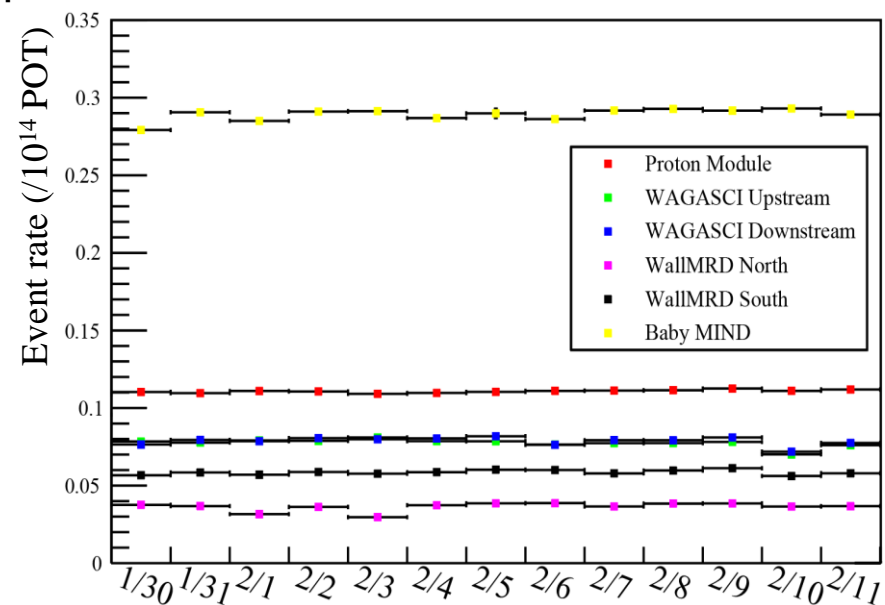
ノイズ低減のための新ボード



ニュートリノイベントのイベントディスプレイ



各検出器のイベントレート



- 究極の位置分解能を持つ原子核乾板を使用。  
→ 低運動量の陽子も検出可能。
- 原子核乾板は時間情報がないので、シンチレータ検出器と飛跡をマッチング、ミュオンを識別。



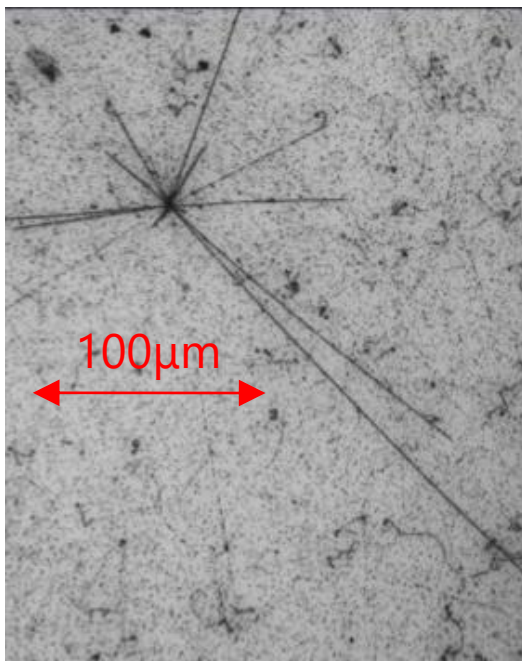
平本



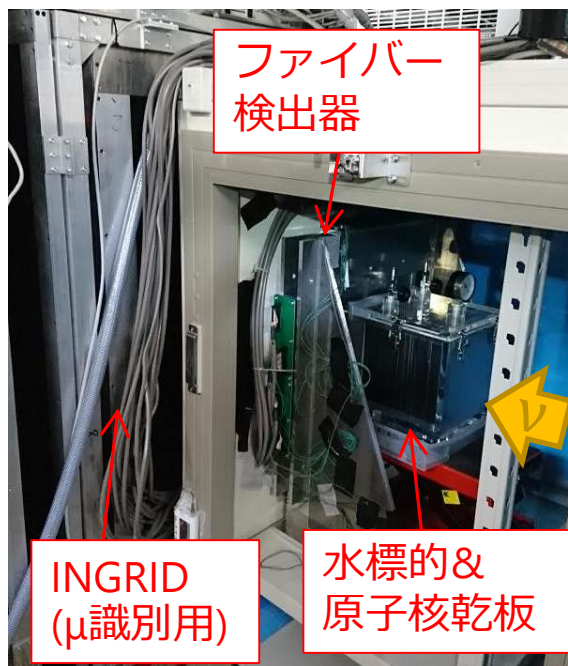
小田川

+ Ali

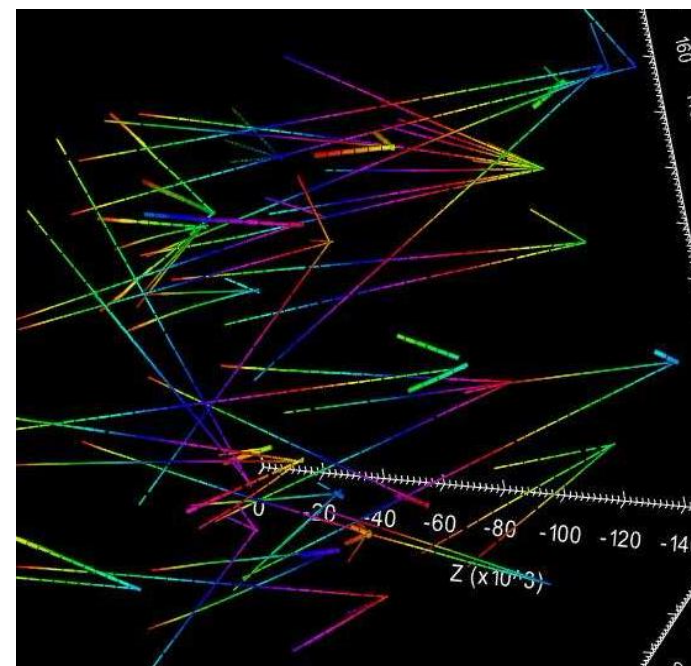
原子核乾板における飛跡



一昨年のセットアップ



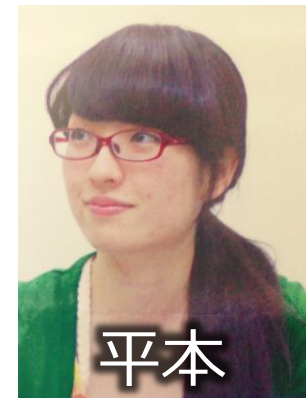
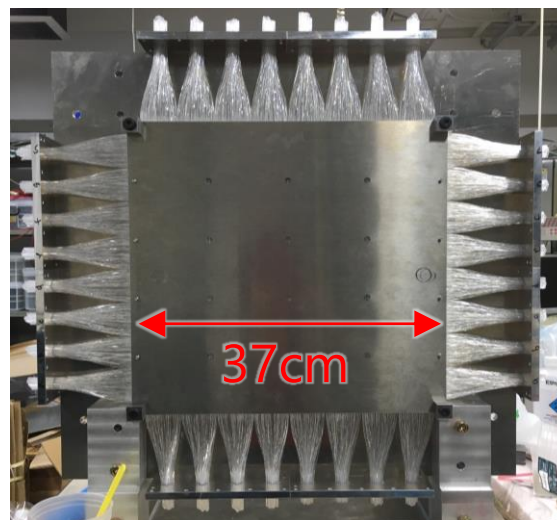
再構成されたニュートリノ事象



# NINJA実験

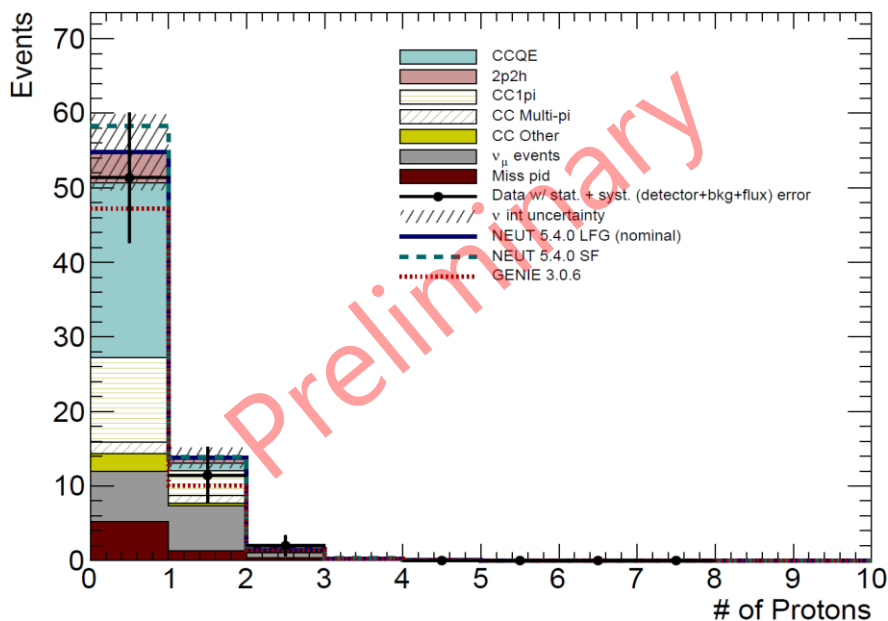
- 飛跡マッチング用のファイバー検出器を開発。
- 一昨年のデータを解析し、初めて水標的のニュートリノ反応からの陽子を200MeV/cまで検出。
- まだ統計誤差が大きい。

## ファイバー飛跡検出器

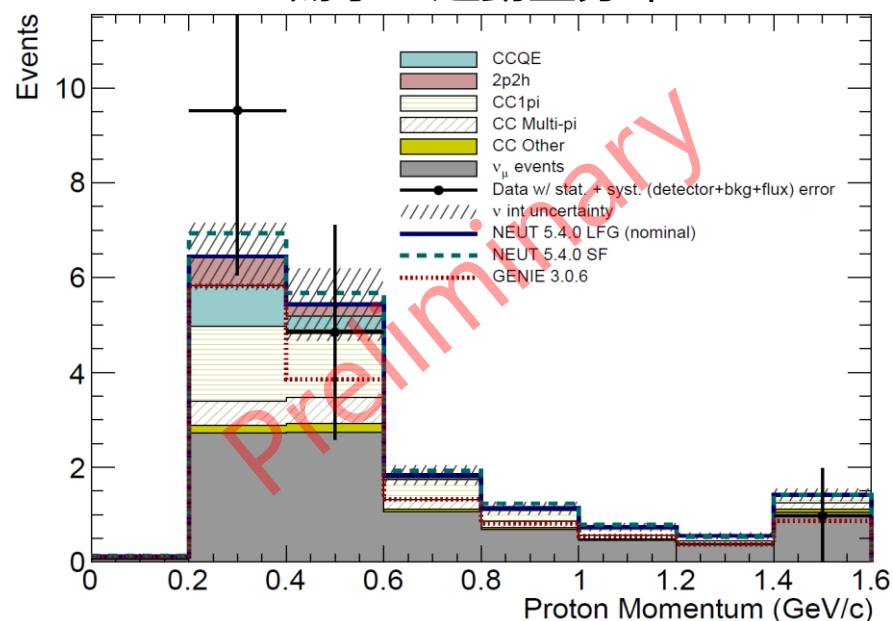


平本

## 陽子の多重度分布



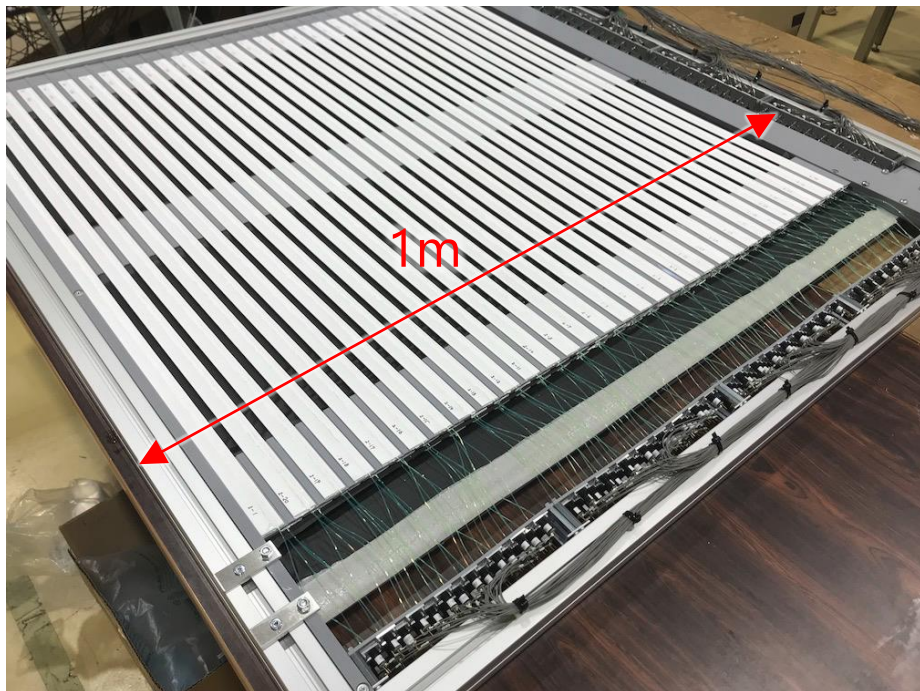
## 陽子の運動量分布



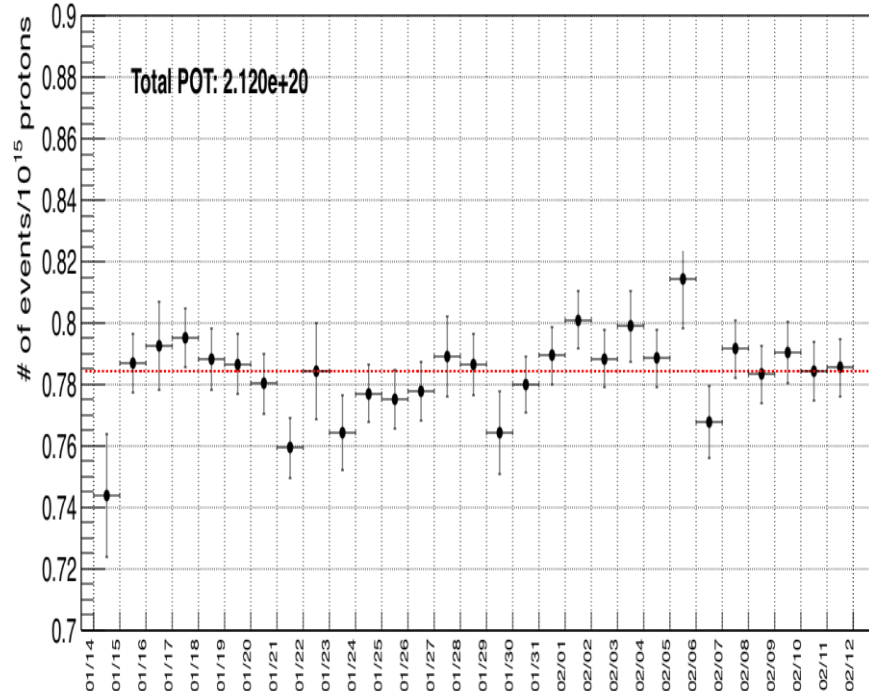
- 去年のビーム運転ではより大型化し(4→75kg)、BabyMINDをミュオン検出に使用。
- 飛跡マッチングのための新トラックを開発、製作して導入。
- データ解析やシミュレーション開発が進行中。



新たに開発されたシンチレータトラック



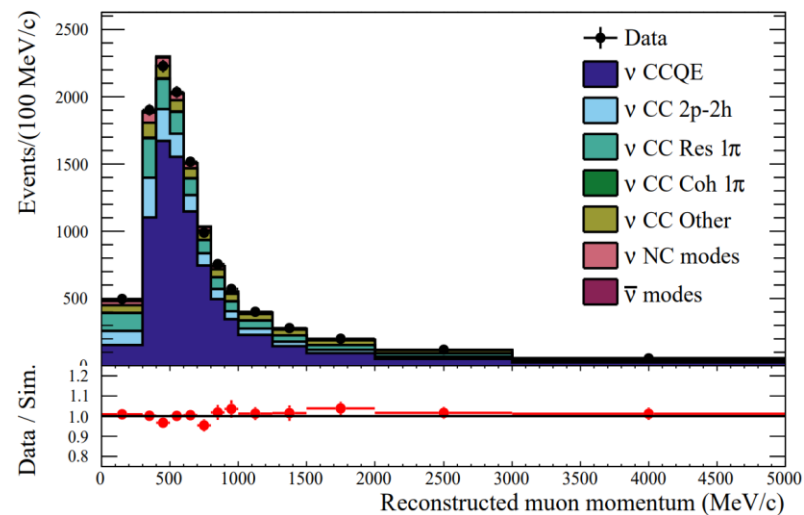
トラックにおけるイベントレート



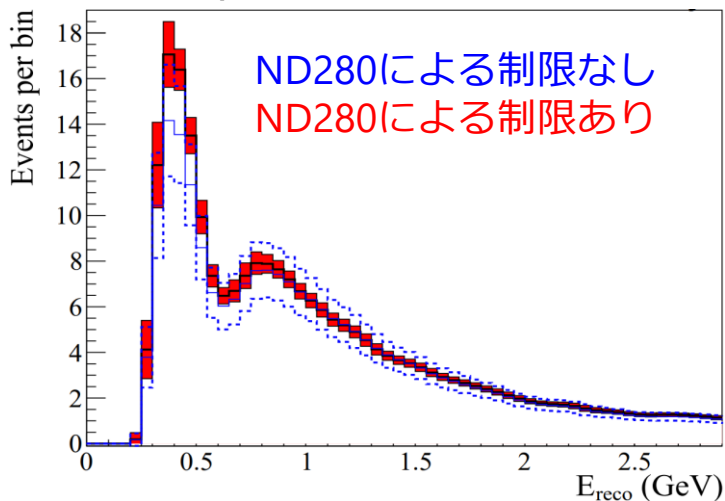
# ニュートリノ振動解析

- 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。
- 大学院における研究の集大成。

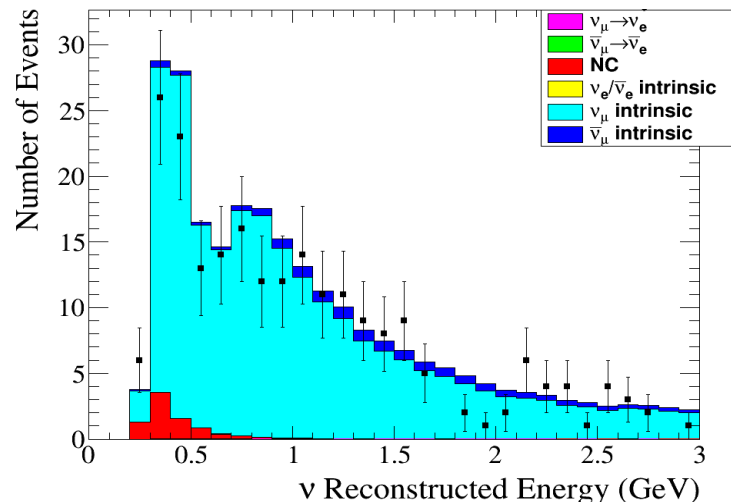
## ND280におけるニュートリノ測定



## Super-Kにおける予測



## Super-Kにデータのフィット



# まとめ

- T2K実験は現在ニュートリノ振動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。
- 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。

博士号までの道のりの一例

