

T2K実験 (東海編)

木河達也

2019年4月23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

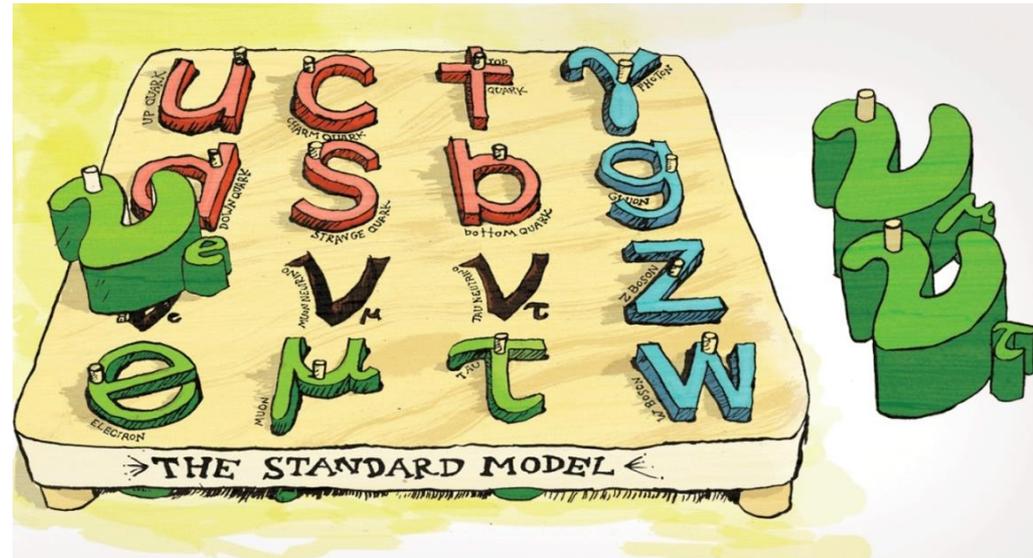
- 1930年: ニュートリノの存在の予言 (Pauli)
- 1932年: ベータ崩壊の理論化 (Fermi)
- 1956年: ニュートリノの発見 (Reines, Cowan) 
- 1962年: ミューニュートリノの発見 (Lederman, Schwartz, Steinberger) 
- 1962年: フレーバー間ニュートリノ振動の予言 (Maki, Nakagawa, Sakata)
- 1970年: 太陽ニュートリノ問題 (Davis) 
- 1987年: 超新星爆発ニュートリノの検出 (Koshiba) 
- 1998年: ニュートリノ振動の発見 (Super-K, SNO)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

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。

T2K実験で探索

- 質量の順序。

- 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、Roger、木河
- 研究員 (3人)
中村輝 (神戸大)、小原、Ali
- 博士課程 (7人)
潘、芦田、平本、中村和、森、吉田、安留
- 修士課程 (3人)
小田川、栗林、田島
- 研究生 (1人)
冯

今回の紹介 → T2K(東海側)+ α 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(ν_e, ν_μ, ν_τ)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 δ_{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

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

これまでの測定状況

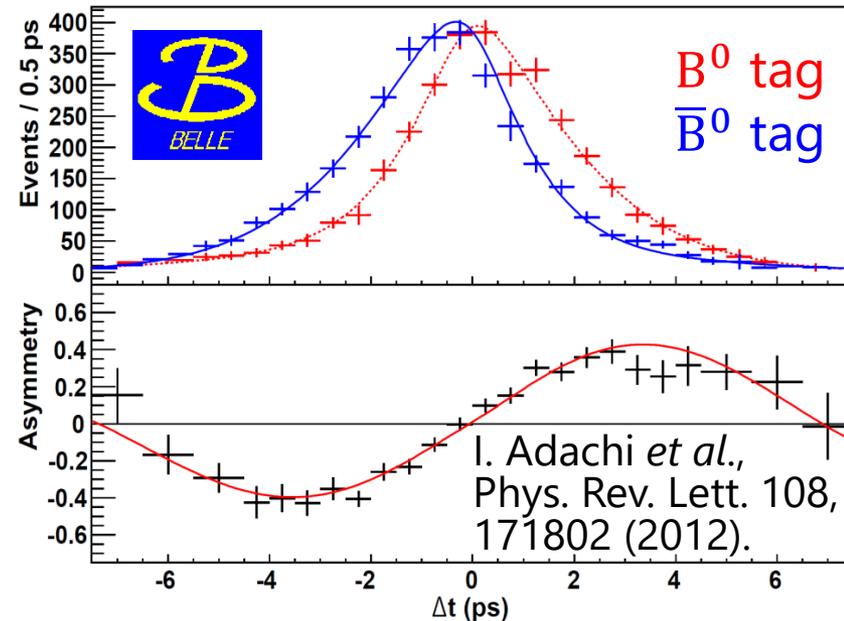
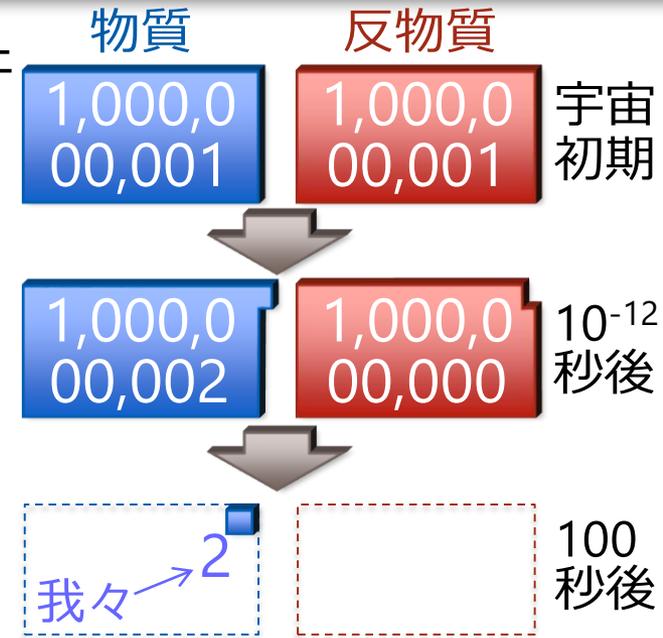
$$\begin{aligned}
 \theta_{12} &= 33.4^\circ \pm 0.8^\circ \quad (\text{太陽}\nu, \text{原子炉}\nu) \\
 \theta_{13} &= 8.5^\circ \pm 0.2^\circ \quad (\text{原子炉}\nu, \text{加速器}\nu) \\
 \theta_{23} &= 45.8^\circ \pm 3.2^\circ \quad (\text{大気}\nu, \text{加速器}\nu) \\
 \Delta m_{21}^2 &= (7.5 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{eV}^2 \\
 |\Delta m_{32}^2| &= (2.3 \pm 0.1) \times 10^{-3} \text{eV}^2
 \end{aligned}$$

残っている謎

- CP対称性は破れているか。
- θ_{23} は 45° (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

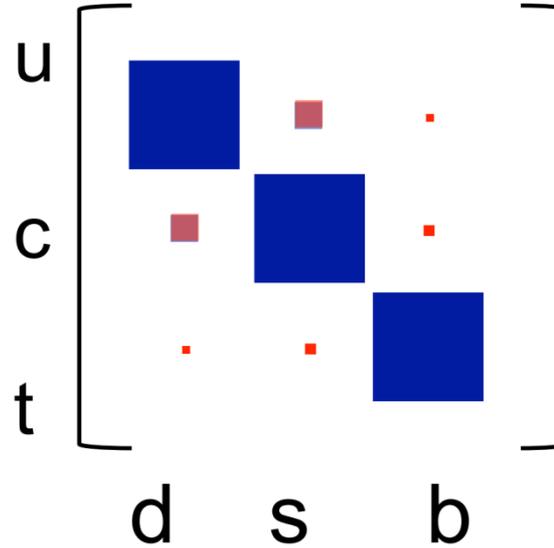
- 物質優勢宇宙を説明するサハロフ3条件
 - バリオン数の破れ。
 - 非熱平衡状態。
 - C, CP対称性の破れ。
- クローニン、フィッチが K^0 崩壊におけるCP対称性の破れを発見 (1964年)。
- 小林、益川がCP対称性の破れを理論的に説明 (1973年)。
- Belle, BaBar実験において B^0 崩壊により理論を検証。
- しかし物質優勢宇宙を説明するにはCP対称性の破れは小さすぎる。
- 新たなCP対称性の破れが必要。
→ ニュートリノが原因?



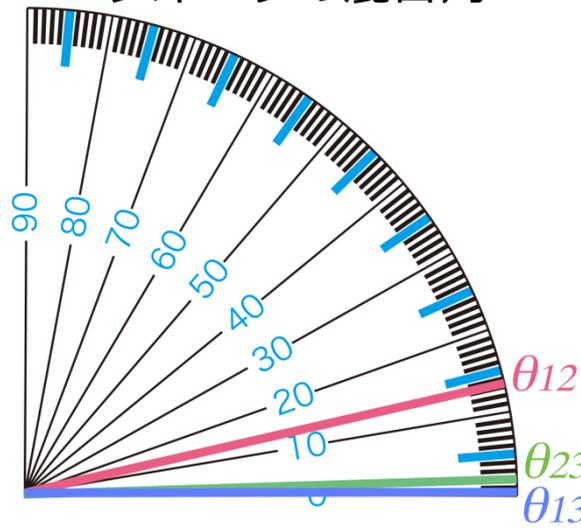
クォークとニュートリノの混合行列

- 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 θ_{23})

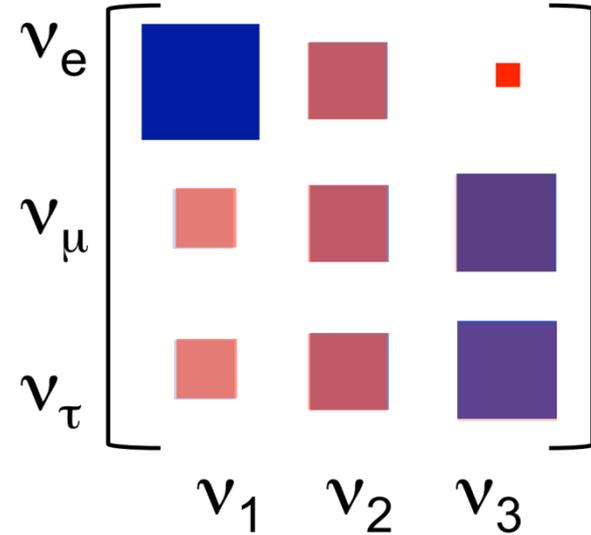
クォークの混合行列
(小林・益川行列)



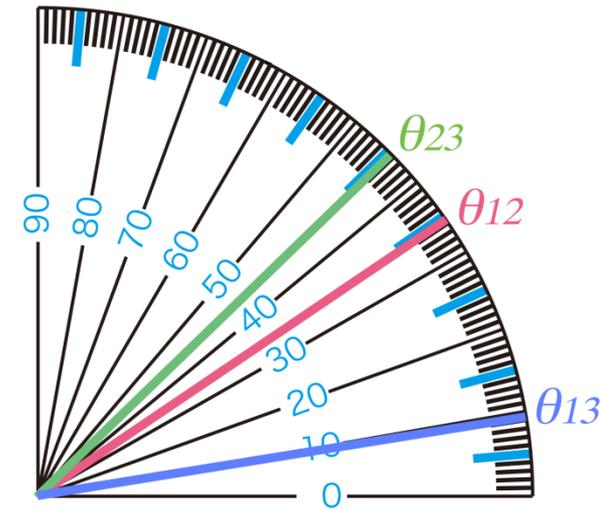
クォークの混合角



ニュートリノの混合行列
(牧・中川・坂田行列)

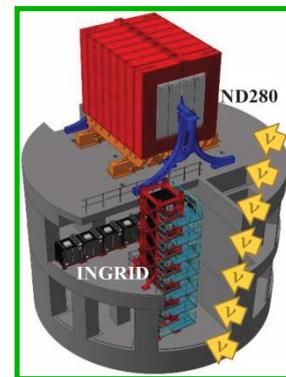


ニュートリノの混合角

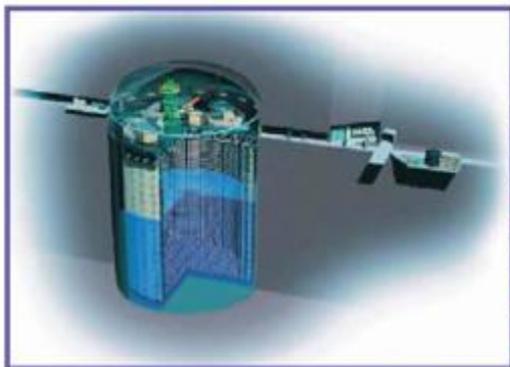


- J-PARCで ν_μ または $\bar{\nu}_\mu$ ビームを生成。
- 直後の前置検出器で振動前のニュートリノの精密測定。
- 295km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノ観測。
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率の違いからCP対称性の破れを探索。
- ν_μ や $\bar{\nu}_\mu$ の消失確率から混合角 θ_{23} を精密測定。

Near detector



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

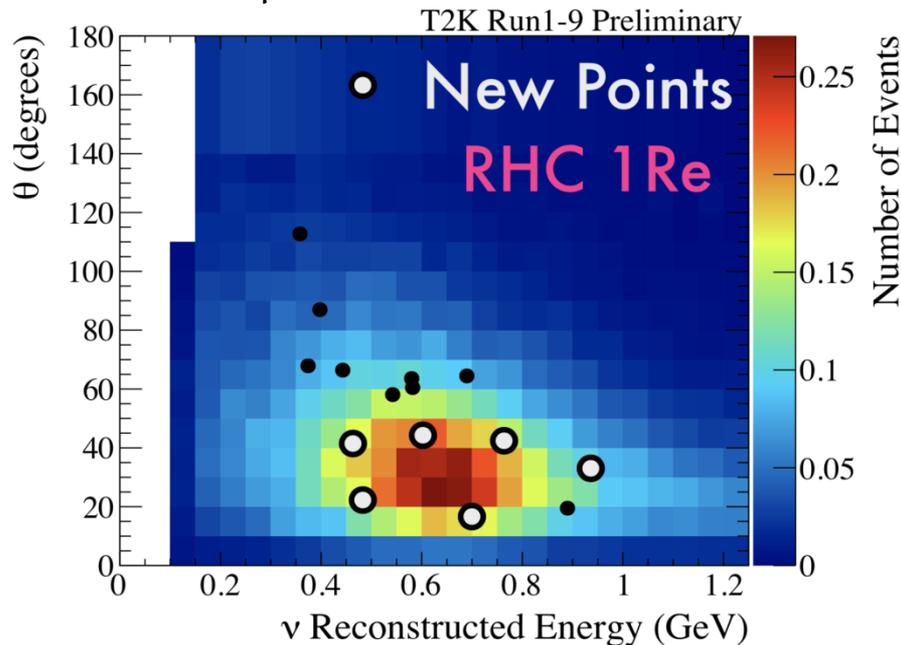


Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)

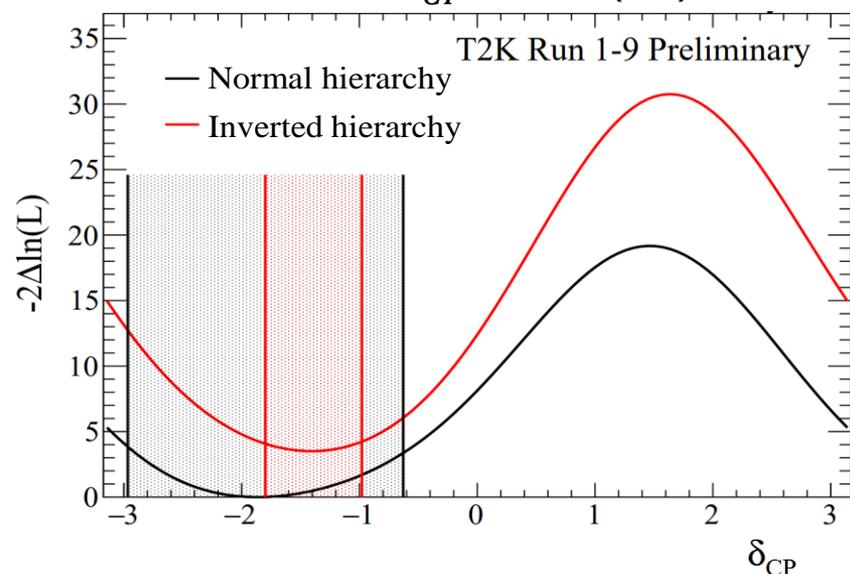


- $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 候補イベントを新たに6イベント観測。
- CP対称性の破れを 2σ (95%)の信頼度で示唆。
- 混合角 θ_{23} を世界最高精度で測定。(45度と無矛盾)

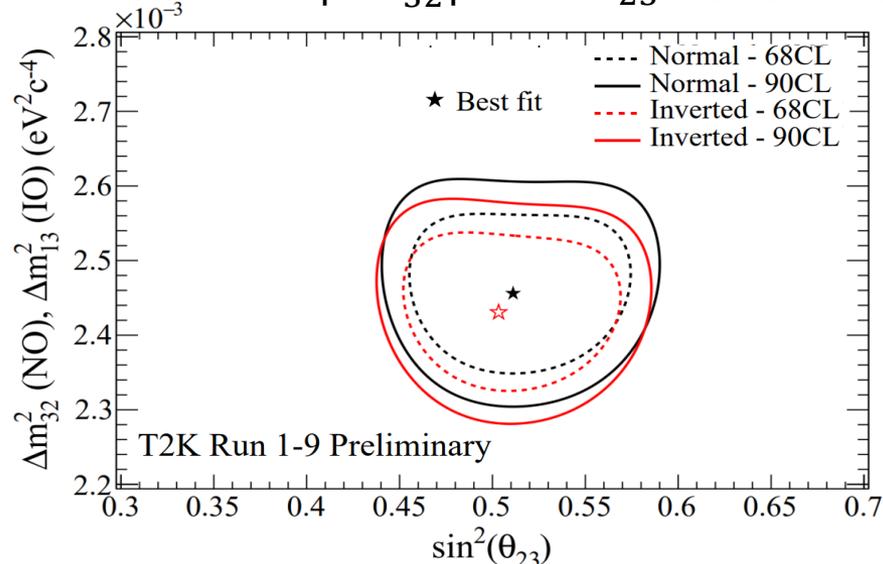
$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の候補イベント



T2K実験による δ_{CP} の95%(2σ)信頼領域

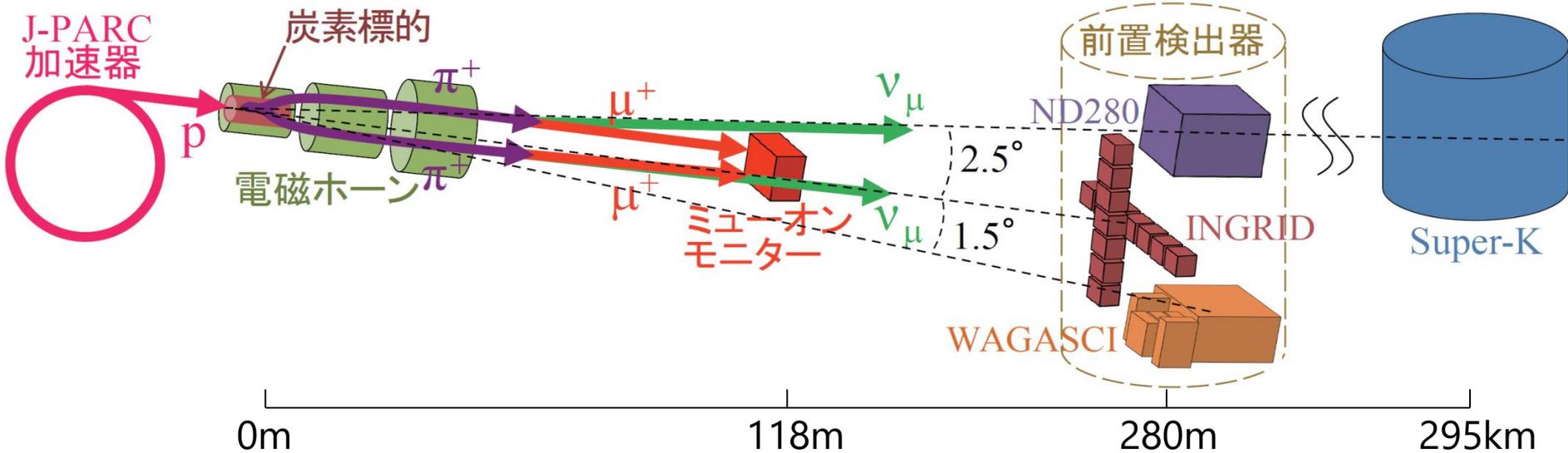
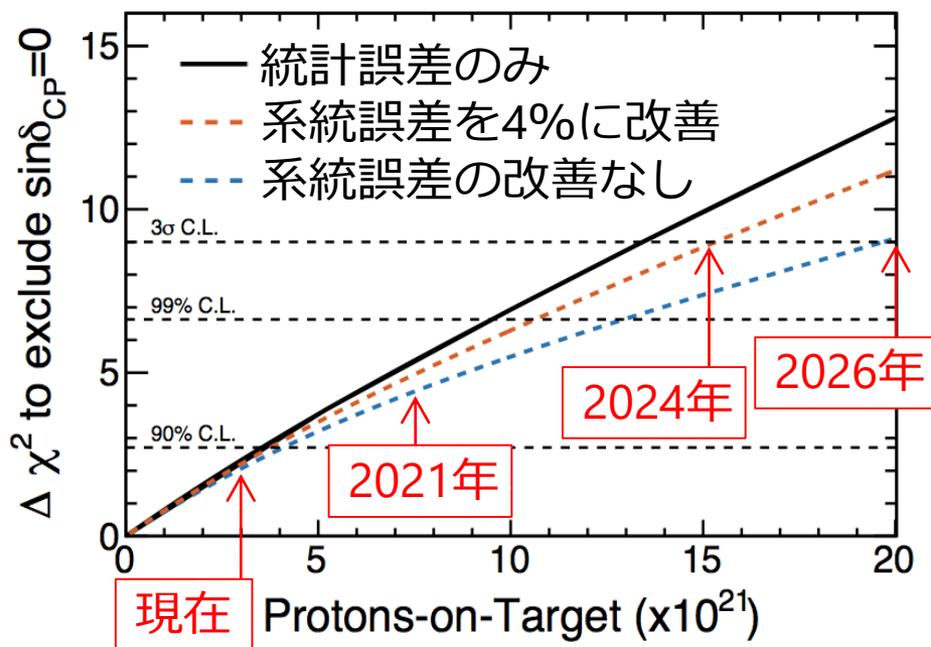


T2K実験による $|\Delta m_{32}^2|$ と $\sin^2\theta_{23}$ の信頼領域



- 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。**

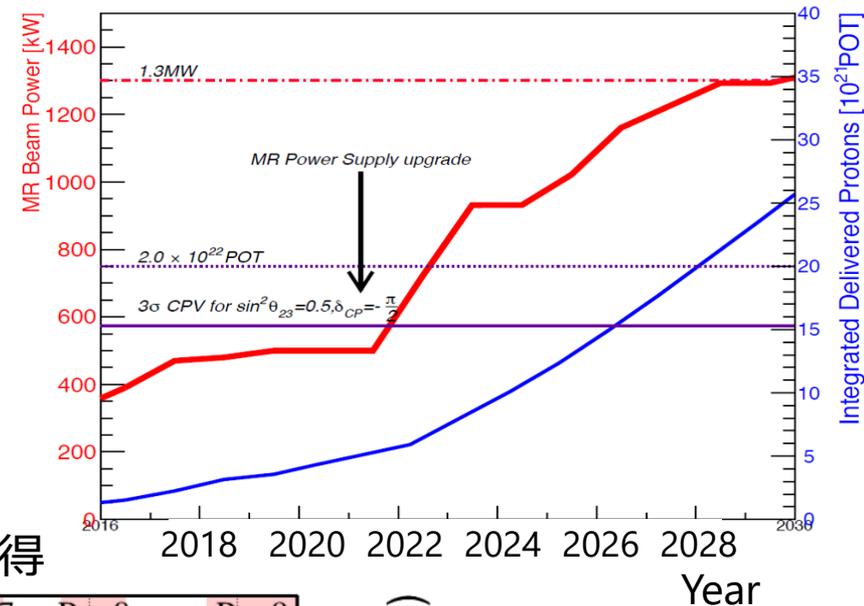
ニュートリノCP対称性破れの探索感度



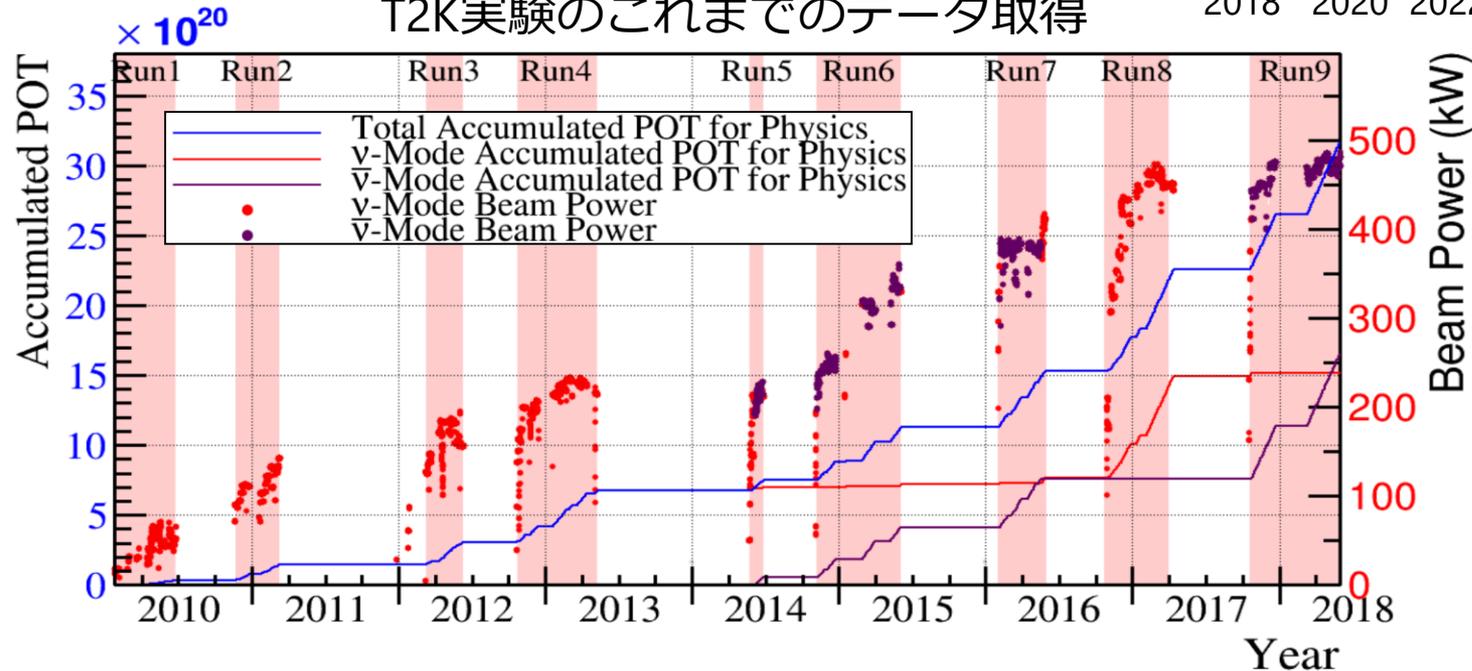
J-PARC加速器の増強

- 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

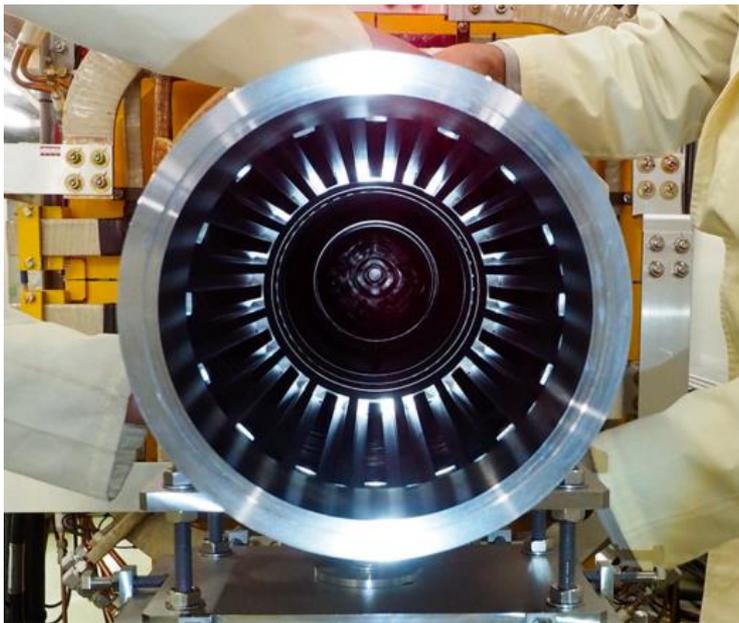


16電極モニター

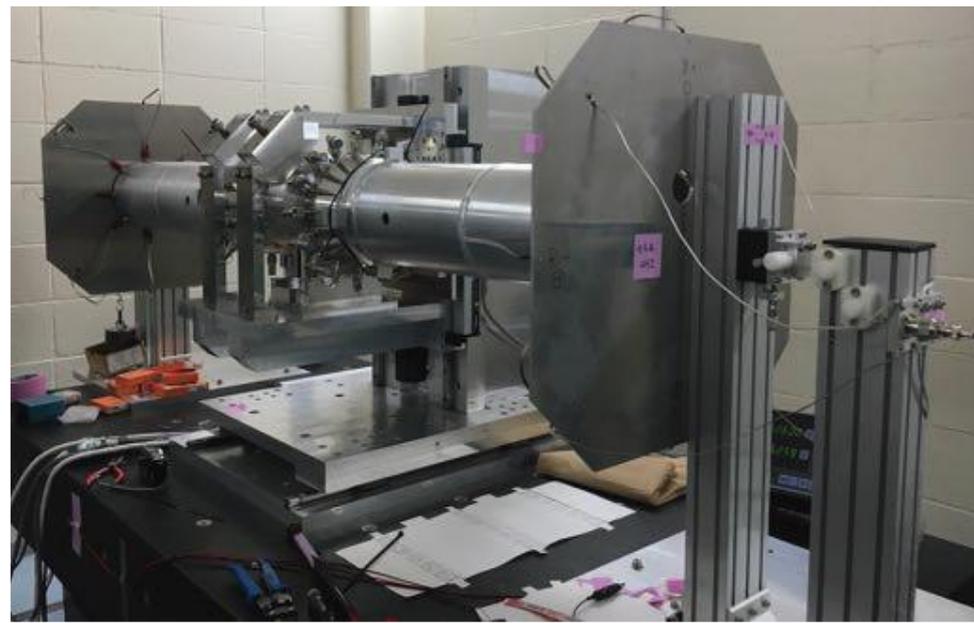
- ビームが加速器を周回中に不安定になり真空ダクトなどに衝突して失われてしまう。(ビームロス)
- ビームロスの原因となるビームの広がりを理解するために16電極モニターを開発。
- 次回のRunで実用してビームの素性を調査。



16電極モニター

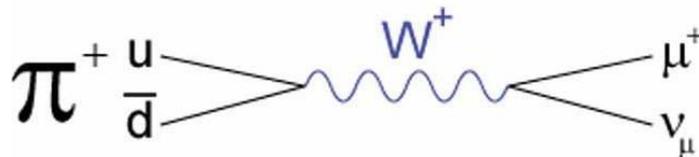


ワイヤーを使った較正



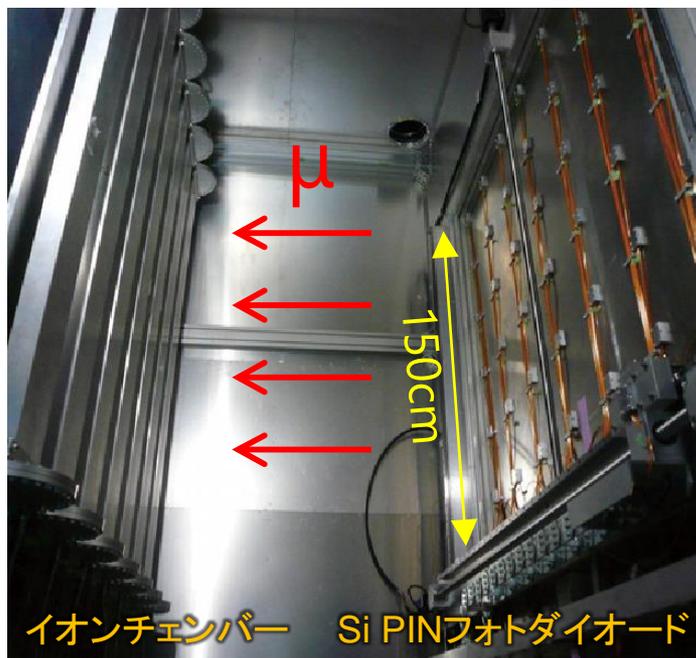
ミュオンモニターによるビーム測定

- ニュートリノが π 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。

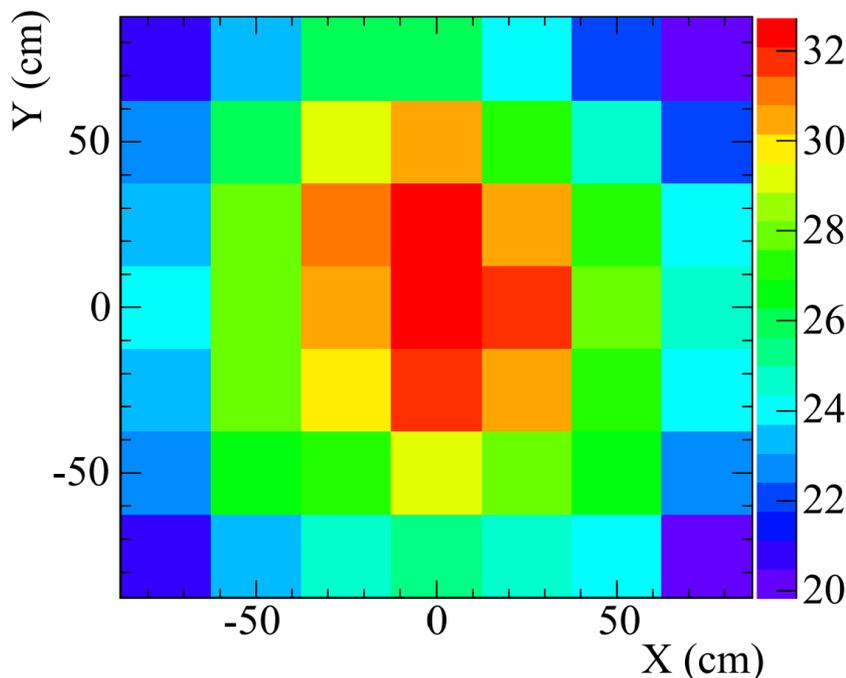


- これを測定することでリアルタイムにビームを監視できる。→ミュオンモニター

ミュオンモニター

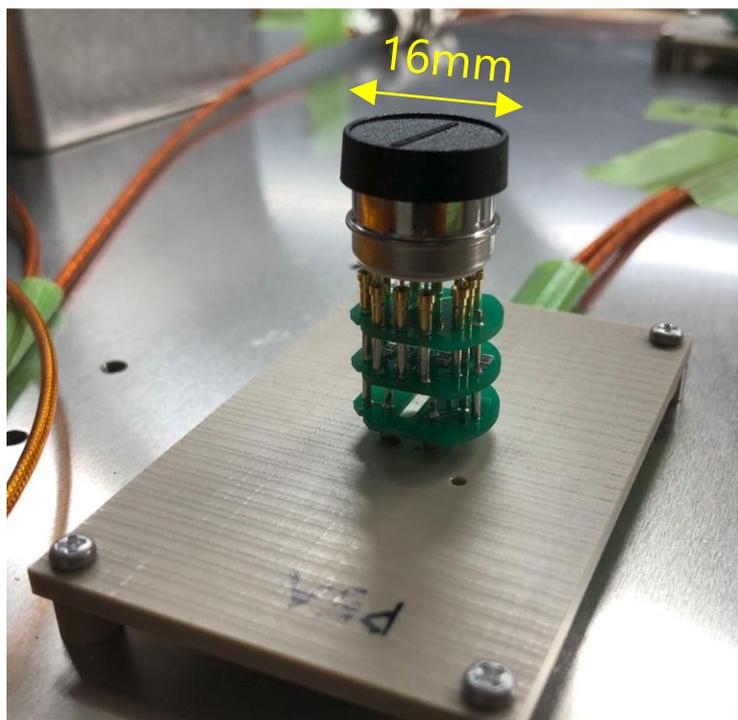


測定されたミュオン分布

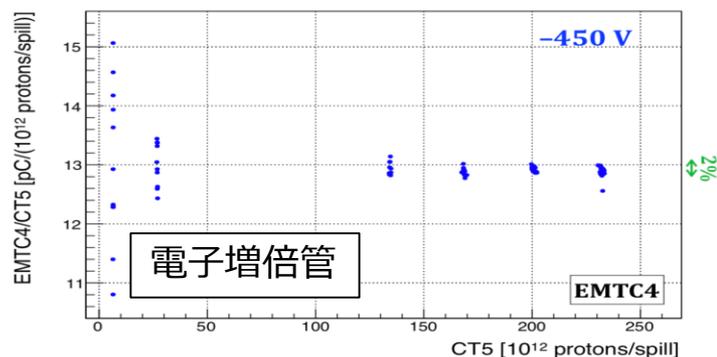
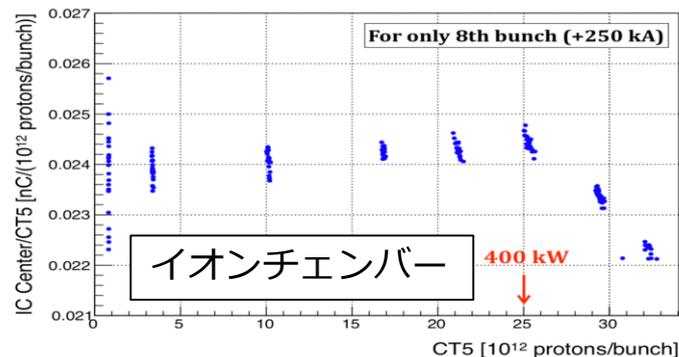


- 既存のミュオンモニターは大強度ビーム運転における問題が見え始めてきた。
- 新しいミュオンモニターとして電子増倍管による検出器を開発、試験中。
- 7月の電子ビーム試験で詳細に性能評価。

電子増倍管検出器



ビーム強度に対する安定性



INGRIDによるビーム測定

- 十字に配置された14台の検出器。
- ニュートリノビームの強度と方向を精密に測定。
- 今後の課題



平本

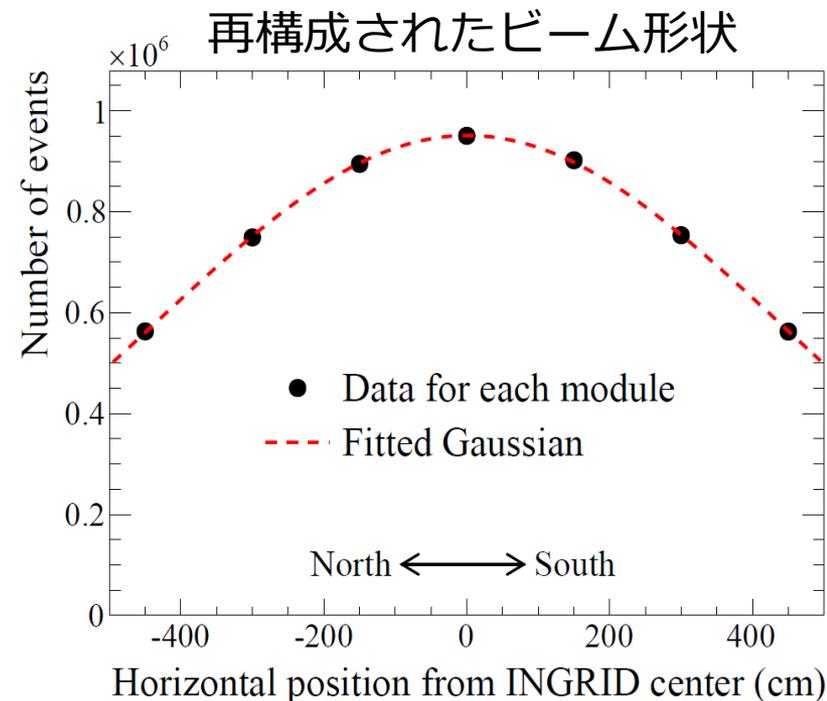
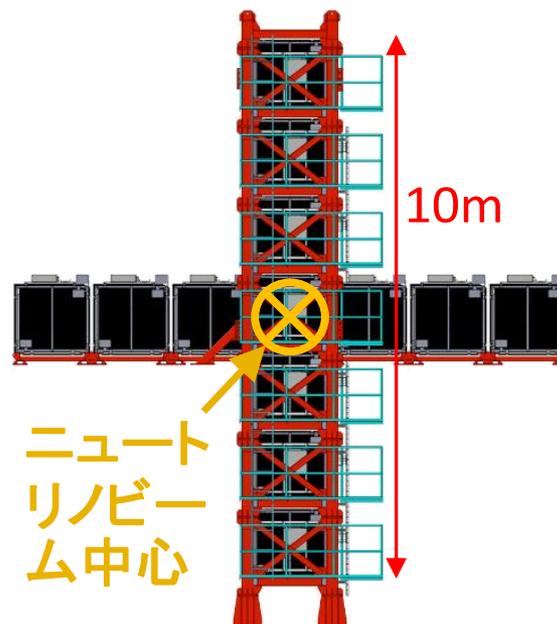


小田川



栗林

- 安定した運転。(ND280のトラブル頻発により重要性大)
- 測定精度の向上。(1GeV付近のニュートリノビームの不定性の最大の原因。)



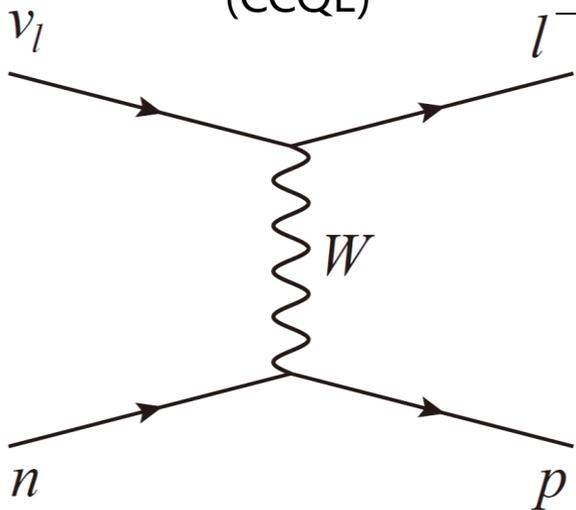
ニュートリノ反応

- 様々なニュートリノ反応モードがある

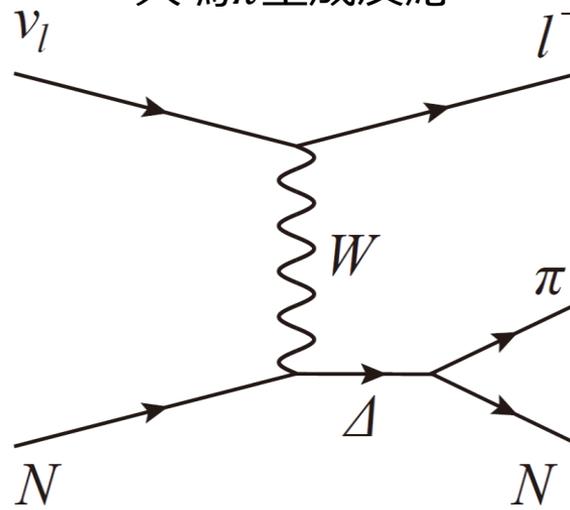
- 荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) $\nu_l + n \rightarrow l^- + p$
- 中性カレント弾性散乱 (NCE) $\nu_l + N \rightarrow \nu_l + N$
- 共鳴 π 生成反応 $\nu_l + N \rightarrow l + N' + \pi$
- コヒーレント π 生成反応 $\nu_l + A \rightarrow l + A + \pi$
- 深非弾性散乱 (DIS) $\nu_l + N \rightarrow l + N' + m\pi$
- 複数核子反応 (2p2h) $\nu_l + n + N \rightarrow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

l : レプトン
 N : 核子
 A : 原子核

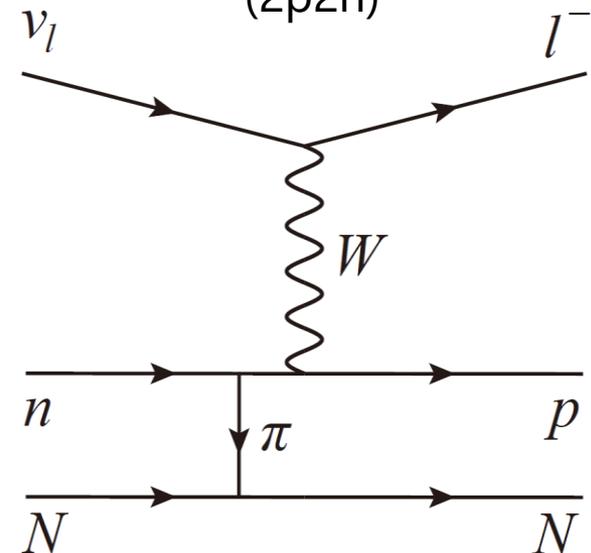
荷電カレント準弾性散乱
(CCQE)



荷電カレント
共鳴 π 生成反応

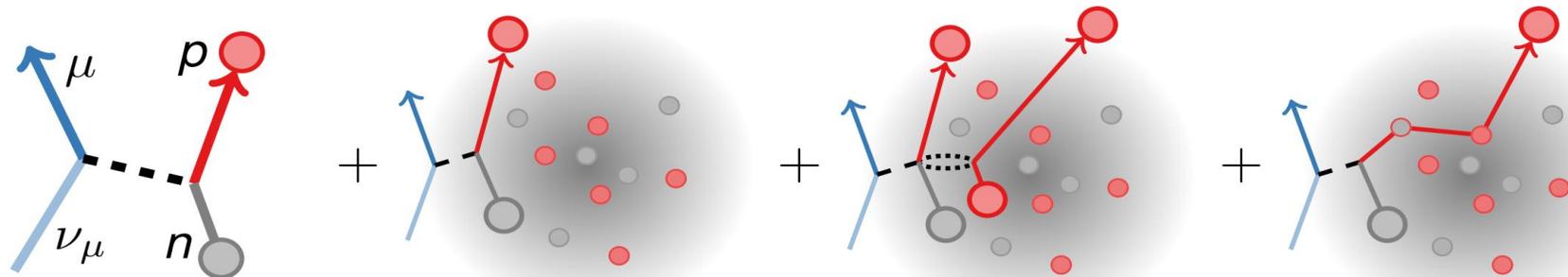


荷電カレント複数核子反応
(2p2h)



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。



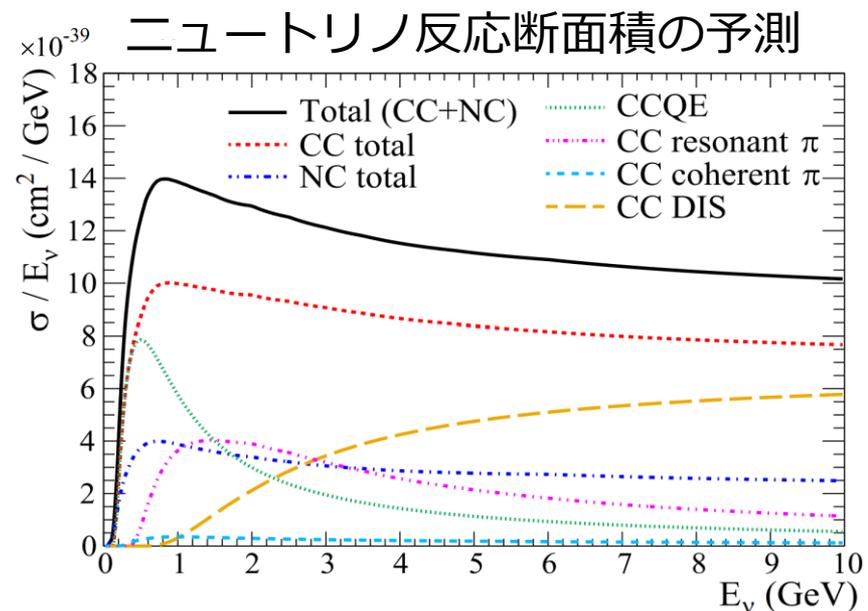
自由核子との散乱

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

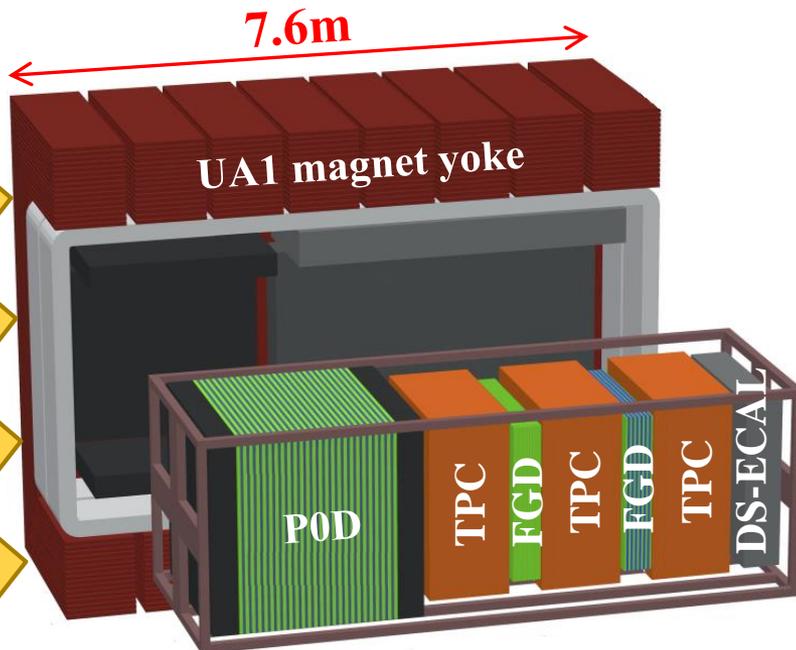
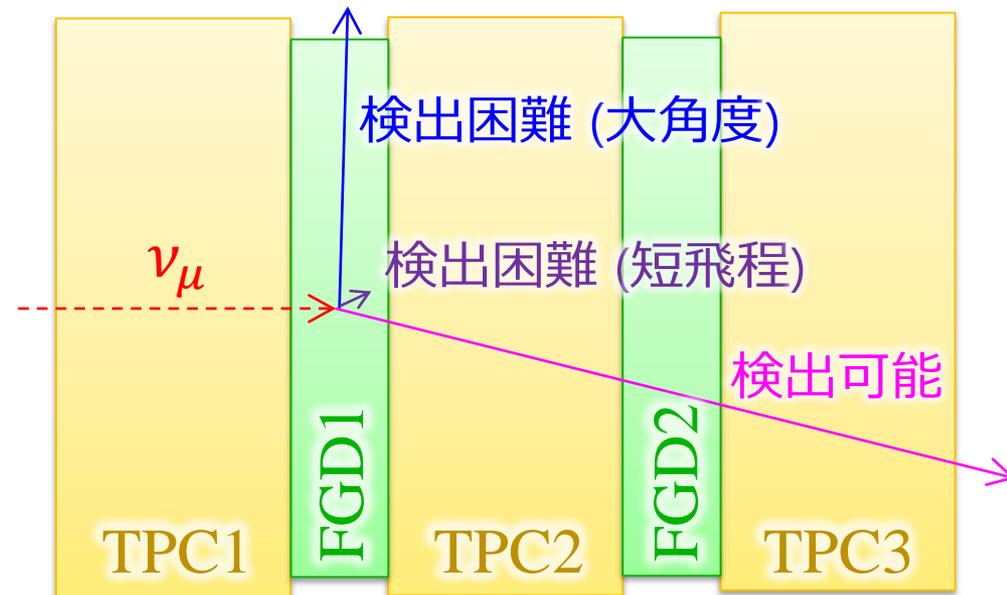
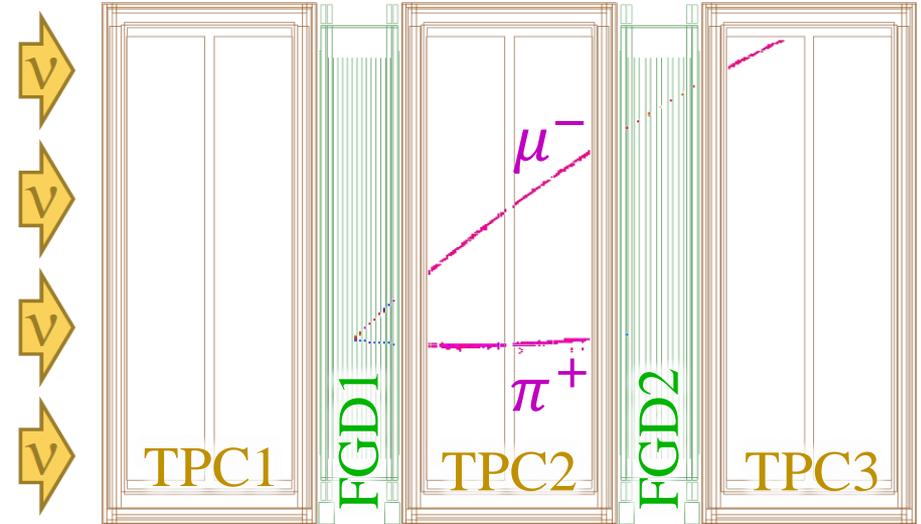
- ニュートリノ反応はエネルギーに依存するが、ニュートリノビームのエネルギー幅は広く、エネルギーを特定不可。
→ 様々なエネルギー、できるだけエネルギー幅の狭いニュートリノビームによる測定。



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

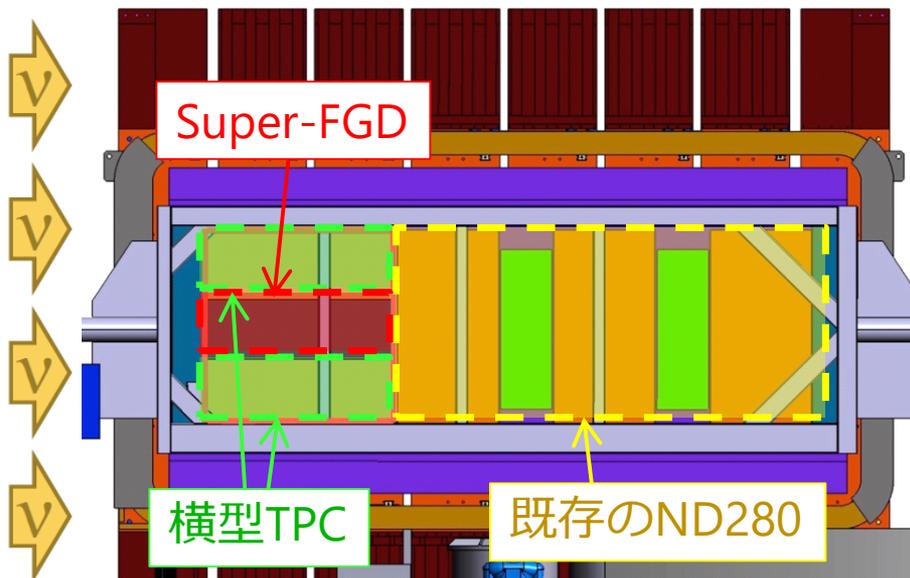


ND280検出器のアップグレード

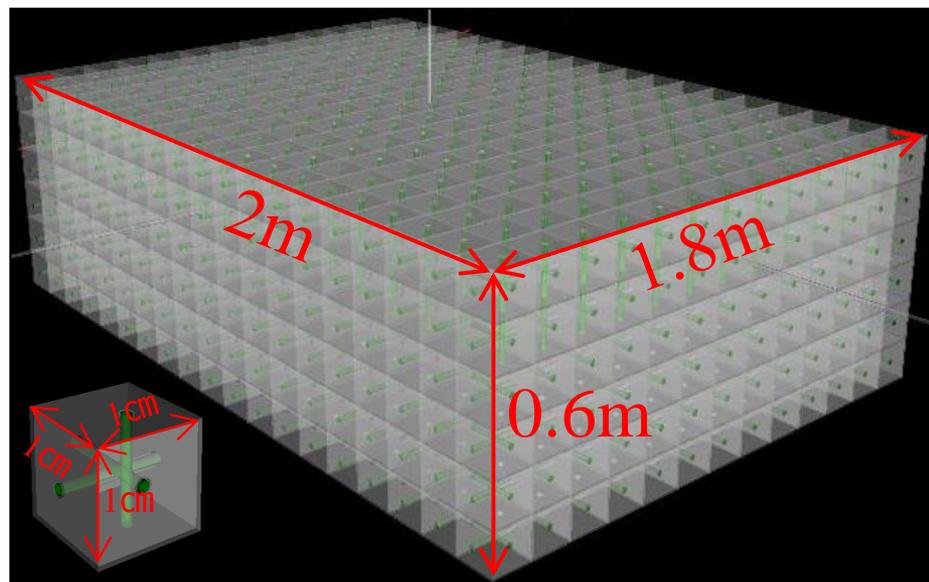
- $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ の立方体のシンチレータを約200万個並べて3方向から波長変換ファイバーで読み出す新しい飛跡検出器 (Super-FGD)。
- Super-FGDの下流だけでなく上下にもTPCを配置。
 - 全方向への荷電粒子の3次元飛跡を再構成。
 - 短い飛跡の検出効率も向上。



アップグレード後のND280の概念図



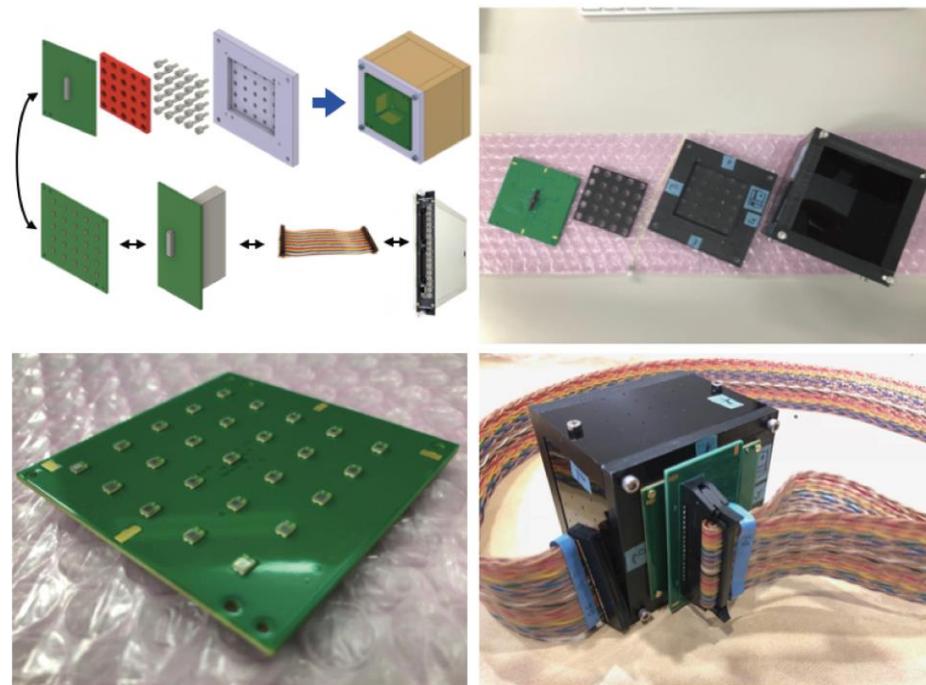
Super-FGDの概念図



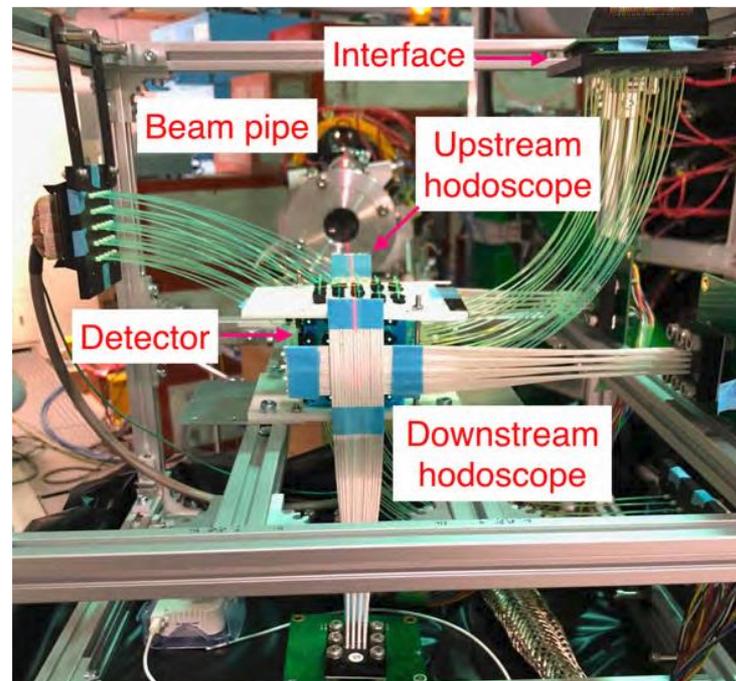
- ビーム試験による性能評価、光学インタフェイスやシミュレーションの開発をやってきた。
- **まだ開発項目が多数。**
 - MPPC大量試験システム。
 - エレクトロニクス。
 - 較正システム。
 - 組立方法の確立。
 - シミュレーション。



光学インターフェイスのプロトタイプ

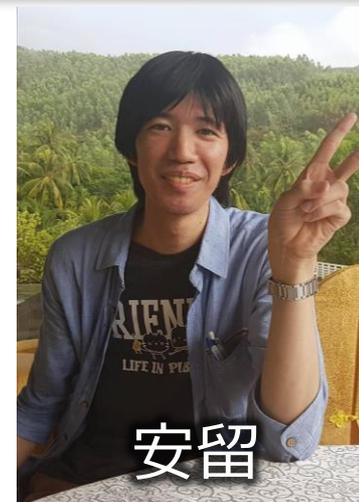


東北大学におけるビーム試験



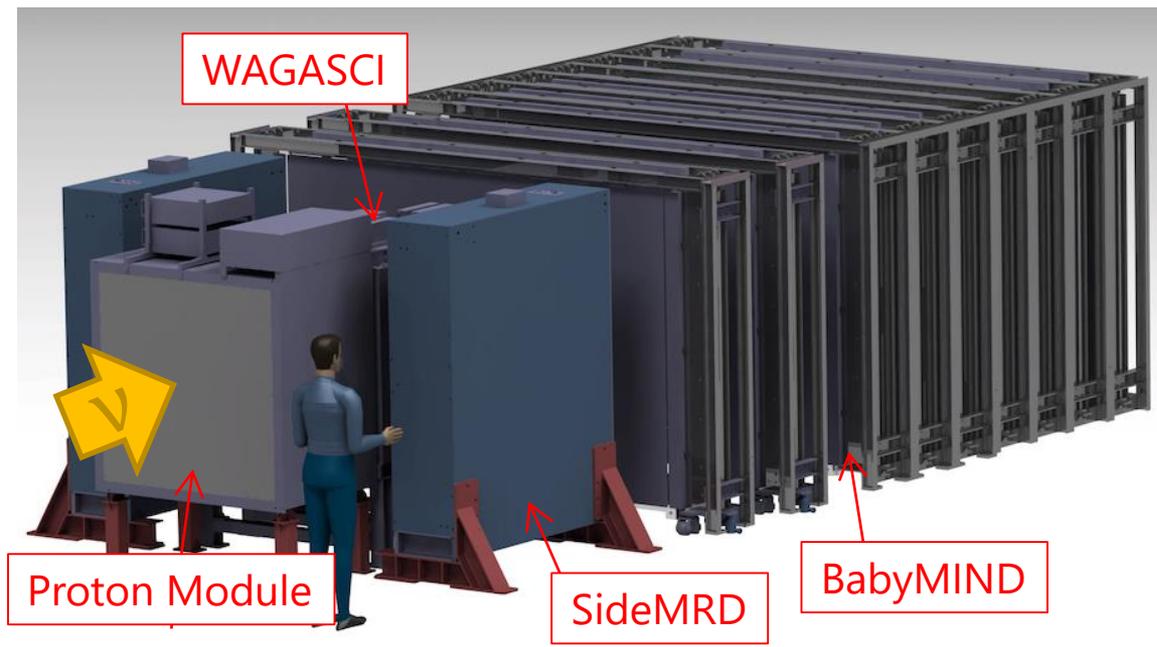
WAGASCI-BabyMIND検出器

- 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は磁場により電荷、運動量を測定できる。
- 次回Runよりfull setupでデータ取得を開始。

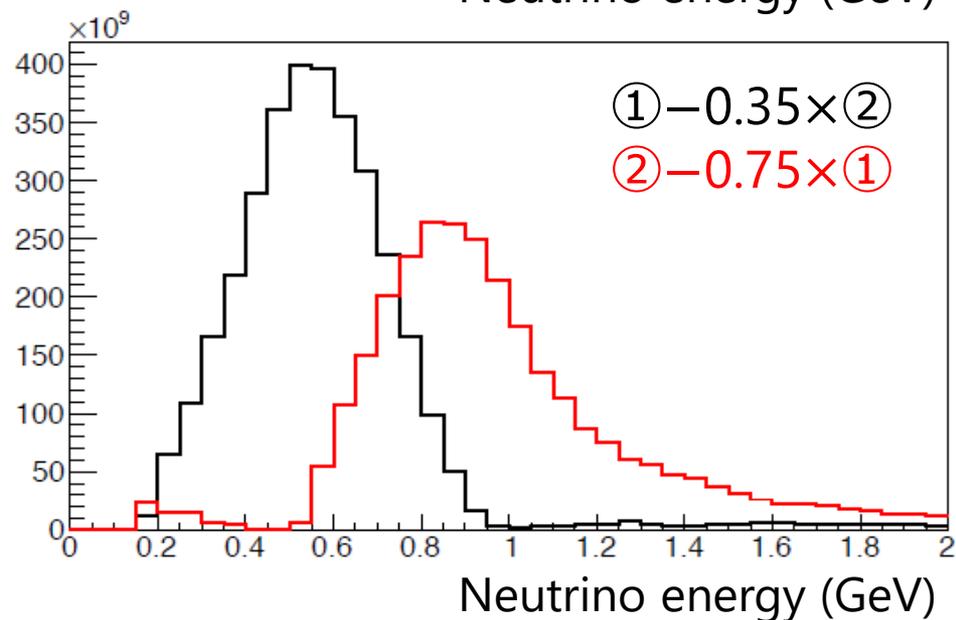
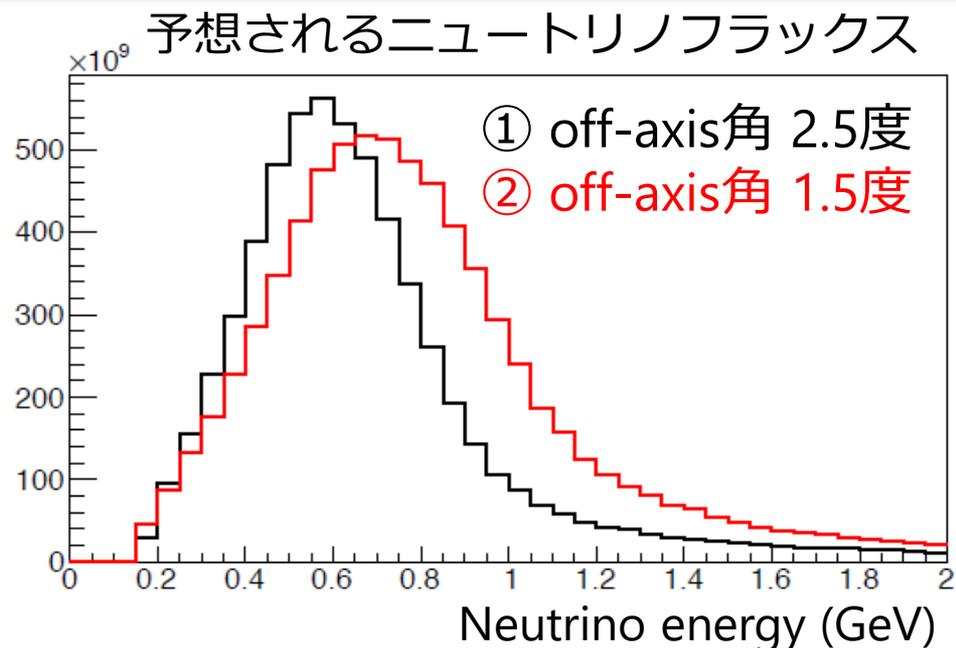


WAGASCI-BabyMIND検出器の概要図

インストール完了時の写真 (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。



- 究極の位置分解能を持つ原子核乾板を使用。
- 低運動量の陽子も高効率で検出可能。
- 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。

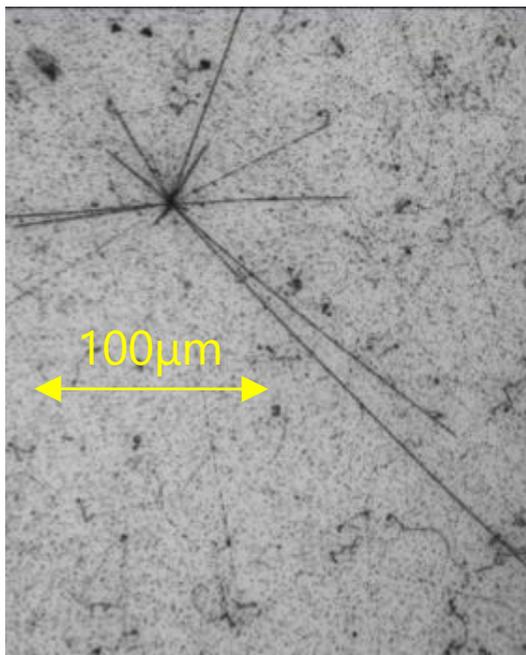


平本

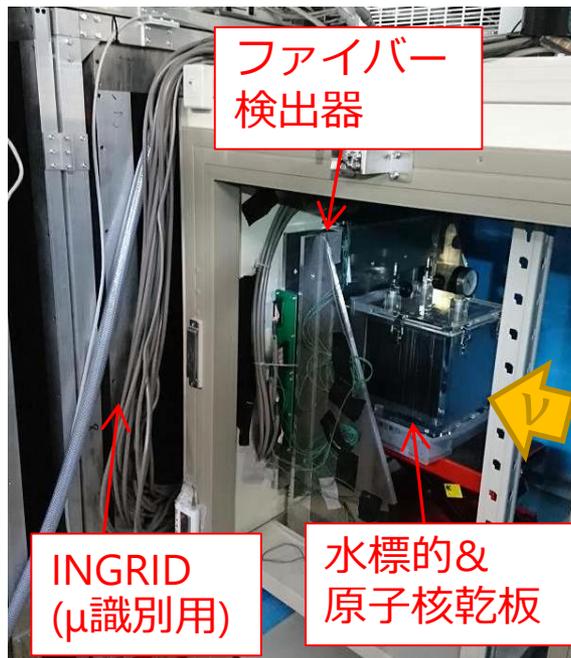


小田川

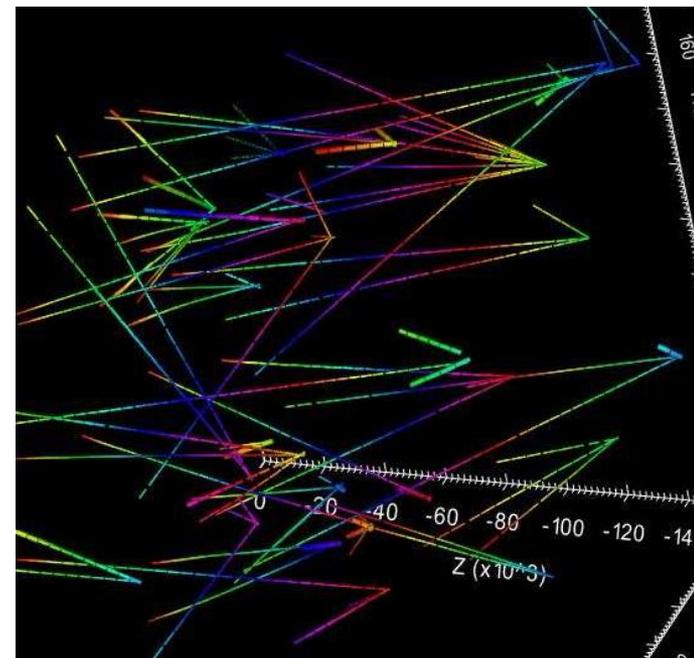
原子核乾板における飛跡



前回のRunのセットアップ



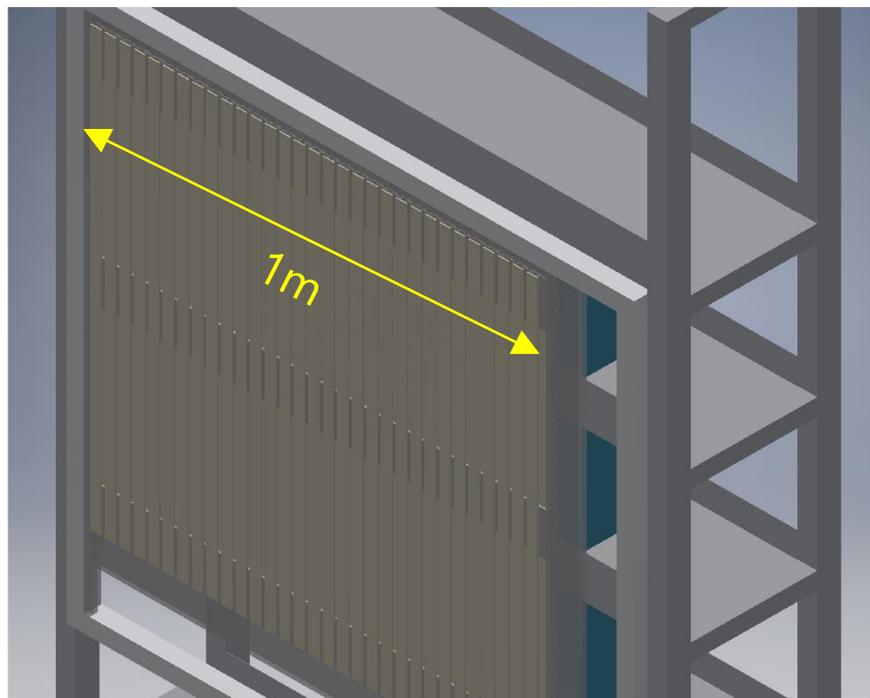
再構成されたニュートリノ事象



- 次回のビーム運転ではより大型化し、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カーを製作中。
- 次回Runで高統計のデータを取得。



新トラックカーの図面



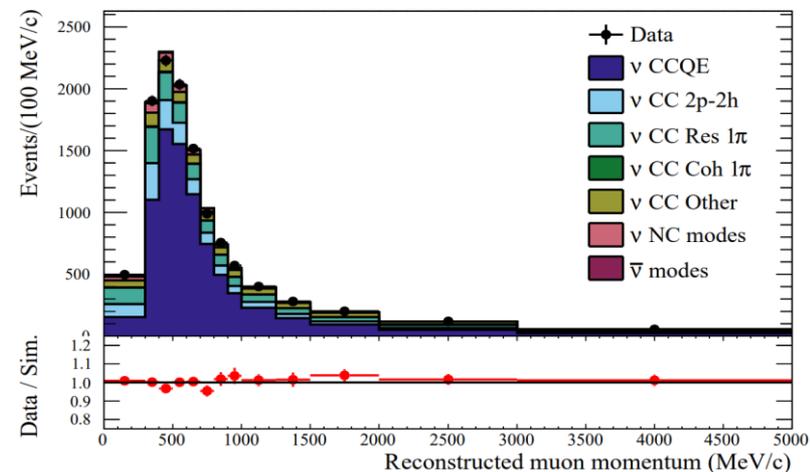
製作中の新トラックカー



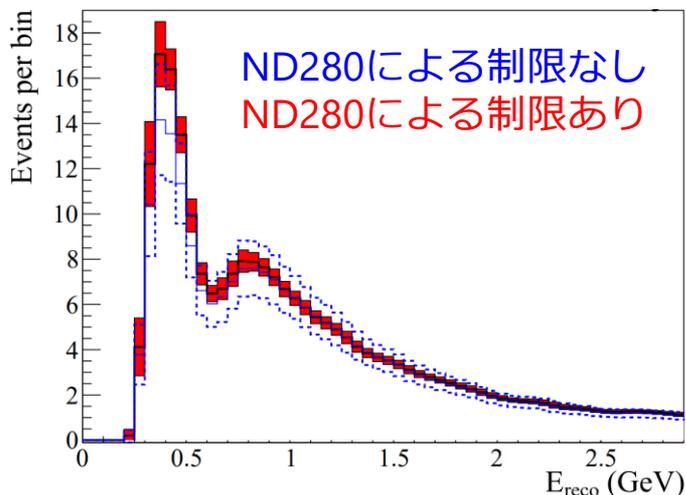
ニュートリノ振動解析

- 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。

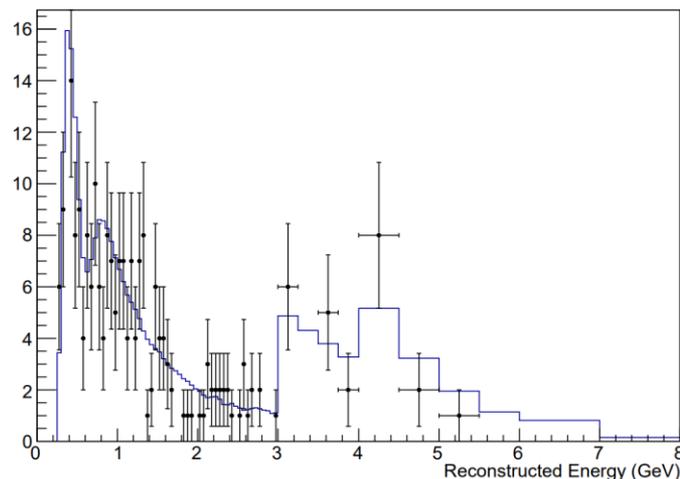
ND280におけるニュートリノ測定



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

