

T2K実験 (東海編)

木河達也

2022年4月20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

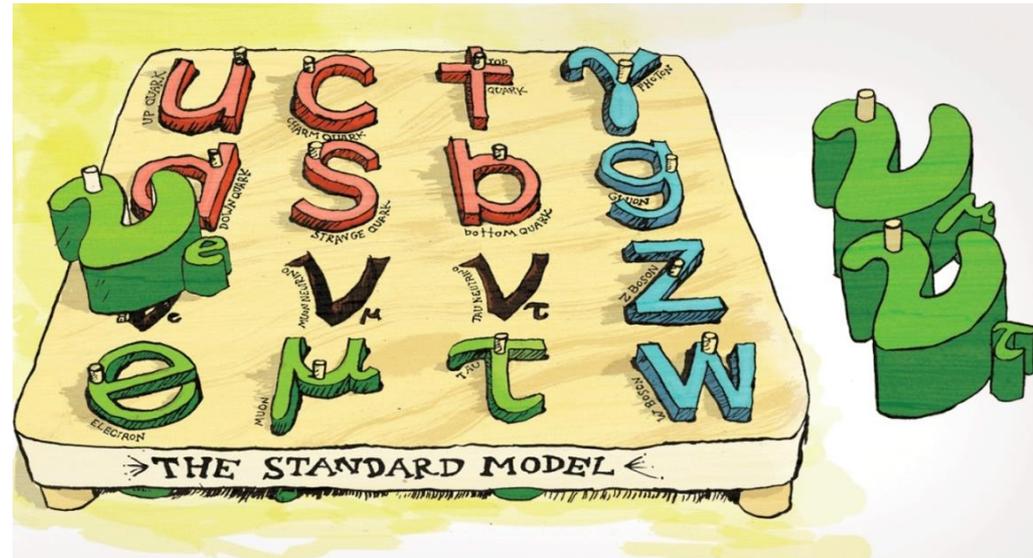
- 1930年: ニュートリノの存在の予言 (Pauli)
- 1932年: ベータ崩壊の理論化 (Fermi)
- 1956年: ニュートリノの発見 (Reines, Cowan) 
- 1962年: ミューニュートリノの発見 (Lederman, Schwartz, Steinberger) 
- 1962年: フレーバー間ニュートリノ振動の予言 (Maki, Nakagawa, Sakata)
- 1970年: 太陽ニュートリノ問題 (Davis) 
- 1987年: 超新星爆発ニュートリノの検出 (Koshiba) 
- 1998年: ニュートリノ振動の発見 (Super-K, SNO)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

- 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)

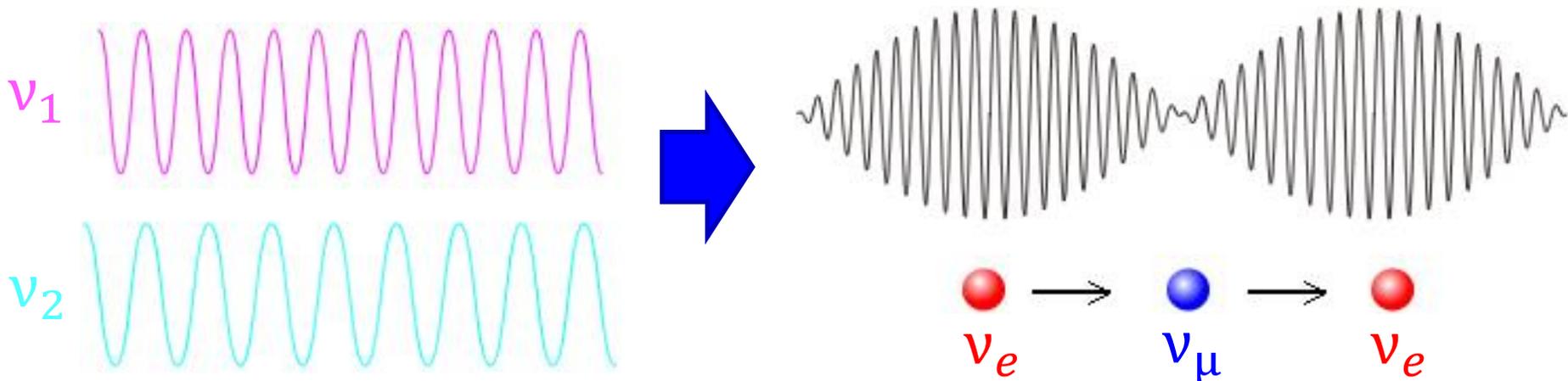
ニュートリノ振動

- ニュートリノが質量を持っていて、フレーバー(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。

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

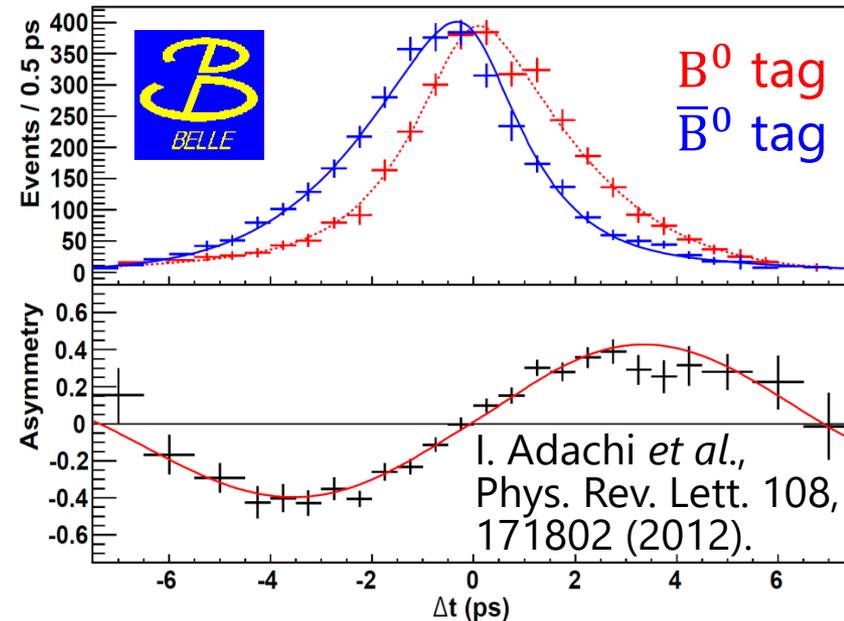
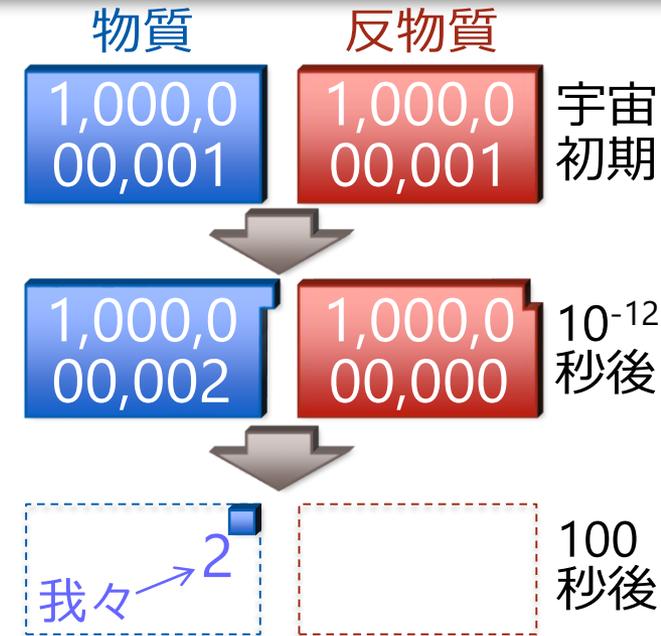
フレーバー固有状態
牧・中川・坂田行列
質量固有状態

- 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

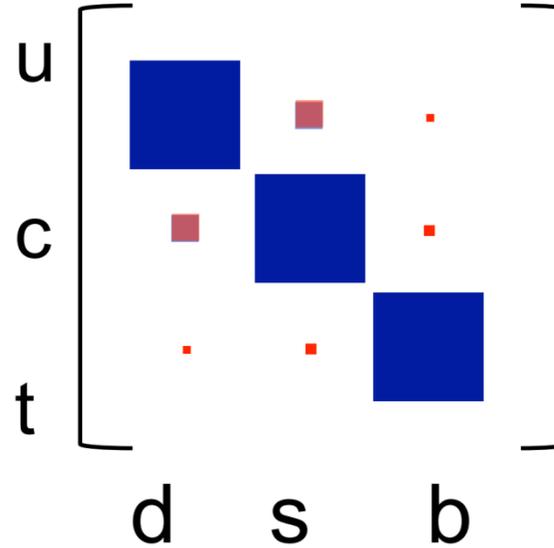
- 物質優勢宇宙を説明するサハロフ3条件。
 - バリオン数の破れ。
 - 非熱平衡状態。
 - C, CP対称性の破れ。
- クローニン、フィッチが K^0 崩壊におけるCP対称性の破れを発見。
- 小林、益川がCP対称性の破れを理論的に説明。
- B^0 崩壊により理論を検証。
- しかし物質優勢宇宙を説明するにはCP対称性の破れは小さすぎる。
- 新たなCP対称性の破れが必要。
→ ニュートリノが原因?



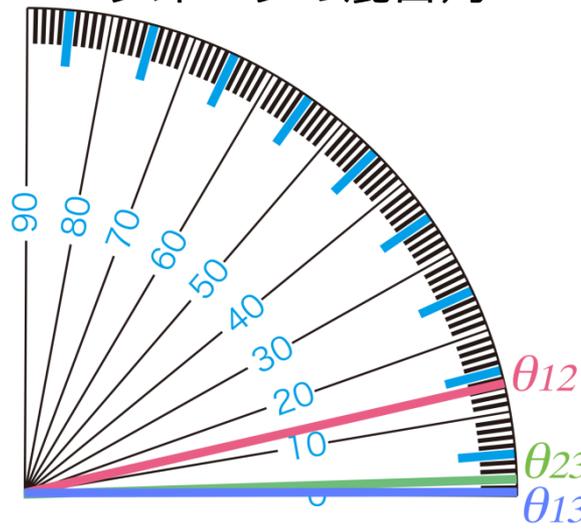
クォークとニュートリノの混合行列

- 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})

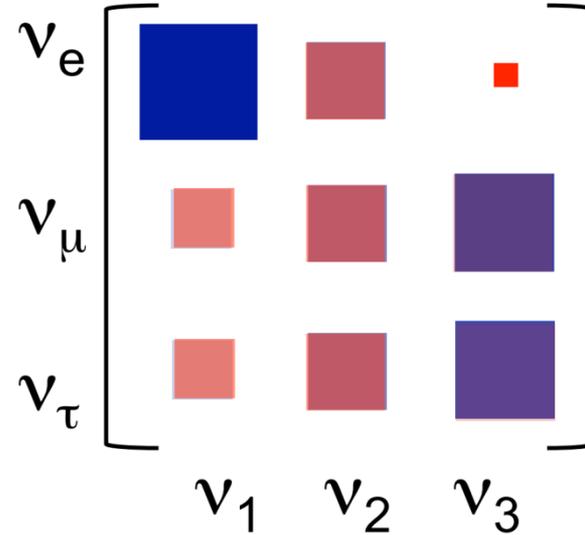
クォークの混合行列
(小林・益川行列)



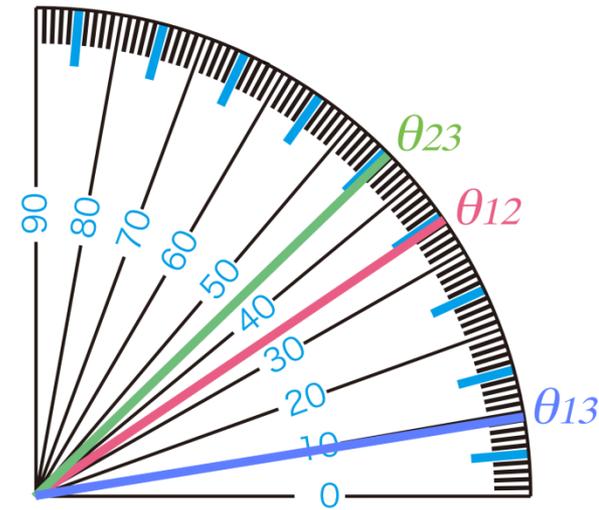
クォークの混合角



ニュートリノの混合行列
(牧・中川・坂田行列)



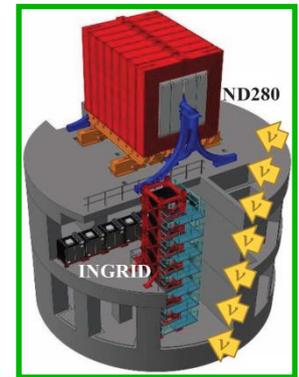
ニュートリノの混合角



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)



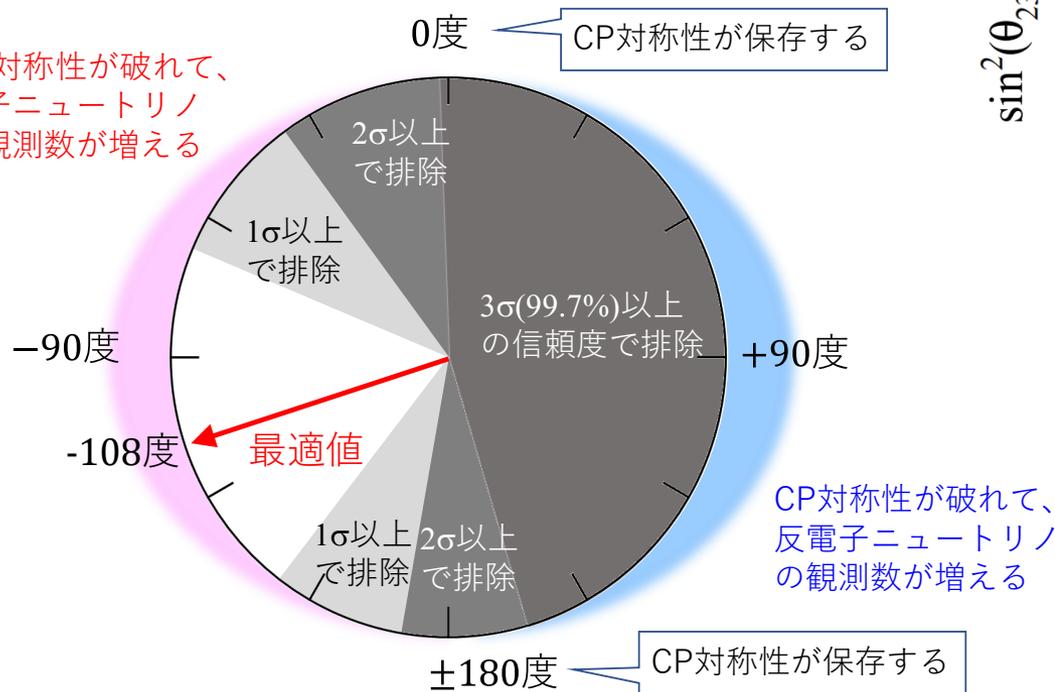
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



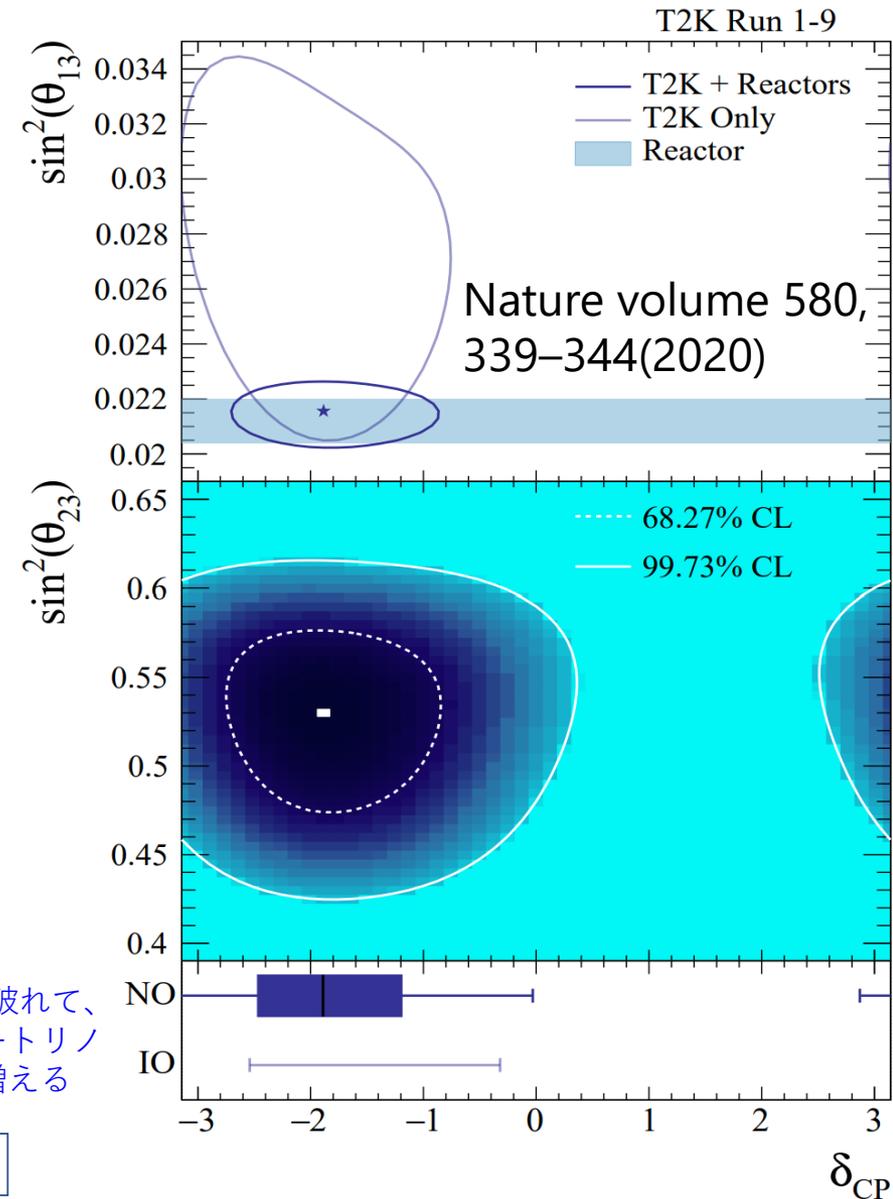
T2K実験の物理結果

- 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 2σ で示唆。
- 混合角 θ_{23} を世界最高精度で測定。(45度と無矛盾)
- 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



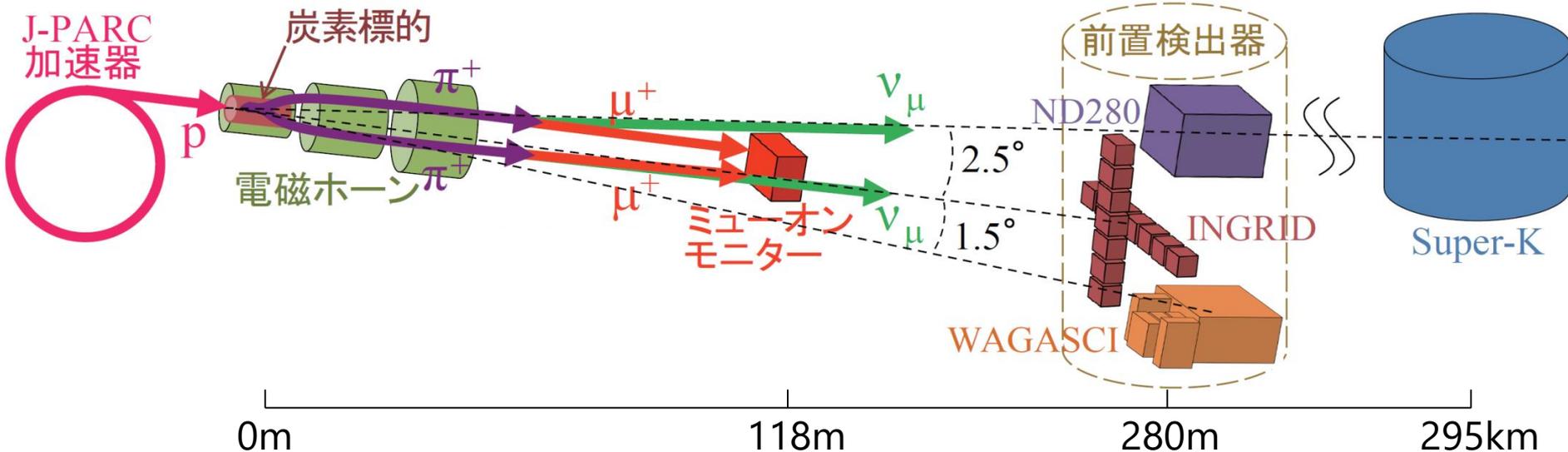
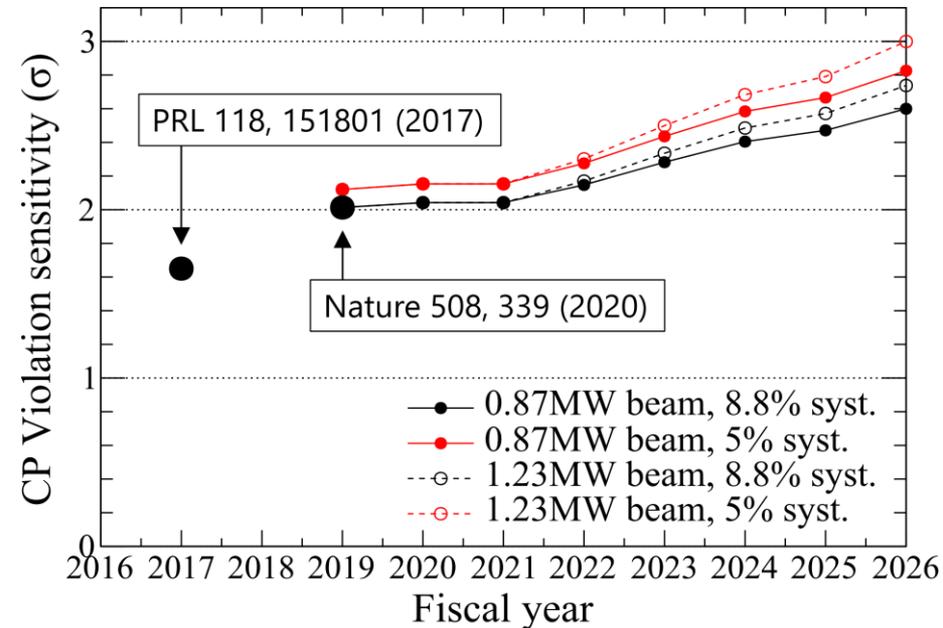
T2K実験による振動パラメータの信頼領域



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。**

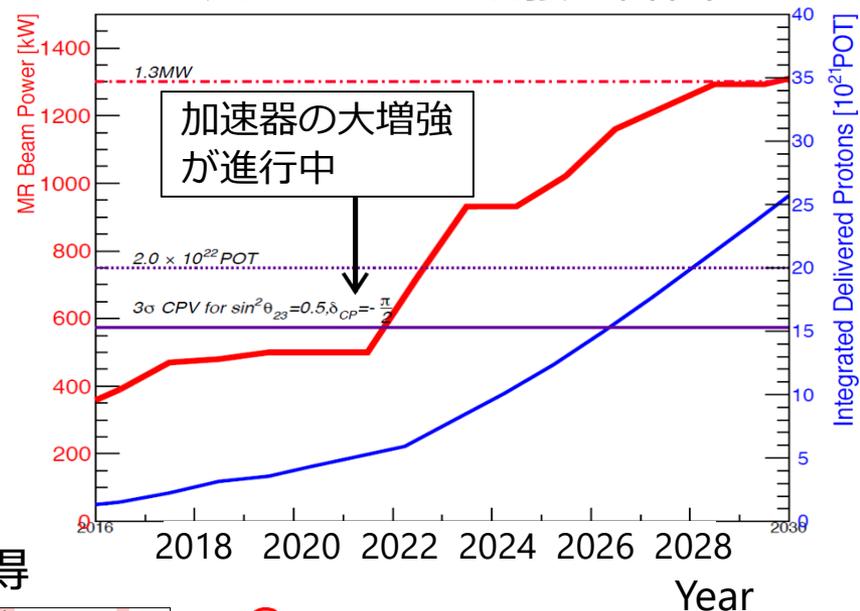
ニュートリノCP対称性破れの探索感度



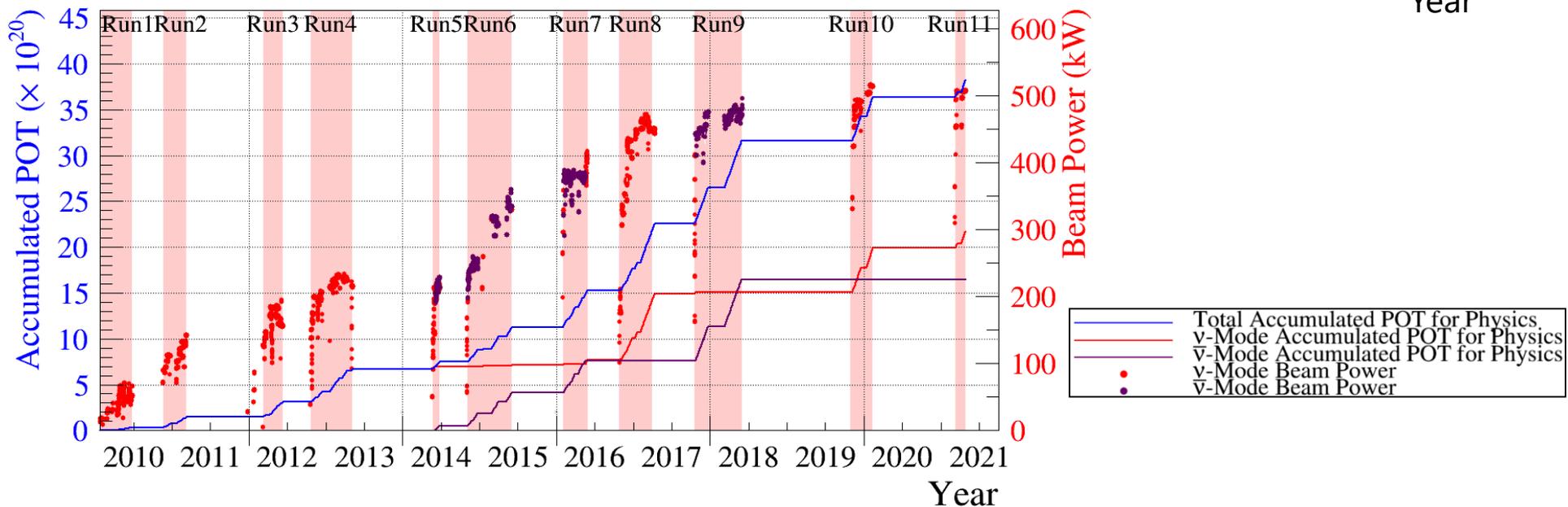
J-PARC加速器の増強

- ビーム強度を徐々に上げてきたが、去年から大増強中。
- 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



16電極陽子ビームモニター

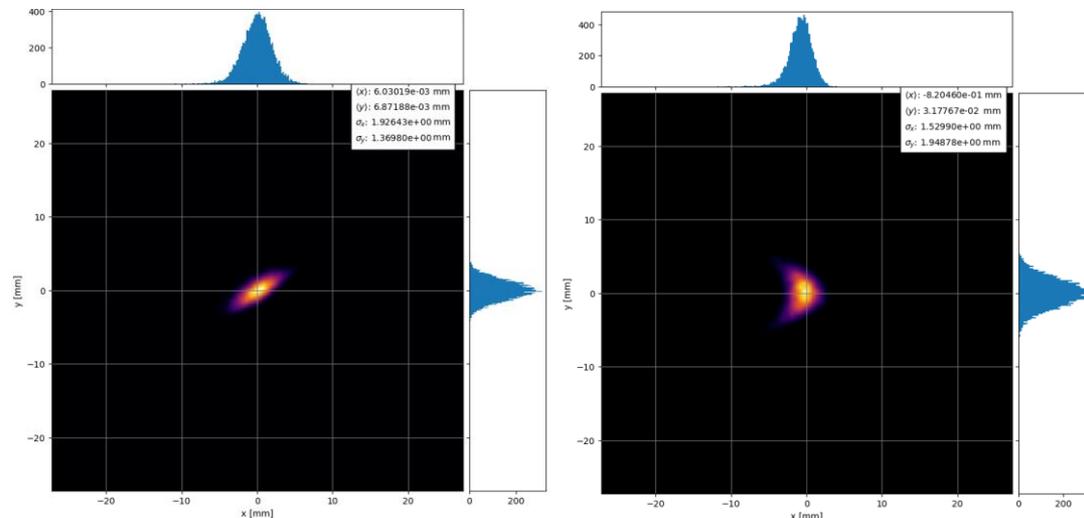
- ビームが加速器を周回中に不安定になりダクトなどに衝突して失われてしまう。(ビームロス)
- ビームロスの原因となる陽子ビームの広がりを理解するために16電極モニターを開発。
- 実際のビーム運転に導入し、データ解析。
- 高速化のためにファームウェアを改良中。



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

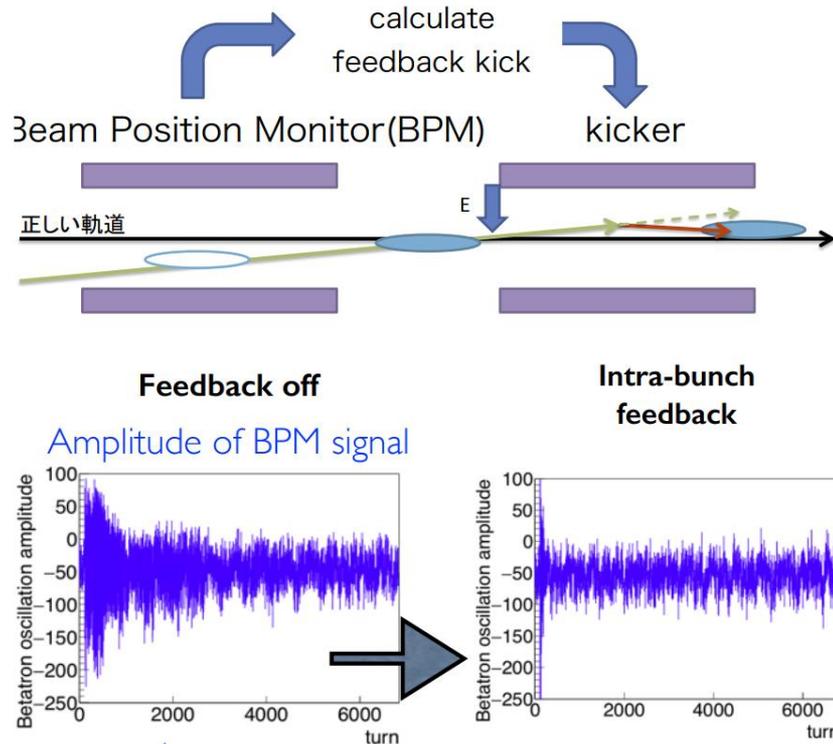


フィードバックシステム

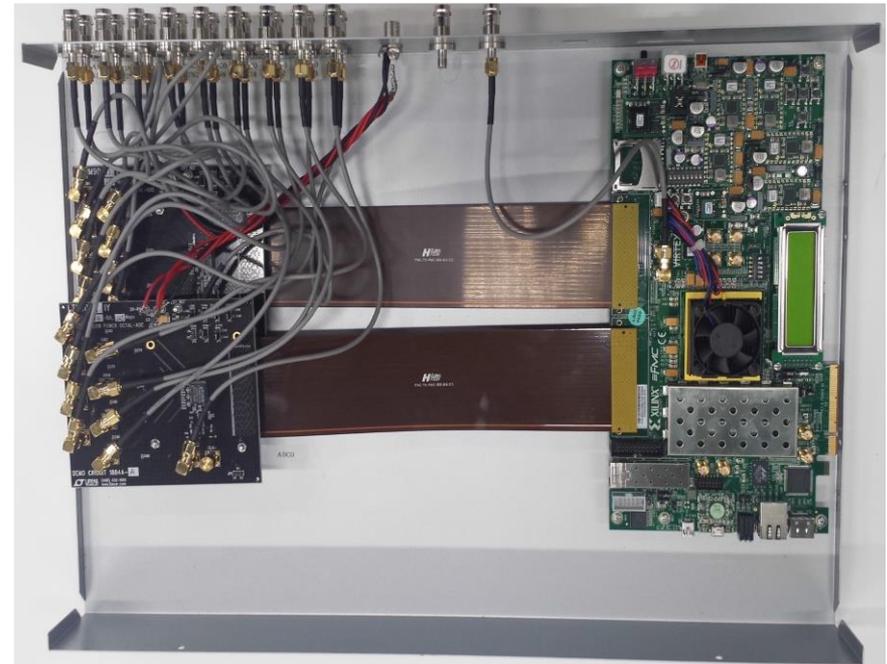
- ビームの振動(位置のずれ)を検知し、周回ごとに補正をかけてビームロスを削減。
- ビーム増強に伴い過去に京大の学生が開発したシステムを改良予定。



フィードバックシステムの概念図

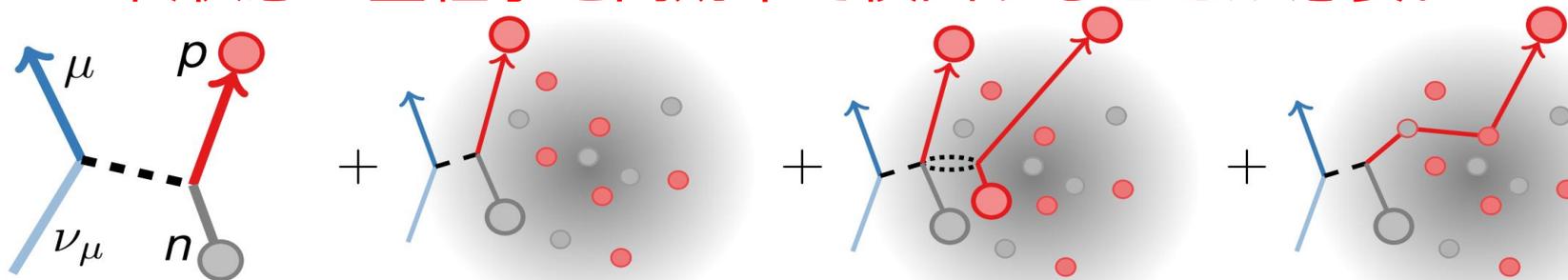


フィードバックシステム用回路



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。



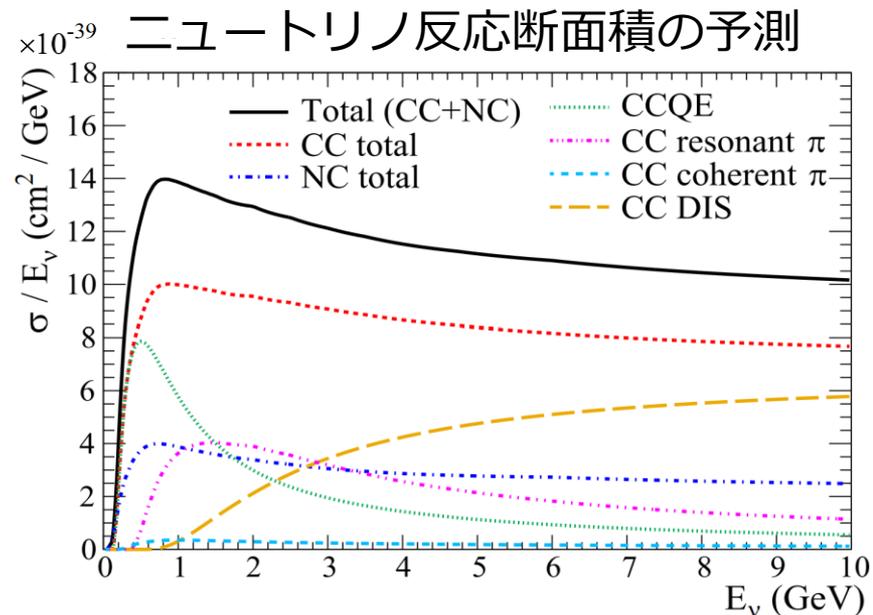
自由核子との散乱

核子の初期状態

核子-核子相互作用

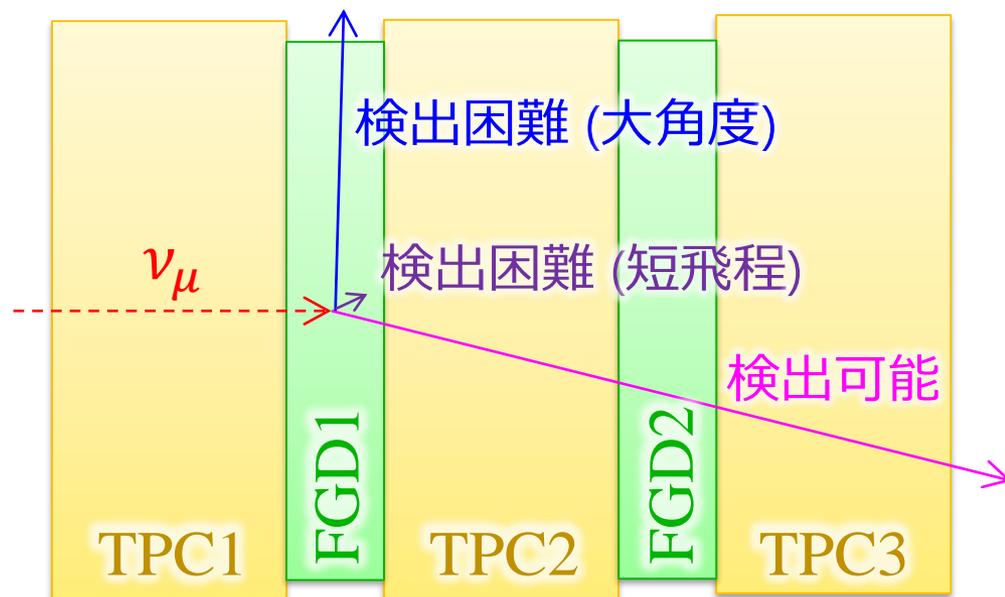
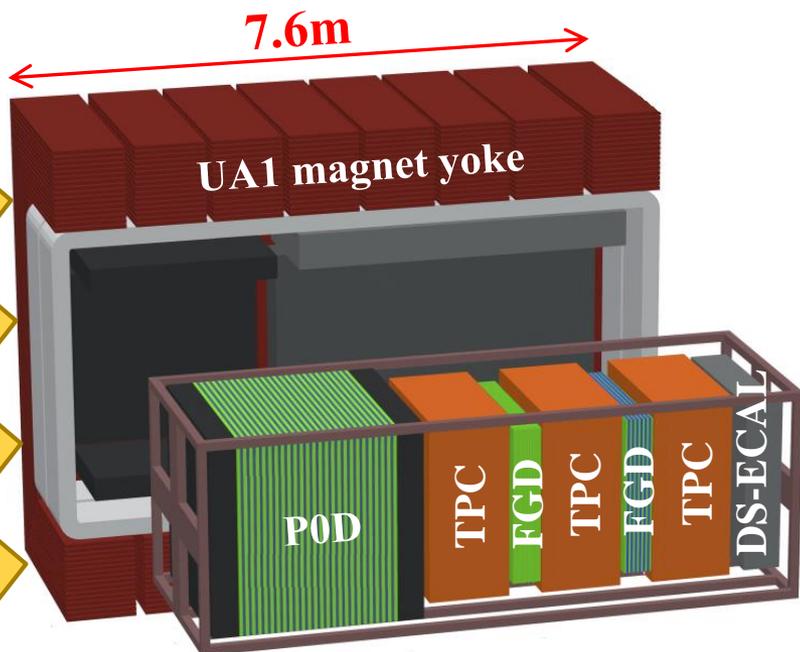
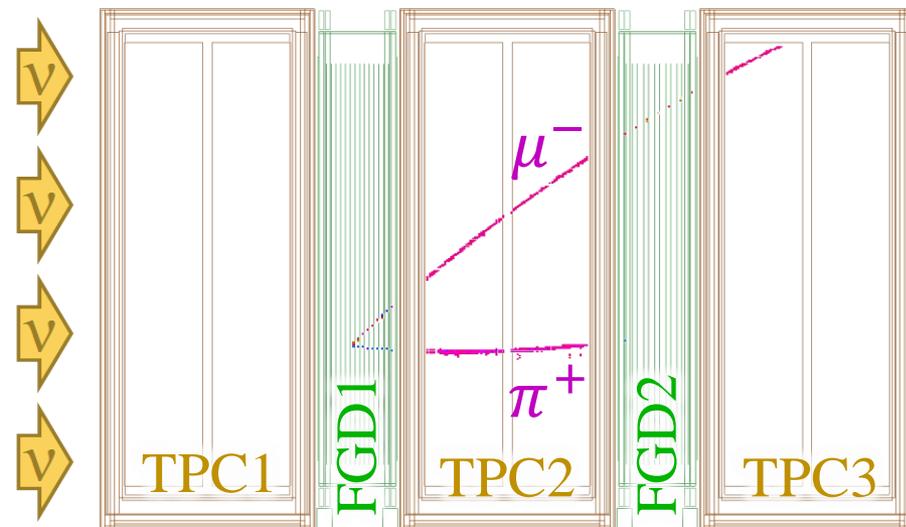
ハドロン原子核内反応

- 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。



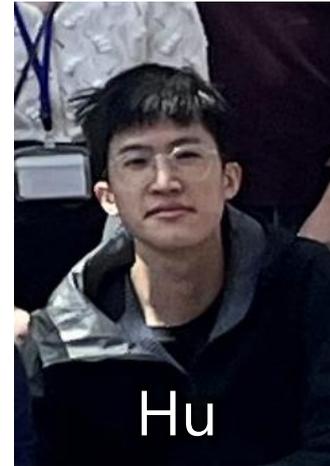
- スーパーカミオカンデ方向に向かう振動前のニュートリノを精密測定。
- 棒状シンチレータを並べた飛跡検出器(FGD)とTPC。
- 大角度の飛跡や短い飛跡の検出効率の低さが課題。

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。



Hu



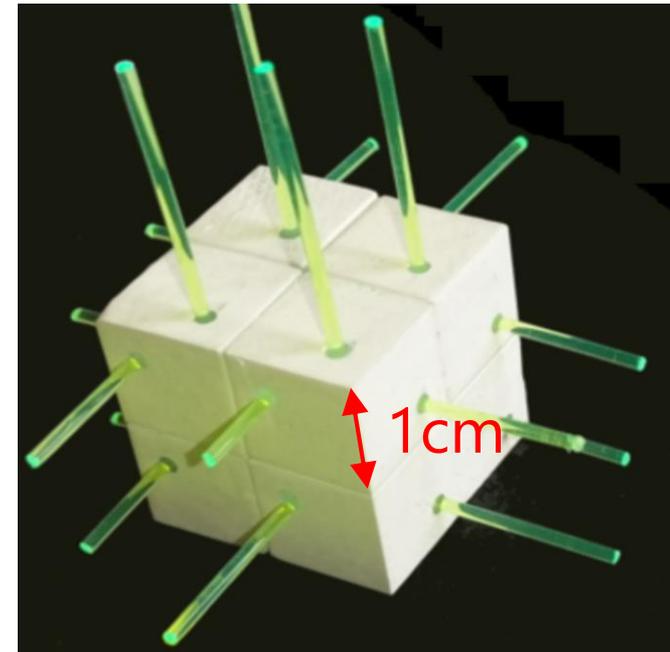
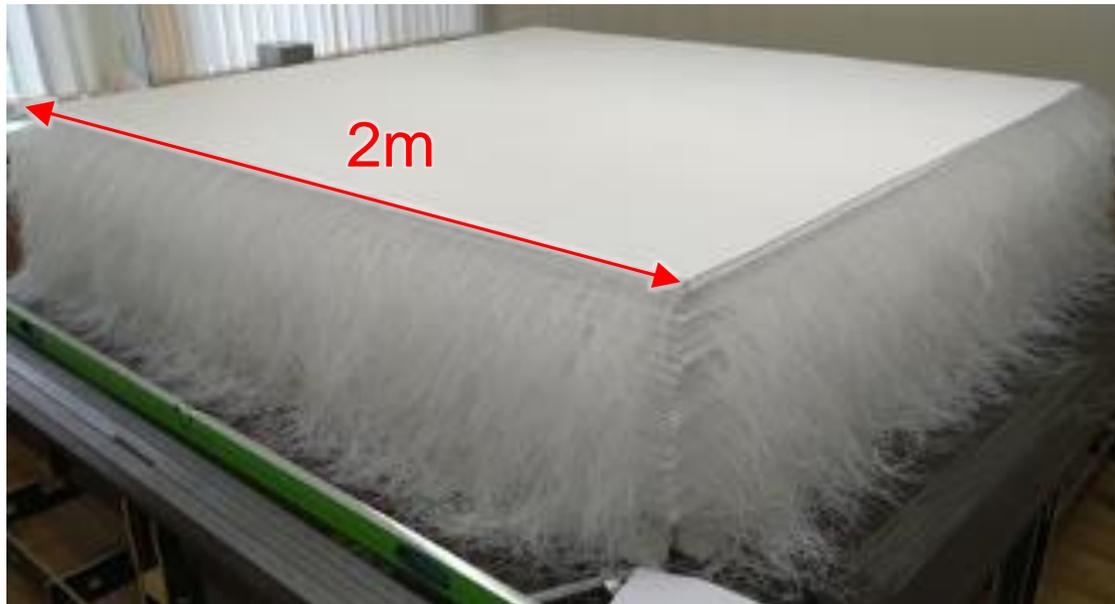
栗林



川上

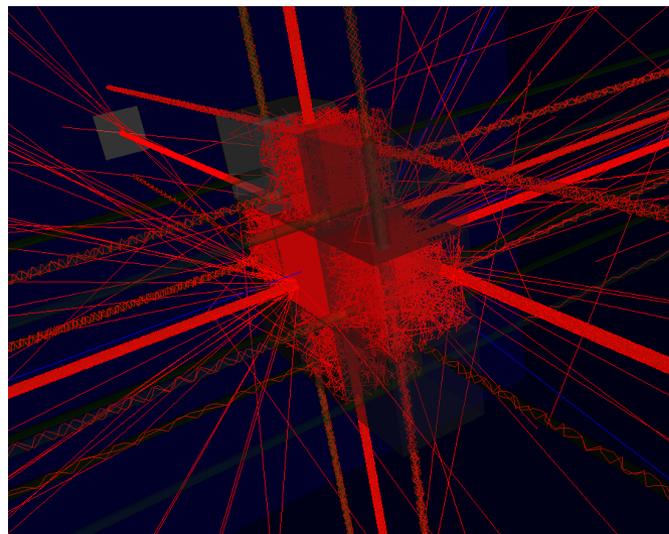
シンチレータとファイバーの構造

組み立て中のSuper-FGD検出器



- ビーム試験やプロトタイプを用いた測定、シミュレーション光学的振る舞いの理解。
- データ取得システムの開発。

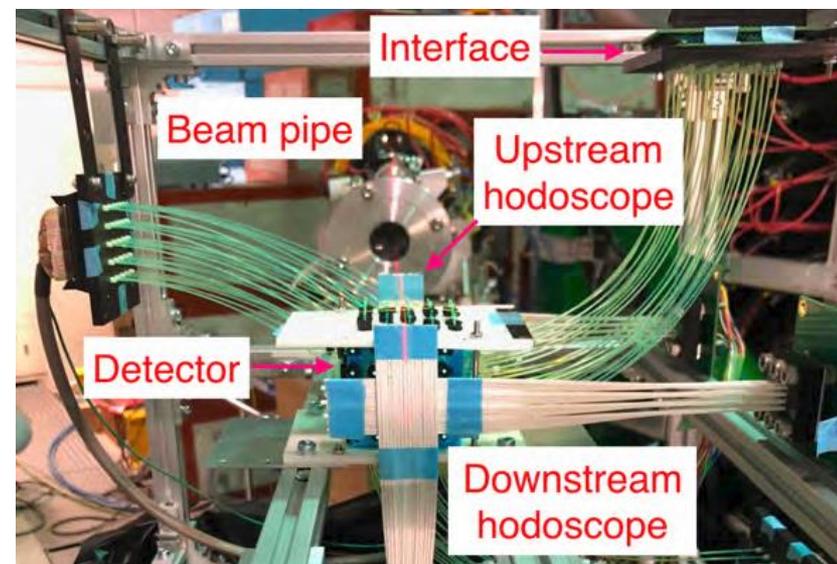
光学シミュレーション



データ取得システムの開発

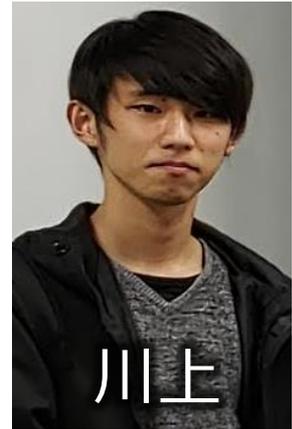


東北大学におけるビーム試験



ND280検出器のアップグレード

- 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。

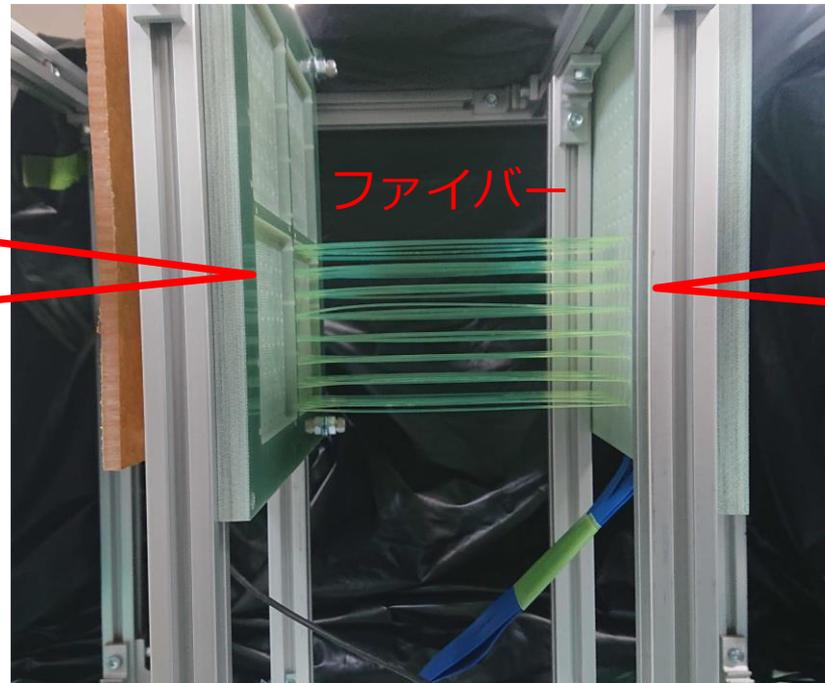
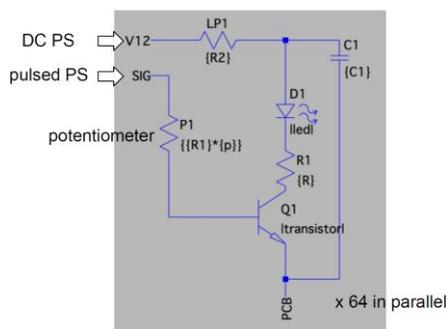
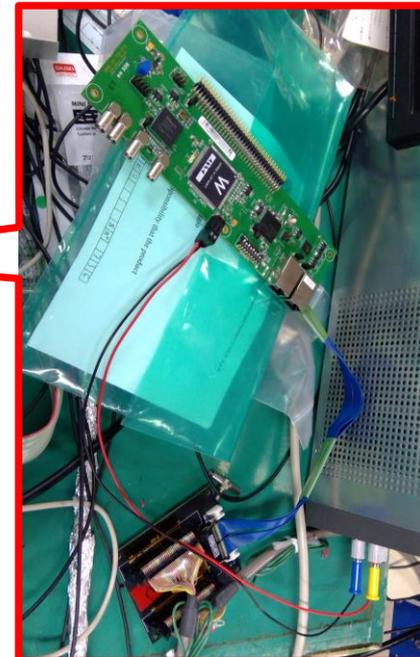


川上

LED光源



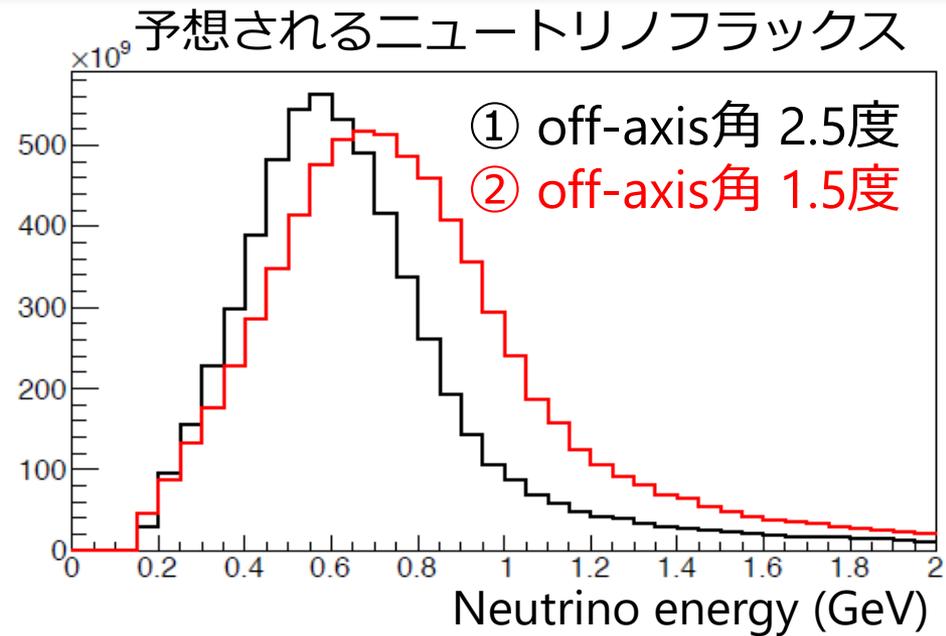
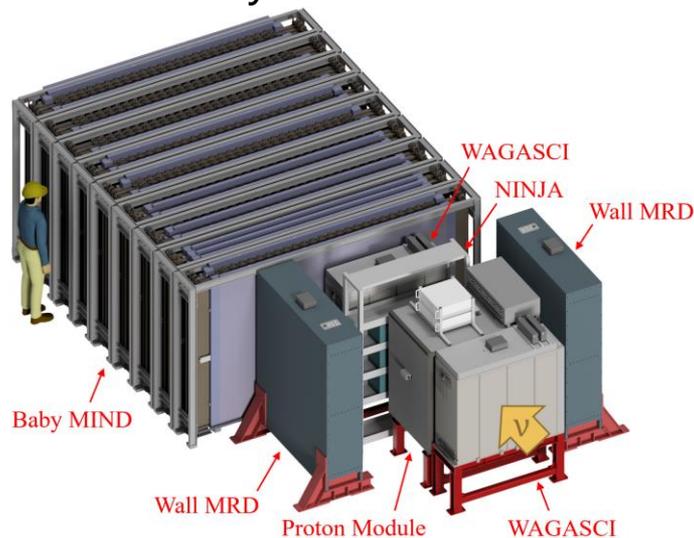
ファイバー検査システムの試作

光センサー+
読み出しシステム

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。

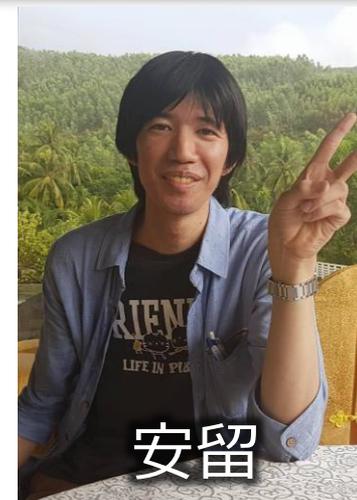
WAGASCI-BabyMIND検出器の概要図



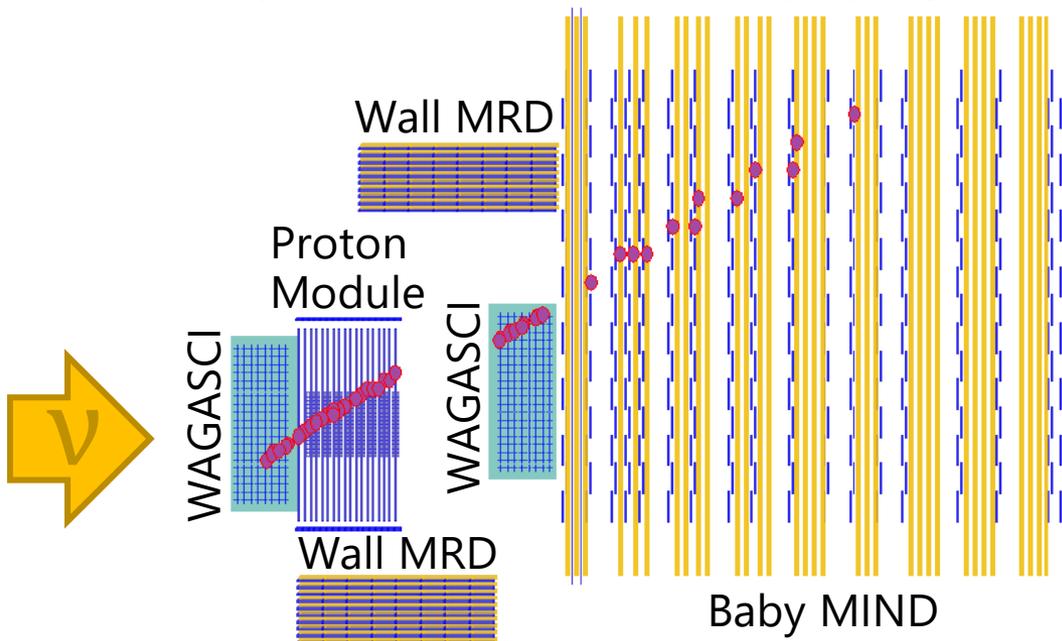
設置完了後の写真



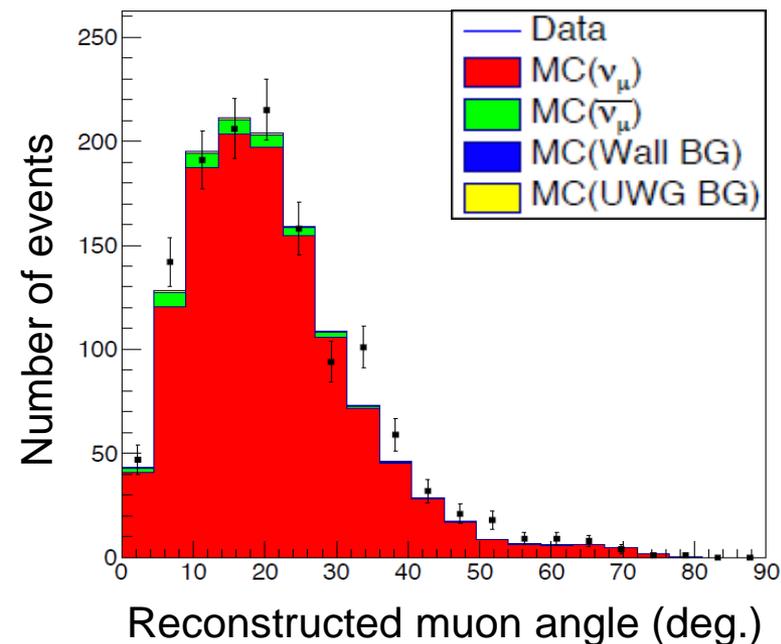
- ニュートリノ反応断面積の測定のための去年までのデータを用いた物理解析を進行中。
 - 検出器応答の基本理解
 - シミュレーションの開発・改良
 - イベント再構成・選択手法の開発
 - 系統誤差の評価



ニュートリノイベントのイベントディスプレイ

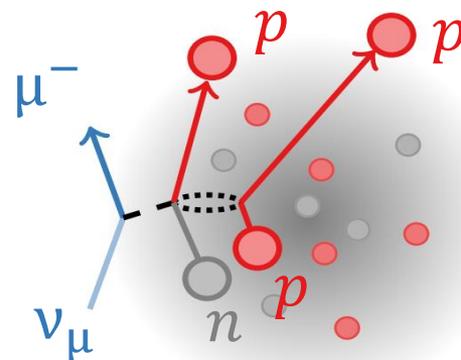


ミュオン角度分布の比較

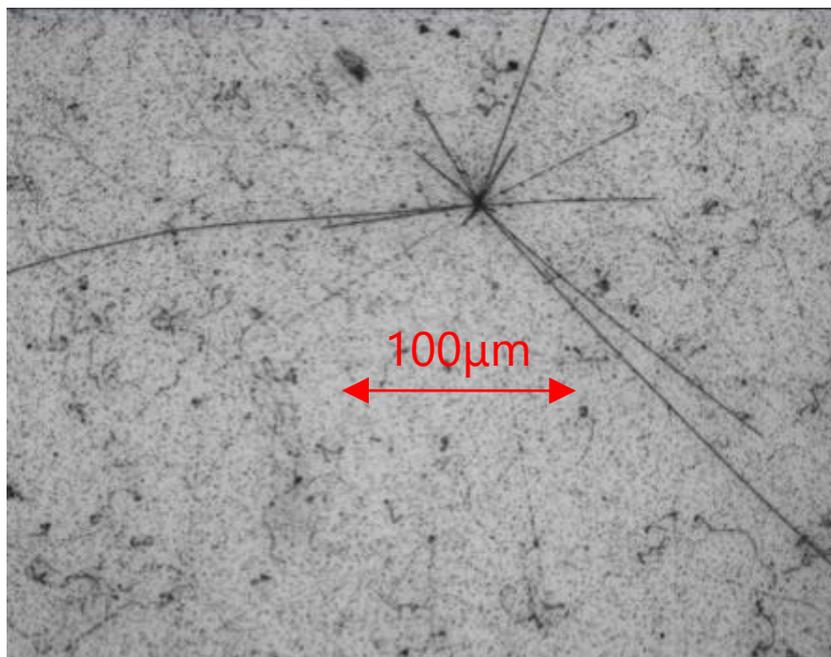


- 究極の位置分解能を持つ原子核乾板を使用したニュートリノ反応測定実験。
→ ニュートリノ反応から出てくる低運動量の陽子も検出可能。

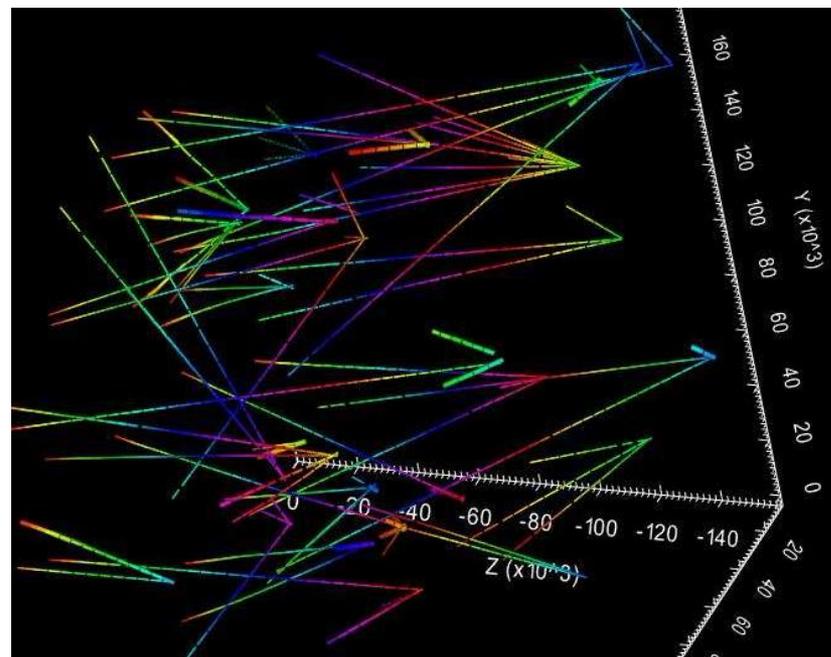
特に測定したい2p2h反応



原子核乾板における飛跡



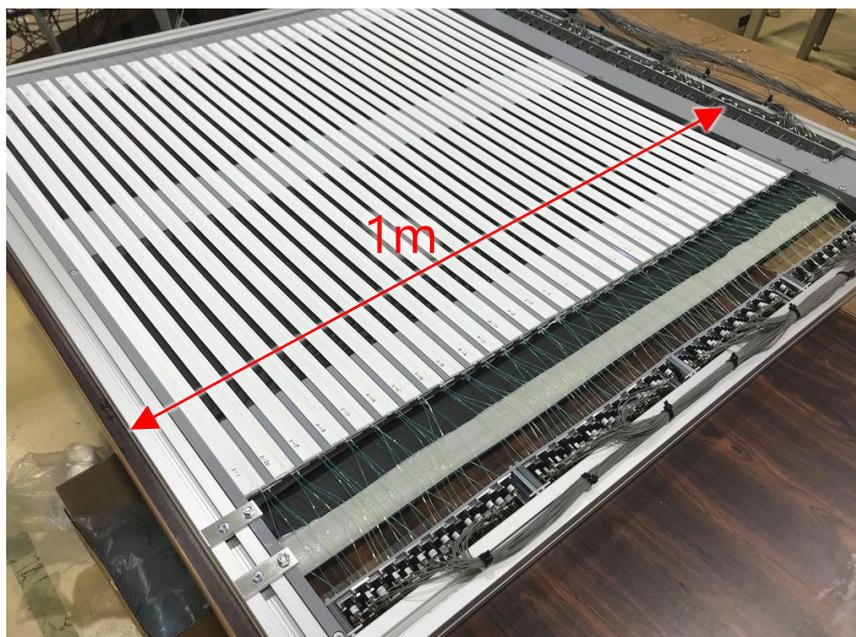
原子核乾板で観測されたニュートリノ事象



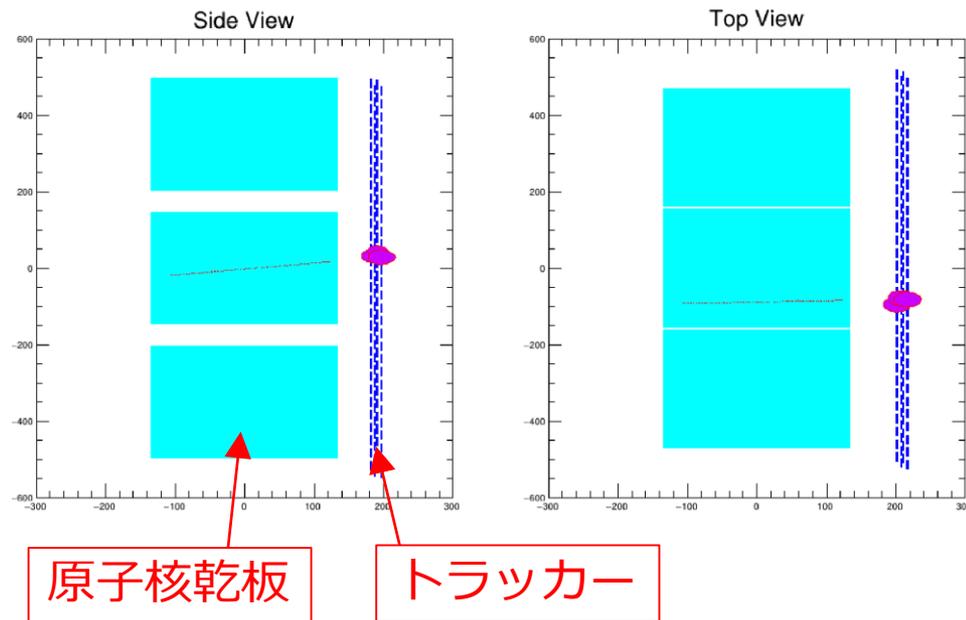
- 原子核乾板は時間情報がないので、シンチレータ検出器と飛跡をマッチングし、時間を取得。
- 飛跡マッチングのためのトラッカーを開発、製作して導入。
- ニュートリノ反応測定の解析が進行中。
(飛跡のマッチング・運動量再構成の大幅改良)



開発されたシンチレータトラッカー

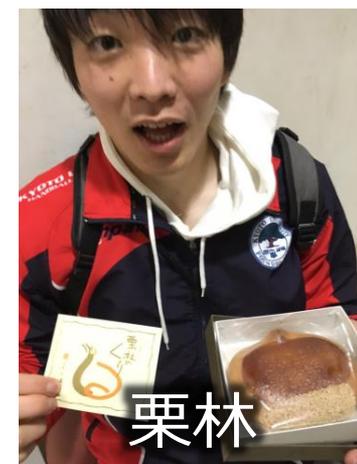


観測されたニュートリノ反応事象

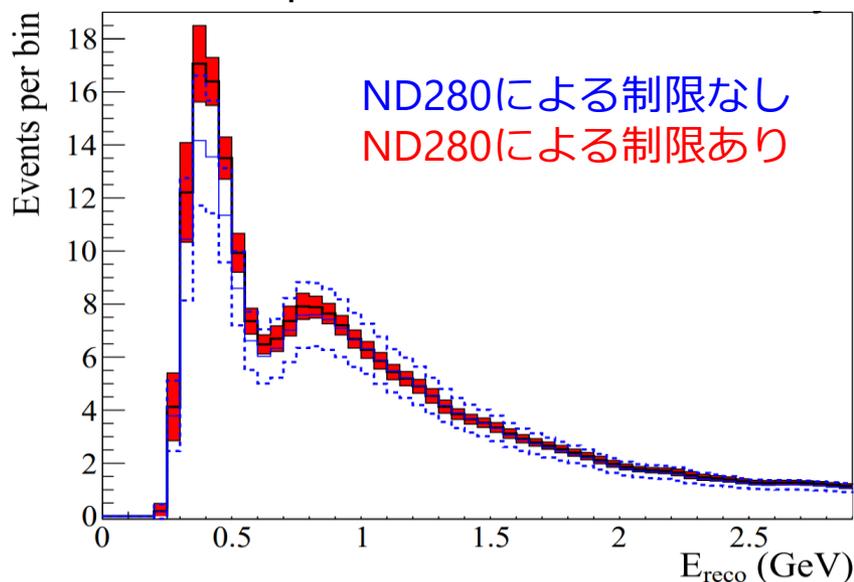


ニュートリノ振動解析

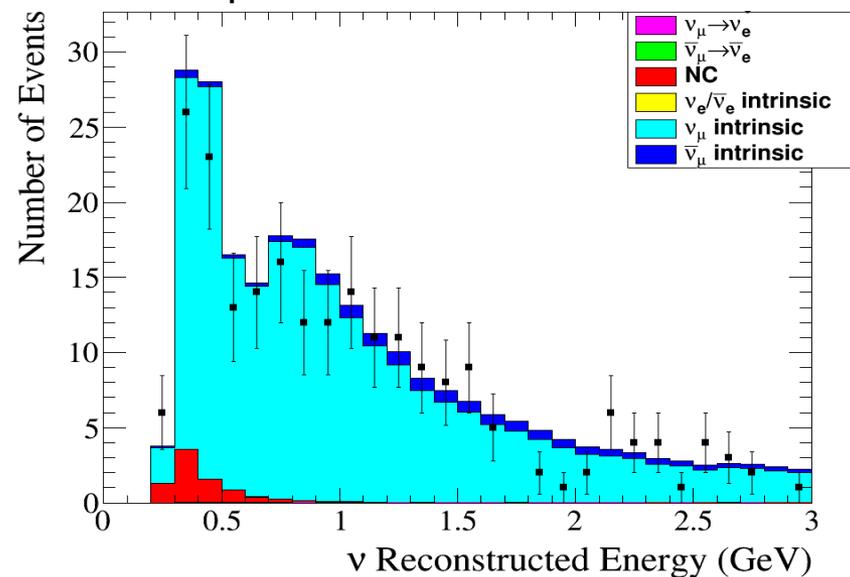
- ND280の測定をもとにスーパーカミオカンデのニュートリノイベントを予測。
- 実際の観測はニュートリノ振動の効果で予測とは異なる。
- 観測と予測が合うように、振動パラメータを決定。



Super-Kにおける予測



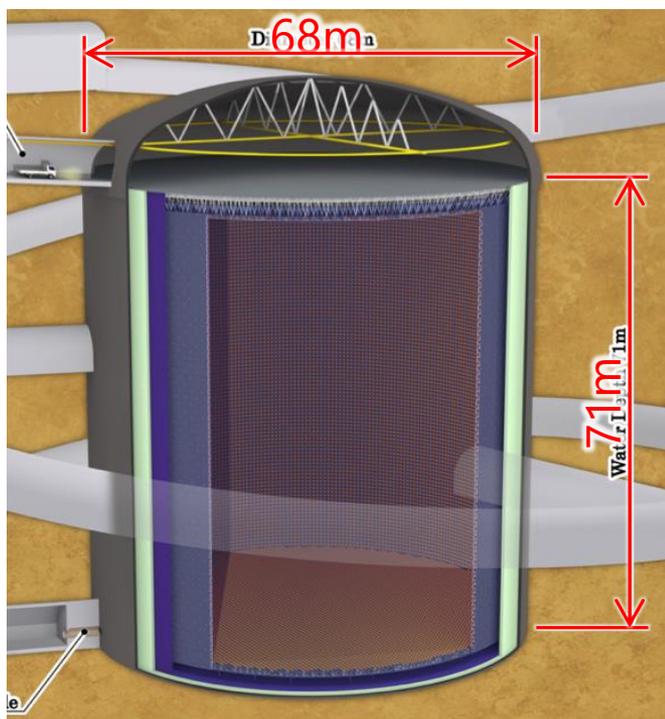
Super-Kにデータのフィット



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

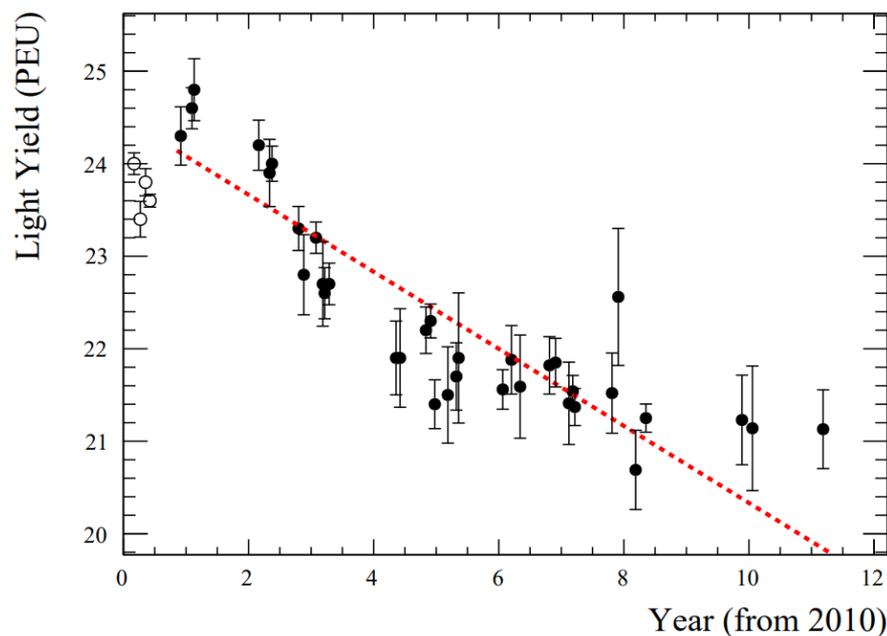


経年劣化の影響の評価

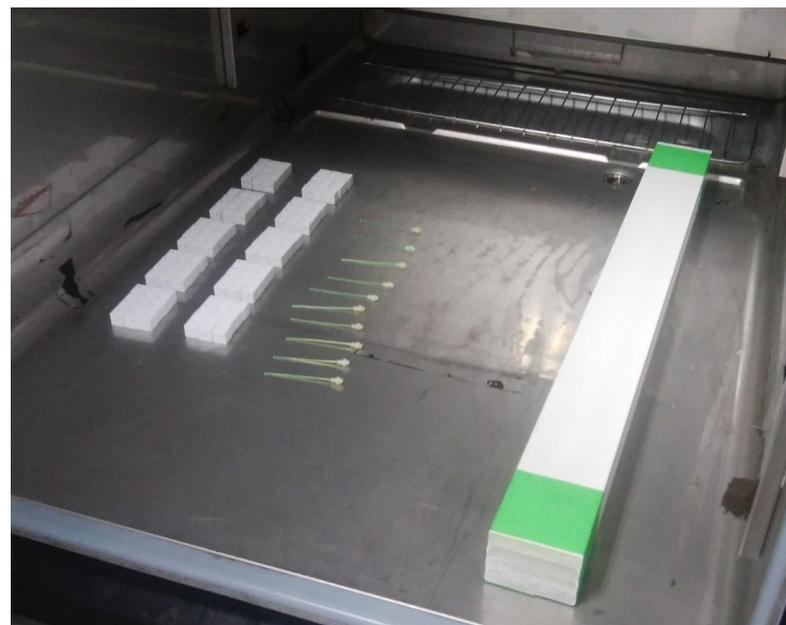
- ハイパーカミオカンデは2027年から10年以上稼働予定。
- 既存の前置検出器でシンチレータの光量の低下が見られている。
- 高温下に置くことで化学反応を劣化させて20年分の経年劣化を1か月で再現。



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いたシンチレータ

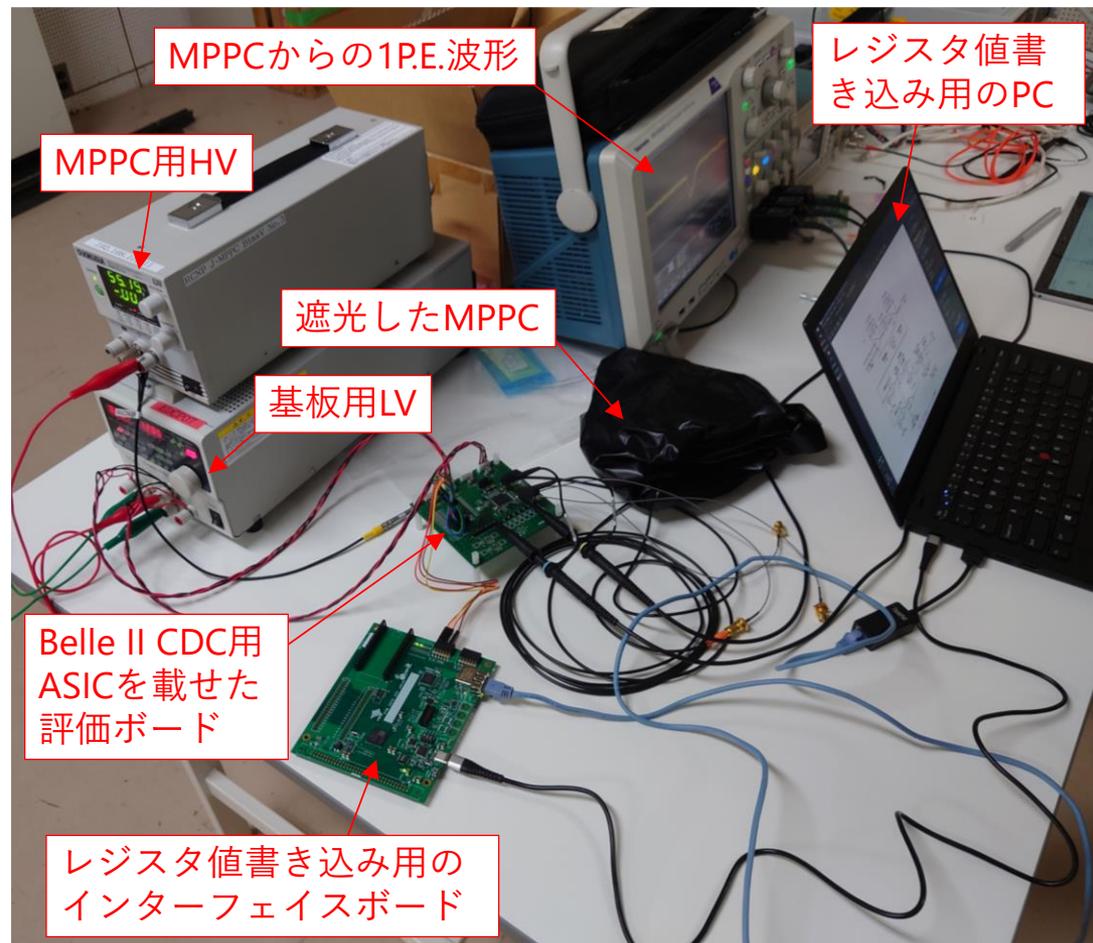


MPPC読み出しエレクトロニクス

- 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。
- 既存のMPPC読み出しエレクトロニクスは海外ベースのものしかない。
- 日本で新たな多チャンネルMPPC読み出しエレクトロニクスを開発。



J-PARCのテストベンチにおける試験の様子



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中。



液体シンチレータ
の製作の流れ



自作した水ベースの
液体シンチレータ



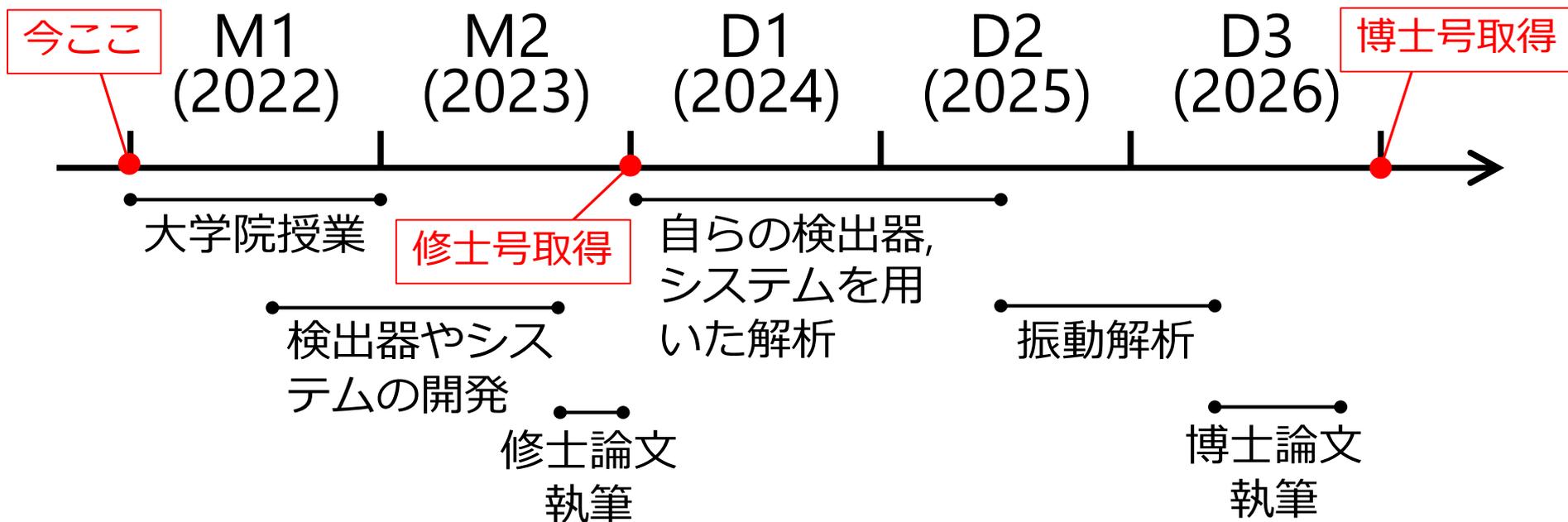
光量の測定



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。

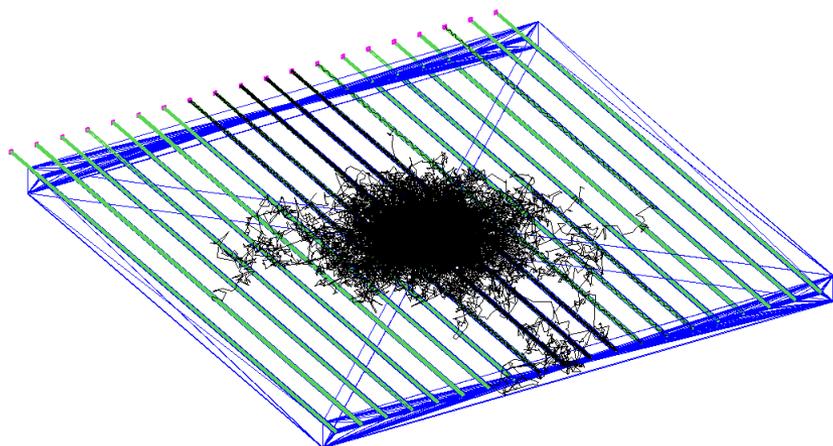
博士号までの道のりの一例



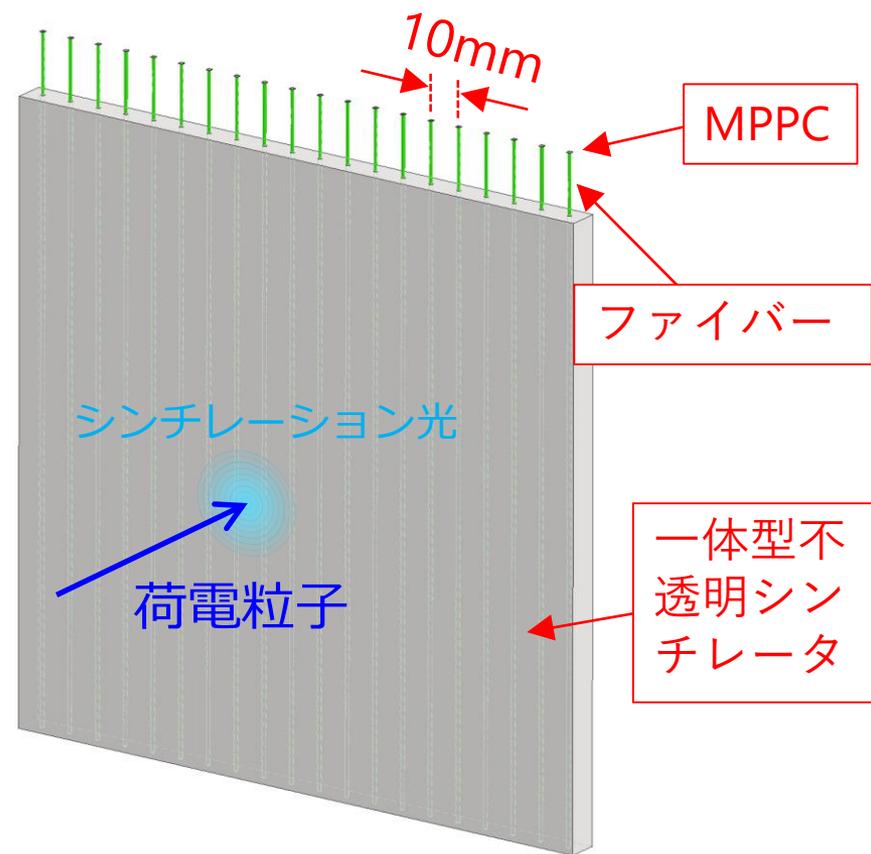
新NINJAトラックー

- 2023年度にNINJA検出器を大型化予定。
- トラックーもより大面積のものが必要。
- 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



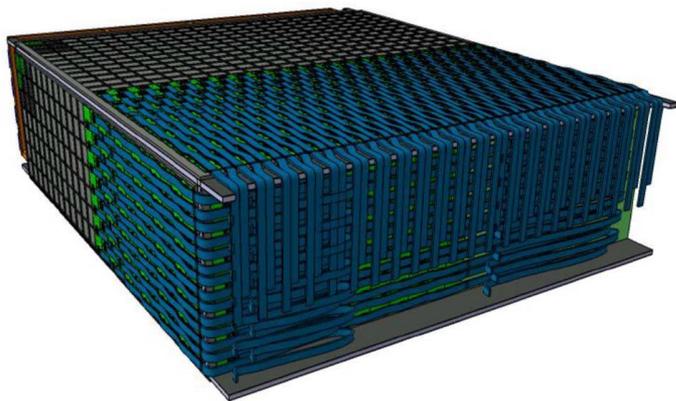
新トラックーのアイデアの概念図



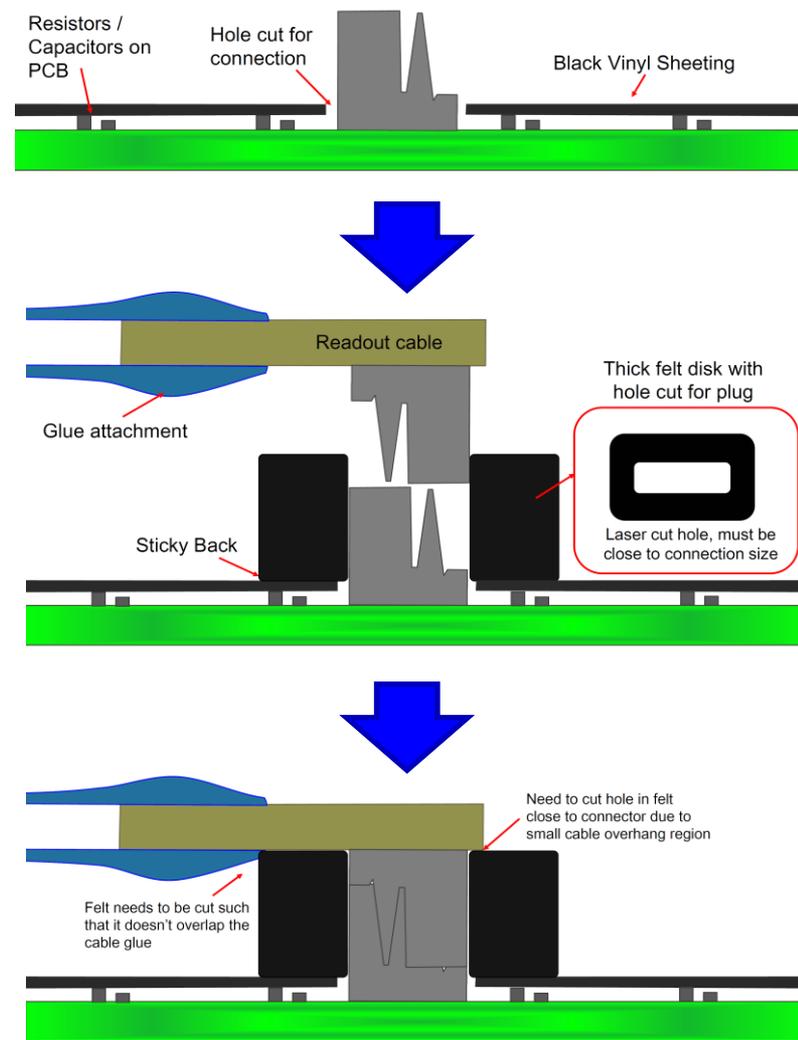
Super-FGDの建設時の試験と性能評価

- 2022年秋からSuper-FGDの日本での組み立てを開始し、2023年春に稼動予定。
- 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が必要。
- 川上君のシステムをベースに半年程度で開発。
- 組み立て後にSuper-FGDの校正や性能評価を主導。

Super-FGDのケーブルの取り回し



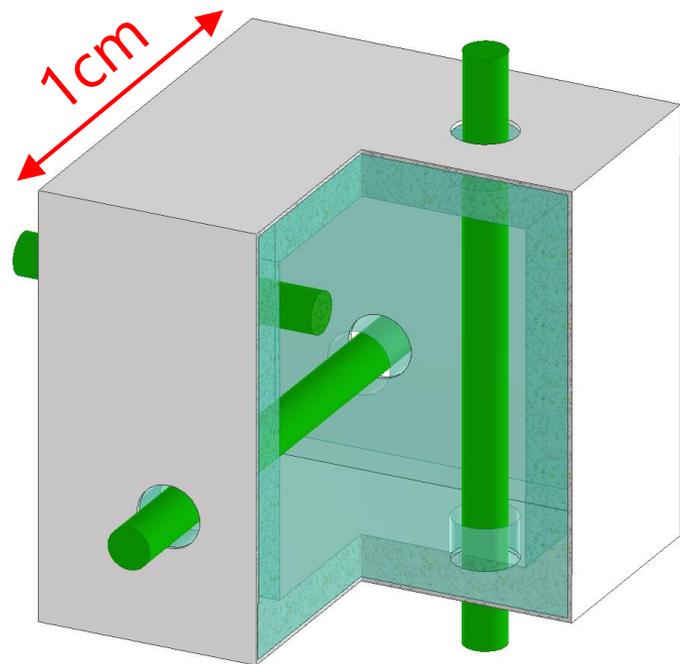
Super-FGDのケーブル接続と遮光



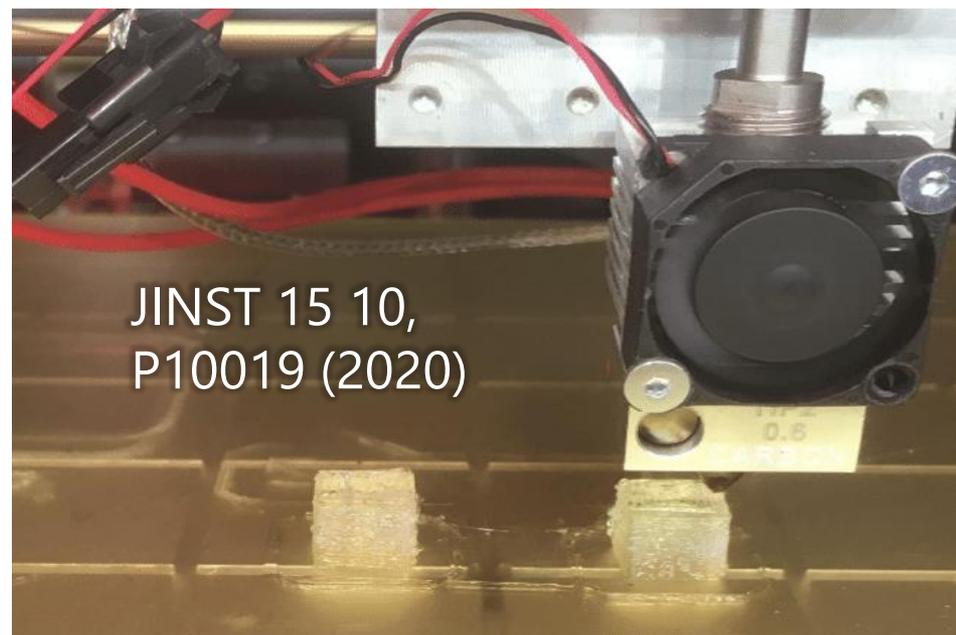
水標的のSuper-FGD

- 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



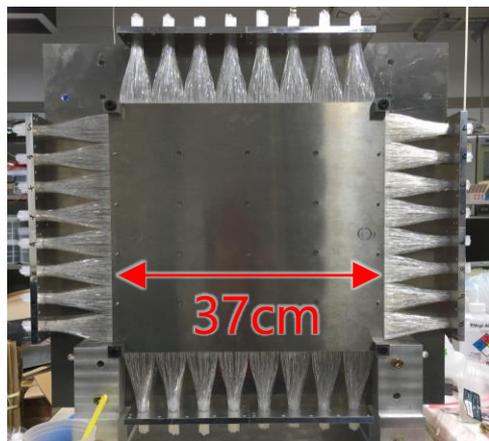
3Dプリンタによるシンチレータ形成



先輩の例 (去年卒業した平本さん)

- 修士課程で高い位置分解能ファイバー飛跡検出器を開発。
- 博士課程でそれを用いたニュートリノ反応の精密測定。
- 日本物理学会若手奨励賞, 高エネルギー物理学奨励賞を受賞。

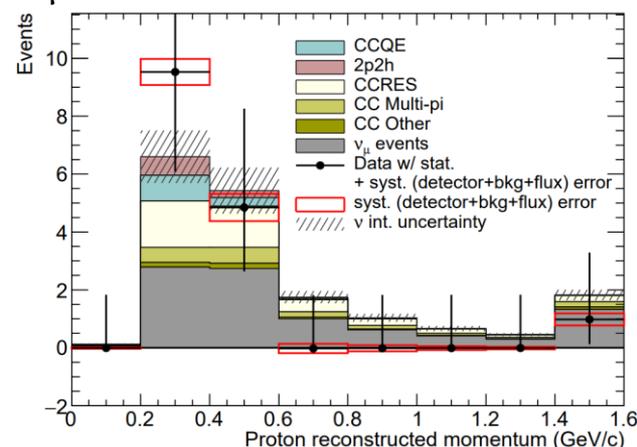
ファイバー飛跡検出器



NINJA実験



ν_μ -水反応からの陽子運動量



平本



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、火曜日9:00からミーティングをやっています。
- 川上君・有元君・浅野さんの実験装置は311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。

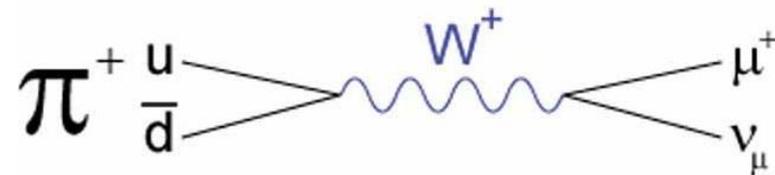
見て面白そうなもの

- 153号室に今年卒業した谷君の作ったシステム。
- 見学だけでなく作業ボランティアを歓迎。

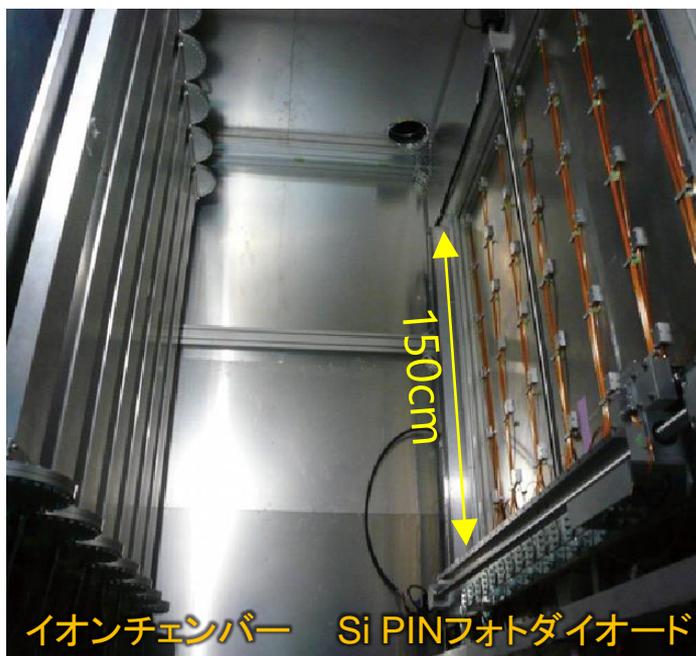


バックアップ

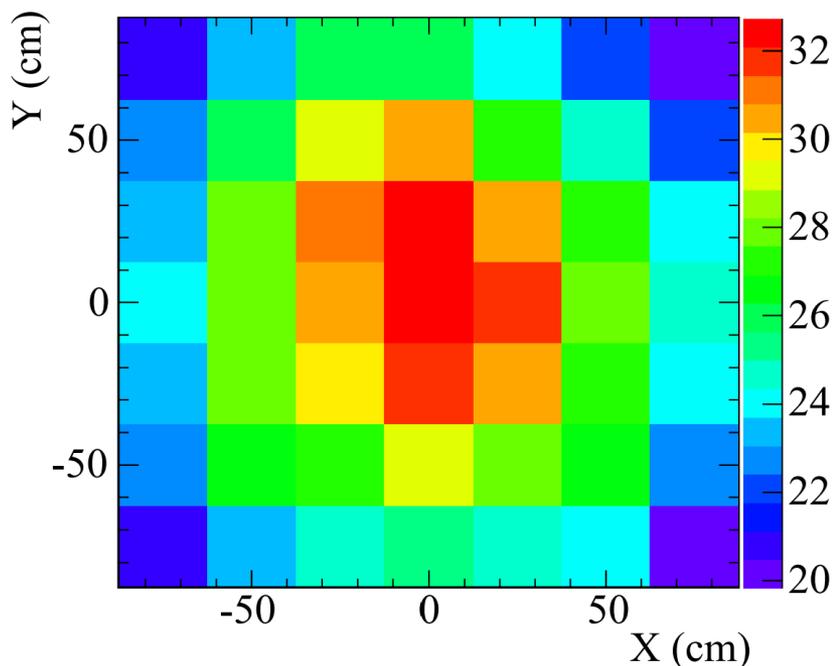
- ニュートリノが π^\pm 中間子の崩壊から生成される際にミュオンも同時生成される。
- これを測定することでリアルタイムにビームを監視できる。
- 既存のミュオンモニターは大強度ビーム運転における問題が見え始めてきた。→ **新しい検出器が必要。**



ミュオンモニター



測定されたミュオン分布

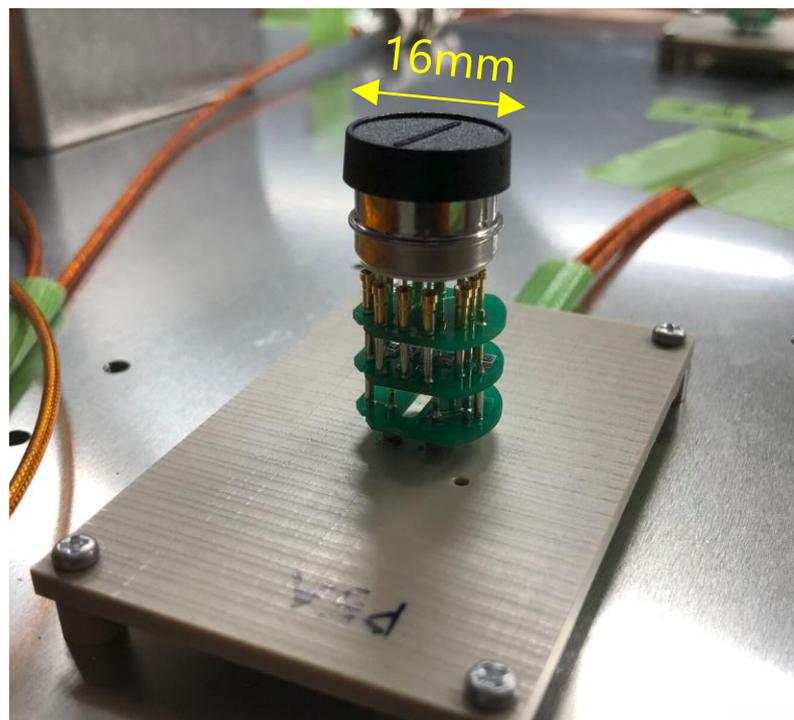


新ミュオンモニターの開発

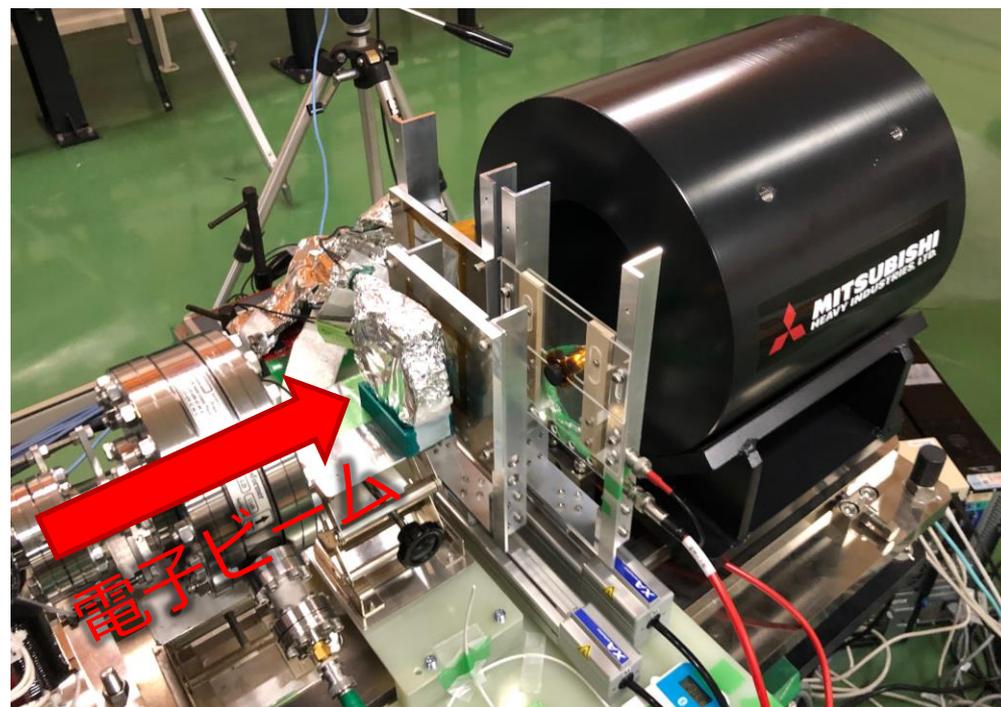
- 新しいミュオンモニターとして電子増倍管による検出器を開発、試験中。
- 一昨年、昨年の電子ビーム試験で性能評価。
→ 将来の大強度ビーム運転でも使えそう。
- 今年秋のビーム試験でさらに詳細に評価。



電子増倍管検出器

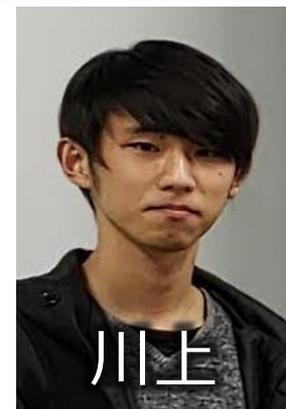


昨年の電子ビーム試験

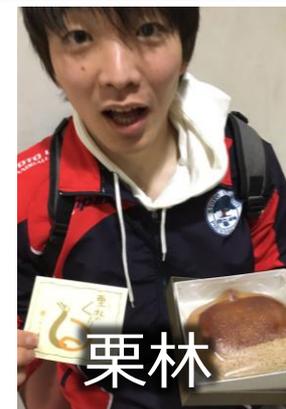


INGRIDによるビーム測定

- 十字に配置された14台の同一検出器。
(鉄板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。

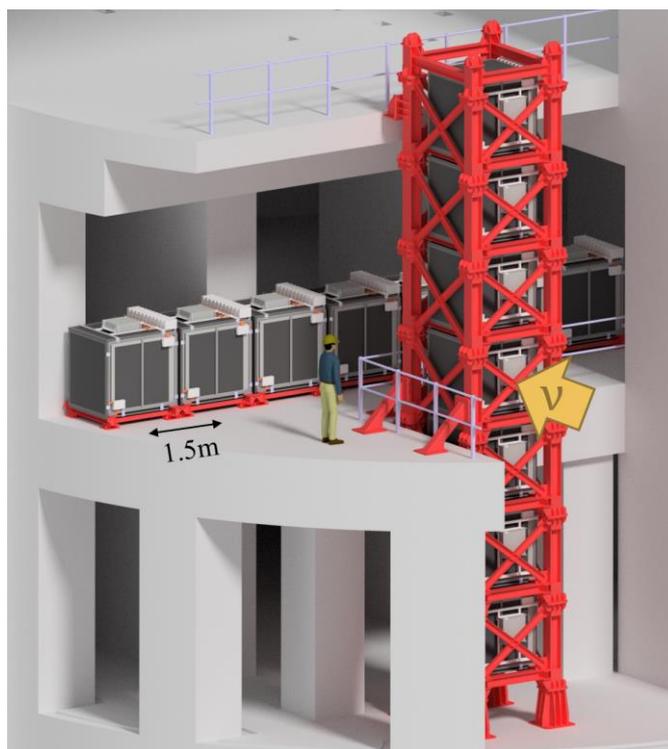


川上

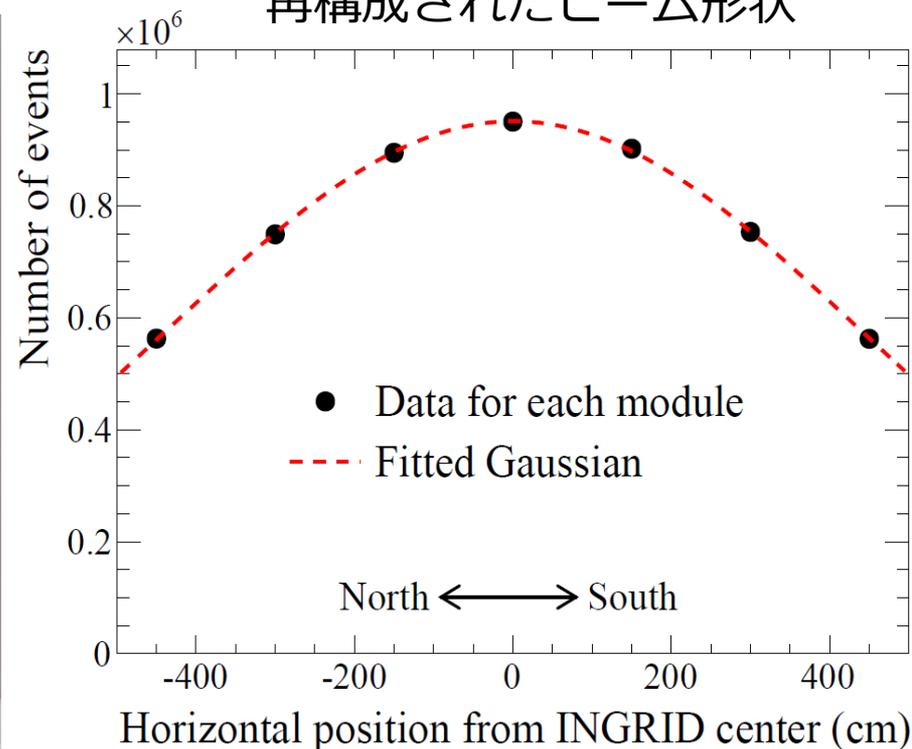


栗林

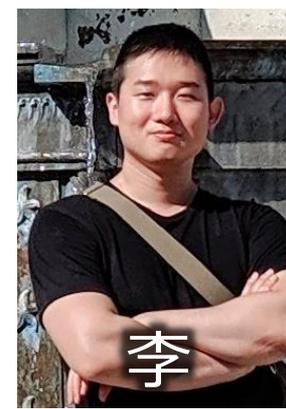
INGRID検出器



再構成されたビーム形状



小田川



李

- 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。

