

T2K実験 (東海編)

木河達也

2018年4月17日

高エネルギー物理学研究室実験紹介

- スタッフ (4人)
中家、市川、ロジャー、木河
- 研究員 (2人)
中村輝 (神戸大)、小原
- 研究生 (1人)
サンジャナ
- 博士課程 (9人)
仲村、江、潘、芦田、田中、平本、
中村和、森、吉田
- 修士課程 (2人)
近藤、安留

今回の紹介 → T2K(東海側)+ α がメインの人たち

ロジャーさんが紹介 → 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

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

これまでの測定状況

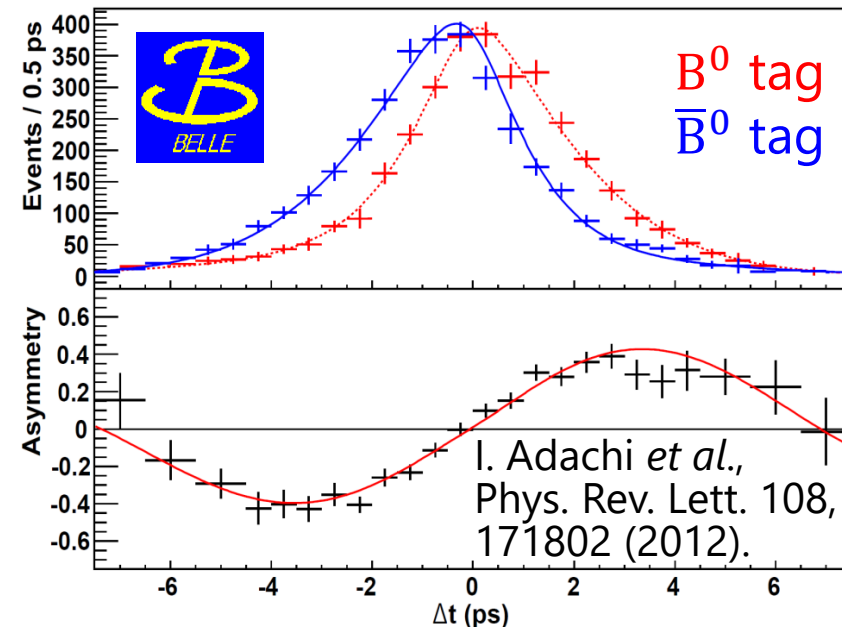
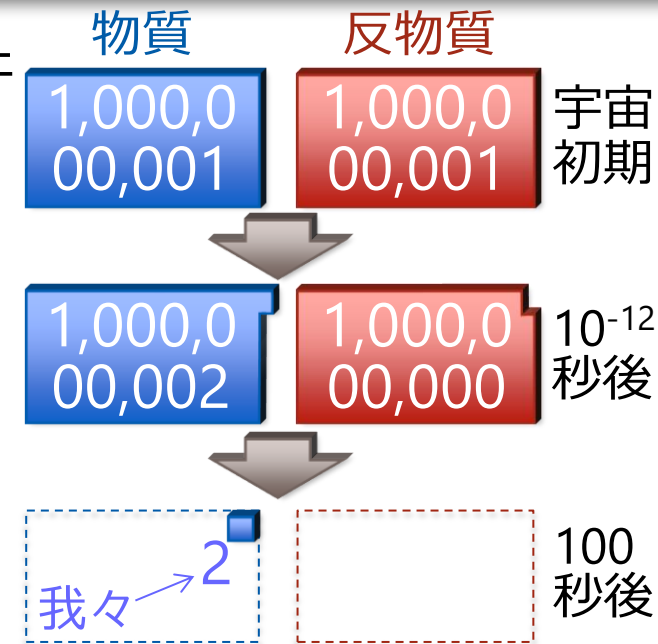
$$\begin{aligned}
 \theta_{12} &= 33.4^\circ \pm 0.8^\circ \text{ (太陽}\nu, \text{原子炉}\nu) \\
 \theta_{13} &= 8.5^\circ \pm 0.2^\circ \text{ (原子炉}\nu, \text{加速器}\nu) \\
 \theta_{23} &= 45.8^\circ \pm 3.2^\circ \text{ (大気}\nu, \text{加速器}\nu) \\
 \Delta m_{21}^2 &= (7.5 \pm 0.2) \times 10^{-5} \text{ eV}^2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

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?

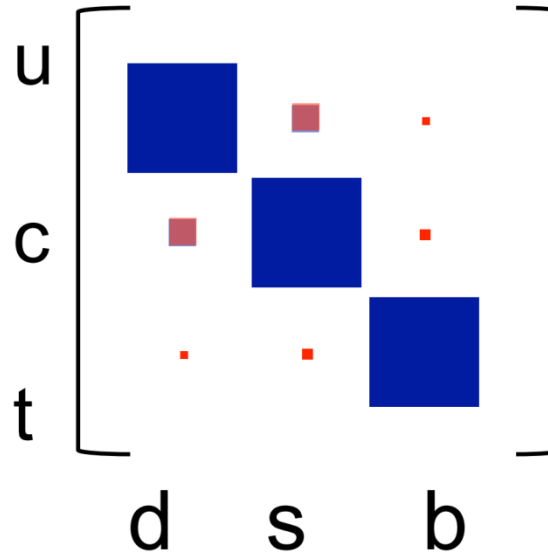


クォークとニュートリノの混合行列

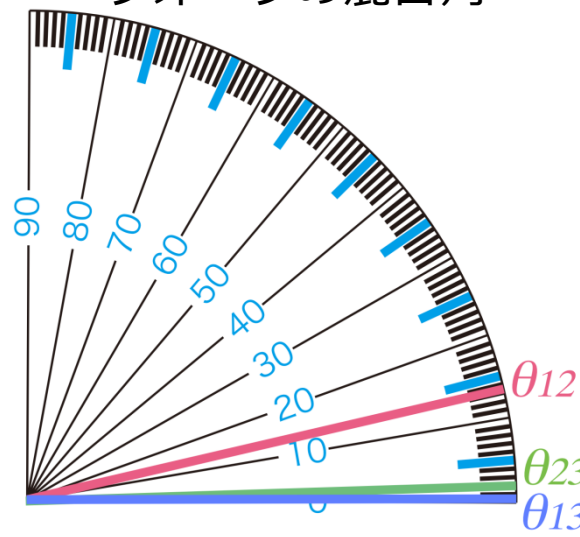
5

- 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})

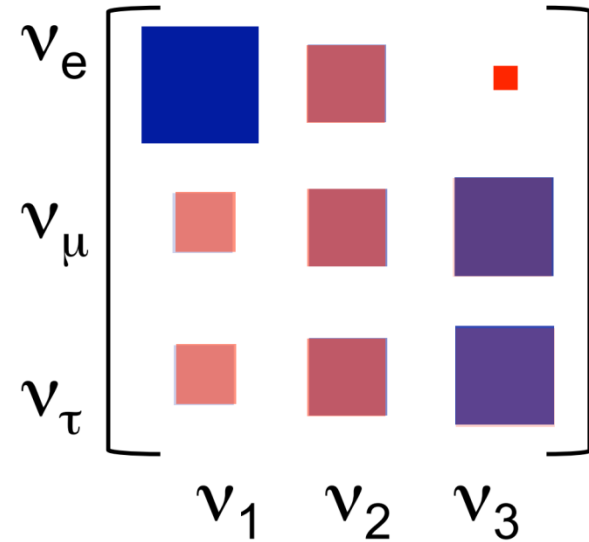
クォークの混合行列
(小林・益川行列)



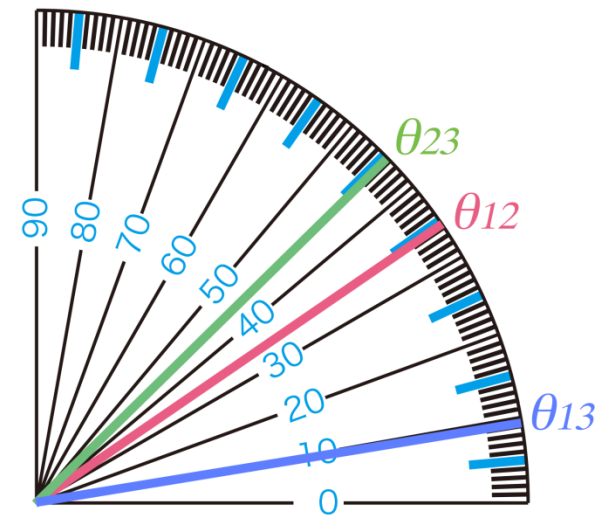
クォークの混合角



ニュートリノの混合行列
(牧・中川・坂田行列)

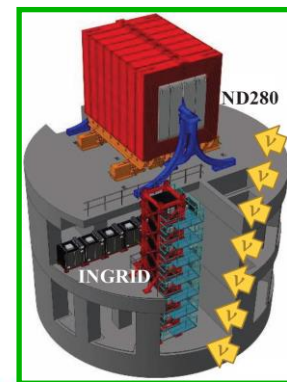


ニュートリノの混合角

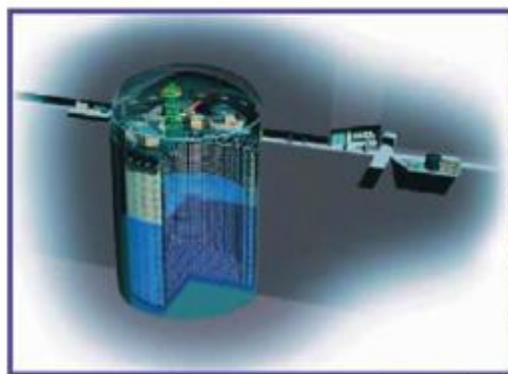


- J-PARCで ν_μ または $\bar{\nu}_\mu$ ビームを生成。
- 直後の前置検出器で振動前のニュートリノの精密測定。
- 295km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノ観測。
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の確率の違いからCP対称性の破れを探索。
- ν_μ や $\bar{\nu}_\mu$ の消失確率から混合角 θ_{23} を精密測定。

Near detector



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



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)

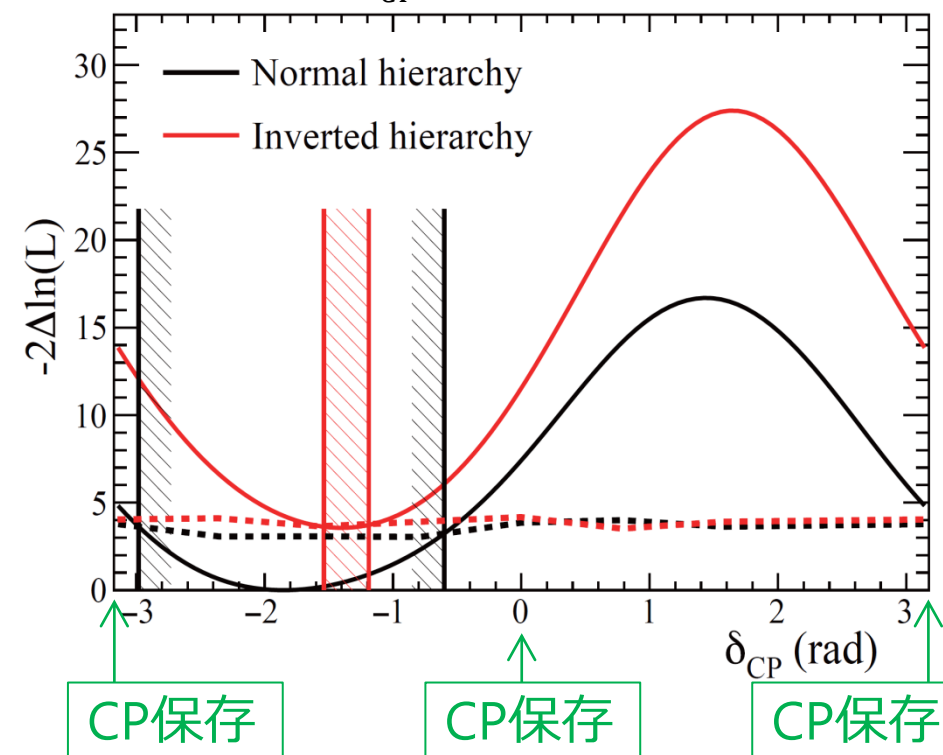


T2K実験の最新結果と課題

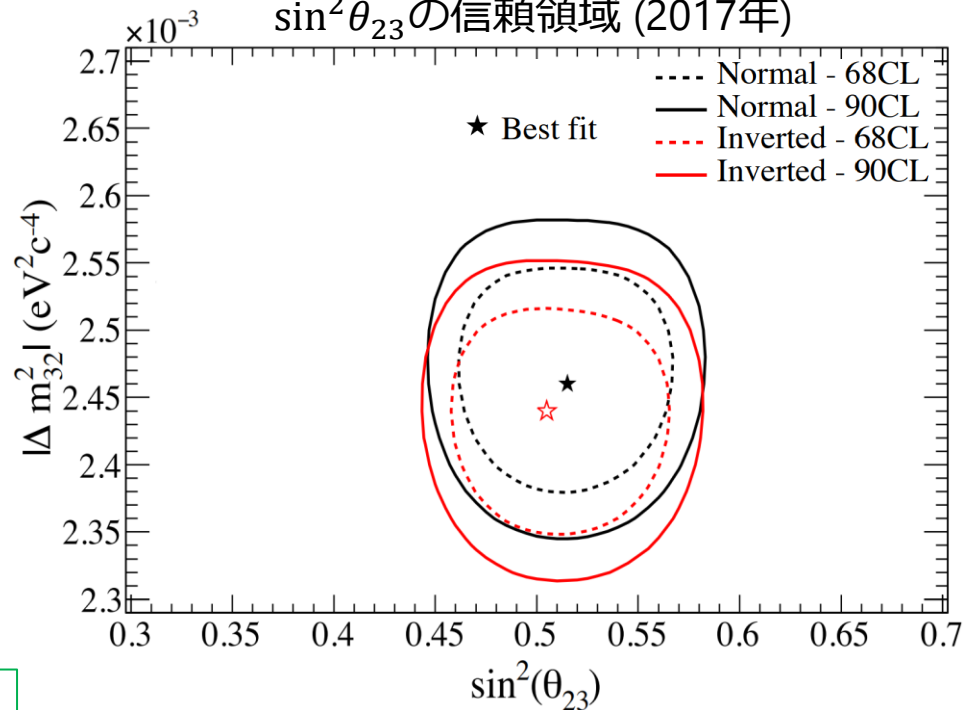
7

- 世界で初めてニュートリノのCP対称性の破れを95%の信頼度で示唆。
- 混合角 θ_{23} を世界最高精度で測定。
- しかし、測定精度はまだ不十分。
- 統計誤差と系統誤差を大幅に削減しなければならない。

T2K実験による δ_{CP} の95%(2σ)信頼領域 (2017年)



T2K実験による $|\Delta m_{32}^2|$ と $\sin^2\theta_{23}$ の信頼領域 (2017年)

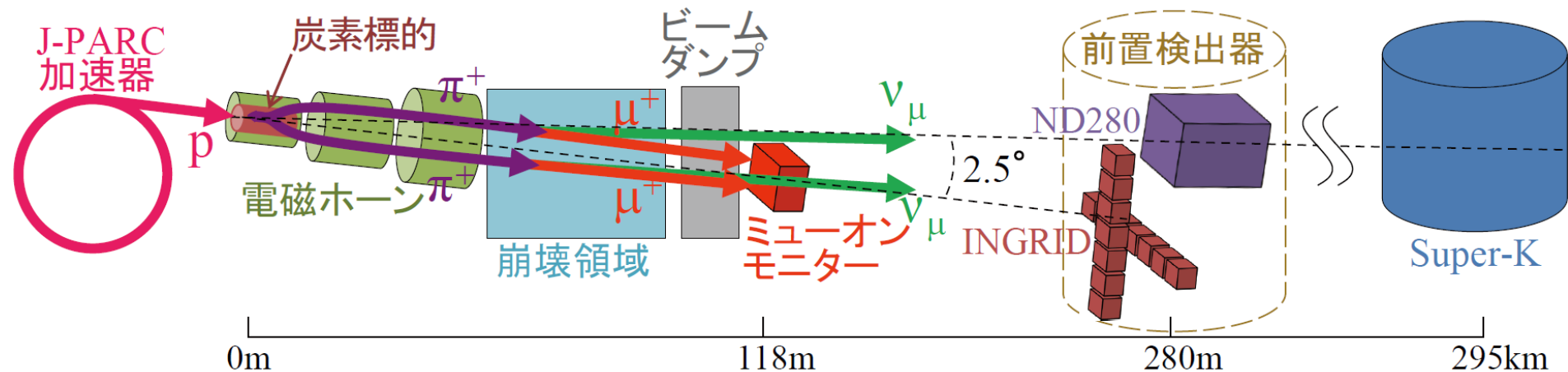
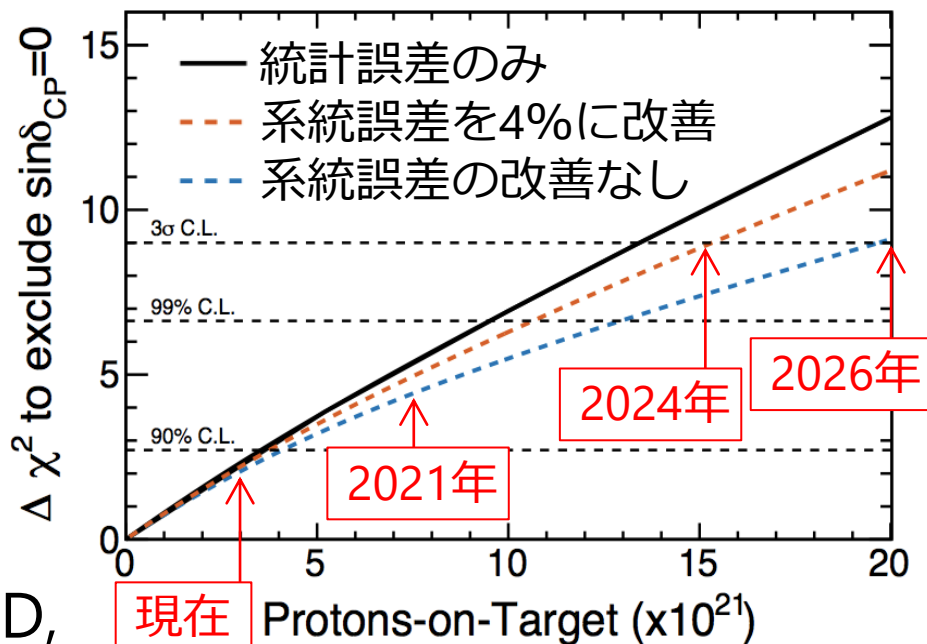


T2K実験の今後の戦略

8

- ビームを増強してデータを取り続け統計誤差を削減。
→ ビームロス の理解, 削減。
→ MUMONとINGRIDで、ビームを精密測定。
- ニュートリノ反応の精密測定により、系統誤差を抑制。
→ 様々な計画が進行中。
(NINJA, WAGASCI+BabyMIND, ND280アップグレード)

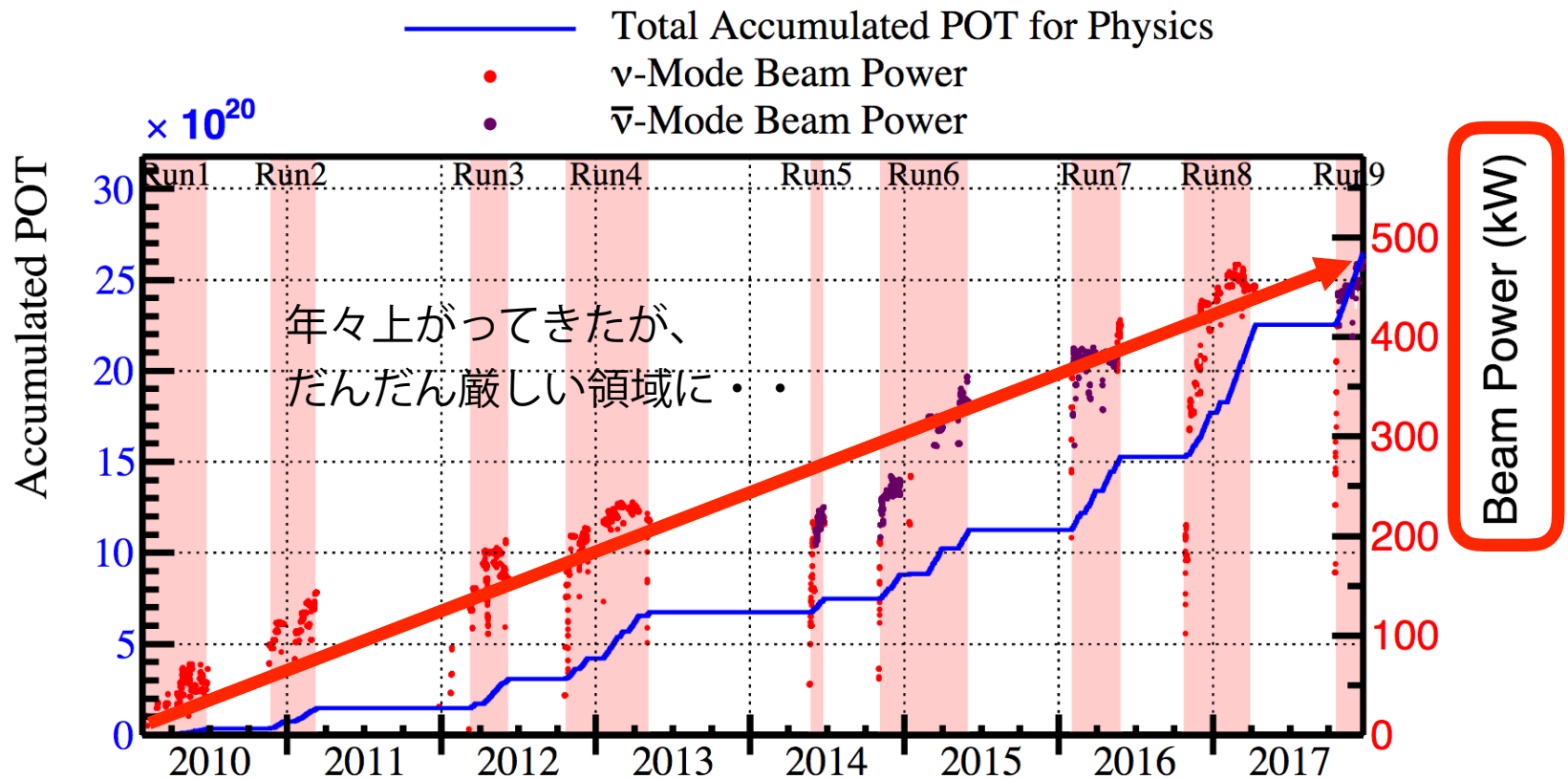
ニュートリノCP対称性破れの探索感度



T2K実験のためのJ-PARC加速器のパワーアップ

- ニュートリノ実験の肝はイベント数

- 加速器・ニュートリノビームのビーム強度と測定器の大きさ
- 加速器のビーム強度は、今はビームのロスの大きさで決まってる。どうやってロスを減らせるかの研究が重要。



● 京大HEで加速器関係の研究をした人

- 仲村 佳悟 (H25.4~27.3)
 - T2K 実験ニュートリノビーム増強のための J-PARC MR Intra-bunch Feedback System の開発
- 中西 芳枝 (H27.4~29.3)
 - T2K 実験のためのJ-PARC MR における 多電極ビームモニターの開発
- 宇野 亘 (H28.4~30.3)
 - J-PARC MR 加速器における 16 電極モニターの処理回路・データ取得システムの開発



● 今後の課題

- J-PARC MRのビーム診断が重要！ なぜビームが不安定になり、ロスを起こすのか調べる装置の開発。
- 装置の開発が大体終わってきたので、運用して、実際にビームの素性を調べるのが大事。データ収集、オンラインモニタリング、解析、シミュレーションと盛りだくさん

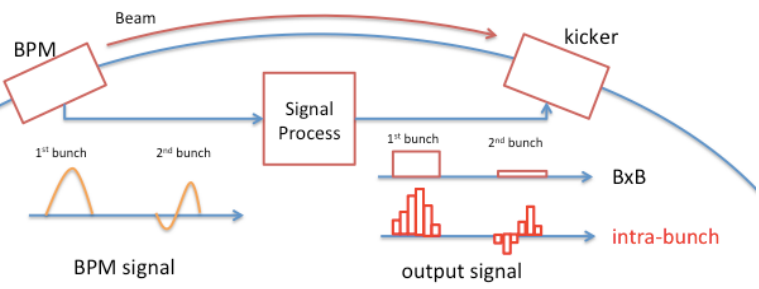


図 4.23: フィードバックシステムの概要図

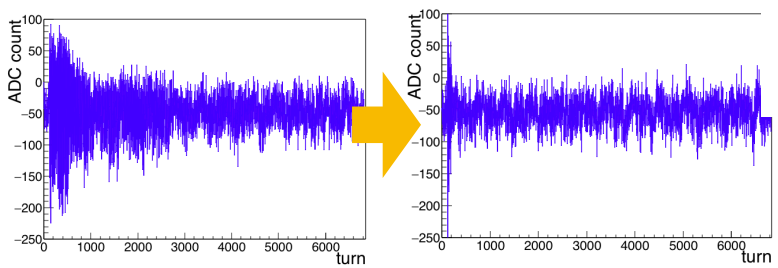


図 6.17: フィードバック off の時のベータトロン図 6.19: IB フィードバック on の時のベータトロン振動の遷移

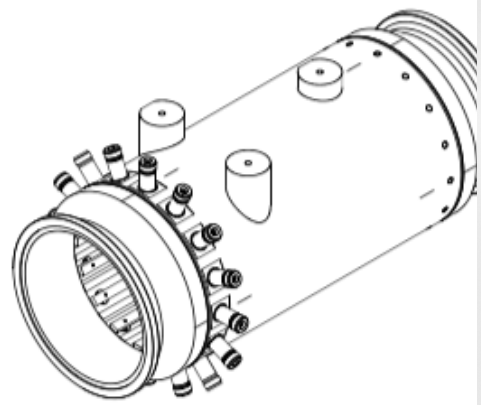


図 6.9: モニターの設計図、外観 (株式会社 TOYAMA 製図)

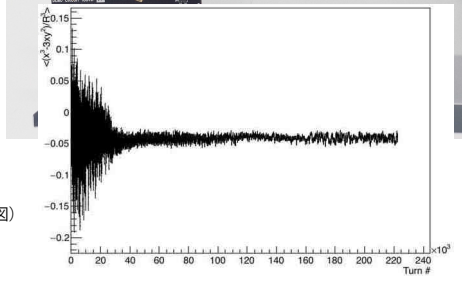
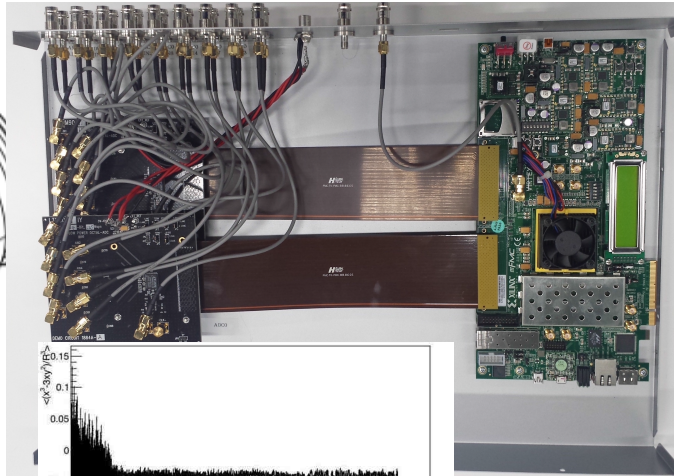
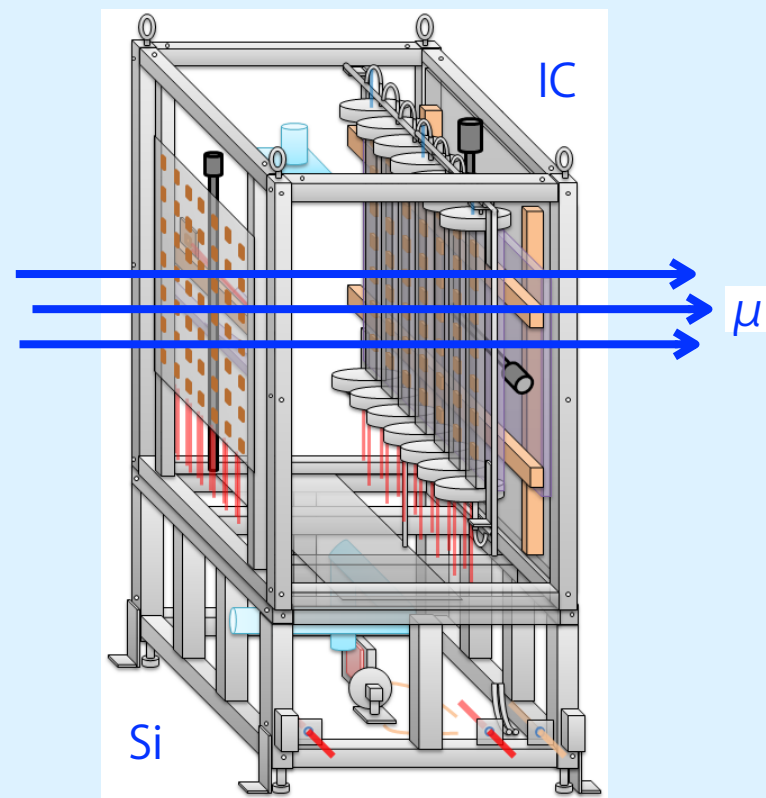


図 6.38: 処理回路により算出した 3 次のモーメント $\langle (x^3 - 3xy^2)/R^3 \rangle$ 、1 バunch 目のみのデータを描いている

MUMON

- ミューオンモニターはニュートリノビーム方向をリアルタイムで監視。
- **これがないとT2K実験は運転できない (学生でも係長ぐらいになれる)。**
- いまの検出器 (シリコン, ガス検出器) の問題点が顕在化してきた。。
なので、新しい検出器の開発研究を始めた。

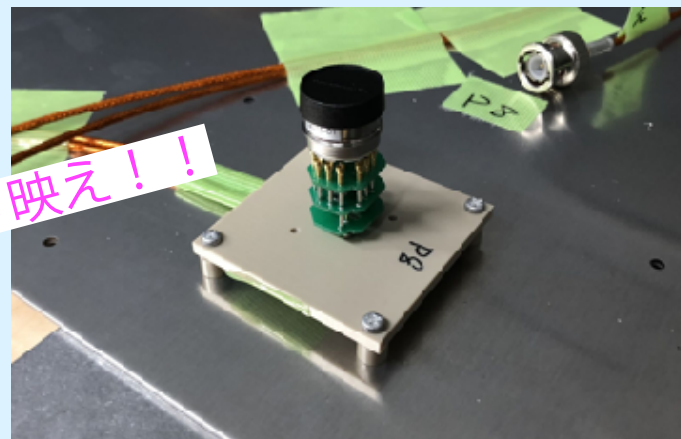


MUMON

- 新しい検出器候補 = 電子増倍管 (EMT)
- プロトタイプ検出器を見る限りなんか良さそう。
- M1が入ったらできること...
 - 電子ビームを使ってビームテスト: 将来のJ-PARC大強度ビーム環境下でも使えるか調べる。
 - (もし使えそうなら) 実機のデザインとインストール!
 - (もしインストールできたら) 実際に運用してビームの評価!!
- (比較的) 大きなシステムを一から作って大実験に貢献できるチャンス!



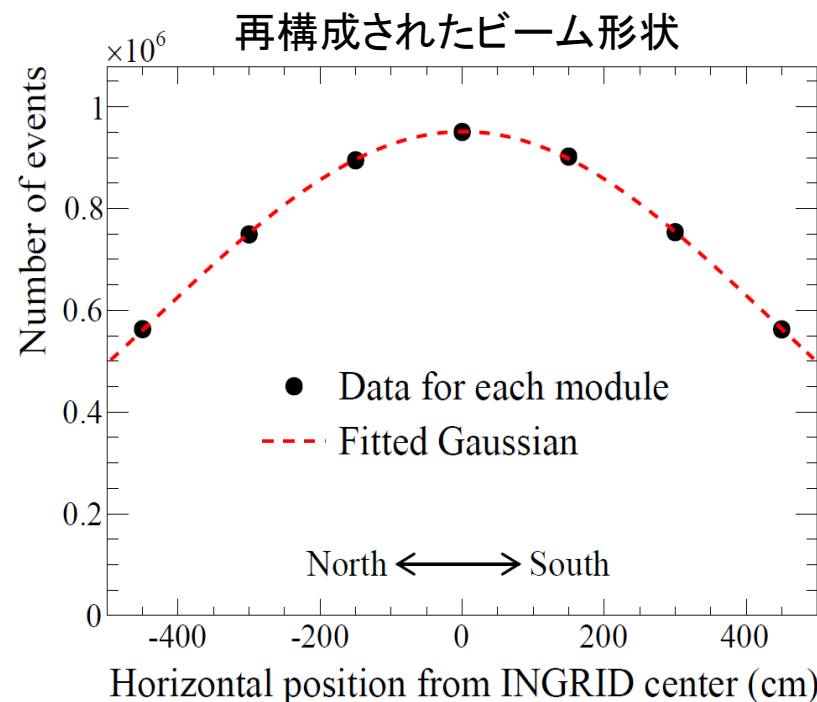
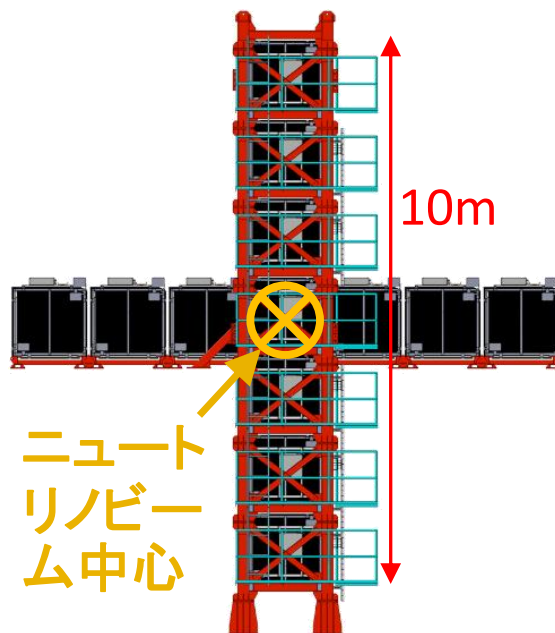
驚きのインスタ映え!!



- 十字に配置された14台ニュートリノ検出器。
- 各検出器でのイベント数から、ニュートリノビームの強度と方向を測定。
- 今後の課題
 - 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。)



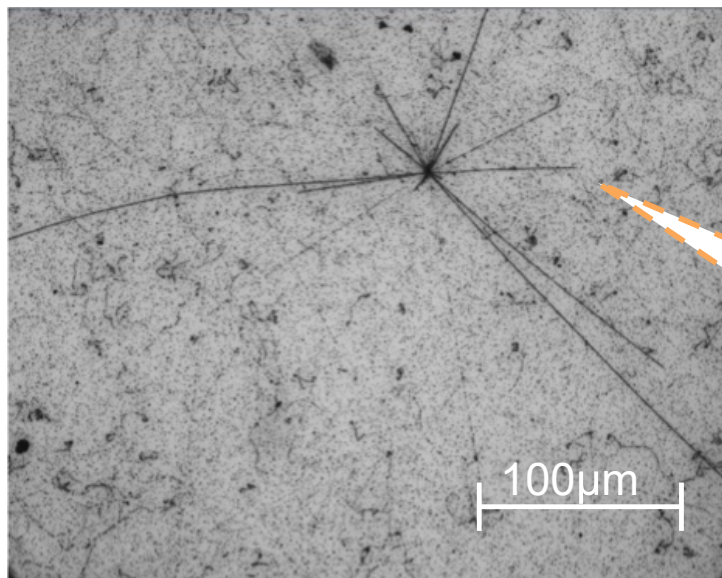
平本



NINJA実験



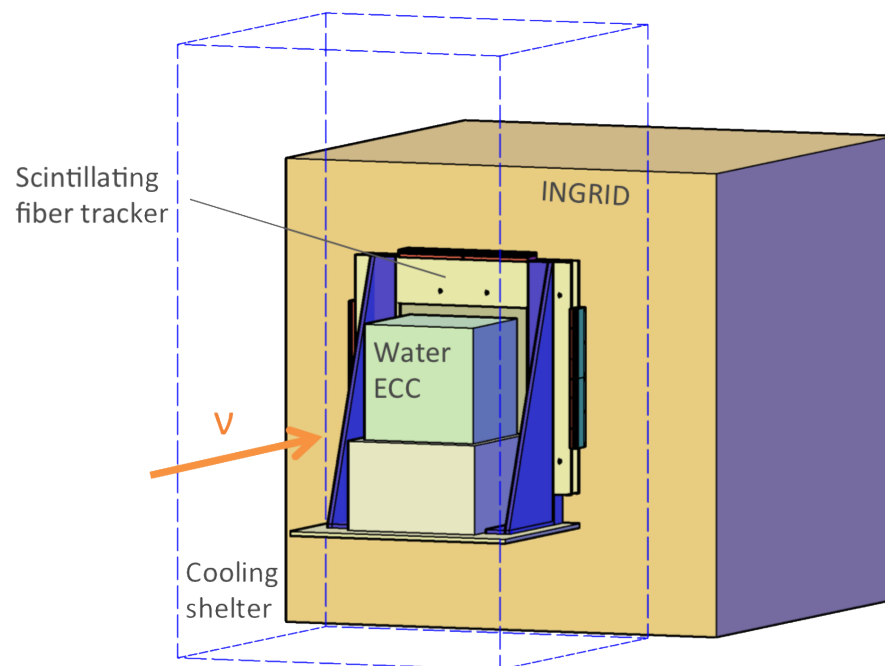
平本



- ニュートリノ反応の精密測定実験
- 原子核乾板を使うとこんなによく見える

原子核乾板で見る荷電粒子の飛跡
(写真フィルムみたいなもの)

- T2K前置検出器の前にファイバートラッカーと原子核乾板検出器を設置
 - 2019年に大規模な物理ラン
- > 準備・データ取得・解析ぜんぶできる



NINJA実験でこれからできること

1. 大型ファイバートラッカー製作(おすすめ！)

- 現在の40x40cm²から1.2x1.2m²へ
- デザイン・製作・オペレーション・解析すべてに関われる
- INGRIDのデータもさわれる

2. 原子核乾板関連

- ~100kg水ターゲットの原子核乾板検出器を製作・データ取得・解析

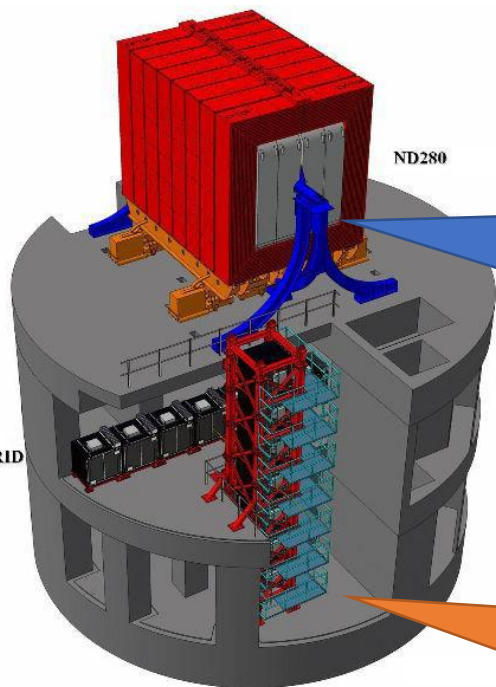
(3. 検出器の最適化)

- シミュレーション・構造設計などを通して、物理結果を出すために最適なコンフィギュレーションを探る

いずれの場合も、2019年のランでの主戦力となって
データ取得・解析を行う

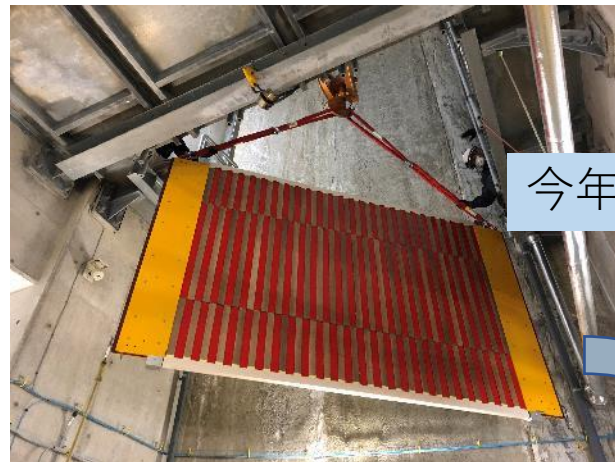
WAGASCI実験

この2か所で、ニュートリノビームのエネルギースペクトルが違うことを利用して、ニュートリノと物質（原子核）の反応を詳細に調べる。（新しい試み！）



T2Kの公式な
前置検出器。
2021年アップ
グレード予定

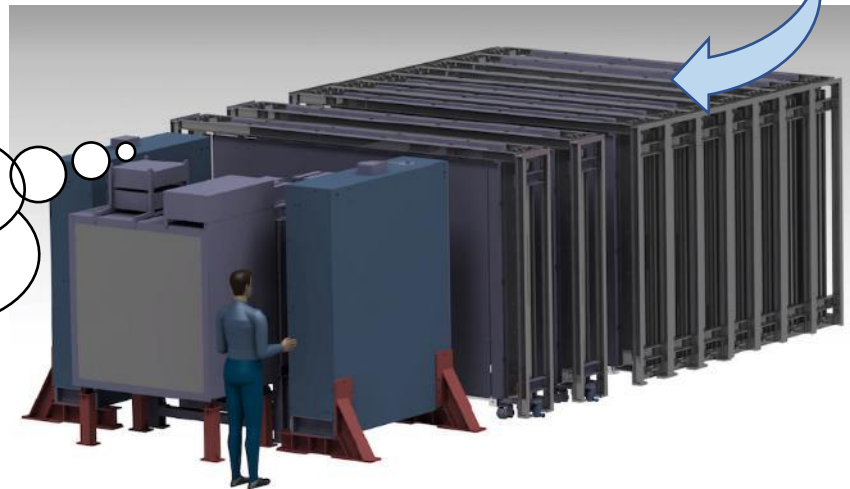
WAGASCI実験
非公式な
前置検出器。



今年の2月

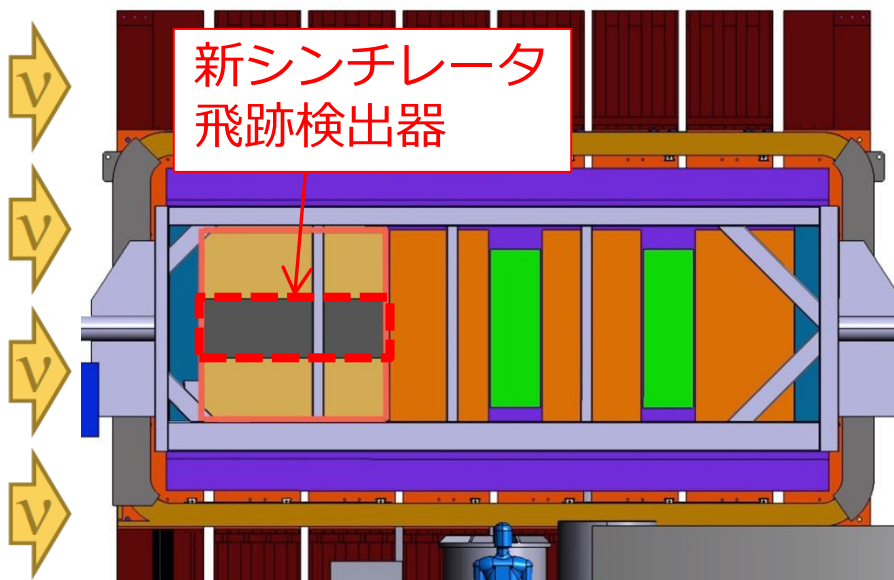


あと、この横のやつ
が6月くらいに入れば、
全部がそろろう。
いよいよ測定へ！
新しいデータ！

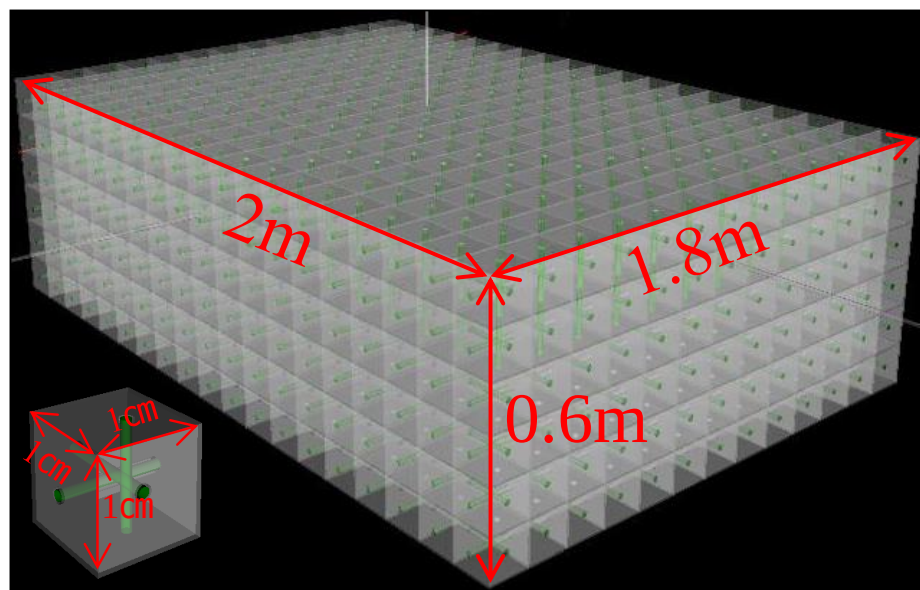


- 現在のND280のシンチレータ飛跡検出器は細長いシンチレータを並べた構造。
→ 横方向の散乱された粒子や低エネルギーの粒子の検出ミスが多い。
- サイコロ状のシンチレータを並べた新検出器を開発中。
→ 粒子の3次元飛跡を正確に再構成。

アップグレード後のND280の概念図



新シンチレータ飛跡検出器の概念図

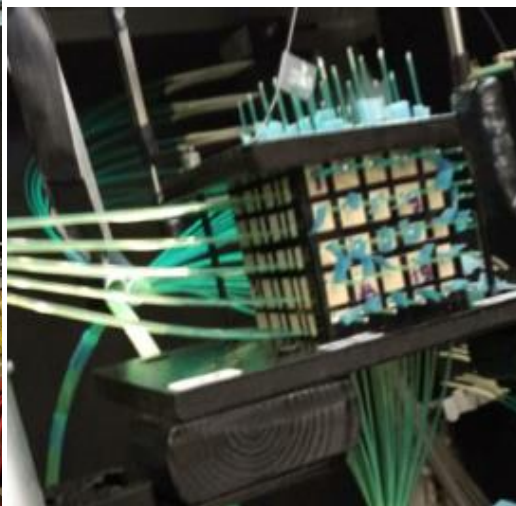
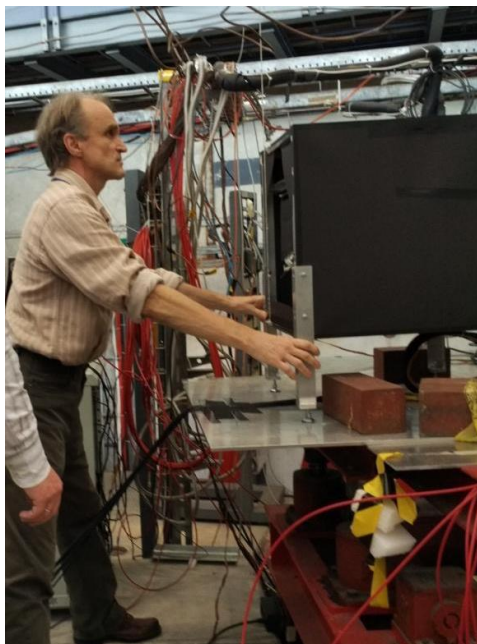


ND280アップグレードでやること

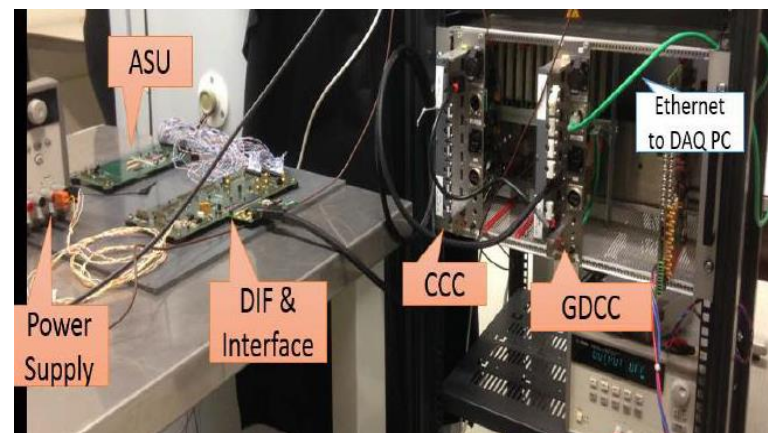
18

- 1/200プロトタイプのビーム試験による性能評価。
- 多チャンネル読み出しエレクトロニクスの開発、試験。
- 検出器構造の設計。
- シミュレーションによる最適化。

ビーム試験@CERN (2017年10月)



エレクトロニクス開発(のイメージ)



組み立て試験



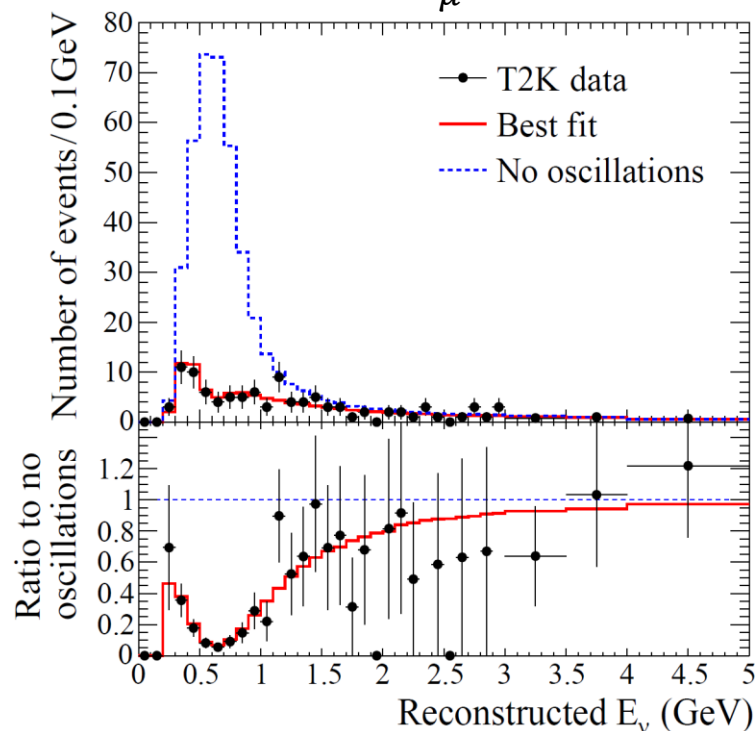
ニュートリノ振動解析

19

- 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。
- 大学院研究の集大成。

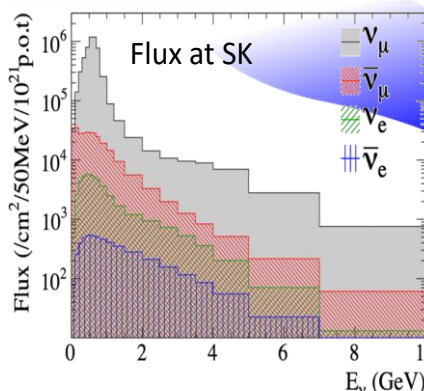


仲村

SKにおける ν_μ スペクトル

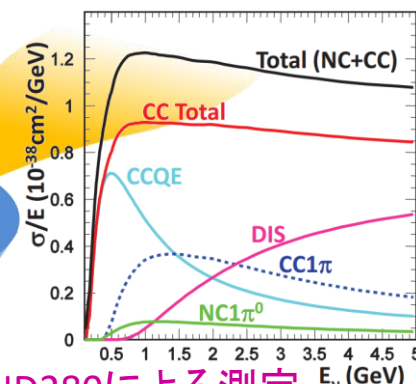
ニュートリノフラックス

- 陽子ビームモニターの測定
- NA61等のハドロン生成データを取り入れたFLUKA, GEANTによるシミュレーション
- INGRIDによるビーム方向の測定



ニュートリノ相互作用

- NEUTによるシミュレーション
- 外部実験からの誤差 (SciBooNE, MiniBooNEなど)



ニュートリノ振動パラメータ →

スーパーカミオカンデでの事象予測



比較

スーパーカミオカンデでの観測結果

- 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

