
高エネルギー物理学研究室
ニュートリノグループ
M1向け研究紹介

高橋将太 他

2012年6月12日 @ 高エネコロキウム
(30分くらいの予定)

メンバー紹介

スタッフ 中家、市川、南野、Walter

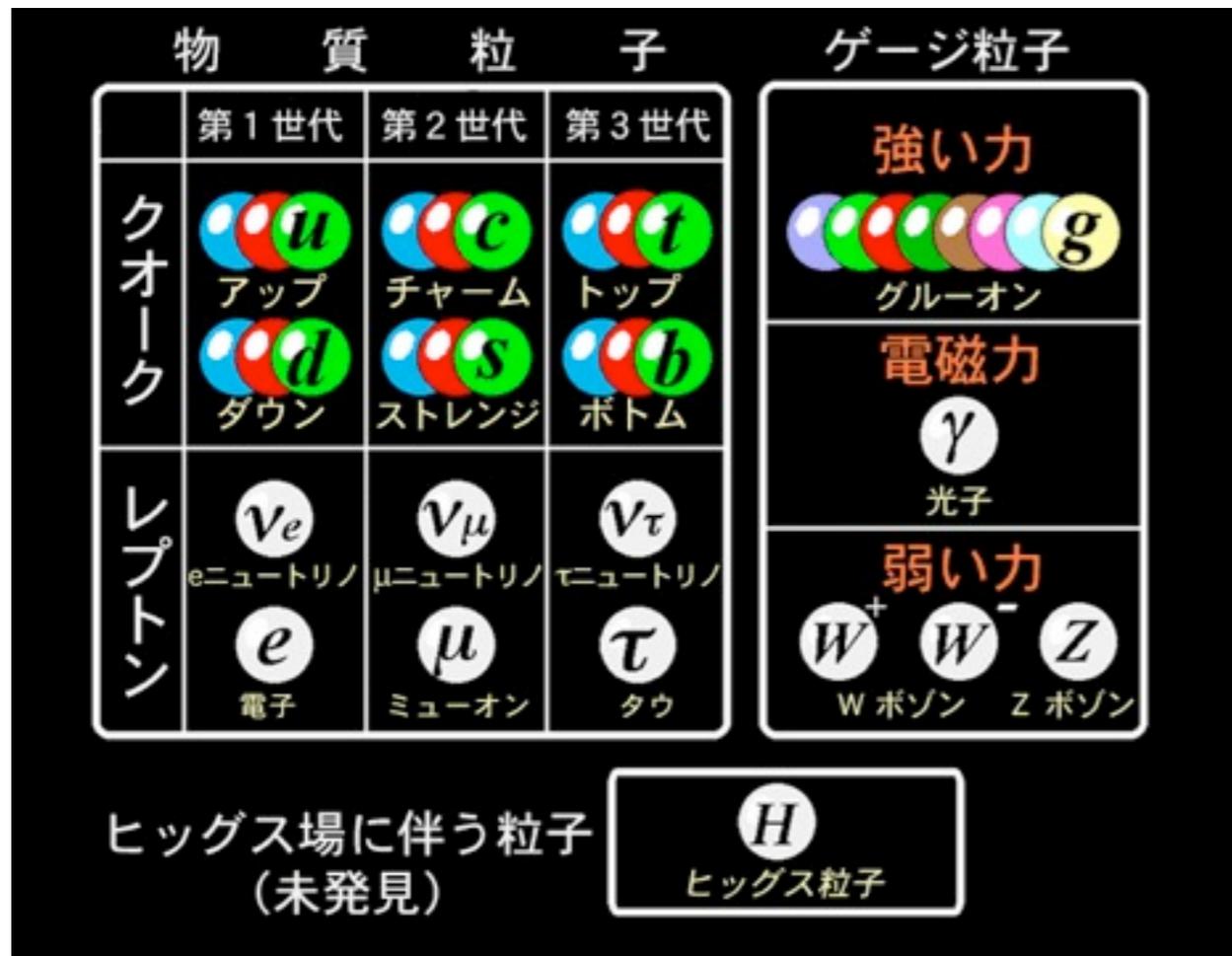
ポスドク 池田、Phillip、Christophe

博士課程
D5：久保、
D3：家城、村上、
D2：木河、鈴木、高橋、黄、
D1：平木、廣田

修士課程 M2：長崎、合田（？）

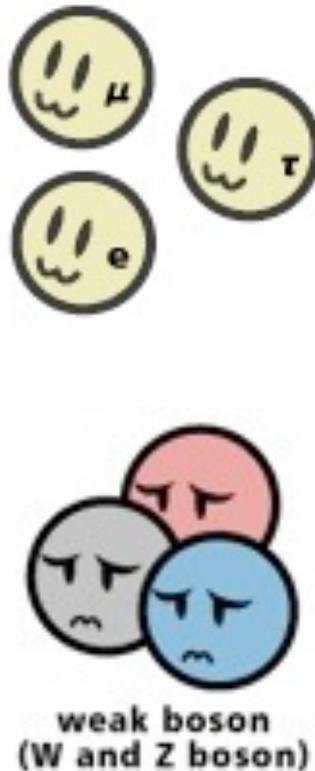
素粒子物理学とニュートリノ

● 素粒子の種類



● ニュートリノの性質

- レプトン
- 3つのフレーバー
- 電氣的に中性
- スピン1/2
- 弱い相互作用のみ
- 質量がとっても小さい
 - 標準理論ではゼロ
 - ...ほんとにゼロ?



ニュートリノの”簡単な”歴史

- 20世紀初頭：放射性崩壊の研究
- 1930： β 崩壊の連続スペクトルからニュートリノ予言
- 1933：Fermiによる β 崩壊理論
- 1956：ReinesとCowanによる原子炉からの反電子 ν 初検出
- 1962：Ledermanらによる加速器を使った ν 世代の観測 ($\nu_e \neq \nu_\mu$)
- 1973：CERN SppSで中性カレント(Z)初検出
- 1987：Kamiokandeなどで超新星爆発 ν 検出
- 1989：CERN LEPで ν が3世代であることを発見
- **1998：Super-Kamiokandeで ν 振動を観測**
- 2000：DONUT実験による ν_τ の初直接観測
- 2004：K2K実験による加速器ニュートリノ振動の確立
- 2012：T2K実験などによる混合角 θ_{13} の発見

ニュートリノに関係する実験の現状



超高エネルギーニュートリノ
IceCube系

超新星ニュートリノ

太陽ニュートリノ Super-Kamiokande
BOREXINO

大気ニュートリノ SNO系
KamLAND系

地球ニュートリノ

加速器ニュートリノ T2K
MINOS
Nova
OPERA
ICARUS

原子炉ニュートリノ Double Chooz
RENO
Daya Bay

ニュートリノのなぜ

(2週間前を思い出してみよう！)

ニュートリノ振動の研究

- クォークと比べて、混合行列の変な特徴は？
- 3世代のニュートリノの質量の順番は？
- CP対称性は破れているの？
- 本当に3種類だけなの？
- 質量の絶対値は？
- クォーク・荷電レプトンに比べ、なぜ軽いの？
- マヨラナ粒子なの？
- 物質優勢宇宙の起源なの？

ニュートリノ振動とT2K実験

ニュートリノの混合行列

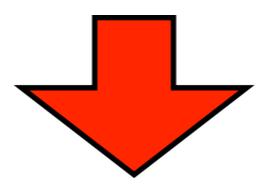
- PMNS (ポンテコルボ・牧・中川・坂田) 行列
 - フレーバーの固有状態と質量の固有状態の混合を表す行列

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

大気ニュートリノ
加速器ニュートリノ
 $\theta_{23} \sim 45^\circ$
 $\Delta m_{23}^2 \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

原子炉ニュートリノ
加速器ニュートリノ
 $\theta_{13} < 10^\circ$
 $\Delta m_{13}^2 \sim \Delta m_{23}^2$
上限値のみ(~2011)

太陽ニュートリノ
原子炉ニュートリノ
 $\theta_{12} \sim 35^\circ$
 $\Delta m_{12}^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

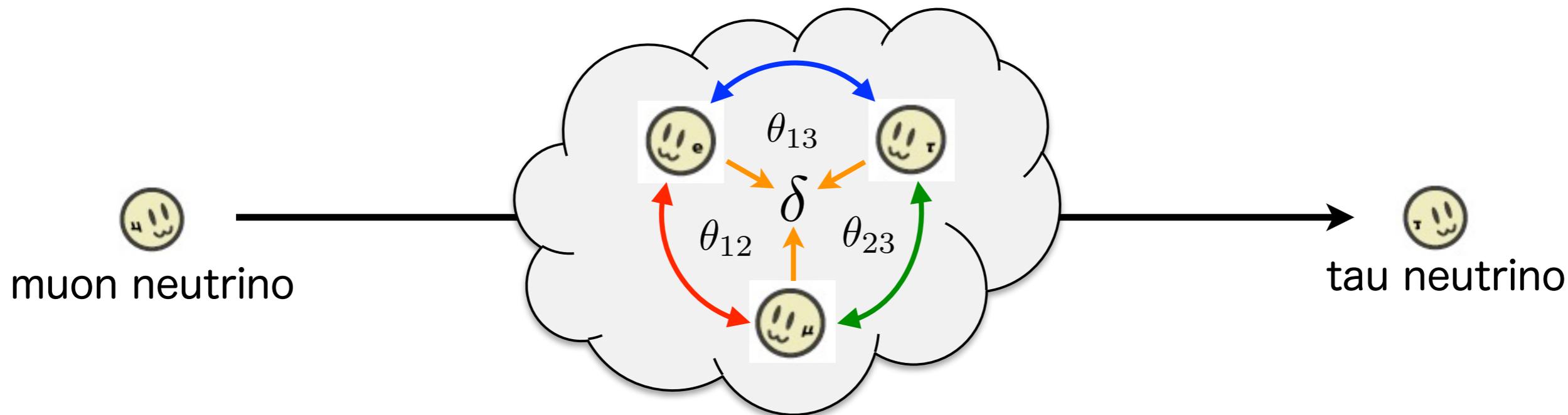


$\theta_{13} \sim 9^\circ$ で遂に見つかった!!!

in 2012 by T2K, MINOS, Double Chooz, Daya Bay, RENO

ニュートリノ振動の概要

- ニュートリノの飛行中に、フレーバーが変化する現象
- ニュートリノの質量差と混合に由来



- **質量がないと起こらない!!!** 標準理論を破っている現象
 - 電子 ν 出現モード(θ_{13})の測定 \Rightarrow CP対称性の破れ、質量階層構造の理解

現在の状況

1. θ_{13} が”比較的大きな”有限の値を持つ \Rightarrow CP対称性の破れ、質量階層の測定
2. θ_{23} が最大混合($=45^\circ$)ではなさそうだ \Rightarrow θ_{23} のoctantの測定

ニュートリノ振動確率の式

- ミューオンニュートリノ消失の場合  → 

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_x) \approx \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{23}^2 L}{E} \right)$$

- 電子ニュートリノ出現の場合  → 

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{23}^2 L}{E} \right)$$

ニュートリノのエネルギー E [GeV]と、
基線長 L [km]を決めて実験をする

T2K	0.7 GeV	295 km	Double Chooz	few MeV	1.05 km
MINOS	few GeV	735 km	Daya Bay	few MeV	2 km

T2K実験 (Tokai to Kamioka)

東海神岡間長基線ニュートリノ振動観測実験

- **世界最大強度** (予定) J-PARC ν ビーム
- **世界最大級**水チェレンコフ検出器

目的 ミューオンニュートリノ消失の精密測定
電子ニュートリノ出現の世界初観測

2009年4月 運転開始
2010年1月 物理運転開始
2011年3月~12月: 東日本大震災のため運転停止・復旧作業
2011年6月 電子 ν 出現モードの兆候を捉える【PRL 107, 041801 (2011)】
2011年12月: 運転再開
2012年6月: 電子 ν 出現モードの存在を証明

Super Kamiokande検出器
長距離飛行後の ν を観測



T2K実験の規模



59 institutions in 12 countries

Canada

TRIUMF
U of Alberta
U of B Columbia
U of Regina
U of Toronto
U of Victoria
York U

France

CEA Saclay
IPN Lyon
LLR E Poly
LPNHE-Paris

Russia

INR

Korea

Chonnam Nat'l U
Dongshin U
Seoul Nat'l U

Spain

IFIC, Valencia
U.A. Barcelona

Poland

A Soltan, Warsaw
HNiewodniczanski
T U Warsaw
U of Silesia
Warsaw U
Wroclaw U

Switzerland

Bern
ETH Zurich
U of Geneva

UK

U of Oxford
Imperial C London
Lancaster U
Queen Mary U of L
Sheffield U
STFC/RAL
STFC/Daresbury
U of Liverpool
U of Warwick

Japan

ICRR Kamioka
ICRR RCCN
KEK
Kobe U
Kyoto U
Miyagi U of Ed
Osaka City U
U of Tokyo

Italy

INFN Bari
INFN Roma
Napoli U
Padova U

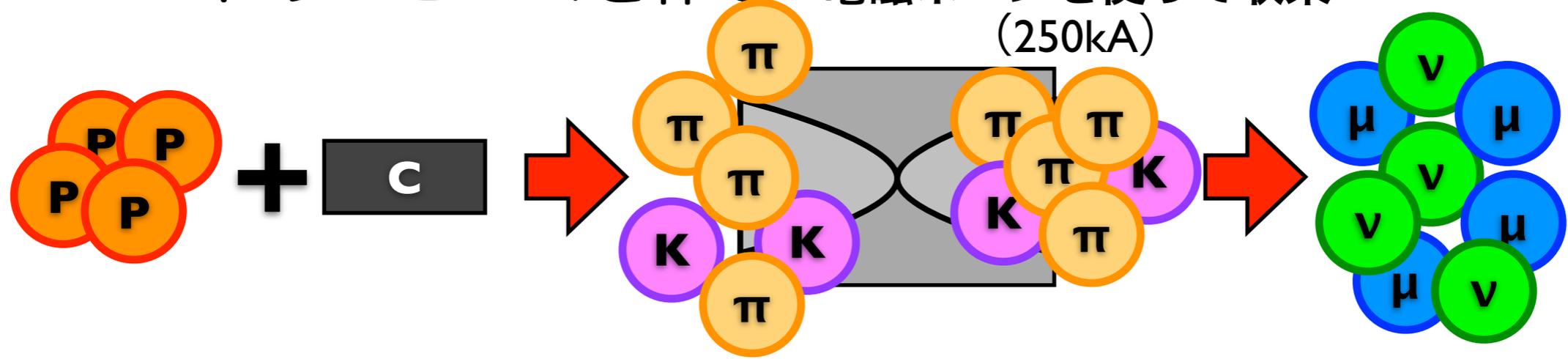
USA

Boston U
BNL
Colorado State U
Duke U
Louisiana State U
Stony Brook U
U of California, Irvine
U of Colorado
U of Pittsburgh
U of Rochester
U of Washington
Germany
RWTH Aachen U

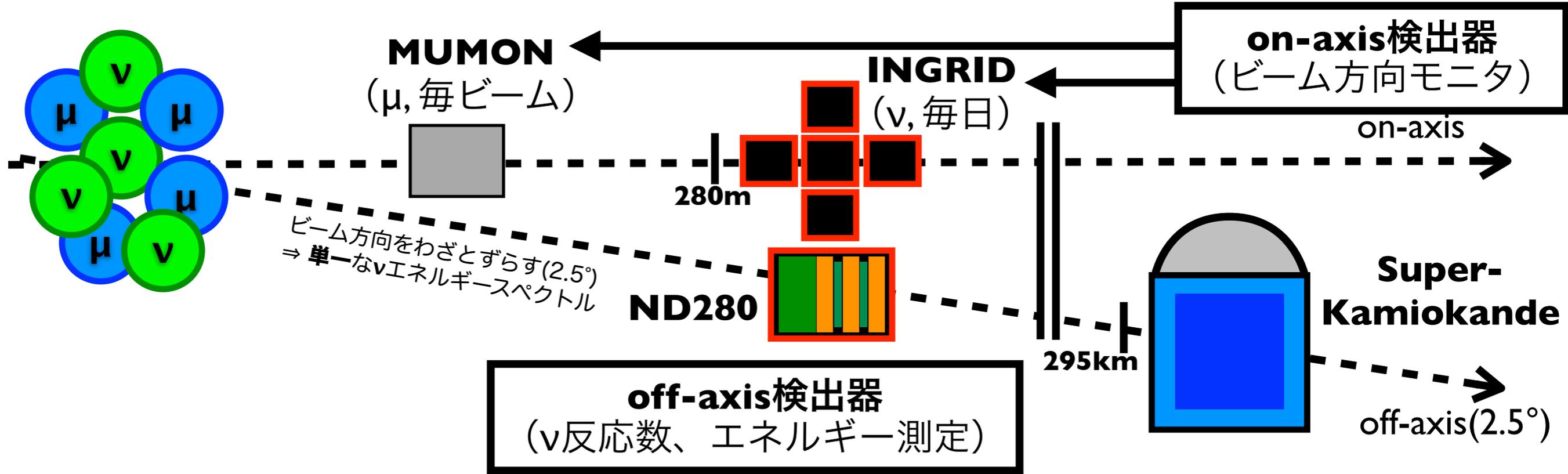
世界12カ国、59研究機関、約500名が参加

ニュートリノ振動の検出方法 (1)

- ニュートリノビームを作る 電磁ホーンを使って収束 (250kA)

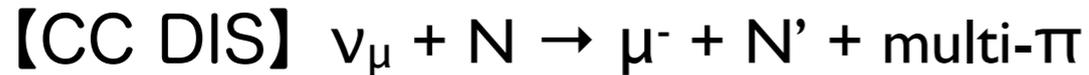
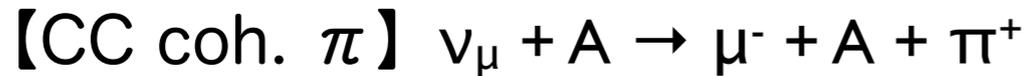
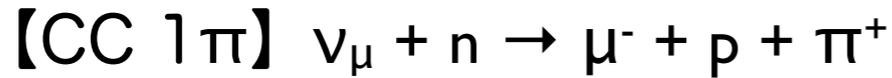


- ニュートリノの数を長距離飛行前後で測定する

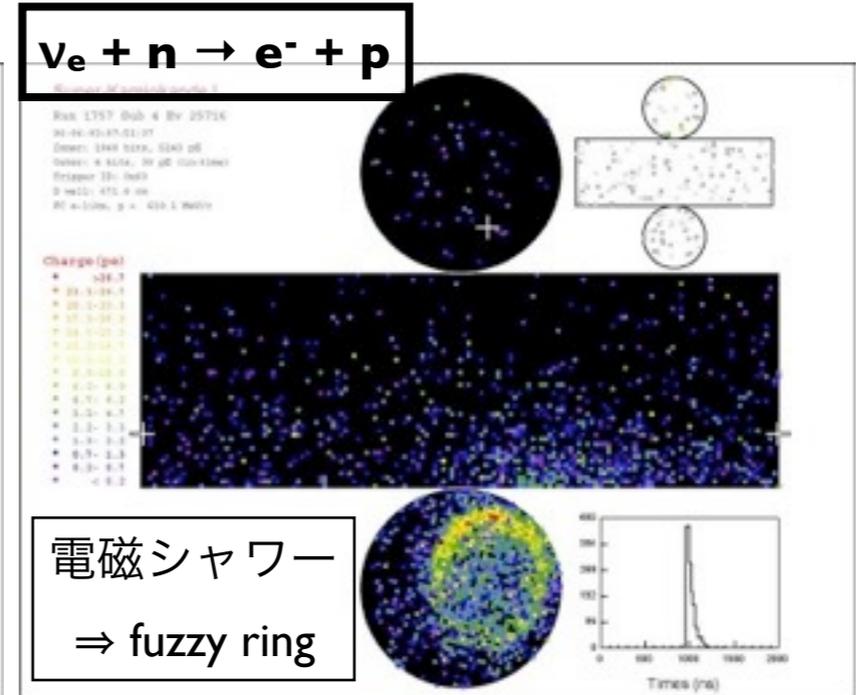
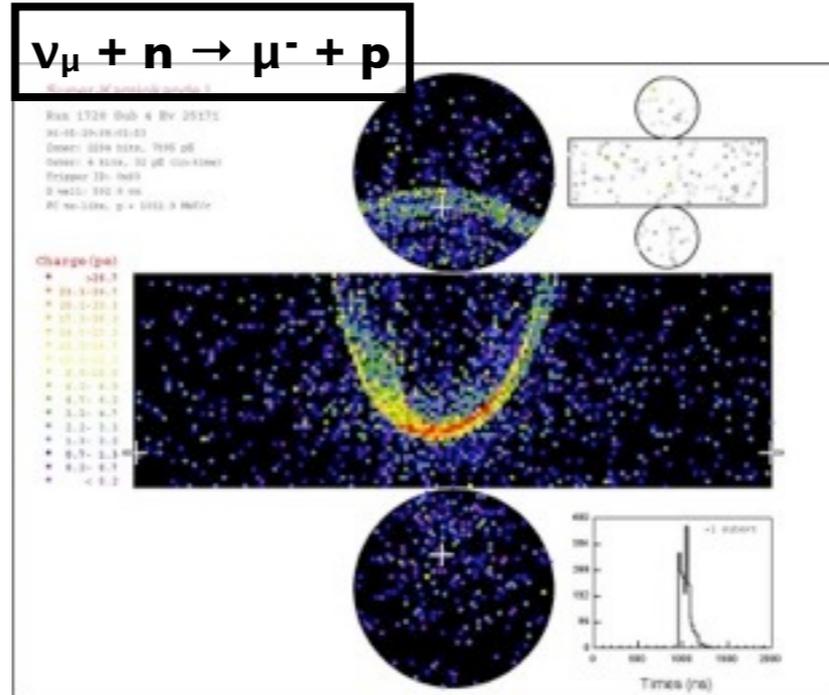
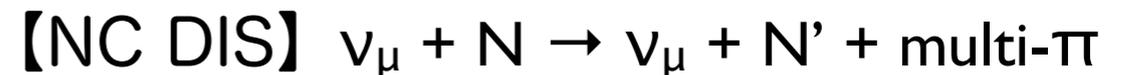
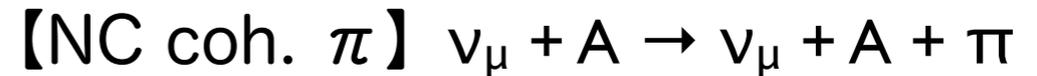
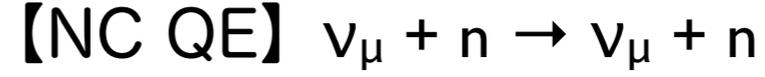


ニュートリノ振動検出方法 (2)

荷電カレント反応

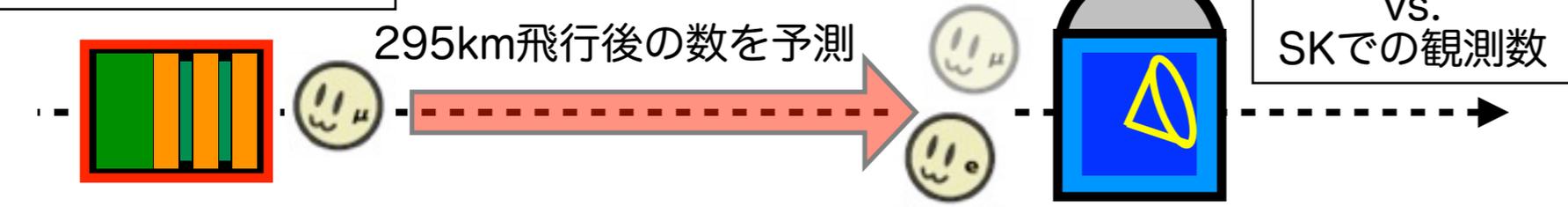


中性カレント反応



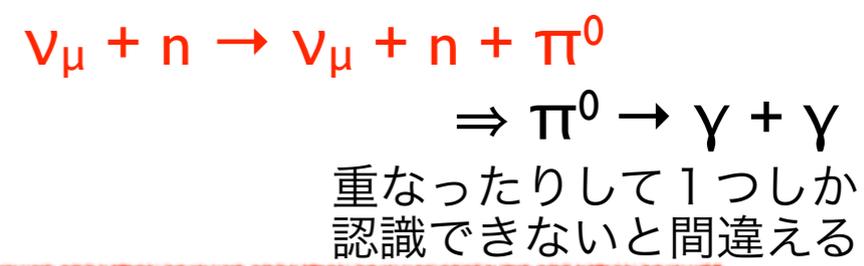
ND280での測定数

295km飛行後の数を予測

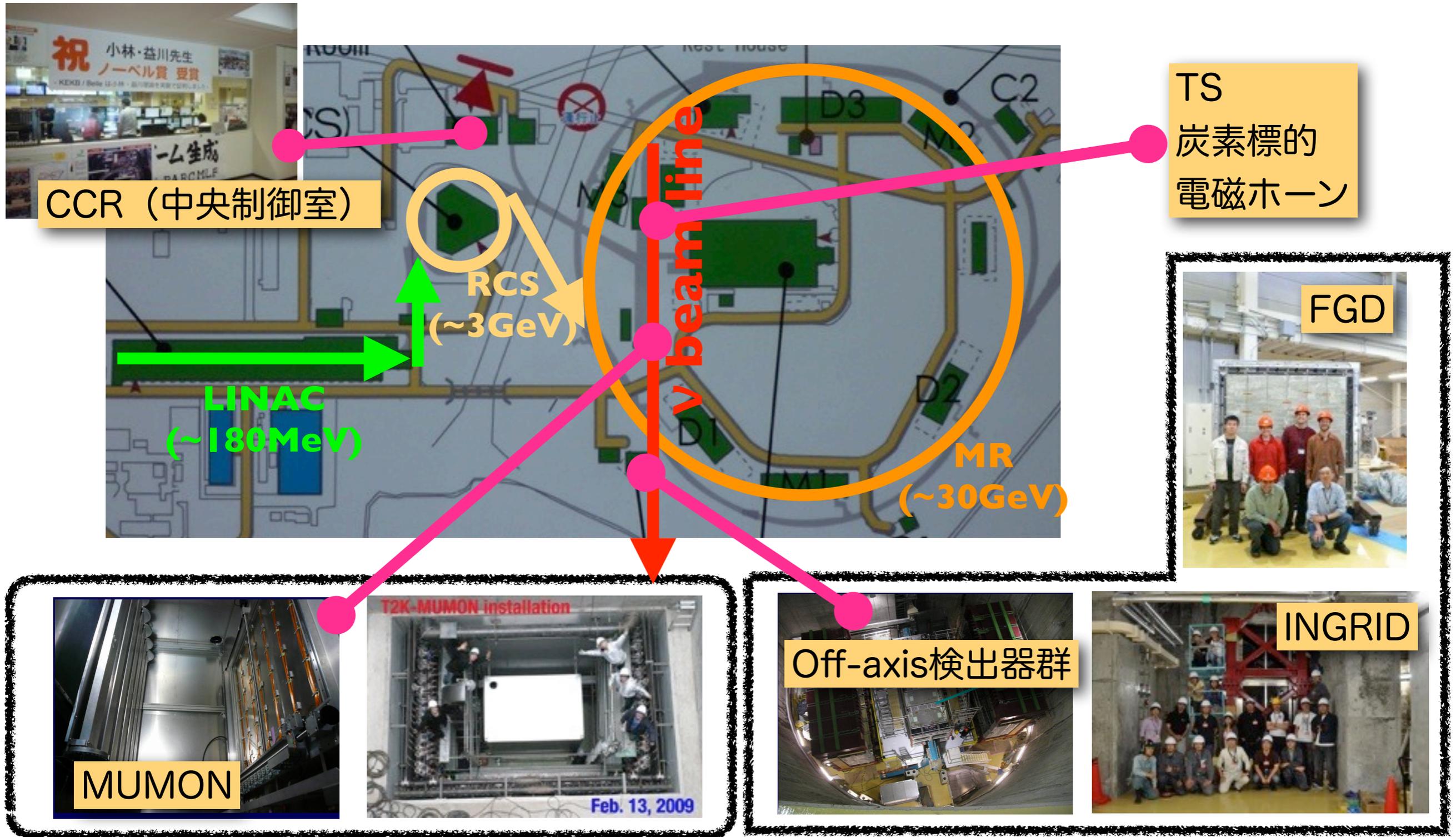


SKでの期待値
vs.
SKでの観測数

BG event



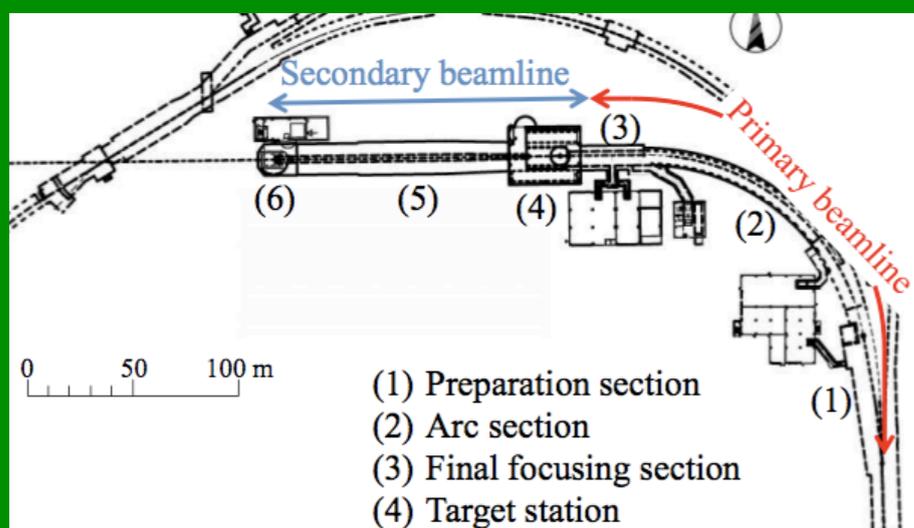
ニュートリノビームライン & 前置検出器



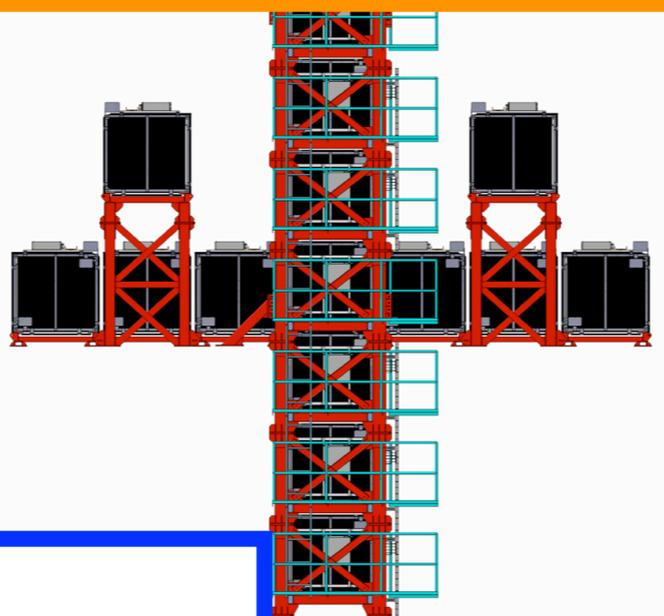
京都グループの活動内容

現在のT2K実験での活動

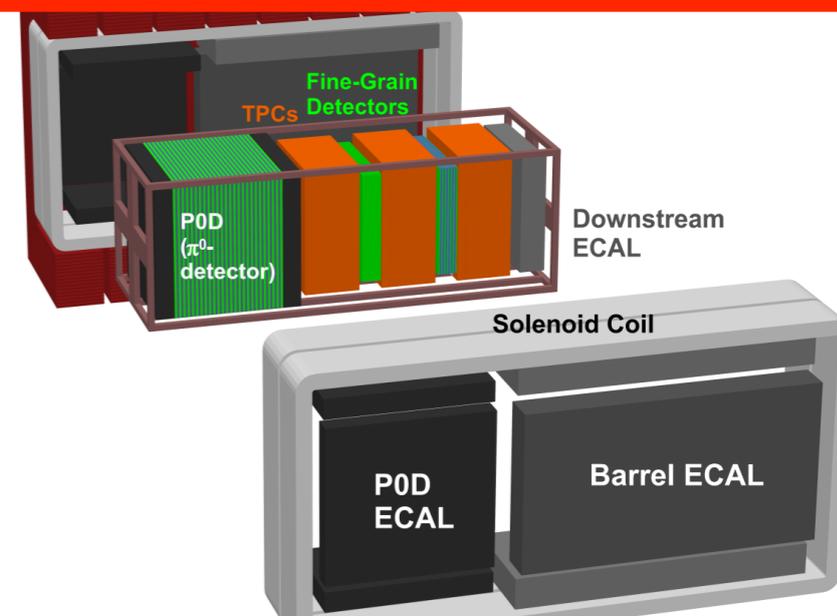
ニュートリノビームライン



前置検出器：INGRID

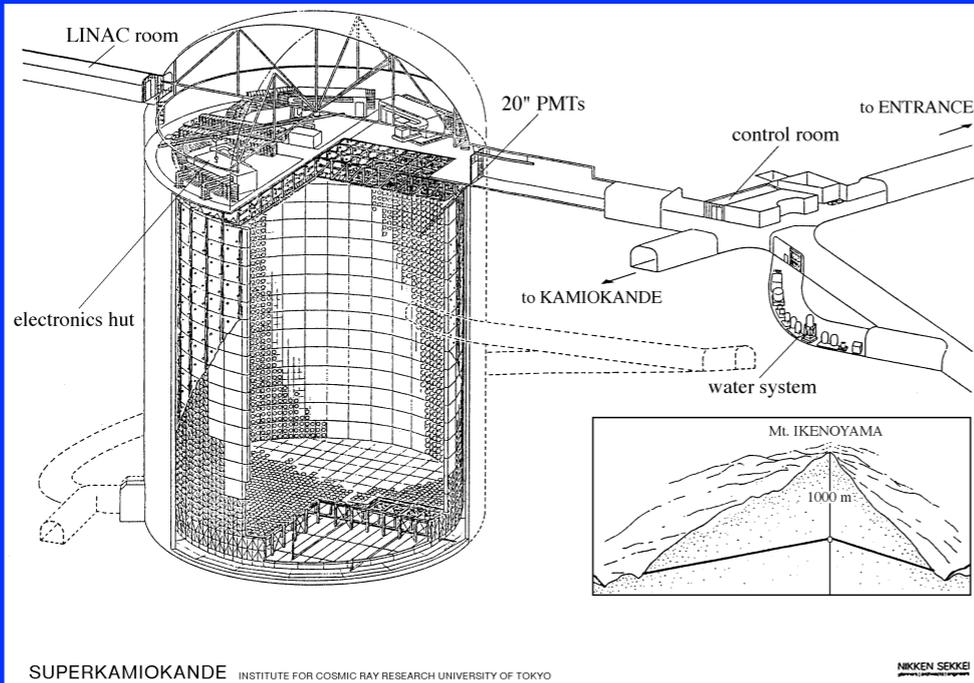


前置検出器：ND280

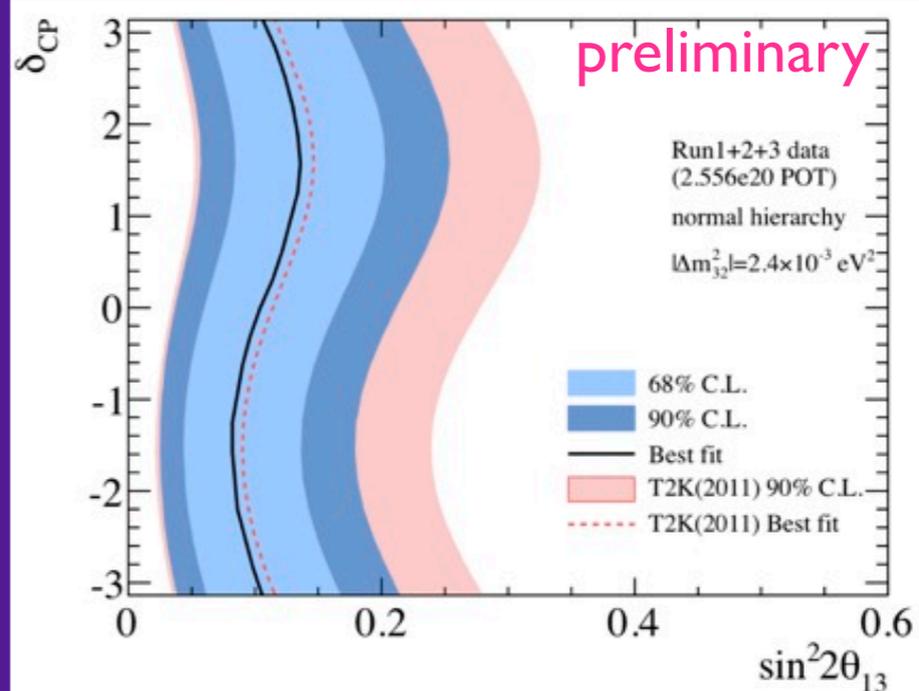


後置検出器：

Super-Kamiokande



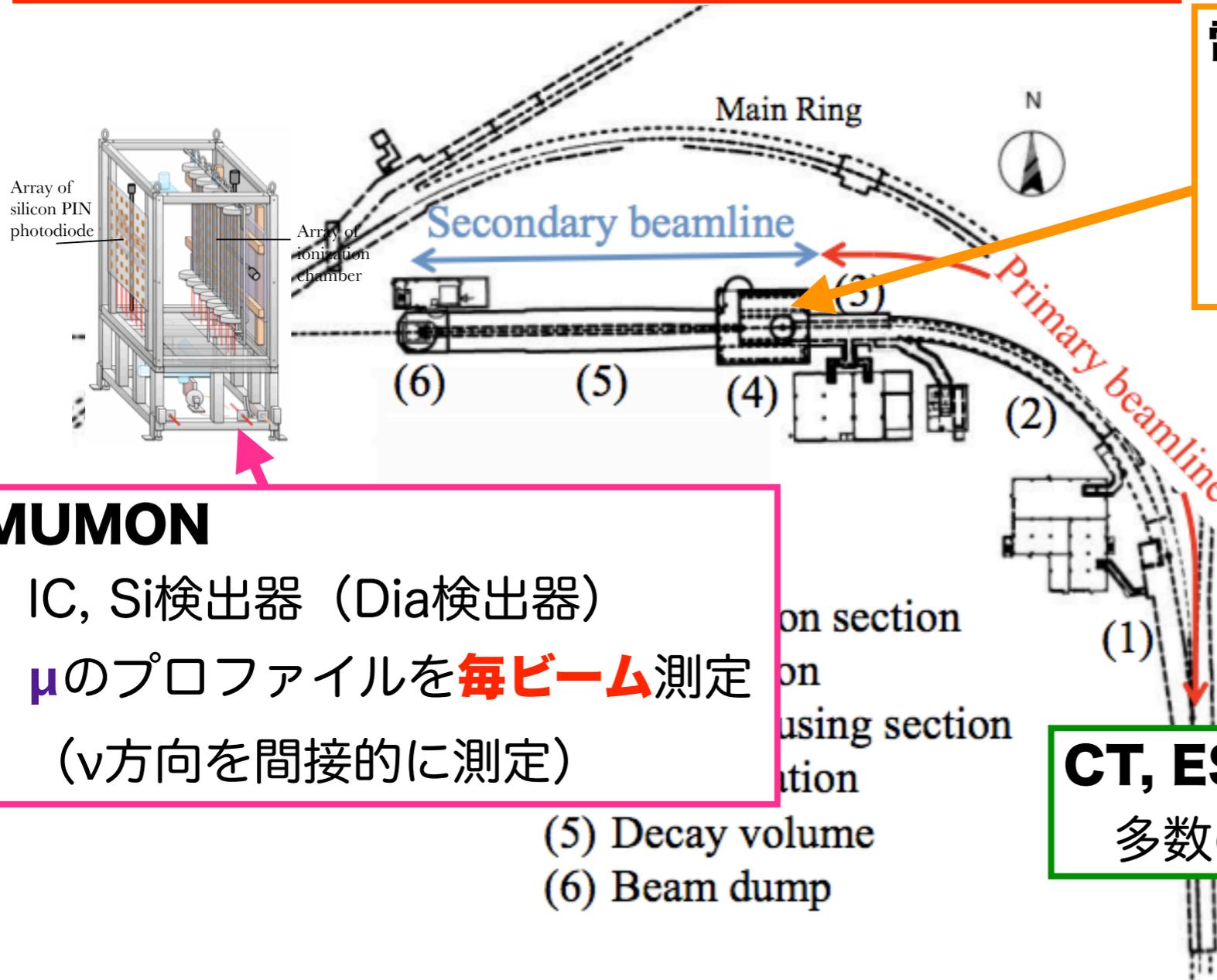
振動解析



ニュートリノビームライン

市川、久保、村上、鈴木

良質なビームの生成 振動解析に欠かせないMCの作成



電磁ホーン

vビームを絞る装置
大強度ビーム生成に必須
(vの歴史はホーンの歴史by西川さん)

MUMON

IC, Si検出器 (Dia検出器)
 μ のプロファイルを**毎ビーム**測定
(v方向を間接的に測定)

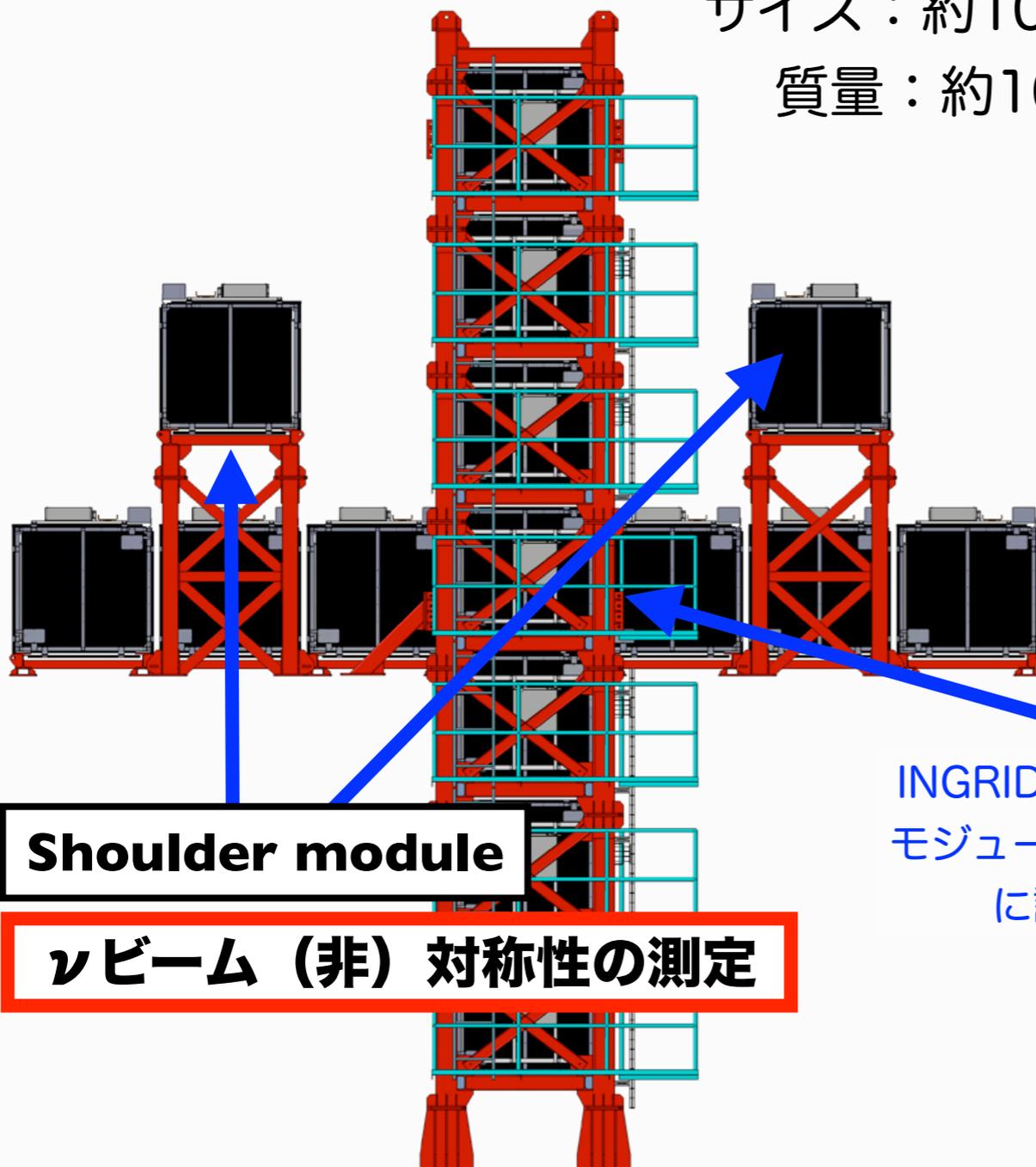
CT, ESM, SSEM, OTR, BLMなど
多数の陽子ビームプロファイルモニタ

前置検出器：INGRID

南野、村上、木河、鈴木、Christophe

ニュートリノビーム方向の測定

サイズ：約10m x 10m
質量：約100トン

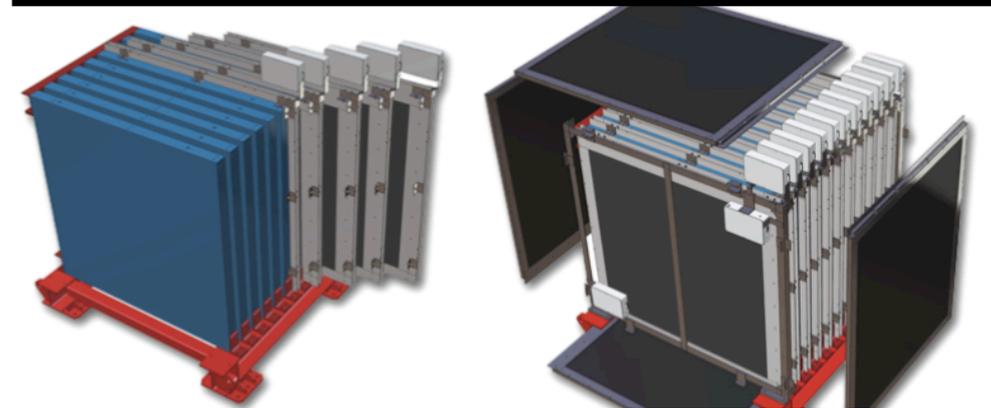


Shoulder module

νビーム（非）対称性の測定

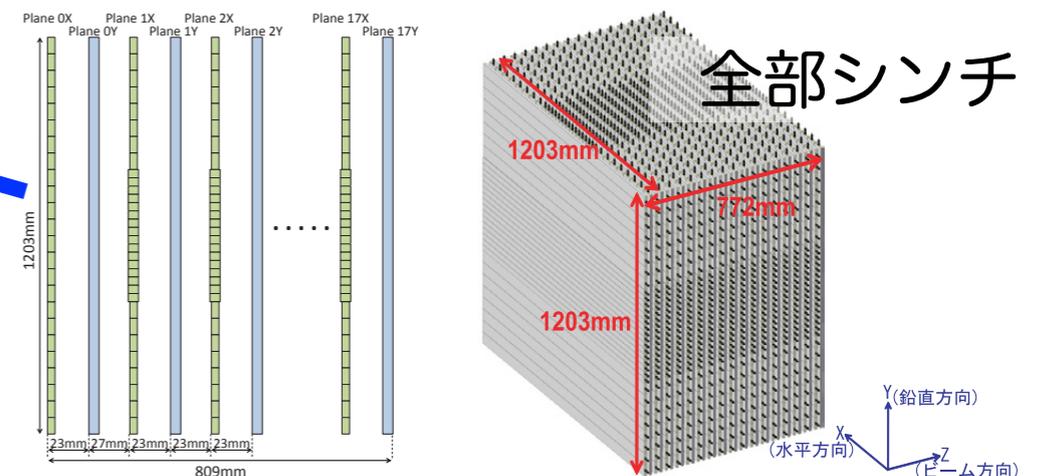
INGRIDの縦と横
モジュールの隙間に
設置

INGRID&Shoulderモジュール



鉄とシンチのサンドイッチ

Proton moduleの構造



全部シンチ

ν反応の同定、反応断面積の測定

前置検出器：ND280

Walter、池田、Phill、家城

ν 反応数、エネルギーの測定

SMRD: Side Muon Range Detector
大角度で散乱されたミュオンの飛跡検出器
UA1電磁石の隙間にシンチを挿入

P0D: π^0 Detector
 π^0 を生成する ν 反応を測定
鉛とシンチと水のサンドイッチ構造

Walter

TPC: Time Projection Chamber
ガスを使った3次元飛跡検出器
飛跡の曲率などから運動量測定、粒子識別
3台ある

FGD: Fine-Grained Detector
全てシンチの飛跡検出器
セグメント化されてるので反応点付近の粒子を検出
2台ある（後方の半分は水標的）

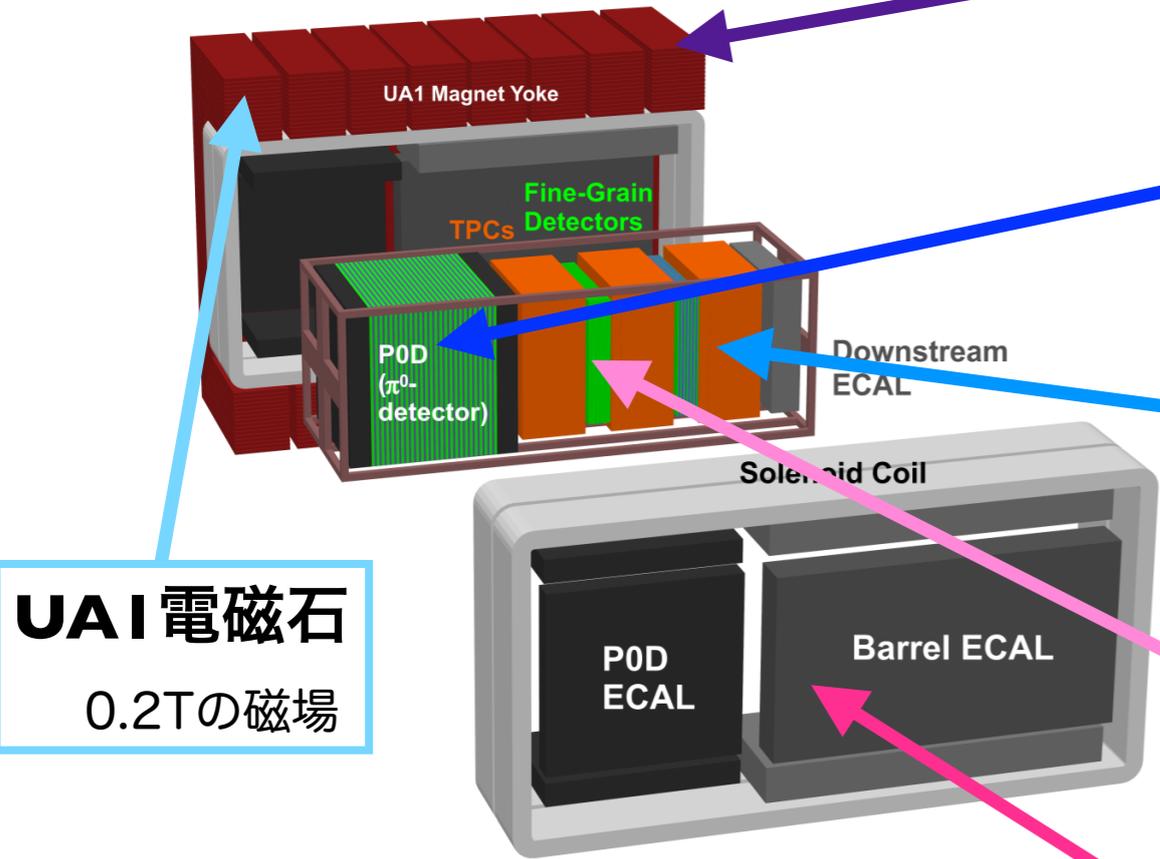
家城

ECAL: Electromagnetic Calorimeter
電子、 γ による電磁シャワーを検出するカロリメータ
鉛とシンチ

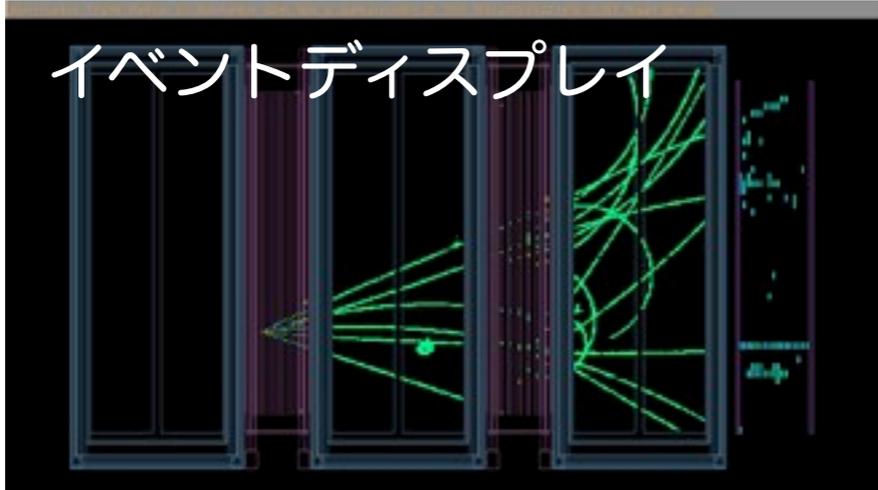
Phill

Run-Coordinator
ND280の定常運転を管理するエライ人

Walter、池田、Phill



UA1電磁石
0.2Tの磁場

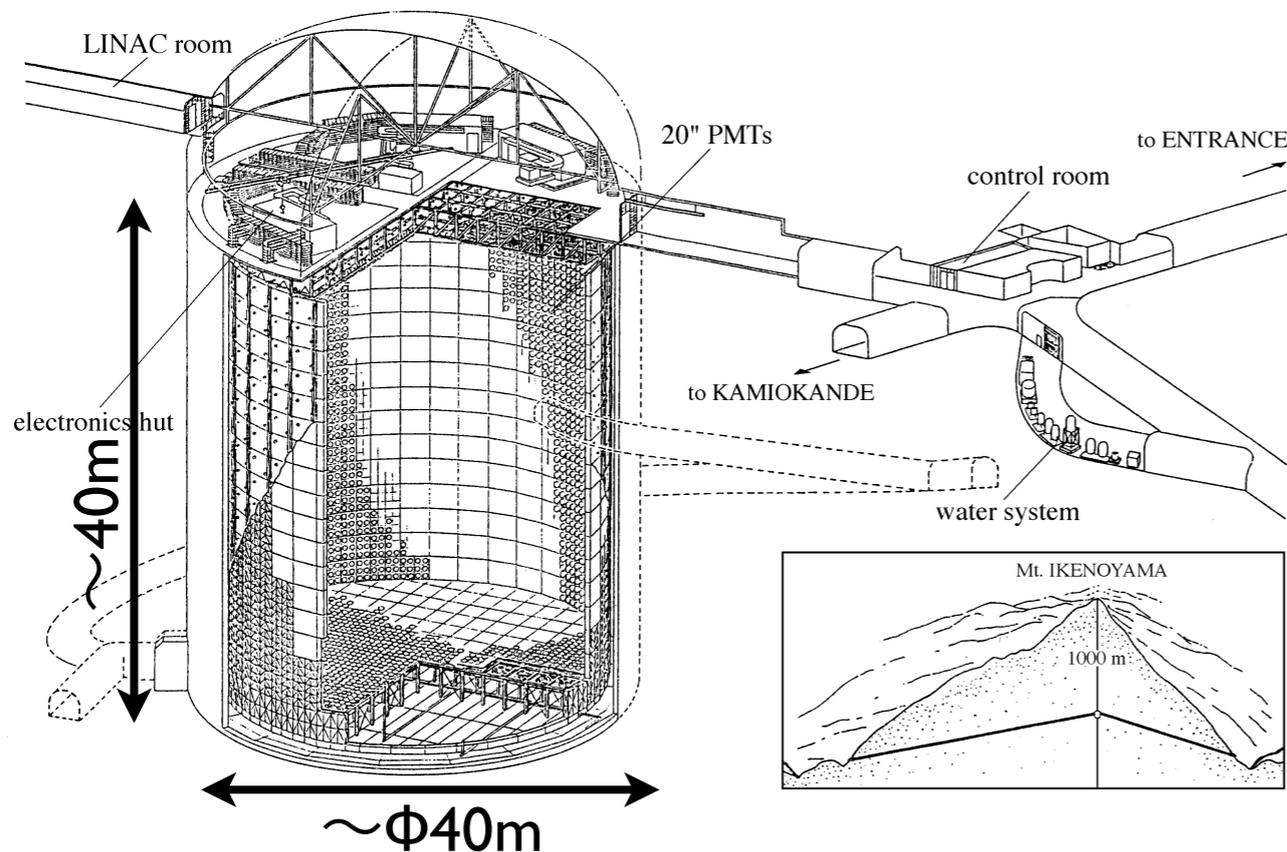


イベントディスプレイ

後置検出器：Super-Kamiokande

ν 反応数、エネルギーの測定

ほぼみんな？



SUPERKAMIOKANDE INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

NIKKEN SEKKEI

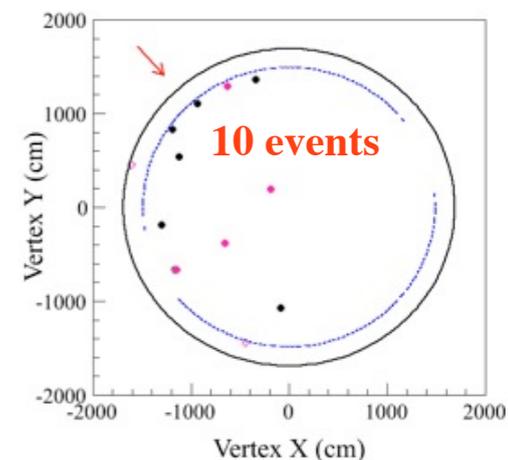
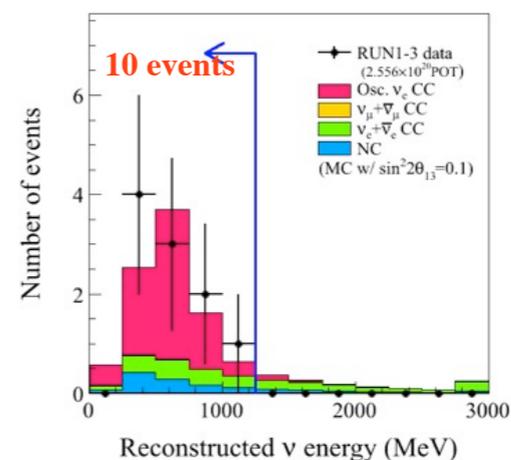


坑内のシフト部屋

1週間／3ヶ月程度のSKシフト
現地にてSKの**全て**を見張り番

岐阜県飛騨市神岡町、地下1000m
50 kt 水チェレンコフ検出器【有効体積22.5t】
約12000 - 20" PMT、被覆率40%
長年のデータ取得実績 信頼性 →

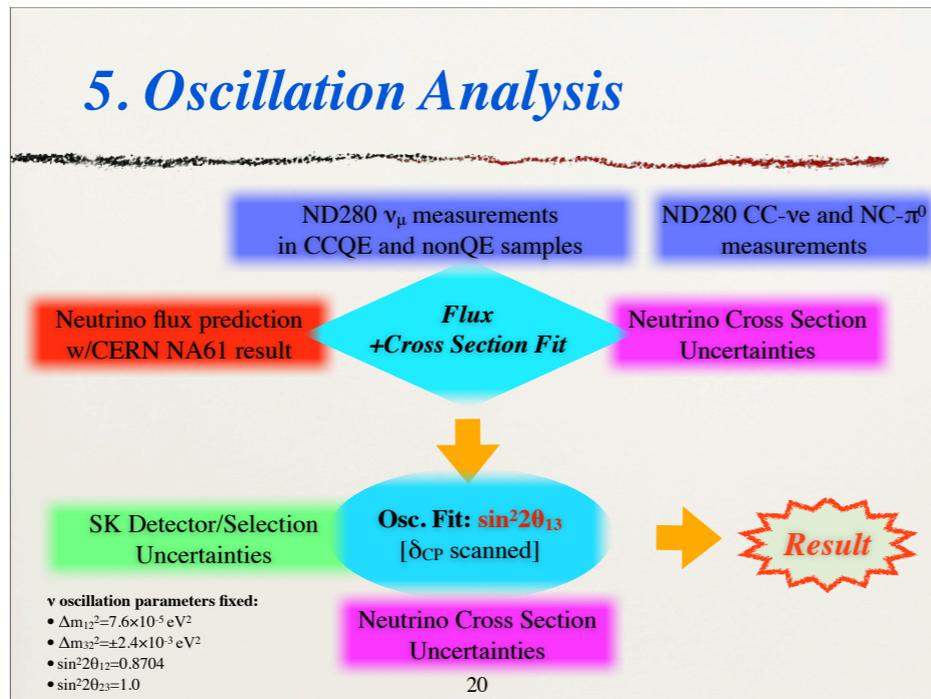
運動量・反応点の再構成能力
粒子識別能力 (μ/e)



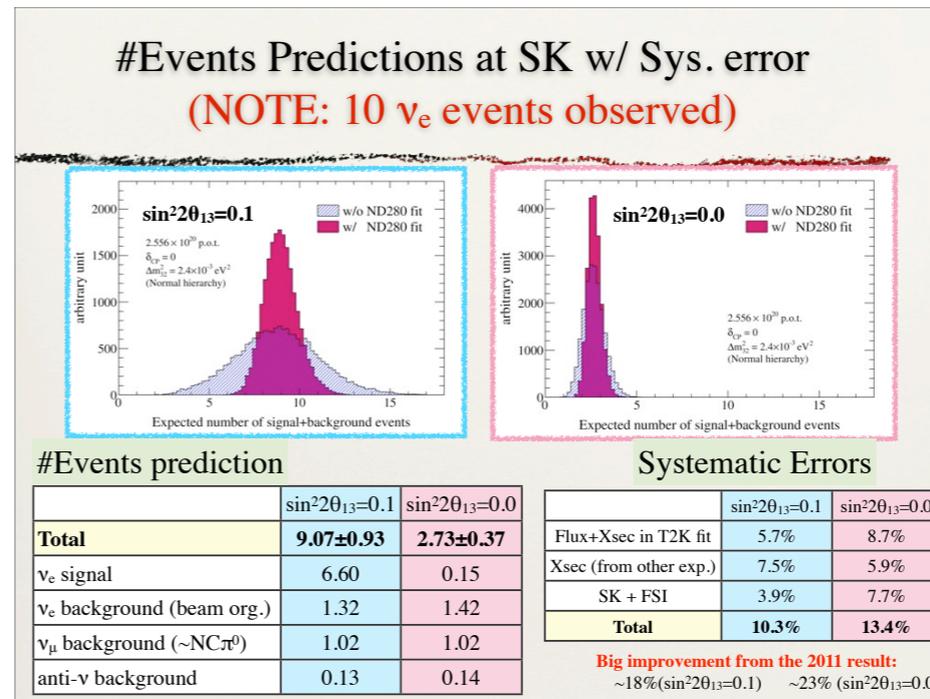
T2Kニュートリノ振動解析

中家、南野、村上、Christophe

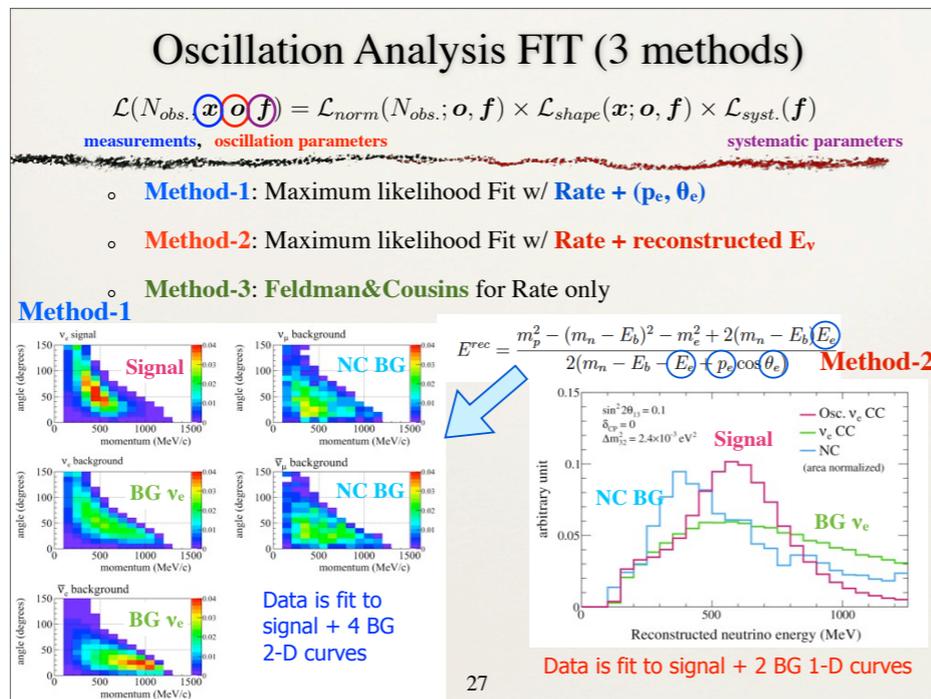
Neutrino2012での中家さんのトークより



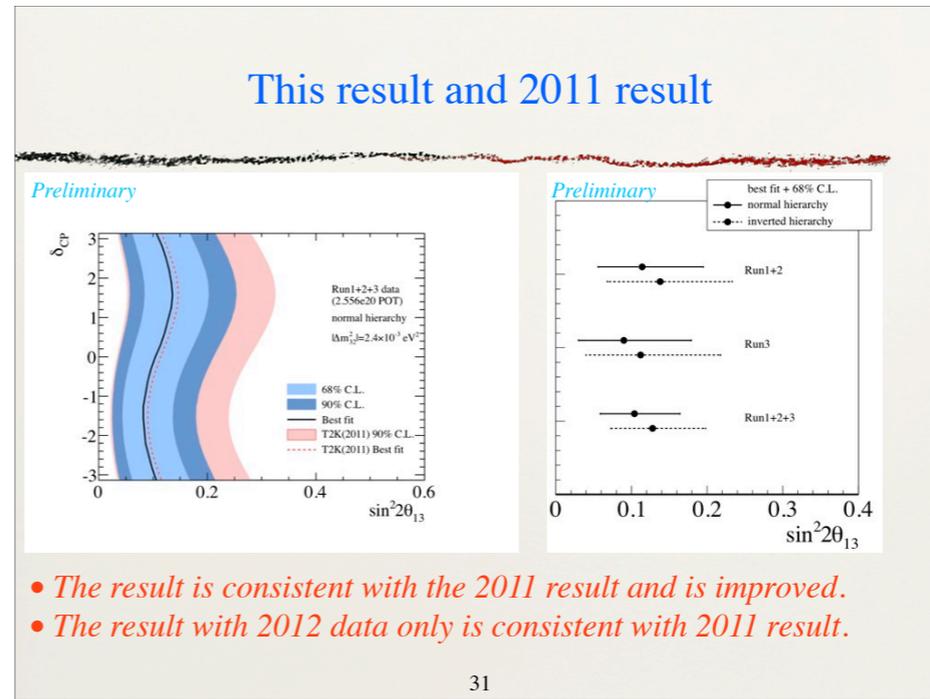
12年6月5日火曜日



12年6月5日火曜日



12年6月5日火曜日



12年6月5日火曜日

Beside T2K ...



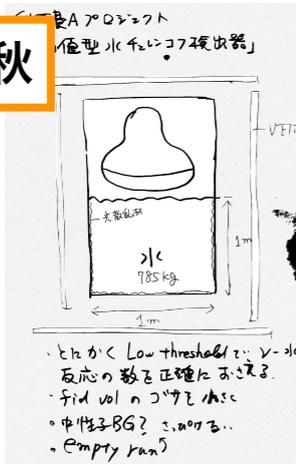
ユニークな小規模実験たち

Mizuche

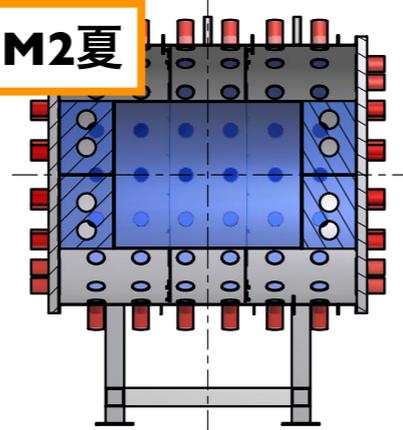
小型水チェレンコフ検出器での ν 反応数の精密測定
T2Kの測定感度向上を目指す

市川、村上、高橋、黄

M1秋



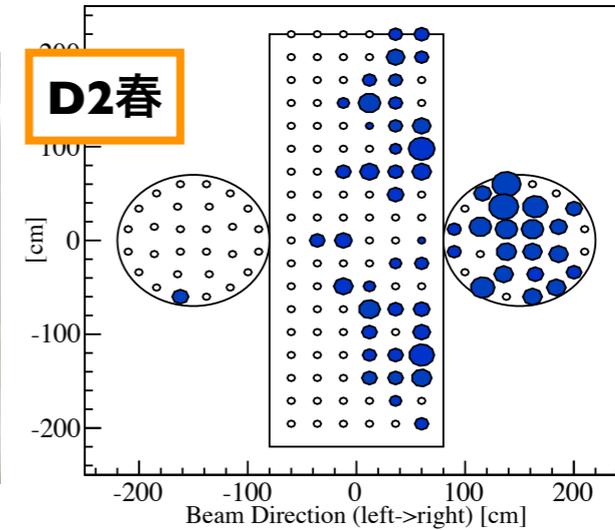
M2夏



D1秋



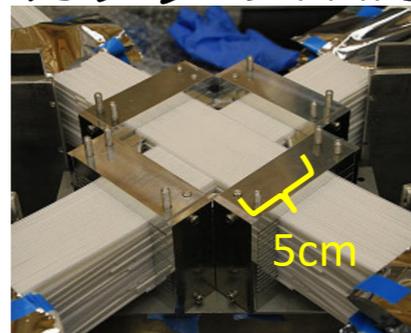
D2春



PIAvo I, II

T2K実験における ν 反応断面積不定性抑制のため、
荷電 π 中間子反応断面積の精密測定
カナダのTRIUMF研究所にてビームテスト x 2夏

池田、家城



PIAvoIII?

荷電 π 中間子反応断面積の精密測定?
J-PARCビームラインにてビームテスト?
詳細が分からない未知なる実験

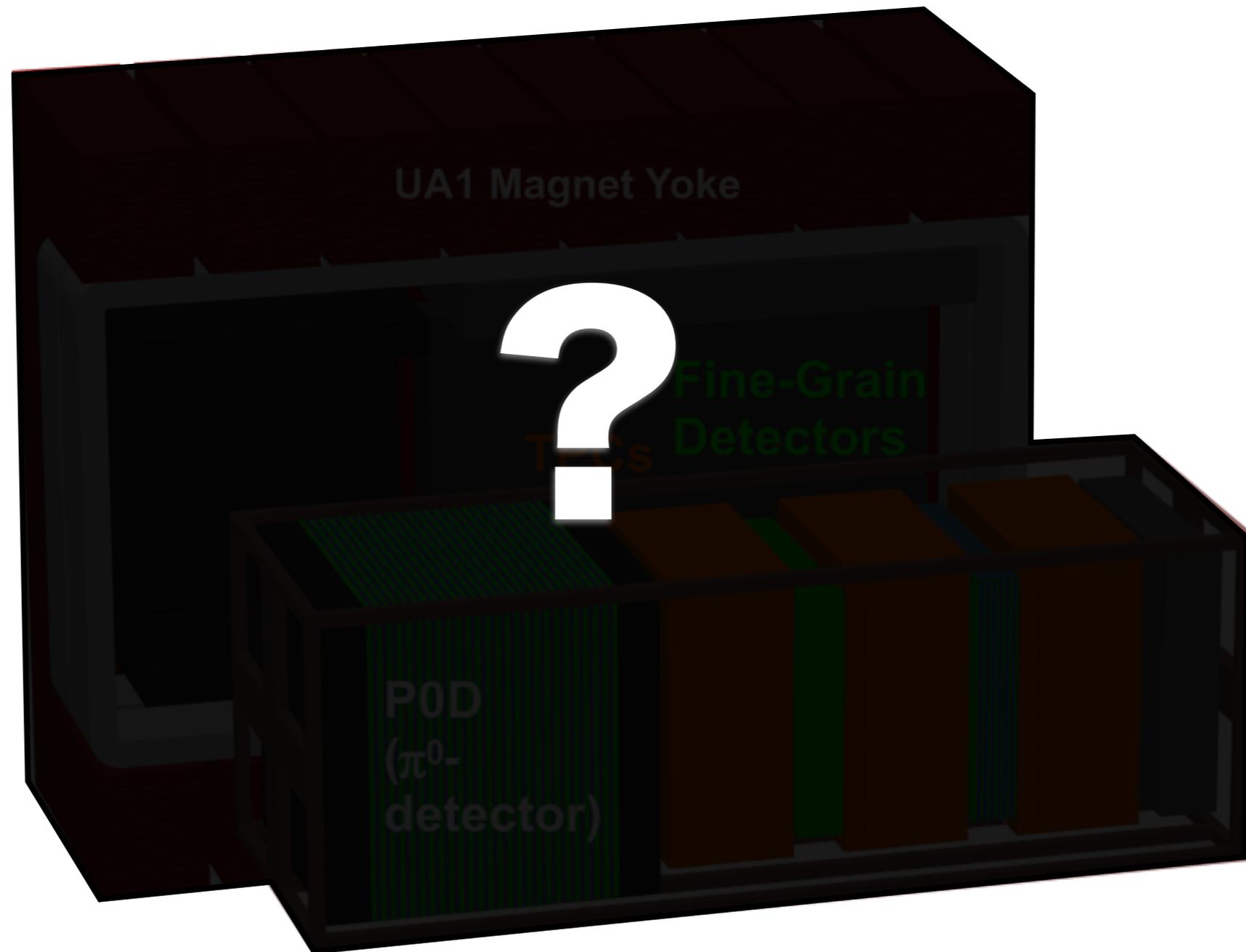
南野、長崎

Future T2K ...



T2K実験のアップグレード

- 前置検出器の分解能向上？とか？



SK未解決問題

陽子崩壊

ニュートリノ振動のCP非対称性
(加速器、大気 ν)

ニュートリノ質量階層
(大気 ν)

暗黒物質

太陽ニュートリノ物質効果

超新星ニュートリノ

太陽フレアニュートリノ

θ_{23} のOctant

高統計な測定器が必要

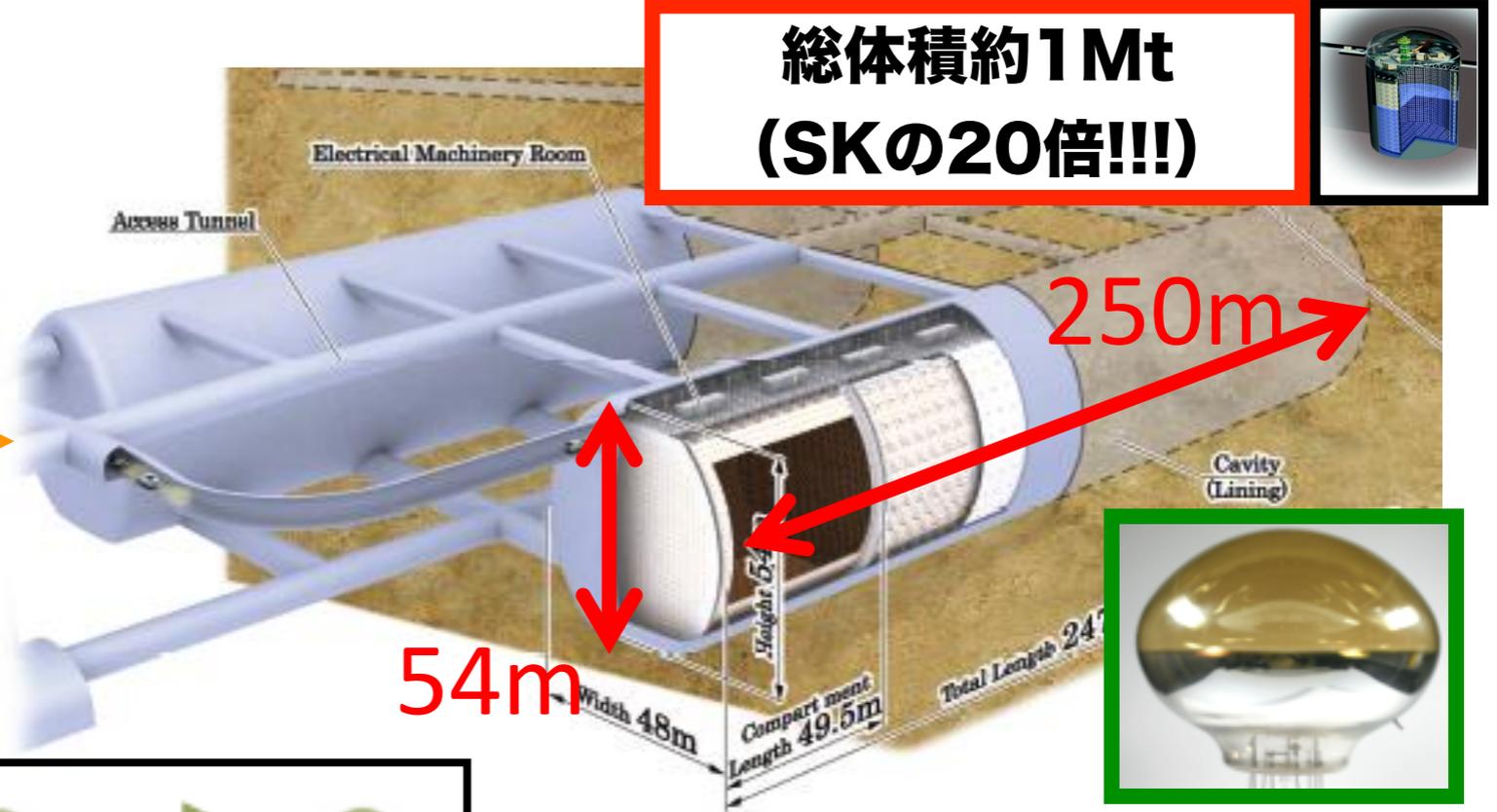
子研究施設

次期計画 Hyper Kamiokande

池田、黄、廣田



**J-PARCビームの大強度化
30GeV、0.75MW → 1MW**



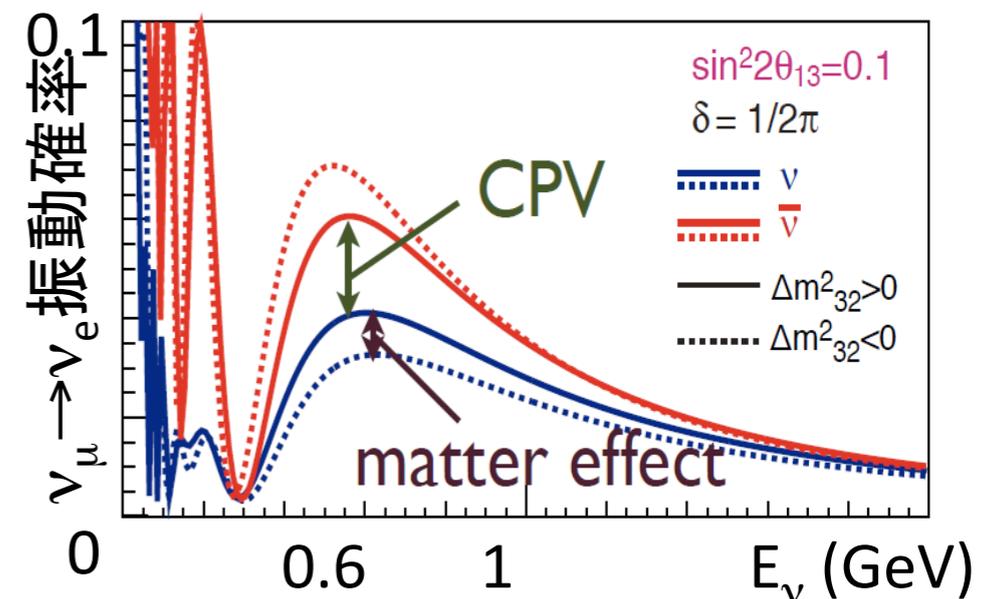
**総体積約1Mt
(SKの20倍!!!)**

光センサ：10万本!!!



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 確率と $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$ 確率との比較
⇒ CP位相差 δ を測定

- アストロニュートリノの研究 (池田)
- 加速器CP位相 δ の感度の見積もり (黄)
- 光センサ (HPD) の開発 (廣田)



研究の様子



研究風景：その1

NU1 (ニュートリノ第一設備棟)



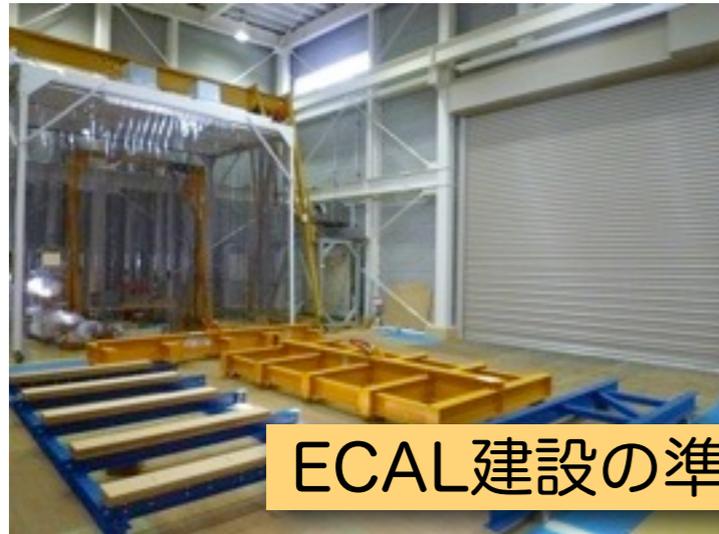
MUMON (ミューモンハット)



MUMON study中の
鈴木くん(当時M2)

研究風景：その2

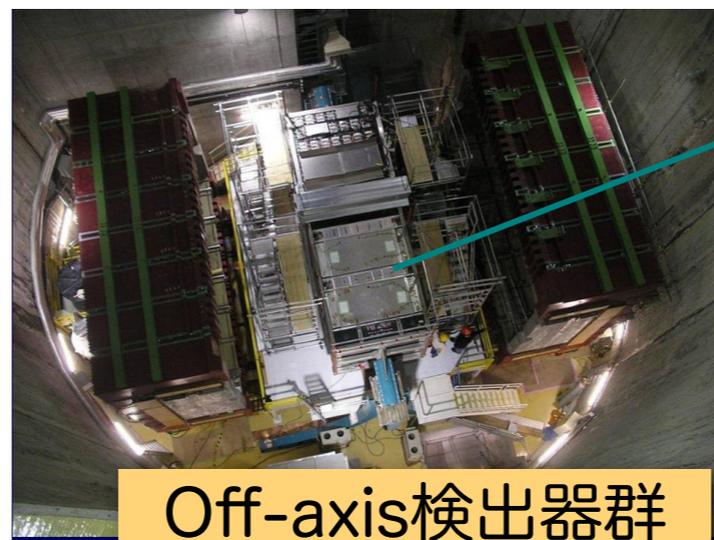
NA (ニュートリノアセンブリ & モニター棟)



ECAL建設の準備 (UKグループ)



新検出器開発中の
しよーたくん(当時M2)



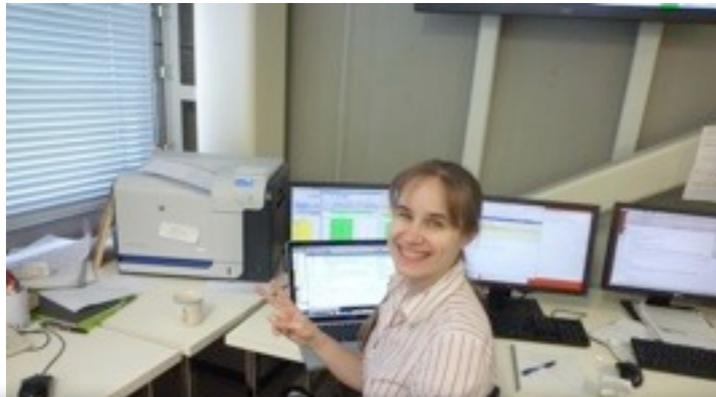
Off-axis検出器群



On-axis検出器
INGRID

シフトの様子

ND280 Shift



シフト中のKendallさん
(TRIUMF研究員なう)



ND280の検出器でちゃんと
データが取れてるかを随時チェック

Beam Shift



シフト中の大谷さん
(2011年度卒業→東北大研究員なう)



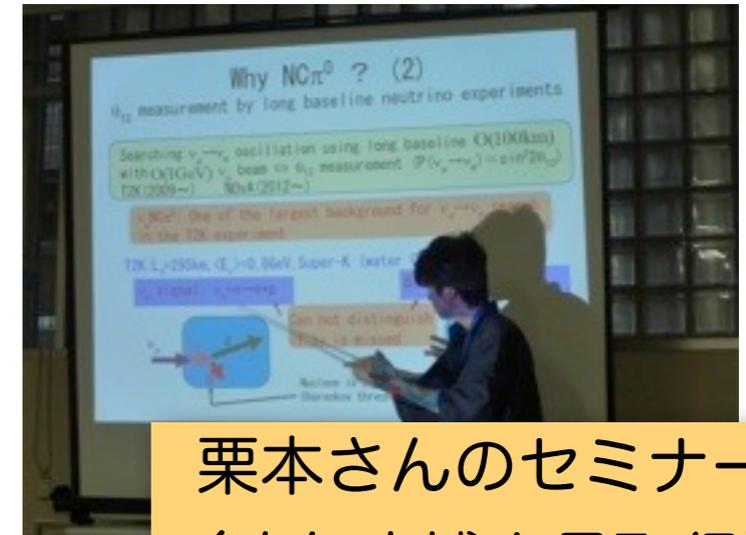
νビームに異常がないかを随時確認

その他

T2K Collaboration MTG



T2K Seminar



栗本さんのセミナー
(昨年度博士号取得)

その他のその他



市川邸で節分



カナダグループと遊んだり



超うまいChristophe
真剣にビリヤードする池田さん

新M1の皆さんへ

- ν 実験はとってもホットです
 - T2K実験などによる混合角 θ_{13} の発見 \Rightarrow CP位相差 δ の測定の幕開け
 - 新物理 (ν 質量階層、混合行列のなぞ) の夜明け
- T2K実験グループ
 - 世界最先端の研究の中心で活躍できる
 - これからの新しい物理結果と一緒に生み出そう！！！！
- スタッフ、学生ともにとても親しみやすい環境
 - KEKスタッフ、他大学（海外）の学生との交流
 - 東海村は何もないけど住みやすい！



東海駅前の「いもじい」

ぜひ一緒に研究しましょう♪

参考資料

- 先輩方の修論・博論
 - <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/index.html>
- Neutrino2012 資料
 - <http://kds.kek.jp/conferenceTimeTable.py?confId=9151#all.detailed>
- 宇宙線研HP (のT2K実験解説)
 - <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/physics/t2k.html>

Backups



フェルミオンの質量階層

Neutrino2012 Stefan Antuschのトークから

物質粒子			
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 eニュートリノ	 μニュートリノ	 τニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

$$M_u = 0.0012 \text{ GeV}$$

$$M_c = 0.0590 \text{ GeV}$$

$$M_t = 162.9 \text{ GeV}$$

$$M_d = 0.0028 \text{ GeV}$$

$$M_s = 0.0520 \text{ GeV}$$

$$M_b = 2.8 \text{ GeV}$$

$$M_e = 0.0005 \text{ GeV}$$

$$M_\mu = 0.102 \text{ GeV}$$

$$M_\tau = 1.8 \text{ GeV}$$

$$|M_3^2 - M_1^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$M_2^2 - M_1^2 = 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$M_i < 0.5 \text{ eV}$$

標準階層

まだ階層構造が分かってない→

CKM (クォーク) vs PMNS (レプトン)

Neutrino2012 Stefan Antuschのトークから

物質粒子			
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 eニュートリノ	 μニュートリノ	 τニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

U_{CKM}

U_{PMNS}

CKM行列

$$\theta_{12} = \theta_c = 13.0^\circ$$

$$\theta_{23} = 2.4^\circ$$

$$\theta_{13} = 0.2^\circ$$

$$\delta = 70^\circ \pm 2^\circ$$

PMNS行列

$$\theta_{12} = 34^\circ \pm 1^\circ$$

$$\theta_{23} = 45^\circ \pm 3^\circ$$

$$\theta_{13} = 9^\circ \pm 1^\circ$$

$$\delta = ???$$

Tri-bimaximalモデル

Neutrino2012 Stefan Antuschのトークから

Tri-bimaximal mixing

Harrison, Perkins, Scott ('02)

$$U_{TB} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} P$$

$\theta_{12} = 35.3^\circ$ $\theta_{23} = 45^\circ$ $\theta_{13} = 0^\circ$

ニュートリノ混合 ↔ 世代間の対称性？

$\theta_{13} \neq 0^\circ$ なので違うかも？

でもまだなんとかなるかも？

Off-axisビーム法

- 大谷さんの博士論文より

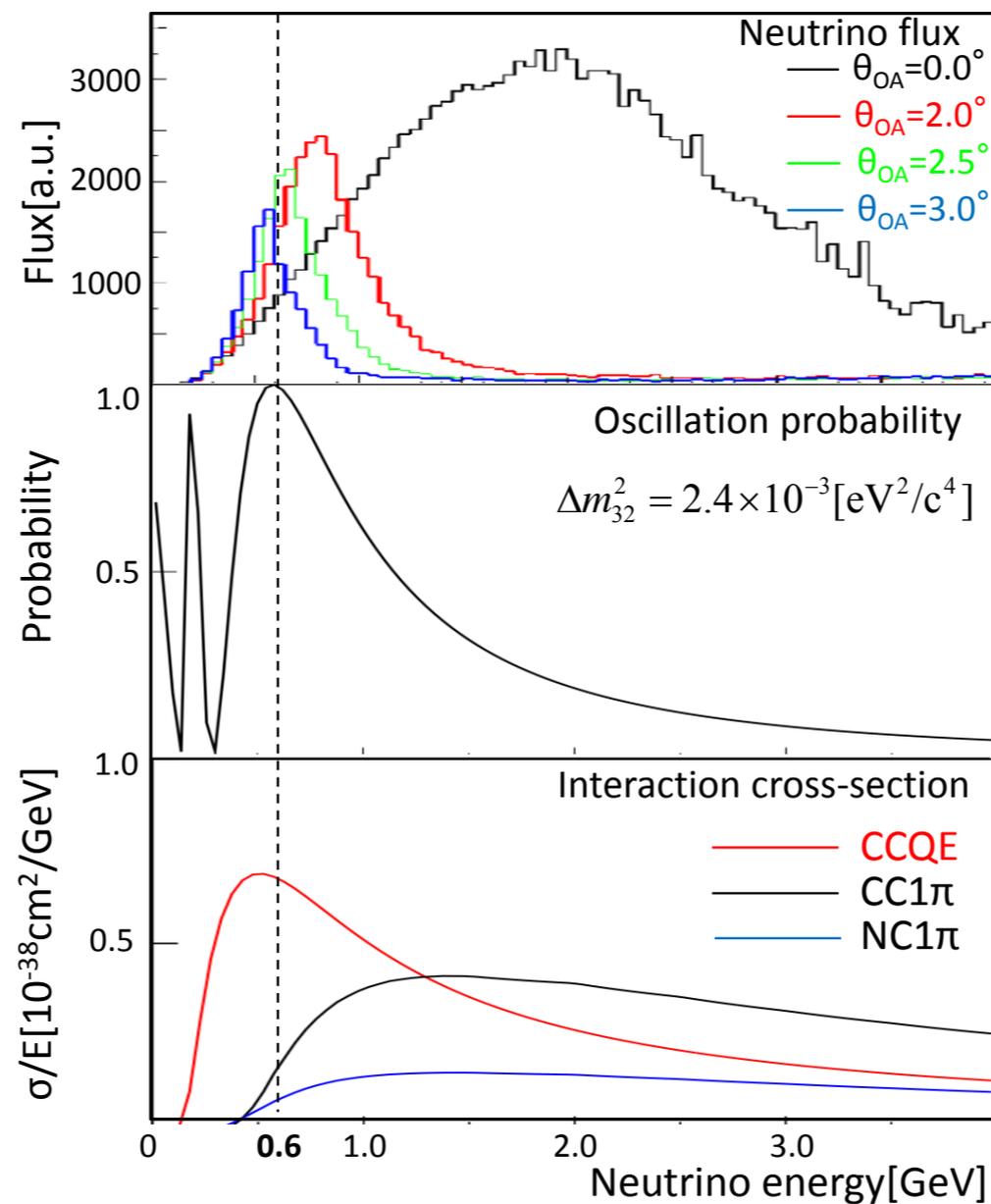


Figure 1.5: (Top) Neutrino energy spectra with several off-axis angles (θ_{OA}). (Middle) Oscillation probability as a function of the neutrino energy. (Bottom) Neutrino interaction cross-sections.