

# ニュートリノグループ

## 研究紹介

- スタッフ

- 中家さん、市川さん、南野さん

- PD

- 池田さん、Phillip

- D3

- 久保さん、大谷さん

- D2

- 家城さん、村上さん

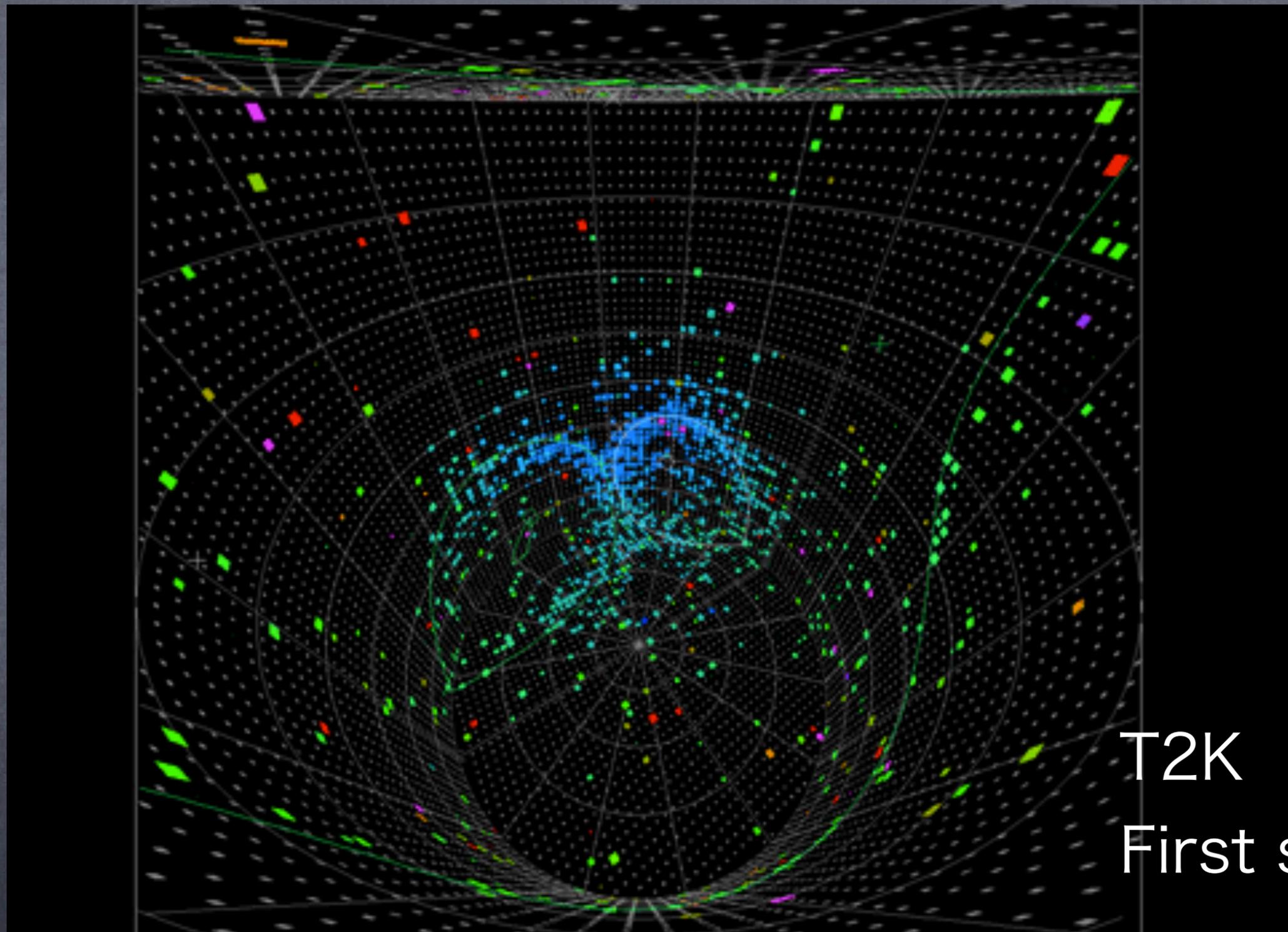
- D1

- 木河くん、黄さん、鈴木、高橋くん、

- M2

- 平木くん、山内くん

# Welcome to HE group



T2K

First signal @SK

ニュートリノの軌跡

# History of the Neutrino

- 20世紀初頭の放射性崩壊( $\alpha$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊)の研究
  - $\beta$ 崩壊：当時は原子核内の中性子が $\beta$ 線を放出し陽子になると解釈されていた
  - $\beta$ 線のエネルギー分布：連続スペクトル
  - 原子の世界ではエネルギー保存則は成り立たないのか。。？

# History of the Neutrino

- 20世紀初頭の放射性崩壊( $\alpha$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊)の研究
  - $\beta$ 崩壊：当時は原子核内の中性子が $\beta$ 線を放出し陽子になるとされていた

のエネルギー分布：連続スペクトル

の世界ではエネルギー保存則は成り立たないのか。。？

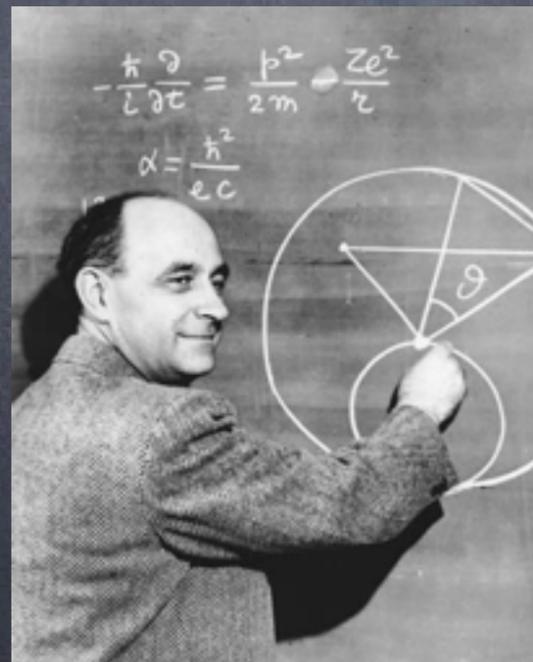
Wolfgang Pauli (1900-1958)

未知の中性微粒子がエネルギーの一部を持ち去り、我々はそれを観測していないのだ  
(1930)



# History of the Neutrino

- 1933年、Fermiが $\beta$ 崩壊の理論付けを行う
  - $n \rightarrow p + e^- + ?$
  - 観測されないこの未知の粒子を「ニュートリノ:Neutrino( $\nu$ )」と名付ける

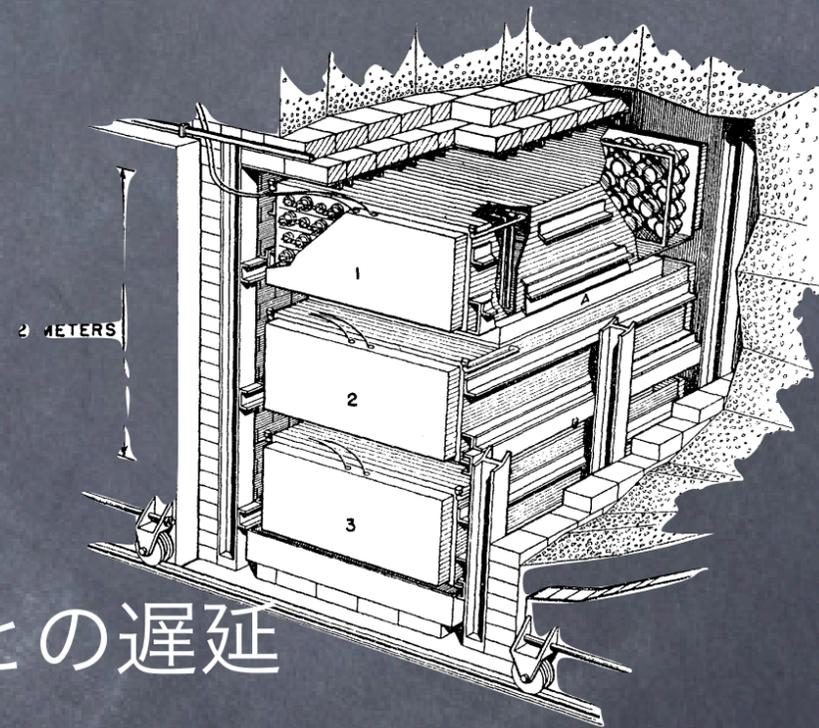


Enrico Fermi (1901-1954)

# History of the Neutrino

## ~First Discovery~

- 1956年、世界で初の(反電子)ニュートリノ観測
  - Savanna River Plantにある原子炉を用いた実験
    - $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$
  - 標的：CdCl<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O
  - e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>の対消滅  $\gamma$  (first) と中性子捕獲からの  $\gamma$  (second) との遅延コインシデンスを利用



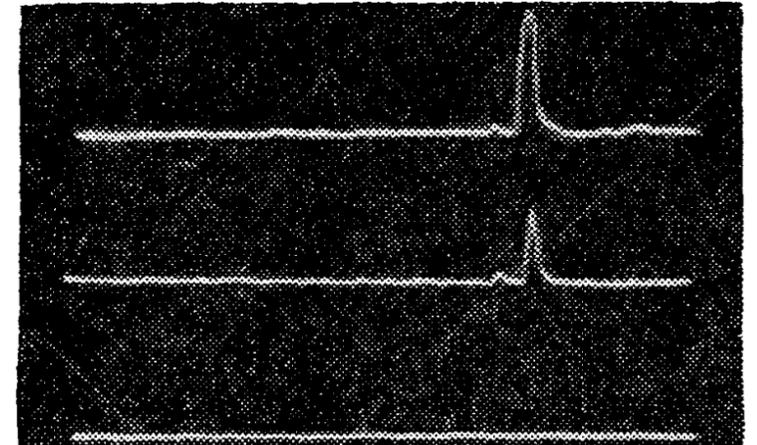
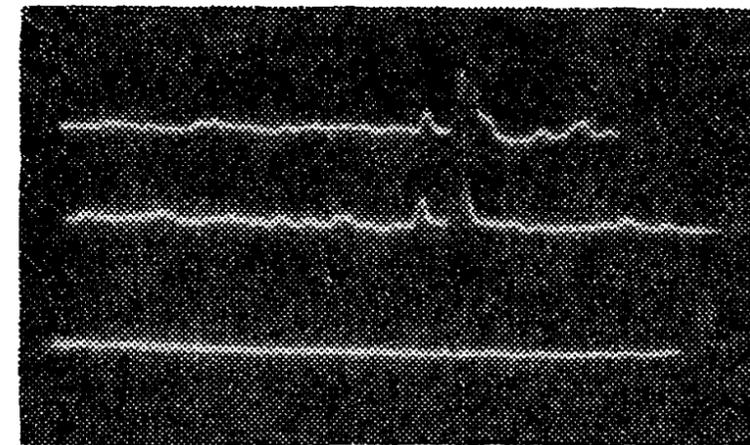
PHYSICAL REVIEW

VOLUME 117, NUMBER 1

JANUARY 1, 1960

### Detection of the Free Antineutrino\*

F. REINES,† C. L. COWAN, JR.,‡ F. B. HARRISON, A. D. MCGUIRE, AND H. W. KRUSE  
*Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, Los Alamos, New Mexico*  
(Received July 27, 1959)



# History of the Neutrino

~Evidence of the existence of more than one species~

Leon M. Lederman (1922-)

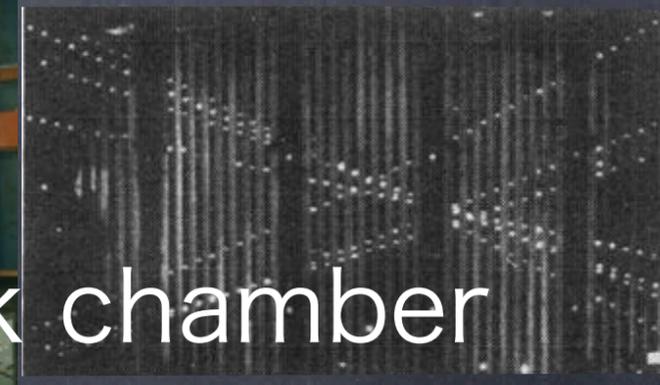
- 宇宙線  $\pi$  からの崩壊  $\pi \rightarrow \mu + \nu$ 
  - $\beta$  崩壊から出るニュートリノと同種？
- 1962年、AGS (Brookhaven, USA)においてLedermanらによる実験にて
  - $\pi$  崩壊から人工的に  $\nu$  "beam" を生成
    - $\nu$  から生じたとされる  $\mu$  を Spark chamber によって観測
    - ミューオン型ニュートリノ ( $\nu_{\mu}$ ) を初検出
    - ニュートリノが複数の型 ( $\nu_e$ ,  $\nu_{\mu}$ ) を持つ事を証明



OBSERVATION OF HIGH-ENERGY NEUTRINO REACTIONS AND THE EXISTENCE  
OF TWO KINDS OF NEUTRINOS\*

G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry,  
M. Schwartz,<sup>†</sup> and J. Steinberger<sup>†</sup>

Columbia University, New York, New York and Brookhaven National Laboratory, Upton, New York  
(Received June 15, 1962)

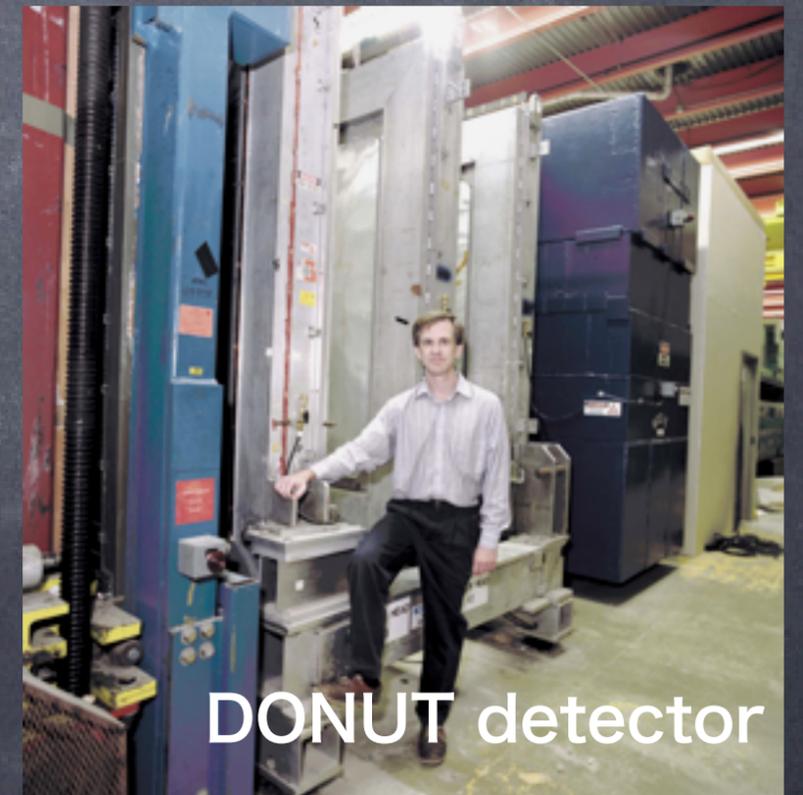


Spark chamber

# History of the Neutrino

## ~Discovery of $\nu_{\tau}$ ~

- 1975年には $\tau$ レプトンの発見、これの対となるニュートリノも存在すると考えられてきたがしかし。
  - 発見されず時は流れるばかり
- 1997年、Fermilab (Illinois,USA)で行われたDONUT (Direct Observation of NU Tau)実験にて
  - 高エネルギーの陽子ビームを使って、人工的にニュートリノビームを生成
  - Emulsionが大活躍
  - ついに4つのタウ型ニュートリノイベントを発見 (2000年に発表)



DONUT detector

# History of the Neutrino

## ~ここまでのまとめと主な出来事~

1930 1933

Pauliによる中性微粒子存在の予言  
Fermiによる $\beta$ 崩壊の理論付け

1956

Reines, Cowanによる中性微粒子をNeutrinoと名付ける

1962

Ledermanらによる初のニュートリノ検出

1973

CERNで初の中性カレント(Z)の発見  
Kamiokandeによるニュートリノの発見

1987

Kamiokande, IMB (USA)等で超新星爆発からのニュートリノ検出

1989

CERN, LEPにてニュートリノ振動を通してニュートリノに質量がある事を証明

1998

Super-Kamiokandeでニュートリノ振動を通してニュートリノに質量がある事を証明

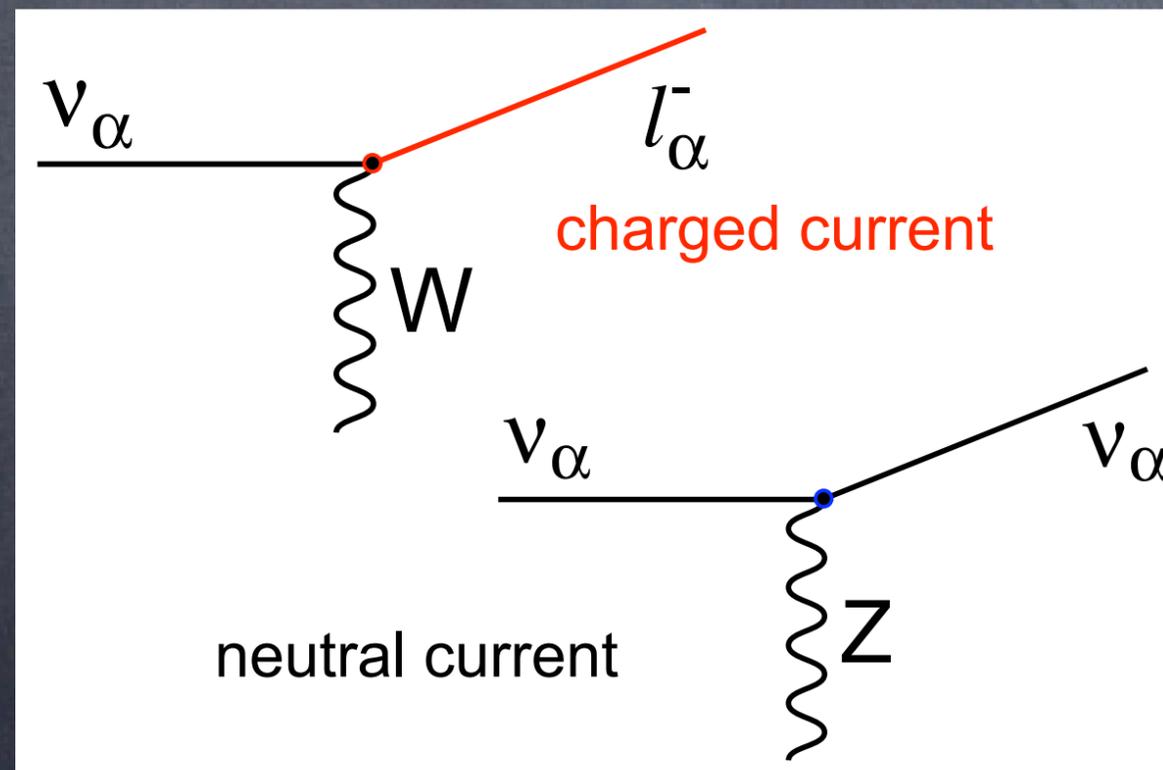
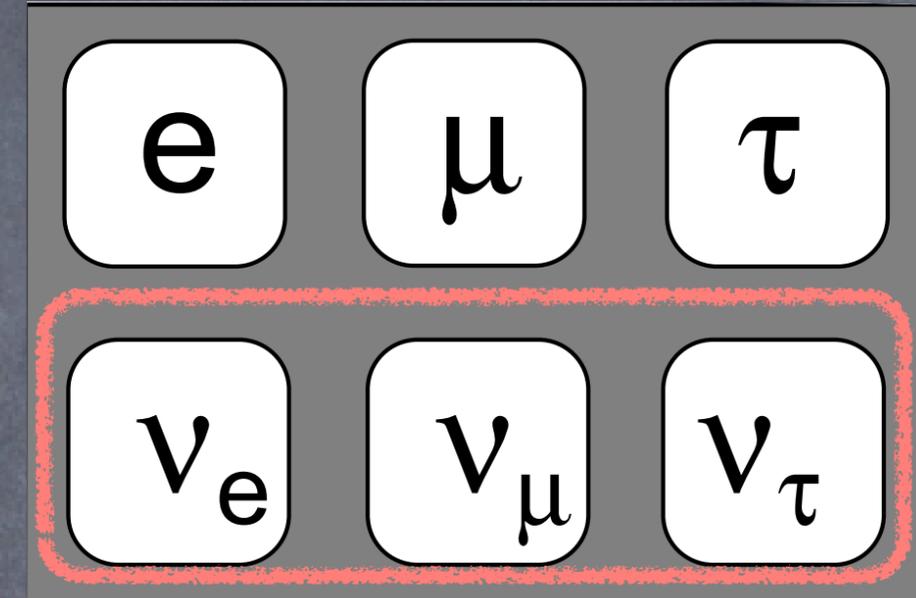
2000

DONUTでタウ型ニュートリノの発見



# これまで分かっているニュートリノの性質

- 3種類のレプトンと対をなした3世代のニュートリノが存在
- 電荷を持たず、1/2のスピンの持つ
- 弱い相互作用（と重力）のみ
- 非常に小さいが質量がある



- 2種類の弱い相互作用
- W exchange
- Z exchange

# ニュートリノ実験

• ニュートリノ天文学

- ニュートリノ振動
- Double Beta Decay
- Direct mass measurement

• ニュートリノ地球物理学  
(Geo-Neutrino)



# ニュートリノ実験

• ニュートリノ天文学

- ニュートリノ振動 T2K, SK, HK
- Double Beta Decay
- Direct mass measurement

• ニュートリノ地球物理学  
(Geo-Neutrino)

# ニュートリノ実験

• ニュートリノ天文学

- ニュートリノ振動 T2K, SK, HK
- Double Beta Decay CdTe
- Direct mass measurement

• ニュートリノ地球物理学  
(Geo-Neutrino)

# ニュートリノ実験

• ニュートリノ天文学  
SK, HK

- ニュートリノ振動 T2K, SK, HK
- Double Beta Decay CdTe
- Direct mass measurement

• ニュートリノ地球物理学  
(Geo-Neutrino)

What is the T2K?

What is the neutrino oscillation?

# ニュートリノ振動

フレーバー固有状態  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$  質量固有状態

MSN行列  $U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$   $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$   
 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$

- フレーバー固有状態は質量固有状態の重ね合わせで表される
- ニュートリノに微小の質量があるならば、自由粒子として飛行中のニュートリノが他の種類のニュートリノに変化する現象

例えば  $\nu_\mu$  から  $\nu_e$  に変化する確率

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

# ニュートリノ振動

フレーバー固有状態  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$  質量固有状態

MSN行列  $U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$   $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$   
 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$

- フレーバー固有状態は質量固有状態の重ね合わせで表される
- ニュートリノに微小の質量があるならば、自由粒子として飛行中のニュートリノが他の種類のニュートリノに変化する現象

測定したいパラメータ  
 $\theta$ 、 $\Delta m^2$

例えば  $\nu_\mu$  から  $\nu_e$  に変化する確率

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

# ニュートリノ振動

フレーバー固有状態  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$  質量固有状態

MSN行列  $U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$   $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$   
 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$

- フレーバー固有状態は質量固有状態の重ね合わせで表される
- ニュートリノに微小の質量があるならば、自由粒子として飛行中のニュートリノが他の種類のニュートリノに変化する現象

例えば  $\nu_\mu$  から  $\nu_e$  に変化する確率

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

測定したいパラメータ  
 $\theta$ 、 $\Delta m^2$

実験で定めるパラメータ  
 $L(\text{km})$ 、 $E(\text{GeV})$

# CP対称性

先ほどのMNS行列

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- $\delta$  : CP violation term
  - $\sin \theta_{13} \neq 0$  なら測れる！
- $32.7^\circ < \theta_{12} < 36.0^\circ$ 、 $36.8^\circ < \theta_{23} < 53.2^\circ$  (90%C.L.)
- $\theta_{13} < 11.4^\circ$  (90%C.L.) ← 上限値しか分かっていない。。

$\theta_{13}$ が測れるか、現在の振動実験の注目はここにある

# CP対称性

先ほどのMNS行列

$U =$

初のレプトンセクターにおけるCP対称性を  
測定できる潜在能力を秘めている

- 何故自然界には反物質がほとんど存在しないのか？  
ニュートリノ振動実験はこの問いに答える  
ヒントになるかもしれない
- 
- 

$\left. \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} \right)$

$\theta_{13}$ が測れるか、現在の振動実験の注目はこちらにある

# T2K Collaborator



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

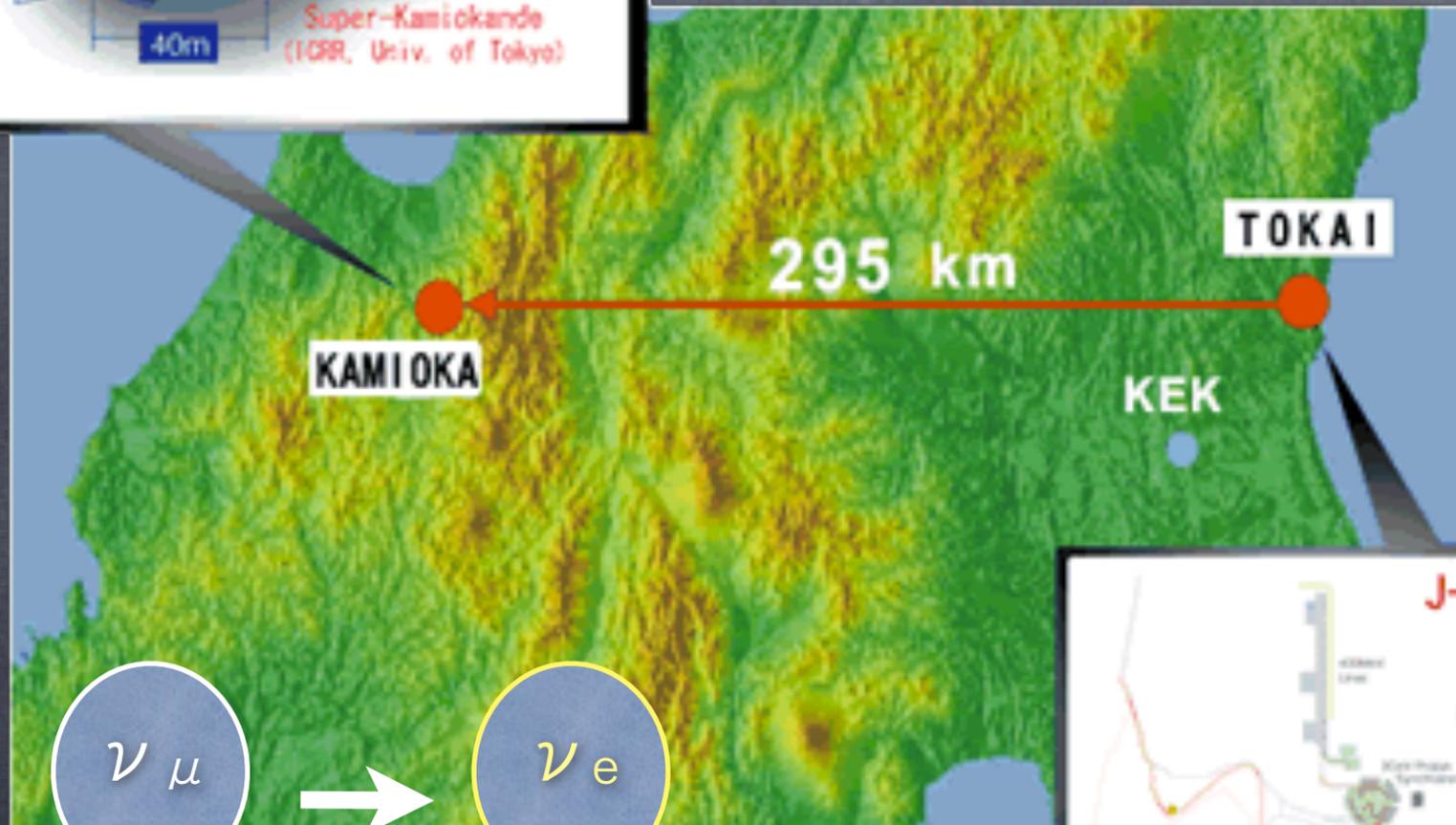
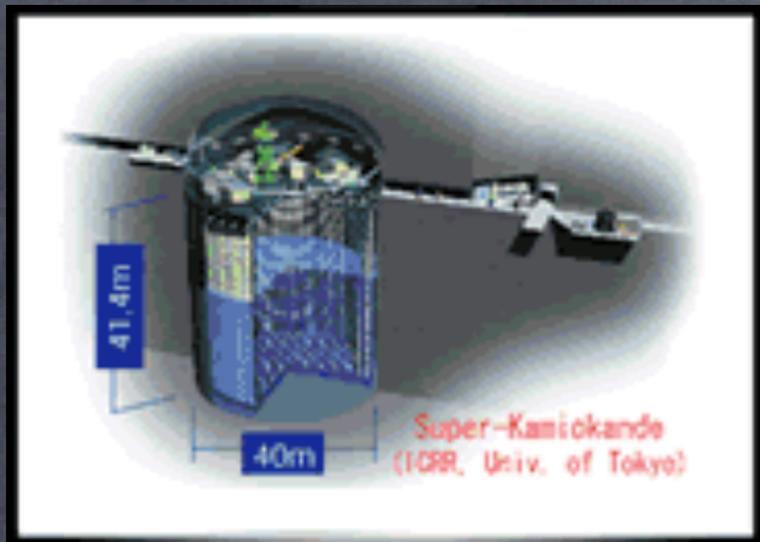
INFN Bari  
INFN Roma  
Napoli U  
Padova U

## USA

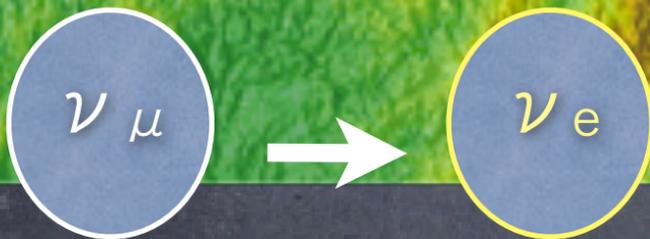
Boston U  
BNL  
Colorado State U  
Duke U  
Louisiana State U  
Stony Brook U  
U of California, Irvine  
U of Colorado  
U of Pittsburgh  
U of Rochester  
U of Washington  
**Germany**  
RWTH Aachen U



# 2K (Tokai to Kamioka)



- J-PARCにおいて30GeVの高強度陽子ビームを生成
- 大量のニュートリノビームを295km離れたSuper-Kamiokandeへと打ち込む
- $\sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E) \sim 1$ 
  - ( $E \sim 1 \text{ GeV}$ ,  $\Delta m^2 \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ )
- **2010年1月より物理データ取得開始!**



$\nu_e$ 出現事象： $\theta_{13}$ の測定

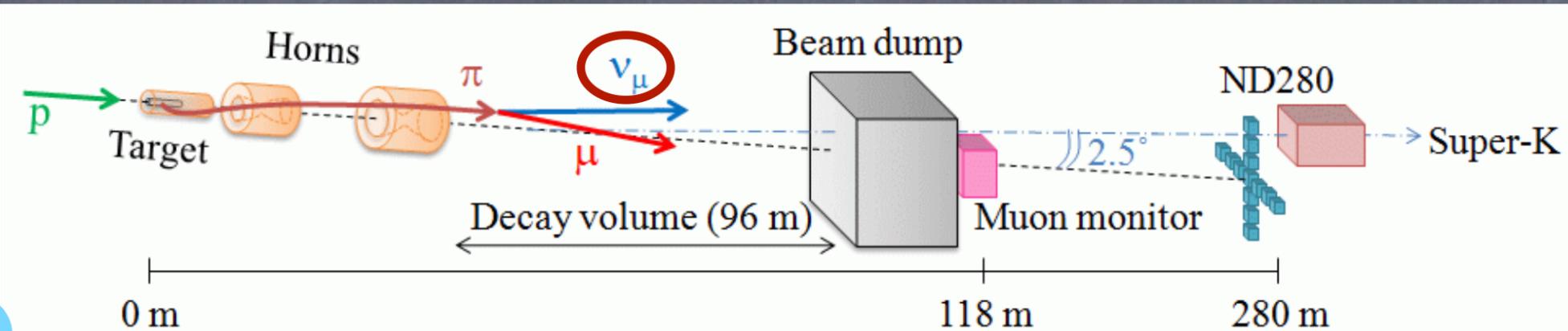


$\nu_\mu$ 消失事象： $\theta_{23}$ 、 $\Delta m^2_{23}$ の精密測定

# How to make the neutrino beam



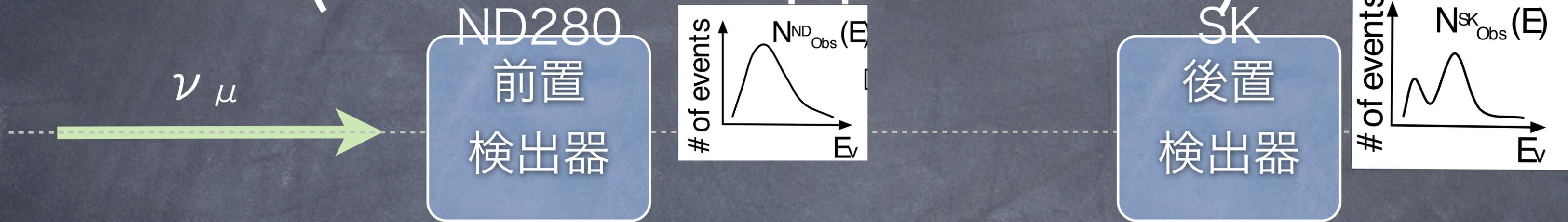
## ミュオンニュートリノ



- $\sim 10$ 兆個/s の30GeV陽子ビームを炭素標的に当てる
- 生じた2次粒子  $\pi$  から崩壊して出来た大量のミュオンニュートリノを用いる
  - 電磁ホーンで  $\pi$  を収束  $\rightarrow$  SKに届くニュートリノを多くする
- 同時に生成されたミュオンはニュートリノビームのモニターのために使われている

# Analysis method

(for  $\nu$  disappearance)



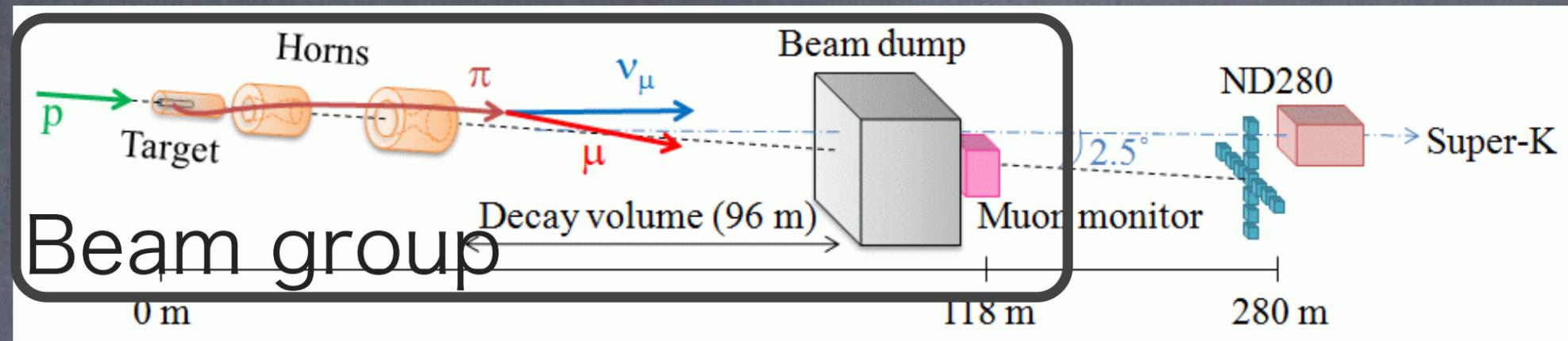
$$\sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E) \sim 0$$

$$\sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E) \sim 1$$

**choosing the appropriate E and L is also important**

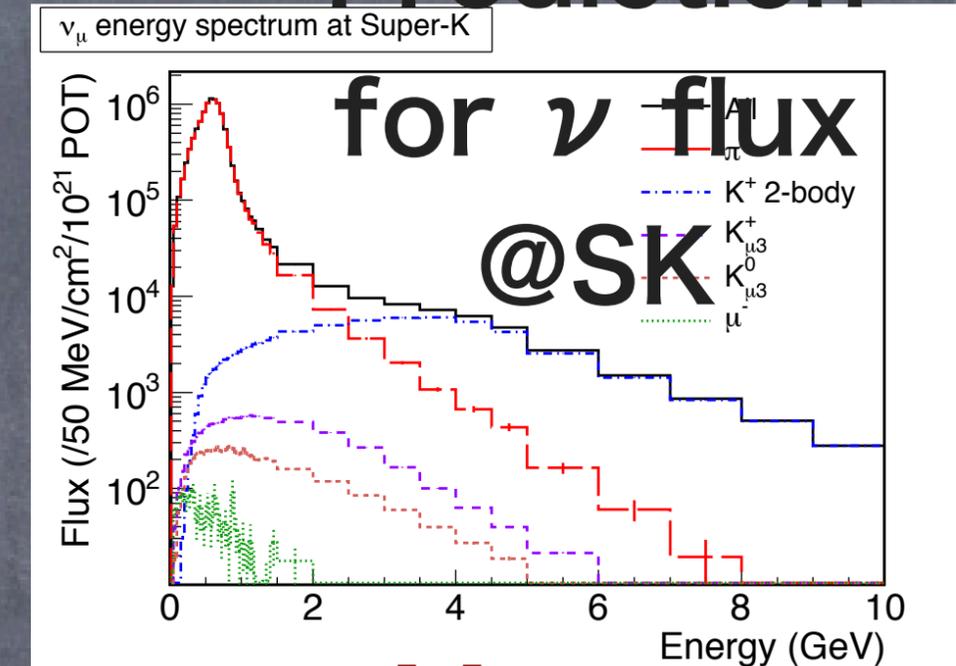
1. 前置検出器で振動前のニュートリノのフラックス・エネルギースペクトルを測定
2. 1.の測定結果から、後置検出器におけるフラックス・エネルギースペクトルを予測
3. 後置検出器で振動後のフラックス・エネルギースペクトルを測定、2.と照らし合わせ
4. 消失事象 (元の $\nu_\mu$ がどれだけ消失したか) 測定によって振動確率を測る

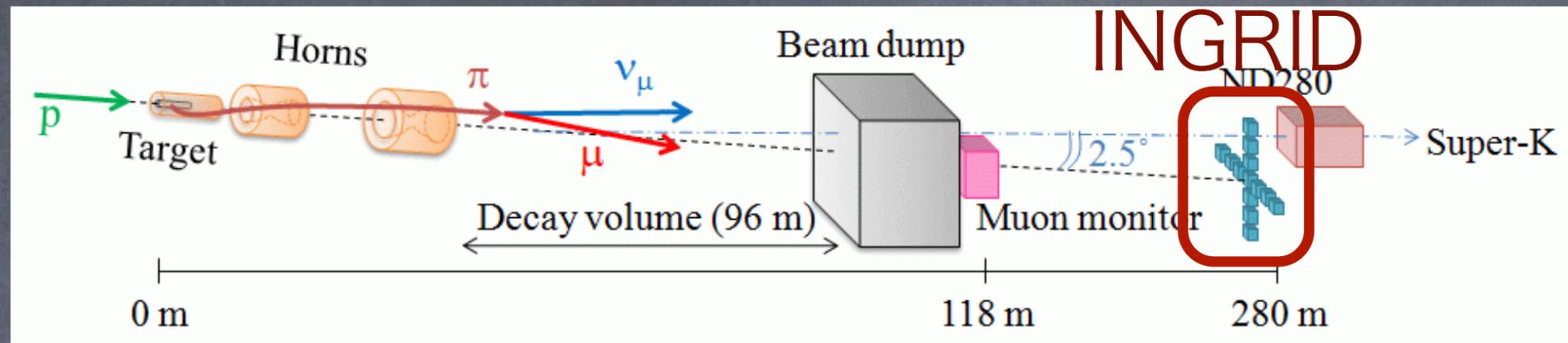
# 京都ニュートリノブループの活動



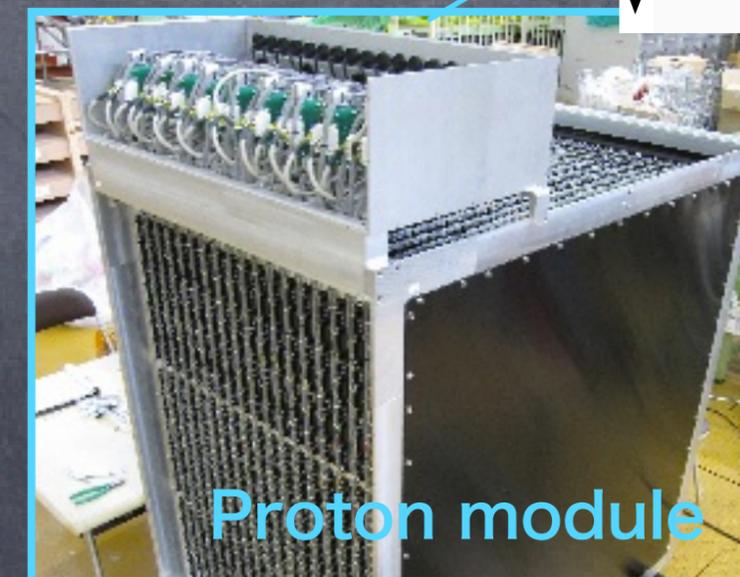
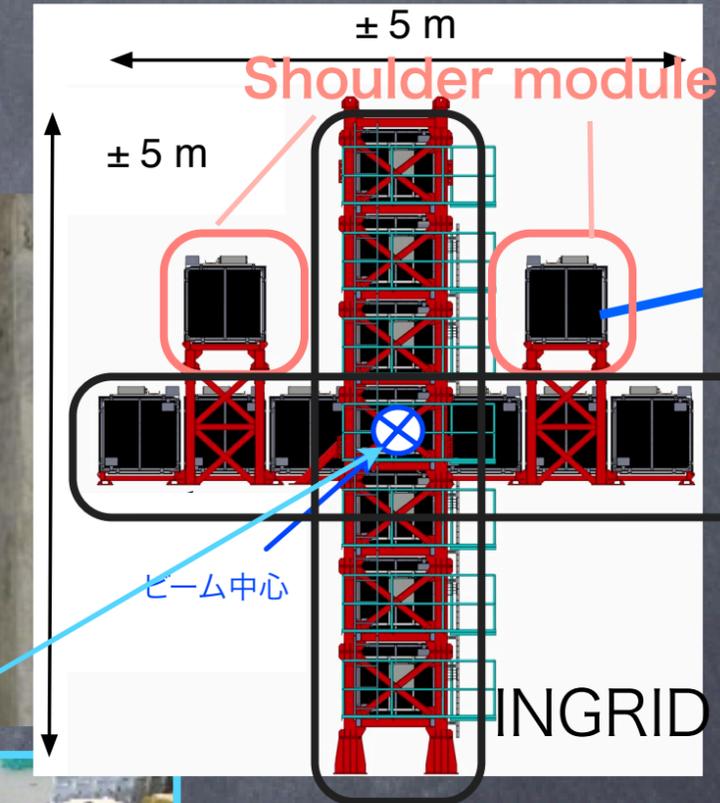
# Prediction

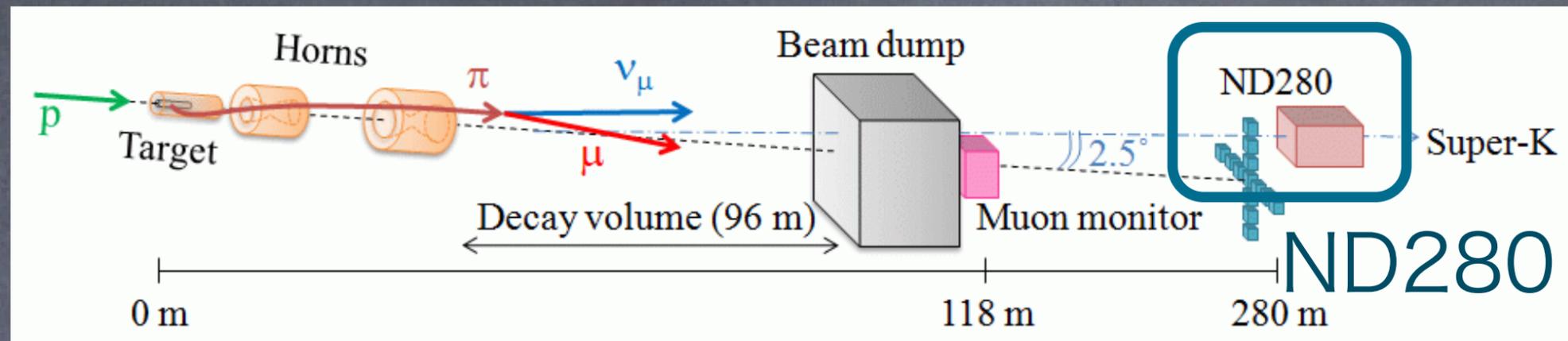
- Beam group: 良質なビーム生成及び振動解析に欠かせないMCの提供
  - (振動前の) ニュートリノフラックスの予測 (市川さん・久保さん)
    - Flux生成・Tuning
  - ミュオンモニター (村上さん・鈴木・久保さん)
    - ニュートリノと共に生成されるミュオンを検出し、間接的にニュートリノビームをモニター





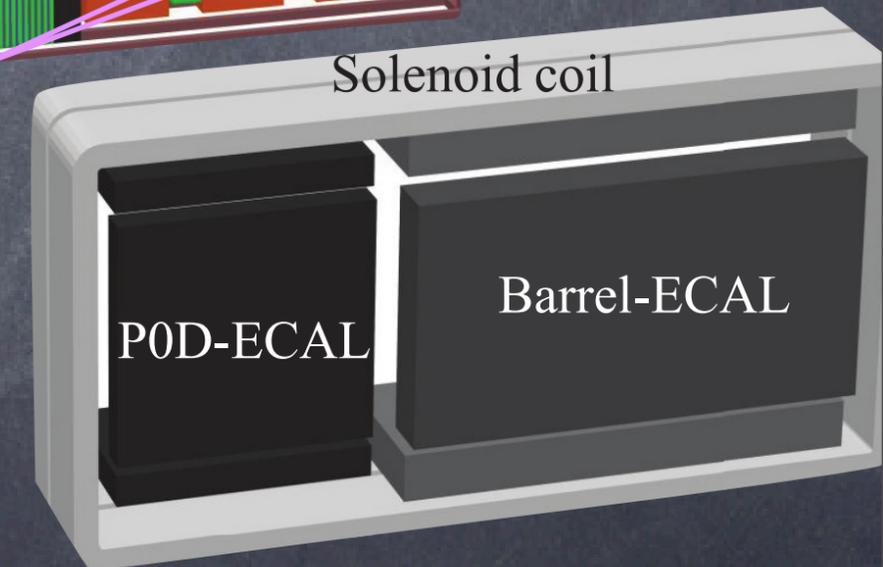
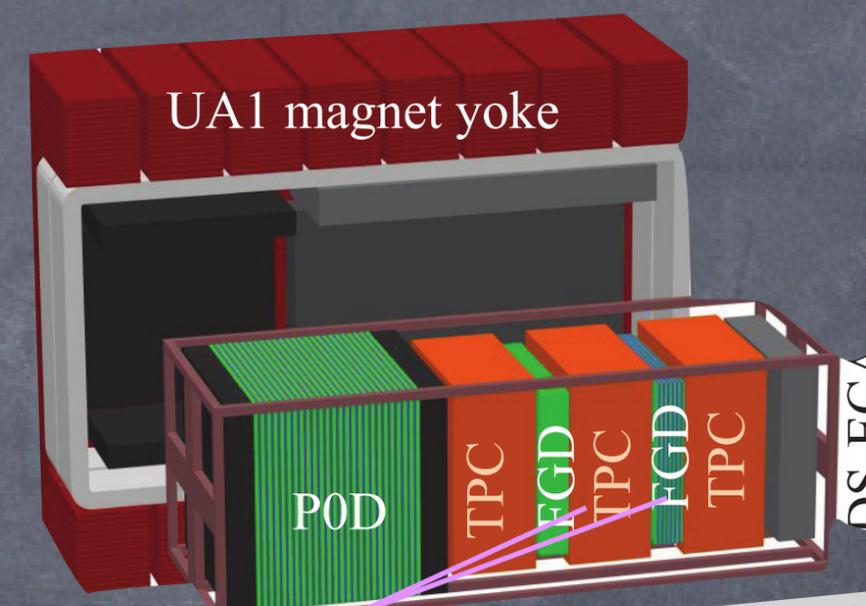
- INGRID (南野さん、大谷さん、村上さん)
  - ニュートリノと鉄との反応数を測定し、ニュートリノビームのモニターをしている
- Proton module (木河君)
  - ニュートリノ反応の同定及び反応断面積の測定
- Shoulder module (鈴木)
  - ビーム形状の非軸対称性の測定



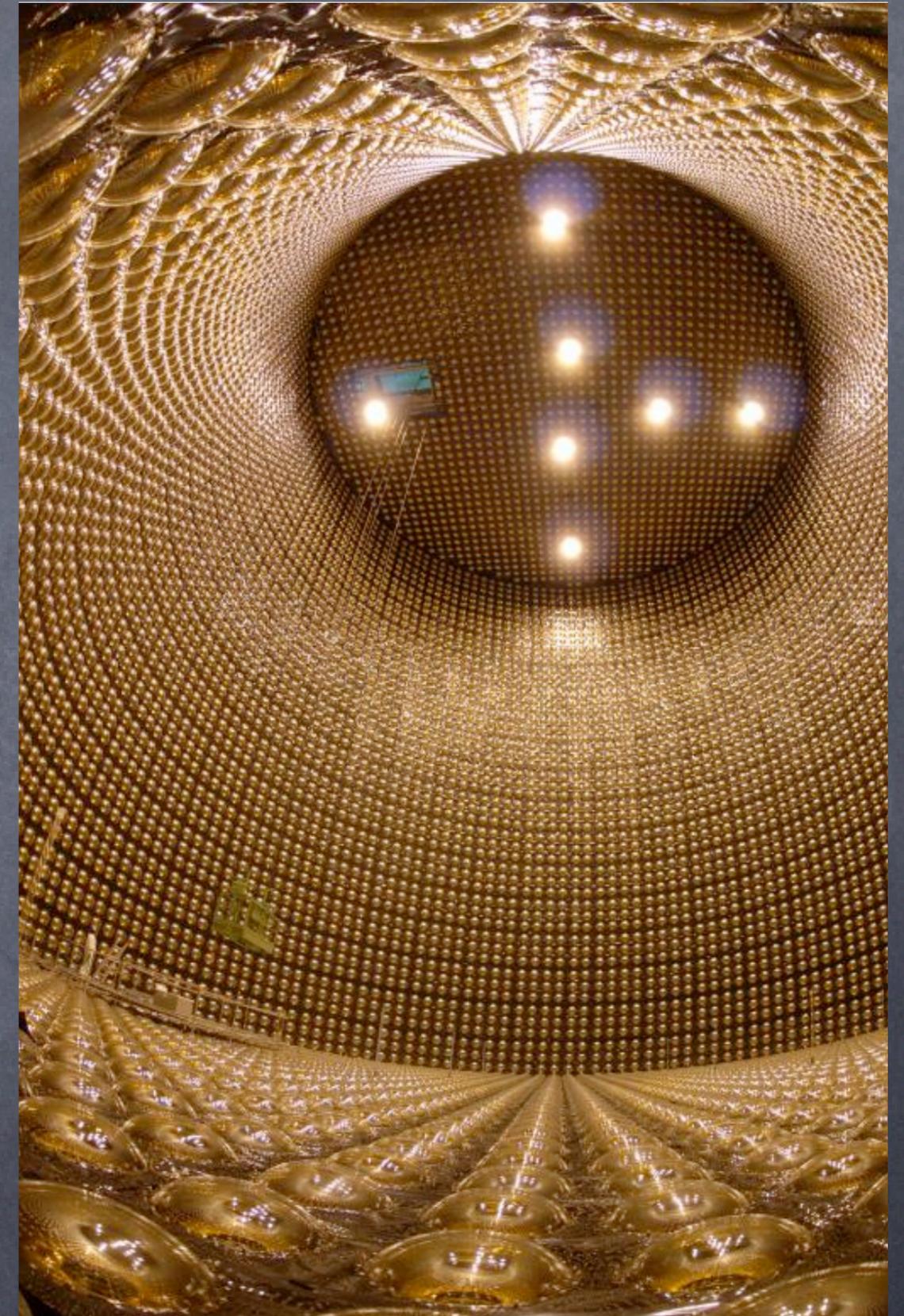
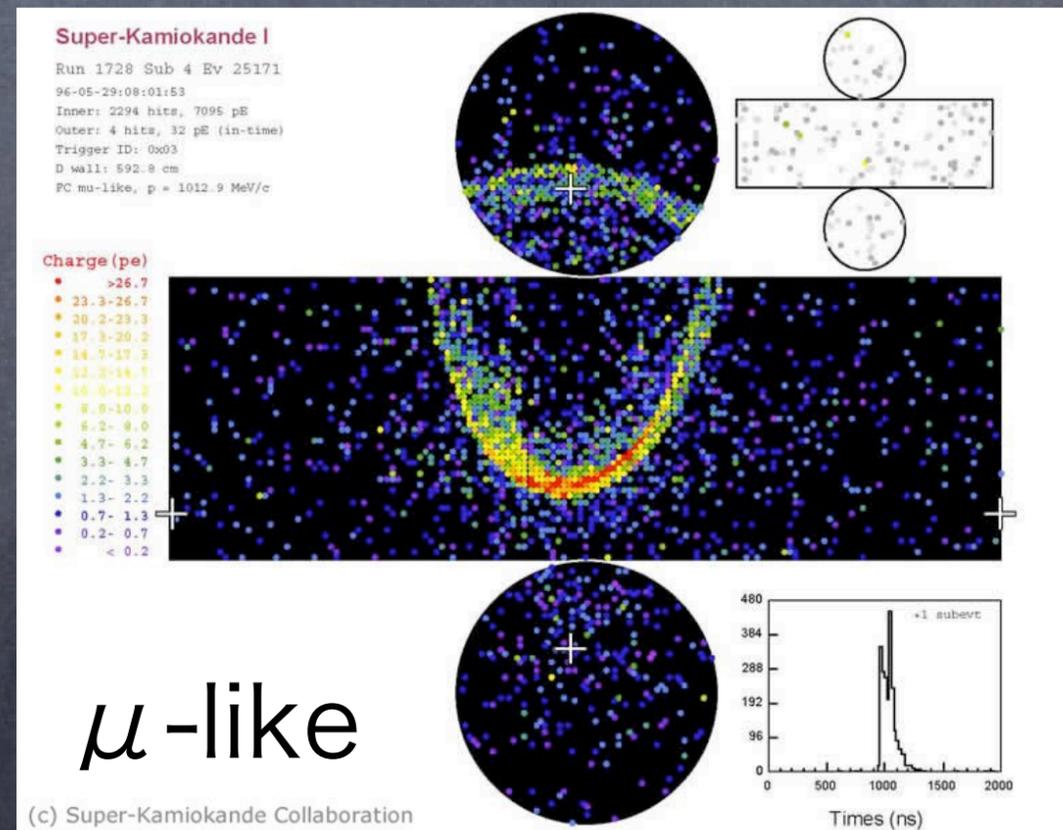
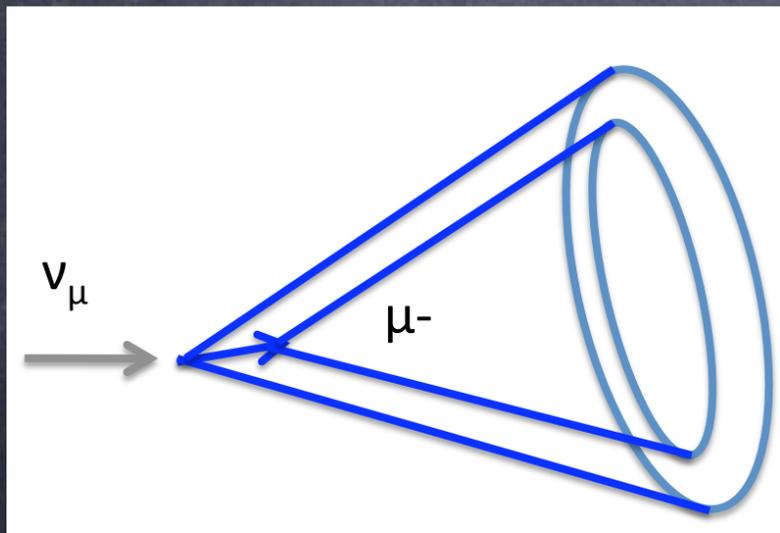


- 前置検出器(ND280):

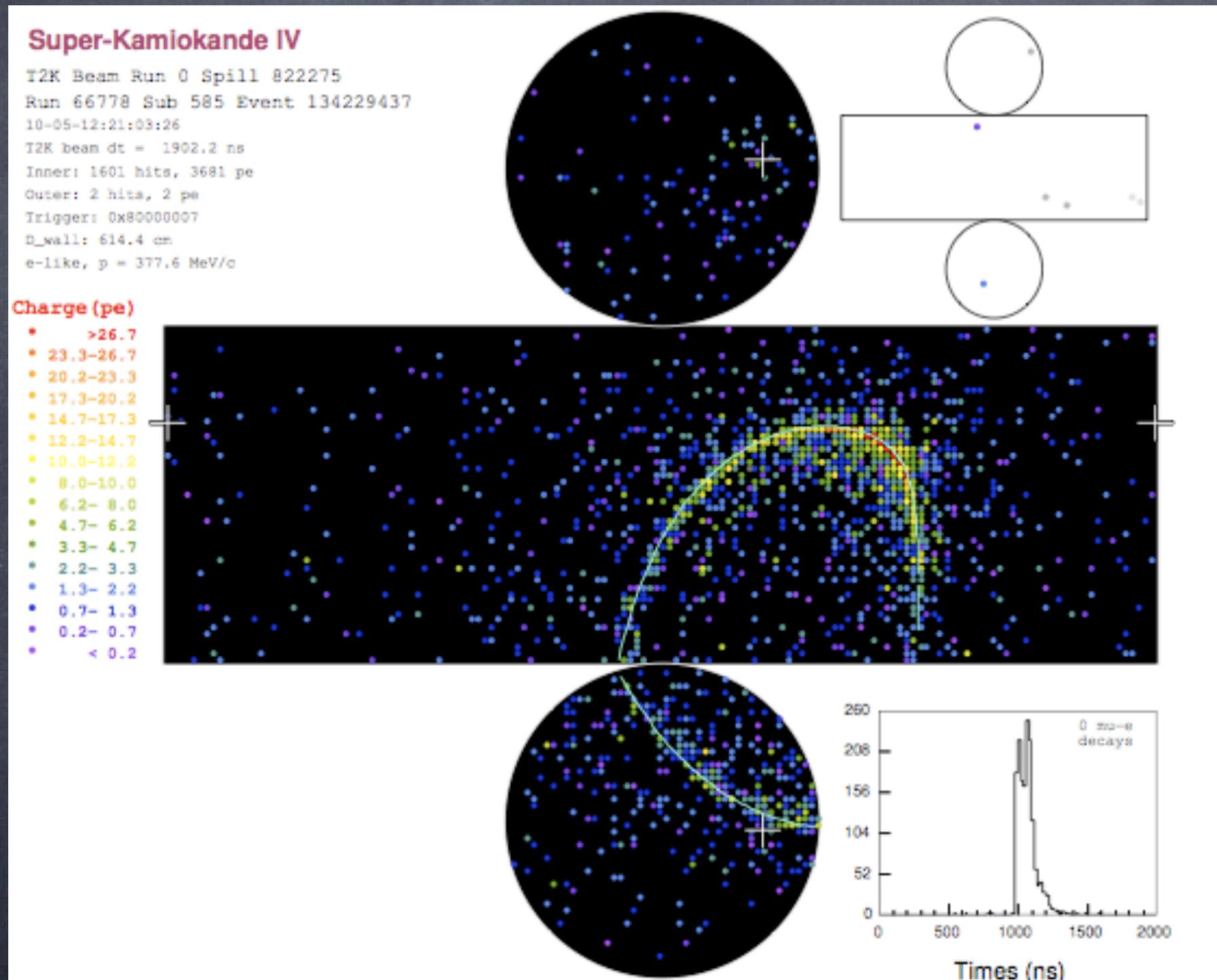
- ここで得られたデータを用いてSKにおける振動前のニュートリノフラックス及びエネルギースペクトルを予測
- SKにおけるバックグラウンド反応を見積もる
- FGD (家城さん)
  - ニュートリノターゲット
  - ニュートリノ反応点の測定
- Run coordinator: 池田さん、Phill



- 後置検出器 Super-Kamiokande (大谷さん)
  - 50kt大型水チェレンコフ検出器
  - PMT: 40% coverage
  - ニュートリノのフラックス及びエネルギースペクトル測定



# First $\nu_e$ candidate



最初の  $\nu_e$  出現事象候補  
(世界初の  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  観測成功か)  
 $\theta_{13}$  測定への第一歩！

# First $\nu_e$ candidate

Super-Kamiokande

T2K Beam Run 0 :  
Run 66778 Sub 50  
10-05-12:21:03:26  
T2K beam dt = 1902.  
Inner: 1601 hits, 36  
Outer: 2 hits, 2 pe  
Trigger: 0x80000007  
D\_wall: 614.4 cm  
e-like, p = 377.6 Me

Charge (pe)

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2- 8.0
- 4.7- 6.2
- 3.3- 4.7
- 2.2- 3.3
- 1.3- 2.2
- 0.7- 1.3
- 0.2- 0.7
- < 0.2

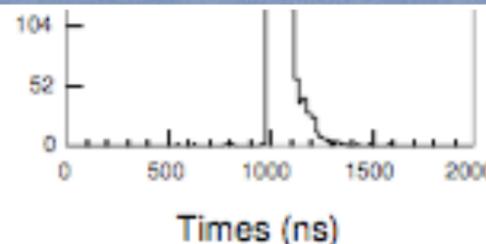
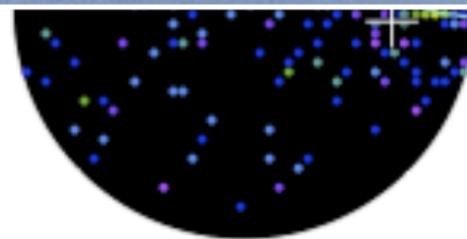


T2K実験の中でも京都の学生は  
最前線に立って研究している

T2K collaborator ~ 500

Contribution from 1 student(Kyoto)  $\gg$  1/500

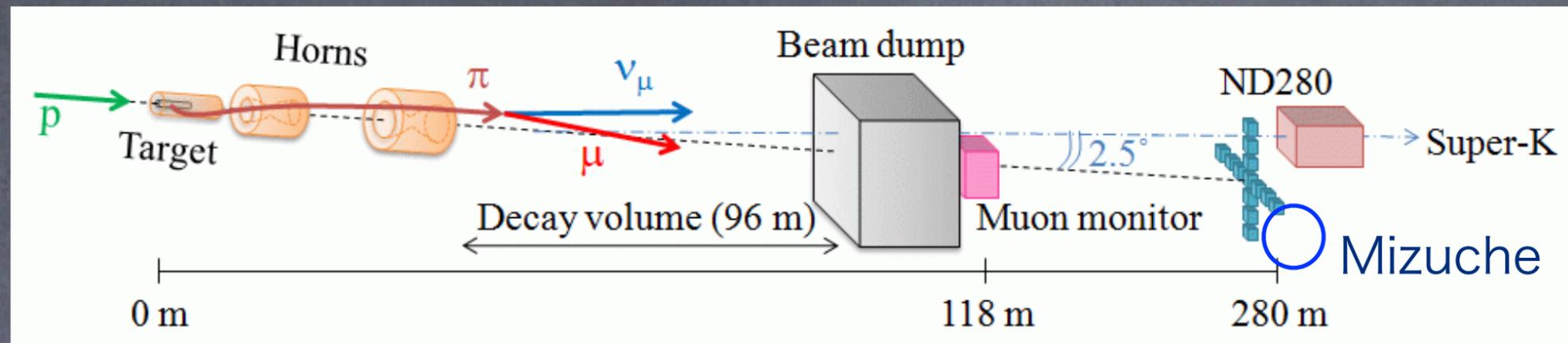
候補  
 $\nu_e$  観



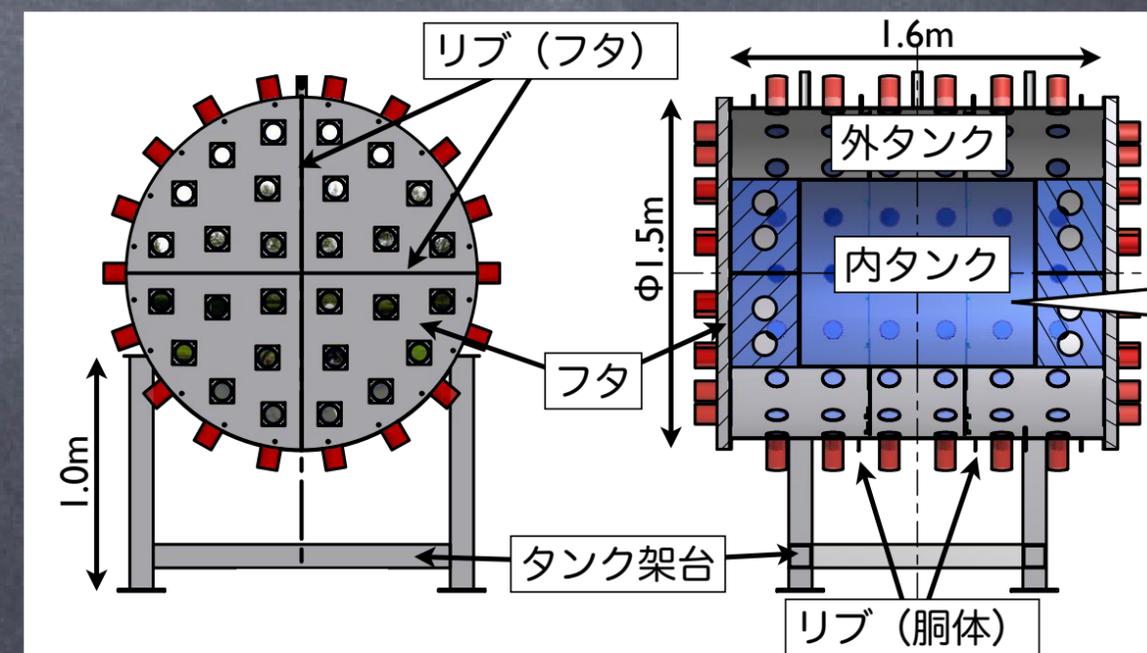
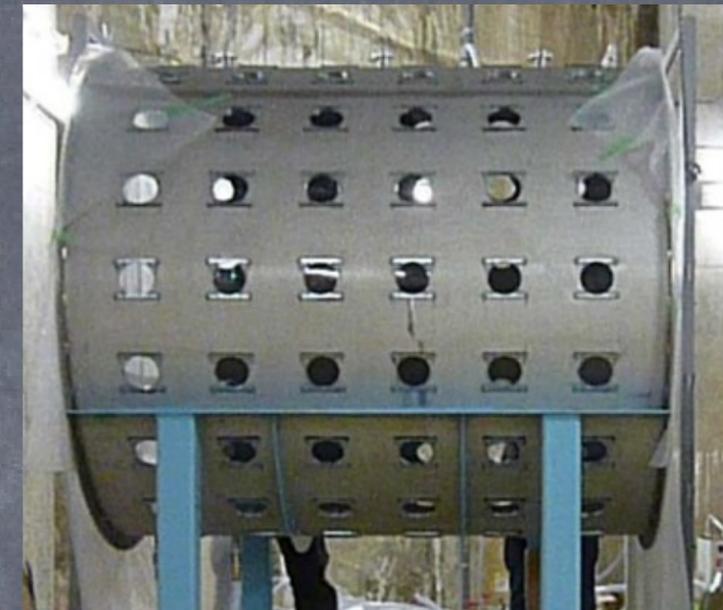
$\theta_{13}$ 測定への第一歩！

京都グループその他の活動

Mizuche



- Mizuche (将太くん、村上さん)
  - 2.5tの水チェレンコフ検出器
  - SKと同じν標的
    - SKにおけるν反応予測精度の向上を目指す
  - 試験実験の段階なので、T2Kとは別実験扱い。しかし将来的には前置検出器の一部として活躍する日が



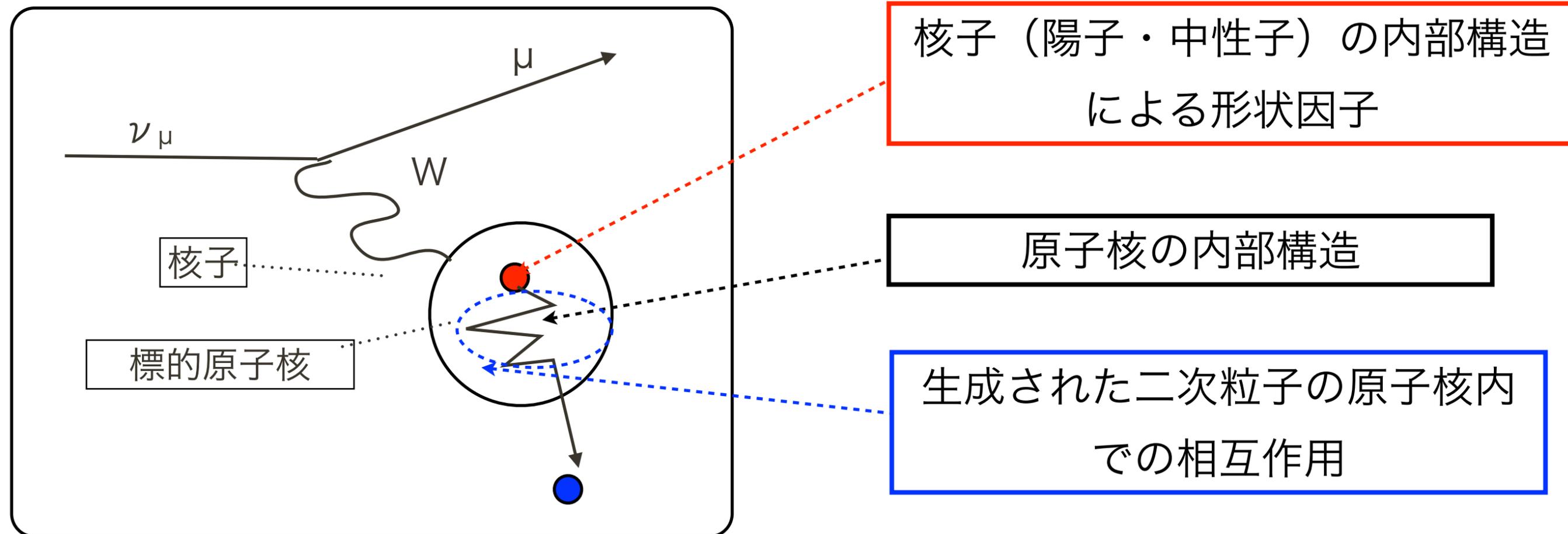
京都グループその他の活動

SciBooNE

# ニュートリノ反応って何が面白い？

そもそも弱い相互作用しかしないのでは？

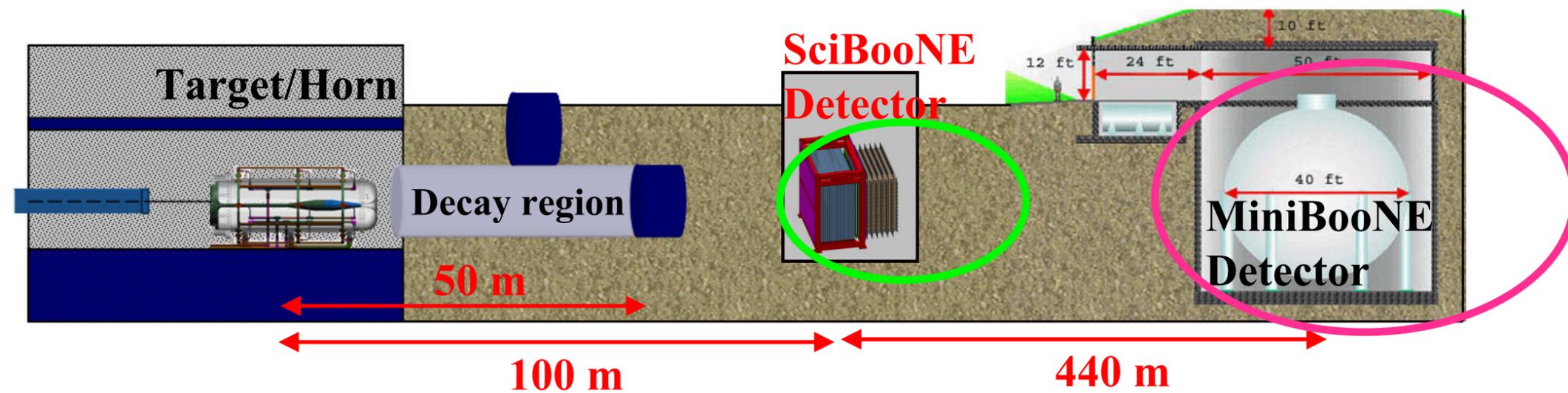
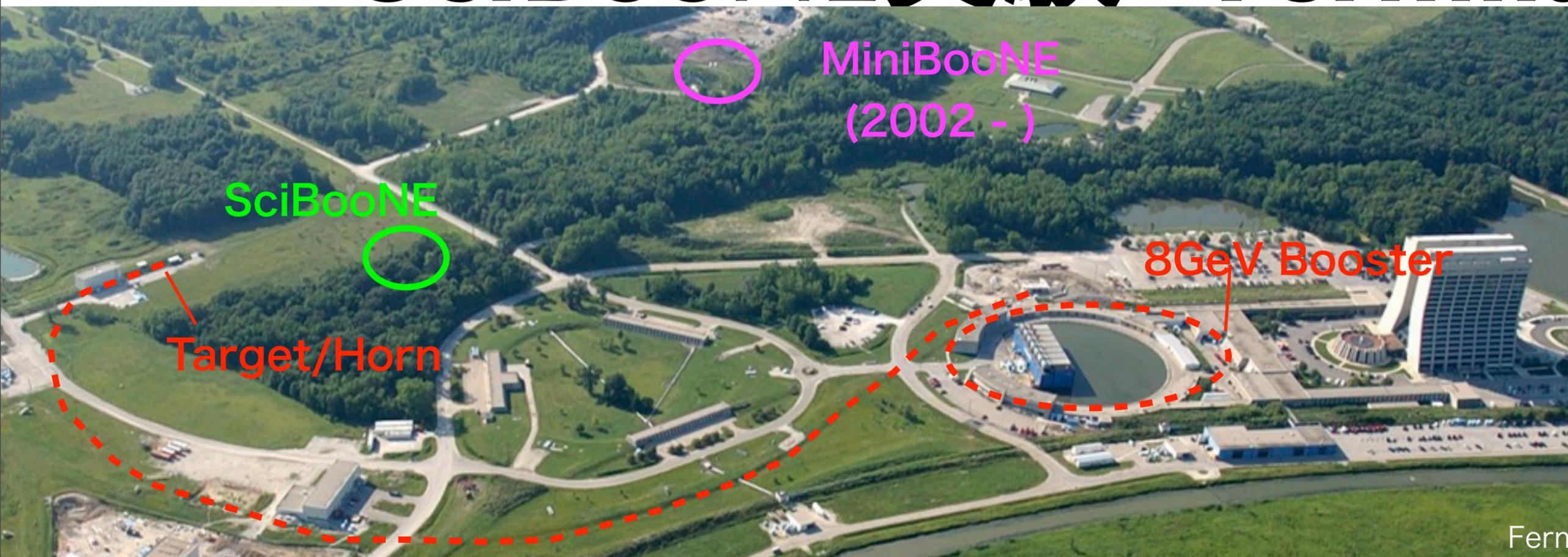
実は、原子核と（数GeV）ニュートリノの反応は奥が深い



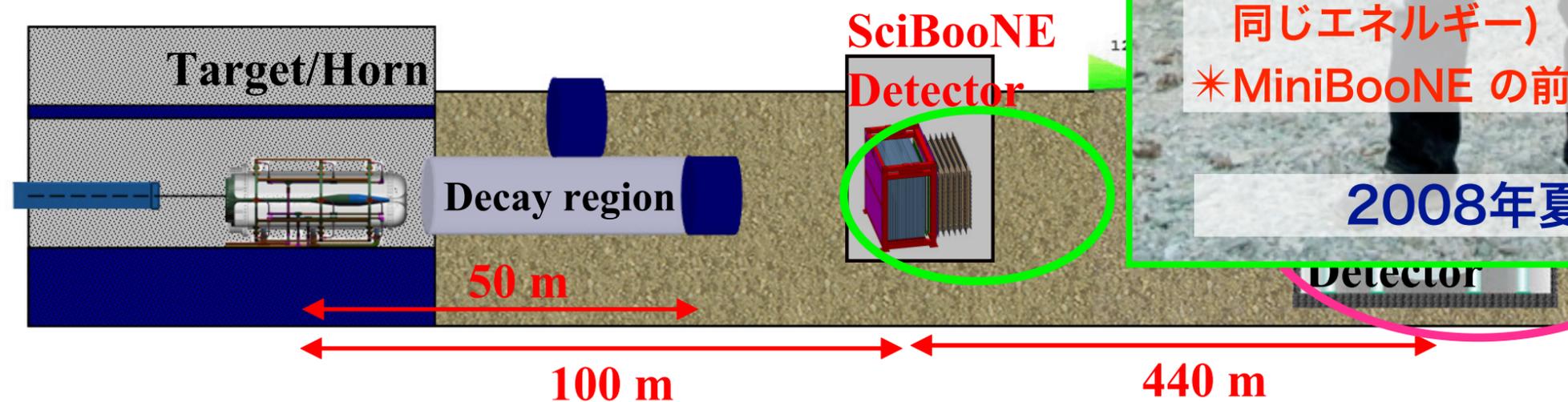
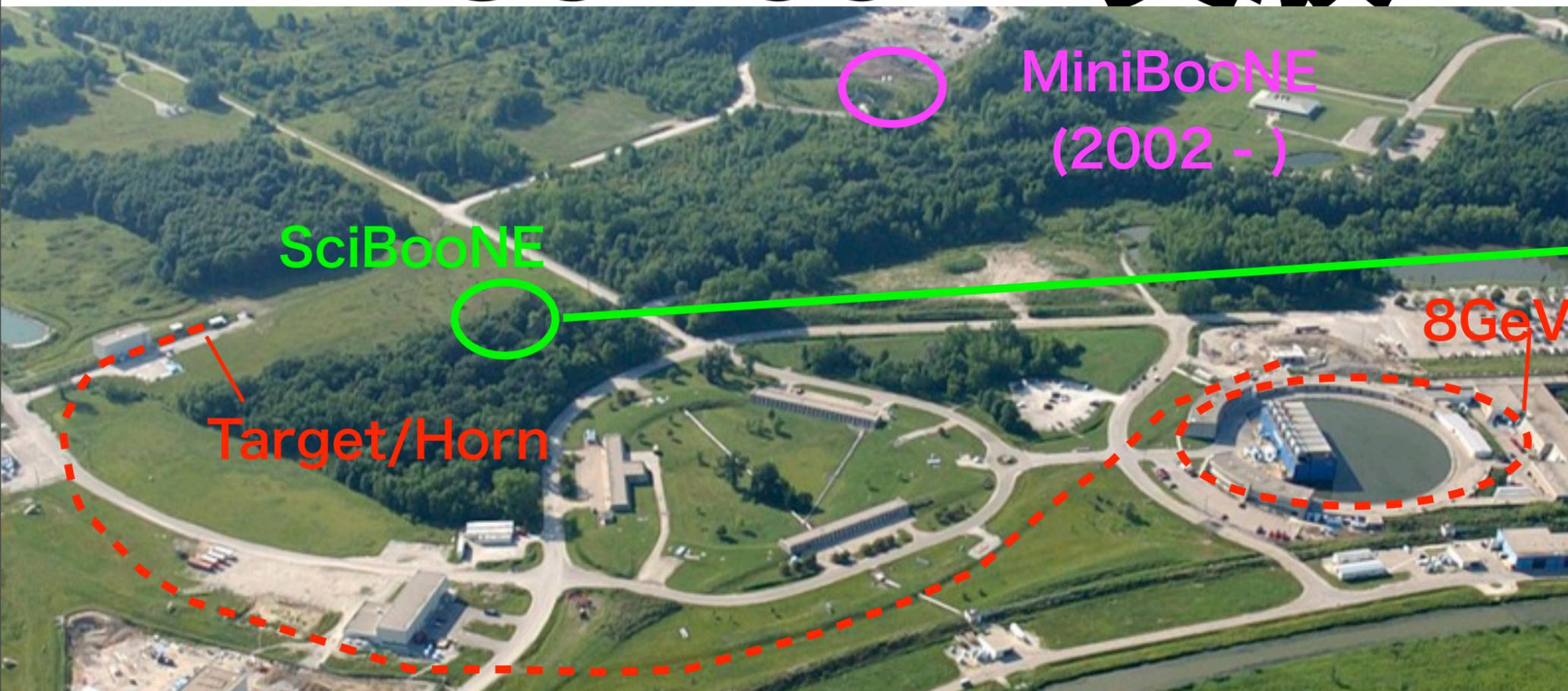
**これらの理解が、ニュートリノ振動の精密測定には不可欠！**

**さらに、ニュートリノを用いて、原子核の内部構造を調べられる！？**

# SciBooNE実験@Fermilab

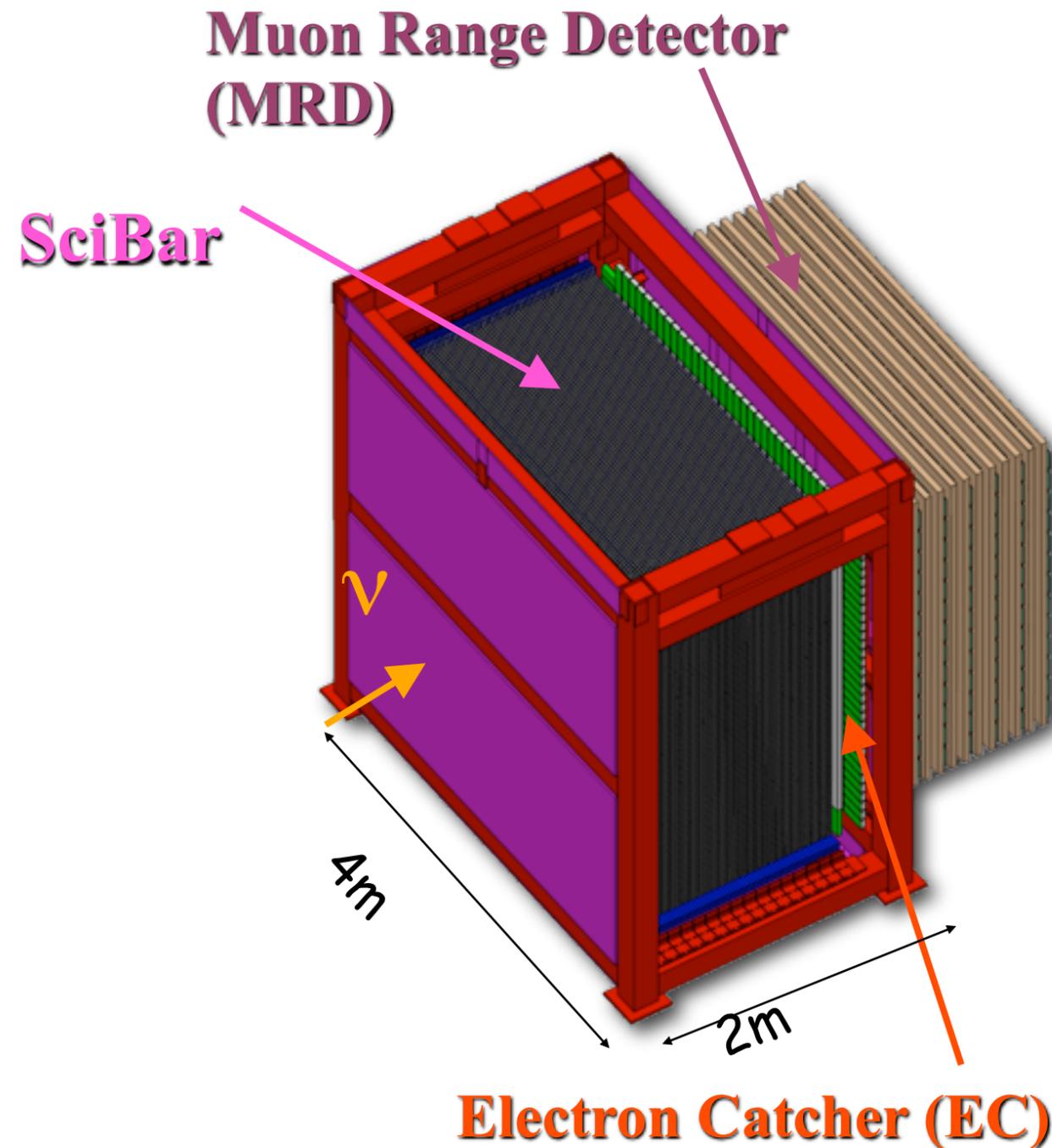


# SciBooNE実験@Fermilab



- \* 1 GeV付近ニュートリノ反応精密測定(T2Kと同じエネルギー)
- \* MiniBooNE の前置検出器

# SciBooNE 検出器



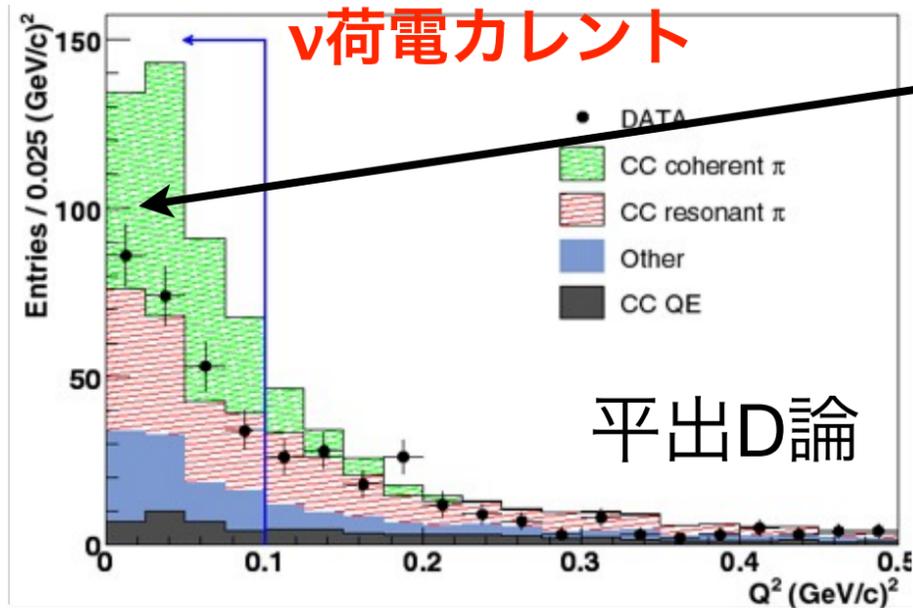
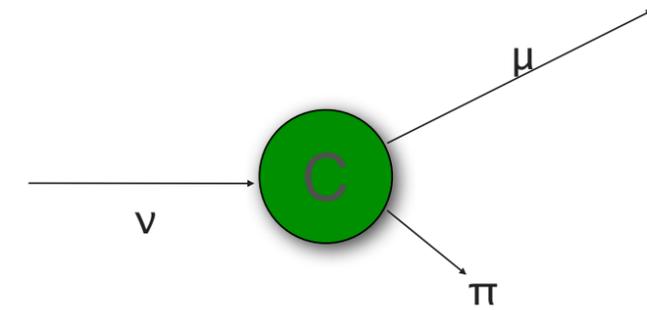
- SciBar検出器
  - ~14000本の棒状シンチレーターからなる飛跡検出器
  - K2K実験(T2Kの前身)の前置検出器を移設
  - 次はメキシコで太陽中性子の測定に使われる予定
- EC: 電磁カロリメーター
  - これもリサイクル
  - CHRUS→K2K→SciBooNE
- MRD: 鉄+シンチのサンドイッチ
  - フェルミラボの古い実験装置を再利用して制作

比較的短時間（実験提案から実験開始まで約1年半）、少人数（実働約10人）で行った実験  
です。

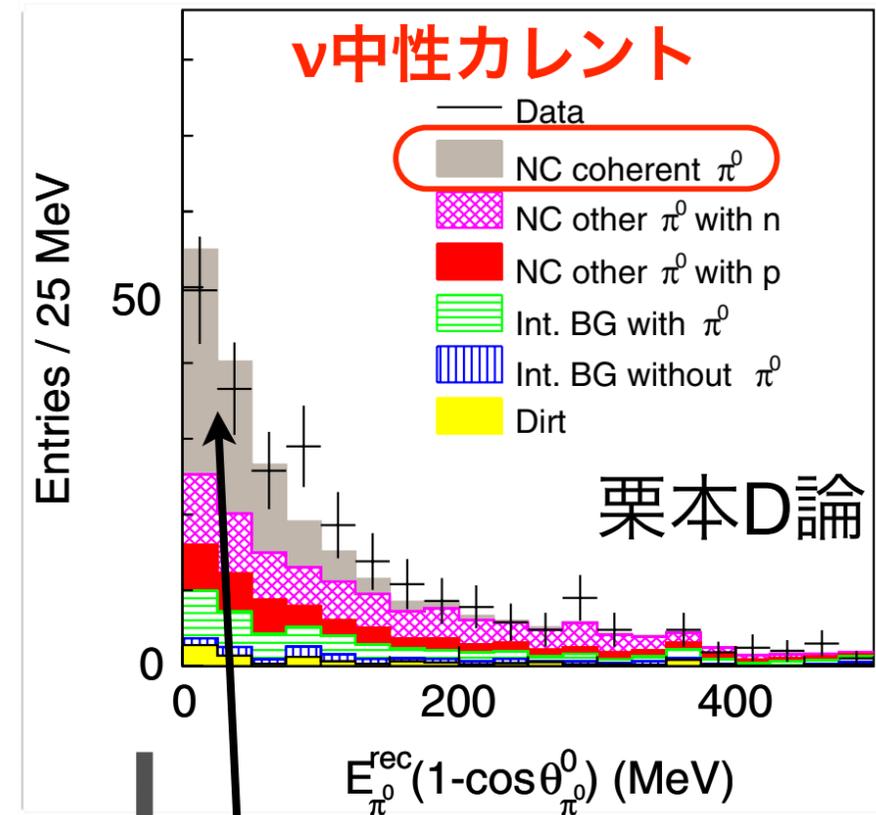
# SciBooNEでの発見

荷電/中性カレントコヒーレント $\pi$ 生成反応  
(炭素原子核全体と反応して $\pi$ を生成する反応)

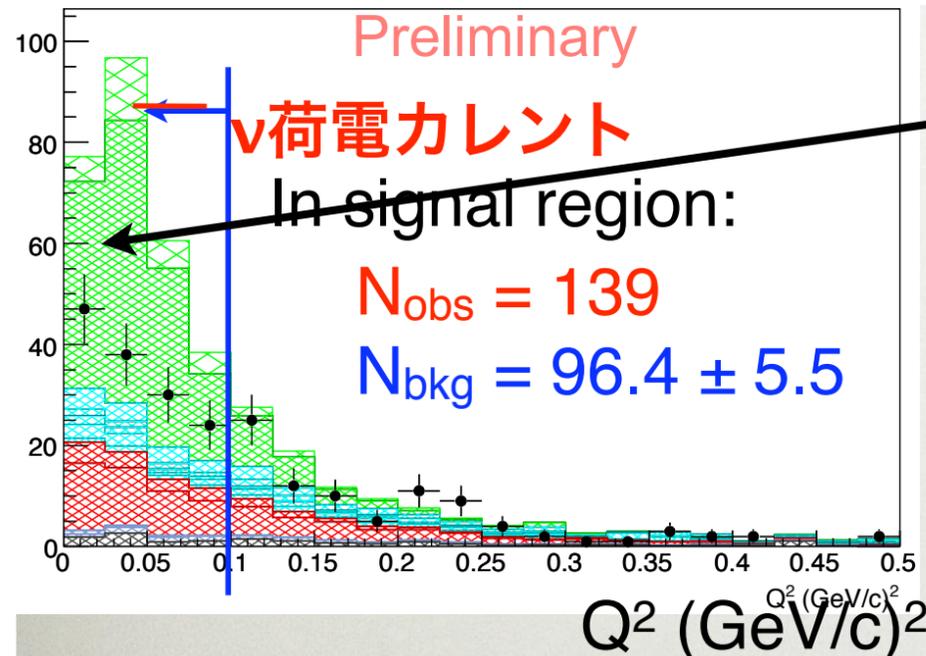
**CC-coherent  $\pi$**   
( $\nu+A \rightarrow \mu+A+\pi$ )



理論の予想に反して信号は見  
つからず。



中性カレントでははっきり見えた!



反ニュートリノでは少し  
ある?

今のところ、これらのデータを同時に説明する理論モ  
デルは存在しない。

ニュートリノグループから新M1へのプレゼント  
皆さんにしてもらいたい事



Pian detector  
for  
analysis of  
V-oscillation

←池田さん作

Pia vo

(T2K実験を支える重要な実験です)

vじゃなくてv(ニュー)

# PIA $\nu$ O (ピアノと読みます)実験の概要

- (主に、)T2K実験のための実験です
    - $\theta_{13}$ が、ものすごく小さいかもしれない
    - CP位相を世界で初めて測定する
- 精度のよい測定が必要。  
(数10%の系統誤差を数%にする)  
簡単そうに見えてなかなか難しい

自分にできること、

やりたいことはなにか？ と考える

# 荷電 $\pi$ 中間子反応断面積の精密測定

**P**ion detector for **A**nalysis of  **$\nu$** (neutrino) **O**scillation

実動メンバー: 池田、家城、山内、カナダのみなさん、先生方

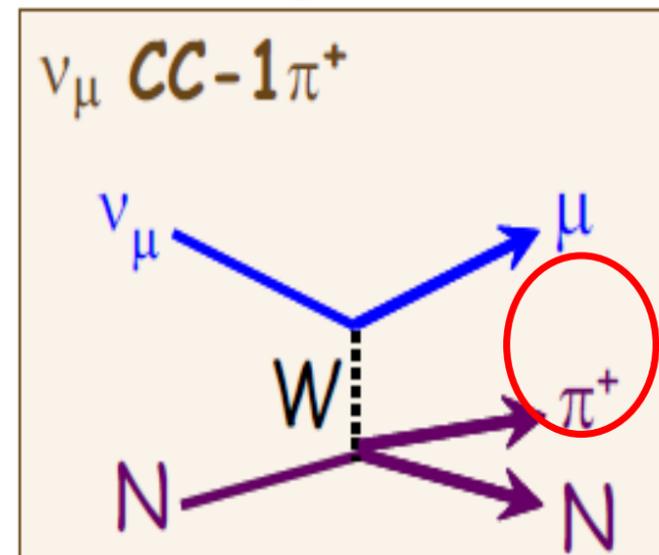
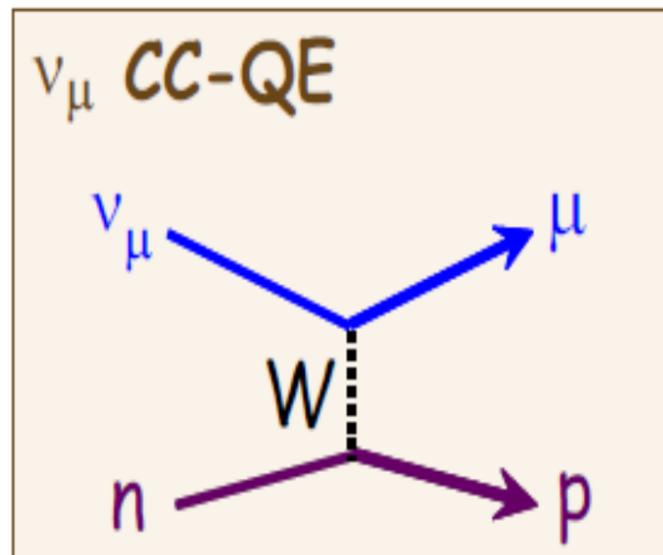
目的:

1. 荷電 $\pi$ の反応断面積を精密に測定 @カナダ  
(今T2Kで使われているのは80年代のデータ結果)

2. ニュートリノエネルギースペクトル精密測定

ニュートリノ反応毎のフラックス又は断面積を精密測定 @東海、SK

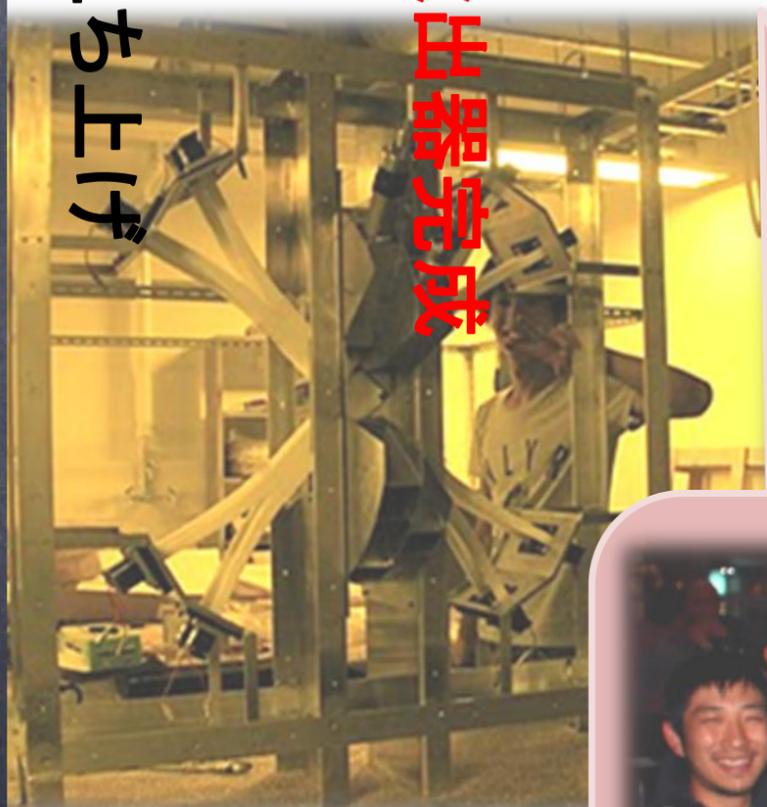
## いろいろなニュートリノ反応の例



終状態に出る  
荷電 $\pi$ がこの後  
どう反応するかを  
知っておくことが必要  
→荷電 $\pi$ ビームを  
シンチや水に照射し  
直接反応を測定する

# PIAvOの現在地とこれから

↓現在地



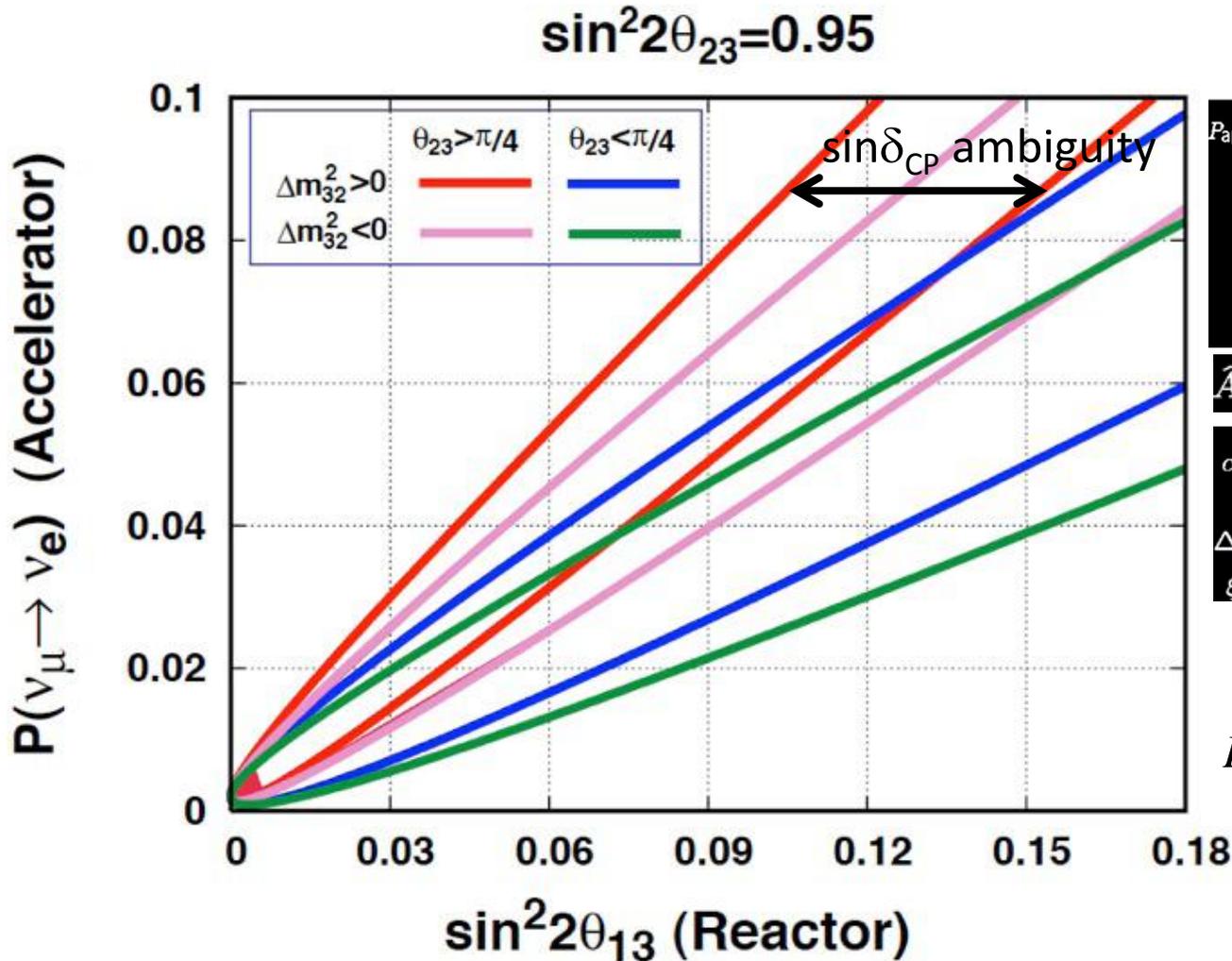
PIAvO-IIの目玉  
>水標的の導入  
>PIAvO-Iの  
補足データ  
一緒にカナダへいこう！

PIAvO-IIIに向けて  
>新MPPCで読み出す(南野さん)  
>水標的のアップグレード  
- 水シンチの開発など、  
アイデア募集中



T2K前置検出器グレードアップ

# $\nu_e$ appearance (加速器 $\nu$ 実験とReactor $\nu$ 実験)



## 加速器 $\nu$ 実験

$$P_{app} \simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \frac{\sin^2[(1-\hat{A})\Delta]}{(1-\hat{A})^2} \pm \alpha \sin 2\theta_{13} \xi \sin \delta_{CP} \sin(\Delta) \frac{\sin(\hat{A}\Delta) \sin[(1-\hat{A})\Delta]}{\hat{A} (1-\hat{A})} + \alpha \sin 2\theta_{13} \xi \cos \delta_{CP} \cos(\Delta) \frac{\sin(\hat{A}\Delta) \sin[(1-\hat{A})\Delta]}{\hat{A} (1-\hat{A})} + \alpha^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2(\hat{A}\Delta)}{\hat{A}^2},$$

$$\hat{A}\Delta = \frac{\sqrt{2}}{2} G_F n_e L$$

$$\alpha = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2} \simeq 0.03,$$

$$\Delta \equiv \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E},$$

$$\xi \equiv \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23}.$$

## Reactor $\nu$ 実験

$$P_{app} \sim 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}$$

# T2Kの今後

2010-2015

T2Kで $\nu_e$  appearance!

YES

YES

$\delta_{CP}$ 測定

$\Delta m_{32}^2$ の符号

Anti- $\nu_\mu$  disappearance

T2K

anti- $\nu$  beam (201?-)

前置検出器の改良 (2016-)

J-PARC(1.66MW運転)+

Hyper-Kamiokande

$\nu$ とanti- $\nu$  beam (2020-)

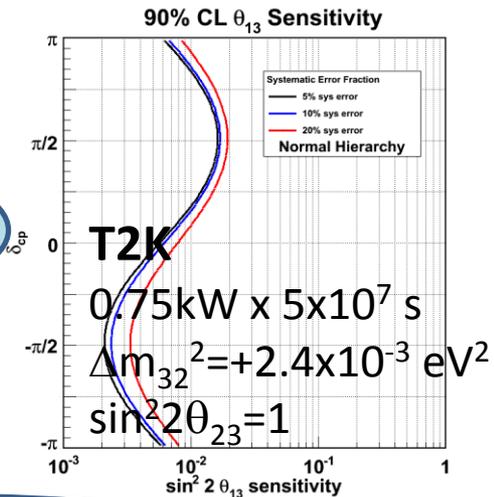
NO

Reactor  $\nu$ 実験で $\nu_e$  app.  
(T2K  $\rightarrow$   $\delta_{CP}$  suppresses)

NO

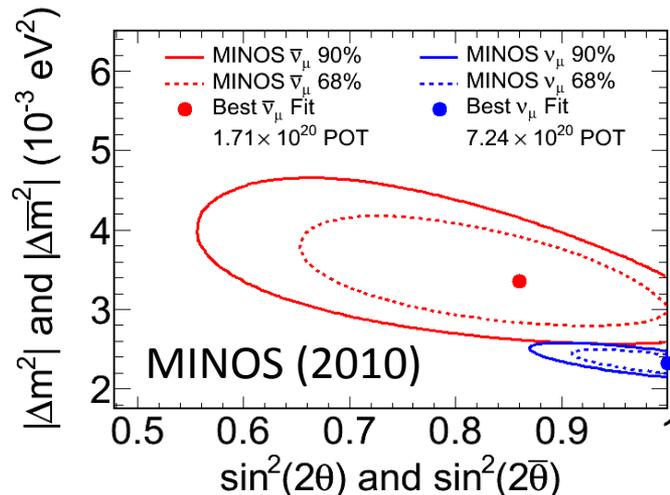
Tiny  $\theta_{13}$

新しいアイデアが必要



# T2Kでのanti- $\nu$ beamに向けたMC study

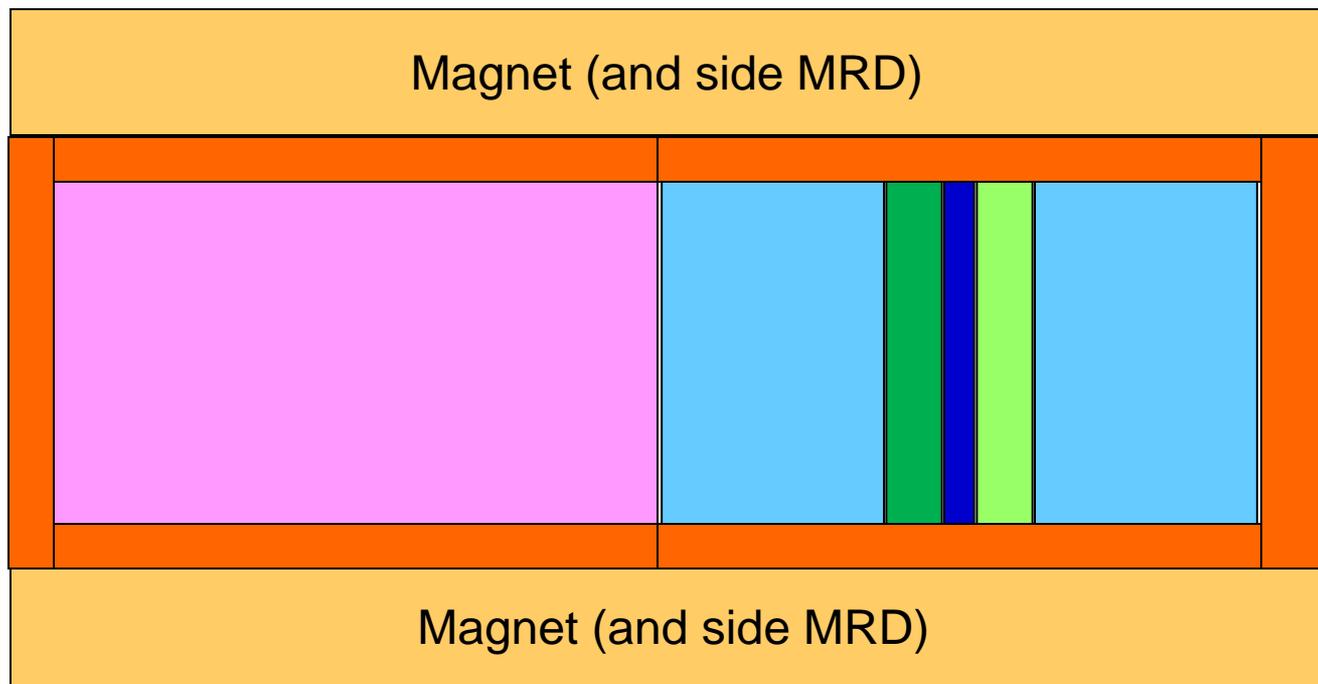
- 前置検出器およびSKで期待されるシグナルを確認し、T2Kにanti- $\nu$  beamのスケジュールを提案
- Anti- $\nu_{\mu}$  disappearanceの感度曲線
  - どの程度POTをためればMINOSの結果を確認できるか
- Anti- $\nu$ のcross section測定
- 現在の前置検出器でのanti- $\nu$  beamの信号を確認し、必要な改良を見つけ、新型検出器を提案する



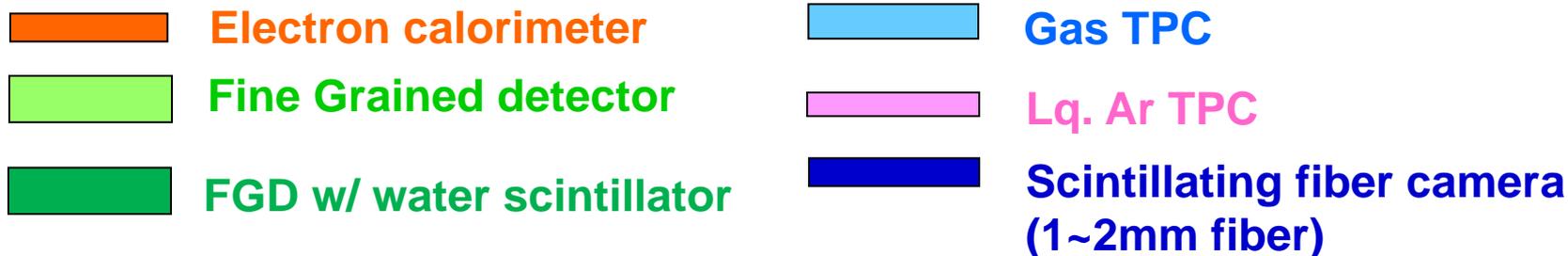
# 前置検出器の改良

(no relation to the T2K collaboration)

T. Nakaya @ GLA2010  
March 28-31, 2010,  
Tsukuba.



One vague  
idea of TN



Idea (2011?) → Realization/Operation 2016?~

# 前置検出器の改良

(no relation to the T2K collaboration)



## Scintillating fiber camera

1~2mm scintillation fiberがactive target

1 cm程度のtrackを再構成可能 (CCQE反応のproton tracking eff.)

70000~300000 chをMagnet中の狭い空間に入れる必要がある

このsub detectorの実現に向けたR&Dを京都で行う

-> Monolithic array MPPCとその読み出しエレキの開発 (2011-2012)

-> プロトタイプ検出器を用いたビームテスト (2012-2013)

この他、新型pi0検出器など様々な新型前置検出器に向けたR&Dを京都で進めいく

 Fine Grained detector

 FGD w/ water scintillator

 Lq. Ar TPC

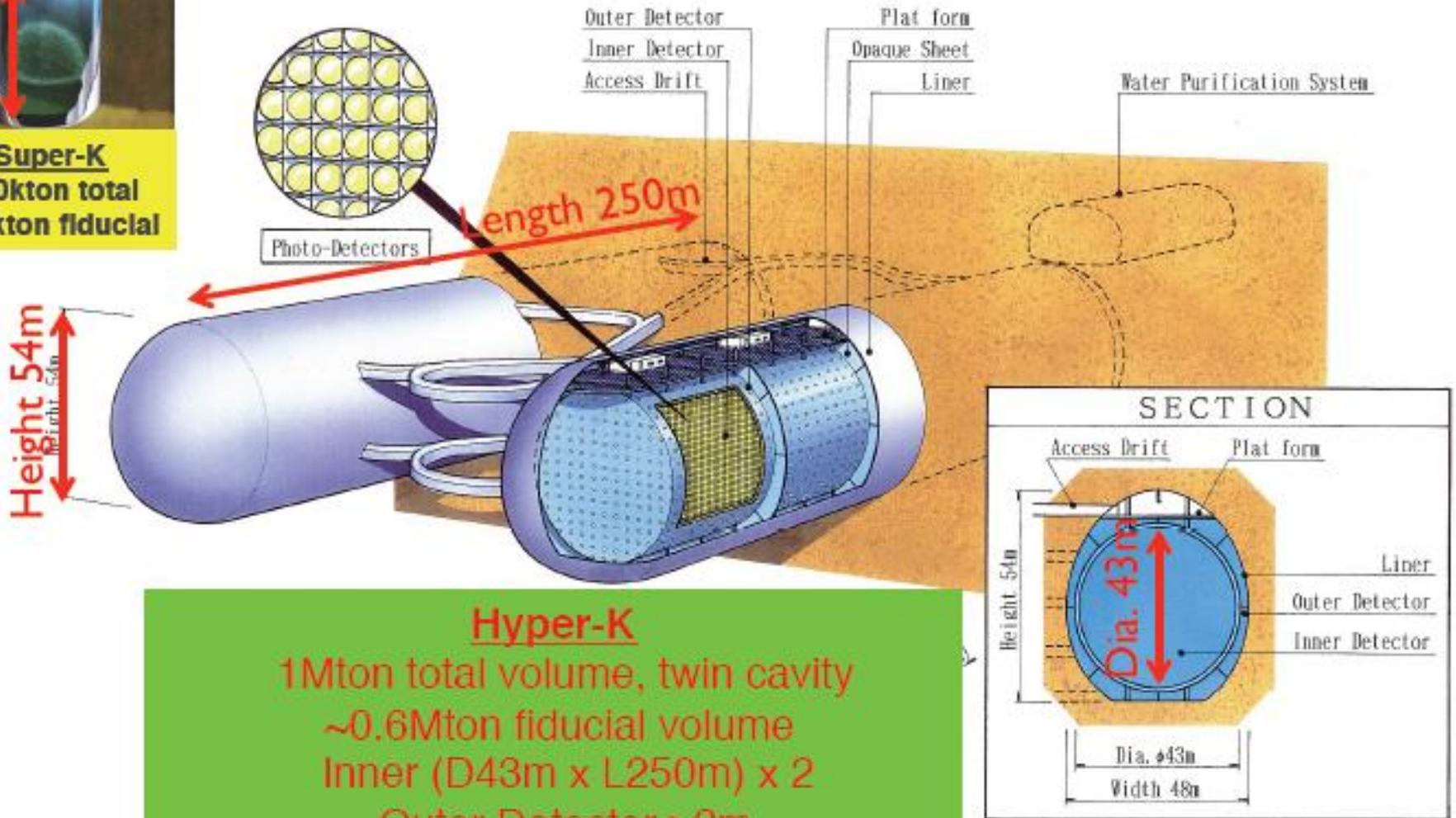
 Scintillating fiber camera  
(1~2mm fiber)

Idea (2011?) → Realization/Operation 2016?~

# Schematic View of the Hyper-Kamiokande



**Super-K**  
50kton total  
22kton fiducial



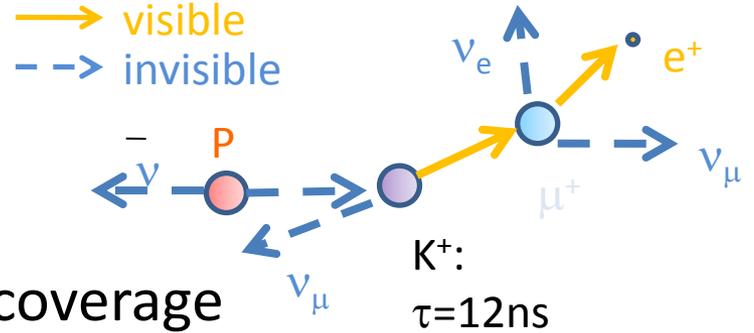
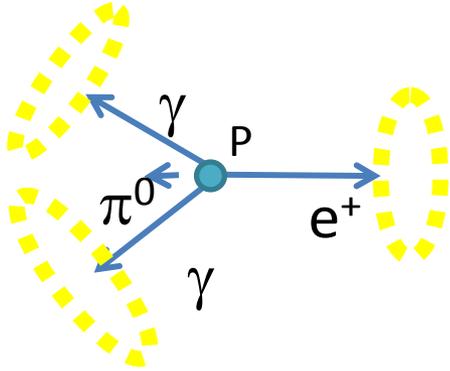
**Hyper-K**  
1Mton total volume, twin cavity  
~0.6Mton fiducial volume  
Inner (D43m x L250m) x 2  
Outer Detector >2m  
Photo coverage 20% (1/2 x SK) or less?

# Hyper-Kamiokandeで何ができるの？

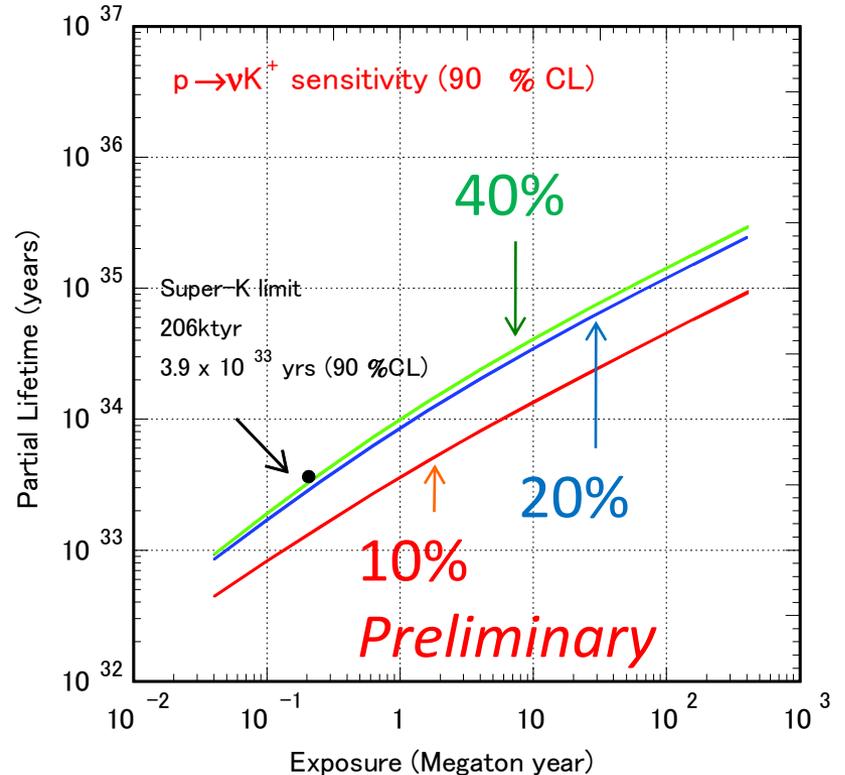
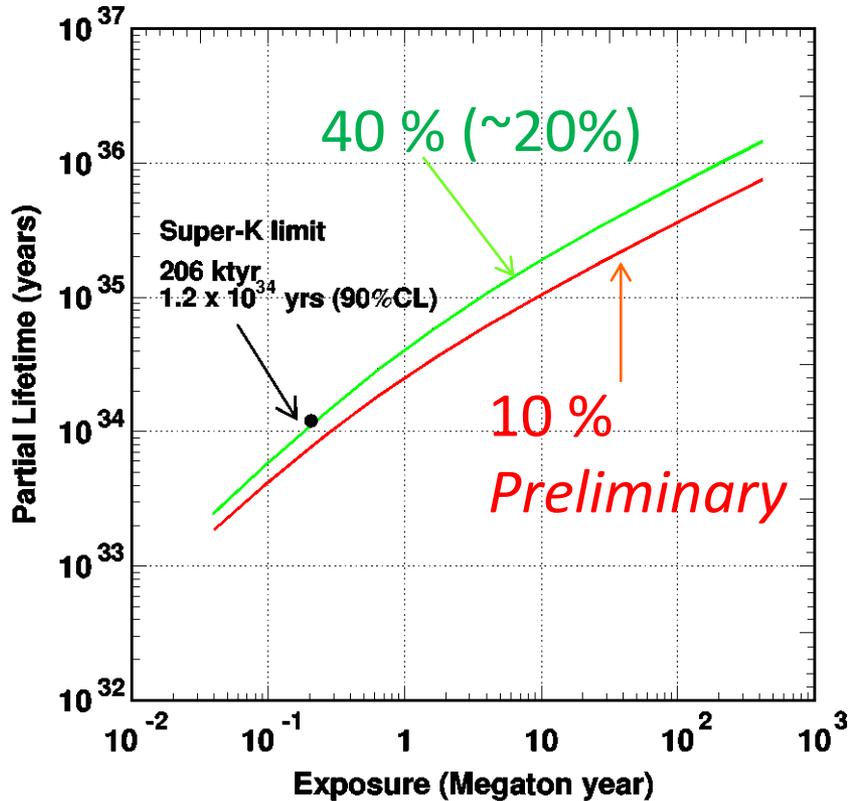
- 陽子崩壊の探索
- **加速器 $\nu$ 実験**
- 大気 $\nu$ 測定
- 太陽 $\nu$ 測定
- **Supernova  $\nu$ 測定**
  - Supernova burst  $\nu$ , supernova relic  $\nu$
- Astrophysics (池田君がまとめ中)
  - Solar flare, Gamma ray burst, Indirect dark matter search, Inner galaxy diffuse  $\nu$

-> 現在LOIを準備中

# Hyper-K: 陽子崩壊探索



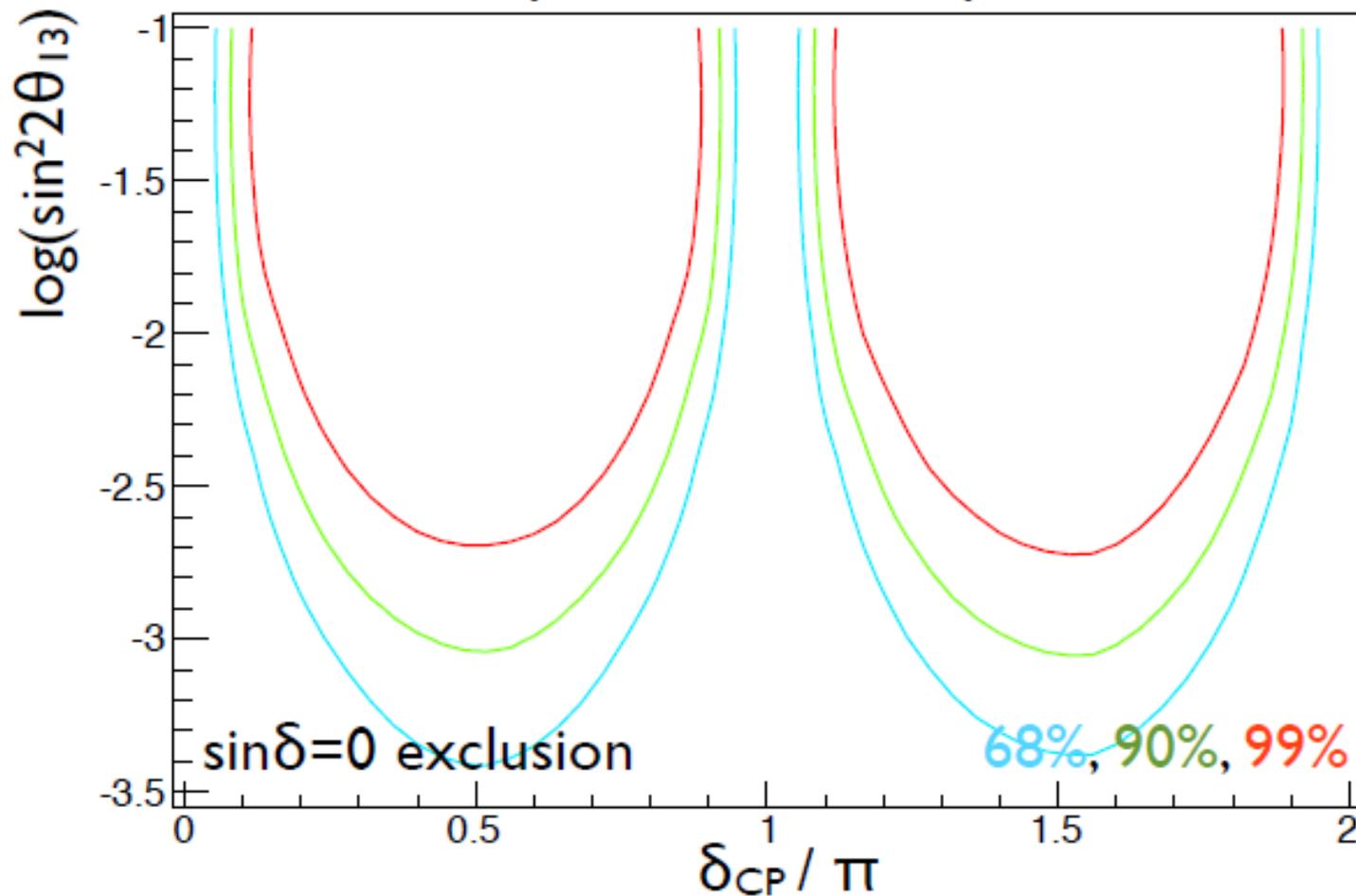
% $\neq$ photo coverage



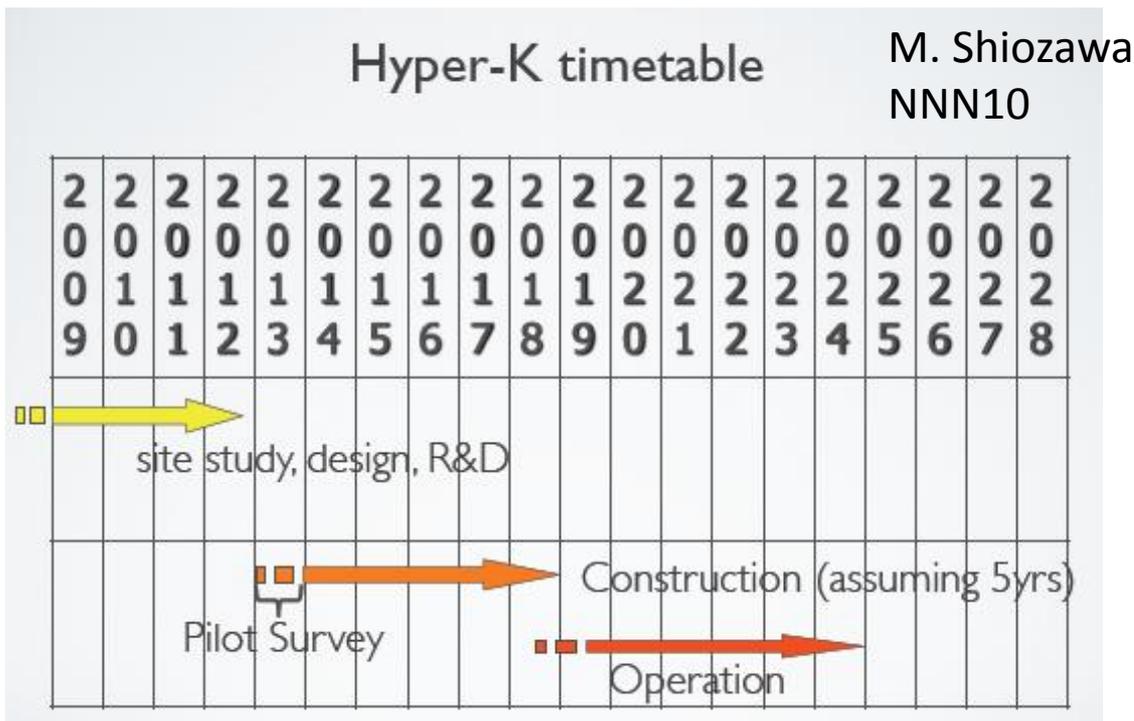
# J-PARC(1.66MW) + Hyper-K

## Discovery potential of CP asymmetry

$\nu$  run 1.5 year +  $\bar{\nu}$  run 3.5 year Normal Hierarchy



# Hyper-Kのスケジュール案



- Design, R&Dを早急に進める必要がある
- 京都はPhoto sensorとFront-end electronicsのR&Dを進める

# Hyper-Kのphoto sensorの候補

## 研究・開発の必要な項目(の主なもの)のまとめ

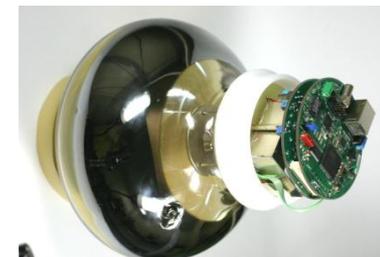
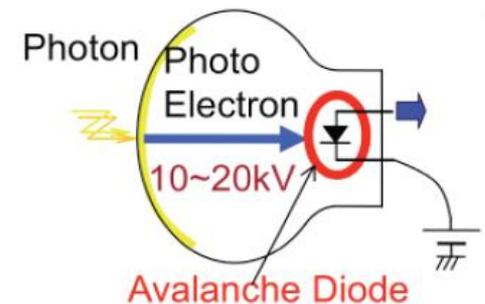
早戸さんのトラペ  
HK WG meeting

### 1) Traditional (ふつうの) PMT

- 10 ~ 13 inch. High QE (~40%) の PMT の開発  
( Dark noise をあまり高くしないこと)
- 防爆ケースの必要性確認  
必要ならケースの設計・製作

### 2) Hybrid PMT

- 10 ~ 13 inch. Hybrid PMT の開発
- 内蔵する高圧回路の寿命確認
- AD変換部の設計、寿命確認
- 防爆ケースの必要性確認  
必要ならケースの設計・製作
- 水中でのテスト

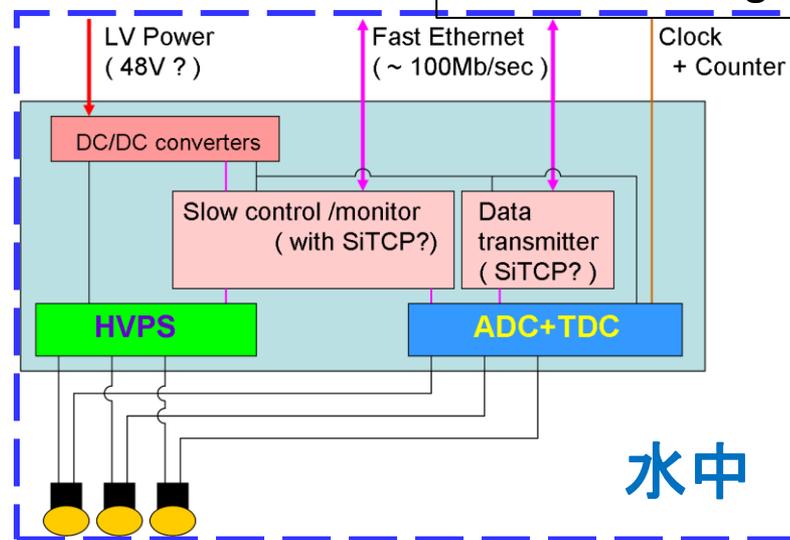


# Hyper-KのFront-end electronics

早戸さんのトラペ  
HK WG meeting

## 水中用 Front end module の 開発事項

- ケーブルの導入方法  
水中用コネクタ
- 耐圧防水ケース  
防爆対策も必要か？
- 熱設計  
ケースを通して水中に  
放熱するしかない



- データおよびタイミング信号を光ファイバーで集約するか?  
耐(水)圧のネットワークケーブルは高いらしい
  - こわれにくい HVモジュールの選定(開発?)
  - HV制御、電圧モニターの開発
  - HVPS と ADC部のノイズシールド
  - ADC/TDC の開発
- などなど

☆ Hybrid PMT で HV や ADC/TDC を PMT に内蔵する場合、  
LV供給とデータ集約を行うモジュールになるか？

ニュートリノグループの今とこれから

T2K



~750kW



50kt

If we find a finite  $\theta_{13}$ ..

ニュートリノグループの今とこれから

T2K Power up!!!



~750kW



50kt

If we find a finite  $\theta_{13}$ ..

# ニュートリノグループの今とこれから

## T2K

Power up!!!



~750kW



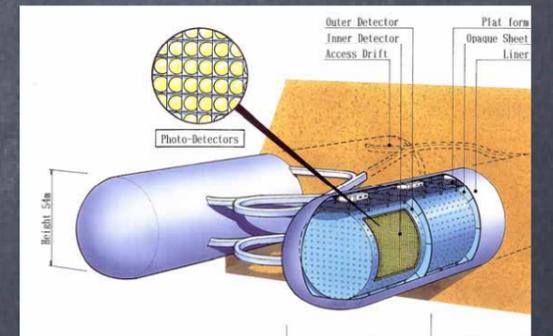
50kt



## T2K



~1.7MW



1 Mt

If we find a finite  $\theta_{13}$ ..

Powerful  $\nu$   $\mu$  sources and detectors  
for CPV search

# ニュートリノグループの今とこれから

# T2K

新しい世界が君たち  
を待っている!!!

本グループを卒業された中島さん



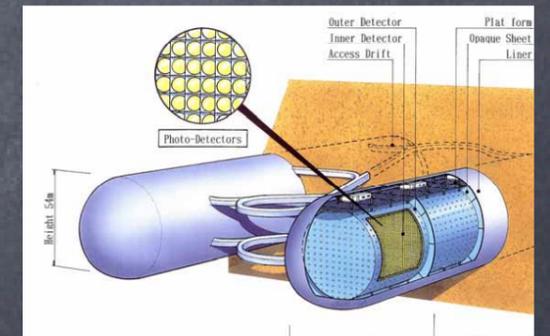
# 50kt

50kt

te  $\theta$  13..



~1.7MW



1Mt

Powerful  $\nu$   $\mu$  sources and detectors  
for CPV search

# 新M1の皆さんへ

- 京都ニュートリノの学生・スタッフはT2K実験の中でも超重要な役割を担っています
- 大変だけど見返りも大きい、そんなやりがいのある仕事がたくさん出来ます。
  - 現在は地震被害からの復旧作業に向けて頑張っています。
- 最先端の実験で最前線で一緒に研究しよう！

# ニュートリノGの今後のスケジュール

- ND280-J meeting
  - 毎週火曜（14:00-）、302号室にて
  - 日本人ら（京大、東大、神戸大、大阪市立大、KEK）によるビデオ会議
- T2K collaboration meeting
  - 5/16-5/21、KEKにて
  - 世界各国からT2Kのコラボレータが日本に集まり、全体会議を行う

Backup

# AN EXPECTED BEAM POWER CURVES FOR RCS AND MR

★1.7MW

