

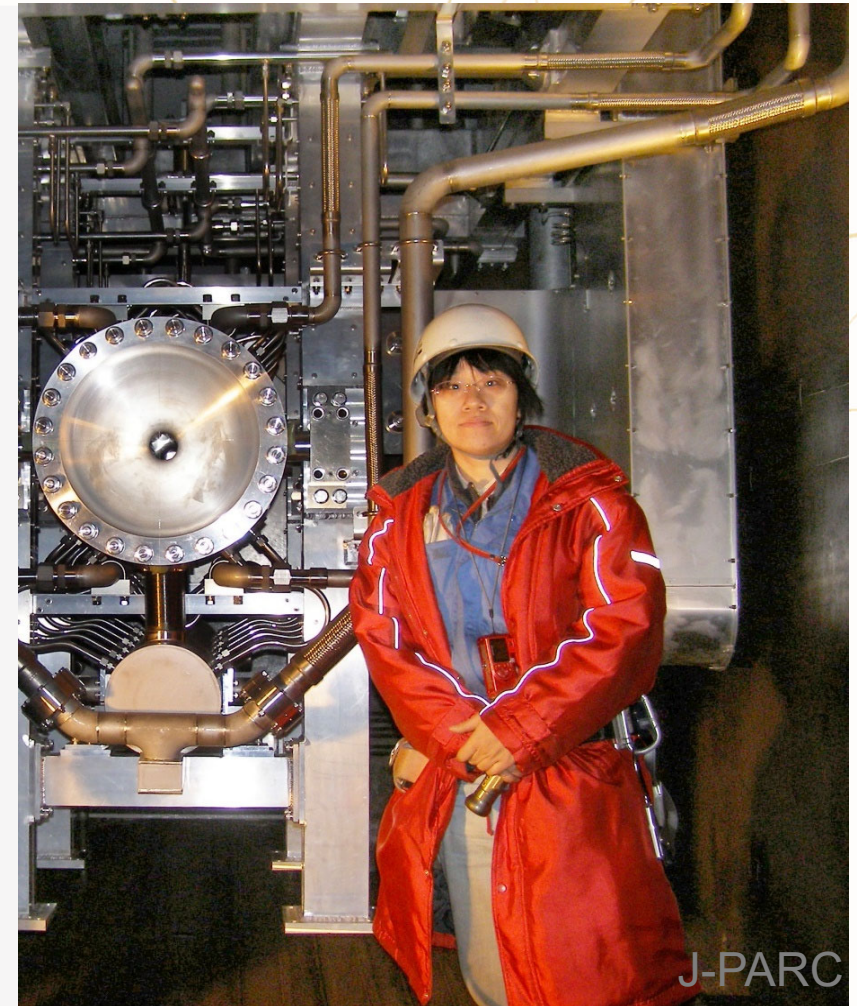
# ニュートリノ振動とCP対称性の破れ (と、その先)

---

東北大学 市川温子

# 自己紹介

- エマルションでダブルハイパー核を探す実験で京大理 博士号取得
- その後、加速器長基線ニュートリノ振動実験へ（京大→KEK→京大→東北大）
  - ✓ K2K実験 前置検出器建設
  - ✓ T2K実験
    - ビームライン建設、実験立ち上げ
    - データ解析、実験グループ代表
- 最近は、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索を目指して高圧キセノンガス検出器の開発もしている
- 量子力学の基礎実験もしたいと思っている
- 近々の悩み：11月に講演が重なり、自分の話に飽きてしまった。今日は、少し個人的な夢（妄想）も入れたり、脱線したりしたい。



# 素粒子の周期律表

質量で区別

フェルミオン  
(物質を構成するスピン $\frac{1}{2}$ の粒子)

ボソン  
(力を運ぶスピン1の粒子)

電荷で区別

mass →  $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$   
charge →  $2/3$   
spin →  $1/2$

u

up

c

charm

t

top

d

down

s

strange

b

bottom

e

electron

$\mu$

muon

$\tau$

tau

$\nu_e$

electron  
neutrino

$\nu_\mu$

muon  
neutrino

$\nu_\tau$

tau  
neutrino

g

gluon

$\gamma$

photon

Z

Z boson

W

W boson

H

Higgs  
boson

素粒子に質量を与える  
スピン0の粒子

?

QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS

# 3つのニュートリノは、どのように識別？

## - コインの表と裏 (SU(2) 二重項) -

ニュートリノは、物質に当たって弱い相互作用を受けると



つまり、これが、電子ニュートリノ、  
ミューニュートリノ、タウニュートリノの定義

- 電子に変わるニュートリノを電子ニュートリノ
- ミュー粒子に変わるニュートリノをミューニュートリノ
- タウ粒子に変わるニュートリノをタウニュートリノ

1960年代に名付けられた。

この分類を  
フレーバーと  
呼んでいる。



# フレーバーと質量の混合

- 3種類の荷電レプトン ( $e, \mu, \tau$ ): 質量でのみ識別可能
- 3種類のニュートリノ: 物質と相互作用することによって識別可能 = フレーバー

ニュートリノが質量を持つならば、フレーバーの固有状態と質量固有状態が同じである必要はない

$$|\nu_e\rangle = a|\nu_1\rangle + b|\nu_2\rangle + c|\nu_3\rangle,$$

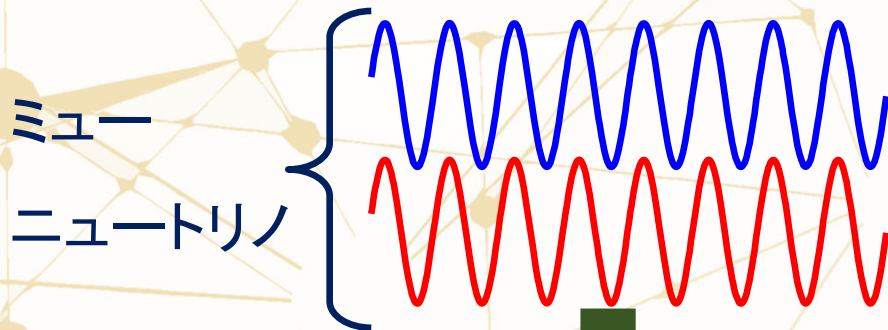
$\nu_1, \nu_2, \nu_3$ : 質量の固有状態

クォークでも同じことが起きている

$$\text{Partner of } |up\rangle = a|down\rangle + b|strange\rangle + c|bottom\rangle$$

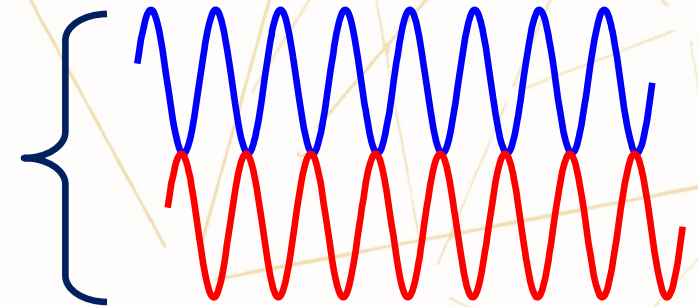
すると、ニュートリノはあるフレーバーの固有状態で作られるが、異なる速さをもつ複数の波として伝搬していく

2種類で説明すると



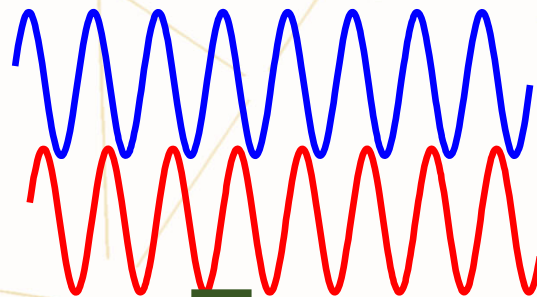
タウ

ニュートリノ

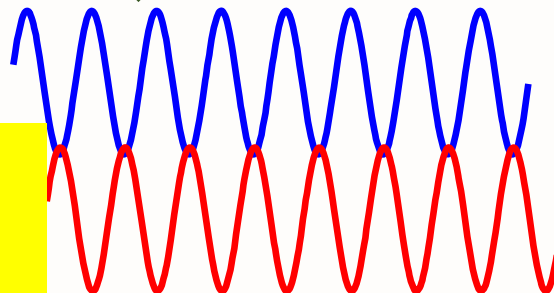


Aの波とBの波は異なる速さで進む

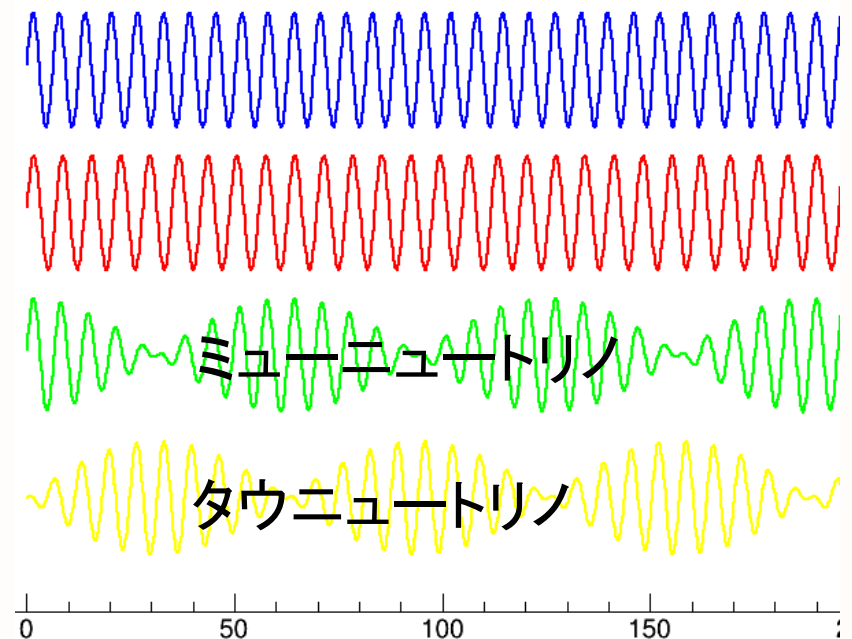
数百キロメー  
タ進むうちに



タウニュートリノ!



1998年  
スーパーカミオカンデ  
により発見



走った距離

# ニュートリノ振動

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \left| \langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle \right|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \Delta m^2 \frac{L}{4E} \right)$$

飛行距離

質量の2乗の差

エネルギー

混合角

ただし

- 電子の質量 : 0.5 MeV
- ミュー粒子の質量 : 106 MeV
- タウ粒子の質量 : 1780 MeV

なので、

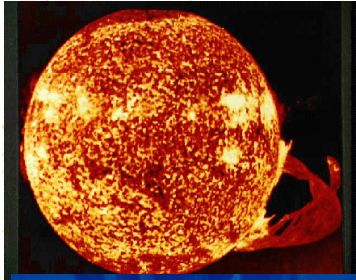
- ミューニュートリノは~110 MeV以上
- タウニュートリノは~ 3.5 GeV以上

のエネルギーを持っていないとフレーバー状態として観測されない。

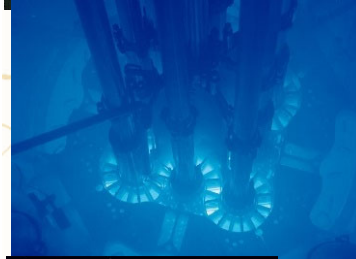
つまり、ニュートリノ振動で種類が変わると、“消失”することがある。

$$|\nu_\alpha\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle$$

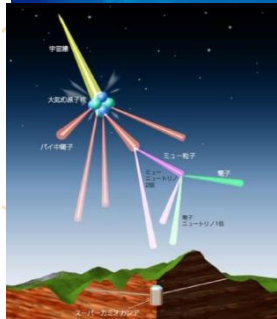
ニュートリノに質量があることが1998年に発見された。  
現在、その大きさはどこまでわかっている？



Sun



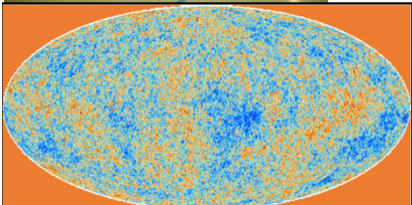
nuclear  
reactor



atmospheric



accelerator



cosmological observation

$$\triangleright m_2^2 - m_1^2 = 7.53 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\triangleright |m_3^2 - m_2^2| = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\triangleright m_1 + m_2 + m_3 < 0.180 \text{ eV (95% 信頼度)}$$



$$m_1, m_2, m_3 \lesssim 74 \text{ meV}$$

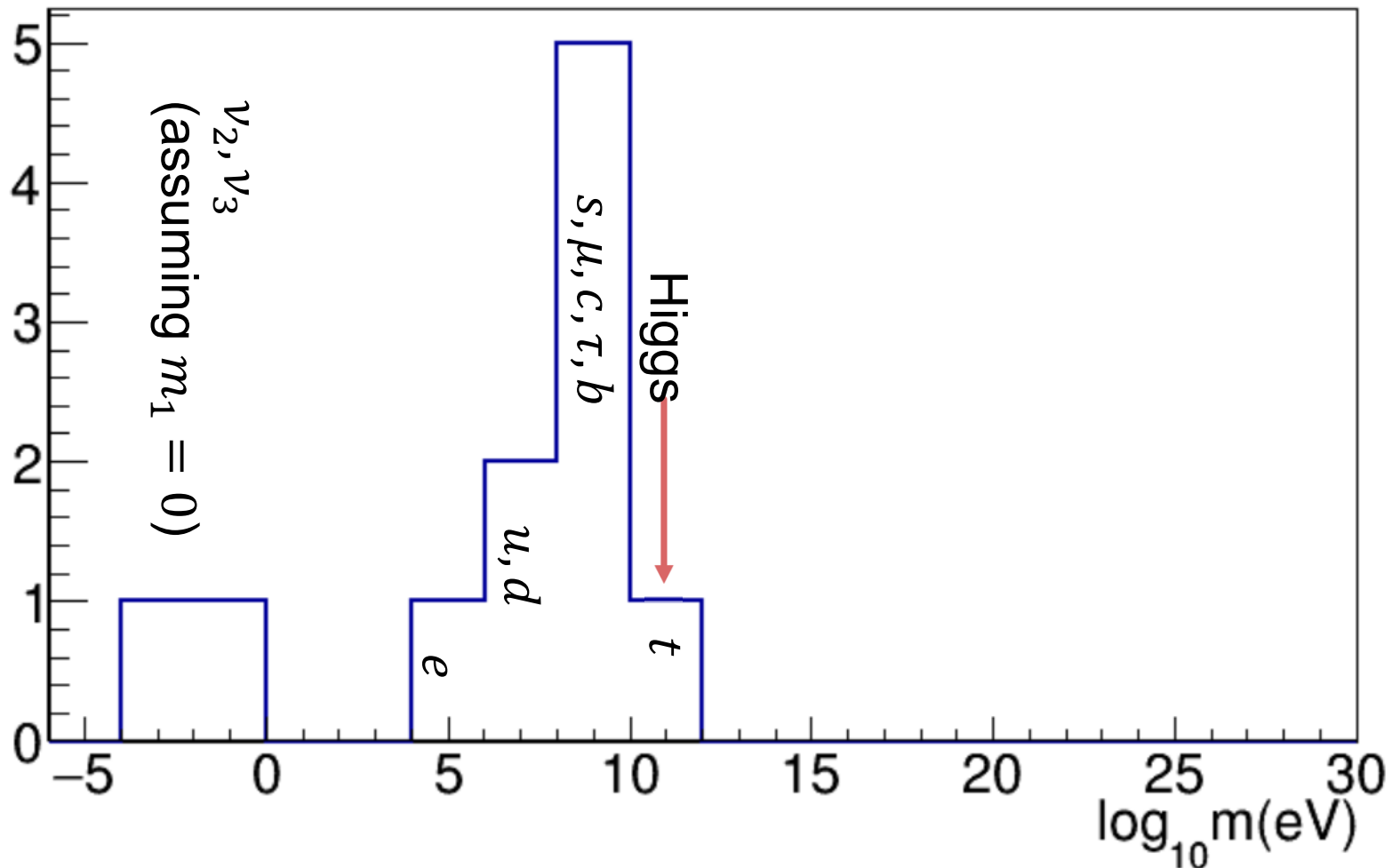
電子の質量の約1/10,000



# ちょっと夢想

The background features a complex network of thin gold lines and dots of varying sizes, creating a web-like or molecular structure. A horizontal bar at the bottom is divided into three segments: red, yellow, and green.

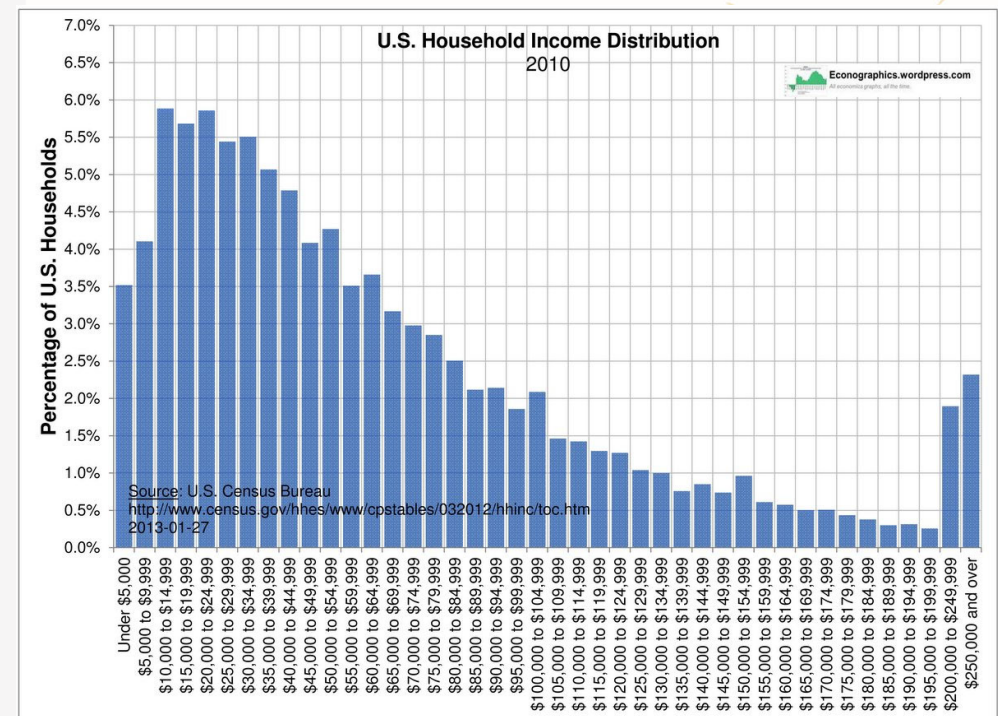
# フェルミオンの質量の分布(横軸対数で)



# 対数正規分布

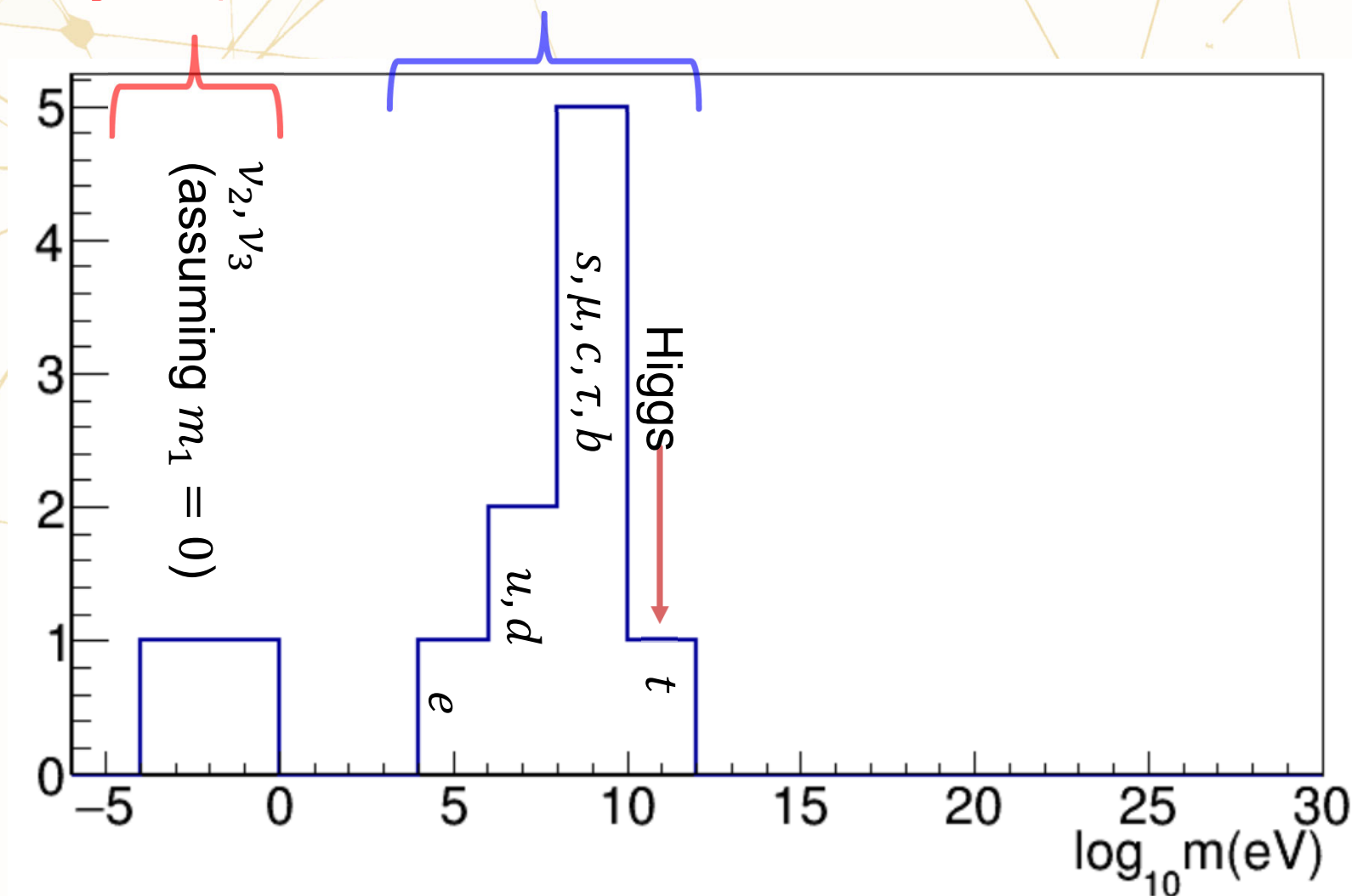
- Wikipedia, “A log-normal process is the statistical realization of the **multiplicative product of many independent random variables**, each of which is positive.”
- 例：個人の年収、油田の埋蔵量、感染爆発時の感染者数
- それぞれの人が収入を何倍かに増やす機会は $n$ 回。 $n$ は正規分布に従うが、得られる収入の分布は対数正規分布になる。

2010年のアメリカの世帯収入分布



# 素粒子の質量の起源は？

どうやって与えられた？ 真空中に凝縮した  
ヒッグス場との相互作用



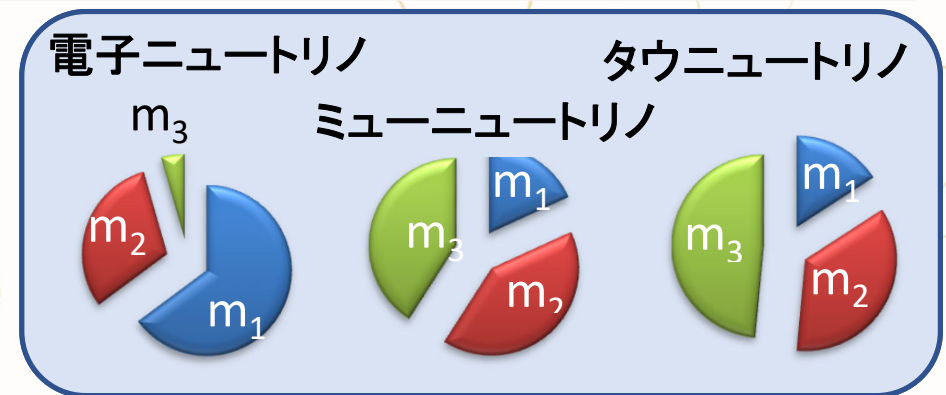
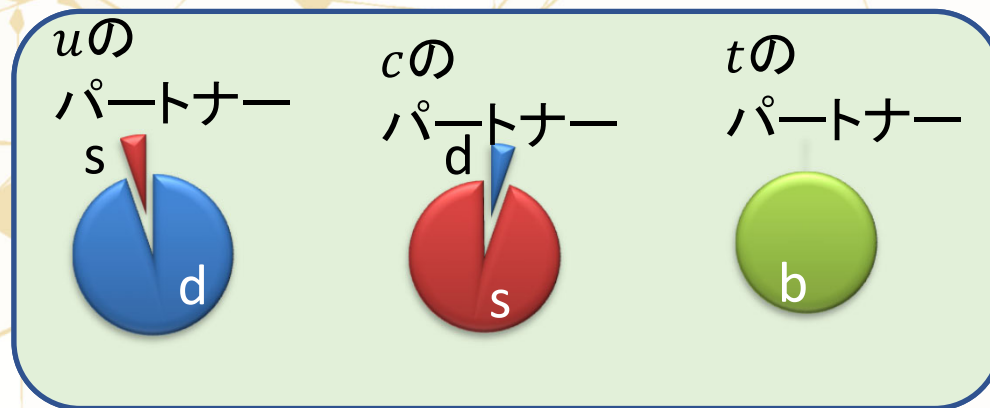


# フレーバーと質量の混合. これは何を意味している？

クォーク：アップタイプとダウンタイプで弱二重項  
レプトン：荷電レプトンとニュートリノで弱二重項



質量の固有状態と一致せず



$$\begin{pmatrix} \text{flavor}_1 \\ \text{flavor}_2 \\ \text{flavor}_3 \end{pmatrix} = U_{3 \times 3} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix}$$

クォーク: キャビボ小林益川行列

$$U_{CKM} = \begin{pmatrix} 0.9742 & 0.2243 & 0.0039 \\ 0.218 & 0.997 & 0.042 \\ 0.0081 & 0.04 & 1.02 \end{pmatrix}$$

レプトン: ポンテコルボ牧中川坂田行列

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 0.823 & 0.55 & 0.148 \\ -0.465 & 0.50 & 0.73 \\ 0.32 & -0.670 & 0.67 \end{pmatrix}$$

# フレーバーと質量の混合. これは何を意味している？

クォーク: アップタイプとダウンタイプで弱二重項  
レプトン: 荷電レプトンとニュートリノで弱二重項

質量の固有状態と一致せず



$$\begin{pmatrix} \text{flavor}_1 \\ \text{flavor}_2 \\ \text{flavor}_3 \end{pmatrix} = U_{3 \times 3} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix}$$

クォーク: キャビボ小林益川行列

$$U_{CKM} = \begin{pmatrix} 0.9742 & 0.2243 & 0.0039 \\ 0.218 & 0.997 & 0.042 \\ 0.0081 & 0.04 & 1.02 \end{pmatrix}$$

レプトン: ポンテコルボ牧中川坂田行列

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 0.823 & 0.55 & 0.148 \\ -0.465 & 0.50 & 0.73 \\ 0.32 & -0.670 & 0.67 \end{pmatrix}$$

クォークとレプトンの間のある種の対称性を仮定した大統一理論の予言

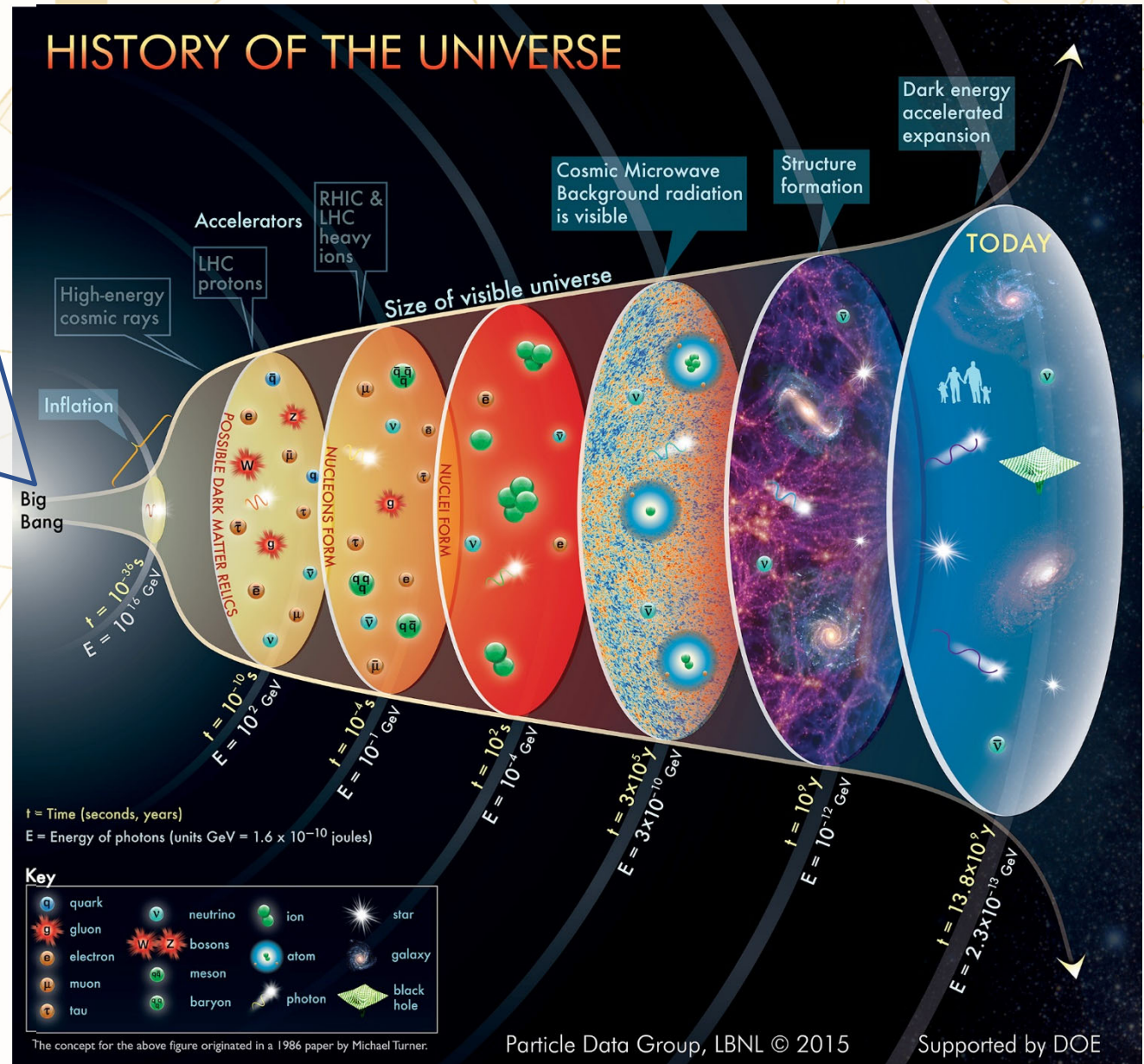
$$U_{CKM} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

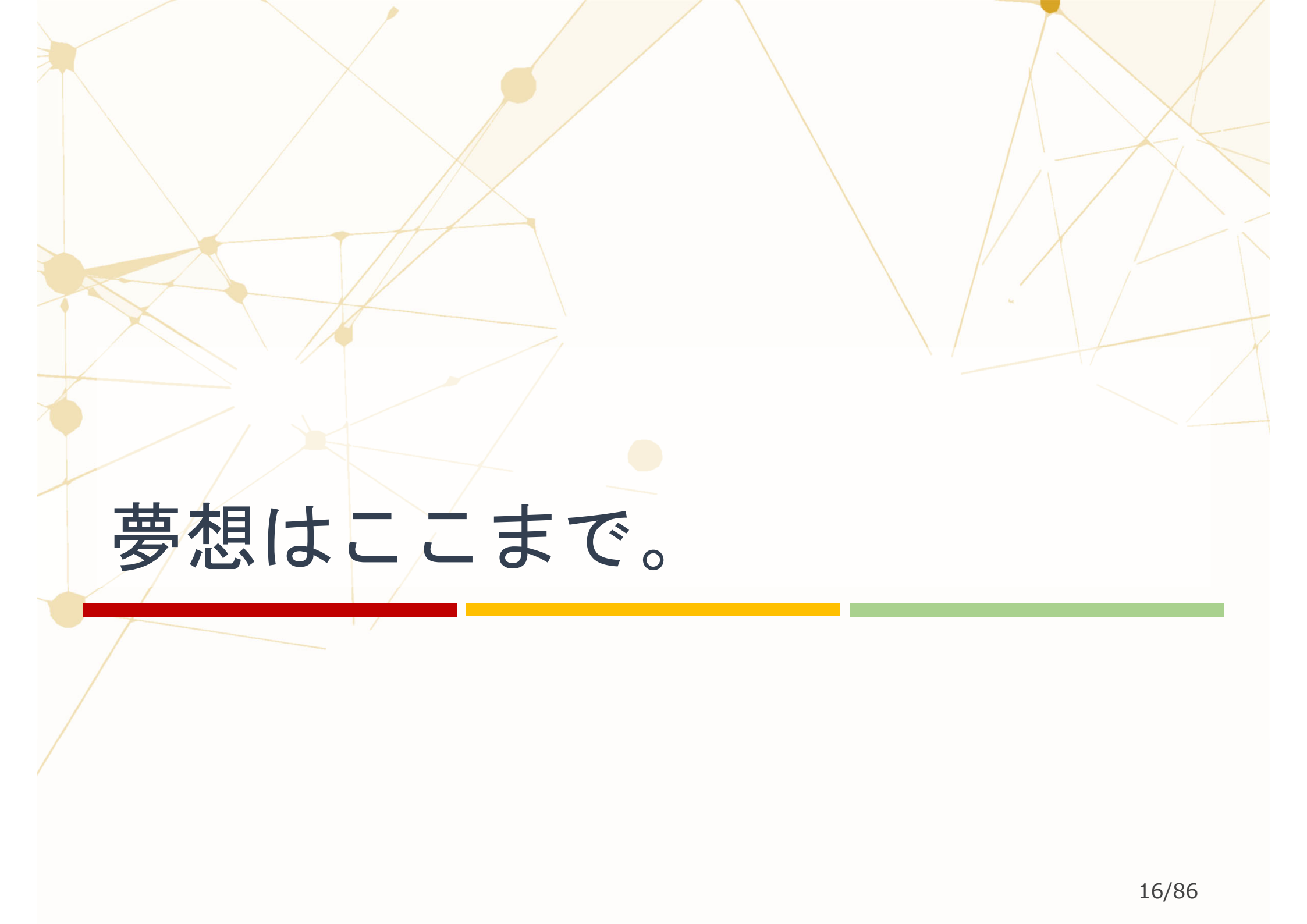
$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} \sqrt{2/3} & \sqrt{1/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/6} & -\sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.816 & 0.577 & 0 \\ -0.408 & 0.577 & 0.707 \\ 0.408 & -0.577 & 0.707 \end{pmatrix}$$

Higgsの性質、  
フェルミオンの質  
量、4つの相互作  
用の強さ、いつど  
うやって決まっ  
た？

インフレーション  
の前？最中？  
対数正規分布に  
なりそうな指数関  
数的なプロセ  
ス？？？

何らかの対称性が  
微妙に破れたの  
が今の混合行  
列？





夢想はここまで。

---



# 三世代混合行列と小林-益川模型

$$\begin{pmatrix} \text{電子}\nu \\ \text{ミュー}\nu \\ \text{タウ}\nu \end{pmatrix} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{混合行列}}}{U} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix}$$



## 小林-益川模型

- 混合行列は、3世代以上の場合には、複素成分を持つことができる。
- 虚数成分は、**粒子と反粒子では逆符号**に影響  
複素位相を $\delta$ として

**粒子**  $\exp\{-i(Et - px - \delta)\}$

**反粒子**  $\exp\{+i(|E|t + px + \delta)\}$

**CP対称性を破る！**

\* CP対称性：荷電(Charge)変換と鏡像(Parity)変換を同時に施した時の物理法則の対称性



# 三世代混合によるCP対称性の破れの大きさ

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{pmatrix}$$

オイラーの角度を用いた混合行列の一般的な表し方

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

$(c_{ij} = \cos \theta_{ij}, s_{ij} = \sin \theta_{ij})$

- $\delta_{CP}$  は、どこに位相を持たせるか定義によって値が変わる。
- 定義によらず三世代混合によるCP対称性の破れの大きさを表す量：

$$\text{Jarlskog不変数 } J_{CP} \equiv \text{Im}(U_{\mu 3} U_{e 3}^* U_{e 2} U_{\mu 2}^*) = \frac{1}{8} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \cos \theta_{13} \sin \delta_{CP}$$

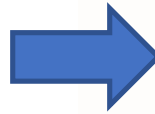
$$\text{Quark } J_{CP}^{CKM} \approx 3 \times 10^{-5}$$

$$\text{Lepton } J_{CP}^{PMNS} \approx 0.033 \sin \delta_{CP}$$

まだ、この値を人類は知らない

- レプトンセクターにおける三世代混合によるCP対称性の破れは、クォークに比べて2~3桁大きい可能性大

# 国際会議(NOW 1998)での 西川さんのスライド



**CP (lepton)** : only in  $\nu$  osci.  
: ~~same~~ MNS

only if  $\left\{ \begin{array}{l} \Delta m_{12}^2 \sim \Delta m_{atm}^2, \Delta m_{23}^2 \gg \Delta m_{12}^2 \\ \text{or} \\ \Delta m_{12}^2 \sim \Delta m_{23}^2 \end{array} \right.$

and  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13} \gg 0$

◦ Must be appearance

disapp. amp.  $V_{e1}^* V_{e1}$  etc. : Real

◦  $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2 \simeq \Delta m_{13}^2$

$\Downarrow$

$m_3 \leftrightarrow m_1, m_3 \leftrightarrow m_2$  contribute  
@ given  $E/L$

Unitarity

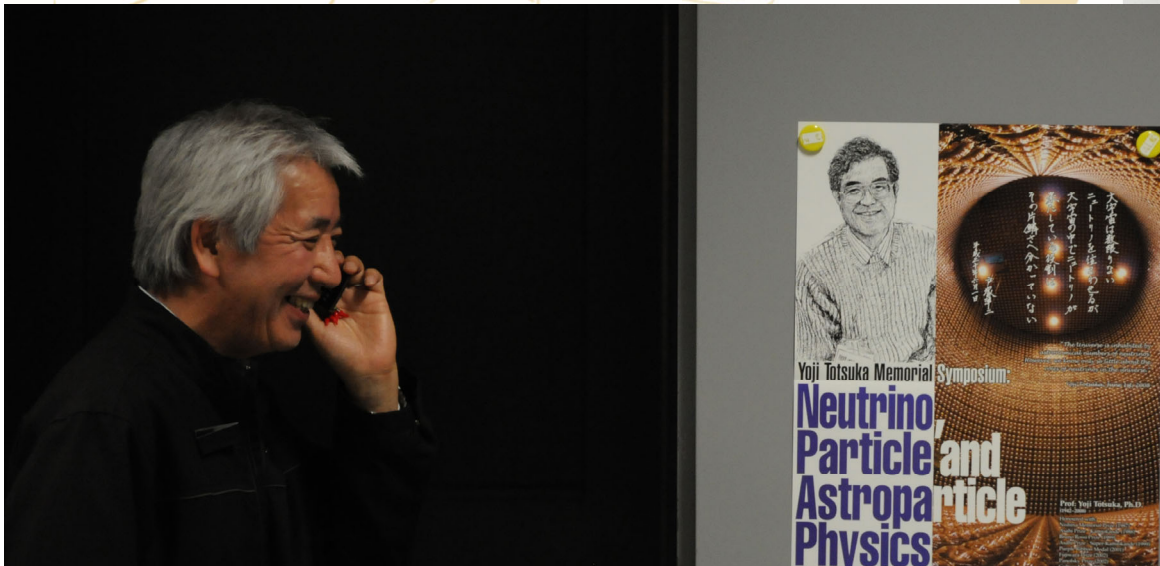
$$V_{e1}^* V_{\mu 1} + V_{e2}^* V_{\mu 2} + V_{e3}^* V_{\mu 3} = 0$$

$$\Rightarrow |V_{e3}^* V_{\mu 3}|^2 : \text{real}$$

Only in accelerator Exp.

◦  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13} \neq 0$

$$\Rightarrow \begin{array}{l} \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau \\ \nu_\mu \rightarrow \nu_e \end{array} \quad \text{with same } \Delta m^2$$





## “消失(disappearance)”

あるフレーバーのニュートリノが、そのフレーバーとしては観測されなくなること

## “出現(appearance)”

別のフレーバーとして観測されること

混合行列のユニタリー性から、消失確率はニュートリノと反ニュートリノで同じになる。(同じでなかったらCPT定理が破れる)

2種類のうち、どちらのニュートリノに変化するかの割合は、ニュートリノと反ニュートリノで異なっても良い  $\Rightarrow$  CP対称性の破れ

**CP (lepton)** : only in  $\nu$  osci.

: ~~same~~ MNS

only if  $\left\{ \begin{array}{l} \Delta m_{12}^2 \sim \Delta m_{atm}^2, \Delta m_{23}^2 \gg \Delta m_{12}^2 \\ \text{or} \\ \Delta m_{12}^2 \sim \Delta m_{23}^2 \end{array} \right.$

and  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13} \gg 0$

◦ Must be appearance

disapp. amp.  $V_{e1}^* V_{e1}$  etc. : Real

◦  $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2 \simeq \Delta m_{13}^2$

$\Downarrow$

$m_3 \leftrightarrow m_1, m_3 \leftrightarrow m_2$  contribute @ given  $E/L$

Unitarity

$$V_{e1}^* V_{\mu 1} + V_{e2}^* V_{\mu 2} + V_{e3}^* V_{\mu 3} = 0$$

$$\Rightarrow |V_{e3}^* V_{\mu 3}|^2 : \text{real}$$

Only in accelerator Exp.

◦  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13} \neq 0$

$$\Rightarrow \nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$$

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$$

with same  $\Delta m^2$

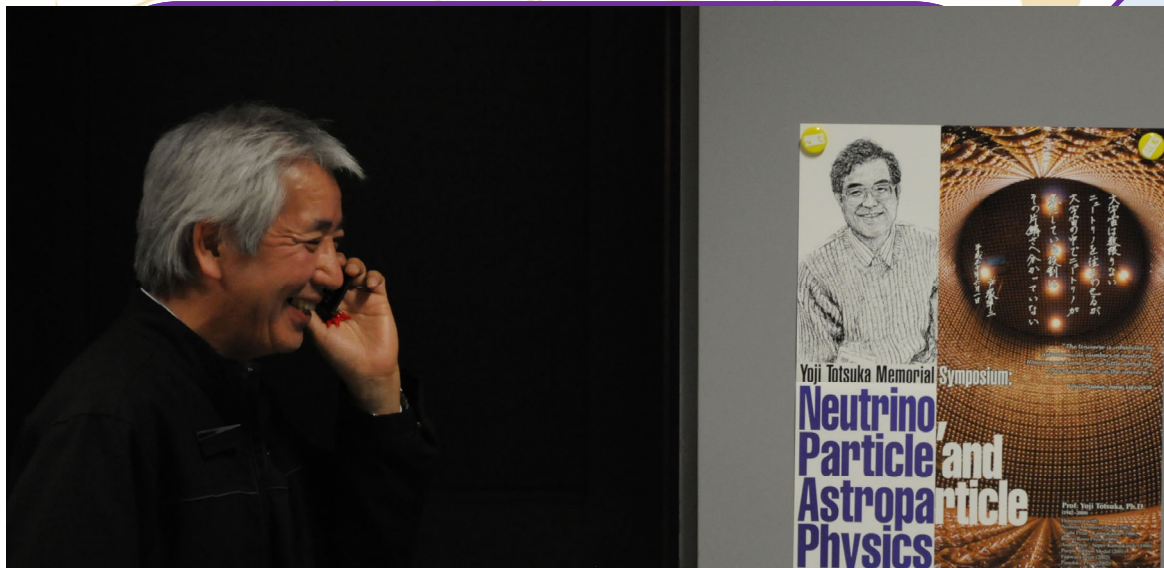
“消失(disappearance)”

あるフレーバーのニュートリノ

西川氏と戸塚氏がCP測定のために加速器

ニュートリノ実験の次の目標としてミュー  
ニュートリノから電子ニュートリノの出現を  
測定することを提案

CP (lepton) : only in  $\nu$  osc.  
: ~~from~~ MNS



$$\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{23}^2 \simeq \Delta m_{13}^2$$

$\Downarrow$

$m_3 \leftrightarrow m_1, m_3 \leftrightarrow m_2$  contribute  
@ given  $E/L$

Unitarity

$$V_{e1}^* V_{\mu 1} + V_{e2}^* V_{\mu 2} + V_{e3}^* V_{\mu 3} = 0$$

$$\Rightarrow |V_{e3}^* V_{\mu 3}|^2 : \text{real}$$

Only in accelerator Exp.

$$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13} \neq 0$$

$$\Rightarrow \begin{matrix} \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau \\ \nu_\mu \rightarrow \nu_e \end{matrix} \quad \text{with same } \Delta m^2$$

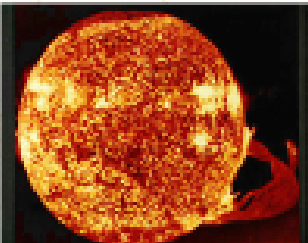


# 加速器長基線ニュートリノ振動実験 ～ 現状と挑戦 ～

---



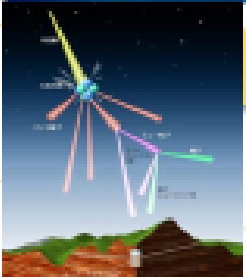
ニュートリノに質量があることが1998年に発見された。  
現在、その大きさはどこまでわかっている？



Sun



nuclear  
reactor



atmospheric



accelerator

$$\triangleright m_2^2 - m_1^2 = 7.53 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\triangleright |m_3^2 - m_2^2| = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\triangleright m_1 + m_2 + m_3 < 0.180 \text{ eV (95% confidence level)}$$



$$m_1, m_2, m_3 \lesssim 74 \text{ meV}$$

~1/10,000 of electron mass

エネルギー1 GeVだと約500 kmで振動が最大に  
原子炉からの~5 MeVの反電子ニュートリノであれば2.5 kmで済むが、  
CPV測定はできない。

# ミューニュートリノビームの作り方

弱い相互作用の特徴(A-V相互作用)のため、パイ中間子は質量の軽い電子と電子ニュートリノの対にはほとんど壊れない。

陽子

原子核

パイ(+)粒子

ミューニュートリノ

パイ(-)粒子

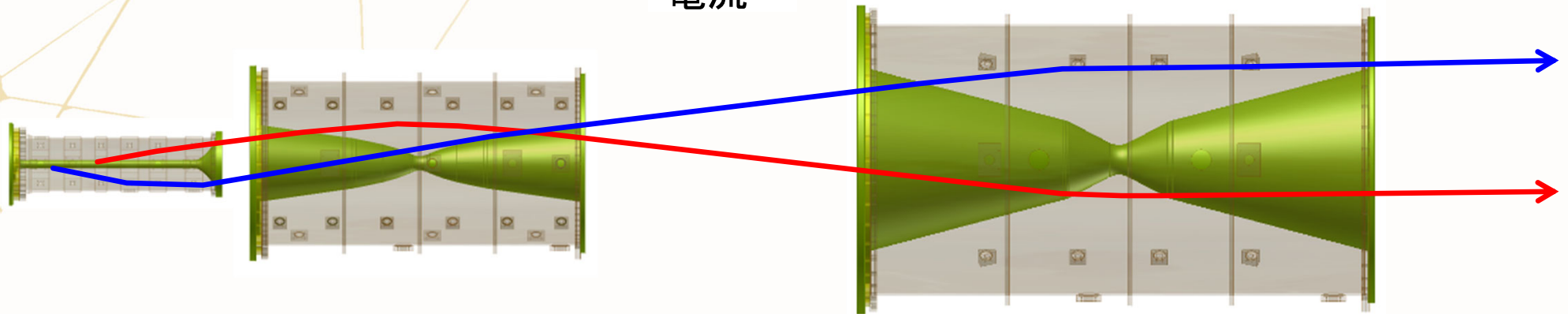
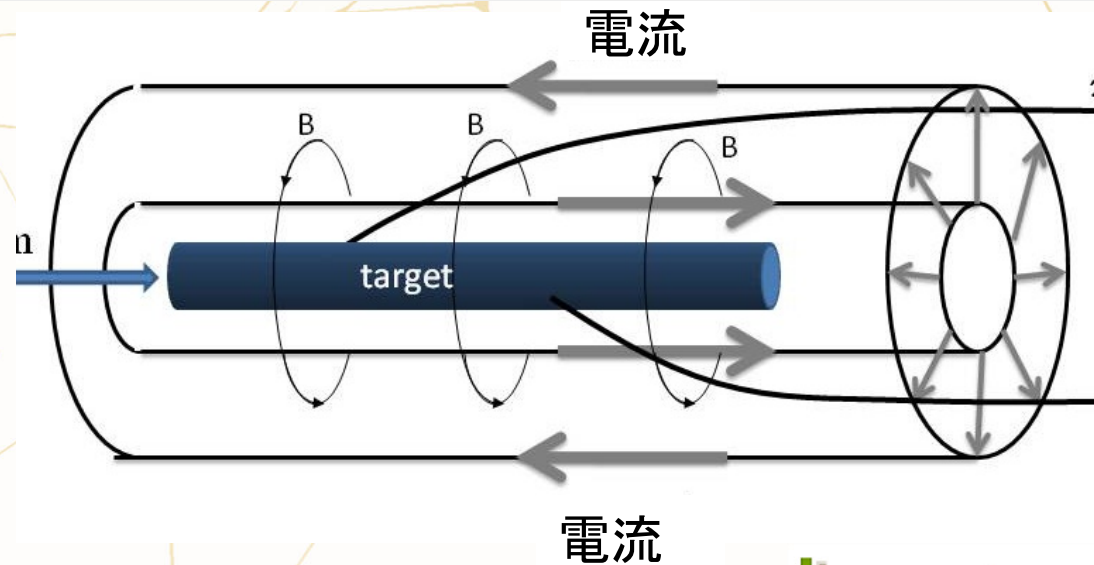
反ミューニュートリノ

~100メートル

数百 MeVから数 GeVのニュートリノを生成  
そのままと、ニュートリノは四方八方に飛び散ってしまう

# 電磁ホーン：パイ粒子を収束させるレンズ

数百キロアンペアの電流を瞬間的に流して磁場を発生



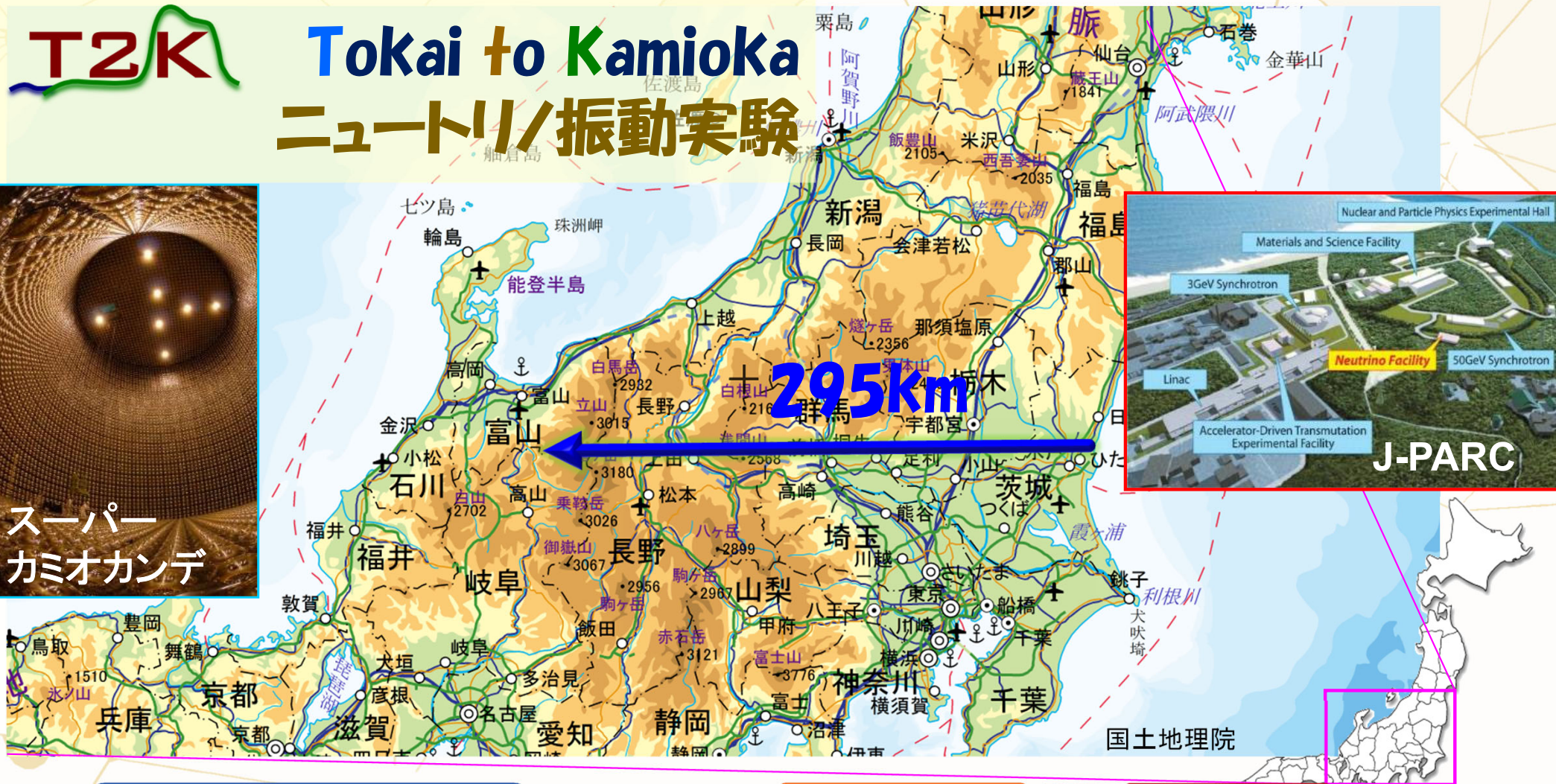
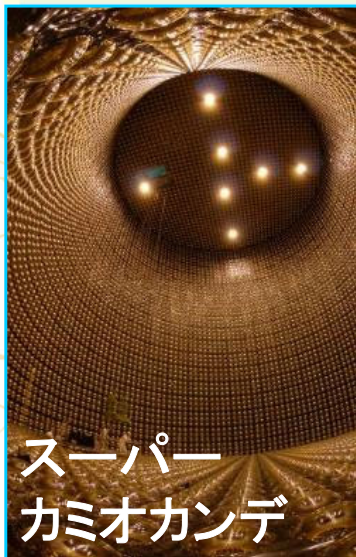
- ✓ パイ(+)中間子を収束させるとミューニュートリノビーム
- ✓ パイ(-)中間子を収束させると反ミューニュートリノビームを作り出せる。





**T2K**

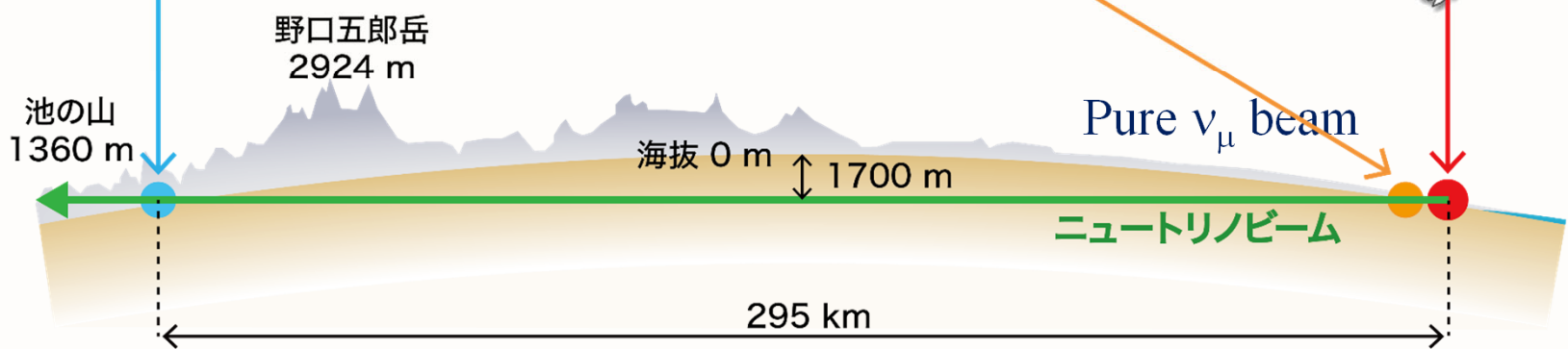
# Tokai to Kamioka ニュートリノ振動実験



スーパーカミオカンデ

前置検出器

J-PARC





**T2K**

# Tokai to Kamioka ニュートリノ振動実験



スーパー  
カミオカンデ

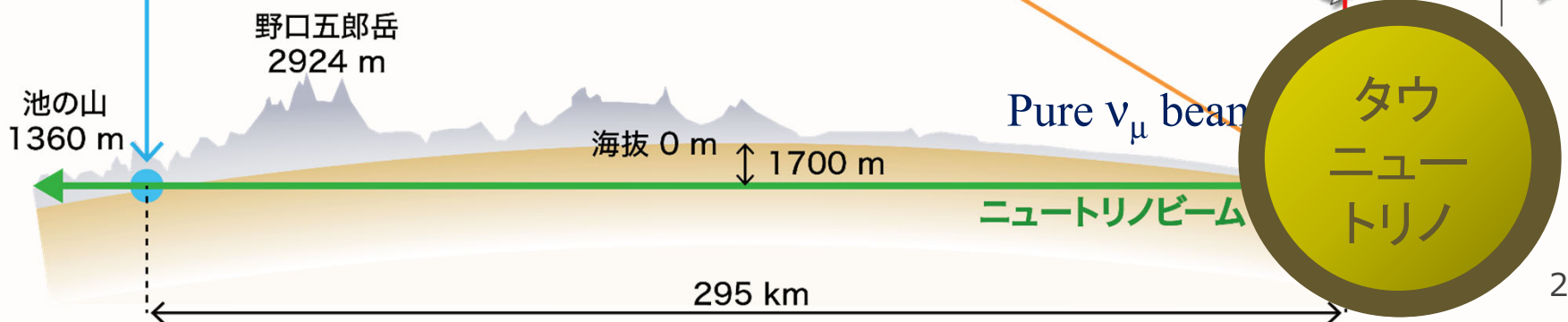


**J-PARCで作ったミュニュートリノの大部分が  
タウニュートリノになって、  
スーパーカミオカンデを素通りする。**

スーパーカミオカンデ

前置検出器

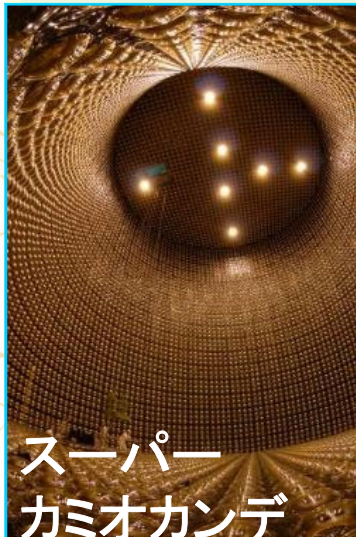
J-PARC





**T2K**

# Tokai to Kamioka ニュートリノ振動実験



スーパー  
カミオカンデ



**T2Kでは稀に電子ニュートリノになって、  
スーパーカミオカンデで捕まえられるのを探す。**

スーパーカミオカンデ

前置検出器

J-PARC

池の山  
1360 m

野口五郎岳  
2924 m

海拔 0 m  
↑ 1700 m

Pure  $\nu_\mu$  beam

ニュートリノビーム

電子  
ニュー  
トリノ

295 km

29/86





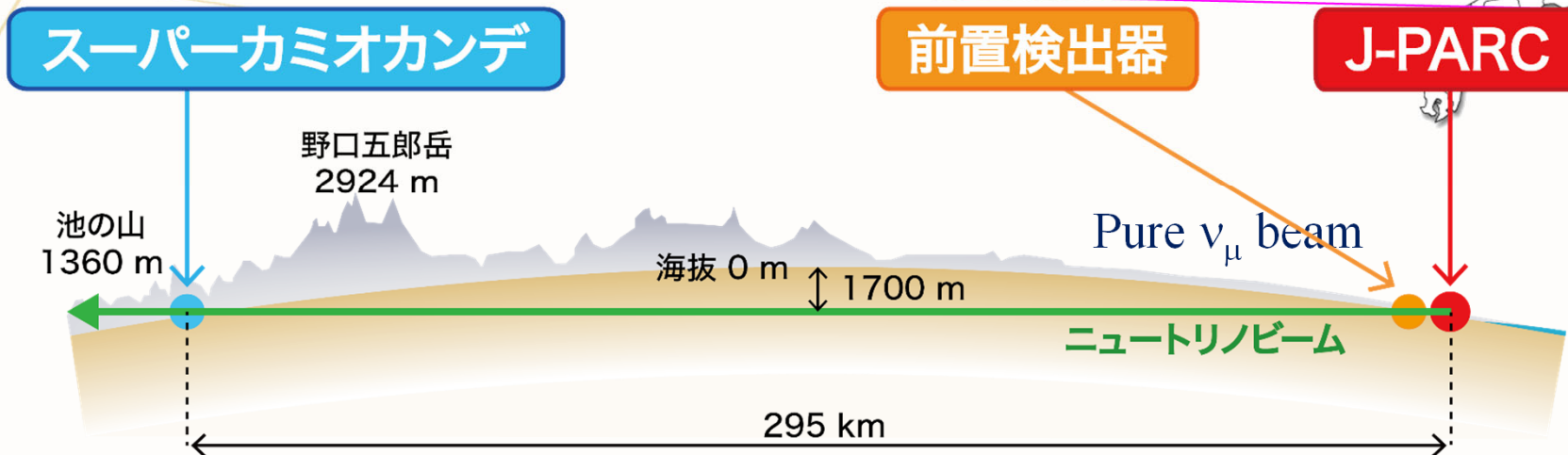
# Tokai to Kamioka ニュートリノ振動実験



スーパー  
カミオ



- 加速された1個の陽子から10個弱のニュートリノが生成
- そのうち、 $\sim 10^{-7}$  がスーパーカミオカンデを通過
- スーパーカミオカンデを通過したニュートリノは、 $10^{11}$  に1回  
くらはは反応して検出される
- つまり、1個のニュートリノをスーパーカミオカンデで観測する  
には、約 $10^{18}$  の加速陽子が必要





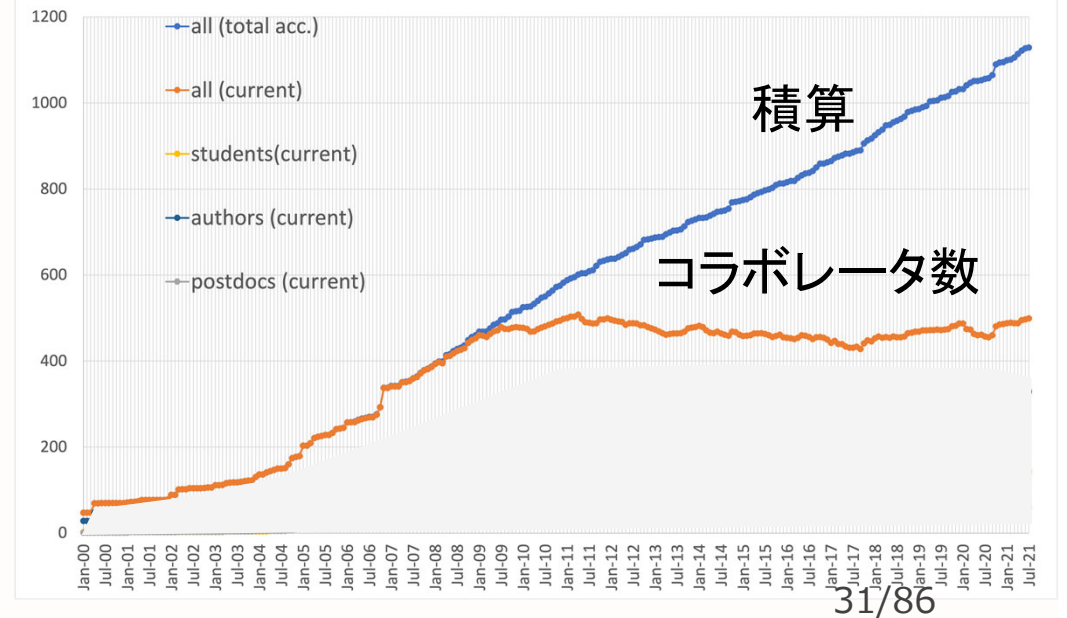
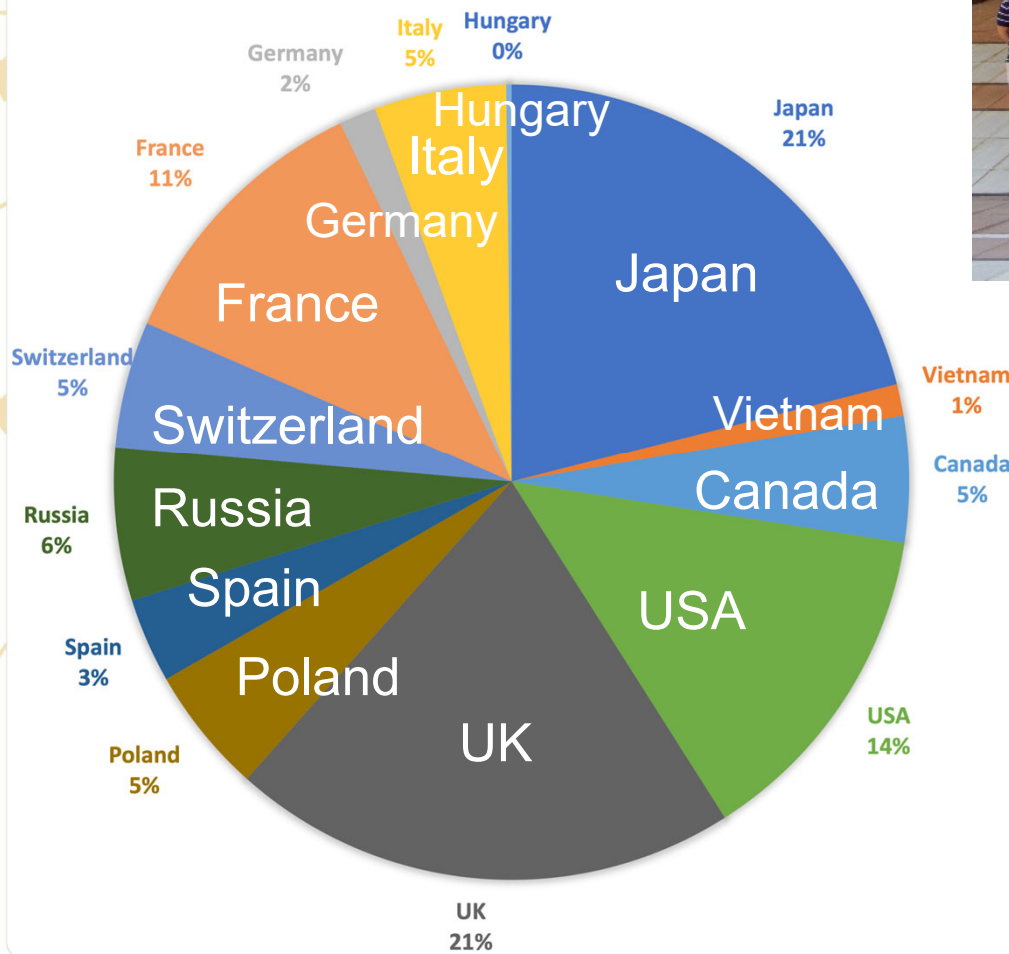
# The T2K Collaboration (2021)

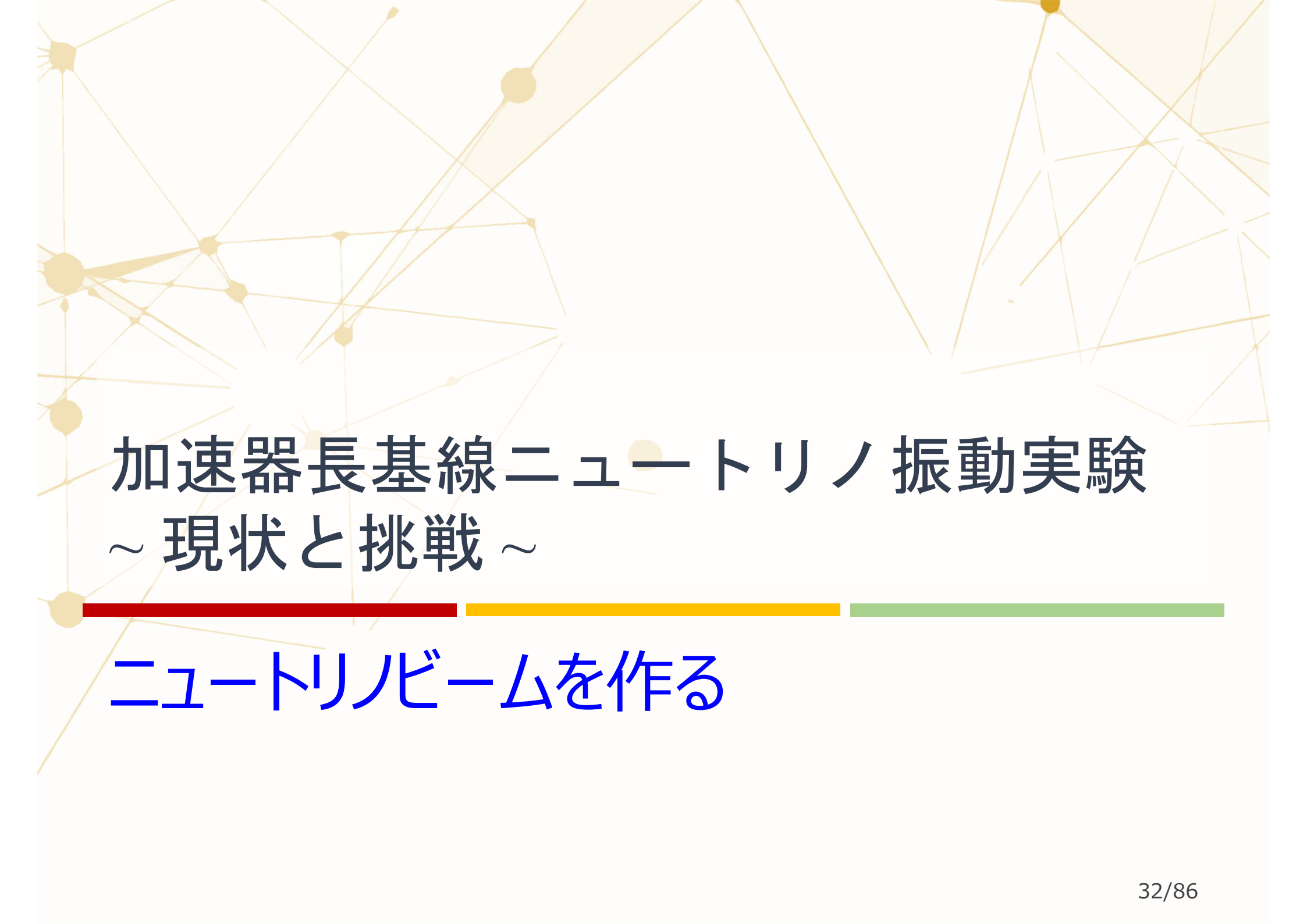


~470 members, 74 Institutes,  
13 countries



JULY 20





# 加速器長基線ニュートリノ振動実験 ～ 現状と挑戦 ～

---

ニュートリノビームを作る



Japan Proton  
Accelerator Research  
Complex : **J-PARC**

KEK/JAEA

400MeV  
Linac

3 GeV RCS

2.48秒に一度、パルスとして取り出される

Neutrino Beams  
(to Kamioka)

Materials and Life  
Experimental Facility

30GeV MR

Hadron Exp.  
Facility



# 大強度フロンティア加速器

毎秒  $\sim 10^{14}$  個の陽子を加速

瞬間的には $\sim 60$ アンペアに対応する陽子が真空パイプの中を流れる。

陽子は、約30万回、リングを回る間に加速

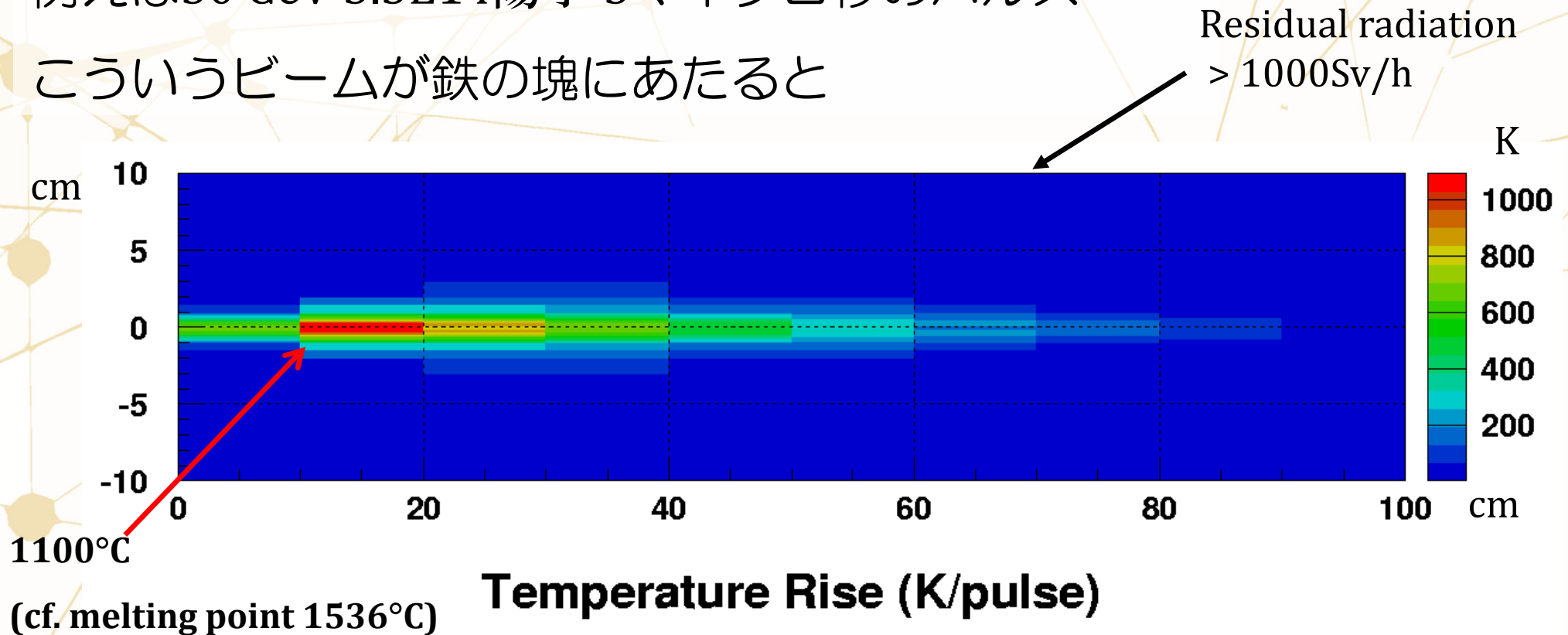
- お互いに働く反発力（空間電荷効果）
  - ビームパイプ中の鏡像電荷からの力（ビームパイプのデコボコが問題）
  - ビームを制御する磁場の誤差が集積して、不安定性が増大。特に周回と整数倍で一致すると共鳴
- これらを、如何に制御するか。

現在 ビーム強度 500キロワットを達成

# ニュートリノビームライン ～数百キロワットビームを使うということ

例えば50 GeV 3.3E14陽子 5マイクロ秒のパルス

こういうビームが鉄の塊にあたると



- ✓ 鉄よりも重い物質はたぶん溶ける
- ✓ 熱衝撃によるストレス  $\approx E\alpha\Delta T \approx 3 \text{ GPa}$  (cf. 耐力  $\sim 200 \text{ MPa}$ )  
チタンよりも重い物質は多分破壊される

# J-PARC ニュートリノビームライン

ニュートリノでCP対称性の破れが測れるかもと聞いた物理屋のあなた。  
ある日、「実験したいなら施設から作りなさい」と言われて海辺の松林を示された。

どうする？

欧米では、こんなやり方しない。

KEKニュートリノ・グループは(それまでそんな経験なかったけれど)、  
(さまざまなエキスパートにサポートされながら)やり遂げた。

土木設計、光学設計、放射線遮蔽、熱計算、応力計算、機械設計、制御などなど。

2010年頃までですが、ここでチームのみなさんと仕事できたことは私の誇りです。



# J-PARC ニュートリノビームライン

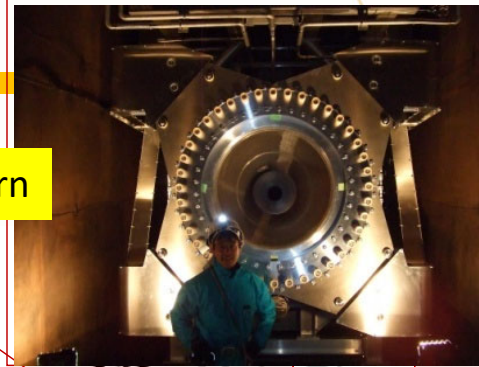
Muon monitors



Horn



Main Ring



target

炭素を風速約200m/sの  
ヘリウムで冷却

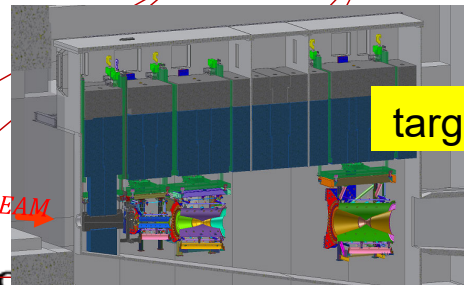


Near Detector

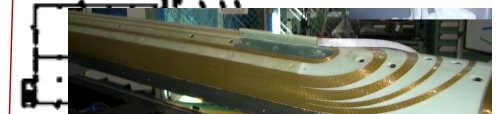


100m

target station



primary beamline



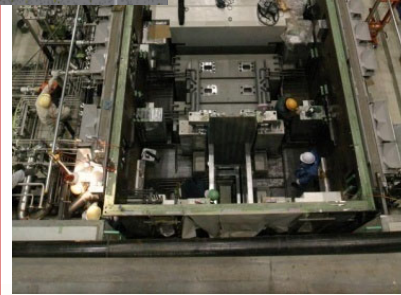
dump



decay volume

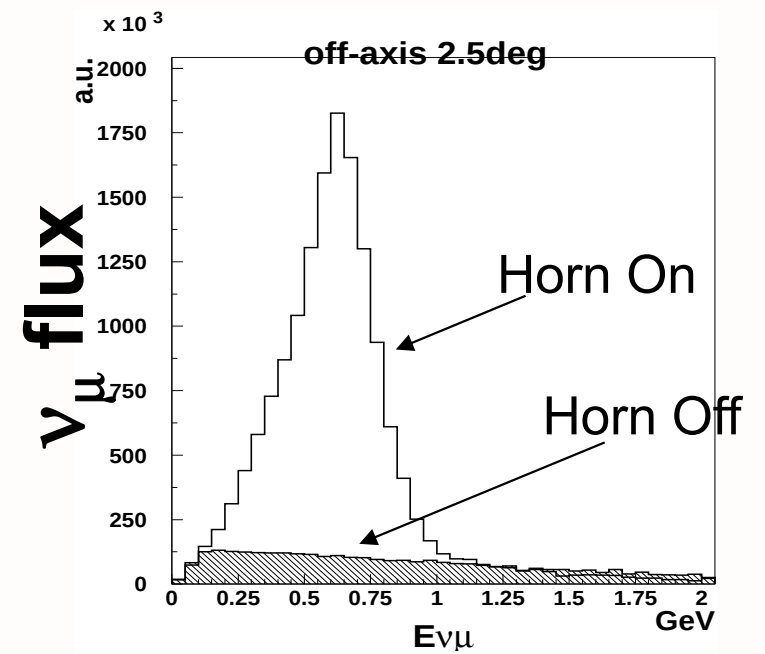
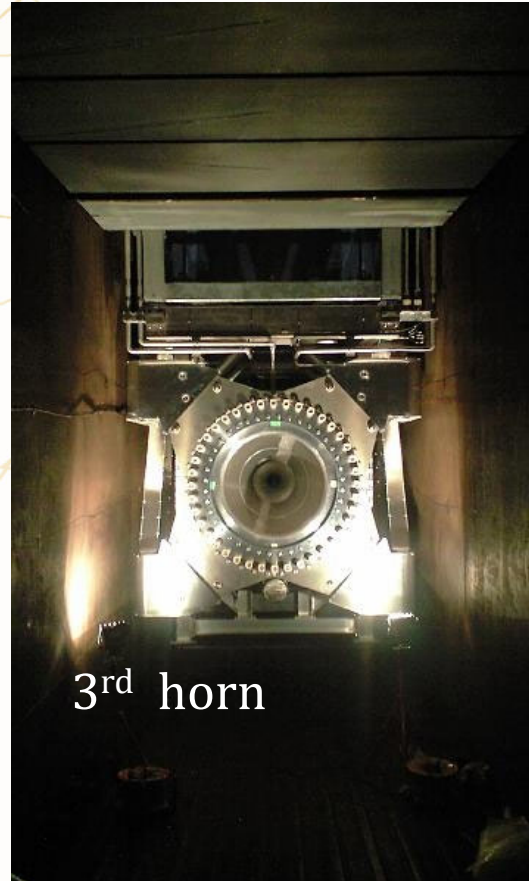
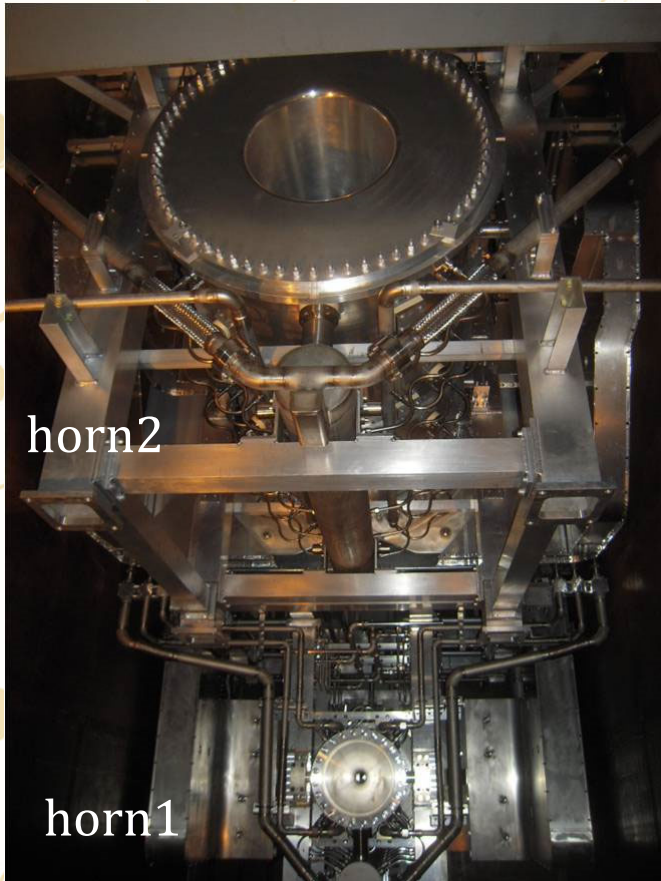


superconducting magnet





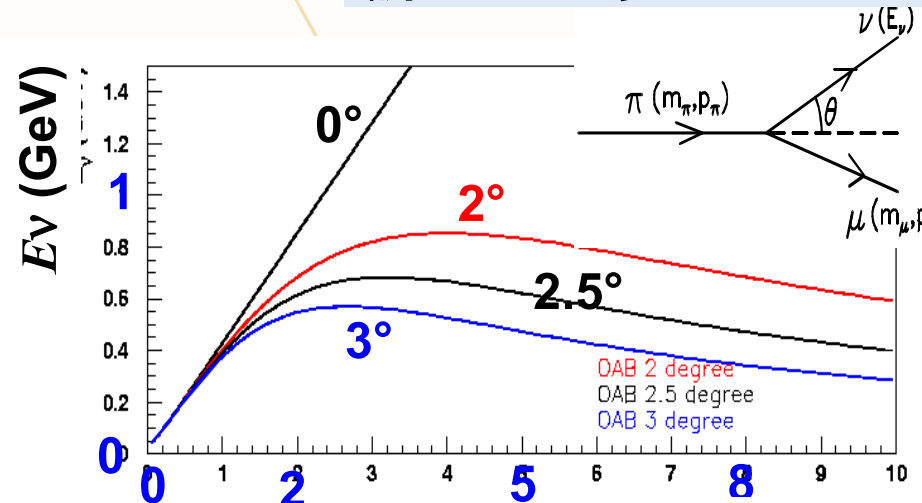
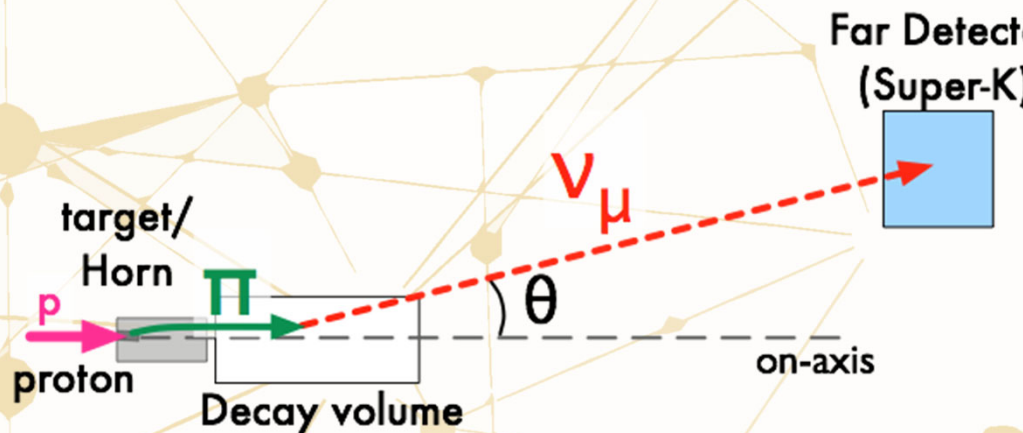
# T2K Horn system



# T2Kで新しく取り入れた“オフアクシス法”

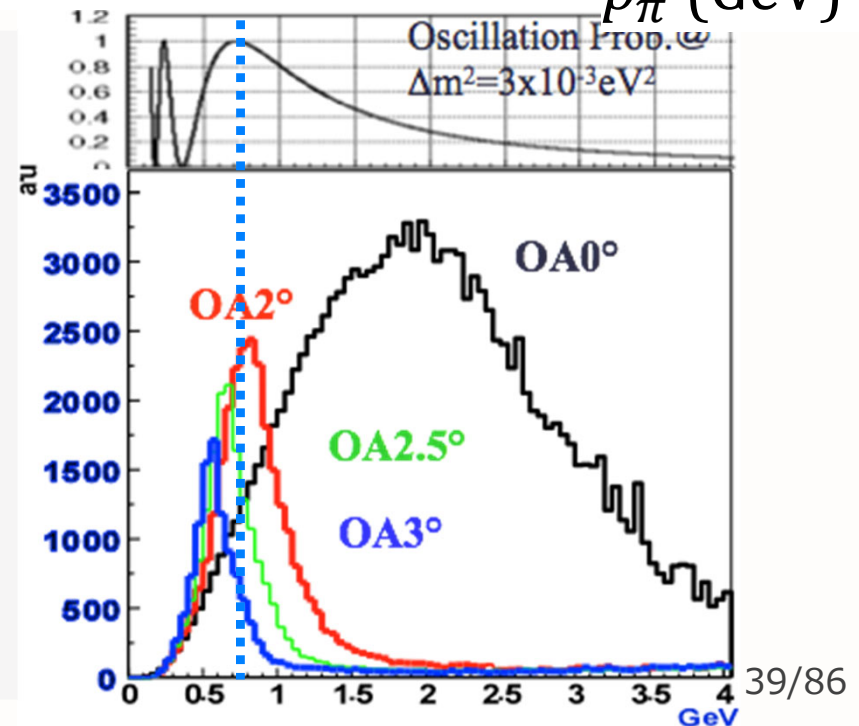
(Proposed in BNL-E889 Proposal)

ビームのずれの許容範囲を調べていて見つけたらしい

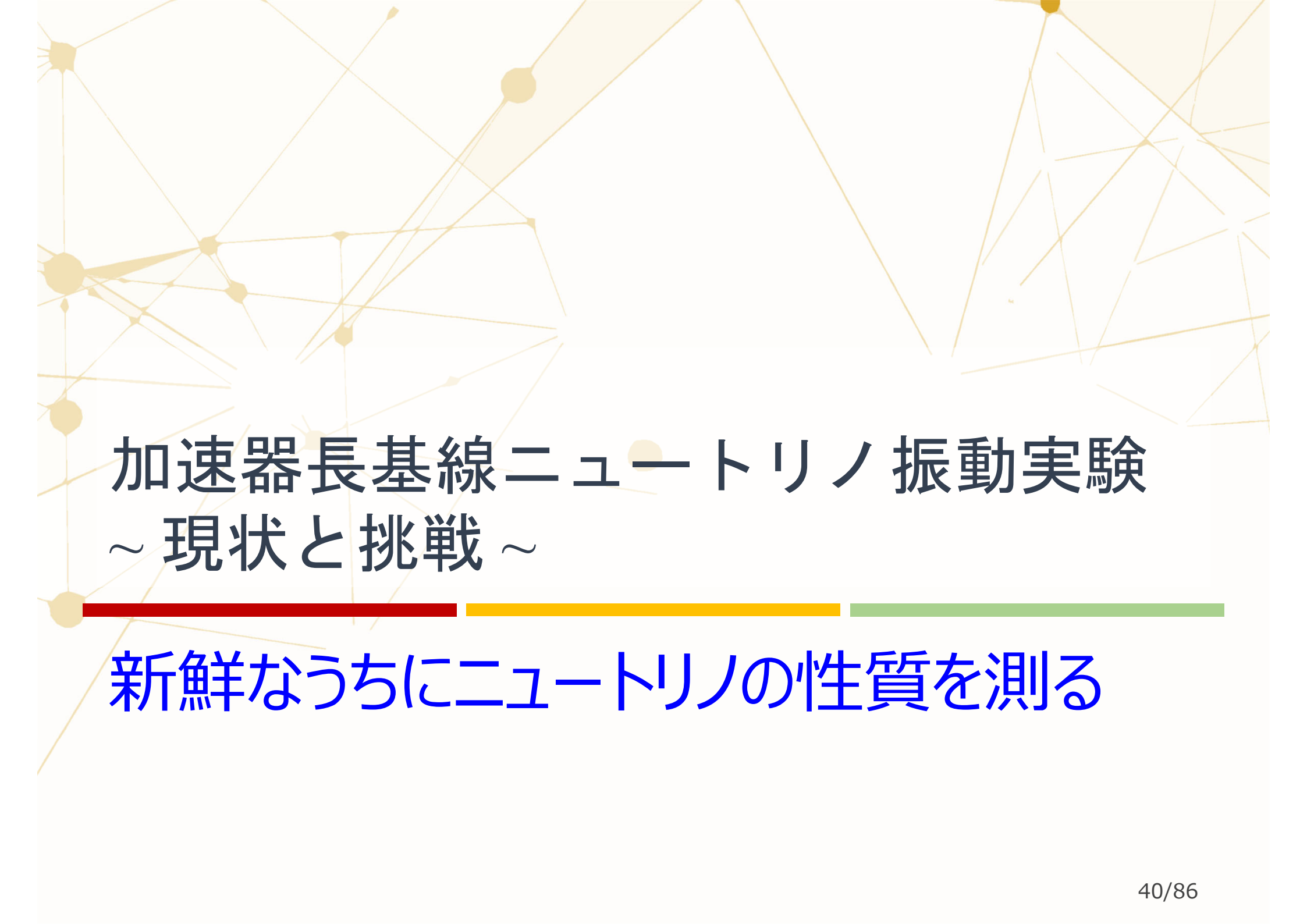


➤ ビームの中心軸をわざとずらす ⇒ 一定の崩壊角で生成したニュートリノがSKに届く ⇒ 親 $\pi$ 粒子のエネルギーによらず大体同じエネルギーのニュートリノ

- T2K off-axis angle : 2.5°
- SKで振動確率が最大になる0.6 GeVにピークをもつエネルギースペクトル
- 信号倍増、背景事象激減







# 加速器長基線ニュートリノ振動実験 ～ 現状と挑戦 ～

---

新鮮なうちにニュートリノの性質を測る

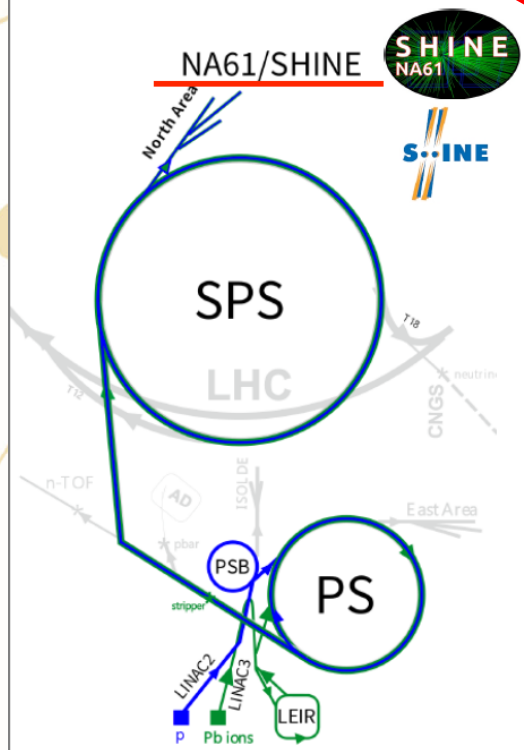
# ニュートリノのフラックス予想

## ミューニュートリノビームの作り方

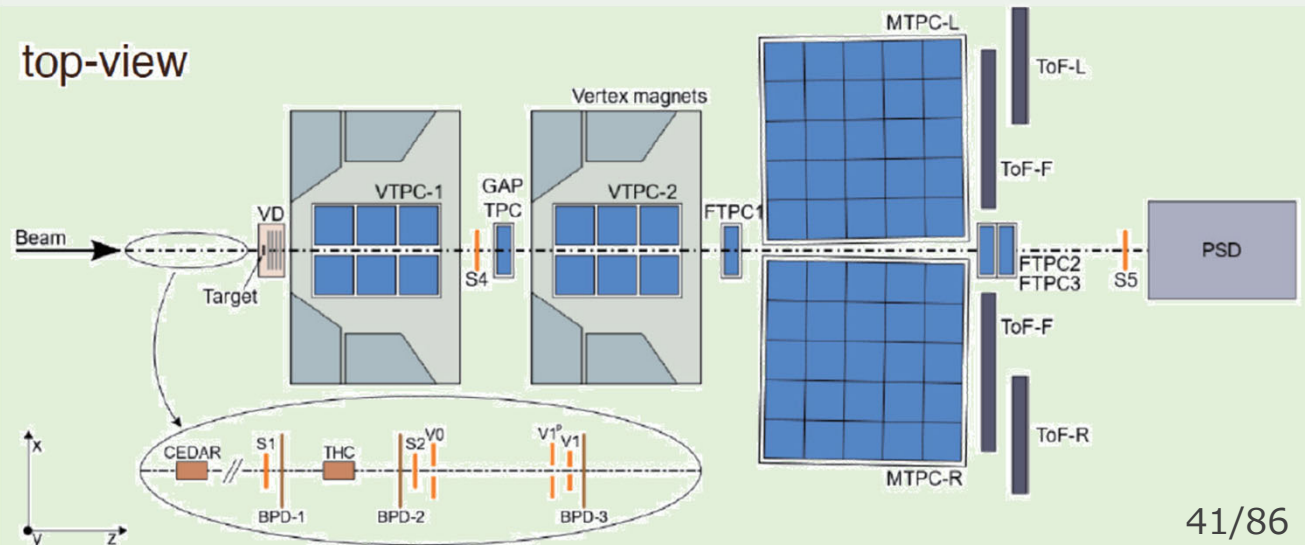
弱い相互作用の特徴(A-V相互作用)のため、パイ中間子は質量の軽い電子と電子ニュートリノの対にはほとんど壊れない。



コラボレータの一部が、CERN NA61/SHINE実験に参加してデータ取得



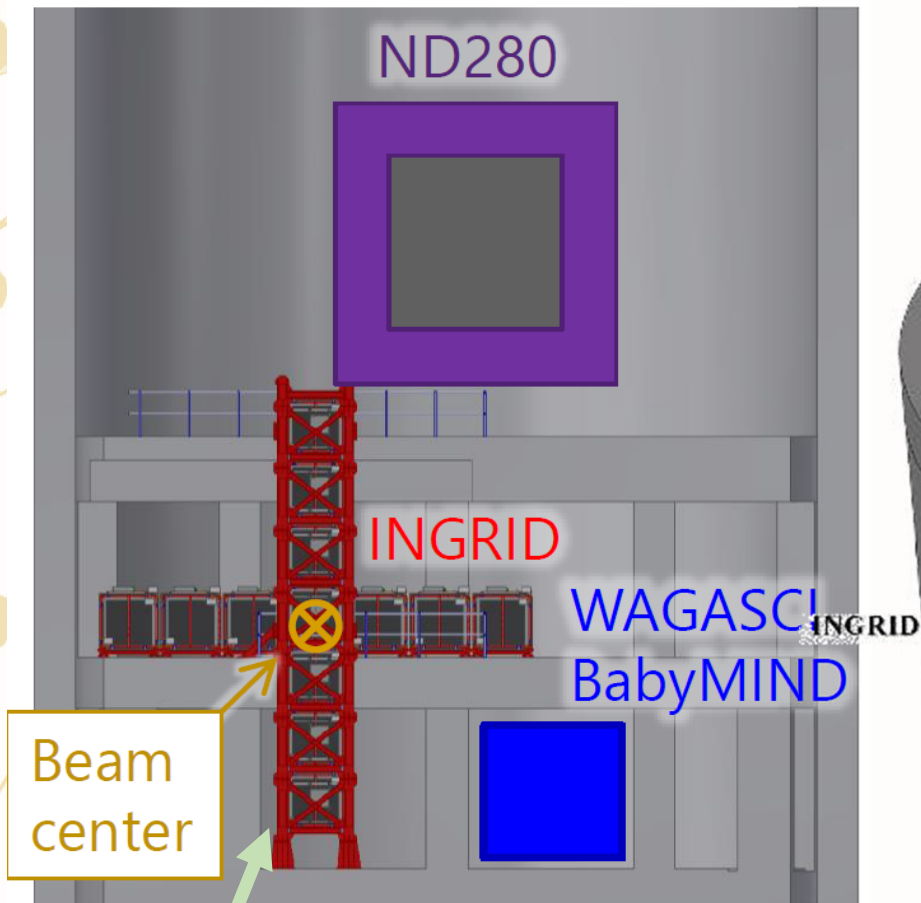
top-view



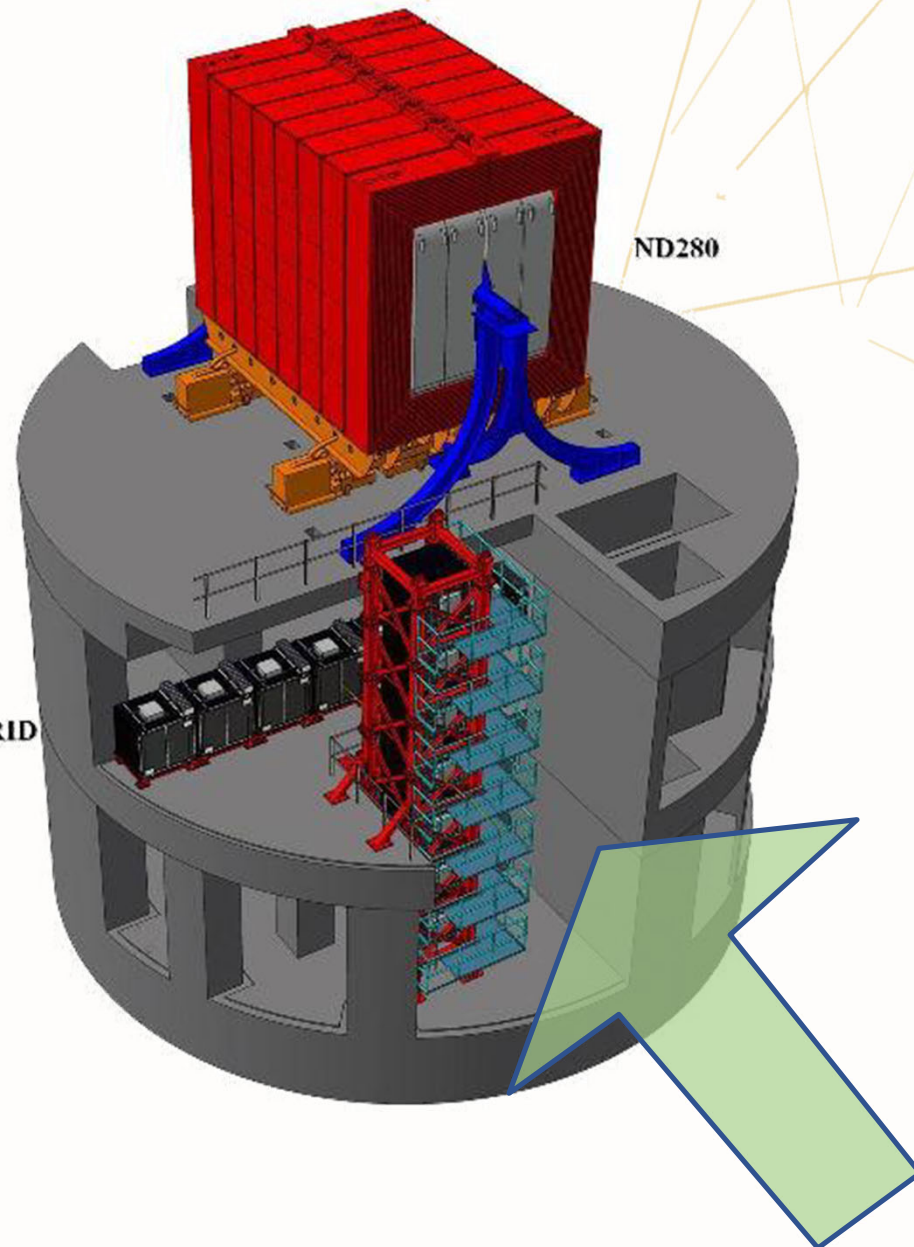


# 前置検出器 @ J-PARC

T2K near detector hall



ビームの空間分布を測ることで、  
ビーム中心軸を測定. ビームの  
安定性もモニター



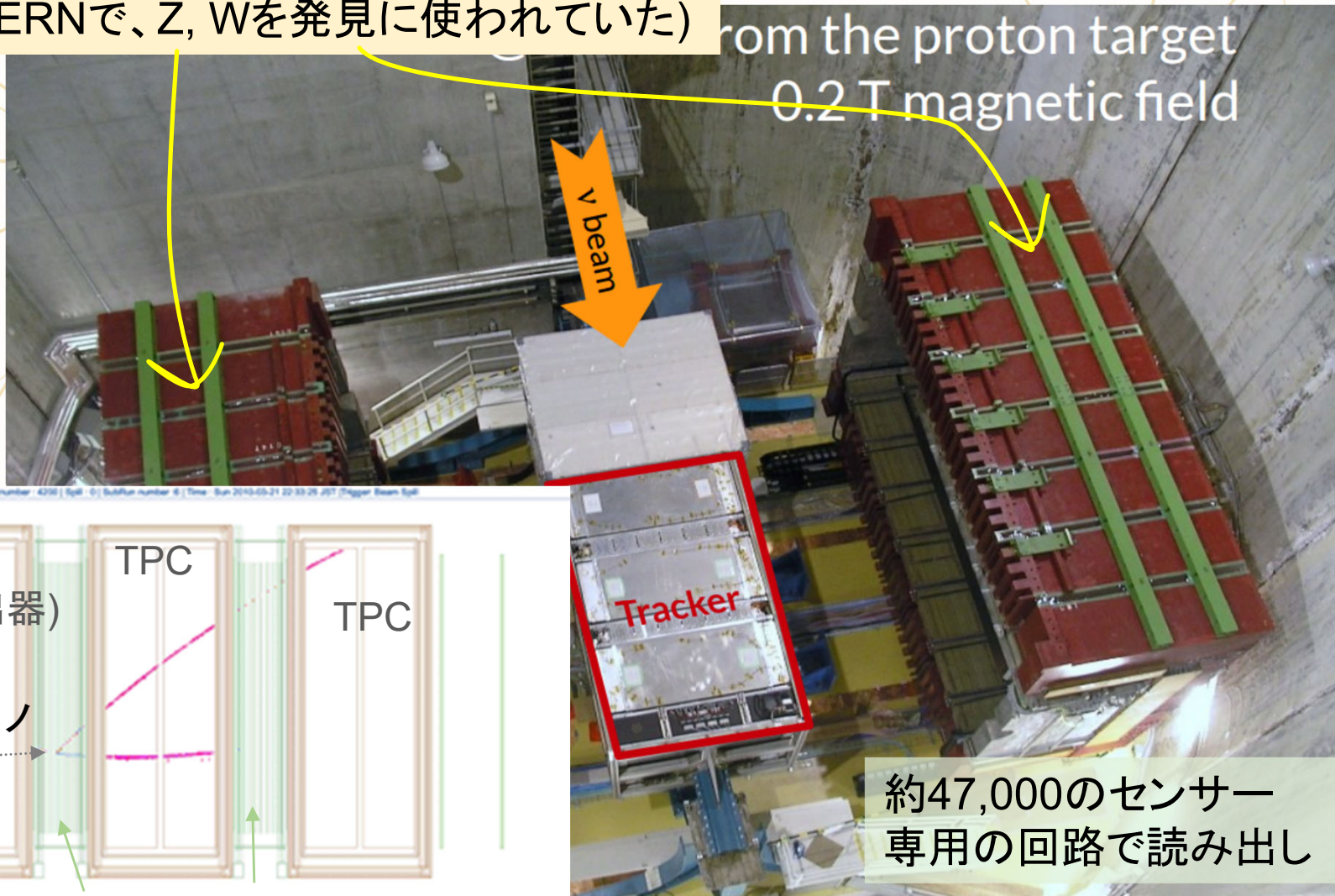


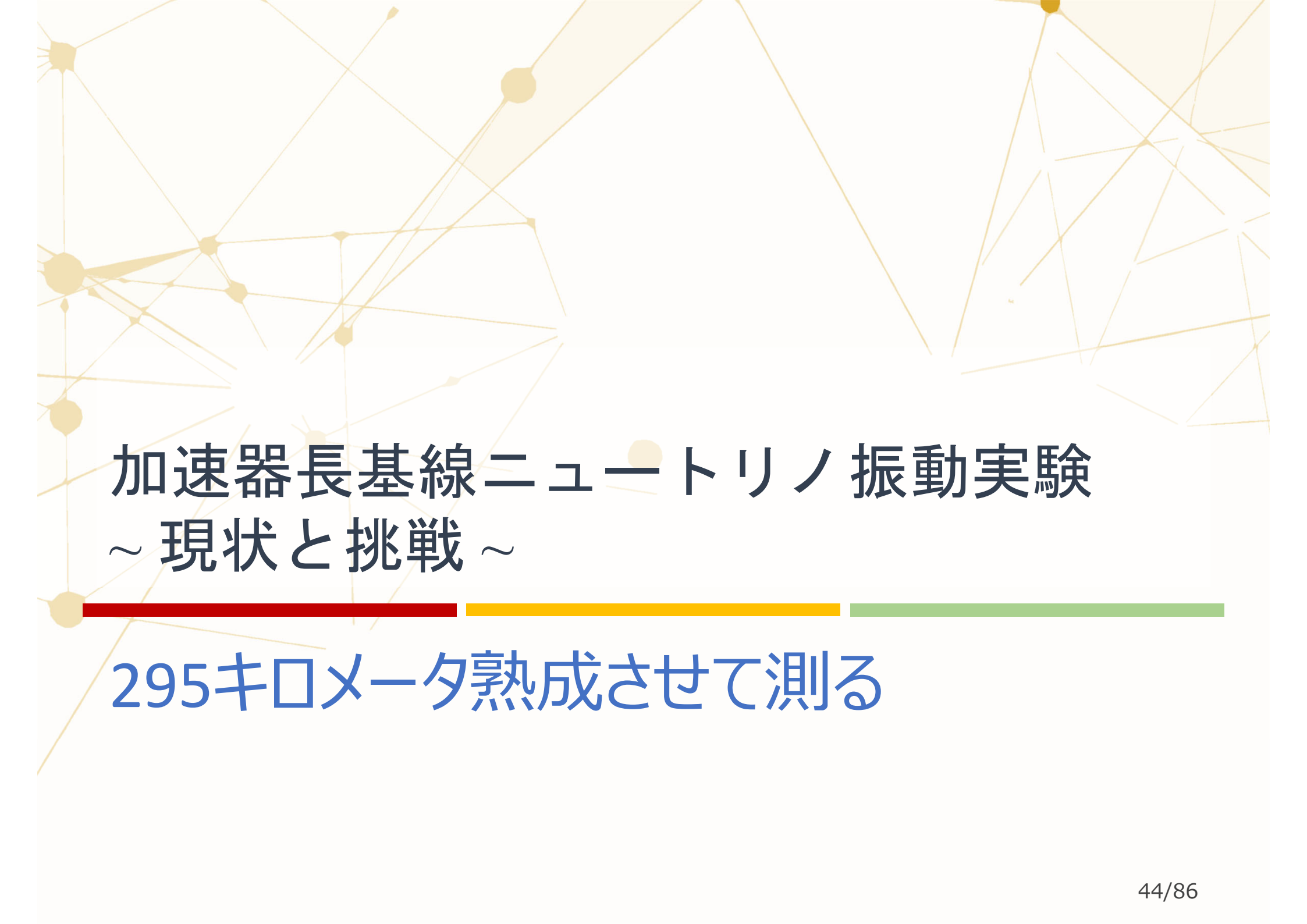


# 前置検出器ND280を上から見た所

## UA1磁石

普段は閉じているが、この写真では開  
(CERNで、Z, Wを発見に使われていた)





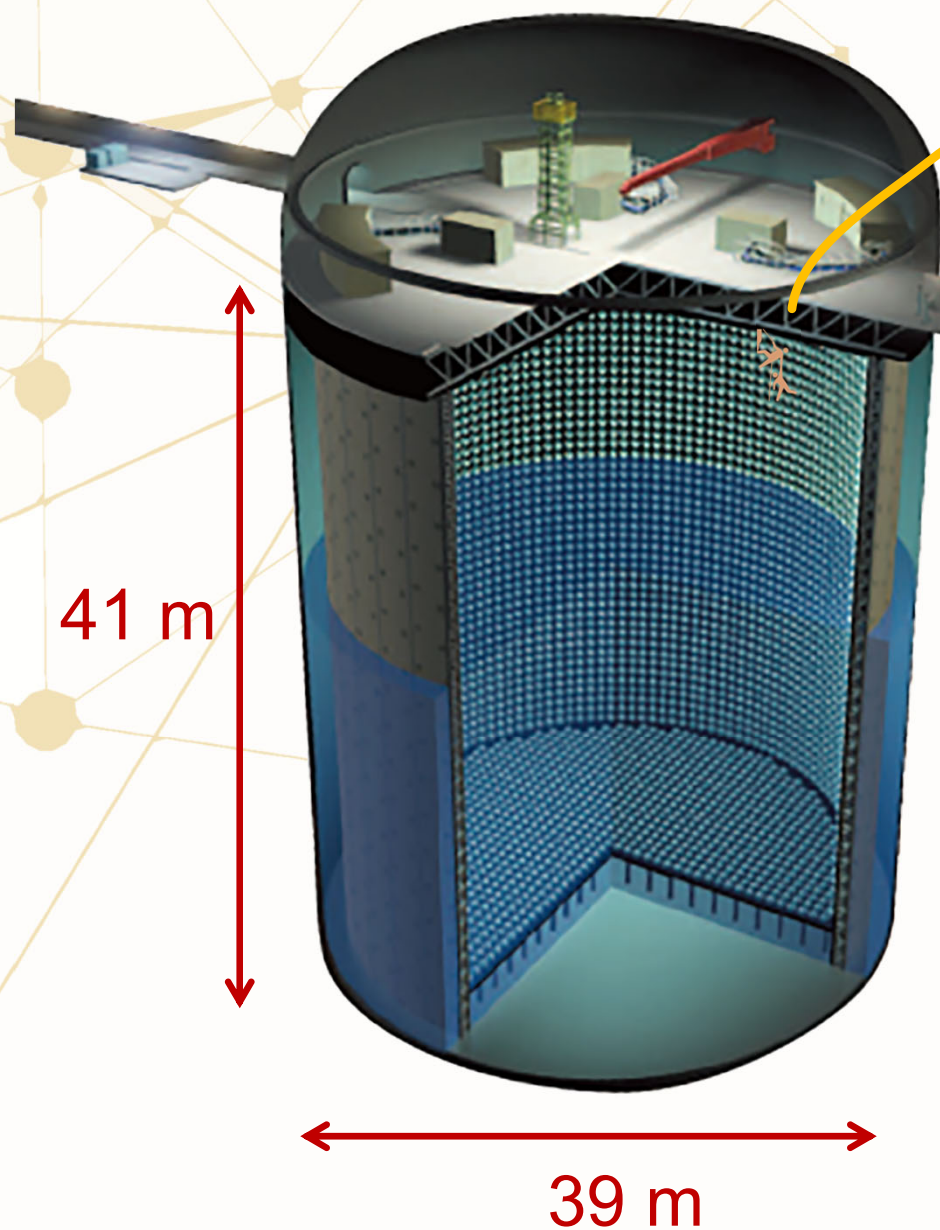
# 加速器長基線ニュートリノ振動実験 ～ 現状と挑戦 ～

---

295キロメートル熟成させて測る



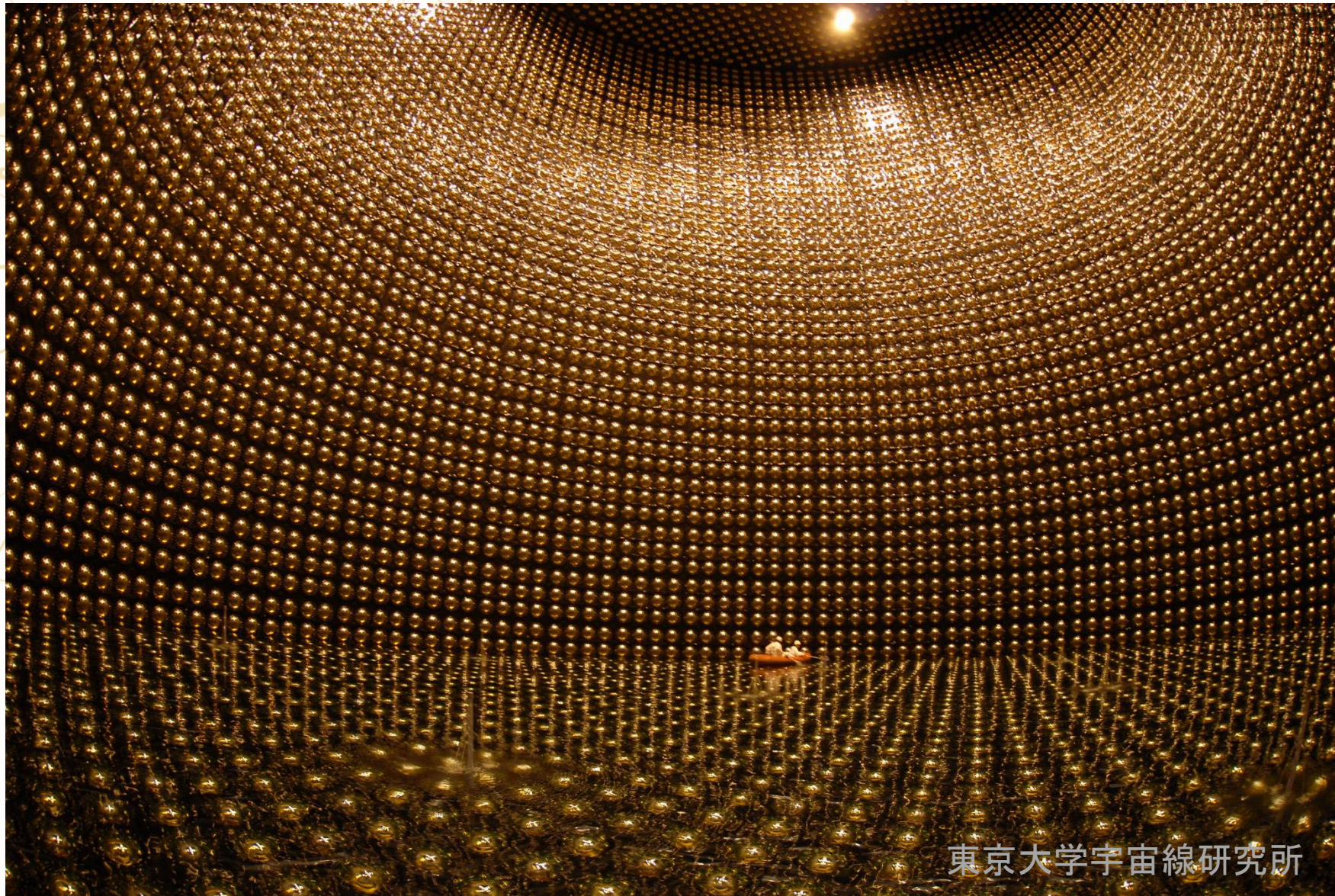
# スーパーカミオカンデ



- 東京大学宇宙線研究所
- 水チェレンコフ検出器
- 地下1,000メートル
- 50キロトン水タンク、有効領域22.5キロトン
- 11,100本の20インチ(50センチ)光電子増倍管
- 1996年観測開始



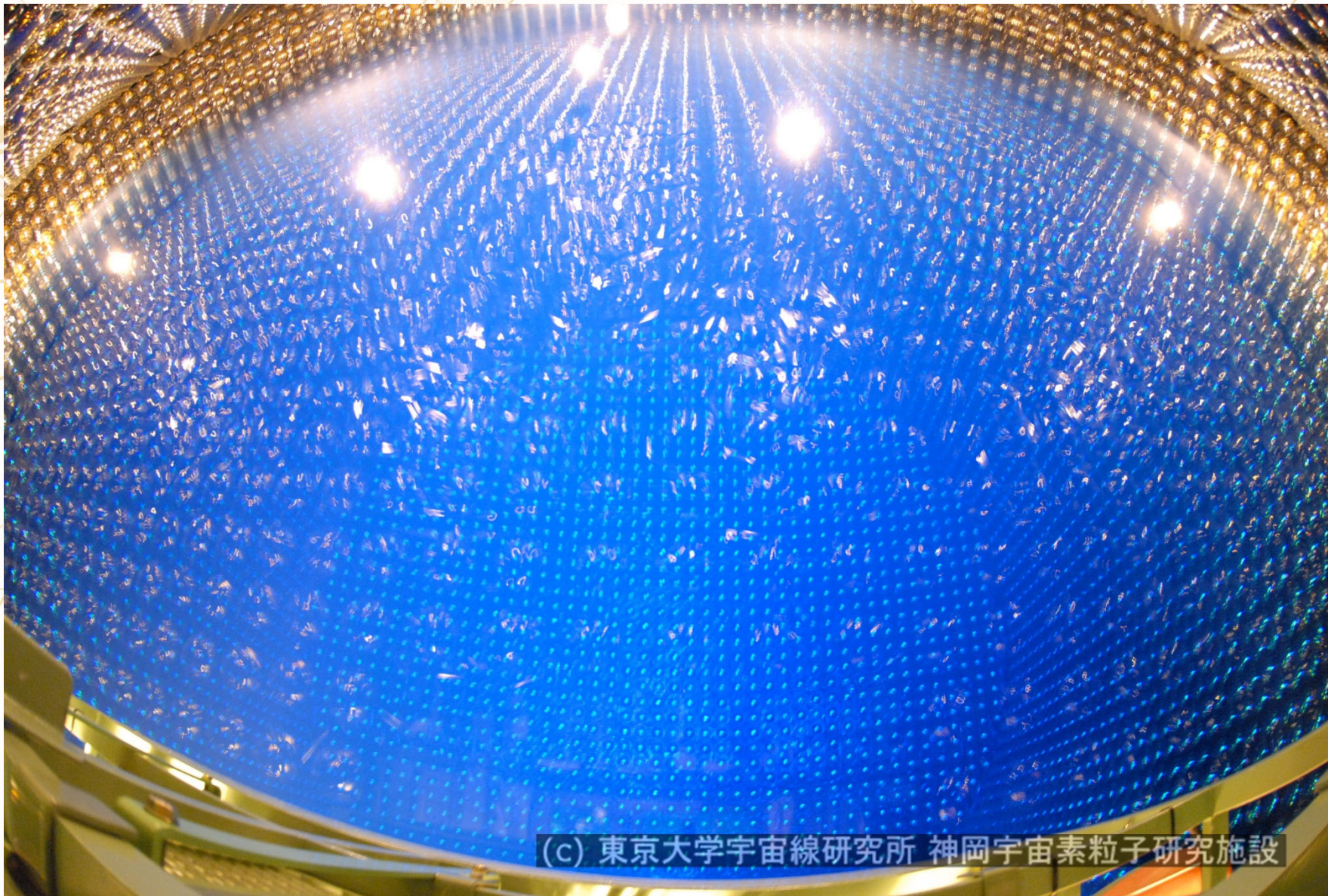
# スーパーカミオカンデ



東京大学宇宙線研究所



# スーパーカミオカンデ

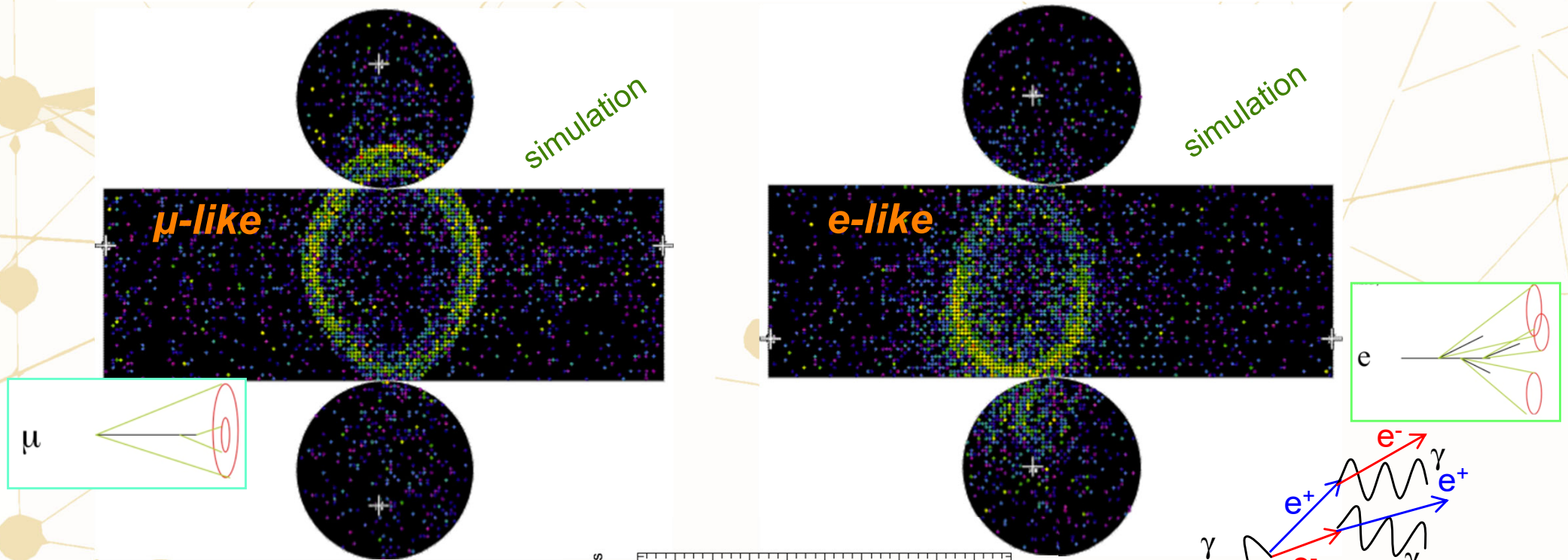


(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

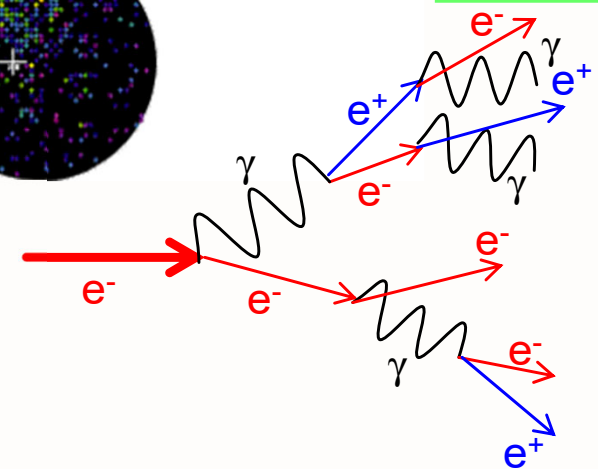
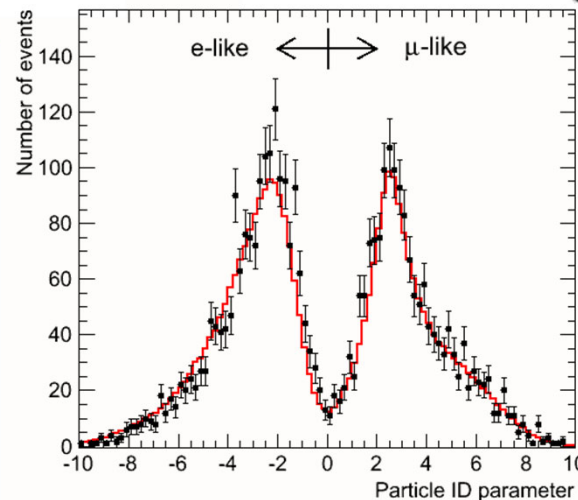


スーパーカミオカンデは  
電子とミュー粒子を区別できる

→ 反応したニュートリノが電子ニュートリノだったかミューニュートリノだったかを識別できる



SKができてから四半世紀経ったが、計算機の進歩や機械学習などで、まだまだ解析手法も発展中  
例：縁の方で起きた反応やリング2個ある反応も解析できるように(~30%統計増)



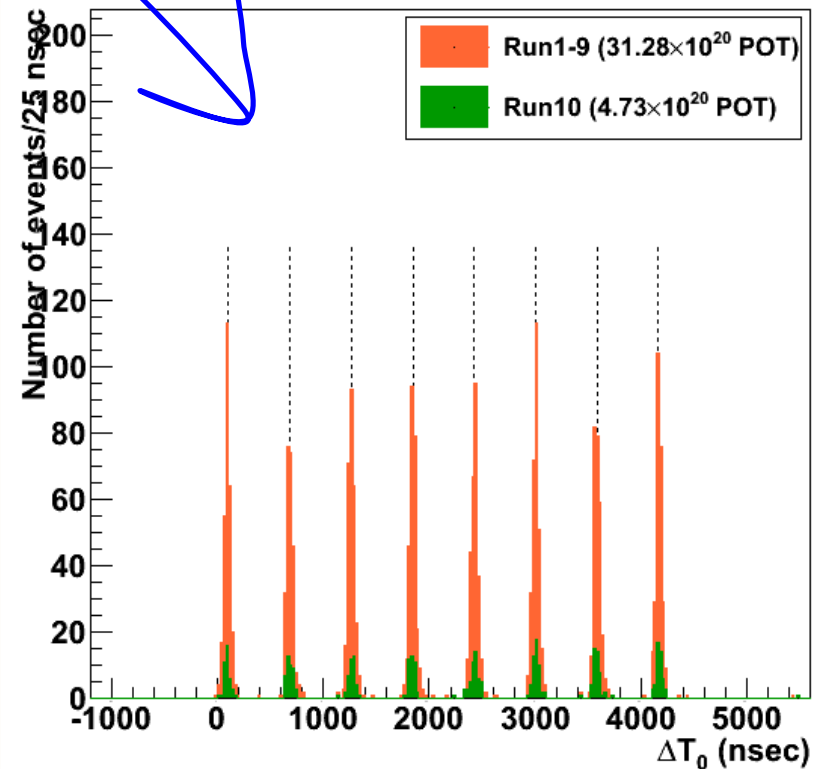
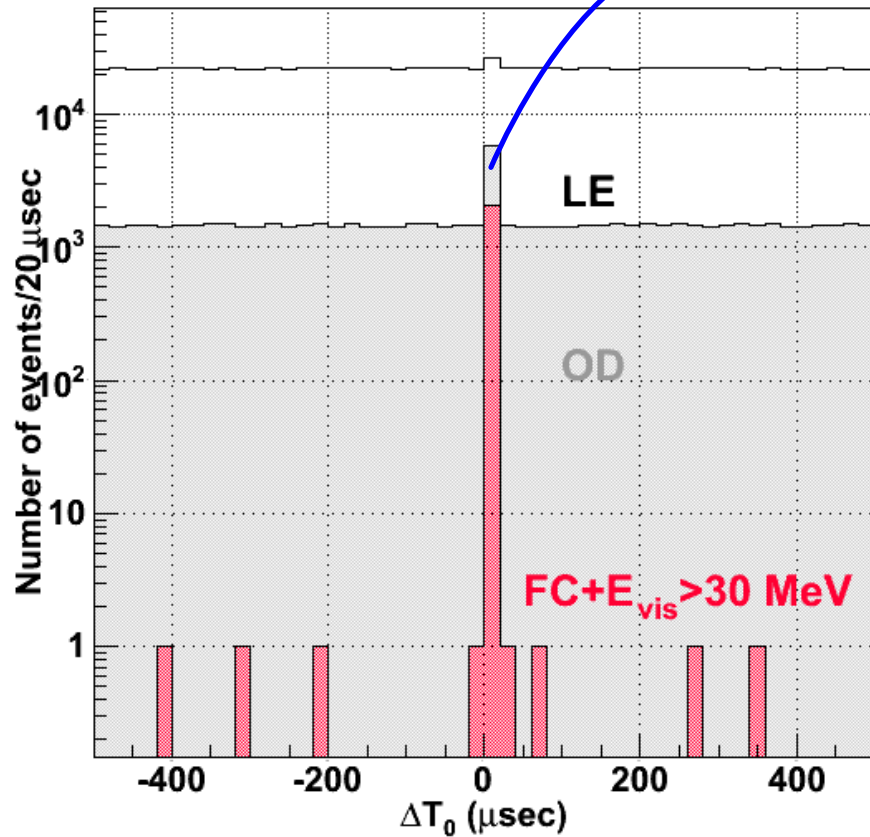
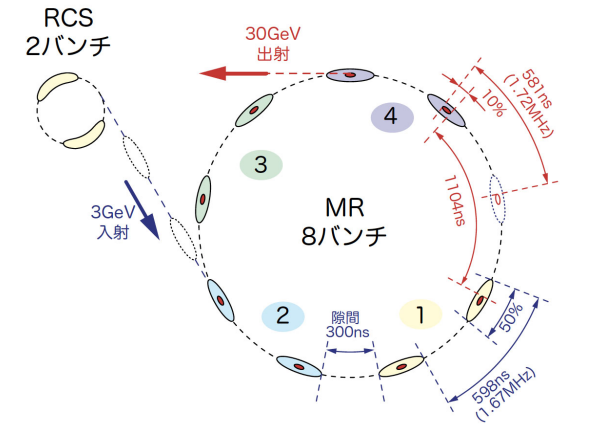


# どれがJ-PARCから来たニュートリノか？

## GPSで加速器とSKを同期

- Events in the T2K beam timing
- Propagation time of Cerenkov photons are correct

relative event timing to the spill timing



$$\Delta T_0 = T_{\text{GPS}@SK} - T_{\text{GPS}@J\text{-PARC}} - \text{TOF}(\sim 985 \mu\text{sec})$$

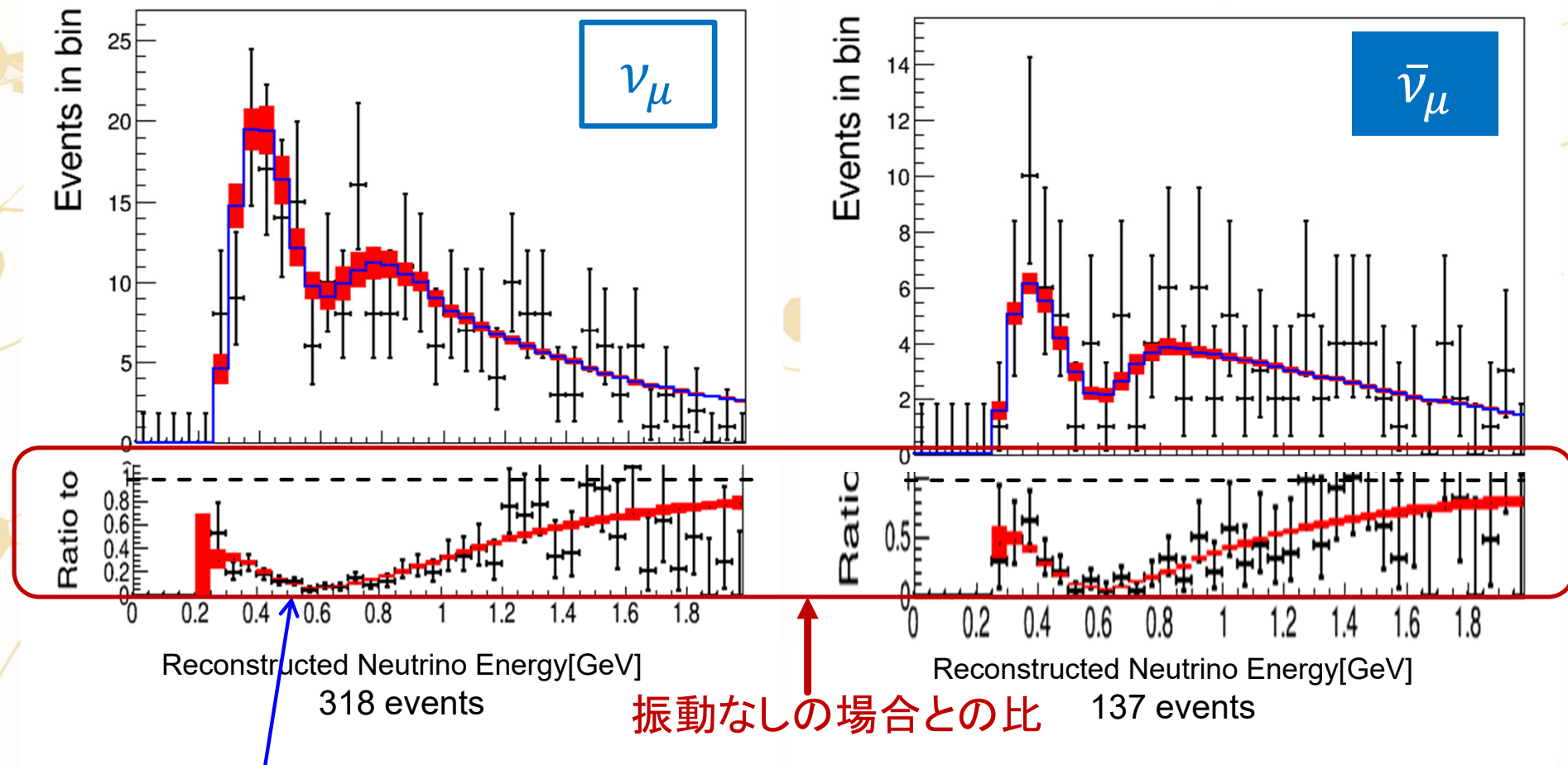
# T2K 最新結果

ミューオンニュートリノは、どれだけミューオンニュートリノとして残っているか

# T2K ミューオンニュートリノがどれだけ残っているか

T2K Run1-10 Preliminary

T2K Run1-10 Preliminary

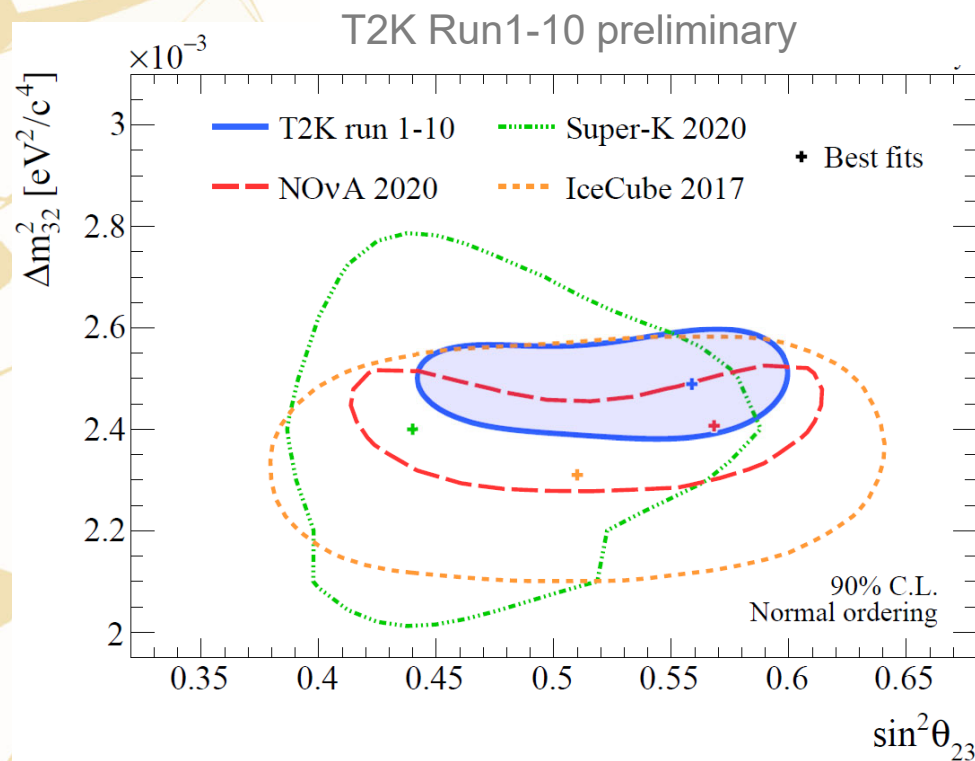


エネルギーの再構成の精度を考えると、ゼロコンシステント

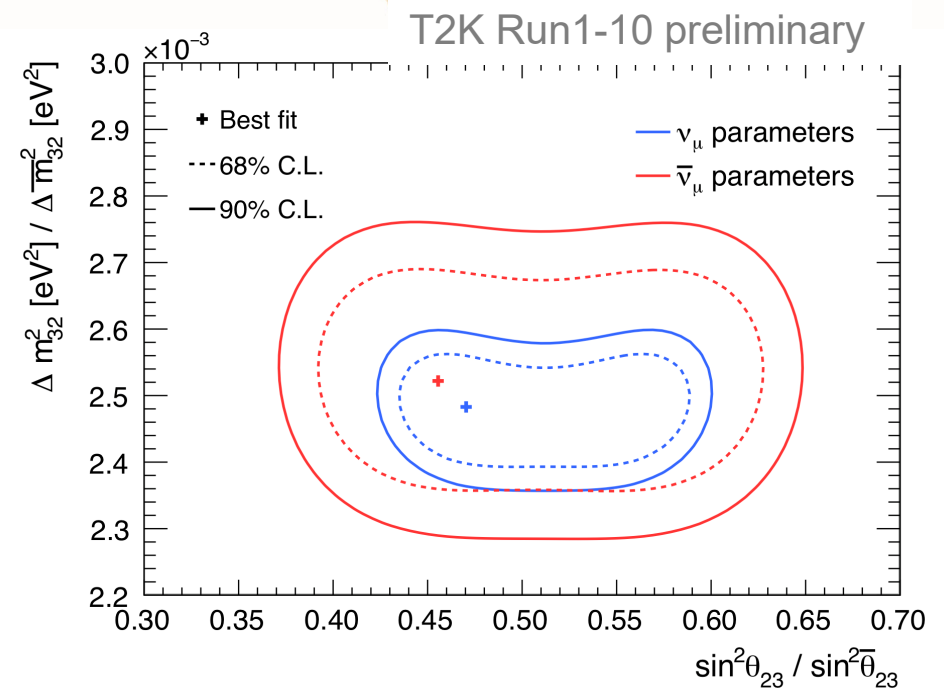
$$P_{\mu \rightarrow \mu} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2(1.27 \Delta m^2 L / E_\nu)$$



# T2K $\Delta m_{32}^2$ vs. $\sin^2 \theta_{23}$



## CPT test : comparison of $\nu$ and anti- $\nu$



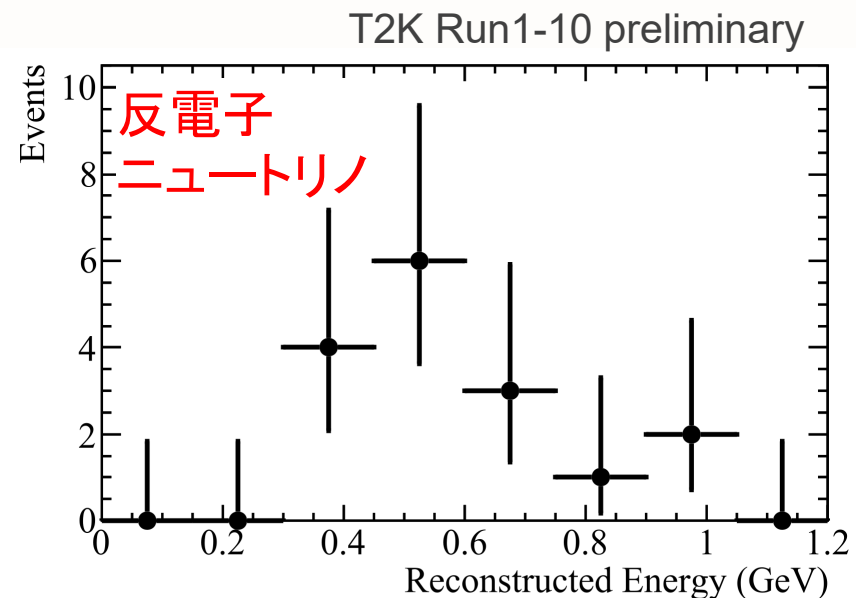
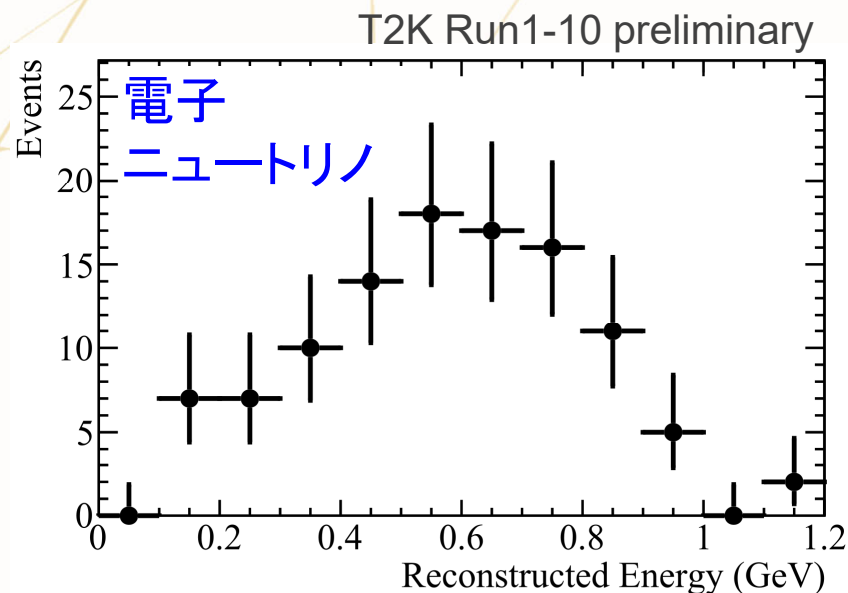
# T2K 最新結果

ミューオンニュートリノは、どれだけ電子ニュートリノに変化したか

# ミューオンニュートリノは、どれだけ電子 ニュートリノに変化したか

| 観測数     |       |
|---------|-------|
| ニュートリノ  | 108 個 |
| 反ニュートリノ | 16 個  |

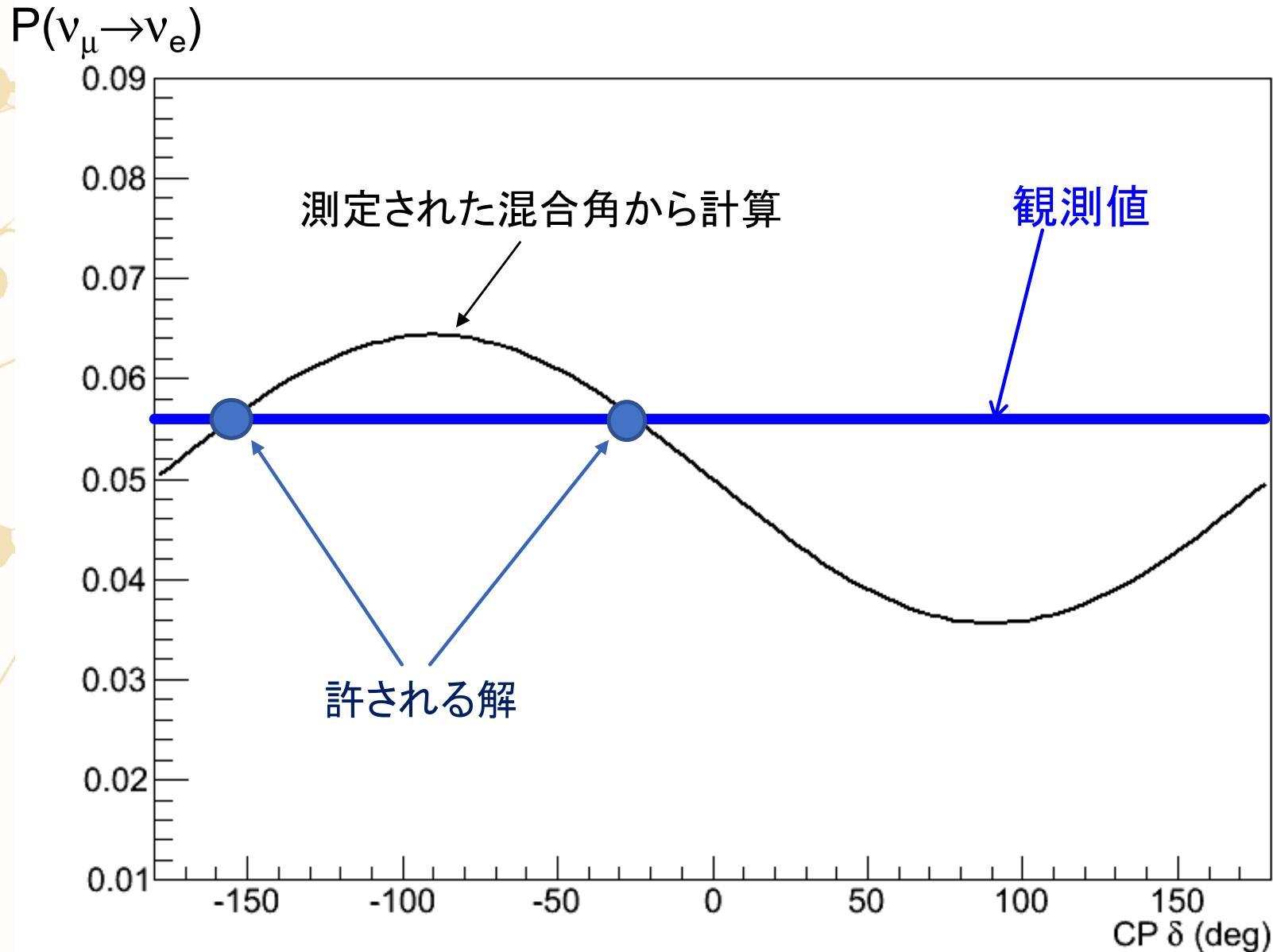
\* 反ニュートリノはニュートリノに比べて物質と反応しにくいので、観測期待値自体が少ない



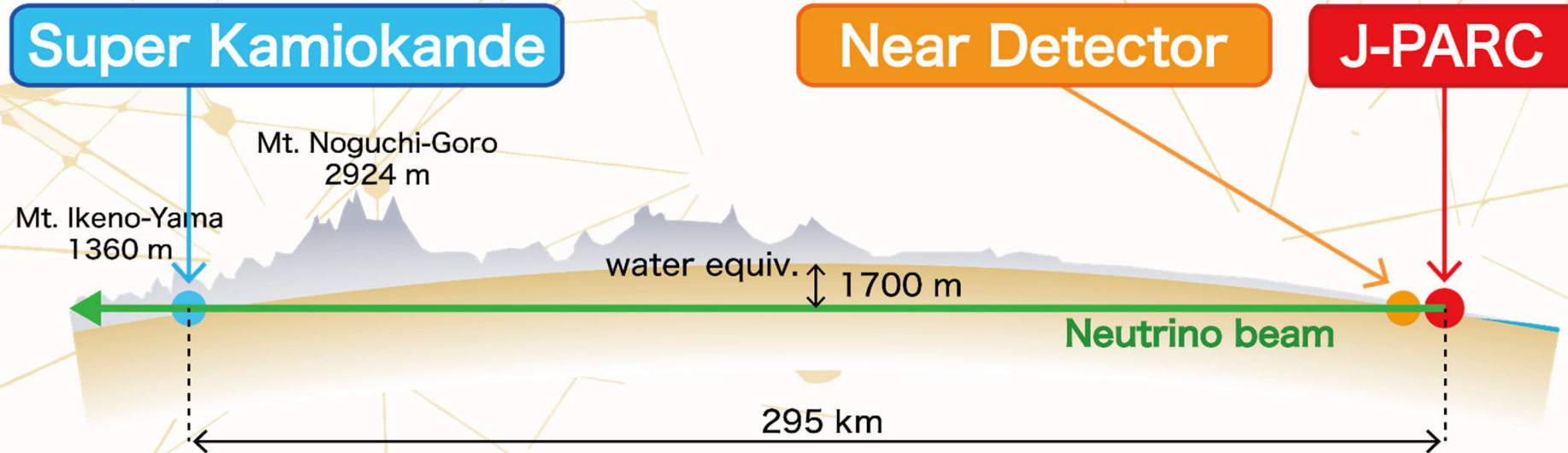


# ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率

@振動が最も大きいエネルギー, 真空中,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$

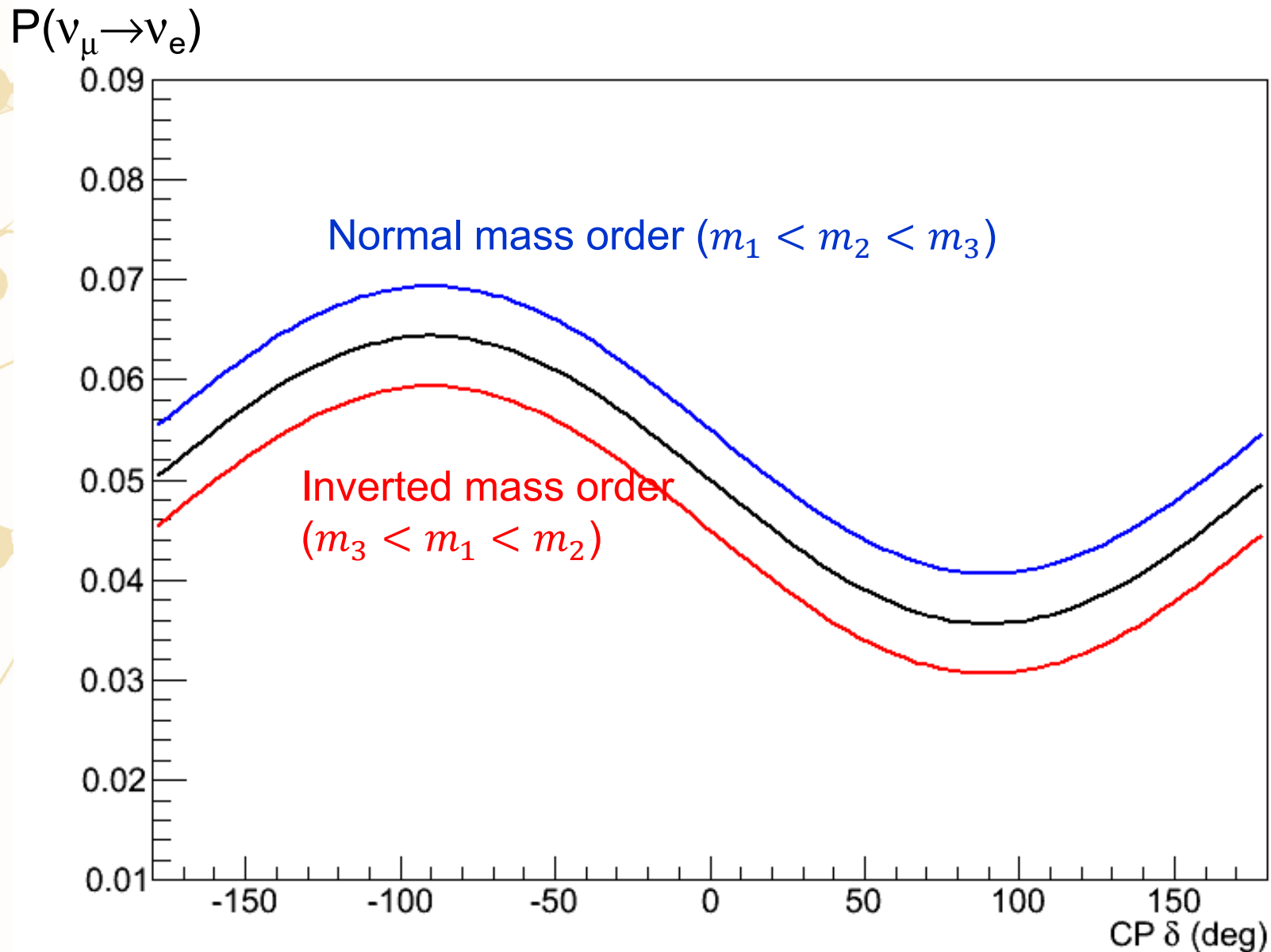


が、地球は、フレーバーについてもCPについても対称でない。。。。



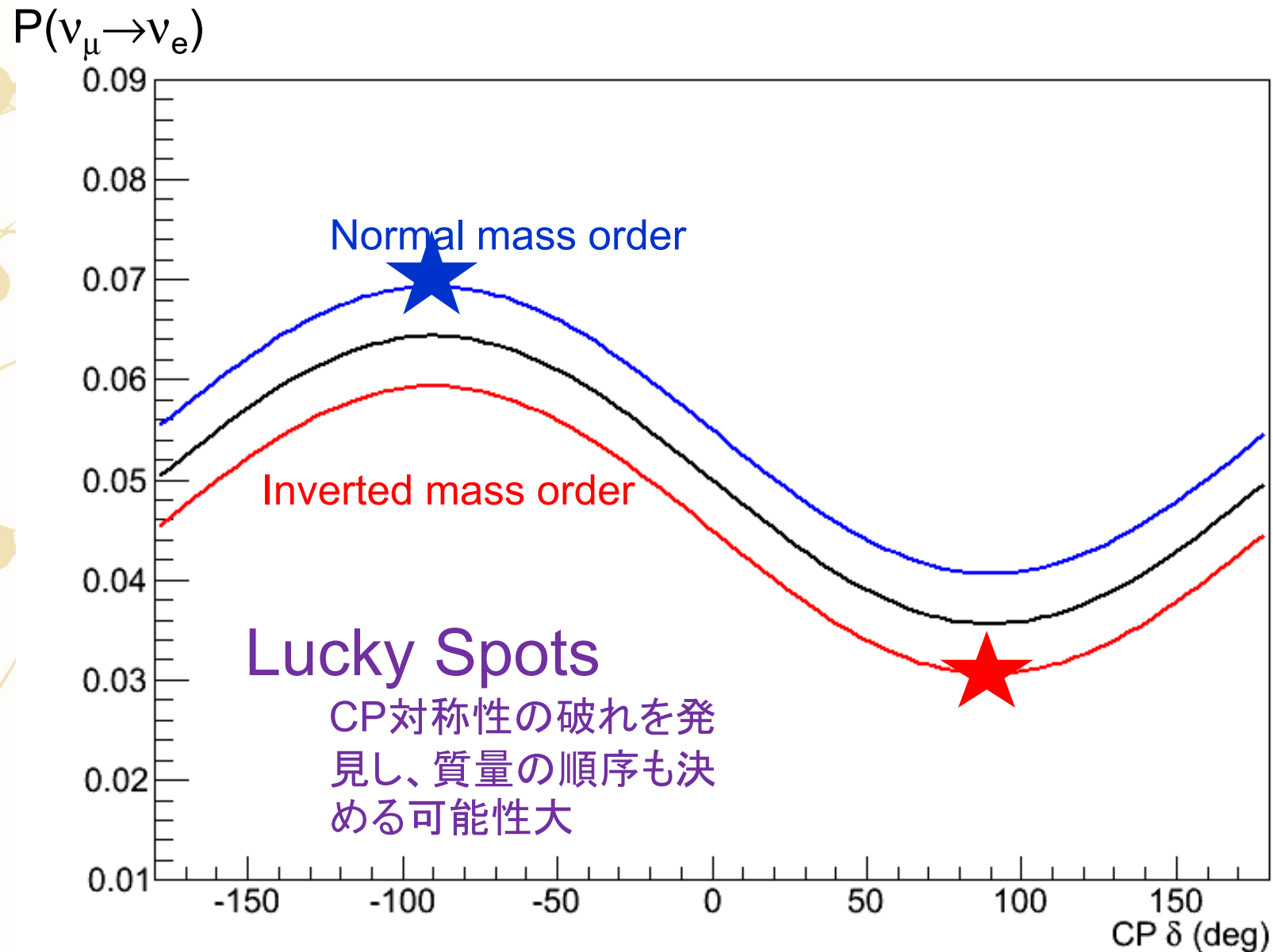
- 地中の電子との相互作用をポテンシャルとして感じる
- 電子ニュートリノとミューニュートリノ/タウニュートリノでは感じるポテンシャルが異なる
- 振動の仕方に影響
  - ✓ ニュートリノと反ニュートリノで反対
  - ✓ 質量の順番 (normal:  $m_1 < m_2 < m_3$ , inverted:  $m_3 < m_1 < m_2$ )で反対
- エネルギーが高い=基線長が長いほど、影響が大きい

ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率  
@振動が最も大きいエネルギー, 地中,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$

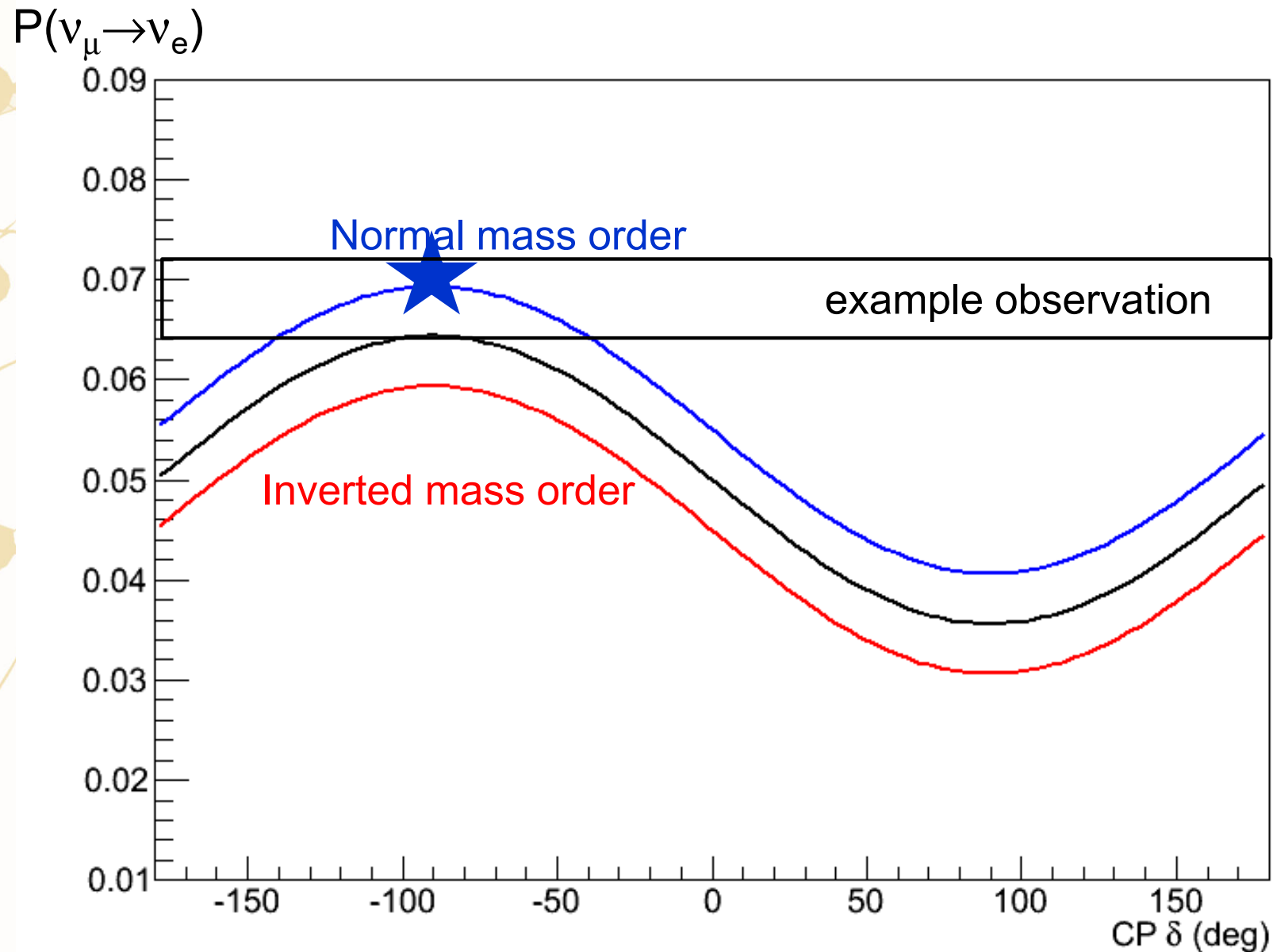




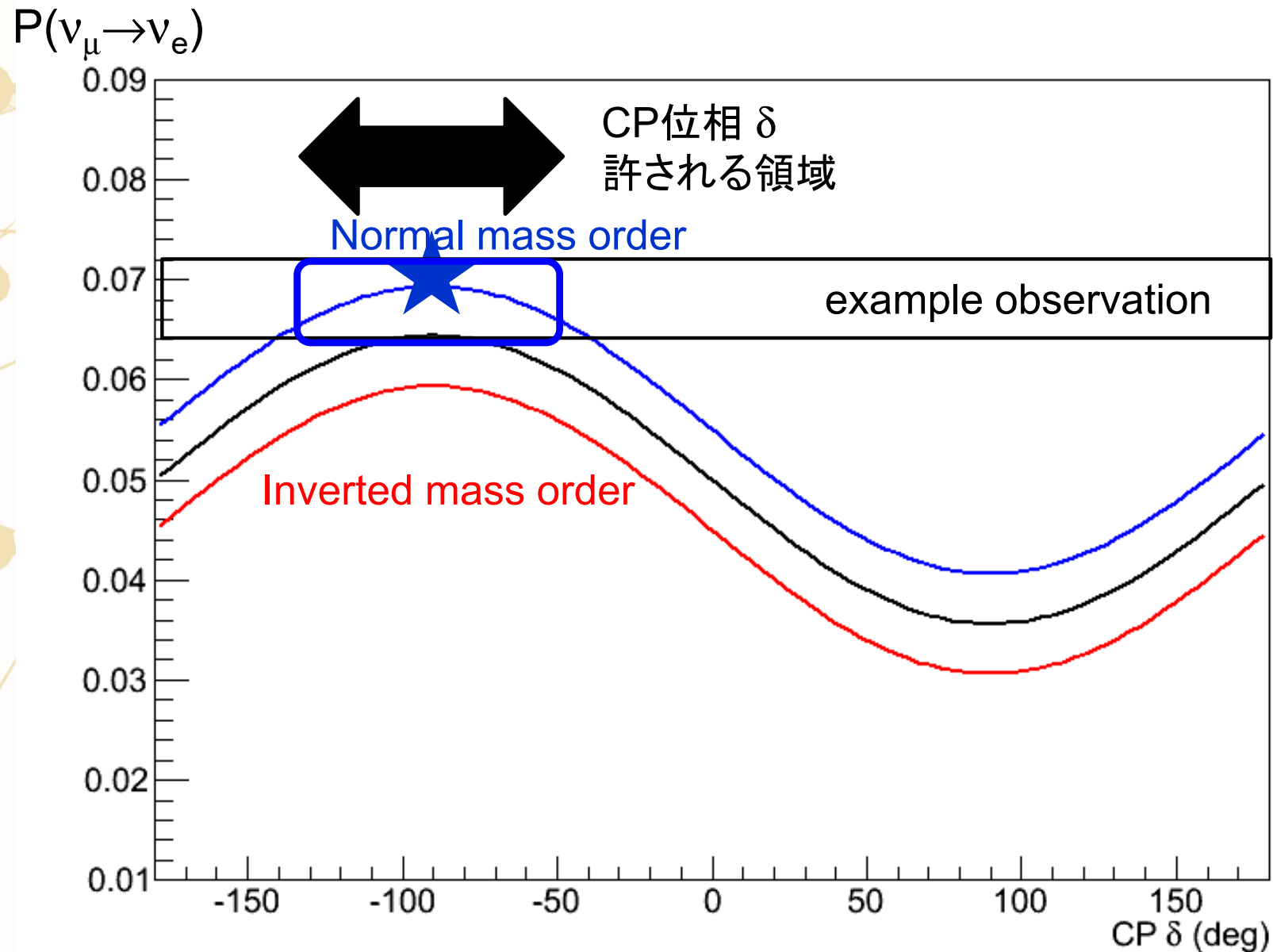
ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率  
@振動が最も大きいエネルギー, 地中,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$



ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率  
@振動が最も大きいエネルギー, **地中**,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$

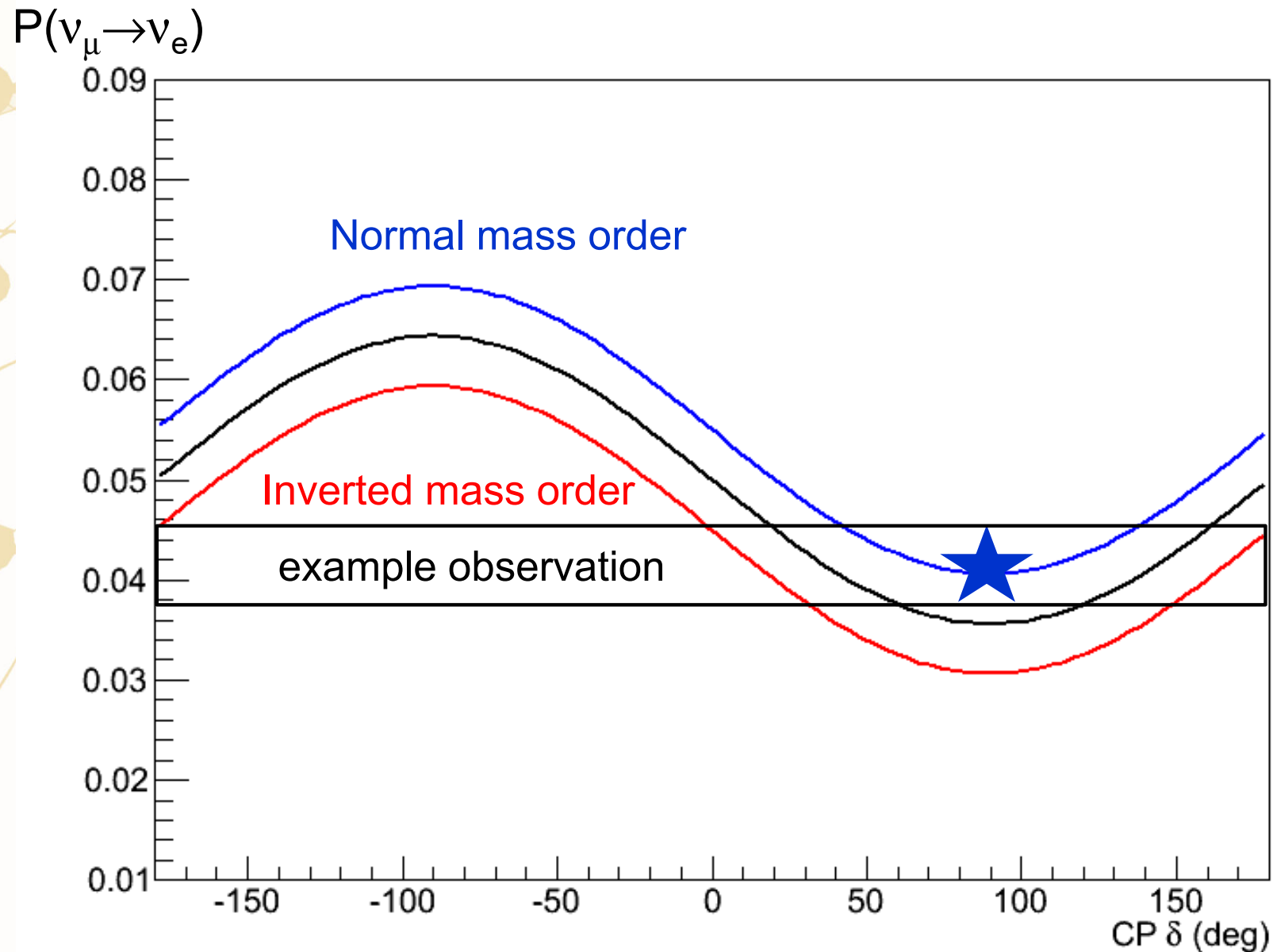


ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率  
@振動が最も大きいエネルギー, **地中**,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$

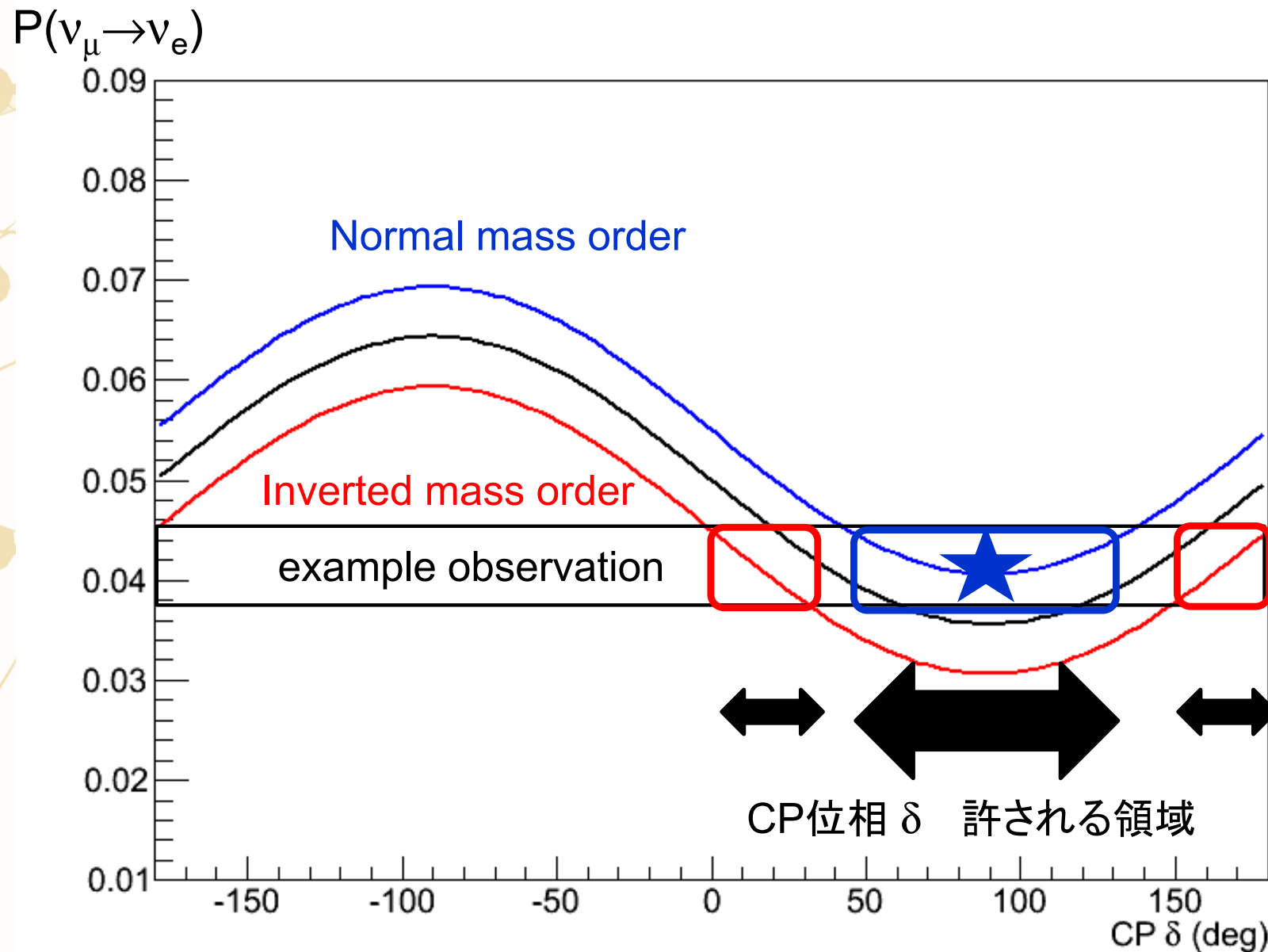




ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率  
@振動が最も大きいエネルギー, 地中,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$



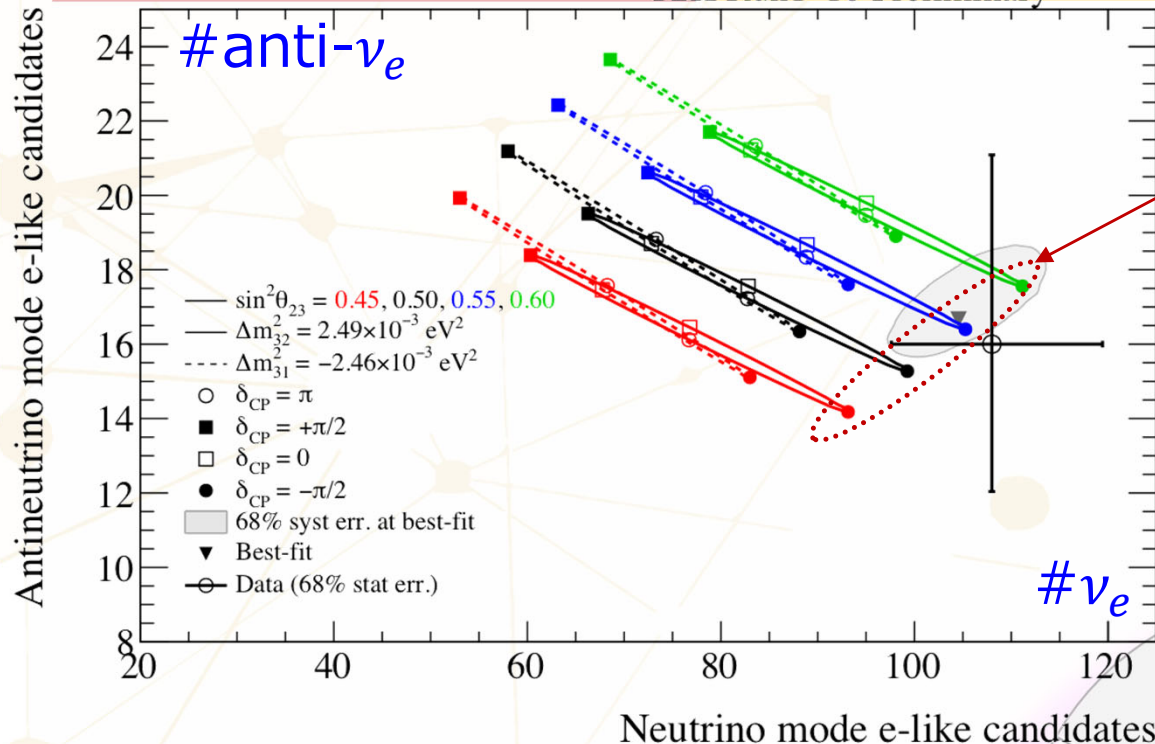
ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率  
@振動が最も大きいエネルギー, 地中,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$





# CP位相：混合行列に現れる複素位相 (-180度から180度の間の値を取り得る)

T2K Run1-10 Preliminary



maximal CPV case  
(normal mass ordering)

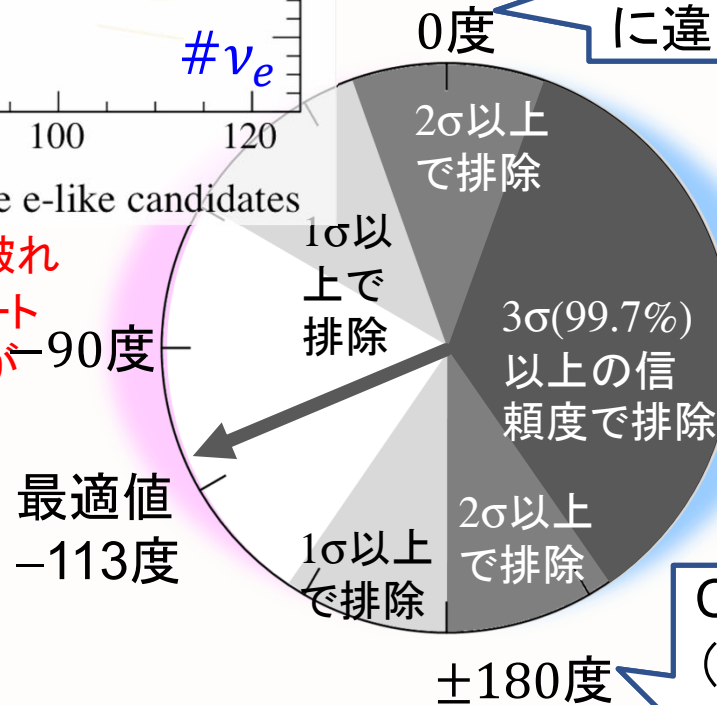
CP対称性が保存する  
(粒子と反粒子の性質  
に違いがない)

CP対称性が破れている  
信頼度は95%弱

CP対称性が破れて、  
電子ニュートリノの観測数が増える

最適値  
-113度

質量の順序についての事後確率  
normal : inverted  
81% : 19%

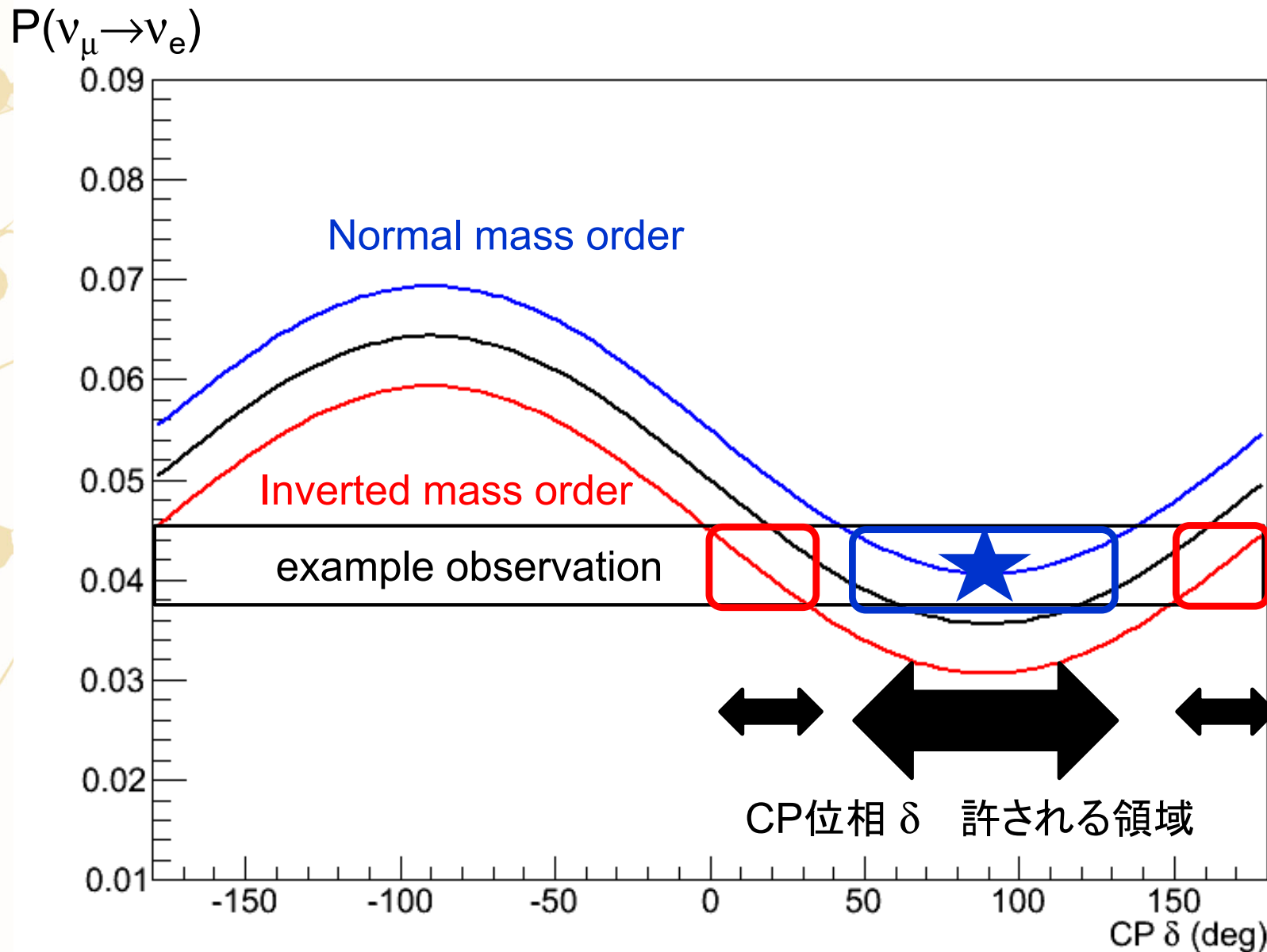


CP対称性が破れて、  
反電子ニュートリノの観測数が増える  
+90度

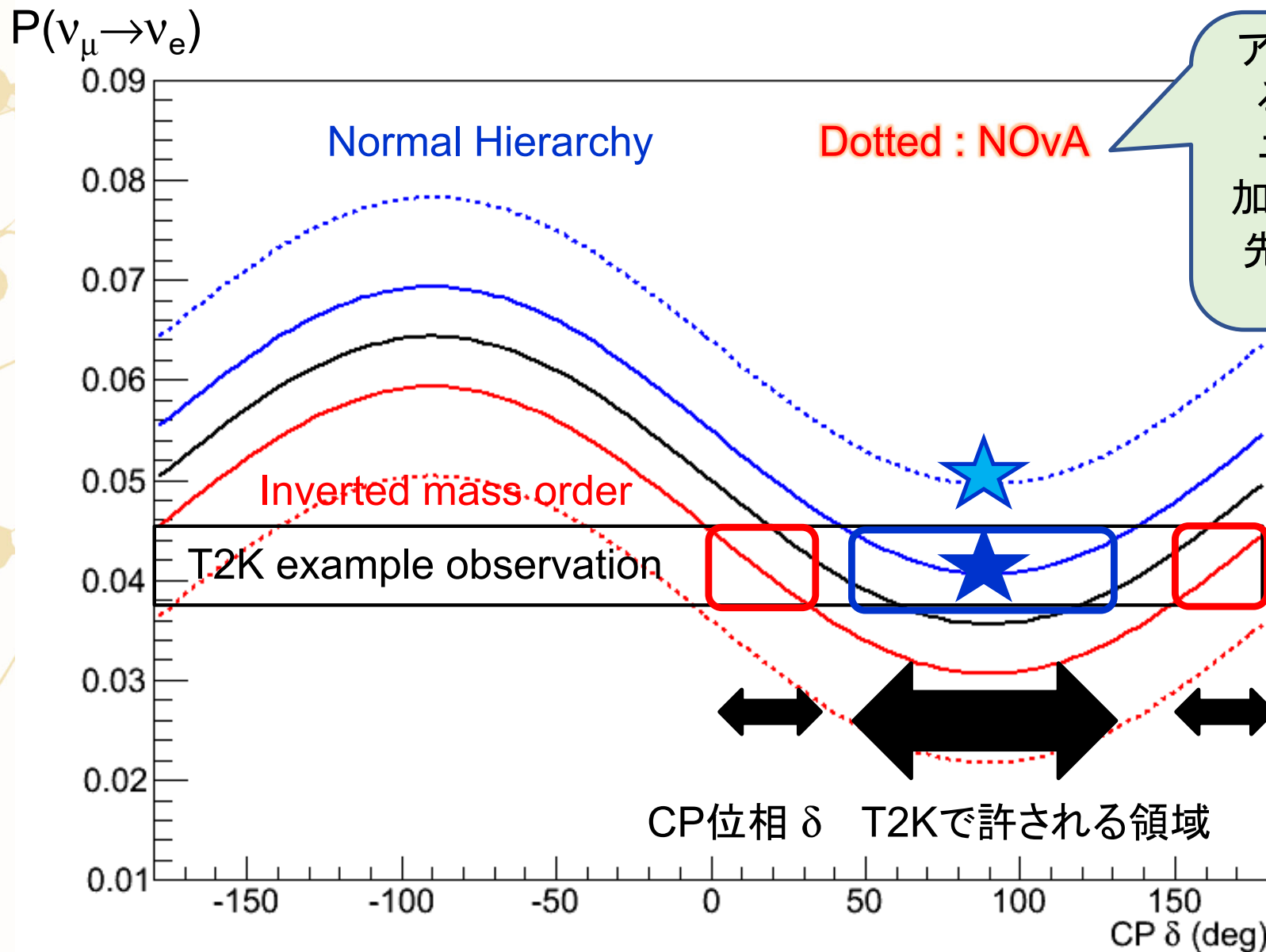
CP対称性が保存する  
(粒子と反粒子の性質  
に違いがない)



ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率  
@振動が最も大きいエネルギー, 地中,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$

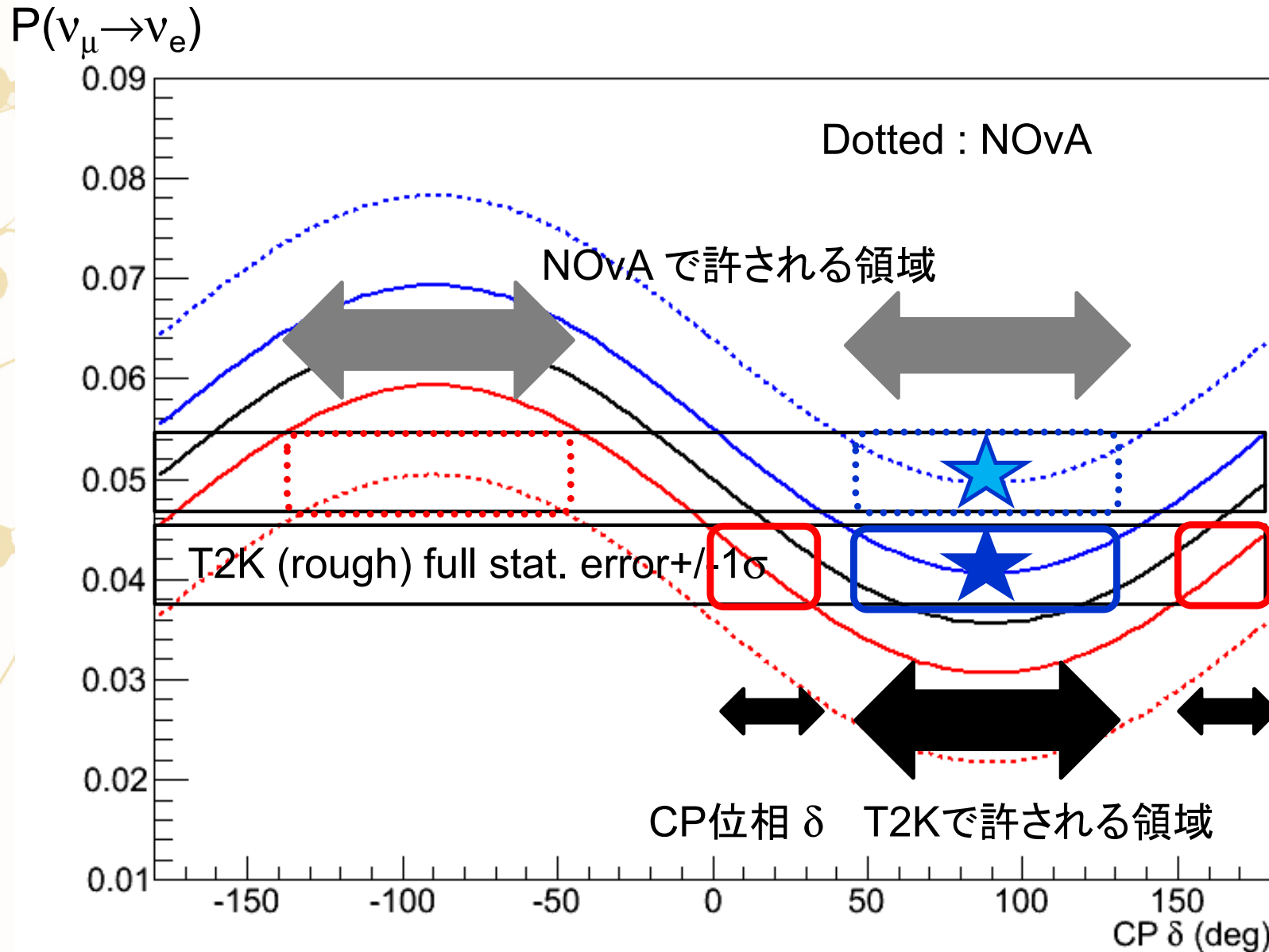


# ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率 @振動が最も大きいエネルギー, 地中, $\sin^2 2\theta_{23}=1$ , $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$



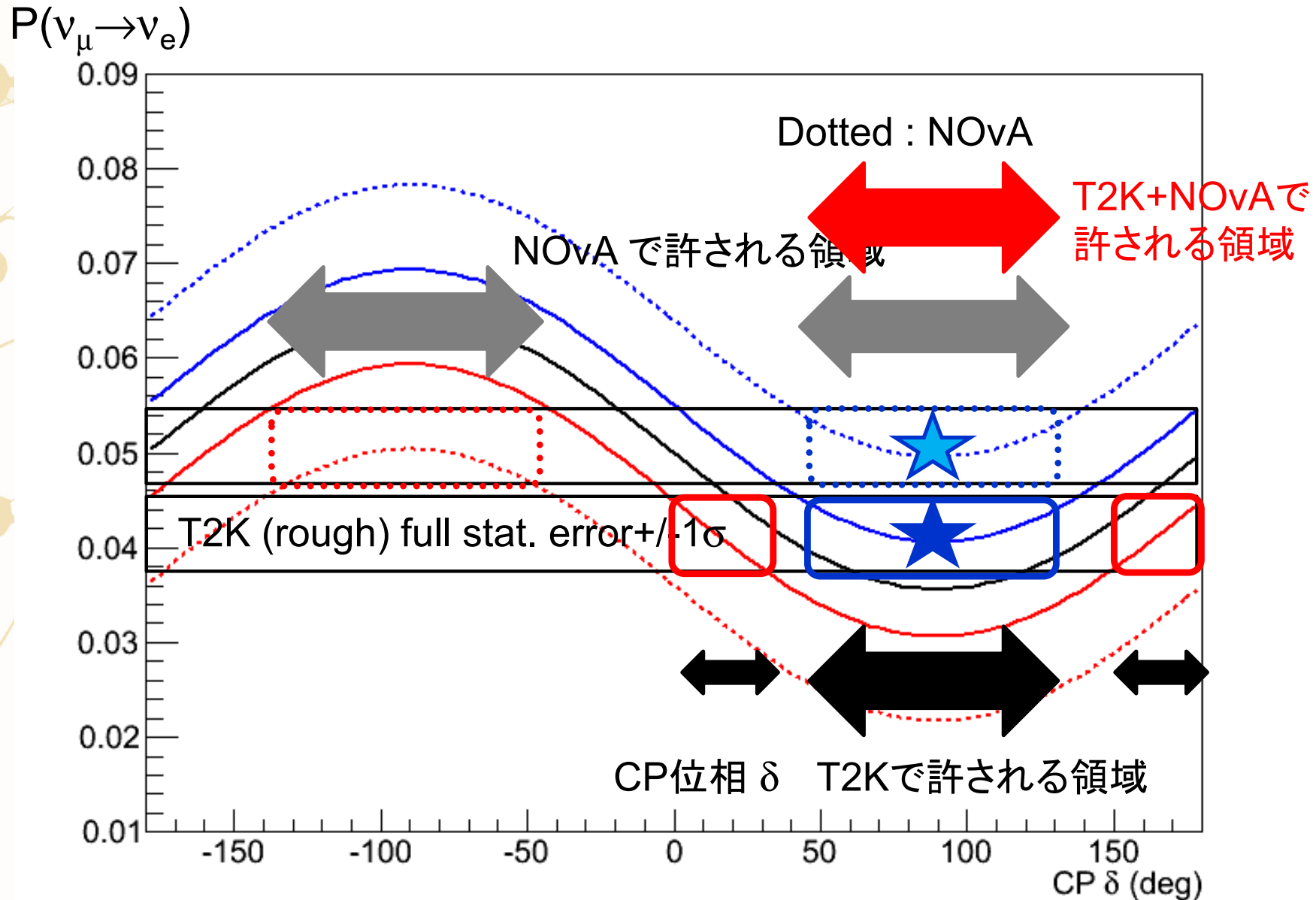
アメリカで走っている  
加速器長基線  
ニュートリノ実験  
加速器から810 km  
先でニュートリノを  
測定

ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率  
 @振動が最も大きいエネルギー, 地中,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$

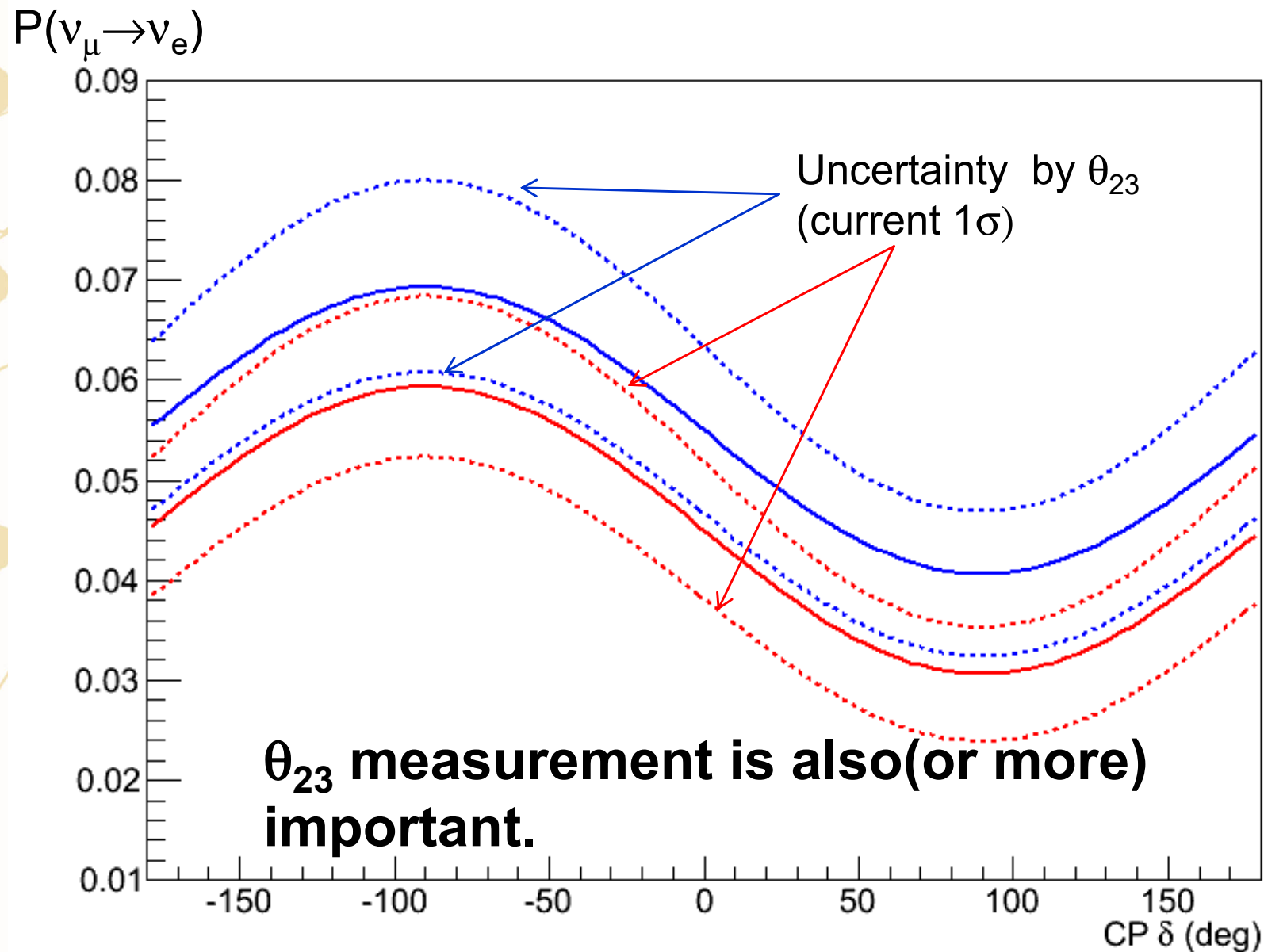




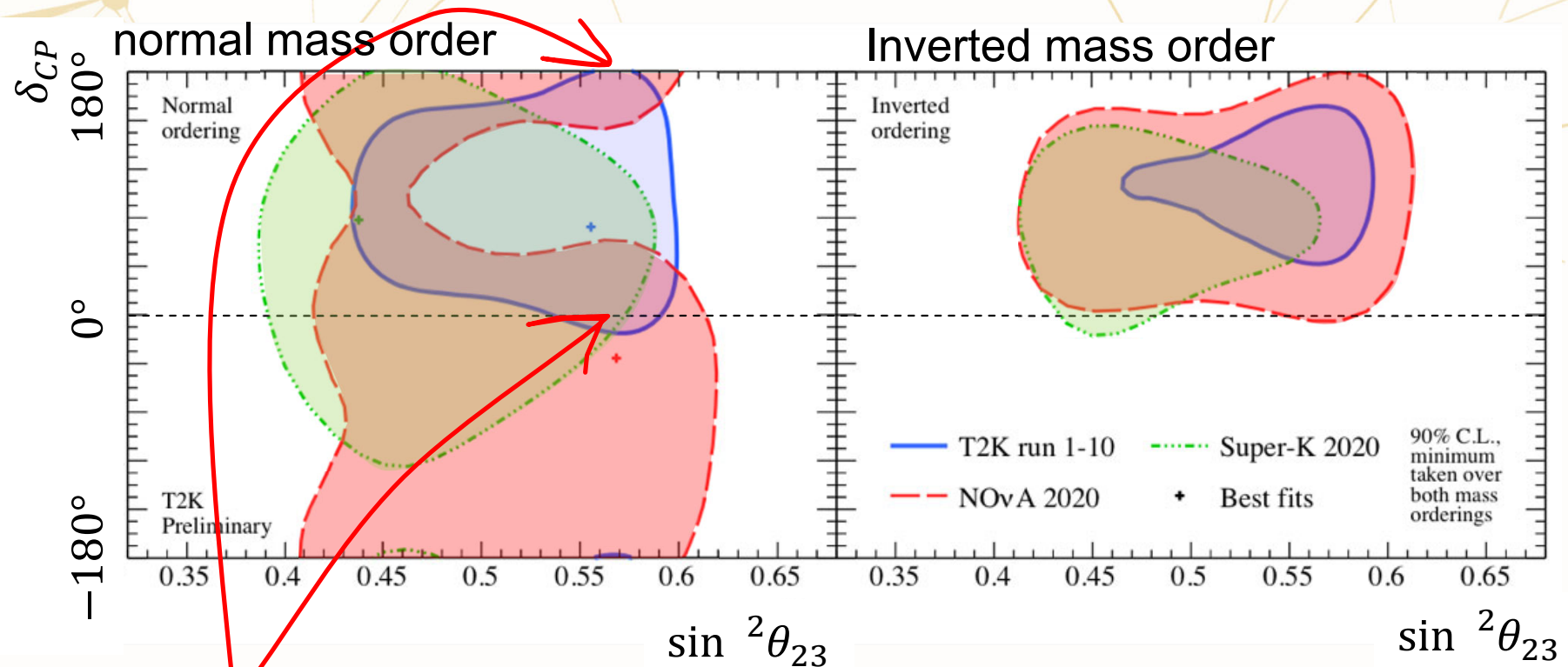
ミューニュートリノから電子ニュートリノへ変化する確率  
 @振動が最も大きいエネルギー, 地中,  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$



# 実際は、混合角 $\theta_{23}$ の不定性のため



# T2K、NOvA、スーパーカミオカンデの大気ニュートリノの結果の重ね書き



- まだ、この辺りがCP保存領域として許されている。
- 質量の順序もnormalとinvertedかどうか何とも。



# 宇宙における物質反物質の非対称性

- 宇宙の始まりの直後には、粒子と反粒子は同じ数だけ存在
- 約 $10^{-10}$ 秒後に10億分の1の違い
- 約100秒後に（10億分の1のほぼ）粒子だけが残った  
どのように？
- これまでにクォークで見つかっているCP対称性の破れで計算すると残れる物質の量が**10桁**くらい足りない.
- レプトジェネシスモデルでは、ニュートリノで説明
  - ✓ ただし、このニュートリノが、今、我々の観測しているニュートリノとは限らない（宇宙初期にもっと重いニュートリノが存在していた可能性）
  - ✓  $J_{CP}^{PMNS} (\approx 0.033 \sin \delta_{CP})$  が0.02程度あればニュートリノ振動で観測されるCP対称性の破れで（も）宇宙の物質-反物質非対称性を作ることとは可能とされている(\*).

\* S. Pascoli, S.T. Petcov, and A. Riotto Nucl. Phys. B774, 1 (2007)

# 加速器長基線ニュートリノ振動実験 ～ 現状と挑戦 ～

## 展望

- ニュートリノをたくさん作ってデータを取る
- 陽子 1 個あたりから得られる情報を増やす

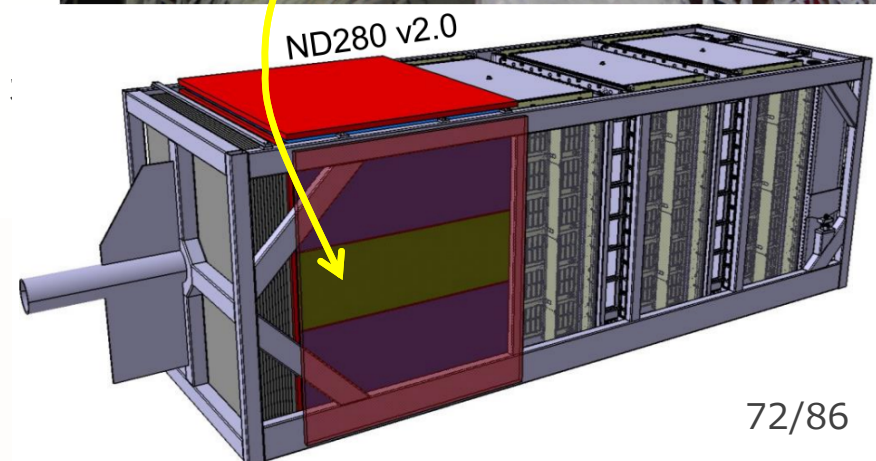
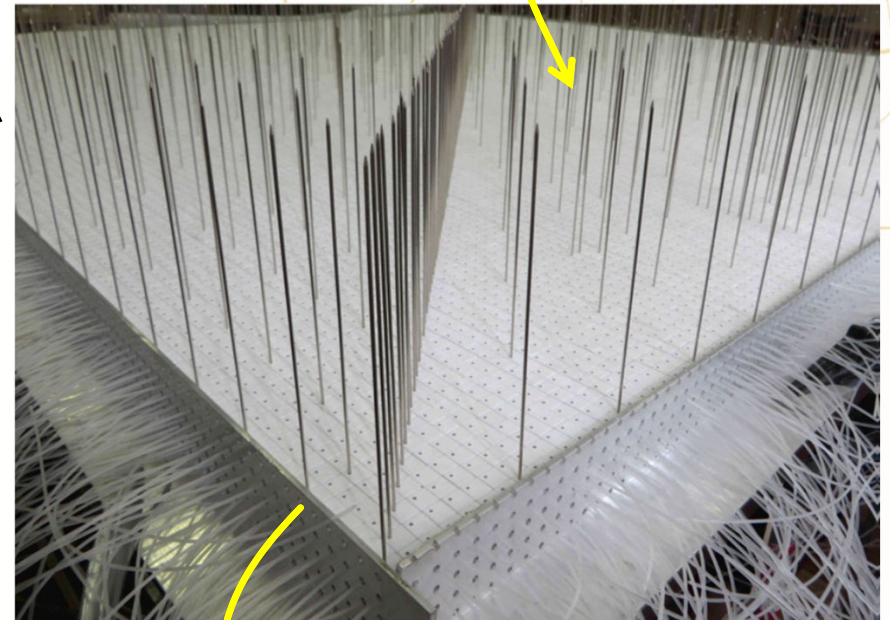
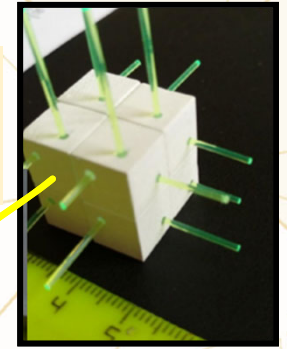


- T2K実験で2026年頃までデータを取る
- 加速器
  - ✓ 磁石電源を増強するなどで加速周期を上げる  $2.48\text{ s} \rightarrow 1.32\text{ s} \rightarrow 1.16\text{ s}$
  - ✓ 加速空洞を増強するなどでパルス当たりの陽子数を増やす
- ニュートリノビームライン
  - ✓ ホーン電流を上げる  $250\text{ kA} \rightarrow 320\text{ kA}$  など
- スーパーカミオカンデ
  - ✓ チェレンコフ・リングが2個以上の事象も使う
  - ✓ 中性子を検出する(SK-Gd)
  - ✓ Deep Learningで挑戦
- 新しい前置検出器
 

ニュートリノと原子核の反応を精密に測定 → 統計誤差を小さく

**$\delta$ が $-90^\circ$ 付近であれば $3\sigma$ 程度で  
CP対称性の破れの証拠を掴む**

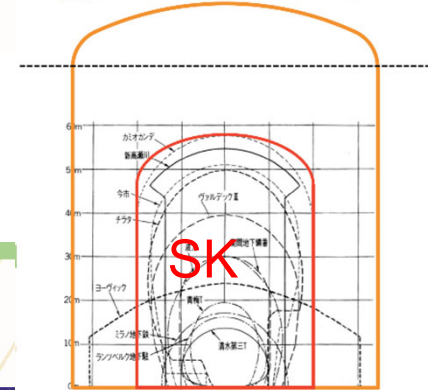
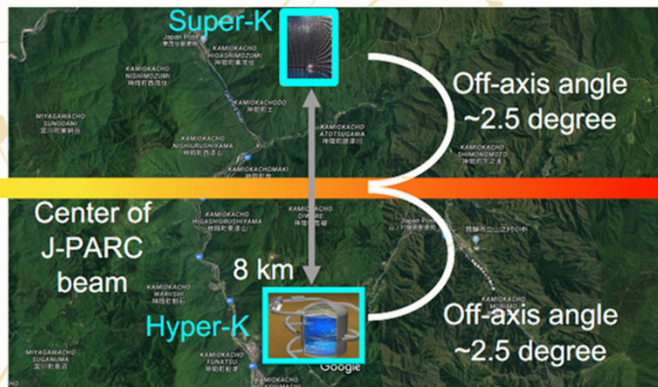
1cmシンチレータ  
キューブ 200万個





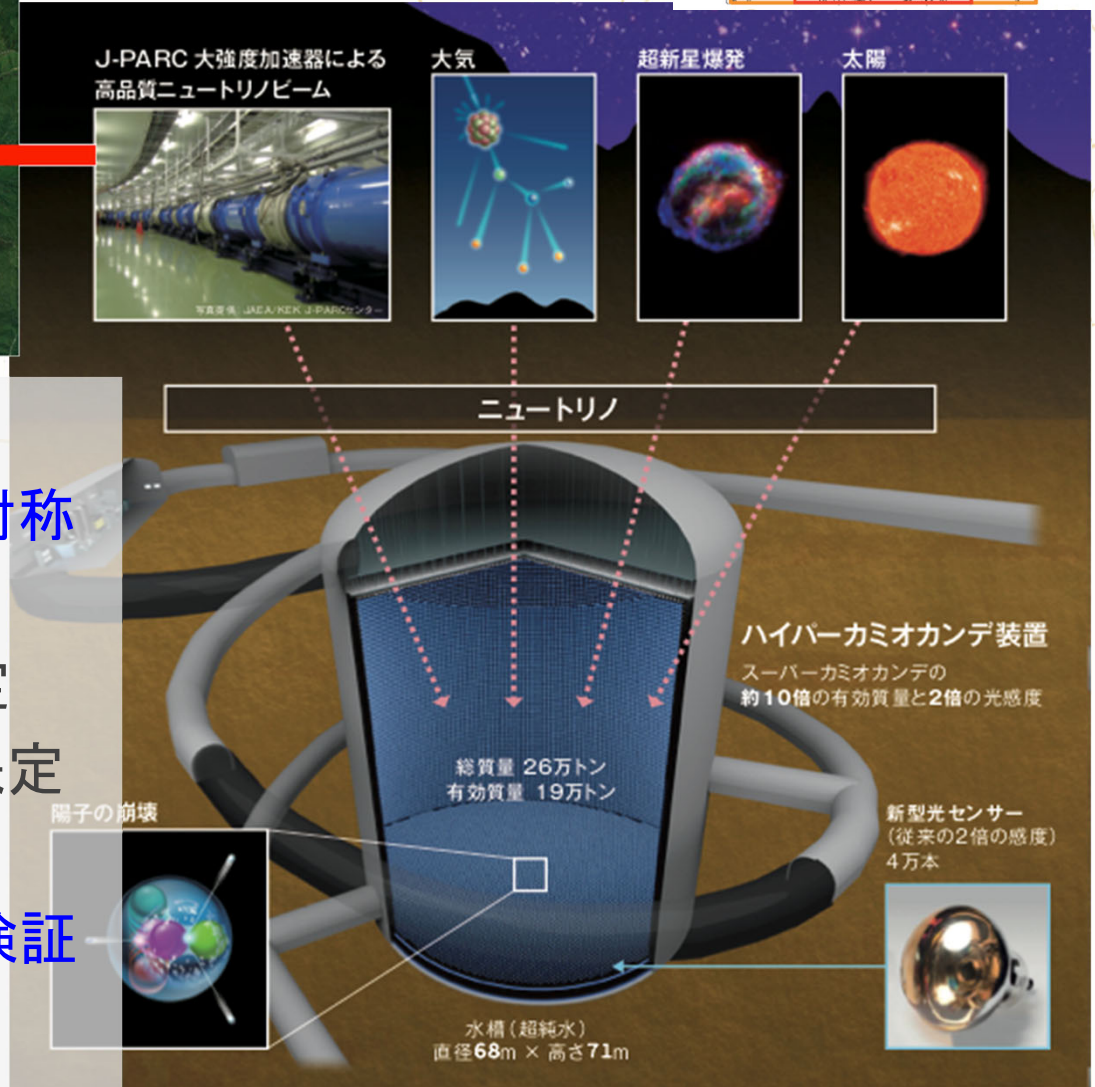
# そして、ハイパーカミオカンデ

## J-PARC NEUTRINO BEAM:



- 加速器長基線実験
  - ✓ CP位相  $\delta_{CP} \approx 0$  であれば  $5\sigma$  でCP対称性の破れを観測
  - ✓ CP位相  $\delta_{CP}$  を  $7^\circ \sim 22^\circ$  の精度で決定
- 大気ニュートリノによる質量順序の決定
- ニュートリノ天文学(太陽、超新星)
- 陽子崩壊探索による大統一理論の検証
- 暗黒物質探索

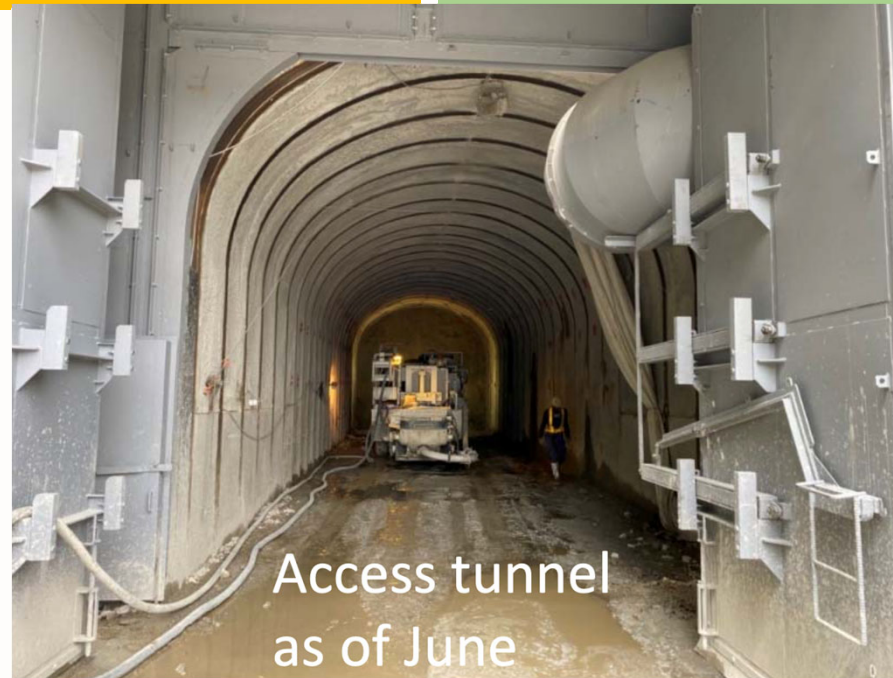
2020年度建設開始 2027年度完成予定





# ハイパーカミオカンデ建設状況

2021年5月



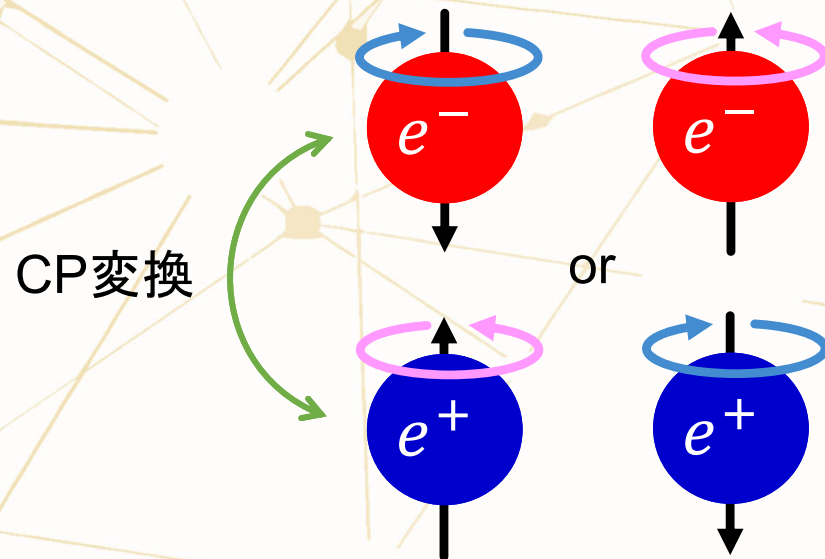
ところで、ニュートリノを通して  
高いエネルギーの物理や  
物質反物質非対称宇宙の起源を  
理解するには、これも重要

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ )

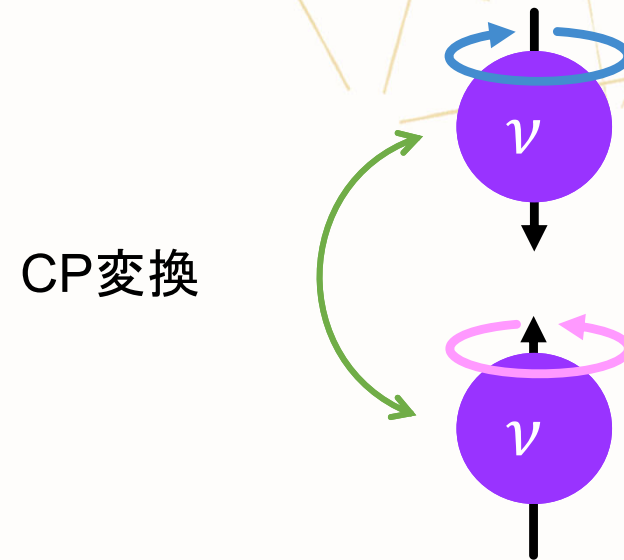


# ニュートリノは、他のフェルミオンとは違うかもしれない

ディラック・フェルミオン

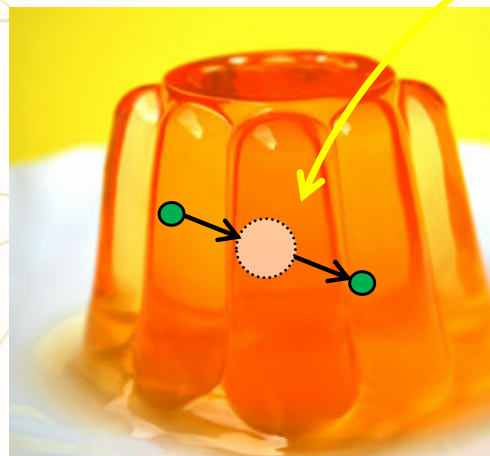


マヨラナ・フェルミオン

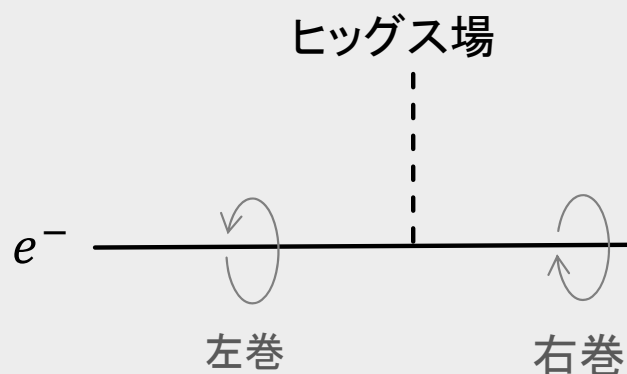


ニュートリノがディラック・フェルミオンなのかマヨラナ・フェルミオンなのかは、わかっていない。

# シーソー模型 by 柳田勉氏他

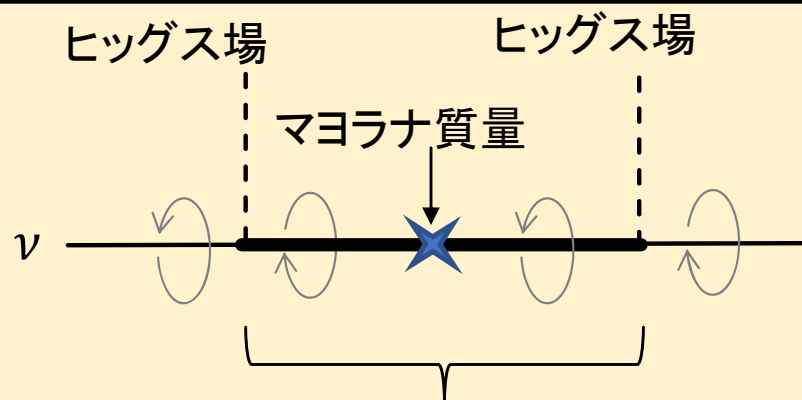
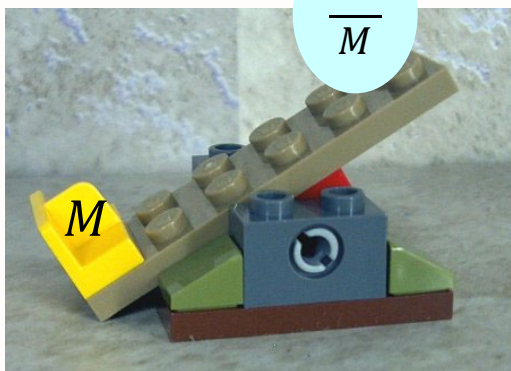


- マヨラナニュートリノはヒッグス場と直接相互作用はできない。
- まだ見つかっていない重いマヨラナニュートリノが存在。
- それを介して(観測されている)ニュートリノはヒッグス場を感じる。
- そのせいですごく軽くなる。
- 重いマヨラナ粒子の質量
  - $10^{10} \sim 10^{15}$  GeVだと自然



電子などの質量の与えられ方

$$\frac{m^2}{M}$$



マヨラナ質量が重いと、ヒッグス場との相互作用で得られる質量が小さくなる

シーソー模型における質量の与えられ方の一例

# 重いニュートリノを勝手に作るってずるくないか？

## 大統一理論 (← まだ完成していない)

- 何種類もあるように見えるフェルミオン、ボソンを一つの枠組に
  - 陽子が崩壊すると予言
  - いくつかの有力候補は重いマヨラナニュートリノがあることを予言
- 混合行列がクォークとレプトンで大きく異なるのは、重いマヨラナニュートリノが関わっているせい？

## レプトジェネシスによる物質反物質非対称宇宙の生成

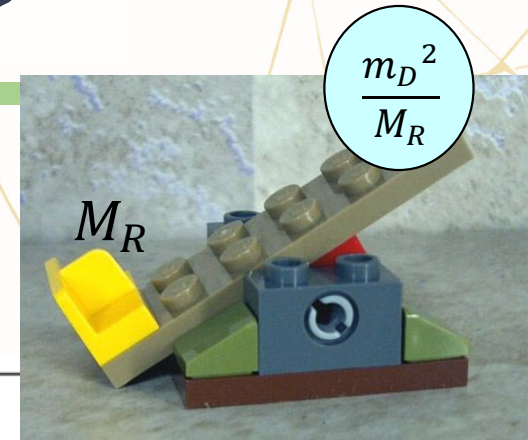
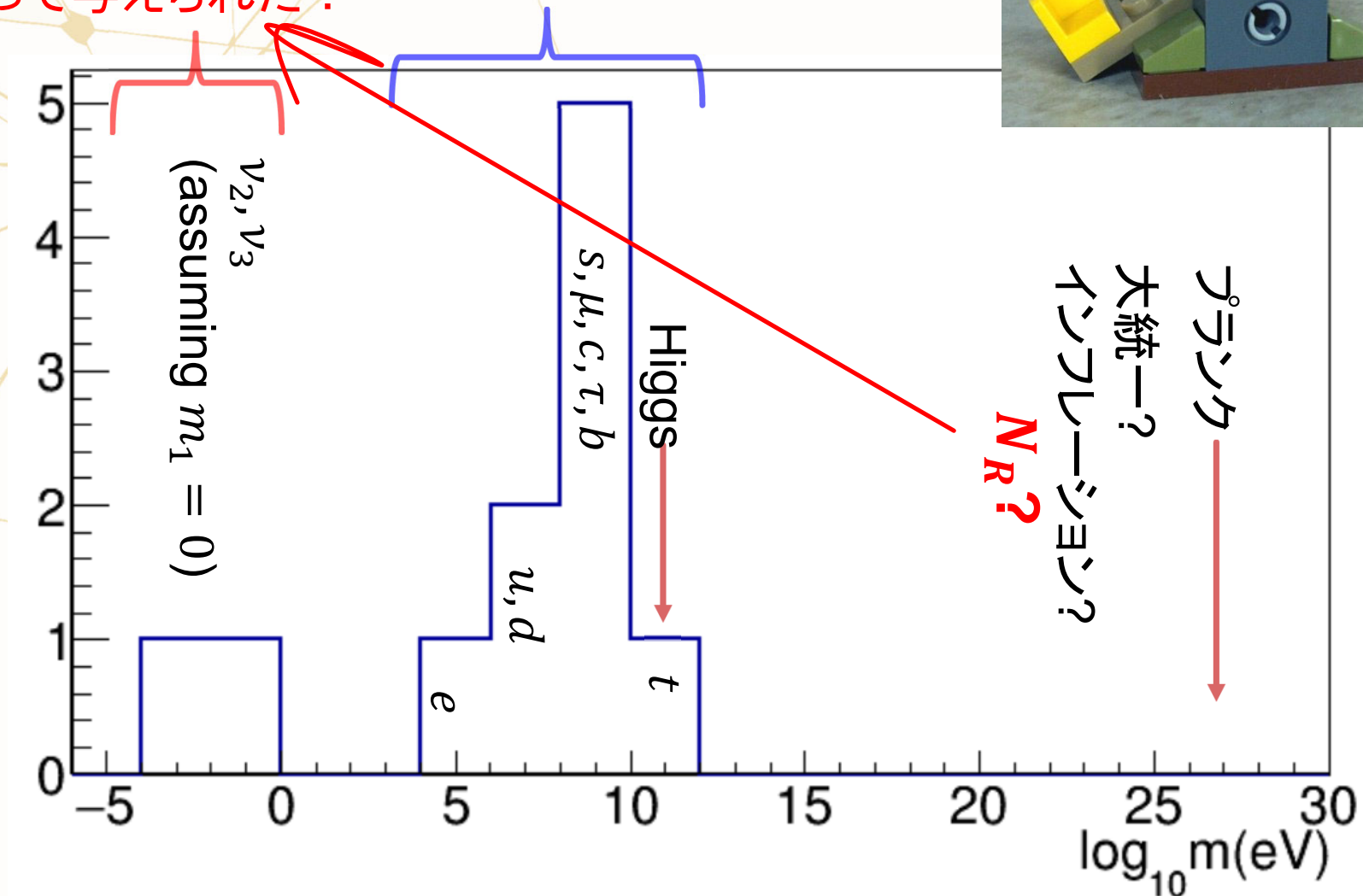
- 宇宙初期に生成した重いマヨラナニュートリノの崩壊で軽いニュートリノを生成。
- この時にCP対称性が破れ ニュートリノの数 $\neq$ 反ニュートリノの数
- その後、真空の遷移などを経て物質の数 $>$ 反物質の数

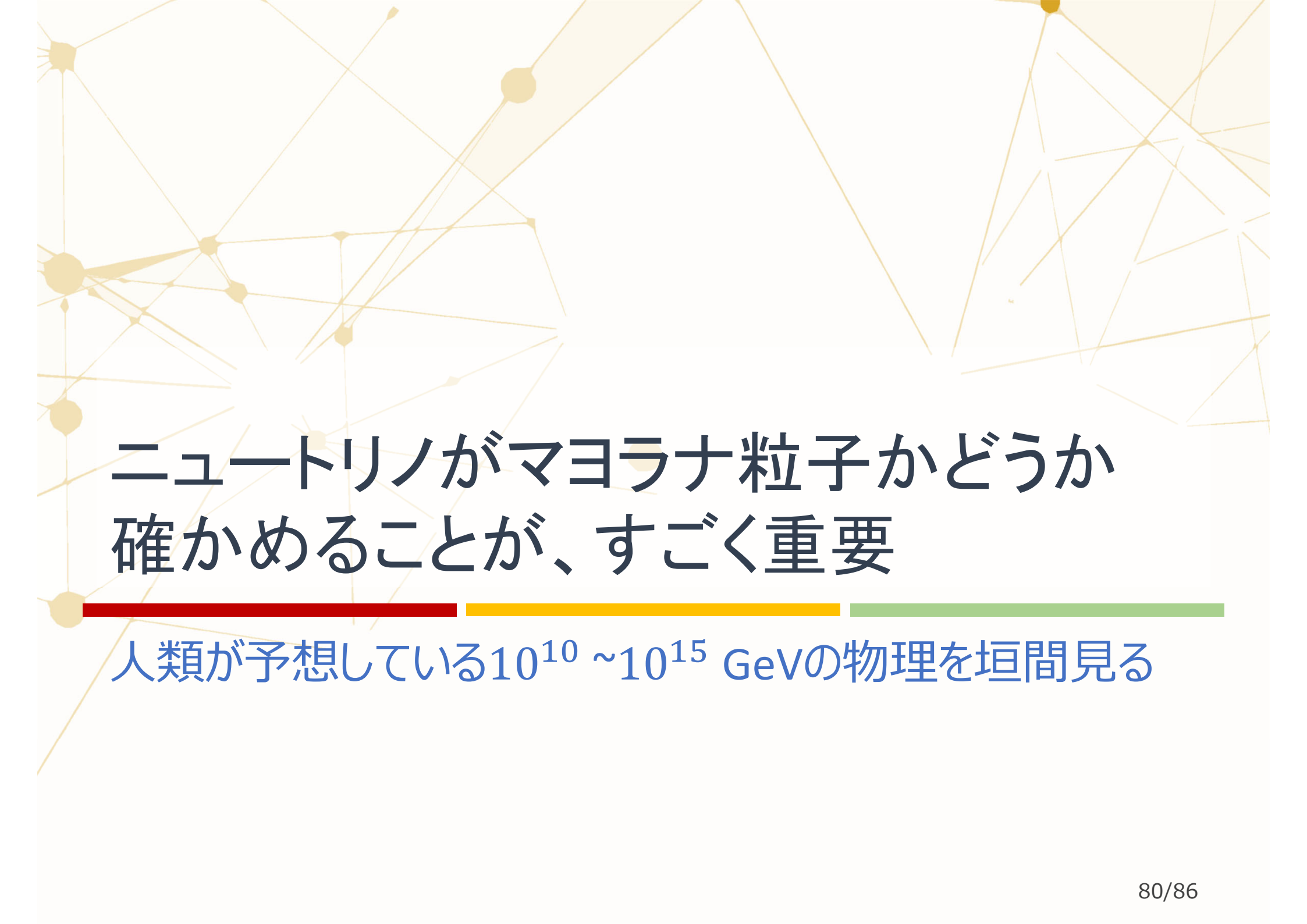


# ニュートリノが極端に軽いのは 高いエネルギーの物理が関係？

どうやって与えられた？

真空中に凝縮した  
ヒッグス場との相互作用





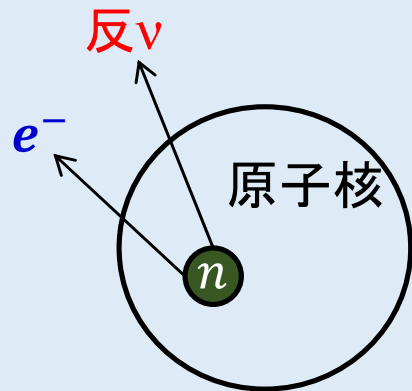
ニュートリノがマヨラナ粒子かどうか  
確かめることが、すごく重要

---

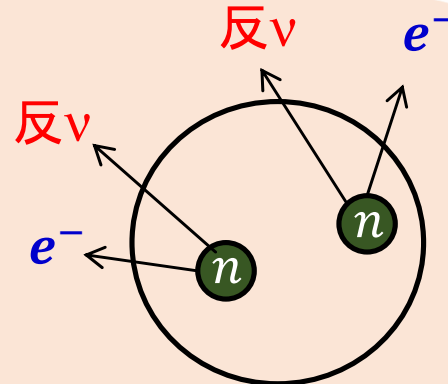
人類が予想している $10^{10} \sim 10^{15}$  GeVの物理を垣間見る

# “ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊” ( $0\nu\beta\beta$ )

## 普通のベータ崩壊

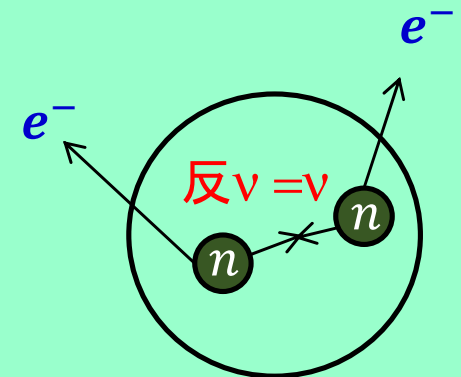


## 普通の 二重ベータ 崩壊



普通のベータ崩壊がエネルギー保存で禁止されているような原子核で稀だけどたまに起きる。

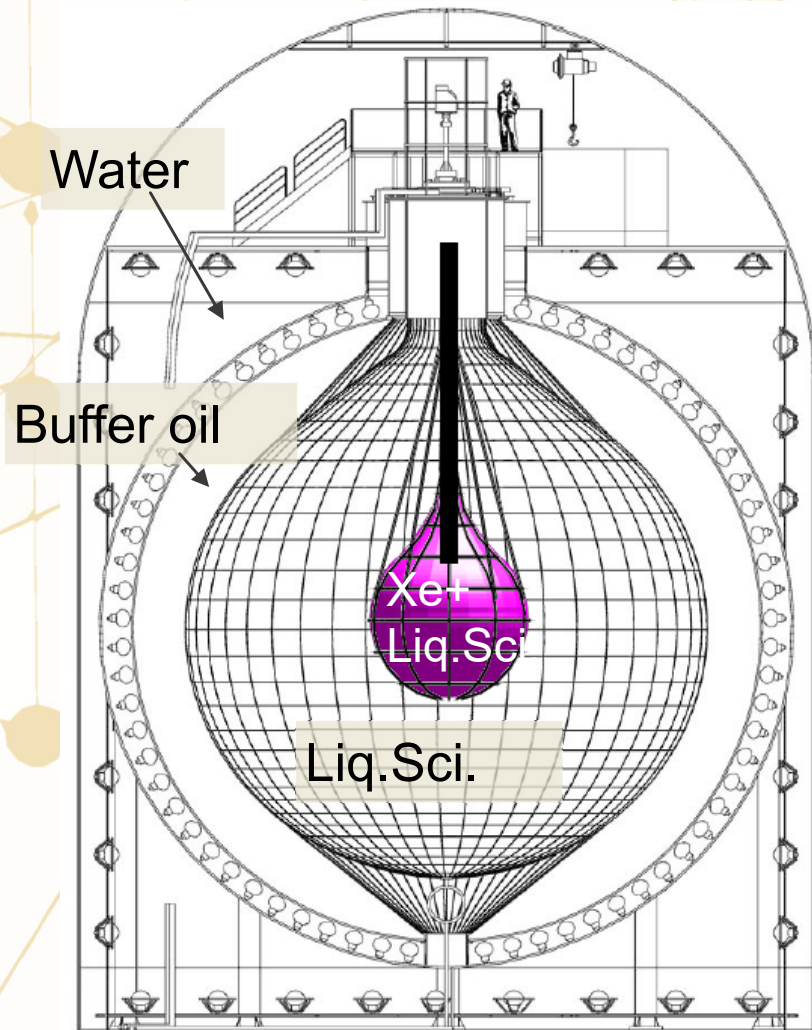
## $0\nu\beta\beta$



- ニュートリノがマヨラナ粒子である場合に起きる
- ニュートリノがマヨラナ粒子かどうか調べるのに、今の所、最も成功の可能性が高い
- この反応の起きやすさ  $\propto (\text{ニュートリノ } \beta\beta \text{ 有効質量})^{-2}$   
ニュートリノの質量が小さいため、なかなか起きない
- 世界中で、これを発見しようと競争が繰り広げられている。  
現在の世界記録は、カムランド禅実験: 寿命  $> 10^{26}$  年



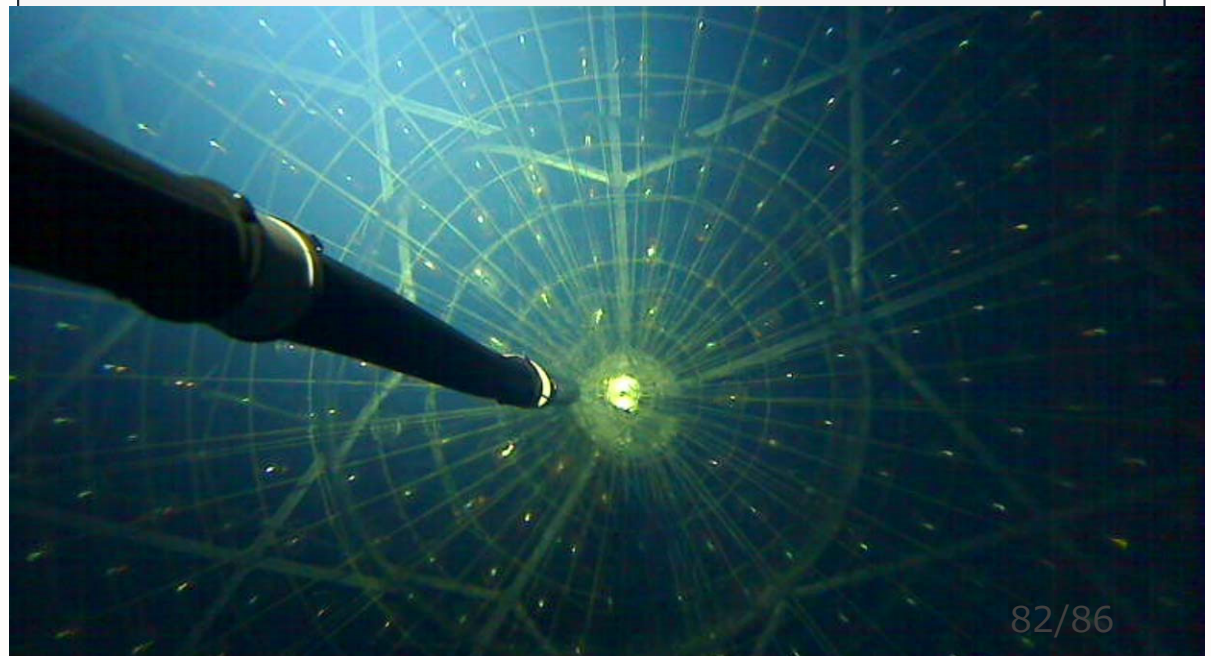
# カムランド禅



カムランド：東北大学ニュートリノ科学研究センターがカミオカンデの場所に建設

カムランド禅：液体シンチレータにキセノン( $^{136}\text{Xe}$ )を溶解

- 2011年～ 2015年：320 ～ 380 kg
- 2019年～：745 kg

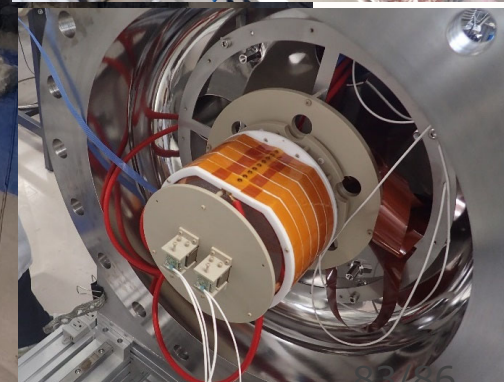
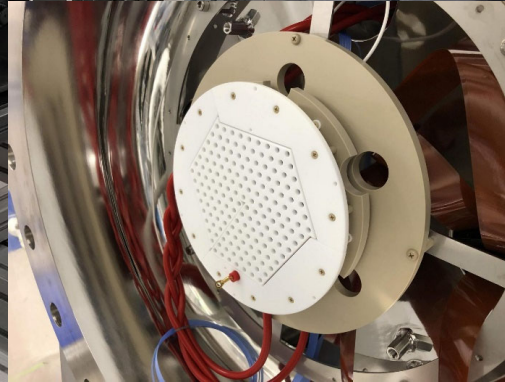
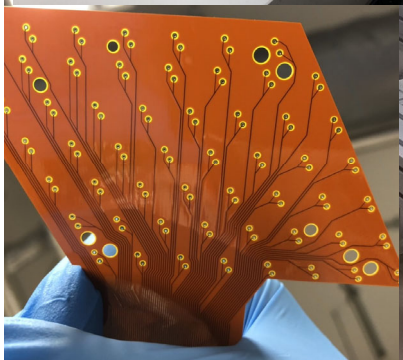
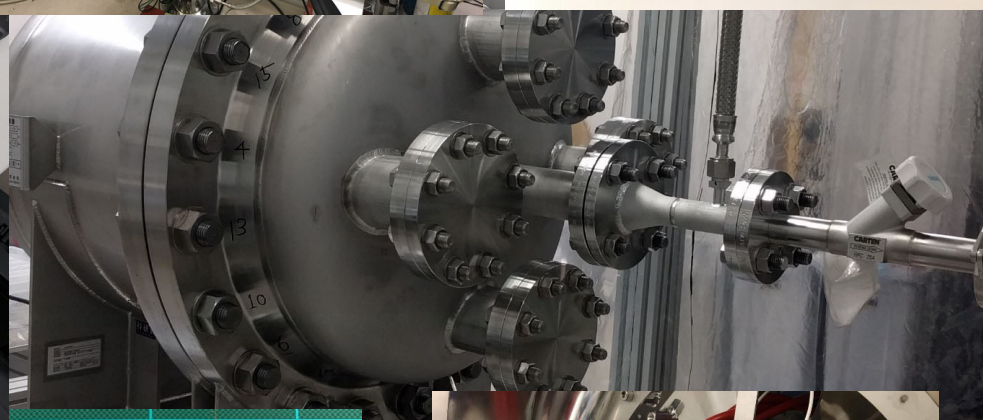
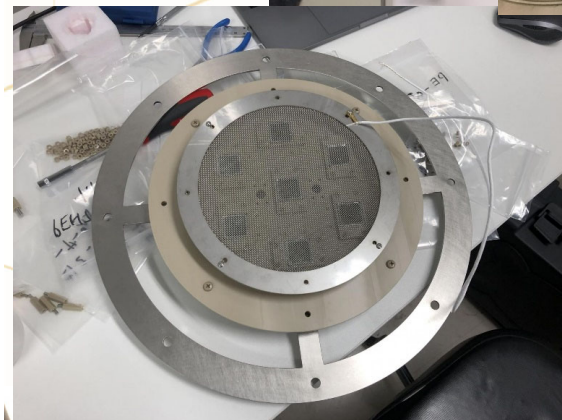
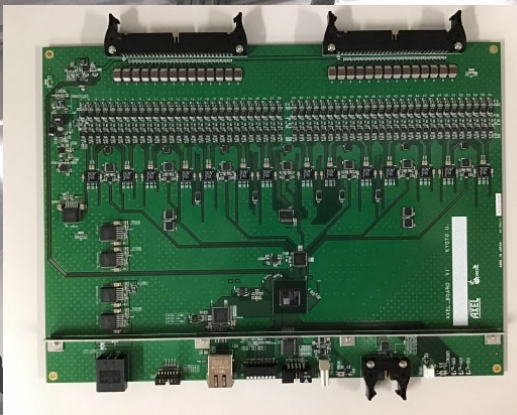
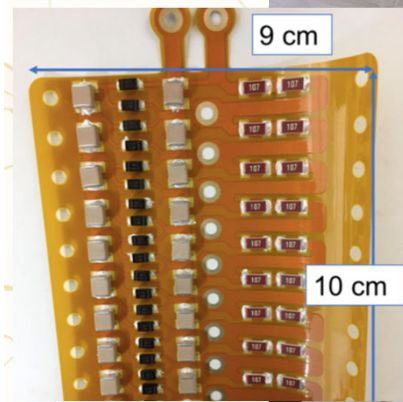






# アクセル・キセノンガス検出器

0 $\nu\beta\beta$ 発見を目指して私も若者と一緒に新しい検出器の開発しています





## アクセル・キセノンガス検出器

$0\nu\beta\beta$ 発見を目指して私も若者と一緒に新しい検出器の開発しています

1.8 MeV 電子の走った跡

2021年11月24日 by 中村和広



# ニュートリノを巡る未解決の問題群

## 加速器ニュートリノ振動実験

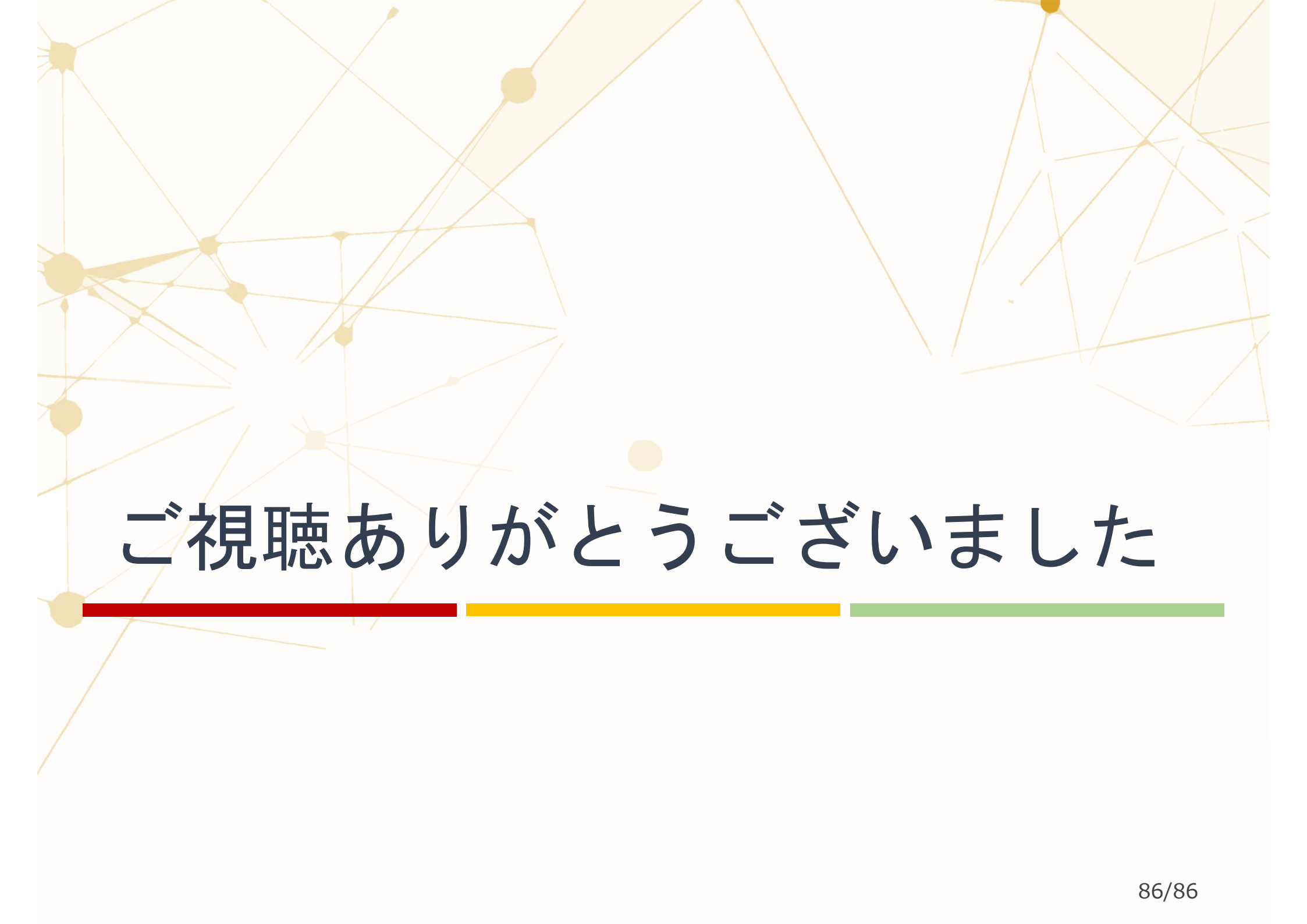
- ✓ フレーバーと質量の混合行列の特徴、特にクォークとの違い
- ✓ 質量の順番  
クォークと同じように  $m_1 < m_2 < m_3$  か、あるいは  $m_3 < m_1 < m_2$  か？
- ✓ (クォークと同じように) CPは破れているのか？

- ✓ 質量の絶対値 **宇宙観測**
- ✓ マヨラナ粒子？  
粒子=反粒子 (スピンの向きが違うだけ)

**ニュートリノを伴わない二重  
ベータ崩壊**

- ✓ クォークや、荷電レプトンに比べ、なぜこんなに軽いのか？
- ✓ 物質反物質非対称の宇宙の起源？ **十大統一理論**
- ✓ LSNDとMiniBooNEのアノマリー (本当に3種類か？)

\* ただし、青色部分を完全に解決するには、もっと研究が必要



ご視聴ありがとうございました

---