

# T2K-SK, Super-K実験, Hyper-K実験: 紹介

ロジャー  
HEミーティング  
令和3年度版



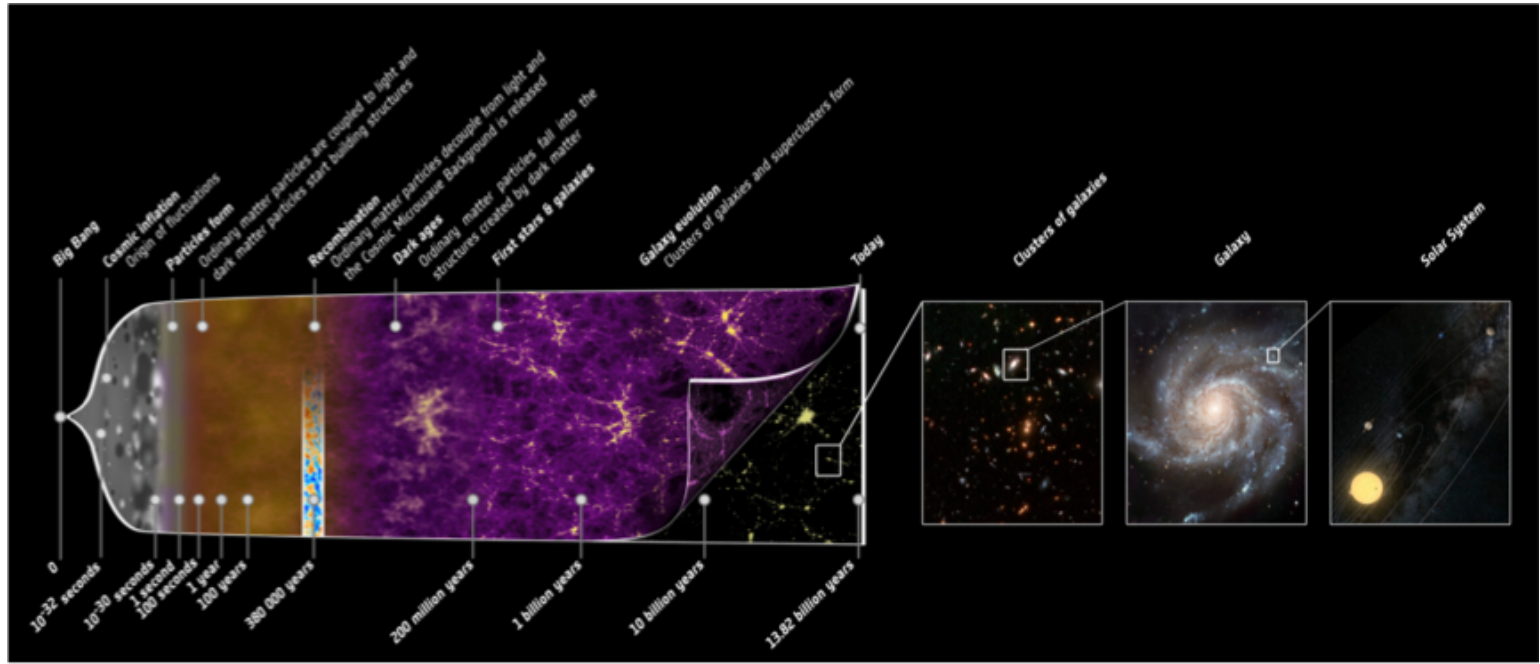
# 主な研究目的

- ニュートリノ振動の完全な理解
  - CP破れの有無
  - ニュートリノ質量階層性
  - 混合パラメーターの精密測定
  
- 自然ニュートリノの観測
  - 大気ニュートリノ
  - 超新星爆発ニュートリノ
  - 超新星背景ニュートリノ
  
- 大統一理論の証明
  
- 上記と関連な測定

# 主な研究目的

- ニュートリノ振動の完全な理解
  - CP破れの有無
  - ニュートリノ質量階層性
  - 混合パラメーターの精密測定

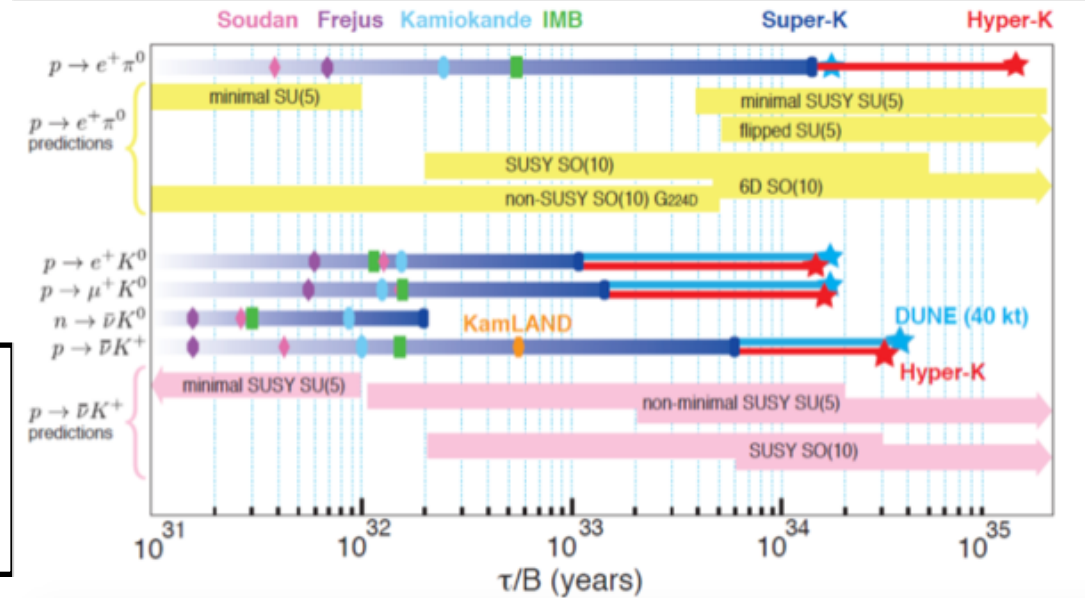
物質優勢宇宙の説明へ！



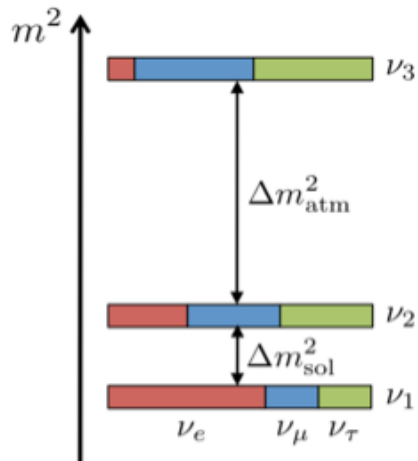
## 主な研究目的

- ニュートリノ振動の完全な理解
  - CP破れの有無
  - ニュートリノ質量階層性
  - 混合パラメーターの精密測定

質量の順を決定  
 大統一理論の種類に絞る  
 ニュートリノと伴わないβ崩壊へ

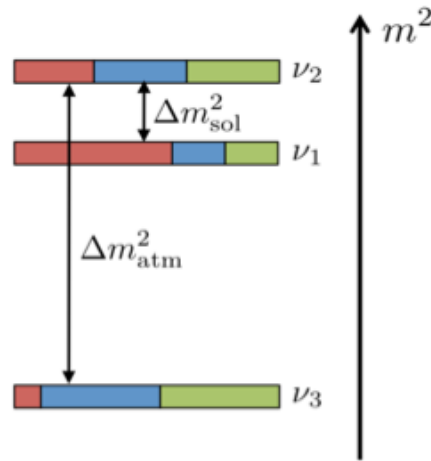


normal hierarchy (NH)



$$\Delta m^2_{32} > 0$$

inverted hierarchy (IH)

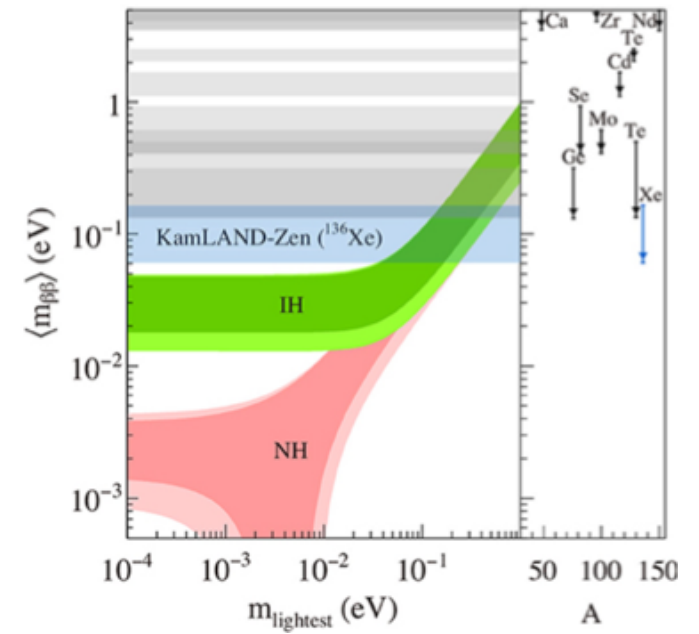
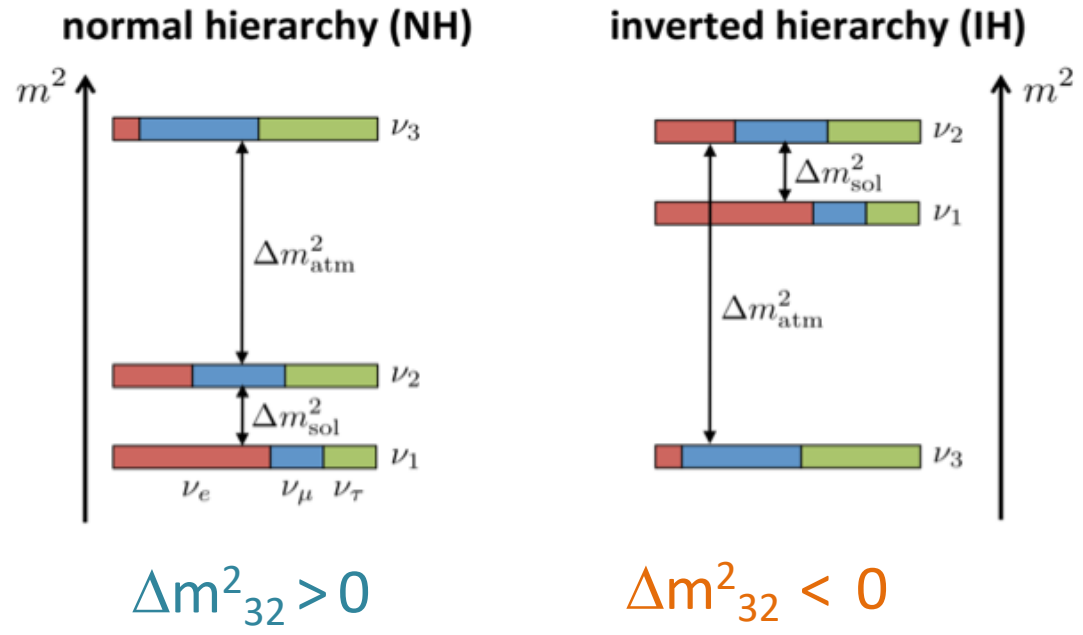


$$\Delta m^2_{32} < 0$$

# 主な研究目的

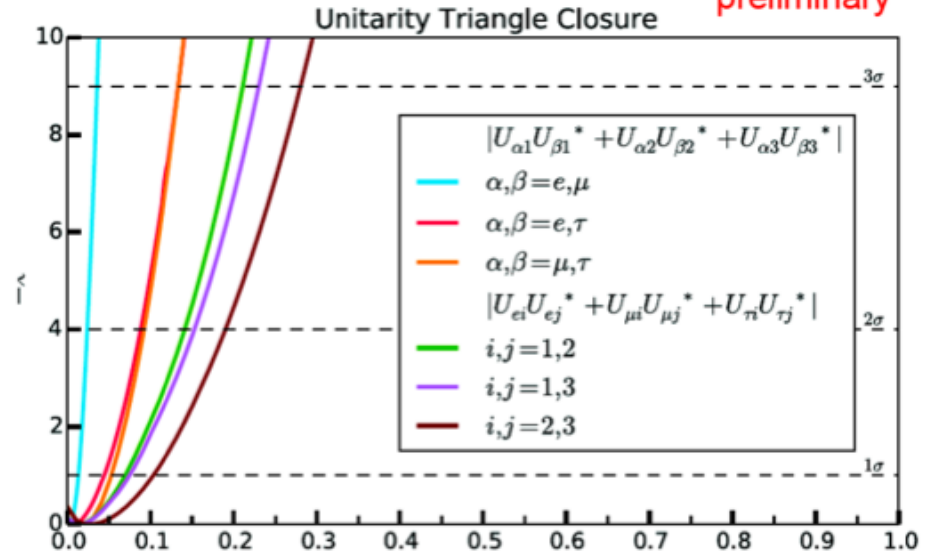
- ニュートリノ振動の完全な理解
  - CP破れの有無
  - ニュートリノ質量階層性
  - 混合パラメーターの精密測定

質量の順を決定  
 大統一理論の種類に絞る  
 ニュートリノと伴わないβ崩壊へ



# 主な研究目的

- ニュートリノ振動の完全な理解
  - CP破れの有無
  - ニュートリノ質量階層性
  - 混合パラメーターの精密測定



混合マトリクス of (非)対称性へ  
ユニタリティーの破れ?

$U_{\text{PMNS}}$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Flavour Eigenstates                      Mass Eigenstates

Mass Eigenstates  
Labeled by  
Decreasing  
 $\nu_e$   
Content

# 主な研究目的

- ニュートリノ振動の完全な理解
  - CP破れの有無
  - ニュートリノ質量階層性
  - 混合パラメーターの精密測定

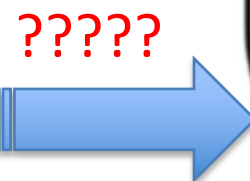
混合マトリクス of (非)対称性へ  
ユニタリティーの破れ?

$U_{PMNS}$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Flavour Eigenstates
Mass Eigenstates

Mass Eigenstates  
Labeled by  
Decreasing  
 $\nu_e$   
Content



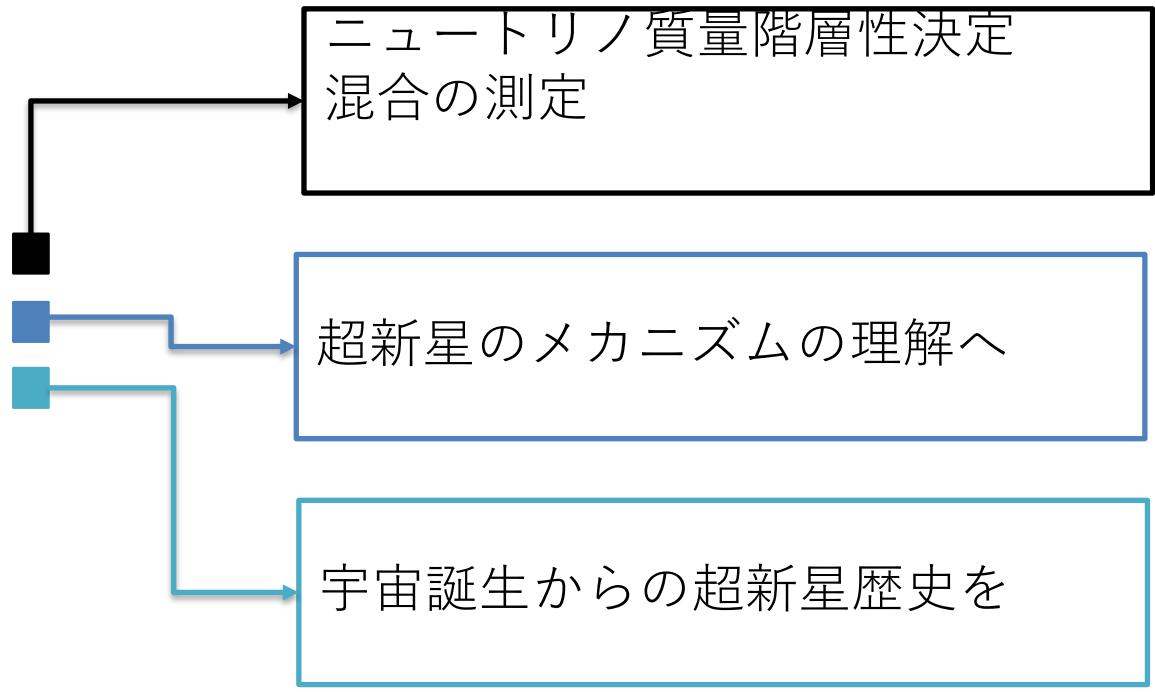
$$\begin{pmatrix} (U_{e1} & U_{e2} & U_{e3}) \cdots U_{eN} \\ (U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3}) \cdots U_{\mu N} \\ (U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3}) \cdots U_{\tau N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ U_{s_n1} & U_{s_n2} & U_{s_n3} & \cdots & U_{s_nN} \end{pmatrix}$$

# 主な研究目的

- 自然ニュートリノの観測

- 大気ニュートリノ
- 超新星爆発ニュートリノ
- 超新星背景ニュートリノ

- 大統一理論の証明



ニュートリノ質量階層性決定  
混合の測定

超新星のメカニズムの理解へ

宇宙誕生からの超新星歴史を

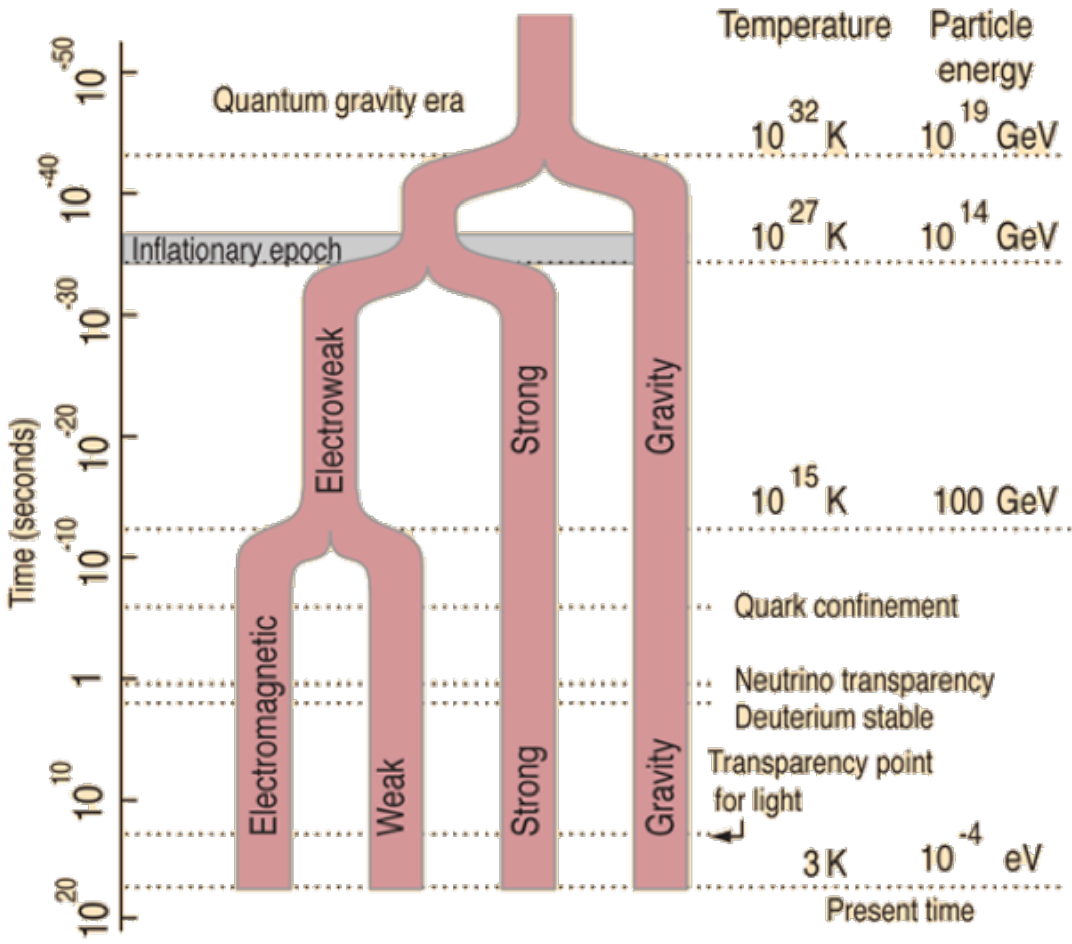


# 主な研究目的

- 自然ニュートリノの観測
  - 大気ニュートリノ
  - 超新星爆発ニュートリノ
  - 超新星背景ニュートリノ

■ 大統一理論の証明

標準模型を超える物理へ  
力の統一？



## トピクス

# 主な研究目的

- ニュートリノ振動の完全な理解
  - CP破れの有無
  - ニュートリノ質量階層性
  - 混合パラメーターの精密測定

- 自然ニュートリノの観測
  - 大気ニュートリノ
  - 超新星爆発ニュートリノ
  - 超新星背景ニュートリノ

- 大統一理論の証明

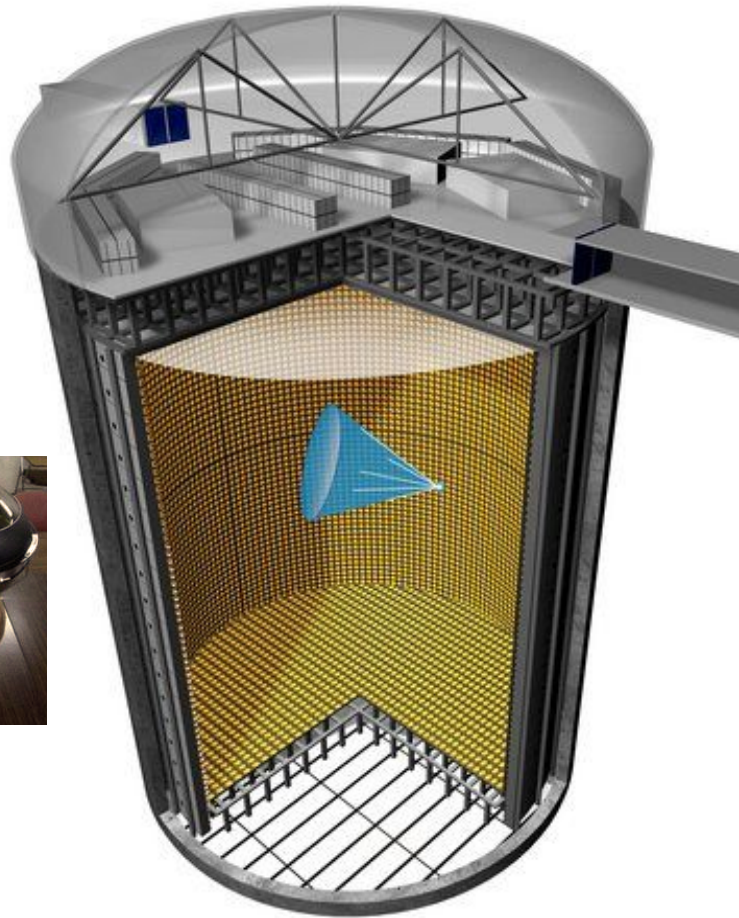
- 上記と関連な測定

ニュートリノと反ニュートリノ  
それぞれの振る舞いを測定

バックグラウンドを削減、再構成  
パフォーマンスを向上

系統誤差を減らす

# Super-Kamiokande: Introduction

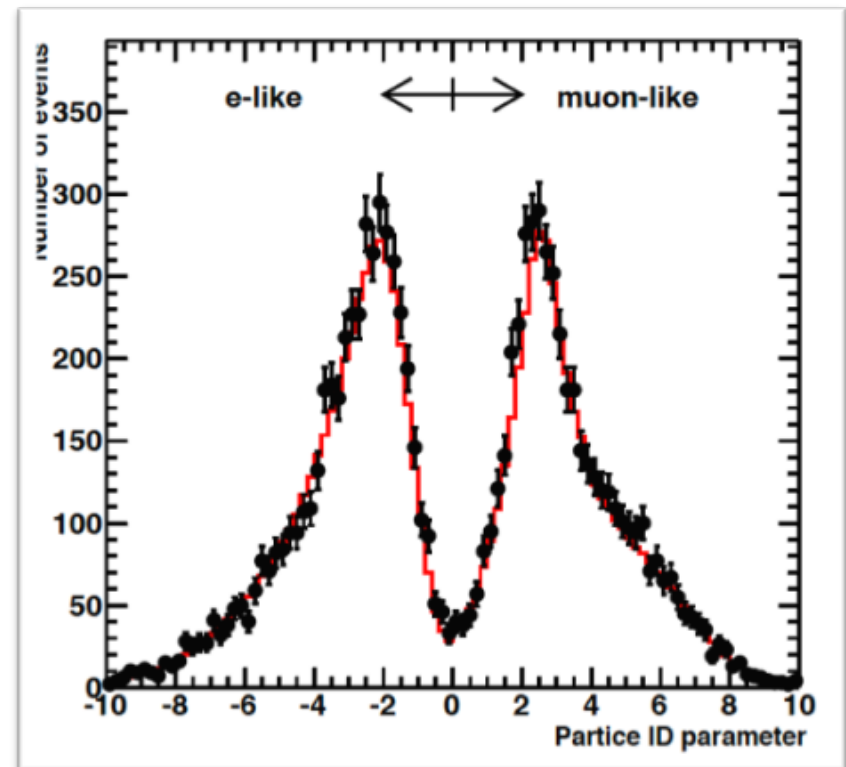


- 5万トンの超純水
- 22.5 kton 有効体積
  - 内部検出器 11,146 20" PMTs
  - 外部検出器 1885 8" PMTs
- 優れている粒子識別 (PID)
  - ミューを間違って「電子」と識別する確率が < 1% MIS ID at 1 GeV
- 多目的の実験

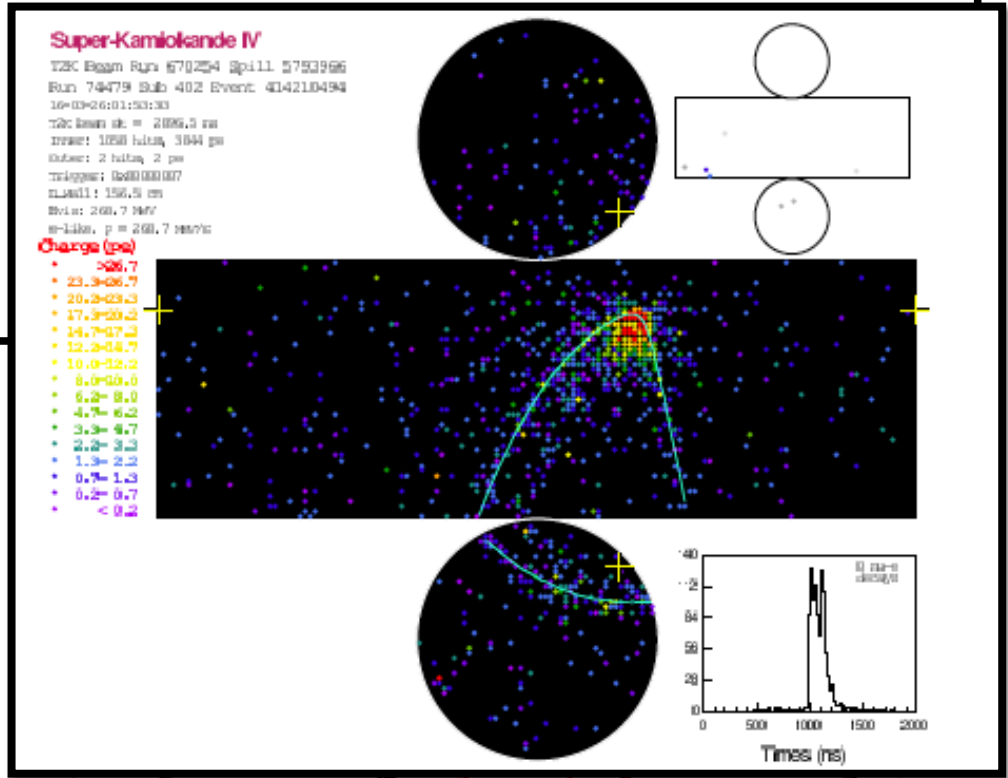
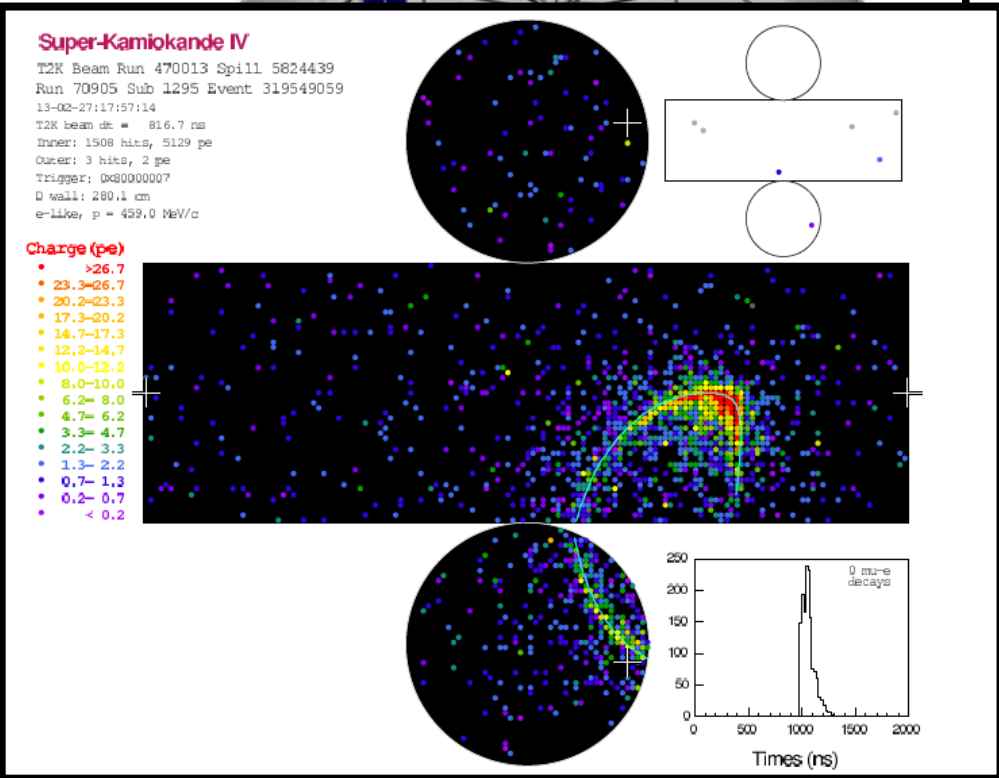


Four Run Periods:  
SK-I (1996-2001) SK-II (2003-2005)  
SK-III (2005-2008) **SK-IV (2008-2018)**

**Upgrade Complete Now operating as SK-V !!**

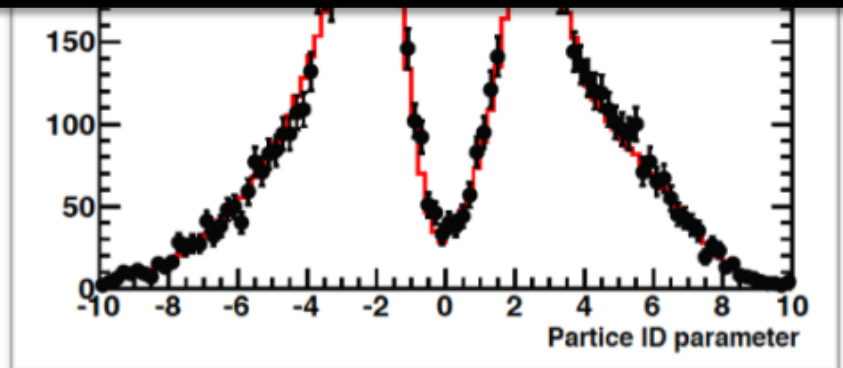


# Neutrino, Antineutrino?



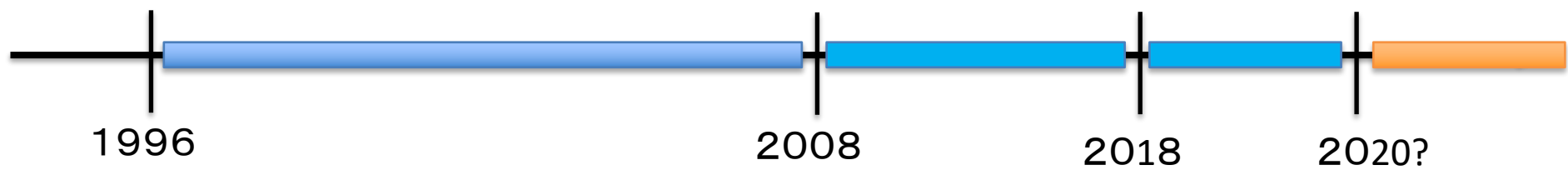
Four Run Periods:  
 SK-I (1996-2001) SK-II (2003-2005)  
 SK-III (2005-2008) **SK-IV (2008-2018)**

Upgrade Complete Now operating as SK-V !!

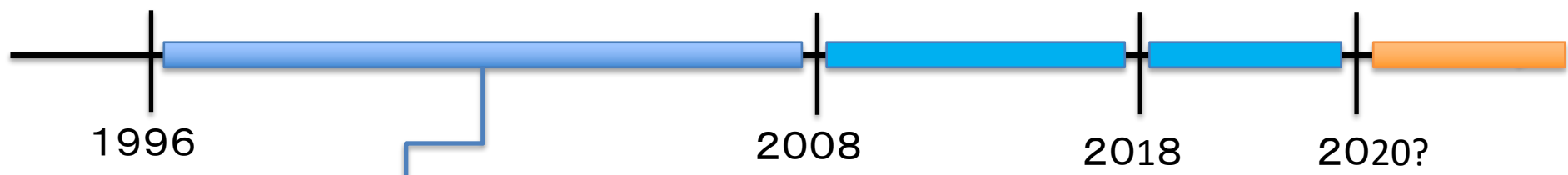


20" PMTs

# スーパーカミオカンデと中性子

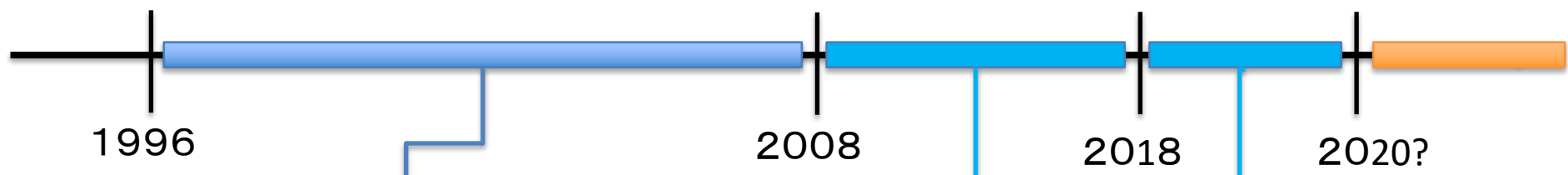


# スーパーカミオカンデと中性子



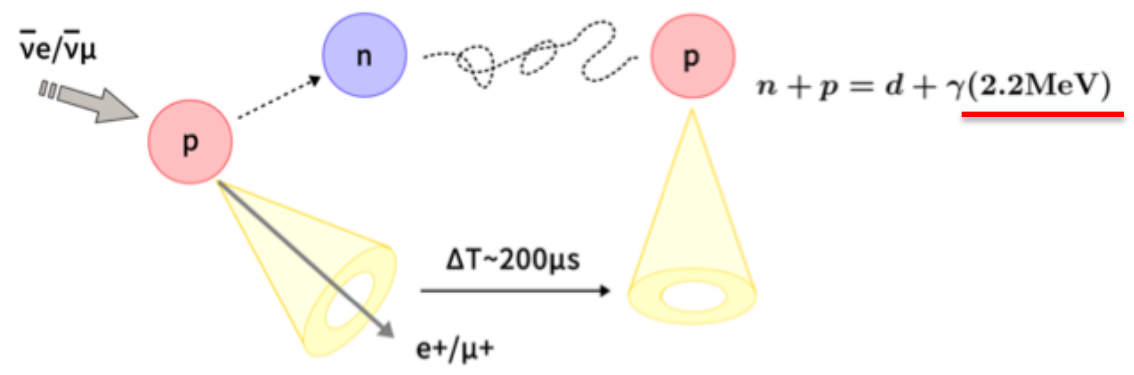
超純水：エレキの性能で、中性子情報なし

# スーパーカミオカンデと中性子

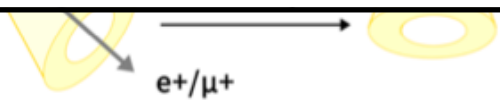
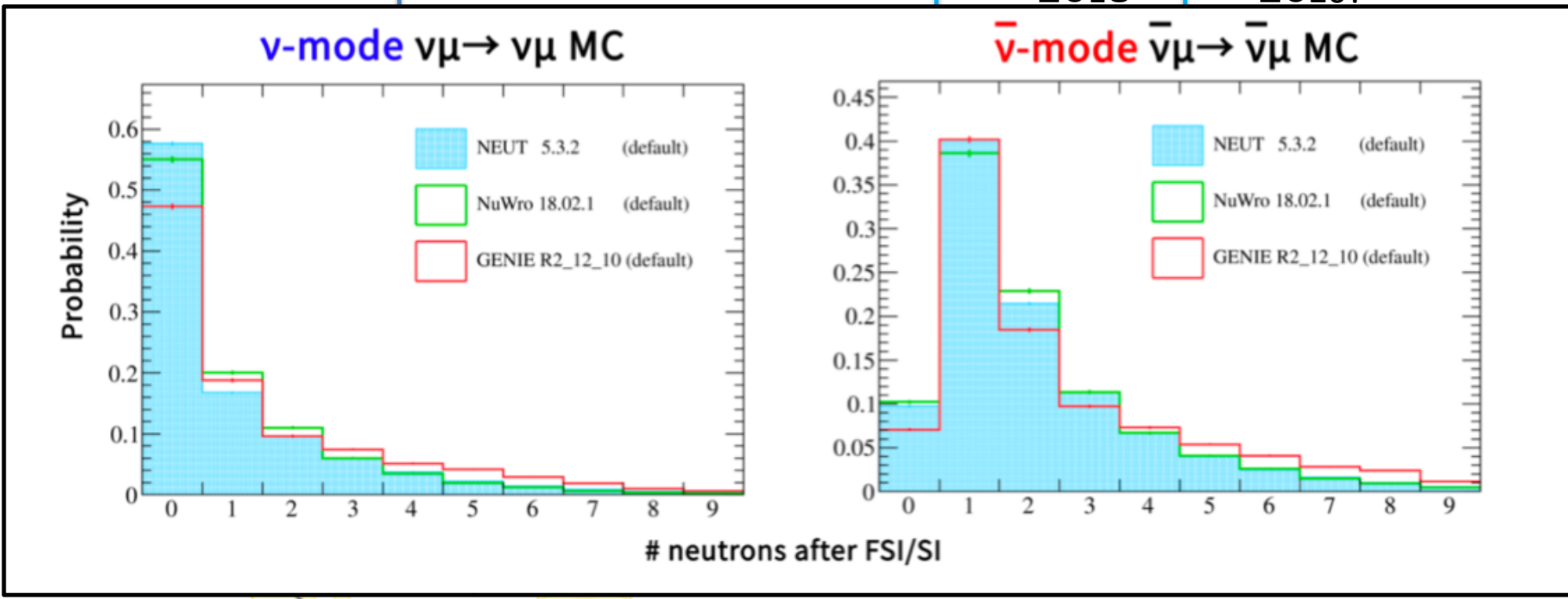
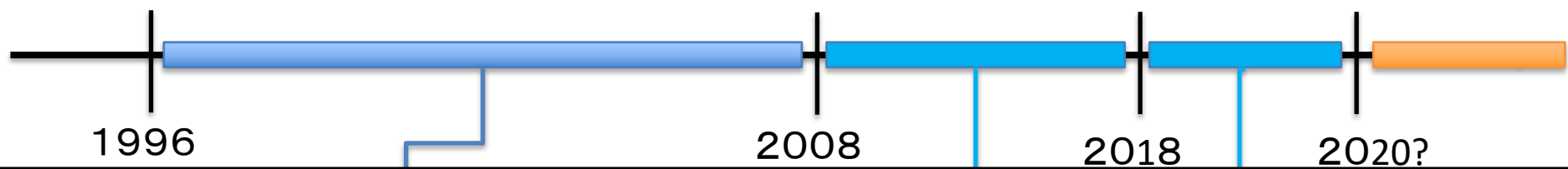


超純水：エレキの性能で、中性子情報なし

超純水：エレキの性能を向上、  
中性子情報あるが検出効率が20%



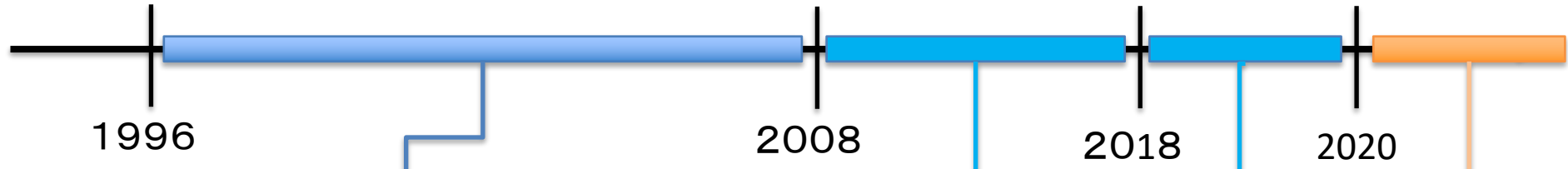
# スーパーカミオカンデと中性子





# スーパーカミオカンデと中性子

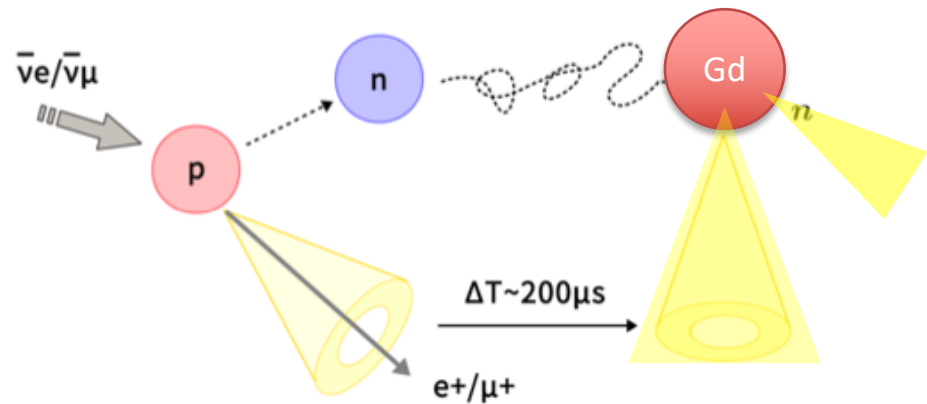
SK-Gd



超純水：エレキの性能で、中性子情報なし

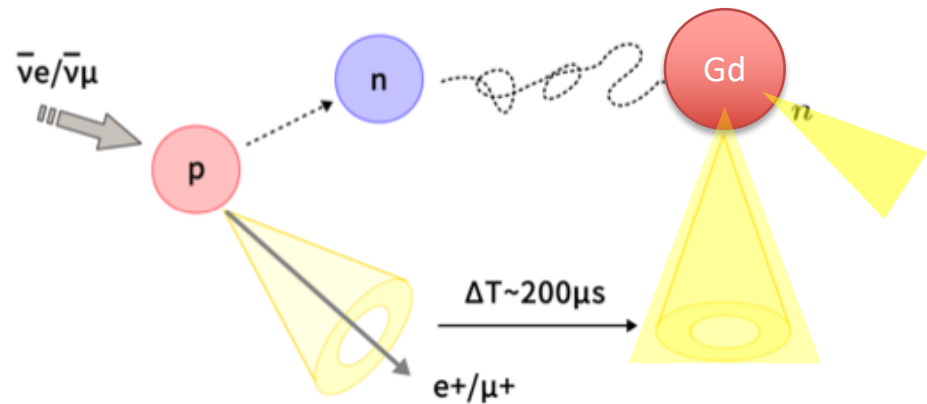
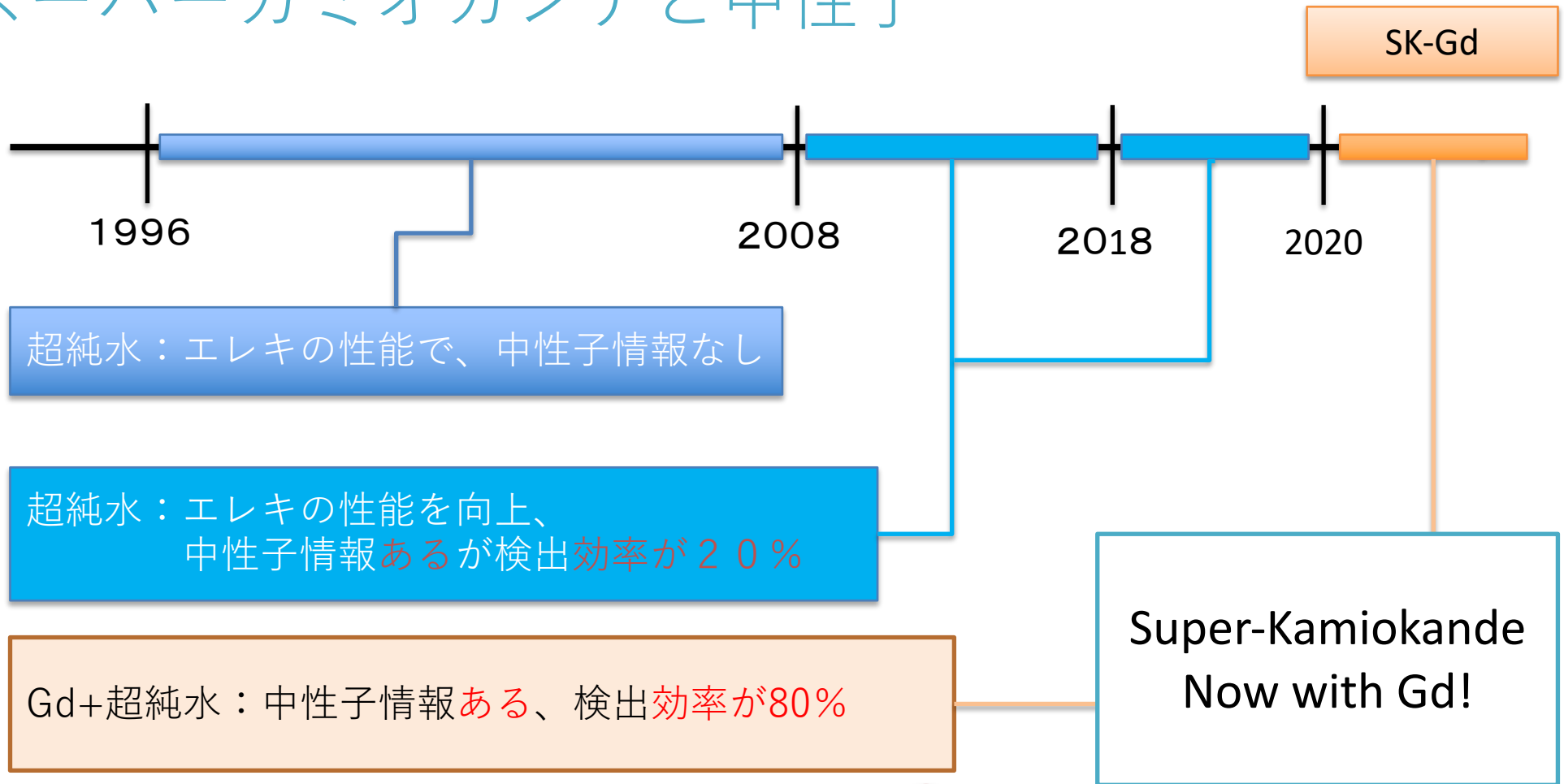
超純水：エレキの性能を向上、  
中性子情報あるが検出効率が20%

Gd+超純水：中性子情報ある、検出効率が80%



複数γ、~8 Mev

# スーパーカミオカンデと中性子



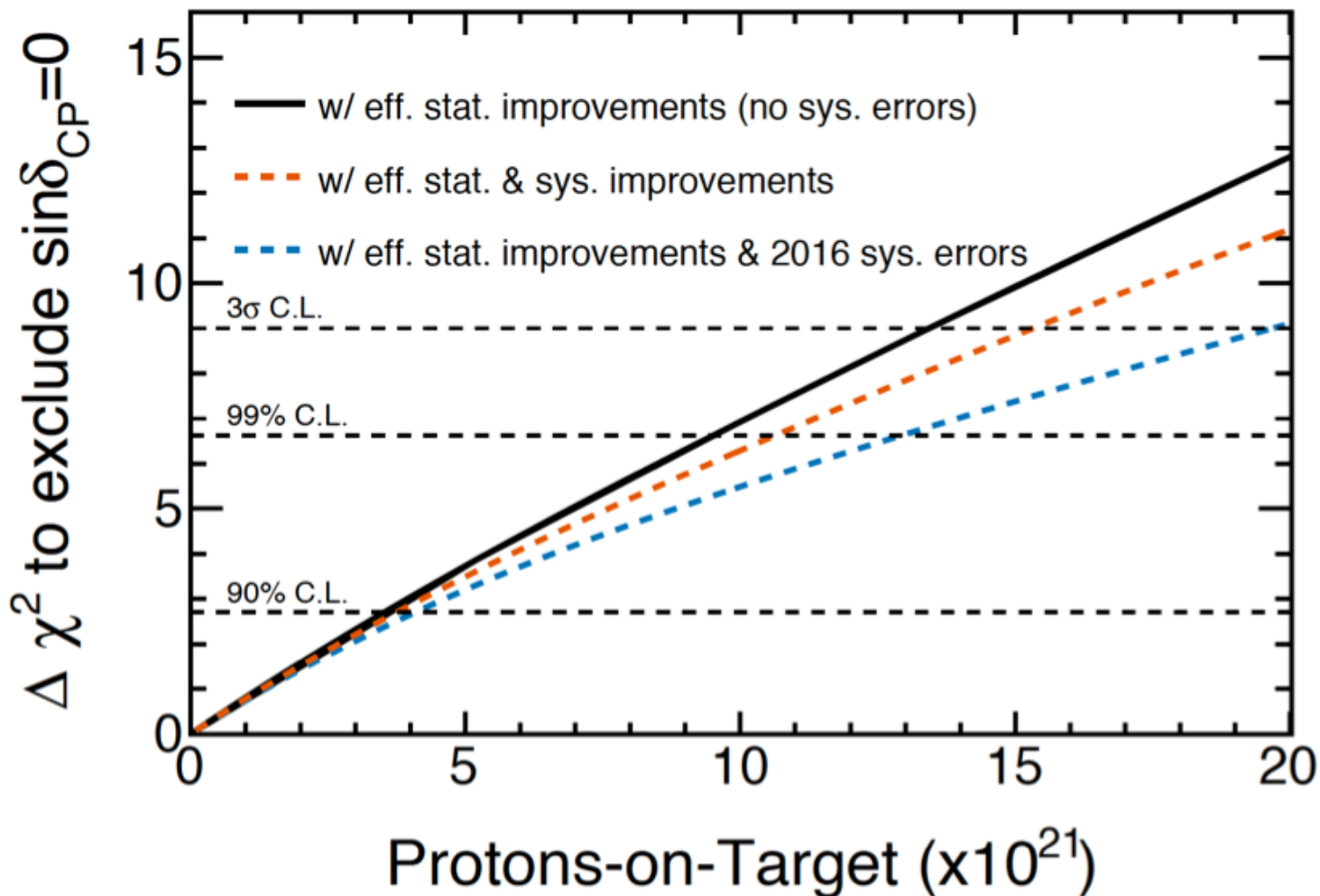
複数 $\gamma$ 、 $\sim 8$  Mev

# スーパーカミオカンデの課題

- 2020年7月初めてGdをSKへ溶かした
  - 0.02% Gd → neutron efficiency ~**50%**
- 2021年にGdを0.06%濃度までに増やす予定
  - 効率~75%
- 関連課題が多い：
  - **Gd入りのシミュレーション**
    - 中性子モデルをキチンと理解
  - 検出器のカリブレーション (中性子効率、energy scale、など)
  - 系統誤差の見積もり
  - 解析の開発
    - ニュートリノ振動
    - 陽子崩壊
    - 超新星探索
    - 。。。

CP破れの優位度

# T2K 関連



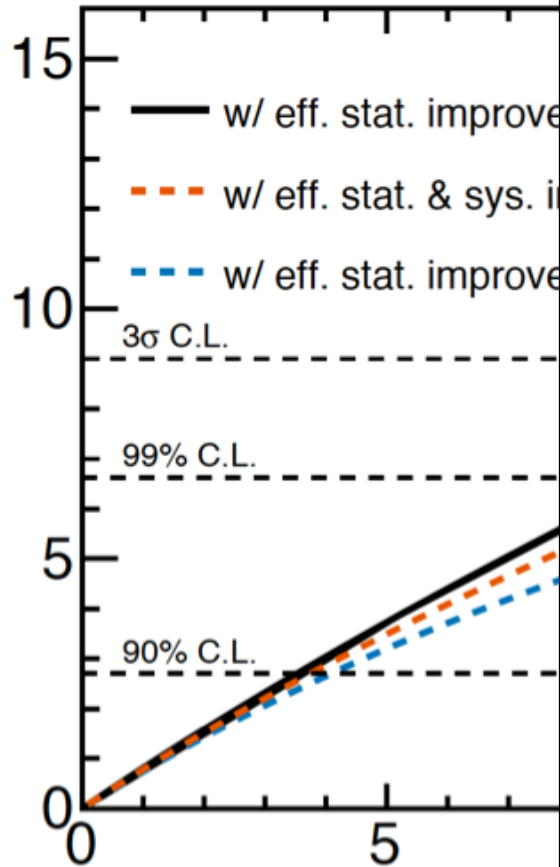
- SK側で解析可能な統計量を増やす
- 検出器反応に伴う系統誤差を削減

# CP破れの優位度

# T2K

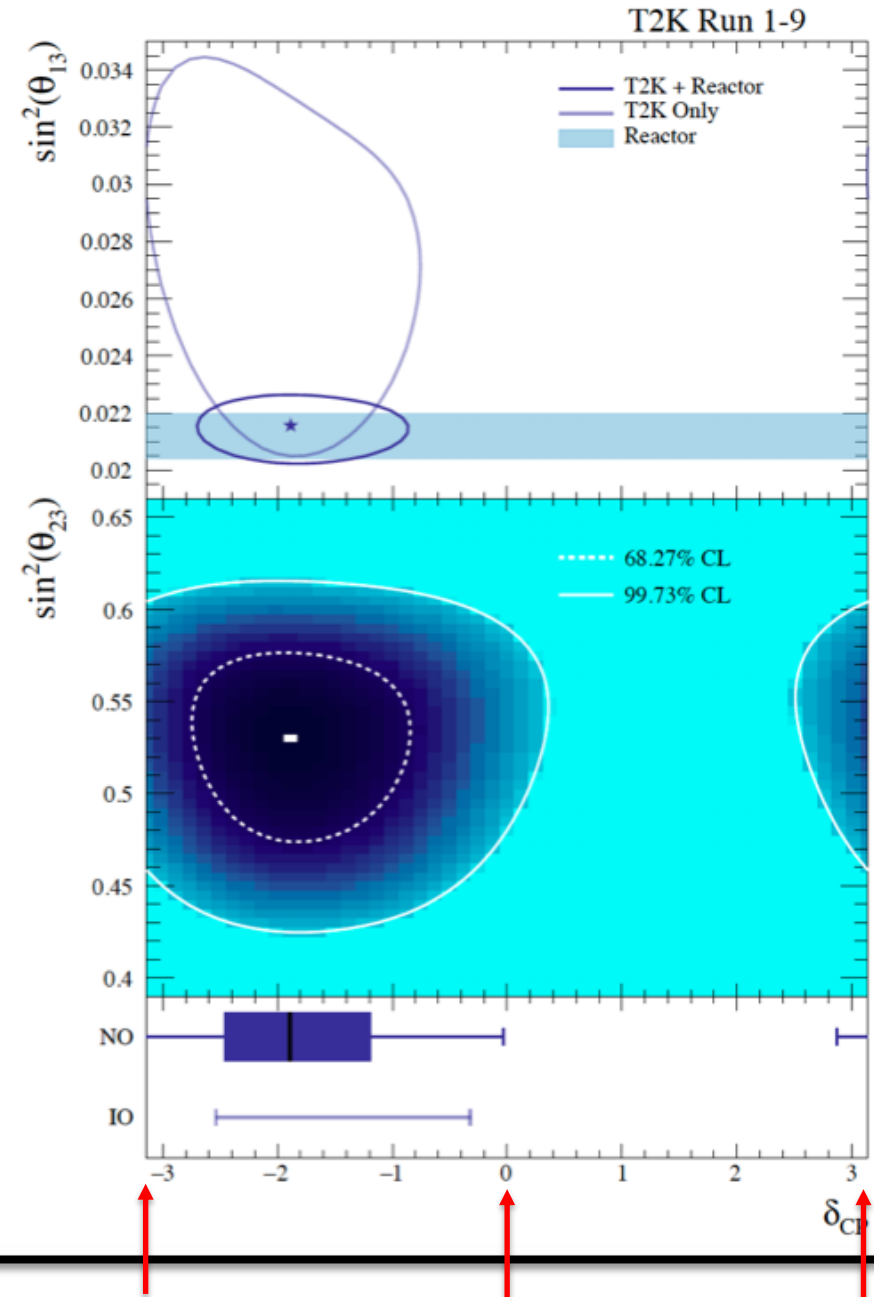
どこまで行ける？

$\Delta \chi^2$  to exclude  $\sin \delta_{CP} = 0$



Protons

- SK側で解析可能な統計量を増や
- 検出器反応に伴う系統誤差を削減



# T2K-SK ワーキンググループ

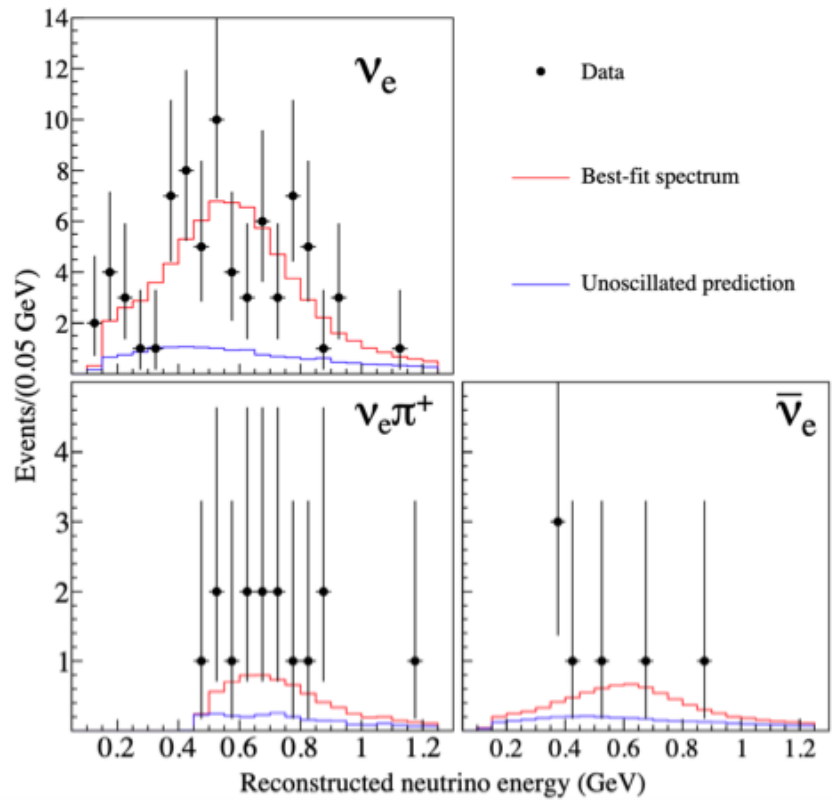
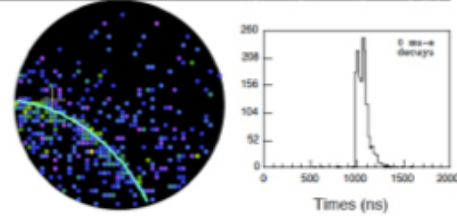
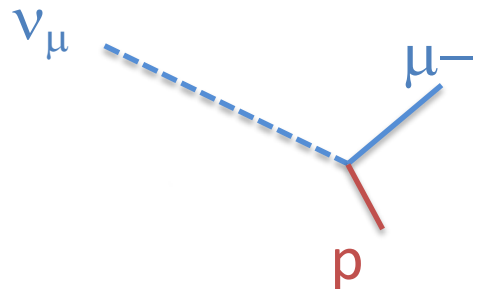
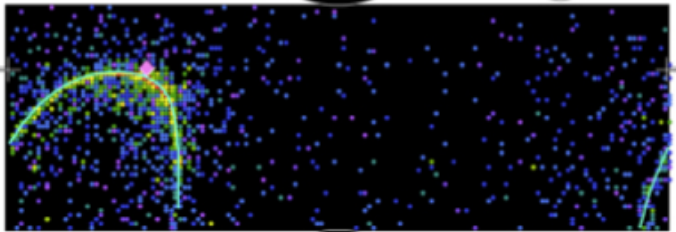
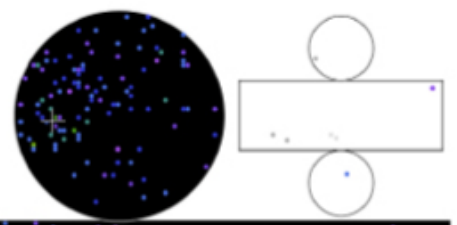
- T2KとSKはそれぞれ独立している実験だが、T2K-SKグループはその間の橋
  - SKにおいてのT2Kビームデータの責任
  - SK側のGPS時間情報の管理
  - SKの再構成アルゴリズムの検証、安定性
  - データのクオリティ
- データサンプルを定義し、系統誤差をつける

再構成した荷電粒子は一つしかないサンプル

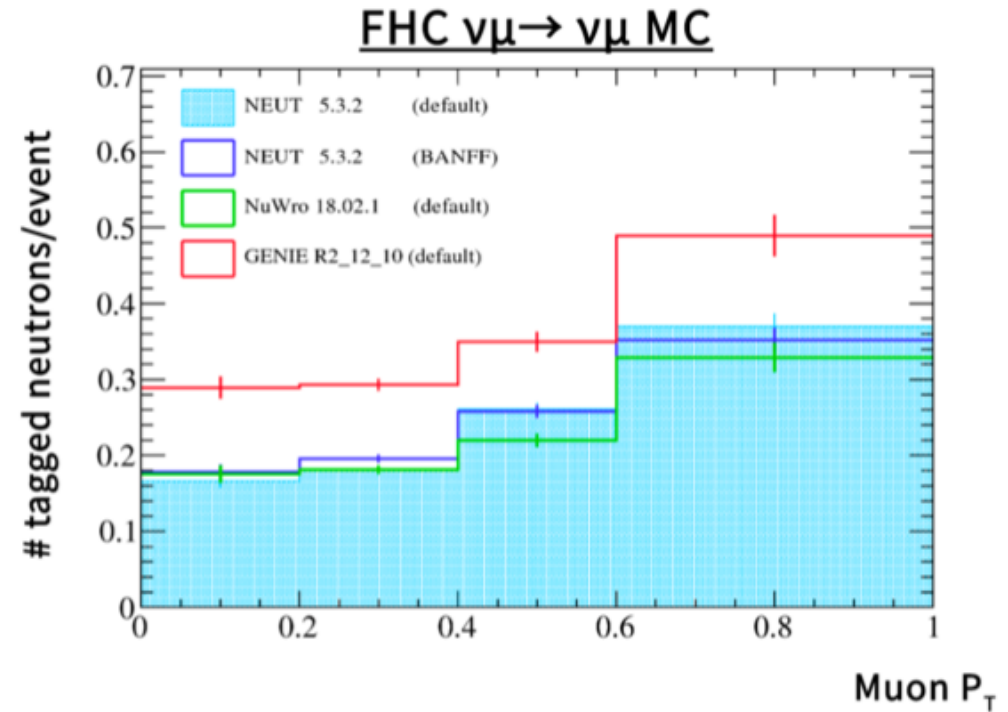
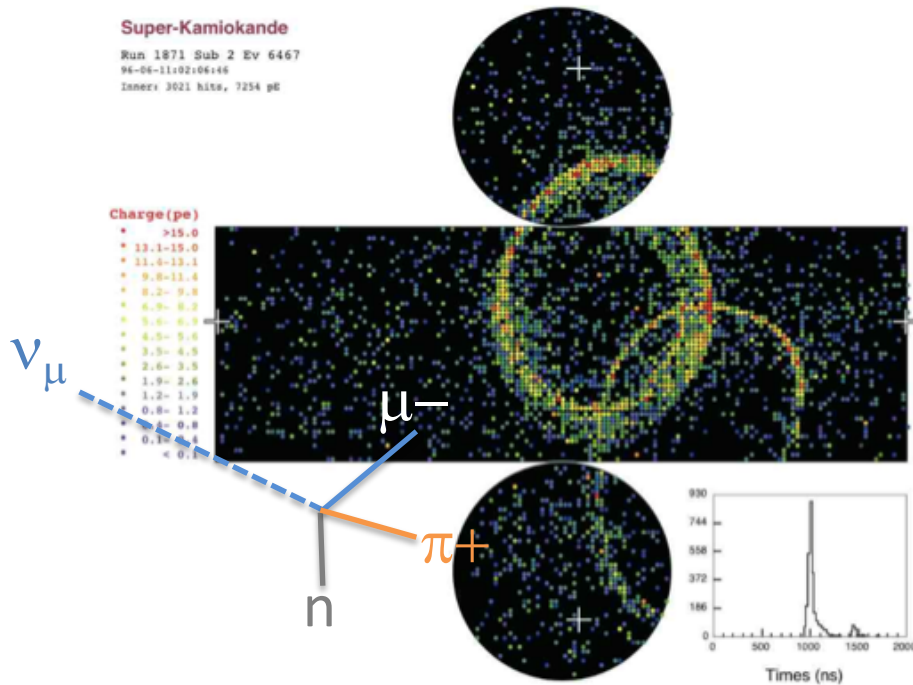


Super-Kamiokande IV  
T2K Beam Run 33 Spill 822275  
Run 66778 Sub 585 Event 134229437  
16-05-12 21:03:22  
T2K beam dt = 1902.2 ns  
Inners: 1600 hits, 3681 pe  
Outers: 2 hits, 2 pe  
Trigger: 5d8f000007  
E\_wall: 614.4 m  
e-like, p = 101.6 MeV/c

Charge (pe)  
● 924.7  
● 21.3-24.7  
● 20.2-23.2  
● 17.3-20.2  
● 14.7-17.3  
● 12.3-14.7  
● 10.0-12.3  
● 8.0-10.0  
● 6.2- 8.0  
● 4.7- 6.2  
● 3.3- 4.7  
● 2.0- 3.3  
● 1.3- 2.0  
● 0.7- 1.3  
● 0.2- 0.7  
● < 0.2

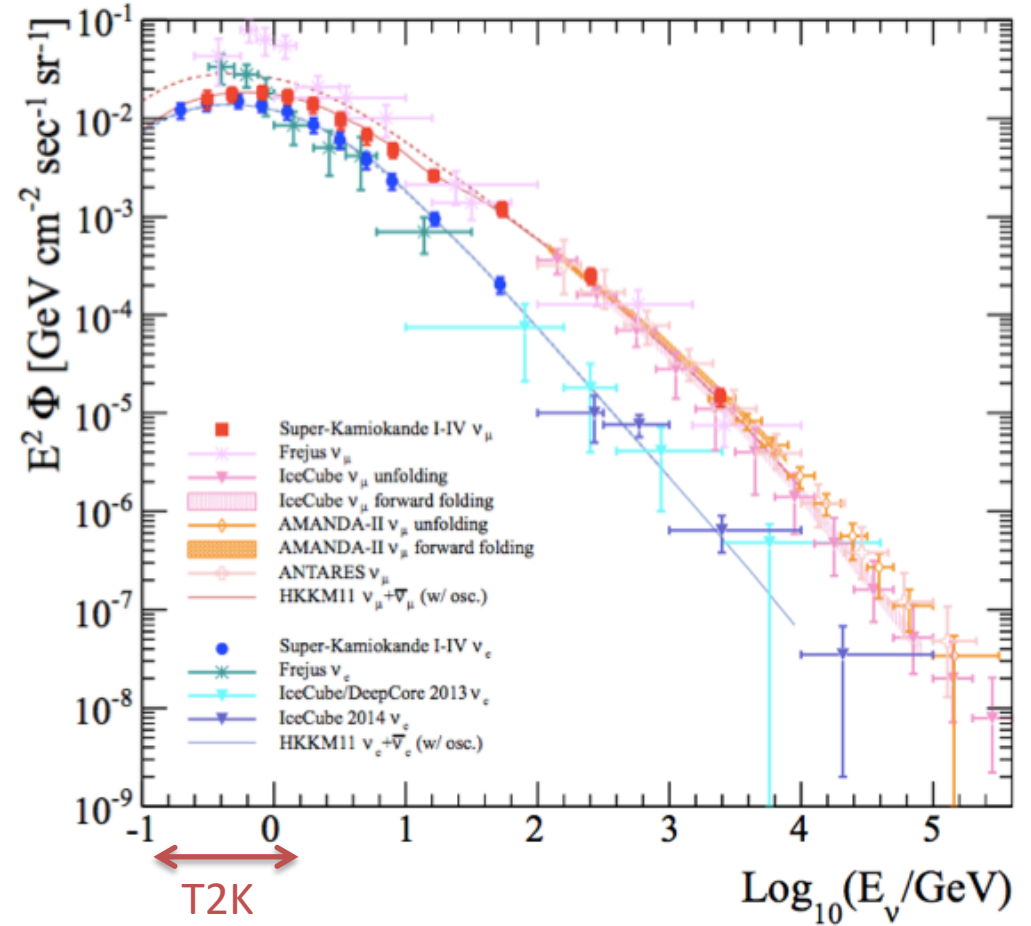
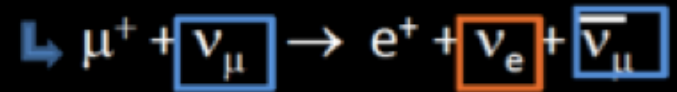
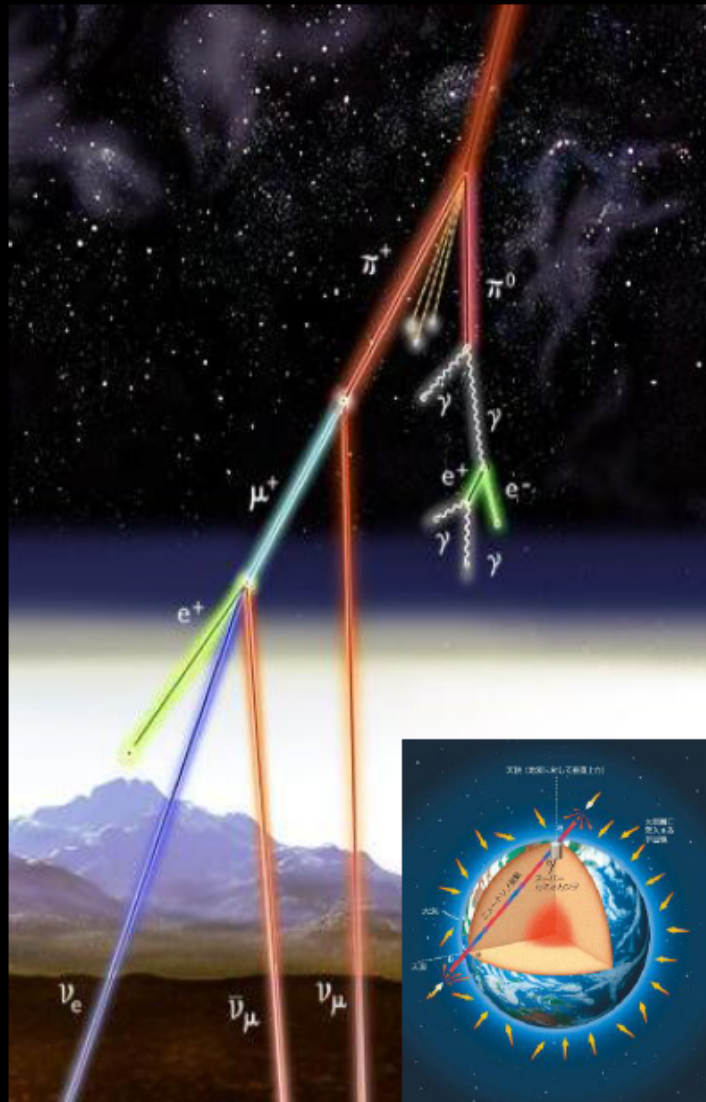


# T2K-SK : 今後の研究



- 複数の粒子が生成された事象を使用！
  - さらに統計量が増える
  - 系統誤差の評価??
- 中性子情報を使った解析を進める
  - ニュートリノと反ニュートリノの識別
  - 中性カレントの事象を探し出す
  - 中性子数の精密測定 (ニュートリノ反応モデルの改善)
  - Gdの準備

# SKの大気ニュートリノ





# スーパーカミオカンデ：大気ニュートリノ

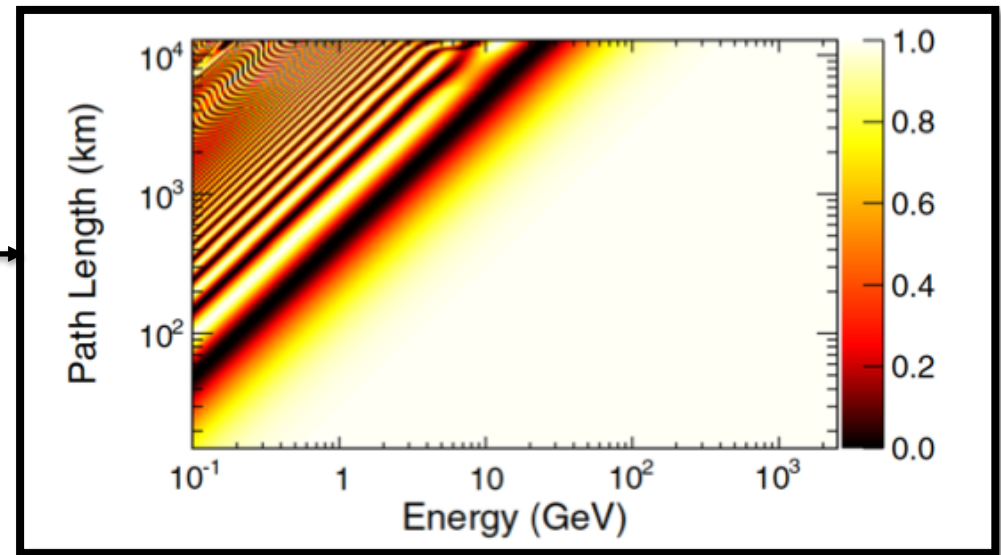
100 MeV < E < 10 TeV

- PMNSニュートリノ振動
- Exotic ニュートリノ振動
  - ステラいるニュートリノ
  - NSI
  - ローレンツ対称性を破る振動
  - 。。。
- 天文学関連
  - 重力波などのCoincidence探索
  - GRB探索
  - 暗黒物質探索

# スーパーカミオカンデ：大気ニュートリノ

$100 \text{ MeV} < E < 10 \text{ TeV}$

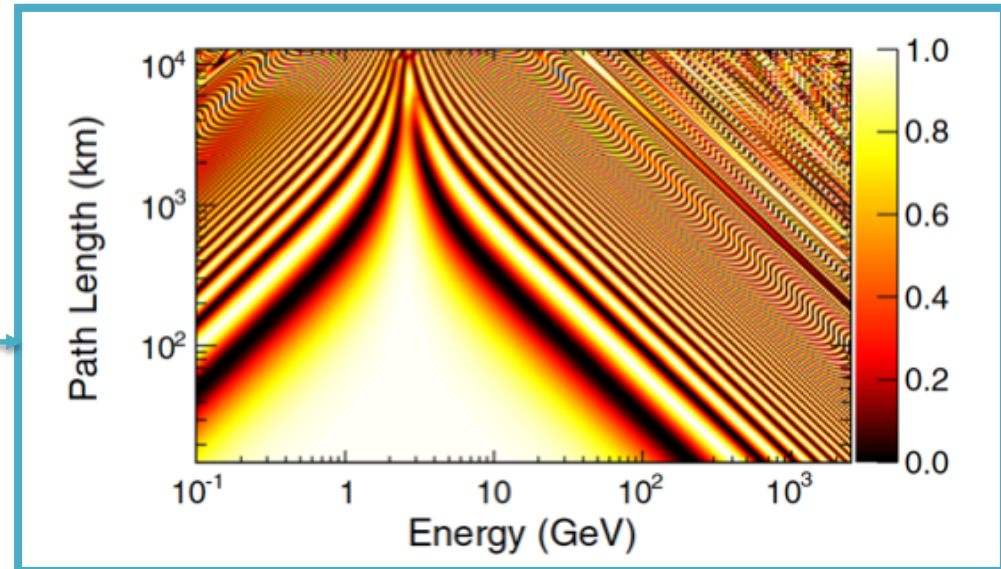
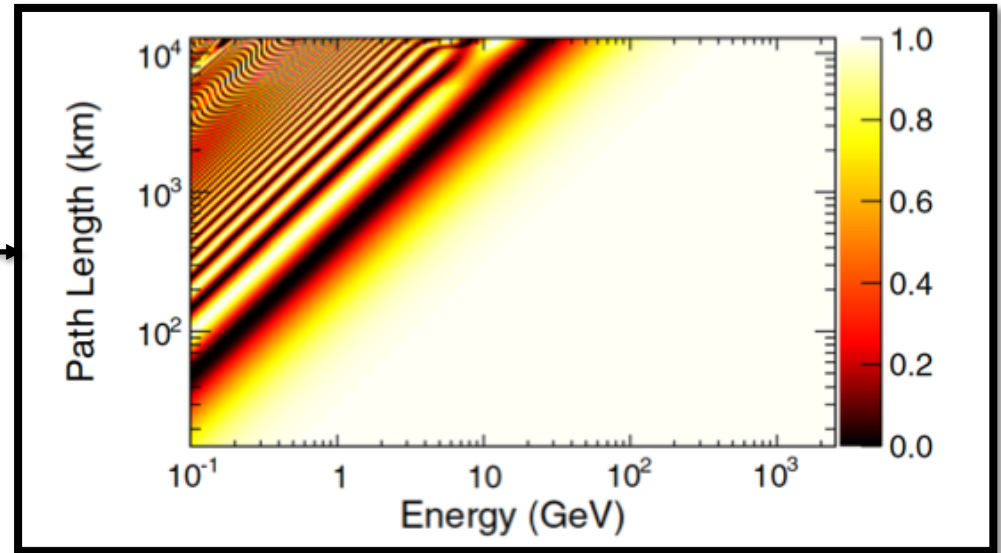
- PMNSニュートリノ振動
- Exotic ニュートリノ振動
  - ステラいるニュートリノ
  - NSI
  - ローレンツ対称性を破る振動
  - . . .
- 天文学関連
  - 重力波などのCoincidence探索
  - GRB探索
  - 暗黒物質探索



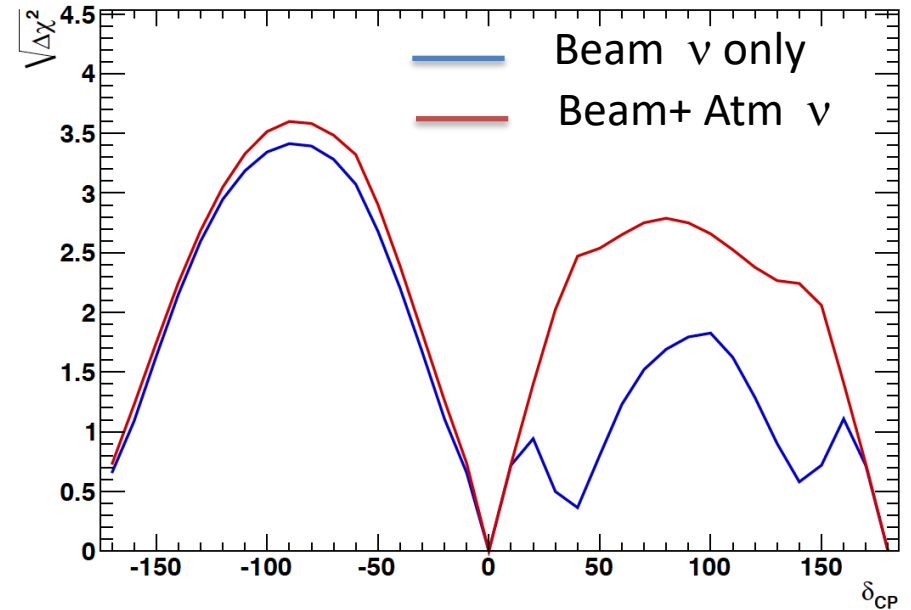
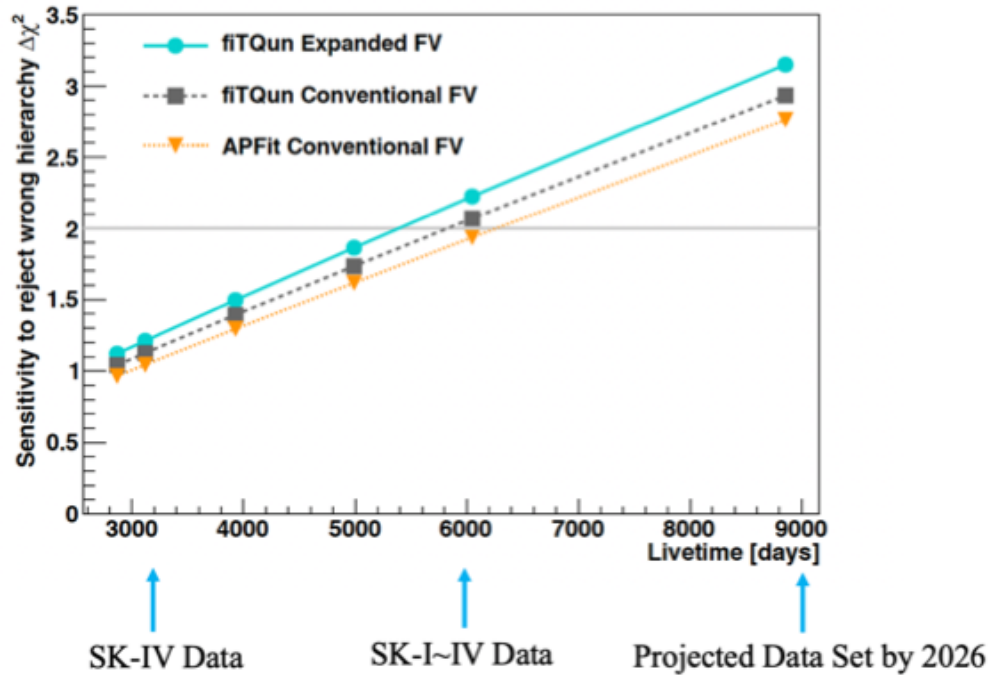
# スーパーカミオカンデ：大気ニュートリノ

100 MeV < E < 10 TeV

- PMNSニュートリノ振動
- Exotic ニュートリノ振動
  - ステラいるニュートリノ
  - NSI
  - ローレンツ対称性を破る振動
  - ...
- 暗黒物質探索
- 重力波などとのCoincidence探索

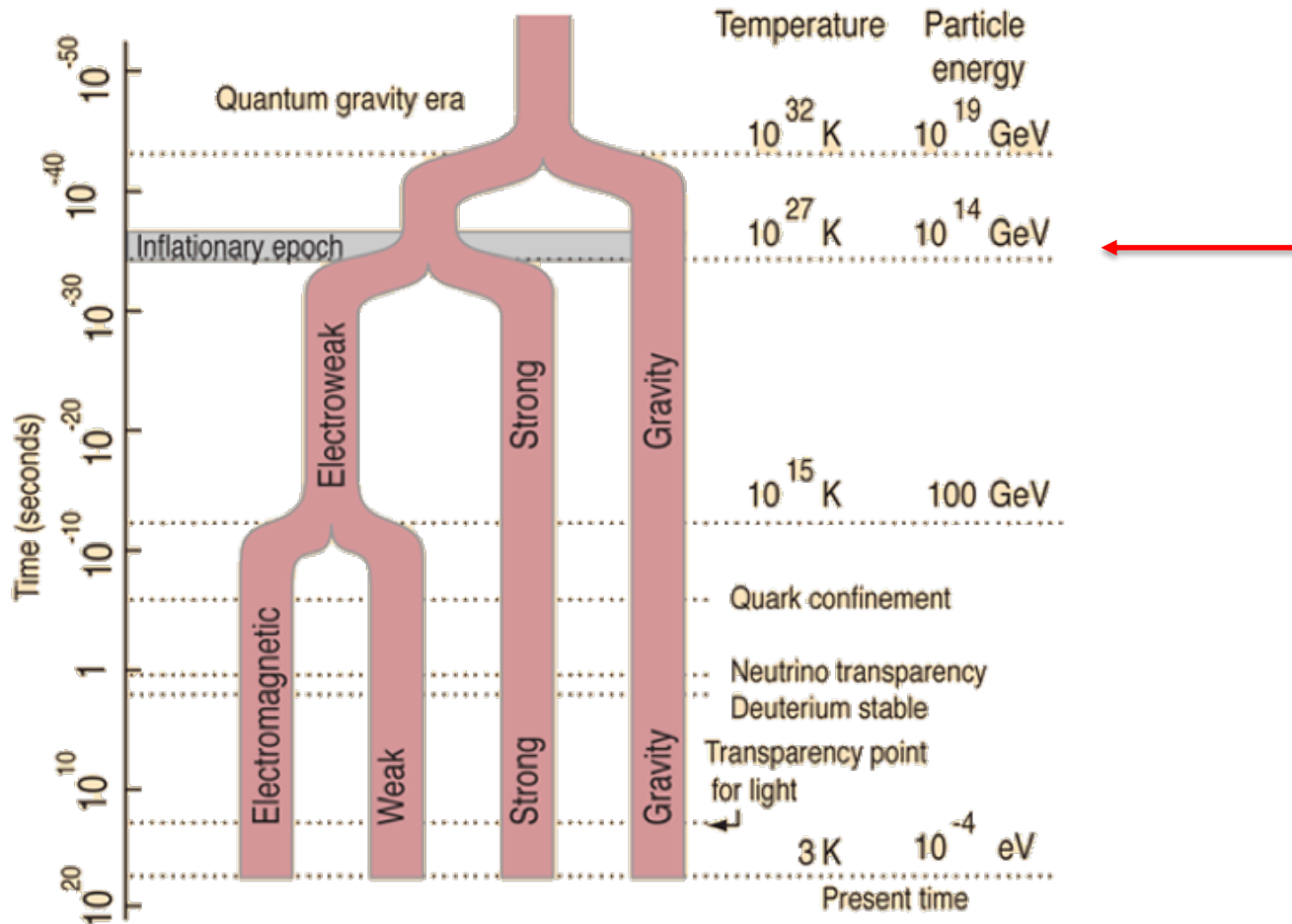


# 大気ニュートリノ解析



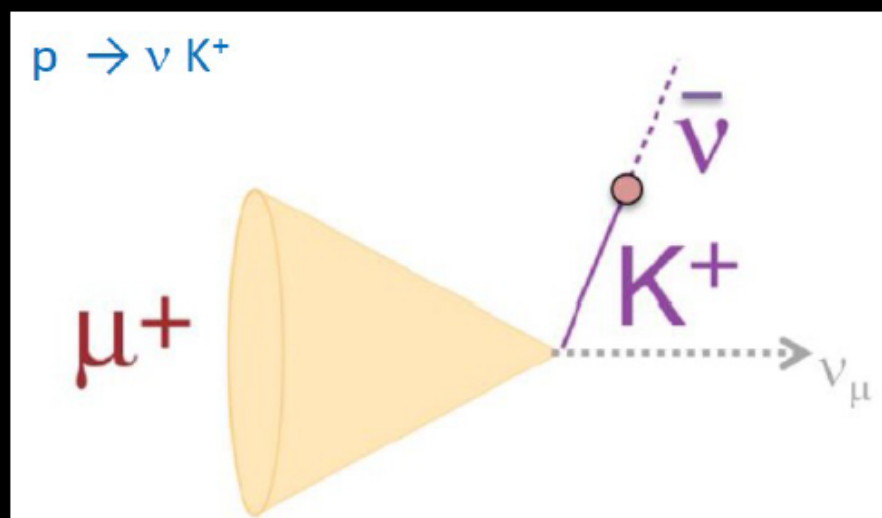
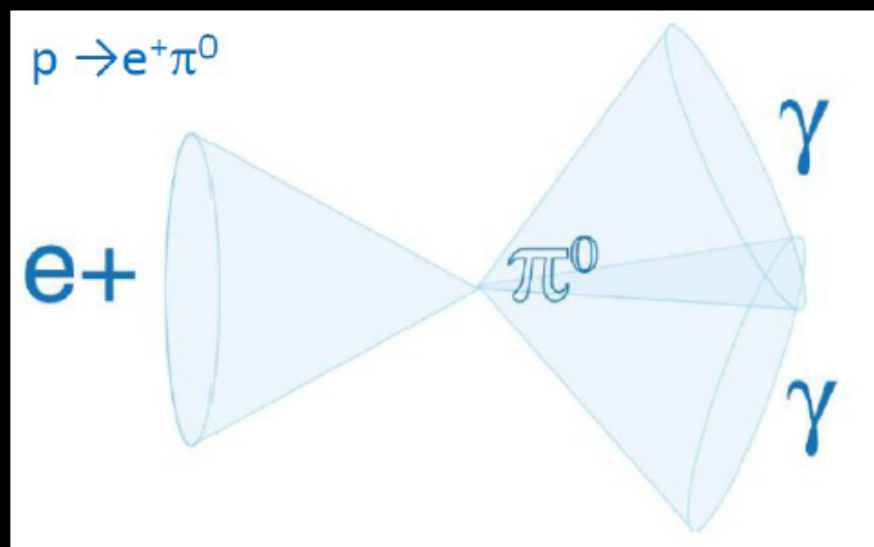
- 新しい事象再構成ツールを導入し、SKの感度向上に成功
  - ただ、一部のデータにしか適応出来ていない、今後は全データを使うように
  - 中性子タグによるニュートリノと反ニュートリノを識別
- SKとT2Kと共同で解析すると、CP破れ感度が向上
  - SKの感度は主に、質量階層性へ
  - T2Kは主に、CPへ

# スーパーカミオカンデ：陽子崩壊

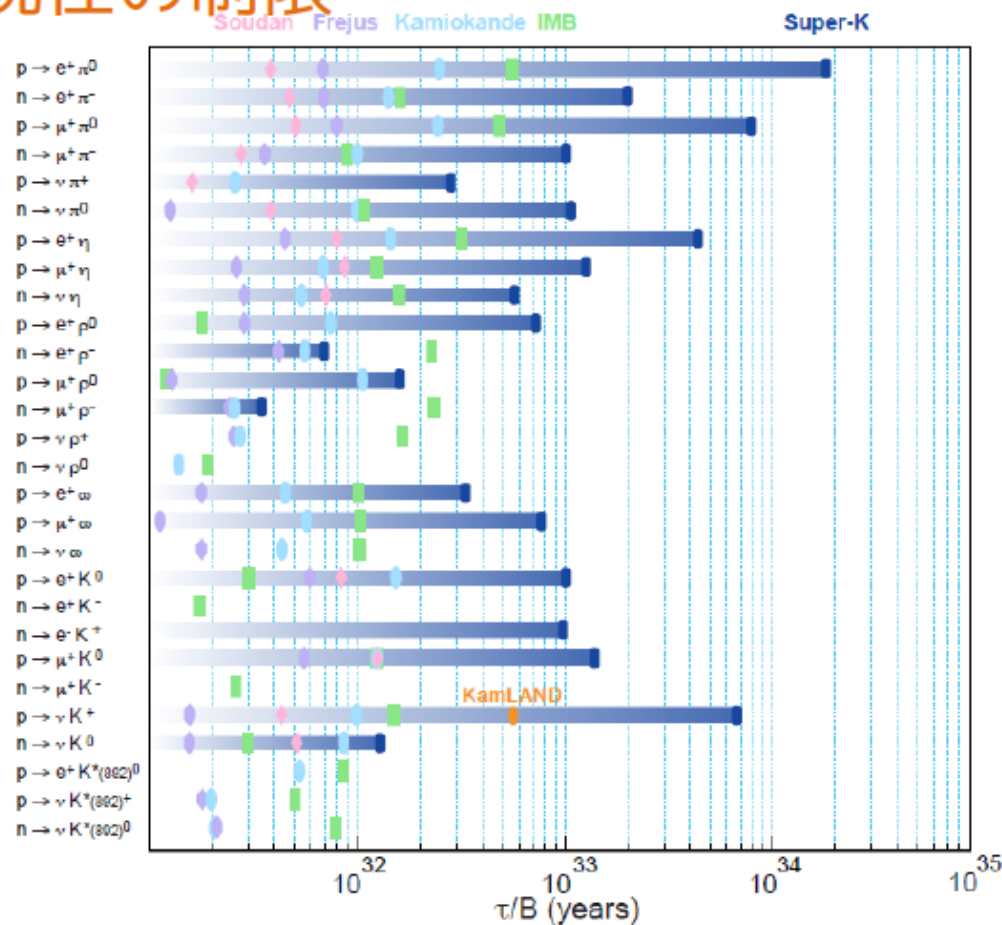


# 陽子崩壊

- 標準理論において陽子は安定粒子で、バリオン数の敗れが（殆ど）ない
- ただ、物質優勢宇宙の説明に必須
- 大統一理論（GUT理論）が鍵と成り得る  
核崩壊を予言
- 陽子（中性子）崩壊の探索がかなり高エネルギー宇宙と新物理への窓となる

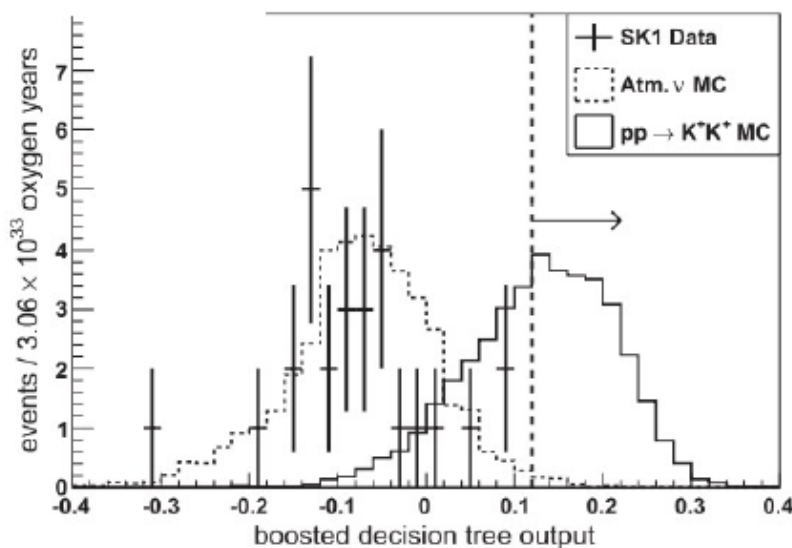


# 現在の制限



- 崩壊モードが沢山存在している
  - この表に載っていないものも！
- サンプルを決めて、エラーを見積もって、解析：学生一人でやるケースが多い

$$pp \rightarrow K^+ K^+$$

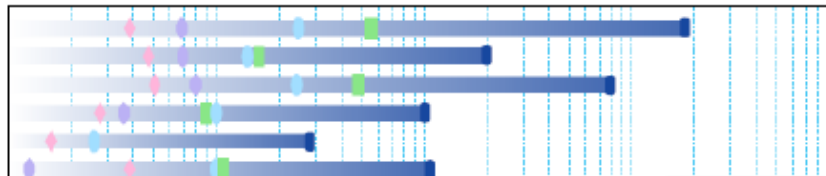


- 新再構成アルゴリズムや解析方法の改善による感度向上が可能

# 現在の制限

Soudan Frejus Kamiokande IMB Super-K

- $p \rightarrow e^+ \pi^0$
- $n \rightarrow e^+ \pi^-$
- $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$
- $n \rightarrow \mu^+ \pi^-$
- $p \rightarrow \nu \pi^+$
- $n \rightarrow \nu \pi^0$



- 崩壊モードが沢山存在している
  - この表に載っていないものも！

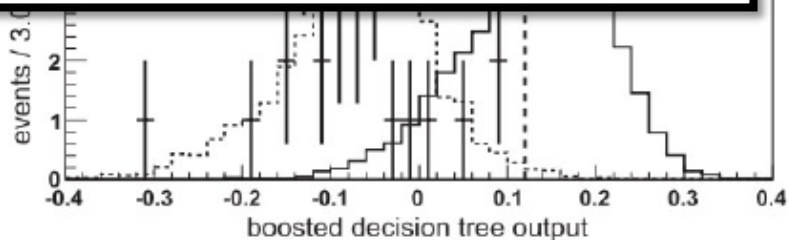
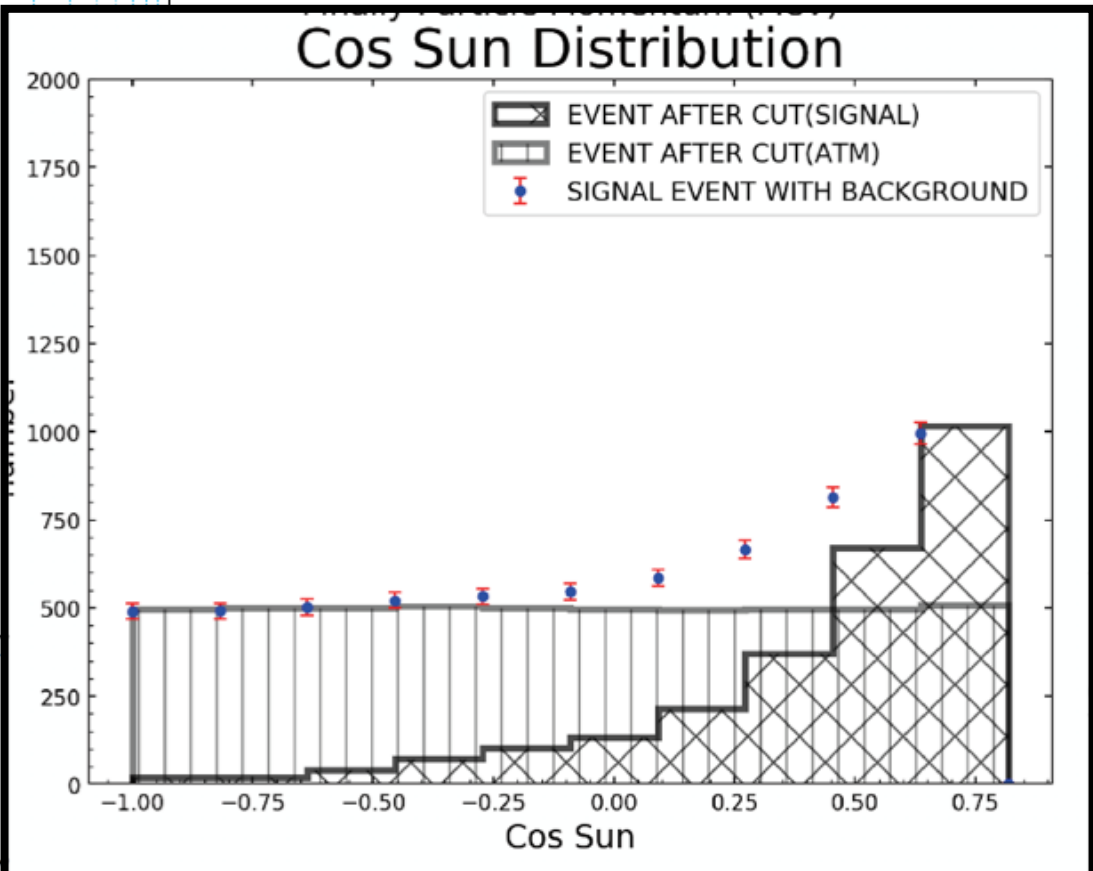
Feng君:

太陽ないでモノポールが溜まっているなら、陽子崩壊を媒介する？

The proton decay mode we used in this time



459 MeV



■ 新再構成アルゴリズムや解析方法の改善による感度向上が可能



# スーパーカミオカンデ：低エネルギー

$E < 50 \text{ MeV}$

- 太陽ニュートリノ振動
- 超新星ニュートリノ
- ラドン研究
- Astrophysicalニュートリノ

超新星爆発： SN1987A 大マゼラン雲 1987年2月24日

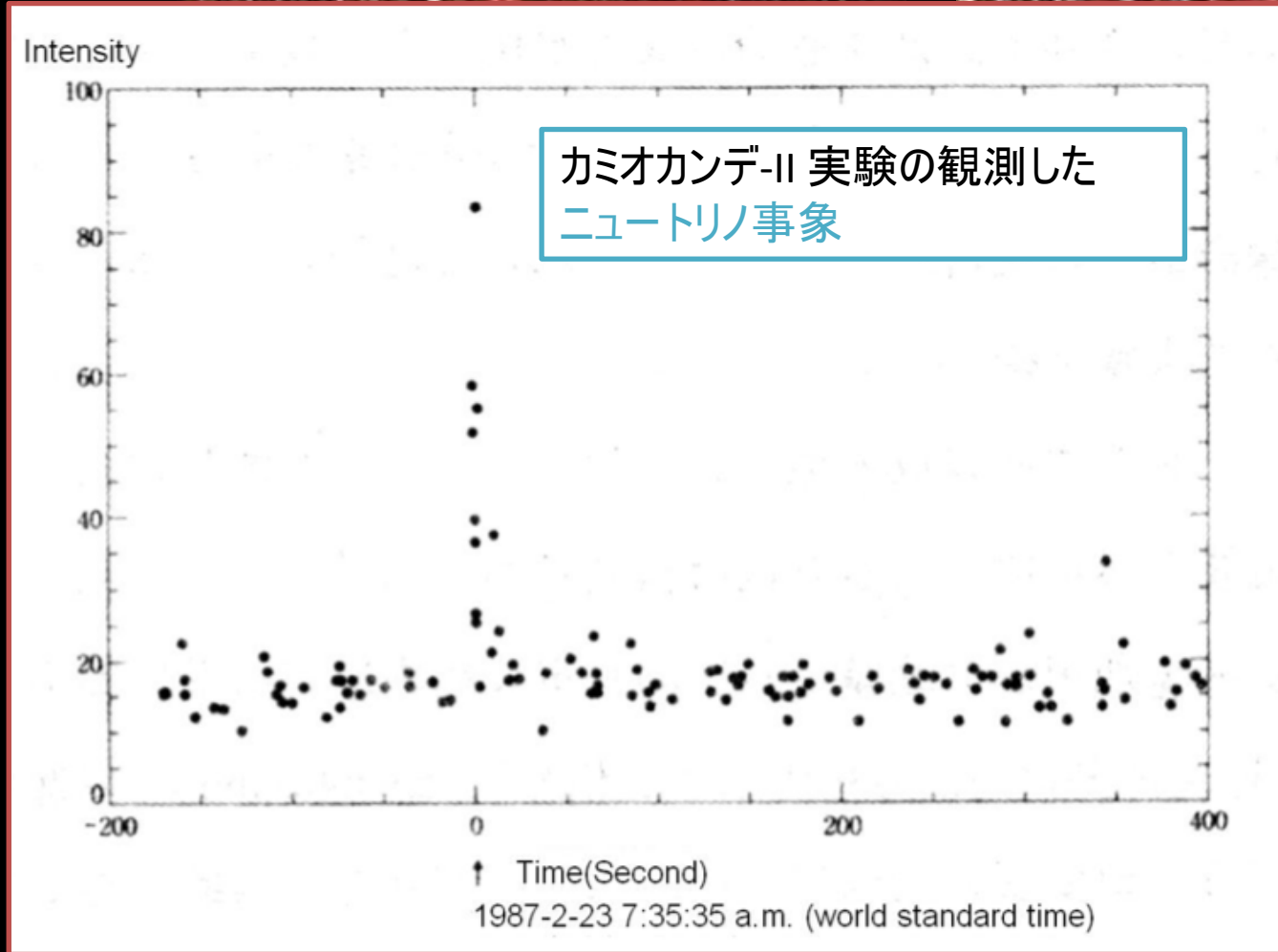
前 後



超新星爆発！

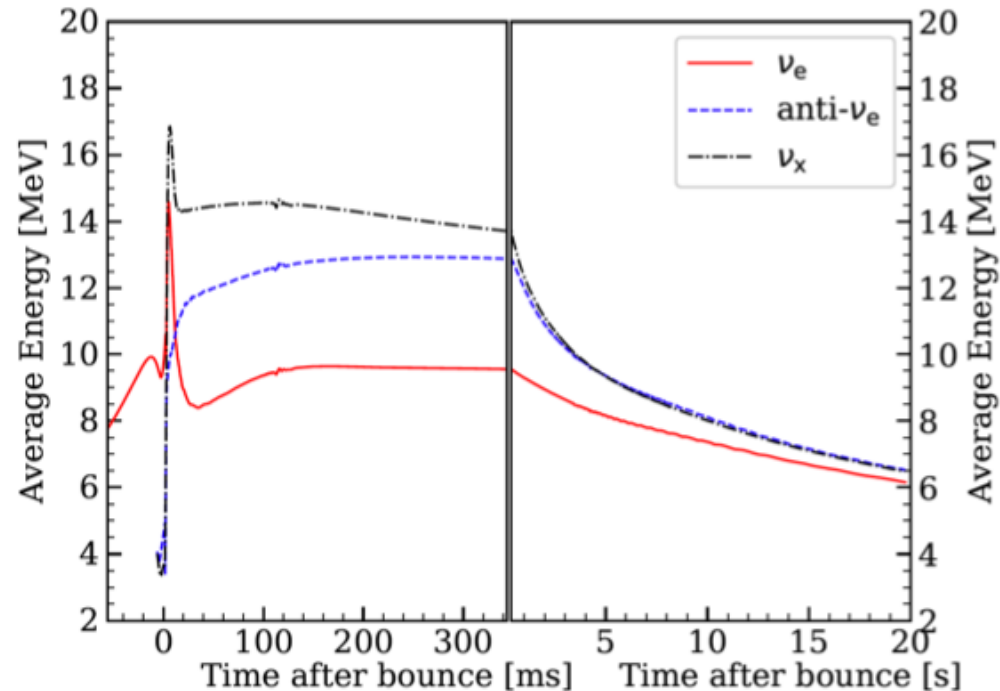
# 超新星爆発： SN1987A 大マゼラン雲 1987年2月24日

## 前 後

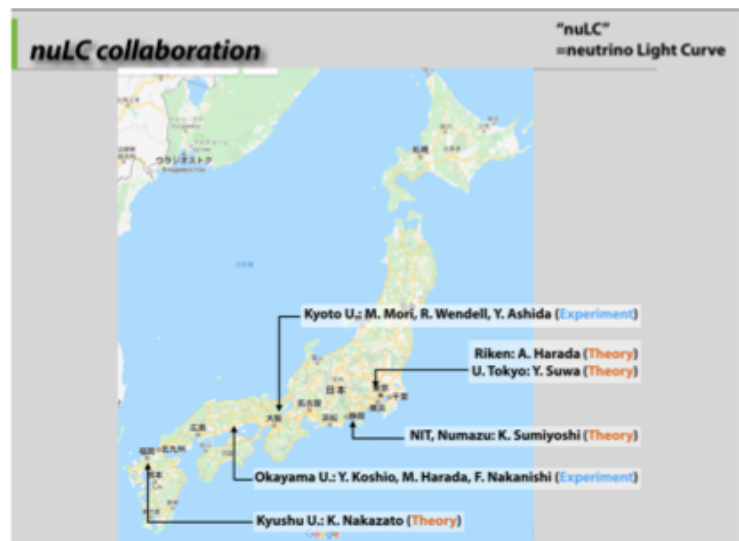


## 超新星爆発！

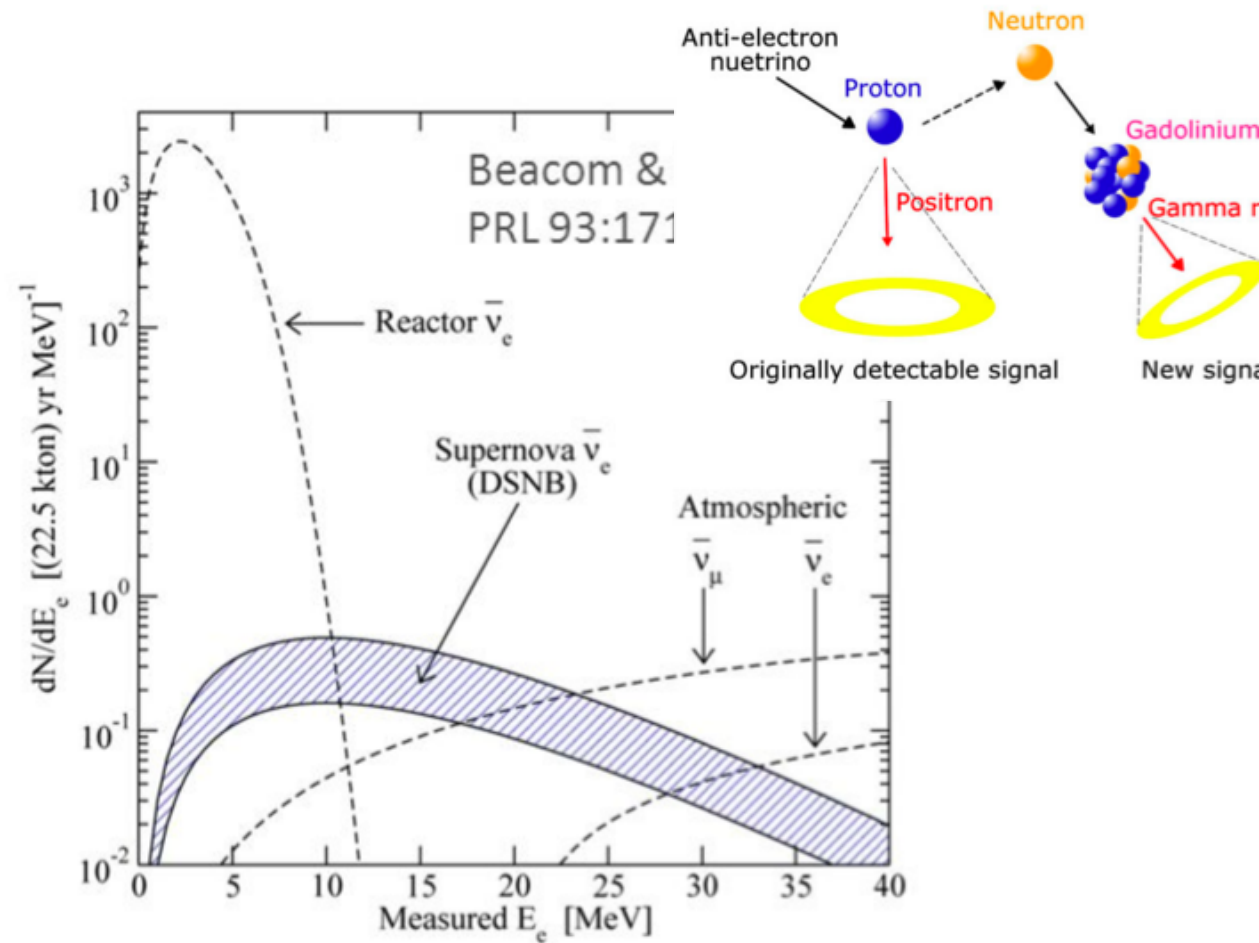
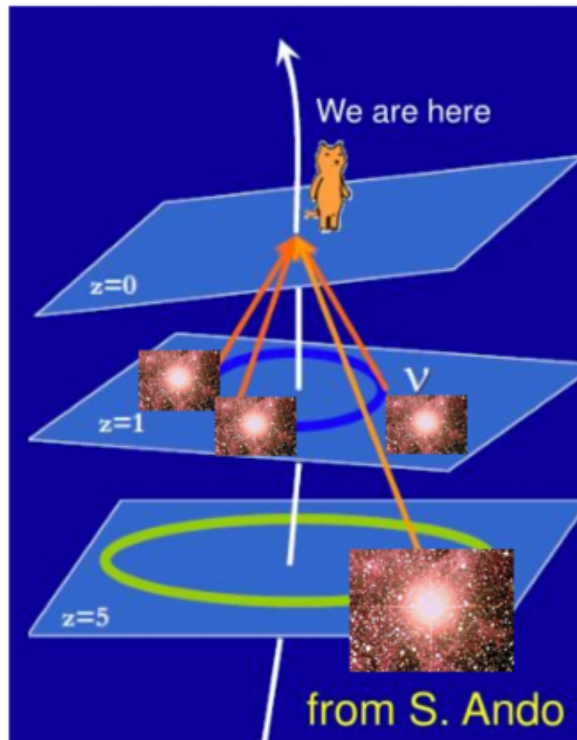
# 超新星爆発の研究



- 超新星爆発のメカニズムは大体理解されている
  - 詳細は全然
- ニュートリノの長時間スペクトラは爆発の理解の鍵となる
  - 中性子星質量、状態方程式の影響を受ける
- 理論グループと共同で、様々な爆発モデルを解いて長時間のニュートリノを調べ、SKでシミュレーション
- SKで観測したスペクトルをみて、超新星の性質を早速推測



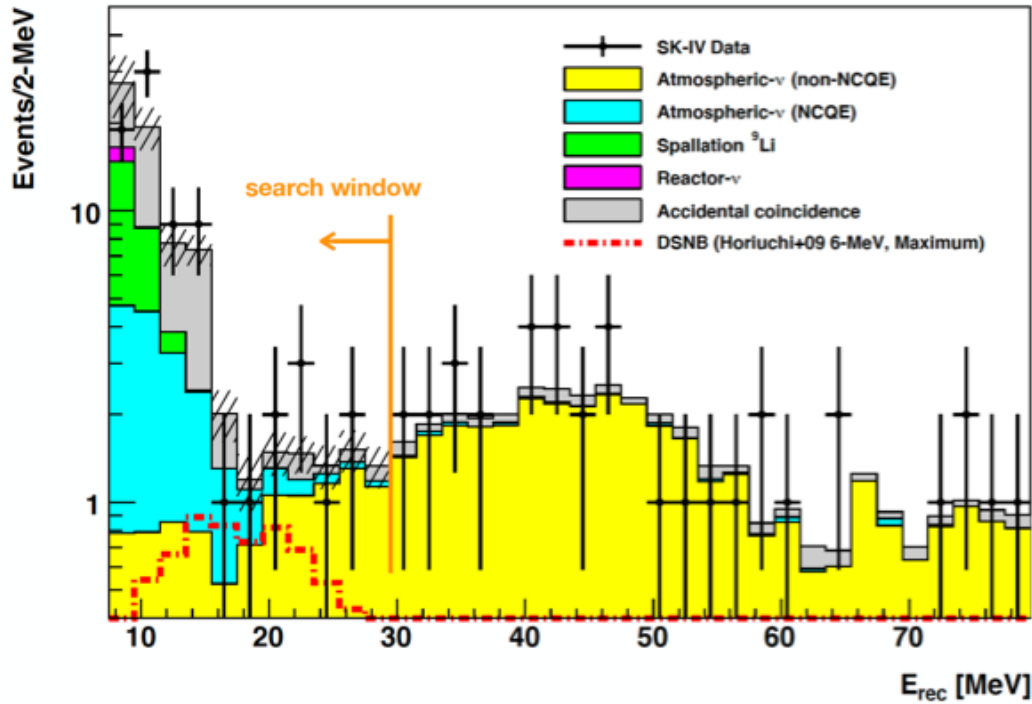
# 超新星背景ニュートリノ



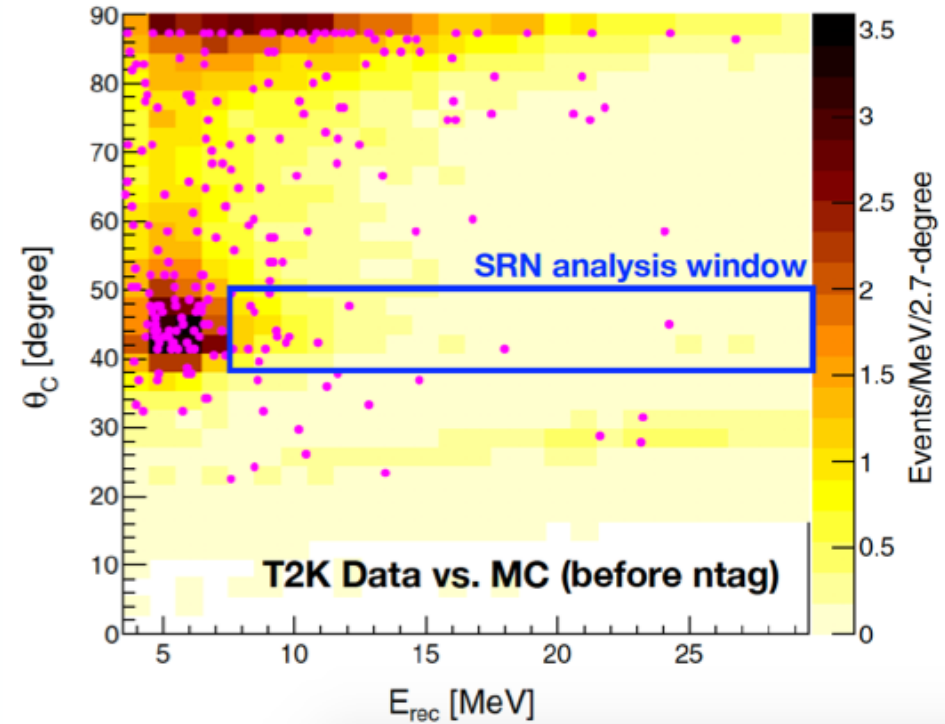
- 現在の宇宙は、宇宙誕生以降爆発した超新星のニュートリノに満ちている
- 世界に先立って測るために、SK-Gd
  - SKで、1年に数個しか期待できない
- 大気ニュートリノの中性カレント反応がBGとなる (芦田)

# Supernova Relic Neutrinos

Super-K preliminary



NCQE BG Measurement



- 主なBGを中性子タグで落とす
- ビーム測定によりNCQE反応理解を深める
- 理論モデルへ制限

# ハイパーカミオカンデ

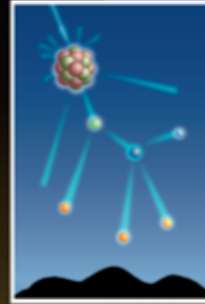
10 × SK + 20 × T2K

# 2020年4月から建設開始

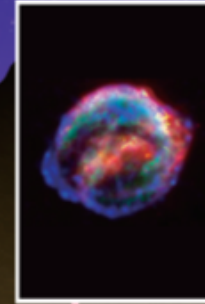
J-PARC 大強度加速器による  
高品質ニュートリノビーム



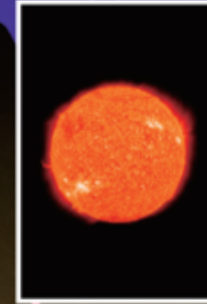
大気



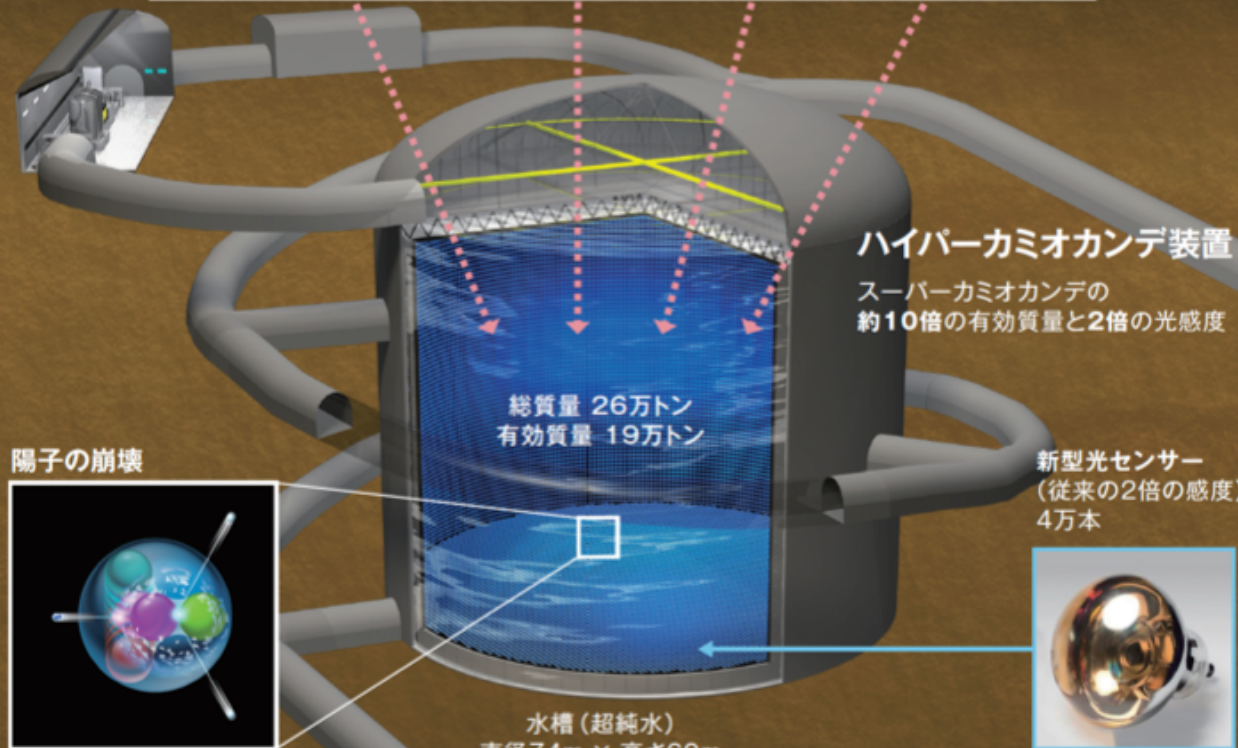
超新星爆発



太陽



ニュートリノ





## ■ かなり大きいいため、より良い制度でニュートリノ振動や陽子崩壊研究が可能

- 現在評価中,大気 $\nu$ +ビーム $\nu$  (江)

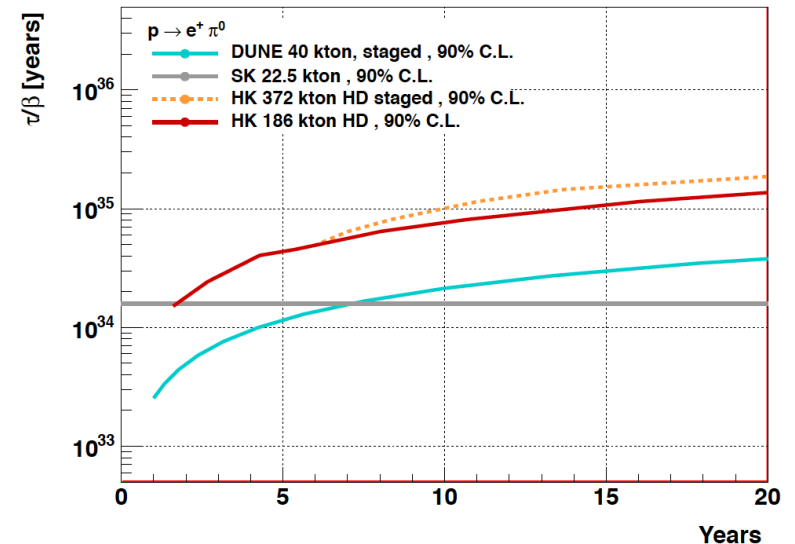
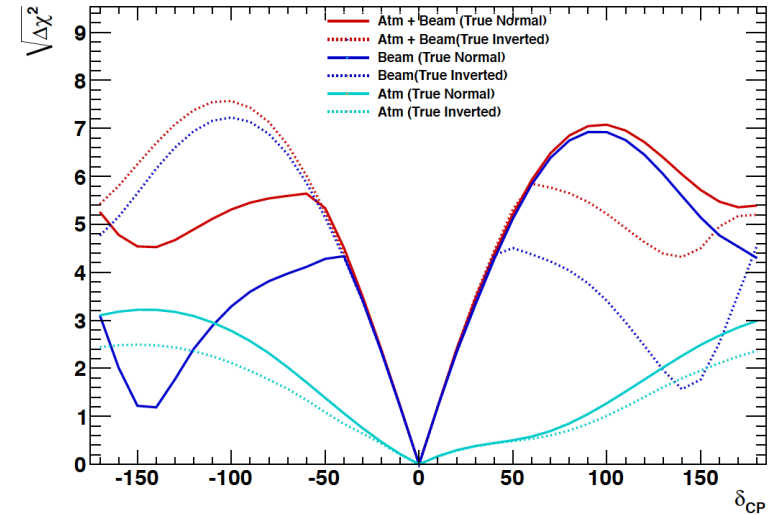
## ■ T2KとSKで出来ない物理も可能

- ニュートリノ振動においてレプトン不変性の検証
- $\nu\tau$  断面積測定
- 地球内部の電子濃度
- 等

## ■ 将来計画だが、修士論文のテーマも

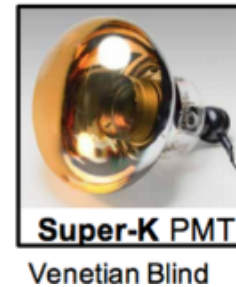
- 光検出器の評価 (東大：須田)
- 光検出器のAMP開発 (江)

## ■ HKシミュレーション (東工大：岡島)

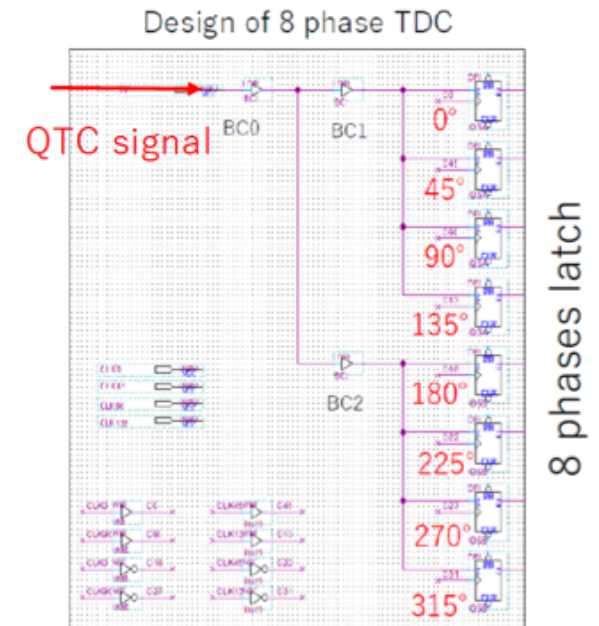


# ハイパーカミオカンデR&D課題

- 昨年度予算が付いた
  - 実験開始を~7年後
  - SKより高い測定制度が要求
- 課題が豊富
- PMTの選出に伴う評価
  - QE、タイミング、評価
  - Light Collector?
- PMTの読み出し回路に伴う開発・評価
  - 水中のエレキ
  - FPGA、ASICベース
  - CATIROC+++?
- 前置検出器関係
  - 木河スライドを参照
- 選出したPMTは物理へどの影響を、シミュレーション



MCP-PMT  
フー君





# 卒業までの流れ

- M1 – 授業＋研究開始
- M2 – 修論研究
  - ハード関係がが多い
    - HK 光センサー開発(江, 廣田, フー),
    - SNモジュール開発(森),
    - NC gamma 測定(芦田)
  - 解析的なものでも可能
- D1 – 進行中の研究に参加, 実験へ貢献
  - 博士研究のテーマを選んで, 研究開始
- D2/D3 – 博士研究を集中
- D3 – 論文執筆

研究トピックは豊富

過去20年のD論と修論:

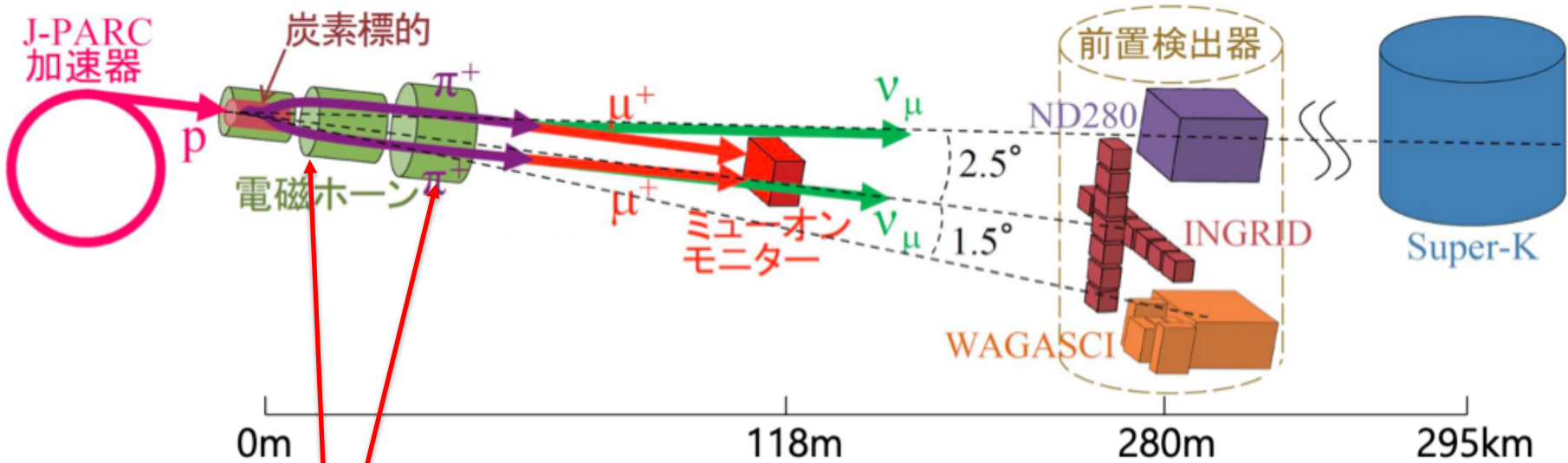
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/publications/index.html>

FIN

# 関連研究



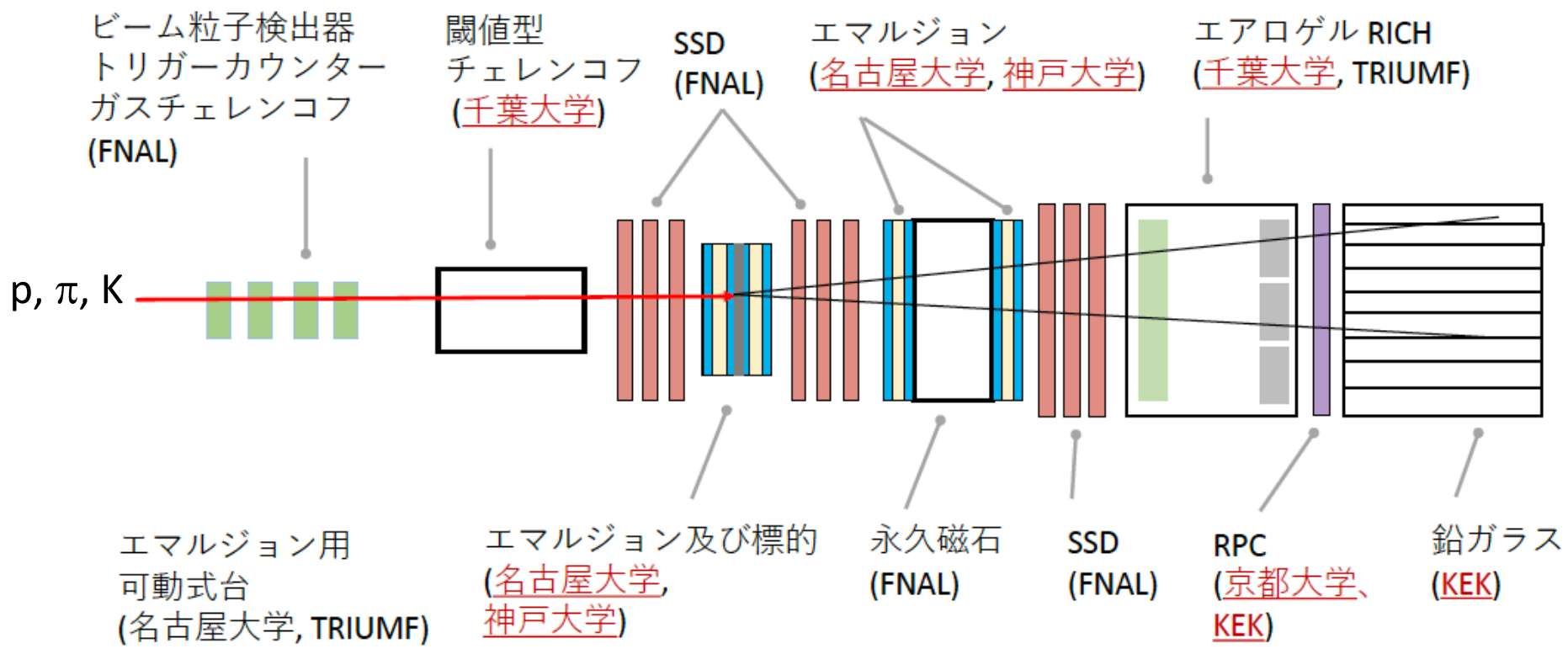
# ニュートリノフラック予測：



- パイオンが崩壊する前に物質と反応すると
  - エネルギー損失
  - 方向変更
  - 二次粒子
  - …などご起こるため、ニュートリノフラックスに影響を
- 外部実験の測定により、制限をかけている



# 関連研究: EMPHATIC (FNAL・米国)



- 陽子ビームと様々な標的を使って精密にハドロン散乱・生成断面積を計る
  - FNALの1~120 GeV/c の 粒子

# EMPHATIC:

■ 京大は、

■ 阪大のE50グループと共同でRPCを作成予定

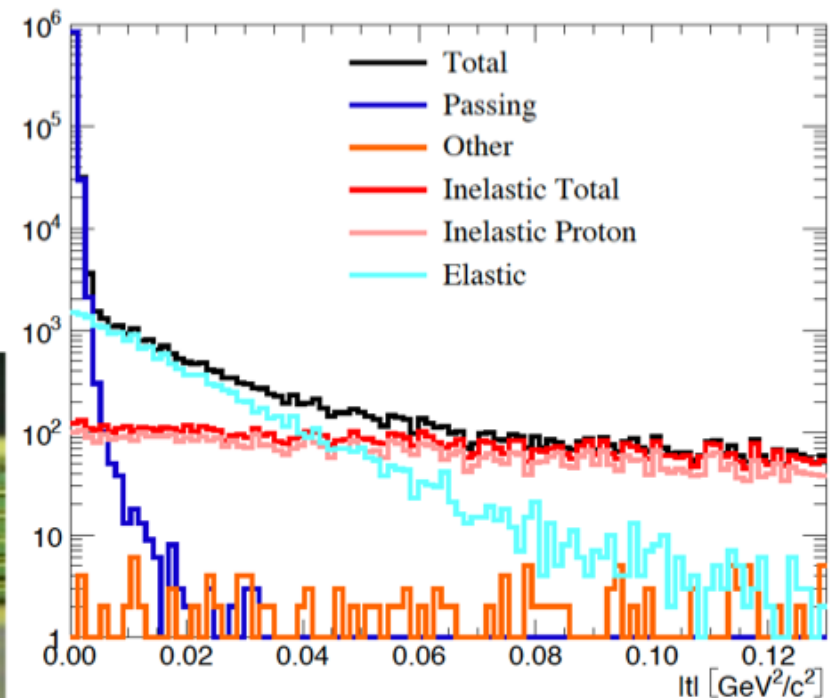
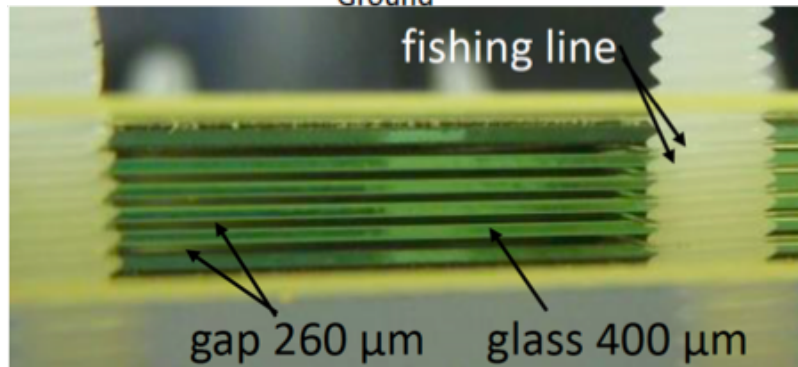
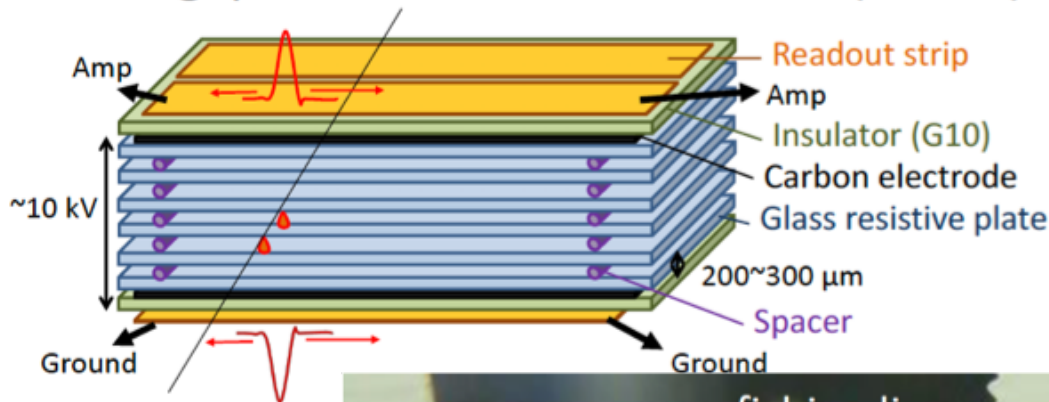
■ 今年度は新たに **5台**

■ 課題：

■ シミュレーション構築とデータ解析

■ エレキの開発、RPC作成、検証

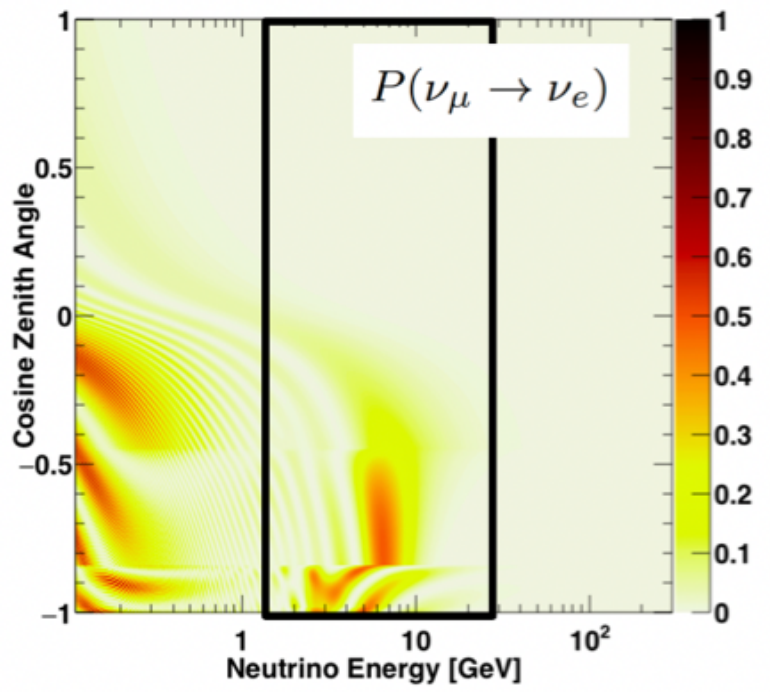
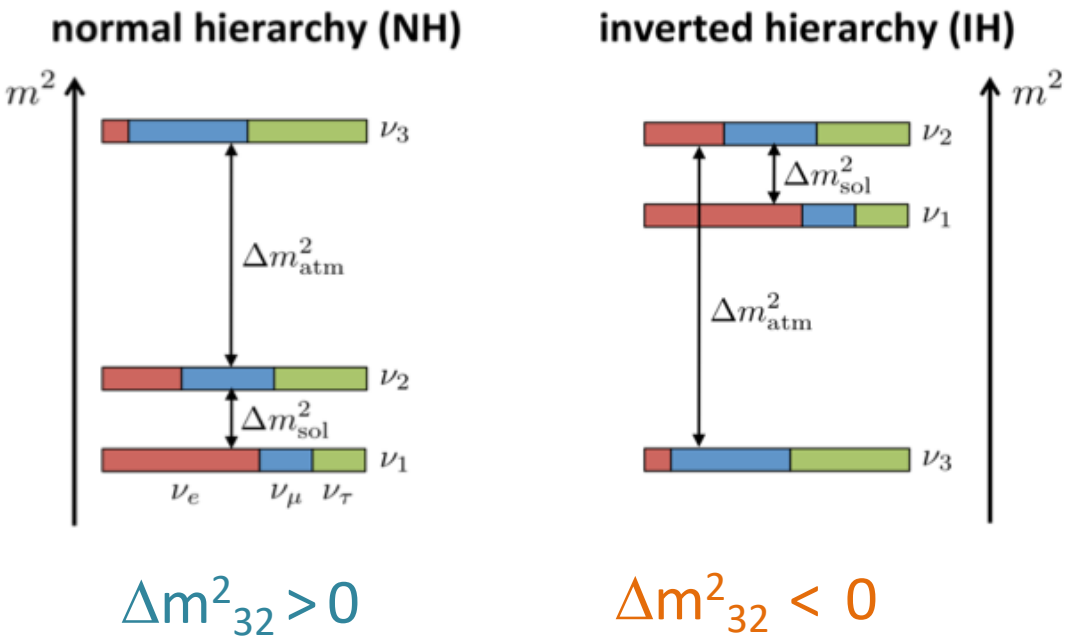
## Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC)



# 大気ニュートリノで測定

## 階層性が未決定

## NH:ニュートリノの場合

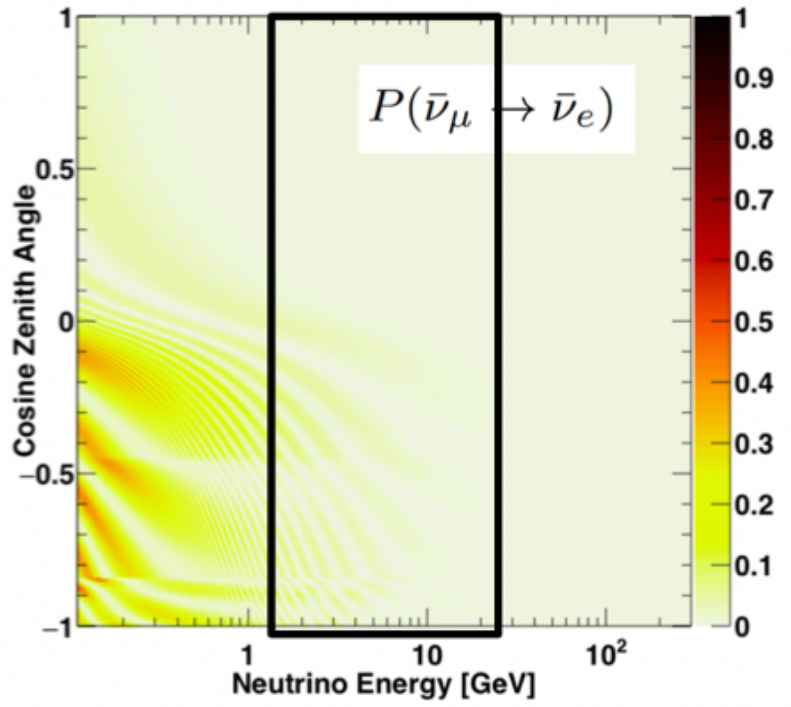
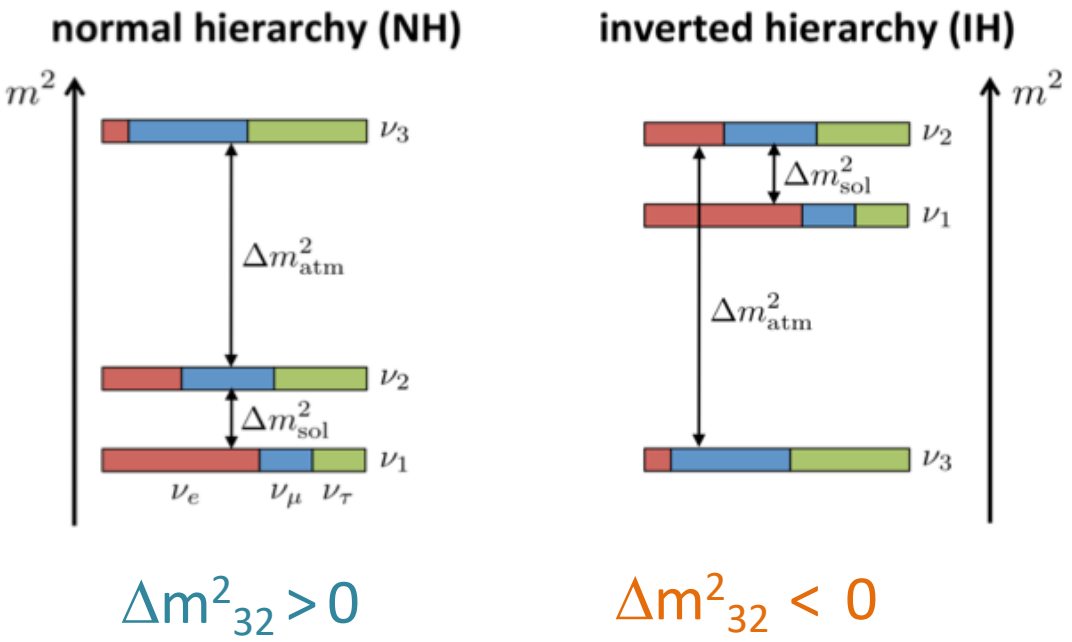


- 質量階層性はCP測定の邪魔（振動確率の縮退を起こす）
  - 大統一理論と関係している
- 大気ニュートリノと反ニュートリノの振動が質量階層性に依存
- 関連領域において再構成が難しい

# 大気ニュートリノで測定

## 階層性が未決定

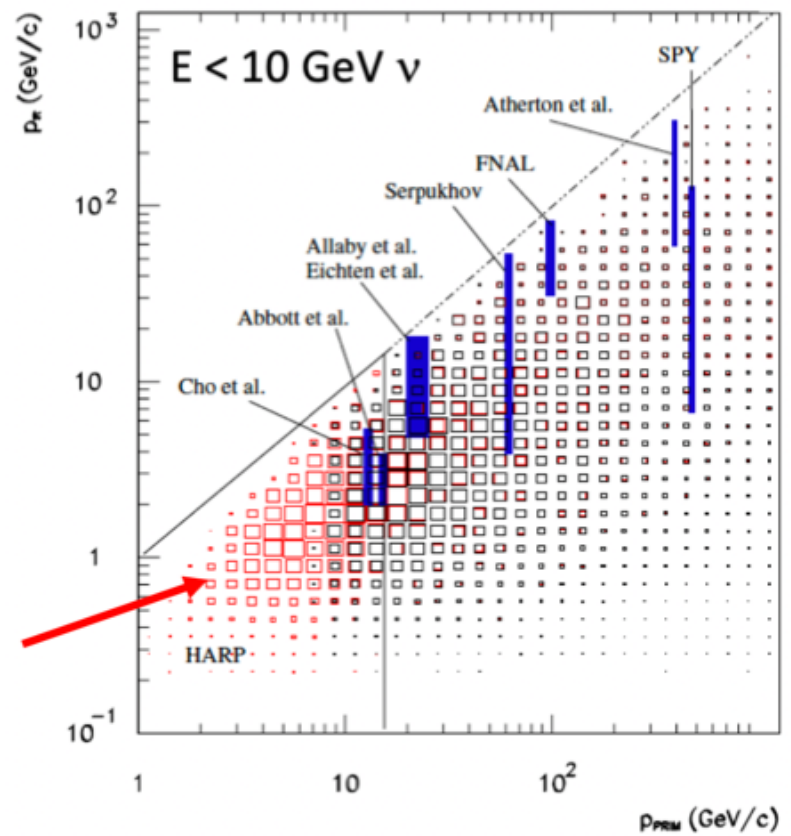
NH: 反ニュートリノの場合



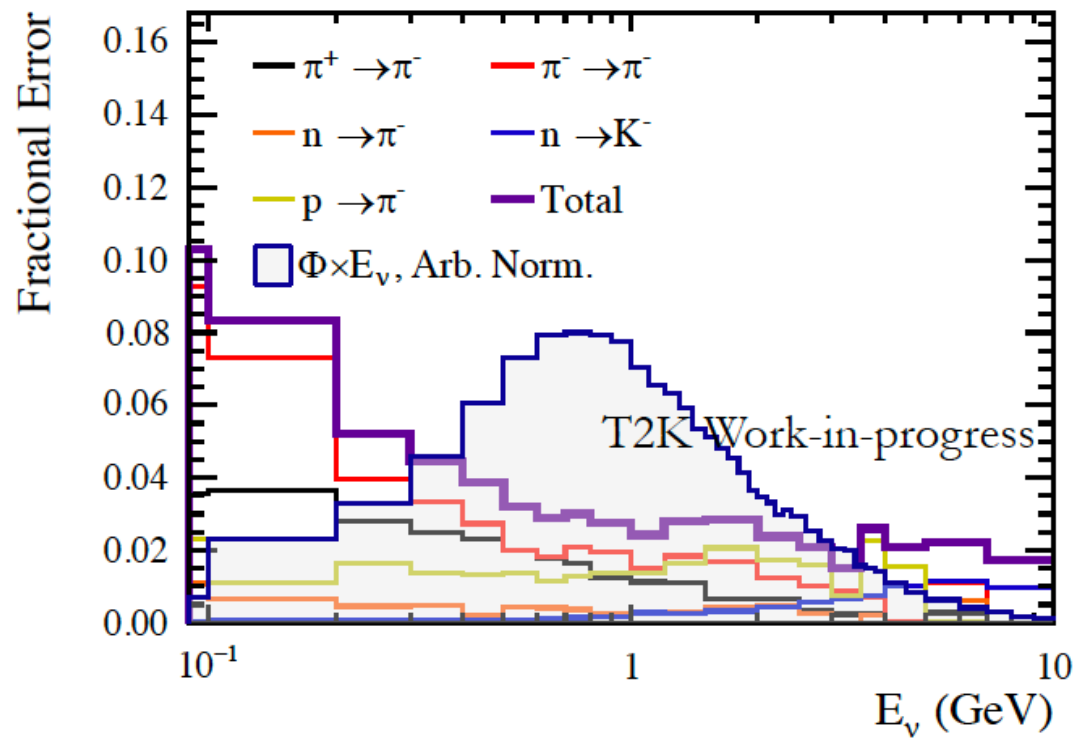
- 質量階層性はCP測定の邪魔 (振動確率の縮退を起こす)
  - 大統一理論と関係している
- 大気ニュートリノと反ニュートリノの振動が質量階層性に依存
- 関連領域において再構成が難しい

# ニュートリノフラック予測：不訂正

PHYSICAL REVIEW D 74, 094009 (2006)



FHC wrong-sign ( $\bar{\nu}_\mu$ )

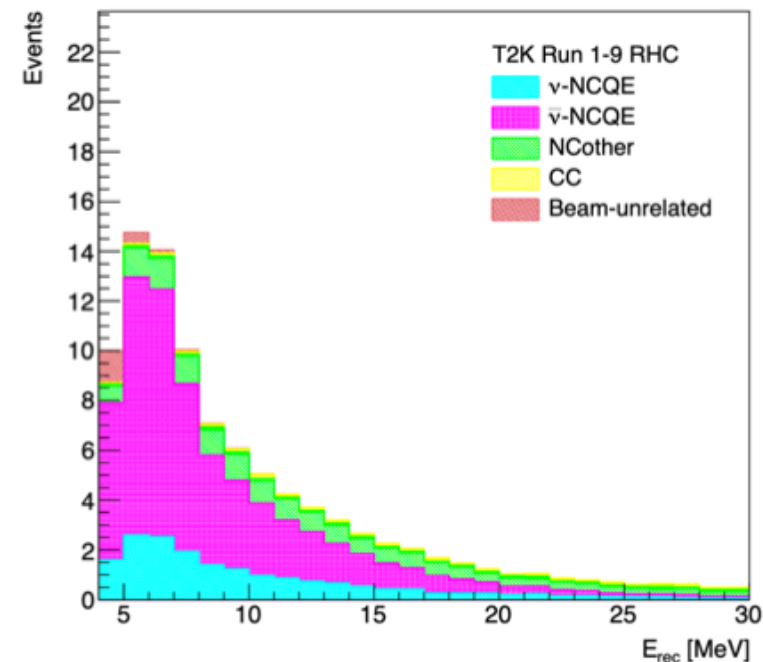
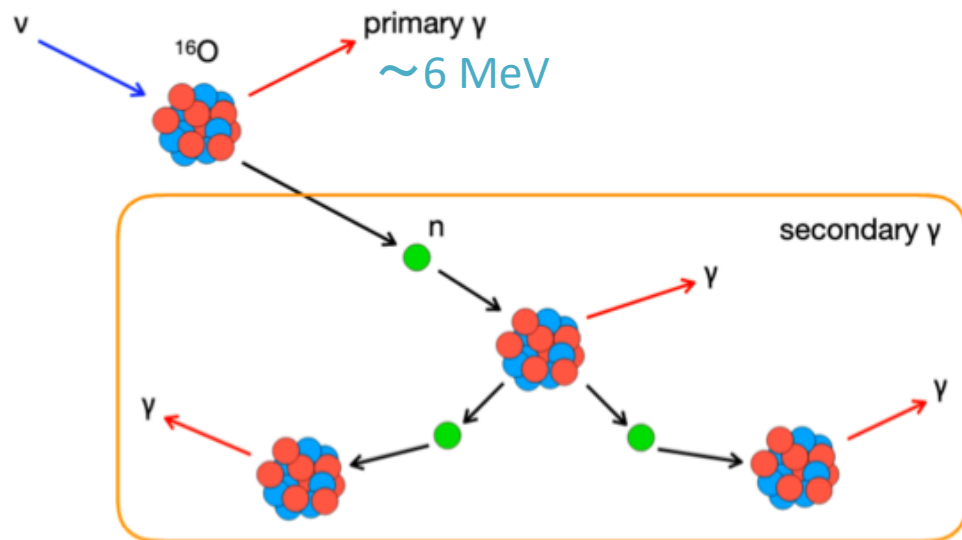


- ニュートリノフラックスを理解するため、ハドロン生成実験とモデルの開発が必要
- 低運動量の粒子により生成されているニュートリノには大きな不訂正がまだついている

# T2K-SKで中性カレントを測定(低エネルギー)

芦田

- T2Kを使って数100 MeVのニュートリノと水との中性カレント準弾性散乱
  - 世界初めて、反ニュートリノで測定予定
  - 超新星背景ニュートリノのBG過程に制限



- 原子核物理と素粒子物理両方楽しめる
- 今後は
  - 中性子情報を導入
  - NC1 $\pi$ 散乱に制限??
  - 統計量を増やす