

# 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4年度版



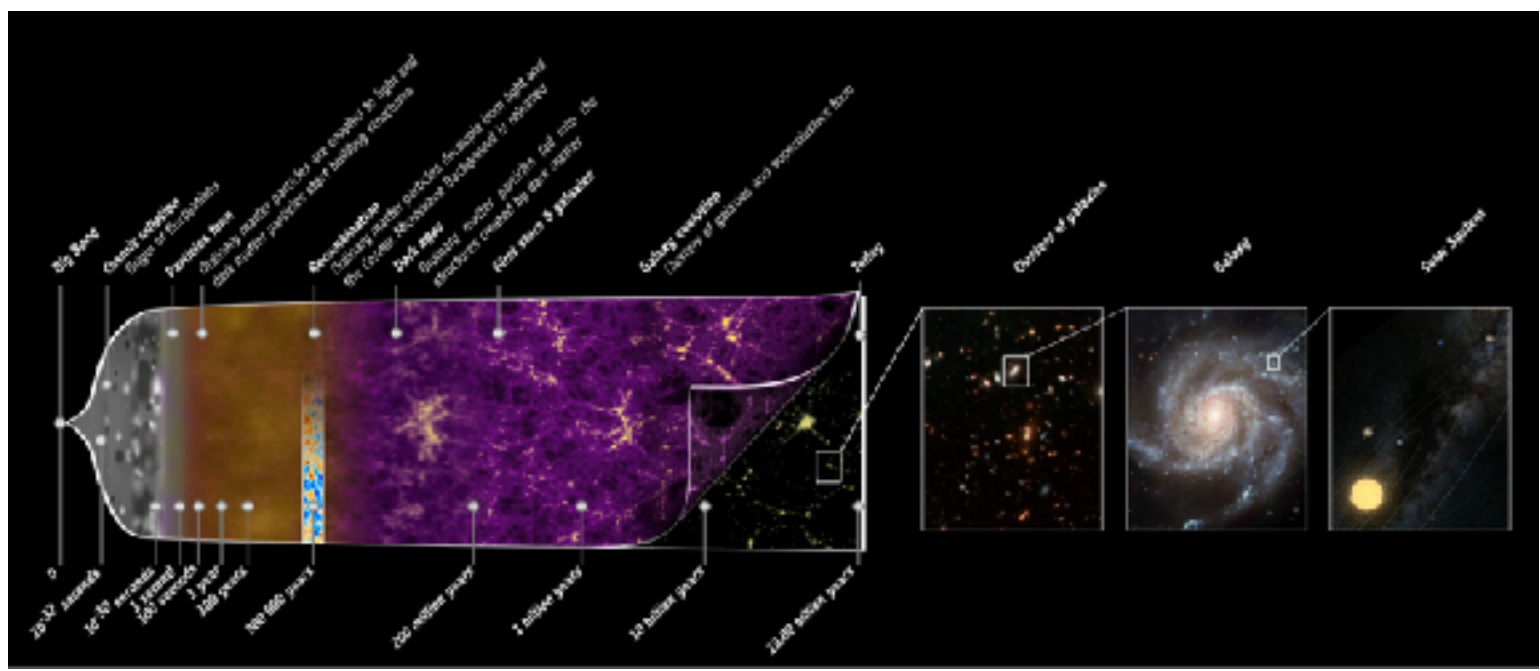
# 主な研究目的

- 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！



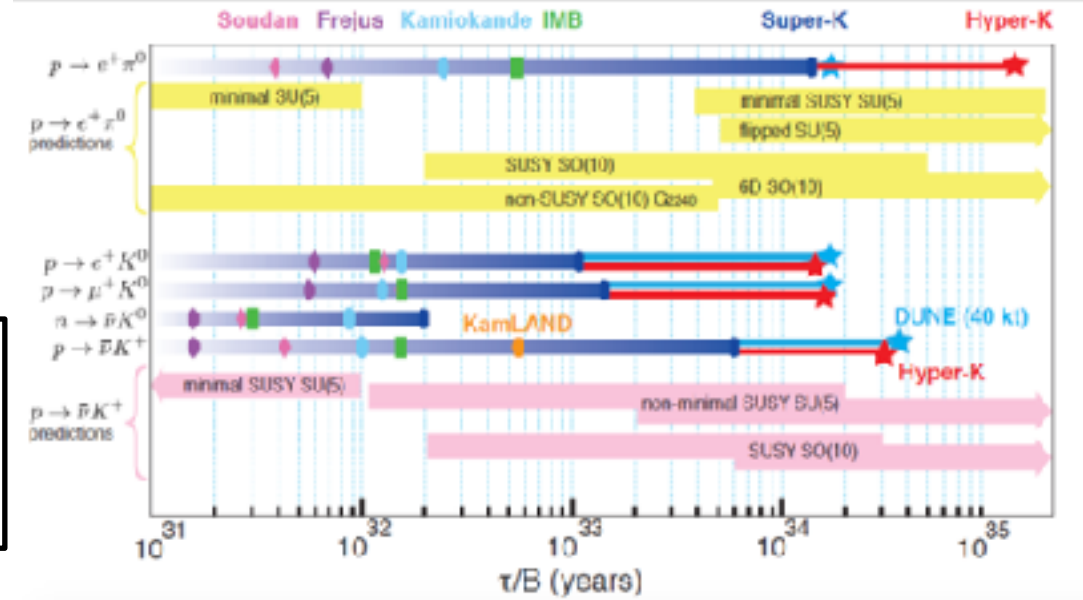
## 主な研究目的

- 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

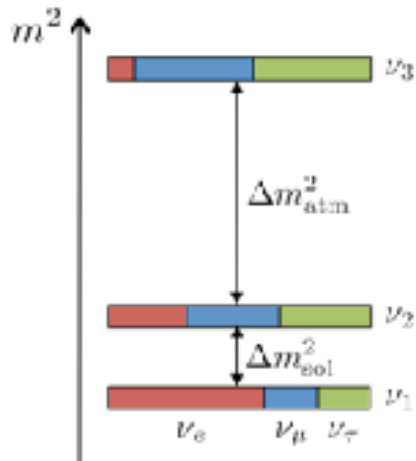
質量の順を決定

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

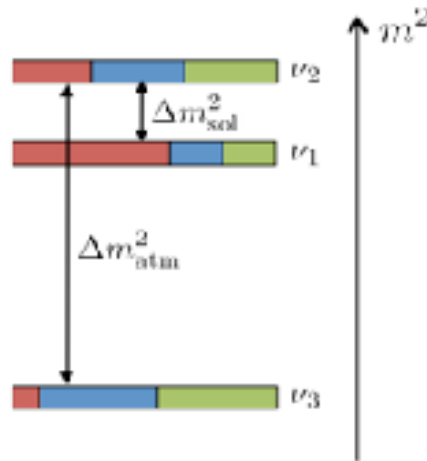


normal hierarchy (NH)



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

inverted hierarchy (IH)



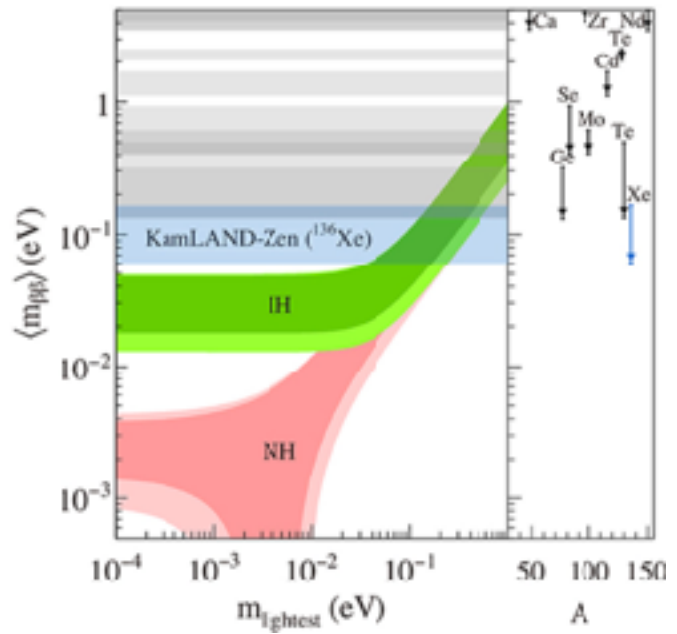
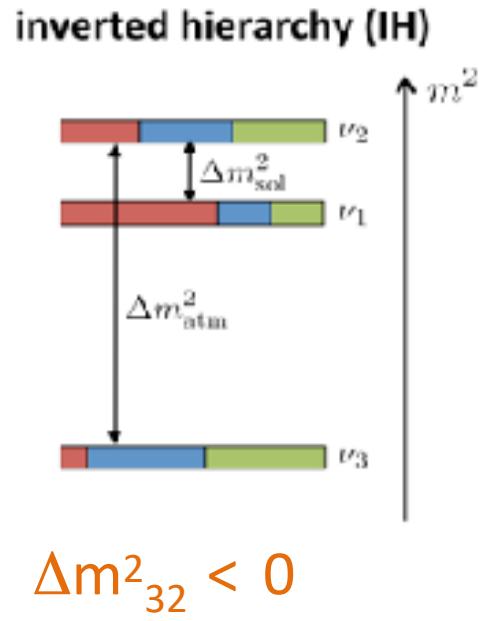
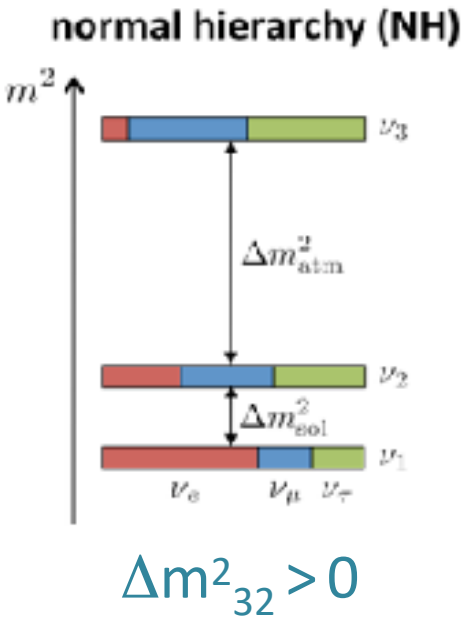
$$\Delta m^2_{32} < 0$$



# 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

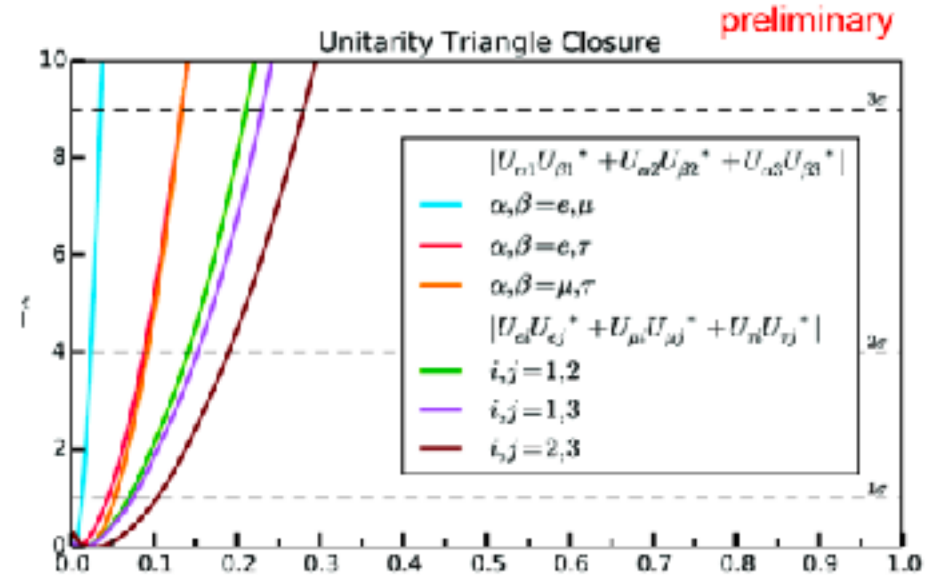
質量の順を決定  
 大統一理論の種類に絞る  
 ニュートリノと伴わないβ崩壊へ



# 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

混合マトリクスの (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

混合マトリクスの (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

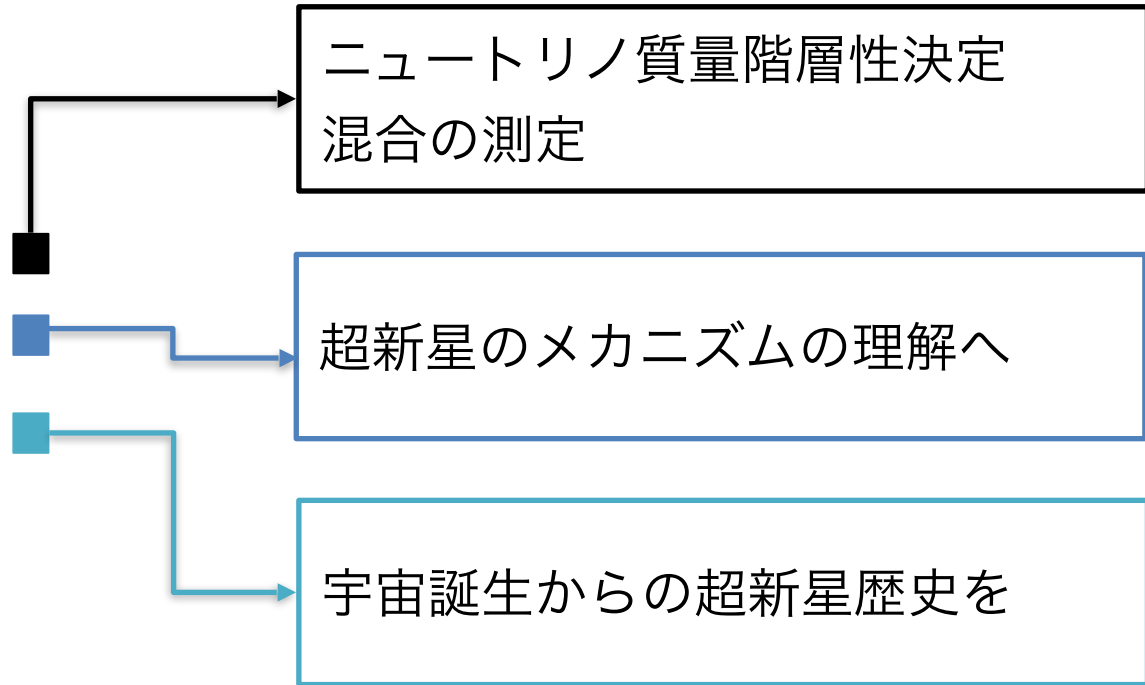
?????

$$\begin{pmatrix} (U_{e1} & U_{e2} & U_{e3}) \cdots U_{eN} \\ (U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3}) \cdots U_{\mu N} \\ (U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3}) \cdots U_{\tau N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ U_{sn1} & U_{sn2} & U_{sn3} & \cdots & U_{snN} \end{pmatrix}$$

ステライル ニュートリノ?

# 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

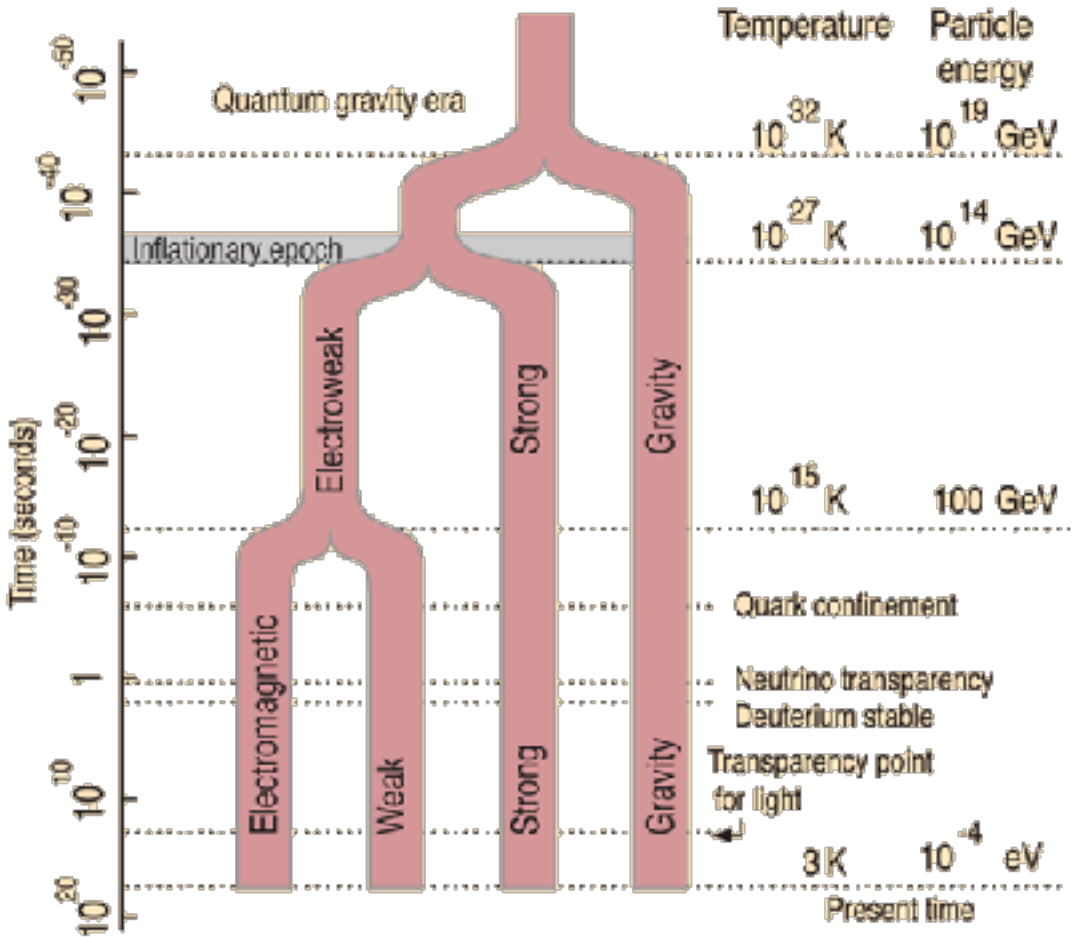


# 主な研究目的

- 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



## トピックス

# 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

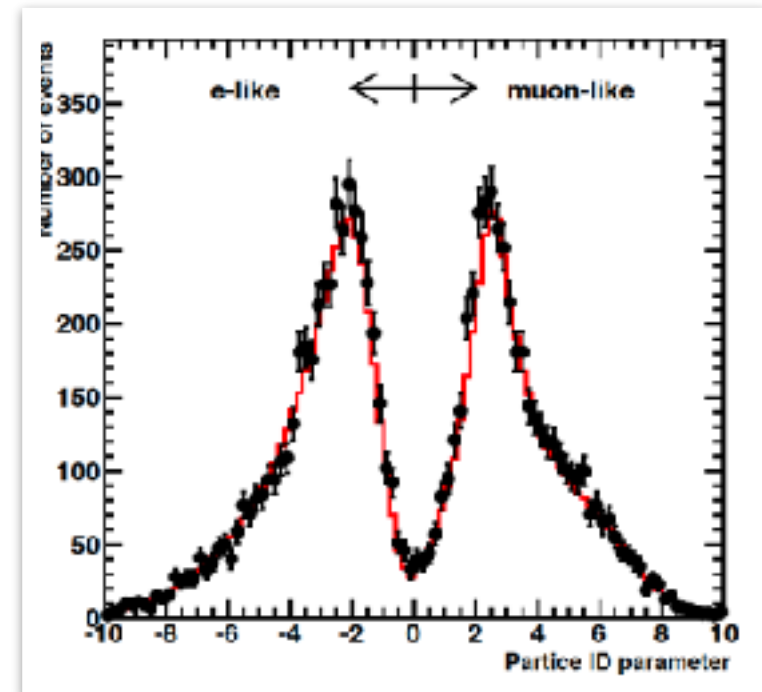
## Four Run Periods:

SK-I (1996-2001) SK-II (2003-2005)

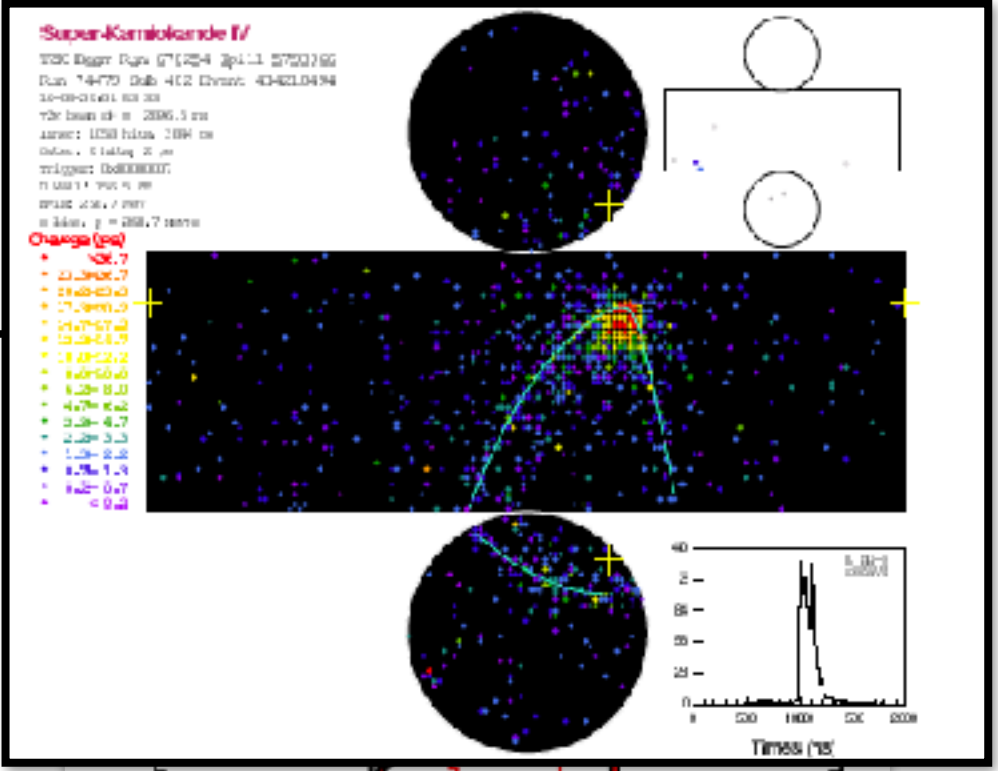
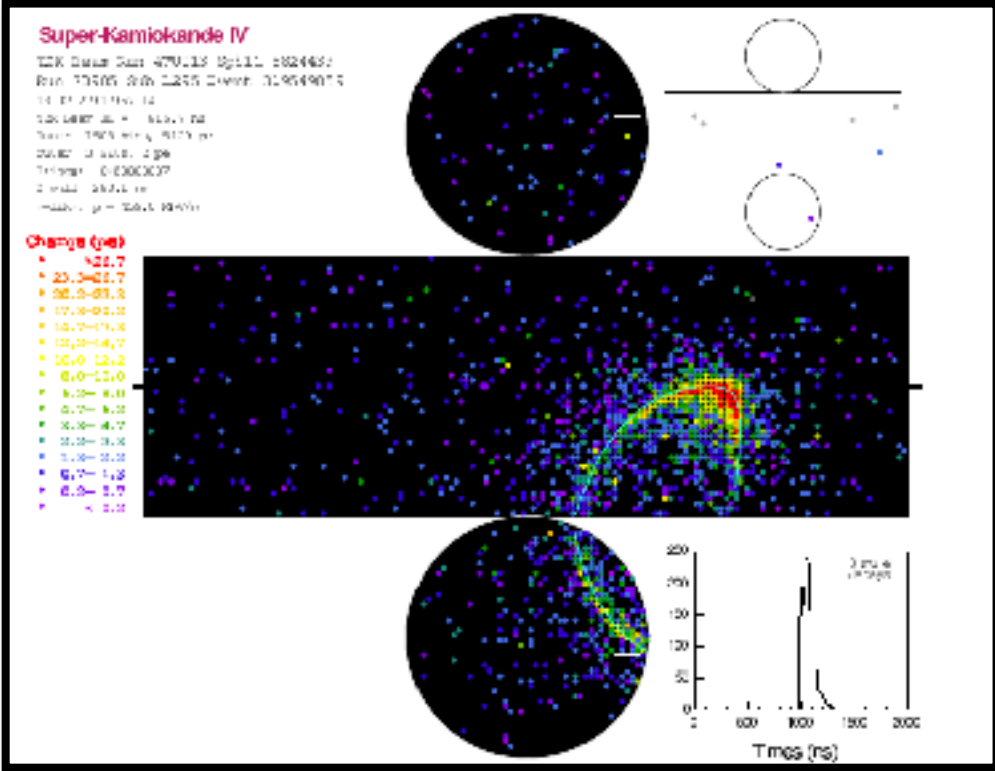
SK-III (2005-2008) SK-IV (2008-2018)

SK-V (2019-2020) **SK-Gd (2020-**

**Upgrade Complete Now operating as SK-VI (SK-Gd) !!**

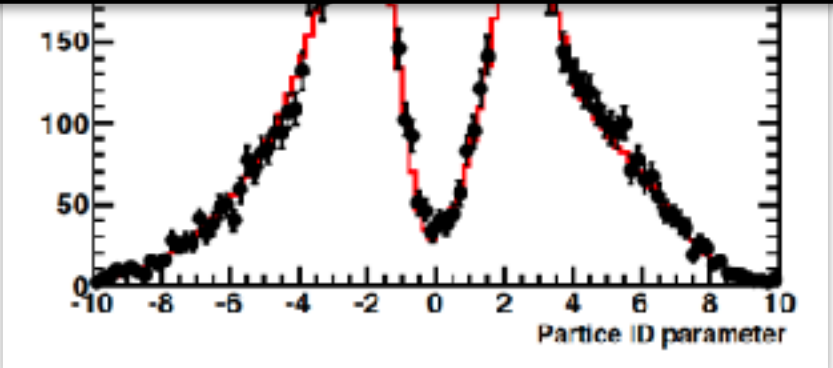


## Neutrino, Antineutrino?



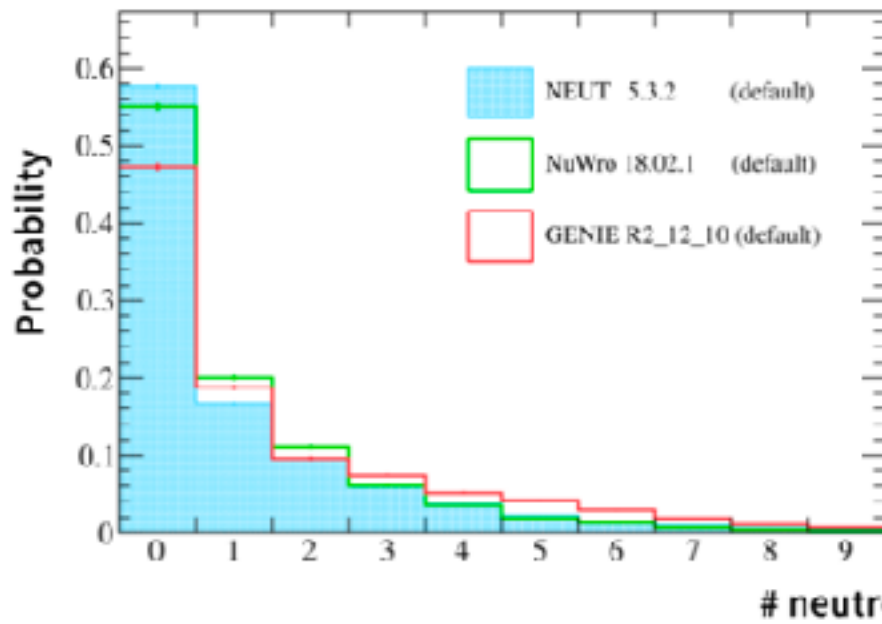
内部検出器 11.146 20% DMIT

Four Run Periods:  
SK-I (1996-2001) SK-II (2003-2005)  
SK-III (2005-2008) SK-IV (2008-2018)  
SK-V (2019-2020) **SK-Gd (2020-**  
**Upgrade Complete Now operating as SK-VI (SK-Gd) !!**

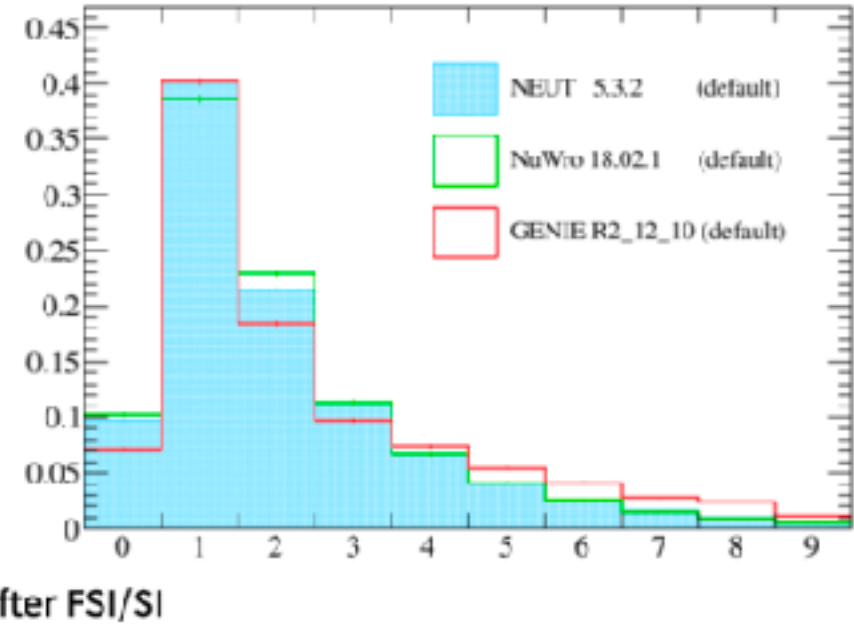


# スーパーカミオカンデと中性子

**$\nu$ -mode  $\nu\mu \rightarrow \nu\mu$  MC**

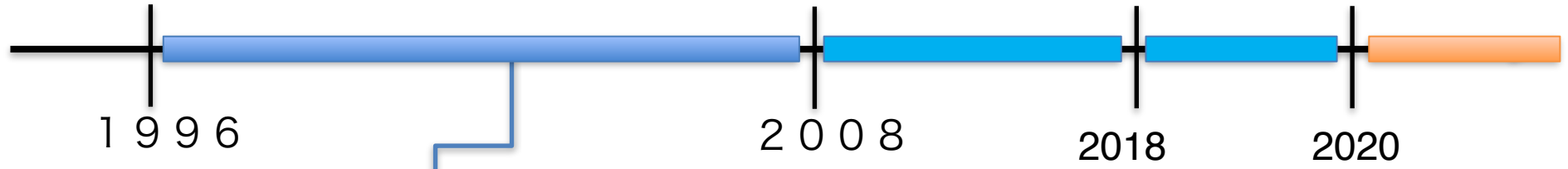


**$\bar{\nu}$ -mode  $\bar{\nu}\mu \rightarrow \bar{\nu}\mu$  MC**



ニュートリノと反ニュートリノ識別へ

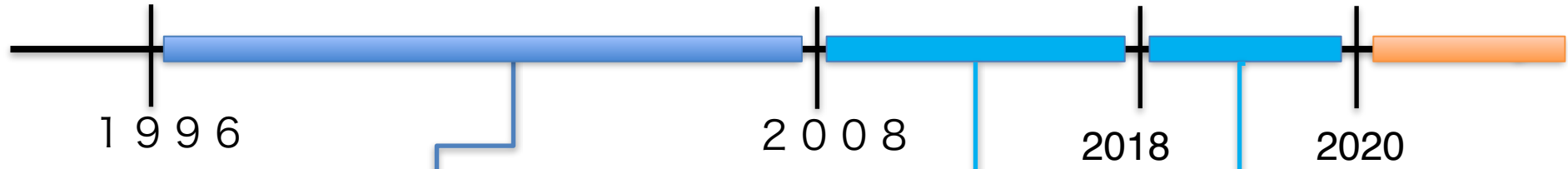
# スーパーカミオカンデと中性子



超純水：エレキの性能で、中性子情報なし

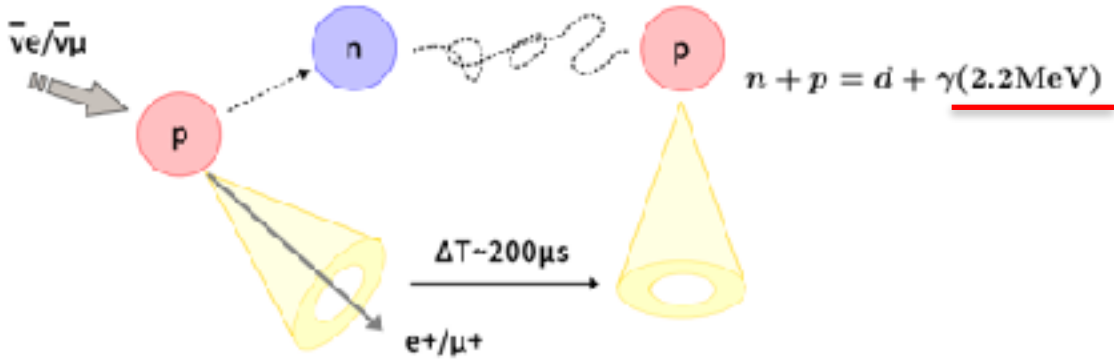


# スーパーカミオカンデと中性子

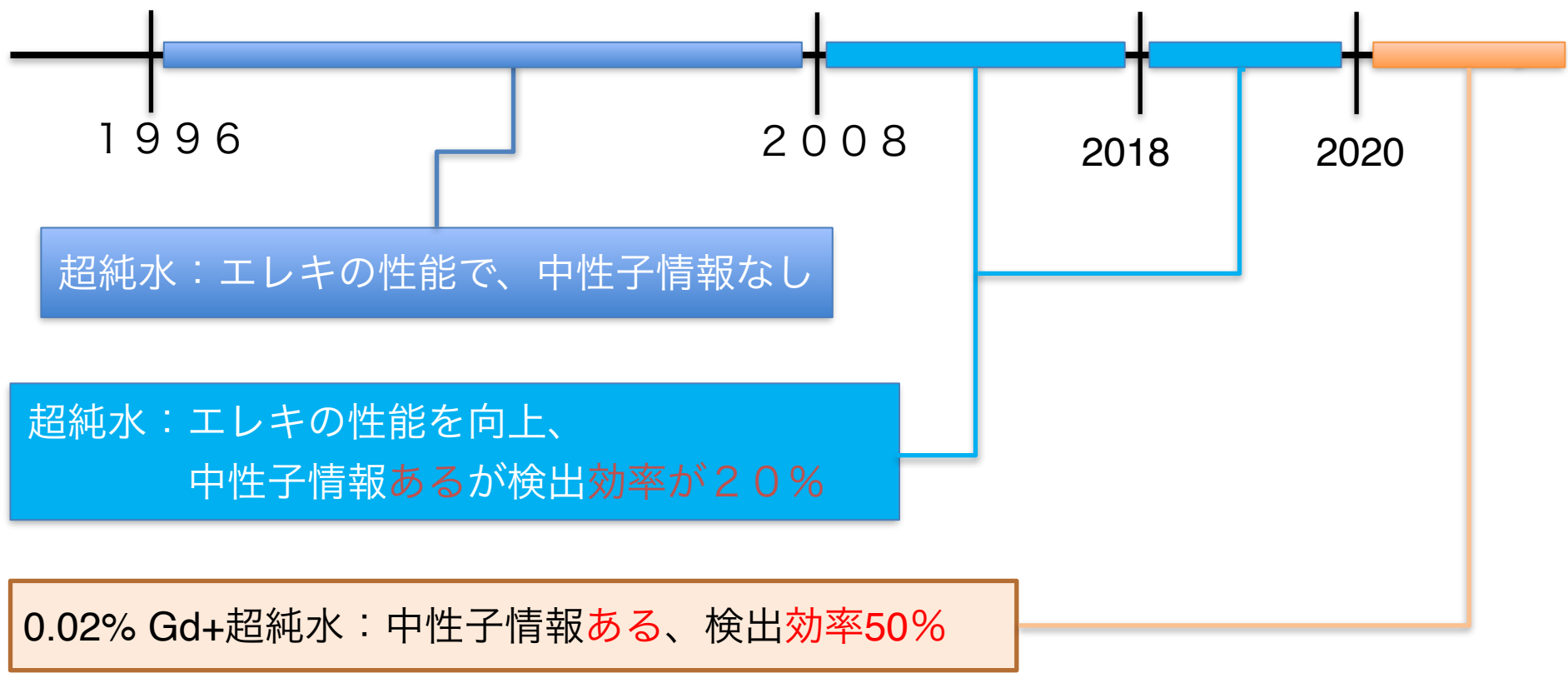


超純水：エレキの性能で、中性子情報なし

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%



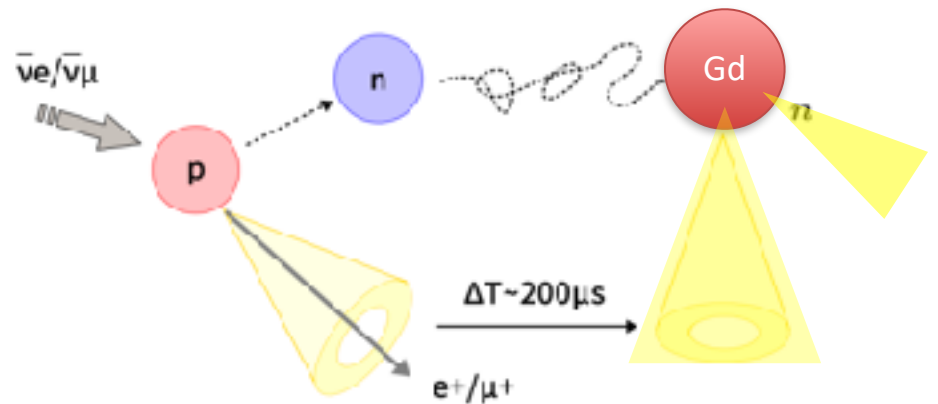
# スーパーカミオカンデと中性子



超純水：エレキの性能で、中性子情報なし

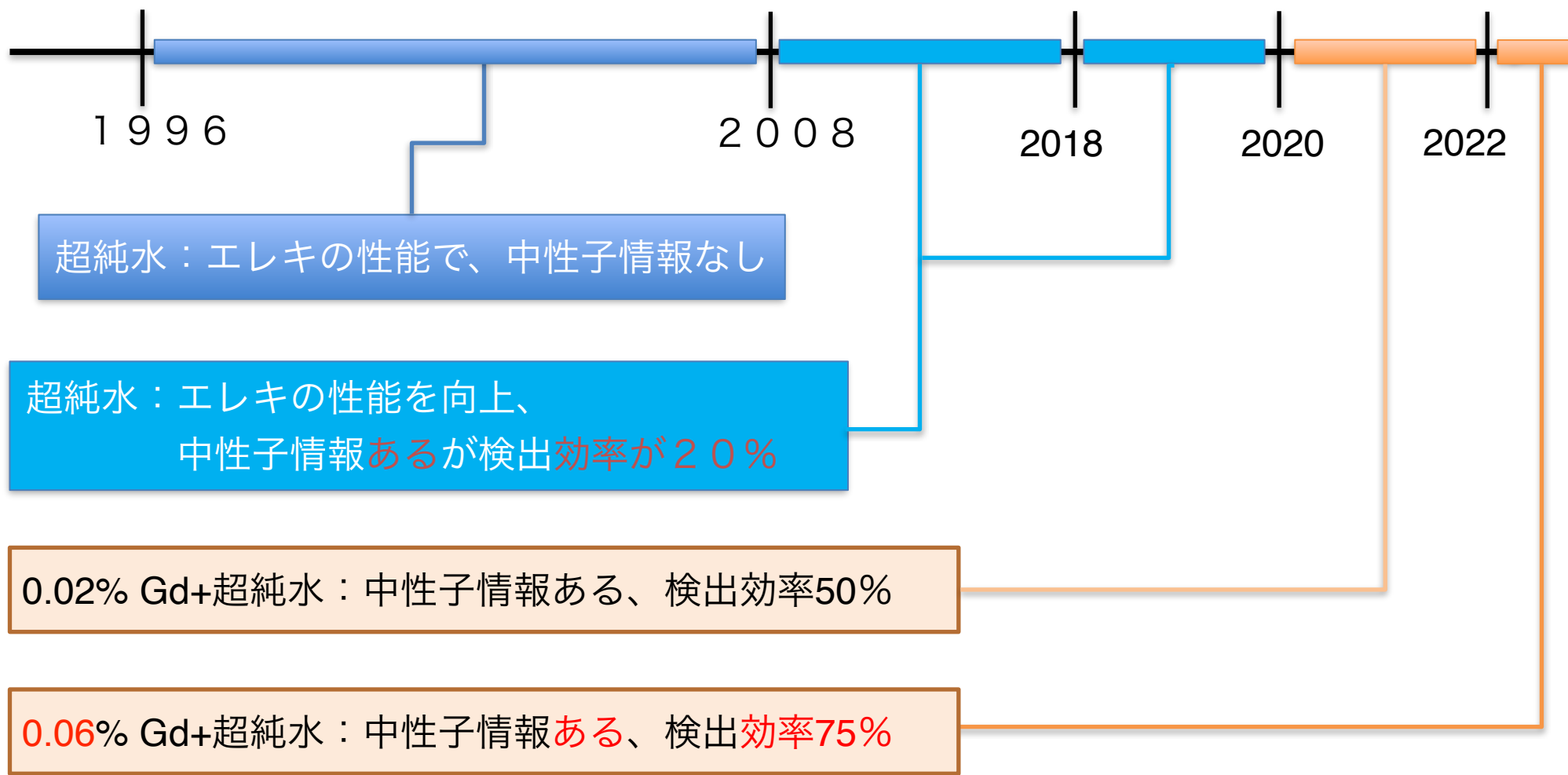
超純水：エレキの性能を向上、  
中性子情報あるが検出効率が20%

0.02% Gd+超純水：中性子情報ある、検出効率50%



複数 $\gamma$ 、 $\sim 8$  Mev

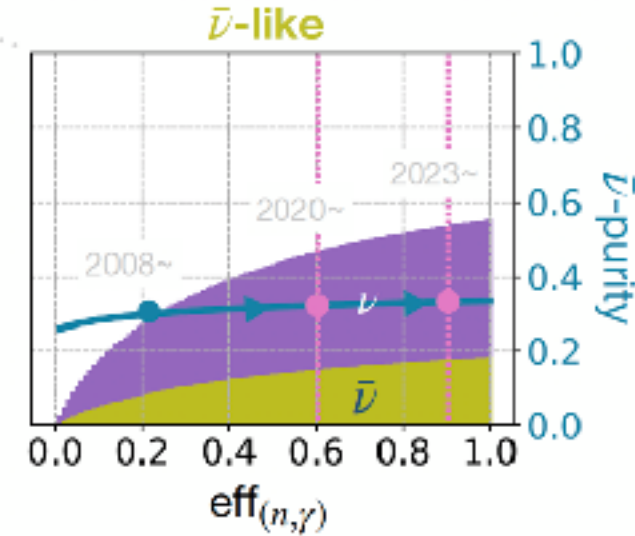
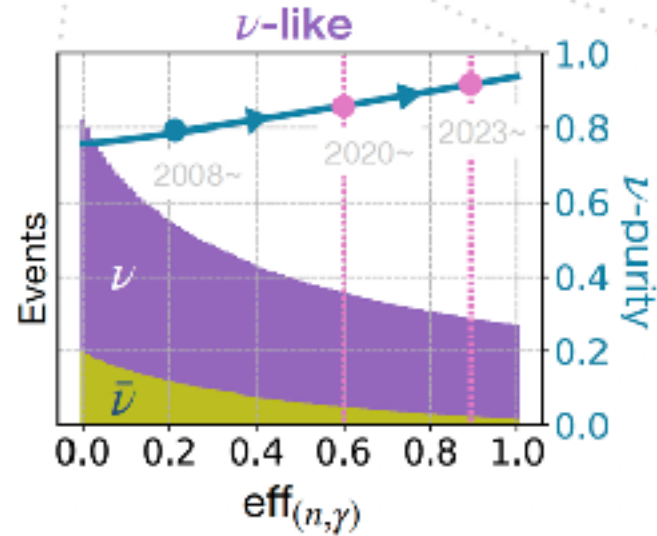
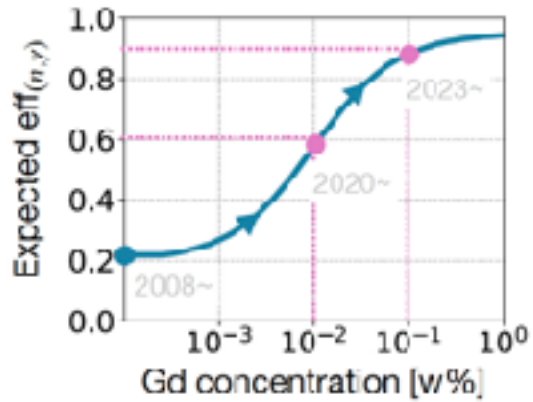
# スーパーカミオカンデと中性子



# 嬉しいこと

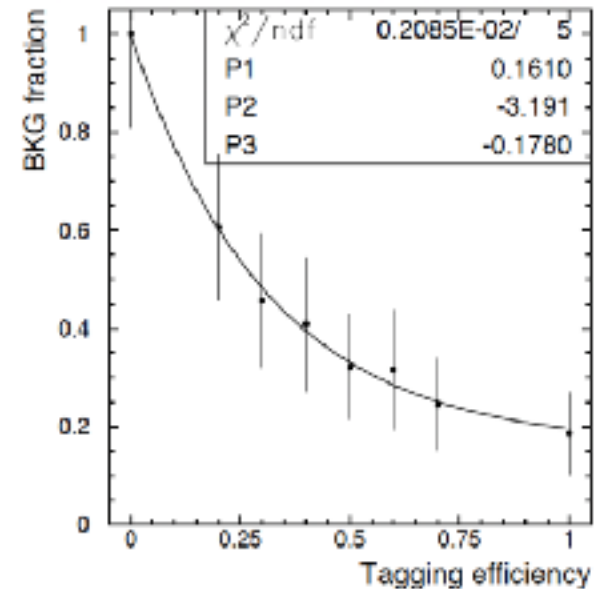
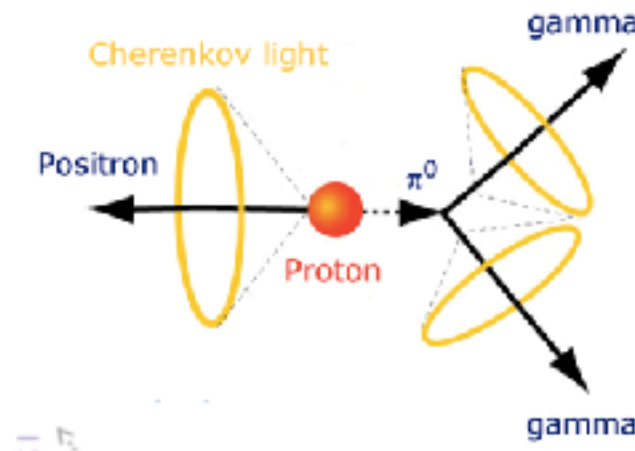
## ニュートリノと反ニュートリノ識別

More Gd, better (n,γ) detection!



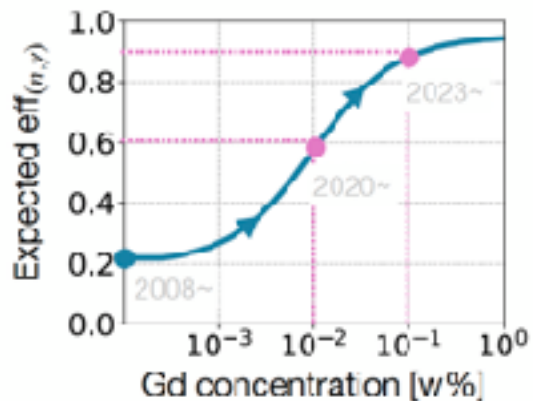
## 陽子崩壊BG削減

PDK signal



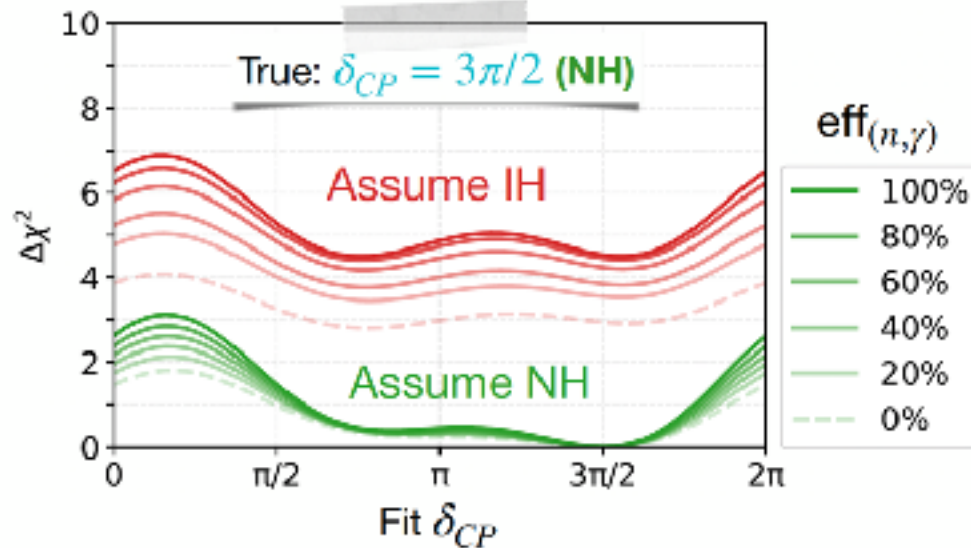
# 嬉しいこと

More Gd, better  $(n, \gamma)$  detection!



## ニュートリノと反ニュートリノ識別

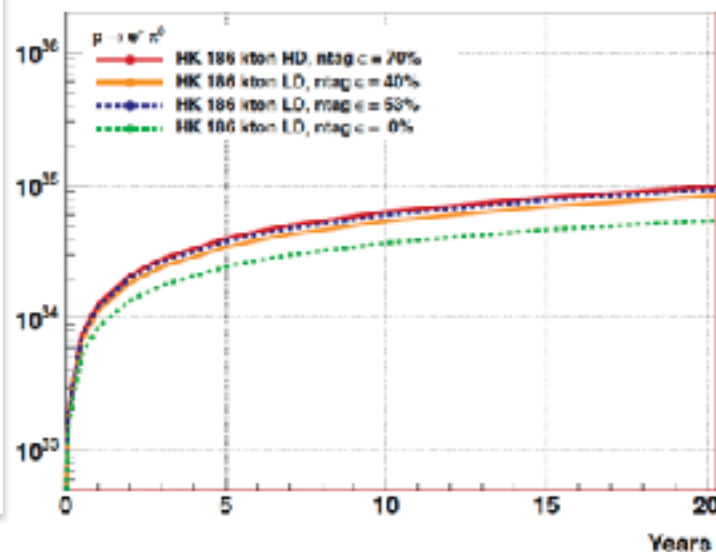
質量階層への感度



陽子崩壊BG削減

発見可能な陽子寿命

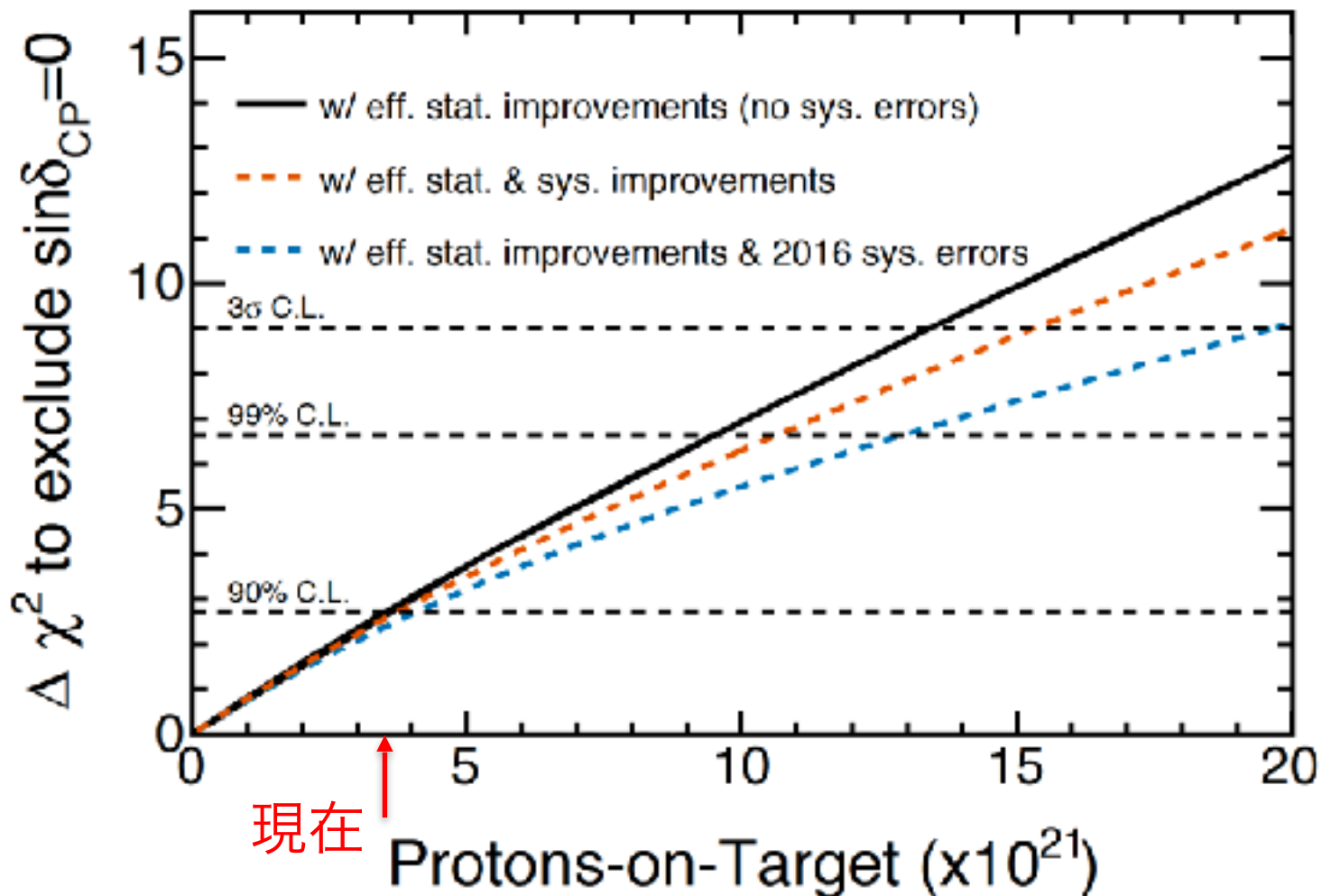
Impact of Neutron tagging efficiency



# 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
    - 。。。



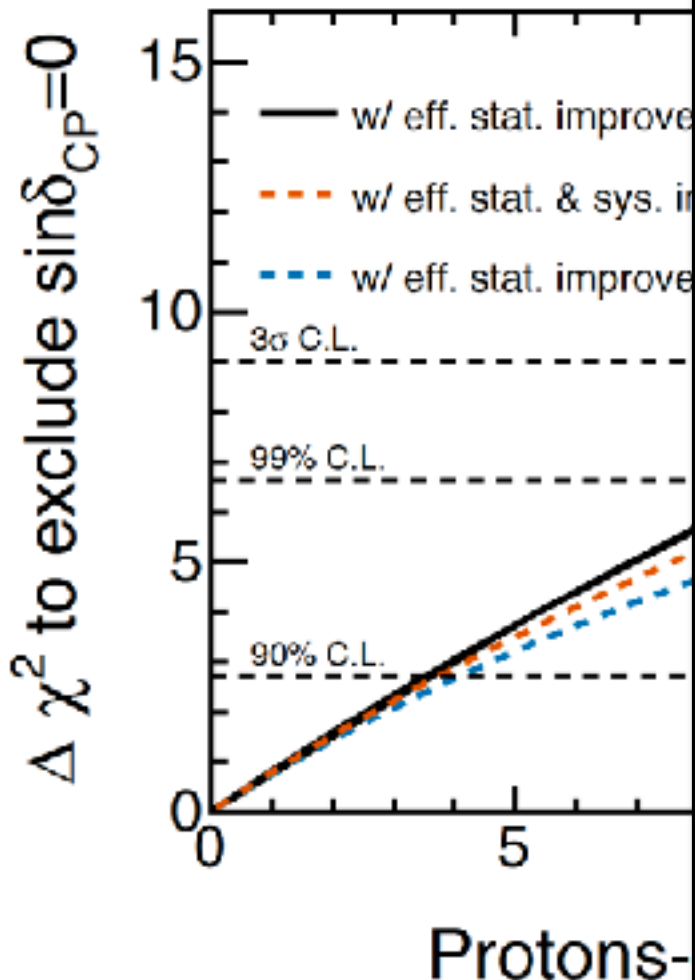


- SK側で解析可能な統計量を増やす
- 検出器反応に伴う系統誤差を削減

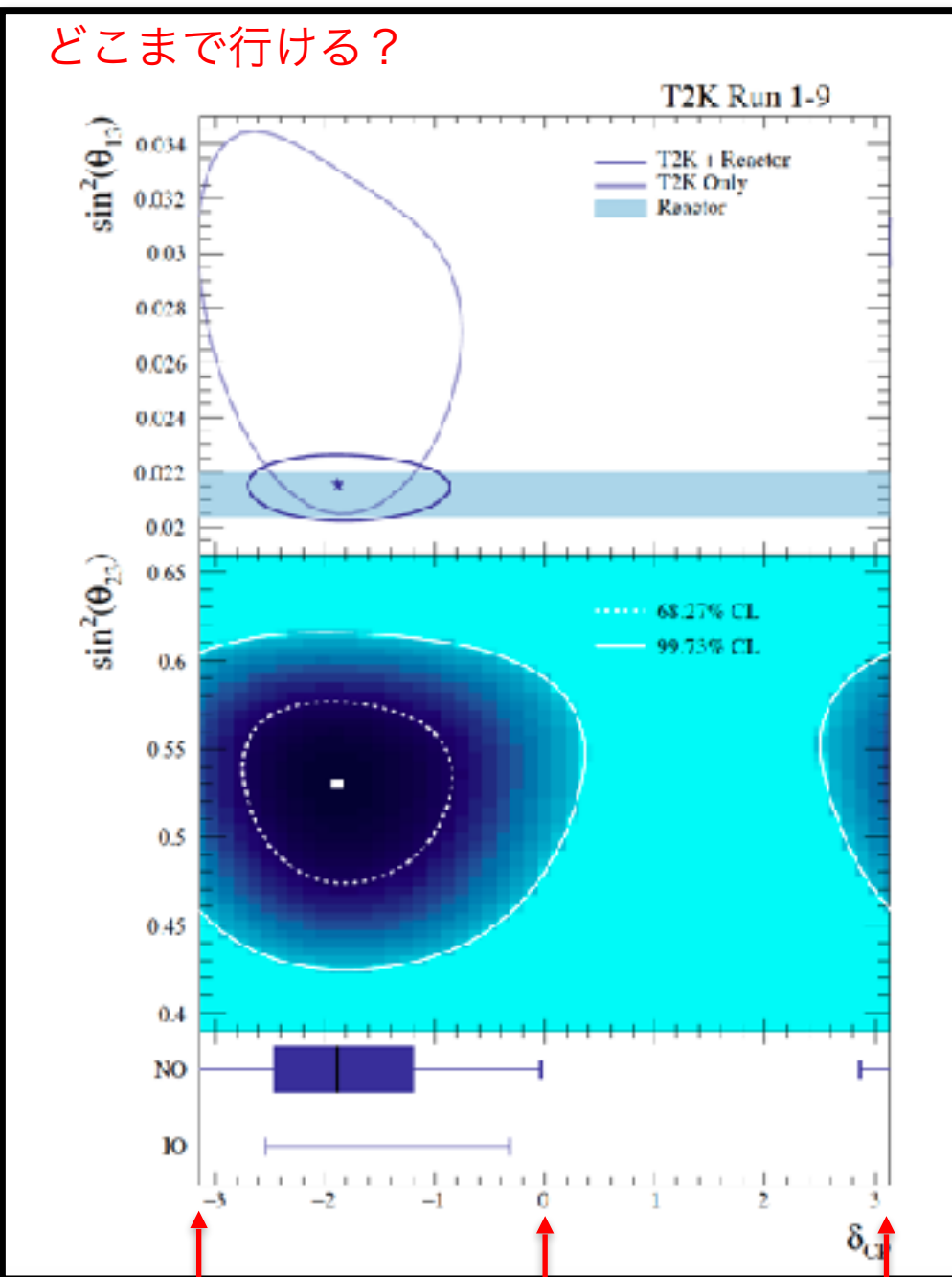
# CP破れの優位度

# T2K

どこまで行ける？



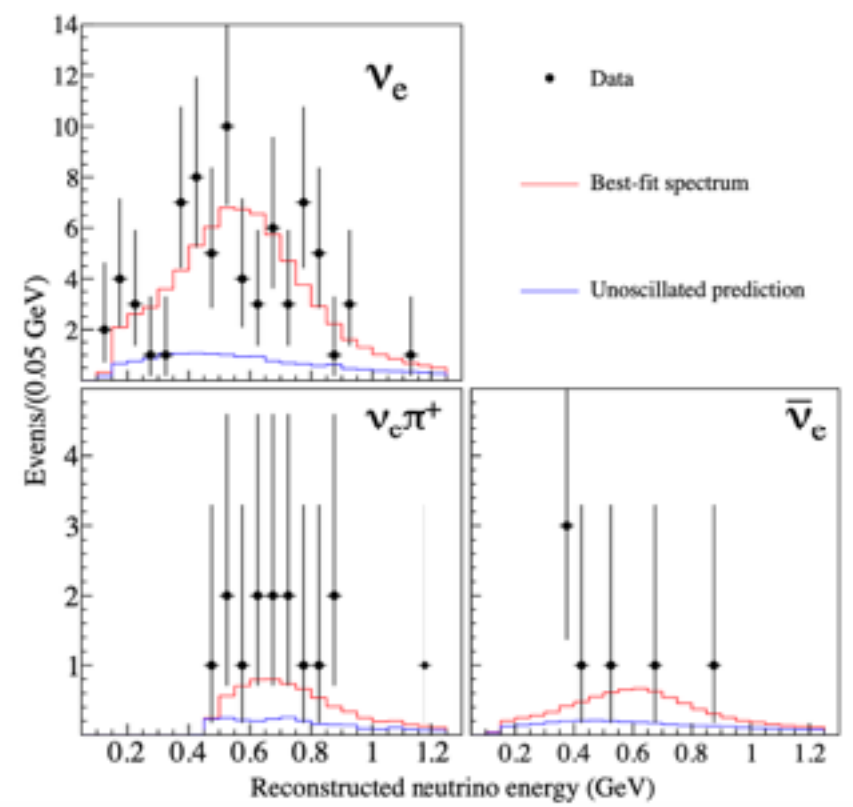
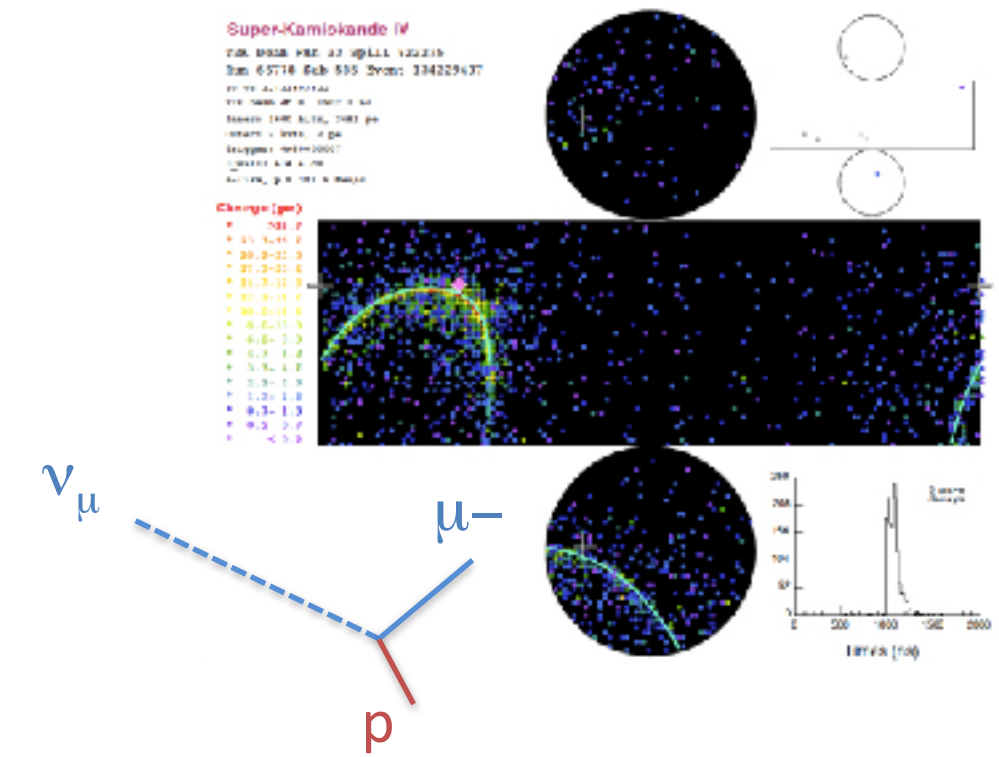
- SK側で解析可能な統計量を増や
- 検出器反応に伴う系統誤差を削



# T2K-SK ワーキンググループ

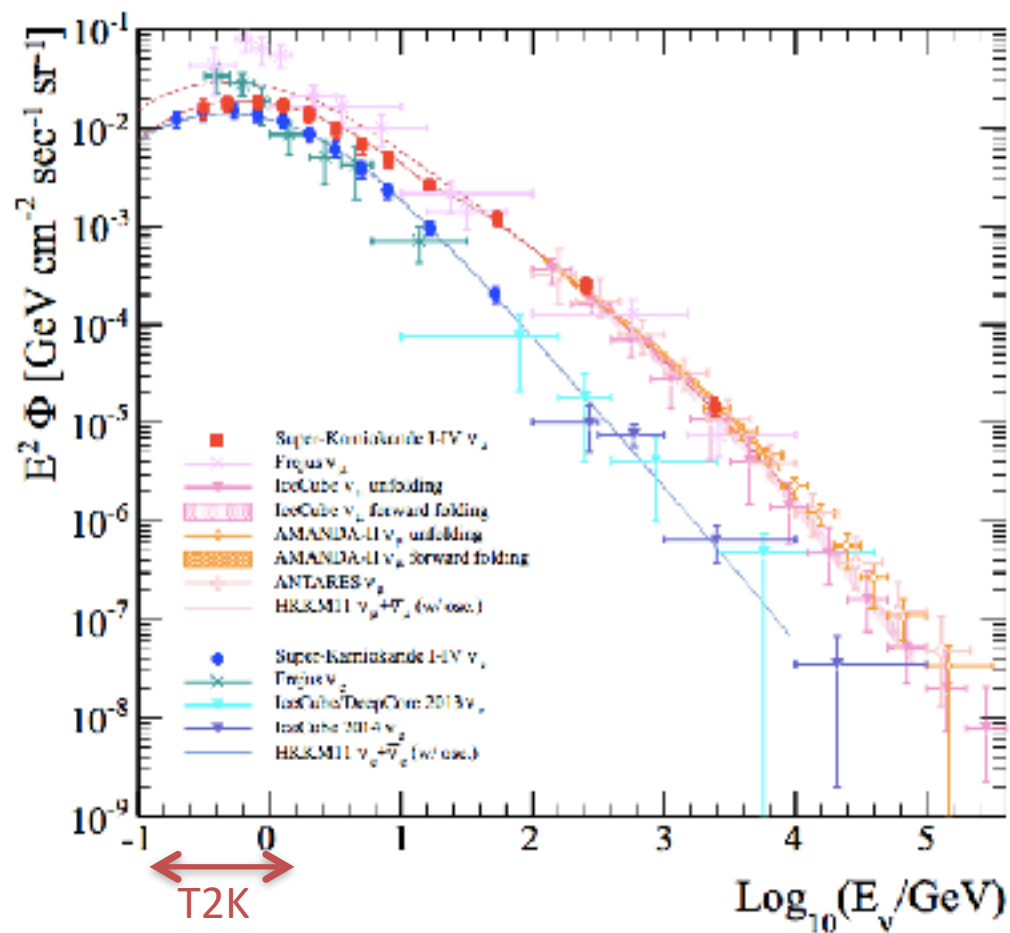
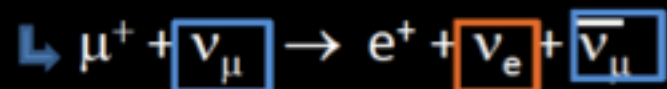
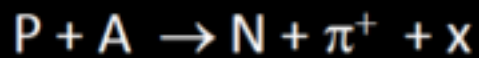
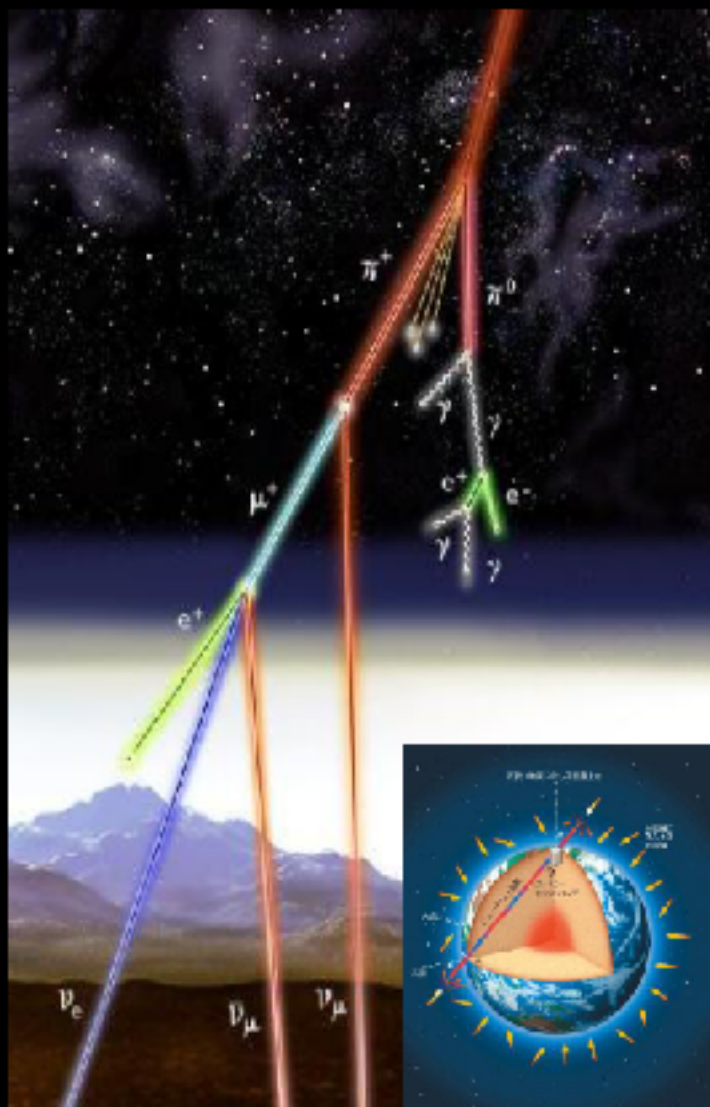
- T2KとSKはそれぞれ独立している実験だが、T2K-SKグループはその間の橋
  - SKにおいてのT2Kビームデータの責任
  - SK側のGPS時間情報の管理
  - SKの再構成アルゴリズムの検証、安定性
  - データのクオリティ
- データサンプルを定義し、系統誤差をつける

再構成した荷電粒子は一つしかないサンプル





# 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

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

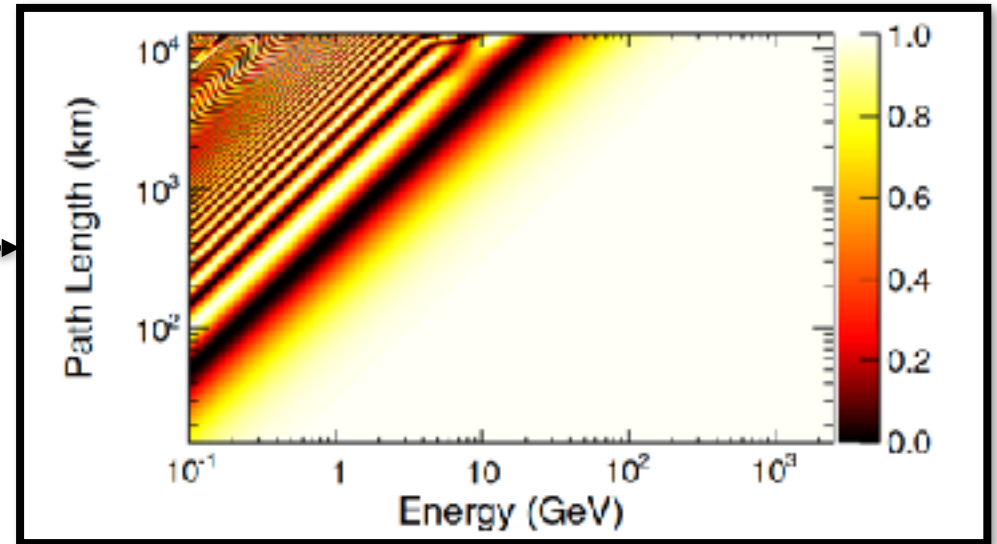
- PMNSニュートリノ振動
- Exotic ニュートリノ振動
  - ステラいるニュートリノ
  - NSI
  - ローレンツ対称性を破る振動
  - . . .
- 天文学関連
  - 重力波などのCoincidence探索
  - GRB探索
  - 暗黒物質探索



# スーパーカミオカンデ：大気ニュートリノ

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

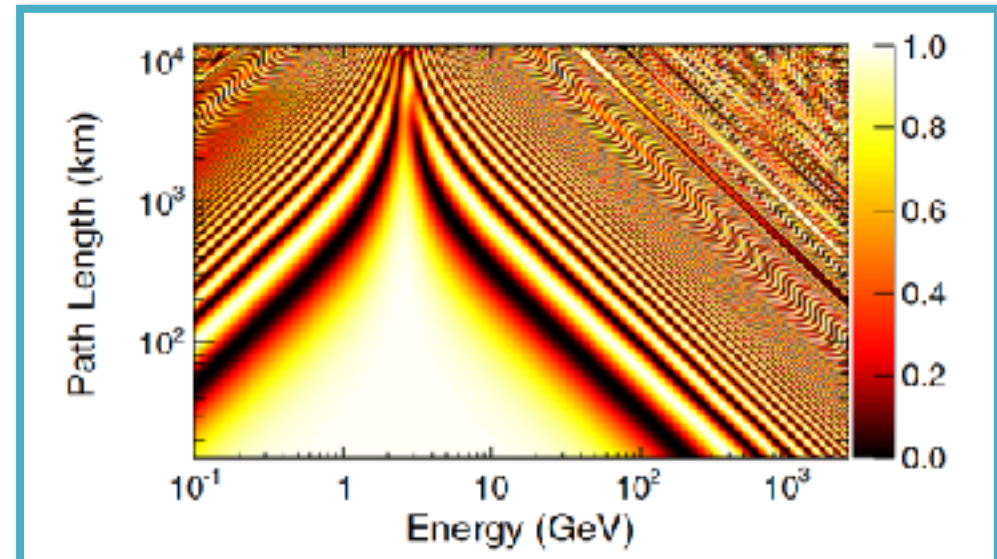
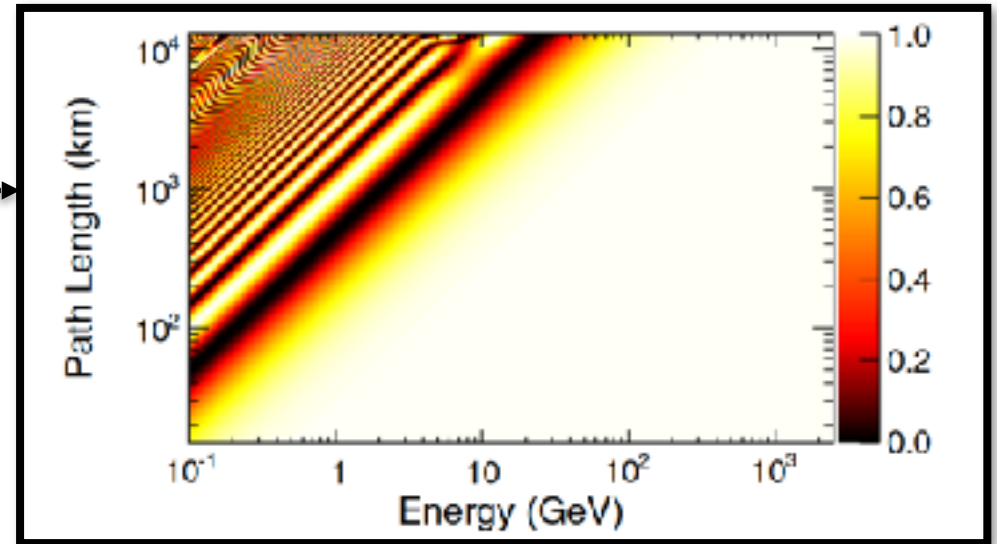
- PMNSニュートリノ振動
- Exotic ニュートリノ振動
  - ステラいるニュートリノ
  - NSI
  - ローレンツ対称性を破る振動
  - . . .
- 天文学関連
  - 重力波などのCoincidence探索
  - GRB探索
  - 暗黒物質探索



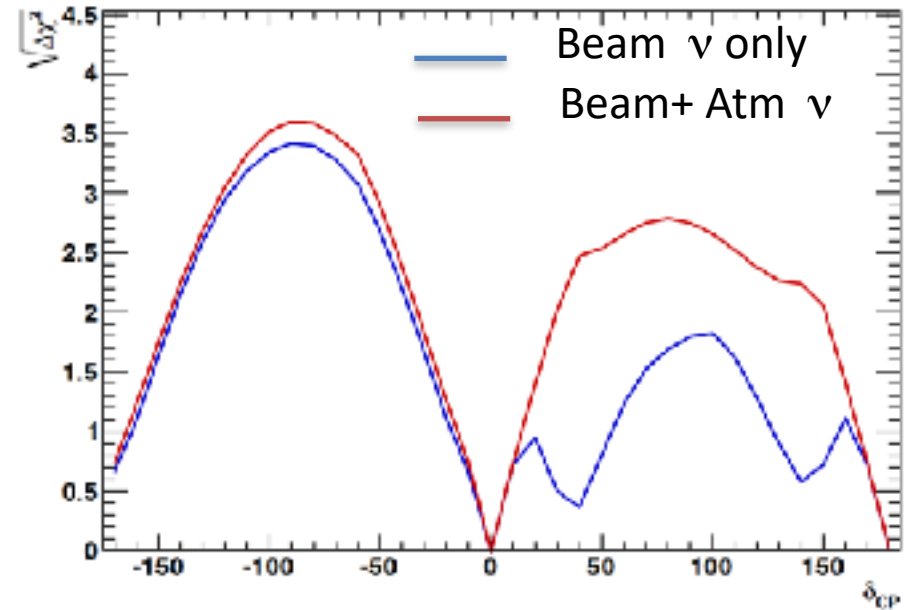
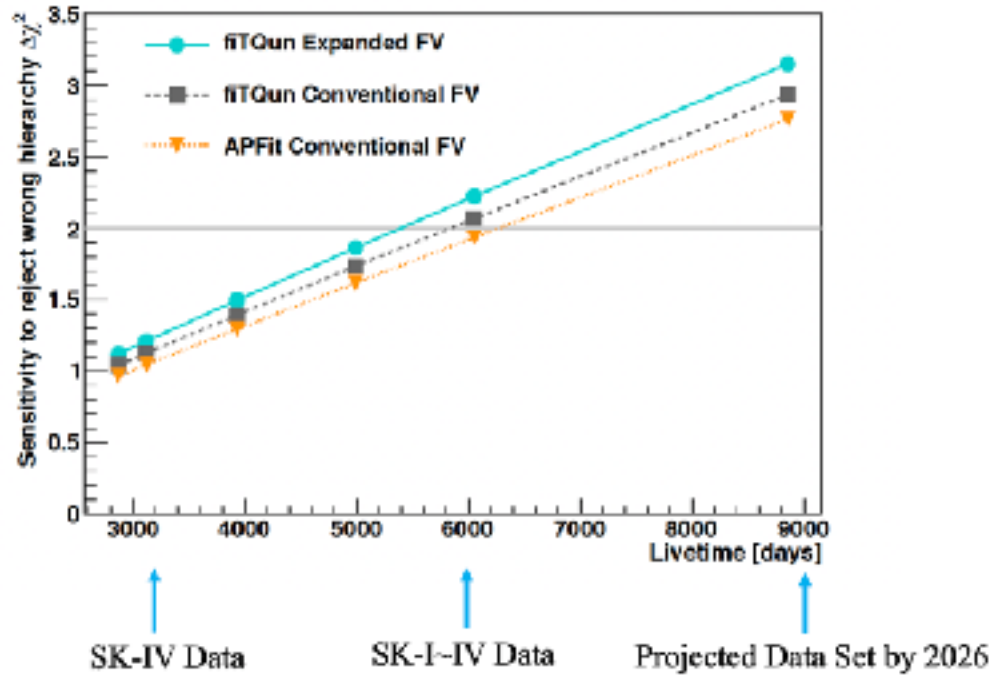
# スーパーカミオカンデ：大気ニュートリノ

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

- 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
    - . . .
- 暗黒物質探索
- 重力波などとのCoincidence探索

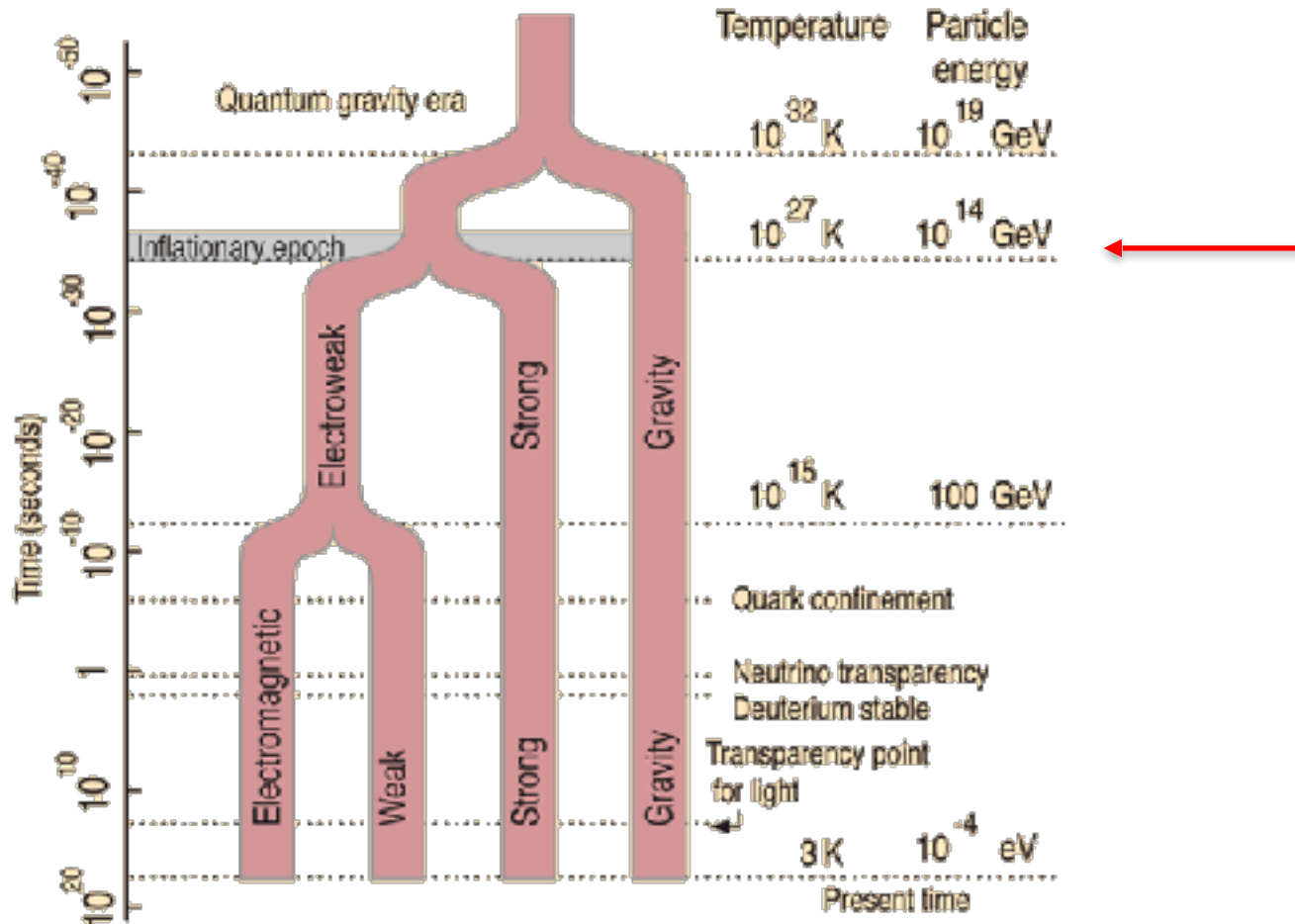


# 大気ニュートリノ解析



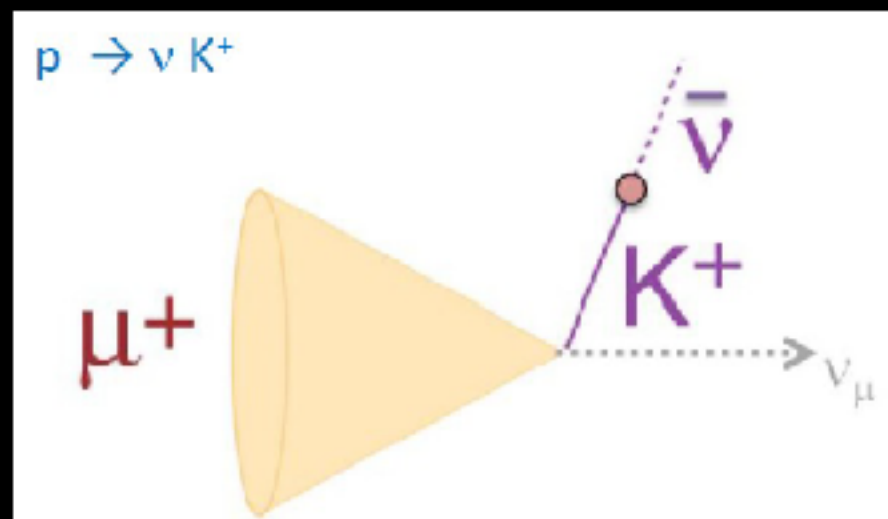
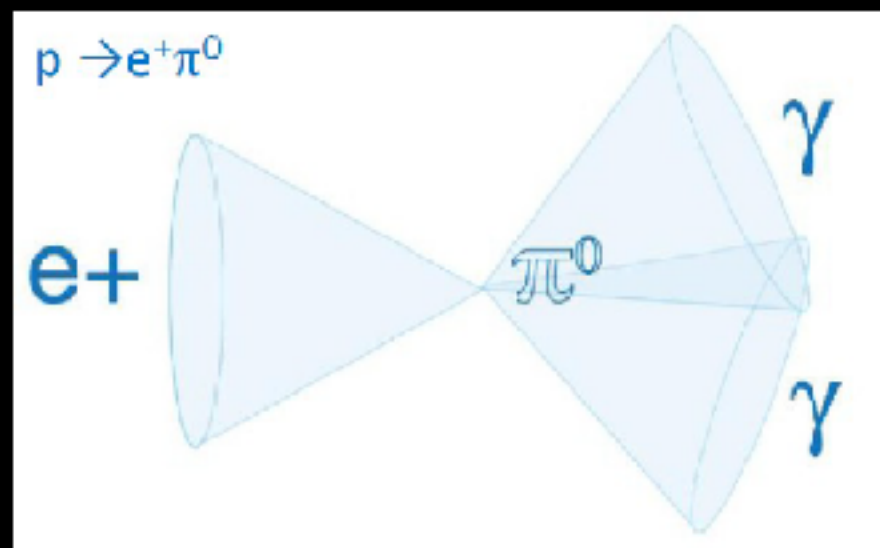
- 新しい事象再構成ツールを導入し、SKの感度向上に成功
  - ただ、一部のデータにしか適応出来ていない、今後は全データを使うように
  - 中性子タグによるニュートリノと反ニュートリノを識別
- SKとT2Kと共同で解析すると、CP破れ感度が向上
  - SKの感度は主に質量階層性
  - T2Kは主にCP

# スーパーカミオカンデ：陽子崩壊

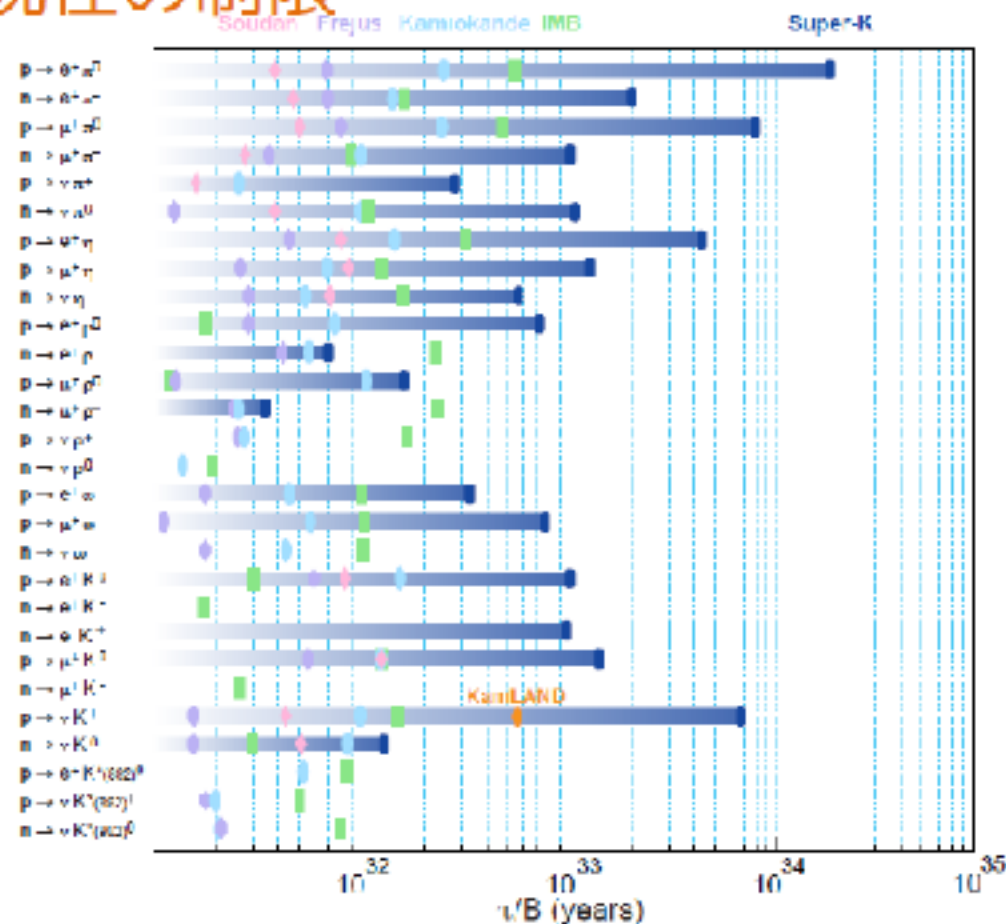


# 陽子崩壊

- 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

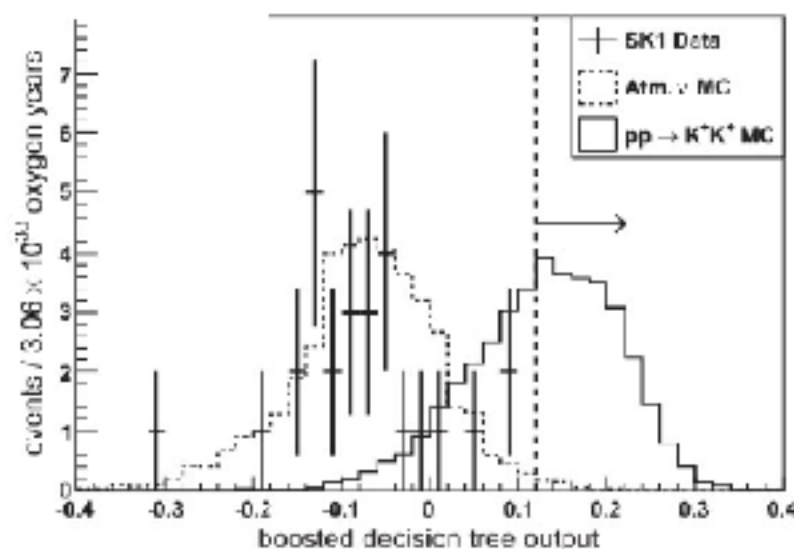


# 現在の制限



- 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

$$pp \rightarrow \bar{K}^+ K^+$$

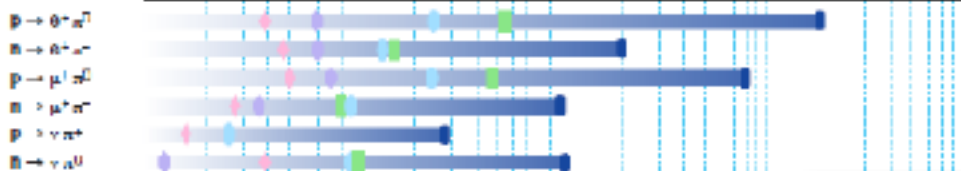


- 新再構成アルゴリズムや解析方法の改善による感度向上が可能



# 現在の制限

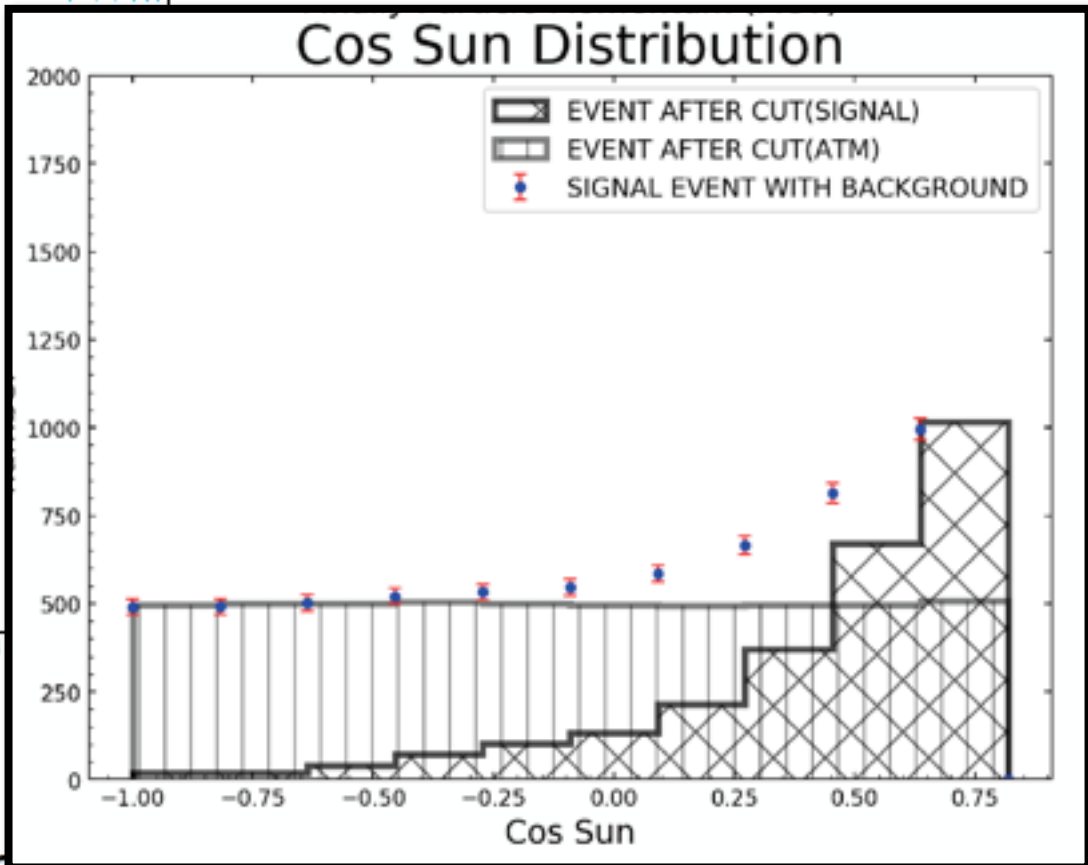
Soudan Frejus Kamiokande IMB Super-K



- 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：

太陽ないでモノプールが溜まっているなら、陽子崩壊を媒介する？

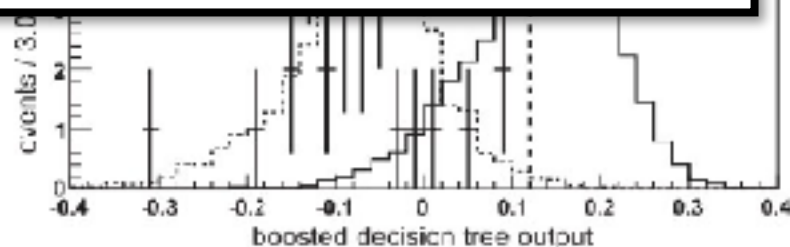


The proton decay mode we used in this time



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： SN 1987A 大マゼラン雲 1987年2月24日

前

後

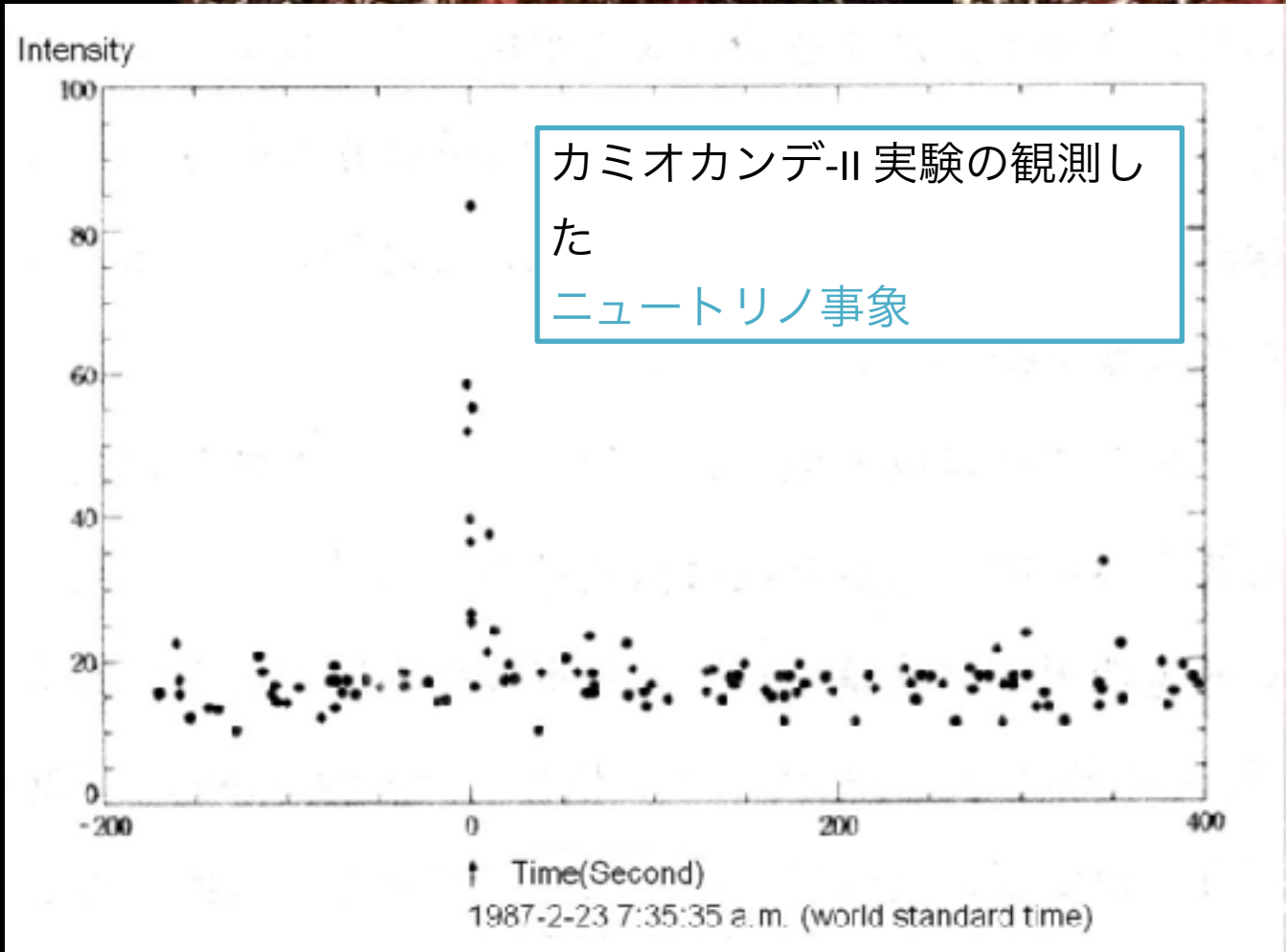


超新星爆発！



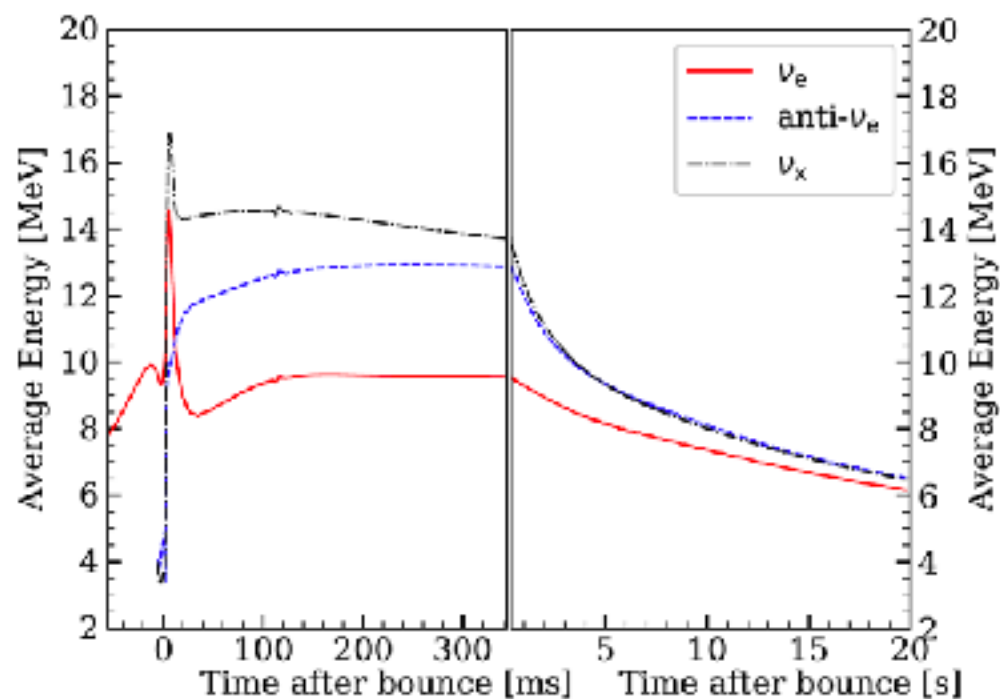
超新星爆発： SN 1987A 大マゼラン雲 1987年2月24日

前 後

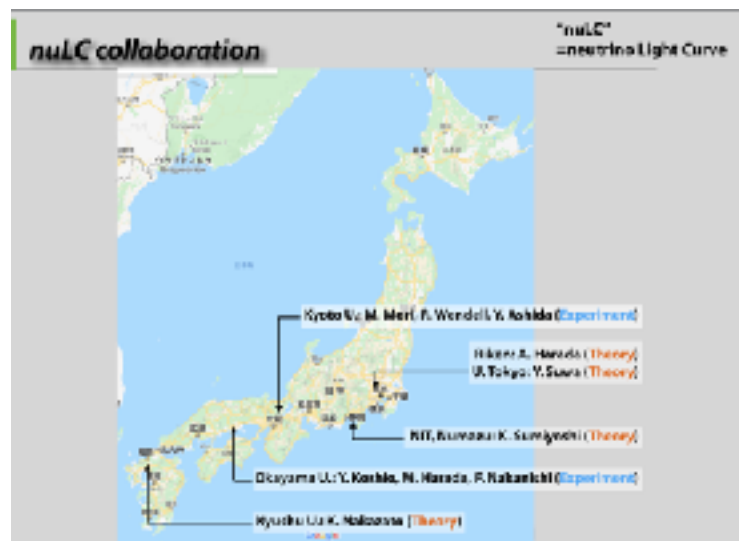


超新星爆発！

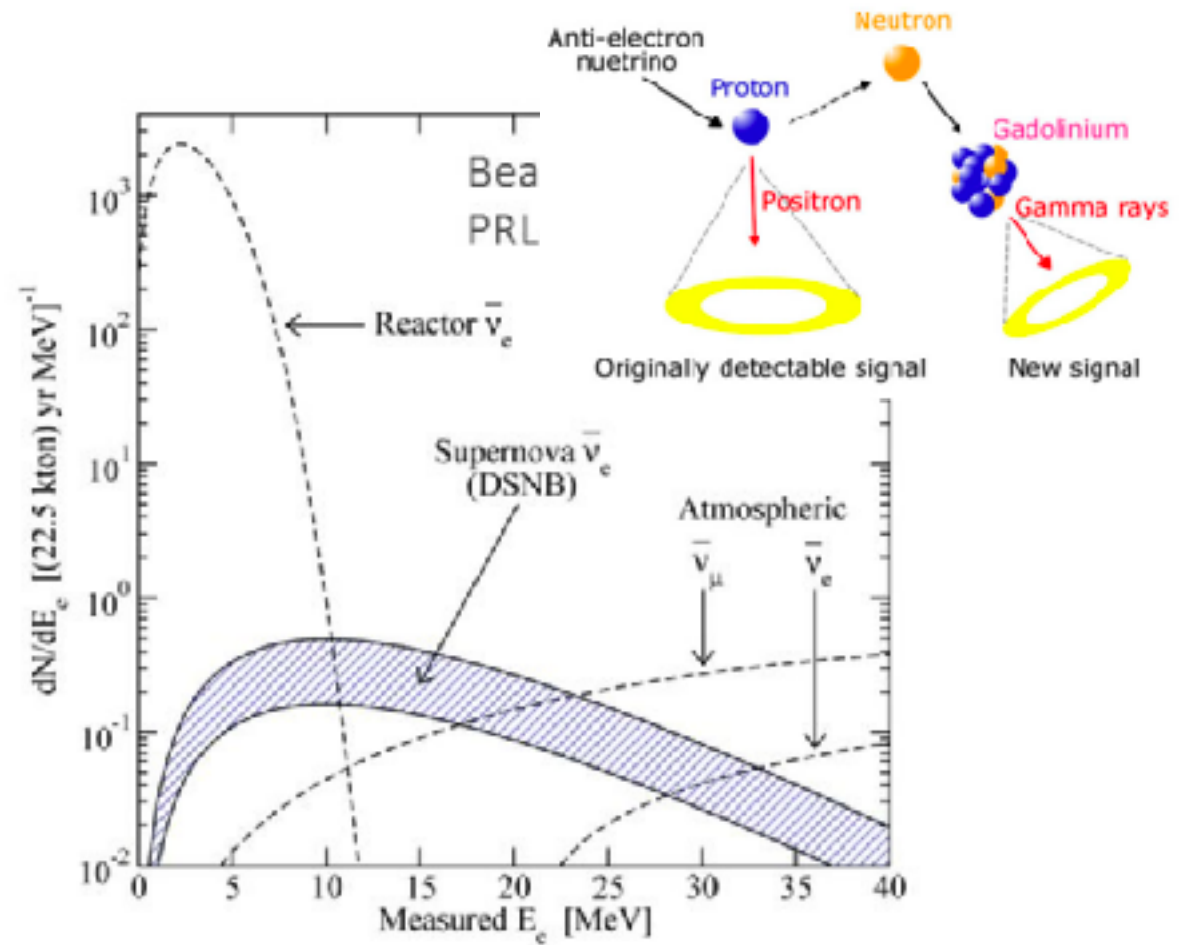
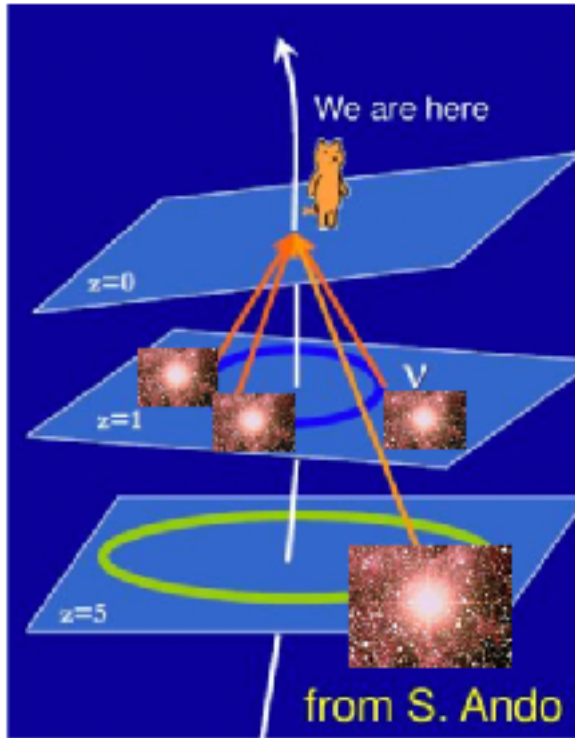
# 超新星爆発の研究: NuLC



- 超新星爆発のメカニズムは大體理解されている
  - 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



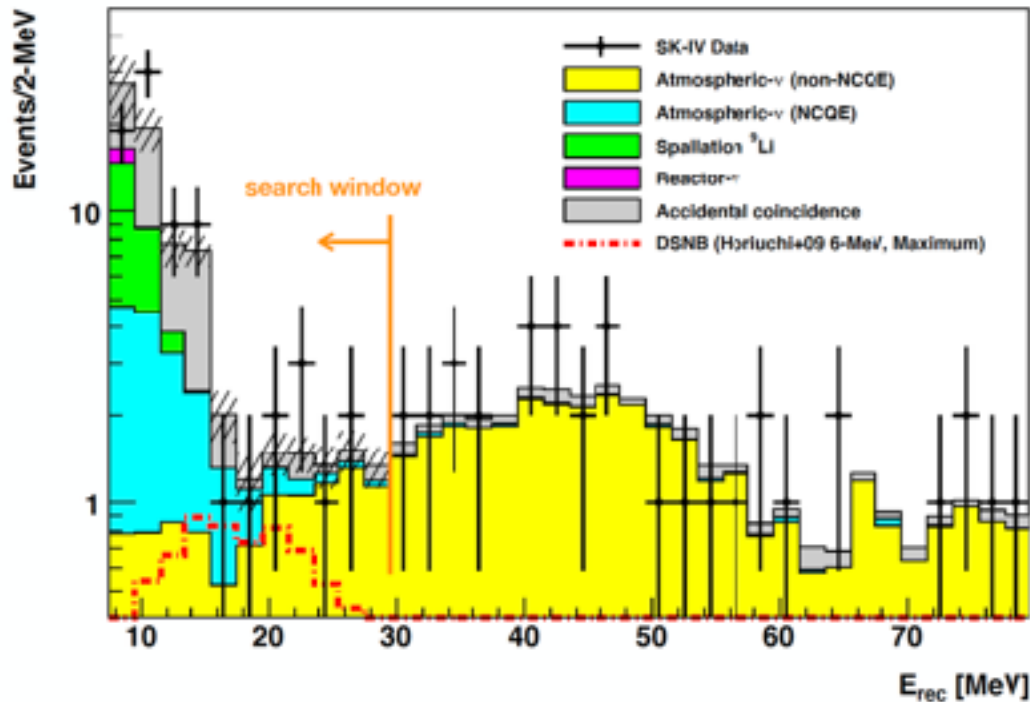
# 超新星背景ニュートリノ



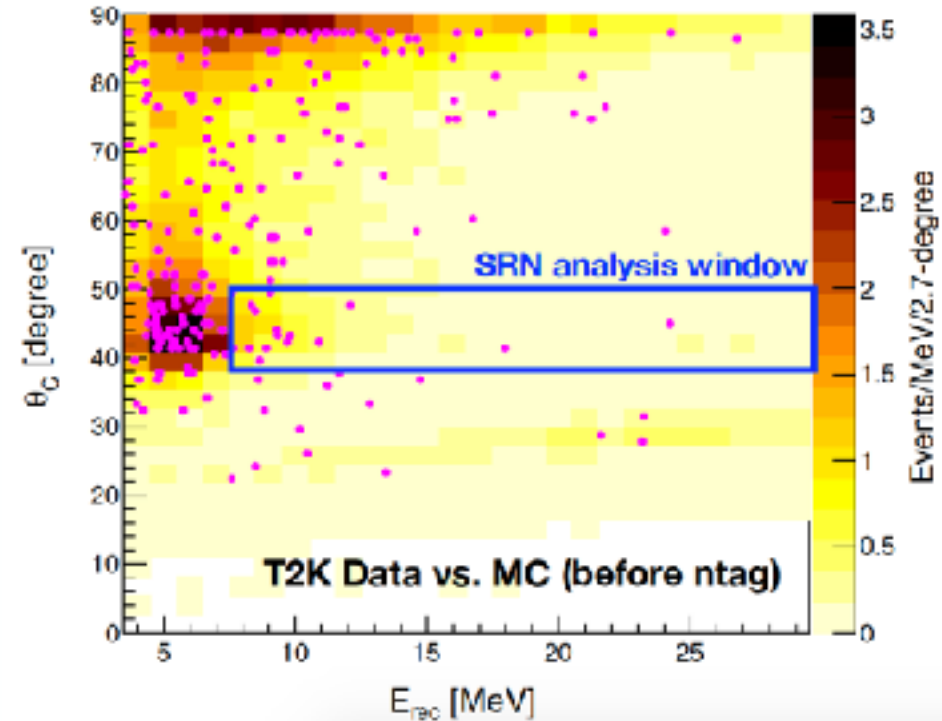
- 現在の宇宙は、宇宙誕生以降爆発した超新星のニュートリノに満ちている
- 世界に先立って測るために、SK-Gd
  - SKで、1年に数個しか期待できない
- 大気ニュートリノの中性カレント反応がBGとなる (芦田)

# 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

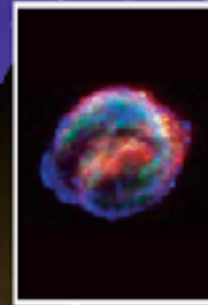
J-PARC 大強度加速器による  
高品質ニュートリノビーム



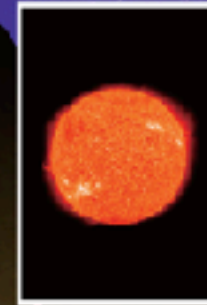
大気



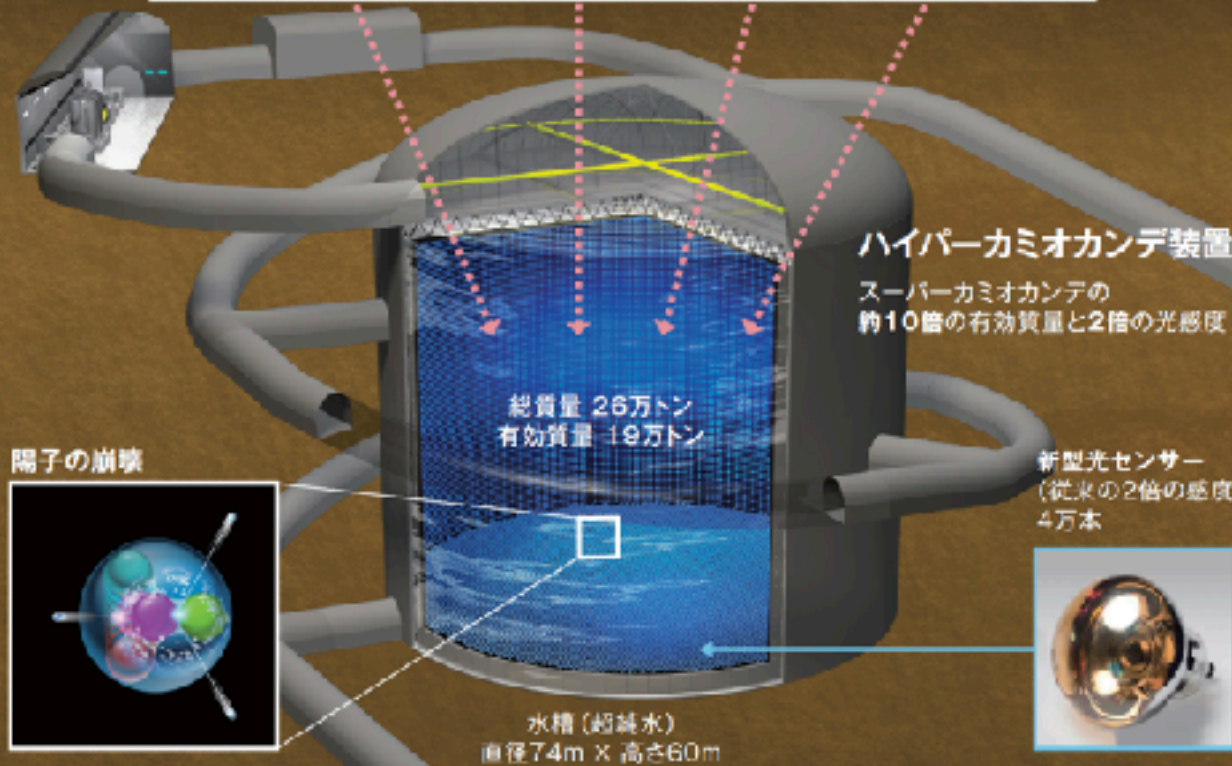
超新星爆発



太陽

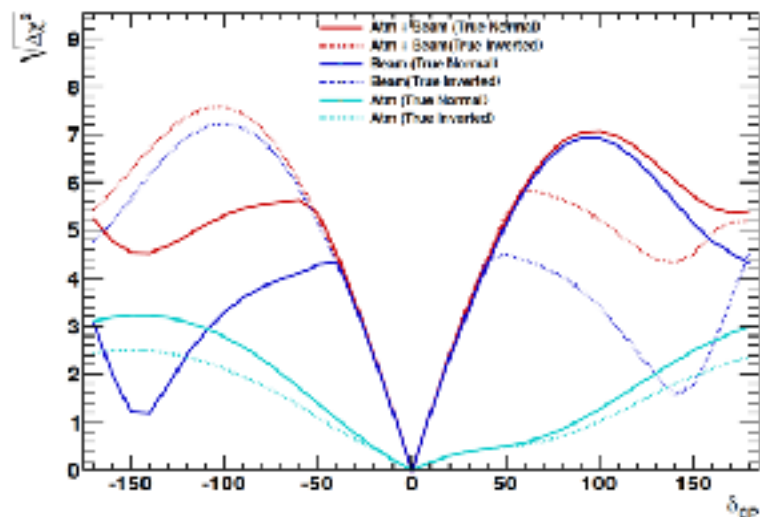


ニュートリノ



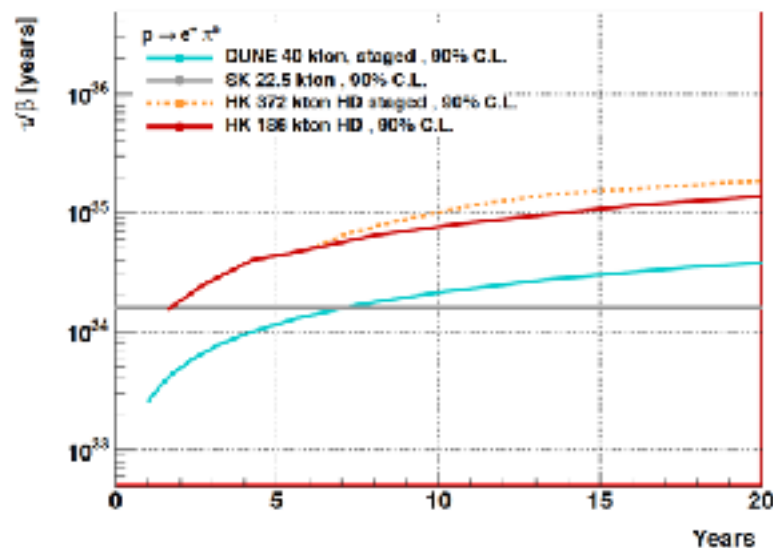
# ハイパーカミオカンデ

- かなり大きいため、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)



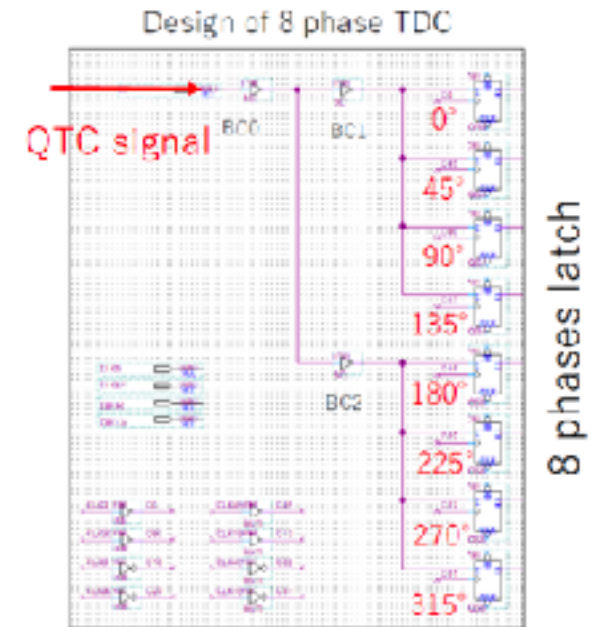
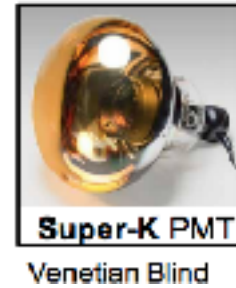
- T2KとSKで出来ない物理も可能
  - ニュートリノ振動においてレプトン不変性の検証
  - $\nu\tau$  断面積測定
  - 地球内部の電子濃度
  - 等

- 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)



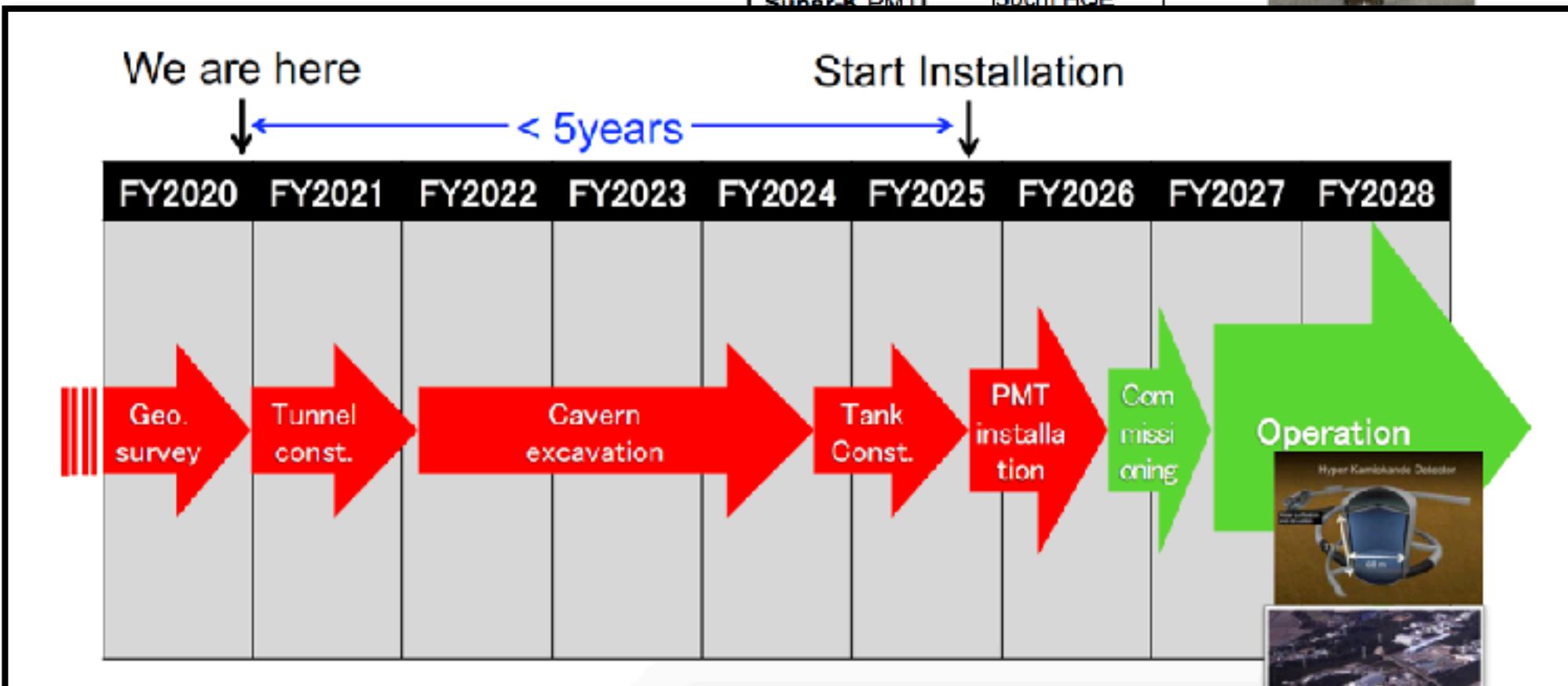
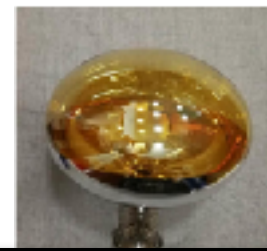
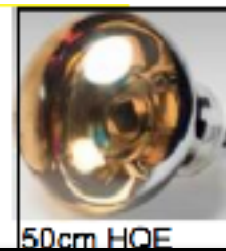
# ハイパーカミオカンデR&D課題

- 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、AISC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



# 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



- 選出したPMTは物理への影響を、シミュレーション

# 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25年のD論と修論：

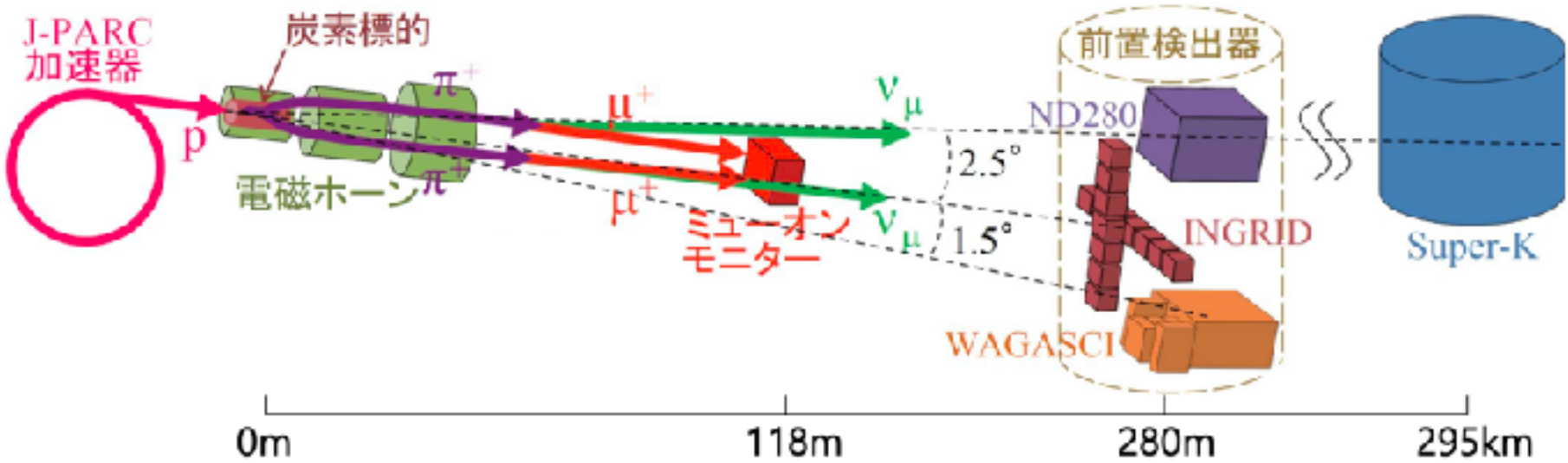
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/publications/index.html>

FIN

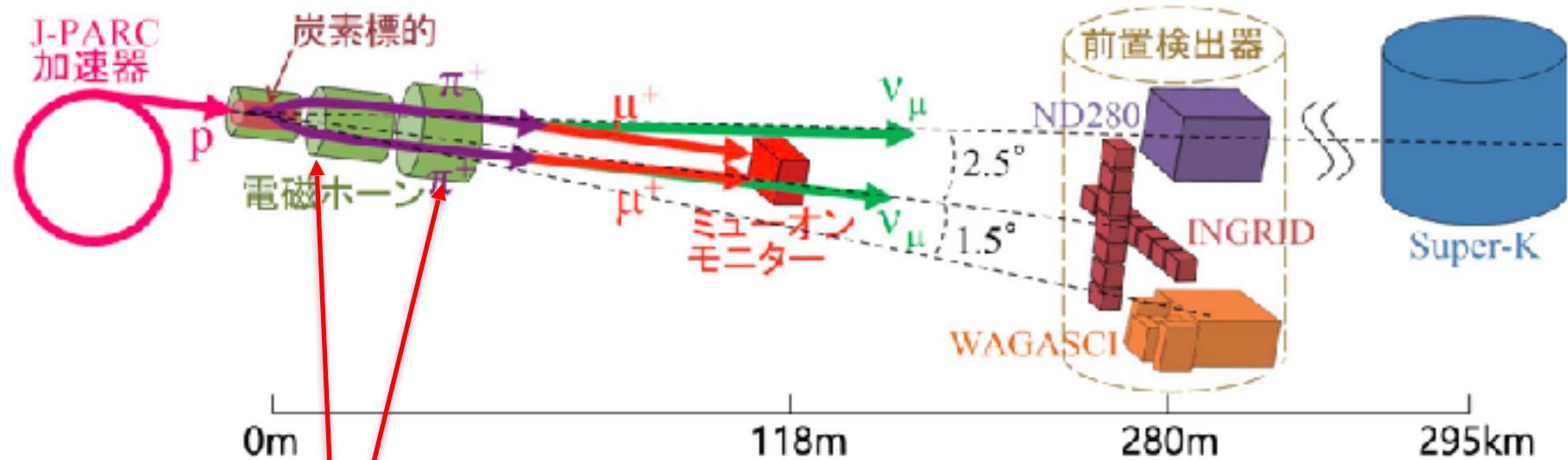


# 関連研究

# ニュートリノフラック予測：

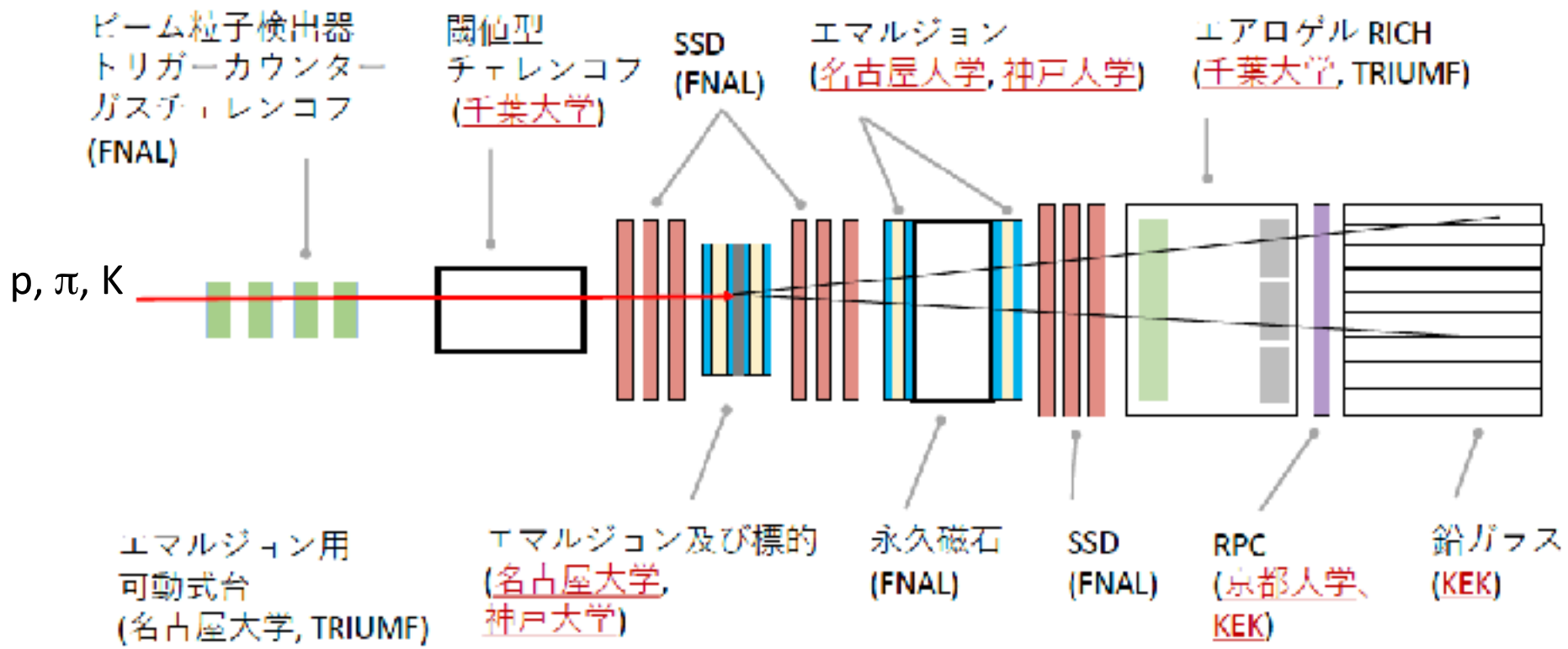


# ニュートリノフラック予測：



- 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)

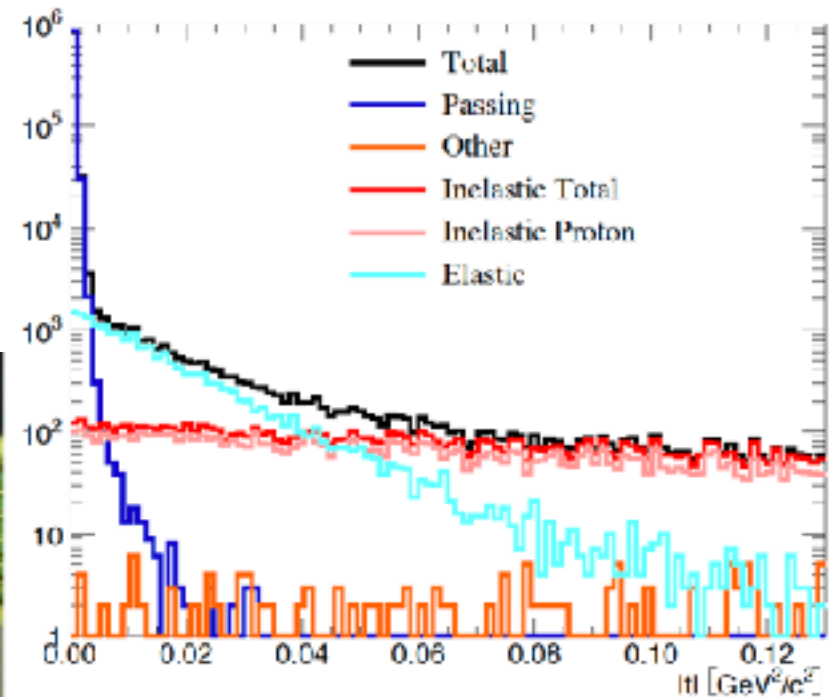
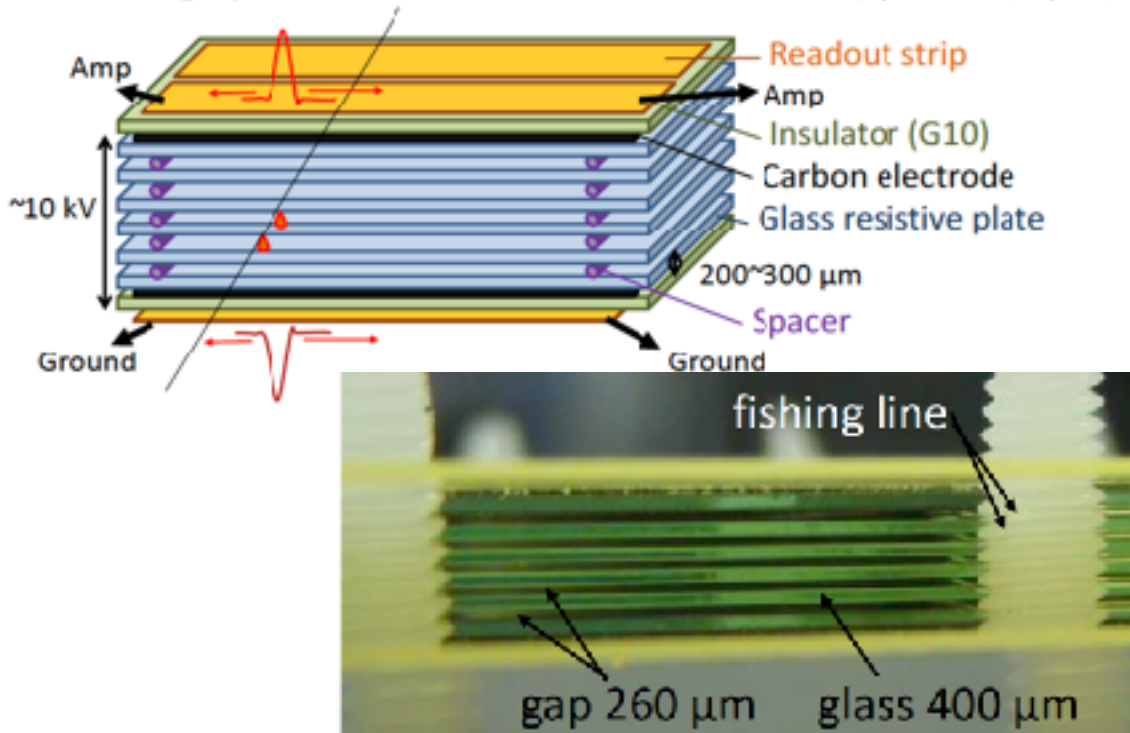


- 陽子ビームと様々な標的を使って精密にハドロン散乱・生成断面積を計る
  - FNALの1~120 GeV/c の 粒子

# 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

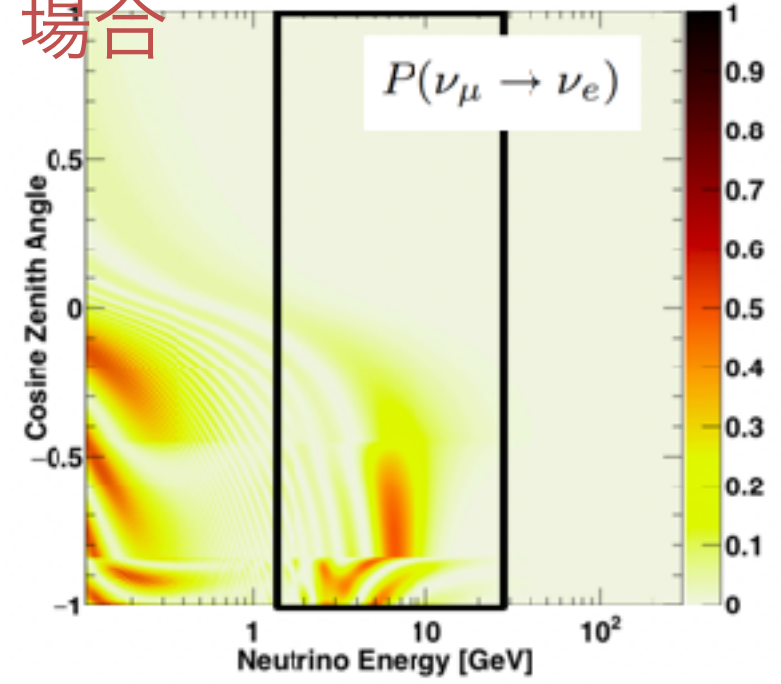
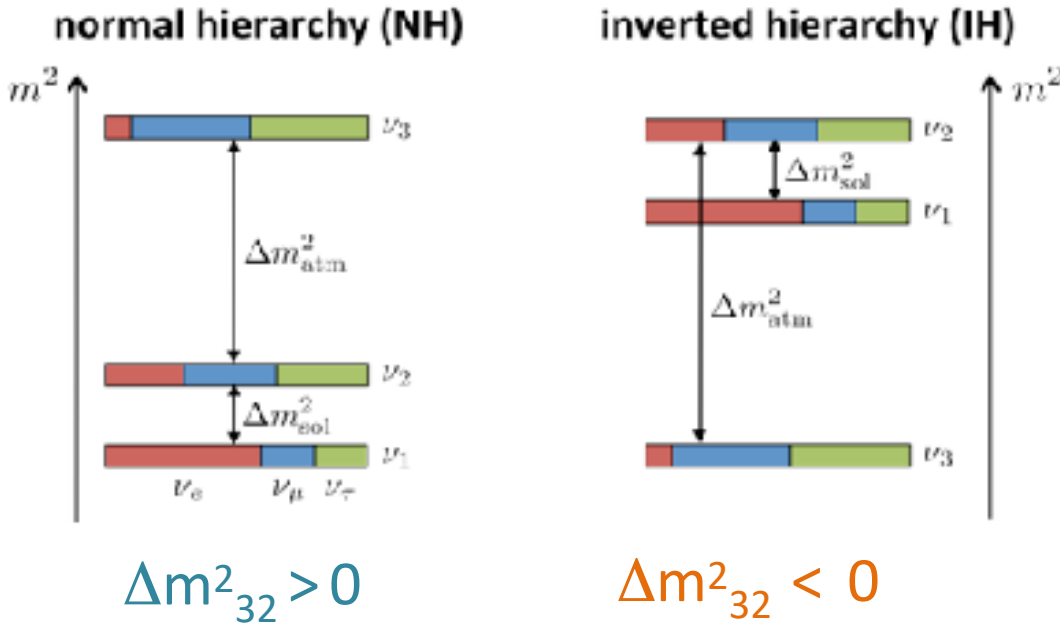
## Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) 検証



# 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

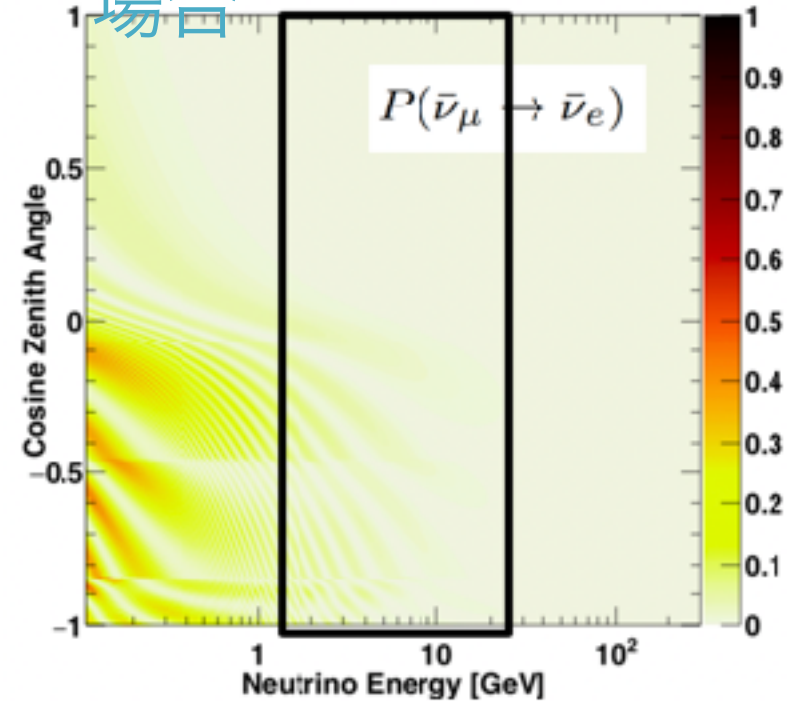
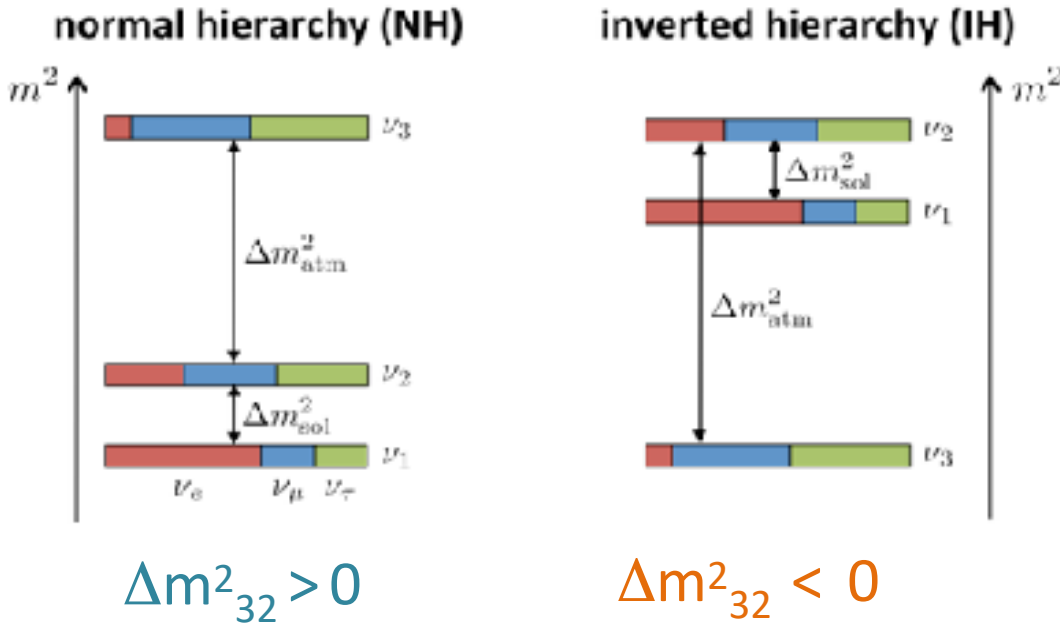


- 質量階層性はCP測定 of 邪魔 (振動確率の縮退を起こす)
  - 大統一理論と関係している
- 大気ニュートリノと反ニュートリノの振動が質量階層性に依存
- 関連領域において再構成が難しい

# 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

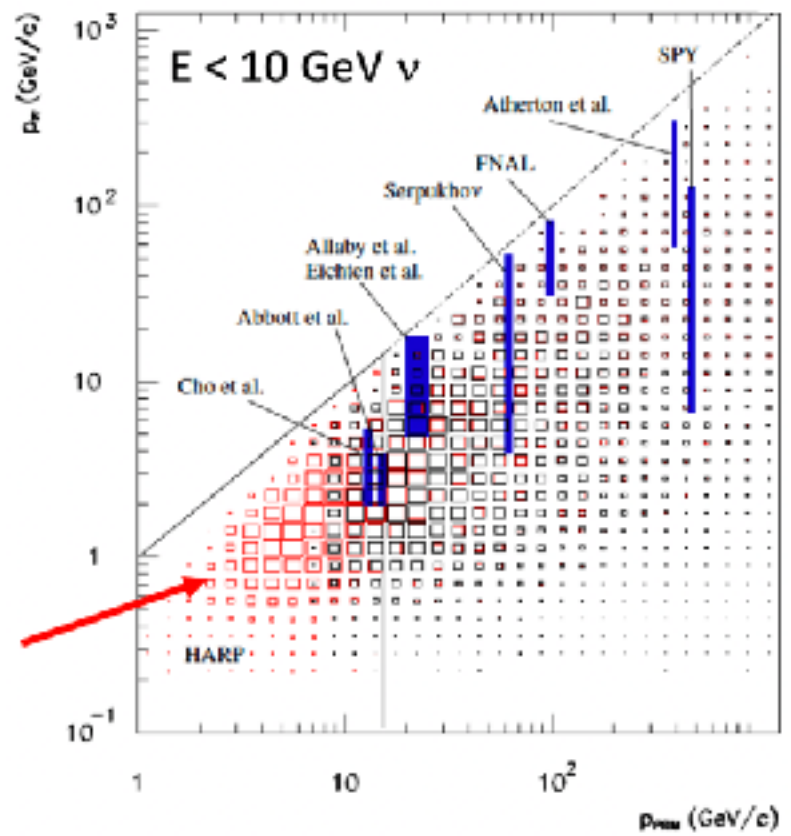


- 質量階層性はCP測定 of 邪魔 (振動確率の縮退を起こす)
  - 大統一理論と関係している
- 大気ニュートリノと反ニュートリノの振動が質量階層性に依存
- 関連領域において再構成が難しい

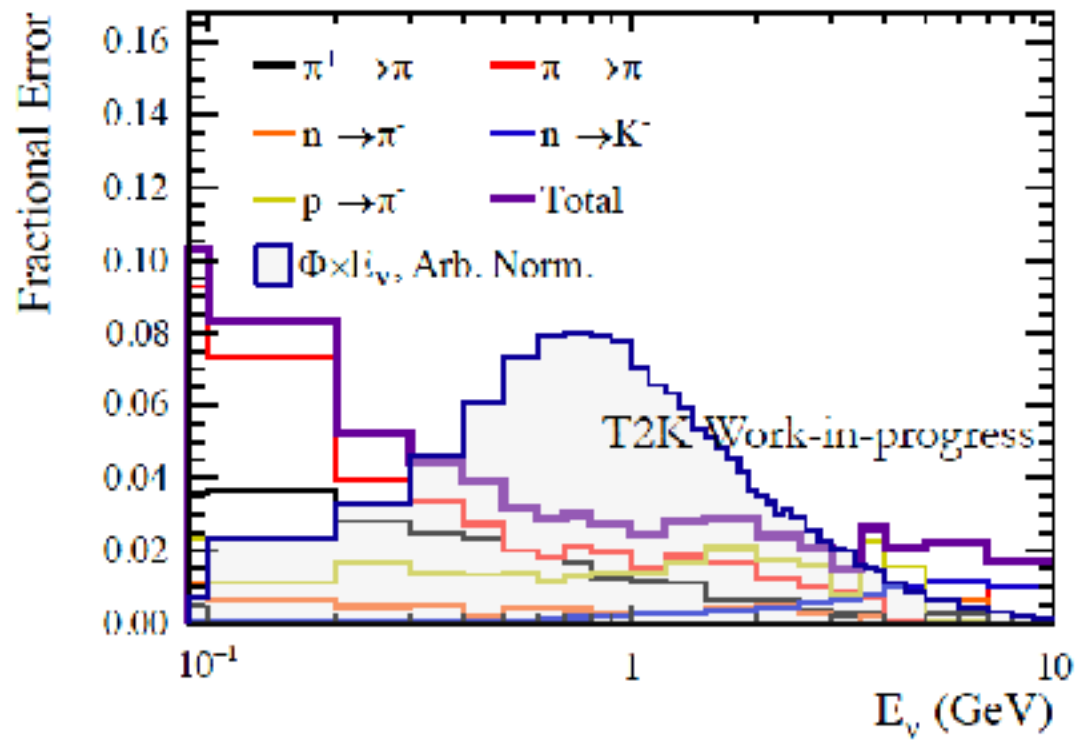


# ニュートリノフラック予測：不訂正

PHYSICAL REVIEW D 74, 094009 (2006)



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

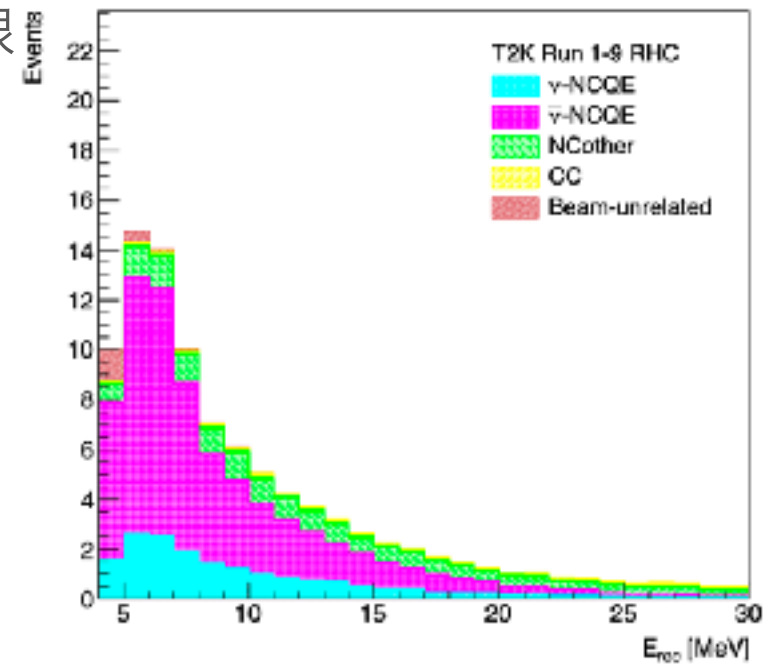
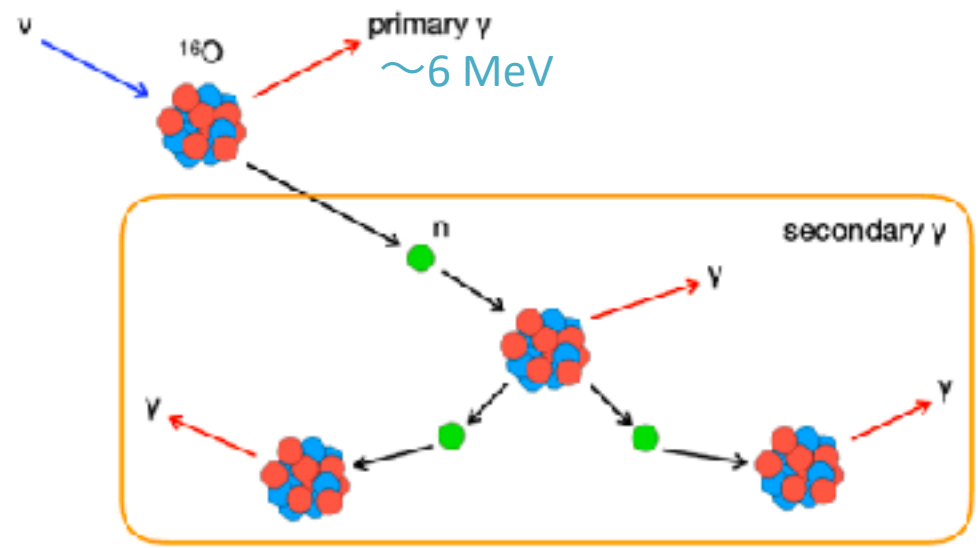


- ニュートリノフラックスを理解するため、ハドロン生成実験とモデルの開発が必要
- 低運動量の粒子により生成されているニュートリノには大きな不訂正がまだついている

# 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