

# 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6年度版



# A Tale of Two experiments



検出器の大きさを10倍に

$\nu$  ビーム強度を2.5倍



検出器を290kT + 1.3 MW  $\nu$  ビーム：現在建設中

Hyper-K

ハイパーカミオカンデ

# Hyper-Kamiokande

極小の素粒子、極大の宇宙を解明する次世代計画。

次世代のニュートリノ研究、さらには陽子崩壊の観測を目指す。

# A Tale of Two experiments



検出器

スーパーカミオカンデ実験とT2K実験で行なっている研究は、  
それぞれの実験への貢献にもなるが、ハイパーカミオカンデ実験に向けた研究会開発的な活度（実験準備）でもある



検出器を290kT + 1.3 MWのビーム：現在建設中

ハイパーカミオカンデ

# Hyper-Kamiokande

極小の素粒子、極大の宇宙を解明する次世代計画。

次世代のニュートリノ研究、さらには陽子崩壊の観測を目指す。



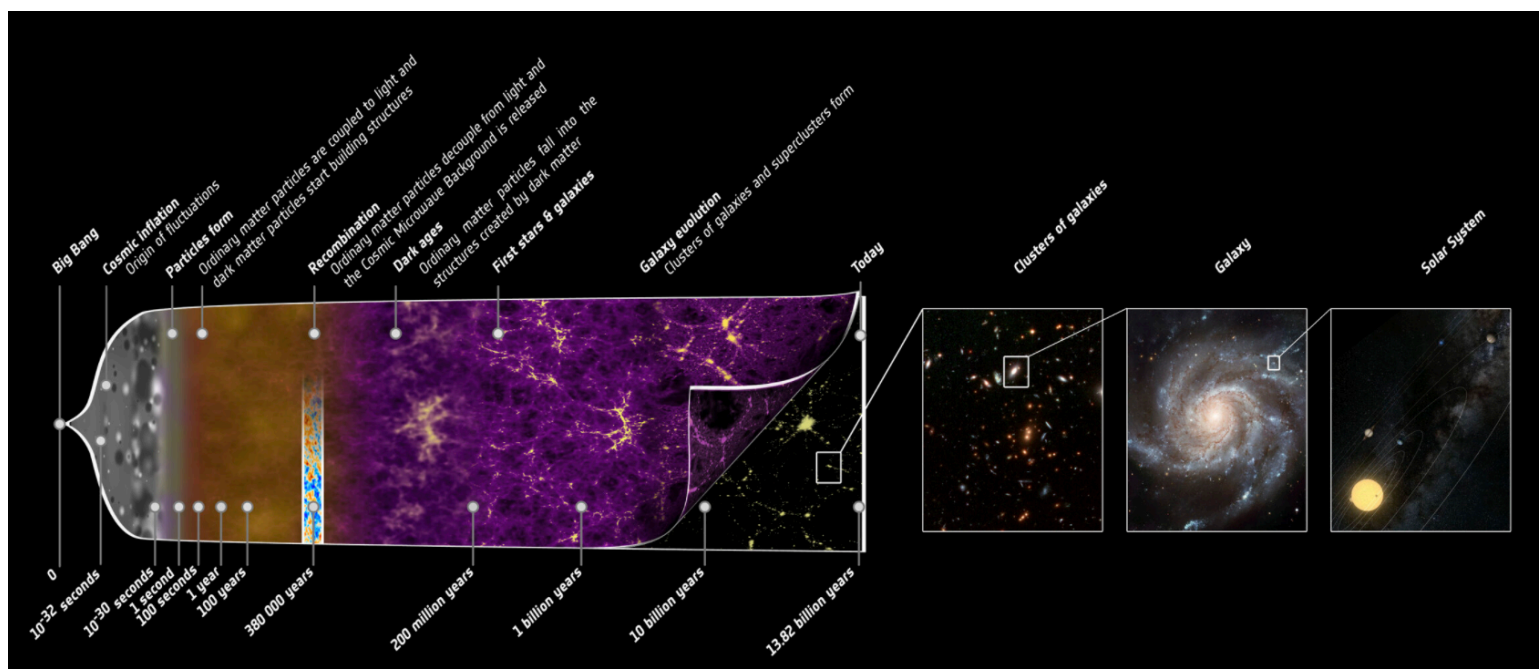
# 主な研究目的

- 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！



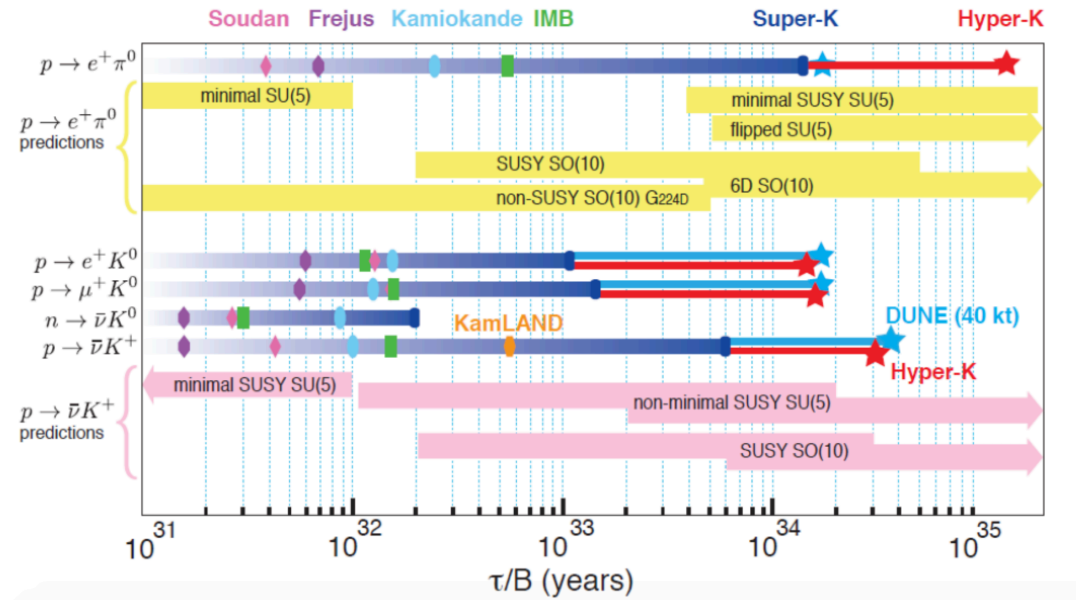
## 主な研究目的

- 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

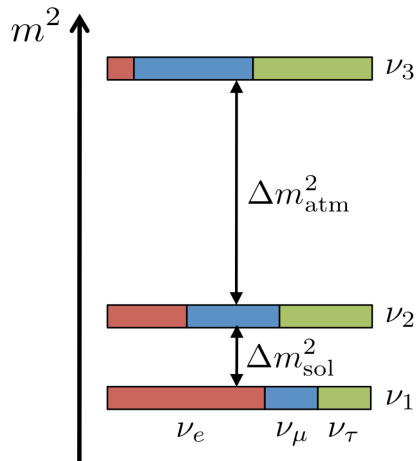
質量の順を決定

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

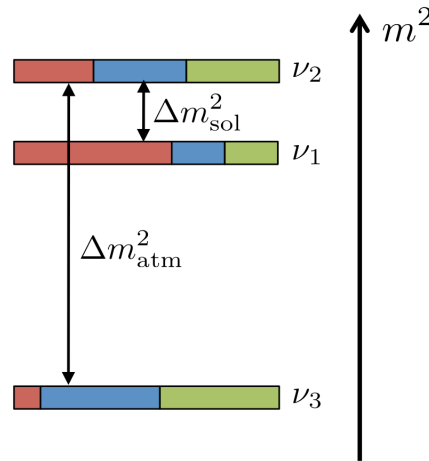


normal hierarchy (NH)



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

inverted hierarchy (IH)



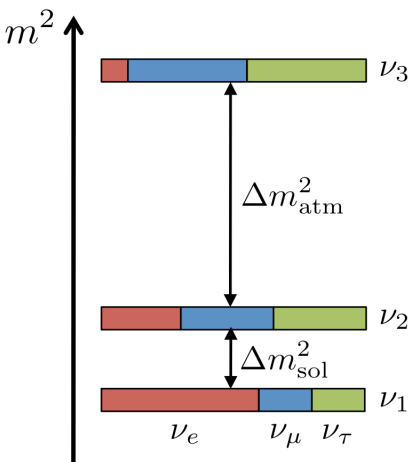
$$\Delta m^2_{32} < 0$$

# 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

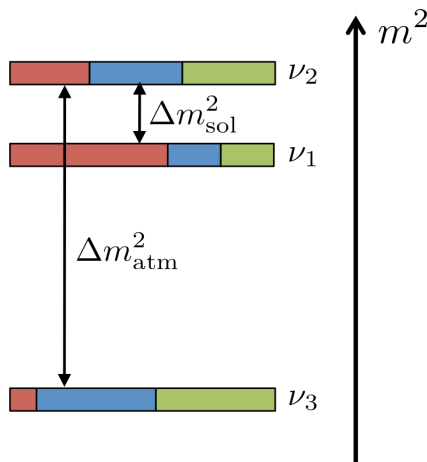
質量の順を決定  
 大統一理論の種類に絞る  
 ニュートリノと伴わないβ崩壊へ

normal hierarchy (NH)

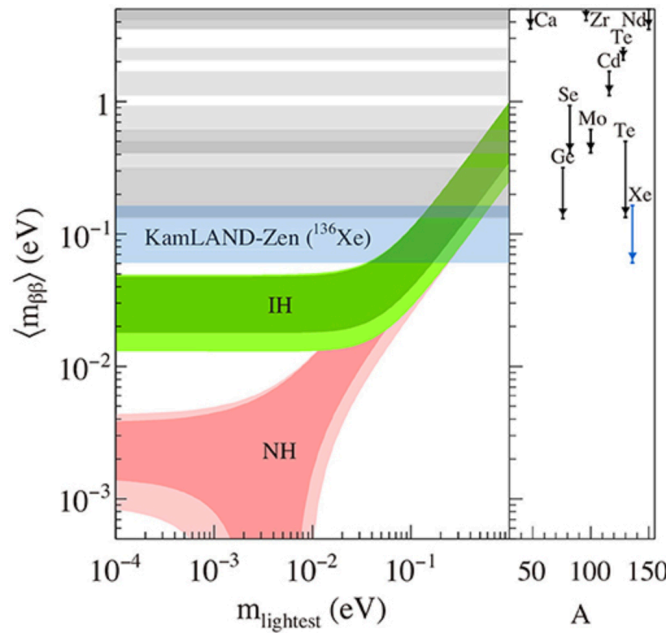


$\Delta m_{32}^2 > 0$

inverted hierarchy (IH)



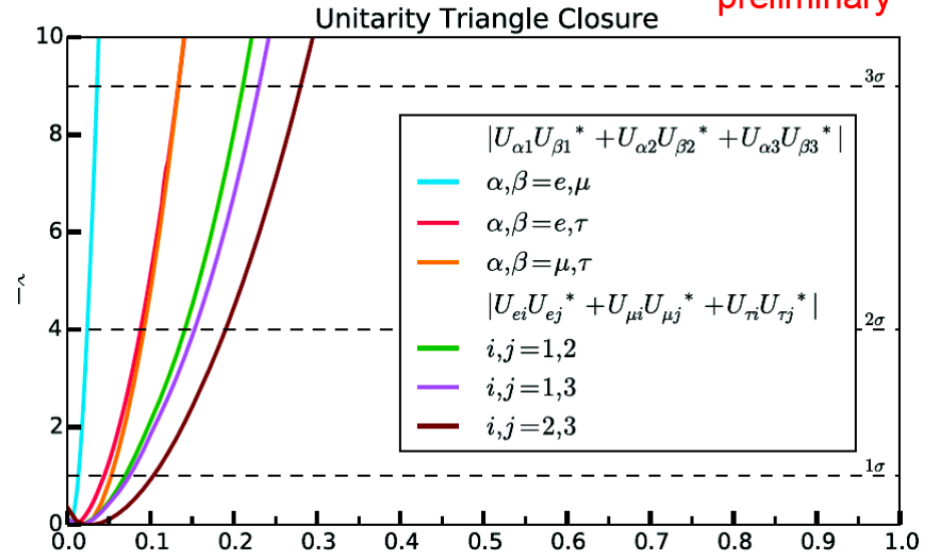
$\Delta m_{32}^2 < 0$



# 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

混合マトリクス of (非) 対称性へ  
ユニタリティーの破れ?



$U_{PMNS}$

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

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?

$U_{\text{PMNS}}$

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

Flavour Eigenstates                      Mass Eigenstates

Mass Eigenstates  
Labeled by  
Decreasing  
 $\nu_e$   
Content

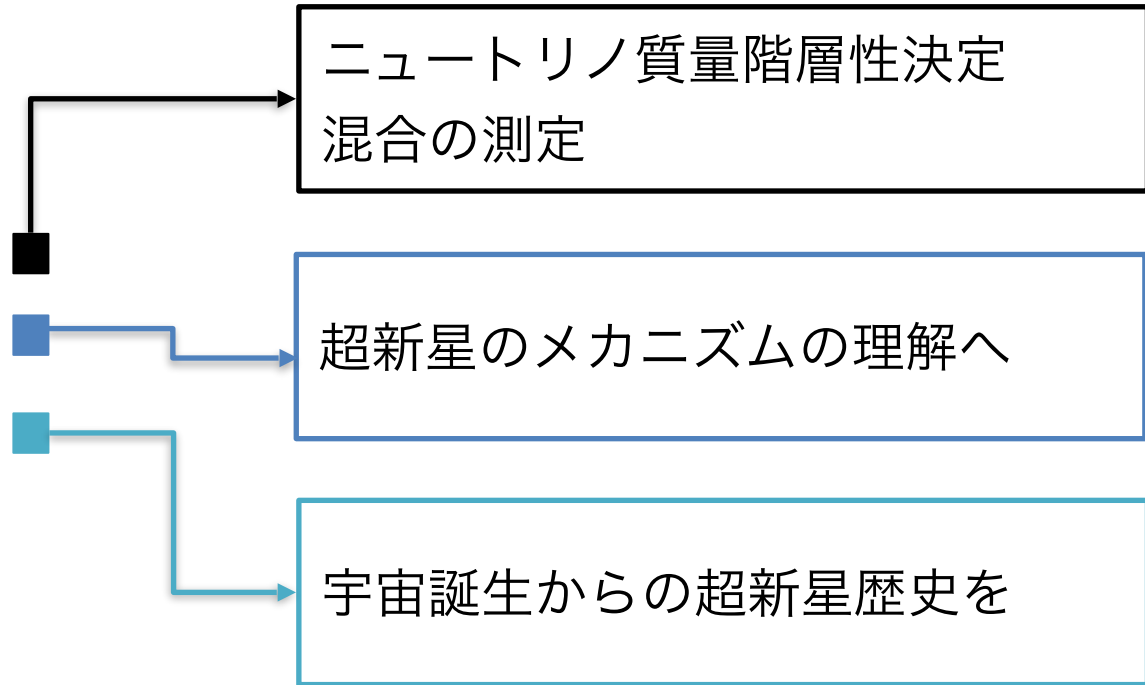
?????

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

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

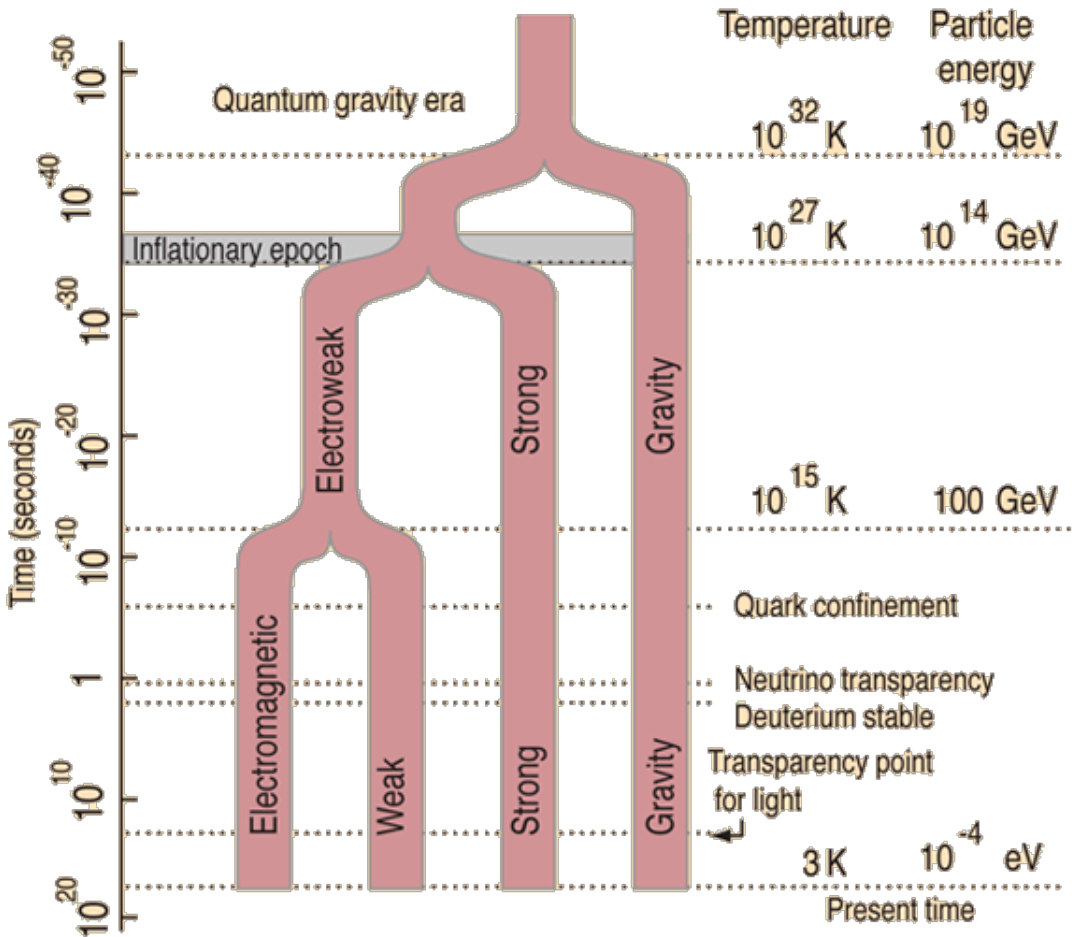
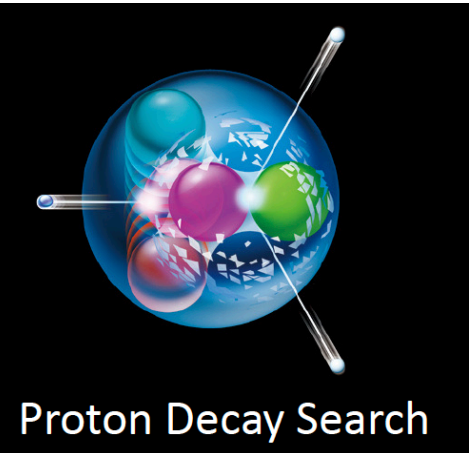
宇宙誕生からの超新星歴史を

# 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



# 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

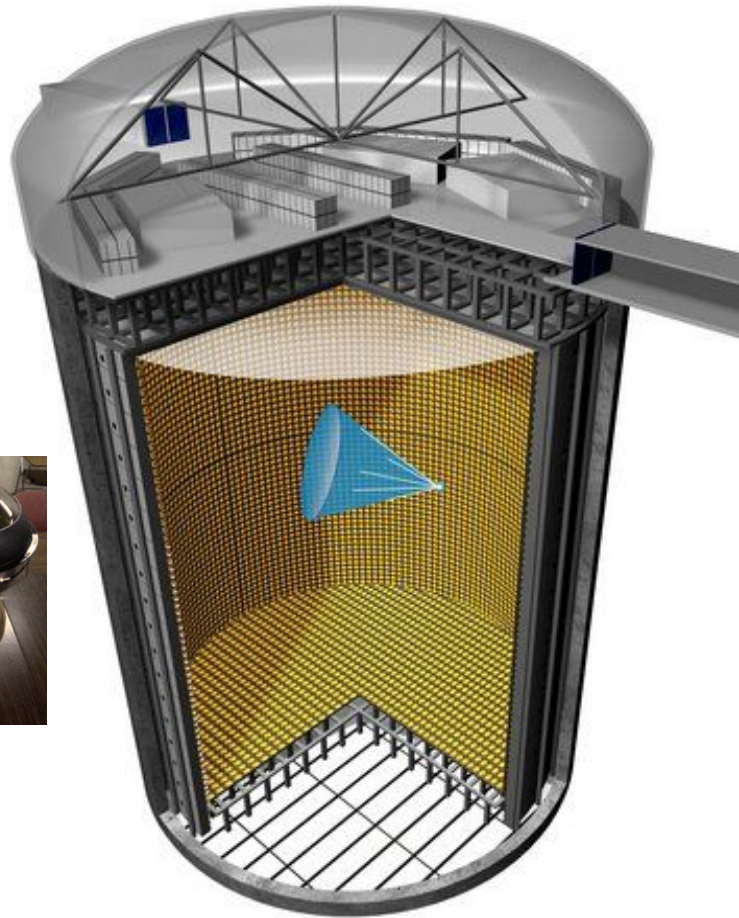
## トピックス

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



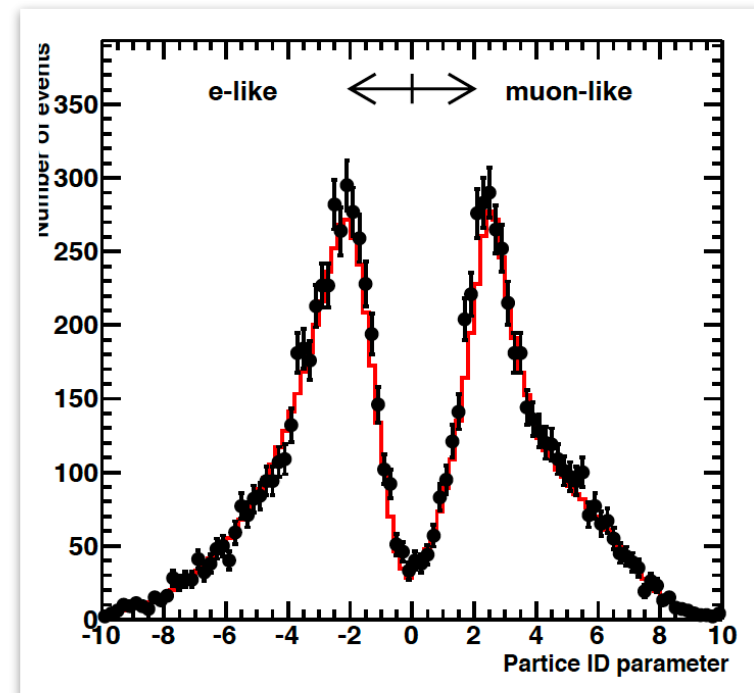
## Four Run Periods:

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

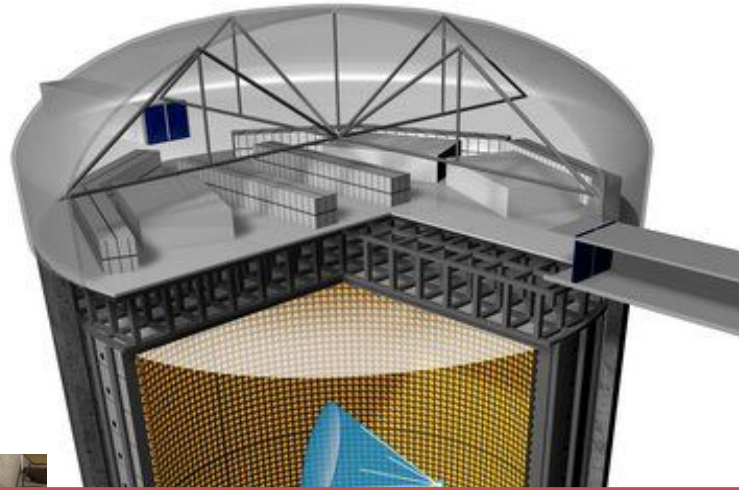
SK-III (2005-2008) SK-IV (2008-2018)

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

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



# Super-Kamiokande: Introduction

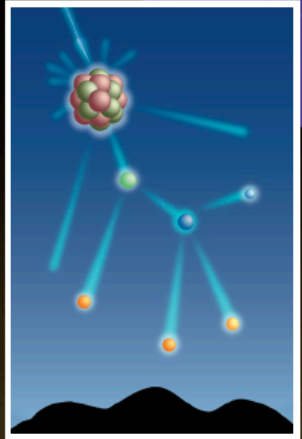


- 5万トンの超純水
- 22.5 kton 有効体積
  - 内部検出器 11,146 20" PMTs
  - 外部検出器 1885 8" PMTs
- 優れている粒子識別 (PID)
  - ミューを間違って「電子」と識別する確率が < 1% MIS ID at 1 GeV
- 多目的の実験

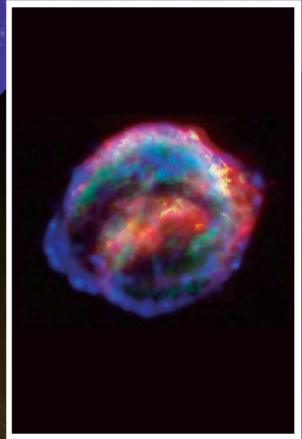
J-PARC 大強度加速器による  
高品質ニュートリノビーム



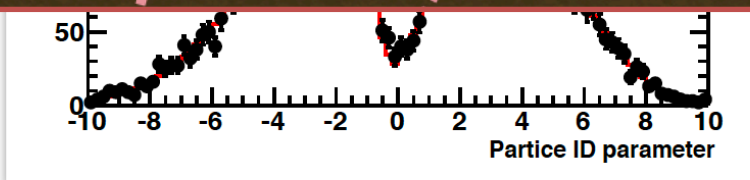
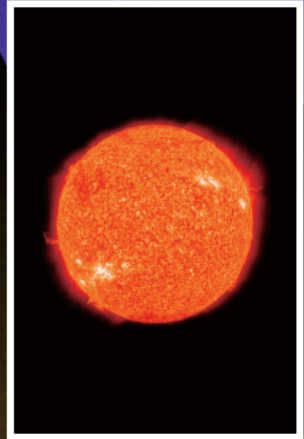
大気



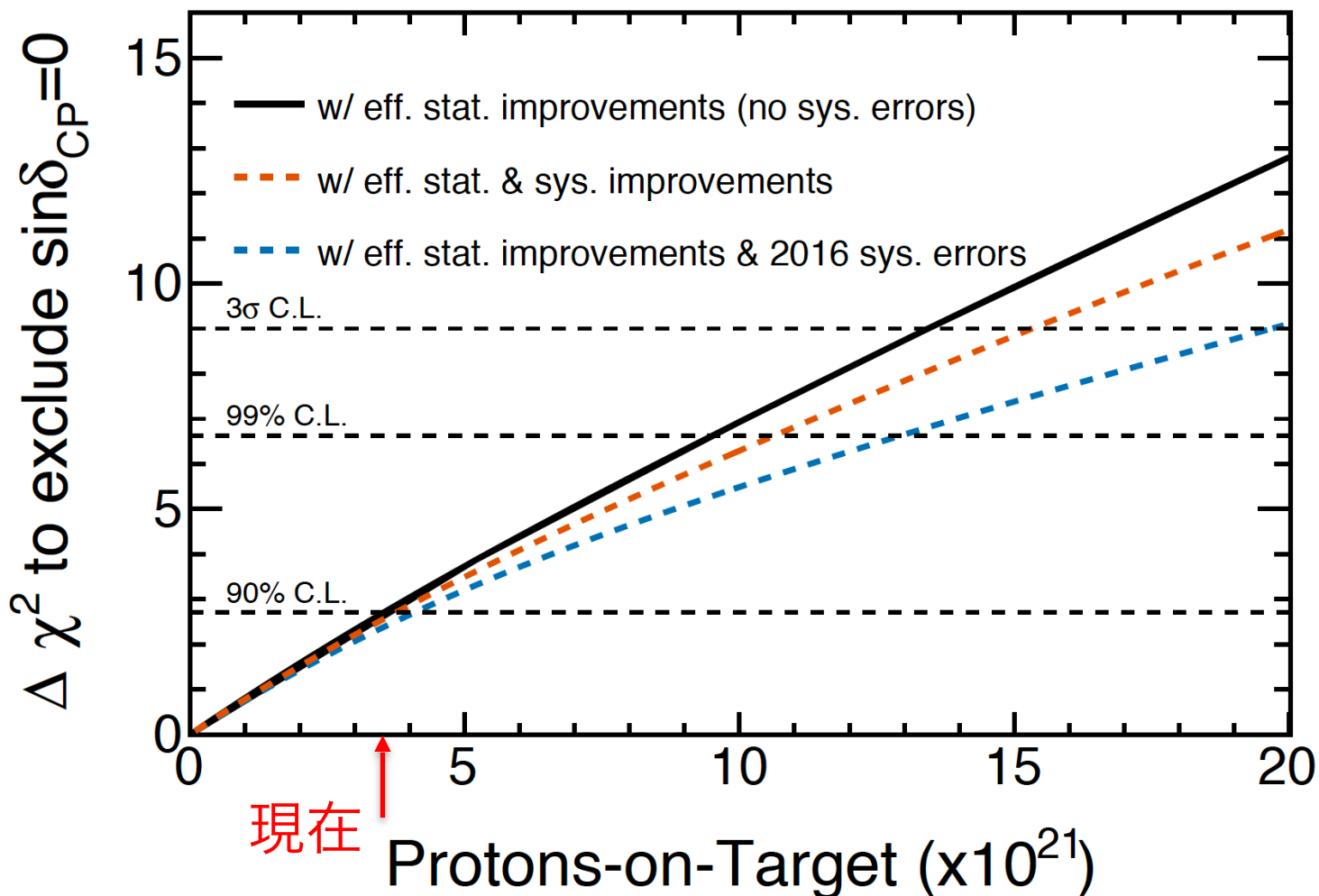
超新星爆発



太陽



Four SK-  
SK-III (2005-2008) SK-IV (2008-2018)  
SK-V (2019-2020) **SK-Gd (2020-**  
**Upgrade Complete Now operating as SK-VI (SK-Gd) !!**

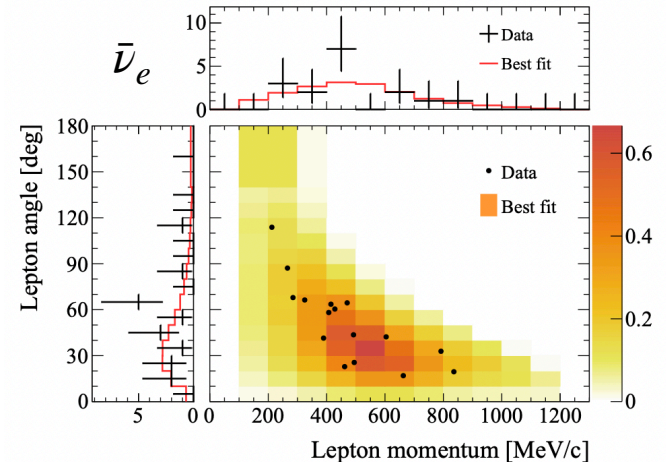
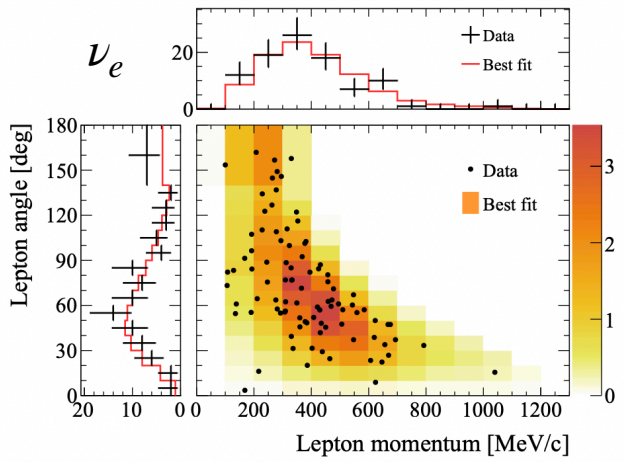
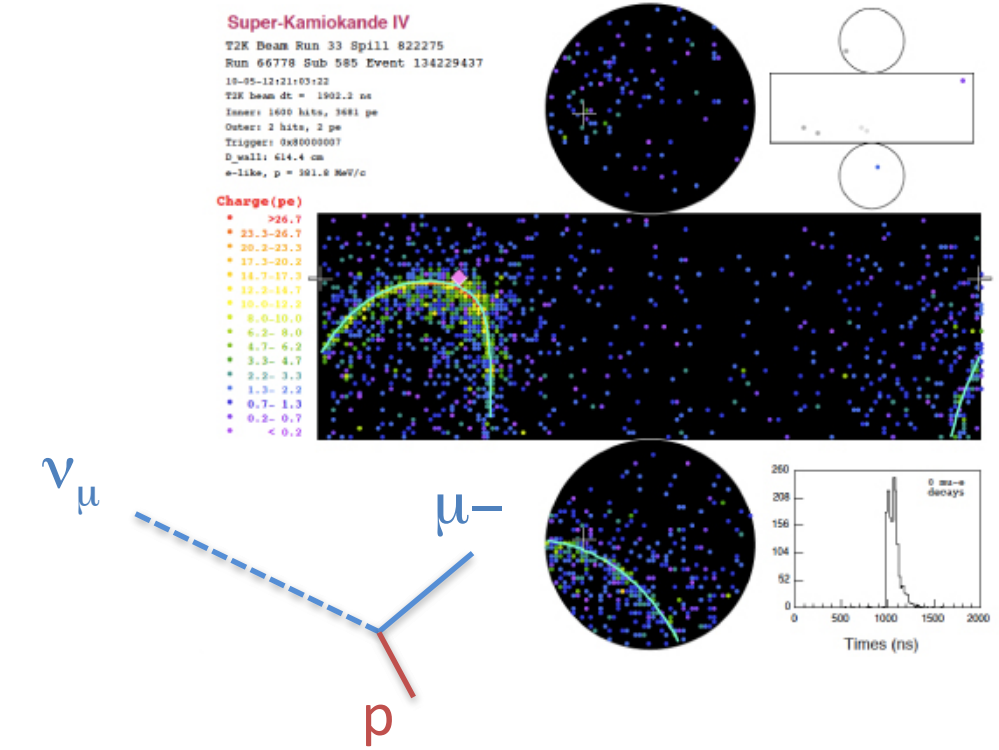


- SK側で解析可能な統計量を増やす
- 検出器反応に伴う系統誤差を削減

# T2K-SK ワーキンググループ

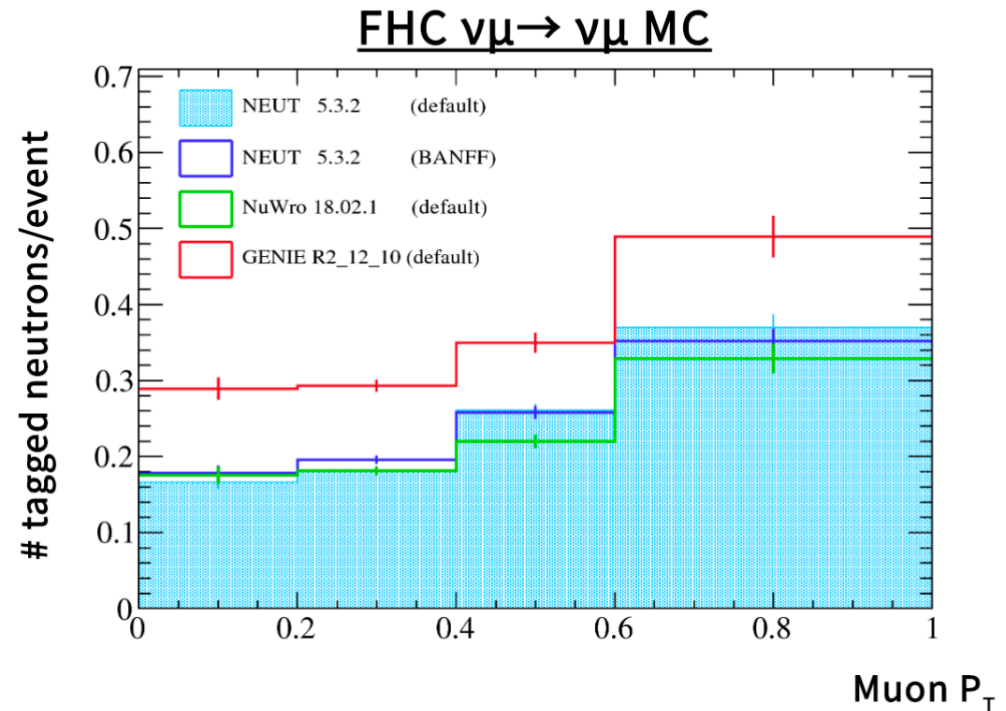
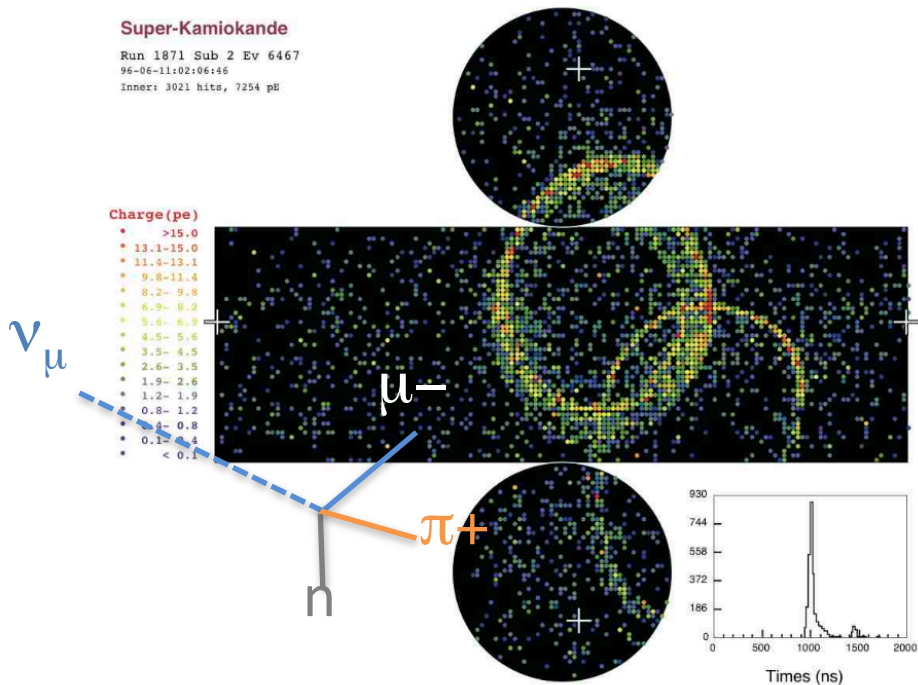
- T2KとSKはそれぞれ独立している実験だが、T2K-SKグループはその間の橋
  - SKにおいてのT2Kビームデータの責任
  - SK側のGPS時間情報の管理
  - SKの再構成アルゴリズムの検証、安定性
  - データのクオリティ
- データサンプルを定義し、系統誤差をつける

再構成した荷電粒子は一つしかないサンプル



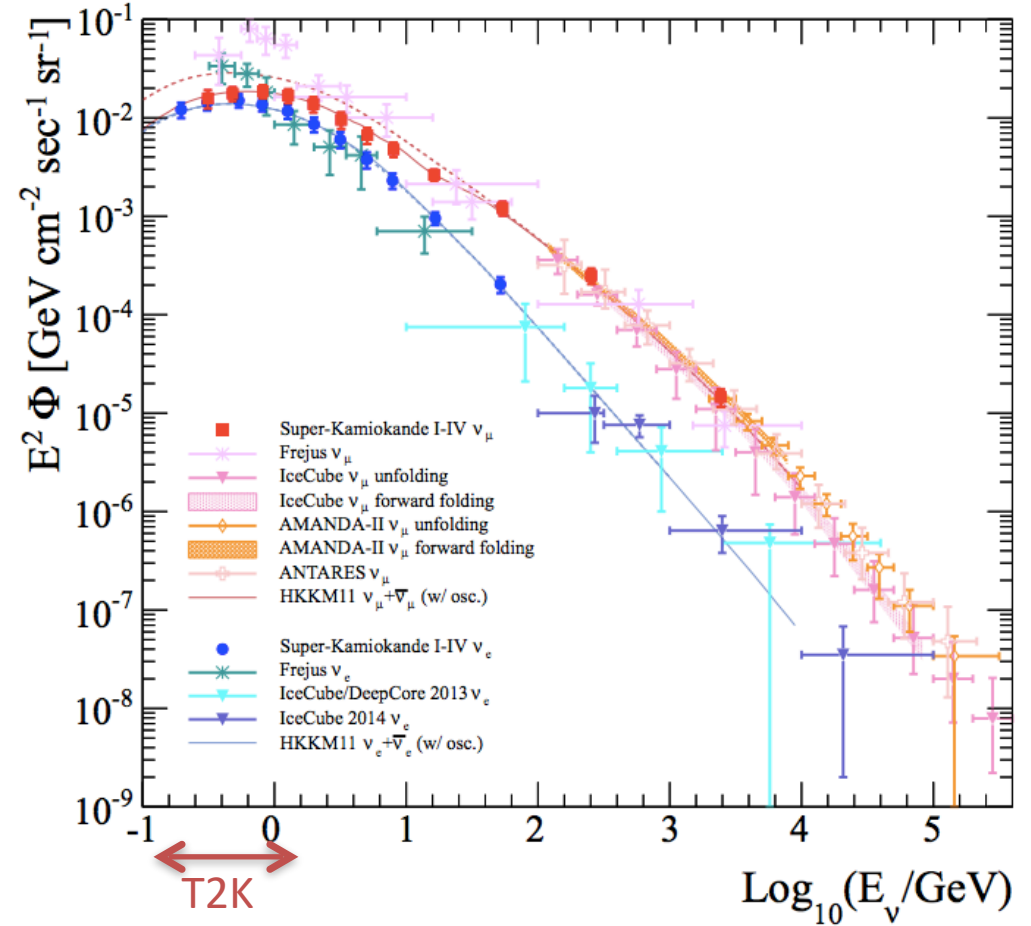
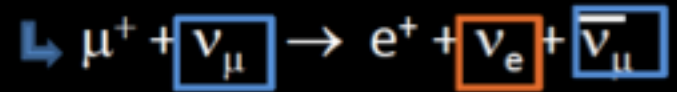
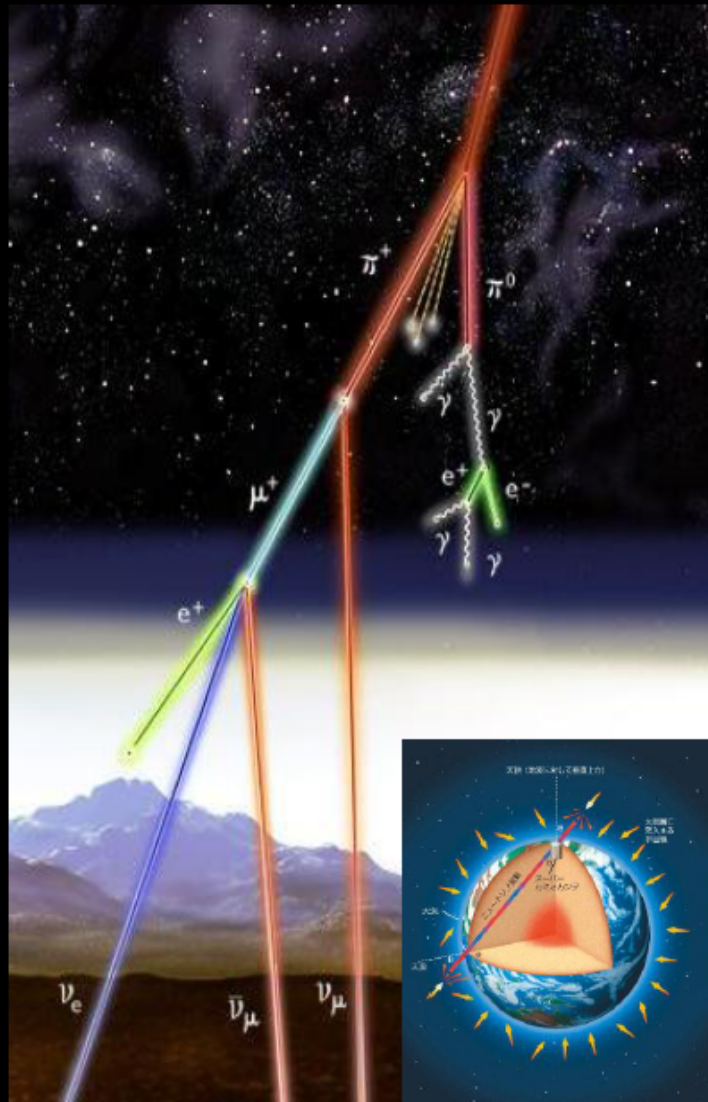


# T2K-SK : 今後の研究



- 複数の粒子が生成された事象を使用！機械学習ベースの再構成アルゴリズム開発
  - 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)

# 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

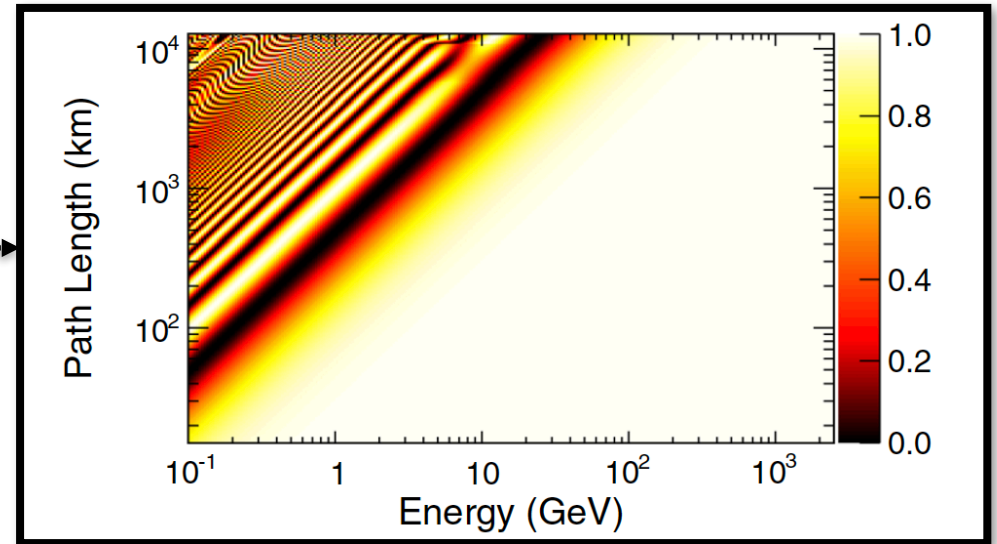
$100 \text{ MeV} < E < 10 \text{ TeV}$

- 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

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

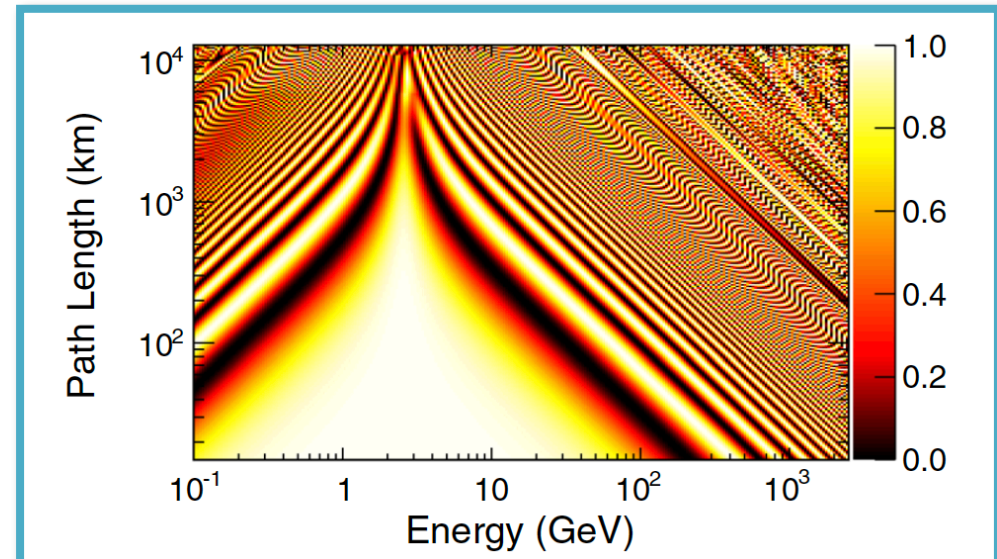
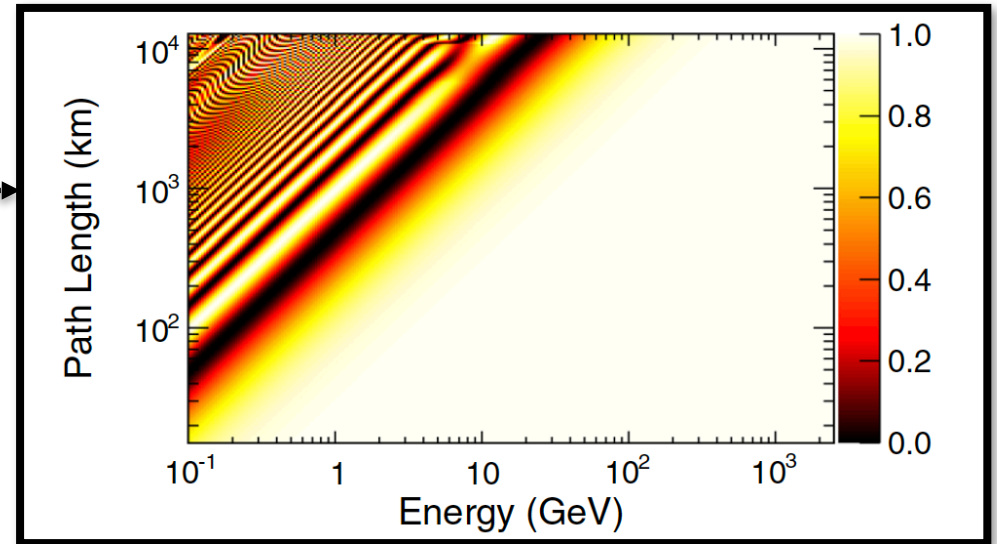
- PMNSニュートリノ振動
- Exotic ニュートリノ振動
  - ステラいるニュートリノ
  - NSI
  - ローレンツ対称性を破る振動
  - . . .
- 天文学関連
  - 重力波などのCoincidence探索
  - GRB探索
  - 暗黒物質探索



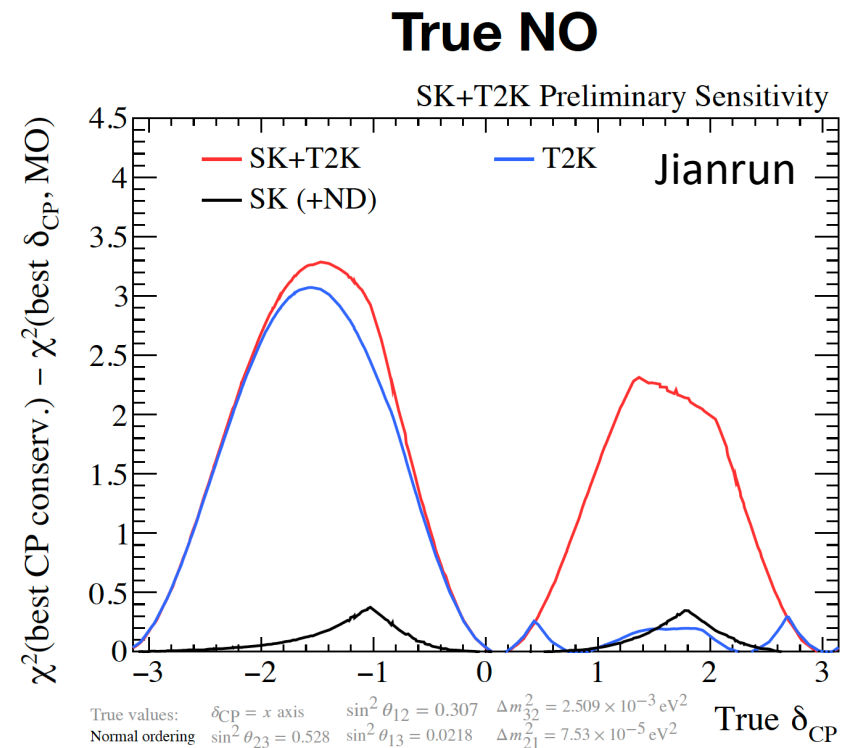
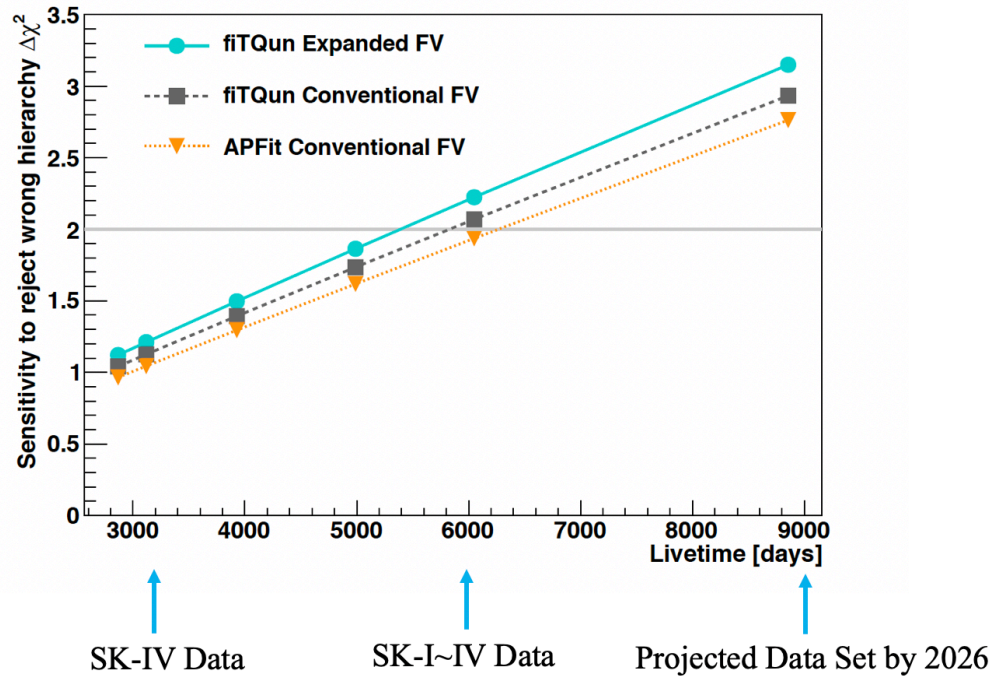
# スーパーカミオカンデ：大気ニュートリノ

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

- 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

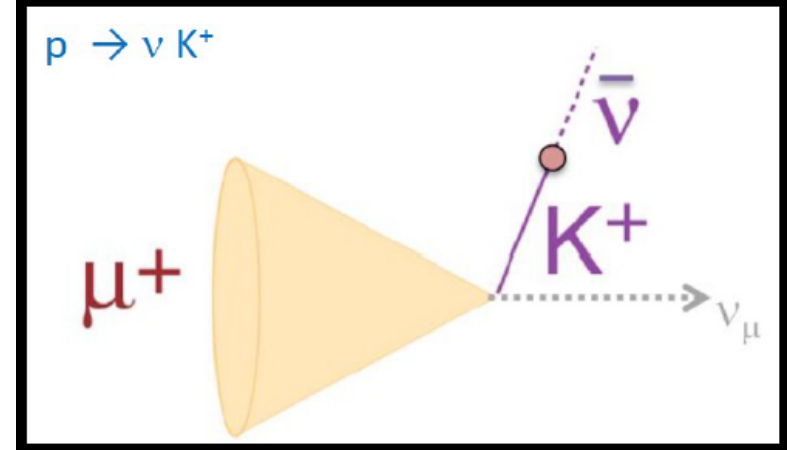
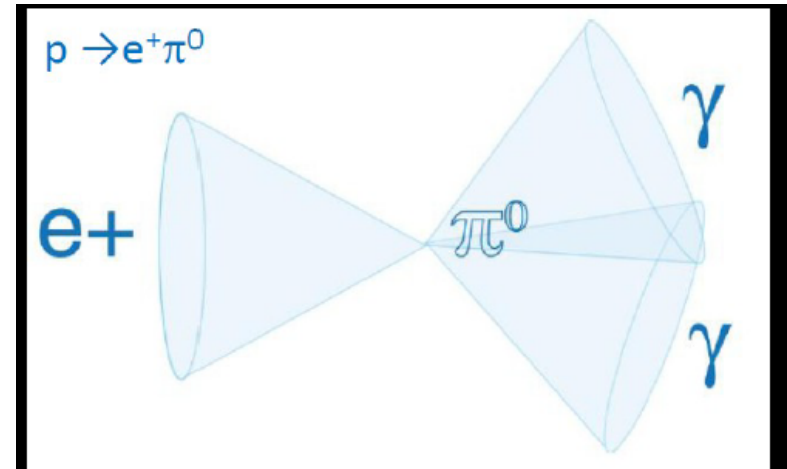
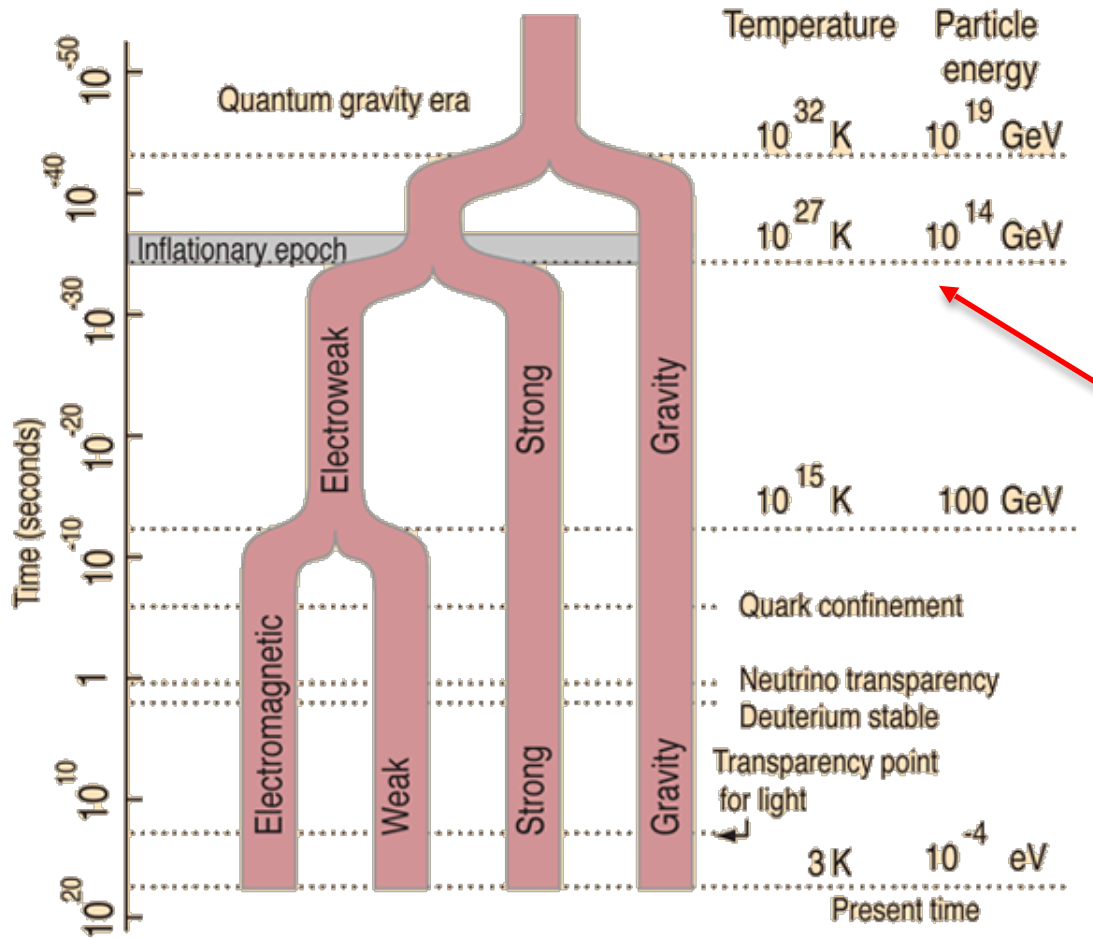


# 大気ニュートリノ解析



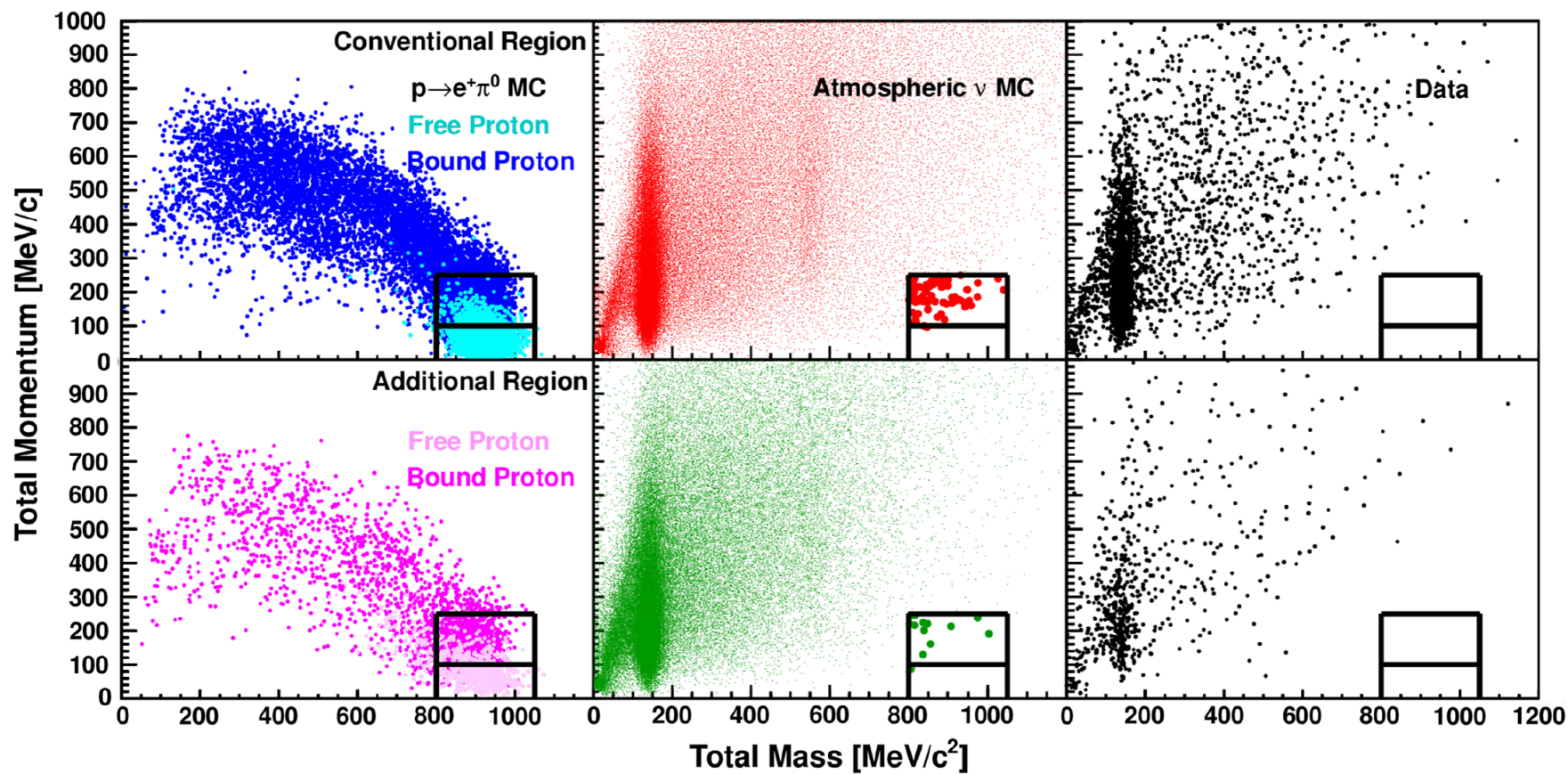
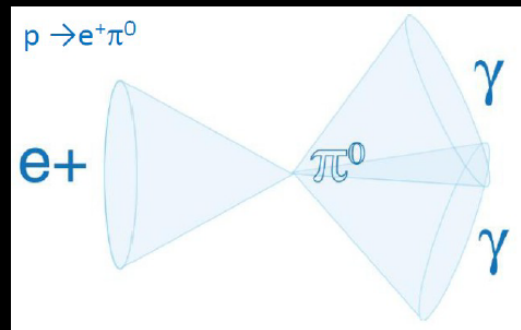
- 新しい事象再構成ツールを導入し、SKの感度向上に成功
  - 一部のデータにしか適応出来ていない、全データを使うように (Zhuojun)
  - 中性子タグによるニュートリノと反ニュートリノを識別
- SKとT2Kと共同で解析すると、CP破れ感度が向上

# スーパーカミオカンデ：陽子崩壊



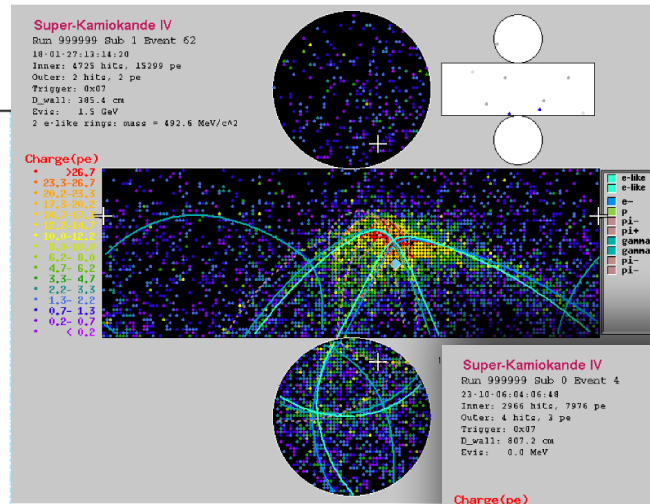
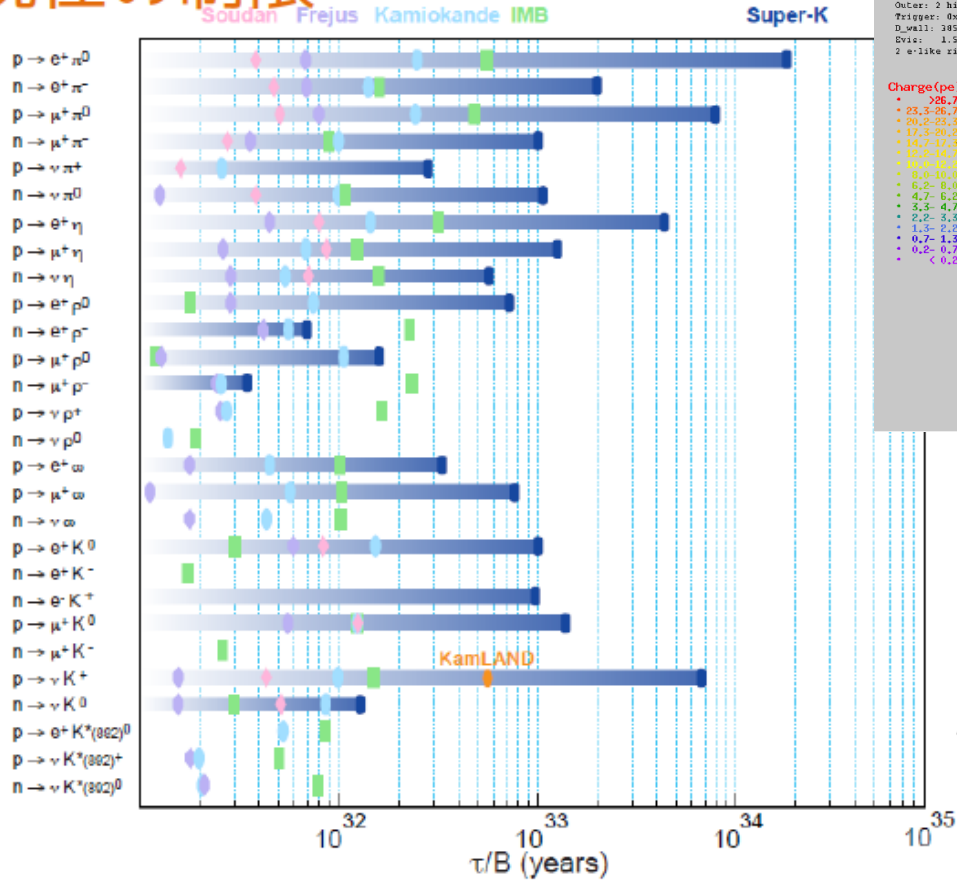
- 大統一理論 (GUT) の検証へ

# 陽子崩壊

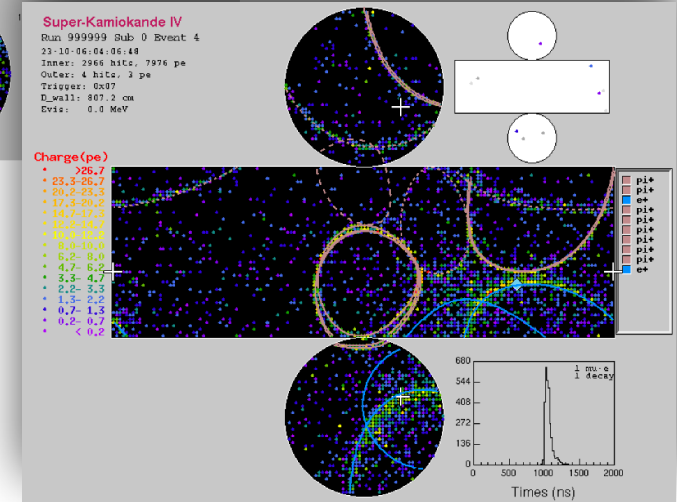




# 現在の制限



# 大気ニュートリノ



$$ppp \rightarrow e^+ + \pi^+ + \pi^+$$

- 再構成ツールを改善・新しく導入、SKの感度向上へ
  - 機械学習 (CNN)を導入、探索可能なモードを増加 (Feng)
  - 既存のアルゴリズム・検出器のシミュレーションのチューンによるパフォーマンス向上 (Zhuojun)

# 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BG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

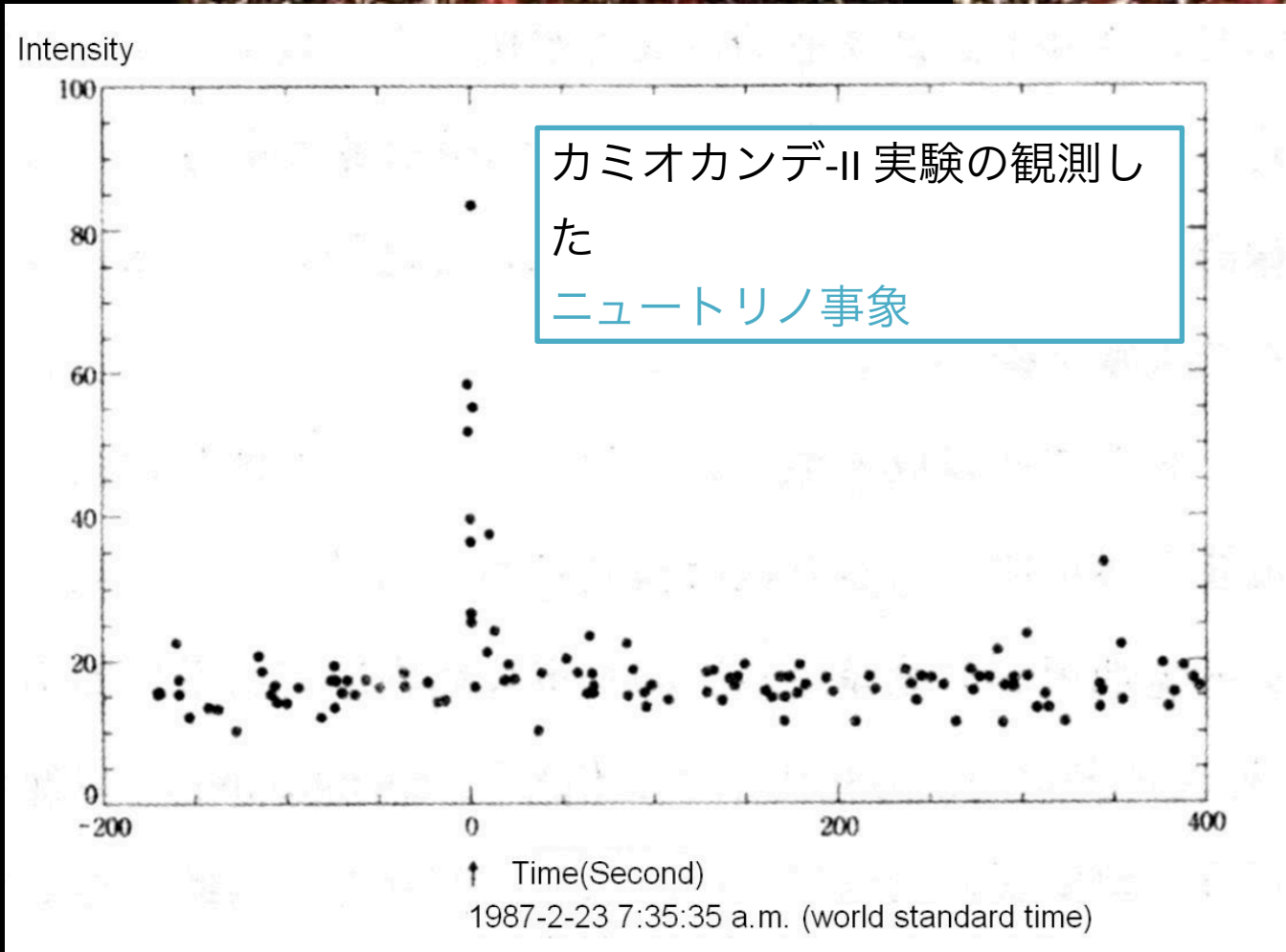
前

後



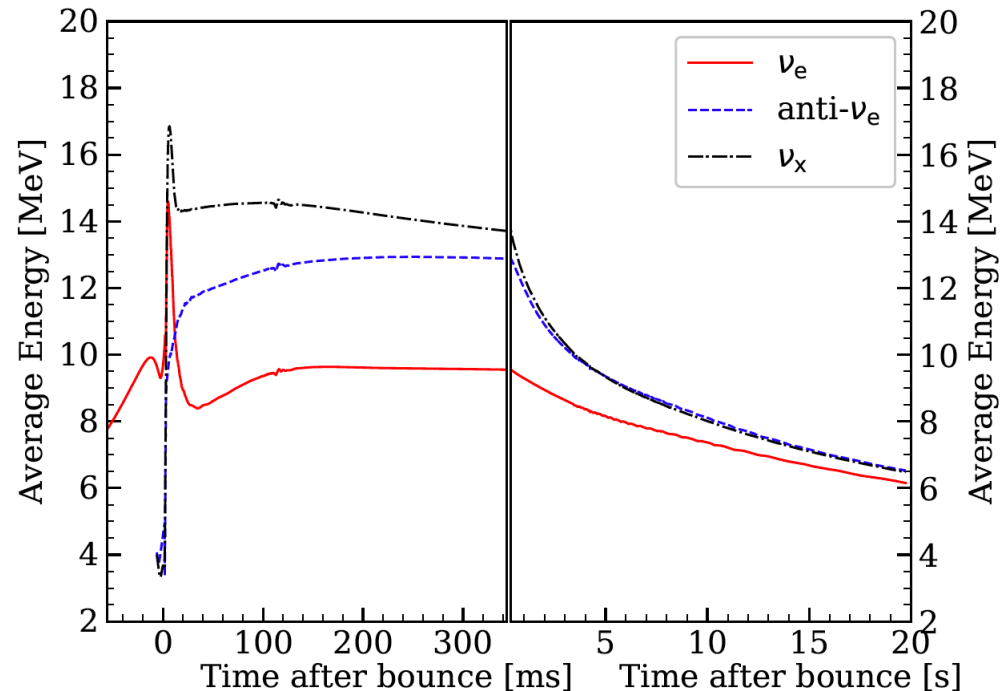
超新星爆発！

超新星爆発： SN1987A 大マゼラン雲 1987年2月24日  
前 後

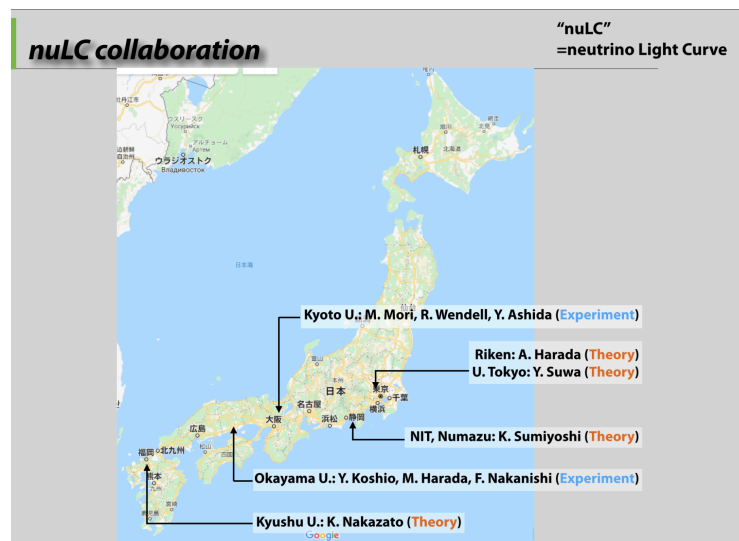


超新星爆発！

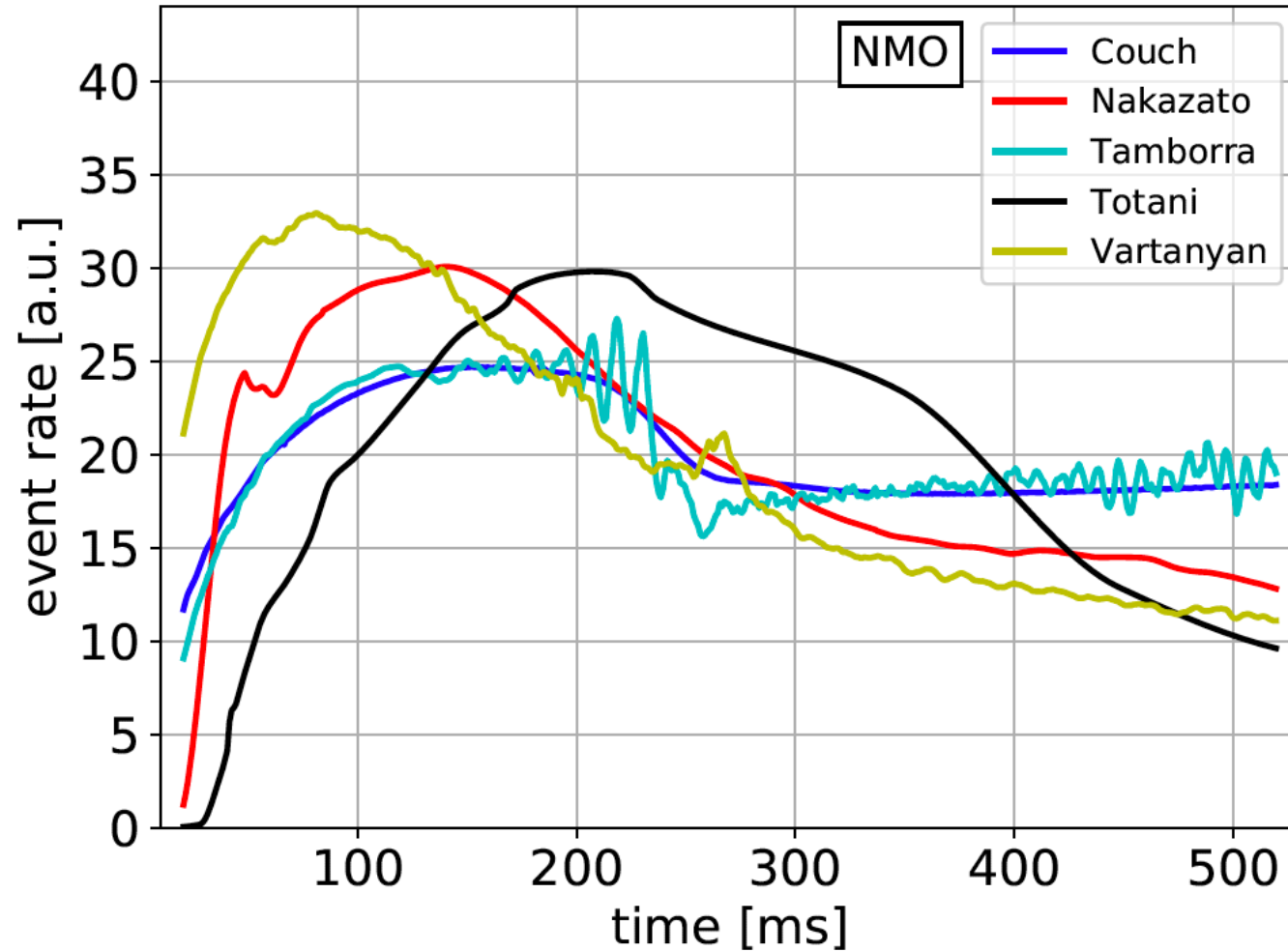
# 超新星爆発の研究: NuLC



- 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

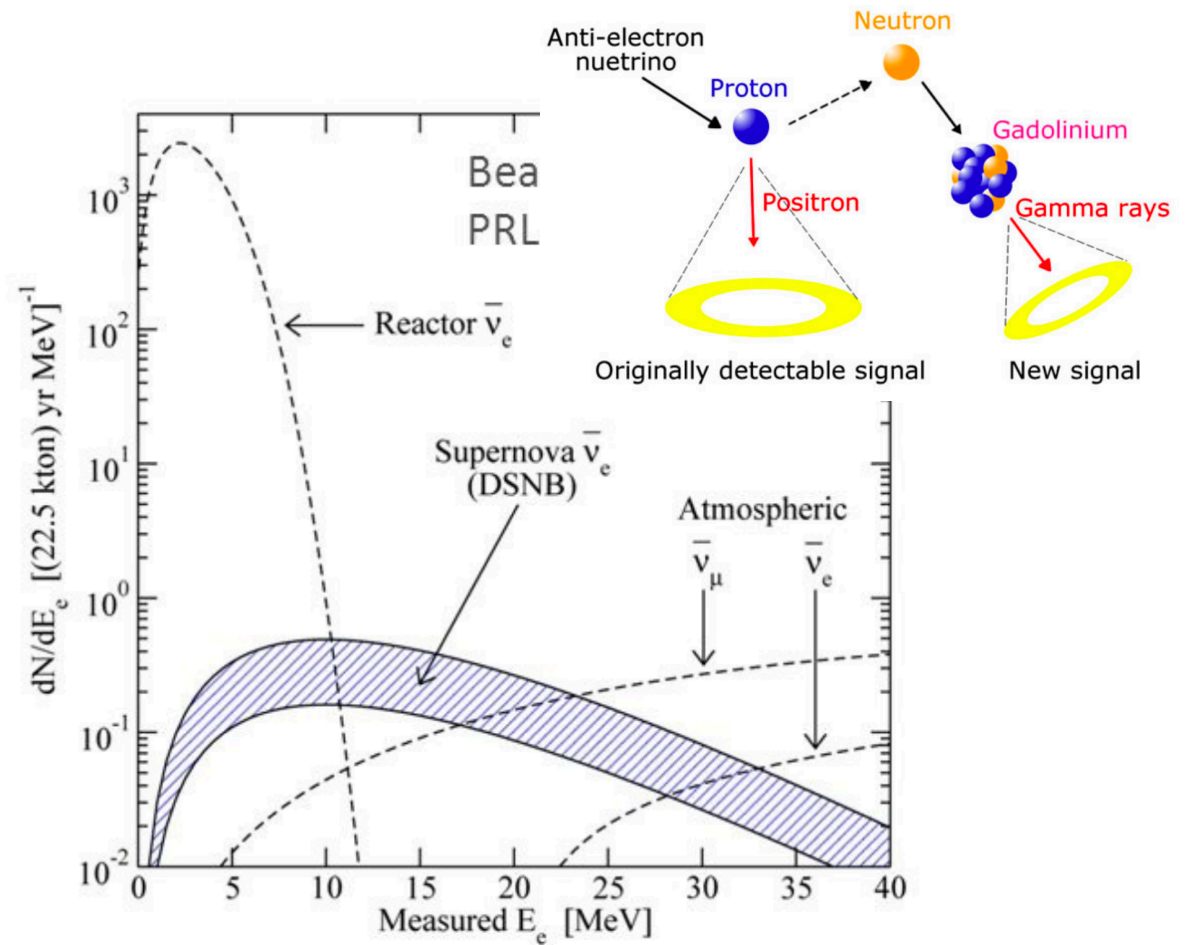
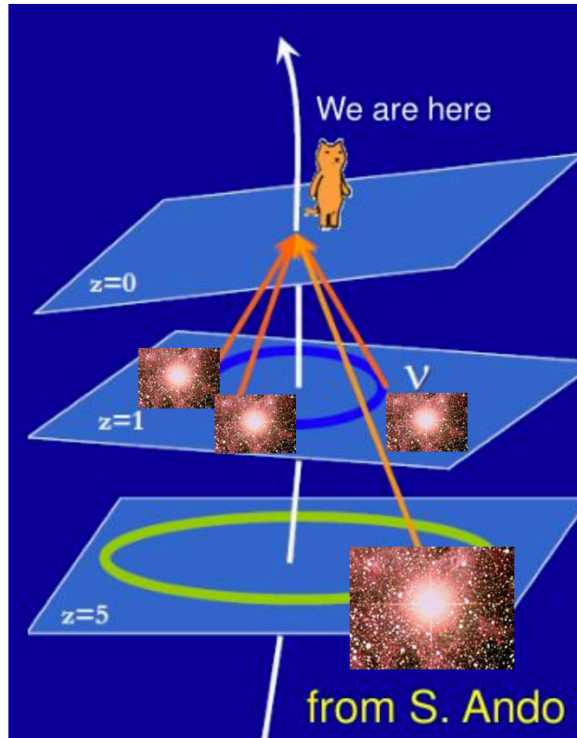


# 超新星爆発の研究: NuLC



- モデルがたくさんある
- 観測情報を使って物理をどう引き出すかを課題に

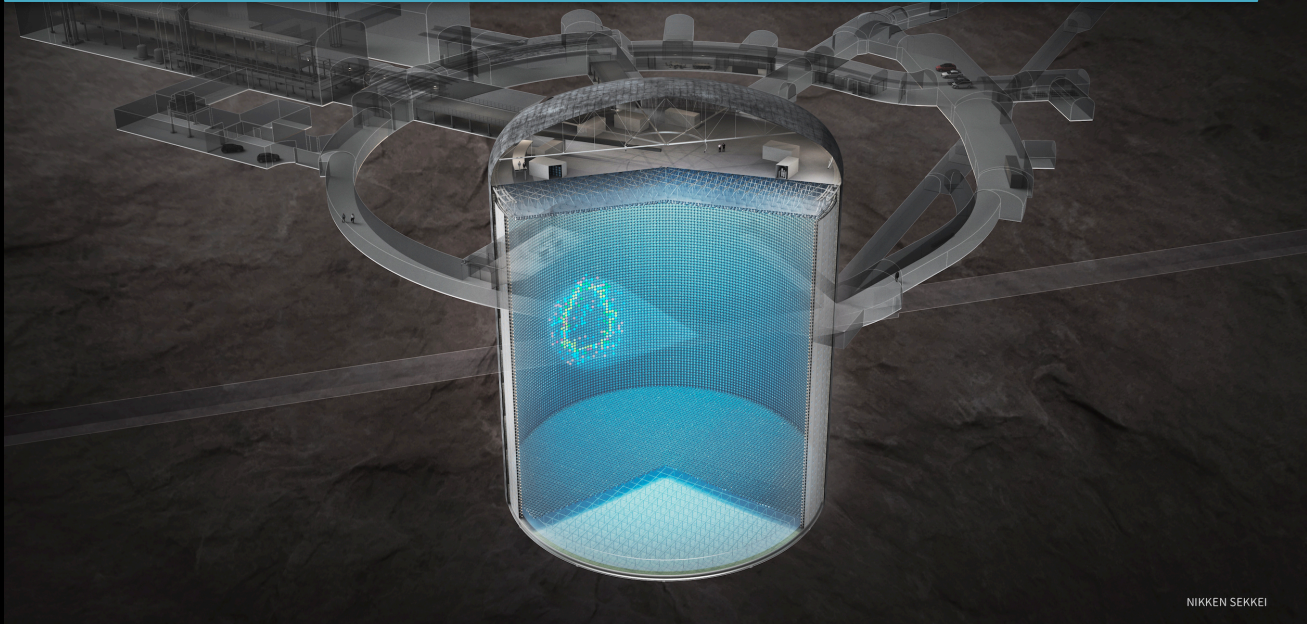
# 超新星背景ニュートリノ



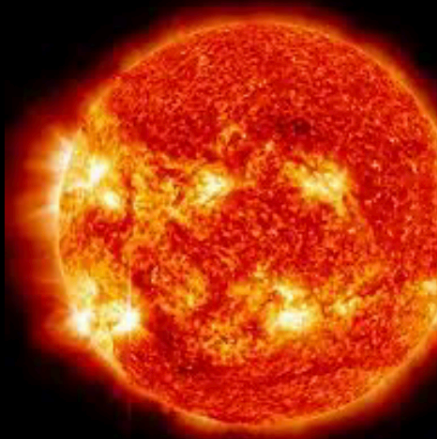
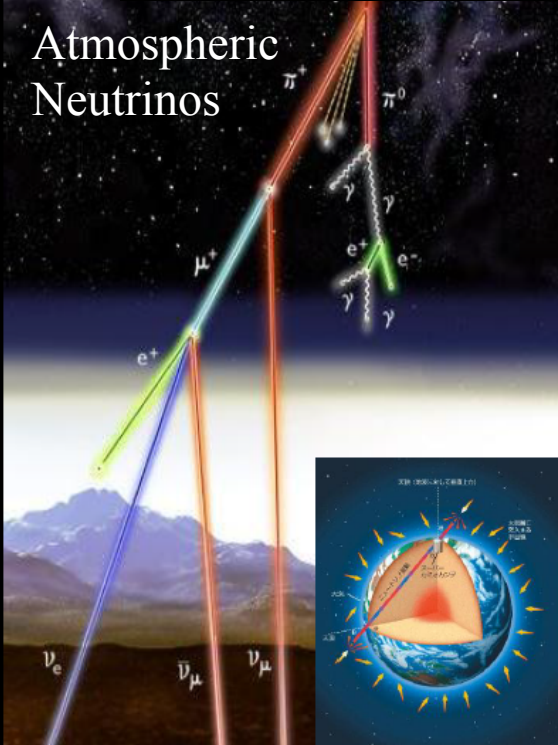
- 現在の宇宙は、宇宙誕生以降爆発した超新星のニュートリノに満ちている
- 世界に先立って測るために、SK-Gd
  - SKで、1年に数個しか期待できない
- 大気ニュートリノの中性カレント反応がBGとなる
  - T2Kのビームで測定可能 (Licheng)

# Hyper-Kamiokande : 次世代 SK+T2K++

検出器を290kT+1.3 MW $\nu$ ビーム : 現在建設中



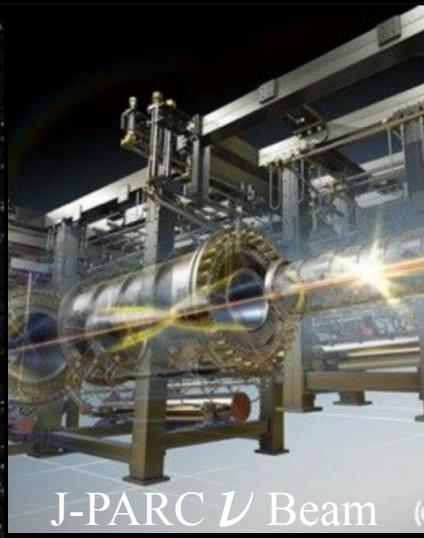
Atmospheric Neutrinos



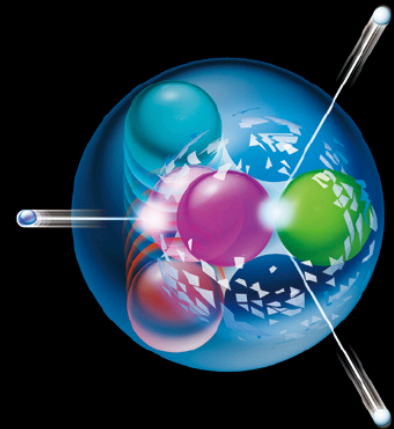
Solar neutrinos,  $\nu_e$



Supernova Neutrinos



J-PARC  $\nu$  Beam

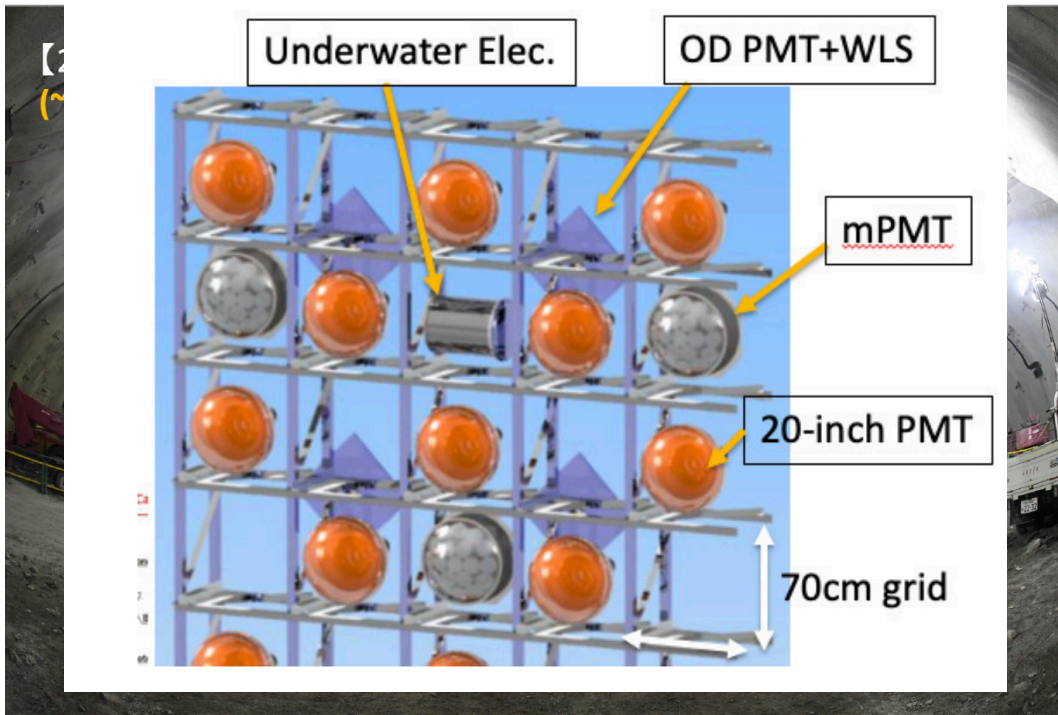


Proton Decay Search





- 現在建設中
- およそSKの8倍くらいの大きさ
- Accept 1.3 MW  $\nu$  beam from J-PARC
- 水中のエレキ
- 20,000 個の高性能PMT
  - SKのもの2倍くらい
- ~1000 Multi-PMT modules (mPMT)



- 現在建設中
- およそSKの8倍くらい  
の大きさ
- Accept 1.3 MW  $\nu$  beam  
from J-PARC

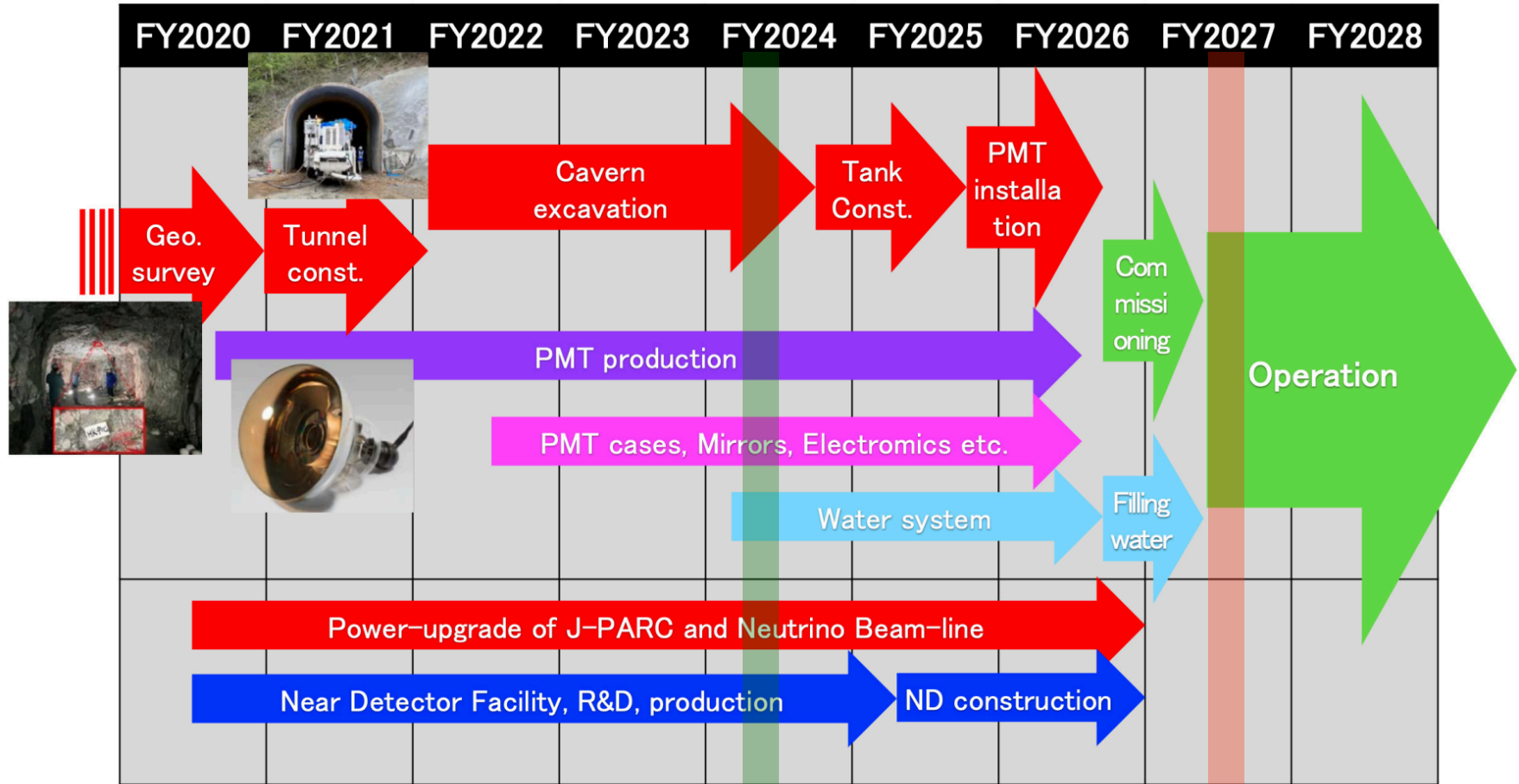
■ 水中のエレキ

【2023/07/13】 Cavern for water purification system (~1/2 of Super-K)

- 20,000 個の高性能PMT
  - SKのもの2倍くらい
- ~1000 Multi-PMT modules  
(mPMT)



# 現在地



## 京大でやっていること

- ビーム＋大気ニュートリノ・陽子崩の解析準備
  - SKやT2KでできることをHKに持って行って改善
- 外部検出器のR D
  - 宇宙線BGの排除シミュレーション
  - 読み出しエレキ関連の試験

現在のM1がD2になる

# Meetings

- 京大 SK ミーティング：
  - 毎週水曜日、16時から（418号室）
- SKの日本メンバー：
  - Local ATMPD (高エネルギー) 2週間に一回、朝火曜日朝10時
  - Local LOWE (低エネルギー) 周一回、火・木
- T2K-SK (英語) 2週間に一回、水曜日22時

## 主にSK側で活躍しているメンバー

- Jianrun - PD : SKとT2Kとの共同振動解析、隠し崩壊探索
- Feng - D3 : 陽子崩壊探索、再構成アルゴリズム開発
- Zhuojun D3 : 超新星前兆ニュートリノ探索、大気ニュートリノ振動
- Lichen D2: NCQE反応測定、超新星背景ニュートリノ探索