

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8年度版



A Tale of Two experiments



検出器の大きさを10倍に

ν ビーム強度を2.5倍



検出器を290kT + 1.3 MW ν 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

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動（実験準備）でもある



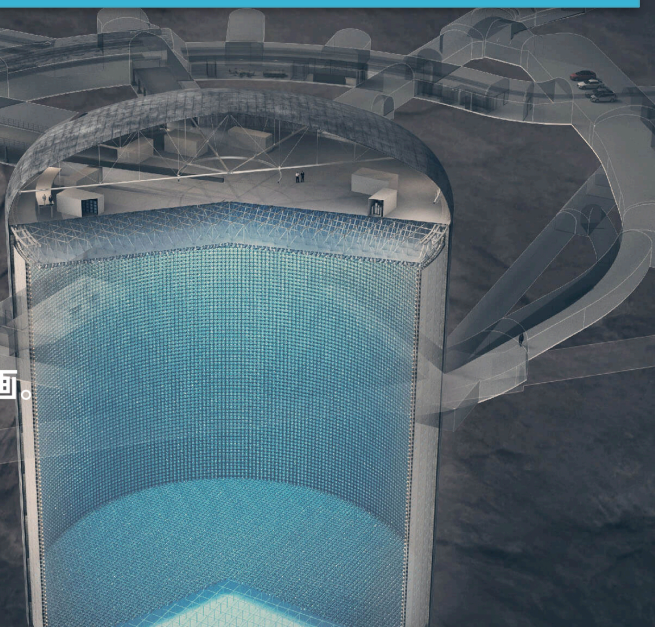
快山谷を290kt + 1.3 MWのヒーム・現任建設中

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

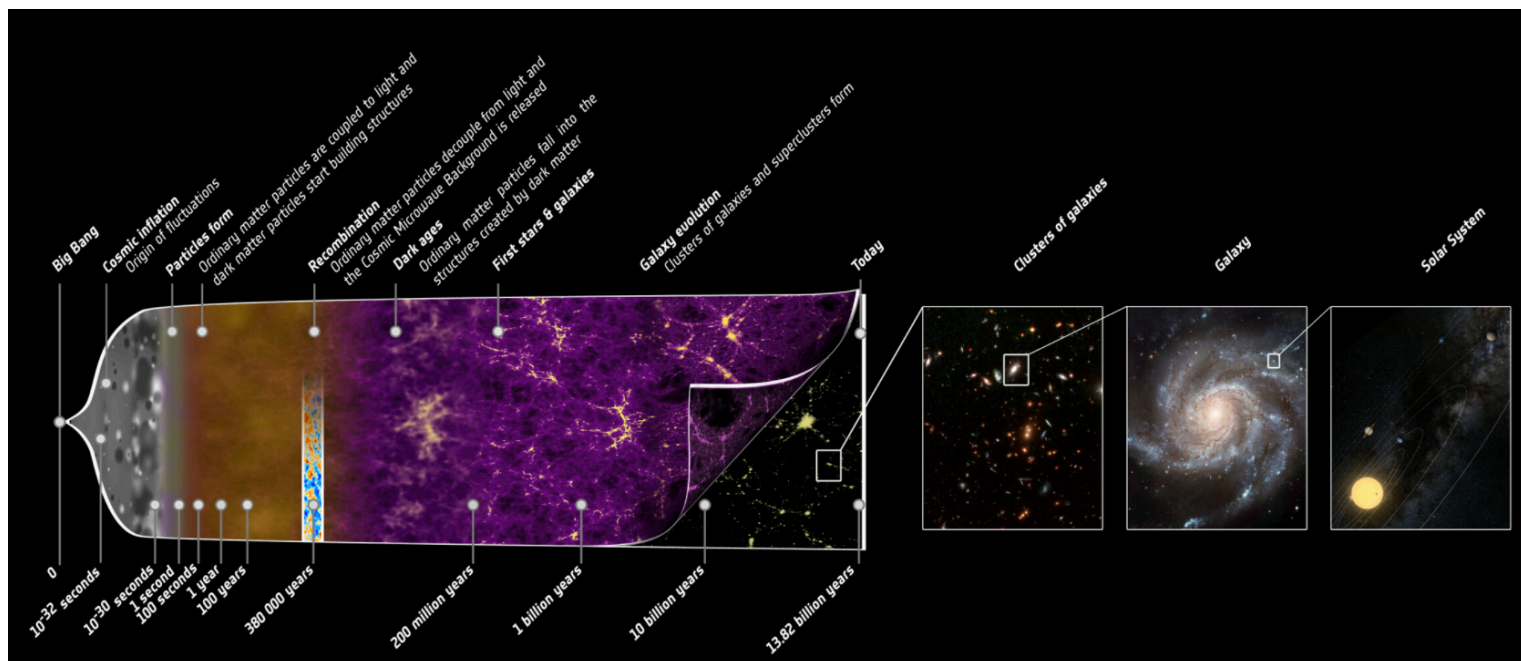
主な研究目的

- 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！



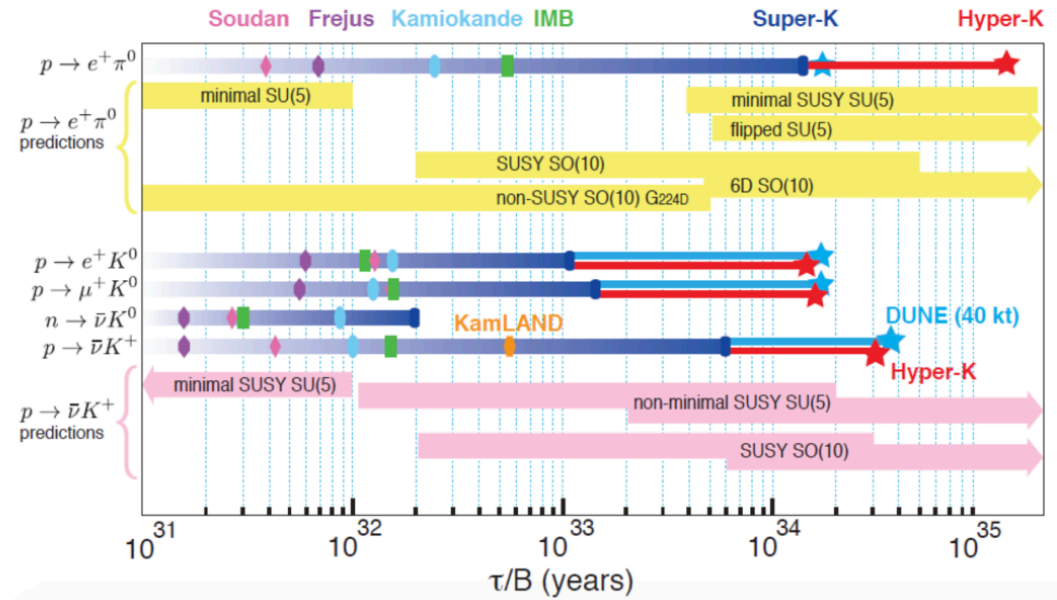
主な研究目的

- 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

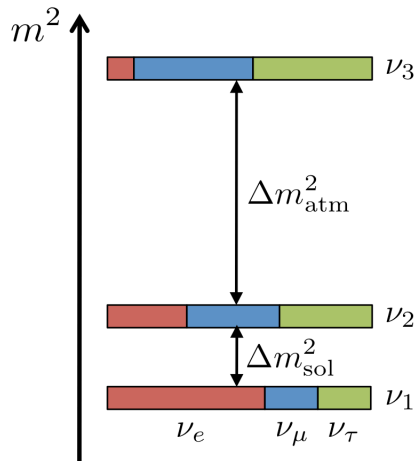
質量の順を決定

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

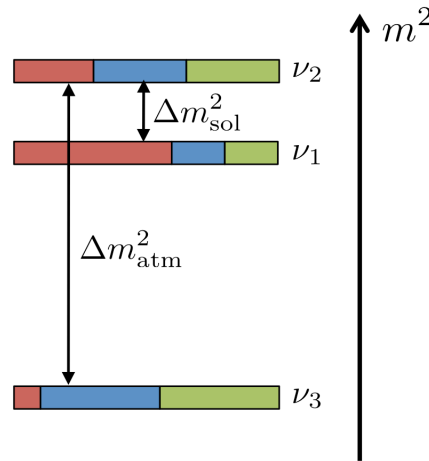


normal hierarchy (NH)



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

inverted hierarchy (IH)



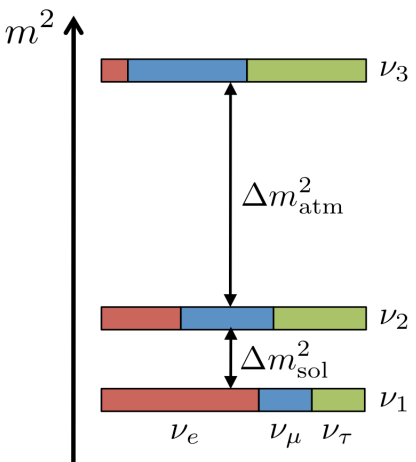
$$\Delta m^2_{32} < 0$$

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

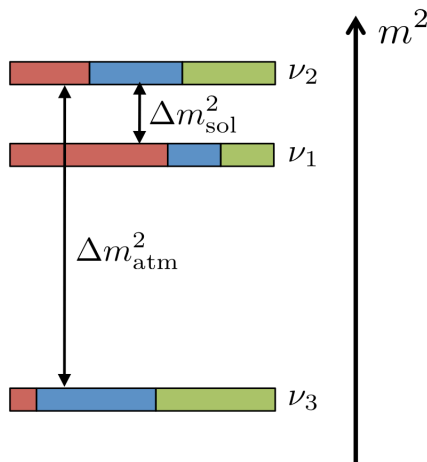
質量の順を決定
 大統一理論の種類に絞る
 ニュートリノと伴わないβ崩壊へ

normal hierarchy (NH)

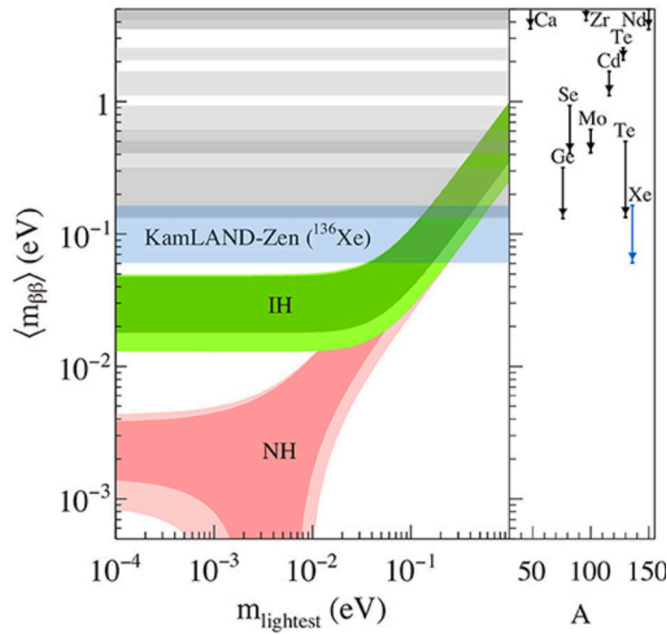


$$\Delta m_{32}^2 > 0$$

inverted hierarchy (IH)



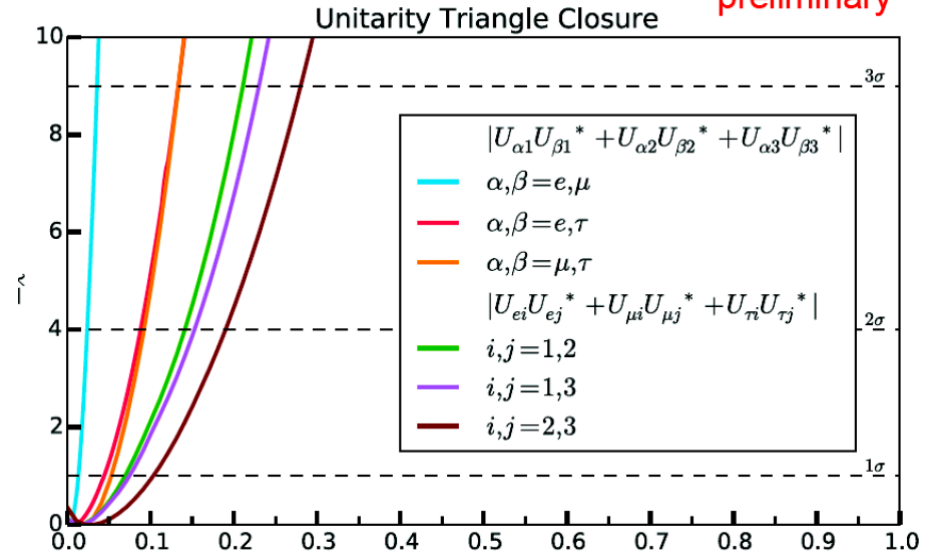
$$\Delta m_{32}^2 < 0$$



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}

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

Flavour Eigenstates

Mass Eigenstates

Mass Eigenstates
Labeled by
Decreasing
 ν_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
 ν_e
Content

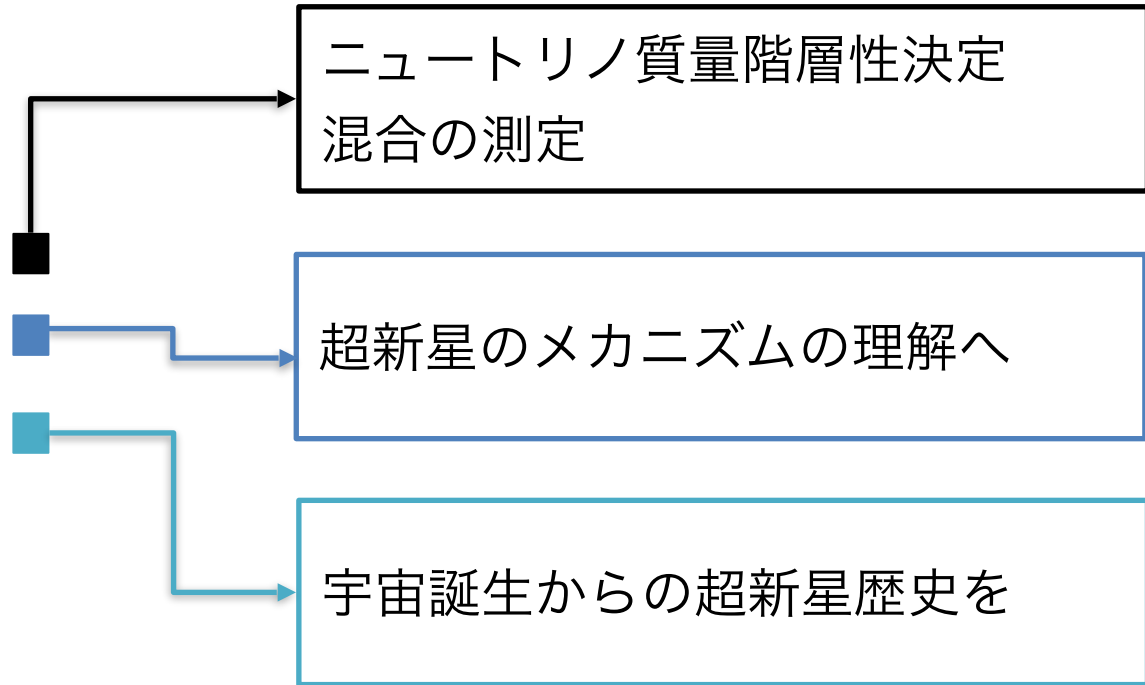
?????

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

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

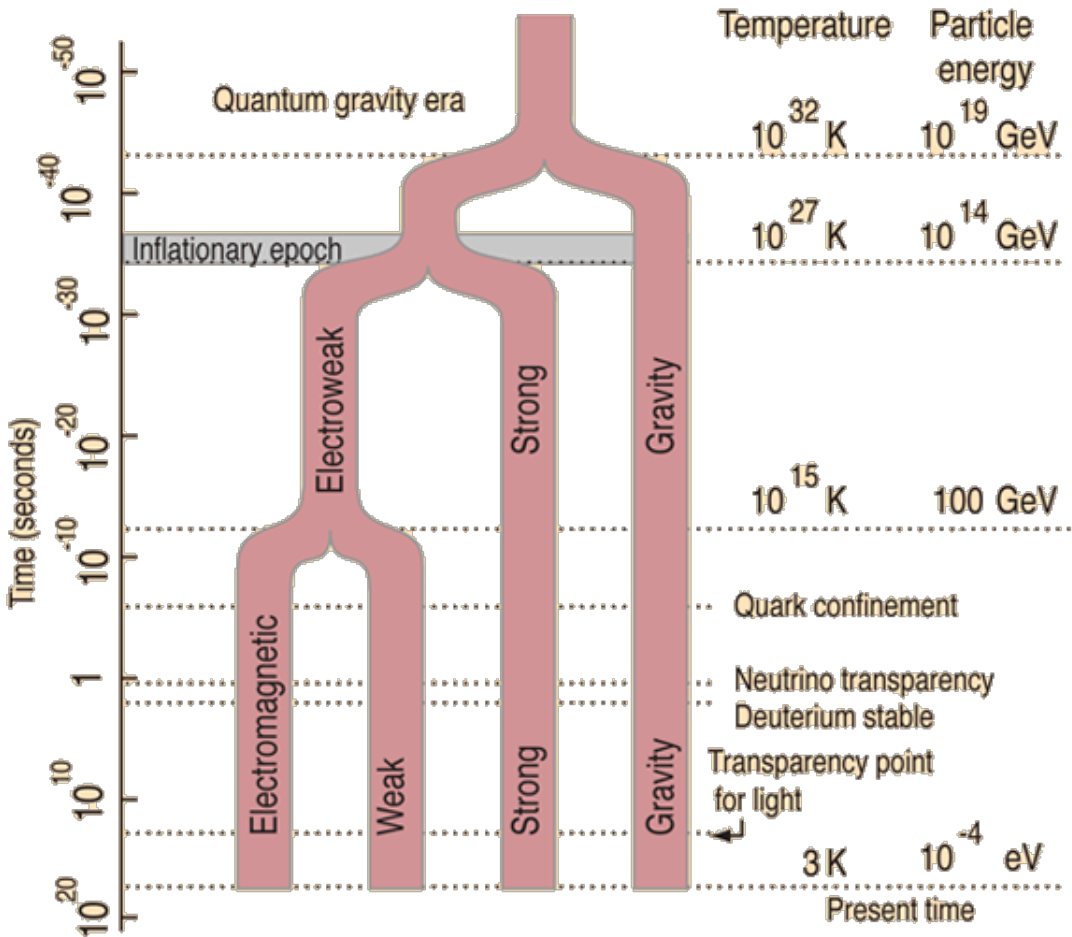
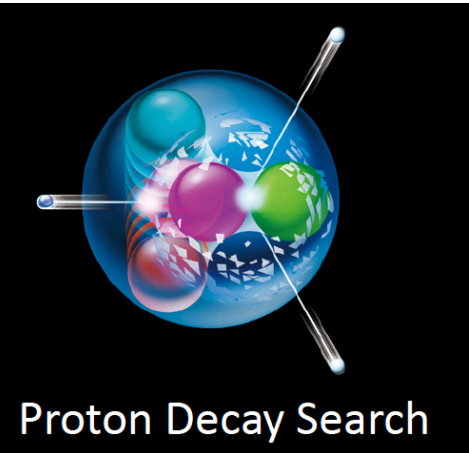
宇宙誕生からの超新星歴史を

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

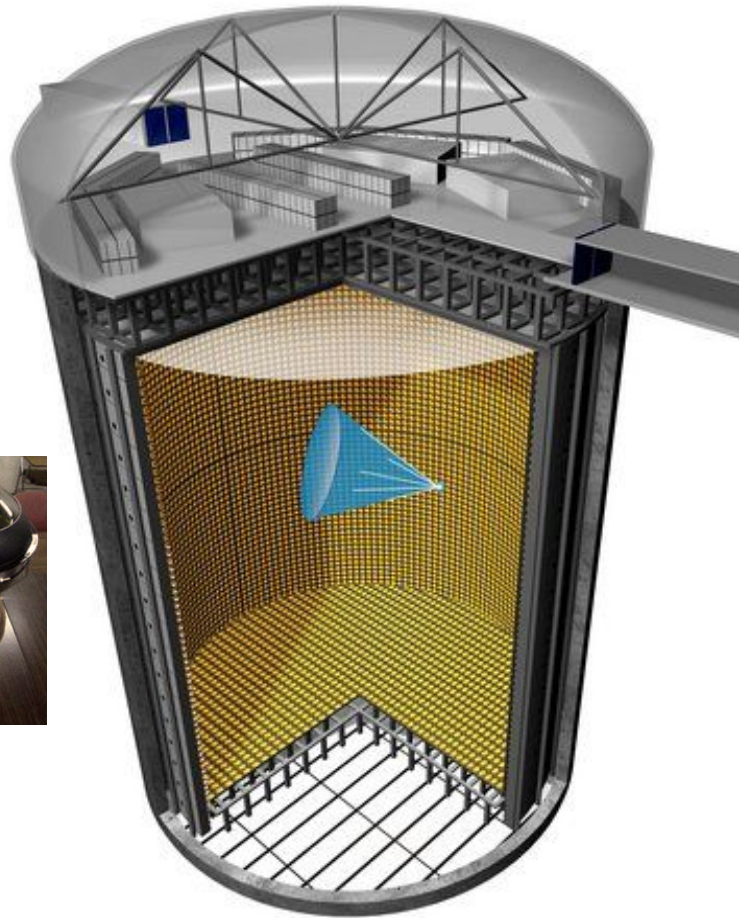
トピックス

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



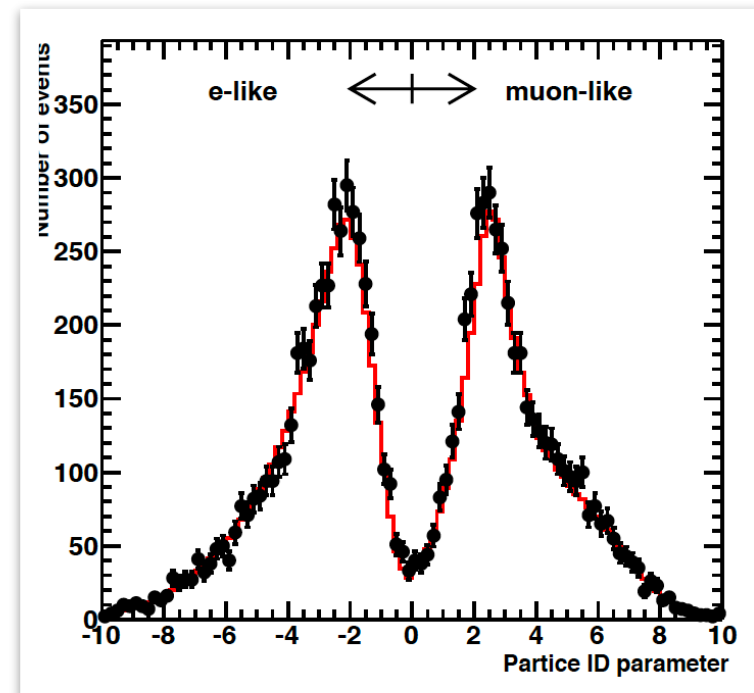
Four Run Periods:

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

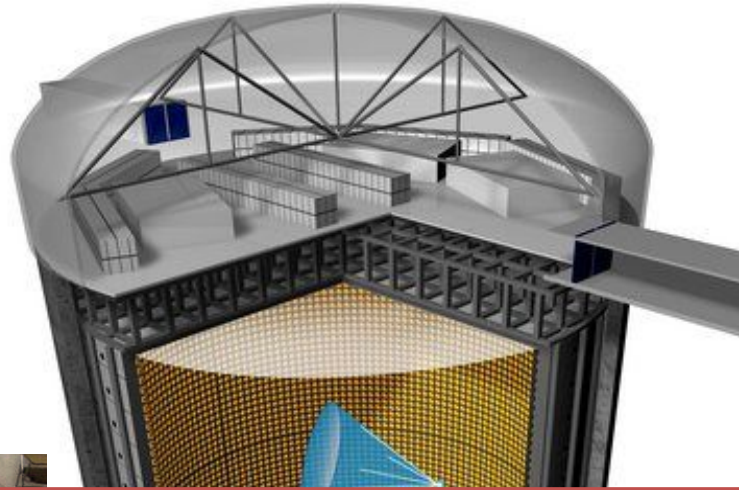
SK-III (2005-2008) SK-IV (2008-2018)

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

Upgrade Complete Now operating as [SK-VIII \(SK-Gd\)](#) !!



Super-Kamiokande: Introduction

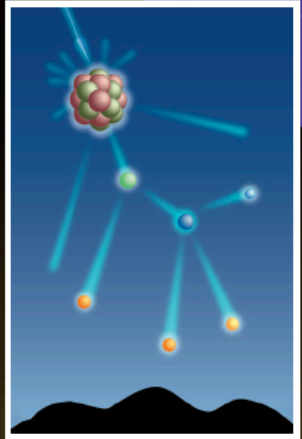


- 5万トンの超純水
- 22.5 kton 有効体積
 - 内部検出器 11,146 20" PMTs
 - 外部検出器 1885 8" PMTs
- 優れている粒子識別 (PID)
 - ミューを間違って「電子」と識別する確率が < 1% MIS ID at 1 GeV
- 多目的の実験

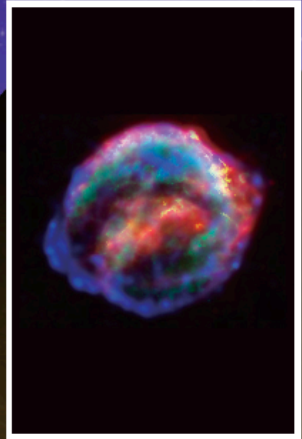
J-PARC 大強度加速器による
高品質ニュートリノビーム



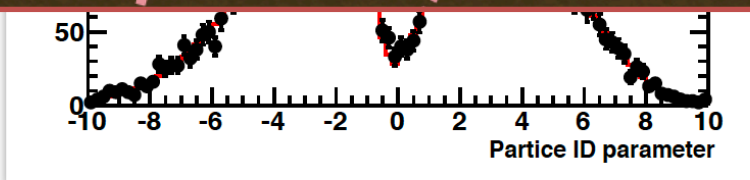
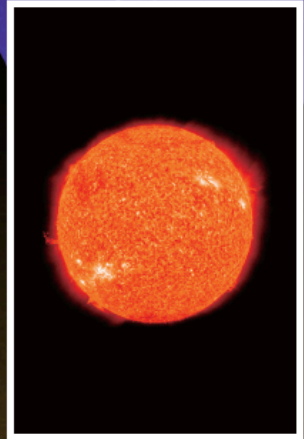
大気



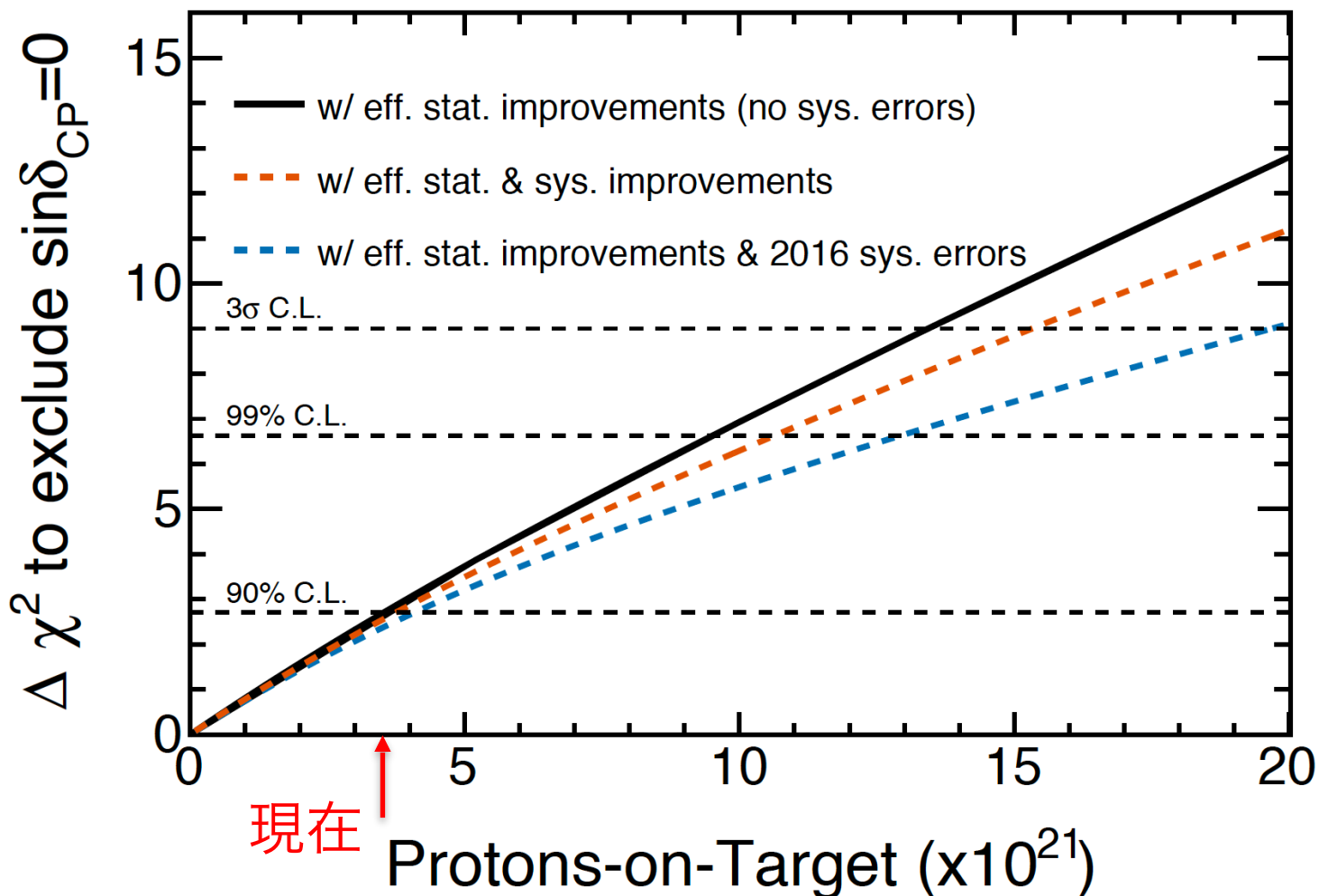
超新星爆発



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) !!

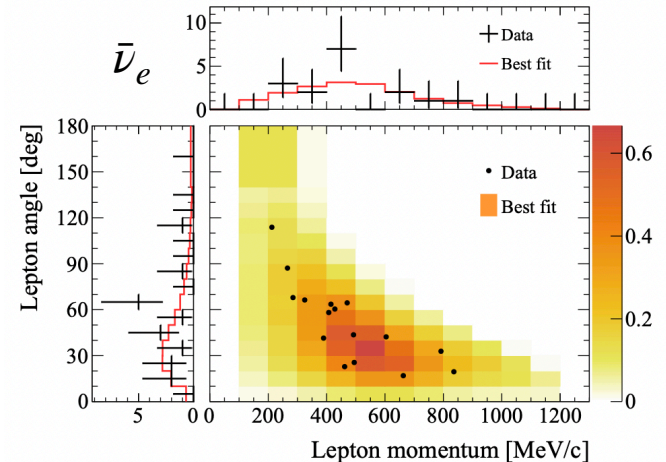
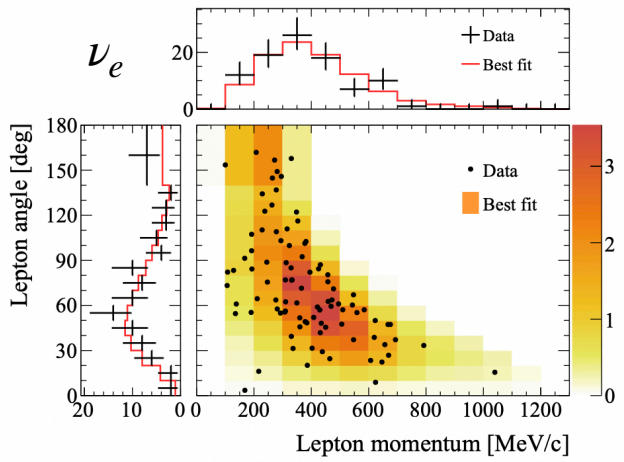
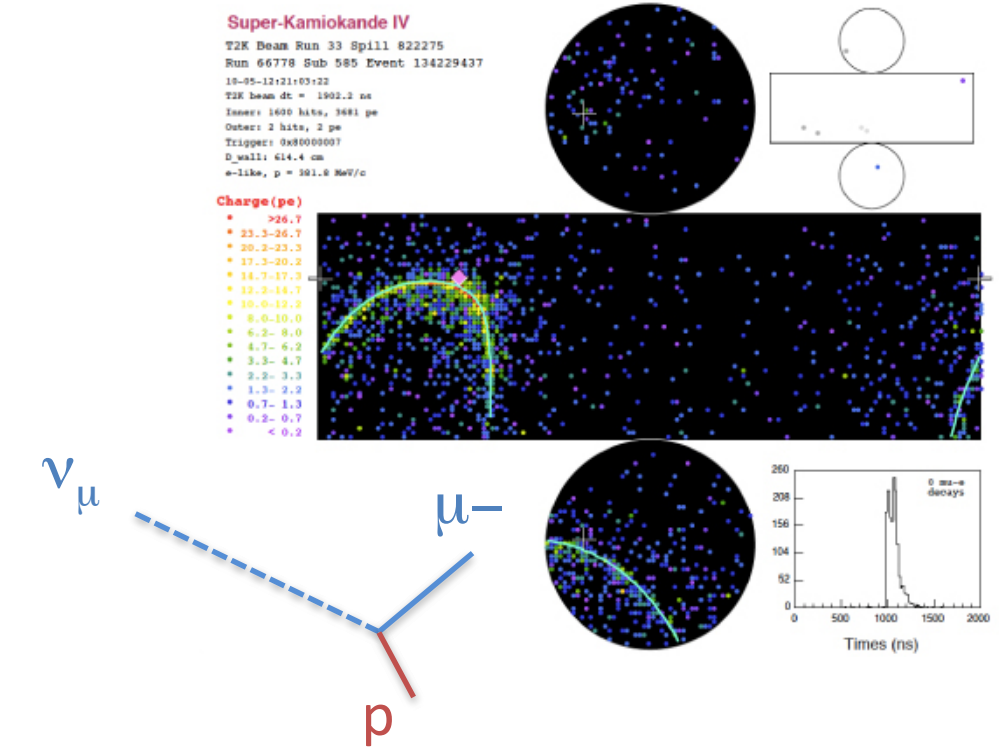


- SK側で解析可能な統計量を増やす
- 検出器反応に伴う系統誤差を削減

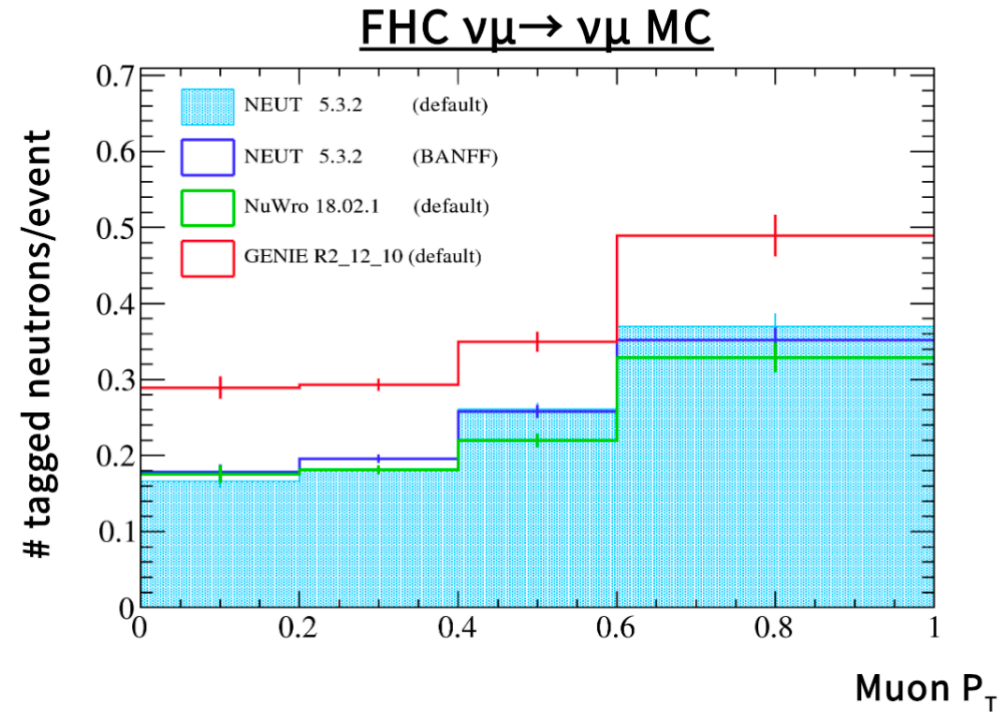
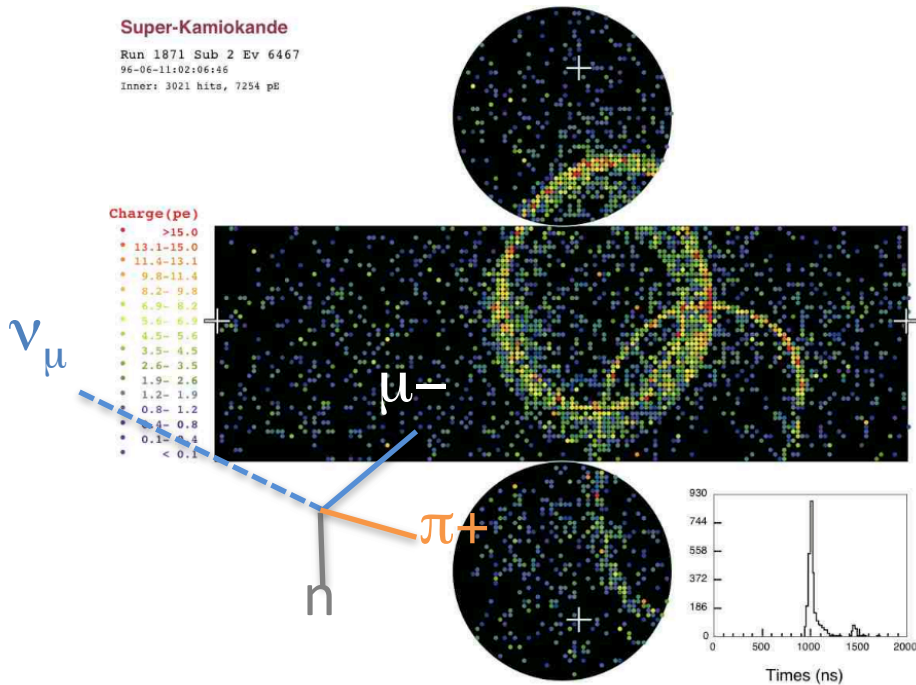
T2K-SK ワーキンググループ

- 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

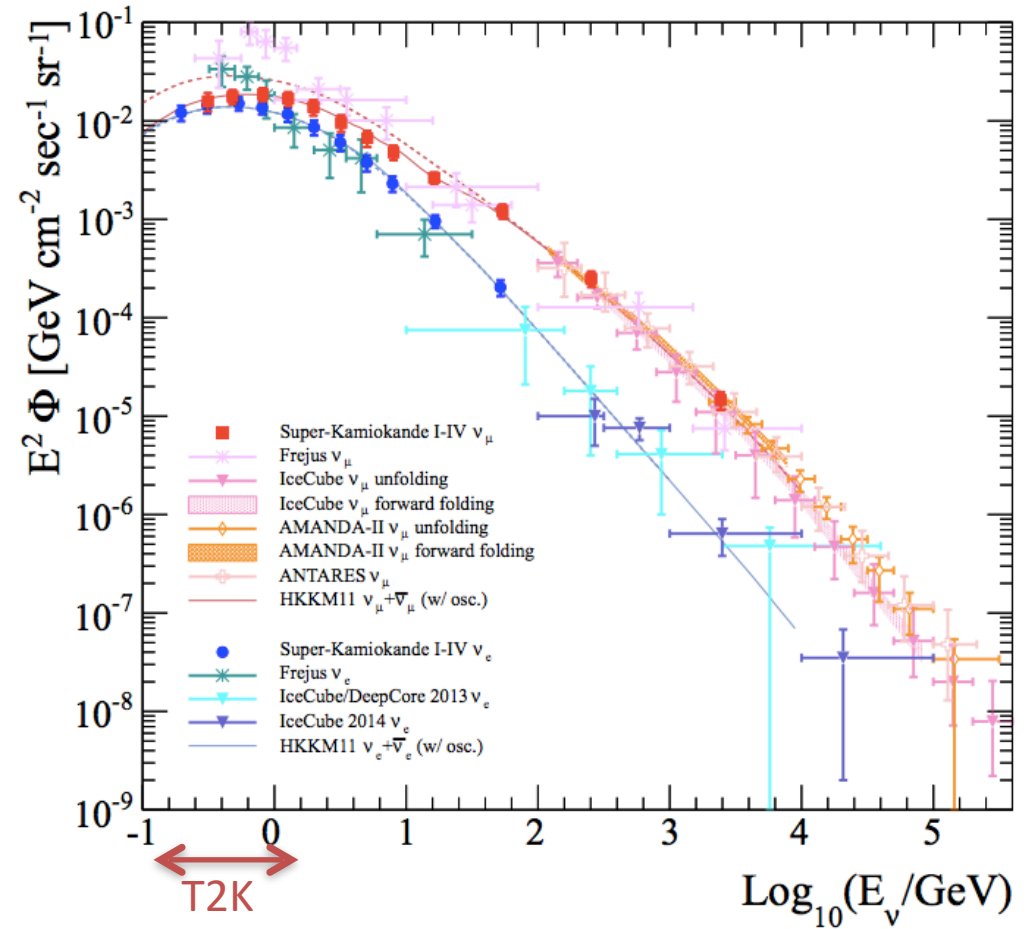
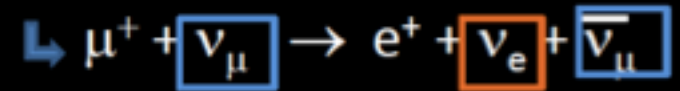
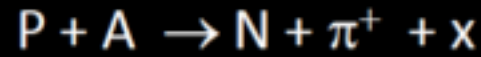
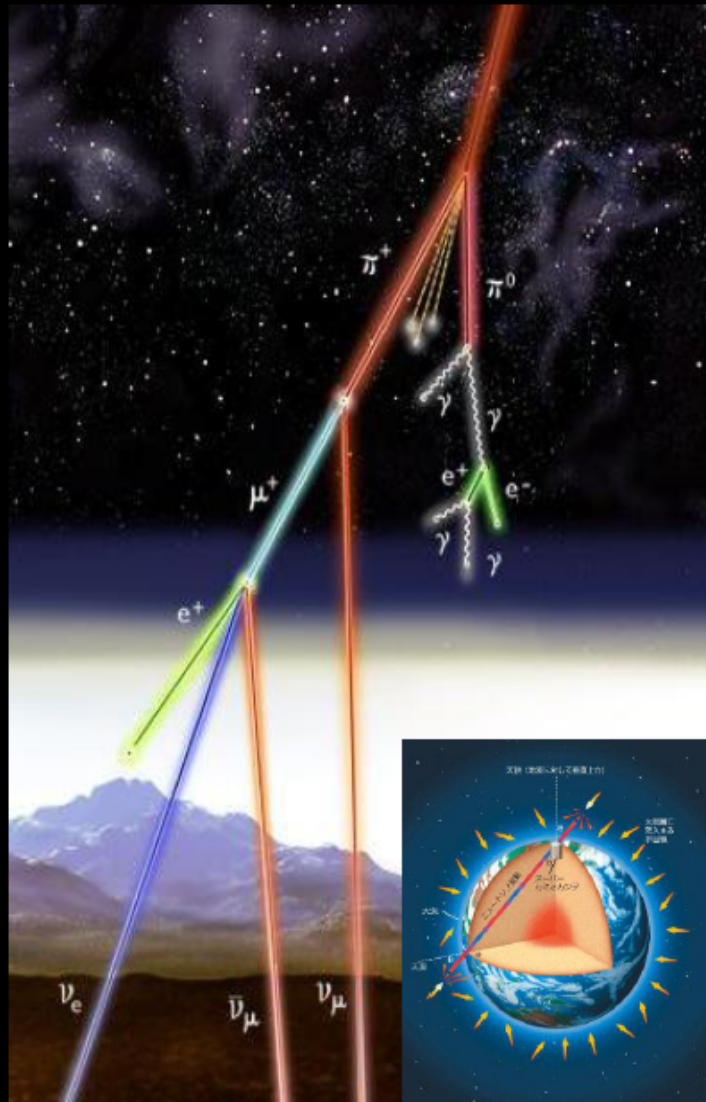


T2K-SK : 今後の研究



- 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

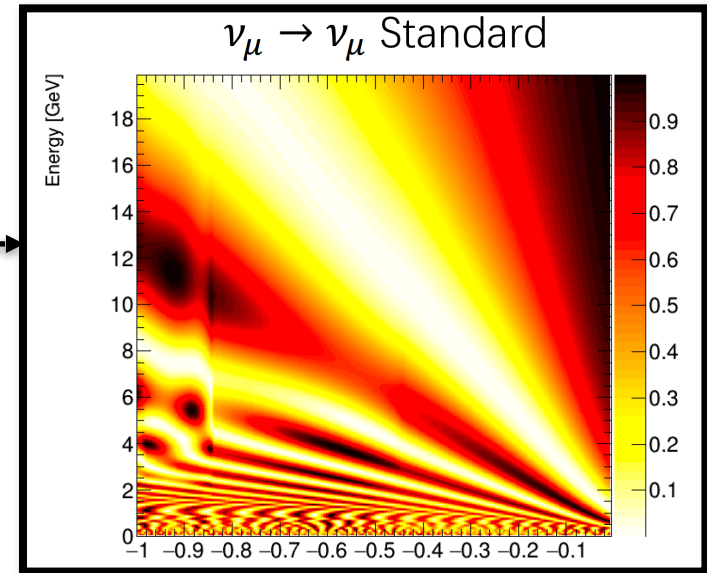
$100 \text{ MeV} < E < 10 \text{ TeV}$

- 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 MeV < E < 10 TeV

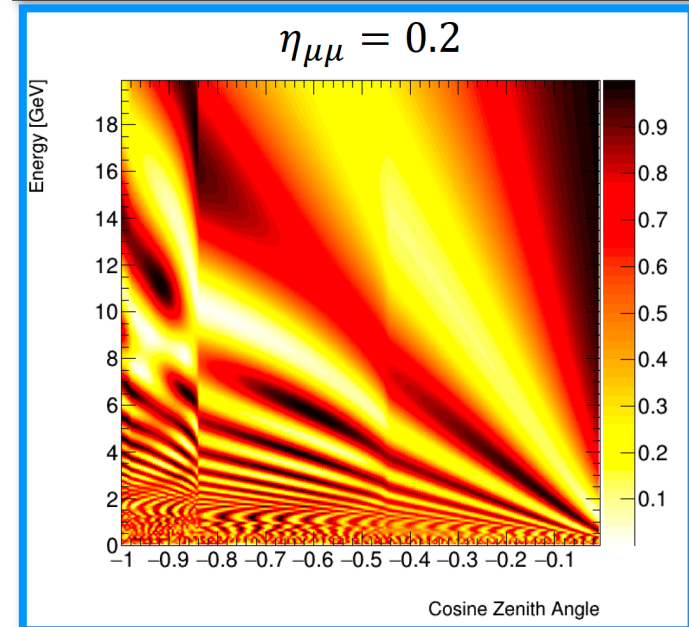
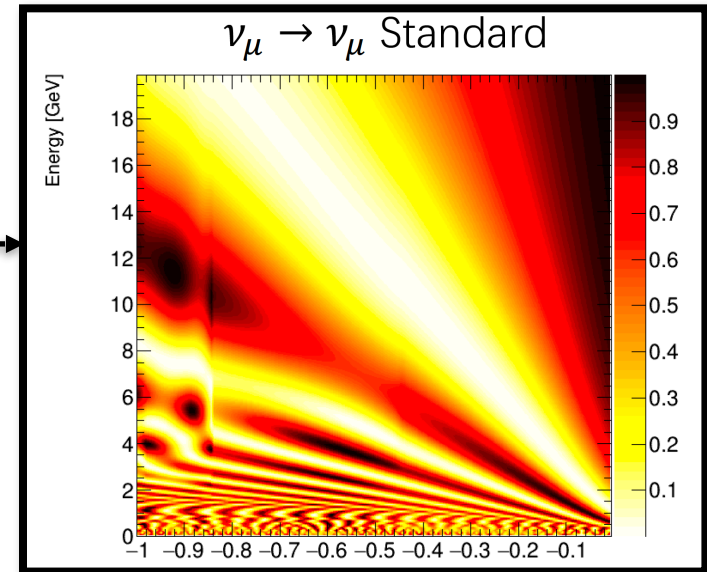
- PMNSニュートリノ振動
 - Exotic ニュートリノ振動
 - ステラいるニュートリノ
 - Scalar NSI
 - ローレンツ対称性を破る振動
 - . . .
 - 天文学関連
 - 重力波などのCoincidence探索
 - GRB探索
 - 暗黒物質探索



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
 - Scalar 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

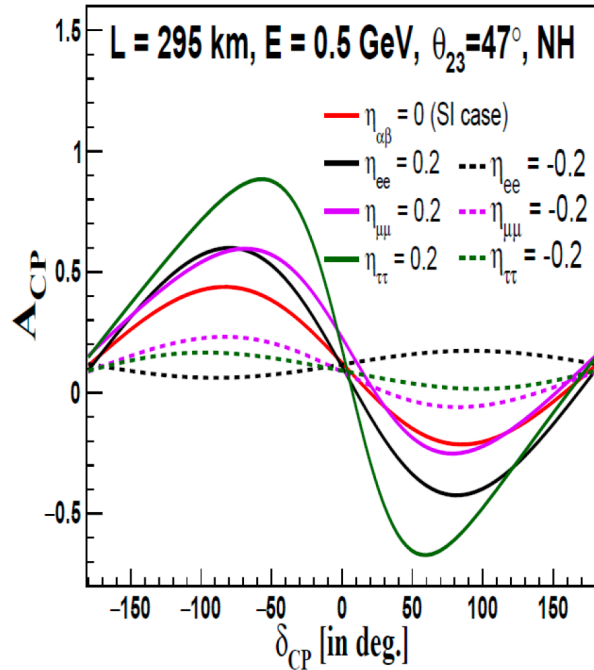
100 MeV < E < 10 TeV

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ Standard

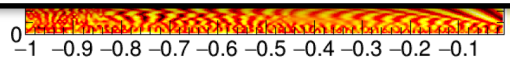
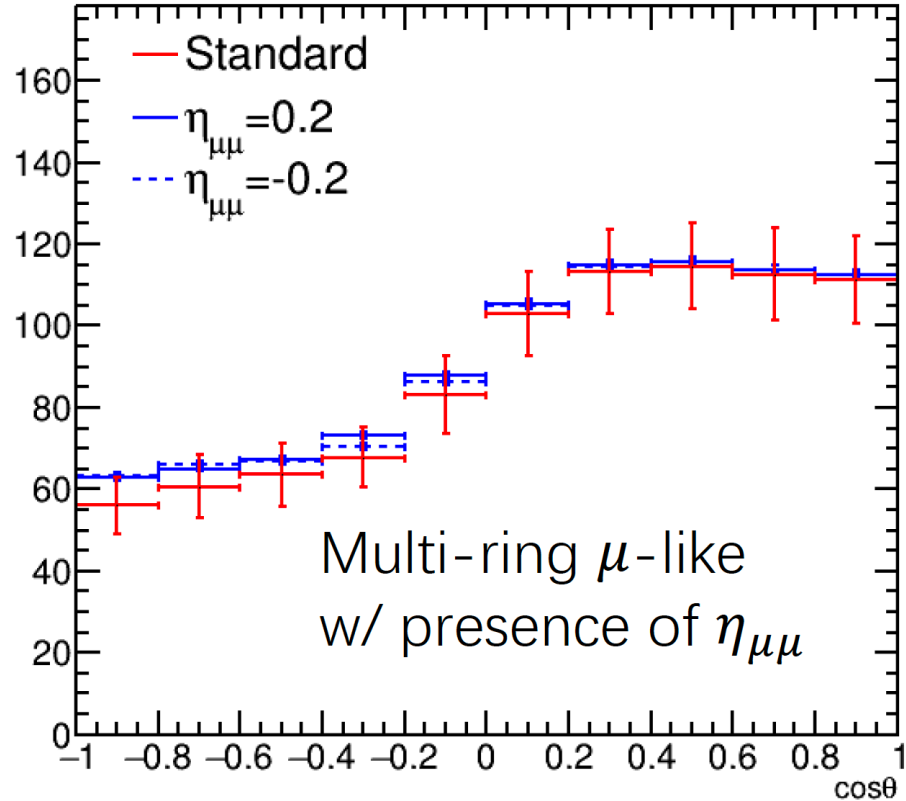
Scalar-NSI can fake CP asymmetry in HK

- degeneracy between $\eta_{\alpha\beta}$ and δ_{CP}

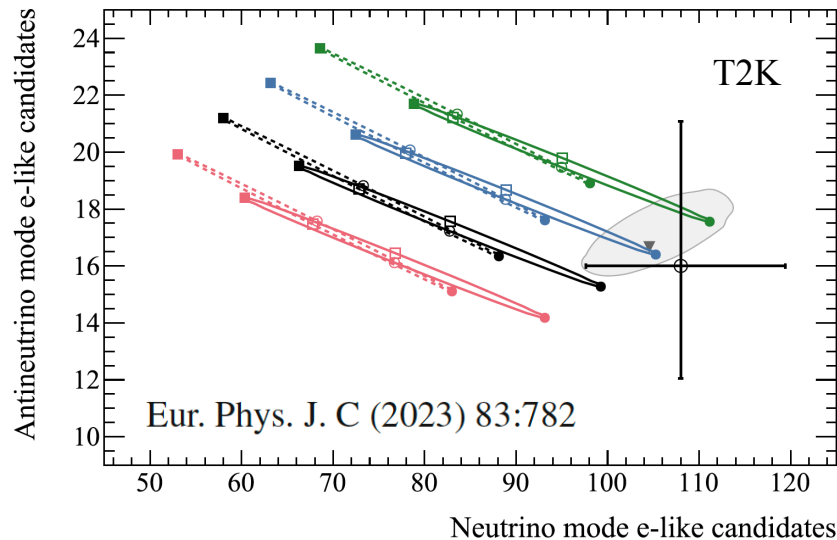
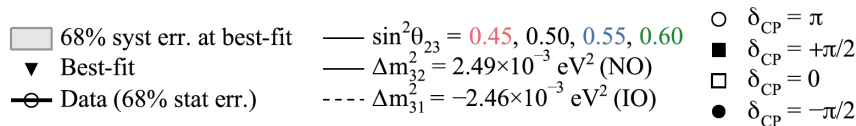
$$A_{CP} = \frac{P_{\mu e} - \bar{P}_{\mu e}}{P_{\mu e} + \bar{P}_{\mu e}}$$



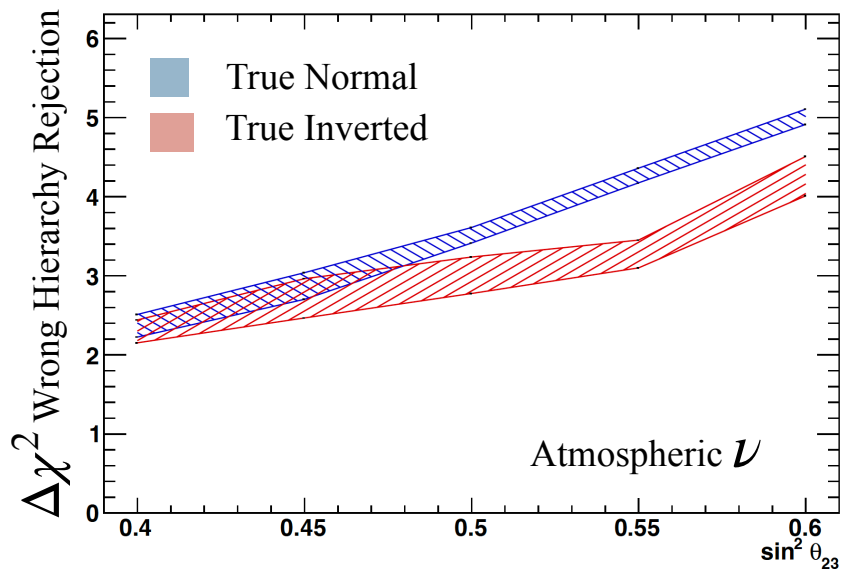
Zhuojun HU



Motivation for A Combined SK+T2K Analysis



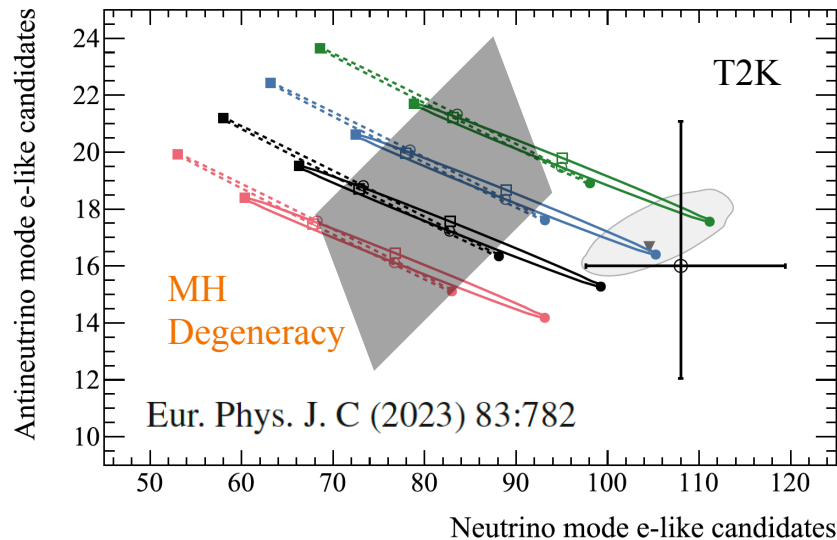
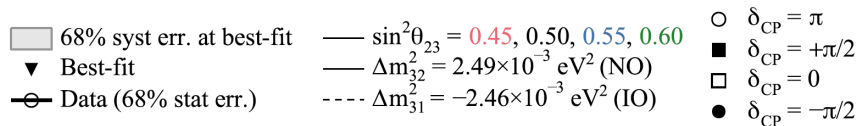
- T2K's Relatively short baseline means limited matter effect
 - \rightarrow limited hierarchy sensitivity
 - Parameter degeneracies
- Off-axis beam measures atmospheric parameters precisely



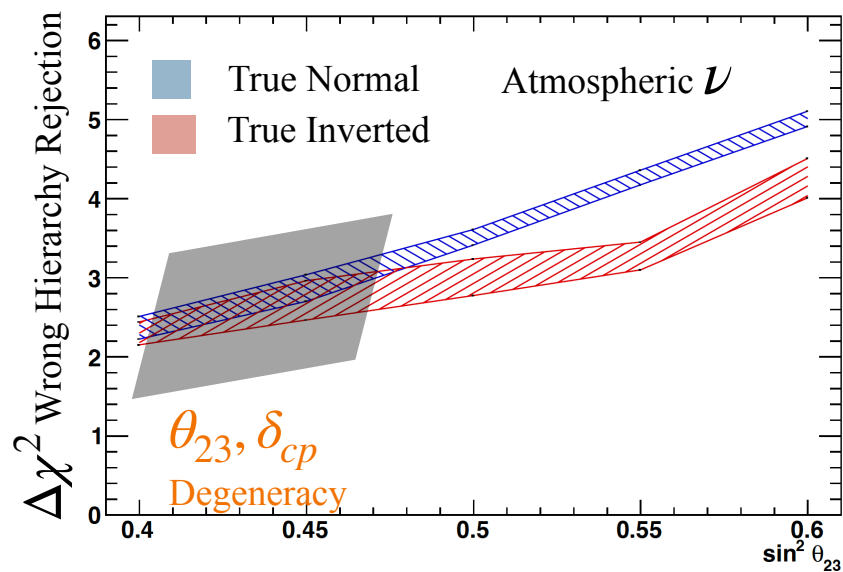
- Super-K has large matter effect
 - \rightarrow good hierarchy sensitivity
 - Strong dependence on atmospheric mixing

Width of bands is effect of δ_{cp}

Motivation for A Combined SK+T2K Analysis



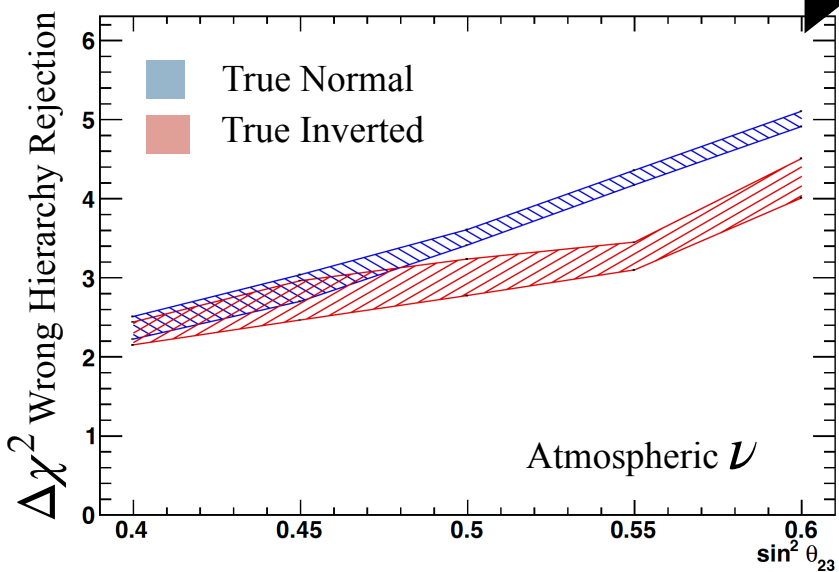
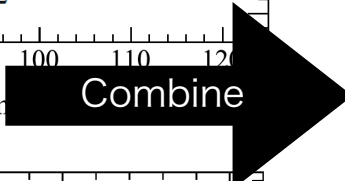
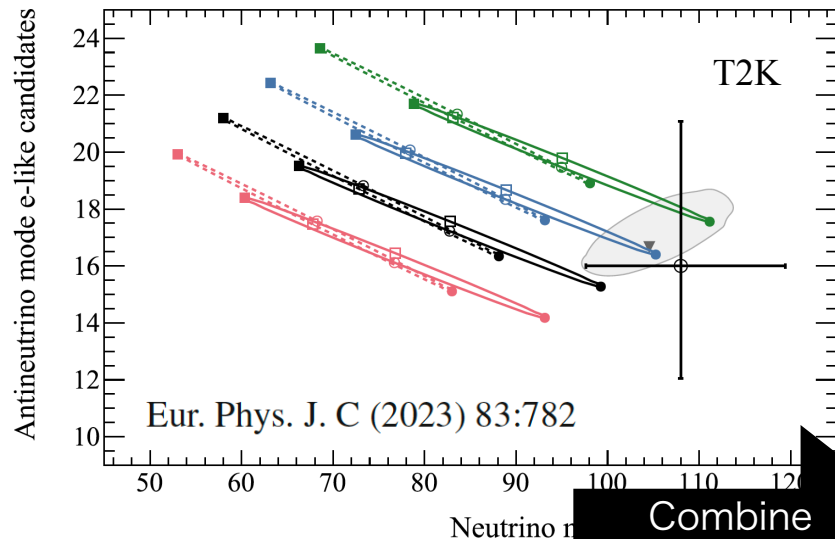
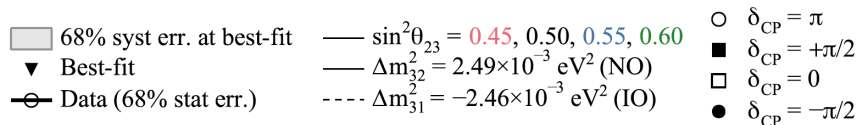
- T2K's Relatively short baseline means limited matter effect
 - → limited hierarchy sensitivity
 - Parameter degeneracies
- Off-axis beam measures atmospheric parameters precisely



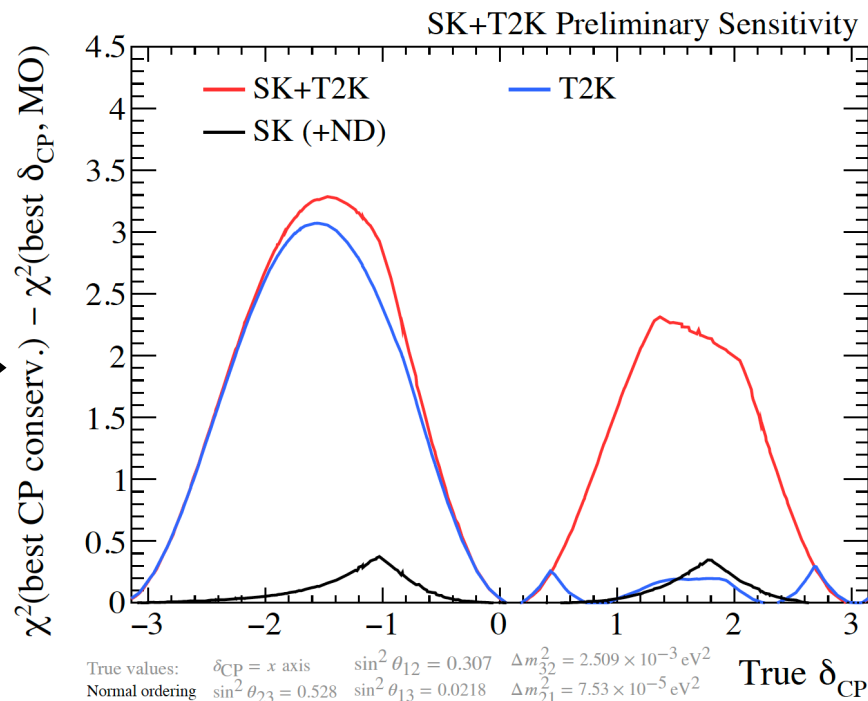
- Super-K has large matter effect
 - → good hierarchy sensitivity
 - Strong dependence on atmospheric mixing

Width of bands is effect of δ_{CP}

Motivation for A Combined SK+T2K Analysis

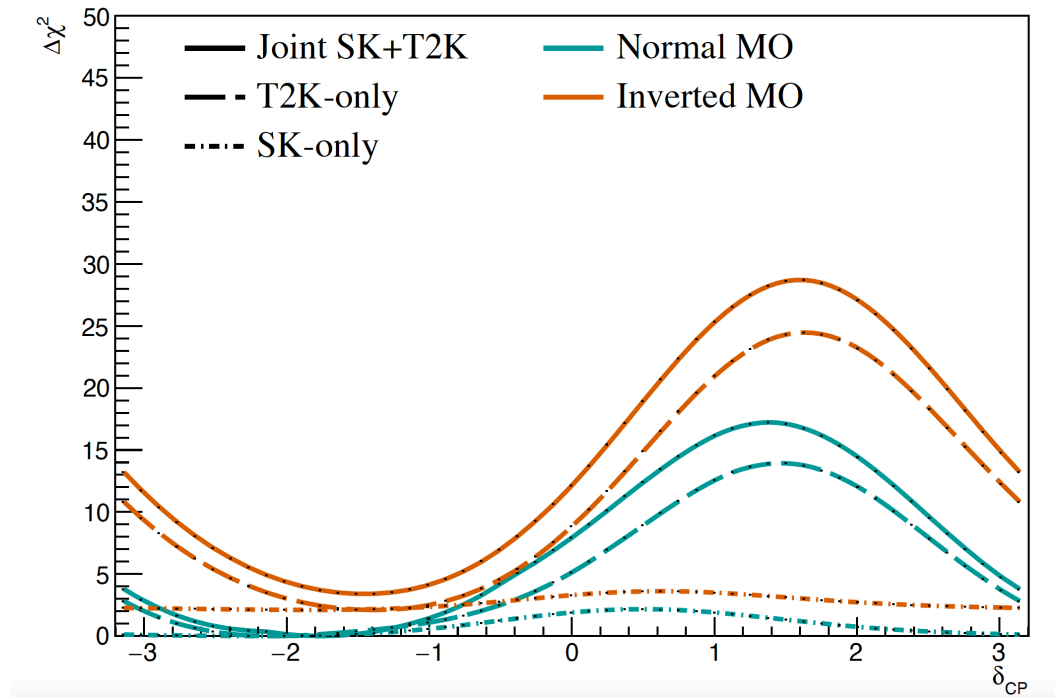
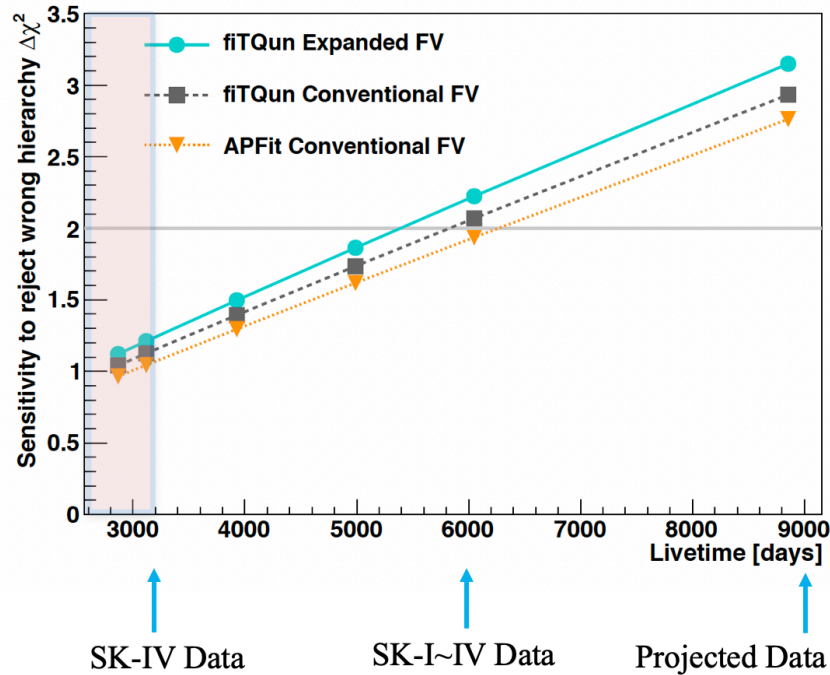


True NO



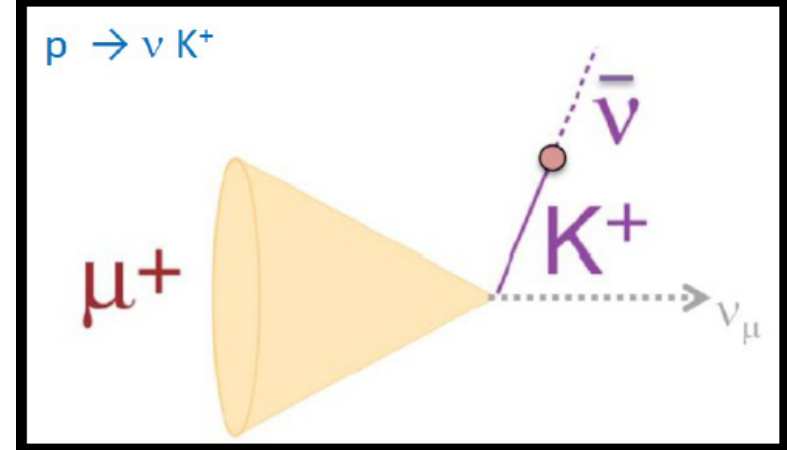
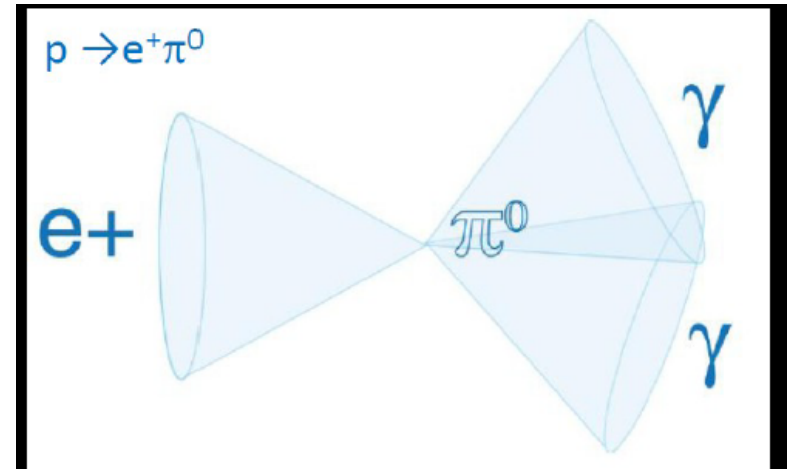
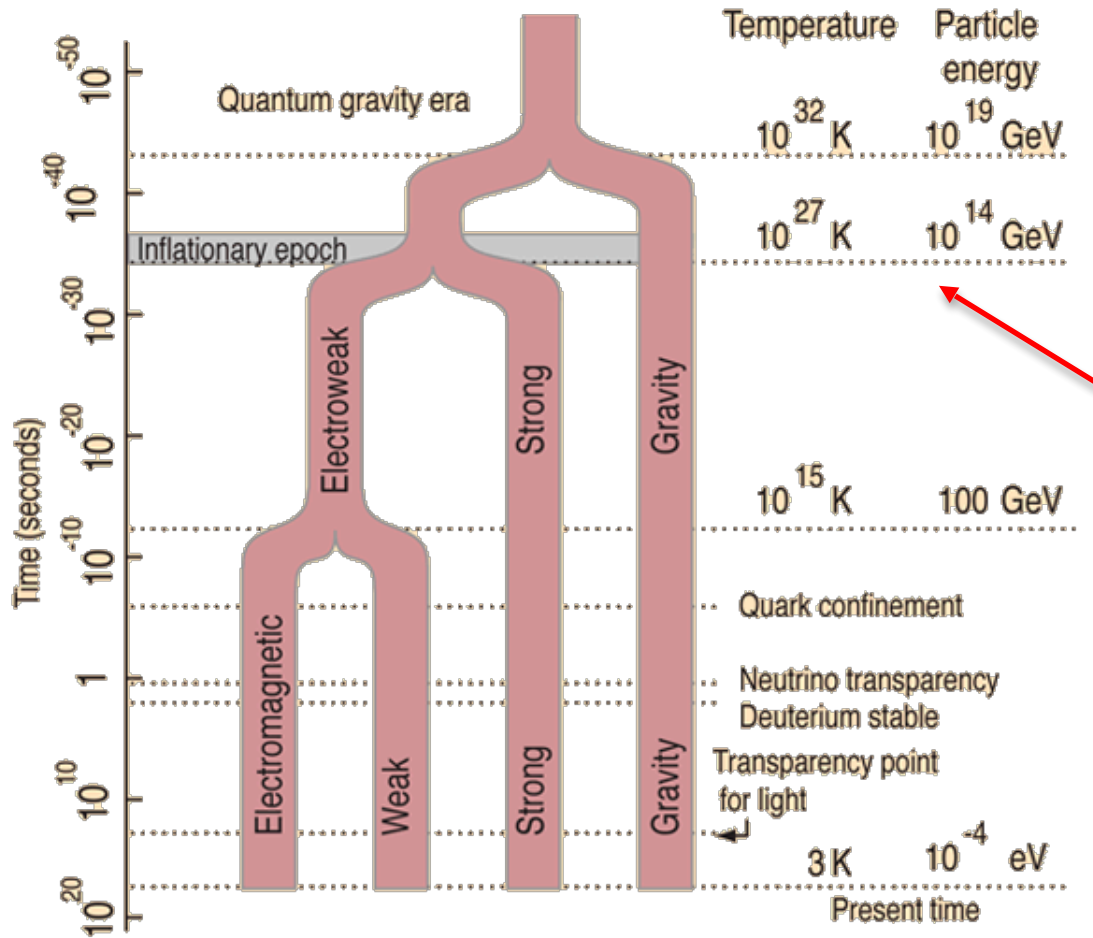
Width of bands is effect of δ_{CP}

SK・T2K共同解析



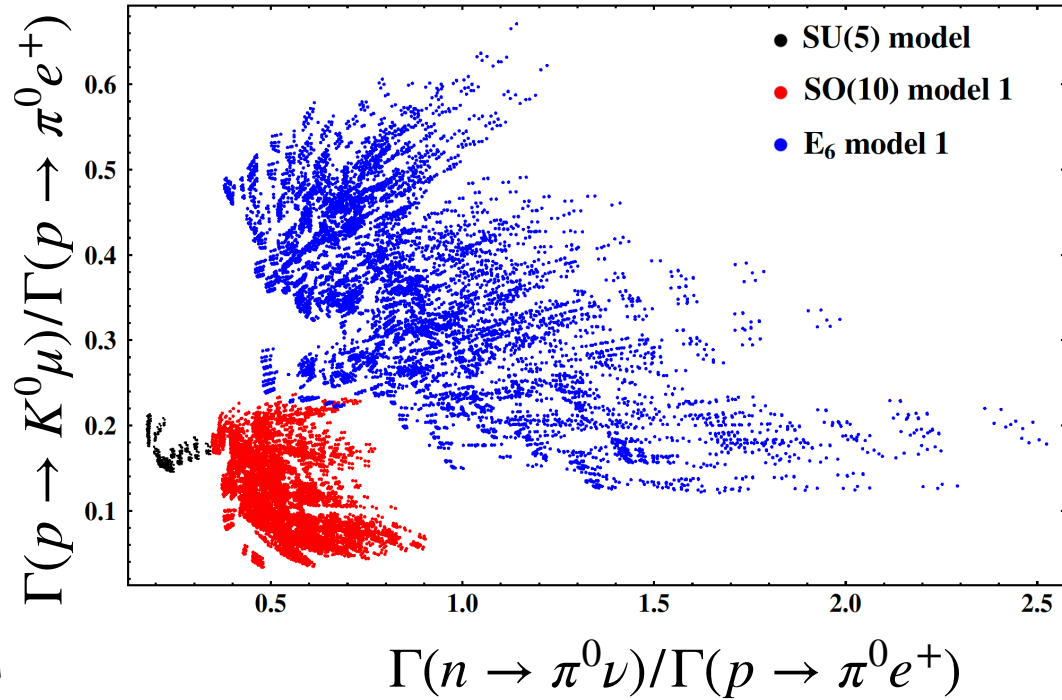
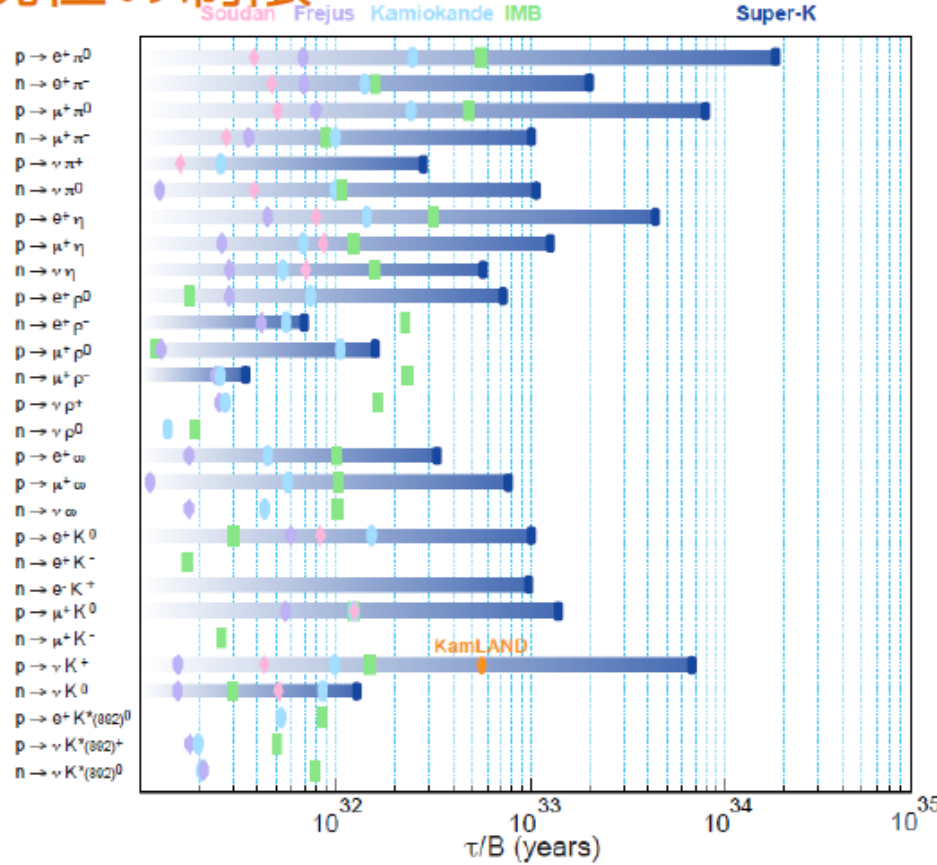
- 新しい事象再構成ツールを導入し、SKの感度向上に成功
 - 一部のデータにしか適応出来ていない、全データを使うように (Zhuojun)
- SKとT2Kと共同、パラメータ縮退を解除
 - 第1回の解析：一部のデータしか使っていない
 - 第2回は進行中：データ増やし、事象選別・系統誤差を改善

スーパーカミオカンデ：陽子崩壊



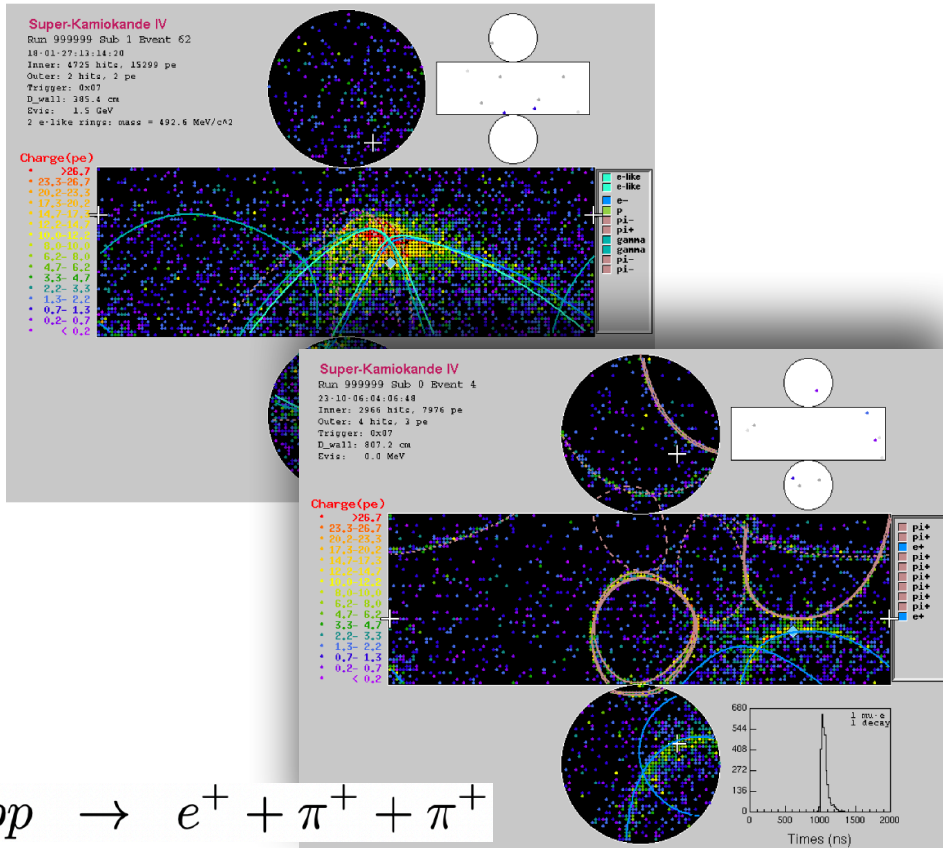
- 大統一理論 (GUT) の検証へ

現在の制限

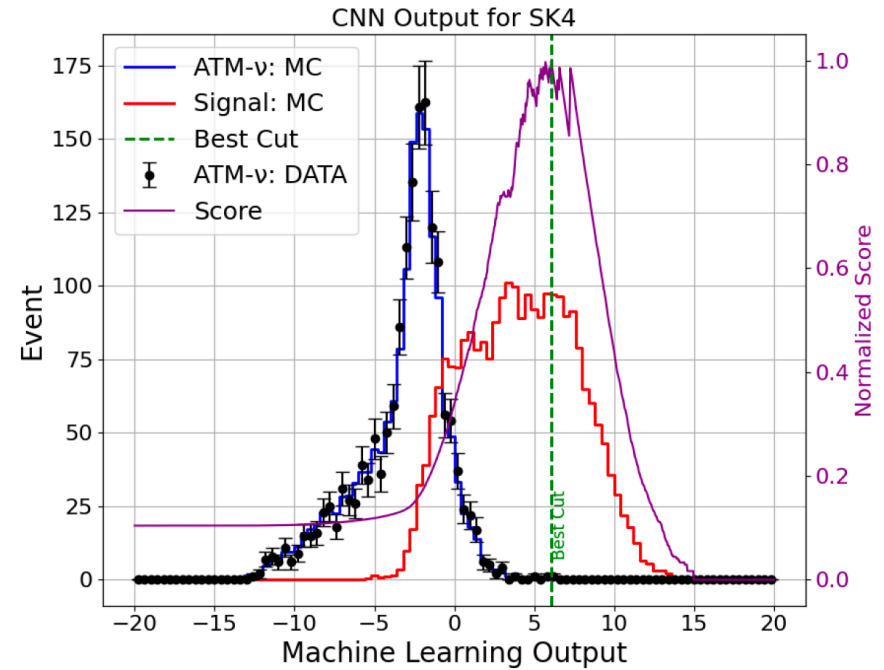


- 複数モードを観測することによって、GUTの群が決まります
 - SO(10) : $\Gamma(p \rightarrow \mu K^+) / \Gamma(p \rightarrow e \pi^0)$ と $\Gamma(n \rightarrow \nu \pi^+) / \Gamma(p \rightarrow e \pi^0)$ が低いけど、E6だとより大きい
 - →全モードを探してみる

大気ニュートリノ



Feng



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

- 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, OB)
 - 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, OB)

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

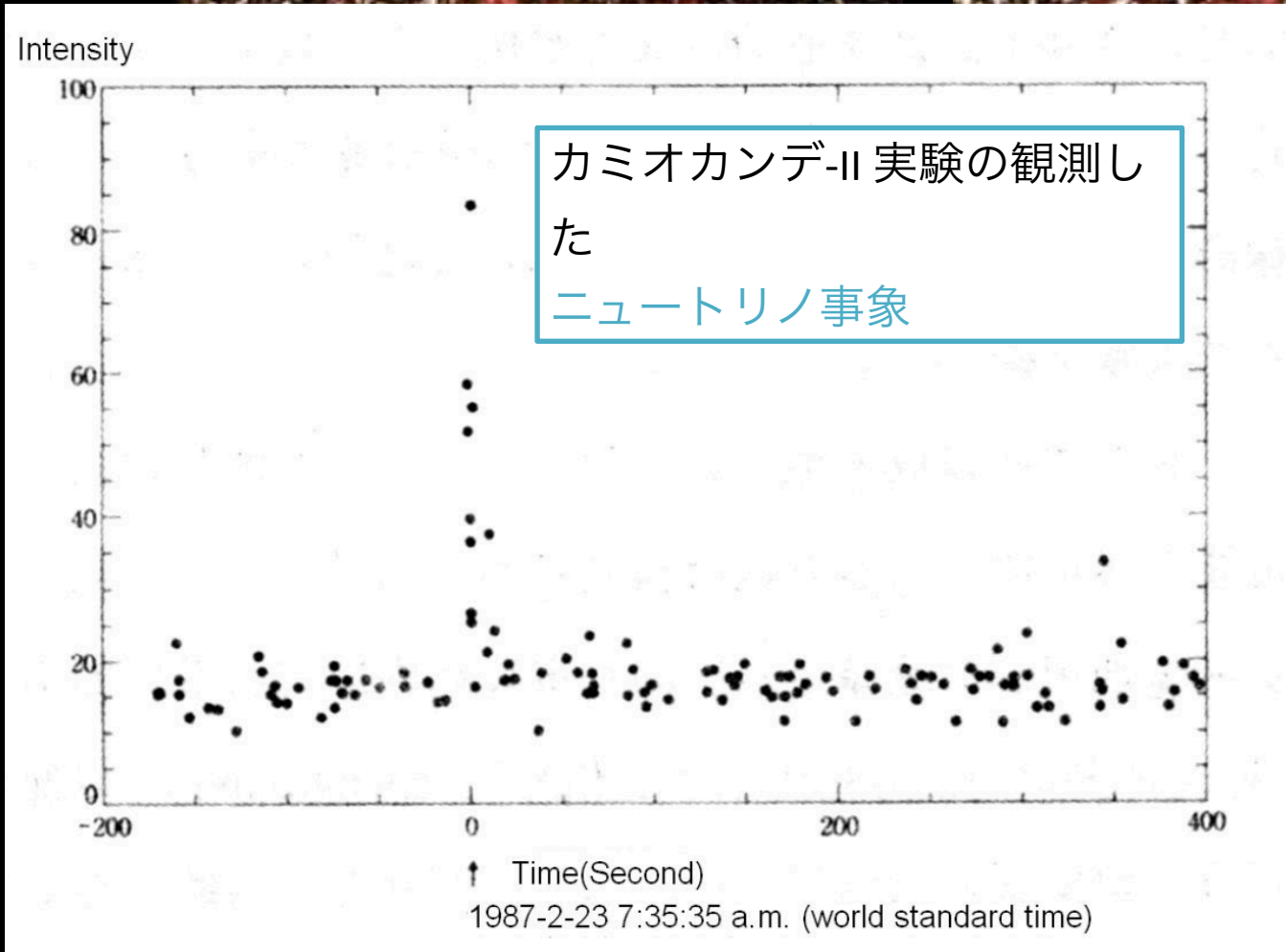
後



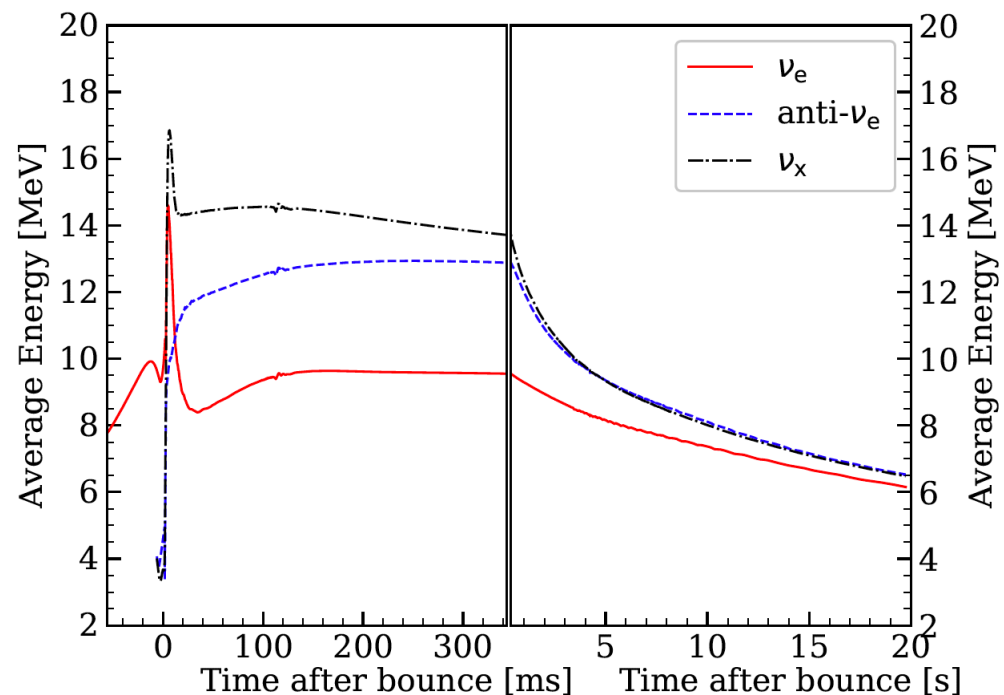
超新星爆発！

超新星爆発： SN1987A 大マゼラン雲 1987年2月24日

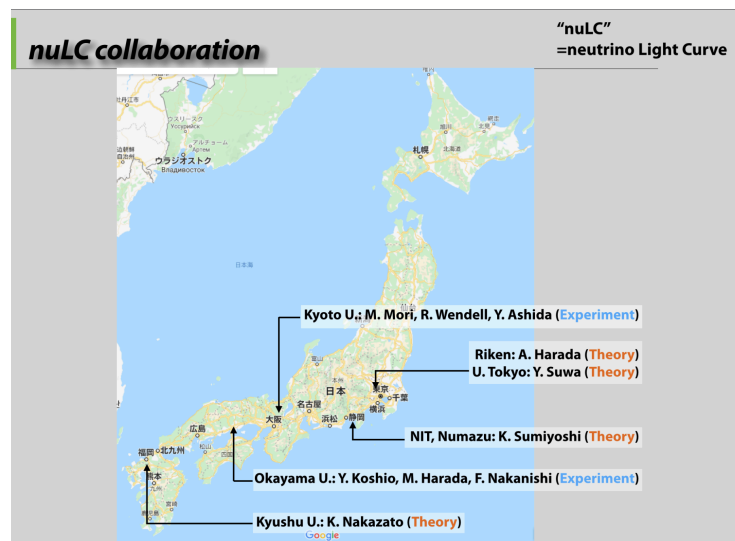
前 後



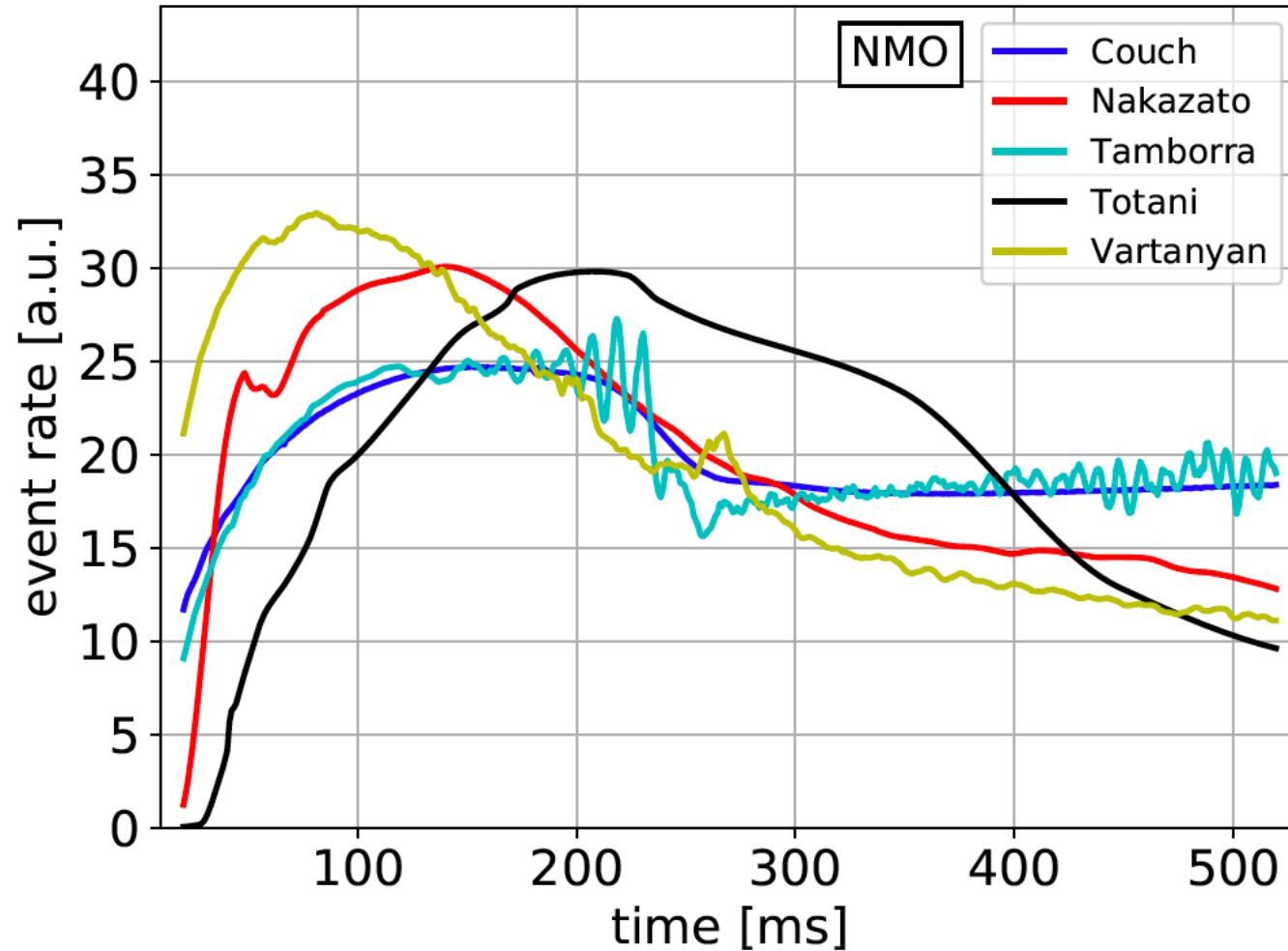
超新星爆発！



- 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

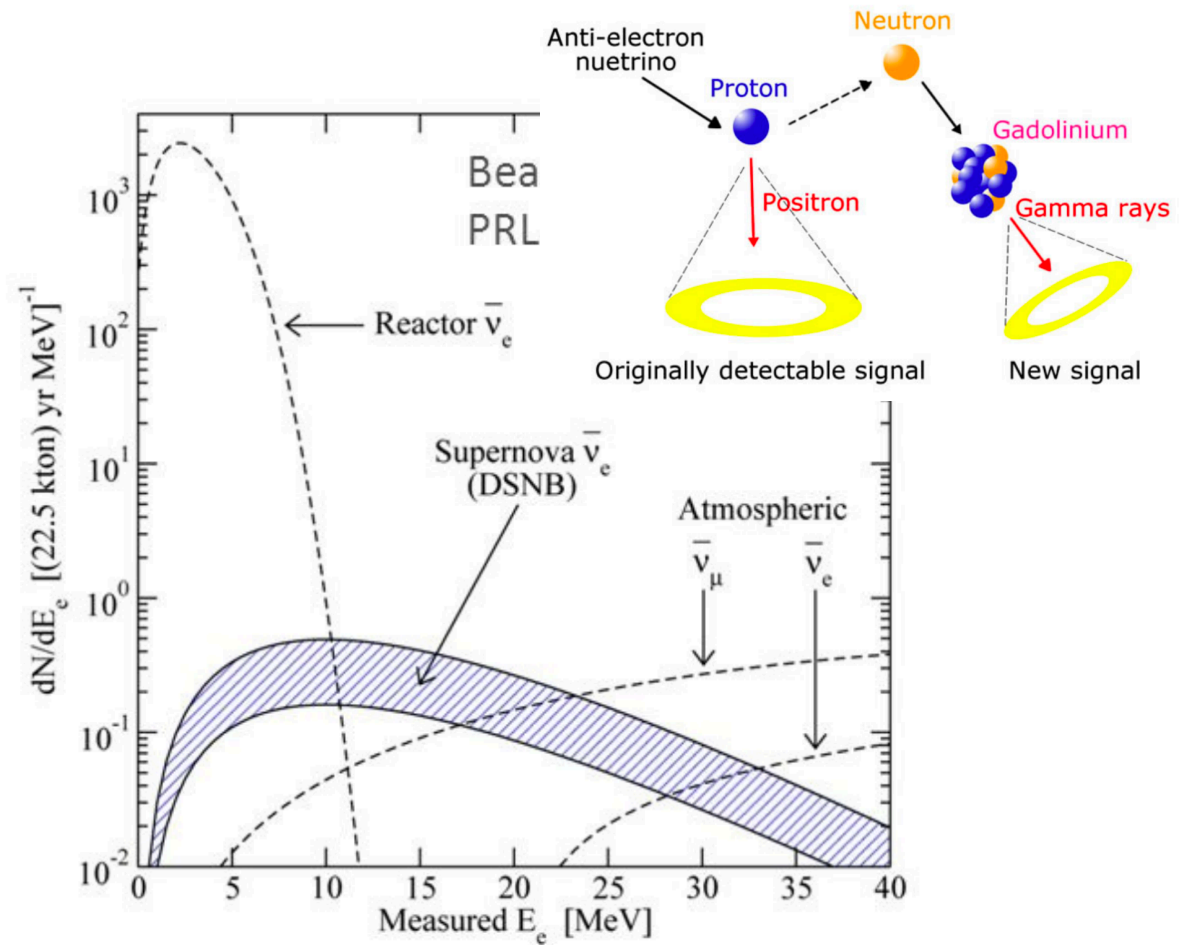
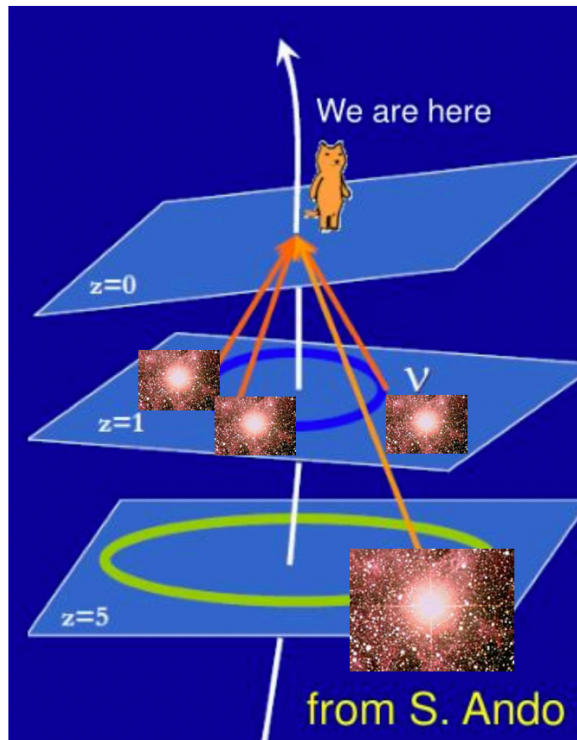


超新星爆発の研究: NuLC



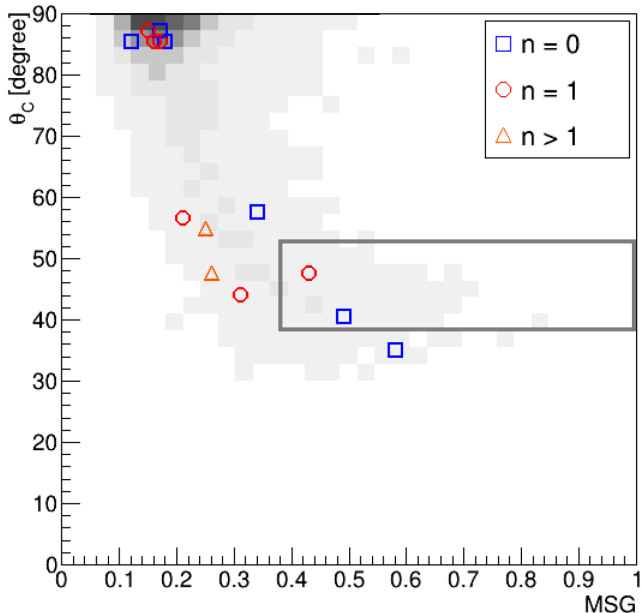
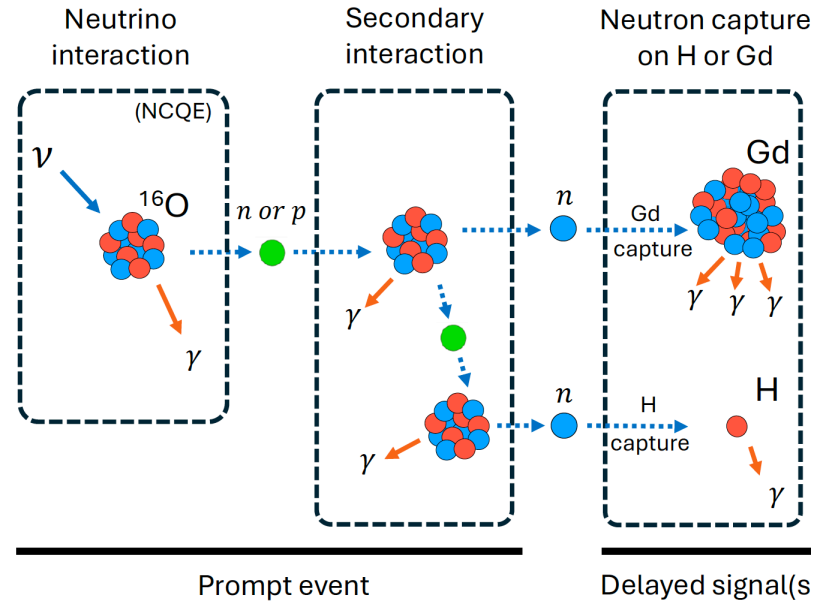
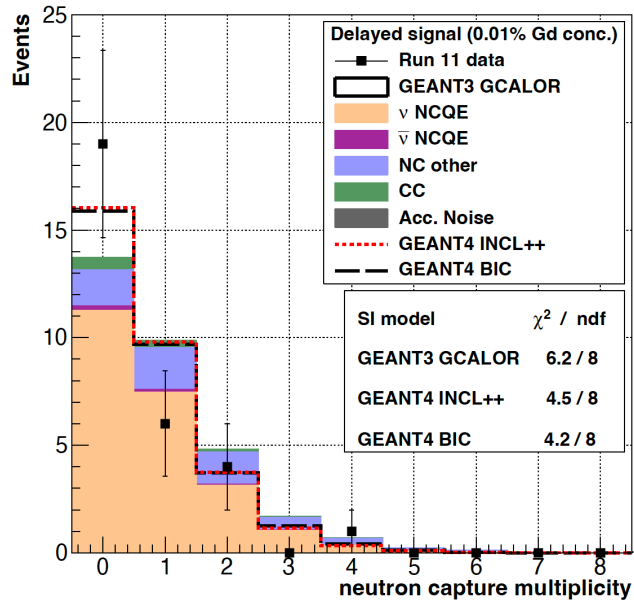
- モデルがたくさんある
- 観測情報を使って物理をどう引き出すかを課題に

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, OB)

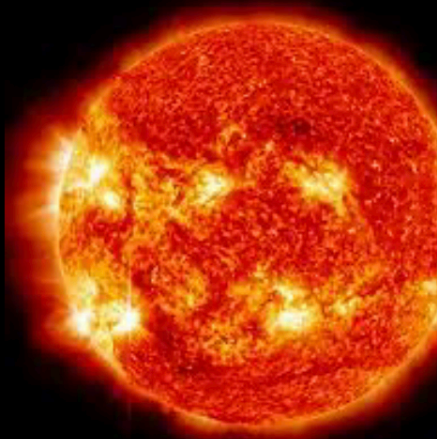
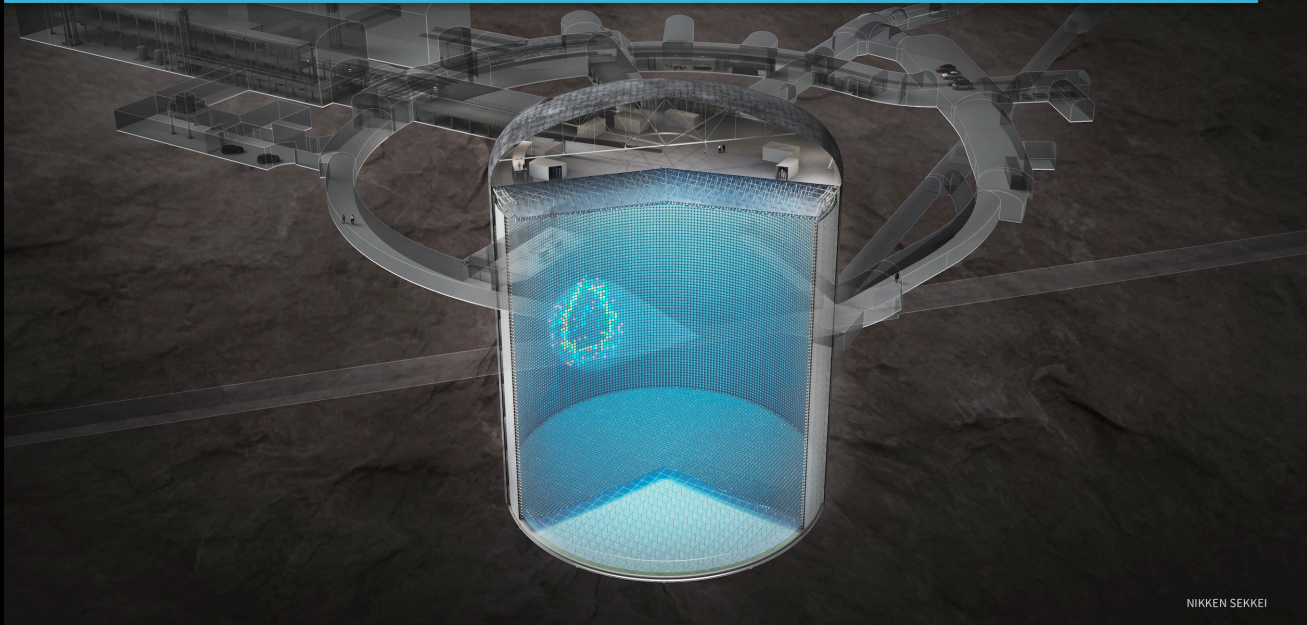
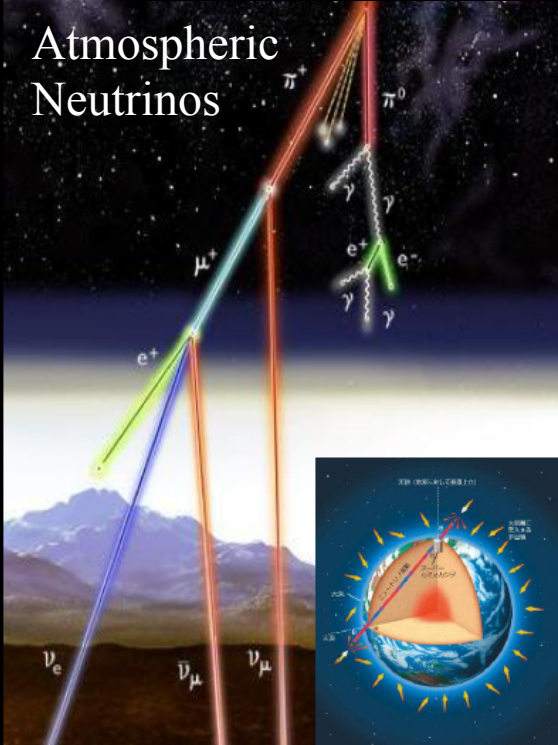
T2K NCQE Measurement : Application to DSNB Search



- 大気ニュートリノによりNCQE反応がDSNB探索のBGとなる
- T2KのビームでNCQE反応を精密に測って、DSNBのBG理解・削減へ

Hyper-Kamiokande : 次世代 SK+T2K++

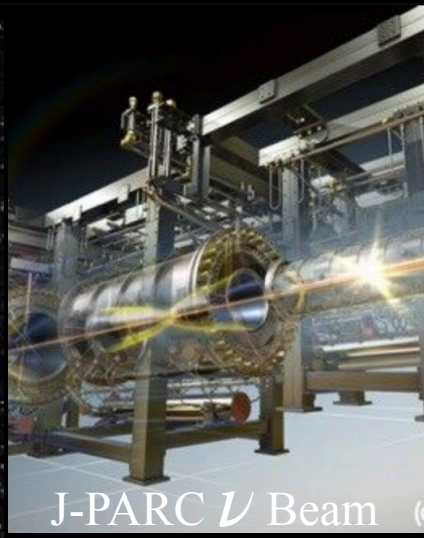
検出器を290kT+1.3 MW ν ビーム : 現在建設中



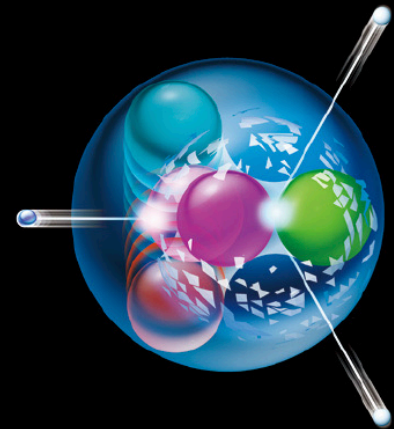
Solar neutrinos, ν_e



Supernova Neutrinos



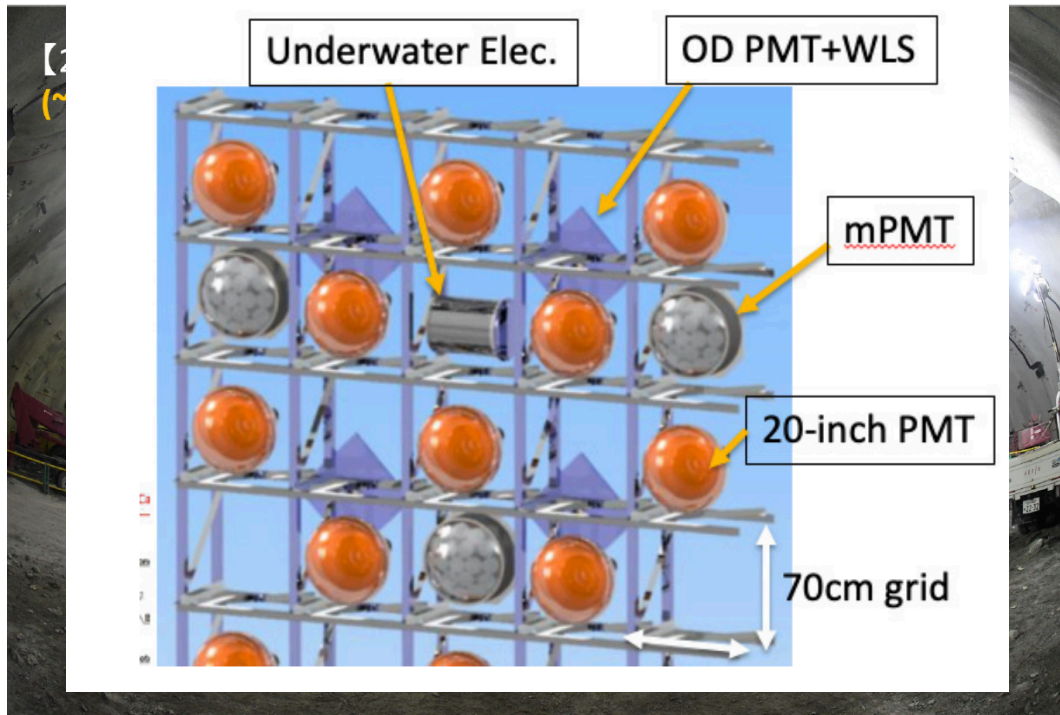
J-PARC ν Beam



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 ν 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 ν beam
from J-PARC

■ 水中のエレキ

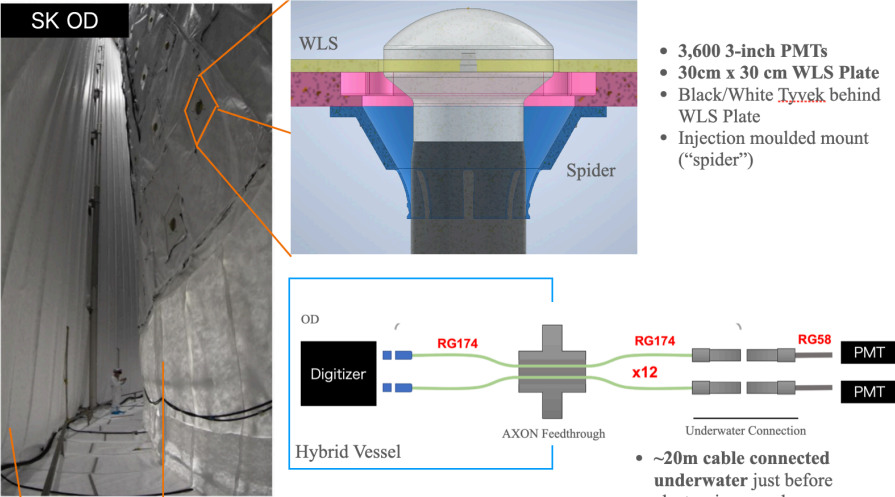
【2023/07/13】 Cavern for water purification system (~1/2 of Super-K)

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



HK FD (=後置検出) 活動

- HK ATMPD Group
 - SK (+T2K-SK) activity をHKにポートし、拡張
 - 生データから解析ツールまで実験を立ち上げる
 - HKの特徴を活かして感動を最大化
- HK Outer Detector (外部検出器)
 - Design and installation - 今年の夏から始まる！
 - Electronics testing (藤本)



- 3,600 3-inch PMTs
- 30cm x 30 cm WLS Plate
- Black/White Tyvek behind WLS Plate
- Injection moulded mount ("spider")

- Single sheet of "Black/White" (B/W) Tyvek on structure
 - Reflection into OD region, light shielding into ID
- Double layer Tyvek on floors and outer walls of detector
 - Termed "White/White" (W/W) Tyvek
 - Bounce light back into PMTs on structure

3



Meetings

- 京大 SK/HK ミーティング：
 - 毎週月曜日、09:00 から（4 1 8 号室）
- SKの日本メンバー：
 - Local ATMPD (高エネルギー) 2 周間に一回、朝火曜日朝 1 0 時
 - Local LOWE (低エネルギー) 周一回、火・木
- T2K-SK（英語）2 周間に一回、水曜日 2 2 時
- Local HK ATMPD

主にSK側で活躍しているメンバー

- 藤本 - M2 : 陽子崩壊探索、HK OD エレキ・PMT性能評価
- 中西 : 超新星ニュートリノ解析・理論、関連断面積測定

FIN

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

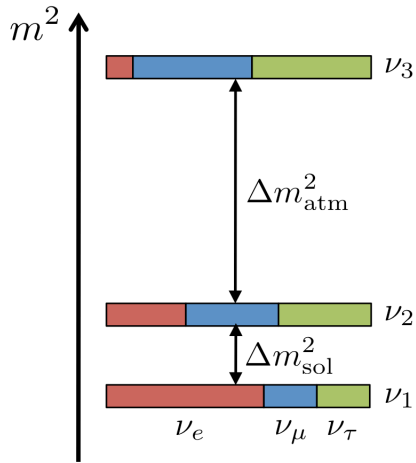
過去25年のD論と修論：

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

大気ニュートリノで測定

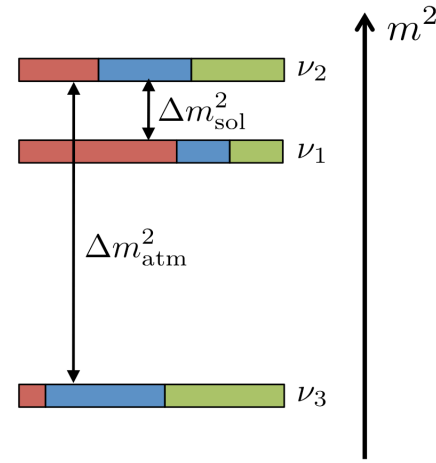
階層性が未決定

normal hierarchy (NH)



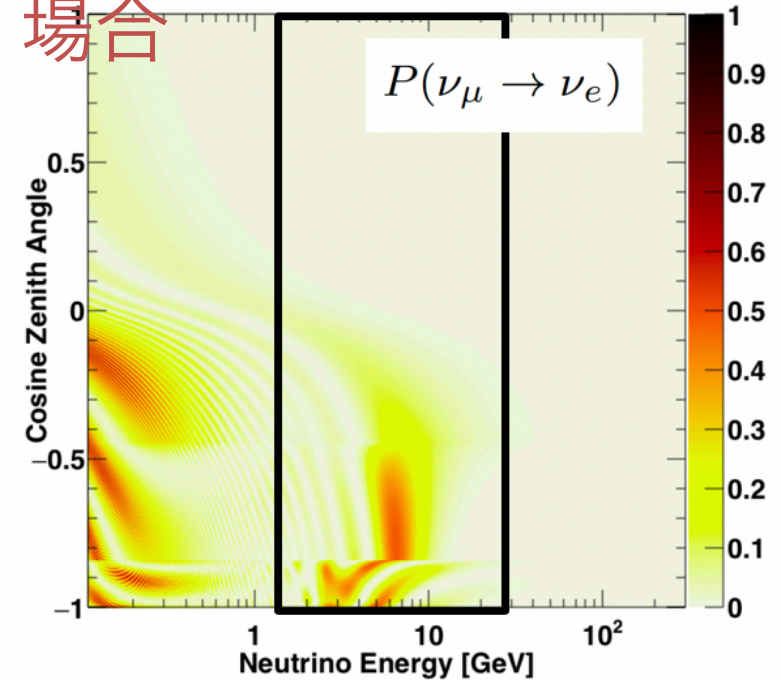
$$\Delta m^2_{32} > 0$$

inverted hierarchy (IH)



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

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

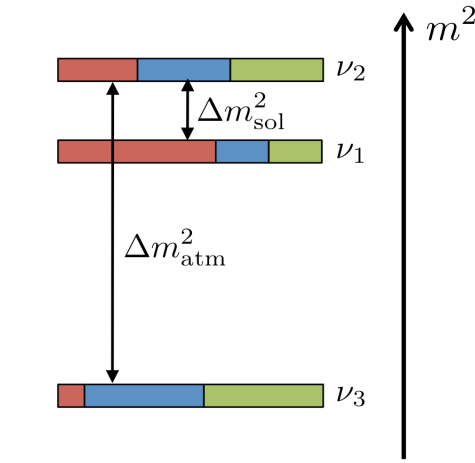
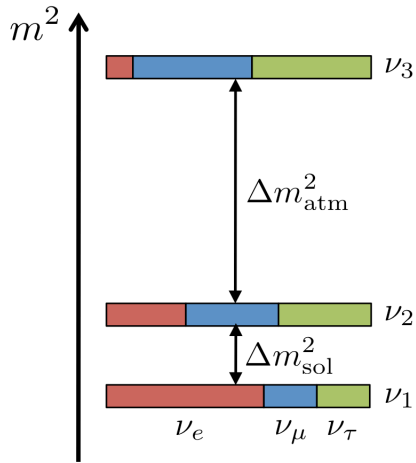
大気ニュートリノで測定

階層性が未決定

NH：反ニュートリノの
場合

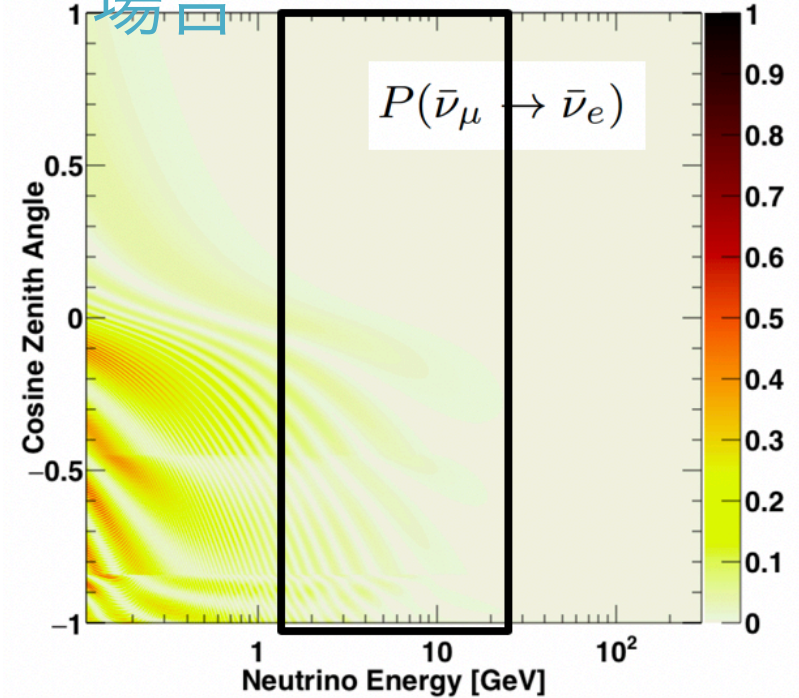
normal hierarchy (NH)

inverted hierarchy (IH)



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

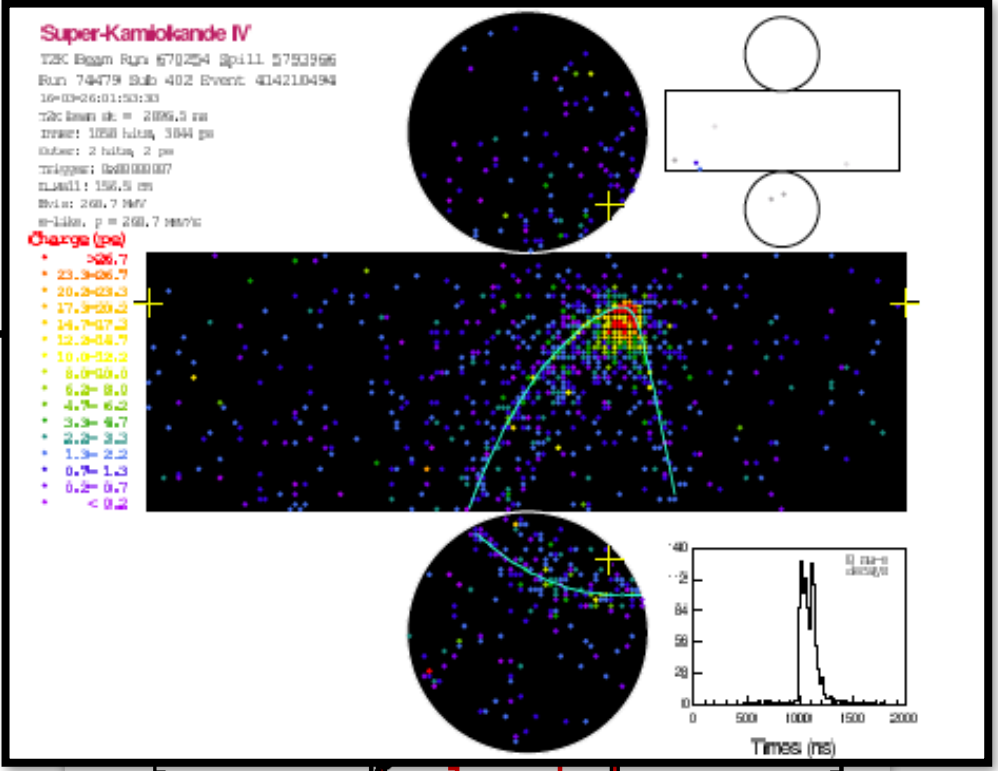
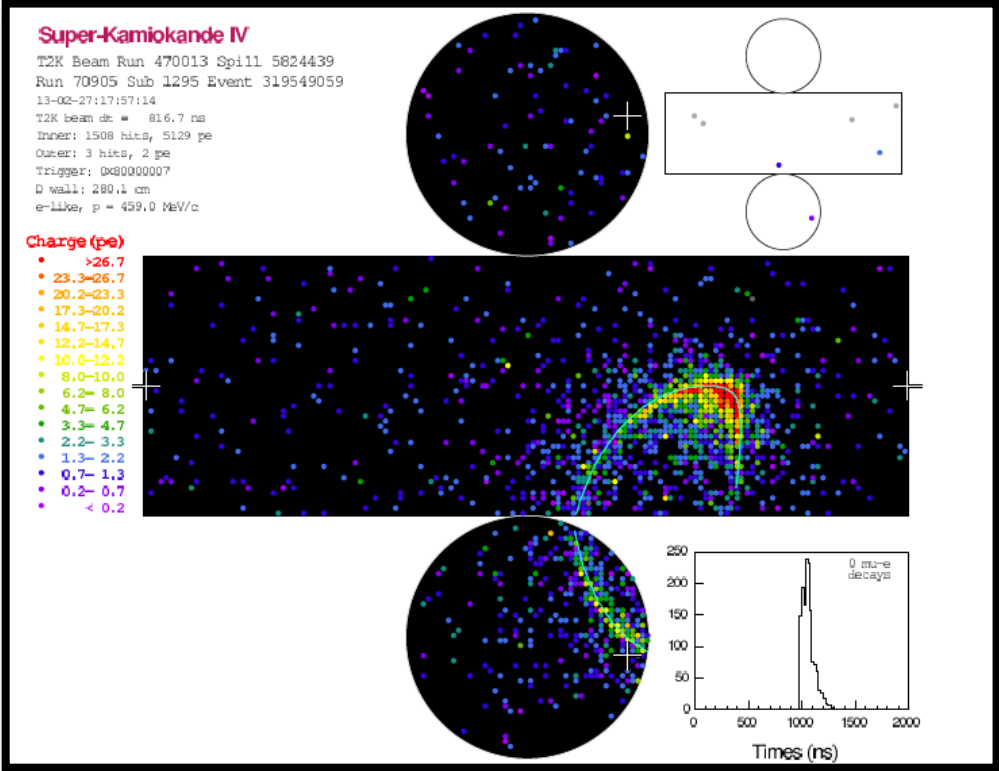
$$\Delta m^2_{32} < 0$$



- 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

SK, SK-Gd

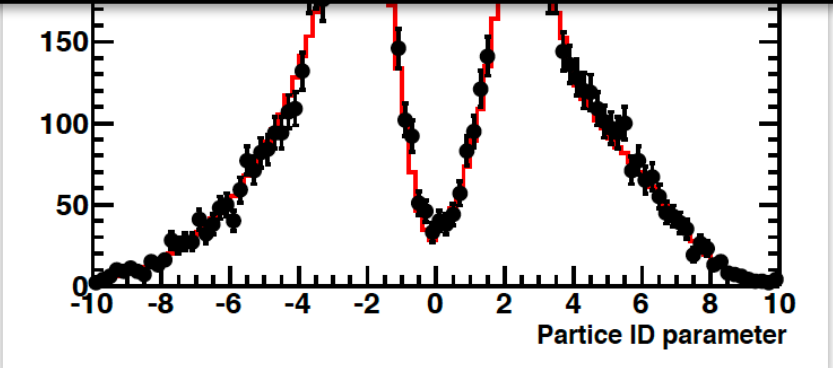
Neutrino, Antineutrino?



内部検出器 11.146 20% DMIT

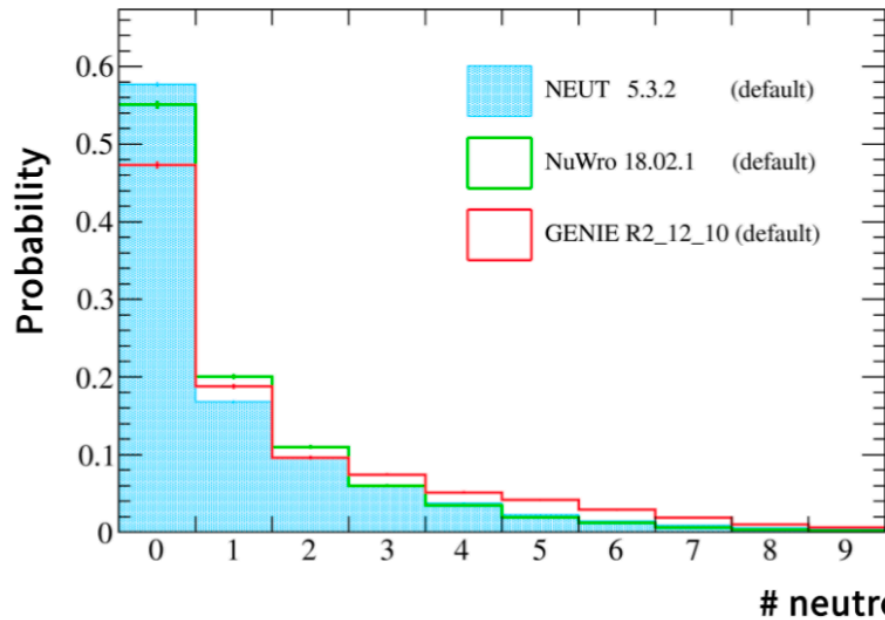
- Four Run Periods:**
 SK-I (1996-2001) SK-II (2003-2005)
 SK-III (2005-2008) SK-IV (2008-2018)
 SK-V (2019-2020) **SK-Gd (2020-**

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

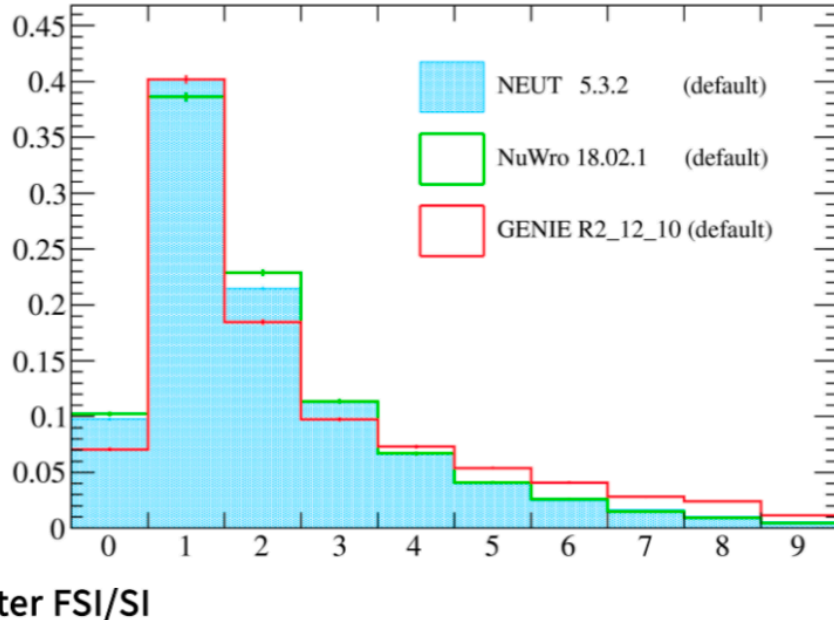


スーパーカミオカンデと中性子

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

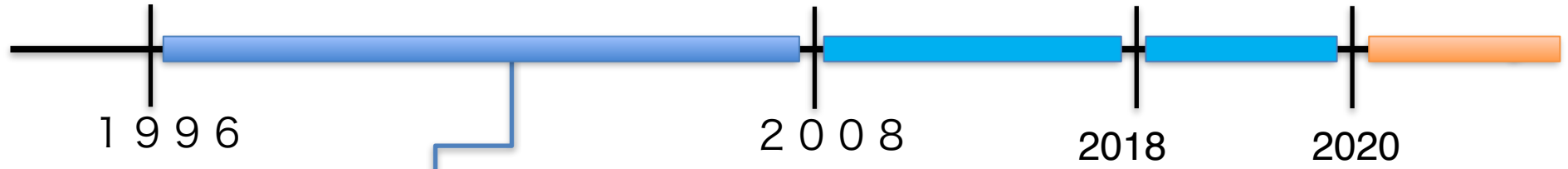


$\bar{\nu}$ -mode $\bar{\nu}\mu \rightarrow \bar{\nu}\mu$ MC



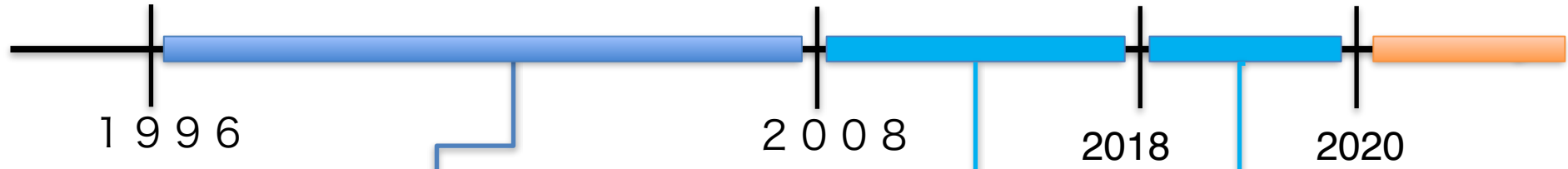
ニュートリノと反ニュートリノ識別へ

スーパーカミオカンデと中性子



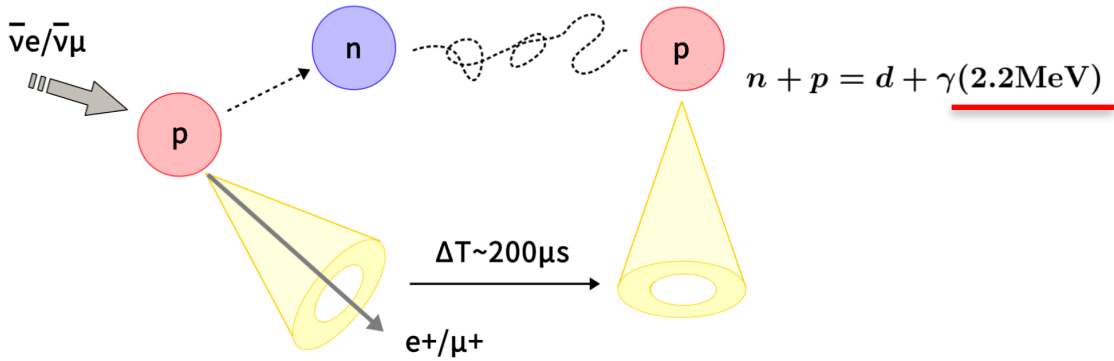
超純水：エレキの性能で、中性子情報なし

スーパーカミオカンデと中性子

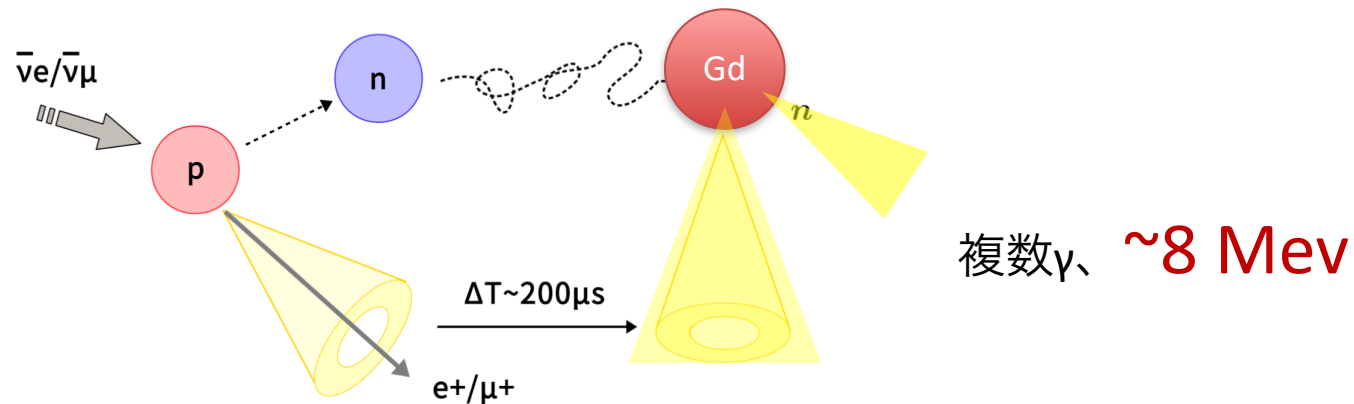
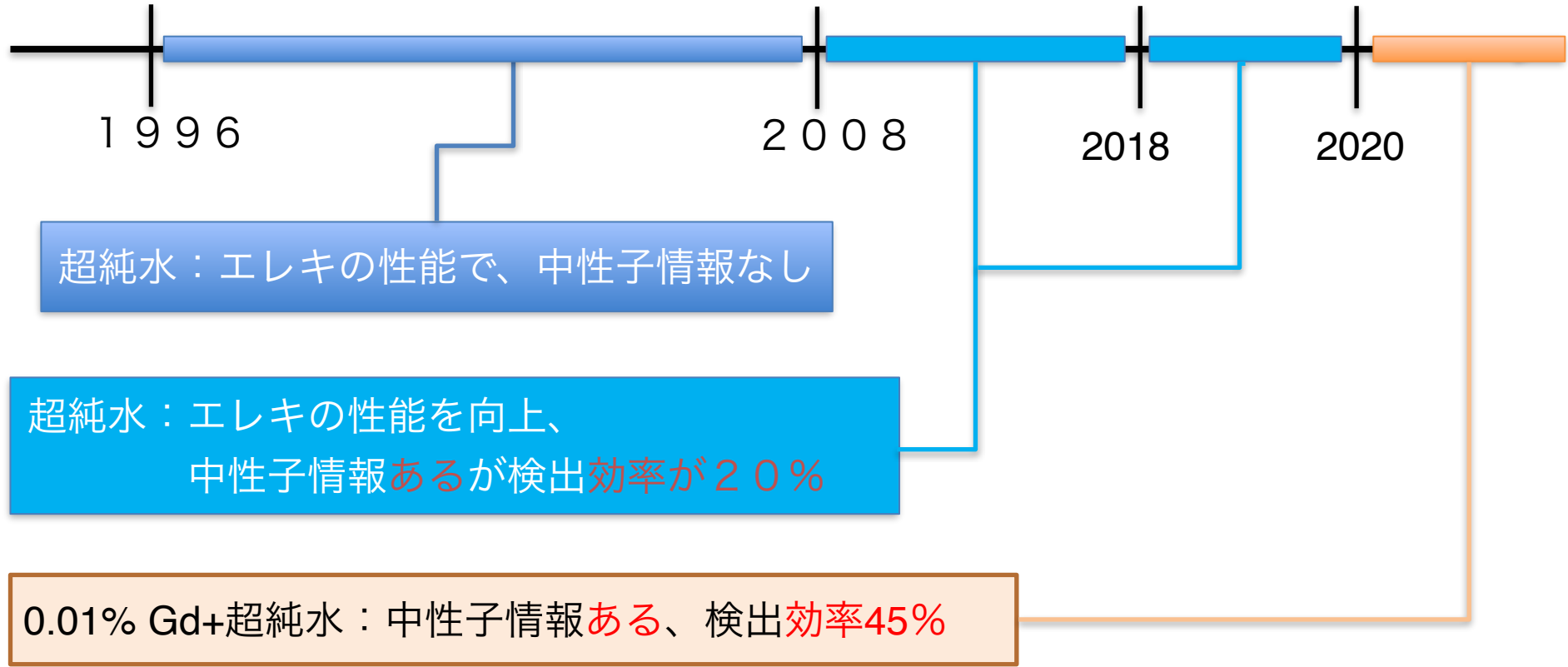


超純水：エレキの性能で、中性子情報なし

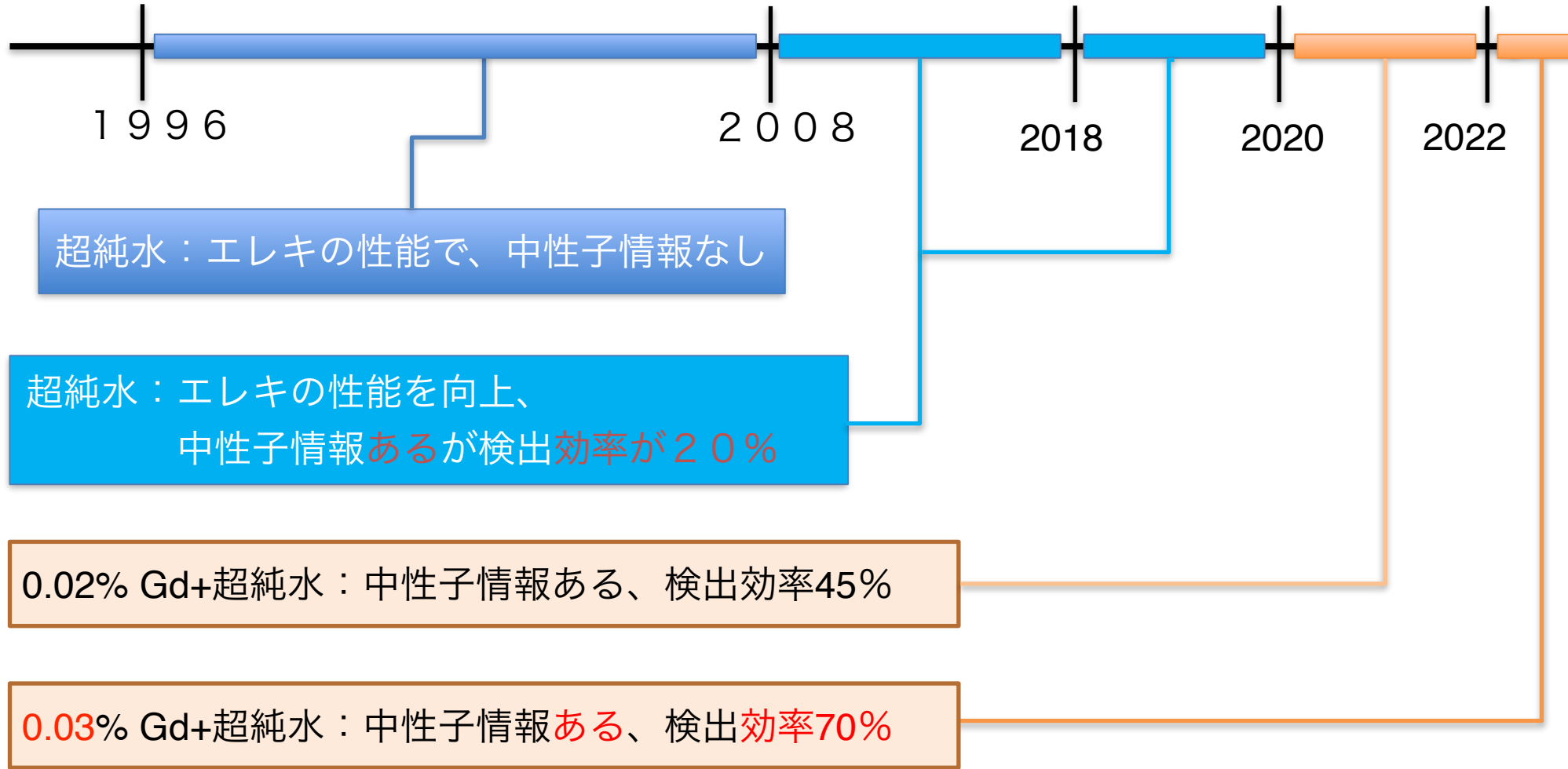
超純水：エレキの性能を向上、
中性子情報あるが検出効率が20%



スーパーカミオカンデと中性子



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

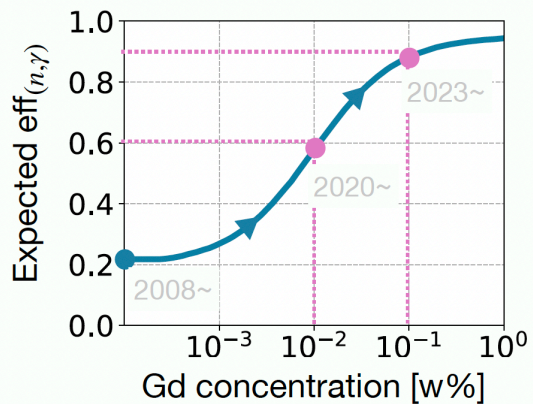
超純水：エレキの性能を向上、
中性子情報あるが検出効率が20%

0.02% Gd+超純水：中性子情報ある、検出効率45%

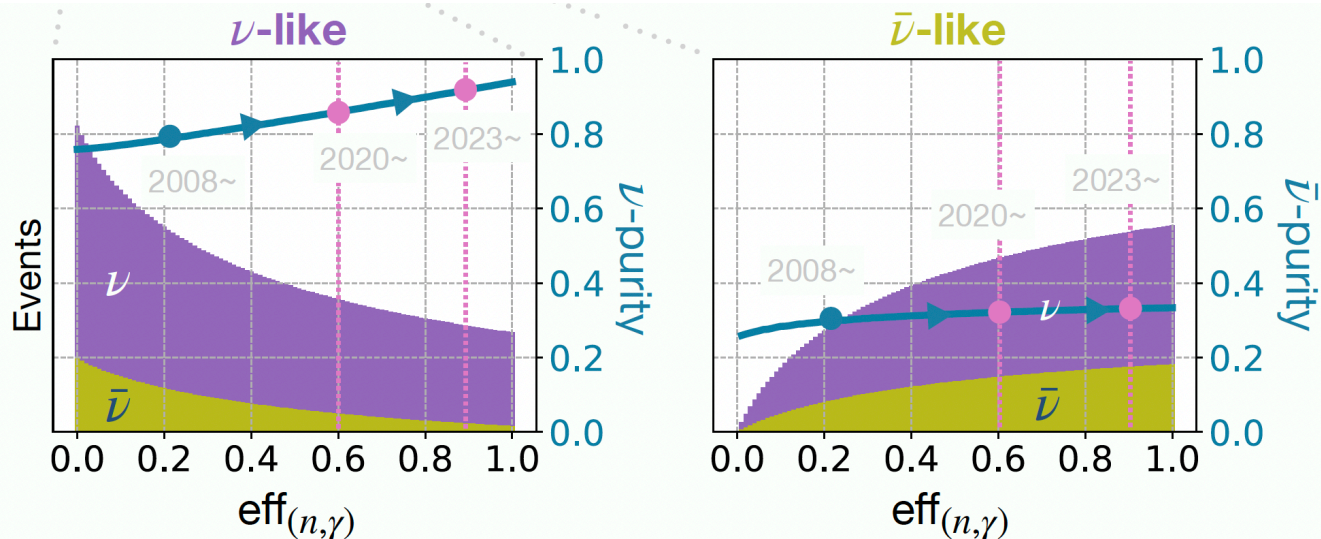
0.03% Gd+超純水：中性子情報ある、検出効率70%

嬉しいこと

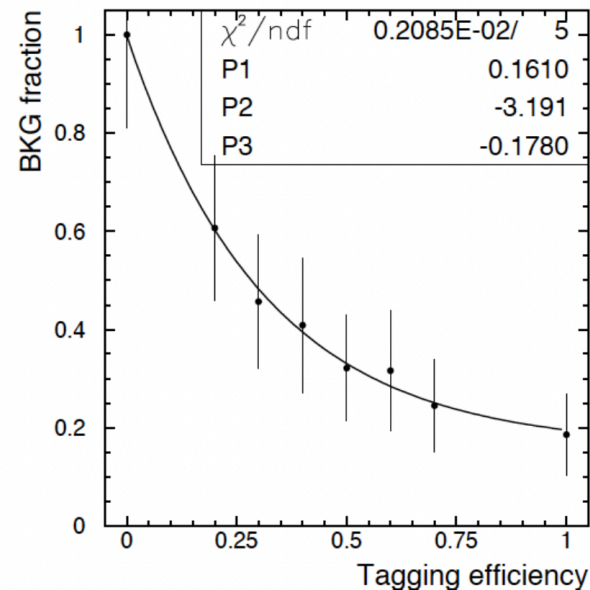
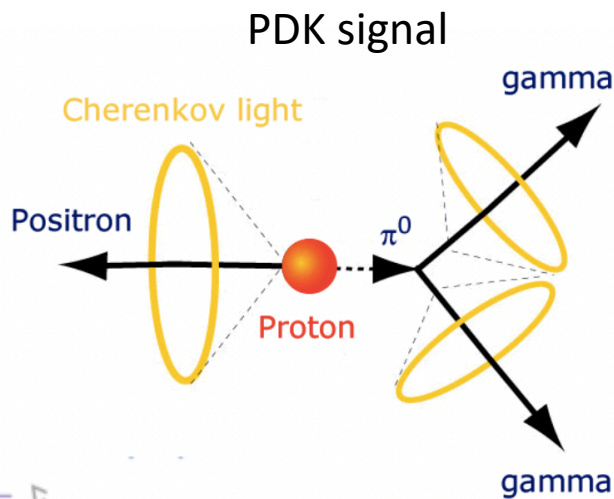
More Gd, better (n,γ) detection!



ニュートリノと反ニュートリノ識別

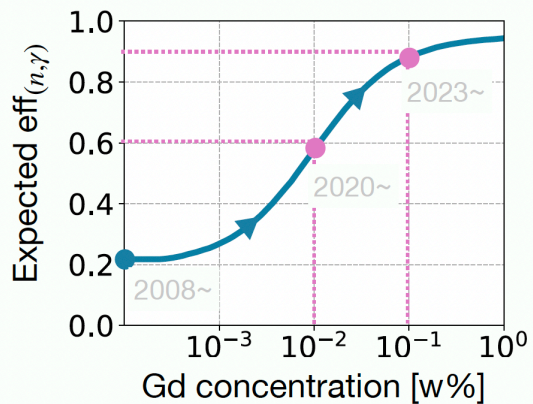


陽子崩壊BG削減



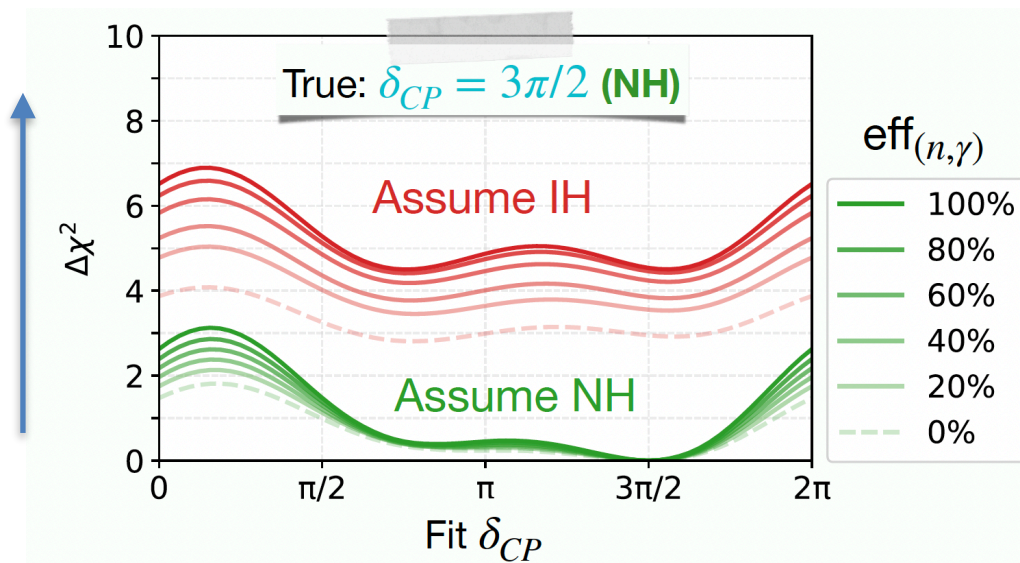
嬉しいこと

More Gd, better (n,γ) detection!



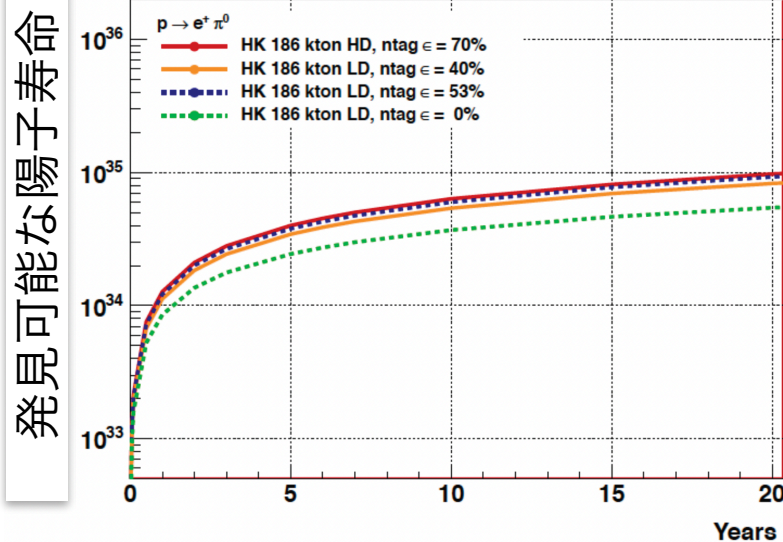
ニュートリノと反ニュートリノ識別

質量階層への感度



陽子崩壊BG削減

Impact of Neutron tagging efficiency



T2K (T2K-SK)

T2K-SK : 今後の研究

Sample		Uncertainty source (%)			Flux \otimes Interaction (%)	Total (%)
		Flux	Interaction	FD + SI + PN		
1R μ	ν	2.9 (5.0)	3.1 (11.7)	2.1 (2.7)	2.2 (12.7)	3.0 (13.0)
	$\bar{\nu}$	2.8 (4.7)	3.0 (10.8)	1.9 (2.3)	3.4 (11.8)	4.0 (12.0)
1Re	ν	2.8 (4.8)	3.2 (12.6)	3.1 (3.2)	3.6 (13.5)	4.7 (13.8)
	$\bar{\nu}$	2.9 (4.7)	3.1 (11.1)	3.9 (4.2)	4.3 (12.1)	5.9 (12.7)
1Re1de	ν	2.8 (4.9)	4.2 (12.1)	13.4 (13.4)	5.0 (13.1)	14.3 (18.7)

検出器応答に由来の誤差

フラックス \times 断面積の誤差

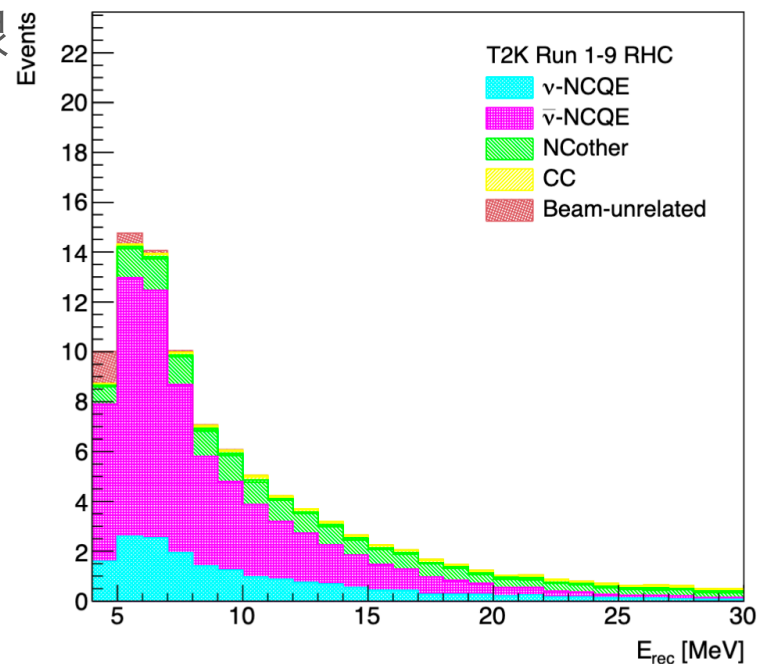
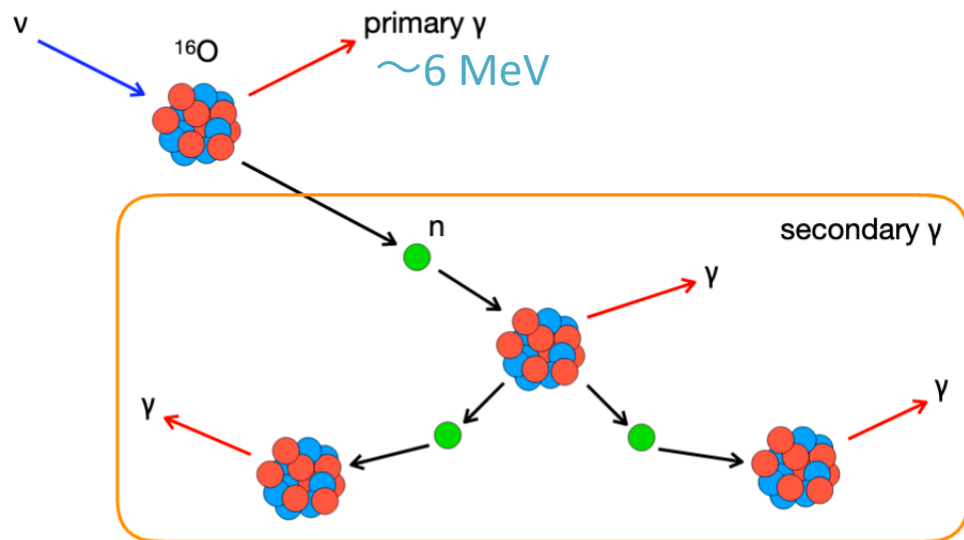
- 検出器のモデルや再構成アルゴリズムに由来ある系統誤差が現在、他の誤差と同程度になっている
- SKでの系統誤差評価を考え直し、削減する必要!
- 今までに大気ニュートリノに頼ったけど、低レベルのcalibrationデータの導入を視野に入れて、より根本的な検出器の理解を目指す
 - simulationの高精度化、再構成アルゴリズムの最適化を

T2K-SKで中性カレントを測定 (低エネルギー)

Licheng

- 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准弾性散乱

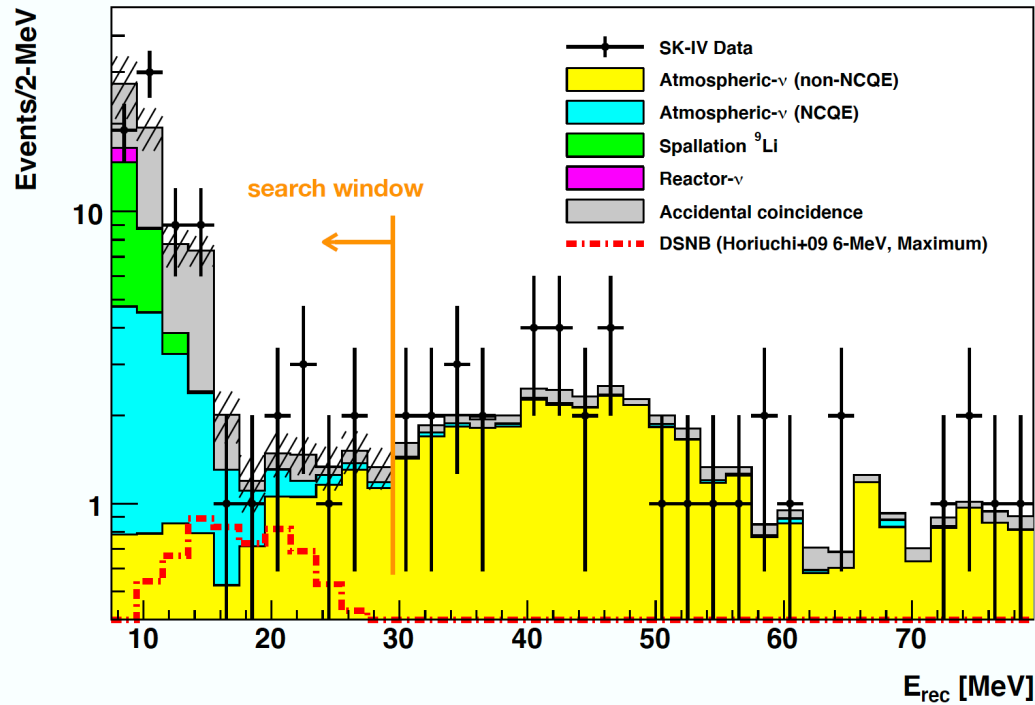
- 世界初めて、反ニュートリノで測定予定
- 超新星背景ニュートリノのBG過程に制限



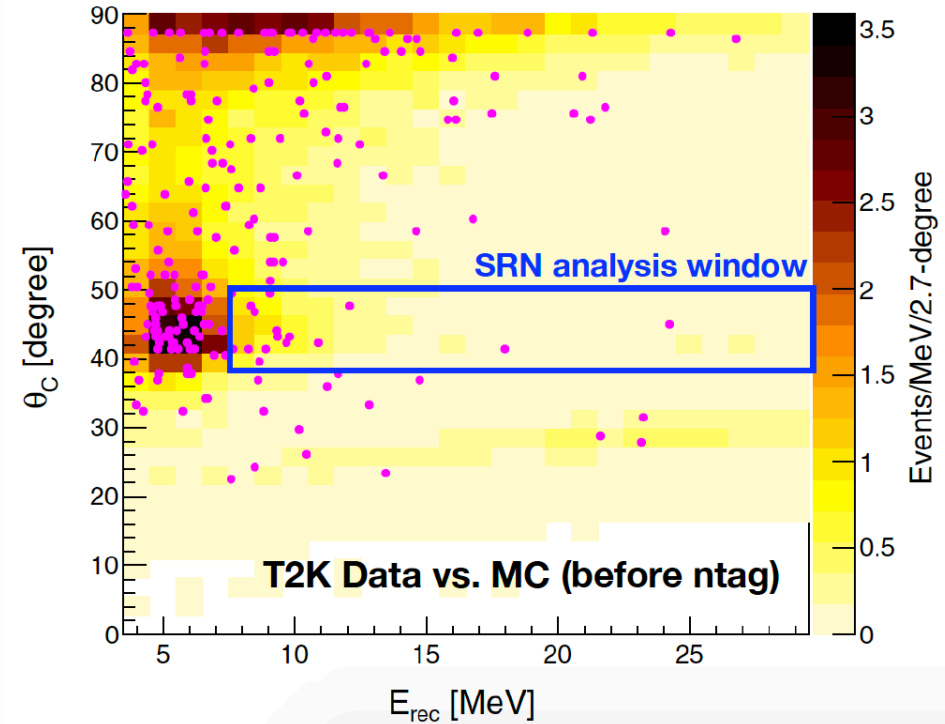
- 原子核物理と素粒子物理両方楽しめる
- 今後は
 - 中性子情報を導入
 - NC 1π 散乱に制限??
 - 統計量を増やす

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

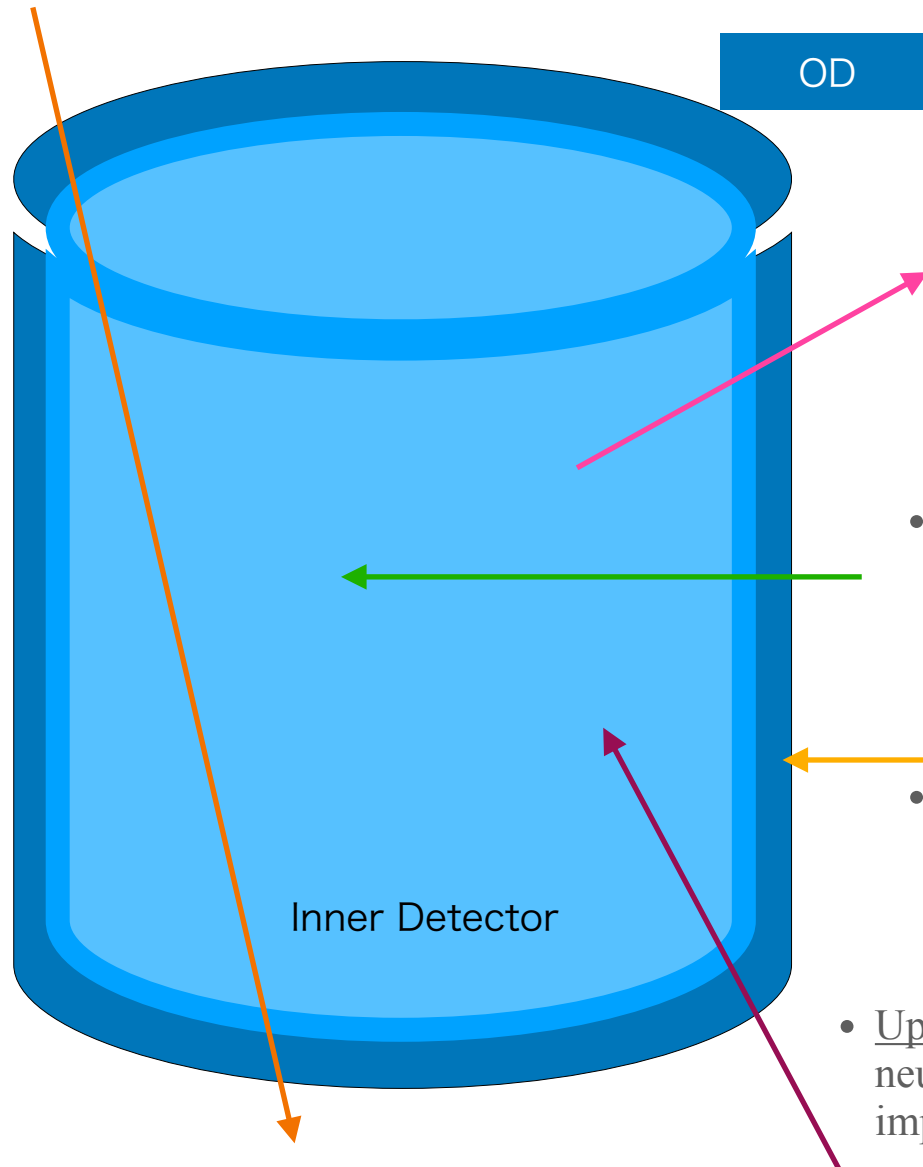
スーパーカミオカンデの課題

- 2020年7月初めてGdをSKへ溶かした
 - 0.02% Gd → neutron efficiency ~50%
- 2022年にGdを0.03%濃度までに増やす予定
 - 効率~70%
- 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
 - 。。。

Hyper-K

Hyper-K Outer Detector : Roles and Importance

- Cosmic ray muon background (45 Hz ~ 1 million/day) must be tagged by the OD and removed from physics analysis



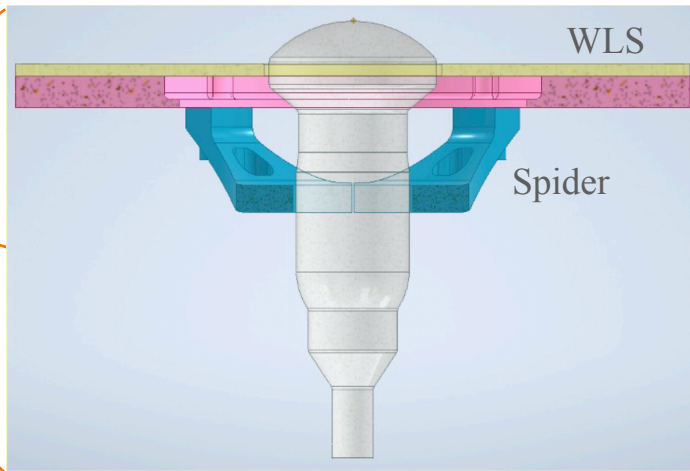
- Fully-contained and Partially Contained event Separation: Determine if particles originating in the ID remain therein (best resolution) or exit

- Veto neutrino-induced rock events from J-PARC beam: Removes beam-induced background from analysis samples

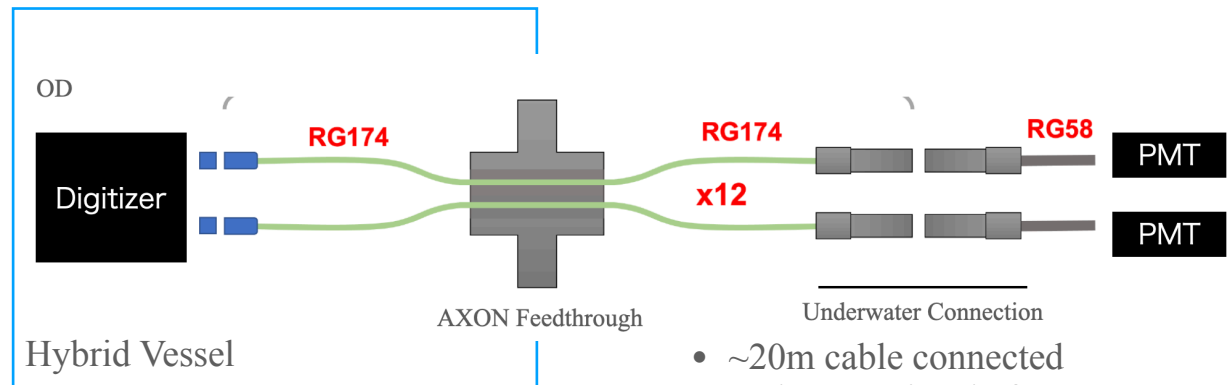
- Passive shield against incoming neutron and gamma radiation

- Upward-going muon neutrino tagging identifies neutrino interaction in the rock around HK; important for various oscillation physics

Hyper-K Outer Detector



- 3-inch PMTs
- 30cm x 30 cm WLS Plate



- ~20m cable connected underwater just before electronics vessel

- Single sheet of “Black/White” (B/W) Tyvek on structure
 - Reflection into OD region, light shielding into ID
- Double layer Tyvek on floors and outer walls of detector
 - Termed “White/White” (W/W) Tyvek
 - Bounce light back into PMTs on structure

■ 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 ν +ビーム ν (江)

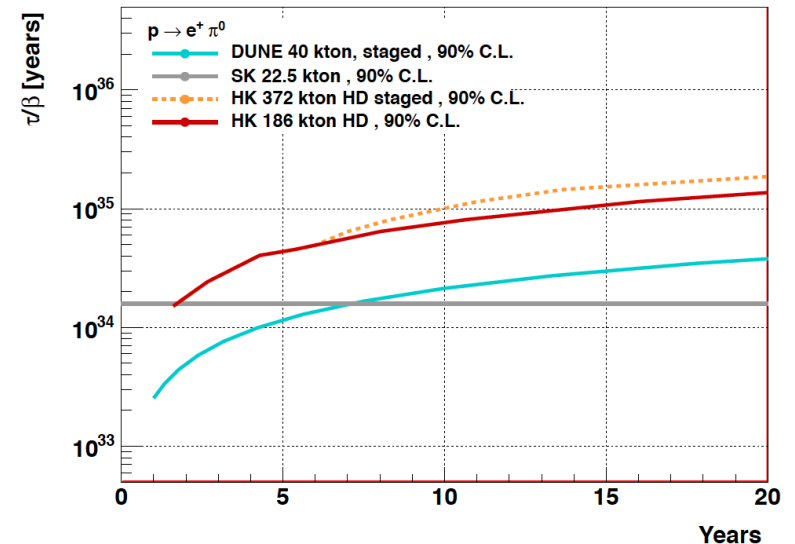
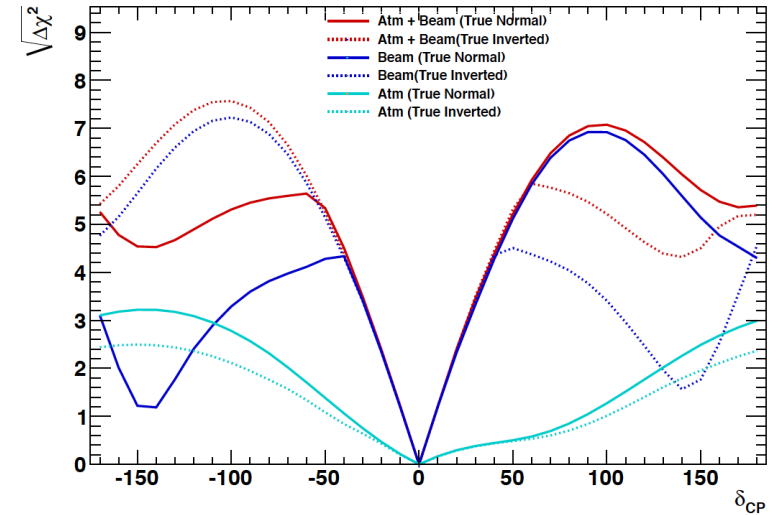
■ T2KとSKで出来ない物理も可能

- 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

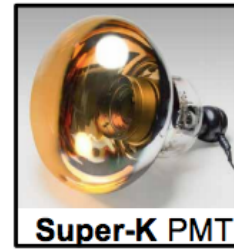
- 光検出器の評価 (東大：須田)
- 光検出器のAMP開発 (江)

■ 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

- 現在HKの穴掘りが進んでいる
 - 実験開始を～4年後!
 - 建設に参加可能性あり
 - SKより高い測定制度が要求
- 検出器の最終最適化が現在進行中
- PMTの選出に伴う評価
 - QE、タイミング、評価
 - Light Collector?
- 前置検出器関係, 現在のものをどうHK時代に持っていくか?
 - 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



Super-K PMT
Venetian Blind



50cm HQE
Box&Line PMT



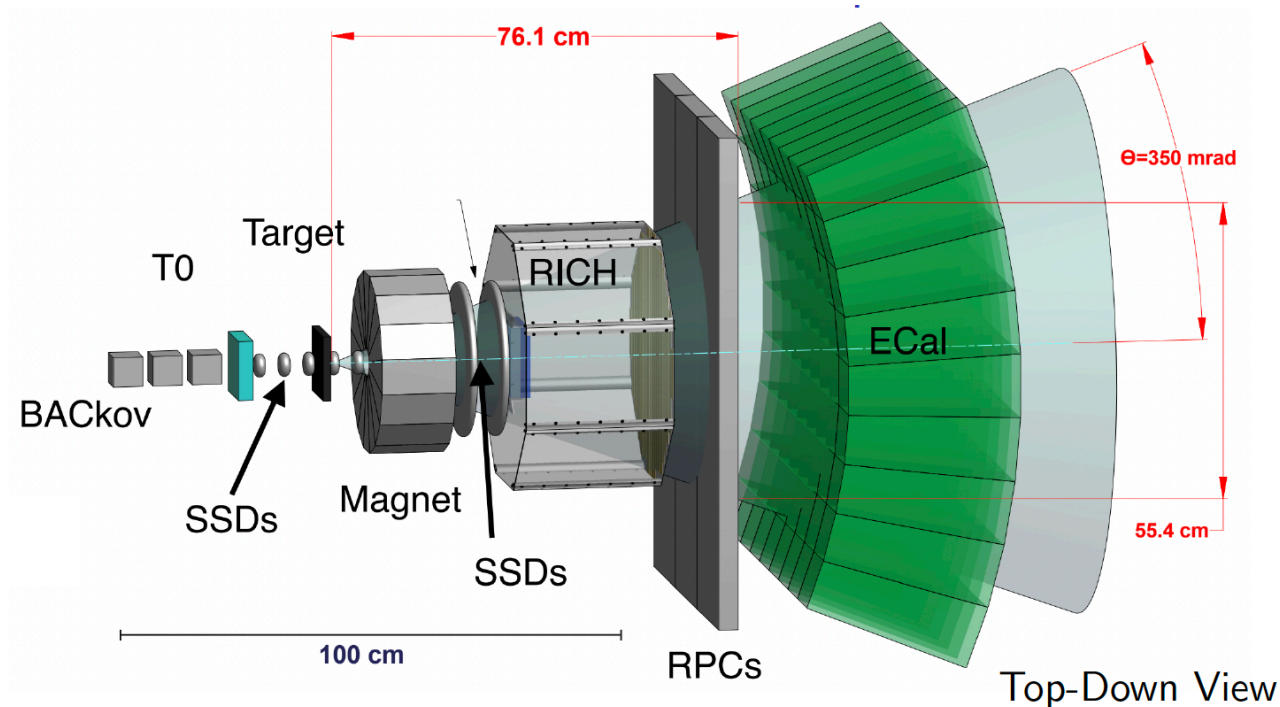
MCP-PMT
フー君

関連研究

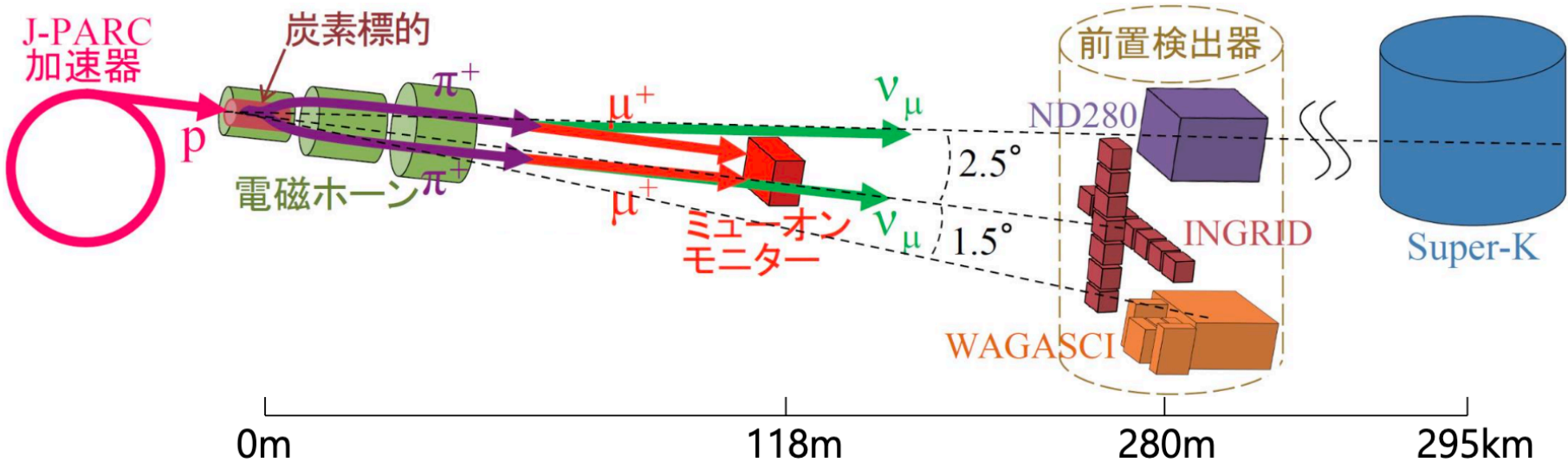
EMPHATIC

Experiment to Measure the Production of Hadrons At a Test beam In Chicagoland

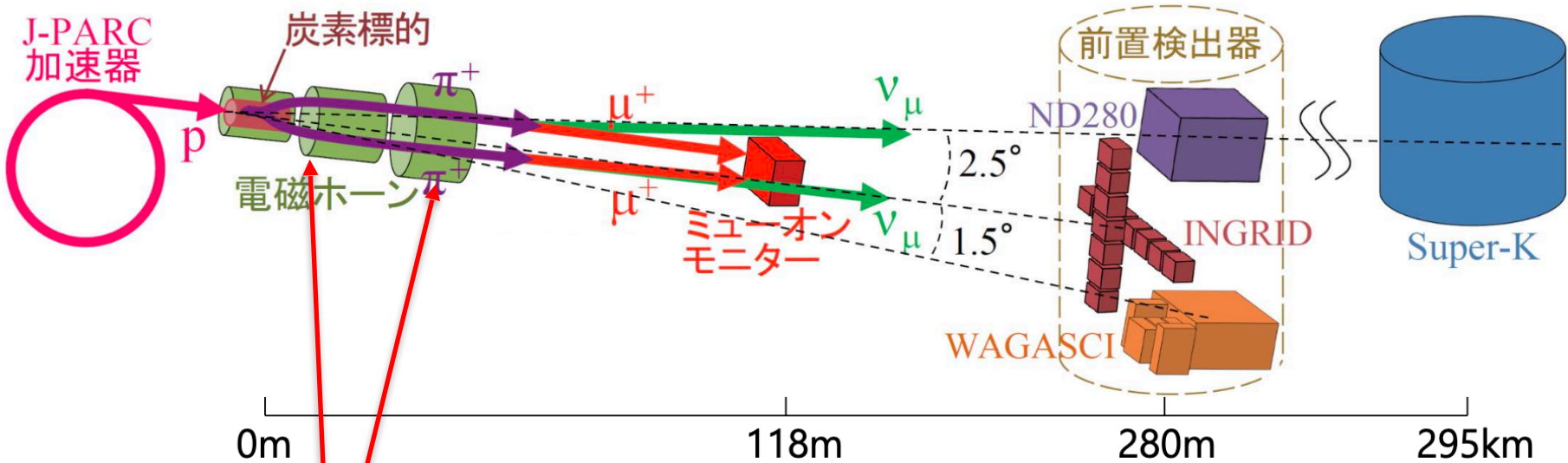
- Table-top-sized experiment for hadron production measurements at FNAL Test Beam Facility (FTBF)
 - Focus on $p < 15 \text{ GeV}/c$ with p, π, K on a variety of targets:
 - C, Fe, Al, H₂O, Ti, Ca, B, BN, B₂O₃...
- Aim for **10%** measurements of hadron production and scattering
- First phase with 100mrad acceptance finished in 2023, data being analyzed now
-



ニュートリノフラック予測：

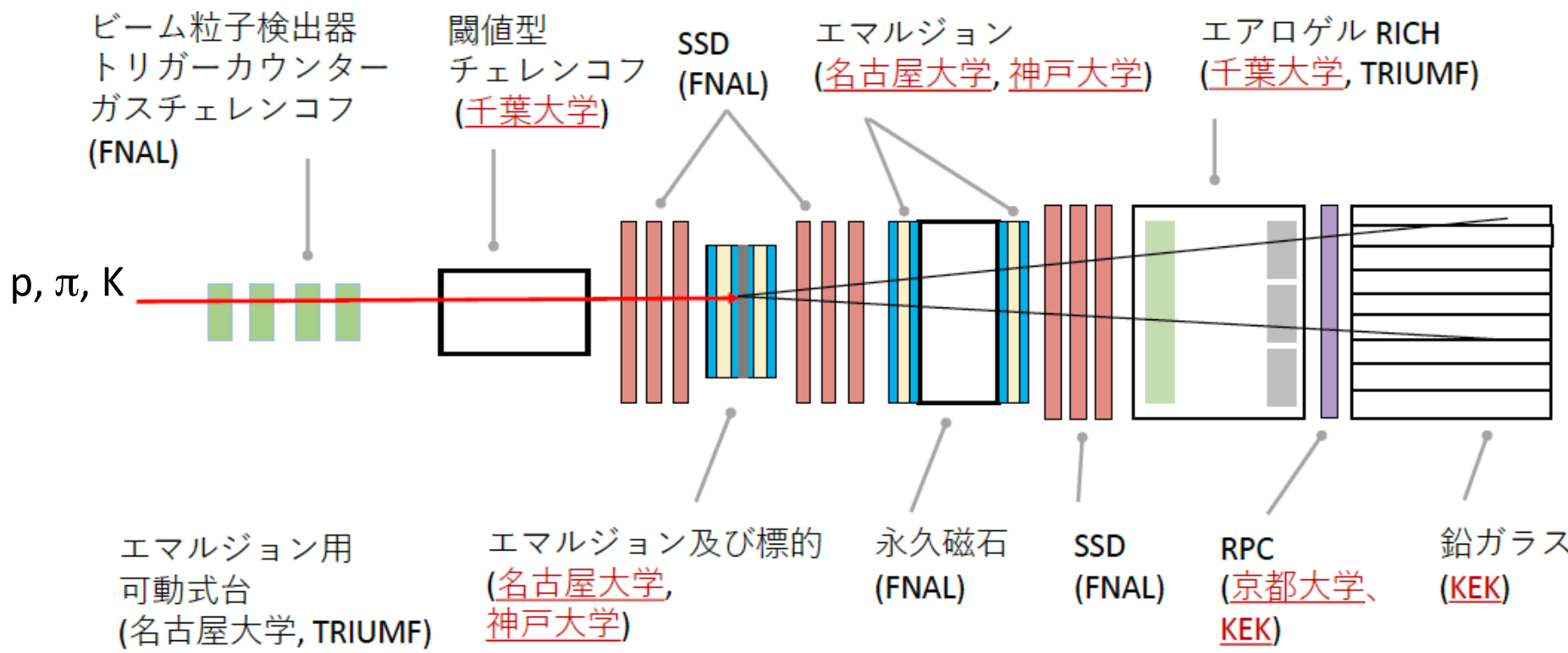


ニュートリノフラック予測：



- 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)

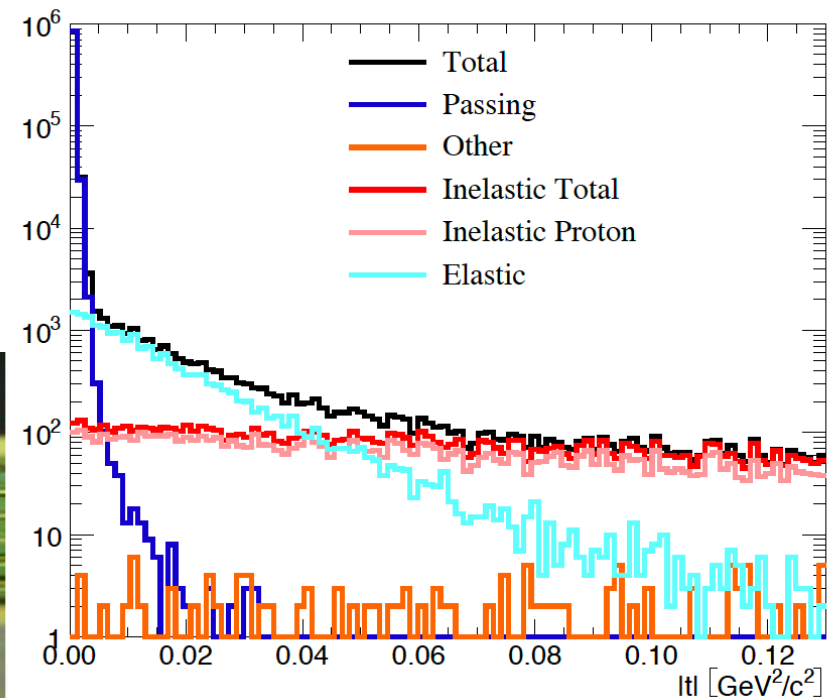
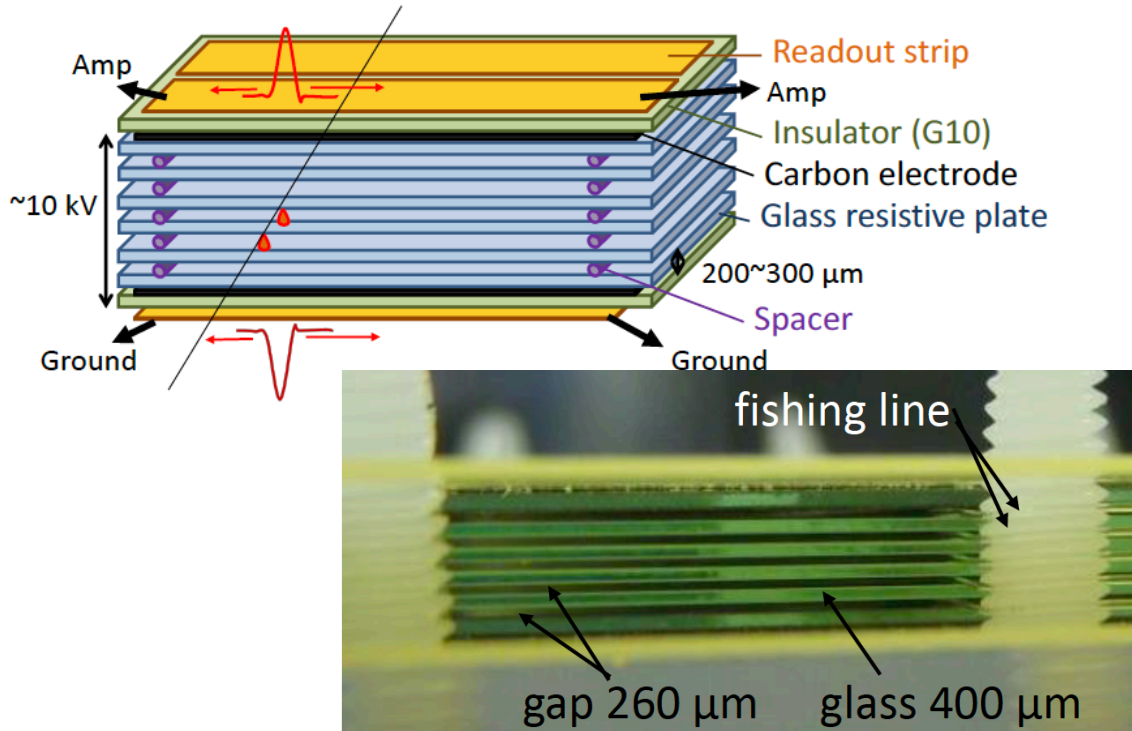


- 陽子ビームと様々な標的を使って精密にハドロン散乱・生成断面積を計る
 - FNALの1~120 GeV/c の 粒子

EMPHATIC :

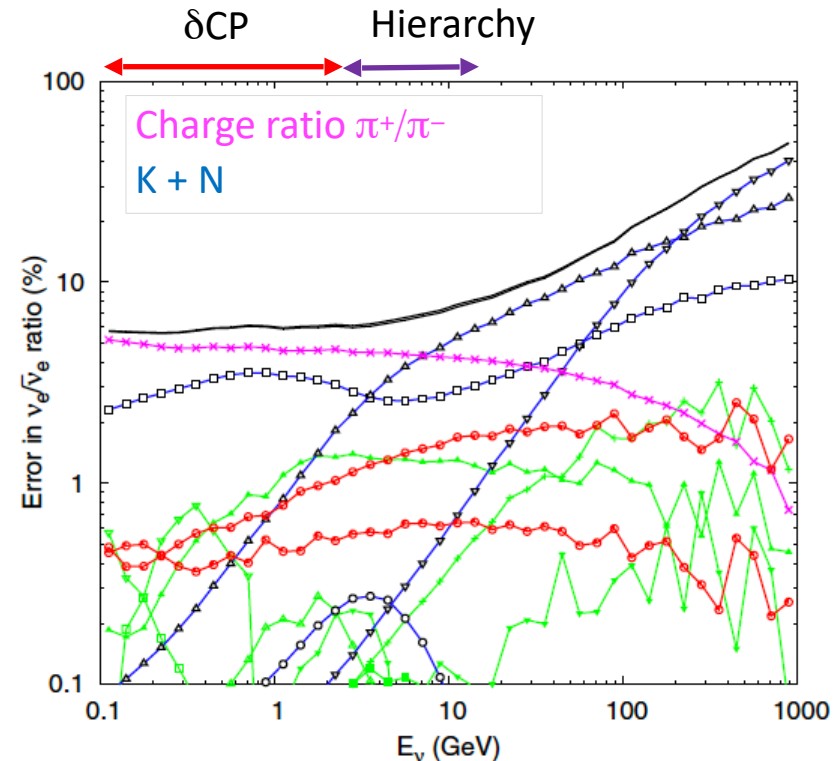
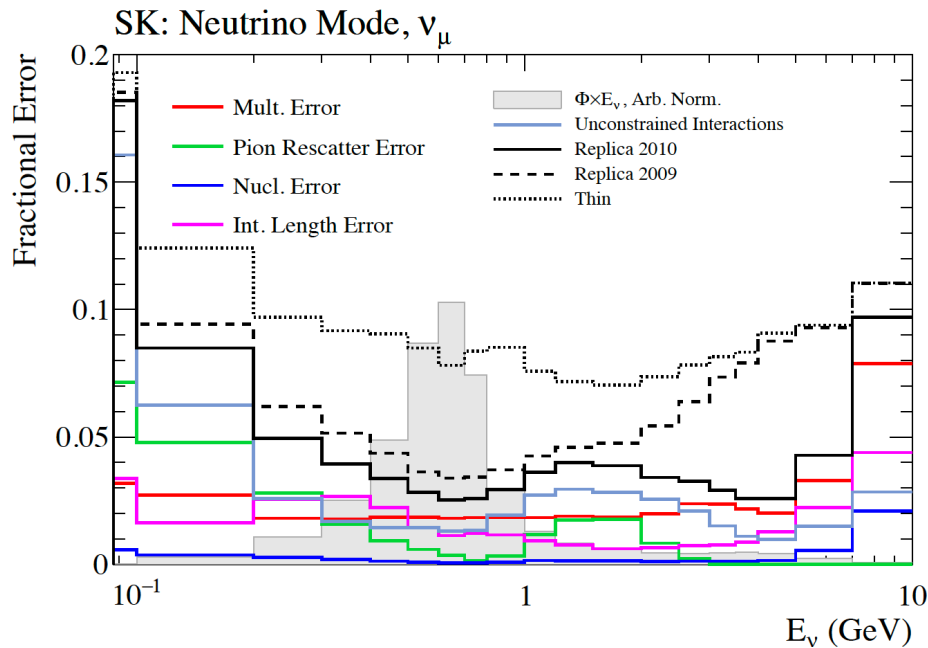
- 京大は、
 - 阪大のE50グループと共同でRPCを作成予定
 - 今年度は新たに **5台**
 - 課題：
 - シミュレーション構築とデータ解析

Multi-gap Resistive Plate Chamber (RPC) 検証



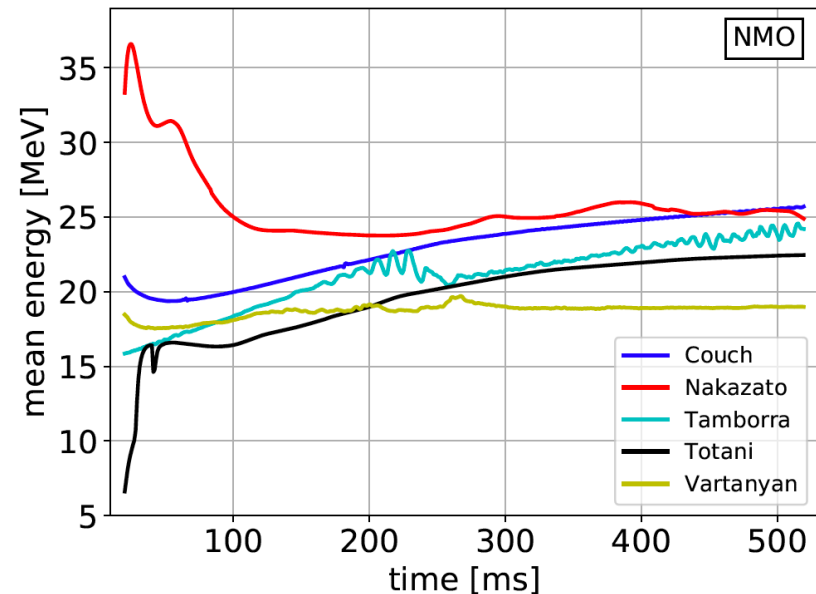
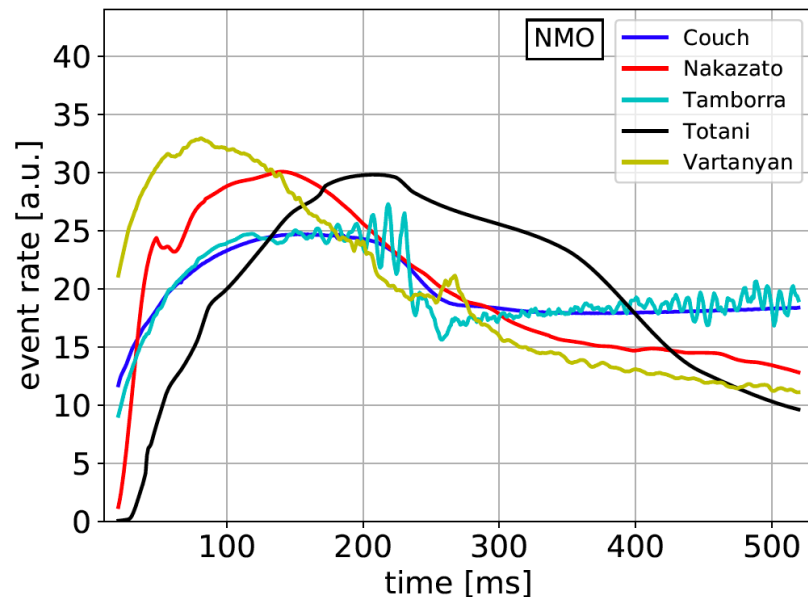
Need For Hadron Production Data

- Hadron production data used extensively in neutrino flux estimations
- Next-generation ν CP-violation experiments require $< 3\%$ flux uncertainties
 - \mathcal{U} Cross section measurements often suffer large flux uncertainties
- However, current hadron production data are insufficient
 - Interactions outside of the target (< 10 GeV/c) are large errors for J-PARC \mathcal{U}
 - Sizable systematic errors in forward production regions
 - Low P data on atmospheric neutrino targets is sparse



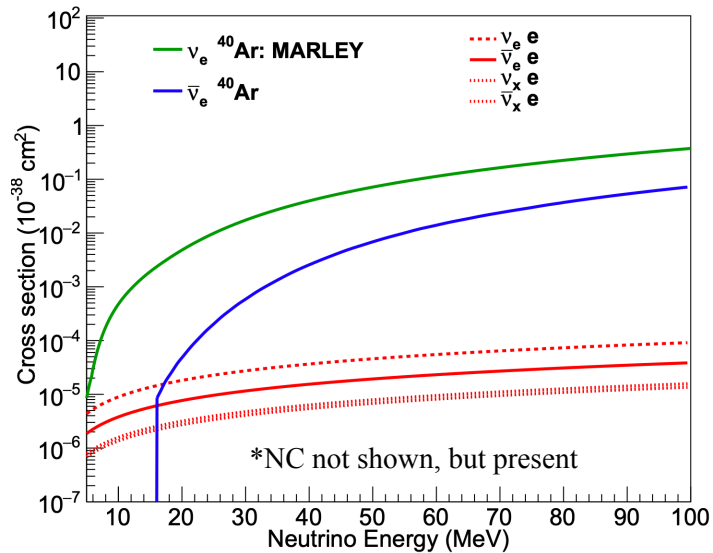
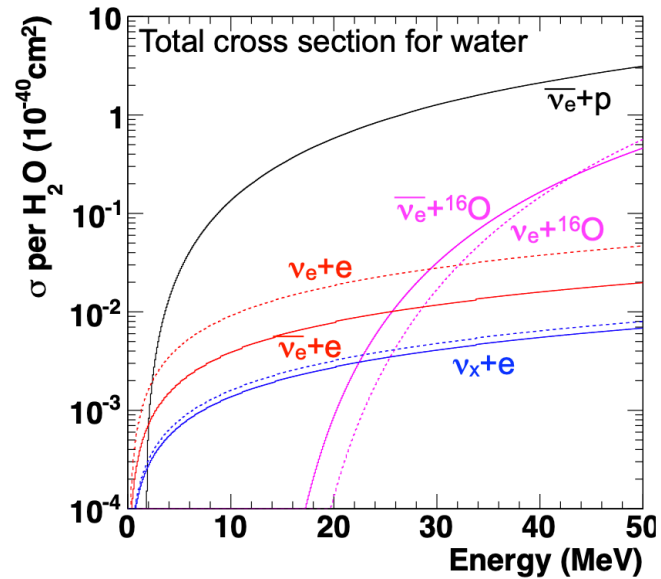
Hyper-Kamiokande: Supernova Neutrinos

Astrophys. J. 916 (2021) 15



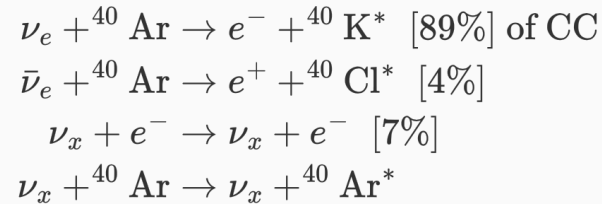
- Basic mechanism of core-collapse supernovae explosions (CCNS) established after observation of ν from SN1987A by Kamiokande, IMB, and Baksan (~ 24 events total)
- Details are largely unknown
 - Shock revival mechanism, equation of state, PNS formation
 - Many models, many assumptions, many different predictions!
- Observations at current (Super-K) and next-generation detectors like Hyper-K and DUNE are essential

Prospects and Limitations for SN Observations

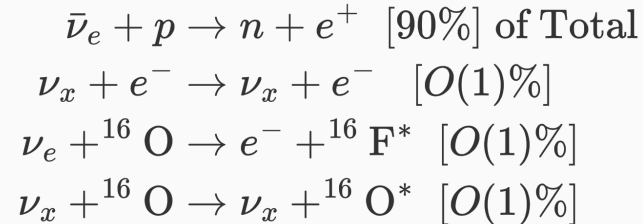


- Expect orders of magnitude more ν events for next CCSN observation [10 kpc]
 - SK \sim O(1k) events
 - HK \sim O(10k) events
 - DUNE \sim O(1k) events

- LAr detectors primarily sensitive to

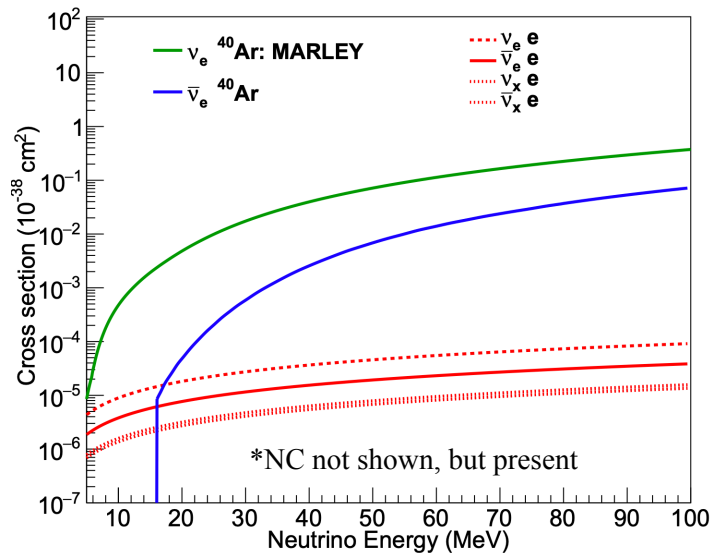
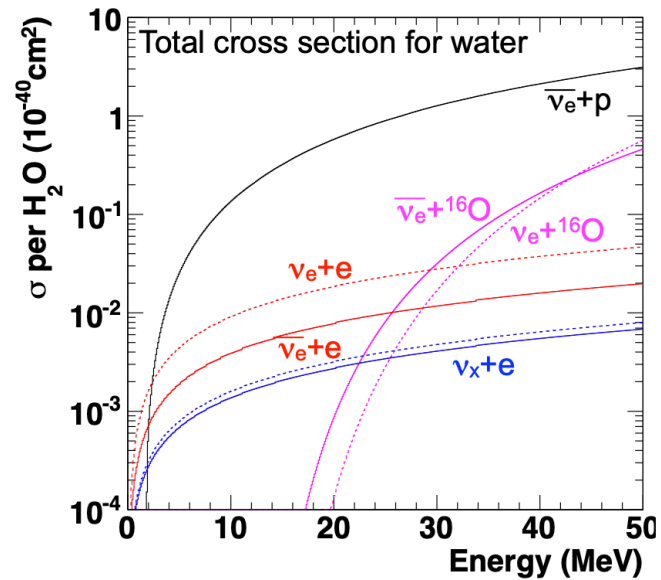


- Water Cherenkov detectors sensitive to



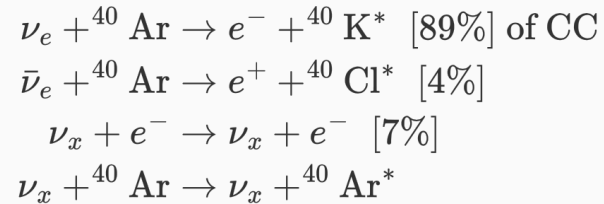
- How well... others are essentially unmeasured!

Prospects and Limitations for SN Observations



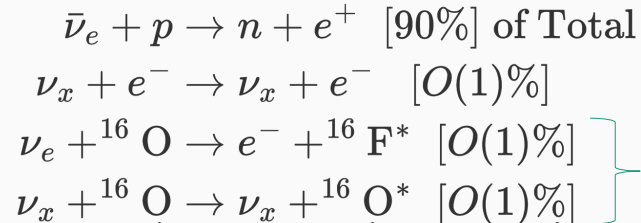
- Expect orders of magnitude more ν events for next CCSN observation [10 kpc]
 - > Error $O(10)\%$
 - SK $\sim O(1\text{k})$ events
 - HK $\sim O(10\text{k})$ events
 - DUNE $\sim O(1\text{k})$ events

- LAr detectors primarily sensitive to



Unmeasured

- Water Cherenkov detectors sensitive to

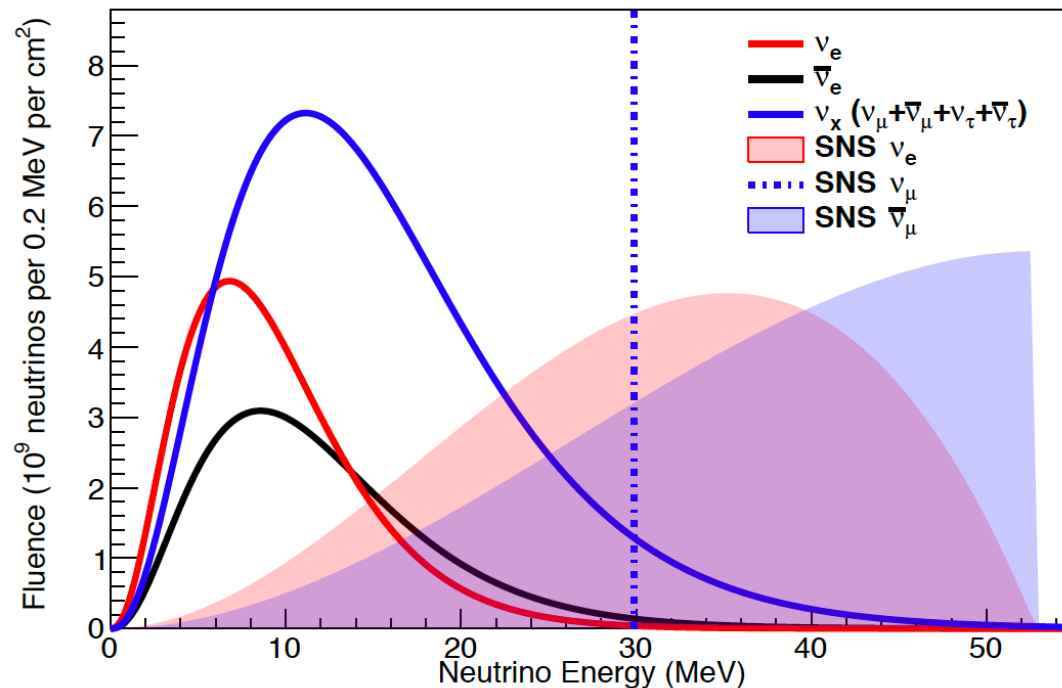


Unmeasured

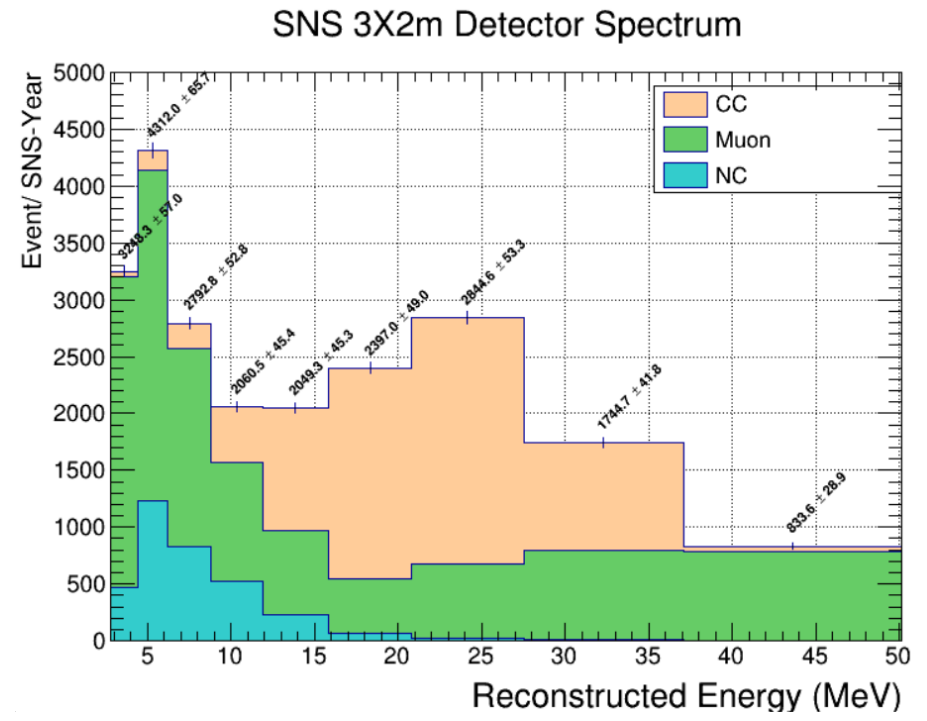
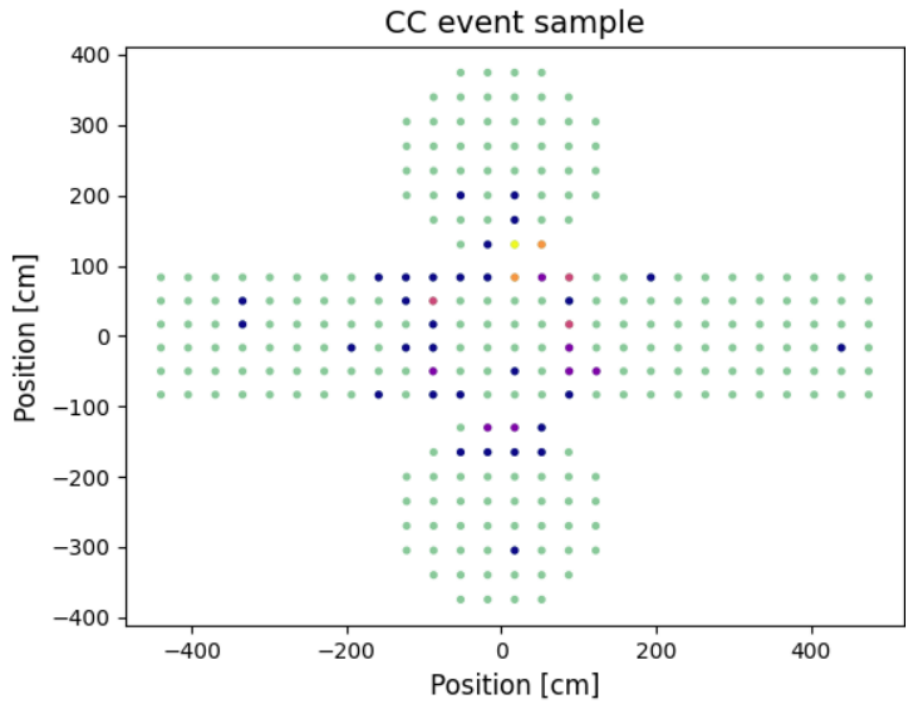
- However, only IBD and ES reactions are known well...others are essentially unmeasured!

SNS Beam Structure

- Prompt peak from stopped pion decay: $\pi^+ \rightarrow \nu_\mu + \mu^+$ (30 MeV)
 - \rightarrow NC measurement
- Delayed Michel decay produces anti- ν_μ and $\nu_e < 52$ MeV
 - Spectrum of ν_e well known \rightarrow CC $\nu_e + {}^{16}\text{O}$, [Flux normalization](#)
- Beam timing powerful for reducing backgrounds
 - \rightarrow Measure [backgrounds during off timing](#) (duty factor $\sim 10^{-4}$)
- Overlaps well with expectation from Supernova

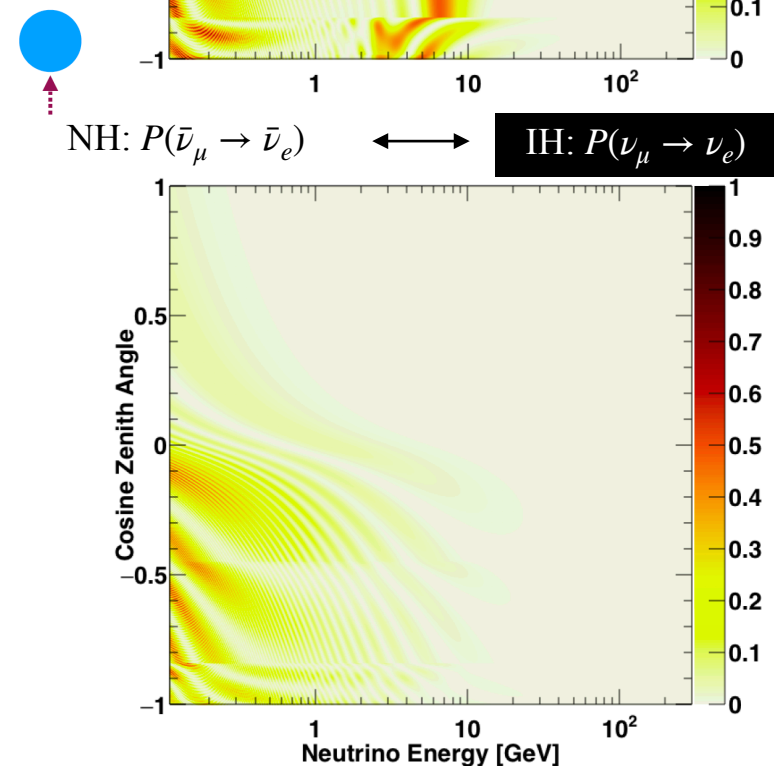
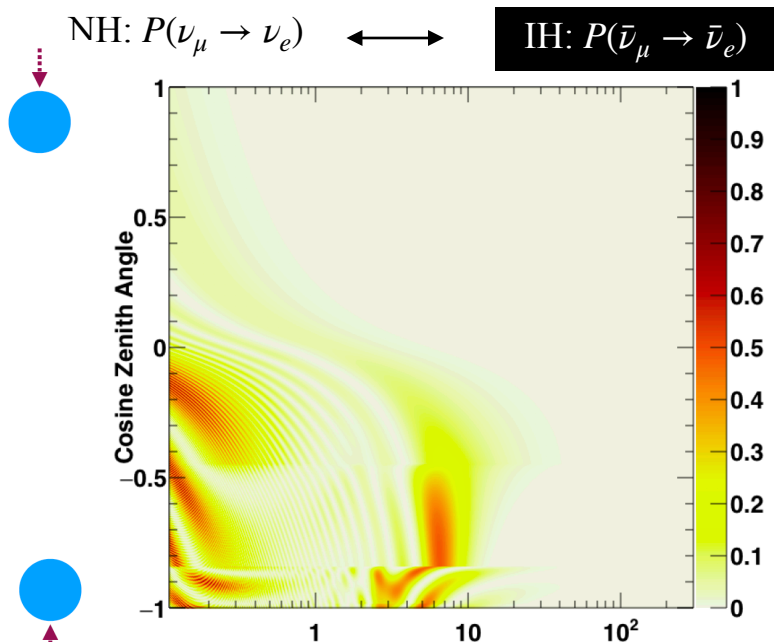


Supernova XSec Measurement at SNS



- 20-ton Water Cherenkov detector, 15m from spallation target
 - 240 3" PMTs, muon paddles for C.R. rejection
- With one SNS year of data ($1.8e7$ s) :
 - 12,800 CC ν_e interactions, analysis $\sim 68\%$ efficiency
 - 5% flux normalization error from D₂O measurement (COHERENT)
 - First measurement of this process possible, map final state particles
- Future upgrade for NC measurement?

Atmospheric Neutrino Oscillations :



Solid: Normal Hierarchy
 Dash: Inverted Hierarchy

— Statistical Error

— $\sin^2\theta_{23} = 0.4$
 — $\sin^2\theta_{23} = 0.5$
 — $\sin^2\theta_{23} = 0.6$

