

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2年度版



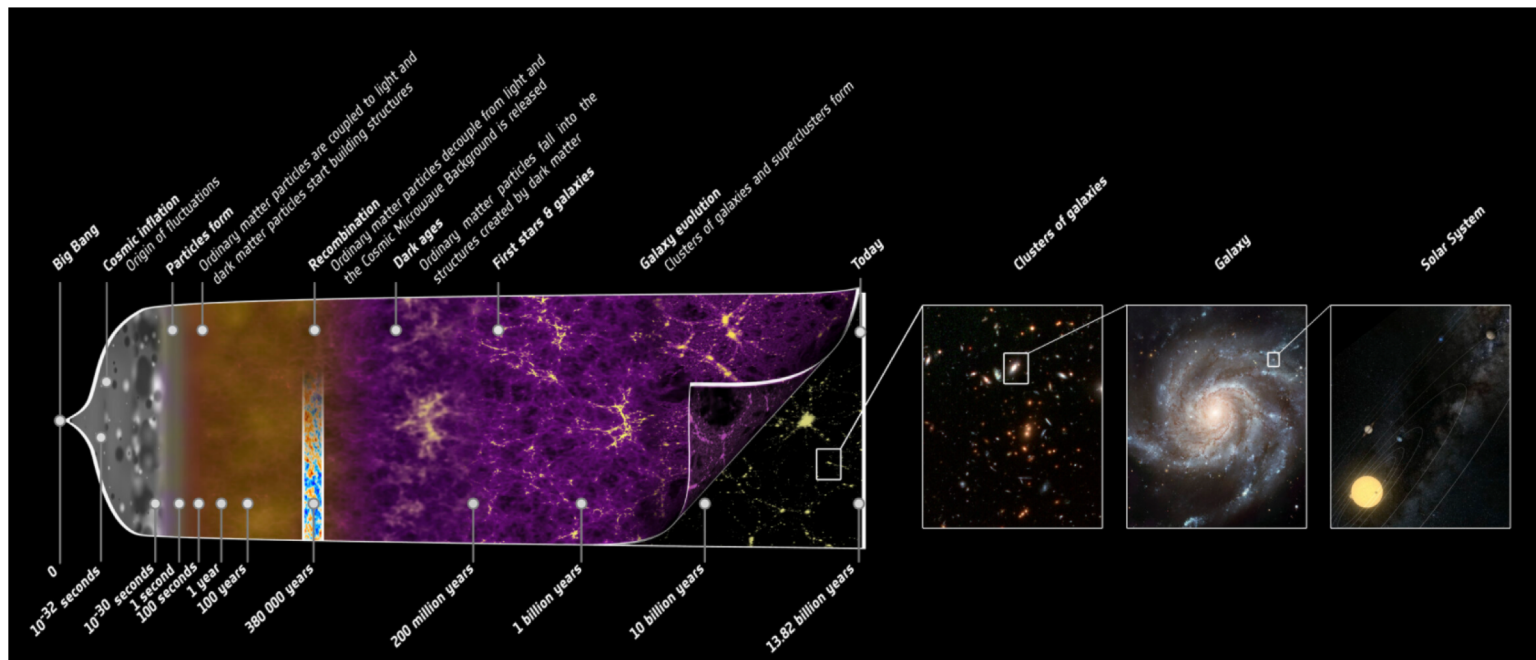
主な研究目的

- 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！

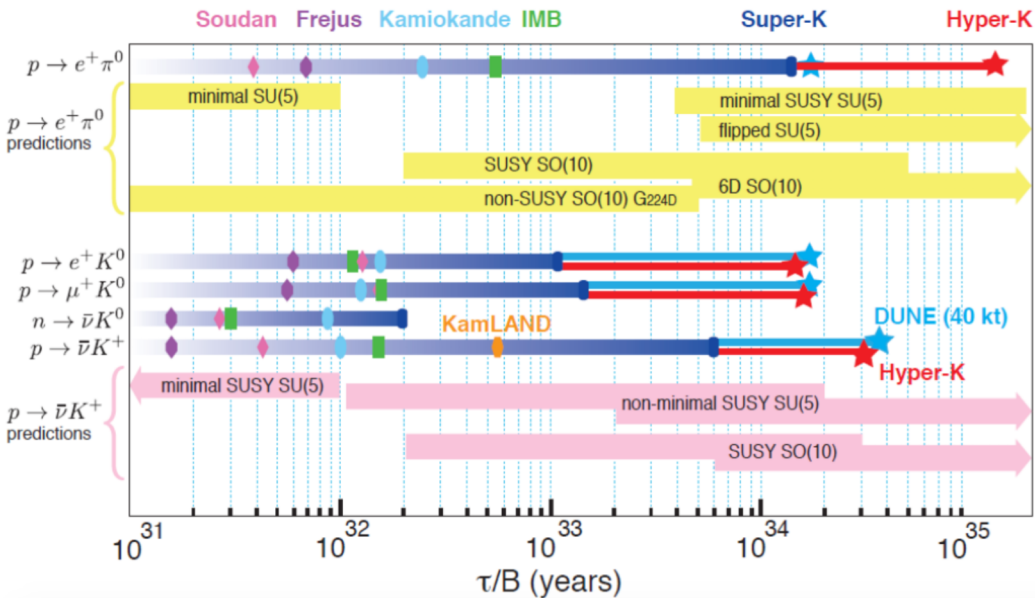


主な研究目的

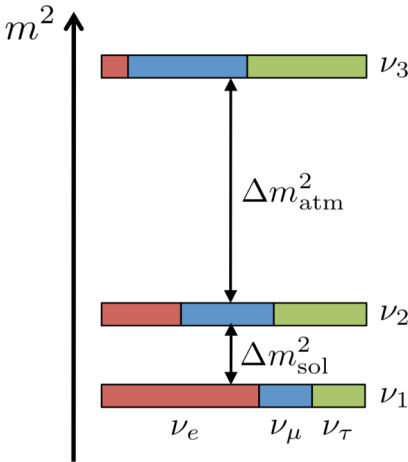
- ニュートリノ振動の完全な理解
 - CP破れの有無
 - ニュートリノ質量階層性
 - 混合パラメーターの精密測定

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

意義

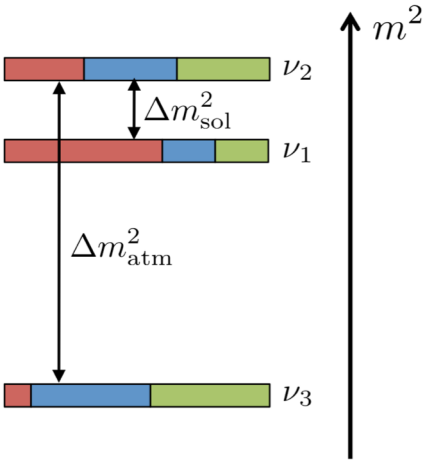


normal hierarchy (NH)



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

inverted hierarchy (IH)



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

主な研究目的

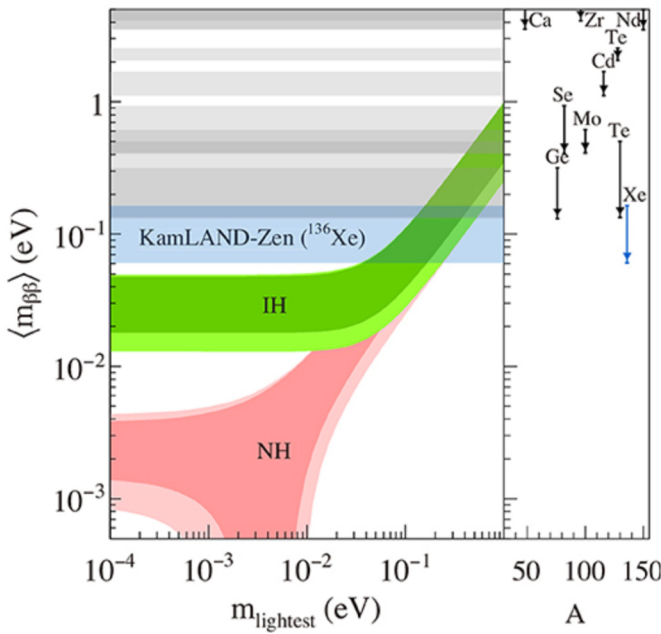
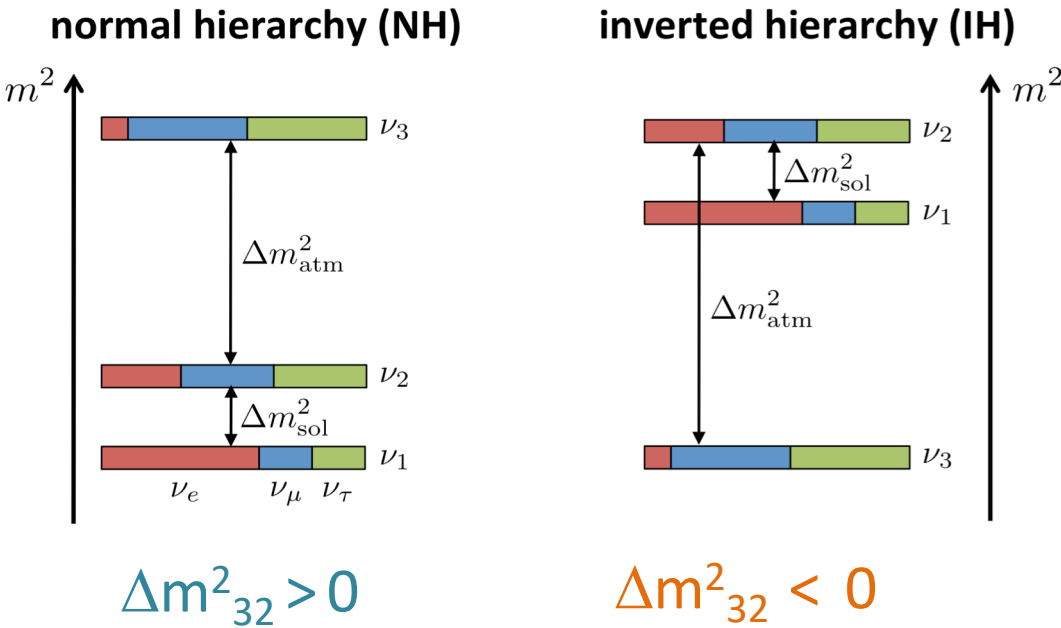
意義

- 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

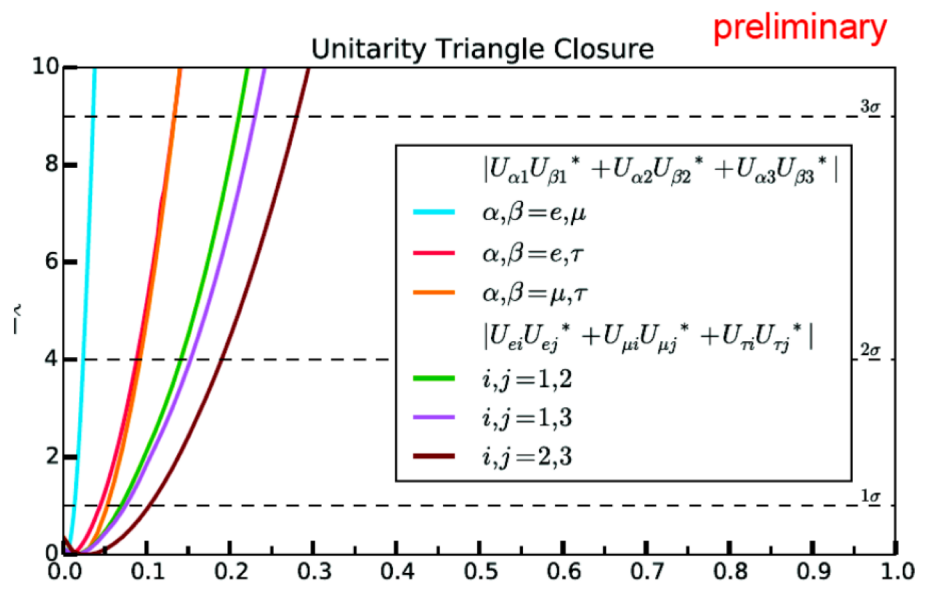


主な研究目的

- 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

混合マトリクスの（非）対称性へ
ユニタリティーの破れ？

意義



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

意義

- 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？

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Flavour Eigenstates Mass Eigenstates

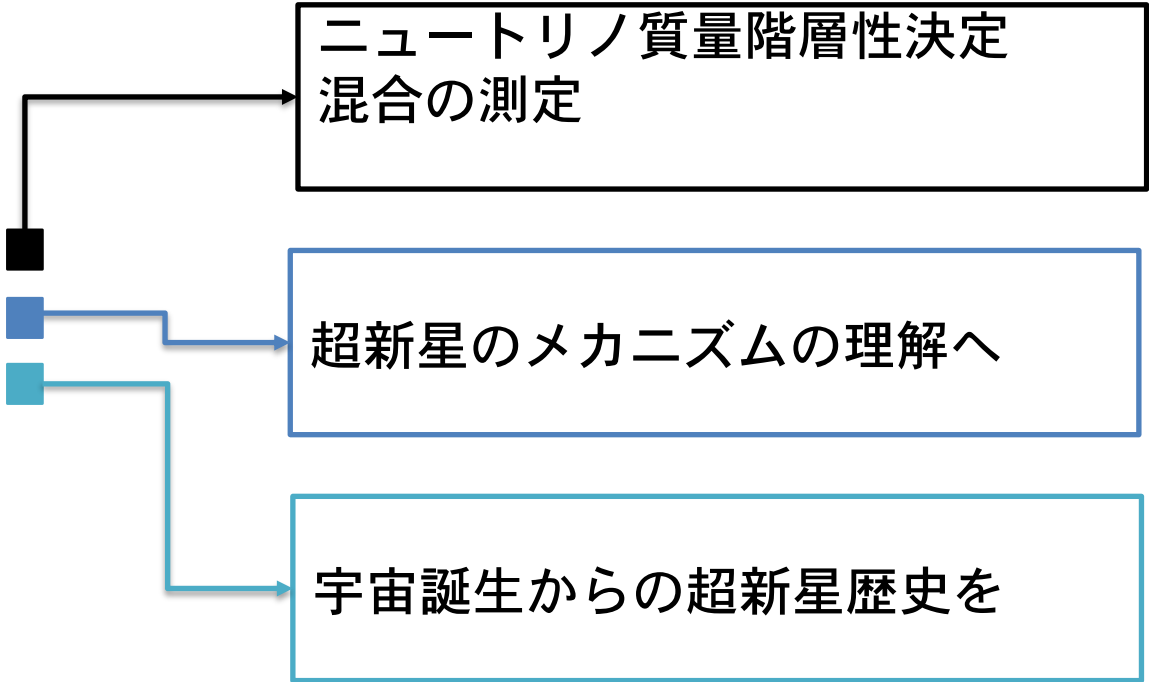
Mass Eigenstates Labeled by Decreasing ν_e Content

?????

$$\begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & \cdots & U_{eN} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & \cdots & U_{\mu N} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & \cdots & U_{\tau N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ U_{sN1} & U_{sN2} & U_{sN3} & \cdots & U_{sNN} \end{pmatrix}$$

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

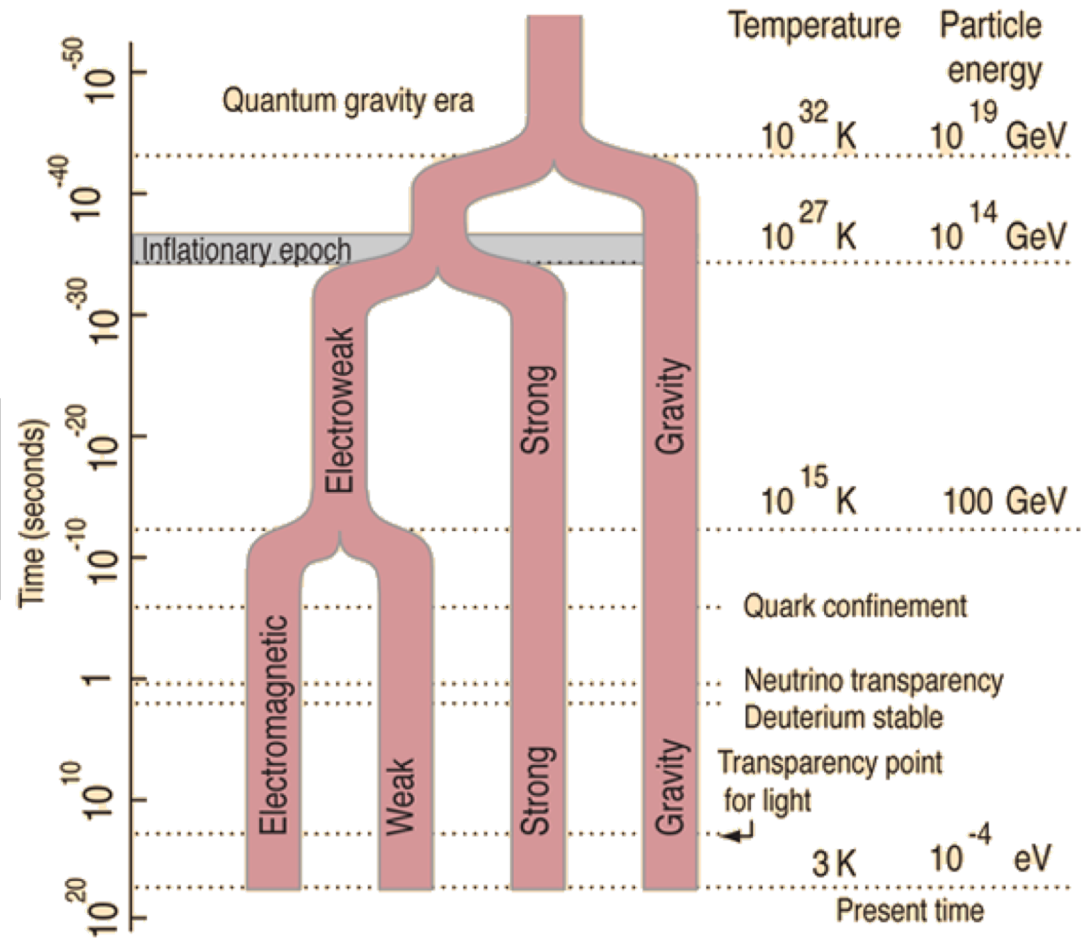


主な研究目的

- 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

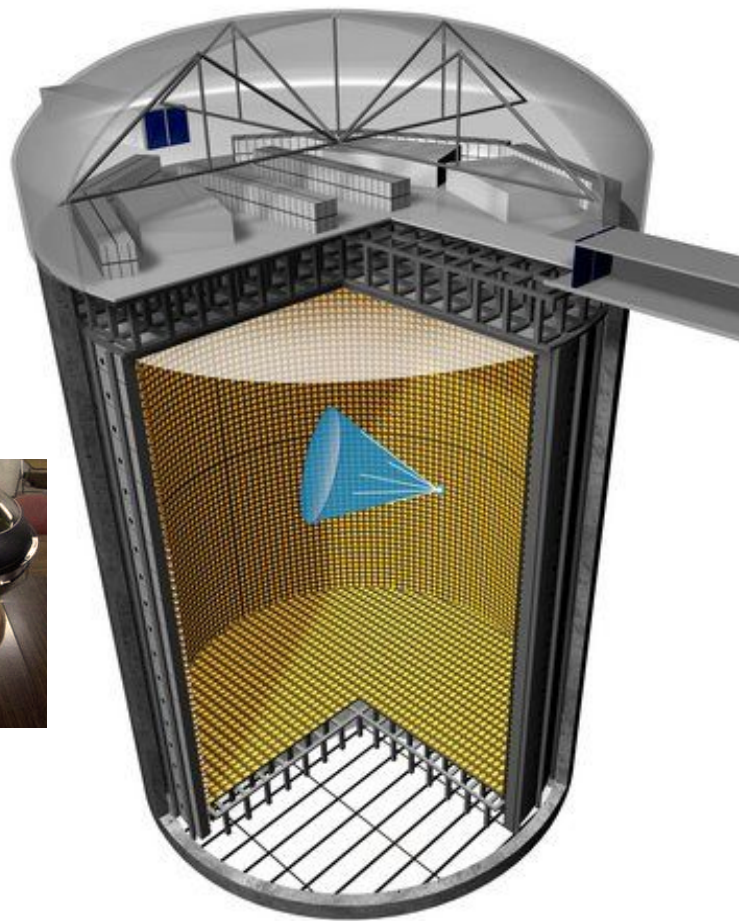
バックグラウンドを削減、再構成
パフォーマンスを向上

系統誤差を減らす

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

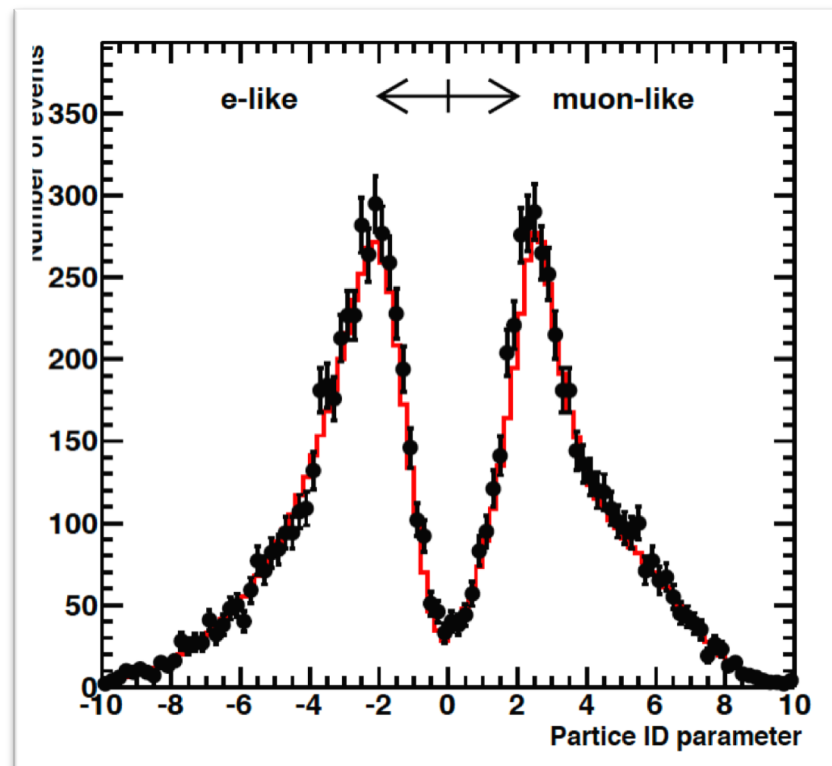
Super-Kamiokande: Introduction



- 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?

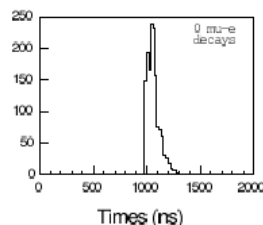
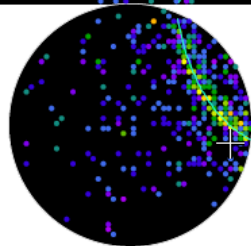
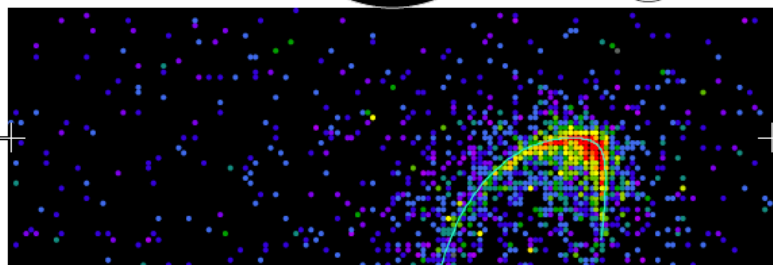
— 11, 16, 20" PMTs

Super-Kamiokande IV

T2K Beam Run 470013 Spill 5824439
Run 70905 Sub 1295 Event 319549059
13-02-27:17:57:14
T2K beam dt = 816.7 ns
Inner: 1508 hits, 5129 pe
Outer: 3 hits, 2 pe
Trigger: 0x80000007
D wall: 280.1 cm
e-like, p = 459.0 MeV/c

Charge (pe)

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2-8.0
- 4.7-6.2
- 3.3-4.7
- 2.2-3.3
- 1.3-2.2
- 0.7-1.3
- 0.2-0.7
- < 0.2

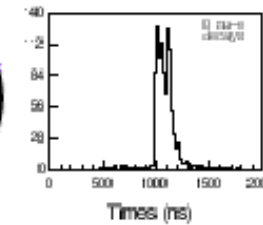
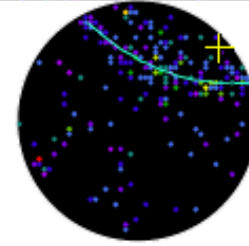
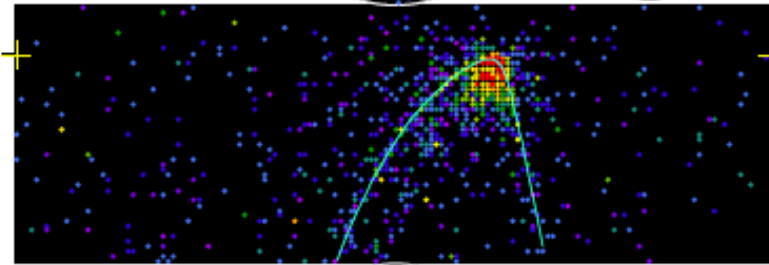


Super-Kamiokande IV

T2K Beam Run 670254 Spill 5753966
Run 74479 Sub 402 Event 404210494
16-03-02:01:33:33
T2K beam dt = 2086.3 ns
Inner: 1050 hits, 3644 pe
Outer: 2 hits, 2 pe
Trigger: 0x80000007
D wall: 156.5 cm
Muon: 268.7 MeV
e-like, p = 268.7 MeV/c

Charge (pe)

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2-8.0
- 4.7-6.2
- 3.3-4.7
- 2.2-3.3
- 1.3-2.2
- 0.7-1.3
- 0.2-0.7
- < 0.2

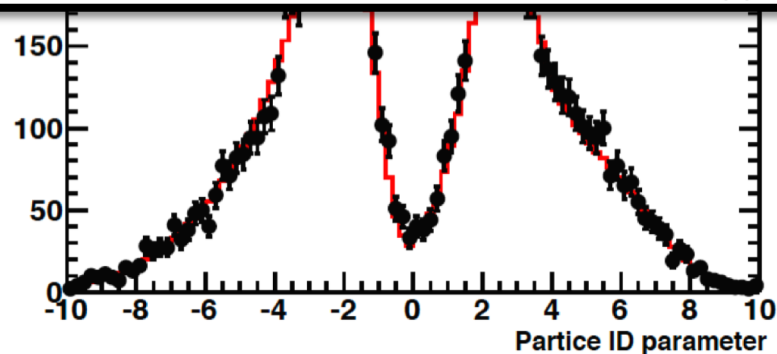


Four Run Periods:

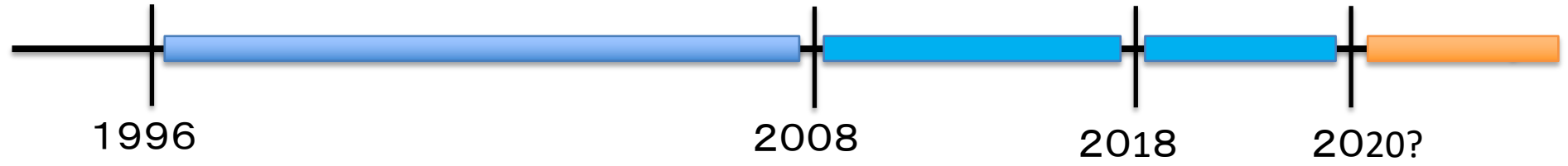
SK-I (1996-2001) SK-II (2003-2005)

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

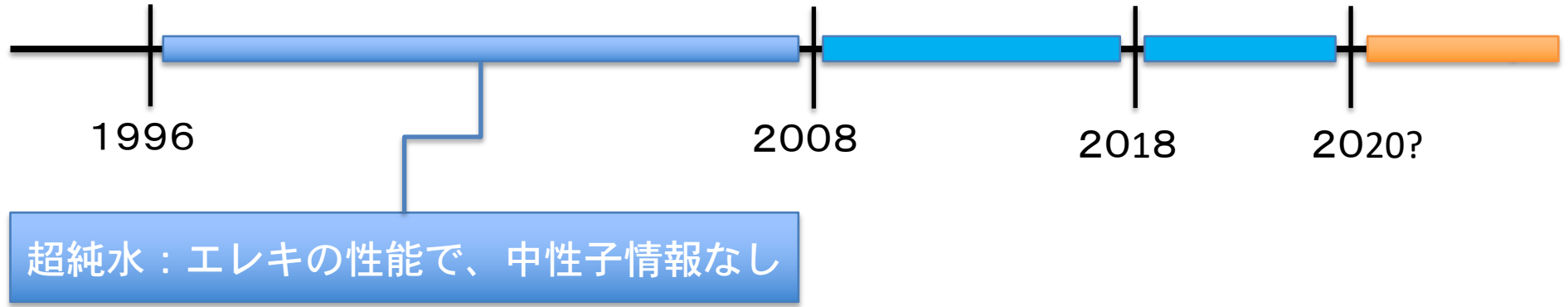
Upgrade Complete Now operating as SK-V !!



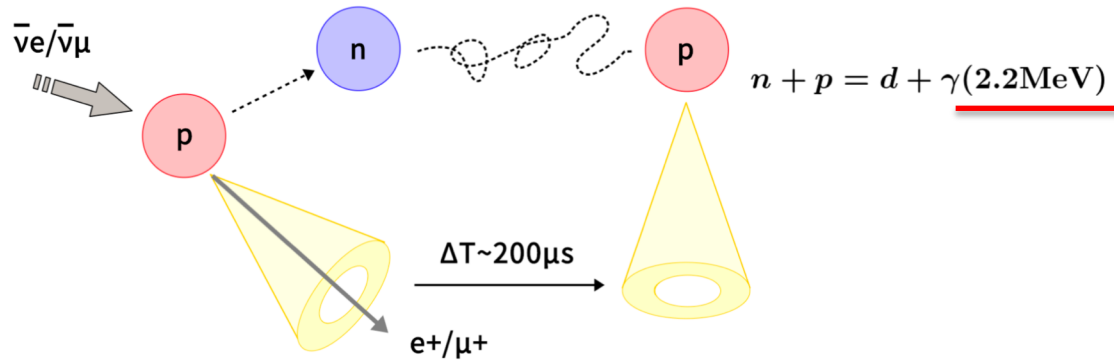
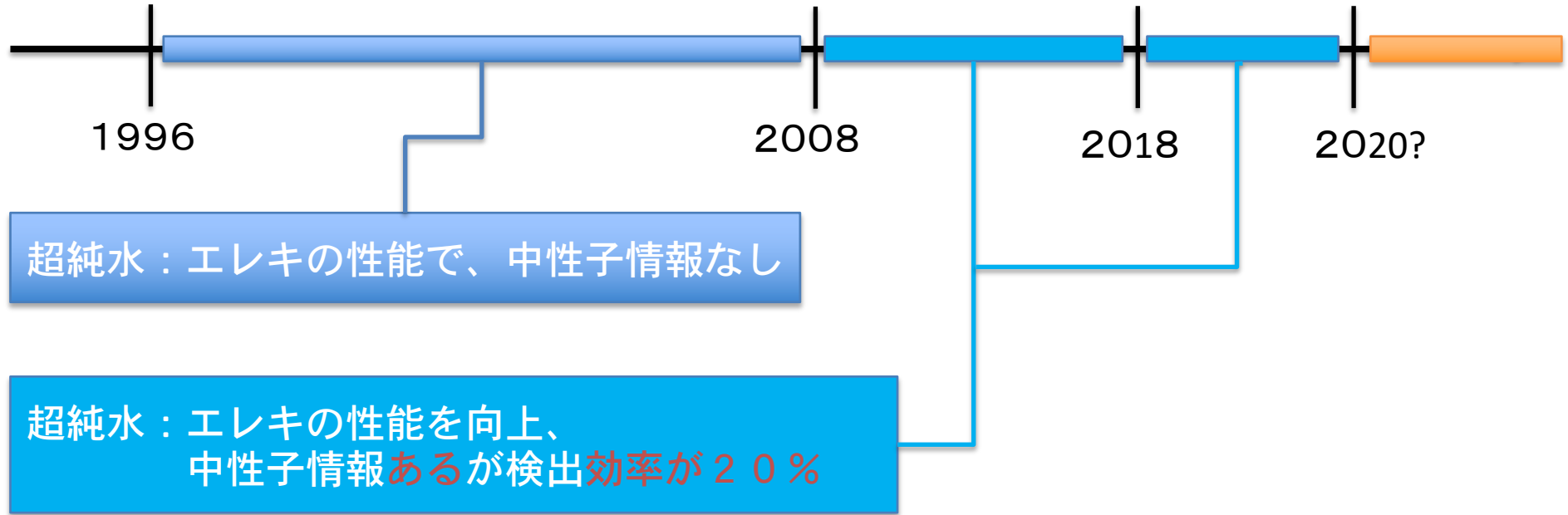
スーパーカミオカンデと中性子



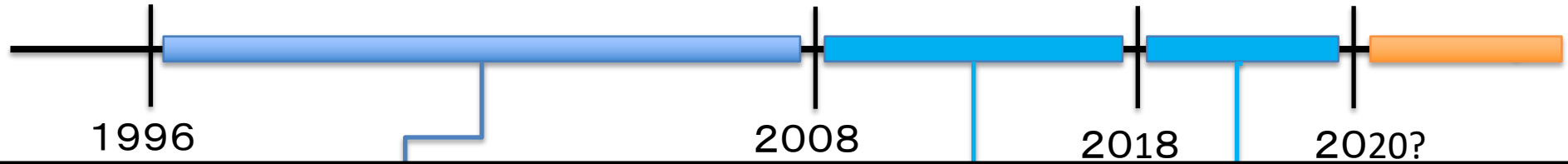
スーパーカミオカンデと中性子



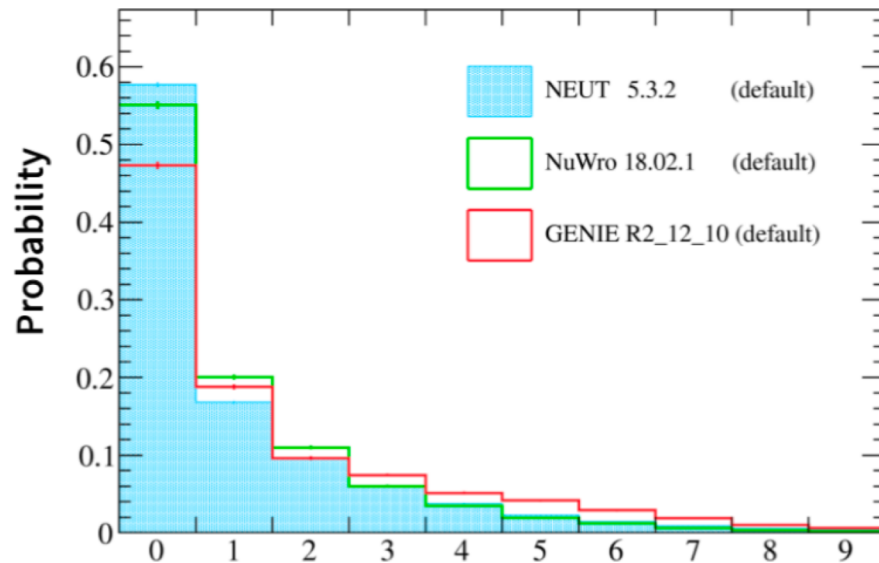
スーパーカミオカンデと中性子



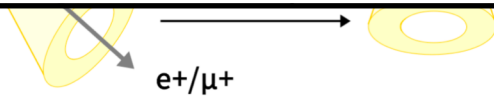
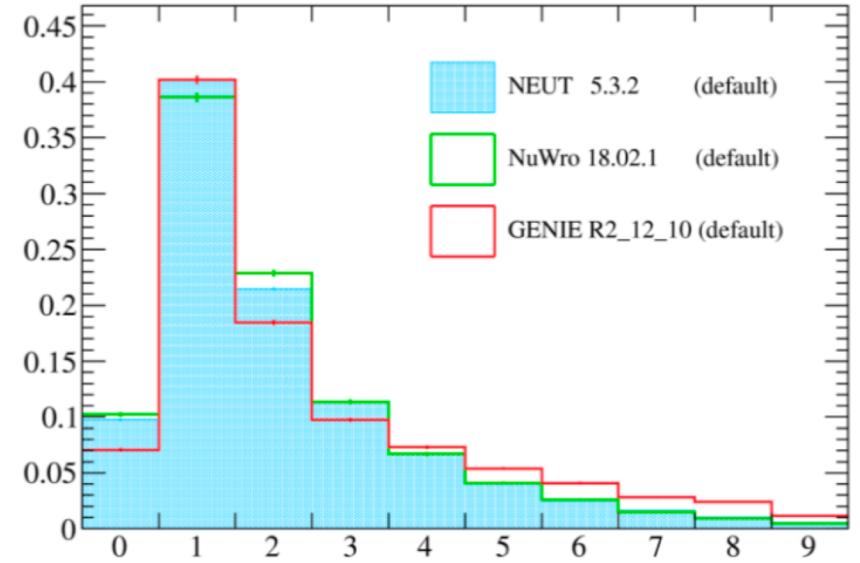
スーパーカミオカンデと中性子



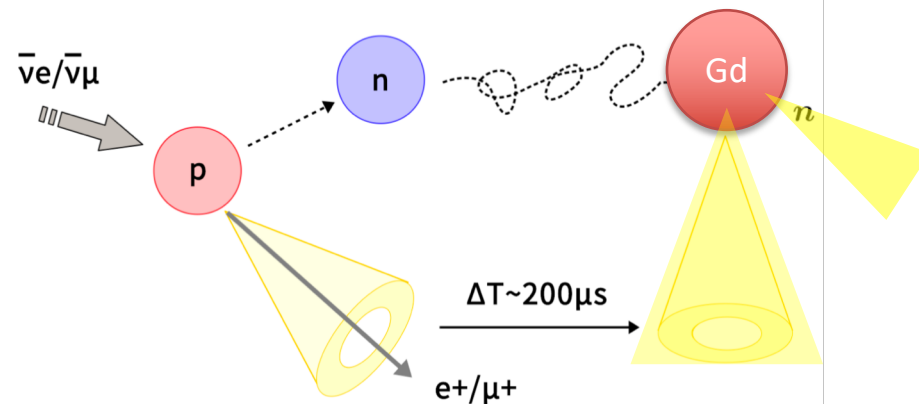
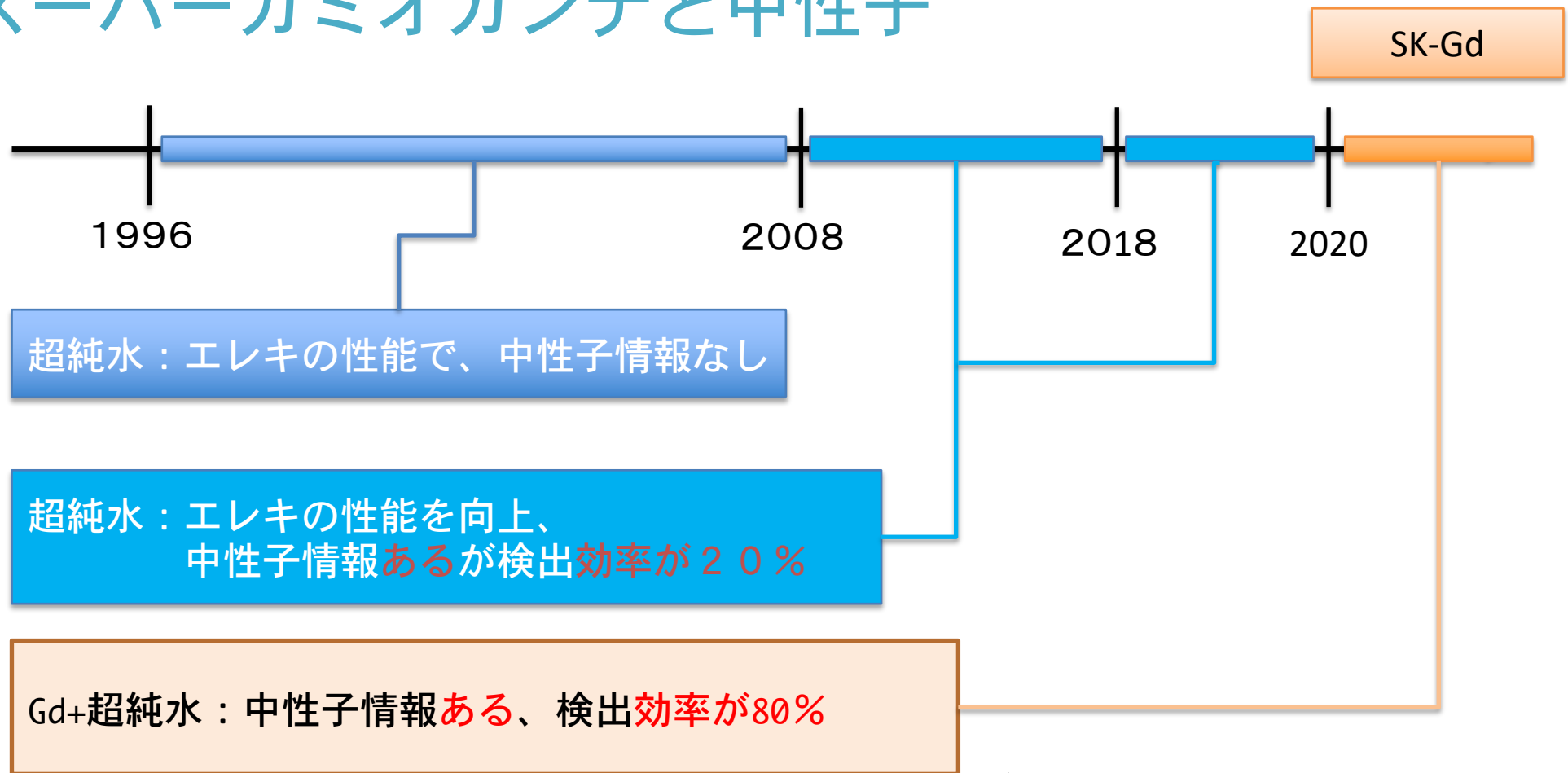
ν -mode $\nu\mu \rightarrow \nu\mu$ MC



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



スーパーカミオカンデと中性子



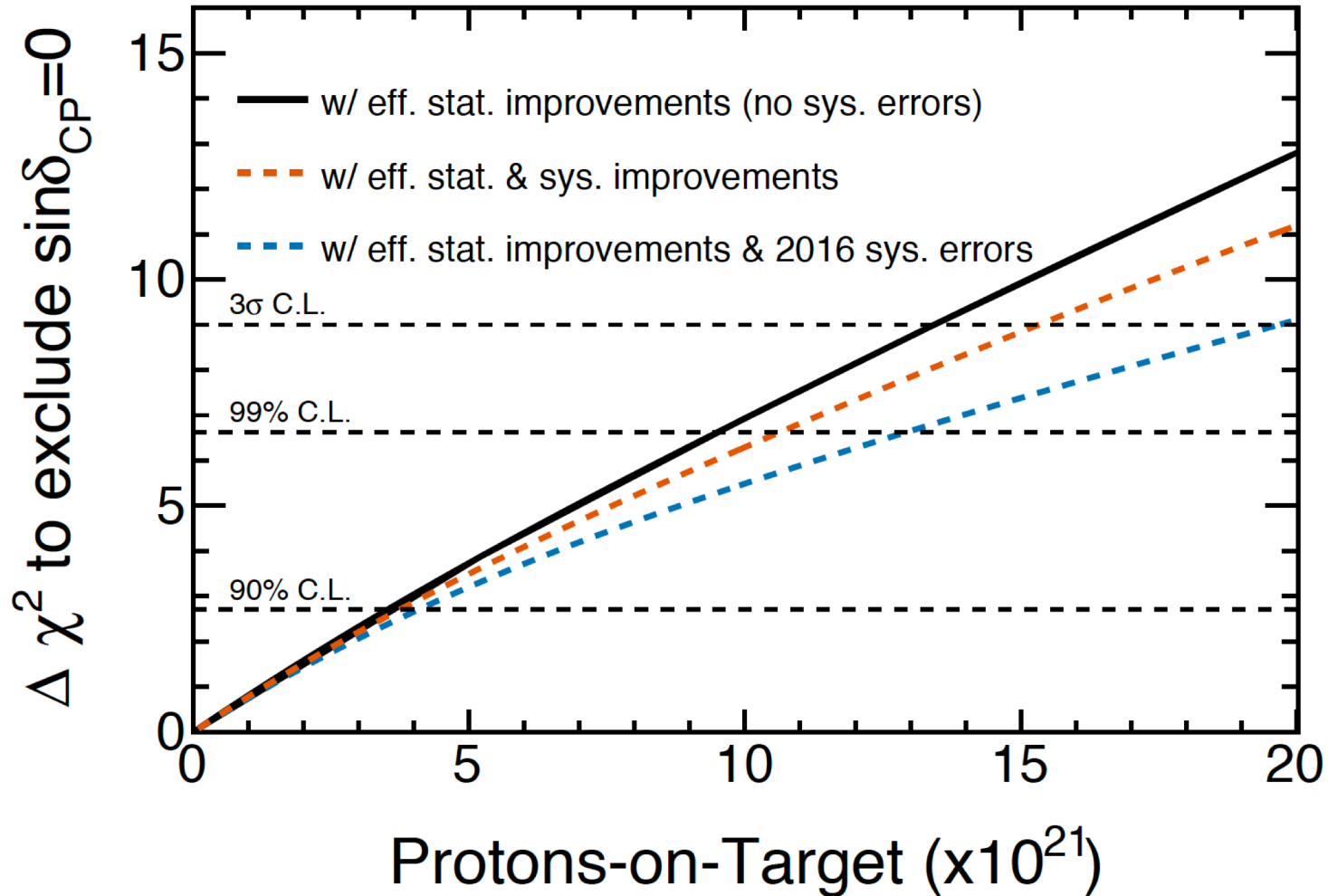
複数 γ 、 ~ 8 Mev

スーパーカミオカンデの課題

- 4月に初めてGdをSKへ溶かす予定が、コロナの影響によって延期されたが、今年度中に
- 関連課題が多い：
 - Gd入りのシミュレーション
 - 検出器のカリブレーション
 - 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
 - 。 。 。
- GdはSKの次の時代を導入

CP破れの優位度

T2K 関連

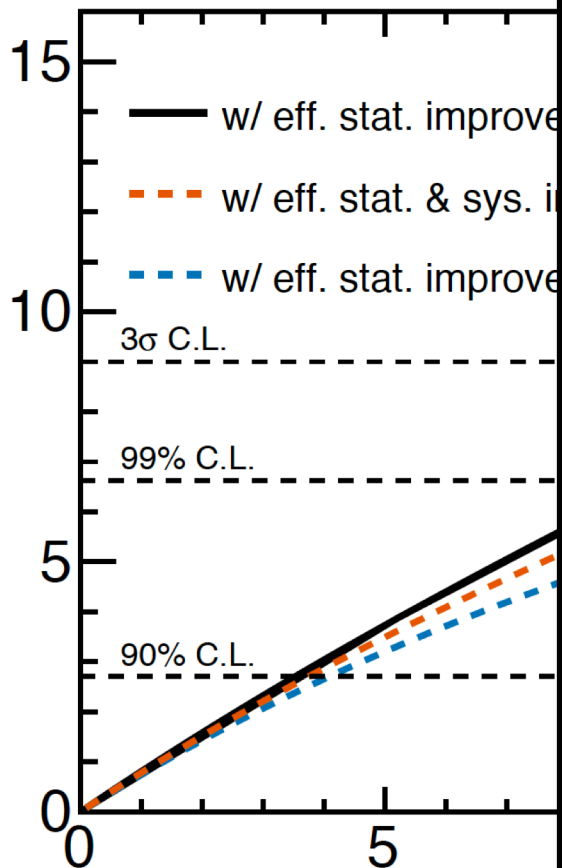


- SK側で解析可能な統計量を増やす
- 検出器反応に伴う系統誤差を削減

CP破れの優位度

T2K

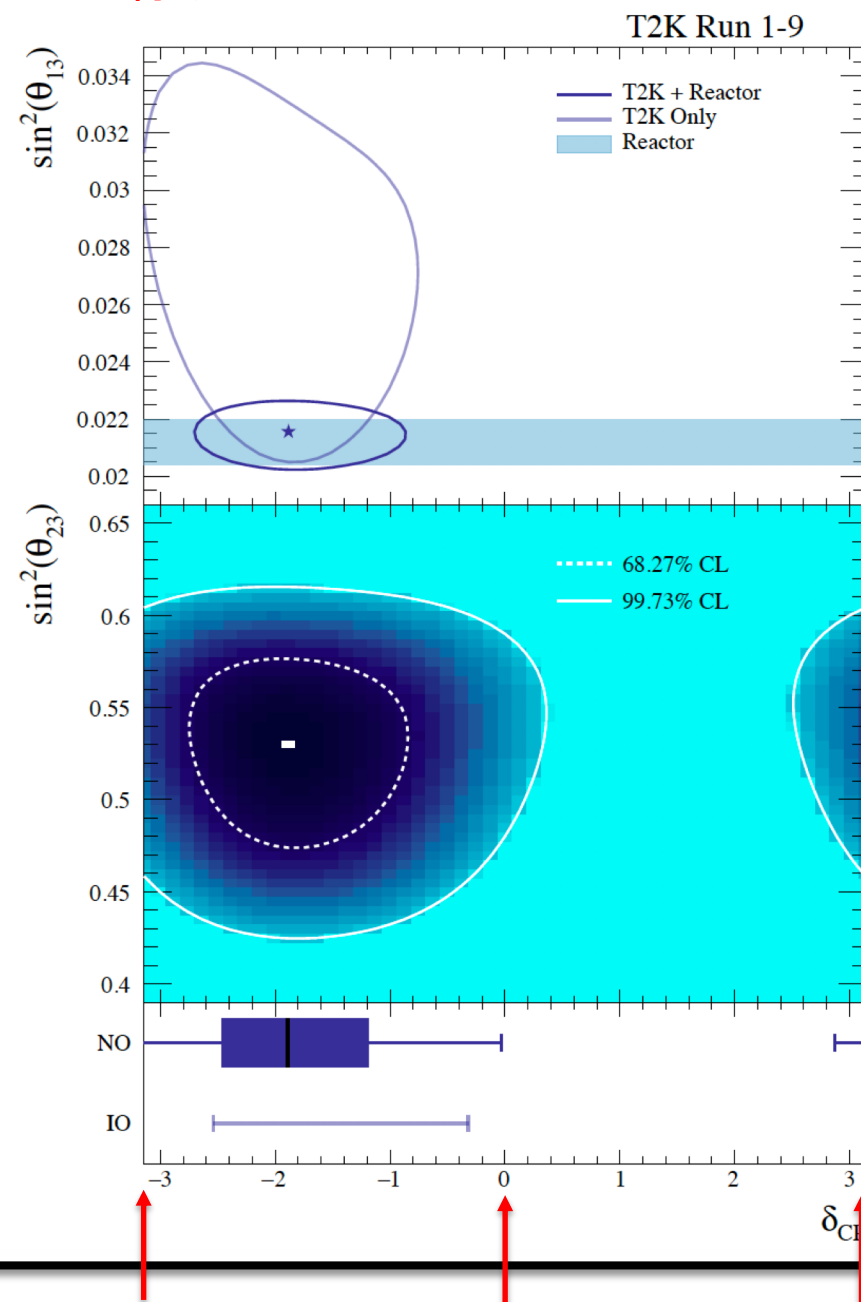
$\Delta \chi^2$ to exclude $\sin \delta_{CP}=0$



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

どこまで行ける？



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における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

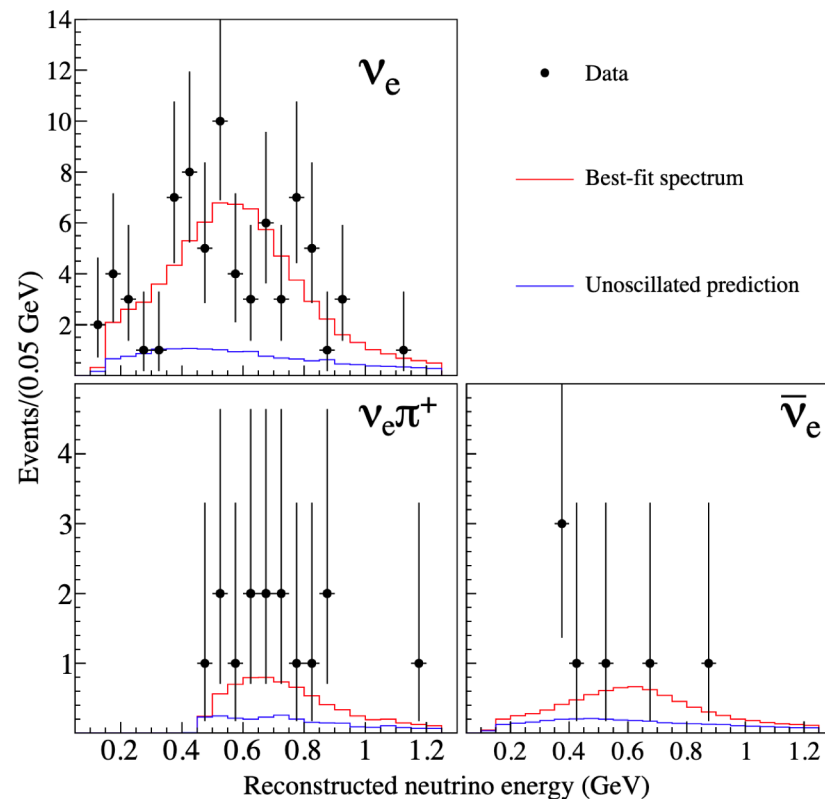
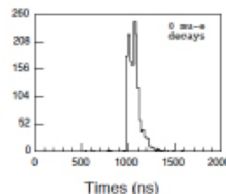
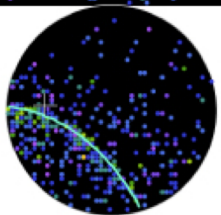
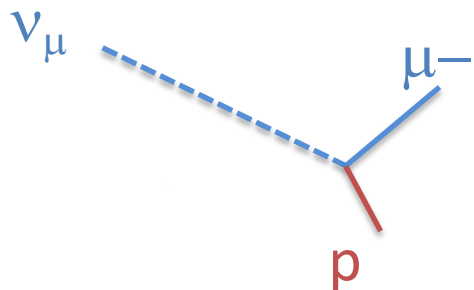
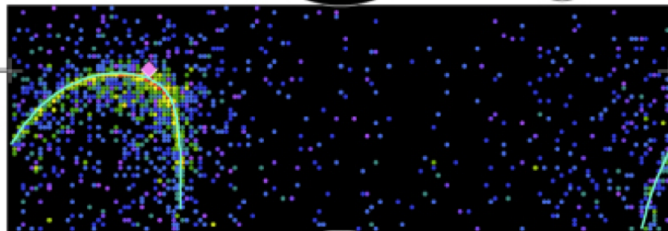


Super-Kamiokande IV

T2K Beam Run 33 Spill 922275
Run 66778 Sub 585 Event 134229437
19-05-12 21:03:22
T2K beam dt = 1902.2 ns
Inner: 1600 hits, 3681 pe
Outer: 2 hits, 2 pe
Trigger: 0x8000007
D_wall: 614.4 cm
e-like, p = 381.8 MeV/c

Charge (pe)

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.0-23.3
- 17.3-20.0
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2-8.0
- 4.7-6.2
- 3.3-4.7
- 2.2-3.3
- 1.3-2.2
- 0.7-1.3
- 0.2-0.7
- < 0.2



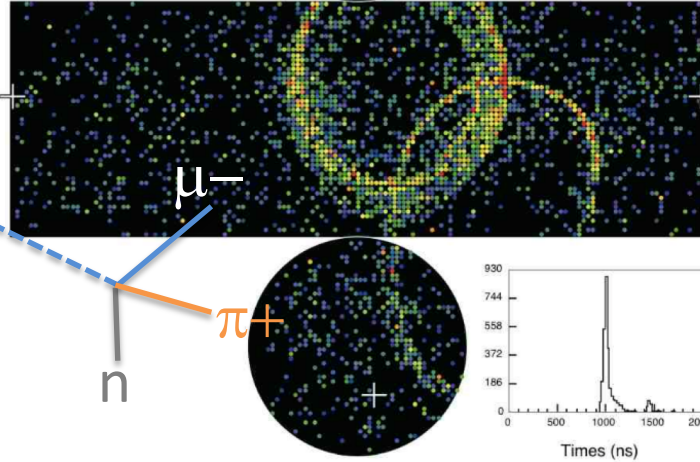
T2K-SK : 今後の研究

Super-Kamiokande

Run 1871 Sub 2 Ev 6467
96-06-11:02:06:16
Inner: 3021 hits, 7254 pE

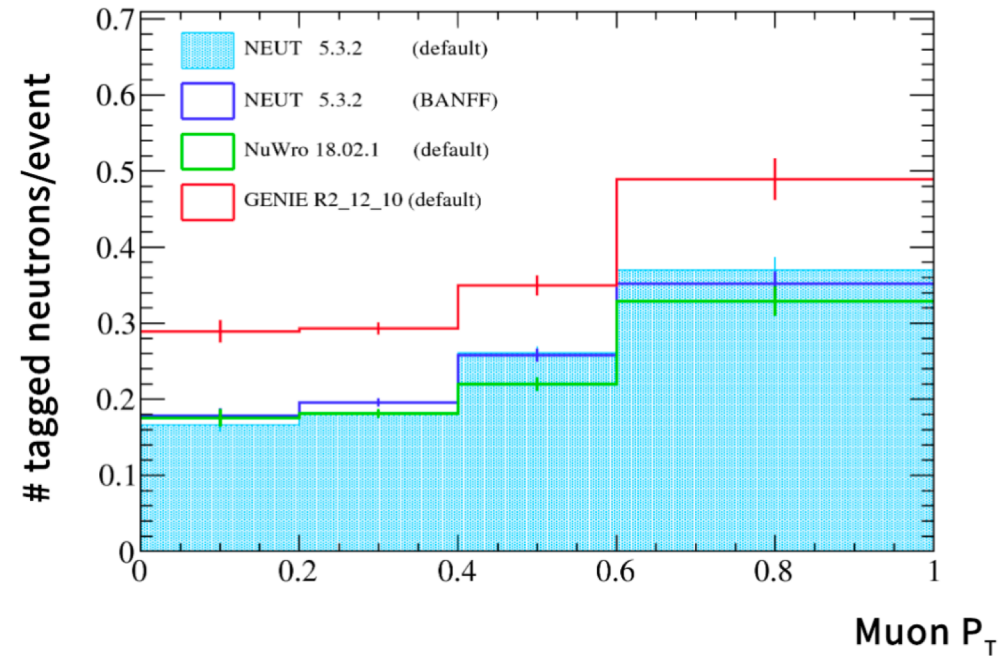
Charge (pe)

• >15.0
• 13.1-15.0
• 11.4-13.1
• 9.8-11.4
• 8.2-9.8
• 6.6-8.2
• 5.0-6.6
• 3.5-5.0
• 2.0-3.5
• 0.5-2.0
• <0.5

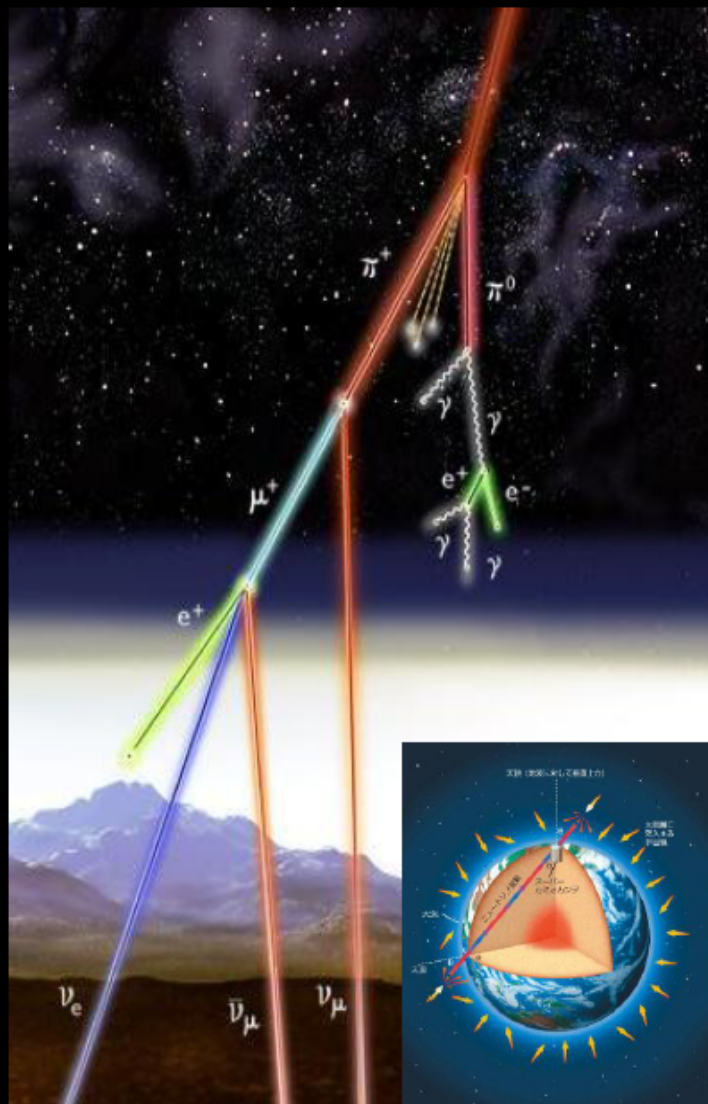


- 複数の粒子が生成された事象を使用！
 - さらに統計量が増える
 - 系統誤差の評価??
- 中性子情報を使った解析を進める
 - ニュートリノと反ニュートリノの識別
 - 中性カレントの事象を探し出す？
 - 中性子数の精密測定（ニュートリノ反応モデルの改善）
 - Gdの準備

FHC $\nu\mu \rightarrow \nu\mu$ MC

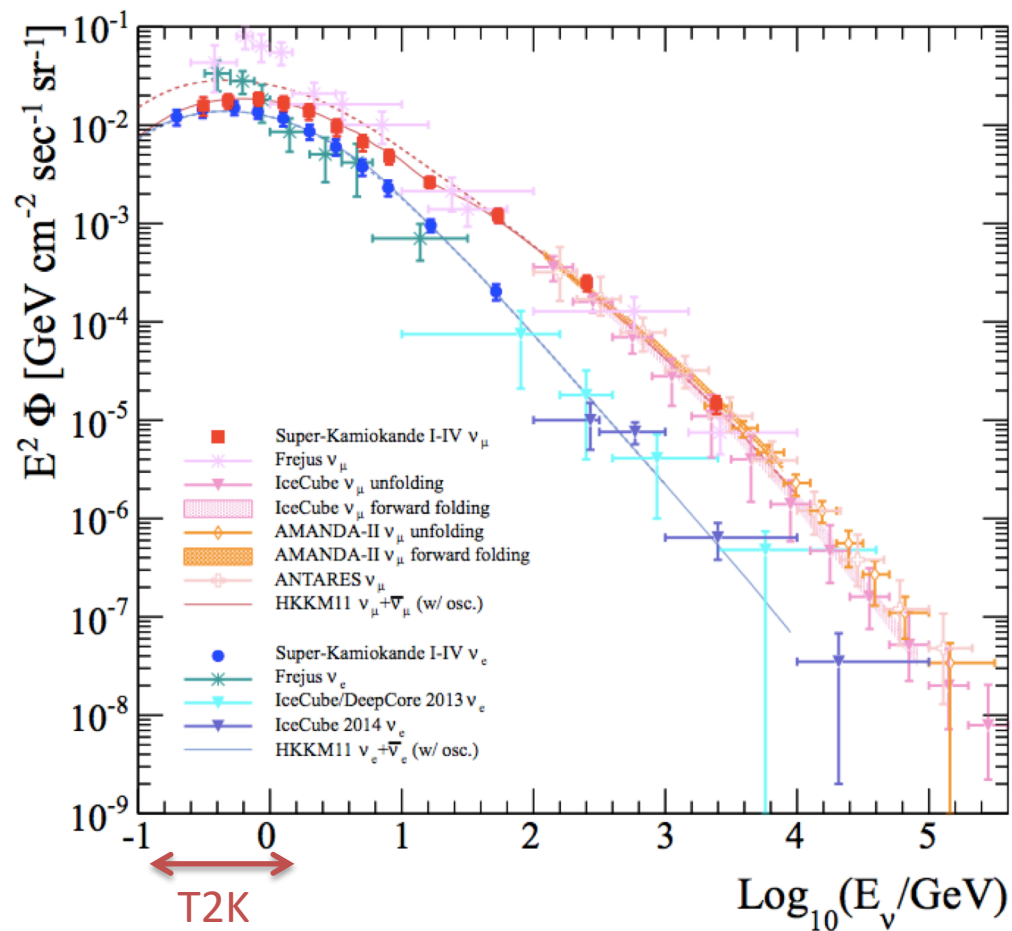


SKの大気ニュートリノ



$$P + A \rightarrow N + \pi^+ + X$$

$$\mu^+ + \boxed{\nu_\mu} \rightarrow e^+ + \boxed{\nu_e} + \boxed{\bar{\nu}_\mu}$$



スーパーカミオカンデ: 大気ニュートリノ

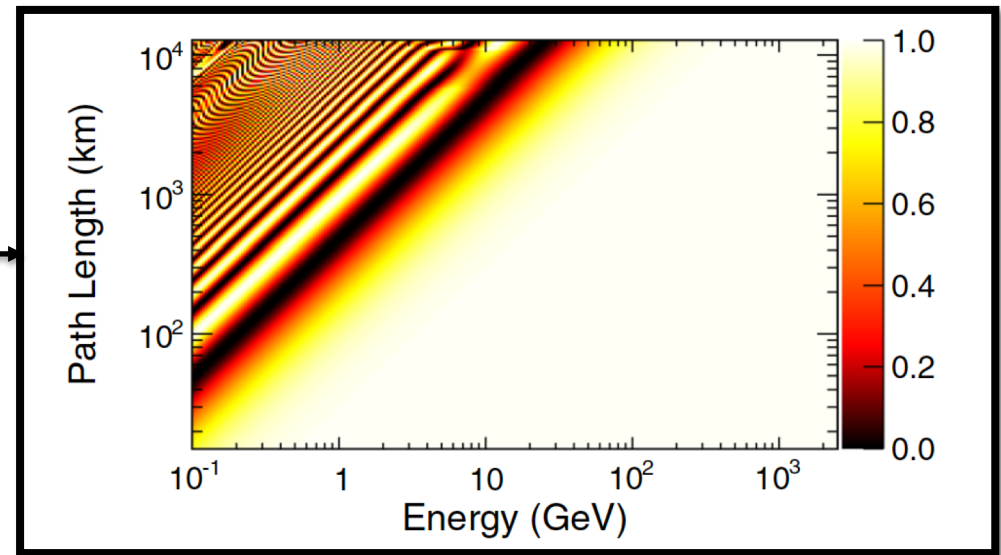
$100 \text{ MeV} < E < 10 \text{ TeV}$

- 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

スーパーカミオカンデ: 大気ニュートリノ

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

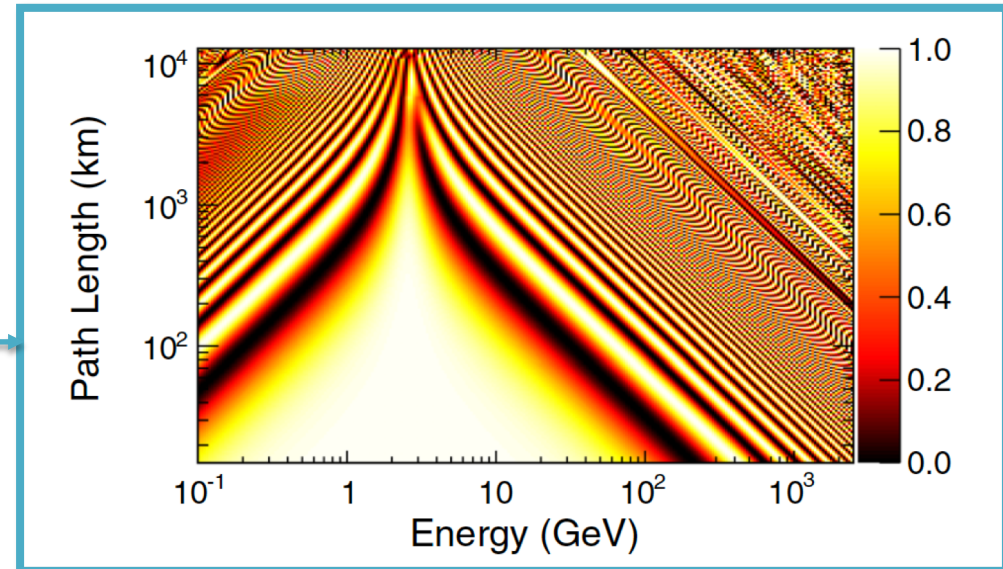
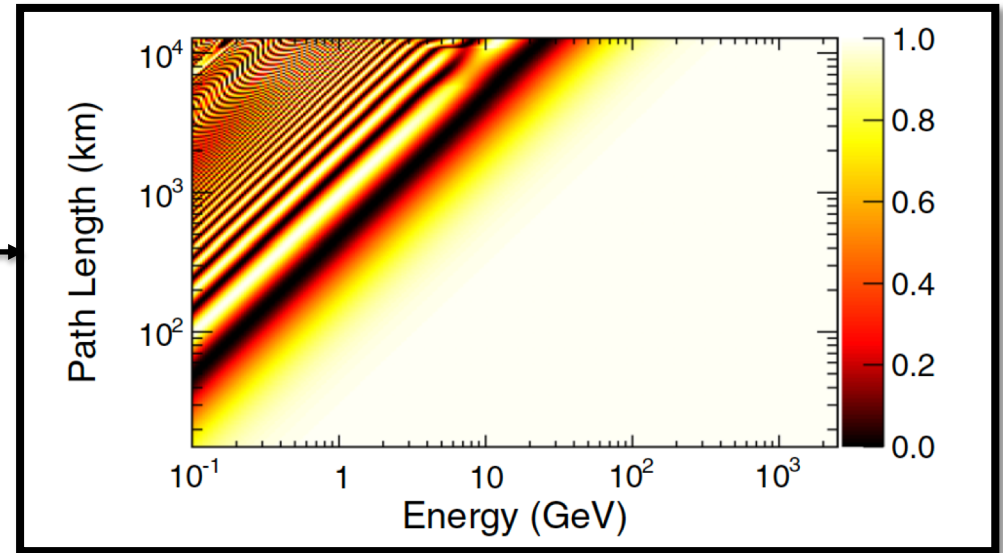
- PMNSニュートリノ振動
- Exotic ニュートリノ振動
 - ステラいるニュートリノ
 - NSI
 - ローレンツ対称性を破る振動
 - . . .
- 暗黒物質探索
- 重力波などとのCoincidence探索

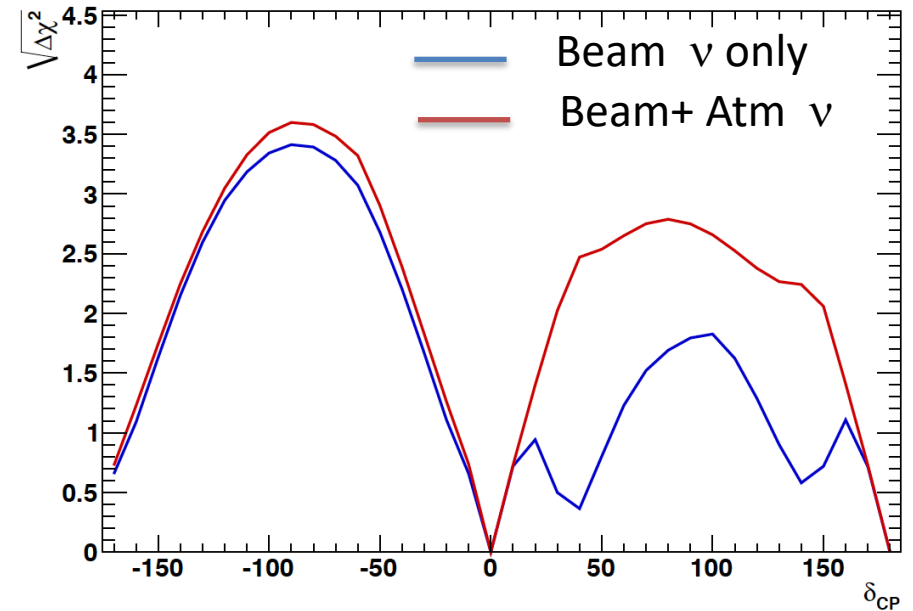
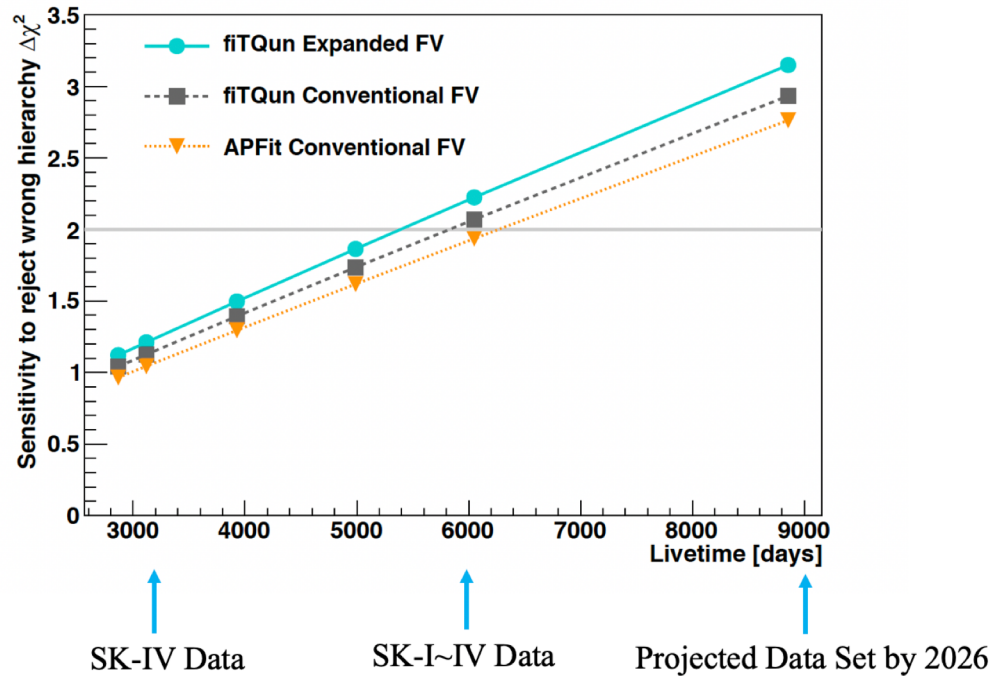


スーパーカミオカンデ: 大気ニュートリノ

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

- 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

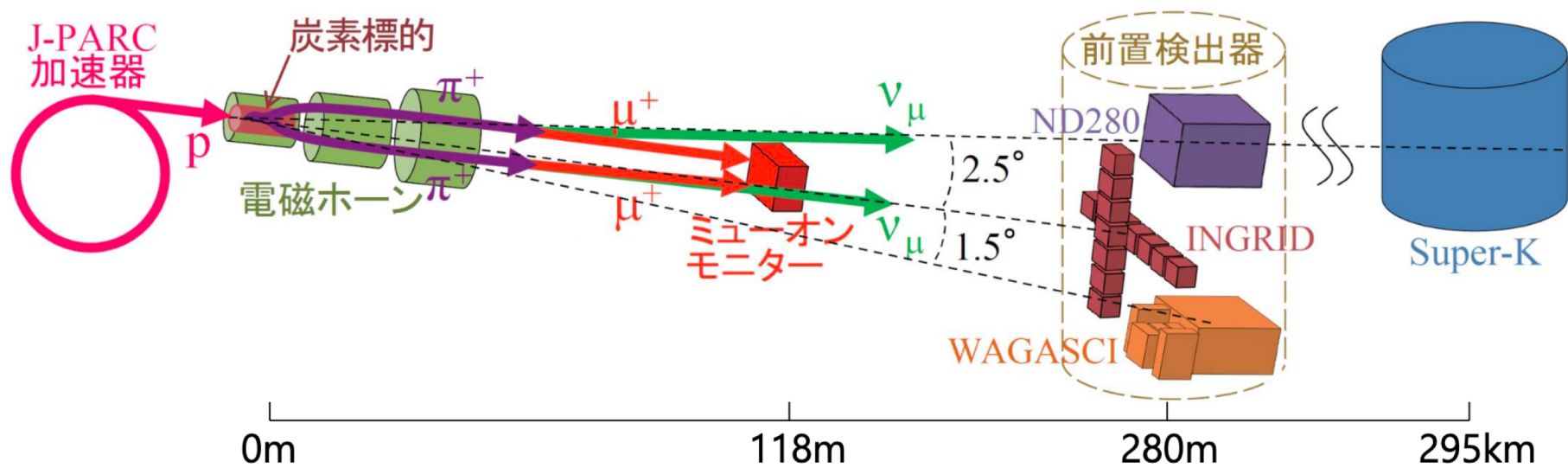




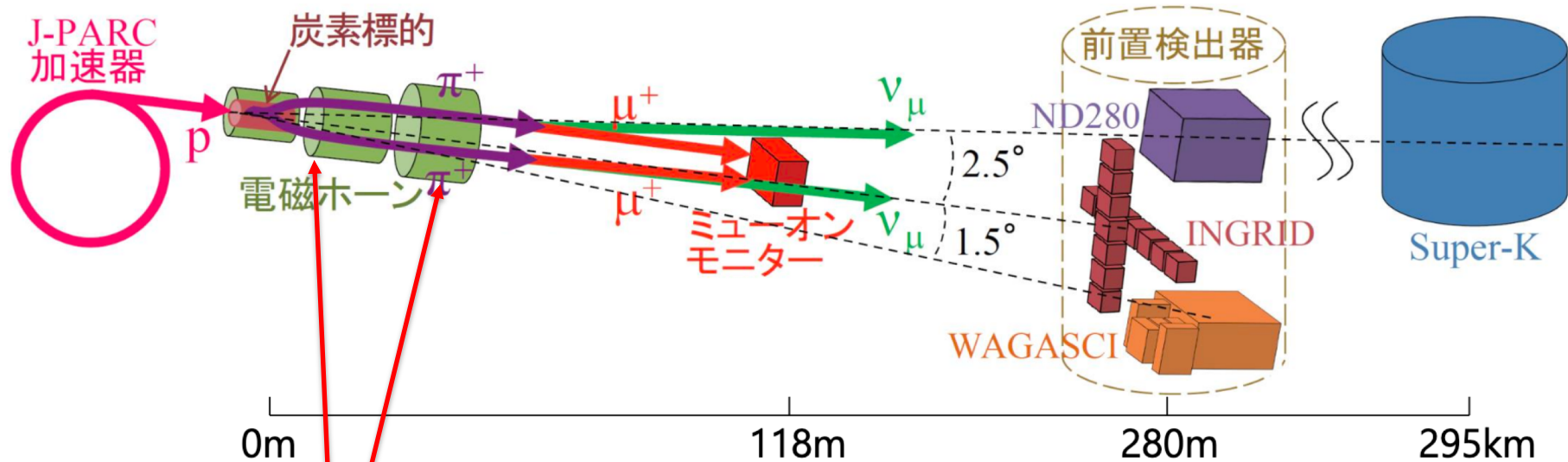
- 新しい事象再構成ツールを導入し、SKの感度向上に成功
 - ただ、一部のデータにしか適応出来ていない、今後は全データを使うように
 - 中性子タッグによるニュートリノと反ニュートリノを識別
- SKとT2Kと共同で解析すると、CP破れ感度が向上
 - SKの感度は主に、質量階層性へ
 - T2Kは主に、CPへ

関連研究

ニュートリノフラック予測：

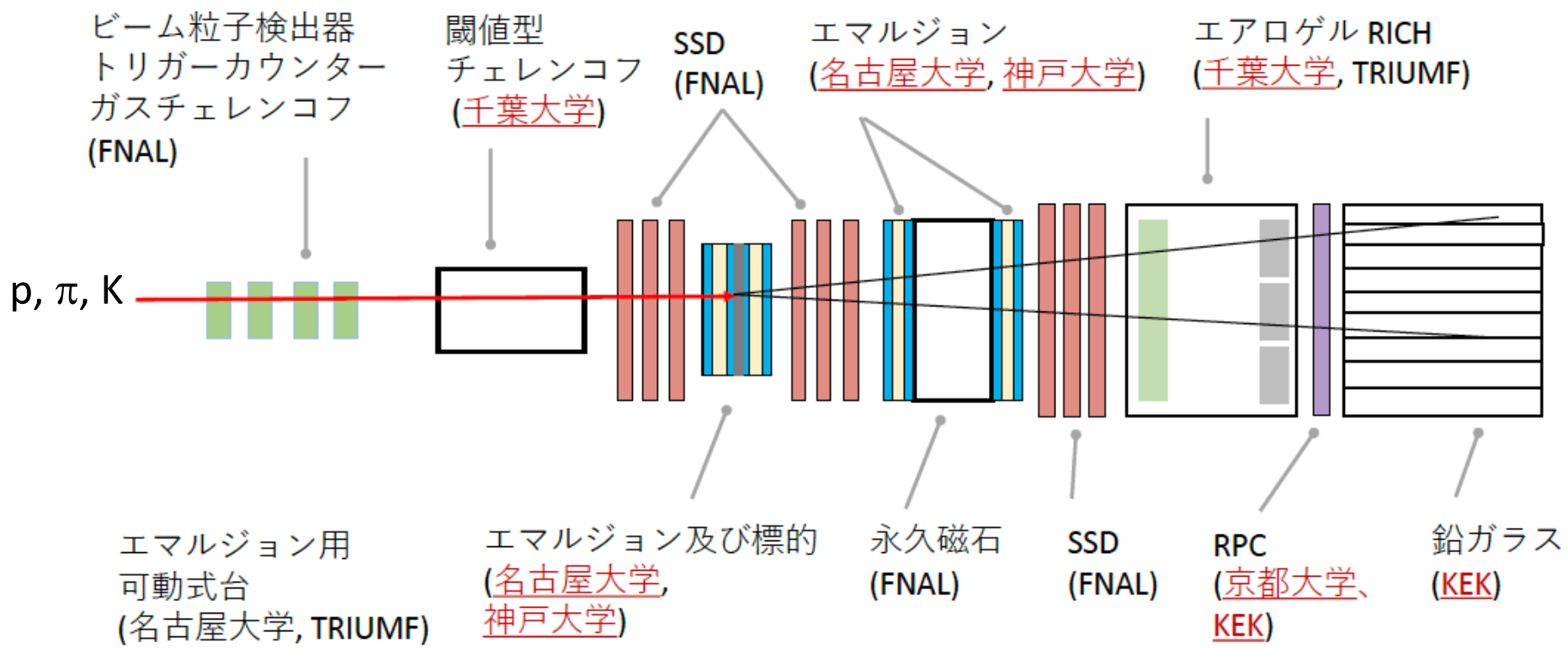


ニュートリノフラック予測：



- 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)

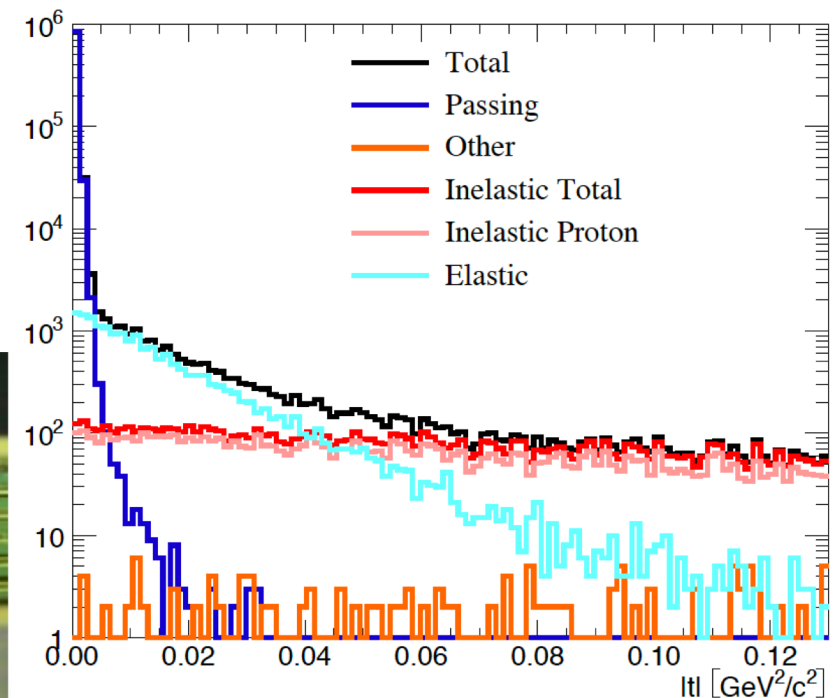
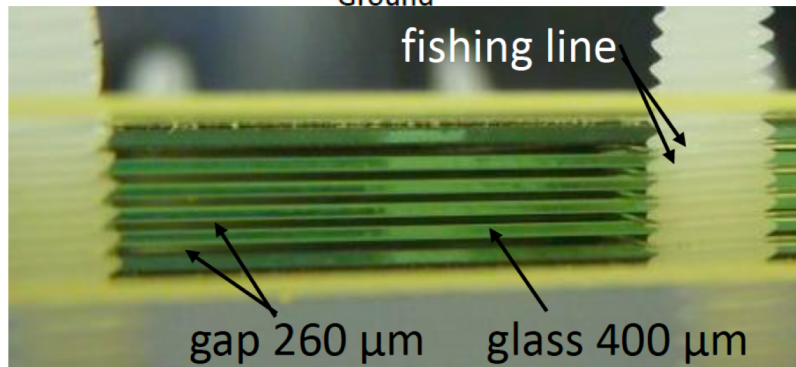
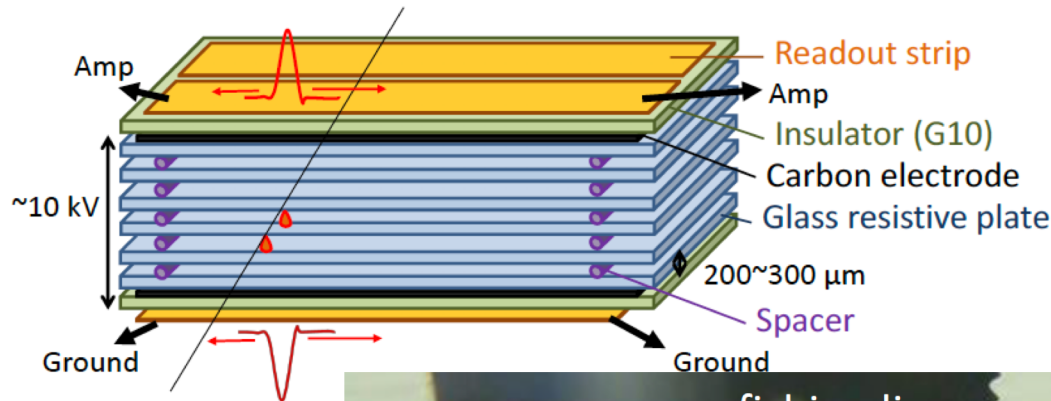


- 陽子ビームと様々な標的を使って精密にハドロン散乱・生成断面積を計る
 - FNALの1~120 GeV/c の 粒子

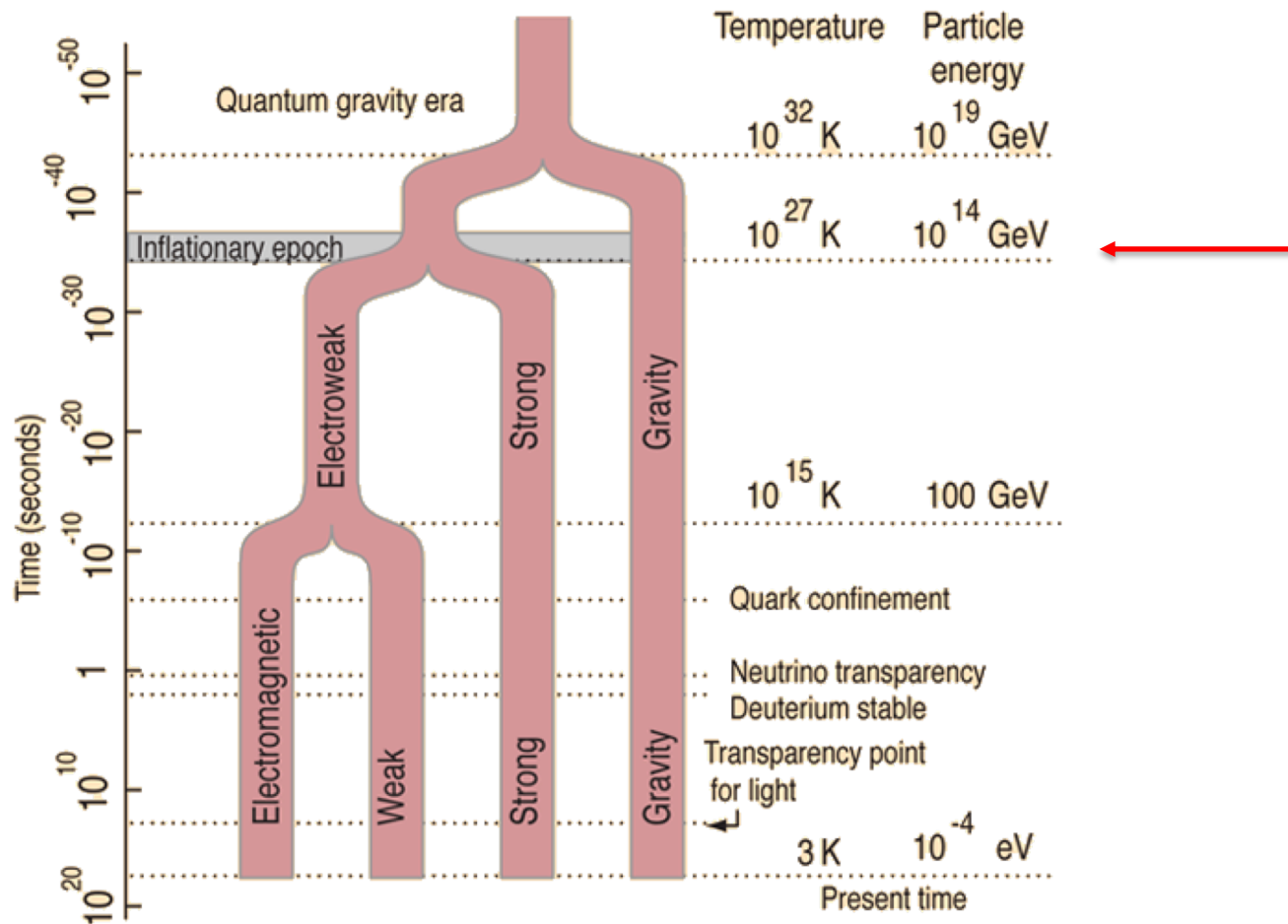
EMPHATIC:

- 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
 - エレキの開発、RPC作成、検証

Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC)

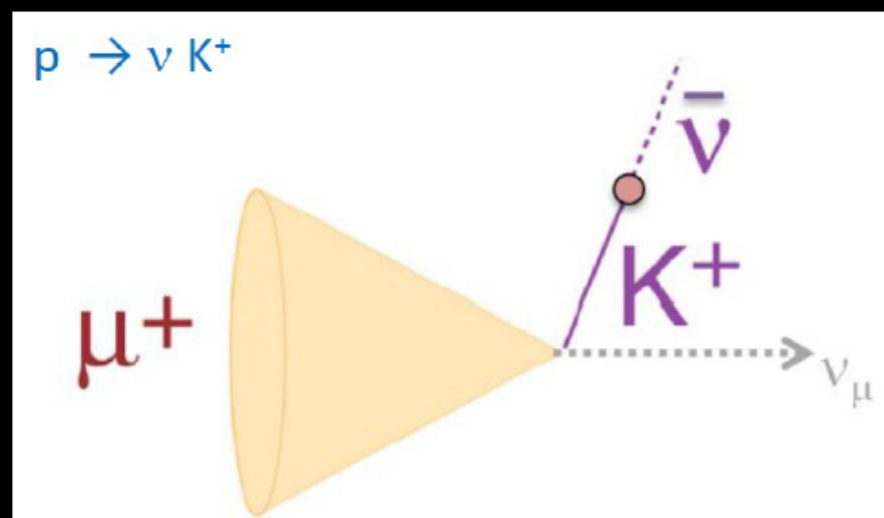
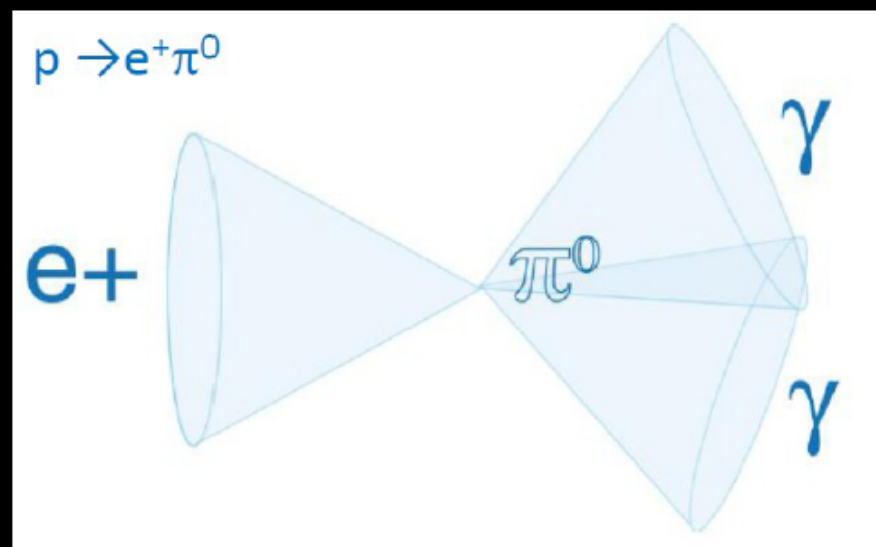


スーパーカミオカンデ: 陽子崩壊

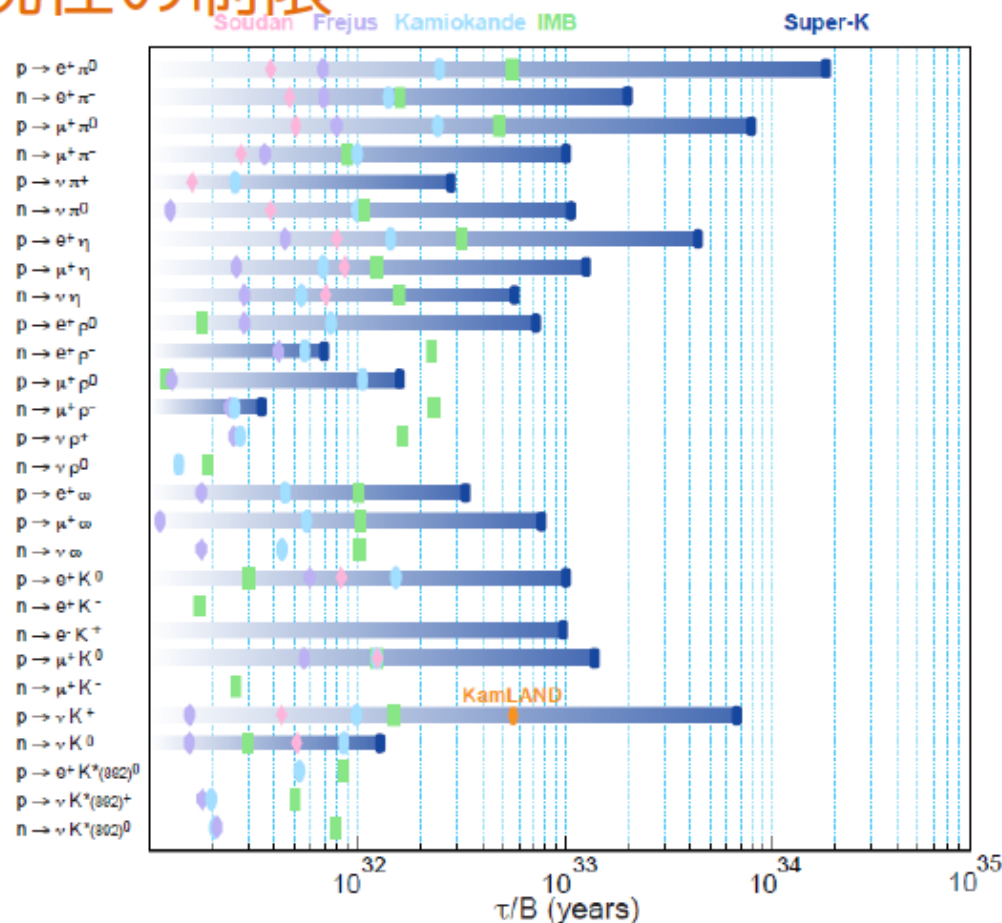


陽子崩壊

- 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



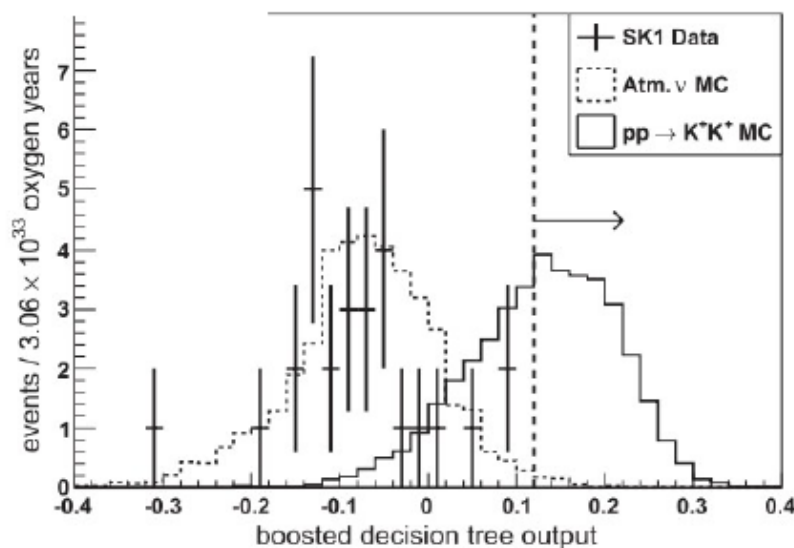
現在の制限



- 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

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

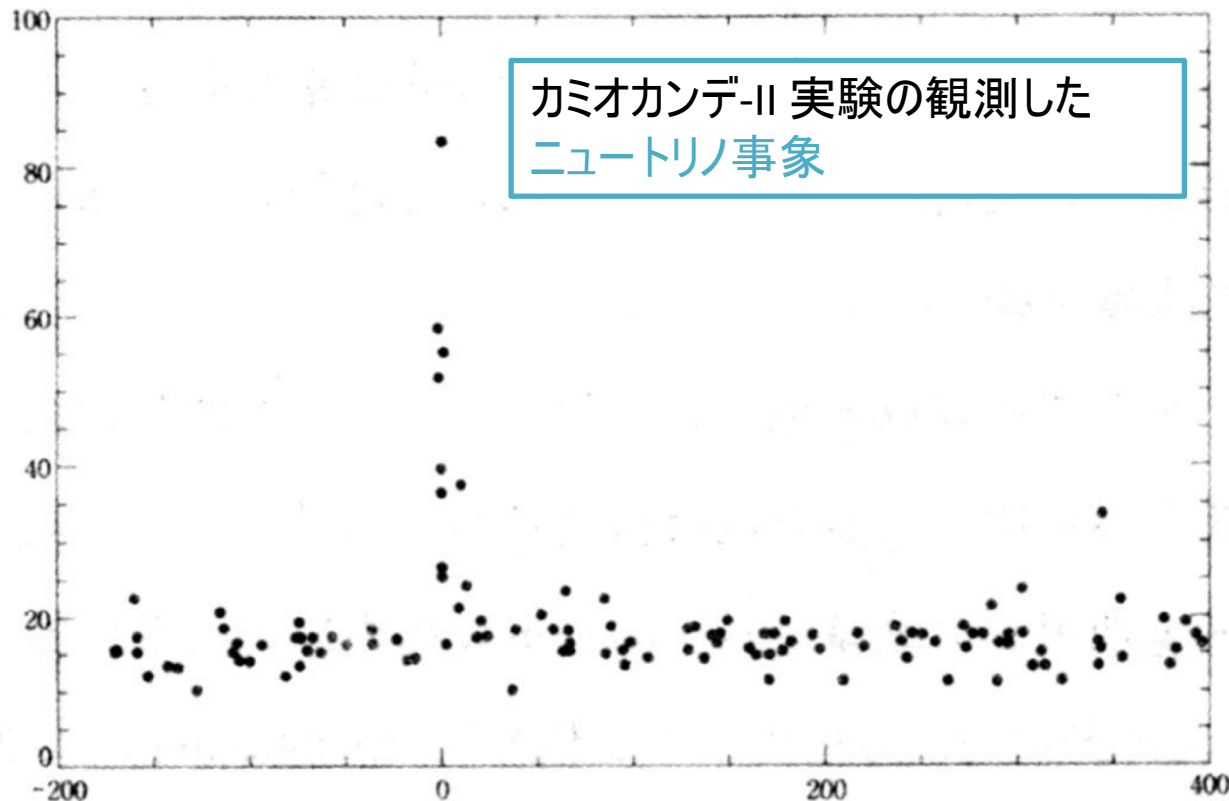


超新星爆発！

超新星爆発： SN1987A 大マゼラン雲 1987年2月24日

前 後

Intensity

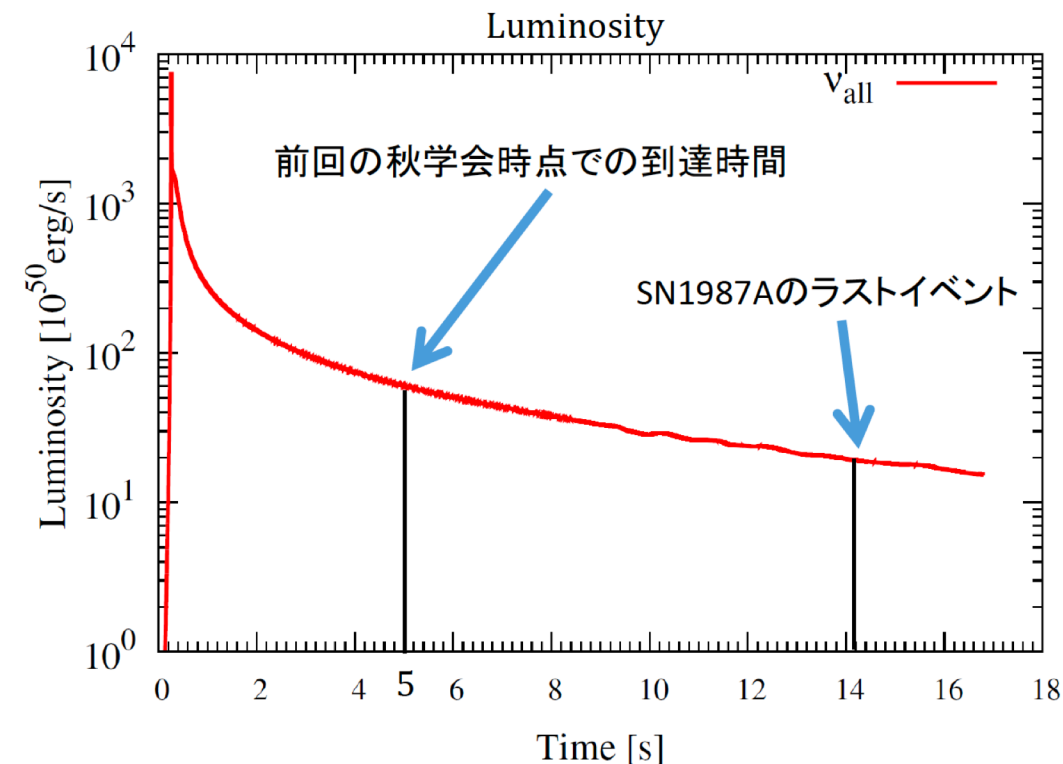


カミオカンデ-II 実験の観測した
ニュートリノ事象

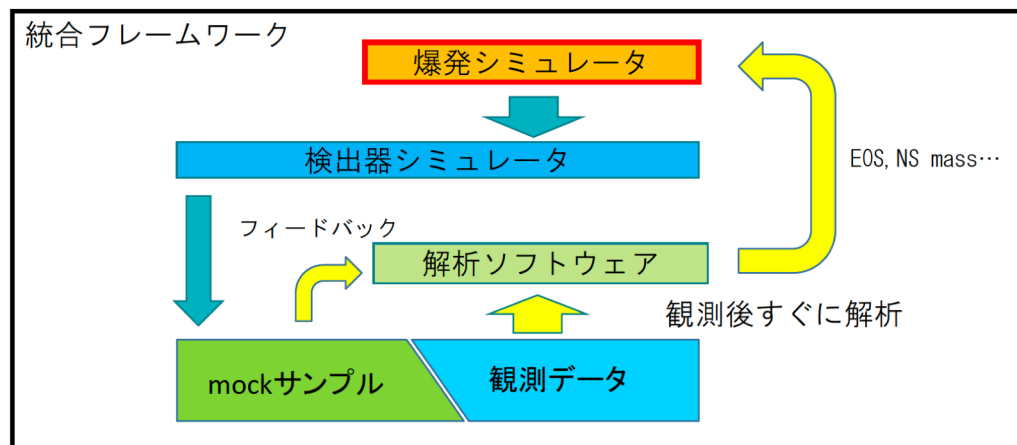
↑ Time(Second)

1987-2-23 7:35:35 a.m. (world standard time)

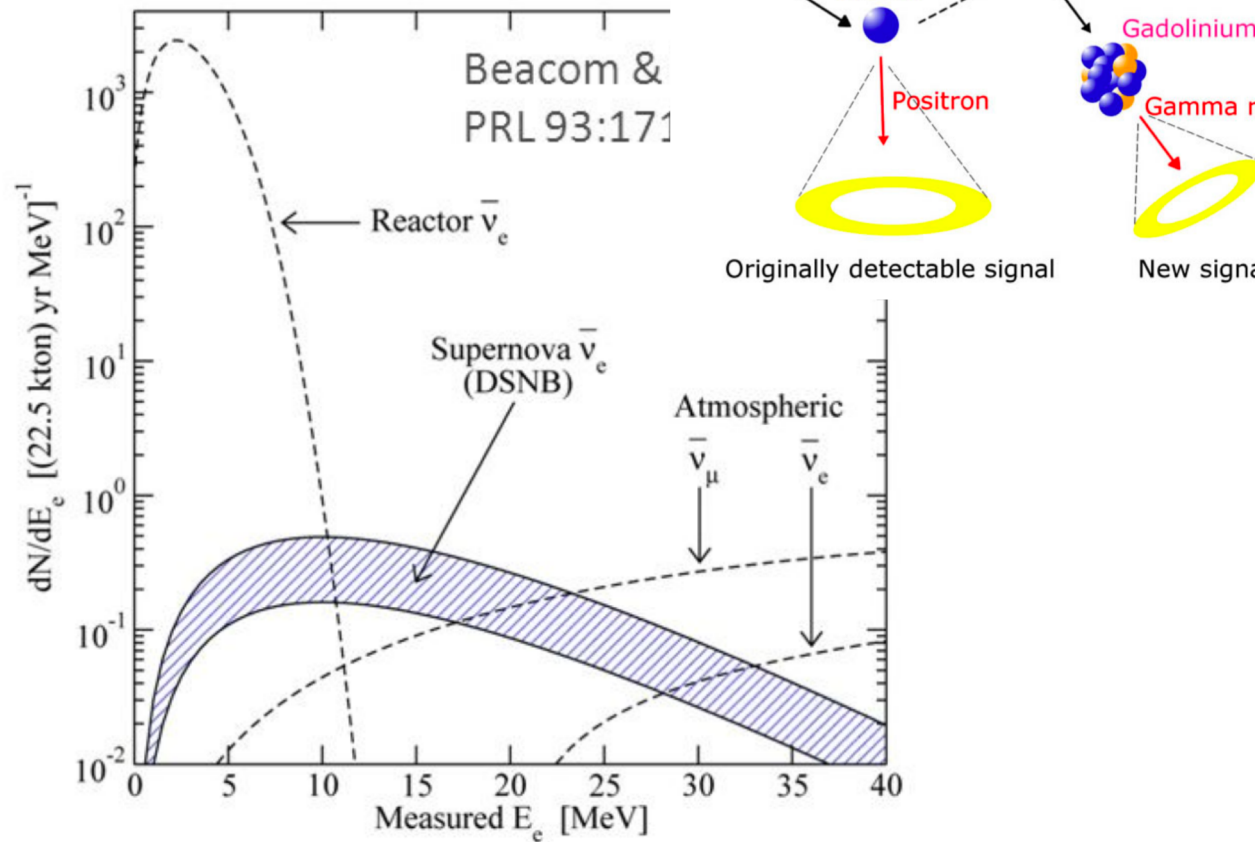
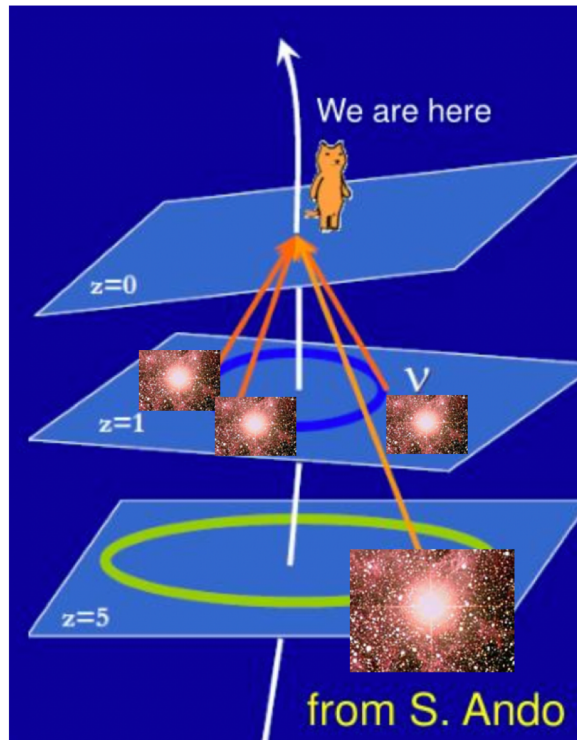
超新星爆発！



- 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）

ハイパーカミオカンデ

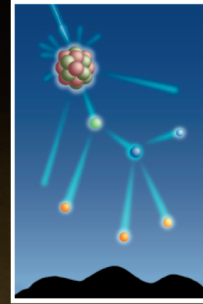
10 × SK + 20 × T2K

2020年4月から建設開始

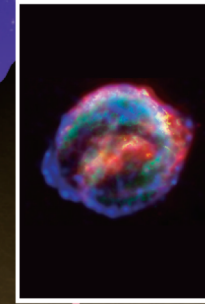
J-PARC 大強度加速器による
高品質ニュートリノビーム



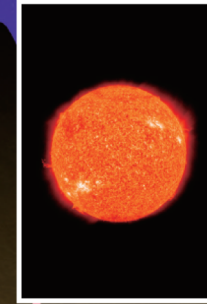
大気



超新星爆発



太陽



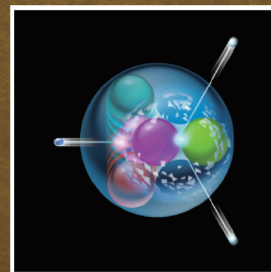
ニュートリノ

ハイパーカミオカンデ装置

スーパーカミオカンデの
約10倍の有効質量と2倍の光感度

総質量 26万トン
有効質量 19万トン

陽子の崩壊



新型光センサー
(従来の2倍の感度)
4万本



水槽 (超純水)
直径74m × 高さ60m

■ 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 ν +ビーム ν (江)

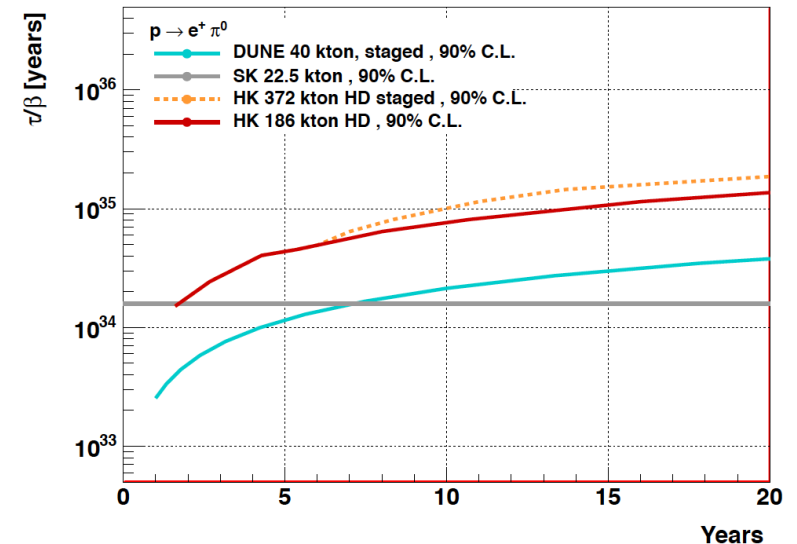
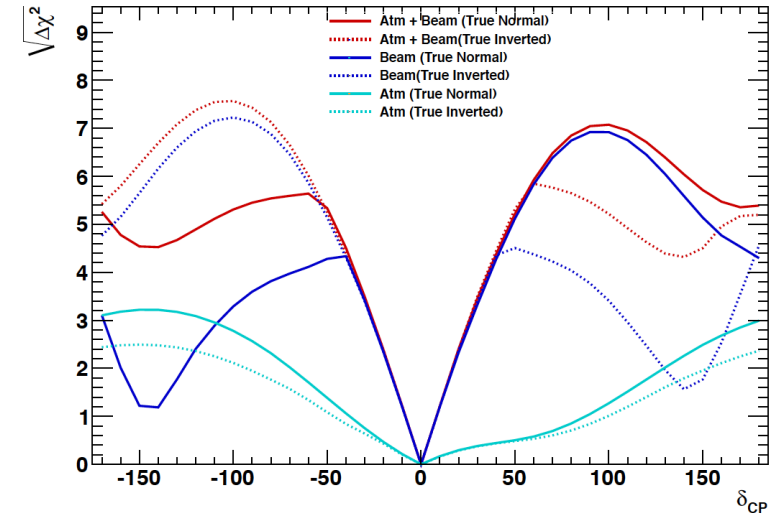
■ T2KとSKで出来ない物理も可能

- 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

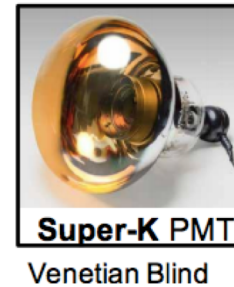
- 光検出器の評価 (東大：須田)
- 光検出器のAMP開発 (江)

■ HKシミュレーション (東工大：岡島)

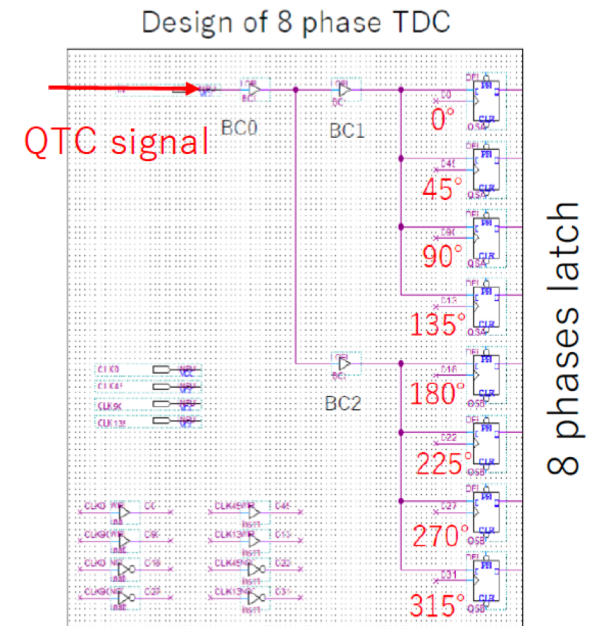


ハイパーカミオカンデR&D課題

- 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



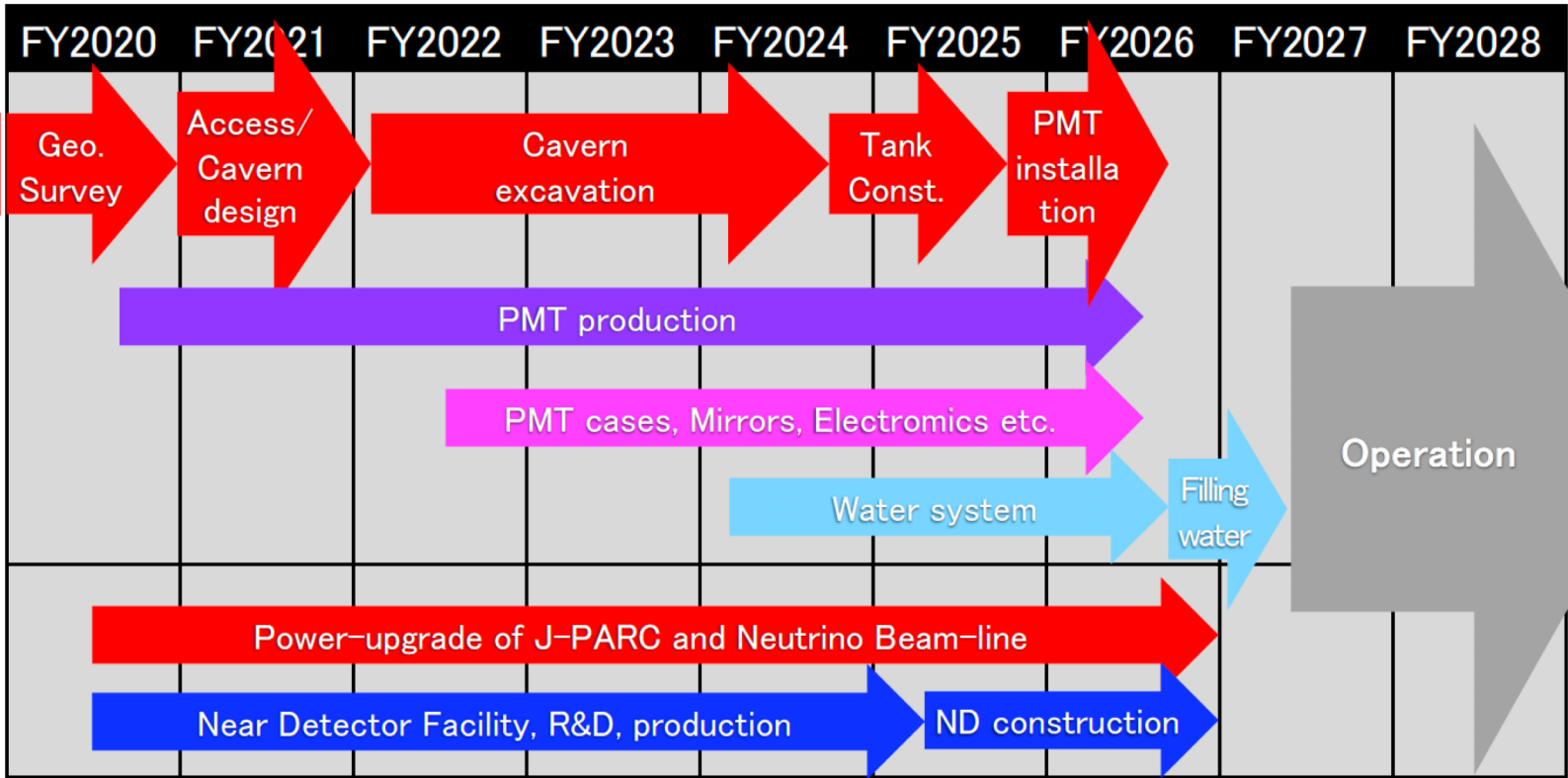
MCP-PMT
フー君



ハイパーカミオカンデR&D課題

■ 昨年度予算が付いた

- We are here; February 2020.
- Aiming at operation start in 2027.



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:

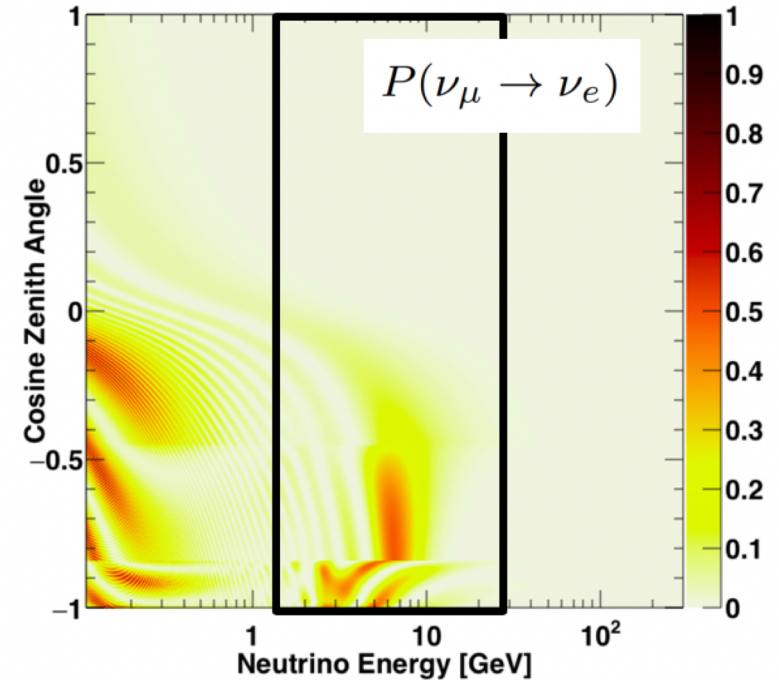
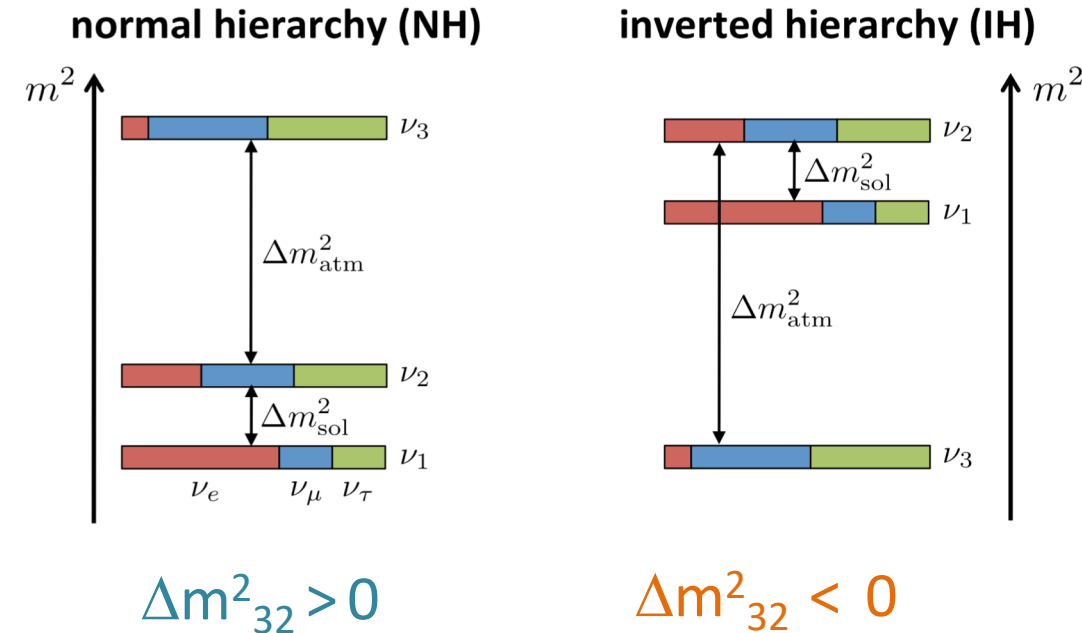
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/publications/index.html>

FIN

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



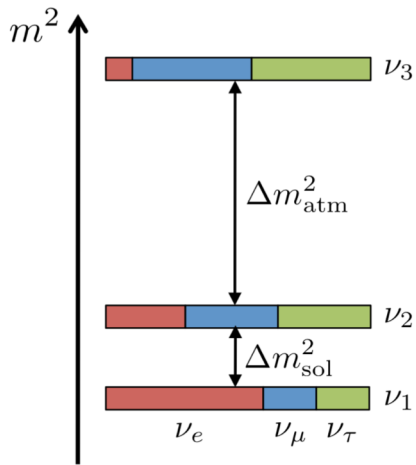
- 質量階層性はCP測定の邪魔（振動確率の縮退を起こす）
 - 大統一理論と関係している
- 大気ニュートリノと反ニュートリノの振動が質量階層性に依存
- 関連領域において再構成が難しい

大気ニュートリノで測定

階層性が未決定

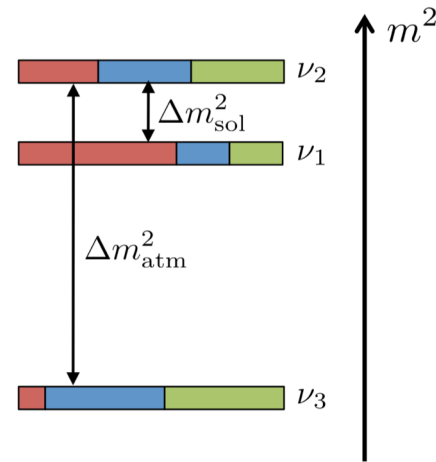
NH: 反ニュートリノの場合

normal hierarchy (NH)

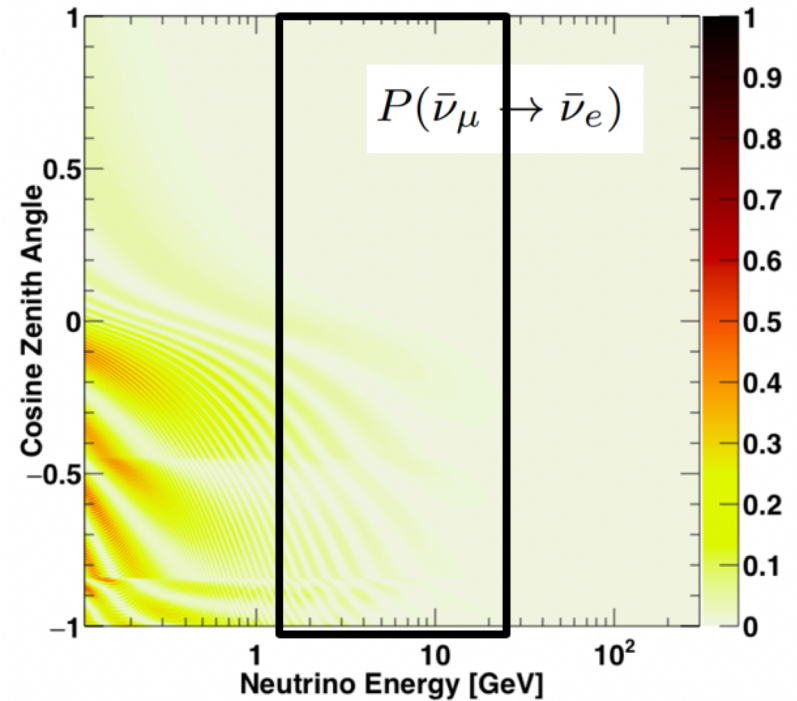


$$\Delta m_{32}^2 > 0$$

inverted hierarchy (IH)



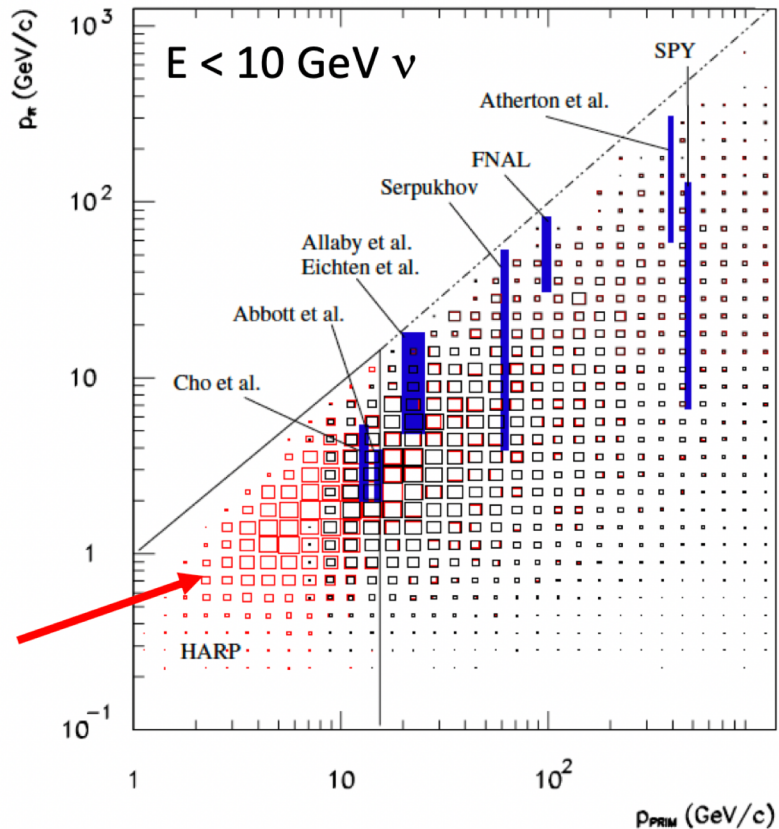
$$\Delta m_{32}^2 < 0$$



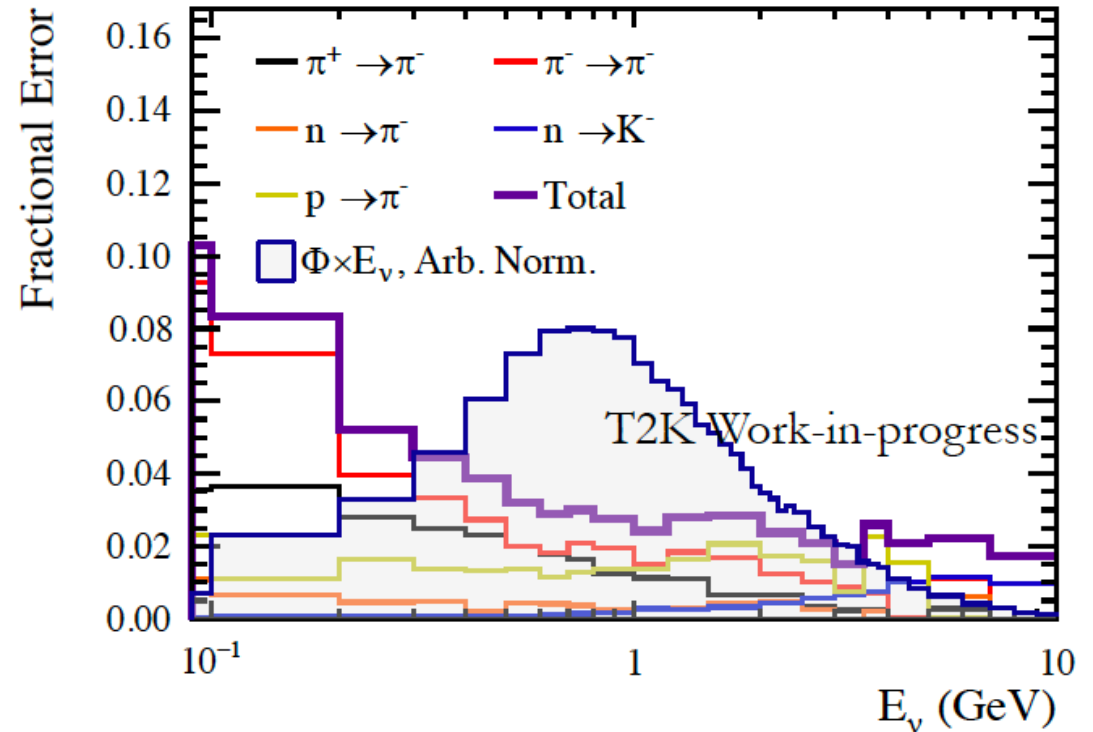
- 質量階層性はCP測定の邪魔（振動確率の縮退を起こす）
 - 大統一理論と関係している
- 大気ニュートリノと反ニュートリノの振動が質量階層性に依存
- 関連領域において再構成が難しい

ニュートリノフラック予測：不訂正

PHYSICAL REVIEW D **74**, 094009 (2006)



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



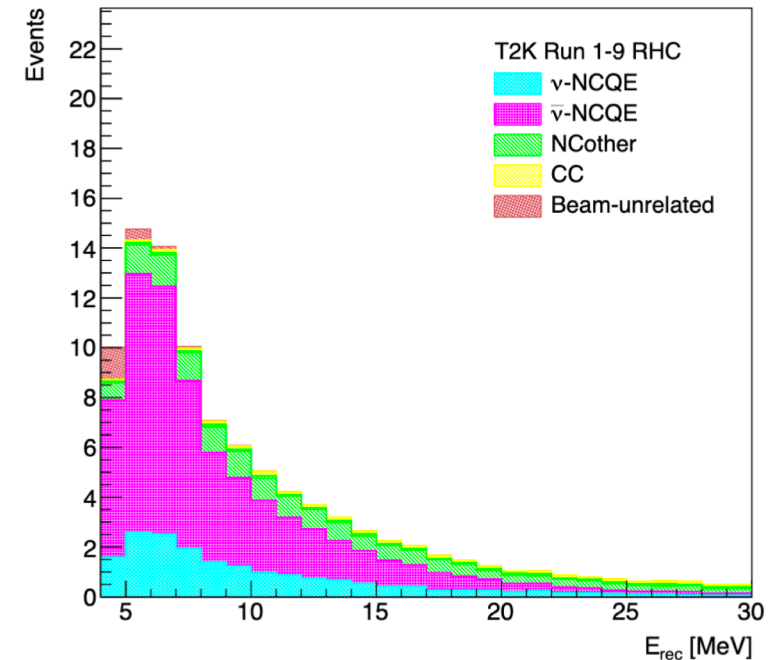
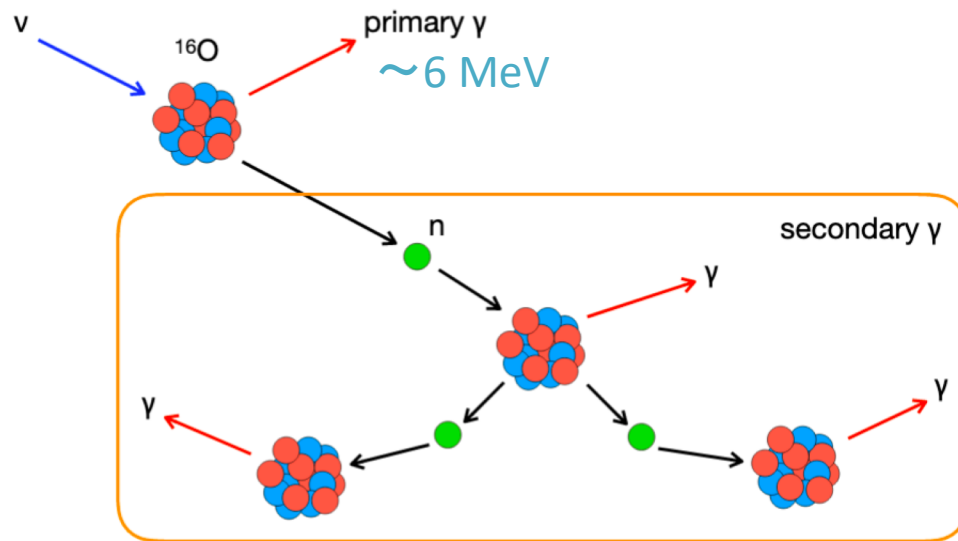
- ニュートリノフラックスを理解するため、ハドロン生成実験とモデルの開発が必要
- 低運動量の粒子により生成されているニュートリノには大きな不訂正がまだついている

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