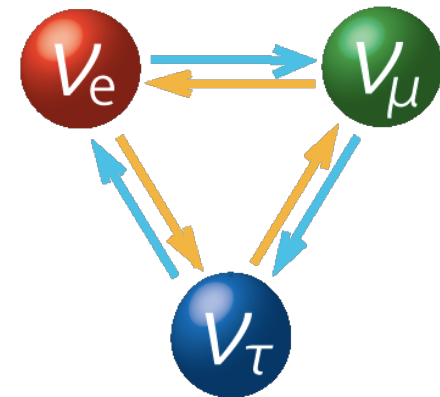


T2K実験

南野彰宏(京都大学)
他 T2Kコラボレーション

平成25年度宇宙線研究所共同利用成果発表会
2013年12月20日

T2K実験



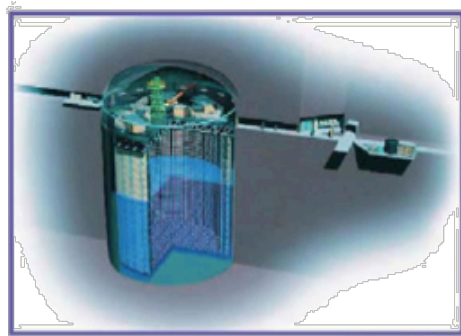
- J-PARCでほぼ純粋な ν_μ ビームを生成。
- 生成点直後の前置検出器と295km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノを観測。



- ニュートリノ振動の精密測定。

T2K実験における振動モード

1. $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (ν_e 出現モード)
2. $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 以外 (ν_μ 消失モード)



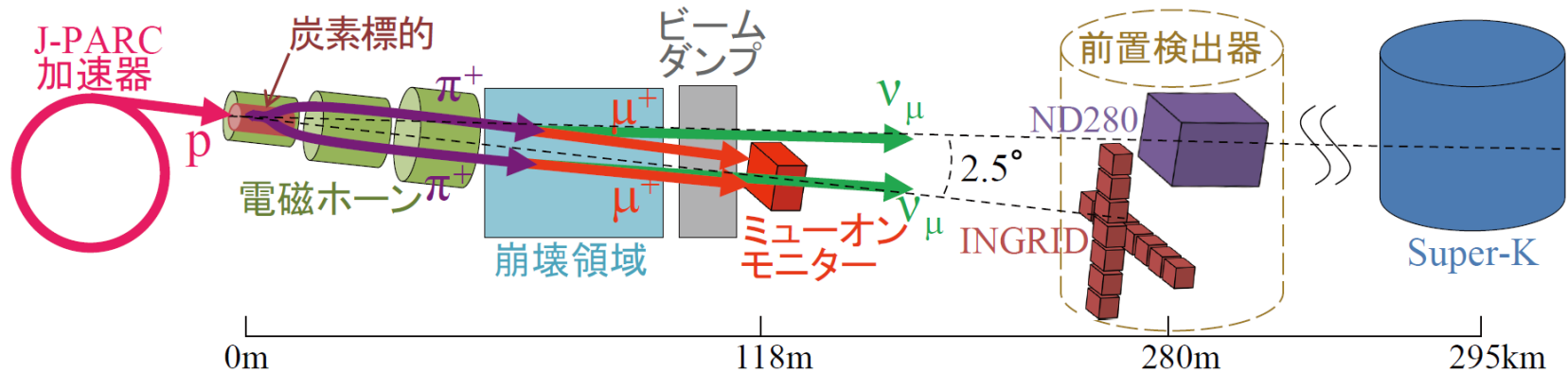
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



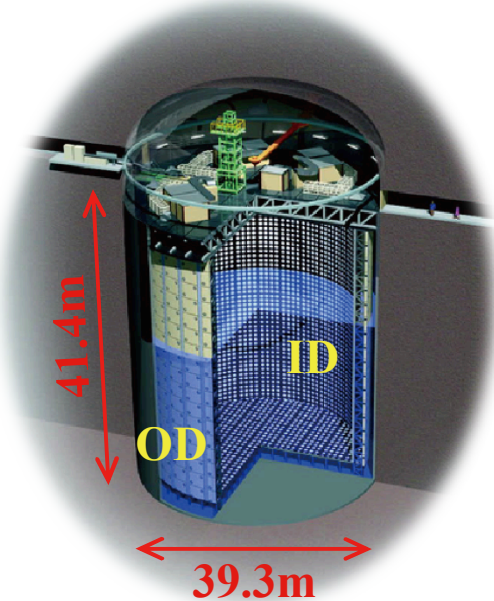
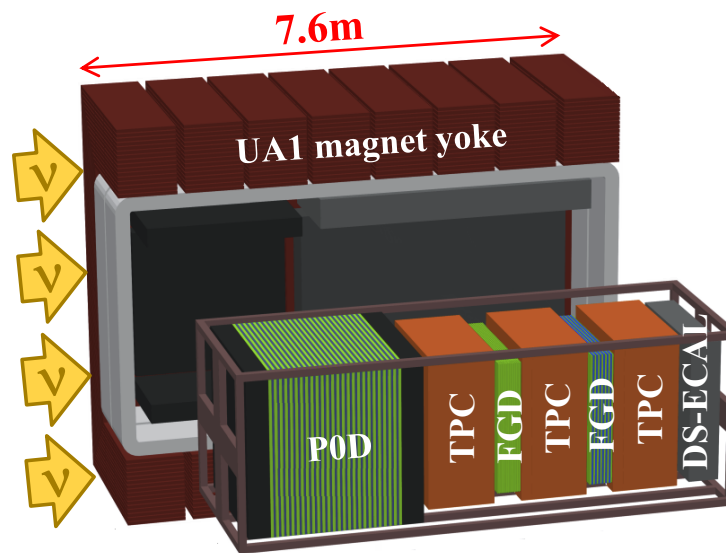
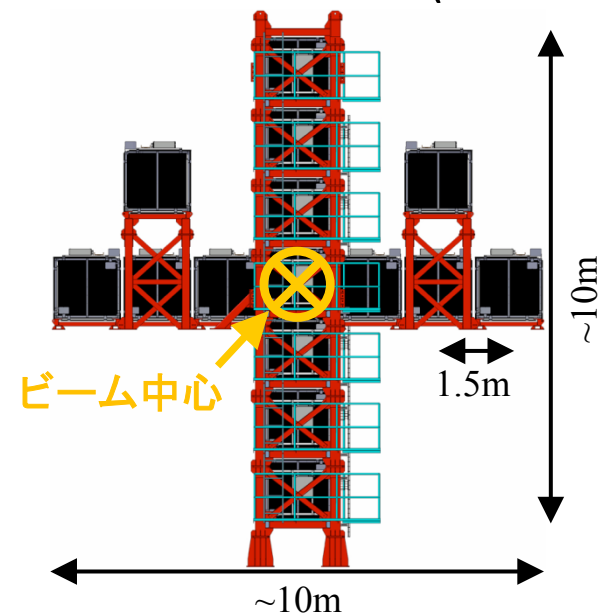
ニュートリノ検出器



on-axis前置検出器(INGRID)

off-axis前置検出器(ND280)

後置検出器(Super-K)



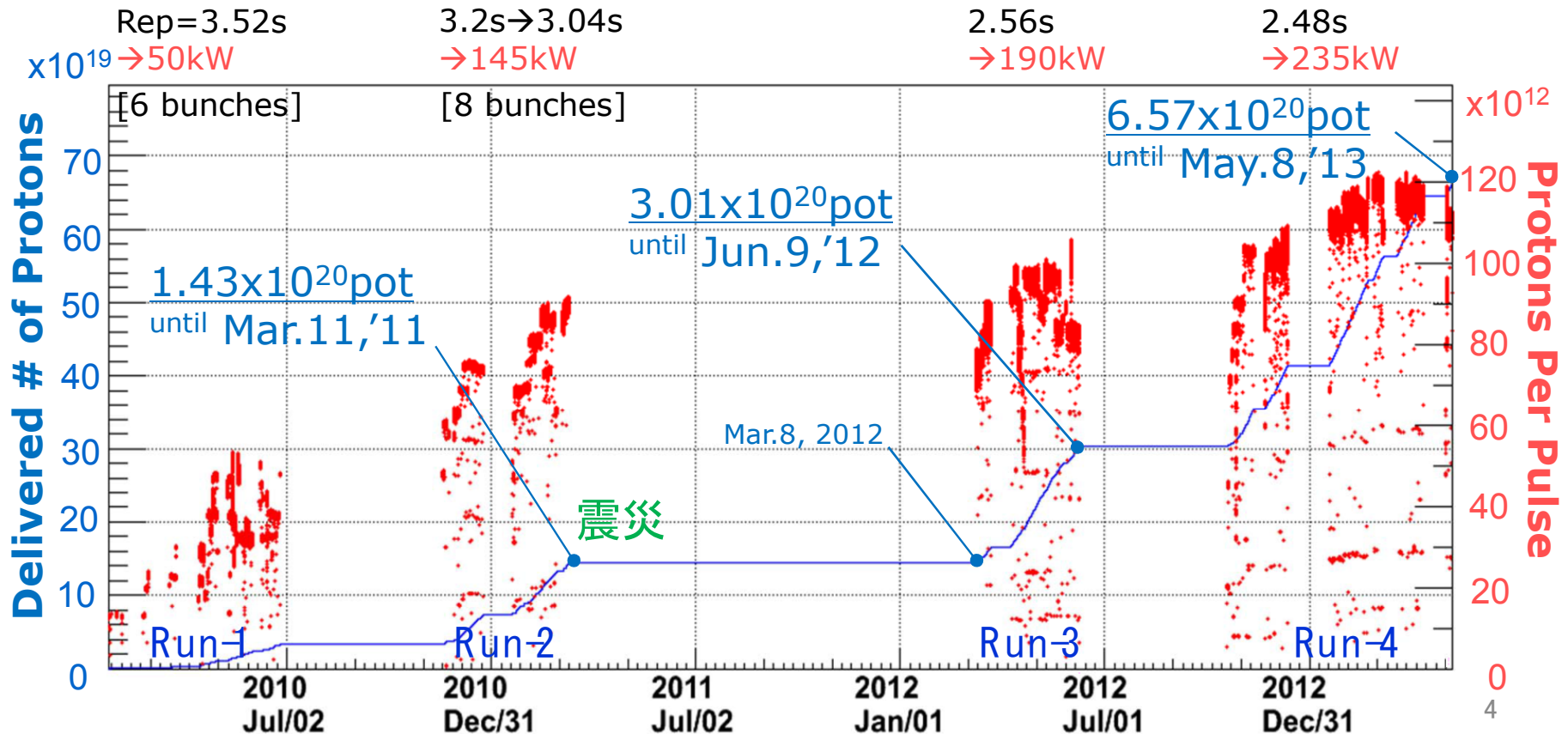
- 16台の同一モジュール
- ν ビーム方向をモニター

- 複合型検出器(FGD, TPCなど)
- 振動前の ν flux/spectrumを測定

- 50kt水チェレンコフ検出器

データ

- 6.57×10^{20} POT (Proton On Target)のデータを取得。
→T2K実験の目標統計の8%
- 最高235kWでのビーム運転を達成。(設計値は750kW)



ニュートリノ振動解析の流れ

ν フラックス予測

- ハドロン生成実験データ (特にNA61@CERN)
- ビームモニター測定
- Geant3ベースのシミュレータ

ν 反応断面積

- MiniBooNE等の実験データでモデル構築&誤差見積り (シミュレータ=NEUT)

ND280の測定

- μ の運動量と角度分布

ND280フィット

- SKとND280で相関が強い systematicパラメータの誤差を削減

SK予測

ND280フィット後のsystematicパラメータとその誤差



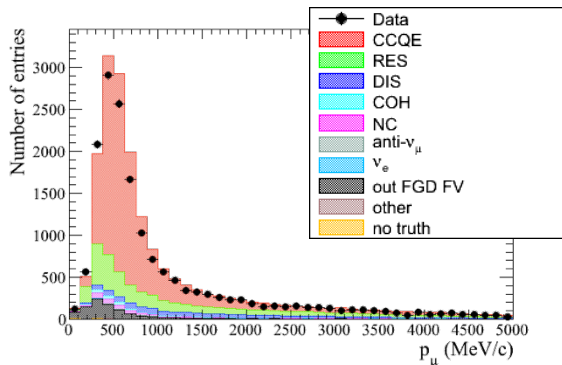
SK測定

イベント数とエネルギースペクトラム

ND280の測定とフィット

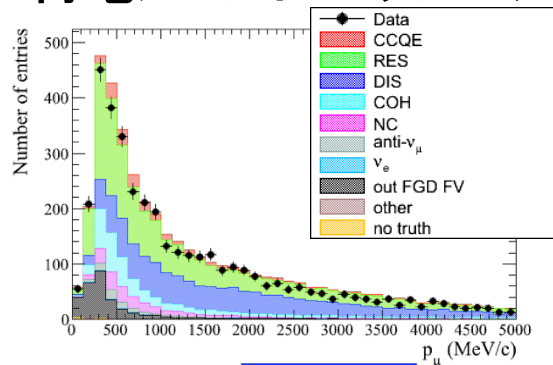
- 各ニュートリノ相互作用を高純度化した3サンプルに分類。
- ミューオンの運動量、角度分布をフィット。
- SKとND280で相関の強いsystematicパラメータとその誤差を導出。

荷電カレント0 π サンプル



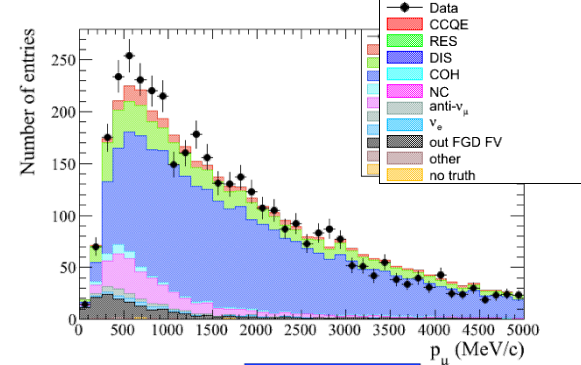
フィット

荷電カレント1 π サンプル

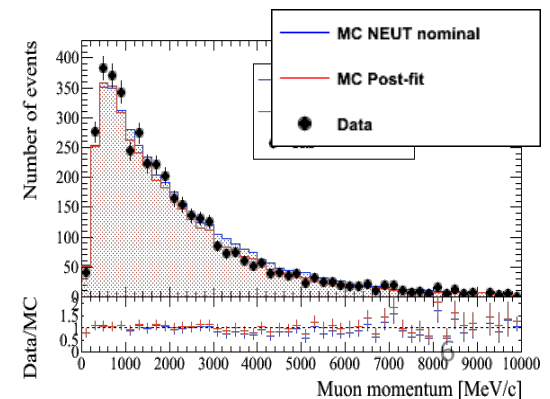
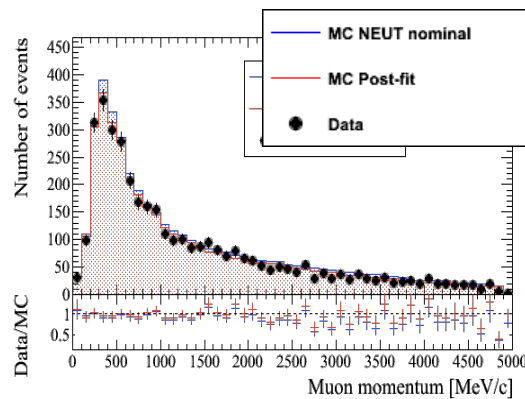
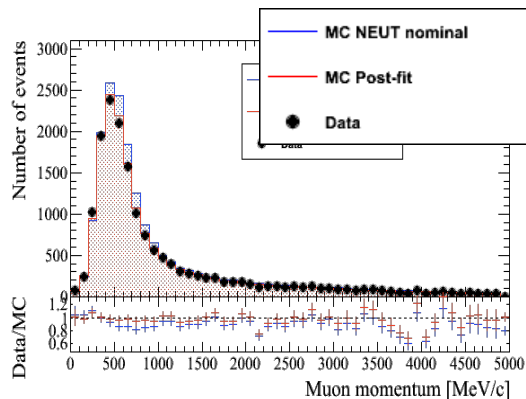


フィット

荷電カレントその他



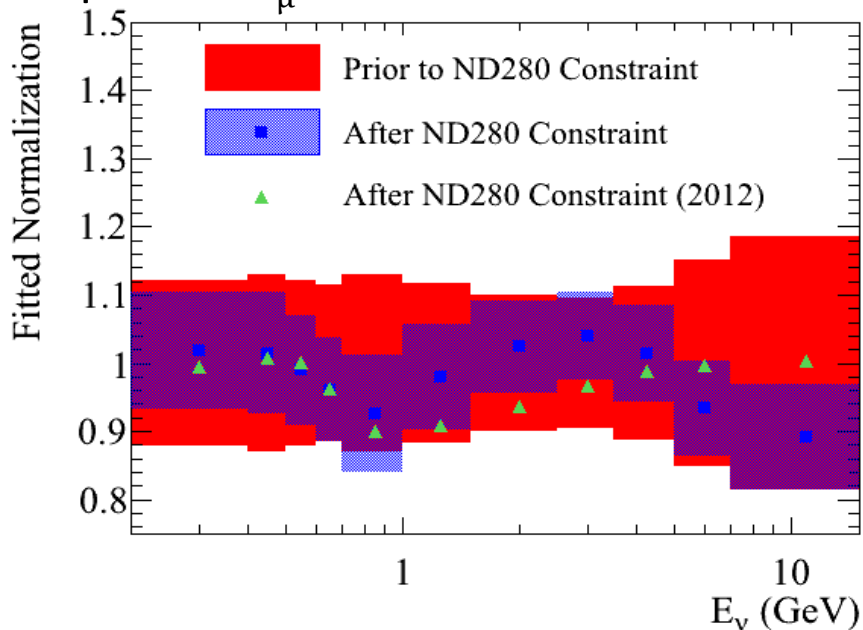
フィット



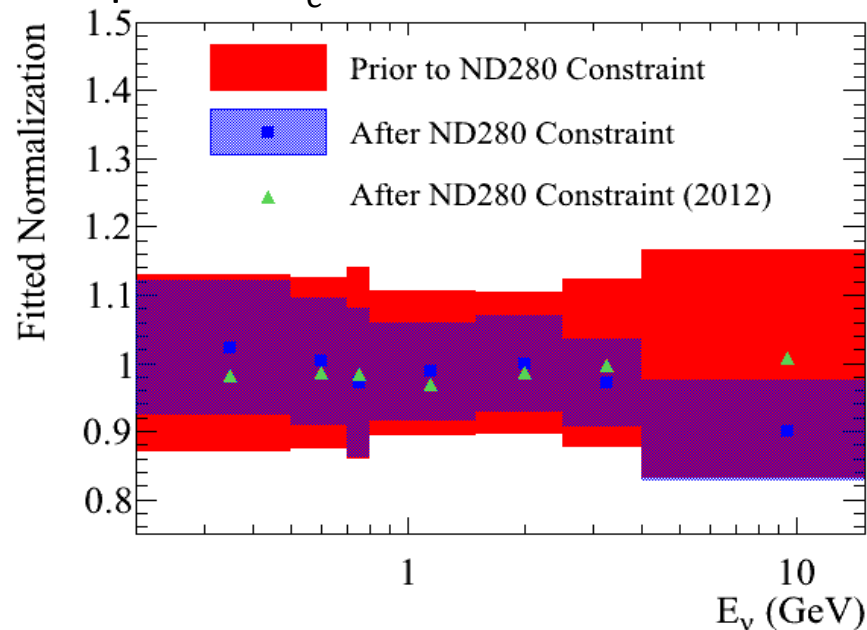
ND280フィットによる誤差の削減

- ν フラックスと ν 反応断面積のsystematicパラメータのうち、Super-KとND280で相関が強いものの誤差を削減。

Super-Kの ν_μ フラックスの規格化と誤差



Super-Kの ν_e フラックスの規格化と誤差



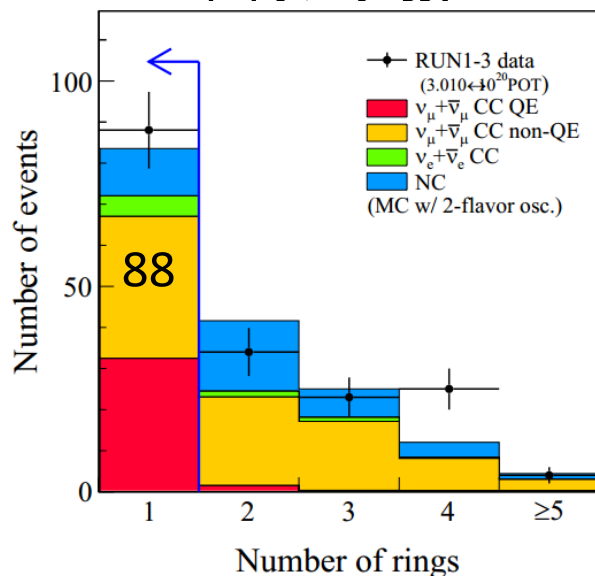
ν_μ 消失モードの解析結果

Phys. Rev. Lett. 111, 211803 (2013)

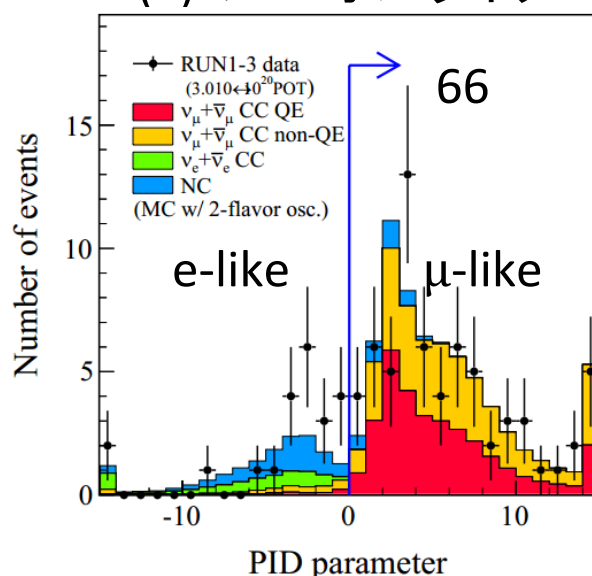
2012年6月までのデータ
3.01x10²⁰ POT

Super-Kの ν_μ イベント選択 (3.01×10^{20} POT)

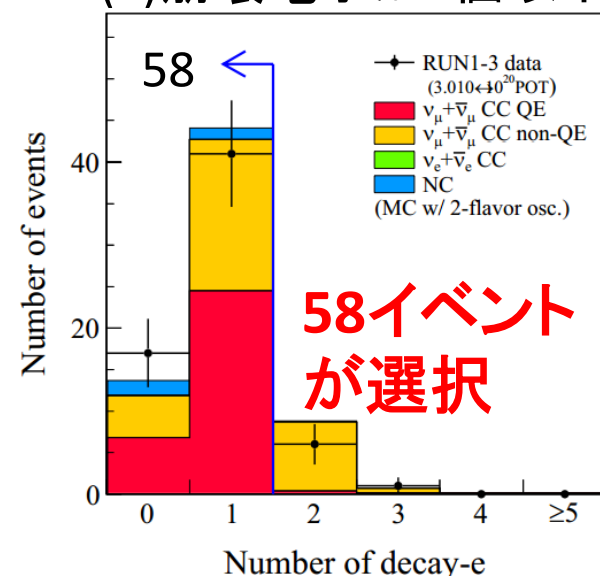
(1) リング数=1



(2) ミューオンライク



(3) 崩壊電子が1個以下



Super-Kでの ν_μ 候補イベント数に対する系統誤差

Systematicパラメータ	ND280フィット前	ND280フィット後
ν フラックス/反応 (ND280フィット)	21.8%	4.2%
ν 反応 (ND280フィットしない)		6.3%
Super-K		10.7%
Total	25.1%	13.1%

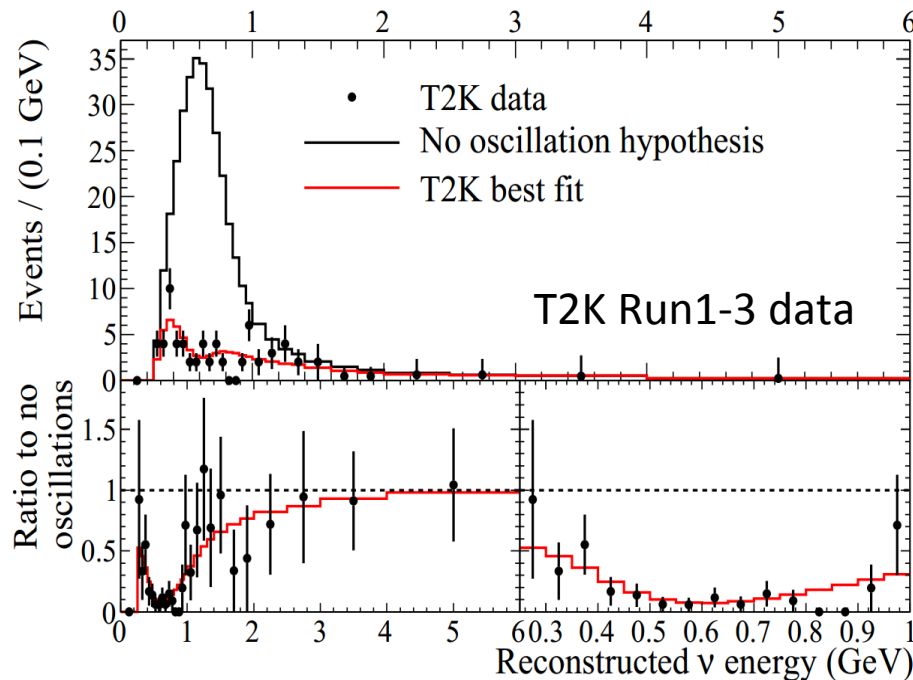
$|\Delta m_{32}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4, \sin^2 2\theta_{23} = 1.0$ の場合

ν_μ 消失モードの解析結果 (3.01×10^{20} POT)

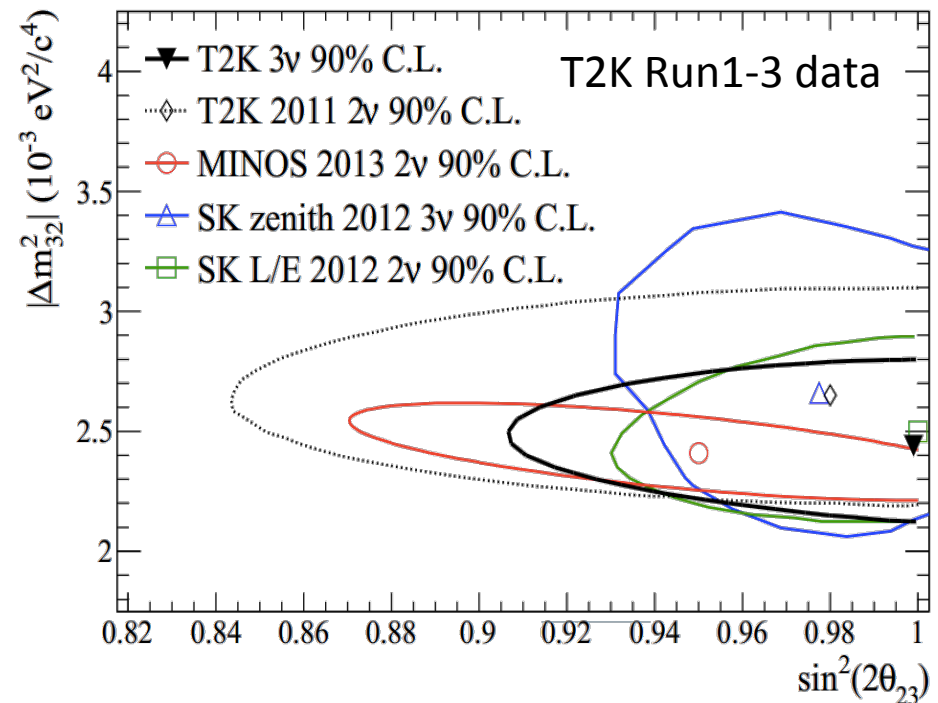
- Super-Kでのエネルギー分布を尤度比を用いてフィット。
- Run1-3のデータで世界最高レベルの精度で測定。

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.514 \pm 0.082, \quad |\Delta m_{32}^2| = 2.44_{-0.15}^{+0.17} \text{ eV}^2/c^4$$

再構成されたエネルギー分布



$\sin^2 2\theta_{23} - |\Delta m_{32}^2|$ の信頼領域



- 2013年5月までのデータの解析結果を近日発表予定。

ν_e 出現モードの解析結果

arXiv:1311.4750 [hep-ex]

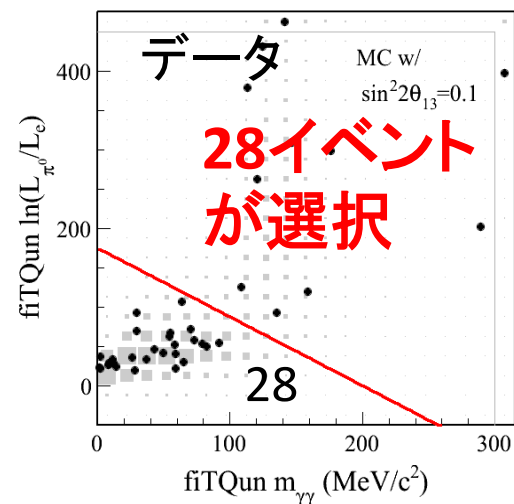
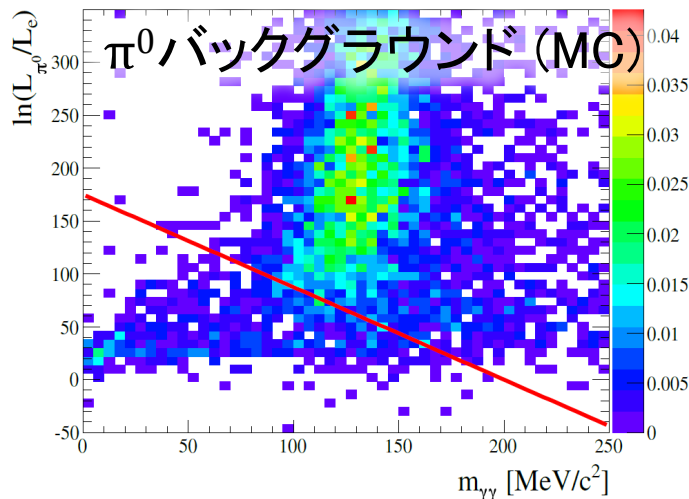
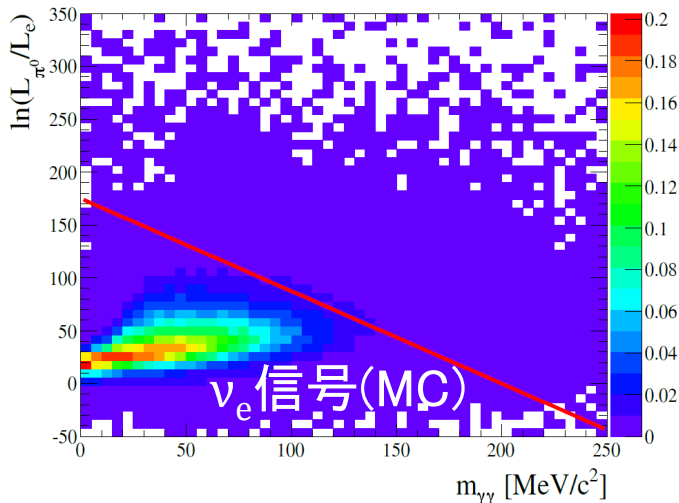
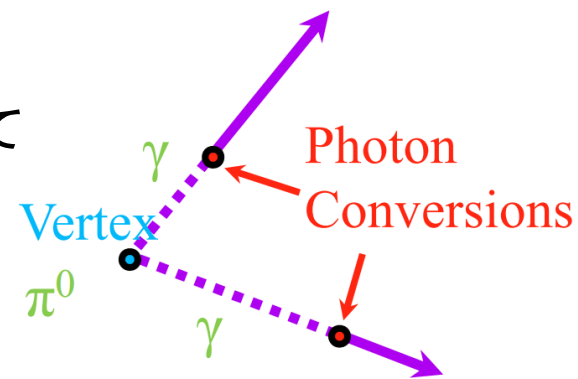
accepted by PRL

2013年5月までのデータ

6.57×10^{20} POT

Super-Kの ν_e イベント選択 (6.57×10^{20} POT)

- イベント再構成アルゴリズム
 - 従来: リングの発光パターンでフィット (POLfit)
 - 今回: 様々な粒子を想定し、時間・電荷を予想して複数の飛跡までフィット (fitQun)
- π^0 除去以外のイベント選択: 従来と同じ
- π^0 除去
 - 従来: 再構成した π^0 質量のみでカット
 - 今回: 再構成した π^0 質量と尤度比を用いた2次元カット
- ν_e イベント数は-2%, π^0 B.G.は-70% (従来との比較)



ν_e 候補イベント数と系統誤差(6.57×10^{20} POT)

Super-Kでの ν_e 候補イベント数(ND280フィット後)

データ	28	
MC	$\sin^2 2\theta_{13}=0$	$\sin^2 2\theta_{13}=0.1$
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 信号	0.4	17.3
ν_e B.G.	3.4	3.1
ν_μ B.G.	0.9	0.9
$\bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu$ B.G.	0.2	0.2
MC 合計	4.9	21.6

$\sin^2 2\theta_{23}=1.0$, $\Delta m_{32}^2=3.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ (Normal hierarchy), $\delta_{CP}=0$

Super-Kでの ν_e 候補イベント数に対する系統誤差

Systematicパラメータ	$\sin^2 2\theta_{13}=0$		$\sin^2 2\theta_{13}=0.1$	
	NDフィット前	フィット後	NDフィット前	フィット後
ν フラックス/反応 (NDフィット)	21.7%	4.8%	25.9%	2.9%
ν 反応 (NDフィットしない)	6.8%		7.5%	
Super-K	7.3%		3.5%	
合計	24.0%	11.1%	27.2%	8.8%

ν_e 出現モードの解析結果(6.57×10^{20} POT)

- Super-Kでの電子のp- θ 分布を最尤法を用いてフィット。
- $\theta_{13}=0$ を 7.3σ で棄却し、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を発見。
- $|\Delta m_{32}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$, $\delta_{CP} = 0$ のとき

Normal hierarchy ($\Delta m_{32}^2 > 0$)

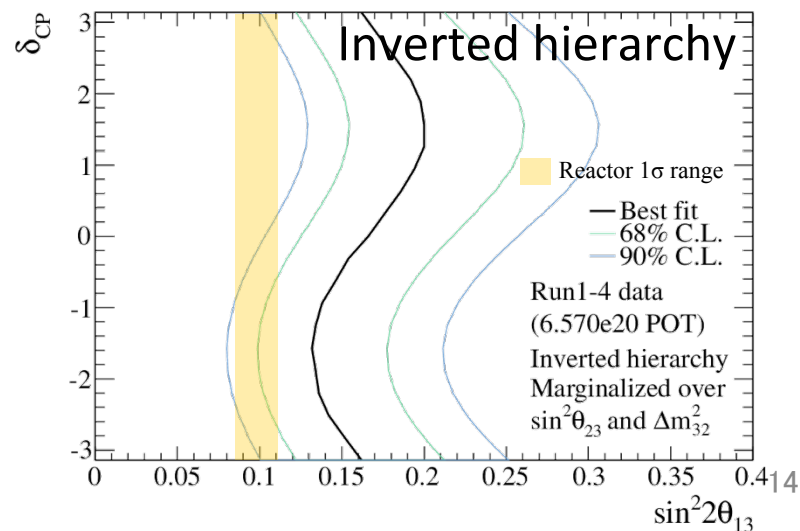
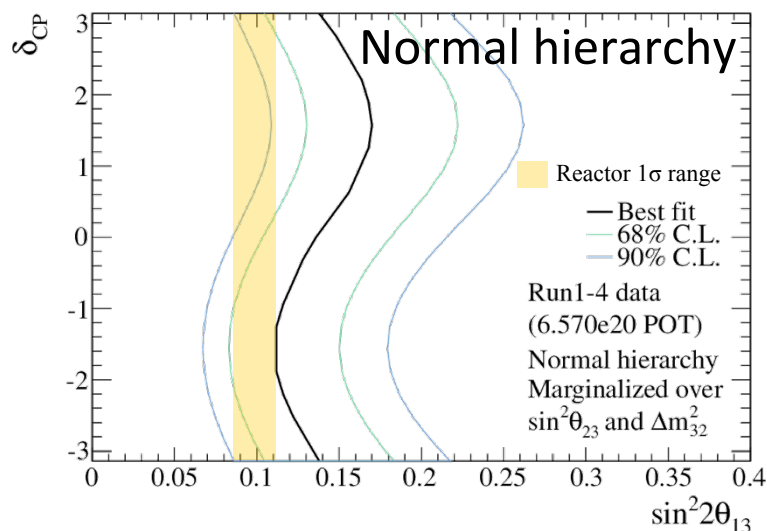
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.140^{+0.038}_{-0.032}$$

Inverted hierarchy ($\Delta m_{32}^2 < 0$)

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.170^{+0.045}_{-0.037}$$

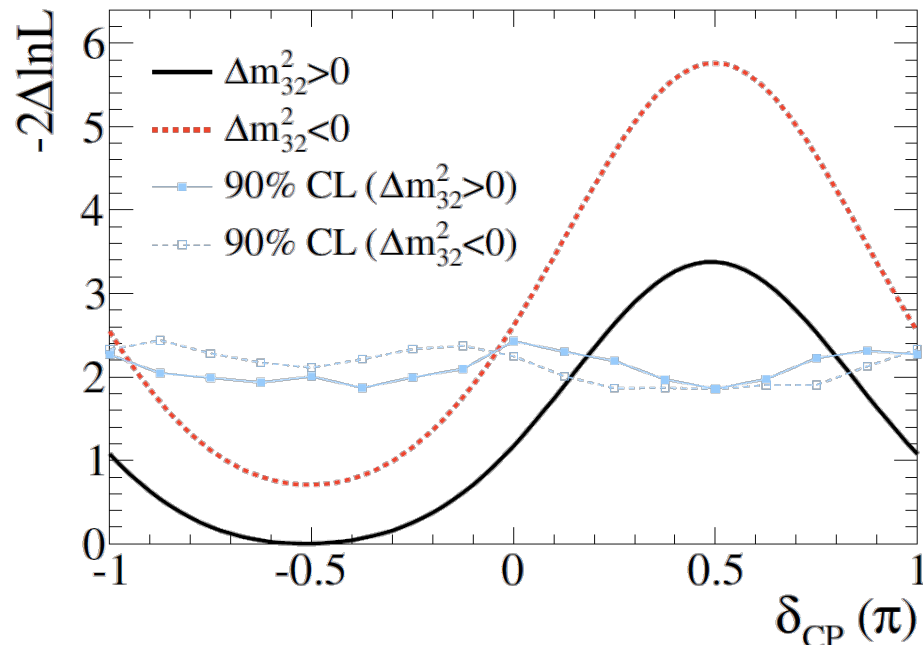
- $\theta_{13} - \delta_{CP}$ の信頼領域

– T2Kの ν_μ 消失モードの解析結果(θ_{23} , $|\Delta m_{32}^2|$ への制限)を尤度関数に追加



δ_{CP} への制限 (6.57×10^{20} POT)

- T2Kの測定結果と原子炉ニュートリノによる θ_{13} の測定結果とを組み合わせて δ_{CP} への制限を与えた。
- $\delta_{CP} = -\pi/2$ が最も好まれる。
- 以下の領域を90% C.L.で棄却。
 - $0.19\pi < \delta_{CP} < 0.80\pi$ (Normal hierarchy)
 - $-\pi < \delta_{CP} < -0.97\pi, -0.04\pi < \delta_{CP} < \pi$ (Inverted hierarchy)



今後の目標と予想感度

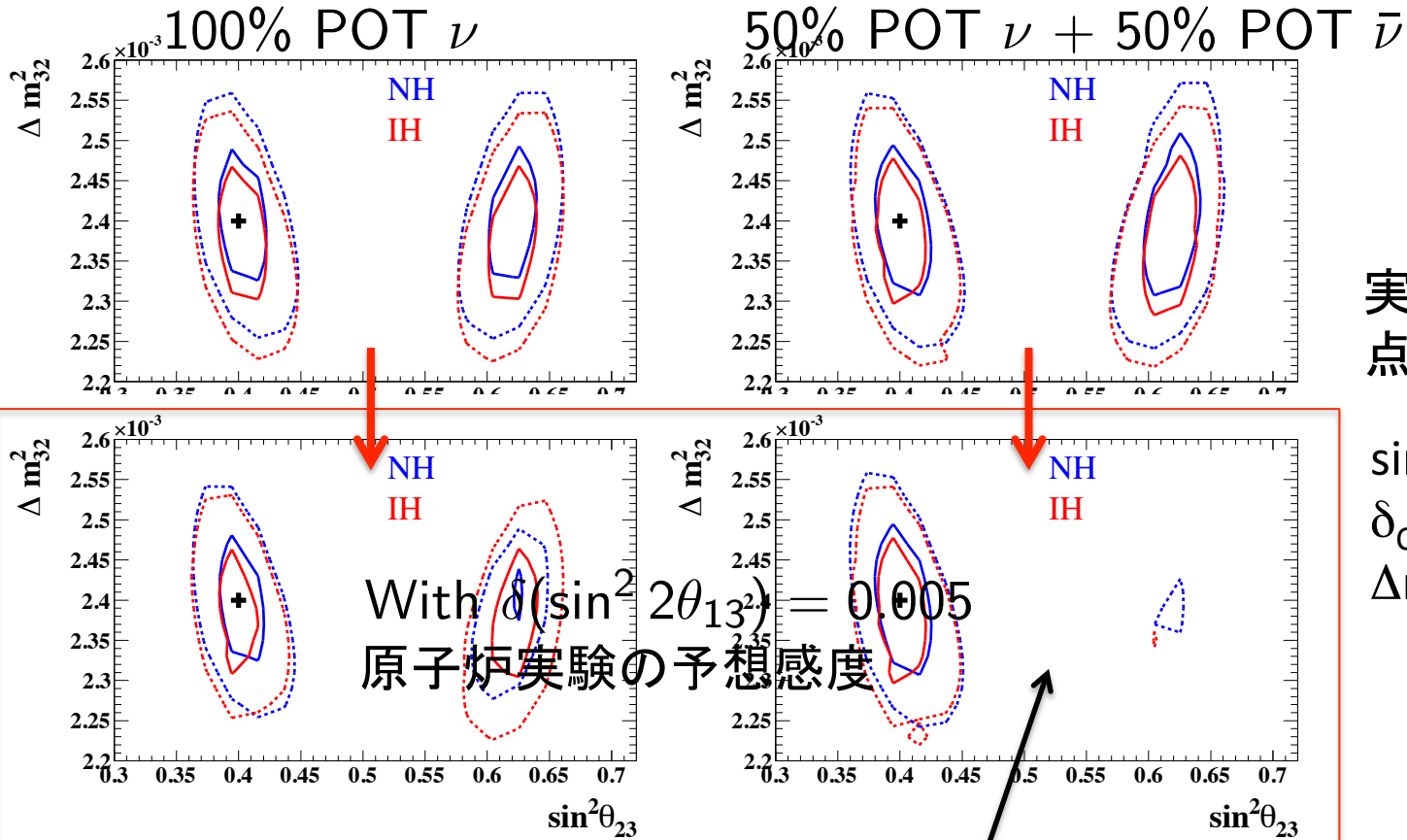
今後の目標

- T2Kが $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動を 7.3σ で発見し、原子炉実験が $\sin^2 2\theta_{13}$ を高精度で測定した。
- T2K実験の今後の目標
 - θ_{23} と $|\Delta m_{32}^2|$ の精密測定
 - δ_{CP} 、 θ_{23} octant、 ν 質量階層性の測定
- 予想感度study
 - 今回は θ_{23} octantのみ発表する。 $(\delta_{CP}$ とMHは別の機会に)
 - T2K approved POT = 7.8×10^{21} POT
 - ν_e 出現モードと ν_{μ} 消失モードを同時に解析
 - $\bar{\nu}$ モードでのデータ収集も想定する。

予想感度 (θ_{23} octant)

Case study: $\sin^2\theta_{23} = 0.4$, Normal hierarchyの場合

90% C.L.



実線: 系統誤差なし
点線: 系統誤差あり

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$
 $\delta_{CP} = 0$
 $\Delta m_{32}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$

octantをほぼ決定。

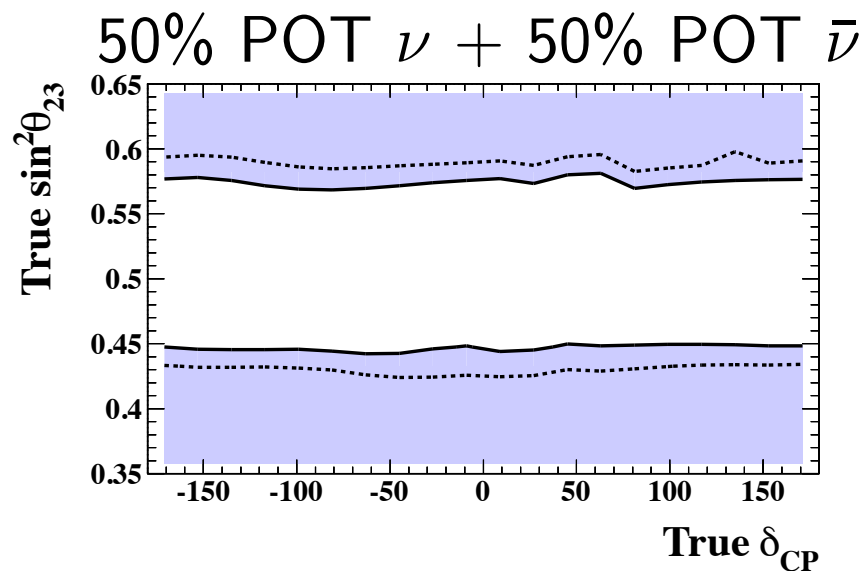
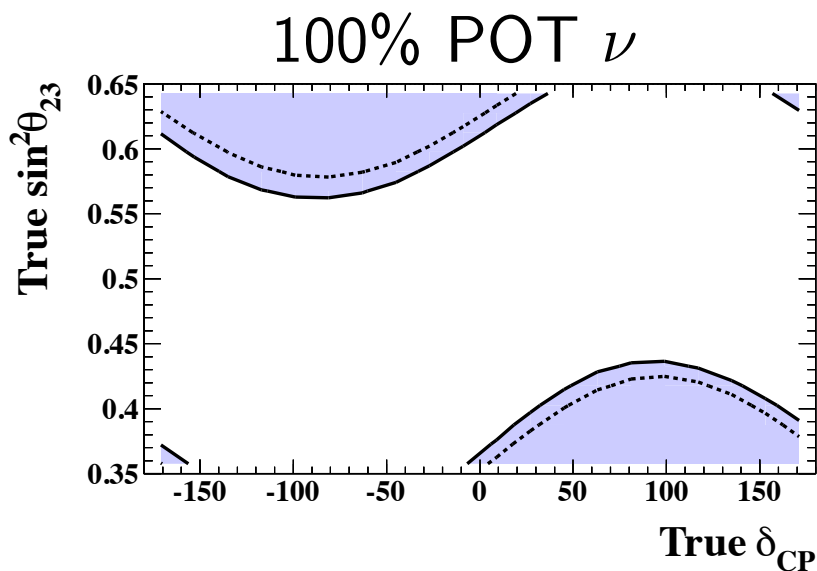
予想感度 (θ_{23} octant)

90% C.L.の感度

(青色の領域内ならoctantを決定可)

実線: 系統誤差なし

点線: 系統誤差あり



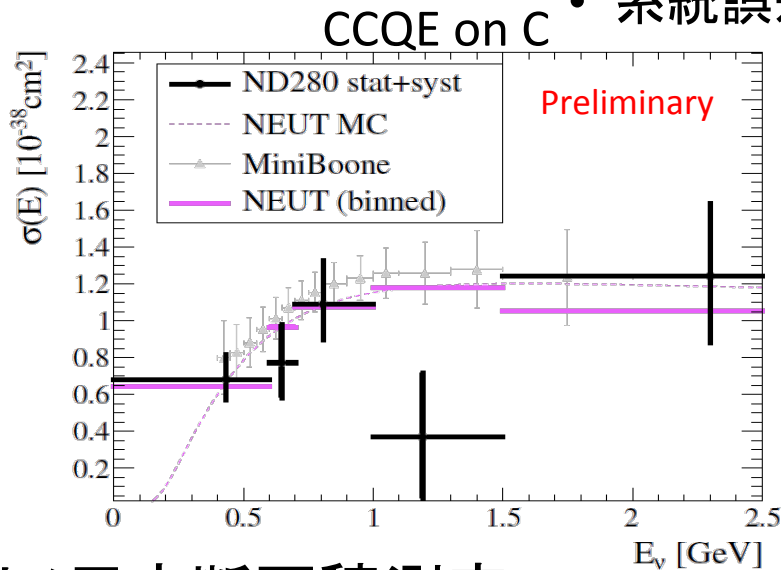
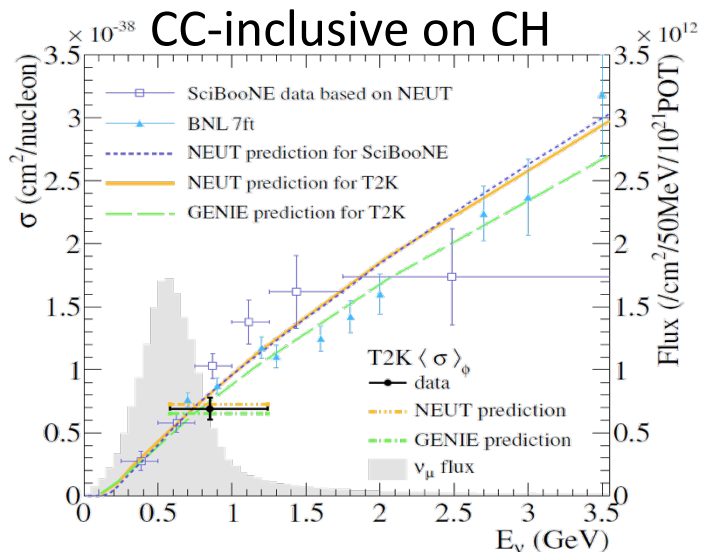
仮定

- $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$
- $\Delta m_{32}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (Normal hierarchy)
- 原子炉実験の予想感度 $\delta(\sin^2 2\theta_{13}) = 0.005$

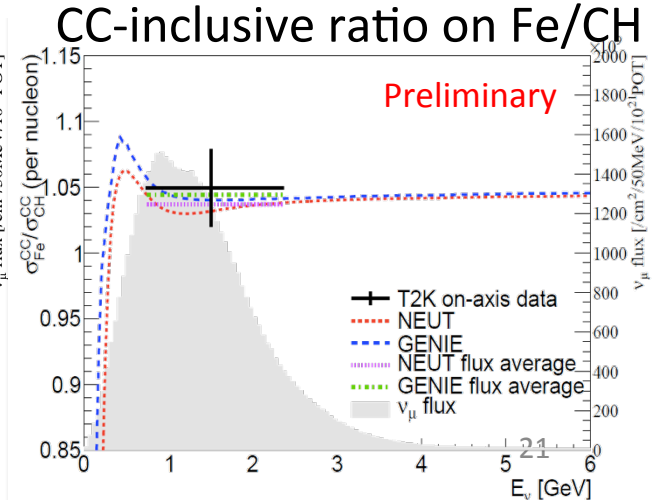
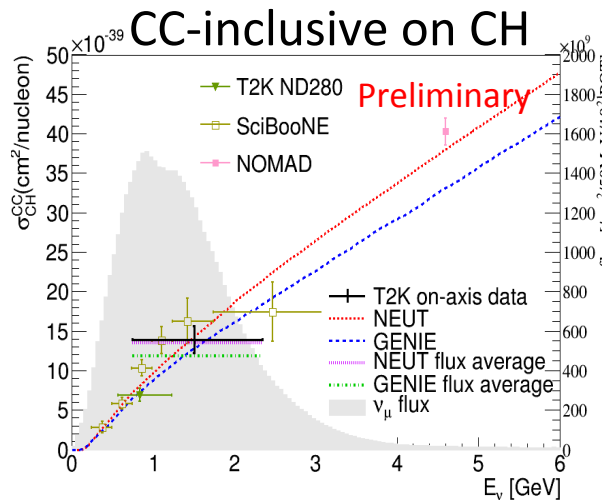
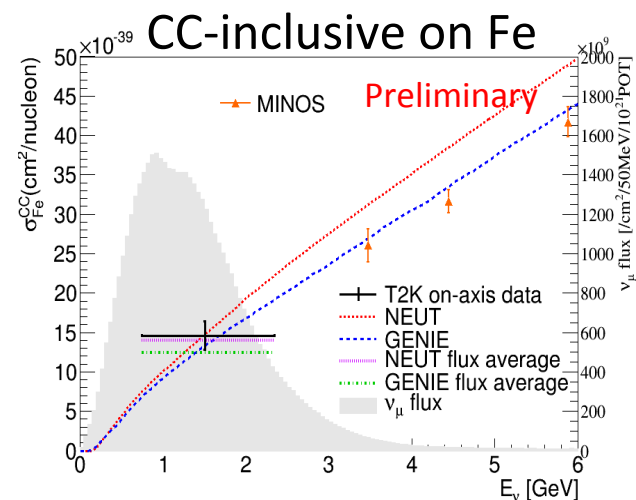
振動解析以外

ニュートリノ反応断面積測定

- ND280によるニュートリノ反応断面積測定
- 様々な測定が進行中。
- 系統誤差の削減に重要。



- INGRIDによるニュートリノ反応断面積測定



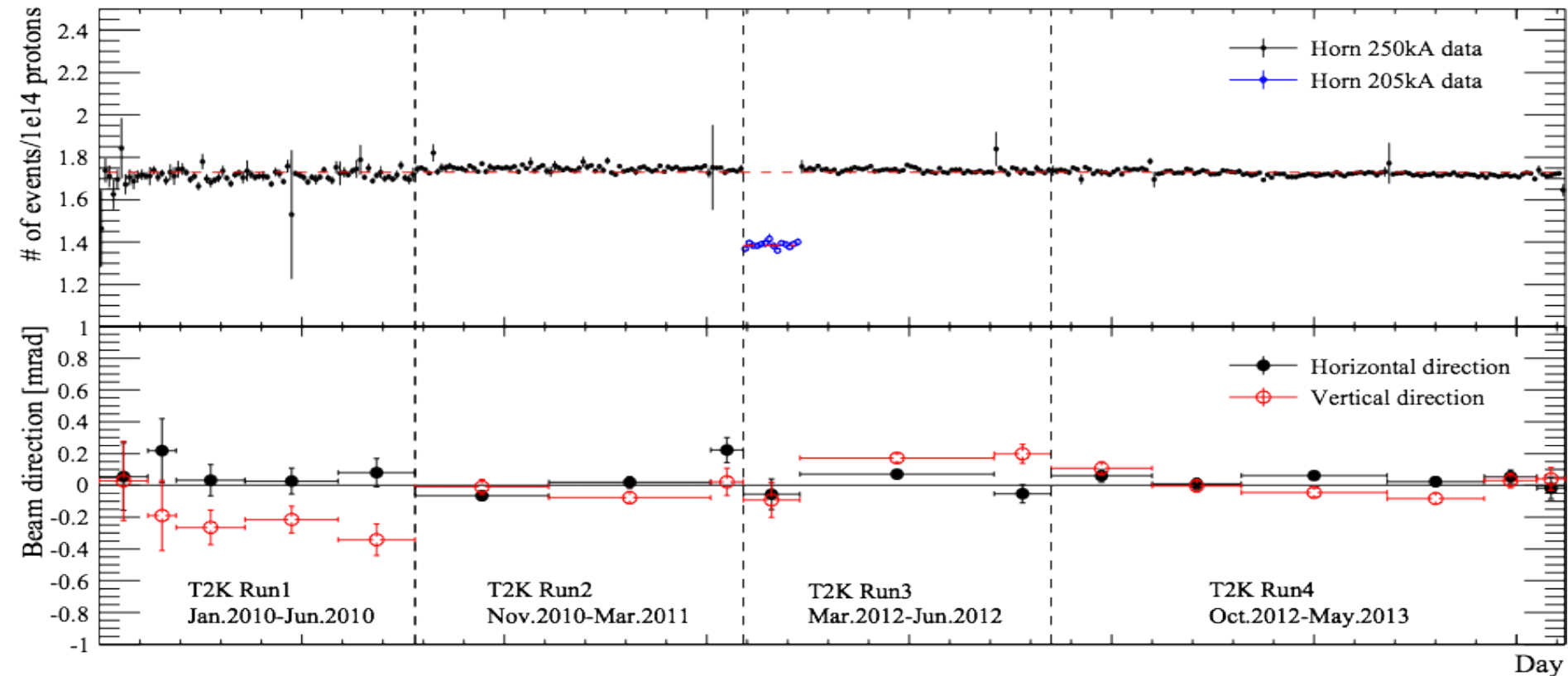
まとめ

- ν_e 出現モード
 - $\theta_{13}=0$ を 7.3σ で棄却し、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を発見。
 - T2K実験の結果と原子炉ニュートリノの測定結果とを組み合わせて、 δ_{CP} への制限を与えた。
- ν_μ 消失モード
 - 2012年6月までのデータを使いnm消失モードの解析を行い、世界最高レベルの精度で θ_{23} と $|\Delta m_{32}^2|$ を測定した。
 - 2013年5月までのデータを使った解析結果を近日公開予定。
- 今後の目標
 - θ_{23} と Δm_{32}^2 の精密測定と δ_{CP} 、 θ_{23} octant、 ν 質量階層性の測定
- 振動解析以外
 - ニュートリノ反応断面積の測定など、さまざまな解析が進行中。

Backup

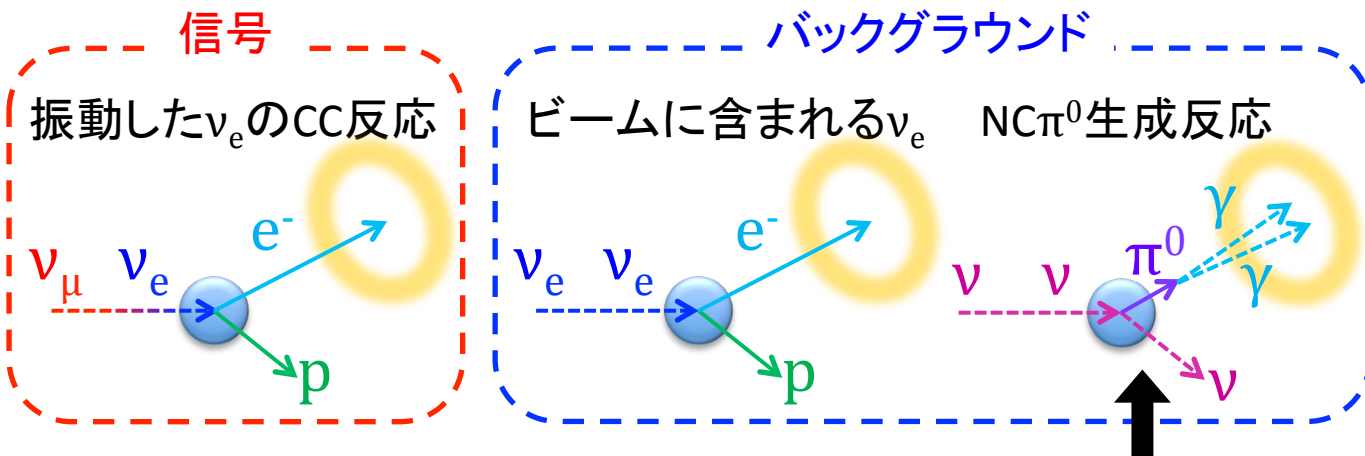
INGRIDの測定

- ニュートリノイベントレートは1%の範囲で安定。
- ニュートリノビーム方向は1mradよりずっと小さい範囲で安定

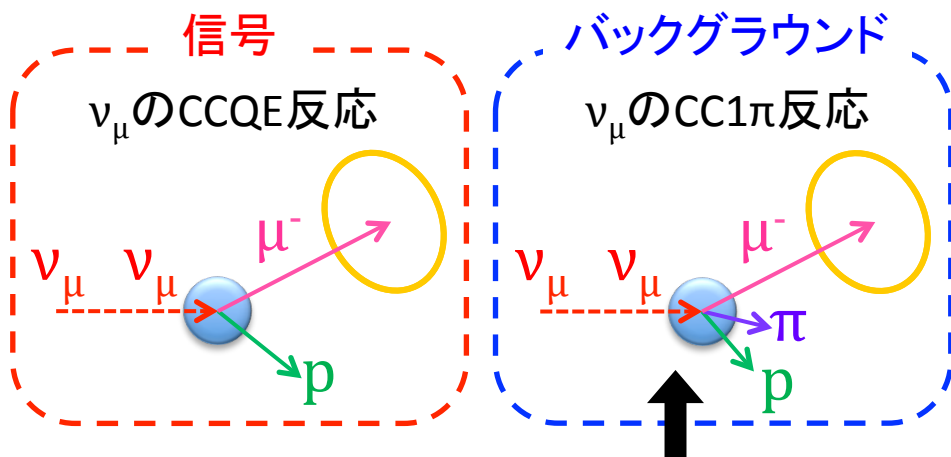


Super-Kでの観測

- ν_e イベント (不明瞭な1リング)

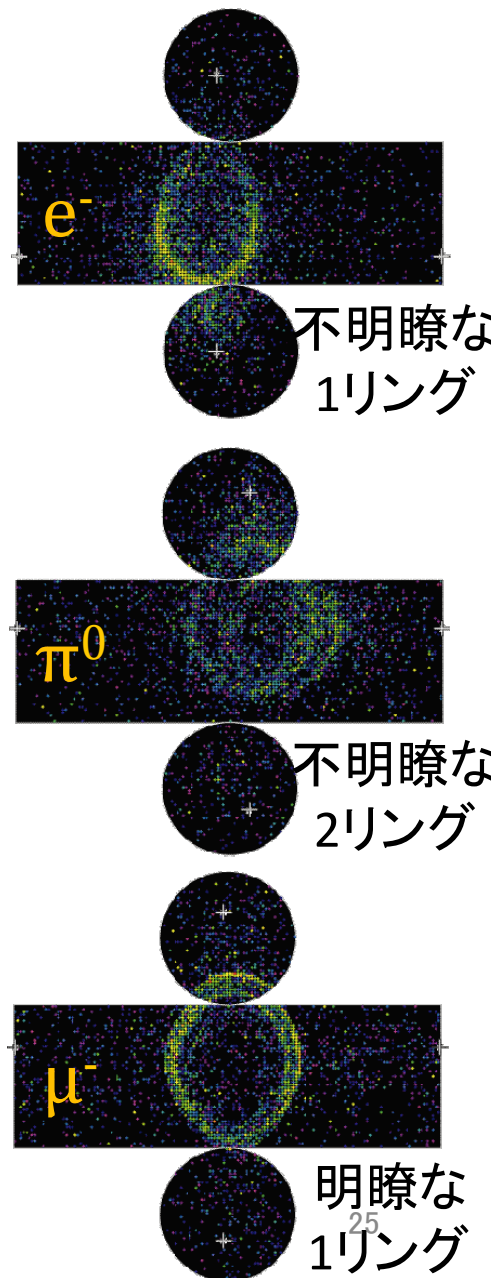


- ν_μ イベント (明瞭な1リング)



2 γ が同じ方向に出たり、片方が再構成できなかった場合に、 ν_e イベントと誤認。

CCQEを仮定してエネルギーを再構成しているため、エネルギーを正しく再構成できない。

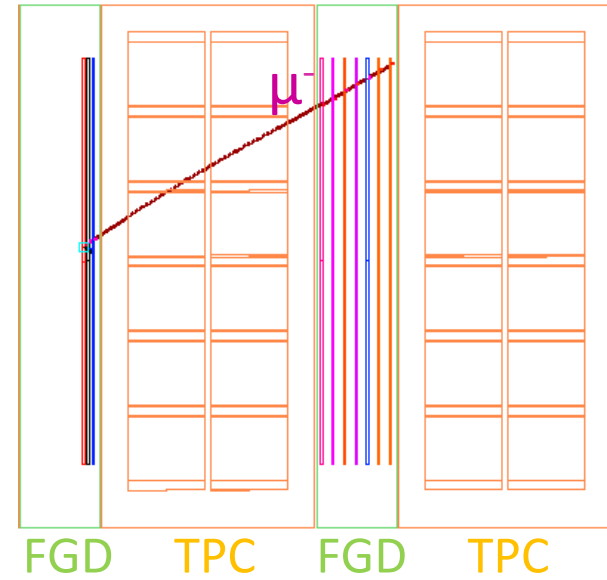


ND280での測定 (イベントの分類)

- 各ニュートリノ相互作用を高純度化した3サンプルに分類。

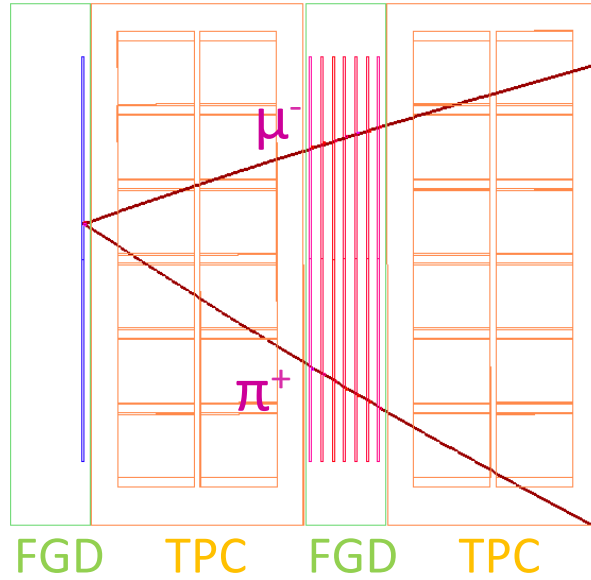
CC0 π サンプル

荷電カレント準弾性散乱が64%



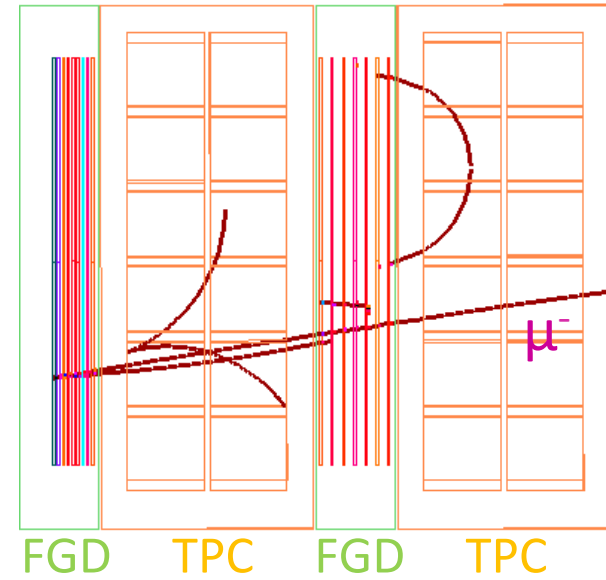
CC1 π サンプル

荷電カレント Δ 共鳴が40%

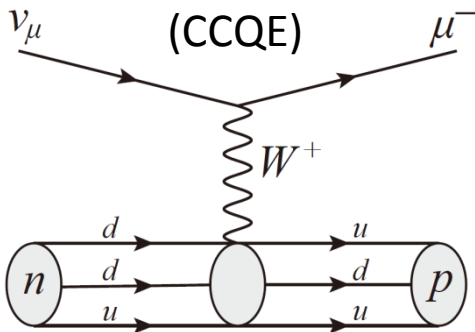


CC otherサンプル

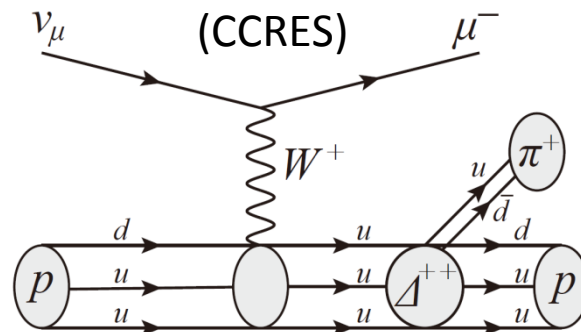
荷電カレント深弾性散乱が68%



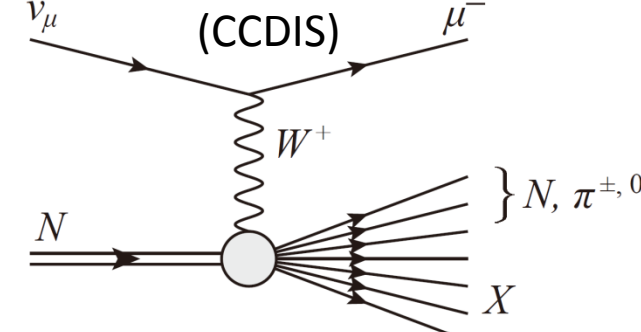
荷電カレント準弾性散乱



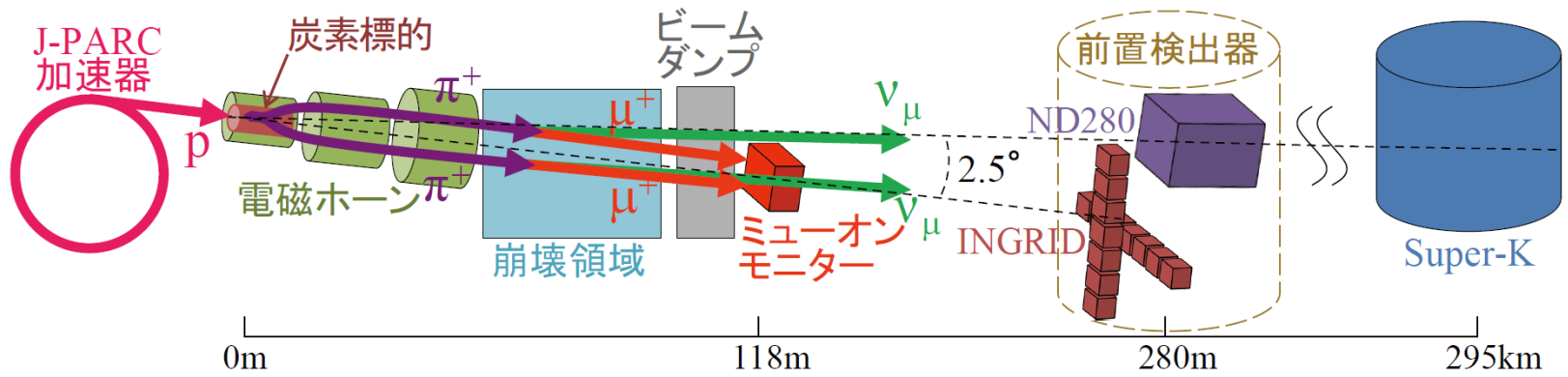
荷電カレント Δ 共鳴 π 生成



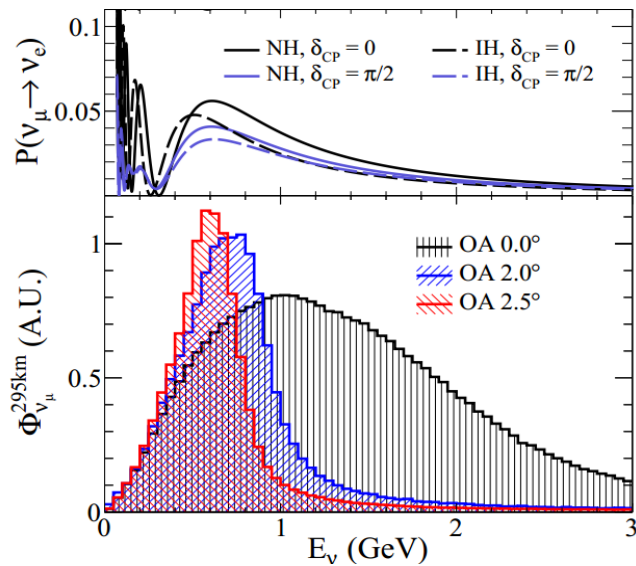
荷電カレント深弾性散乱



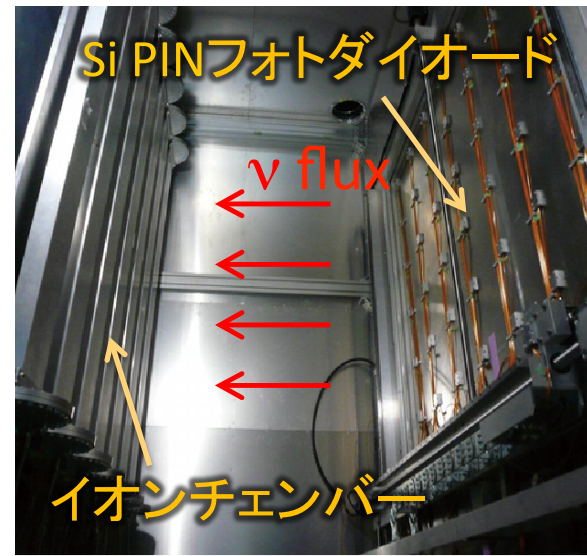
Off-axis法



Off-axis法



ミュオンモニター(MUMON)

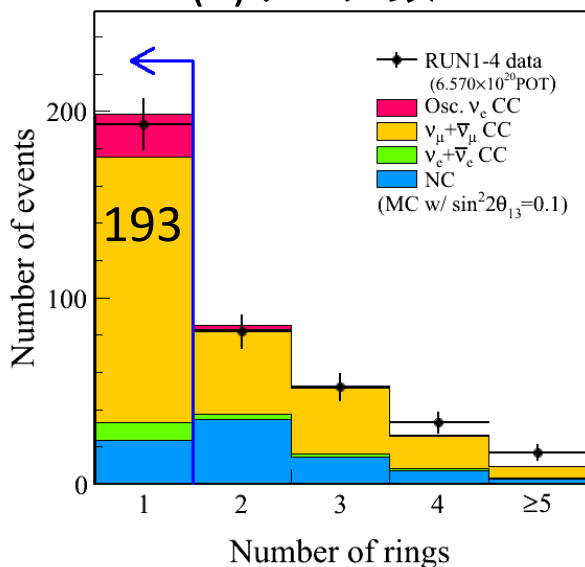


- ビーム中心をSuper-Kの方向から2.5度ずらす
- 最大振動領域にナローバンドなビームを実現

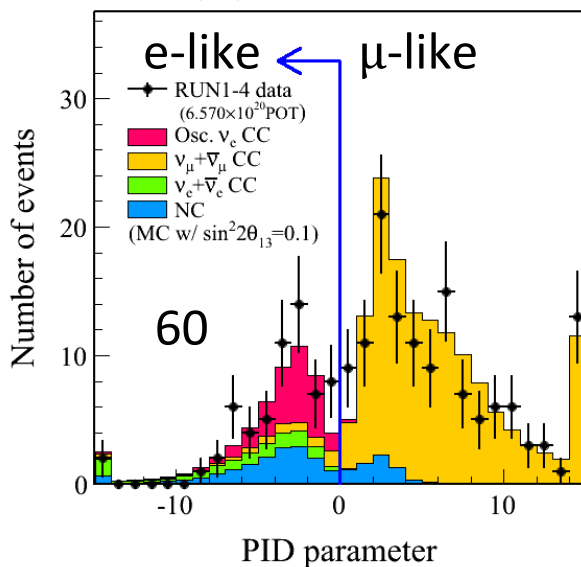
- ビーム方向をスピル毎にモニター

Super-Kの ν_e イベント選択(6.57×10^{20} POT)

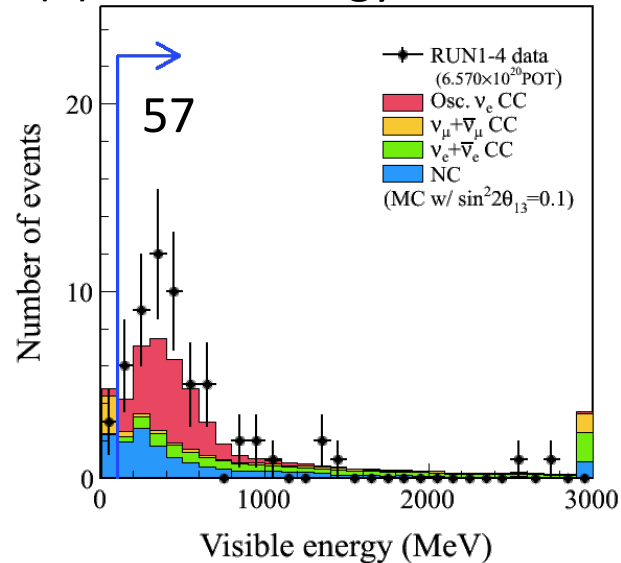
(1) リング数=1



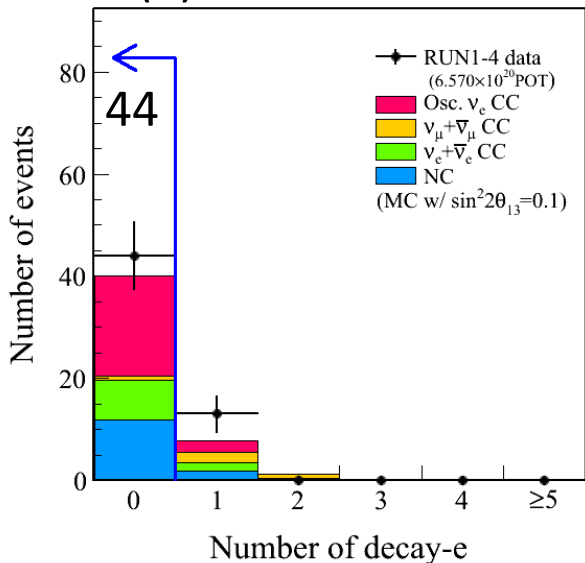
(2) 電子らしさ



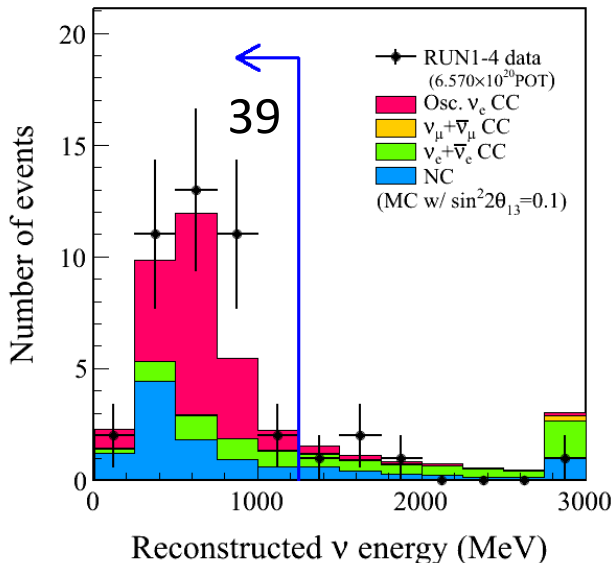
(3) Visible energy > 100MeV



(4) 崩壊電子がない



(5) 再構成エネルギー < 1250MeV



(6) π^0 除去 (次ページ)

ν_e 出現モードの解析結果

- 最尤法を用いて電子の運動量と角度の2次元分布を最も再現する θ_{13} を探す。

ポアソン分布

各イベントの電子の
p- θ 分布の確率の積

各系統誤差
の不定性

$$\mathcal{L}(N_{obs.}, \mathbf{x}; \mathbf{o}, \mathbf{f}) = \mathcal{L}_{norm}(N_{obs.}; \mathbf{o}, \mathbf{f}) \times \mathcal{L}_{shape}(\mathbf{x}; \mathbf{o}, \mathbf{f}) \times \mathcal{L}_{syst.}(\mathbf{f})$$

: ν_e 候補イベント数
: 運動量-角度ビン
: 振動パラメータ
: 系統誤差

