

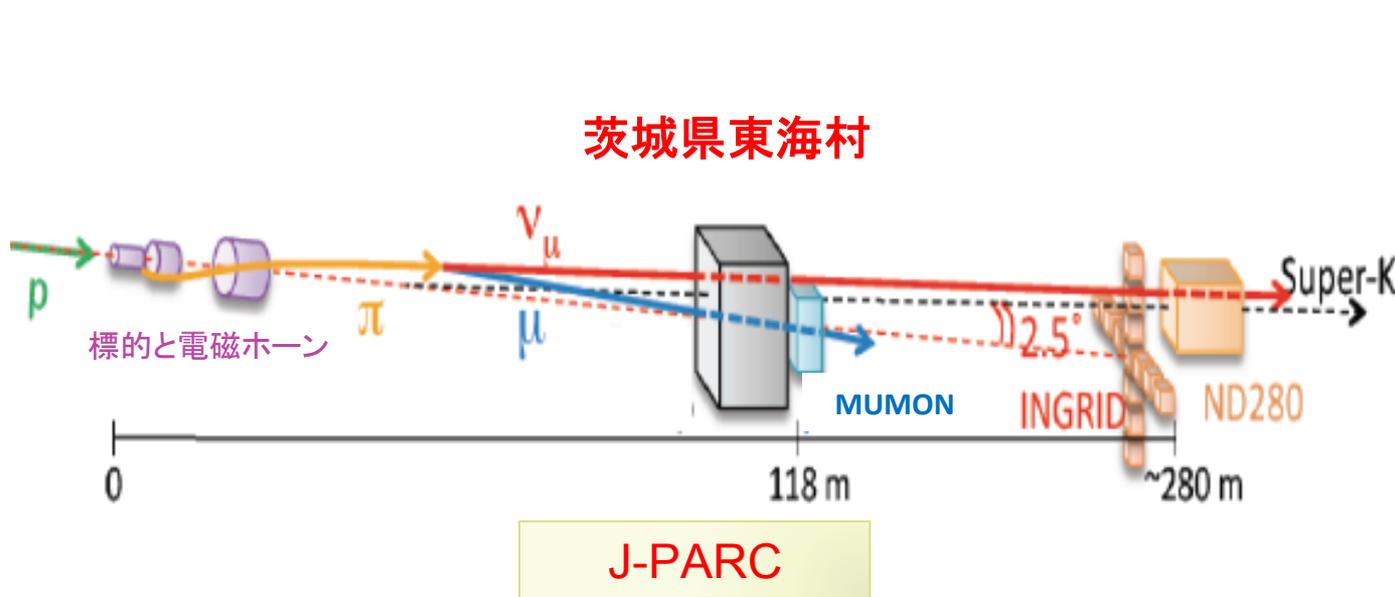
ニュートリノ物理のための  
中性子・酸素原子核反応による  
ガンマ線測定

岡山大学 白髭哲也

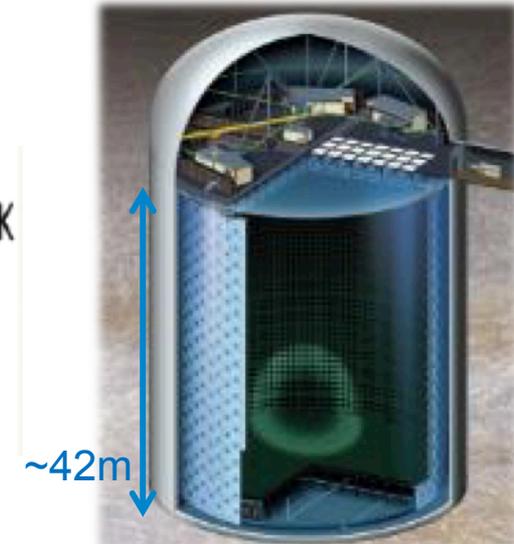
# 目次

- NCQE反応断面積測定のもちベーション
- NCQE反応断面積
- 二次ガンマ線測定の予備実験
- 今後の展望

# T2K long-baseline neutrino experiment



岐阜県神岡町



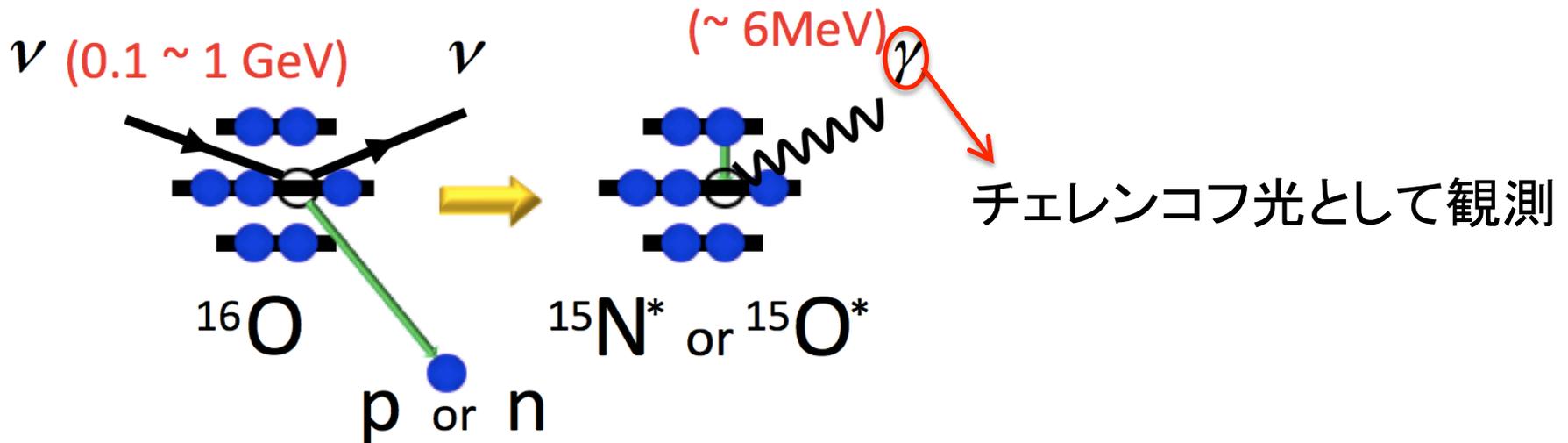
Super-K

- J-PARCニュートリノビーム：
  - off-axis法：陽子ビーム方向とSuper-K検出器方向は2.5度をずらす。
  - Super-K検出器方向ニュートリノビームのフラックスピーク値は600MeV。
  - GPS時間を含める毎スピル情報をSuper-Kへ送る。
- Super-K検出器：
  - 直径39m、高さ42mの円筒形水タンク
  - 内側のタンクは内水槽 (Inner detector)、内向きに約11,000本の光電子増倍管が取り付けられ、荷電粒子によるチェレンコフ光を観測
  - 4MeVから1TeVくらいまで幅広いニュートリノエネルギー範囲を観測できる
  - J-PARCスピル情報でT2Kビームによるニュートリノ事象を記録

# T2K実験における中性カレント準弾性 (NCQE)反応による核脱励起ガンマ線



NCQE(neutral current quasi-elastic)反応



NCQE反応断面積

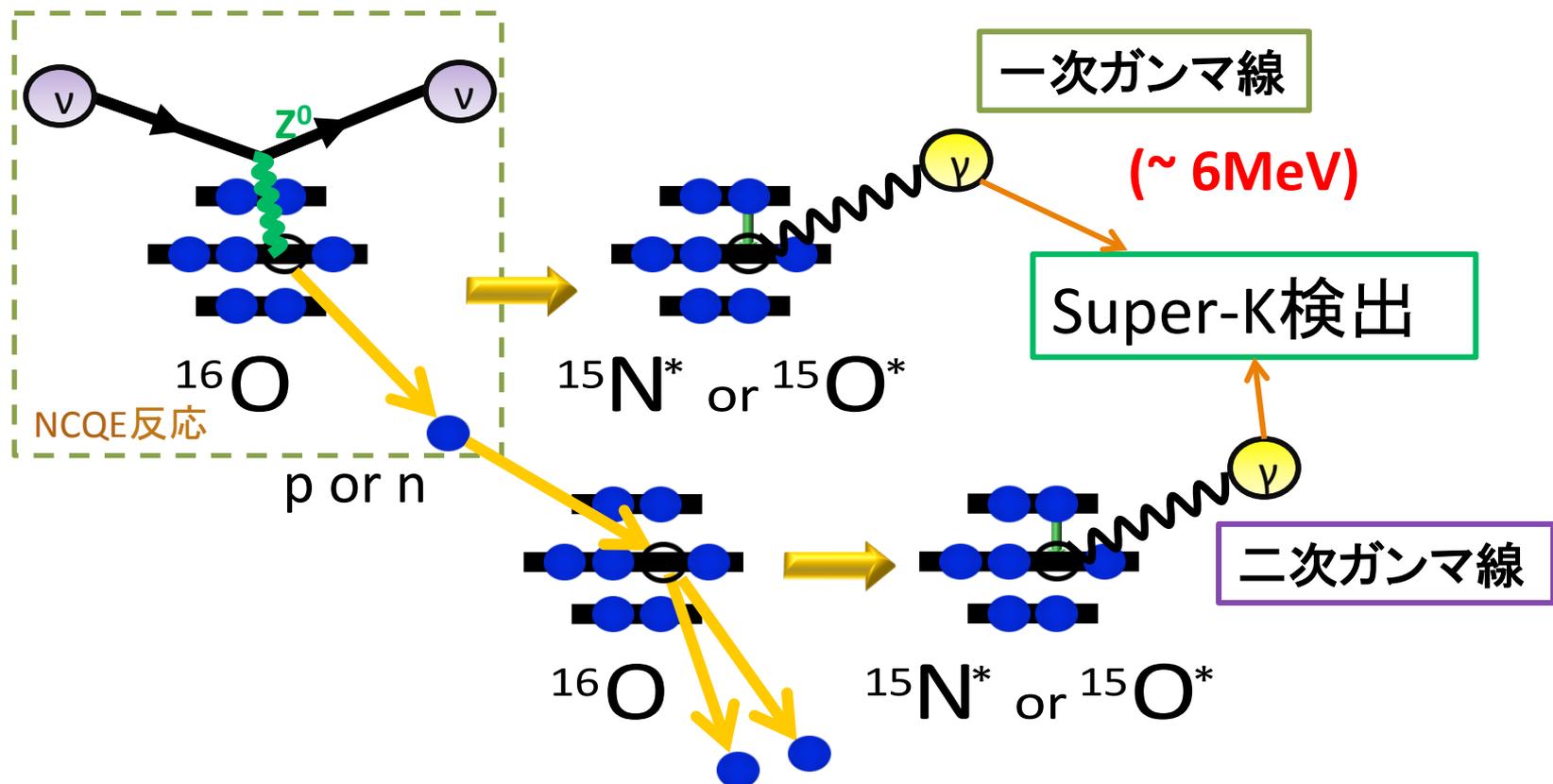
$$\langle \sigma_{NCQE} \rangle = 1.55 \pm 0.395(stat.)^{+0.65}_{-0.33}(sys.) \times 10^{-38} \text{ cm}^2$$

# NCQE反応断面積測定のもちベーション

- T2K実験におけるNCイベントのdisappearanceは、原子核と弱い相互作用をしないステライルニュートリノの存在を与える( $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$ )。
- 超新星背景ニュートリノ(SRN)観測のバックグラウンドとなるNCイベントの数を見積もることができる。

# De-excitation $\gamma$ -ray induced by NCQE

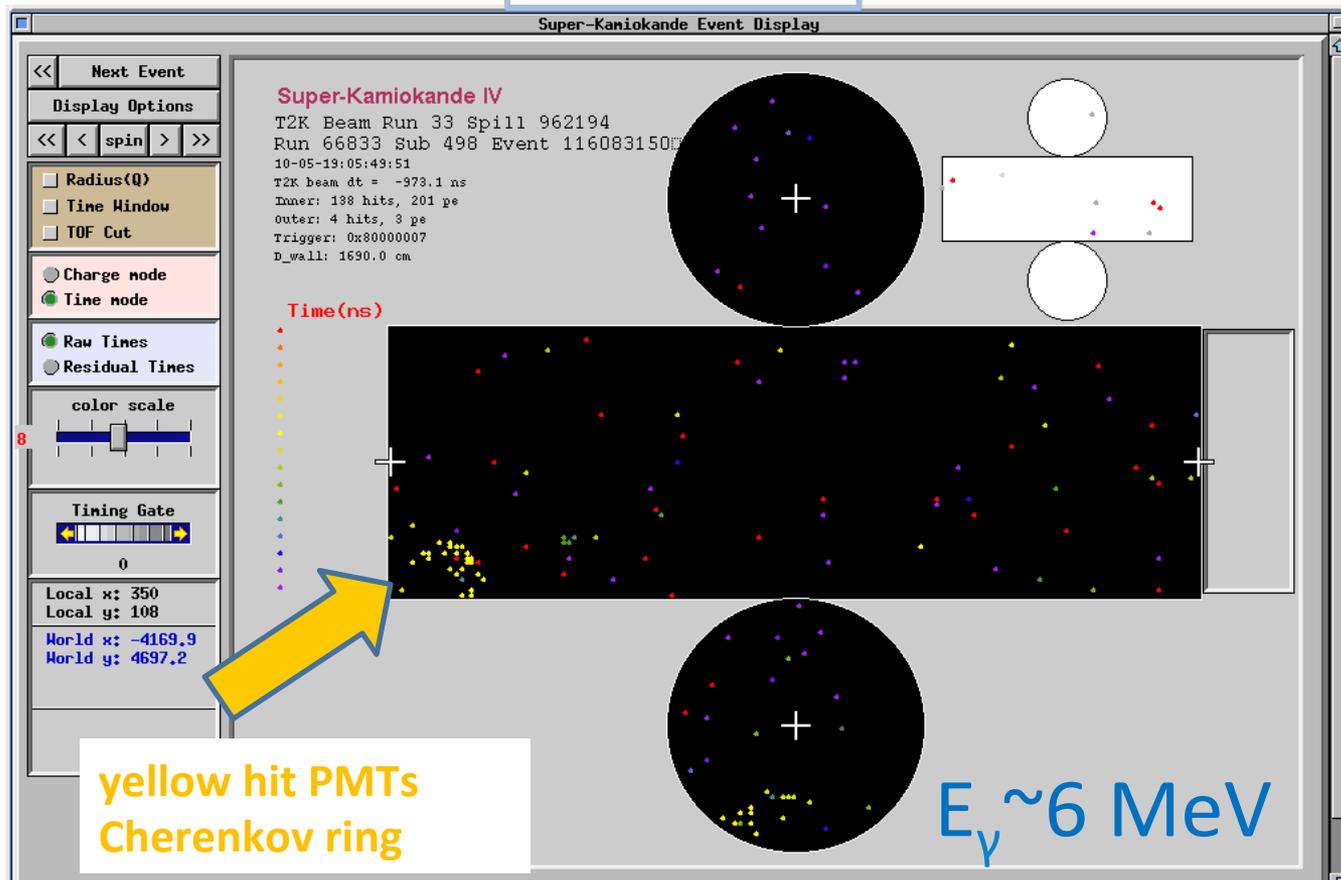
- 中性カレント準弾性散乱反応後、酸素原子核から核子が蹴飛ばされ、励起された残存原子核がある確率で一次ガンマ線を放出。
- 一次反応から飛ばされた自由核子が他の酸素原子核と反応し、二次ガンマ線が放出される
- Super-Kで一次、二次ガンマは時間的に分けられない



# De-excitation $\gamma$ -ray observed at Super-K

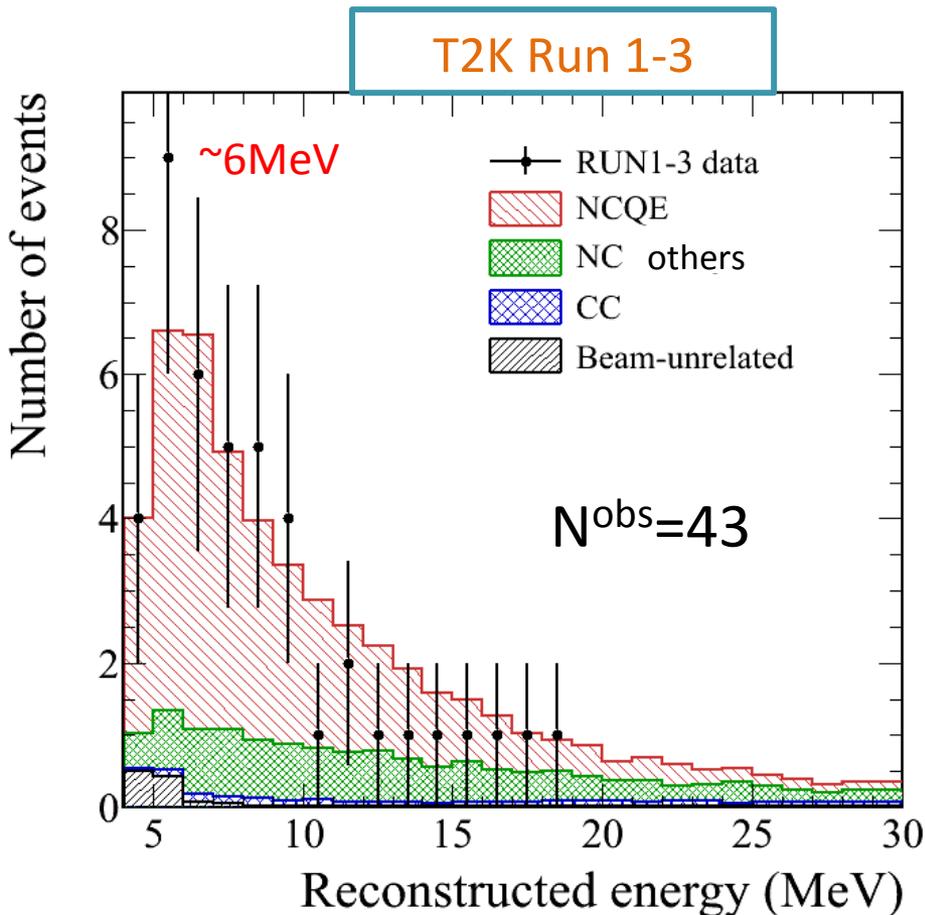
- Super-K has the ability to observe 6 MeV  $\gamma$ -ray, as the threshold of reconstructed energy is 4 MeV (SK IV).

event example



# Observed $\gamma$ -rays

- Observation period: Jan., 2010 ~ Jun, 2012
  - accumulative proton-on-target(POT):  $3.01 \times 10^{12}$
- 43 de-excitation  $\gamma$ -ray events are selected from data, while the expected number of events is 51.0



$\nu$ interaction	Expected number	fraction (%)
NCQE	34.8	68.2
NC others	13.0	25.5
CC	2.0	3.9
Beam-unrelated	1.2	2.3
Total	51.0	

$$N^{exp}=51.0 \quad N_{bkg}^{exp}=16.2$$

$$N_{\nu, NCQE}^{exp} = N^{exp} - N_{bkg}^{exp} = 34.8$$

# NCQE反応断面積

$$\langle \sigma_{\nu, NCQE}^{obs} \rangle = \frac{N^{obs} - N_{bkg}^{exp}}{N^{exp} - N_{bkg}^{exp}} \langle \sigma_{\nu, NCQE}^{theory} \rangle$$

$$\langle \sigma_{\nu, NCQE}^{obs} \rangle = \frac{43 - 16.2}{51.0 - 16.2} \times 2.01 \times 10^{-38} = 1.55 \times 10^{-38} \text{ cm}^2$$

## NCQE反応断面積

$$\langle \sigma_{NCQE} \rangle = \underline{1.55 \pm 0.395(stat.)} \underline{_{-0.33}^{+0.65}(sys.)} \times 10^{-38} \text{ cm}^2$$

Physical Review D 90, 072012 (2014)

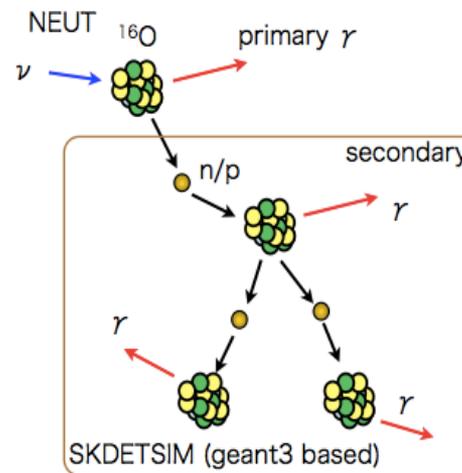
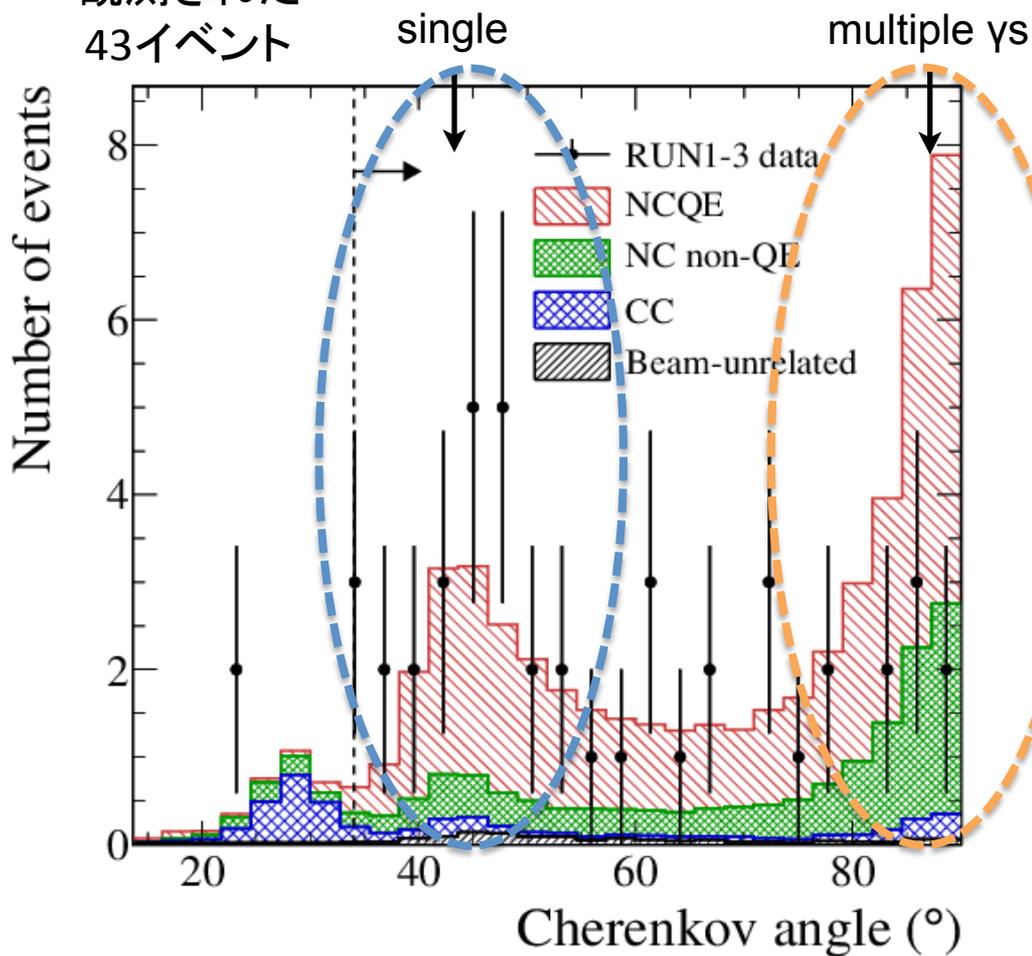
統計をためて統計誤差は小さくできるが  
系統誤差が支配的になる



系統誤差の主な原因は、二次ガンマ線の放出

# Cherenkov Angle (シミュレーションと観測データ)

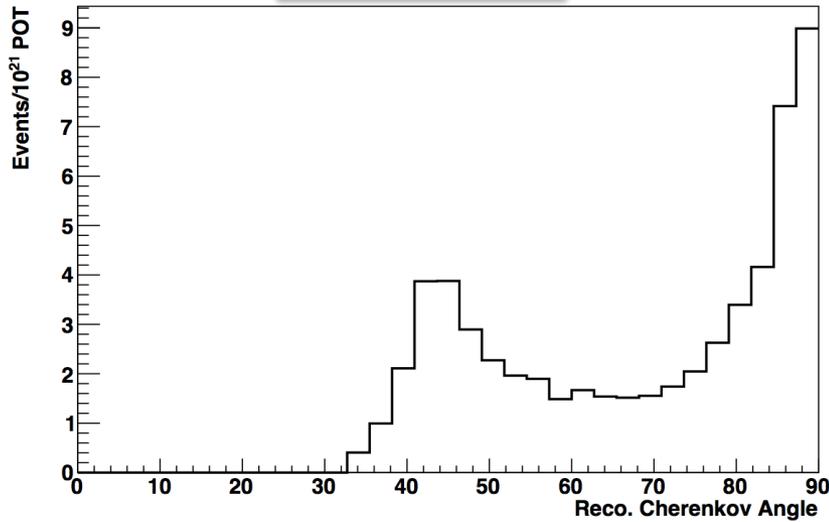
T2K Run1-3で  
観測された  
43イベント



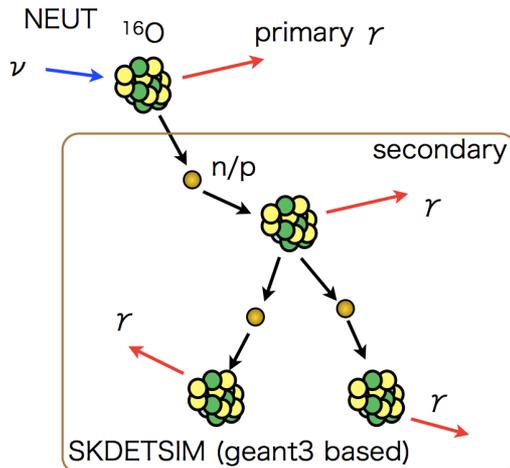
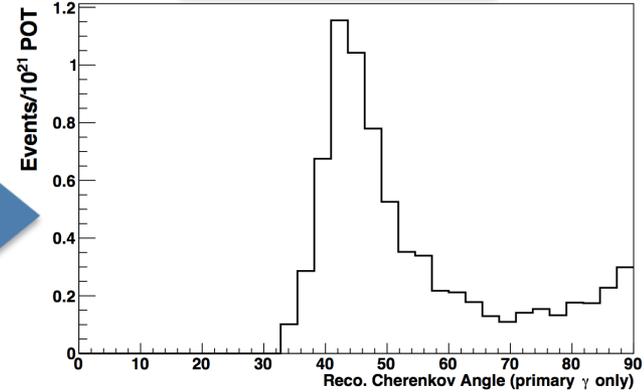
シミュレーションと  
実際の観測データの  
チェレンコフ光の角度が  
大きいところで一致していない

# チェレンコフ光の放出角度 (Cherenkov Angle)

Total events

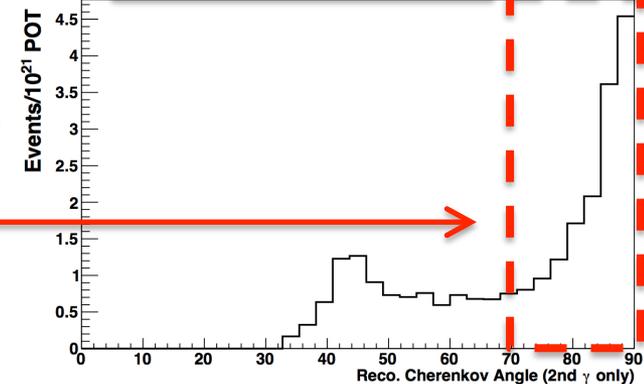


Primary  $\gamma$  only



複数のSecondary  $\gamma$ は  
広く分布し、  
Cherenkov Angleが  
大角度になりやすい。

Secondary  $\gamma$  only



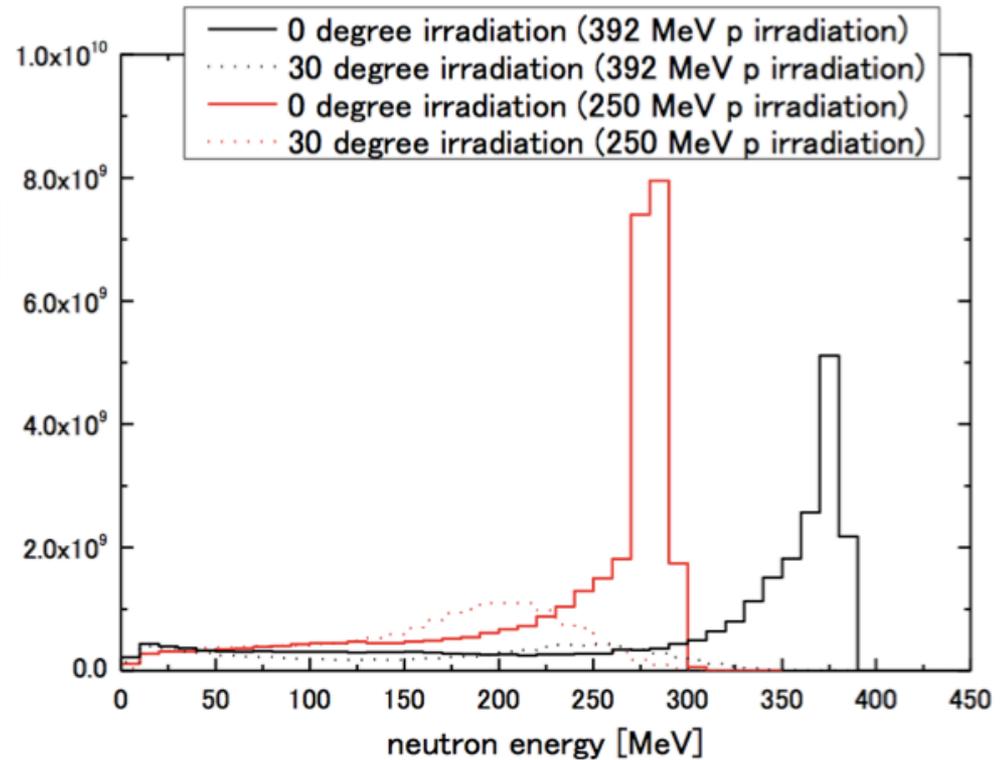
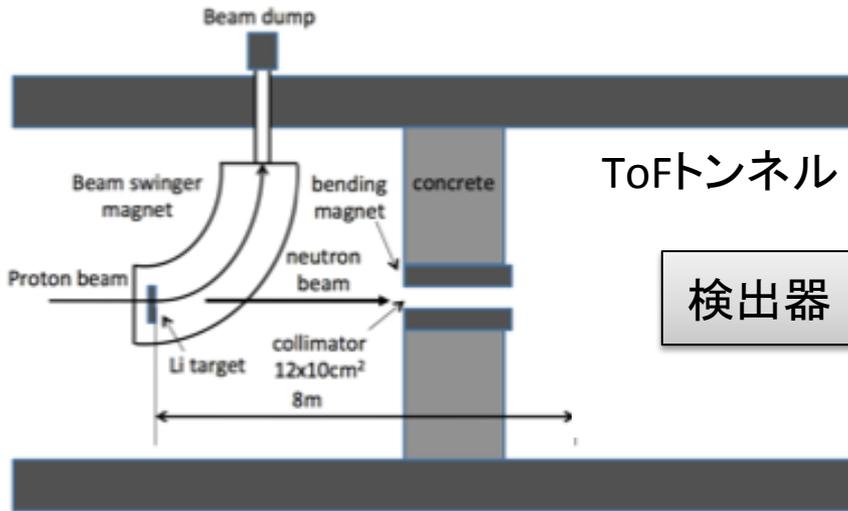
# 系統誤差

二次ガンマ線は精密な測定が行われておらず、シミュレーションの物理モデルの違いによるイベント数の比較のみを行っているため不定性が大きい

Largest error due to model uncertainty

Sys. error	NCQE	NC others	CC	Beam unrel.
Flux	11%	10%	12%	-
Cross-section	--	18%	24%	-
Primary $\gamma$ Production	10%	3%	6%	-
Secondary $\gamma$ Production	<b>13%</b>	13%	7.6%	-
Detector response	2.2%	2.2%	2.2%	-
Oscillation Parameters	-	-	10%	-
Total	20%	25%	30%	0.8%
Fraction	0.68	0.26	0.04	0.02

# 大阪大学核物理研究センター(RCNP) Research Center for Nuclear Physics



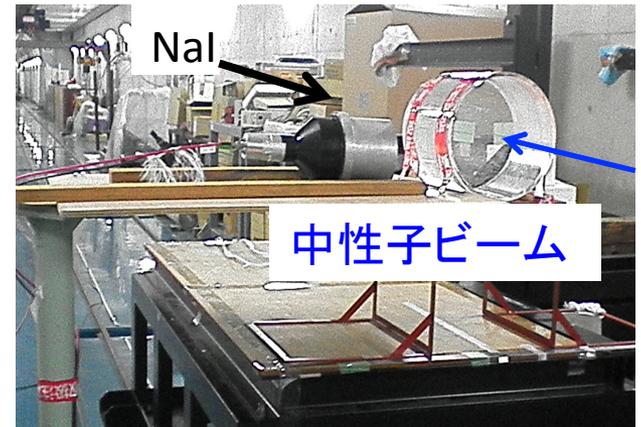
ほぼ単色のエネルギーの  
中性子ビームを生成できる。



RCNP ToFトンネル内

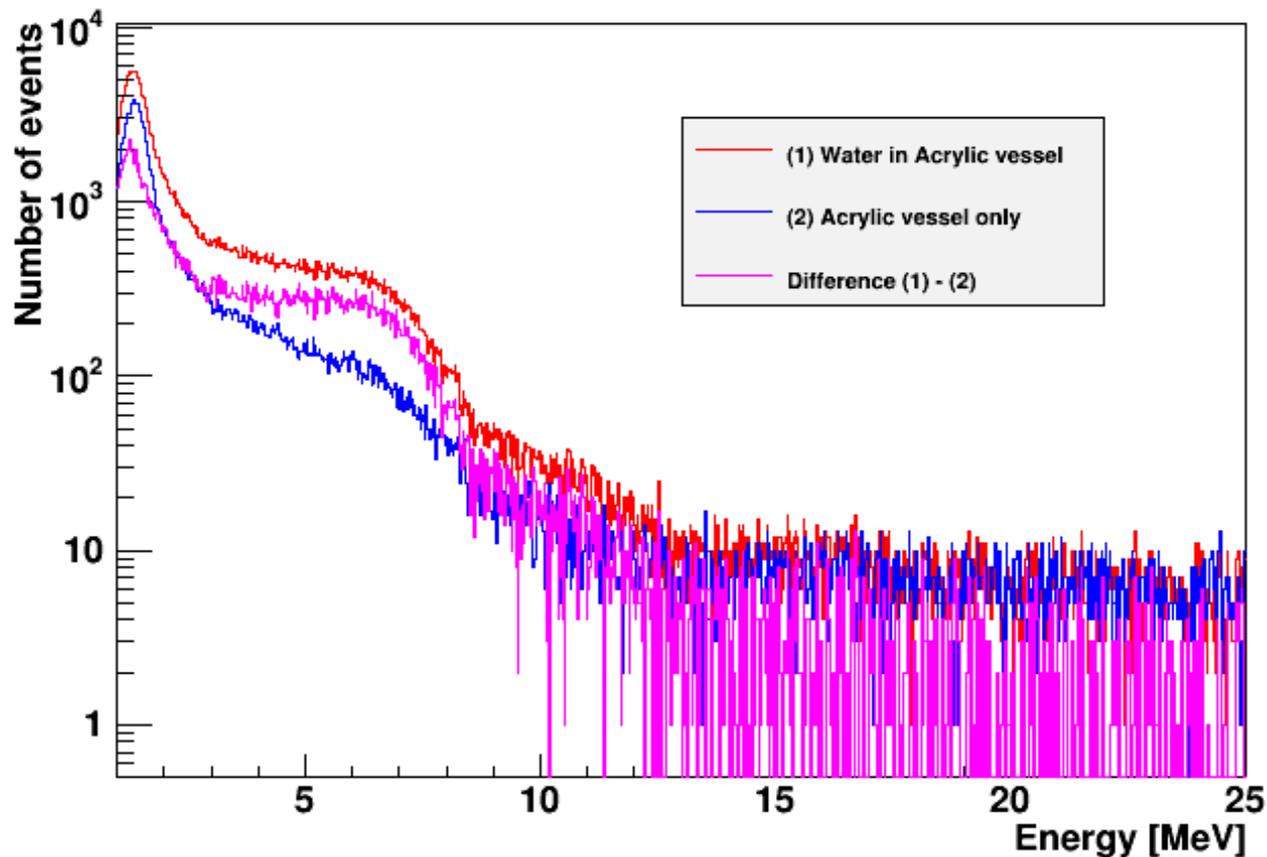
# 二次ガンマ線測定の予備実験

- 目的
  - パラサイト実験(E361 2015/1/22)
  - 中性子ビームトンネル内での水ターゲット設置時のバックグラウンドの取得。
- 入射中性子
  - 約80MeVの中性子ビーム
  - 中性子の数 $\sim 7 \times 10^8/\text{sec}$
- キャリブレーションデータ
  - $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ で取得。
- 測定時間
  - 水を入れたアクリル製タンク・・・1248 sec
  - 水を抜いたアクリル製タンク・・・ 548 sec
- 測定
  - 中性子ビーム実験の環境データを取得した。



# 予備実験結果

## 水タンクと空タンクの比較



6 MeV付近に  
ガンマ線イベント  
があることを示唆

測定不可能になる  
ような極端な  
バックグラウンド  
はない

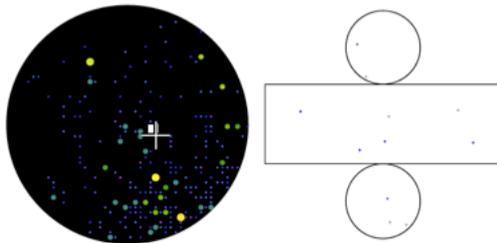
# 今後の展望

- 直径30cm、高さ30cmの円柱形の水ターゲットへ80MeV中性子を入射し、水ターゲットの横31cmの位置に設置したNaI(Tl)検出器でガンマ線を測定した。測定不可能になるほどのバックグラウンド事象は観測されなかった。
- 中性子ビームを水標的に当て、周囲をガンマ線検出器で覆い、十分なイベント数 (数十万のイベント) のデータ取得を計画している。
- 現在、J-PARCで高エネルギーの中性子とガンマ線を使い、様々な検出器を使った測定を行う予定である。
- すでにRCNPでのテスト実験が承認されており、そこではバックグラウンドの精密な見積もり、検出器の選定、水標的のサイズの決定などを行う予定である。さらにその結果をもとに、本実験を提案する予定である。

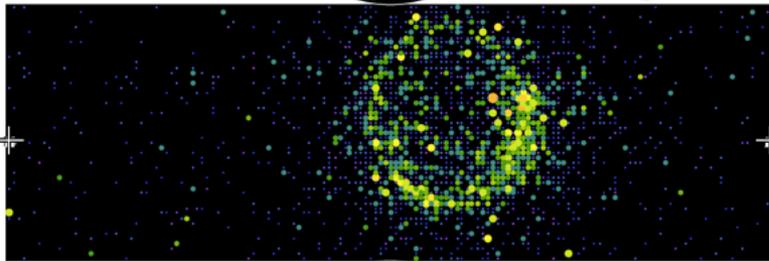
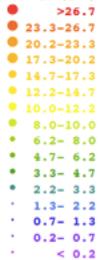
バックアップ

# $\nu_e$ と $\nu_\mu$ のリングの違い

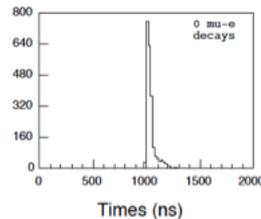
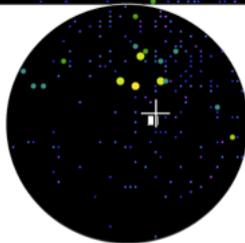
Super-Kamiokande IV  
Run 999999 Sub 0 Event 686  
11-11-23:19:16:48  
Inner: 2222 hits, 4687 pe  
Outer: 6 hits, 6 pe  
Trigger: 0x07  
D\_wall: 1270.2 cm  
e-like, p = 480.6 MeV/c



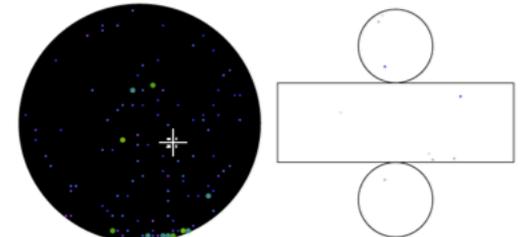
Charge (pe)



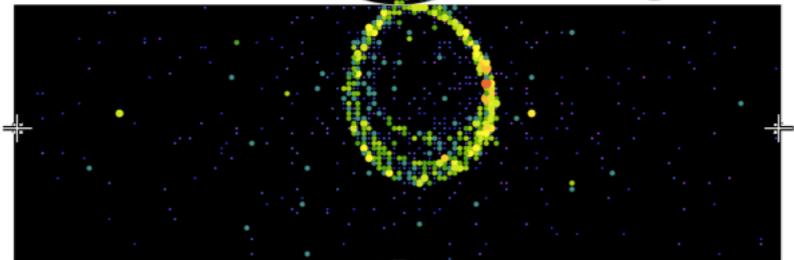
$\nu_e$  CC



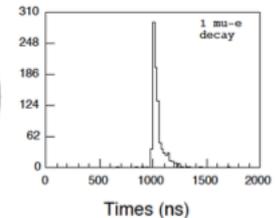
Super-Kamiokande IV  
Run 999999 Sub 0 Event 97  
11-11-21:09:15:49  
Inner: 915 hits, 2461 pe  
Outer: 2 hits, 0 pe  
Trigger: 0x07  
D\_wall: 1161.7 cm  
mu-like, p = 461.7 MeV/c



Charge (pe)



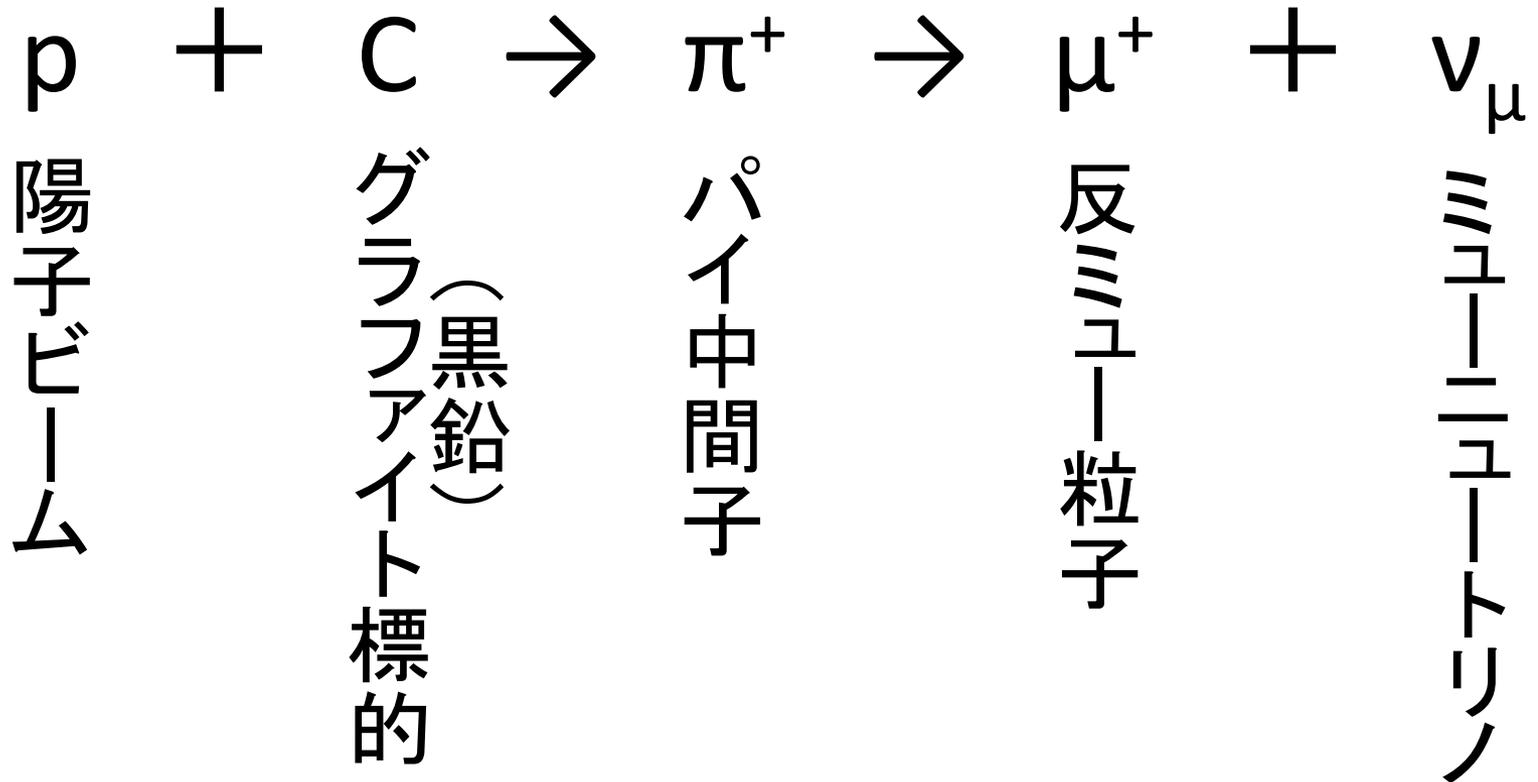
$\nu_\mu$  CC



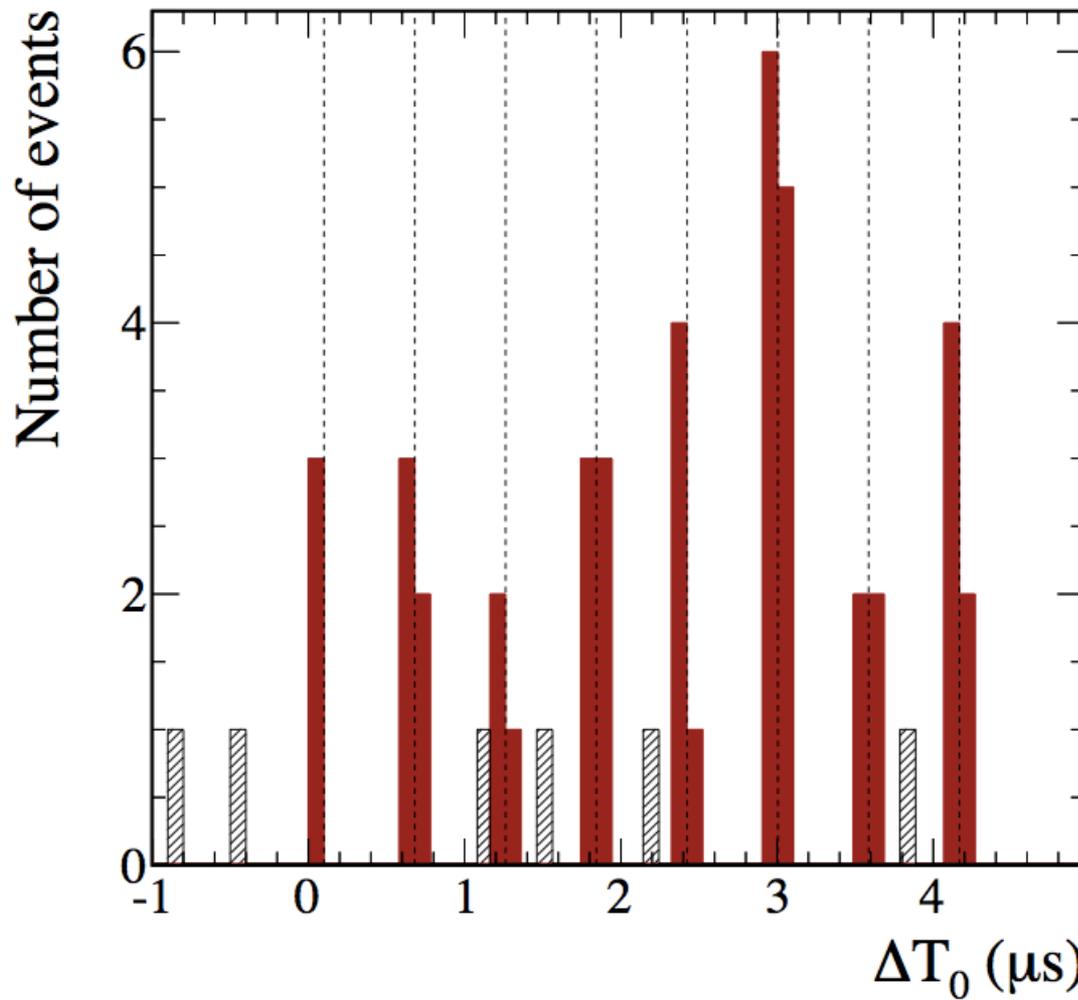
電子ニュートリノ反応によって生成された電子は水中で電磁シャワーを起こすためリングの輪郭が乱れる

ミューニュートリノ反応によって生成されたミュー粒子は水中をほぼ直進するのでリングの輪郭がはっきりしている

# J-PARCのミューニュートリノビーム生成



# ビームタイミング (8 bunches)



点線が  
8バッチの  
ビームタイミング

棒グラフが  
SKで観測された  
イベント数

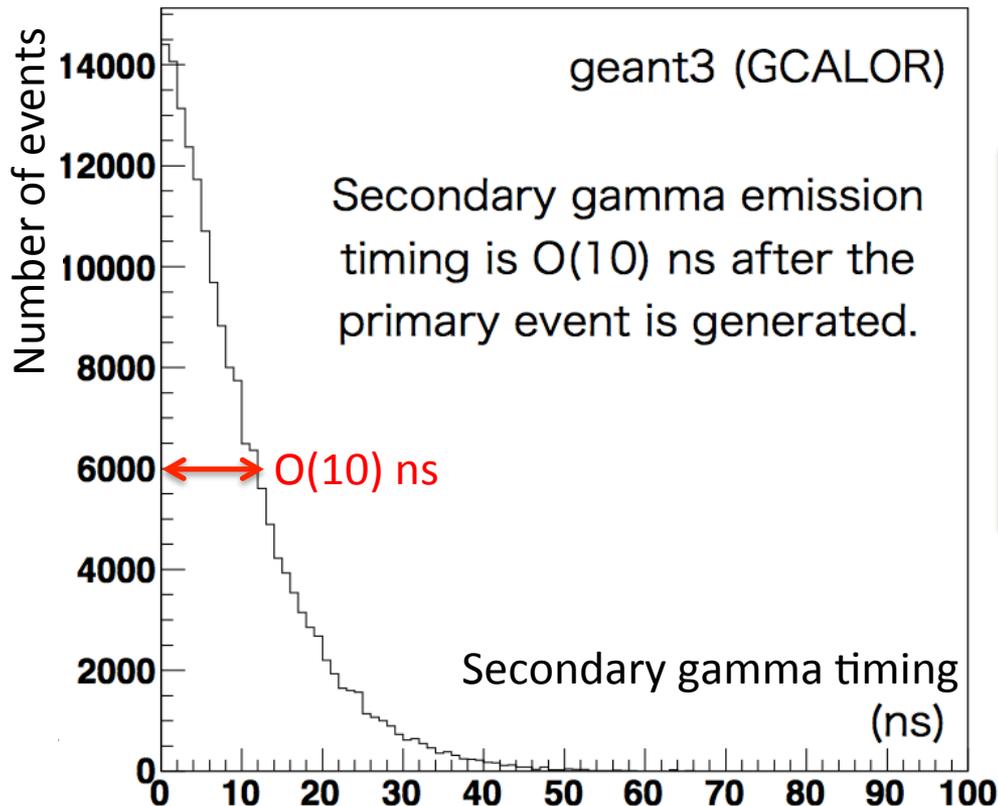
43イベント

$\Delta T_0$  ( $\mu\text{s}$ ) 15ヶ月間のデータ

# Geant3 (GCALOR)

T2K実験のSKシミュレーションはGeant3が使われている。

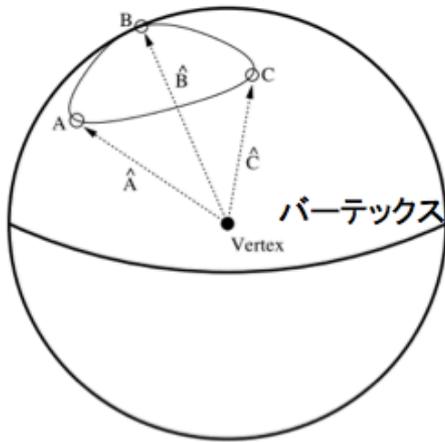
## Secondary gamma timing



スーパーカミオカンデで  
Primary Gammaと  
Secondary Gammaは  
時間的に区別は困難。

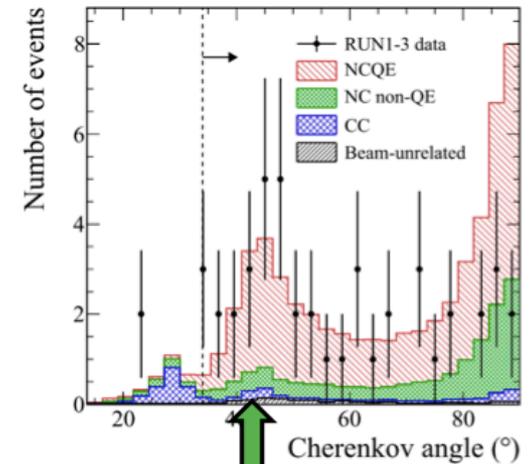
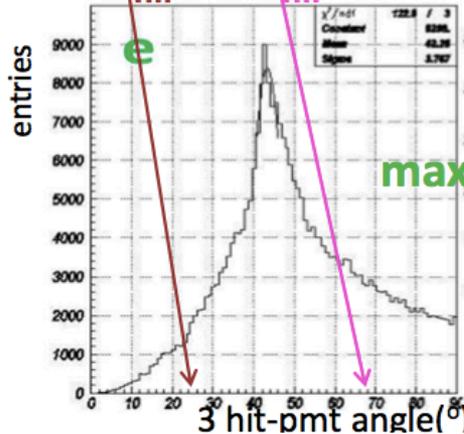
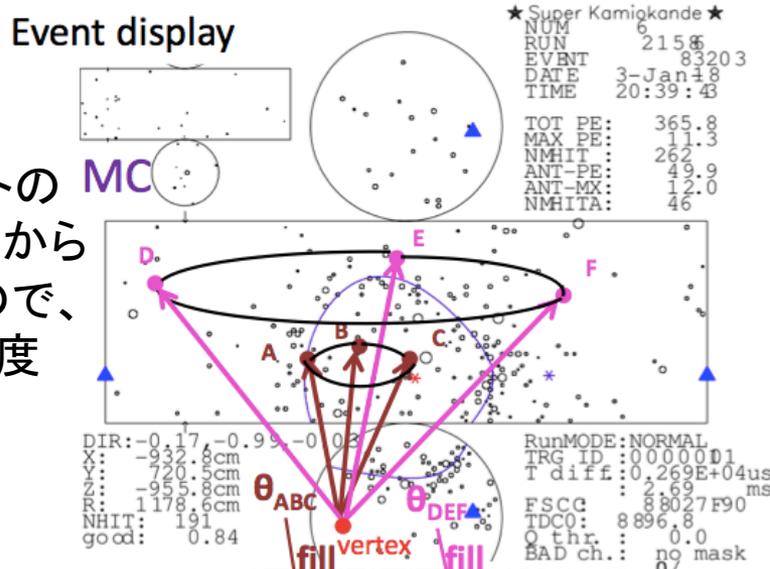
# チェレンコフ光の放出角度 (Cherenkov Angle)

ヒットPMTの3本1セットの組を作り、バーテックスから一意な円錐が描けるので、そこから3-hit-pmt角度を計算する。



3hit pmt 角度:

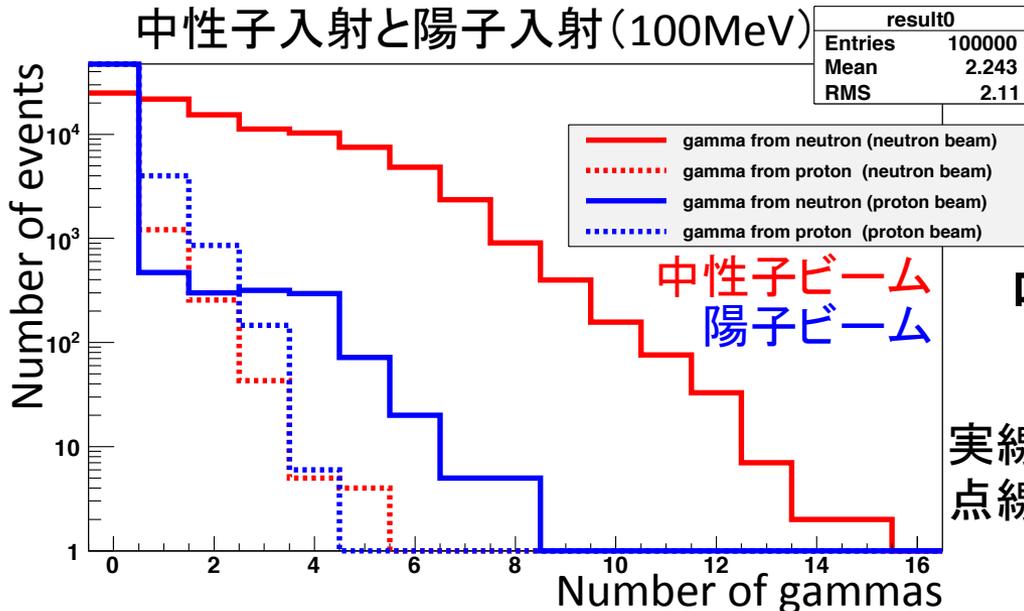
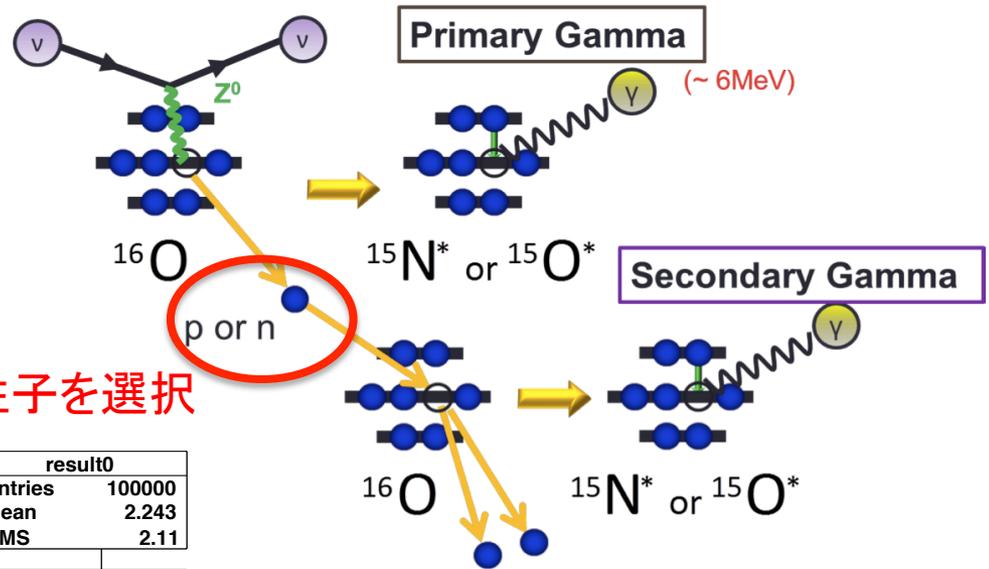
Event display



全ての組に対して行い、最大の3-hit-pmt角度を選ぶ  
→ Cherenkov Angle

# なぜ中性子を入射するのか？

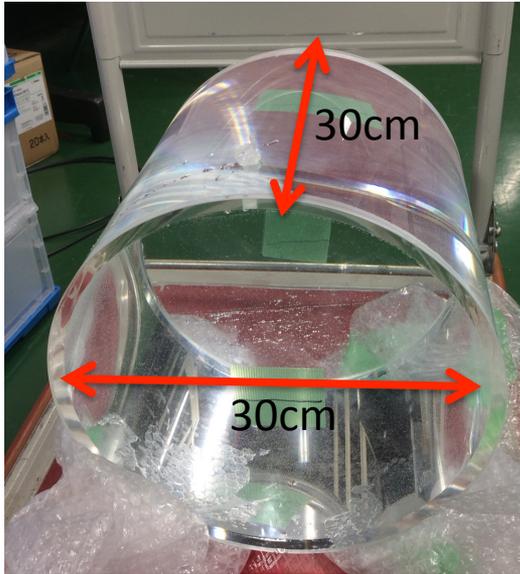
Secondary Gammaの数を調べるために中性子を入射する。



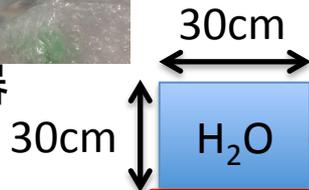
中性子が核子を叩き出すイベントが多い。

実線：n起源  
点線：p起源

# セットアップ (横から見た図)



アクリル容器



金網

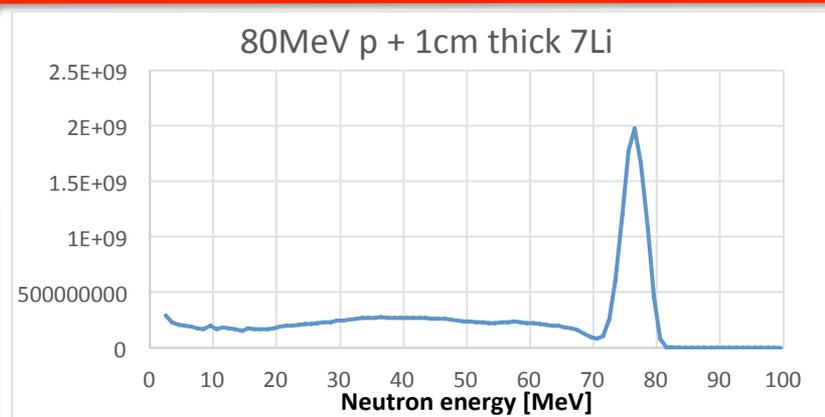


台車

コリメーター

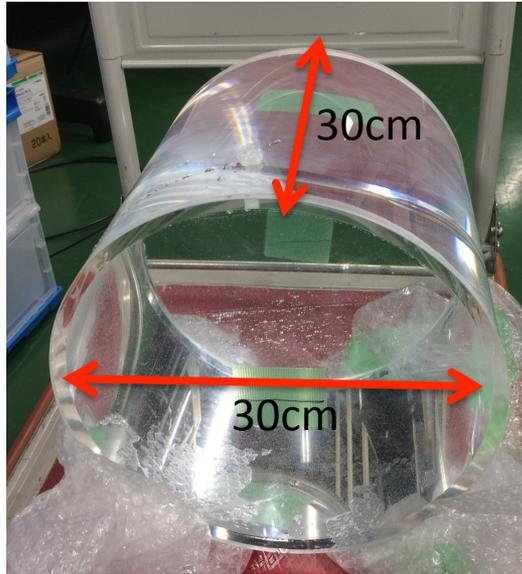
Neutron beam (about 80MeV)

壁



17m

# セットアップ (ビーム軸方向)



アクリル容器

