

# ニュートリノ中性カレント反応 理解のための中性子・酸素原子核 反応に関する研究

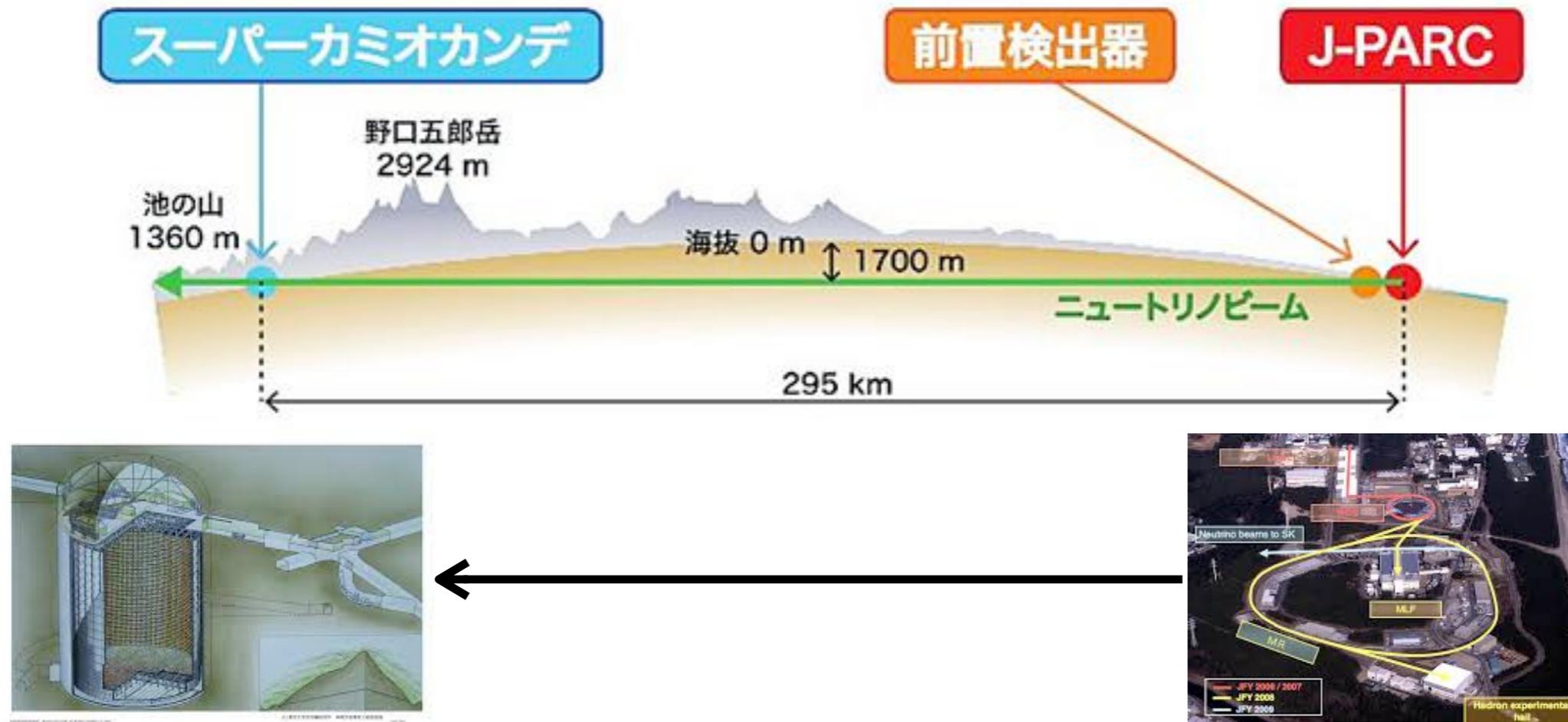
岡山大学 田野 智大

Flavor Physics workshop 2022

2022/11/7 - 10

@ ニュー八景園

1. 研究背景
2. E525実験
3. 解析の流れ
4. 中性子フラックス解析
5. ガンマ線スペクトル解析
6. まとめ・展望



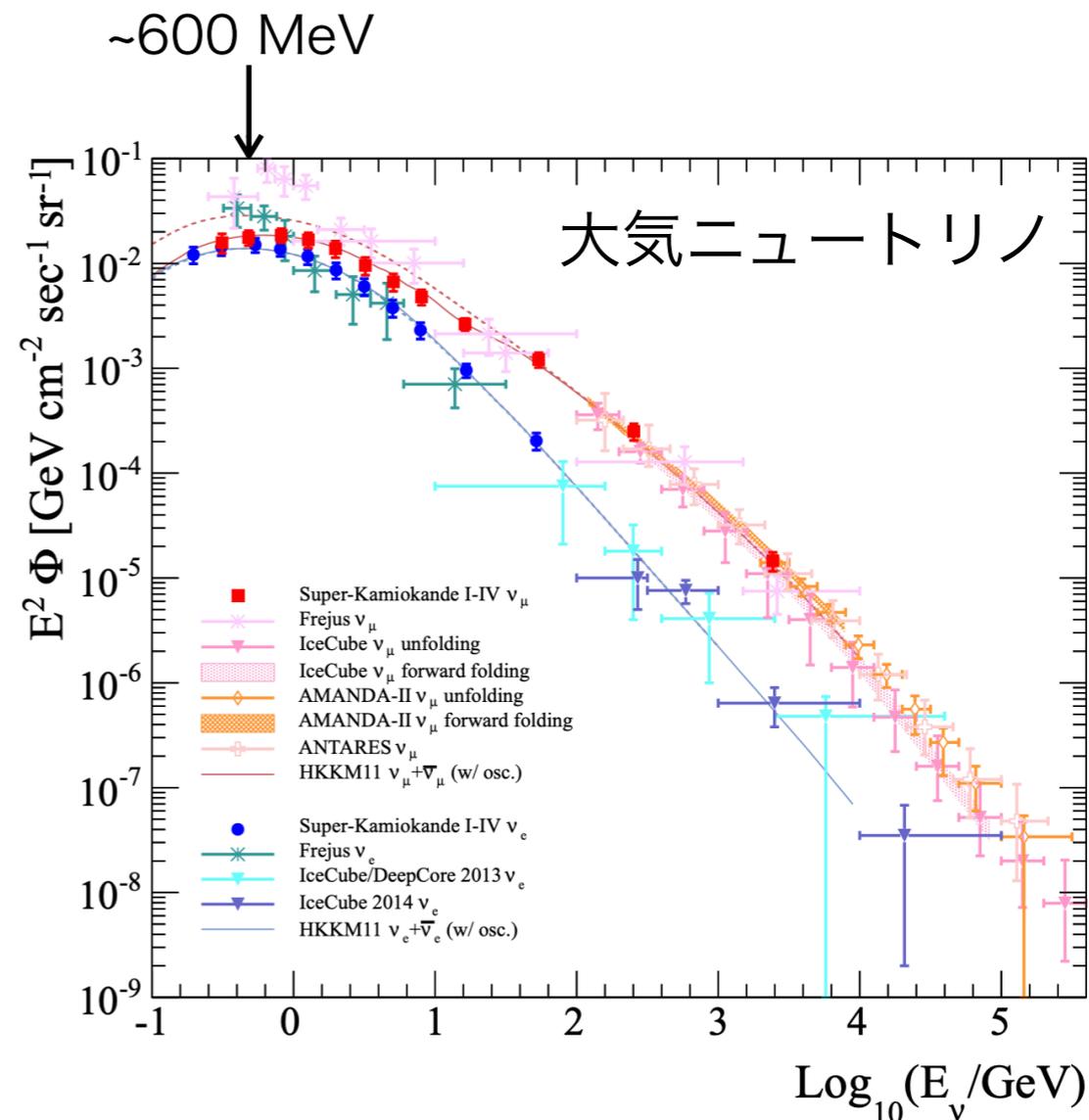
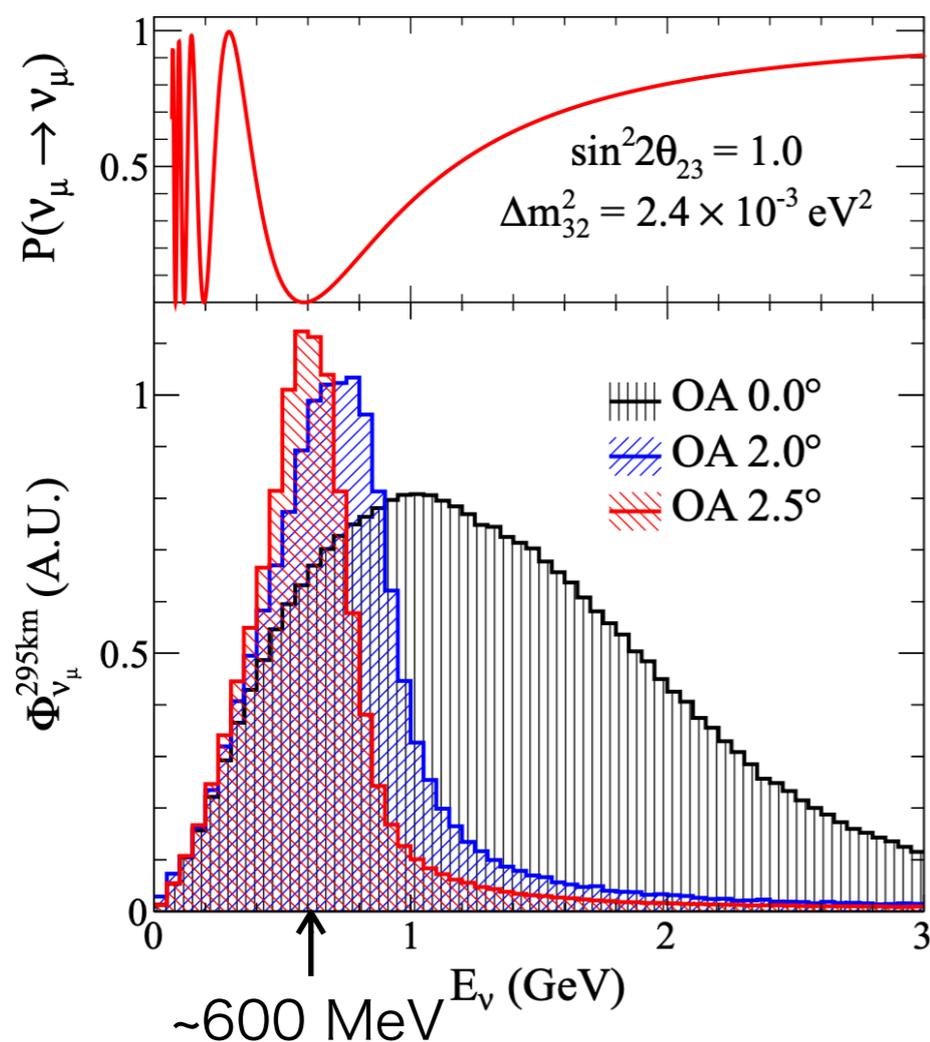
- レプトンセクターにおけるCP対称性の破れの実証を目指す  
長基線ニュートリノ振動実験
- J-PARCでニュートリノビームを生成して、スーパーカミオカンデで  
ニュートリノ振動事象を探索
- CP位相角( $\delta_{CP}$ )に最も厳しい制限

→ 95%の信頼度で  $\delta_{CP} = 0$  を棄却

# T2Kのニュートリノビーム

- T2K実験におけるニュートリノビーム：600 MeV付近にピーク
- 大気ニュートリノ：600 MeV付近にピーク
- T2K実験のニュートリノビームは、大気ニュートリノによる様々な反応の測定に応用されている

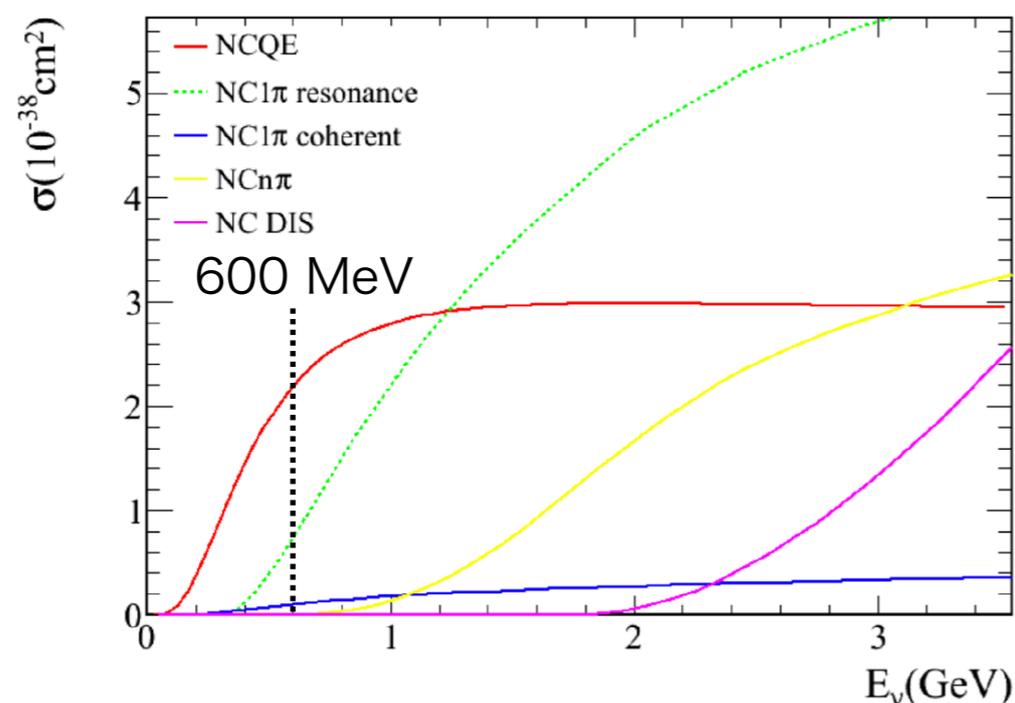
T2K実験のニュートリノビーム



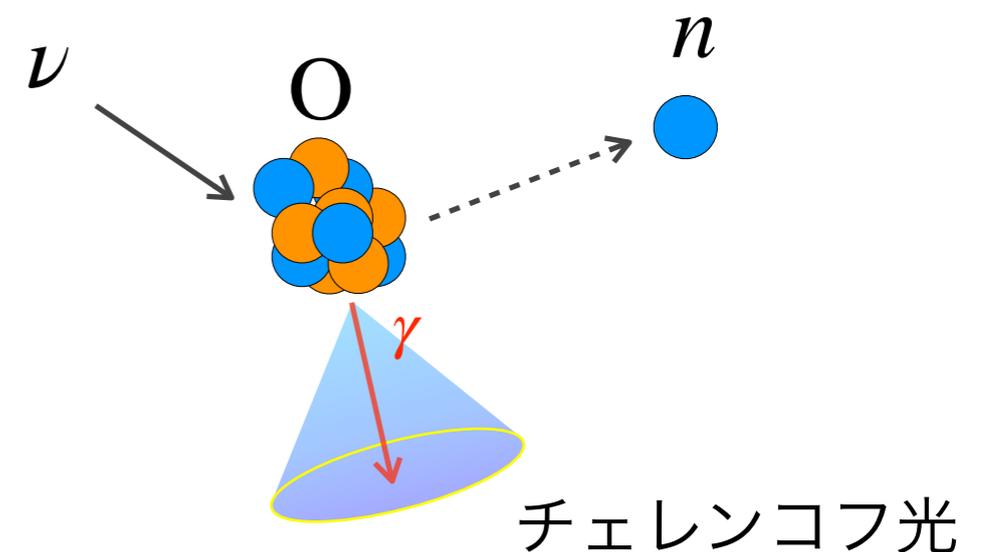
# 大気ニュートリノによる反応

- ニュートリノは弱い相互作用で反応
  - $W^\pm$  : 荷電カレント (CC) 反応
  - $Z^0$  : 中性カレント (NC) 反応
- スーパーカミオカンデ実験における超新星背景ニュートリノ探索において、大気ニュートリノ由来のNC反応の不定性が大きい
  - T2Kのニュートリノビームを利用したNC反応の測定実験 (次ページ)
- 600 MeV付近のニュートリノによるNC反応
  - ▶ 準弾性散乱 (NCQE反応) が支配的

NC反応の断面積



NCQE反応

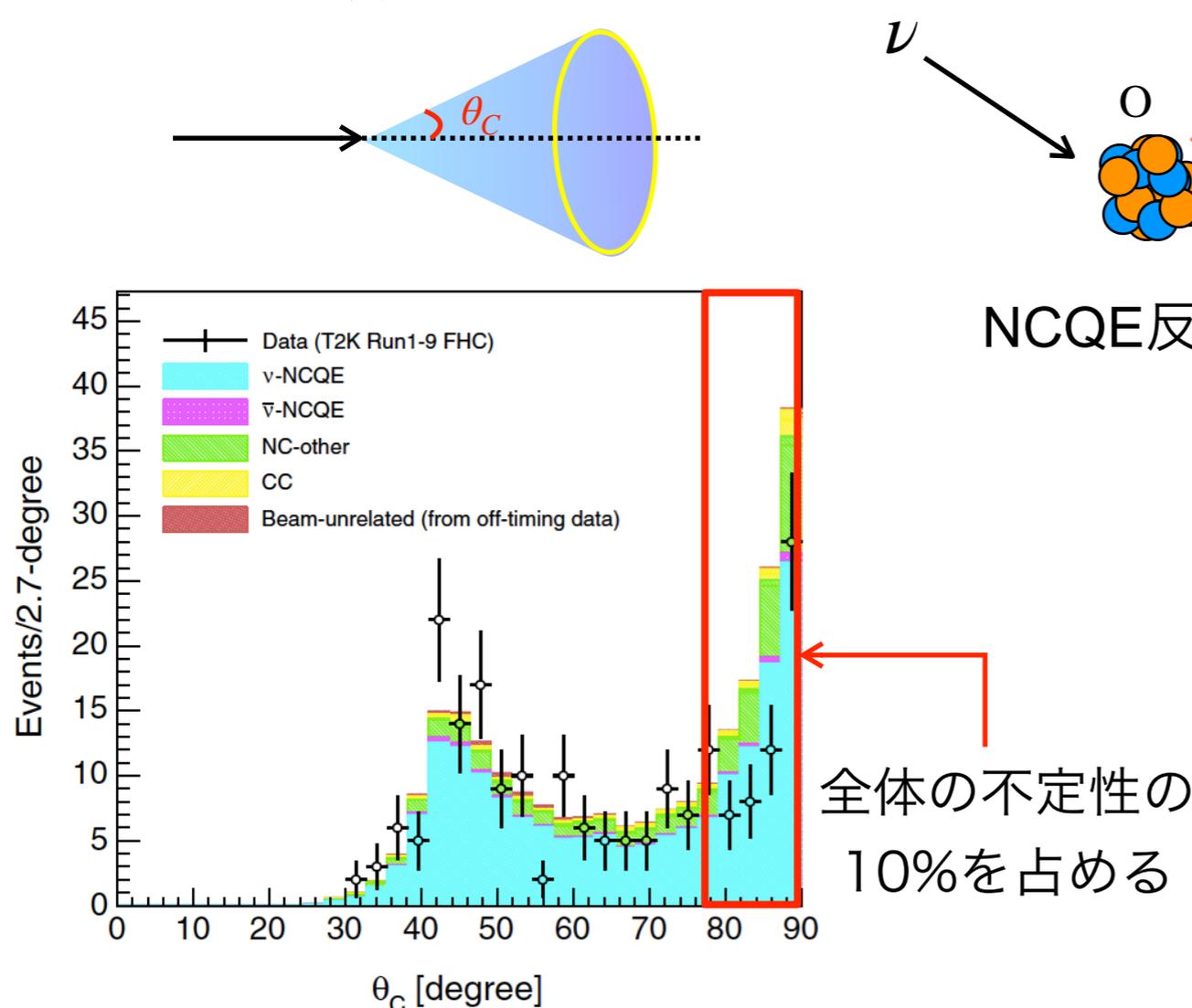


# NC反応の測定実験

- T2Kのニュートリノビームを利用したNC反応の測定実験
- チェレンコフ角分布のピーク部分でデータとMCに差異
- 特に大角度部分があっていない

→ NCQE反応後の中性子と酸素原子核反応由来のガンマ線が影響

チェレンコフ角

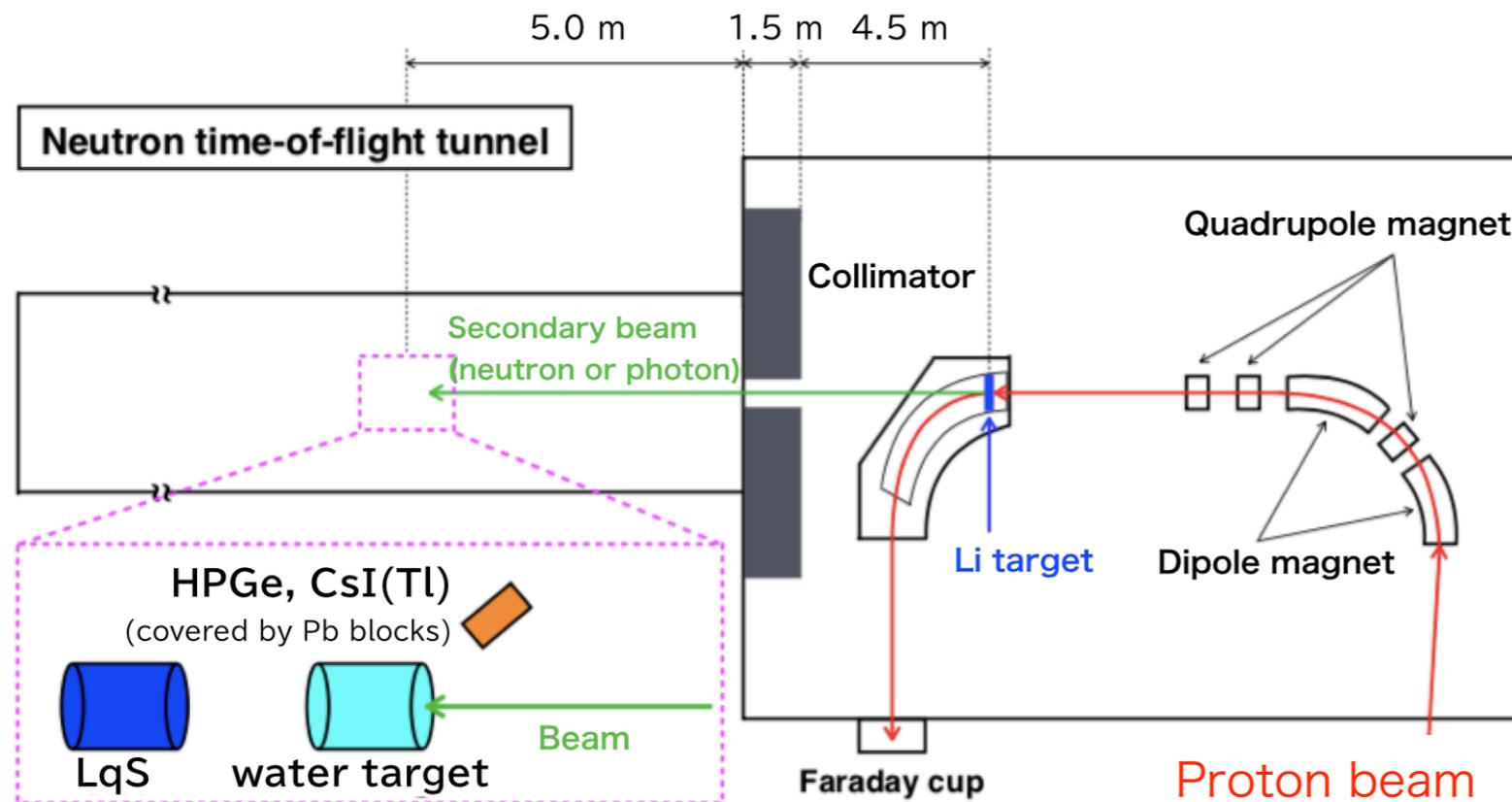


中性子・酸素原子核反応の詳細な理解が必要

# E525実験

- 2018年10月30日・12月16日に大阪大学RCNPで行われた
- 中性子ビームを水標的に入射し、放出されるガンマ線を測定
- 各ガンマ線の発生確率 (生成断面積) を算出

## RCNP N0コース



### 検出器

中性子

→ 液体シンチレータ (LqS)

ガンマ線

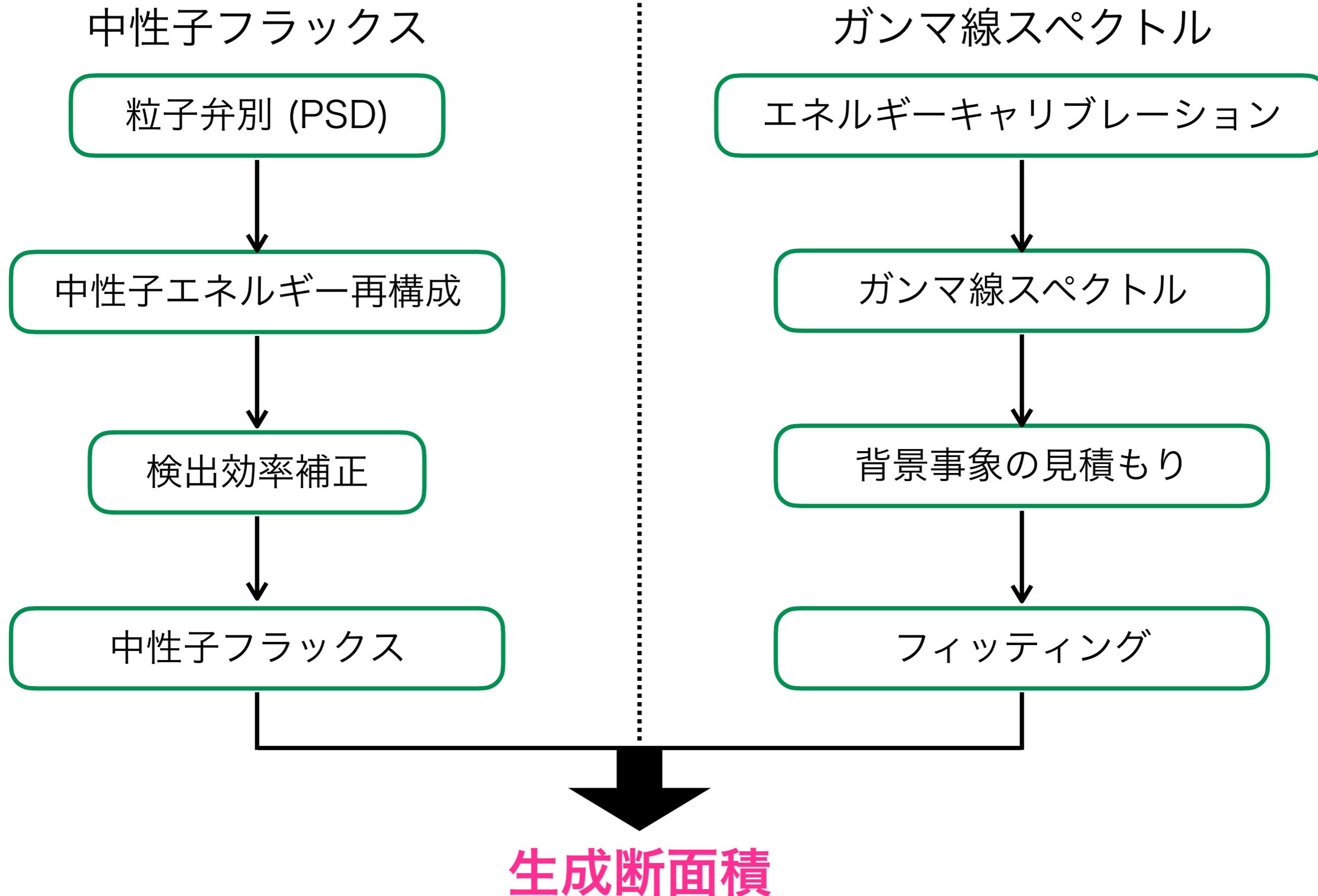
→ ゲルマニウム検出器

(HPGe)

Proton beam  
30 MeV · 250 MeV

### 本研究

250 MeV実験のデータを解析し、ガンマ線の生成断面積を算出する

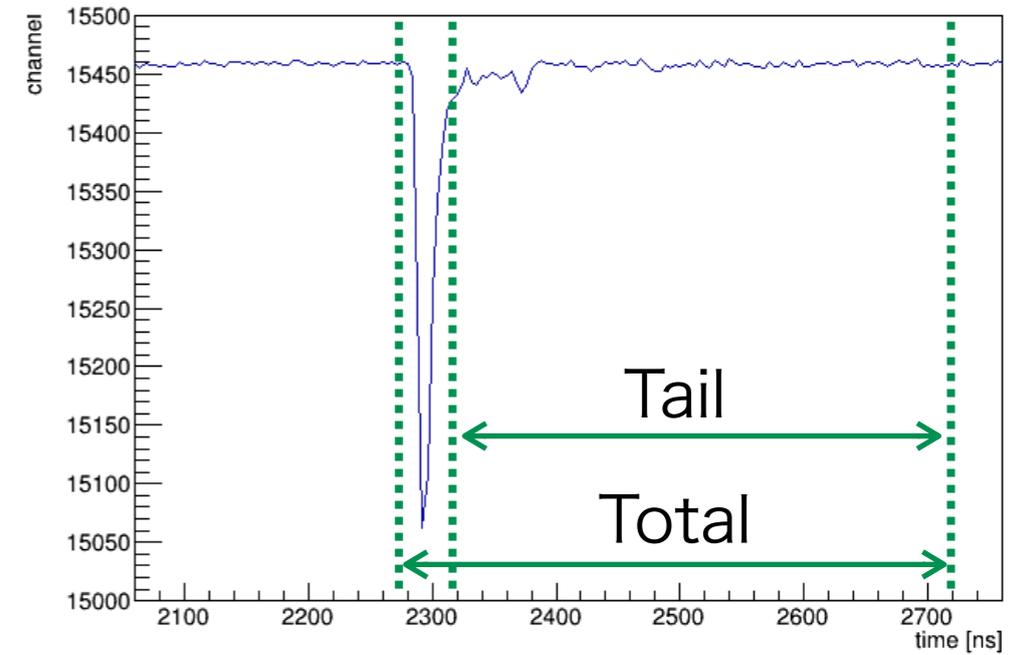


# 粒子弁別

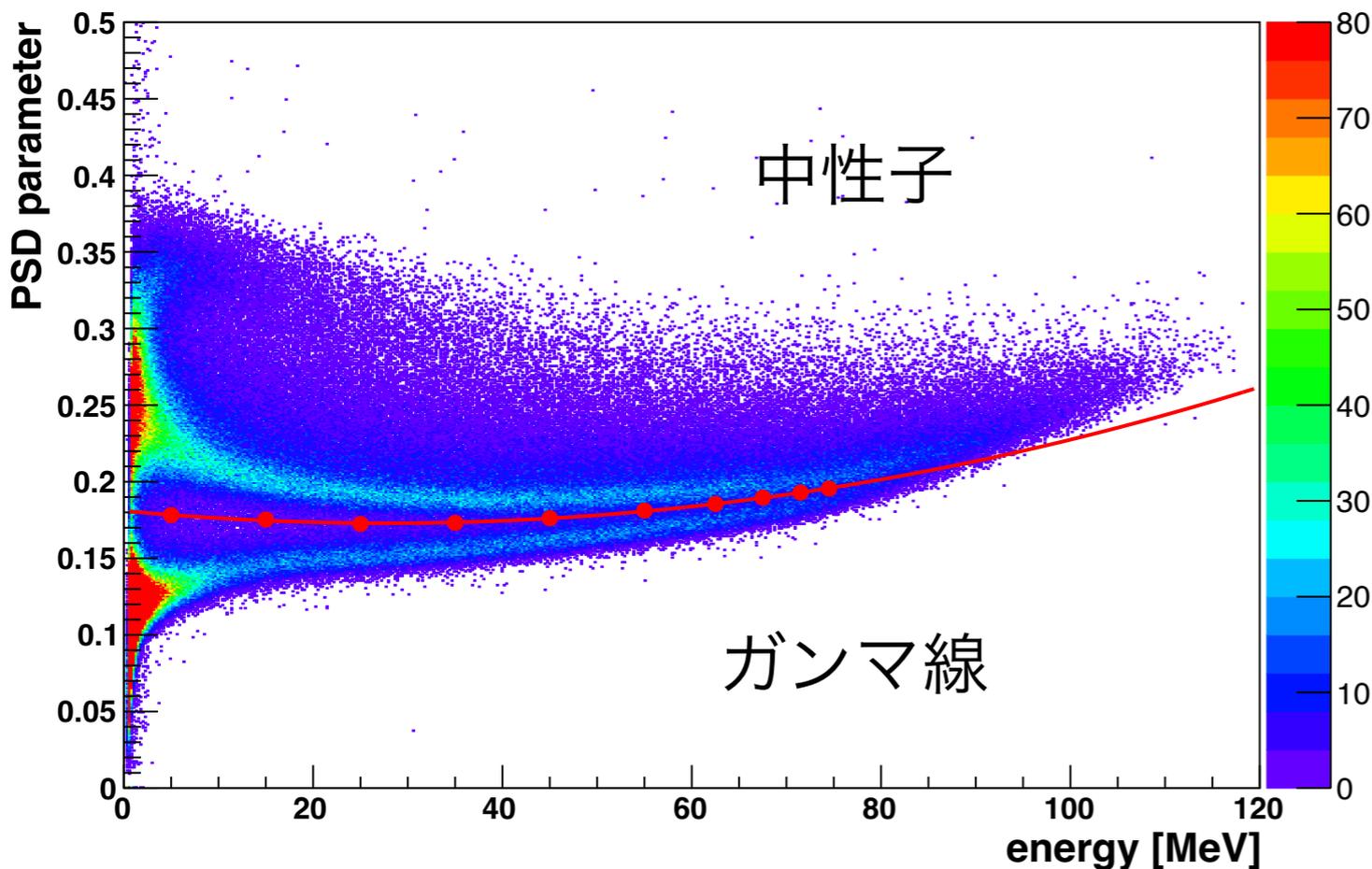
- 波形の違いを利用して中性子イベントを選別 (Pulse Shape Discrimination)
- 中性子イベントはテールが長くなる  
→ PSD parameterが大きい

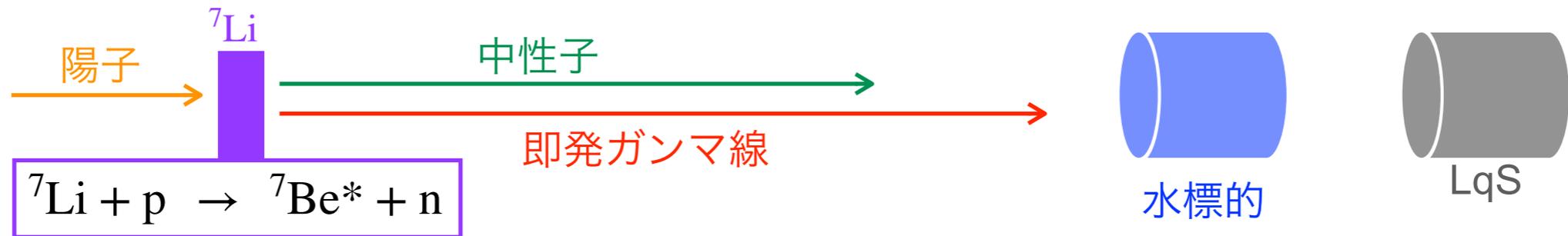
$$\text{PSD parameter} = \frac{\text{Tail}}{\text{Total}}$$

LqSの波形

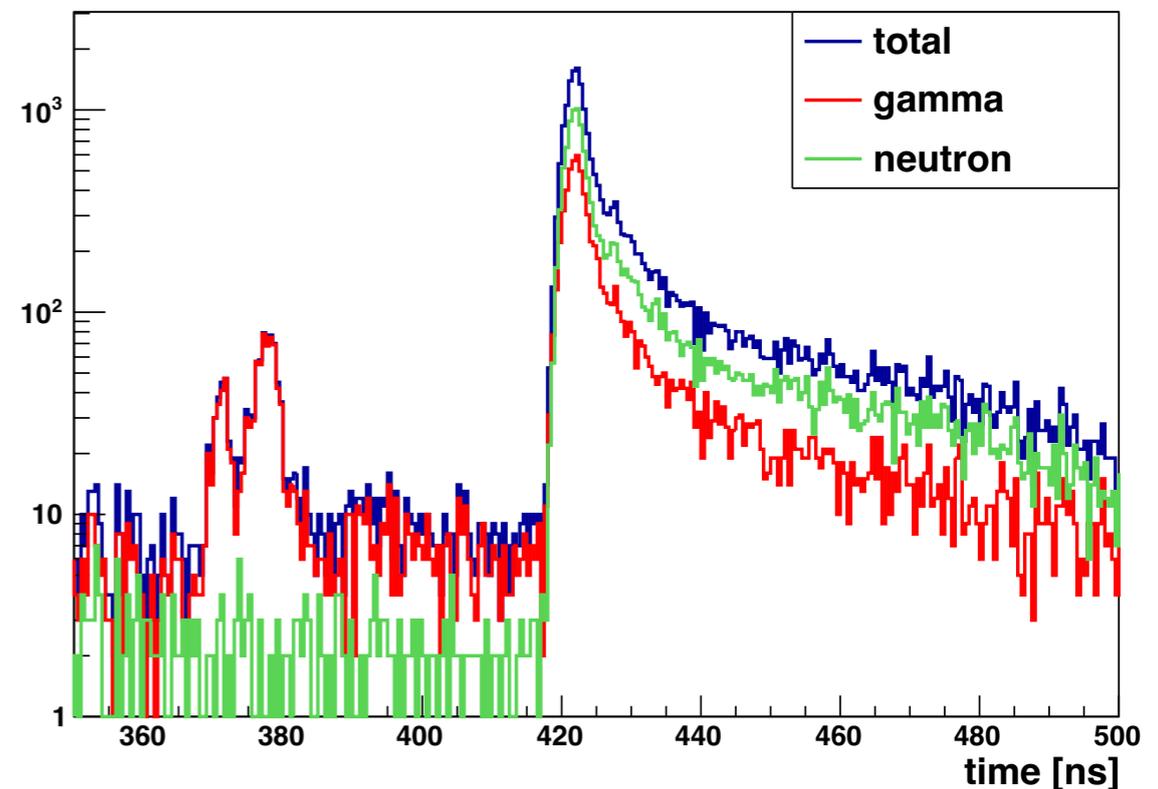


- エネルギー領域毎に中性子とガンマ線のカット条件を決定





- 即発ガンマ線：Be\*の脱励起ガンマ線
- LqSまで光速で飛来する  
→ 中性子と飛来時間差  $\Delta t$  が生じる
- ToF分布を作成  
→ 即発ガンマ線のピークと  
中性子のピークを確認
- 下の式を用いてエネルギー再構成



$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{c}{L}} \Delta t\right)^2}} - mc^2$$

$mc^2$  : 中性子の質量 (939.6 MeV)

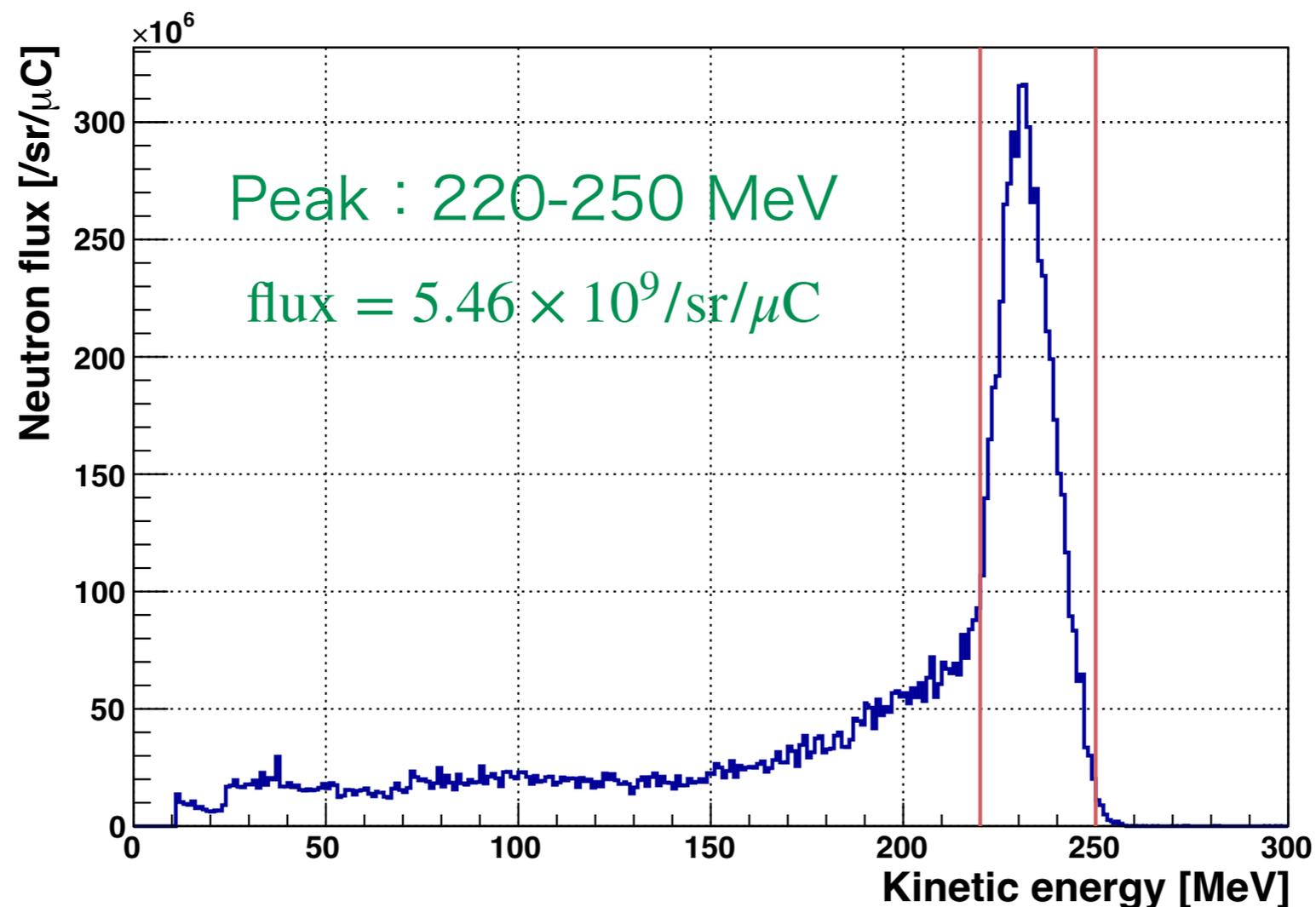
L : Liターゲットから水標的までの距離

$\Delta t$  : 飛来時間の差

# 中性子フラックス

- シミュレーションを用いて計算した検出効率を考慮して中性子フラックスを算出
- ピーク領域は220 - 250 MeV  
→ このエネルギー領域の中性子を断面積計算に用いる

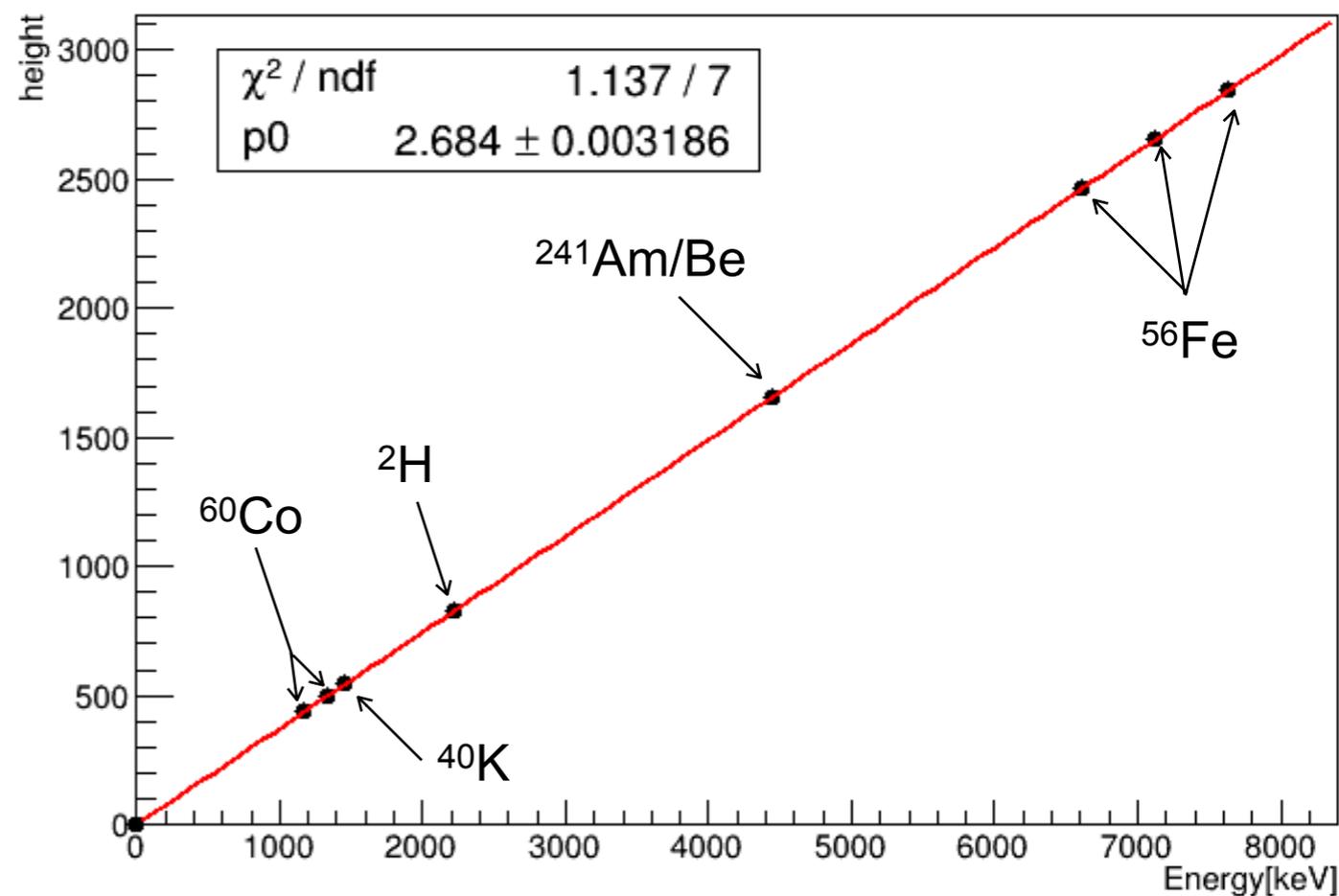
## 中性子フラックス



# エネルギーキャリブレーション

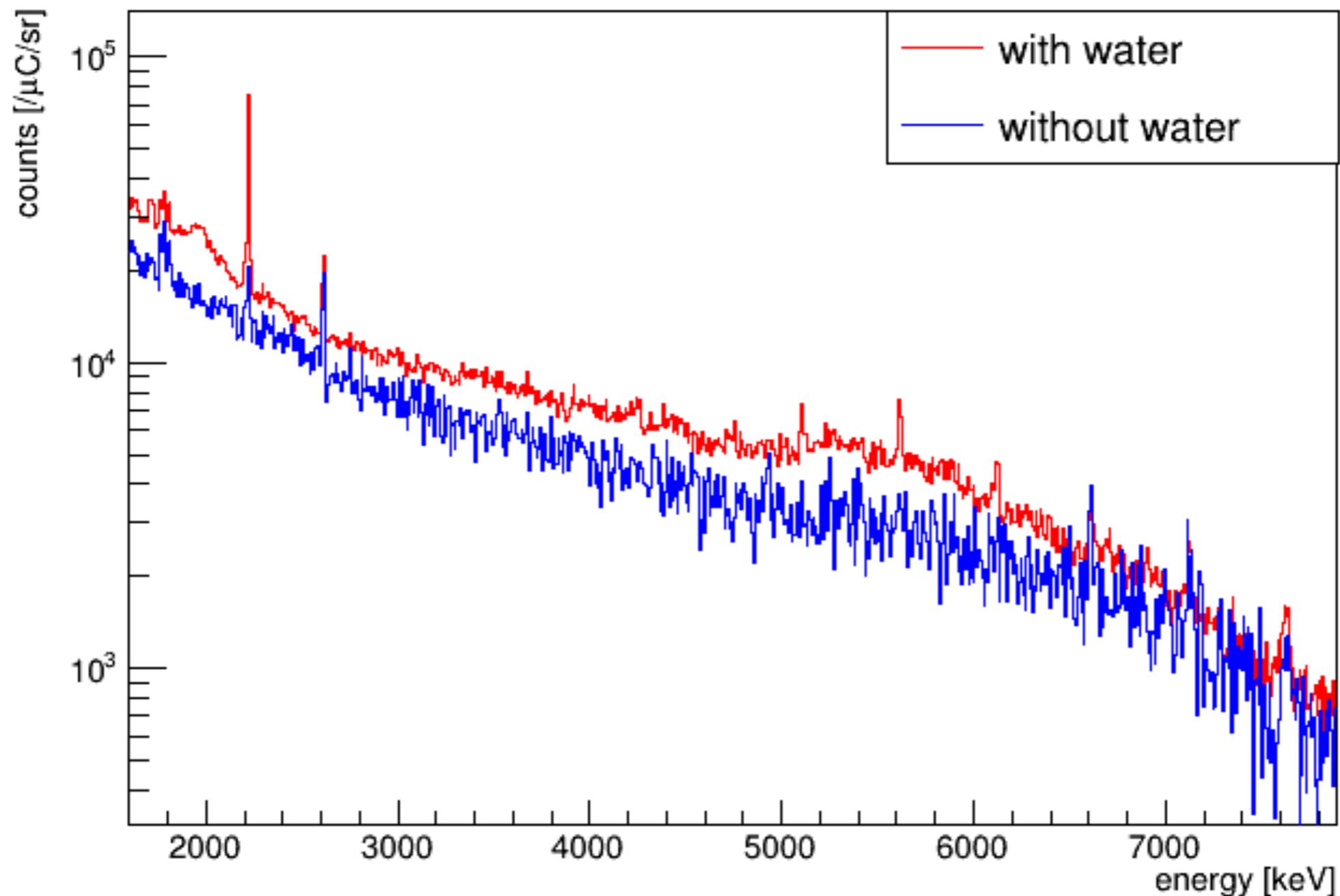
$^{60}\text{Co}$	1.17 MeV, 1.33 MeV
$^{241}\text{Am}/\text{Be}$	4.44 MeV
$^{56}\text{Fe}$	7.63 MeV + S.E. + D.E.
$^{40}\text{K}$ (環境)	1.46 MeV
$^1\text{H}$ (熱中性子捕獲)	2.22 MeV

- 上記のガンマ線を用いてHPGe検出器のエネルギーキャリブレーションを行なった
- 信号が予想される6 MeV付近を含め、良い線形性を確認



# ガンマ線スペクトル

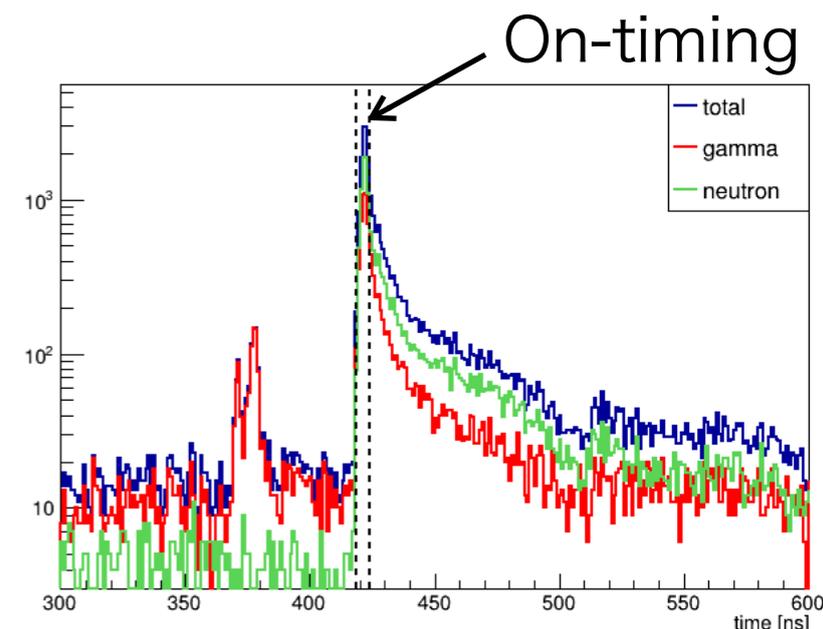
- 以下のようなガンマ線スペクトルが得られた
- $^1\text{H}$ の熱中性子捕獲や $^{16}\text{O}$ 由来のものなど、複数のピークが見られる
- このスペクトルから背景事象を差し引く



# 背景事象の見積もり

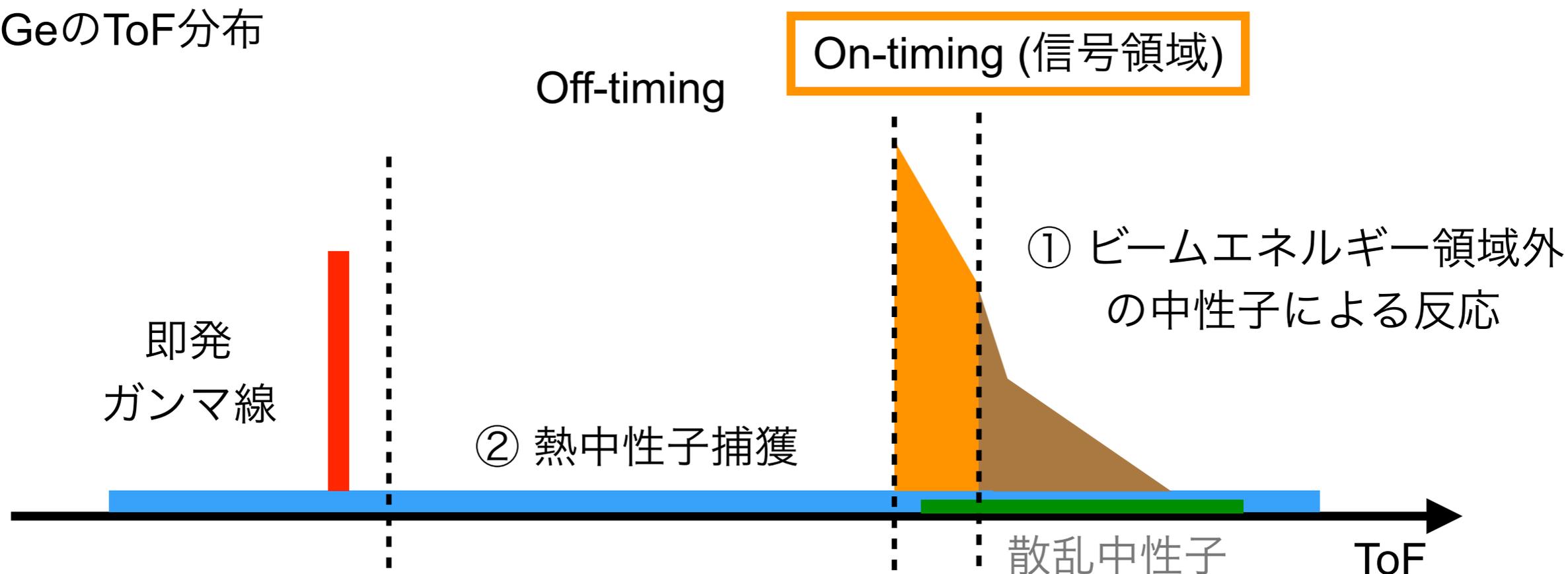
## 主な背景事象

- ① ビームエネルギー領域外の中性子による反応  
→ ToFを用いたカット
- ② 熱中性子捕獲  
→ Off-timing 領域のイベントを用いる



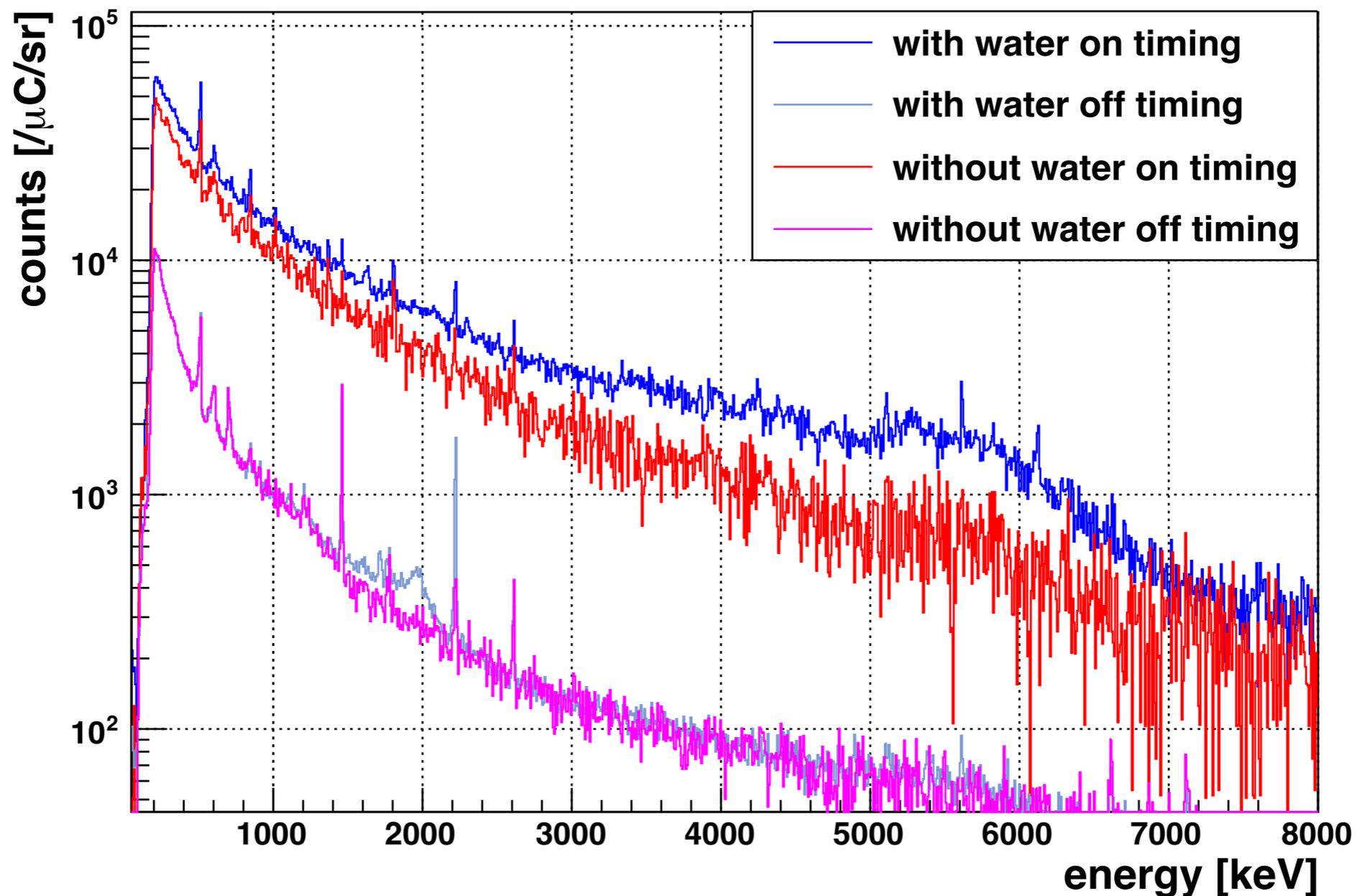
On-timing・Off-timing 考慮したガンマ線スペクトルを作成

## HPGeのToF分布



# Timing別のスペクトル

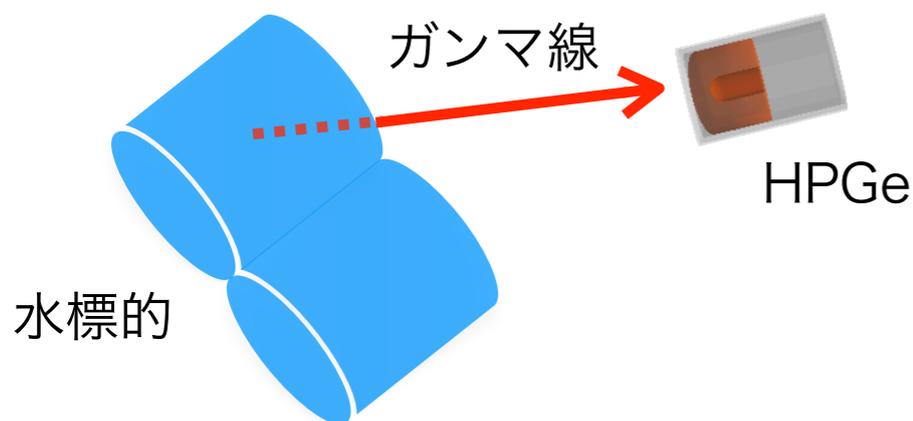
- w/ water ( on / off timing ), w/o water ( on / off timing ) の計4つのスペクトル図を作成
- これらの分布を利用して背景事象を差し引く



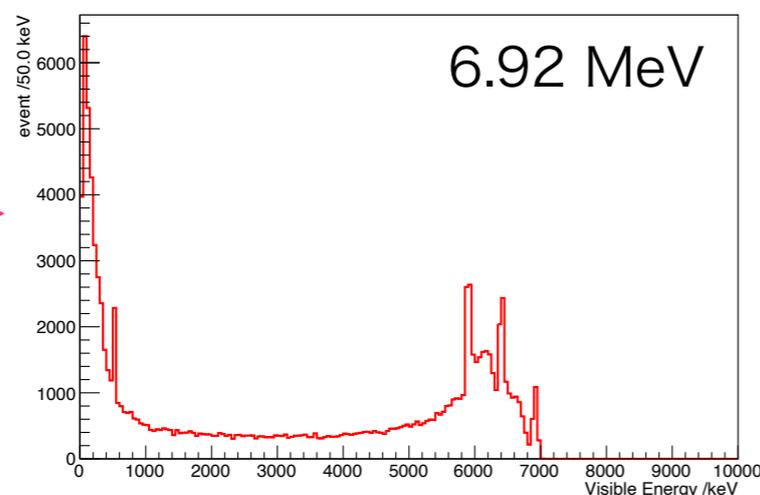
## フィッティングを行い、各ガンマ線の生成断面積を求める

### Signal template

- シミュレーションを用いて作成



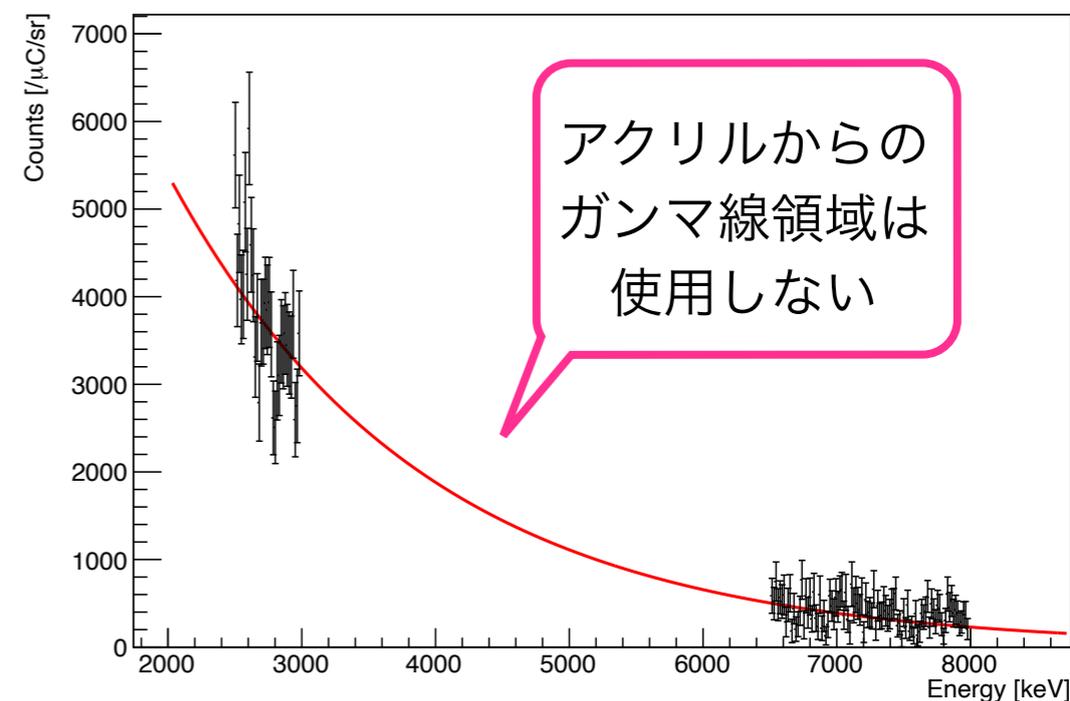
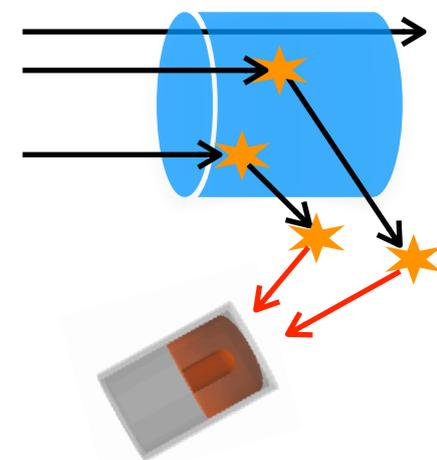
6.92 MeVの  
ガンマ線を  
1億本発生



計10個のガンマ線について  
同様にテンプレートを作成

### Background template

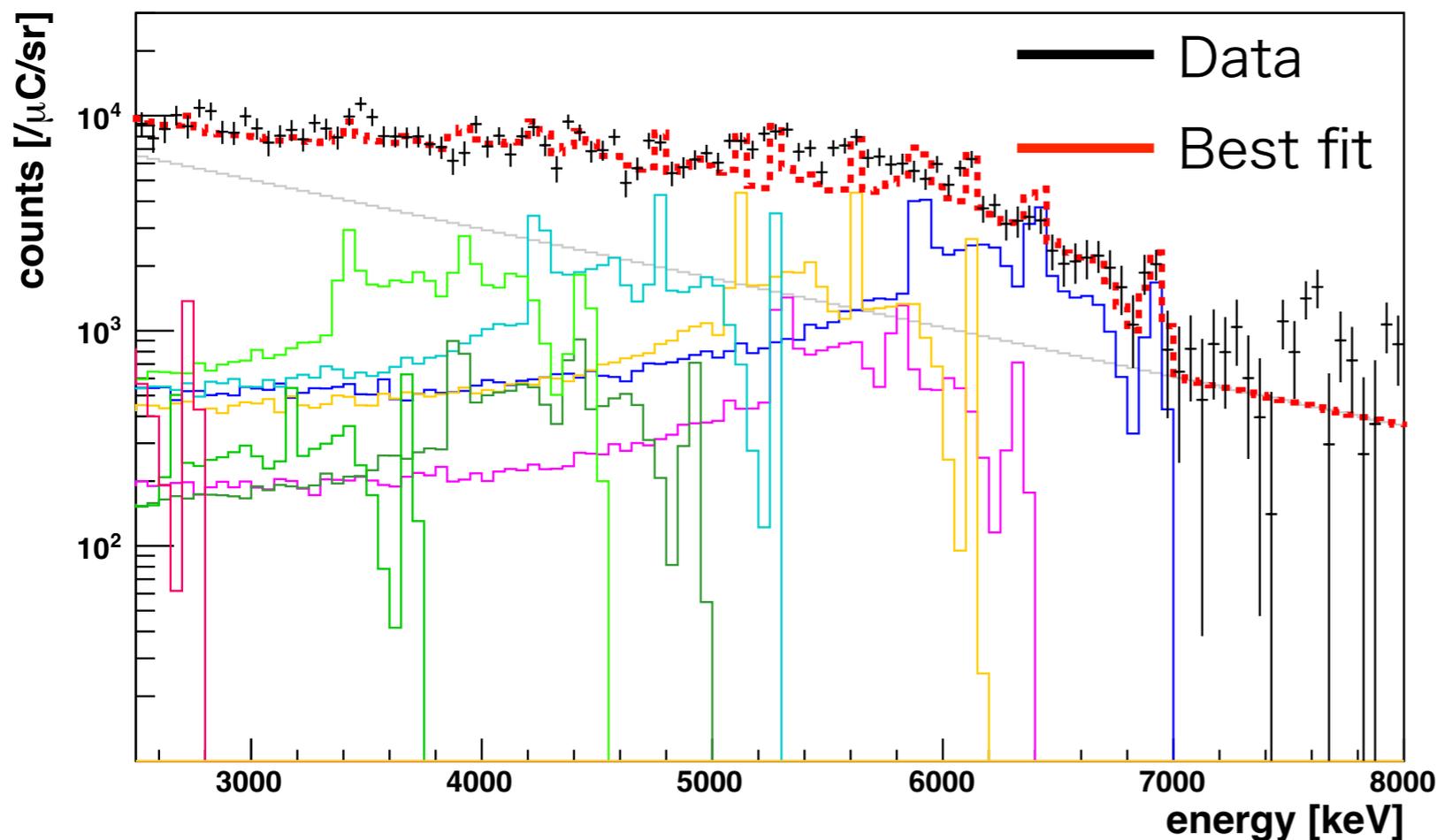
- 水標的で散乱された中性子が周辺物質と反応して生じるガンマ線
- 水なしランを用いて作成
- 指数関数を仮定



# フィッティング結果

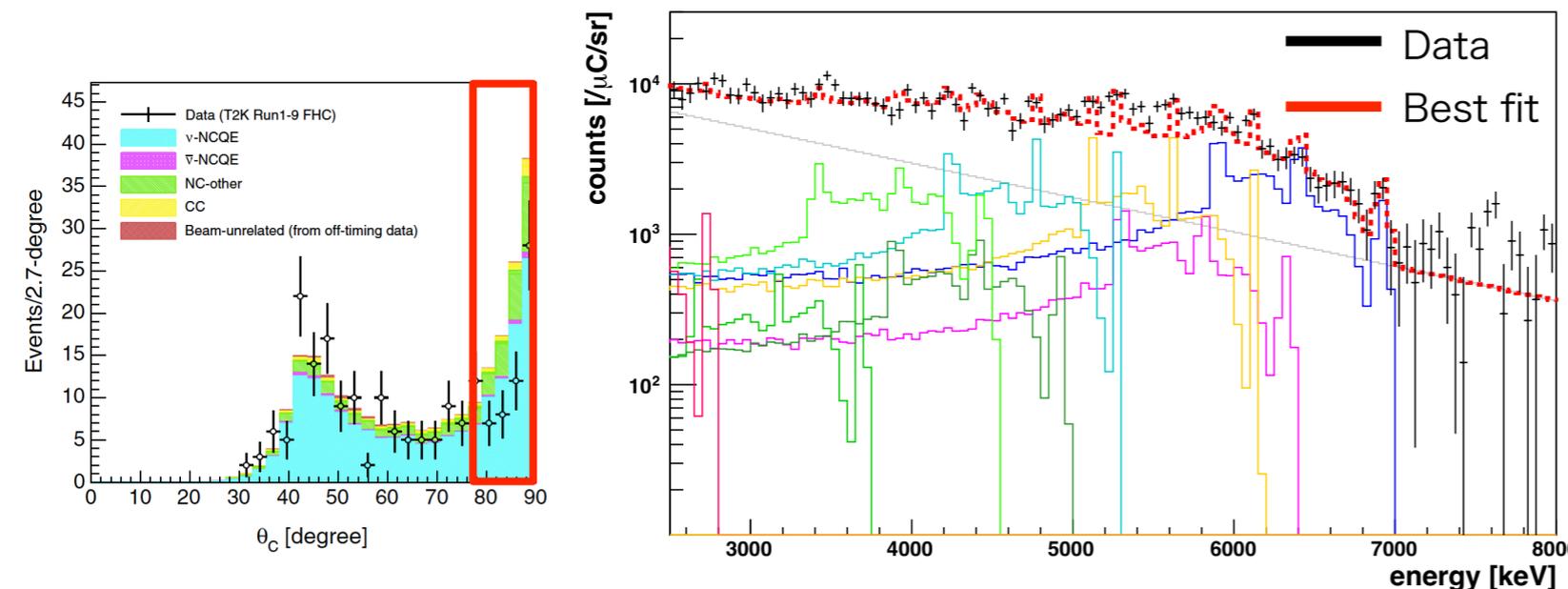
- 用意したテンプレートにパラメータをかけて足し合わせる  
→ データを最もよく再現するパラメータセットを求める
- 高エネルギー側から、光電吸収ピークを用いて  $\chi^2$  を計算

エネルギー [MeV]	6.32 MeVに対する強度
6.92	2.96 $^{+0.35}_{-0.44}$
6.32	1.00 $^{+0.37}_{-0.37}$
6.13	2.23 $^{+0.60}_{-0.37}$
5.27	2.35 $^{+0.63}_{-0.40}$
5.10	0.00 $^{+0.33}$
4.91	0.63 $^{+0.33}_{-0.33}$
4.44	2.08 $^{+0.38}_{-0.29}$
3.84	0.00 $^{+0.13}$
3.68	0.33 $^{+0.15}_{-0.23}$
2.74	0.56 $^{+0.27}_{-0.19}$



- 最も強いガンマ線：6.92 MeV
  - ▶  $^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$  反応  
 $^{16}\text{O}^*$  の第三励起状態から放出される
- 非弾性散乱が支配的な反応
  - ▶ 現在使用されているモデルは  
 ノックアウト反応が支配的
- これらの反応をシミュレーションに導入  
 → 原子核反応によるガンマ線由来の不定性の  
 削減につながる

エネルギー [MeV]	6.32 MeVに 対する強度
6.92	2.96 $^{+0.35}_{-0.44}$
6.32	1.00 $^{+0.37}_{-0.37}$
6.13	2.23 $^{+0.60}_{-0.37}$
5.27	2.35 $^{+0.63}_{-0.40}$
5.10	0.00 $^{+0.33}$
4.91	0.63 $^{+0.33}_{-0.33}$
4.44	2.08 $^{+0.38}_{-0.29}$
3.84	0.00 $^{+0.13}$
3.68	0.33 $^{+0.15}_{-0.23}$
2.74	0.56 $^{+0.27}_{-0.19}$



- T2K実験のニュートリノビームを利用してNCQE反応の測定実験が行われ、チェレンコフ角分布でデータとMCに差異が見られた
- この違いを理解するためには中性子と酸素原子核の反応を理解する必要がある
- RCNPでE525実験が行われ、現在250 MeV陽子ビーム実験のデータ解析を進めている
- 中性子フラックスを求めた後、スペクトルフィッティングを行ない各ガンマ線の強度を求めた
- 最も強いピークは、 $^{16}\text{O}^*$ の第3励起状態から放出される、6.92 MeVのガンマ線であった
  
- 今回求められた反応をシミュレーションに導入することで、NCQE反応測定実験におけるチェレンコフ角分布の不定性の削減が期待される