

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

新学術「地下宇宙」第9回超新星ニュートリノ研究会

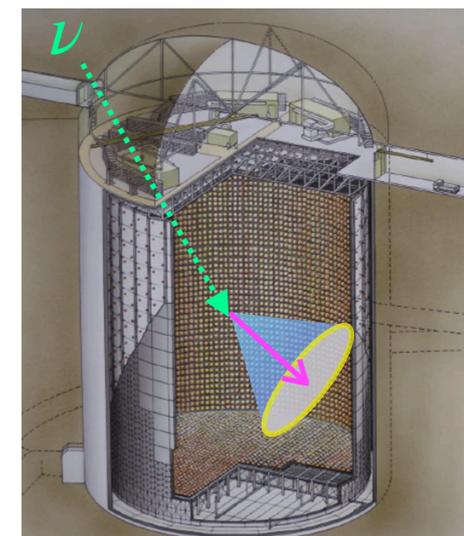
2022/3/2 - 3

@九州大学

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

• SK-Gd実験

- ▶ スーパーカミオカンデ (SK) にガドリニウム (Gd) を導入
→ 中性子検出効率の向上



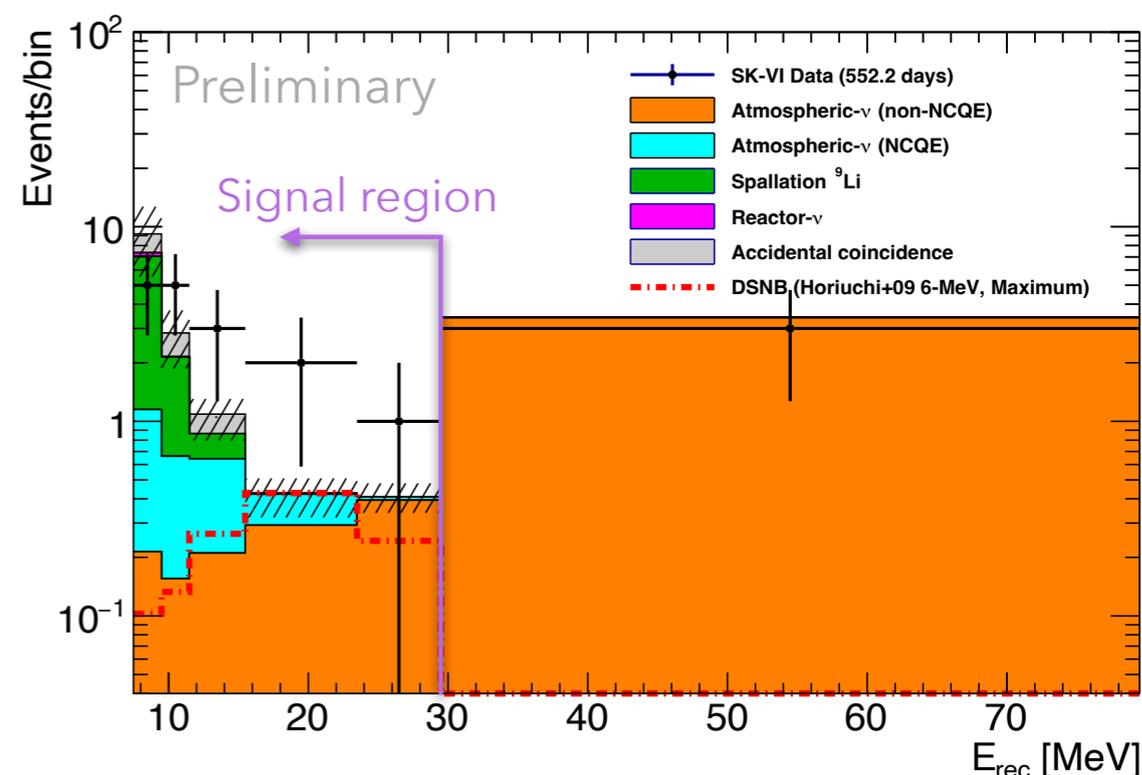
• SK-Gd実験における超新星背景ニュートリノ (SRN) 探索

- ▶ 逆ベータ崩壊 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) を探索
- ▶ 陽電子と $Gd(n, \gamma)$ の同時遅延計測 → 背景事象との識別

- ▶ 中性子を放出する反応は
取り除くことが難しい

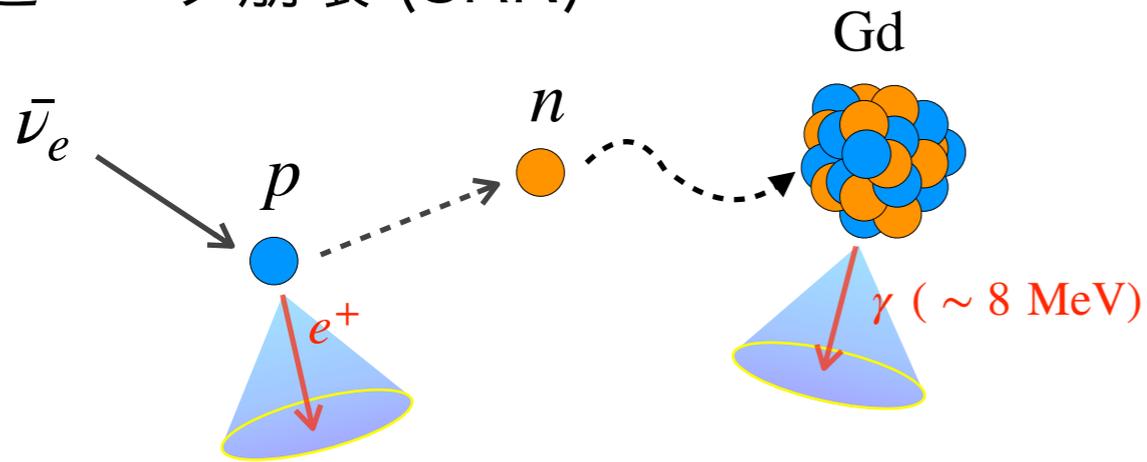
- 大気ニュートリノの
中性カレント反応 (NCQE 反応)

SK-Gdでの探索結果 (原田さん)

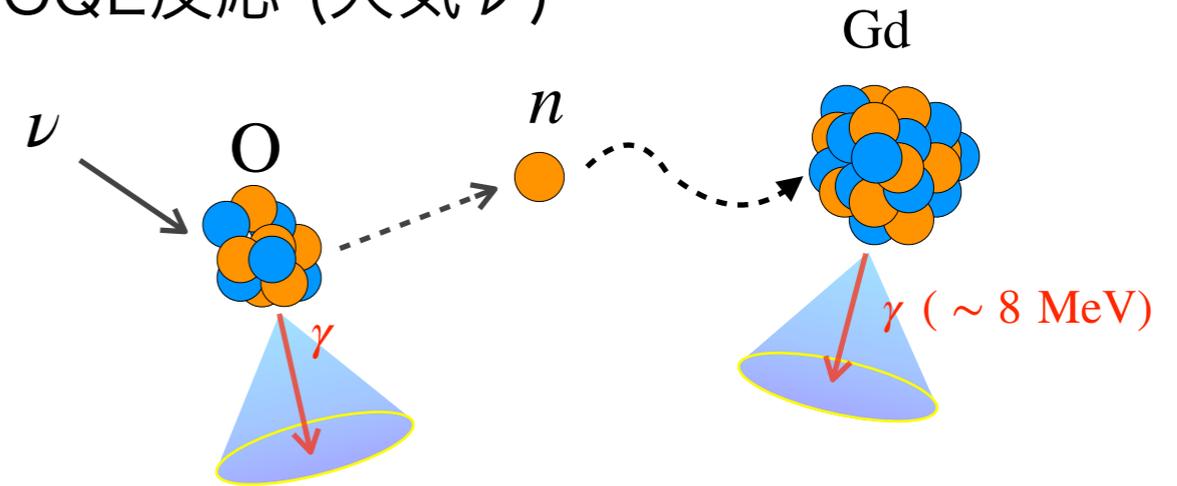


大気ニュートリノのNCQE反応

逆ベータ崩壊 (SRN)



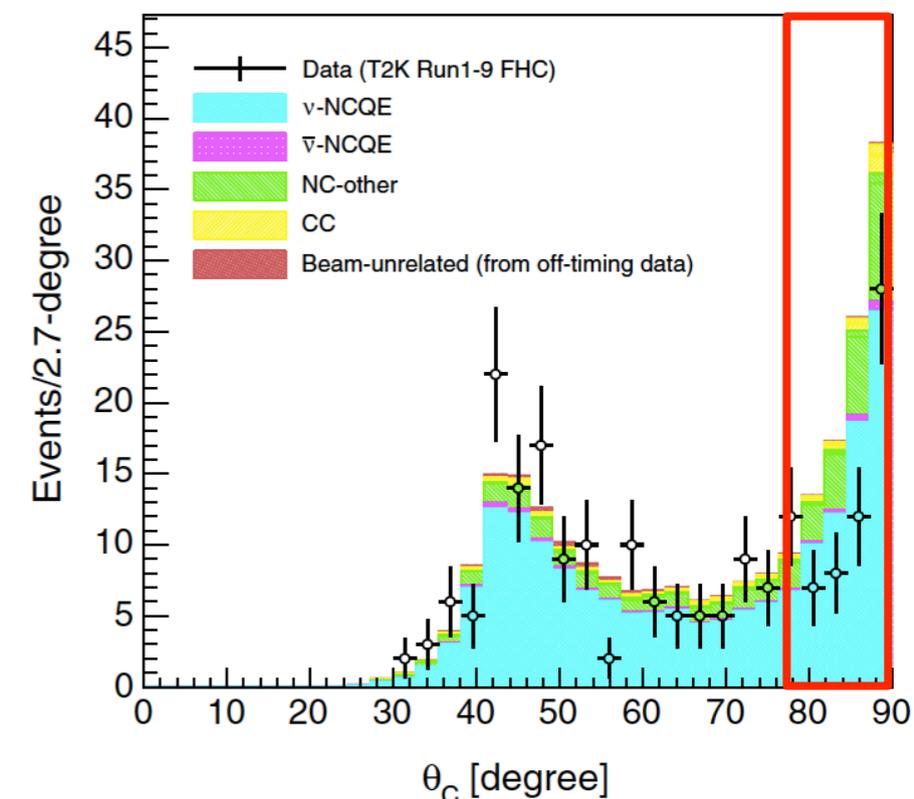
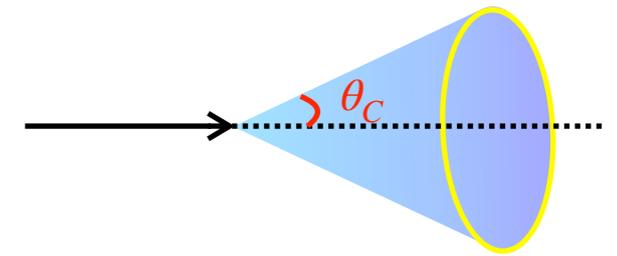
NCQE反応 (大気 ν)



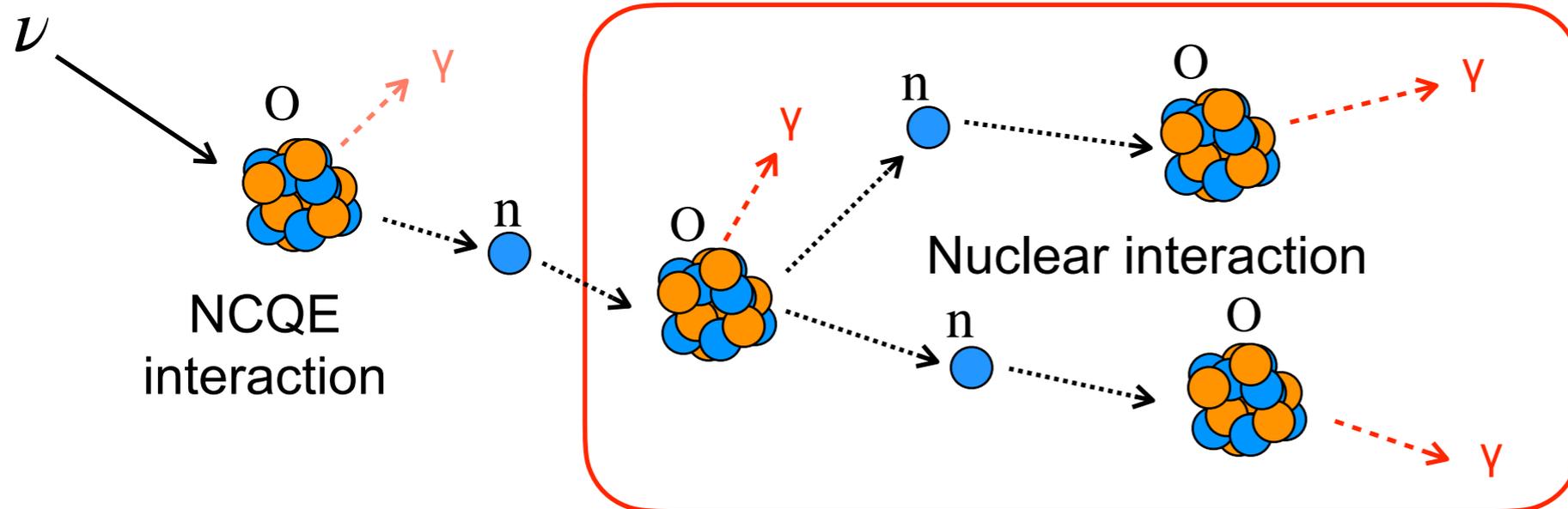
- SRNの逆ベータ崩壊と区別できない
→ シミュレーションを用いた事象数の見積もり

- T2K実験のニュートリノビームを用いたNCQE反応の測定実験

- ▶ T2K実験：～ 600 MeV
大気 ν ：～ 600 MeV
- ▶ チェレンコフ角分布に不定性あり
- ▶ 大角度部分は中性子・酸素原子核反応によるガンマ線が影響



中性子・酸素原子核反応



NCQE反応測定実験における
系統誤差(T2K実験)

FHC	ν -NCQE
Event fraction	75.0
Neutrino flux	6.7
Neutrino interaction	3.0
Primary- γ production	11.0
Secondary- γ production	13.5
Oscillation parameter	...
Detector response	3.4
Total error	19.2

- NCQE反応後の中性子と酸素原子核の反応によるガンマ線
- 複数のガンマ線が同時に放出
→ チェレンコフ角は大角度に再構成される
- 中性子と酸素原子核の反応は詳細に理解されていない

中性子・酸素原子核反応を理解して
原子核反応由来の不定性を削減する

- 中性子と酸素原子核の反応は実験データが少ない
- ガンマ線スペクトルはモデルごとに異なる
- 反応を正しくシミュレーションに導入したい

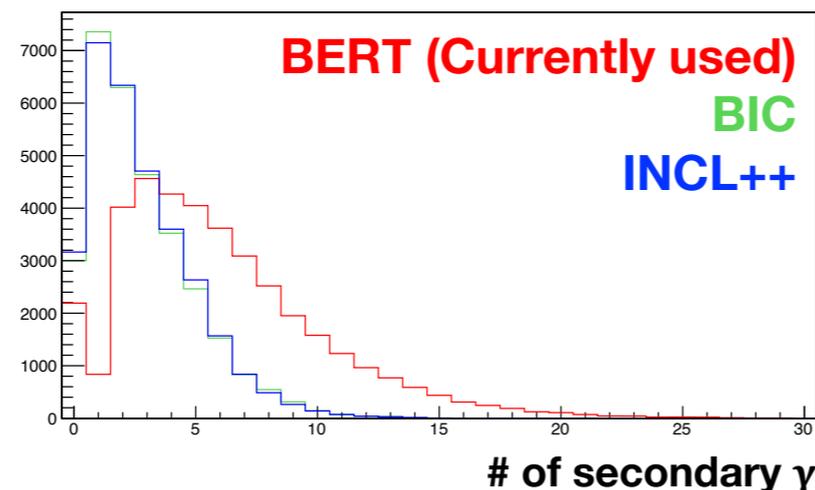
酒井さんの講演

二次ガンマ線

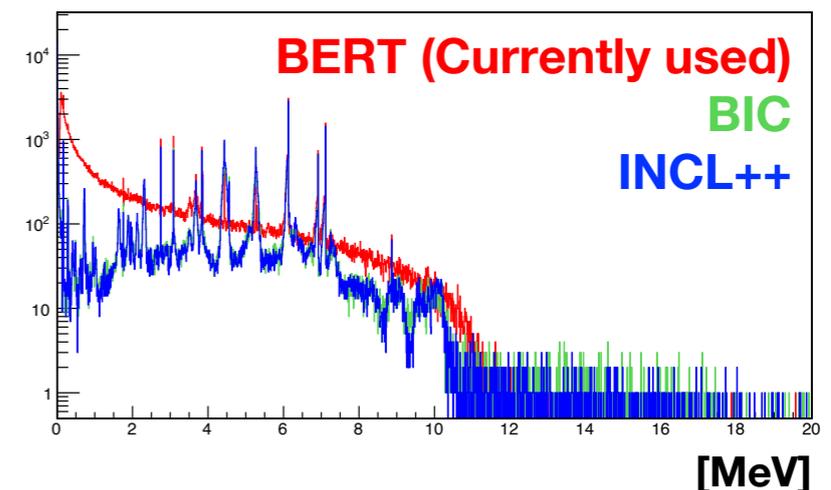
10

- BERT (現在使用中のモデル) では二次ガンマ線が多く発生
- BERTでは脱励起ガンマ線のピークが少ない

of secondary γ (MC, true)



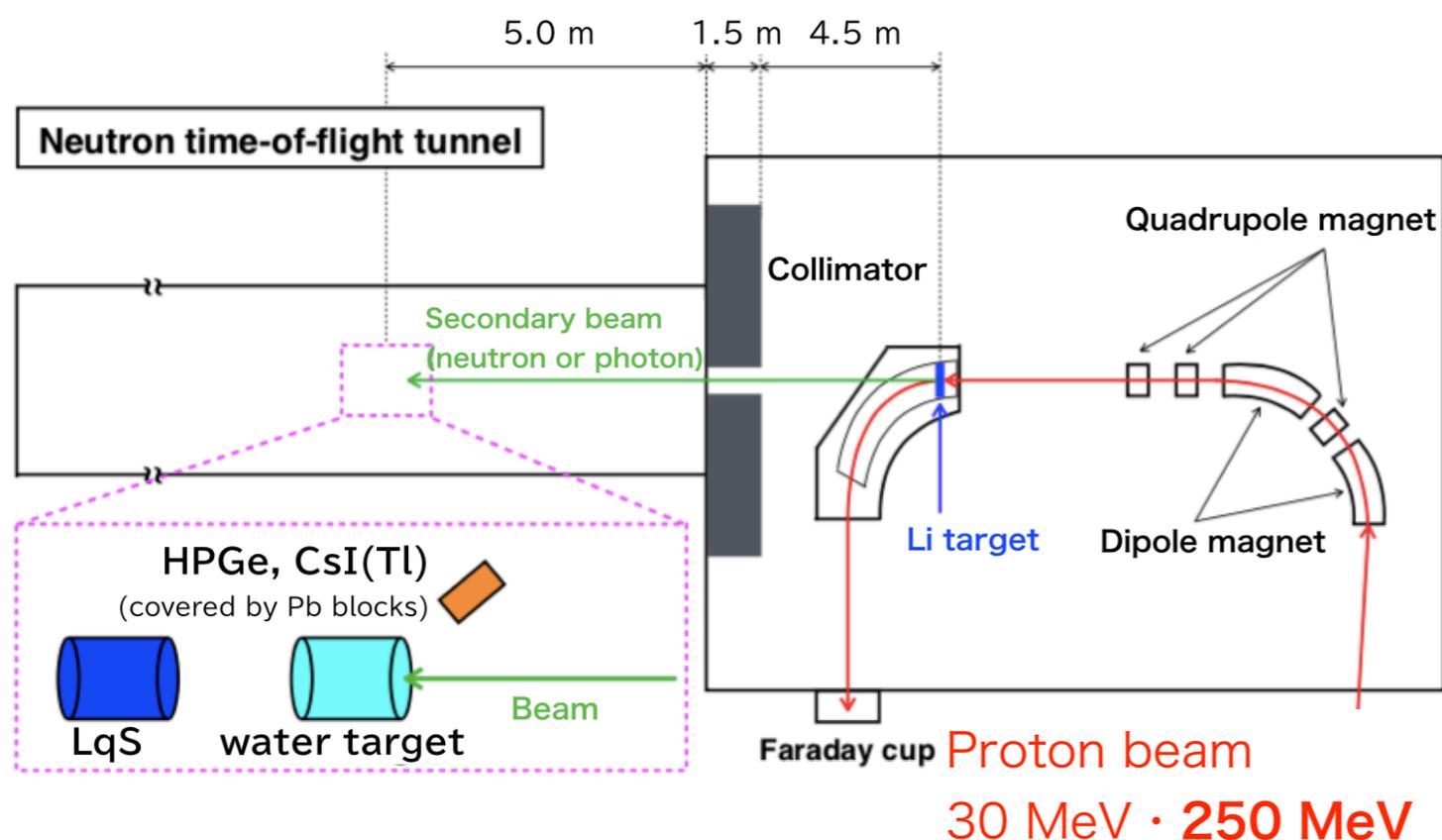
Energy of secondary γ (MC, true)



第9回超新星ニュートリノ研究会

- 2018年10月30日・12月16日 @大阪大学RCNP
- 中性子ビーム(30・250 MeV)を水標的に入射し、放出されるガンマ線を測定
 - ▶ 先行研究：E487 (中性子エネルギー 80 MeV)
- 各ガンマ線の発生確率 (生成断面積) を算出

RCNP NOコース



検出器

中性子

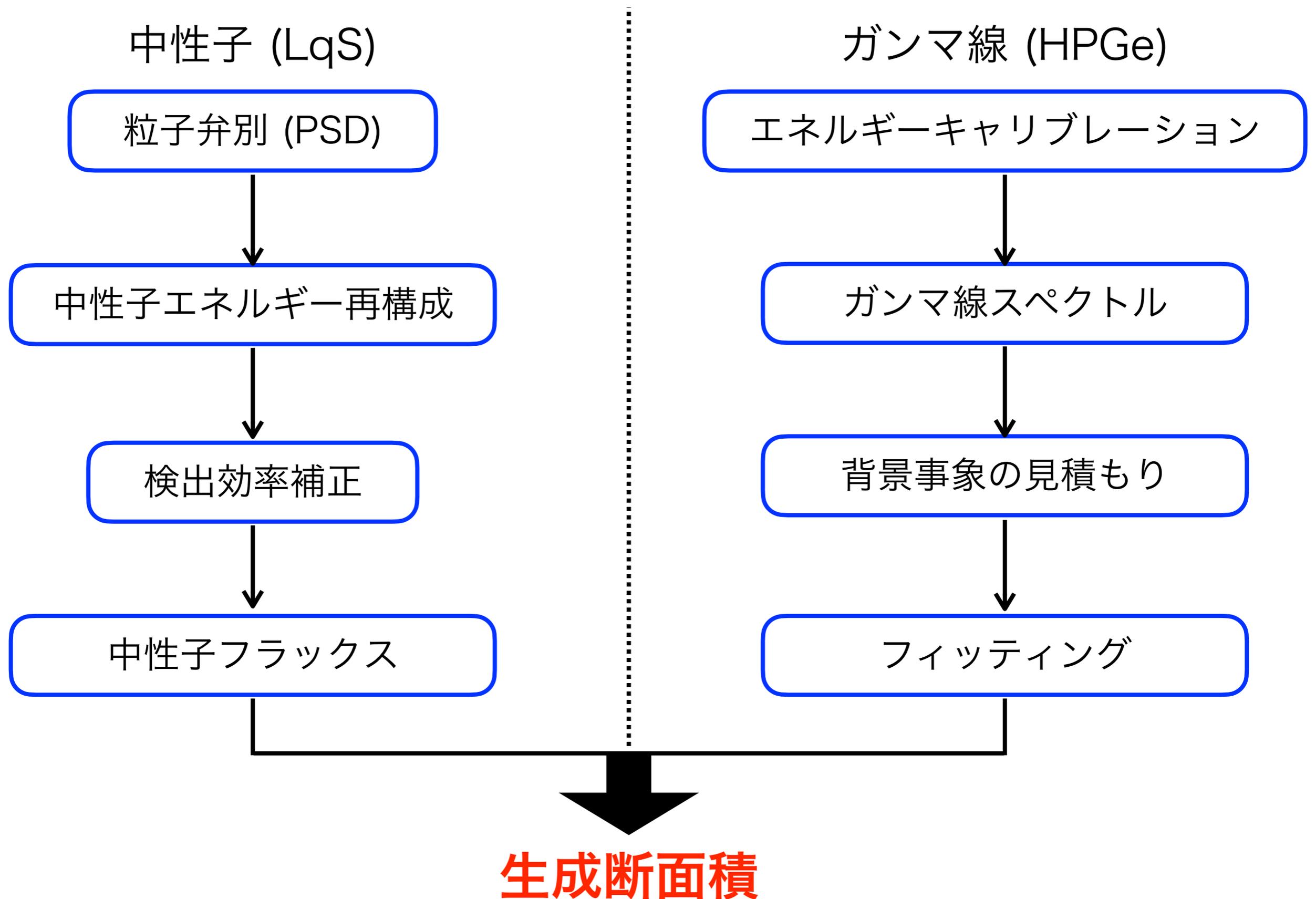
→ 液体シンチレータ (LqS)

ガンマ線

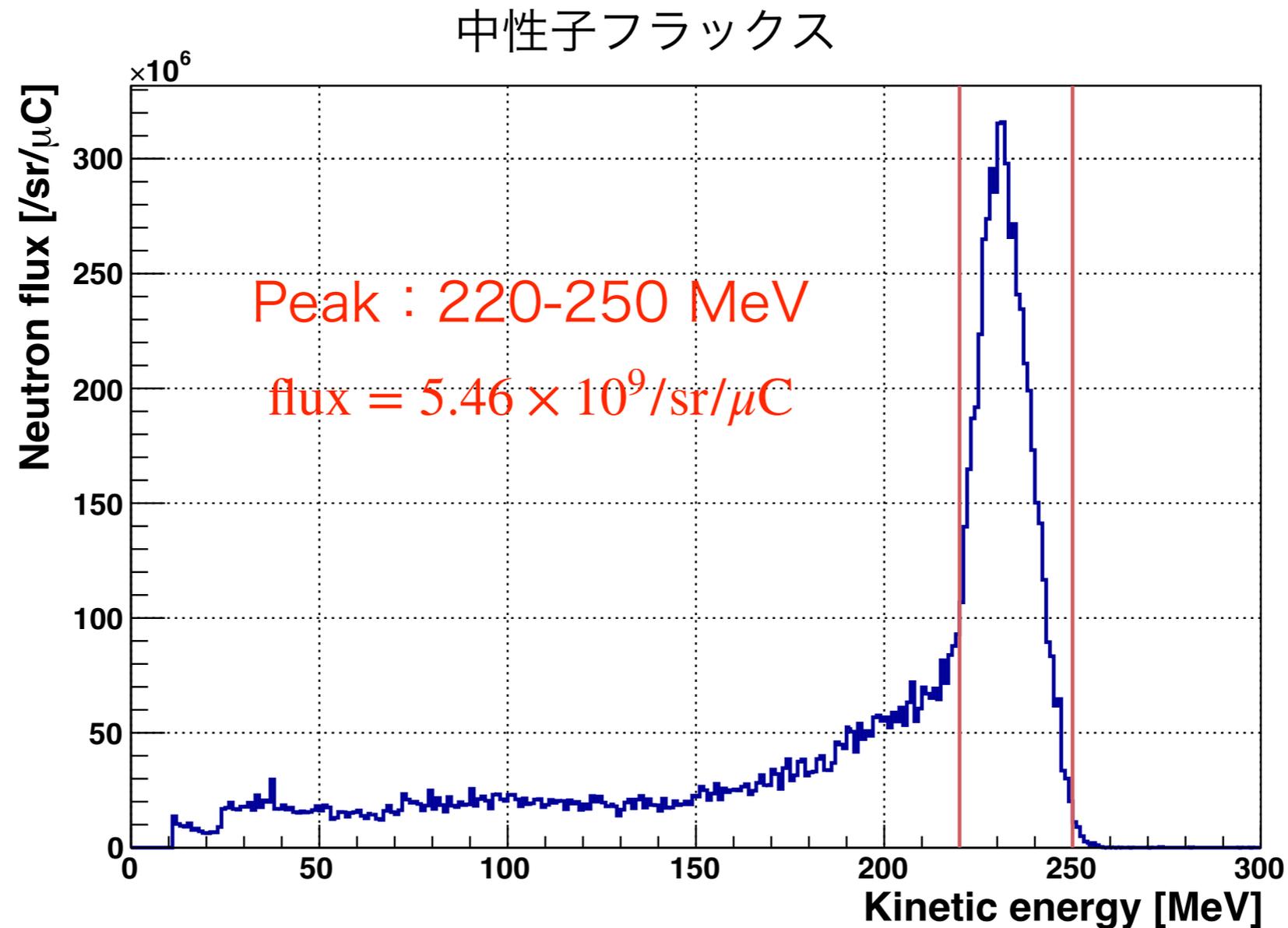
→ ゲルマニウム検出器 (HPGe)

本研究

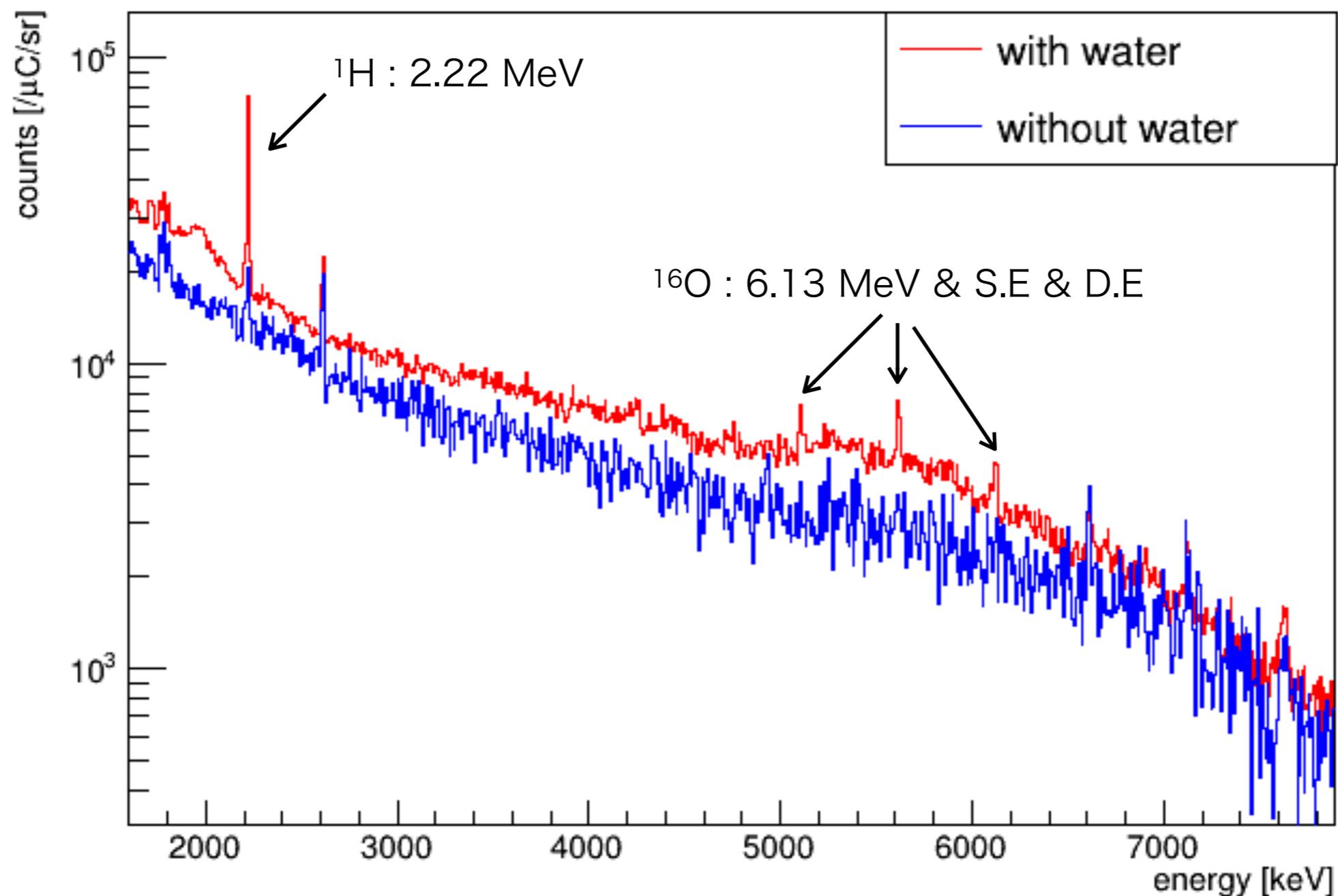
250 MeV実験のデータ解析を行い、ガンマ線の生成断面積を算出する



- 中性子フラックスを算出
- ピーク領域は220 - 250 MeV
→ この領域の中性子を断面積計算に用いる



- 以下のようなガンマ線スペクトルが得られた
- ^1H の熱中性子捕獲や ^{16}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



- 信号事象：220-250 MeV の中性子と水の反応によるガンマ線

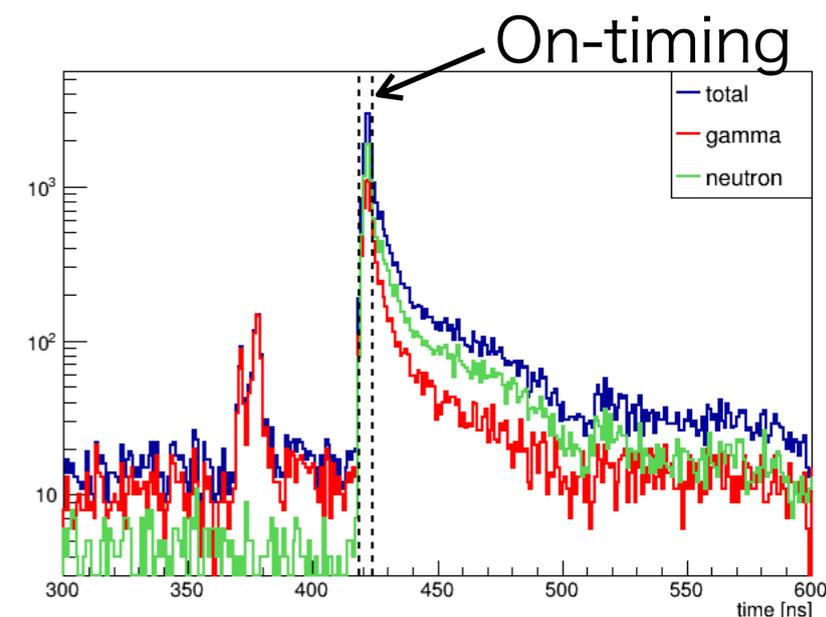
- 主な背景事象

- 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 を考慮したガンマ線スペクトルを作成

HPGeのToF分布

Off-timing

On-timing (信号領域)

即発
ガンマ線

② 熱中性子捕獲

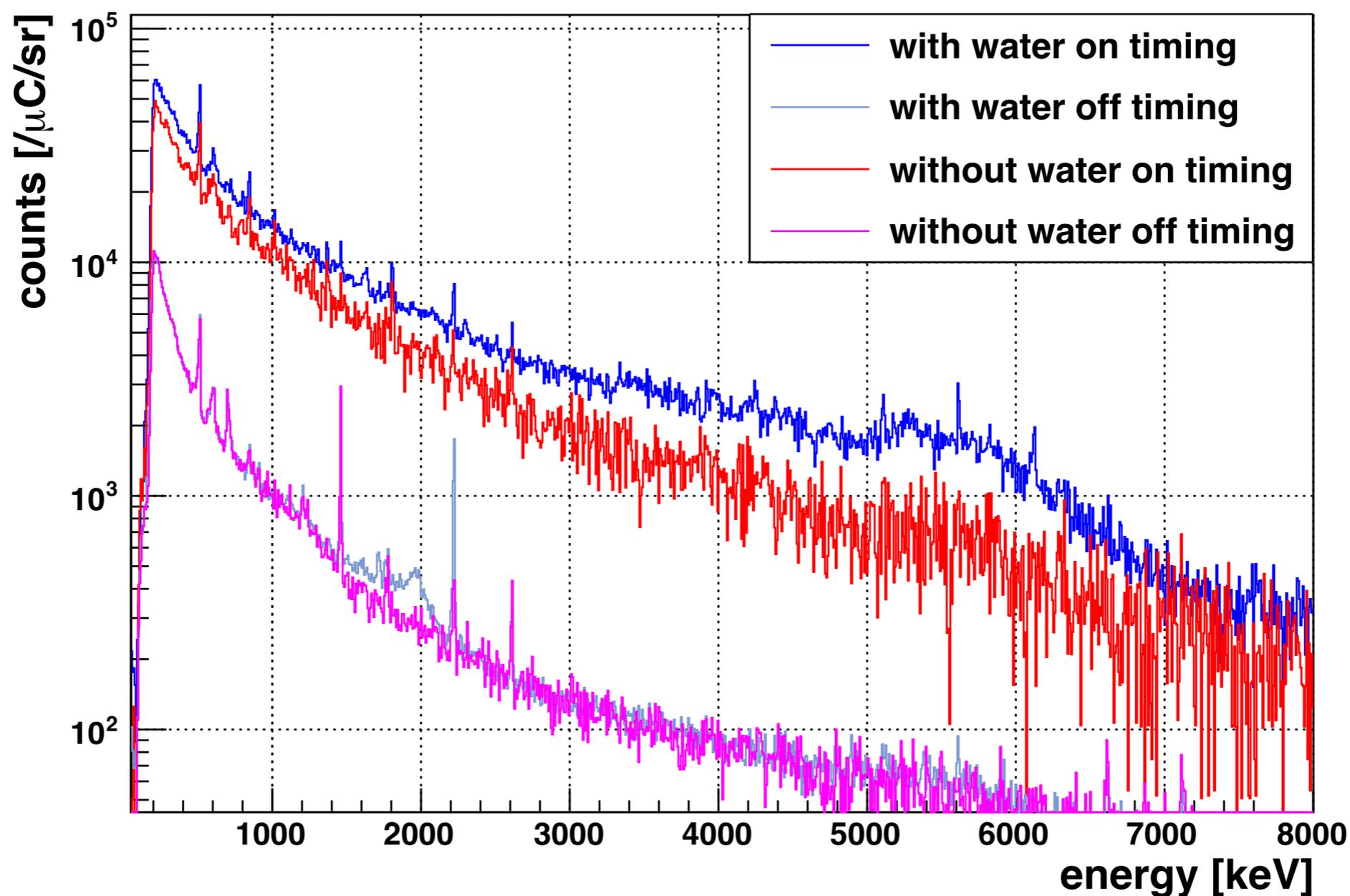
① ビームエネルギー領域外
の中性子による反応

散乱中性子

ToF

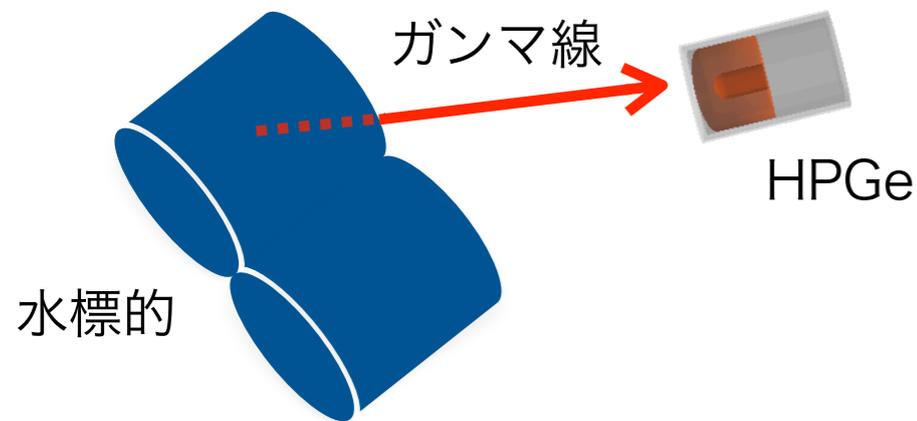
Timing 別のスペクトル

- 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



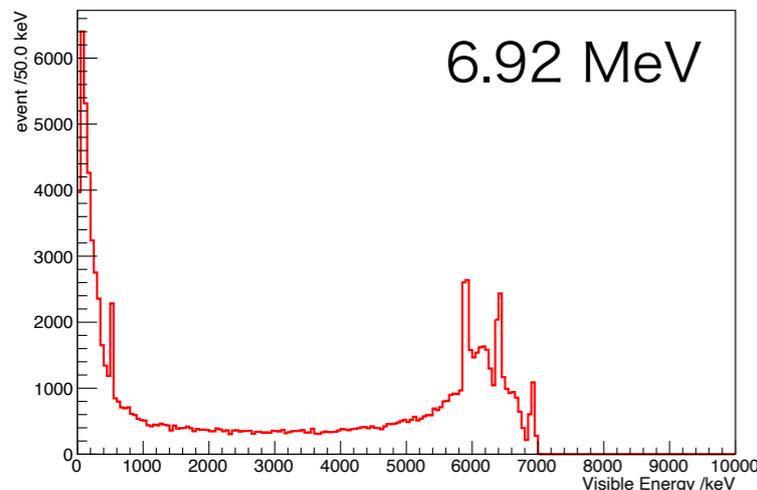
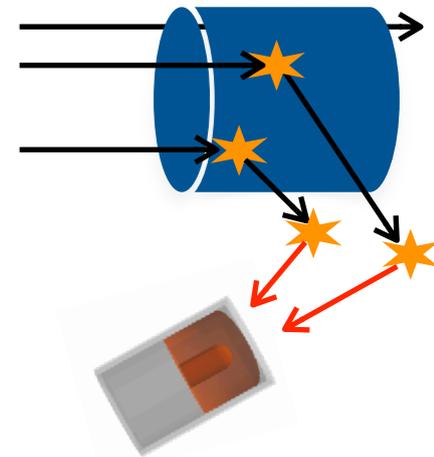
- フィッティングを行い、各ガンマ線の生成断面積を求める

Signal template

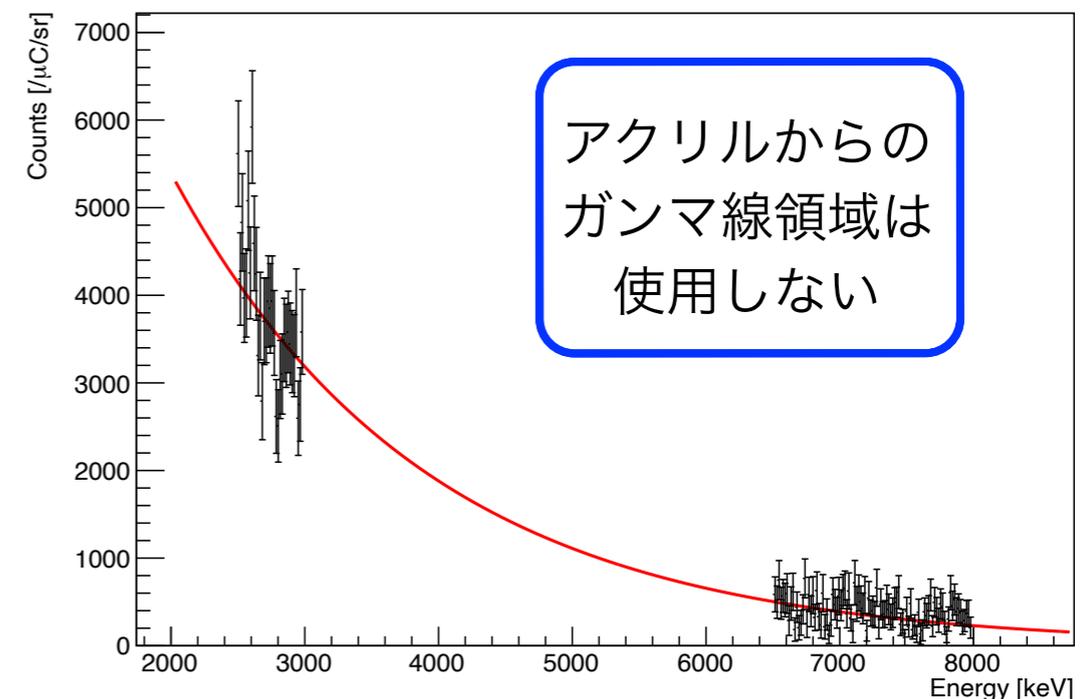


Background template

- 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



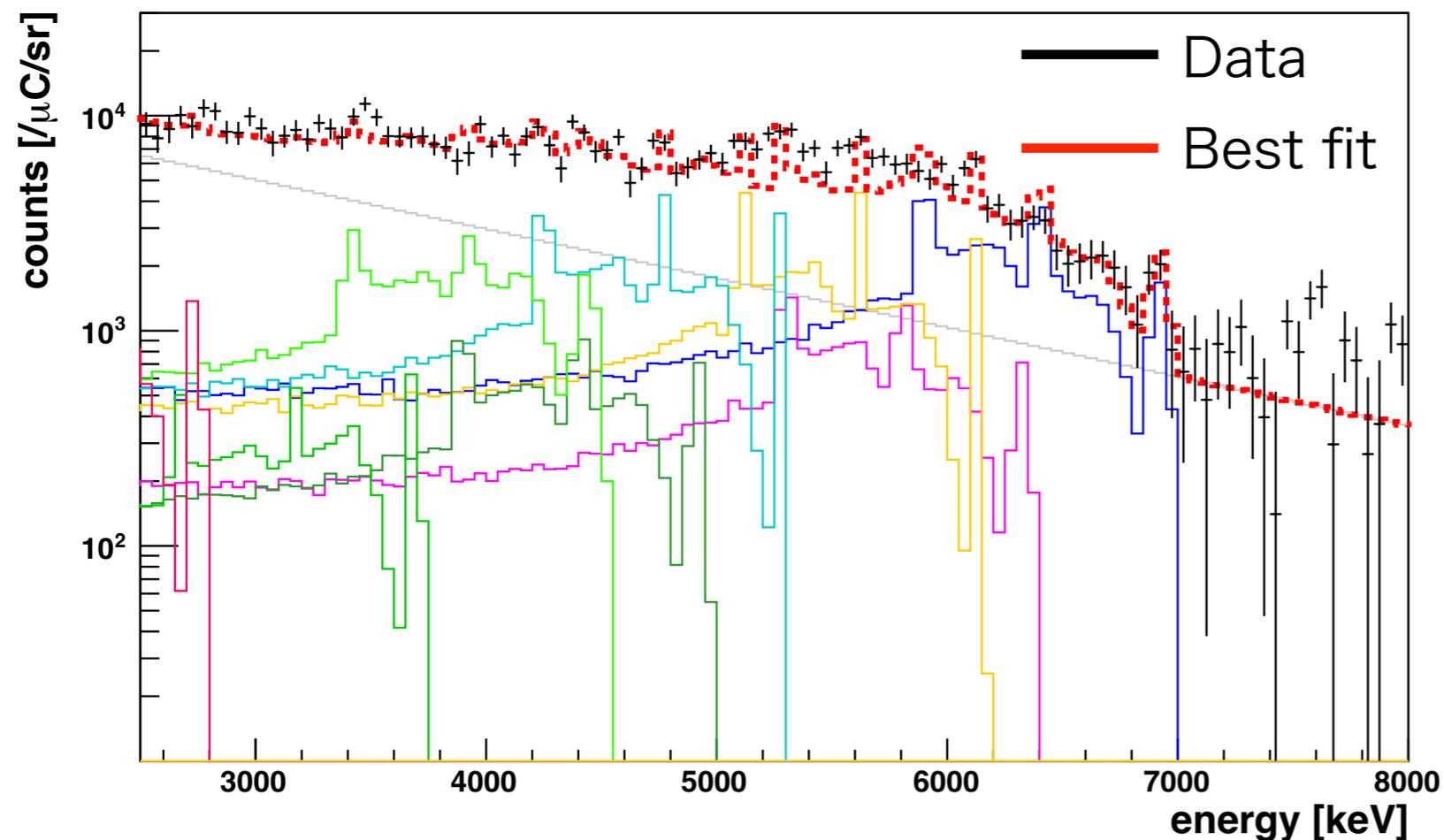
6.92 MeVの
ガンマ線を
1億本発生



計10個のガンマ線について
同様にテンプレートを作成

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 χ^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

- 各ガンマ線の生成断面積

$$N_{MCgenerated} = 10^8$$

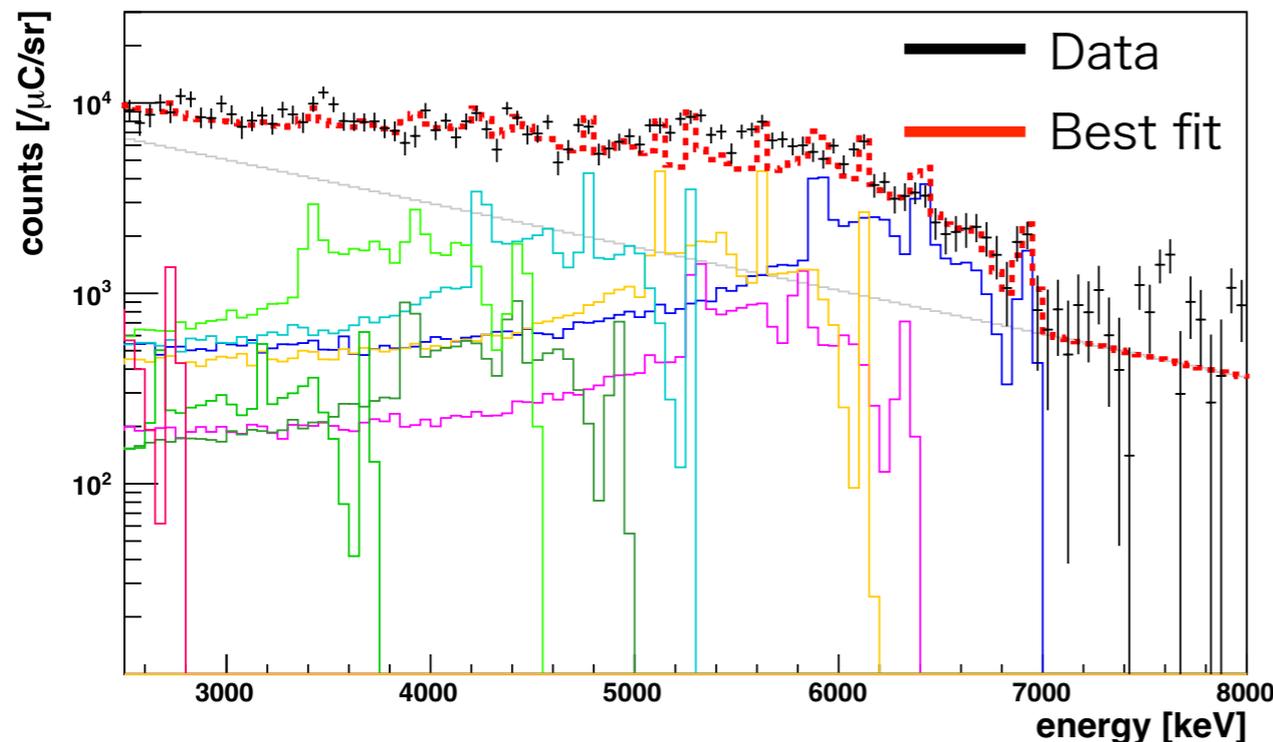
ϕ_n : 中性子フラックス

f_i : フィットで得たパラメータ

T : 酸素原子核数

$$\sigma_{\gamma,j} = f_j \cdot \frac{N_{MCgenerated}}{\phi_n \cdot T}$$

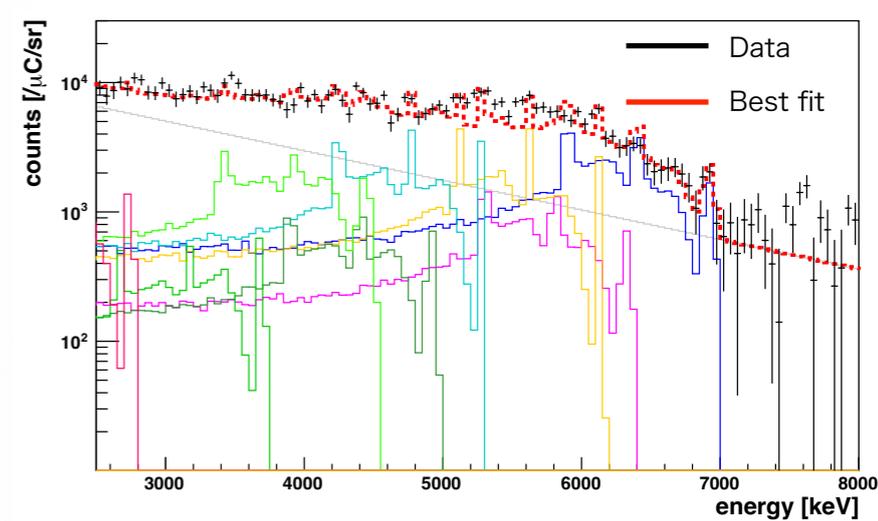
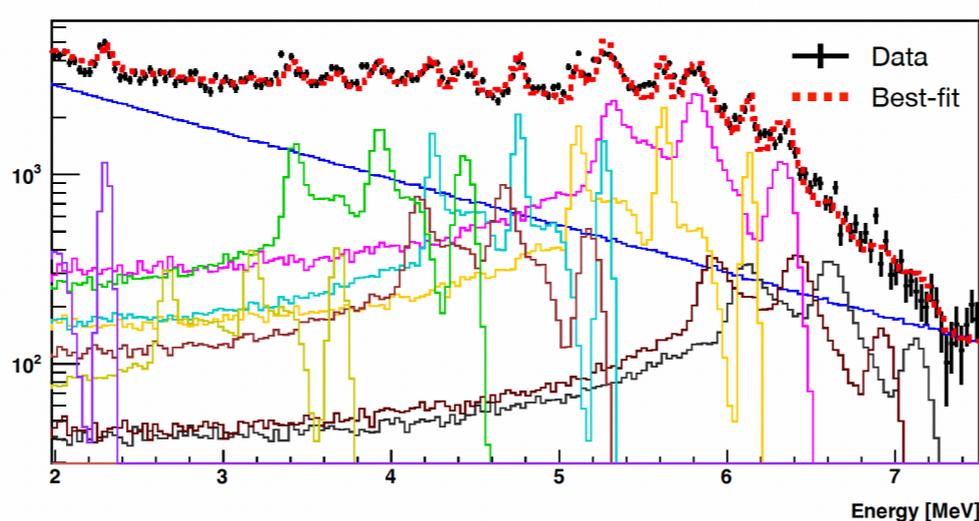
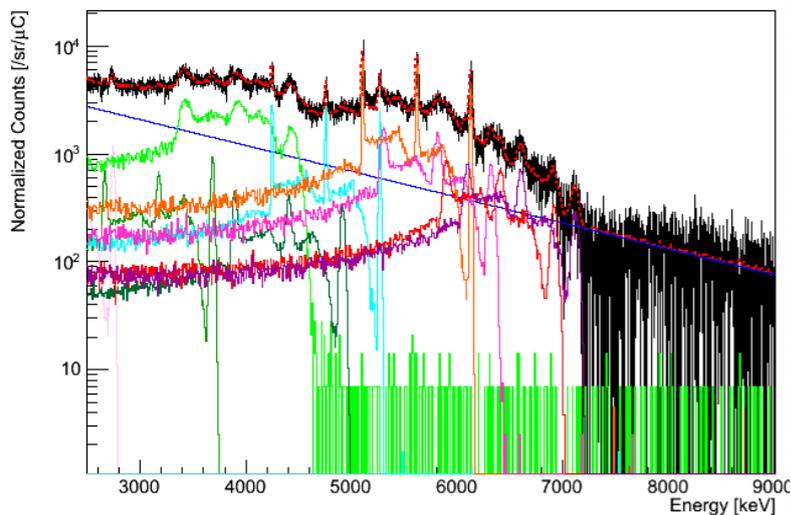
エネルギー [MeV]	6.32 MeVに対する強度
6.92	2.96 $^{+0.35}_{-0.44}$
6.32	1.00 $^{+0.37}_{-0.37}$
6.13	2.23 $^{+0.60}_{-0.37}$
5.27	2.35 $^{+0.63}_{-0.40}$
5.10	0.00 $^{+0.33}$
4.91	0.63 $^{+0.33}_{-0.33}$
4.44	2.08 $^{+0.38}_{-0.29}$
3.84	0.00 $^{+0.13}$
3.68	0.33 $^{+0.15}_{-0.23}$
2.74	0.56 $^{+0.27}_{-0.19}$



30 MeV

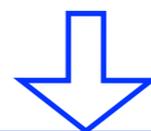
80 MeV

250 MeV

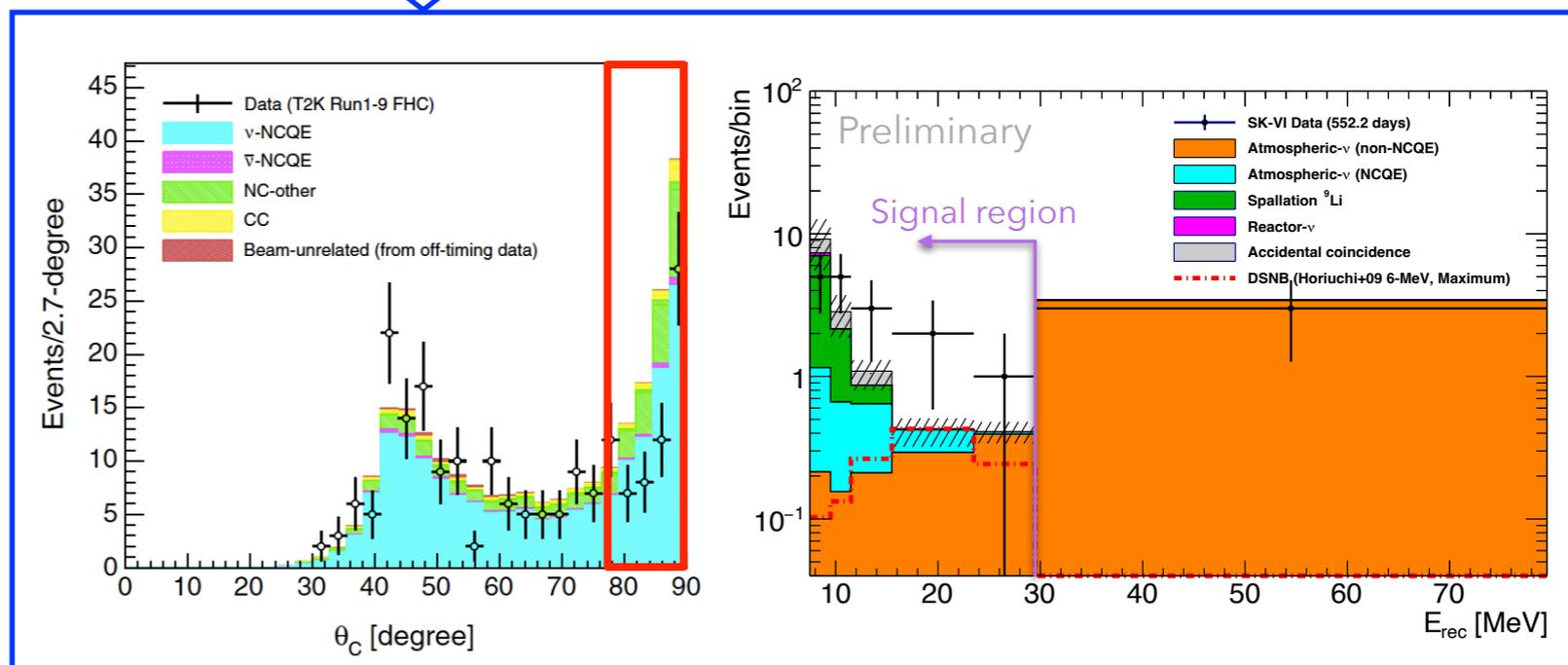
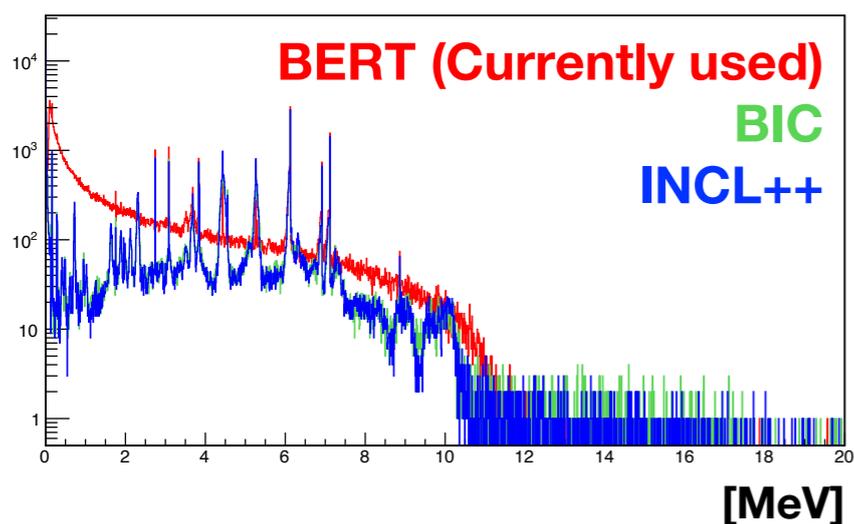


• これらの実験データを再現するようにモデルを修正

→ 中性子・酸素原子核由来の不定性の削減



Energy of secondary γ (MC, true)



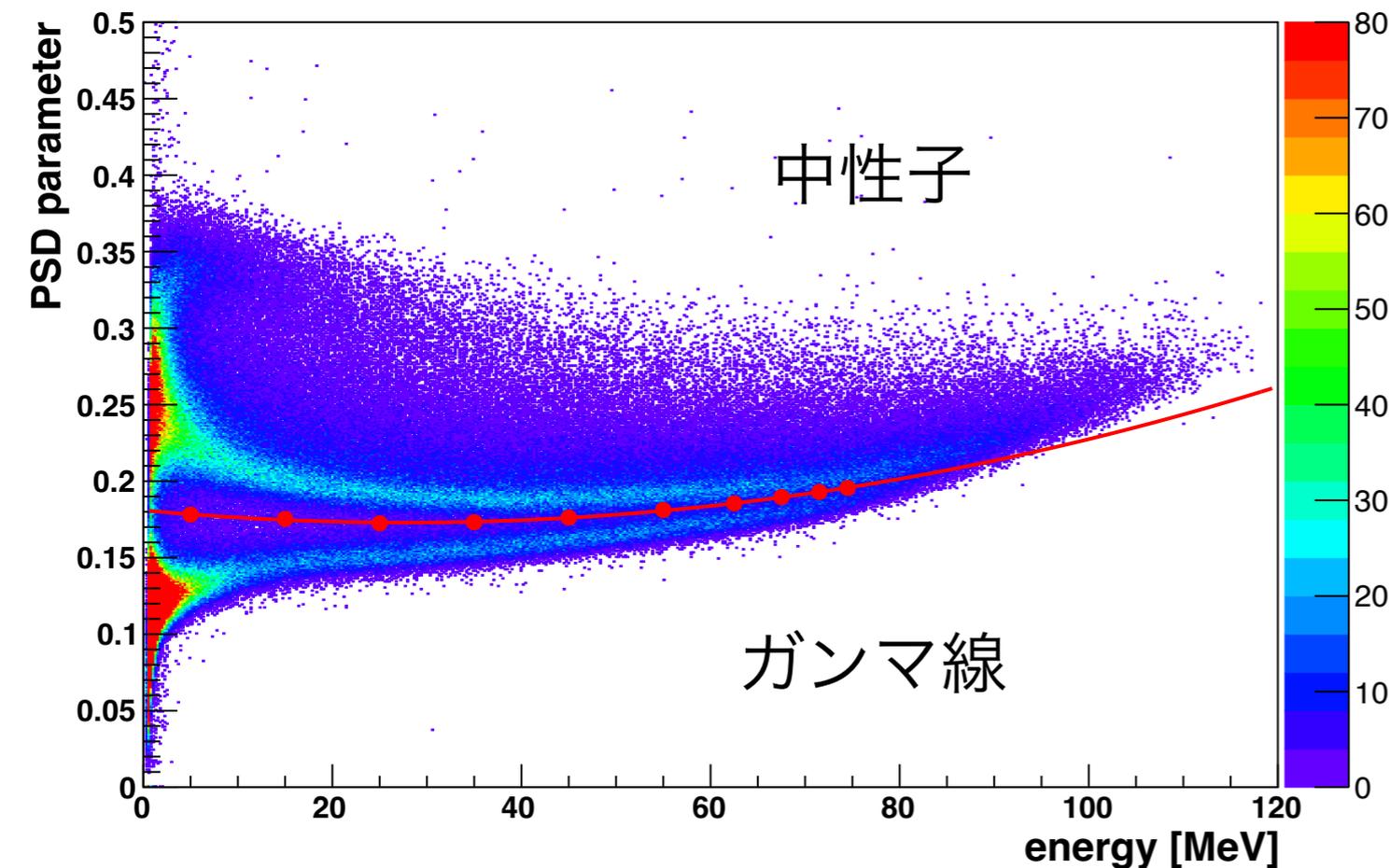
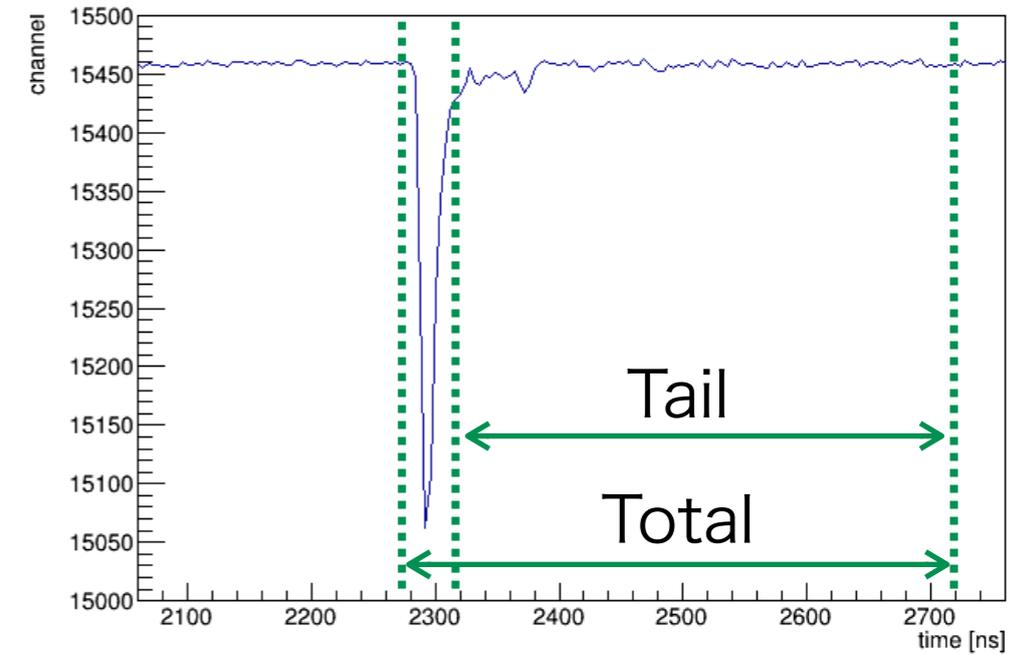
- 大気ニュートリノのNCQE反応は、SK-Gd実験でのSRN探索における主要な背景事象の一つである
- 特に、NCQE反応後の中性子と酸素原子核の反応に由来する不定性が大きい
- 中性子・酸素原子核反応を測定するE525実験が行われた
- 現在、250 MeV実験のデータ解析を進めている
- 中性子フラックスを算出した後、ガンマ線スペクトルをフィッティングして各ガンマ線の強度を求めた
- フィッティングの結果、最も強いガンマ線は酸素原子核由来の6.92 MeVであり、非弾性散乱が支配的な反応であることが分かった
- これらの反応をシミュレーションに導入することで、中性子・酸素原子核反応由来の不定性の削減が期待される

Backup

- 波形の違いを利用して中性子イベントを選別 (Pulse Shape Discrimination)

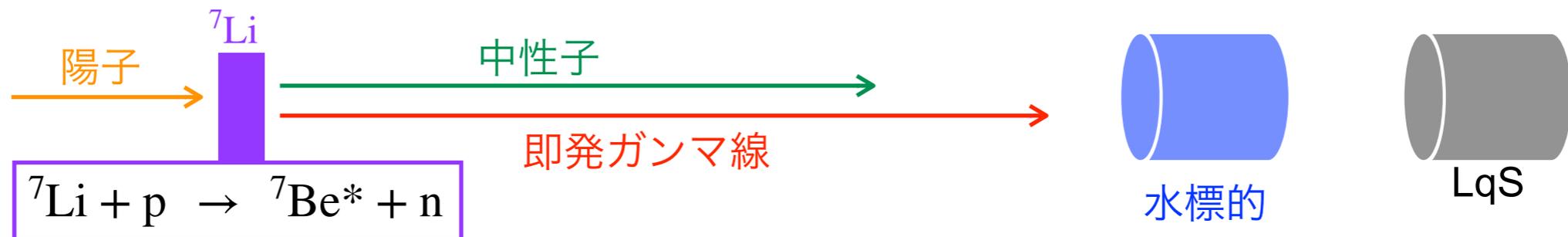
$$\text{PSD parameter} = \frac{\text{Tail}}{\text{Total}}$$

- 中性子イベントはテールが長くなる
→ PSD parameter が大きい

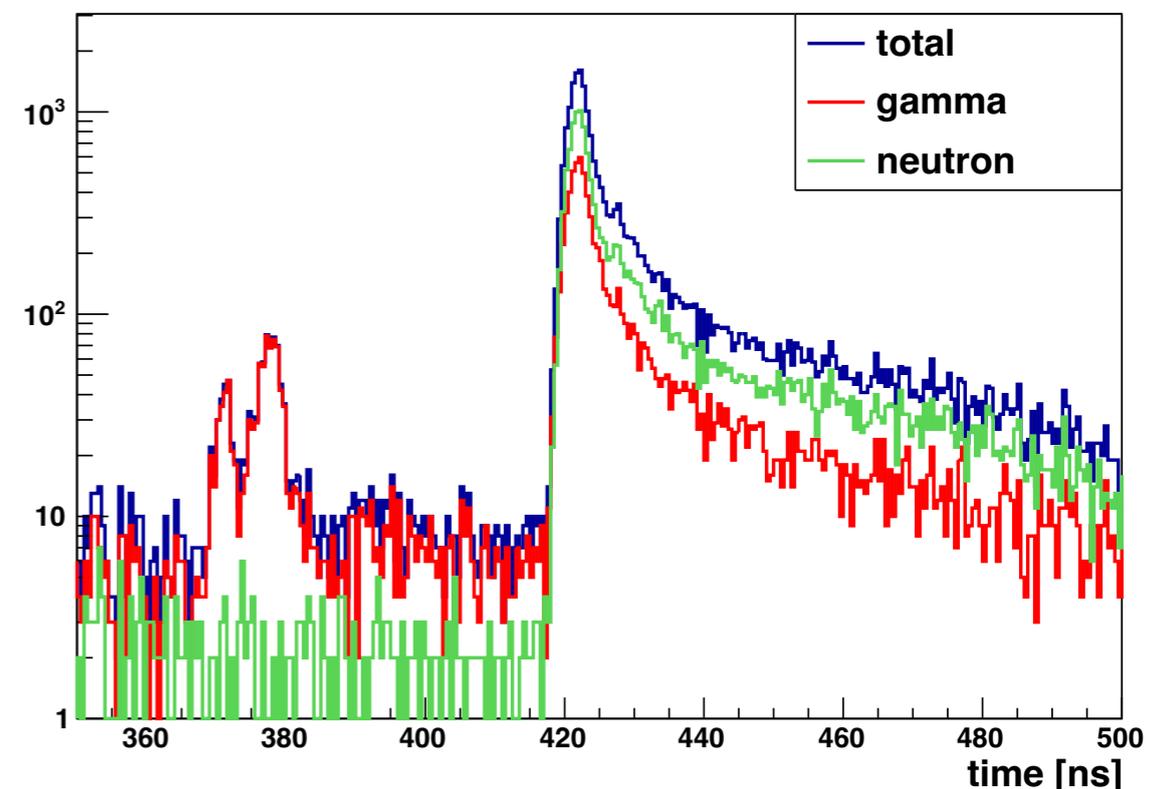


- エネルギー領域毎に中性子とガンマ線のカット条件を決定

エネルギー再構成 (LqS)



- 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 Δt 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



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

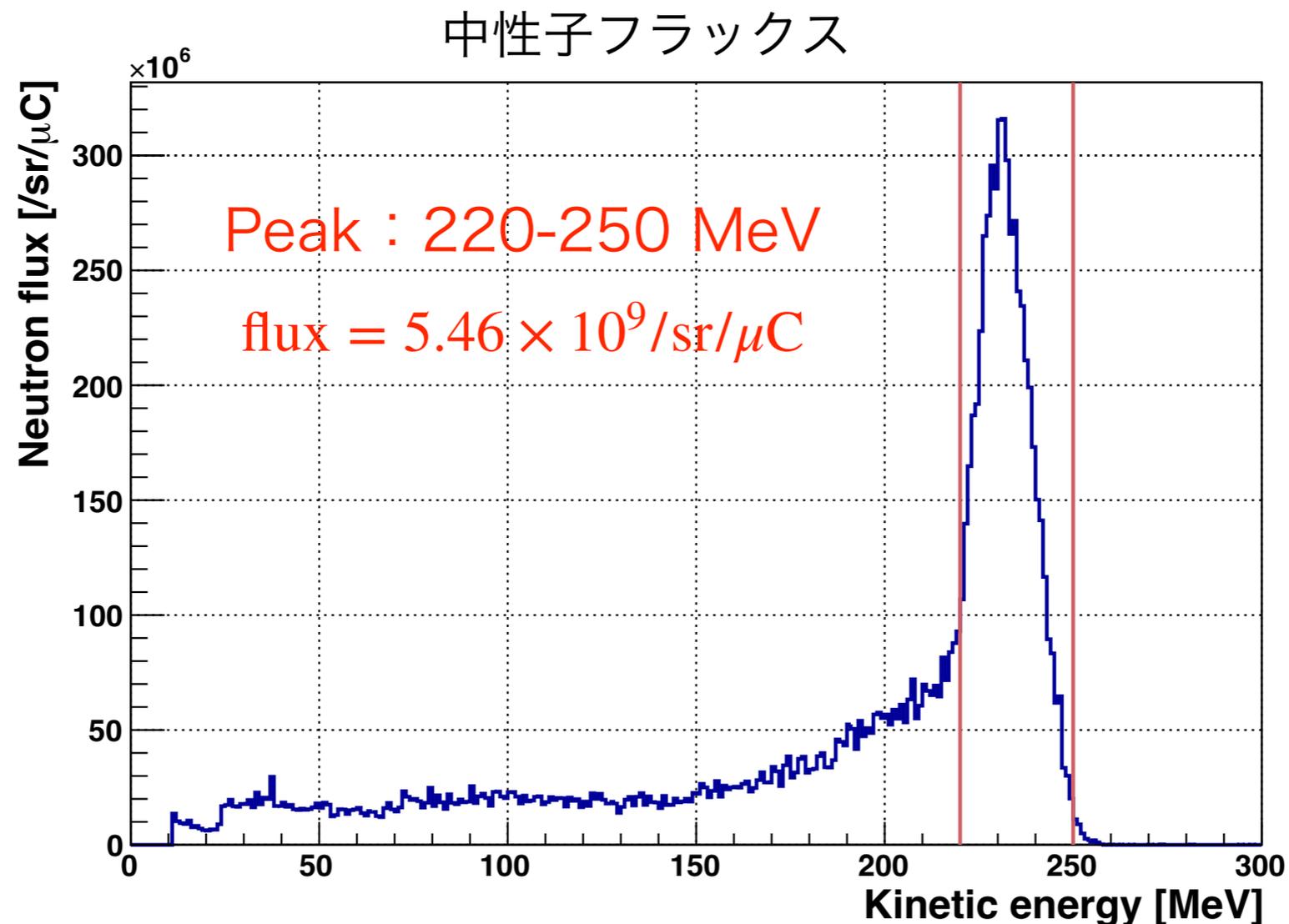
mc^2 : 中性子の質量 (939.6 MeV)

L : Liターゲットから水標的までの距離

Δt : 飛来時間の差

中性子フラックス (LqS)

- シミュレーションを用いて LqS の中性子検出効率を計算
- 中性子フラックスを算出
- ピーク領域は220 - 250 MeV
→ この領域の中性子を断面積計算に用いる



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

