

2019/03/23

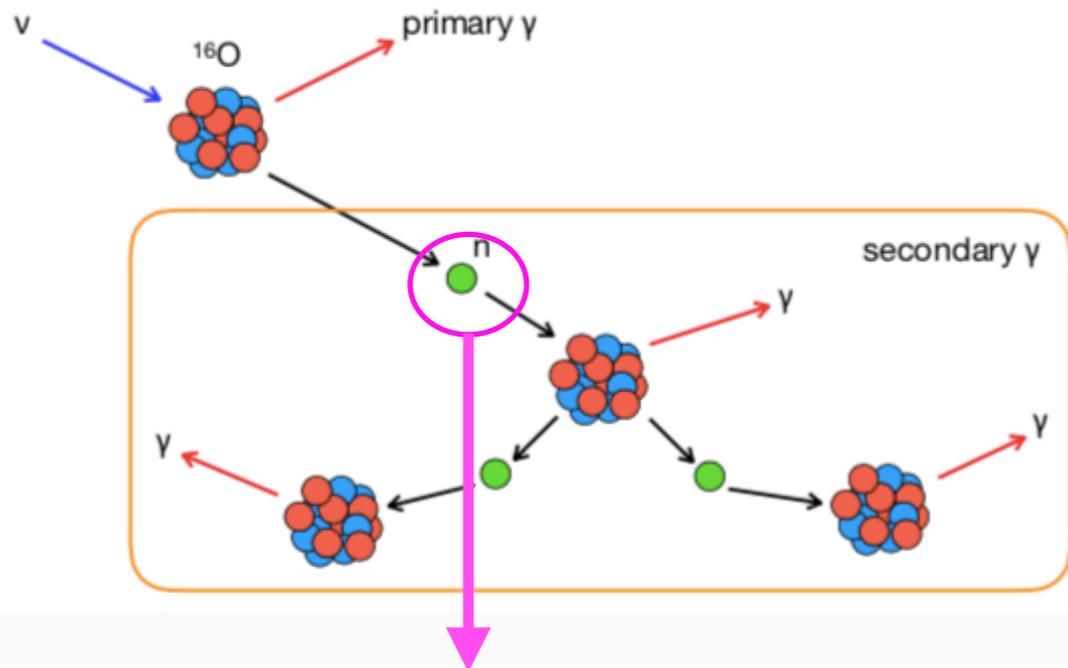
# 中性カレント弾性散乱反応理解のための 中性子・酸素原子核反応の測定

---

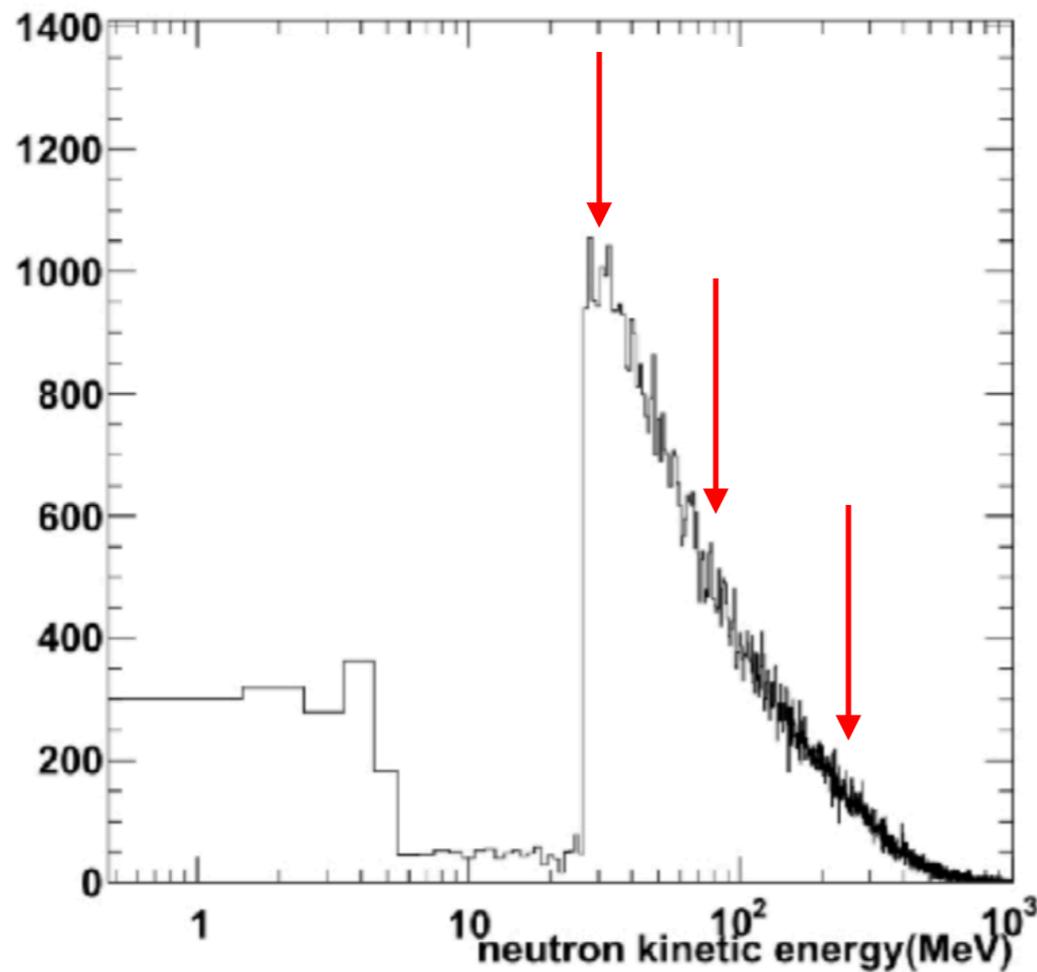
岡大理, 京大理<sup>A</sup>, Padova University<sup>B</sup>, Toronto University<sup>C</sup>, TRIUMF<sup>D</sup>,  
Stanford University<sup>E</sup>, RCNPF<sup>F</sup>

蓬菜 明日, 小汐 由介, 芦田 洋輔<sup>A</sup>, 中家 剛<sup>A</sup>, WENDELL Roger<sup>A</sup>, 森 正光<sup>A</sup>,  
COLLAZUOL Gianmaria<sup>B</sup>, IACOB Fabio<sup>B</sup>, NANTAIS Corina<sup>C</sup>,  
KONAKA Akira<sup>D</sup>, TANAKA Hiro<sup>E</sup>, 嶋 達志<sup>F</sup>

# モチベーション

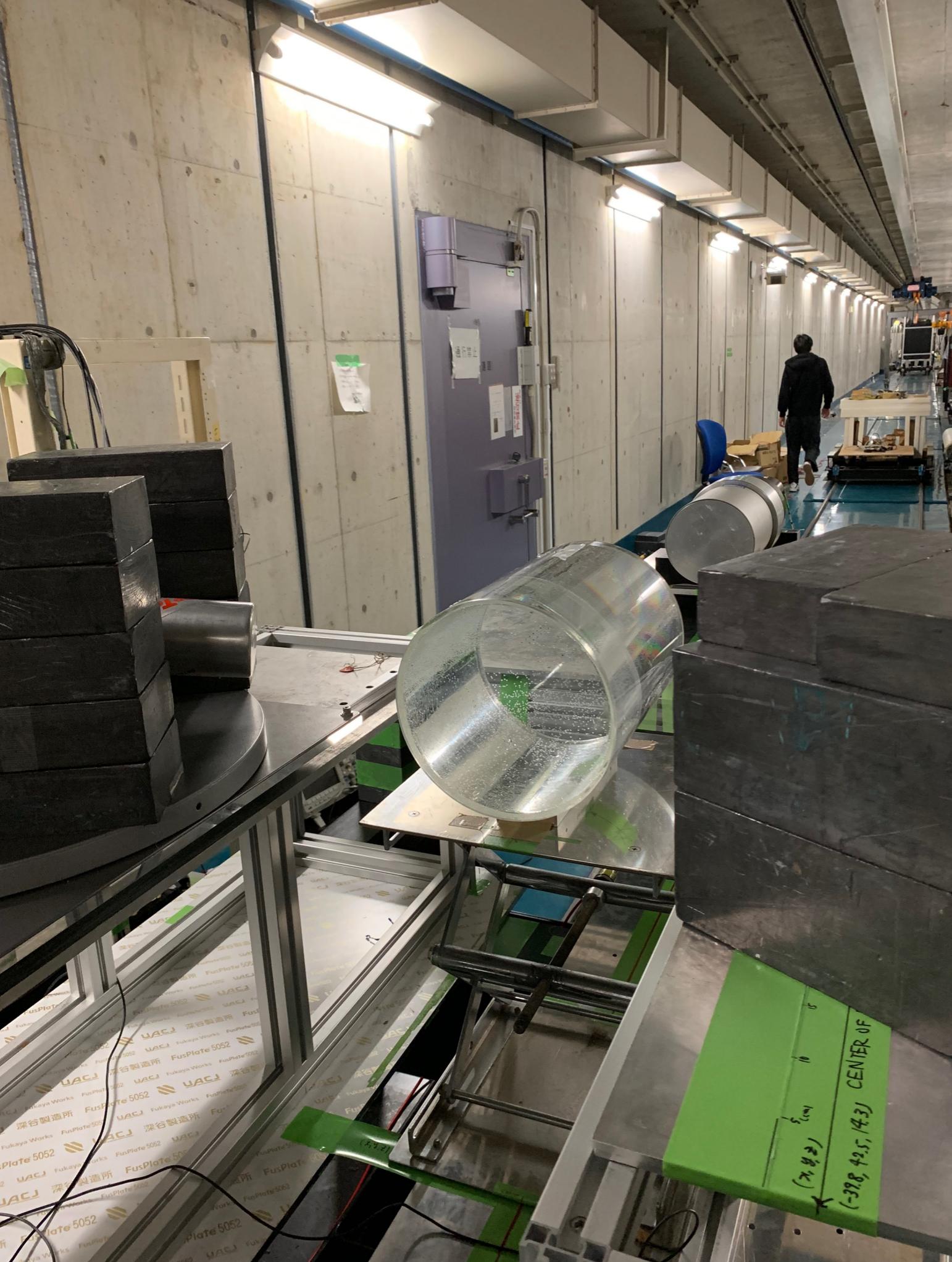


二次ガンマ線の不定性を小さくするため  
中性子・酸素原子核反応によるガンマ線  
測定を行う



NCQE反応後の中性子の運動エネルギーの  
シミュレーションから30, 80, 250 MeVの  
エネルギーの中性子ビーム実験を行なった

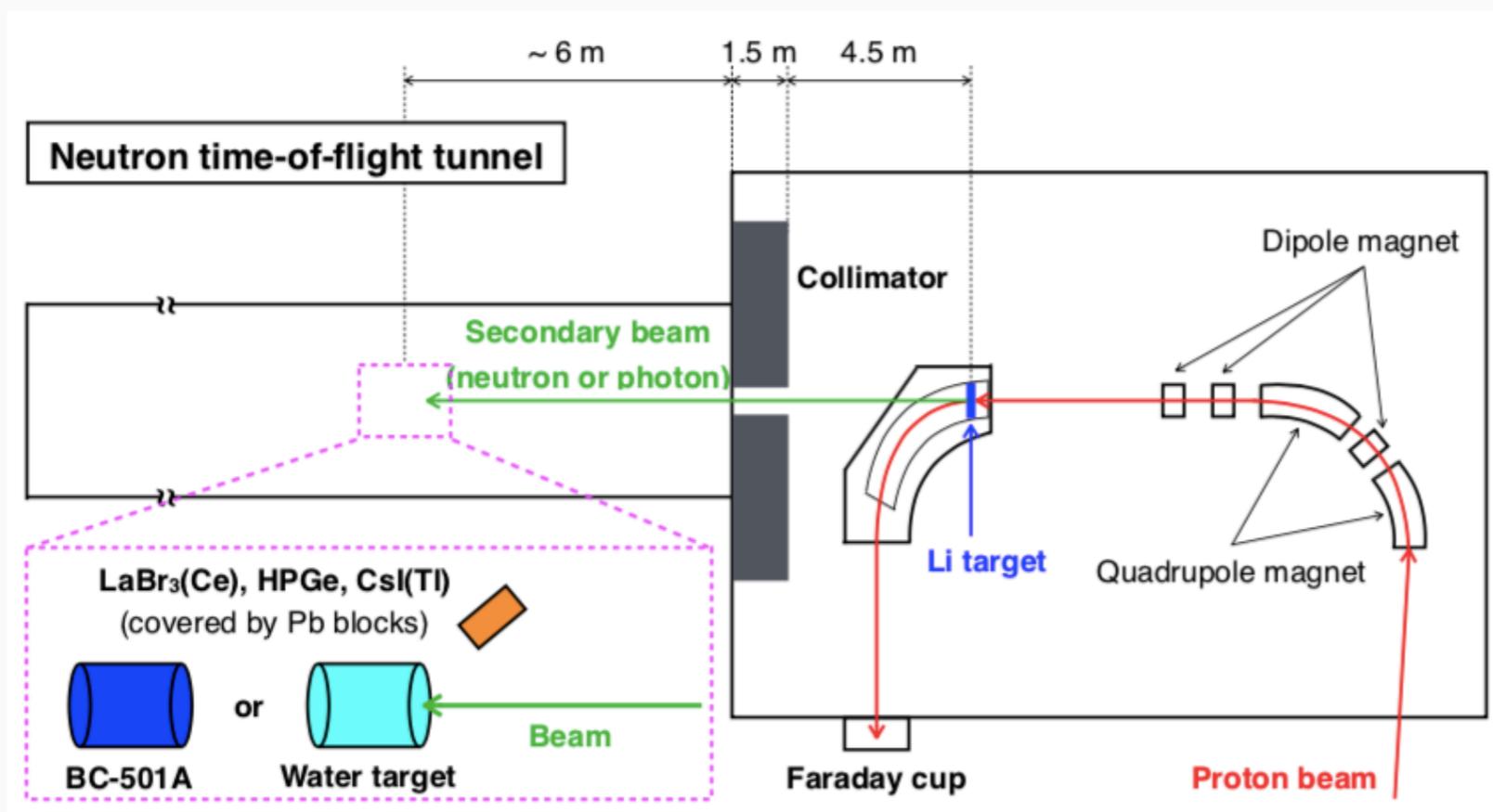
NCQE反応後の中性子運動エネルギーのシミュレーション(Fermi gas model)



# 中性子ビーム実験

# 中性子ビーム実験

大阪大学核物理研究センター(RCNP)にて実験を行った



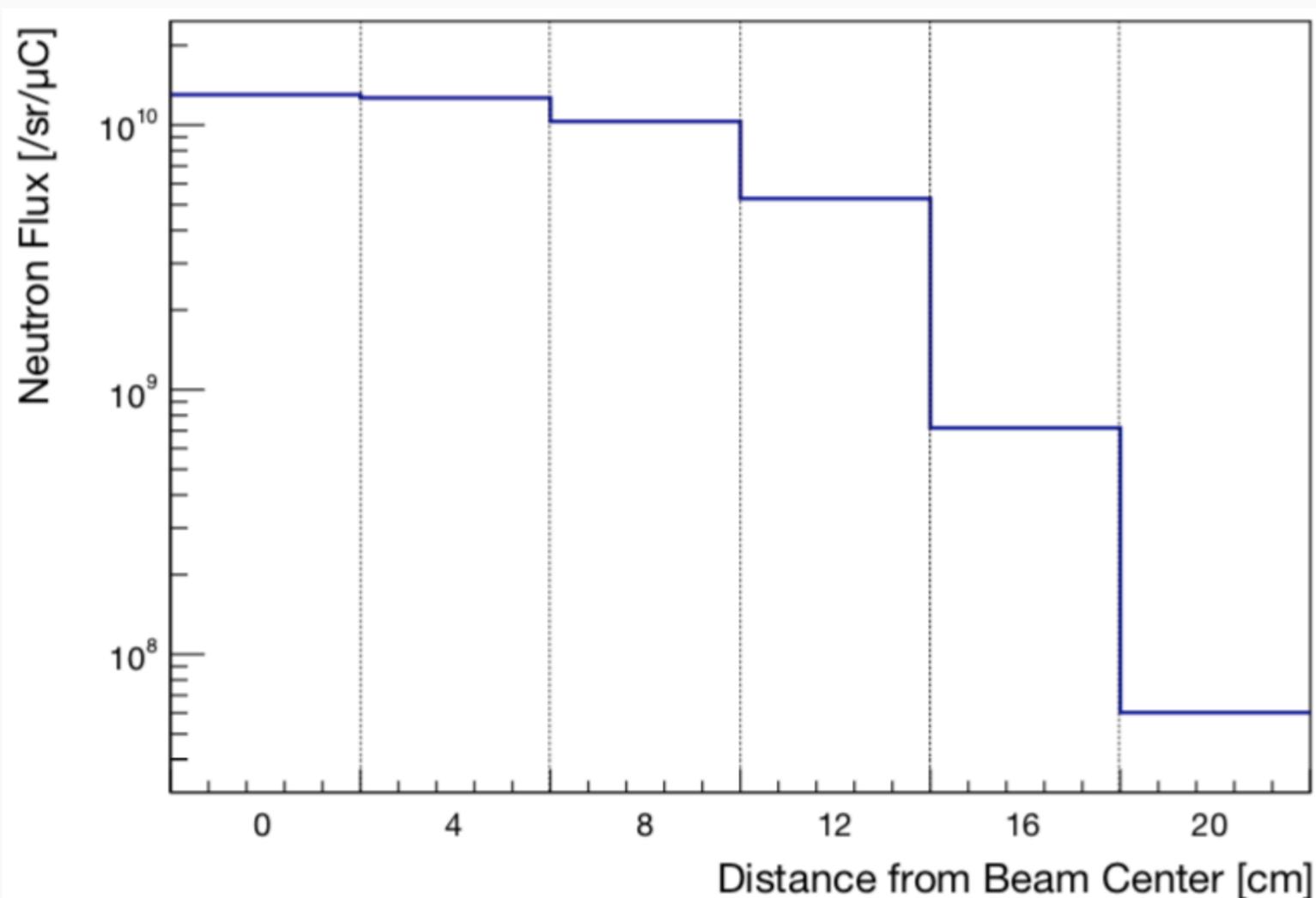
陽子を加速し、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応により準単色中性子ビームを生成する  
水ターゲットに中性子を照射し、中性子・酸素原子核反応から発生する  
ガンマ線を測定する

本公演では特に80 MeV実験について発表する

# 中性子ビーム実験

ガンマ線検出器 :  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ,  $\text{HPGe}$

中性子 :  $\text{LqS}$  (BC-501A),  $\text{CsI}(\text{Tl})$



中性子ビーム構造  
ガンマ線検出器はビーム中心から20 cm以上離して設置

中性子ビーム構造

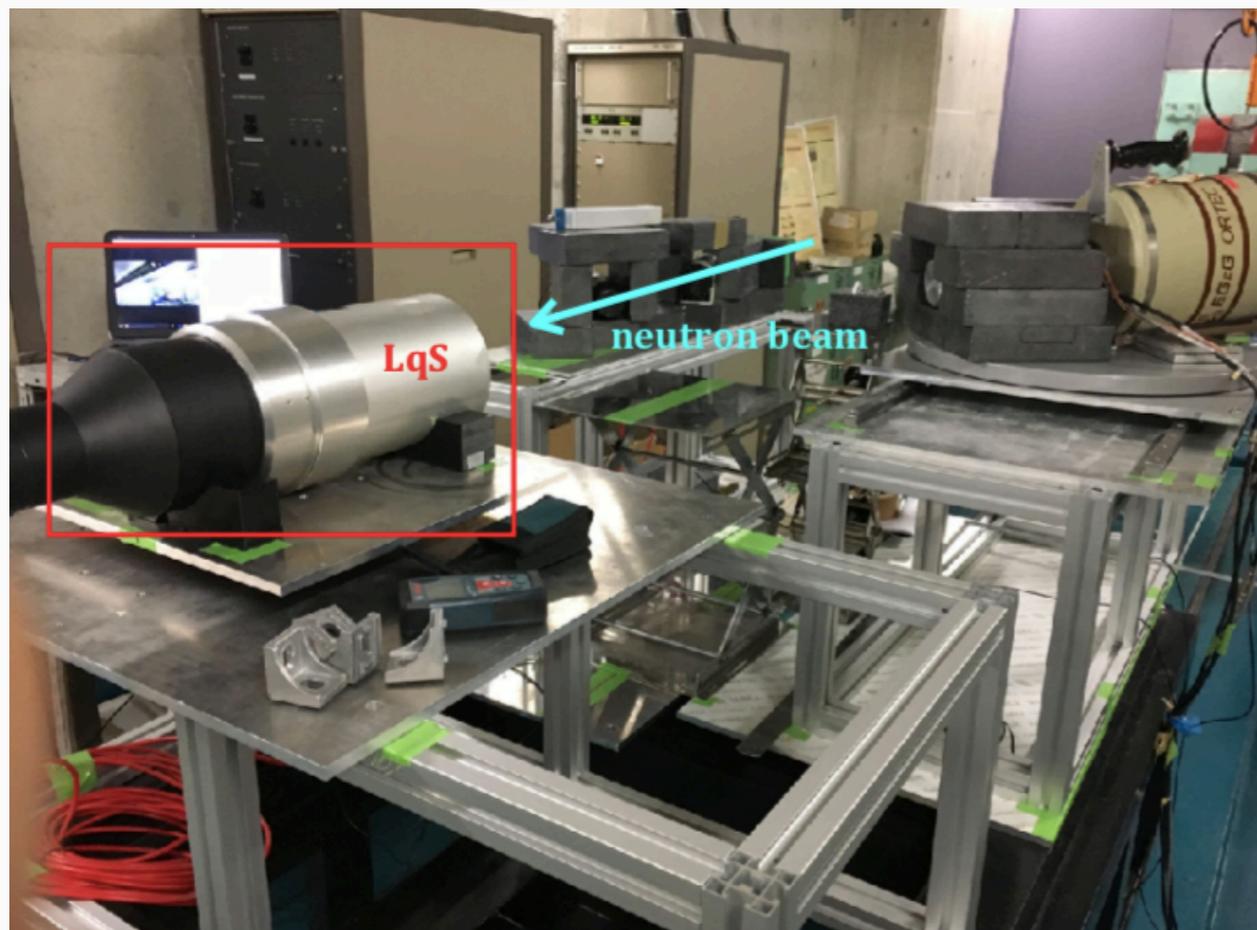
LqSをビーム中心から4 cmずつ離してフラックスを測定した

# 中性子ビーム実験

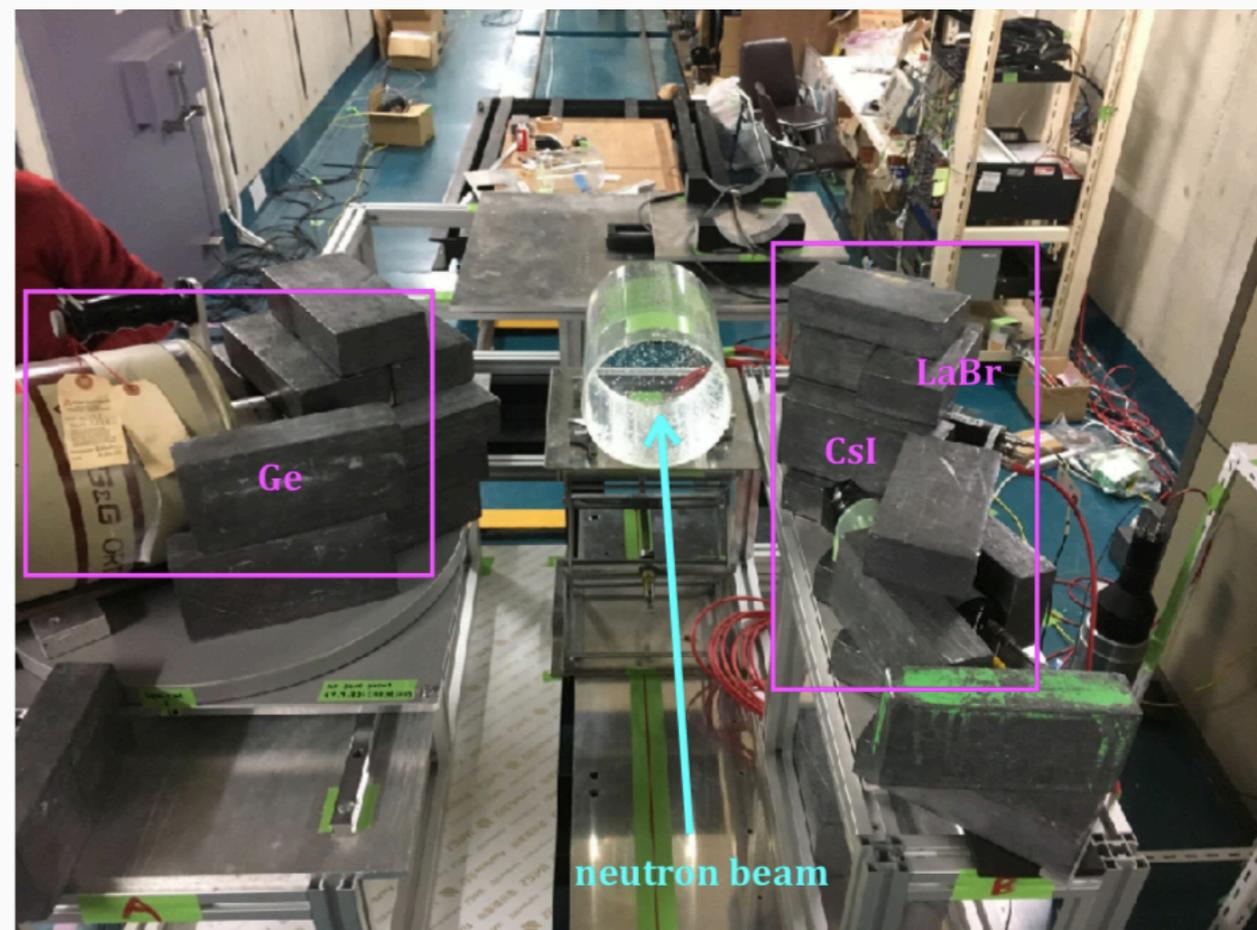
実際のセットアップ

データの取得にはADC, TDCを用いた

中性子フラックス測定



ガンマ線測定

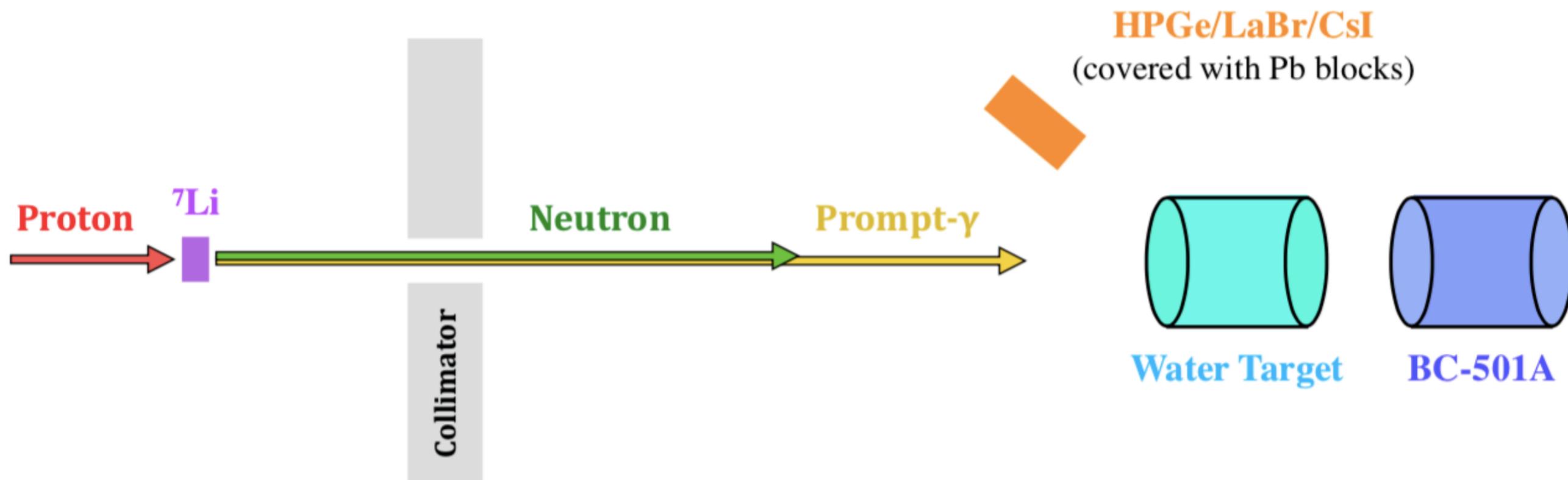


# 80MeV実験(中性子ビームについて)

有機液体シンチレータより中性子フラックスを求める

PSD手法による入射粒子弁別、TOF分布による運動エネルギー、

シミュレーションによる検出効率を用いる

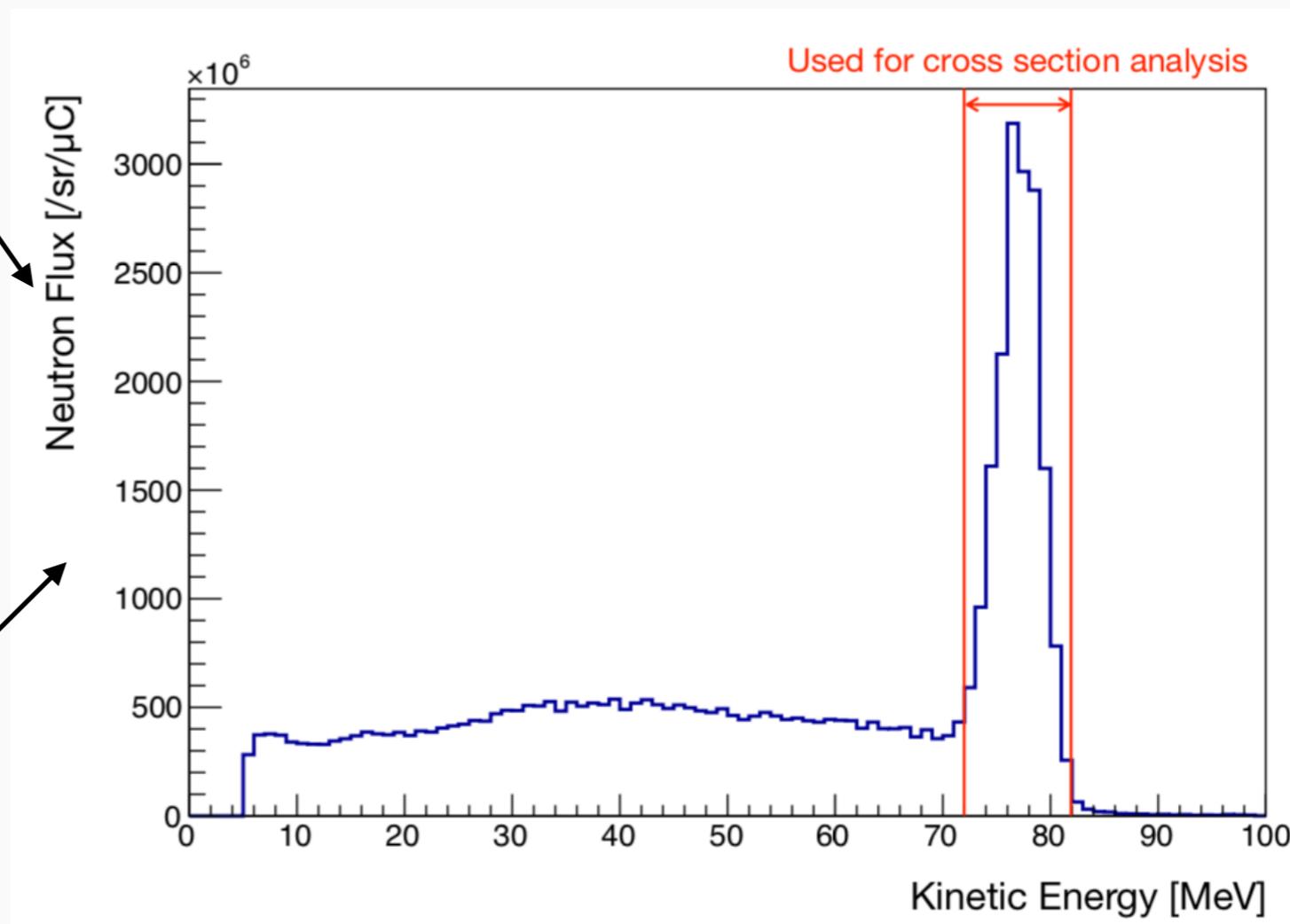
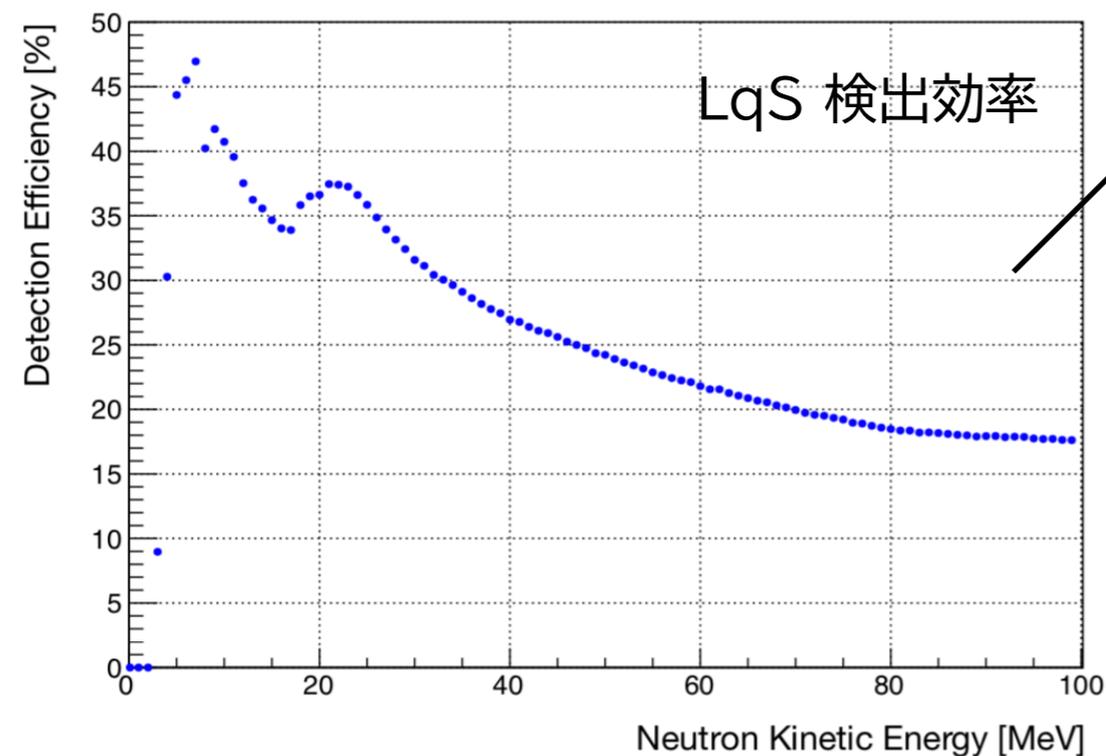
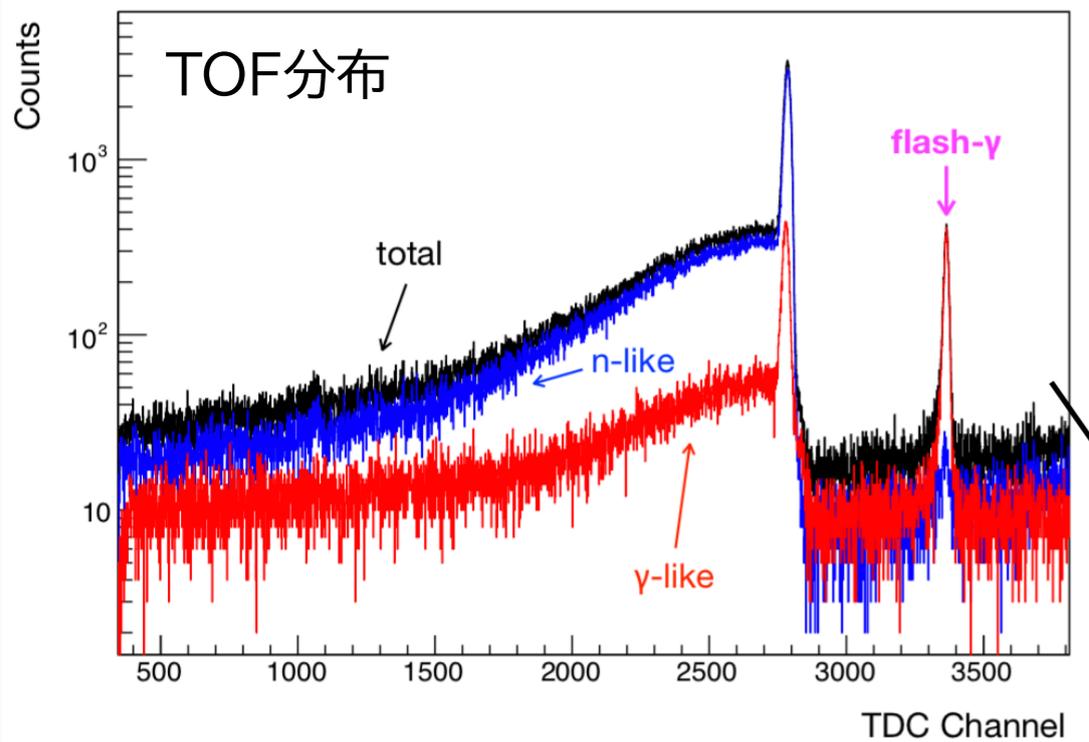


${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応ではガンマ線と中性子を放出する

飛行時間の差を用いることで運動エネルギーを再構成する

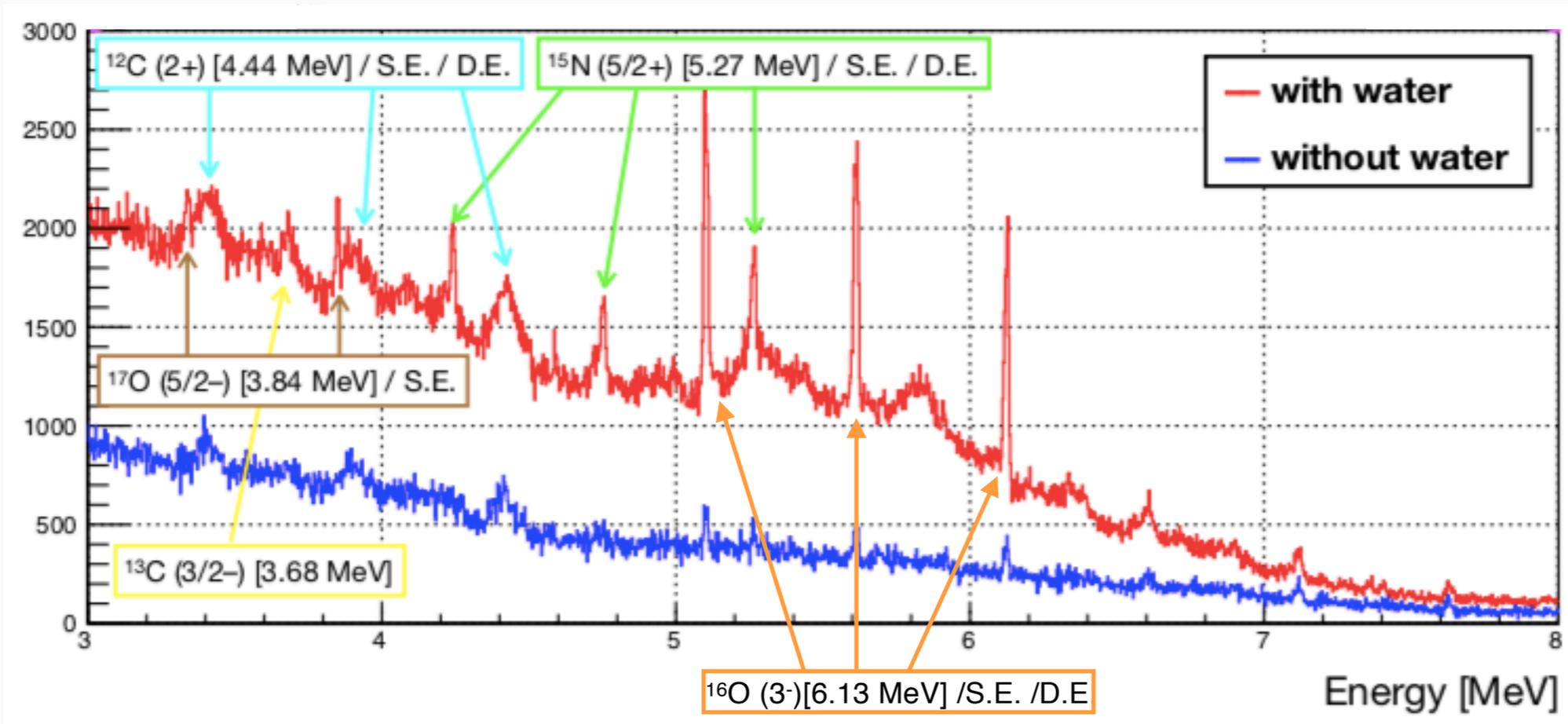
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - mc^2$$

# 80MeV実験(中性子ビームについて)



使用した中性子ビームは72~82 MeVにピーク  
以降の解析ではこの領域を使用する

# 80MeV実験(HPGe)



80 MeV陽子ビーム実験  
HPGeでのエネルギー分布図

$6.13\text{MeV} \mid {}^{16}\text{O}(n, n'){}^{16}\text{O}^*$

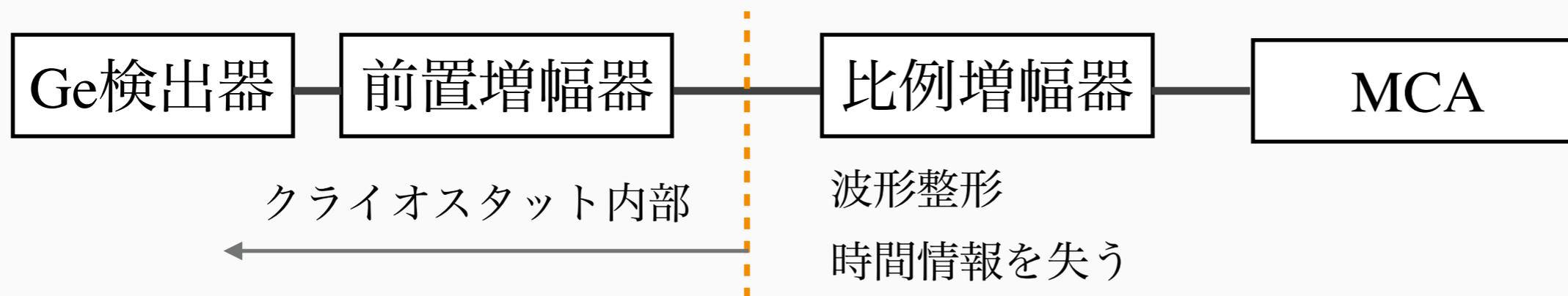
$5.27\text{MeV} \mid {}^{16}\text{O}(n, n'){}^{16}\text{O}^*$  then  ${}^{16}\text{O}^* \rightarrow {}^{15}\text{N}^* + p$ , or  ${}^{16}\text{O}(n, np){}^{15}\text{N}^*$ , or  ${}^{16}\text{O}(n, d){}^{15}\text{N}^*$

$4.44\text{MeV} \mid {}^{16}\text{O}(n, n'){}^{16}\text{O}^*$  then  ${}^{16}\text{O}^* \rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \alpha$ , or  ${}^{16}\text{O}(n, n\alpha){}^{12}\text{C}^*$

$3.68\text{MeV} \mid {}^{16}\text{O}(n, \alpha){}^{13}\text{C}^*$

$3.84\text{MeV} \mid \text{neutron capture by } {}^{16}\text{O}$

# 80MeV実験

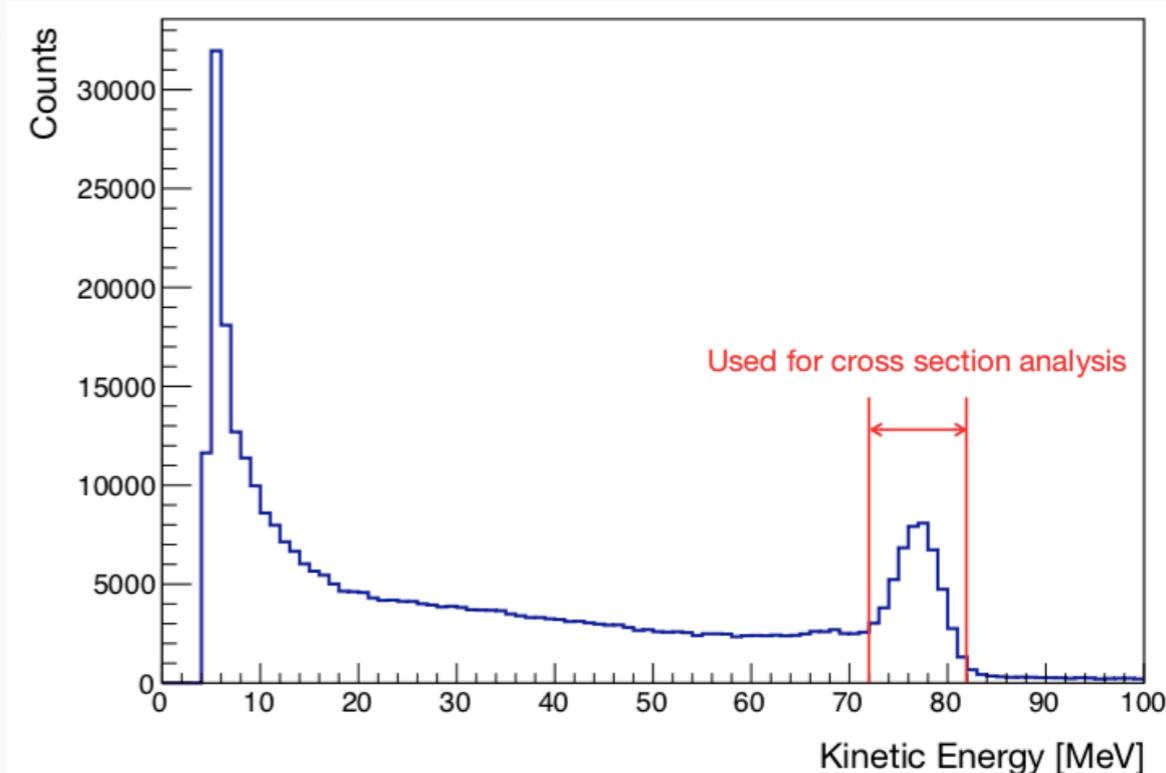


ゲルマニウム検出器の信号は比例増幅器を通じた段階で時間情報を失う

TOF分布による中性子イベントの選別ができない

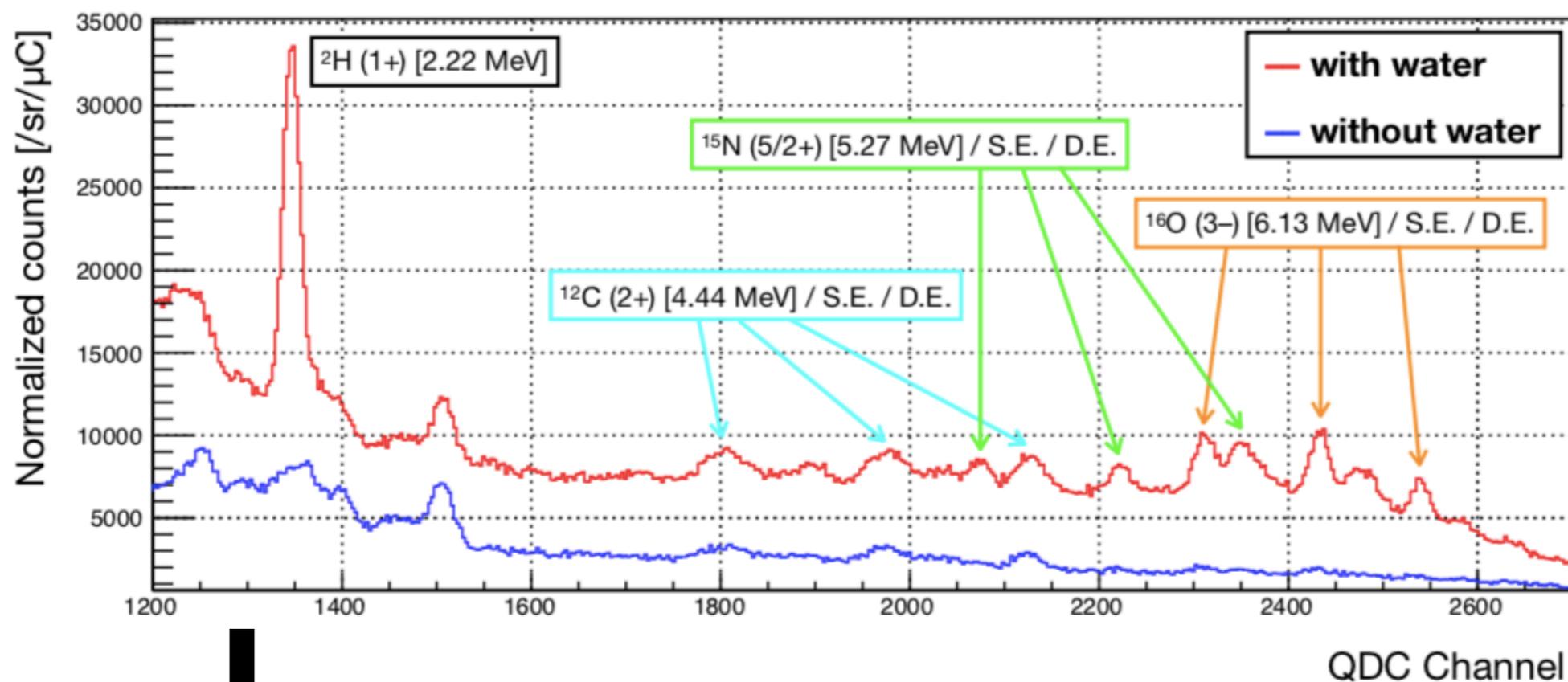
80 MeV実験では**時間情報を失っていない**

**LaBr<sub>3</sub>のデータ**を解析に用いる



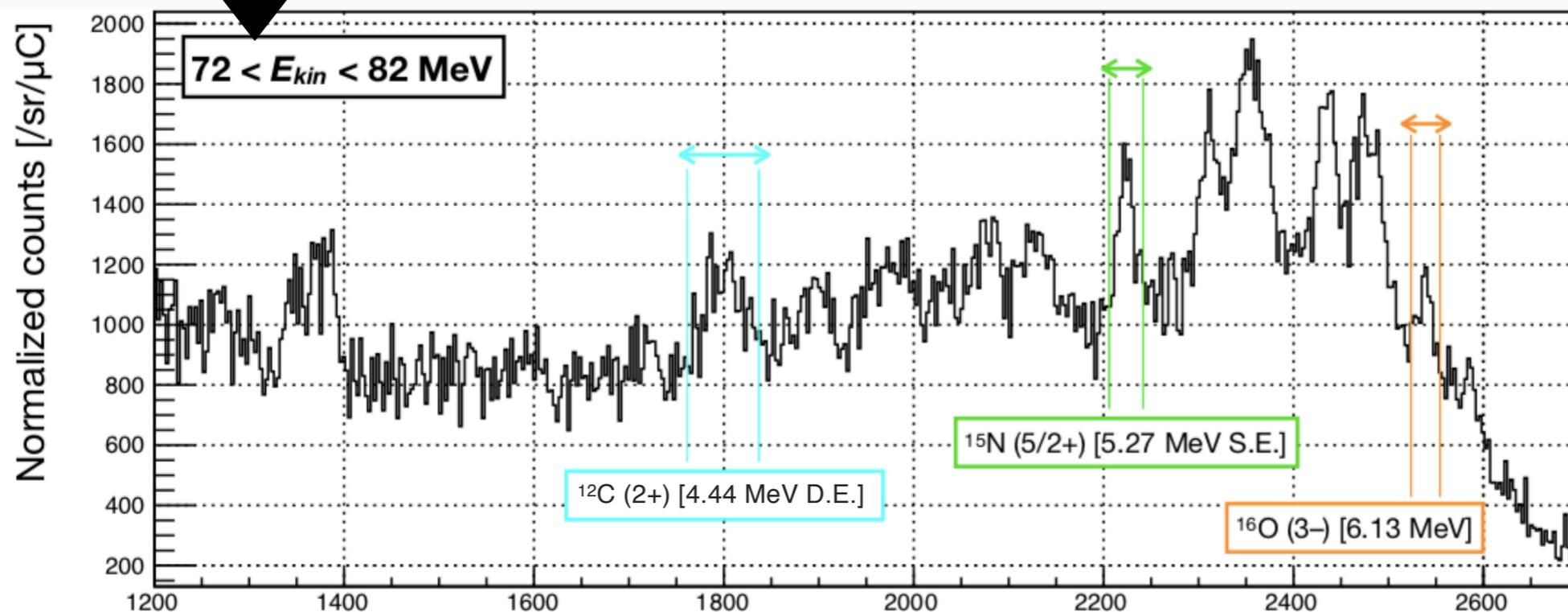
TOF分布より求めた入射粒子の  
運動エネルギー分布 (LaBr<sub>3</sub>)

# 80 MeV実験 (LaBr<sub>3</sub>)



80 MeV陽子ビーム実験  
LaBr<sub>3</sub>でのエネルギー分布図

TOF分布より入射粒子のエネルギーを選別



$$\sigma_{\gamma} = \frac{N_{sig} - N_{bkg}}{\phi_n \epsilon_{\gamma} T}$$

$N_{sig}$  : Normalized number of signal events—LaBr<sub>3</sub>  
 $N_{bkg}$  : Normalized number of background —CsI, no water run  
 $\phi_n$  : Normalized neutron flux —LqS  
 $\epsilon_{\gamma}$  : Gamma ray detection efficiency —Simulation, experiment  
 $T$  : Number of target oxygen nuclei par area —Calculate  
 $= 8.3546 * 10^{23} [lcm^3]$

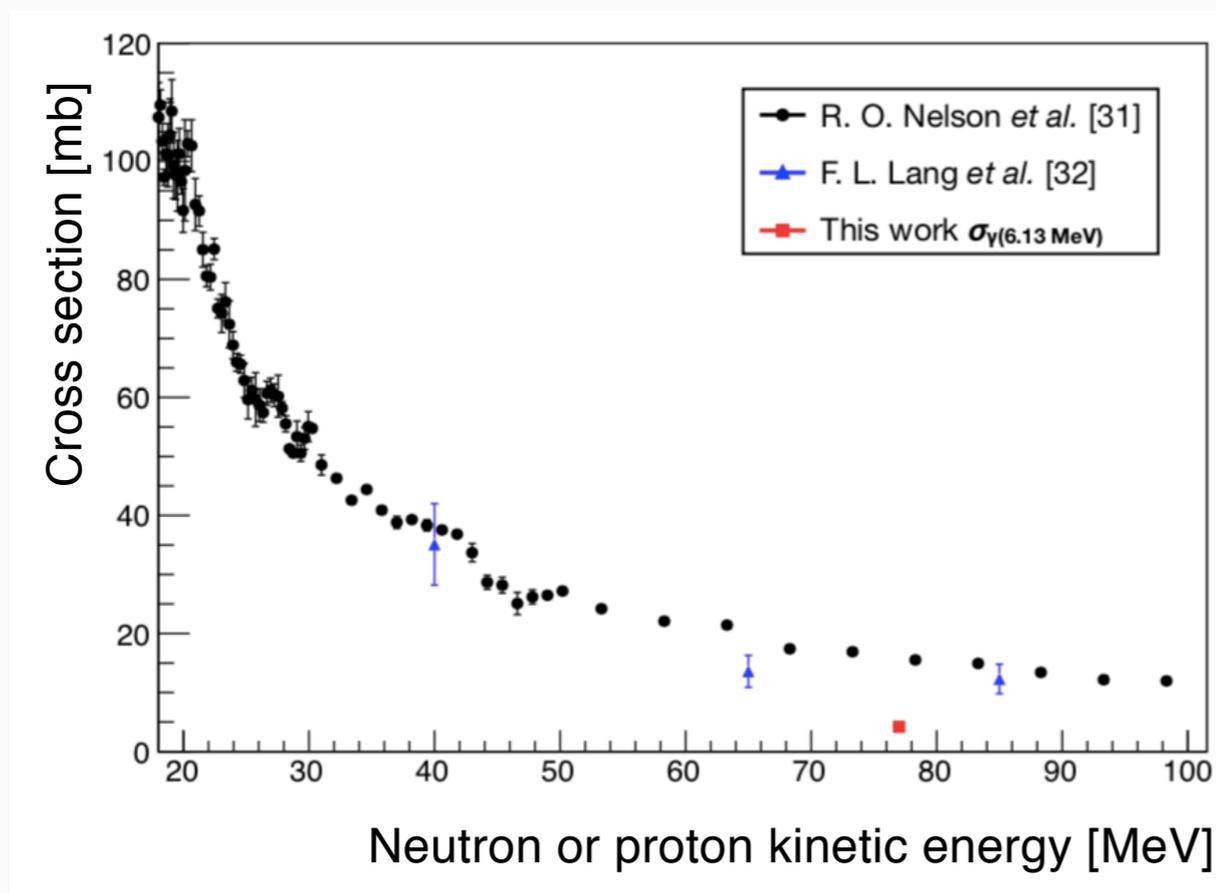
放出される各ガンマ線に対してのクロスセクションを計算

$$\sigma_{\gamma(6.13 \text{ MeV})} = 4.2 \pm 0.1(stat.) \pm 0.9(sys.) \text{ mb}$$

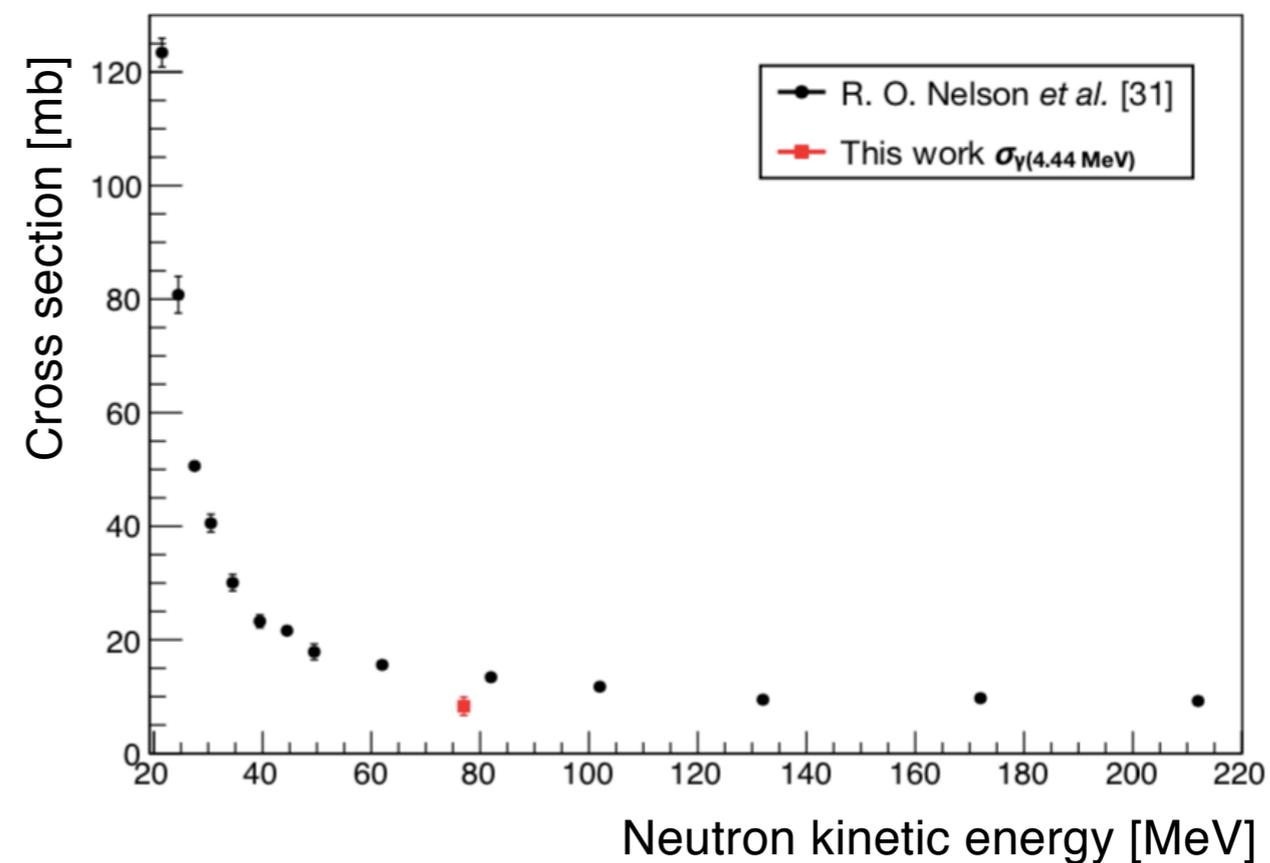
$$\sigma_{\gamma(5.27 \text{ MeV})} = 6.4 \pm 0.1(stat.) \pm 2.2(sys.) \text{ mb}$$

$$\sigma_{\gamma(4.44 \text{ MeV})} = 8.3 \pm 0.1(stat.) \pm 1.6(sys.) \text{ mb}$$

## 先行研究との比較



6.13 MeV cross section (arXiv:1902.08964)



4.44 MeV cross section (arXiv:1902.08964)

実験結果のクロスセクションは各実験の結果より低い値を示している

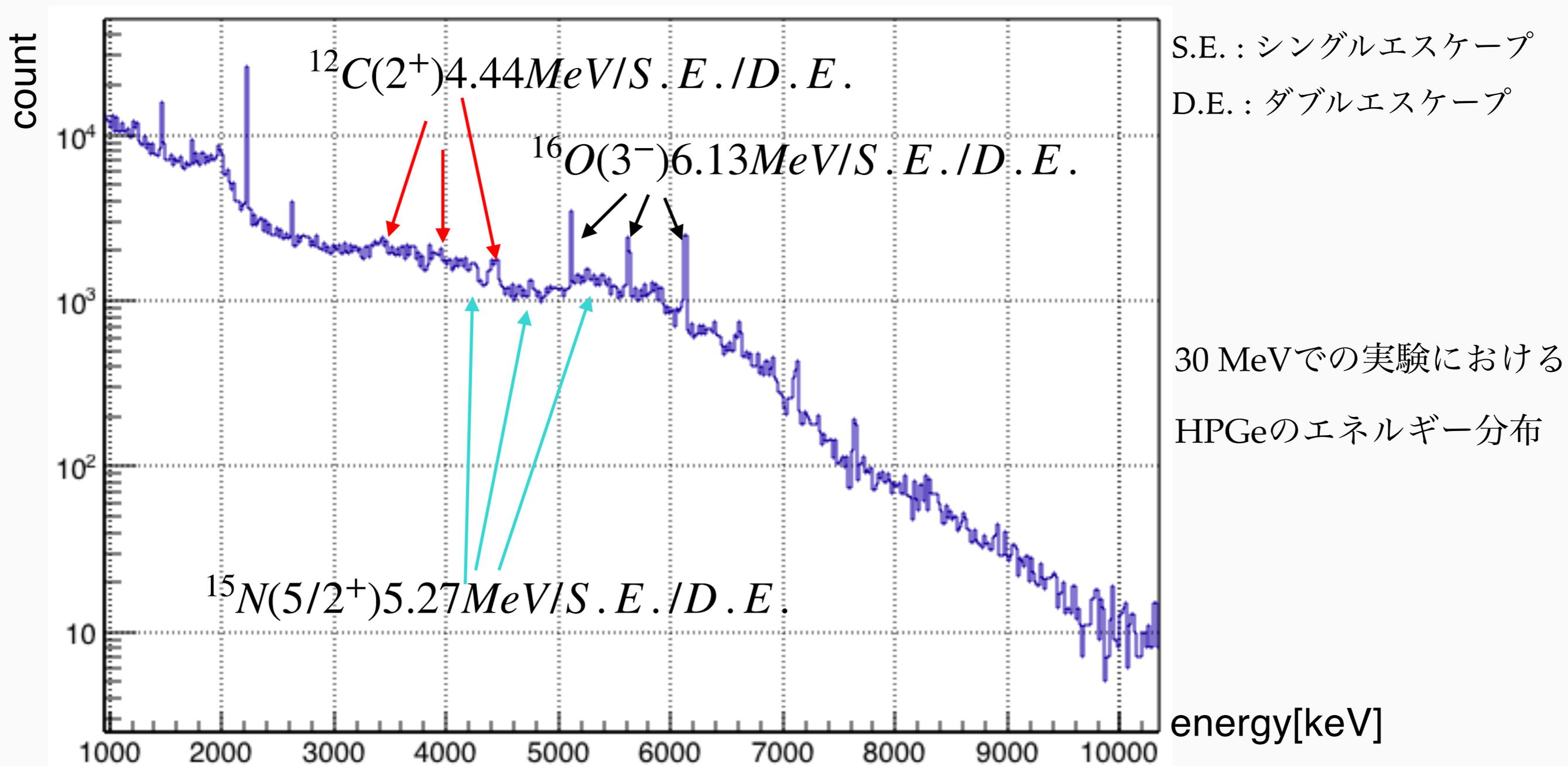
先行研究との差については以下のように考えている

- R.O.Nelsonらの実験は中性子ビームのエネルギーが準単色ではない  
→他のエネルギーの中性子が結果に混ざっている可能性がある
- ▲ F.L.Langらの実験は陽子を照射している  
→純粹に比較するのは難しい

さらなる検証も兼ねて30, 250 MeVでも実験を行なった

その際にはより精度の高い実験セットアップを構築

# 30 MeV実験



先行実験と同様なピークを確認

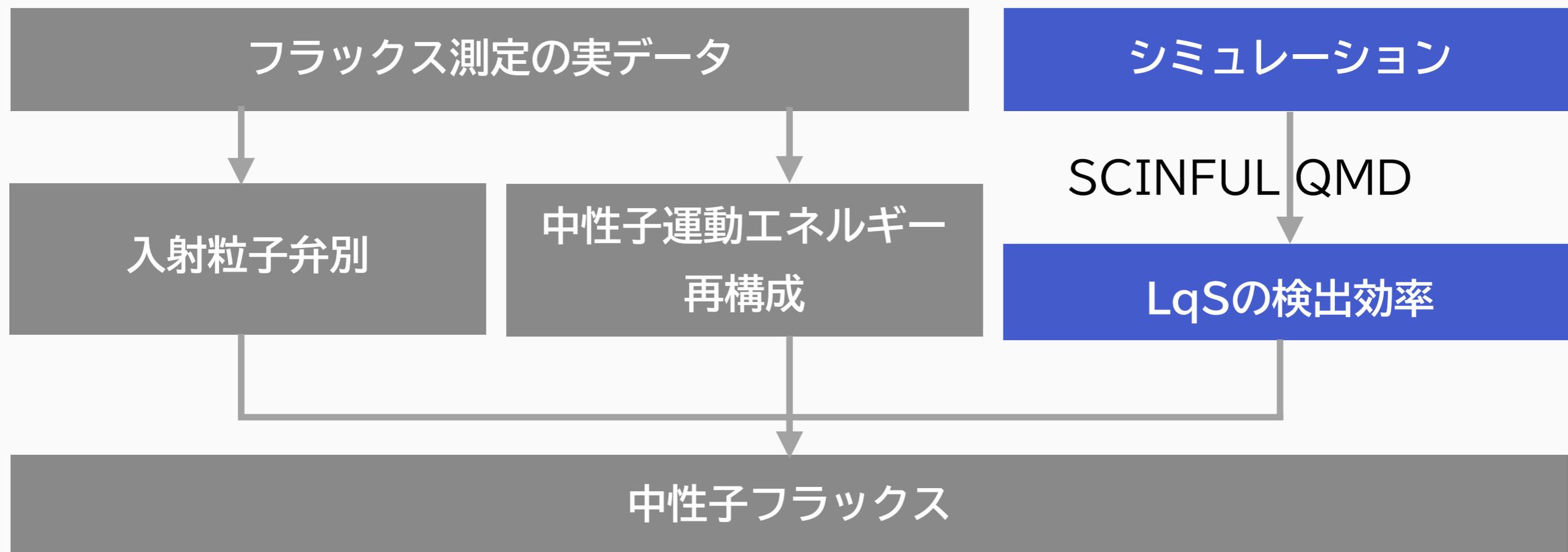
クロスセクションは現在解析中

- NCQE反応はSK-GdでのSRN探索において背景事象となりうる
- 現在のシミュレーションは二次ガンマ線についての不定性が大きい
- 不定性削減のため二次ガンマ線に焦点を当てた実験を行なった
- これから30 MeV, 250 MeVの断面積解析を行う
- 3回実験の結果をフィットし、シミュレーションに入れる

# Backup

# 中性子フラックス

18



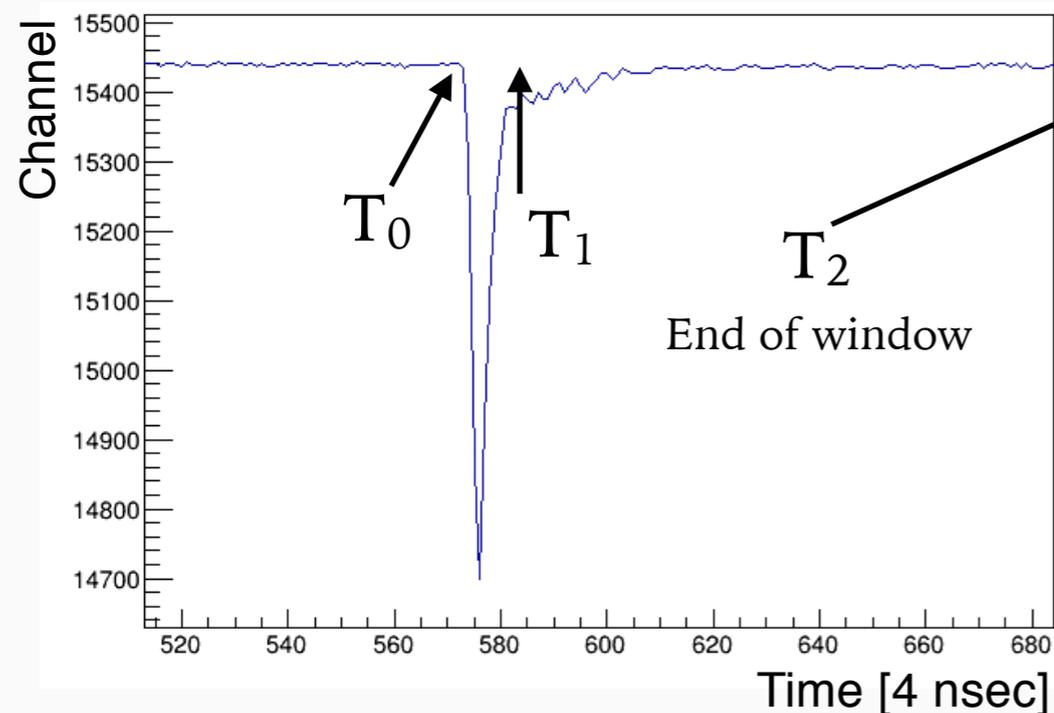
入射粒子弁別：Pulse Shape Discrimination(PSD)手法を用いる

中性子運動エネルギー： $\gamma$ 線と中性子のTOF分布より求める

LqSの検出効率：シミュレーションを用いる

# 入射粒子弁別能力

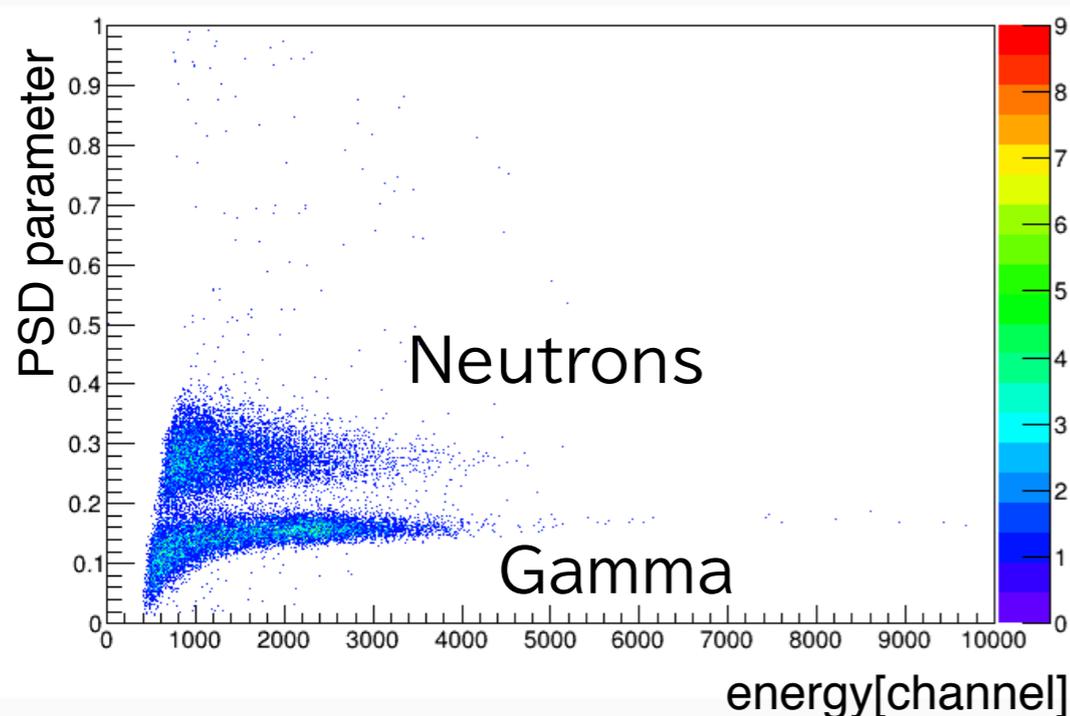
入射粒子によって出力される波形が異なることを利用



$$PSD\ par = \frac{Q(T_2) - Q(T_1)}{Q(T_2)}$$

$Q(T_1)$  :  $T_0$ から $T_1$ までの積分値

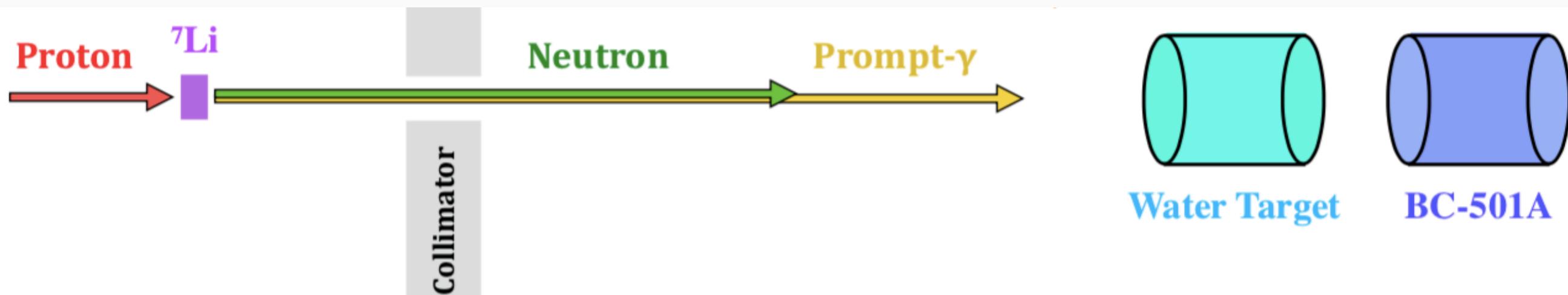
$Q(T_2)$  :  $T_0$ から $T_2$ までの積分値



本実験の場合PSD parが大きいほど  
中性子イベント

**入射粒子弁別能力を確認**

# 中性子の運動エネルギー



$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - mc^2$$

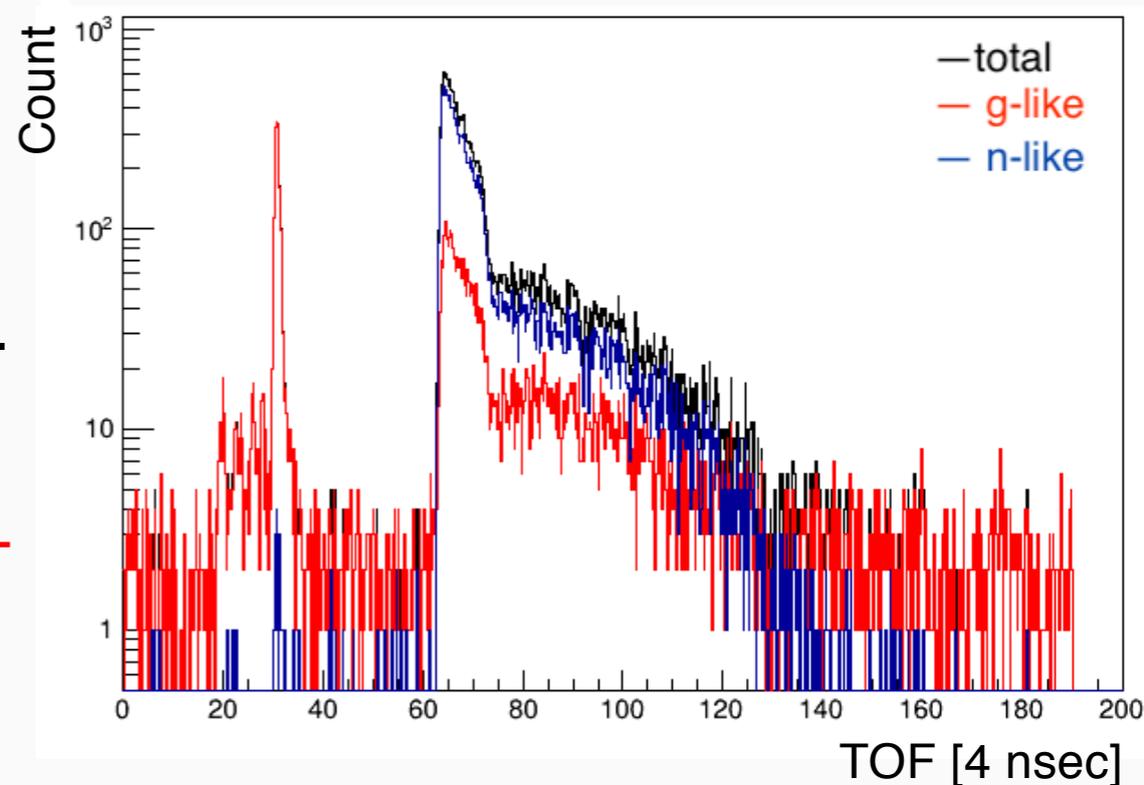
$mc^2$  : rest mass of neutron 939.6 MeV  
 $c$  : light speed 0.299 m/ns  
 $L$  : distance (Li to water) 11.46 m

飛行時間

$$TOF_\gamma = \frac{L}{c}$$

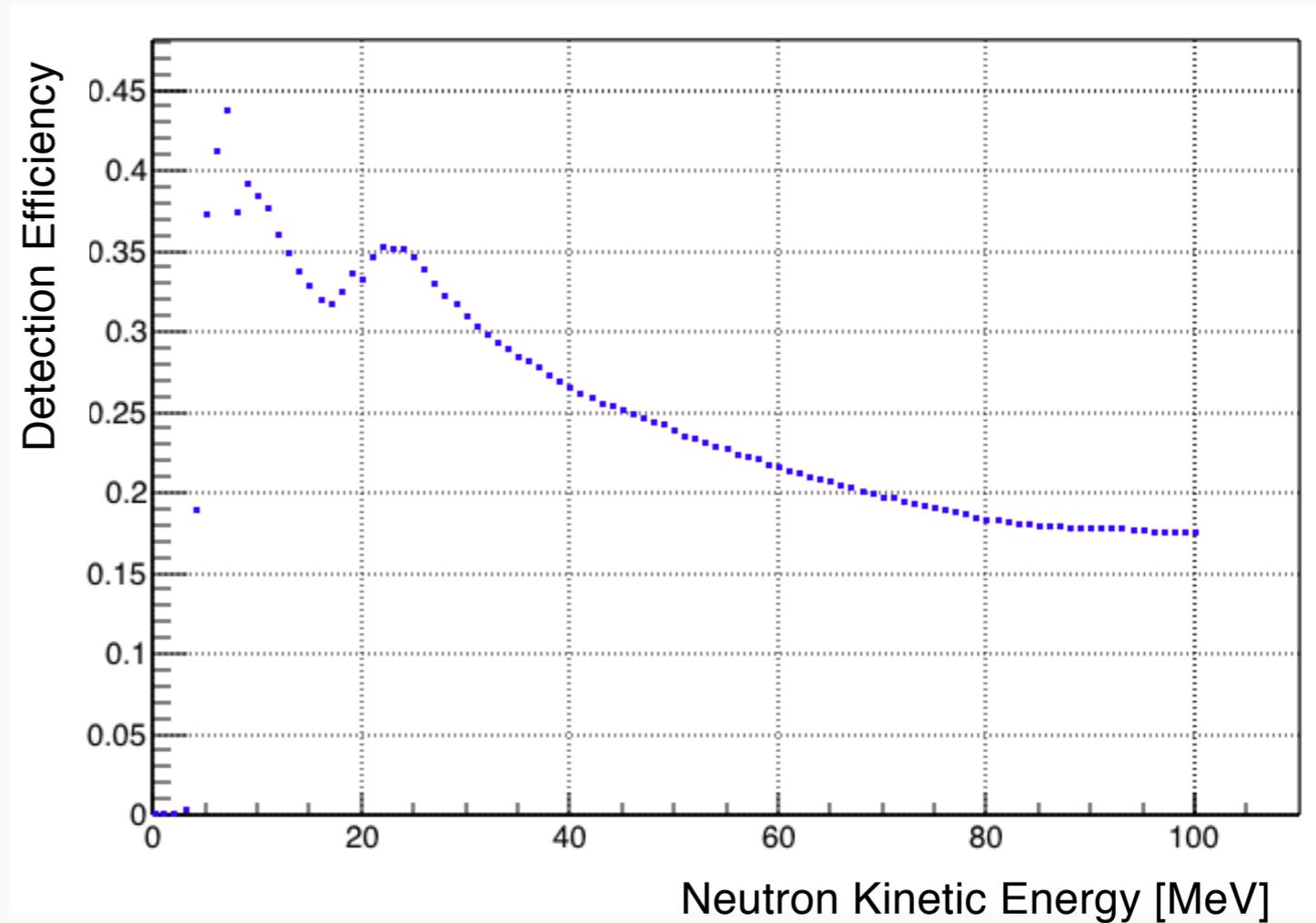
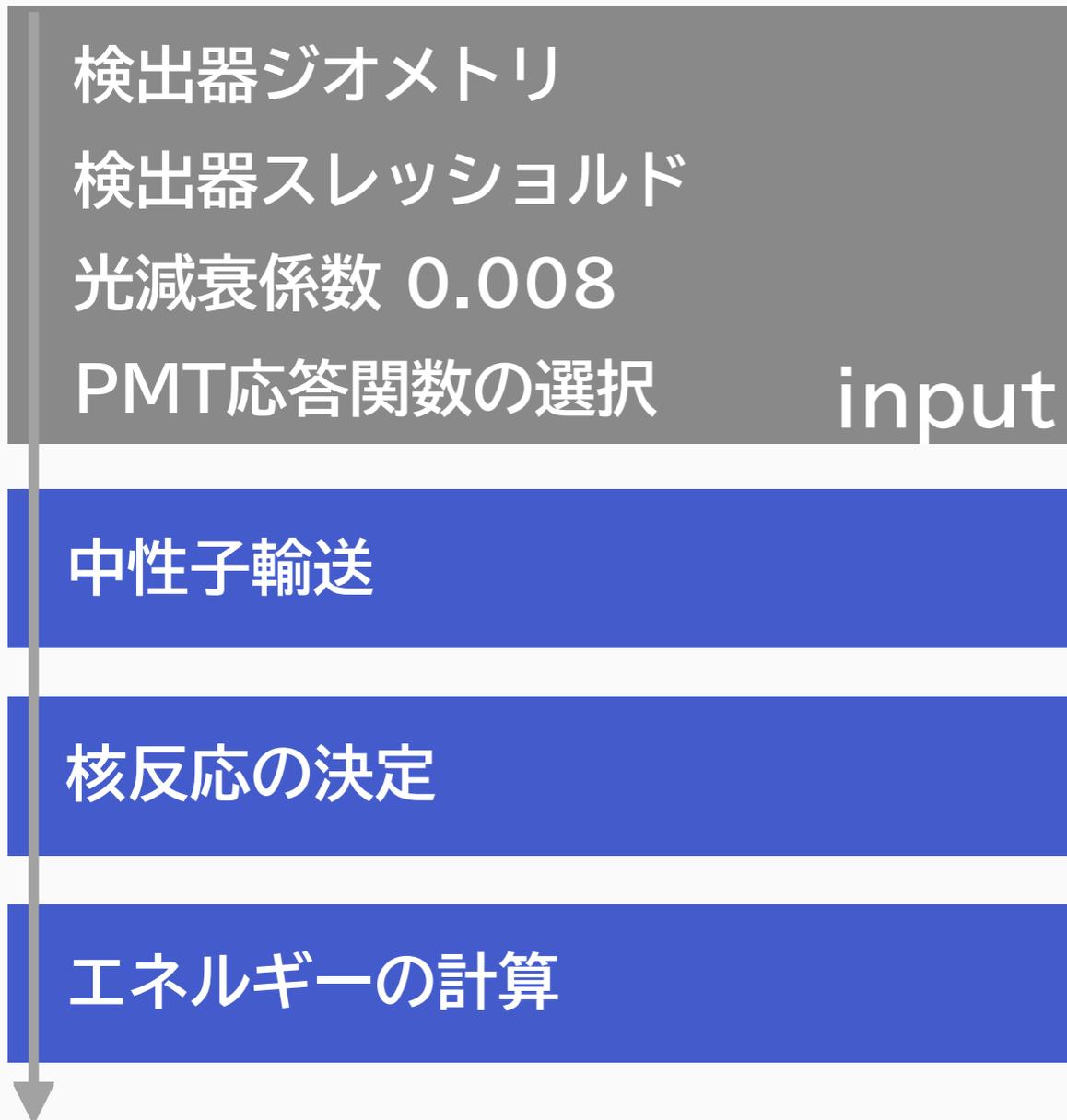
$$TOF_n = \frac{L}{\beta c}$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{c}{L}(T_{TOF_n} - TOF_\gamma)}$$



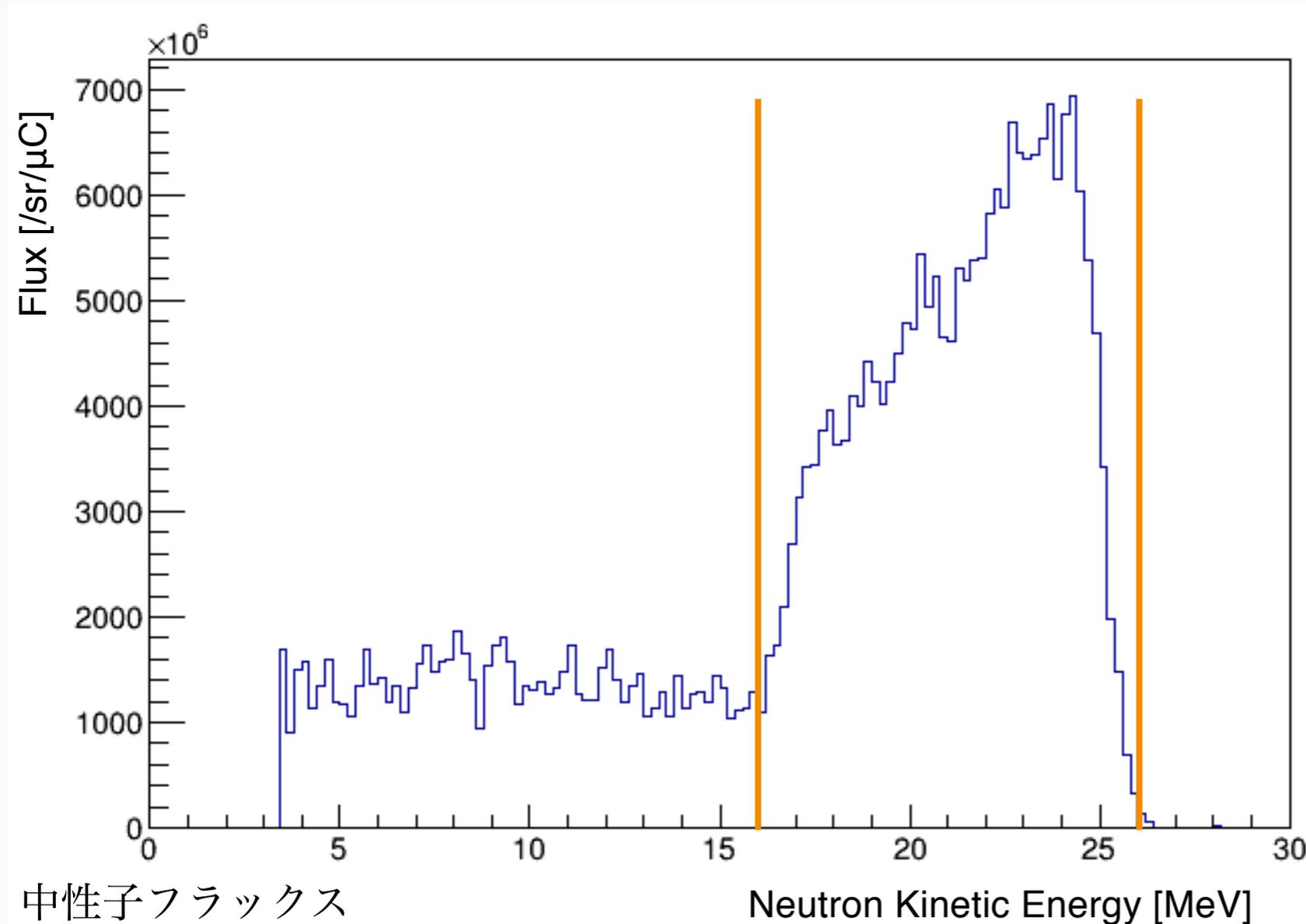
# SCINFUL QMD MC

有機液体シンチレータの検出効率をエネルギーbinごとに計算



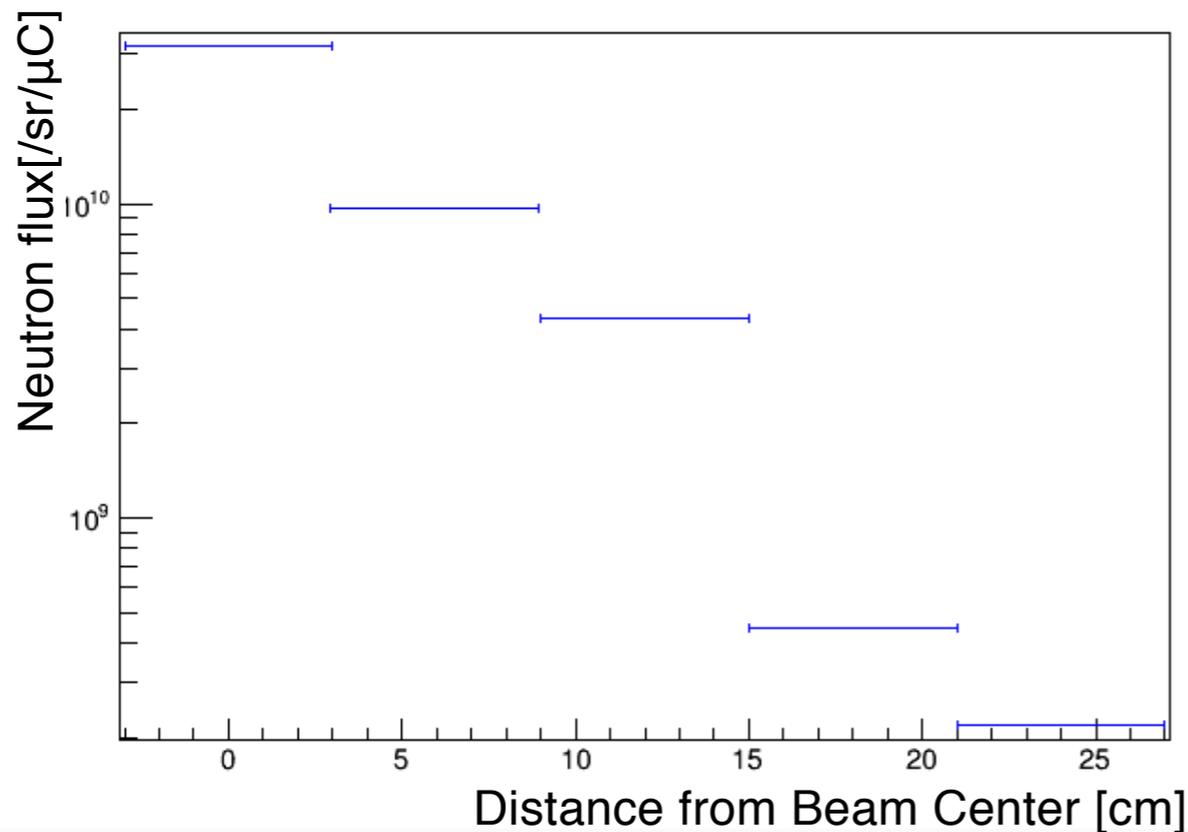
# 中性子フラックス

TOFから求めた運動エネルギー分布を検出効率で割ったもの  
立体角, ファラデーカップの電流値で規格化



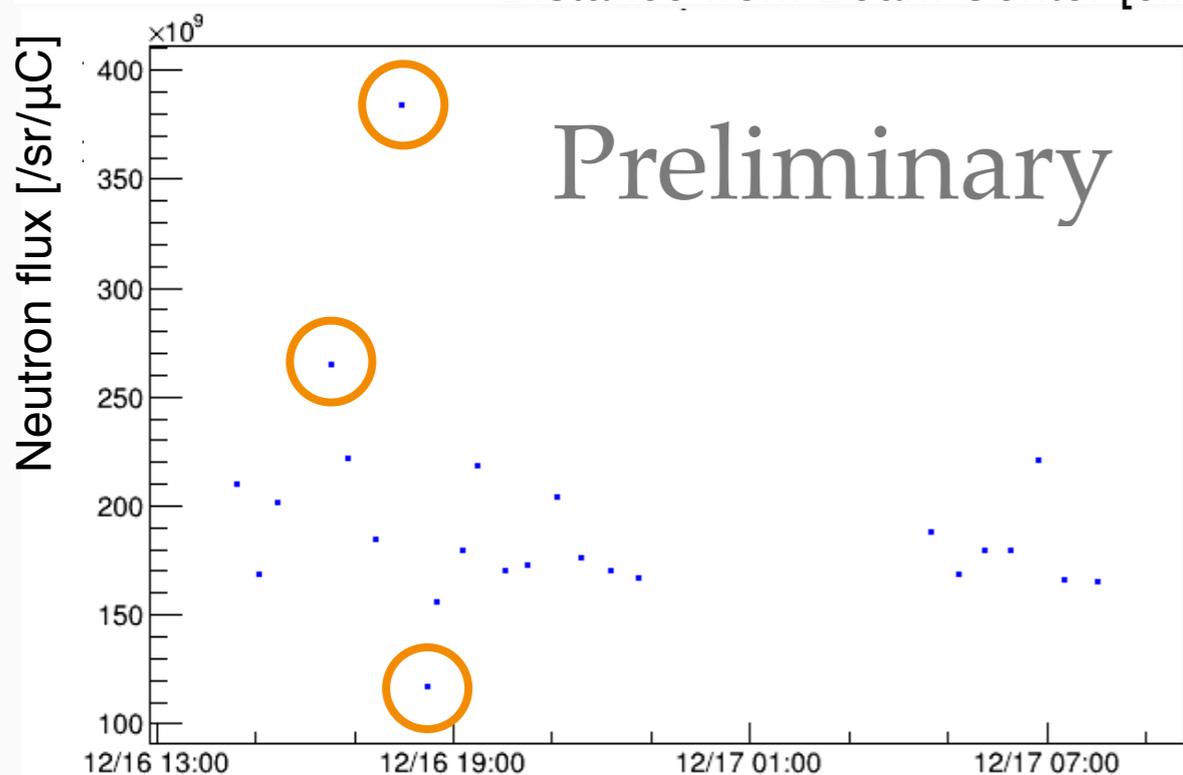
16 MeV~26 MeVが  
生成されたビームで  
あると考えられる

# ビーム構造、安定性



中性子ビーム中心からのビーム構造  
6cm毎にフラックスを測定

バックグラウンド低減のためガンマ線  
検出器を中心から24 cm以上離して設置



安定性に25%程度のゆらぎ

断面積解析の大きな誤差になりうる

→フラックスとガンマ線を同時測定した  
データセットを使用することで解消

# エラー

Error source	Size [%]
Statistical	0.5
Beam stability	3.4
Neutron selection	2.2
Detection efficiency by SCINFUL-QMD	10.0
Former bunch and environmental events	0.3
Kinetic energy reconstruction	1.0
Total	10.9

中性子フラックス測定

Error source	6.13 MeV	5.27 MeV	4.44 MeV
Statistical	2.0	1.7	1.0
Signal counting	19.0	32.8	16.1
Neutron flux	10.9	10.9	10.9
Detection efficiency	3.8	3.8	3.8
Target material number	0.4	0.4	0.4
Total	22.3	34.8	19.8

ガンマ線

クロスセクション

Hole	Residual	States	( $k$ )	$E_\gamma$	$E_p$	$E_n$	$B(k)$
$(p_{1/2})_p^{-1}$	g.s.	$\frac{1}{2}^-$	$^{15}\text{N}$	0	0	0	0.25
$(p_{3/2})_p^{-1}$	6.32	$\frac{3}{2}^-$	$^{15}\text{N}$	6.32	0	0	0.41
	9.93	$\frac{3}{2}^-$	$^{15}\text{N}$	9.93	0	0	0.03
	10.70	$\frac{3}{2}^-$	$^{15}\text{N}$	0	0.5	0	0.03
$(s_{1/2})_p^{-1}$	g.s.	$1^+$	$^{14}\text{N}$	0	0	$\sim 20$	0.02
	7.03	$2^+$	$^{14}\text{N}$	7.03	0	$\sim 13$	0.02
	g.s.	$\frac{1}{2}^-$	$^{13}\text{C}$	0	1.6	$\sim 11$	0.01
	g.s.	$0^+$	$^{14}\text{C}$	0	$\sim 21$	0	0.02
	7.01	$2^+$	$^{14}\text{C}$	7.01	$\sim 14$	0	0.02
	g.s.	$\frac{1}{2}^-$	$^{13}\text{C}$	0	$\sim 11$	$\sim 2$	0.03
$(j)_p^{-1}$	others		many states	$\leq 3-4$			0.16
$(p_{1/2})_n^{-1}$	g.s.	$\frac{1}{2}^-$	$^{15}\text{O}$	0	0	0	0.25
$(p_{3/2})_n^{-1}$	6.18	$\frac{3}{2}^-$	$^{15}\text{O}$	6.18	0	0	0.44
$(s_{1/2})_n^{-1}$	g.s.	$1^+$	$^{14}\text{N}$	0	$\sim 24$	0	0.02
	7.03	$2^+$	$^{14}\text{N}$	7.03	$\sim 17$	0	0.02
	g.s.	$\frac{1}{2}^-$	$^{13}\text{C}$	0	$\sim 14.5 + 1.6$	0	0.01
	g.s.	$0^+$	$^{14}\text{O}$	0	0	$\sim 18$	0.02
	g.s.	$\frac{1}{2}^-$	$^{13}\text{N}$	0	2.0	$\sim 11.5$	0.02
$(j)_n^{-1}$	others		many states	$\leq 3-4$			0.22

# エネルギー

---

30 MeV

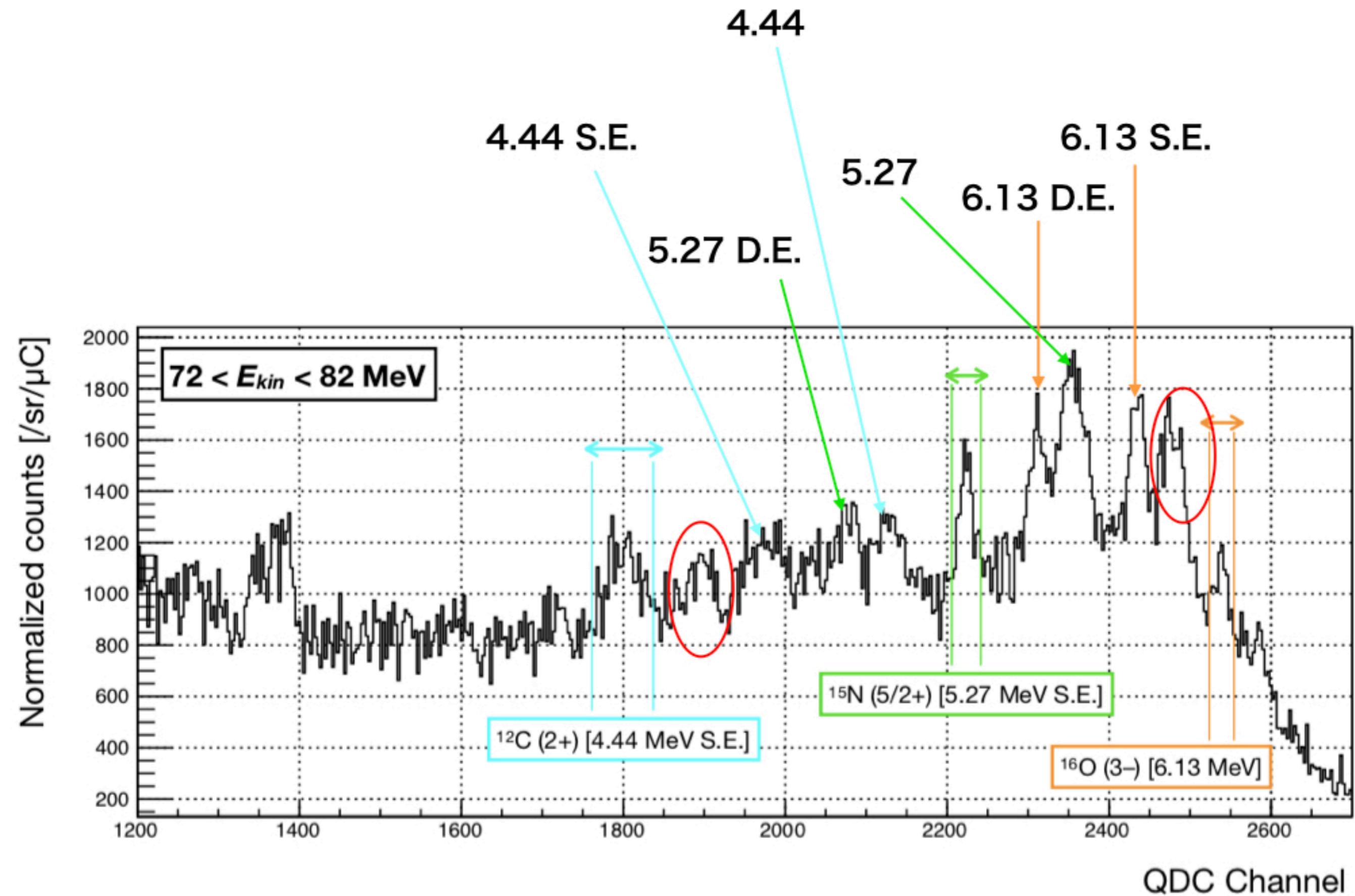
— 中性子の運動エネルギーのピーク付近

酸素のフェルミ面付近(27 MeV)

246 MeV

— 高エネルギー側のデータ点も欲しい

p-Li反応によるパイオン生成スレッシュホールド以下



$$\sigma_{\gamma} = \frac{N_{sig} - N_{bkg}}{\phi_n \epsilon_{\gamma} T}$$

$T$  : Number of target oxygen nuclei par area  
=  $8.3546 * 10^{23} [cm^3]$

$\epsilon_{\gamma}$  : Gamma ray detection efficiency —Simulation, experiment

Geant4を用いてエネルギーbinごとに検出効率をシミュレート

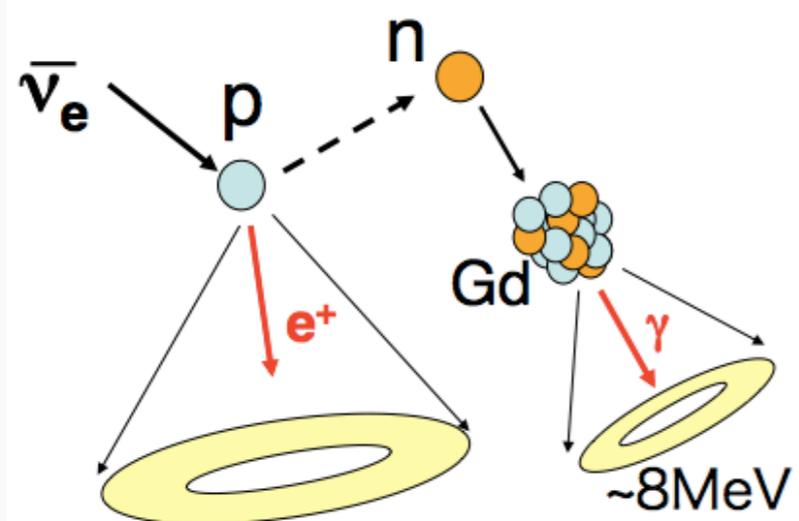
また $^{60}\text{Co}$ を用いた実験結果とも比較を行う

# ニュートリノ中性カレント反応

大気ニュートリノ由来の中性カレント準弾性散乱反応 (NCQE)

スーパーカミオカンデにガドリニウムを溶かしたSK-Gd計画での

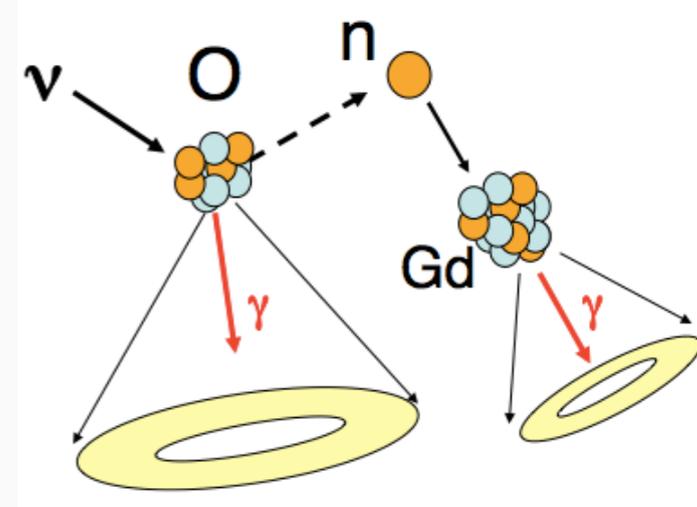
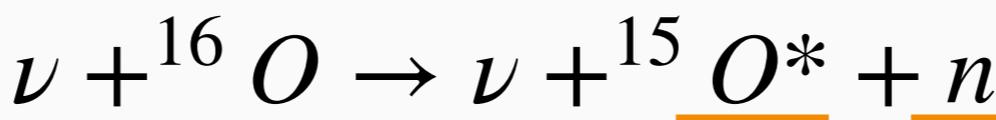
超新星背景ニュートリノ (SRN) 探索において主要なバックグラウンドになると考えられている



SRNのシグナル



NCQEのシグナル

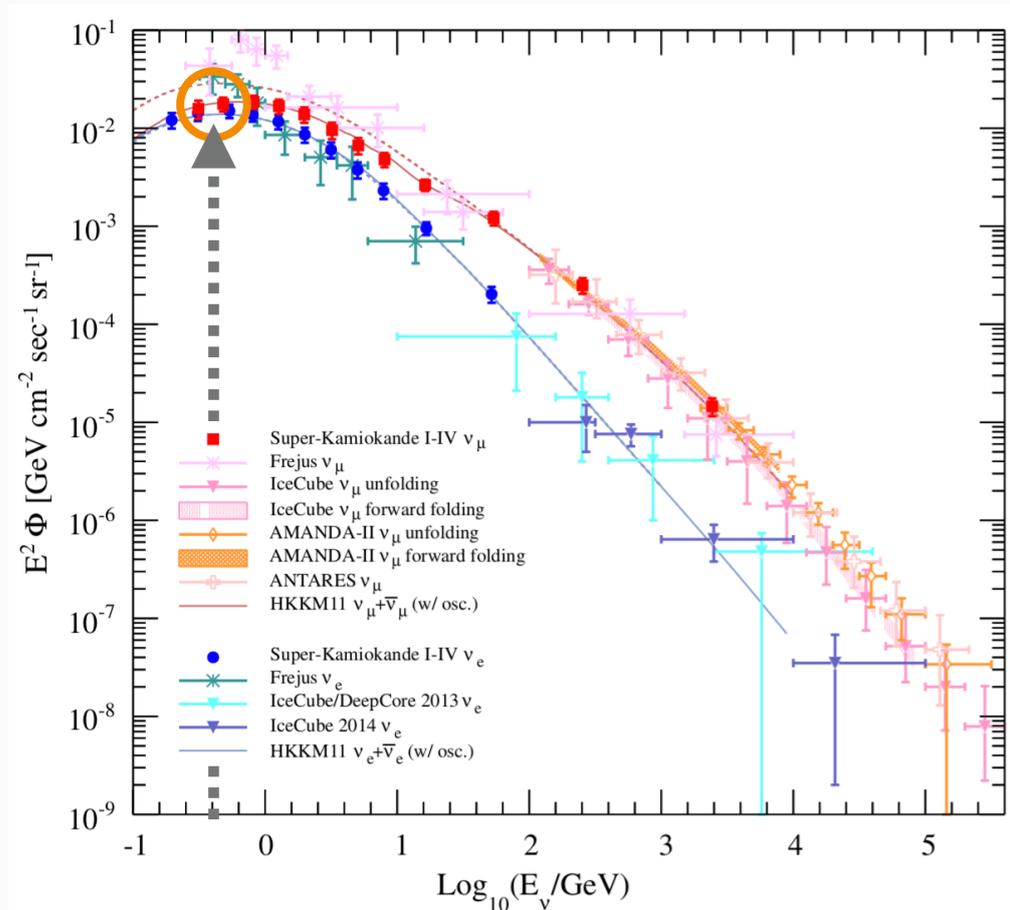
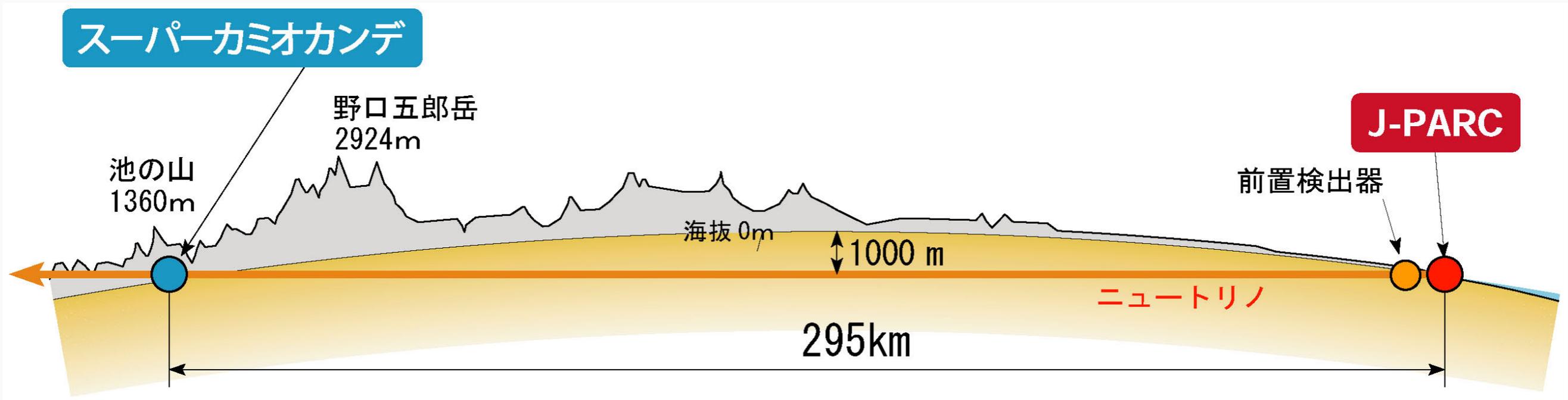


どちらも  $e^+/e^-$ , neutron が観測されるため

識別が不可能

→ NCQE 反応の理解が重要

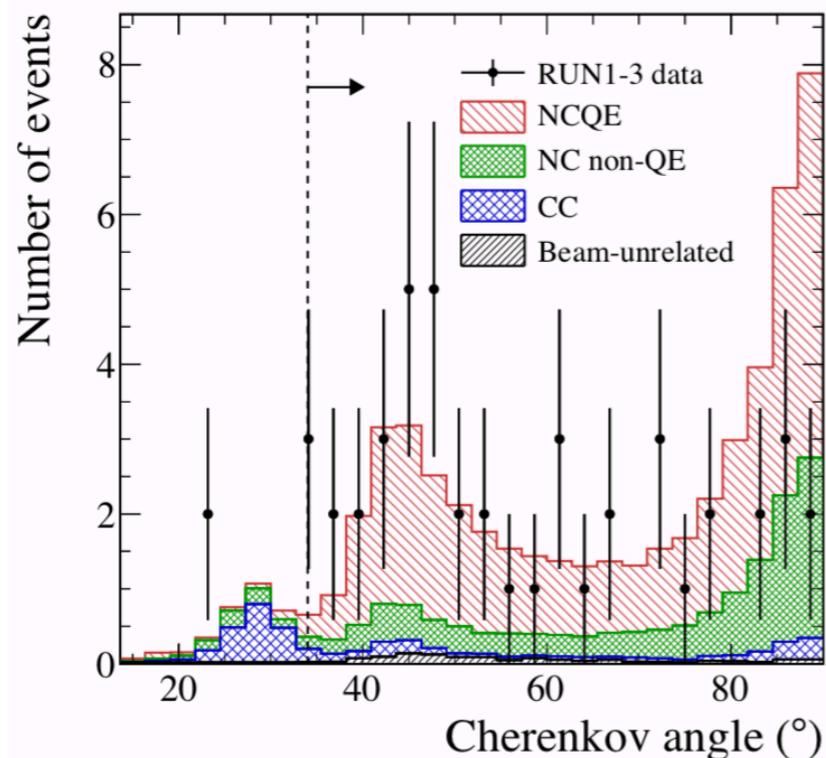
# T2K実験



ビームは630 MeVにピーク

大気ニュートリノのピークとほぼ同じエネルギー

→T2K実験データをNCQE反応測定に利用

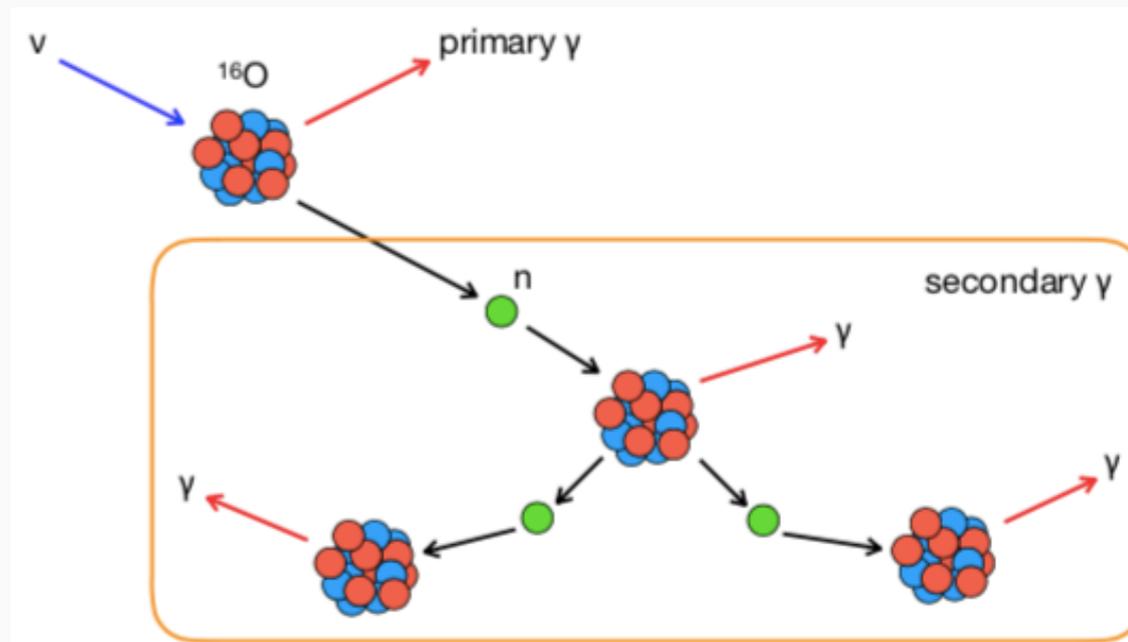


チェレンコフ角再構成 arXiv:1403.3140

	Signal		Background		
	NCQE	NC	non-QE	CC	Unrel.
Fraction of Sample	68%	26%	4%	2%	-
Flux	11%	10%	12%	-	-
Cross sections	-	18%	24%	-	-
Primary $\gamma$ production	15%	3%	9%	-	-
Secondary $\gamma$ production	13%	13%	7.6%	-	-
Detector response	2.2%	2.2%	2.2%	-	-
Oscillation Parameters	-	-	10%	-	-
Total Systematic Error	23%	25%	31%	0.8%	-

シミュレーションの不定性 arXiv:1403.3140

- ・シミュレーションと実データが不一致
  - ・90°の再構成は2次ガンマ線に起因
  - ・2次ガンマ線の不定性が大きい
- 中性子・酸素原子核反応で放出される  
ガンマ線を理解し不定性を小さくする



# ニュートリノの中性カレント反応

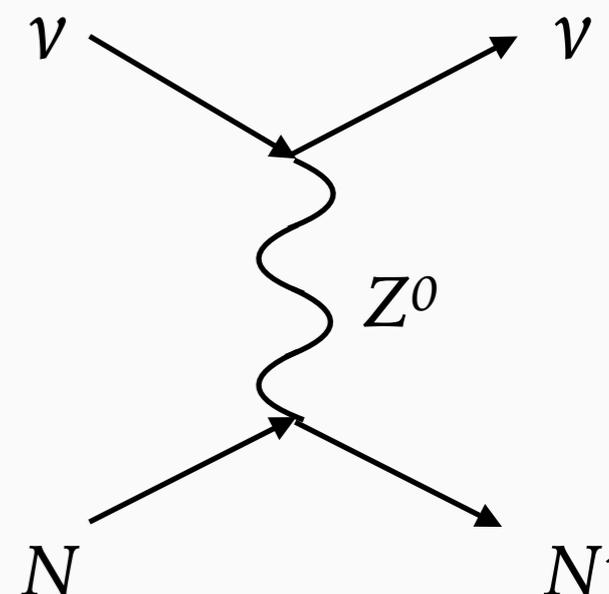
ニュートリノが $Z^0$ 粒子の交換を通して起こす反応のこと

$$\nu + N \rightarrow \nu + N$$

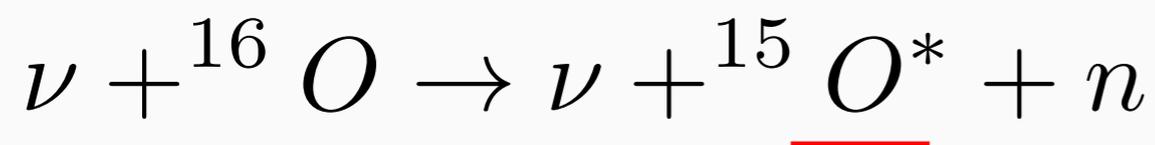
$$\nu + N \rightarrow \nu + N^*$$

$$\nu + N \rightarrow \nu + N^* + n$$

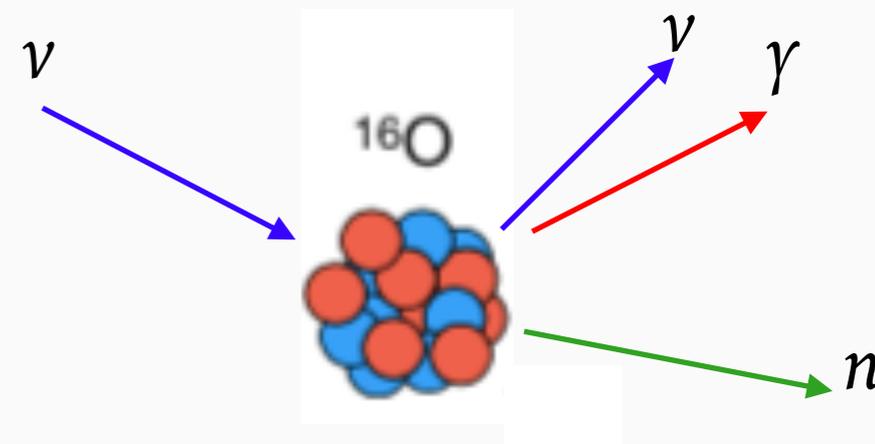
⋮



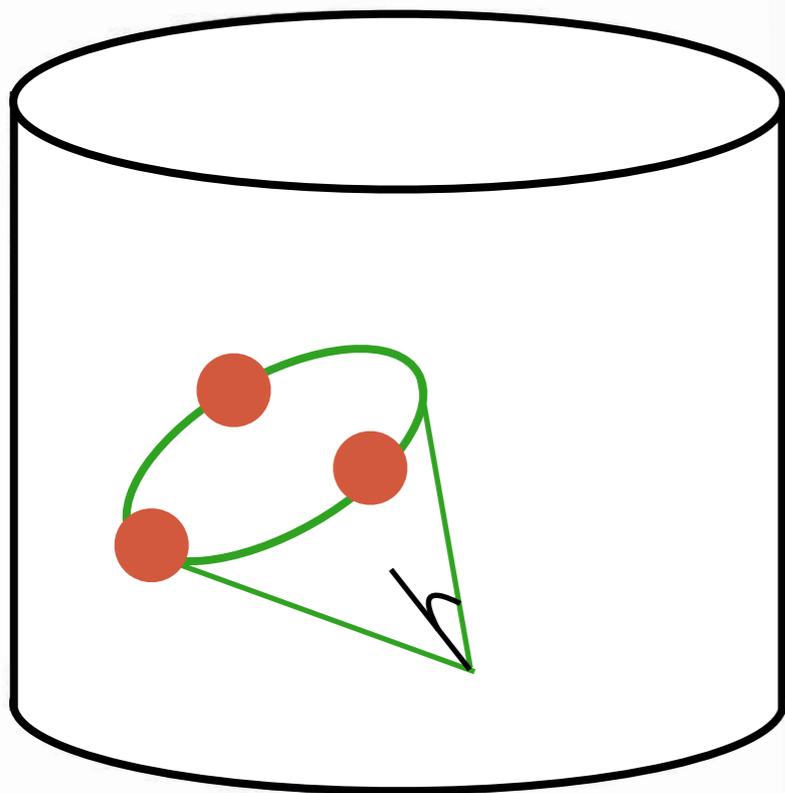
ターゲットが酸素原子核の場合以下のような反応が起こる(一例)



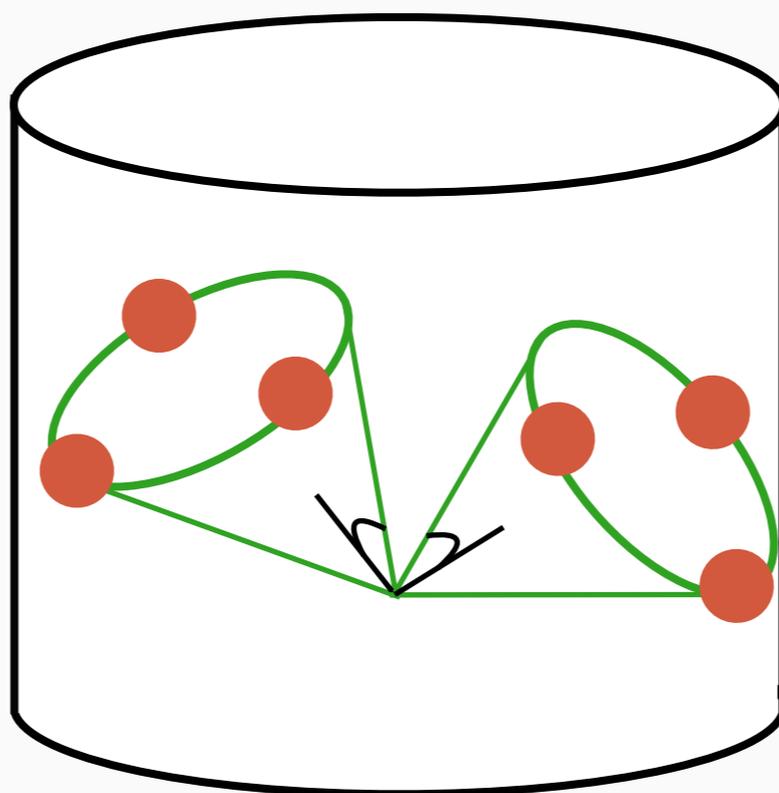
脱励起でガンマ線を放出



# 中性カレント反応による問題



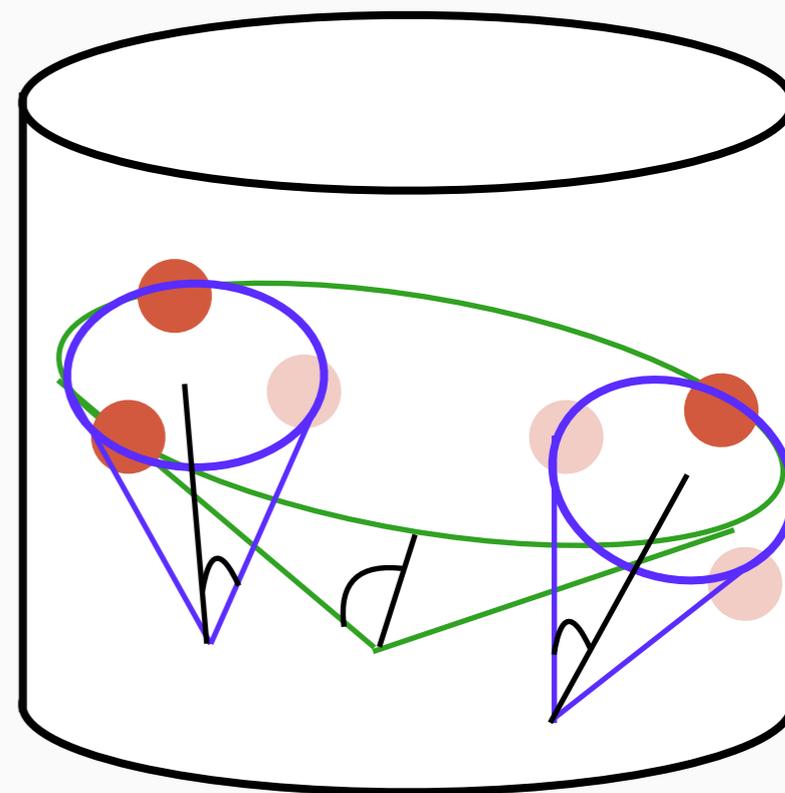
信号のあったPMTから3つを  
取り出しチェレンコフリングの  
再構成を行う  
これを全ての組み合わせで行い  
中央値をその信号の角度とする



同時に複数発生した場合

チェレンコフ光の区別はできない

リングが実際よりも大きい値に再構成される



# 中性子ビーム実験

## Flash-ADC (CAEN DT5725)

4 ns毎にデータ取得可能

検出器からの波形データを

そのまま保存する



## MCA

HPGeの信号からリアルタイムで

エネルギー分布を作成する

データがおかしくないかを

その場で確認するために使用

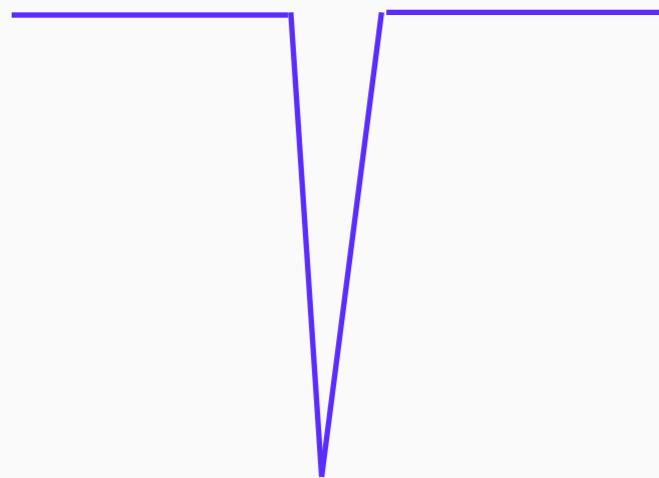


# Pulse shape discrimination (PSD)

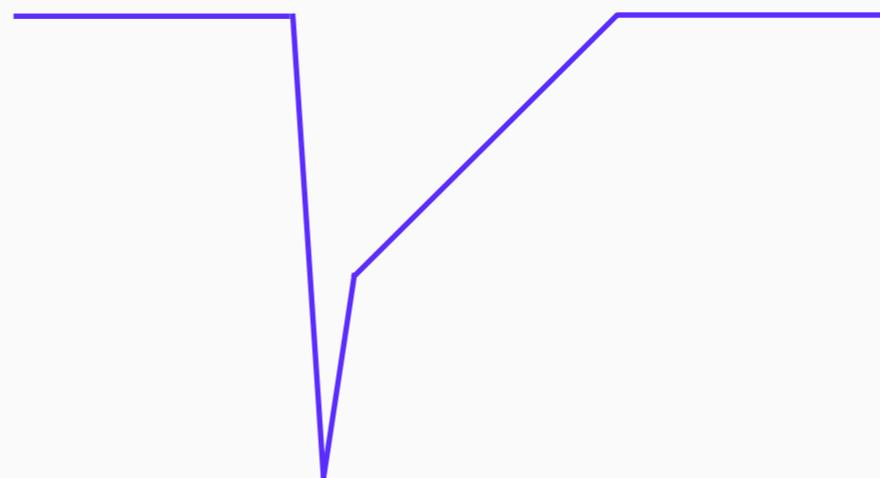
検出器の出力波形が入射粒子の種類で異なることを利用した粒子弁別技術

本実験で使用したLqSの場合中性子の波形は減衰に時間がかかり

尾を引くような形になる



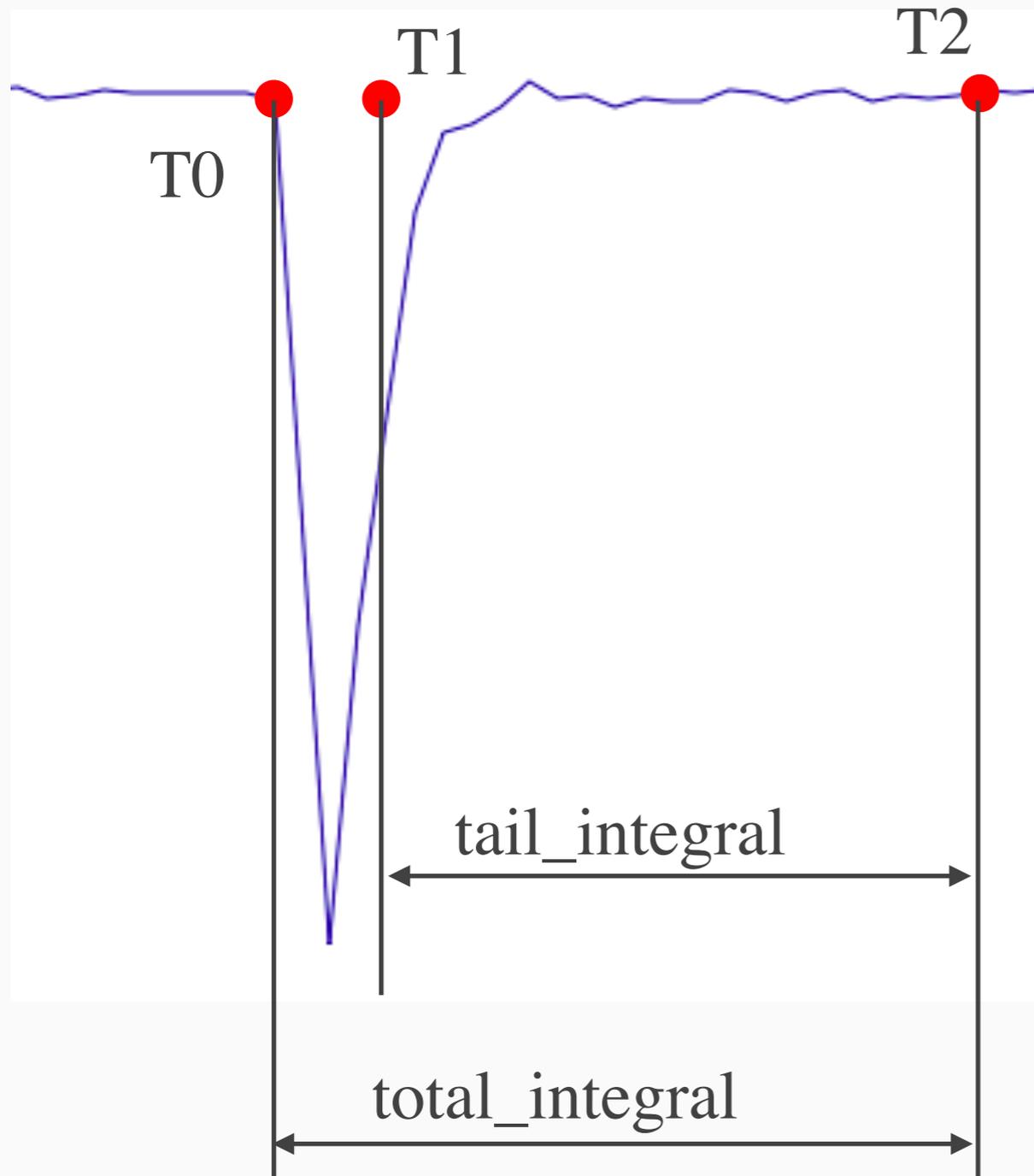
ガンマ線



中性子

\*極端な表現をしています

# Pulse shape discrimination (PSD)



T0からT2までの積分値をTotal

T1からT2までの積分値をTailとし

PSD parameterを以下のように定義する

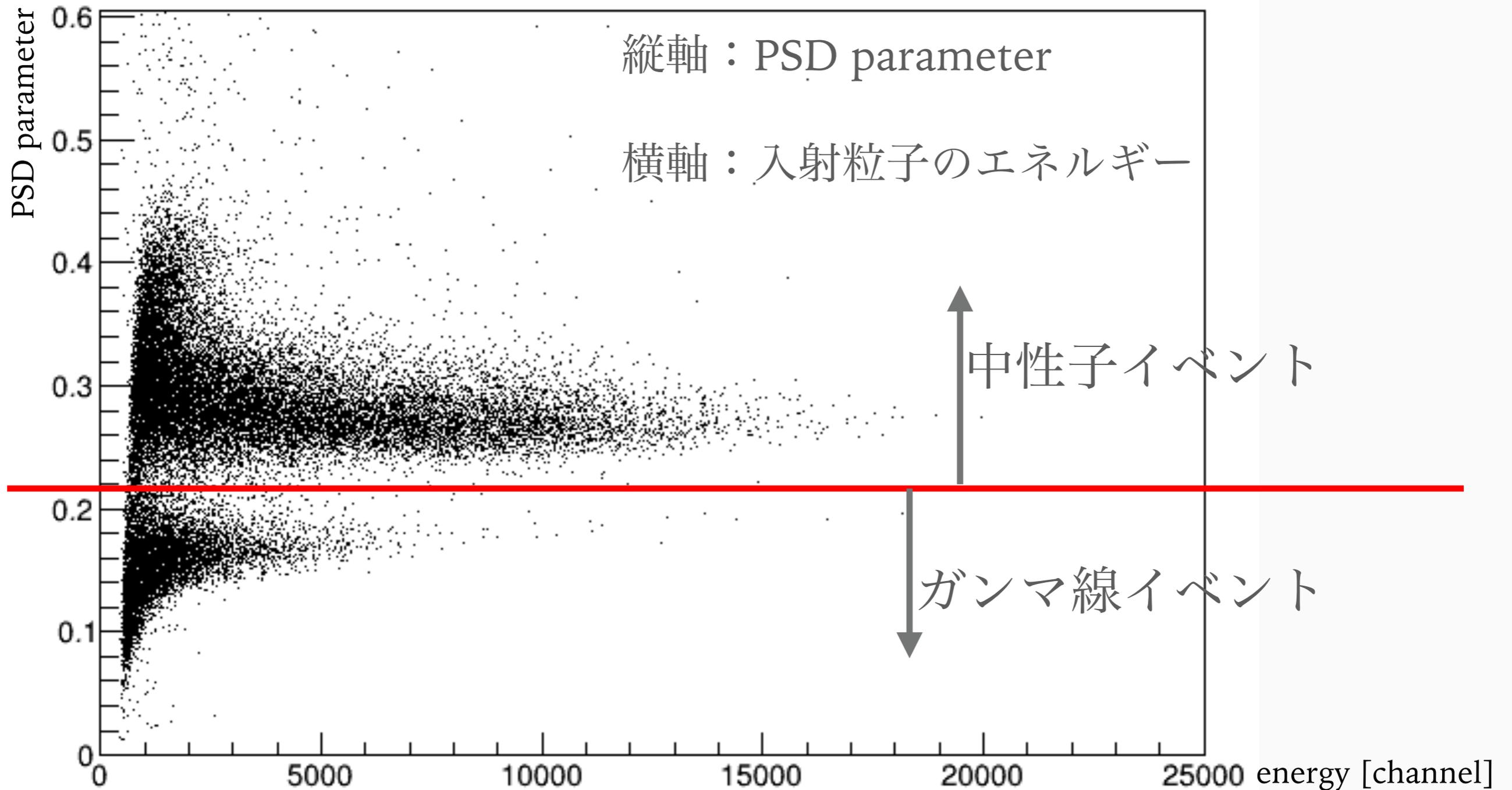
$$PSD = \frac{tail}{total}$$

この値が大きいほど減衰に時間がかかる

→中性子イベントである

# LqSのPSD性能

30 MeV Run data



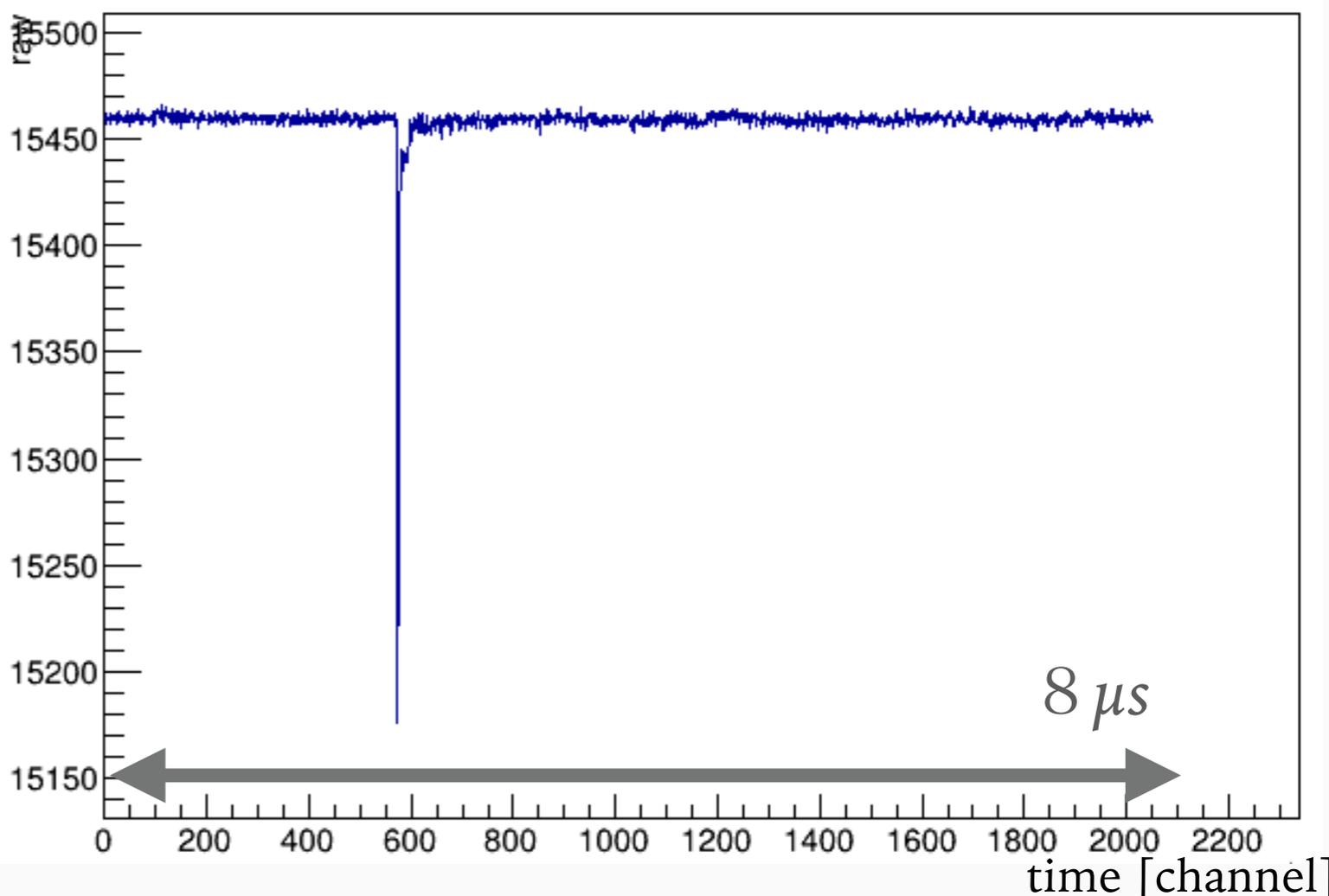
実験で使用した検出器は粒子弁別機能を持つ

# LqSデータ解析

中性子フラックスを求めるためにはFADCで取得した生データから

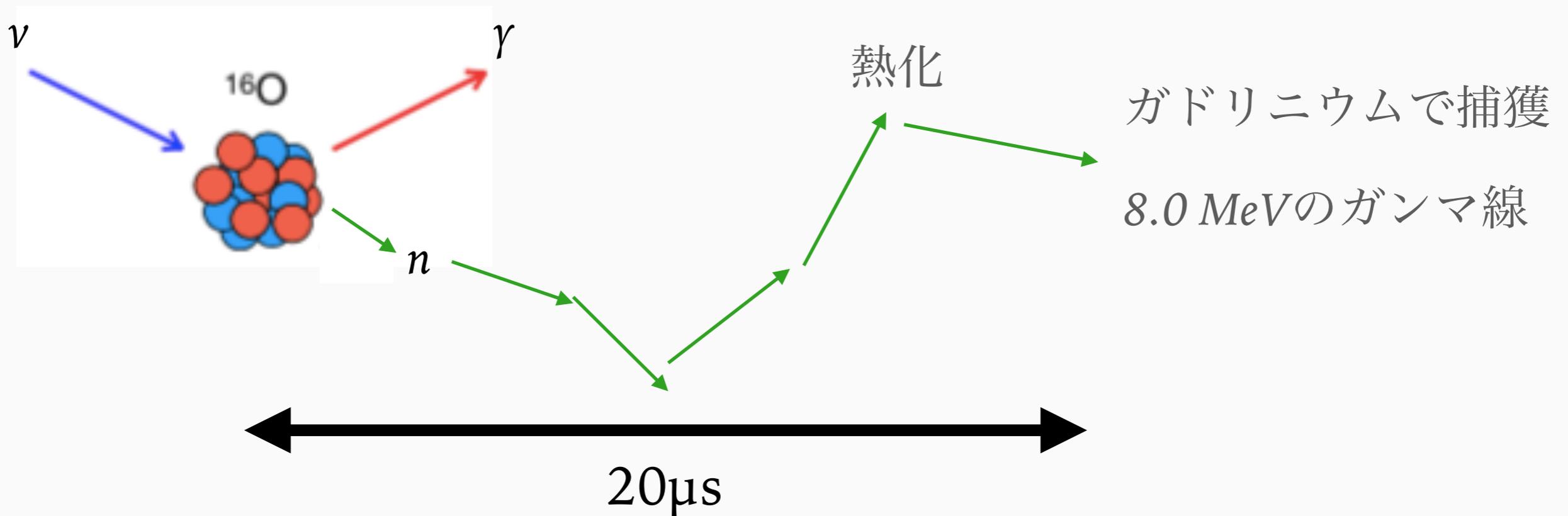
- 入射粒子の弁別
  - Pulse shape discrimination (PSD) を使用
- 中性子エネルギーの再構成(信号領域の中性子イベントを取り出すため)

を行う必要がある



熱中性子化するまでキャプチャーはされない

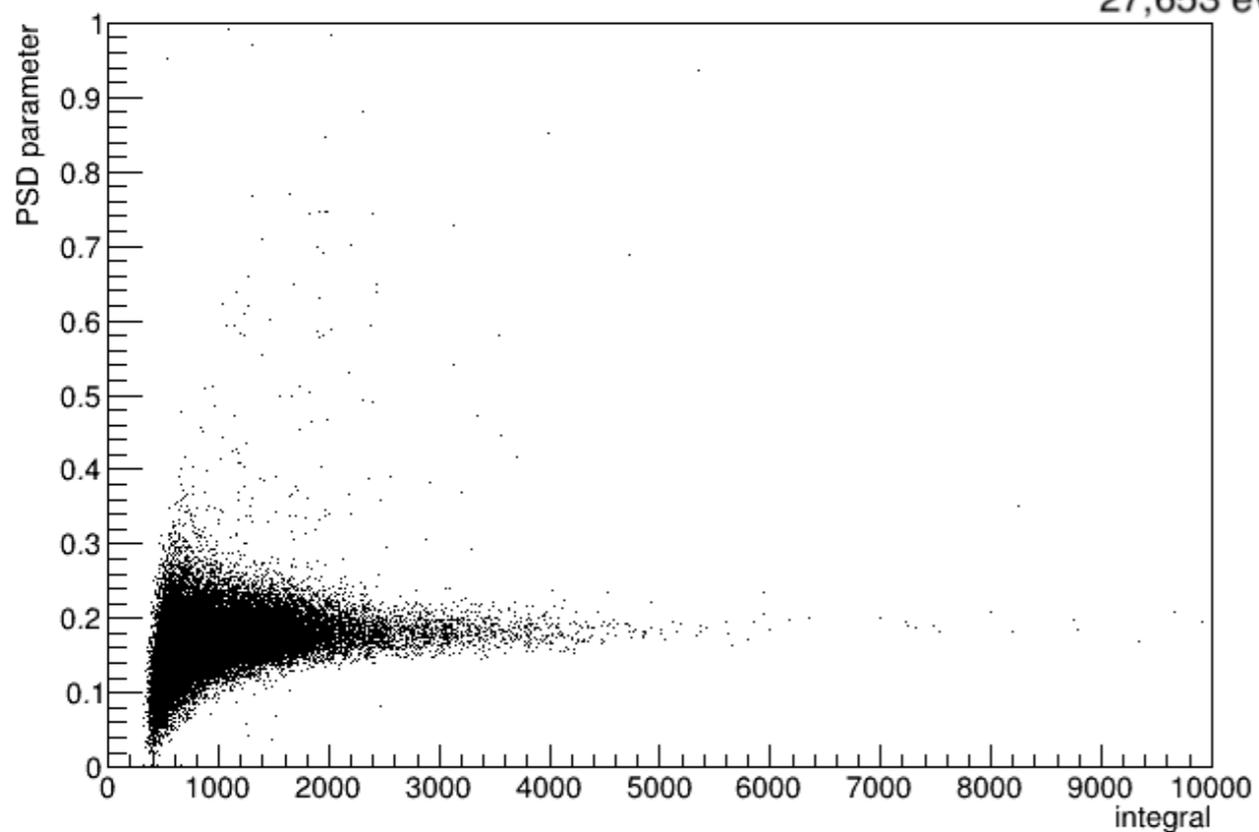
途中でどんどんエネルギーを落としていき、熱化



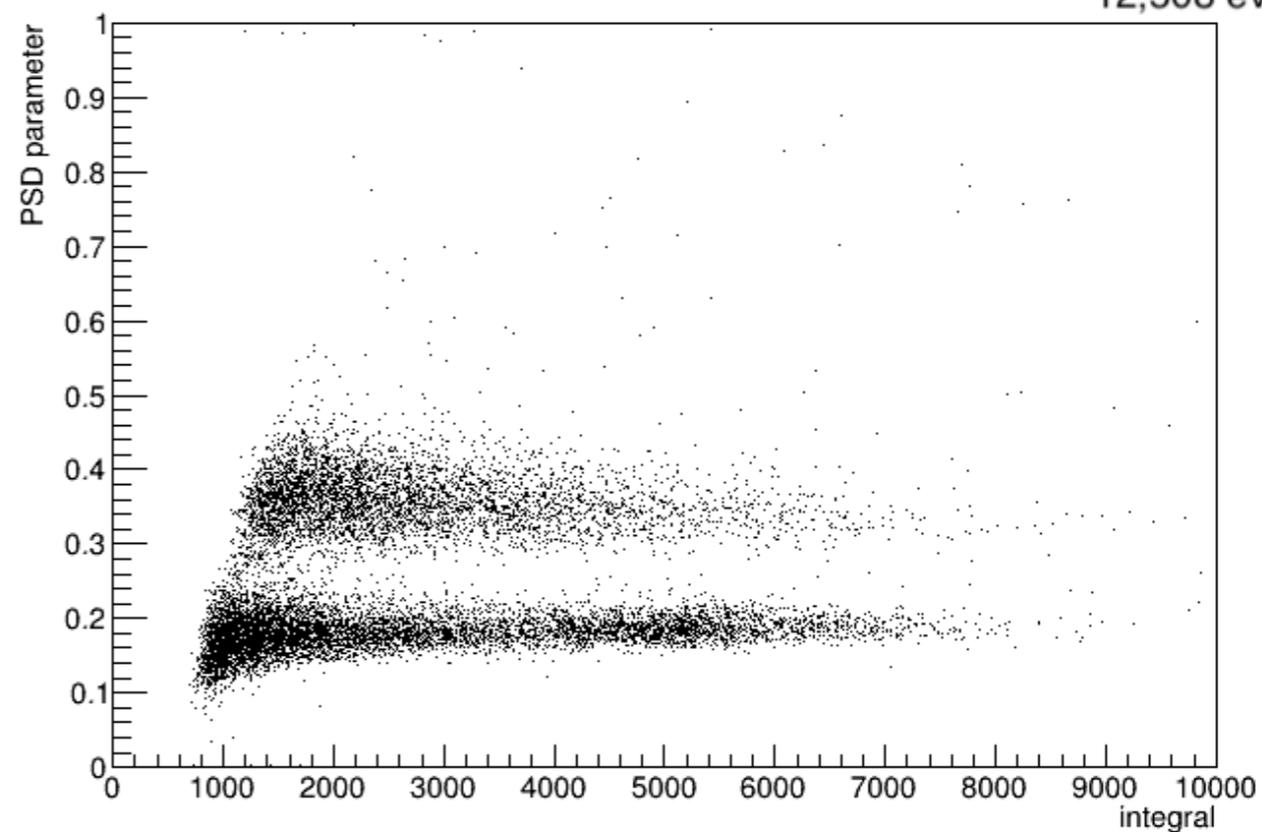
スーパーカミオカンデの時間分解能  $1.3 \mu\text{s}$

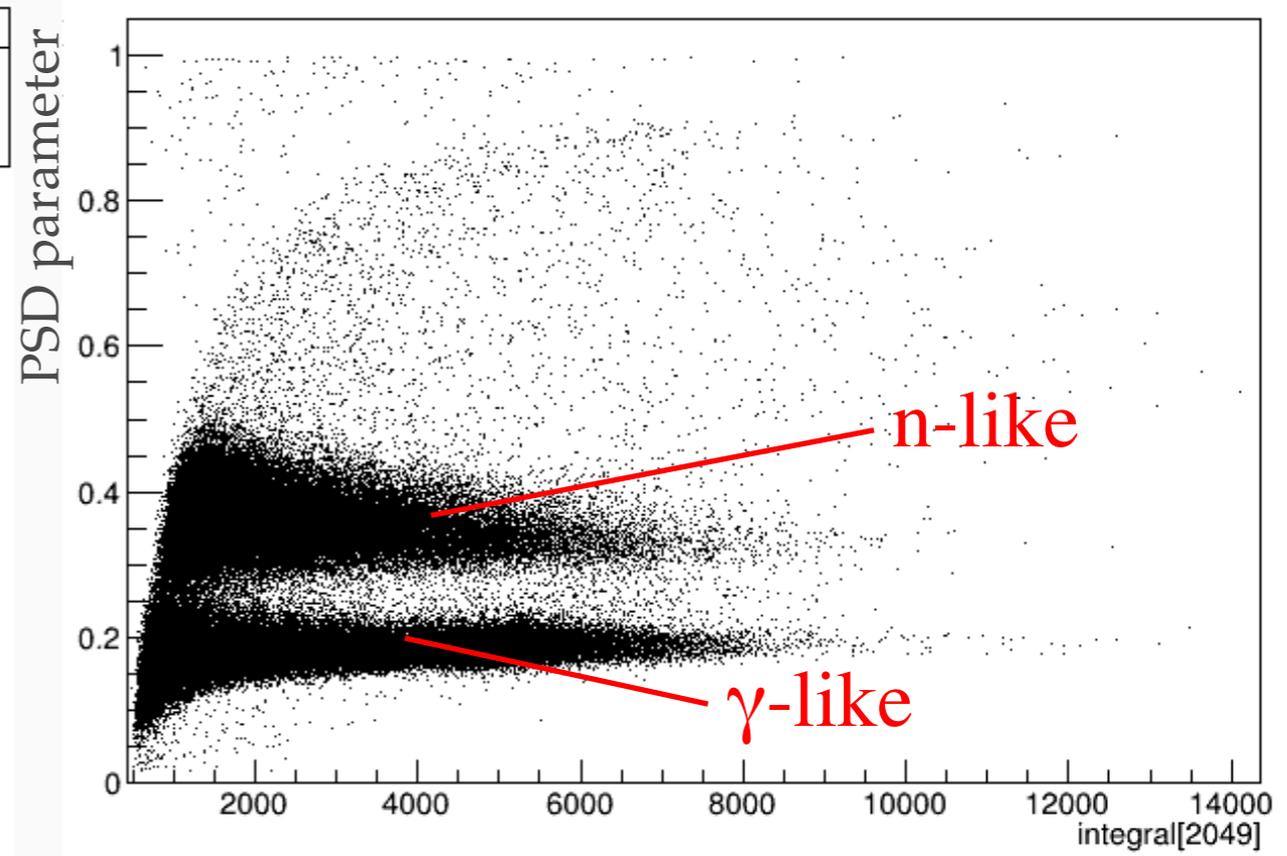
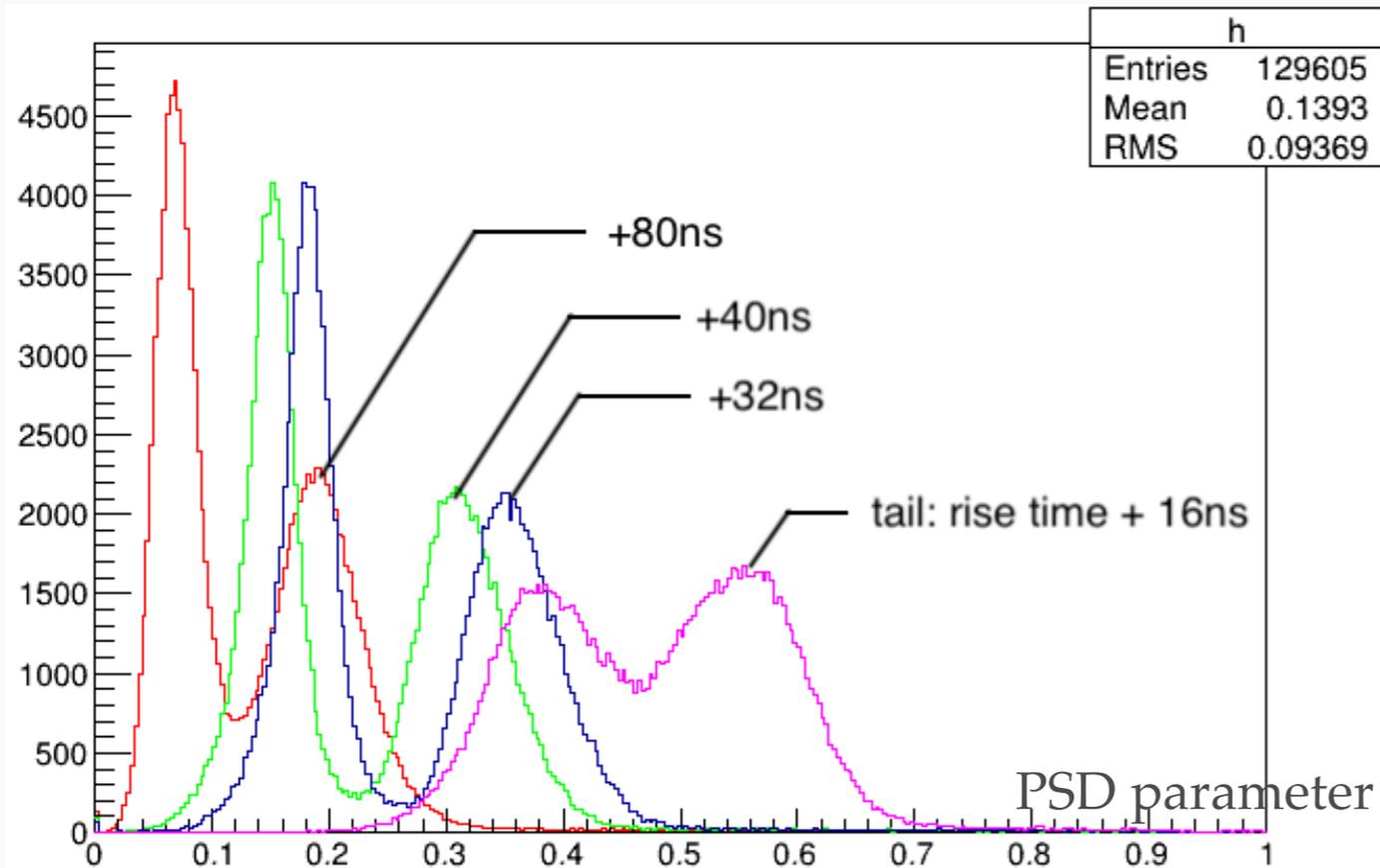
# LqSのPSD性能

PSD:integral (run#00351\_22Na) 27,653 events



PSD:integral (run#00353\_241AmBe) 12,508 events



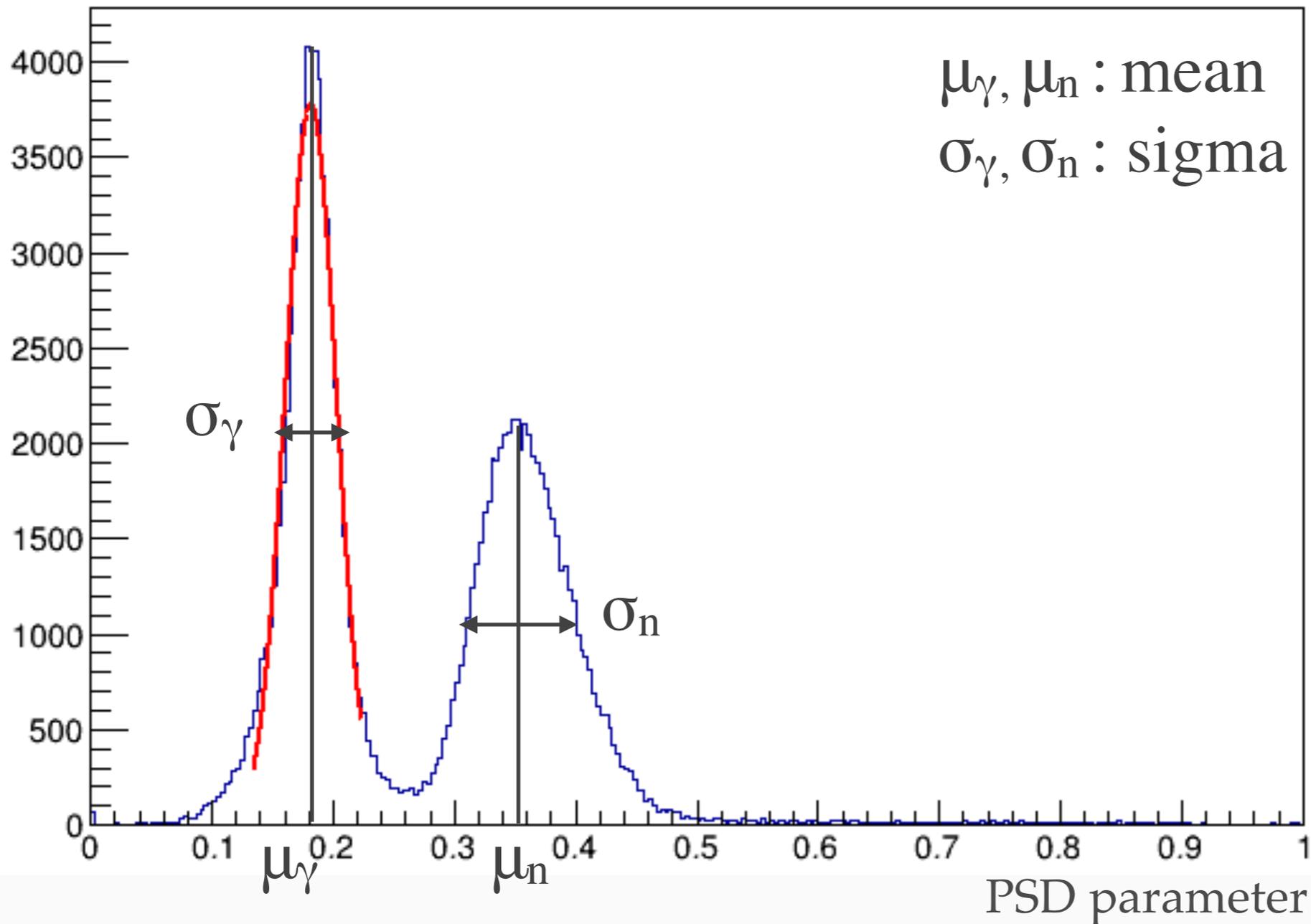


Some PSD parameter.

T1 value is changed.

PSD parameter as a function of  
integral value. (T1 = 32ns)

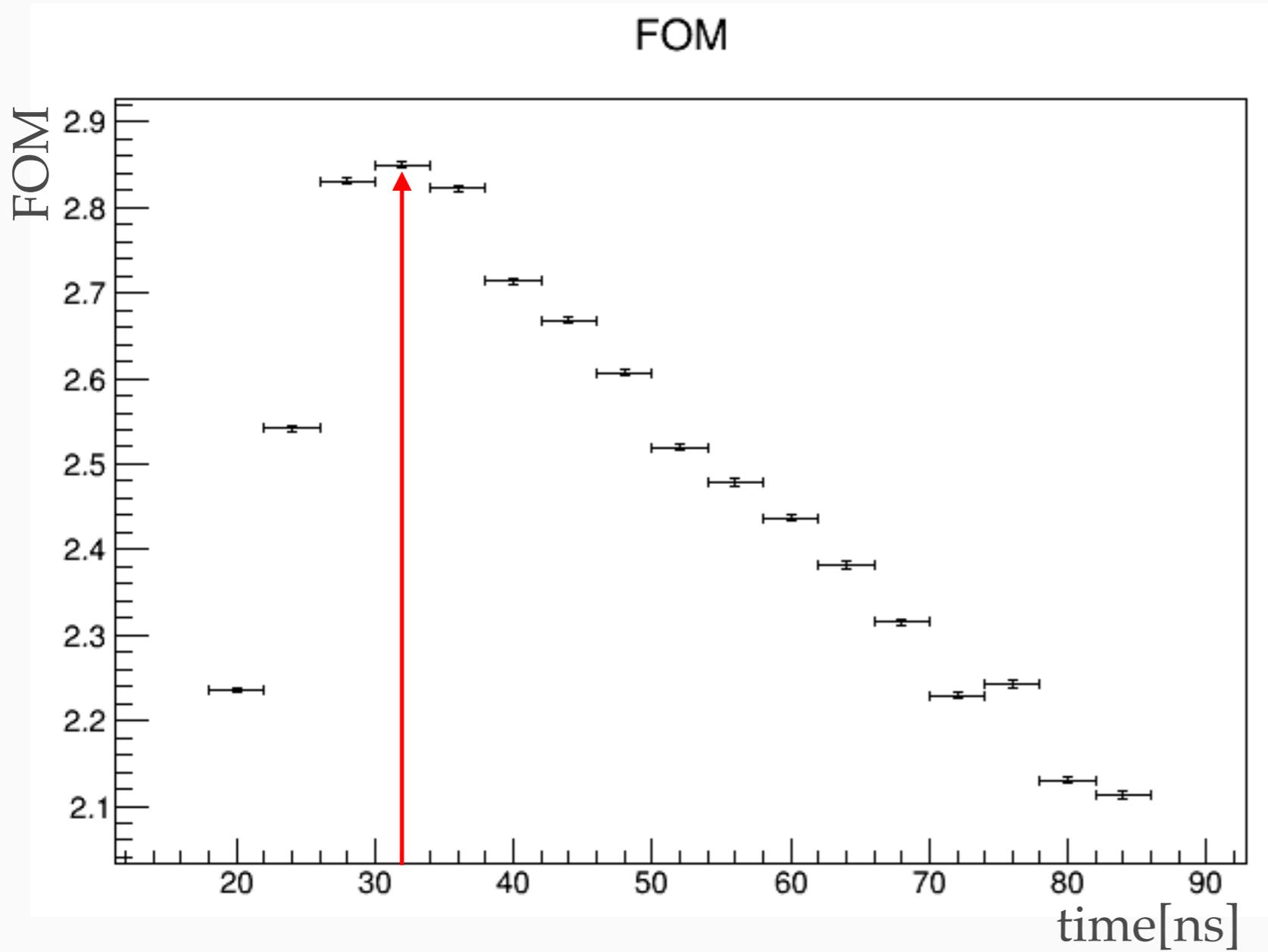
-> Optimize the T1 from histogram



Fit n-like event,  
 $\gamma$ -like event.

$$FOM = \frac{|\mu_\gamma - \mu_n|}{\sigma_\gamma + \sigma_n}$$

The bigger, the better

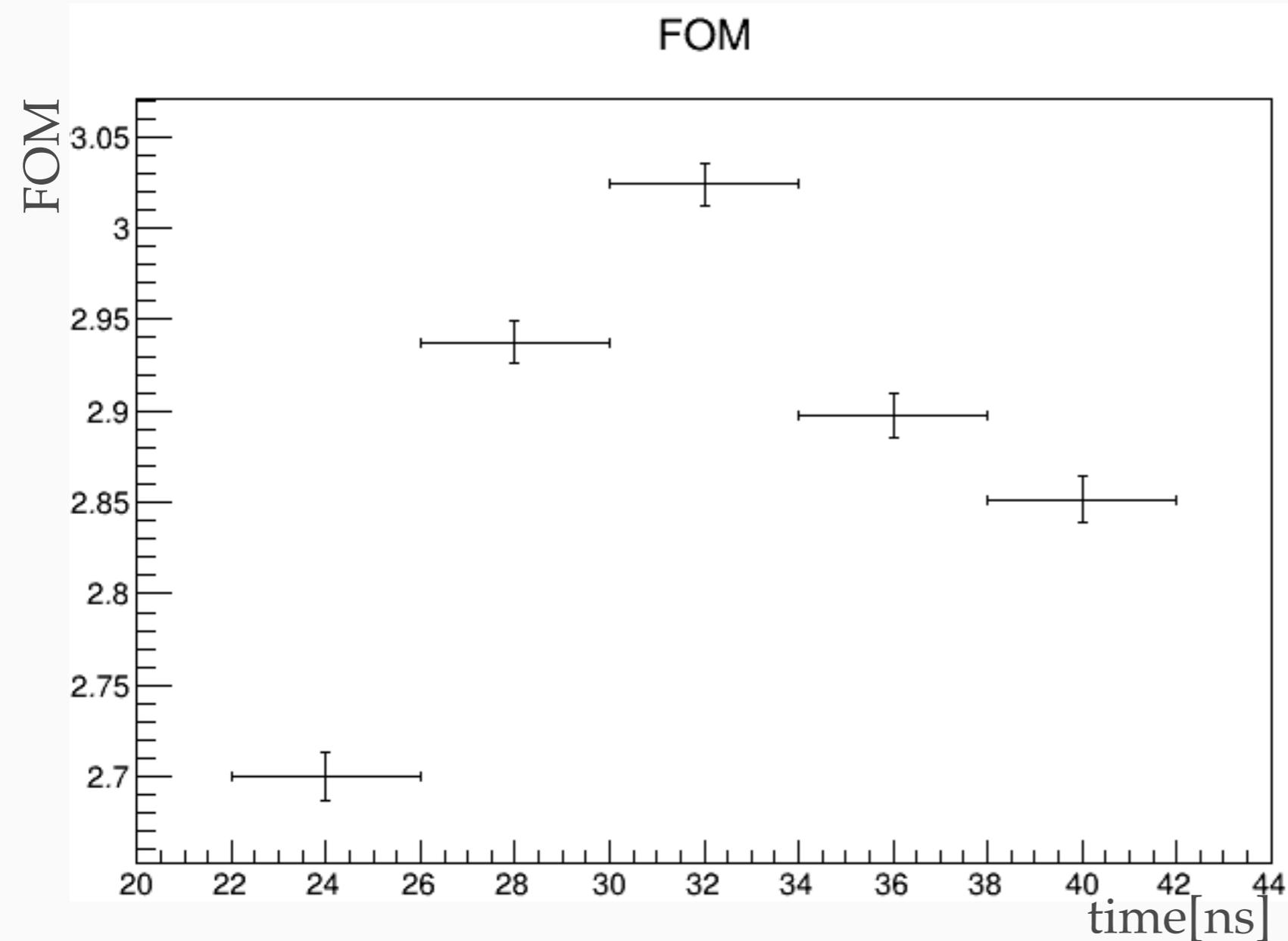


Error:

Only fitting error

From rise time(T0)

**32 ns is best point**



From rise time(T0)

Error:

Only fitting error

Check other run.

(Run# 00353 <sup>241</sup>AmBe)

**32 ns is best point**

-> I use this value  
in my analysis.

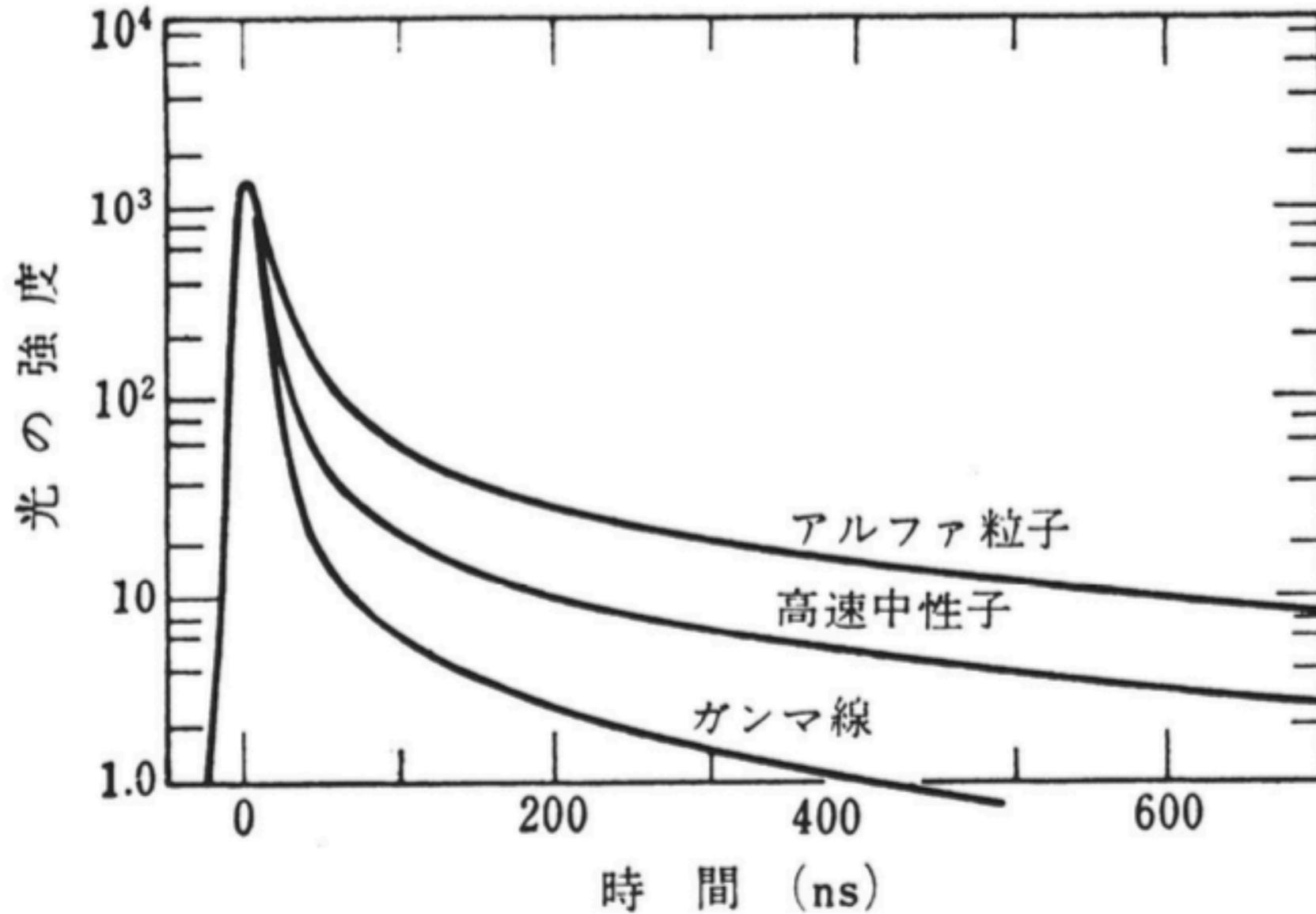
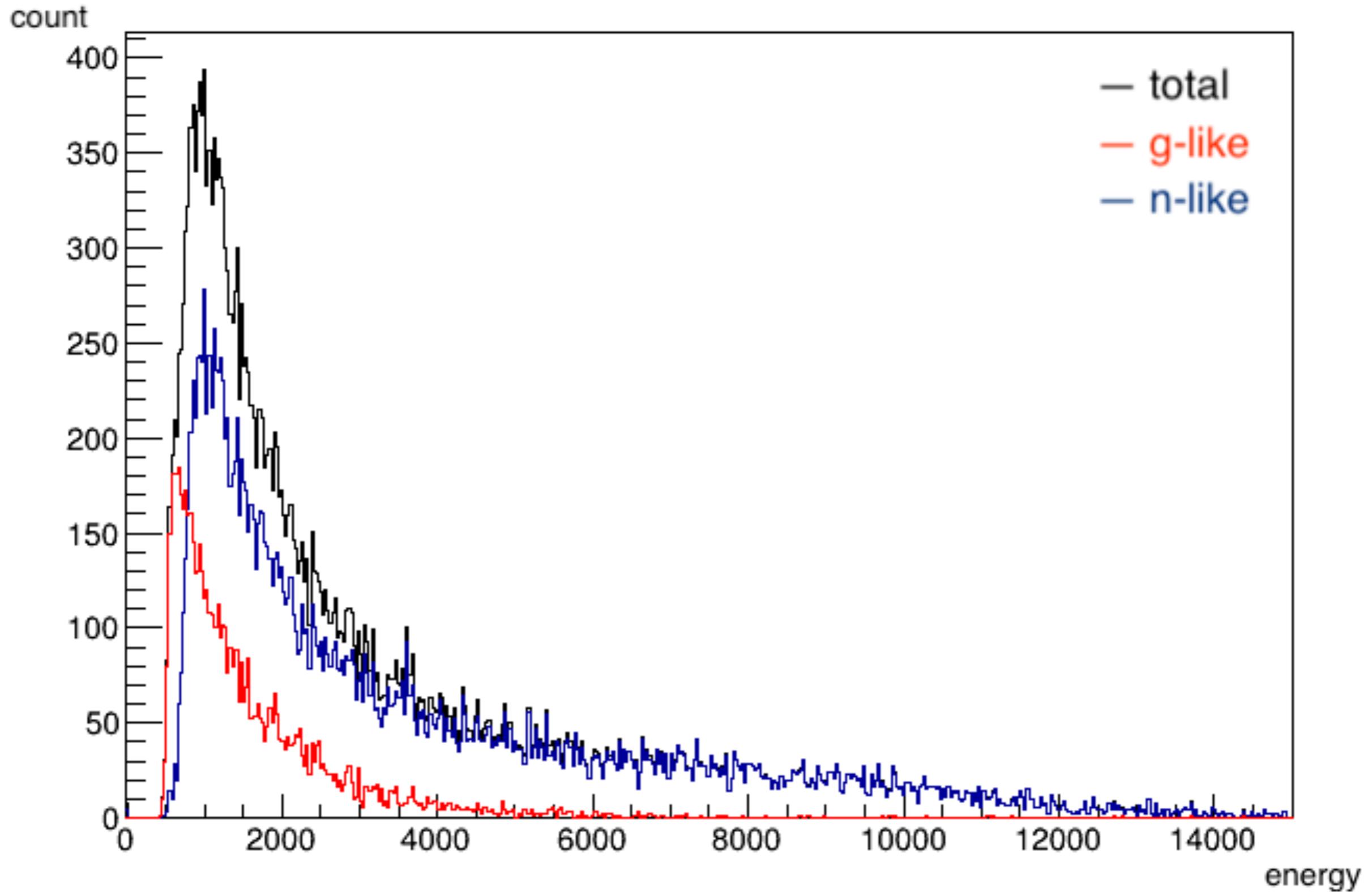


図 8.5

異種放射線で励起したスチルベン中のシンチレーションパルスの時間特性 (時間 0 で同じ強度に規格化)  
(Bollinger and Thomas<sup>60)</sup> による)

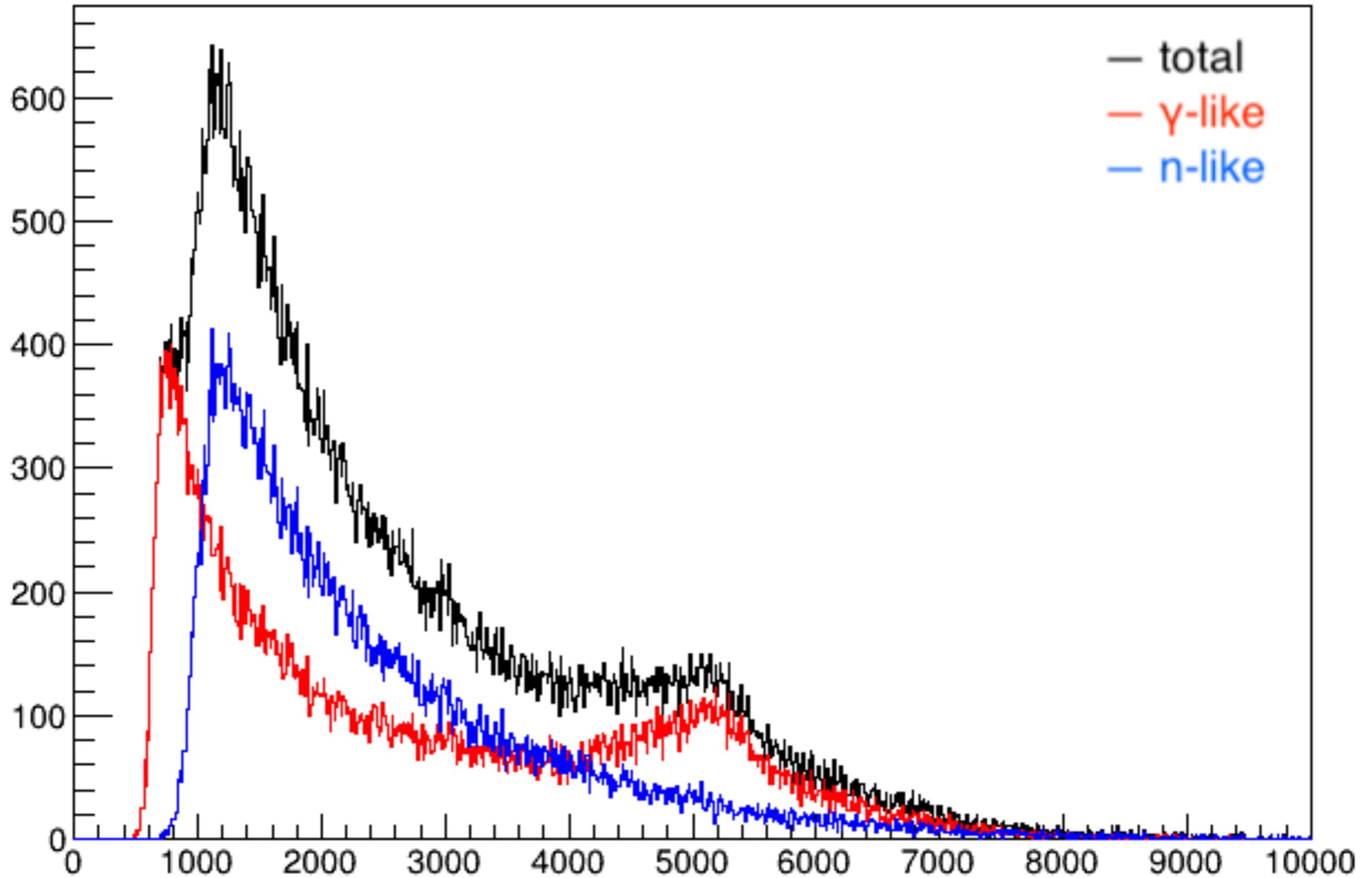
# Energy distribution

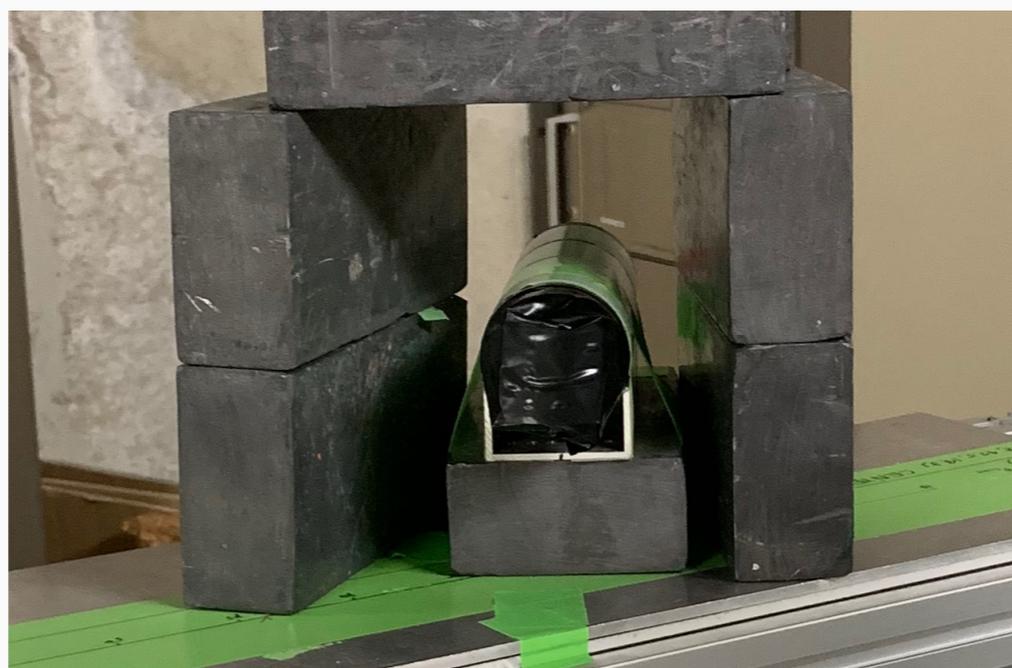
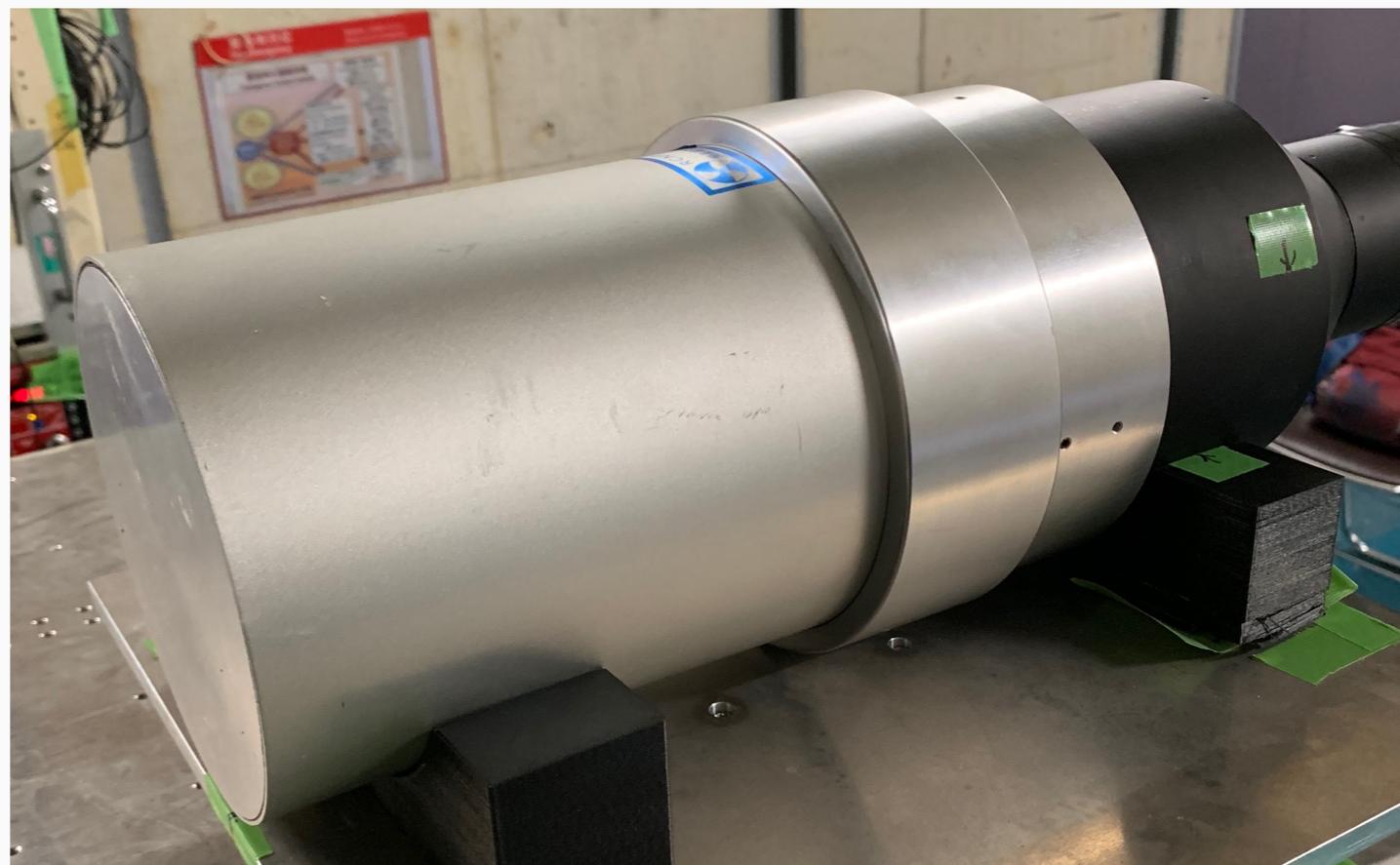
integral\_cp[lqs\_risetime+250]



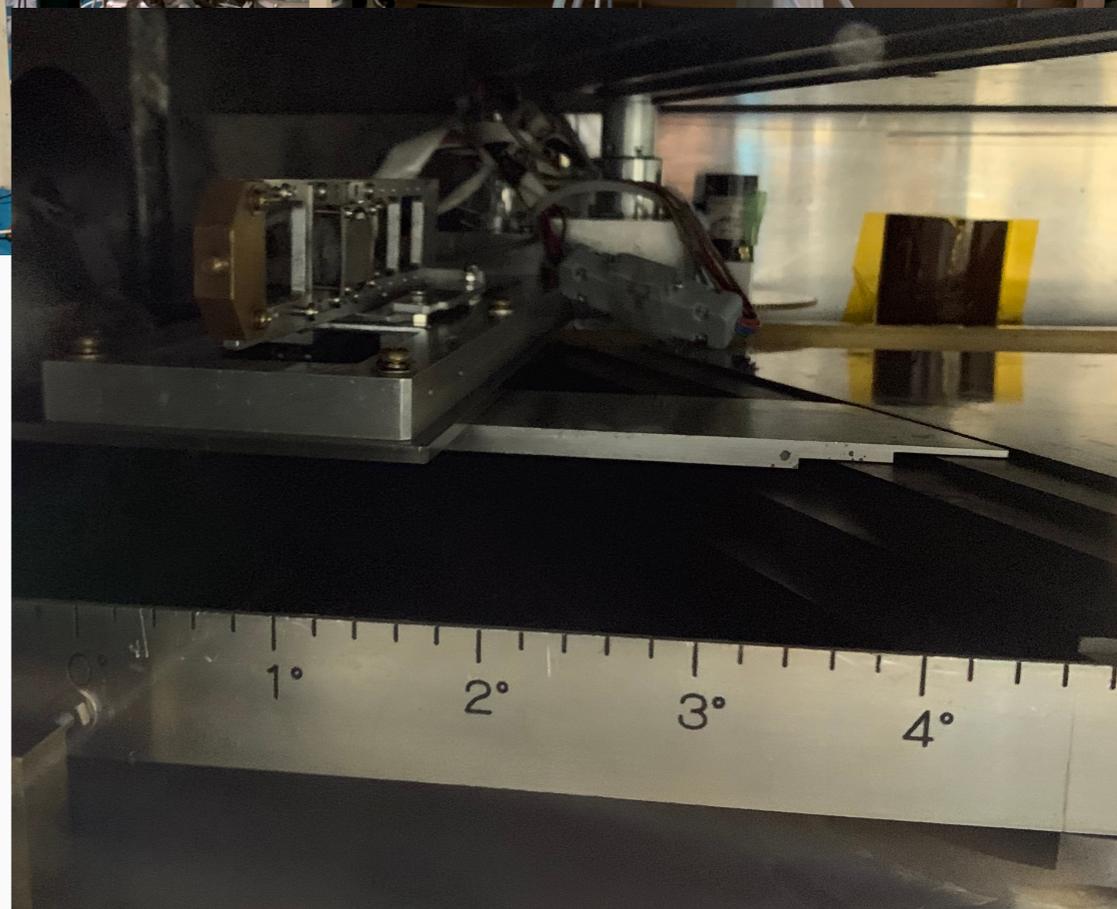
# Energy distribution ( $^{241}\text{Am}:\text{Be}$ )

47

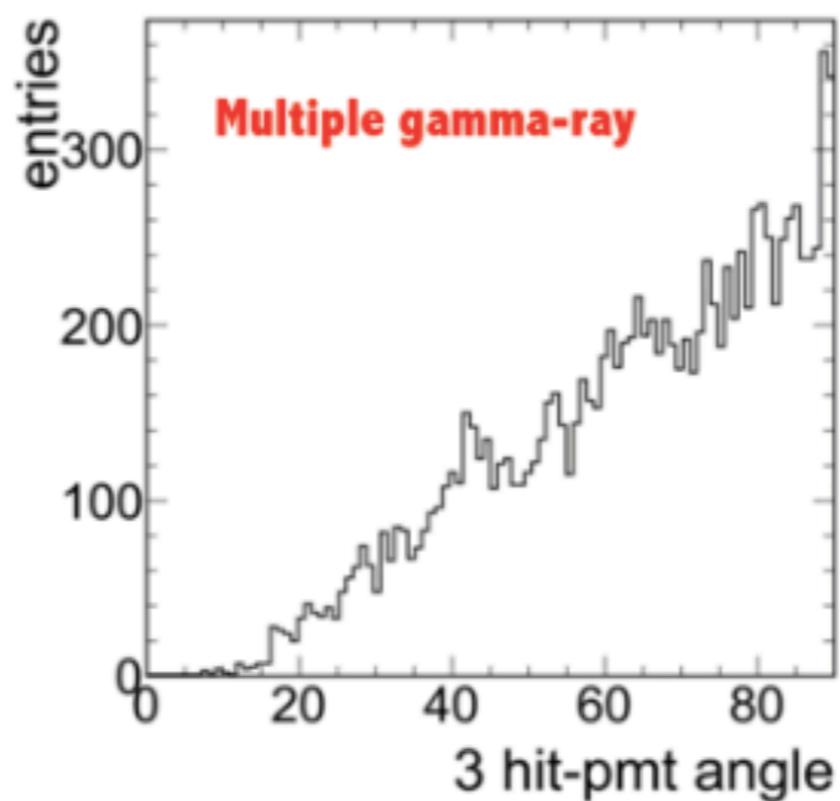
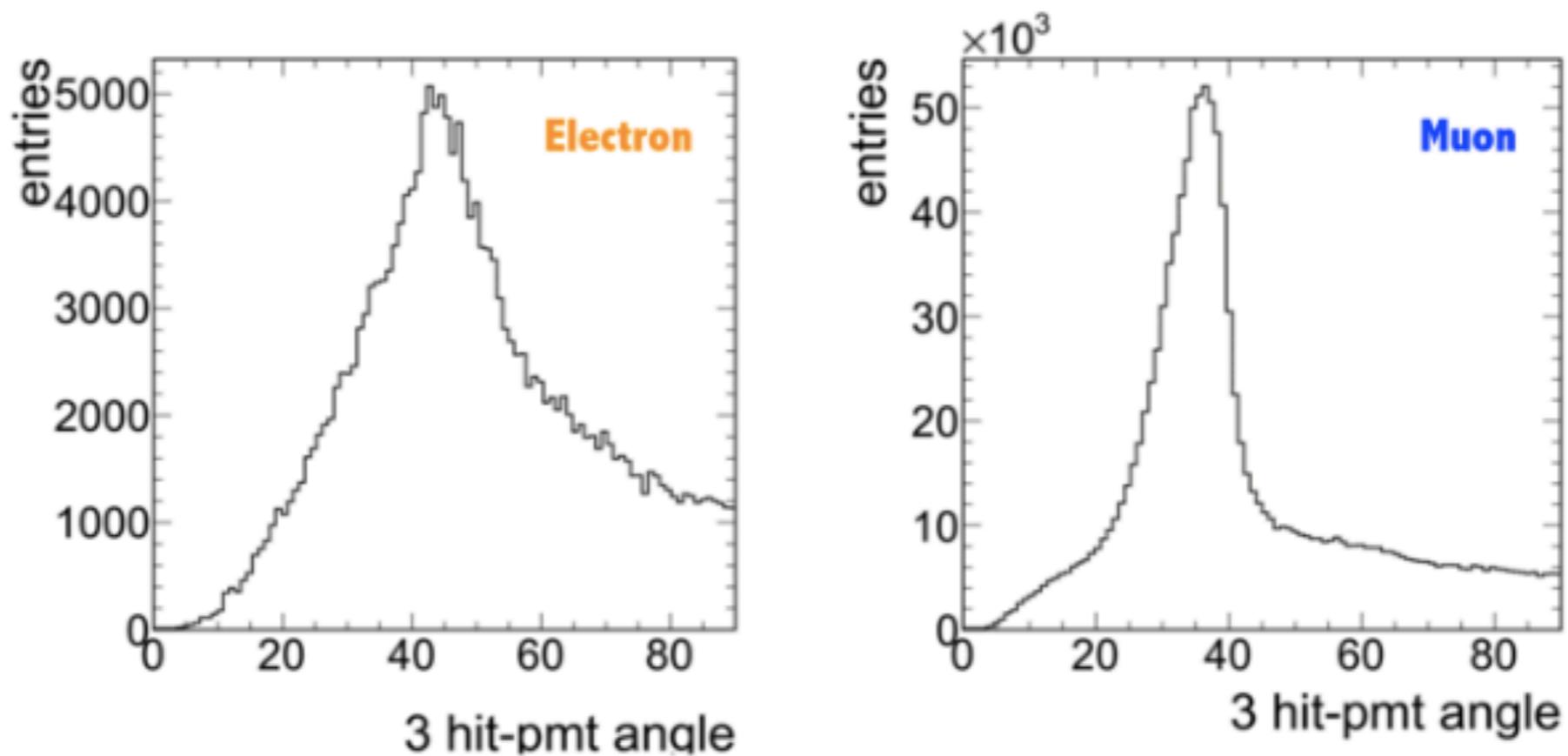




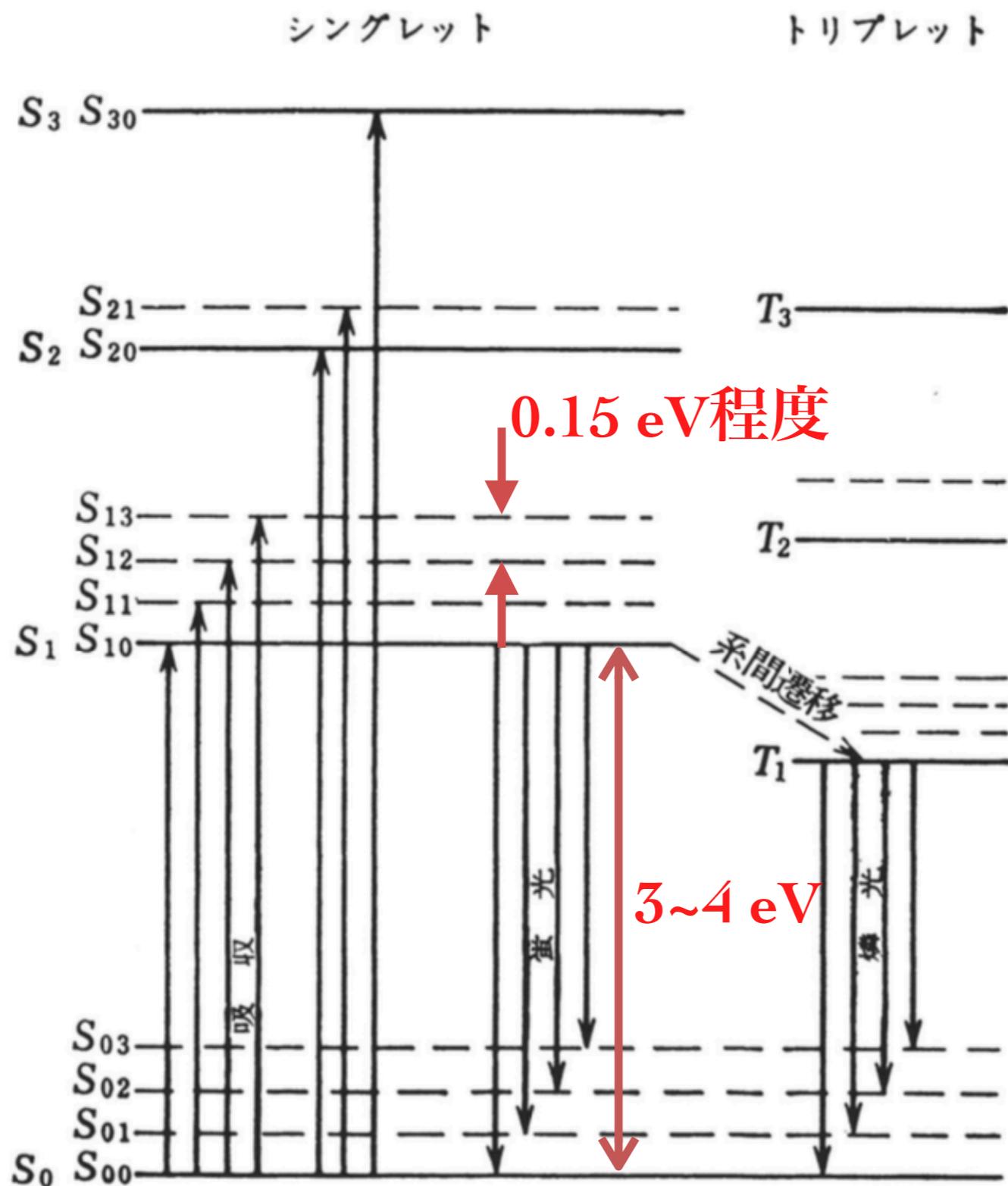




# チェレンコフ角再構成



# 有機シンチレータ 発光過程



放射線により  $S_1$  に励起  
大部分は  $S_1$  から  $S_0$  へ  
光子を放出(蛍光)

系間遷移を経て  $T_1$  へ移ることも  
 $T_1$  から  $S_0$  でも光子を放出(燐光)

熱的励起により  $T_1$  から  $S_1$  へ戻り  $S_0$   
へ落ちることもある(遅発蛍光)

図:  $\pi$ 電子構造を持つ有機分子のエネルギー準位



生成される ${}^7\text{Be}$ の基底状態は半減期53.3dの不安定な核

電子捕獲による崩壊

その10.3%が ${}^7\text{Li}$ の励起エネルギー0.478MeVの第一励起状態に遷移

この励起状態が ${}^7\text{Li}$ の基底状態に遷る際に0.478MeVのガンマ線を放出

(a) 6.13 MeV from  $^{16}\text{O}(3^-)$ :

$^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}^*$ , then  $^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{16}\text{O} + \text{gamma}$

(b) 5.27 MeV from  $^{15}\text{N}(5/2^+)$ : (\*)

$^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}^*$ , then  $^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{15}\text{N}^* + \text{p}$ , then  $^{15}\text{N}^* \rightarrow ^{15}\text{N} + \text{gamma}$  (p-emission)

(c) 6.32 MeV from  $^{15}\text{N}(3/2^-)$ : (\*)

$^{16}\text{O}(n,np)^{15}\text{N}^*$ , then  $^{15}\text{N}^* \rightarrow ^{15}\text{N} + \text{gamma}$

(d) 4.44 MeV from  $^{12}\text{C}(2^+)$ :

$^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}^*$ , then  $^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{12}\text{C}^* + \text{alpha}$ , then  $^{12}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{C} + \text{gamma}$  (alpha-emission)

(e) 3.84 MeV from  $^{17}\text{O}(5/2^-)$ :

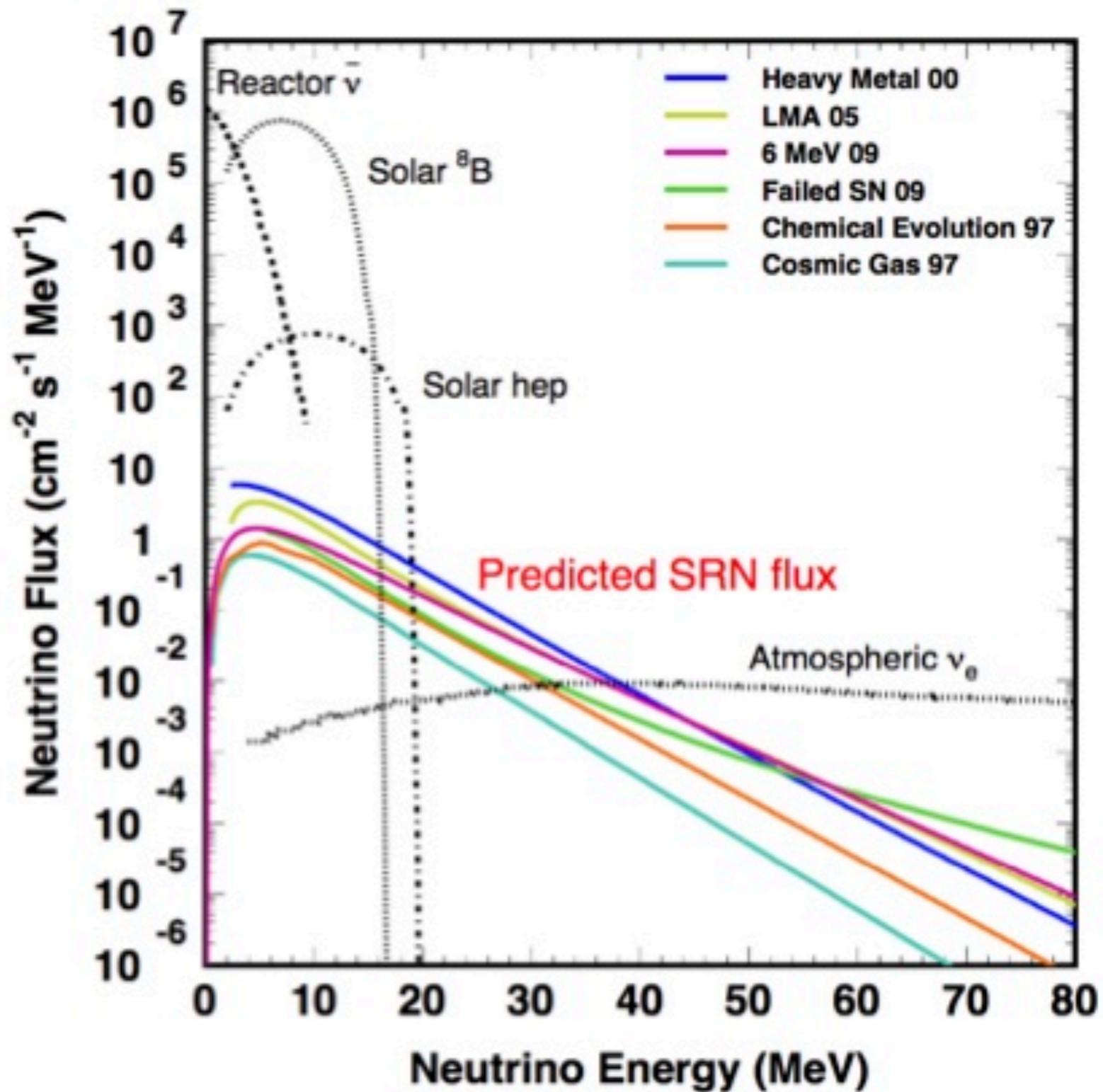
$^{17}\text{O}$  creation (neutron capture by  $^{16}\text{O}$  or inelastic scattering with  $^{17}\text{O}$ ?),

then  $^{17}\text{O}^* \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{gamma}$

(f) 3.68 MeV from  $^{13}\text{C}(5/2^+)$ :

$^{16}\text{O}(n,\text{alpha})^{13}\text{C}^*$ , then  $^{13}\text{C}^* \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{gamma}$

# SRN flux



# Raw data

