

2019/03/23

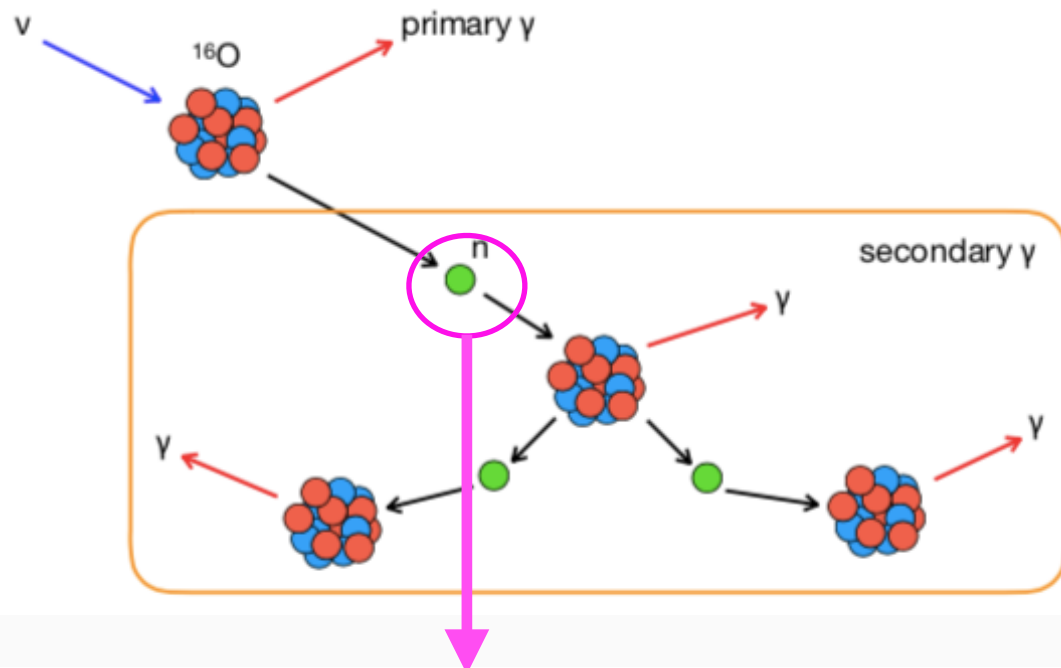
中性カレント弾性散乱反応理解のための 中性子・酸素原子核反応の測定

岡大理, 京大理^A, Padova University^B, Toronto University^C, TRIUMF^D,
Stanford University^E, RCNPF^F

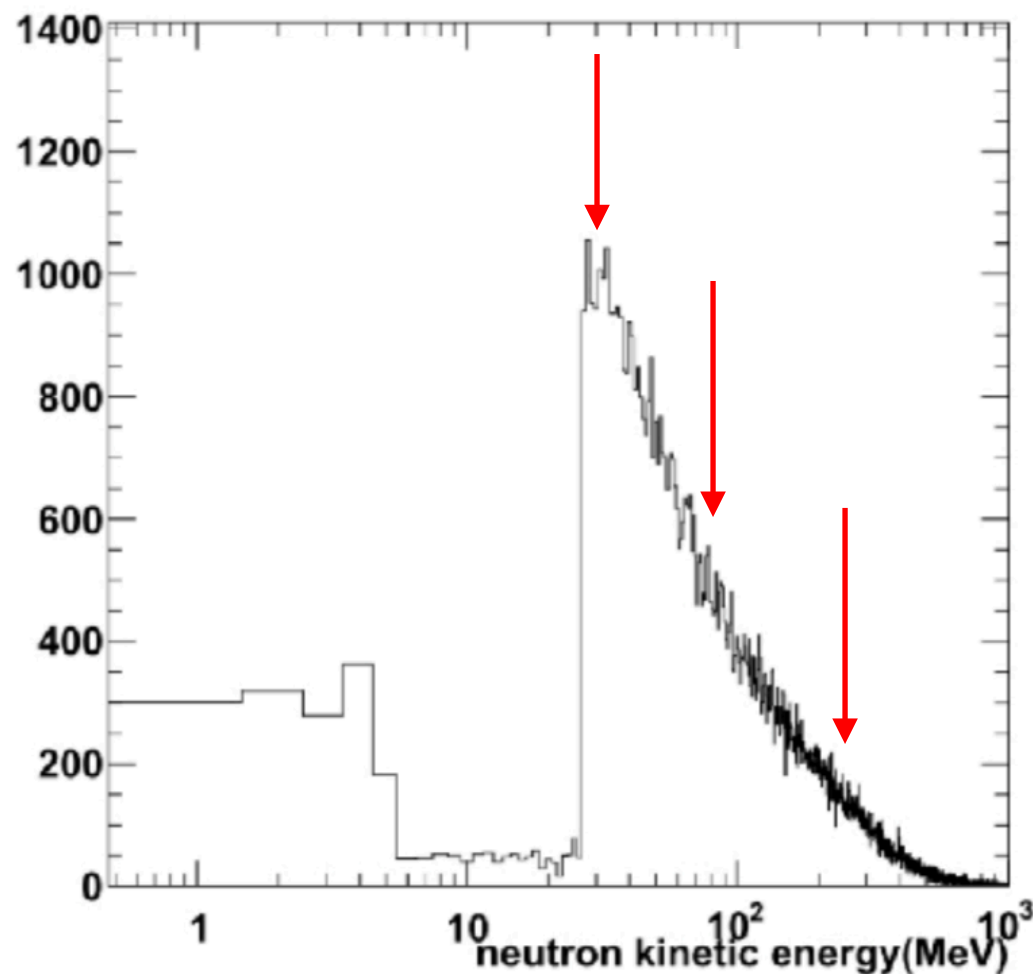
蓬菜 明日, 小汐 由介, 芦田 洋輔^A, 中家 剛^A, WENDELL Roger^A, 森 正光^A,
COLLAZUOL Gianmaria^B, IACOB Fabio^B, NANTAIS Corina^C,
KONAKA Akira^D, TANAKA Hiro^E, 嶋 達志^F

モチベーション

2

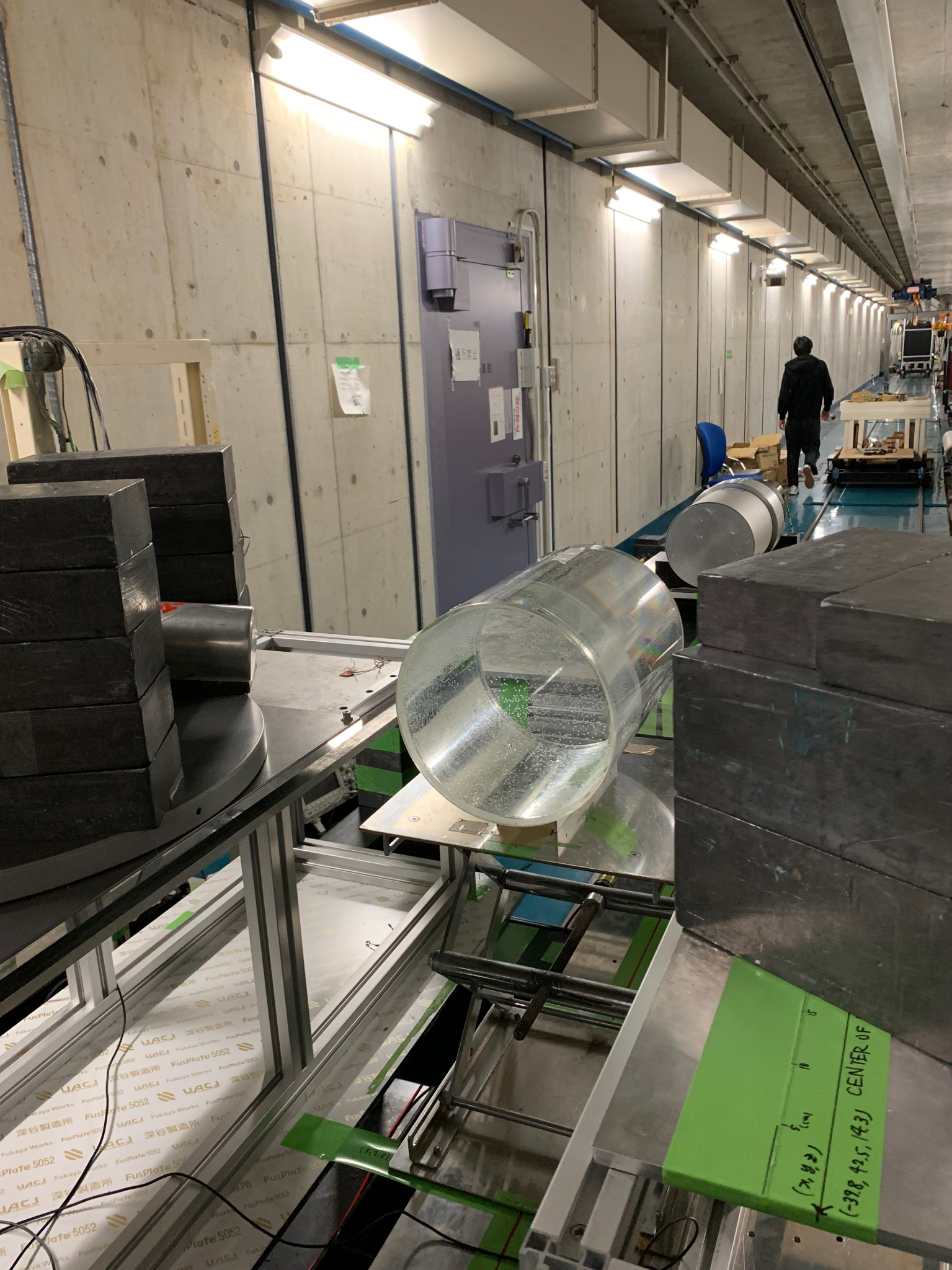


二次ガンマ線の不定性を小さくするため
中性子・酸素原子核反応によるガンマ線
測定を行う



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)

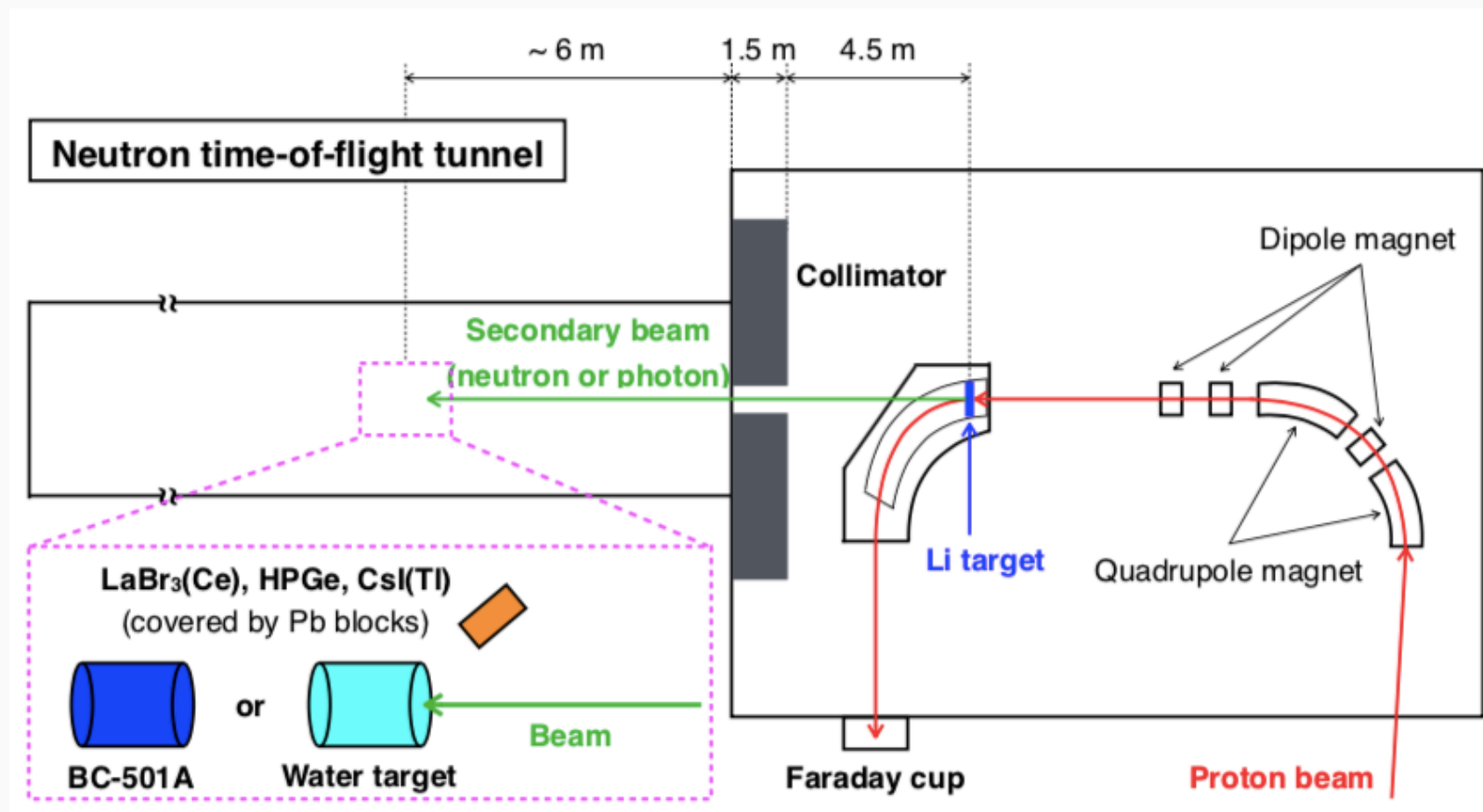


中性子ビーム実験

中性子ビーム実験

4

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

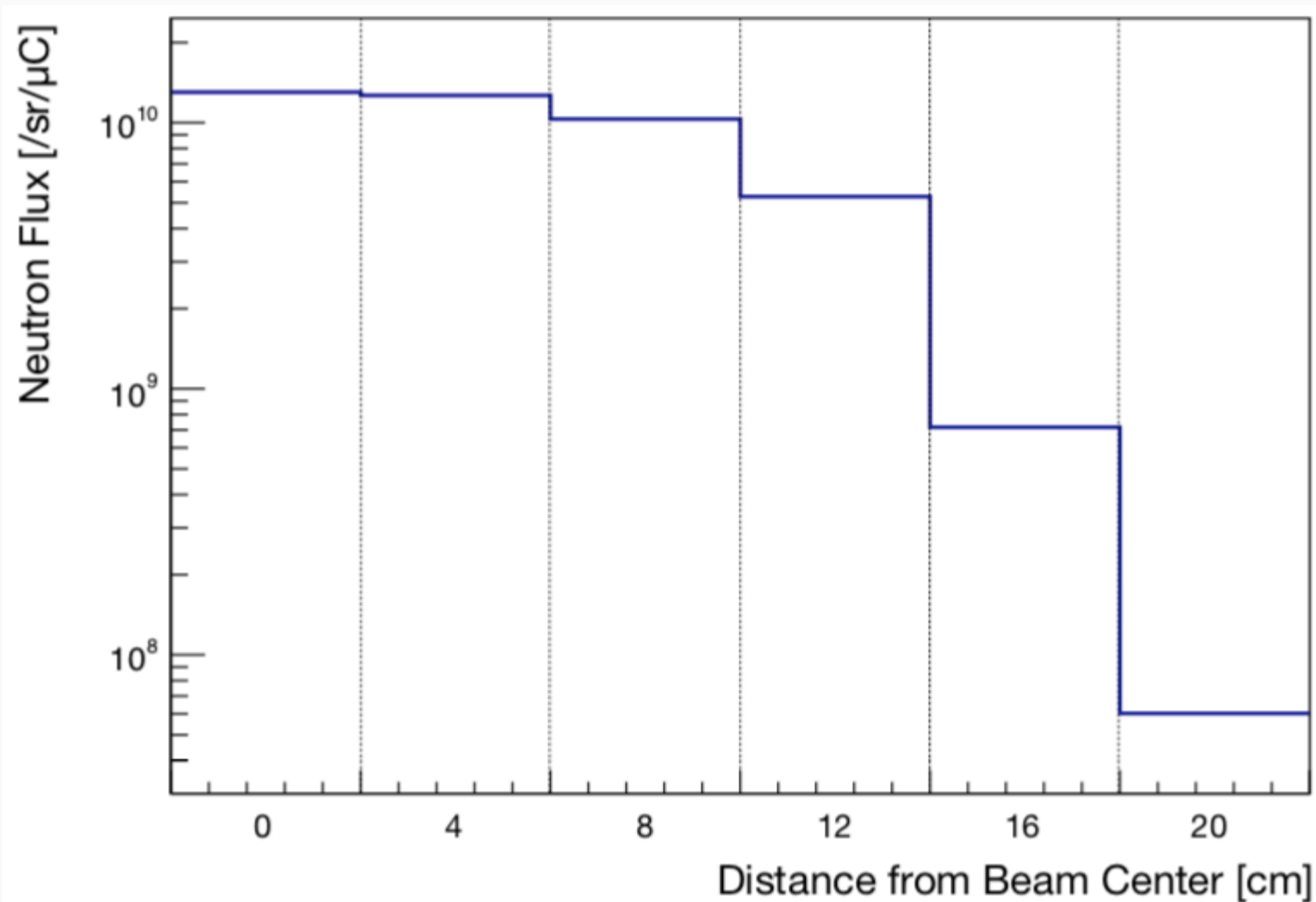
本公演では特に80 MeV実験について発表する

中性子ビーム実験

5

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

中性子 : 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

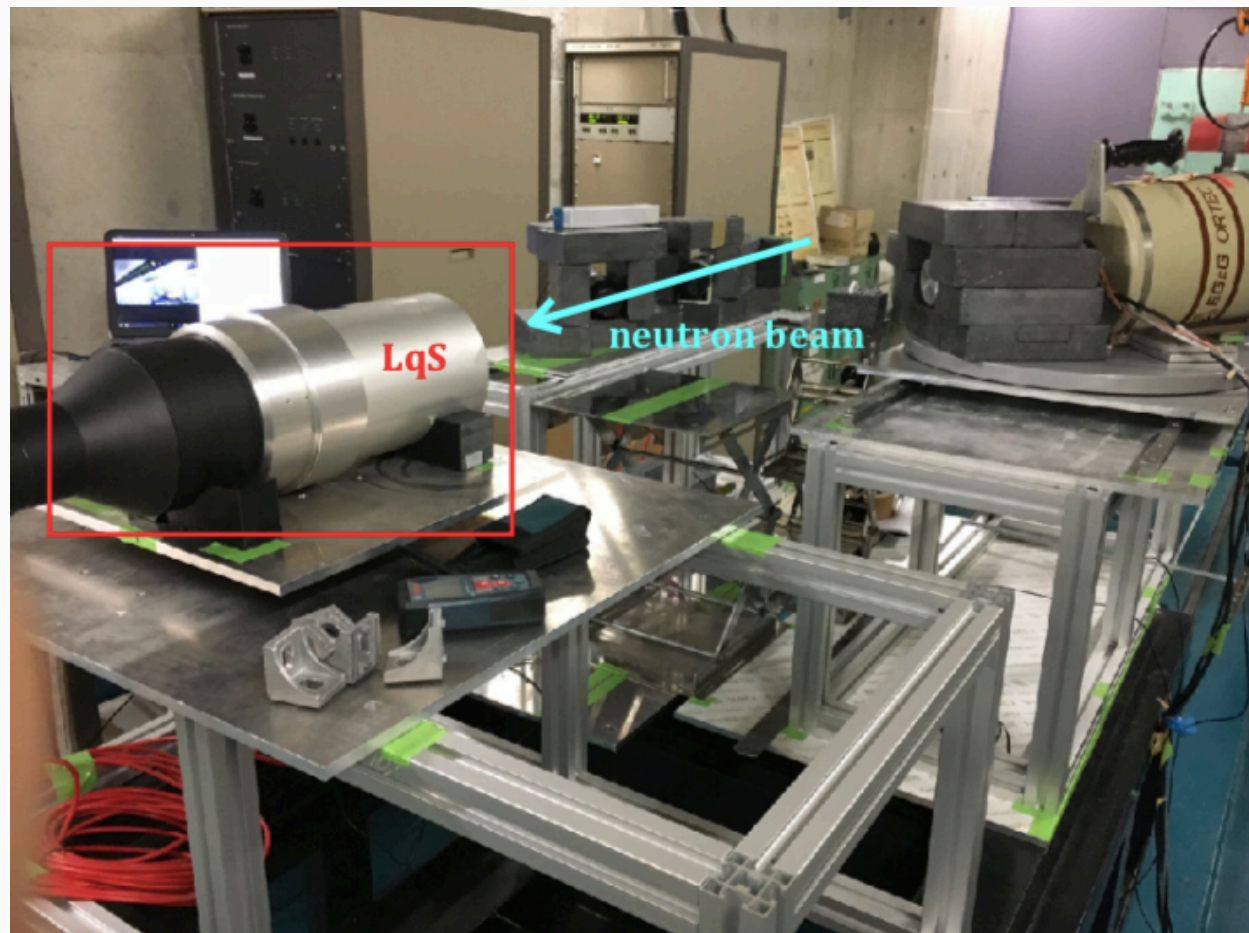
中性子ビーム実験

6

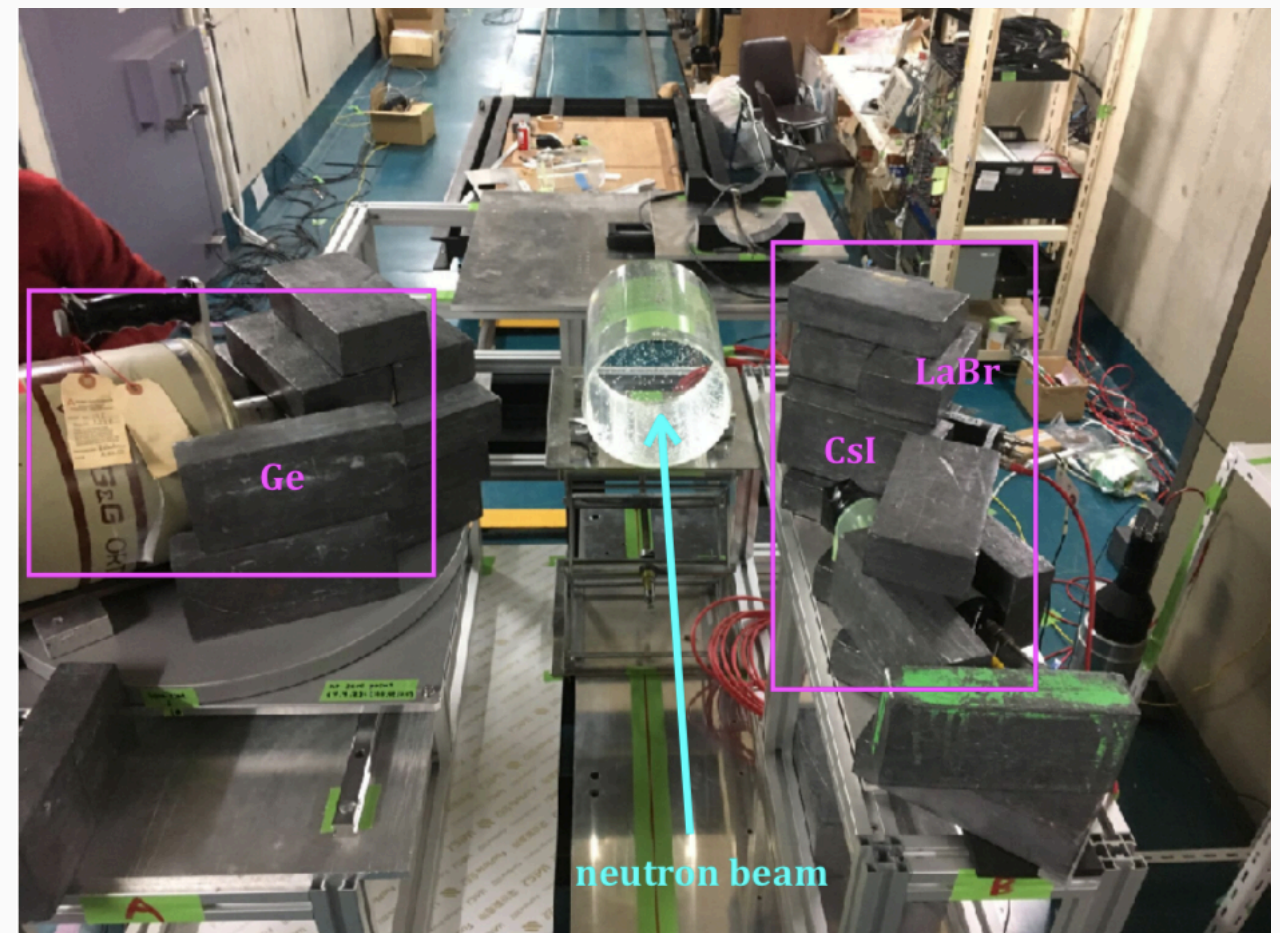
実際のセットアップ

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

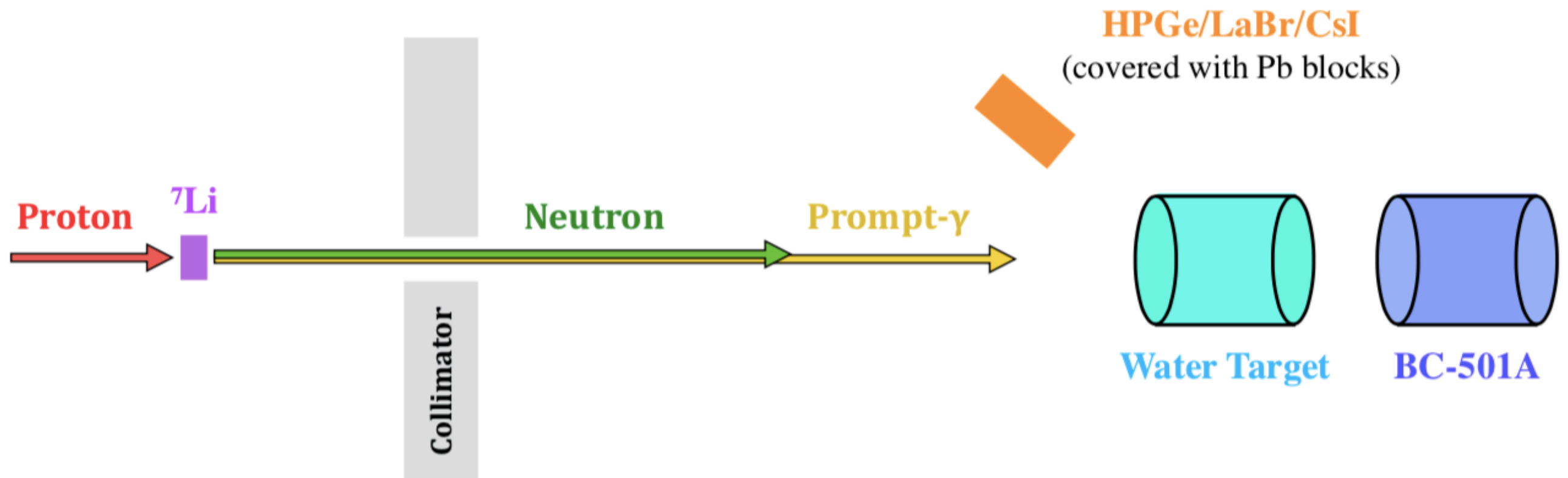


80MeV実験(中性子ビームについて)

7

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



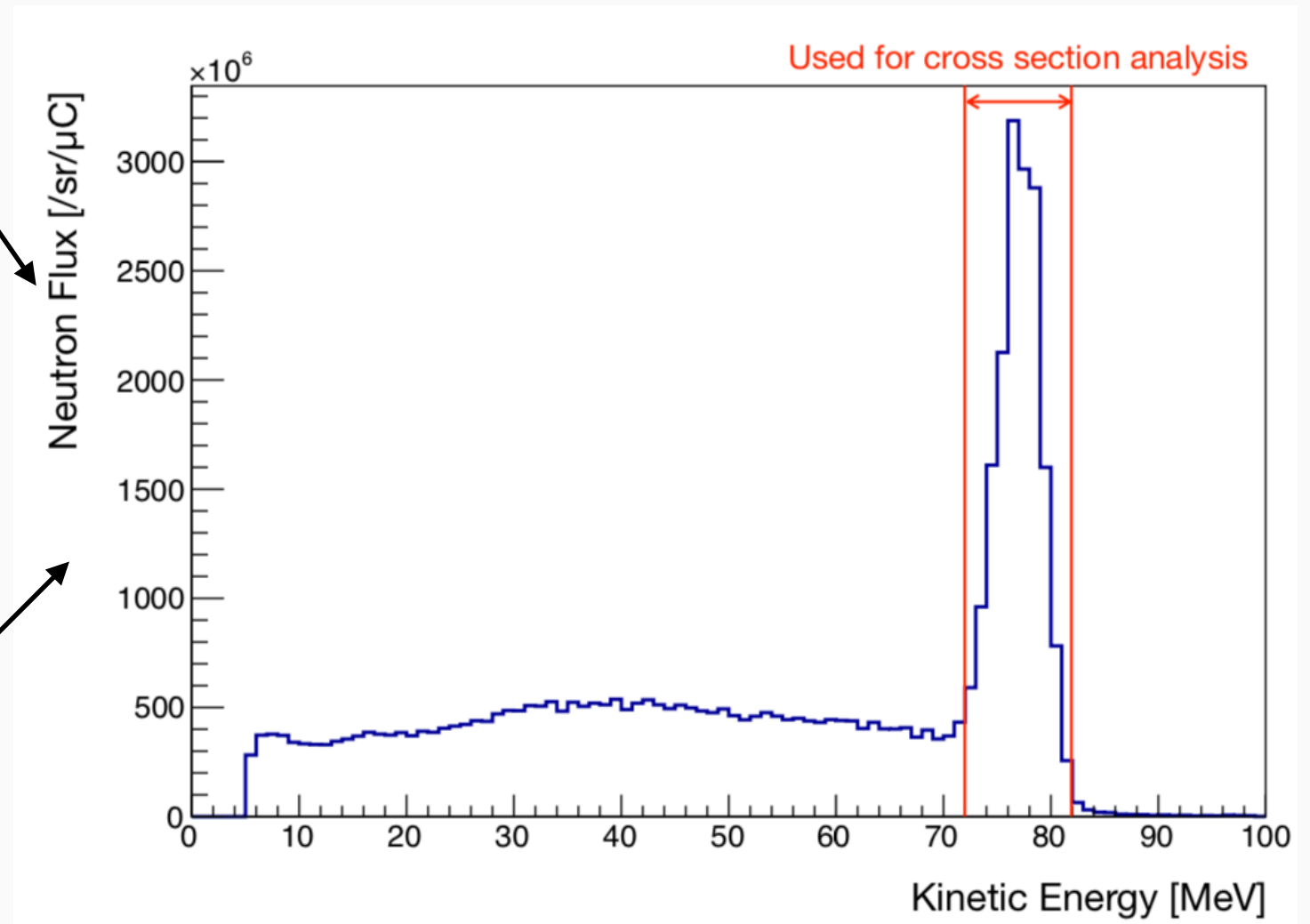
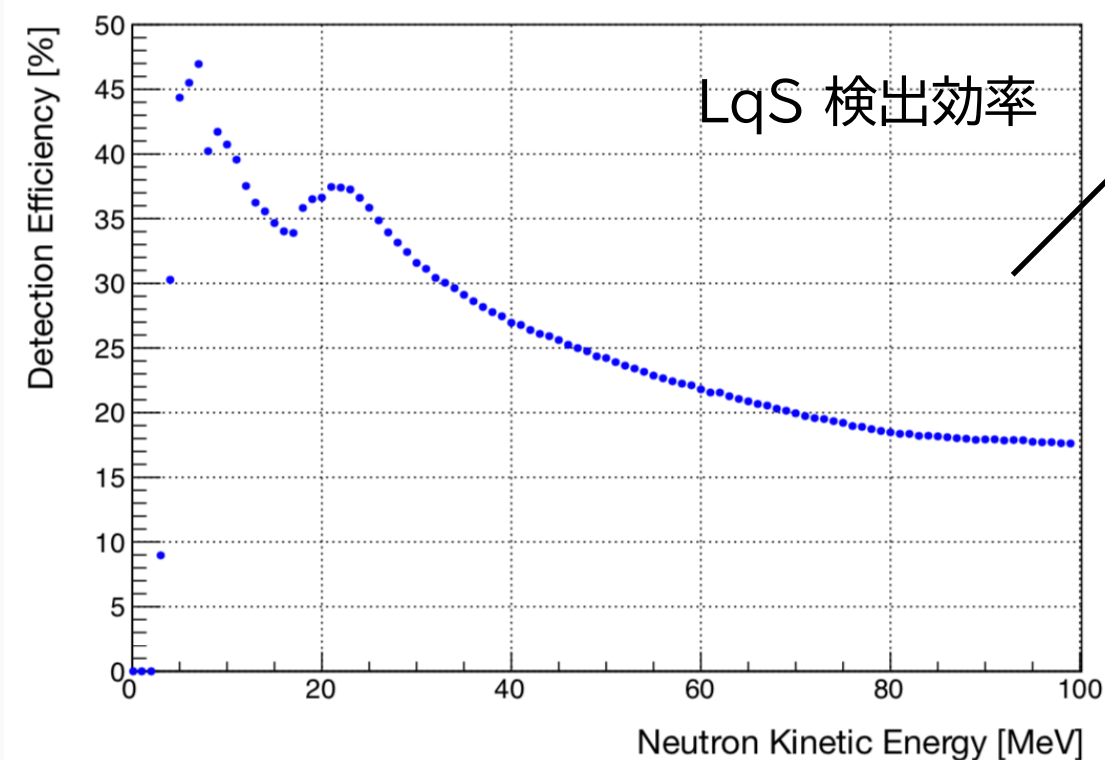
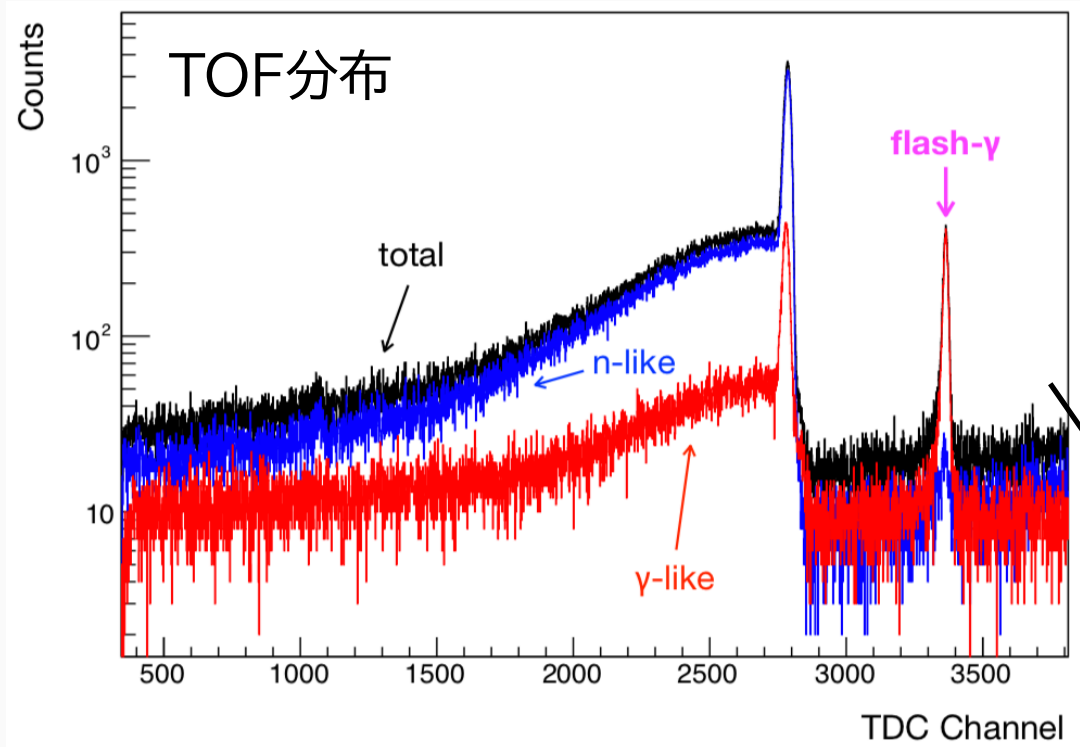
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応ではガンマ線と中性子を放出する

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)

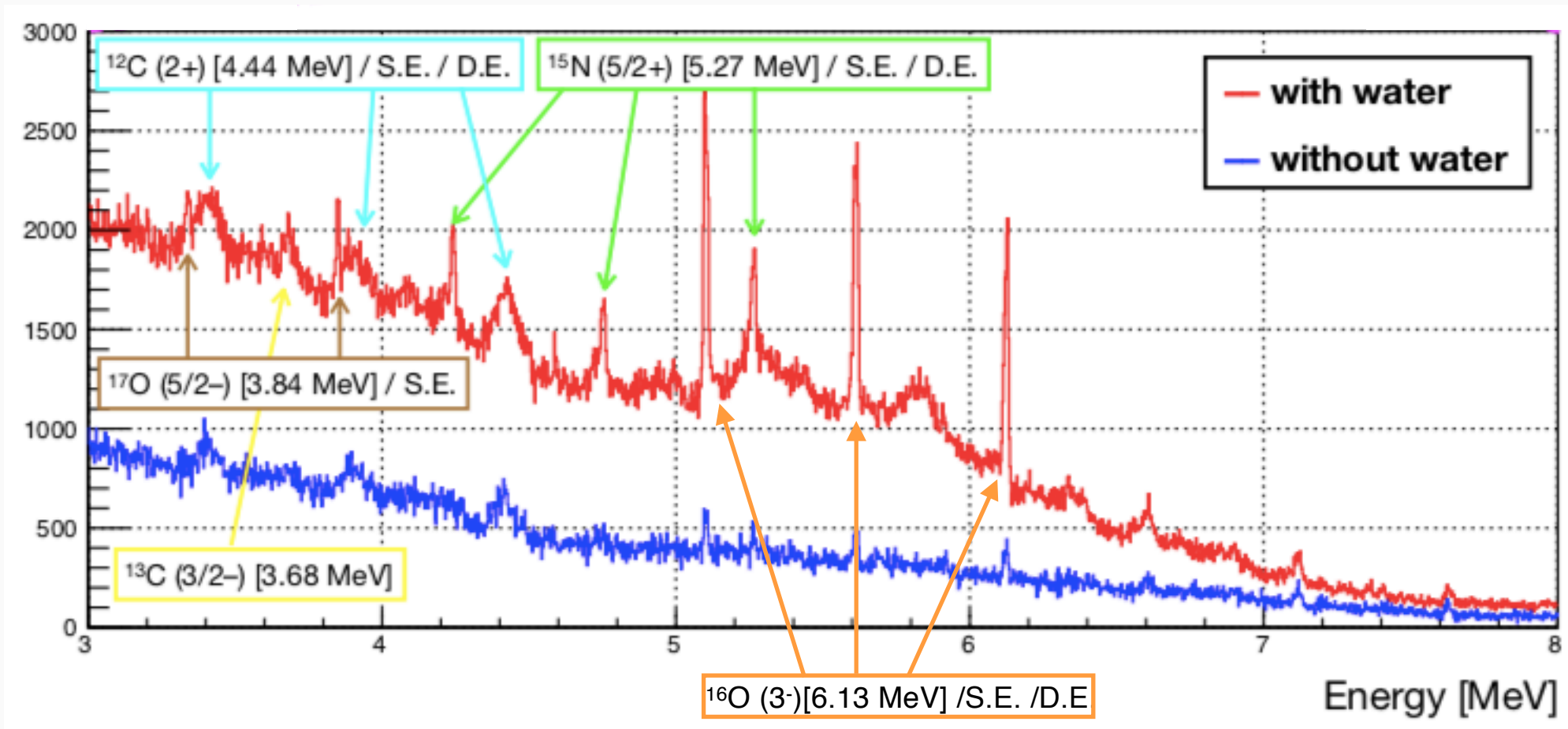
8



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)

9



80 MeV陽子ビーム実験
HPGeでのエネルギー分布図

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

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

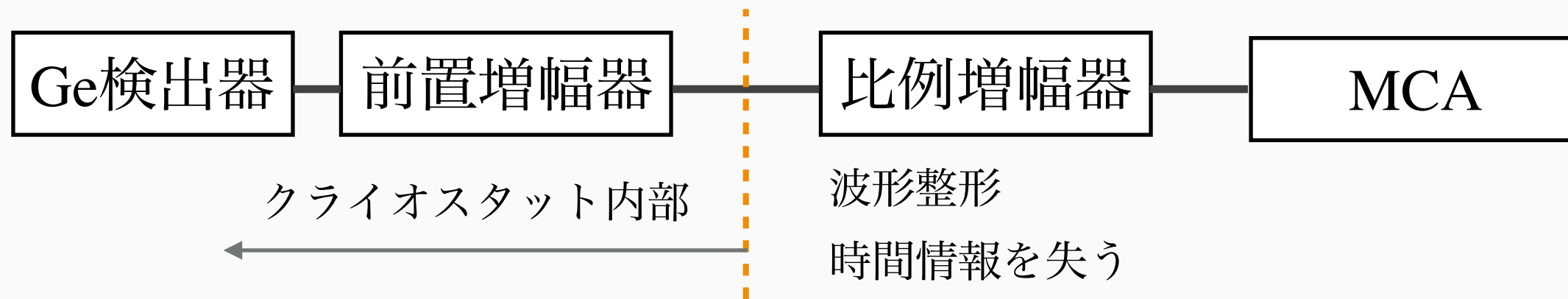
$4.44 \text{ MeV} \mid ^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^* \text{ then } ^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{12}\text{C}^* + \alpha, \text{ or } ^{16}\text{O}(n, n\alpha)^{12}\text{C}^*$

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

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

80MeV実験

10

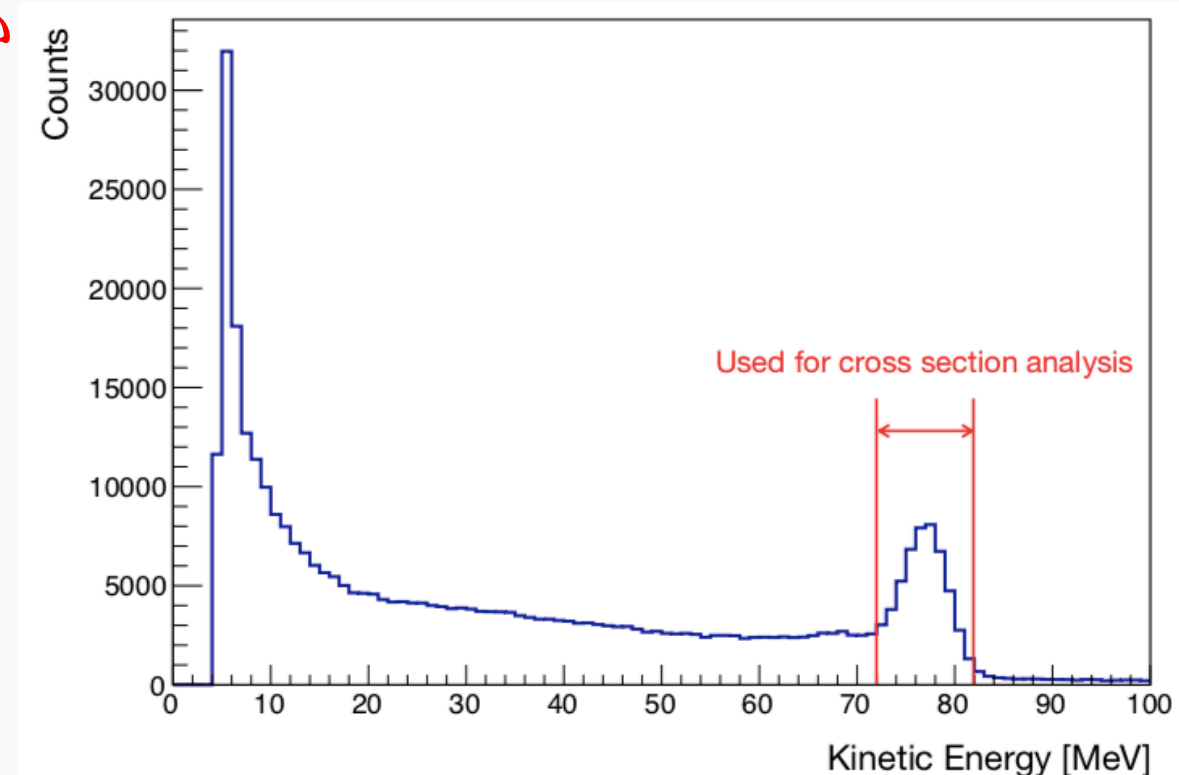


ゲルマニウム検出器の信号は比例増幅器を通した段階で時間情報を失う
TOF分布による中性子イベントの選別ができない

80 MeV実験では時間情報を失っていない

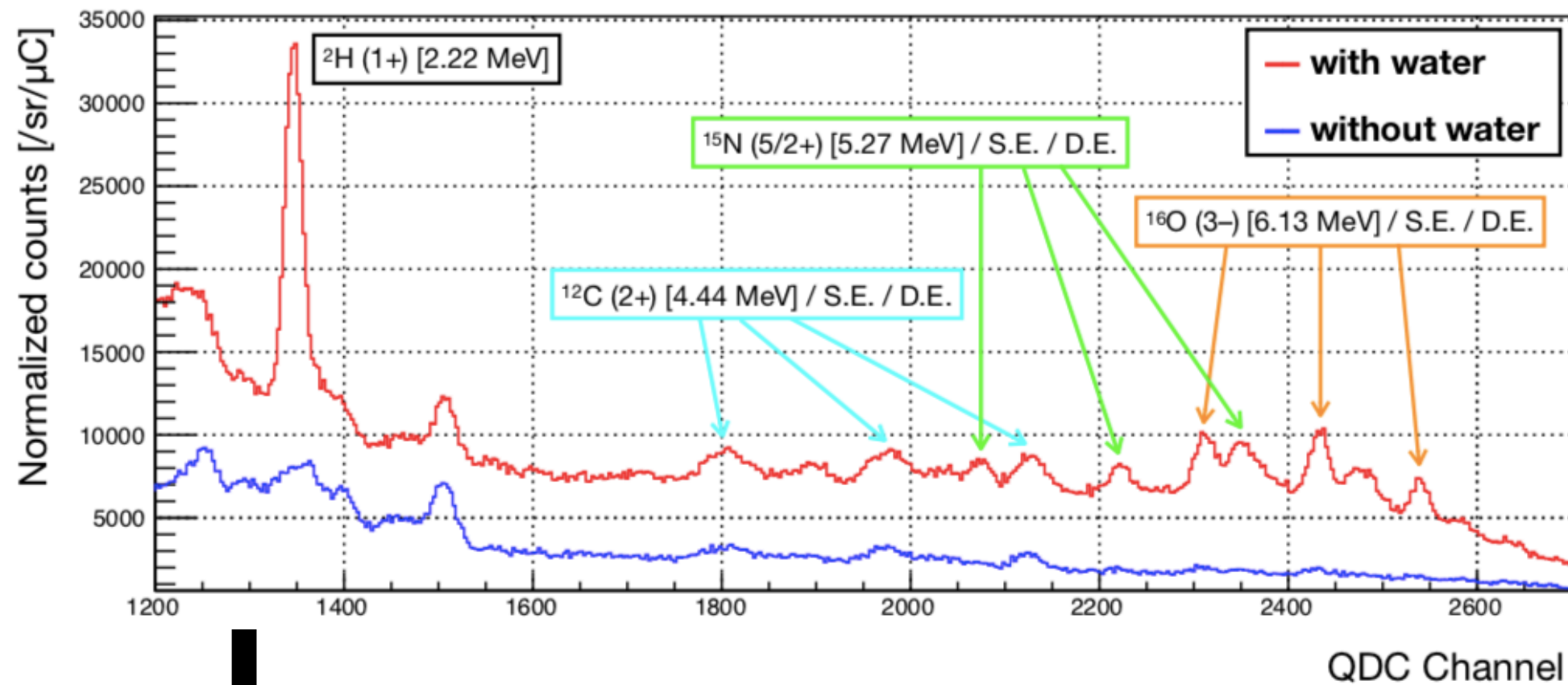
LaBr₃のデータを解析に用いる

TOF分布より求めた入射粒子の
運動エネルギー分布 (LaBr₃)



80MeV実験(LaBr₃)

11



80 MeV陽子ビーム実験
LaBr₃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—LaBr₃
 N_{bkg} : Normalized number of background —CsI, no water run
 ϕ_n : Normalized neutron flux —LqS
 ϵ_{γ} : Gamma ray detection efficiency —Simulation, experiment
 T : Number of target oxygen nuclei par area —Calculate
 $= 8.3546 * 10^{23} [/cm^3]$

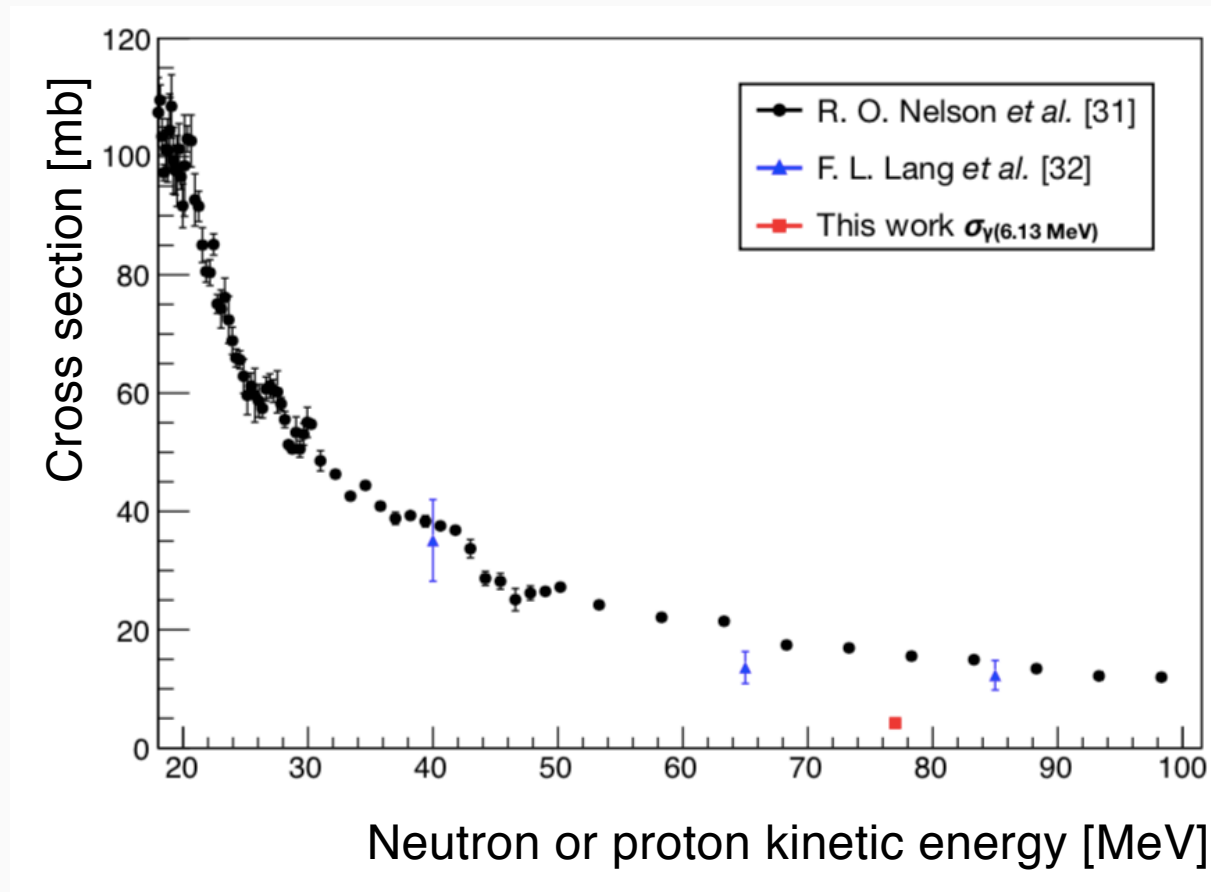
放出される各ガンマ線に対してのクロスセクションを計算

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

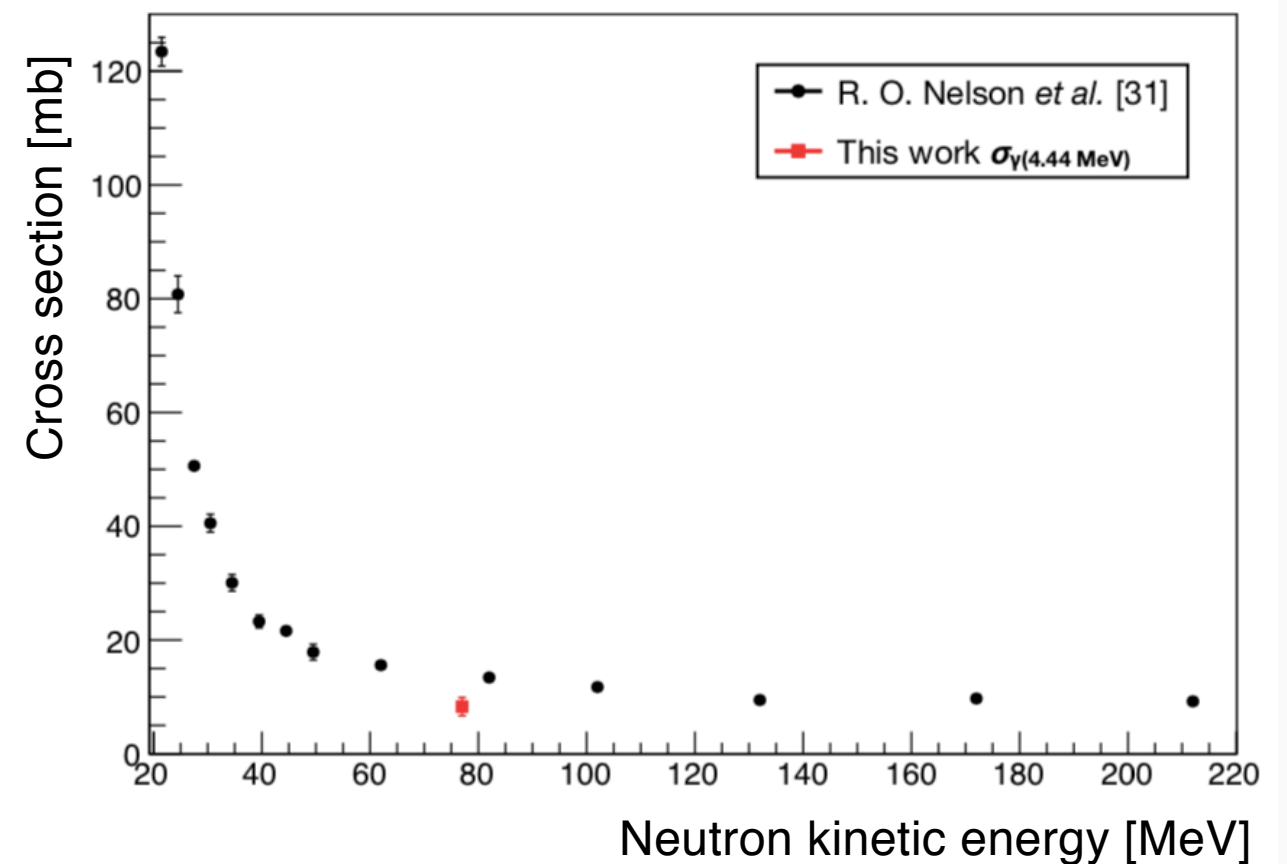
$$\sigma_{\gamma(5.27 \text{ MeV})} = 6.4 \pm 0.1(stat.) \pm 2.2(sys.) \text{ mb}$$

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

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

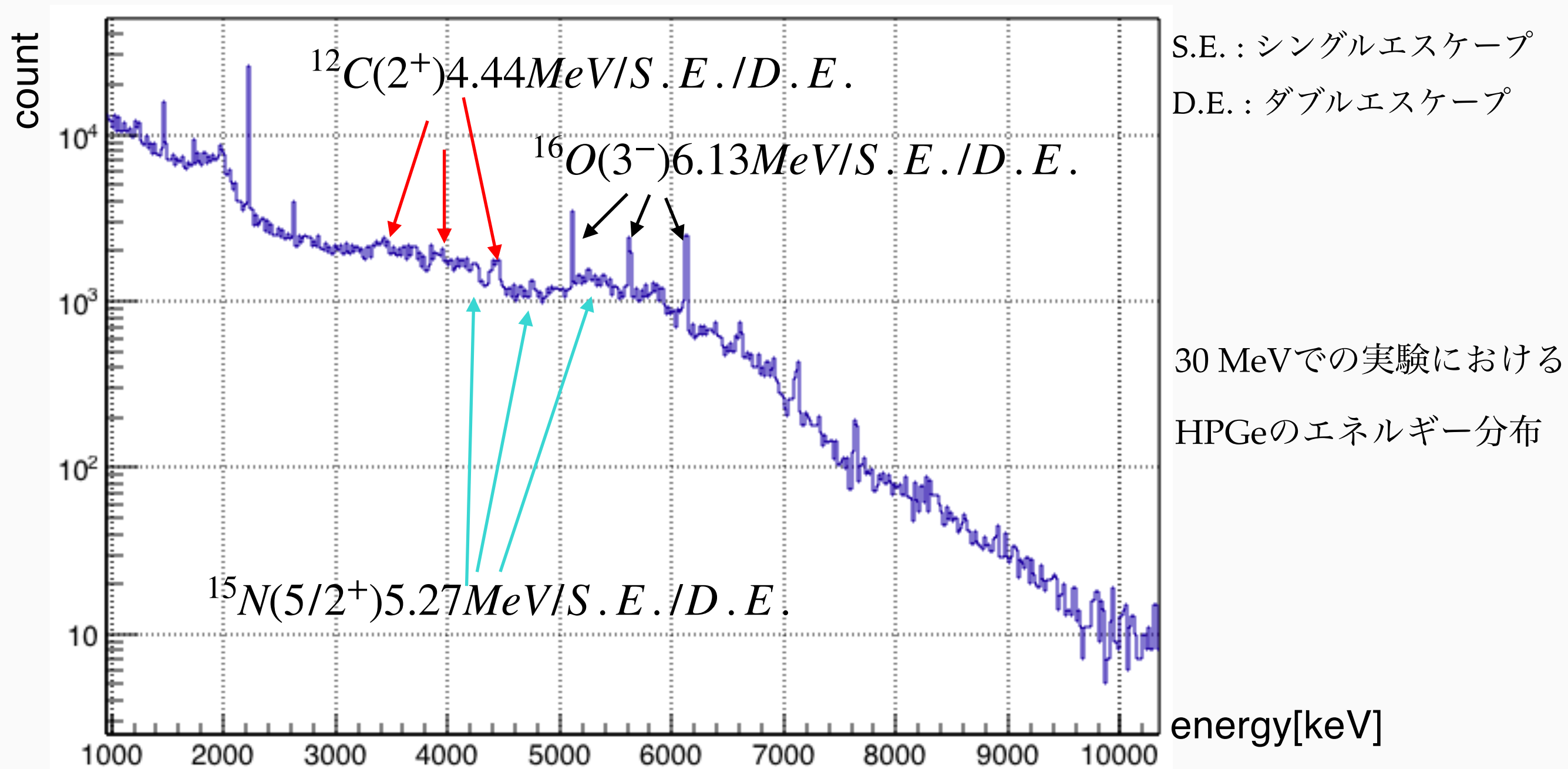
- R.O.Nelsonらの実験は中性子ビームのエネルギーが準単色ではない
→他のエネルギーの中性子が結果に混ざっている可能性がある
- ▲ F.L.Langらの実験は陽子を照射している
→純粹に比較するのは難しい

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

15



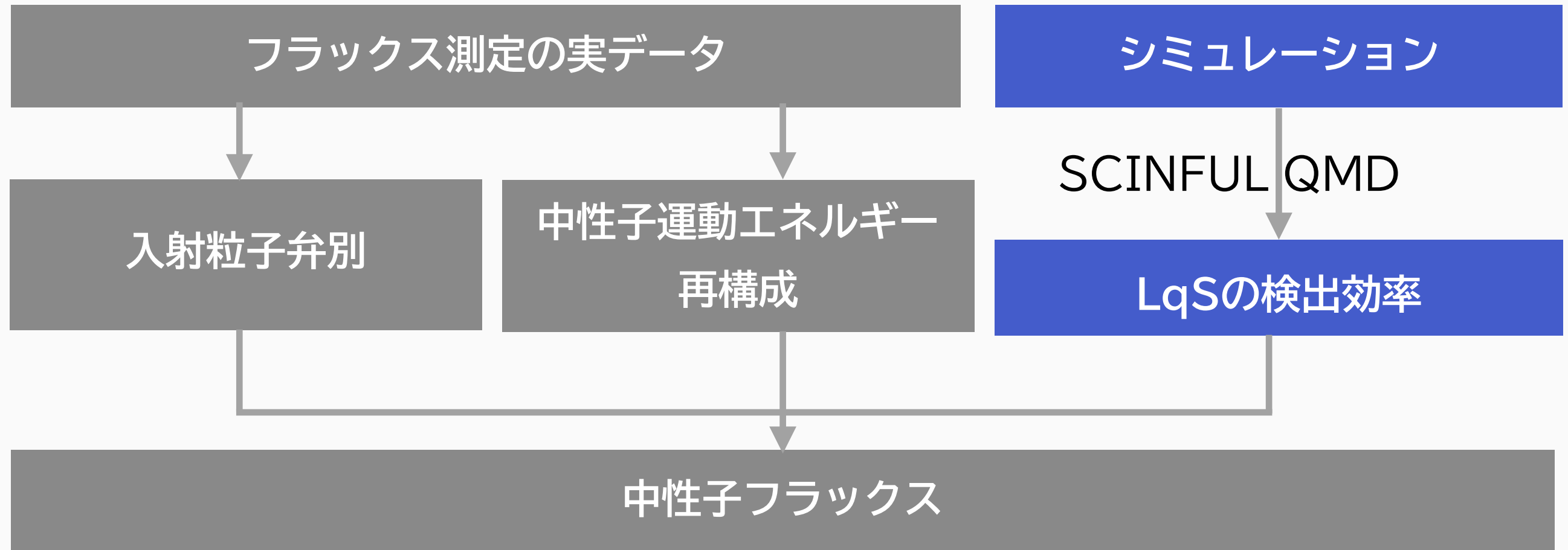
先行実験と同様なピークを確認
クロスセクションは現在解析中

- 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

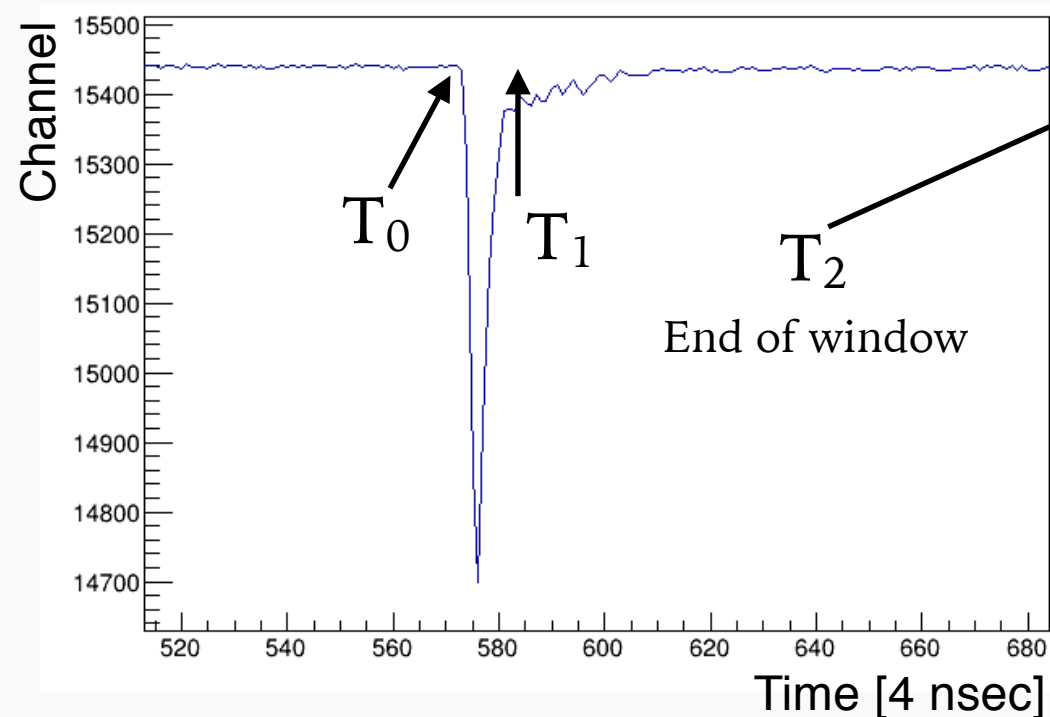
中性子運動エネルギー： γ 線と中性子のTOF分布より求める

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

19

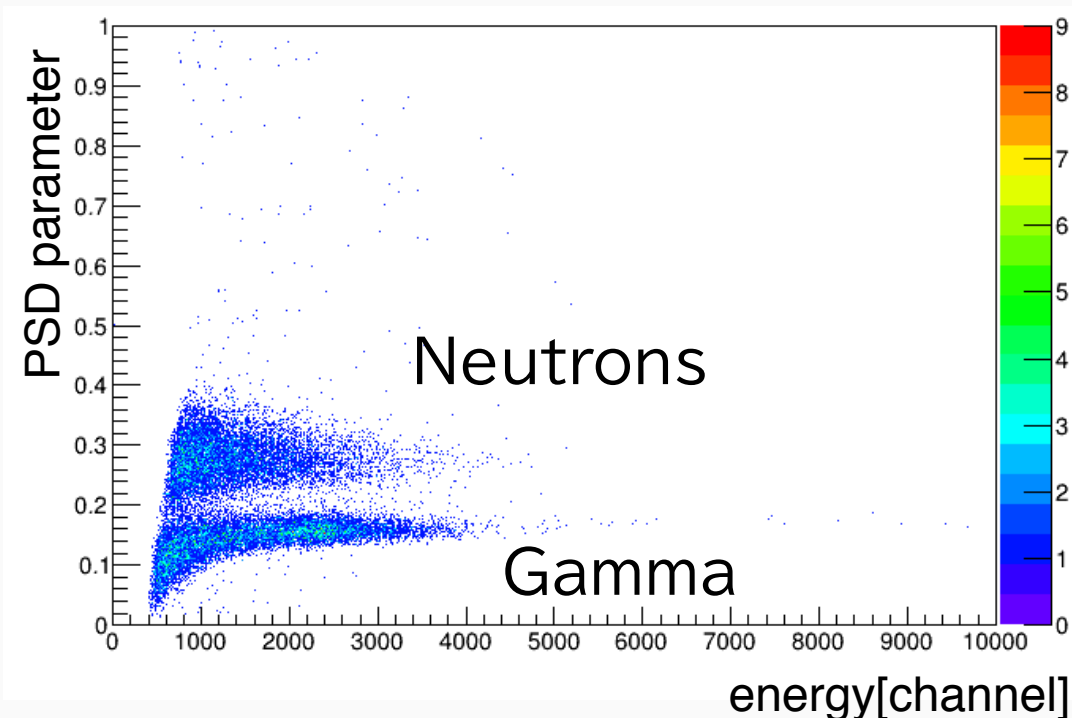
入射粒子によって出力される波形が異なることを利用



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

$Q(T_1)$: 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

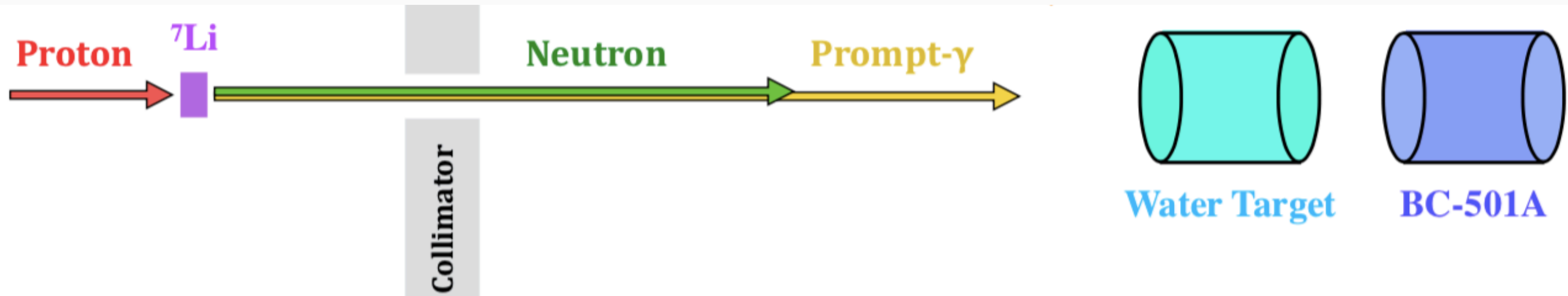


本実験の場合PSD parが大きいほど
中性子イベント

入射粒子弁別能力を確認

中性子の運動エネルギー

20



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

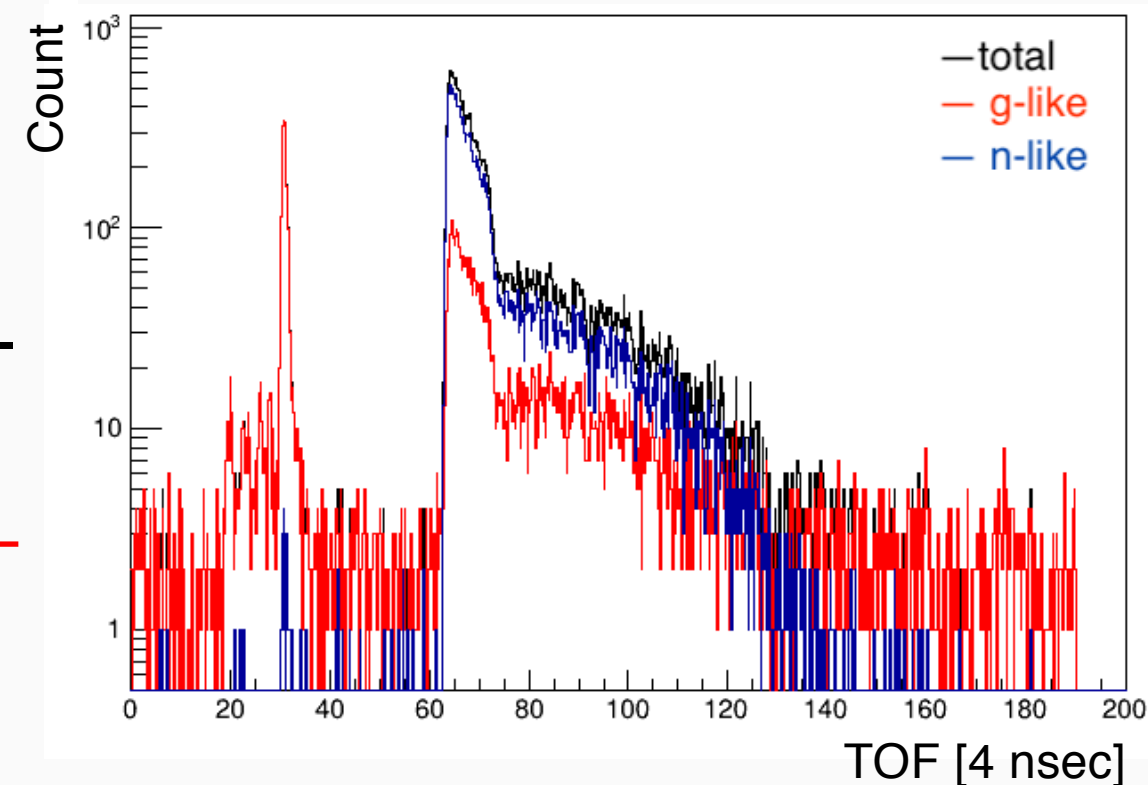
mc^2 : rest mass of neutron 939.6 MeV
 c : light speed 0.299 m/ns
 L : distance (Li to water) 11.46 m

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

21

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

検出器ジオメトリ

検出器スレッシュホールド

光減衰係数 0.008

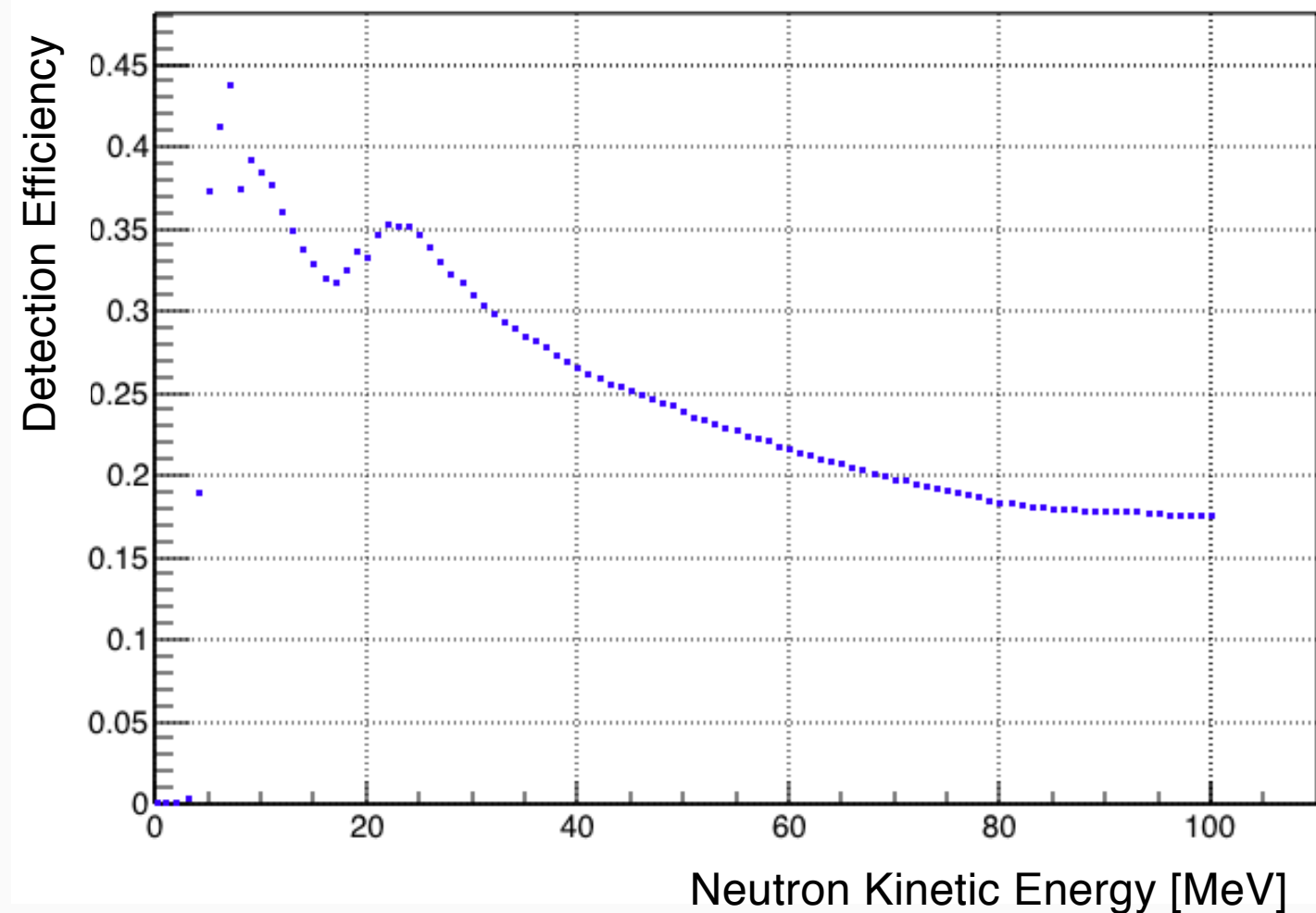
PMT応答関数の選択

input

中性子輸送

核反応の決定

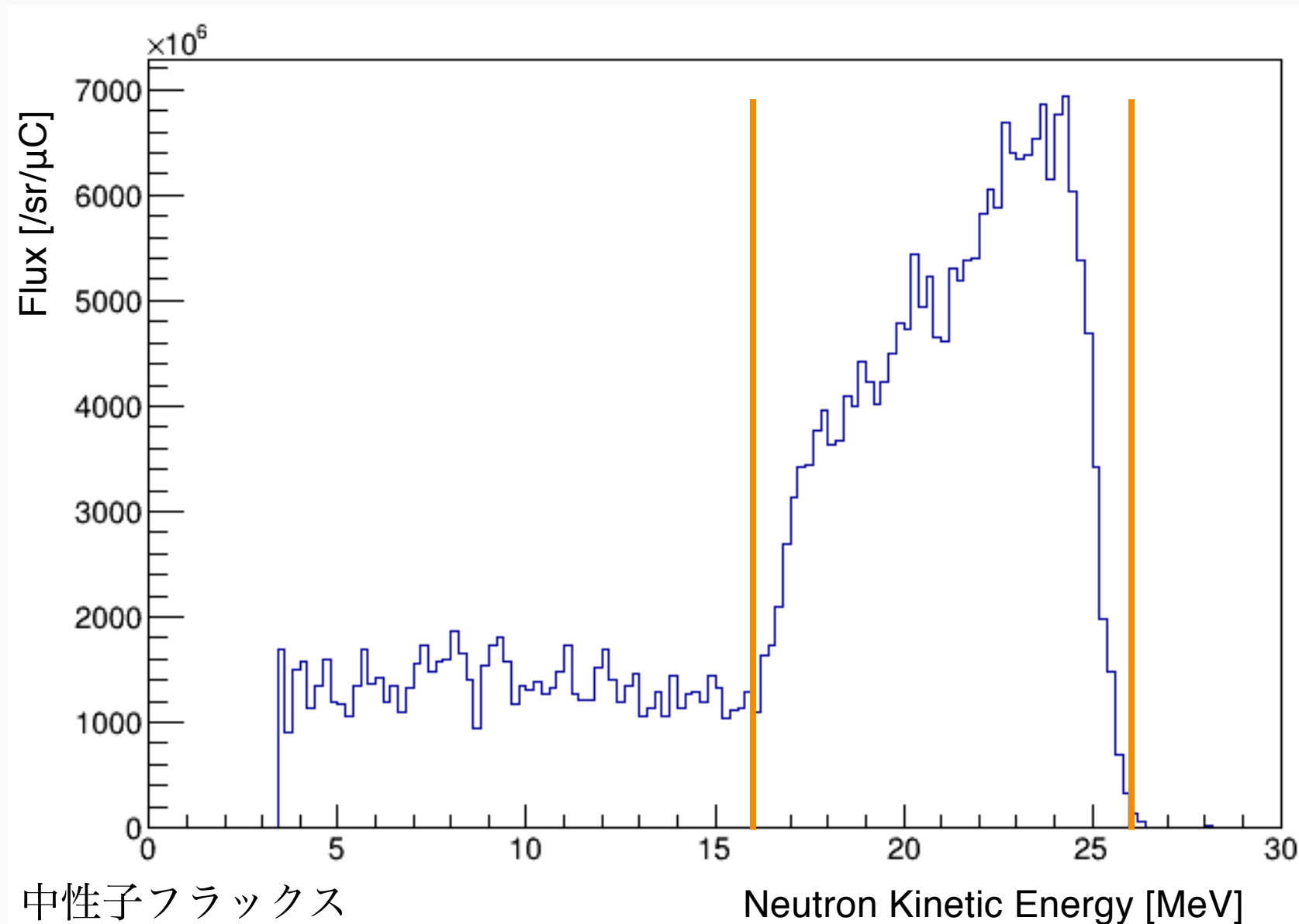
エネルギーの計算



中性子フラックス

22

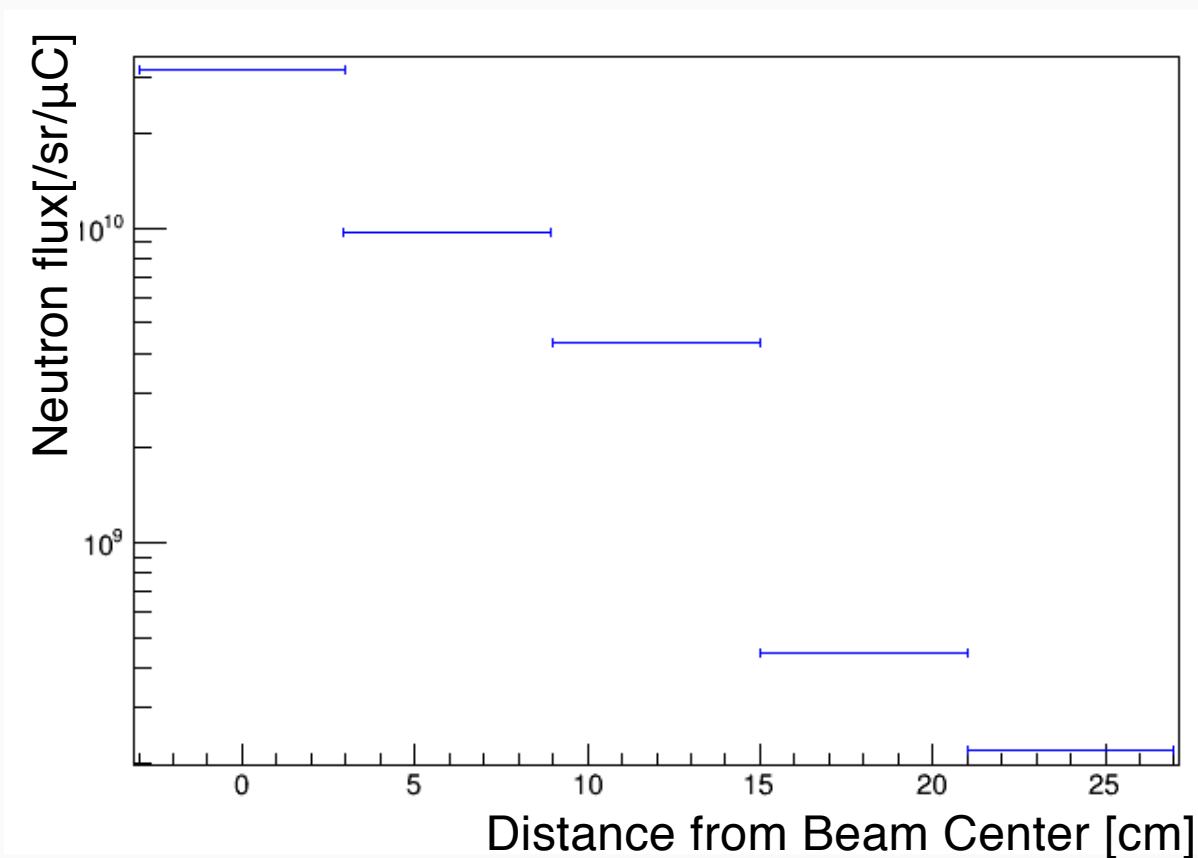
TOFから求めた運動エネルギー分布を検出効率で割ったもの
立体角, ファラデーカップの電流値で規格化



16 MeV~26 MeVが
生成されたビームで
あると考えられる

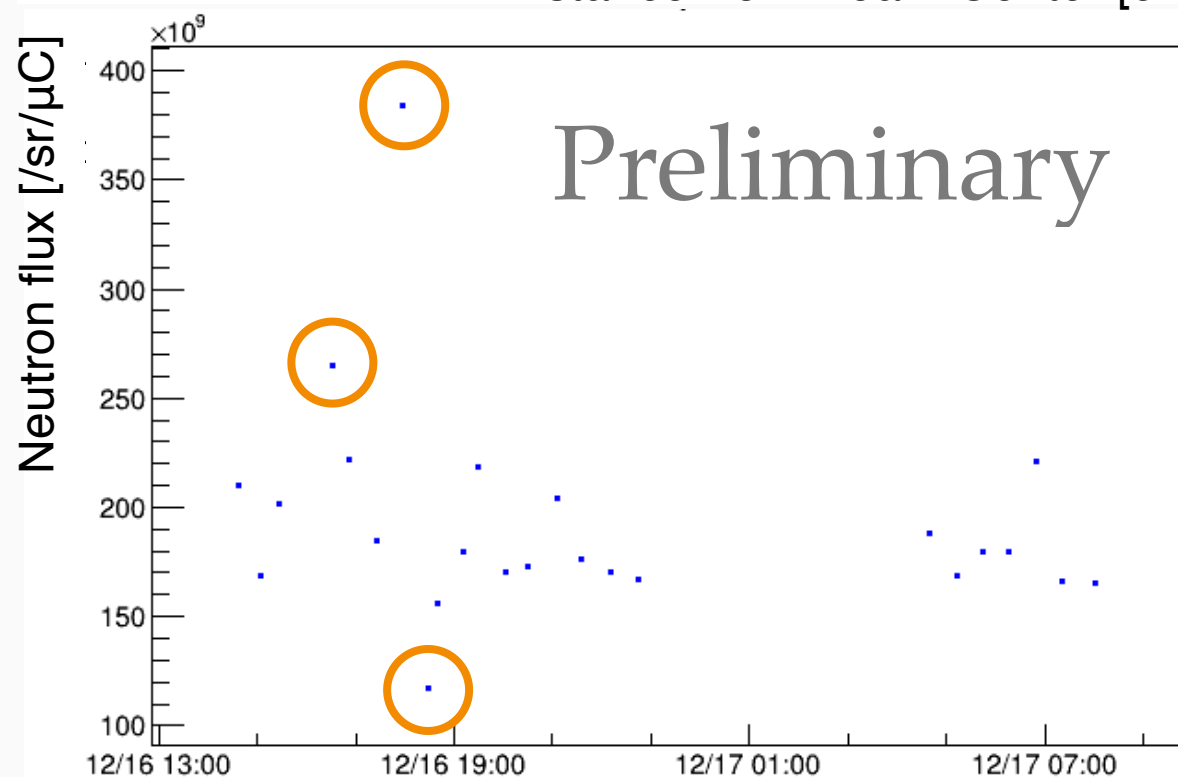
ビーム構造、安定性

23



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

24

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

エネルギー

26

30 MeV

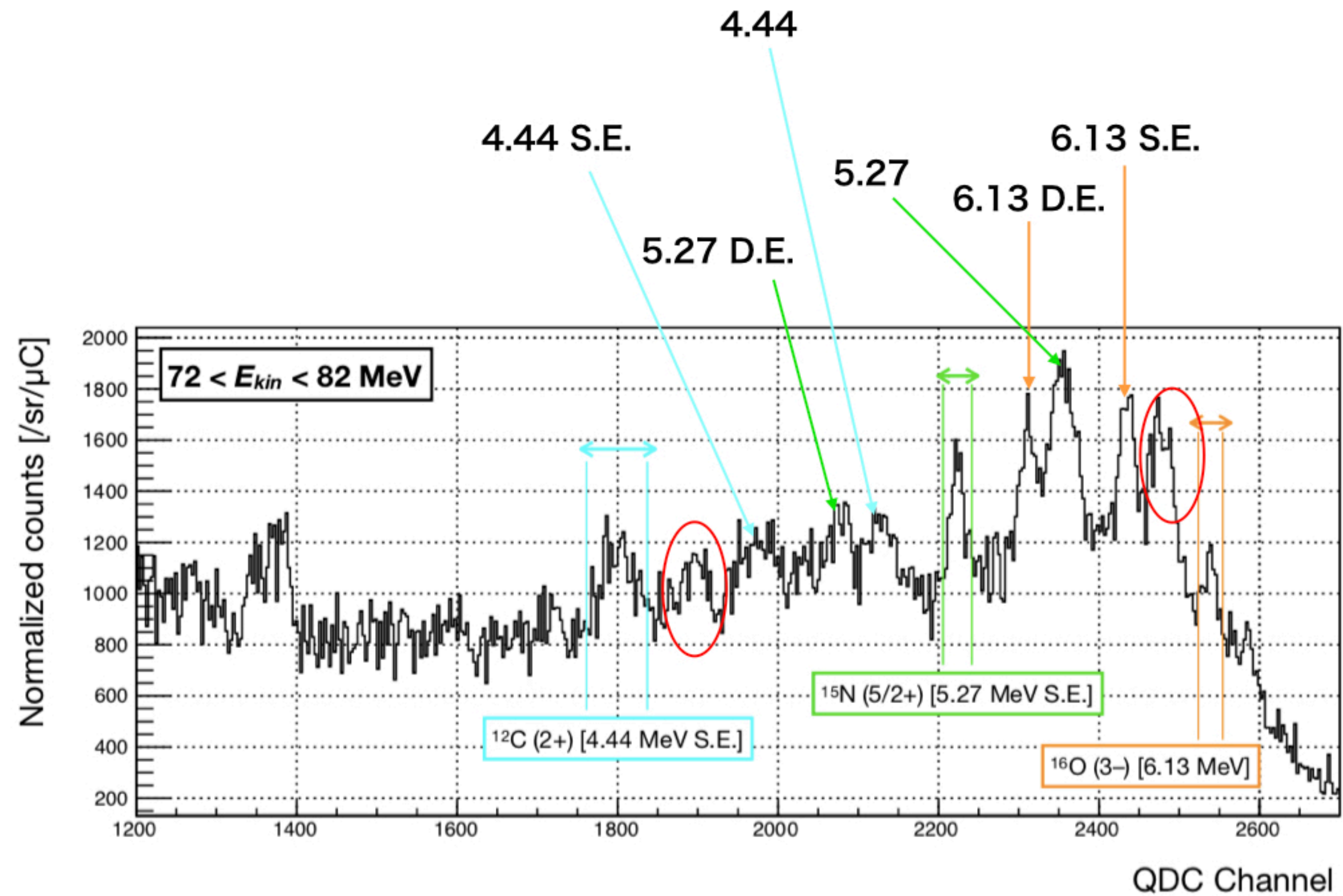
— 中性子の運動エネルギーのピーク付近

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
 $= 8.3546 * 10^{23} [1/cm^3]$

ϵ_{γ} : 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

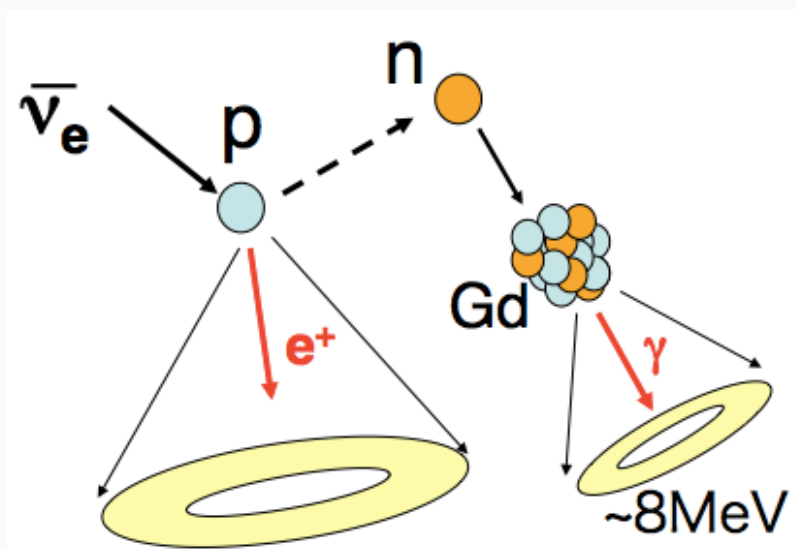
また ^{60}Co を用いた実験結果とも比較を行う

ニュートリノ中性カレント反応

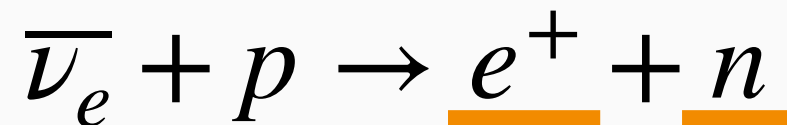
29

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)

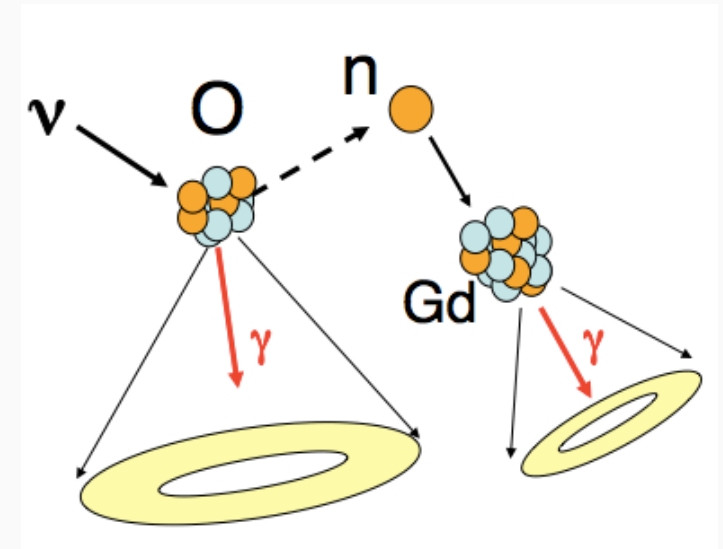
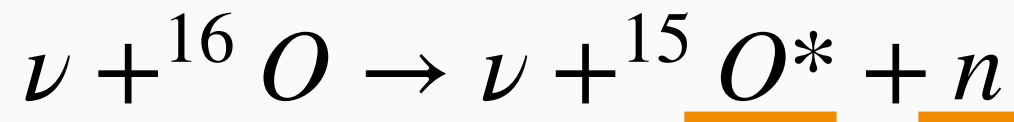
スーパーカミオカンデにガドリニウムを溶かしたSK-Gd計画での
超新星背景ニュートリノ (SRN)探索において主要なバックグラウンドに
なると考えられている



SRNのシグナル



NCQEのシグナル

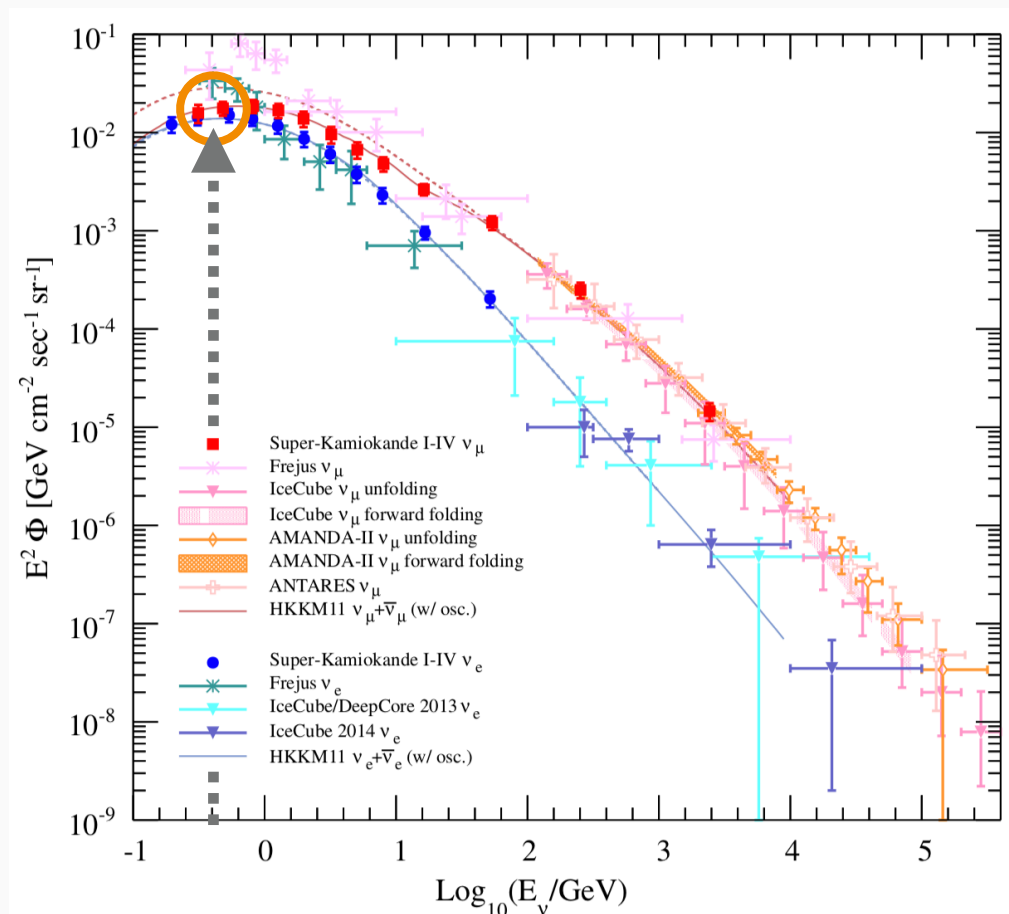
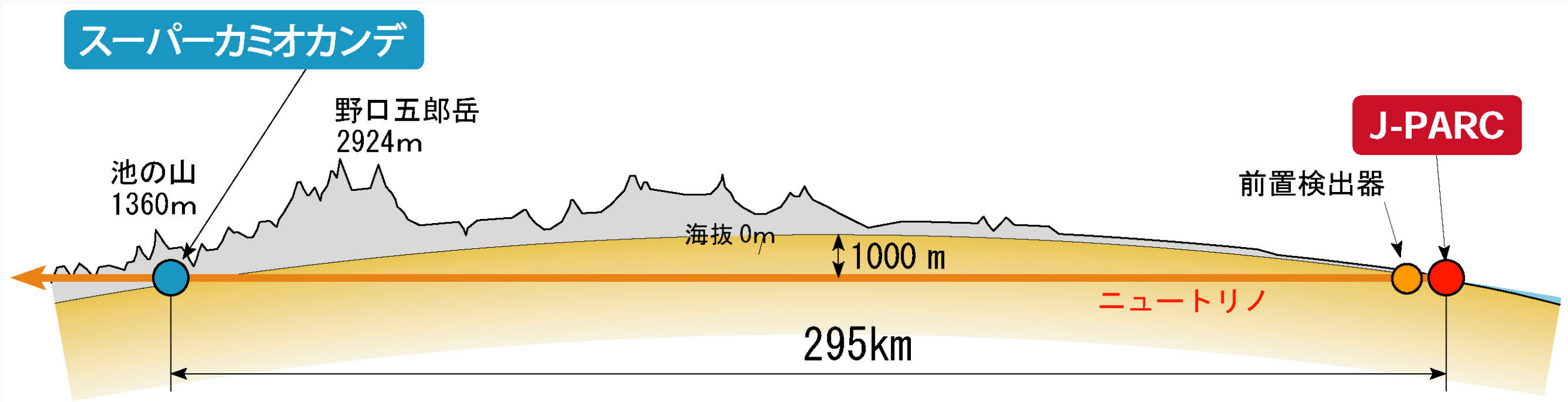


どちらも e^+/e^- , neutron が観測されるため
識別が不可能

→ NCQE 反応の理解が重要

T2K実験

30

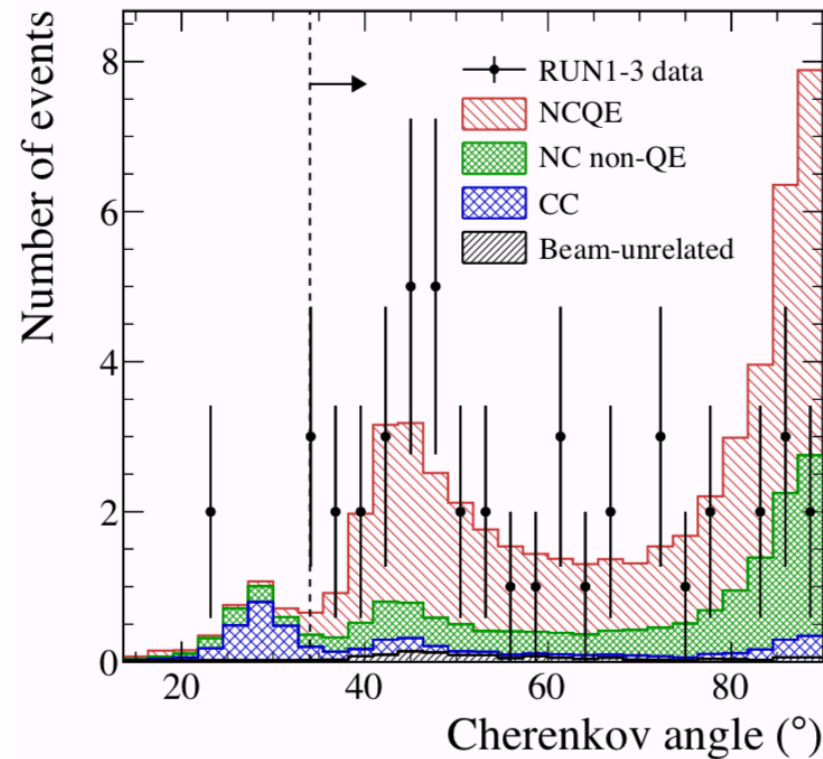


ビームは630 MeVにピーク

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

様々な実験での大気ニュートリノフラックス (DOI: 10.1103)

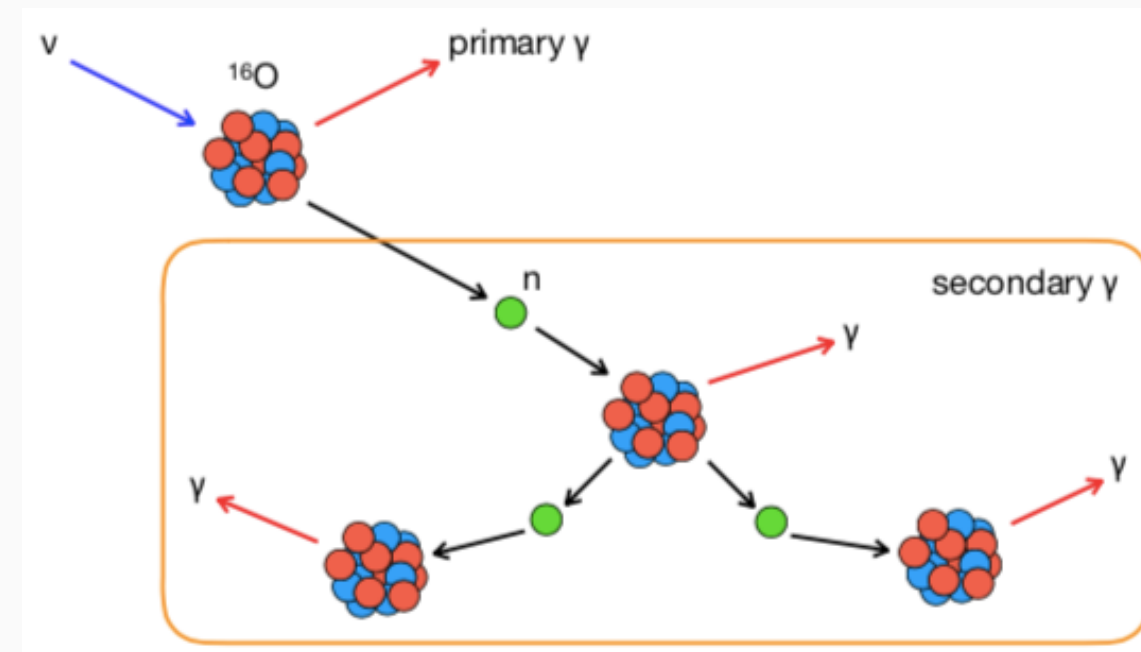


チェレンコフ角再構成 arXiv:1403.3140

	Signal		Background		
	NCQE	NC non-QE	CC	Unrel.	
Fraction of Sample	68%	26%	4%	2%	
Flux	11%	10%	12%	-	
Cross sections	-	18%	24%	-	
Primary γ production	15%	3%	9%	-	
Secondary γ 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

32

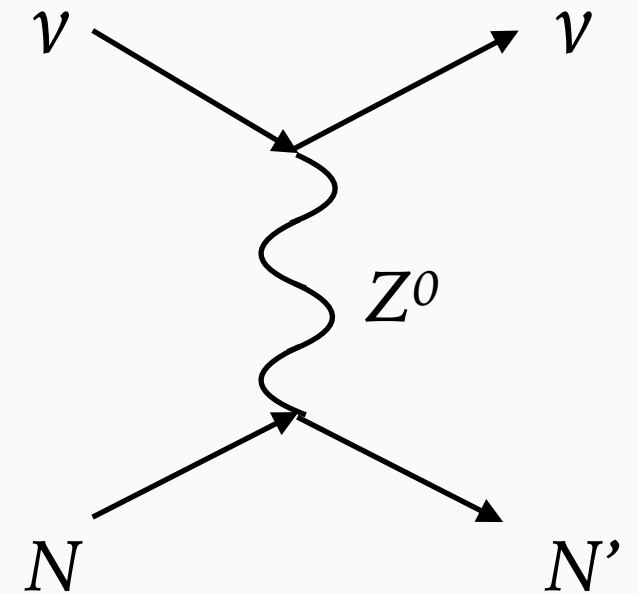
ニュートリノが Z^0 粒子の交換を通して起こす反応のこと

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

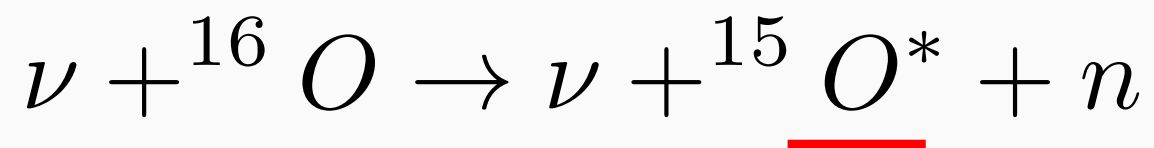
$$\nu + N \rightarrow \nu + N^*$$

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

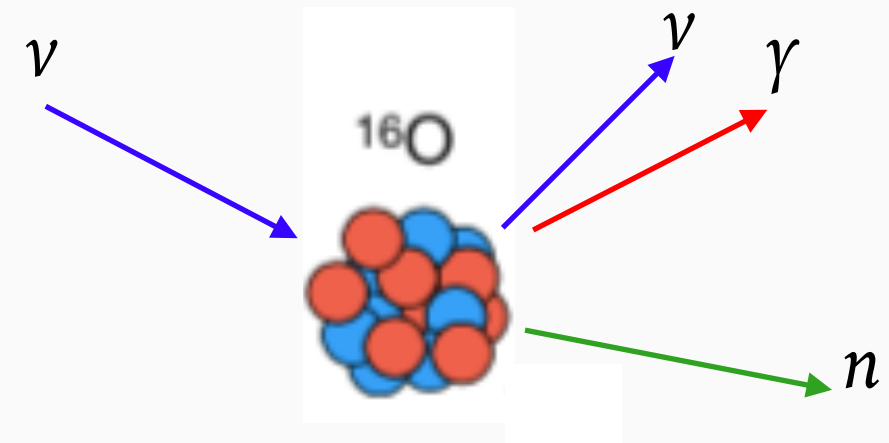
⋮



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)

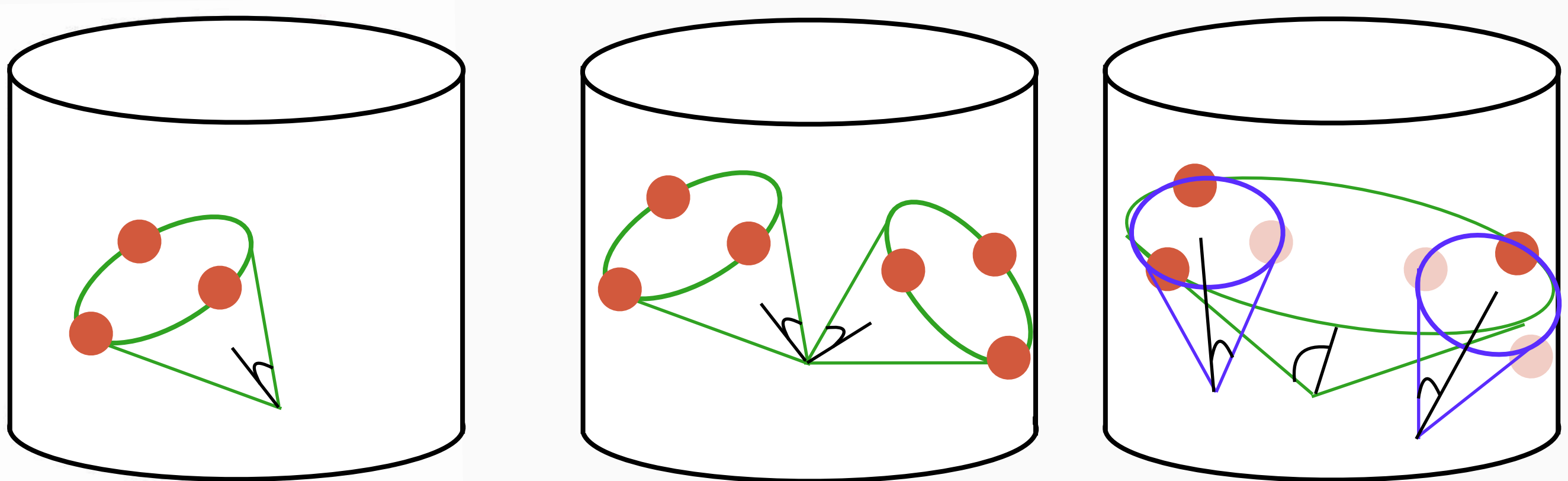


脱励起でガンマ線を放出



中性カレント反応による問題

33



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

34

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



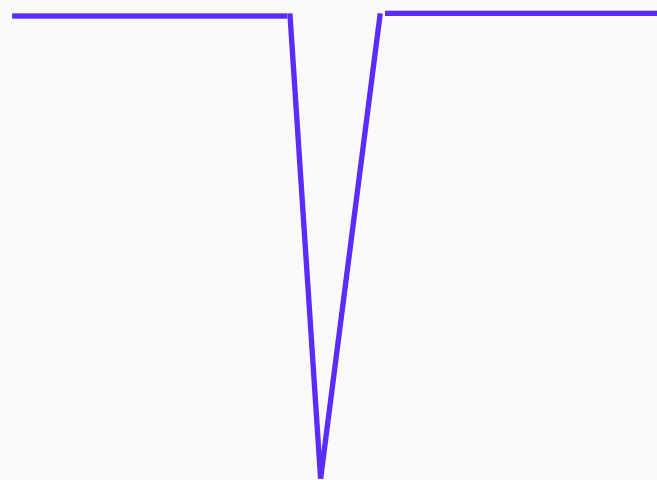
Pulse shape discrimination (PSD)

35

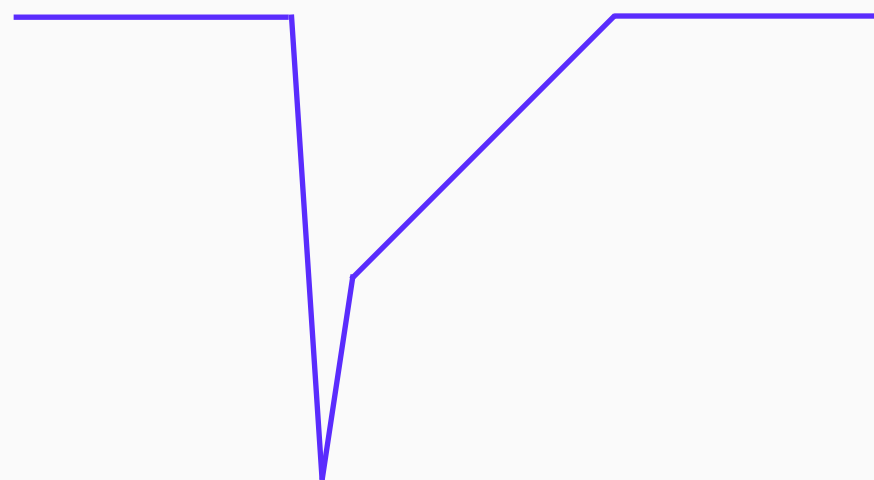
検出器の出力波形が入射粒子の種類で異なることを利用した粒子弁別技術

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

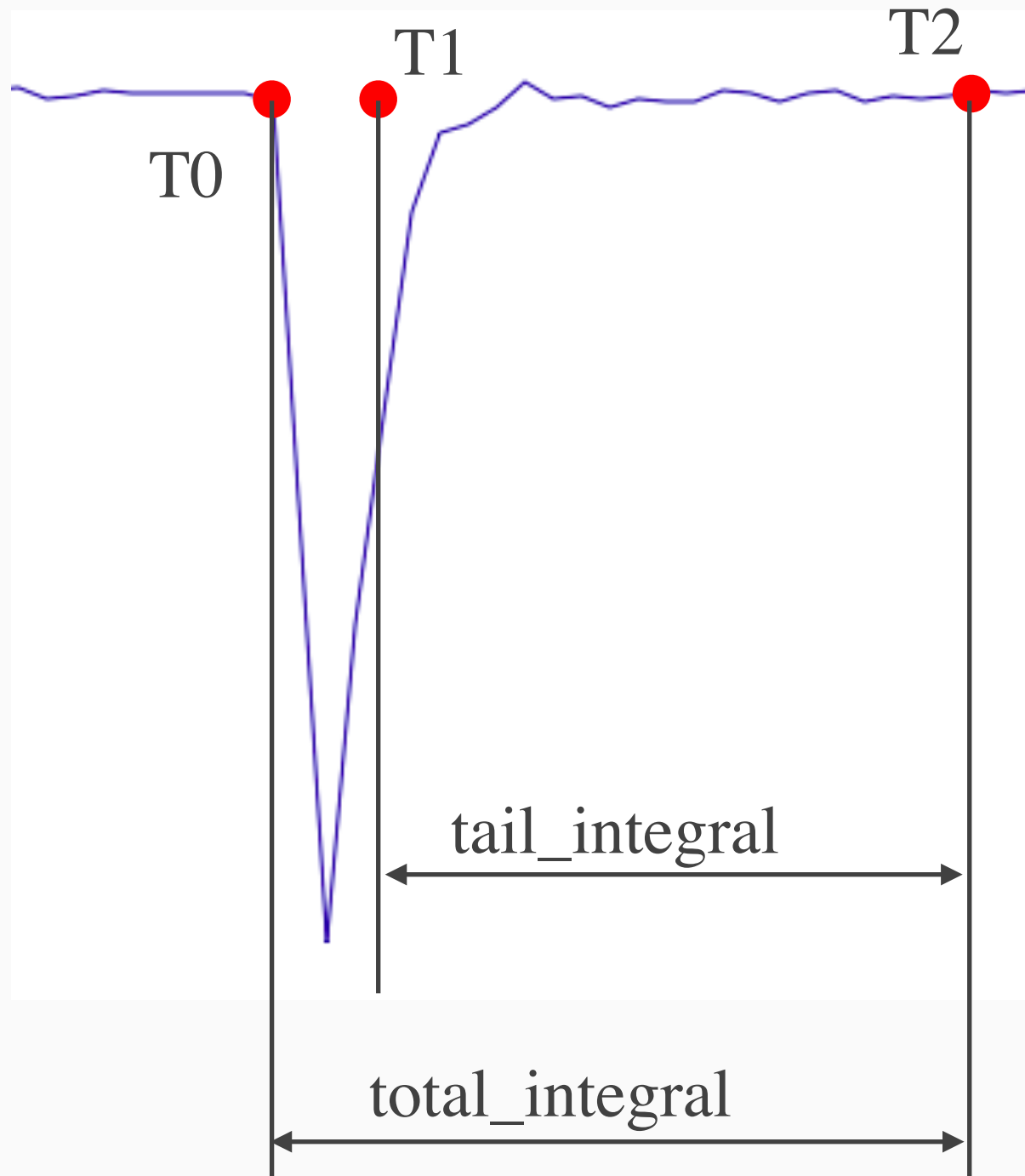


中性子

*極端な表現をしています

Pulse shape discrimination (PSD)

36



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

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

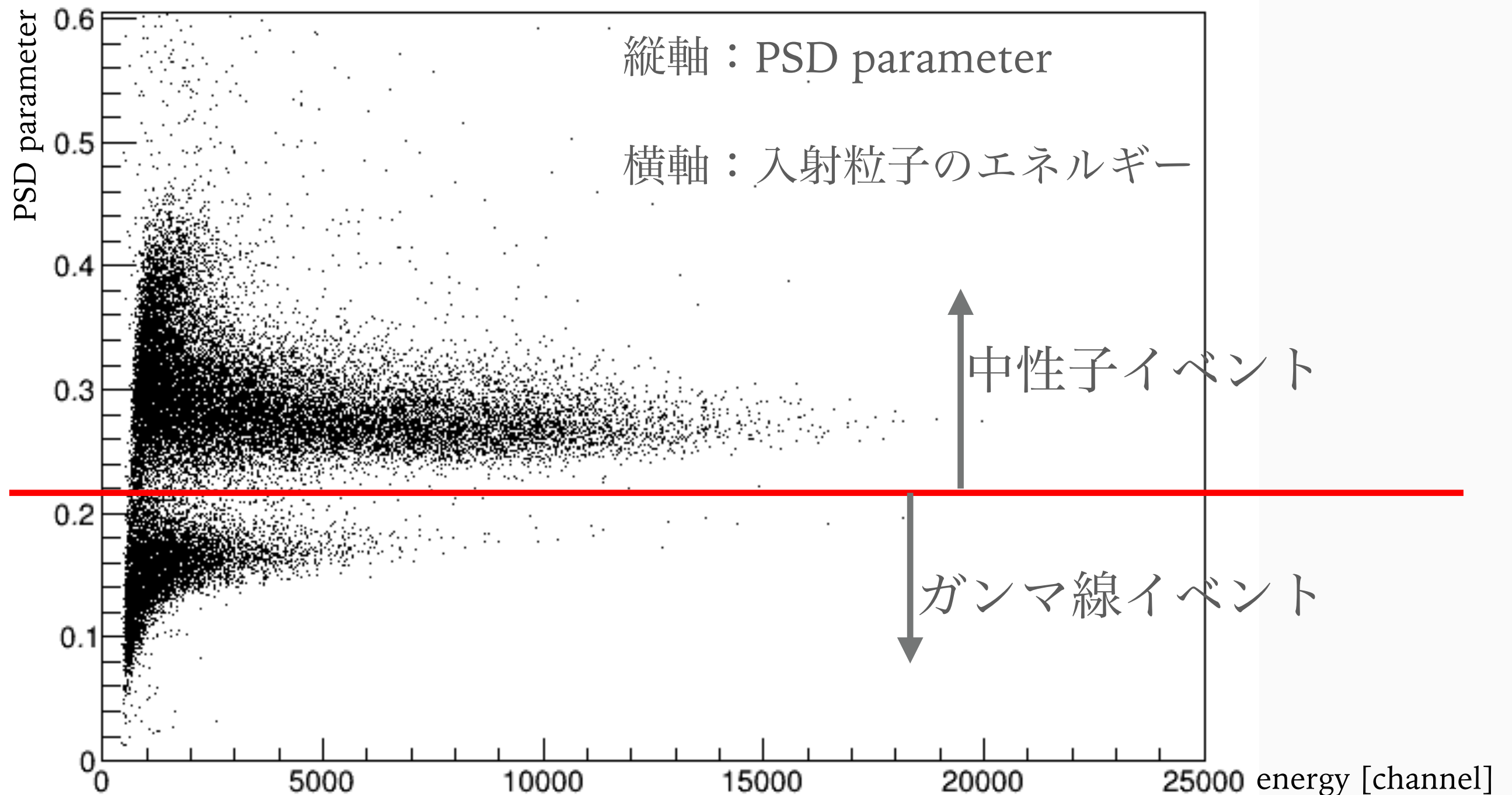
この値が大きいほど減衰に時間がかかる

→中性子イベントである

LqSのPSD性能

37

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

38

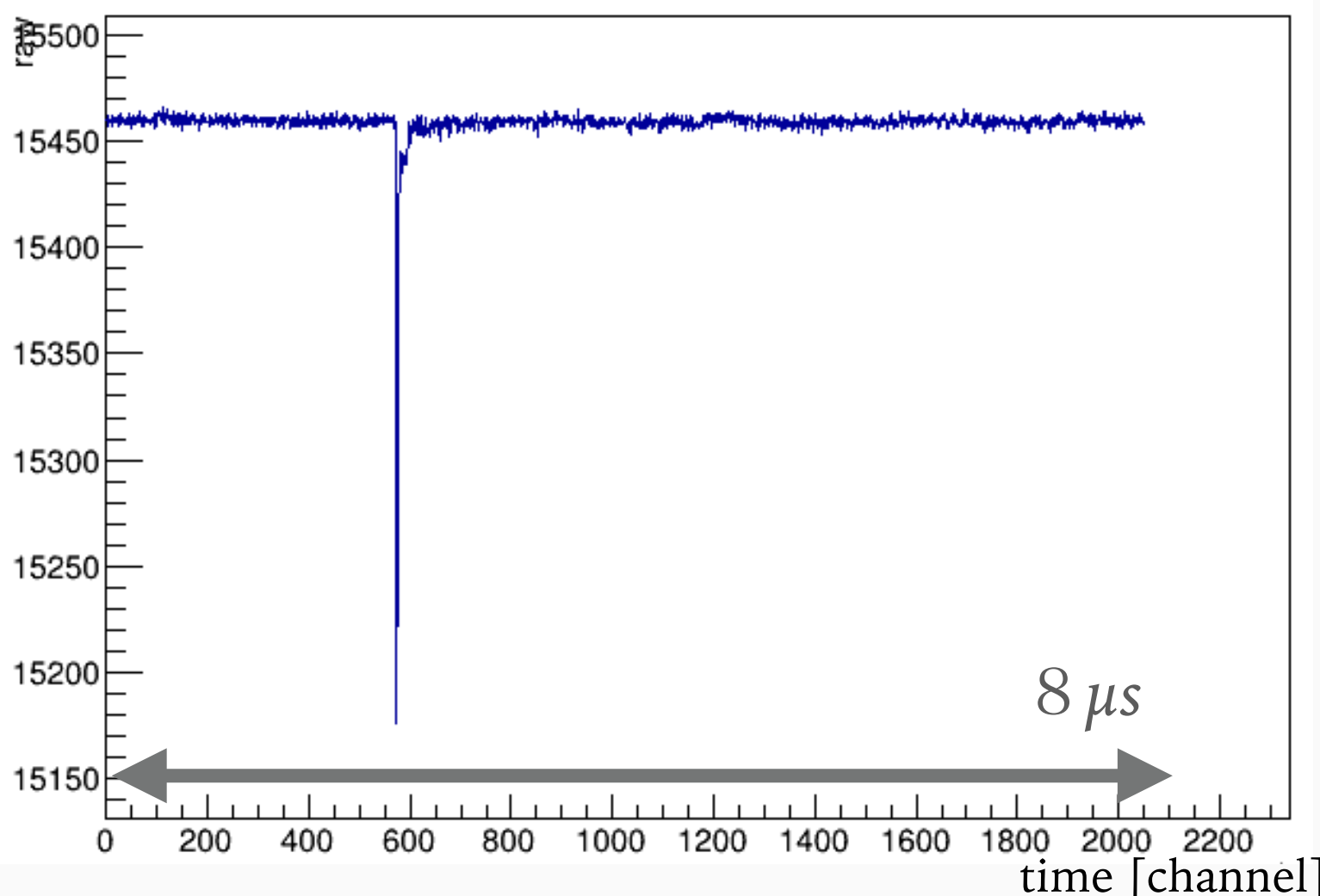
中性子フラックスを求めるためにはFADCで取得した生データから

- ・ 入射粒子の弁別

— Pulse shape discrimination (PSD) を使用

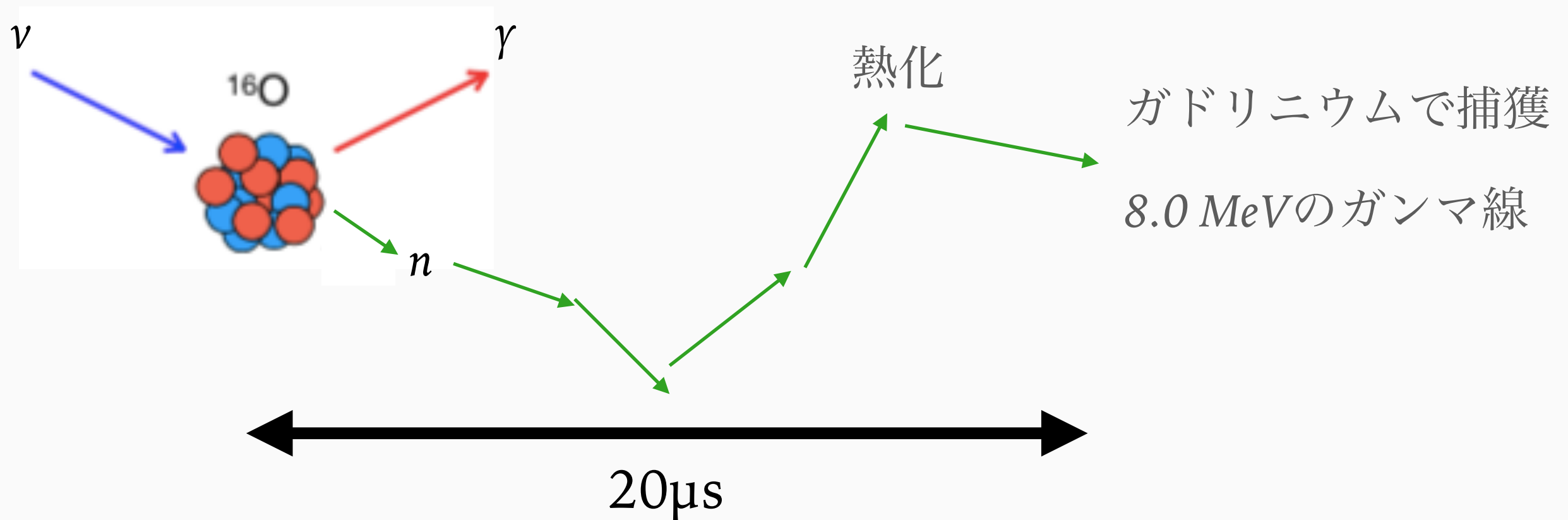
- ・ 中性子エネルギーの再構成(信号領域の中性子イベントを取り出すため)

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

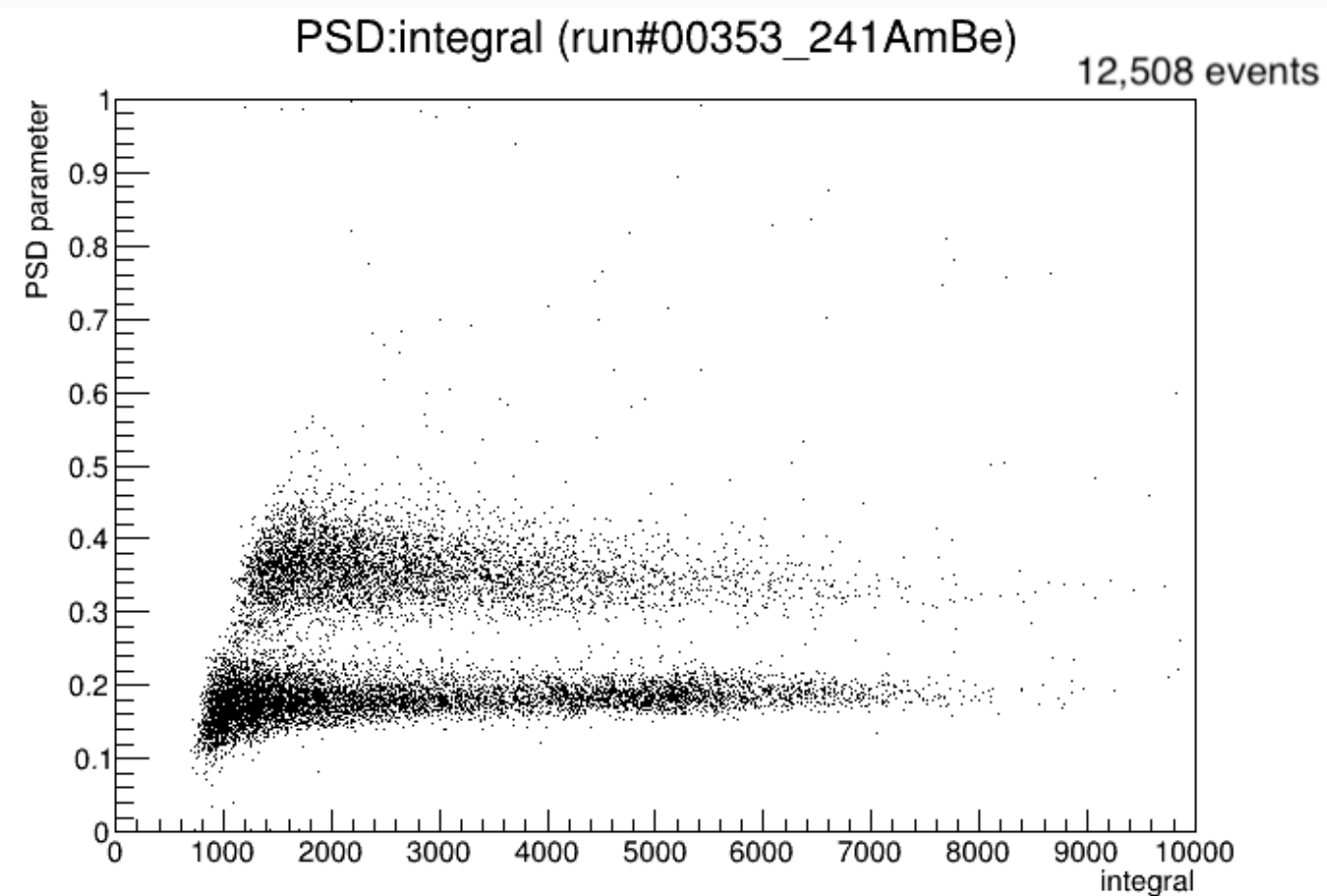
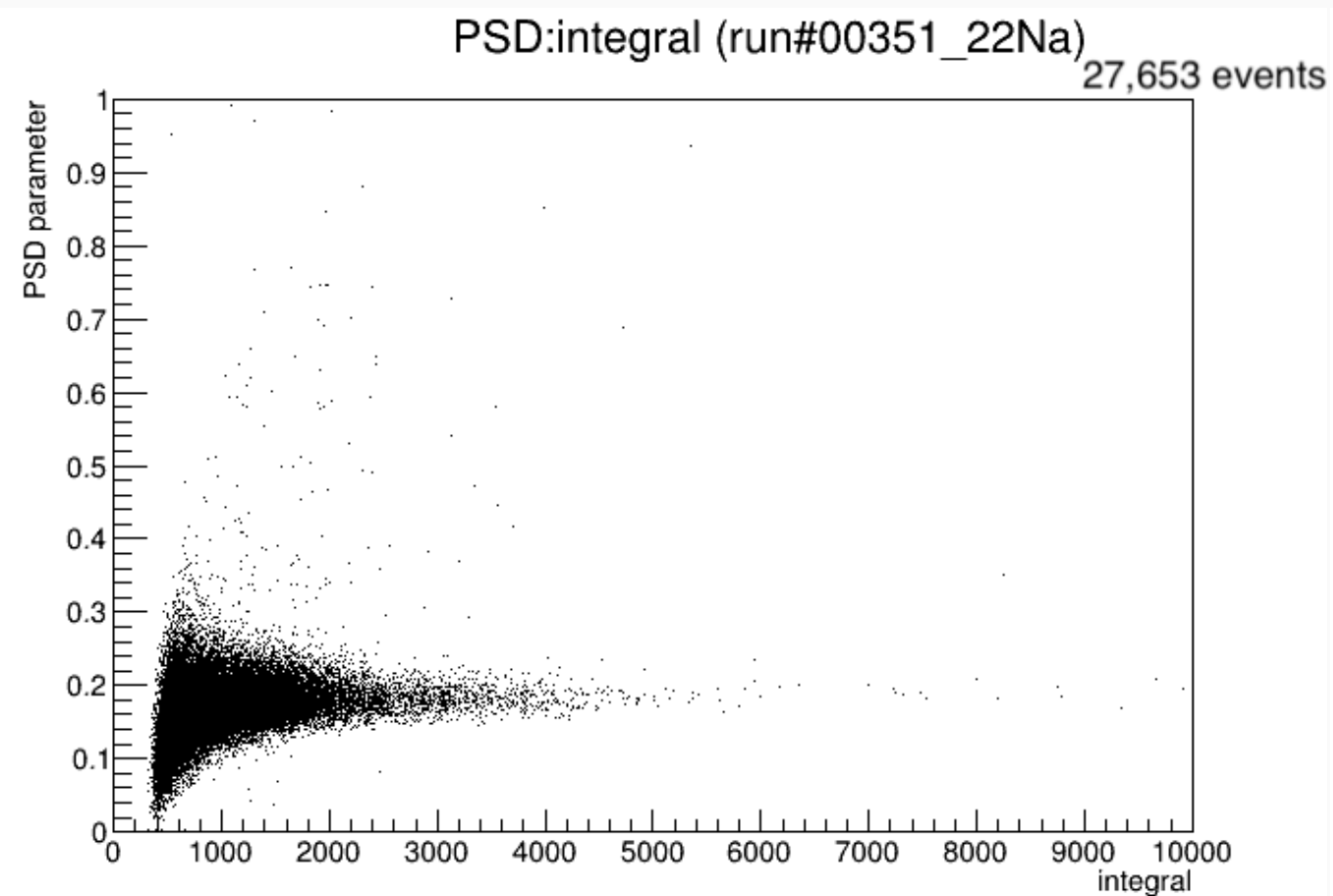
途中でどんどんエネルギーを落としていき、熱化



スーパーカミオカンデの時間分解能 $1.3 \mu\text{s}$

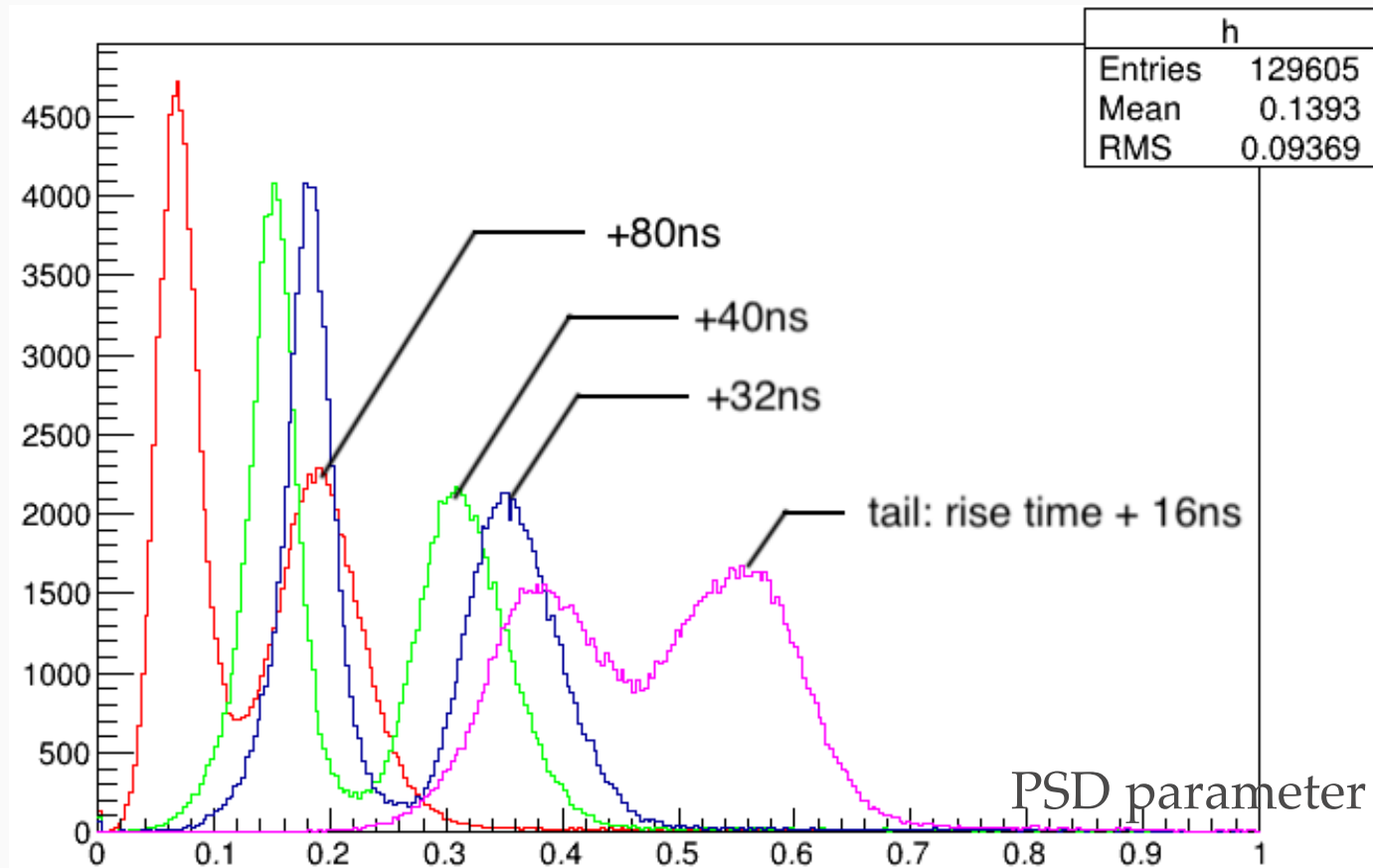
LqSのPSD性能

40



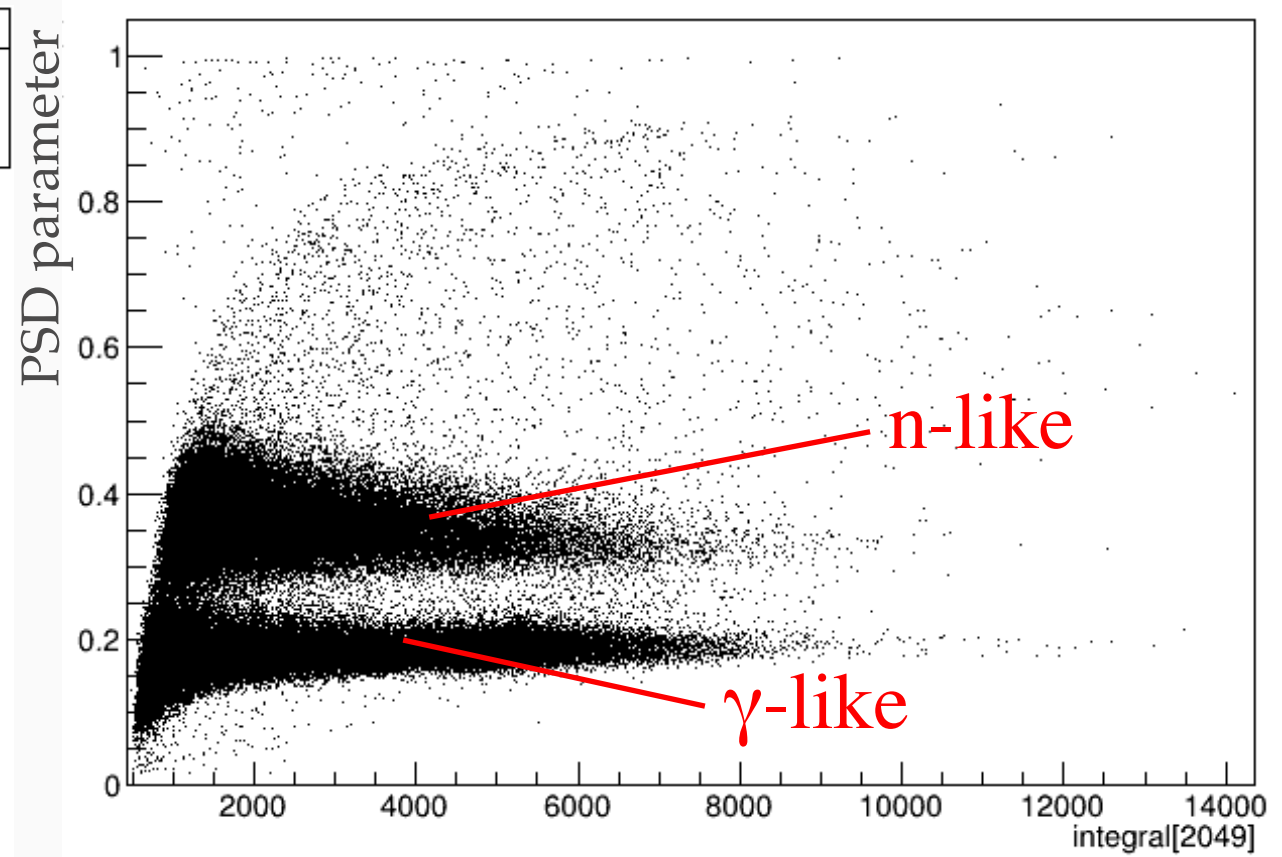
PSD

41



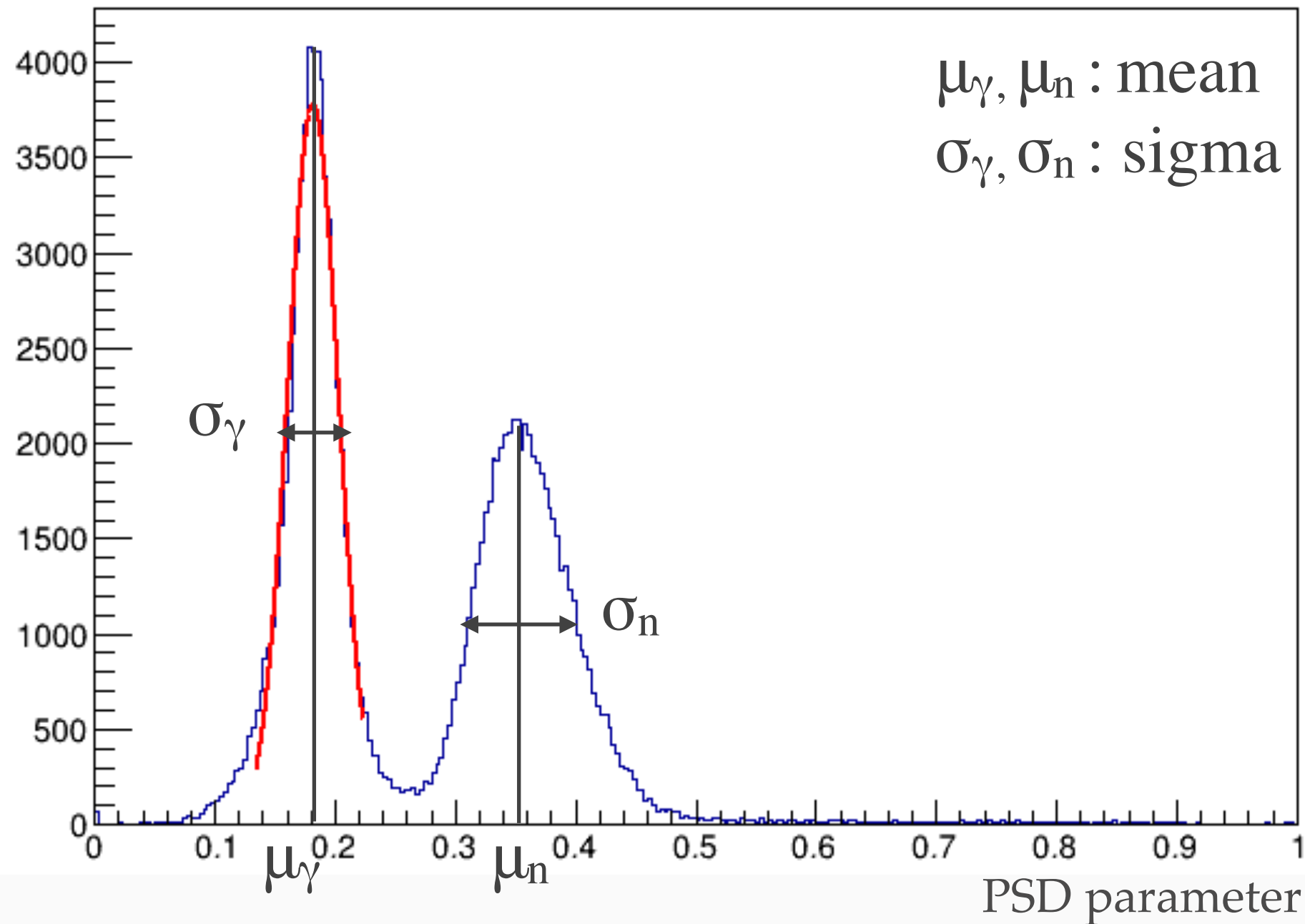
Some PSD parameter.

T1 value is changed.



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

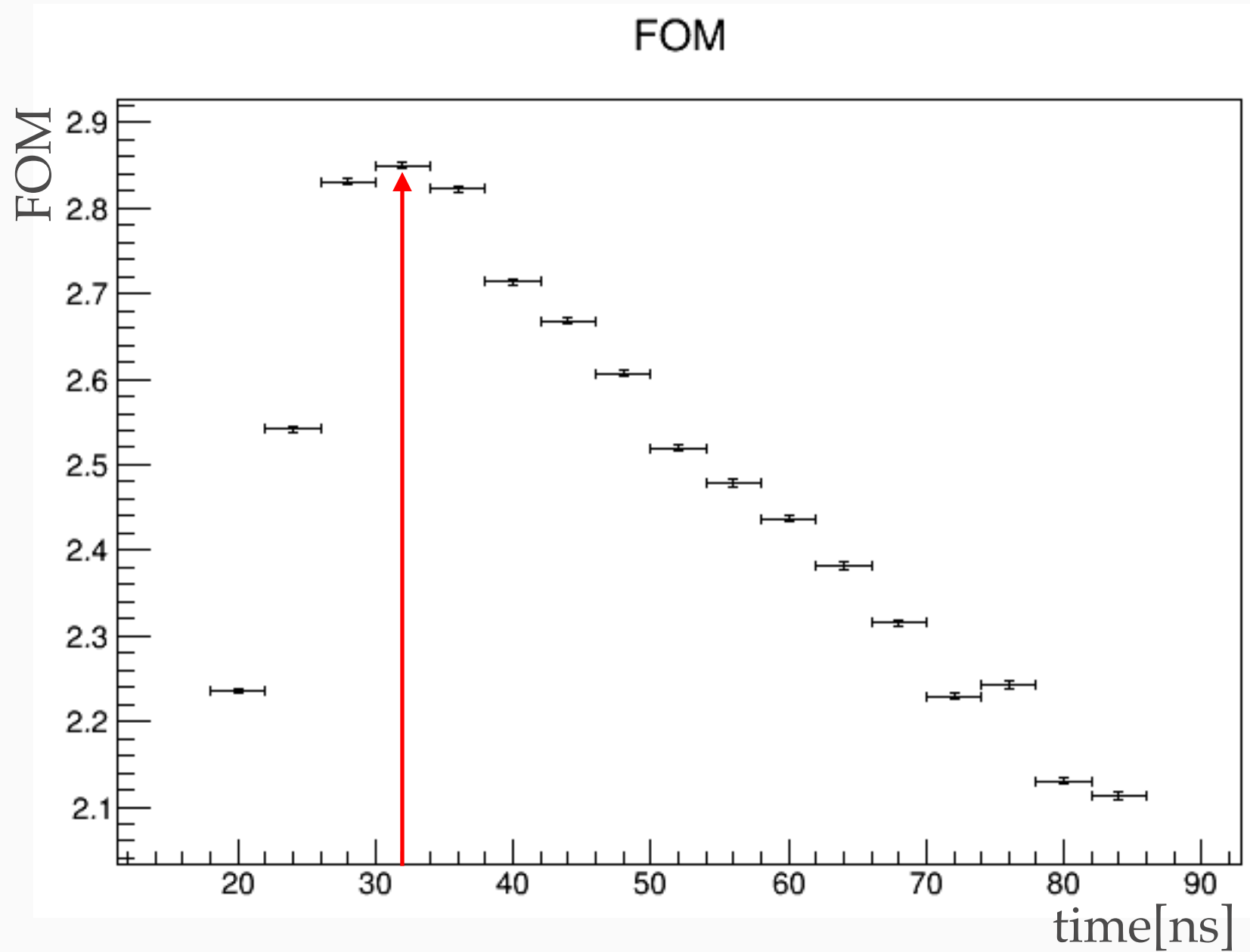
-> Optimize the T1 from histogram



Fit n-like event,
 γ -like event.

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

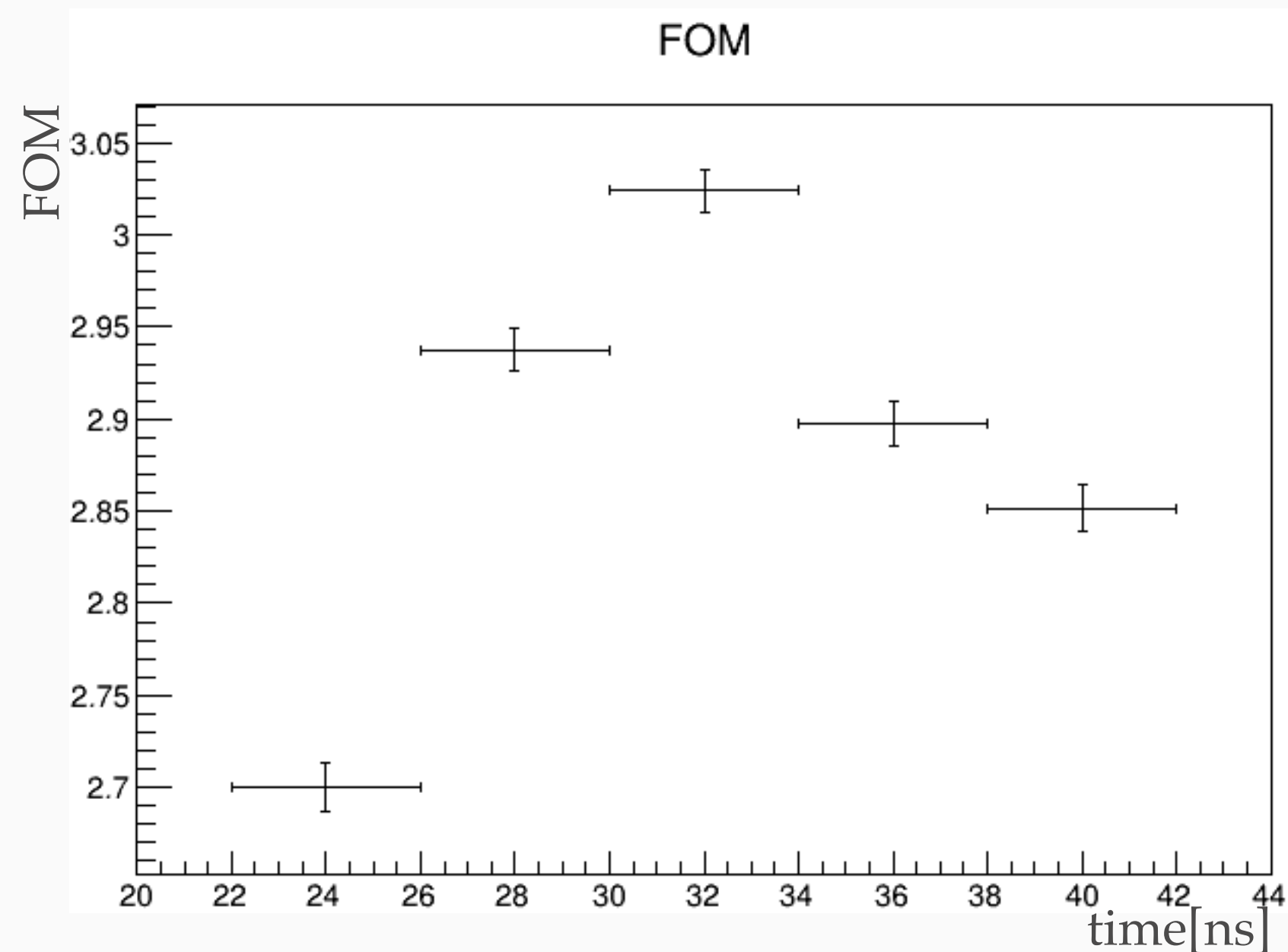
The bigger, the better



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 ²⁴¹AmBe)

32 ns is best point

-> I use this value
in my analysis.

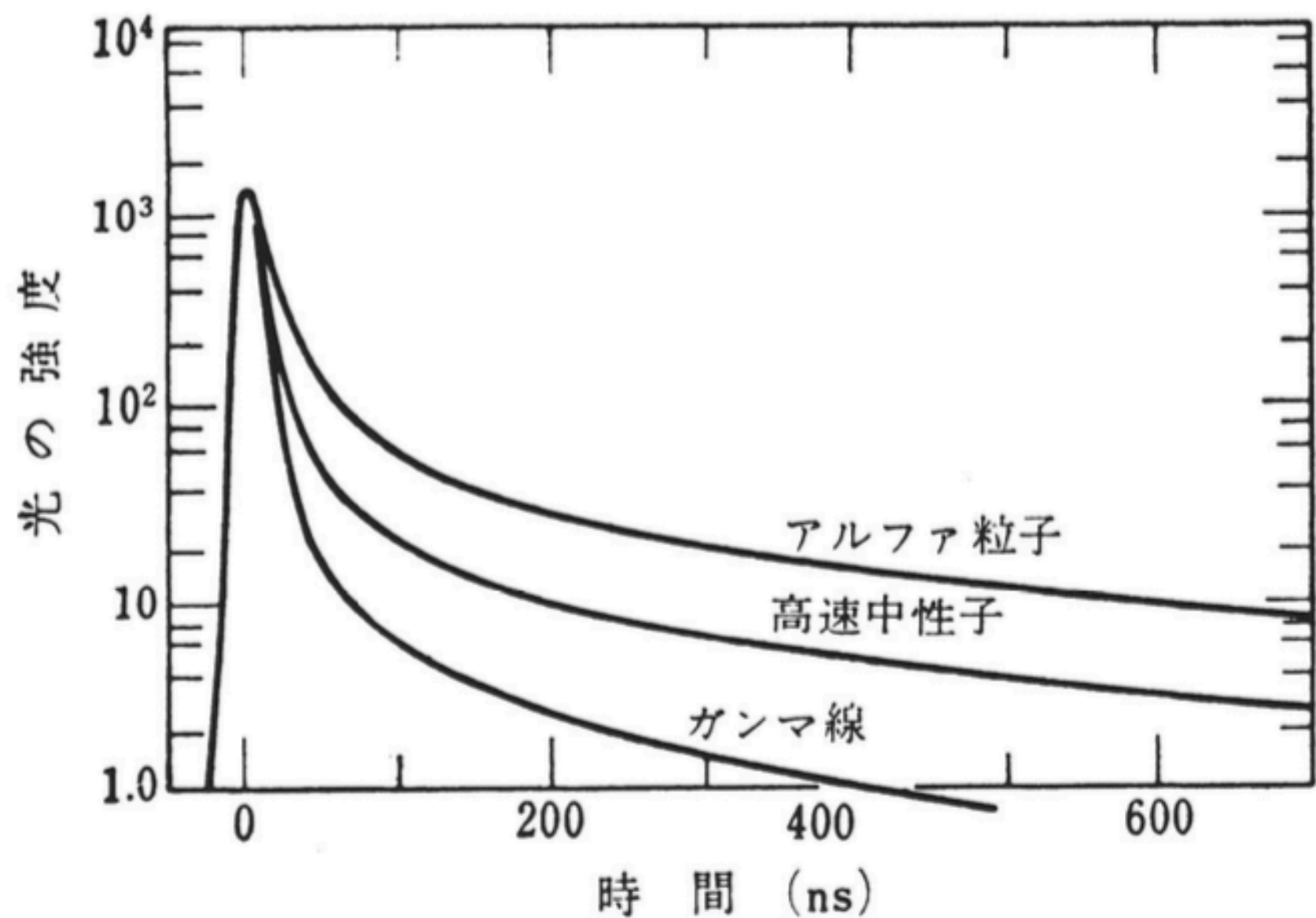


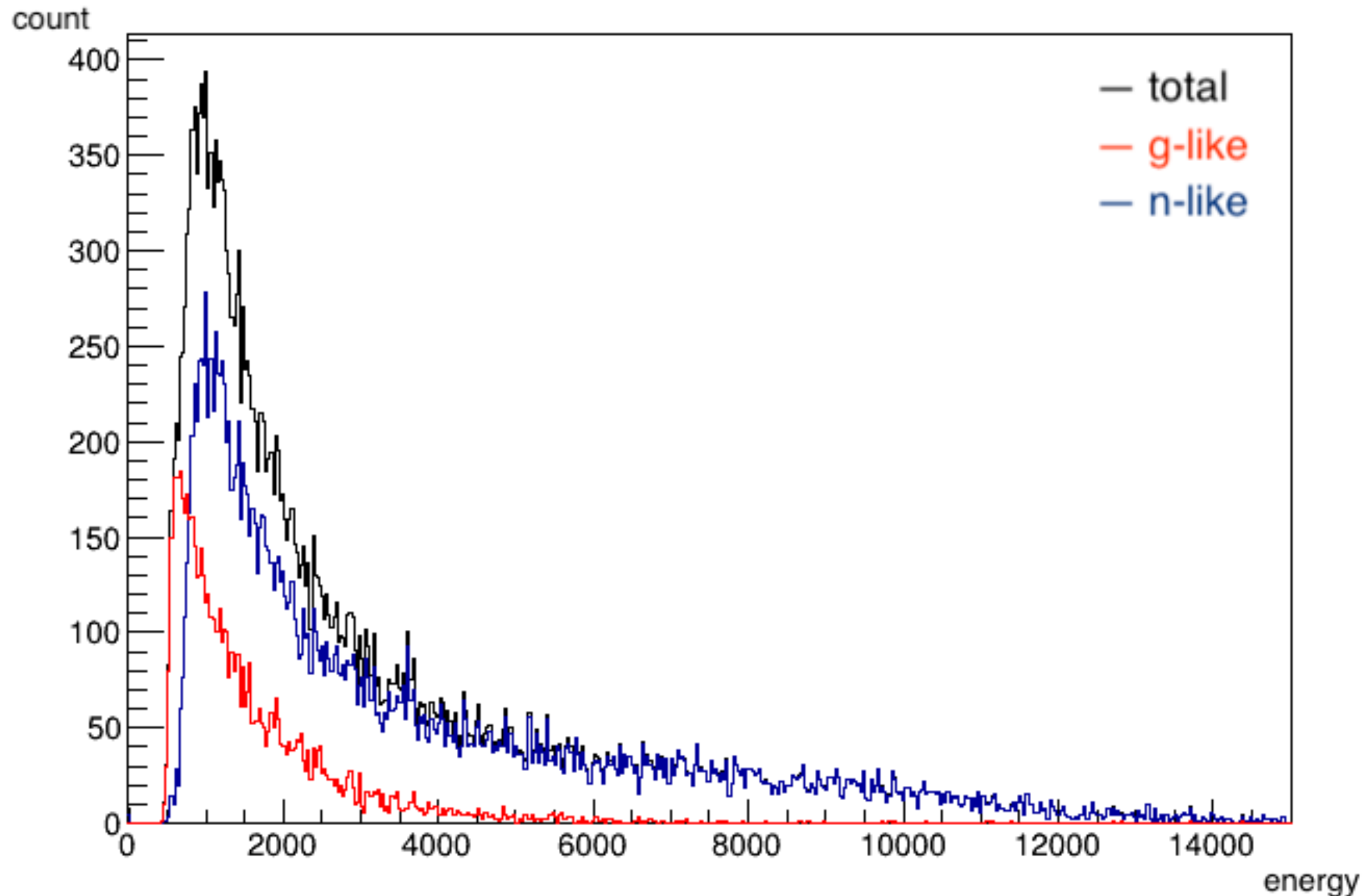
図 8.5

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 Thomas⁶⁰⁾ による)

Energy distribution

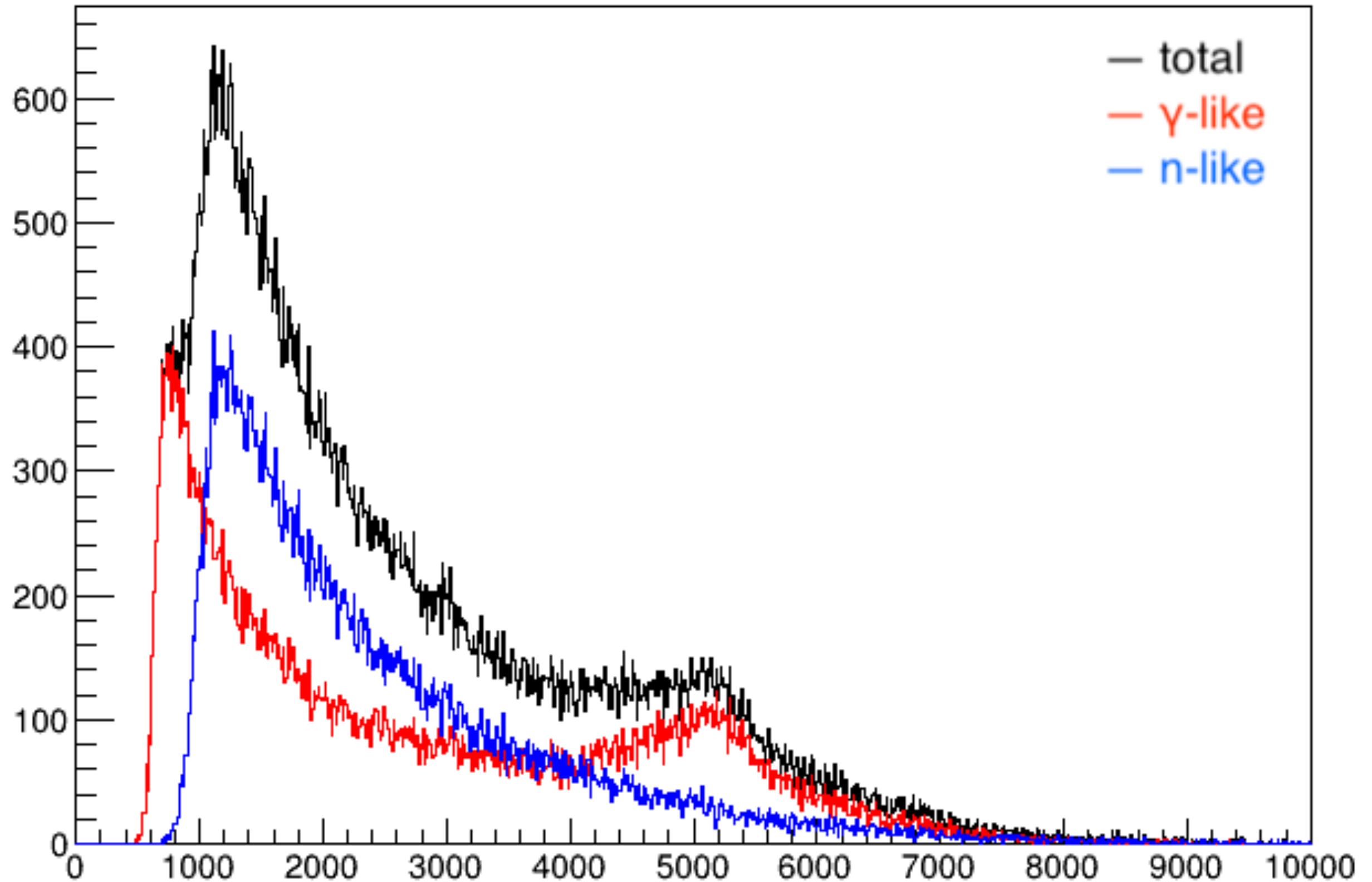
46

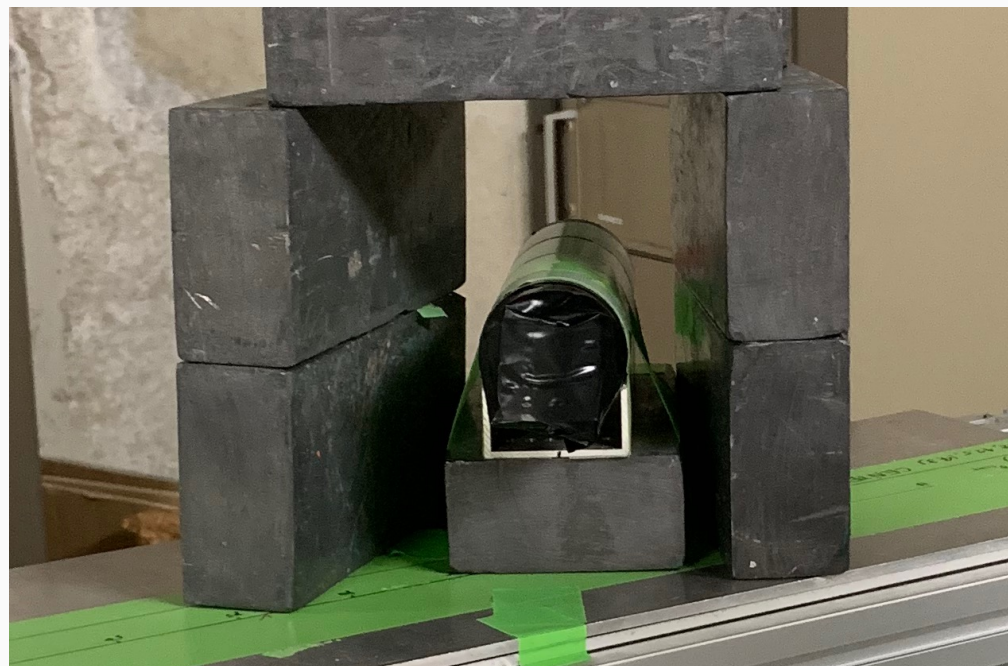
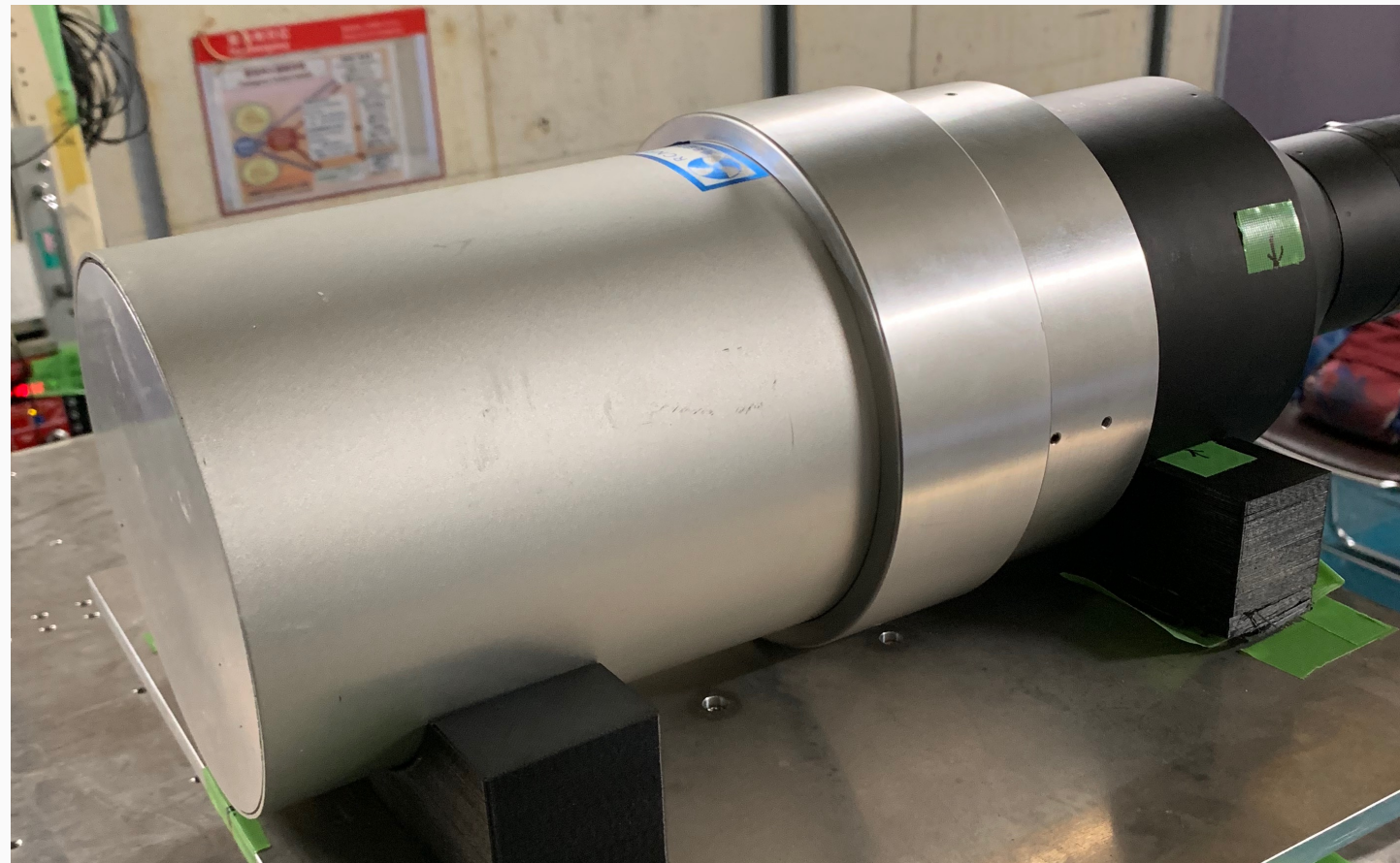
integral_cp[lqs_risetime+250]



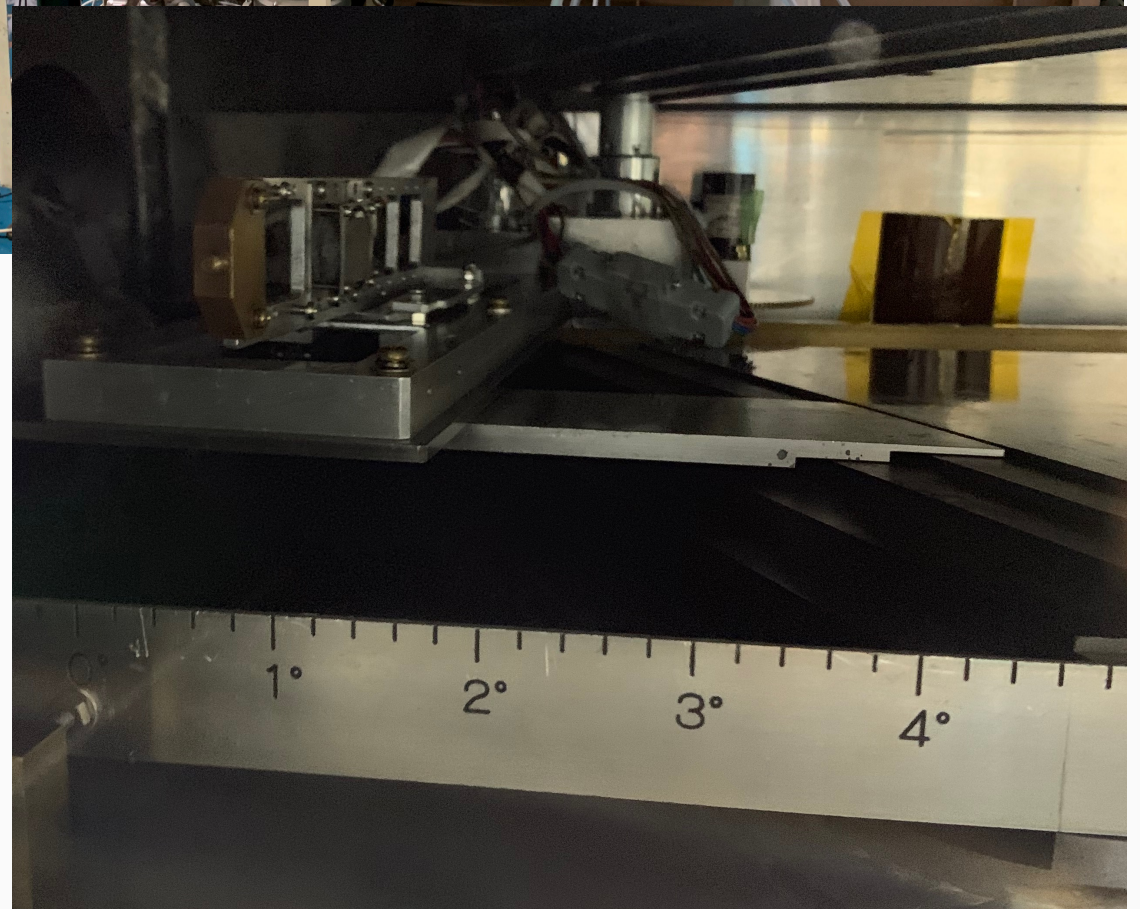
Energy distribution ($^{241}\text{Am}:\text{Be}$)

47



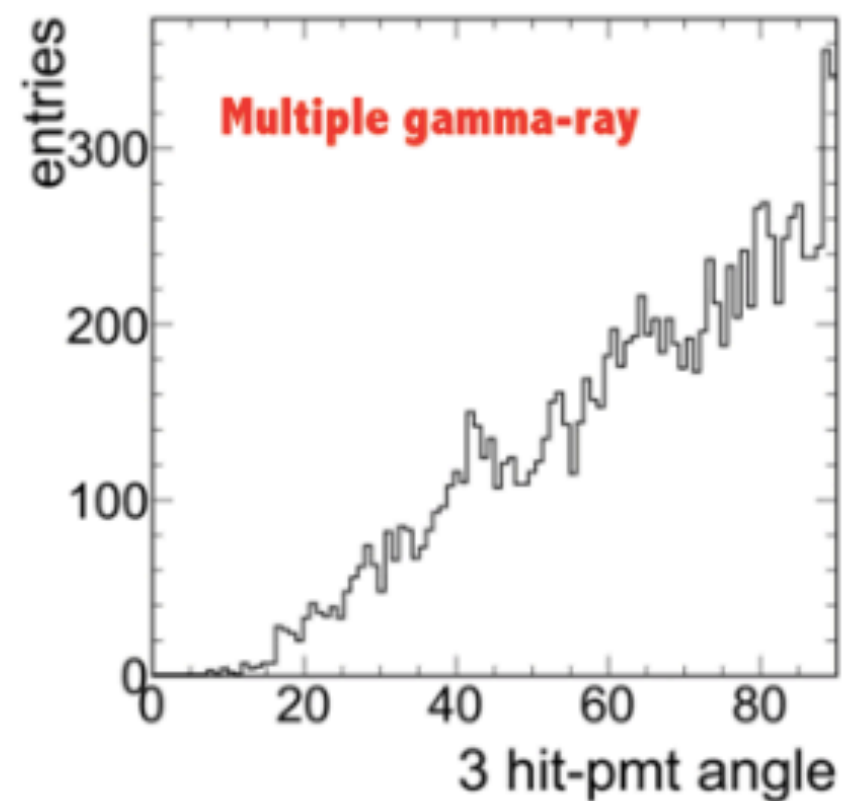
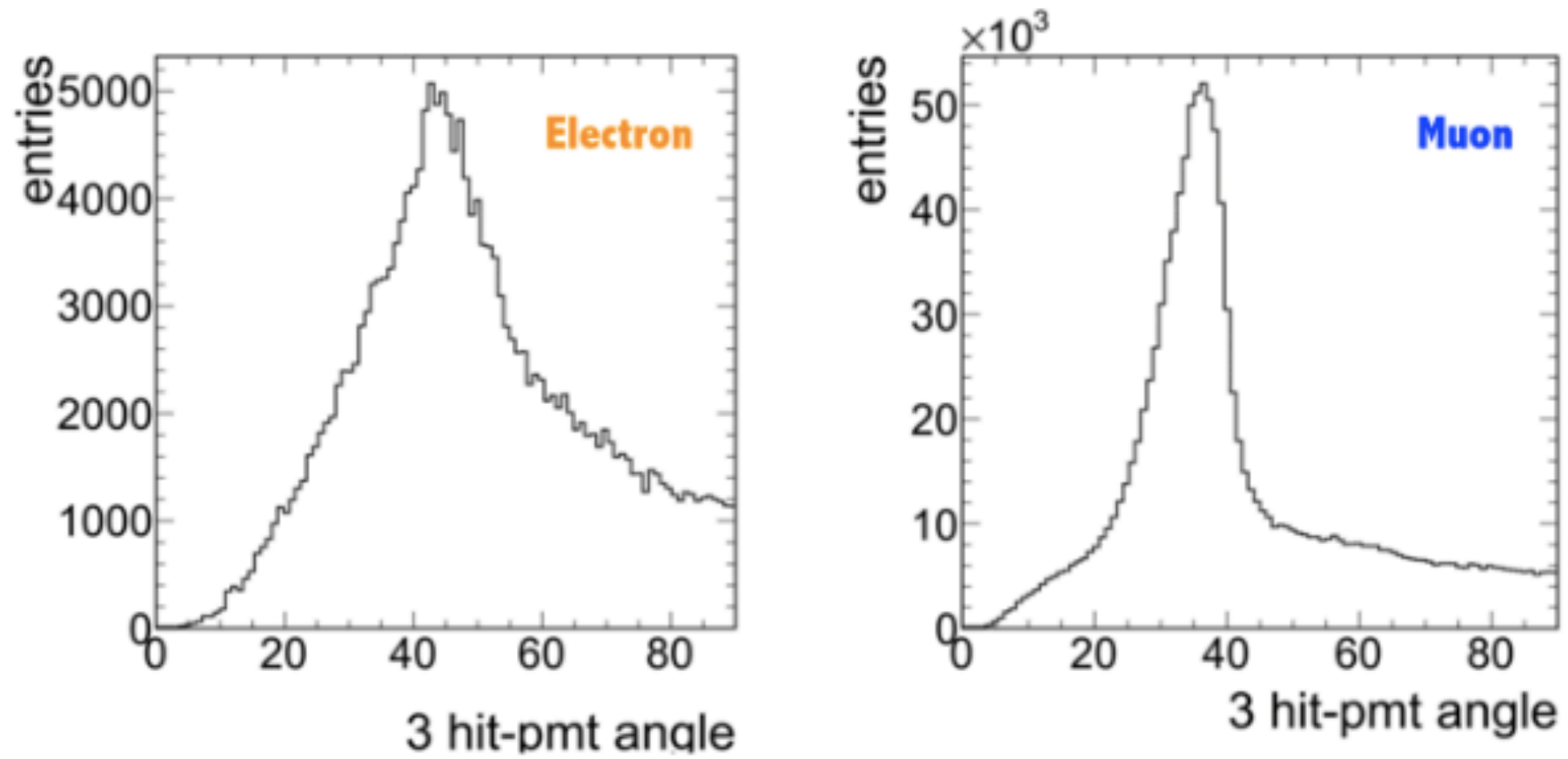






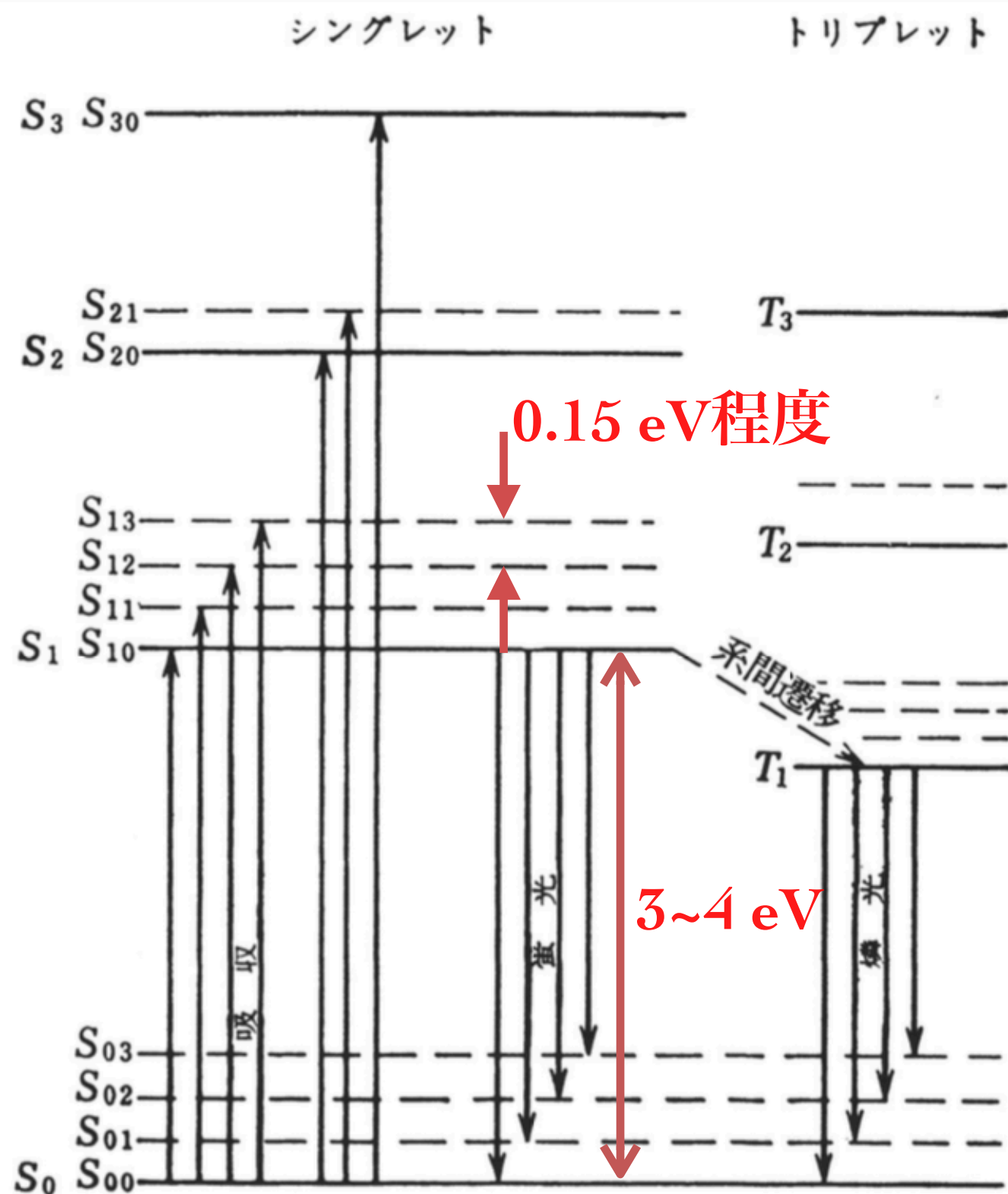
チェレンコフ角再構成

51



有機シンチレータ 発光過程

52



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)

$${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}(g.s. + 0.43\text{MeV})$$

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

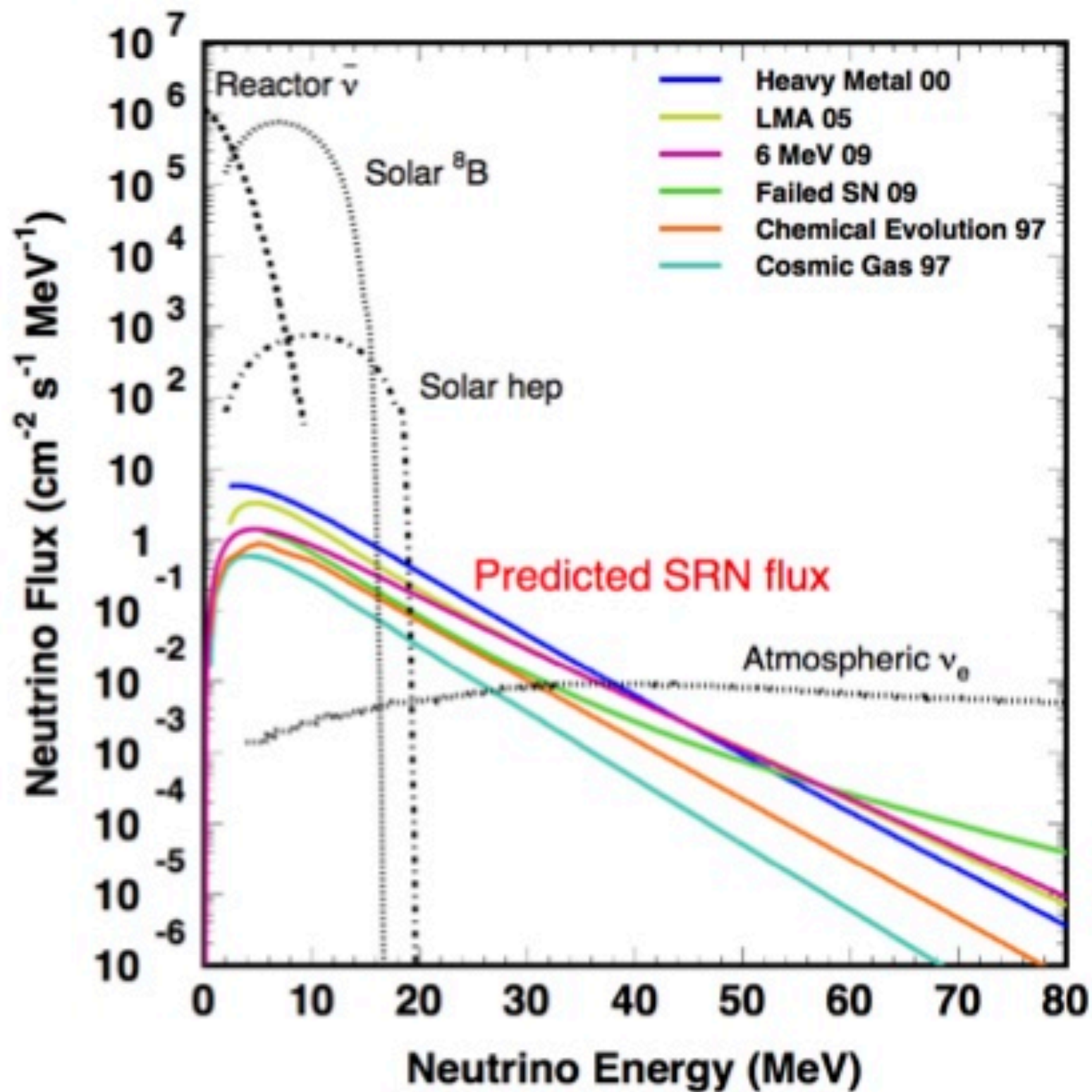
then $^{17}\text{O}^* \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{gamma}$

(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

55



Raw data

