

BISCOTTEE実験に向けた BGO結晶中の酸素原子核反跳における クエンチングファクターの測定

神戸大学 粒子物理学研究室 M1 門田佳吾

目次

- 導入
 - DSNB(超新星背景ニュートリノ)探索
 - BISCOTTEE実験
 - クエンチングファクターとは
 - 実験概要
- 中性子実験
 - セットアップ
 - ビームプロファイル
 - PSD
 - BGOと液体シンチレーターの時間差
- 解析結果
 - BGOエネルギー分布
 - クエンチングファクター
 - MC(モンテカルロシミュレーション)

DSNB(超新星背景ニュートリノ)探索

DSNB

過去に発生した超新星ニュートリノの総和
数十MeV領域での観測が期待

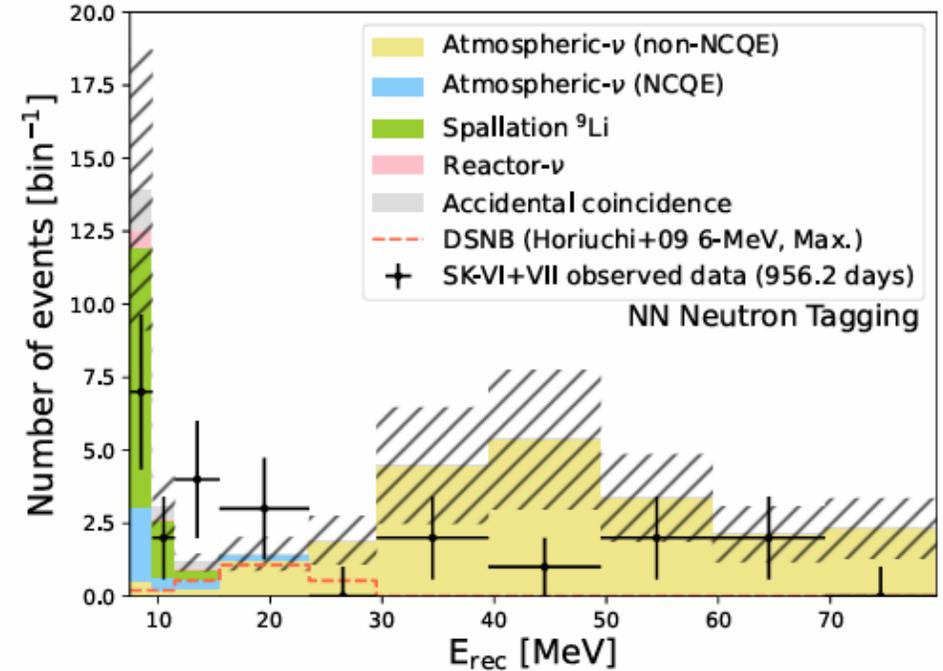
現在スーパーカミオカンデはGdを実装し、
反電子ニュートリノの検出感度を向上させ、
探索が行われている。

NCQE反応



大気ニュートリノと酸素のNCQE反応はDSNB
探索における背景事象

SK-GdでのDSNB探索

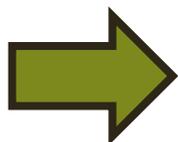


Event category	Relative systematic error	
	SK-VI	SK-VII
Atmospheric- ν (NCQE)	$\pm 71\%$	$\pm 71\%$
Atmospheric- ν (non-NCQE)	$\pm 36\%$	$\pm 41\%$
Spallation ${}^9\text{Li}$	$\pm 55\%$	$\pm 55\%$
Reactor- ν	$\pm 100\%$	$\pm 100\%$
Accidental coincidence	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$

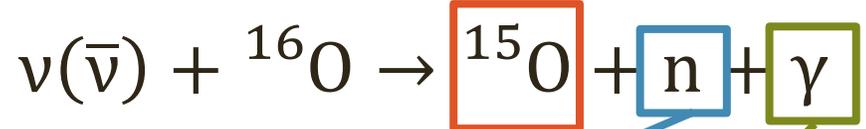
[arXiv:2511.02222v1](https://arxiv.org/abs/2511.02222v1)

BISCOTTEE (BISmuth-germanate Crystal base neutrino(neutrino)-nucleus scaTTering Experiment)

ニュートリノと酸素のNCQE反応を精密測定をしたい！



BISCOTTEE 組成にOを含むシンチレーション結晶であるBGO結晶(Bi₄Ge₃O₁₂)に短基線ニュートリノを照射する将来実験として計画



signal1

signal2

signal3

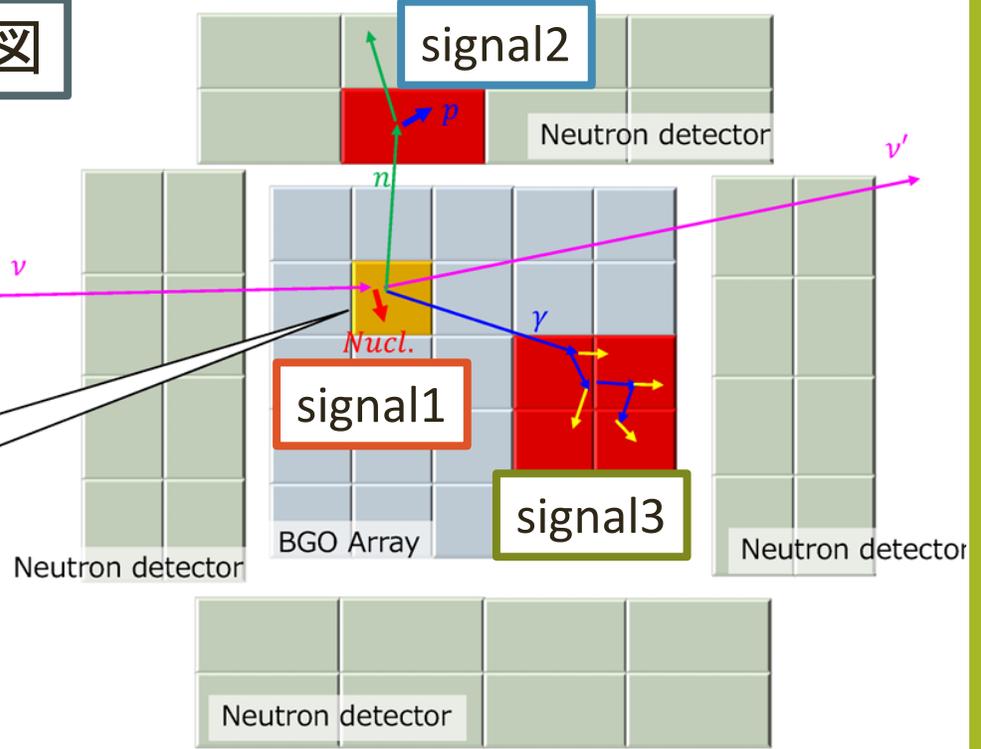
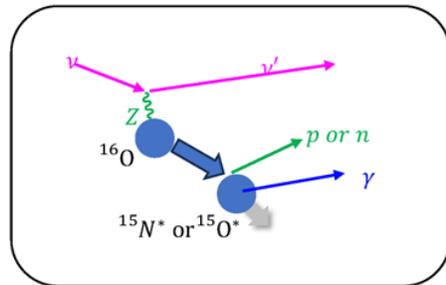
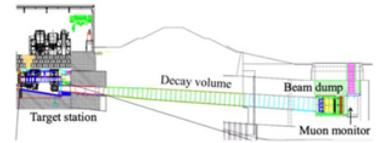
BGO中の酸素原子核反跳を信号の一つとして検出

本発表

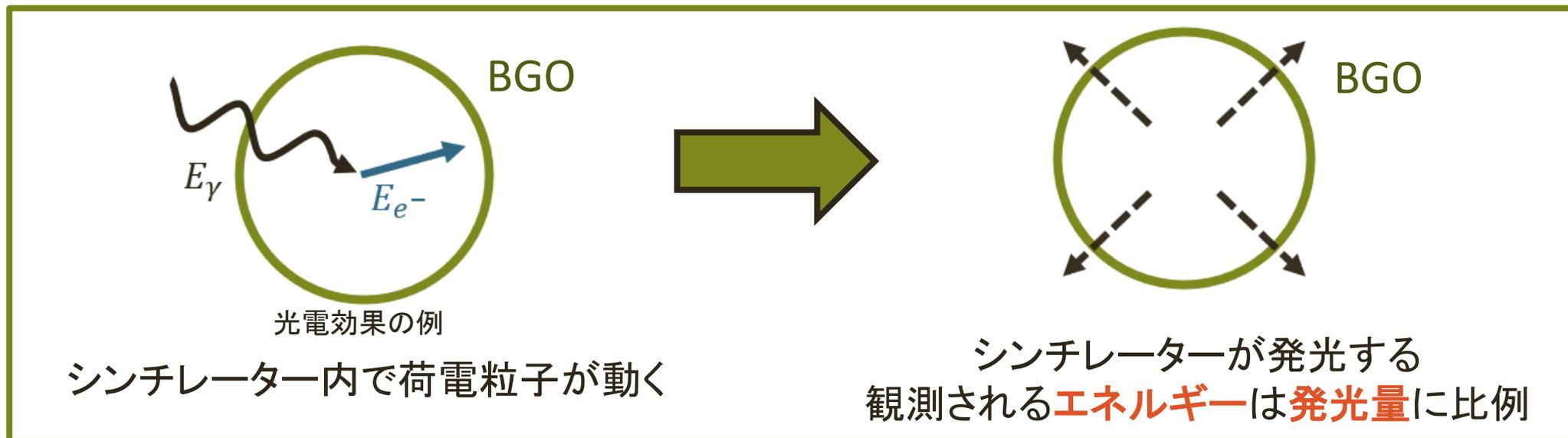


クエンチングファクターを測っておこう

BISCOTTEE構想図



クエンチングファクターとは？



発光量は荷電粒子の種類とエネルギーに依存

クエンチングファクター

= 荷電粒子が電子のときの発光量との比

Target! 荷電粒子の種類が酸素原子核の時、BGOでのクエンチングファクター

実験概要

中性子で**酸素原子核**を反跳させて落としたエネルギーを観測すればクエンチングファクターを計測可能

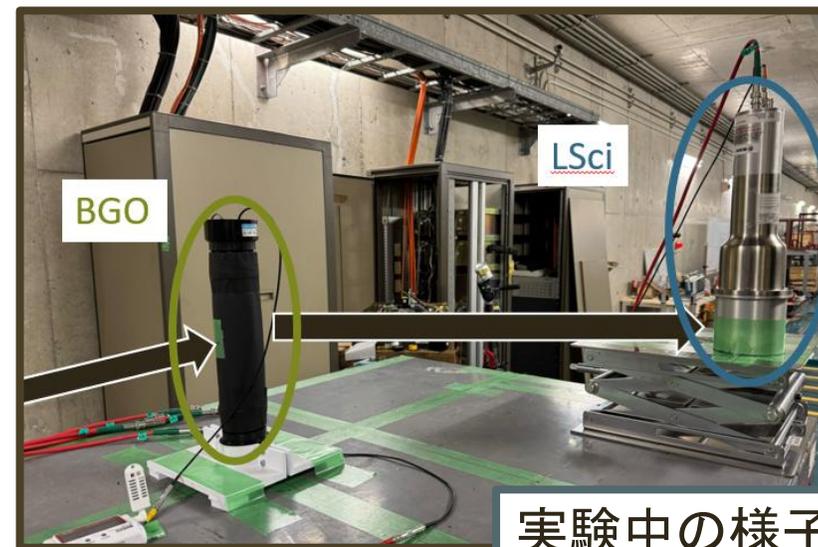
➡ 大阪大学RCNPにて2025/8/4～5で
純単色中性子ビーム(61.9±0.9(1σ)MeV)照射実験を実施

中性子が散乱角 θ で弾性散乱

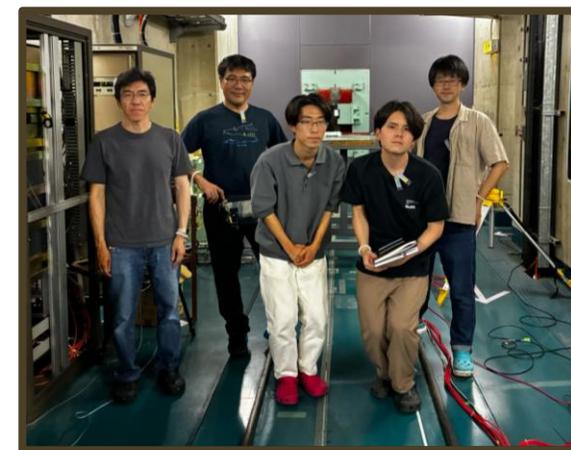
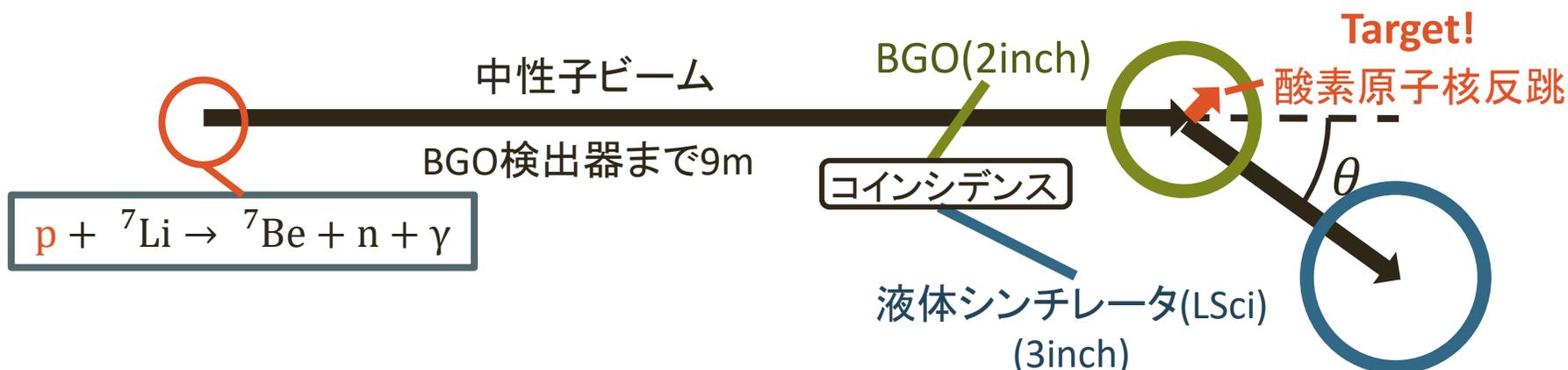


原子核反跳エネルギー $E_R(\theta)$ から
クエンチングファクターを決定

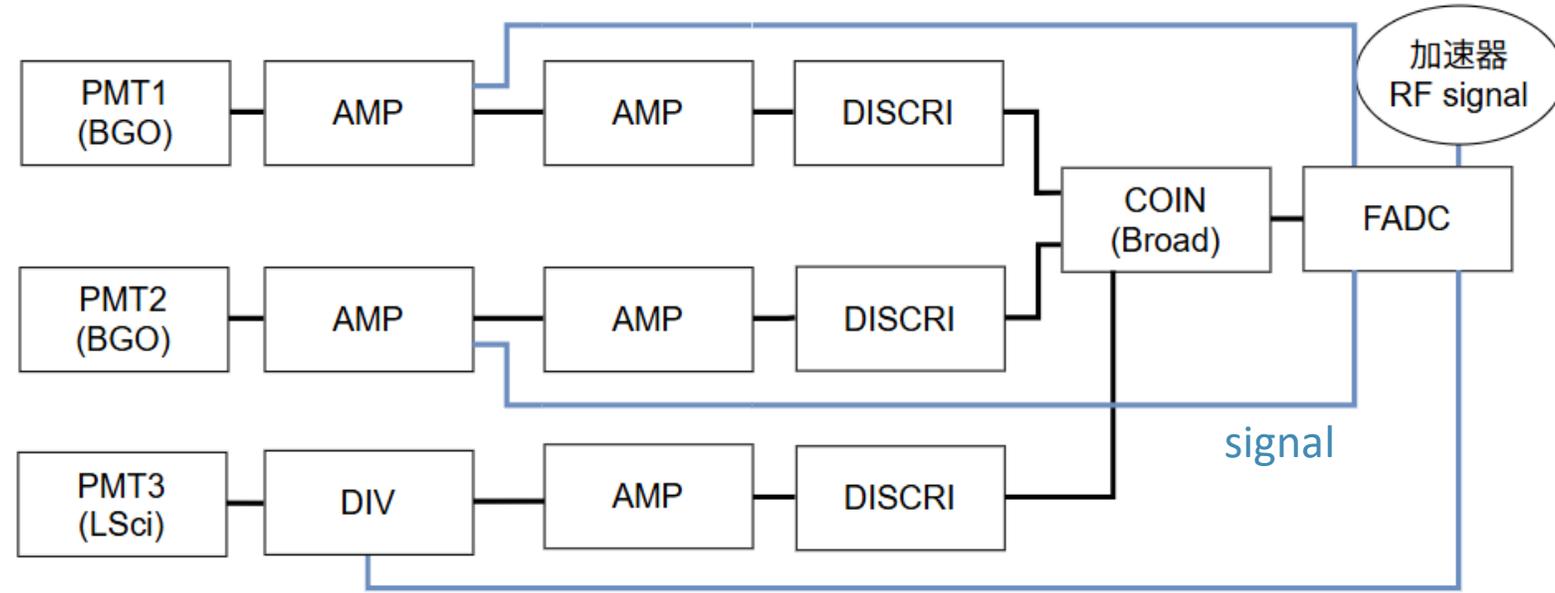
$$Q.F. = E_R^{vis} / E_R$$



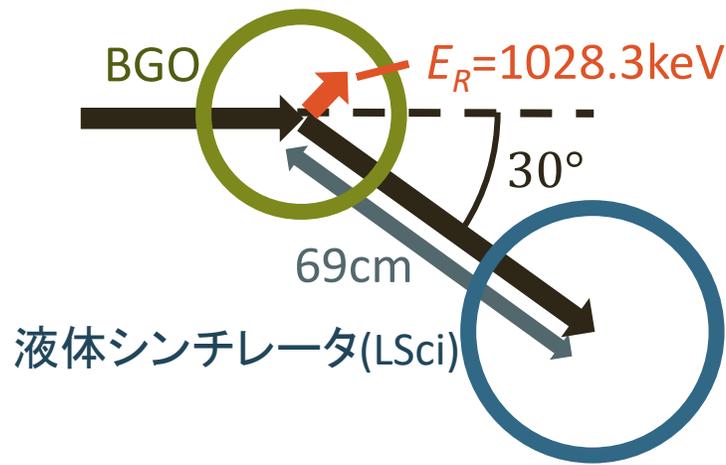
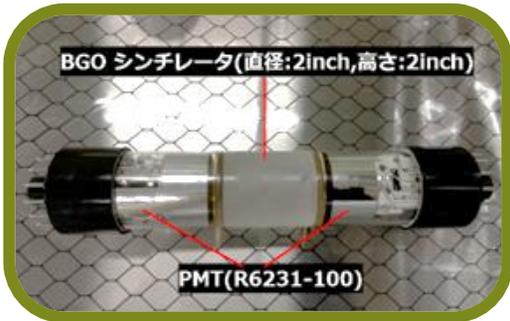
実験中の様子



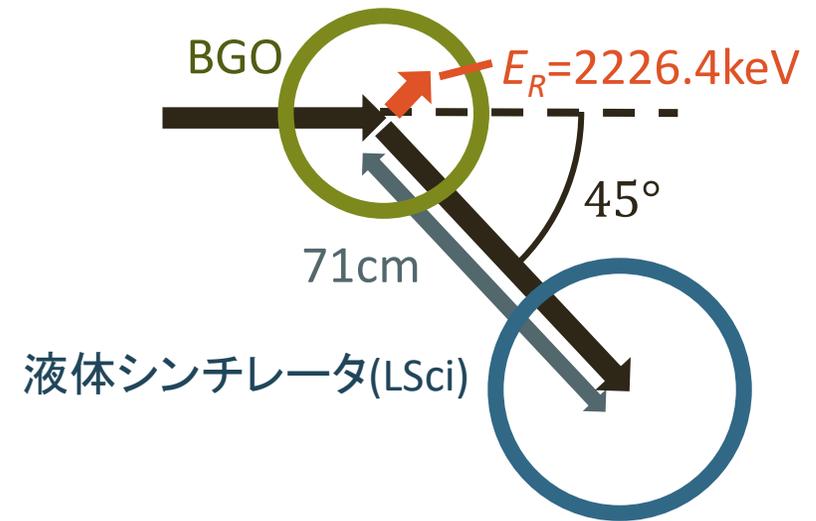
セットアップ



遮光前



計測期間 2026/8/4 4:24~11:10



計測期間 2026/8/4 12:11~16:10



直径 3inch
高さ 3inch

ビームプロファイル

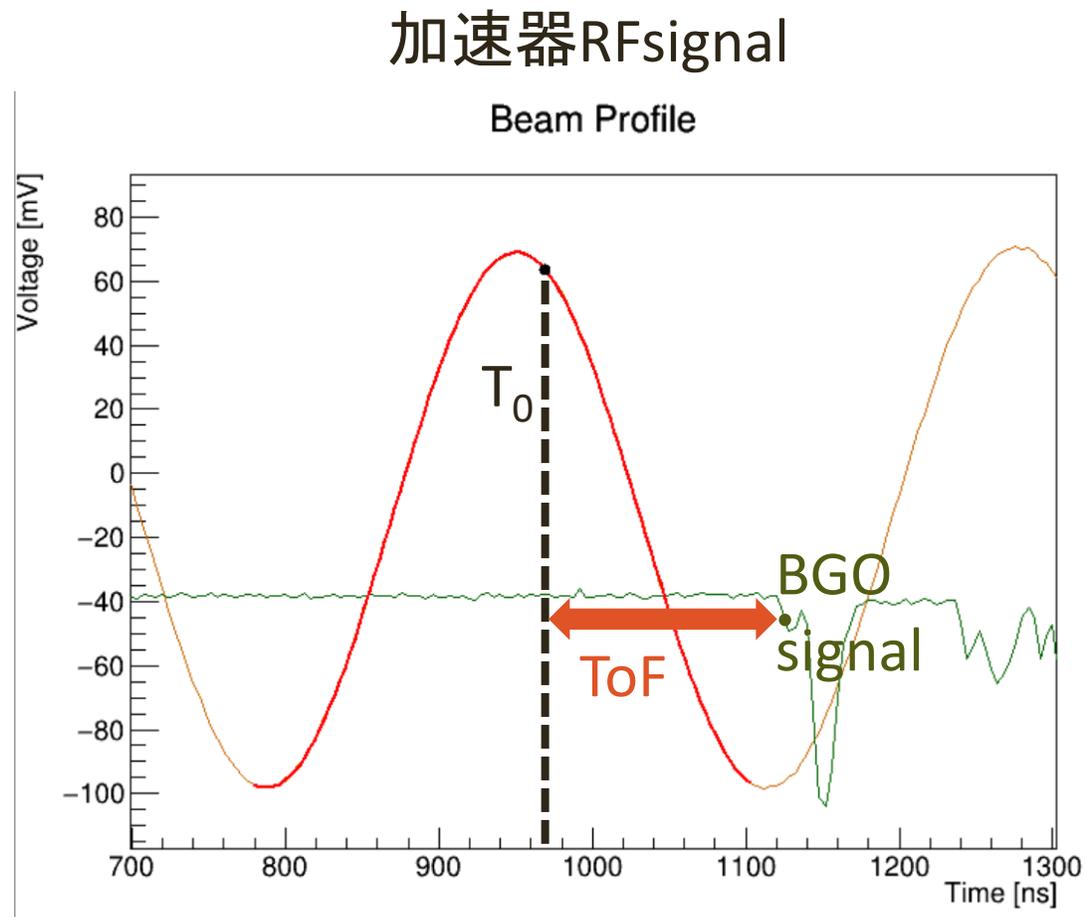
大阪大学RCNPでは加速された**プロトン**をパルス的にLiにぶつけることで中性子ビームを生成



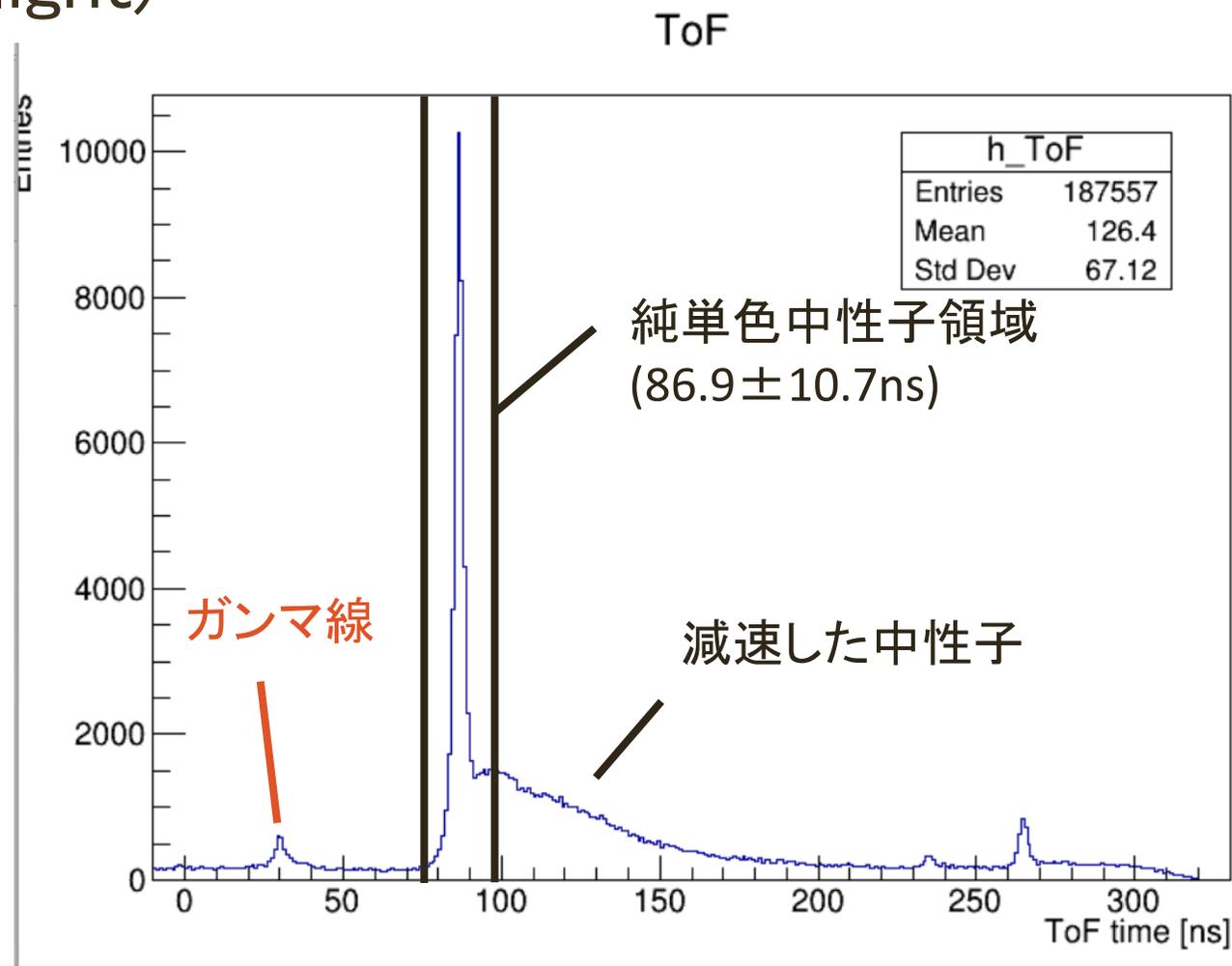
パルス波の周期をサイン波として
プロファイリング

ビームが出るタイミングを T_0 として設定

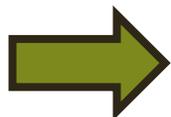
$$\begin{aligned} \text{ToF (Time of Flight)} \\ = T_{\text{BGO}} - T_0 \end{aligned}$$



ToF(Time of Flight)



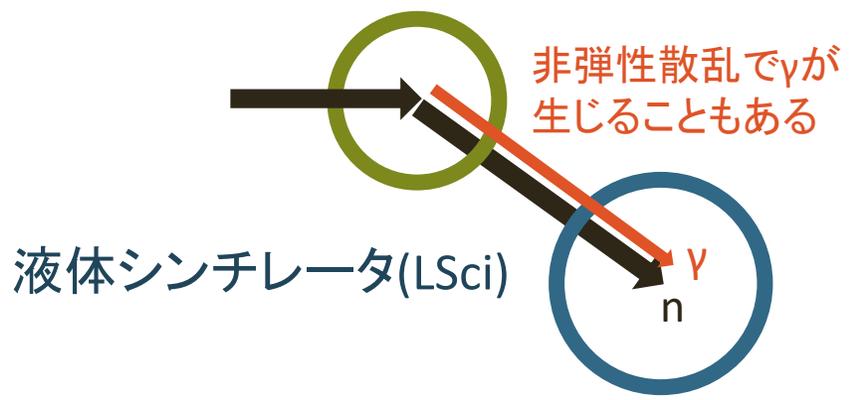
ToFは飛来した粒子の**速度**の情報を持つ



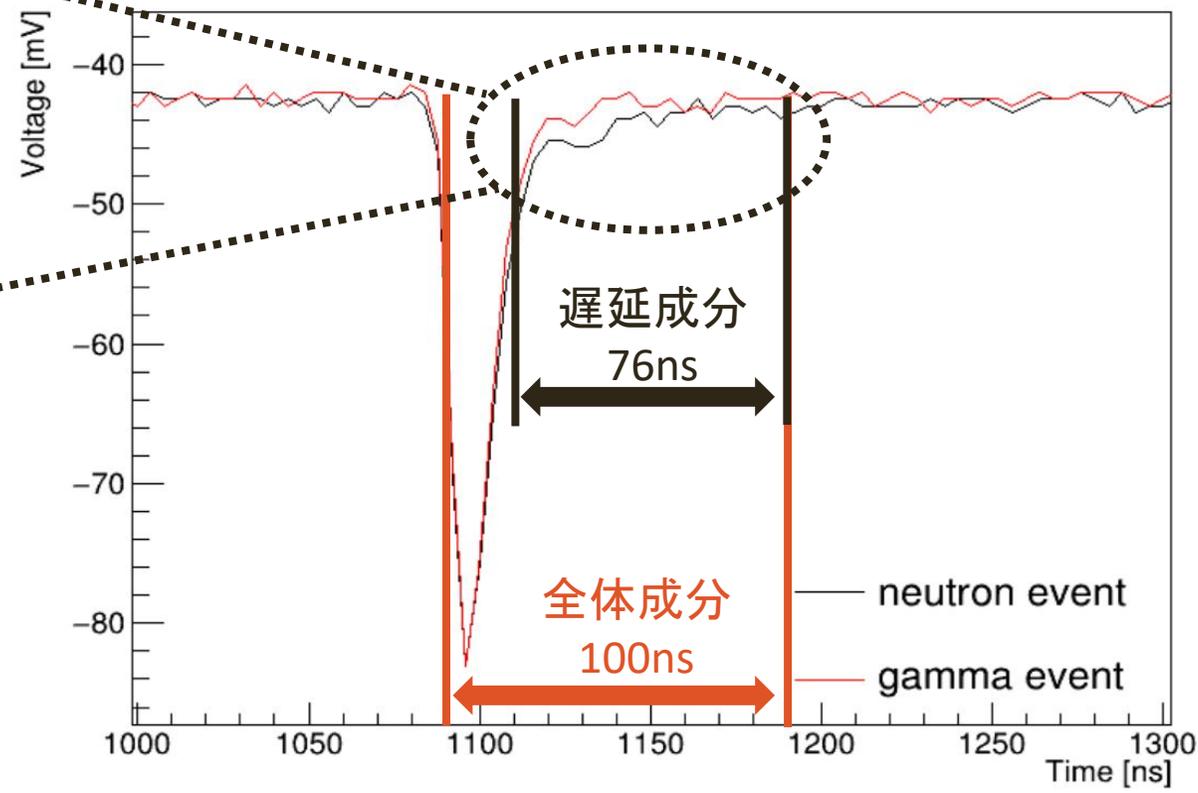
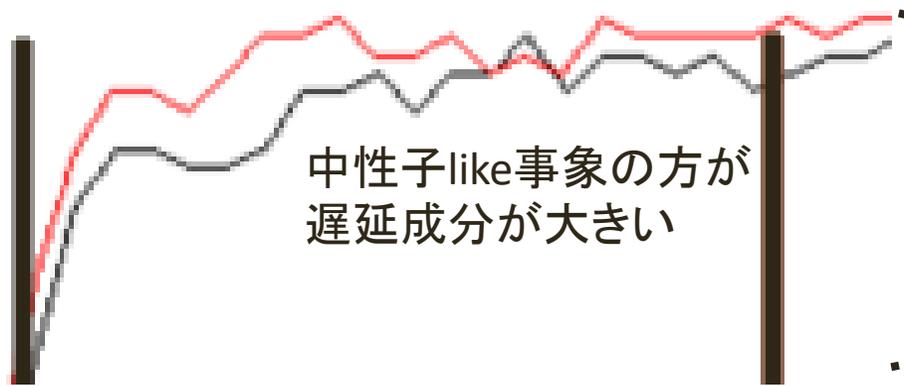
BGOに純単色エネルギー中性子が入射した事象を選択

PSD(Pulse Shape Discrimination)

液体シンチレータでは得られる波形の形によって入射した粒子の識別が可能



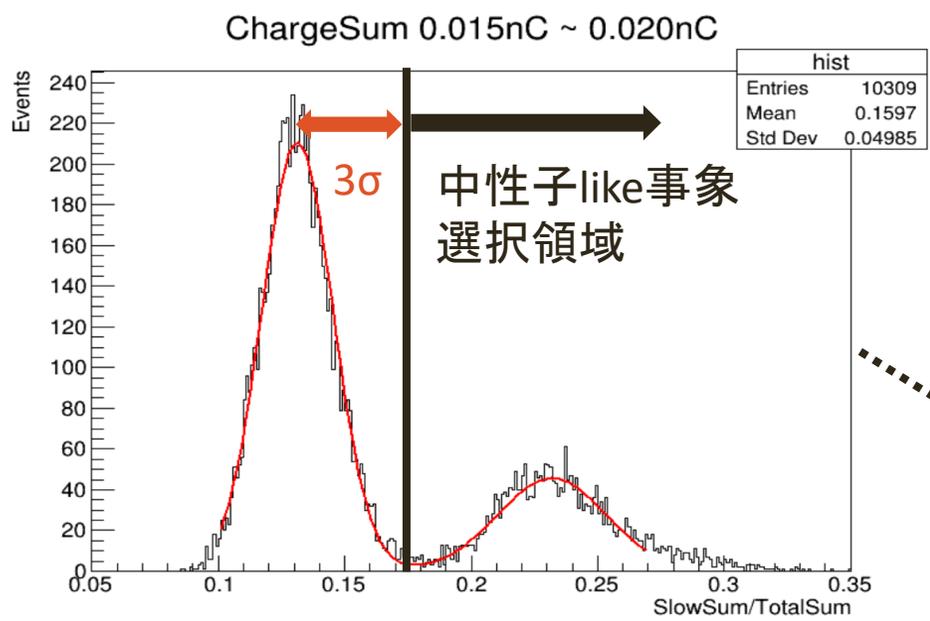
LSci signal



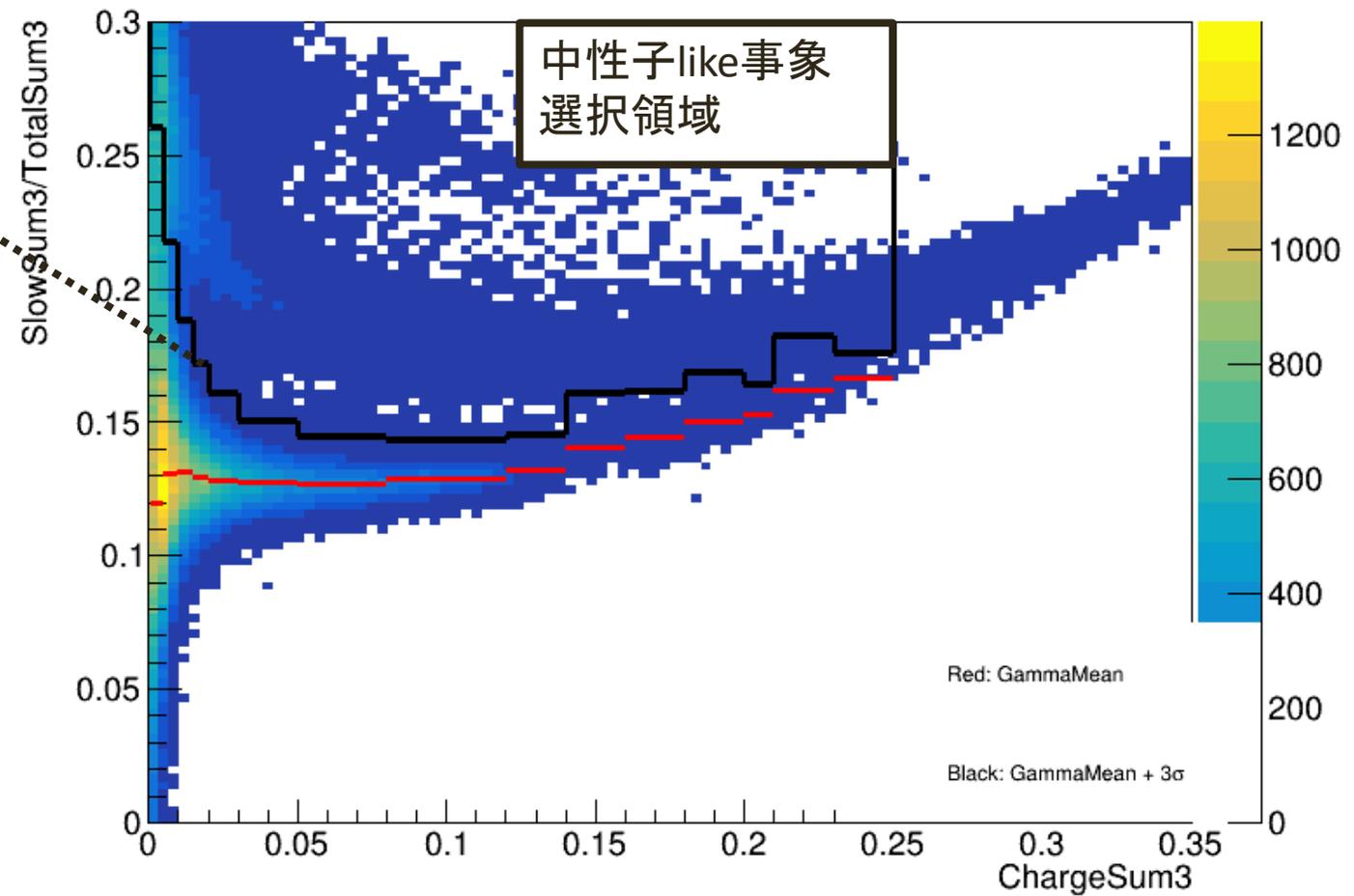
積分電荷を考え、

$\frac{\text{遅延成分(SlowSum)}}{\text{全体成分(TotalSum)}}$ で信号を弁別

PSD(Pulse Shape Discrimination)



PSD: SlowSum3/TotalSum3 vs ChargeSum3

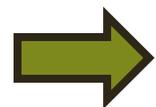


積分電荷を区切ってPSDを評価

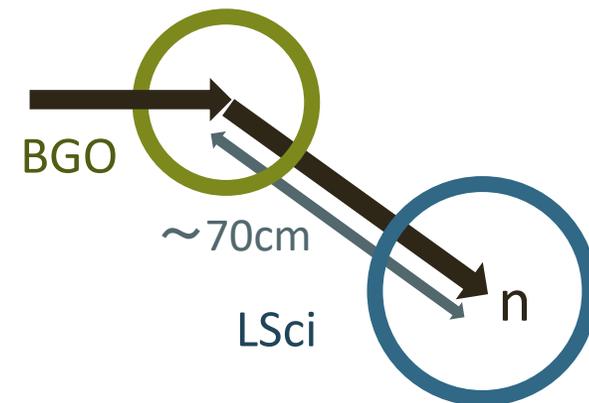
中性子like事象を選択

BGOと液体シンチレータの信号時間差

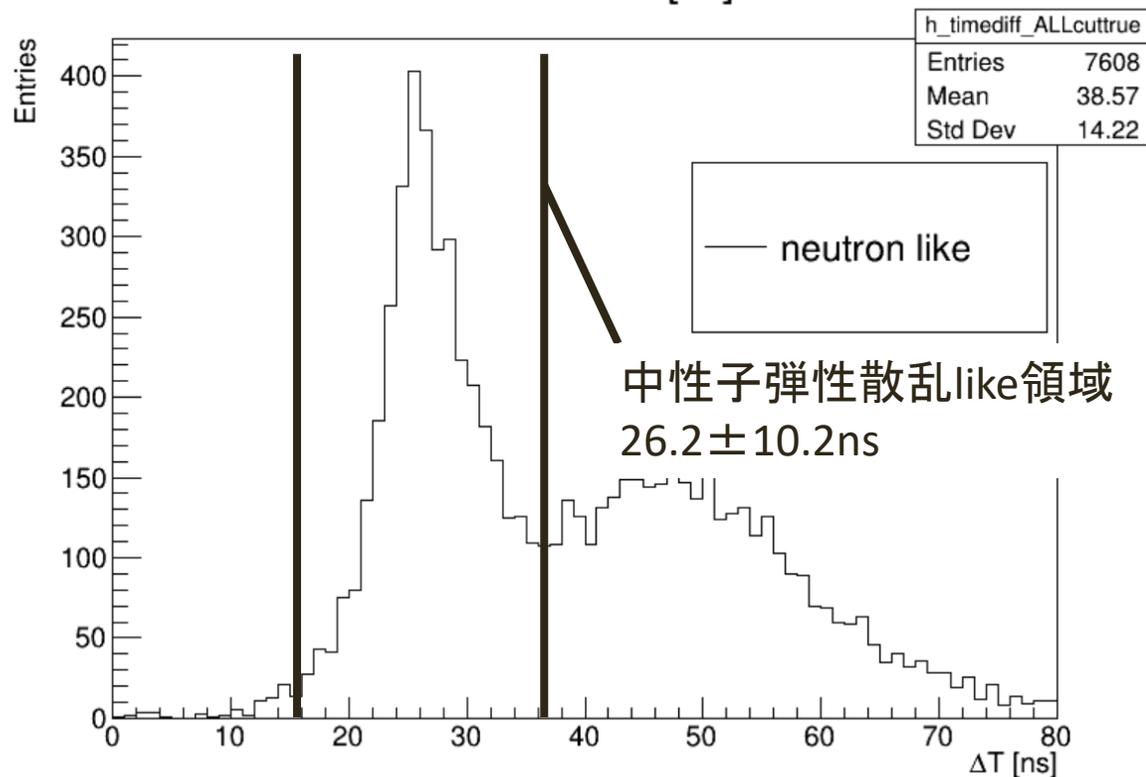
中性子がBGOで弾性散乱したならLSciに到達するまでの時間は一定のはず



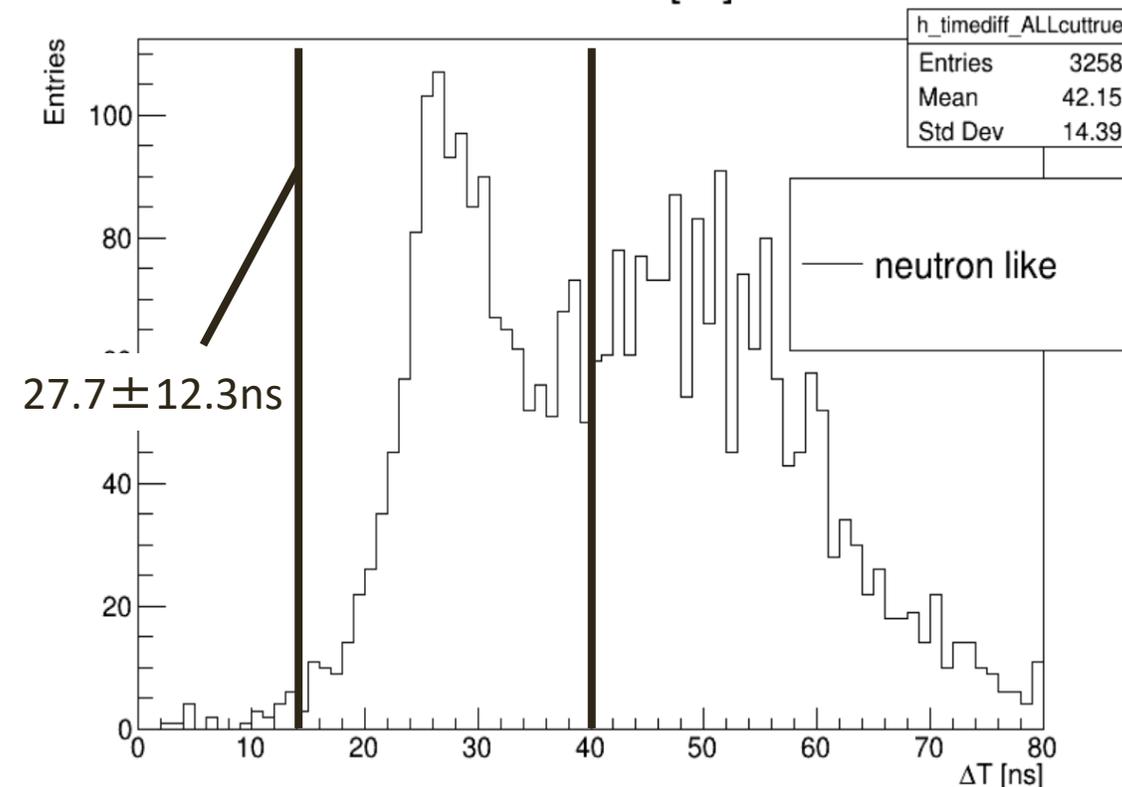
BGOとLSciの信号の時間差から**弾性散乱like事象**を選択



$\theta = 30^\circ$
BGO to LSci[ns]



$\theta = 45^\circ$
BGO to LSci[ns]

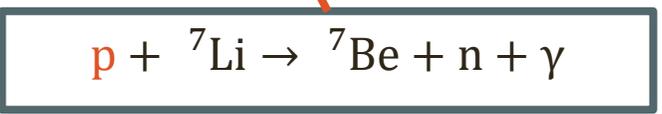


Step1

ビームプロファイルから
純単色中性子ビーム事象を選択

Next Step!

BGO内で弾性散乱した酸素原子核の落としたエネルギーを観測したい



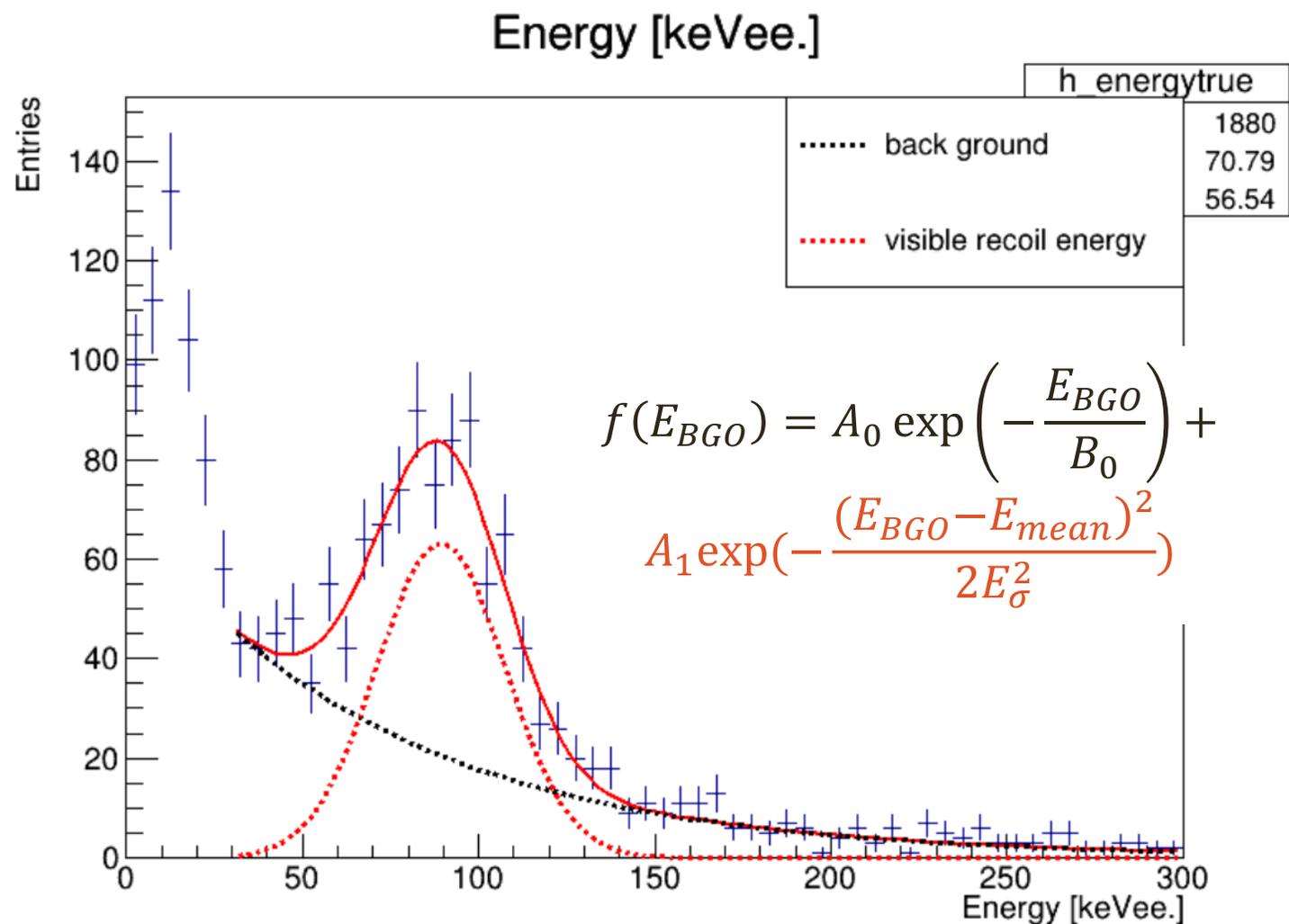
Step2

PSDによって液体シンチレーターに
中性子が入った事象を選択

Step3

BGOと液体シンチレータの信号時間差から
中性子弾性散乱likeな事象を選択

BGOエネルギー分布($\theta = 30^\circ$)

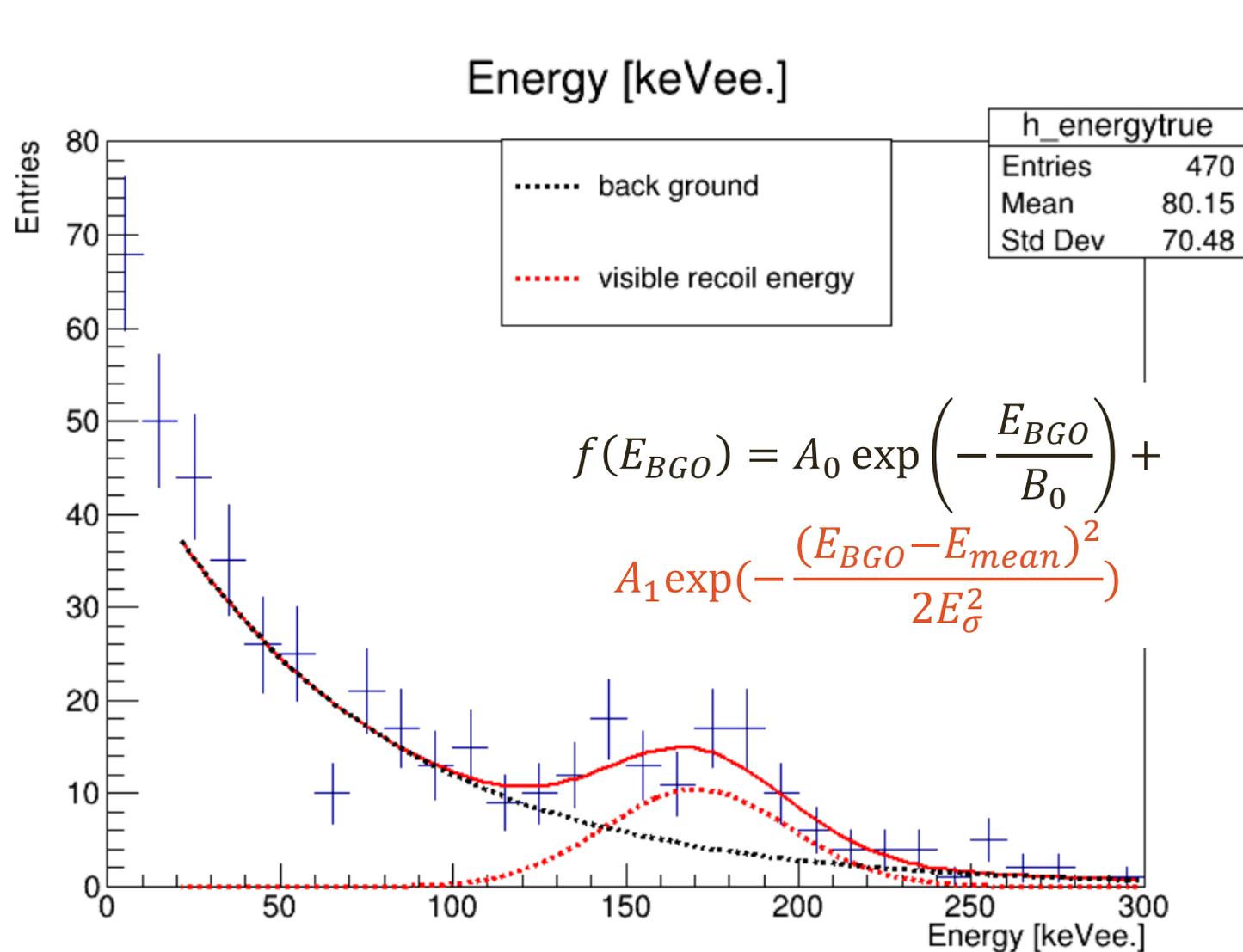


A_0	69.2	± 8.0
B_0 (keV)	73.5	± 4.2
A_1	63.2	± 4.2
E_{mean} (keV)	89.3	± 1.3
E_σ (keV)	18.2	± 1.4

$$\chi^2/NDF = 57.159/49$$

$$E_R^{vis} = 89.3 \pm 18.2(1\sigma)(\text{keV})$$

BGOエネルギー分布($\theta = 45^\circ$)

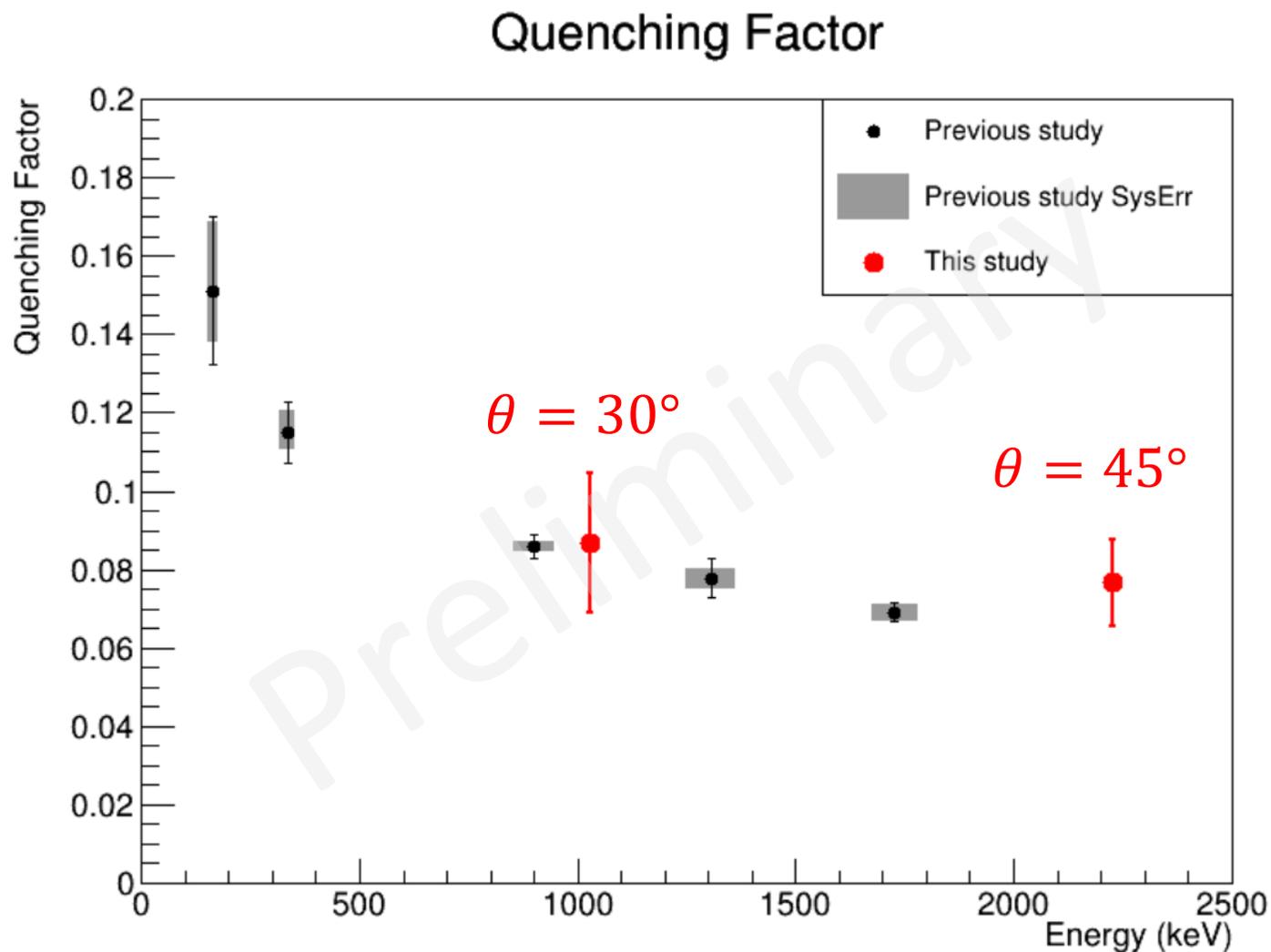


A_0	43.3	± 6.8
B_0 (keV)	78.7	± 11.9
A_1	10.1	± 2.2
E_{mean} (keV)	170.7	± 5.9
E_σ (keV)	24.7	± 6.1

$$\chi^2/NDF = 21.172/21$$

$$E_R^{vis} = 170.7 \pm 24.7(1\sigma)(\text{keV})$$

クエンチングファクター



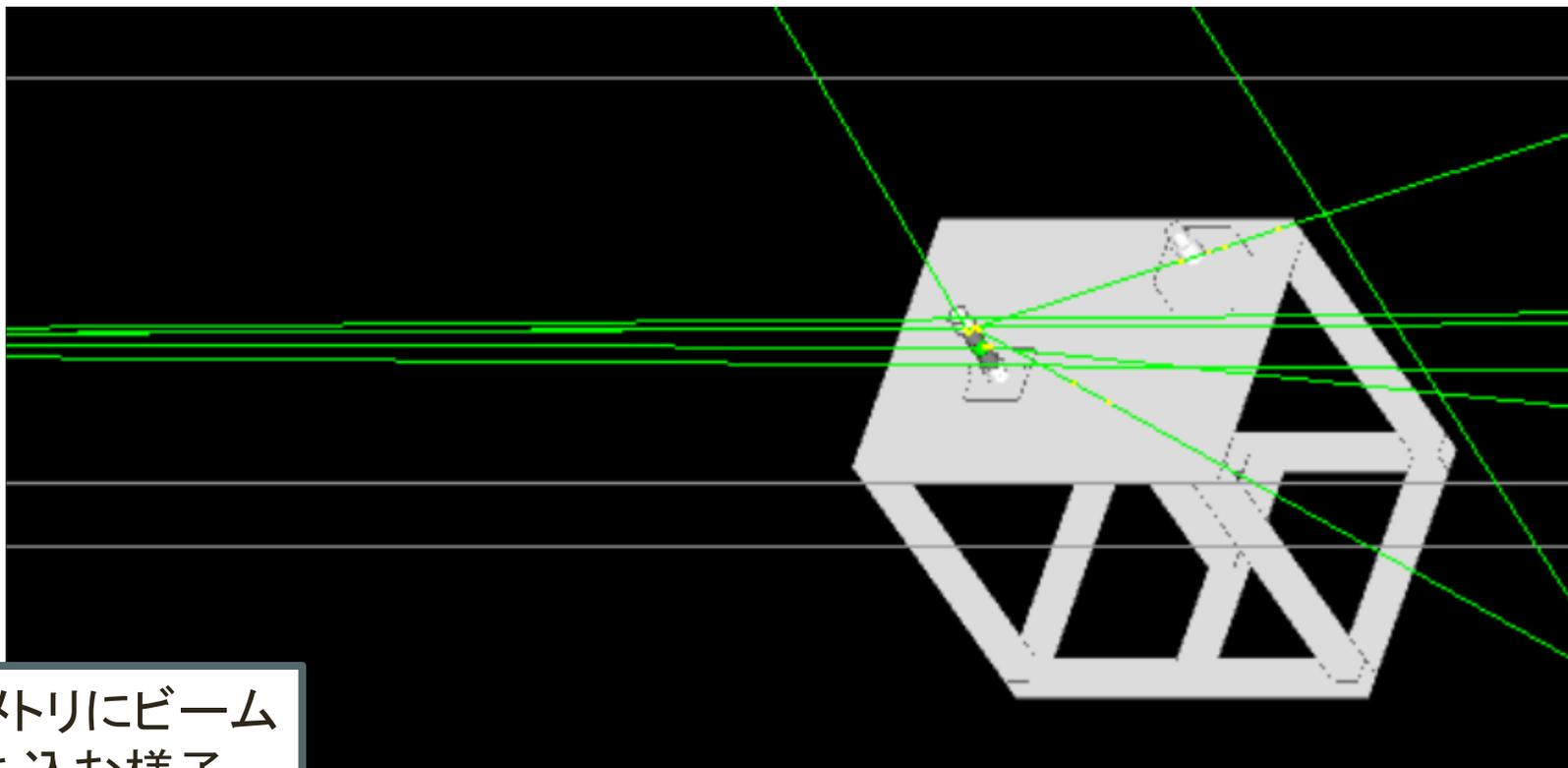
$$\begin{aligned}
 QF(E_R = 1028.3\text{keV}) &= E_R^{vis} / E_R \\
 &= \mathbf{0.087 \pm 0.018(1\sigma)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 QF(E_R = 2226.4\text{keV}) &= E_R^{vis} / E_R \\
 &= \mathbf{0.077 \pm 0.011(1\sigma)}
 \end{aligned}$$

➡ 先行研究と同様の傾向がみられる

MC(モンテカルロシミュレーション)

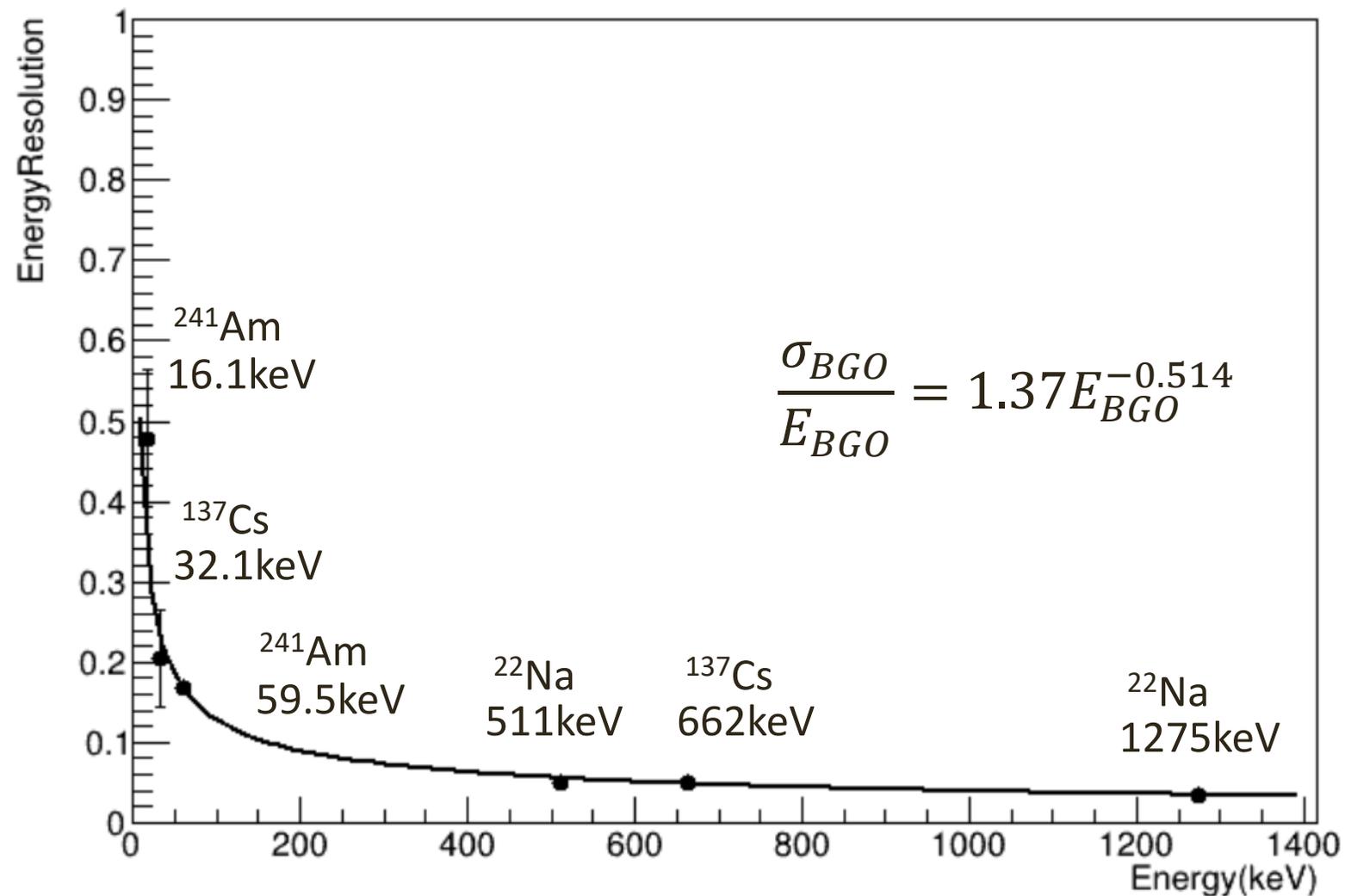
- Geant4に散乱角 30° の実験環境を再現
- $61.9 \pm 0.9(1\sigma)$ MeV中性子ビームを照射
- 発生地点から6mで10cm×12cmの長方形でコリメート



ジオメトリにビーム
を打ち込む様子

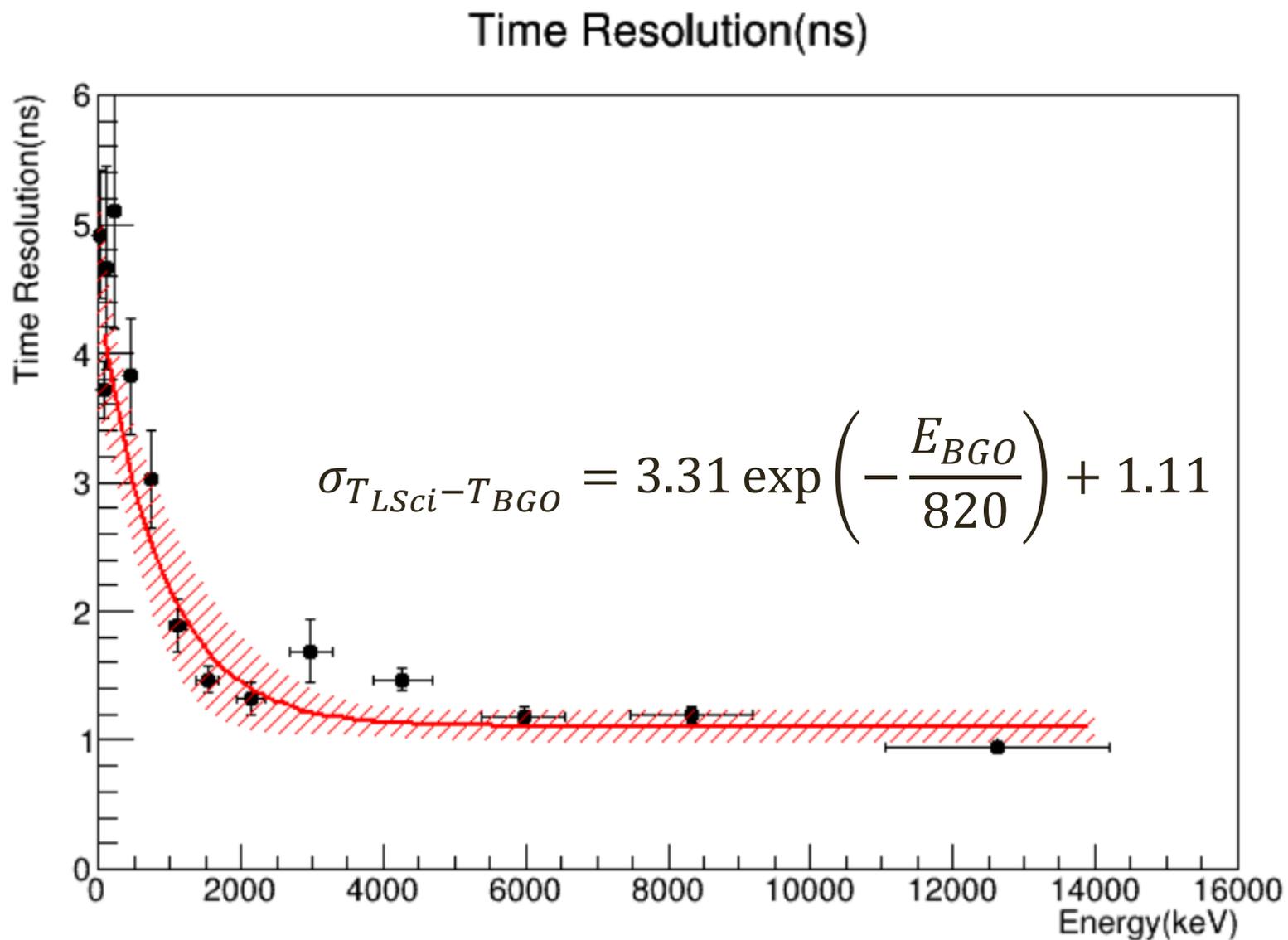
エネルギー分解能

Energy vs EnergyResolution



検出器応答として
BGOエネルギー分解能を
線源を用いて計測データ
から実装

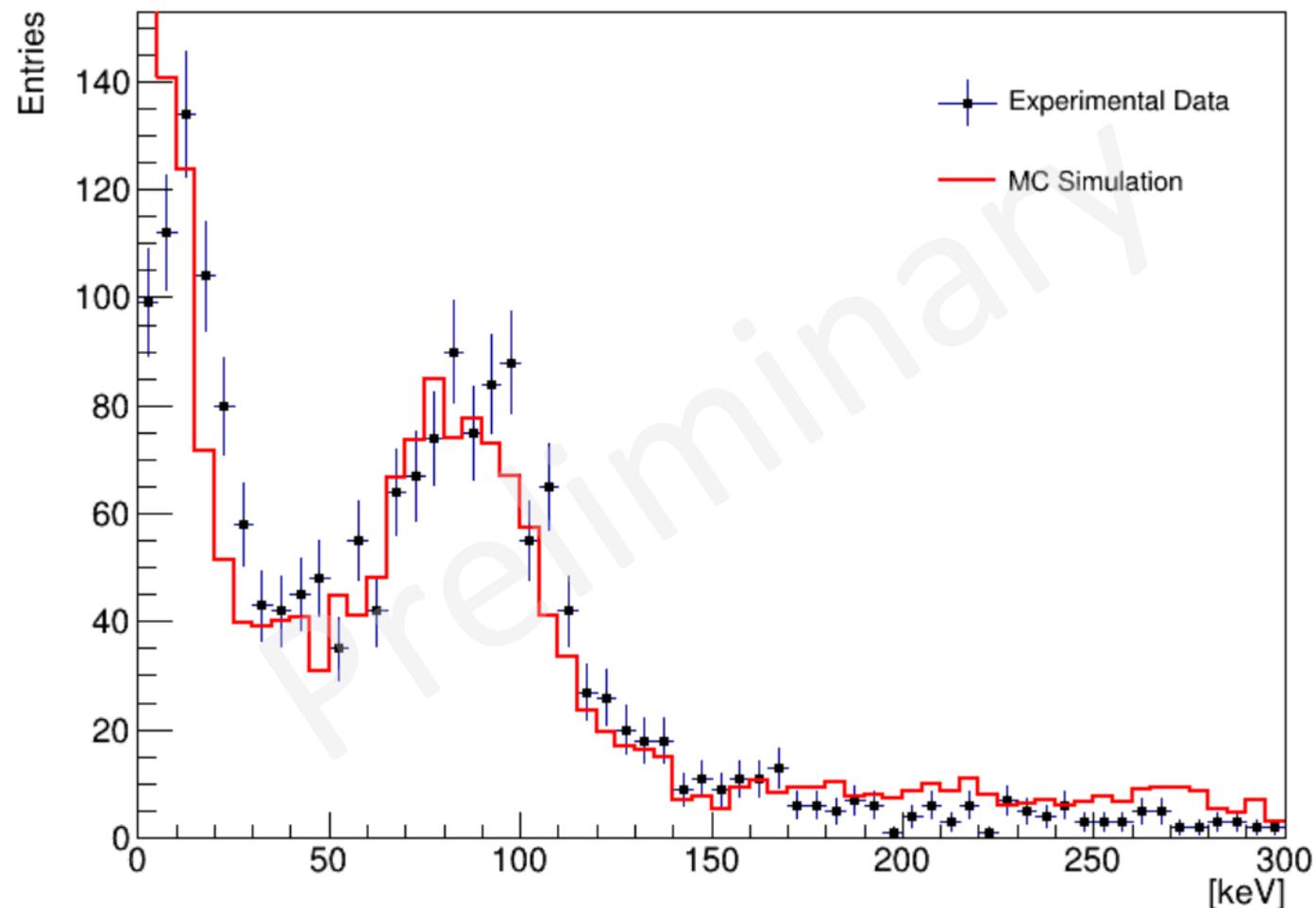
時間分解能



検出器応答として
BGO-LSci時間分解能を
ビーム実験データ
から実装

MCと実験値の比較

Energy



MC選択条件

LSciで中性子がエネルギーを落とす

BGO-LSci時間差(実験を再現)

酸素原子核のクエンチングファクター

$$QF_O = 0.087$$

その他のクエンチングファクター(仮の値)

$$QF_\alpha = 0.1, QF_{Ge} = 0.005, QF_{Bi} = 0.005$$

を実装

シミュレーションが実験を
再現できていそう

まとめと今後の展望

大阪大学RCNPでの中性子ビーム照射実験で
BGOでの弾性散乱を観測し、クエンチングファクターを測定した

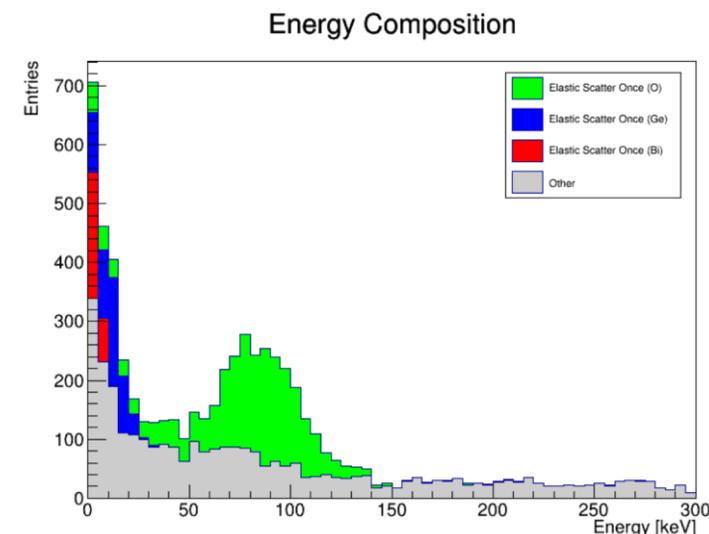
$$QF(30^\circ) = E_{recVis}/E_{rec} = \mathbf{0.087 \pm 0.018(1\sigma)}$$

$$QF(45^\circ) = E_{recVis}/E_{rec} = \mathbf{0.077 \pm 0.011(1\sigma)}$$

しかし、系統誤差や背景事象の評価が不十分
→Geant4との比較で解決を目指す

キャリブレーションが誤差を持っている
→系統誤差として導入

O原子核反跳だけでなく、Ge原子核、Bi原子核反跳も
見られる
→Geant4を用いてそれぞれのクエンチングファクター
をフリーパラメータとした解析が必要

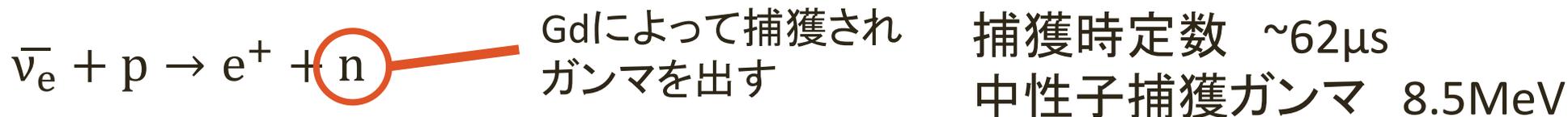


クエンチングファクターの最終決定を目指す

バックアップ

中性子捕獲

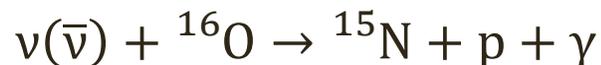
SKではGdを導入



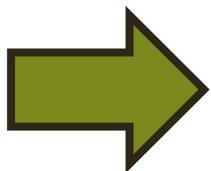
遅延同時計測によって、 $\bar{\nu}_e$ の逆ベータ崩壊を識別する
DSNB探索では、 $\bar{\nu}_e$ の逆ベータ崩壊がターゲット

しかし、

NCQE反応も同様に中性子を出す



生成された中性子や陽子の副反応によっても追加で
中性子が生成される

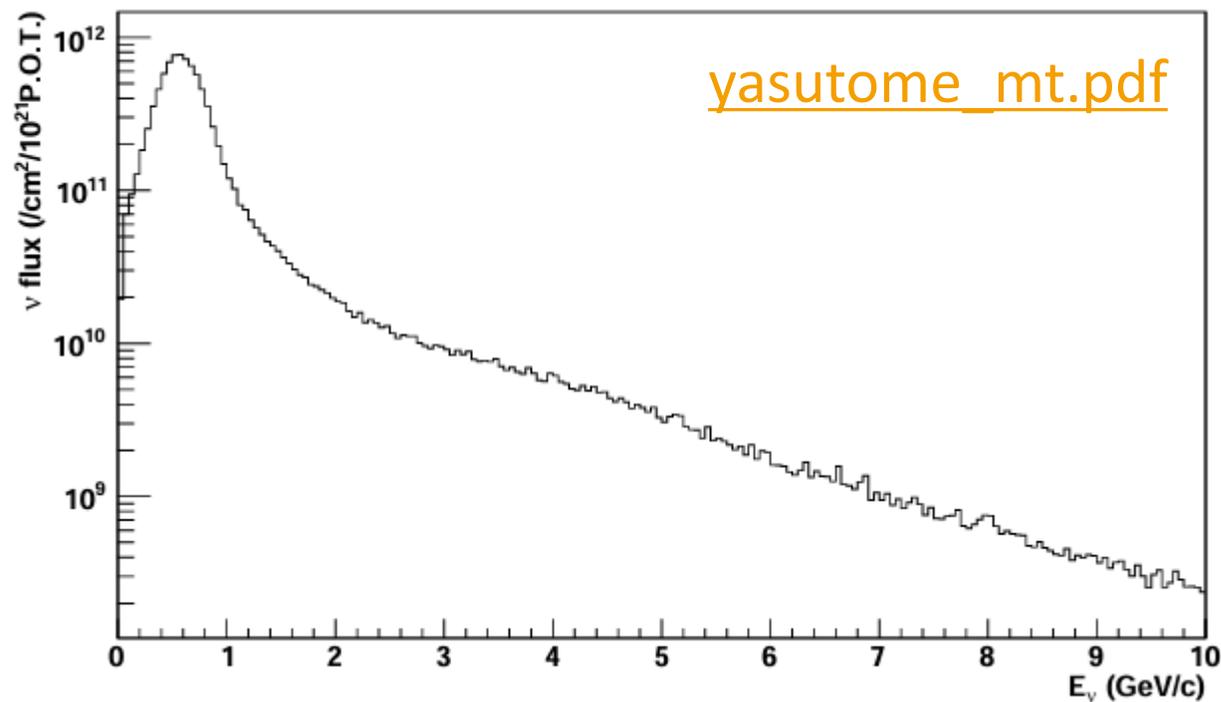


$\bar{\nu}_e$ の逆ベータ崩壊をターゲットにすると背景事象となりやすい

T2Kニュートリノエネルギー分布

OffAxis1.5°

0.7GeVあたりがピーク



実験器具の説明

液体シンチレーター



BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 密度 7.14g/cm^3
一般的に $1\text{MeV}\sim 8200\text{photon}$

表 2.1: 本研究に用いた BGO シンチレータの仕様 [20, 21]

項目	BGO シンチレータの仕様
形状	円筒形
直径	2 in (5.1 cm)
高さ	2 in (5.1 cm)
密度	7.13g/cm^3
実効原子番号	75
結晶構造	立方晶
屈折率	2.15
発光波長	480 nm (ピーク値)
発光時定数	300 ns
潮解性	なし

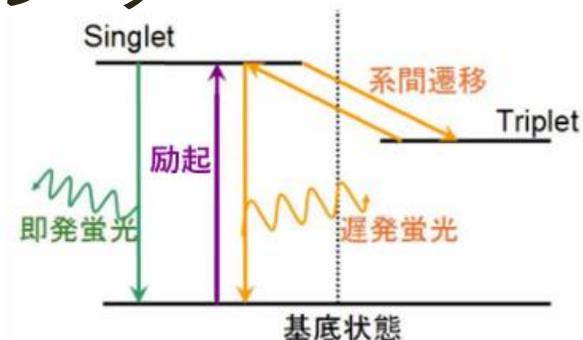


図 2.2: 液体シンチレータの発光原理 [22]

表 2.2: 液体シンチレータ BC501A の仕様 [1, 23]

項目	液体シンチレータ BC501A の仕様
光量	12,000 photons/MeV
波長	425 nm (ピーク値)
水素/炭素 元素比	1.212
密度	0.874g/cm^3
屈折率	1.505
発光時定数	3.16, 32.3, 270 ns
シンチレータの形状	3 in Φ \times 3 in 円筒



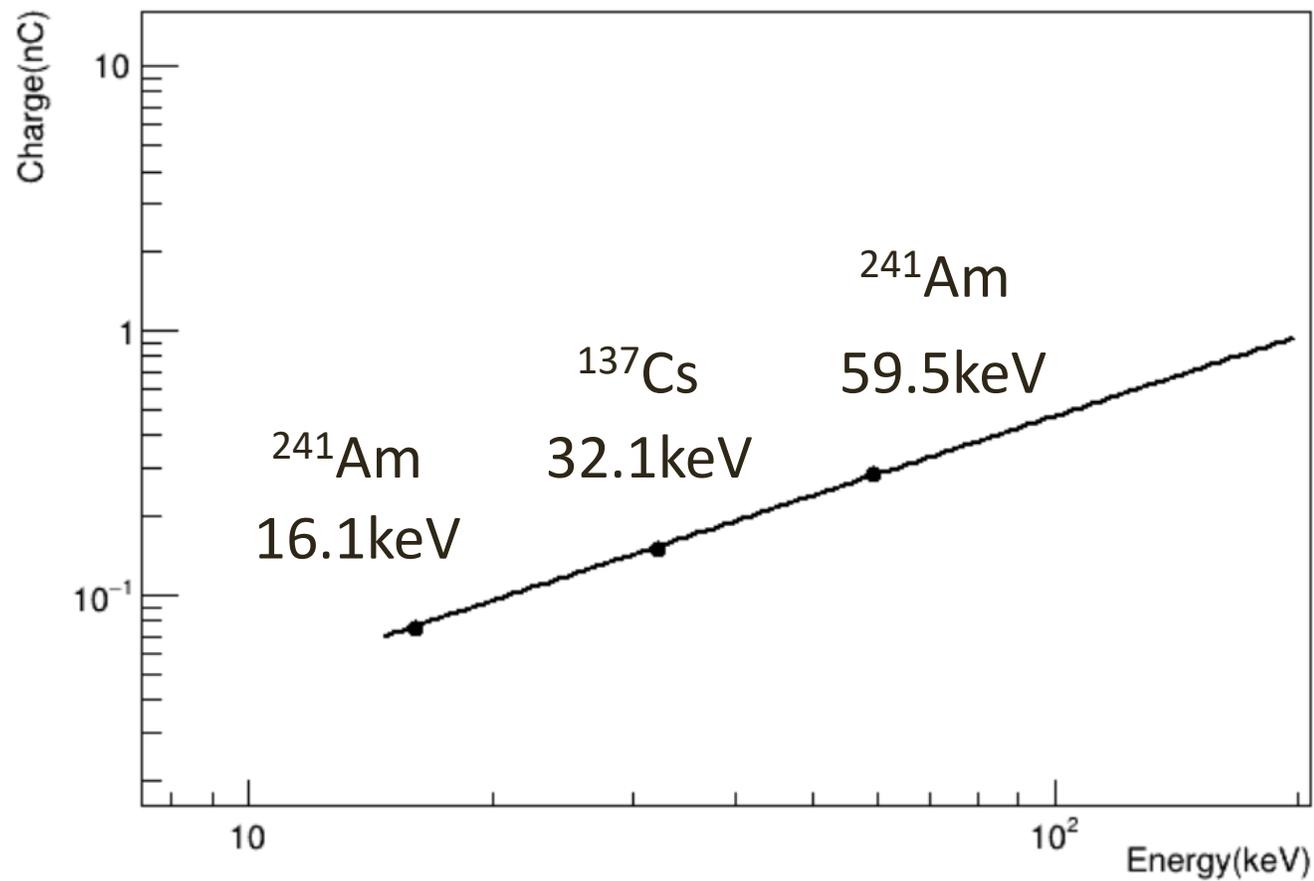
FADC

表 3.4: 測定に用いた FADC の仕様 [24]

項目	DT5720B の仕様
サンプリングレート	250 MHz
分解能	12 bit
ダイナミックレンジ	$\pm 1\text{V}$
入力チャンネル数	4 ch

エネルギーキャリブレーション

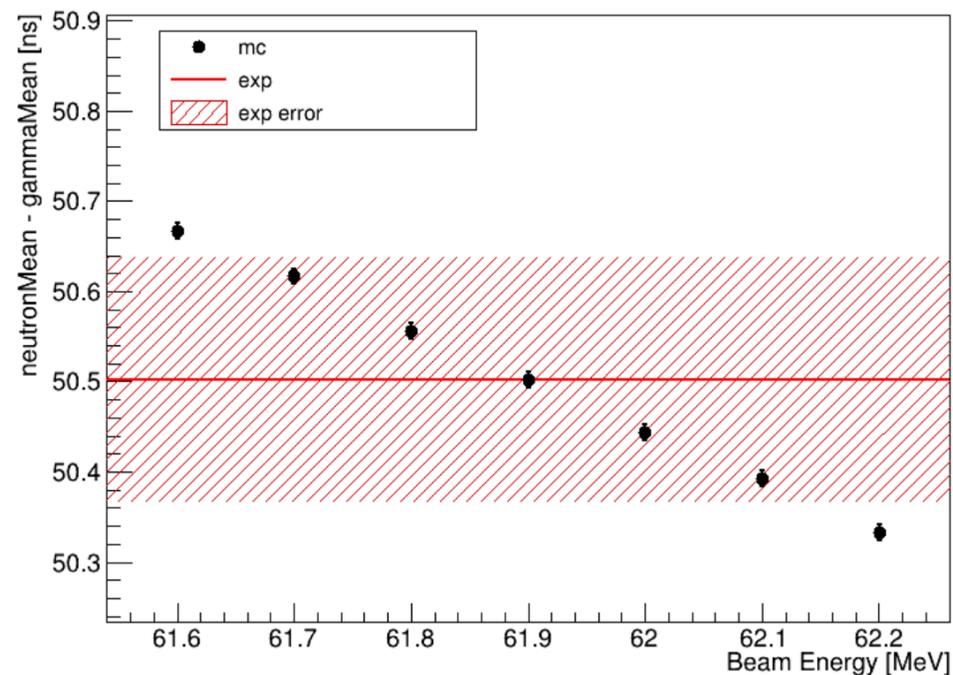
Charge vs Energy



```
Amp: 0.0047628 +/- 1.45649e-05  
Chi2/NDF: 0.951081  
Chi2: 1.90216  
NDF: 2
```

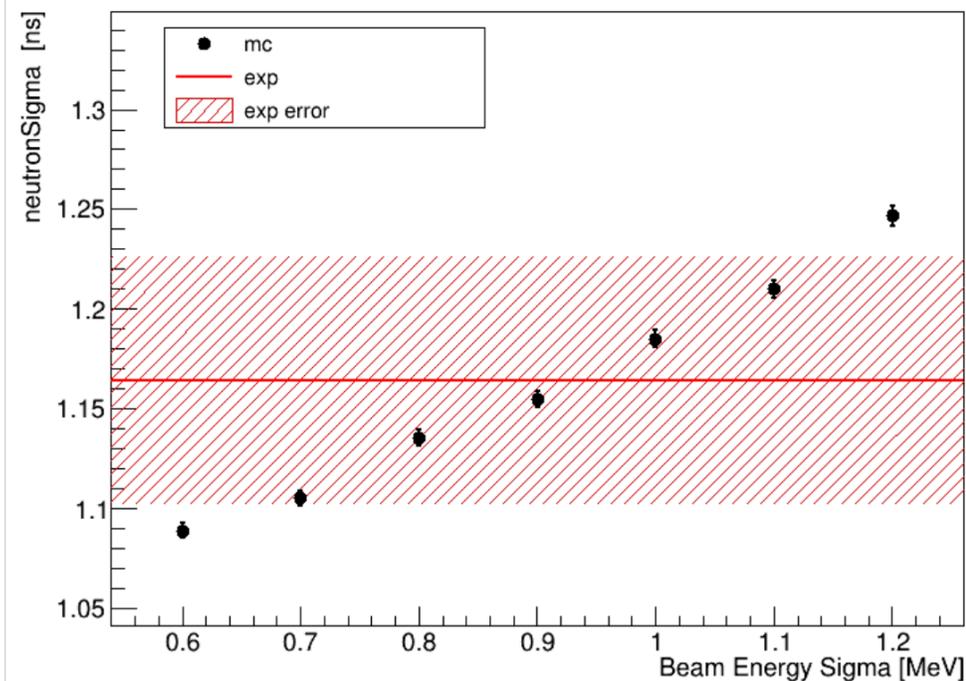
ビームのコンディション評価

Beam Evaluation



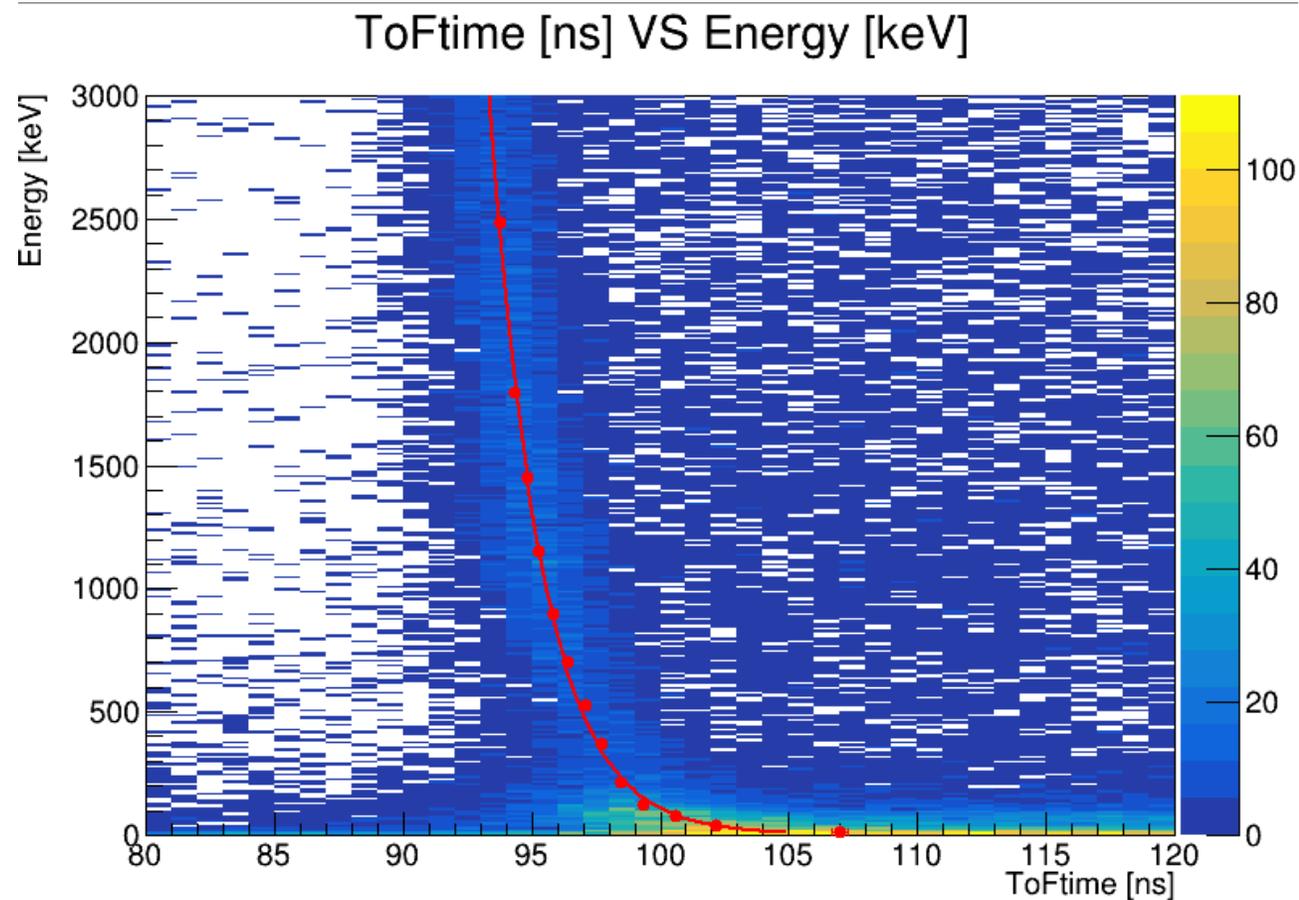
$$E_{Beam} = 61.9 \pm 0.3(\text{sys})\text{MeV}$$

Beam Evaluation



$$\sigma_{Beam} = 0.9 \pm 0.2(\text{sys})\text{MeV}$$

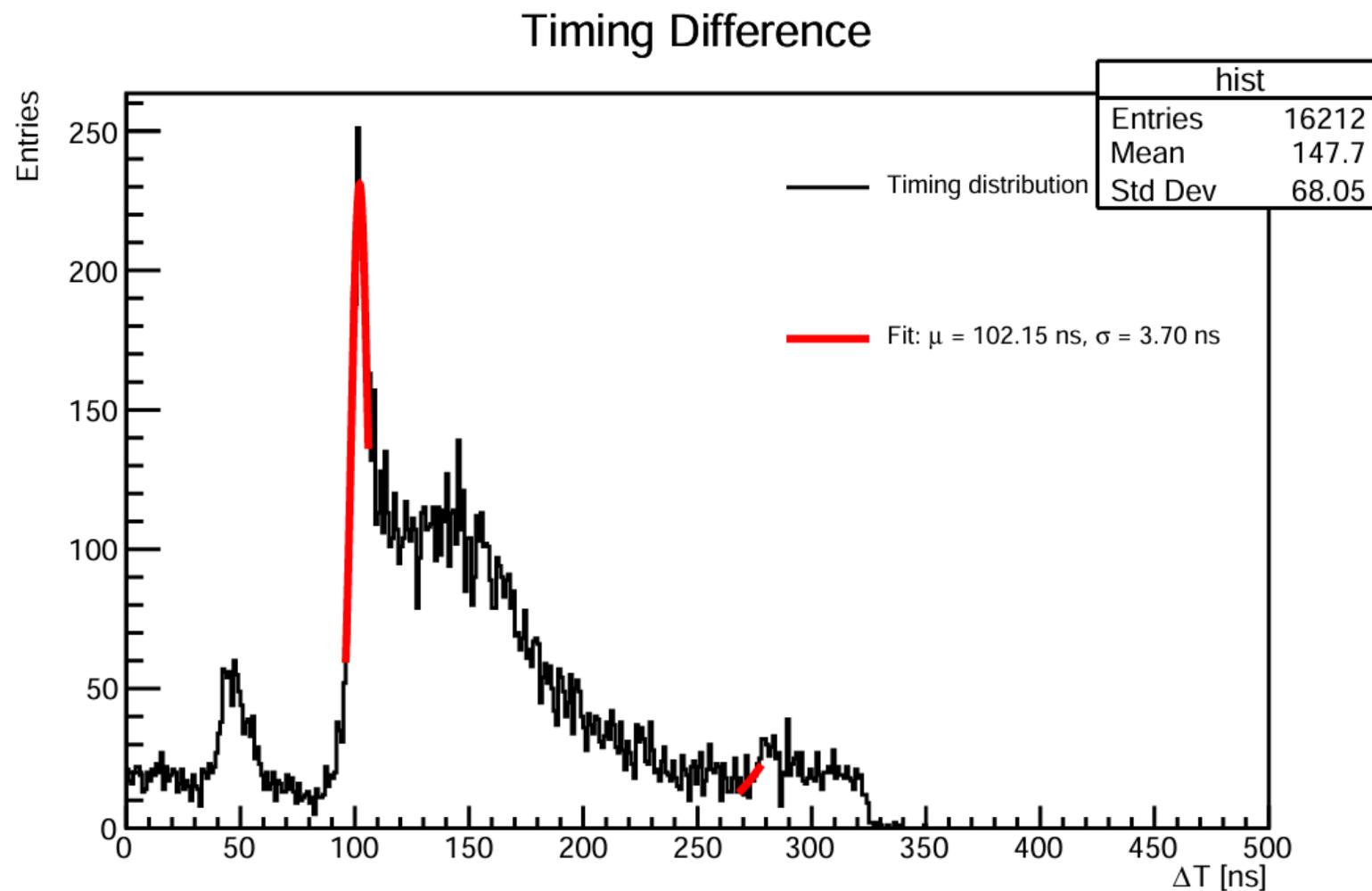
ToFのエネルギー依存性



```
==== Fit Result: f_exp ====
Function: [0] * exp(-(x-[1])/[2])
A       = 500.1854 ± 282.2829
mu      = 96.9539 ± 1.1334
tau     = 2.0082 ± 0.0173
chi2    = 39.4111
ndf     = 10
chi2/ndf = 3.9411
=====
```

この式で補正をかける

純単色中性子(ToF)の選択方法

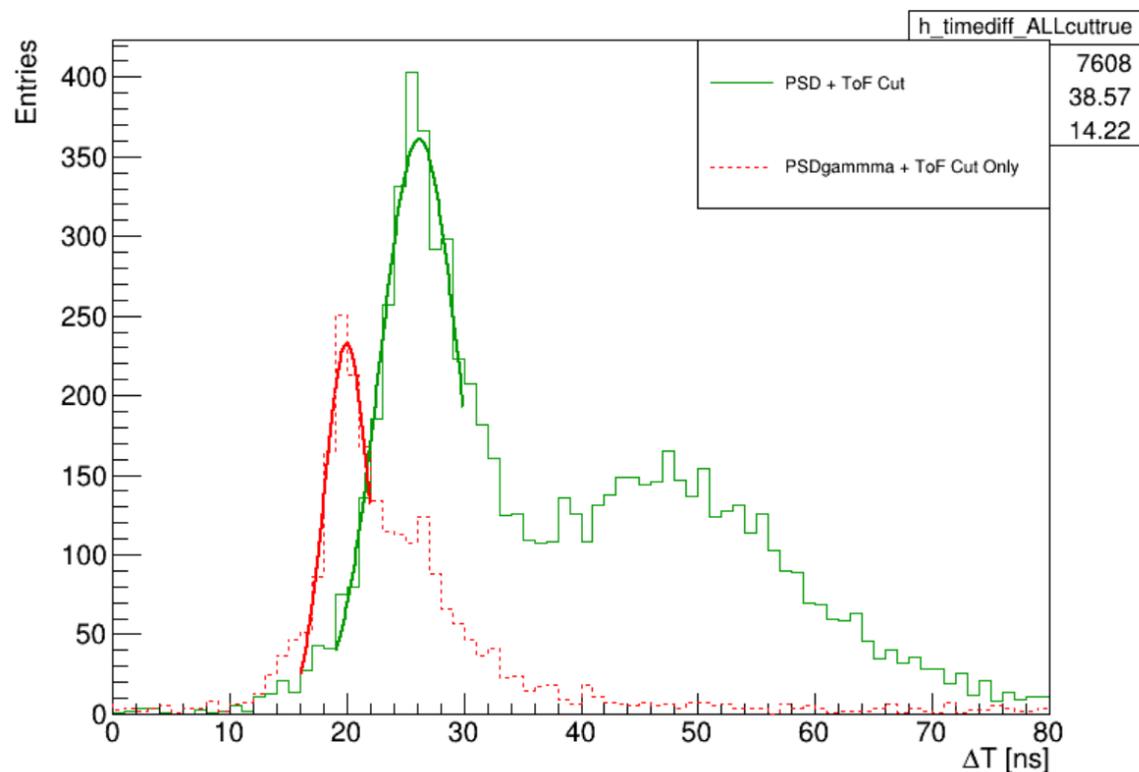


20keV~50keV
で 2σ

BGOtoLSci

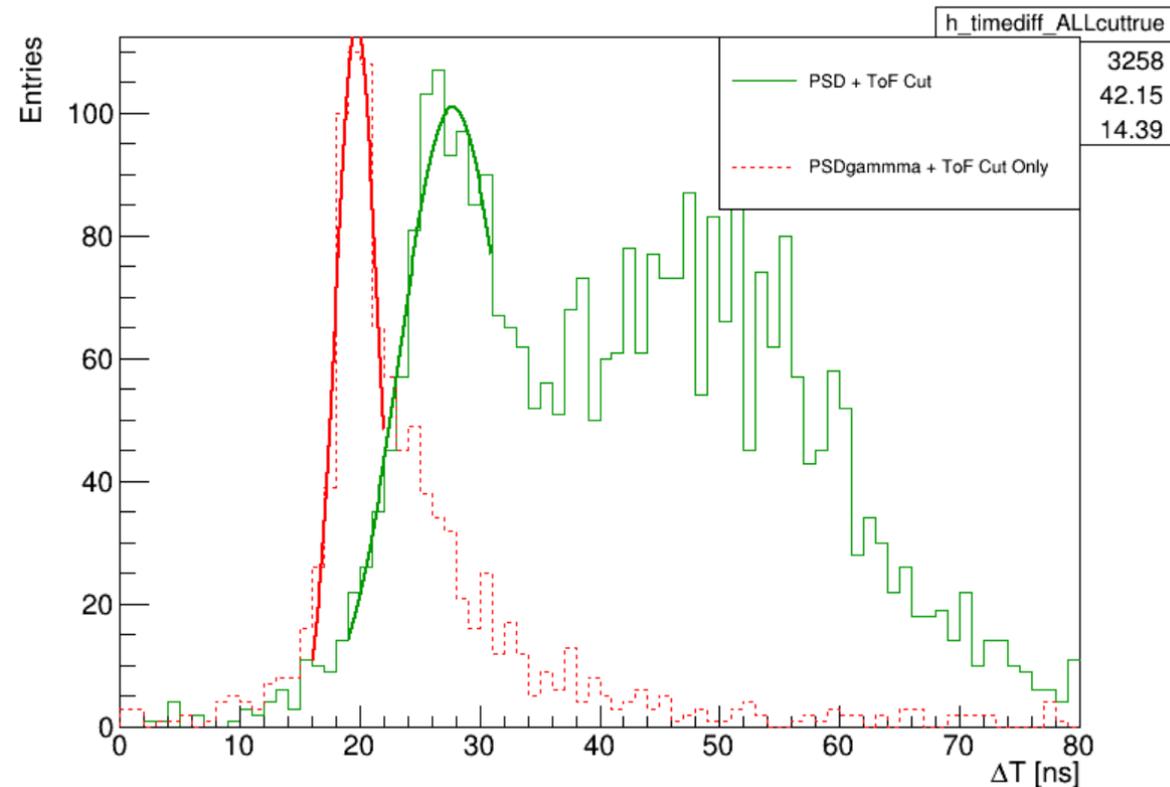
ガンマlike事象選択との比較

PSD + ToF Cut



```
neutron peak:26.1503 ± 0.109415
neutron sigma:3.38403 ± 0.112279
gamma peak:19.9774 ± 0.109187
gamma sigma:1.87732 ± 0.111731
```

PSD + ToF Cut



```
neutron peak:27.709 ± 0.392001
neutron sigma:4.38521 ± 0.350817
gamma peak:19.7277 ± 0.114204
gamma sigma:1.70594 ± 0.123541
```

先行研究

産総研にて実施

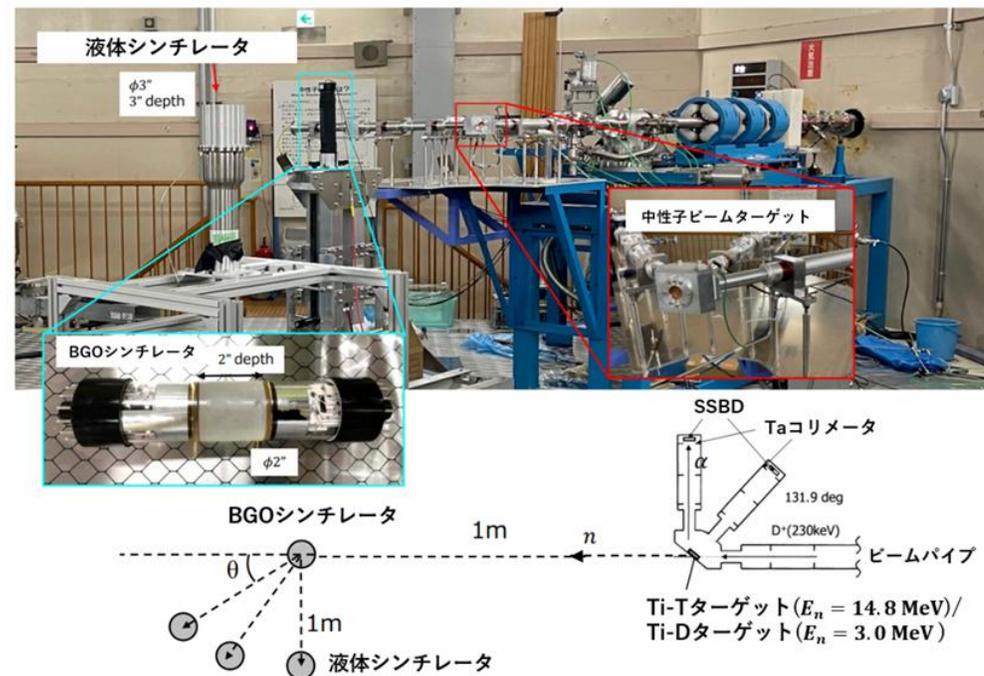
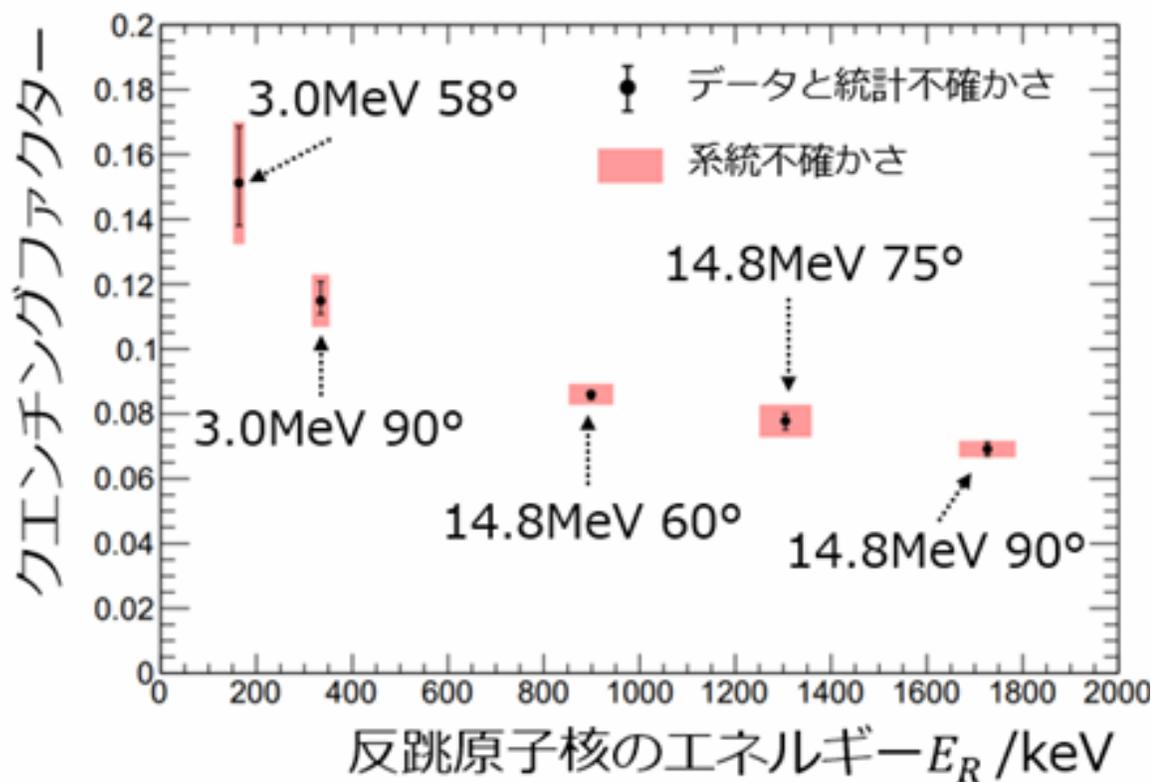
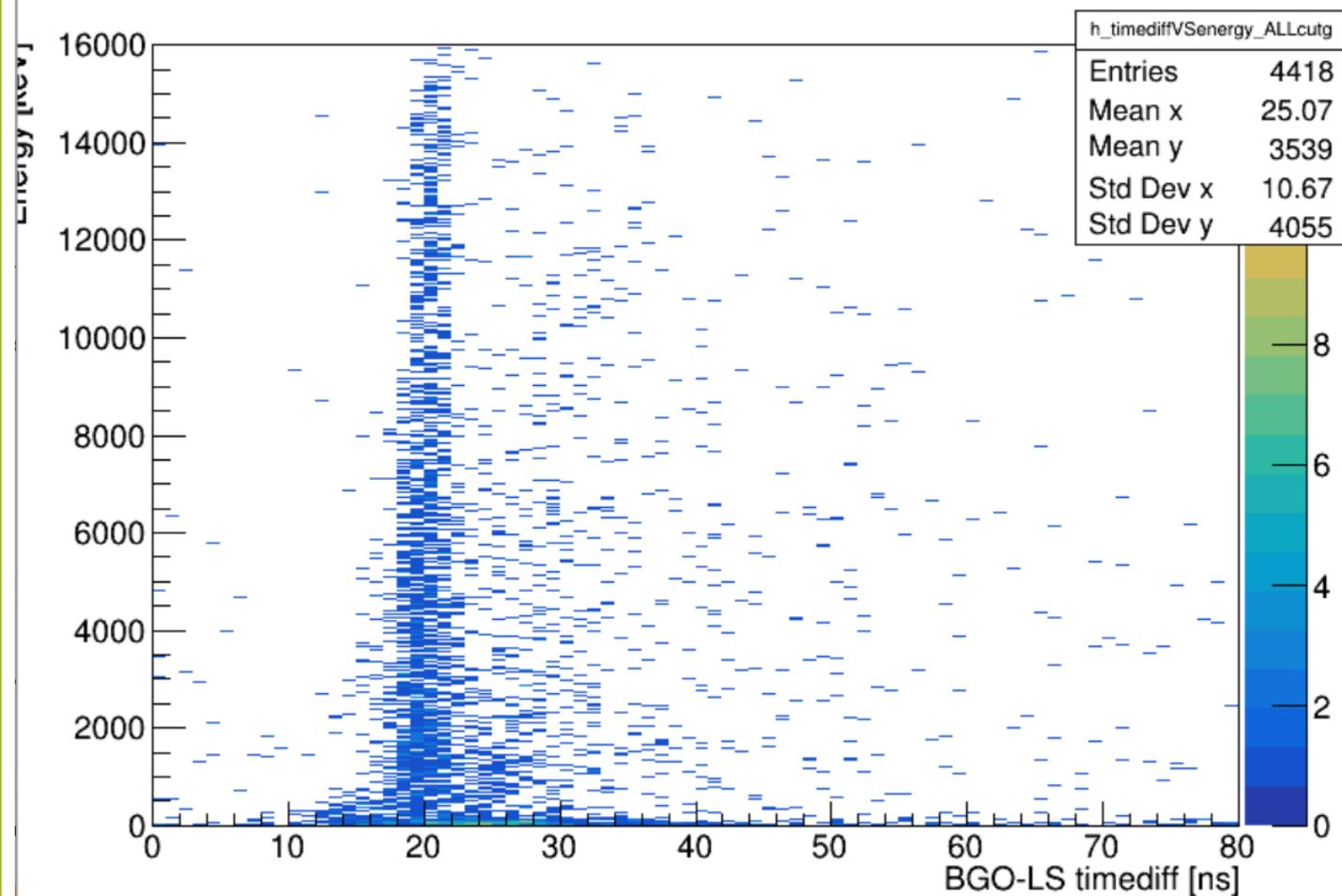


図 4.1: 中性子照射試験のセットアップ。上の図は実際のビームホールで撮影した写真であり、中性子の散乱角度が 90° のときのイベントを測定する際のセットアップである。下の図は実験の概略図である。

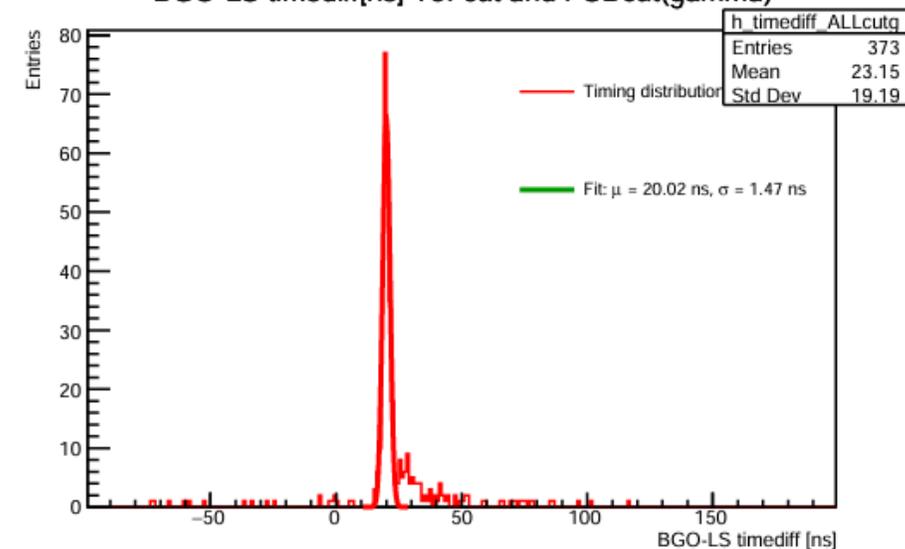
時間分解能

BGO-LS timediff[ns] vs Energy[keV] ToFcut and PSDcut(gamma)



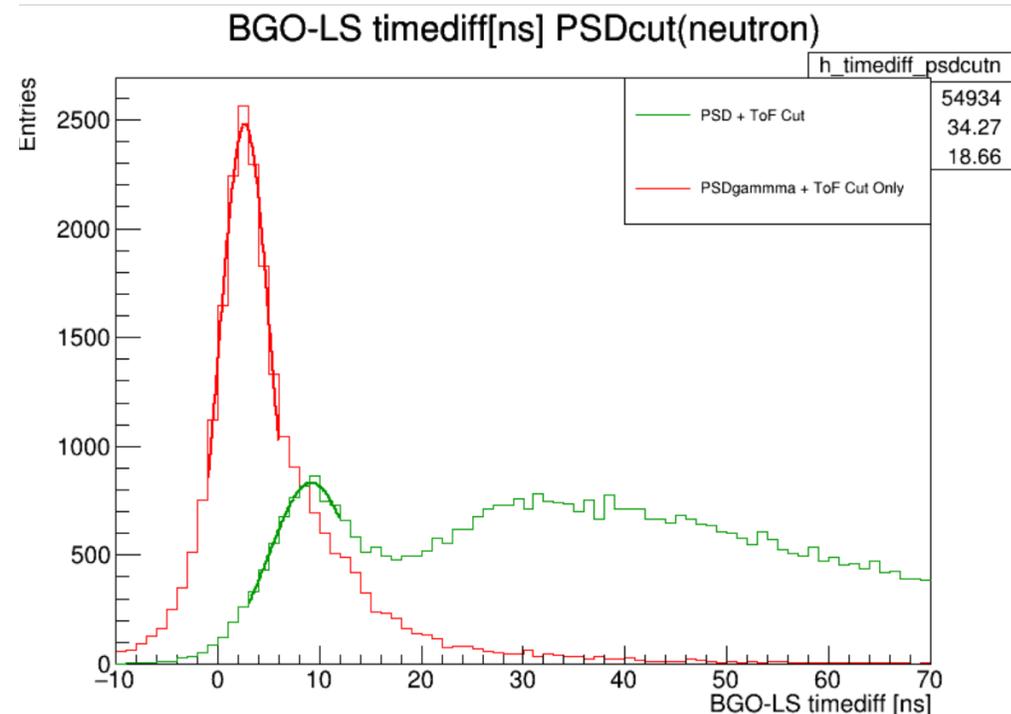
3500keV~5000keV

BGO-LS timediff[ns] ToFcut and PSDcut(gamma)



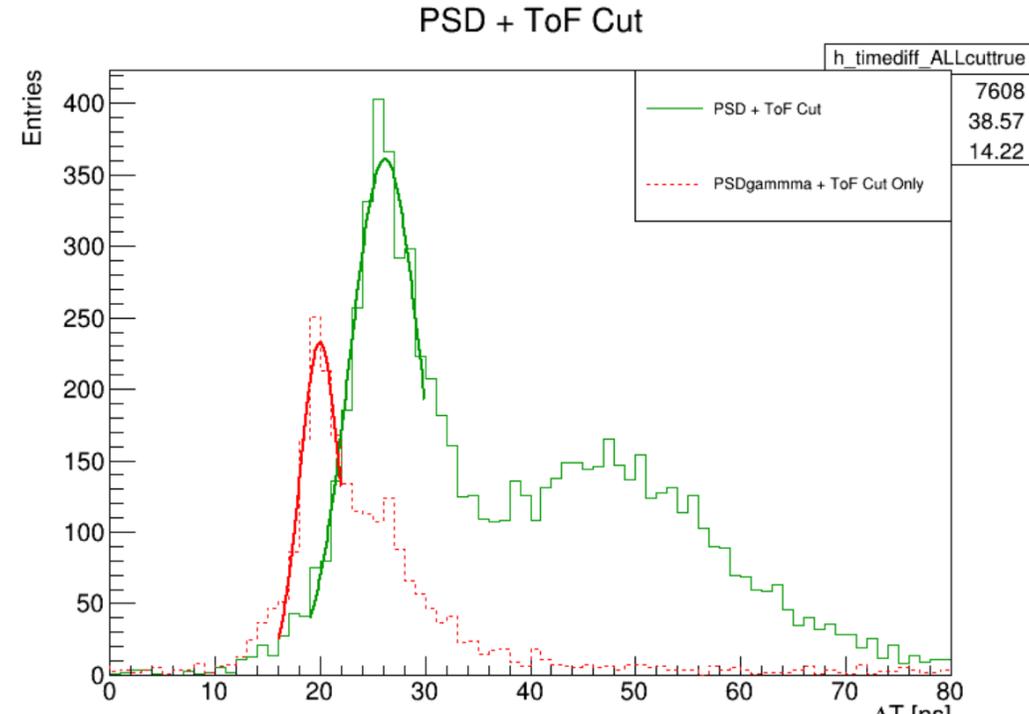
エネルギーごとにスライスして分解能をプロット

シミュレーションで実験のBtoLdiffを実装



```
neutron peak:9.20552 ± 0.15502
neutron sigma:4.18441 ± 0.176346
gamma peak:2.66319 ± 0.0311571
gamma sigma:2.48908 ± 0.0435525
-----
Peak time difference (n - gamma): 6.54233 ± 0.15812 ns
```

mc



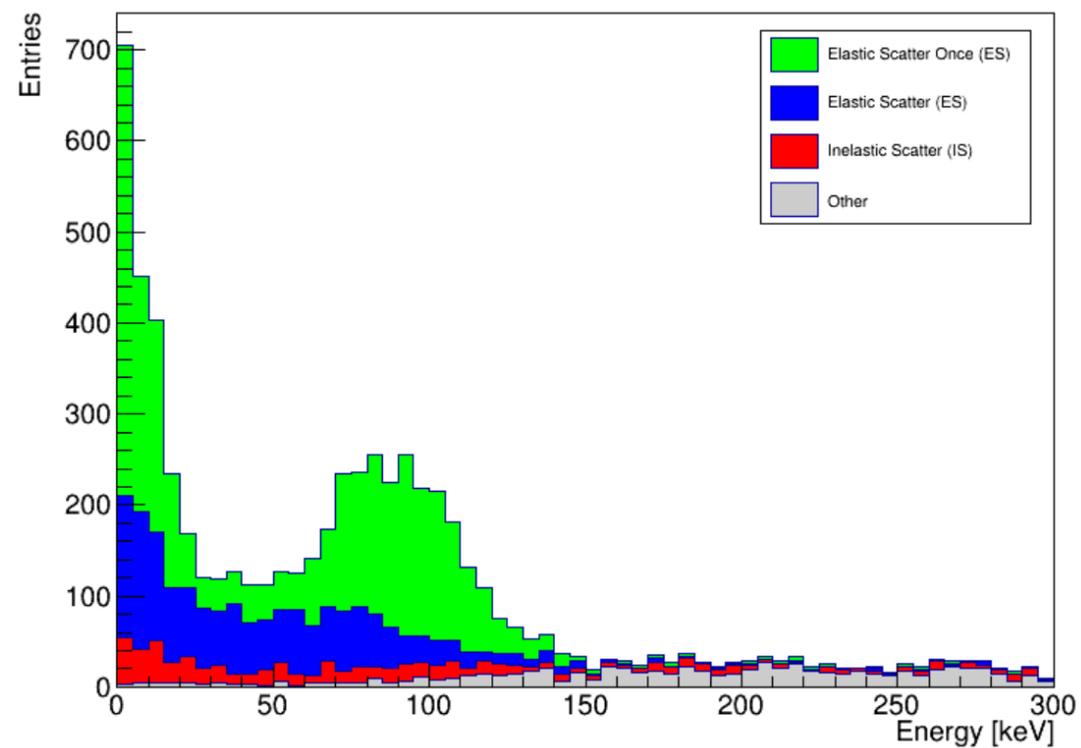
3 σ

```
neutron peak:26.1503 ± 0.109415
neutron sigma:3.38403 ± 0.112279
gamma peak:19.9774 ± 0.109187
gamma sigma:1.87732 ± 0.111731
-----
Peak time difference (n - gamma): 6.17285 ± 0.154575 ns
-----
```

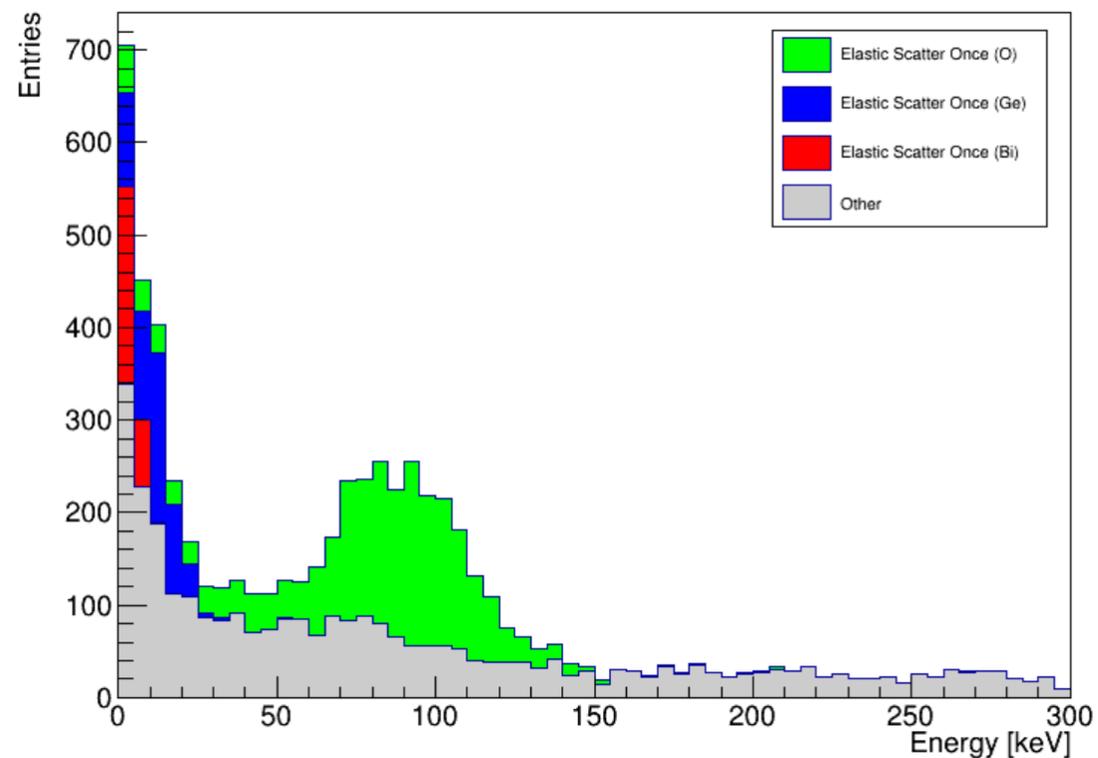
exp

実験の再現として9.21ns+-10.15nsを採用

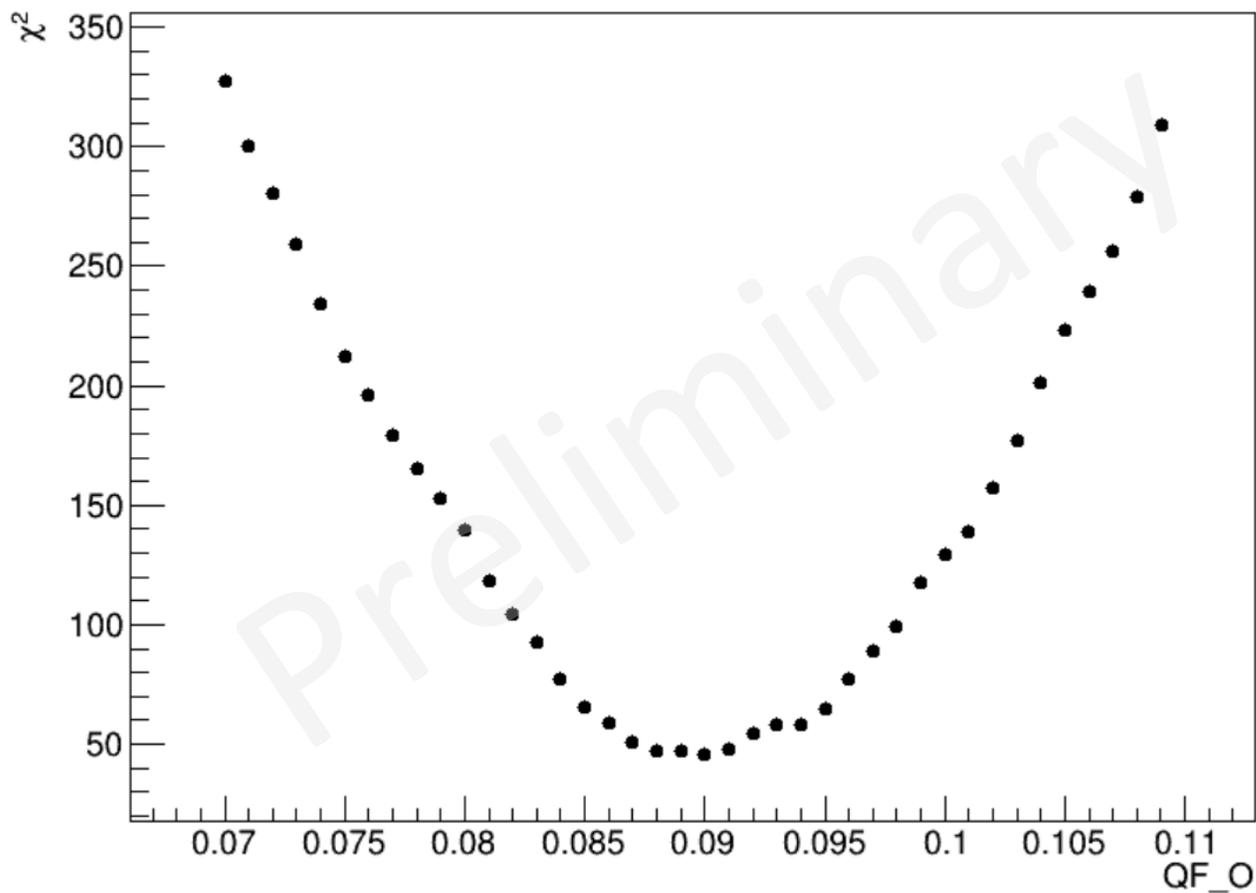
Energy Composition



Energy Composition



Chi2 vs QF_O



$$\alpha = \frac{\sum_i D_i M_i / \sigma_i^2}{\sum_i M_i^2 / \sigma_i^2}$$

スケージングの式

```

=====
Best QF = 0.09
Chi2_min = 46.0135
NDF = 32
Chi2/NDF = 1.43792
Error (-) = 0.000896231
Error (+) = 0.00054297
=====

```