

BGOシンチレータにおける 酸素原子核反跳の クエンチングファクター測定

恩村悠河、石塚正基、伊藤博士(東京理科大)、
南野彰宏(横国大)、矢野孝臣(ICRR)

2022/11/23 新学術「地下宇宙」若手研究会

研究目的

本研究の目的：

スーパーカミオカンデの中性子検出効率の不定性を改善するためにBGOシンチレータの中性子応答について研究する。

スーパーカミオカンデでは超新星背景ニュートリノの世界初の観測を目指している。



超新星背景ニュートリノの観測には中性子の検出効率が重要。



中性子検出効率のキャリブレーションにスーパーカミオカンデではAm/Be中性子線源とBGOシンチレータを用いている。



中性子検出効率の不定性を改善するためにAm/BeとBGOについて理解することが必要。

今回はBGOの中性子に対する応答を理解するための第一段階として、クエンチングファクターを測定した結果を報告する。

スーパーカミオカンデ(SK)

• 検出器

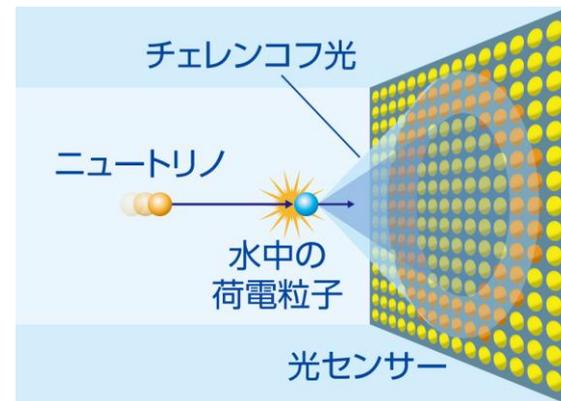
- 水チェレンコフ検出器
- 岐阜県神岡の地下1000mに設置
- 約5万トンの超純水
- 約1.1万本の光センサー(PMT)

• 主な研究目的

- 陽子崩壊の探索
- ニュートリノの性質の解明
- ニュートリノ天文学(太陽ニュートリノ、**超新星背景ニュートリノ**)

• 検出方法

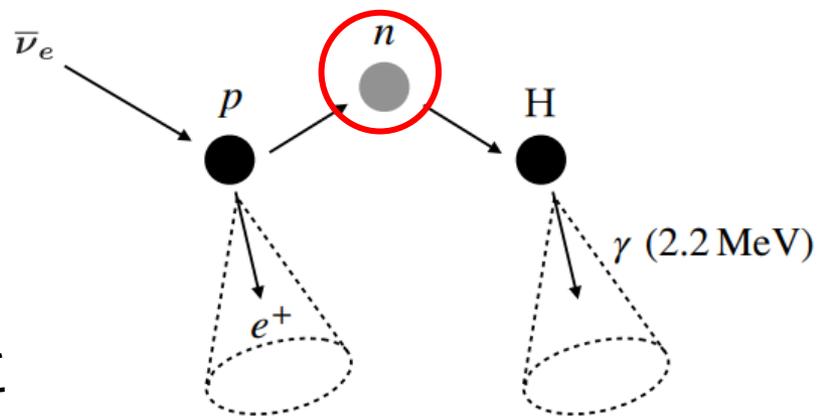
- 壁面に取り付けられた光センサーでチェレンコフ光を検出。



超新星背景ニュートリノ

- 超新星背景ニュートリノ
 - 過去の超新星爆発によって放出されたニュートリノ。
 - 現在でも宇宙空間をほぼ一様に満たしているはず。
- 検出方法
 - 逆ベータ崩壊反応を用いる。

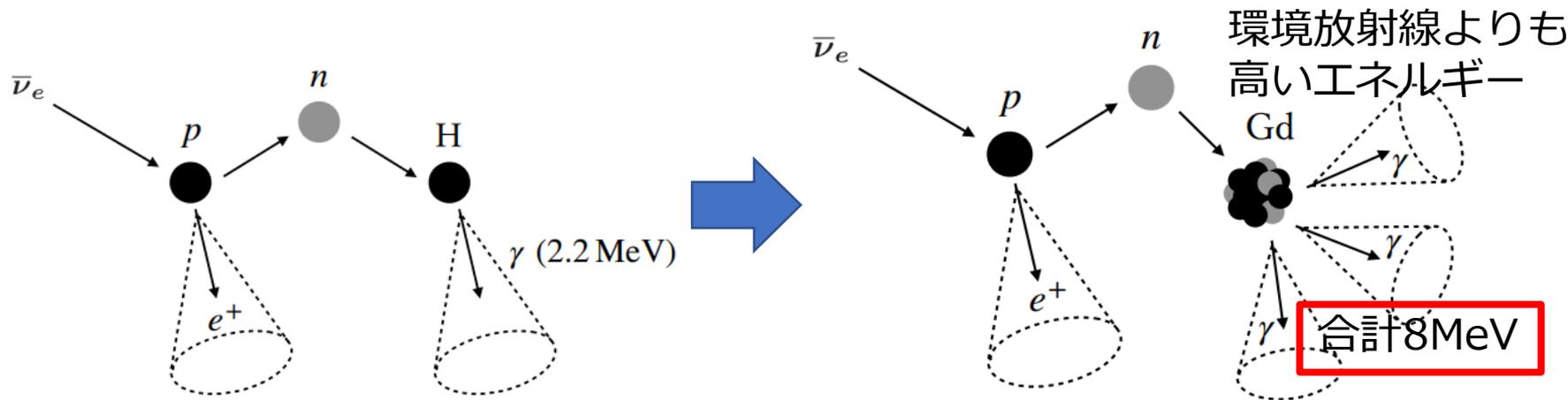
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$
 - 陽電子による信号と γ 線に由来する信号を同時に測定することでバックグラウンドと区別。



1年間に数イベント程度しか
検出できない。

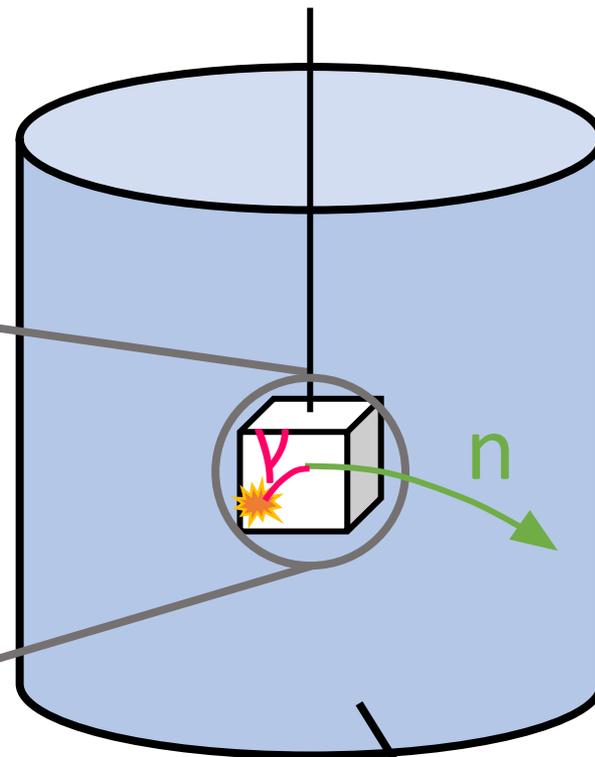
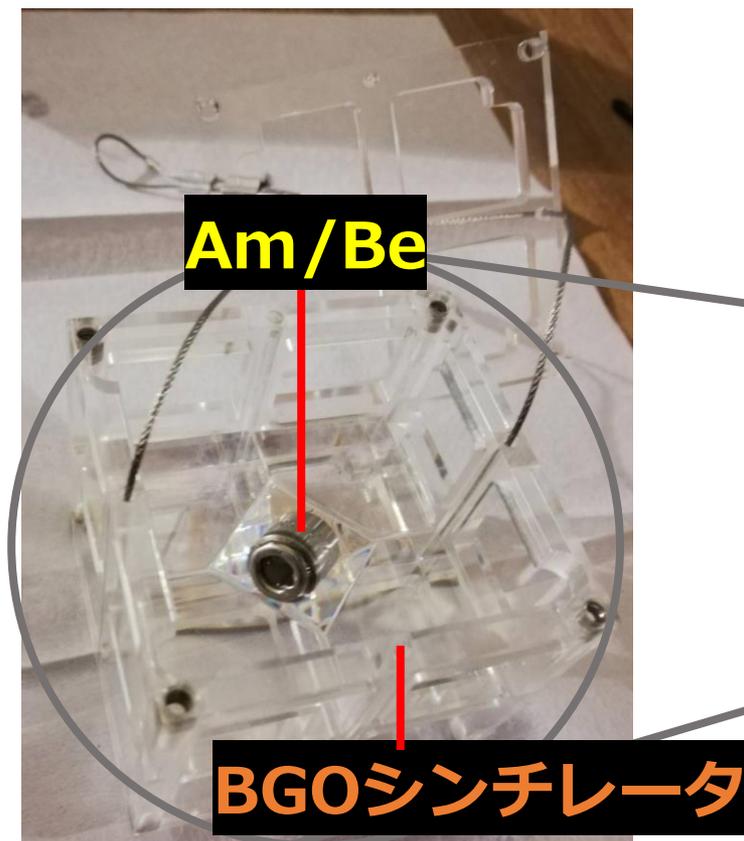
SK-Gd

- 中性子検出効率の向上を目的としてGdを導入。(2020年8月21日開始)
- 中性子検出効率を飛躍的に向上。
- 今後5年間の測定データで5~20個の超新星背景ニュートリノの検出ができると期待されている。



スーパーカミオカンデにおける 中性子検出効率のキャリブレーション

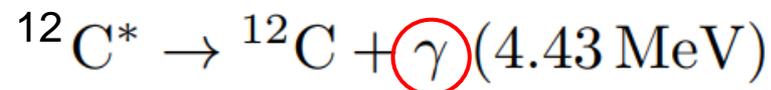
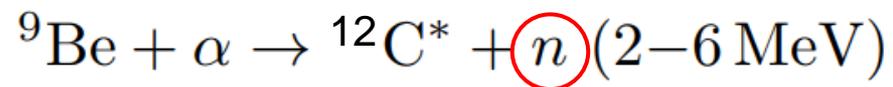
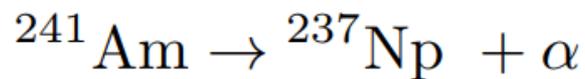
- スーパーカミオカンデでは、中性子検出効率のキャリブレーションにBGOシンチレータで囲まれたAm/Be中性子線源を用いる。



スーパーカミオカンデ

Am/Be中性子線源とBGOシンチレータ

- Am/Be中性子線源
 - 一般的に用いられる中性子線源。
 - 4.4MeVの γ 線と2~6MeVの中性子を放出する。
- BGOシンチレータ
 - Bi、Ge、O原子核で構成されている。
 - 無機シンチレータであり、発光量が多い。
 - 質量数が大きいため、 γ 線が光電効果を起こしやすい。



BGOシンチレータ

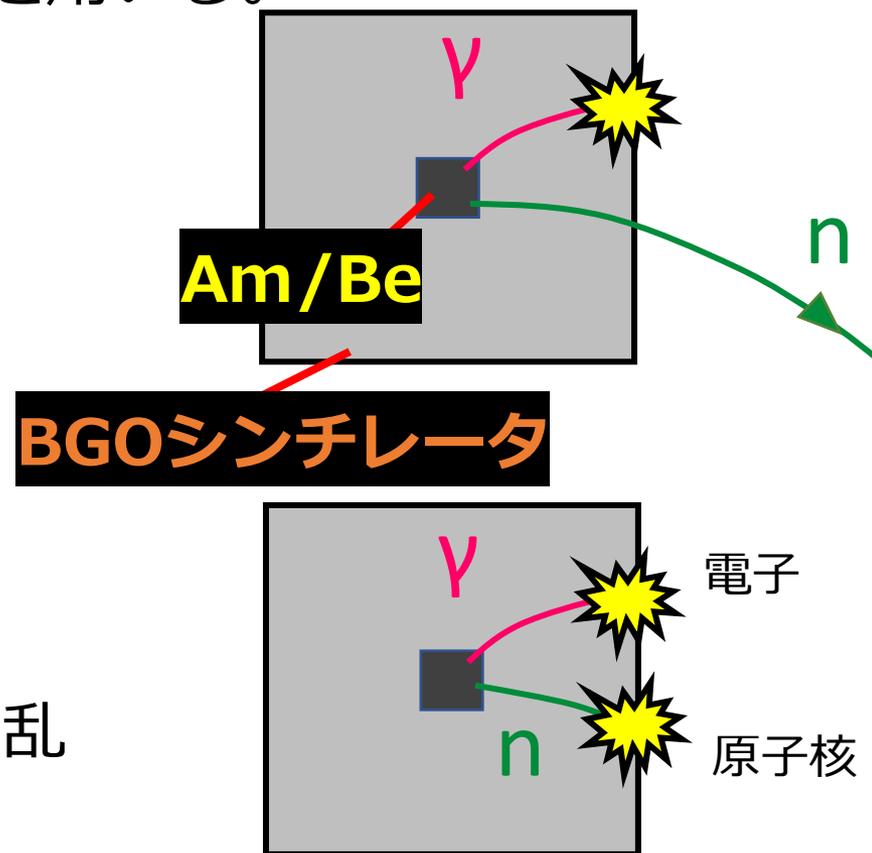
Am/Be中性子線源とBGOシンチレータ

- 中性子検出効率を正確に理解することが重要。
- 中性子検出効率のキャリブレーションにBGOシンチレータで囲まれたAm/Be中性子線源を用いる。

- 中性子検出効率の実験結果とシミュレーションの結果には相対的に10%の差がある。
←不定性の原因

- 原因として考えられるのは

- Am/Beの崩壊比
- BGOの中性子応答
→中性子とBGOの原子核の散乱
について研究する。

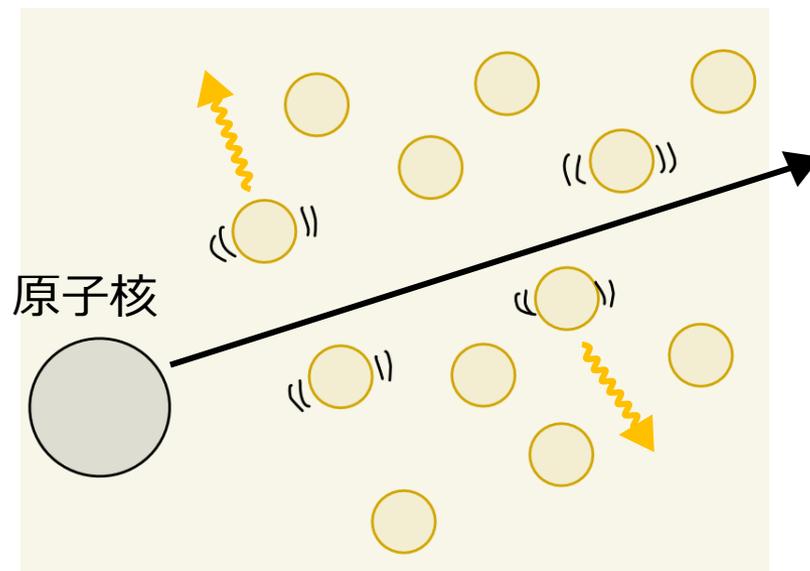
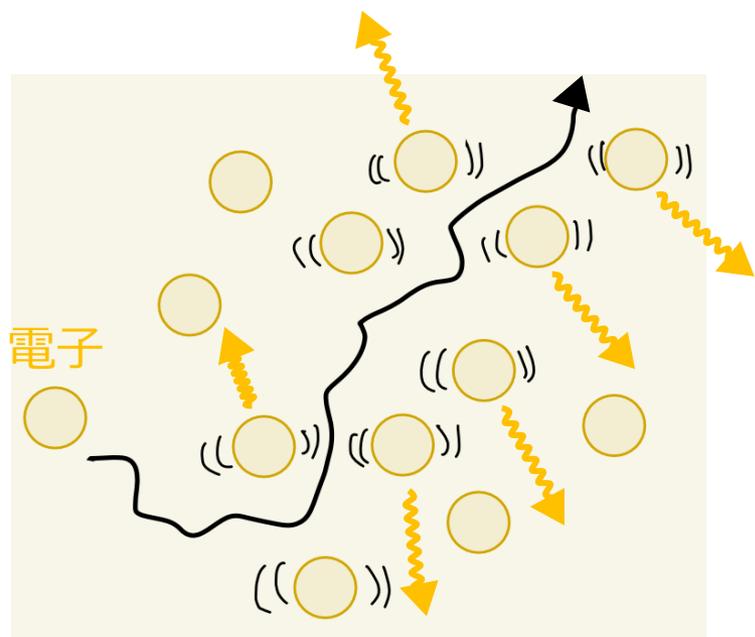


クエンチ効果

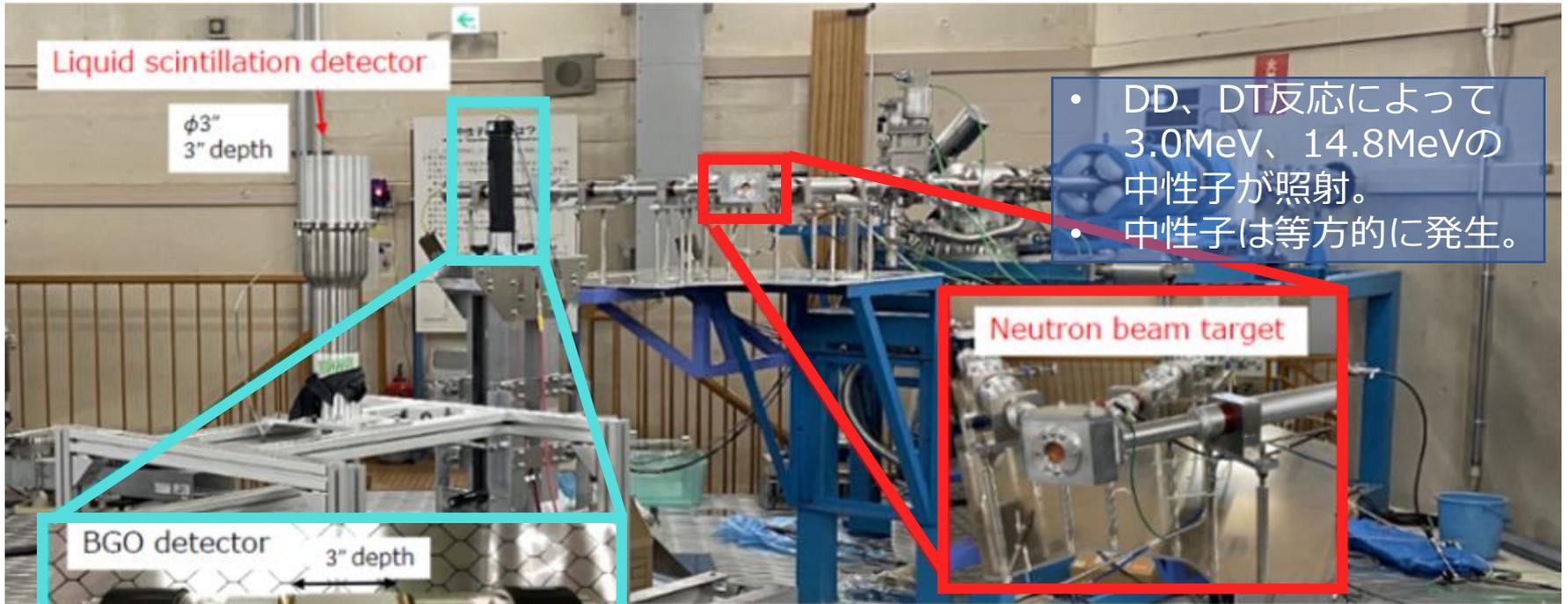
クエンチ効果

原子核反跳による発光量は、同じエネルギーの電子反跳による発光量よりも小さくなり、エネルギーが小さく見積もられる現象。

$$\Delta E = \Delta E_{\text{photon}} + \Delta E_{\text{thermal}} + \Delta E_{\text{other}}$$

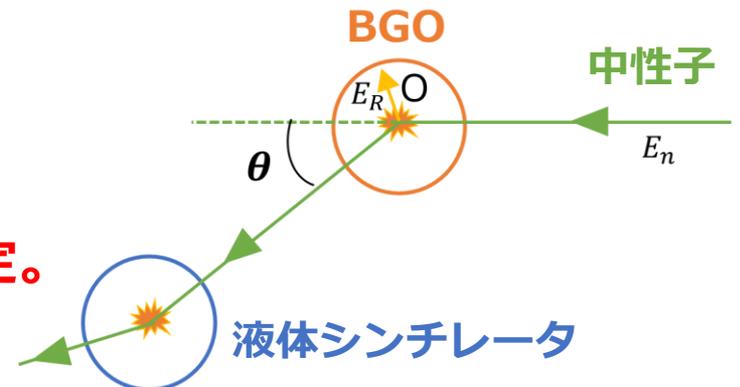


中性子ビーム照射試験



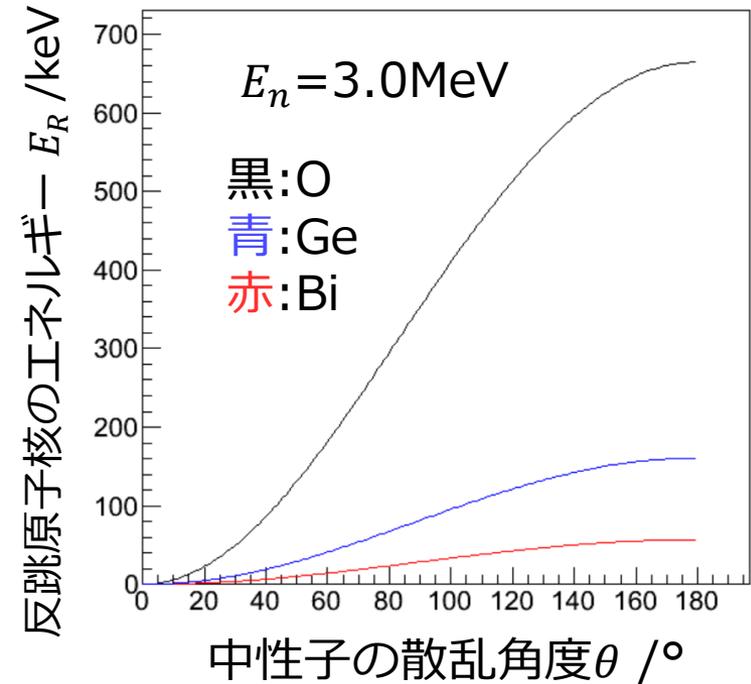
目的：BGOのクエンチングファクターを測定。

2022年2月に産総研で実施。



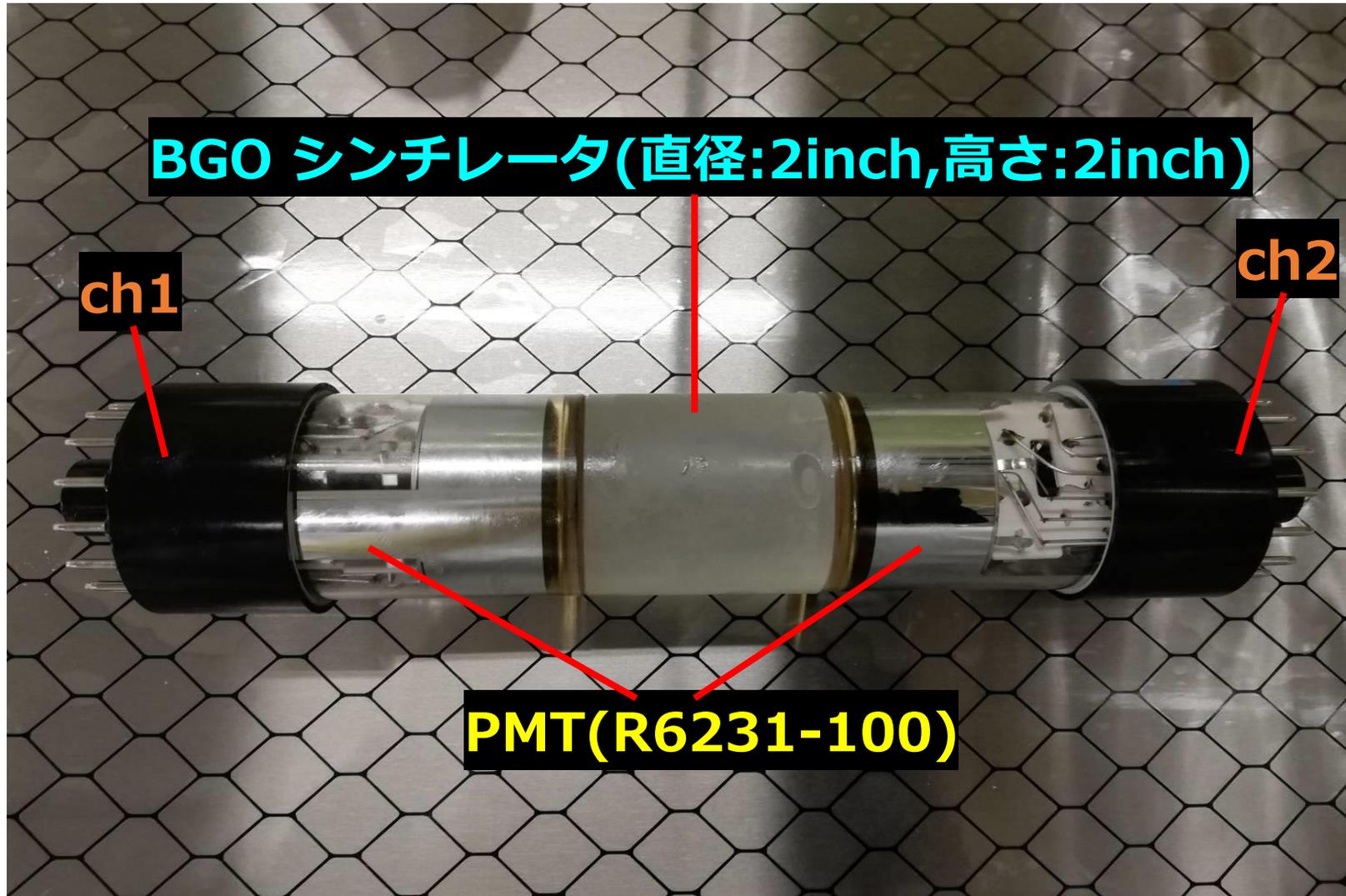
中性子ビーム照射試験

- 反跳原子核のエネルギー(E_R)に対するクエンチングファクターを測定した。
- BGOと液体シンチレータのコインシデンス信号を記録。
 - BGO：反跳原子核のエネルギーを測定。
 - 液シン：中性子/ γ 線識別の役割。
- 中性子の散乱角度によって反跳原子核のエネルギーが一意に決まる。
 - 液シンを移動して角度を変更。
- 測定される反跳原子核のエネルギー(E_{vis})は反跳電子のエネルギーに比べてクエンチする。
- クエンチングファクター = $\frac{E_{vis}}{E_R}$



E_n (MeV)	θ (deg.)	E_R (keV)
3.0	58	171
3.0	90	353
14.8	60	897
14.8	75	1311
14.8	90	1741

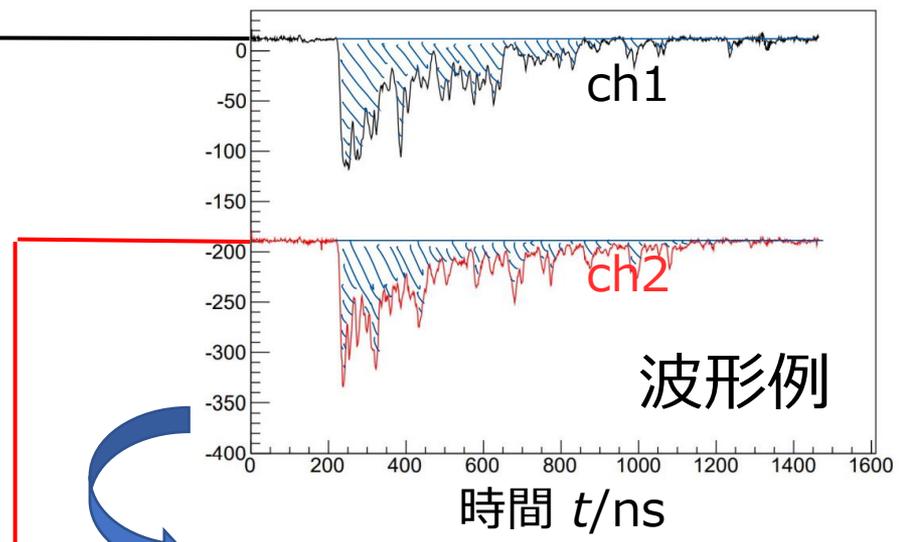
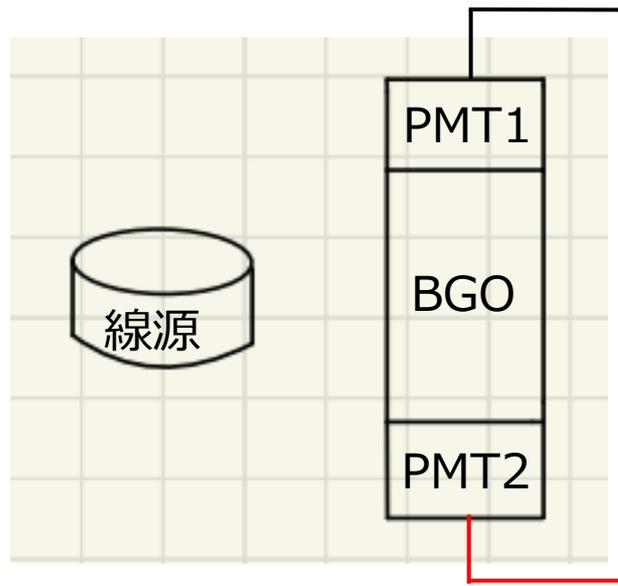
BGO検出器の製作



PMTで検出される波形例

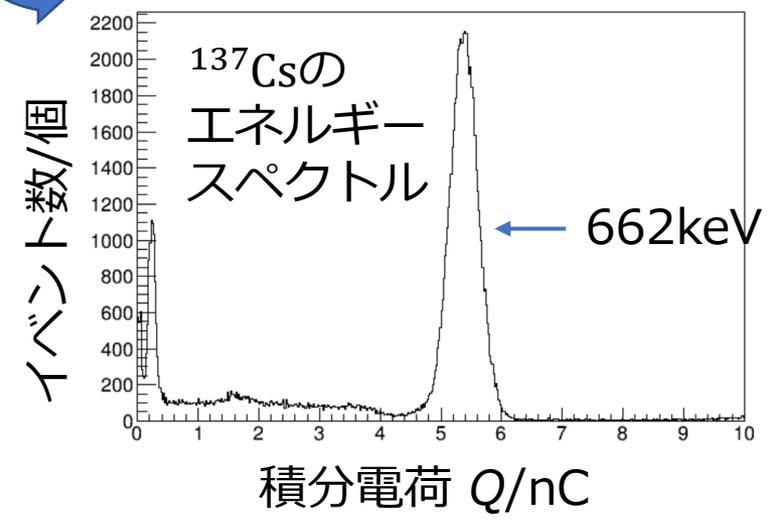


DRS4

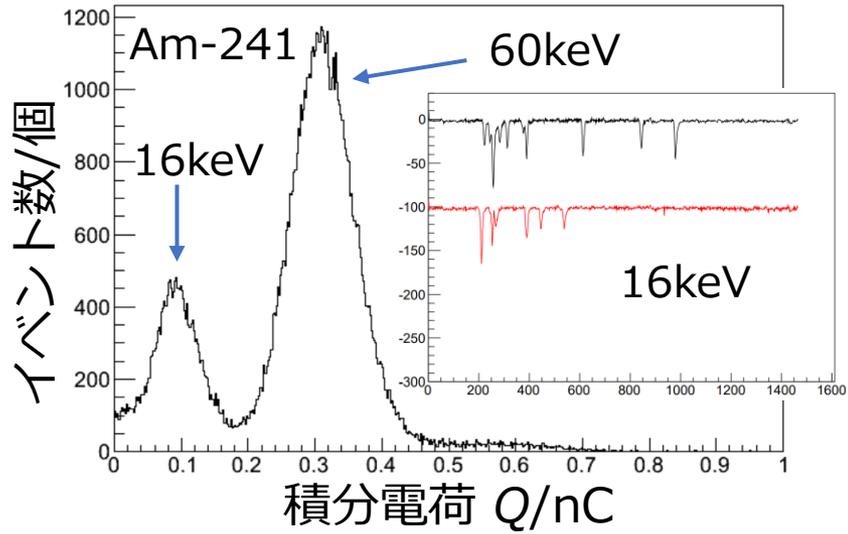


波形例

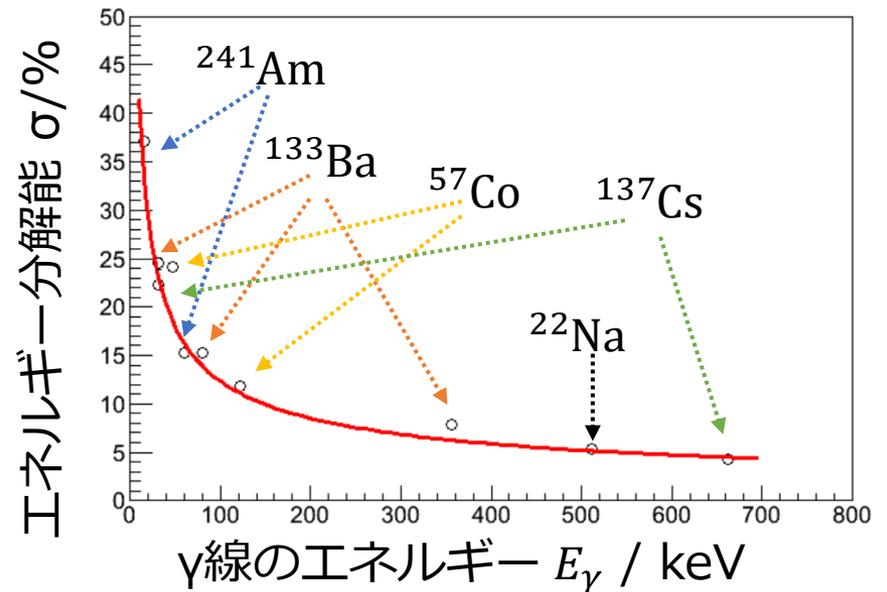
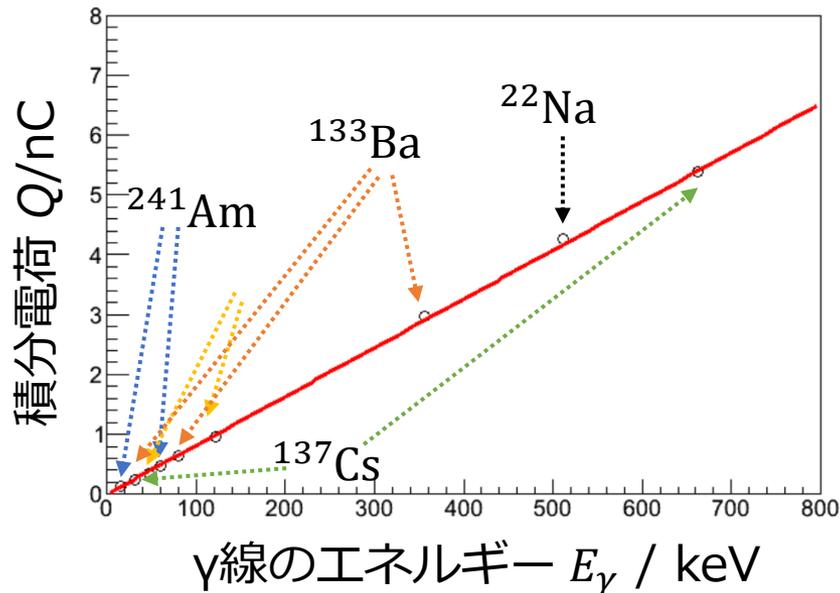
- 両端のPMTのコインシデンスを要求することでノイズを減らす。
→1p.e.以下の閾値を設定。
- 積分電荷がBGO中のエネルギー損失に対応する。



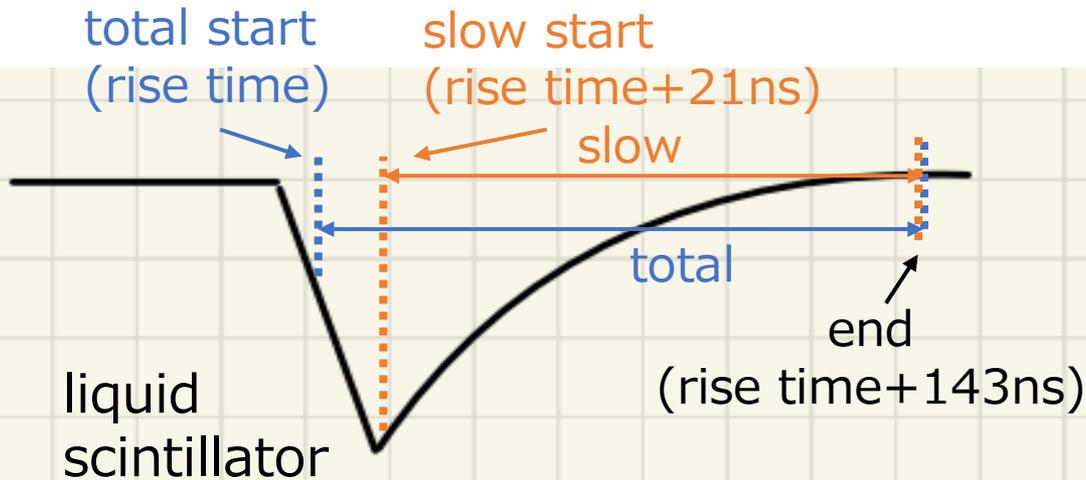
BGOシンチレータのエネルギーキャリブレーション¹⁴



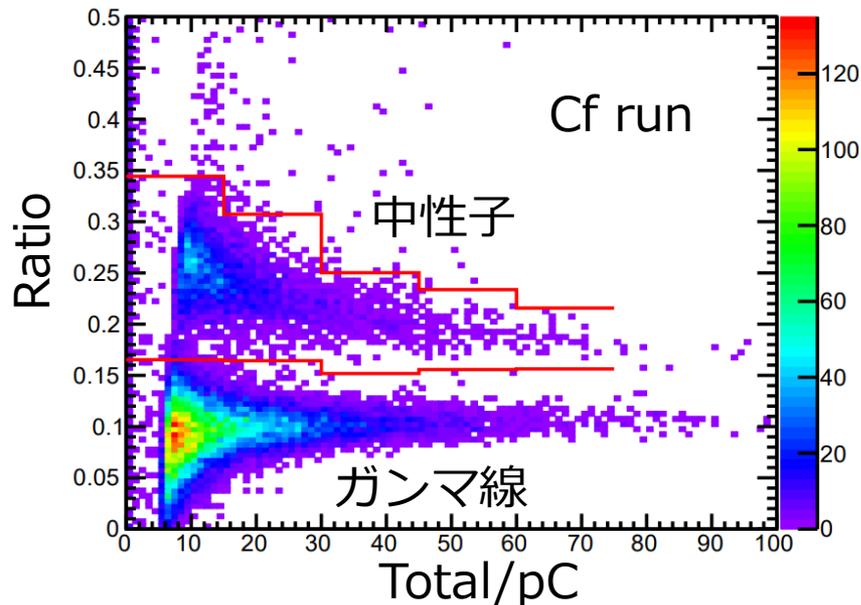
- γ 線源を用いてエネルギーキャリブレーションを行った。
 - Am-241の16keVを測定できた。
 - 線形性を800keV程度まで確認。
- 得られたエネルギー分解能はシミュレーションに用いた。



中性子/ガンマ線識別(液体シンチレータ)¹⁵

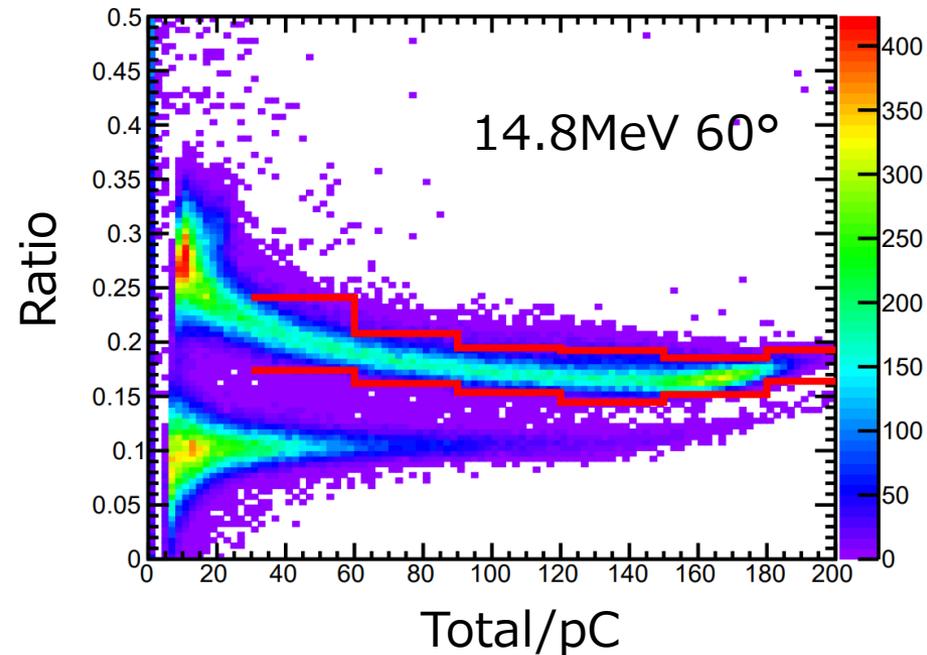
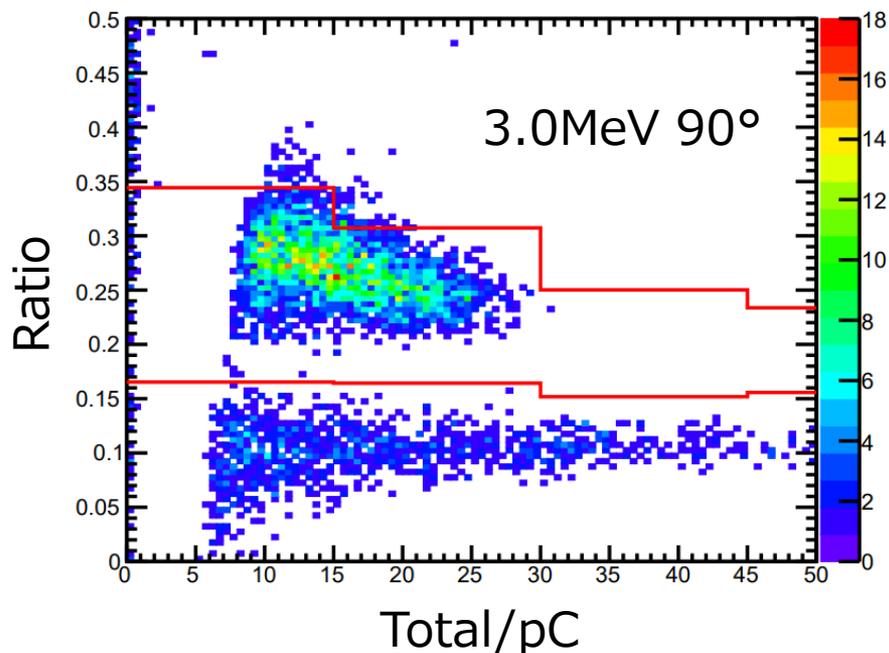


- 中性子とガンマ線は波形弁別法(PSD)を用いて識別できる。
- $\text{ratio} = \text{slow}/\text{total}$
- Cf-252線源の測定から、中性子事象の選択条件を決定した。



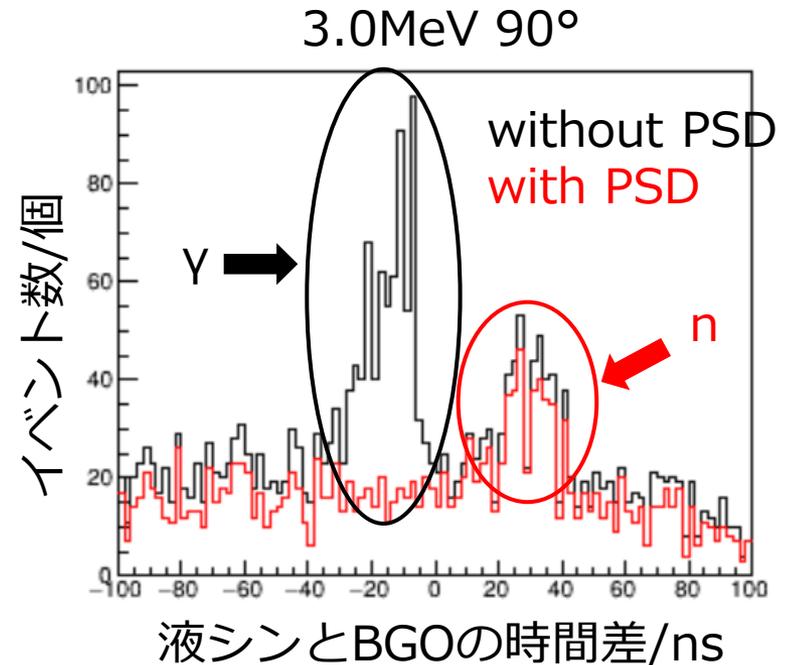
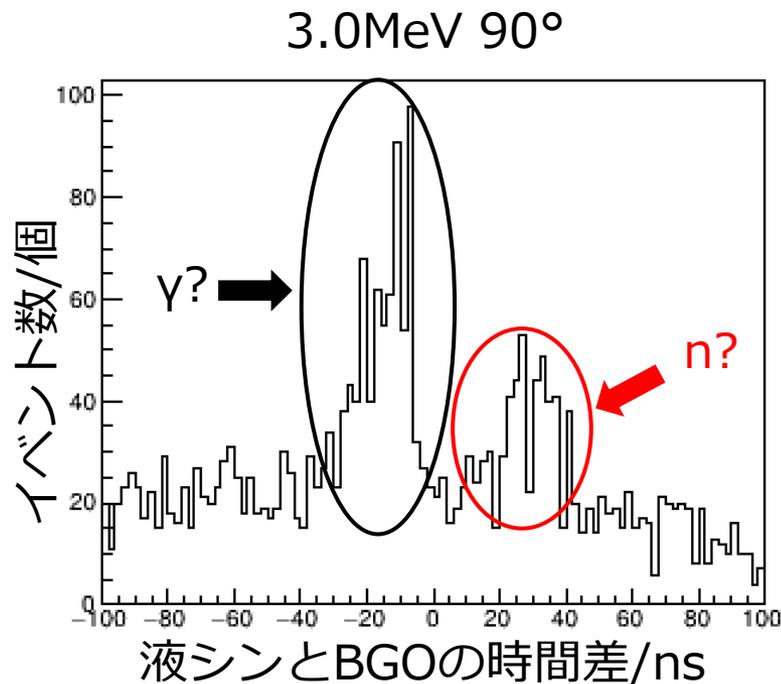
中性子/ガンマ線識別(液体シンチレータ)¹⁶

- Cf runから得た中性子事象の選択条件を適応した。
- 中性子のエネルギーが14.8MeVの測定結果には独自の選択条件を設定した。



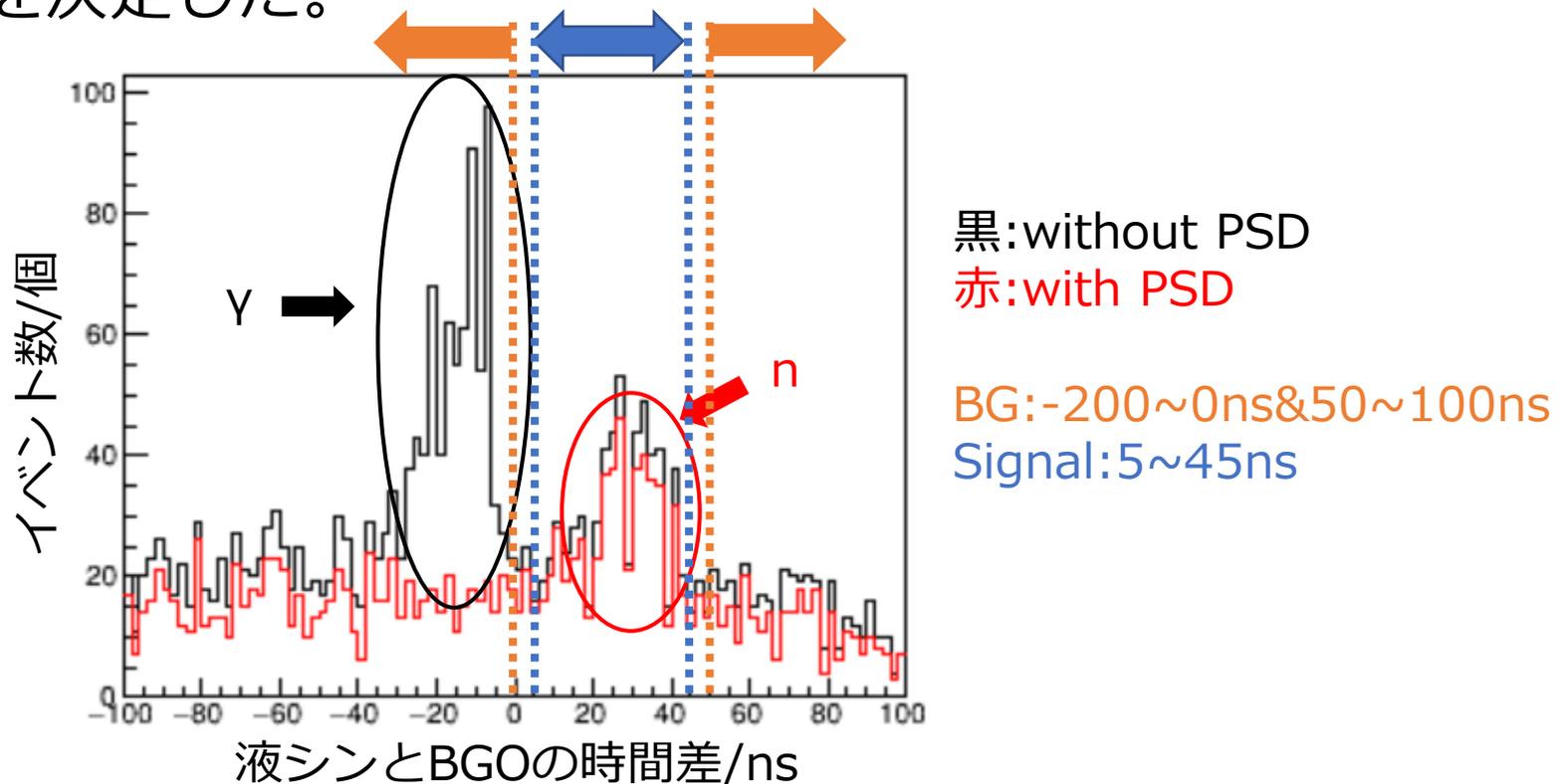
ビーム試験で得られたデータの解析

- 中性子のエネルギーが3.0MeV、BGOと液シンの角度が90°のときの液シンとBGOの時間差分布。
- Cfの測定結果をもとにしたPSDによって中性子による信号を選択した。



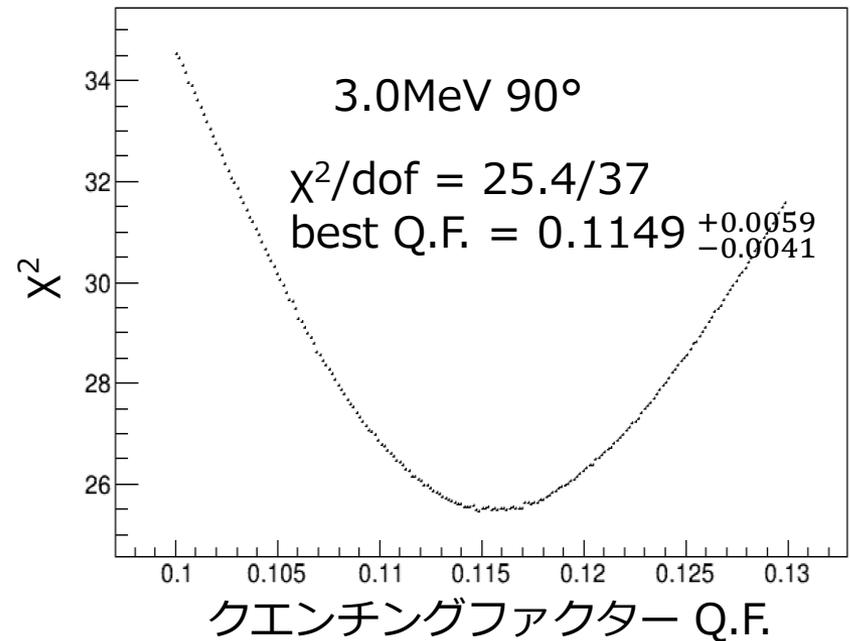
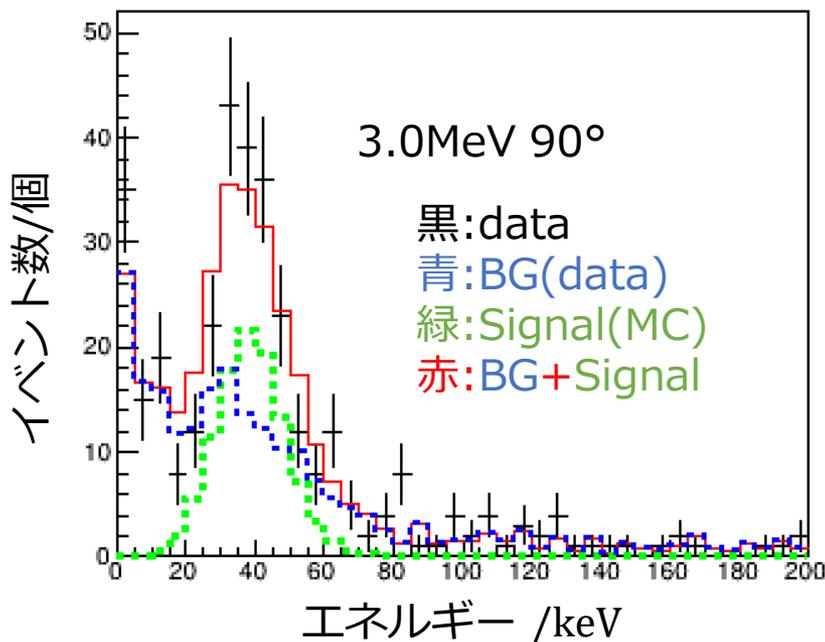
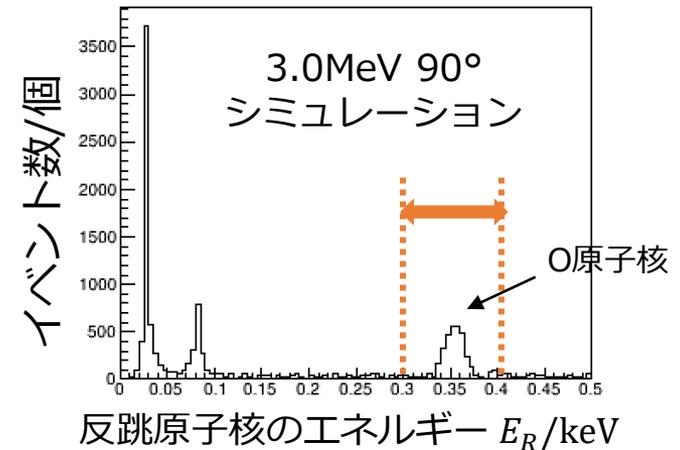
ビーム試験で得られたデータの解析

- 時間差ピークの存在は、中性子と酸素原子核の弾性散乱事象を正しく得られたことを意味する。
- 時間差分布をもとにSignal領域とバックグラウンド(BG)領域を決定した。

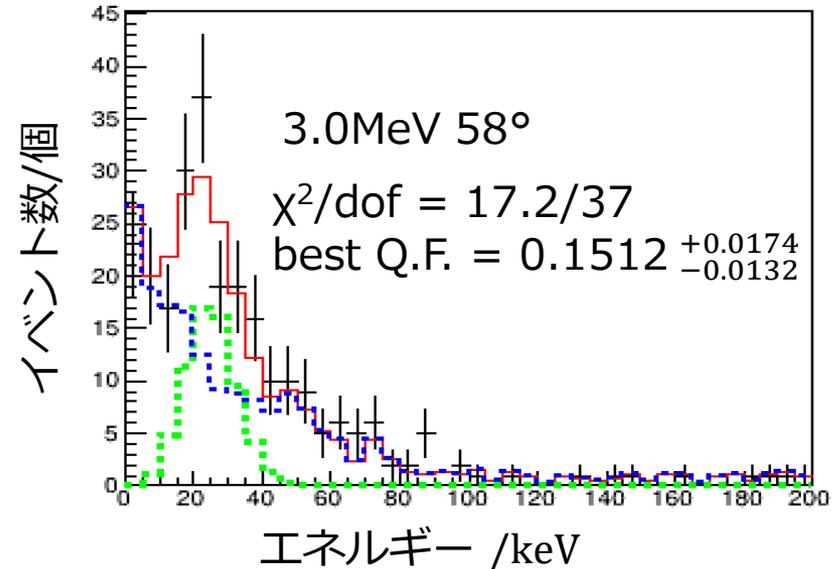
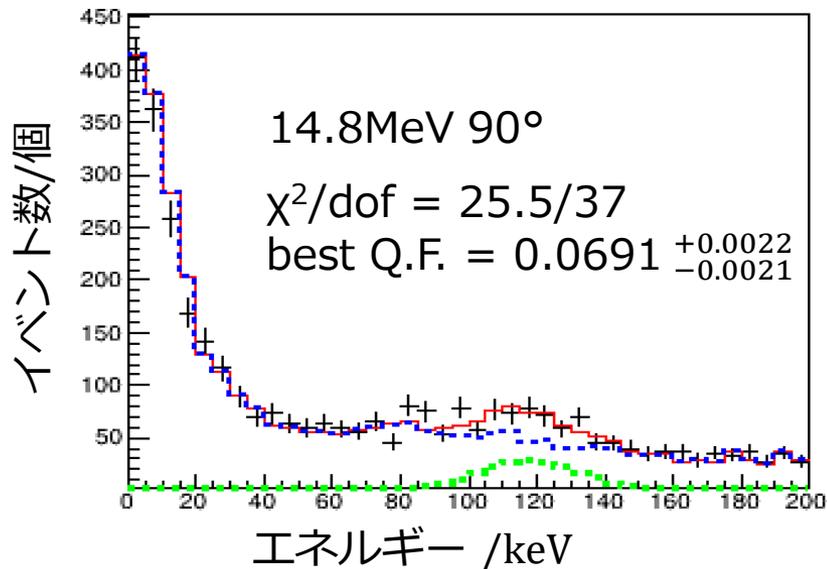
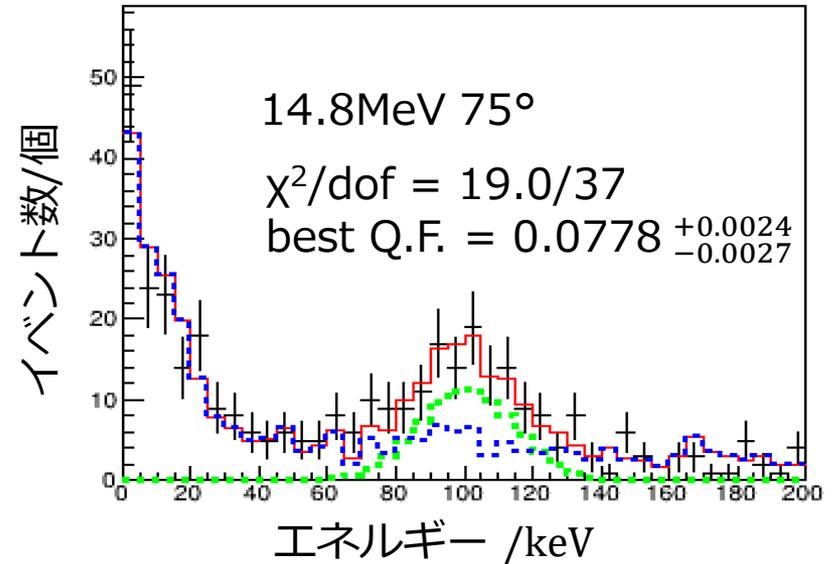
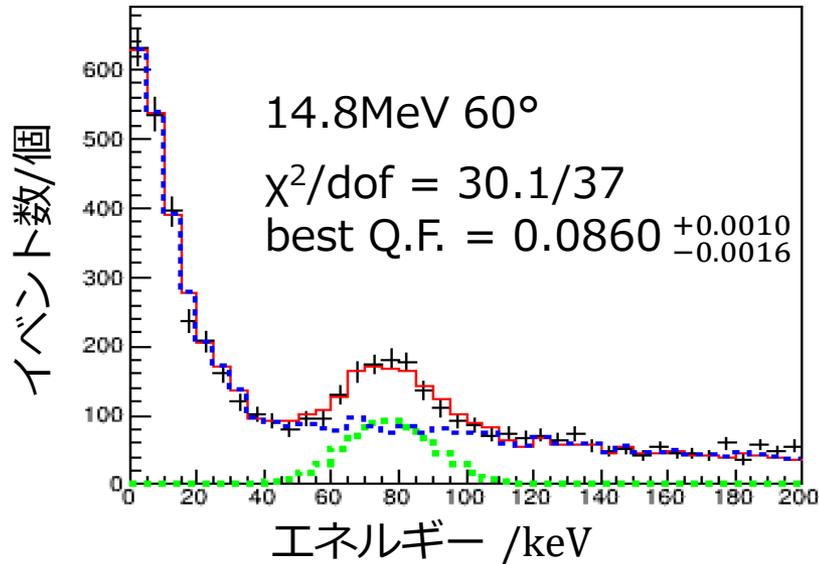


中性子のエネルギースペクトル

- BGOで測定されたエネルギー分布をfitすることでピークを求めた。
- 測定結果とシミュレーションの比較からクエンチングファクター(Q.F.)を求めた。

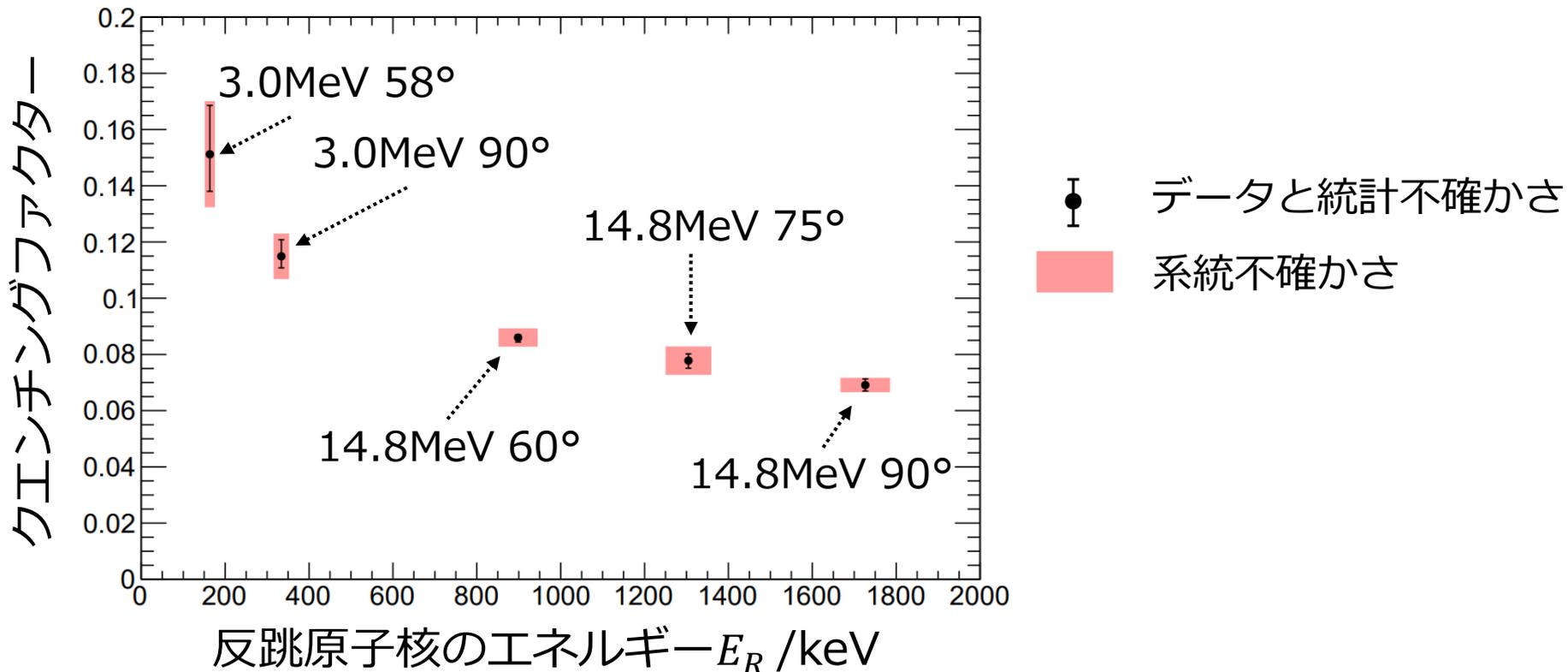


中性子のエネルギースペクトル

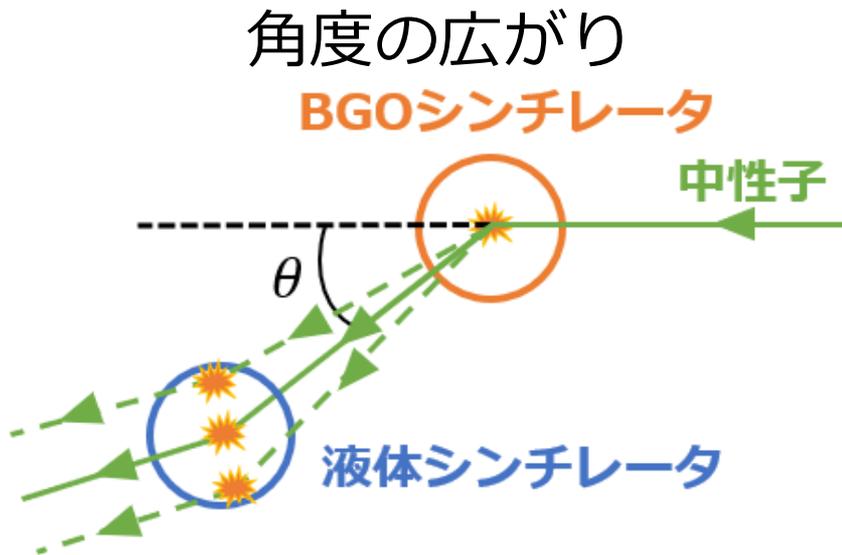


結果(クエンチングファクター)

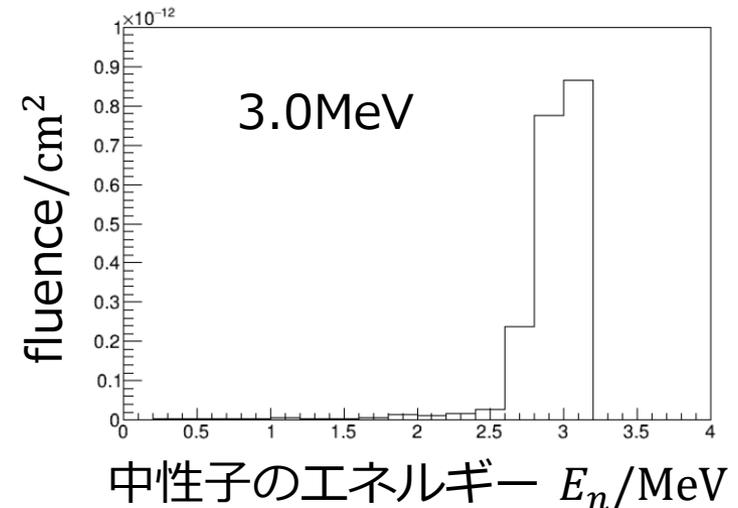
- BGOシンチレータの酸素原子核におけるクエンチングファクターが得られた。
- 赤い長方形は系統不確かさを表している。



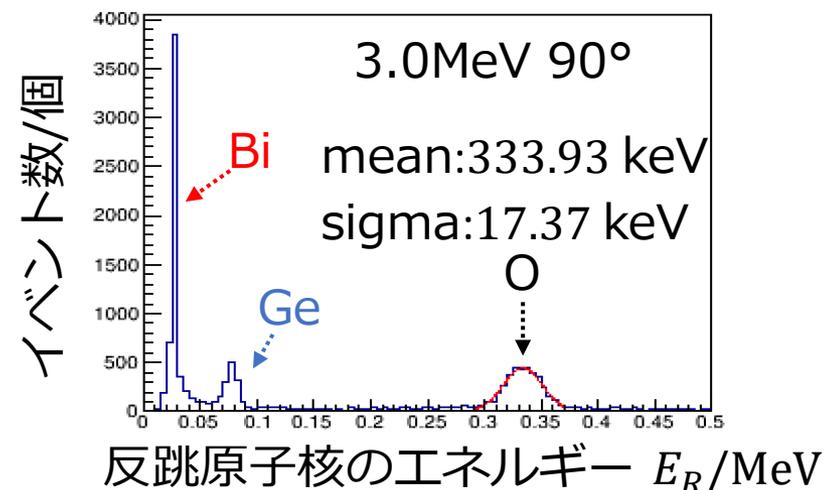
系統不確かさをの見積もり(横軸)



中性子のエネルギーの広がり

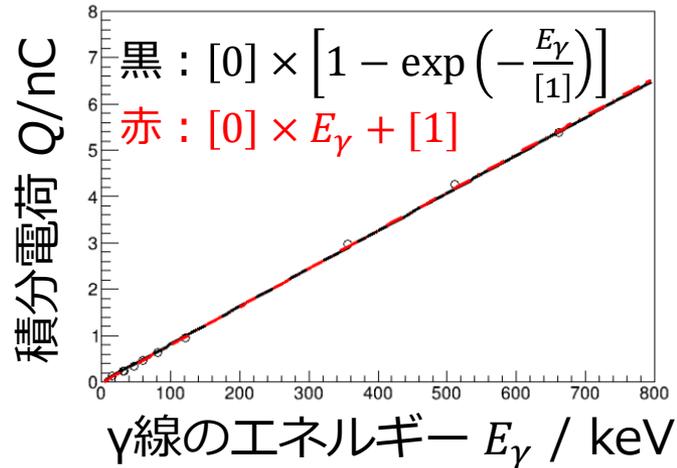


- シミュレーションを用いて系統不確かさを見積もった。
 1. 角度の広がり
 2. 中性子のエネルギーの広がり

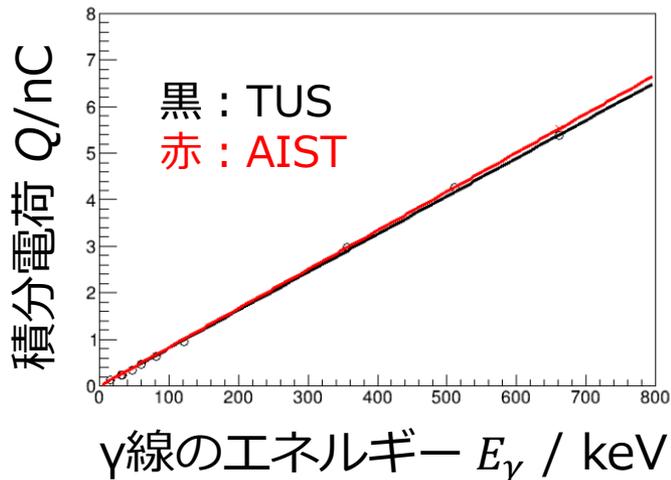


系統不確かさをの見積もり(縦軸)

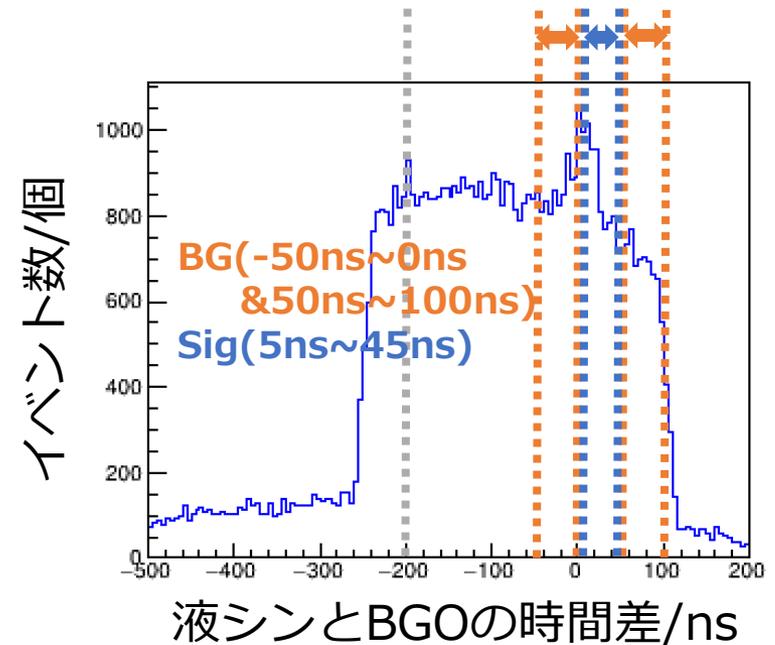
キャリブレーションのfit関数の違い



キャリブレーションデータの違い



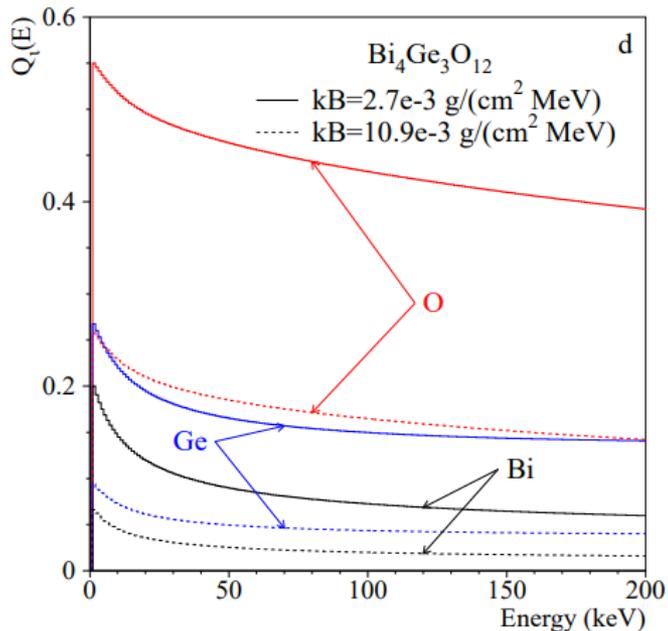
時間差領域の選び方の違い



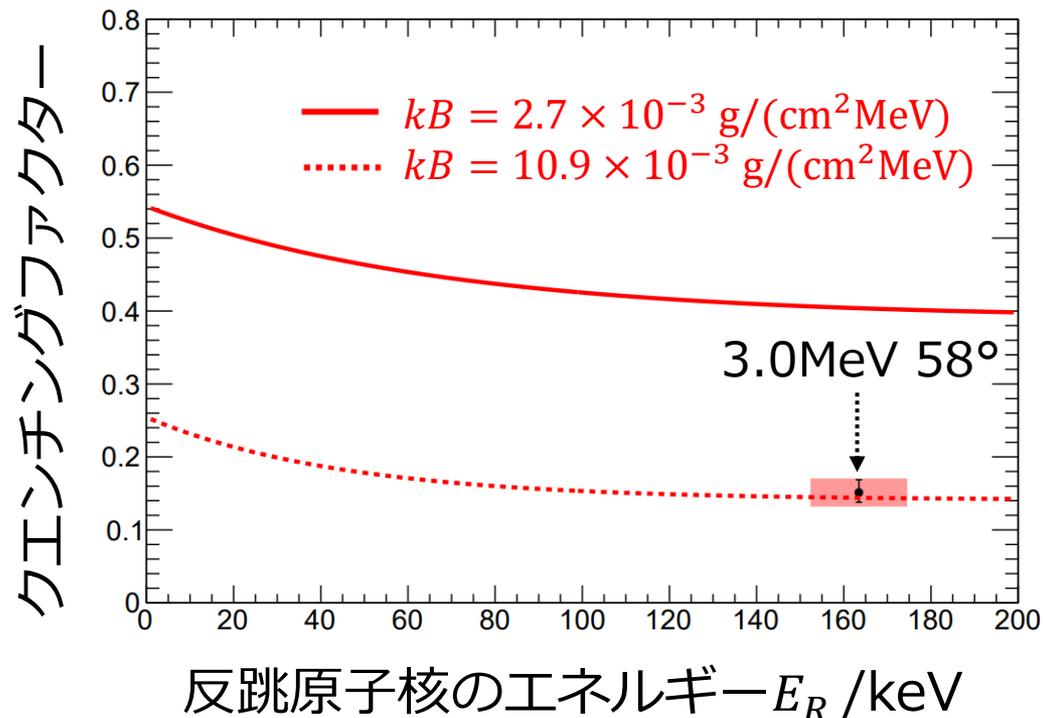
- 系統不確かさを見積もった。
 1. キャリブレーションのfit関数の違い
 2. キャリブレーションデータの違い
 3. 時間差領域の選び方の違い

結果(クエンチングファクター)

- Birksファクター(k_B)を用いたクエンチングファクターの理論予想と比較した。
- 2つの値のうち $k_B = 10.9 \times 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm}^2 \text{MeV})$ の方に近い。



[V.I. Tretyak, Astroparticle Physics 33 \(2010\) 40-53.](#)



まとめと展望

まとめ

- BGO中での中性子応答を調査するため、中性子照射試験を行った。
 - 酸素原子核の反跳エネルギーに対するクエンチングファクターを測定した。
 - 反跳エネルギーとクエンチングファクターの相関が確認できた。

展望

- この測定結果は、暗黒物質探索や二重ベータ崩壊探索($0\nu\beta\beta$)を目的とした地下実験への応用が期待される。
- SKでの中性子検出効率の精度を高めるため、BGOと中性子の非弾性散乱イベントについても研究を行う。