

スーパーカミオカンデにおける 中性子検出効率の測定精度向上を 目的としたBGOシンチレータの 中性子応答の研究

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

2021/11/26 第2回新学術「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。



スーパーカミオカンデの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10%の違いがある。



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。

スーパーカミオカンデ(SK)

• 検出器

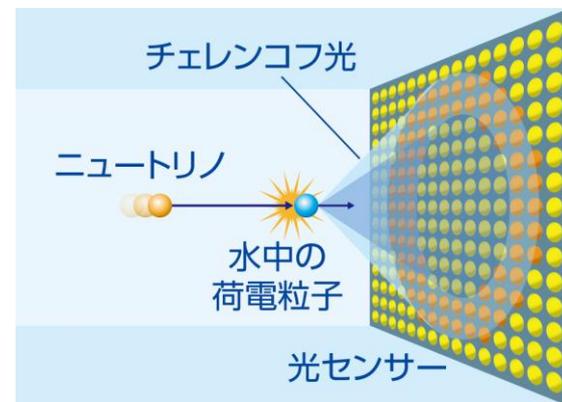
- 水チェレンコフ検出器
- 岐阜県神岡の地下1000mに設置
- 約5万トンの超純水
- 約1.1万本の光センサー(PMT)

• 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。



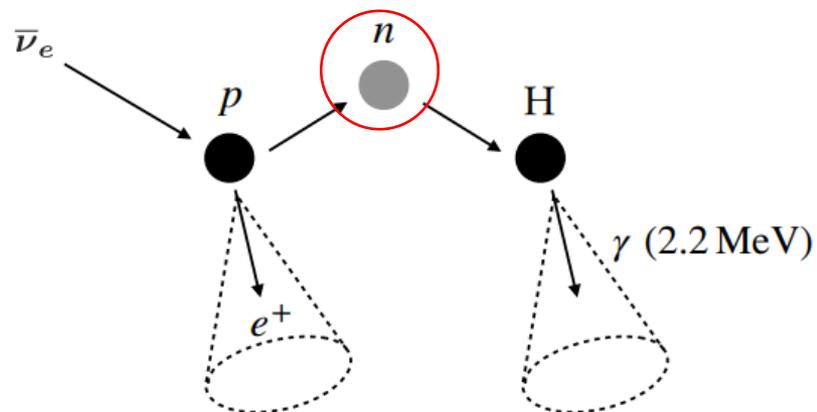
超新星背景ニュートリノ

- 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。

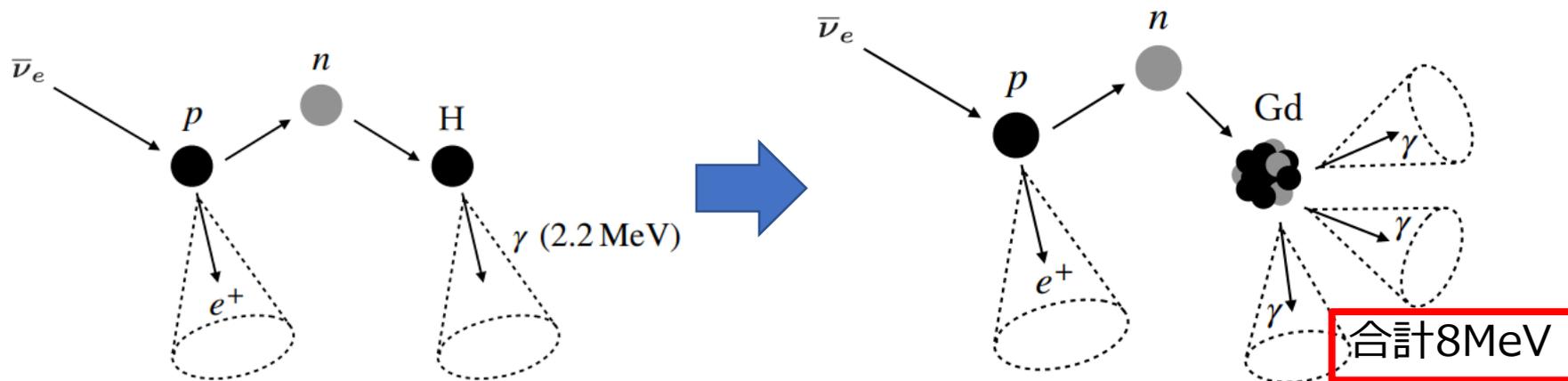
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$
 - 陽電子による信号と γ 線に由来する信号を同時に測定することでバックグラウンドと区別。



1年間に1~4イベント程度しか検出されない。

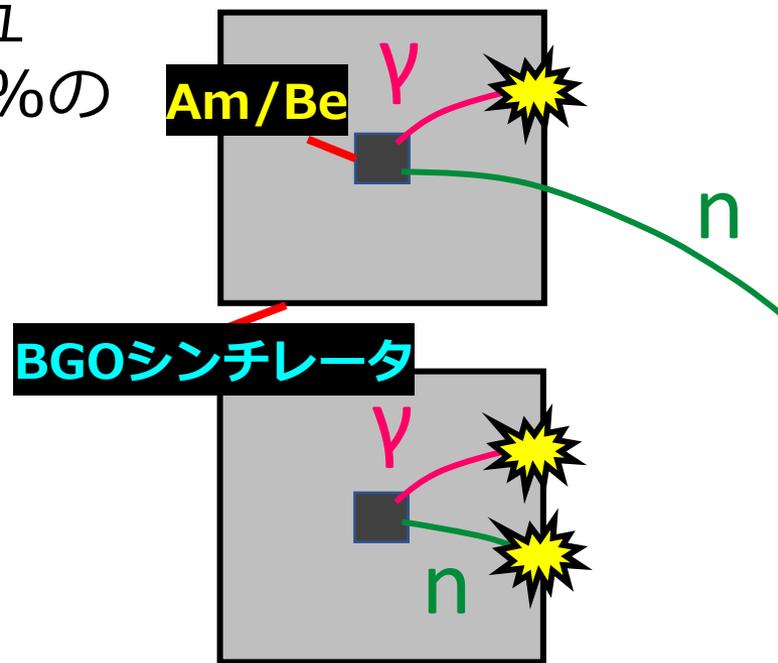
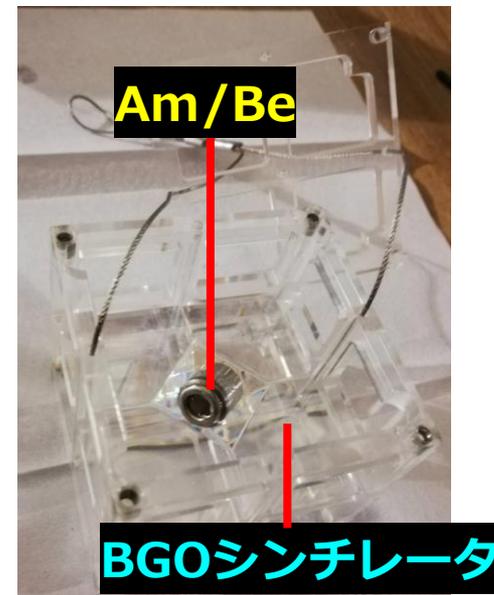
SK-Gd

- 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。



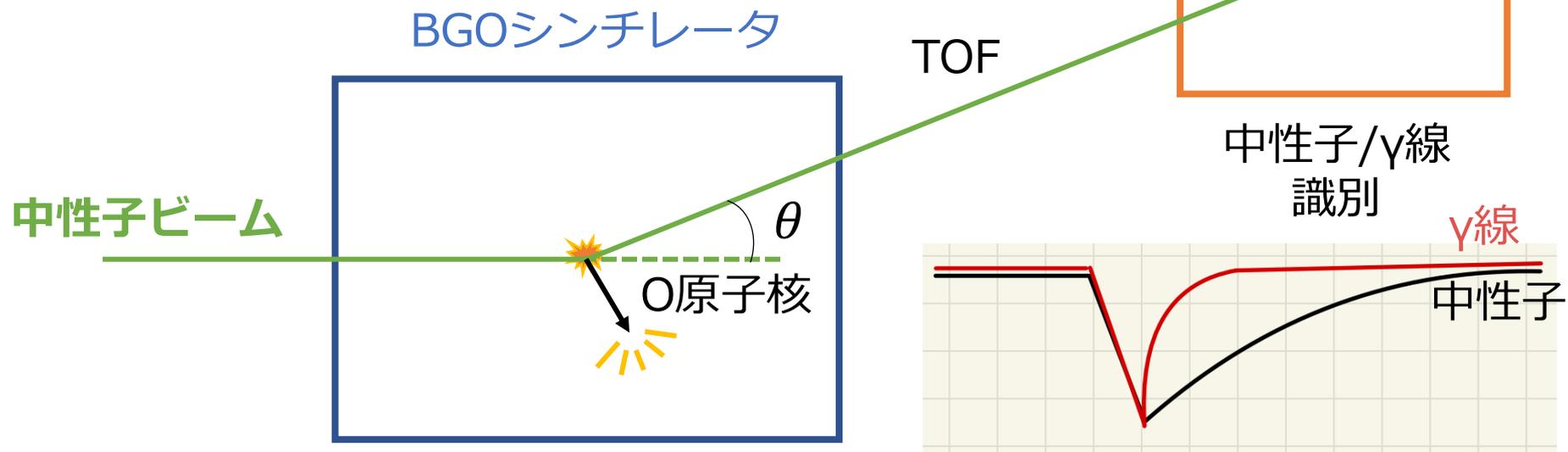
Am/Be中性子線源

- 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→BGOの特性について研究する。



ビームテスト

- BGOシンチレータのクエンチ効果を理解するために行う。
 蛍光の強度が低下し、エネルギーが小さく見積もられる現象。
- 中性子ビームをBGOシンチレータに当て、BGOシンチレータで反応した後、液体シンチレータでも反応したイベントを記録する。

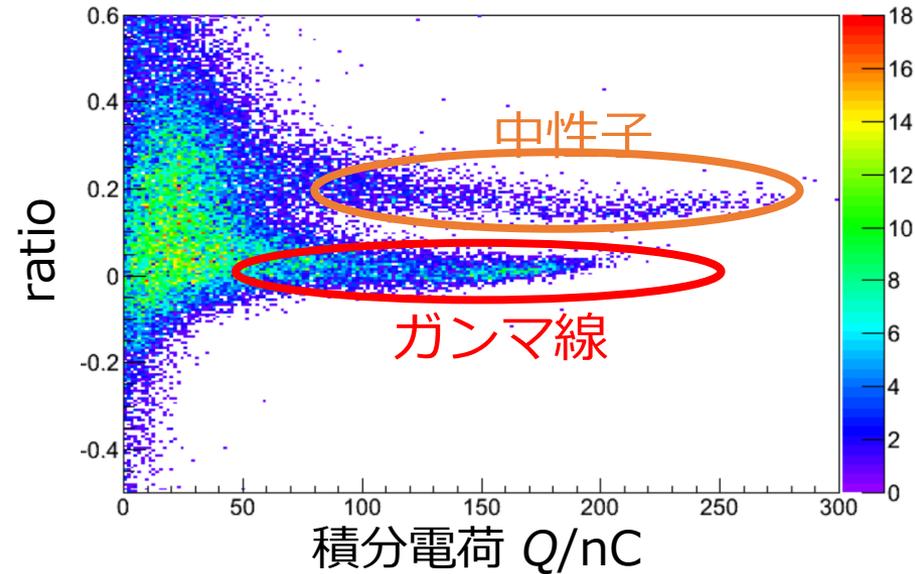
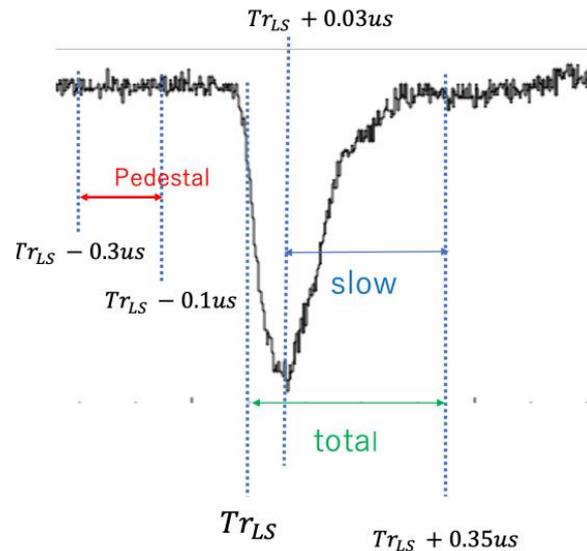
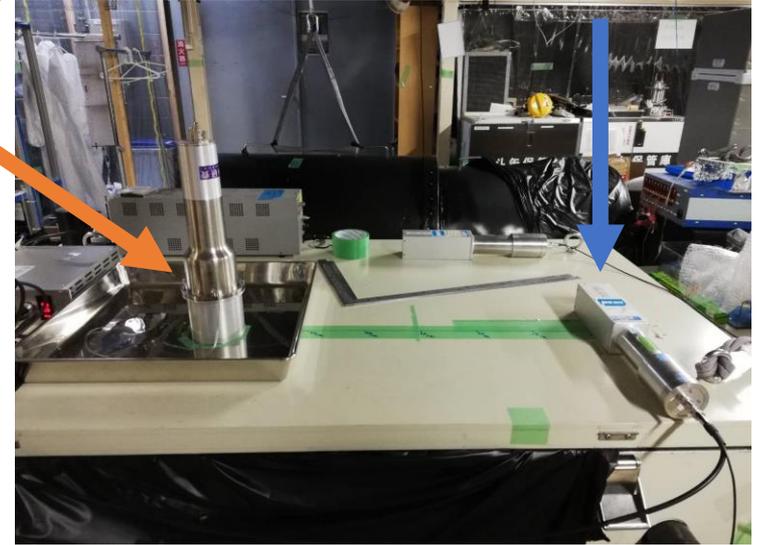


中性子/ガンマ線識別

NaIシンチレータ

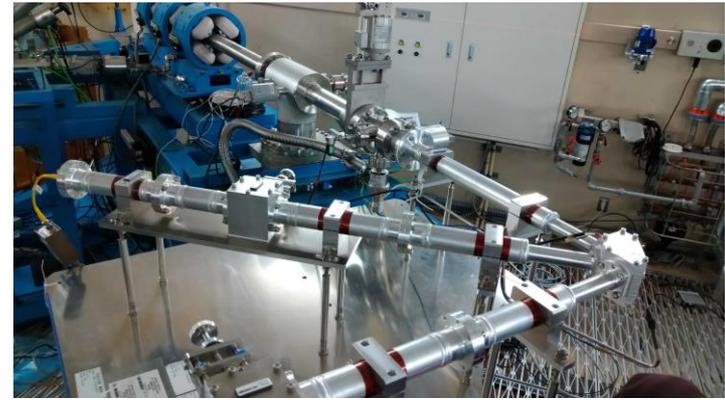
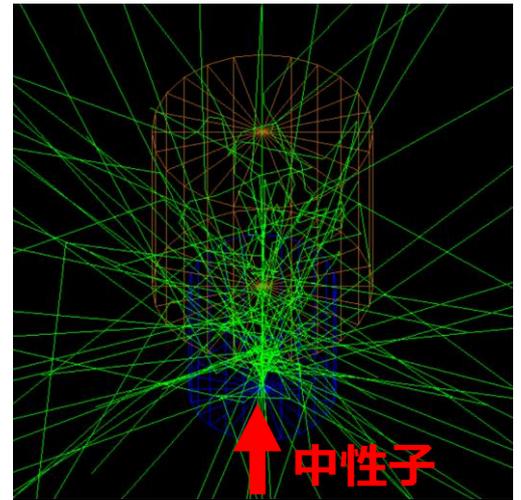
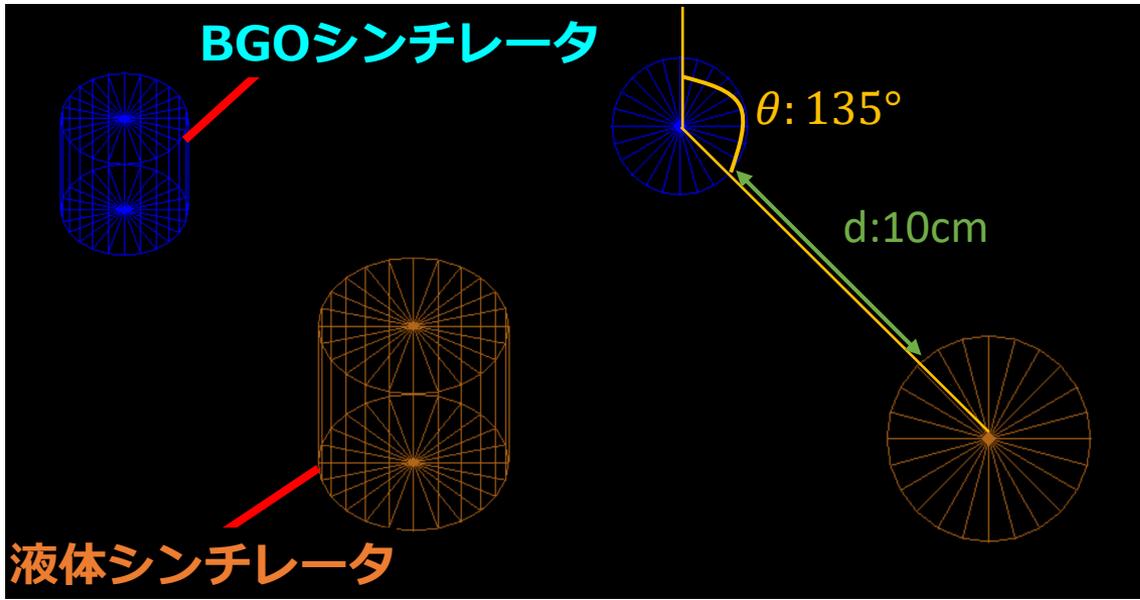
液体シンチレータ

- $\text{ratio} = \text{total} / \text{slow}$
- 中性子はガンマ線よりもテイル成分が大きいいため、ratioが大きくなる。



ビームテストにおける角度とイベントレートの依存性のシミュレーション

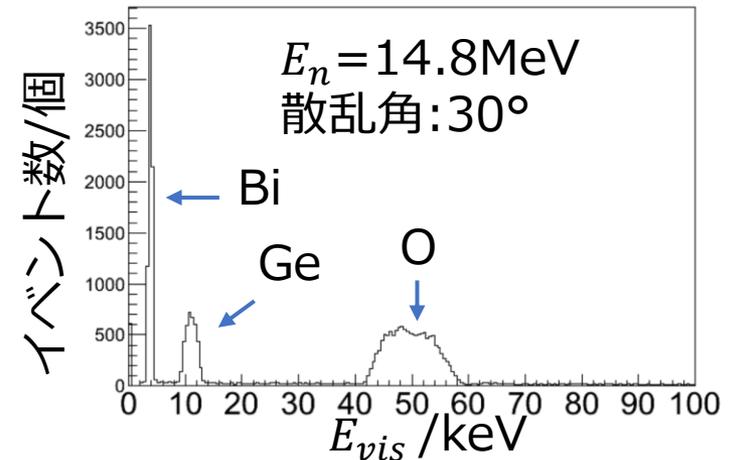
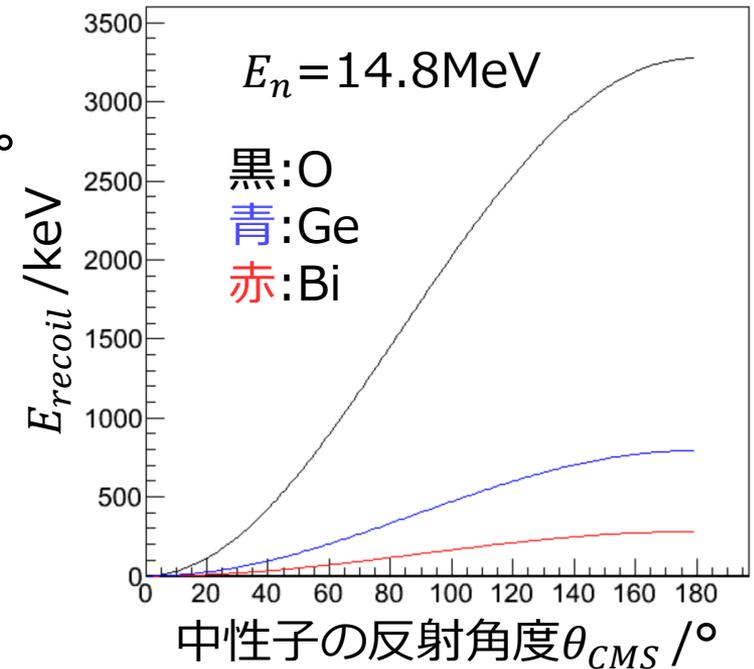
- ビームテストではイベントレートが問題。
→ビームテストに適した検出器の距離と角度を求める必要がある。



青: BGOシンチレータ(直径: 2in, 高さ: 2in)
 橙: 液体シンチレータ(直径: 3in, 高さ: 3in)

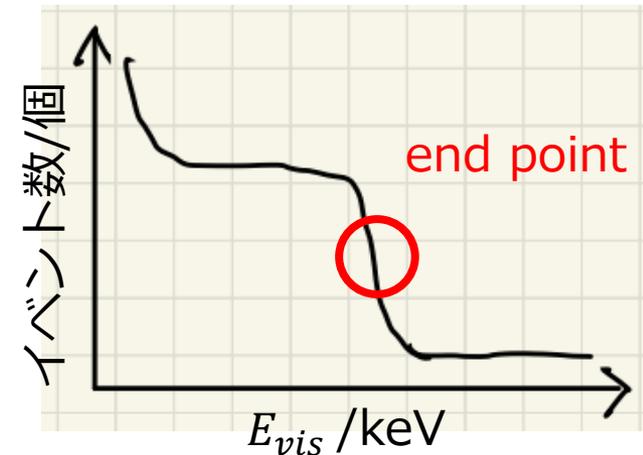
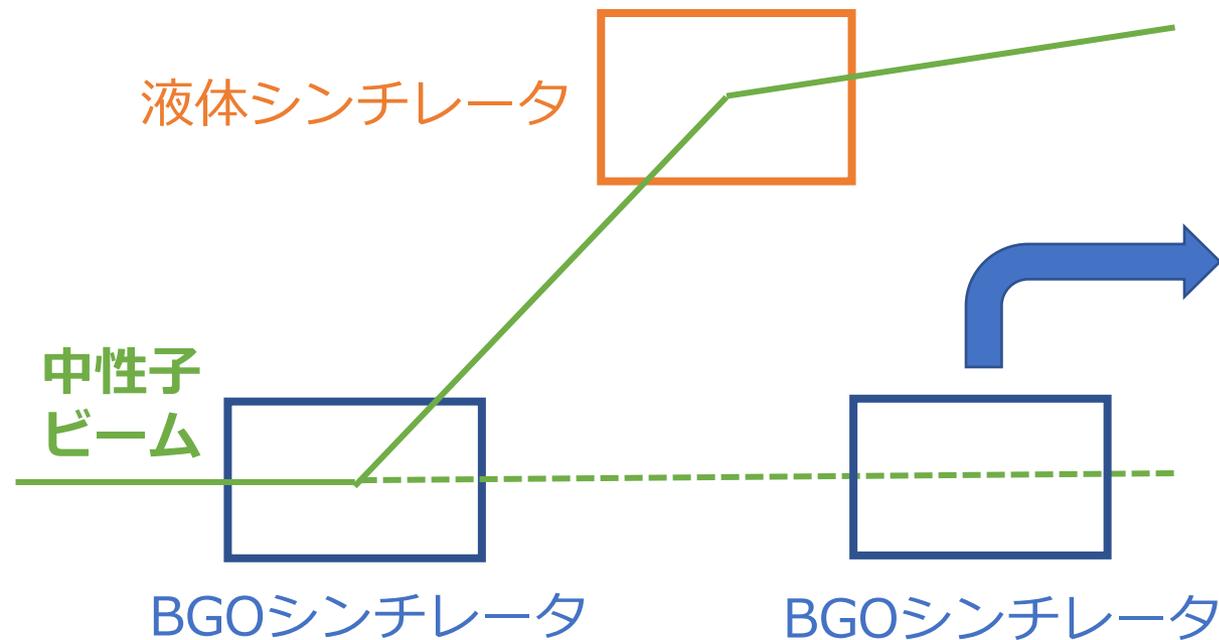
ビームテスト

- 中性子はBGO中の原子核と弾性散乱をし、原子核にエネルギーを渡す。
- 弾性散乱の際の中性子の反射角度によって反跳される原子核のエネルギーが決まる。
- クエンチ効果によって実際に観測されるエネルギーは小さくなるはず。
- 本来観測されるエネルギー(E_{recoil})と実際に観測されたエネルギー(E_{vis})を比較することでクエンチ効果の角度依存性が分かる。



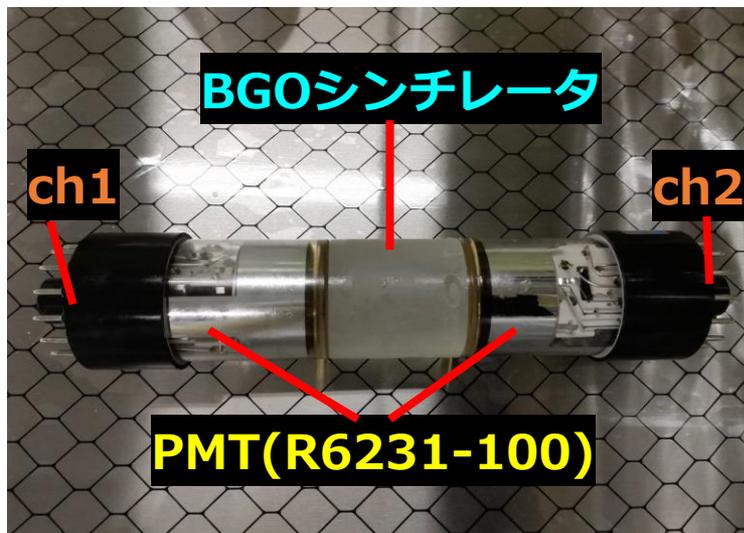
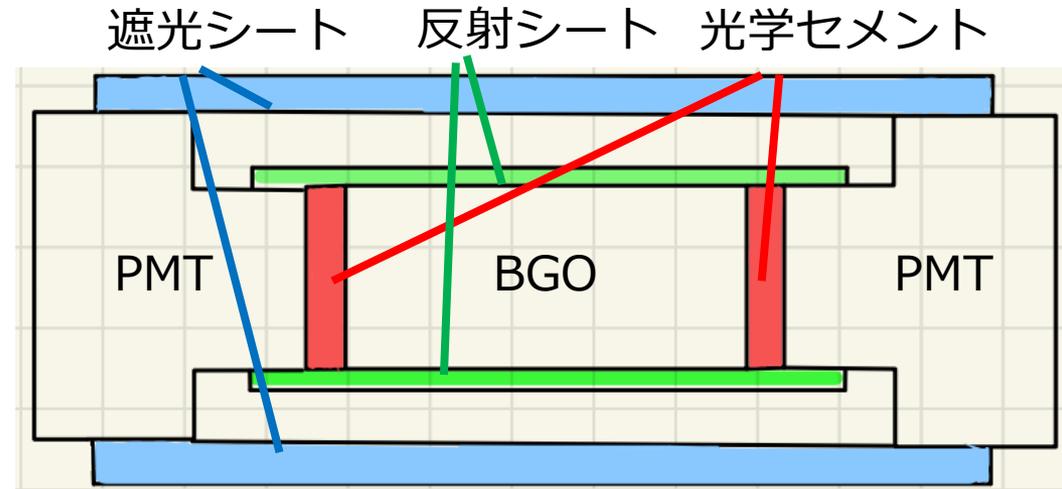
ビームテスト

- 中性子ビームのエネルギーは3MeVと14.8MeVを予定。
- 角度は2つか3つ選びたい。45°と90°か、30°、60°と90°。
- ビームライン上にもう一つBGOを置くことで180°についても記録できる。



BGO検出器の製作

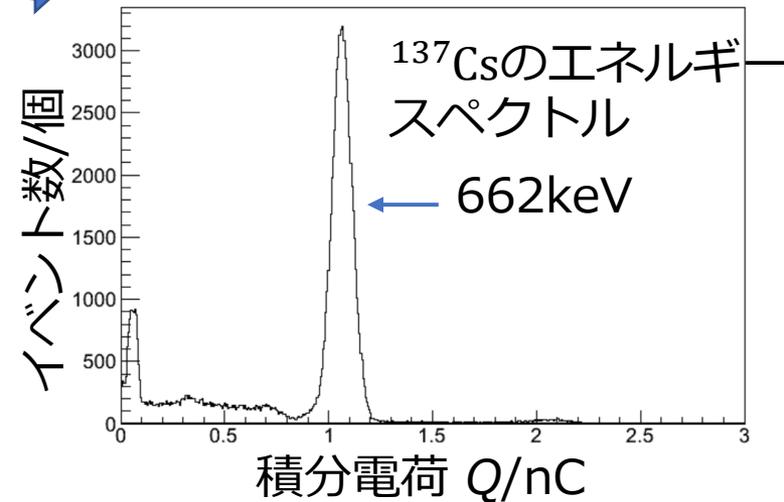
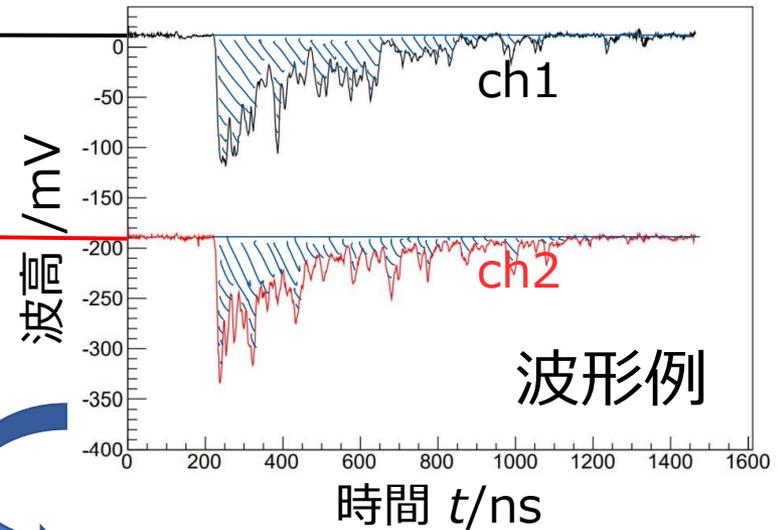
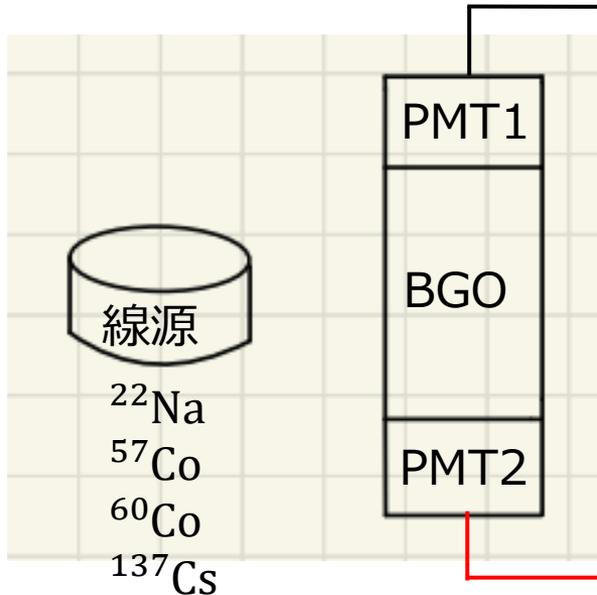
- BGOシンチレータとPMTを光学セメントで結合した後、反射シート(アルミ蒸着シート)と遮光シートを巻いた。
- 作業はクリーンルームで行った。



PMTで検出される波形例



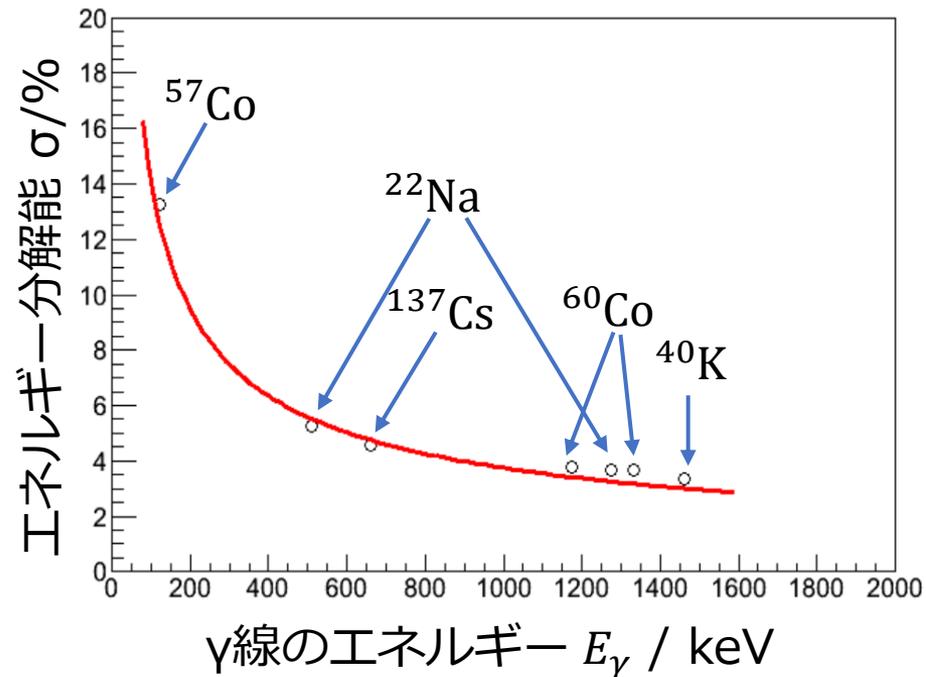
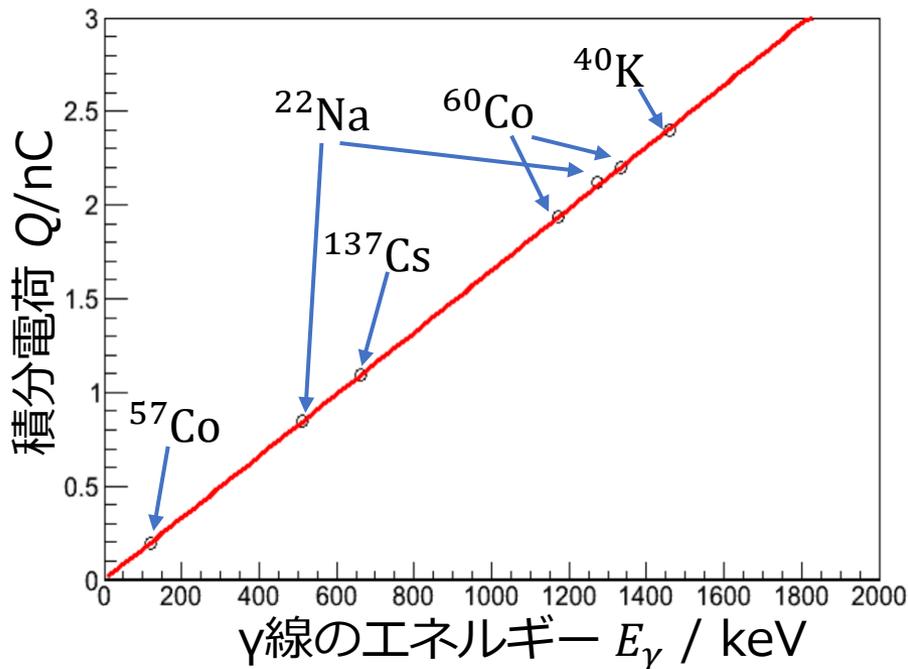
DRS4



- PMTが2つあるのでノイズを減らせる。
- 右上図の斜線部分を積分した値は、BGO中のエネルギー損失に対応する。

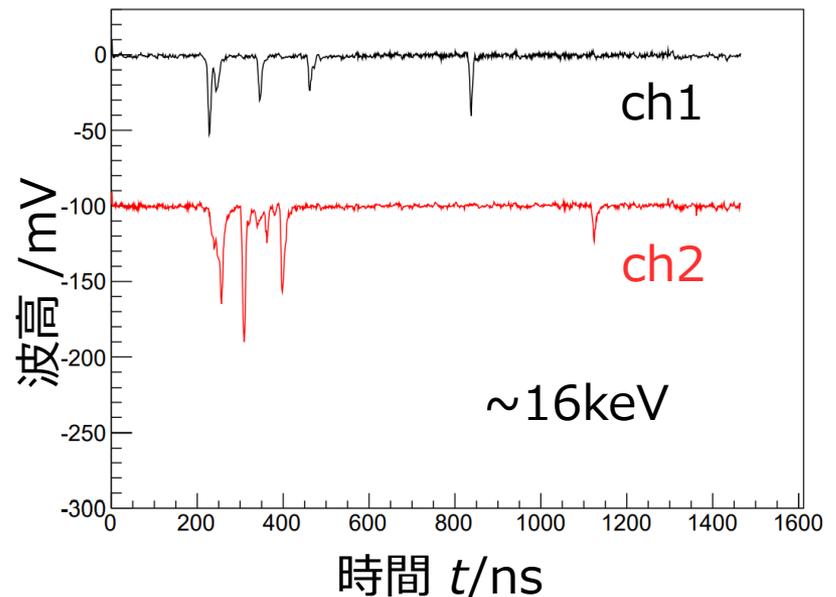
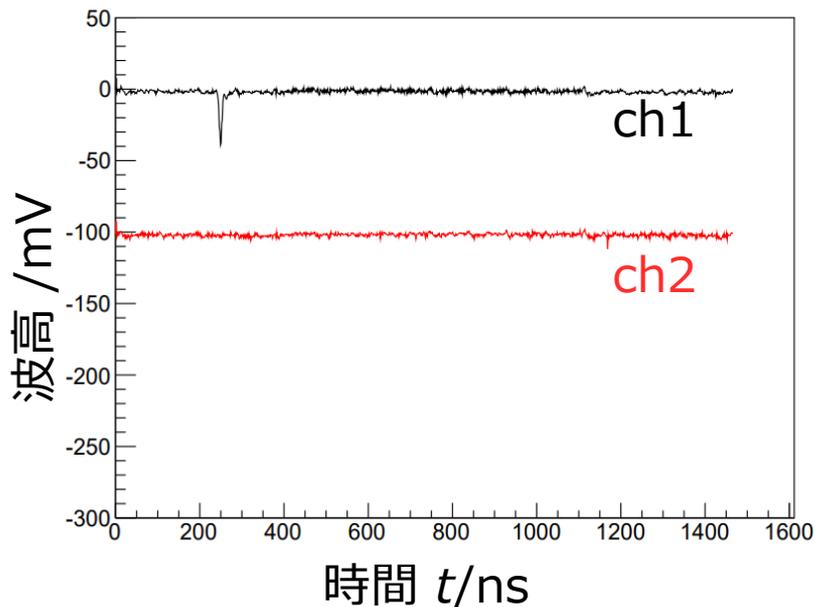
BGOシンチレータの エネルギーキャリブレーション

- PMTのch1の信号についてのしきい値を決め、波形を記録した。
- ビームテストでは低エネルギーが重要なので ^{57}Co (122keV)を用いた。

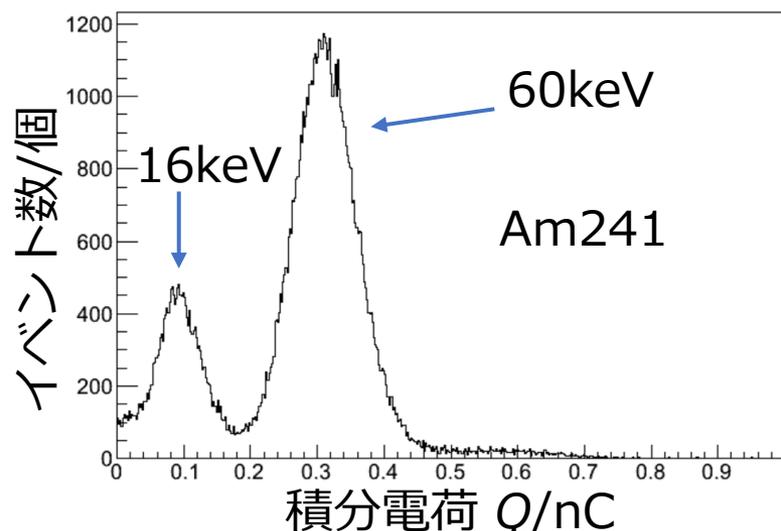
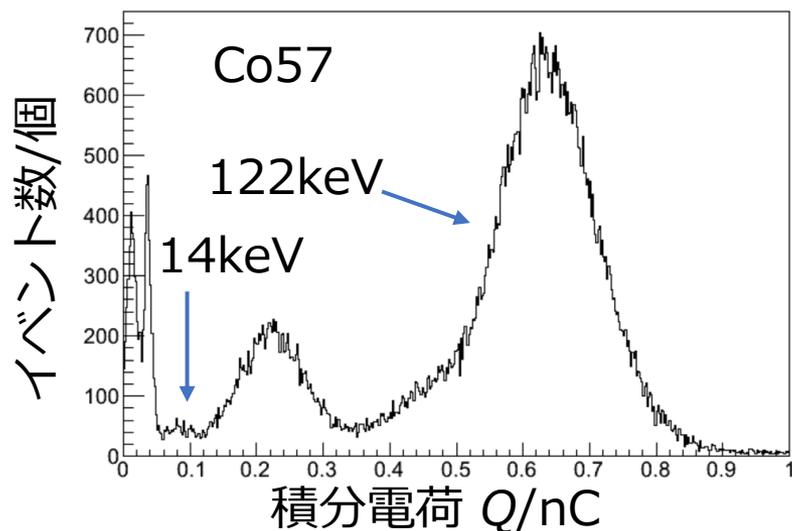
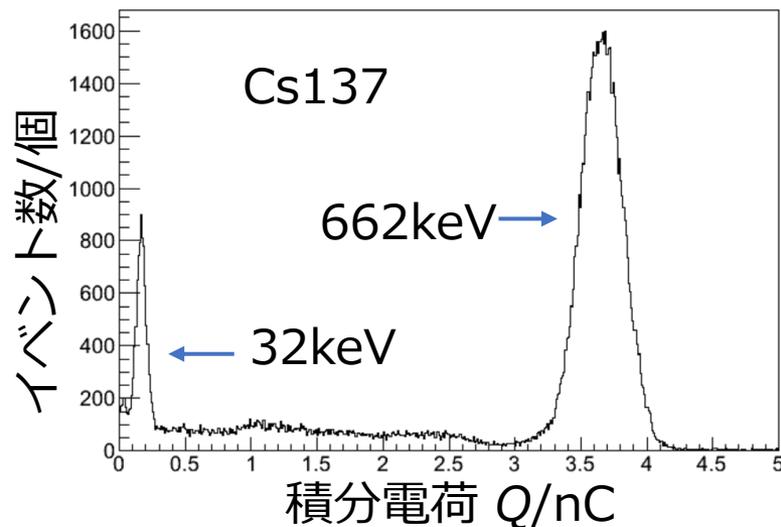
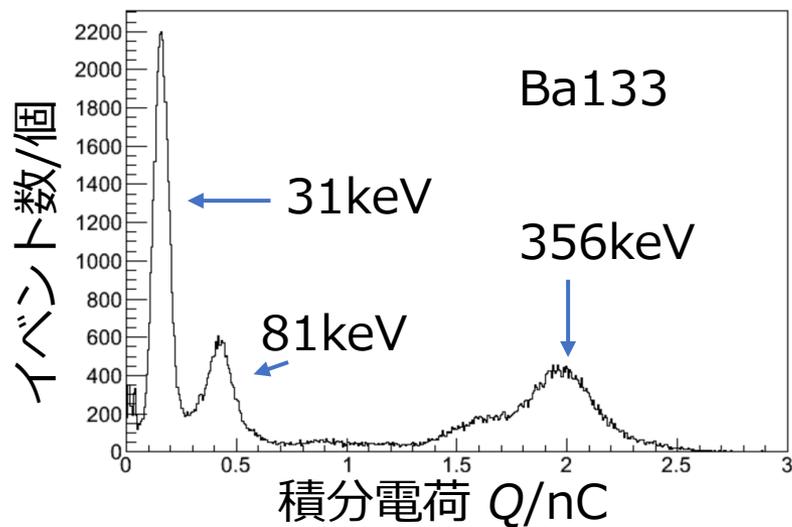


BGOシンチレータの エネルギーキャリブレーション

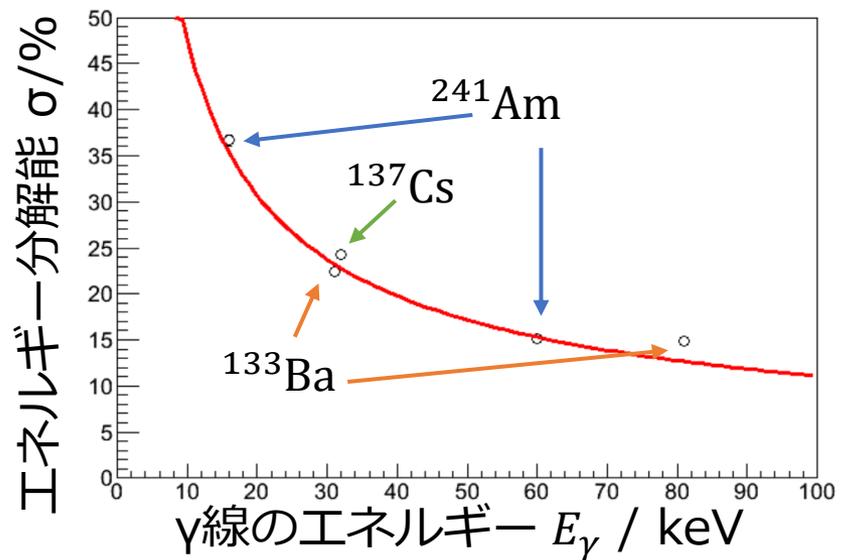
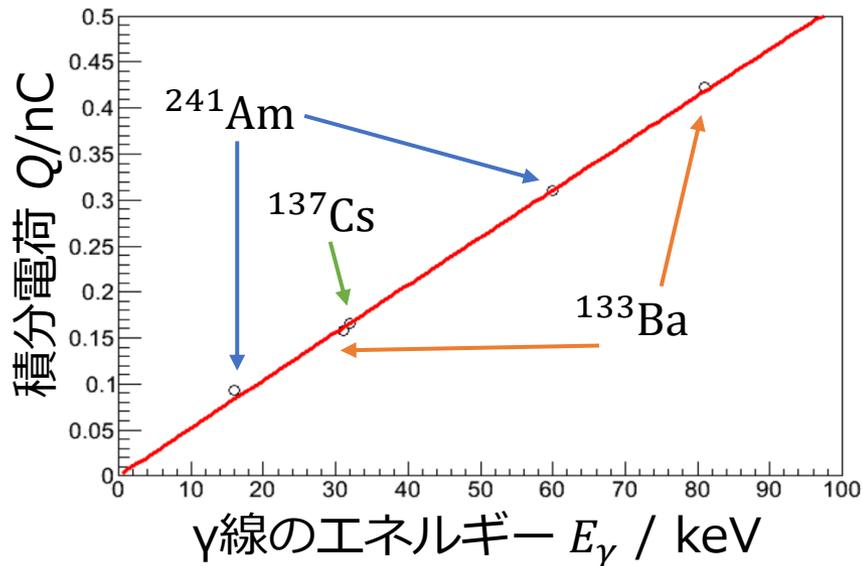
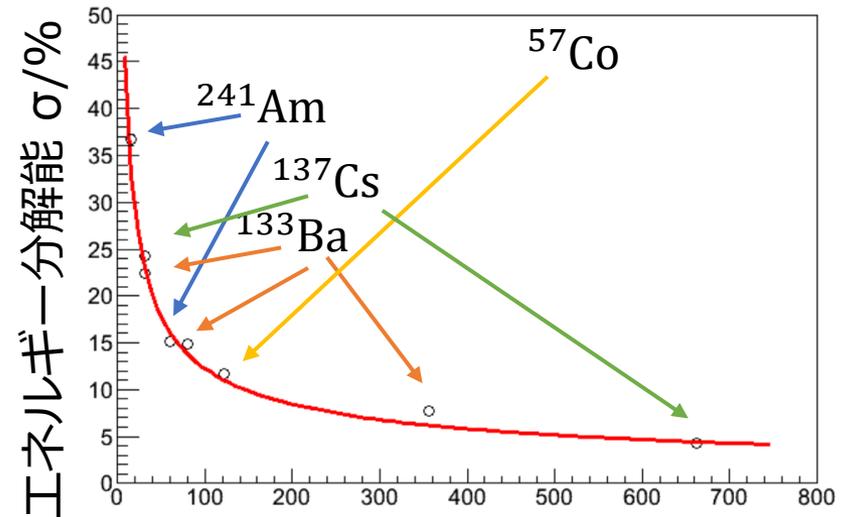
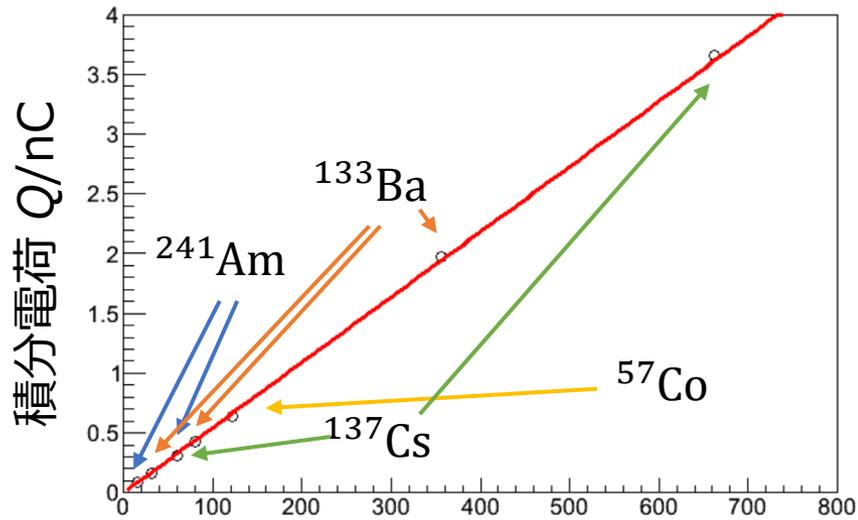
- 特に100keV以下の低エネルギーでは、PMTのch1の信号についてのしきい値のみを決めるだけの測定では左下の図のようなノイズが邪魔。
→右下の図のようなch1とch2に波形が同時に来たときに信号を記録した。



BGOシンチレータの エネルギーキャリブレーション

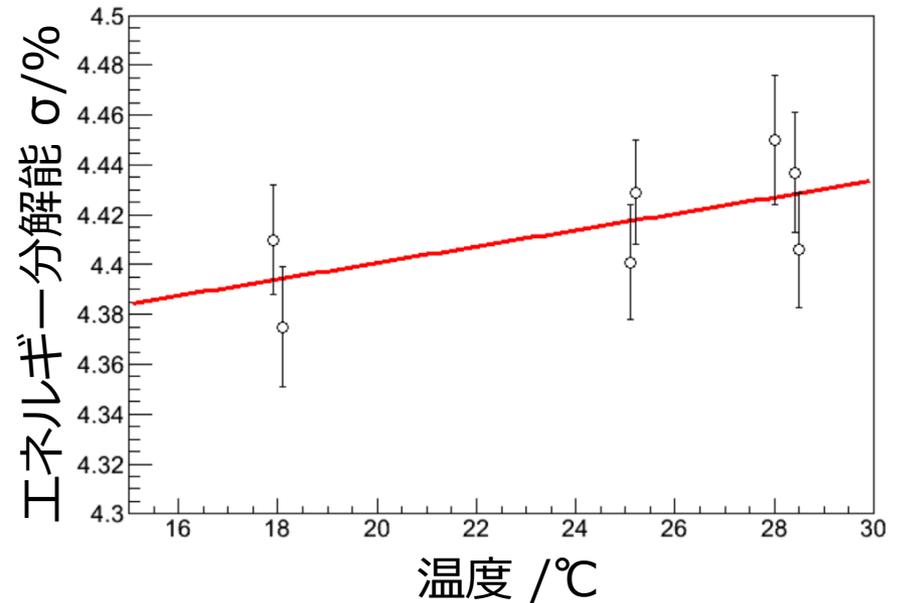
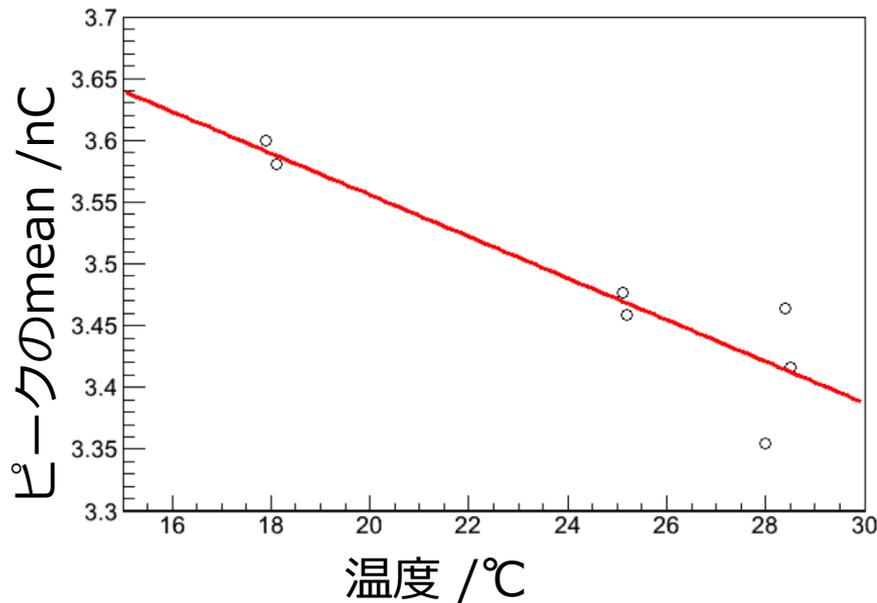
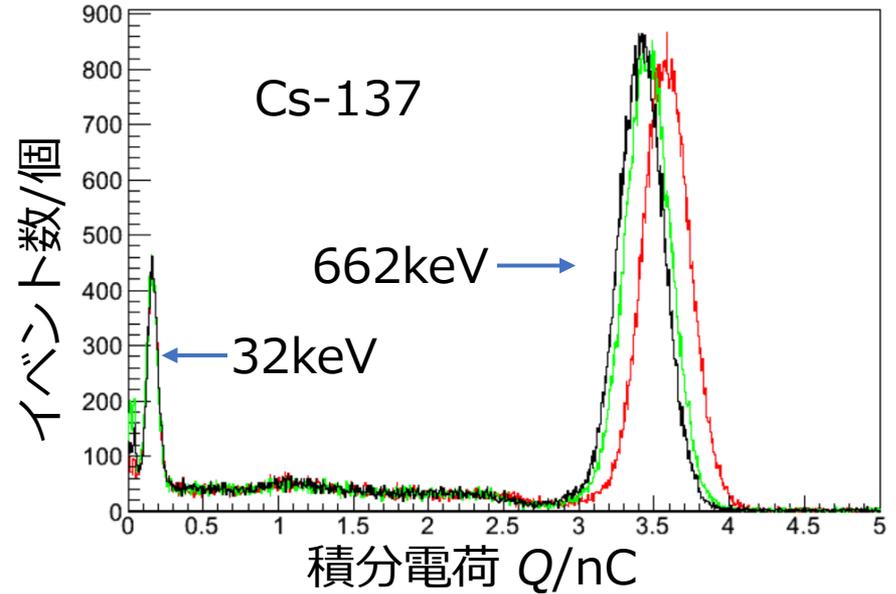


BGOシンチレータの エネルギーキャリブレーション



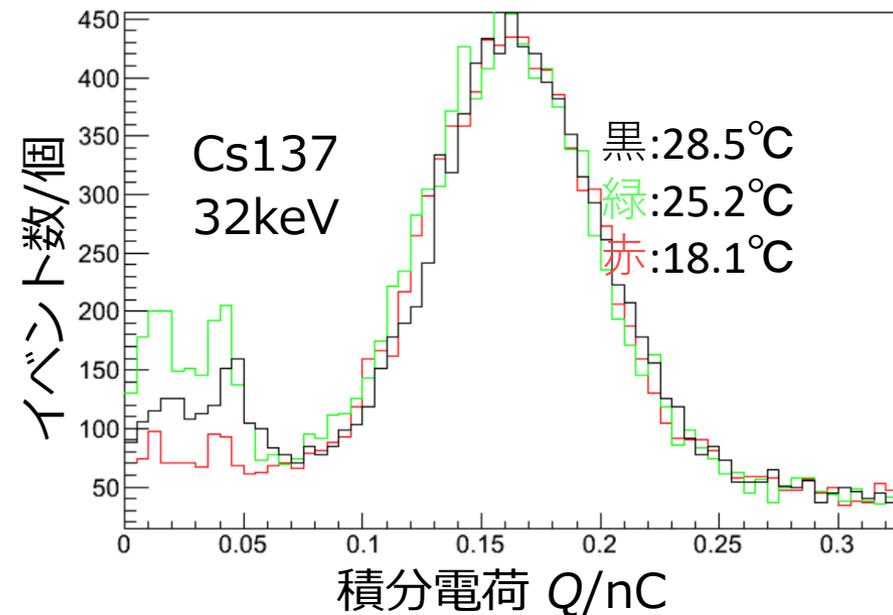
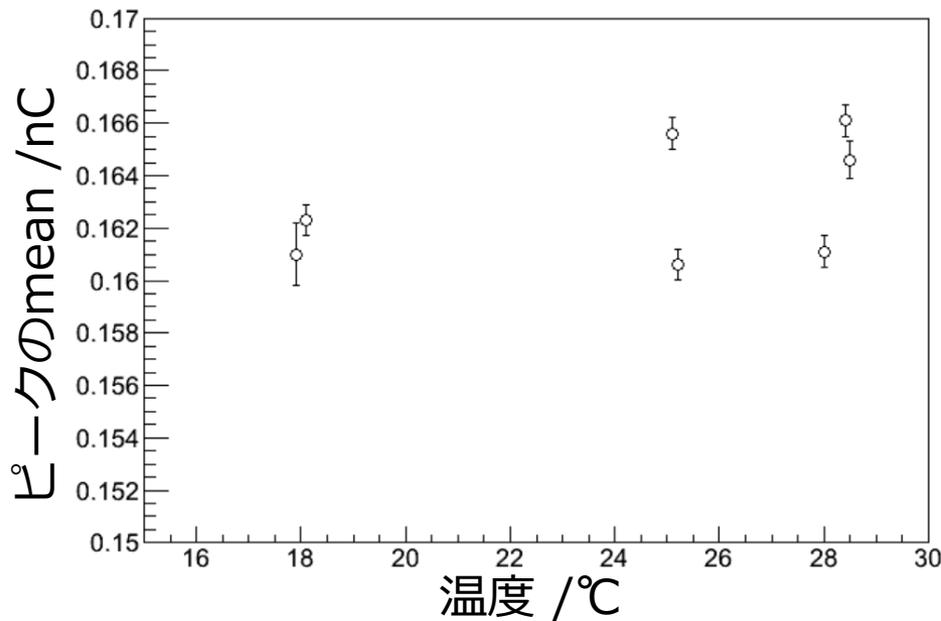
BGOシンチレータの温度依存性¹⁸

- BGOシンチレータの温度依存性を測定した。
- 662keVで $-0.5 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ となった。
- エネルギー分解能も相関が見られた。



BGOシンチレータの温度依存性

- 32keVでは、相関は見られなかった。
←PMTに入る光電子数が少ないため、温度によるばらつきが見えにくい。(32keVのとき、PMTに入る光電子数は約20~30個。)



まとめ

- 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では、データとMCで10%程度のずれが生じている。
 - 原因の可能性の一つとしてBGO中での中性子散乱が指摘されている。
- BGO中での中性子応答を調査するため、産総研において中性子を照射するビームテストを計画している。
 - BGO検出器を準備し、エネルギーキャリブレーションを行った。
 - $\sim 10\text{keV}$ の低エネルギーまで測定することができた。
 - ビームテストの結果を再現するようにシミュレーションモデルを修正する。