

暗黒物質方向感度検出器の開発 に向けた $ZnWO_4$ シンチレータの評価

2022年11月23日(水)
東京大学宇宙線研究所
修士1年 河内弘輝

目次

○研究目的

- 方向感度を持ったWIMPの探索
- 発光異方性のあるシンチレータ ($ZnWO_4$)
- これまでの結果と課題

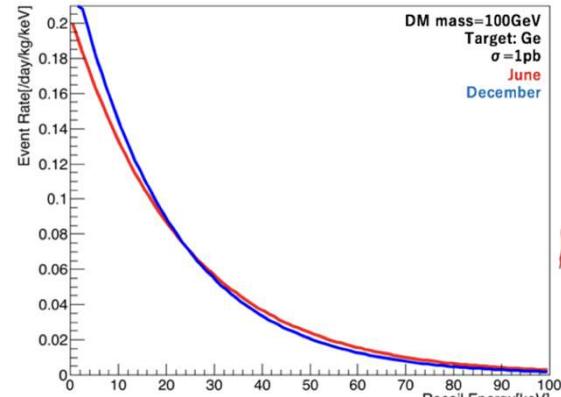
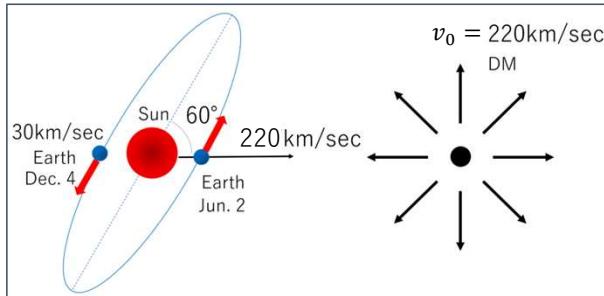
○本発表の内容

- プリアンプ時定数の最適化
- 高量子効率のPMT (R11934-200-010)
- 反射材の最適化
- 結晶表面研磨方法の変更と発光異方性の測定
- まとめ

研究目的：方向感度を持ったWIMPsの探索

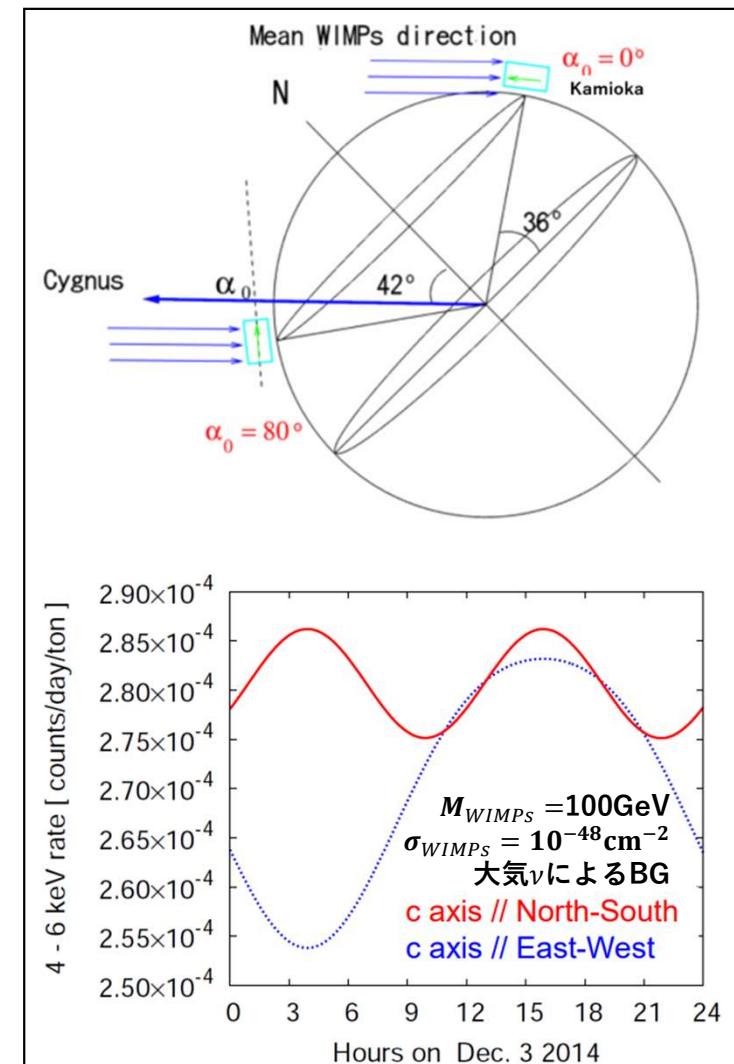
○ WIMPsが飛来する方向

- ・ 暗黒物質候補の1つがWeakly Interacting Massive Particles。
- ・ 銀河内を等方的に飛び回っている。
- ・ 太陽系は銀河系を秒速220kmではなくちょうど座の方向に進む。
→はくちょう座の方向からWIMPsが降り注ぐ。
- ・ 公転によりイベントレートが年周変化するが、とても小さい。
→方向感度があると、さらに方向の情報も加わる。



○ 光量の日周差

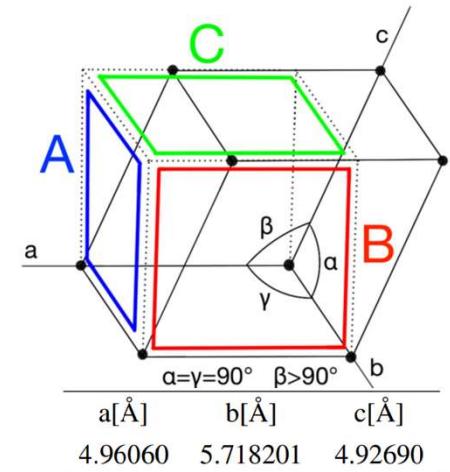
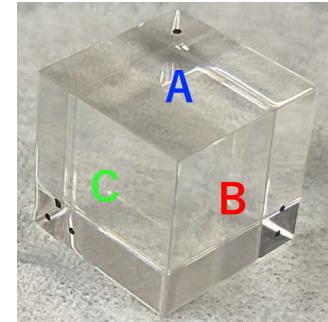
- ・ 粒子の入射方向により発光量の異なる異方性シンチレータを用いる。
- ・ 自転による光量の変化(日周変化)を捉える。
- ・ シンチレータの向きを変えると異なった光量の日周変化が見える。
→日周変化でWIMPsを探索できる。



研究目的：発光異方性のあるシンチレータ (ZnWO_4 結晶)

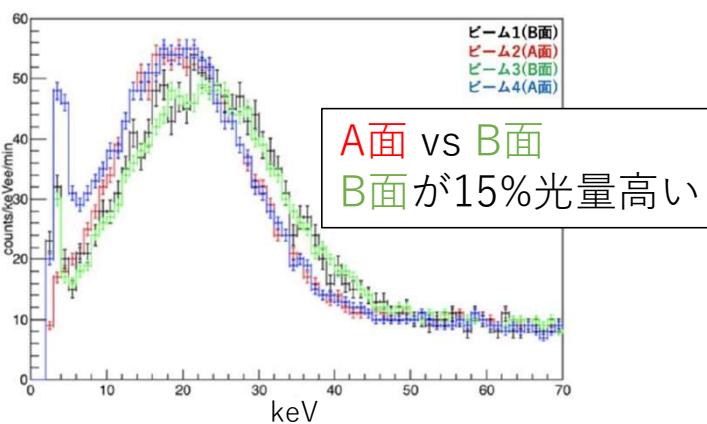
○ ZnWO_4 結晶

- 無色透明の单斜晶系結晶。
結晶底面(B,C面)は単位格子面。結晶側面(A面)はそれらと垂直になるようカットしてある、 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ の結晶を使用した。

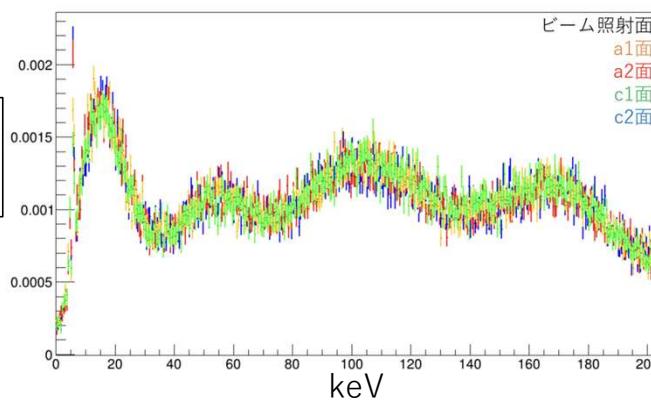


○発光特性

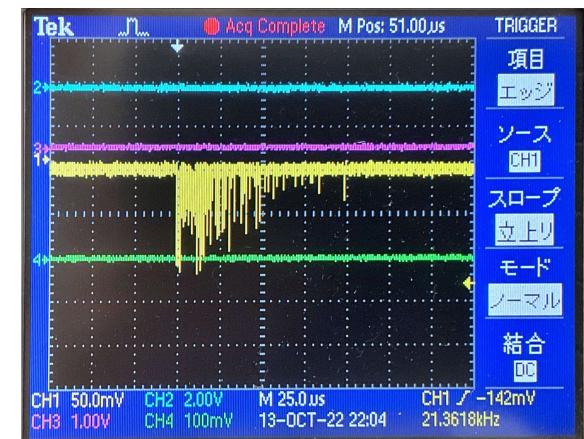
- 発光量はNaIの23%程度。
- 発光時定数が長い(約 $20\mu\text{s}$)ためPMTからの信号が離散的になる。
→電荷積分回路が必要。
- 先行研究では中性子ビームによる酸素原子核反跳の測定が2回行われ、発光の異方性が確認された。



885keVの準単色中性子ビーム照射時



565keVの単色中性子ビーム照射時



A面 VS C面
<5%の光量差

研究目的：これまでの結果と課題

○565keVの中性子ビームテスト

- 885keVの中性子ビームでは酸素原子核反跳エネルギー約200keV。
- WIMPsの質量0.1-1TeVの反跳エネルギーは100keV以下。
→まずは酸素原子核反跳エネルギー約100keVとなる、565keVの中性子ビームテストが行われた。

○実験結果

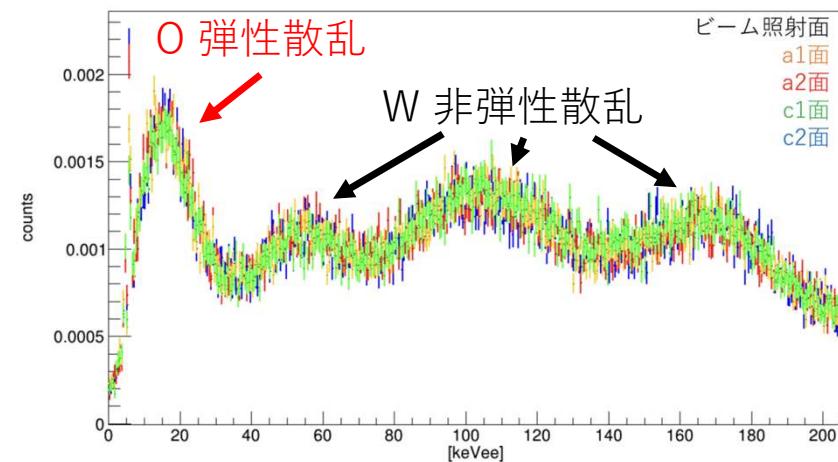
- OによるA面とC面の異方性が5%以下であることまでわかった。
→A面とB面の異方性15%に比べて小さいことはわかる。
- Wの弾性散乱ピークとOの弾性散乱ピークが重なり異方性が確認しづらい。
- プリアンプの時定数が短く積分しきれず、系統誤差が大きい。

○課題

- 100keV以下の測定のため集光量の向上。
- より低バックグラウンドの検出器の作成。

→課題解決に向けて行った研究を発表する。

中性子ビームの照射面	Oによる弾性散乱によるedge[keVee]	^{183}W の非弾性散乱によるpeak[keVee]
A1	23.7 ± 0.3	54.5 ± 0.7
A2	23.8 ± 0.4	55.5 ± 0.9
C1	23.7 ± 0.4	53.0 ± 1.3
C2	23.7 ± 0.4	54.6 ± 1.0
最大の差	$1.7 \pm 3.3\%$	$4.5 \pm 3.9\%$



本発表の内容

○低エネルギーでの測定に向けた測定装置の改良。

- ・ 集光量を向上させる。
→ウルトラバイアルカリ光電面の高量子効率PMTを使用した。
- プリアンプの時定数を $33\mu\text{s}$ から $68\mu\text{s}$ にした。
- ・ 結晶の付け外しと時間変化による光量測定における系統誤差を抑制させる。
→反射材の最適化を行った。

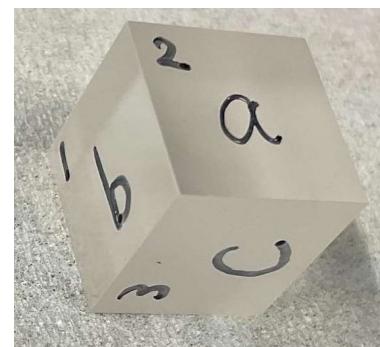


ウルトラバイアルカリ光電面
H11934-200-010

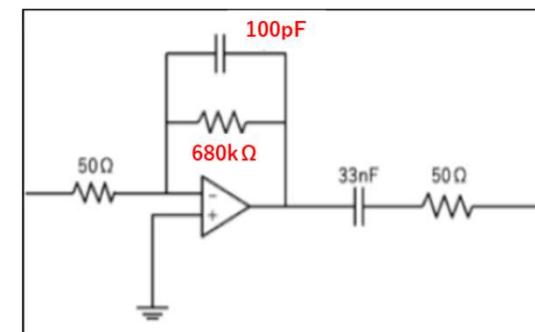
○低バックグラウンド研磨(高純度SiO₂研磨)での集光量の評価。
→従来の研磨(Diamond研磨)による結晶との光量差を比較した。



Diamond研磨

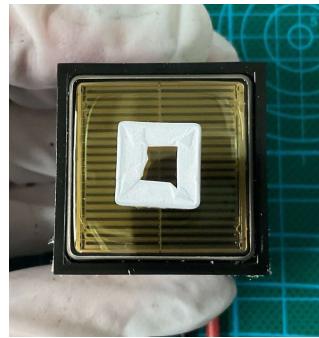


SiO₂研磨



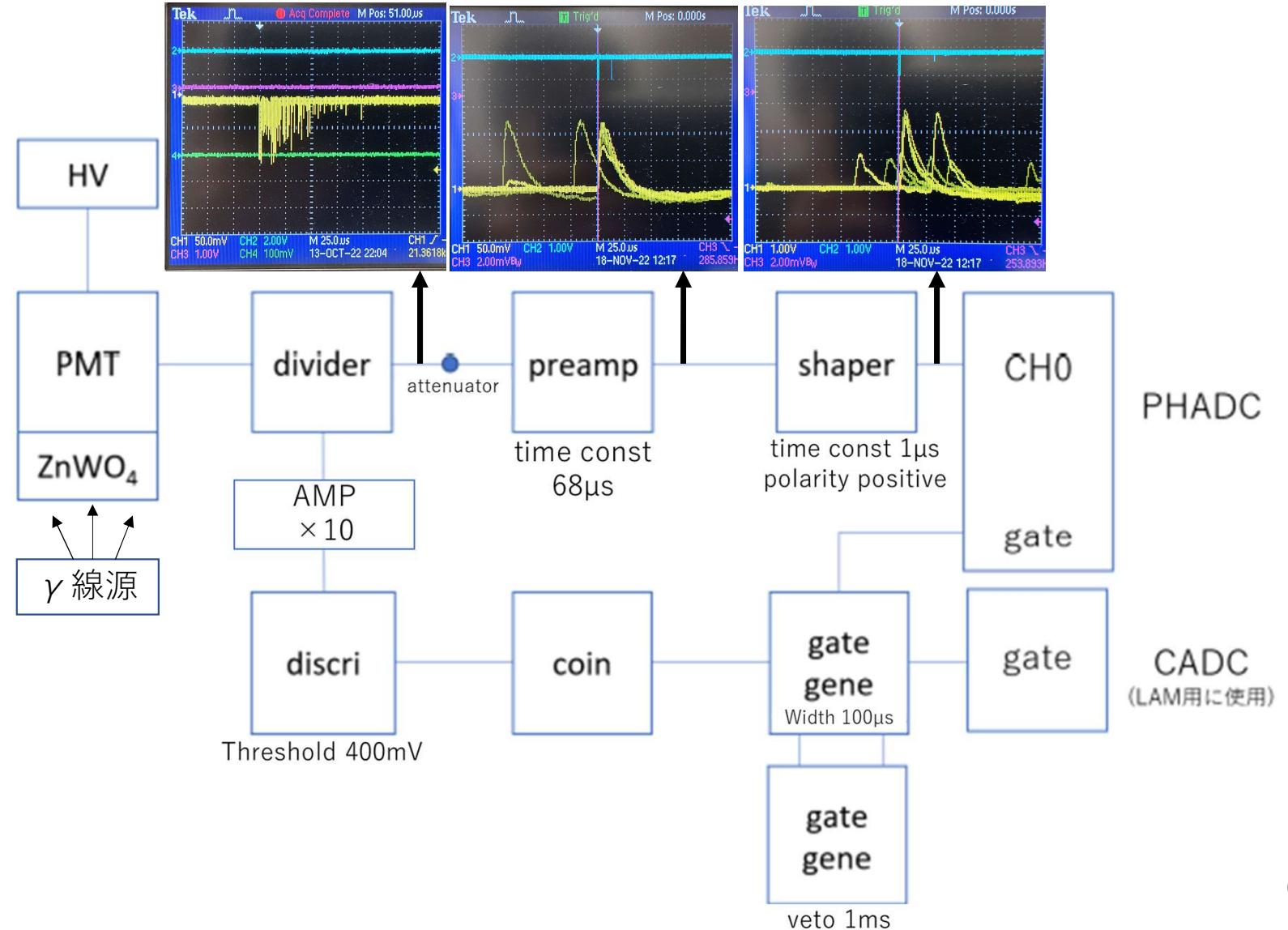
プリアンプの回路図

測定のセットアップ



PMTとZnWO₄

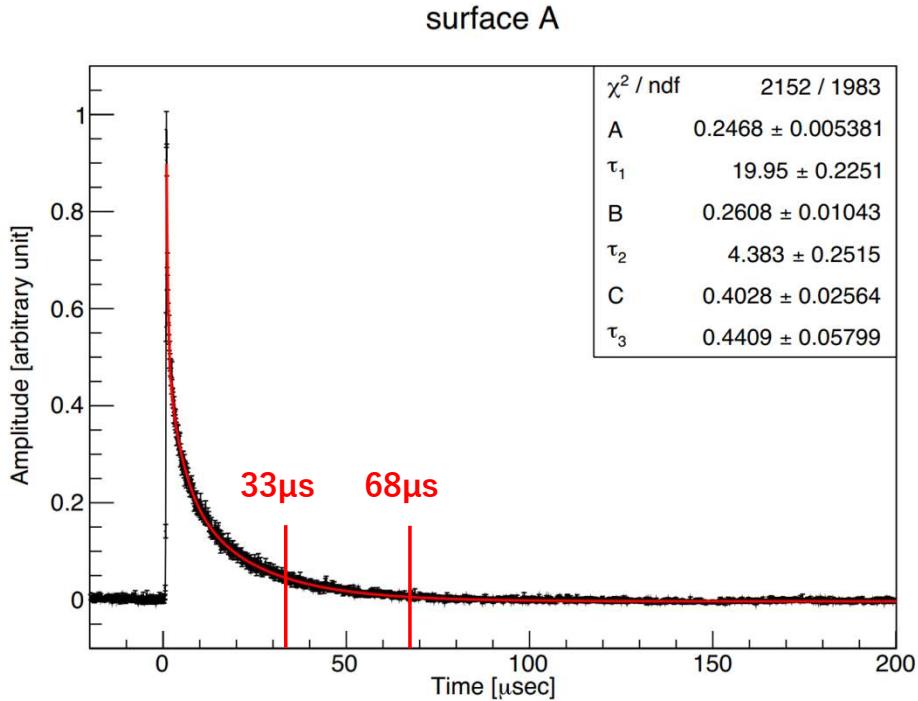
結晶の向きを変えて
それぞれで光量を測定



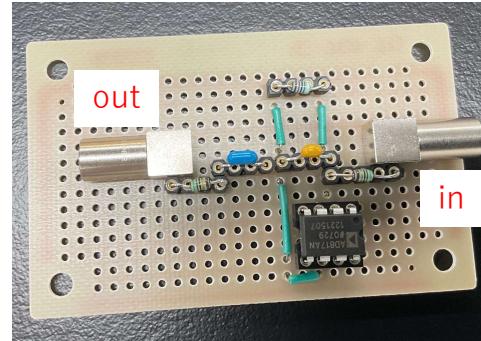
プリアンプ時定数の最適化

○プリアンプとフィルターの作成

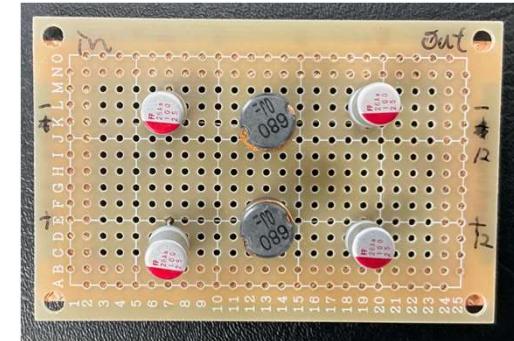
- 離散的な信号を積分する。
- 積分時定数を $33\mu\text{s}$ から $68\mu\text{s}$ にする。
- 同時にノイズを低減する。
→プリアンプとフィルターを自作した。



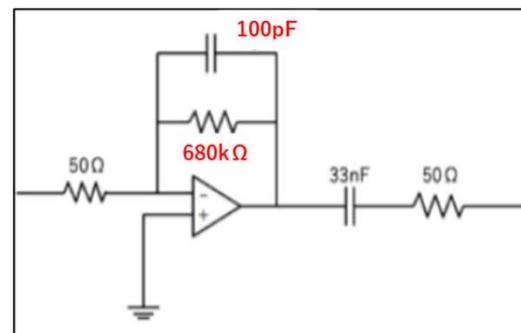
$^{137}\text{Cs}(662\text{keV} : \gamma\text{線})$ に対する発光減衰曲線(平均化)



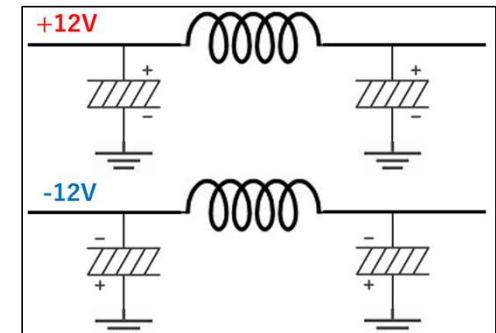
自作したプリアンプ[†]



自作したフィルター[†]



プリアンプの回路図

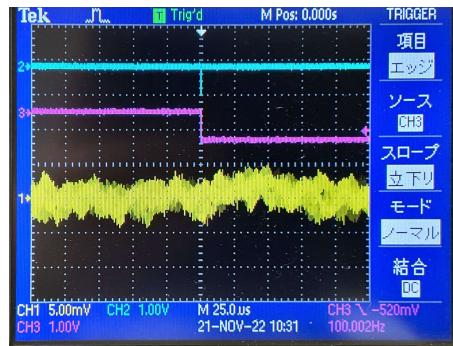


フィルターの回路図

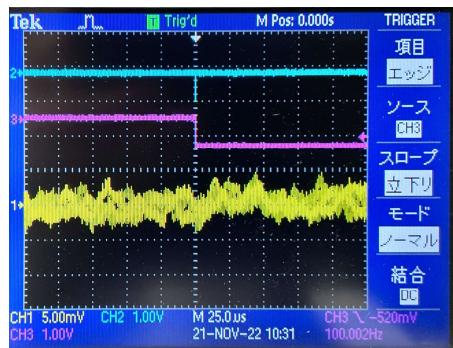
プリアンプ時定数の最適化

○ノイズが低減

- ・ フィルターにより先行研究のプリアンプよりもノイズが低減し1p.e.が測定できた。
- ・ PMTはH11934-200-010を使用。
- ・ LEDの光量を調整して測定した。

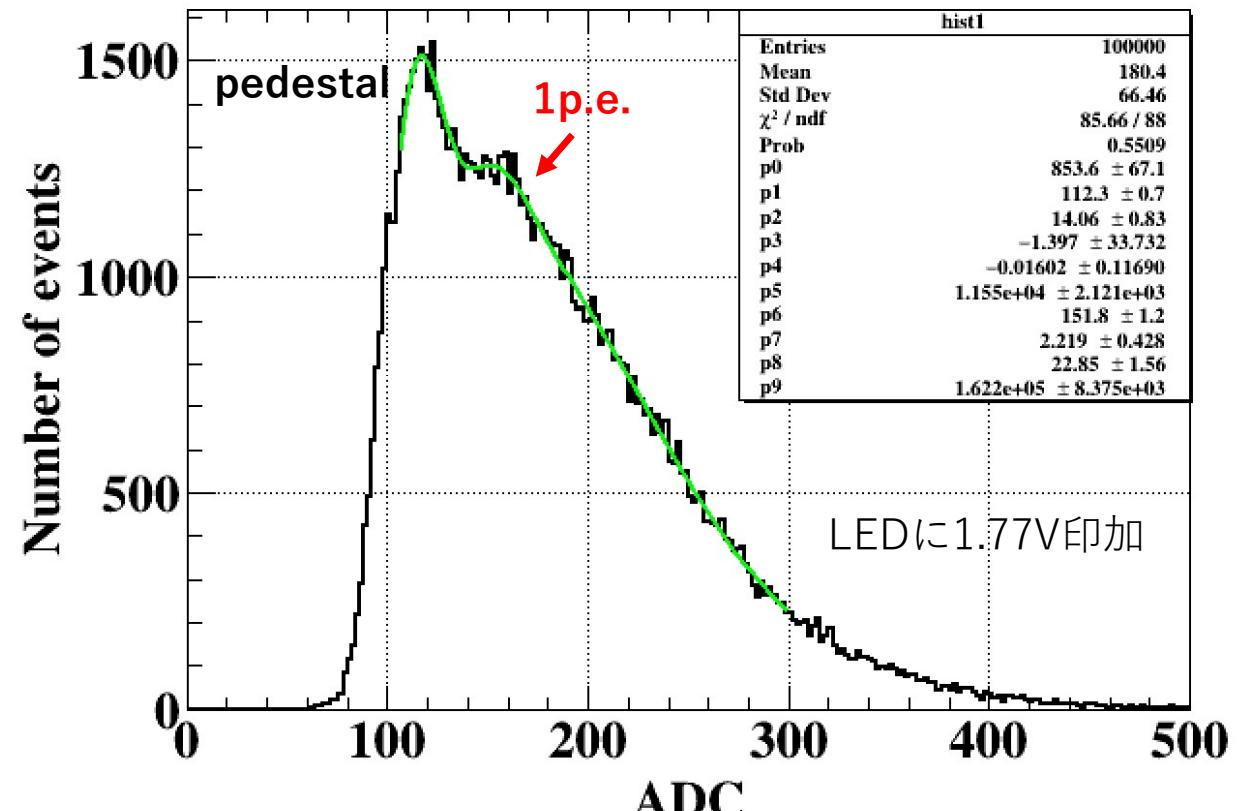


旧プリアンプのベースライン



新プリアンプのベースライン

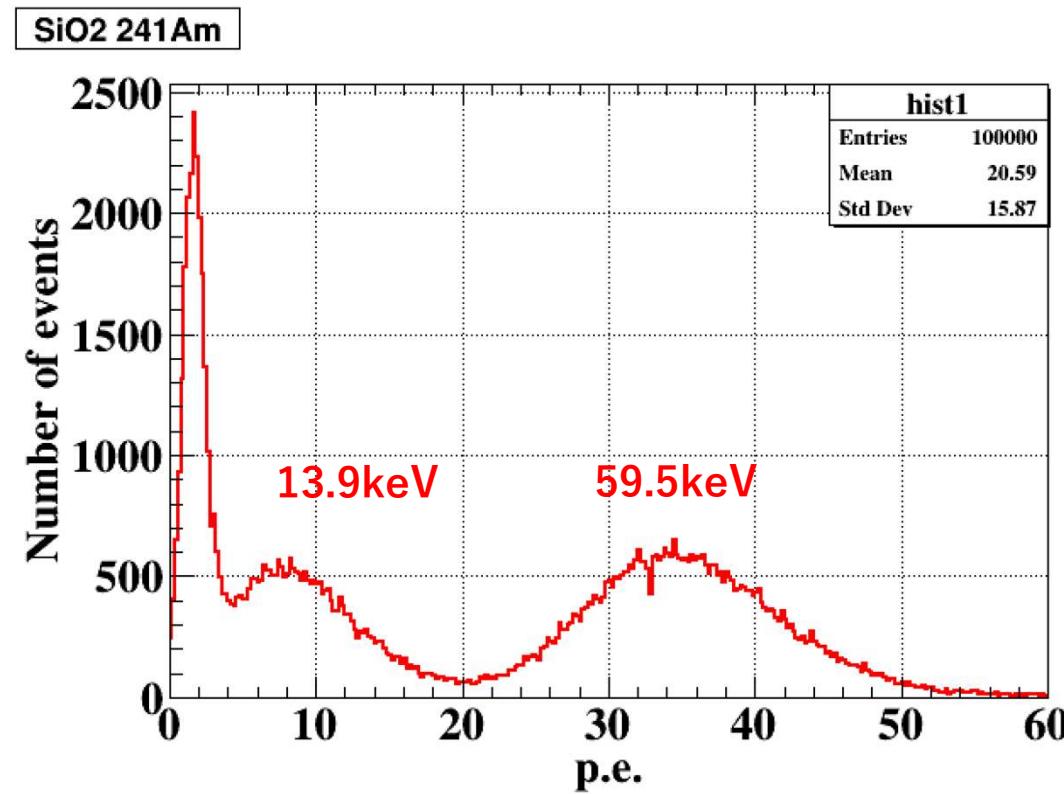
1 p.e.



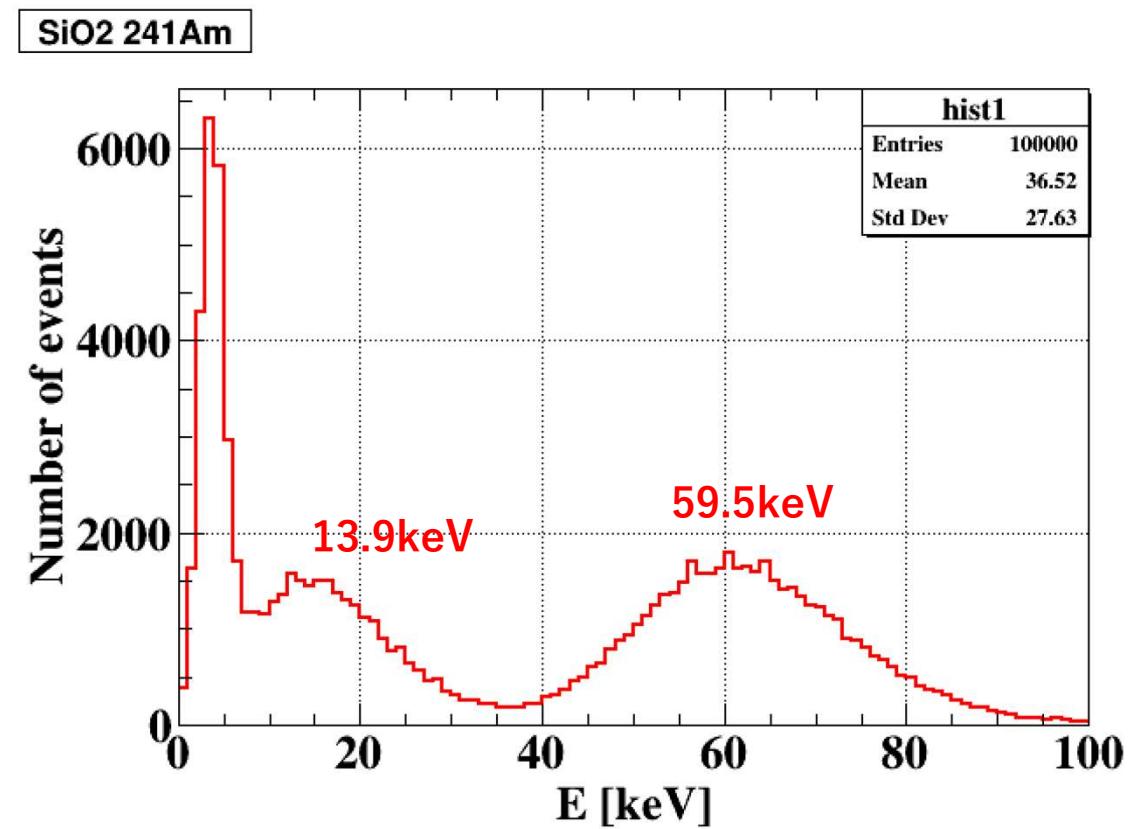
新プリアンプでの結果

○低エネルギーでの光量と閾値

光量 0.6 p.e./keV

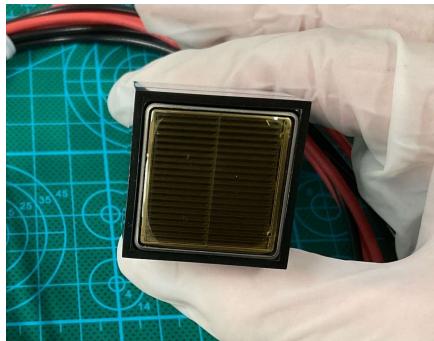


閾値は9keVほどになった。

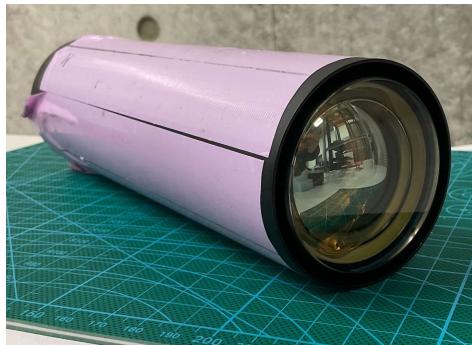


高量子効率のPMT (R11934-200-010)

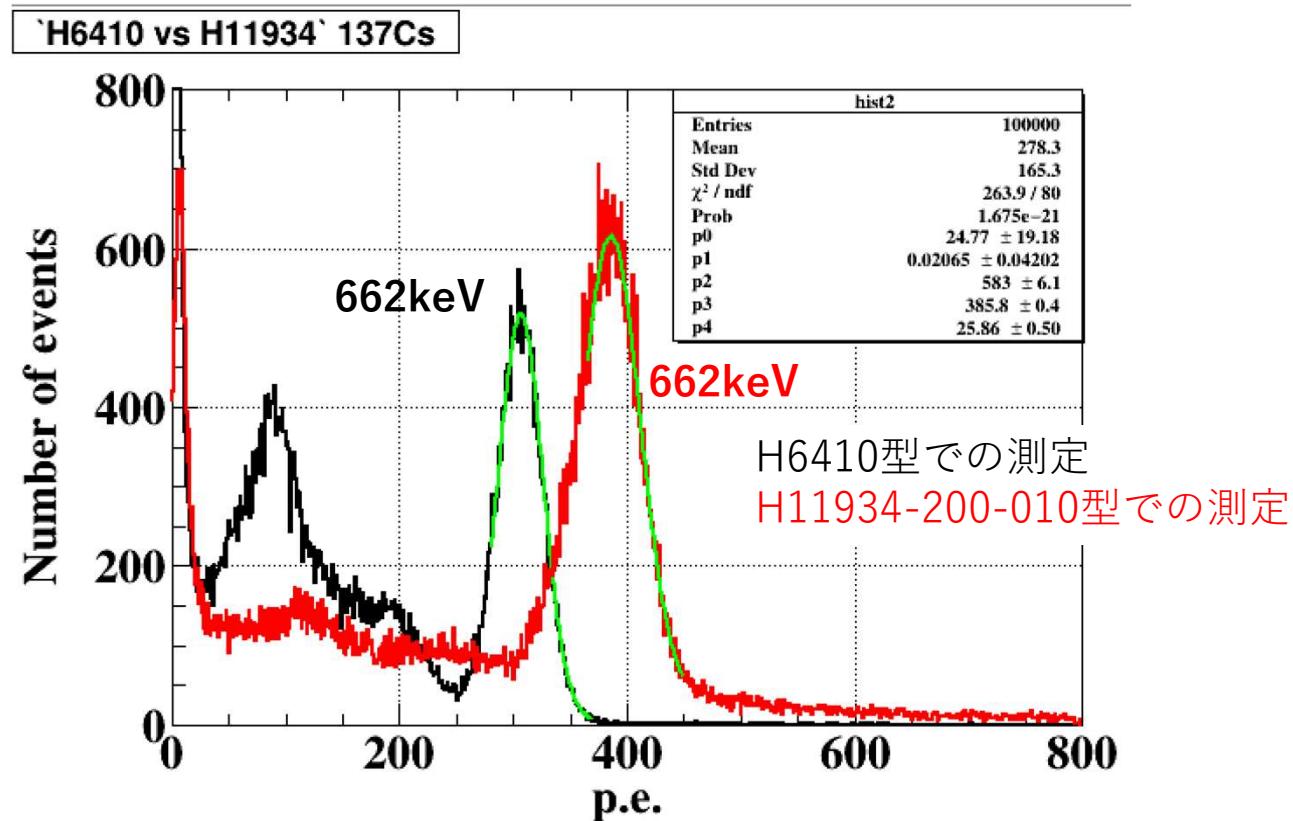
○ウルトラバイアルカリ光電面のPMTを使用



H11934-200-010型
量子効率40% @400nm



H6410型
量子効率27% @400nm



^{137}Cs (662keV) $0.46 \pm 0.01 \text{ p.e./keV} \rightarrow 0.58 \pm 0.01 \text{ p.e./keV}$
光量が約1.26倍になっていることを確認した。

反射材の最適化

○反射材の最適化

アルミ蒸着シートを2周 + テフロンテープを2周 vs テフロンテープ7周



アルミ蒸着シート

- 厚さ50μmでPETのフィルムに0.04~0.06μmのアルミが蒸着してある。
- 2枚重ねにし外側をテフロンテープで2周巻き固定することで隙間をなくす。
- 先行研究では集光率が最も高い。
- 隙間ができると付け外し毎の光量差が生じる。
- グリースが染みないので時間経過で光量が安定する。

テフロンテープ[®]

- 厚さは100μm。
- 1枚では簡単に透過するので7周巻いて透過を抑えた。
- 集光率がアルミ蒸着シートよりも高い。
- 隙間ができるにくく取り付け毎の光量差が生じにくい。
- グリースが染みるので時間経過で光量が不安定のまま。



→光量の時間変化が少ないアルミ蒸着シートを反射材に選んだ。

他にも様々な条件で系統誤差の原因を検証した。

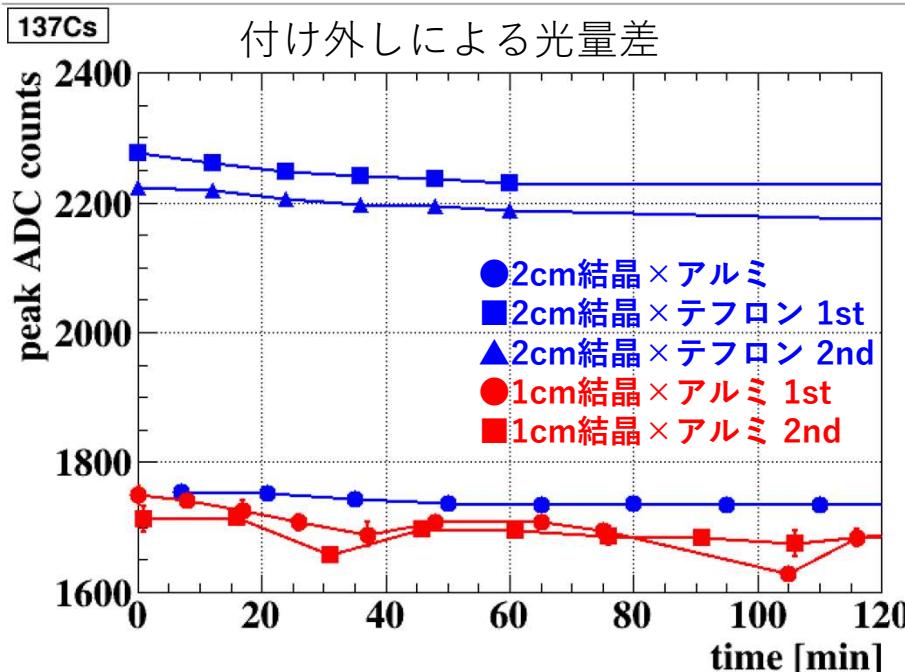
→結晶の表面状態(反射材+グリース)の変化が主な要因。

NaIシンチレータ
シリアル番号 900309-2
確立している反射材パッケージ
の参照として測定した。

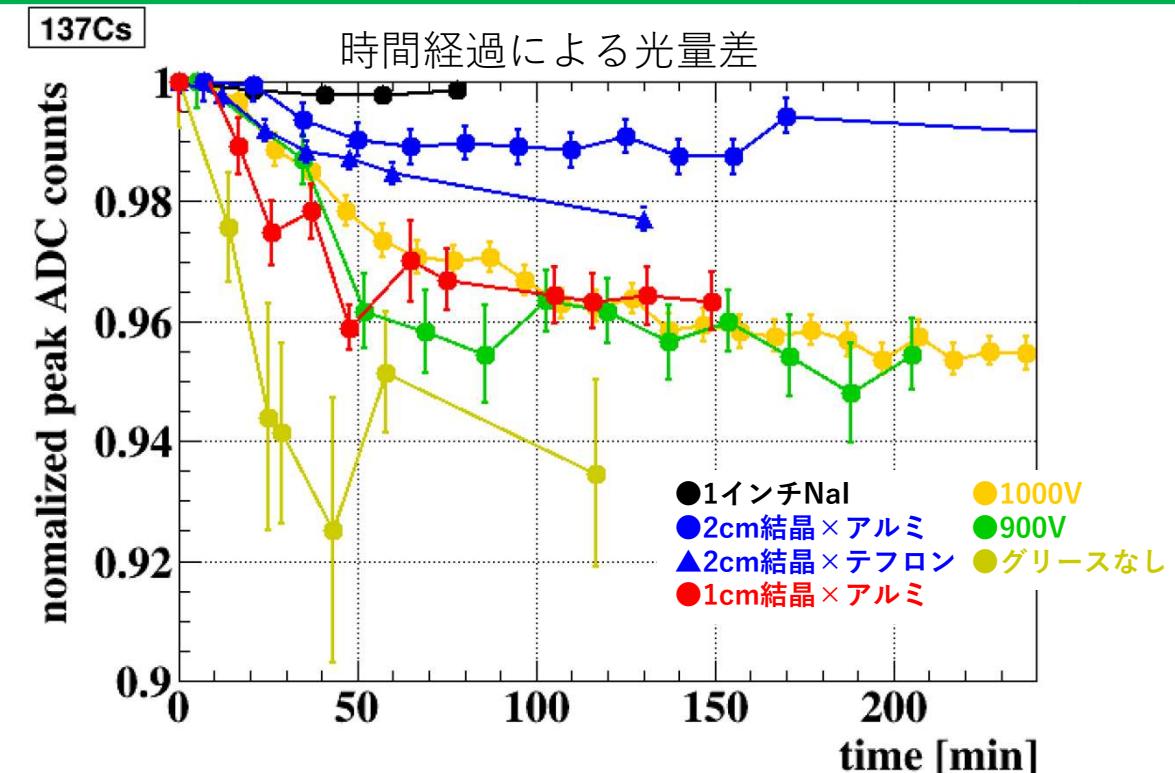
反射材の最適化 時間経過による光量の変化

○系統誤差の要因の検証

- 1cm立方結晶 vs 2cm立方結晶
- グリースなし vs グリースあり
- HV-1000V vs HV-900V (最大規格-1000V)



→テフロンでしっかりと締め付けることでアルミでも大きな光量差は生じない。

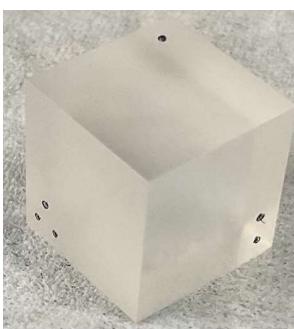
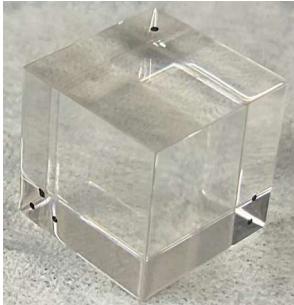
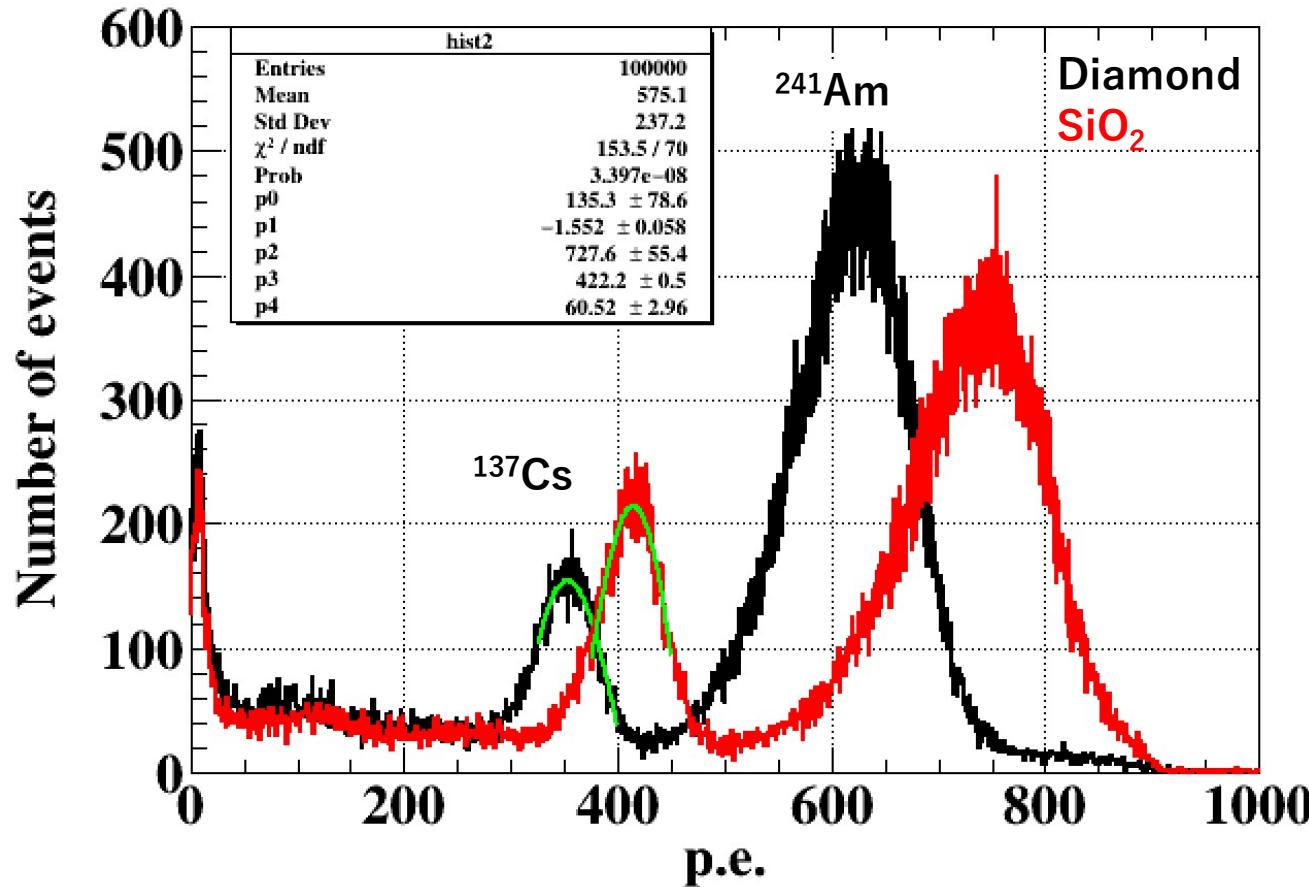


- **アルミ** vs テフロン (グリースが染み込まないため。)
 - 1cm立方結晶 vs **2cm立方結晶** ([体積/面積]が2倍で表面の影響が少ない。)
 - グリースなし vs **グリースあり** (空気層による散乱がない。)
 - HV-1000V vs HV-900V (変化なし。)
 - NaIではほとんど光量に時間変化なし。
- 結晶の表面状態(反射材+グリース)の変化が主な要因。

結晶表面研磨方法の変更と異方性の測定結果

○Diamond研磨による結晶とSiO₂研磨による結晶の光量と異方性の評価

Diamond vs SiO₂ '137Cs+241Am'



Diamond
0.53 ± 0.01 p. e./keV

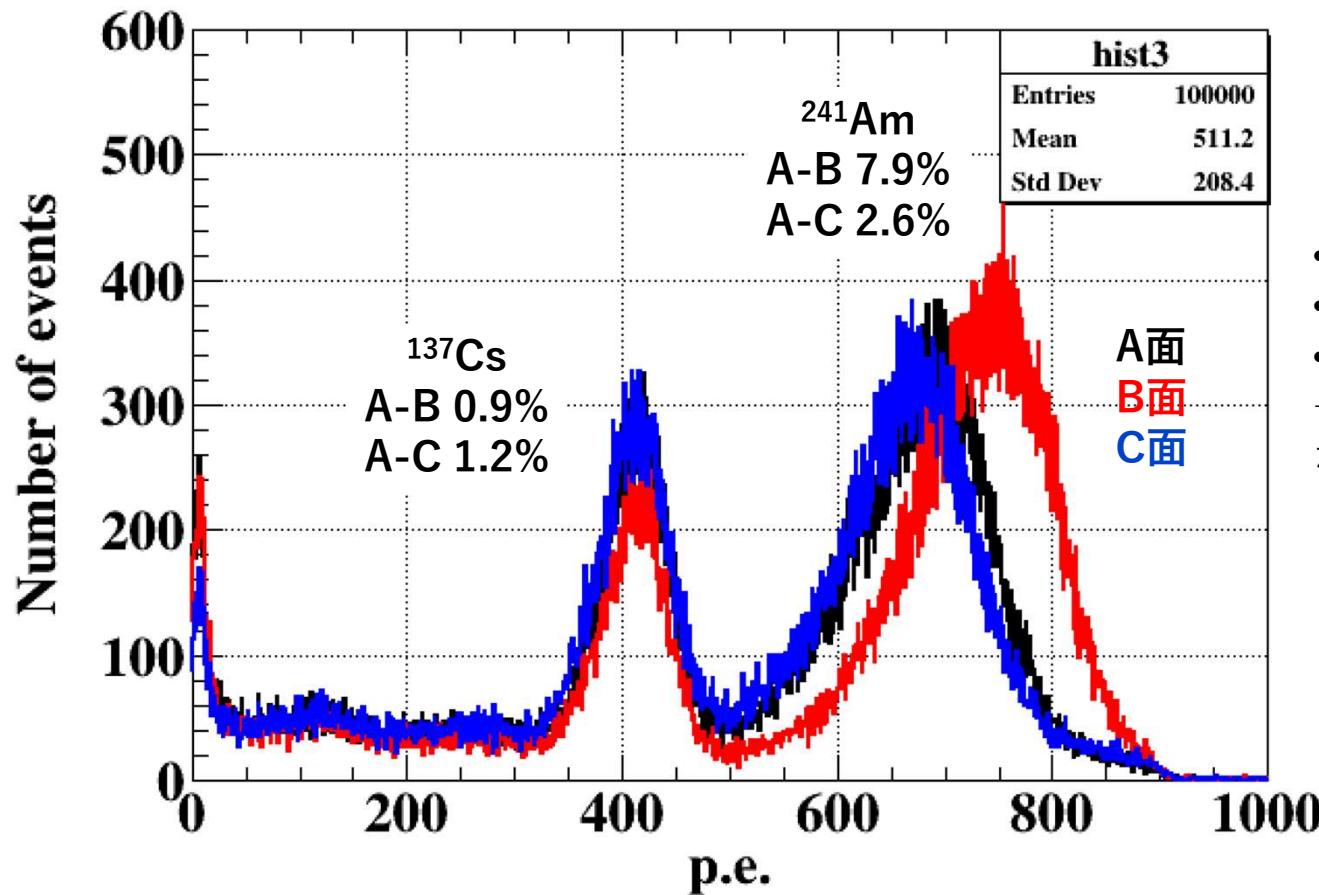
SiO₂
0.64 ± 0.01 p. e./keV

- SiO₂の方が光量が1.2倍大きい。
→RIの観点だけでなく、光量の面でもSiO₂研磨の結晶の方が適している。

結晶表面研磨方法の変更と異方性の測定結果

○ SiO_2 研磨による結晶の異方性の評価

SiO_2 137Cs+241Am



- γ 線に対する3面の光量差は1%程度。
- α 線に対するA-C面の光量差は2.6%。
- α 線に対するA-B面の光量差は7.9%。
→ザラザラな表面による系統誤差よりも有意な α 線に対する異方性が確認できた。

まとめ

- 結晶の付け外しや時間経過による光量の変化は、結晶の表面状態(反射材+グリース)による影響が大きいことがわかった。
 - 光量の時間変化が少ないアルミ蒸着シートを反射材に採用した。
- プリアンプとフィルターを作成し1p.e.が測定できるようになった。
- 時定数を33μsから68μsにすることで集光率が向上した。
- ウルトラバイアルカリ光電面のPMTを用いることで光量が1.26倍となり、先行研究よりも低エネルギーまで観測可能になった。
- SiO₂研磨の結晶にするとさらに光量が1.2倍になることを確認した。

今後の展望

- SiO₂研磨の結晶を用いて中性子に対する低エネルギー応答を調べる。
- SiO₂研磨の結晶に含まれる放射性不純物の評価を行う。