

暗黒物質方向感度検出器の開発 に向けたZnWO₄シンチレータの評価

2023年2月21日(火)

東京大学宇宙線研究所

修士1年 河内弘輝



新しい研究棟

山の中に近代的な建物があるよ



神岡施設長 塩澤さん



前髪重めの車たち

いっぱい雪降るよ



数時間でこのくらい



○研究目的

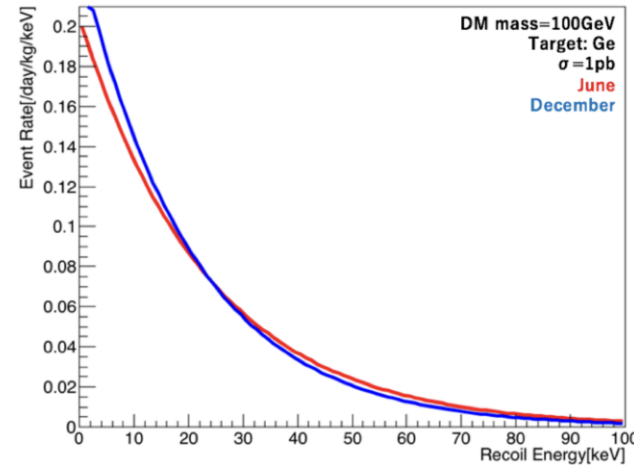
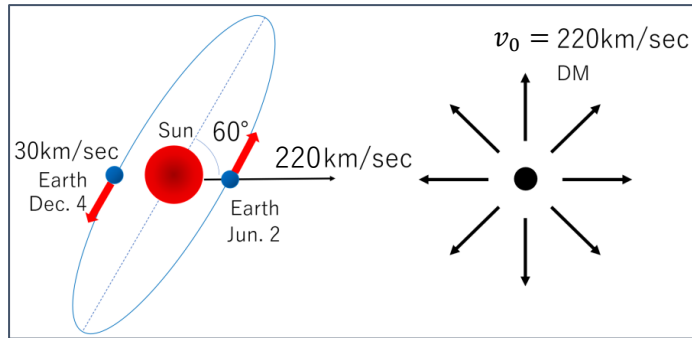
- 方向感度を持ったWIMPの探索
- 発光異方性のあるシンチレータ (ZnWO_4)
- これまでの結果と課題

○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
- Geant4による中性子ビーム試験シミュレーション
- まとめ

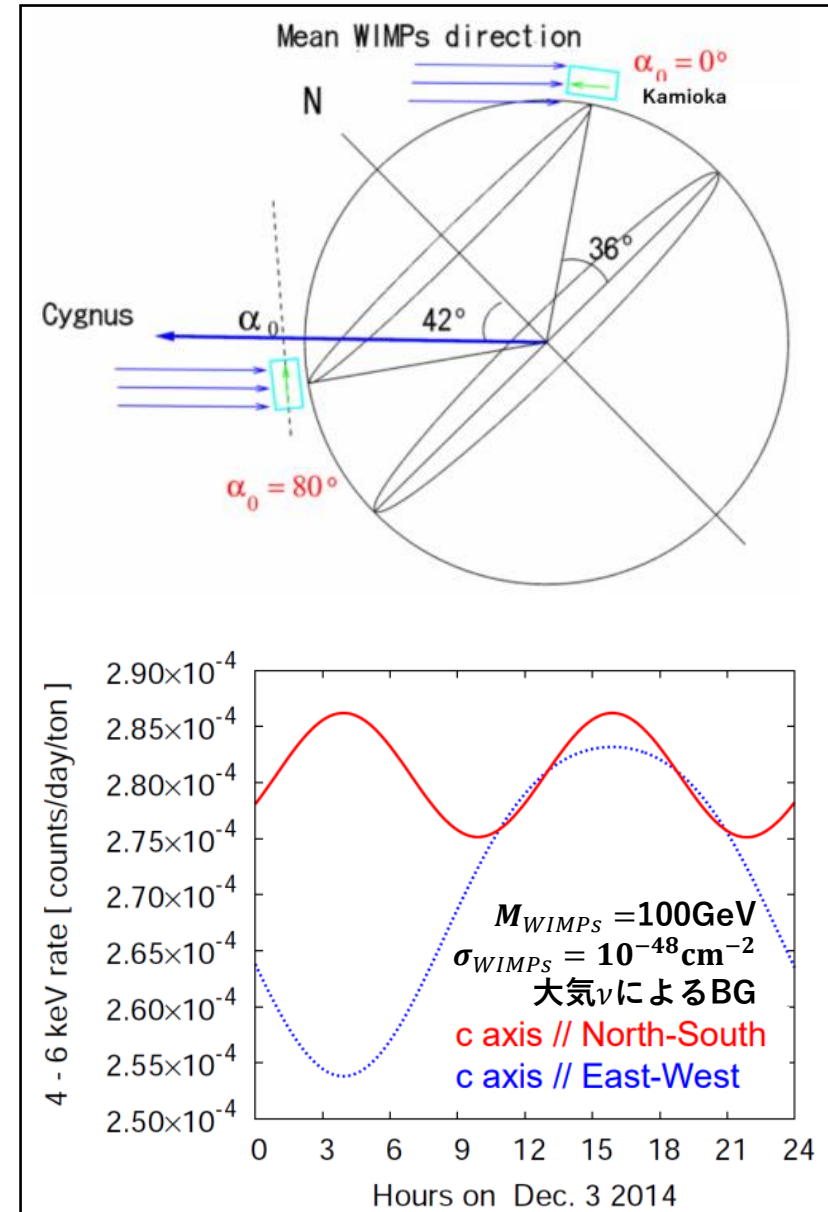
○WIMPsが飛来する方向

- 暗黒物質候補の1つがWeakly Interacting Massive Particles.
- 銀河内を $v_0 = 220 \text{ km/s}$ のマクスウェル分布に従い飛び交う。
- 太陽系は銀河系を秒速220kmではくちょう座の方向に進む。
→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。



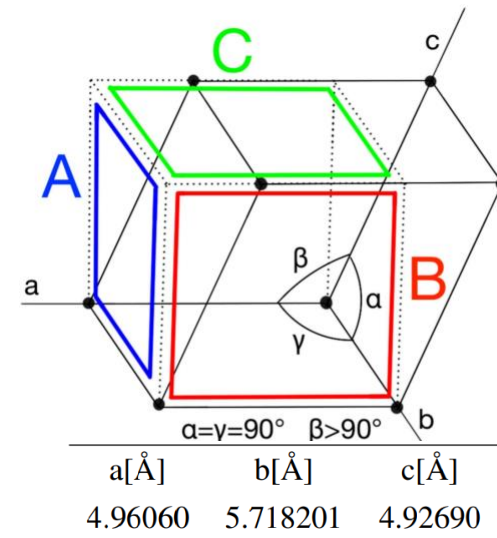
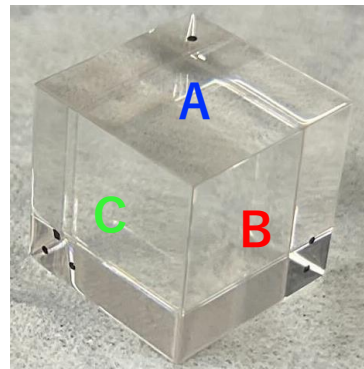
○光量の日周差

- 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。



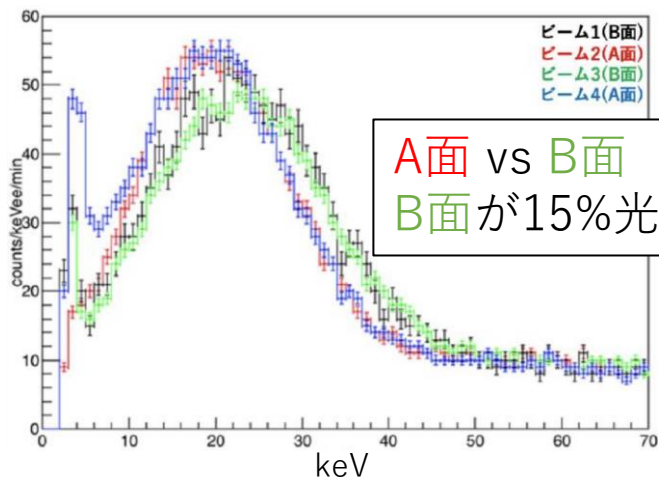
○ZnWO₄結晶

- 無色透明の単斜晶系結晶。
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、1cm×1cm×1cmの結晶を使用した。

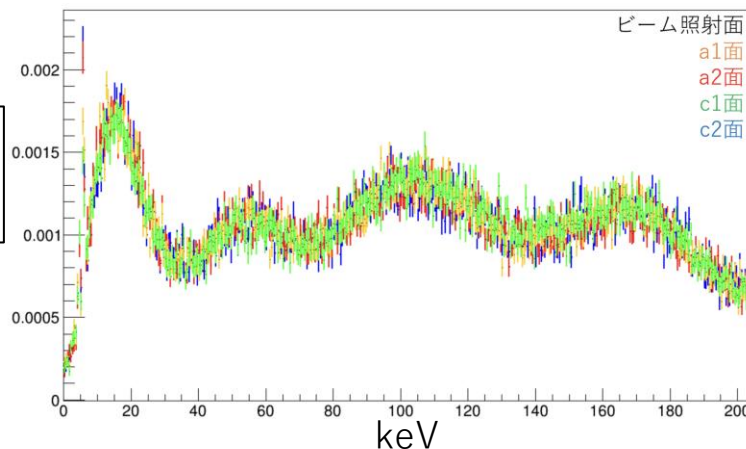


○発光特性

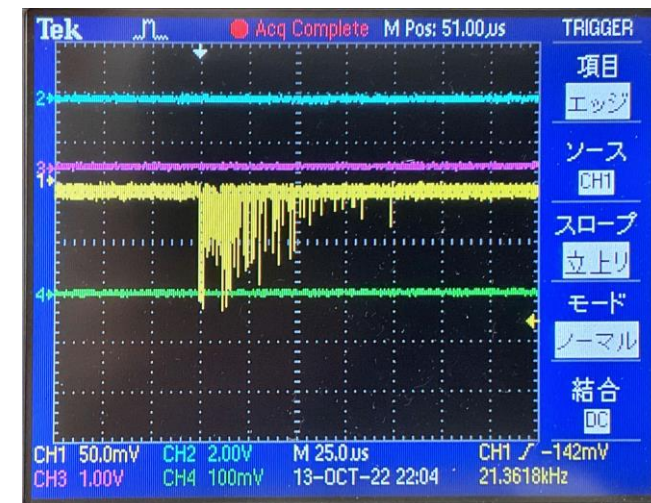
- 発光量はNaIの23%程度。
- 発光時定数が長い(約20μs)ためPMTからの信号が離散的になる。
→電荷積分回路が必要。
- 先行研究では中性子ビームによる酸素原子核反跳の測定が2度(ビームエネルギーは885keVと565keV)行われ、発光の異方性が確認された。



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

○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

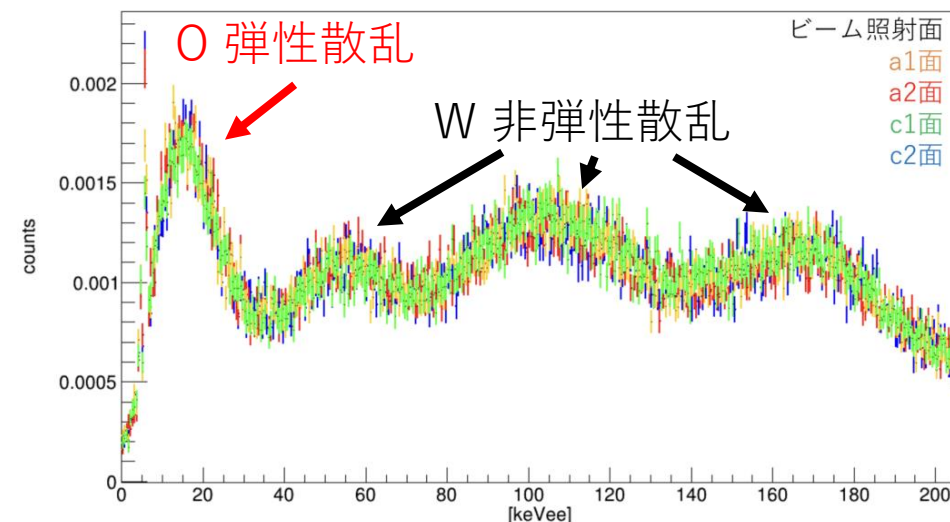
- OによるA面とC面の異方性が5%以下であることまでわかった。
- A面とB面の異方性15%に比べて小さいことはわかる。
- Wの弾性散乱ピークとOの弾性散乱ピークが重なり異方性が確認しづらい。
 - 中性子ビームが高レートのためプリアンプの時定数を短くした。

○課題

- 100keV以下で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 ± 3.3% | 4.5 ± 3.9% |



○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。
→ **プリアンプの時定数を $33\mu\text{s}$ から $68\mu\text{s}$ にした。**
- **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。**
- 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。**

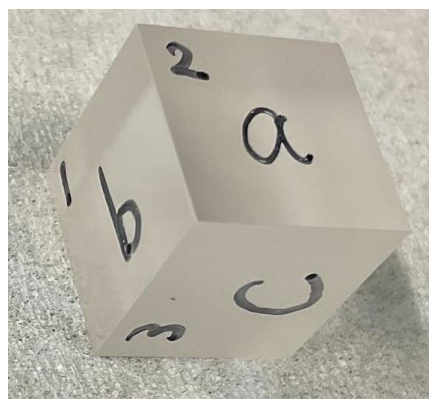


○低バックグラウンド研磨(高純度 SiO_2 研磨)での集光量の評価。
→ **従来の研磨(Diamond研磨)による結晶との光量差を比較した。**

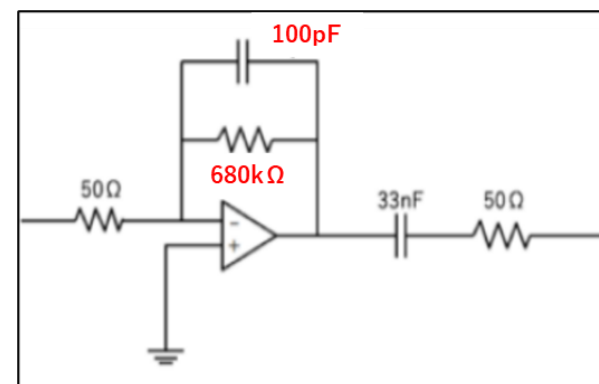
ウルトラバイアルカリ光電面
H11934-200-010



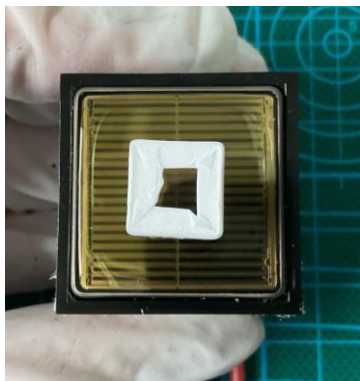
Diamond研磨



SiO_2 研磨

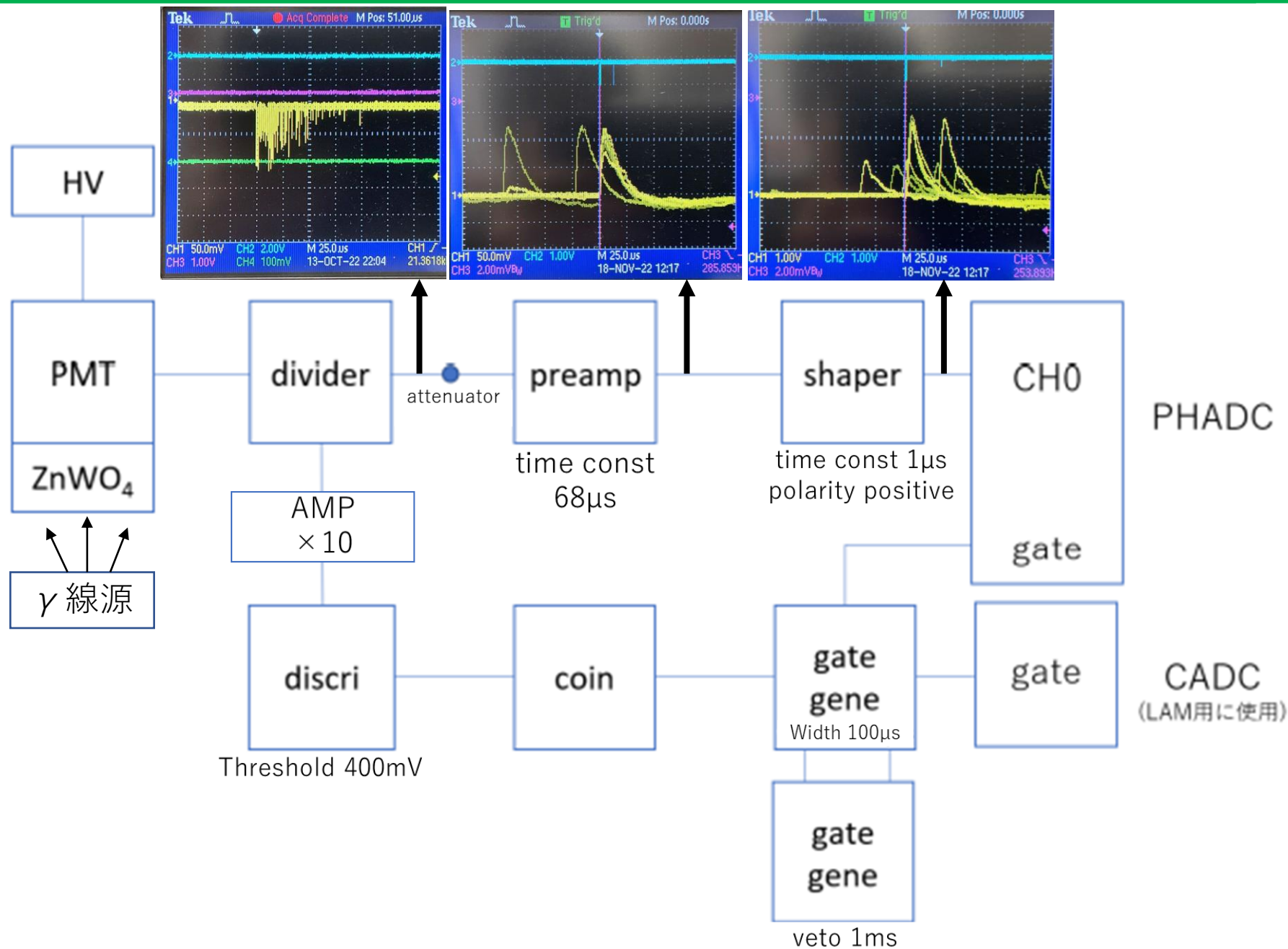


プリアンプの回路図



PMTとZnWO₄

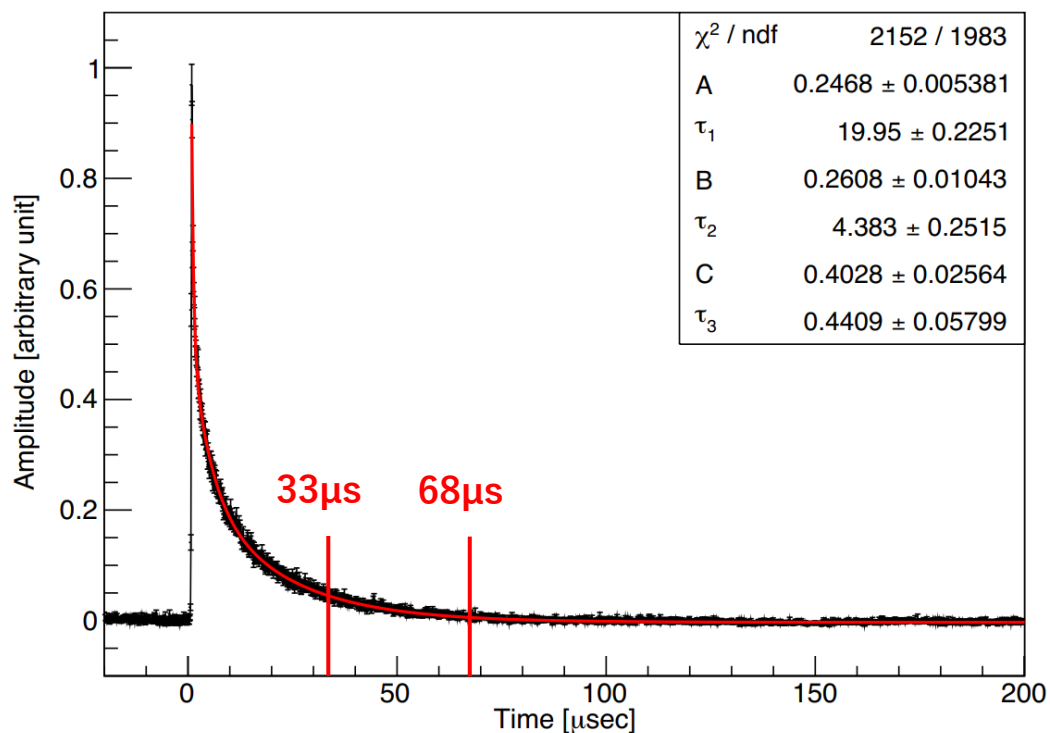
結晶の向きを変えて
それぞれで光量を測定



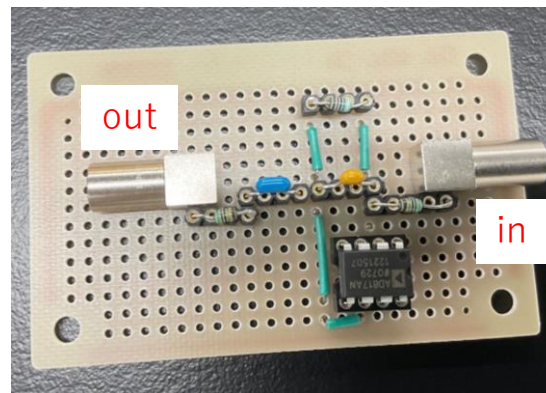
○プリアンプとフィルターの作成

- ・ 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。

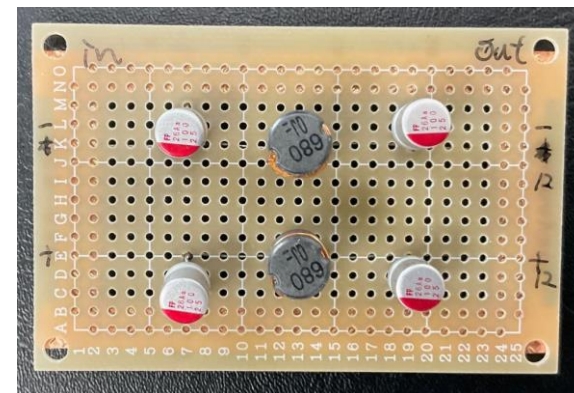
surface A



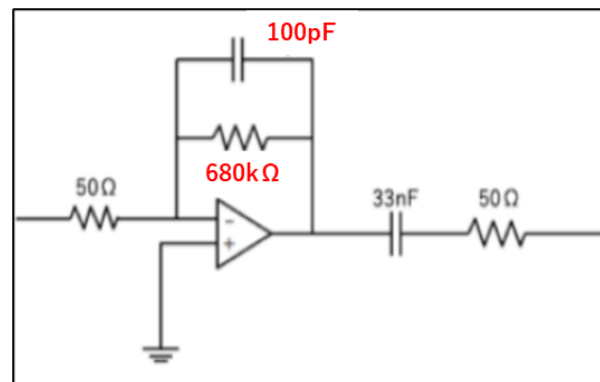
$^{137}\text{Cs}(662\text{keV} : \gamma \text{線})$ に対する発光減衰曲線(平均化)



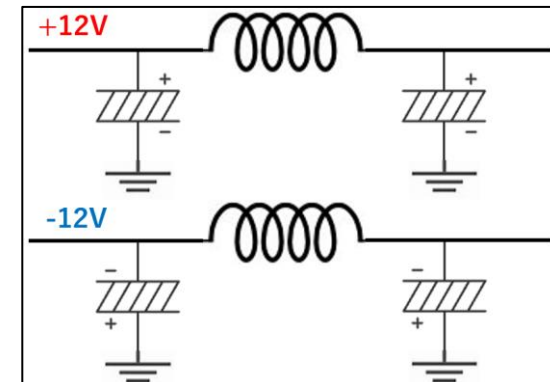
自作したプリアンプ



自作したフィルター



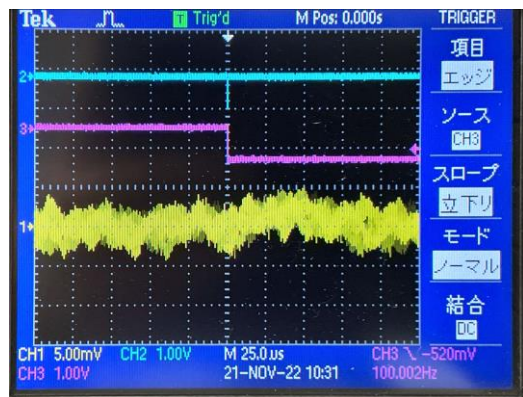
プリアンプの回路図



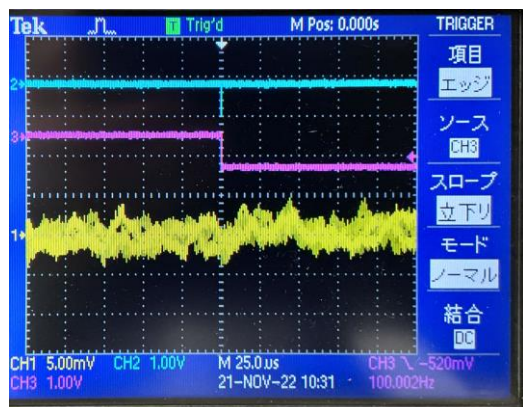
フィルターの回路図

○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。

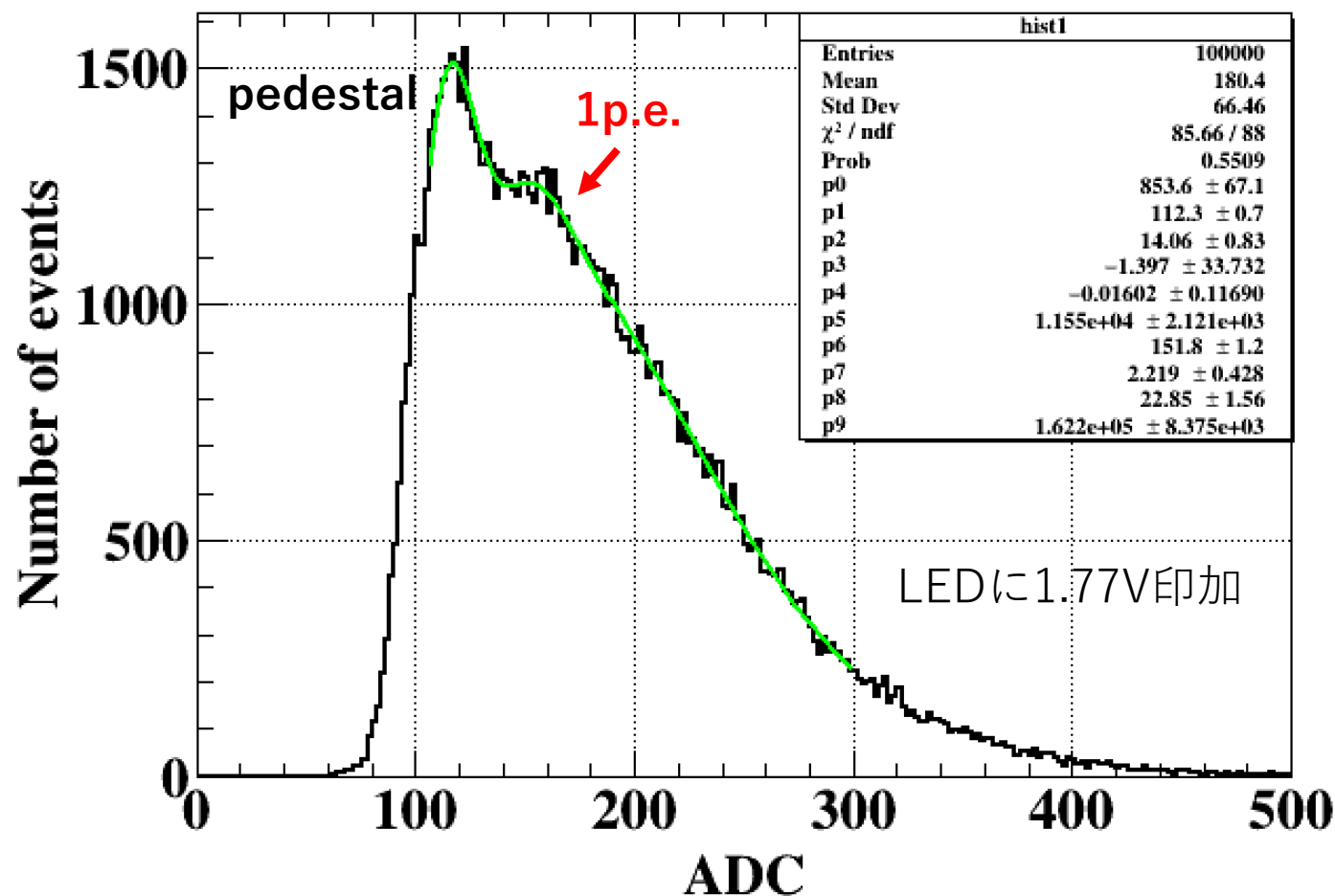


旧プリアンプのベースライン



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

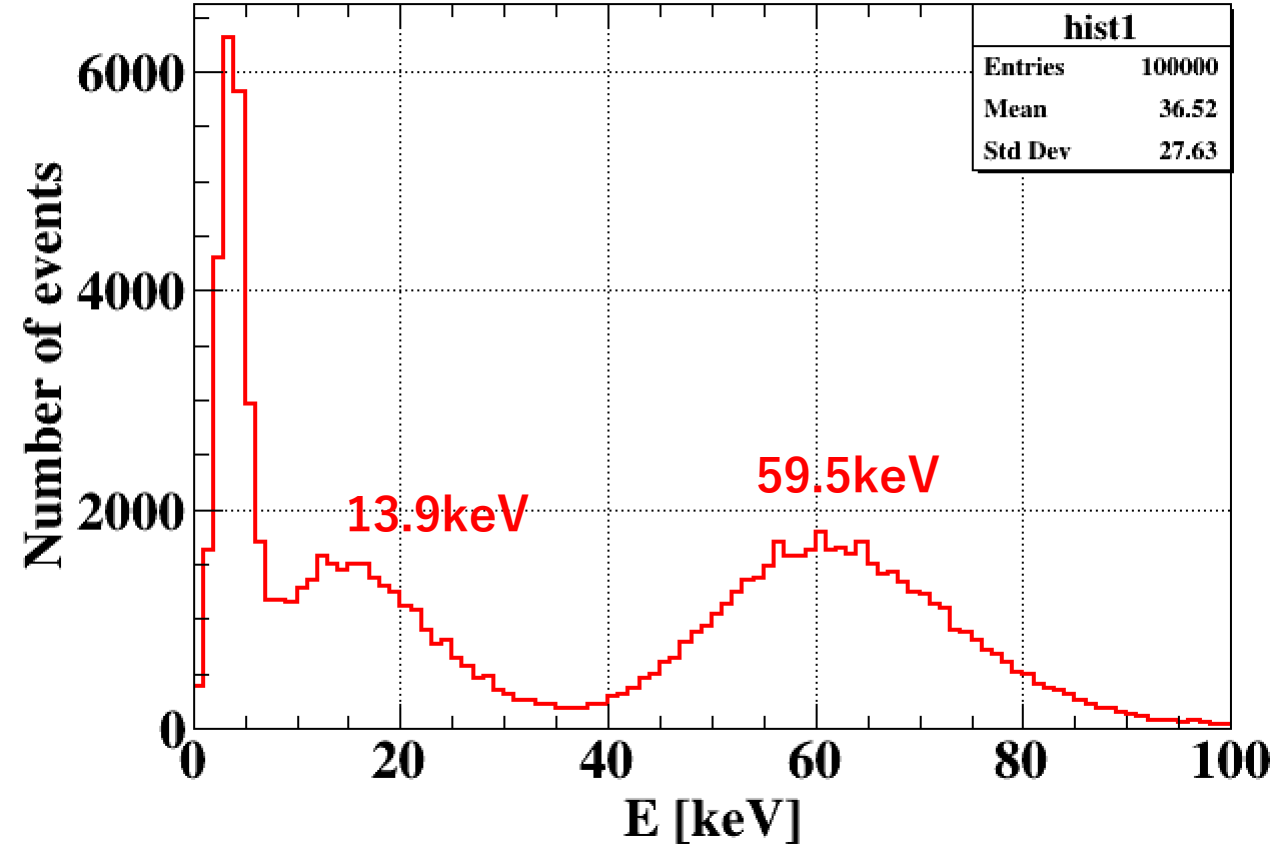
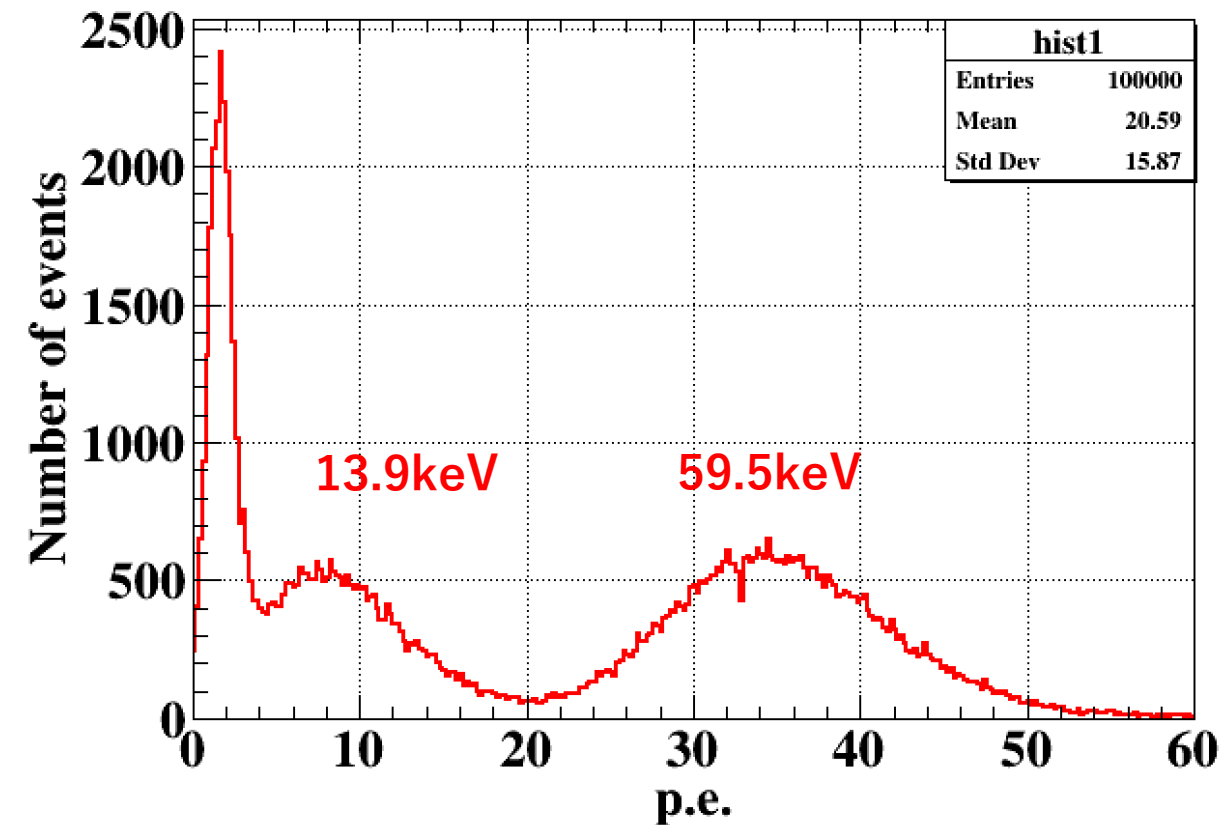
○低エネルギーでの光量と閾値

光量 0.58 ± 0.01 p. e./keV

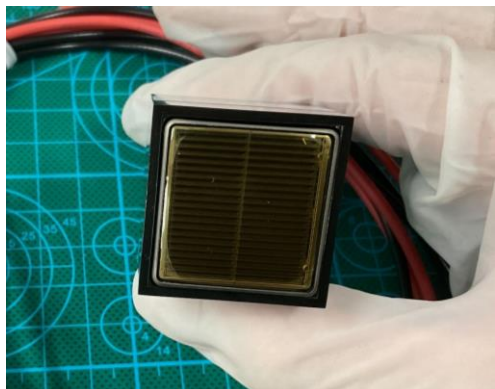
閾値は9keVほどになった。

SiO2 241Am

SiO2 241Am



○ウルトラバイアルカリ光電面のPMTを使用

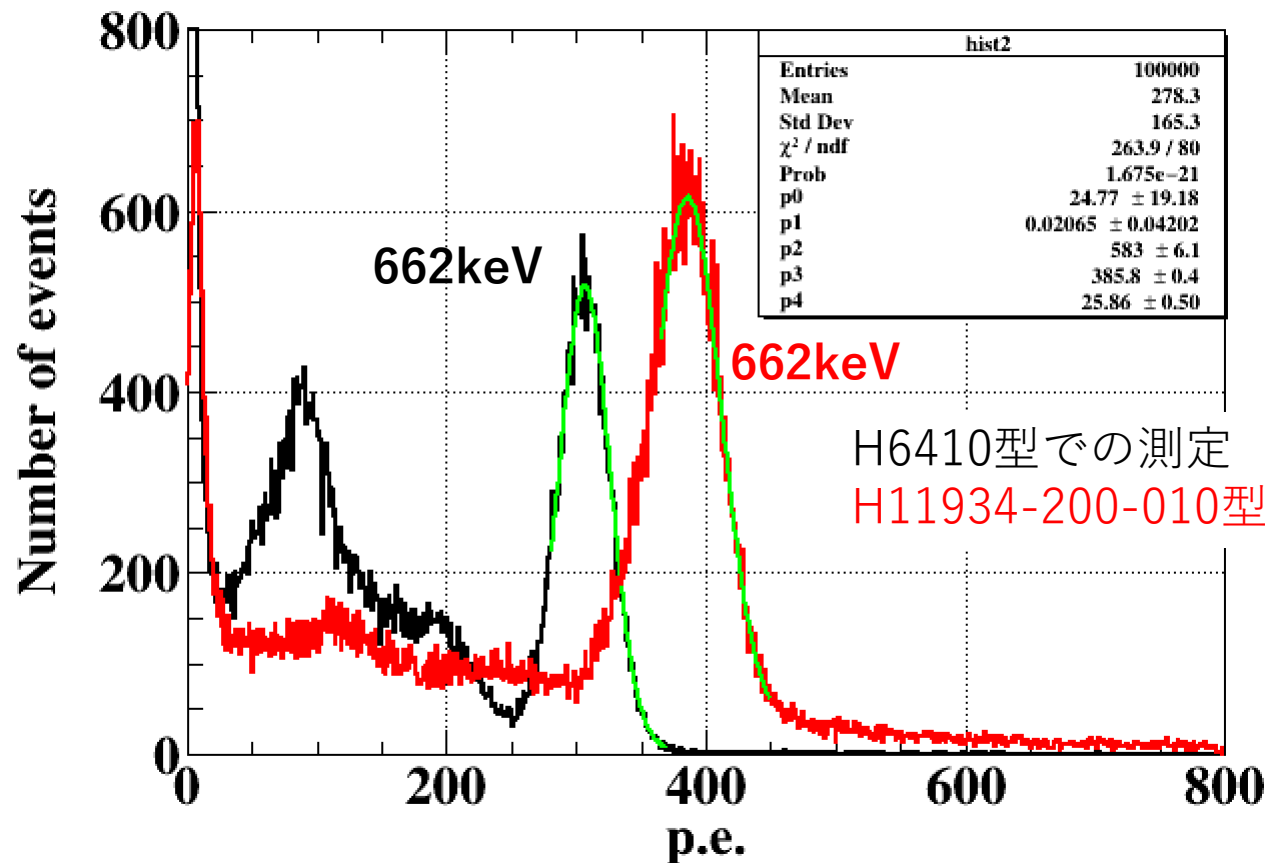


H11934-200-010型
量子効率40% @400nm



H6410型
量子効率27% @400nm

`H6410 vs H11934` 137Cs



H6410型での測定
H11934-200-010型での測定

^{137}Cs (662keV) 0.46 ± 0.01 p.e./keV \rightarrow 0.58 ± 0.01 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

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50 μm でPETのフィルムに0.04~0.06 μm 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100 μm 。
- 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。



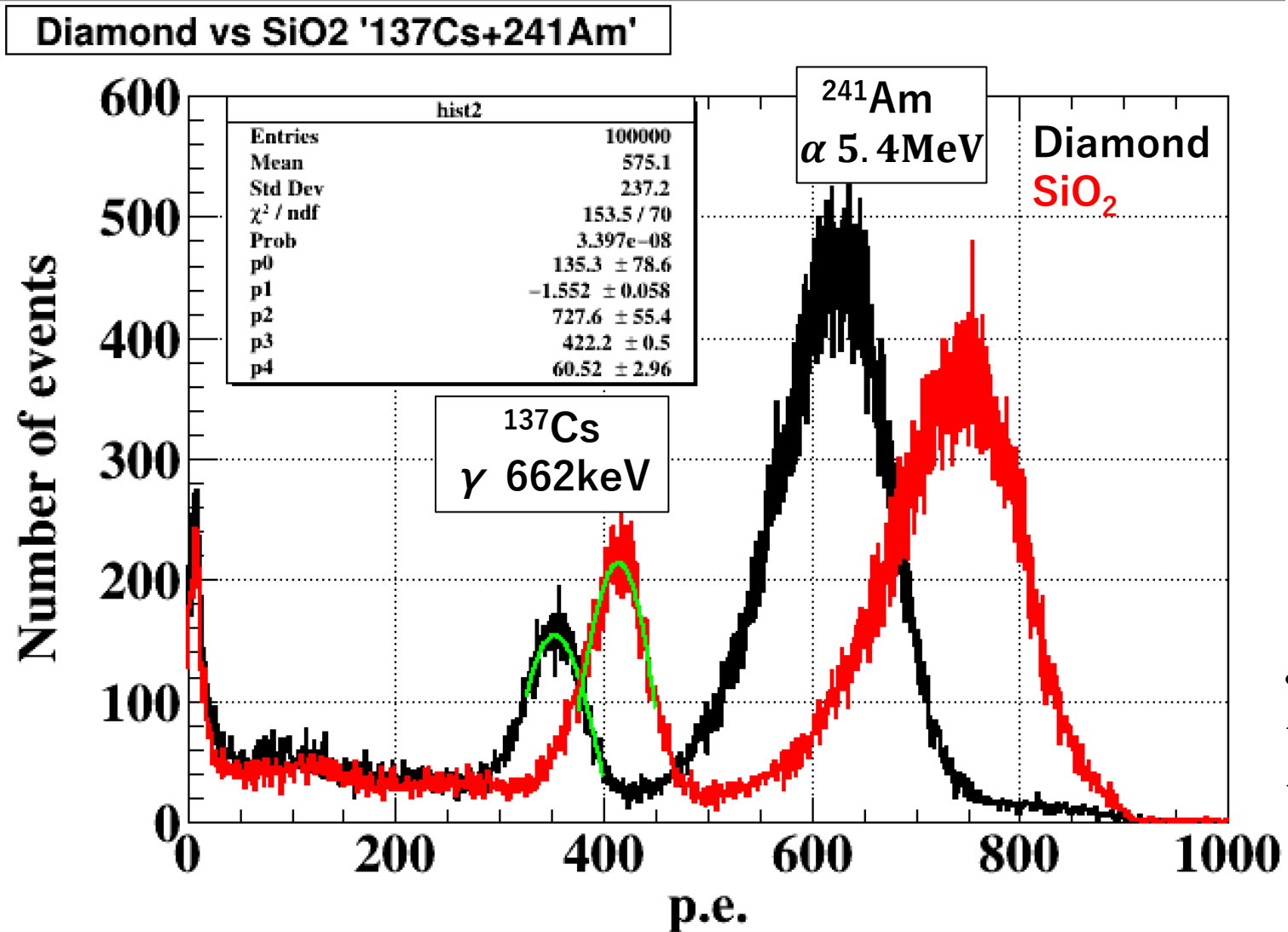
Nalシンチレータ
応用光研工業株式会社製
確立している反射材パッケージ
の参照として測定した。

→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。

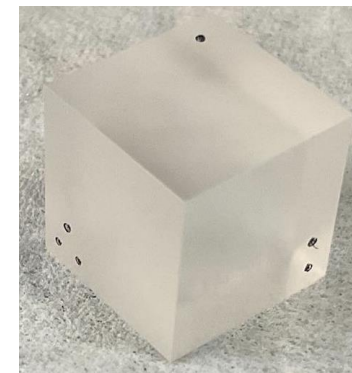
他にも様々な条件で系統誤差の原因を検証した。

→**結晶の表面状態(反射材+グリース)の変化が主要因。**

○Diamond研磨による結晶と高純度SiO₂研磨による結晶の光量と異方性の評価

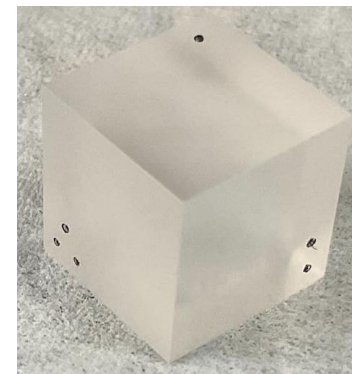
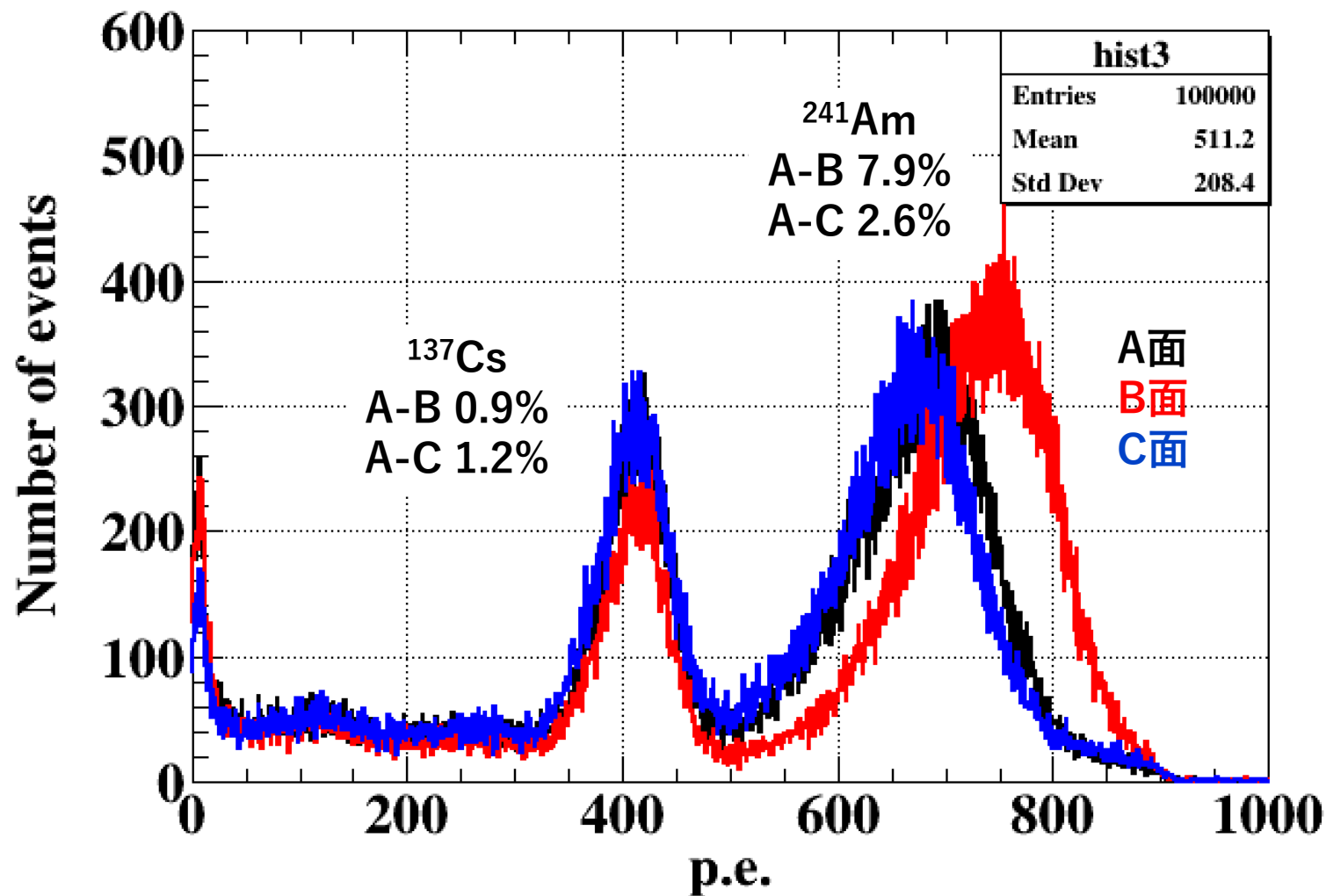


Diamondパウダー研磨
0.53 ± 0.01 p. e./keV



高純度SiO₂パウダー研磨
0.62 ± 0.03 p. e./keV

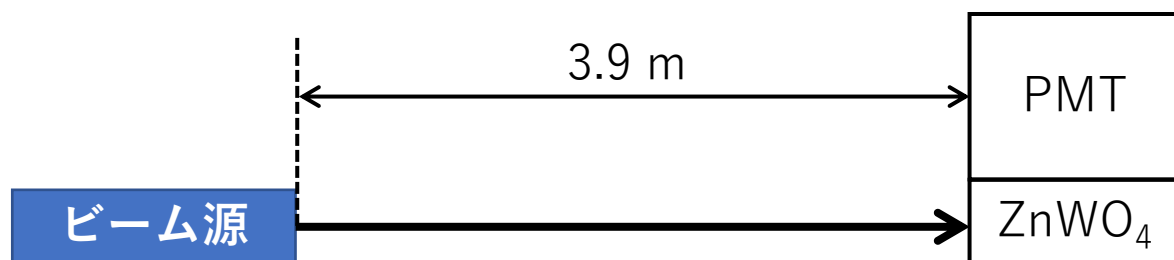
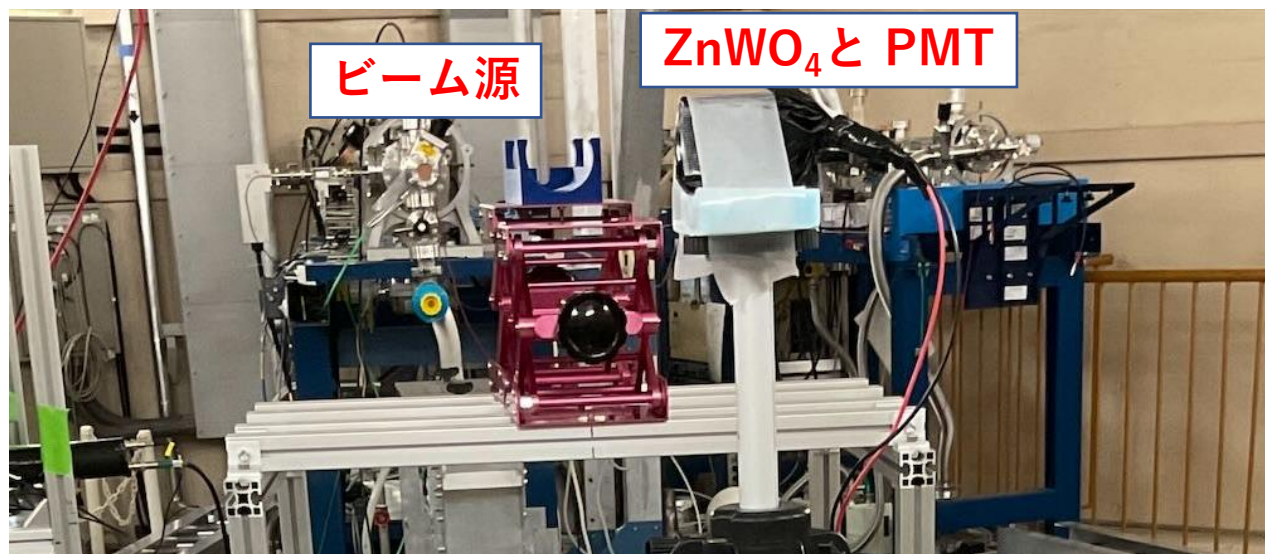
- SiO₂の方が光量が1.2倍大きい。
→RIの観点だけでなく、光量の面でもSiO₂パウダー研磨の結晶の方が適している。

○SiO₂研磨による結晶の異方性の評価SiO₂ 137Cs+241Am

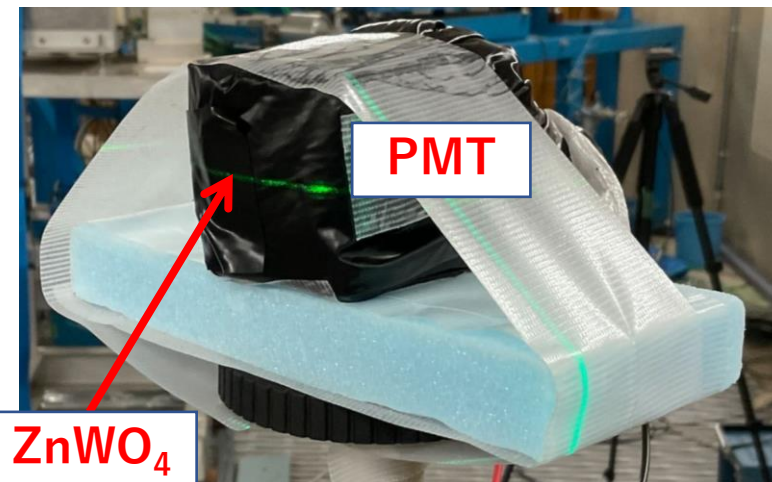
- γ 線に対する3面の光量差は1%程度。
 - α 線に対するA-C面の光量差は2.6%。
 - α 線に対するA-B面の光量差は7.9%。
- ザラザラな表面による系統誤差よりも有意な α 線に対する異方性が確認できた。

○中性子に対する発光応答を確認するため、6月頃に産総研で中性子ビーム試験を予定している。
→他の実験の随伴として予備的にビーム試験(2022/12/22)を行った。

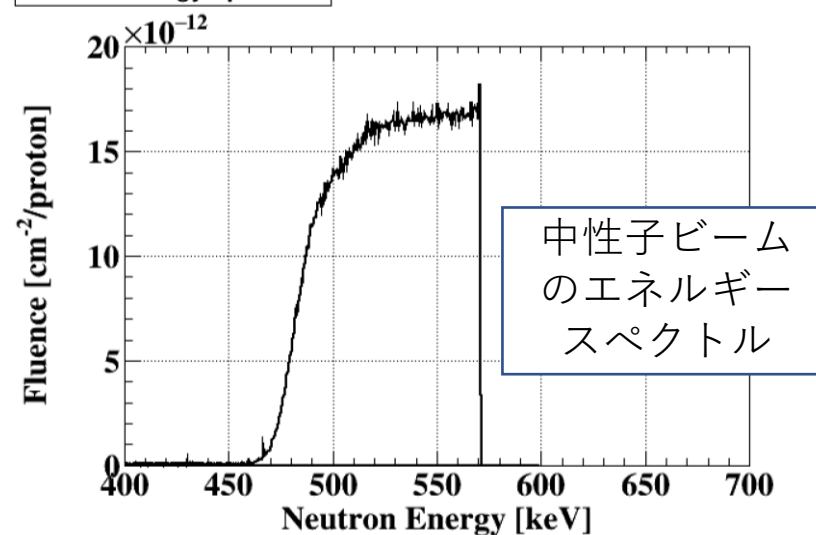
- 応答スペクトルをGeant4でシミュレーションした。
- 565keVビームでの測定結果とシミュレーション結果を比較した。



他実験が優先なので、ビーム源から遠く統計が非常に限られている。

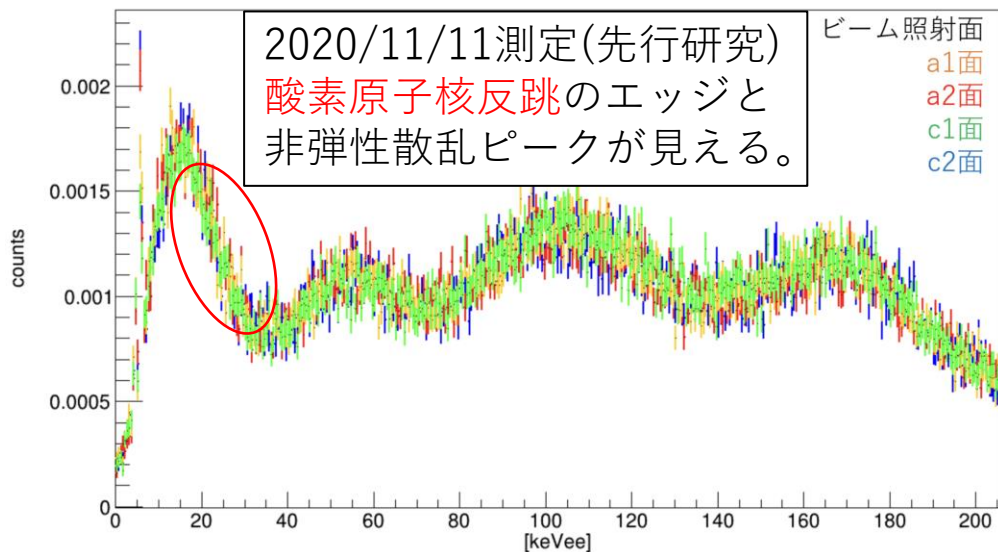
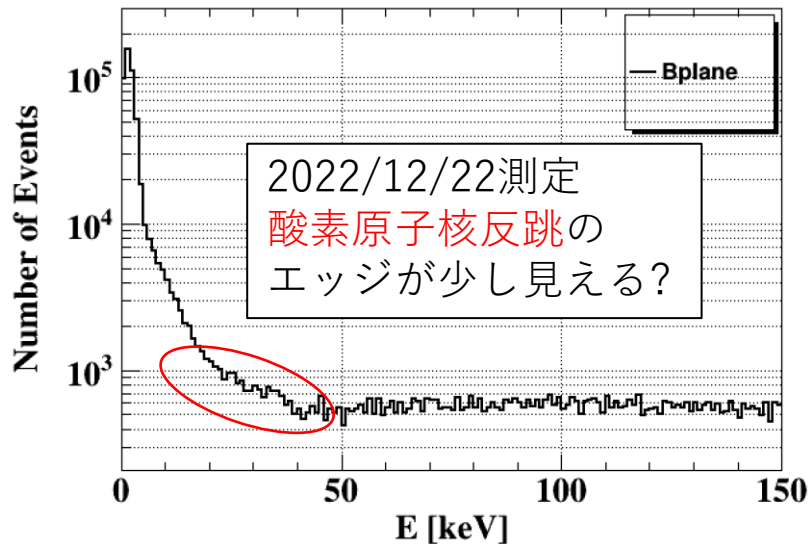


Neutron Energy Spectrum



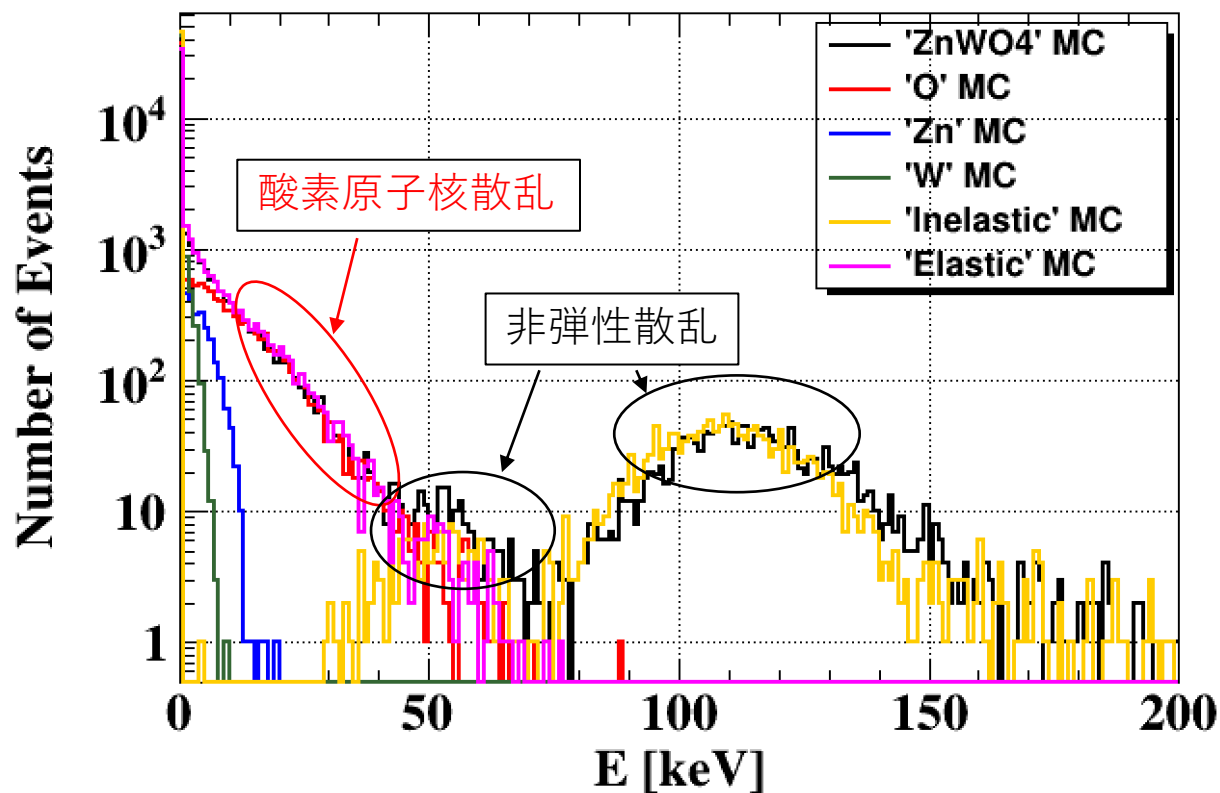
○シミュレーション結果とデータとの比較

NeutronBeam 565keV Data

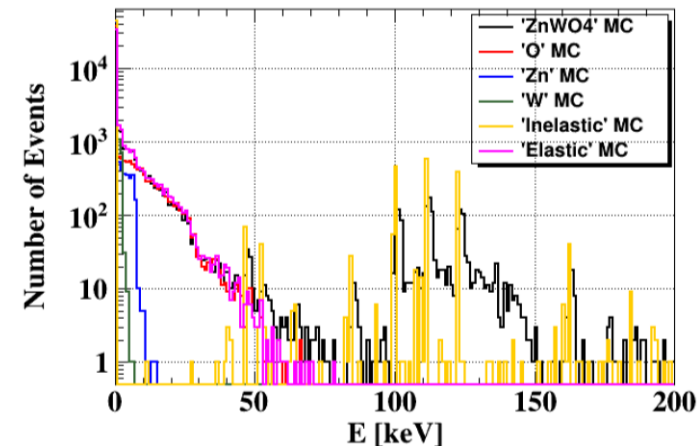


分解能を付け加えた。

NeutronBeam 565keV Simulation



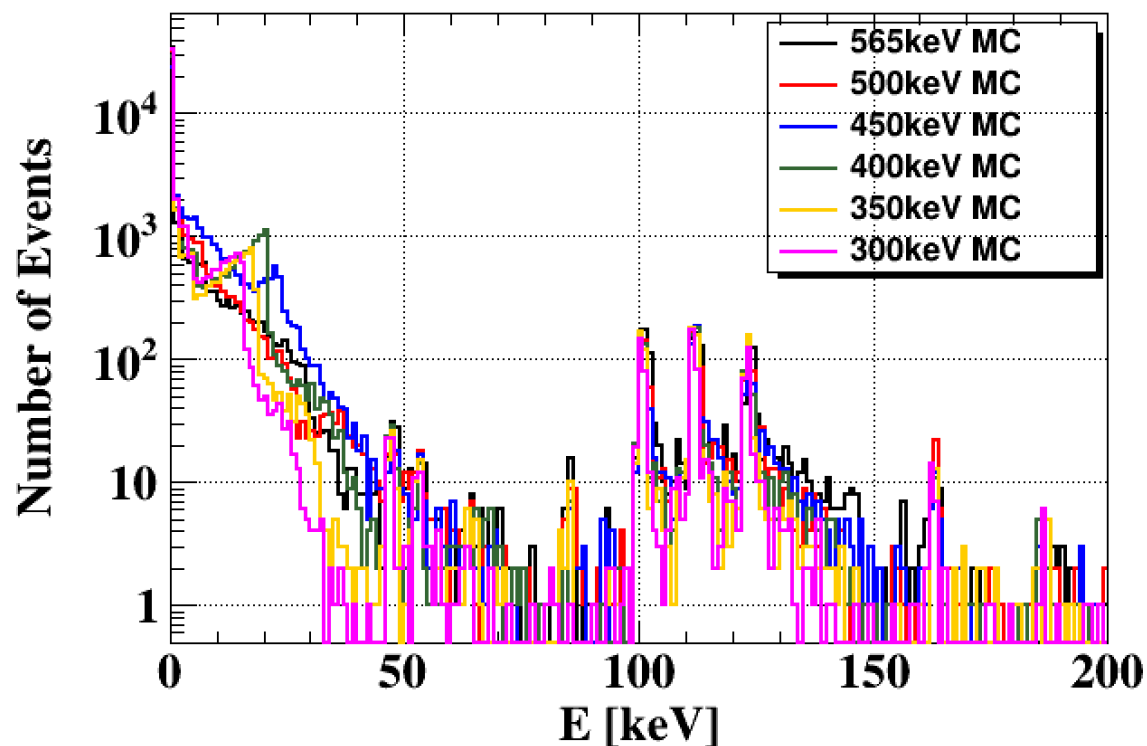
NeutronBeam 565keV Simulation



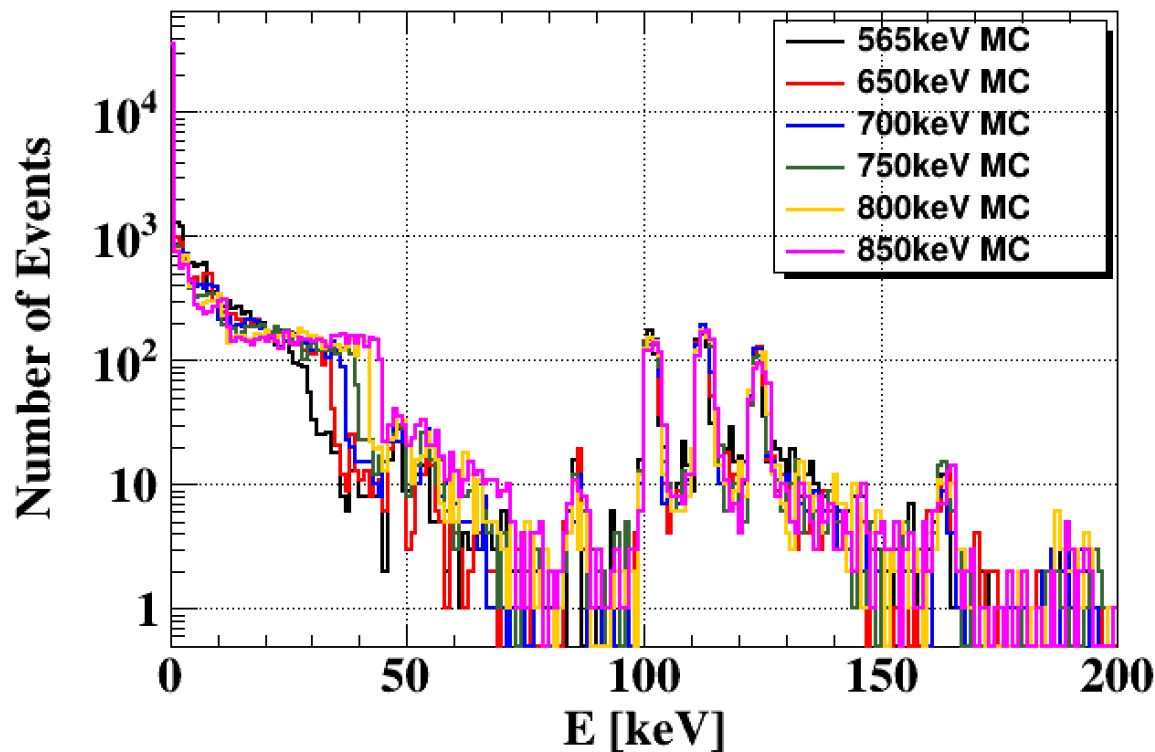
○次回のビーム試験に向けて

- 弾性散乱のエッジが見やすい650-750keVのビームで測定をする予定。
- 今後、産総研と相談してエネルギーを決定する。

NeutronBeam 565-300keV Simulation



NeutronBeam 565-850keV Simulation



- 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33 μ sから68 μ sにすることで集光量が**0.58 p.e./keV**になった。
- 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。
- 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。
- 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。
- 次回の中性子ビーム試験に向けて、予備実験とGeant4を用いたシミュレーションを行った。

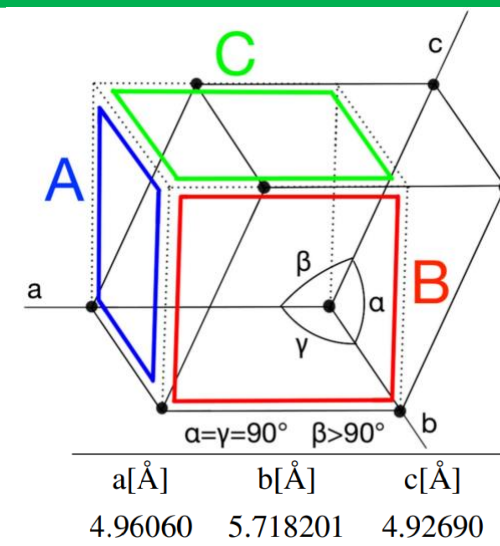
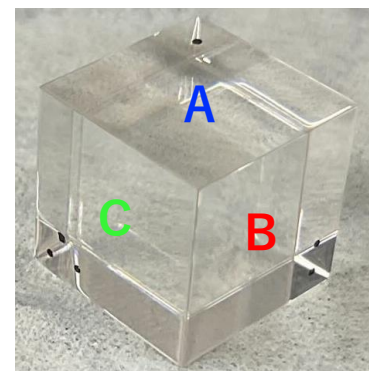
今後の展望

- ZnWO₄結晶を用いて中性子に対する100keV以下での応答を調べる。
- ZnWO₄結晶に含まれる放射性不純物の評価を行い暗黒物質に対する感度を見積もる。

研究目的：発光異方性のあるシンチレータ（ZnWO₄結晶）

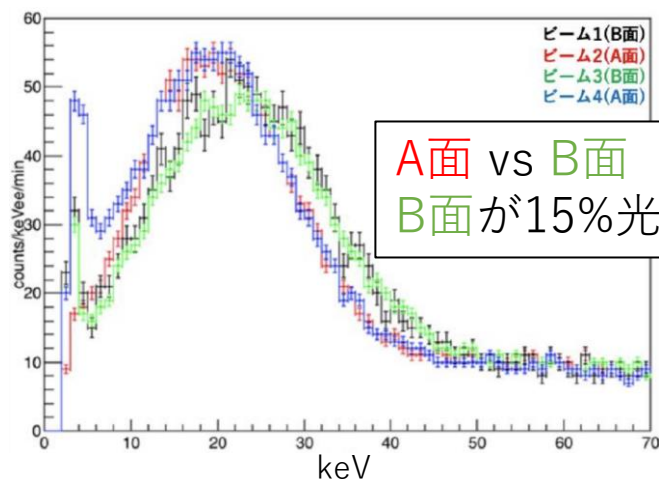
○ZnWO₄結晶

- 無色透明の単斜晶系結晶。
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、1cm×1cm×1cmの結晶を使用した。

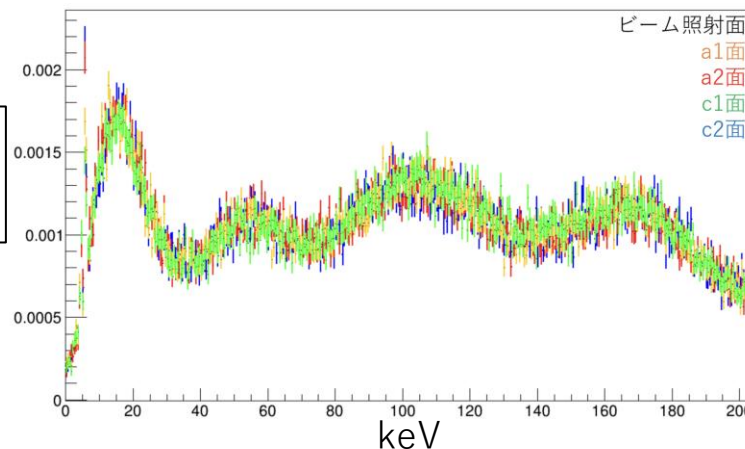


○発光特性

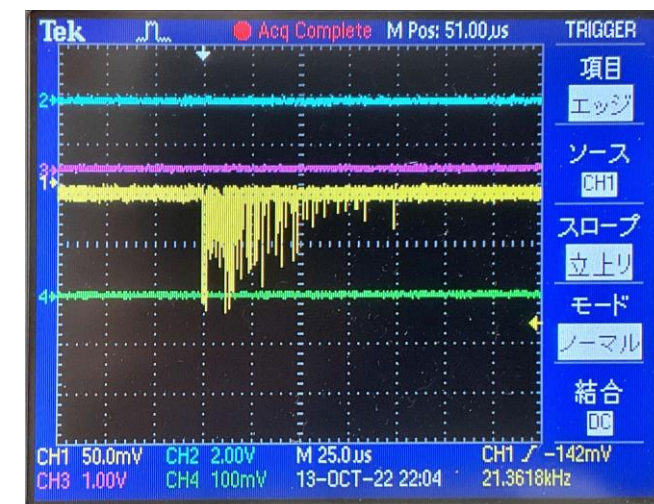
- 発光量はNaIの23%程度。(9p.e./keV : NaIが40p.e./keV)
- 発光時定数が長い(約20μs : 通常数100nsとか)ためPMTからの信号が離散的になる。→電荷積分回路が必要。
- 先行研究では中性子ビームによる酸素原子核反跳の測定が2回行われ、発光の異方性が確認された。



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

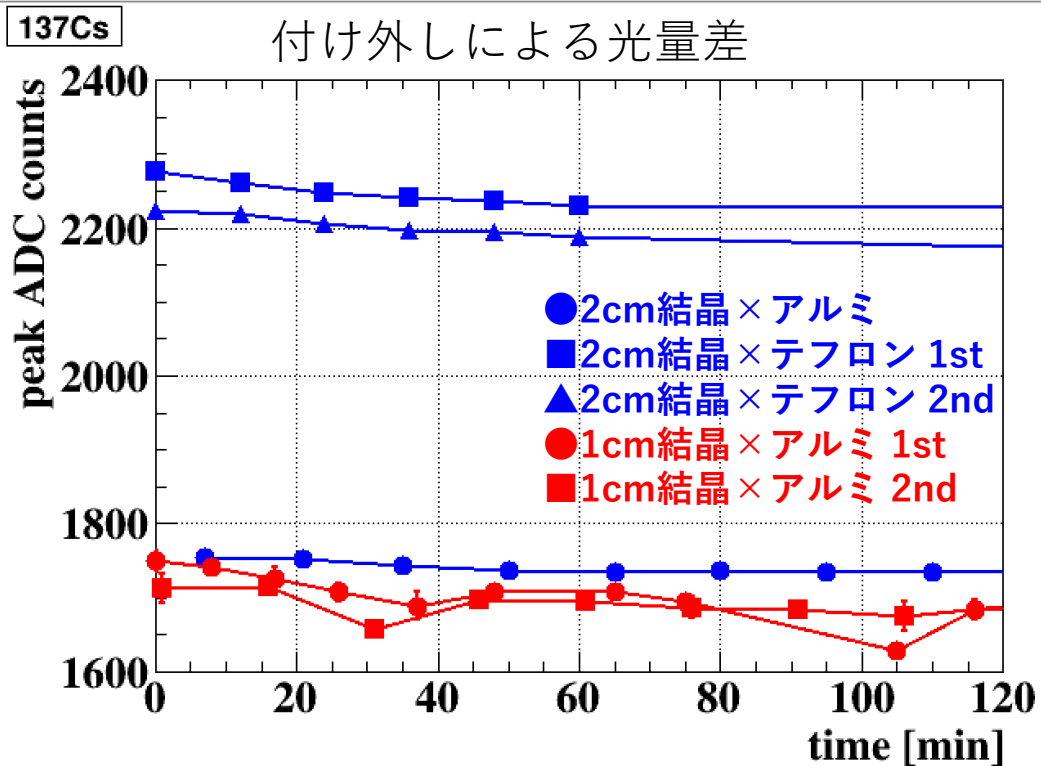


A面 vs C面
<5%の光量差

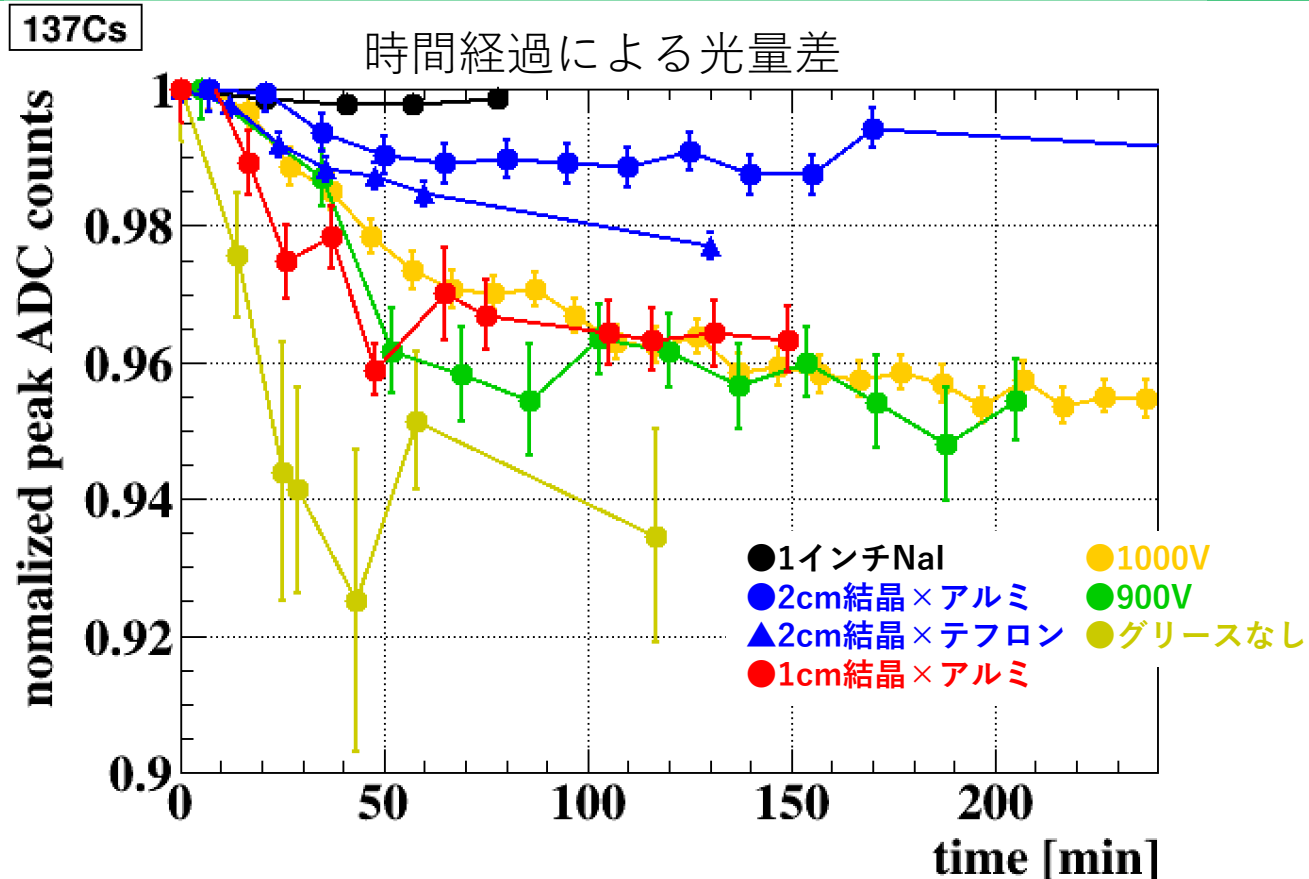
反射材の最適化 時間経過による光量の変化

○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。

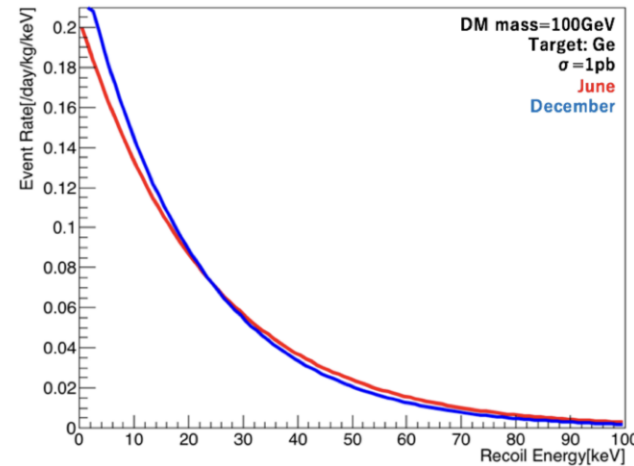
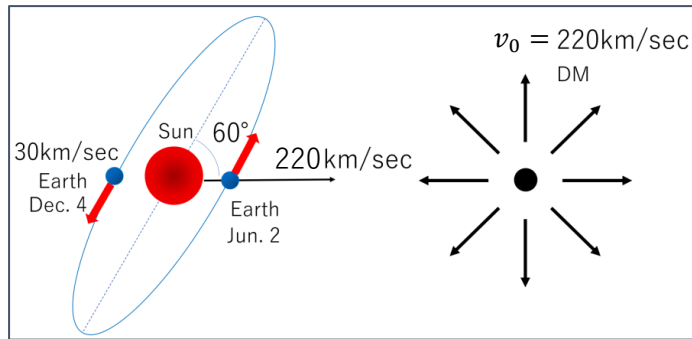


- **アルミ** vs テフロン (グリースが染み込まないため。)
 - 1cm立方結晶 vs **2cm立方結晶** ([体積/面積]が2倍で表面の影響が少ない。)
 - グリースなし vs **グリースあり** (空気層による散乱がない。)
 - HV-1000V vs HV-900V (変化なし。)
 - NaIではほとんど光量に時間変化なし。
- 結晶の表面状態(反射材+グリース)の変化が主要な要因。

研究目的：方向感度を持ったWIMPsの探索

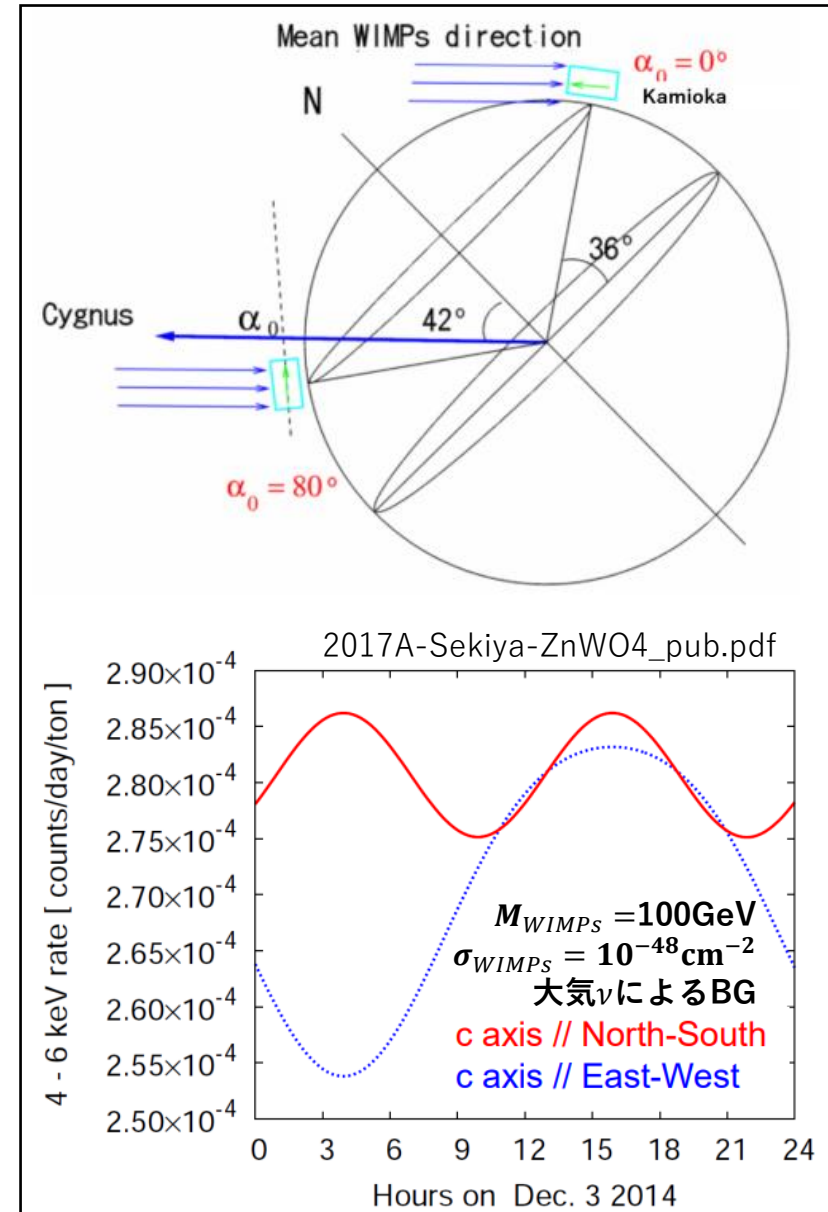
○WIMPsが飛来する方向

- 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ではくちょう座の方向に進む。
→はくちょう座の方向から絶え間なく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：これまでの結果と課題

○565keVの中性子ビームテスト

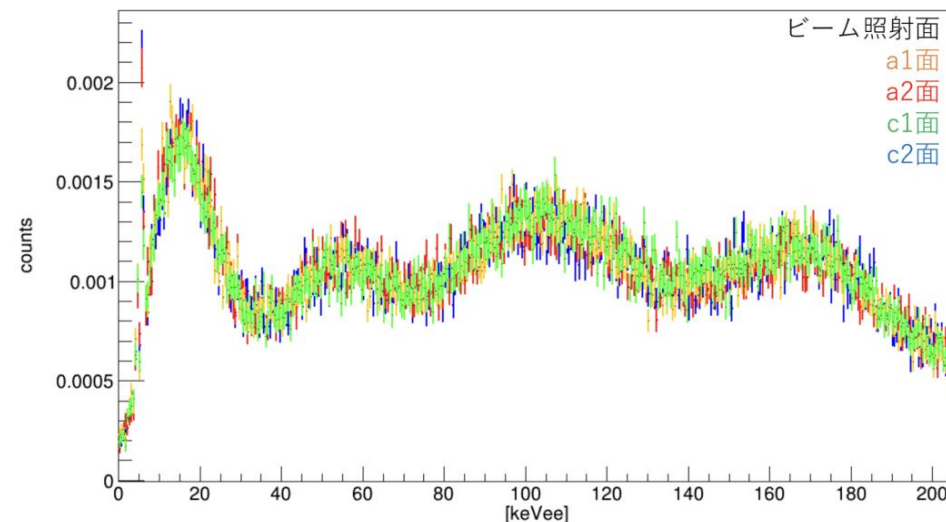
- 1回目の885keVの中性子ビームテストでは反跳エネルギーは~200keV。
 - WIMPsの質量100GeV-1TeVの反跳エネルギーは100keV程度。
- 反跳エネルギーが~100keVとなる565keVの中性子ビームテストが行われた。

○実験結果

- A面とC面の光量差が5%未満。
- A面とB面の異方性15%に比べて十分小さい。
- 重粒子に対してB面のみ発光量が大きい。**
- 非弾性散乱のピークで異方性が出てしまった。
 - 50keV領域での系統誤差が大きくなってしまった。
- プリアンプの時定数が短い。**

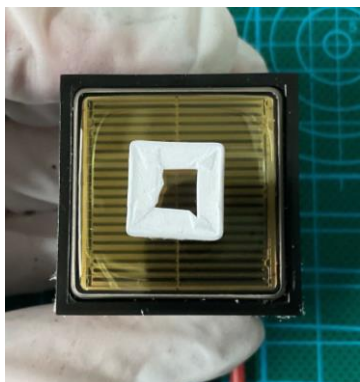
○課題

- 100keV以下での分解能の向上。
- 集光率の増加とプリアンプの時定数の増加。
- 量子効率が2倍のPMTの使用と時定数が十分長いプリアンプの作成。**
- より低バックグラウンドの検出器の作成
- 結晶をDiamondでなくSiO₂で研磨する。
- **Diamond研磨の結晶とSiO₂研磨の結晶で光量を比較する。**



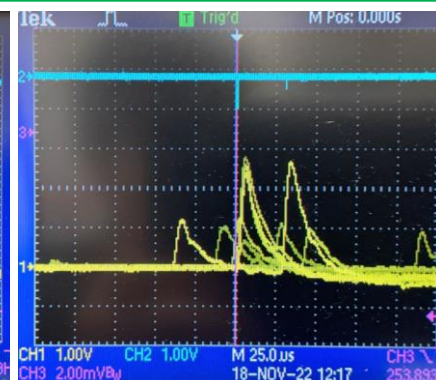
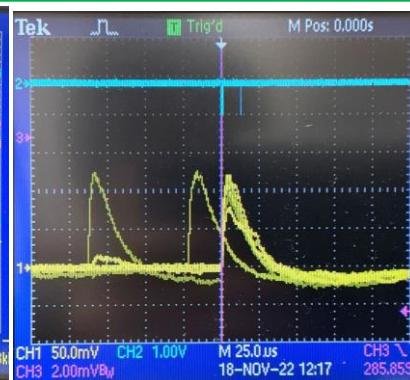
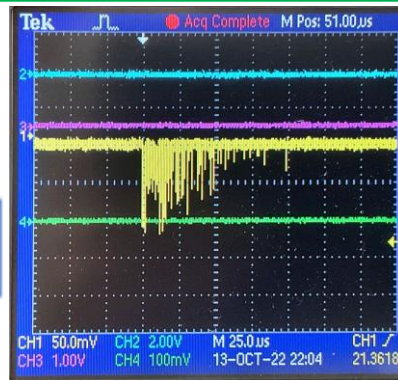
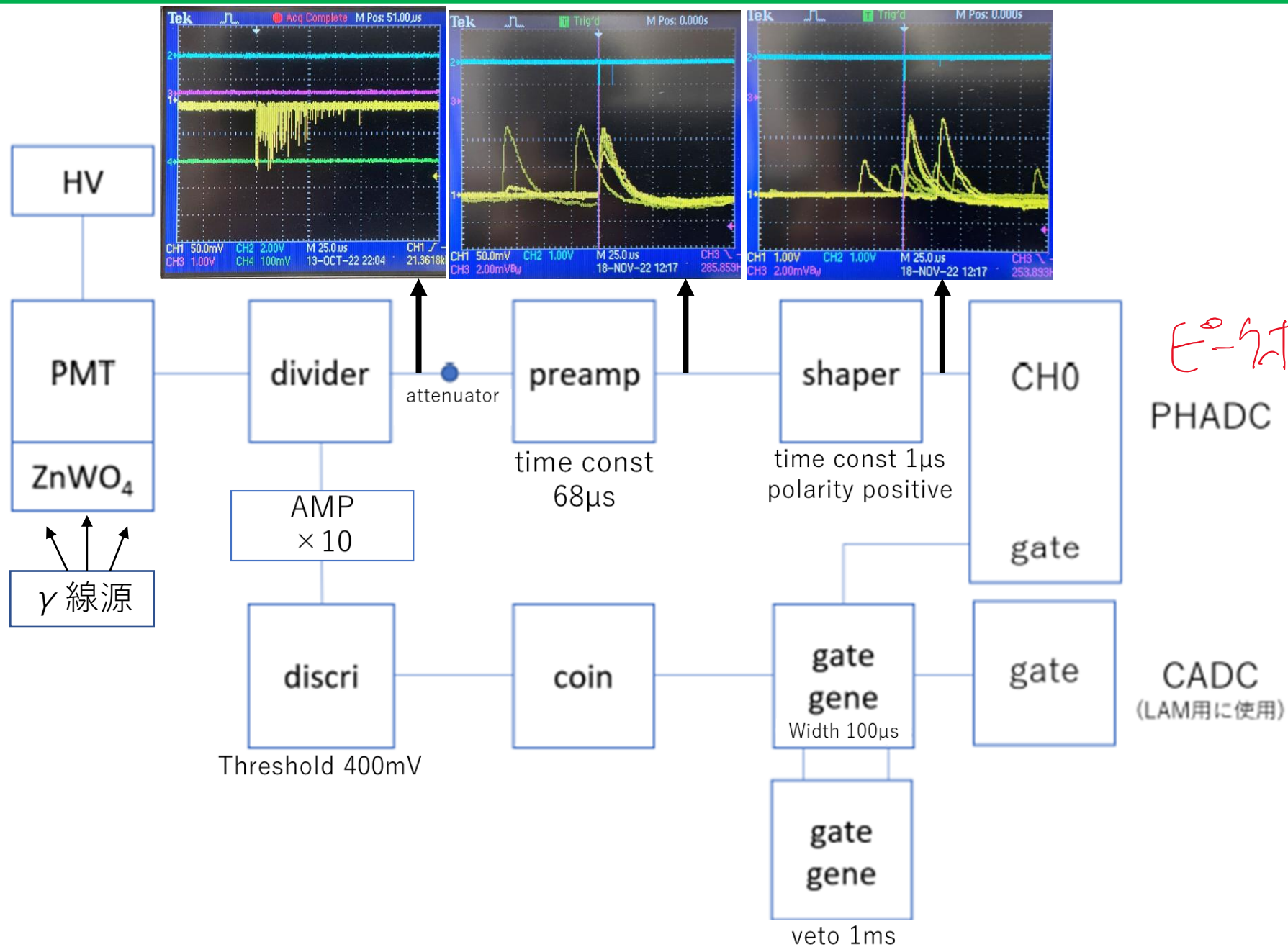
| 中性子ビームの照射面 | Oによる弾性散乱によるedge[keVee] | ¹⁸³ Wの非弾性散乱によるpeak[keVee] |
|------------|------------------------|--------------------------------------|
| A1 | 23.7 ± 0.3 | 54.5 ± 0.7 |
| A2 | 23.8 ± 0.4 | 55.5 ± 0.9 |
| C1 | 23.7 ± 0.4 | 53.0 ± 1.3 |
| C2 | 23.7 ± 0.4 | 54.6 ± 1.0 |
| 最大の差 | 1.7 ± 3.3% |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

測定のセットアップ



PMTとZnWO₄

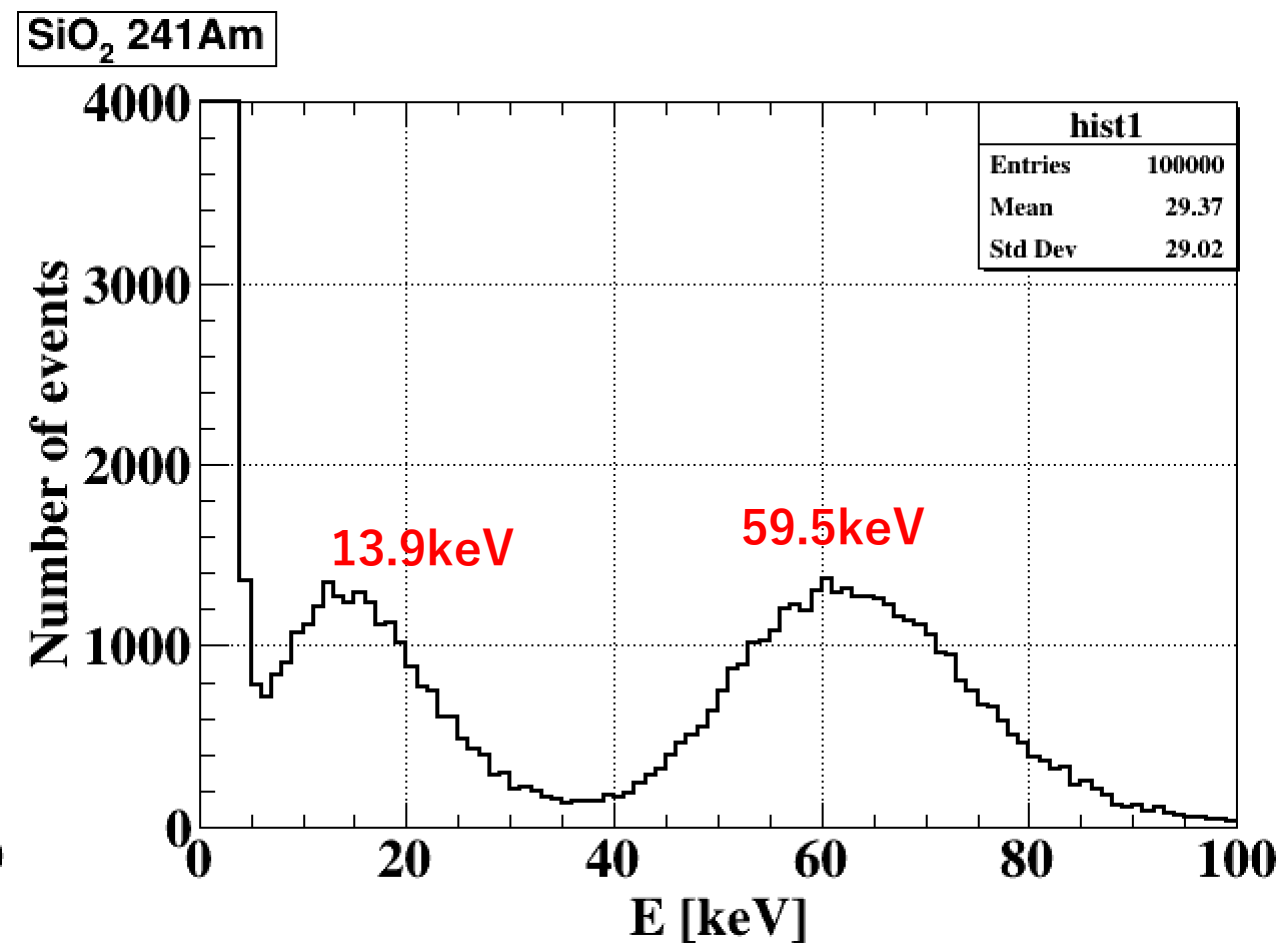
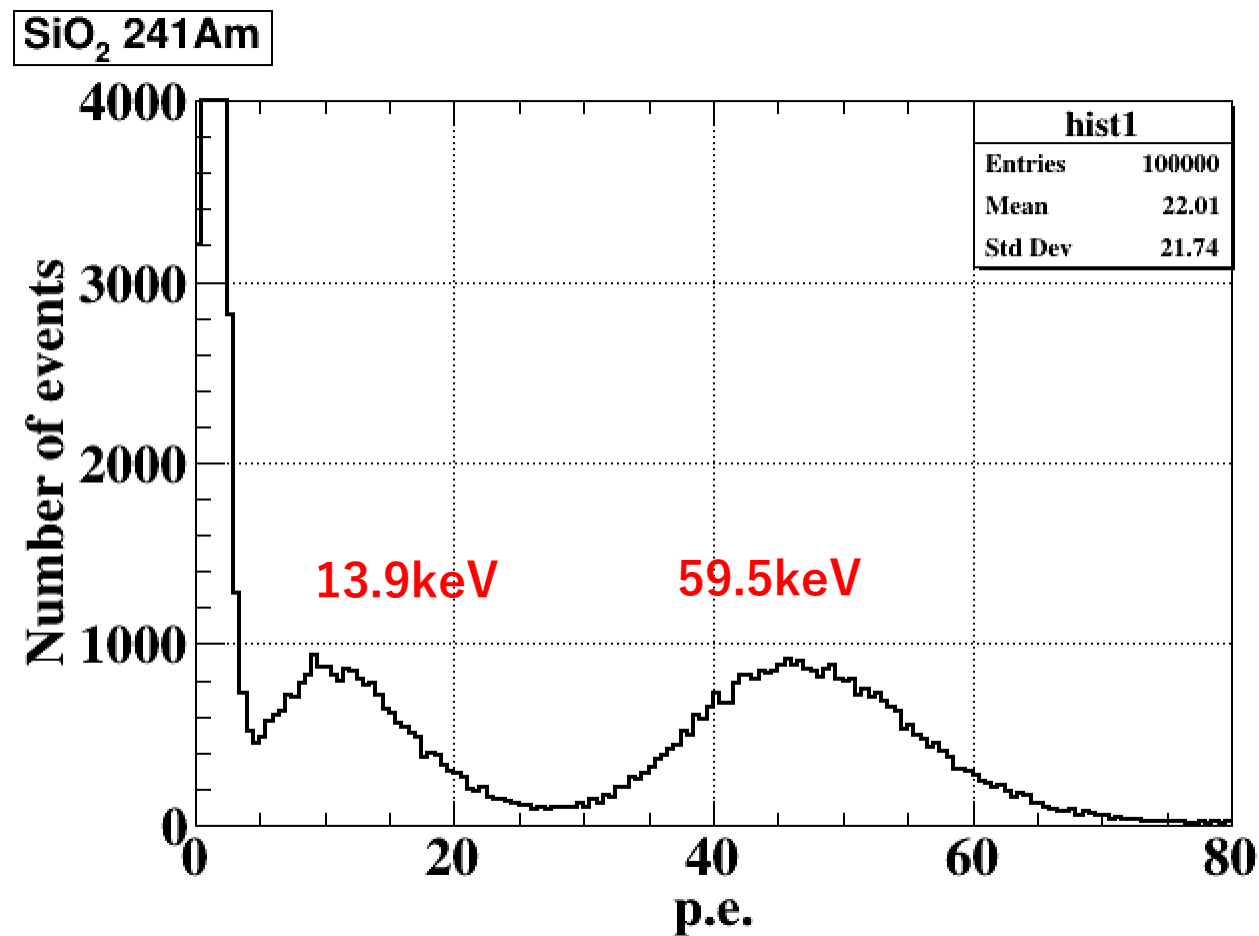
結晶の向きを変えて
それぞれで光量を測定



○低エネルギーでの光量と閾値

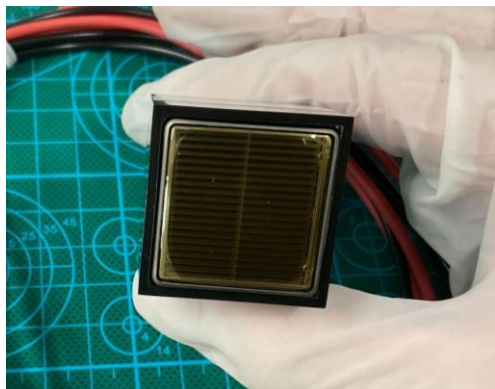
光量 0.77 ± 0.01 p. e./keV

閾値は7keV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

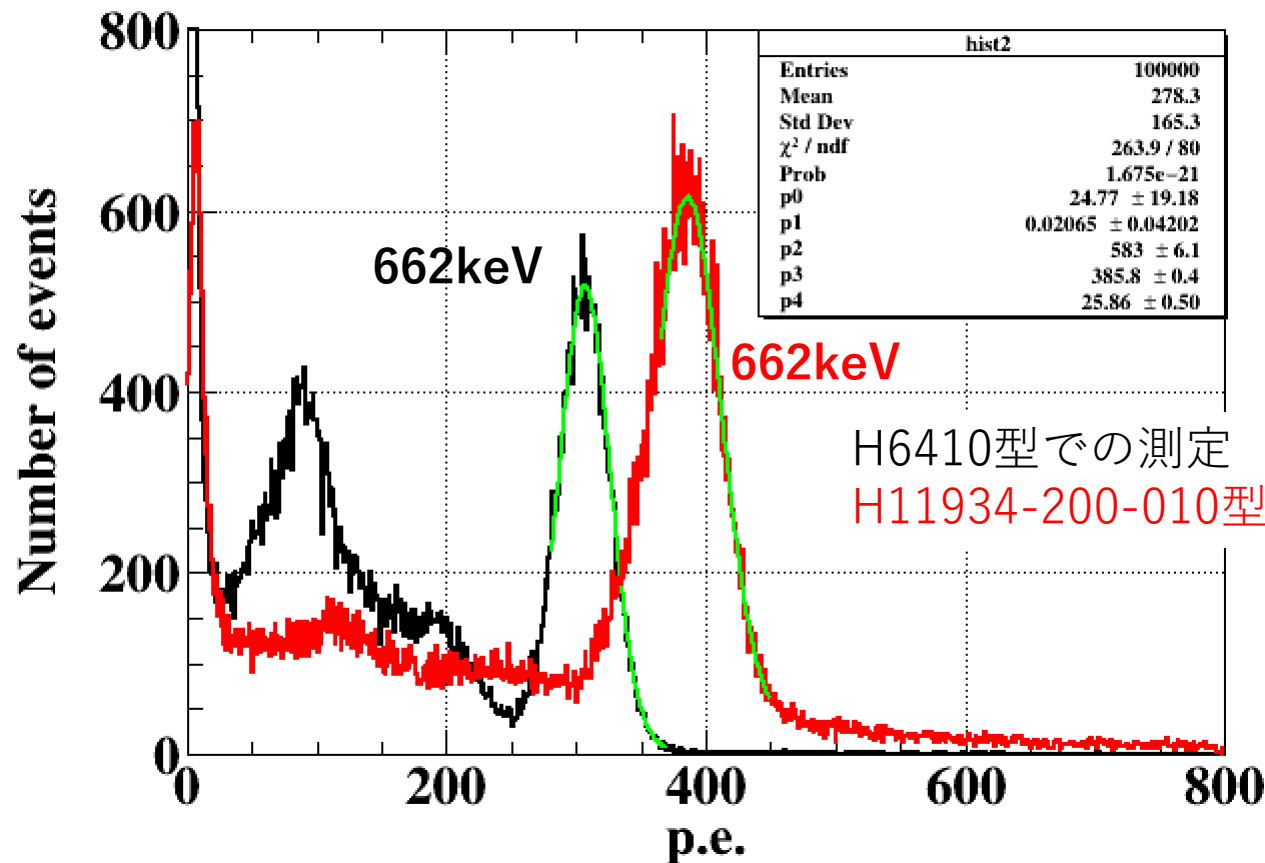


H11934-200-010型
量子効率40% @400nm



H6410型
量子効率27% @400nm

‘H6410 vs H11934’ 137Cs



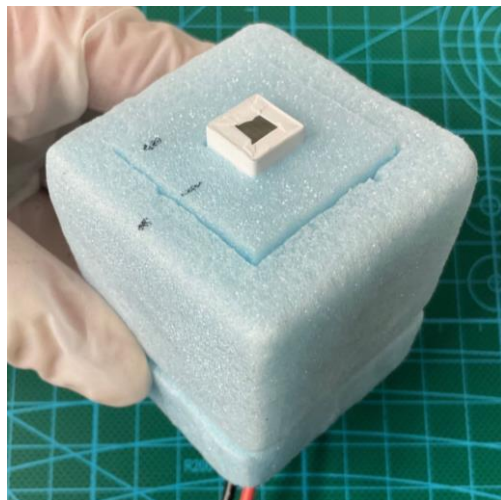
H6410型での測定
H11934-200-010型での測定

137Cs (662keV) 0.46 ± 0.01 p.e./keV \rightarrow 0.58 ± 0.01 p.e./keV
光量が約1.26倍になっていることを確認した。
系統誤差は多くとも16dBで5ADC \rightarrow 0.85p.e. \rightarrow 0.001p.e./keV

反射材の最適化 付け外しによる光量の変化

○結晶の固定

固定具とテープでPMTと結晶を固定する。
前回と全く同じ位置で結晶を固定できる。
→位置による差を低減させる。



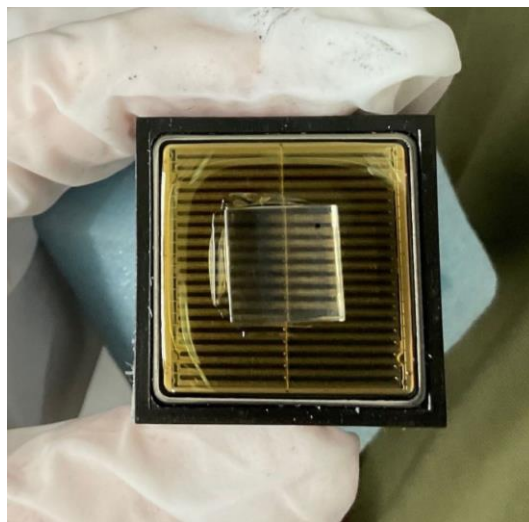
マウンター固定具



テープで固定

○グリースの影響

グリースが多いと、反射材に染みる。
少なすぎると空気が入り光量が減少。
→量を毎回一定かつ最小にする。

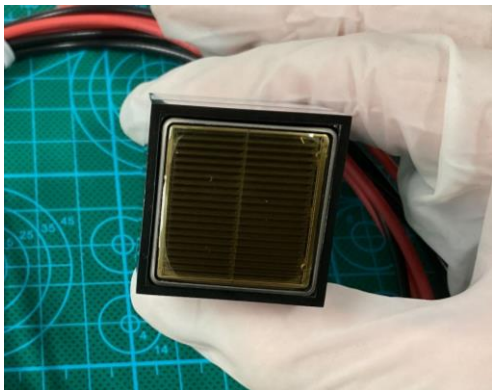


はみ出してしまいう
グリース

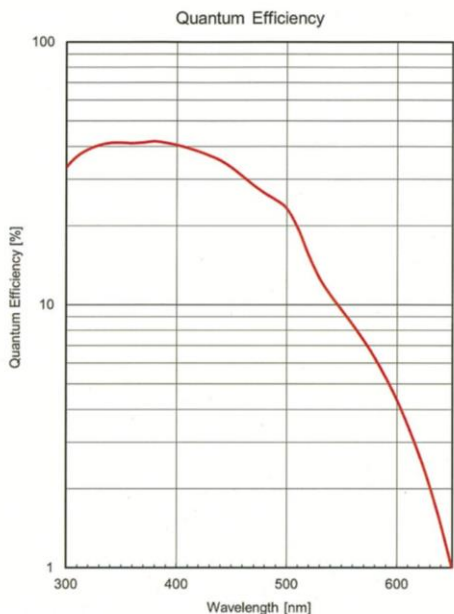


グリースが染みた
テフロンテープ

量子効率が2倍のPMT (R11934-200-100)



Tube Type : H11934-200-010
 Serial No. : DC0616
 Date : 2022.09.05

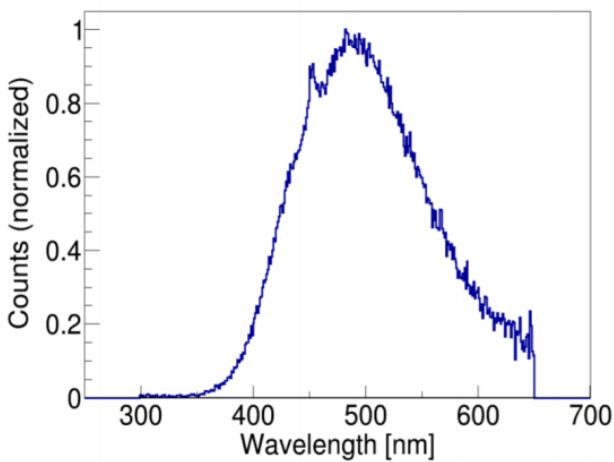
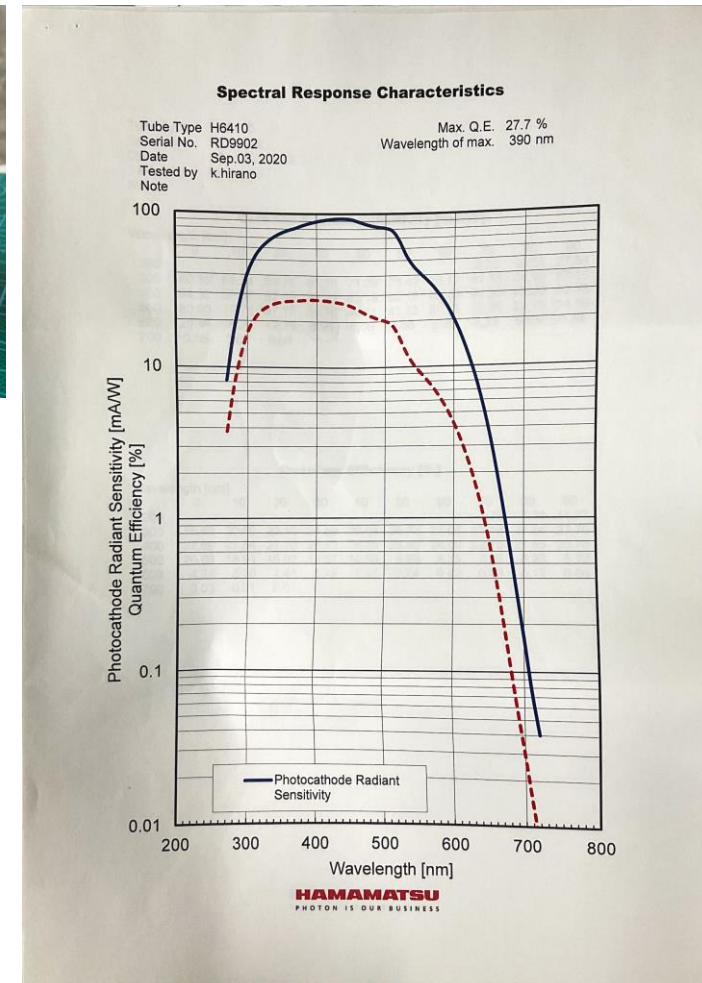


| Wavelength [nm] | Quantum Efficiency [%] |
|-----------------|------------------------|
| 300 | 33.3 |
| 310 | 36.8 |
| 320 | 39.1 |
| 330 | 40.5 |
| 340 | 41.3 |
| 350 | 41.4 |
| 360 | 41.2 |
| 370 | 41.5 |
| 380 | 41.9 |
| 390 | 41.4 |
| 400 | 40.6 |
| 410 | 39.5 |
| 420 | 38.3 |
| 430 | 36.9 |
| 440 | 35.4 |
| 450 | 33.3 |
| 460 | 30.8 |
| 470 | 28.5 |
| 480 | 26.6 |
| 490 | 25.1 |
| 500 | 23.3 |
| 510 | 19.7 |
| 520 | 15.4 |
| 530 | 12.6 |
| 540 | 10.9 |
| 550 | 9.6 |
| 560 | 8.4 |
| 570 | 7.3 |
| 580 | 6.3 |
| 590 | 5.3 |
| 600 | 4.4 |
| 610 | 3.5 |
| 620 | 2.7 |
| 630 | 2.0 |
| 640 | 1.5 |
| 650 | 1.0 |

H11934-200-010型



H6410型



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

集光率低い。

隙間ができると取り付け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

集光率高い。

隙間ができ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。



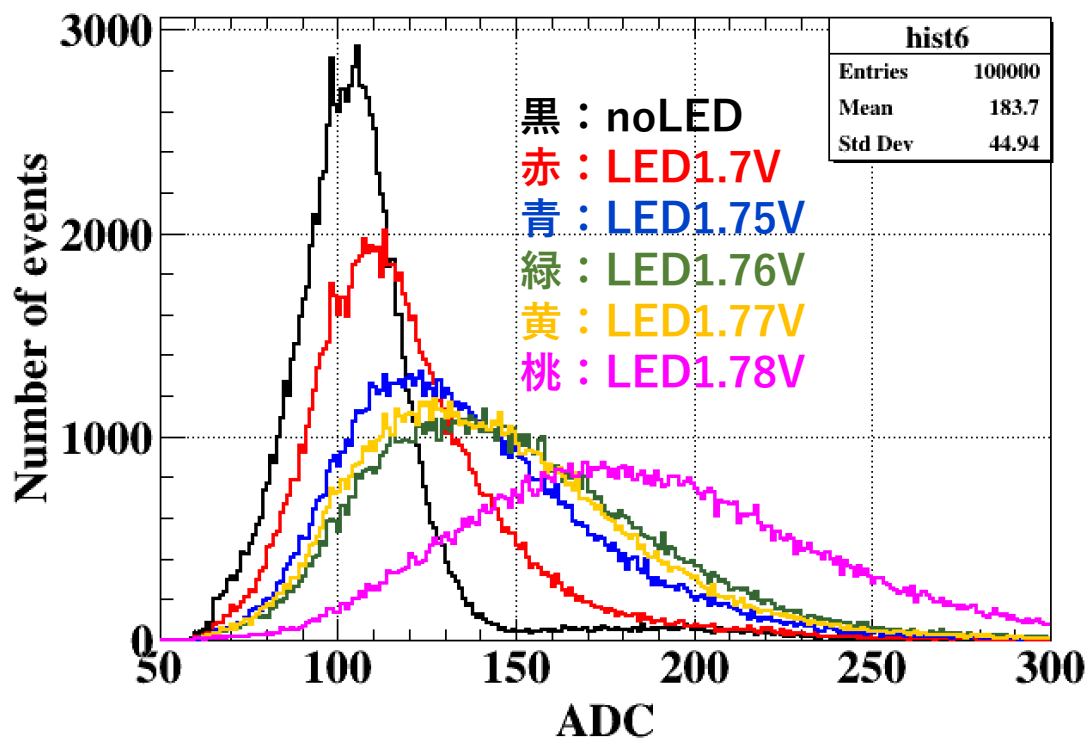
グリースが染みた
テフロンテープ

本発表の内容：プリアンプ時定数の最適化

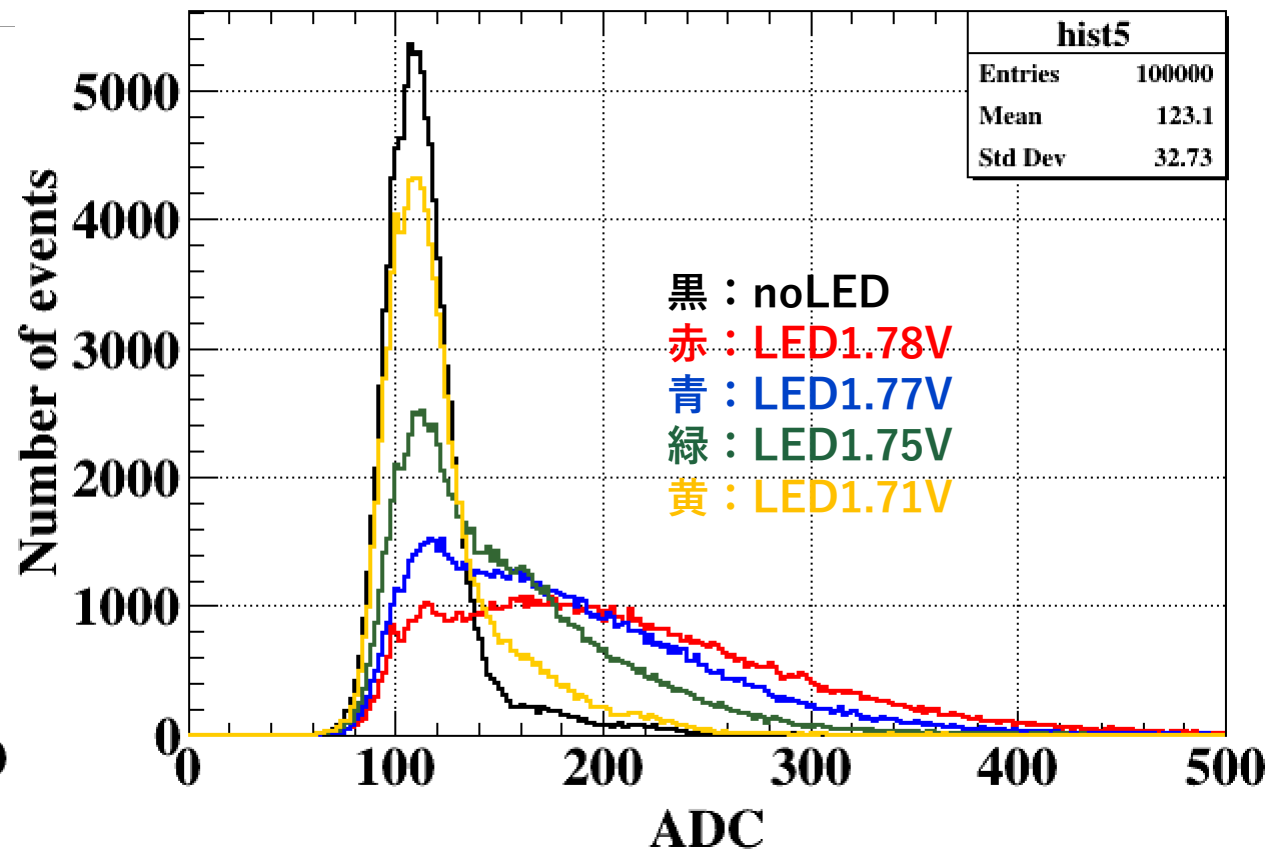
○ノイズが低減

- 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で1p.e.を放出して測定した。
- 旧プリアンプでは取れなかった。
- 新プリアンプで見ることができた。

1p.e.



1 p.e.

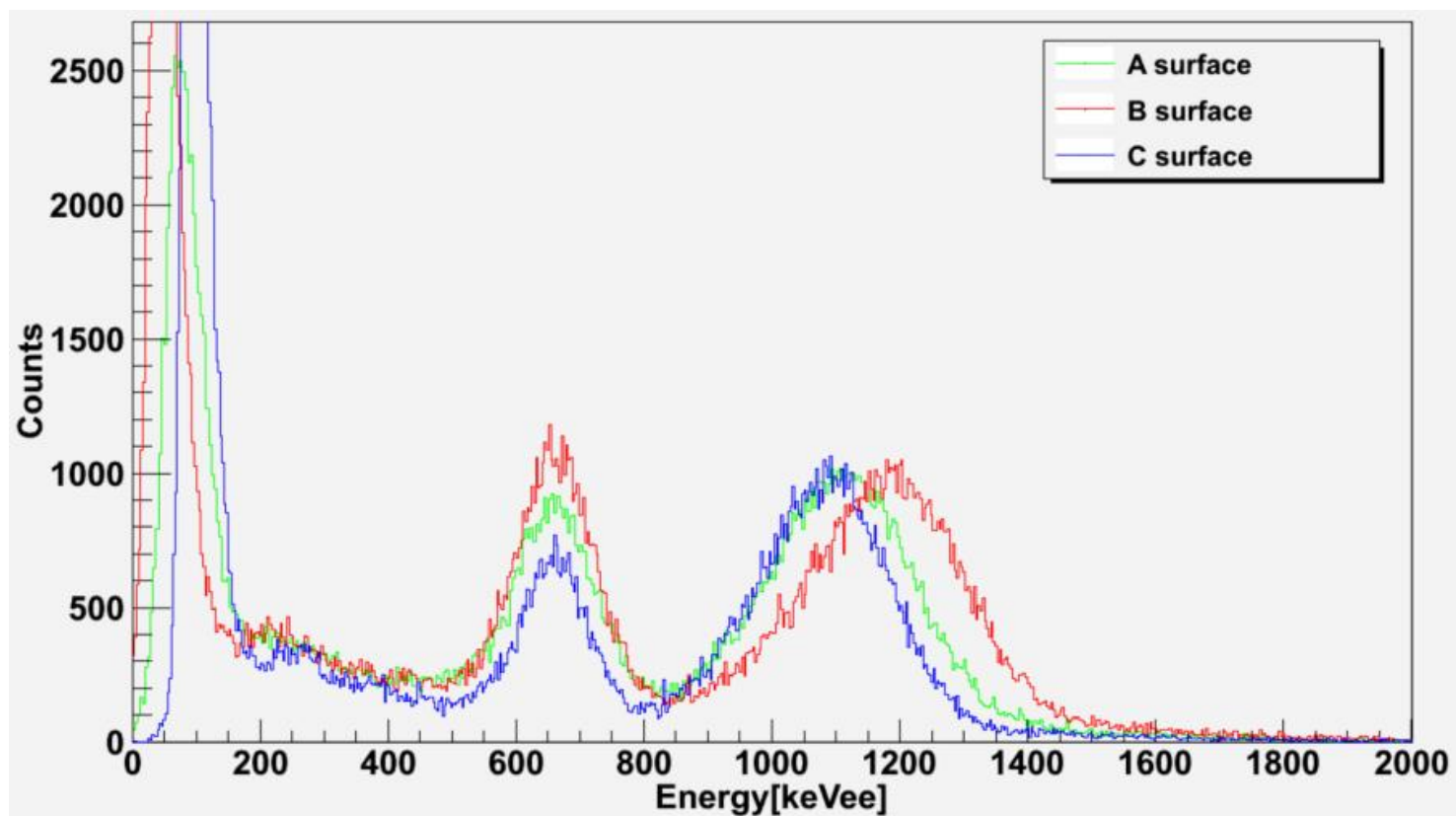


プリアンプ時定数の最適化

○先行研究

B面 VS A面で6.4%の異方性。

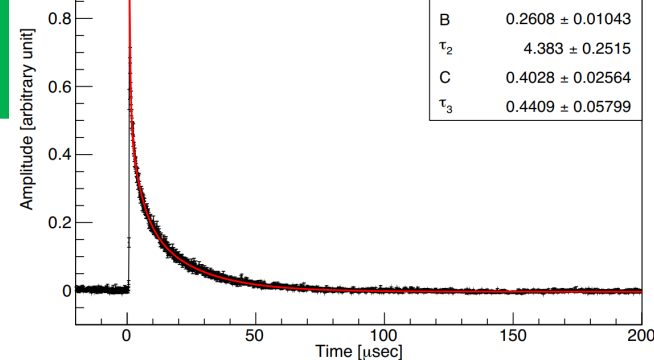
B面 VS C面で8.5%の異方性。



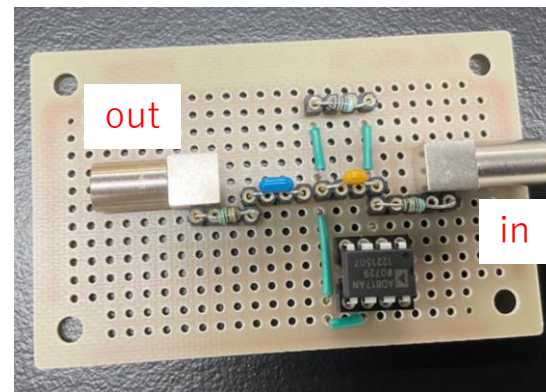
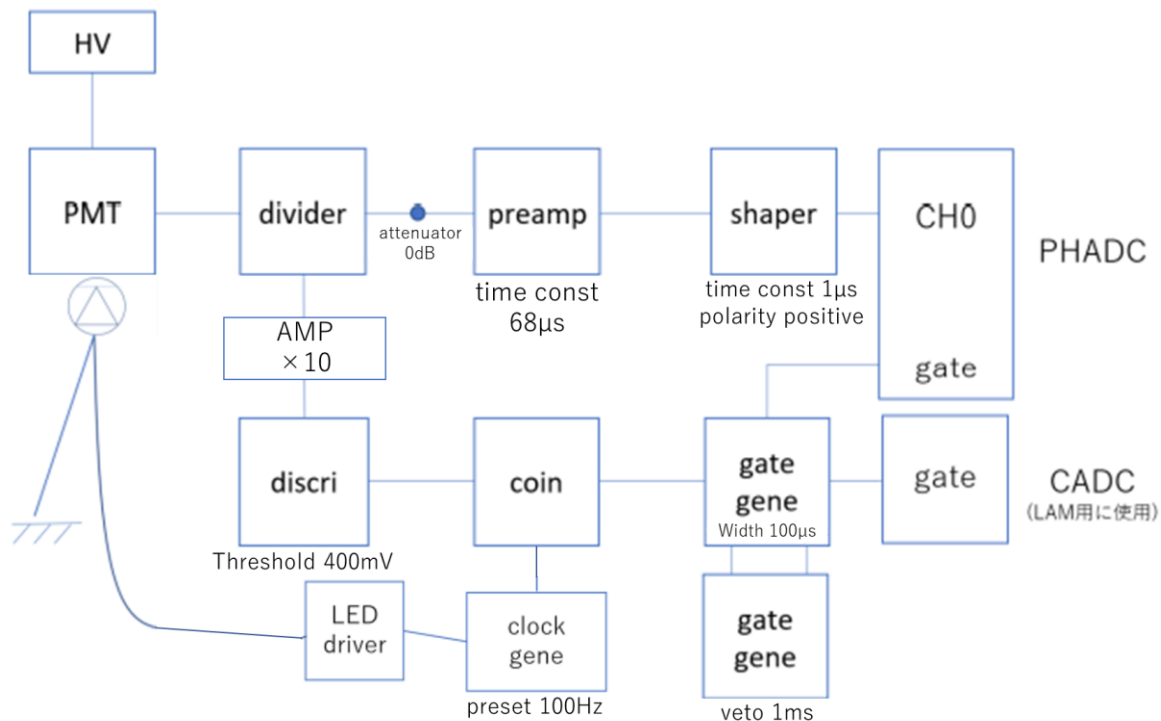
本発表の内容：プリアンプ時定数の最適化

○プリアンプとフィルターの作成

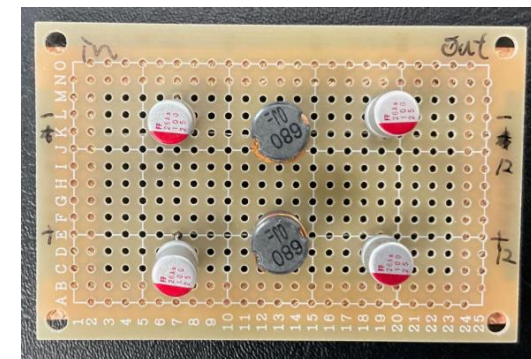
- ・ 離散的な信号を積分する。
 - ・ 積分時定数を $33\mu\text{s}$ から $68\mu\text{s}$ にする。
 - ・ 同時にノイズを低減する。
- プリアンプとフィルターを自作した。



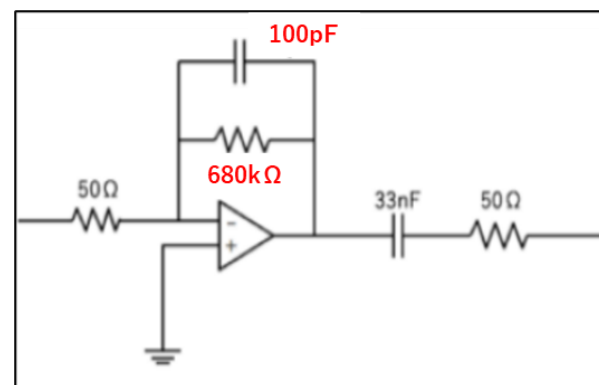
○セットアップ



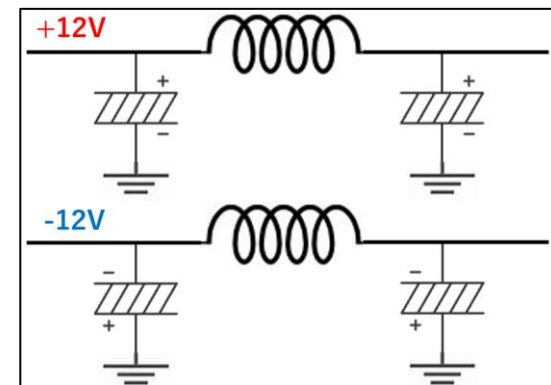
自作したプリアンプ



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

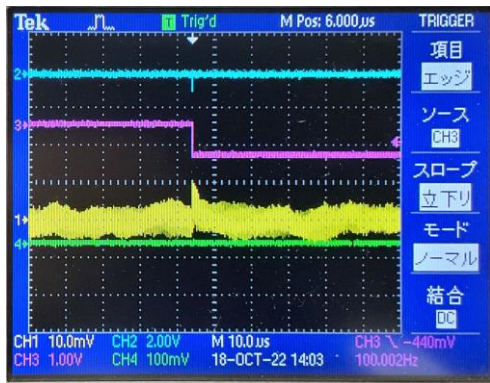
プリアンプ時定数の最適化

○アンプとフィルターの作成

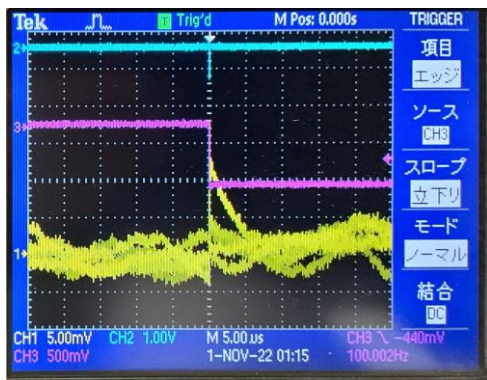
離散的な信号を積分する。
積分時定数を $33\mu\text{s}$ から $68\mu\text{s}$ にする。
同時にノイズを低減する。
→プリアンプとフィルターを自作した。

○ノイズが低減

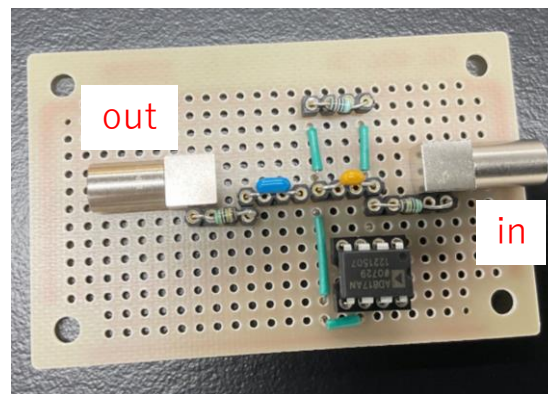
フィルターによりノイズが低減した。



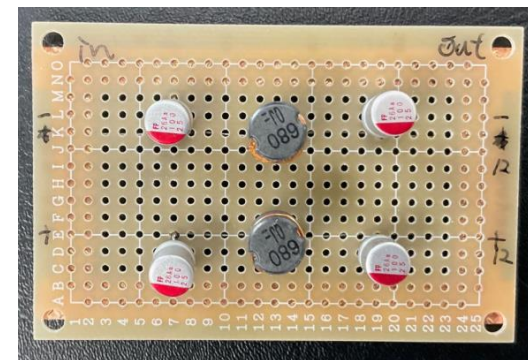
フィルター無し



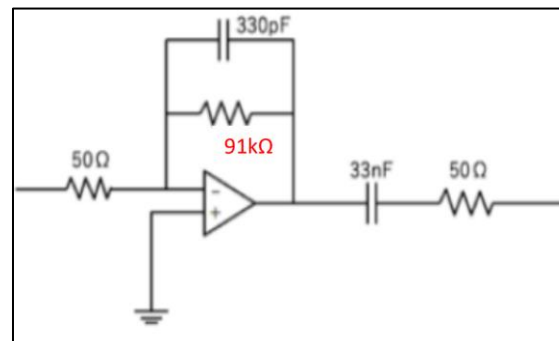
フィルター有り



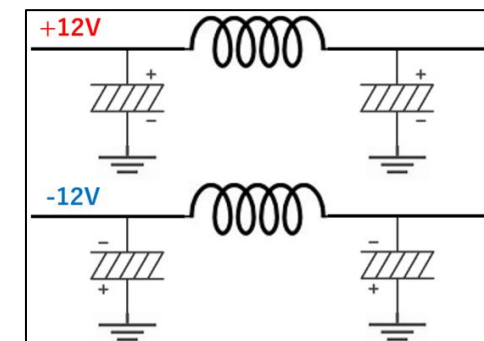
自作したプリアンプ



自作したフィルター



プリアンプの回路図

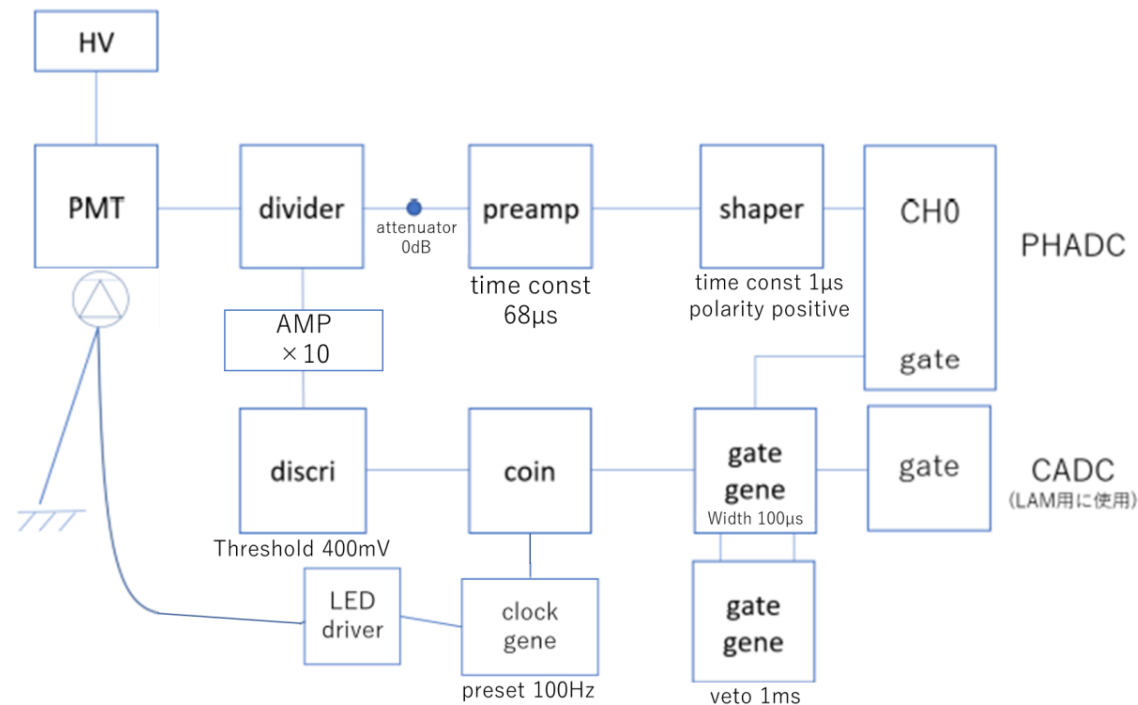
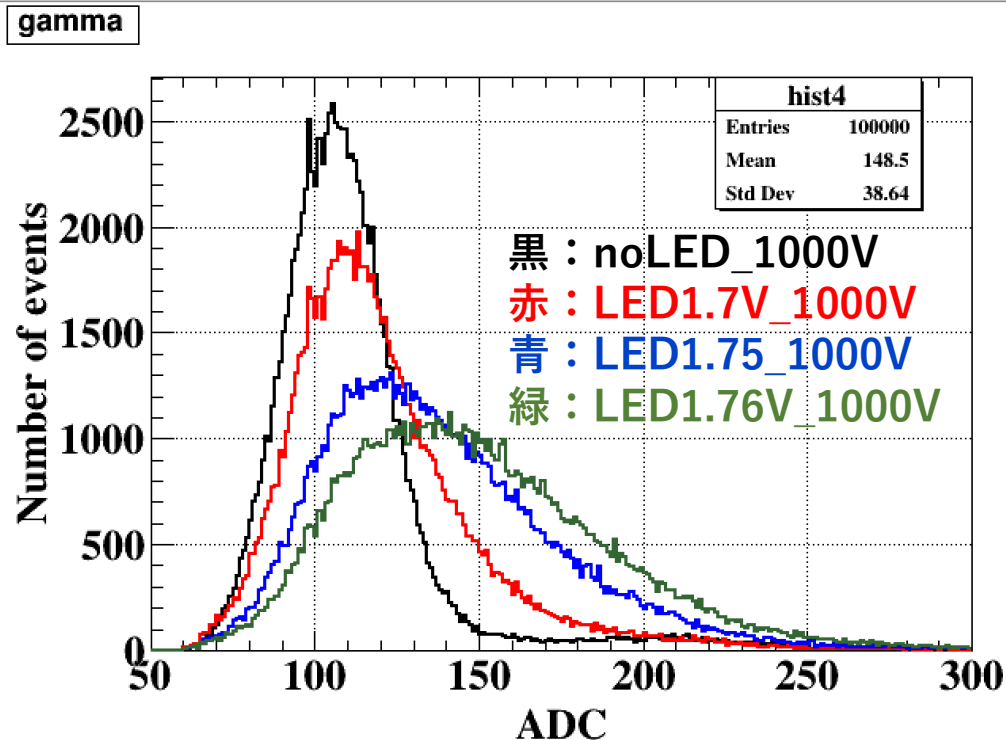


フィルターの回路図

プリアンプ時定数の最適化

○1p.e.の測定

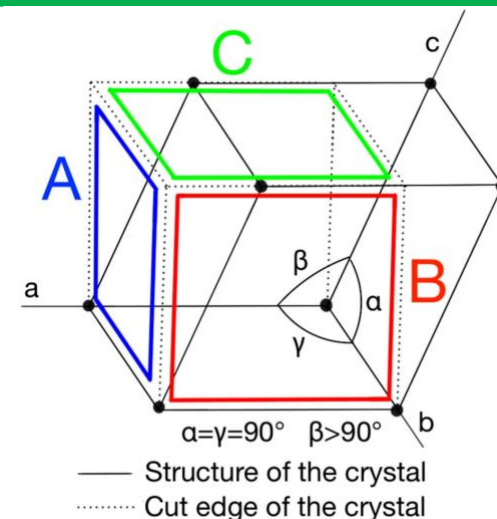
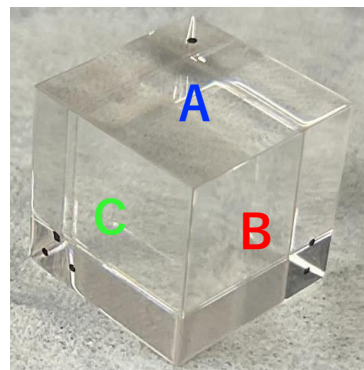
PMTはH11934-200-100を使用。
旧プリアンプでは取れなかった。
新プリアンプで見ることができた。
LEDで1p.e.を放出して測定。



研究目的：これまでの結果と課題

○ZnWO₄結晶

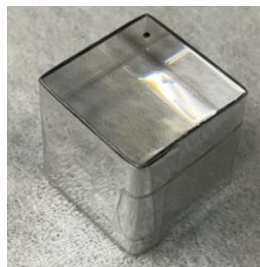
- 無色透明の単斜晶系結晶。
- 結晶底面(B,C面)は単位格子と共通。
- 結晶側面(A面)はほとんど平行になるようカットしてある。
- 主に1cm×1cm×1cmの結晶を使用した。
- B面のみ発光量が大きい。



| α [deg.] | β [deg.] | γ [deg.] |
|-----------------|----------------|-----------------|
| 90.0000 | 90.6210 | 90.0000 |
| a[Å] | b[Å] | c[Å] |
| 4.96060 | 5.718201 | 4.92690 |

○反射材

- 先行研究ではアルミ箔の中で最適はアルミ蒸着シート。
 - 他の候補にテフロンテープ、アルミ箔がある。
- アルミ蒸着シートでは隙間ができ、系統誤差の要因になると考えた。



| 反射材 | 集光量 [p.e./keV] |
|---------------|----------------|
| テフロンテープ (三重) | 1.27±0.01 |
| アルミホイル | 1.31±0.05 |
| アルミ蒸着シート (二重) | 1.45±0.04 |

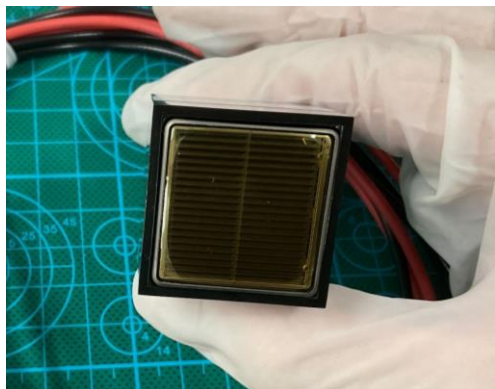
○プリアンプ

- ZnWO₄は発光時定数が長く離散的な信号になるので、積分回路が必要。
 - 先行研究では中性子ビームに対応するため積分時定数を33μsにしていた。
 - 通常の測定では1イベントの光子を確実に集光したい。
- 積分時定数が68μsのプリアンプを作成した。



量子効率が2倍のPMT (R11934-200-010)

○ウルトラバイアルカリ光電面のPMTを使用



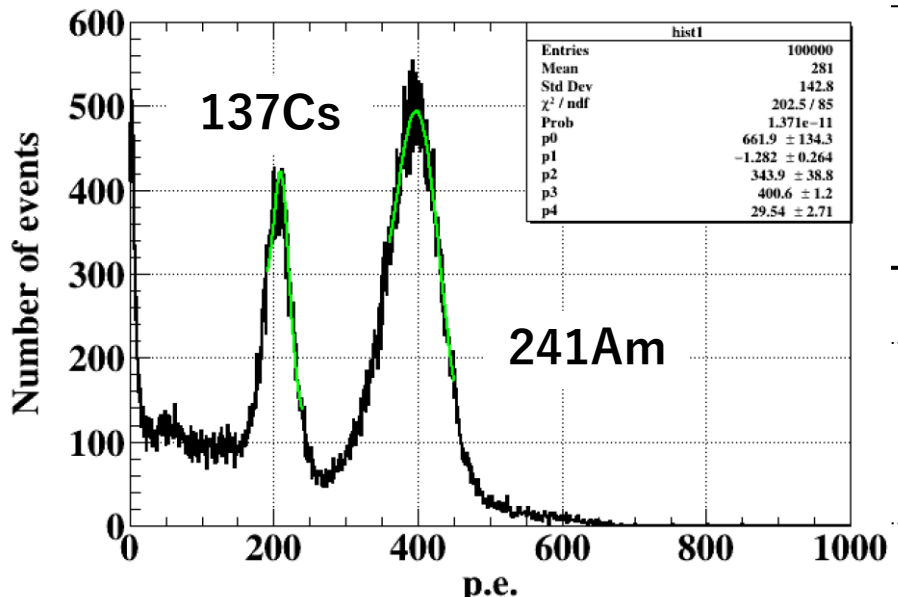
H11934-200-010型
量子効率40% @400nm



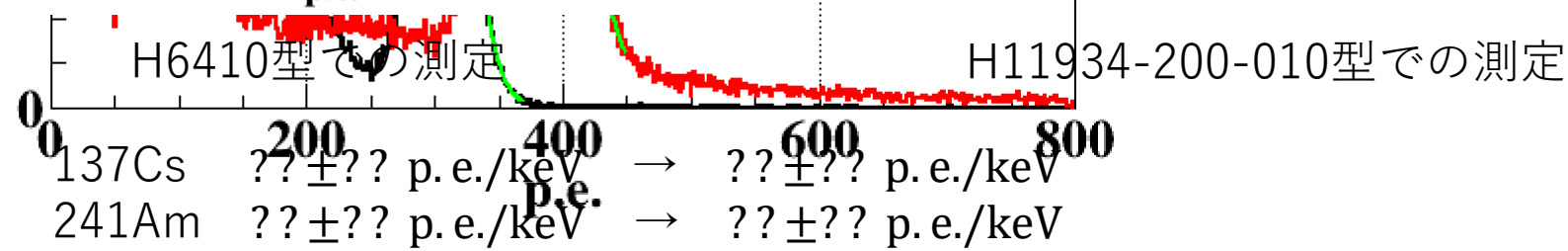
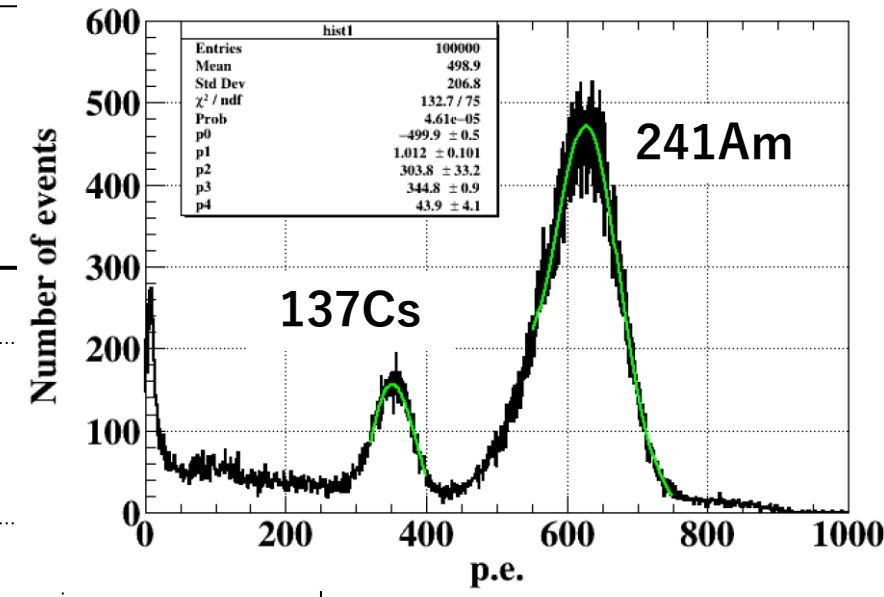
H6410型
量子効率27% @400nm

'H6410 vs H11934' 137Cs

'B plane' 241Am+137Cs



'B plane' 241Am+137Cs

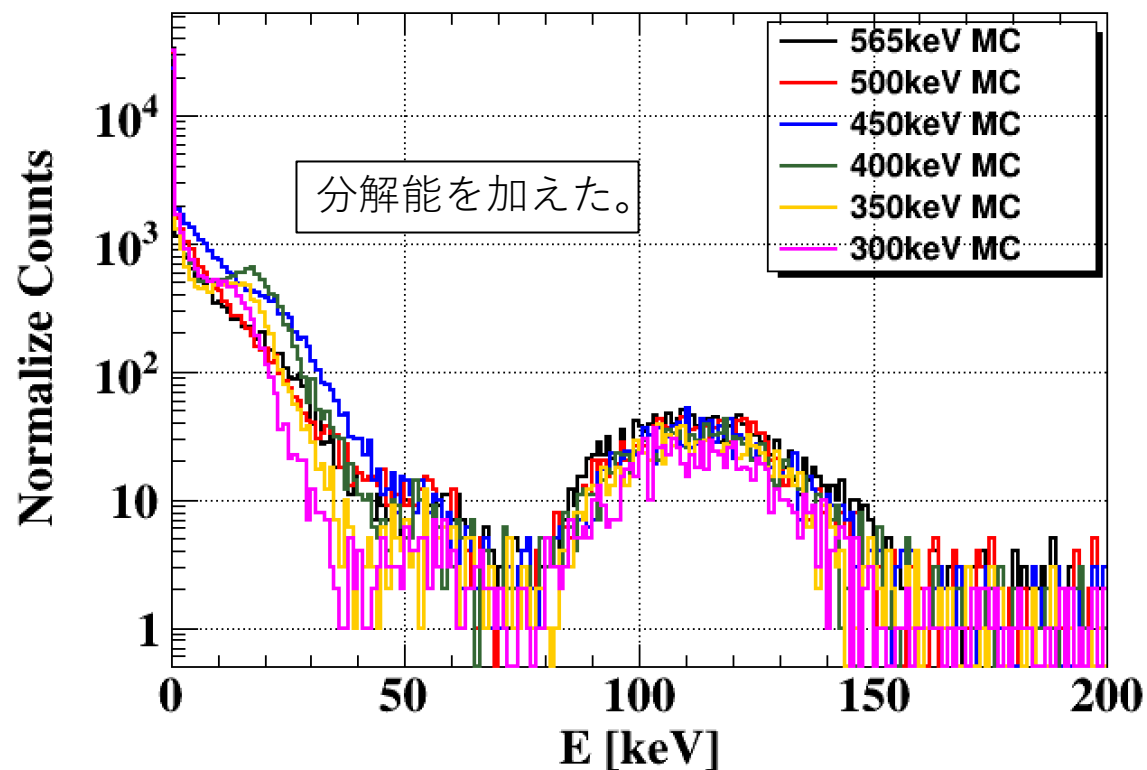


光量も約??倍になっていることを確認した。

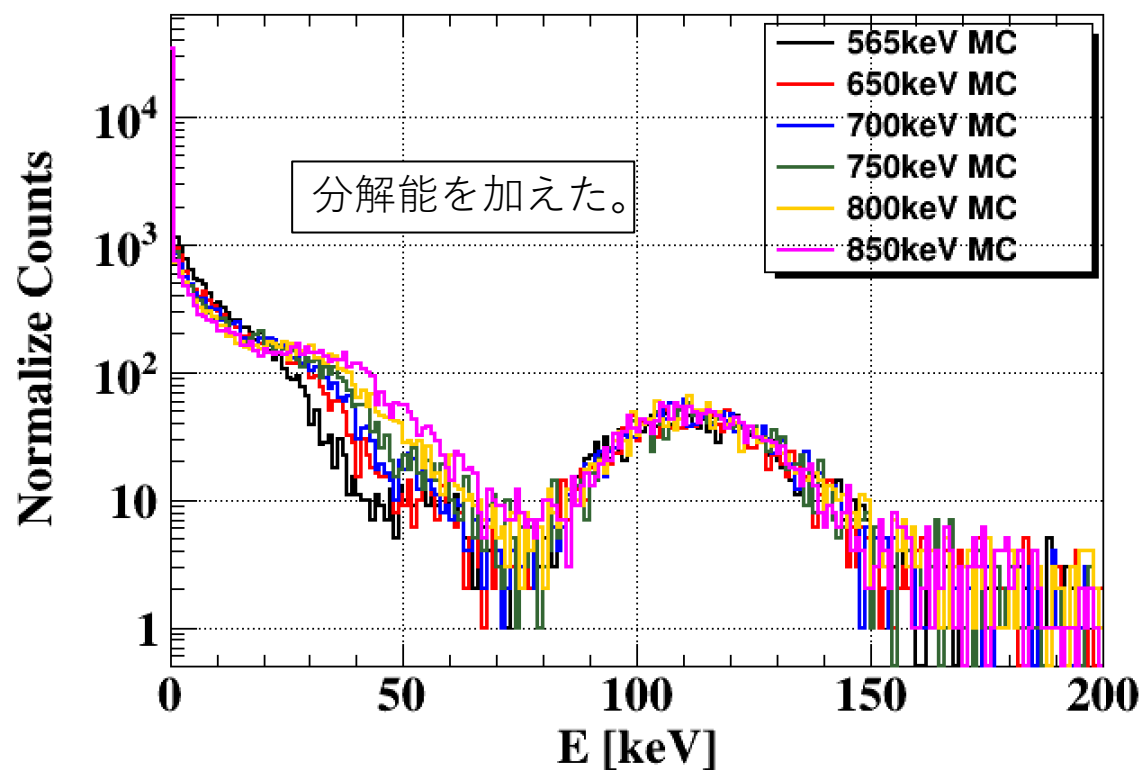
○次回のビーム試験に向けて

- 弾性散乱のエッジが見やすい650-750keVのビームで測定をする予定。
- 今後、産総研と相談してエネルギーを決定する。

Simulation

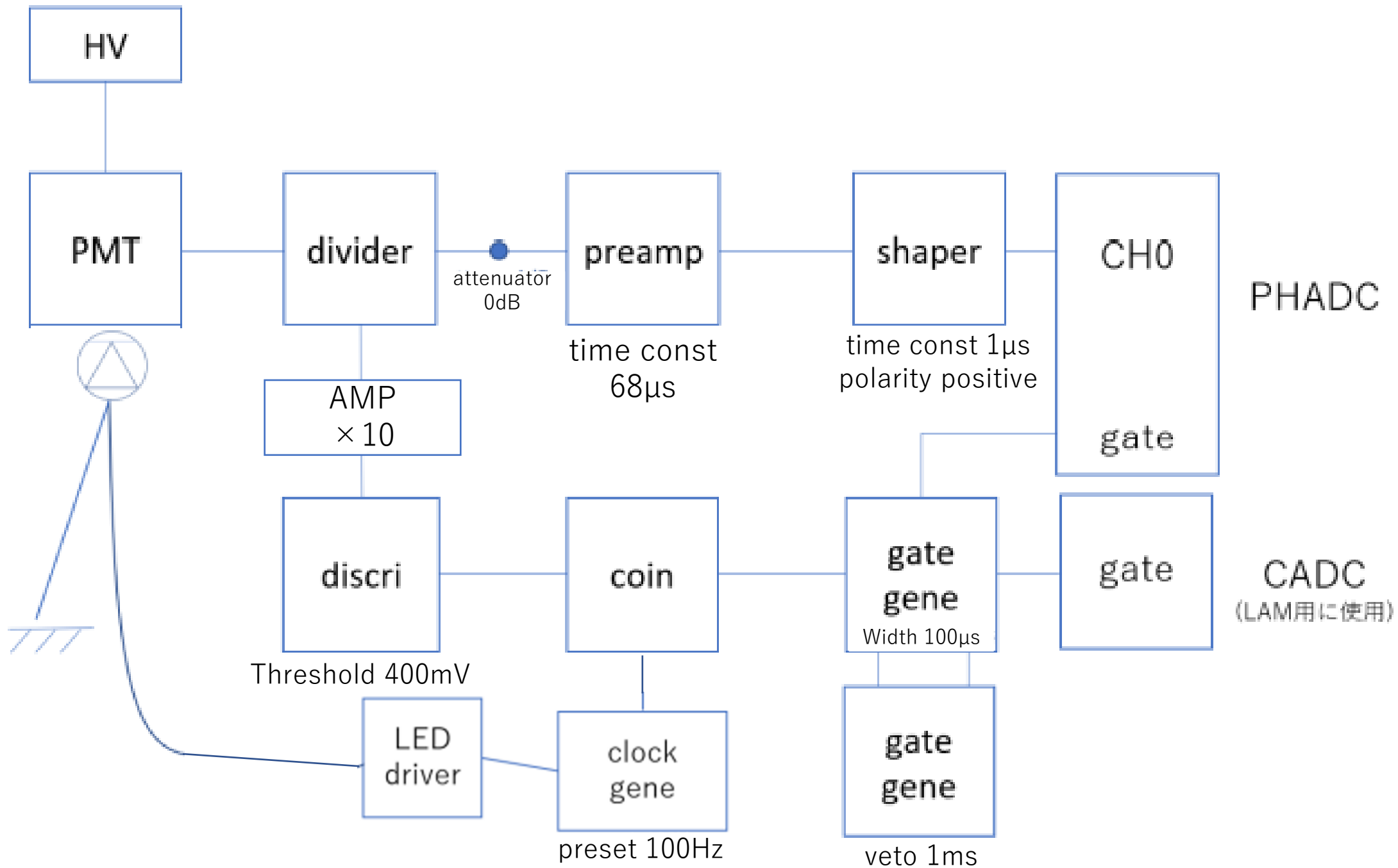


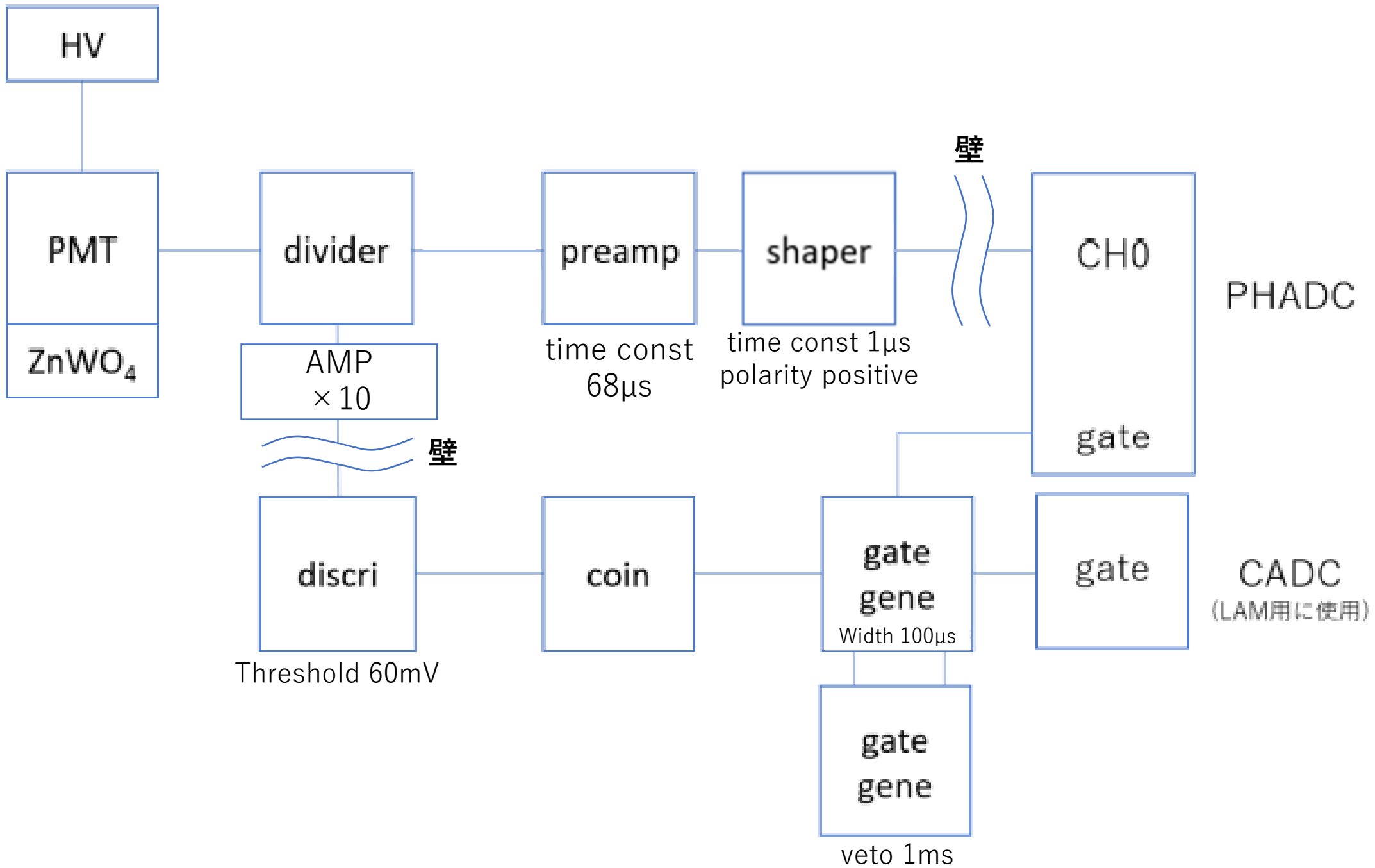
Simulation



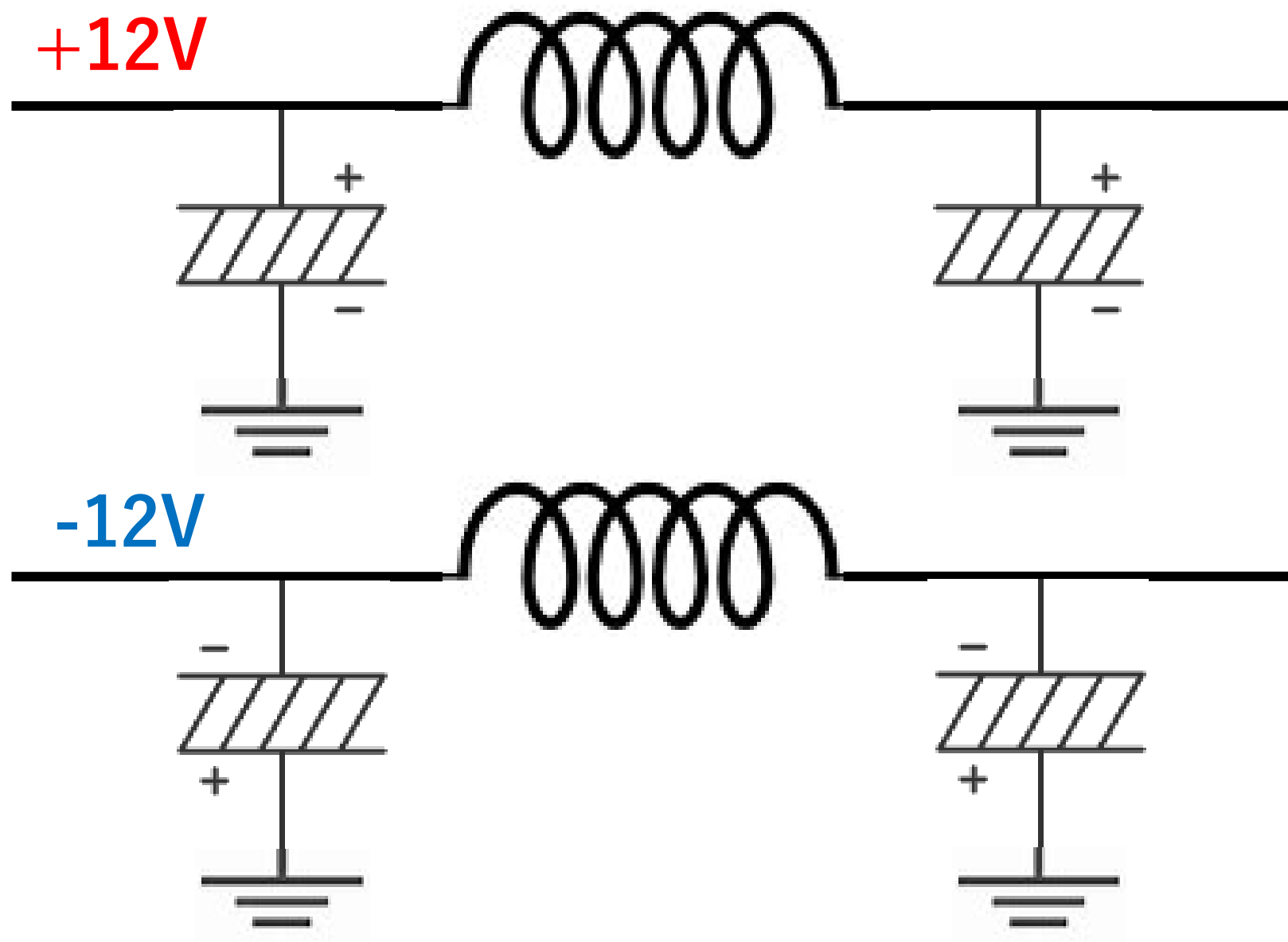
まとめ

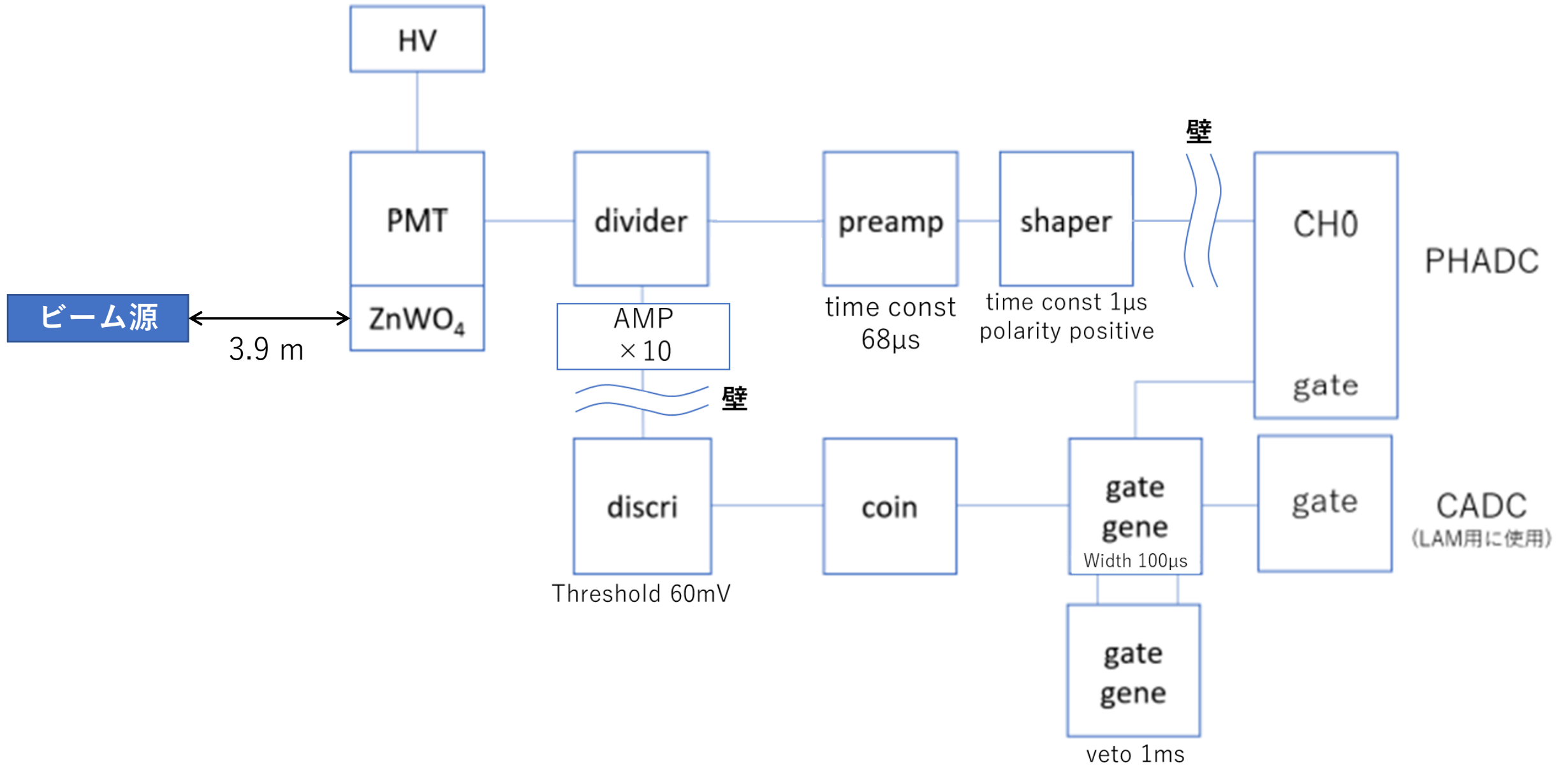
- 結晶の付け外しや時間経過による光量の変化は、結晶の表面状態(反射材+グリース)による影響が大きいことがわかった。
 - 光量の時間変化が少ないアルミ蒸着シートを反射材に採用した。
- プリアンプとフィルターを作成し1p.e.が測定できるようになった。
- 時定数を33 μ sから68 μ sにすることで集光率が向上した。
- ウルトラバイアルカリ光電面のPMTを用いることで、光量が1.5倍となり、先行研究よりも低エネルギーまで観測可能になった。
- SiO₂研磨の結晶にするとさらに光量が???倍になることを確認した。
- γ 線に対する3面の光量差は1%程度で異方性はなかった。
- α 線に対するA-C面の光量差は2.6%で異方性がほとんどなかった。
- α 線に対するA-B面の光量差は7.9%で異方性があった。





プリアンプ時定数の最適化





- 12/21(水)-12/22(木)の2日間で中性子ビーム試験を行った。
- 神戸大と東北大の実験と一緒にビーム試験をさせていただいた。
- 前方に2つの検出器がある状態で行った。
- ビーム源から3.9m離れた位置で行った。

- 写真のように、PMTとZnWO₄をシミュレーション空間に設置し565keVのビームを照射した。

