

暗黒物質方向感度検出器開発のため  
の中性子による $ZnWO_4$ シンチレータ  
の異方性の測定

東京大学 宇宙線研究所

ピーダーセン 珠杏

# 実験の目的

(本研究の目的)

ZnWO<sub>4</sub>結晶を用いて暗黒物質方向感度検出器を開発する

(本講演での実験の目的)

暗黒物質の代わりとして中性子を用いて結晶の各面のクエンチングファクターおよびその異方性を測定し、結晶の暗黒物質方向感度検出器としての原理検証をする

# 暗黒物質とその候補

(暗黒物質の存在証拠)

- 銀河団中の銀河の軌道速度における欠損質量

- 銀河の回転曲線

力学的に計算される速度分布:  $v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$

- 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)

$$\Omega_m h^2 = 0.1415 \pm 0.0019$$

$$\Omega_b h^2 = 0.02226 \pm 0.00023$$

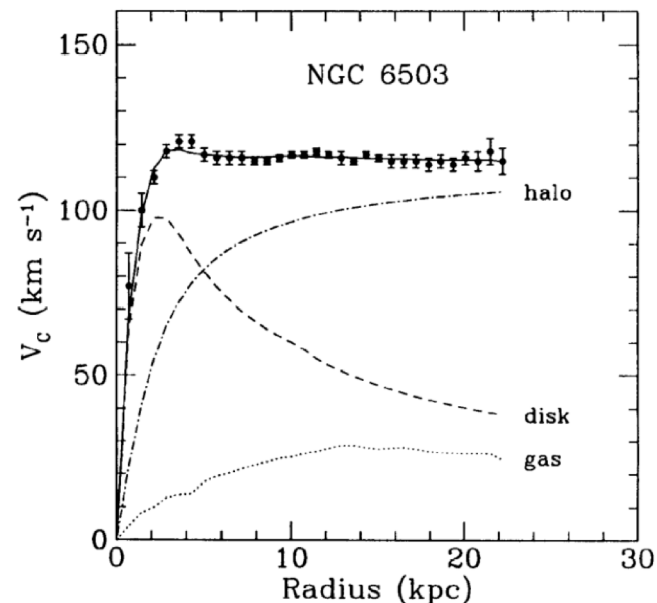
$$\Omega_{DM} = 0.222 \pm 0.026$$

(暗黒物質の候補)

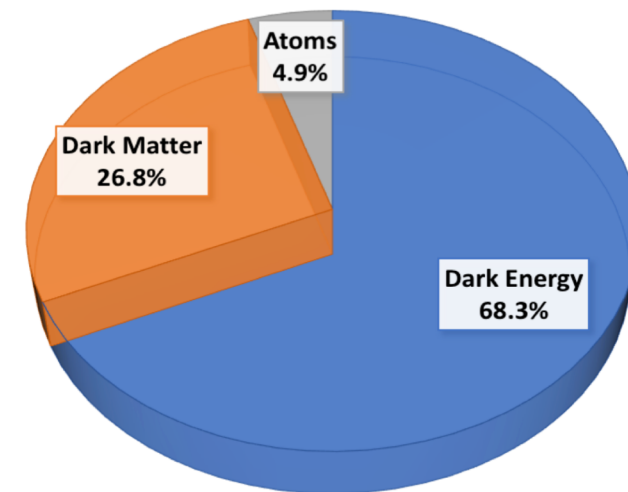
- アクシオン

- WIMPs

超対称性粒子ニュートラリーノ



R. H. Begeman, K. G. Broeils, A. H. Sanders,  
Monthly Notices of the Royal Astronomical  
Society 249, 523 (1991)



プランク衛星の観測による  
宇宙のエネルギー組成図

# WIMP方向感度検出器について

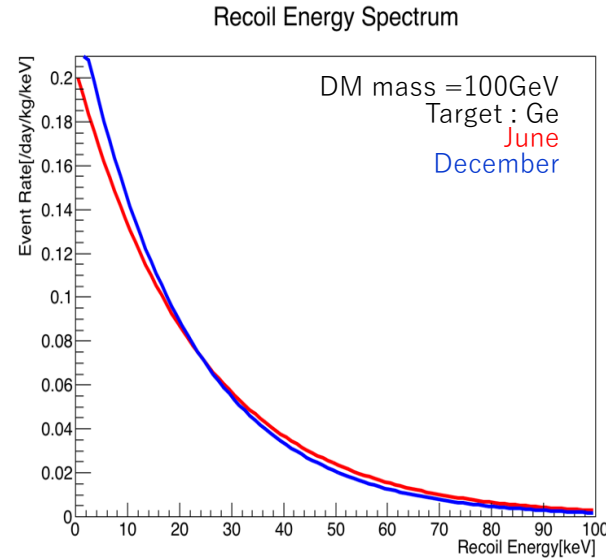
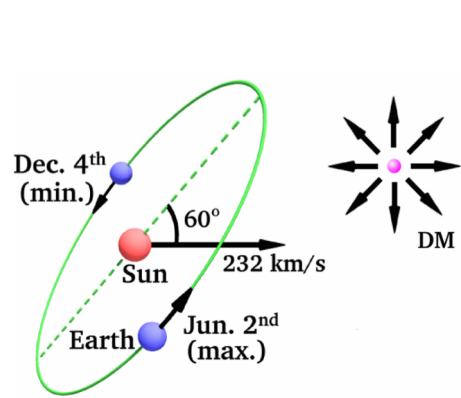
- 通常のWIMP検出器

- WIMPの風によるイベントレート、エネルギースペクトルの年周変化

⇒暗黒物質検出のシグナル

- 銀河回転( $\sim 220\text{km/s}$ ) + 地球の公転( $\sim 30\text{km/s}$ )

⇒反跳エネルギースペクトルの年周変化



- 方向感度検出器

- WIMPの風をより確実なシグナルとして直接捉えられる

- ガスによる方向検出器

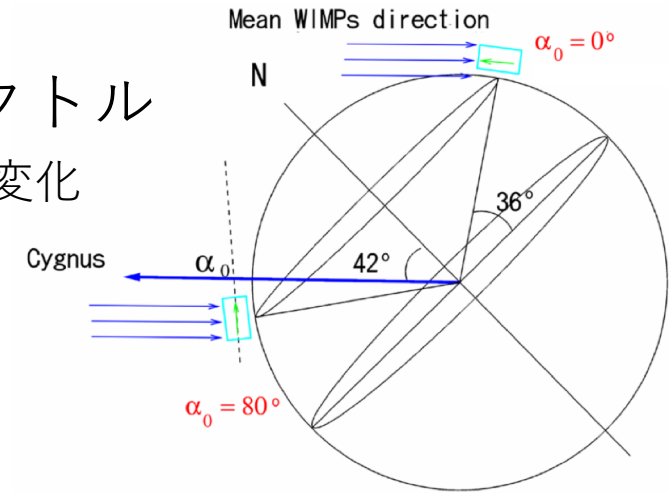
- NEWAGE(神戸大)などが稼働中

- 異方性結晶を使うメリット

- ① 粒子の到来方向についての情報

- ② 日周変化スペクトル

- 地球の自転⇒日周変化



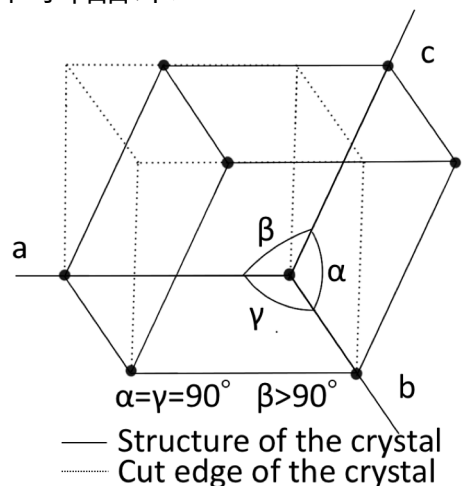
- ③ 結晶の密度

- ガスをを用いた方向感度検出器よりも検出器の質量を稼ぎやすい



# ZnWO<sub>4</sub>結晶について

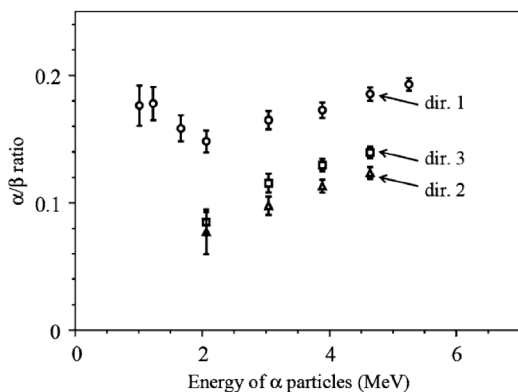
- 結晶構造  
単斜晶系



$\alpha$ [deg.]	$\beta$ [deg.]	$\gamma$ [deg.]
90.0000	90.6210	90.0000
a[Å]	b[Å]	c[Å]
4.96060	5.71820	4.92690

表 2.2 単位格子の長さおよび角度

- ADAMO による異方性の報告



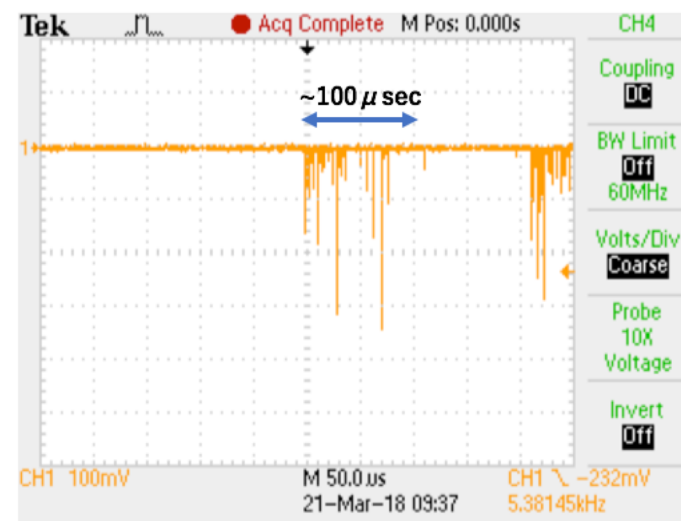
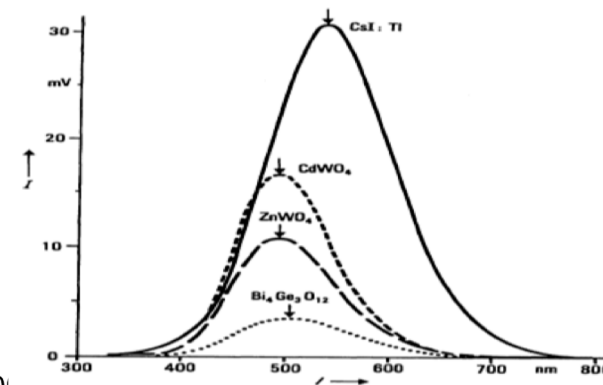
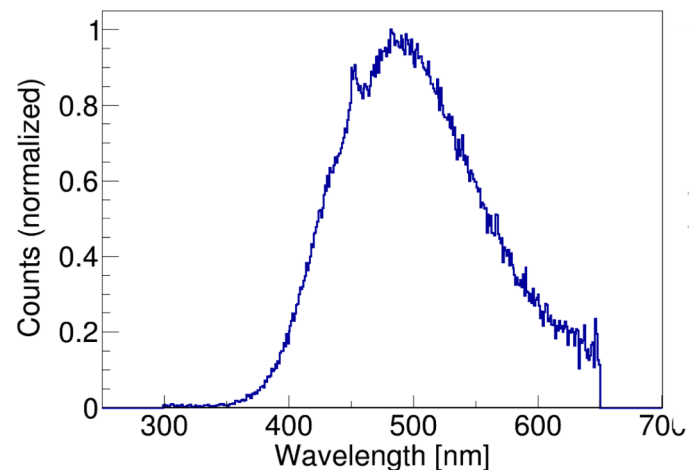
表面から  $\alpha$  線と  $\beta$  線を入射し各面に  $\alpha/\beta$  比最大55%の異方性がみられると報告されている

Eur. Phys. J. C (2013) 73:2276

- シンチレーション光
  - 発光波長 ピーク480nm
  - 減衰時間が長い( $\sim 20 \mu\text{sec}$ )
  - 発光量 Csl(Tl)の1/4程度

H.Sekiya, CYGNUS2017(China), June 14 (2017),

Grabmaier, IEEE TNS 31, 372(1984)

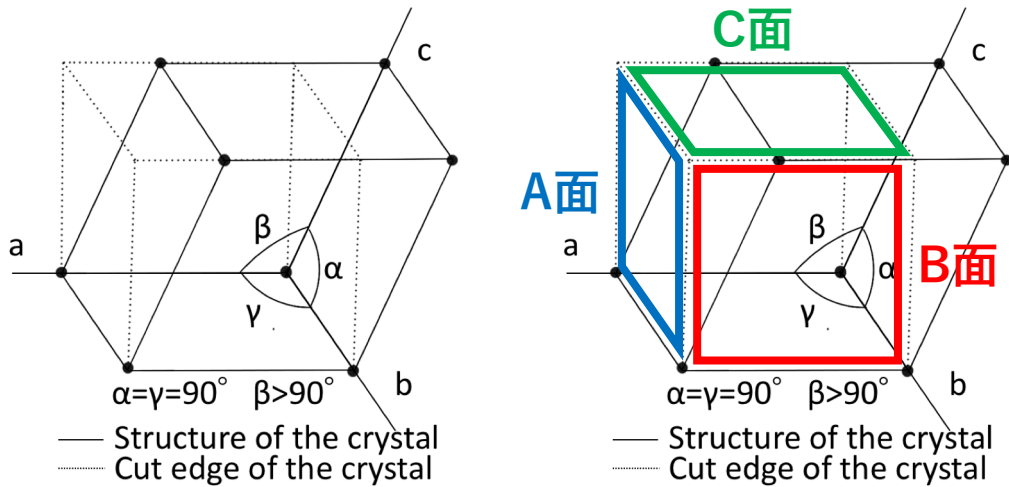


典型的なシンチレーション光波形

# $\alpha$ 線異方性測定実験

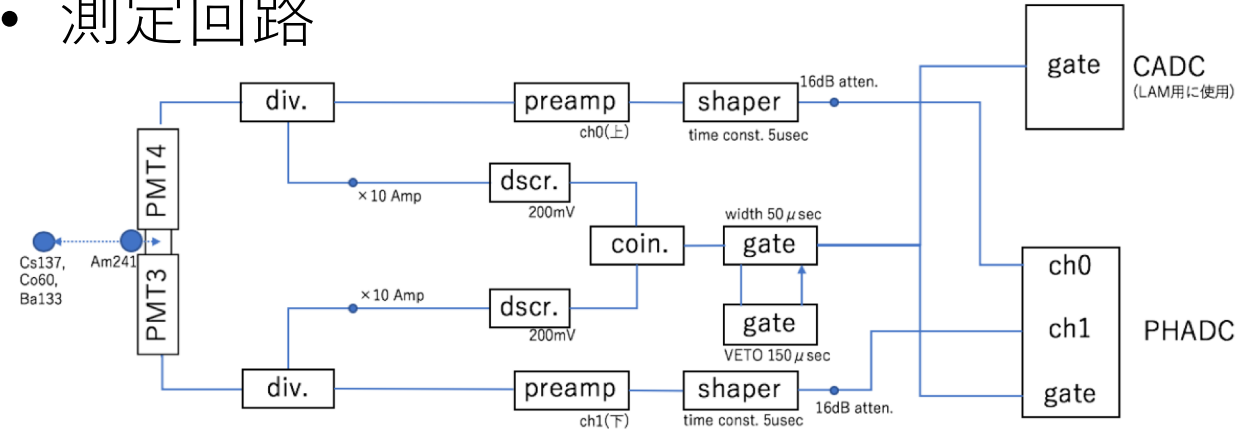
単色中性子線を用いた実験の予備実験として、まず  $^{241}\text{Am}$   $\alpha$  線 (5.486MeV  $\cdots$ 84.5%、5.443MeV  $\cdots$ 13.0%、5.388MeV  $\cdots$ 1.4%) に対するクエンチングファクター (以下QF) の測定を行なった。

## • 本実験で用いた結晶



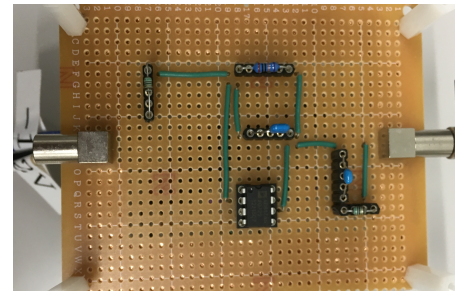
東北大の金属材料研究所にてA面、B面、C面が  $1^\circ$  以下の精度で上図のように同定された結晶を用いて実験を行なった。  
(5軸X線回折ATX-G RIGAKU)

## • 測定回路

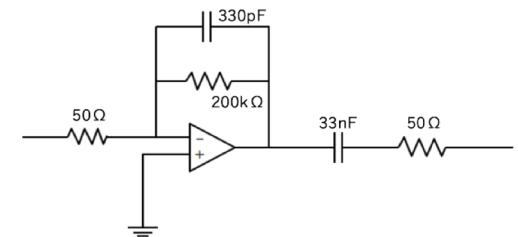


## • 積分回路

長い減衰時間 ( $\sim 20 \mu\text{sec}$ ) に合わせてプリアンプを自作した (積分時定数  $66 \mu\text{sec}$ )

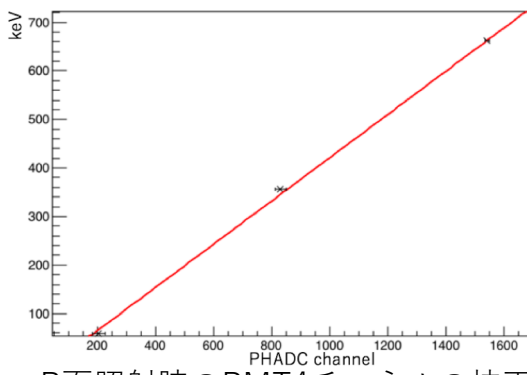
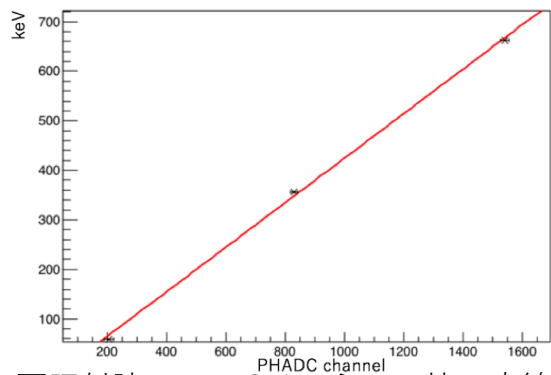


Preamp circuit



# α線異方性測定結果

- γ線校正結果

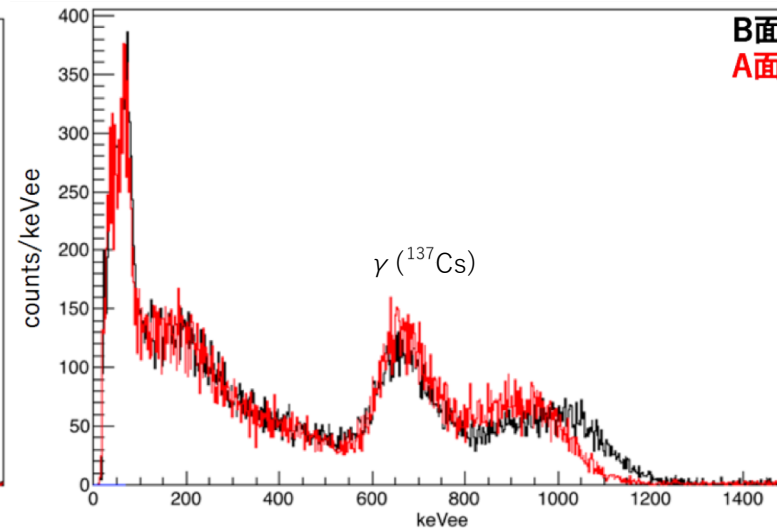
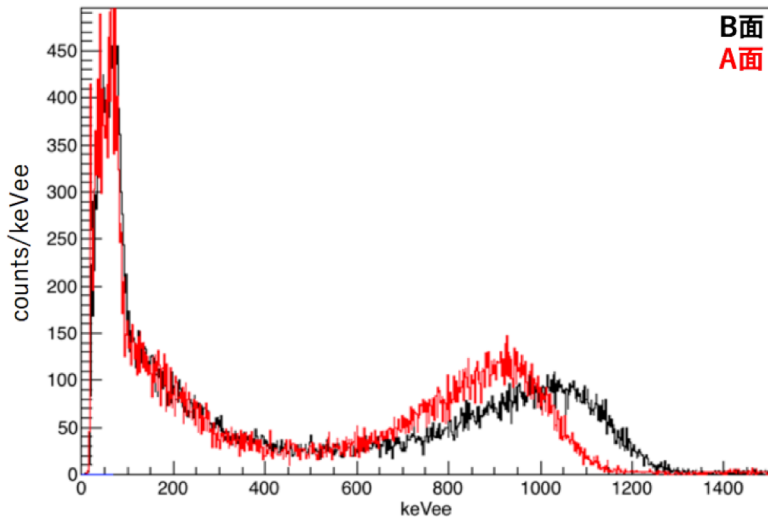


各面からの信号をそれぞれkeVeeに校正し、PMTの増幅率の差を補正した上で平均をとって解析した

	ピークエネルギー (keVee)	/B	$\gamma(662\text{keV})/\alpha$
B面	$1031.3 \pm 30.8$	1.00	$0.64 \pm 0.05$
A面	$942.2 \pm 33.0$	$0.92 \pm 0.06$	$0.70 \pm 0.05$

表 5.1 各面の  $\gamma/\alpha$  比の算出

- 異方性測定結果



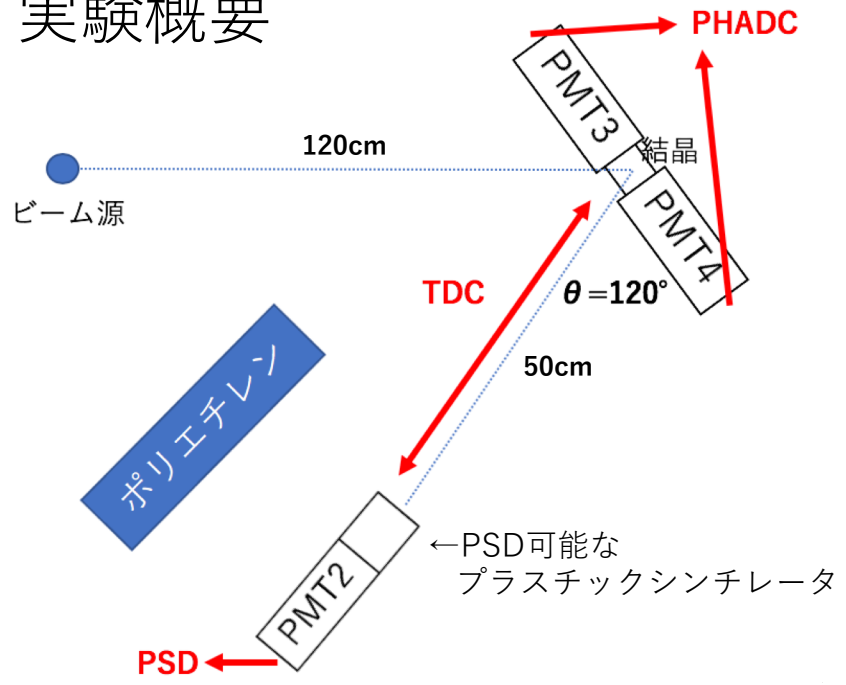
照射面	クエンチングファクター	誤差	$Q_B$ に対する相対値の比率
B面	0.189	$\pm 0.005$	0.000
A面	0.162	$\pm 0.005$	0.141

表 5.2 各面の  $\alpha$  線に対するクエンチングファクターの算出

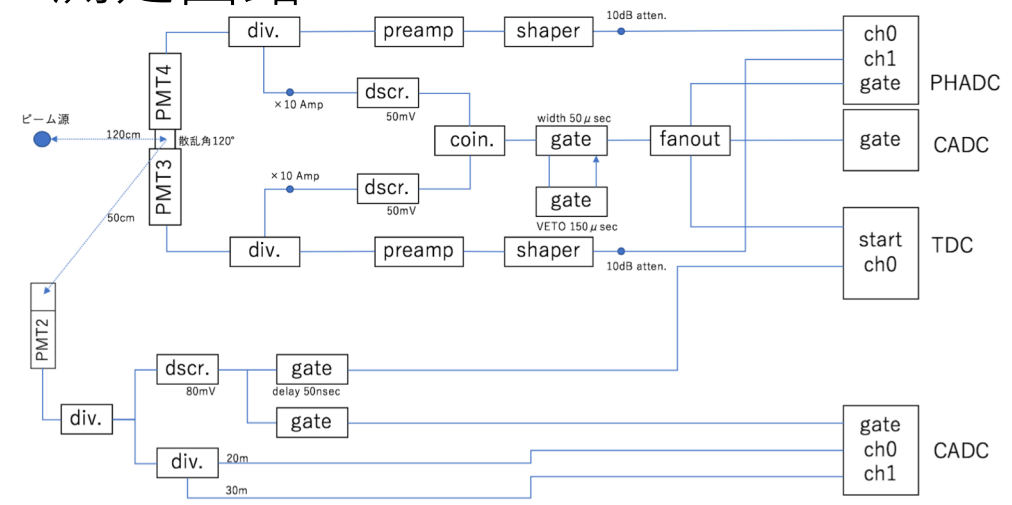
**-B面、A面のQFはそれぞれ0.189、0.162であり、14.1%の異方性が確認できた。**

# 中性子ビーム実験概要

- 実験概要



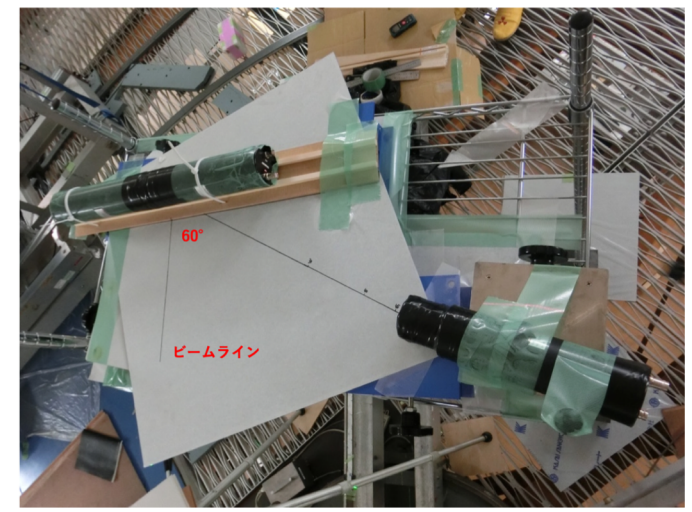
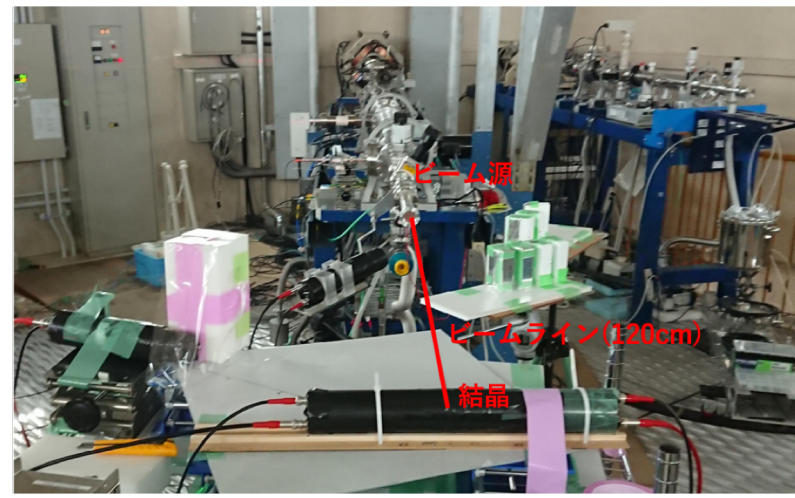
- 測定回路



- ビーム源と結晶、検出器の配置の様子

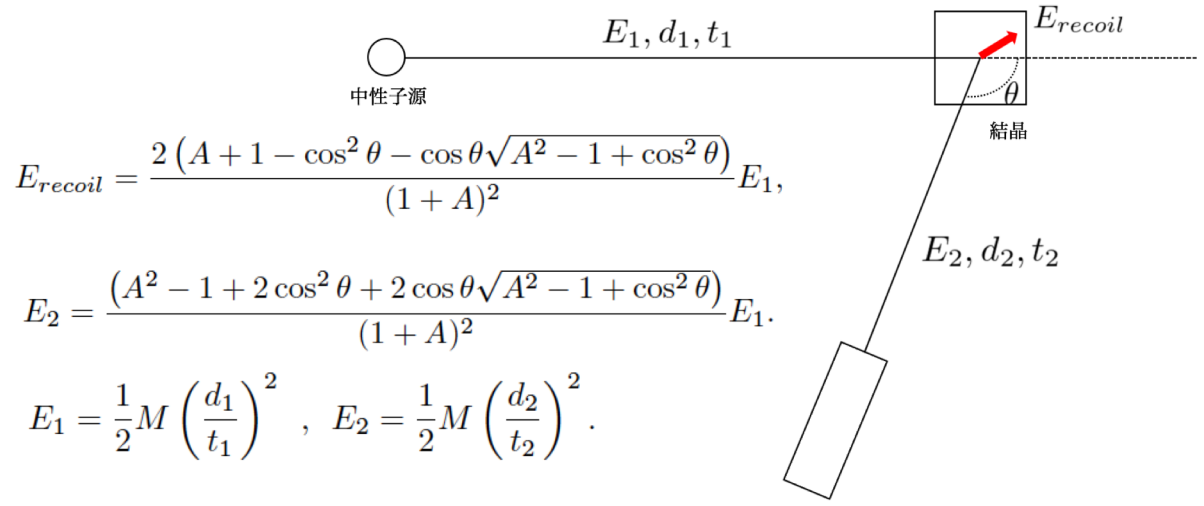
(step1) PHADC、エネルギー校正用データの測定

(step2) TDC、PSD、PHADCの測定



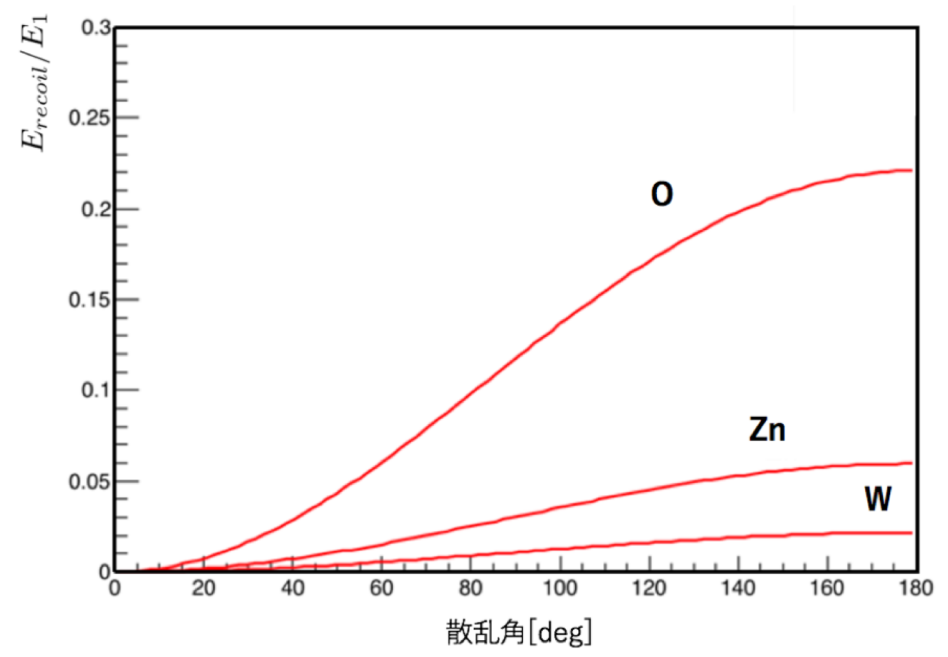
# 中性子による原子核反跳測定の詳細

- 中性子散乱の概要図



中性子源～結晶、結晶～散乱後の検出器のTOFと  $E_{visible}$  を測定することでクエンチングファクターを算出できる

- 原子核反跳エネルギースペクトル



中性子が各原子核により散乱した場合の  $E_{recoil}/E_1$  の散乱角依存性  
 → 検出器のエネルギー閾値を考えるとZn,W原子核との散乱イベントは検出できないと考えられる



# 照射したビームについて

- 照射条件

(使用したビーム)

産業技術総合研究所の放射能中性子標準研究グループの  
4MV ペレトロン加速器

(利用した反応)

1.7MV加速陽子とトリチウム(T)によるT(p,n)反応

(照射時間)

2018年10月24日の11時~21時、合計8時間31分

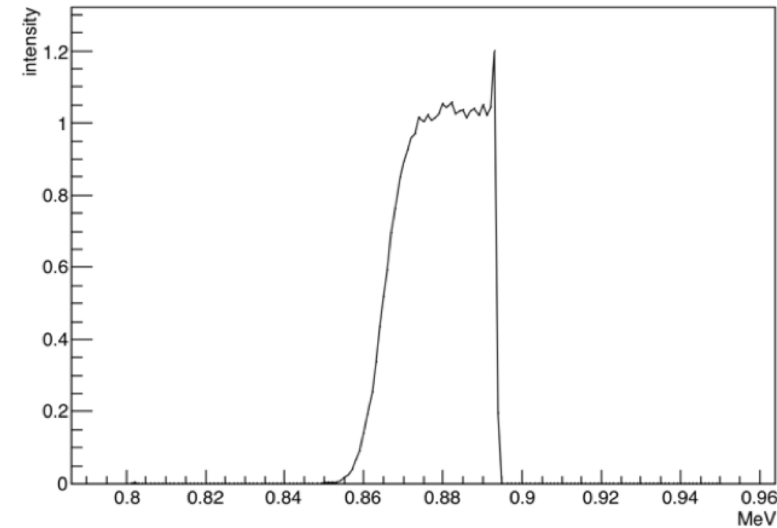
(測定内容)

2時間程度の照射を4回行った(ビーム1~ビーム4)。  
それぞれの測定ではビームラインに垂直となる面を  
B面、A面、B面、A面として照射した。

(ビームフラックス)

ビーム源から120cm離れた地点で、結晶の面積あたりに  
受けるビームのフラックスは $\sim 861 \text{neutron}/(2\text{cm})^2/\text{s}$

- ビームのエネルギースペクトル



0.885MeVを中心に $\pm 0.05\text{MeV}$ 程度の幅を持つ  
ほぼ単色なスペクトル

- 予想される反跳エネルギー

中性子のエネルギー $0.885\text{MeV}$ 、散乱角 $120^\circ$ では

O原子核反跳エネルギー :  $0.151\text{MeV}$

Zn原子核反跳エネルギー :  $0.039\text{MeV}$

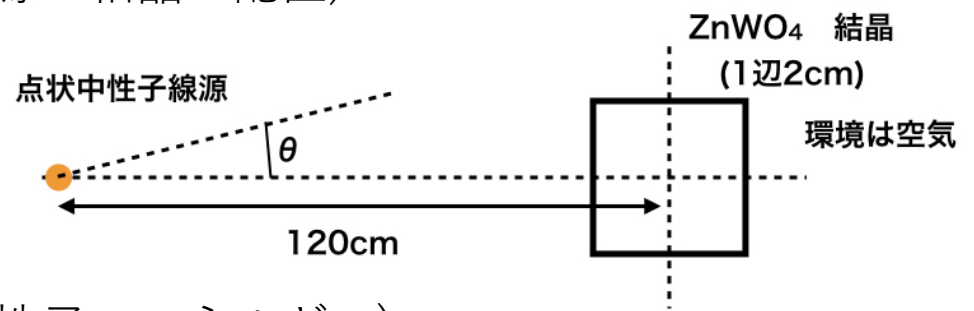
W原子核反跳エネルギー :  $0.014\text{MeV}$

# シミュレーション

- モンテカルロシミュレーション

QFを算出するため、Geant4を用いた $E_{recoil}$ のモンテカルロシミュレーションを行い、測定されたエネルギースペクトルと比較してQFを算出する。

(線源と結晶の配置)



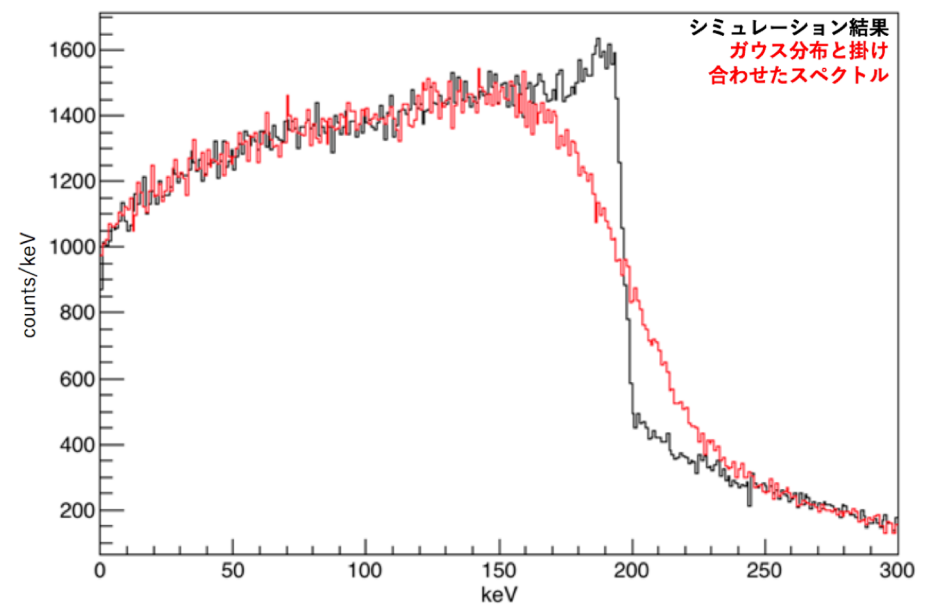
(中性子のエネルギー)

0.865MeV~0.895MeVの一様なスペクトル

(イベント数)

10万発

- シミュレーション結果

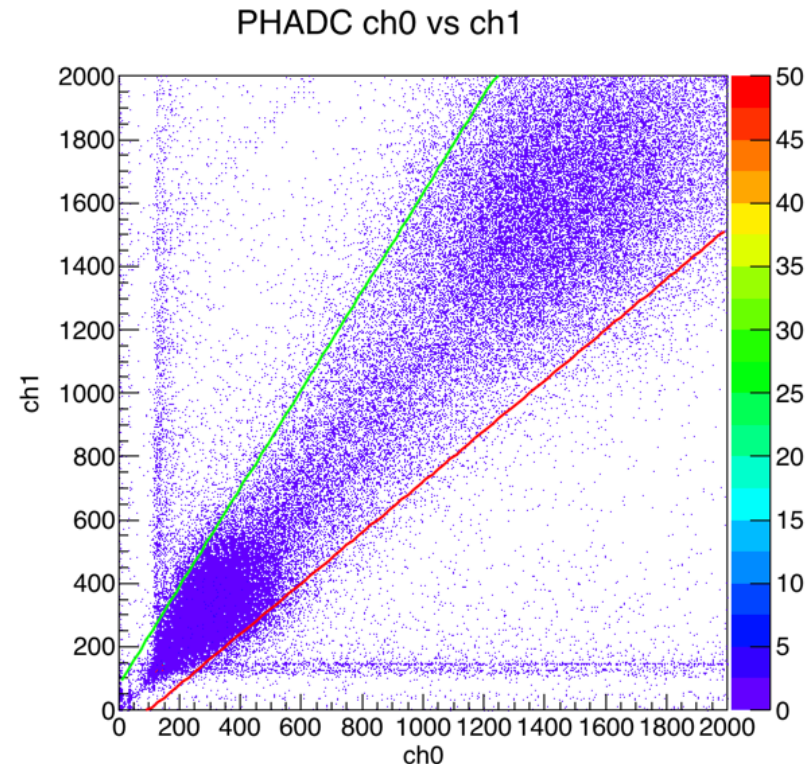


- シミュレーション結果に対して、光電子数の統計誤差を考慮したスペクトルが赤線で描かれたヒストグラムである。
- シミュレーション結果を見ると、197keVが酸素原子核反跳の最大エネルギーであり、エッジが確認できる。

# (step1)解析方法

- データの選択

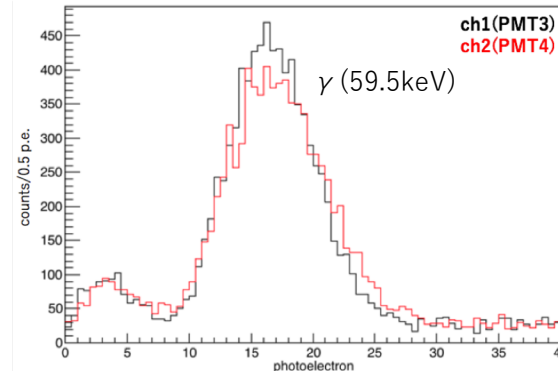
得られた結果はすべて両面PMTの出力値の散布図を描き、2本の直線間に含まれるデータのみを解析に用いた。



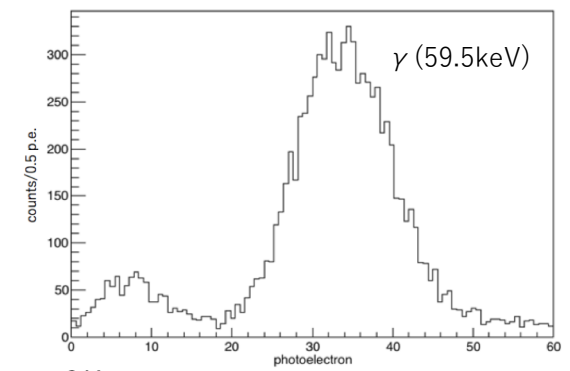
ビーム3(B面)測定結果の散布図

- デジタル値から光電子数への変換

$\gamma$ 線源を照射して測定したエネルギー校正用のデータをもとに、ビーム1~4の測定で得られたデジタル値を各面のPMTで検出した光電子数に変換し、両面の測定結果を足し合わせて解析を行った。



$^{241}\text{Am}$  照射時の両面PMTで検出された光電子数



$^{241}\text{Am}$  照射時の両面PMTで検出された光電子数の和

$\gamma$ 線源	ピークエネルギー (keV)	光電子数	1keV あたりの光電子数
$^{133}\text{Ba}$	81.0	$45.2 \pm 3.5$	$0.572 \pm 0.044$
$^{137}\text{Cs}$	32.2	$16.9 \pm 1.9$	$0.593 \pm 0.064$
$^{241}\text{Am}$	59.5	$33.8 \pm 2.9$	$0.568 \pm 0.049$

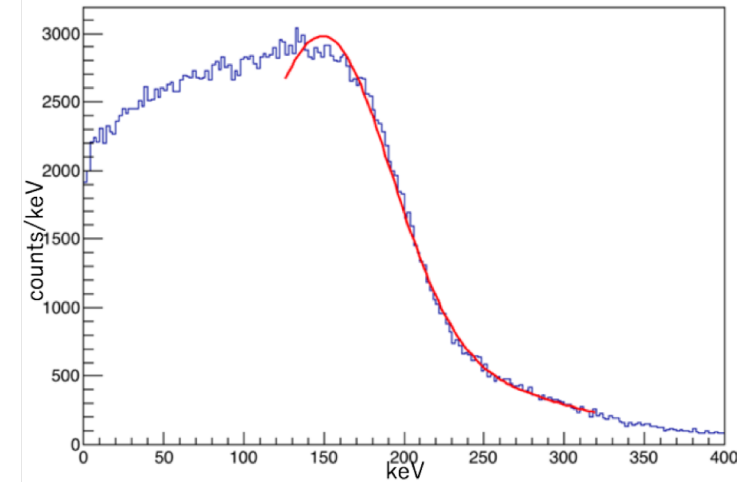
表 5.4  $\gamma$ 線源のピークエネルギーと光電子数の校正

各 $\gamma$ 線源の1keVあたりの光電子数の誤差は数%程度であり、このエネルギー範囲で線形なエネルギー応答であることが確認できる。



# (step1) フィッティング

- シミュレーション結果のフィッティング

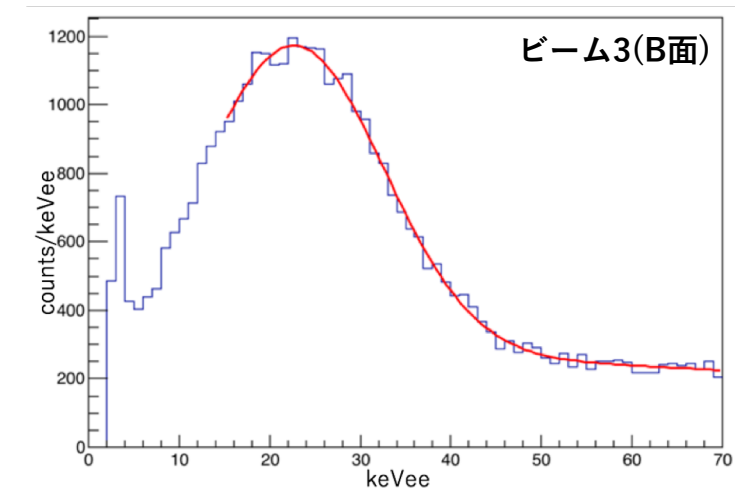


(1) 150keVから高エネルギー側にあるスロープの形に合うようフィットした。

$$(\text{フィット式: } y = p_0 \exp\left\{-\frac{(x-p_1)^2}{p_2^2}\right\} + p_3x + p_4)$$

(2) (1)のフィット結果をもとにピーク位置から $-0.7\sigma \sim 4\sigma$ の範囲で再度フィットした。

- 測定結果のフィッティング



-シミュレーション結果のフィットと同様の方法でフィットした

-低エネルギー側でスロープの形状が一致しない原因として検出効率の低下、QFのエネルギー依存性が考えられる

- フィット結果

$p_1(\text{keV})$	$p_2(\text{keV})$
$149.754 \pm 3.602$	$49.468 \pm 3.925$

表 5.5 シミュレーション結果の1度目のフィット結果

$p_1(\text{keV})$	$p_2(\text{keV})$
$151.242 \pm 4.600$	$41.033 \pm 3.378$

表 5.6 シミュレーション結果の2度目のフィット結果

ビーム	照射面	$p_1(\text{keVee})$	$p_2(\text{keVee})$
ビーム 1	B 面	$23.459 \pm 0.242$	$8.618 \pm 0.190$
ビーム 2	A 面	$18.744 \pm 0.186$	$9.760 \pm 0.108$
ビーム 3	B 面	$23.305 \pm 0.175$	$9.150 \pm 0.129$
ビーム 4	A 面	$19.038 \pm 0.150$	$8.033 \pm 0.139$

表 5.7 ビーム 1~4 測定結果の1度目のフィット結果

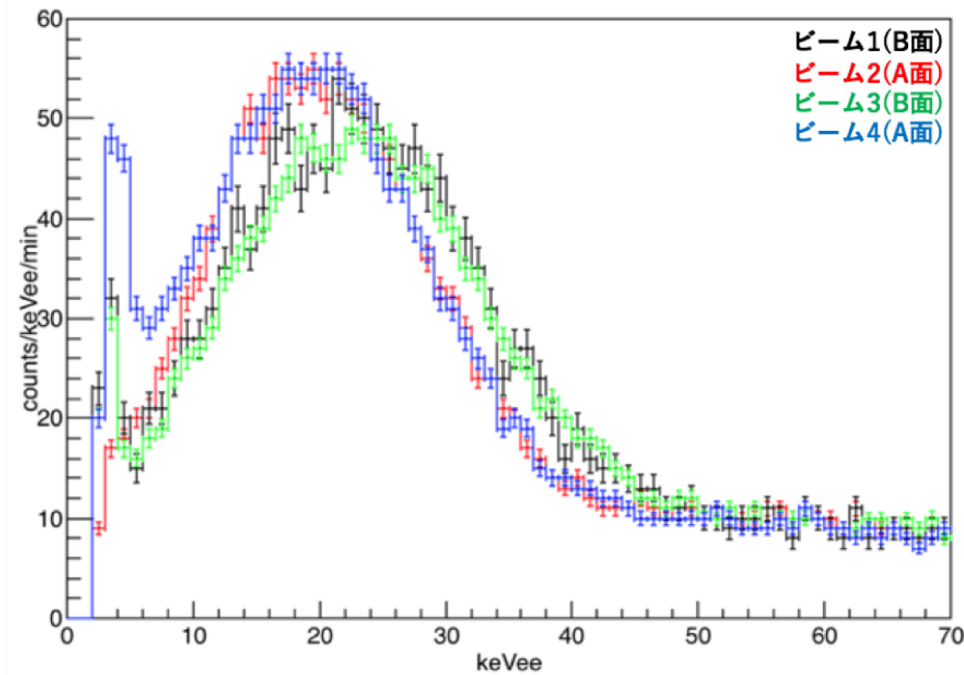
ビーム	照射面	$p_1(\text{keVee})$	$p_2(\text{keVee})$
ビーム 1	B 面	$22.673 \pm 0.401$	$9.813 \pm 0.190$
ビーム 2	A 面	$19.500 \pm 0.217$	$8.699 \pm 0.215$
ビーム 3	B 面	$22.732 \pm 0.210$	$8.822 \pm 0.215$
ビーム 4	A 面	$19.651 \pm 0.178$	$8.711 \pm 0.216$

表 5.8 ビーム 1~4 測定結果の2度目のフィット結果

# (step1)異方性測定結果

- 異方性測定結果

ビーム1~4で測定された中性子の $E_{visible}$ スペクトルを下図に示す。  
ただし分ごとのイベント数で規格化してある。



ビーム	照射面	クエンチングファクター	$Q_3$ に対する相対値の比率
ビーム 1	B 面	$0.150 \pm 0.003$	0.000
ビーム 2	A 面	$0.129 \pm 0.002$	0.140
ビーム 3	B 面	$0.150 \pm 0.002$	0.000
ビーム 4	A 面	$0.129 \pm 0.002$	0.140

表 5.9 各面のクエンチングファクターの算出

1回目と2回目の中性子線に対するB面、A面それぞれの~150keV酸素原子核反跳のQFは一致した。  
B面、A面のQFはそれぞれ0.150、0.129であり14.0%の異方性を確認できた。

# まとめと今後の課題

- $^{241}\text{Am}$ を用いたQF測定結果について

$^{241}\text{Am}$  5.5MeV  $\alpha$ 線に対するB面、A面のQFの測定結果はそれぞれ0.189、0.162と求まり、14.0%の異方性が確認できた。

- 単色中性子測定ビームを用いたQF測定結果について

ビーム1~4までの測定結果とシミュレーション結果を比較し、 $\sim 150\text{keV}$ 酸素原子核散乱に対するB面、A面のQFがそれぞれ0.150、0.129と求まり、14.1%の異方性が確認できた。これにより世界で初めて $\text{ZnWO}_4$ 結晶の中性子に対するQFとその異方性を測定し、暗黒物質方向感度検出器としての原理検証ができた。

- 今後の課題

-3月に2日間のビーム時間を確保しており、改めて同様のTOF測定を行う。

-2面の比較だけでなく結晶のQFの散乱角依存性およびより低エネルギーでのエネルギー依存性を測定し、暗黒物質方向感度検出器としての評価を行う。

バックアップ

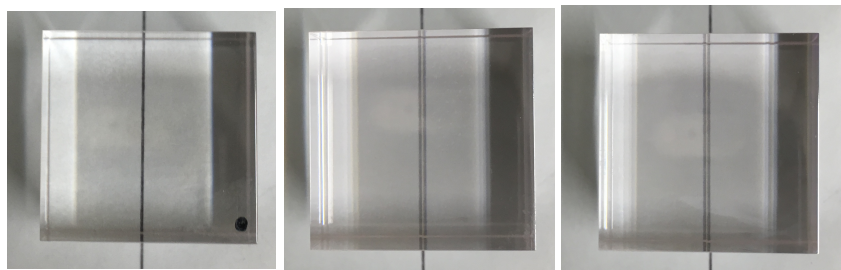
# 【3章】 $\alpha$ 線異方性測定

$\alpha$  線源とそれぞれの  $\gamma$  線源を同時に入射する実験を異なる3面について行った。

$\alpha$  線源としては $^{241}\text{Am}$ のピーク(5.486MeV …84.5%、5.443MeV…13.0%、5.388MeV…1.4%)を用いた

- 3章・4章の実験で用いた結晶  
(複屈折)

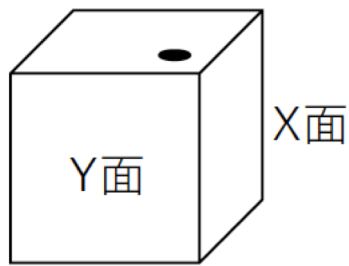
B面(光学軸に垂直)



B面

X面

Y面

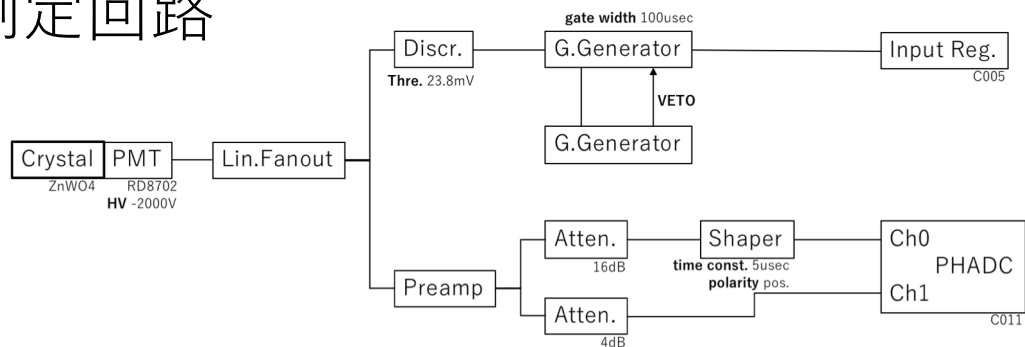


-Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry(Russia)で製作された2cm角の結晶を使用

-なるべく結晶軸と一致するように立方体にカットした

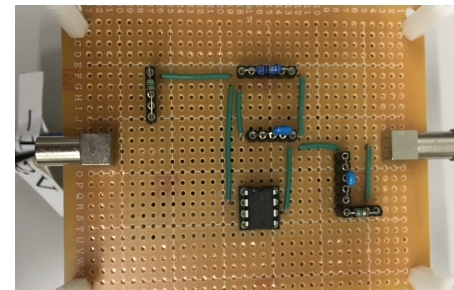
-ADAMOの結晶と同じインゴットから切り出したもの

- 測定回路

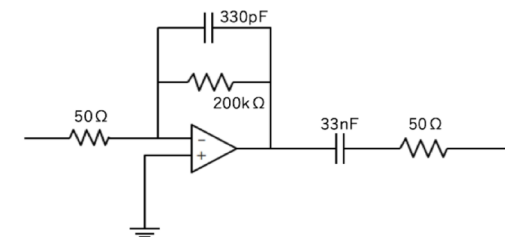


- 積分回路

長い減衰時間( $\sim 20 \mu\text{sec}$ )に合わせてプリアンプを自作した(積分時定数 $66 \mu\text{sec}$ )



Preamp circuit



- $\gamma$  線校正

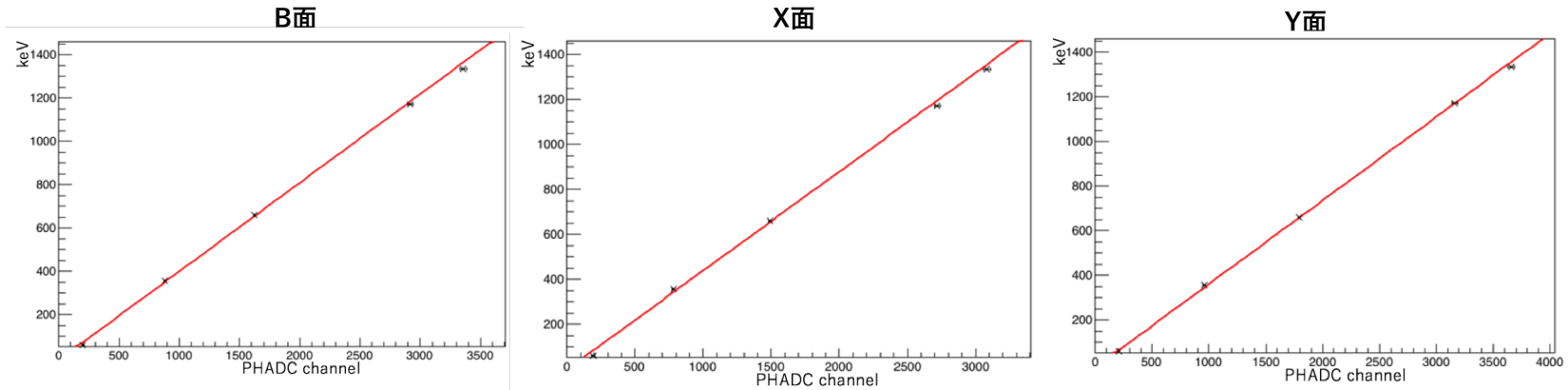
下の表に与えた  $\gamma$  線源をエネルギー校正用に用いた。

$\gamma$ 線源	ピークエネルギー (keV)	放射能 (kBq)
$^{60}\text{Co}$	1173,1333	44.5
$^{133}\text{Ba}$	356	17.4
$^{137}\text{Cs}$	662	74.1
$^{241}\text{Am}$	59.5	2.9

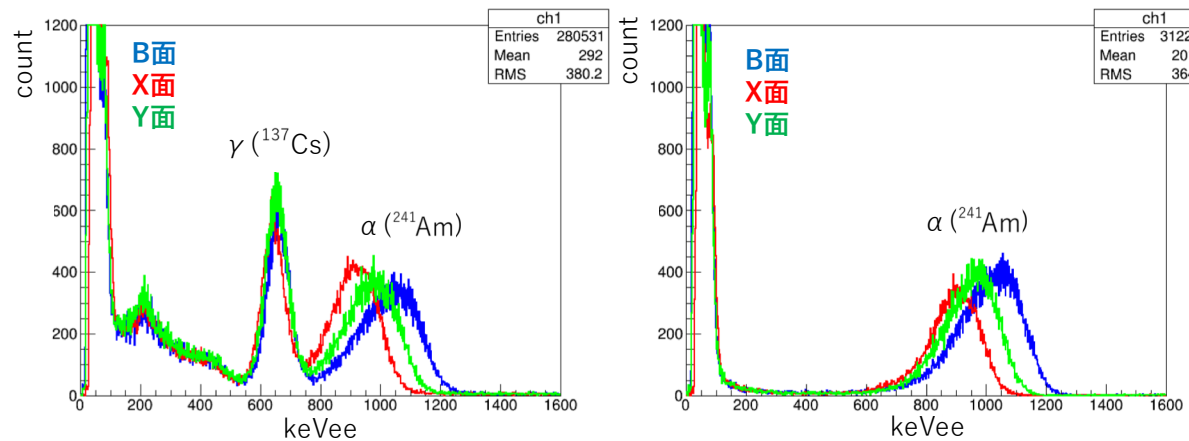
表 3.2 使用した線源とピークエネルギー

# 【3章】 $\alpha$ 線異方性結果

- $\gamma$  線校正結果



- $\alpha$  線異方性測定結果



	5.5MeV $\alpha$ 線に対する ピークエネルギー (keVee)	/ B 面	$\gamma(662\text{keV}) / \alpha$
B 面	$1011.2 \pm 25.2$	1.00	$0.65 \pm 0.04$
X 面	$941.7 \pm 28.2$	$0.93 \pm 0.03$	$0.70 \pm 0.04$
Y 面	$987.0 \pm 22.1$	$0.98 \pm 0.02$	$0.67 \pm 0.04$

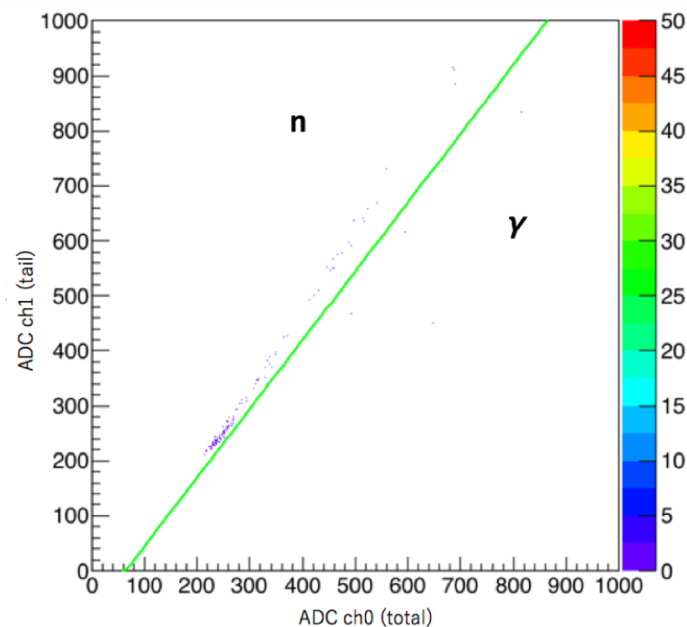
表 3.3 異方性の測定結果

**$\gamma$  線に対する異方性はなく、 $\alpha$  線に対しては最大8%程度の異方性を示すことが確認できた**

# 【5章】 (step2)TOF測定結果

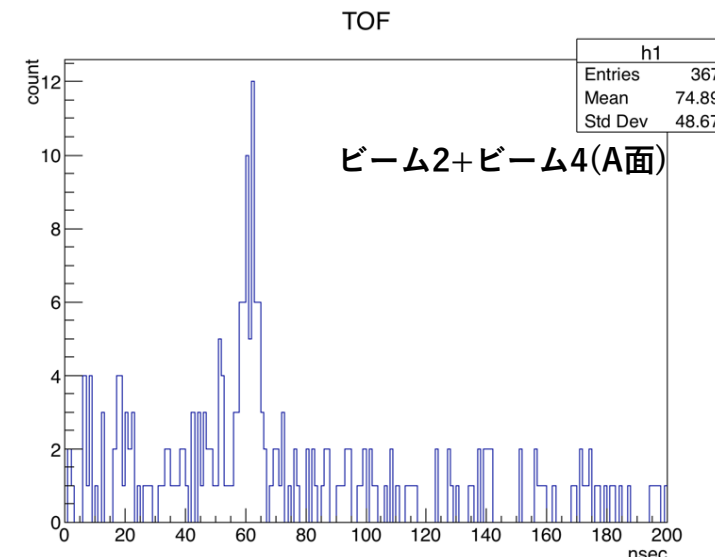
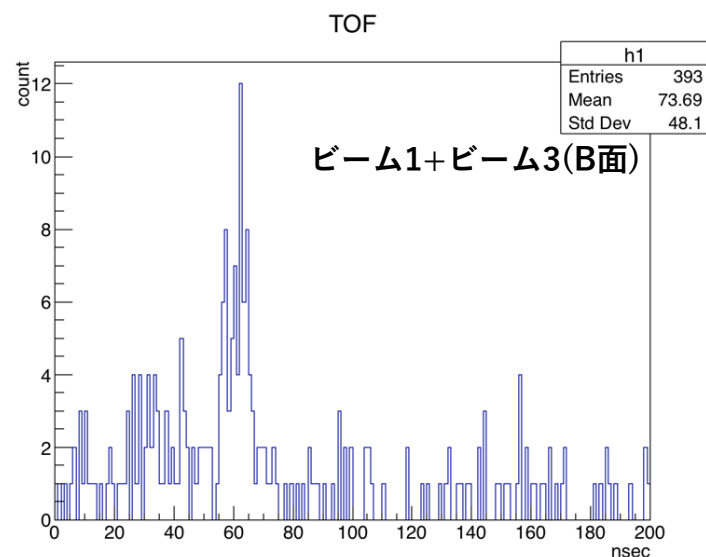
## • 散乱後イベントのPSD結果

ビーム3でのPSD結果を下図に示す。  
中性子イベントが優位なクリーンな環境であったことがわかる。



## • TOF測定結果

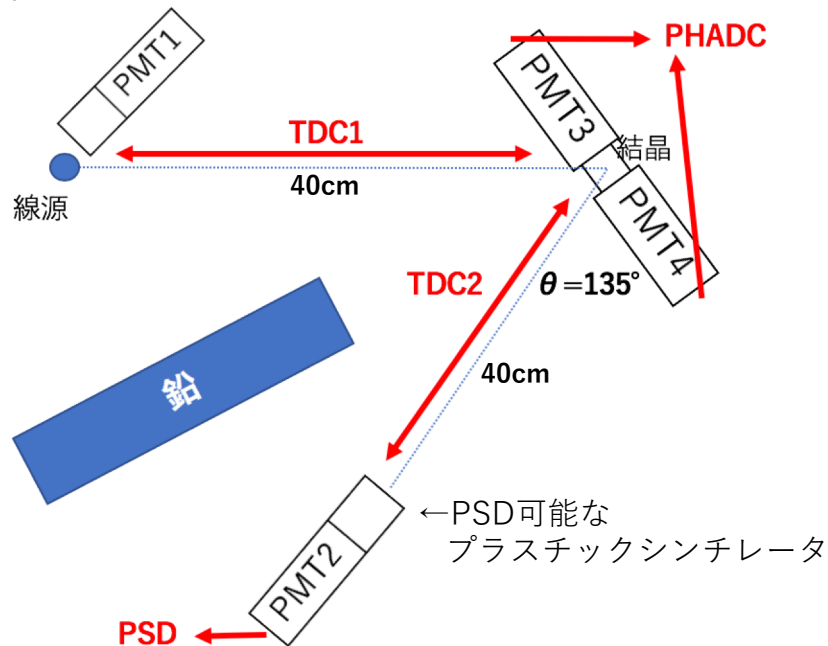
(step1)の結果からビーム1~4での系統誤差は小さく、ビーム1と3(B面)、ビーム2と4(A面)の結果はそれぞれ同質の結果であると言えるので、それらを統合してB面、A面それぞれに対するTOF分布を描いた。



- 60n秒付近に確認できるピークが中性子のTOF分布であると考えられる。
- ピークは確認できるものの、トリガーとして全てのcoincidenceを要求しているため統計が足りていないことがわかる。

# 【4章】中性子散乱実験概要

## 実験概要



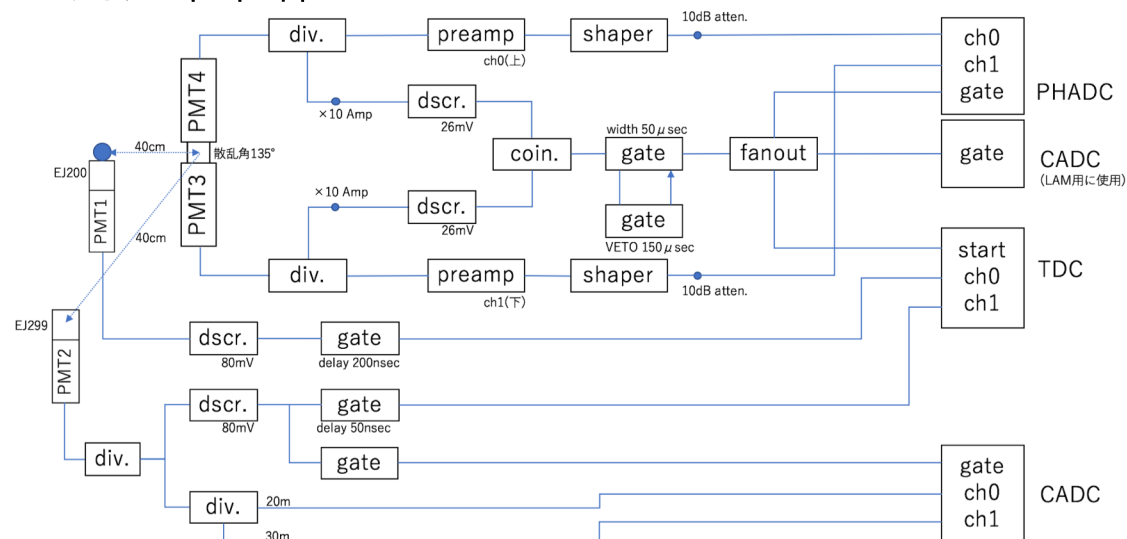
(step1) PHADC、エネルギー校正用データの測定

(step2) TDC1、PHADCの測定

(step3) TDC2、PSD、PHADCの測定

(step4) TDC1、TDC2、PSD、PHADCの測定

## 測定回路



## γ線校正

使用した3種類のγ線源および中性子線源

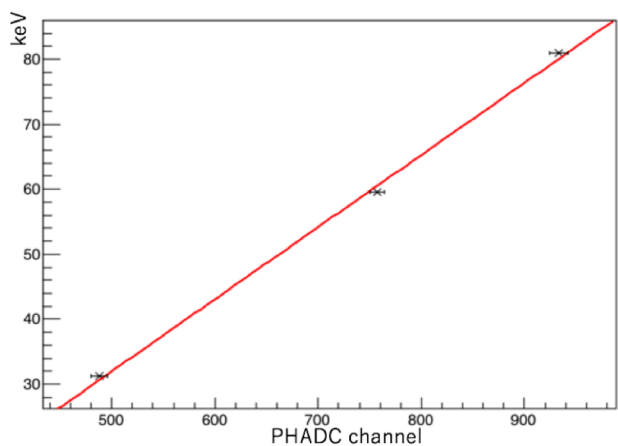
γ線源	ピークエネルギー (keV)	放射能 (kBq)
$^{133}\text{Ba}$	81.0	17.4
$^{137}\text{Cs}$	32.2	74.1
$^{241}\text{Am}$	59.5	2.9
中性子線源		放射能 (kBq)
$^{252}\text{Cf}$		140.7

表 4.1 使用した線源とピークエネルギー

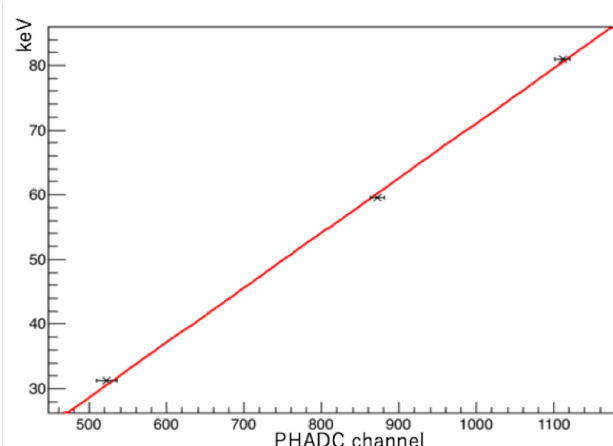


# 【4章】 (step1)測定結果

- $\gamma$  線校正結果



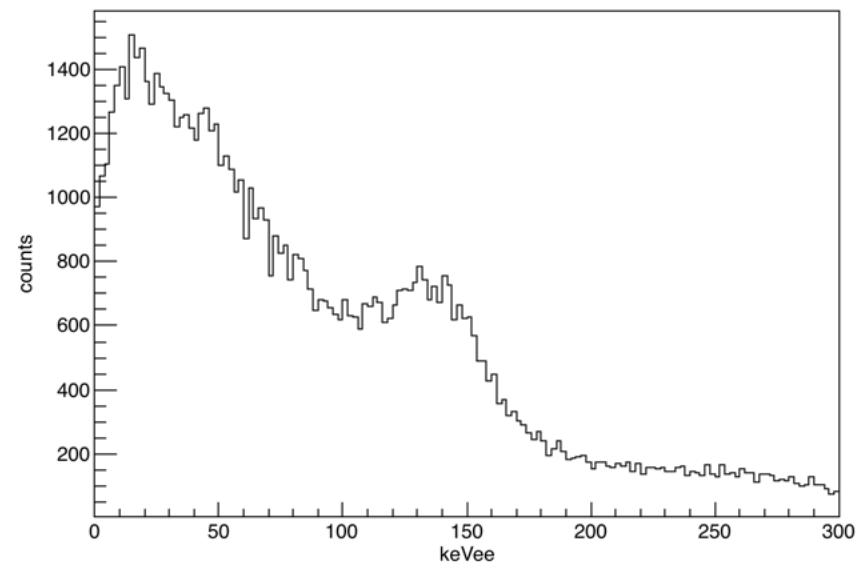
B面照射時のPMT3チャンネルの校正直線



B面照射時のPMT4チャンネルの校正直線

各面からの信号をそれぞれkeVeeに校正し、PMTの増幅率を補正した上で平均をとって解析した

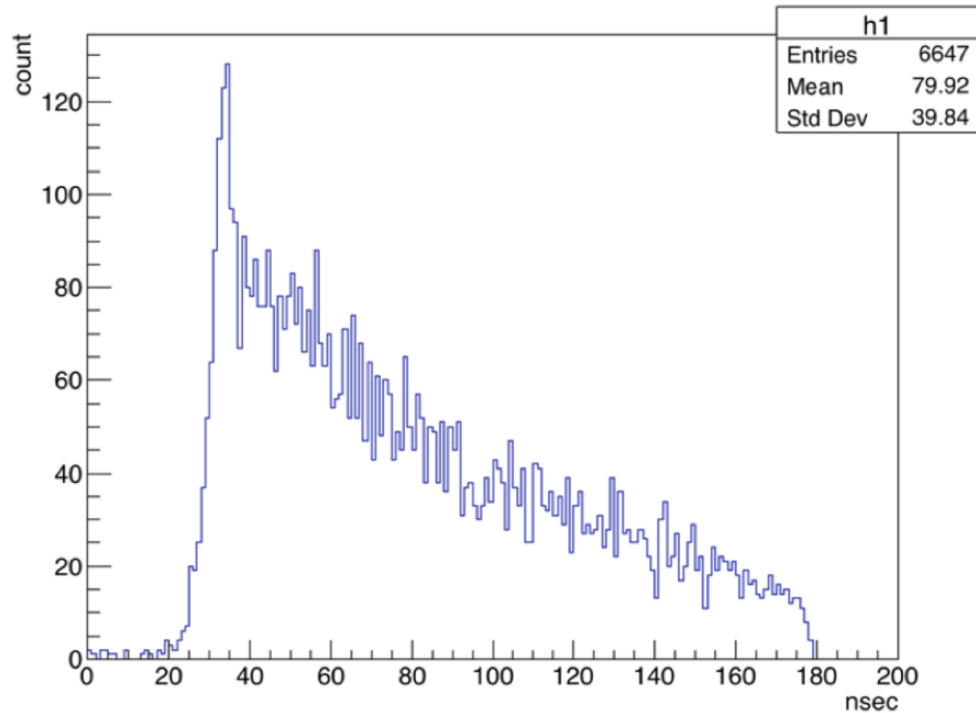
- PHADC測定結果



- Cf252によるピークは確認できなかった。あらゆる散乱角で散乱したイベントが重ね合わされているため、マクスウェル分布に従う中性子はピークを作らないと考えられる。
- 140keV付近に見られるピークは、他の信号の反射、もしくは非弾性散乱によって生じた $\gamma$ 線によるピークだと考えられる

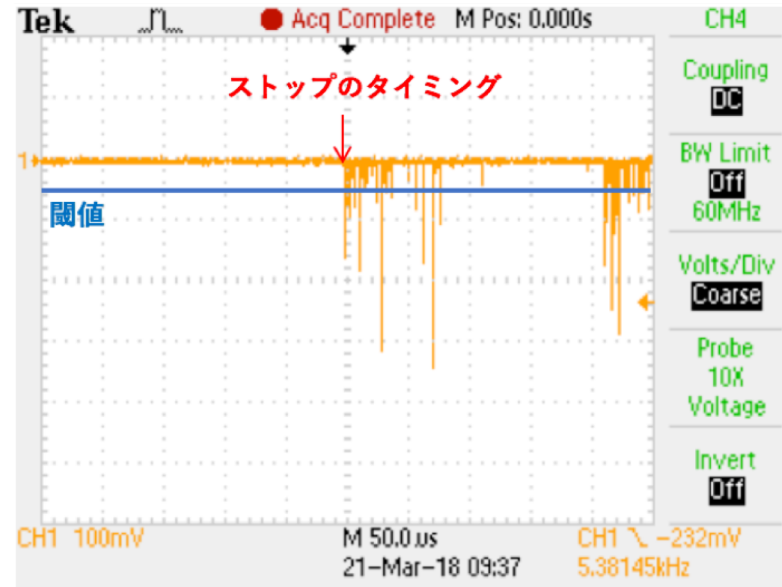
# 【4章】 (step2)測定結果

## 線源～結晶のTOF測定結果



- $\gamma$ 線によるピークは30nsec付近に確認できる。
- 中性子イベントの分布からマクスウェル分布に従うTOF分布は確認できなかった。この原因として、TOFのタイミングが正確にとれていないことがわかる。結晶のシンチレーション波形の特性上、原理的にTOF測定の分解能が悪くなってしまうと考えられる。

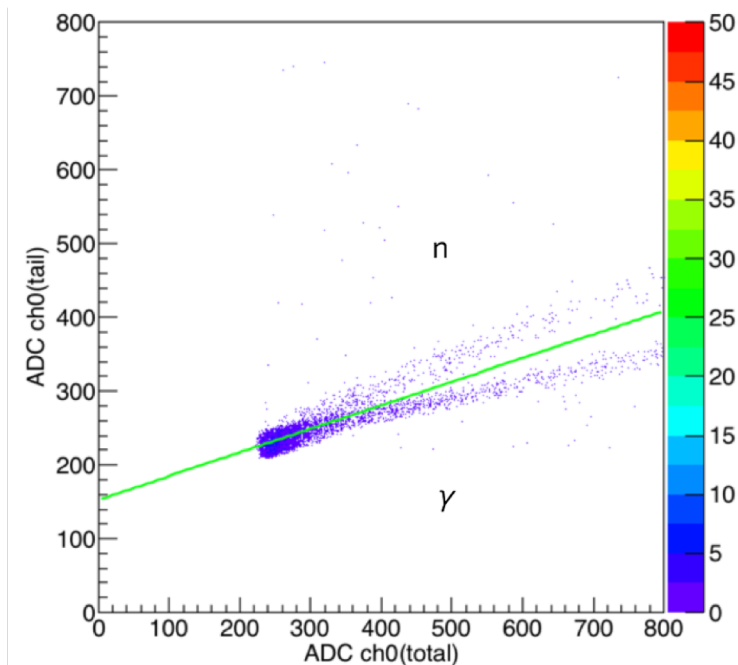
## ZnWO<sub>4</sub>の典型的なシンチレーション波形



- 1~数photoelectron程度の離散的なパルスが100 $\mu$ 秒程度続くような波形
- 閾値を1photoelectron相当レベルの低い値に設定しなければ、正しいスタートのタイミングを測定することができない

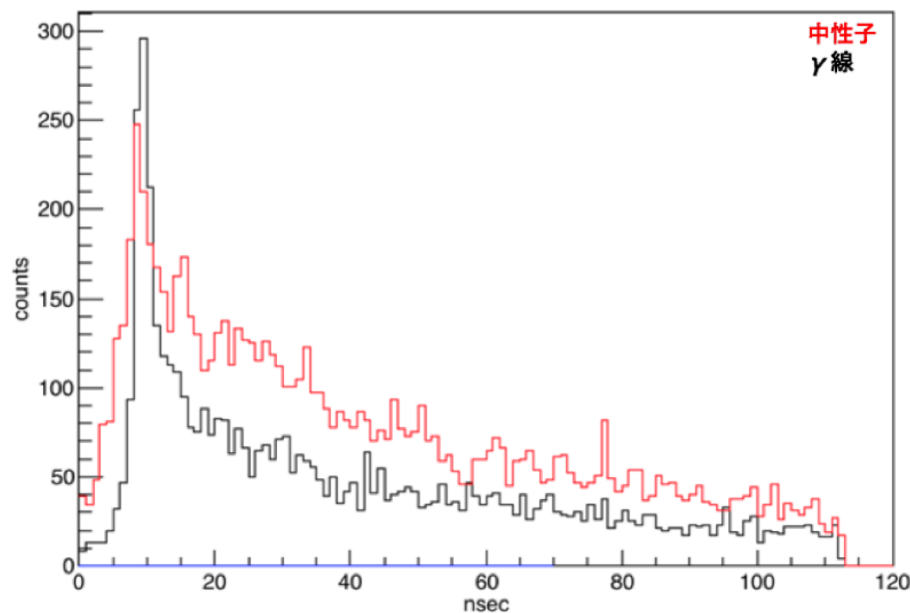
# 【4章】 (step3)測定結果

- 散乱後イベントのPSD結果



中性子、 $\gamma$ 線によるバンドがそれぞれ確認できるが、低エネルギー側で2つのバンドが重なっている部分でのイベントの分離ができていないと思われる。

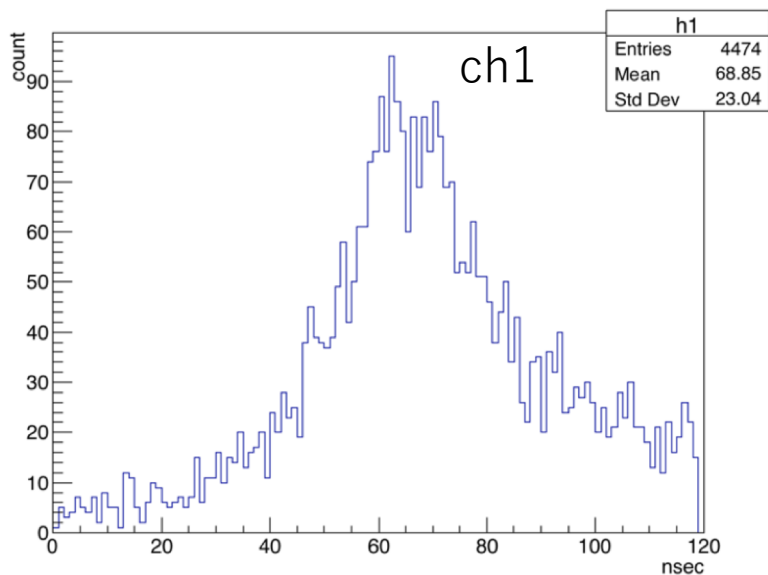
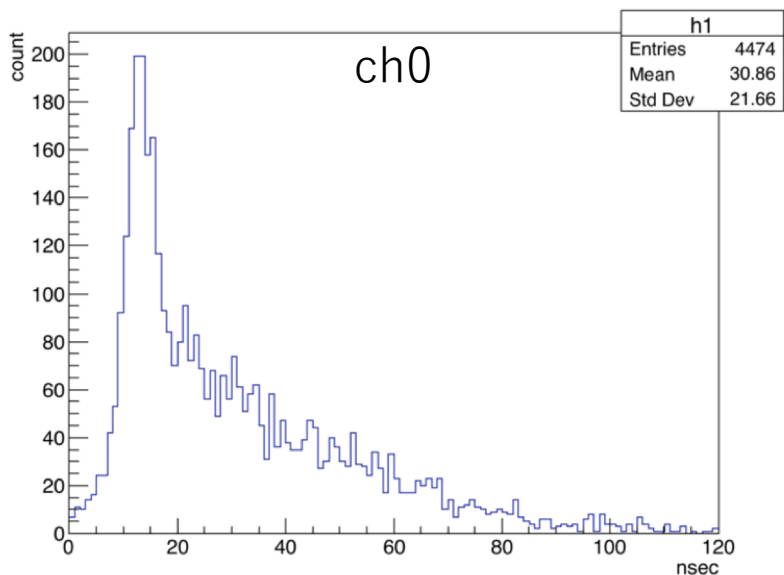
- 結晶～散乱後の検出器のTOF測定結果



PSDによる弁別で $\gamma$ 線イベントと中性子イベントが分離できていないことがわかる。(S/N比は向上している)

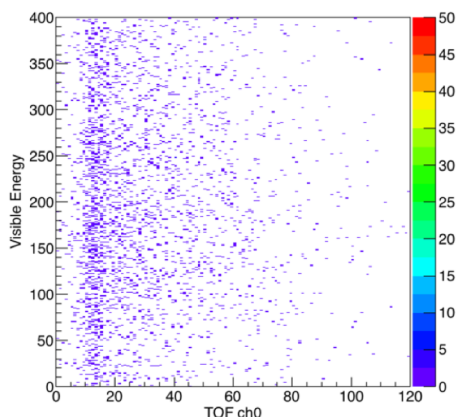
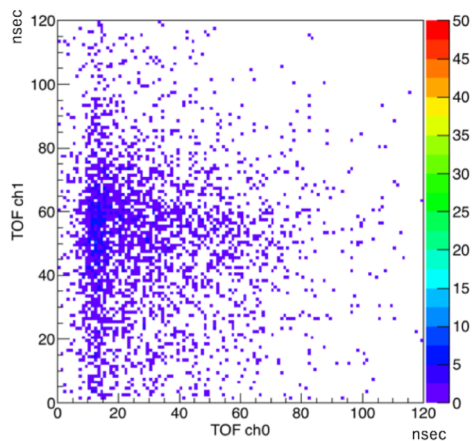
# 【4章】 (step4)測定結果

- 線源～結晶のTOF(ch0)、結晶～散乱後の検出器のTOF(ch1)の測定結果



- PSDによる弁別は行なっていない。
- step2、3と同様にタイミングが正しくとれていない

- TOF ch0 とTOF ch1、TOF ch0と  $E_{visible}$  の散布図



いずれの散布図にも相関は見られない。

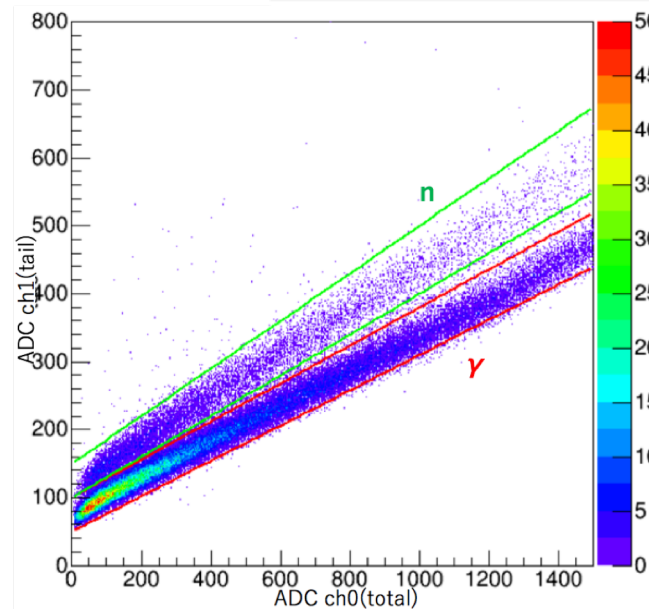
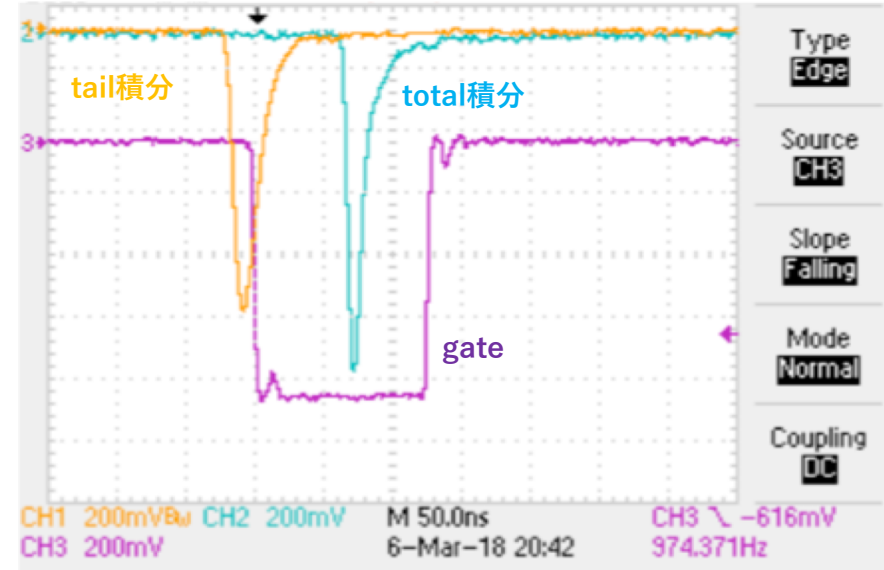
# 散乱後の検出器によるPSD

- 波形別弁別(PSD)

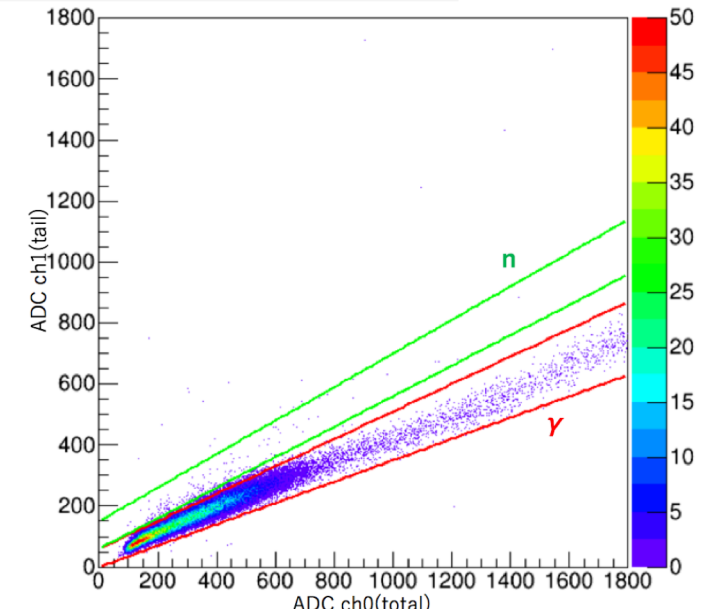
- シンチレーション光波形の違いを利用して、イベントを粒子ごとに弁別する方法

- 長さが10m異なる2本のケーブルを用いてシンチレーション光波形を50n秒ずらし、100n秒のゲートで積分することで、シンチレーション波形のtotal積分とtail部分の積分を得る(右図)

- total積分とtail部分の散布図を描くと粒子ごとに異なる帯を示す



252CfのPSD結果



133BaのPSD結果

# 【4章】 まとめ

- PHADCによる  $E_{visible}$  測定について

$^{252}\text{Cf}$ による中性子のエネルギー分布の特徴は確認できなかった。

→単色中性子線源を用いた実験が必要

- TOF測定について

タイミングのずれ、 $\gamma$ 線イベントと中性子イベントの分離の問題により、マクスウェル分布に従うTOF分布は得られなかった。

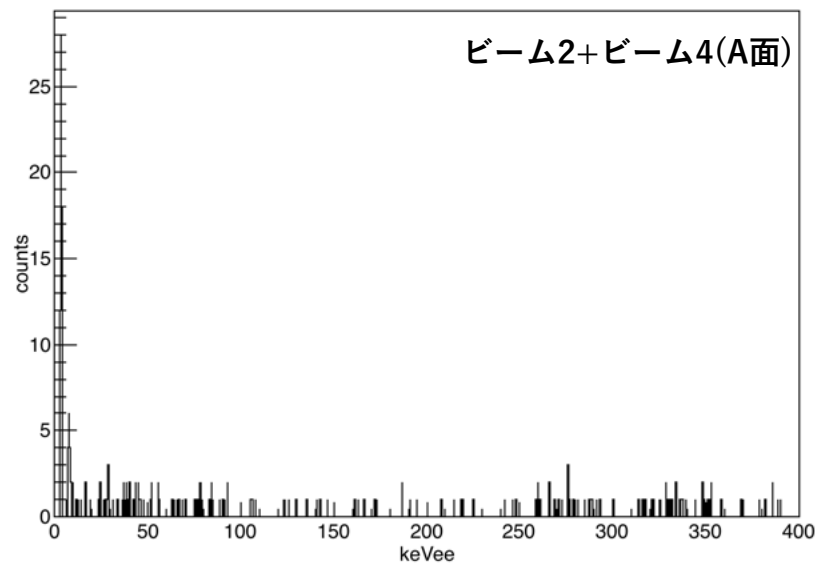
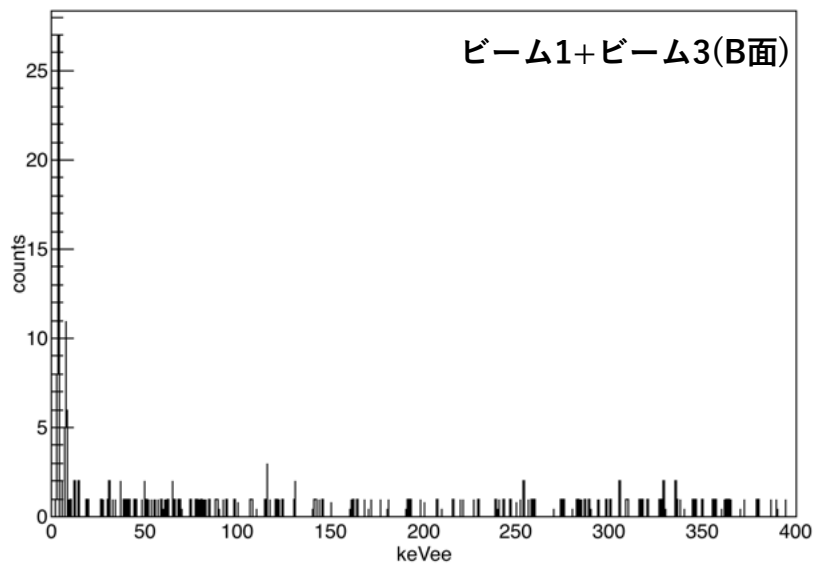
→単色中性子線を用いるとガウス分布に従うTOF分布が得られることが期待できるため、中性子イベントによる分布を確認しやすくなると考えられる

→単色中性子線ビームによって中性子線イベントが優位な環境を実現できれば、 $\gamma$ 線イベントとの分離の問題も改善できると考えられる

# 【5章】 (step2) $E_{visible}$ 測定結果

- $E_{visible}$ 測定結果

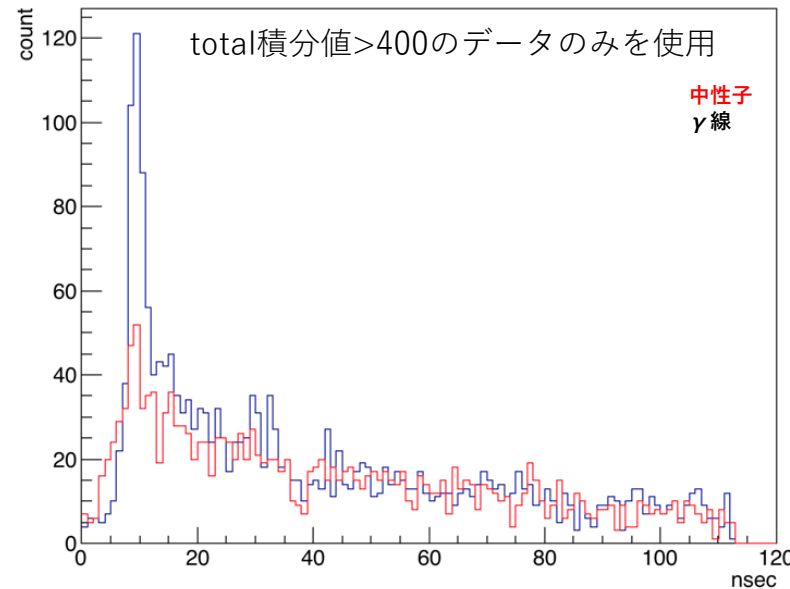
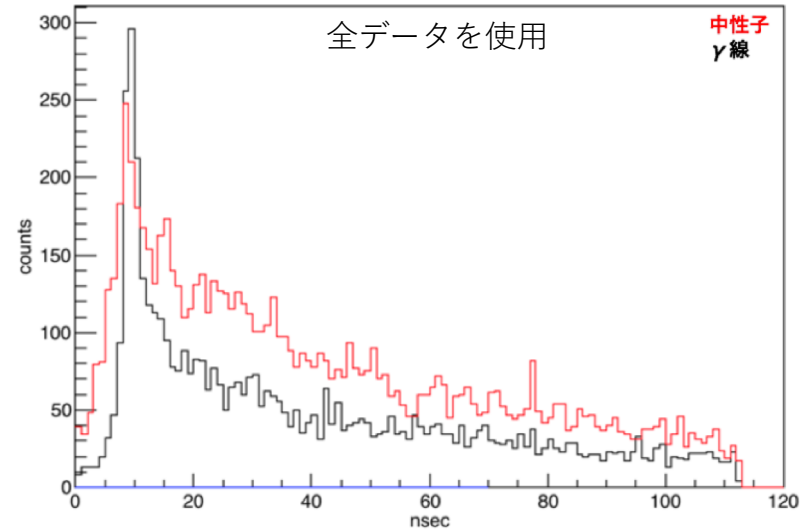
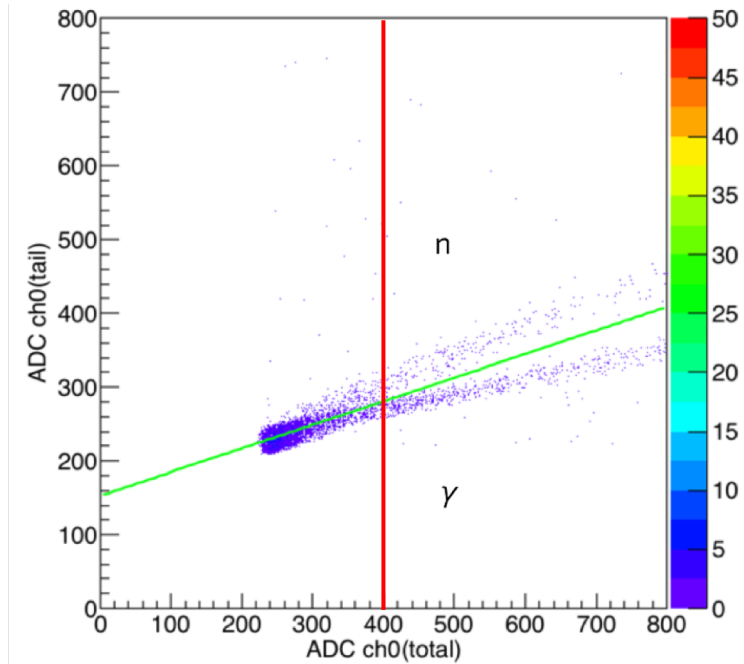
TOF測定結果の場合と同様に、ビーム1と3、ビーム2と4をそれぞれ統合してエネルギースペクトルを描いた。



20~40keV付近にピークは確認できず、統計が足りていないことがわかる。

# 【4章】 (step3)測定結果補足

- 散乱後イベントのPSD結果



-PSDの散布図上で比較的よく分離されていると思われる範囲のデータのみを使用した。

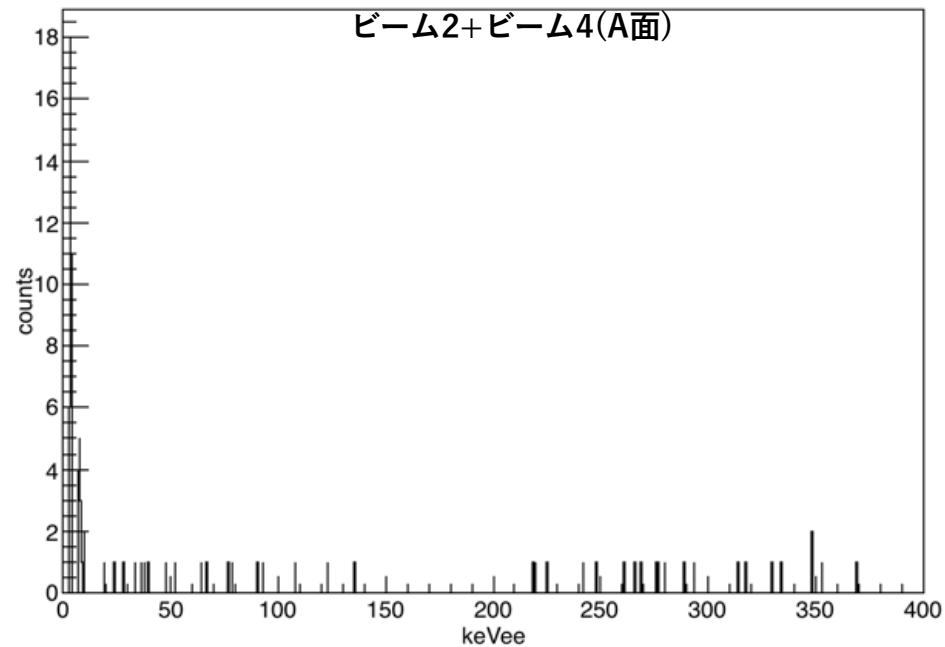
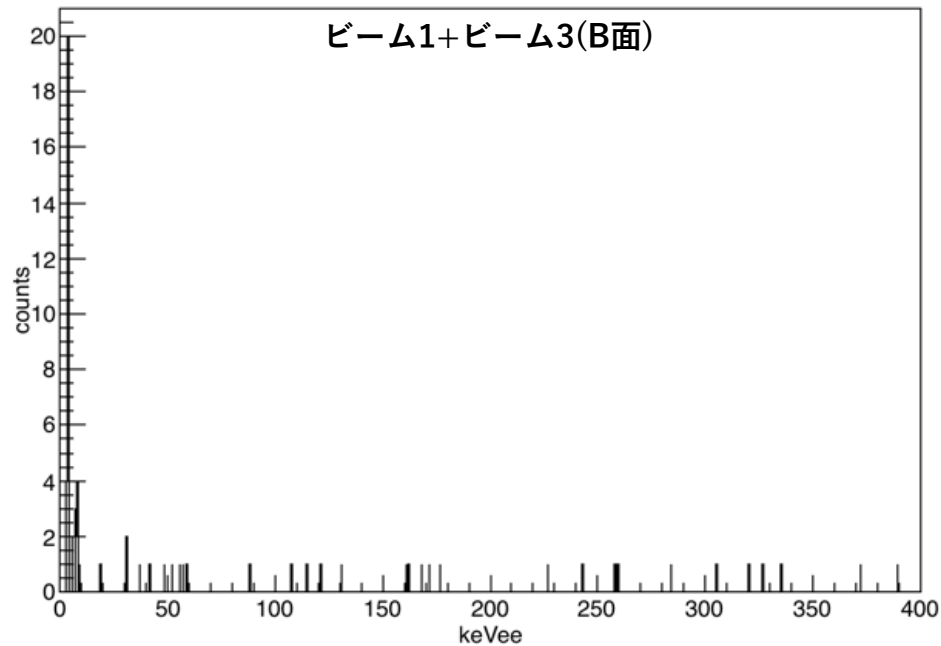
-中性子の分布に $\gamma$ 線のピークは含まれず、S/N比は向上しているが、中性子の特徴的なTOF分布は確認できなかった。



# 【5章】 (step2) $E_{visible}$ 測定結果補足

- $E_{visible}$ 測定結果

TOF測定結果の60n秒ピーク付近のイベントのみを選択して描いたスペクトル

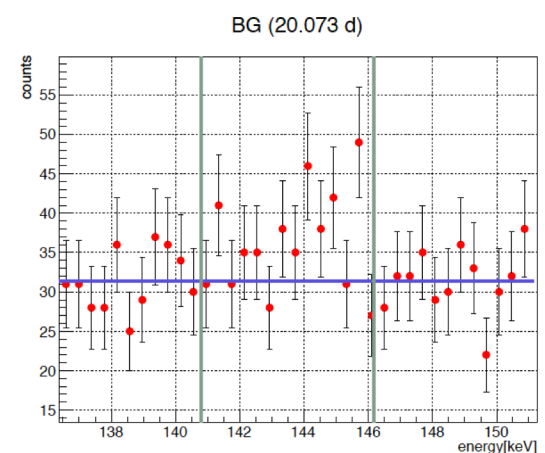
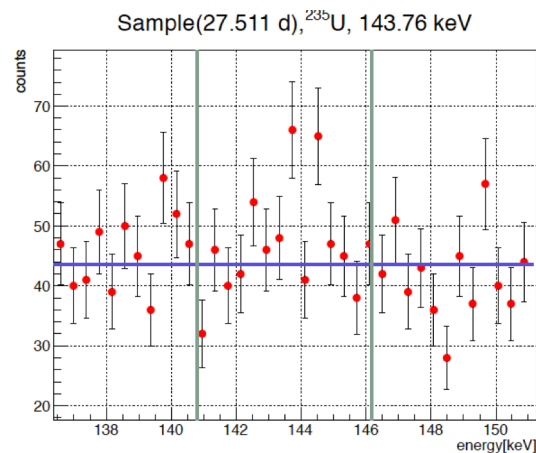
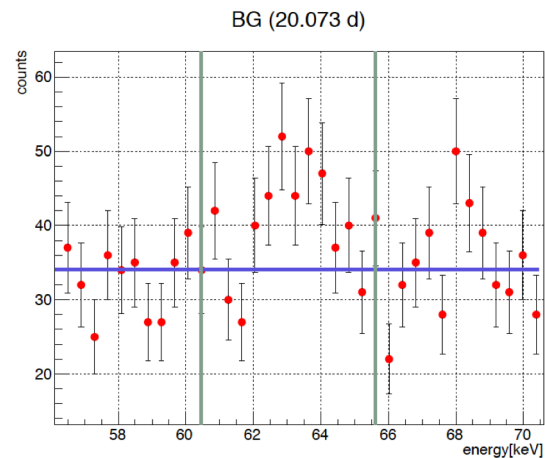
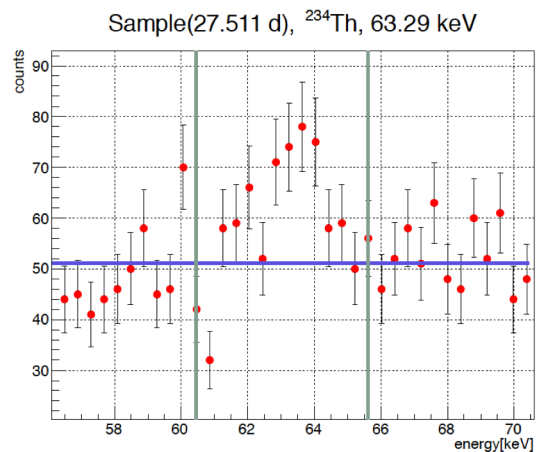


# 【6章】 本論文のまとめと今後の課題

## (本論文のまとめ)

- $\text{ZnWO}_4$ 結晶を用いた暗黒物質方向感度検出器開発のため、 $\alpha$ 線と中性子線に対する $\text{ZnWO}_4$ 結晶のQFを測定した。
- 5.5MeV  $\alpha$ 線に対するB面、A面のQFはそれぞれ0.189、0.162であり、14.1%の異方性が確認できた。
- 中心エネルギー0.885MeVのほぼ単色中性子線を照射し、 $\sim 150\text{keV}$ 酸素原子核反跳に対するQF測定を行ったところ、B面、A面のQFはそれぞれ0.150、0.129であり、14.0%の異方性が確認できた。これにより世界で初めて $\text{ZnWO}_4$ 結晶の中性子に対するQFとその異方性を測定し、暗黒物質方向感度検出器としての原理検証ができた。
- $120^\circ$  散乱におけるTOF測定では測定時間が足りず、解析に十分なデータ数を得ることができなかった。

# 結晶のバックグラウンドについて



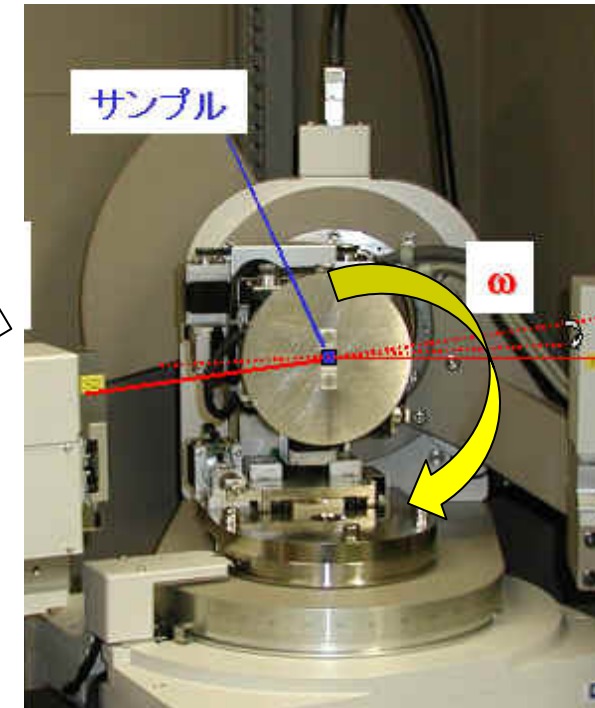
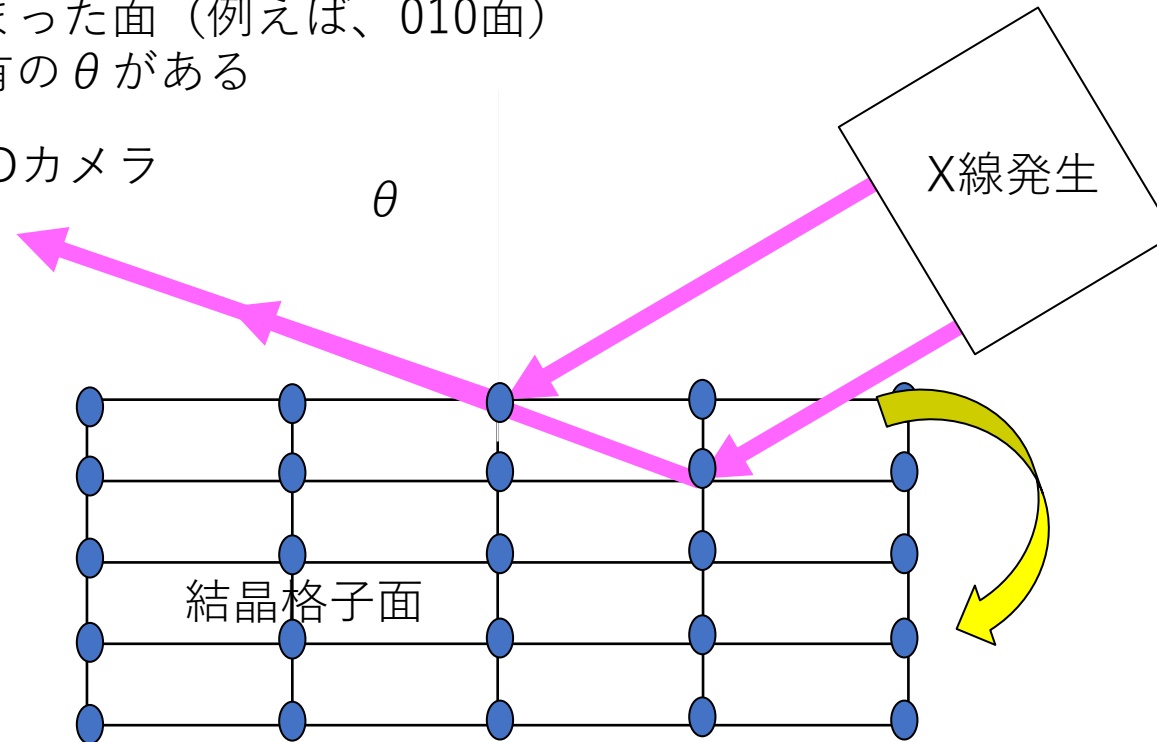
- BGデータ :180425N
- Ge Type : IPMUGe-N
- サンプル測定時間 : 2.38e+06 sec (27.5 days)
- BG測定時間 : 1.73e+06 sec (20.1 days)
- Middle U-Chain : < 5.27mBq/kg (2.62 +/- 2.07 mBq/kg)
- Upper U chain : < 216 mBq/kg (115 +/- 79 mBq/kg)
- $^{210}\text{Pb}$  : < 822 mBq/kg
- Th-Chain : < 3.80 mBq/kg (1.63 +/- 1.70 mBq/kg)
- $^{40}\text{K}$  : < 23.4 mBq/kg
- $^{60}\text{Co}$  : < 1.18 mBq/kg
- $^{137}\text{Cs}$  : < 1.69 mBq/kg
- $^{235}\text{U}$  : < 59.7 mBq/kg

測定では、実験で用いた結晶と同じインゴットから切り出された結晶を使用

高出力・高精度複数軸X線回折計 (ATX) の説明

決まった面 (例えば、010面)  
固有の $\theta$ がある

CCDカメラ

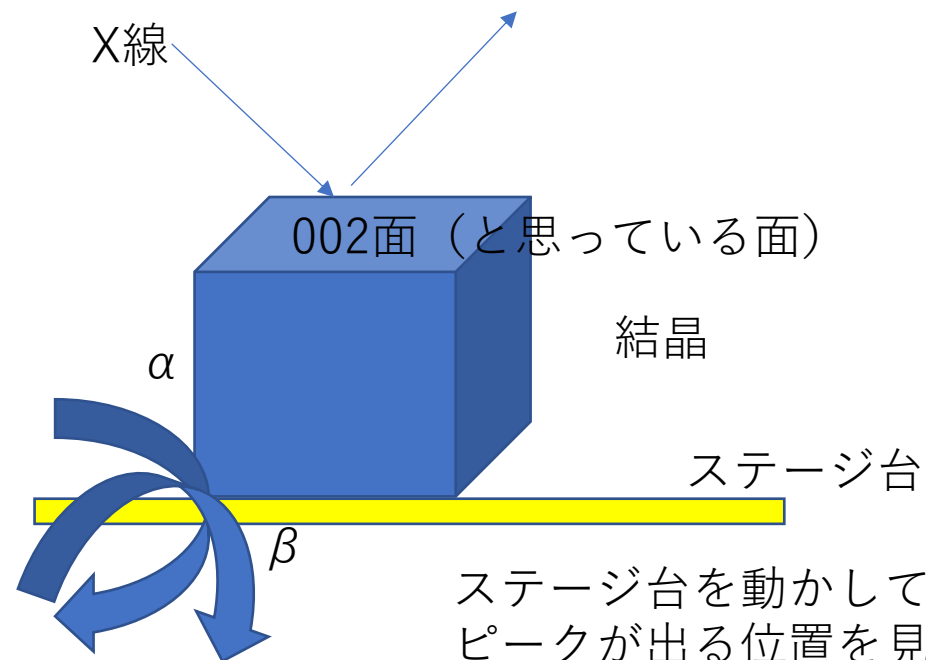


結晶を少し回転( $\omega$ )させて、例えば010面 (b軸面) からの反射がどの角度で強いかを見る  
反射が最強のところ正しい010面

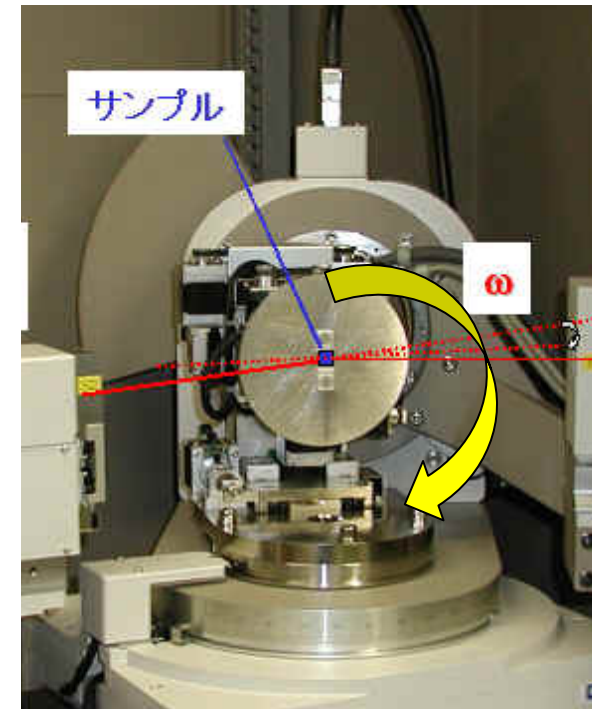
(東北大学金属材料研究所 ATXに関するスライドから抜粋)

M005\_M2\_(002)を例にもう少し詳しく説明：

ファイルの読み方 002(=C面としている面を上にしてステージに乗せる,  
(00n=C面, n00=A面)、 UT17-1：サンプル名

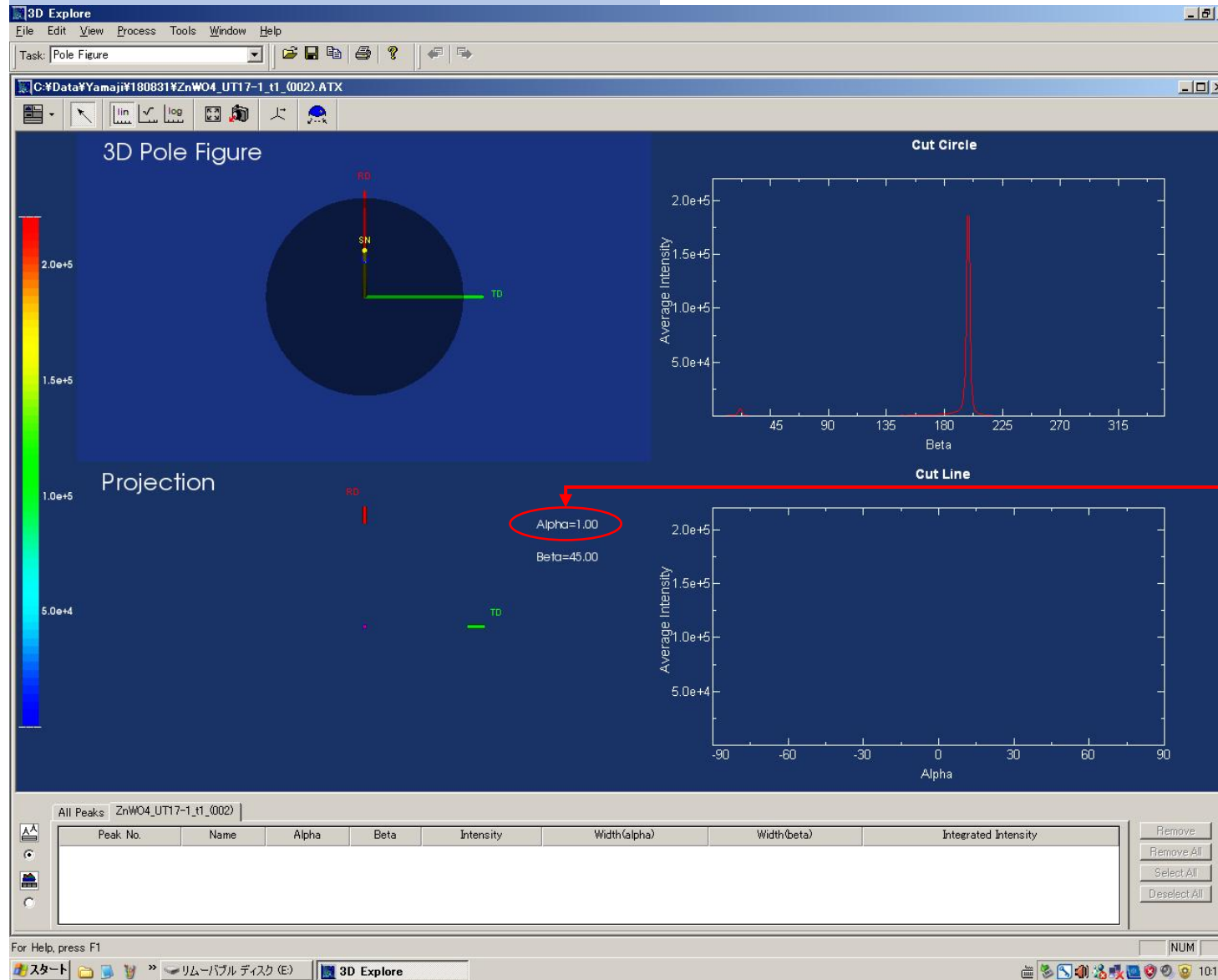


ステージ台を動かして、正しい002面の  
ピークが出る位置を見つける



疑問 (に感じると思われるポイント) : なぜ、001ではなく、002か？  
答え : あらかじめ粉末X線回折から、001ではなく002のピークがC面では一番X線  
反射強度が強く、001は強度が小さい、ないしは消滅則から見えないため

# ZnWO<sub>4</sub> UT17-1 10x10x10 t1面



面のずれの大きさを表す  
パラメータ

$\chi = -2 \sim 0$  で、(002)をスキャン。  
高強度ピークがあるので、t1は(002)面。