

# $^{208}\text{Pb}$ と $^{40}\text{Ca}$ の超前方角度での 中性子散乱断面積の測定

長尾昂青, 谷口智大, 橋本竣史, 石井大智, 小倉誠, 西村侑真  
京都大学理学部4回生 2023年度課題研究P4



京都大学  
理学研究科・理学部

# 目次

- Intro 実験の目的・Neutron RIA
- 実験概要
- 測定手法 TOF法・波形弁別法
- 実験Set up 陽子ビーム・標的回り・検出器・回路
- 解析  $n\gamma$ 弁別・TDCスペクトル

# 目的

$$\rho = \rho_n + \rho_p$$
$$\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$$

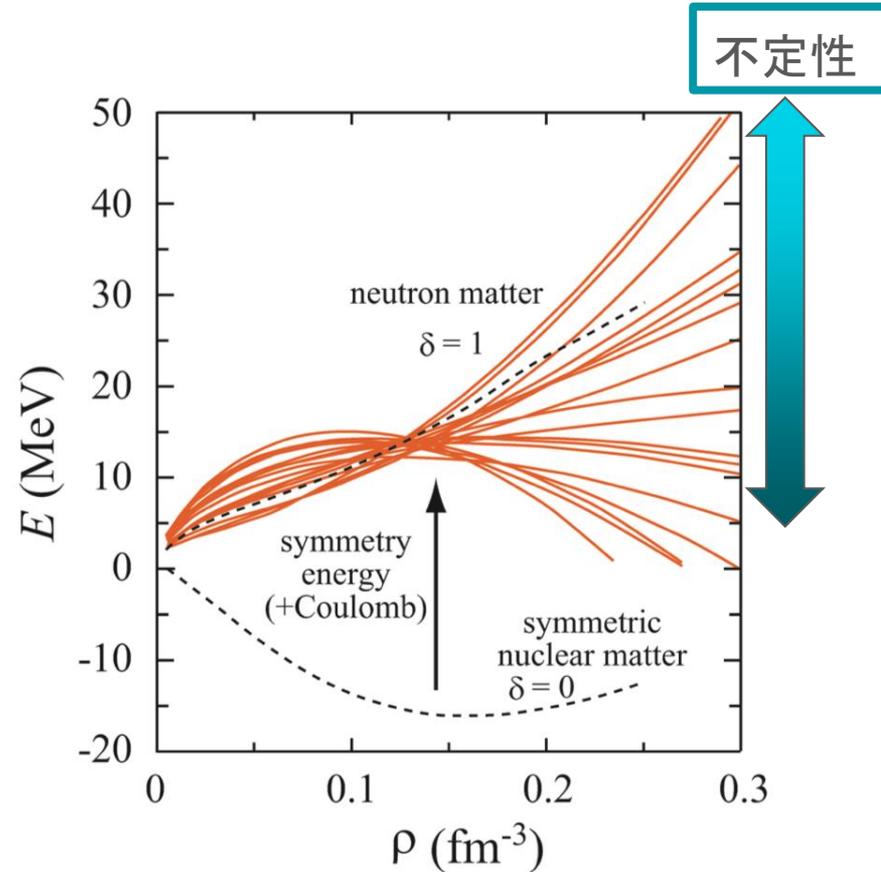
- 核物質の状態方程式

$$E(\rho, \delta) = E(\rho, 0) + S(\rho)\delta^2 + \mathcal{O}(\delta^4)$$

- 対称エネルギー

$$S(\rho) = S_0 + \frac{L}{3\rho_0}(\rho - \rho_0) + \mathcal{O}((\rho - \rho_0)^2)$$

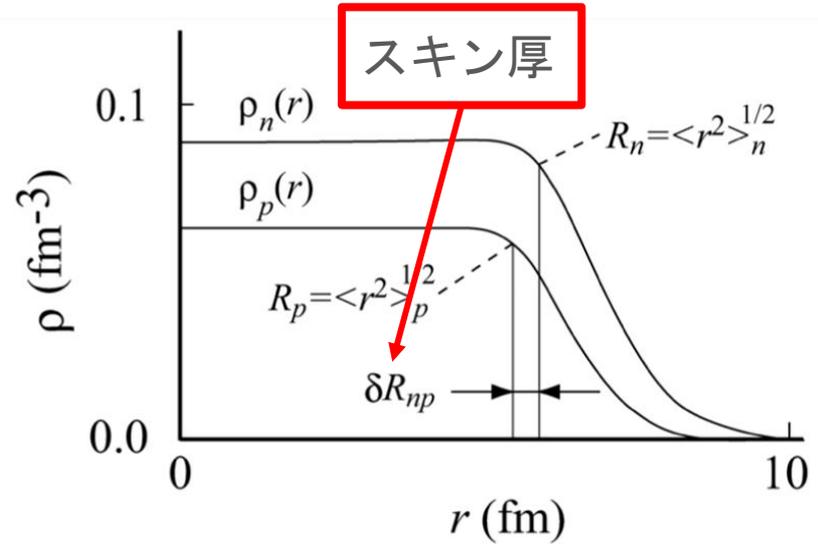
- 中性子星のような中性子物質の性質に深く関係している。



A.Tamii, 日本物理学会誌, Vol 69より引用

# スキン厚

- ・ 重い安定な原子核は中性子過剰  
→ 内部領域で対称エネルギー**増**
- ・ 内部領域で対称エネルギーを**減**  
→ 粒子数の保存でスキン厚**大**  
→ 表面で対称エネルギー**増**



$^{208}\text{Pb}$ の核子の密度分布の模式図

A.Tamii, 日本物理学会誌, Vol 69より引用

全体のエネルギーを最小にするスキン厚が実現





# 中性子弾性散乱

- ・ 中性子散乱は核力からのみ影響を受ける。
- 電子とのアナロジーで前方の散乱が分かれば平均二乗半径が分かる
- ・ 中性子弾性散乱を記述する理論モデルが必要！

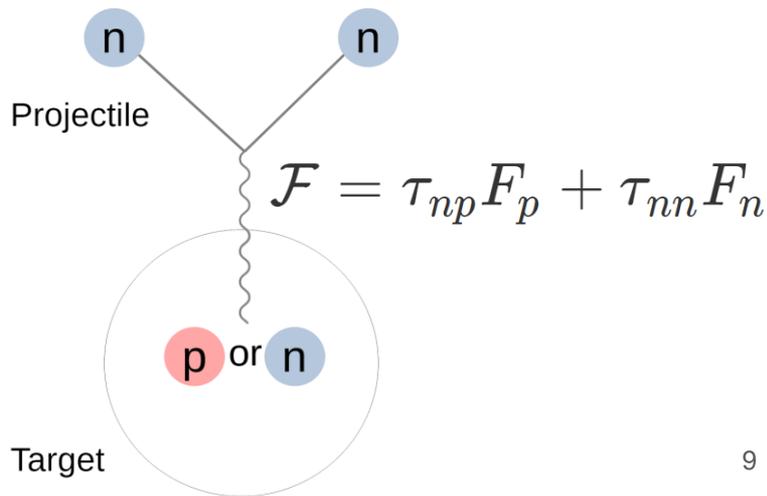
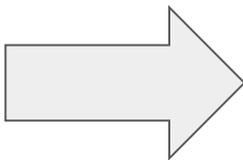
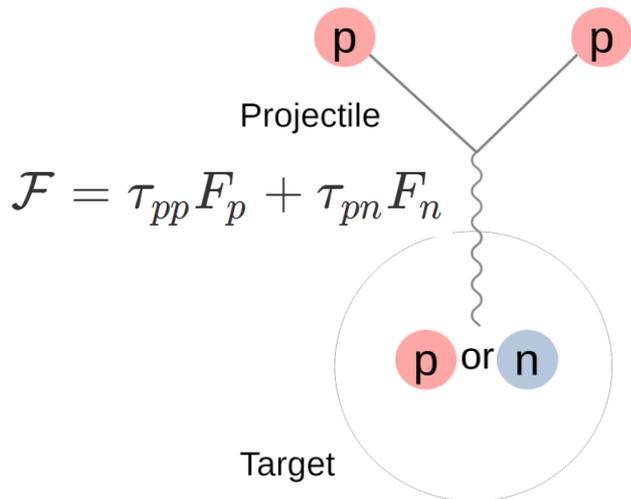
# 理論計算 Neutron-RIAの使用

陽子弾性散乱をうまく説明する理論計算のモデルとしてRIA(Relativistic Impulse Approximation)が存在する (G.C. Hillhouse, et al, PRC, Vol.78, 2008; G.C. Hillhouse, et al, PRC, Vol.79, 2008を参照)

→核力の荷電対称性を課せば中性子弹性散乱にも適用できる

→昨年と同様に**Neutron-RIA**を使用

$$\begin{aligned} \tau_{pp} &= \tau_{nn} \\ \tau_{pn} &= \tau_{np} \end{aligned} \quad \text{を仮定}$$



# 理論計算 Neutron-RIAの計算結果

$^{40}\text{Ca}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ の65MeV中性子弾性散乱について理論計算と実験データを重ねてプロット

実験データは

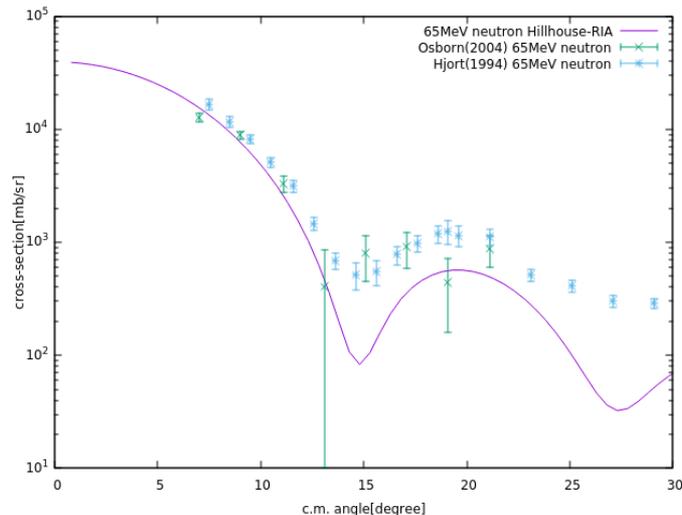
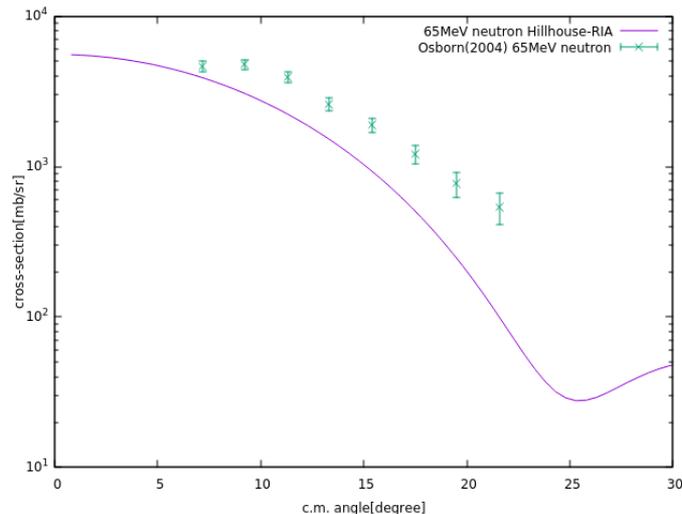
J. H. Osborne, et al, PRC, Vol.70, 2004

E.L. Hjort, et al, PRC, Vol.50, 1994 より引用

傾向は実験と理論で一致している(Caの一致が去年の理論計算より悪く確認が必要だが未解決)

【条件】

- ・ エネルギー依存Hillhouse RIAをもとにしたNeutron RIA
- ・ 核分布はTIMORAの結果を使用
- ・ Pauli Blocking ON



# 理論計算 -理論から実験へ

この実験を通して我々は中性子分布に制限を与えたい

→中性子分布を少し変化(1パーセント中心側に寄せる)させたときの断面積への影響を以下の式で定量化

※ただし中性子分布の変化のさせ方にはこれ以外にもさまざまなやり方が考えられるので、どのような変化がどれだけ断面積と相関するのかは今後より詳細に調べたい。

$$\left| \frac{2(\sigma_{\text{normal}} - \sigma_{\text{distorted}})}{\sigma_{\text{normal}} + \sigma_{\text{distorted}}} \right|$$

この値が大きい場所ほど中性子分布が断面積に敏感になる

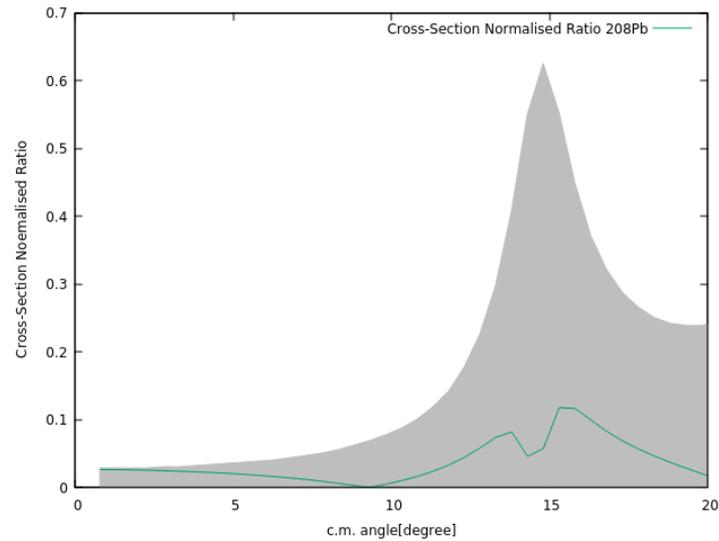
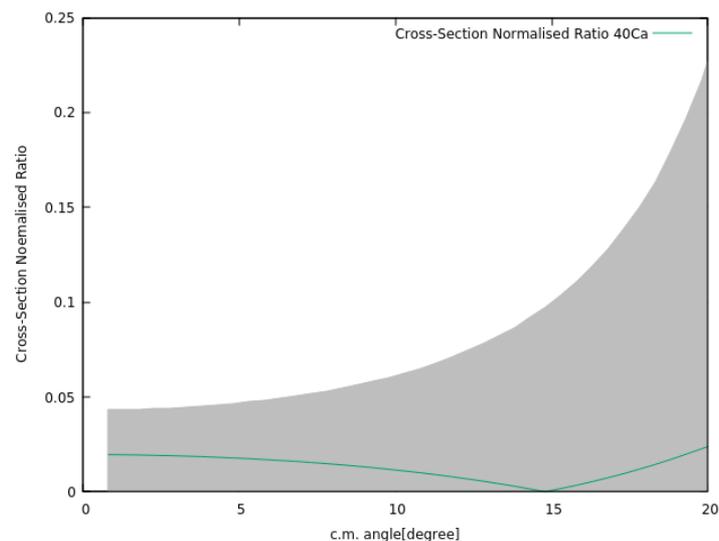
# 理論計算 -理論から実験へ

先ほどの指標を40Caと208Pbについてプロットしたもの。

灰色の領域はCaについては3.3°で500counts, Pbについては3.3°で1000counts得られたときの統計誤差の範囲を示している(この値は後述する実験時に得られるcount数の見積りに基づいている)。

→実験時間が同じであれば前方のほうが中性子分布により制限を加えることができる

→**前方**(特に前回以外でデータが取られていない**7°より前**)について実験を行いたい！



# 実験概要

なぜこのテーマにしたか？

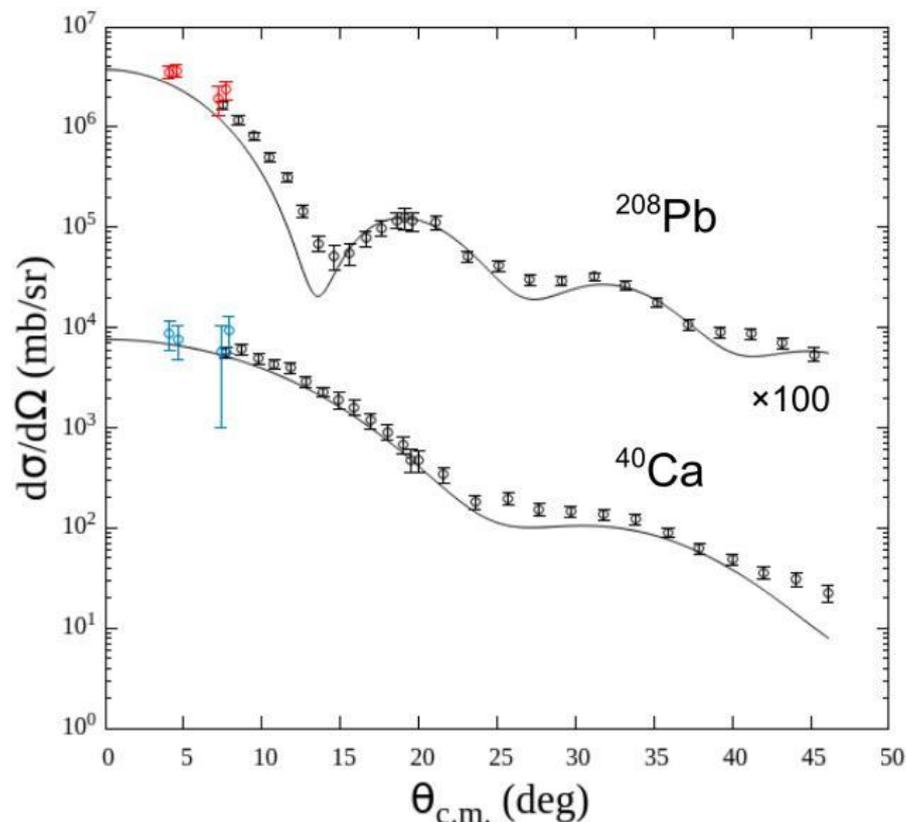
前年度の実験

→BGが多く統計誤差が大きい

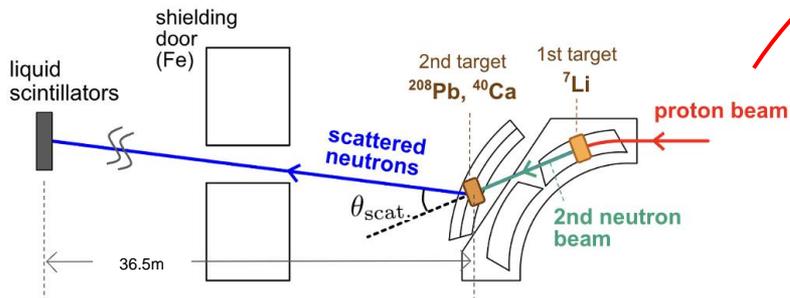
今年度の実験

- 統計誤差を減らしたい
- さらに前方の散乱角をみたい

S/Nを上げて、 $\theta=3^\circ$ の中性子弾性散乱を測定する



# 実験概要



N0コース

中性子実験室



RCNP

- 阪大RCNPの中性子実験室、N0コースで実施(3/3~3/5)
- AVFサイクロトロンからの65MeV陽子ビーム(RF Freq: 16.845Hz (60ns) )をLi標的に入射
- 散乱中性子を液体シンチレータで測定
  - TOF法：散乱粒子のエネルギーを測定→弾性散乱を識別
  - 波形弁別法：散乱粒子( $\gamma$ 線or中性子)を識別

# 実験概要

## 今回測定した散乱角

- 0°
  - 一次,二次標的ともになし (beam run)
  - 二次標的のみなし (blank)
- 3°
  - 二次標的のみなし(blank)
  - 二次標的あり ( $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ca}$ )
- 4°
  - 二次標的のみなし(blank)
  - 二次標的あり ( $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Ca}$ )

# 測定手法

## 励起エネルギー分解能

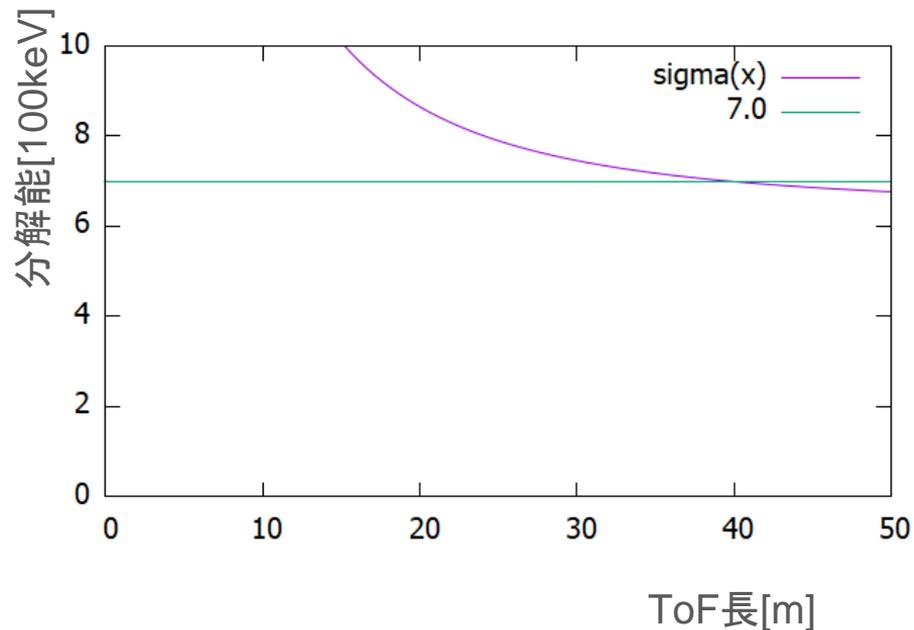
散乱中性子と二次標的を第一励起状態にした中性子を区別

第一励起エネルギー

Pb : 2.615MeV , Ca : 3.353MeV

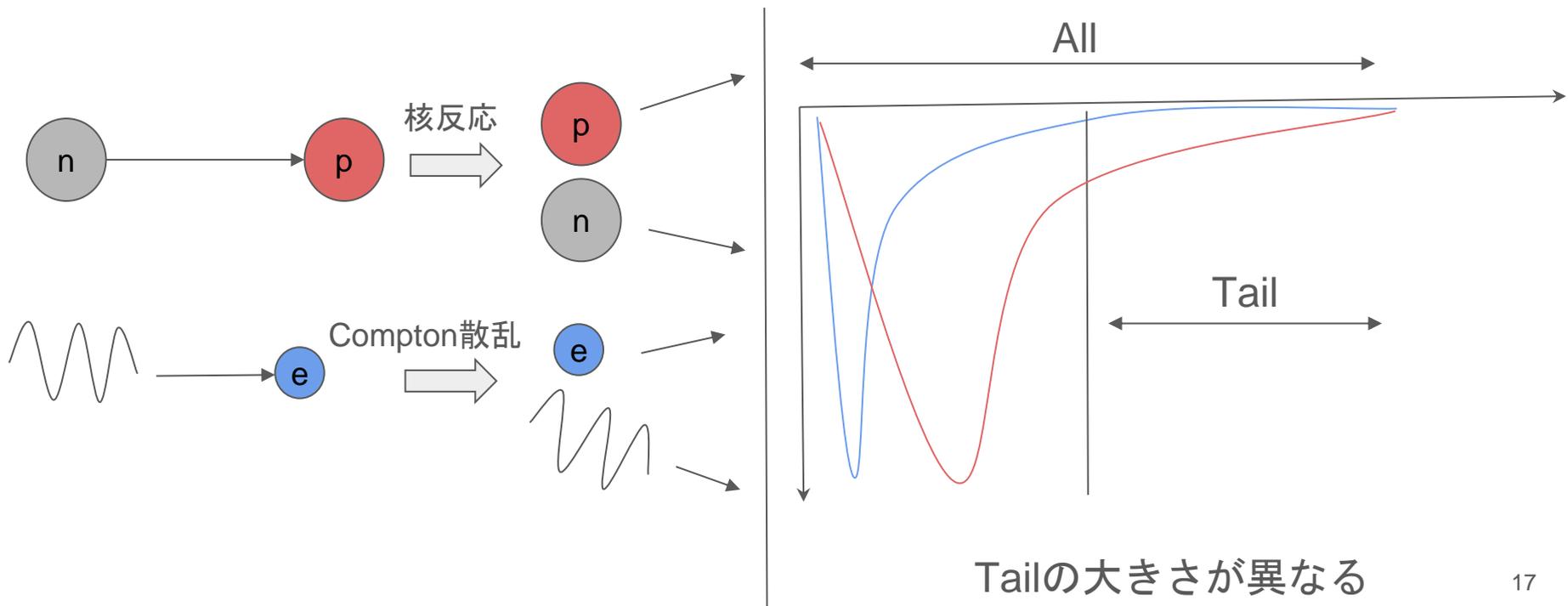
40m弱が700keV→36.5mに決定

分解能は $\sigma=710\text{keV}$ で約 $4\sigma$ で弁別



# 測定手法

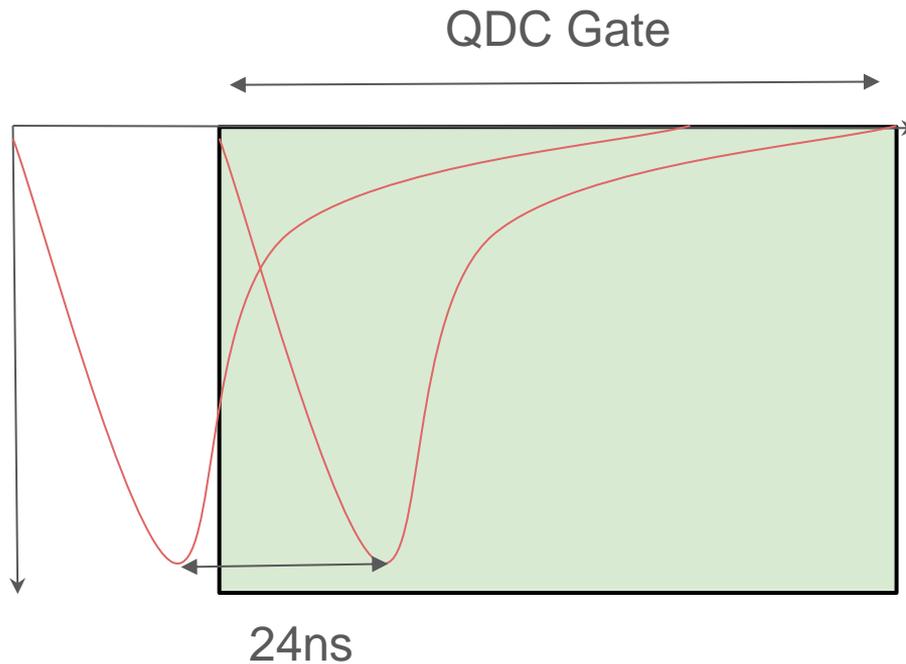
波形弁別法：中性子と $\gamma$ 線とに対するLSの応答の違い→中性子を識別



# 測定手法

## 波形弁別法

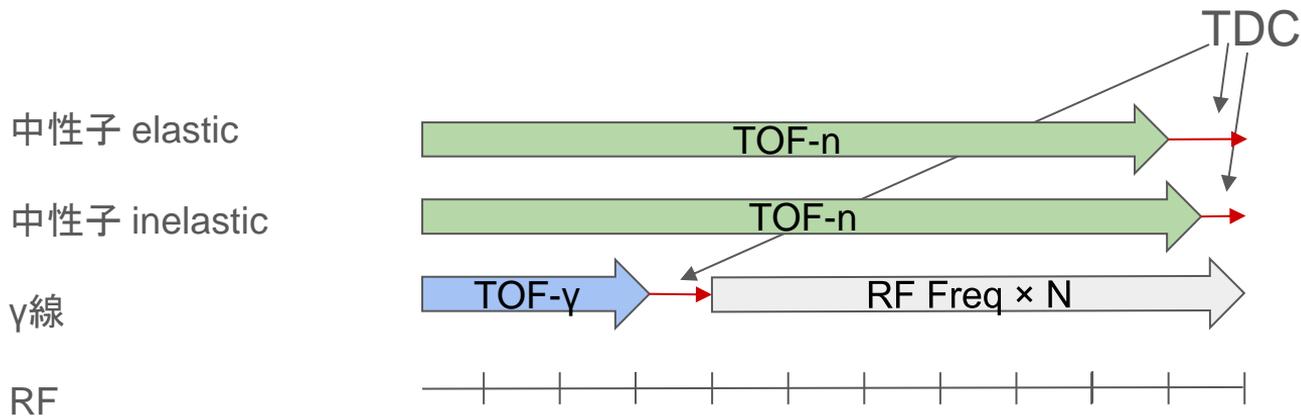
- 1つの信号を2つに分け一方にdelay(24ns)をかける
- 1つのeventに対してAll,Tailの2つのデータをとる



# 測定手法

TOF法：粒子の検出にかかった時間→粒子のエネルギー

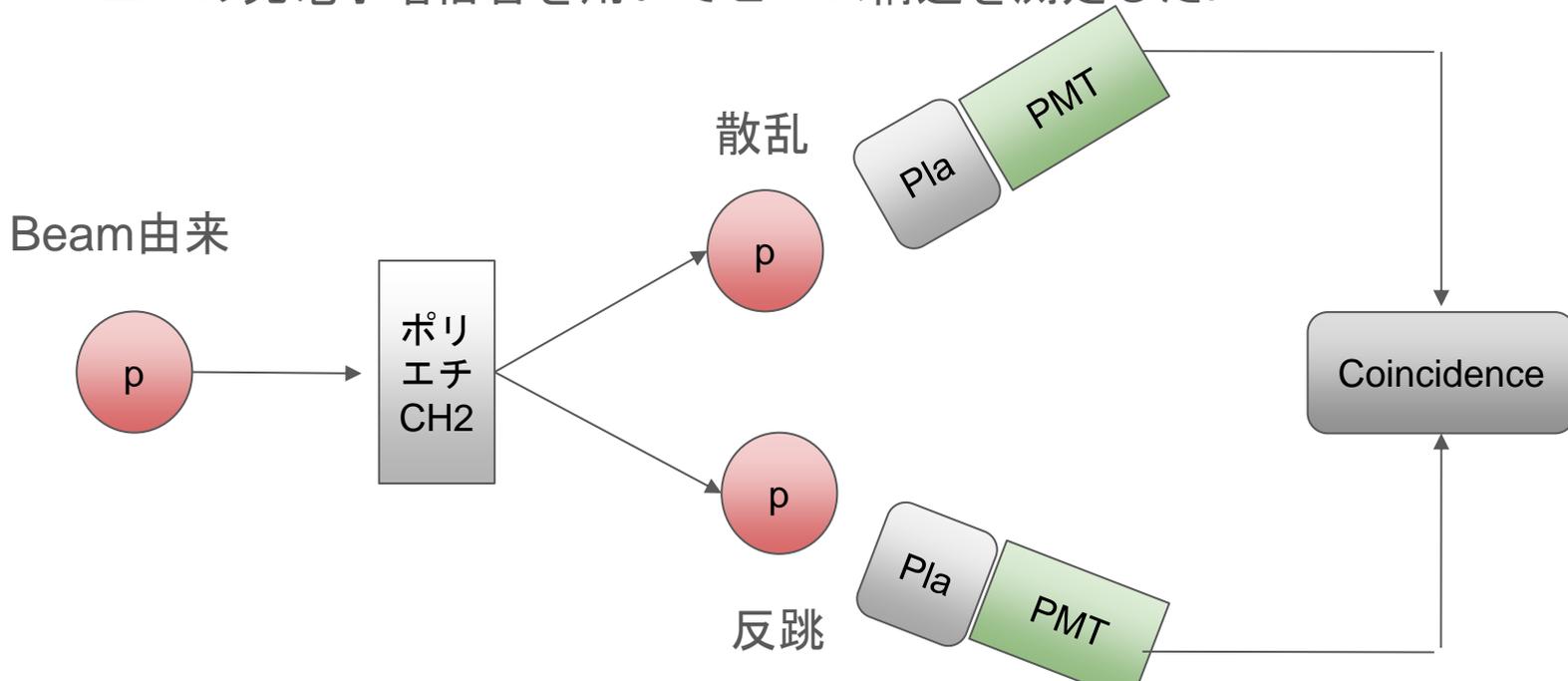
- TDC：LS-RF間の時間の測定
- TOF- $\gamma$ ： $c=1$ から算出
- TOF-n： $\gamma$ 線の時間情報から算出

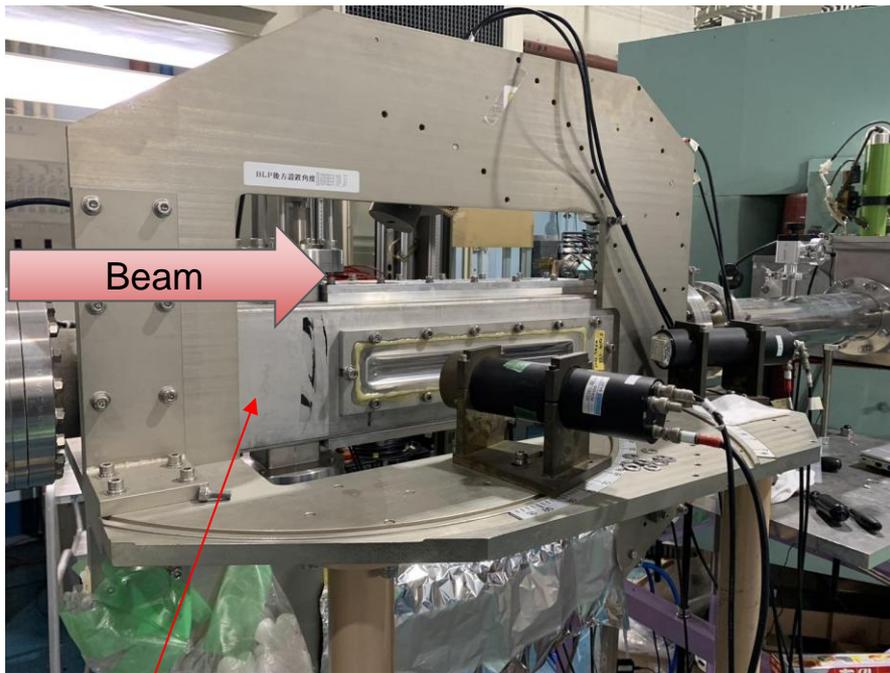


$$\text{TOF-n} + \text{TDC-n} = \text{TOF-}\gamma + \text{TDC-}\gamma + \text{RF Freq} \times N$$

# 陽子ビームの構造

- ・ RCNPの職員の方をお願いして、一次ビームの調整を行った.
- ・ 二つの光電子増倍管を用いてビーム構造を測定した.

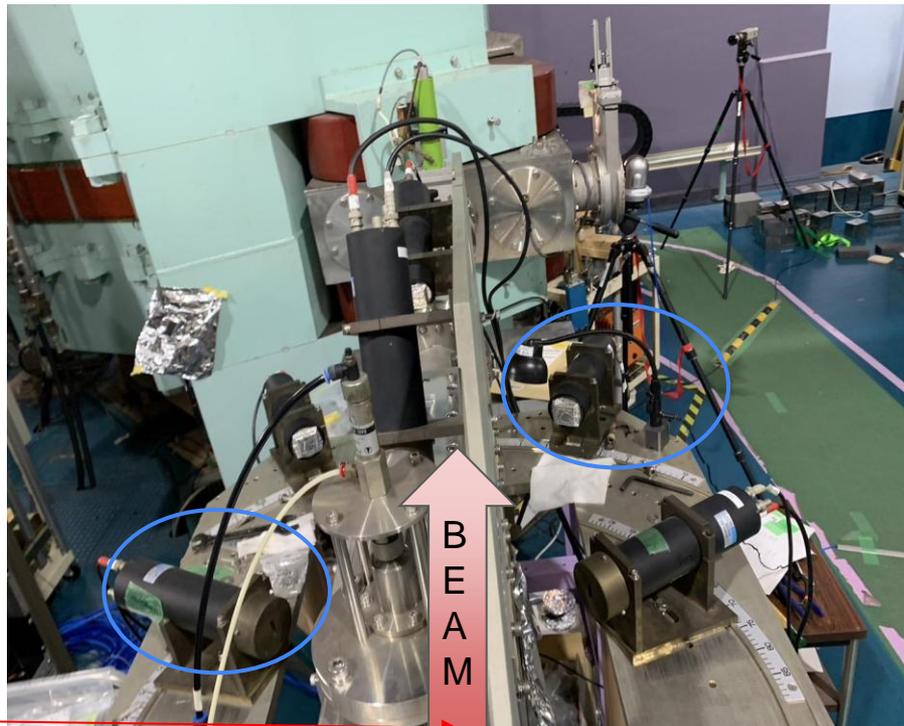




横から見た図

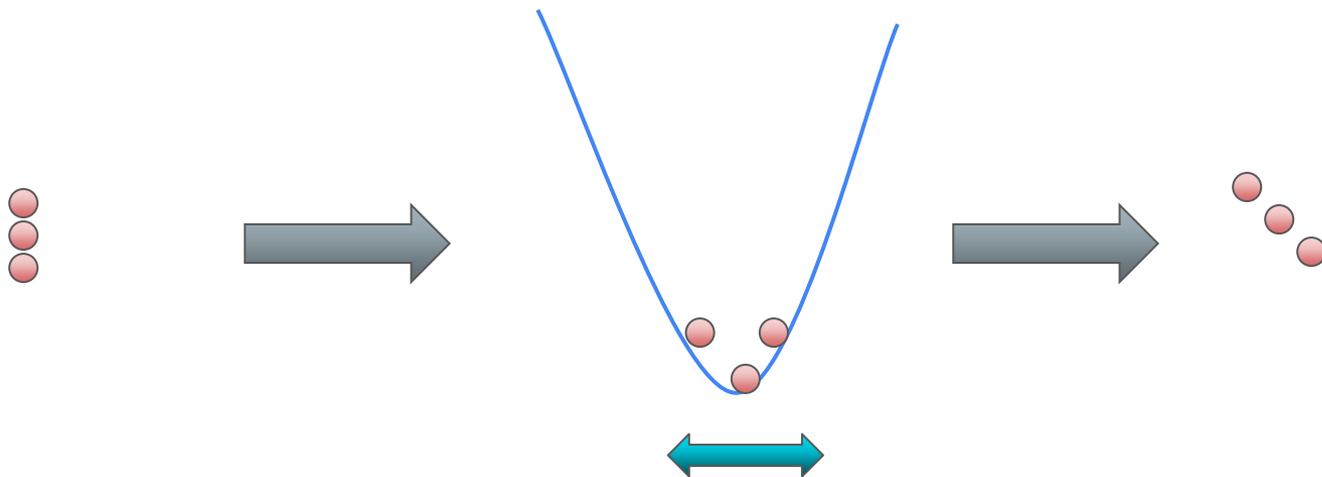
ポリエチ

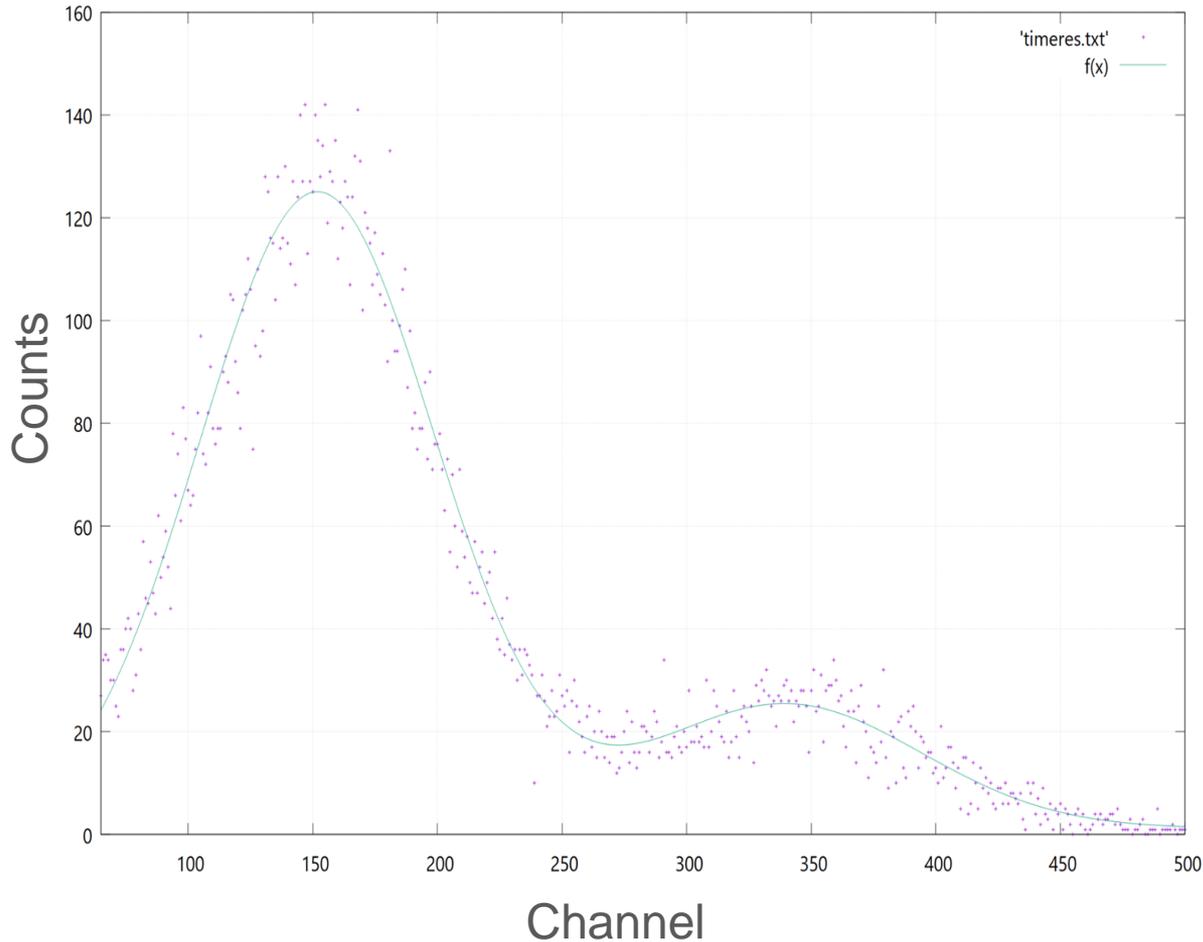
上から見た図



# なぜ時間的な広がりをもってしまうのか

- ・サイクロトロンでのAC的な加速電圧による影響



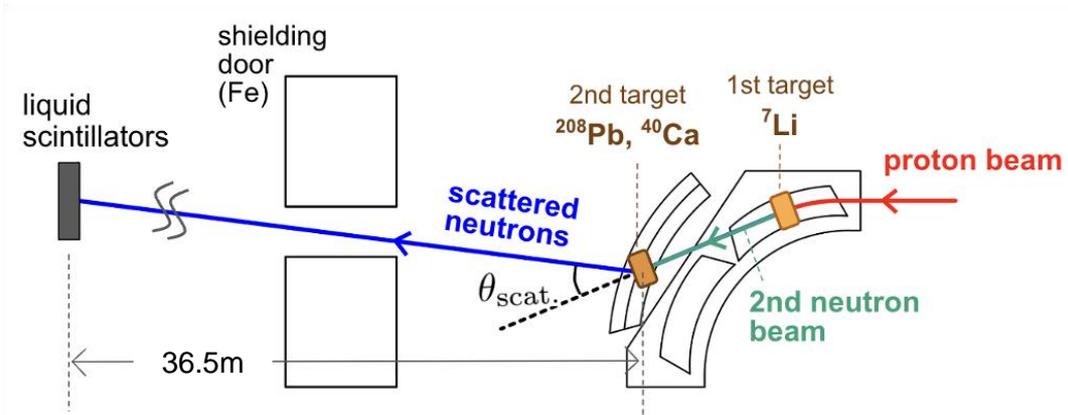


- ・ 二つのピーク構造は取り除けなかった.

- ・ 左側のピークはFWHMで0.75ns

- ・ 左と右の大きさの差は5:1程度であった.

# 実験Setup (一次標的, 二次標的)



- 陽子ビームをSwinger磁石中の磁場で曲げてLiに入射
- Li(p,n)反応で生成される二次中性子ビームがSwinger磁石側面から放射
- 二次中性子ビームをコリメート
- 二次中性子ビームを ${}^{208}\text{Pb}, \text{natCa}$ に入射
- 二次標的からの散乱中性子が検出器へ

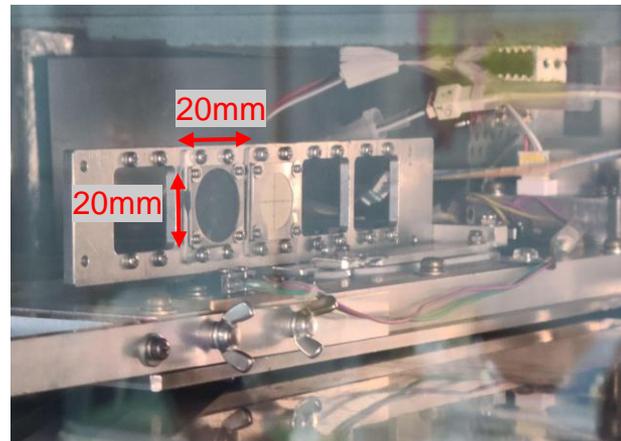
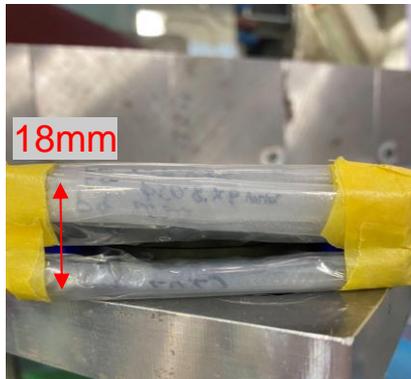
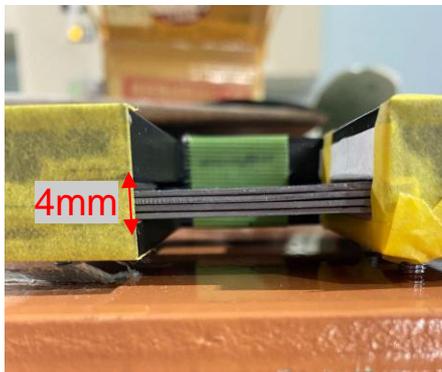
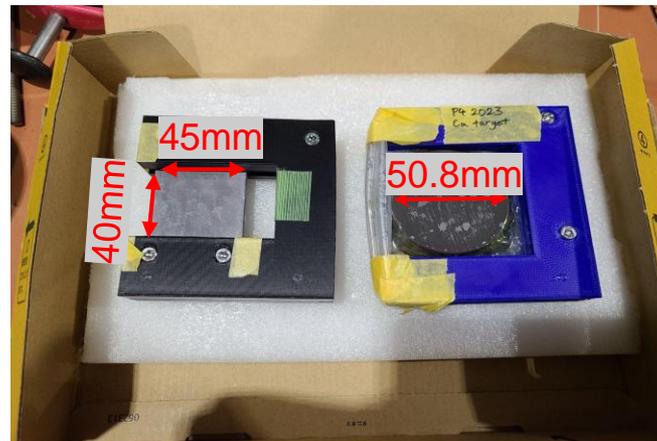
# 実験Setup (一次標的,二次標的)

## 標的について

$^7\text{Li}$ : 20mm×20mm×1mm<sup>t</sup>

$^{\text{nat}}\text{Ca}$ :  $\Phi$ 50.8mm×18mm<sup>t</sup> 純度99.5%

$^{208}\text{Pb}$ : 40mm×45mm×4mm<sup>t</sup> 純度99.9%



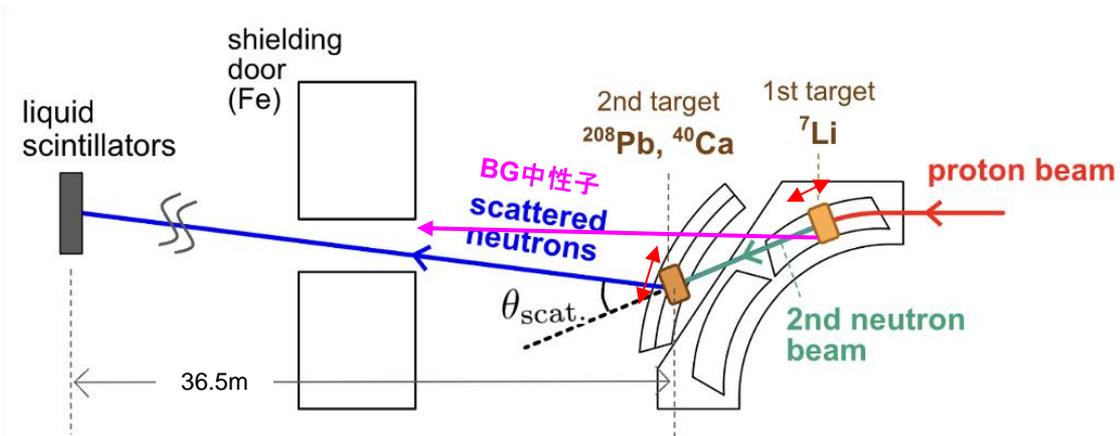
# 実験Setup (一次標的,二次標的)

## 散乱角の選別

- LiをSwinger磁石内で回転
  - Pb,Caをコリメーターと同時に回転
- 幾何学的に測定したい散乱角の散乱中性子が遮蔽扉に入射する

## 注意点

- 他の散乱角をもった二次標的に入射する二次中性子の遮蔽
- 二つの回転中心が一致するための正確なアライメント



# 実験Setup (一次標的,二次標的)

## BG中性子の遮蔽

昨年の問題点: BG中性子が多すぎて統計誤差が大きくなった

→PhitsによるシミュレーションでBG中性子を減らす配置を考える

(※Phits: 主に核反応に関するモンテカルロシミュレーションを計算するシミュレーションコード)

BGとして考えられるのは主にLiからの二次中性子ビーム

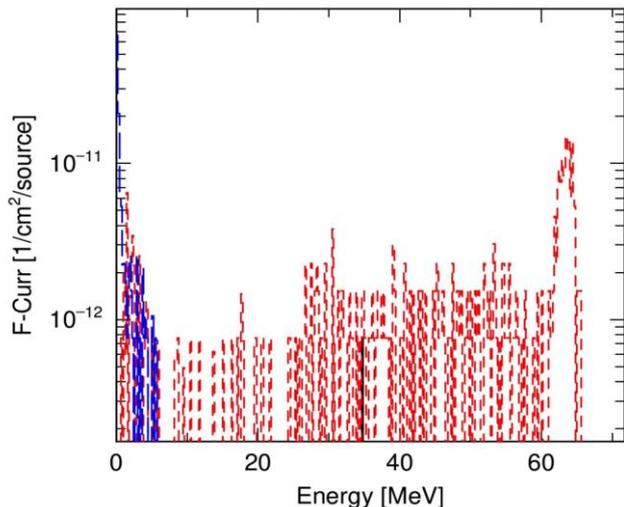
→コリメーターを延長することでBG中性子を減らせそう

# 実験Setup (一次標的,二次標的)

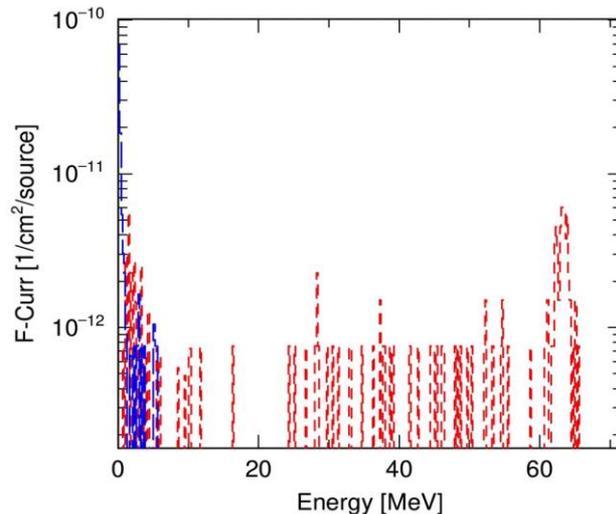
## BG中性子の遮蔽

Phitsによるシミュレーションの結果(散乱角 $4^\circ$ )

コリメータ45cm



コリメータ75cm



赤線:中性子  
青線:γ線

縦軸:フルエンス  
横軸:エネルギー

S/Nは良くなりそう

検出器に入射する中性子フルエンス:  $3.1896E-10 \rightarrow 8.1986E-11$

# 実験Setup (一次標的,二次標的)

## BG中性子の遮蔽

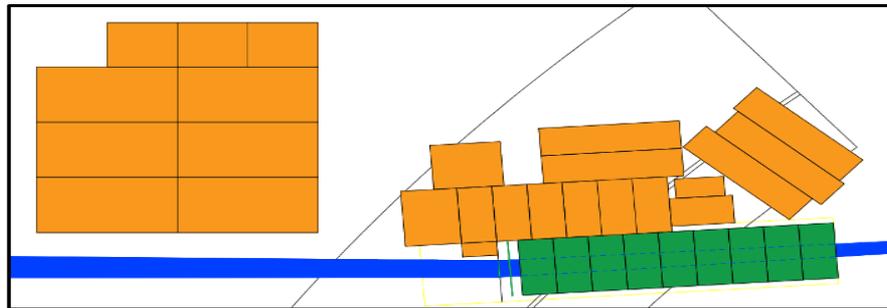
- 二次標的直前のFeコリメーター：450mm<sup>t</sup>(2022年度P4実験)  
→750mm<sup>t</sup>  
寸法：100mm×100mm×50mm<sup>t</sup>×15個  
径：Φ[mm]=24×4個,24.5×1個,26×2個,27×3個,28×2個,30×3個
- コリメーター脇の遮蔽ブロック：約630mm<sup>t</sup>→700mm<sup>t</sup>  
Fe(100mm×80mm×100mm<sup>t</sup>)：6個  
Fe(100mm×50mm×100mm<sup>t</sup>)：4個  
W(100mm×50mm×100mm<sup>t</sup>)：2個  
Fe(120mm×100mm×100mm<sup>t</sup>)：1個  
Fe(100mm×25mm×50mm<sup>t</sup>)：1個
- 遮蔽ブロック：400mm<sup>t</sup>→700mm<sup>t</sup>  
Fe(200mm×100mm×50mm<sup>t</sup>)：42個  
Fe(160mm×100mm×100mm<sup>t</sup>)：7個  
Fe(100mm×40mm×100mm<sup>t</sup>)：7個

# 実験Setup (一次標的,二次標的)

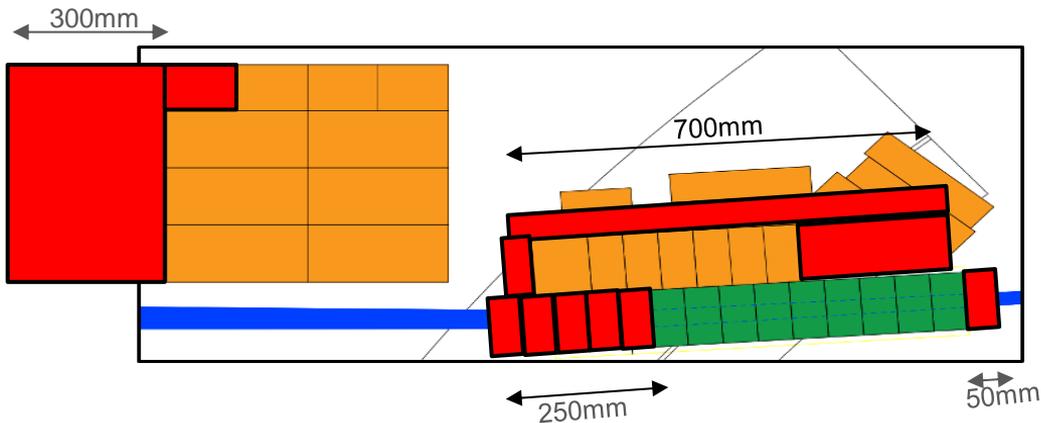
## BG中性子の遮蔽

上: 前年度の遮蔽の配置

下: 今年度の遮蔽の配置

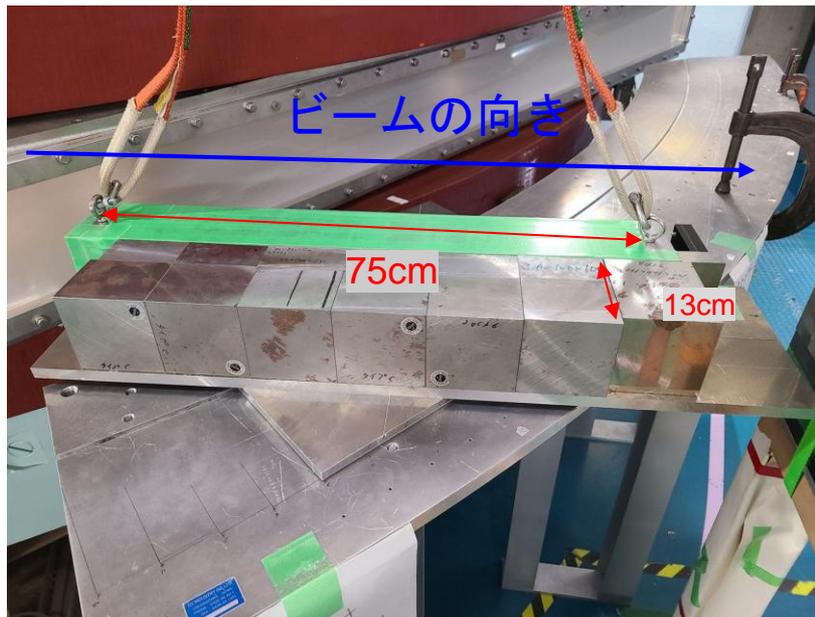


前年度と比較して増やした遮蔽を  で示した

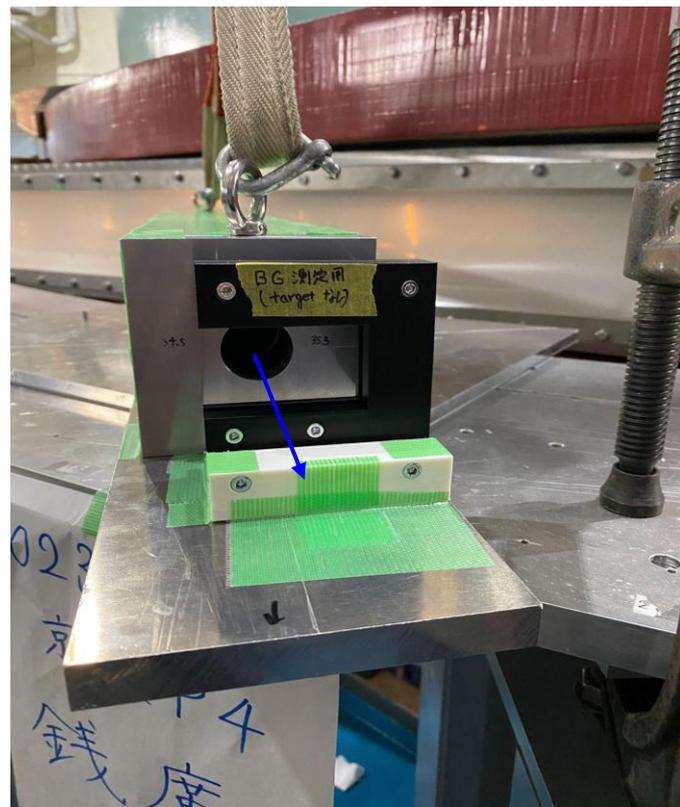


# 実験Setup (一次標的,二次標的)

## BG中性子の遮蔽



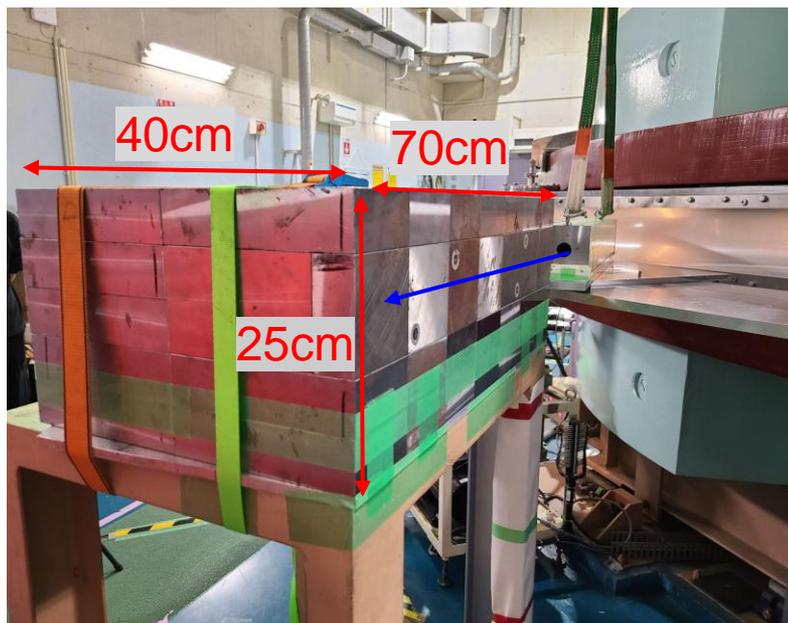
2次標的直前のコリメーターと脇に置いた遮蔽ブロック



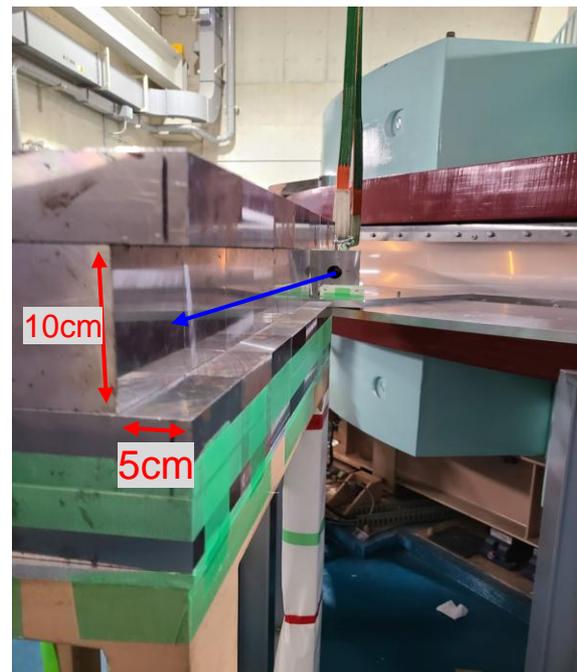
下流側から見たコリメーター

# 実験Setup (一次標的,二次標的)

## BG中性子の遮蔽



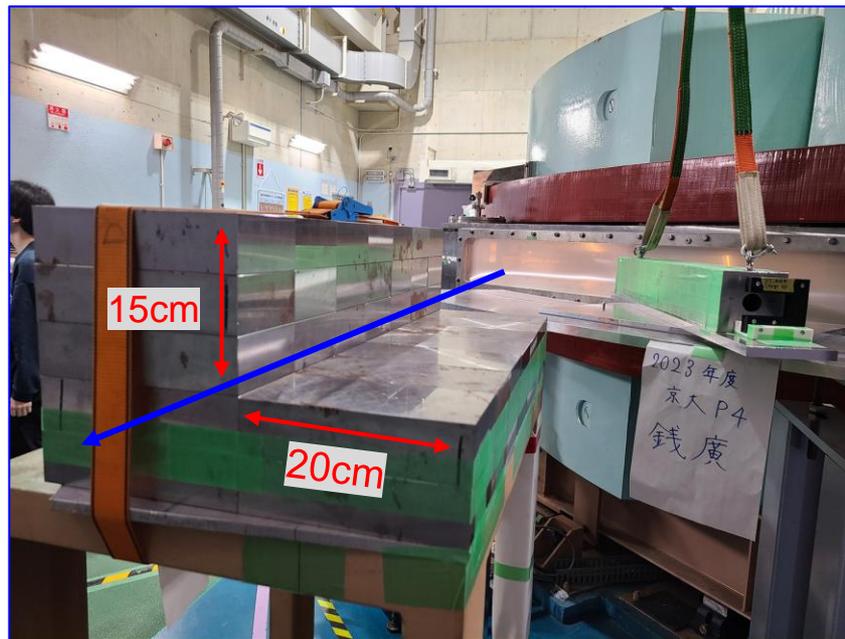
下流側においた遮蔽ブロック(4°)



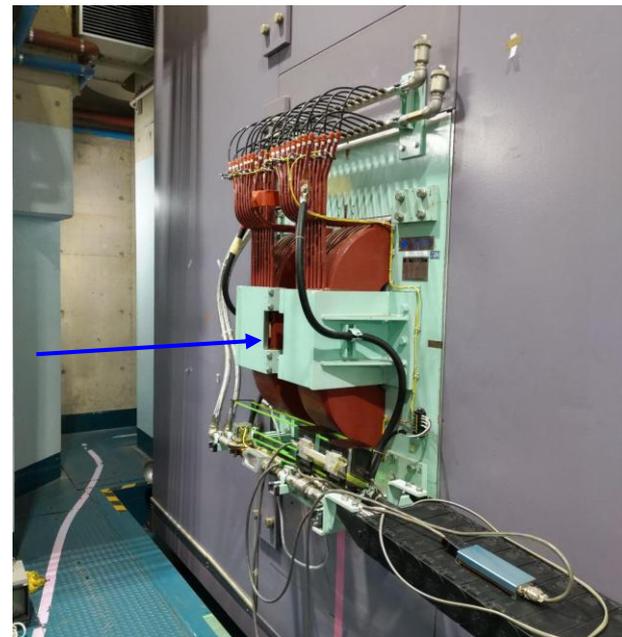
下流側においた遮蔽ブロック(3°)

# 実験Setup (一次標的,二次標的)

## BG中性子の遮蔽



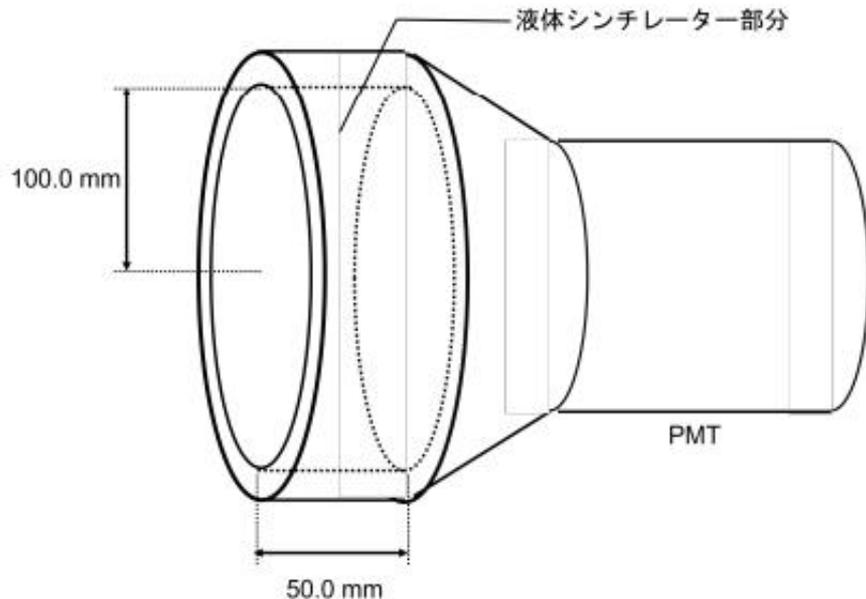
下流側においた遮蔽ブロック(0°)



遮蔽扉

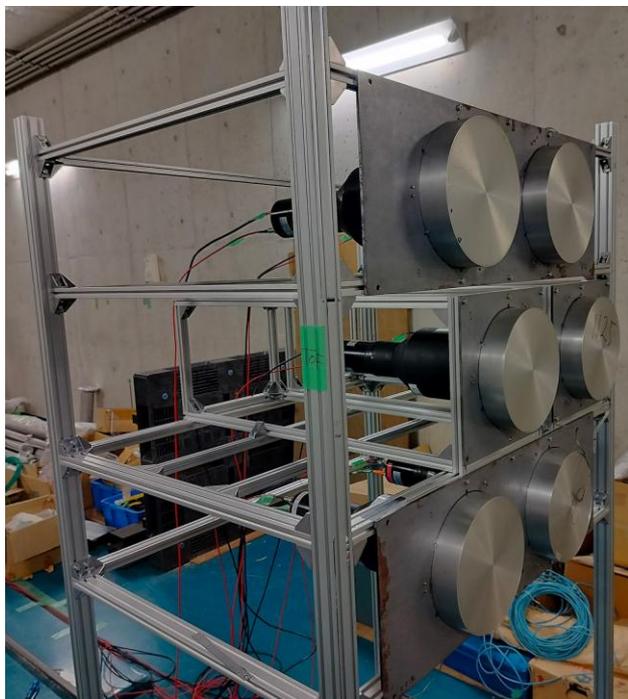
## 実験Setup(使用した検出器)

浜松ホトニクス R4414-01MODを使用. 中性子を検出するためシンチレータは液体シンチレータ.

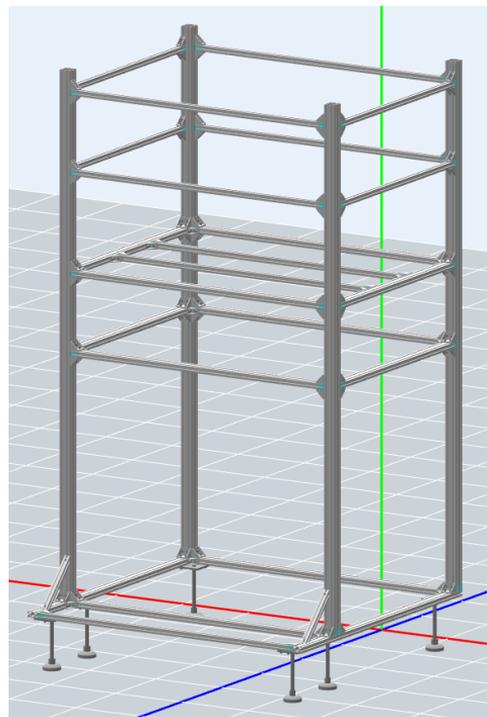


# 実験Setup(検出器の配置)

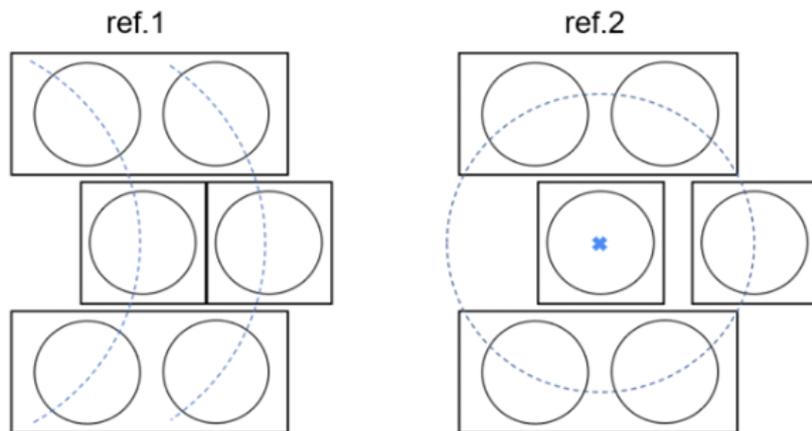
検出器は昨年度のP4の実験で使用した検出器架台を再利用した



横幅が1040mm



# 実験Setup(検出器の配置)



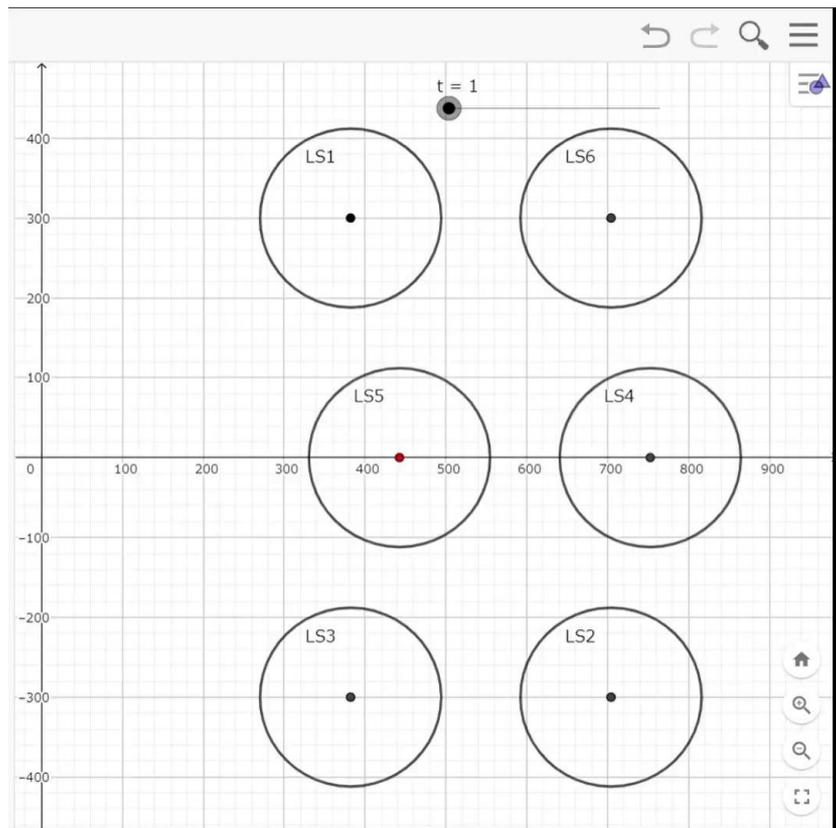
検出器は左図のように配置した.

Ref.1は中性子弾性散乱を測定したときの配置である. 昨年度は上下4つの検出器を固定して中段のみを動かしたが, 本年度はすべてを動かして, 中段左の検出器が, 常に二次標的で散乱されて遮蔽扉を抜けてやってくるビームの中心を追うようにした.

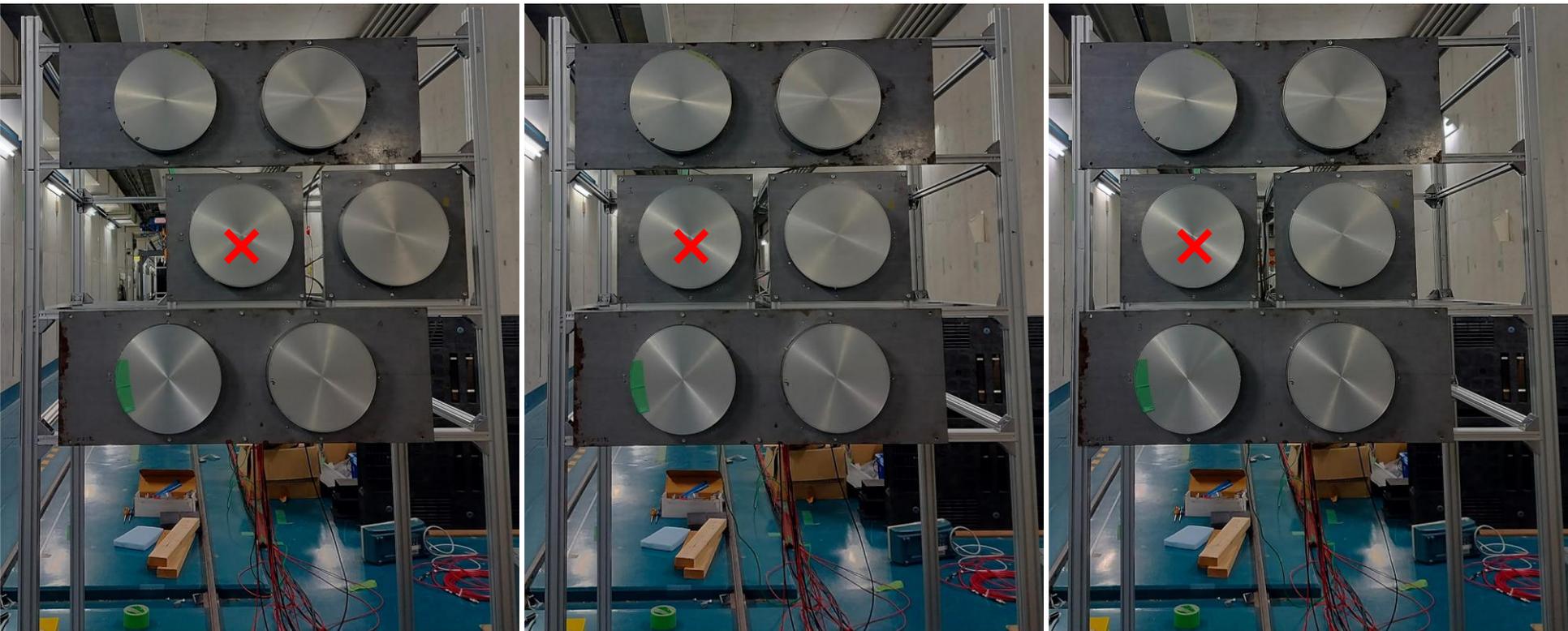
→これによって解析がやりやすくなる&アライメントのズレに対する許容量が大きくなる

ref.2は $0^\circ$ でLiのp,n散乱を測定したときの配置である. 中段左が $0^\circ$ ビーム中心上に来るようにした.

# 実験Setup(検出器の配置)



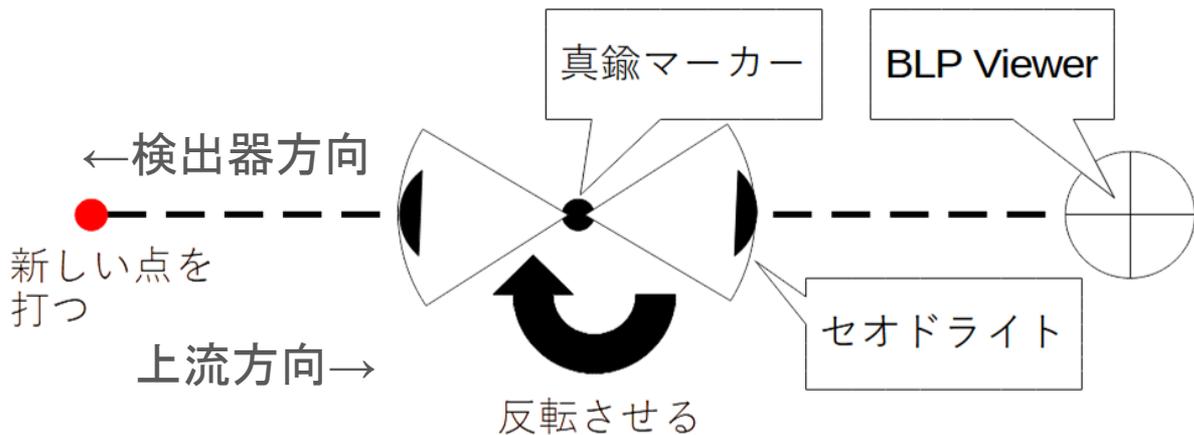
## 実験Setup(検出器の配置)



左から順に散乱角 $0^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ セッティング時の検出器の配置

# 実験Setup(検出器のアライメント)

TOFトンネル内には0°ビーム中心を示す真鍮のマーカがある。その上にセオドライトを置き、それを通してBLP Viewerを見て、下流側に0°ビーム中心の線を延長していくことで精度良く水平方向のアライメントを行い、検出器架台の位置を決定した。鉛直方向のアライメントにはレベルを用いた。



使用したセオドライト。これを真鍮マーカ上に置きBLPを見ることでアライメントを行った。

# 収量見積

陽子ビーム	1 $\mu$ A
一次標的 <sup>7</sup> Li	1.0mmt
<sup>7</sup> Li(p,n) <sup>7</sup> Be 0°散乱	33.4 mb/sr *
二次標的 <sup>208</sup> Pb	3.92mmt, $\Phi$ 30mm
<sup>40</sup> Ca	18mmt, $\Phi$ 30mm
一次標的と二次標的	2.37m
二次標的と検出器	34.3m
検出器	$\Phi$ 200mm
検出効率	3%(4MeVee)

## 208Pb

散乱角 (LAB)	微分散乱断面積	収量(cps)
3	3.3e+04 mb/sr	0.024
4	2.9e+04 mb/sr	0.021

## 40Ca

散乱角 (LAB)	微分散乱断面積	収量(cps)
3	5.2e+03 mb/sr	0.012
4	4.9e+03 mb/sr	0.011

# ビームタイムの時間配分計画

検出器での計数がポアソン分布に従うと仮定すると、誤差を最小にする測定時間の割り振りは

$$t_2 = \frac{t_1}{\sqrt{1 + \gamma}}$$

( $t_1$ :標的ありの測定時間,  $t_2$ :バックグラウンドの測定時間,  $\gamma$ :S/N比)になる.

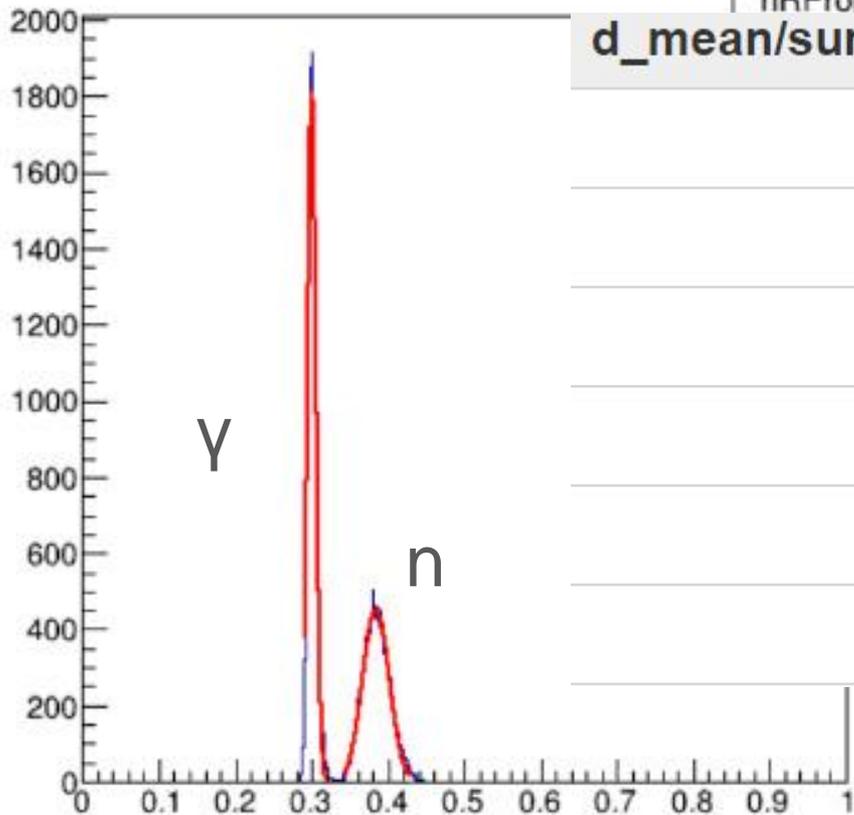
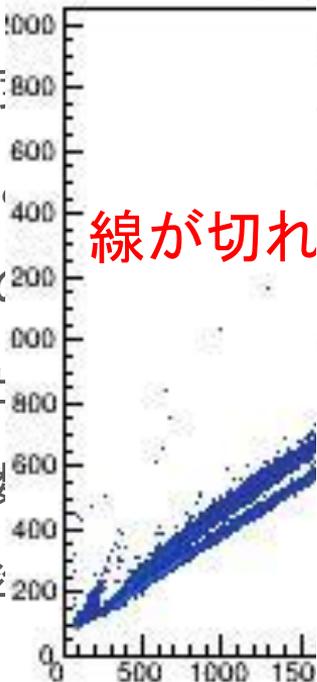
これを用いて, PbのS/Nを1, 1つの散乱角度について測定に使える時間を15時間としたときの最適な時間配分を求めると以下のようなになる(3°と4°の断面積の違いは無視).

background	40Ca	208Pb
4.12h	5.05h	5.83h

# 検出器の選定

- 今年度  
 ・ All  
 ・ NYC  
 ・ 検出器  
 を十  
 実験

線が切れ



(qdc[3]-108)/(qdc[2]-154) (qdc[2]>400 && qdc[3]>400)

hRProjY1

d\_mean/sum\_sigma

3.65191

3.6239

4.08313

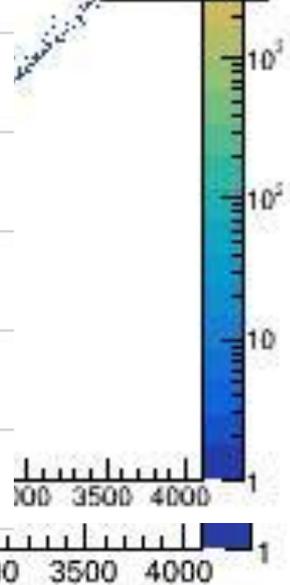
4.33825

3.89974

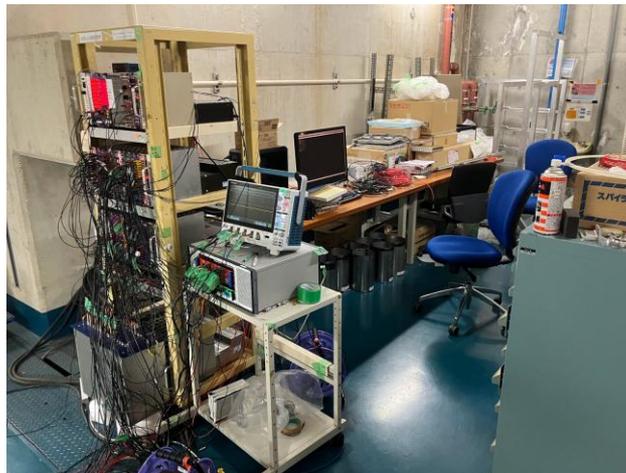
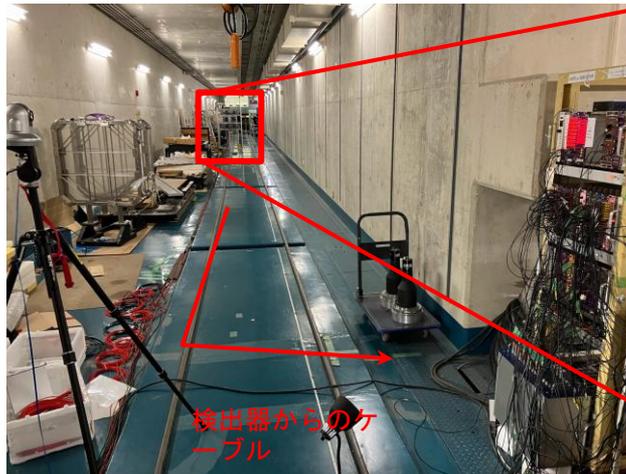
4.35527

hNG4
Entries 331584

hNG6
Entries 307894
Mean x 122.6
Mean y 152.5
Std Dev x 188.2
Std Dev y 82.59



## 検出器 → 回路台



- ・ 検出器から約25m後方に回路台，データ収集用のPCが設置されている
- ・ 検出器の性能テストや線源を用いた較正(後述)はここで作業した。

# 回路について

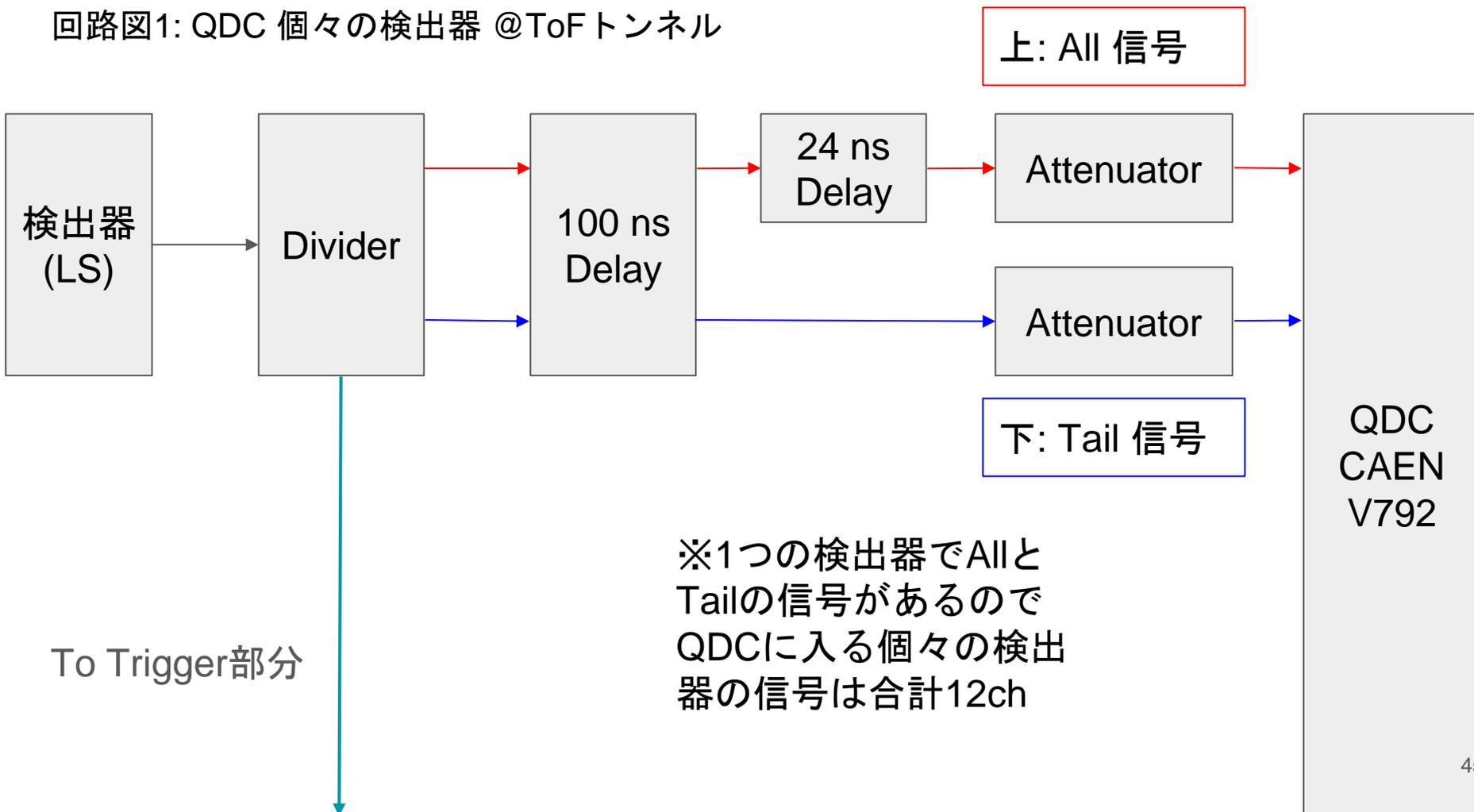
## 回路で行う主なこと

- QDCで中性子— $\gamma$ 線の弁別
- TDCで弾性—非弾性の弁別

## 回路図での略称

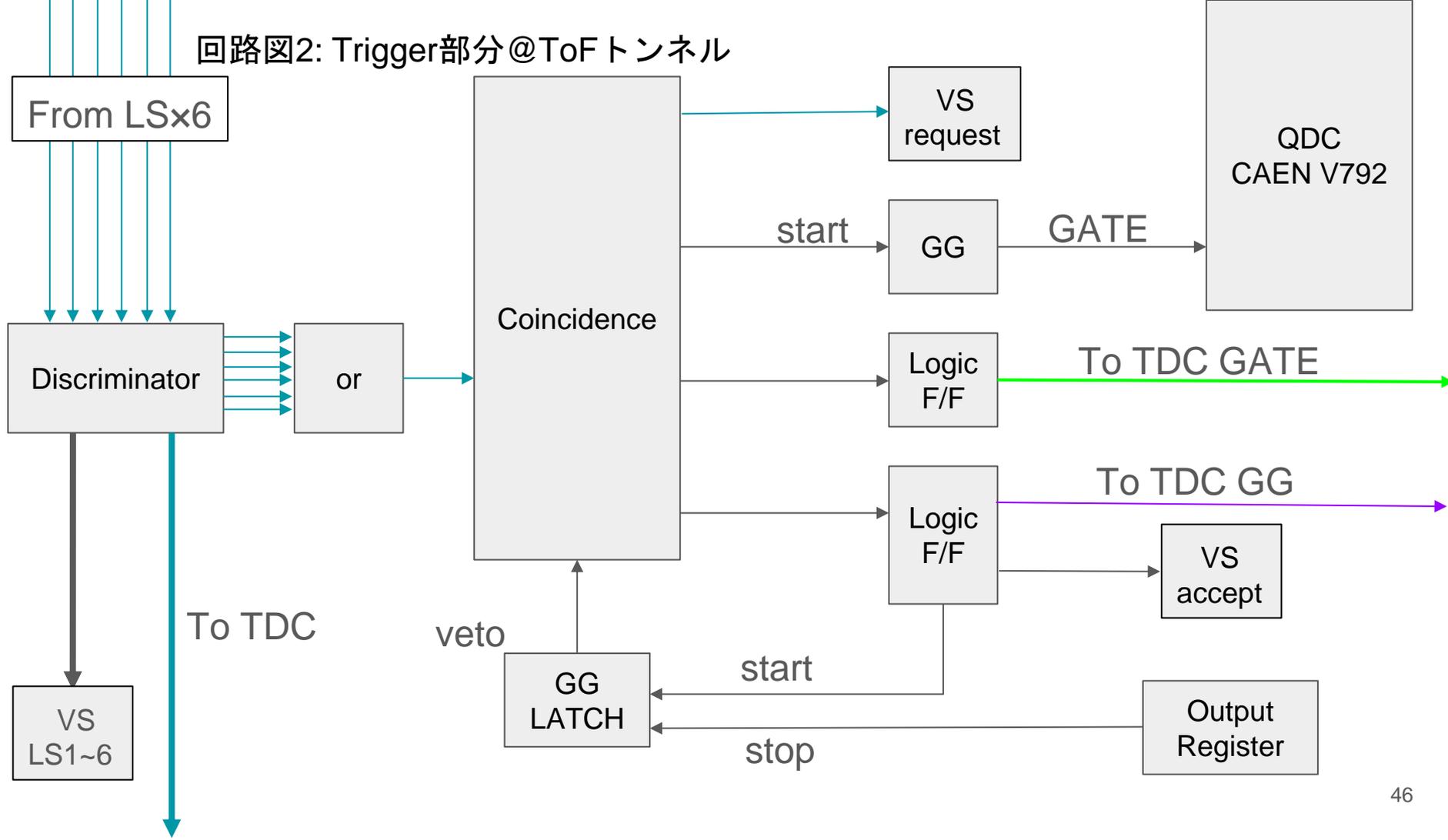
- VS: Visual Scaler
- GG: Gate Generator
- F/F: Fan-in/Fan-out
- CFD: Constant Fraction Discriminator

回路図1: QDC 個々の検出器 @ToFトンネル

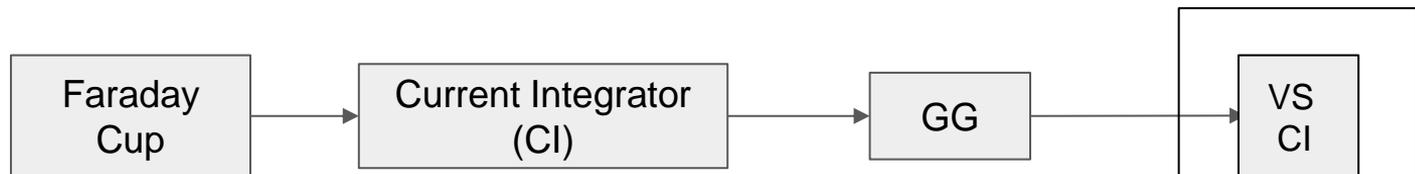
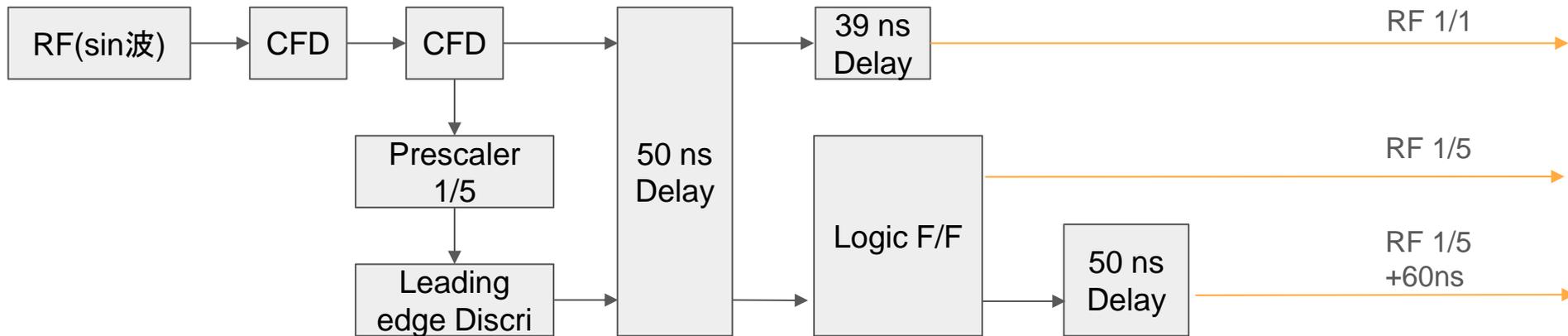


※1つの検出器でAllとTailの信号があるのでQDCに入る個々の検出器の信号は合計12ch

回路図2: Trigger部分@ToFトンネル



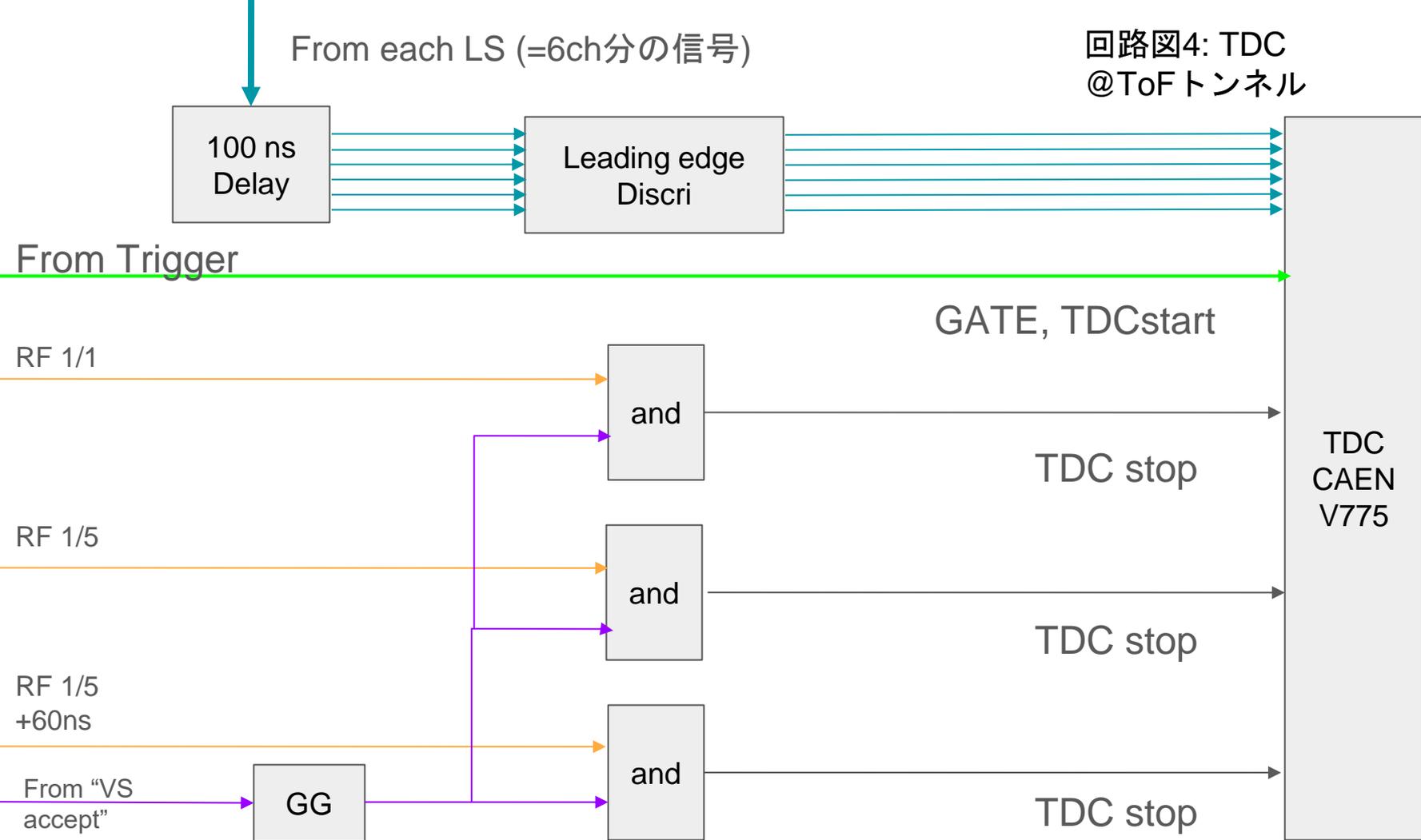
### 回路図3: RF信号, Current Integrator(CI)部分 @共同溝



CI : 陽子ビームの強度指標

これはToFトンネルの回路台に設置

回路図4: TDC  
@ToFトンネル



## 回路つづき

赤く光っているものがVS



- ・ 以上の回路図におけるVSの値は左図のようにwebカメラを三脚に設置して値の読み取り・監視を行った.

- ・ webカメラの映像はユーザー名及びパスワードを入力すれば個々の端末で閲覧可能

右図は共同溝に配置したモニター. 実験中はwebカメラの映像をここでチェック

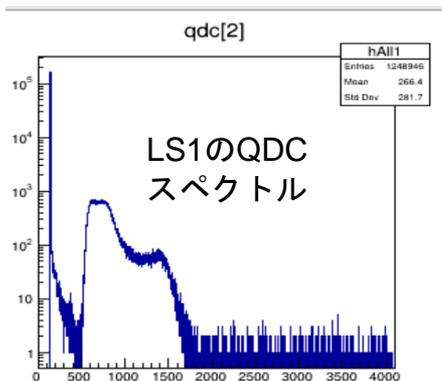


# エネルギー較正

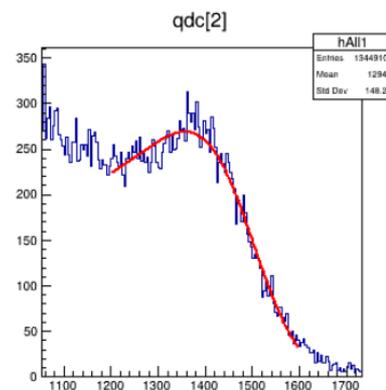
- 較正線源として $^{232}\text{Th}$ (トリタン棒)及びAmBe線源を使用
- エネルギースペクトルにおいて $\gamma$ 線由来のコンプトンエッジをfitすることでQDCchとエネルギーの対応を取る



トリタン棒



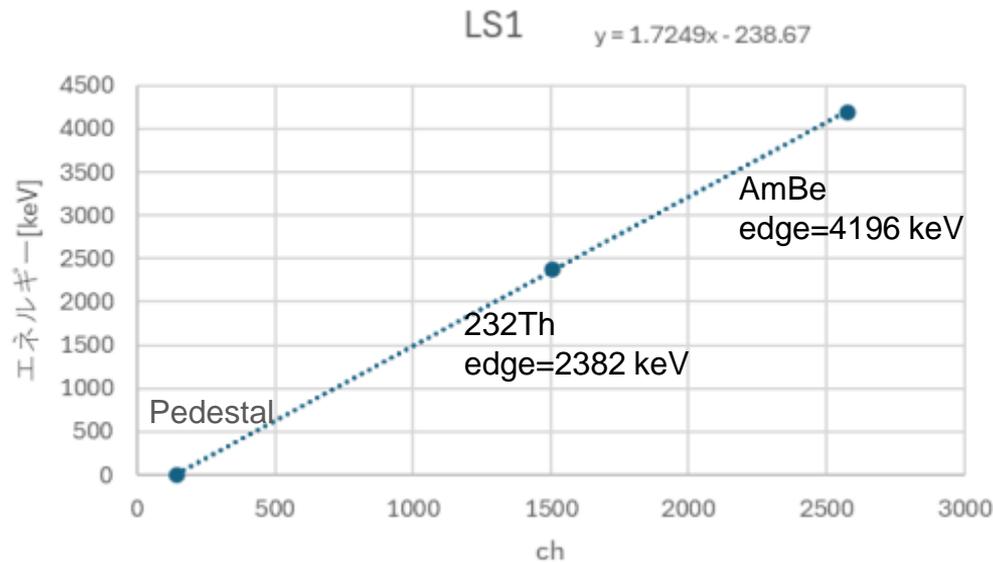
拡大 & fit



AmBe線源容器

## エネルギー較正 2

- fitした値を二次元座標にプロットし，エネルギーの原点をPedestalにとって線型fitした
- しかし，本番時は高いエネルギー中性子を扱うために信号強度を1/5にattenuateしている。  
→この減衰分の補正として較正式の値を5倍した。
- ただし，QDCchの端は線型性が悪いためPedestalはattenuate時の値を基準に



X: QDCch Y: エネルギー [keV]

$$Y = 1.7249X - 238.67$$

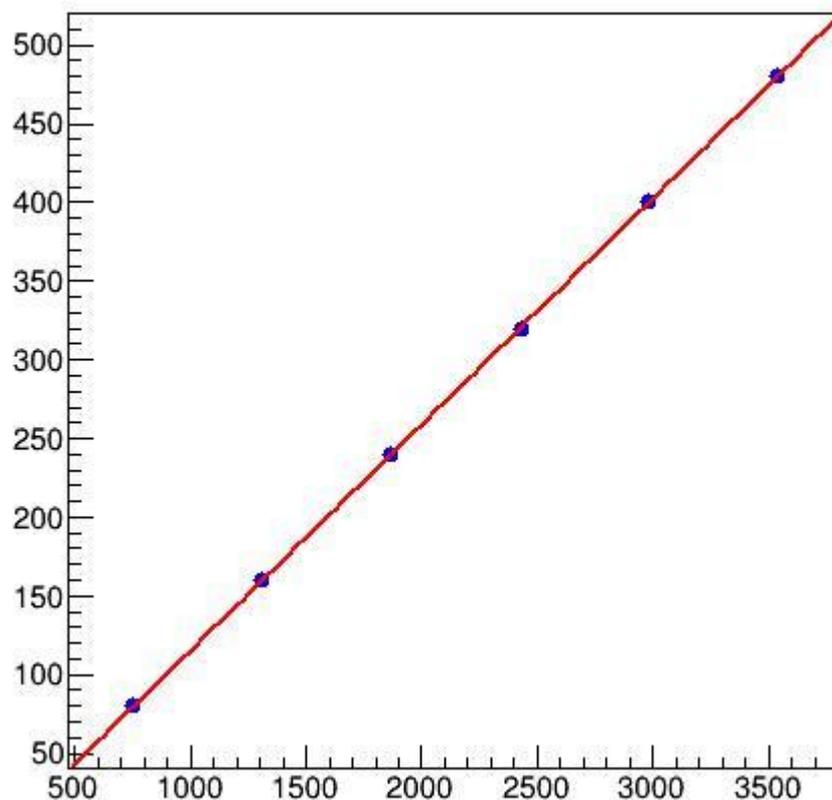
↓ 補正

$$\underline{Y = 8.6246X - 726.61}$$

# TDC較正

Time Calibratorとして  
 右図は80ns間隔で  
 入っており  
 それに対応するチャ  
 ところにピークが  
 それらの相関を見  
 1次関数でフィッテ

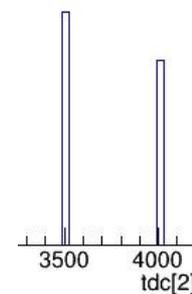
## gTDCCal



を使用

htemp	
Entries	117920
Mean	50.03
Std Dev	366.5

180ns



# TDC較正

がしかし

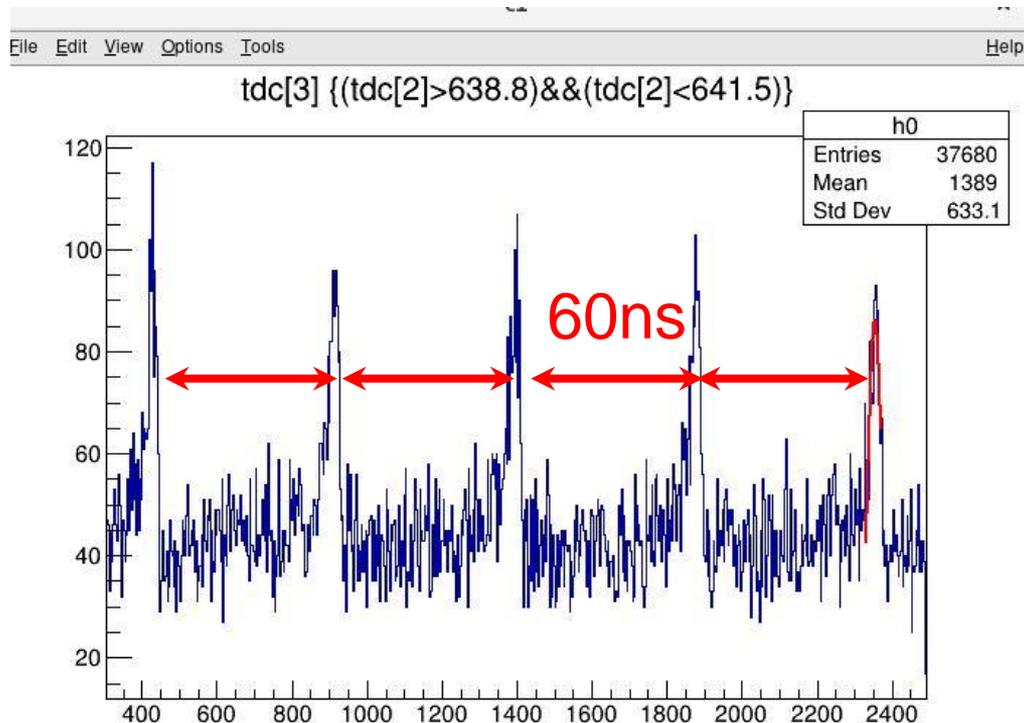
TDCの設定と異なる結果になった

測りなおす時間がなかったため

実験データで較正を行う

TDCのピークが16.845MHzで

来ていることを利用



## 昨年度からの変更まとめ

- 2次標的前のコリメーターを増やした (45cm→75cm)
- 遮蔽を増やした
- TOF長を増やした(34m→36.5m)
- 検出器の動かし方を変えた
- 検出器を選定した

# 解析

最終目標：散乱断面積を出す

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{N_{\text{out}}}{n_{\text{in}} \times \rho d} \times \frac{T_{\text{ref}}}{T_{\text{sca}}} \quad N_{\text{out}} = \sum_{i=1,3,5} \text{ or } \sum_{i=2,4,6} \frac{n_{\text{out}}^{(i)}}{e_i}$$

$T_{\text{ref}}$  : Li(p,n)を測定した時間     $T_{\text{sca}}$  : 散乱を測定した時間

必要なこと：“2次標的に入射する中性子の数”と“各検出器で散乱中性子を  
検出した数”を数える

→ ・ 中性子を選ぶ(n $\gamma$ 弁別)

・ 弾性散乱の中性子を選ぶ(TDCスペクトル)

# n $\gamma$ 弁別

縦軸 : ChTail/ChAll

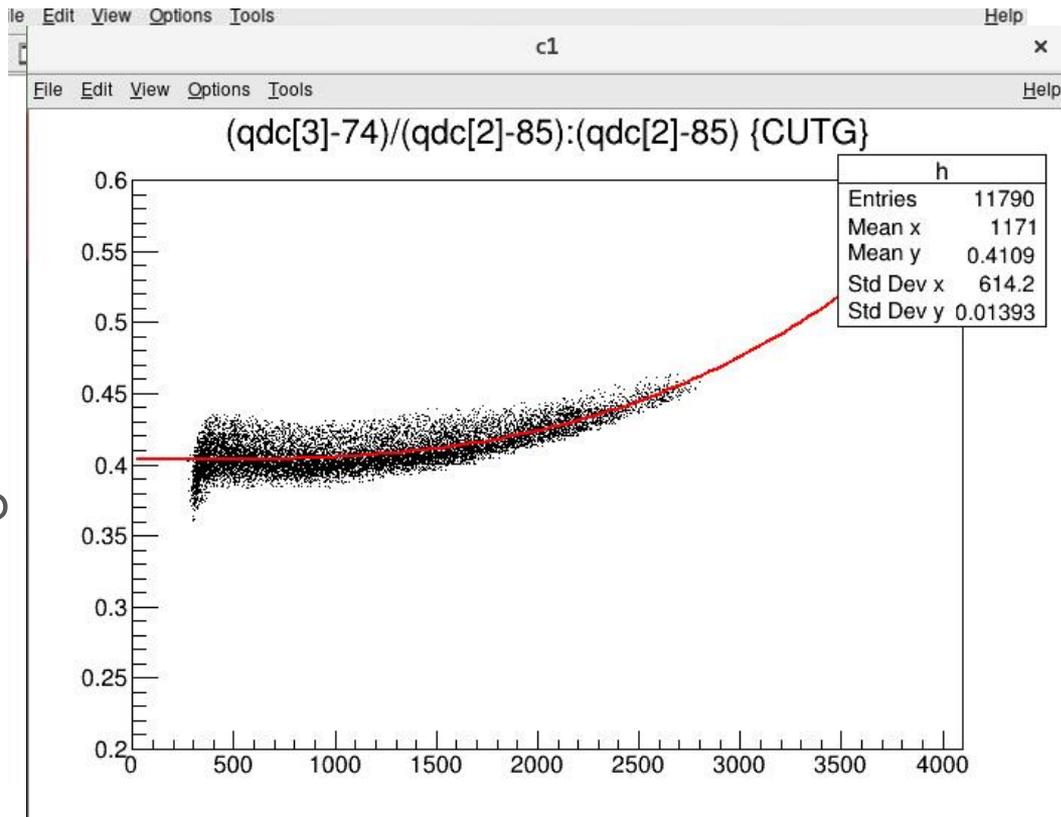
横軸 : 発光量(MeVee)

を各検出器で描き

グラフ上でnの部分を取り取る

切り取った後

3次関数でフィッティング



Pb4° 検出器1のデータを使用

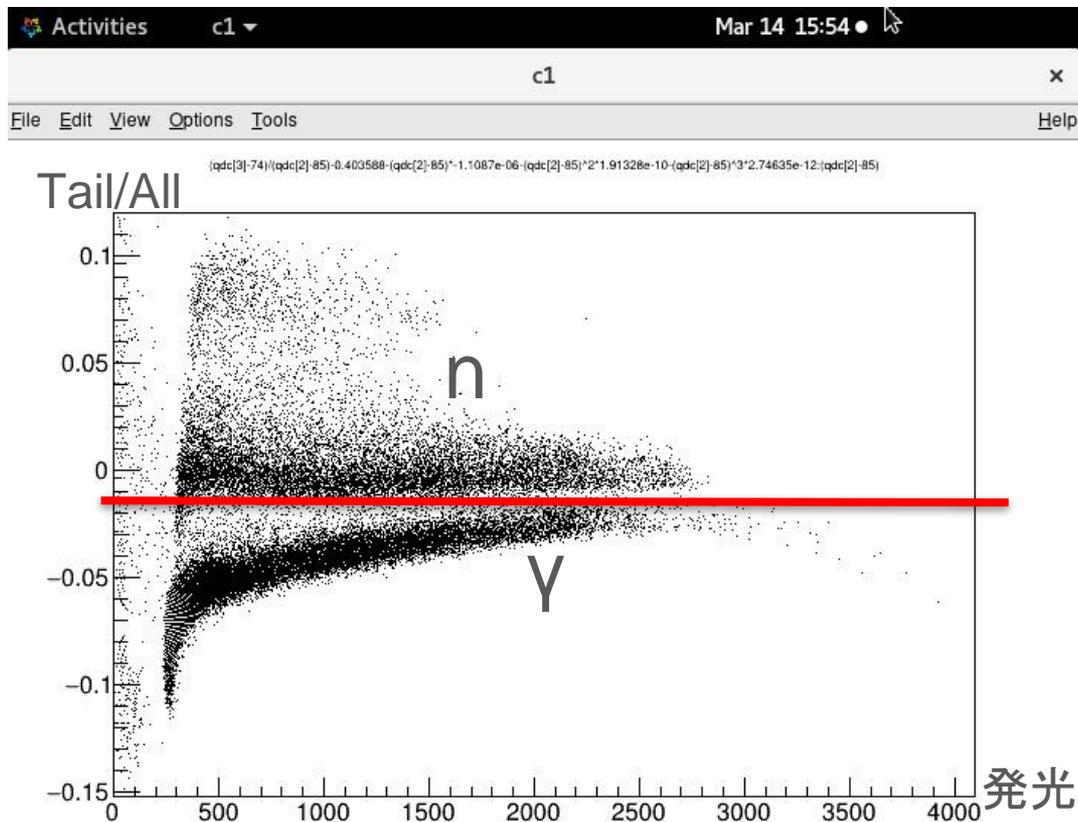
# n $\gamma$ 弁別

Tail/Allのグラフから

3次関数を引き算

赤線よりも上が中性子とする

赤線はどう引くのか？



# n $\gamma$ 弁別

先ほどのグラフをy軸に射影

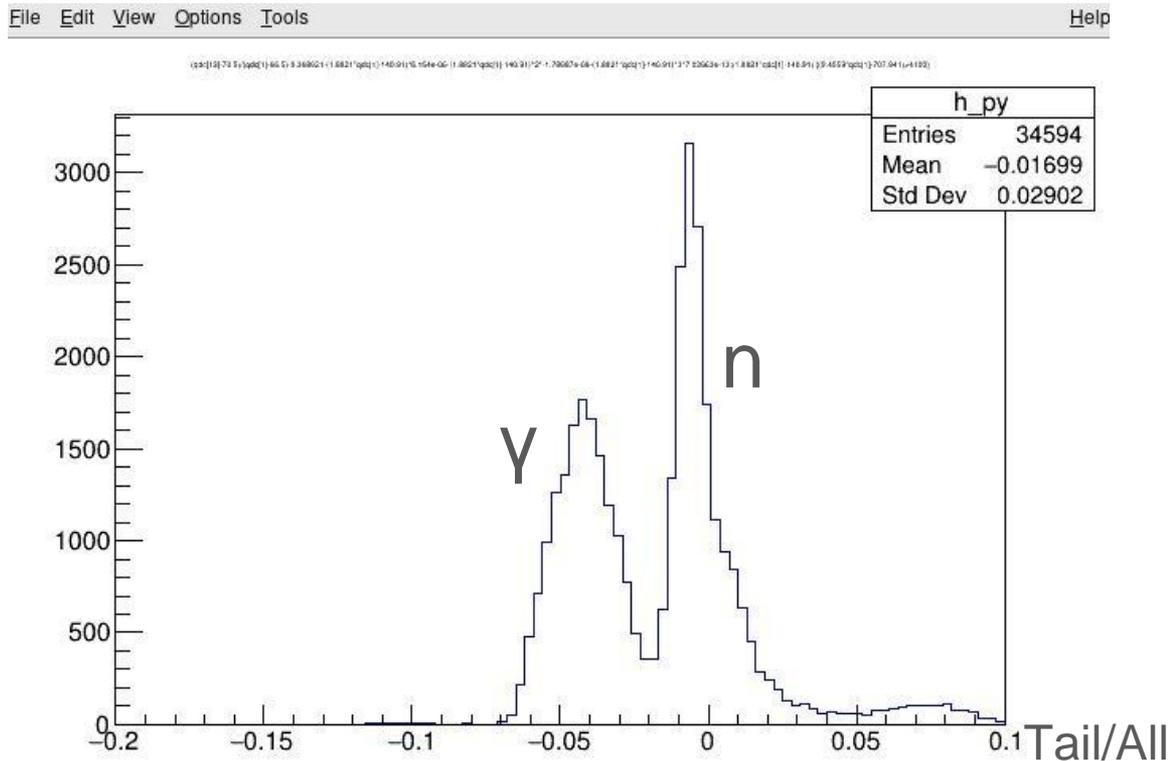
左右の山をそれぞれ

ガウシアンでフィッティング

平均と偏差を出す

これをPb, Ca, blankの3°, 4°

とLi(p,n)に対して行う



# n $\gamma$ 弁別

ProjectionY Pb4deg

LS1	mean	sigma
n	-0.00219	0.009299
$\gamma$	-0.03836	0.009673

FOM  
1.906676

LS5	mean	sigma
n	-0.00421	0.009622
$\gamma$	-0.04826	0.019468

FOM  
1.514169

LS3	mean	sigma
n	-0.00193	0.010001
$\gamma$	-0.03838	0.010142

FOM  
1.80977

LS6	mean	sigma
n	-0.00375	0.008705
$\gamma$	-0.04162	0.010344

FOM  
1.98811

LS4	mean	sigma
n	0.000204	0.008708
$\gamma$	-0.04203	0.011987

FOM  
2.04048

LS2	mean	sigma
n	-0.00219	0.009299
$\gamma$	-0.03836	0.009573

FOM  
1.91677

Pb4°を射影したデータ

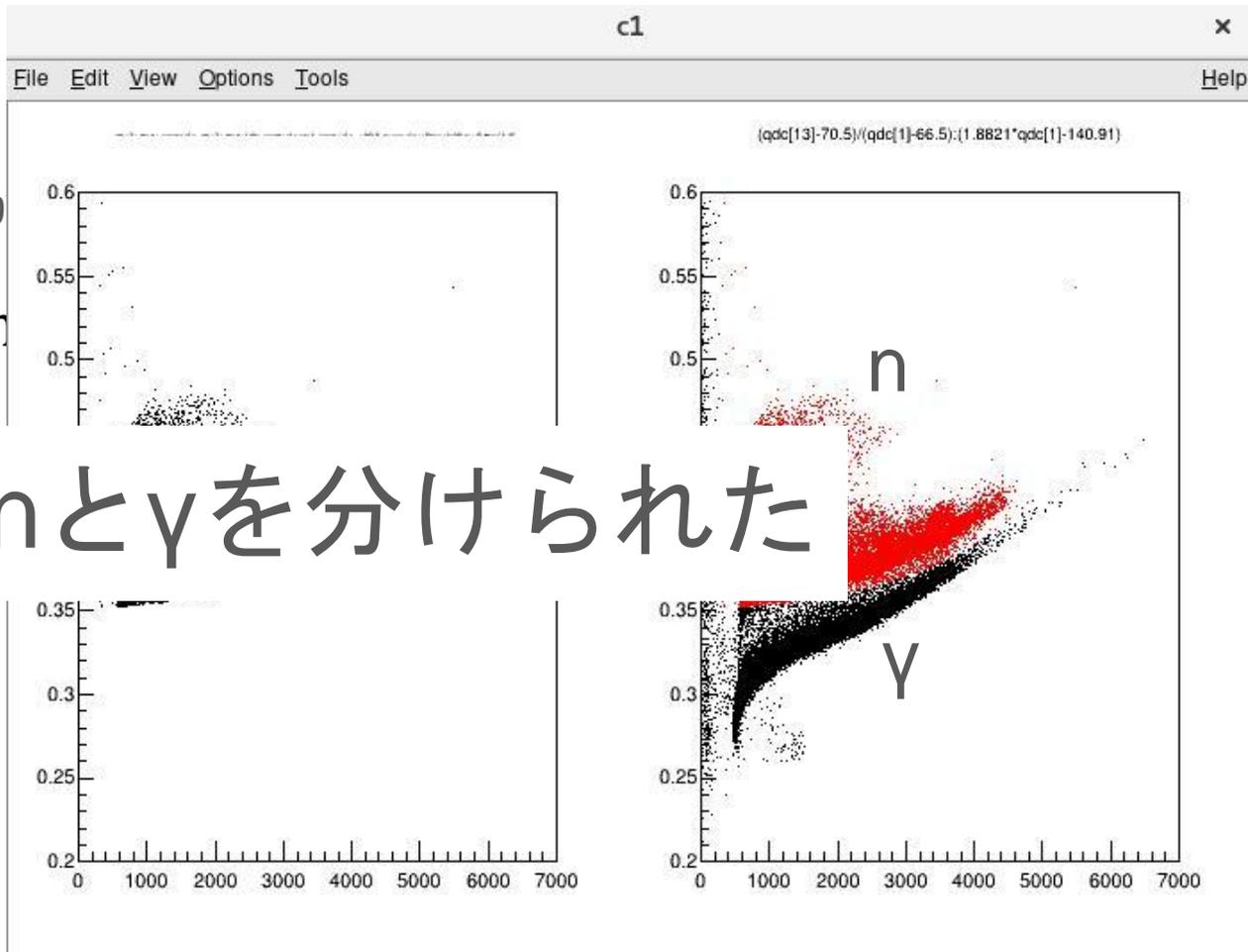
# n $\gamma$ 弁別

各検出器でFOMの値が

$$\frac{\text{Tail}}{\text{All}} - (\text{多項式}) \geq n$$

で中性子を選ぶ

## nと $\gamma$ を分けられた



e]

# Li(p,n)

## 0°のLi(p,n)反応についても同様に解析

ProjectinY Blank0deg

LS1	mean	sigma
n	-0.005726	0.006002
$\gamma$	-0.036034	0.009428

FOM  
1.964191

LS6	mean	sigma
n	-0.003201	0.005092
$\gamma$	-0.043514	0.012517

FOM  
2.289352

LS5	mean	sigma
n	-0.002757	0.005751
$\gamma$	-0.037341	0.009780

FOM  
2.226706

LS4	mean	sigma
n	-0.002432	0.005545
$\gamma$	-0.040640	0.009524

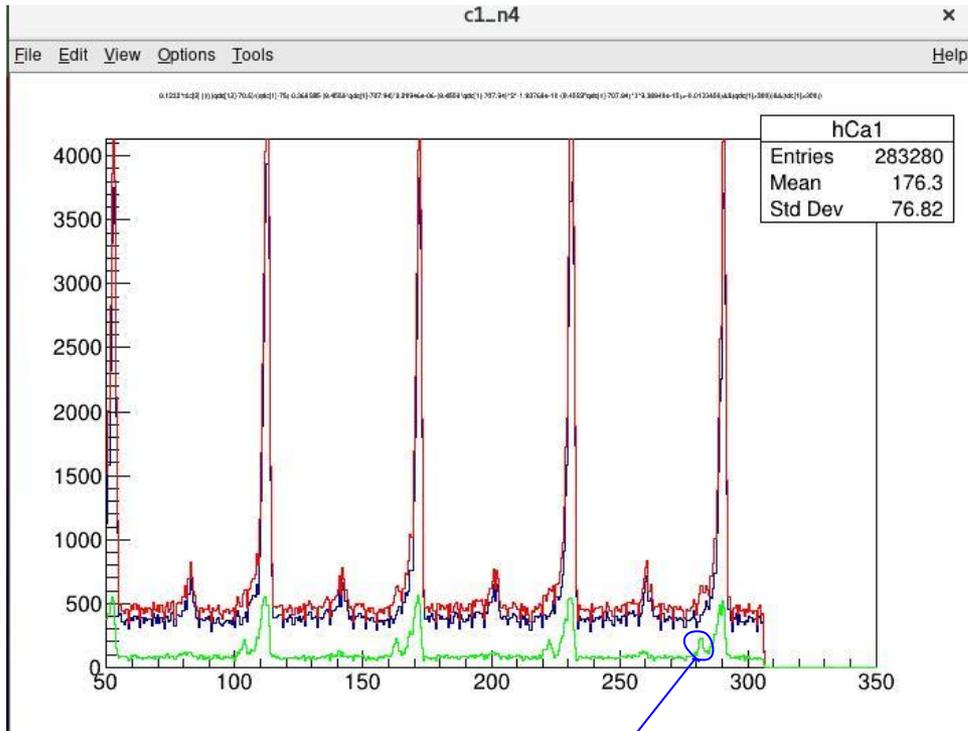
FOM  
2.535484

LS3	mean	sigma
n	-0.003044	0.004694
$\gamma$	-0.035175	0.009526

FOM  
2.259738

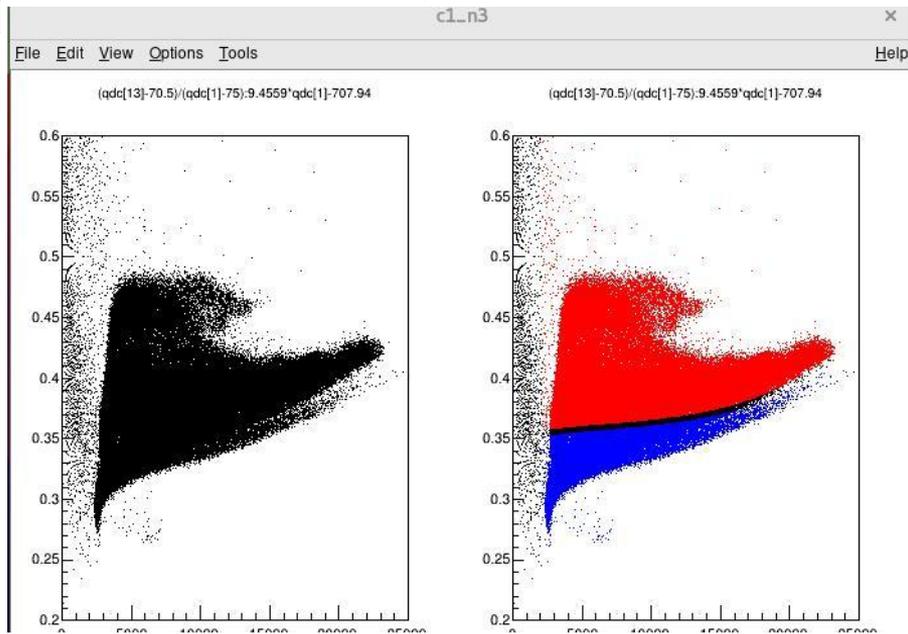
LS2	mean	sigma
n	-0.003907	0.005703
$\gamma$	-0.038240	0.010519

FOM  
2.116359



赤 : 全体  
 青 : nのみ  
 緑 : n+y

γ線が見えている  
 →分離できる



nとγを弁別

## TDCスペクトル

中性子を選び取ることができたので

次は弾性散乱した中性子を選ぶ

→速い中性子即ちTDCの値が大きい中性子を選ぶ

標的があるとき：弾性散乱中性子＋Back Gouundが来る

標的がないとき：BackGoundが来る

→標的ありから標的なしを引けば弾性散乱中性子が見える

# TDCスペク

2次標的あり

ny弁別を行

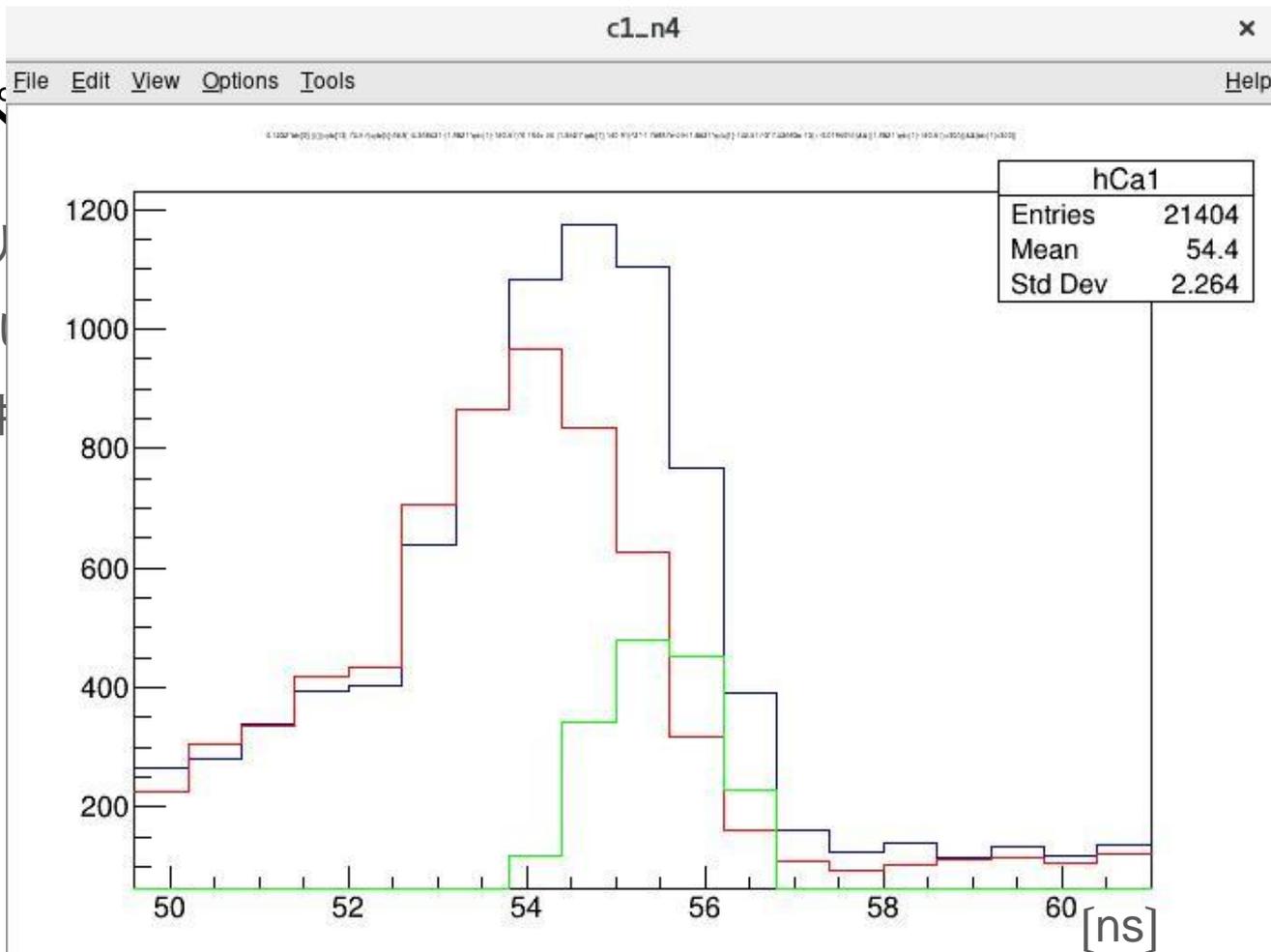
nのみの条件

TOFスペク

青：Pbあり

赤：Pbなし

緑：青-赤



# TDCスペクトル

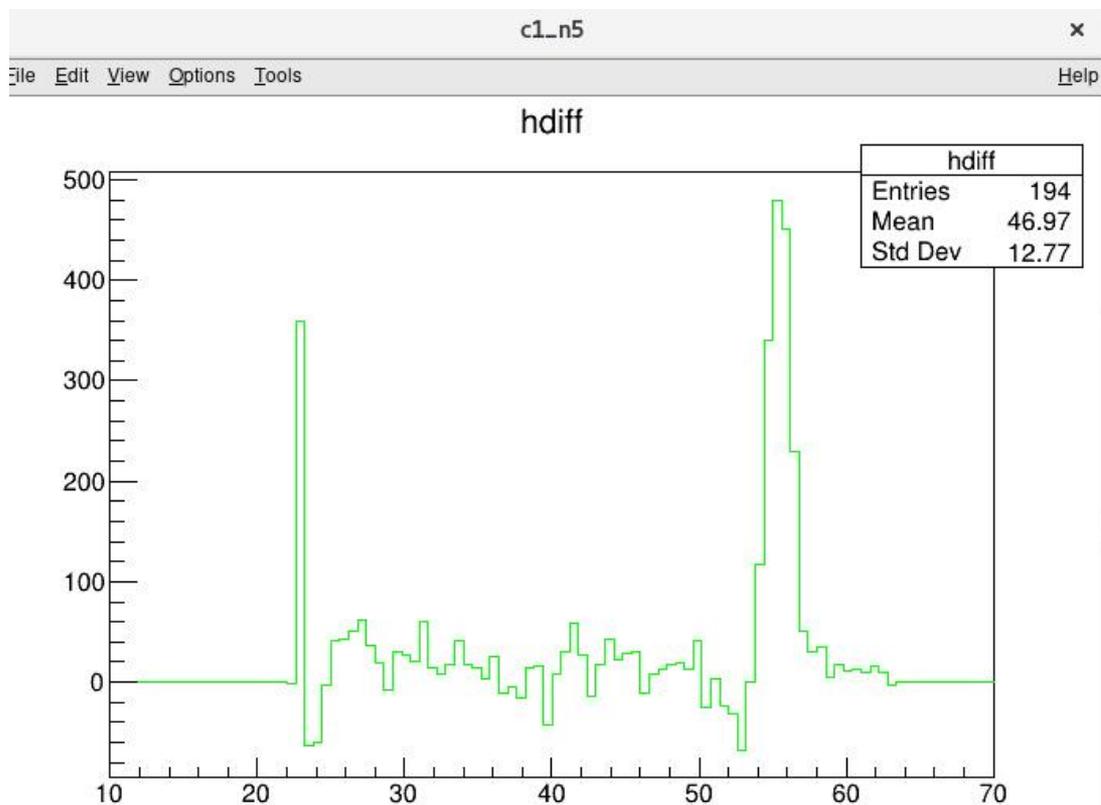
(標的あり)-(標的なし)の  
緑のスペクトルに対して  
右端の山が弾性散乱

この幅を求めると

$\sigma=0.805\text{ns}$

FWHMで $1.90\text{ns}$

→Li(p,n)の幅よりも小さい





## TDCスペクトルの幅が $Li(p,n)$ と合致しない

- ・ TDCに問題があるか？

→TDCの時間変化を見ても直接的な原因はなし

- ・ 規格化が違っている？

→そんなことはなさそう

# TDCスペクトル

原因は分からなかったが進めてみる

$\sigma=0.805\text{ns}$ に対して

Pbの第1励起状態から

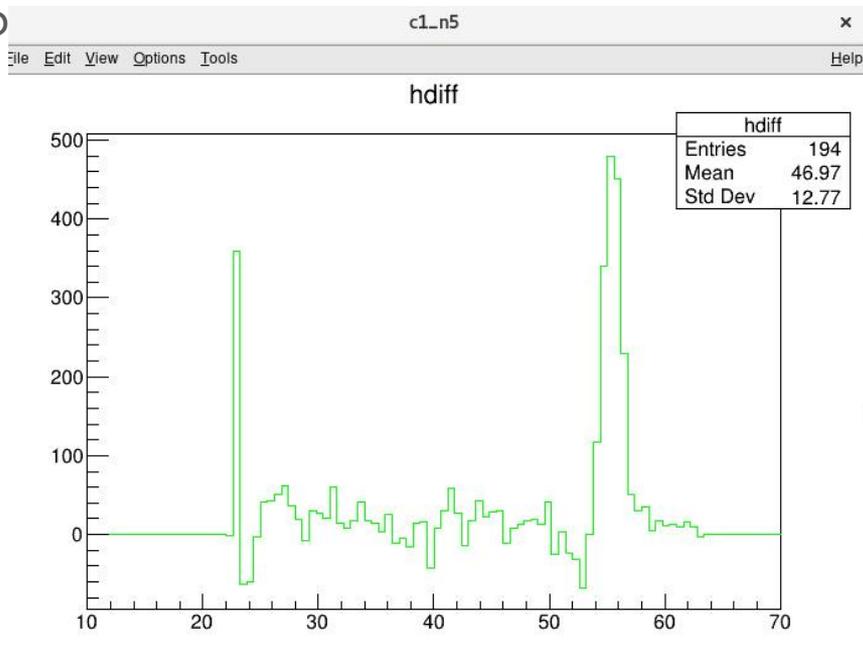
飛んでくる中性子と

弾性散乱する中性子が

検出器に来るのには

6.4nsの時間差があり

十分分離できる



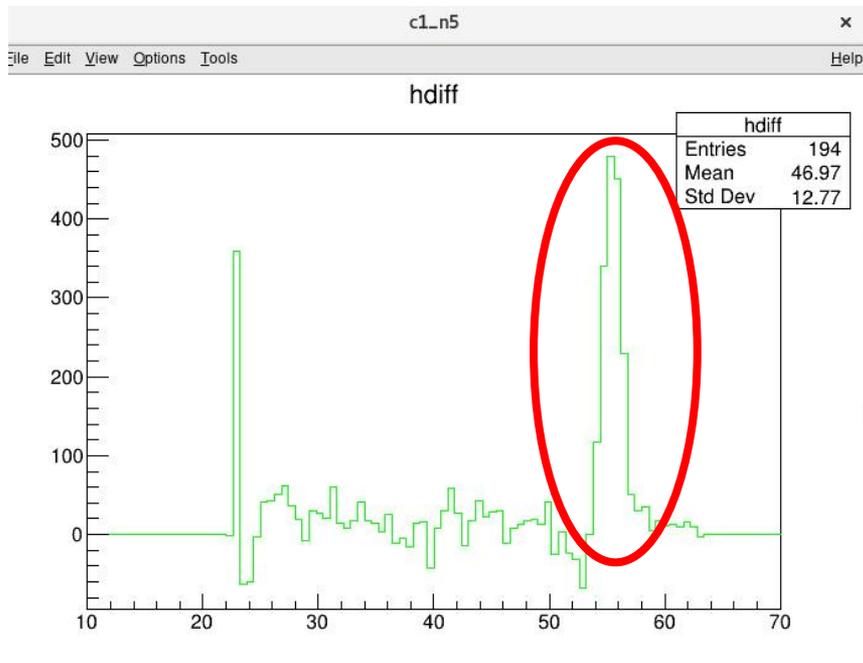
# TDCスペクトル

丸く囲った部分をFitting

Mean $\pm$ 2 $\sigma$ の範囲で

TDCを縦に切り

そこに含まれる数を数える



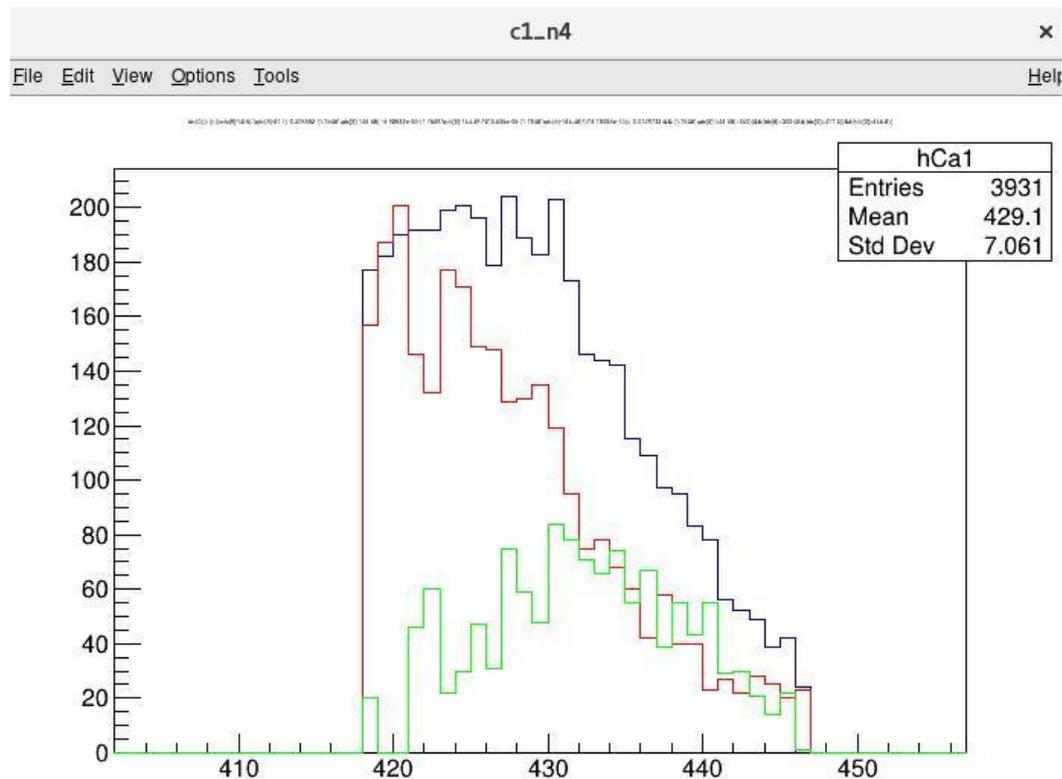
# TDCスペクトル

緑： 標的あり-標的なし

の $\text{mean} \pm 2\sigma$ で切った

青のcount数-赤のcount数

が散乱中性子の個数



# TDCスペクトル

	S+N [count]	N [count]	S [count]	efficiency	CI(S+N)	CI(N)	S/N
LS1	2275	1373	886.9654049	0.474888	4421427	4373536	0.646005
LS2	3376	2353	997.2342299	0.446914	4421427	4373536	0.423814
LS3	4248	2856	1360.72629	0.791016	4421427	4373536	0.476445
LS4	2729	1850	858.7421697	0.203795	4421427	4373536	0.464185
LS5	3756	2366	1364.091878	1	4421427	4373536	0.576539
LS6	2722	1893	808.271312	0.45997	4421427	4373536	0.426979
LS1,3,5	10279	6595	3611.783573		4421427	4373536	0.547655
LS2,4,6	8827	6096	2664.247712		4421427	4373536	0.437049

Pb4°においてcount数は表のようになった

## 昨年度からの進化

昨年度の実験ではSN比が

およそ0.1であった

→4倍以上向上している

コリメーターを増やしたこと

中性子の飛距離を増やしたことが

功を奏した

	S/N
36	0.646005
36	0.423814
36	0.476445
36	0.464185
36	0.576539
36	0.426979
36	0.547655
36	0.437049

## 相対検出効率

相対検出効率(Sのみ)	Pb4deg	Pb3deg
LS1	0.65022	0.73521
LS2	0.64896	0.73378
LS3	0.99753	0.71495
LS4	0.33130	0.37460
LS5	1.00000	1.00000
LS6	0.63447	0.71740

Sのcount数から求めた相対検出効率

LS5を基準としている

本来4°と3°で変わらないはず

# 今後の展望

断面積と中性子分布の相関をより詳細に分析する

TDCスペクトルが細くなった原因究明

Pb $3^\circ$ やCaに対しても同様に求めていく

TDCのスペクトルからTOFを出しエネルギースペクトルに直す

相対検出効率をブラッシュアップ

散乱断面積をだす

# Backup

$$\sigma = \sqrt{(\Delta T_1)^2 + (\Delta T_3)^2}$$

p beamエネルギー広がり:  
Li53.4 mg/cm<sup>2</sup>で~446 keV(SRIM)

$$(\Delta T_1)^2 = (\Delta E_p)^2 + (\Delta E_n)^2$$

n beamのエネルギー広がり

検出器の厚さ:0.05 m

$$(\Delta T_3)^2 = (T_3 \times \gamma(\gamma + 1))^2 \left\{ \left( \frac{\Delta t}{t} \right)^2 + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2 \right\}, \gamma = 1 + \frac{T_3}{m_1}$$

検出器の時間分解能:0.42 ns

$$t = t_{det} - t_{Rf} \rightarrow (\Delta t)^2 = (\Delta t_{det})^2 + (\Delta t_{Rf})^2$$

p beamの時間広がり:~0.5 ns

## 計測時間の見積もり

標的あり (S+N) と標的なし (N) のカウントレート  $r$  はそれぞれ

$$\begin{array}{l} r_1 = \frac{n_1}{t_1} = S + N \\ r_2 = \frac{n_2}{t_2} = N \end{array} \quad \longrightarrow \quad S = r_1 - r_2 = \frac{n_1}{t_1} - \frac{n_2}{t_2}$$

検出器での計数  $n$  は Poisson 分布になると仮定すると  $n_1$ ,  $n_2$  の誤差は

$$\begin{array}{l} \delta n_1 = \sqrt{n_1} \\ \delta n_2 = \sqrt{n_2} \end{array} \quad \longrightarrow \quad (\delta S)^2 = \frac{r_1}{t_1} + \frac{r_2}{t_2}$$

## 計測時間の見積もり

$(\delta S)^2$  を最小にする時間を求めるために計測時間で微分 $\rightarrow 0$ になる $t_1$ を調べる

$$\frac{d(\delta S)^2}{dt_1} = -\frac{r_1}{t_1^2} + \frac{r_2}{t_2^2} \longrightarrow \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} = \frac{t_1}{t_2}$$

ここでS/N比を $\gamma$ とすると

$$r_2 = \frac{r_1}{1 + \gamma} \quad \text{が成り立つので} \quad t_2 = \frac{t_1}{\sqrt{1 + \gamma}} \quad \text{と求められる}$$

# BLP2を用いた測定の回路図

## 収量の見積もりに用いた式

$$N_{\text{obs}} = F_n N_{\text{Pb}} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \varepsilon$$

$N_{\text{obs}}$  : 弾性中性子のカウントレート

$F_n$  : 二次ビームのフラックス

$N_{\text{pb}}$  : 鉛の単位面積当たりの個数

$D\sigma$  : 微分散乱断面積

$D\Omega$  : 二次標的から検出器への立体角

$\varepsilon$  : 検出効率

# n $\gamma$ 弁別

検出器 1 ~ 6 で

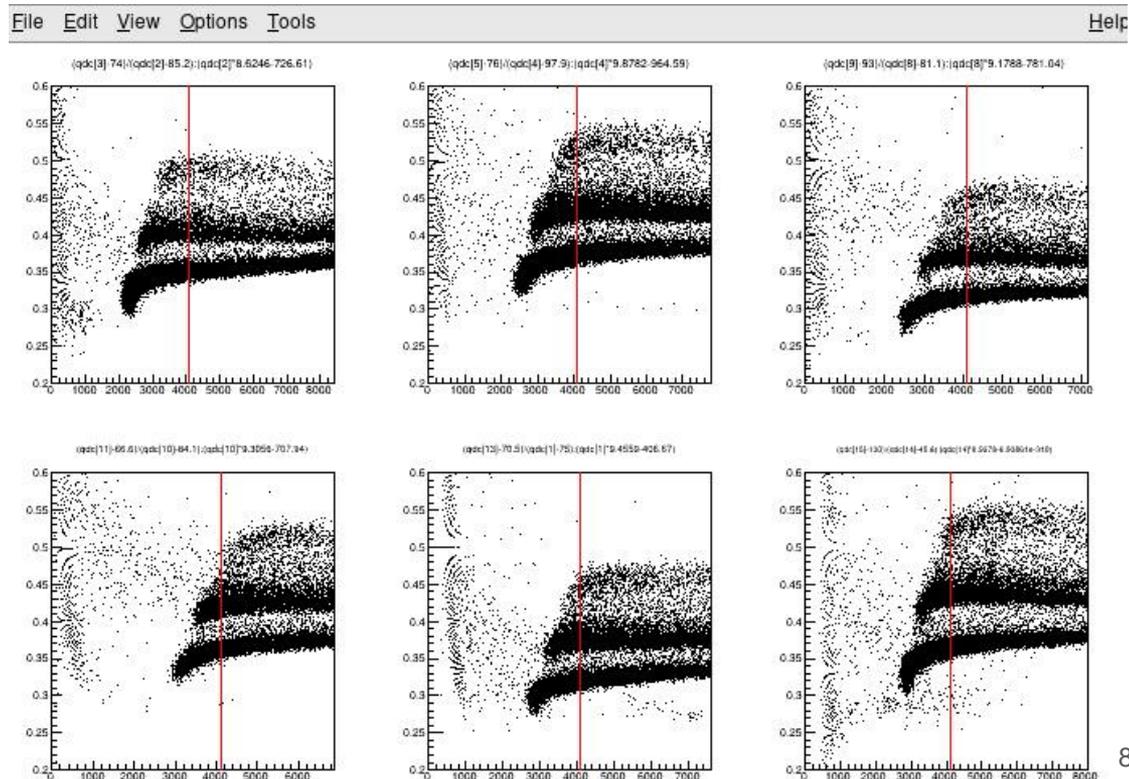
Tail/All : 発光量

を並べた

左の曲がっているところを

切るために

(発光量) > 4100keV でカット



# n $\gamma$ 弁別

Projection Pb3deg

LS1	mean	sigma
n	-0.00172	0.00893
$\gamma$	-0.03929	0.011514

FOM  
1.837525

LS6	mean	sigma
n	3.38E-05	0.010159
$\gamma$	-0.04836	0.015021

FOM  
-1.92198

LS5	mean	sigma
n	-0.00314	0.008786
$\gamma$	-0.04133	0.010876

FOM  
-1.9428

LS4	mean	sigma
n	-0.00061	0.008679
$\gamma$	-0.0434	0.01191

FOM  
-2.07814

LS3	mean	sigma
n	-0.00051	0.008601
$\gamma$	-0.03813	0.00996

FOM  
-2.02682

LS2	mean	sigma
n	-0.00067	0.009274
$\gamma$	-0.04178	0.012008

FOM  
-1.93183

Pb3°を射影したデータ

# ny弁別

Projection Blank4deg

LS1	mean	sigma
n	0.001895	0.008951
$\gamma$	-0.03382	0.008662

FOM  
2.027831

LS4	mean	sigma
n	-0.00081	0.009957
$\gamma$	-0.04182	0.014428

FOM  
-1.68193

LS2	mean	sigma
n	0.00213	0.008096
$\gamma$	-0.03382	0.008662

FOM  
-2.14527

LS5	mean	sigma
n	-0.02877	0.010596
$\gamma$	-0.06612	0.011826

FOM  
-1.6655

$\gamma$  Height 1699

LS3	mean	sigma
n	0.00213	0.008096
$\gamma$	-0.03376	0.008701

FOM  
#VALUE!

LS6	mean	sigma
n	0.02985	0.009965
$\gamma$	-0.01876	0.011057

FOM  
-2.31225

Blank4°を射影したデータ

# n $\gamma$ 弁別

Projection Blank3deg

LS1	mean	sigma
n	-0.00126605	0.00916815
$\gamma$	-0.0381255	0.014238

FOM  
1.574776287

LS2	mean	sigma
n	-0.000376995	0.00910497
$\gamma$	-0.04080122	0.0138078

FOM  
-1.76426617

LS3	mean	sigma
n	-0.0333894	0.0092235
$\gamma$	-0.0730849	0.00905379

FOM  
-2.17184823

LS4	mean	sigma
n	0.004113	0.009056
$\gamma$	-0.04129	0.015367

FOM  
-1.8590723

LS5	mean	sigma
n	-0.00331	0.008943
$\gamma$	-0.04176	0.012202

FOM  
-1.8186141

LS6	mean	sigma
n	-0.00125	0.009591
$\gamma$	-0.04836	0.015352

FOM  
-1.8888451

Blank3°を射影したデータ

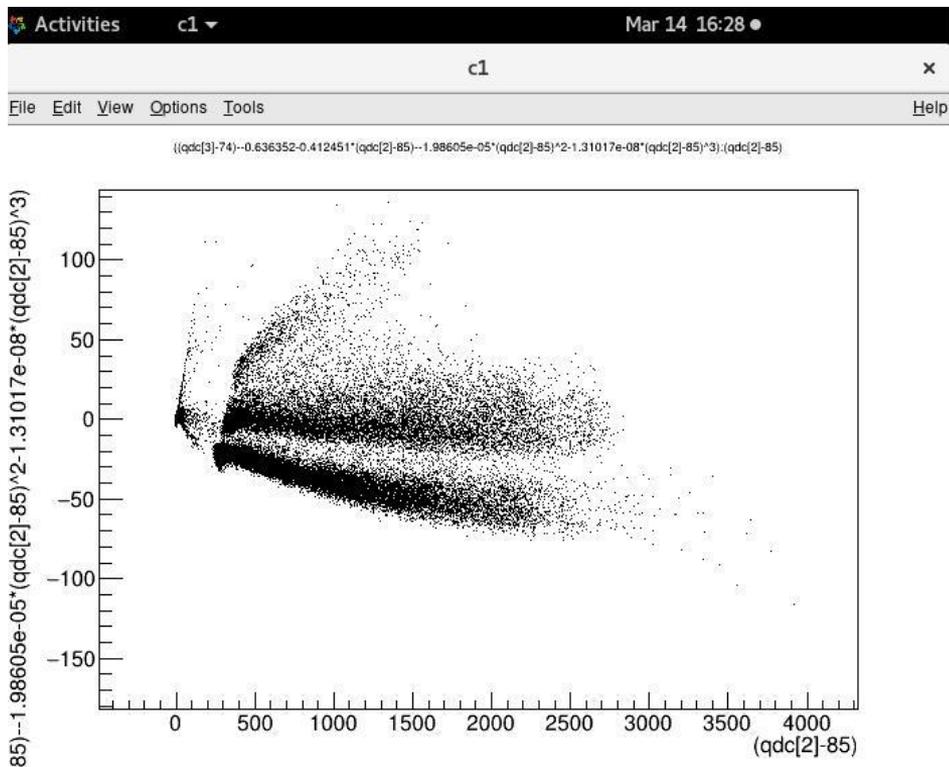
# ny弁別

射影する相関を今回は

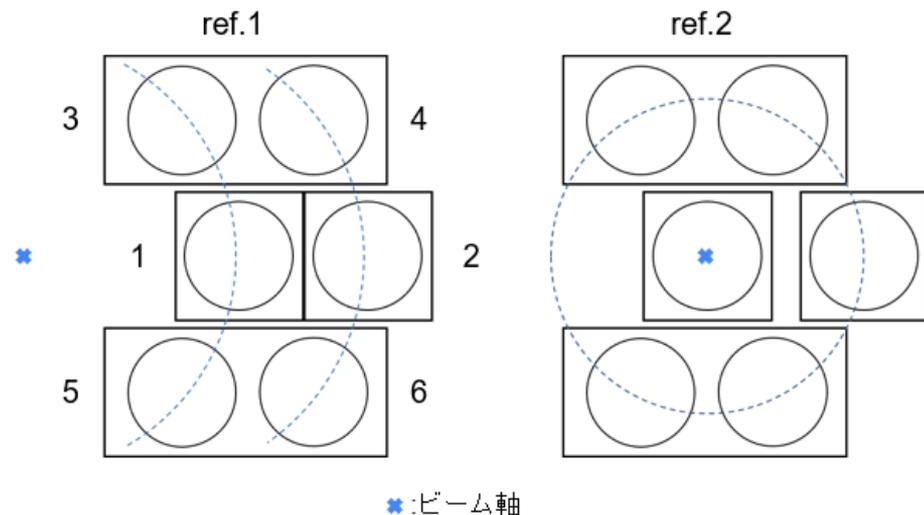
”Tail/All : 発光量”で取ったが

”Tail : All”の相関に対しても

同様のことができる



- reference(2次標的なし)を測定しよう



ビーム軸からの距離が等しければやって来る  
中性子数も等しいと仮定



検出器ごとのcount数の比から検出効率の比を  
見積もれる！

- 検出器1の検出効率を1として他の検出器の検出効率を評価すれば

$$e_i = \frac{r_1^{(i)}}{r_1^{(1)}} \quad (i = 1, 3, 5) \quad , \quad e_i = \frac{r_1^{(3)}}{r_1^{(1)}} \times \frac{r_2^{(i)}}{r_2^{(3)}} \quad (i = 2, 4, 6)$$

$e_i$  : 検出器iの検出効率

$r_1^{(i)}$  : ref.1での検出器iのcount数

$r_2^{(i)}$  : ref.2での検出器iのcount数