



# 高圧キセノンガス検出器によるミグダル効果探索 のためのバックグラウンド低減に向けた研究

---

**矢野清志郎**

東北大学 理学研究科 物理学専攻 素粒子実験（加速器）研究室

2025年2月5日

## ◆ 量子力学から導かれた現象

- 原子核が動き、それに追従できない束縛電子が励起・電離

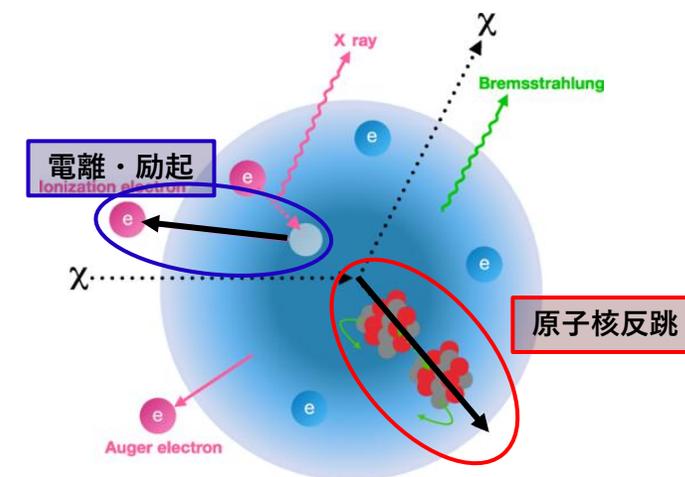
## ◆ 理論的に以下の現象を予言

- $\alpha$ 崩壊に伴うミグダル効果 ← 観測済(1975)
- $\beta, \beta^+$ 崩壊に伴うミグダル効果 ← 観測済(1954)
- 散乱による原子核反跳に伴うミグダル効果 ← **未観測**

## ◆ 原子核反跳に伴うミグダル効果の性質

- 生じる確率は電子の運動量移行の2乗に比例し、反跳原子核のエネルギーに比例する。
- 励起が伴う確率は電離の場合よりも $O(10^{-3})$ で小さい。
- 内殻電子ほど、励起や電離の確率は小さくなる。  
(XeのK殻電子の電離確率は $O(10^{-6})$ )

### 原子核散乱に伴うミグダル効果

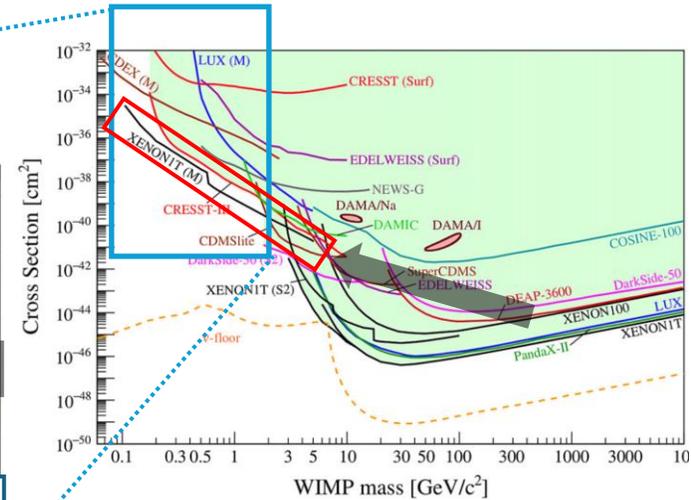
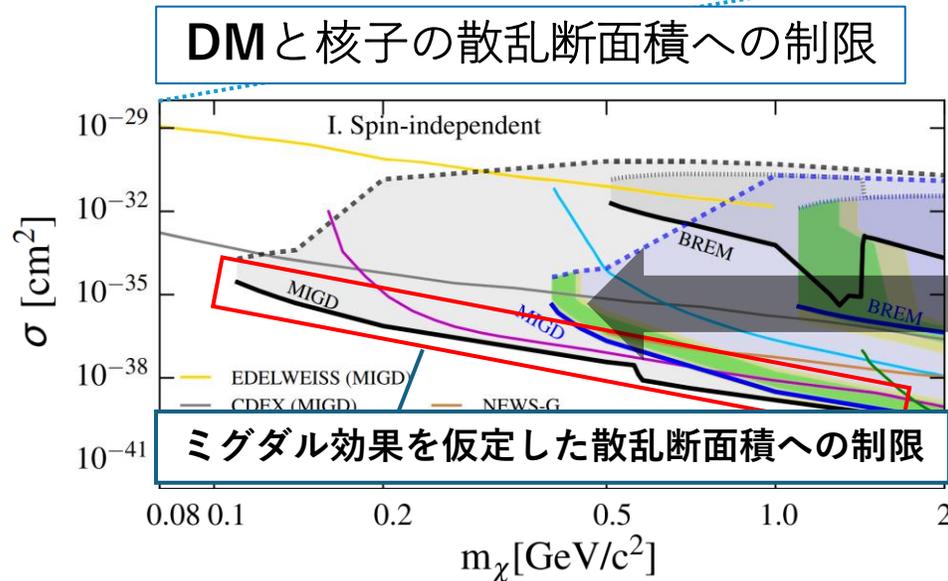


PHYSICAL REVIEW LETTERS 123, 241803 (2019)

# 暗黒物質探索とミグダル効果

- ◆ 暗黒物質探索において、散乱による原子核反跳に伴ったミグダル効果を用いた探索が注目されている
  - 暗黒物質がターゲット原子核と弾性散乱し、低確率で軌道電子の励起・電離が追加で生じる。
  - このミグダル効果により低質量領域の暗黒物質探索の感度があがる。

**XENON実験**  
 ミグダル効果を仮定することで、これまで感度のなかった1GeV以下の質量領域へ感度が伸びた  
 ⇒世界最高感度を達成



## ◆ 中性子をキセノン原子核に当てる

- 中性子ビームを位置感度のあるガス検出器に照射し、検出器内部での原子核散乱を見る



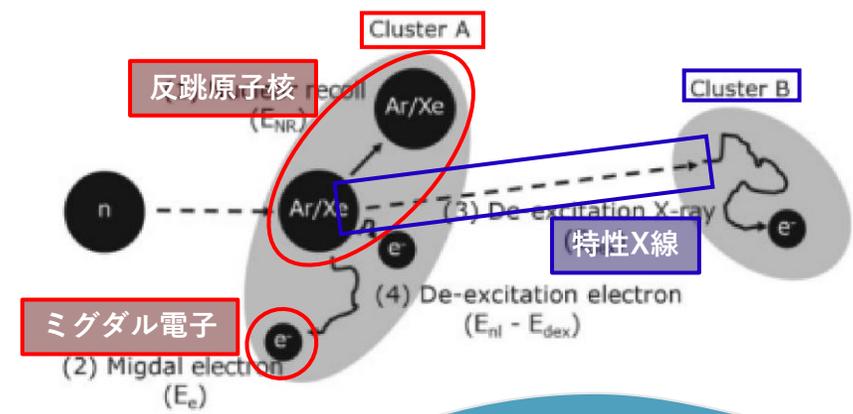
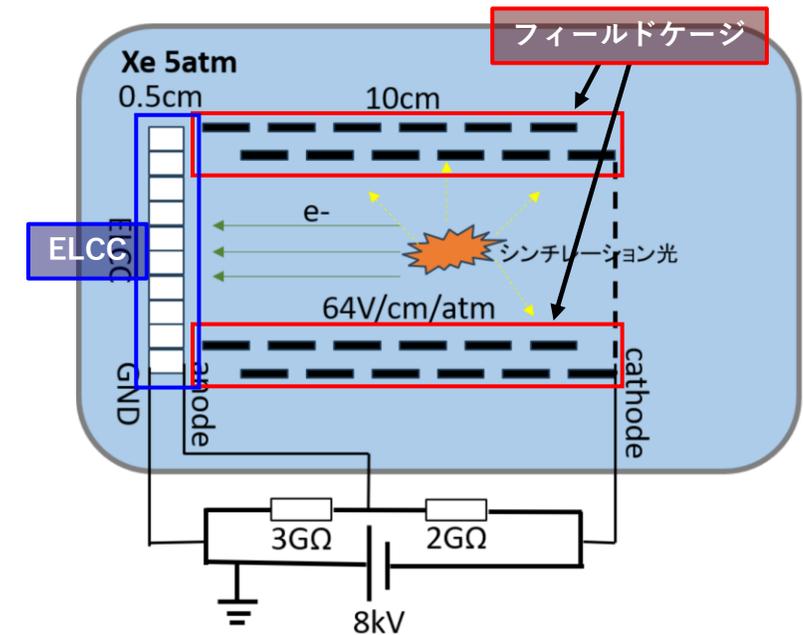
K殻電子の電離が伴うミグダル効果の観測を目指す

## ◆ ガス検出器

- ガスキセノンTPC
  - フィールドケージで電場を形成し、ドリフト電子をELCCで読み出す
  - ガスキセノンはエネルギー分解能が良い
  - キセノンは世界で多くの実験に用いられており、その解析にフィードバックが可能

## ◆ 2つのクラスターを観測

- クラスターA：反跳原子核、ミグダル電子、オージェ電子
- クラスターB：30 keVの特性X線



# 測定におけるバックグラウンド

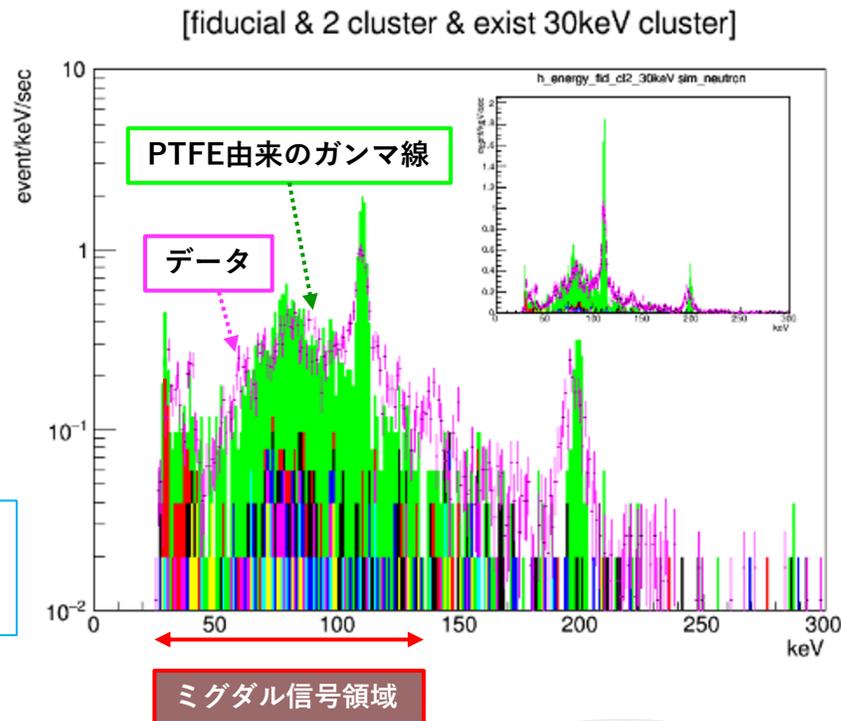
2022年4月に行われた最初のビーム試験結果では、中性子の散乱による2clusterかつ片方が30 keVというイベントを見たいにもかかわらず、**ガンマ線由来のバックグラウンドが支配的**であることがわかった。

## ◆ ガンマ線によるバックグラウンド

- 壁や床での $(n, \gamma)$ 反応
- 検出器内物質による $(n, n'\gamma)$ 反応  
前回の測定では特に $^{19}\text{F}(n, n'\gamma)$ によるものが多かった

### 本実験の課題

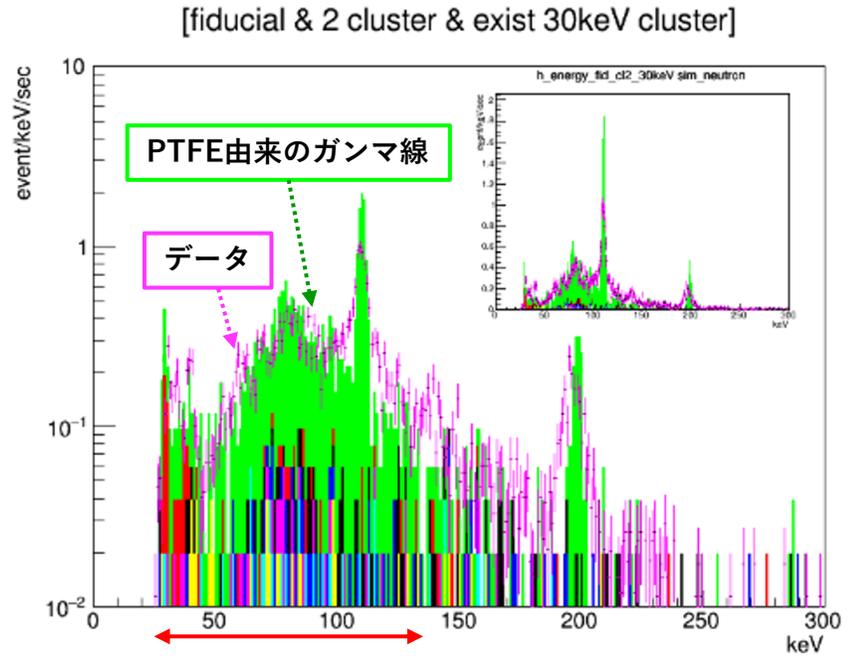
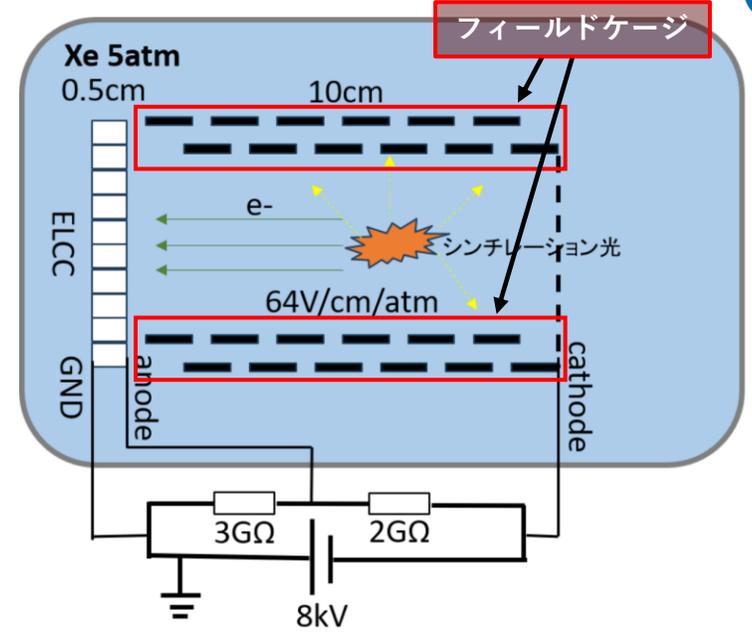
ミグダル効果発見にむけて、このバックグラウンドを減らさなくてはならない。



# フッ素によるバックグラウンドの低減

## ◆ 旧TPCの改善点

- フィールドケージに**PTFE**(ポリテトラフルオロエチレン)を用いていた。  
→**PTFE**を使わずにフィールドケージを構成する。
- また軽量化(低物質量化)を行うことで検出器の構成要素自体による反応も防ぐ。





## 前回の実験で未測定の物理特性

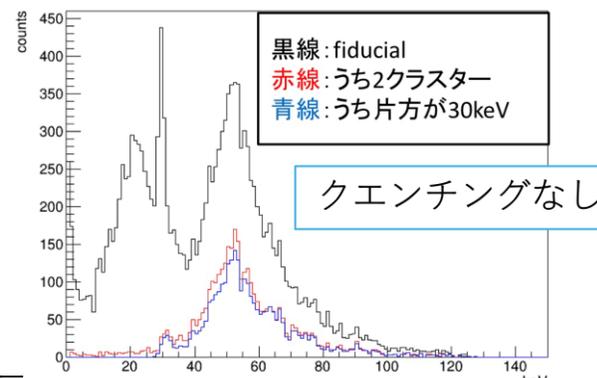
◆クエンチング値  $Q_F = \frac{\text{検出器が出力する見かけの核反跳エネルギー}}{\text{真の核反跳エネルギー}}$

- クエンチングによって見える光量が減少。
- 測定することでミグダル信号シミュレーションにおいて正確な信号をシミュレート可能

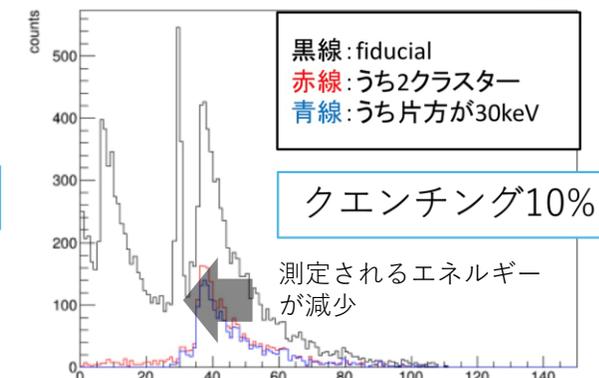
◆フォームファクター

- 散乱中性子数に散乱角度依存性がある。
- 先行研究とフォームファクターに差がないかを確認し、ミグダレイベント数の散乱角度依存を正確に考慮したい

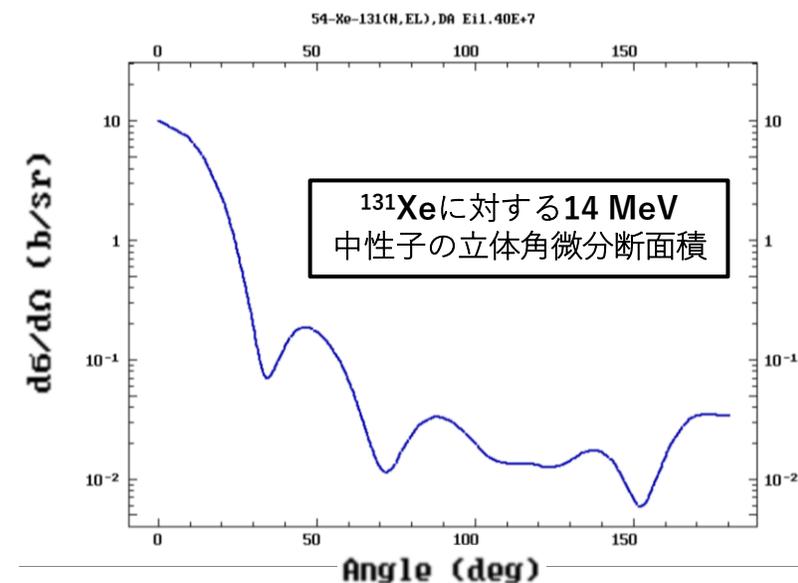
二つの物理量は独立なものであり、同時に測定することが可能。  
より正確なミグダル効果探索のためにこの2つを調べることが必要。



ミグダル信号のシミュレーション。  
クエンチング10%では信号が左側に寄っている。



(内山修論)



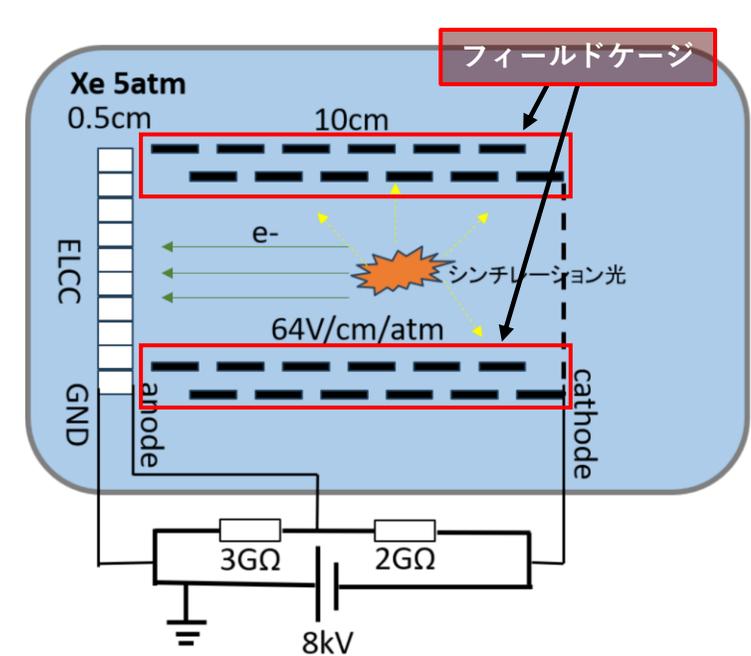
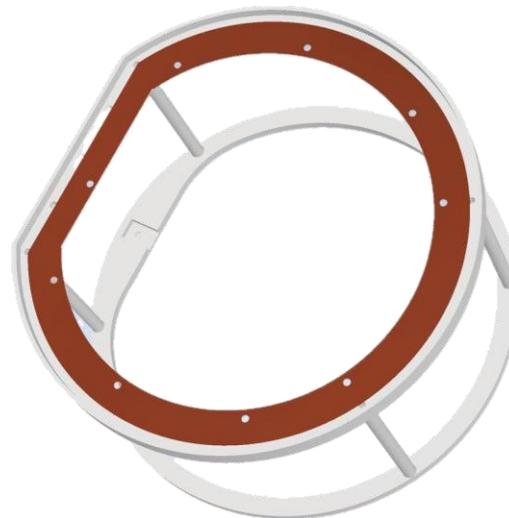
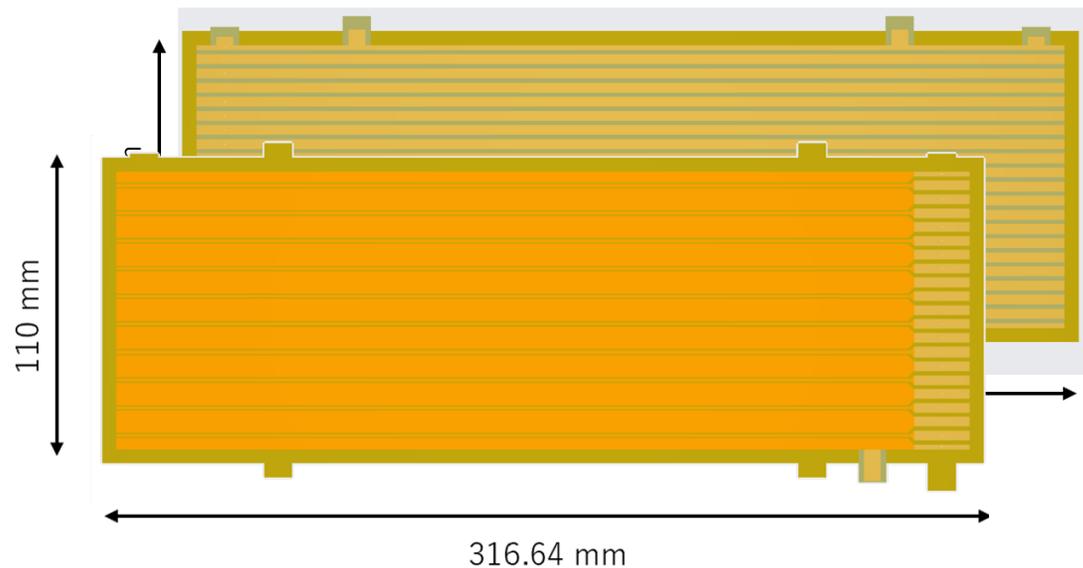
<https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>  
National Nuclear Data Center

# 実験装置

---

# フィールドケージ改良

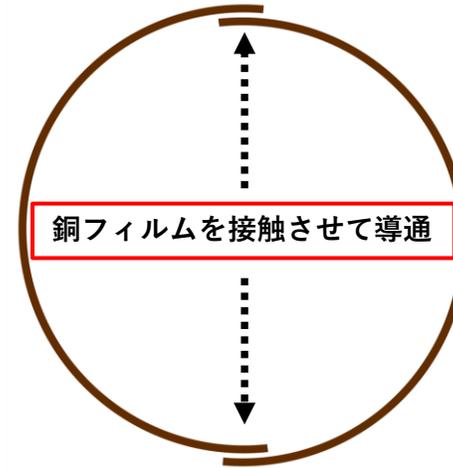
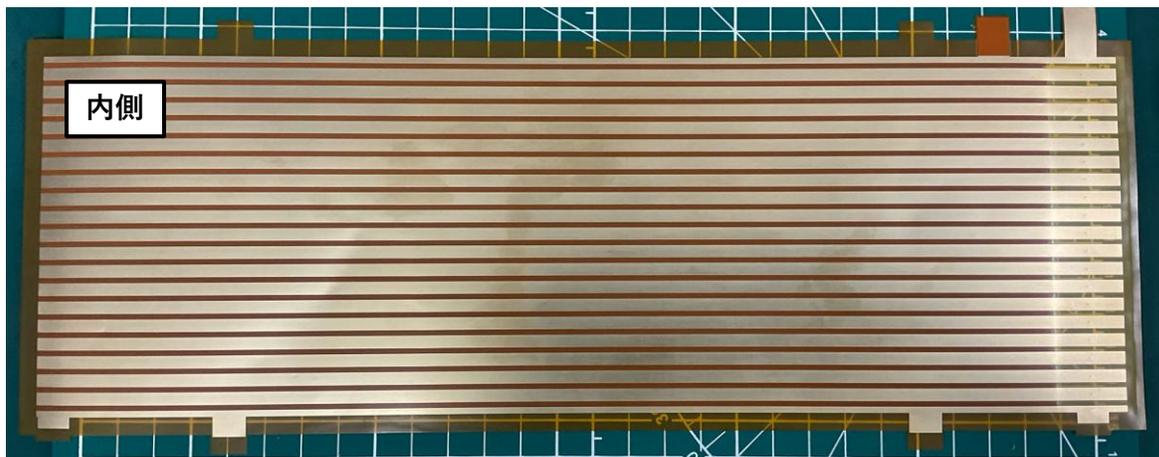
- **PTFE**を用いないこと、フィールドケージの軽量化が行えることこの観点からフレキシブル基盤(Flexible Print Circuit, FPC)を用いるフィールドケージ構造を採用。
- 銅フィルムを均等に配置し、電位差を等しくかけることで電場を形成。
- FPCを支える枠としてフッ素不使用のPEEK材(Poly Ether Ether Ketone)を使用。



## ◆ 2枚組で使用

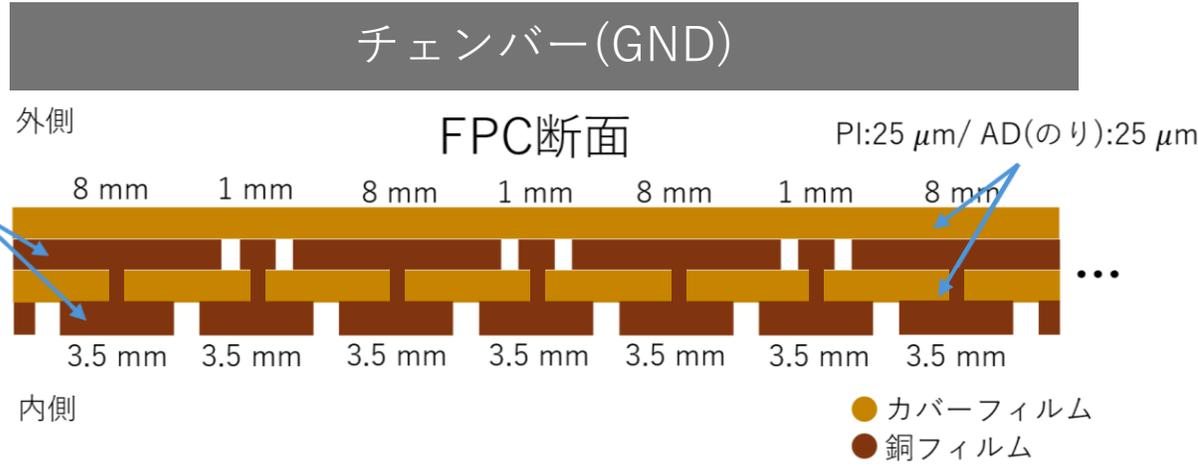
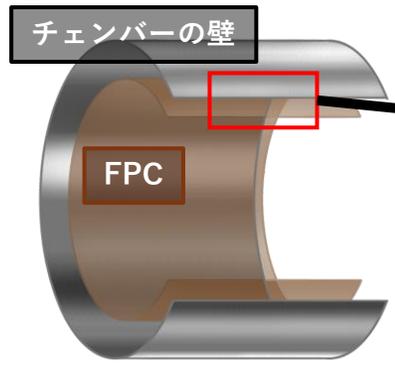
製造上のサイズ上限**500 mm**を超えてしまうため  
2枚組で使用。

接触させるむき出し銅フィルム

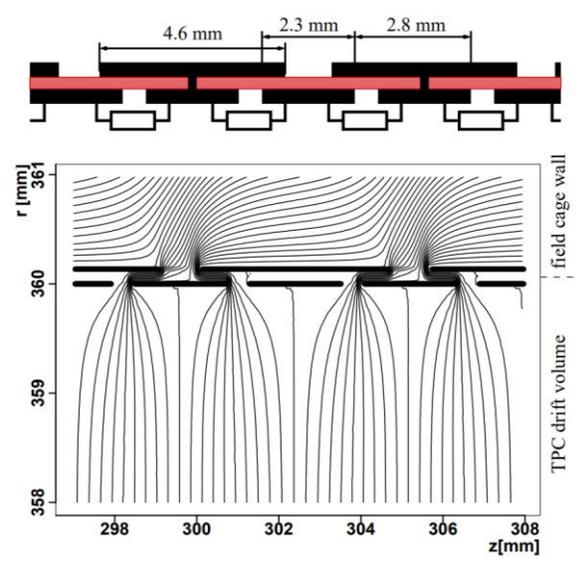


2枚を組み合わせた様子→





電極中心間隔は5 mmピッチ

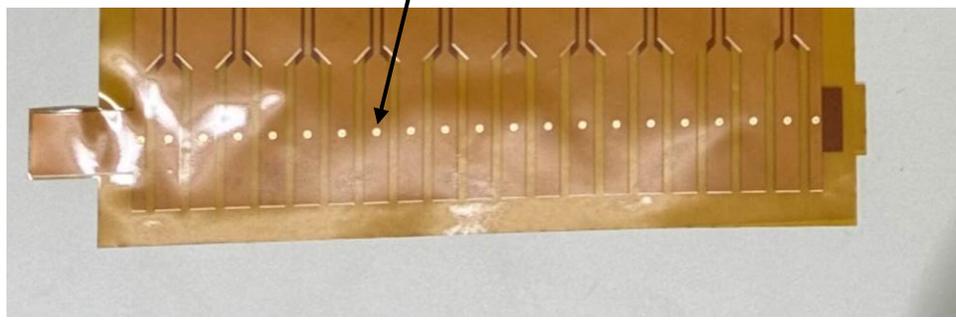


T Behnke et al 2010 JINST 5 P10011

類似の電場についてもシミュレーションで実証済

## ◆断面

- 二層の銅フィルム  
上の銅フィルムは下の銅フィルムの隙間を覆うように配置しており、チェンバー(GND)による電場の歪みを抑える。
- ビア  
二層の銅フィルムはビアによって接続されており導通させてある。

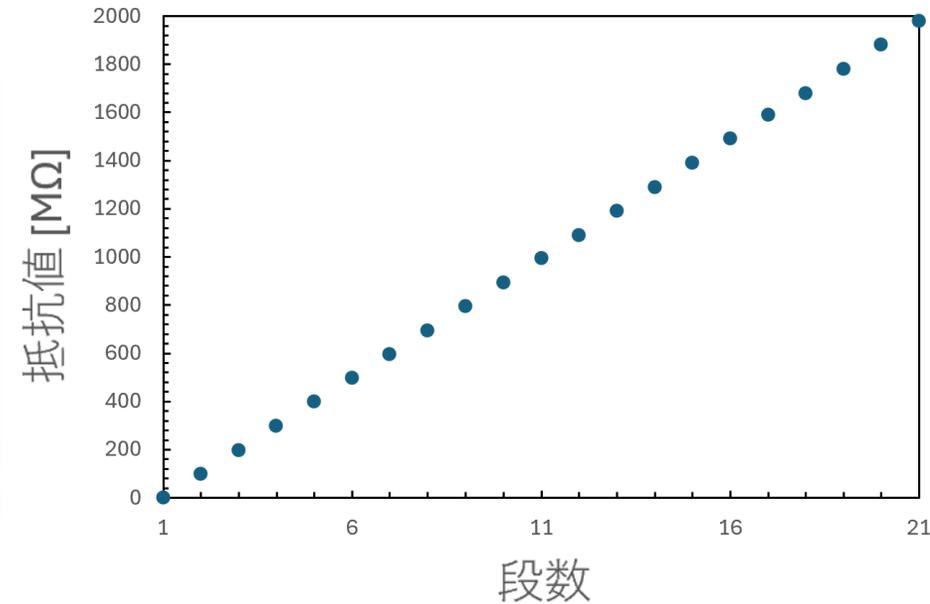


## ◆ FPCの性能評価

- 均一な電場をかけるため各段に抵抗を取付け、均等に抵抗をかかっているか確かめた。
- 抵抗値の測定は絶縁抵抗計で測定  
無事想定通りの抵抗値がかけられており、導通がないことがわかった。



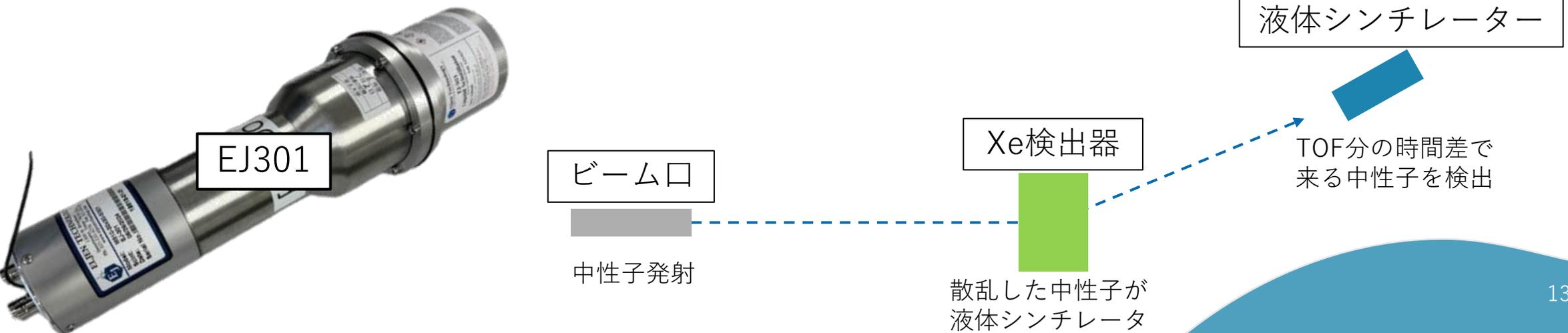
絶縁抵抗計



# 液体シンチレータ

## ◆ ガンマ線バックグラウンド低減及びクエンチング・フォームファクター測定

- 原子核反跳を起こした中性子を見分ける
  - TOF(飛行時間)を考慮することで検出器内部で原子核反跳を起こした中性子を見分けることが可能。(Efficiencyは犠牲)
  - 液体シンチレーターはガンマ線と中性子で波形の時定数が異なるため、見分けることが可能。
- 散乱中性子と反跳原子核のエネルギーは散乱角度をもとに計算可能  
→液体シンチレーターの配置角度を定めると原子核反跳エネルギーも定まる。
- 反跳原子核エネルギーと実際測定されたエネルギーの違いからクエンチング値が測定可能
- 角度ごとの散乱中性子数変化をみることでフォームファクターが測定可能



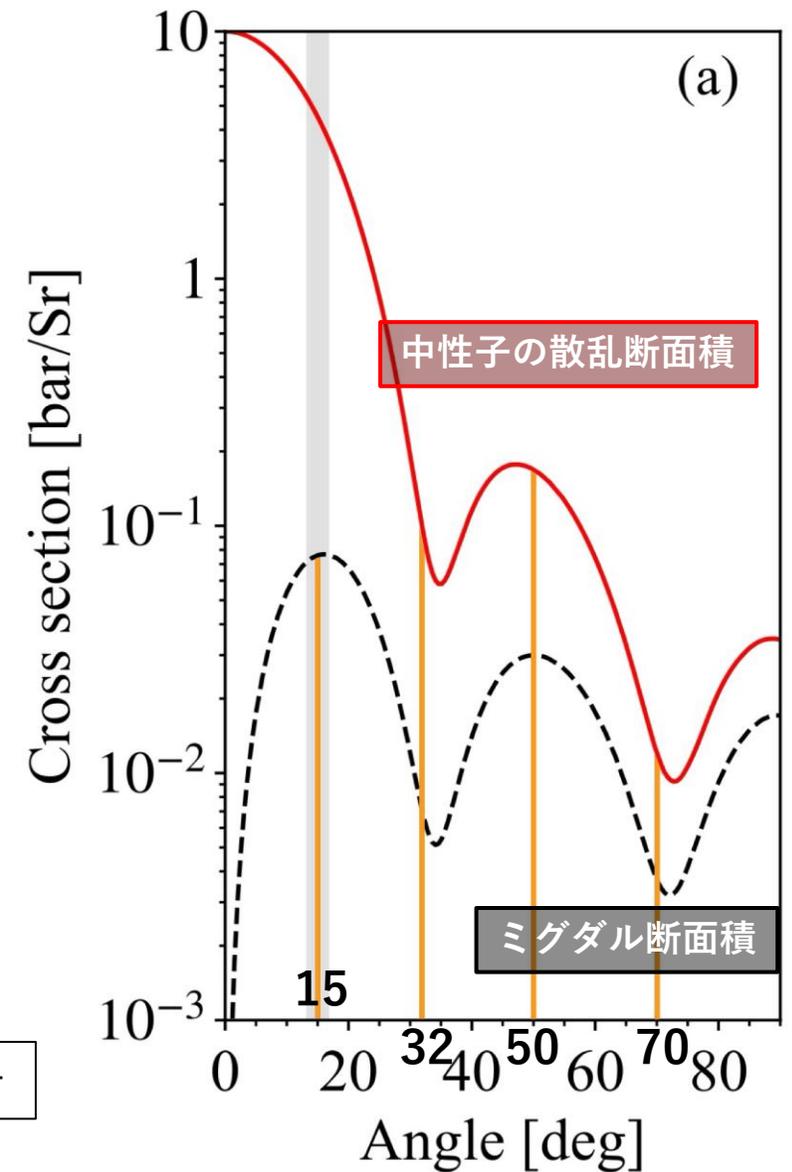
# 液体シンチレータ

## ◆ 液体シンチレータ配置

- 角度：ミグダル効果が最も期待される15度、及び大まかにフォームファクターを測定可能な 32, 50, 70 度と決め、その時のクエンチング値も測定。
- 距離：近づければイベント数増加。遠ければ分解能向上。この2つを考慮して決定。

角度	距離 [m]	エネルギー幅/反跳エネルギー %
15	5.8	9.976
32	2.7	9.828
50	1.7	9.579
70	1.1	9.826

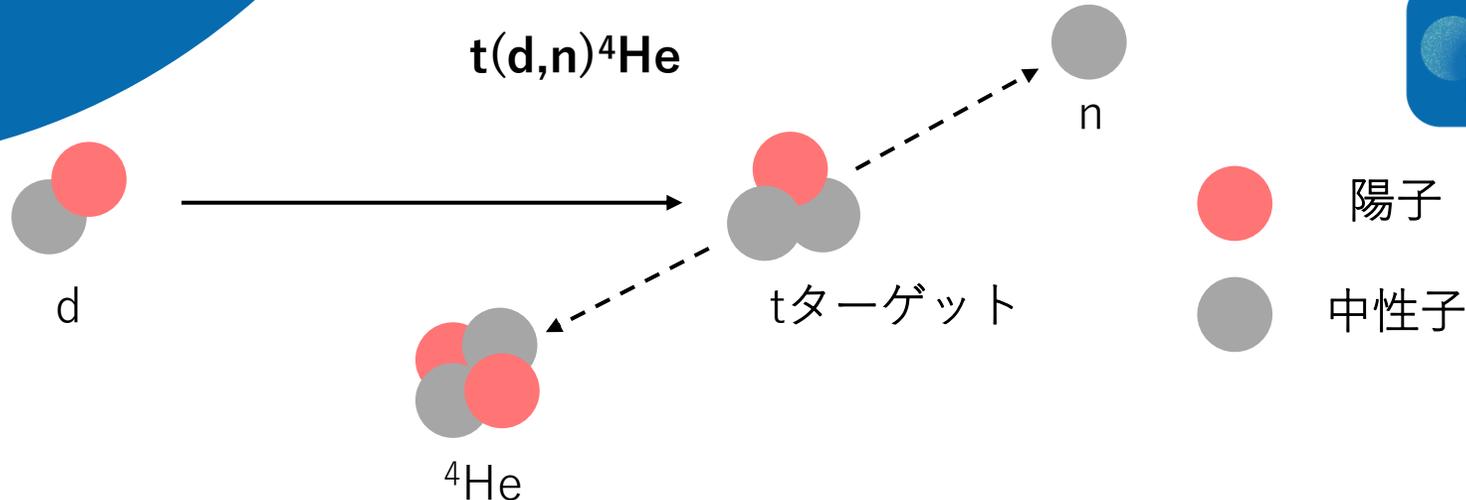
液体シンチレータ



PHYSICAL REVIEW D 109, L051101 (2024)

# 中性子ビーム試験

---



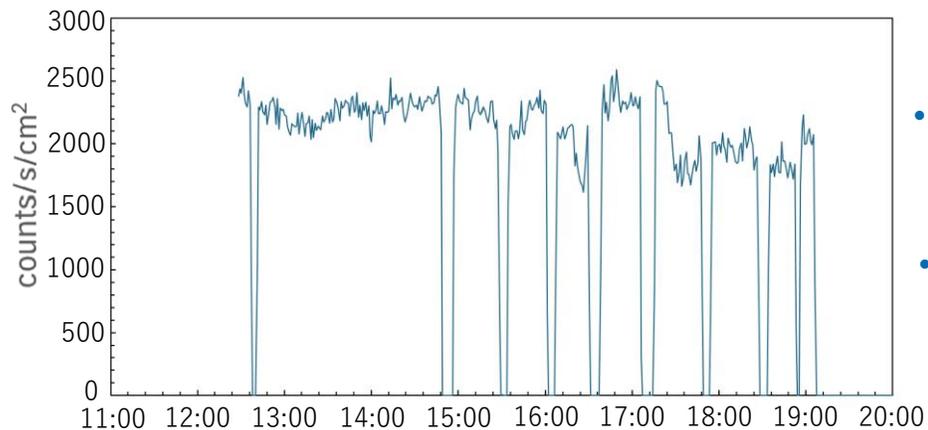
## ◆ 中性子ビームの概要

### ◆ 産業技術総合研究所

- エネルギー：14,8 MeV
- 反応： $t(d,n)^4\text{He}$
- 中性子ビーム方向： $4\pi$  方向

## ◆ 中性子フラックスモニター

- 加速器の電流値(CI)でモニター
- 事前に中性子検出器で中性子フラックスとCIの比例係数を求めておく



- ビーム口からキセノン検出器中央の距離 2 m の位置でのフラックス
- フラックス0は液体シンチレーターの配置条件を変えているタイミング



<https://unit.aist.go.jp/rima/ract-neu/neutron/kenkyu/kenkyu2-2.html>

# セットアップ

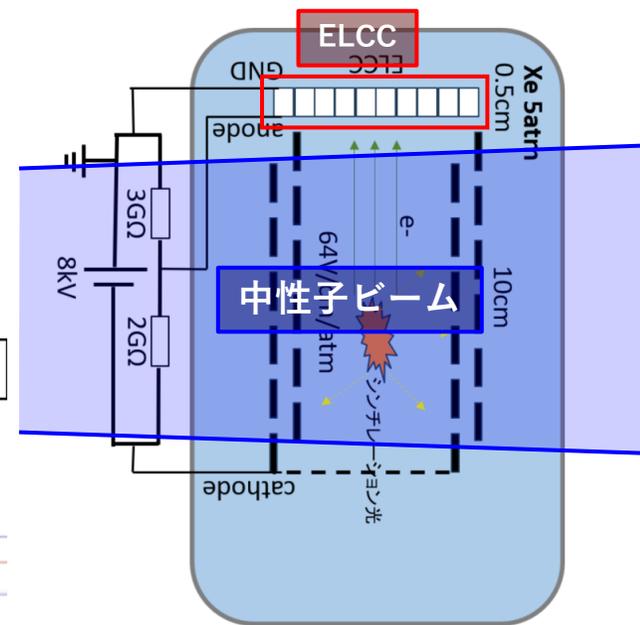
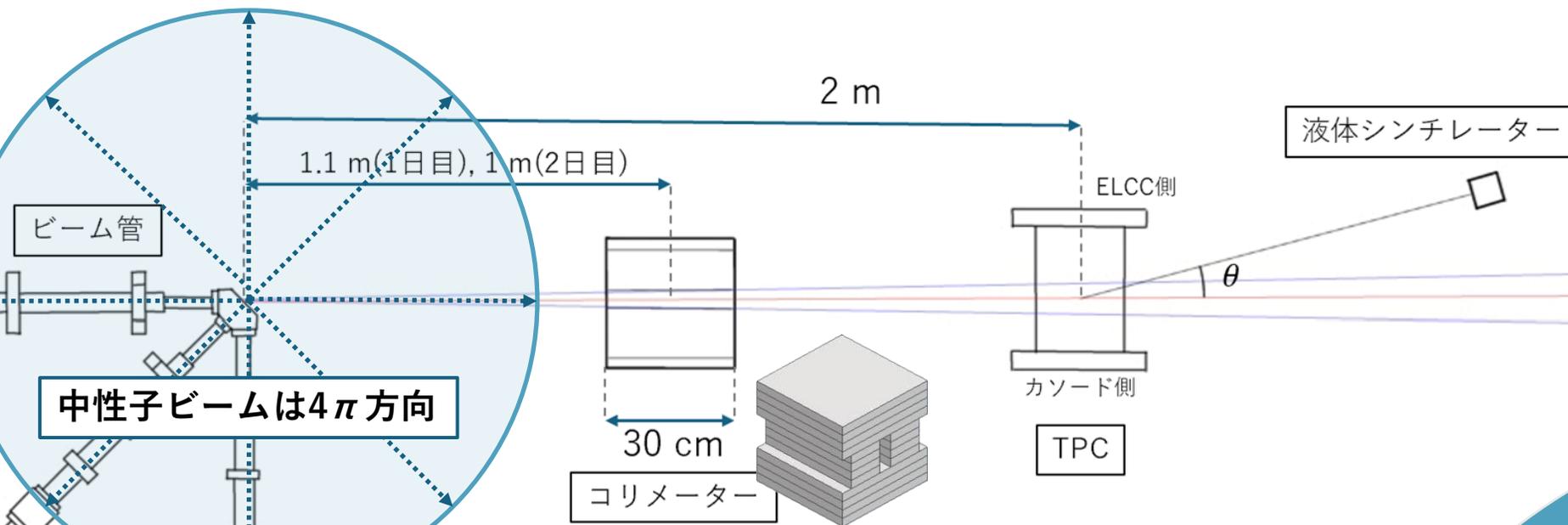
## ◆ 液体シンチレーター

- 距離と角度を測定目的ごとに表のように決定。

## ◆ コリメーター

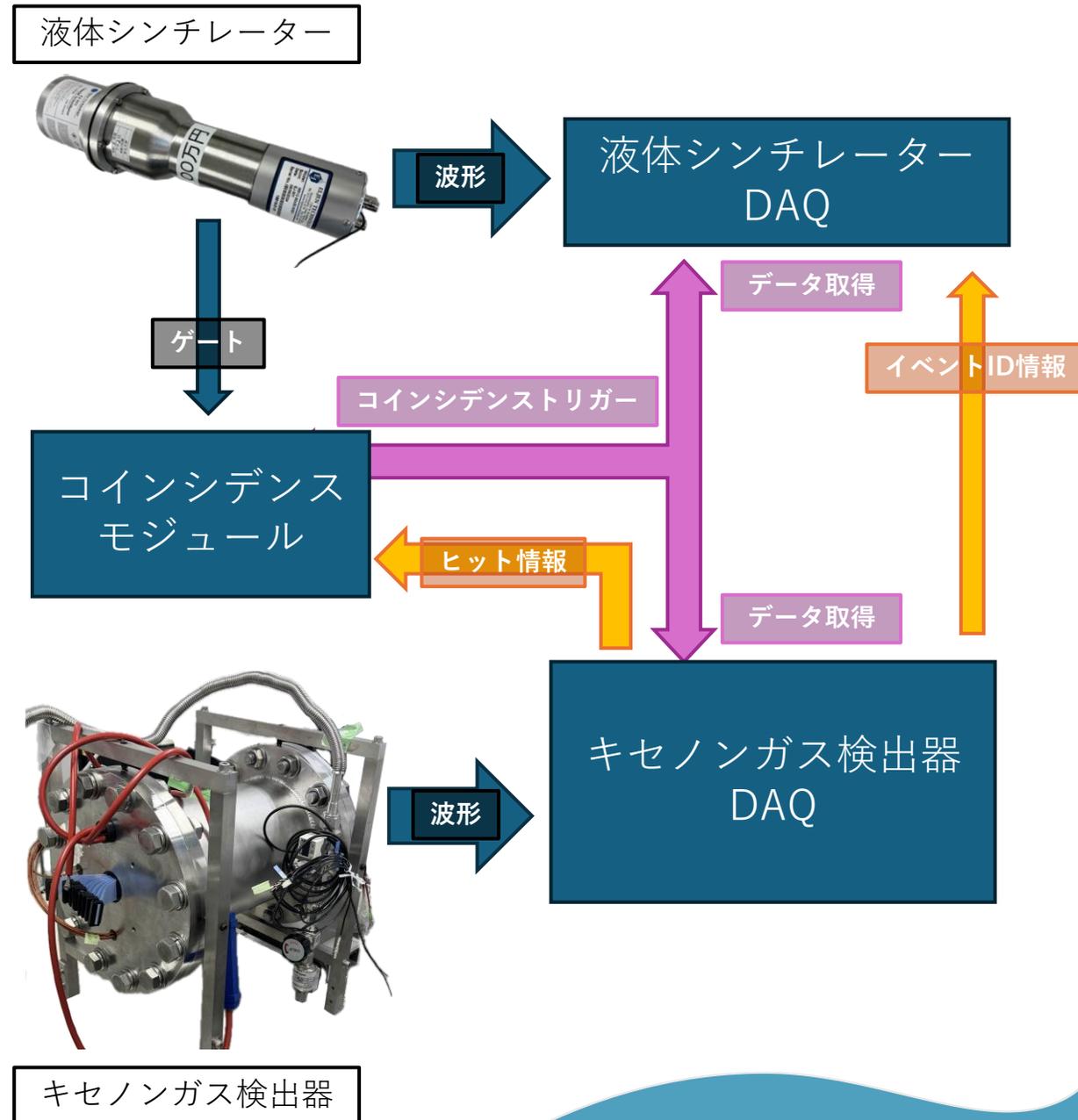
- ELCCにもPTFEが用いられているため、コリメーターはキセノンガス検出器内のPTFE部分のビームを遮蔽するよう配置

角度	距離 [m]	目的
15	1.0	ミグダリイベント測定
15	4.0	クエンチング値 & フォームファクター測定
32	2.7	
50	1.7	
70	1.1	



## ◆ データ取得の流れ

1. 液体シンチレーターにヒットがあれば**液体シンチレーターDAQに波形を送りつつゲート開放**
2. ゲート解放中にキセノンガス検出器に**ヒットがあればイベントIDを液体シンチレーターDAQに送りつつデータを取得**



# 解析の流れ

---

## ◆ 解析の全体像

液体シンチレーター



- 捉えた粒子の波形弁別
- キセノンガス検出器側から送られてくるイベントIDのデコード

キセノンガス検出器



- エネルギー解析
- クラスター数解析
- **2 cluster**かつ**30 keV** イベントセレクション

統合解析

# ガスキセノン検出器解析



## ◆ エネルギーの求め方

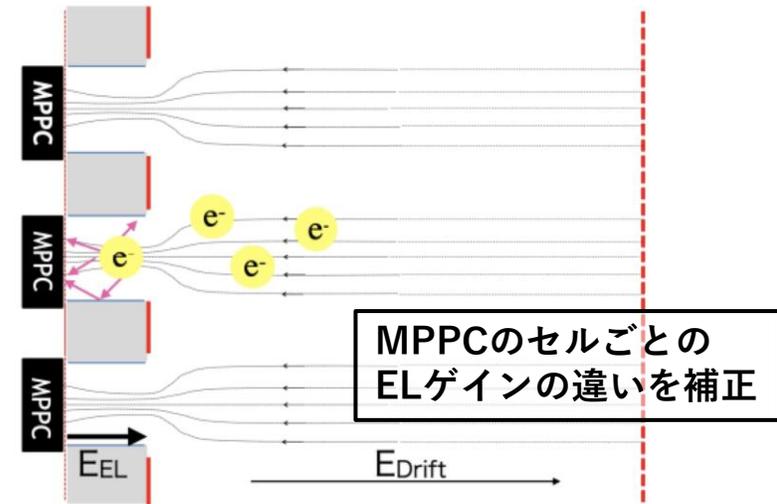
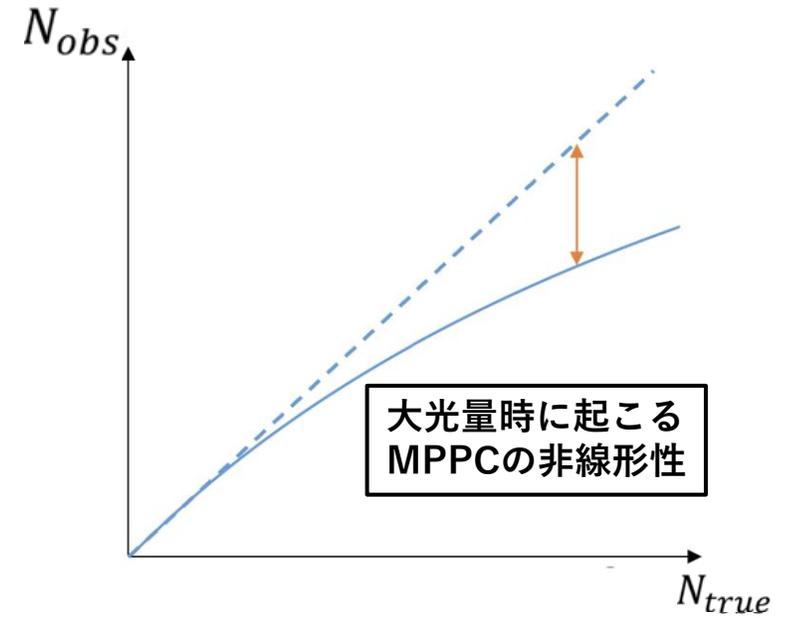
- 波形  
↓  
MPPCの1p.e.ゲイン解析
- photon数  
↓  
MPPCのサチュレーション補正
- photon数の補正  
↓  
ELゲイン補正
- エネルギー

## ◆ クラスタ数求め方

- Hitイベントの位置  
↓  
クラスタ識別
- クラスタ数

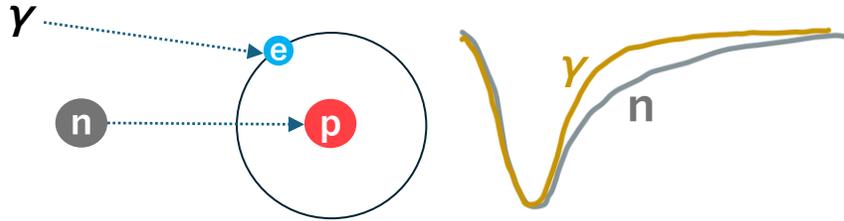
## ◆ 2 クラスタかつ30 keVのイベント

- イベントセレクション



# 液体シンチレータ－解析

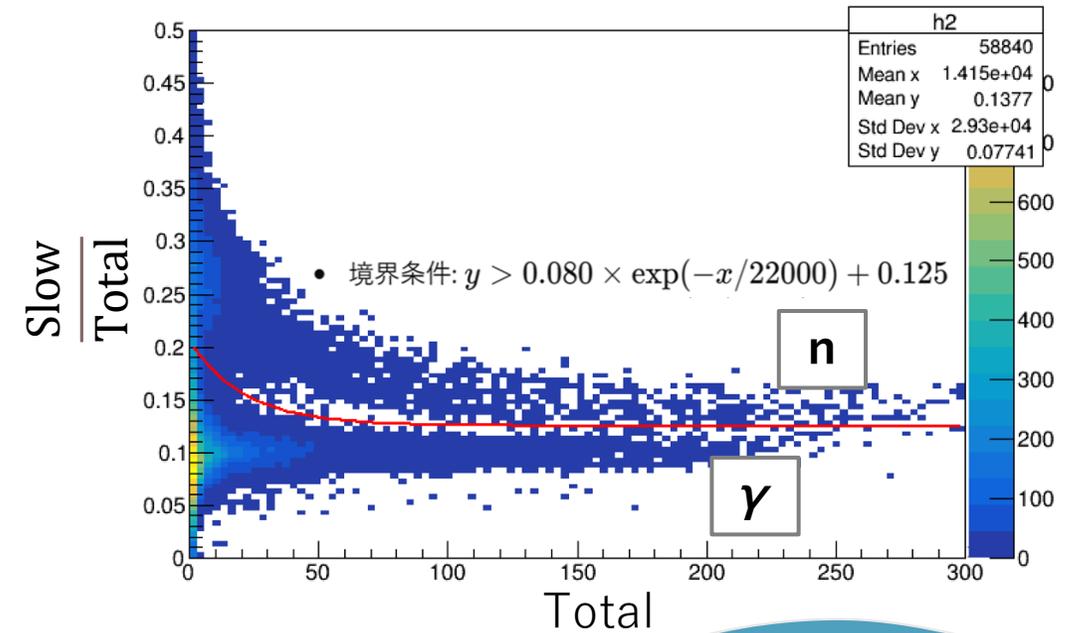
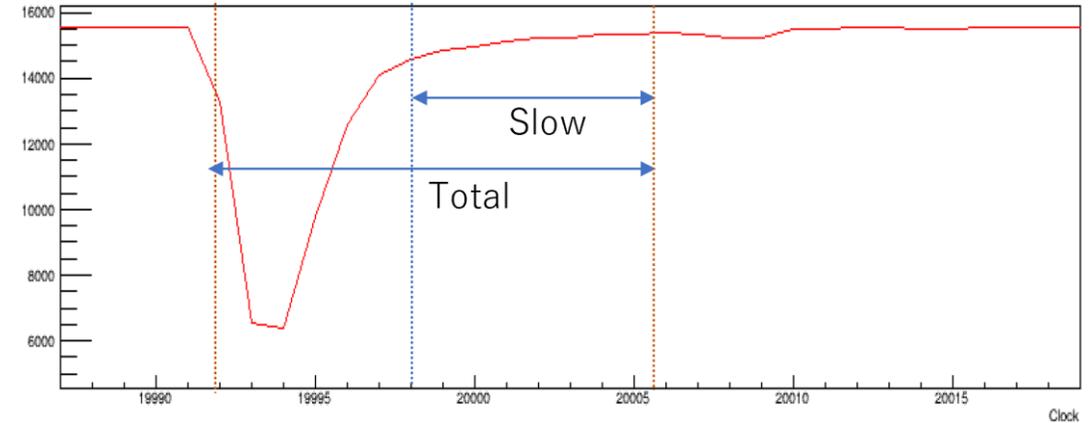
## ◆ 波形弁別



- 重い粒子はエネルギー損失が大きく、エネルギー損失の密度が高いため、長寿命の励起状態が多く生成され、テール部分が大きくなる

## ◆ 解析

- 波形全体の積分値(Total)とテール部分の積分値(Slow)を計算する
- 縦軸  $\frac{\text{Slow}}{\text{Total}}$ 、横軸 Total としてグラフに描画すると、中性子とガンマ線イベントを分離できる。
- 境界条件を設け、条件より上側を中性子、下側をガンマ線イベントとして波形弁別をおこなった。





## ◆ 二進数のデコード

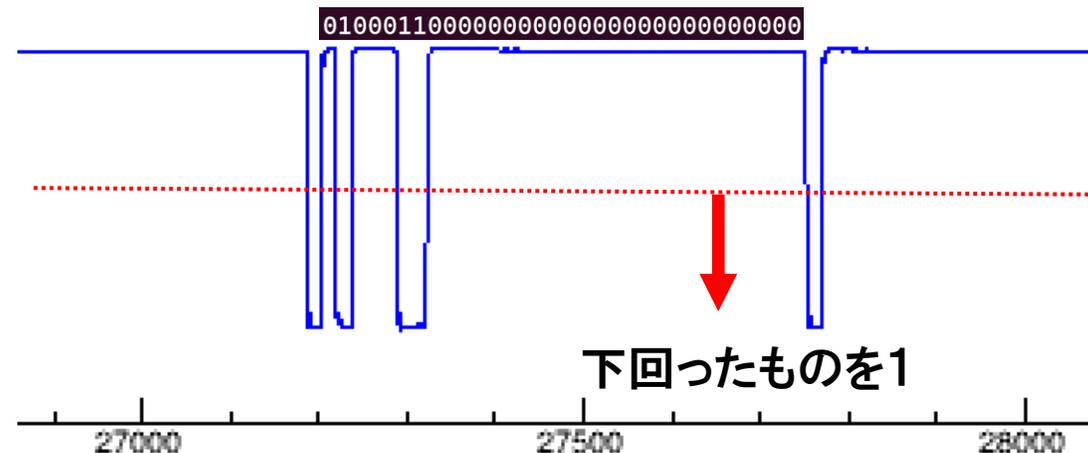
- ◆ 両検出器において同一のイベントをマッチングさせるためキセノンガス検出器側から送られてくるイベントIDを読み取る必要がある。

- 送られてくるイベントID情報を波形で読み取ると、右のようになる。
- Thresholdを設け、それを**下回ったものを1**、それ以外を**0**と読むことでキセノンガス検出器側から送られてきた二進数を読み取りイベントIDに戻す。

## ◆ マッチング成功率

- 液体シンチレーター側にイベントID波形が記録されていないものがあった。  
液体シンチレーターDAQに過剰なdead timeが生じたためと考えられる。

イベントID:98を示す波形

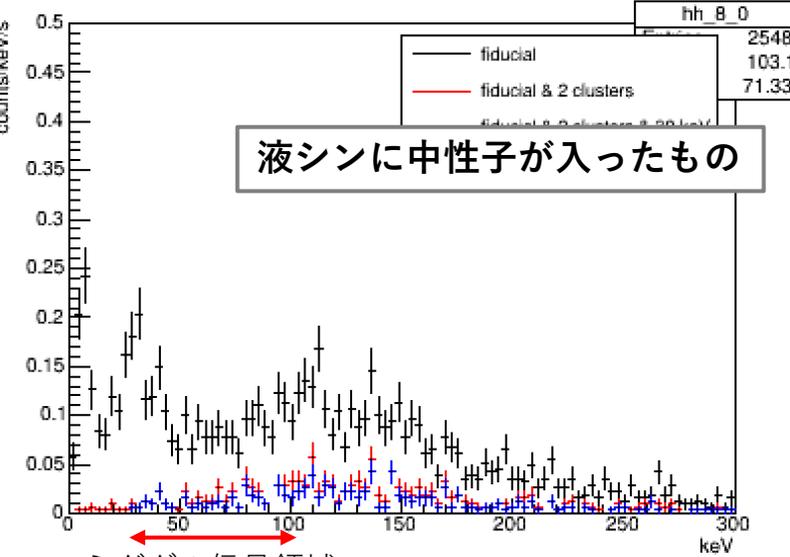
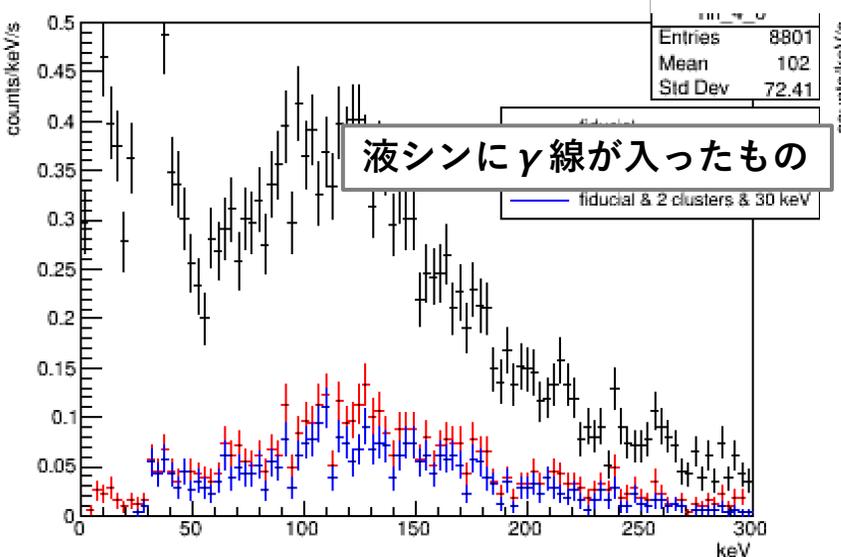
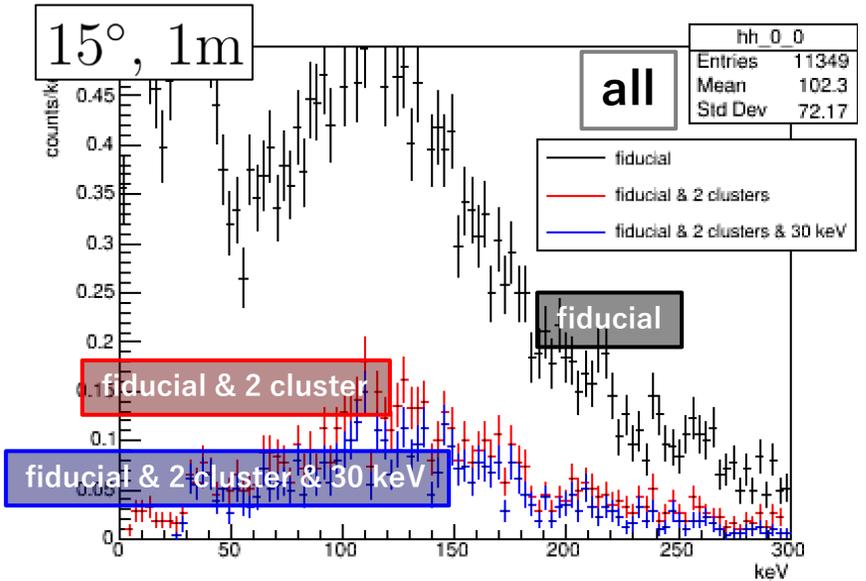
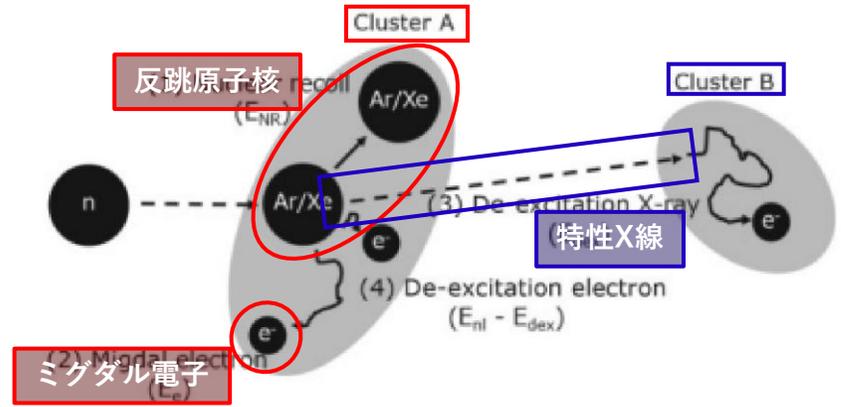


条件	マッチング率
角度15° , 距離1 m	74%
角度15° , 距離4 m	78%
角度32° , 距離2.7 m	96%
角度50° , 距離1.7 m	96%
角度70° , 距離1.1 m	97%

# 統合解析結果



2 clusterかつ片方が30 keVのイベントを取り出し、液体シンチレーターでの粒子情報により選別を施したエネルギー分布。



- 中性子による原子核反跳を見たいため、液シンにガンマ線が入射したイベントすべてバックグラウンド

- 波形弁別を施した後にもかかわらず原子核反跳と思われるピークが見えず、バックグラウンドが多い。

➡ キセノンガス検出器ではガンマ線イベントが発生したにも関わらず液体シンチレーターには中性子が入射したイベントが多いと考えられる。

# ミグダルイベント数概算

## ◆ まず原子核反跳イベント数を見積もる

- 原子核反跳イベント数  $N_{eIa} = fT\sigma nV \times t$
- 立体角 $\Delta\Omega$ で見えるのは  $\Delta N_{eIa} = fTnV \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \times t$
- $f$  : 各runにおける平均中性子フラックス
- $T$  : 液体シンチレーターの検出効率0.481
- $n$  : ガスキセノン5気圧の数密度  $n = \frac{N_{AP}}{RT} \sim 1.35 \times 10^{20} / \text{cm}^3$
- $V$  : fiducial領域体積  $584\sqrt{3} \text{ cm}^3$
- $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  : 角度ごとにおける立体角微分断面積
- $d\Omega$  : 液体シンチレーターは  $\phi 7.62 \text{ cm}$  であるから、距離  $r [\text{m}]$  に置いたとき  $\frac{0.00456}{r^2} \text{ Sr}$   <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>  
National Nuclear Data Center
- $t$  : livetime

ミグダル探索測定

条件	原子核反跳イベント数
角度15° , 距離1 m	$3.6 \times 10^3$
角度15° , 距離4 m	$1.5 \times 10^2$
角度32° , 距離2.7 m	11
角度50° , 距離1.7 m	40
角度70° , 距離1.1 m	7.3

更に、解析時統合不可だった割合を考慮。

# ミグダリイベント数概算

## ◆ ミグダリイベント数のオーダー計算

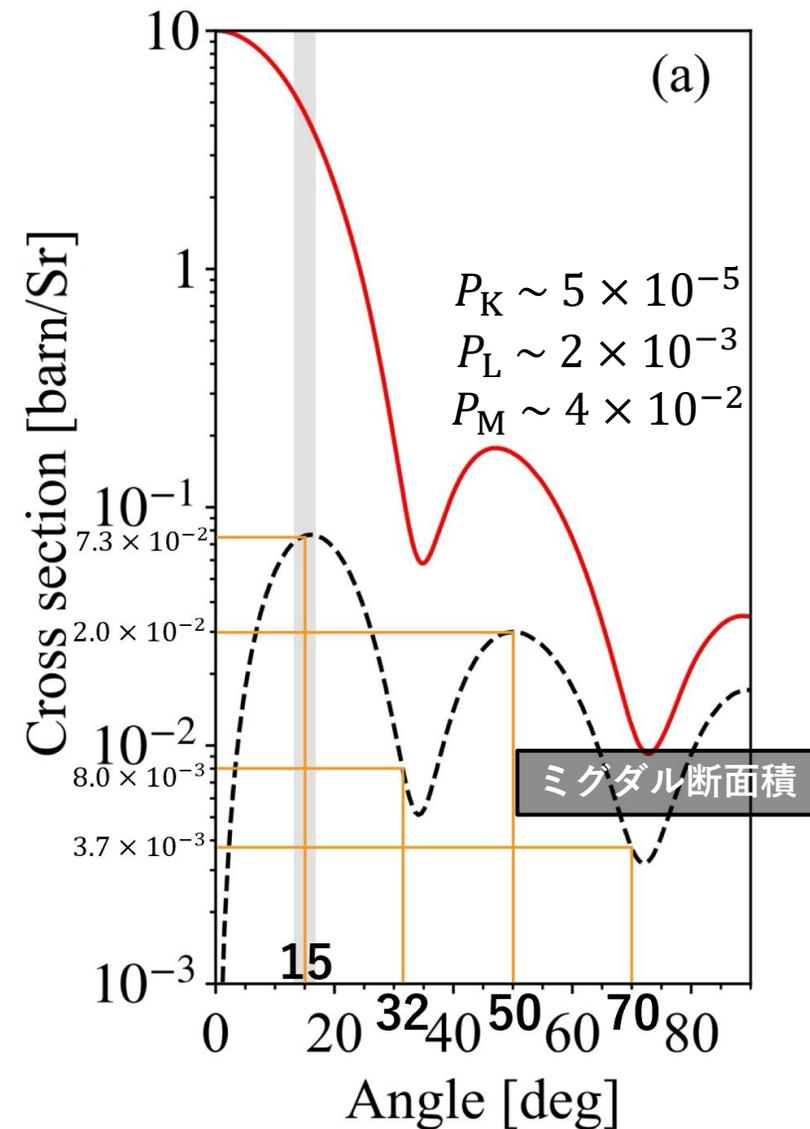
- 図のミグダル断面積はK殻L殻M殻3つの殻からの電離が伴うミグダリイベントの断面積
- 電離確率の角度依存が同じであると近似すると、K殻電離の割合は

$$\frac{P_K}{P_K + P_L + P_M} \approx 1.2 \times 10^{-3}$$

と求まり、これをミグダル断面積にかけ、ミグダリイベント数を見積もった。

条件	ミグダリイベント数	ミグダルエネルギー領域の 2cluster 30 keVイベント数
角度15° , 距離1 m	0.078	159

➡ 液体シンチレーターを10個、測定時間を1000分とすれば15発程度のミグダル効果を観測可能である。  
また現在は約2000倍の差が見られさらなるBG低減が望まれる。



PHYSICAL REVIEW D 109, L051101 (2024)

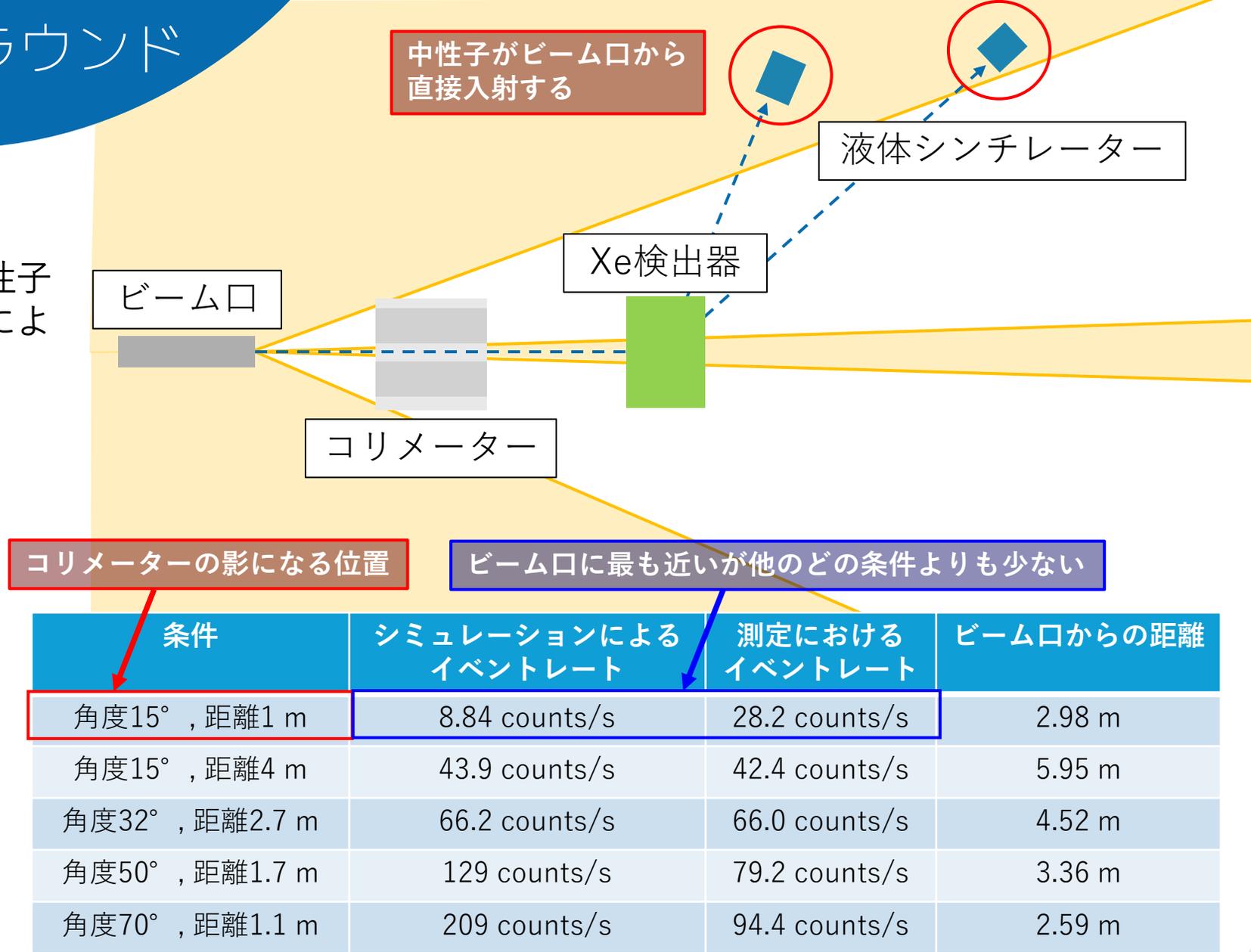
# 本測定におけるバックグラウンド

液体シンチレーターにのみ入射する中性子のイベントレートをシミュレーションにより見積もり、測定と比較した。

- シミュレーションと測定双方から、コリメーターの影になっているものが最もイベントレートが低く、また、それ以外ではビーム口に近づくほどイベントレートが高くなる傾向が得られた。

ビーム口から直接液体シンチレーターに入射したイベントが多かったこと。

測定側が少ない原因は波形弁別が不完全であったことが原因と思われる。

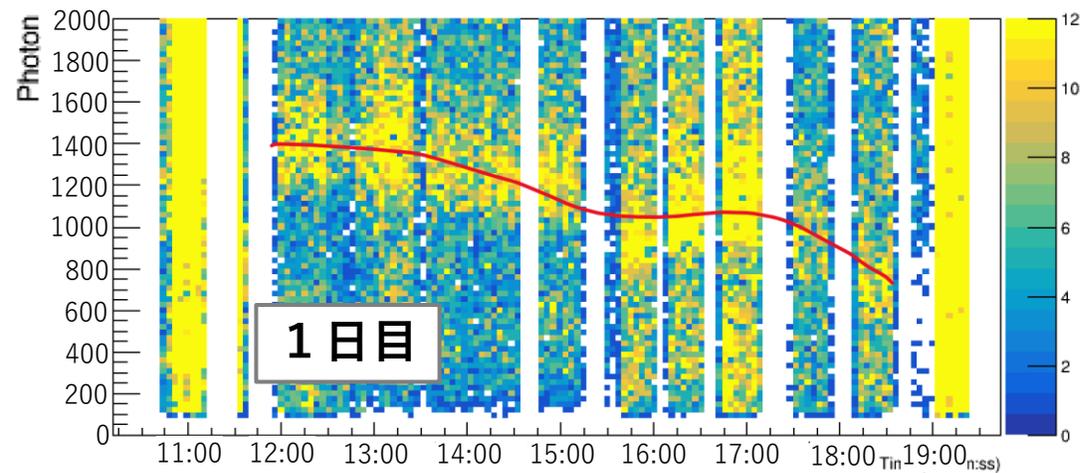


## ◆ コリメーターの有無の差による差

シミュレーションにて液体シンチレーターに直接入射する中性子数の差を見積もったところ、コリメーターによって液体シンチレーターに入る中性子は約1/10に減少しているを見積もられた。

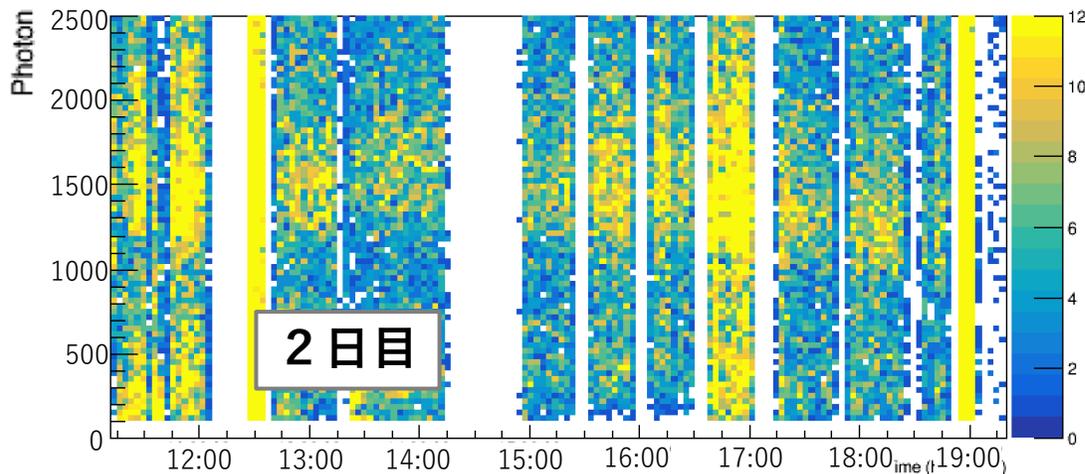
条件	イベント数 [counts]
コリメーターあり	693
コリメーターなし	6799

更なるバックグラウンド低減に向けてビーム口と液体シンチレーターを遮蔽することが有効であるとわかる。



## ◆ 30 keVピーク付近の光子数変化

- 時間と共に光量が減少している。
- 真空引きの時間が短くFPC由来のアウトガスが多かったことが原因。



2日目はTPCにかけた電圧が上がっているため  
一日目の終わりよりもPhoton数は増加している。

エネルギー分解能向上のために真空引きを適切に行う  
ことが重要

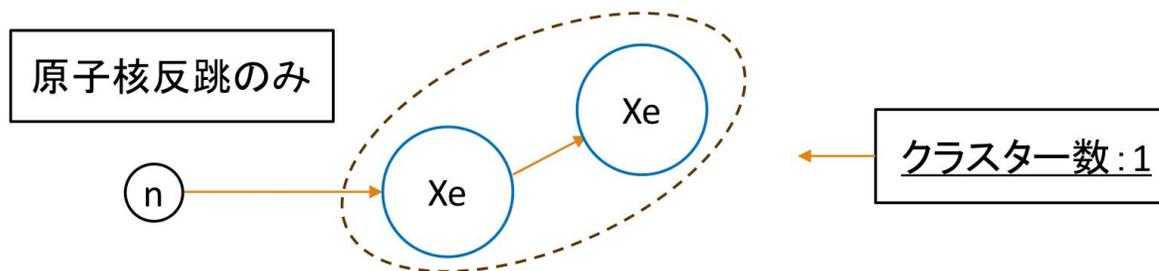
# まとめと展望

- ◆ 前回実験では $\gamma$ 線バックグラウンドが支配的であり、これを減らす必要があるとわかった。
- ◆ 本実験では新たに液体シンチレーターを用い、さらに検出器内のフィールドケージの改良を行った。
- ◆ バックグラウンド
  - ・得られたエネルギースペクトルから、原子核反跳イベント、ミグダルイベントを観測するには依然バックグラウンドが多いことが明らかとなった
  - ・特に液体シンチレーターに直接入射する中性子が多く今回の測定では中性子バックグラウンドが支配的であった。
- ◆ 将来展望
  - ・測定時間の確保、液体シンチレーターを増設しミグダルイベント観測数増加
  - ・PMTの実装を行うことでTOFによる中性子のタグ付けをより正確に行う
  - ・中性子の遮蔽を行い、液体シンチレーターで検出されるバックグラウンド中性子の低減
  - ・不足していた真空引きを十分行い、測定中のキセノンを高純度に保ち高分解能を維持

Back up

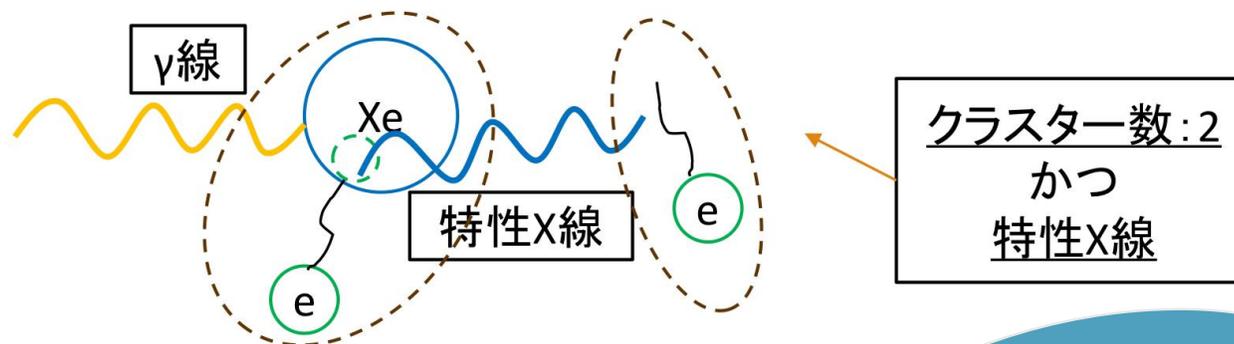
## ◆ メリット

- 原子核反跳のみのイベントはクラスターにより区別できる



## ◆ デメリット

- ガンマ線が光電吸収されてK殻電子が電離した場合と区別できない



# 原子核反跳に伴うミグダル効果

## ◆ 量子力学から導かれた現象

- 原子核反跳が起こった状態

$$|\phi_0'\rangle = e^{-iv_N \cdot r} |\phi_0\rangle$$

電子の位置 (pointing to  $r$ )  
 反跳原子核の速度 (pointing to  $v_N$ )  
 始状態 (pointing to  $|\phi_0\rangle$ )

## ◆ ミグダル効果の起こる確率(分岐比)

- 原子核よりも電子の速度が十分小さい場合、電子の運動量移行( $q_e$ )の二乗に比例し、反跳原子核のエネルギー( $E_R$ )に比例

$$W = \left| \int \phi_n^* e^{-iv_N \cdot r} \phi_0 dr \right|^2$$

励起または電離した状態  
 $\downarrow$   $v_N \ll v_e$ , ( $v_N$ がz方向と仮定)

$$W = v_N^2 |\langle \phi_n^* | z | \phi_0 \rangle|^2$$

$q_e \approx \frac{m_e}{m_N} q_N$ ,  $q_N \approx m_N v_N$ ,  $E_R \approx \frac{q_N^2}{2m_N}$   
 ( $q_e, q_N$ : 電子、原子核への運動量移行)

$$W \propto q_e^2, \quad W \propto E_R$$

(n, l)	$\mathcal{P}_{\rightarrow 4f}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 5d}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 6s}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 6p}$	$E_{n\ell}$ [eV]	$\frac{1}{2\pi} \int dE_e \frac{dp_e}{dE_e}$
1s	-	-	-	$7.3 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^4$	$4.9 \times 10^{-6}$
2s	-	-	-	$1.8 \times 10^{-8}$	$5.4 \times 10^3$	$3.0 \times 10^{-5}$
2p	-	$3.0 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-9}$	-	$4.9 \times 10^3$	$1.3 \times 10^{-4}$
3s	-	-	-	$2.7 \times 10^{-7}$	$1.1 \times 10^3$	$1.1 \times 10^{-4}$
3p	-	$3.4 \times 10^{-7}$	$4.0 \times 10^{-7}$	-	$9.3 \times 10^2$	$6.0 \times 10^{-4}$
3d	$2.3 \times 10^{-9}$	-	-	$4.3 \times 10^{-7}$	$6.6 \times 10^2$	$3.6 \times 10^{-3}$

励起

M.Ibe, arXiv:1707.07258v5, 2023

電離

- ミグダル効果の確率は小さい(例: 1s軌道電子の電離確率 $\Rightarrow O(10^{-6})$ )
- 電離に比べ励起の確率はより小さい(同じ(n,l)のとき $O(10^3)$ ほどの違いがある)



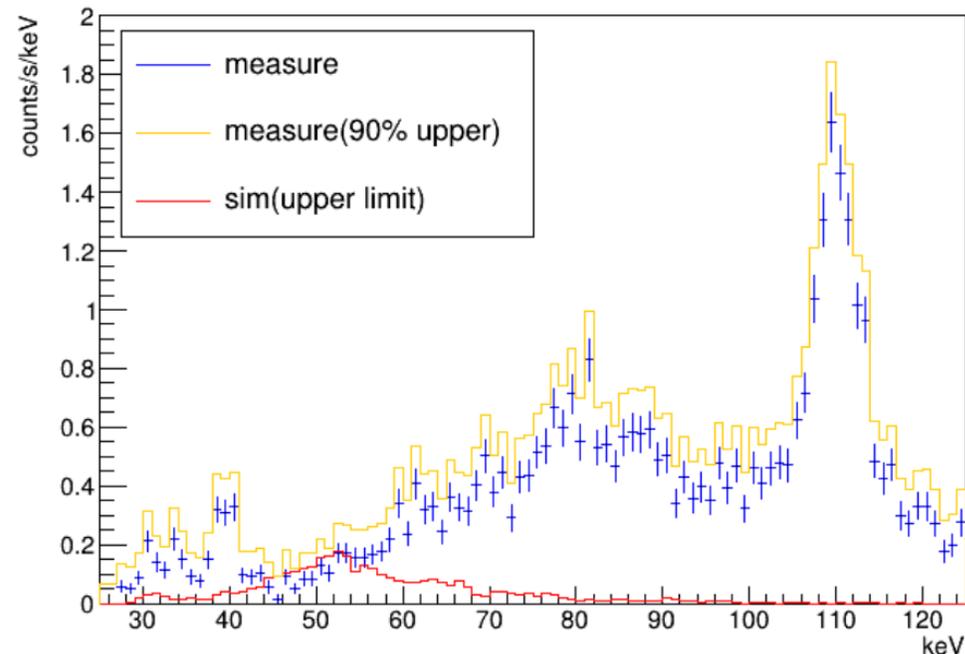
## ◆ 発生確率の上限値と理論から導かれる分岐比の比較

※クエンチング値が  $q = 0$  の時

理論から導かれたミグダル効果分岐比： $6.0 \times 10^{-7}$

前実験から得られているミグダル効果分岐比の上限値： $1.91 \times 10^{-1}$

よって比で $3.2 \times 10^5$ 程の差がある状態となっている。



## ◆ 分岐比の上限値(クエンチング0.1~1.0)

- 文献値との比： $2.7 \sim 5.0 \times 10^5$

	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9	q=1.0
分岐比	0.20	0.27	0.20	0.17	0.18	0.16	0.19	0.18	0.30	0.21
文献値との比	$3.3 \times 10^5$	$4.5 \times 10^5$	$3.3 \times 10^5$	$2.8 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	$2.7 \times 10^5$	$3.2 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	$5.0 \times 10^5$	$3.5 \times 10^5$



## ◆ Time Projection Chamber検出器

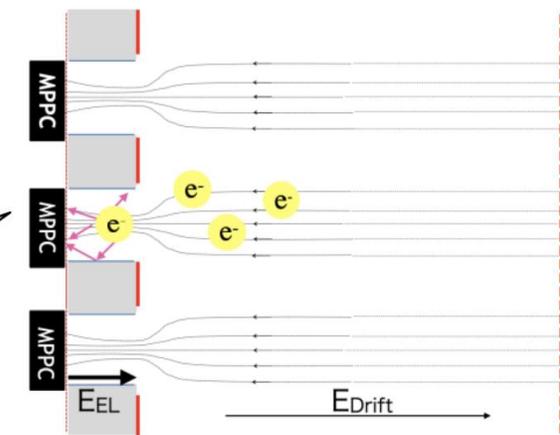
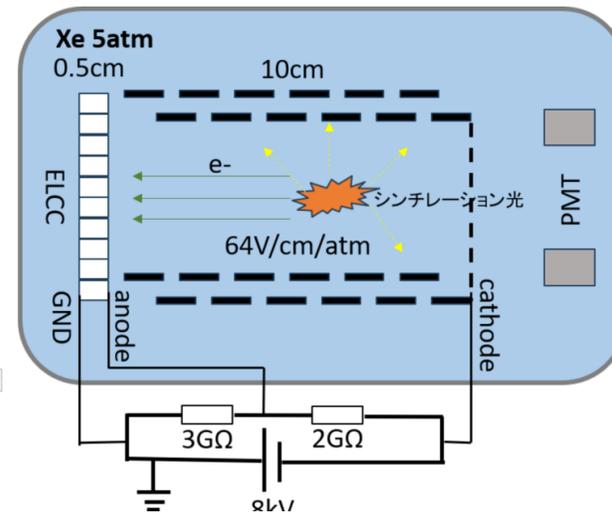
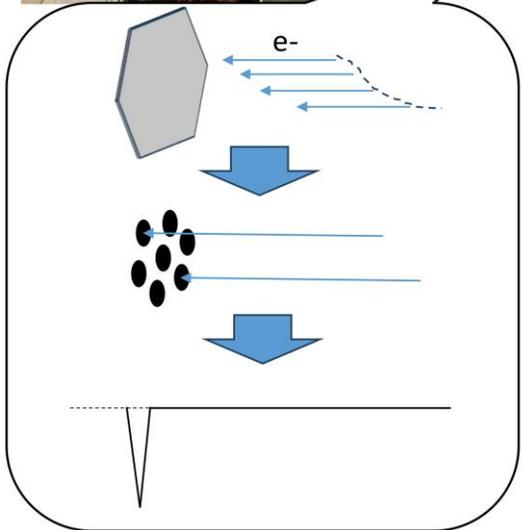
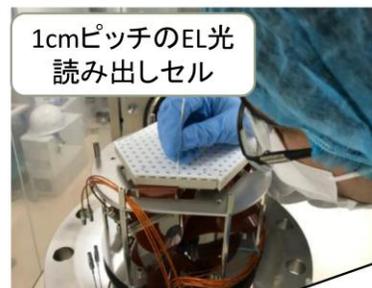
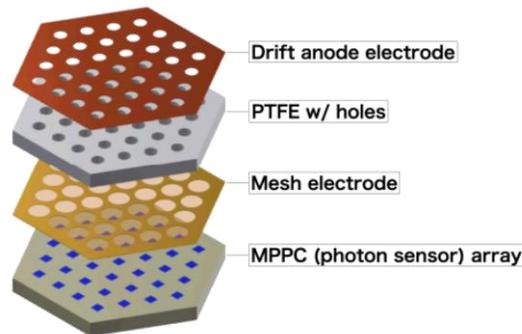
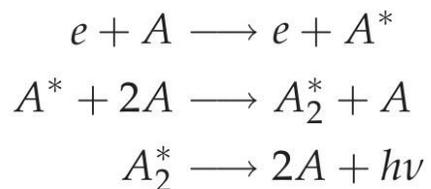
- ELCCで電離電子をエレクトロルミネッセンス光で読み出す
- 1 cm 間隔で計168 chを六角形状に配列

## ◆ 印加電圧 8 kV (GND-カソード間)

- ドリフト電場：64 V/cm/atm
- EL電場：1.92 kV/cm/atm

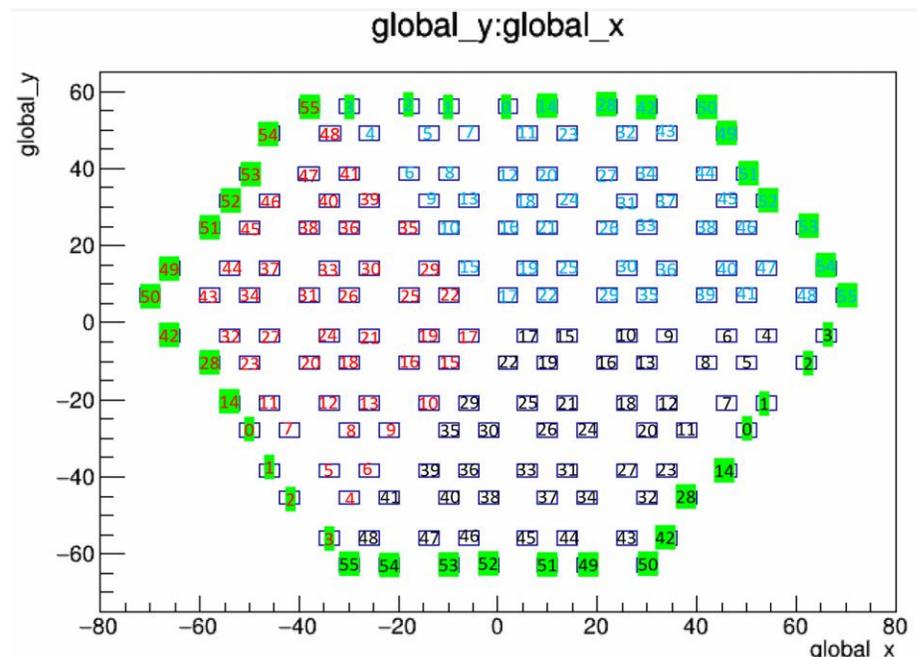
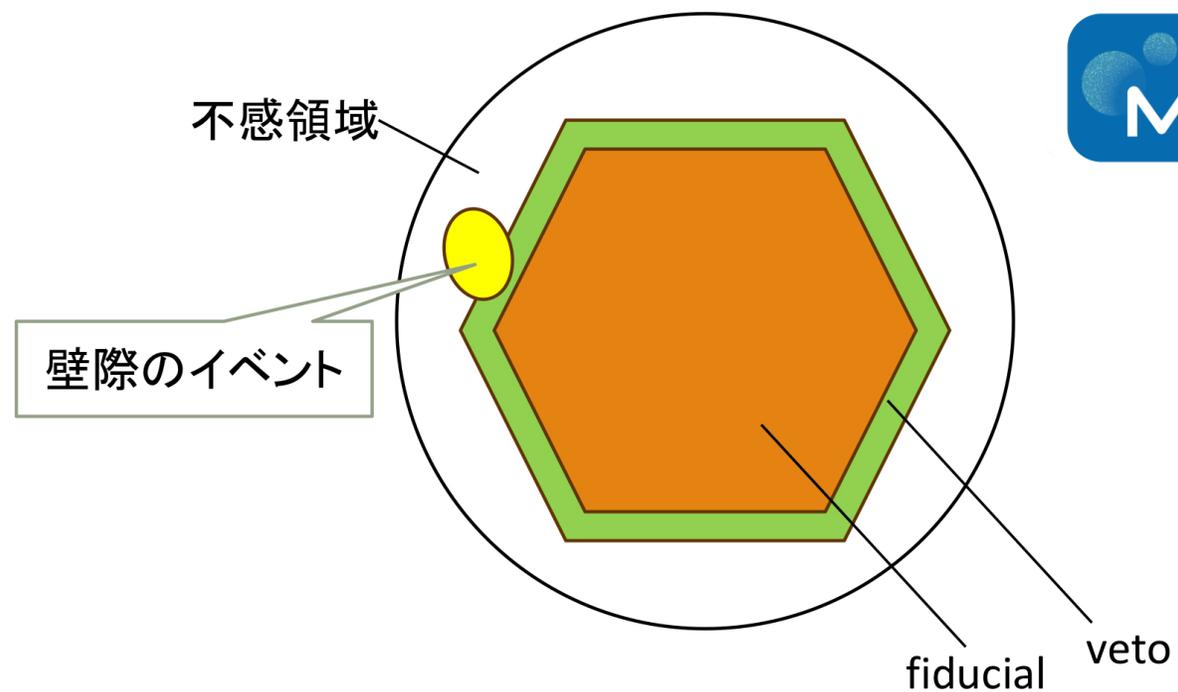
## エレクトロルミネッセンス過程

- ◆ 電子のエネルギーがイオン化の閾値以下であるとき、衝突によって電離はせずに励起をし、エレクトロルミネッセンスを生成



## ◆ fiducial領域とveto領域の設定

- イベントが完全に収まるイベントを検出
- 壁際のイベントはクラスターの一部が不感領域に入る  
⇒エネルギー損失の一部を取りこぼす  
⇒エネルギー分解能の低下
- 有感領域の一番外側のチャンネルをvetoチャンネルとし、そこにHitしたイベントはvetoイベントとしてデータ取得をしない
- 今回未使用のPMTをもちいてz方向にもveto領域を設けることが望まれる



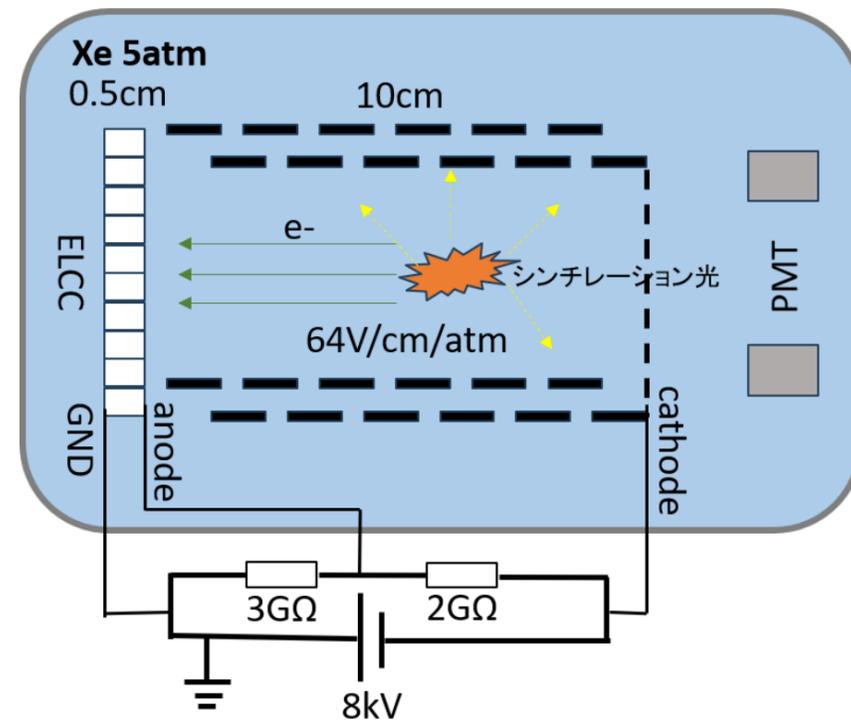
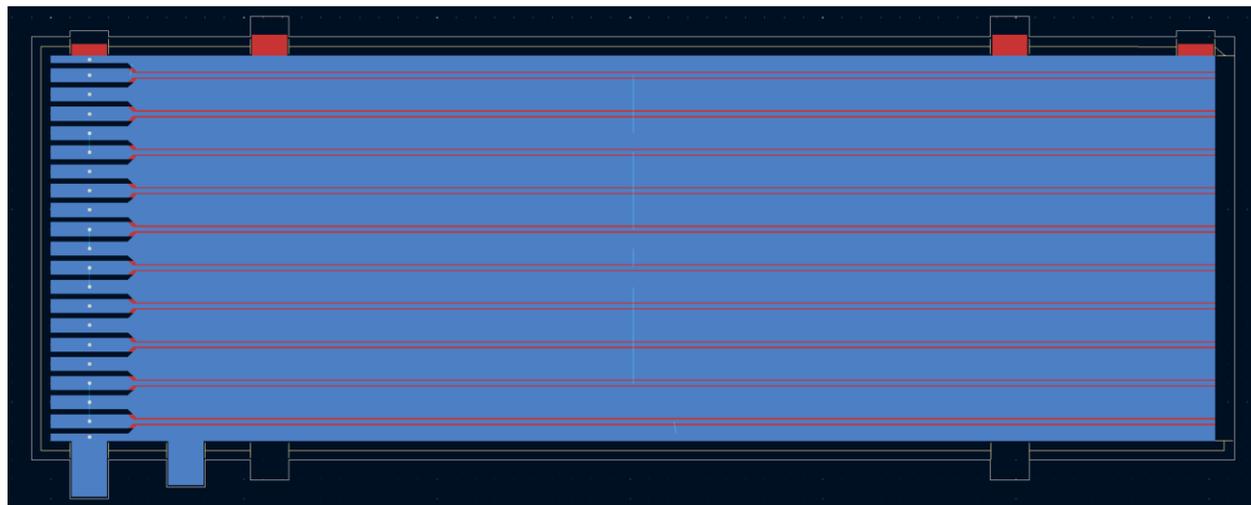
# 抵抗選定

選定前の見積もり。

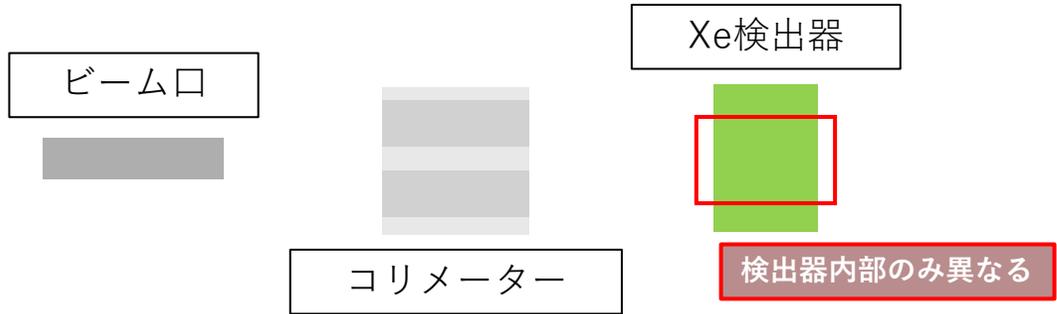
TPCの電場は**100 V/cm/atm**をかけたい。

そのためFPC全体では**10cm**あるので、電位差**8 kV**。また、FPCの電極は21本ある為電極間につける抵抗は全20個で、銅フィルム間ごとに**400 V**ずつ電位差が必要。

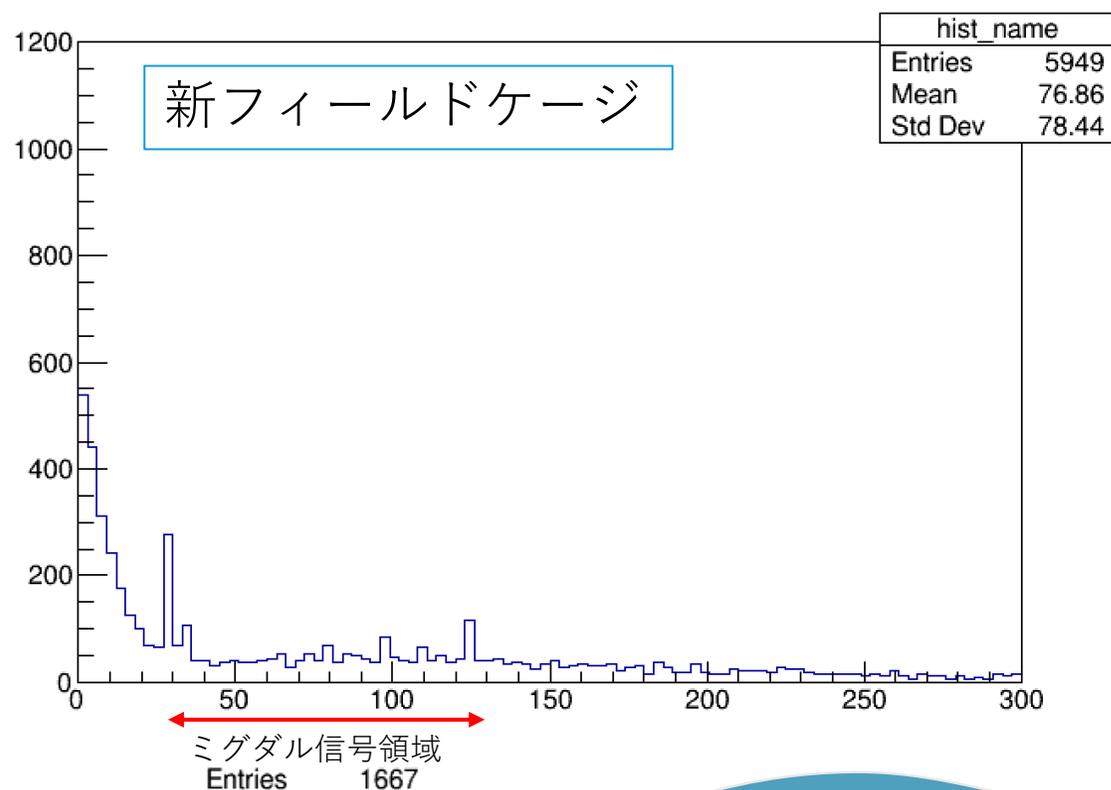
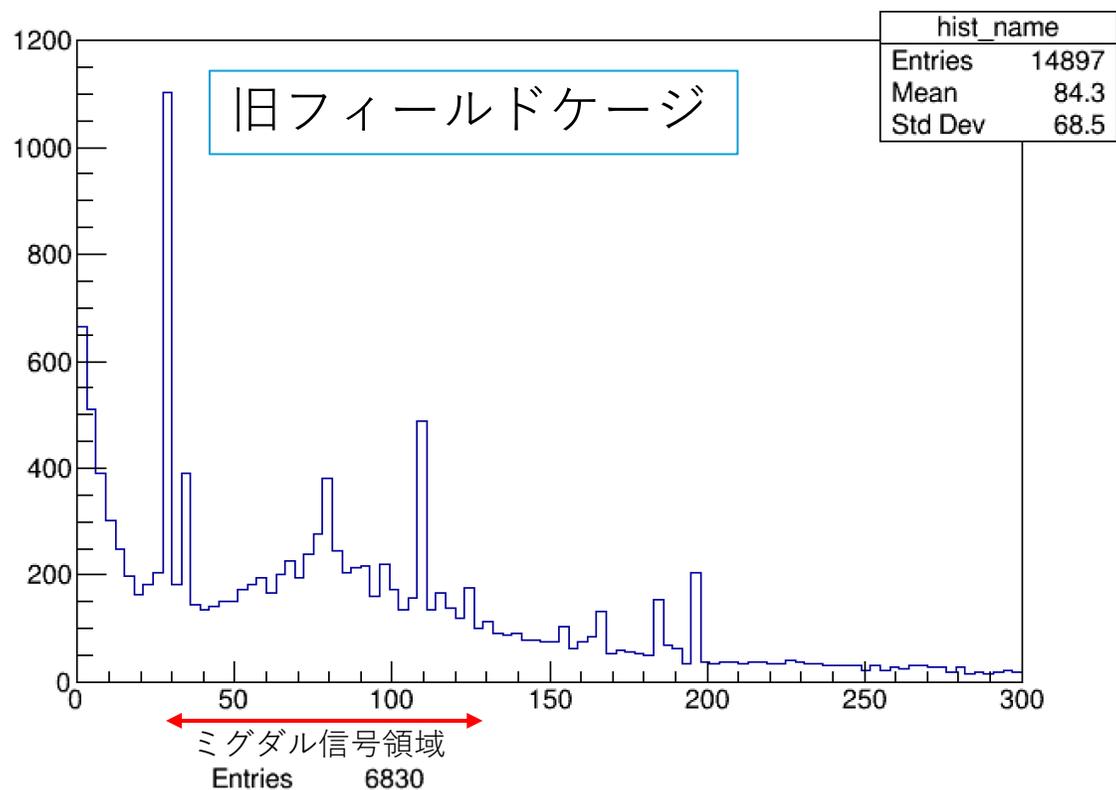
合計**2G $\Omega$** の抵抗値が欲しいので、1つあたり**100M $\Omega$** の抵抗があればいい。



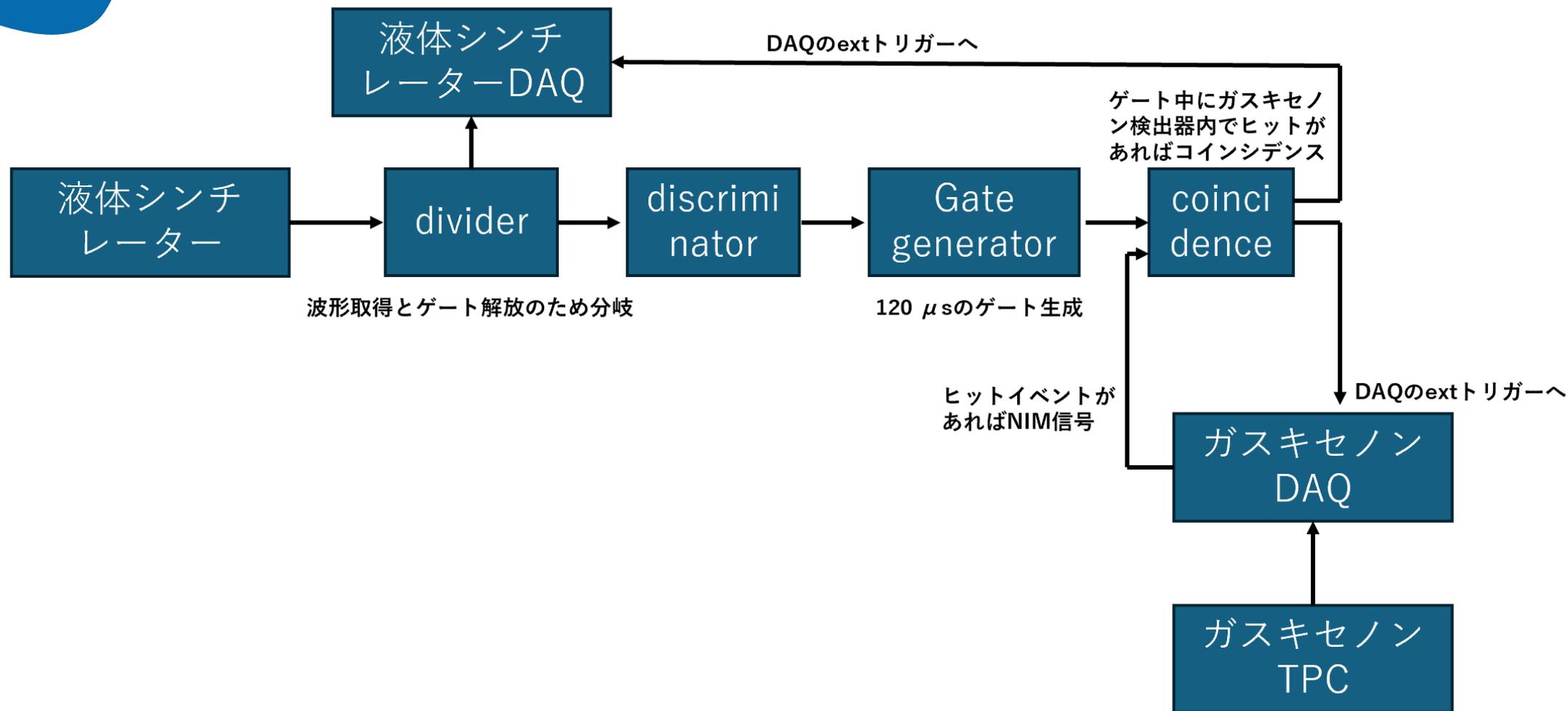
# 新旧フィールドケース比較



同条件下において、旧フィールドケースと新フィールドケースによるエネルギー分布をシミュレーションした。

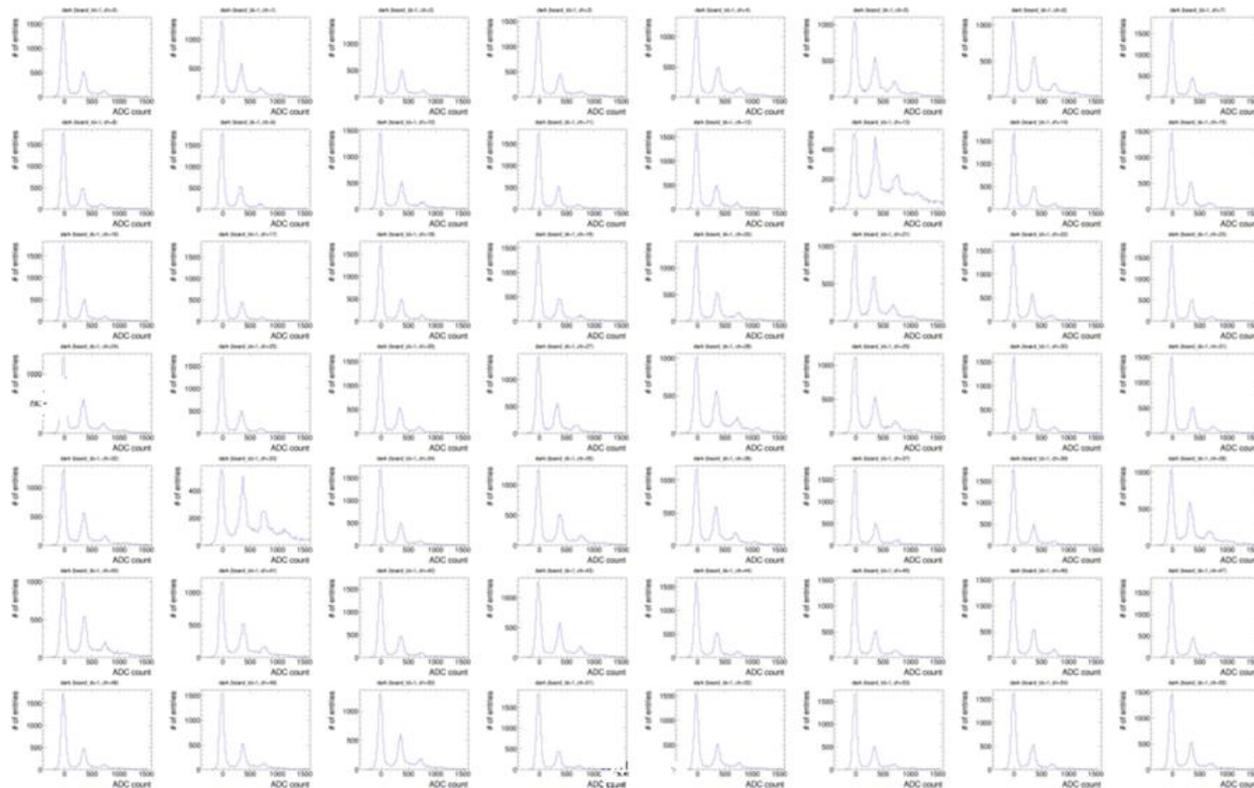
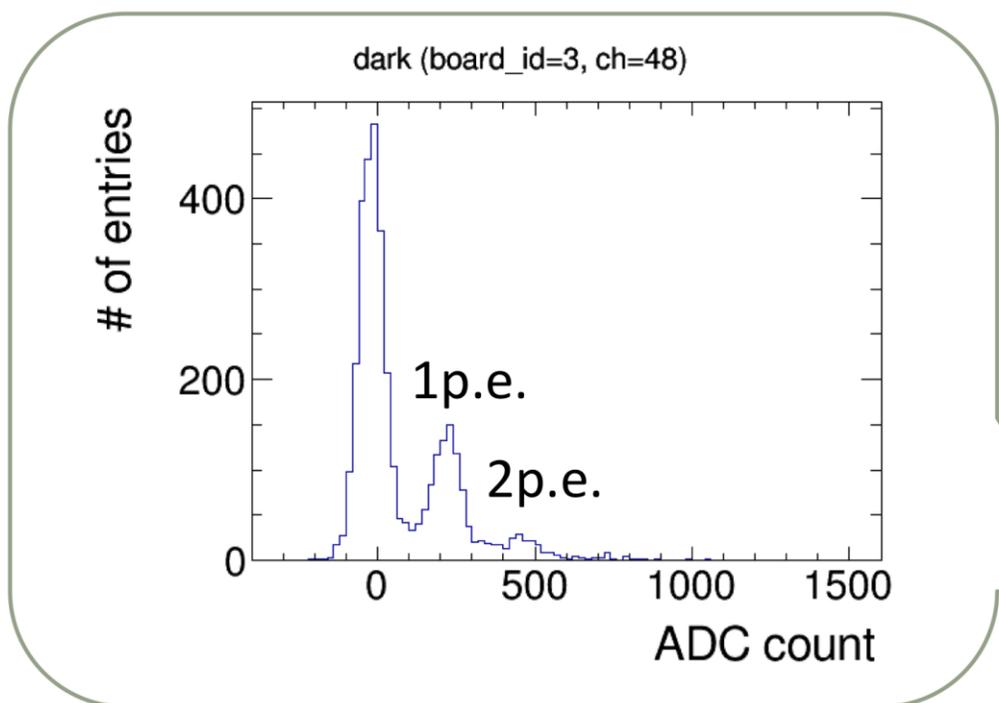


ミグダル信号領域においてイベント数は約1/4に減少。



## ◆ MPPCのダークカウントを各チャンネルで測定

- FittingによりペDESTアルと1 p.e. に対応するADCカウントを求め差をとる。
- ダークカウント測定時と通常データ測定時のそれぞれのゲイン増幅率からスケールングを行い1 p.e. ゲインを算出。



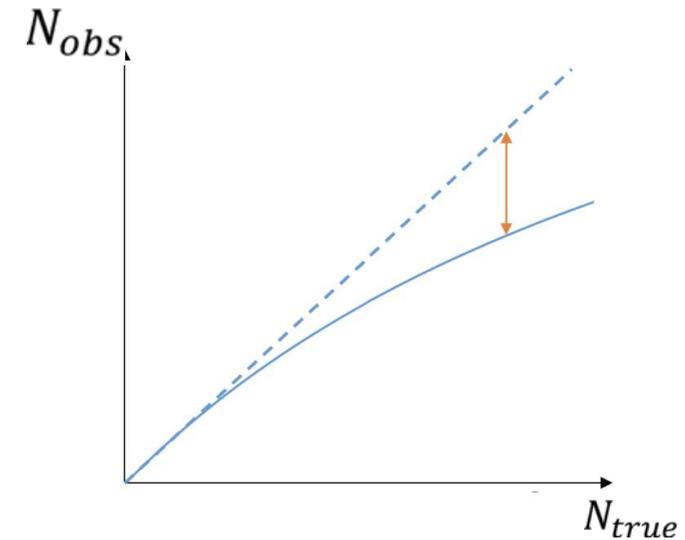
## ◆ 大光量下ではMPPCの応答が非線形になる。

- 同じピクセルに光子が同時に入った場合でも 1 光子分の出力しかされない
- 非線形性はMPPC”回復時間”で特徴づけられる。  
回復時間：出力をしてから次の所定の出力ができるようになるまでの時間
- 各chで回復時間は異なるが、今回は典型的な回復時間を全チャンネルに適用し補正。

$$N_{obs} = \frac{N_{true}}{1 + \tau \frac{N_{true}}{\Delta t \cdot N_{pix}}}$$

↑  
非線形応答の原因

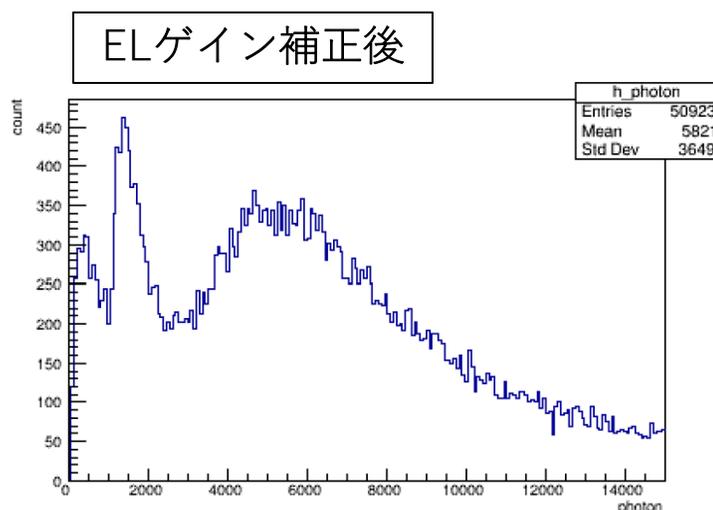
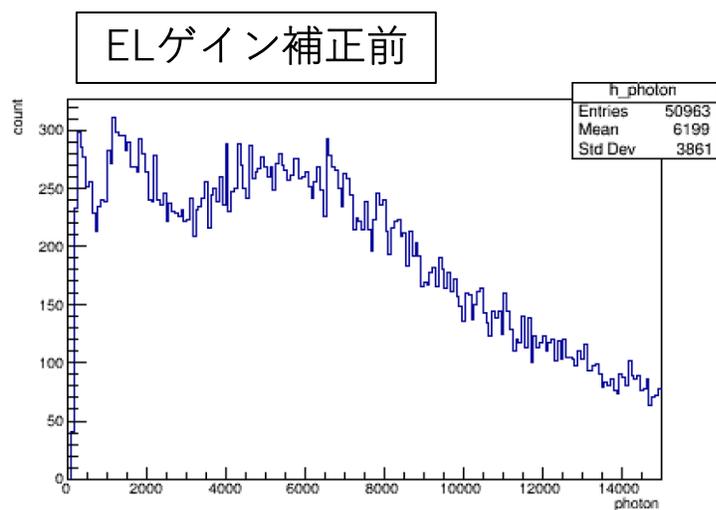
$N_{obs}$ : 観測光子数、 $N_{true}$ : 入射光子数  
 $\Delta t$ : 単位時間、 $N_{pix}$ : MPPCのピクセル数、 $\tau$ : 回復時間



Kazuhiro Nakamura, "Development of a large-sized high-pressure xenon gas time projection chamber for neutrinoless double beta decay search", Doctoral thesis, Kyoto University, 2022

◆  $K_{\alpha}$ 線イベントを収集し、各chのELゲインのばらつきを補正

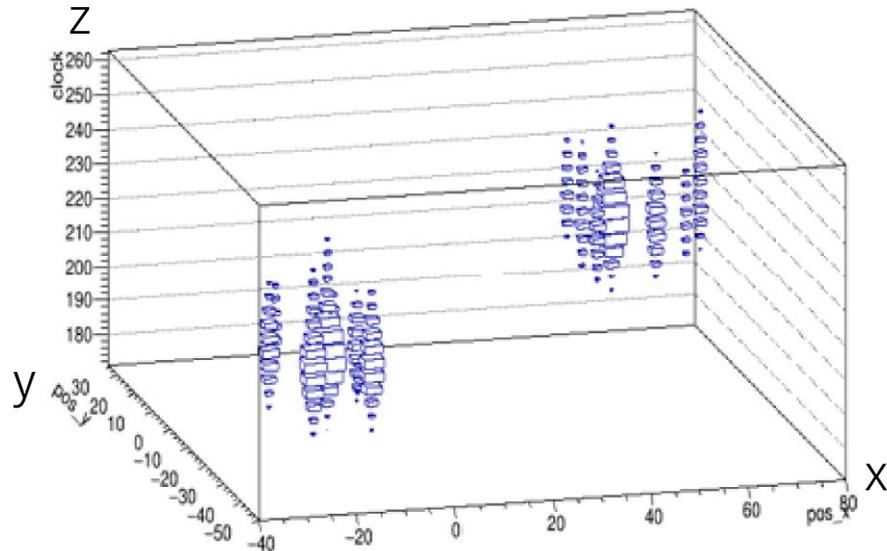
- 光電効果により、 $K_{\alpha}$ 線のイベントがキセノンガス中の様々な場所で発生
  - $K_{\alpha}$ 線イベントのエネルギーの大半は1つのチャンネルにおち、残りは隣接するチャンネルに落とされる
    - ELCC面方向のdiffusionの最大の長さ：0.33 cm
    - 30 keVの電子の飛程：0.12 cm
- ← 合計0.45 cm < ELCCのセル間隔 1 cm
- $K_{\alpha}$ 線のエネルギーに対応するphoton数が揃うようにELゲインの補正を繰り返す。  
→ELゲインのずれが大きいチャンネルを特定して補正できる。



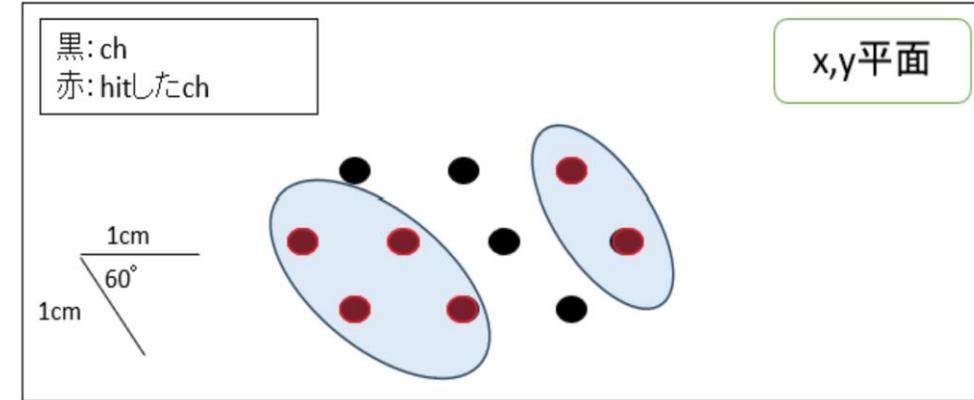
## ◆ Hitしたチャンネルが隣同士、かつ時間的に波形が重なっている場合に同一クラスターと判断

- (x,y)平面でHitしたチャンネルが離れている。  
→別クラスター
- z位置に関して、時間的に波形が重なっていない  
→別クラスター

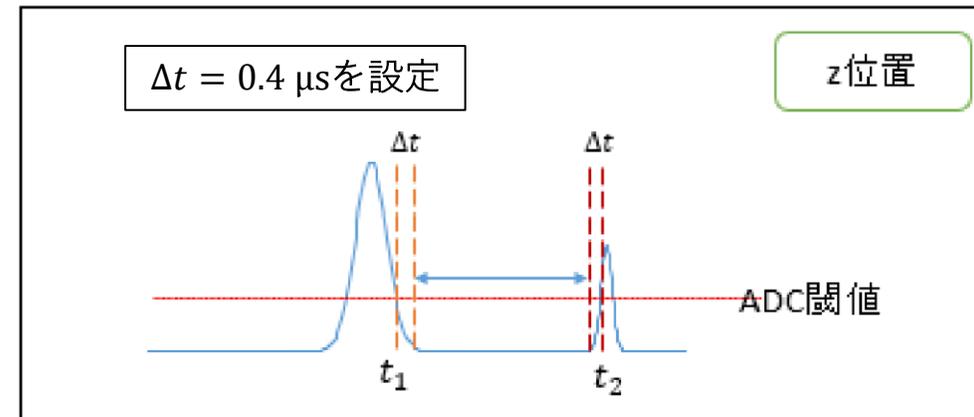
2クラスターのイベントディスプレイ



複数クラスターと認識される場合



$\Delta t = 0.4 \mu\text{s}$ を設定



## ◆ x,y平面

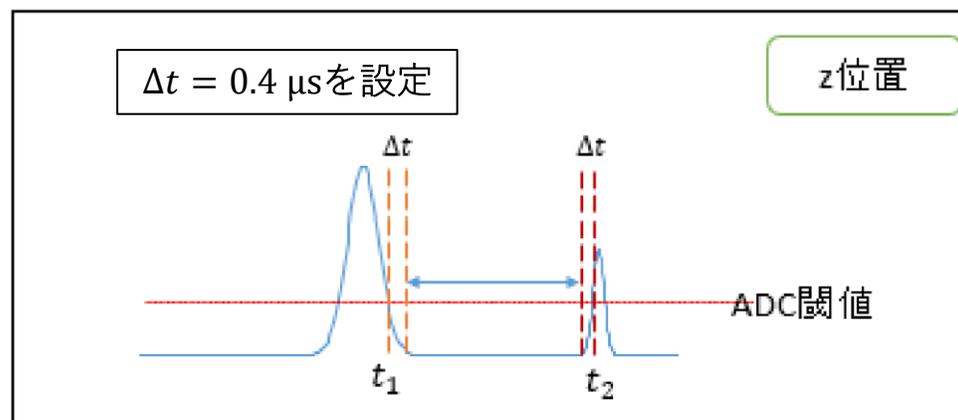
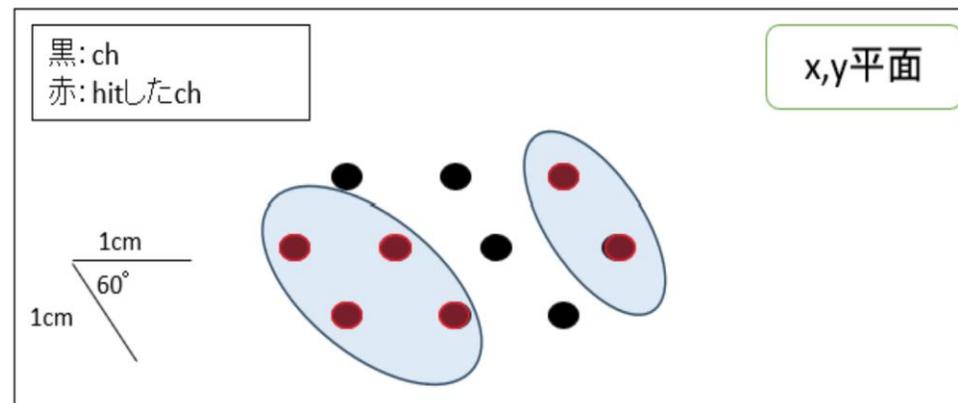
- ドリフト電子は最大**0.33cm**拡散する
- **Hitしたch**が隣同士でなければ別クラスター

## ◆ z位置

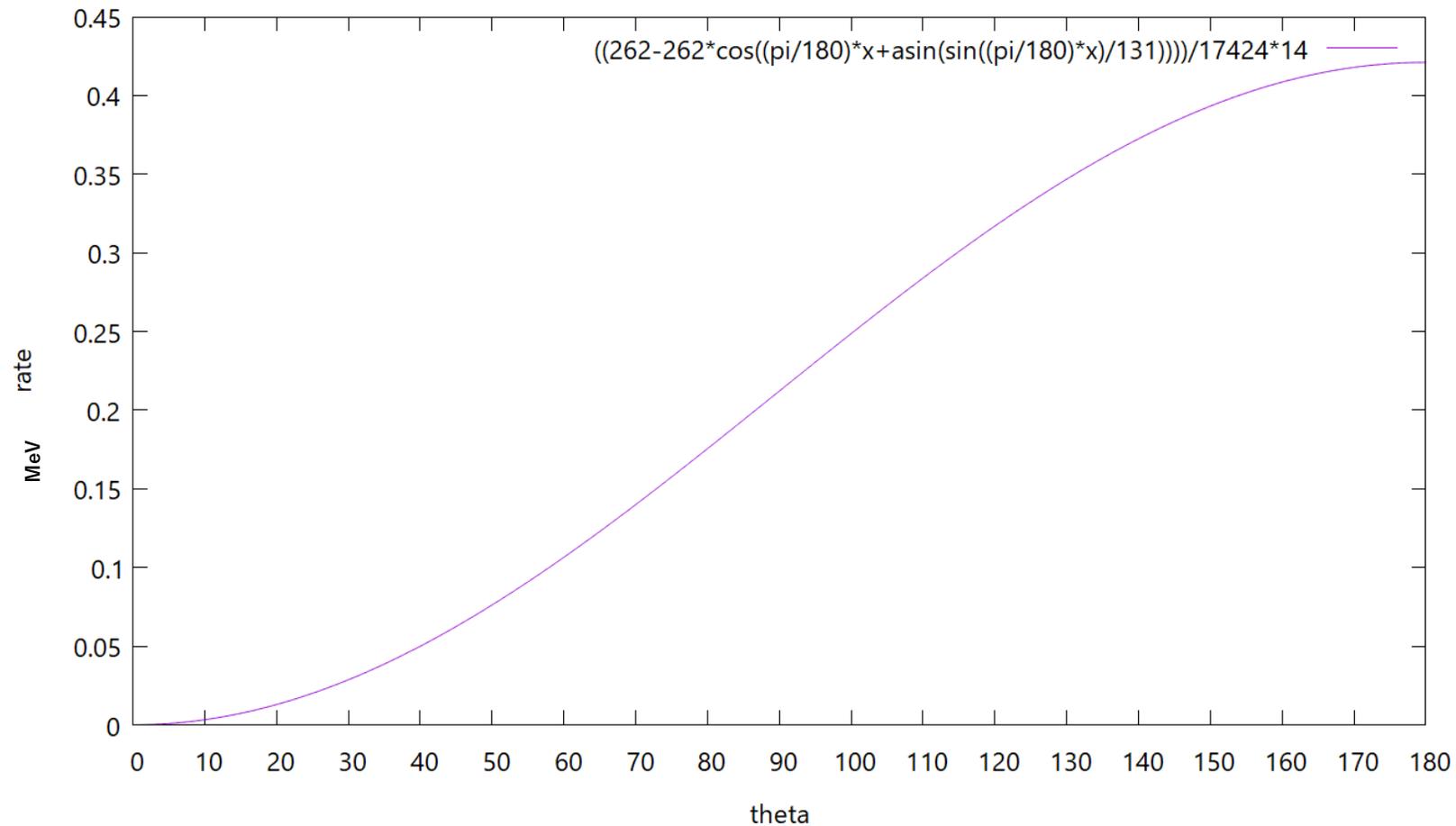
- 最大**0.095 cm (0.95  $\mu$ s相当)**の拡散
- 時間的に波形が重なっているかを判定し、
  - データ取得に際し**ADC**の閾値を設けているため、**ADC**閾値をとった瞬間から**baseline**に戻るまでの時間**0.4  $\mu$ s**を設定

- ◆ **hitしたch**が隣同士かつ時間的に波形が重なっている場合同一クラスターと判定

複数クラスターと認識される場合



# 散乱原子核エネルギーの角度依存性について

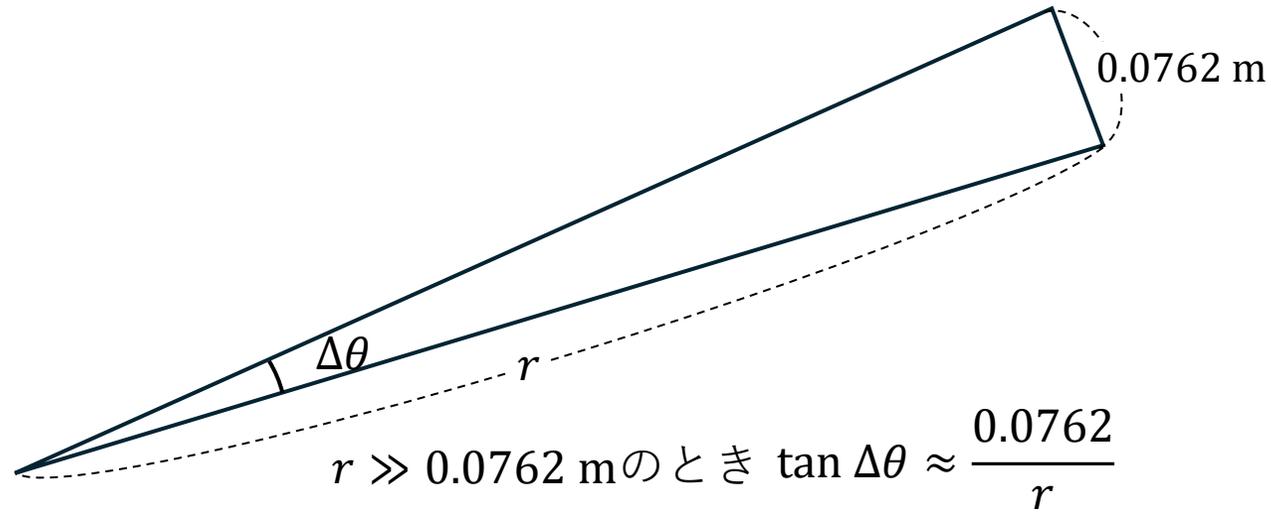


角度は中性子の散乱角度。  
中性子がまっすぐの時は原子核はエネルギーを貰わない。  
中性子が完全に跳ね返った時が最大。

ここから距離によるエネルギーの広がりがわかる。  
( $r = 1$  mで $4.36^\circ$ 、 $r = 2$  mで $2.18^\circ$ )

角度 [度]	反跳エネルギー [keV]
15	7.28
32	32.44
50	76.14
70	139.94

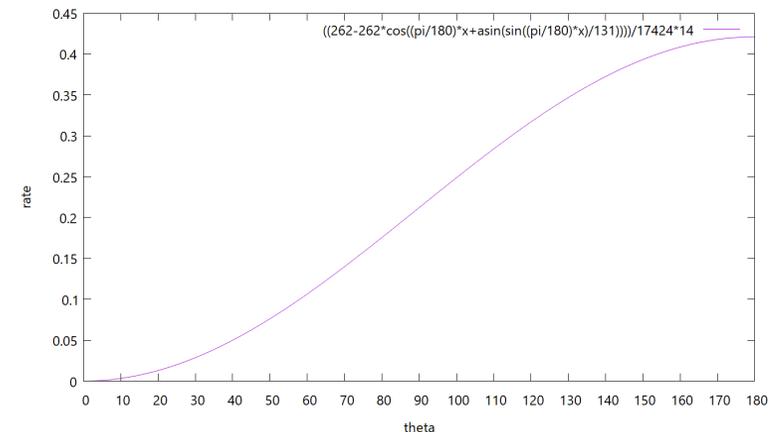
# 液シンの距離と見える反跳エネルギーの関係



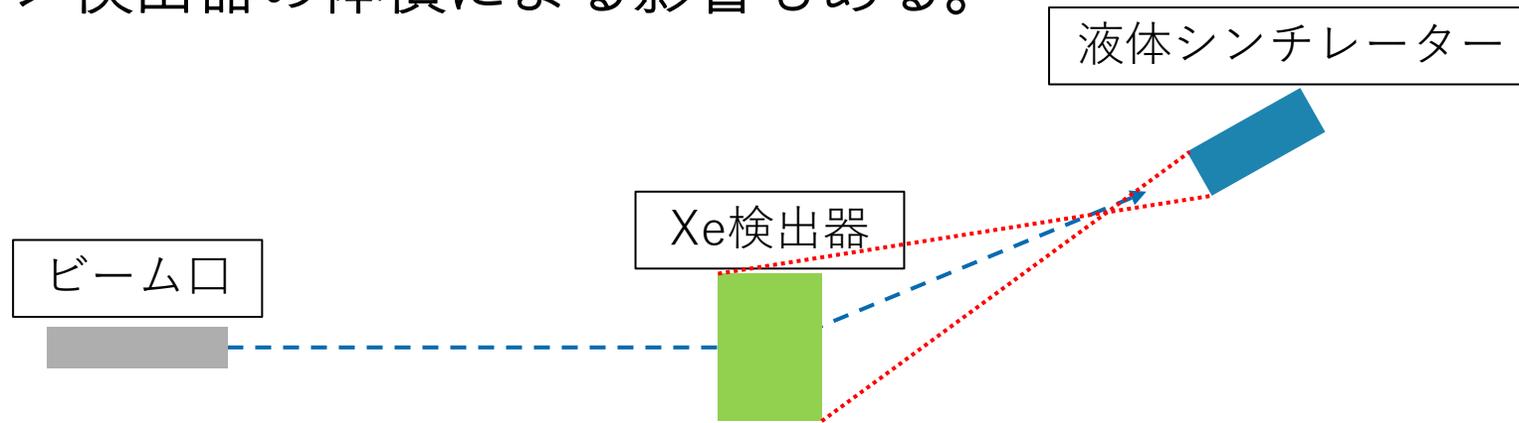
$$\Delta\theta \approx \arctan\left(\frac{0.0762}{r}\right)$$

よってある角度  $\theta$  に液シンを置いた時、その液シンは散乱角度  $\theta - \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{0.0762}{r}\right)$  から  $\theta + \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{0.0762}{r}\right)$  までの中性子を検出する。

角度とエネルギーの関係から、■の時のエネルギーと■の時のエネルギーの差を求めればエネルギーの広がりが出る。



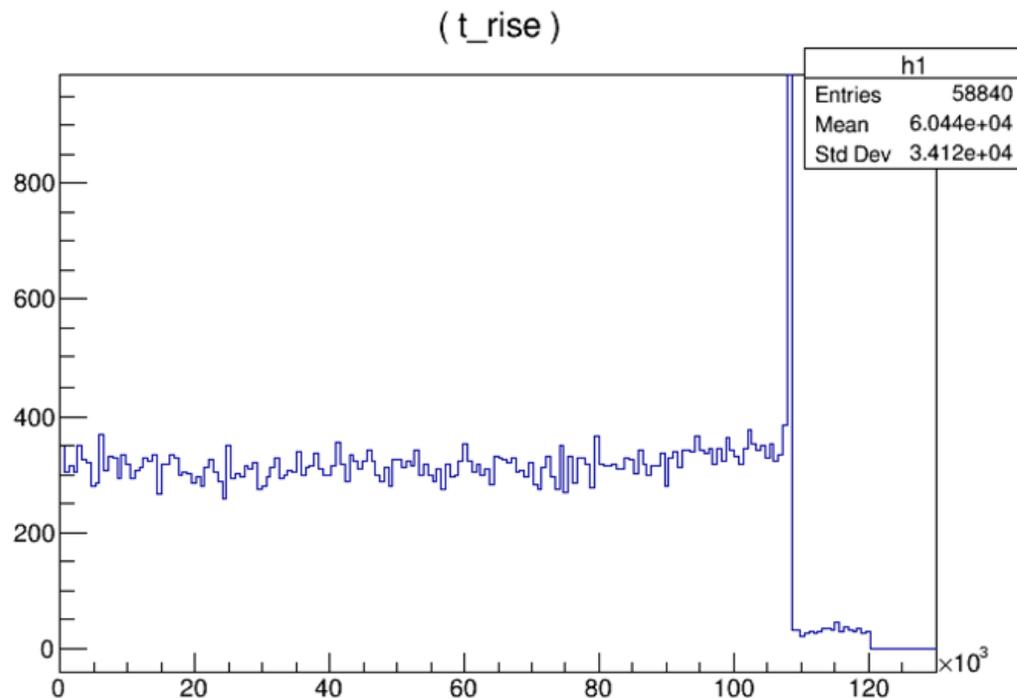
- ◆ 液体シンチレーターで検出される散乱中性子の角度広がりにはガスキセノン検出器の体積による影響もある。



条件	Xe検出器を考慮した 原子核反跳エネルギー幅	エネルギー幅/反跳エネルギー
角度15° , 距離1 m	9.66	132%
角度15° , 距離4 m	2.62	36.0%
角度32° , 距離2.7 m	10.62	32.7%
角度50° , 距離1.7 m	22.46	29.5%
角度70° , 距離1.1 m	42.24	30.2%

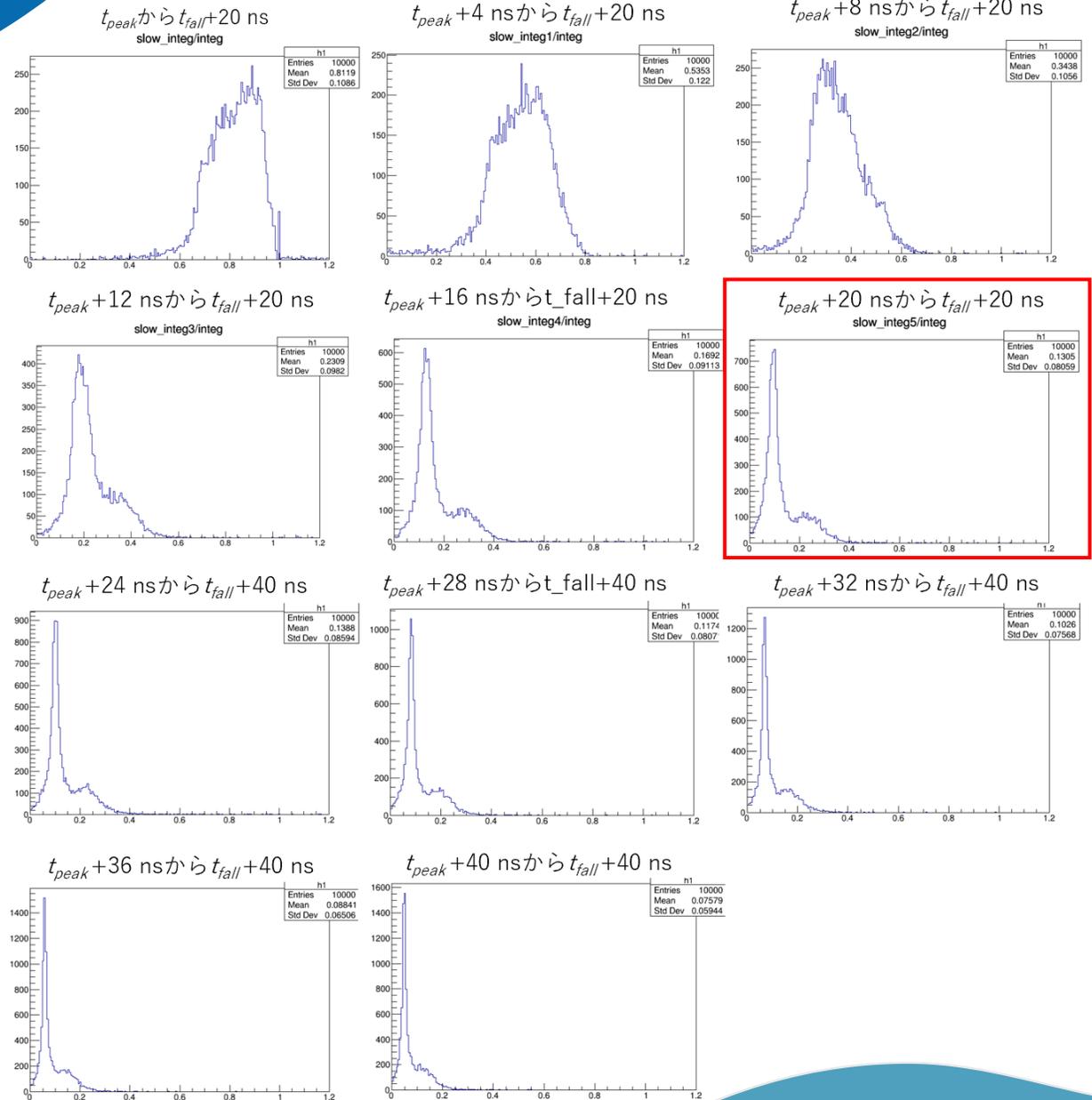
## ◆ 液体シンチレーターヒットとガスキセノン検出器ヒットの時間差分布。

- 電子のドリフト時間分の検出時間差が見えている。  
⇒ 時間差が均等であることから、均等な電場がかけられていることがわかる。





# 波形弁別のパラメーター決定

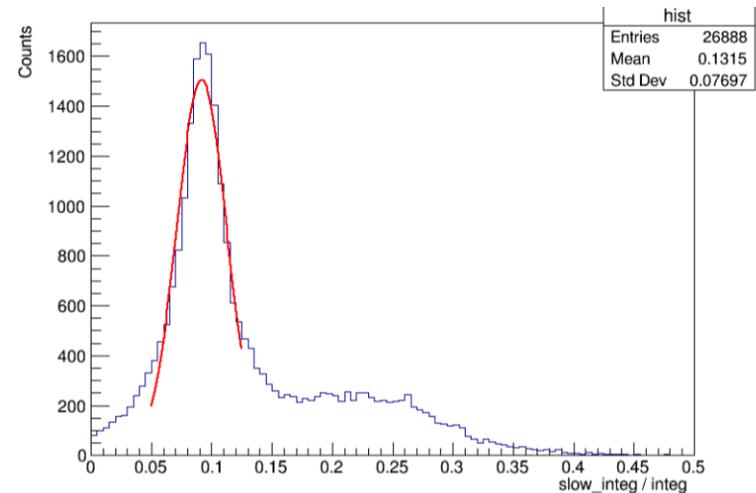


Slow  
Totalの一次元ヒストグラムを描画し、  
最も分離できるものを採用

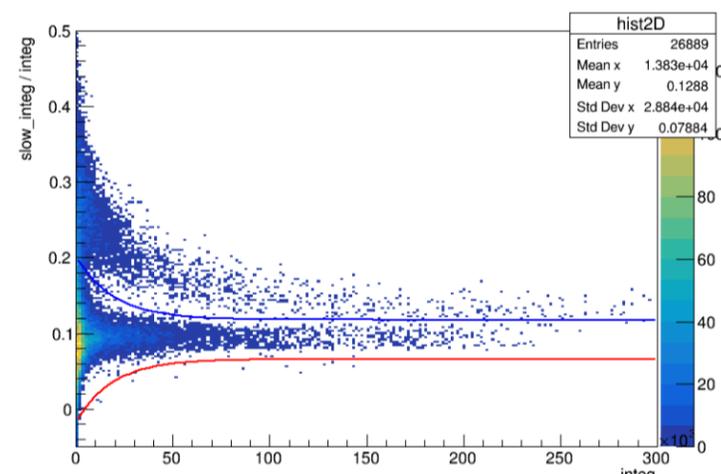


# 波形弁別のパラメーター決定

$\frac{\text{Slow}}{\text{Total}}$ の一次元ヒストグラムから、 $\gamma$ 線イベントの平均値を算出し、その平均値を基準として設定したThresholdを反転させ、それを下回るイベント数が中性子側に混じっているガンマ線イベントと同程度であるとし、中性子側に紛れ込んだガンマ線イベント割合を見積もった。

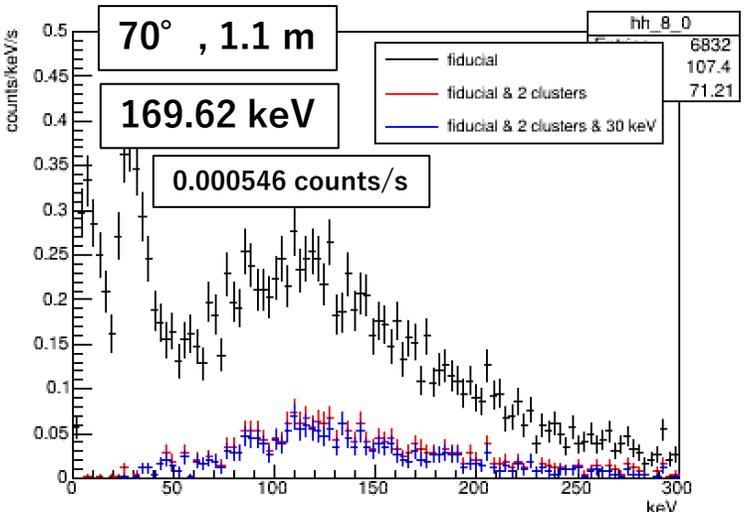
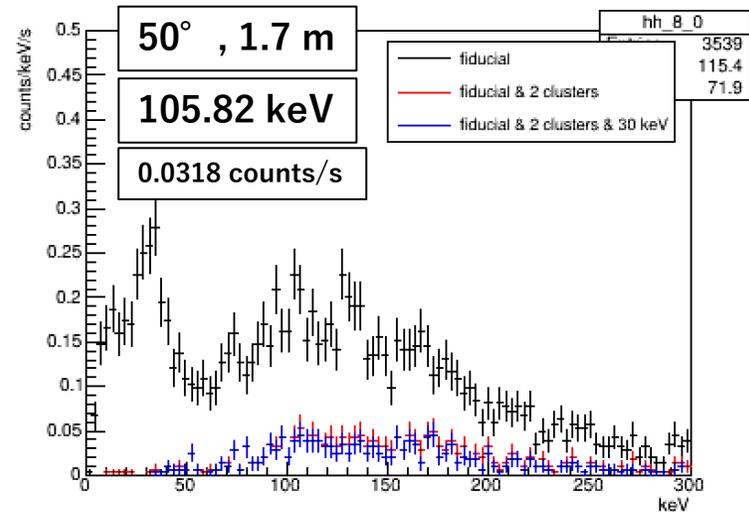
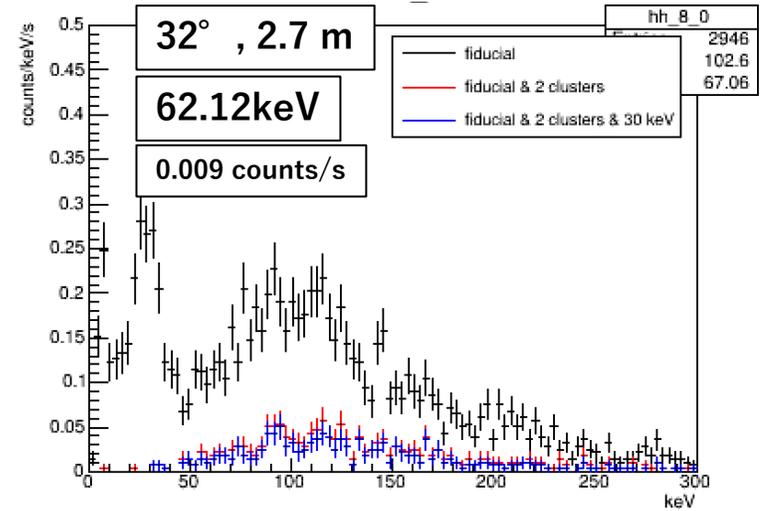
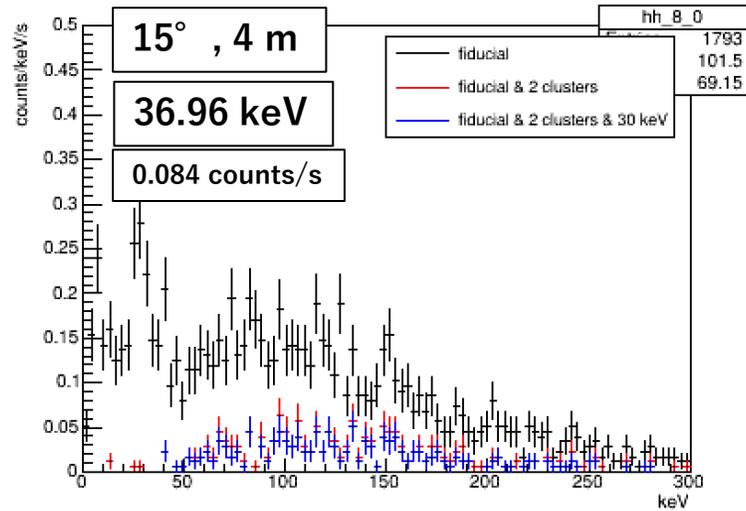
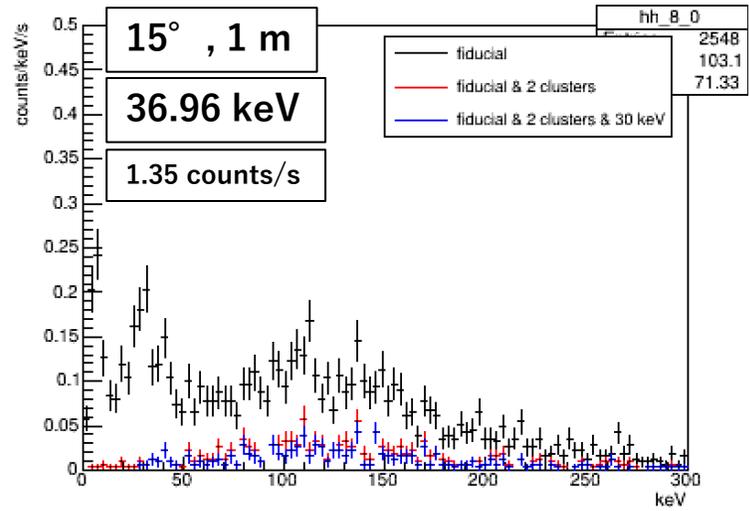


条件	原子核反跳イベント数
角度15° , 距離1 m	15.6%
角度15° , 距離4 m	15.8%
角度32° , 距離2.7 m	10.1%
角度50° , 距離1.7 m	8.83%
角度70° , 距離1.1 m	7.66%



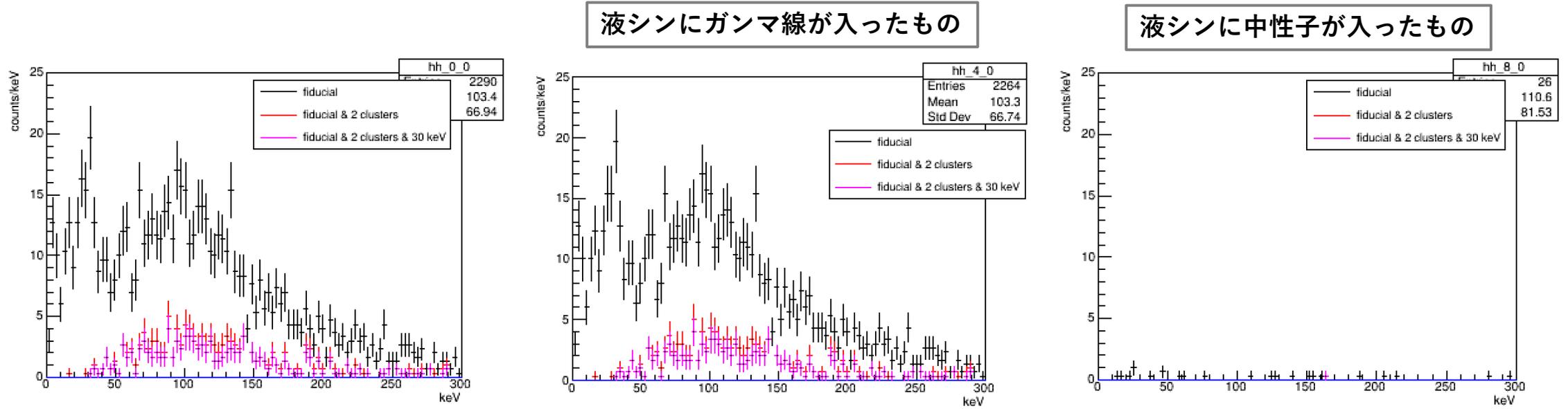
Number of entries below the threshold: 986

# 全測定条件における測定結果



角度 [度]	反跳エネルギー [keV]
15	7.28
32	32.44
50	76.14
70	139.94

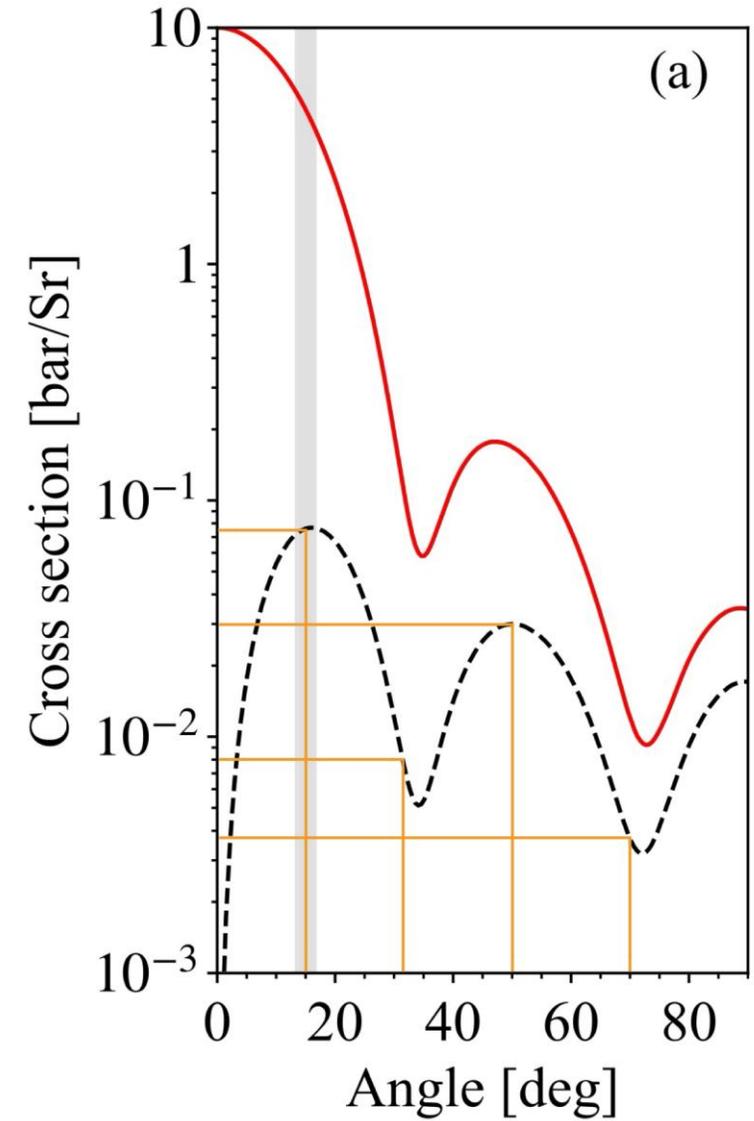
◆ バックグラウンド測定における波形弁別を施したエネルギー分布



# ミグダルイベント数算出



条件	イベント数
角度15° , 距離1 m	0.078
角度15° , 距離4 m	$3.4 \times 10^{-3}$
角度32° , 距離2.7 m	$1.0 \times 10^{-3}$
角度50° , 距離1.7 m	$5.6 \times 10^{-3}$
角度70° , 距離1.1 m	$2.7 \times 10^{-3}$





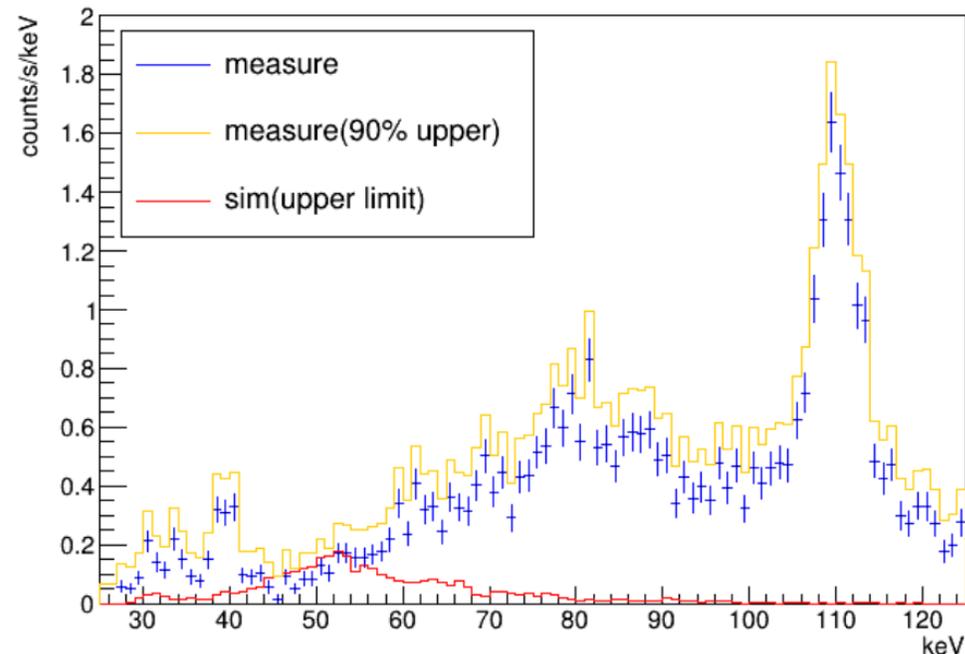
## ◆ 発生確率の上限値と理論から導かれる分岐比の比較

※クエンチング値が  $q = 0$  の時

理論から導かれたミグダル効果分岐比： $6.0 \times 10^{-7}$

前実験から得られているミグダル効果分岐比の上限値： $1.91 \times 10^{-1}$

よって比で  $3.2 \times 10^5$  程の差がある状態となっている。



## ◆ 分岐比の上限値(クエンチング0.1~1.0)

- 文献値との比： $2.7 \sim 5.0 \times 10^5$

	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9	q=1.0
分岐比	0.20	0.27	0.20	0.17	0.18	0.16	0.19	0.18	0.30	0.21
文献値との比	$3.3 \times 10^5$	$4.5 \times 10^5$	$3.3 \times 10^5$	$2.8 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	$2.7 \times 10^5$	$3.2 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	$5.0 \times 10^5$	$3.5 \times 10^5$

## ◆ 算出原子核反跳イベント数

条件	原子核反跳イベント数
角度15° , 距離1 m	$3.6 \times 10^3$

## ◆ 算出ミグダルイベント数と測定2cluster 30 keVイベント数

条件	ミグダルイベント数	ミグダルエネルギー領域の2cluster 30 keVイベント数
角度15° , 距離1 m	0.078	159
分岐比	$2.2 \times 10^{-5}$	$4.4 \times 10^{-2}$