



ArガスTPCを用いた ミグダル効果探索実験



神戸大学 M2 鈴木 啓司

イントロダクション

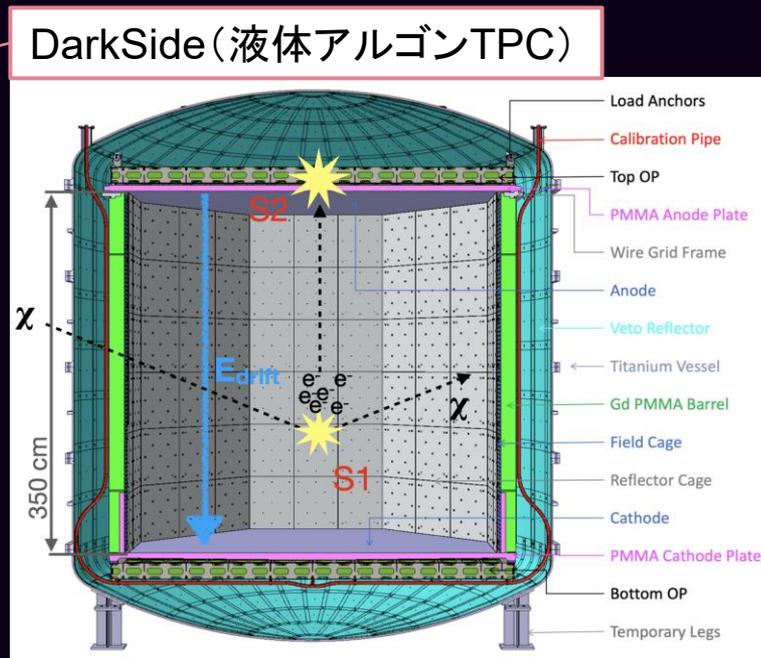
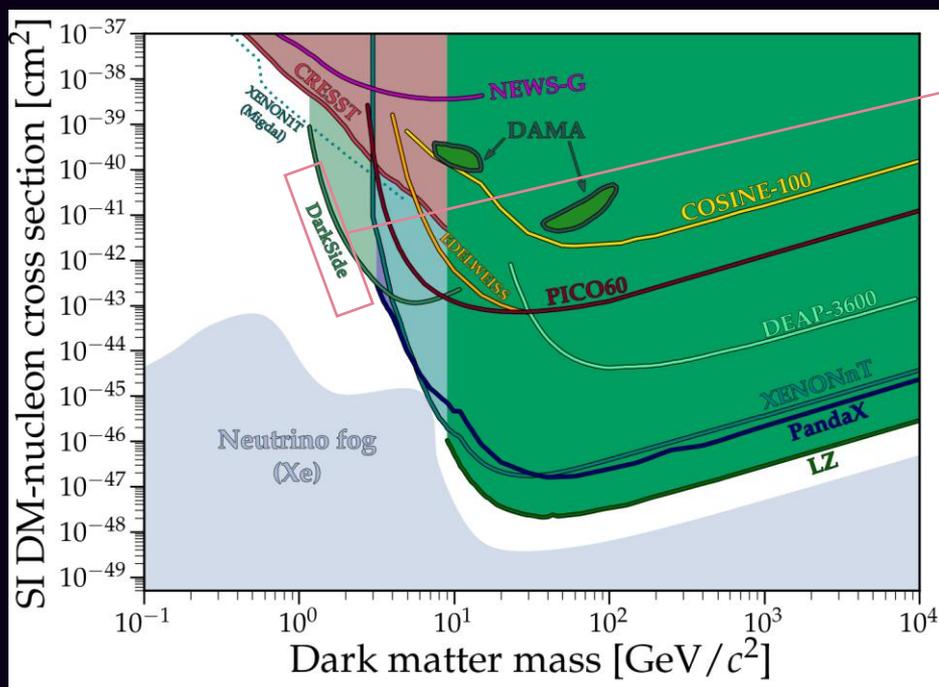
暗黒物質直接探索

暗黒物質...さまざまな観測結果から存在が示唆されている

- 候補の1つがWIMP (Weakly Interacting Massive Particles)

直接探索実験...WIMPと原子核の散乱事象を観測する

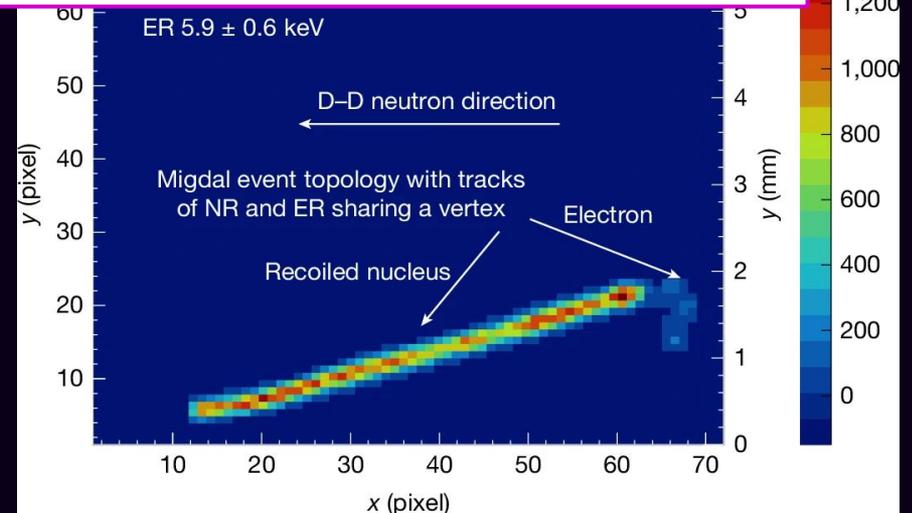
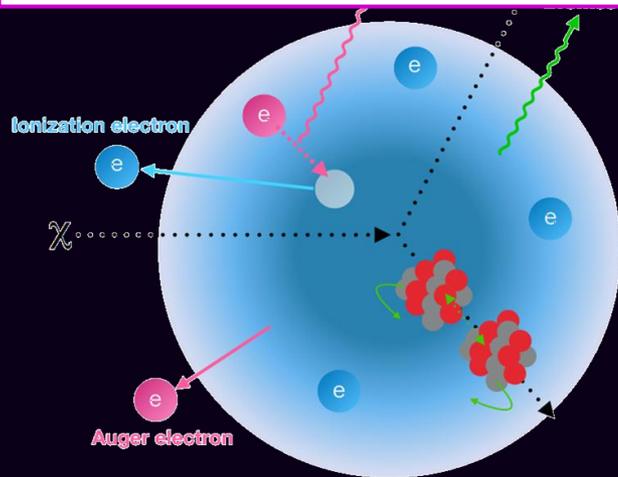
- 大質量の液体貴ガス(キセノン・アルゴン)を用いた高感度な探索を進めているが、未だ発見には至っていない



ミグダル効果とは

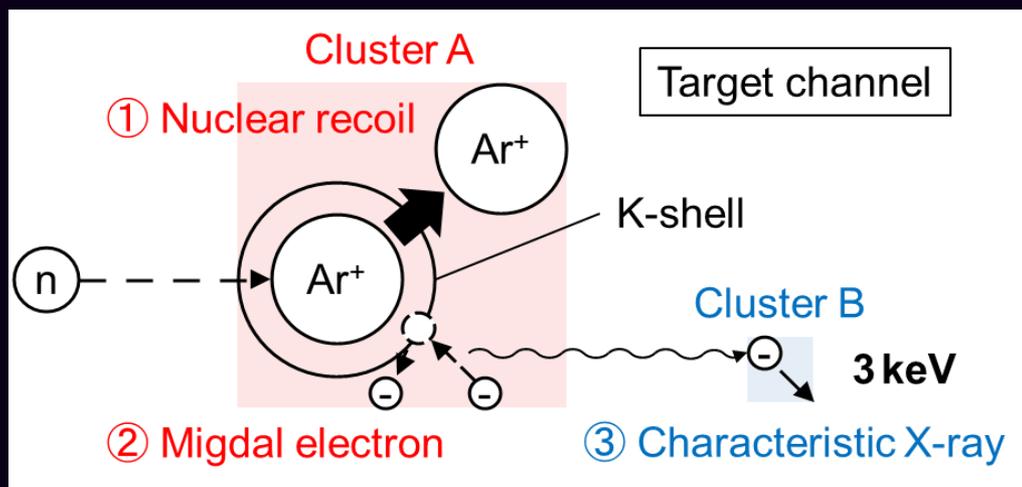
- 原子核が突然動いたときに低確率で追加の電離・励起が生じる
原子核反跳(Nuclear Recoil, NR)に伴うミグダル効果
- 利点: 追加の電子信号により低質量WIMPに対する感度が向上する
- 2026年1月に初観測が報告され注目を集めている(*Nature* 649, 580-583)

◎ WIMP直接探索への応用のためには
アルゴン・キセノンで観測することが重要！

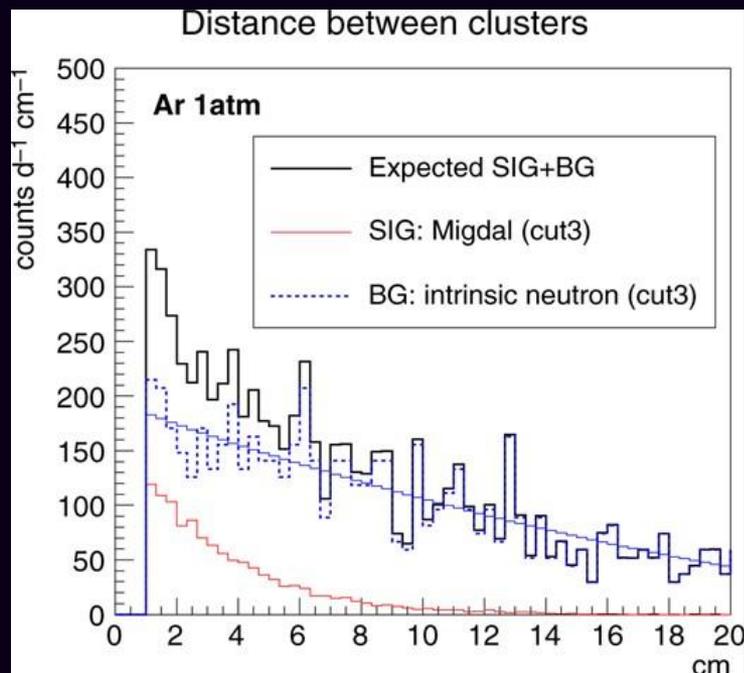


中性子ビームを用いて原子核反跳に伴うミグダル効果を観測する

- 標的物質→WIMP探索での使用実績があるアルゴン・キセノン
- ガスTPCを用いた2クラスター手法による探索
 - 原子核反跳+Arの特性X線
 - エネルギーやクラスター間の距離を用いて背景事象を除去



◎ クラスター間の距離分布を用いると
信号事象と背景事象を識別可能

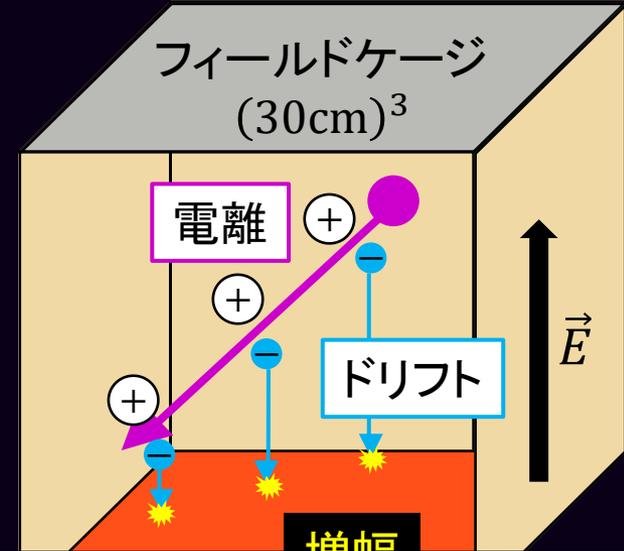


アルゴンガスTPC

アルゴンガスTPC概要

NEWAGEの技術を応用したガスTPC

- アルゴンとクエンチャー（放電を抑制するガス）の混合ガス（合計1気圧）を封入
- 荷電粒子のエネルギー・3次元飛跡を取得可能



GEM: 前段増幅

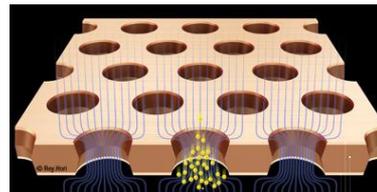


図2.6

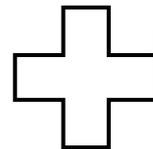
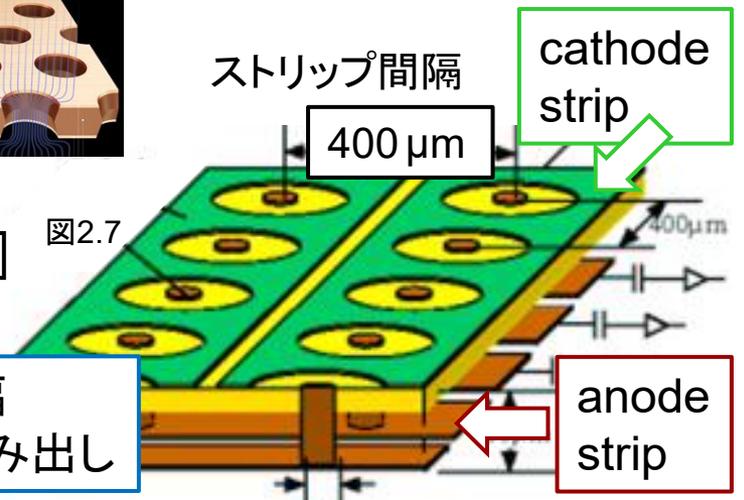


図2.7

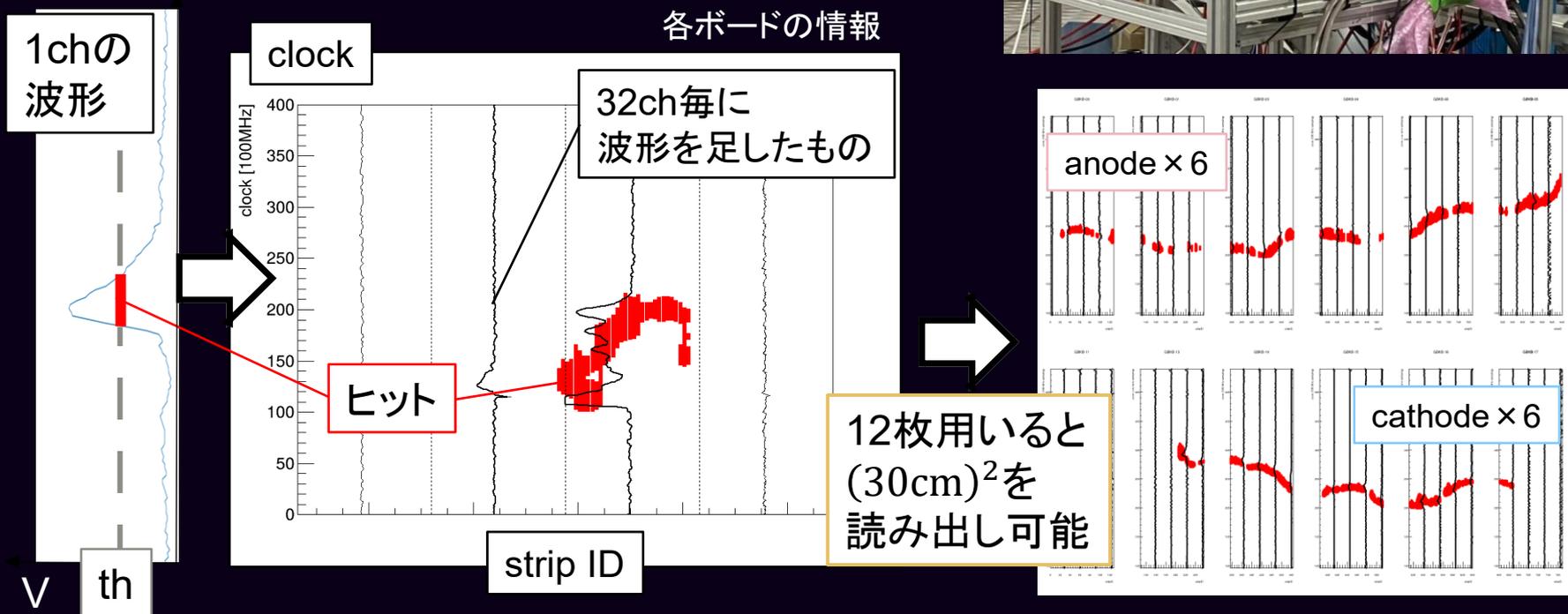
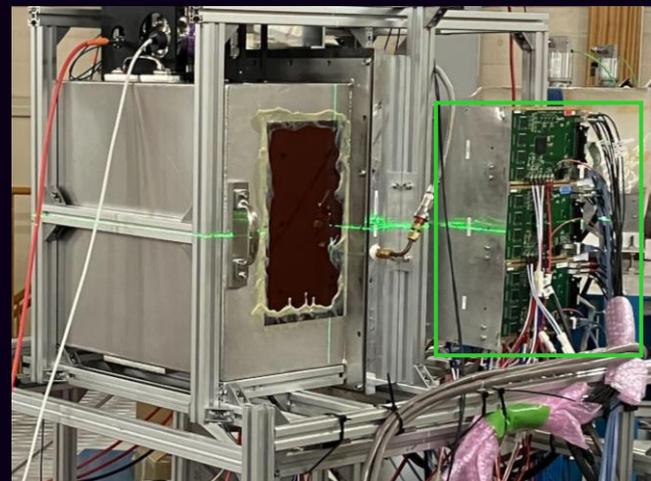


μ -PIC: 増幅
+ 2次元読み出し

データ取得システム

1枚の基板で128chの読み出しが可能

- chごとのヒット情報を用いて3次元飛跡を取得
 - どのchに(2次元)+いつ(1次元)
- 波形の積分値を用いてエネルギーを算出



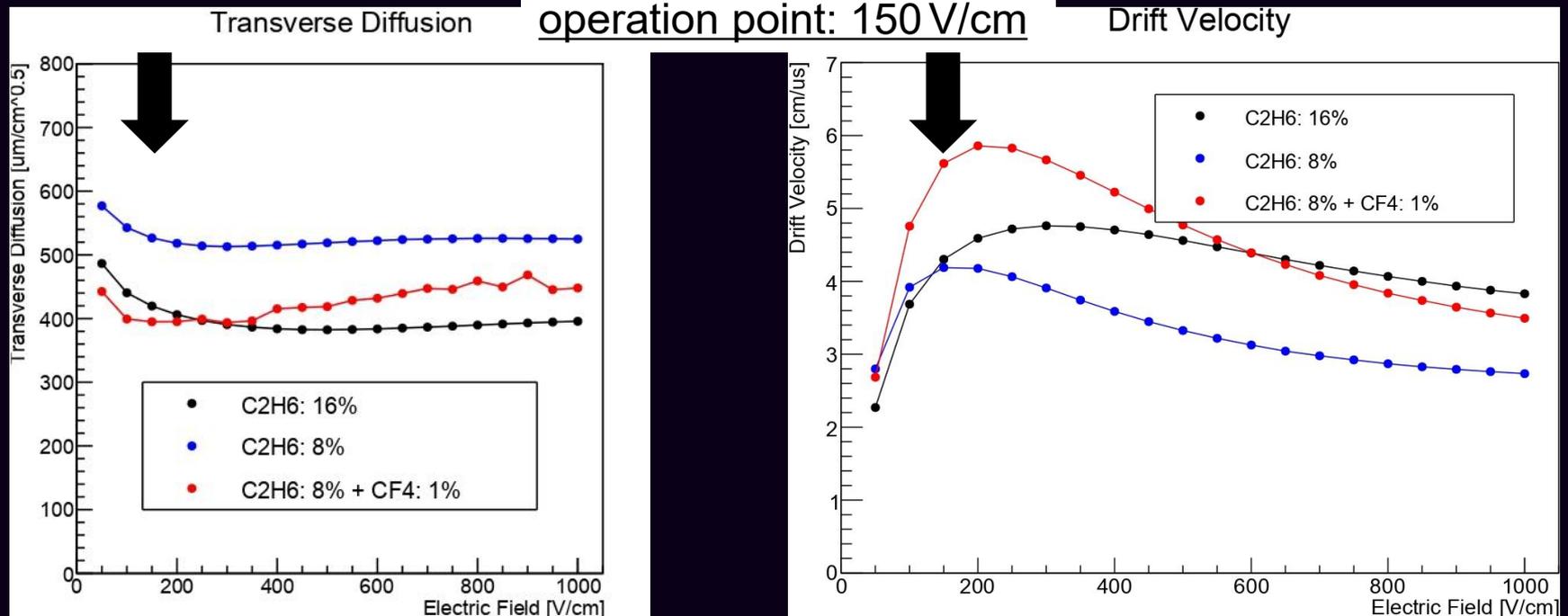
アルゴン混合ガス

混合ガス: Ar (91%) + C₂H₆ (8%) + CF₄ (1%)

要請①: 放電耐性を維持したままアルゴン以外の原子核数を減らす

- アルゴン以外の原子核も2クラスターを形成する背景事象の元となりうる
(例: 中性子の多重散乱・偶発同時計測)

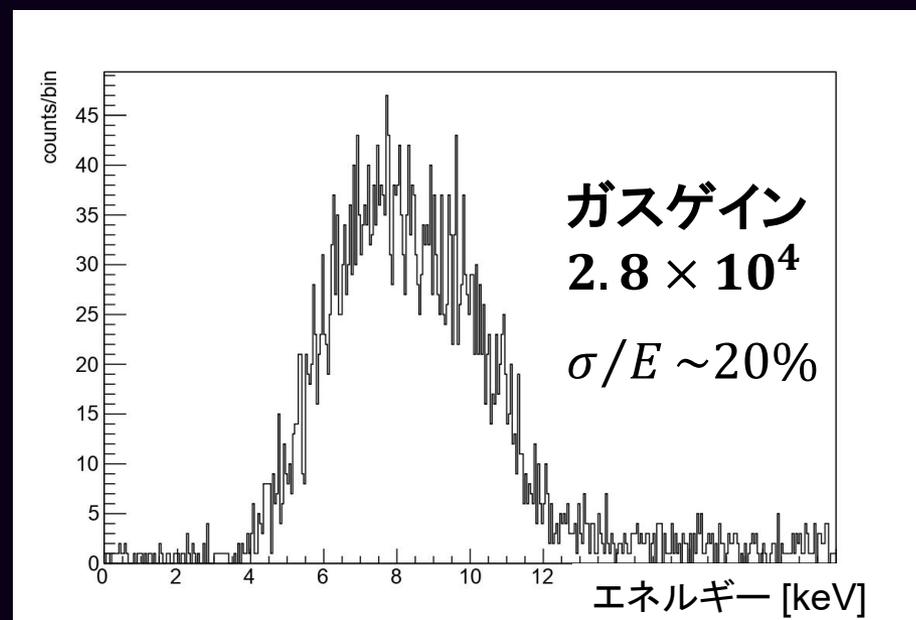
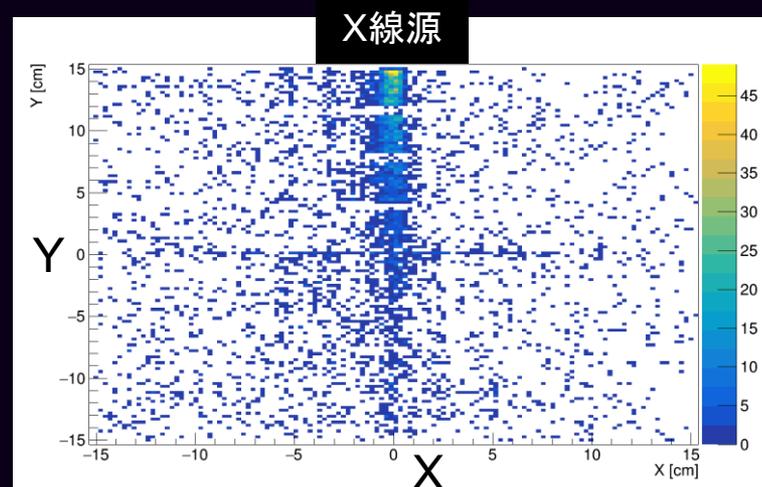
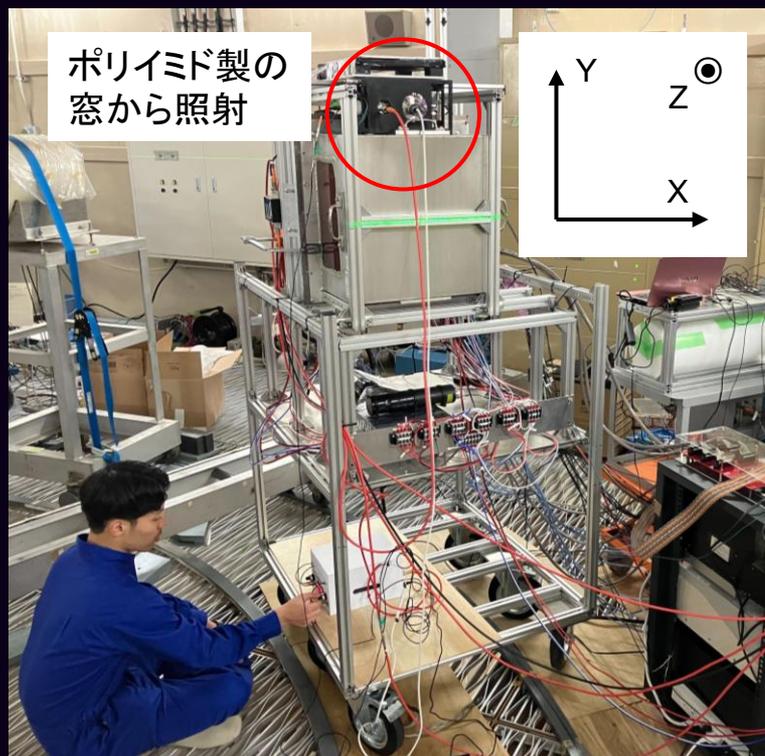
要請②: 検出器の性能を維持する(位置分解能・検出効率など)



性能評価(エネルギー較正)

8 keVのX線(銅の K_{α} 線)を使用

◎ミグダル効果探索に必要なガスゲイン
およびエネルギー分解能が得られた

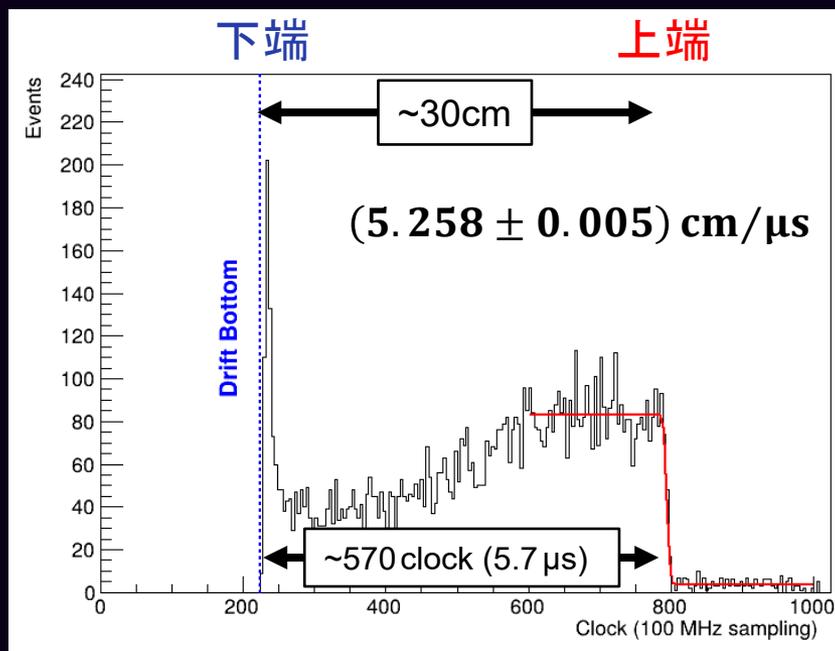
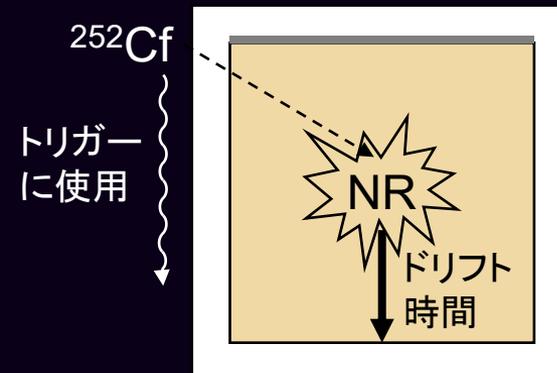


性能評価(ドリフト速度測定)

^{252}Cf 線源の自発核分裂...複数の中性子・ γ 線を放出

- トリガーとTPCの信号の時間差を測定
 - 事象数が急激に減少するところ(図の赤線)がフィールドケージの上端に対応する

◎ドリフト速度の要請値を満たすことを確認



項目	測定値	要請値
ガスゲイン	2.8×10^4	$> 10^4$
エネルギー分解能	33% @3 keV	60% @3 keV
ドリフト速度	5.3 cm/ μs	> 4.0 cm/ μs

◎ ガスTPCの準備完了。
いざ中性子ビーム実験へ！

中性子ビーム実験

中性子ビーム実験概要

2025年11月@産業技術総合研究所(産総研)

- 加速した陽子をリチウム標的に衝突
→ ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応で565 keVの中性子を生成
- LiF50%添加ポリエチレン製のコリメータを使用
- ビーム照射前後に検出器の較正を実施

測定諸元

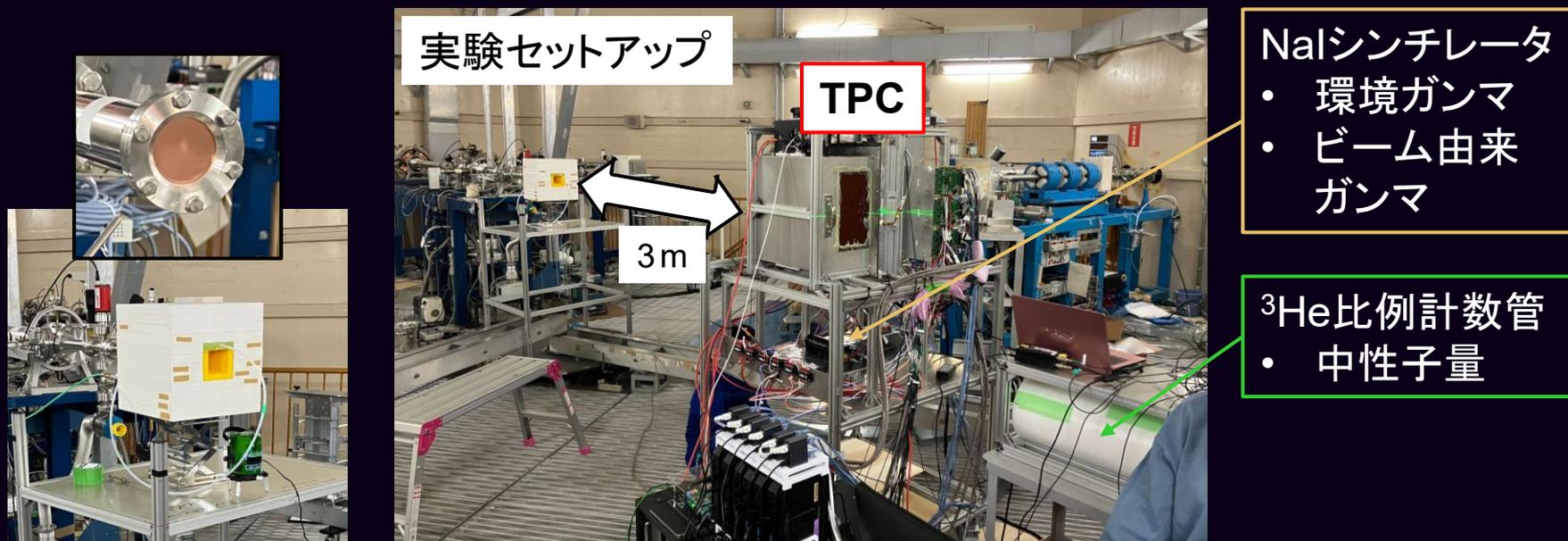
入射中性子数→ 1.0×10^9

総トリガー数→ 1.2×10^6

測定時間 (live time)

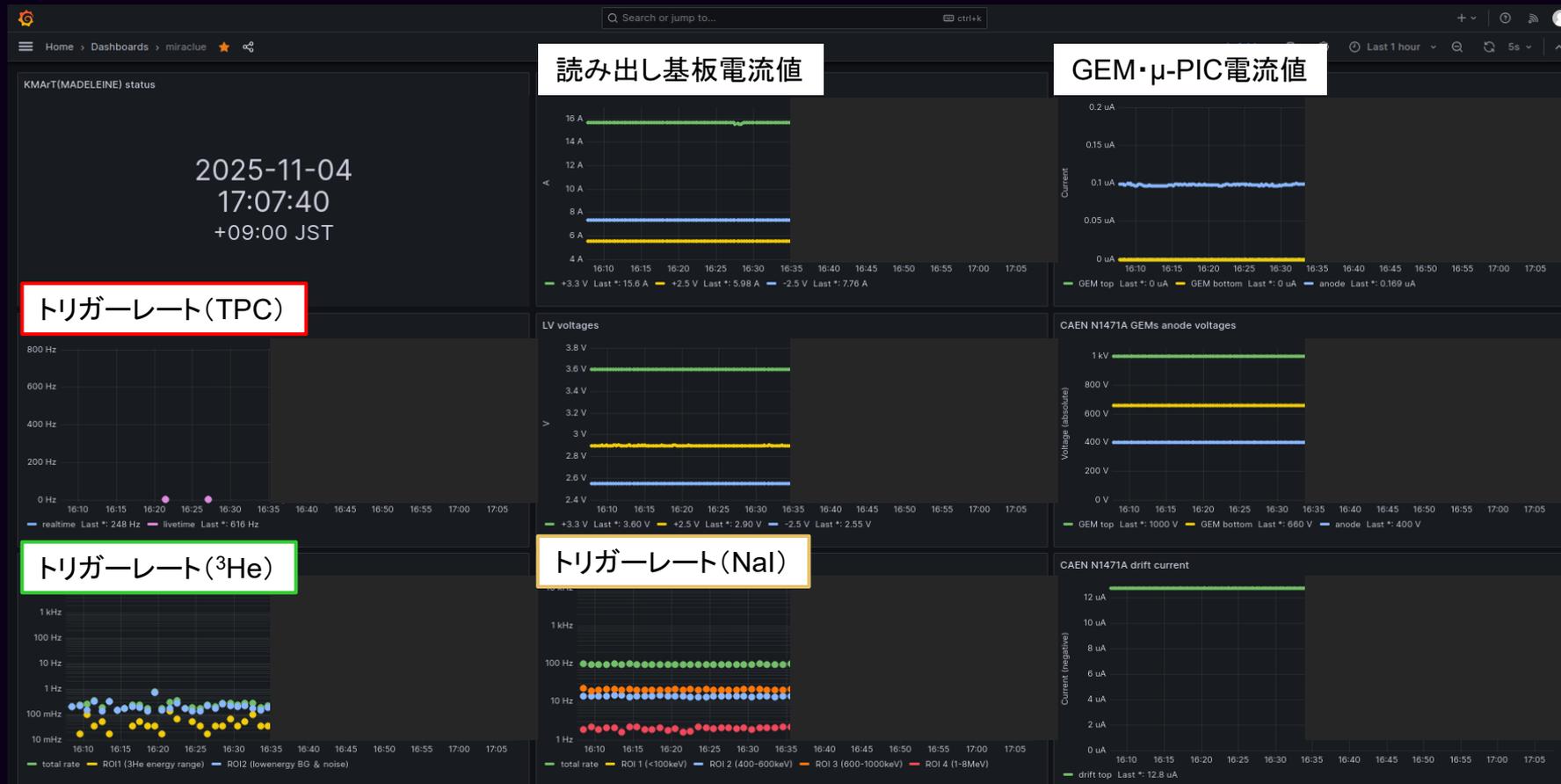
→1105 sec

(ミグダル効果探索に用いるデータセット)



データ取得状況の監視

ログ・データ可視化ツール(Grafana)を用いて監視



beam OFF

beam ON

beam OFF

beam ON

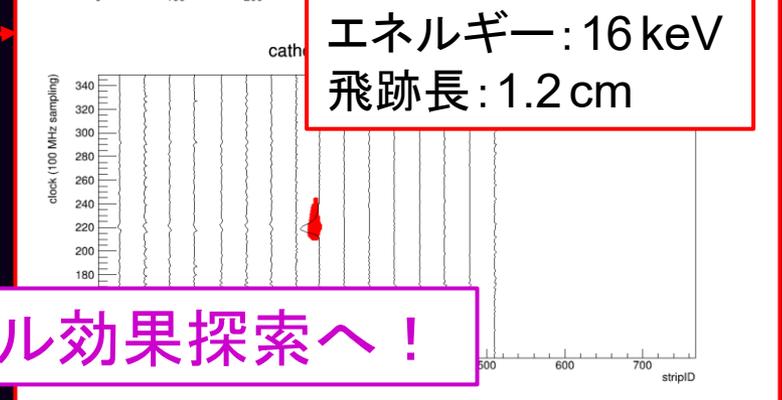
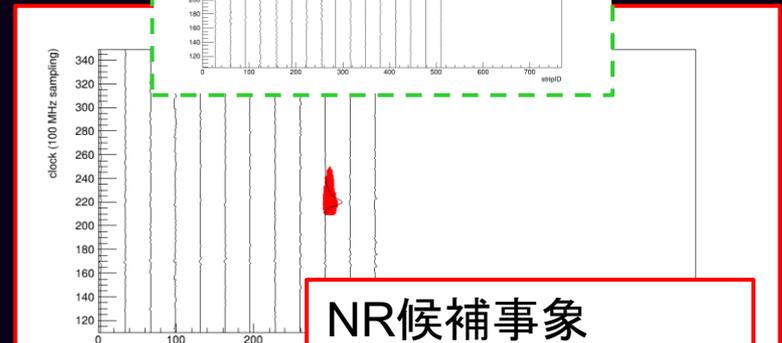
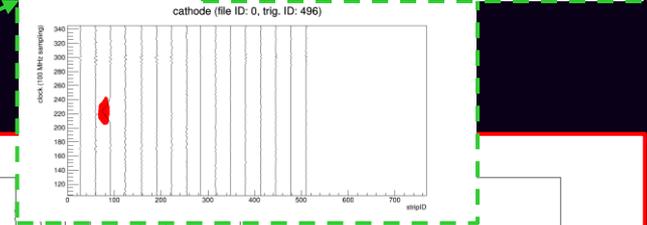
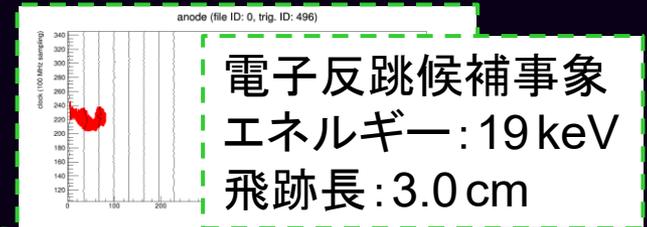
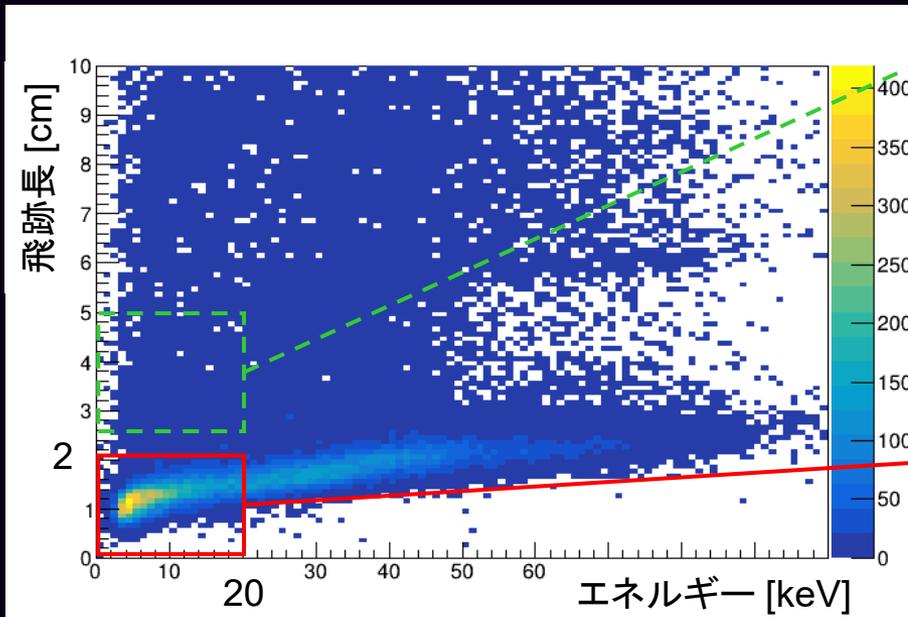
beam OFF

beam ON

Quality check

ビーム照射データの一部を用いて解析

- ビーム由来のNR事象が見えている
- 飛跡長から反跳粒子の識別ができています



◎ 正常なデータ取得を確認。ミグダル効果探索へ！

解析

ミグダル効果(アルゴンのK殻電離)の分岐比を

$\frac{\text{観測されたミグダル事象候補数}}{\text{観測されたアルゴン原子核反跳事象数}}$ で求める

① アルゴン原子核反跳事象数(N_{Ar})の見積もり

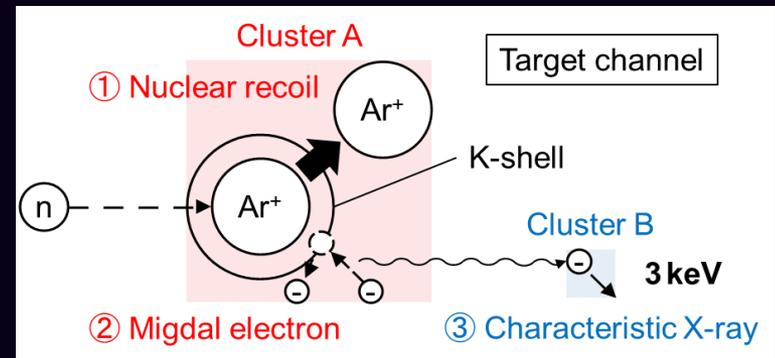
・アルゴン以外の原子核(H・C・F)が反跳された事象数(N_{HCF})

・ガンマ線由来の事象数(N_{γ})

を差し引くことで N_{Ar} を求める

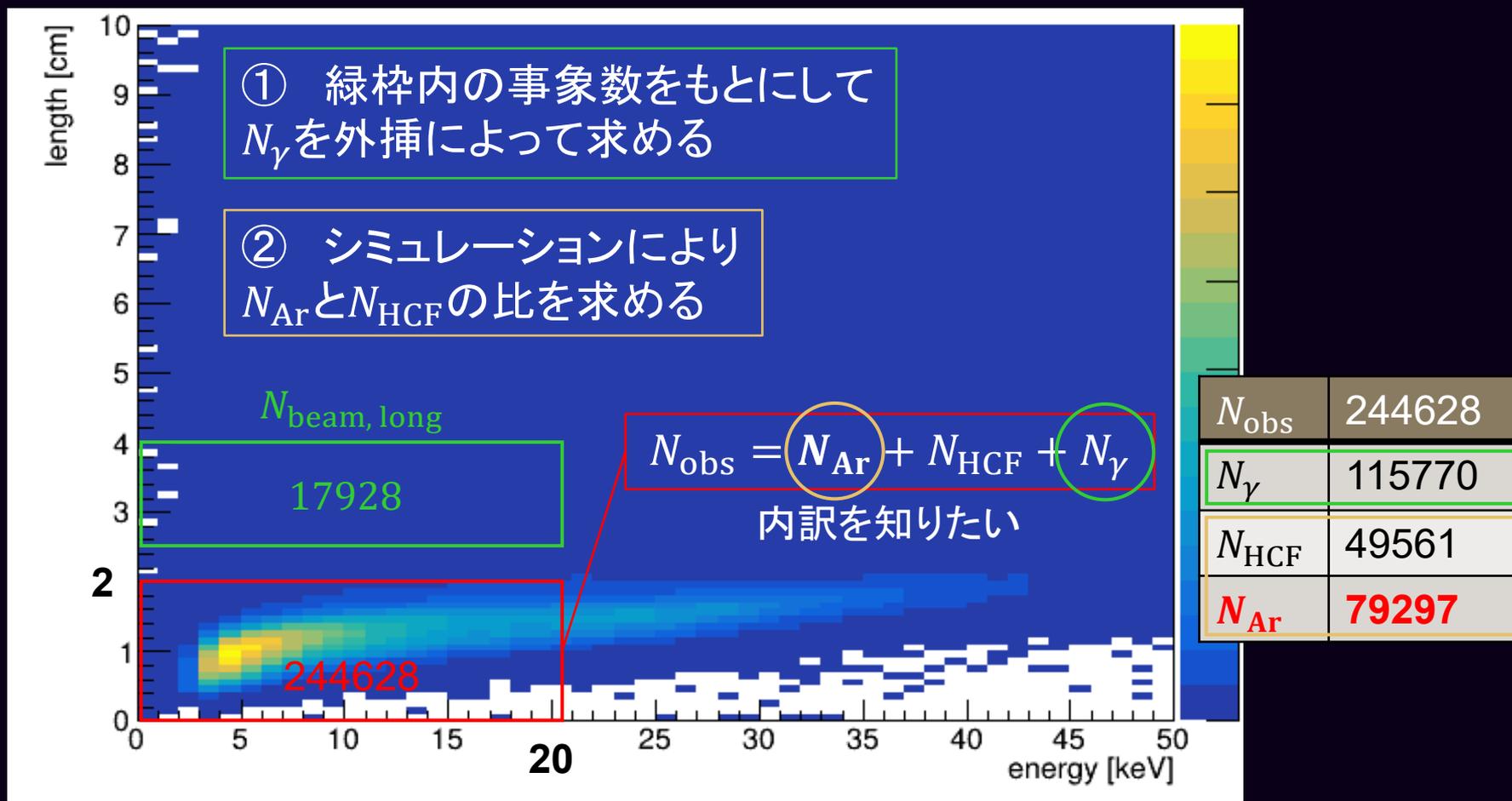
② ミグダル事象候補数(N_{sig})の見積もり

・特性X線のエネルギーをもつ
2クラスター事象を数える



N_{Ar} の見積もり

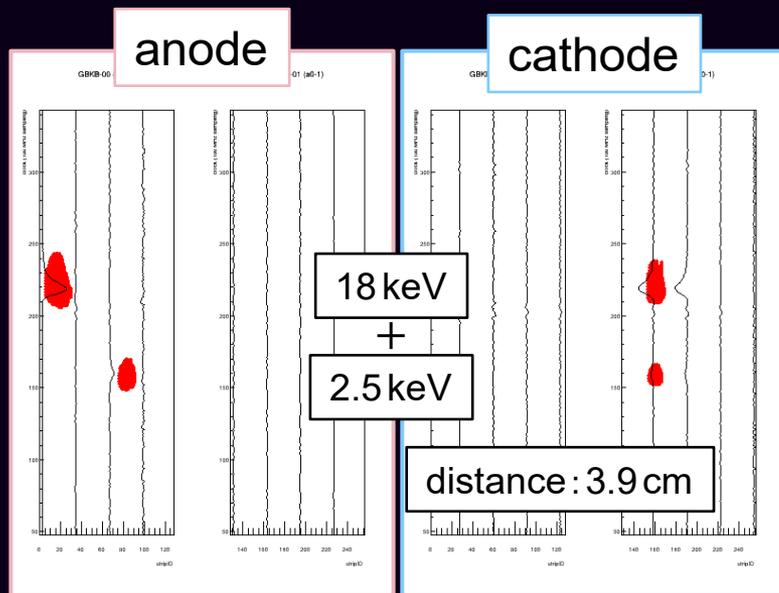
- ROI(関心領域): エネルギーが20.5 keVより小さく、飛跡長が2 cmより短い
- 20.5 keVはアルゴン原子核反跳事象で検出される最大のエネルギー



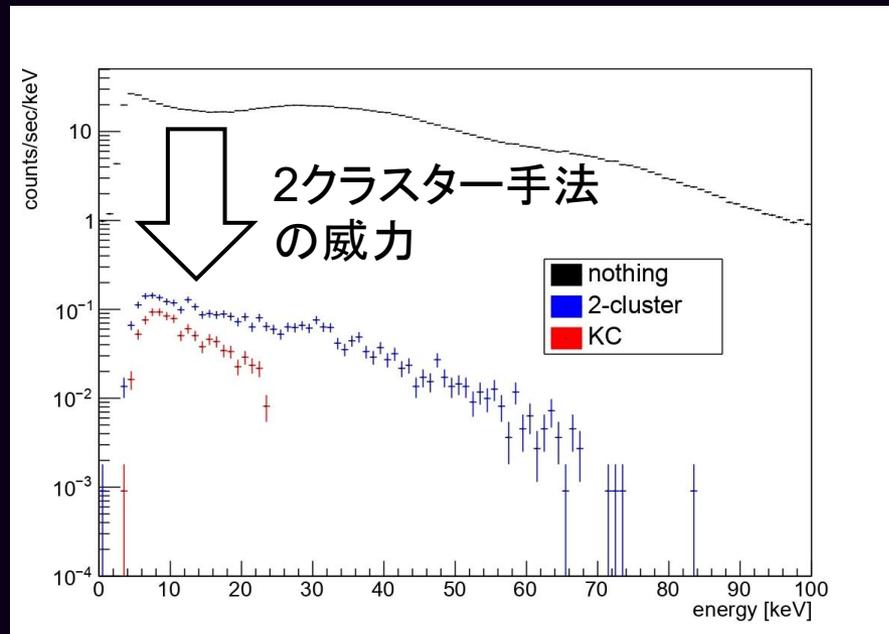
N_{sig} の見積もり

ミグダル事象を選別するための「KC (K-shell Criteria)」を設定

- 少なくとも一方のクラスターのエネルギーが (3.0 ± 1.5) keV



KCを満たす2クラスター事象の例



◎2クラスター手法により
背景事象を3桁削減！

適用したカット	通過した事象数
なし	1.2×10^6
2クラスター	3499
KC	1058

これまでの解析を整理すると

preliminary

- 観測されたアルゴン原子核反跳事象数 (N_{Ar}): 7.93×10^4
- 観測されたミグダル事象候補数 (N_{sig}): 1058

理論から予測される分岐比は 10^{-5} 程度→背景事象が 10^3 倍程度存在する

信頼度95%の分岐比の上限値 (R_{upp}) を求めると

$$\bullet R_{upp} = \frac{N_{sig} + 1.96\sqrt{N_{sig}}}{N_{Ar}} = \frac{1058 + 1.96 \times \sqrt{1058}}{7.93 \times 10^4} = 1.4 \times 10^{-2}$$

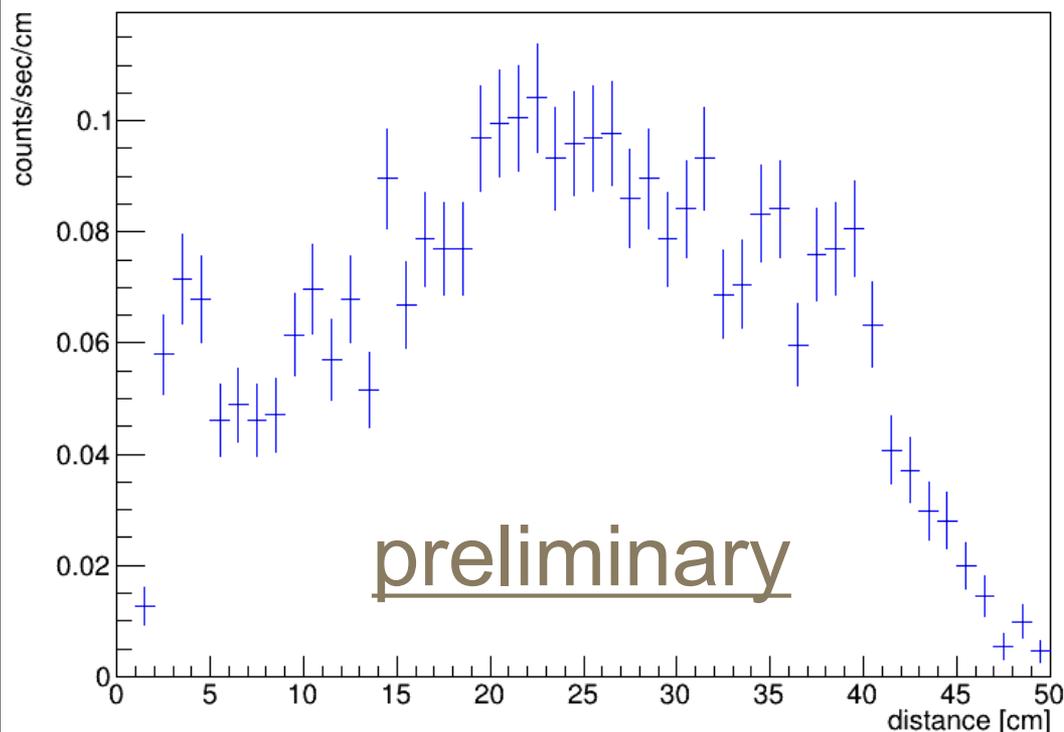
◎ アルゴンを用いたミグダル効果探索で
世界初の制限をかけた！

(観測のためにはさらなる背景事象の削減が必須)

2クラスターを形成する背景事象の削減が重要

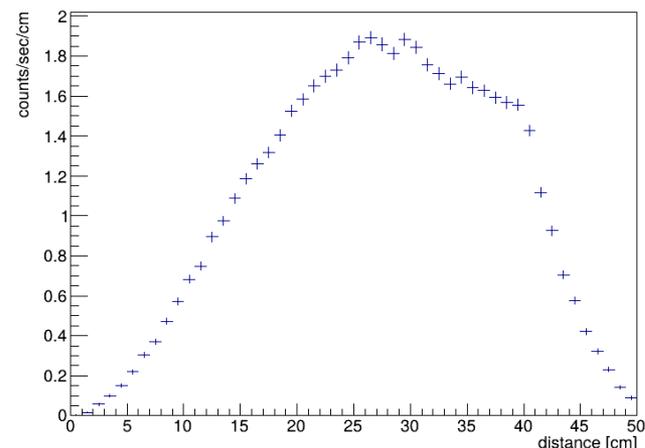
- 距離分布の形状から偶発同時計測が支配的であると推測
- ガンマ線背景事象の影響→次の西田トーク

クラスター間の距離分布



偶発同時計測の距離分布
(シミュレーション)

Simulation (Geant4)



$\propto d^2$
で上がる

検出器サイズで
落ちる

展望

- 背景事象の削減によりアルゴンでのミグダル効果の観測を目指す

まとめ

- 暗黒物質探索への応用を見据えたミグダル効果探索実験「MIRACLUE」
 - ガスTPCを用いた2クラスター手法により背景事象を分離する
- 2025年11月に中性子ビームを用いた測定を実施
 - ミグダル効果探索に使用可能なデータが取得できた
- ミグダル効果の分岐比に 1.4×10^{-2} という上限値を設けた
 - アルゴンを用いたミグダル効果探索では初の制限

BACK UP