



MIRACLUE実験における 中性子ビームを用いた ミグダル効果探索



神戸大学 M2 鈴木 啓司

イントロダクション

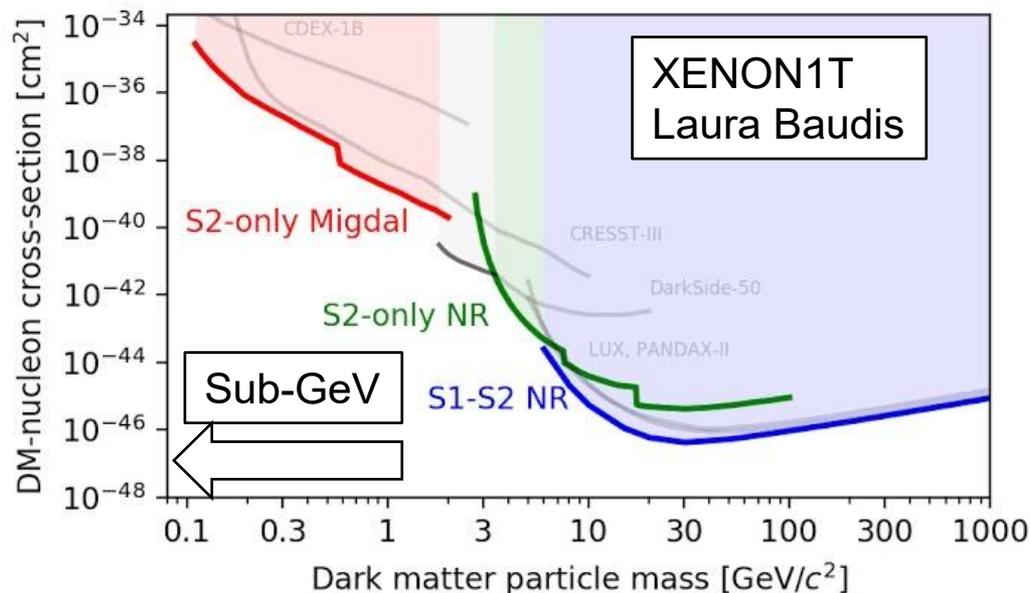
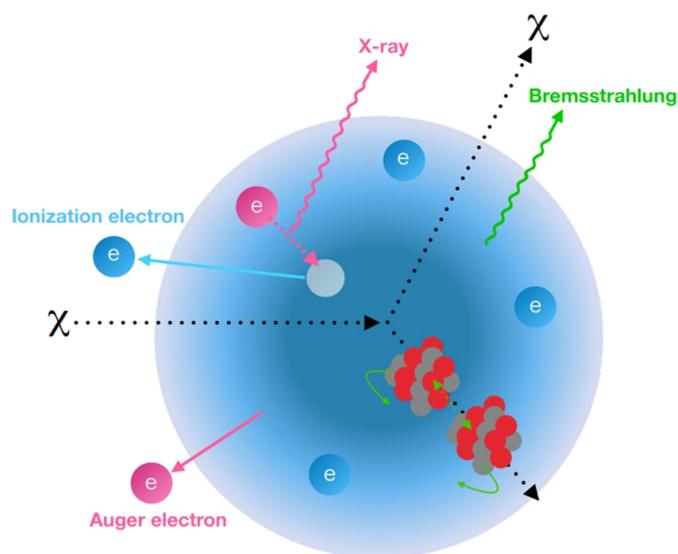
ミグダル効果とは

- 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(NR)に伴うものは実験的な観測事例がない

NRに伴うミグダル効果があれば...

- 低エネルギー閾値化→軽い暗黒物質に対する感度UP

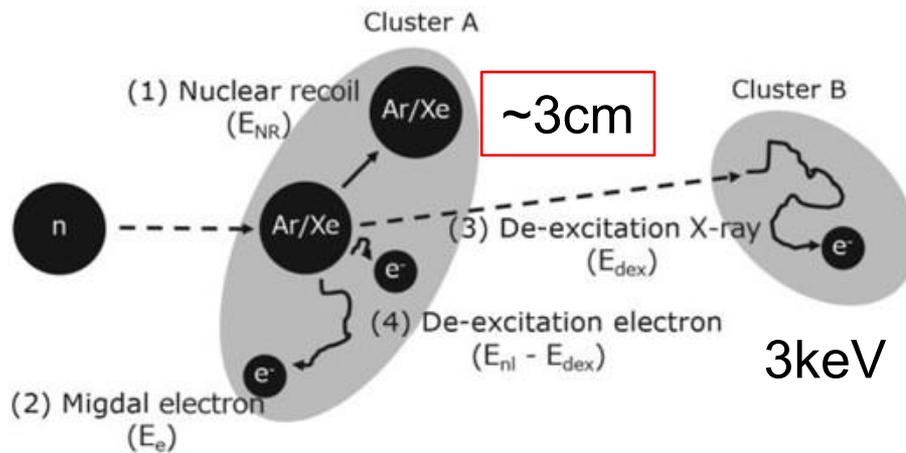
◎ミグダル効果を実験的に検証して暗黒物質探索に応用したい！



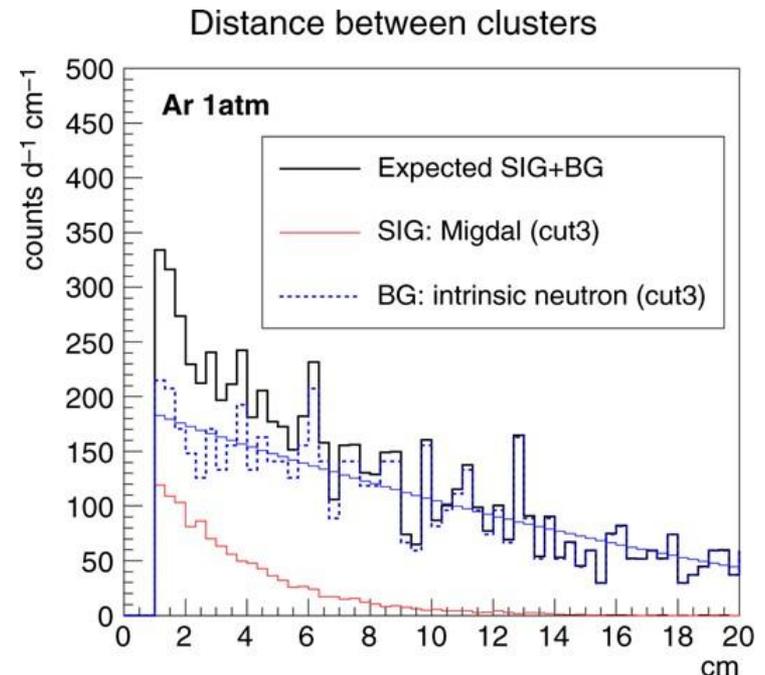
MIRACLUE実験(神戸大・東北大)

中性子ビーム照射実験でミグダル効果の初観測を目指す

- 高フラックスの中性子ビーム($\sim 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)で統計量を稼ぐ
- ガスTPCを用いた**2-cluster手法**による探索(PTEP 2021, 013C01)
 - 原子核反跳(NR) + Ar(Xe)の特性X線
 - 2-cluster間の距離分布から背景事象と識別可能



2-cluster手法における信号事象
距離分布は特性X線の吸収長に従う

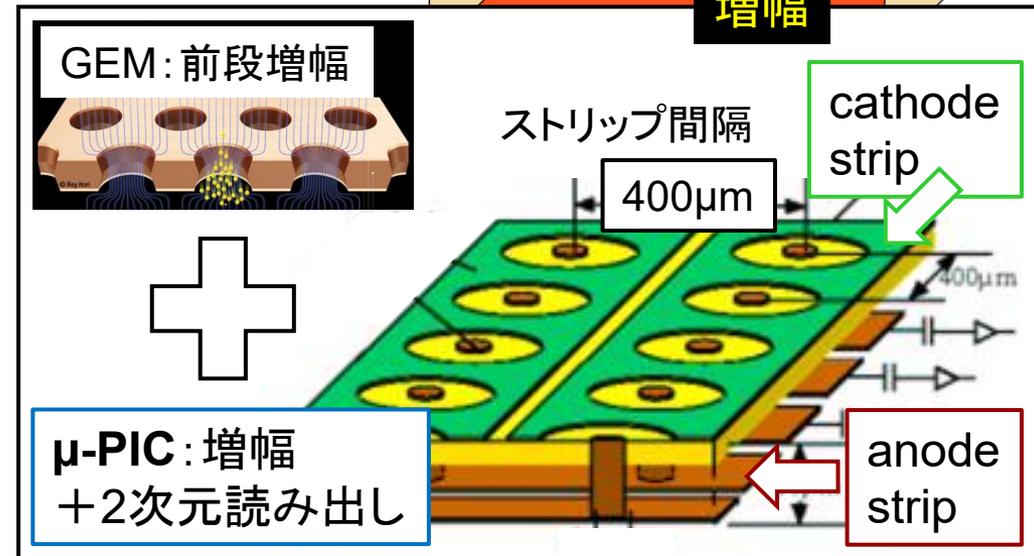
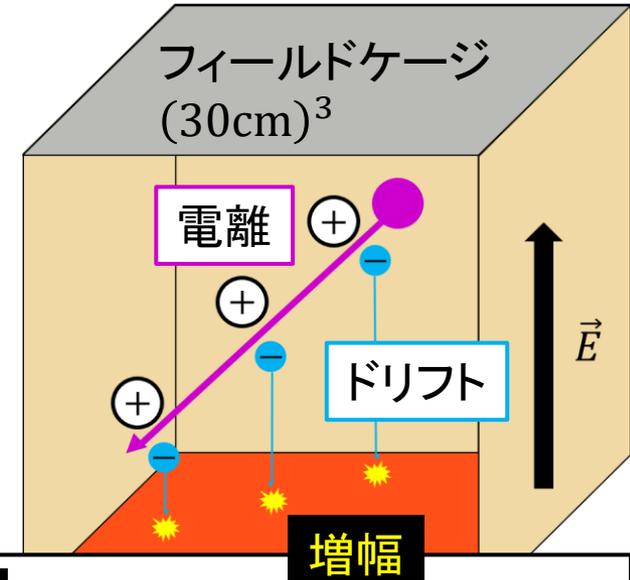


ArガスTPC(検出器概要)

KMArT(Kobe MIRACLUE Argon TPC) ...NEWAGEの技術を応用したガスTPC

- Arガスとクエンチャー(放電を抑制するガス)の混合ガス(合計1atm)を封入
- 低物質量の部材で構成
→(n, γ)反応による背景事象を低減
- 荷電粒子の3次元飛跡を取得可能

※東北大のXeガスTPC→中野talk

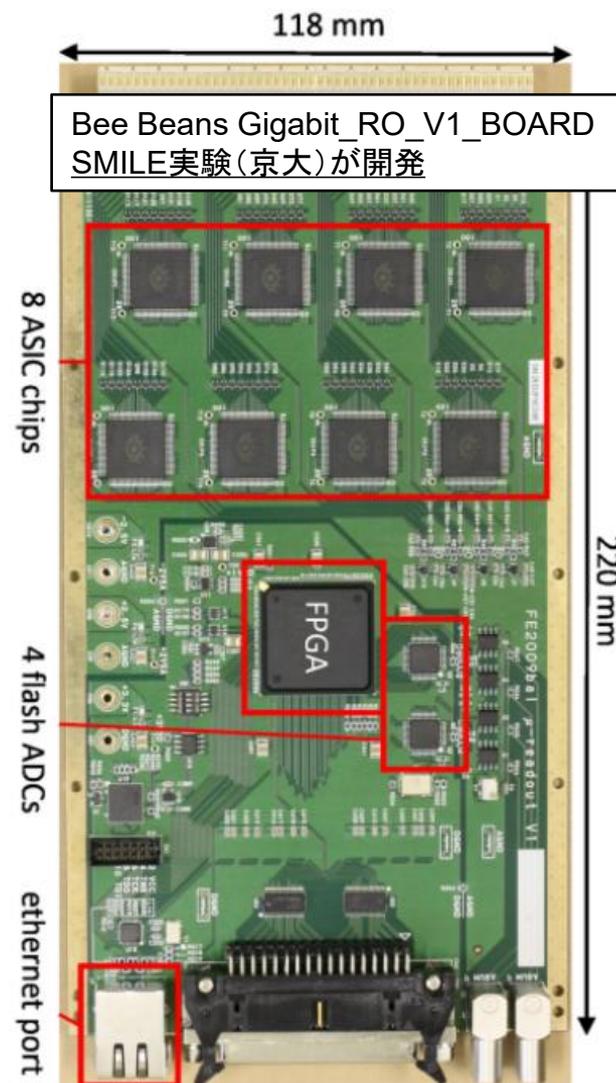
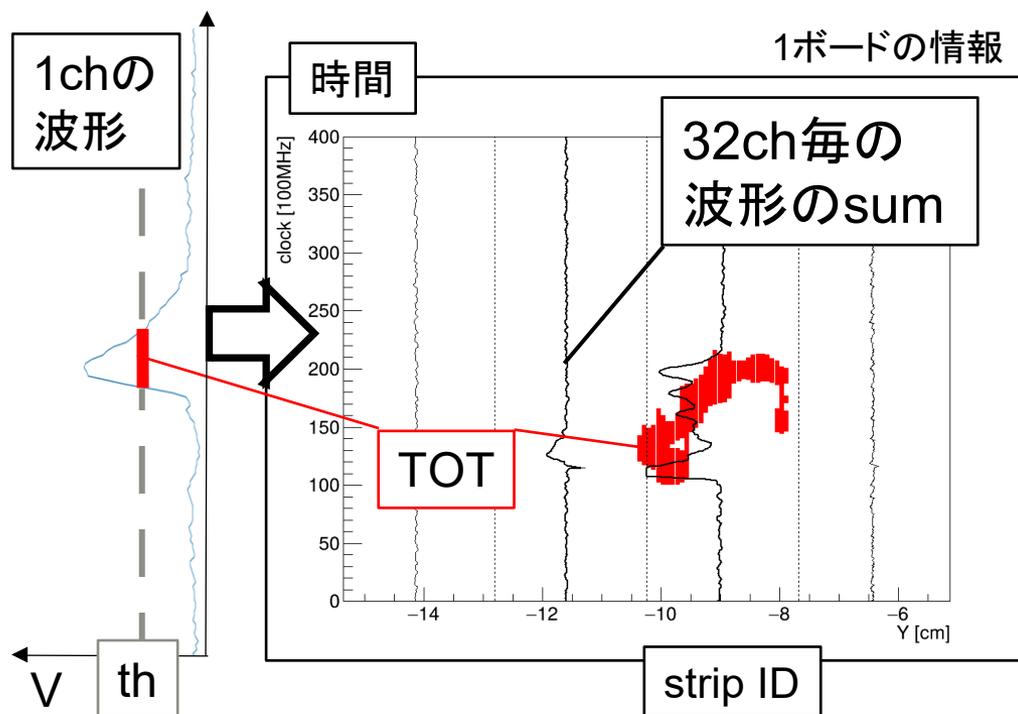


ArガスTPC(読み出し)

読み出しボード: **GBKB (Giga Bit Kobe Board)**

➤ 1ボードあたり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)
- FADCの積分値を用いて**エネルギー**を算出

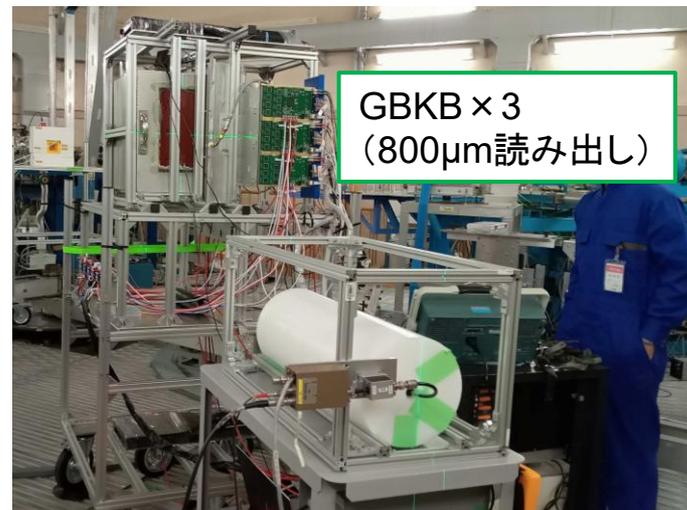


ArガスTPCの改良

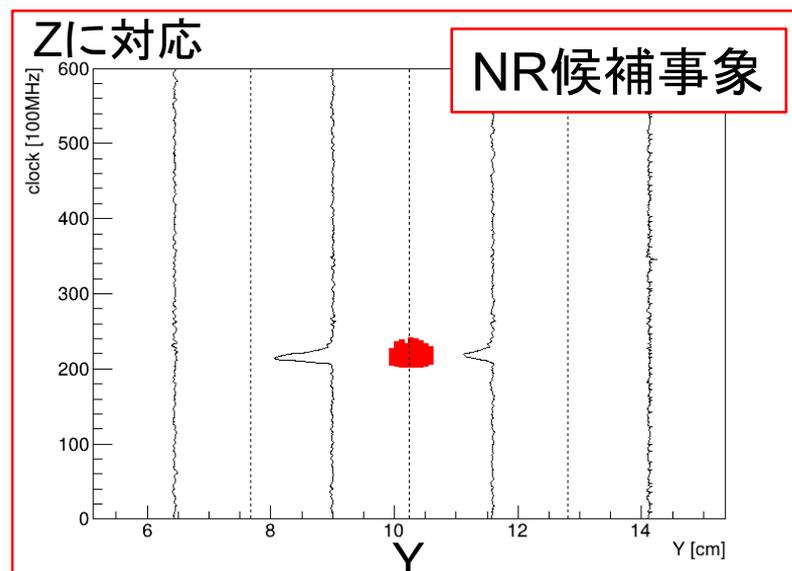
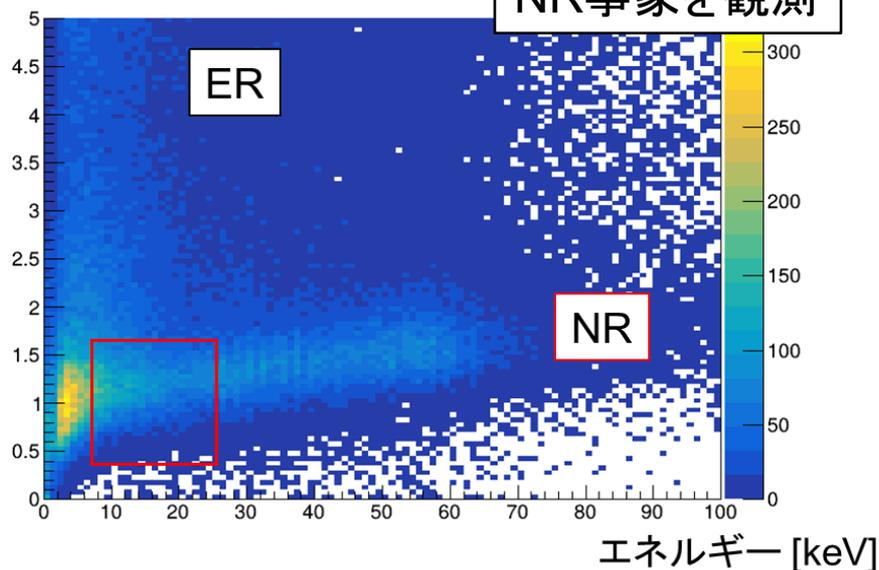
前回の中性子ビーム実験

2024年12月@産業技術総合研究所(産総研)

- ビーム→565keVの単色中性子
- 封入ガス→Ar(84%) + C₂H₆(16%) ※カッコ内は体積比
 - 放電耐性に特化したガス混合比
- 有感領域→20cm×30cm×30cm(5ボード)
- 測定時間→ 1.4×10^4 sec(live time)



飛跡長 [cm]



ArガスTPC改良①(混合ガス最適化)



従来の混合ガス(Ar 84% + C₂H₆ 16%)の問題点

- クエンチャーに含まれるH(およびC)原子核の反跳事象が支配的
→低エネルギー側で背景事象の元になりうる

◎ガスTPCとしての性能を維持したままクエンチャーを減らすことを検討
→**Ar(91%) + C₂H₆(8%) + CF₄(1%)**を採用

※ビームフラックスは $10^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を仮定

Target nuclei	Ar	H
Number of nuclei	6.1×10^{23}	7.0×10^{23}
Cross-section for 565keV neutron	0.65 barn	5.75 barn
Migdal branching	7.2×10^{-5}	
Fluorescence yield (K shell)	0.14	
Expected event rate	$4.0 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$	$4.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$
Expected event rate (Migdal)	$2.9 \times 10^2 \text{ day}^{-1}$	

Ar(84%) + C₂H₆(16%)における事象の計数率の見積もり

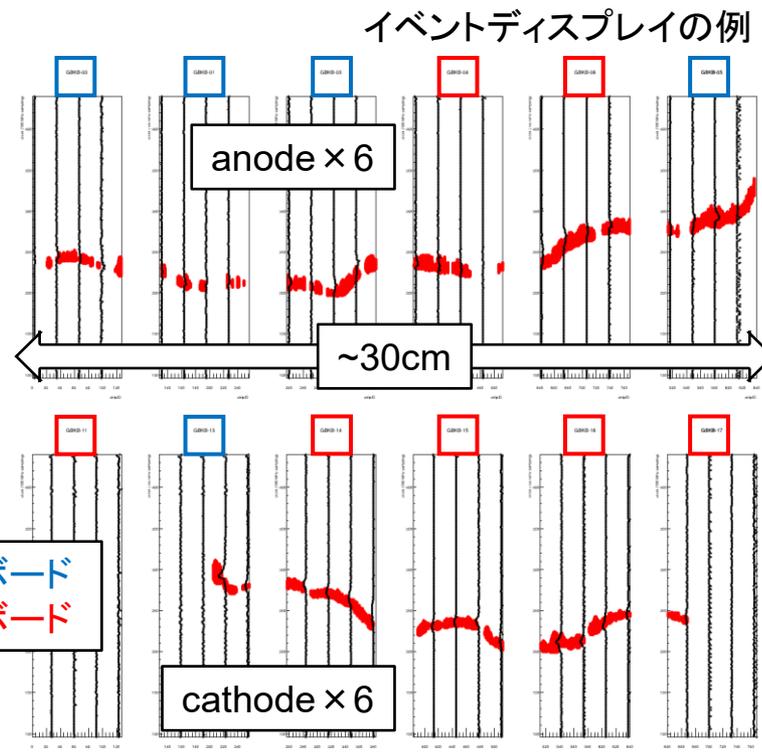
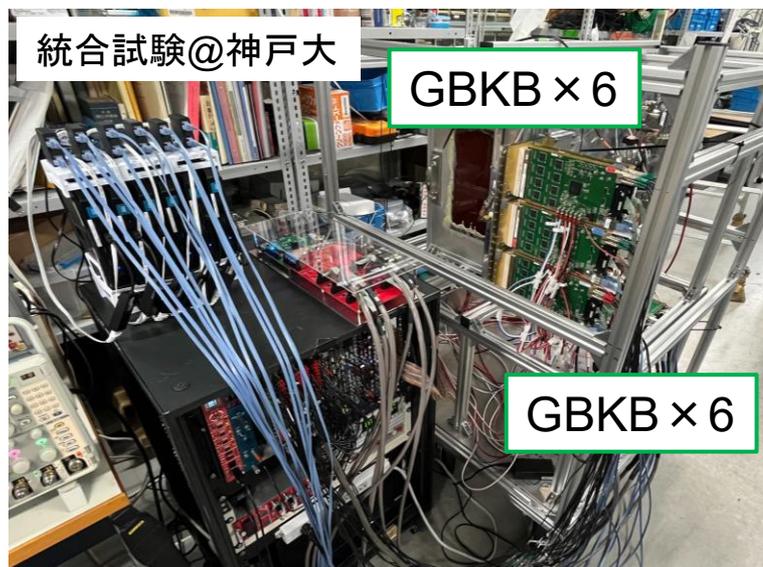
ArガスTPC改良②(読み出し微細化)

高性能化を図り、読み出しピッチを $800\mu\text{m}$ → $400\mu\text{m}$ に

- 位置分解能の向上やサチュレーションの緩和などが主な狙い

この改良に伴い、使用する読み出しボードが6枚→12枚に

- 新DAQシステムの開発(西田talk)
- 読み出しボードの調達(7枚)
 - 7枚とも高田氏(京大)より拝借した



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)

- 封入ガス(カッコ内は体積比、合計1atm)
 - Ar(91%) + C₂H₆(8%) + CF₄(1%)
- 有感領域(前回比1.5倍)
 - 30cm × 30cm × 30cm(12ボード)

測定諸元

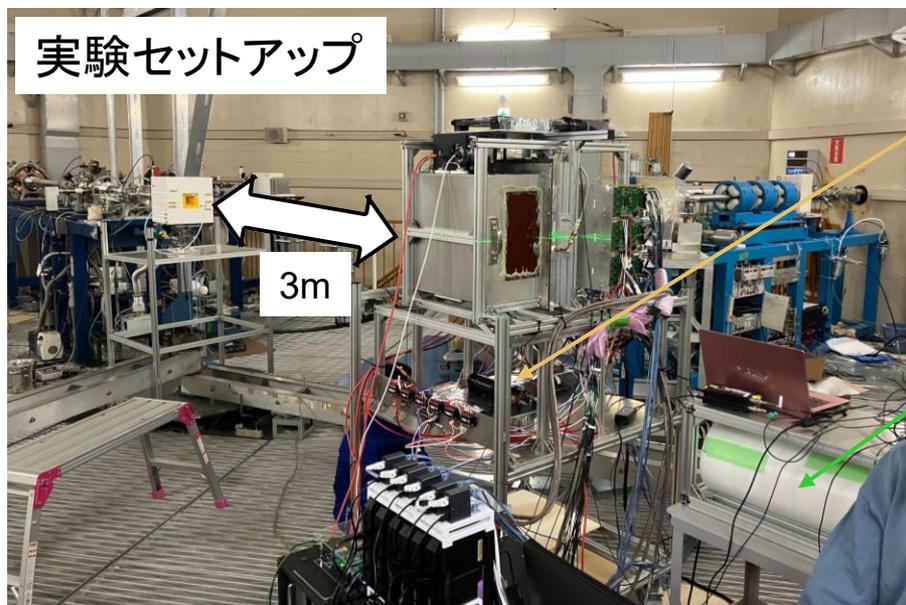
ビームエネルギー→565keV
総トリガー数→ 1.0×10^5
測定時間(live time)
→ 1.1×10^3 sec
(ミグダル効果探索に用いるデータセット)

ビーム照射口



コリメータ装着

実験セットアップ



3m

NaIシンチレータ

- 環境γ
- ビーム由来γ

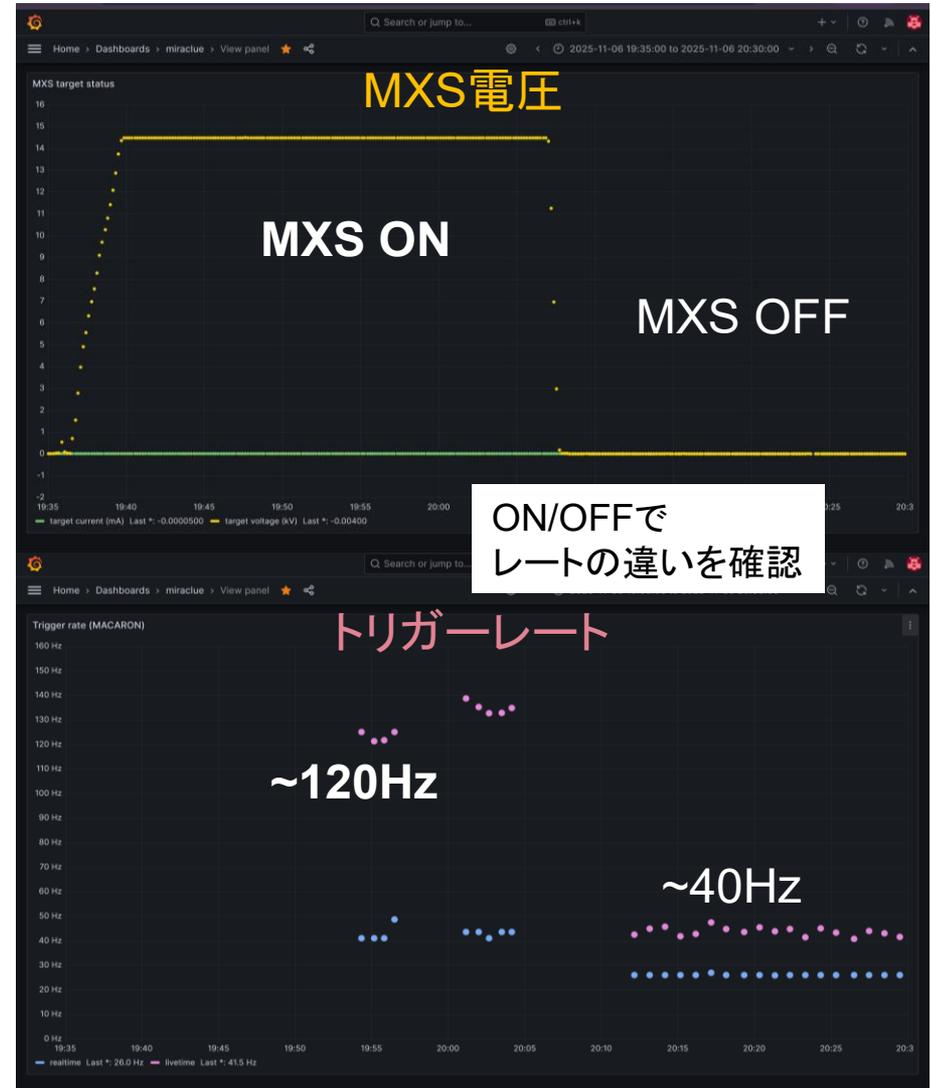
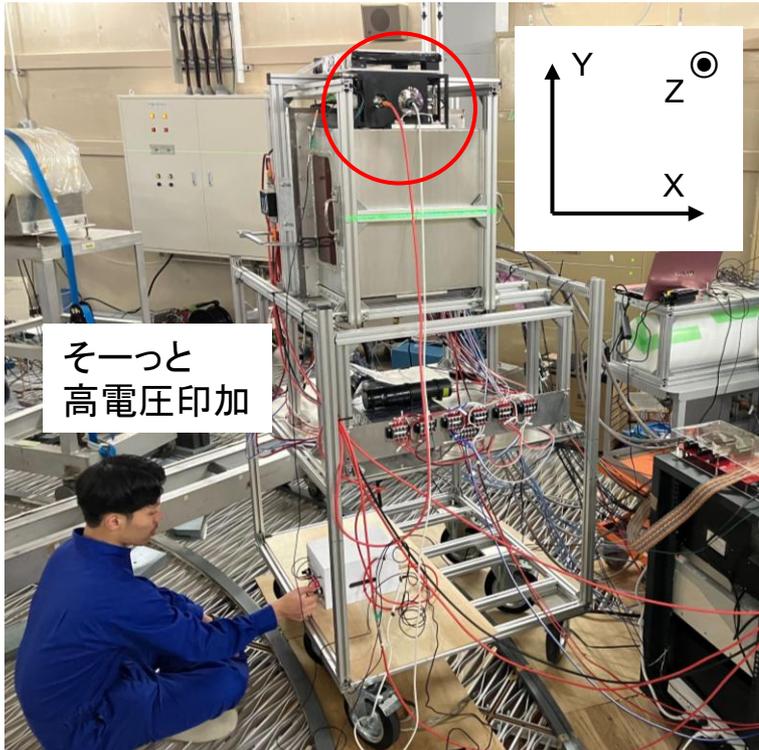
³He比例計数管

- 中性子量

エネルギー較正 (MXS-30k)

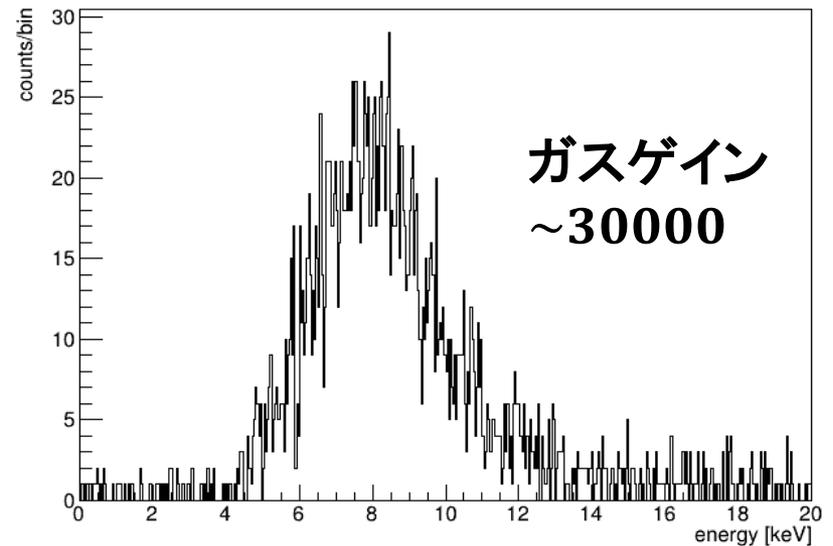
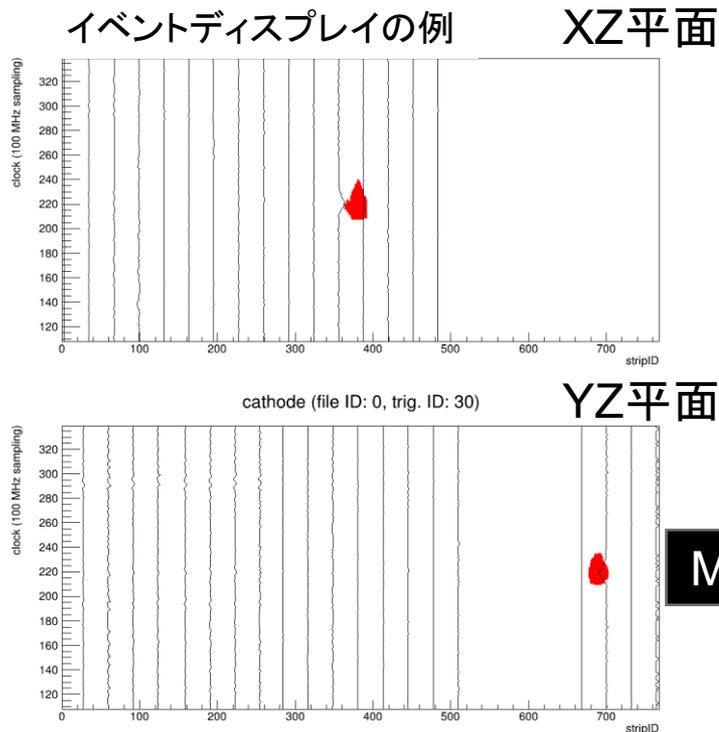
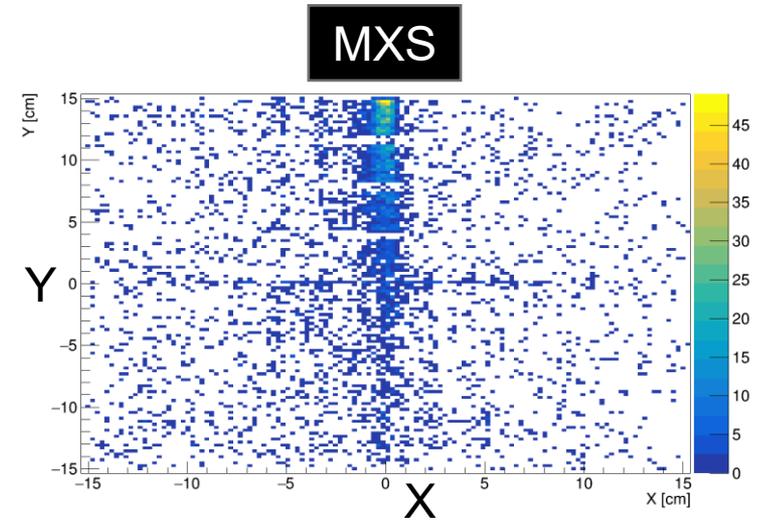
8keVのX線源「MXS-30k」を使用

- 持ち運び可能なX線源
- ポリイミド製の窓から照射
- ✓MXS-30kの開発→身内talk



エネルギー較正 (MXS-30k)

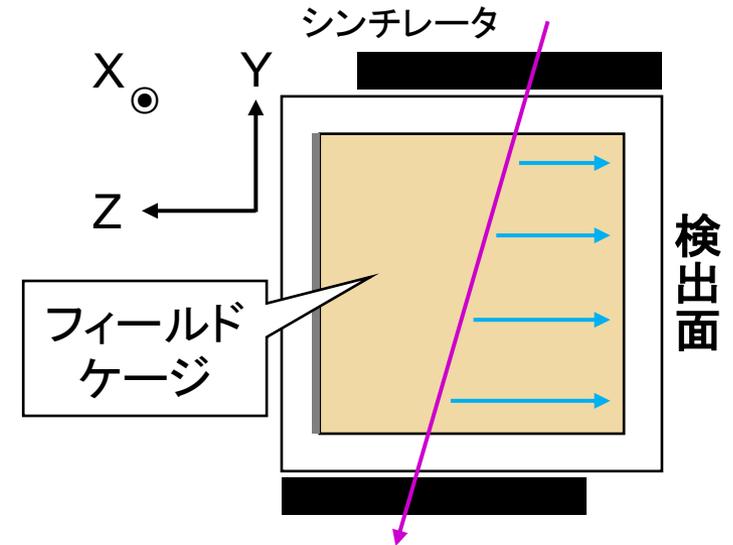
- 飛跡の2次元分布に線源位置との相関がみられる
 - 波形の積分値にピークを確認
- ◎ビームタイム中のエネルギー較正OK



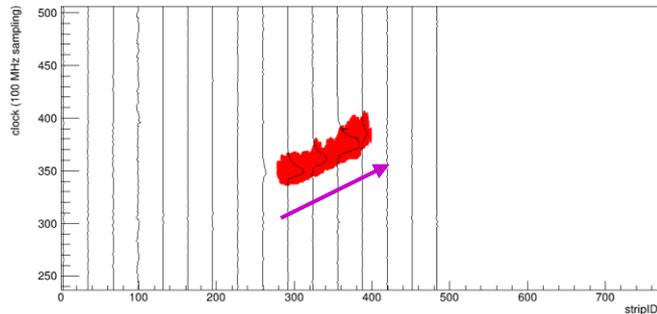
ドリフト速度較正 (cosmic muon)

宇宙線ミュオンを用いた手法

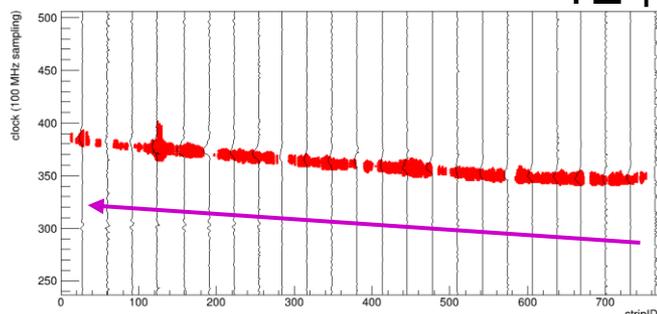
- 2つのシンチレータのコインシデンスをトリガーにしてZ方向の位置を再構成
- ◎ビームタイム中のドリフト速度較正OK



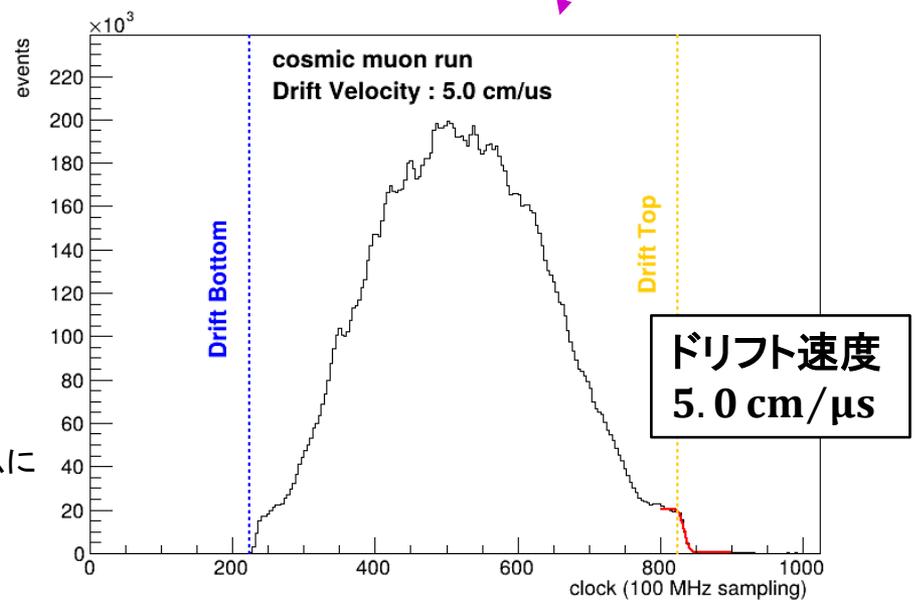
イベントディスプレイの例 XZ平面



cathode (file ID: 7, trig. ID: 45) YZ平面



⇒
全ヒットを
ヒストグラムに
詰める



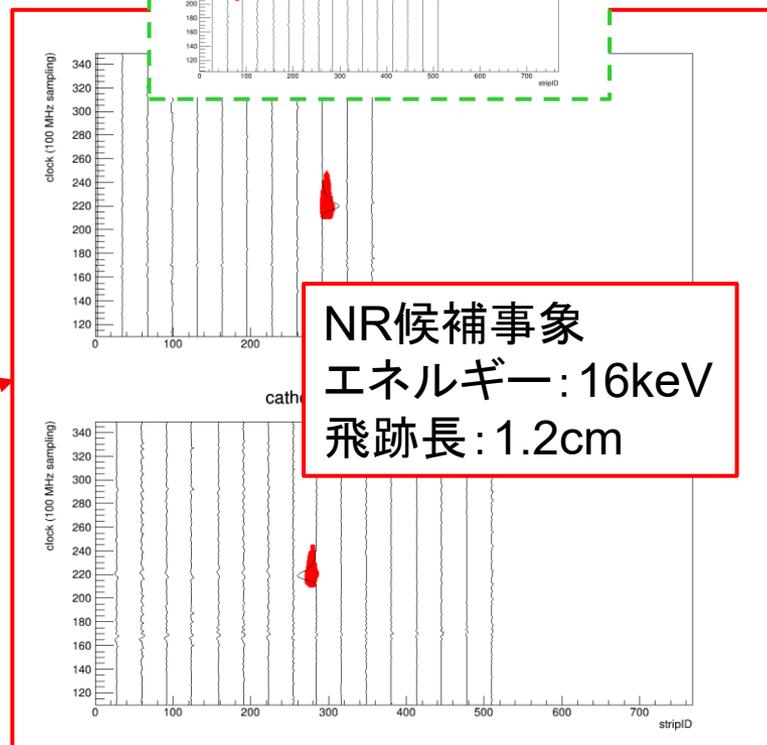
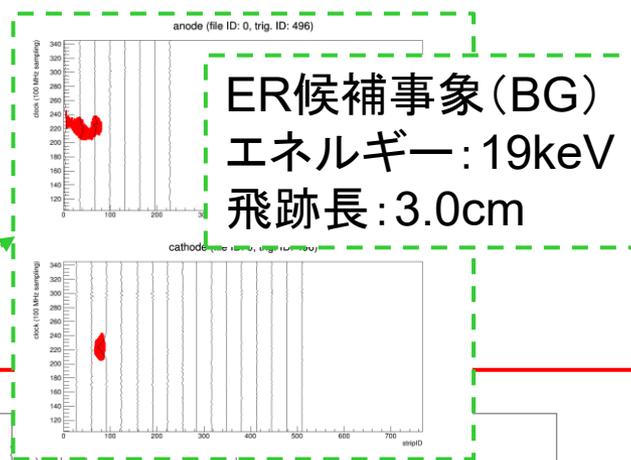
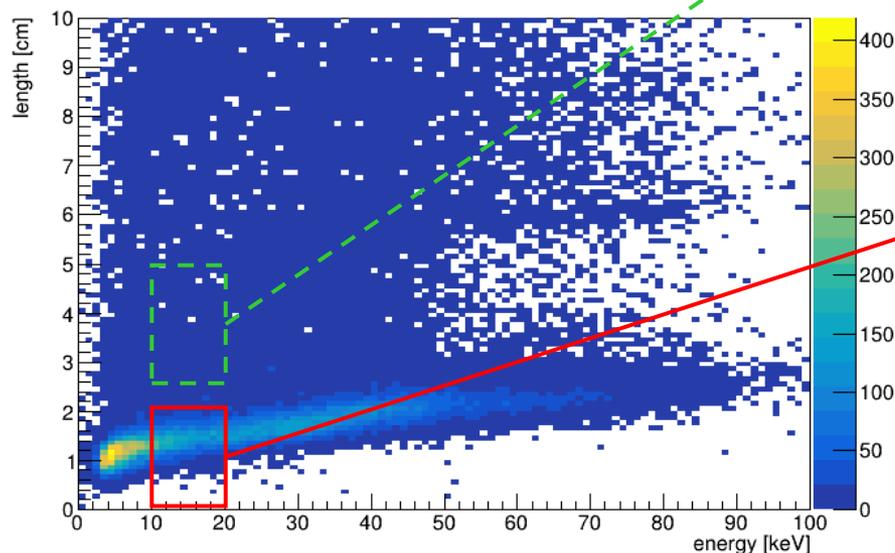
beam run解析

取得した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NR/ERの分離ができている

解析に使用したデータセット
トリガー数: 1.0×10^5
測定時間 (live time): 93sec

エネルギー vs. 飛跡長



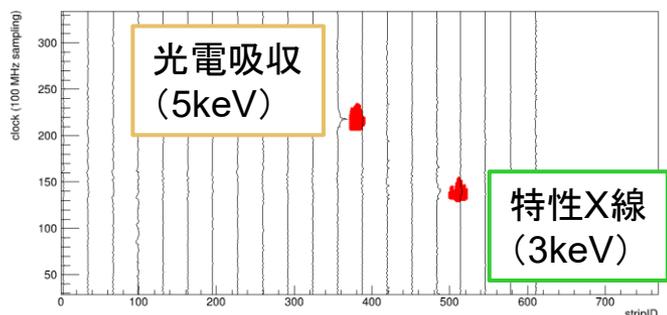
2-cluster解析 (MXS-30k)

まず「MXS-30k」のデータで2-cluster事象を探索

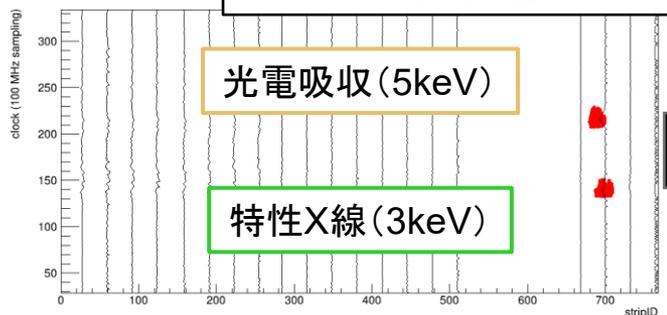
- ヒット情報を用いて2-cluster間の距離を求める
- 波形情報を用いてclusterごとのエネルギーを求める

◎2-cluster解析のデモンストレーションができた

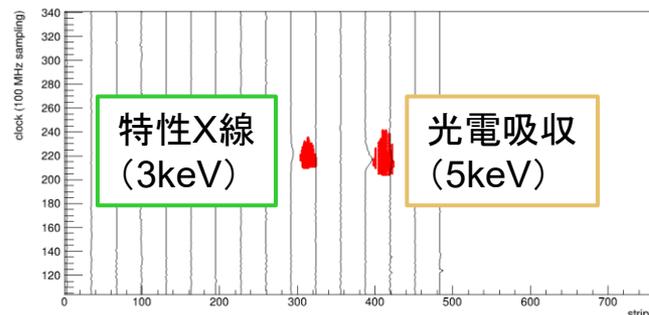
Z(ドリフト)方向の2-cluster



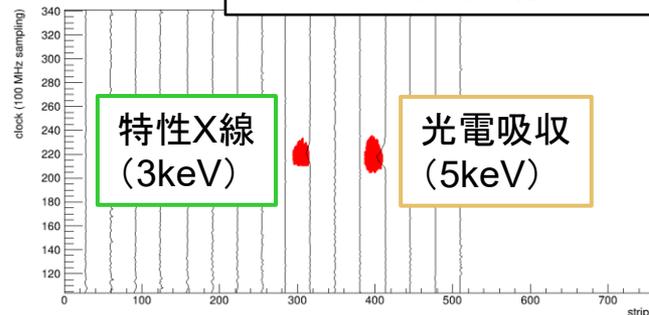
2-cluster間の距離: 6.5cm



X(Y)方向の2-cluster



2-cluster間の距離: 5.4cm

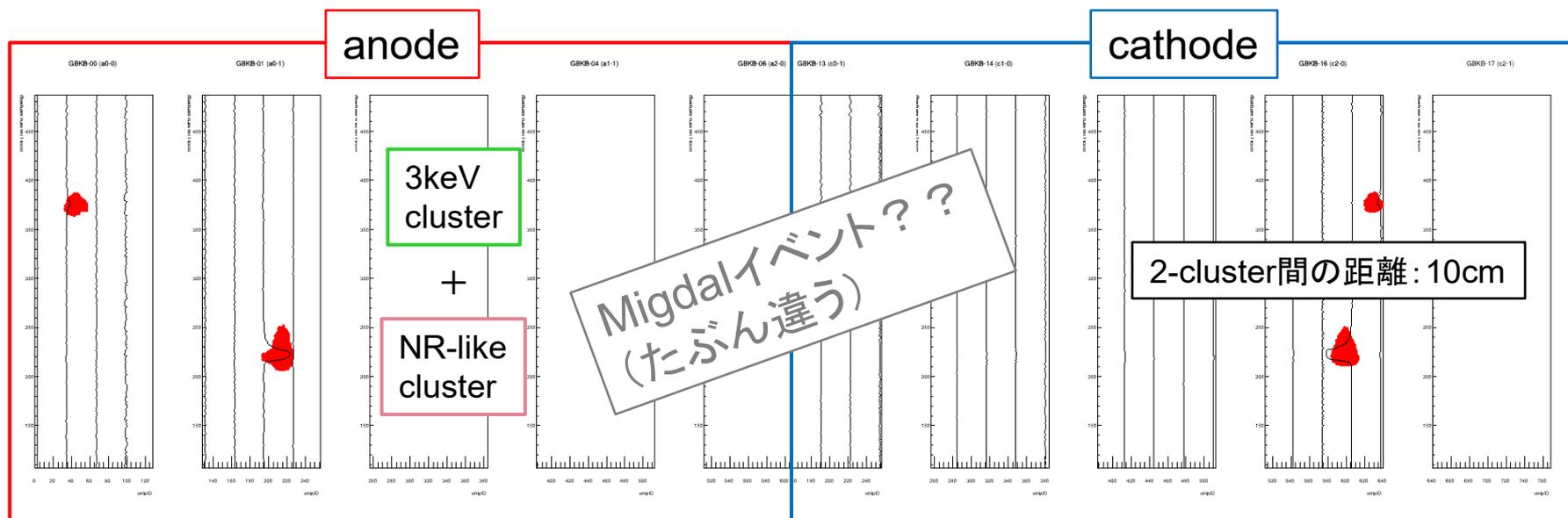


2-cluster解析 (beam run)

現在beam runのデータで2-cluster解析中

- DAQのdead timeが大きかった影響でexposureを稼げなかった(西田talk)
 - 期待されるMigdalイベントは $O(1)$
- 2-cluster事象は検出できている(下図)

◎シミュレーションを用いたBG評価が次のステップ

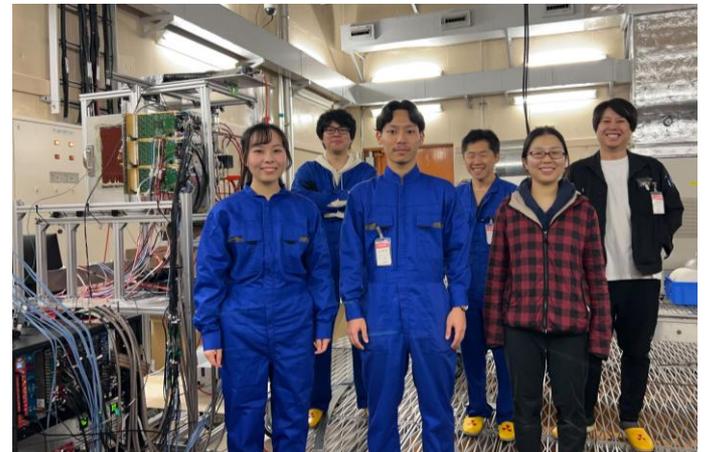


展望

- シミュレーションによるBG評価→branching ratioの上限値を設定

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-cluster手法により背景事象を分離する
- 産総研での中性子ビーム実験に向けて検出器を改良した
 - 新DAQシステムの開発＋混合ガスの最適化
- 2025年11月にビーム実験を実施した
 - DAQのdead timeに課題は残ったものの貴重なデータがとれた
 - 現在2-cluster解析に取り組んでいる



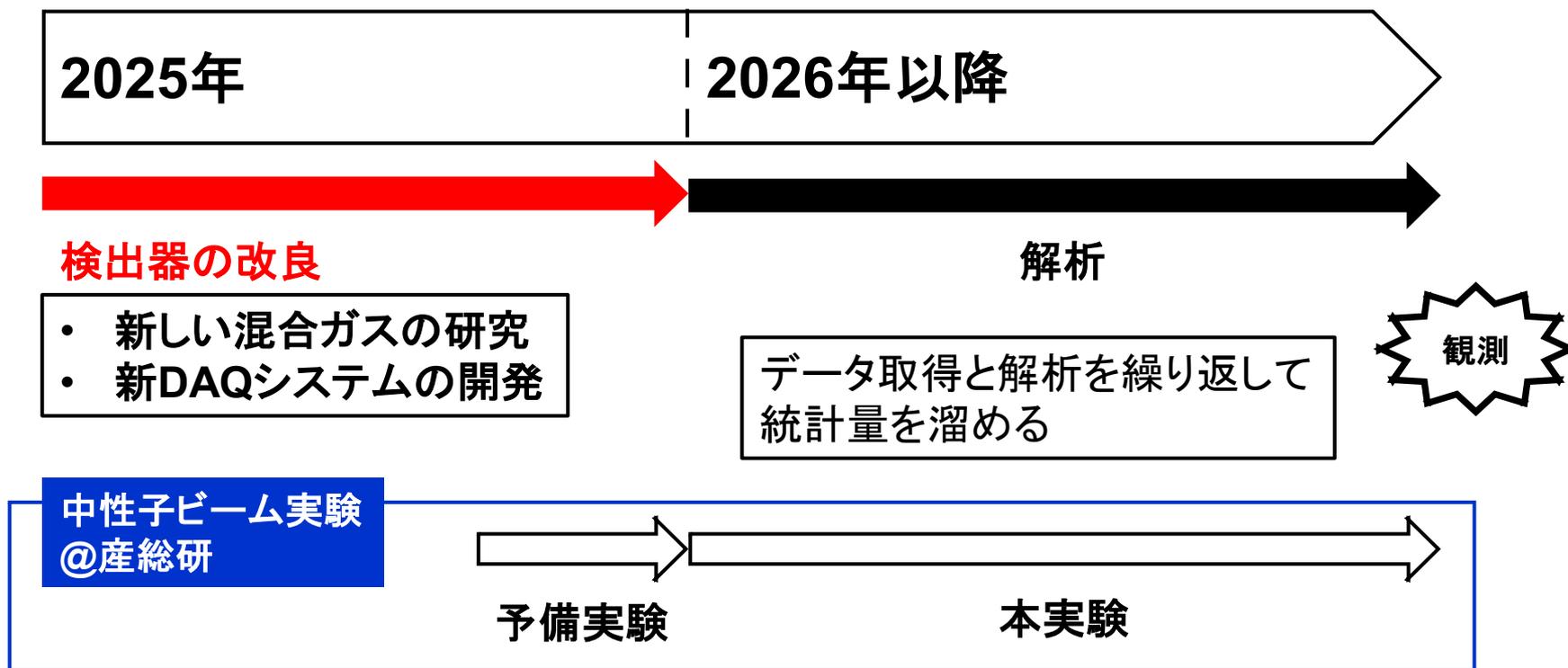
BACK UP

MIRACLUE実験のロードマップ



検出感度を向上すべく、**検出器の改良**に取り組んでいる

- 改良した検出器を用いた予備実験を11月上旬に実施する
- 2026年には本格的なミグダル効果探索を開始する

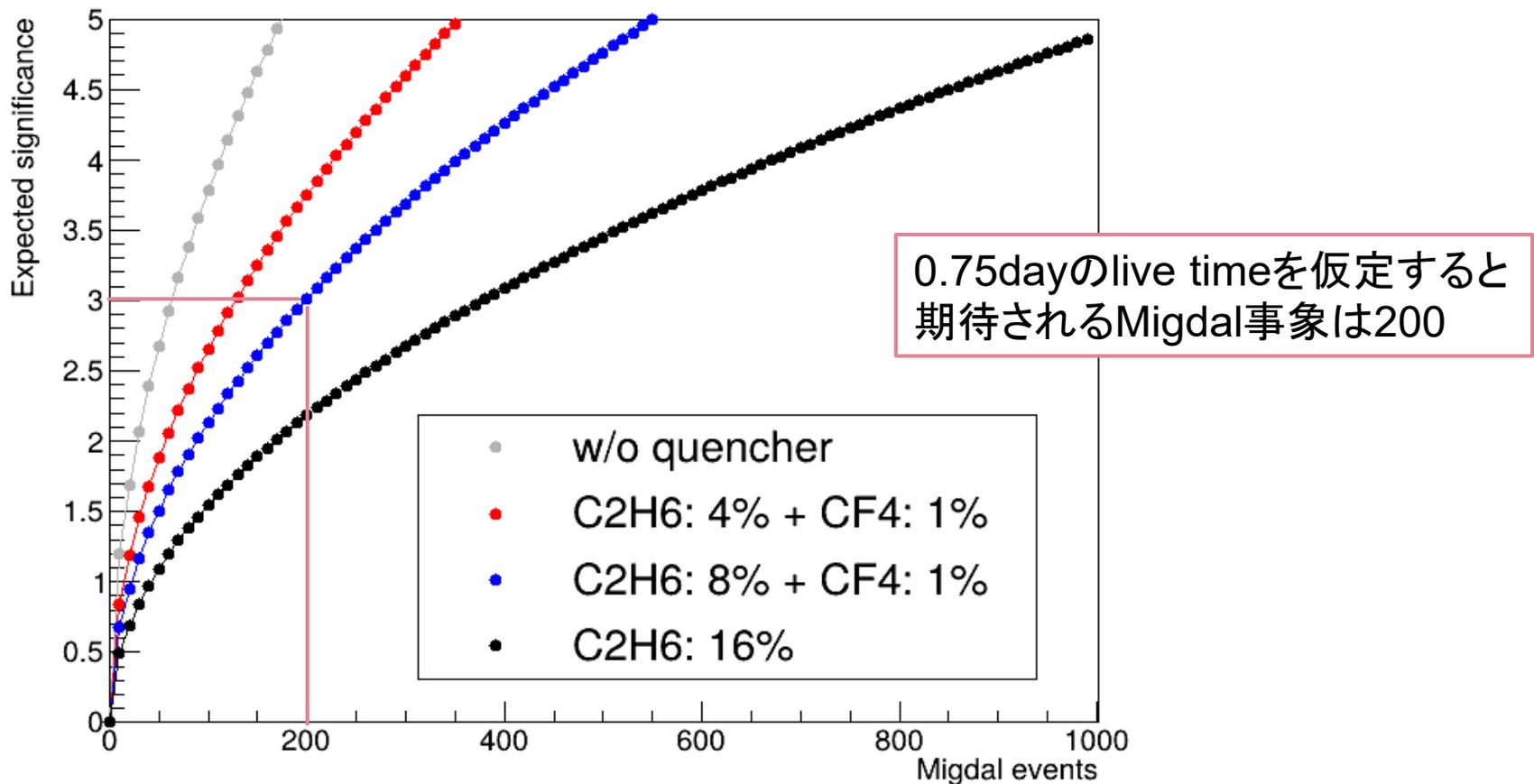


MIRACLUE実験で予想される感度



11月上旬の予備実験では3日間のビームタイムを計画している

- C2H6 8%+CF4 1%でも 3σ の有意性に到達する見込み

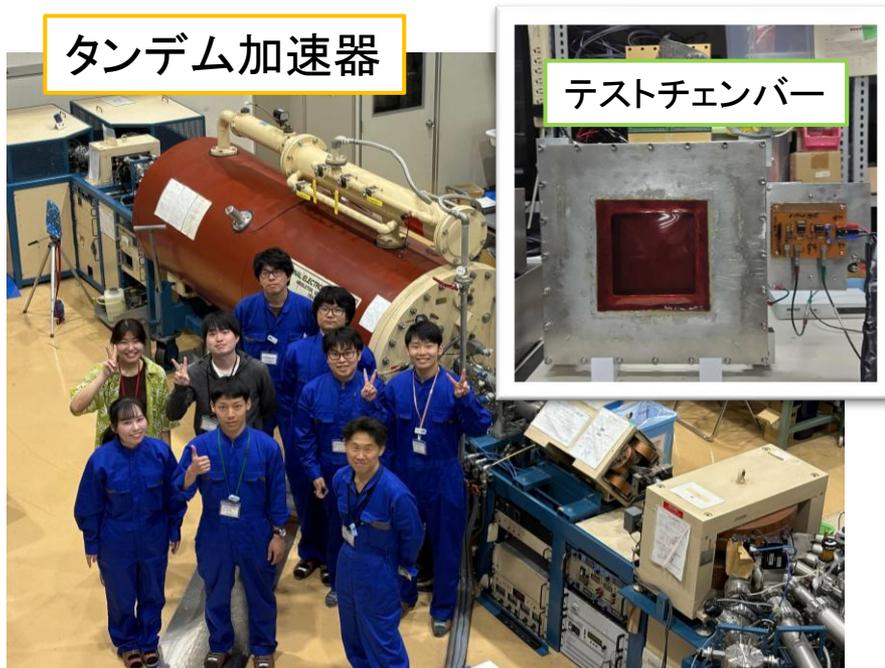


ArガスTPCの放電耐性試験

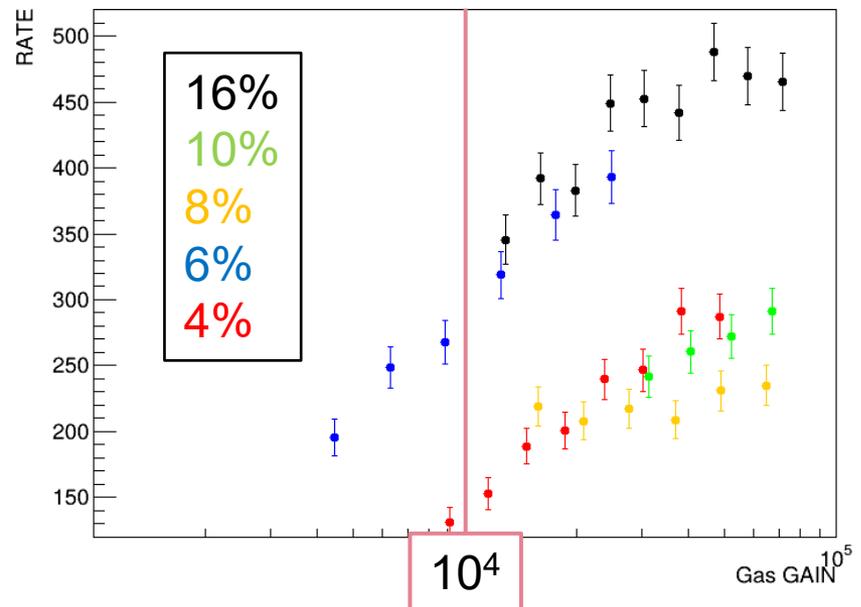
中性子ビーム照射試験@神戸大学タンデム加速器

- KMArTと同様の電子増幅機構を持つテストチェンバーを使用
- クエンチャー(C_2H_6)の割合を変化させながら放電耐性を評価

◎すべての混合比でガスゲインの要請値($>10^4$)をクリア
(放電が頻発した場合は計数率が急激に低下する)



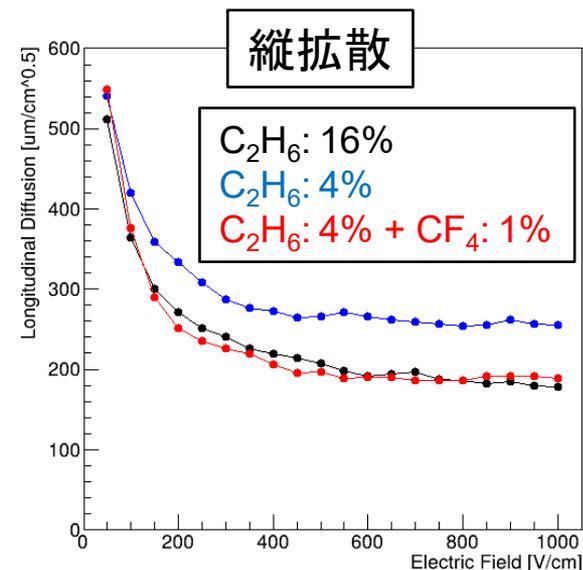
ガスゲインに対する事象計数率



電子のドリフト速度・拡散がもたらす影響

- 横拡散が大きい→位置分解能を悪化させる
- 縦拡散が大きい・ドリフト速度が遅い
→波形がなまり、検出効率を悪化させる

◎C₂H₆の割合を減らすとガスTPCの性能が悪化
→少量のCF₄を加えて影響を緩和



混合ガス(合計1atm)	ドリフト速度 (cm/μs)	横拡散係数 (μm/√cm)	縦拡散係数 (μm/√cm)
Ar: C ₂ H ₆ = 84: 16	4.30	420	301
Ar: C ₂ H ₆ = 96: 4	3.37	677	358
Ar: C ₂ H ₆ : CF ₄ = 95: 4: 1	5.89	442	291

各混合ガスにおけるドリフト速度と拡散(Magboltz, ドリフト電場は150V/cm)