



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

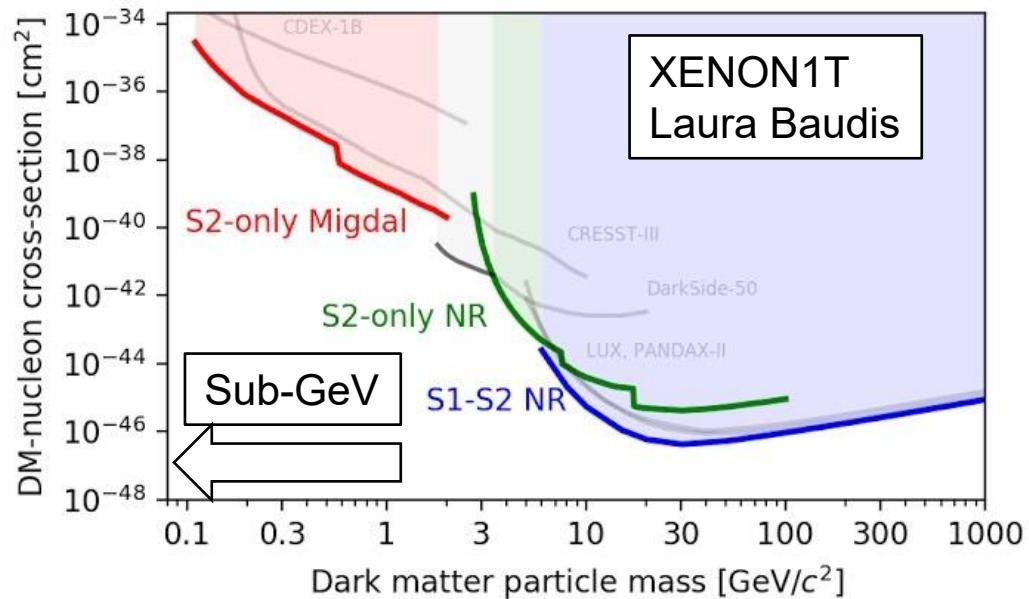
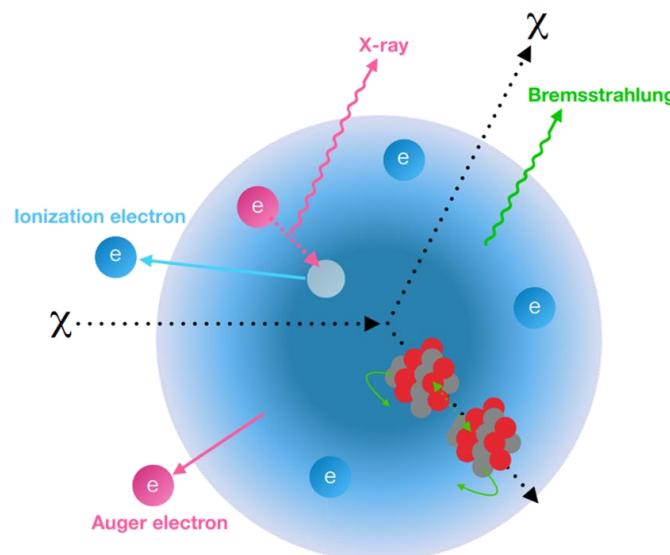
ミグダル効果

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

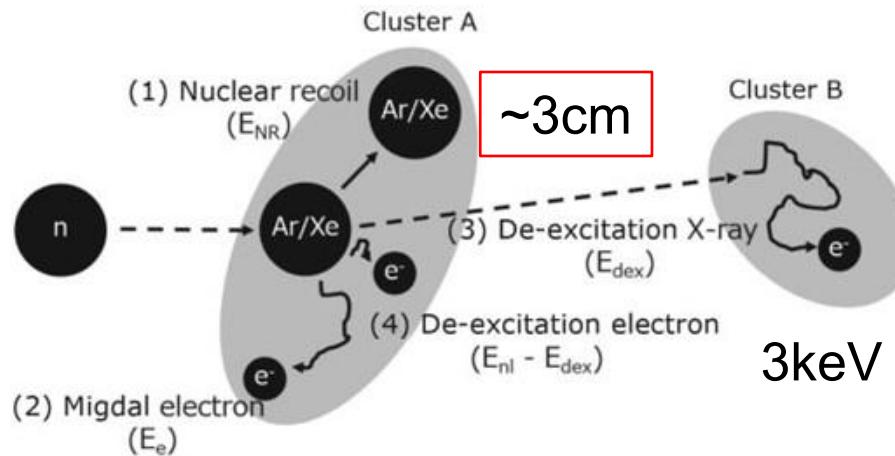
NRに伴うミグダル効果があれば...

- ・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！

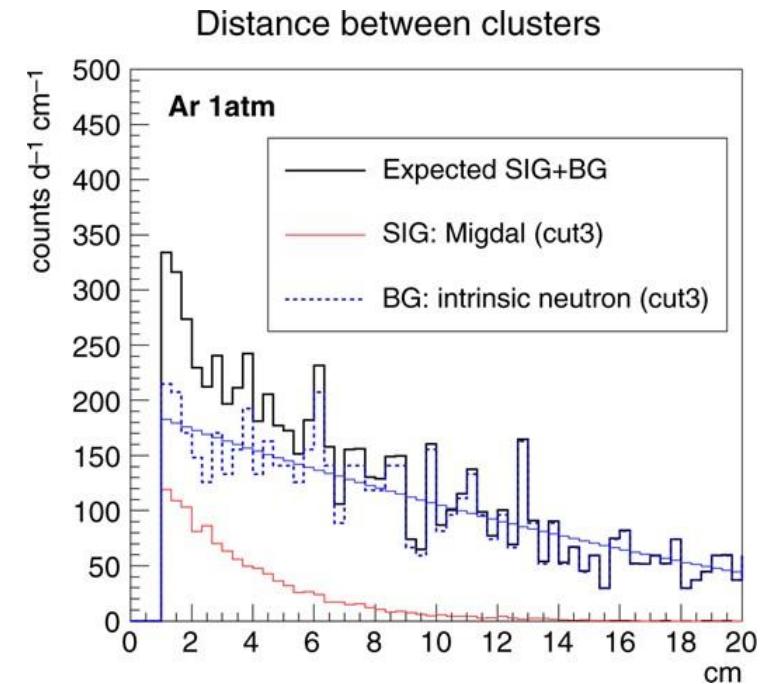


中性子ビーム照射実験でミグダル効果の初観測を目指す

- ・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)

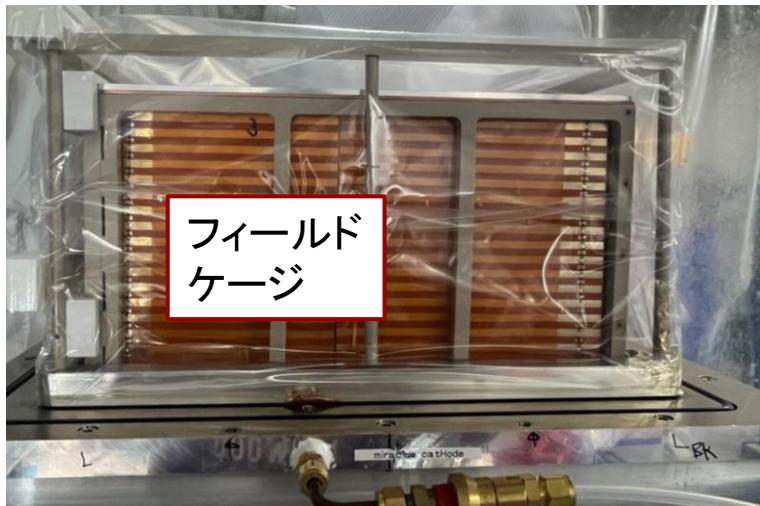


KMArT (Kobe MIRACLUE Argon TPC)

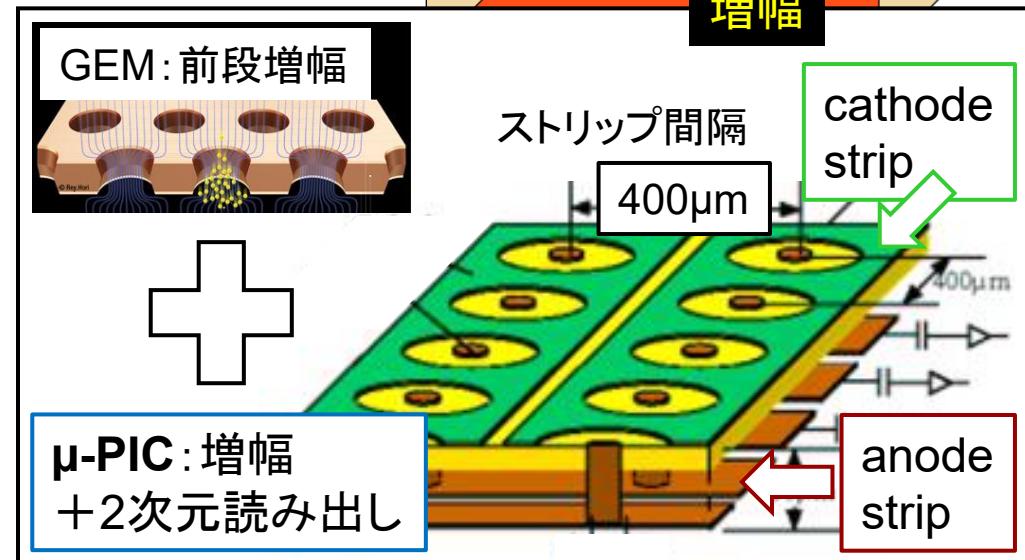
...NEWAGEの技術を応用したガスTPC

- 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



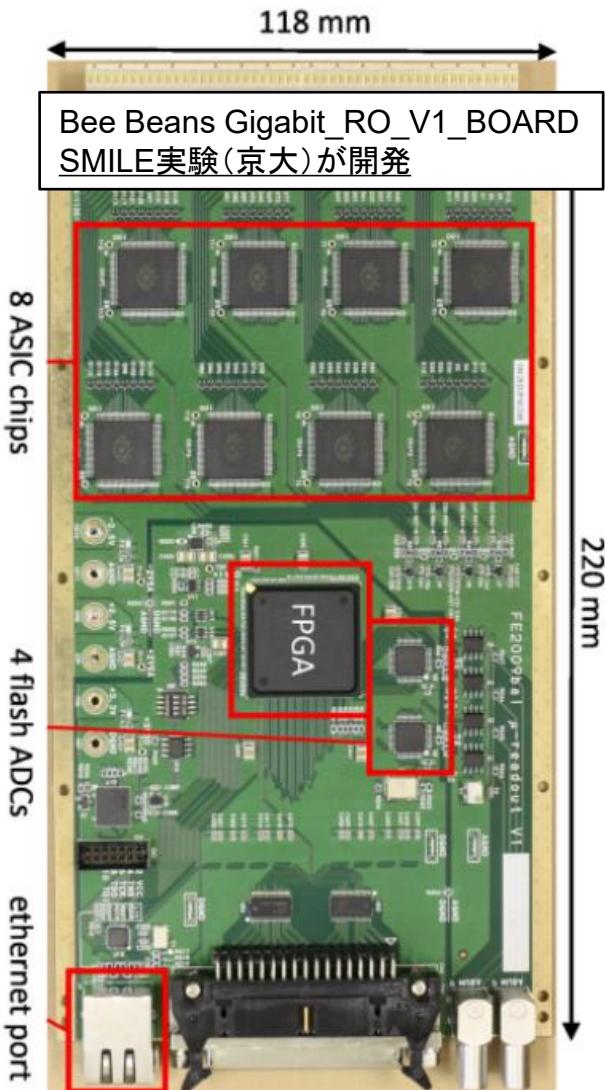
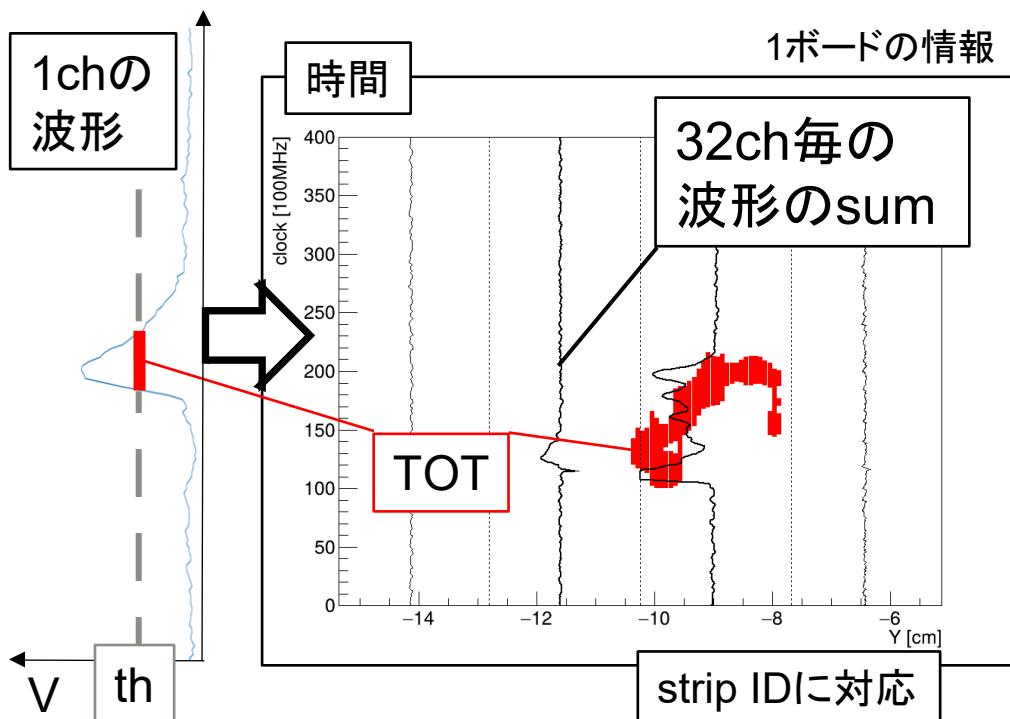
フィールド
ケージ



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



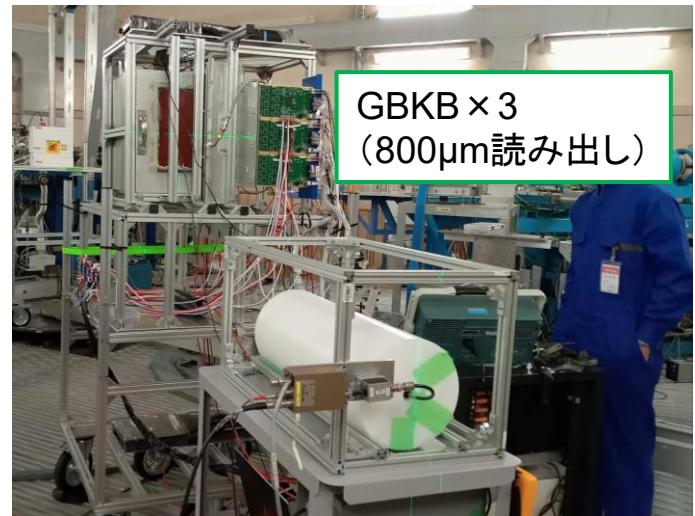
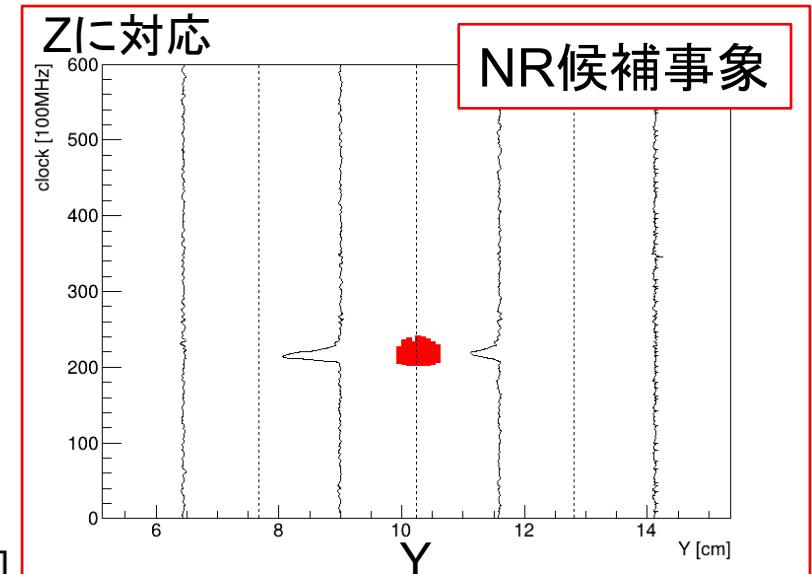
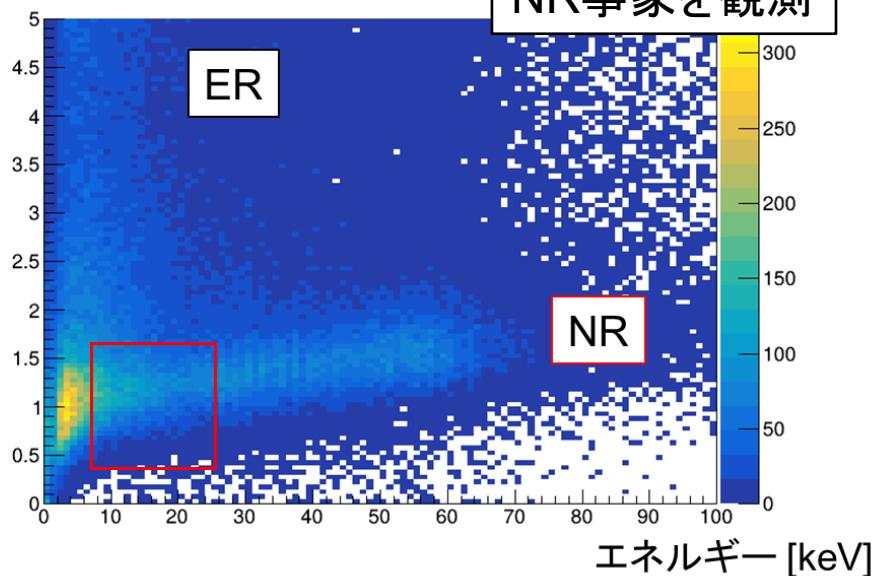
ArガスTPCの改良

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)

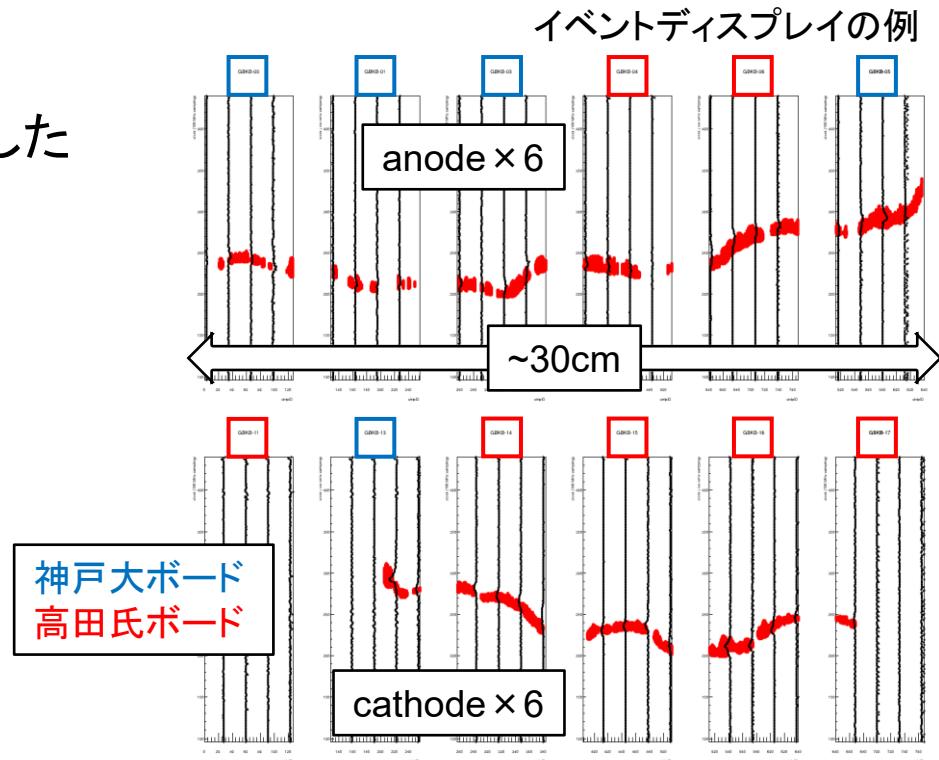
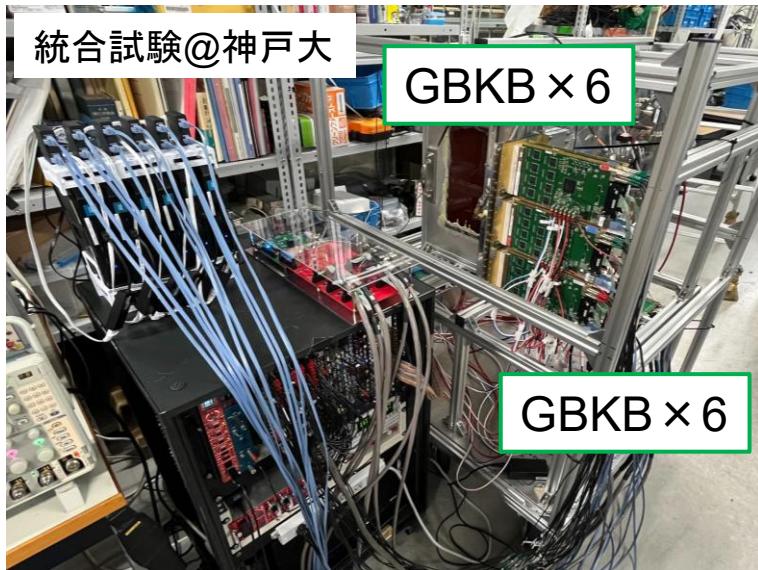


高性能化を図り、読み出しピッチを $800\mu\text{m} \rightarrow 400\mu\text{m}$ に

- 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 \rightarrow 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

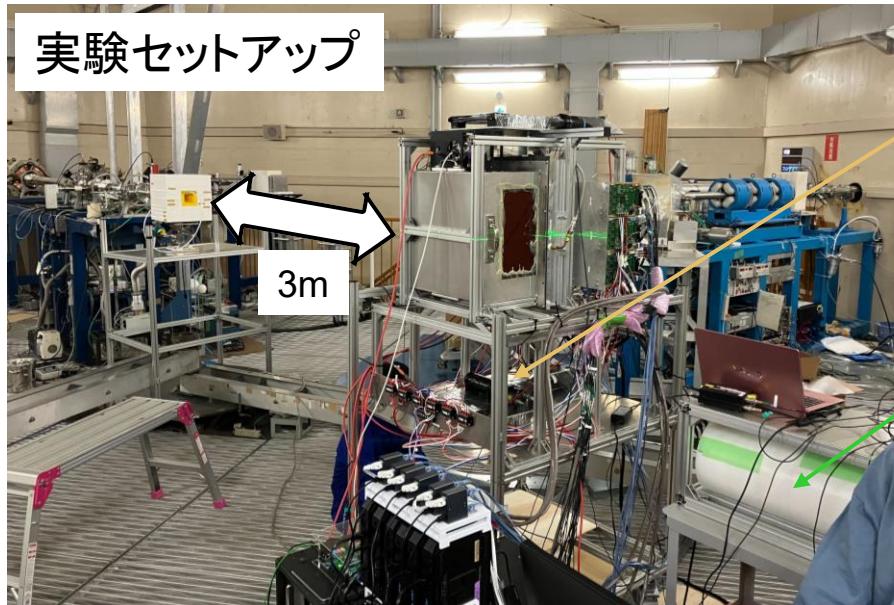
ビームエネルギー → 565keV
総トリガー数 → 1.0×10^5
測定時間(live time)
→ 1.1×10^3 sec
(ミグダル効果探索に用いる
データセット)

ビーム照射口



コリメータ装着

実験セットアップ



3m

Nalシンチレータ
• 環境γ
• ビーム由来γ

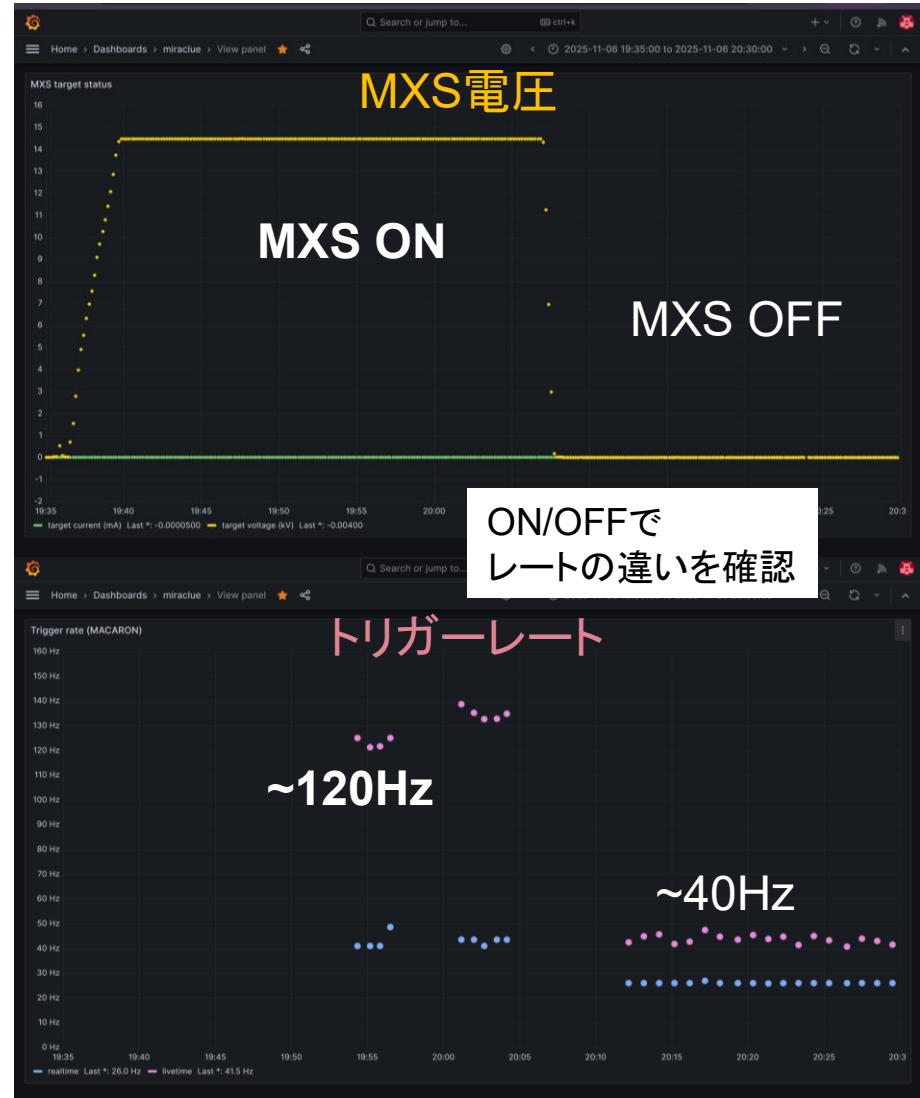
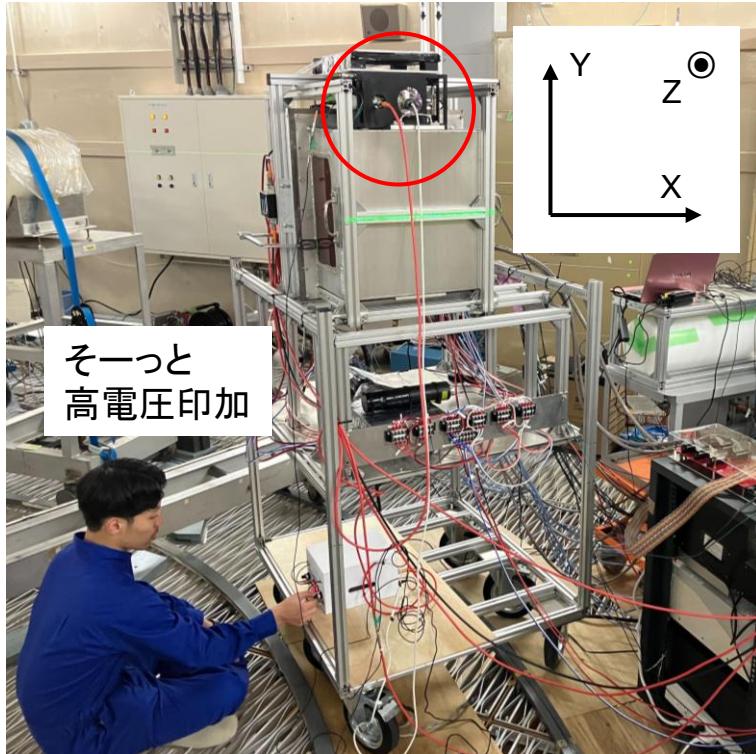
³He比例計数管
• 中性子量

エネルギー較正(MXS-30k)



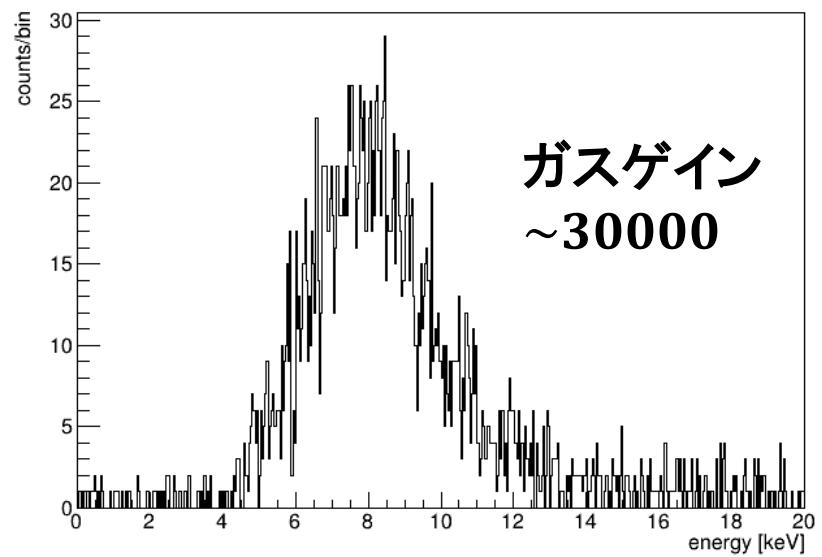
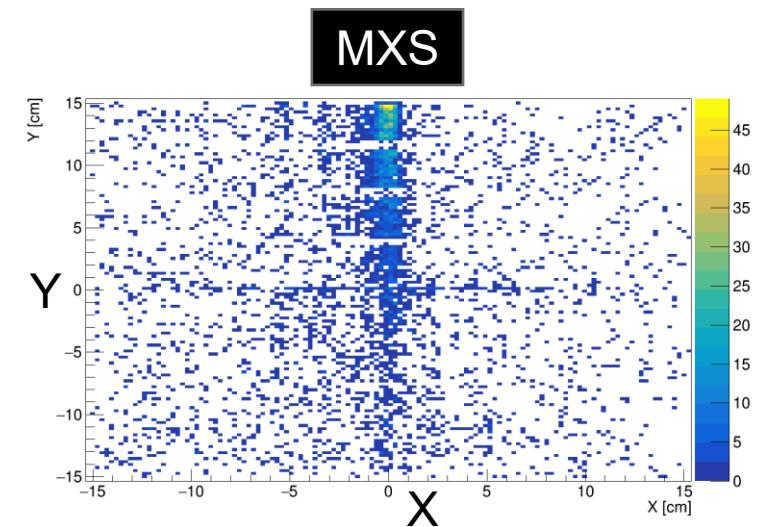
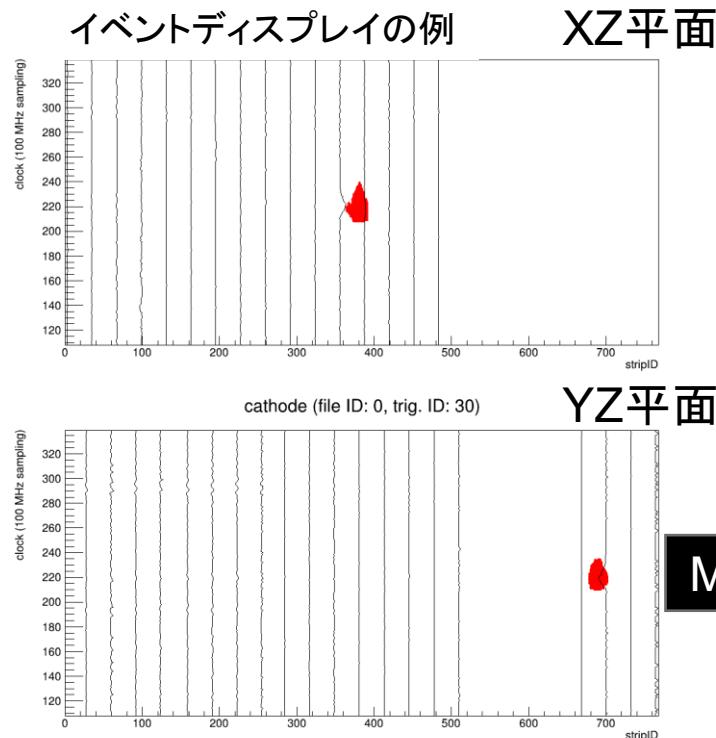
8keVのX線源「MXS-30k」を使用

- 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



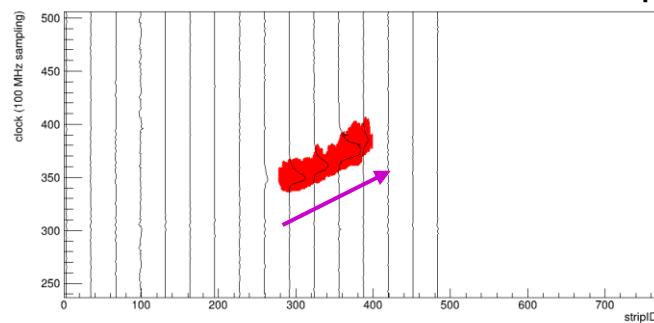
ドリフト速度較正(cosmic muon)



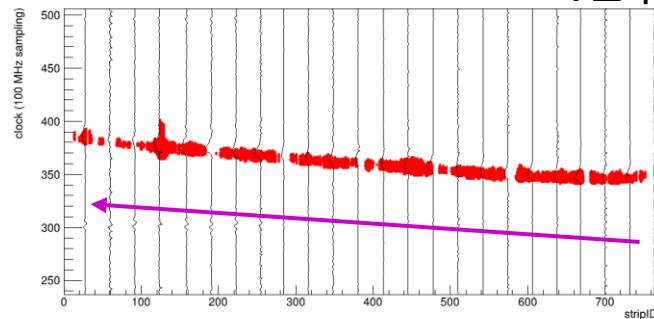
宇宙線ミューオンを用いた手法

- ・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

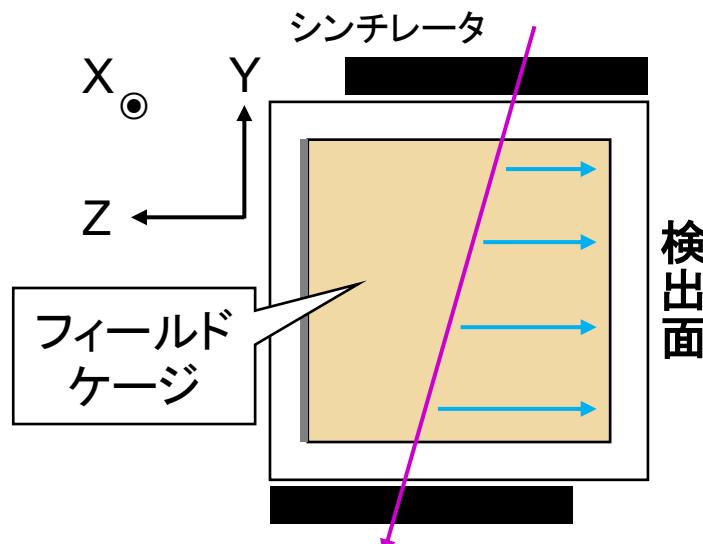
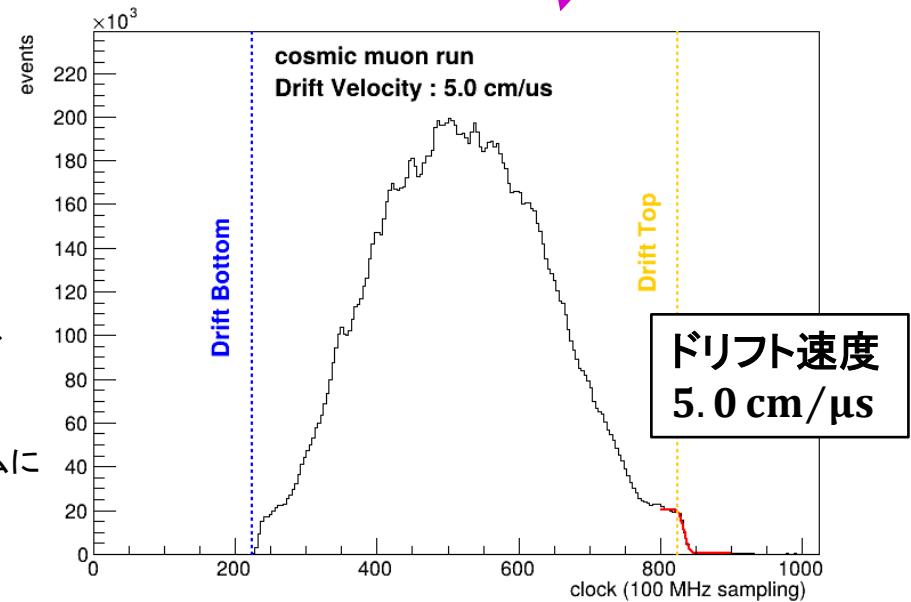
イベントディスプレイの例 XZ平面



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

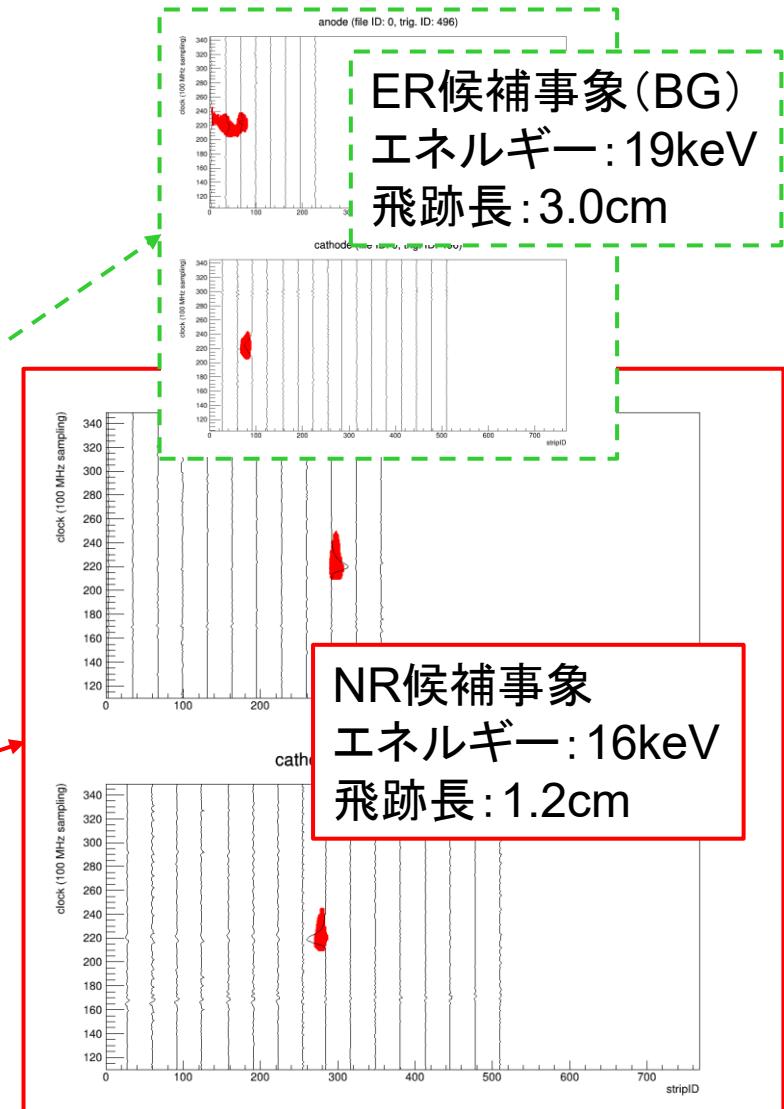
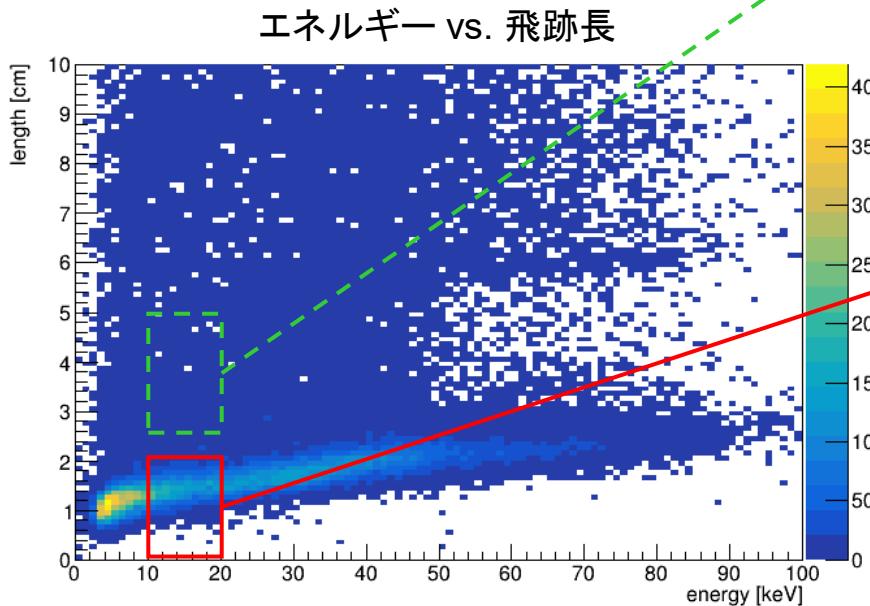
取得したデータの一部を用いて解析

- ・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

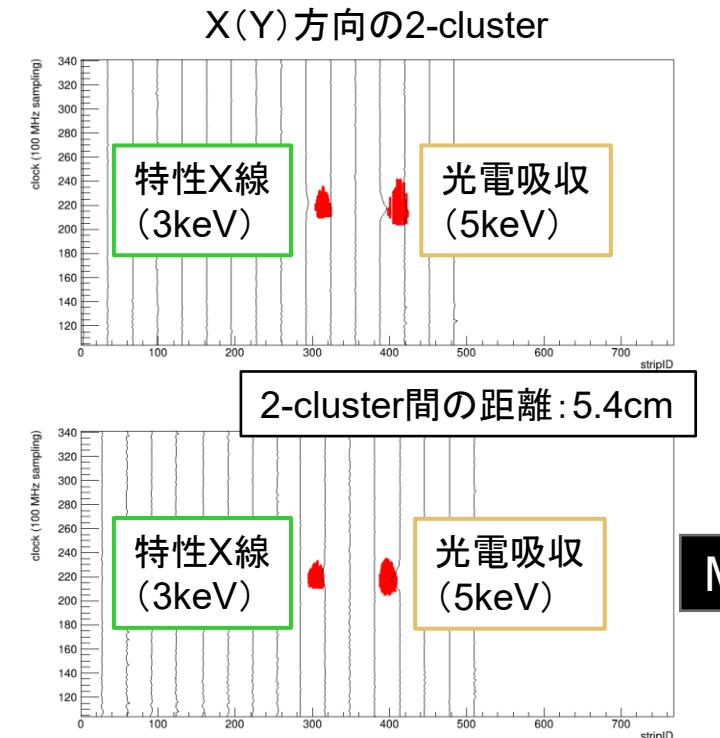
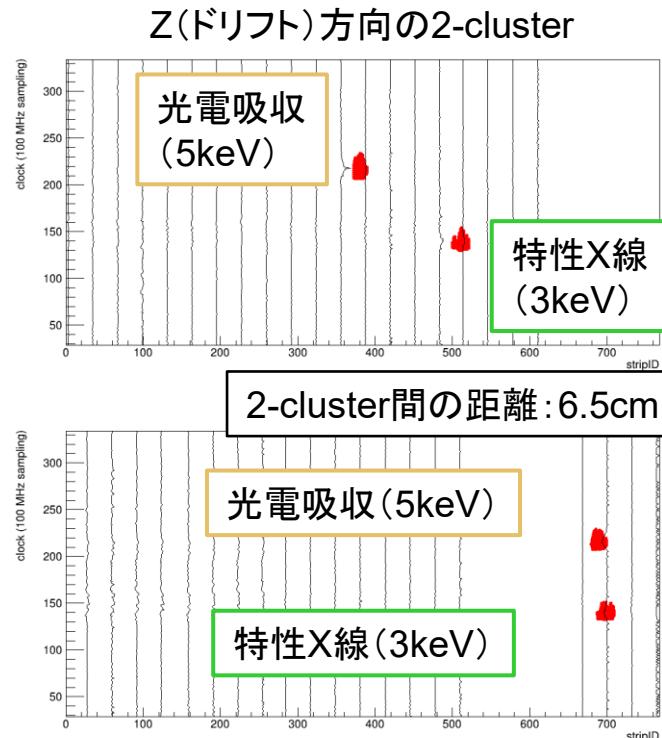
測定時間 (live time): 93sec



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



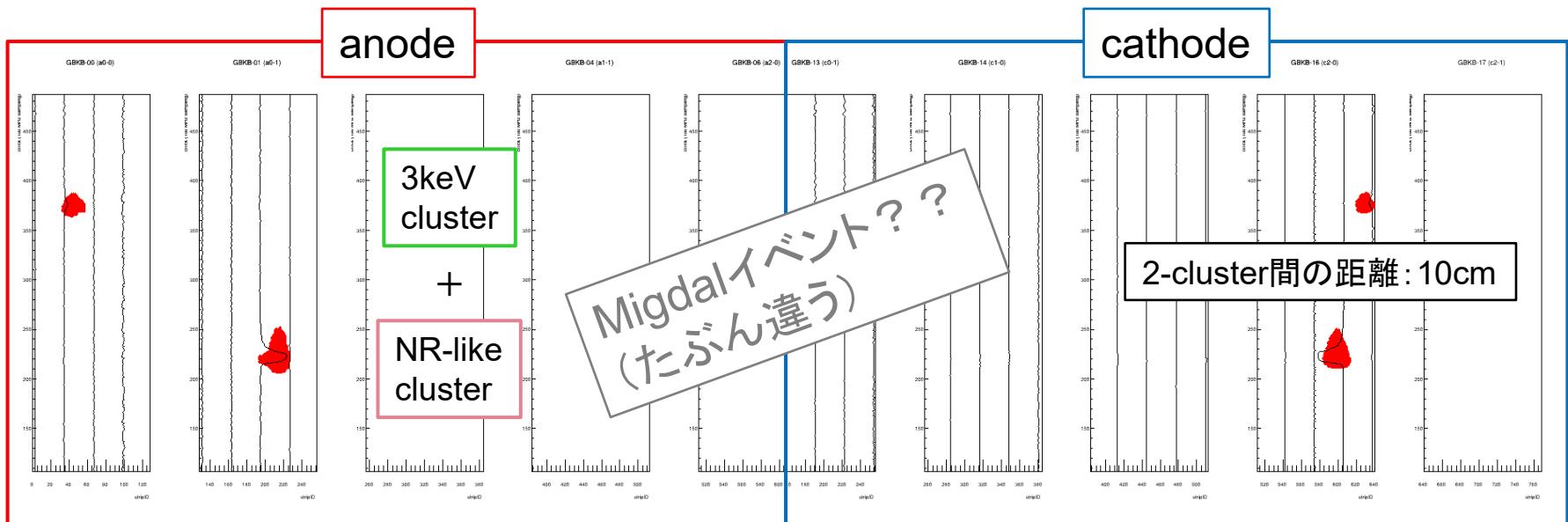
2-cluster解析 (beam run)



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を稼げなかつた(西田talk)
 - 期待されるMigdalイベントは $\mathcal{O}(1)$
 - 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



今後の展望・まとめ

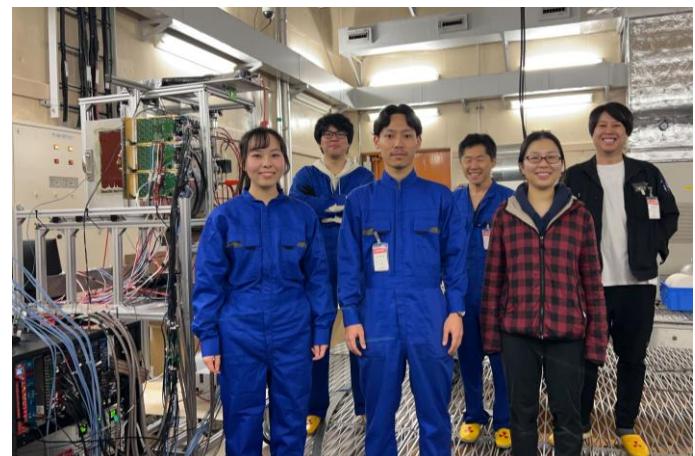


展望

- ・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



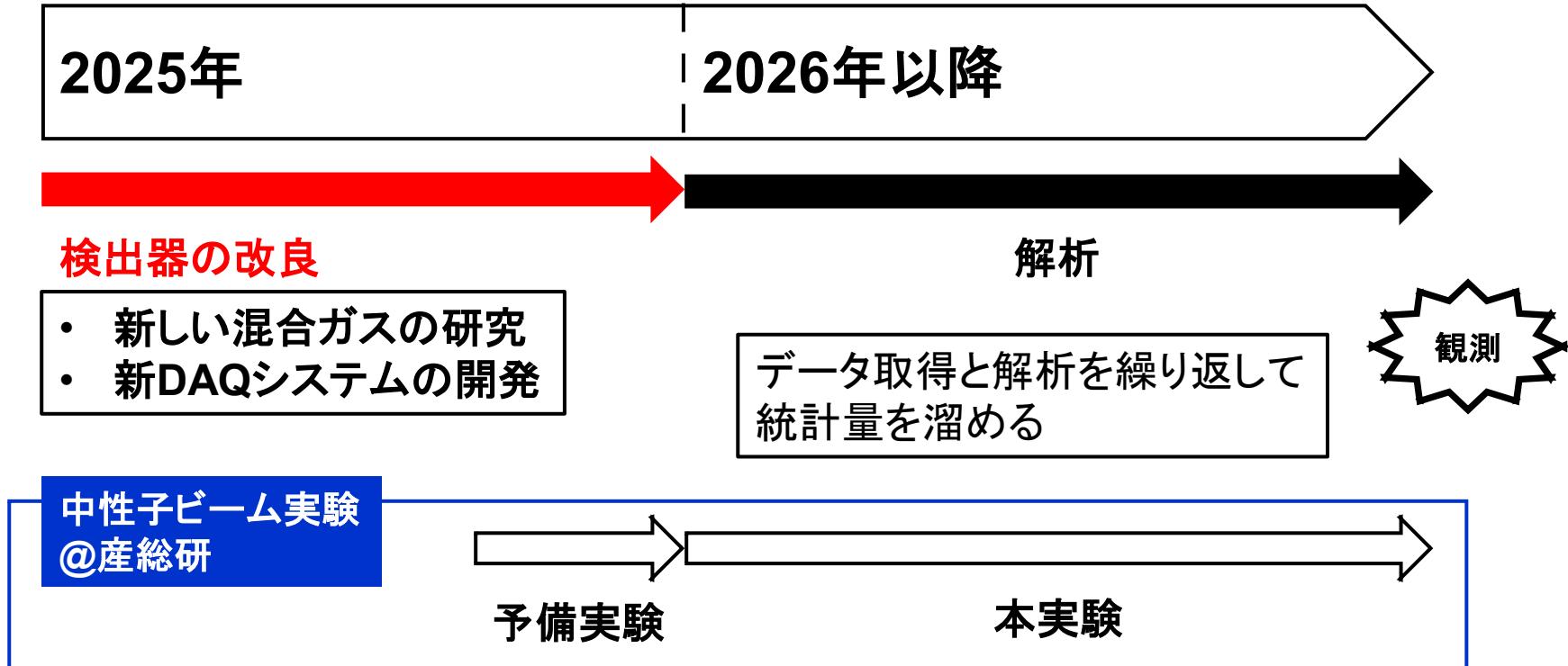
BACK UP

MIRACLE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

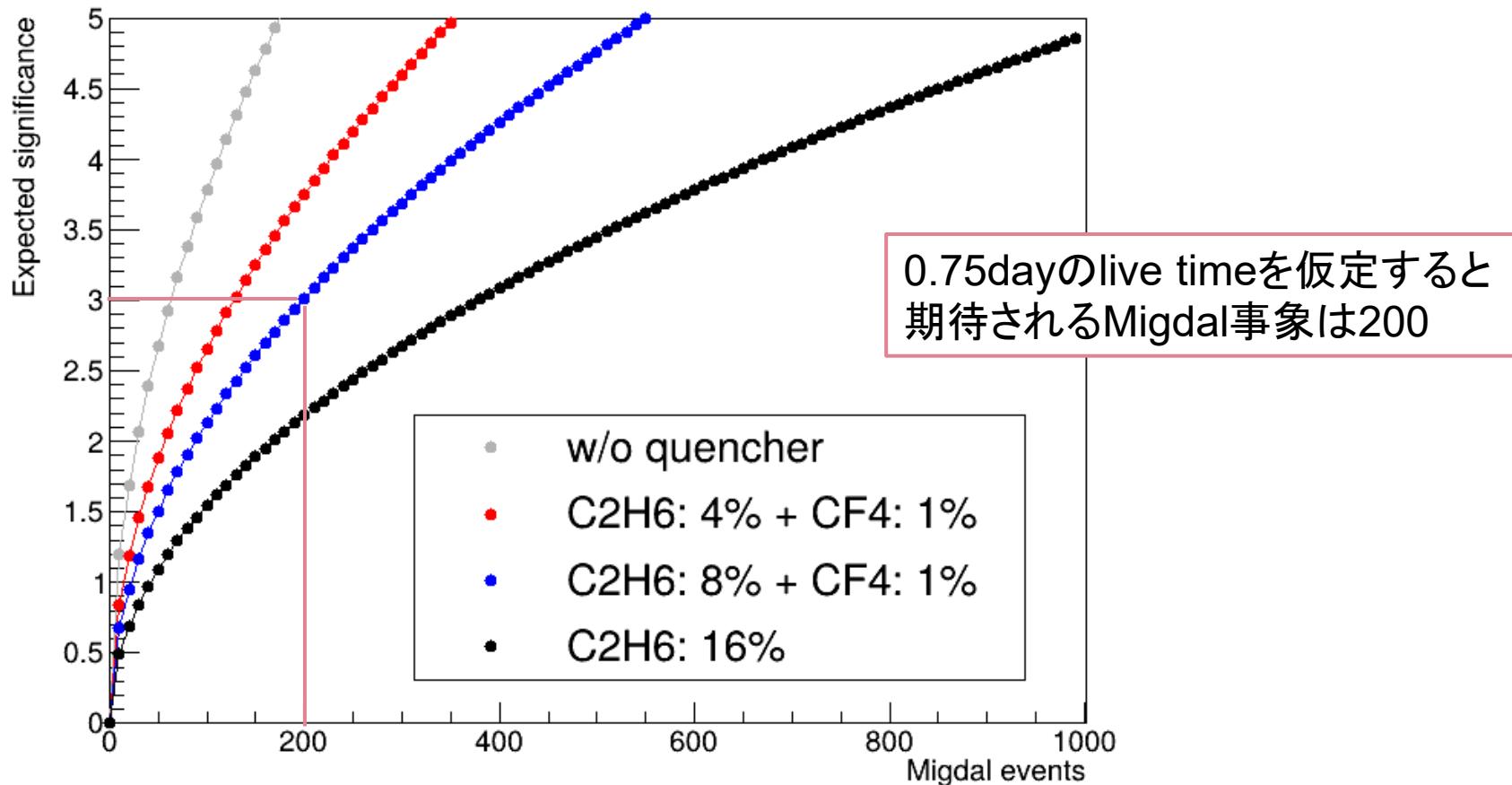
- ・改良した検出器を用いた予備実験を11月上旬に実施する
- ・2026年には本格的なミグダル効果探索を開始する



MIRACLE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3 σ の有意性に到達する見込み

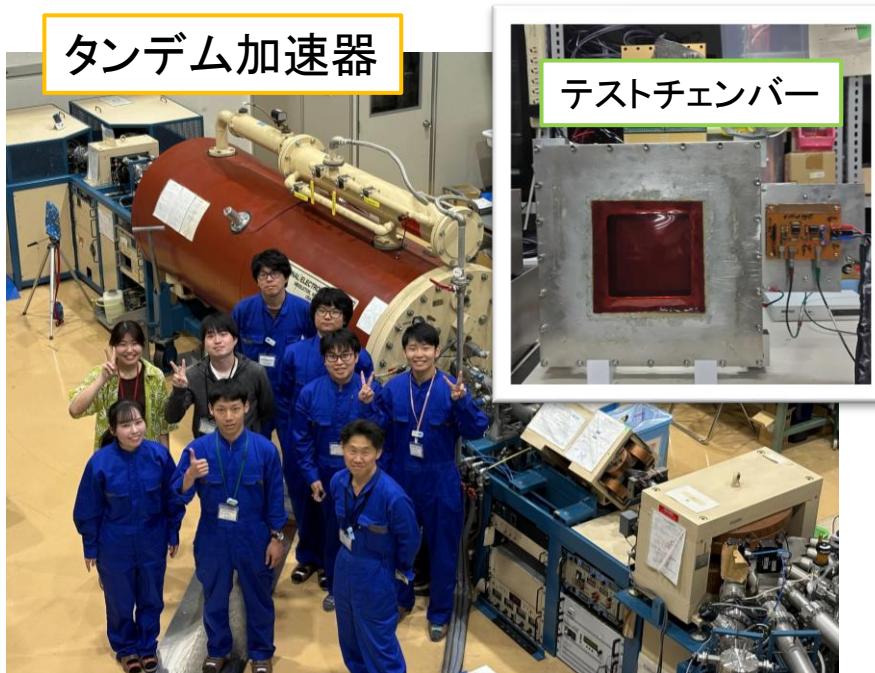


ArガスTPCの放電耐性試験

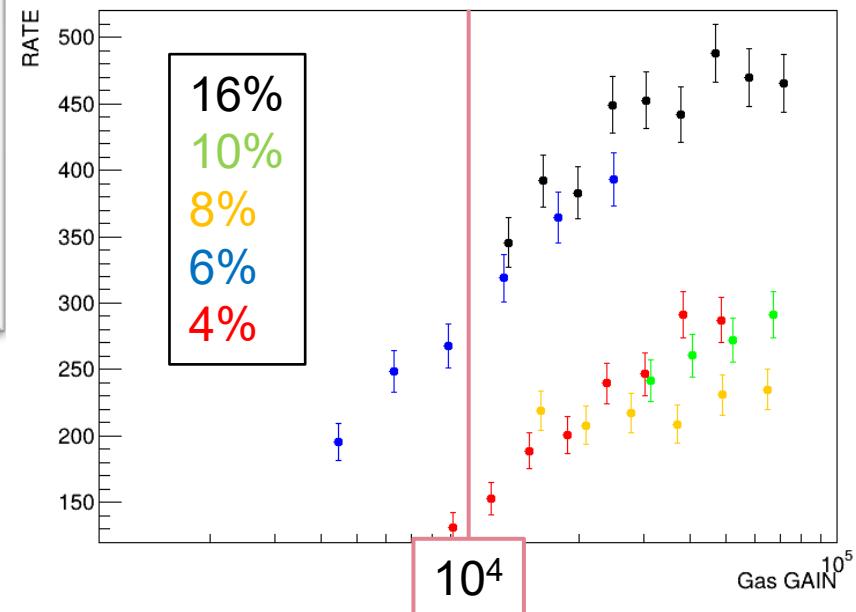


中性子ビーム照射試験@神戸大学タンデム加速器

- KMArTと同様の電子増幅機構を持つテストチャンバーを使用
 - 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

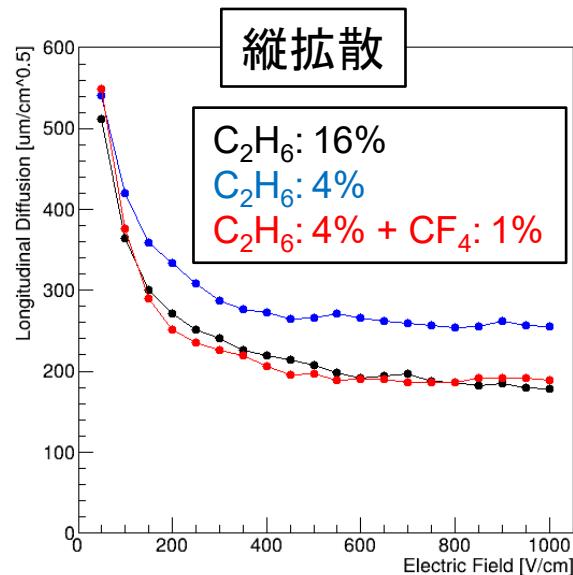


混合ガスの検討

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

◎ C_2H_6 の割合を減らすとガスTPCの性能が悪化
→少量の CF_4 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 ($\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$)	縦拡散係数 ($\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$)
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)