

講演番号: 17aEK203-11



MIRACLUE実験における ミグダル効果観測のための ArガスTPCの改良



神戸大理 鈴木 啓司

神戸大理, 東北大理^A, 東北大RCNS^B

身内 賢太郎, 東野 聡, 西田 汐里, 生井 凌太
遠山 和佳子, 柳 凜, 中村 輝石^A, 中野 愛弓^A, 細川 佳志^B

2025/9/17

日本物理学会 第80回年次大会@広島大学

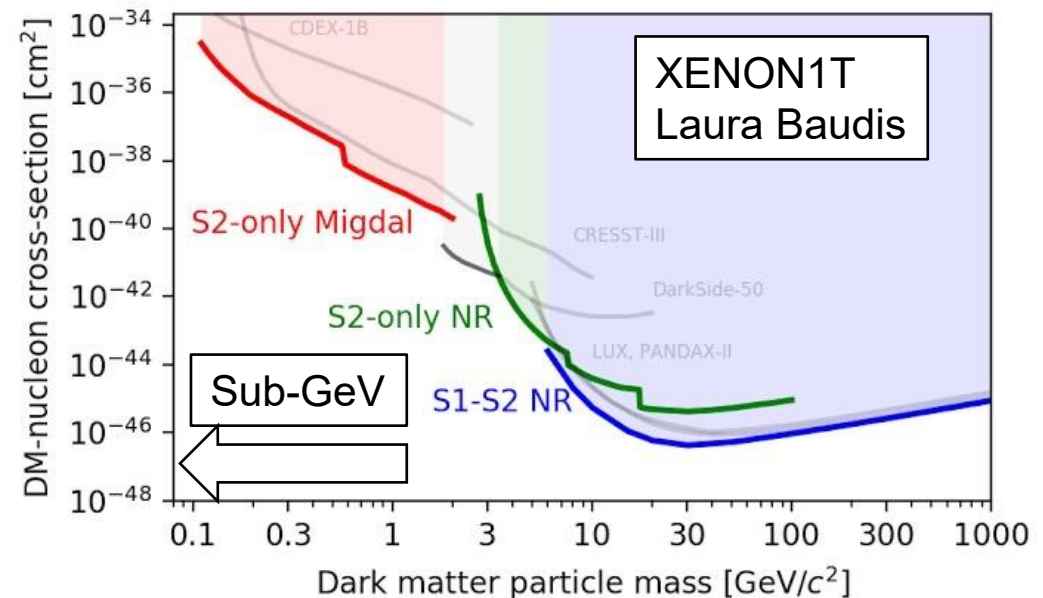
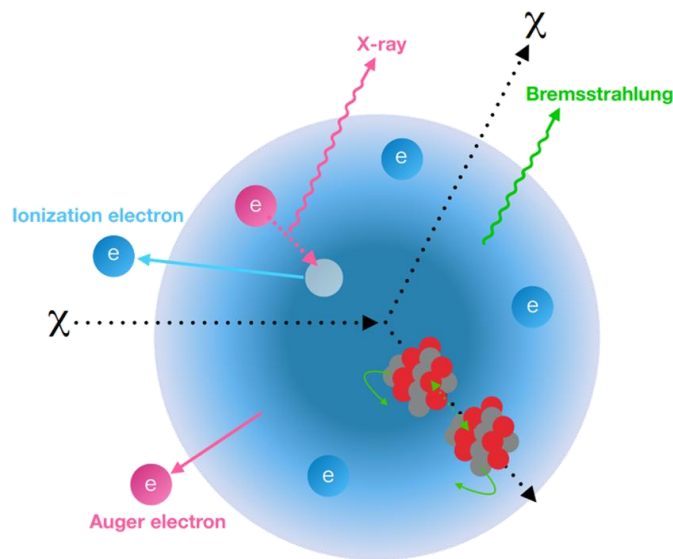
ミグダル効果とは

- 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...

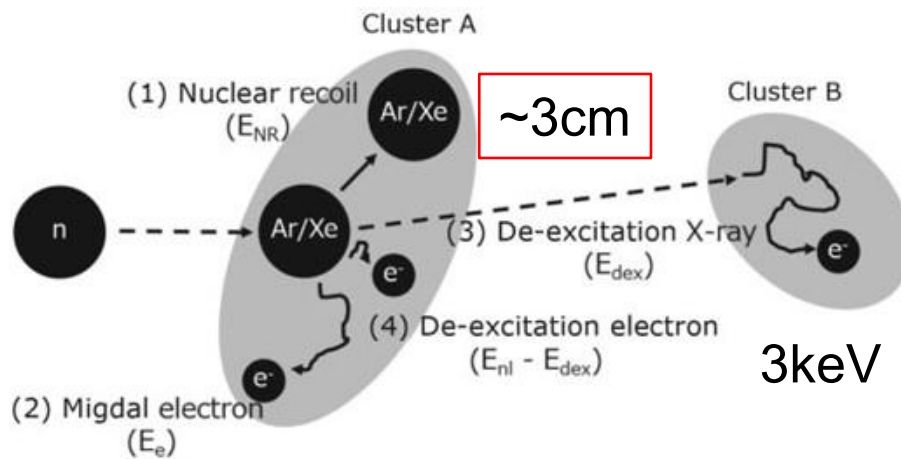
- 低エネルギー閾値化→軽い暗黒物質に対する感度UP

◎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！

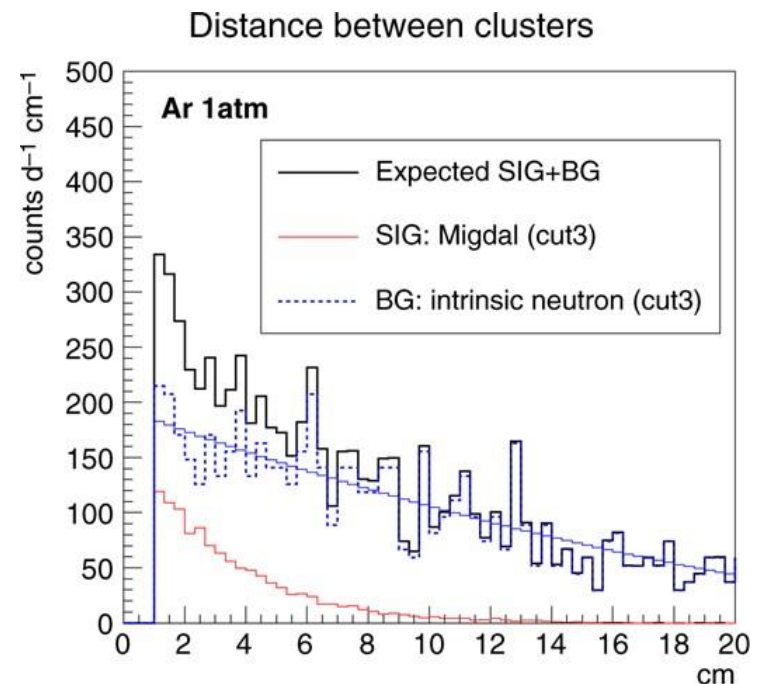


中性子ビーム照射実験でミグダル効果の初観測を目指す

- 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

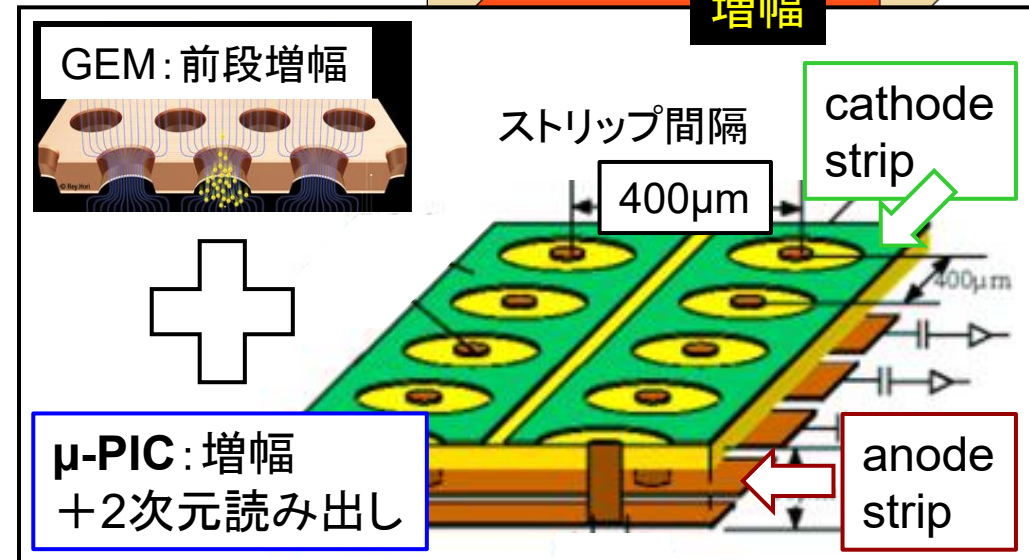
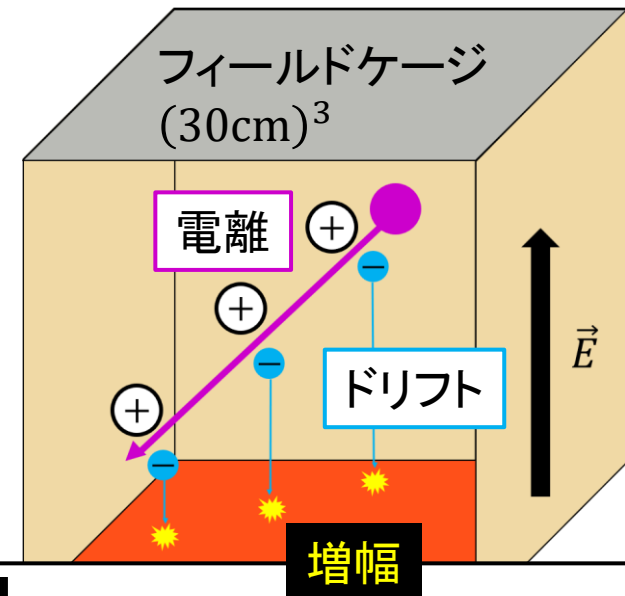


ArガスTPC(検出器概要)

KMArT (Kobe MIRACLUE Argon TPC)
...NEWAGEの技術に応用したガス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(次スライド)

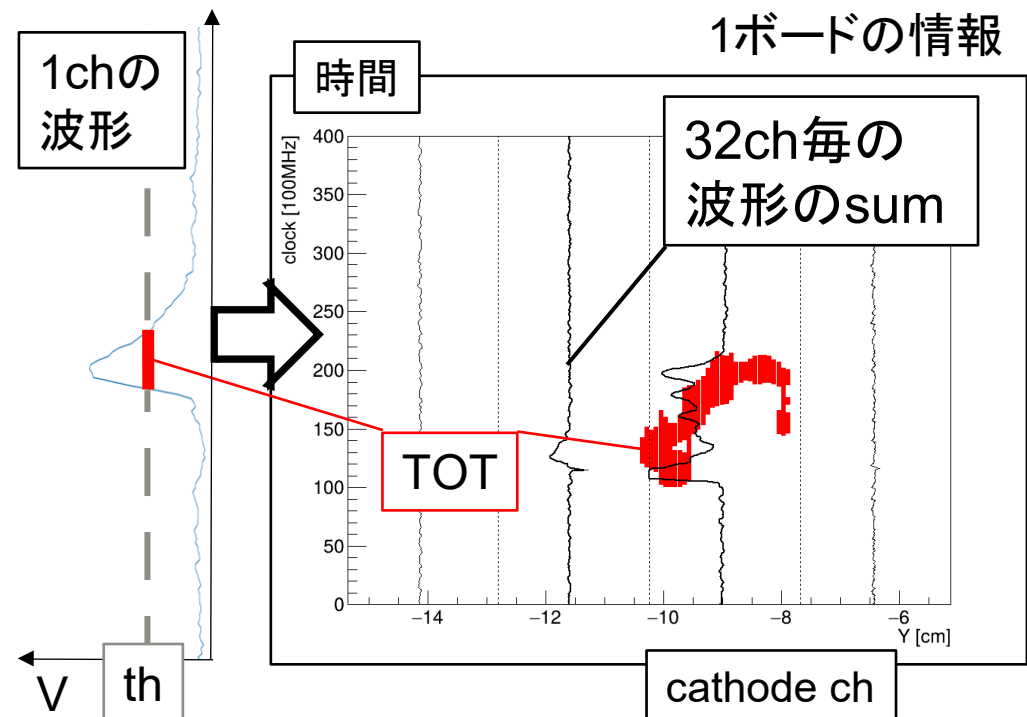
※東北大のXeガスTPC...講演番号:17aEK203-8



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

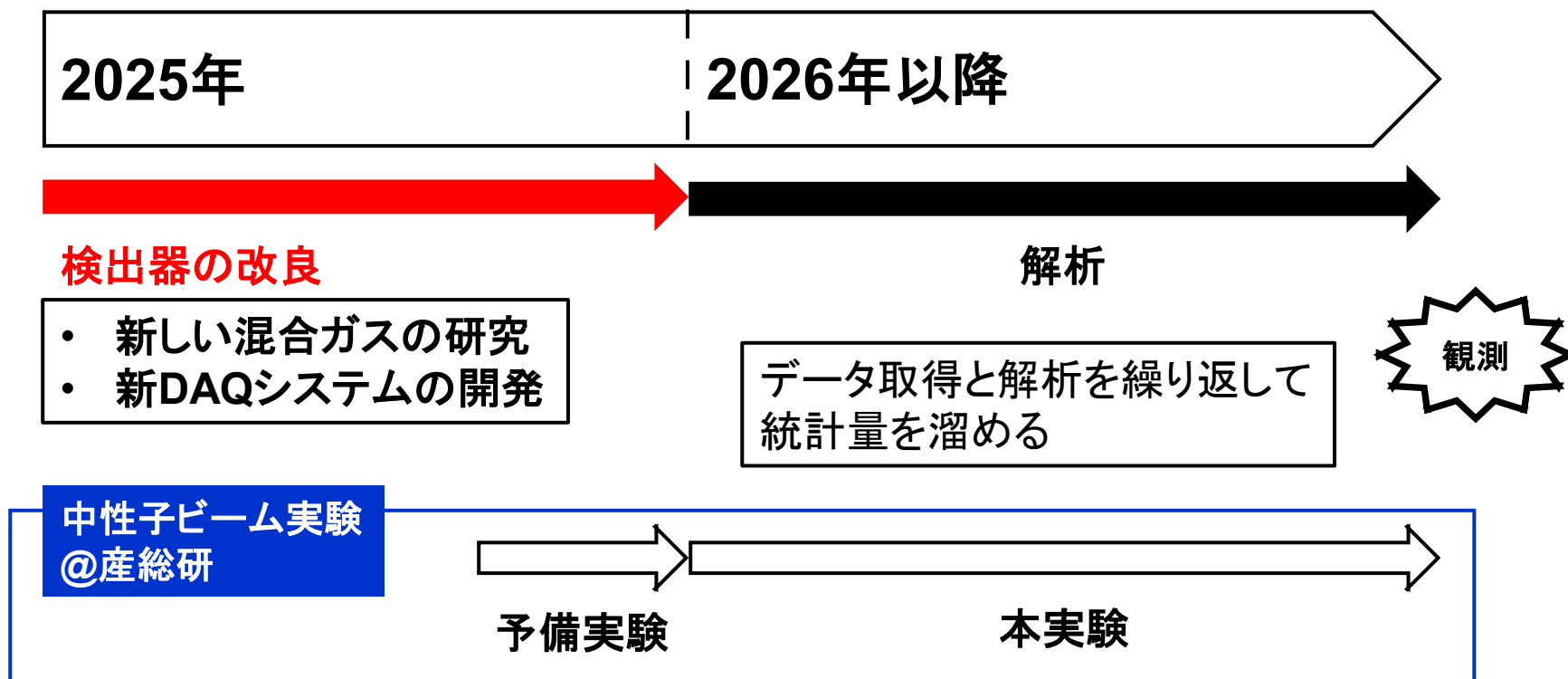
- 10cm ($800\mu\text{m} \times 128\text{ch}$) ごとにボードを割り当て
- chごとのTOT・TOFを用いて**3次元飛跡**を取得
 - どのchに(2次元) + いつ(1次元)
- FADCの積分値を用いて**エネルギー**を算出

※現状は2stripずつ束ねて
800 μm 間隔で読み出し
読み出しの微細化に向けた
新しいDAQシステムを開発中
(講演番号: 16pEK215-11)



検出感度を向上すべく、**検出器の改良**に取り組んでいる

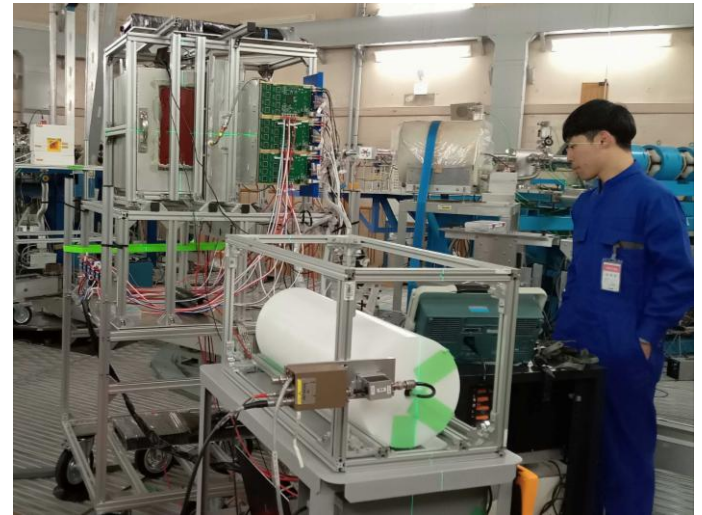
- 改良した検出器を用いた予備実験を11月上旬に実施する
- 2026年には本格的なミグダル効果探索を開始する



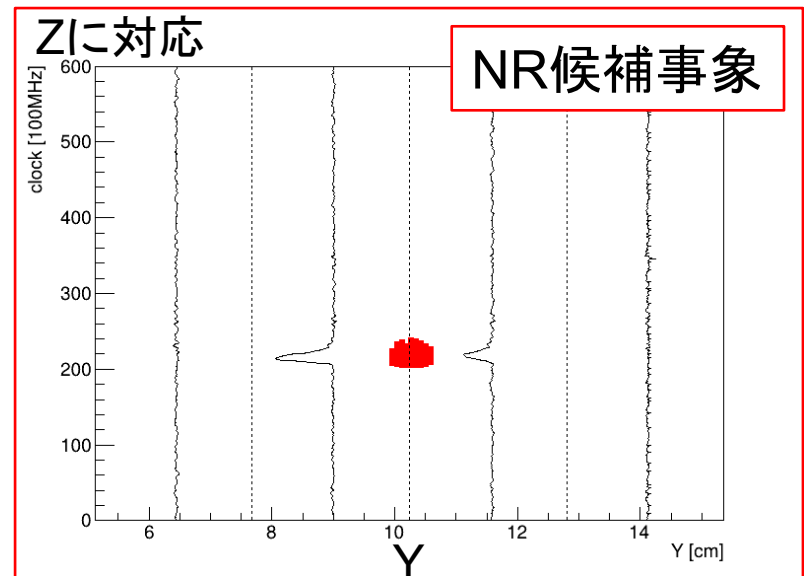
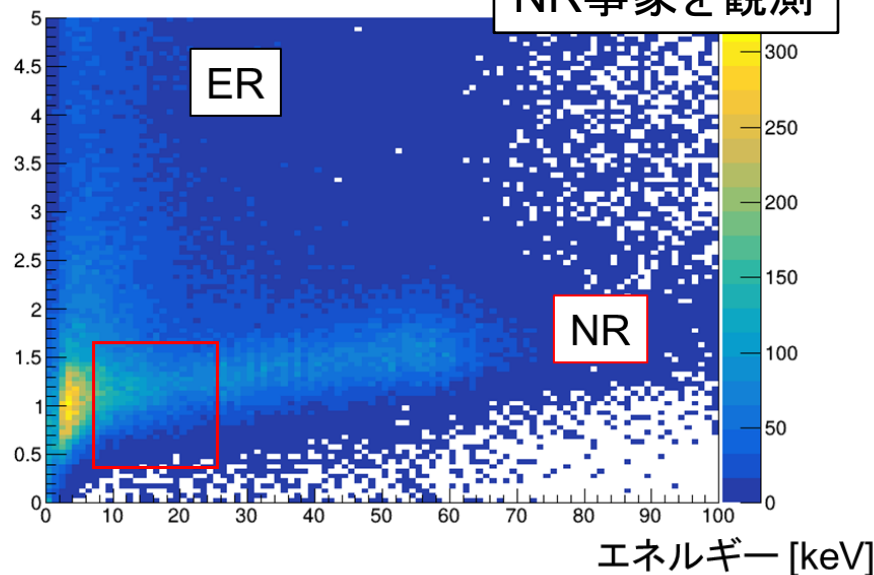
前回の中性子ビーム実験

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(0.84atm) + C₂H₆(0.16atm)
 - 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改良のモチベーション

Ar(0.84atm) + C₂H₆(0.16atm)における事象の計数率の見積もり

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)	$2.9 \times 10^2 \text{ day}^{-1}$	

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

従来の混合ガスの問題点

- ・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
- ・低エネルギーのNR事象は短飛跡で、反跳原子核の識別が難しい
→ミグダル効果探索における背景事象の元になりうる

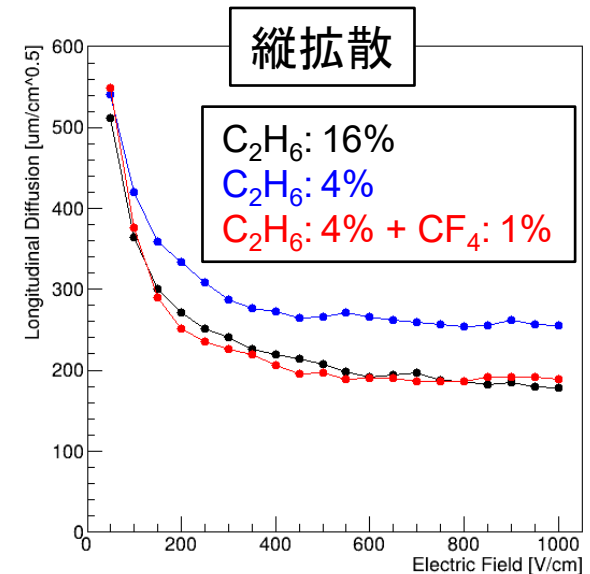
◎ガスゲイン・放電耐性を維持しつつ、クエンチャーを減らしたい！

使用する混合ガスの検討

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

◎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 ($\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$)	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

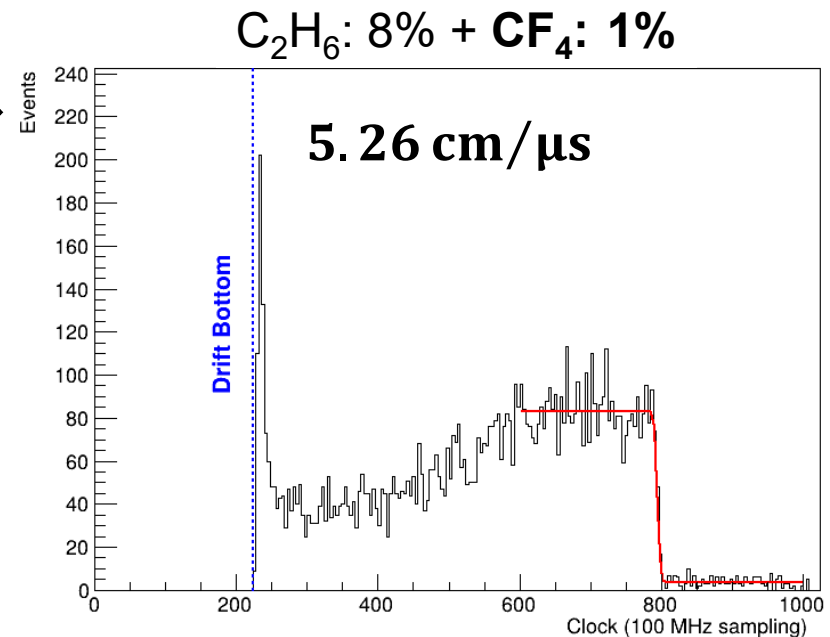
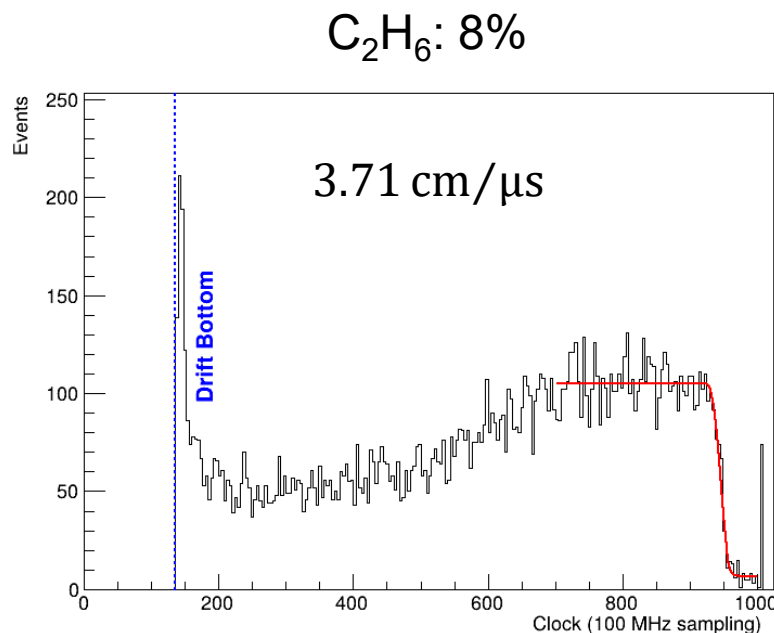
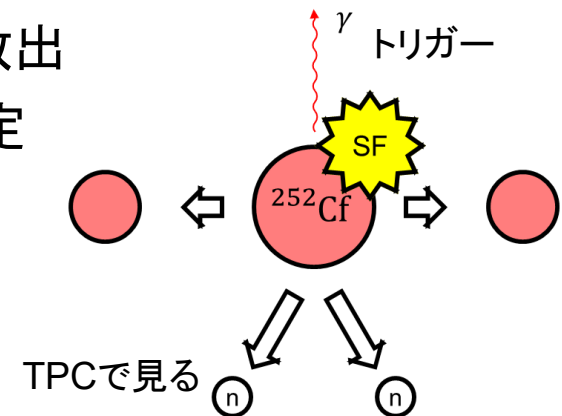
各混合ガスにおけるドリフト速度と拡散(Magboltz, ドリフト電場は150V/cm)

基礎測定(ドリフト速度)

^{252}Cf 線源の自発核分裂(SF)...複数の中性子・ γ 線を放出

- トリガーとTPCの信号の時間差(=ドリフト時間)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

◎ CF_4 を加えたときのドリフト速度の上昇が確認できた

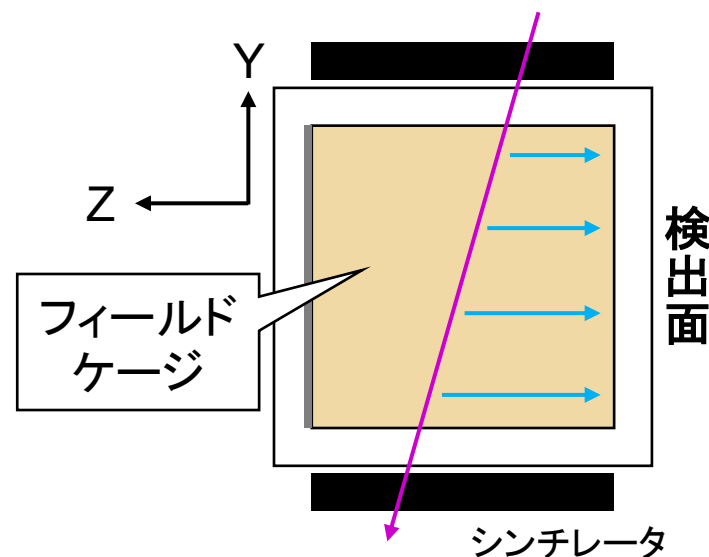
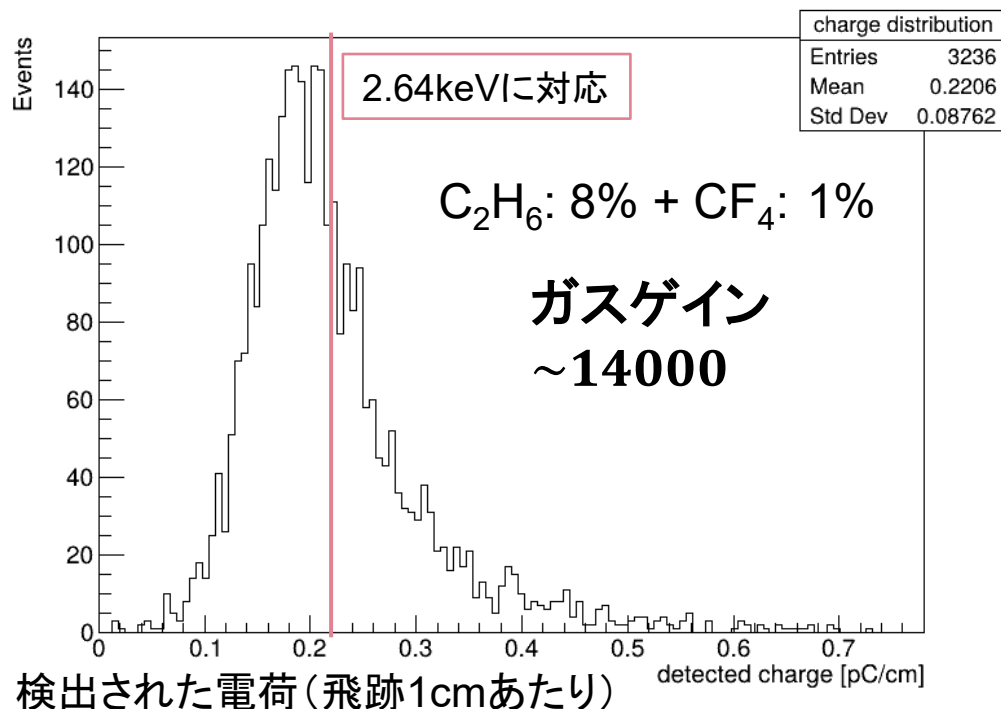


基礎測定(エネルギー較正)

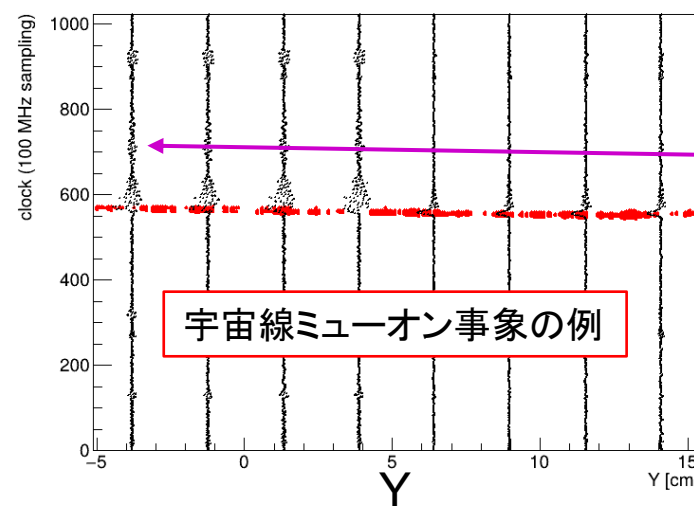
宇宙線ミュオンを用いたエネルギー較正

- 検出領域を挟んだシンチレータの
コインシデンスをトリガーにしてデータ取得

◎ Migdal効果探索に必要なガスゲイン
($>10^4$)が得られることを確認できた



Zに対応



展望

- 現在開発中の新DAQシステムとの統合試験
- ガス混合比の最適化→検出効率の評価(NR・3keV ER)

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
- 現在は**検出器の改良**に取り組んでいる
 - 高性能化に向けた**新たな混合ガス**での試験的運用を開始
 - 基礎測定(ドリフト速度・エネルギー較正)を進めている
 - 読み出し微細化に向けた新DAQシステムを開発中

◎**万全の準備をして11月上旬のビーム実験に臨む！**

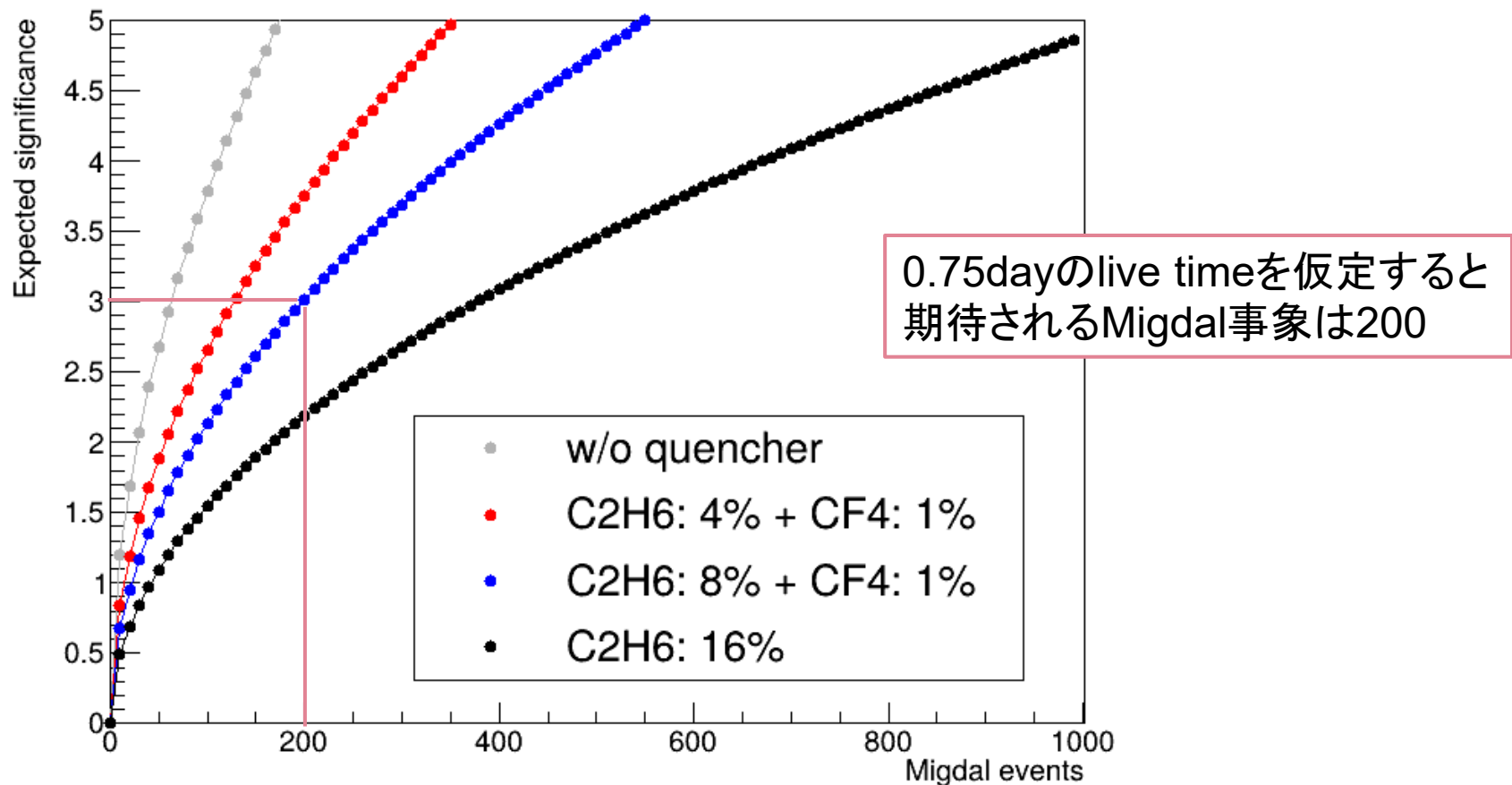
BACK UP

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

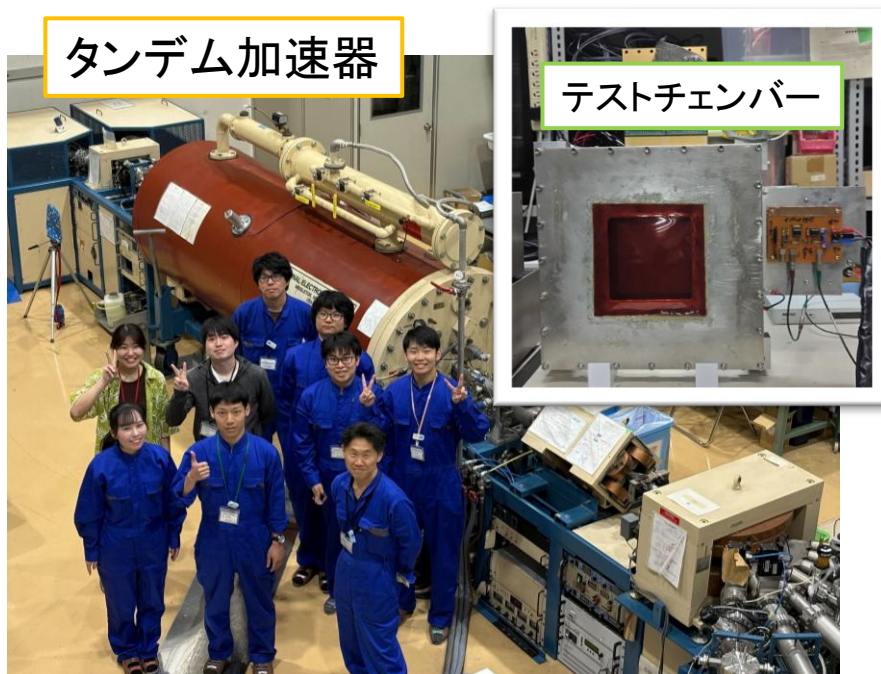


ArガスTPCの放電耐性試験

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

