

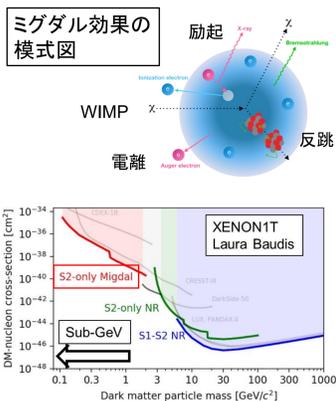
1. 研究のモチベーション

● 暗黒物質直接探索

- WIMPIによる標的原子核の反跳(NR)事象を観測する
- 軽い暗黒物質は反跳エネルギーが小さく探索が難しい

● ミグダル効果

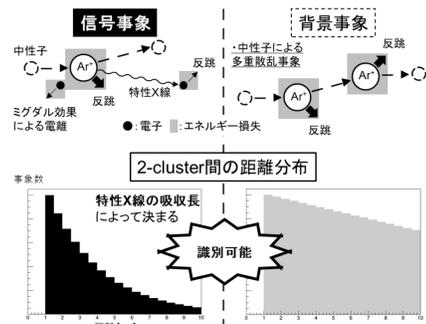
- 原子核が突然動いたときに追加の電離・励起が生じる
 - 電子や特性X線のエネルギーを検出できる
 - 軽い暗黒物質に対する感度が向上する
- ◎ NR事象に伴うミグダル効果の観測事例はない
- 実験的に検証して暗黒物質探索に応用したい!



● どのようにして探索する?

● 2-cluster手法を用いた探索

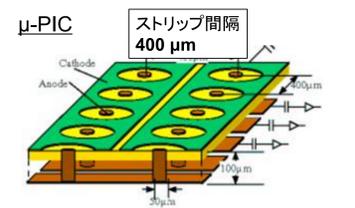
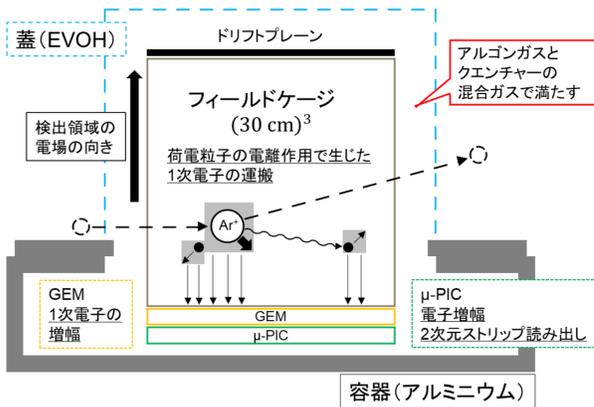
- 2021年に提案された(PTEP 2021, 013C01)
- ミグダル効果によるK殻電離→特性X線放出のプロセスに着目する
- 位置有感型ガス検出器を用いることで特性X線による電子反跳の飛跡を分離して検出
- 強力な背景事象除去能力を持つ
- 2-cluster間の距離分布から背景事象と識別可能



◎ 中性子ビームを照射してミグダル効果の初観測を目指す「MIRACLUE実験」(東北大と共同)

2. MIRACLUE実験

● Arガス検出器(神戸大)

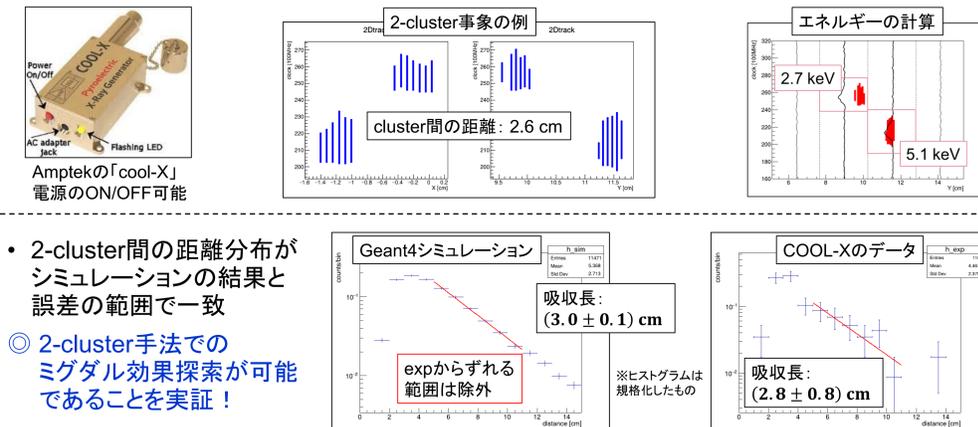


◎ 2次元読み出し+時間情報で3次元の位置を再構成

※ 高圧Xeガス検出器(東北大) 詳細はP35

● 2-cluster手法の原理検証

- エネルギー較正のために8 keVのX線源「COOL-X」を用いていた
- 光電効果(5 keV) + Arの特性X線(3 keV)で2-cluster手法の原理検証をする

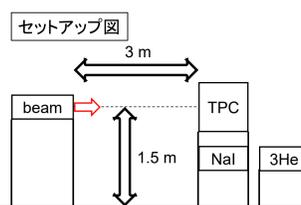
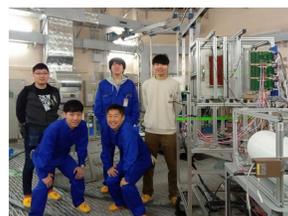


- 2-cluster間の距離分布がシミュレーションの結果と誤差の範囲で一致
- ◎ 2-cluster手法でのミグダル効果探索が可能であることを実証!

◆ 中性子ビーム実験

● 実験概要

- 2024年12月に実施(@産業技術総合研究所)
- ビーム→565 keVの単色中性子
- 封入ガス→Ar(0.84 atm) + C₂H₆(0.16 atm)
- 有感領域→20 cm × 30 cm × 30 cm
- 神戸大で開発した検出器を産総研へ運搬



● イベントレートの見積もり

- Migdal効果探索に用いるデータセット
- 総トリガー数: 3.5 × 10⁶ events
- 測定時間(live time): 1.4 × 10⁴ sec
- ビームフラックス: ~10² cm⁻²s⁻¹

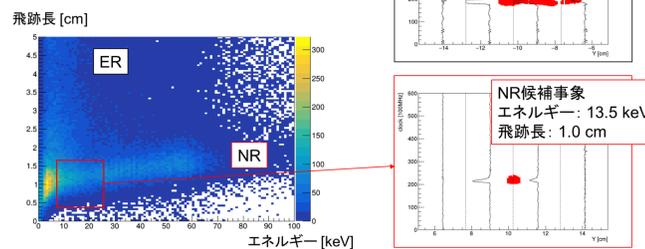
Target nuclei	H	Ar
Number of nuclei	7.0 × 10 ²³	6.1 × 10 ²³
Cross-section for 565keV neutron	5.75 barn	0.65 barn
Migdal branching	7.2 × 10 ⁻⁵	0.14
Fluorescence yield (K shell)		0.14
Expected event rate (NR)	2.7 × 10 ² s ⁻¹	2.7 × 10 ¹ s ⁻¹
Expected events (NR)	3.8 × 10 ⁶	3.8 × 10 ⁵
Expected event rate (Migdal)		34 day ⁻¹
Expected events (Migdal)		5.4

H原子核の反跳事象のレートが高い

→クエンチャーを削減する必要がある

● 取得したデータの解析

- 電子反跳(ER)事象はエネルギー・飛跡長でNR事象と識別可能

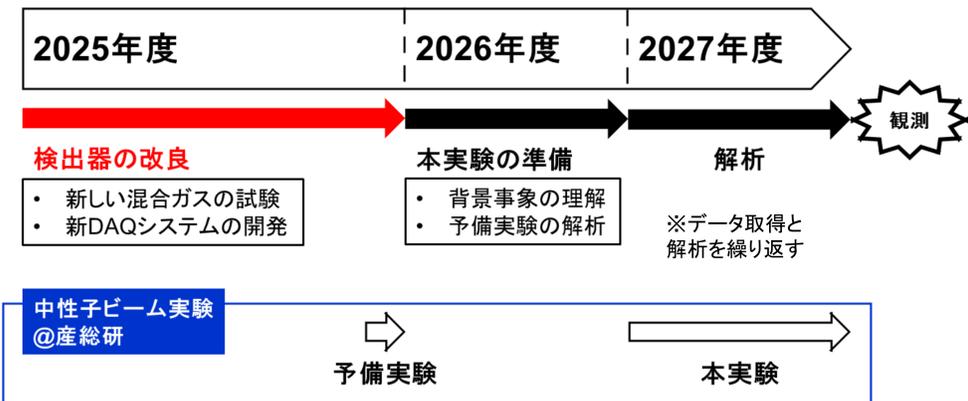


低エネルギーのNR事象においてどの原子核が反跳されたかを識別するのは難しい

◎ミグダル効果の観測には検出器の改良が必須!

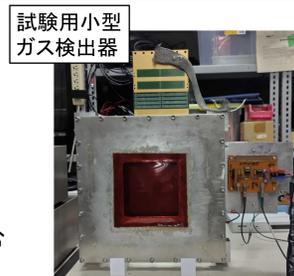
3. ミグダル効果観測に向けた将来計画

● MIRACLUE実験のロードマップ



● 新しい混合ガスの試験(詳細はP33)

- 小型のガス検出器を用いて混合ガスの放電耐性を評価した
- クエンチャーを減らしても十分な放電耐性を持つことを確認
- 本実験用のガス検出器に新たな混合ガスを導入して試験する



● 新DAQシステムの開発

- 検出器の改良として読み出し微細化・有感領域拡大に取り組む
- 読み出しの間隔: 800 μm → 400 μm 有感領域: 1.5倍
- 制御する読み出し基板の枚数は現行のシステムの2倍以上に
- 分散・並列処理に基づく新たなDAQシステムを設計・開発中

● 予備実験による背景事象の理解

- 予備実験のデータと背景事象のシミュレーションの結果を比較
- ミグダル効果の分岐比の上限値を得る

● 本実験によるミグダル効果の観測

- 統計量を増やして理論で予測される分岐比を検証
- ミグダル効果発見へ



4. まとめ

● ミグダル効果の初観測を目指す「MIRACLUE実験」

- 位置有感型ガス検出器の強みを活かした2-cluster手法により、背景事象の大幅な削減が可能
- 2024年12月に産総研にて中性子ビーム実験を実施
- 検出器の改良が必要不可欠であることが明らかになった

● ミグダル効果の初観測を達成すべくロードマップを作成

- 今年度は検出器の改良に重点を置く
- 現在調査中の混合ガスを試験的に導入→本格的な運用へ
- 並行して検出器の改良に伴う新DAQシステムを設計・開発中
- 来年度以降はアップデートした検出器+統計量で勝負

◎2年でミグダル効果の初観測を達成する!