

講演番号: 25pV2-13

中性子ビームを用いた ミグダル効果探索実験における背景事象の評価

日本物理学会 2026年春季大会
2026/03/25

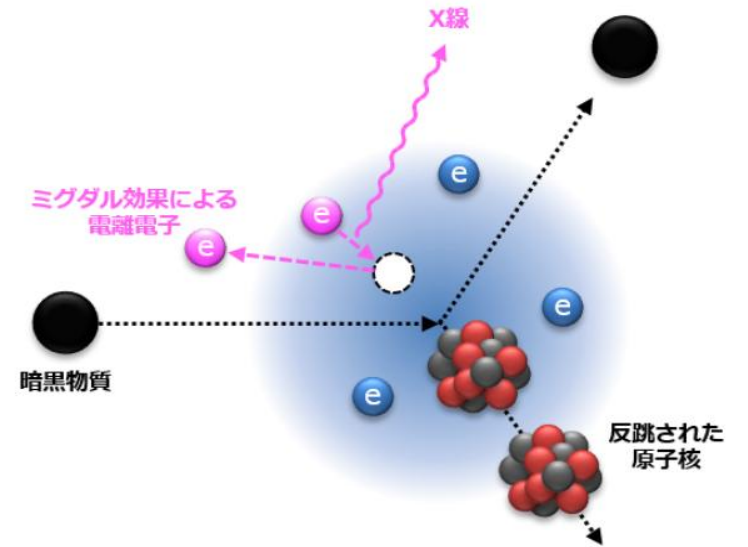
神戸大学 西田汐里

身内賢太郎, 東野聡, 鈴木啓司, 生井凌太, 遠山和佳子
中村輝石^A, 中野愛弓^A, 細川佳志^B

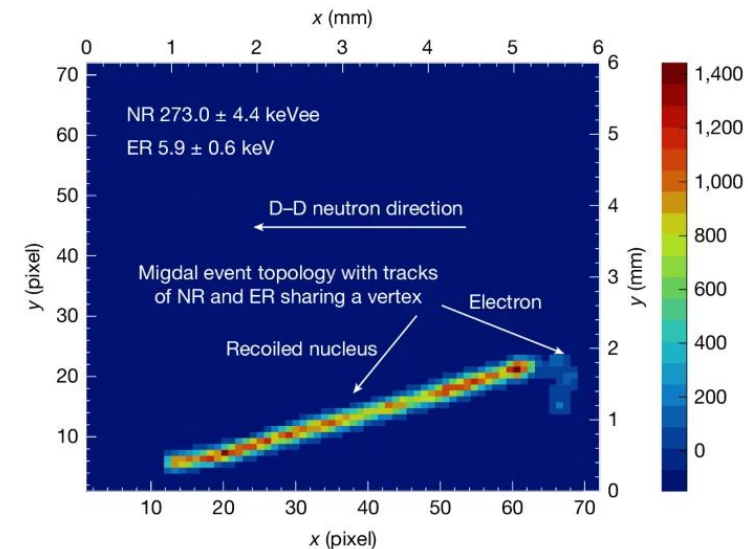
東北大理^A, 東北大RCNS^B

Migdal効果

- 原子核が急激に動く際、低確率で束縛電子が電離・励起する現象
- 原子核反跳に伴うMigdal効果
 - 低質量DM(WIMP)に対する感度向上
(原子核反跳 + Migdal効果に起因する電子反跳)
 - 2026年1月に中国グループが初観測を報告
- WIMP直接探索への応用に向けてArガスでの観測を目指す
 - **MIRACLUE実験**



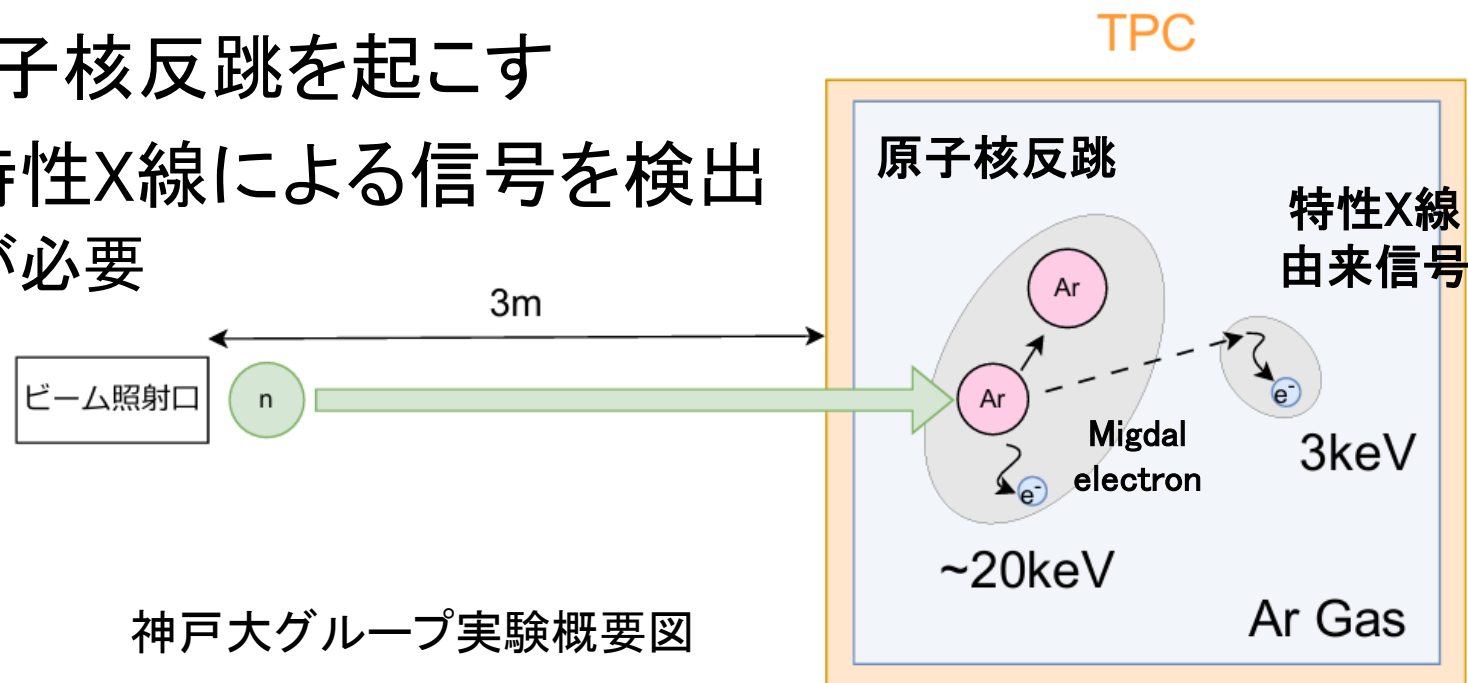
Migdal効果 模式図



中国グループが報告したMigdal Event

MIRACLUE実験

- 検出器 : ガスTPC
 - 東北大 : 高圧Xeガス
 - 神戸大 : Arガス
 - 3次元の飛跡取得が可能
- 中性子ビームを照射し原子核反跳を起こす
- 原子核反跳とAr(Xe)の特性X線による信号を検出
 - 2クラスターの座標取得が必要



神戸大グループ実験概要図

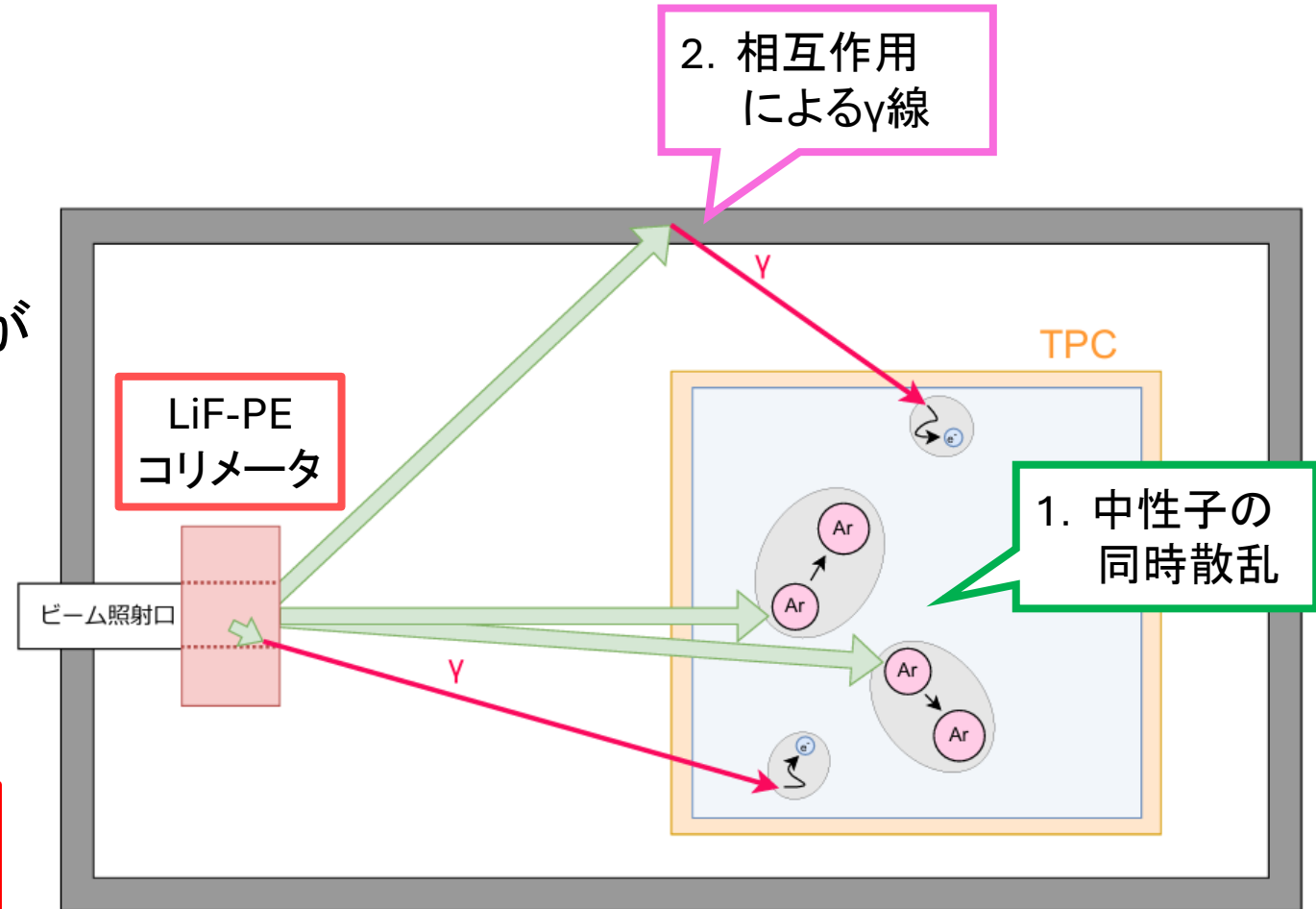
背景事象

- 支配的な背景事象

- 2クラスターを作ってしまうものが特に考慮すべき背景事象

1. 複数の中性子の同時散乱
2. 壁、床を含む周辺物質との相互作用(中性子捕獲など)による γ 線

本研究の目的:
 γ 線背景事象について理解し、
削減を目指す



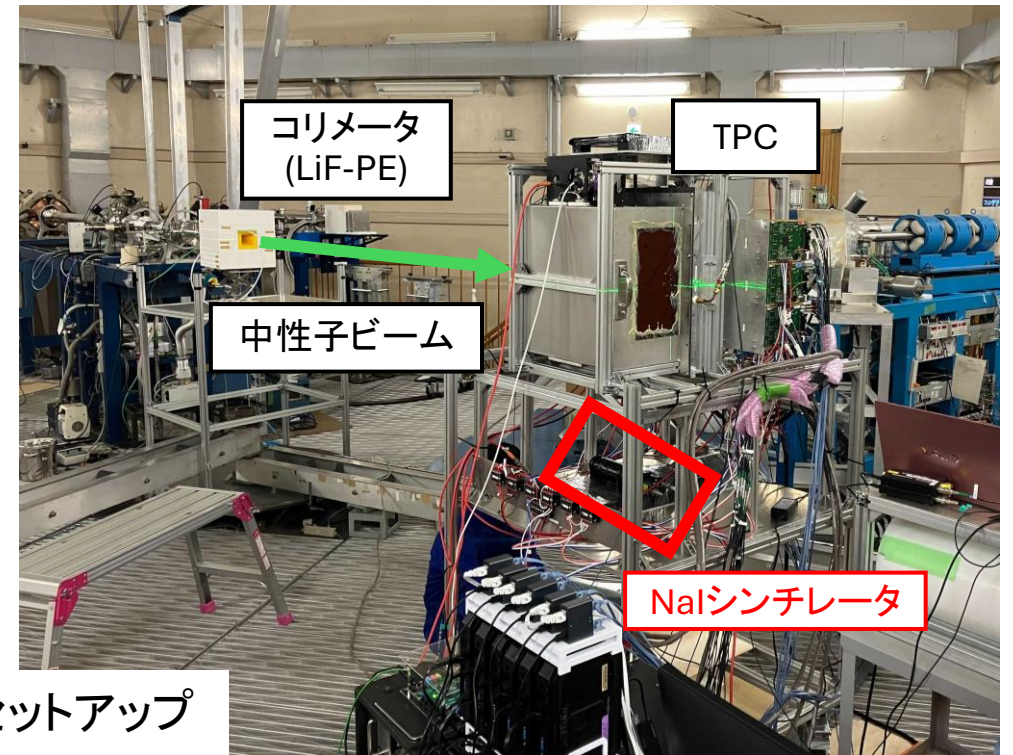
中性子ビーム実験

• 実験概要

- 2025年11月 産業技術総合研究所にて実施
- 565keV単色中性子ビーム
 - 陽子をLi標的に衝突させることで生成
- コリメータとしてLiF-PEを使用
- TPC近傍にNaIシンチレータを設置

• NaIでの取得データ

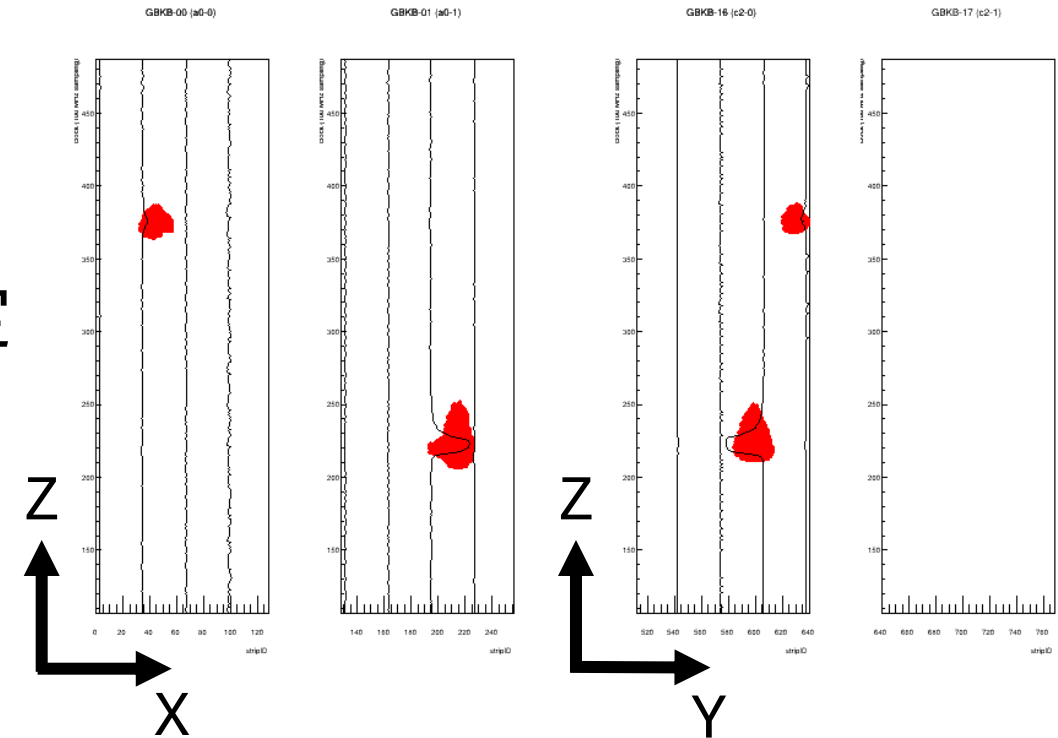
- 実験中の γ 線エネルギースペクトル
- TPCに入射する γ 線背景事象の評価



中性子ビーム実験セットアップ

中性子ビーム実験

- 2クラスター事象の取得に成功
- Arガスにおける分岐比の上限値を設定
 - $R_{\text{upp}} = 1.4 \times 10^{-2}$
 - 理論値: $R = 7.2 \times 10^{-5}$
- Migdal効果事象数を大幅に超える背景事象の存在を示唆



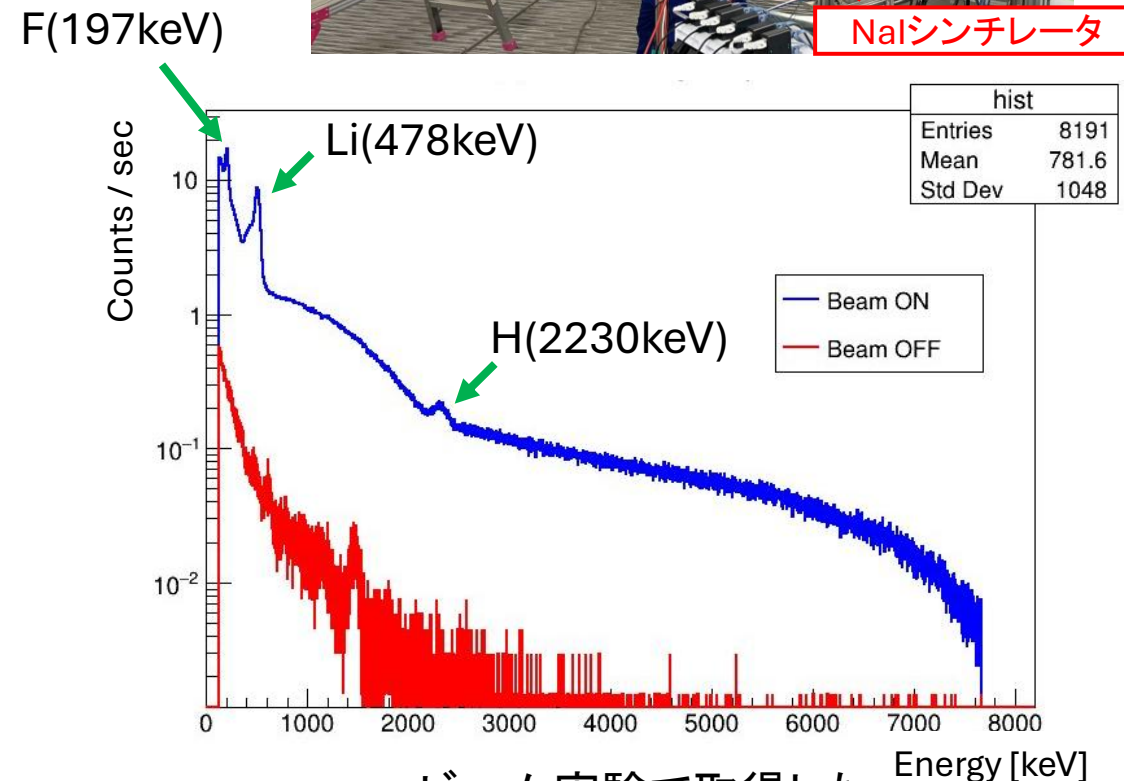
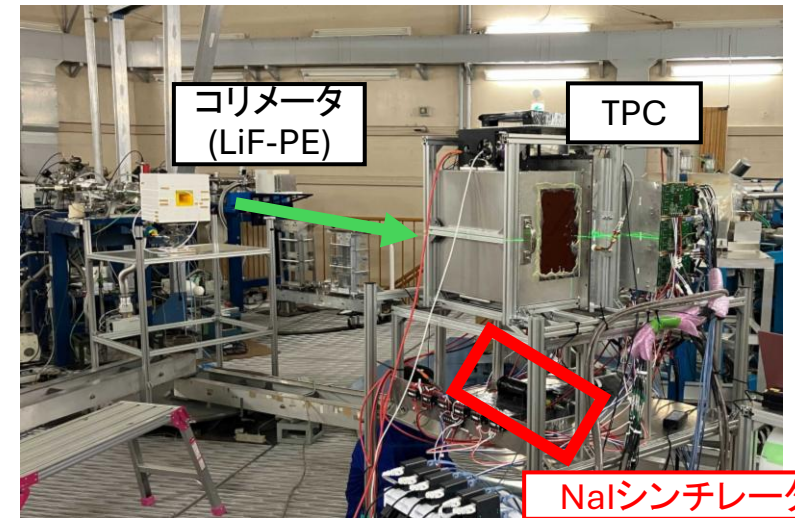
2クラスター事象の例

ビーム照射時 エネルギースペクトル

• ビームON/OFF比較

- ビーム照射時に計数が増加
- ビーム照射時特有のピークを確認
 - LiF-PEコリメータ、Liターゲット由来
 - Fと中性子の非弾性散乱(197keV)
 - Liの中性子捕獲(478keV)
 - Hの中性子捕獲(2230keV)

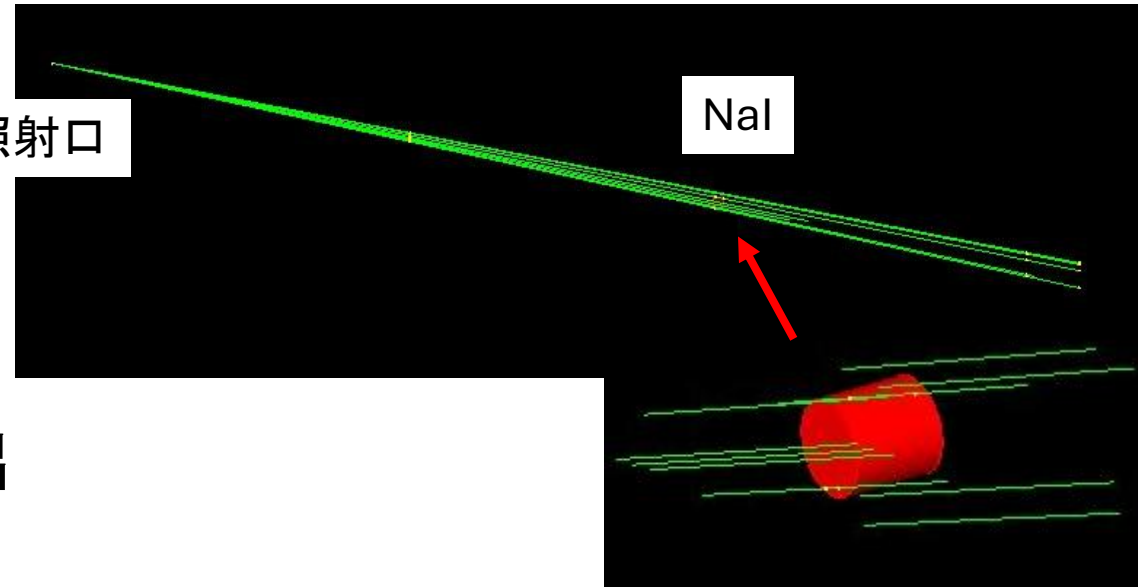
ピークとして見える3成分について
理解する



ビーム実験で取得した
 γ 線エネルギースペクトル

γ 線Fluxの見積もり

ビーム照射口

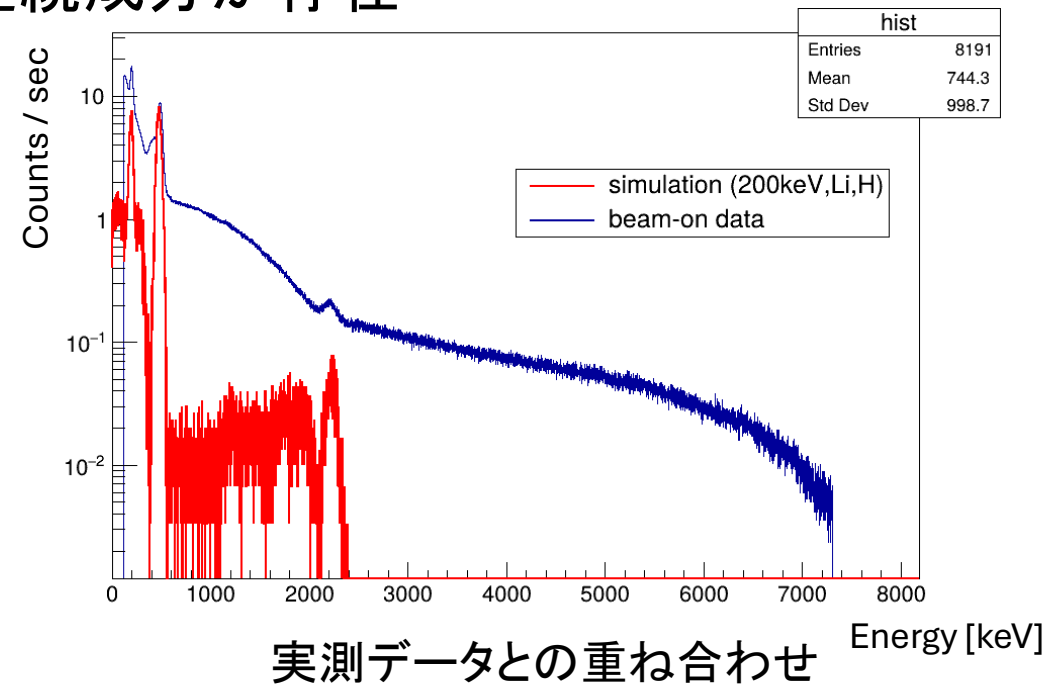
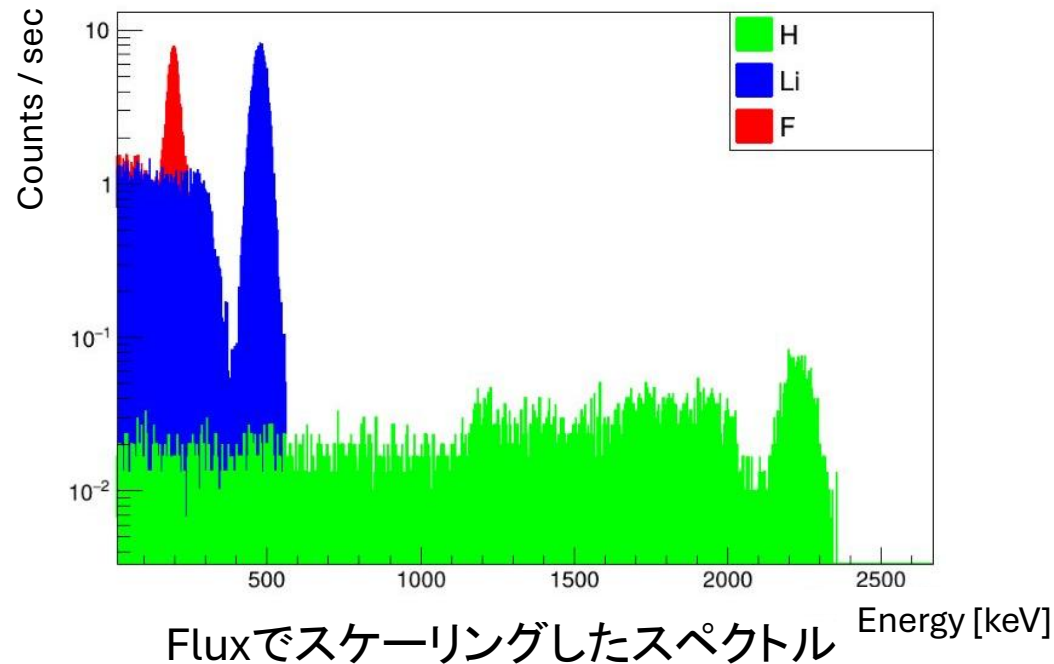


- F(197keV), Li(478keV), H(2230keV)の3成分についてピーク事象数を抽出
- Geant4を用いてFluxを見積もり
 - NaIシンチレータのみを配置し、実際のビーム照射口位置から既知エネルギーの γ 線を照射
 - シミュレーションで得たピーク事象数と実測データのピーク事象数の比を用いて実環境でのfluxを算出

成分	F(197keV)	Li(478keV)	H(2230keV)
γ 線flux [$/cm^2/s$]	12.7 ± 0.1	44.6 ± 0.6	3.69 ± 0.13

実測データとの比較

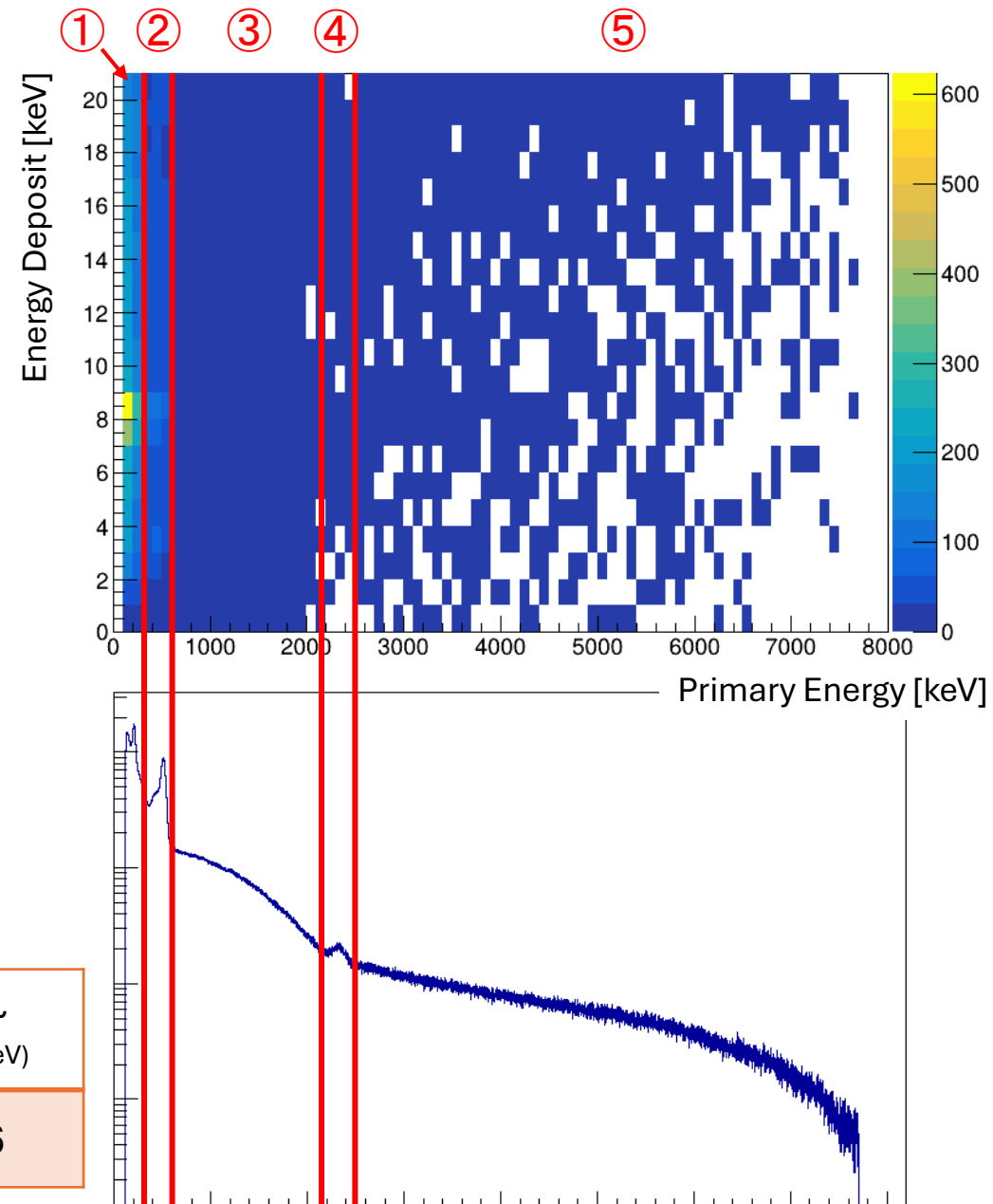
- 3成分について、fluxでスケールリング
- 実測データと比較
 - 2230keV以上の領域とピーク間に
検証した3成分では説明できない連続成分が存在



TPCへの影響

- 最も削減すべきエネルギー帯の特定
- NaIで取得した実測スペクトルを確率分布として
Geant4でTPCへ γ 線を照射
- ROI内事象数を初期エネルギー帯ごとに比較
 - ROI: TPC内エネルギー損失20keV以下
- 低エネルギー側の寄与が大きい

領域	①F (~300keV)	②Li (300~600keV)	③Li~H (600~2150keV)	④H (2150~2500keV)	⑤H~ (2500~keV)
割合 [%]	51.6	20.2	16.4	1.2	10.6



展望とまとめ

• 展望

- 低エネルギー γ 線の遮蔽方法の検討
- 連続成分についての理解

• まとめ

- Migdal効果探索実験での背景事象を評価するため、中性子ビーム実験においてNaIシンチレータによる γ 線測定を実施
- 実測スペクトルとシミュレーションにより、主要な γ 線成分のFluxを算出
- γ 線によるTPCへの影響評価
 - 低エネルギー側の寄与が支配的

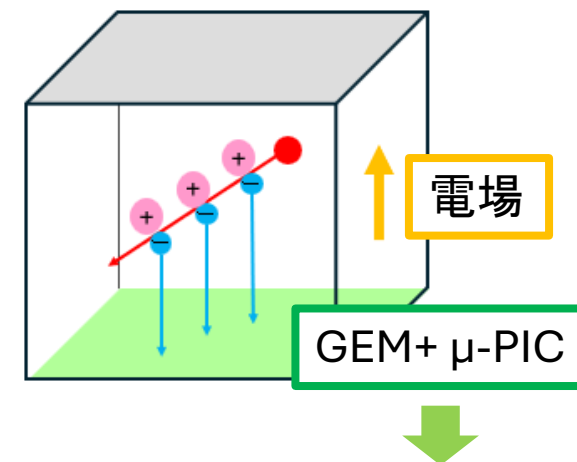
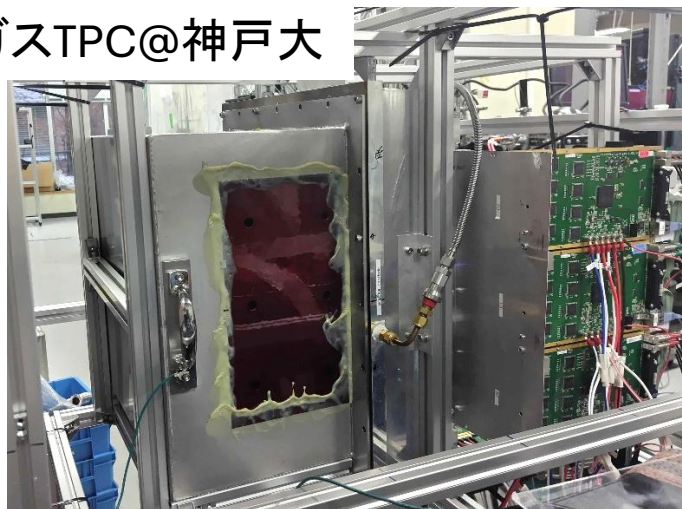
Backup

Migdal効果

- 想定される検出数

Target gas	Ar (1 atm)	Xe (8 atm)
Number of nuclei	7.26×10^{23}	5.81×10^{24}
Cross-section for 565 keV neutron	0.65 barn	6.0 barn
Migdal branching	7.2×10^{-5}	4.6×10^{-6}
Fluorescence yield (K-shell)	0.14	0.89
Scaling factor $(q_e^{\max}/511 \text{ eV})^2$	2.92	0.280
Event rate	603 day^{-1}	975 day^{-1}

ArガスTPC

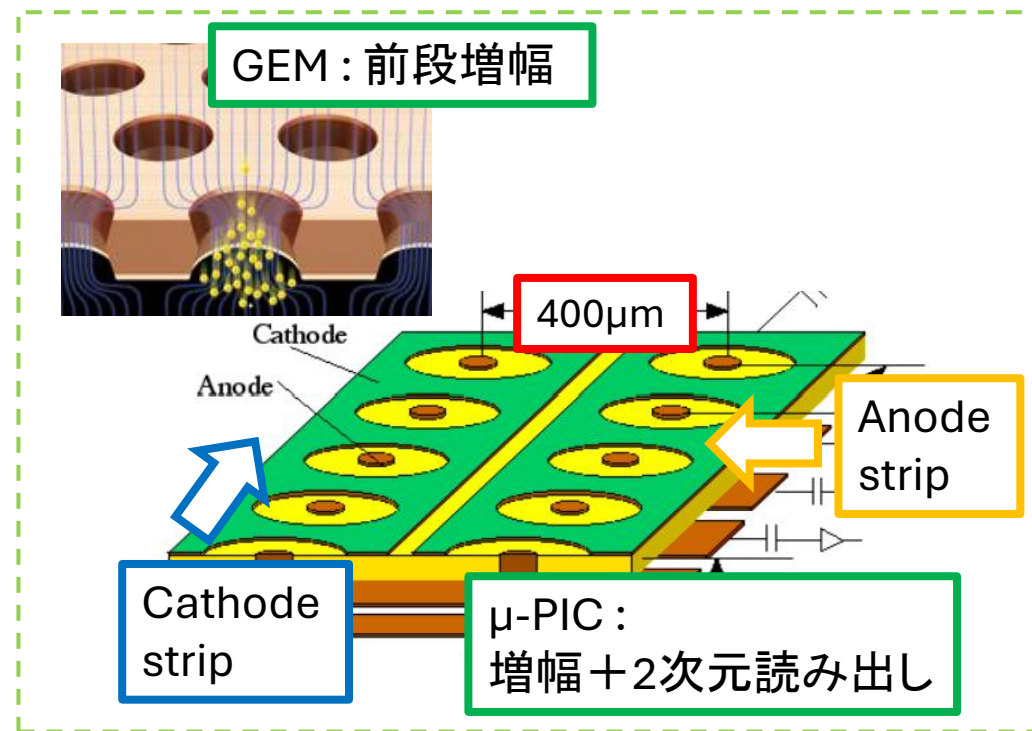


• 検出原理

- 荷電粒子がArガスを電離
- 電離電子がドリフト電場に沿って移動
- GEM + μ -PICで増幅&二次元読み出し

• 3次元で飛跡を取得可能

- 2次元座標 + 時間情報
- 2クラスター事象の取得



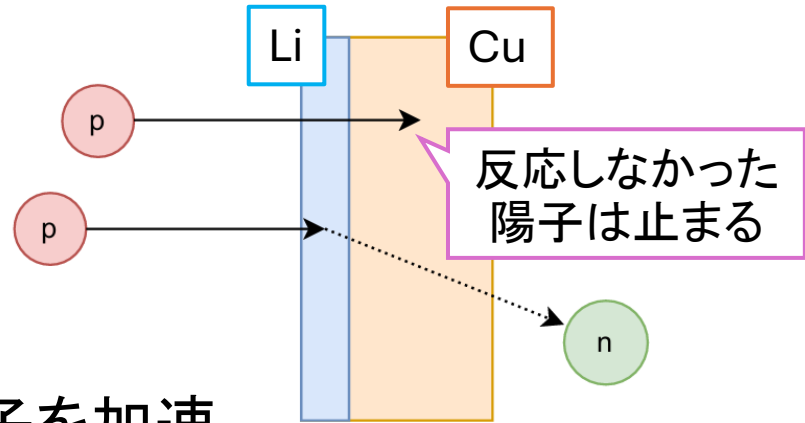
中性子ビーム実験

• 中性子の発生方法

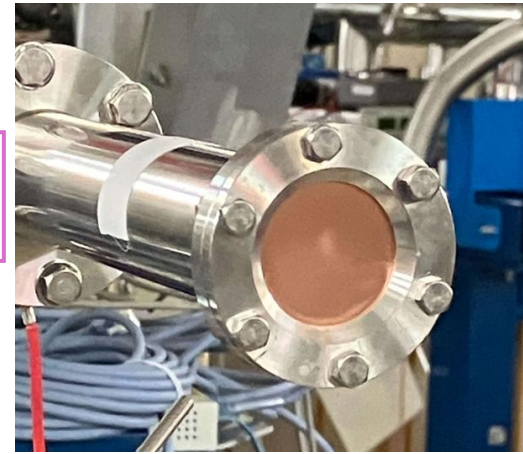
- ペルトロン加速器で2.3MeVに陽子を加速
- ${}^7\text{Li}$ を蒸着した銅に陽子を衝突させる
- ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応により中性子を生成
 - ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{Be} + n$

• LiF-PEコリメータ

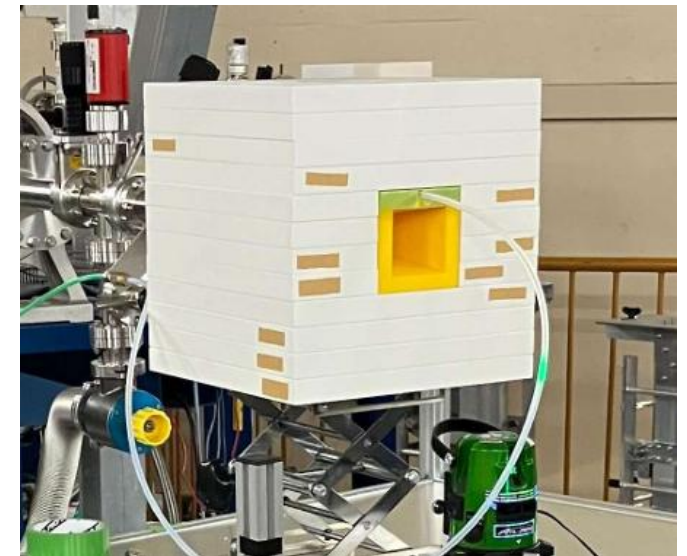
- フッ化リチウムを50%添加したポリエチレン
 - ${}^6\text{Li}$ による熱中性子の吸収
 - ポリエチレンによる中性子の減速



中性子生成過程



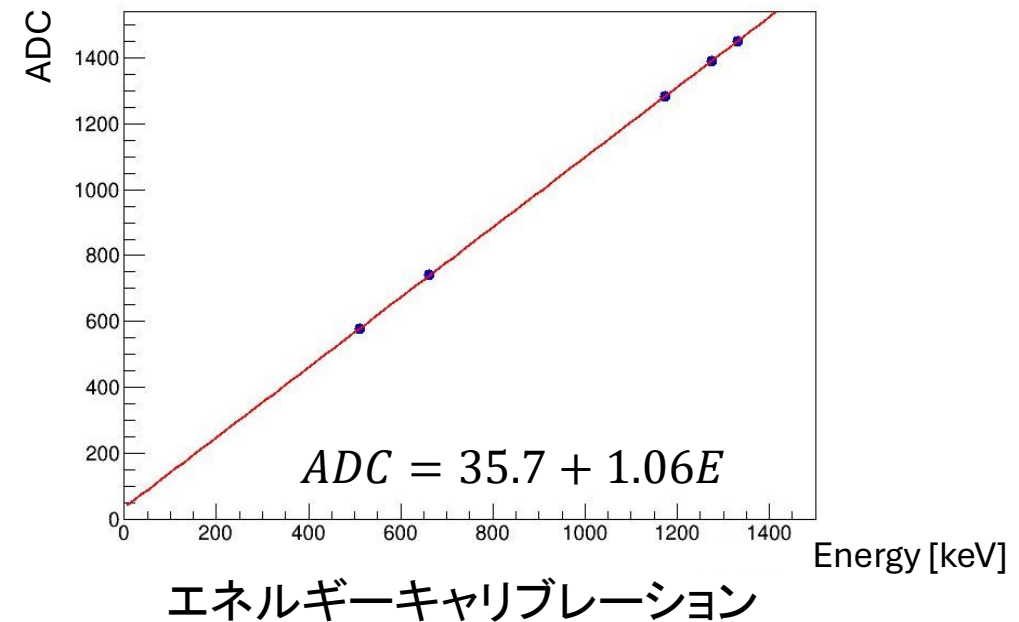
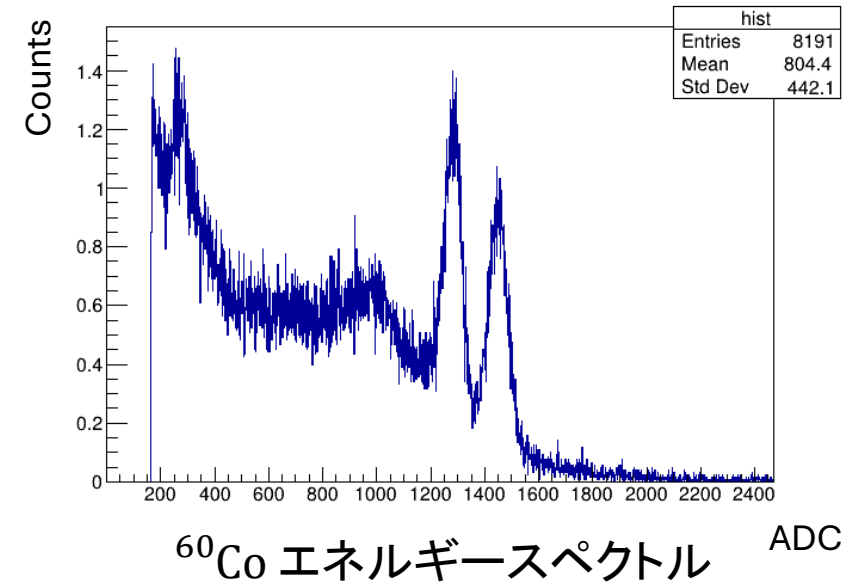
ビーム標的



コリメータ

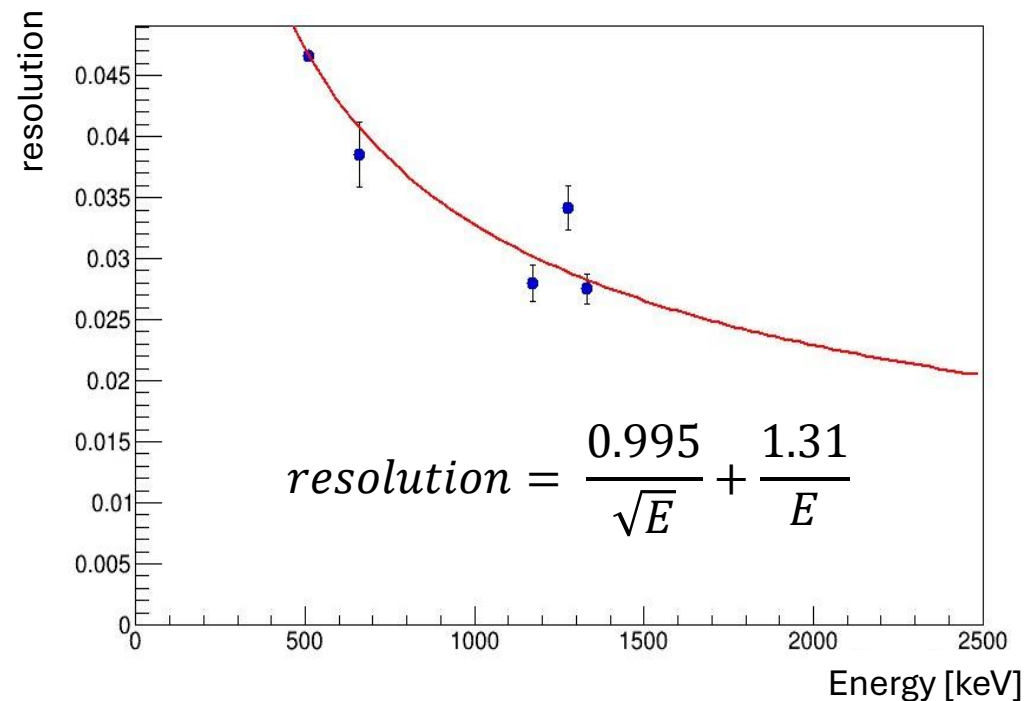
Naシンチレータ

- データ取得方法
 - Naシンチレータからの光信号をPMTで電気信号に変換
 - 波高値をMCAで取得
- キャリブレーション
 - ADC値をエネルギー(keV)に変換
 - 以下の標準線源を使用
 - ^{137}Cs (662keV)
 - ^{60}Co (1173keV, 1332keV)
 - ^{22}Na (511keV, 1275keV)
 - ADC値とエネルギーの線形性を確認



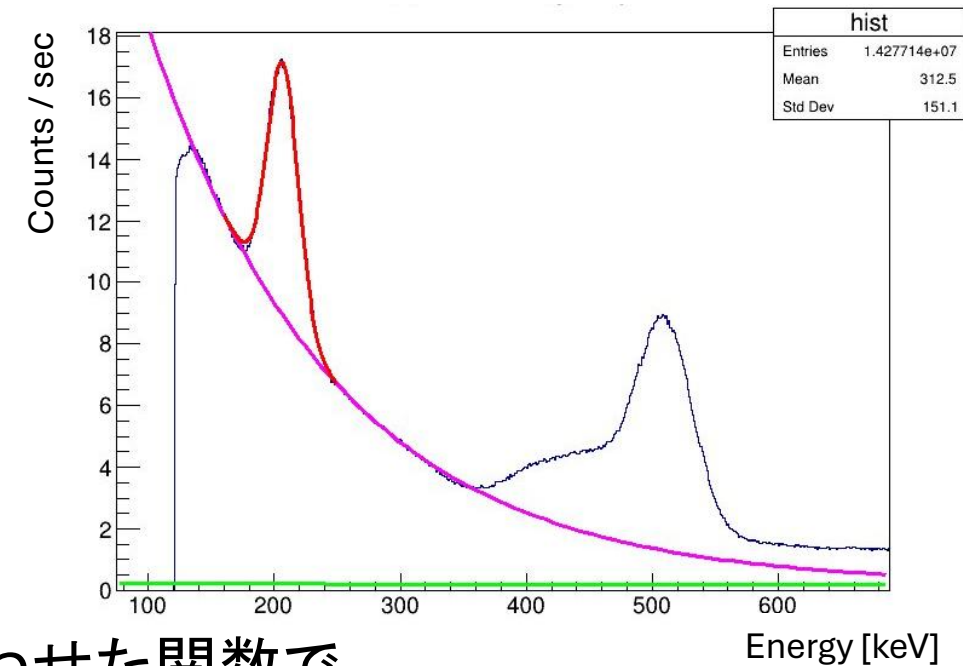
Naシンチレータ

- 検出器の応答評価
 - エネルギースペクトルのピーク形状理解のため、エネルギー分解能を評価
- 分解能のエネルギー依存性
 - 各標準線源のエネルギースペクトルでのピーク幅から分解能を導出



γ線ピーク事象数

- F(197keV), Li(478keV), H(2230keV) について事象数を抽出
- 抽出手法
 - ビームON/OFF時の差分をとる
 - 連続成分とピーク成分(ガウス関数)を組み合わせた関数で対象領域をフィッティング
 - ピーク成分のガウス関数のみを積分

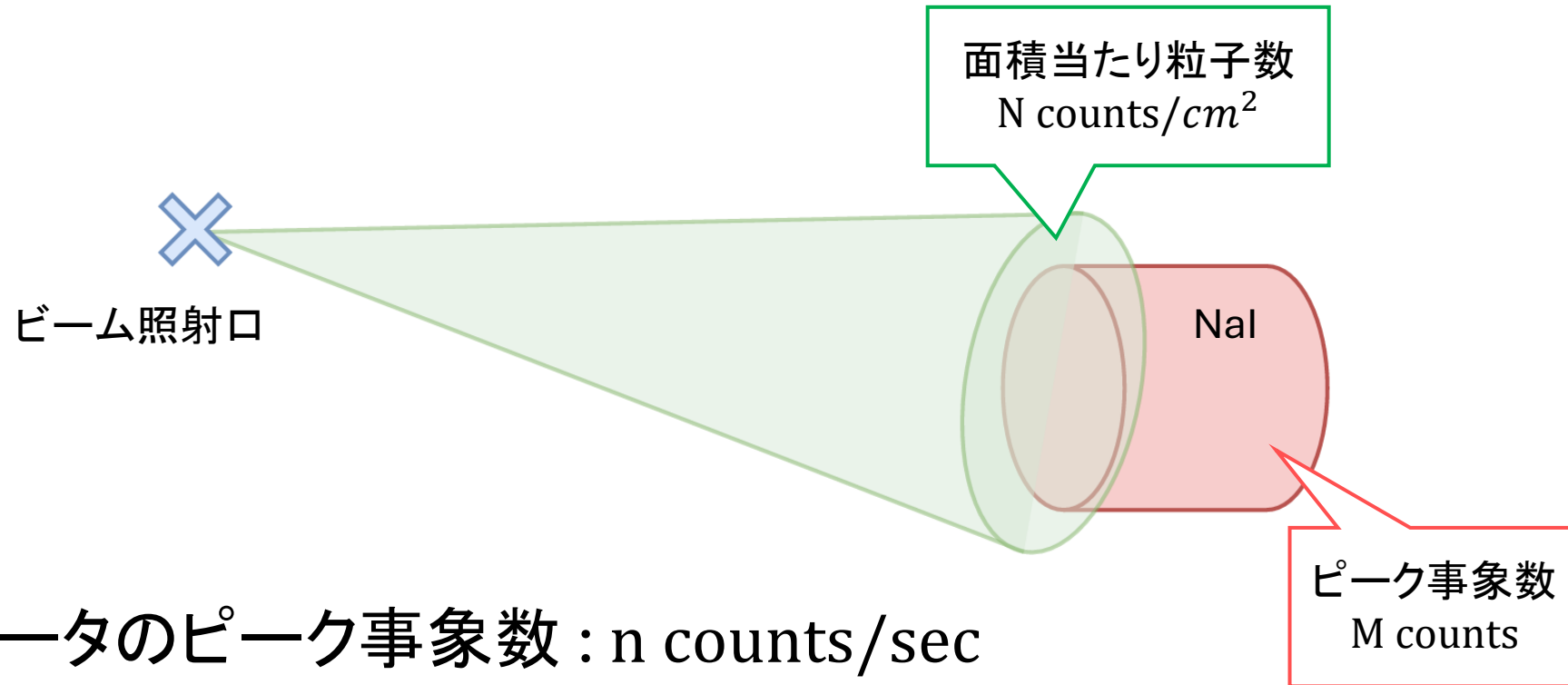


F[○]ピークのfitting

成分	F(197keV)	Li(478keV)	H(2230keV)
NaIでの検出事象数 [counts/s]	252.8 ± 1.9	431.5 ± 5.5	6.633 ± 0.234

➡ この値を用いて各成分のFluxを求める

γ 線Fluxの見積もり



実測データのピーク事象数 : $n \text{ counts/sec}$

$$\Rightarrow \text{Flux } [/\text{cm}^2/\text{sec}] = n \times \frac{N}{M}$$