



# ミグダル効果観測に向けた 中性子ビーム試験結果

神戸大理 濱田悠斗

身内賢太郎, 金崎奎, 東野聡, 大藤瑞乃,

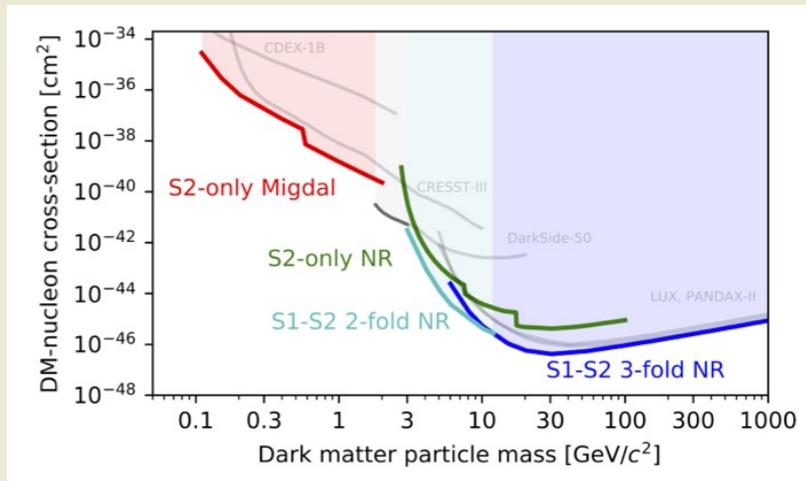
中村輝石, 内山偉貴, 吉田将, 池田智法

# もくじ

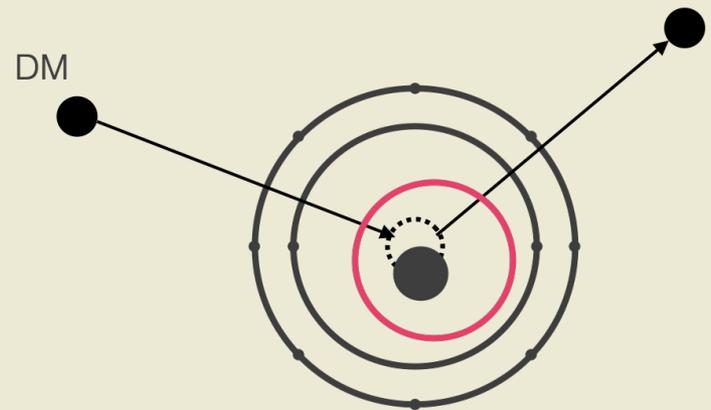
- イントロ
- MIRACLUE実験の検出器
  - 検出器の大型化
  - DAQの改良
- 中性子ビーム試験
  - 原子核反跳の確認
- 展望・まとめ

# イントロ：暗黒物質の直接探索

- WIMP: Weakly Interacting Massive Particle
  - DMの有力候補
  - SM粒子と相互作用すると仮定して直接探索されている
- 超対称性理論から 100GeV ~ 10TeV と予言されている
  - まだ見つかっていない
  - sub-GeV領域の探索も -> **ミグダル効果**



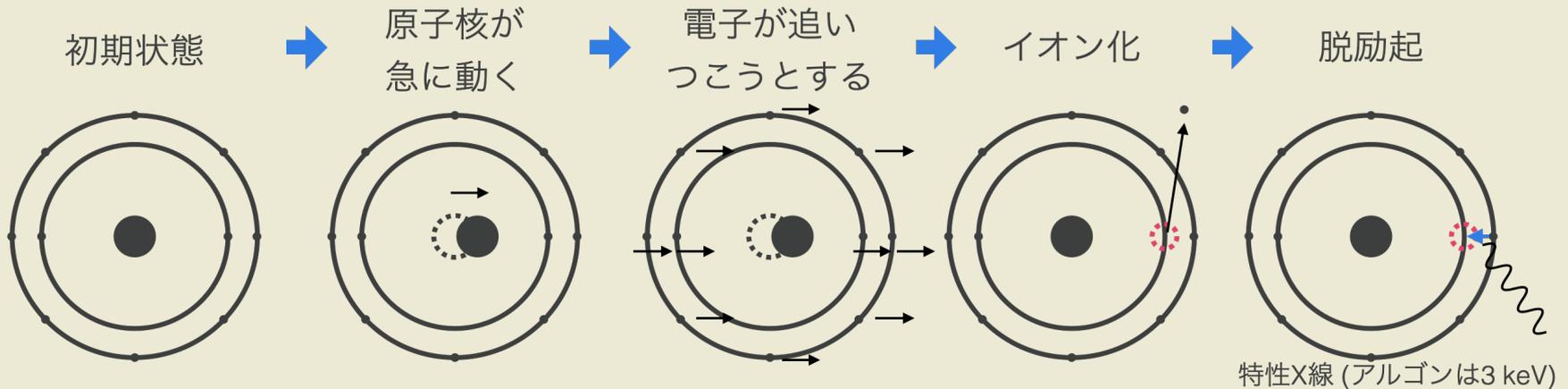
Jacques Pienaar TAUP2021



動いた原子核の  
運動エネルギーぶんを検出

# イントロ：ミグダル効果

- 原子核が急に動くときに低確率で追加の励起/電離が起こる
  - 量子力学の計算から導かれる
  - 軽いDMの探索領域を広げる

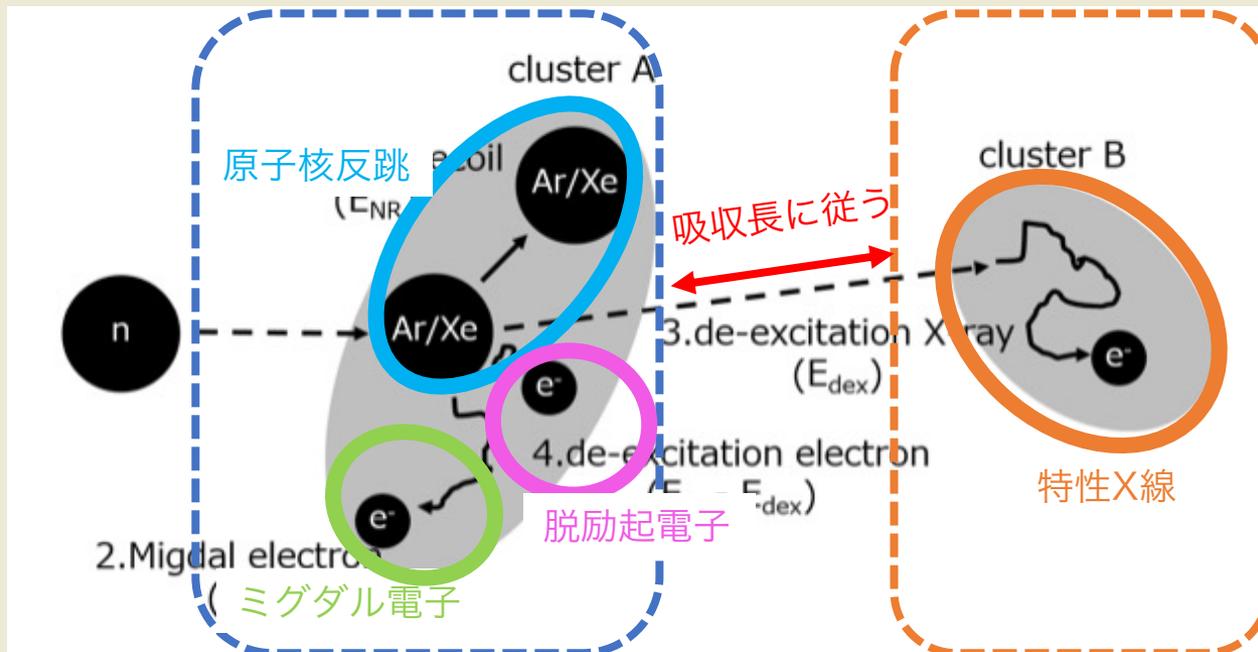


- しかし、原子核反跳に伴うミグダル効果の観測事例はない
  - 初観測を目指す -> **MIRACLUE**実験

Migdal effect Investigation  
as RARE event CLUES

# イントロ：信号となる事象

- 原子核反跳によるミグダル効果の初観測を目指す
  - ガスTPCに中性子ビームを照射
  - 原子核反跳とK殻電離に伴う特性X線放出のプロセスに注目
  - 適切なガス (圧) を選べば2つのクラスターを分離できる → BG排除
  - クラスターBは固定のエネルギー → BG排除



# 検出器

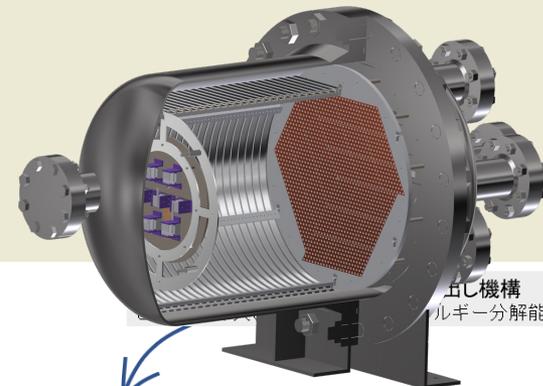
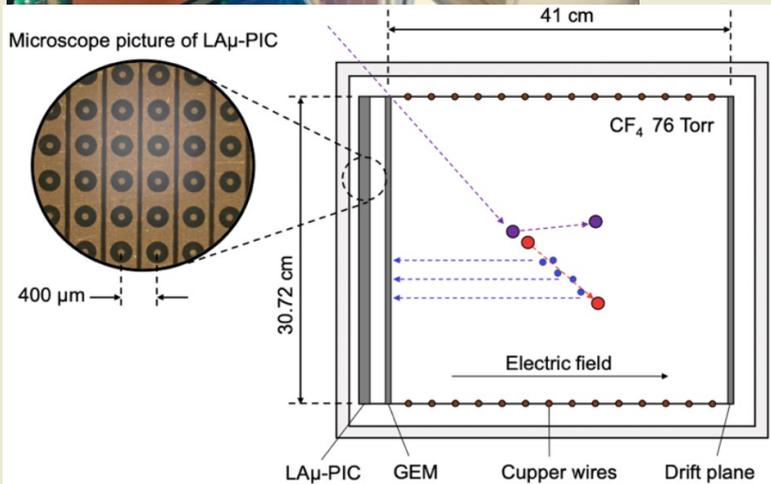
- 既存のガスTPC技術を用いてミグダル効果の観測を目指す



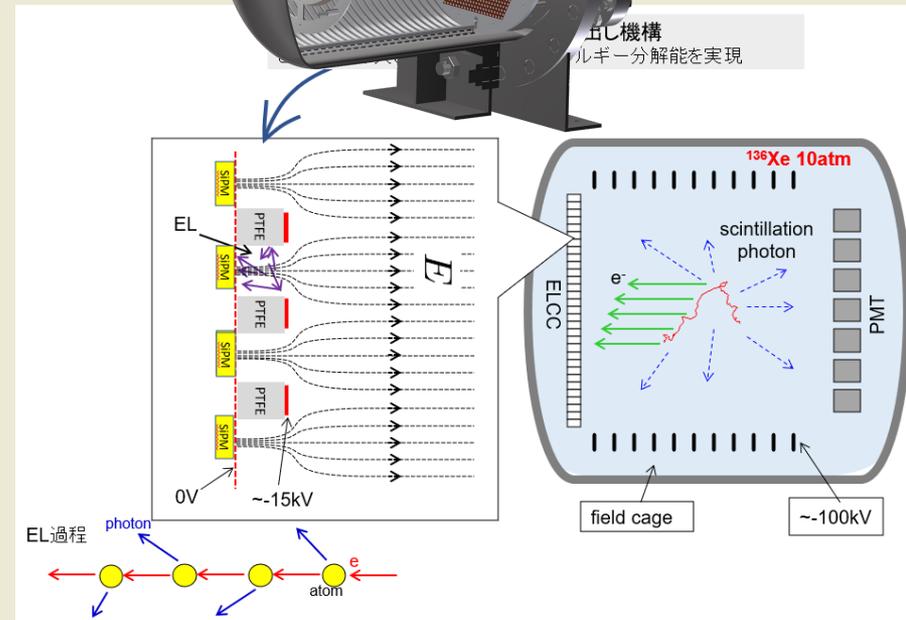
DM探索  
Ar 1atm, GEM +  $\mu$ -PIC



$0\nu\beta\beta$ 探索  
高圧Xe, ELCC + MPPC

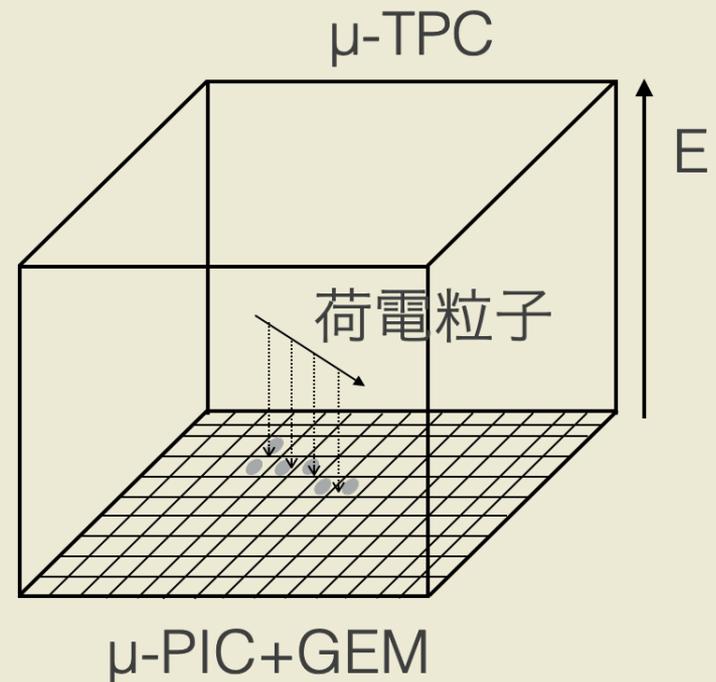


出し機構  
ルギー分解能を実現



# 検出器：ArガスTPC

- Ar : C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> = 9 : 1 (1atm)
- 30cm角
  - 400um pitchストリップの uPIC (800 um 読み出し)
  - anode, cathode 各384chずつ
- GEM + uPICで3次元飛跡検出



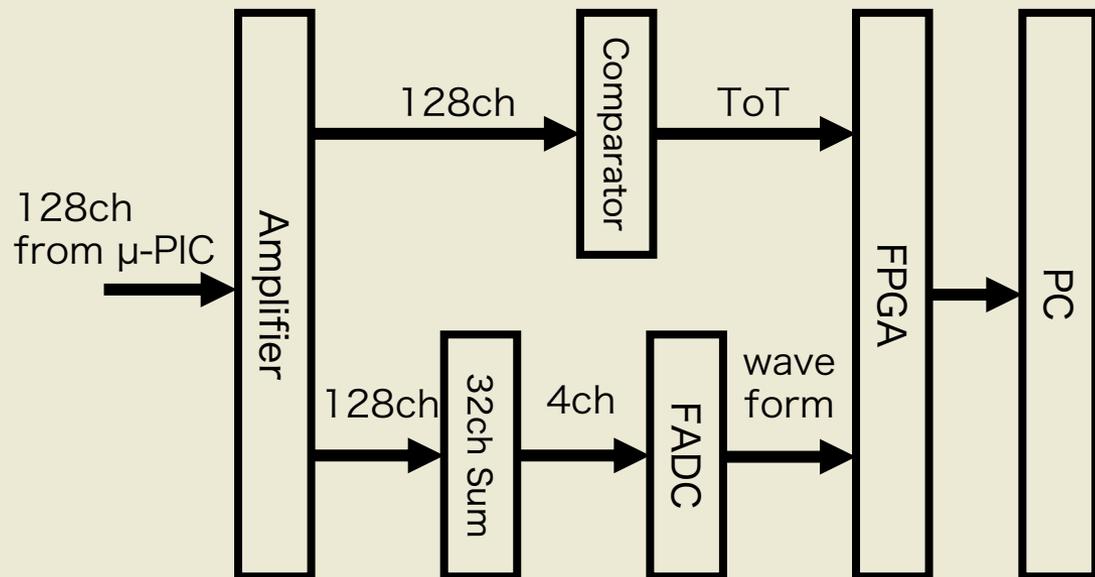
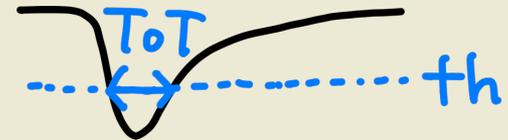
# 検出器：読み出し

- Bee Beans Gigabit\_RO\_V1\_BOARD × 6

- uPICからの信号をデジタイズするボード

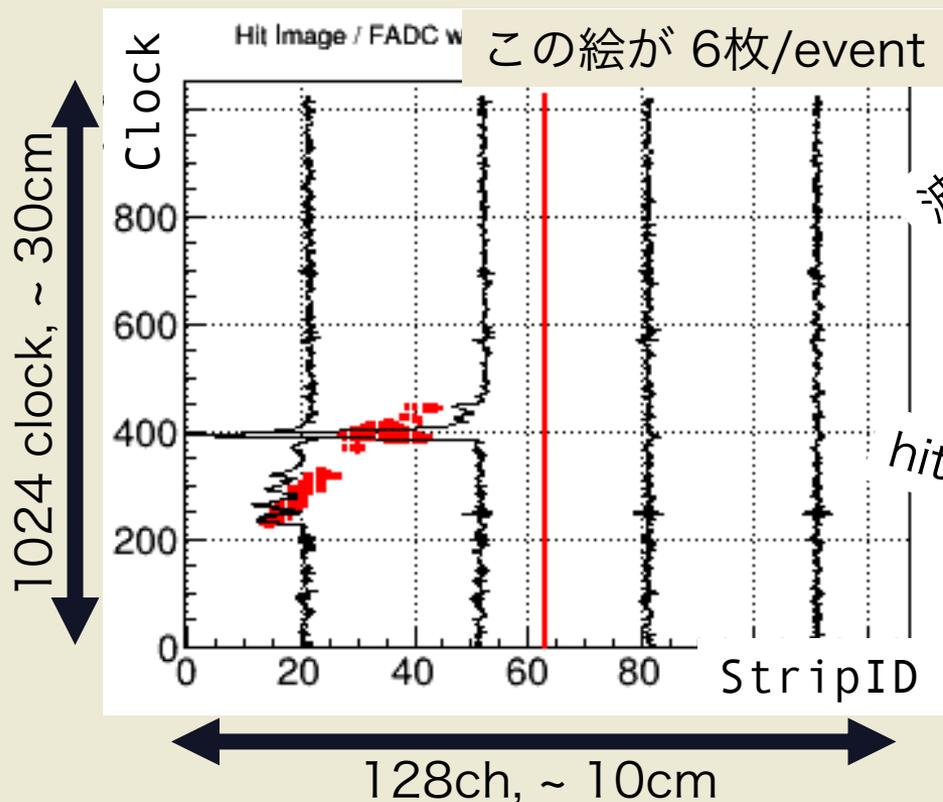
- 入力：128ch アナログ信号

- 出力：128ch ToT (Time over Threshold), 4ch 波形情報



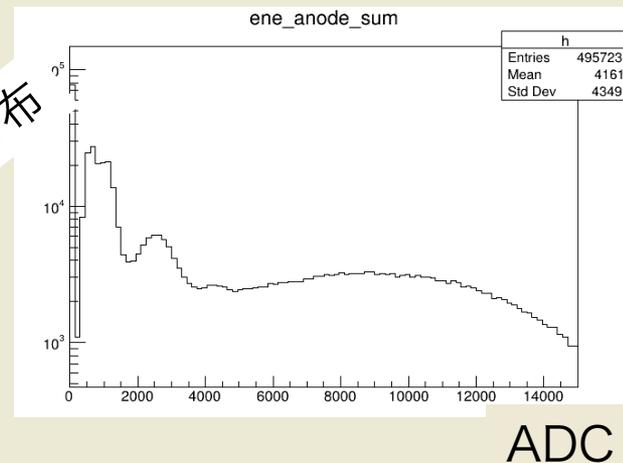
# 検出器：読み出し

- 読み出されたイベントの情報
  - hit情報 と 波形情報 重ね書きplot

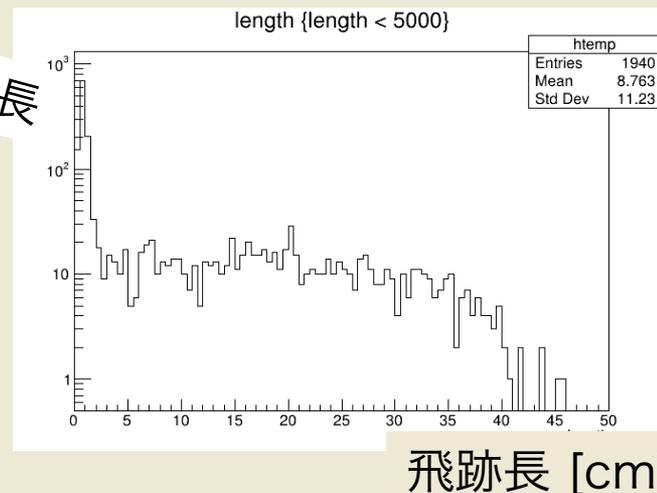


黒線：波形情報  
赤点：各ストリップでToTな時間

波形 → energy分布



hit情報 → 飛跡長



# DAQの改良

- 前回のビームテスト
  - 2022/04/11 - 13 @産業技術総合研究所
  - 原理実証のため小さいTPC (10cm角) で測定した
  - 読み出しボードのASIC故障多発
    - anode側でデータが取れなかった
- 2022/12のビームテストに向けてDAQの改良を行なった
  - ASICを守る
  - 大きくなるTPCへの対応

# ASICを守る

- 放電によってASICに過電流が流れる
  - -> ラッチアップする -> 放置するとASICが故障する
- 過電流を検知してASICの電源電圧を一時的に落とすようにした
  - 安定化電源 IT6332A

ASIC電流の時間推移



5分間

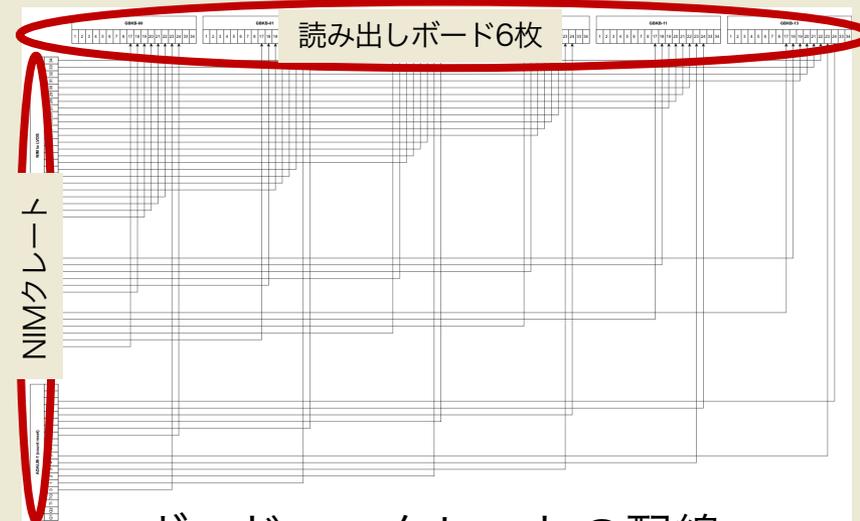
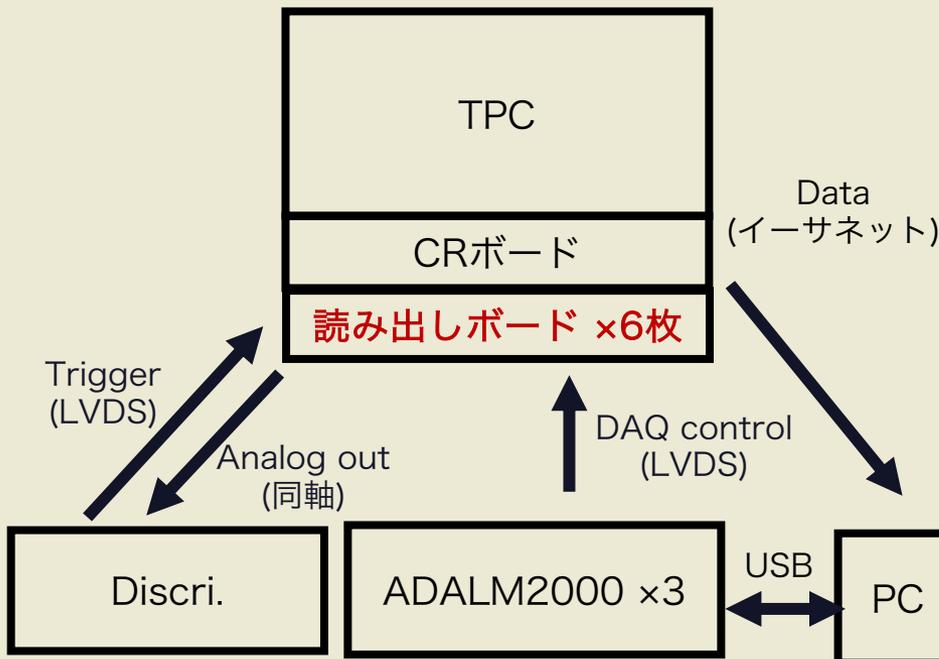
5分間

# TPC大型化

- 10cm角 -> 30cm角
  - 400 -> 800 um pitch
  - 512ch -> 768ch
  - 読み出しボードの数 4 -> 6
- ケーブル作成・ソフトウェア対応



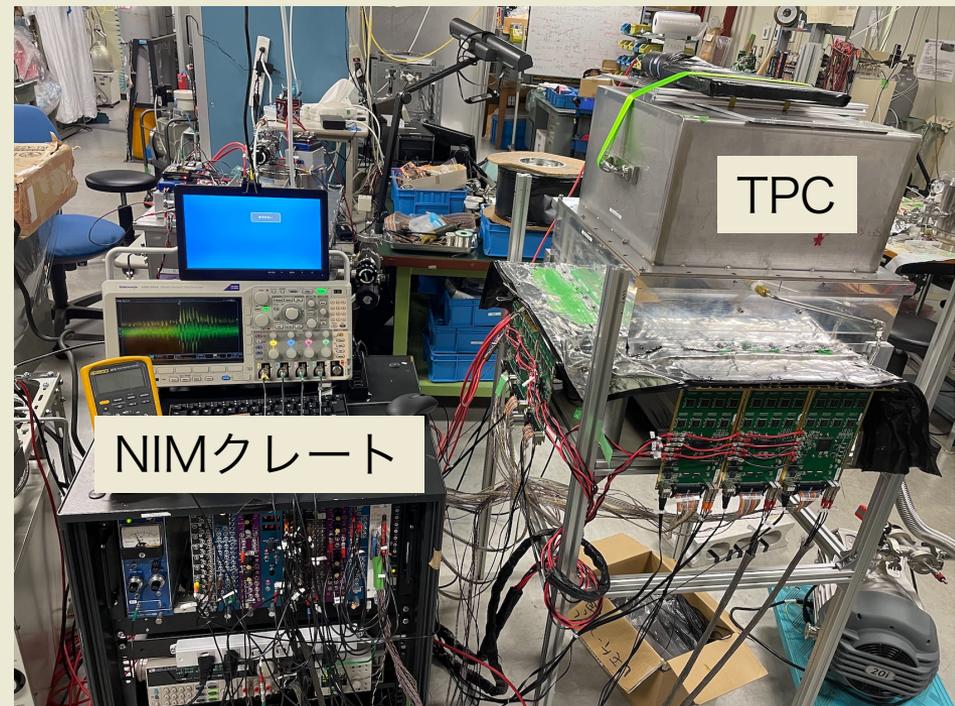
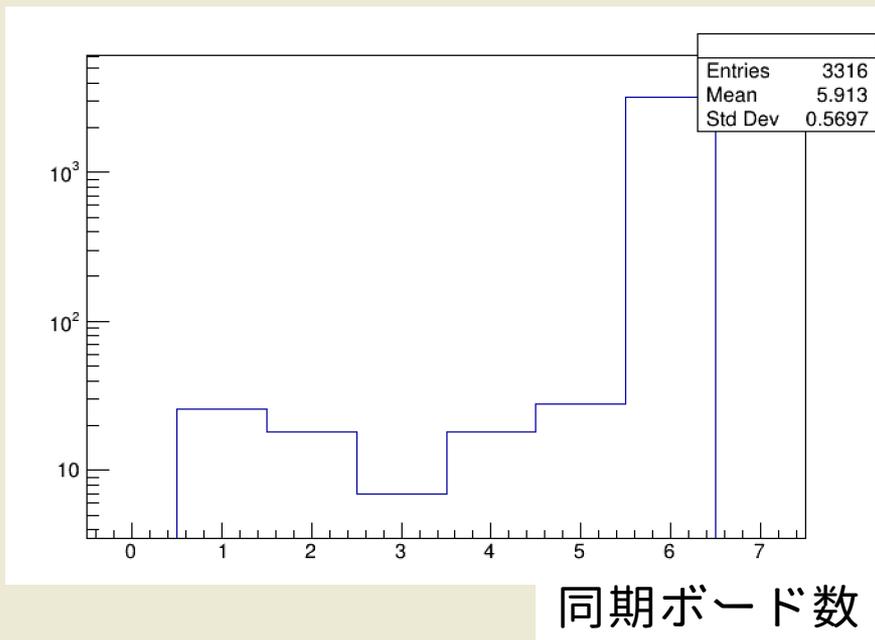
1ターミナルにデジタル信号  
が出たり入ったりしている



ボード <-> クレートの配線

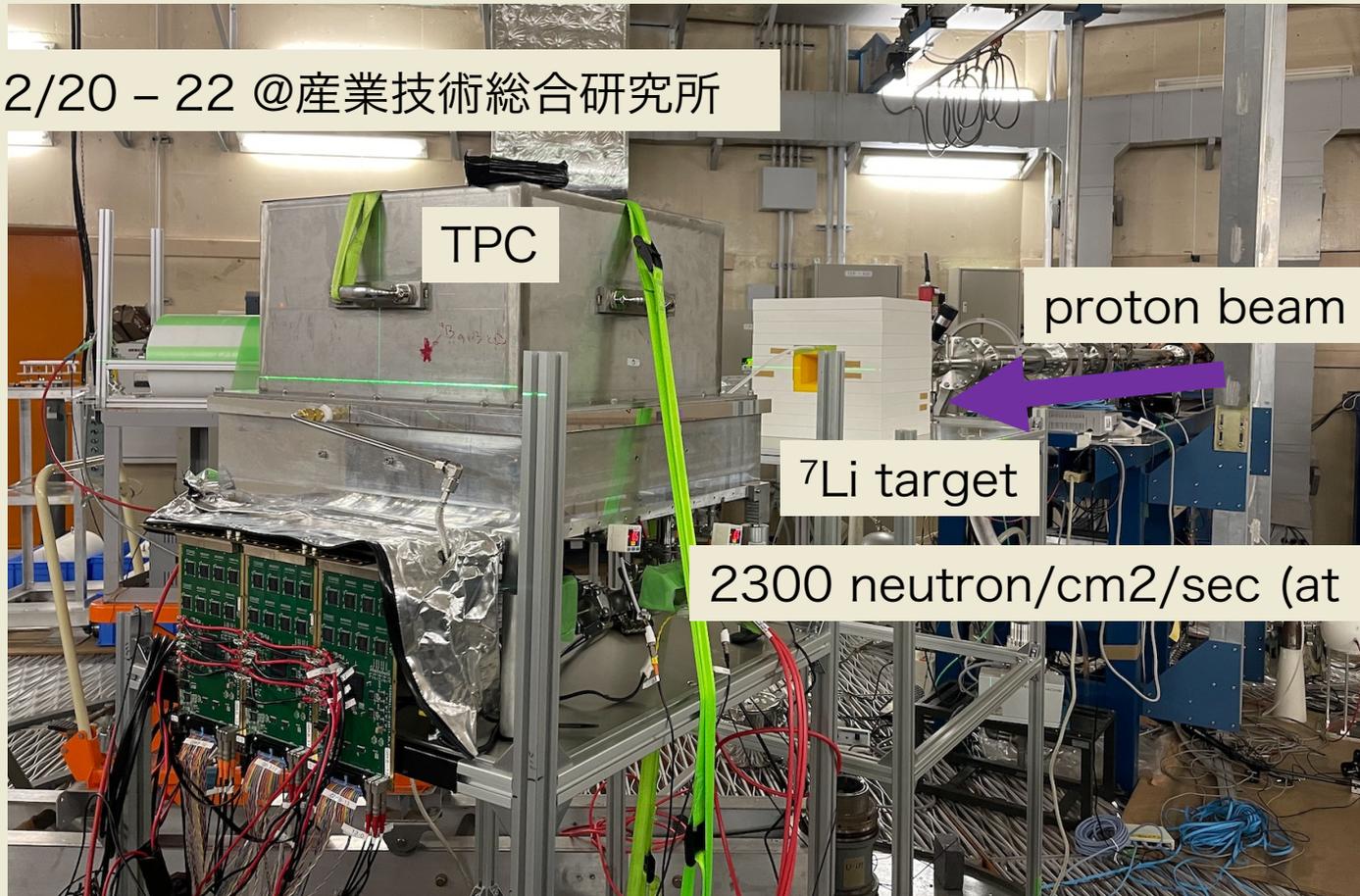
# TPC大型化

- テストトリガーを入れて試験
  - 10Hzトリガを入力
  - ~ 97% のイベントで6枚読み出しができた
  - -> イベントスリップが主な原因



# 中性子ビーム試験

2022/12/20 - 22 @産業技術総合研究所

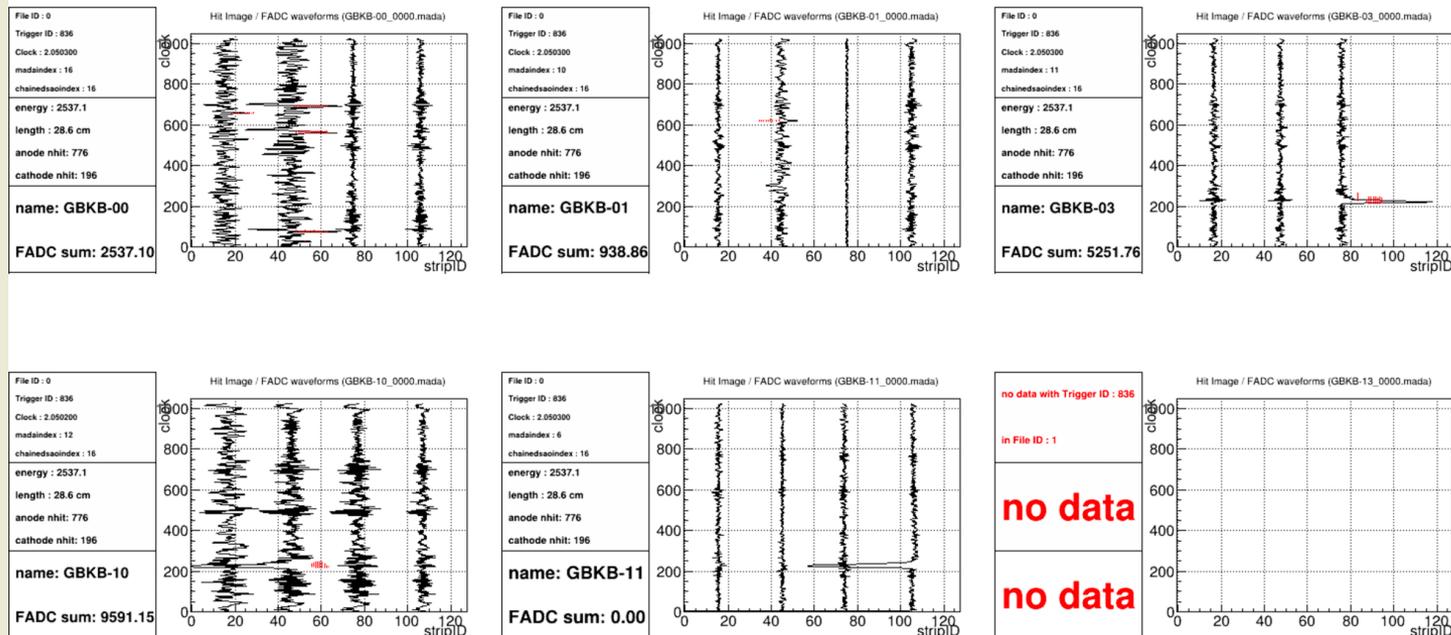


- 高レート中性子下での放電 -> 3keV ( $^{55}\text{Fe}$ ) 観測時の 1/17 のガスゲイン
  - 3keV見えない状態での測定
  - nとAr原子核の反跳は見えなかった / nとH原子核の反跳を捉えることができた

# 中性子ビーム試験：calibration

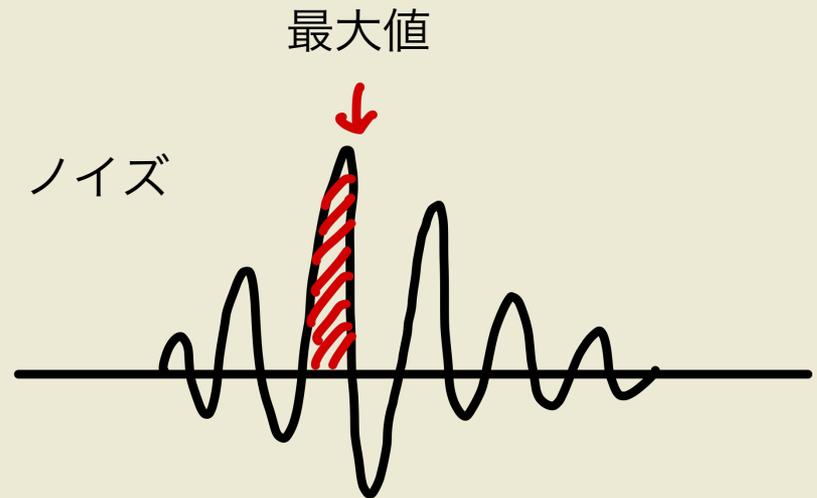
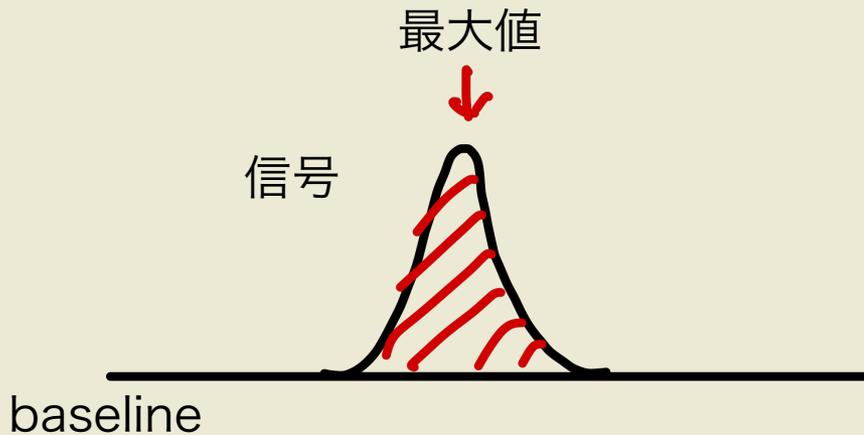
- $^{109}\text{Cd}$ 線源  $\gamma$  88keV
  - 低ガスゲインのため $^{55}\text{Fe}$ がキャリブレーションソースとして使えない
- 典型的な信号イベント
  - 2/6ボードで 信号と同程度の波高のノイズ が確認された

## Event Display



# 波形の積分

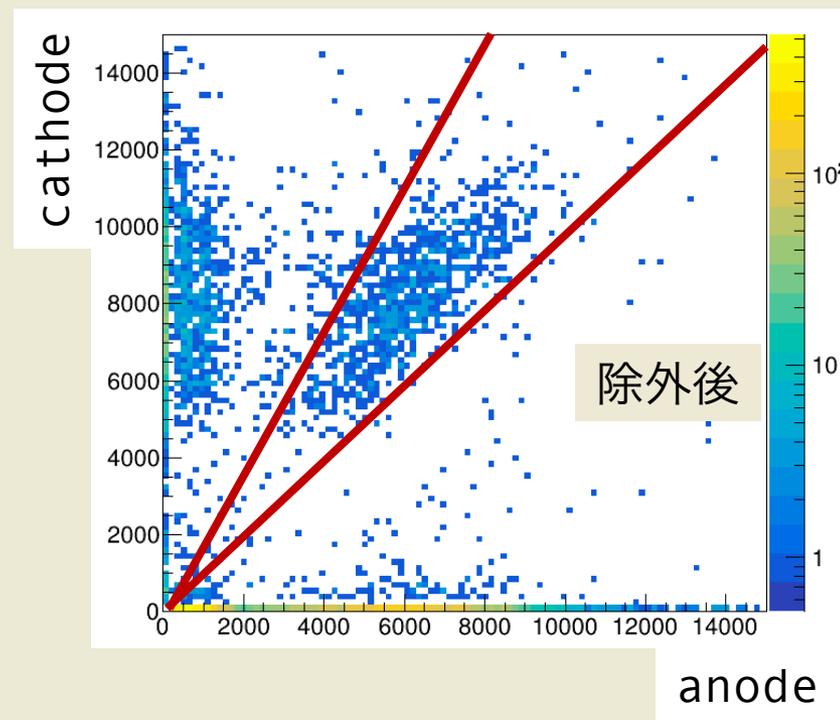
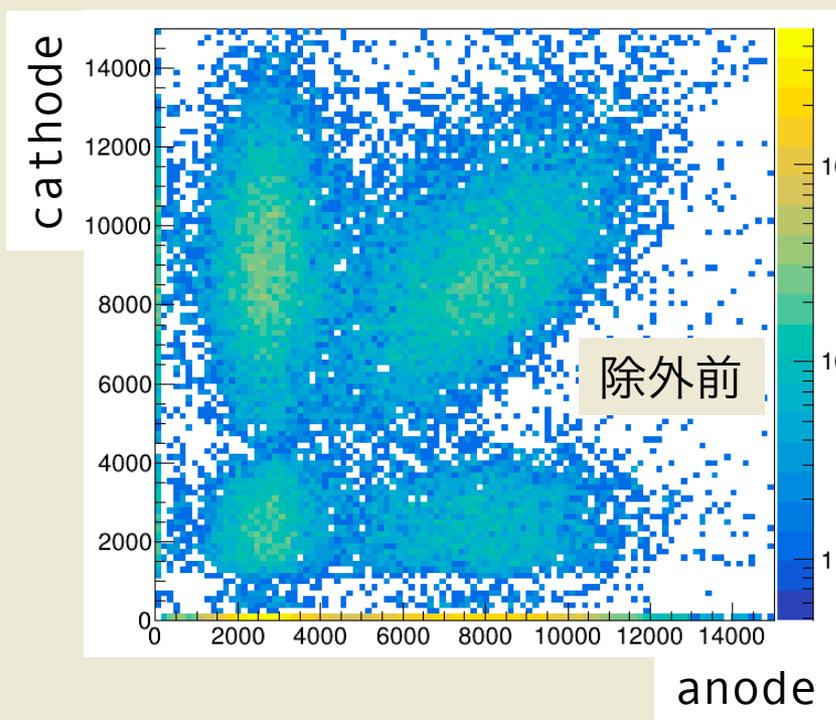
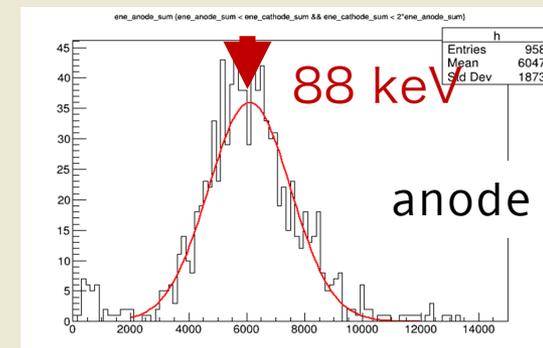
- FADCで取れた波形を積分するアルゴリズム
  - 波形の最大値から山を一つ分積分する
  - 信号の波高 ~ ノイズの波高 ならノイズと信号が区別できない



- ノイズを弾く方法として検討中：
  - 波高 vs 積分値の分布を用いる
  - マイナス側に veto threshold を設ける

# 中性子ビーム試験：calibration

- $^{109}\text{Cd}$ 線源  $\gamma$  88keV
- ノイジーなボード2枚を解析から除外
- anode-cathode間に相関があるイベントを選択

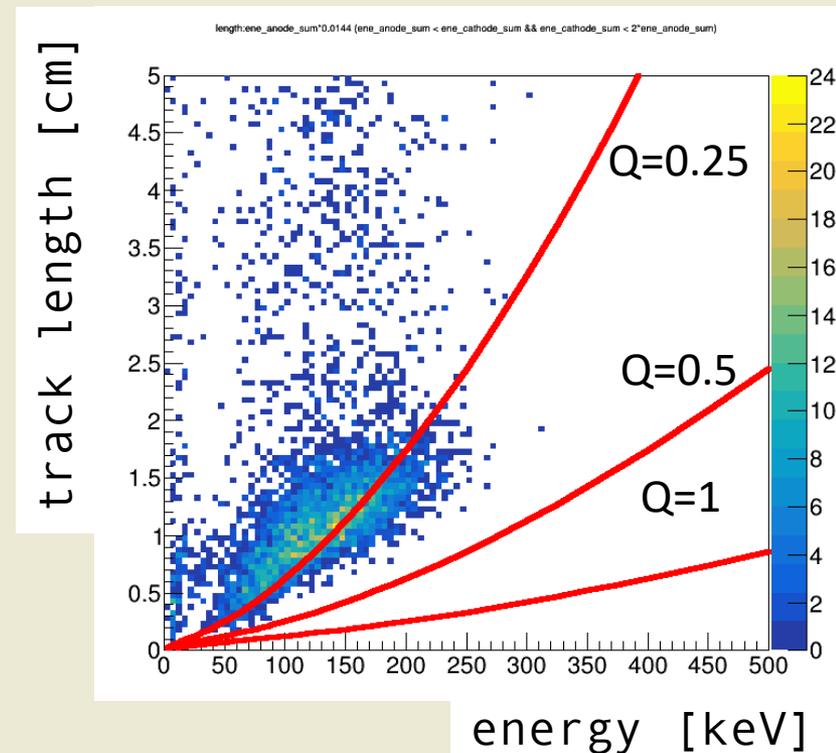


# 中性子ビーム試験：原子核反跳 (H)

- 中性子run 495723 events / 1007 sec
  - calibrationと同様にボード2枚を除外した解析
  - anode-cathode間に相関があるイベントを選択
- エネルギーvs飛跡長が計算値と合わない
  - 109Cd の分布を再確認?
    - 調査中
  - 拡散の効果を考慮する必要
    - 次スライド

$$E_{\text{visual}} = Q \times E_{\text{recoil}}$$

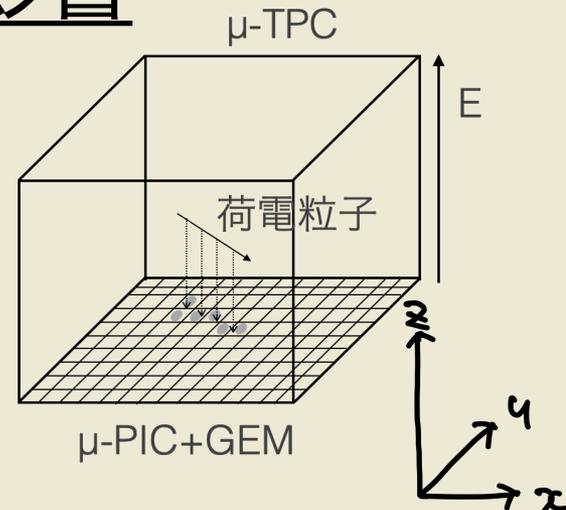
原子核	最大反跳エネルギー	数密度比 (TPC内)
H	565 keV	3
C	160 keV	1
Ar	53 keV	36



# 拡散が飛跡長に与える影響

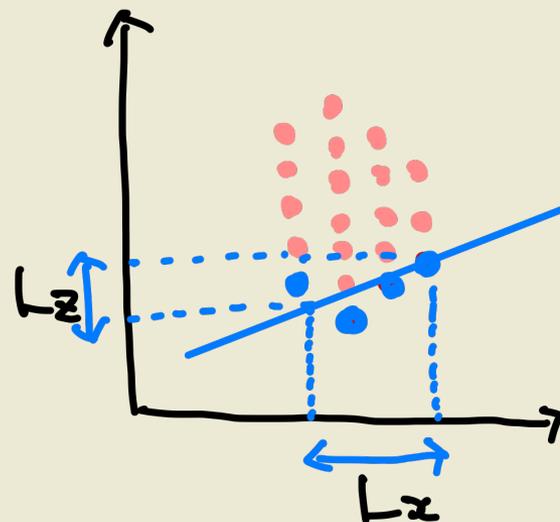
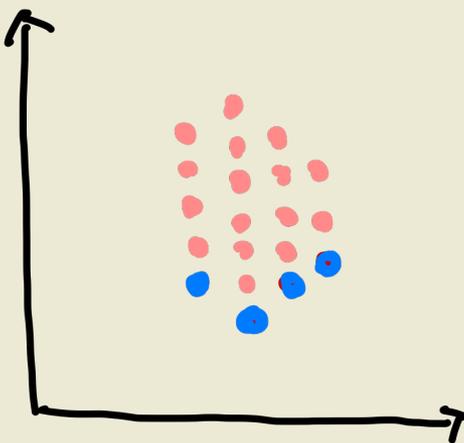
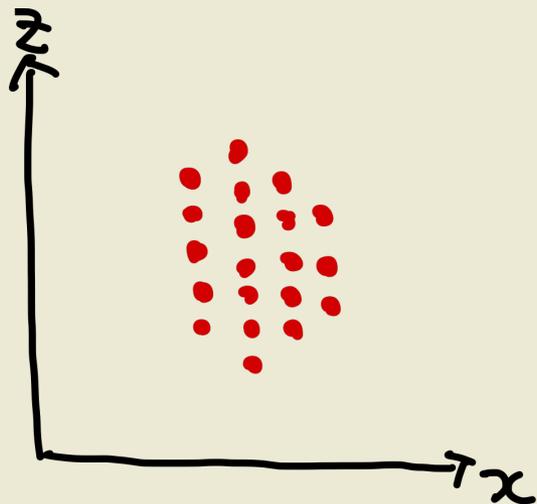
- hitに外接する直方体の対角線としている

$$L = \sqrt{L_x^2 + L_y^2 + L_z^2}$$



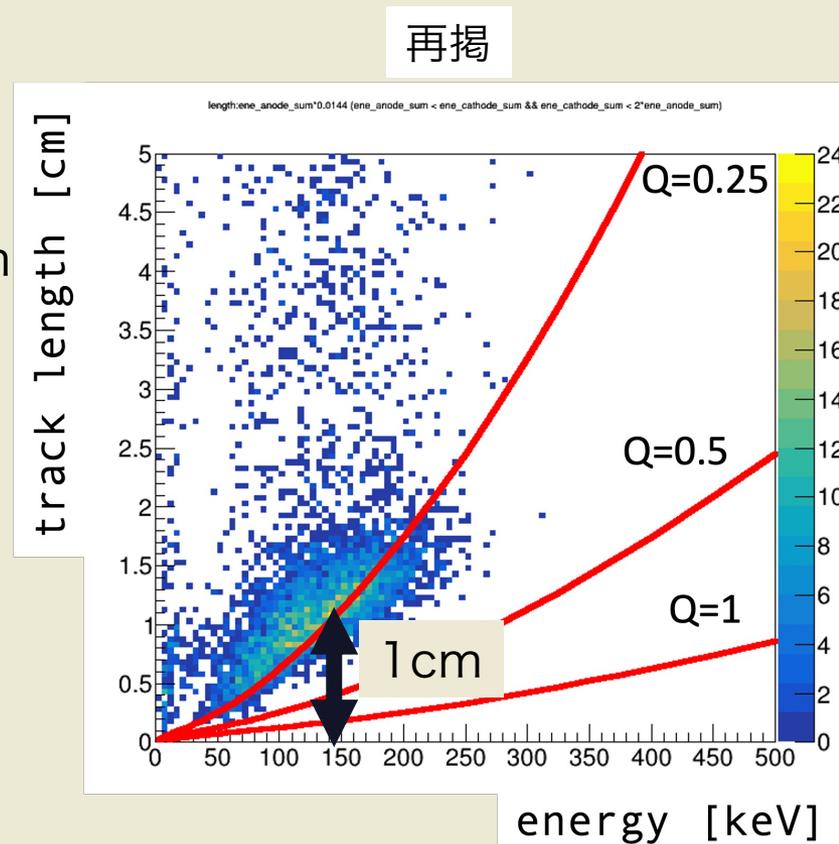
zの最小値を選ぶ

直線fit  
各軸に射影した長さを求める



# 拡散が飛跡長に与える影響

- 拡散が飛跡長に与える影響を概算
  - 一様なドリフト電場 133V/cm
  - 縦/横 拡散係数  $\sim O(100)$   $\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$
  - 30cm角TPCのドリフト距離  $\sim O(10)$  cm
  - $\rightarrow$  直方体の各辺が  $O(1)$  mm 長くなる
- 拡散を考慮した補正などは今後の課題



# まとめ・展望

- 軽いDM探索に寄与するミグダル効果
- ミグダル効果の初観測を目指すMIRACLUE実験
- 検出器を大型化し中性子ビーム試験を行った
  - 水素原子核との原子核反跳を確認
  - アルゴン原子核反跳は厳しい
- ミグダル効果の観測のために
  - 中性子ビーム下でのガスゲインを上げる必要がある
  - クエンチャーの検討
  - 中性子入射フラックスの調整

# バックアップ：DAQ

- dead time ~ 50ns / event
- 中性子試験時 500Hz <-> 2ms
  - clock counter ~ 100us