



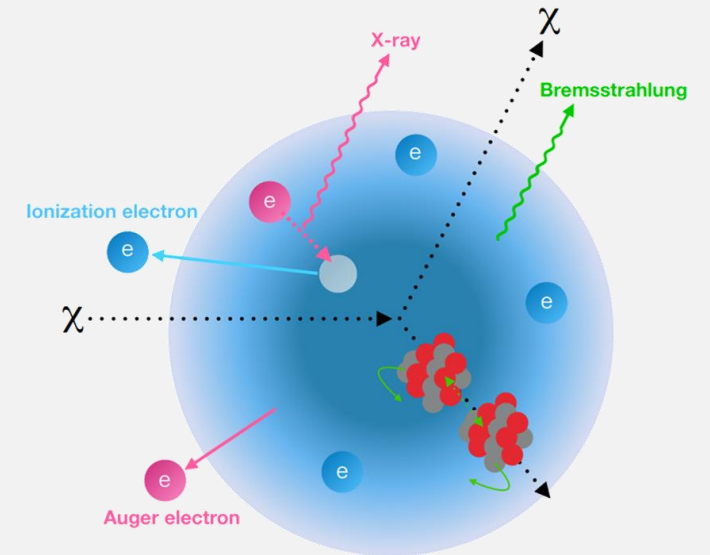
Migdal効果観測のための 中性子ビーム試験に向けた ArガスTPCの性能評価

神戸大学 M1 鈴木 啓司

Migdal効果とは？

Migdal効果

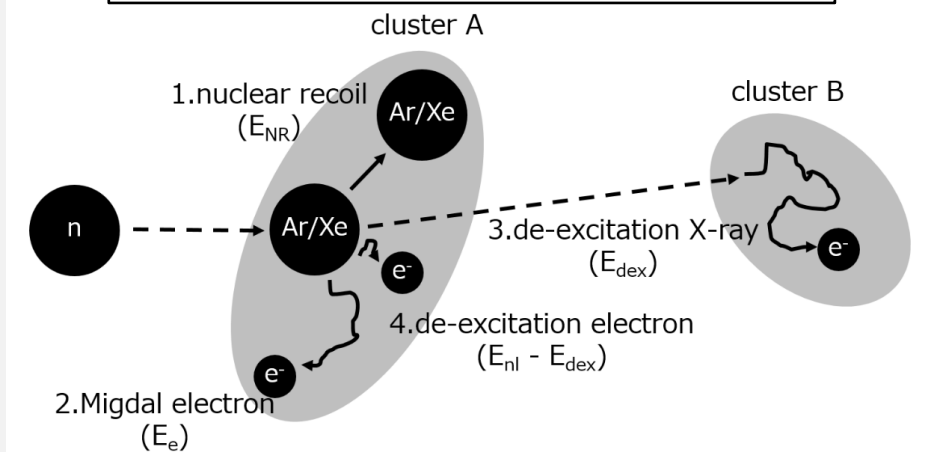
- 原子核反跳に伴い、追加の電離・励起が低確率で生じる
- 低質量DMの探索に用いられている
 - 実験的には未観測



MIRACLUE実験

- 東北大と共同でMigdal効果の初観測を目指す
 - 神戸大: ArガスTPC
 - 東北大: 高圧XeガスTPC
- K殻電離に伴う2-cluster事象を探索
 - 原子核反跳(NR)+Ar(Xe)の特性X線

PTEP 2021, 013C01より引用

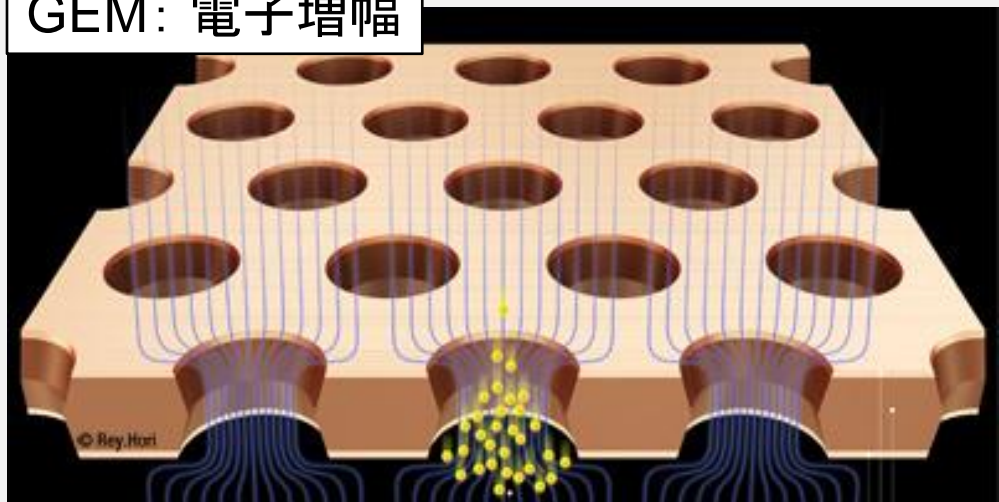


ArガスTPCの検出原理

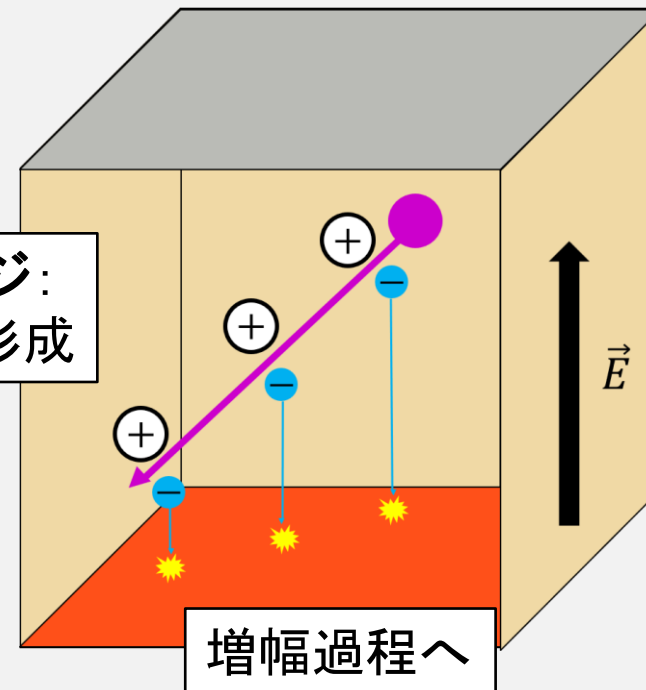
荷電粒子の検出は次の3ステップ

- ① 荷電粒子がArガスを電離
- ② ドリフト電場に沿って電子が移動
- ③ 強い電場で増幅して検出
 - GEM & μ -PIC

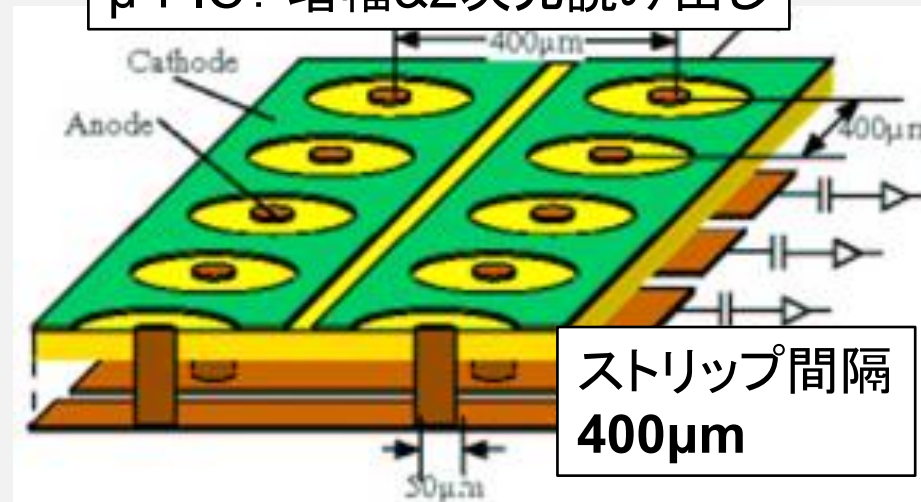
GEM: 電子増幅



フィールドケージ:
ドリフト電場を形成



μ -PIC: 増幅&2次元読み出し

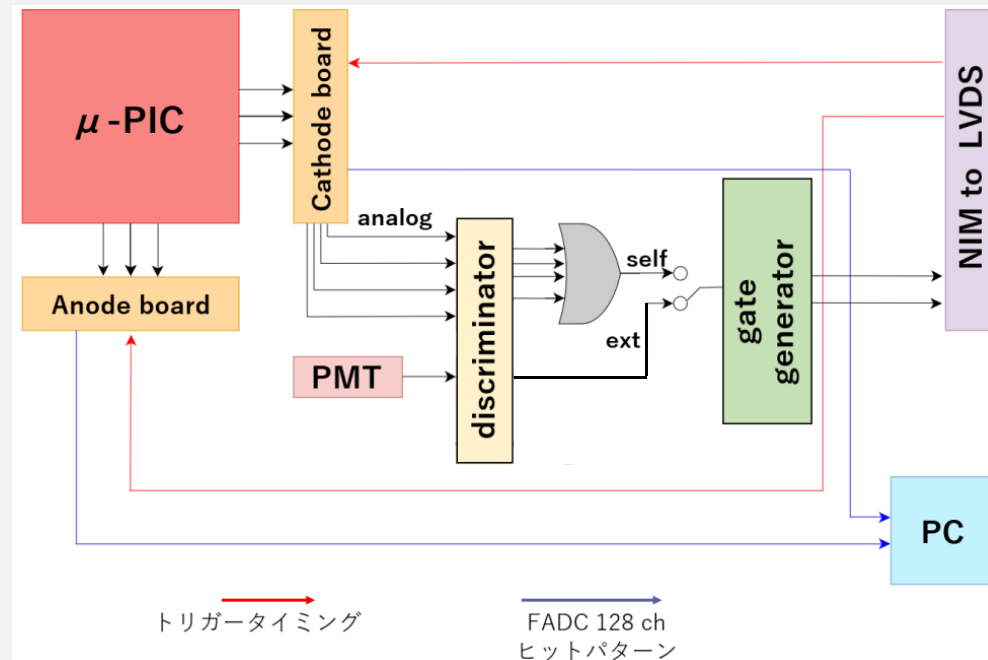


ストリップ間隔
400 μ m

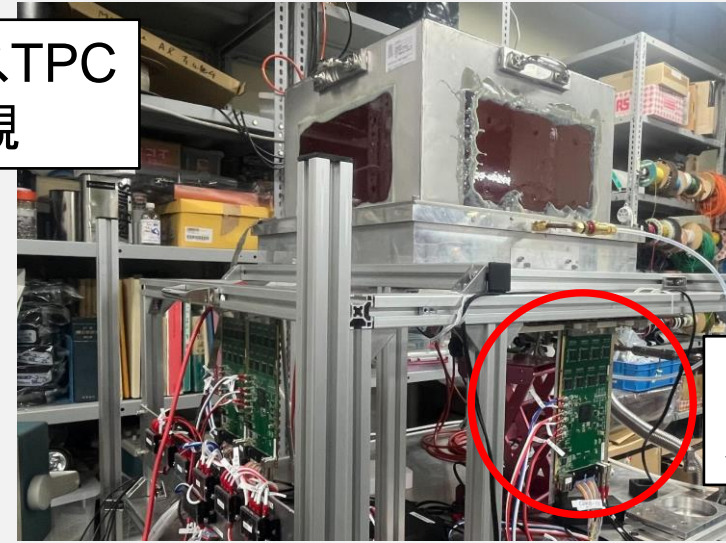
読み出し回路

μ -PICの2次元読み出し

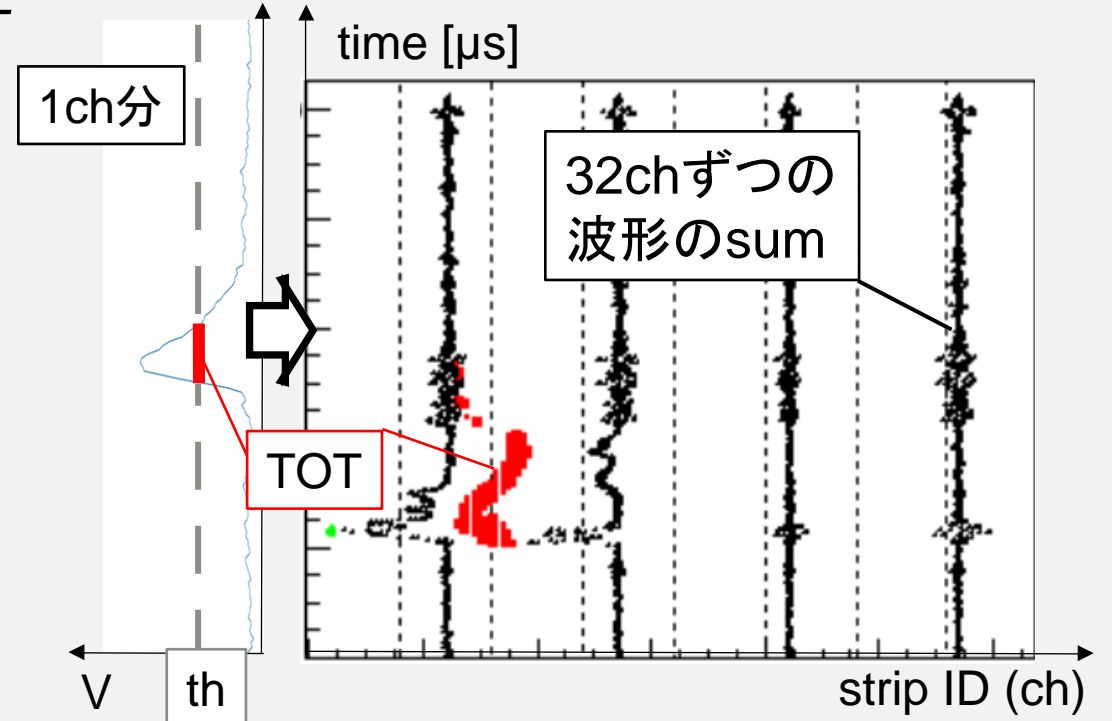
- anode・cathodeともに256strip/10cm
 - 現在は2 × 128chで使用
 - Time over Threshold (ToT)を測定



ArガスTPC
の外観



読み出し
ボード



ArガスTPCのこれまで

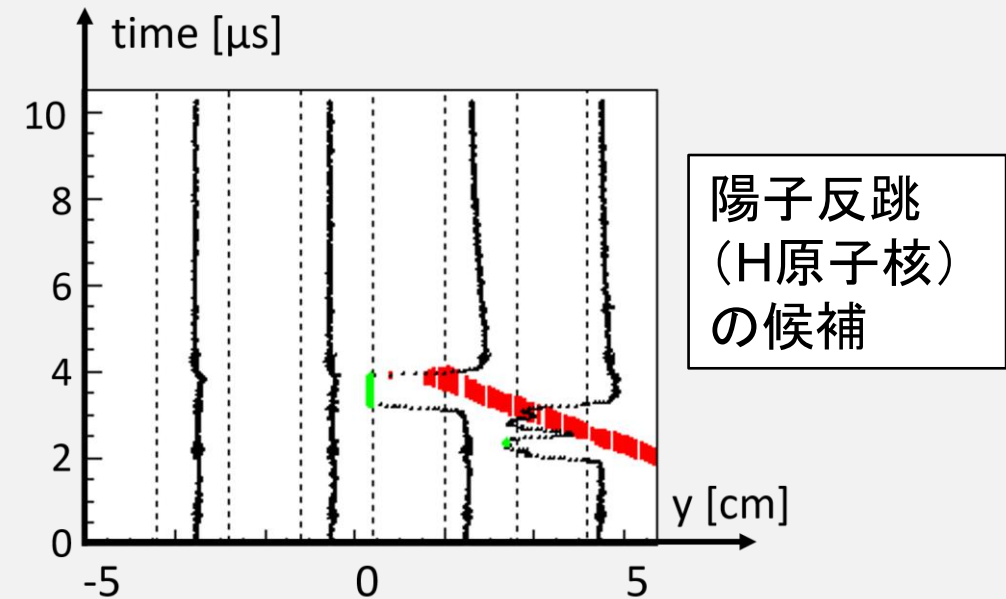
ビーム試験(2024年1月@AIST)

- ビーム→14.8MeVの中性子
- 封入ガス→Ar: C₂H₆ = 84: 16(体積比)
- 有感領域→20cm × 10cm × 30cm



ビーム試験時点での問題点

- **ドリフト電場の形成不良**
 - ドリフト距離の長い事象が見えていない
- ✓ フィールドケージの改良が必要



以前のフィールドケージ

高抵抗シートを使用

- 片面にカーボンスパッタ
→ 一様な面抵抗

一様な電場形成が期待されたが...

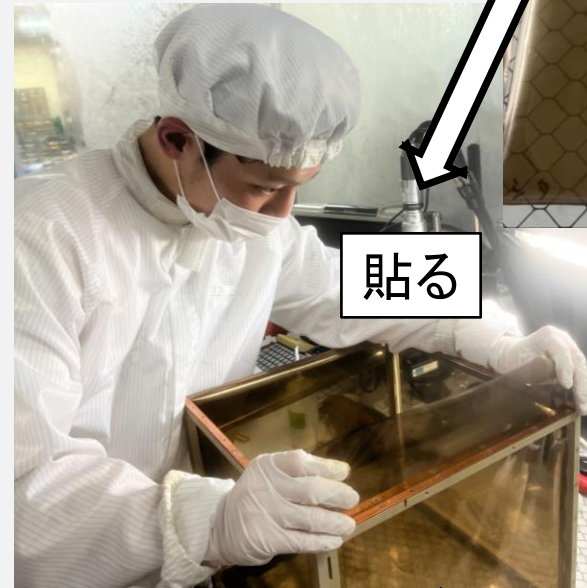
問題点

- 電極まわりの抵抗値が大きい
→ 工夫により解決
 - ドリフト距離の長い事象が見えない
 - 不安定な抵抗値
→ ドリフト電場も不安定に
- ◎ 新タイプのフィールドケージの運用へ

側面のサイズに
合わせてカット



貼る

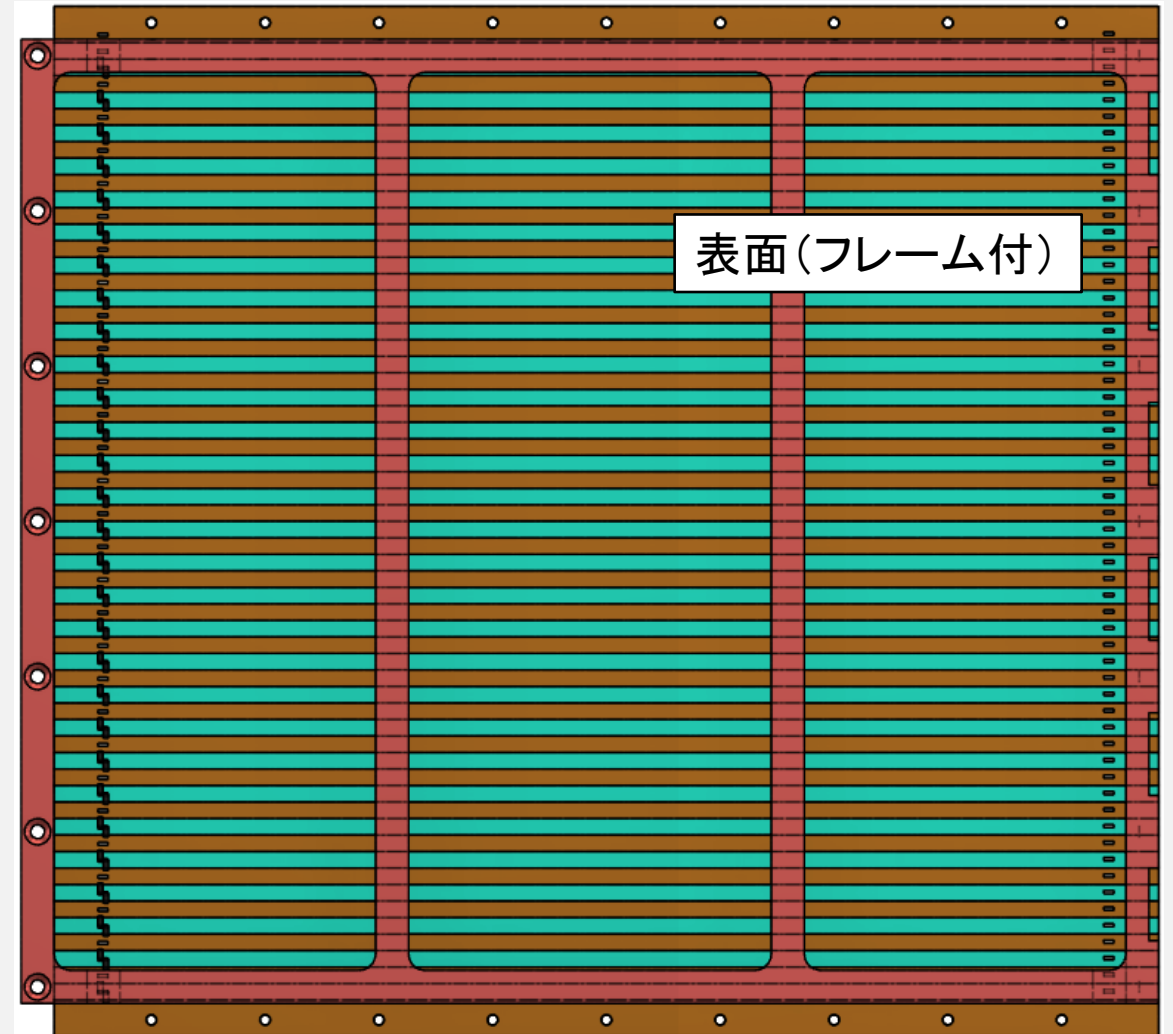
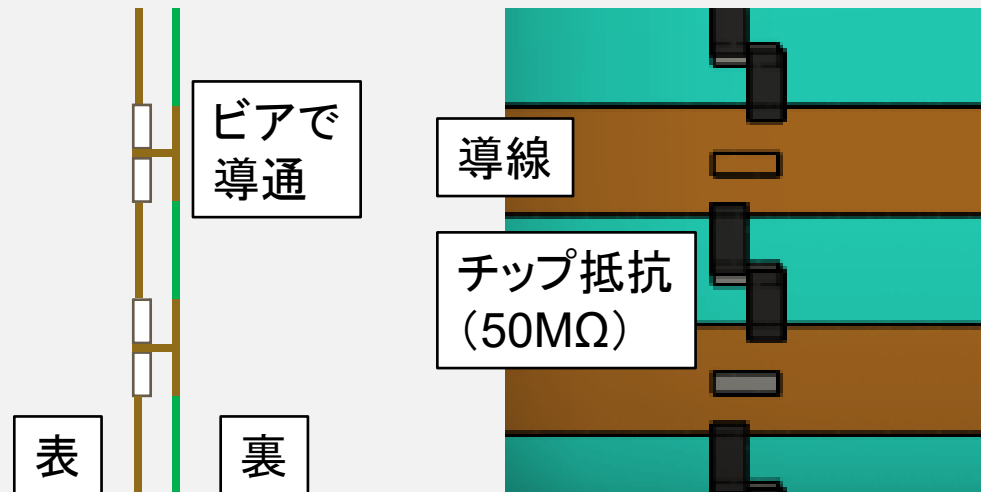


完成図



新フィールドドケージ案 (JPS2024秋)

- 導線と絶縁層を5mmごとに交互に配置
- フレキシブル基板 (FPC) を使用
 - 低物質量
- 導線どうしをチップ抵抗でつないで鎖状にする



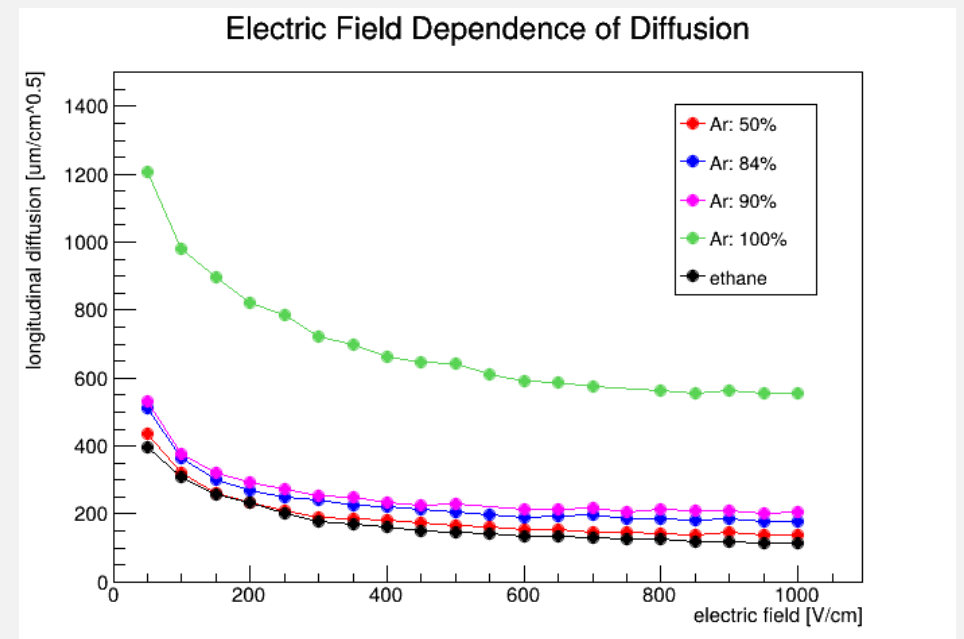
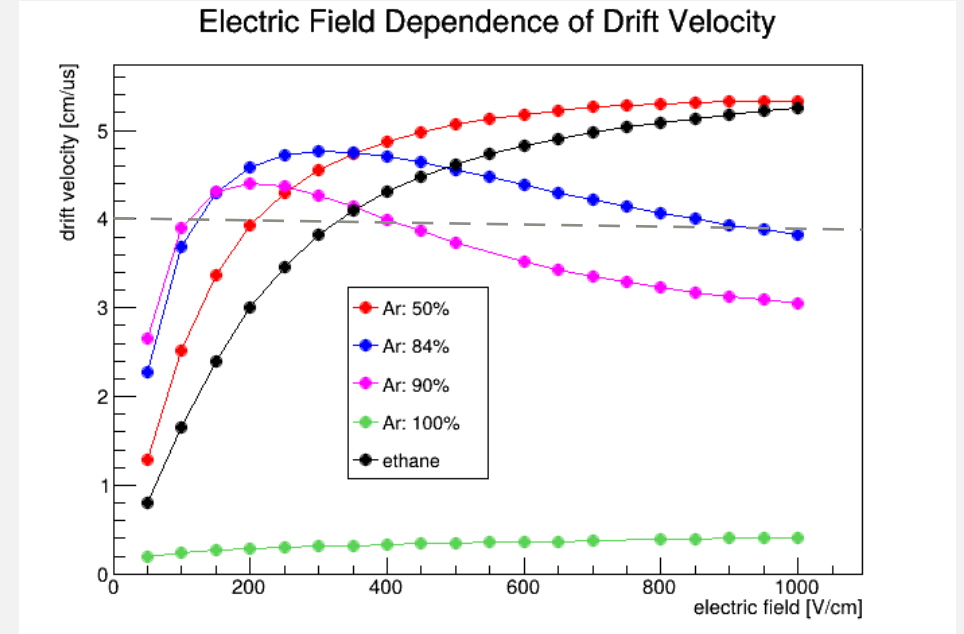
電場の要請値

ドリフト速度・拡散の2つの観点から
ドリフト電場の要請値を決める

シミュレーション(Magboltz)の結果を使用

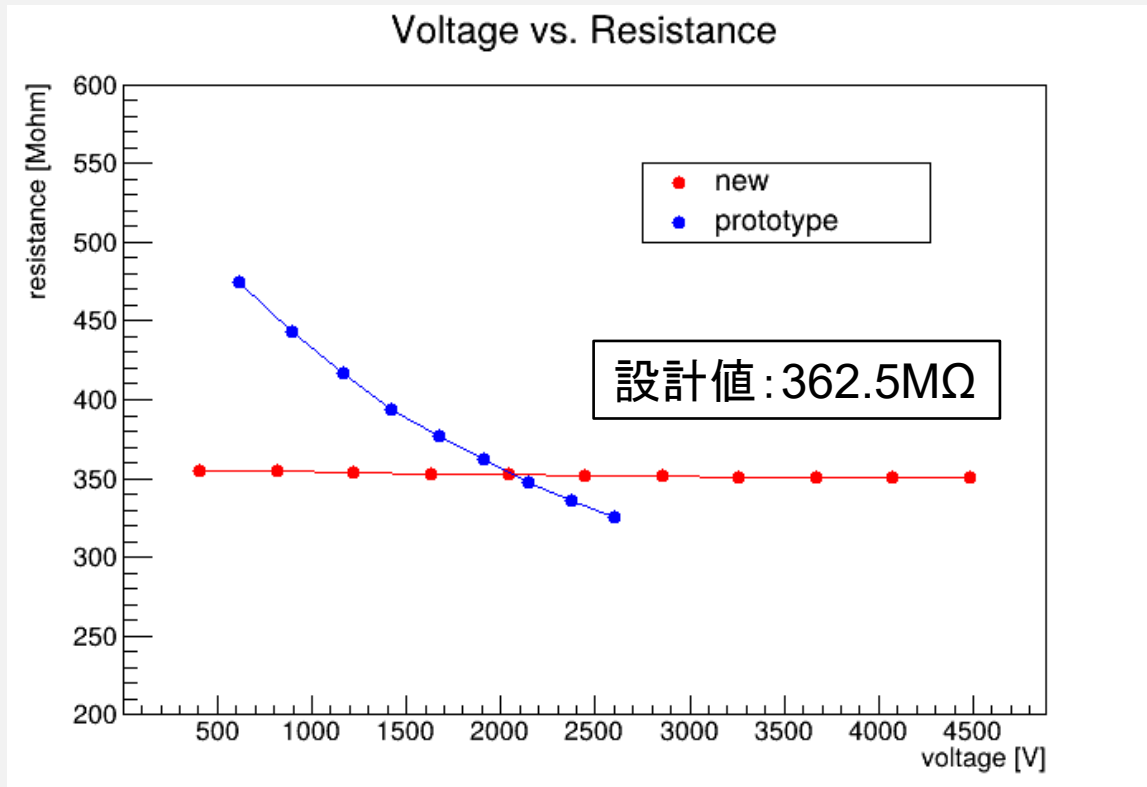
- ドリフト速度(上): 4cm/μs以上を要求
 - 現在採用している混合比(青)では150V/cmで要求を満たす
- 縦拡散(下): 検出効率に影響
 - ドリフト電場を強くしていくと縦拡散は減少する

以上より、150V/cmを要請値とする



新フィールドドケージ

- 放電が起こることなく150V/cmを達成
- 抵抗値の安定性UP



旧フィールドドケージ
に別れを告げた

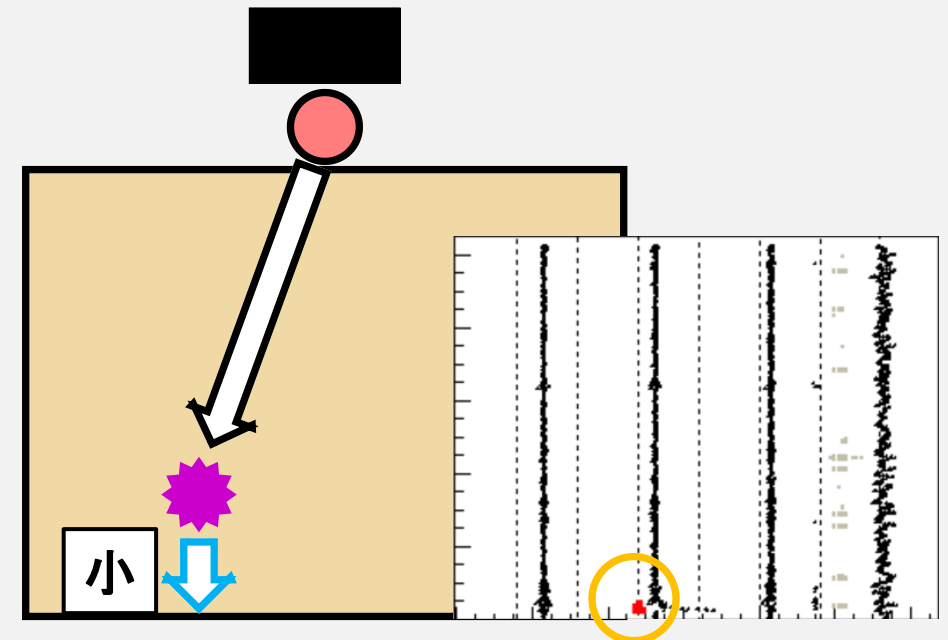
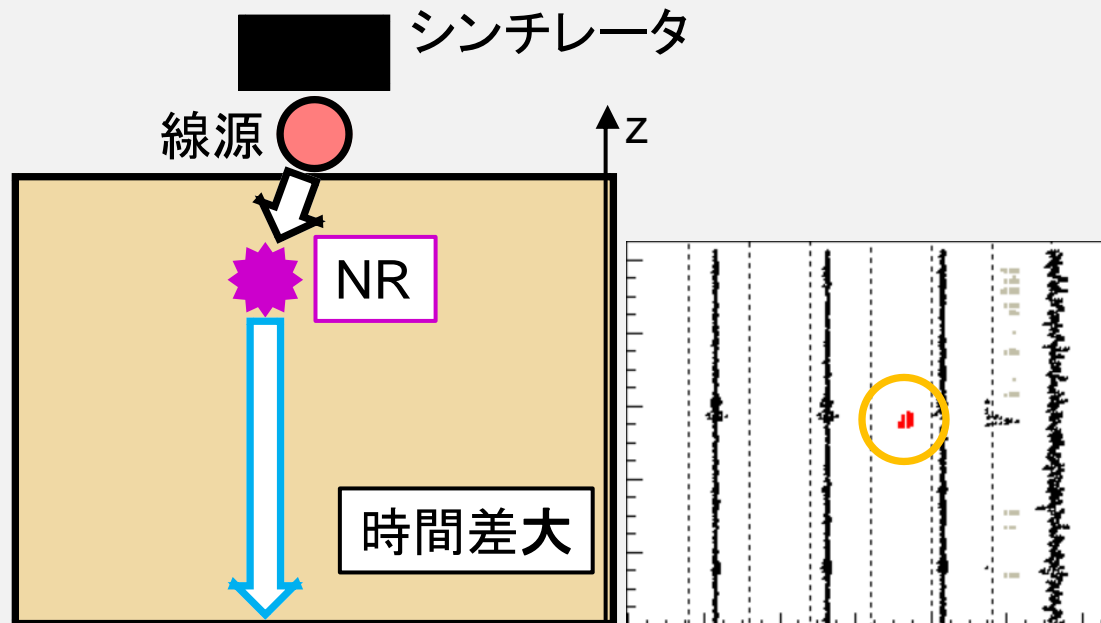
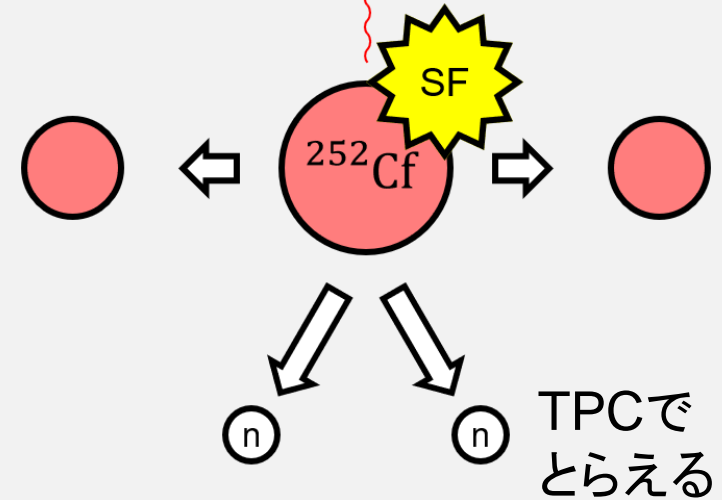


新フィールドドレーズの性能評価

γ トリガーに使用

ドリフト速度の測定

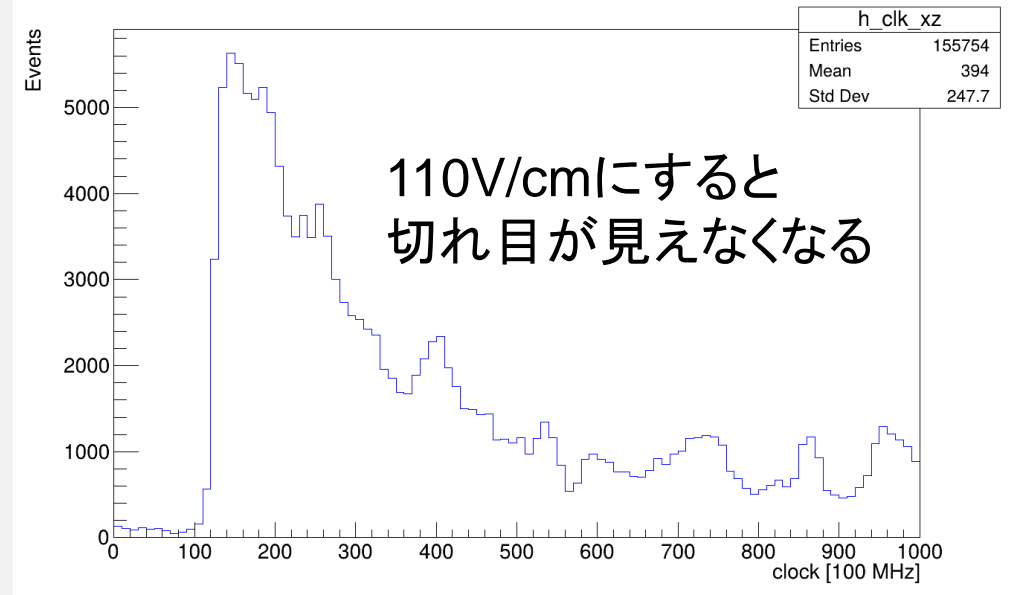
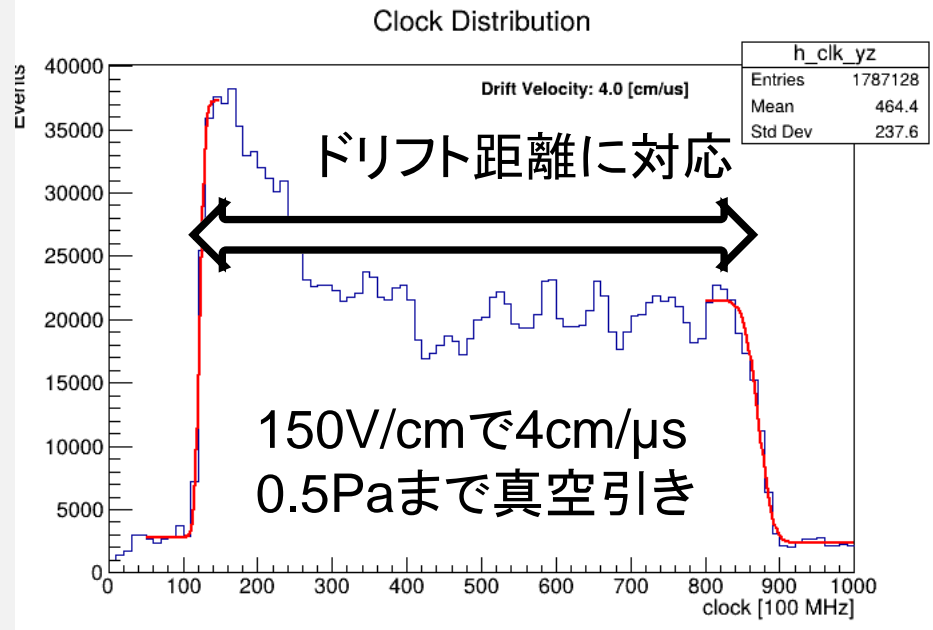
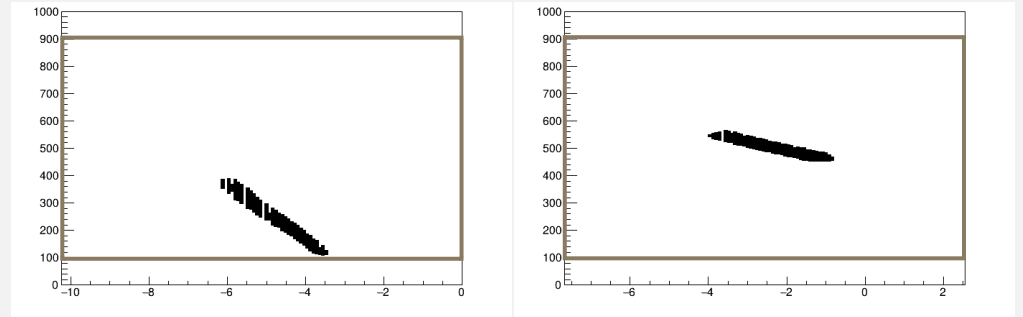
- ^{252}Cf の自発核分裂(SF)を利用
 - 複数のガンマ線・中性子を放出
- トリガーとの時間差でz座標を再構成



ドリフト速度の測定

- ToT分布からドリフト速度を見積もる
- ドリフト電場の強さはもちろん
ガス純度もドリフト速度に影響？
 - 50Pa程度では切れ目が見えない

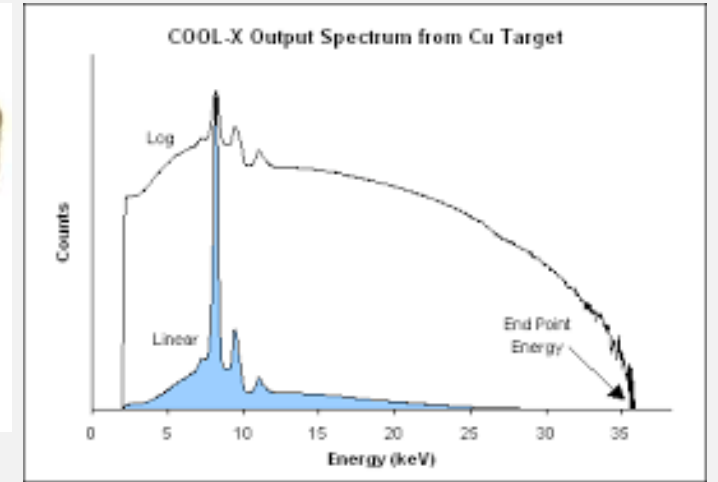
陽子反跳の2イベント
z座標の大きいイベント(右)は
以前は確認できなかった



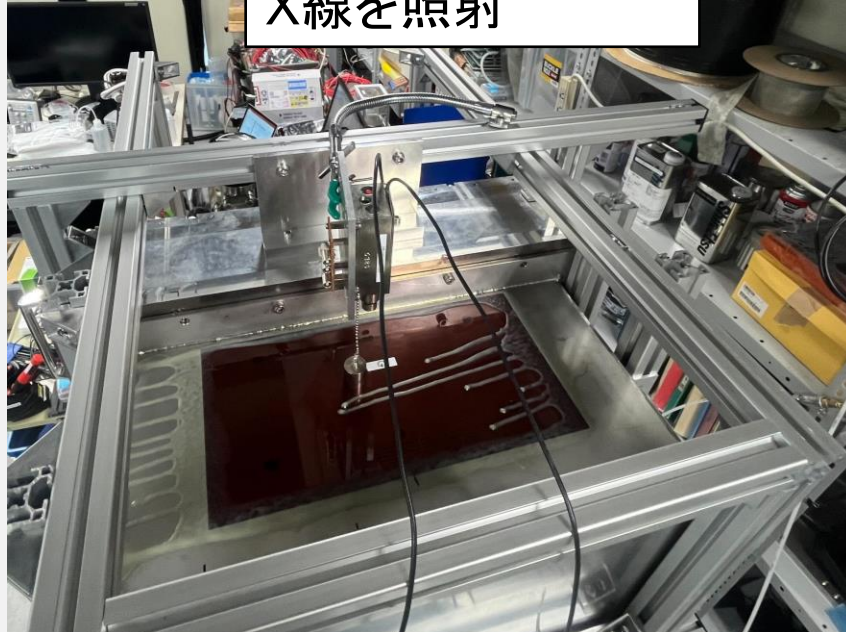
エネルギー較正

Amptekの「COOL-X」を使用

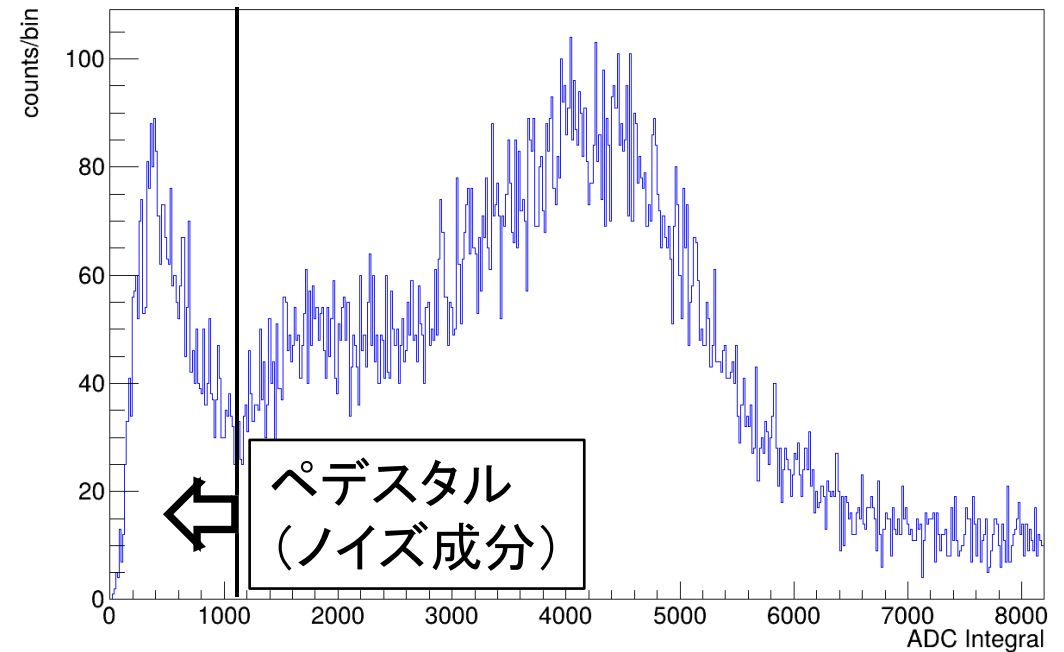
- 8keVのX線でのエネルギー較正が可能であることを確認



ポリイミドの窓から
X線を照射



ADCの積分値のスペクトル

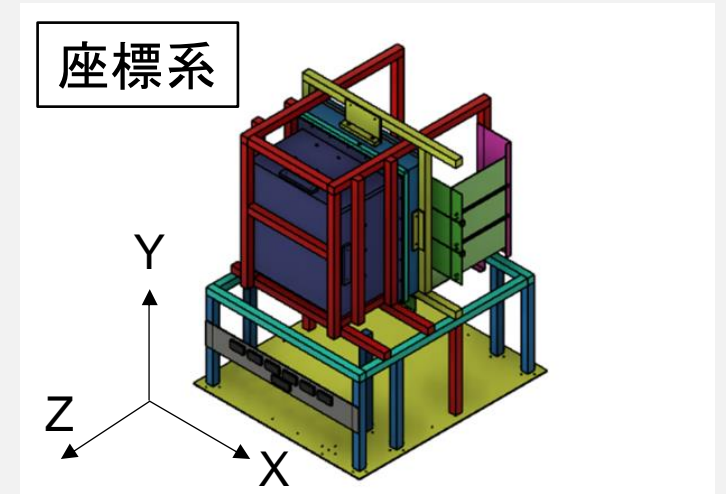


ビーム試験の準備OK

神戸大でのstudyで検出器の応答を理解

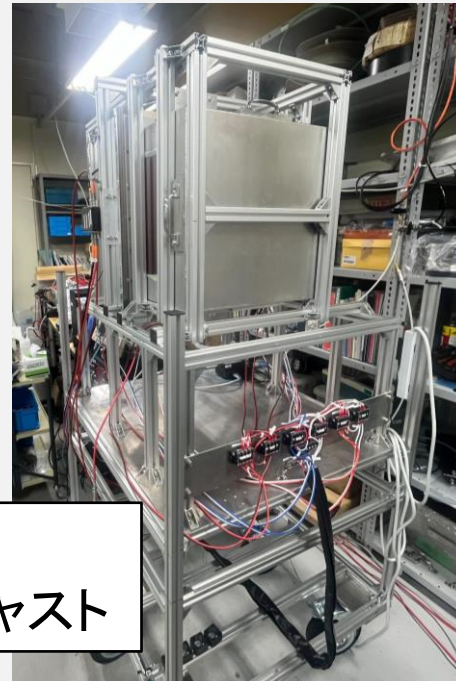
- ドリフト速度: $4\text{cm}/\mu\text{s}$ 、ガスゲイン: $0(10^4)$

AISTへ運搬して中性子ビーム試験を実施

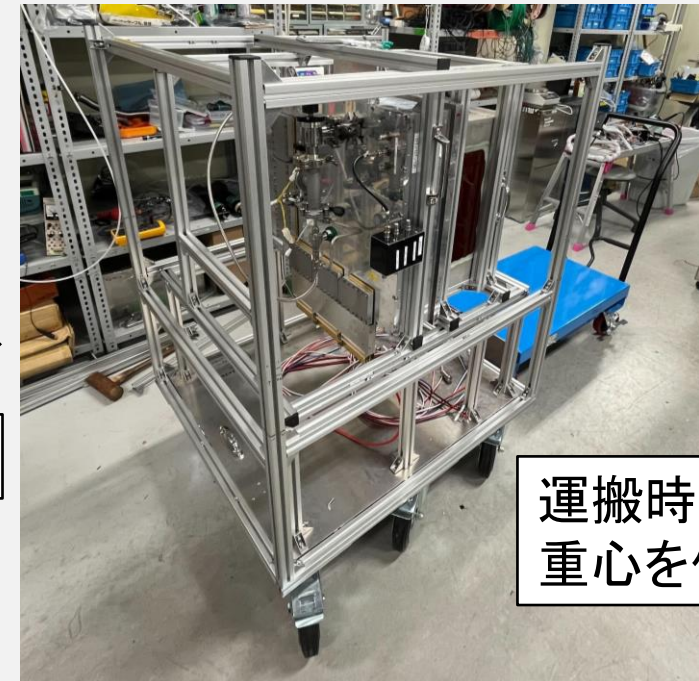


- GEMの歪み
- 運搬時の振動の観点からTPCを90度回転

ビーム照射時
高さをビーム軸にアジャスト



transform

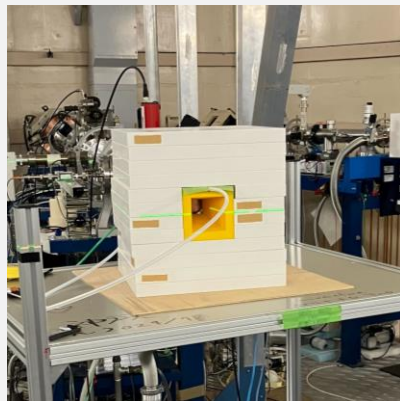
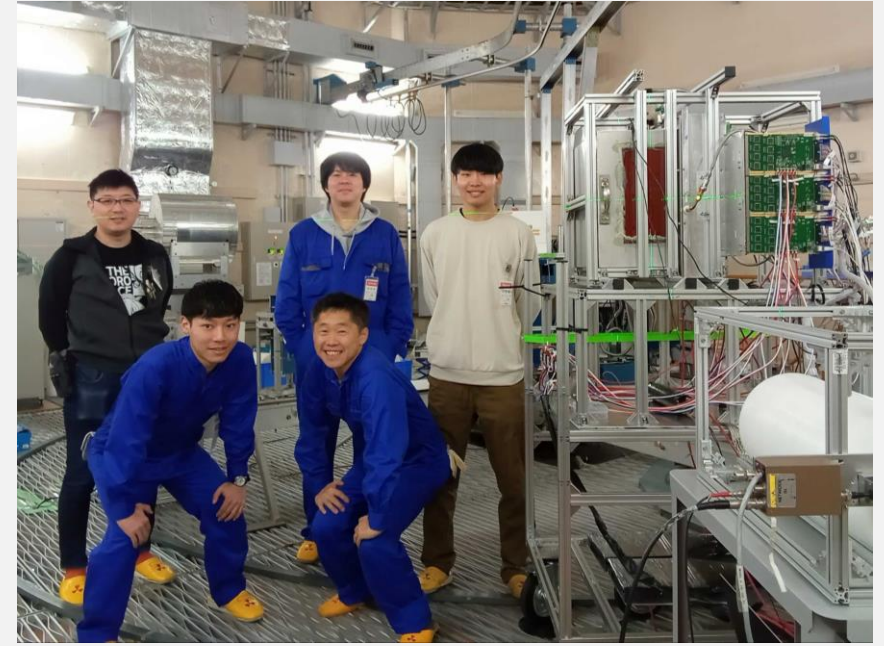


運搬時
重心を低くする

先週のビーム試験

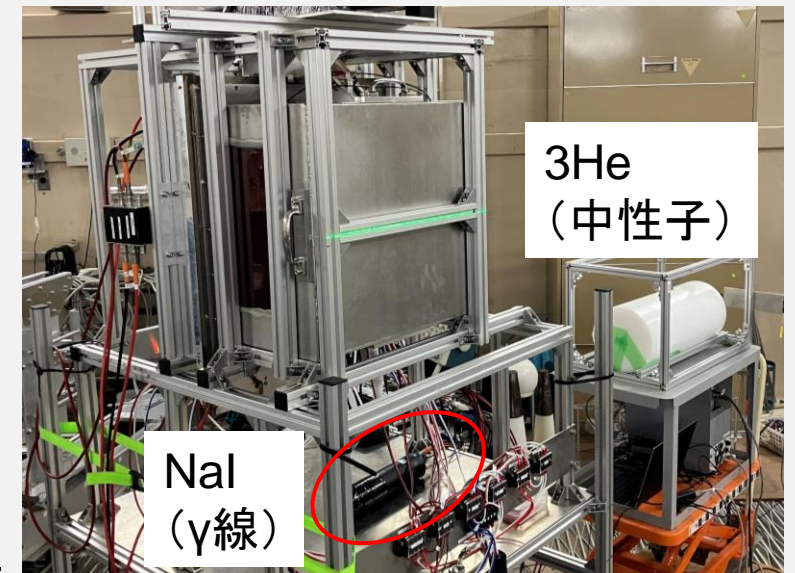
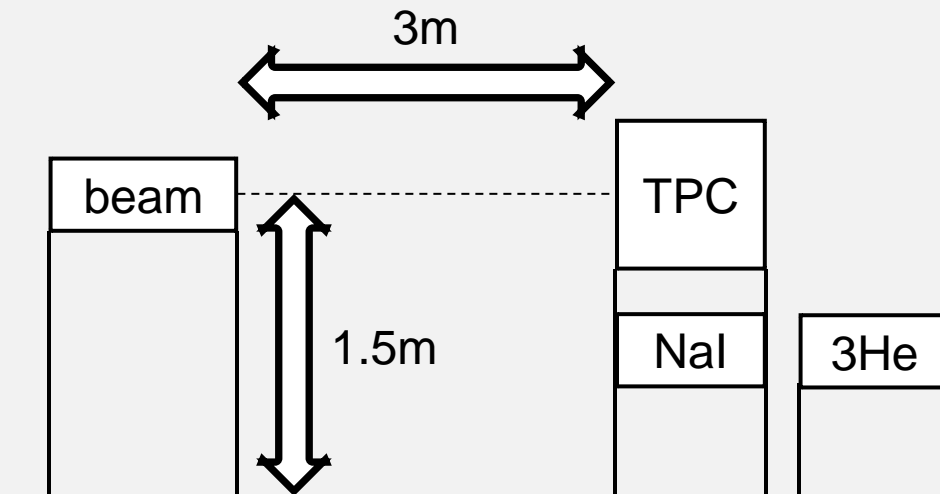
2024年12月 @AIST 太字は前回との変更点

- ビーム→**565keV**の中性子
- 封入ガス→Ar: C₂H₆ = 84: 16(体積比)
- 有感領域→20cm × **30cm** × 30cm



コリメーター
を設置

セットアップ図

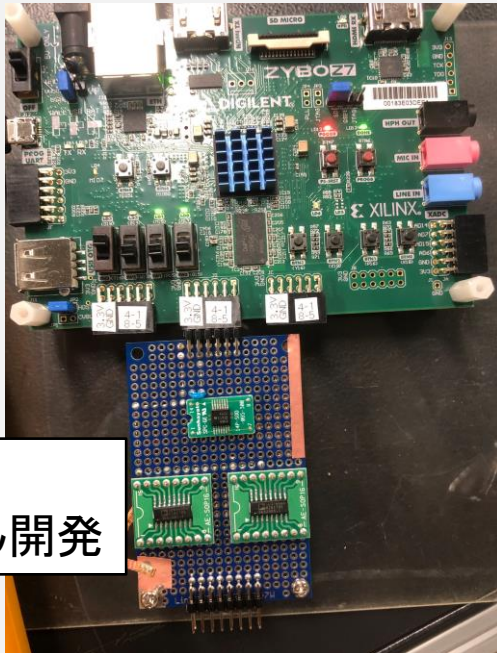


データ取得のようす

総トリガー数: 3.5×10^6

grafanaでモニター

- 3keVが見える設定で安定したデータ取得ができた(6時間半)

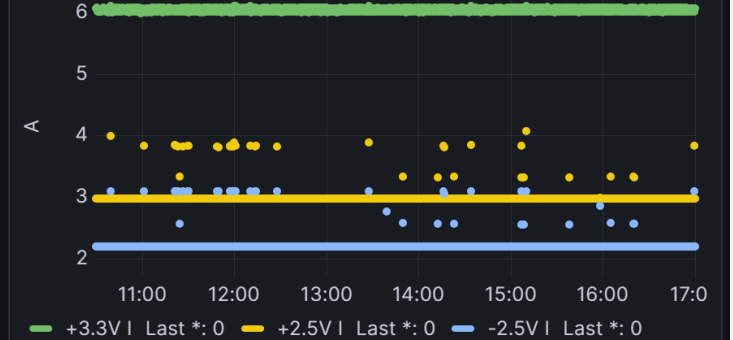


scaler
東野さん開発

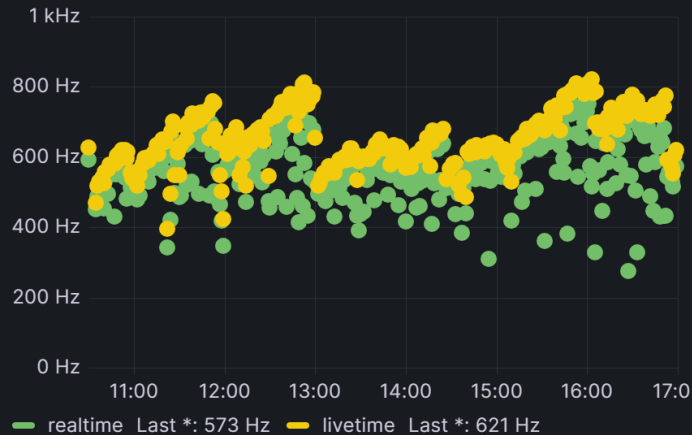
3Heレート(中性子モニター)



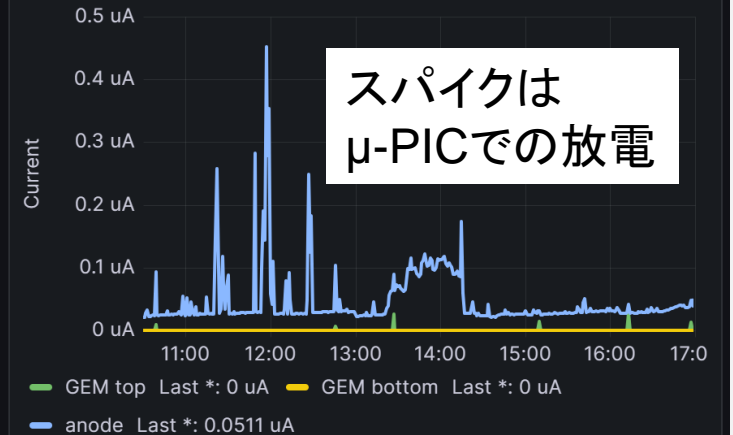
読み出しボード電流値



トリガーレート



GEM・μ-PIC電流値



期待されるMigdalイベント

ビーム発射口から1mの位置でのMigdalイベントのレート

- 典型的な中性子フラックス: $1000 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- クエンチングについては考慮していない

PTEP 2021, 013C01より引用

Target gas	Ar 1atm ((30cm) ³)
Number of nuclei	7.26×10^{23}
Cross-section for 565keV neutron	0.65 barn
Migdal branching	7.2×10^{-5}
Fluorescence yield (K shell)	0.14
Scaling factor	2.92
Event rate	603 events per day

本測定では
中性子フラックスが1/9
有感領域が2/3
Migdalイベントは
数個のオーダー

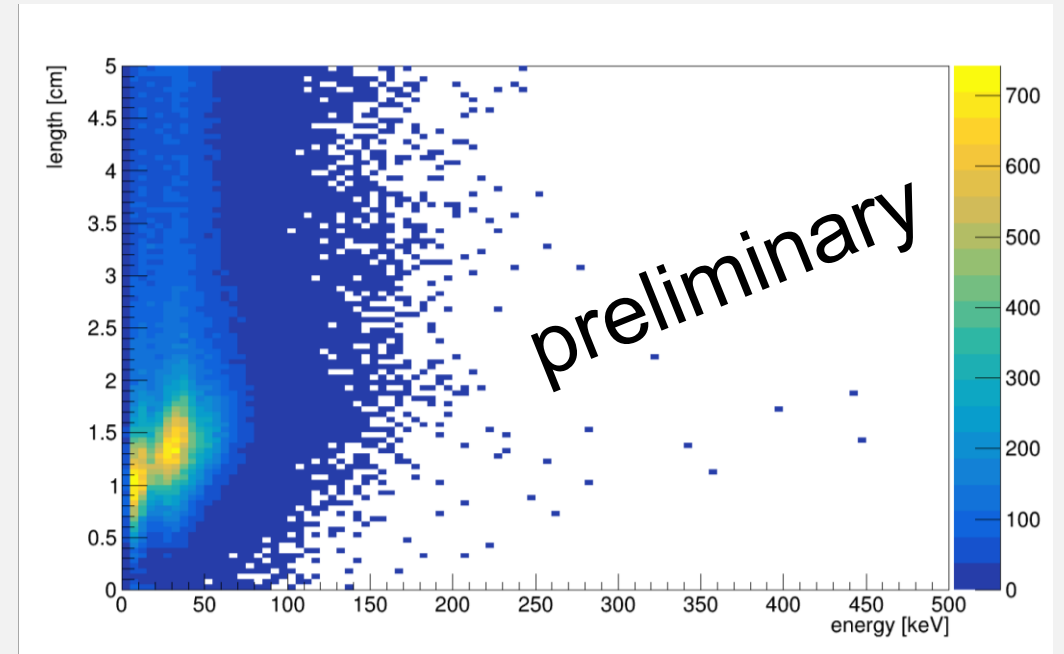
解析の方針について

陽子反跳とAr原子核反跳の識別が課題

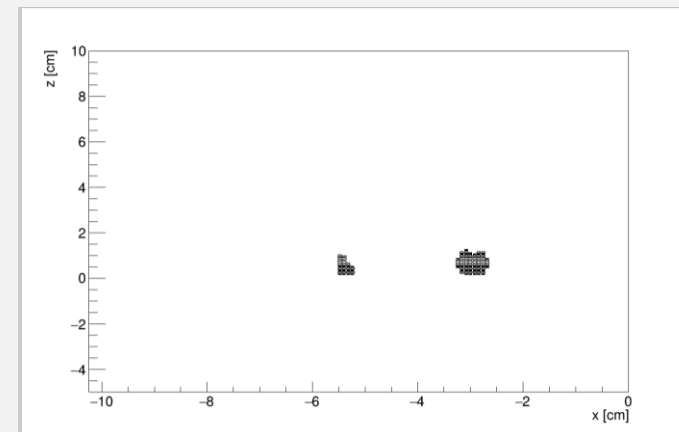
- 最大反跳エネルギーの違いを利用
 - 陽子: 565keV、Ar原子核: 54keV
- 方向感度を活かした解析も検討中

他にもすべきことはたくさん

- NaIの測定データを用いたBGシミュレーション
- 検出効率の評価
- 2-cluster解析
 - Ar原子核反跳 + 3keVを選別



エネルギー vs. 飛跡長の2次元プロット
算出方法については最適化の余地あり



2-cluster
イベントの例

まとめと今後の展望

新フィールドケージの運用開始

- 課題となっていたドリフト速度の測定をクリア
- エネルギー較正の手法を確立した

先週AISTにてビーム試験を実施した

- フラックスは控えめながら高ゲインでデータを取得

今後の展望

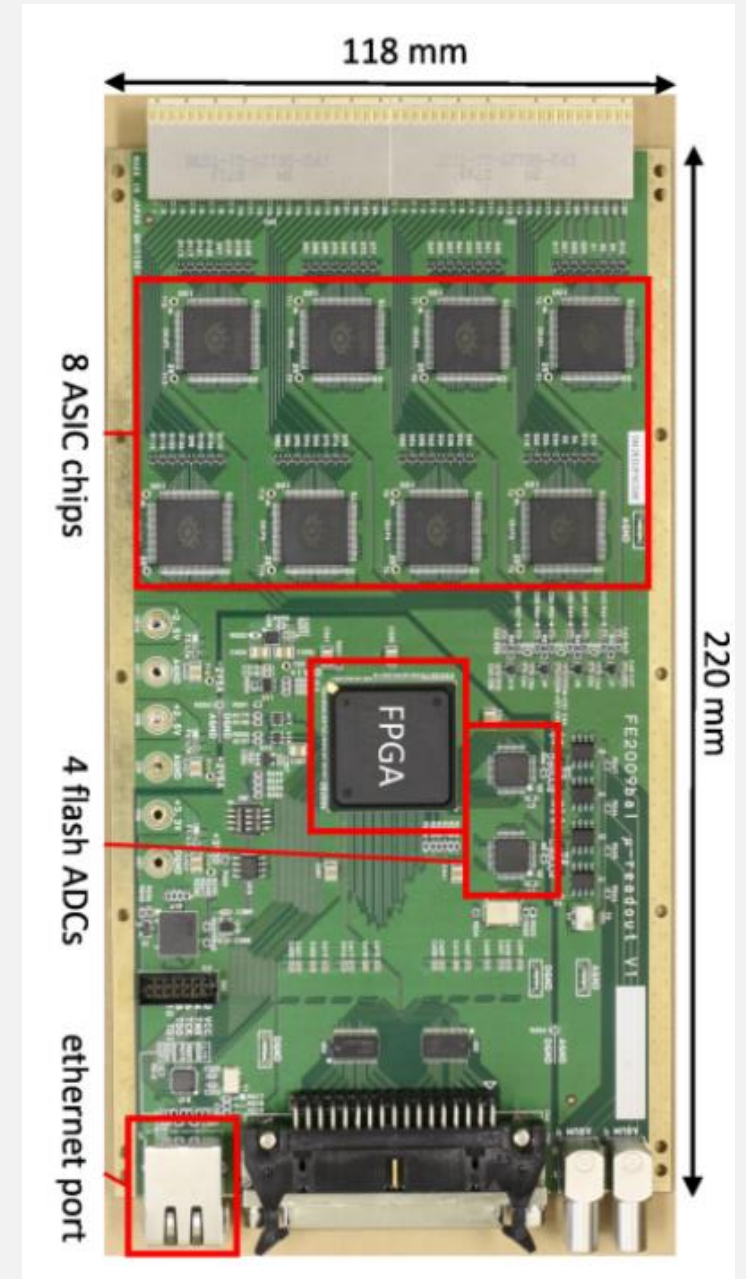
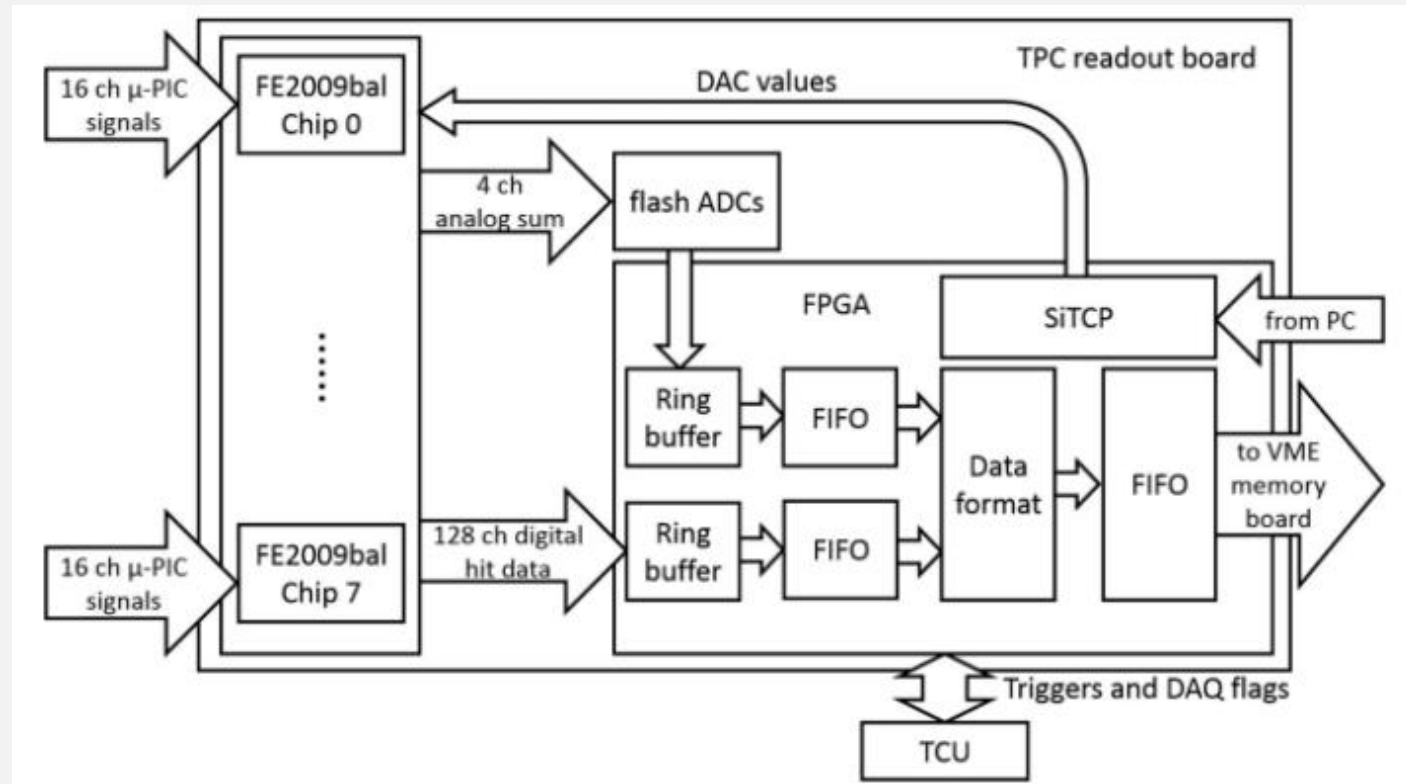
- 陽子反跳とAr原子核反跳の識別手法を確立する
- NaIで取得したデータを用いたBGシミュレーション
- 検出効率の評価
- 2-cluster解析



BACK UP

読み出しボード

■ 岩城ボード

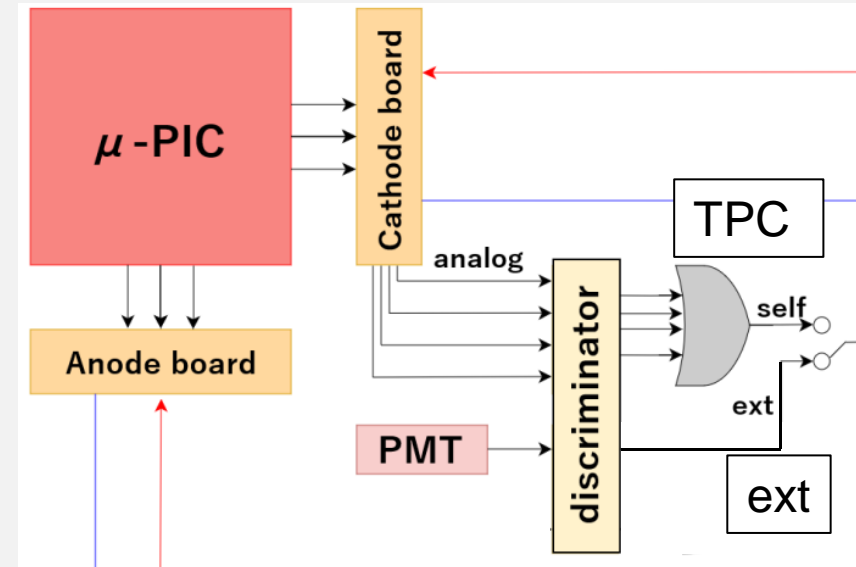


トリガーの改良

^{252}Cf runにおけるトリガーの問題点

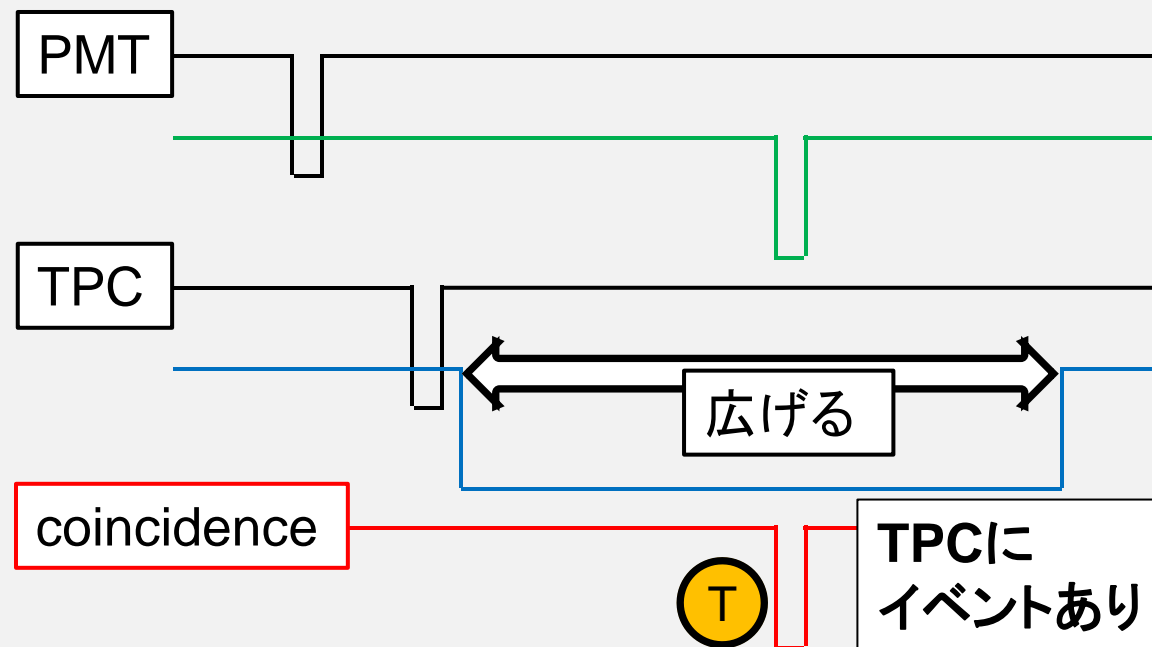
- 高確率でTPCにイベントがない
- ◎ TPCとのコインシデンスをとって解決

p.4 回路図の一部



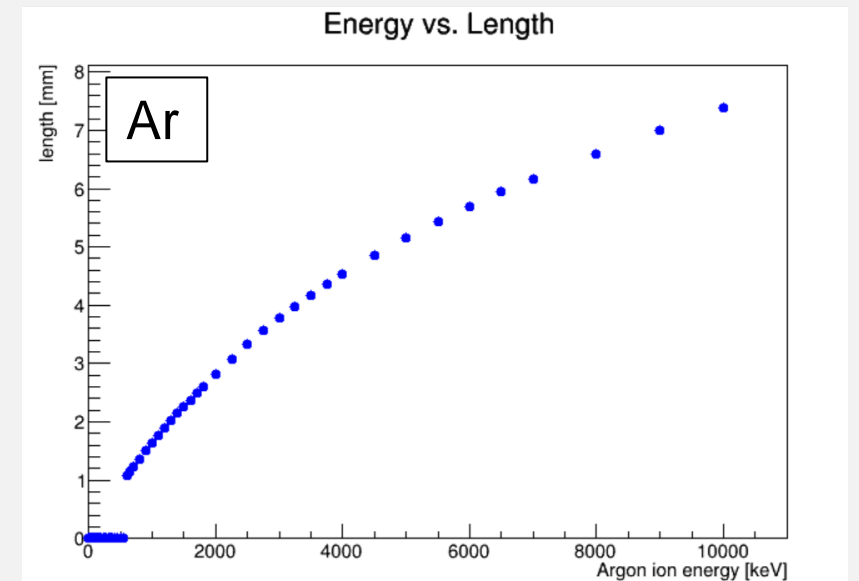
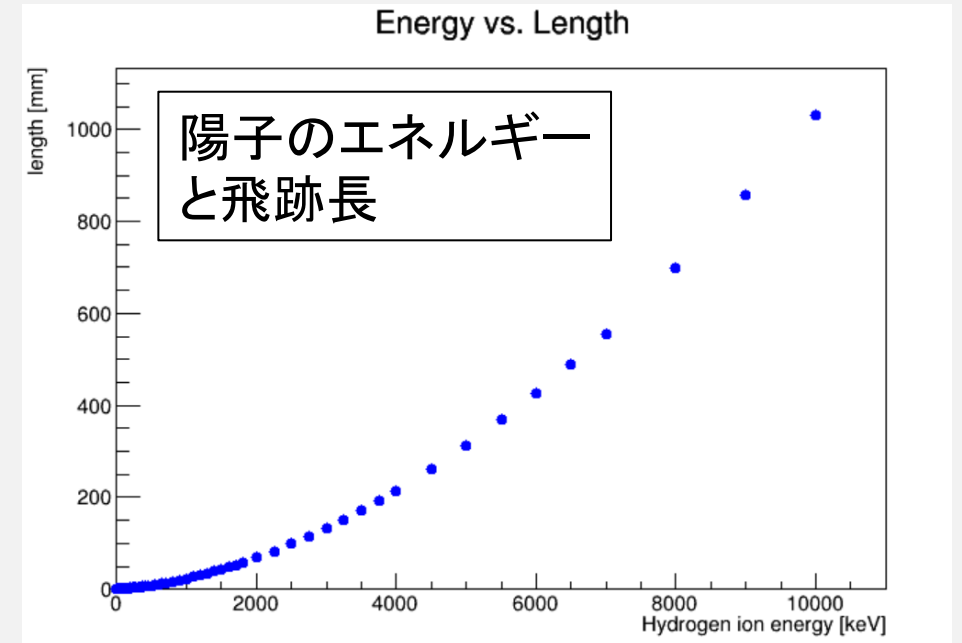
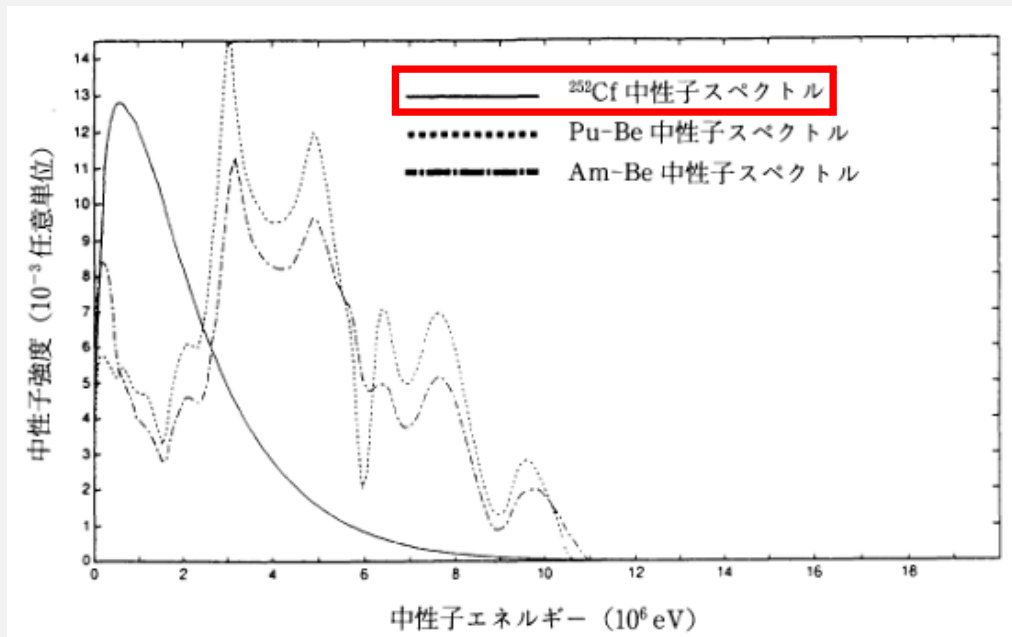
従来のextトリガー

- TPCの信号の有無を問わない
→効率が悪い



^{252}Cf run関連の情報

- 半減期: 2.645年
- α 壊変: 96.9%、自発核分裂(SF): 3.1%
- 1個のSFにより約3.8個の中性子を放出
 - 1MeV付近で極大、平均は2~3MeV



宇宙線ミューオンの飛跡

- 3keVを観測するのに十分なゲインであることを示唆

