



ガスTPCの大型化に向けた モジュール型飛跡検出器の性能評価

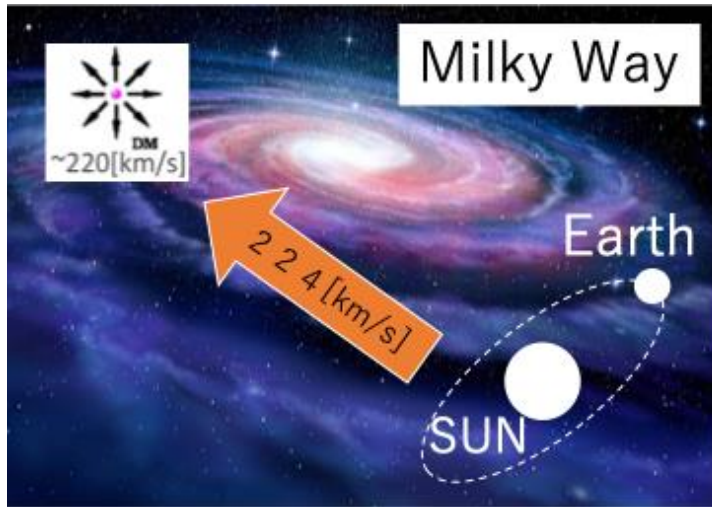
神戸大 生井 凌太

MPGD & ACTIVE媒質TPC合同研究会

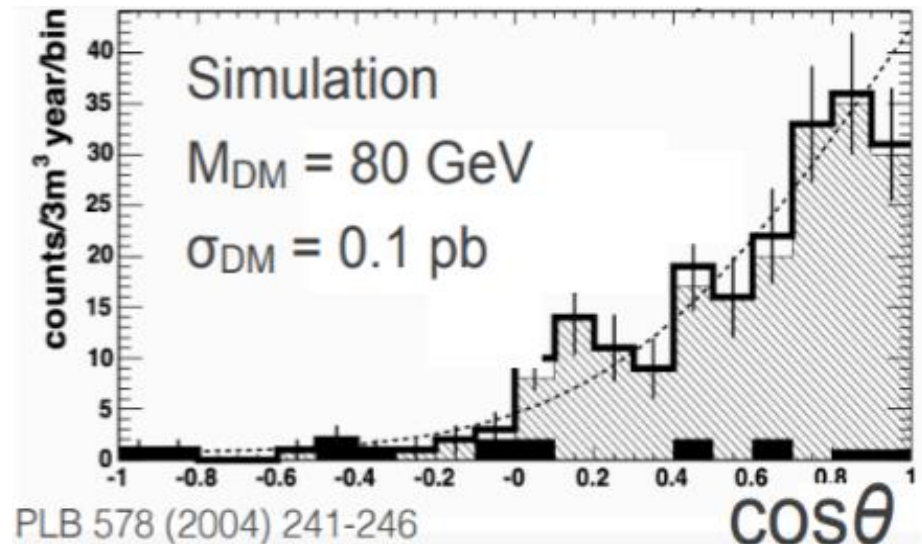
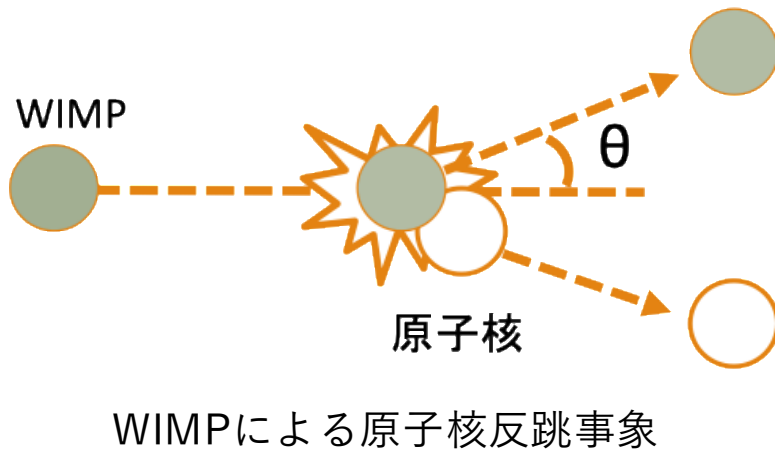
大阪大学 核物理研究センター

2024/12/23 - 24

方向に感度をもつ暗黒物質探索実験

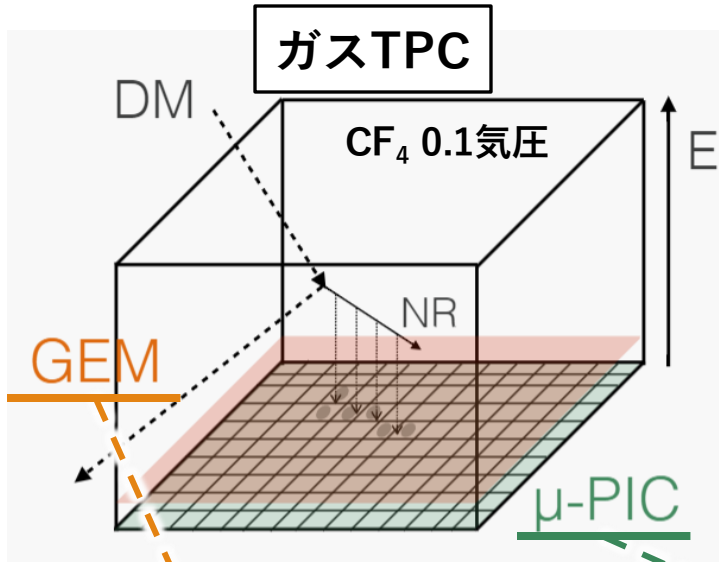


- WIMP (Weakly Interacting Massive Particles)
: 暗黒物質の候補粒子
- 太陽系の進行方向からのWIMPの到来量が多くなる
→この方向依存性をWIMPと原子核の弾性散乱による反跳角度分布から観測
- メリット
 - 方向分布 + エネルギーによる強固な観測の証拠
 - neutrino fogを方向依存性を用いて解析で除去可

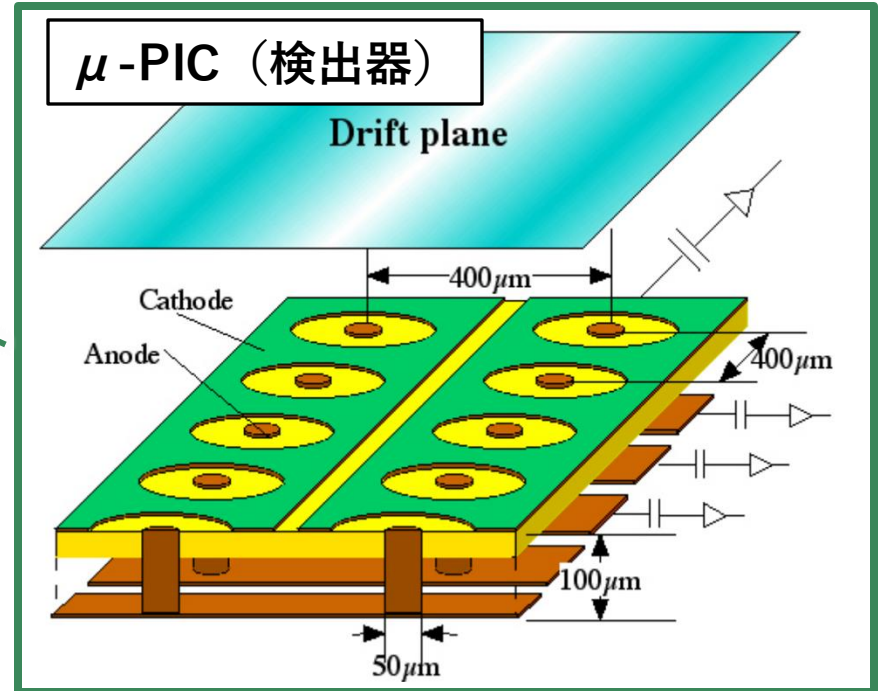
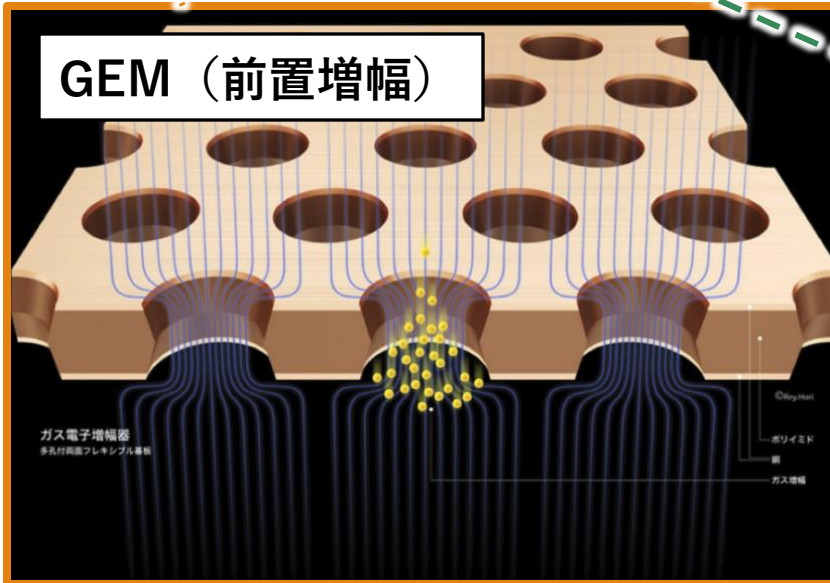


原子核反跳の角度分布 (シミュレーション)

NEWAGE実験

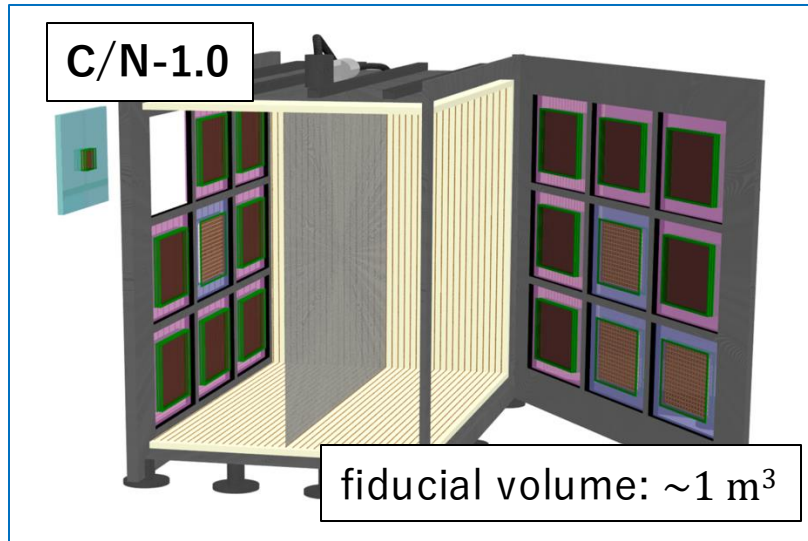


- ガスTPC (Time Projection Chamber)
- CF₄ 0.1気圧
- GEMによる前置増幅
- μ-PIC(Micro Pixel Chamber)による三次元読み出し



- 位置分解能 (二次元) + 時間分解能 (一次元)
- 電極付近に高電場を形成し、電子の雪崩増幅を行う

CYGNUS-KM / NEWAGE (C/N-1.0)



➤ 更なる感度向上に向けて

- 大型化 (従来の30倍)
- 検出器のモジュール化 (最大9 × 2台)

➤ Module-1 (GEM + μ -PIC)

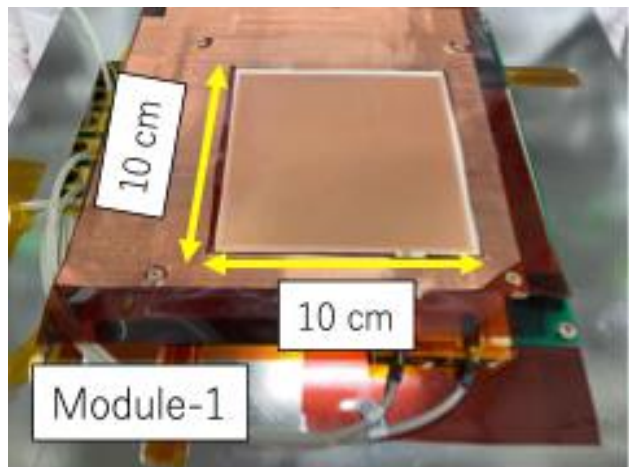
- 10x10 cm² fiducial volume
- 三次元での飛跡再構成が可能
- 検出器の性能評価 (本研究の目的)



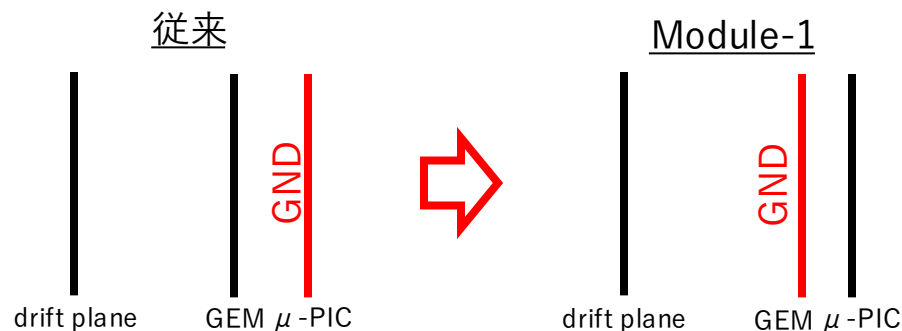
Module-1

➤ 現行NEWAGEからの変更点

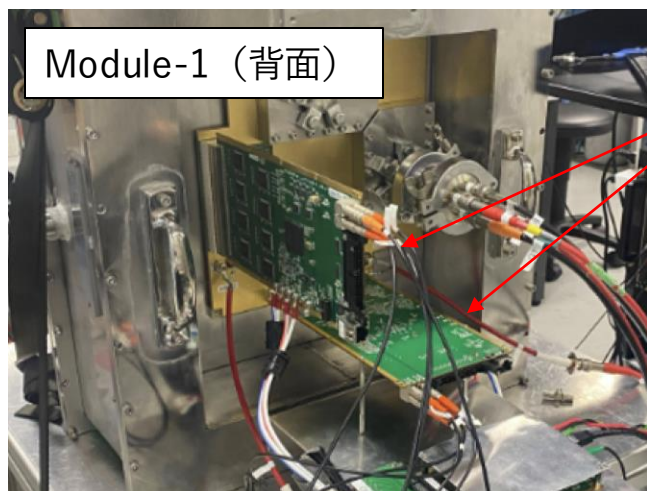
- GND面の変更



- C/N-1.0搭載時周囲の電場を乱さないため
- μ -PIC基板に銅箔を貼ってGND面に



- 隣のモジュールに干渉しないDAQシステム (SMILE実験 高田さん設計)

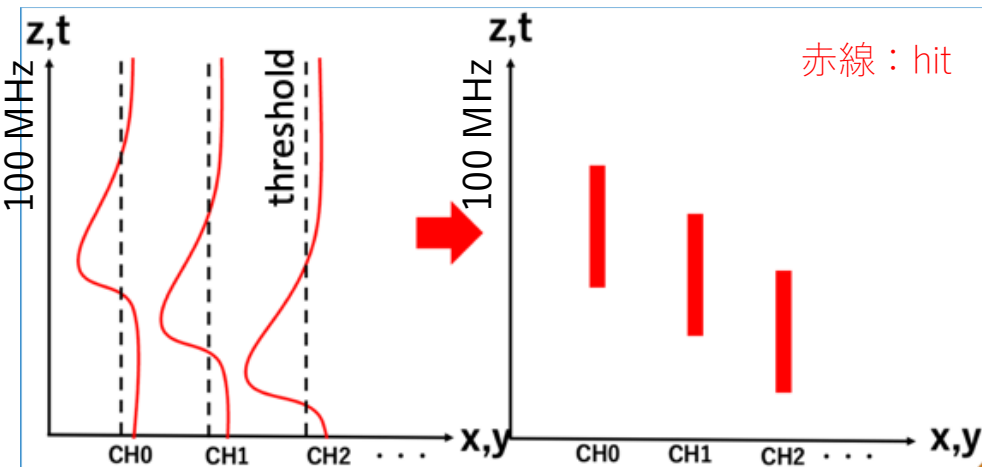


➤ FE2009bal μ -readout V3.1ボード (SMILE-3実験、京都大)

- strip pitch: 800 μ m
- Anode, Cathode: 各128 ch
- ADC波形: 4 ch (32 chごとのsum)

飛跡のパラメータ解析方法

➤ 飛跡再構成の概略



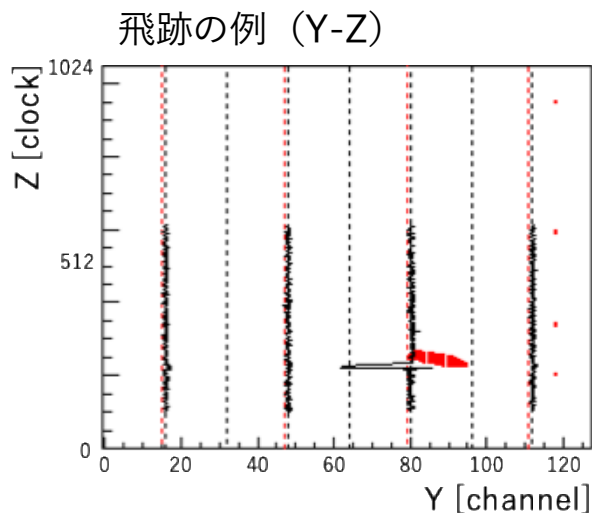
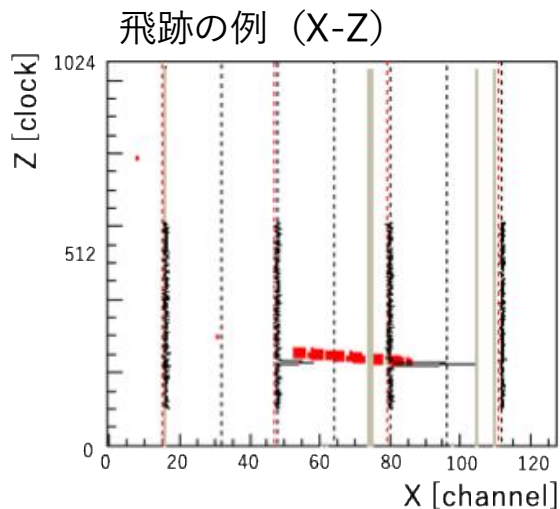
➤ 長さ・角度

- hitの立ち上がりの位置情報から飛跡の長さ・角度を計算

➤ エネルギー

- カソードのADC波形でthresholdを超えたclockのADC値の和

➤ 飛跡のパラメータから反跳粒子の識別を行う

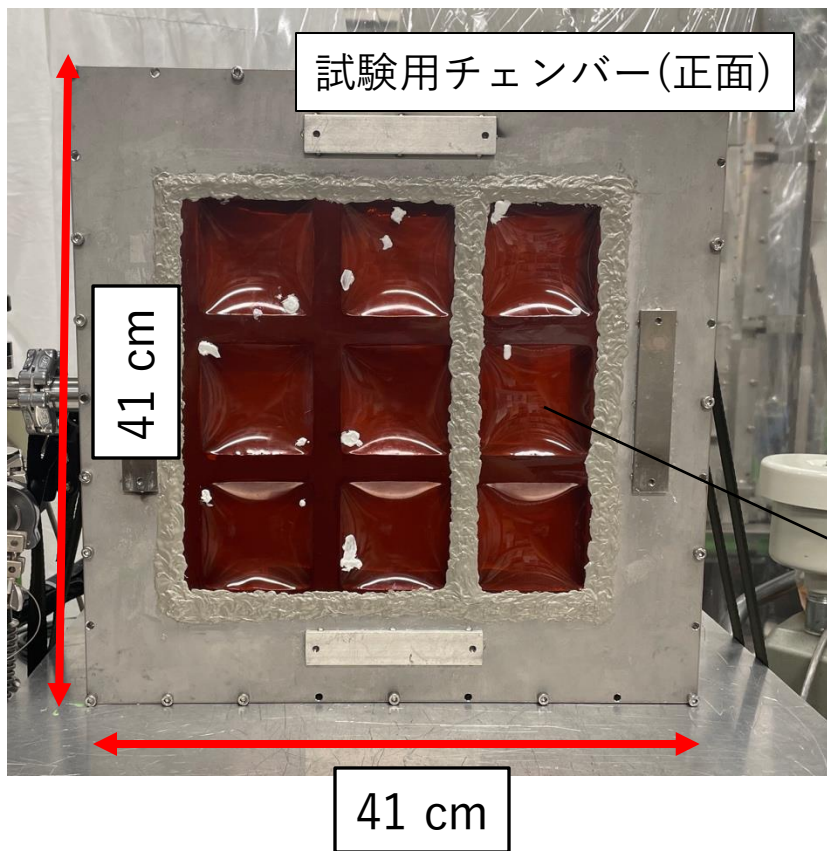


赤線 : hit

黒線 : ADC波形

- Energy: 498.7 keV
 - Length: 3.1 cm
- protonと推測される

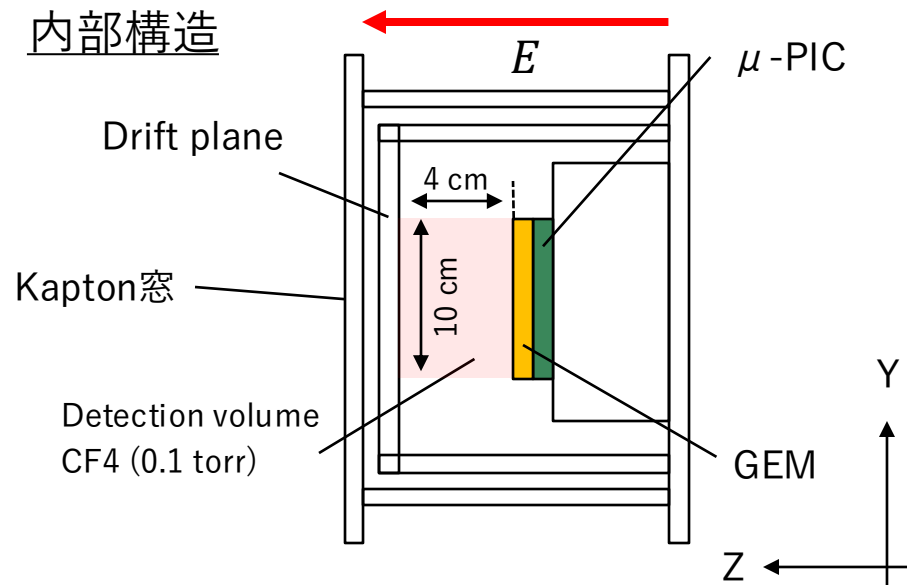
Module-1の性能評価



➤ 試験用チェンバーを使用

- sensitive volume: $10 \times 10 \times 4 \text{ cm}^3$
- CF_4 ガス 0.1気圧

内部構造



➤ trackを再構成するために必要な以下のパラメータを評価

1. ゲイン特性評価 (ADC値→energyへのcalibration)

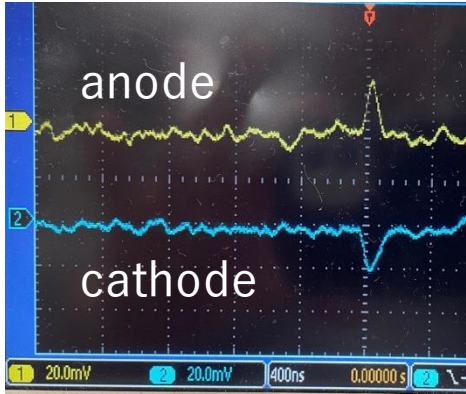
- ^{55}Fe の5.9 keV特性X線を使用

2. 電子のドリフト速度評価 (trackのZ方向長さのcalibration)

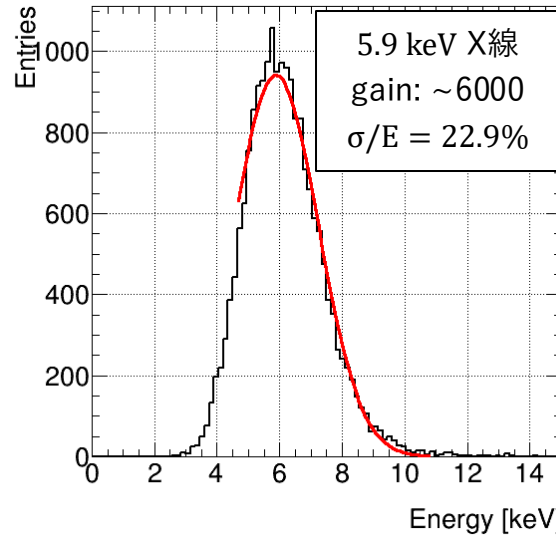
- 宇宙線 μ を使用

ゲイン特性評価

基礎応答評価



▲ 5.9 keV γ の waveform



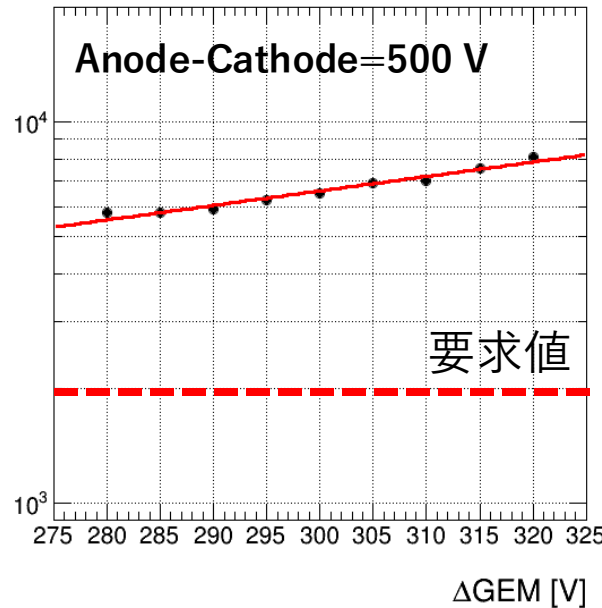
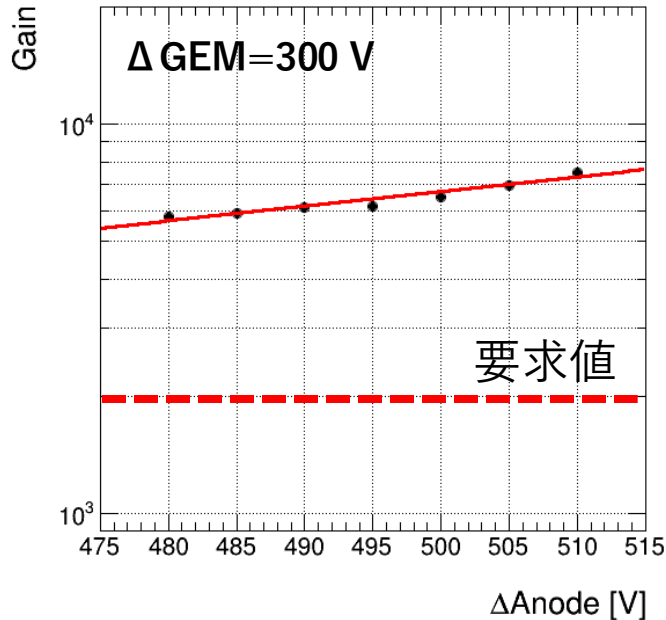
測定諸元

- CF_4 (0.1 atm)
- ^{55}Fe の 5.9 keV X線

分解能

- $\sigma/E = 22.9\%$ @ gain~6000

μ -PIC電極の電位差とゲインの関係

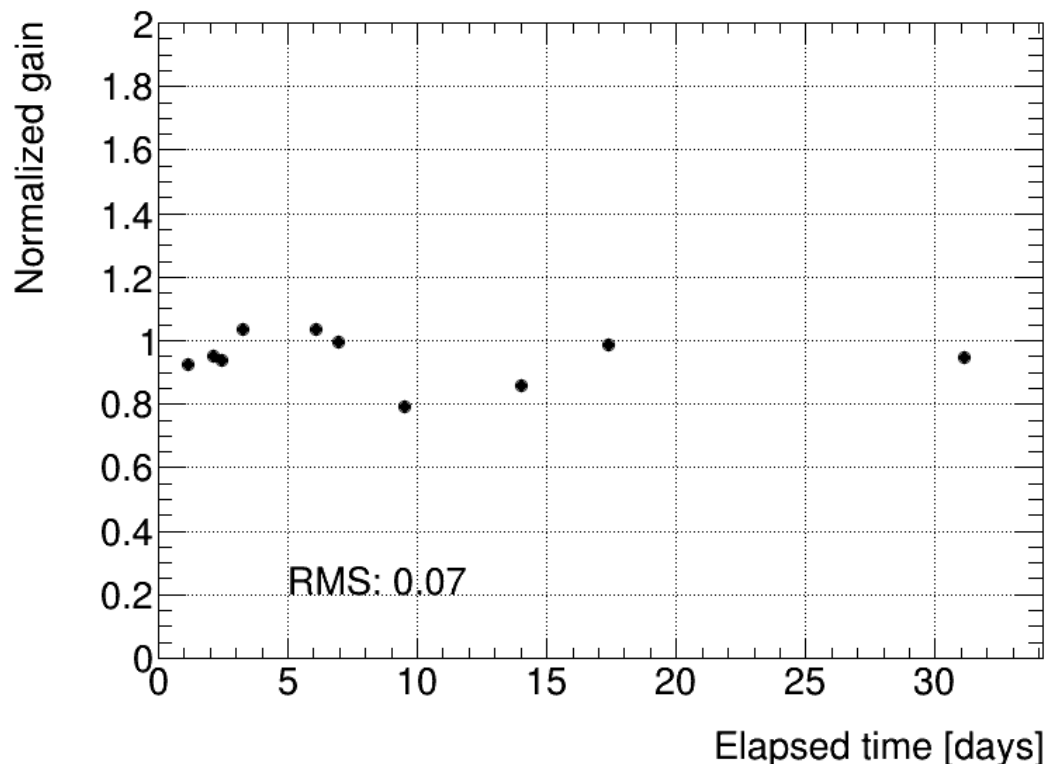


測定諸元

- CF_4 (0.1 atm)
- ^{55}Fe の 5.9 keV X線
- ゲイン要求値: > 2000
- 安定な印加電圧で達成可能

検出器の動作安定性評価

ゲインの時間依存性



➤ ガス純度の低下によるゲインの変動を測定

➤ ガス封入後のゲインを測定

- 規定の電圧値で測定

→ 約 7% のゲインの変動

➤ ノイズによる系統誤差

検出器の動作安定性

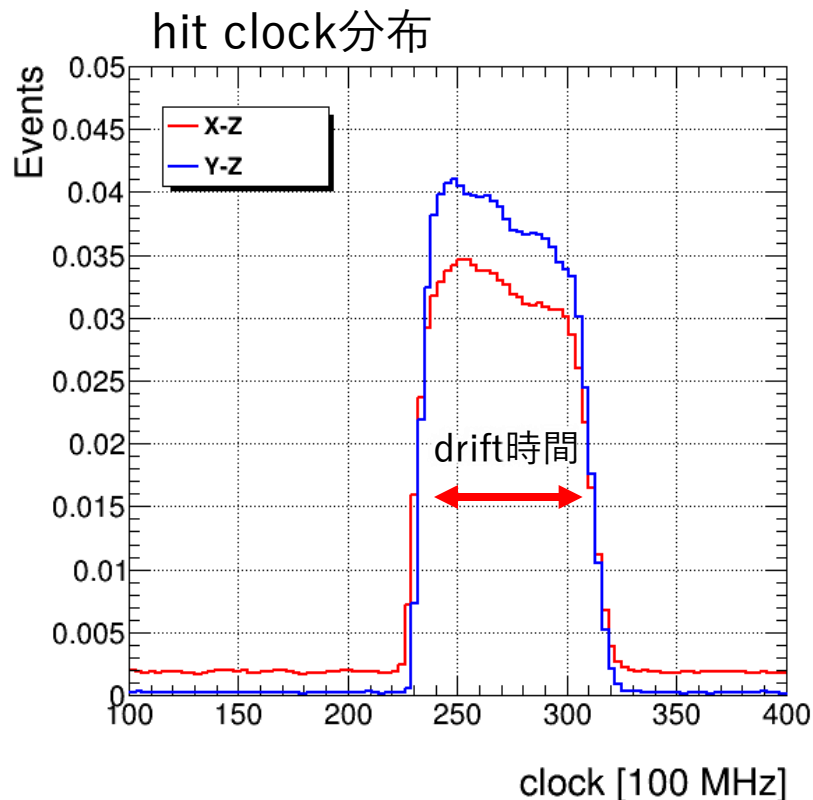
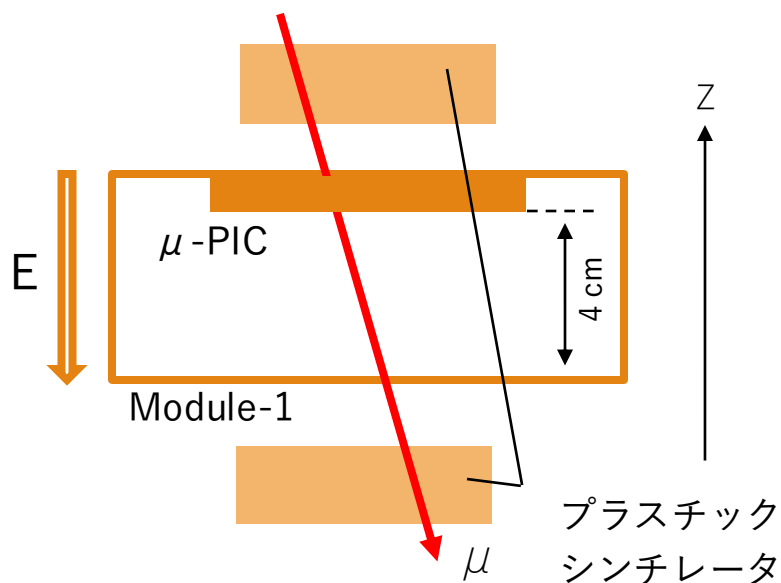
➤ 連続してゲイン > 2000 に必要な電圧を印加し続ける

➤ 約 3 週間の安定した DAQ の動作を確認（現在も動作中、要求値 1 ヶ月）

ドリフト速度評価

- Z方向のtrackの長さを求めるためにはドリフト電子の速度を知る必要がある。
- cosmic μ を使用したドリフト速度評価

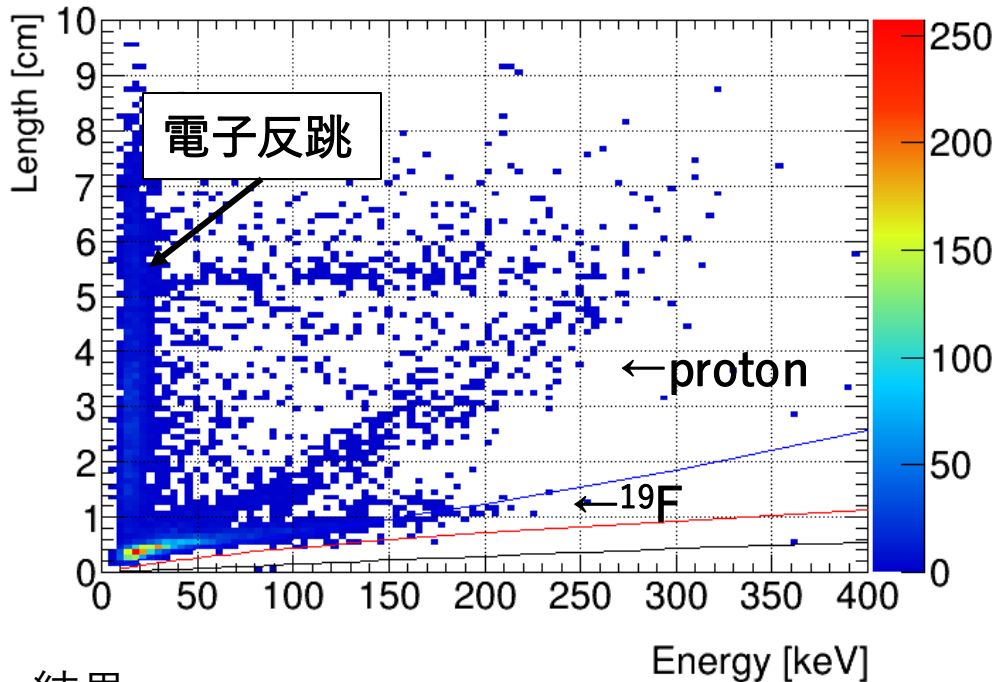
セットアップ概略図



- hitのあるclockのrangeがdriftにかかる時間
- drift volumeの高さ4 cm
- 求められたドリフト速度は5 cm/ μ s

再構成されたトラックのパラメータ

Trackのenergy vs length



- ²⁵²Cf中性子線源による応答確認
- シミュレーションとの比較
 - シミュレーション (SRIM)

- 青線 : proton
- 赤線 : ⁴He
- 黒線 : ¹⁹F

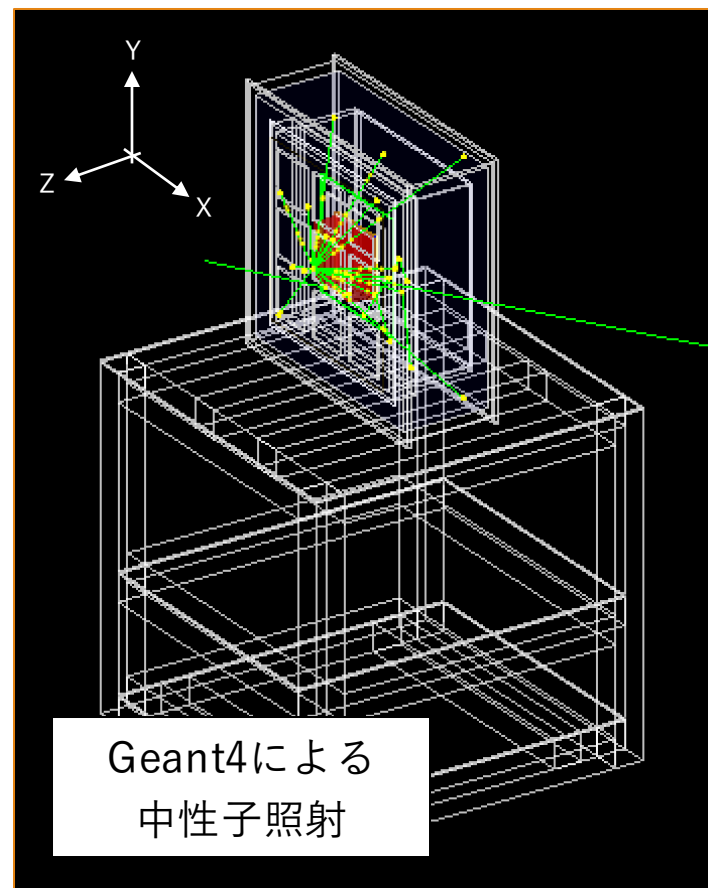
結果

- Module-1で再構成したtrackパラメータがシミュレーションと2倍以上異なる
- MCシミュレーションを用いてこの応答が再現されるかを確認
 - 検出効率が100%に収束するかを確認
 - ⁵⁵Fe calibrationによるエネルギーを使用した場合
 - protonのenergy depositがsimulationと一致するようにenergyを補正した場合

検出効率の評価

定義

- 検出効率 = 実際のHit数 / 理想的なHit数
simulation
- MC simulation (Geant4)
 - ^{252}Cf 自発核分裂の中性子スペクトル
 - +X方向から照射 (proton事象を減らすため)
- データ
 - ^{12}C 、 ^{19}F 原子核反跳のみを選別
 - 測定ゲイン: ~2500

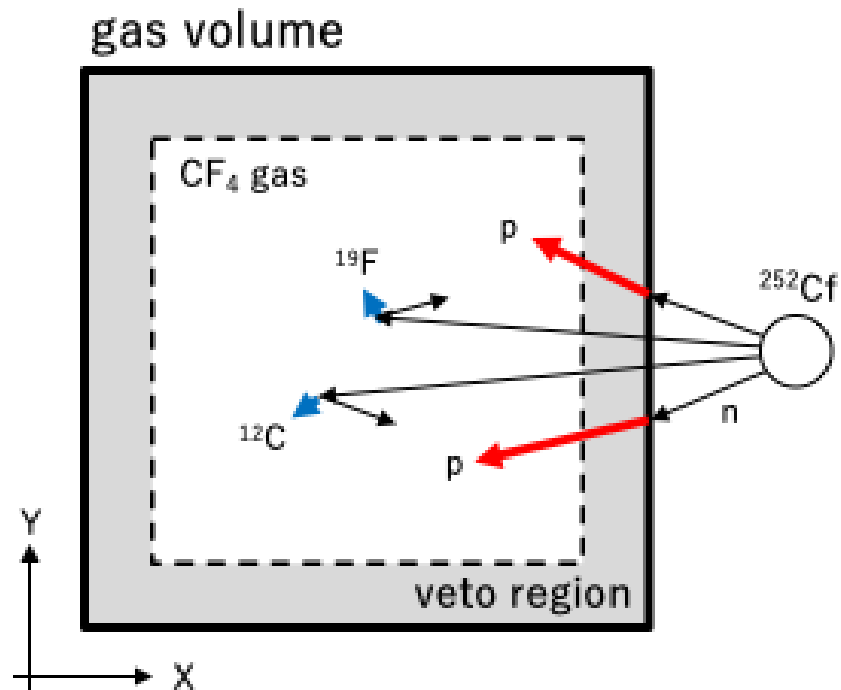


イベントセレクション

- ① Preselection: ToTが一定値に満たないイベントをカット
- ② Fiducial cut: veto regionをtrackに含むイベントをカット
- ③ Length cut: 粒子ごとのenergy depositの違いを用いたカット

Fiducial cut

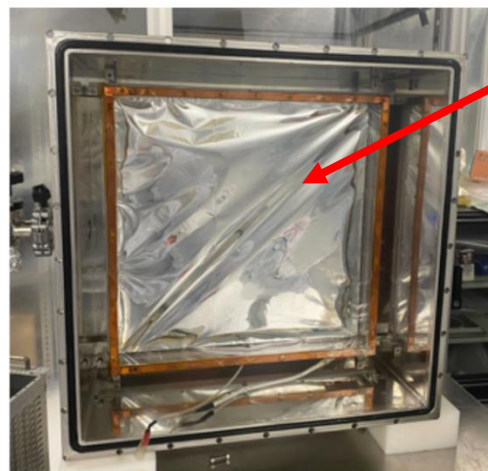
➤ Fiducial cut



- 壁面素材に含まれるH原子核の反跳
 - 壁面の放射性同位体ラドン崩壊によるα線
 - これらのtrackは壁面から伸びる
- trackの位置情報を用いてveto

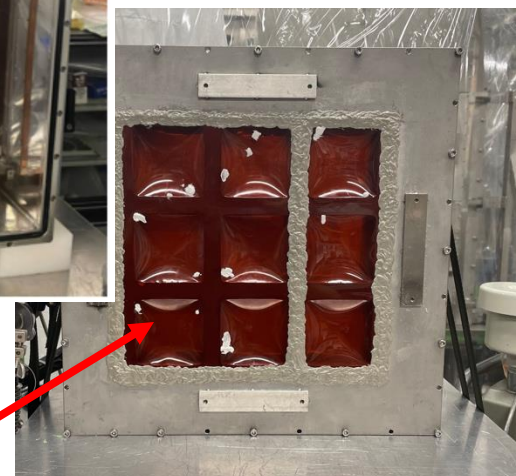
➤ proton対策

proton原子核を多く含む構造体の少ない
X方向からの中性子照射



drift planeの
アルミマイラ

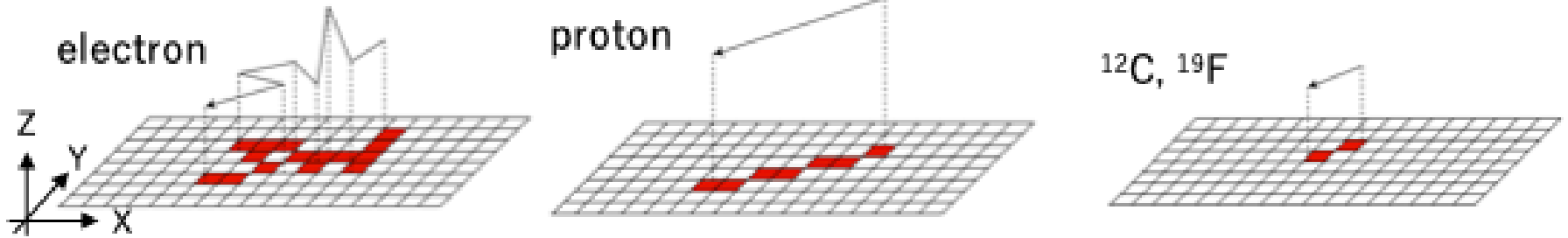
energy calibration用の
Kapton window



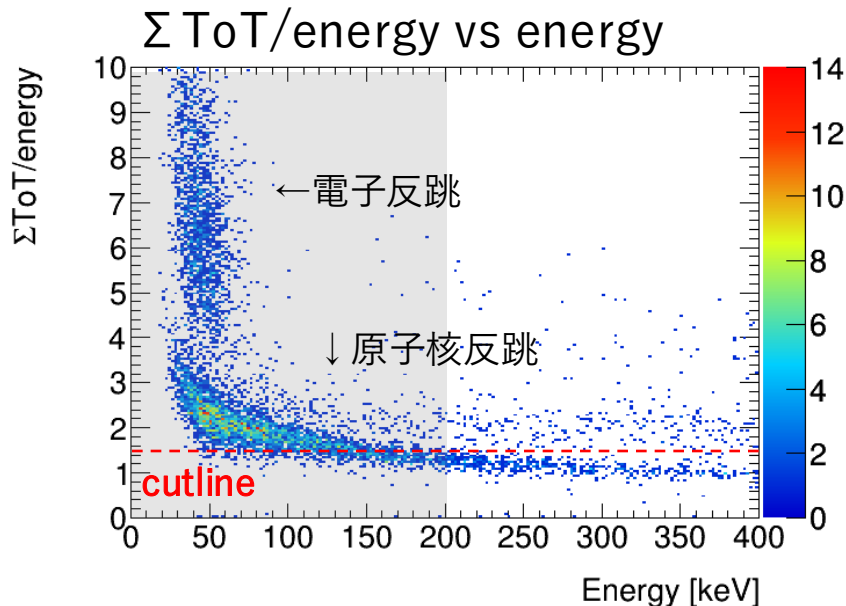
ToT cut

➤ ToT cut

各trackは全て同じenergy



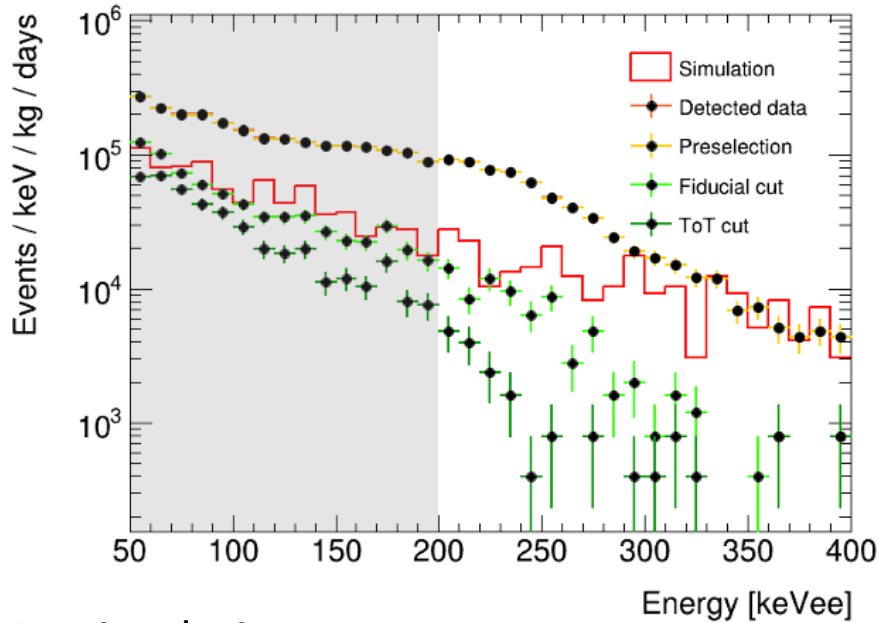
- 反跳粒子の種類によってenergy deposit → ToTとtotal energyを利用してcutが異なる。



- protonは ^{12}C 、 ^{19}F と比較してToT大
- protonと ^{19}F の分離のいい > 200 keV以上についてefficiencyを求める
- cutline: $\Sigma\text{ToT}/\text{energy} < 1.5$

検出効率の評価

イベントレート



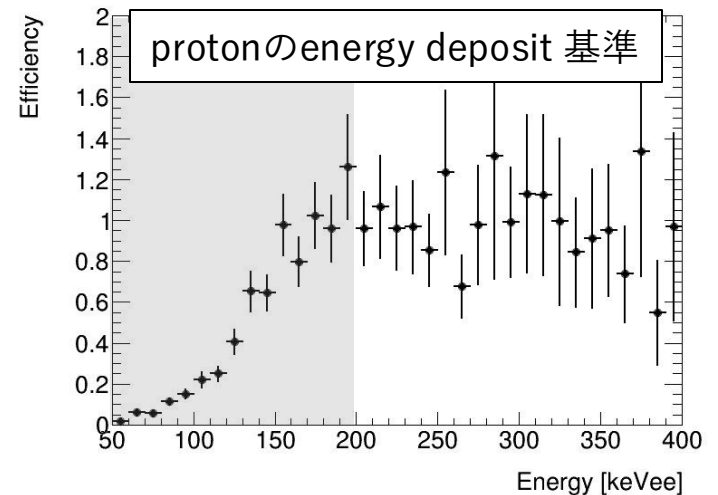
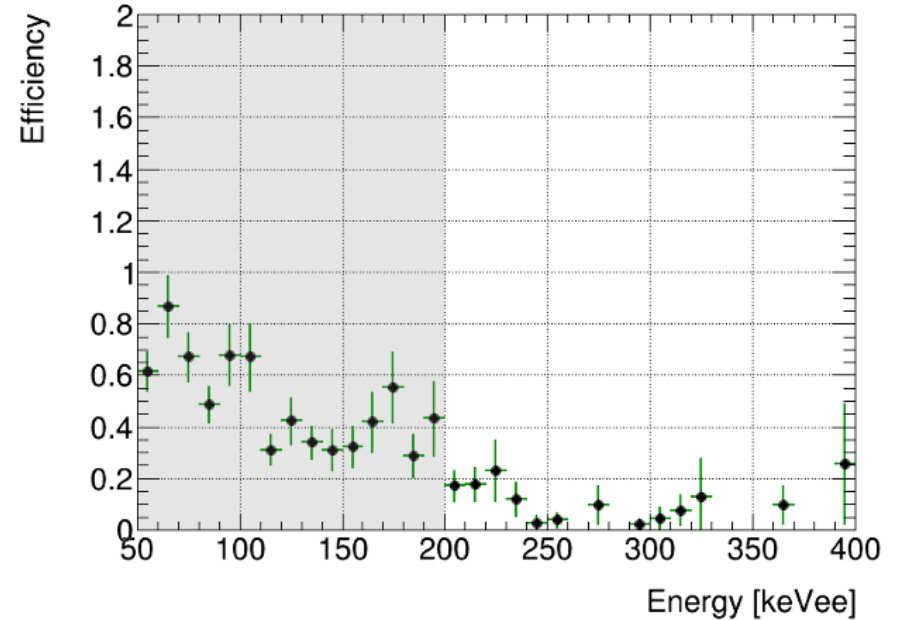
➤ simulation

- ^{19}F , ^{12}C 原子核反跳イベントのみ
- Fiducial cut適用

➤ 検出効率

- 非常に低い検出効率を得られる。
- protonのenergy depositを基準とすると~100%に収束

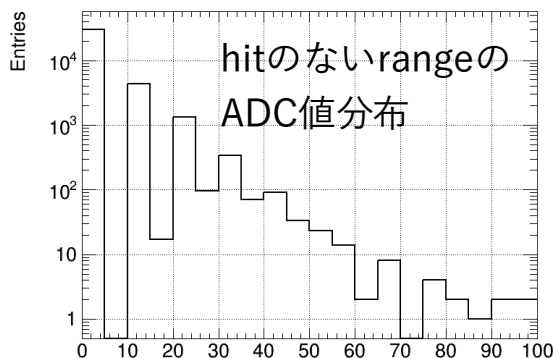
反跳エネルギーごとの検出効率



今後の課題

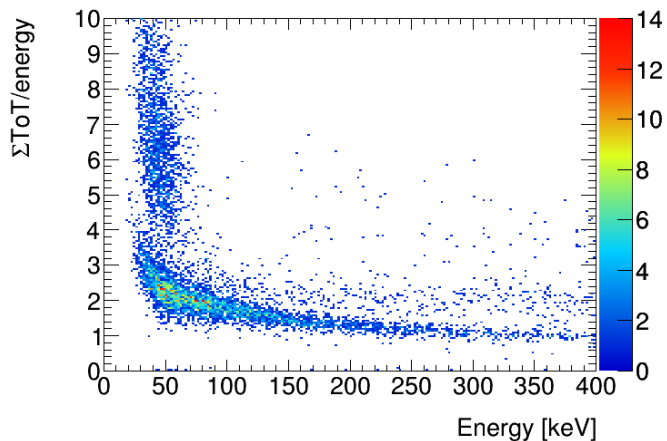
energy, lengthパラメータのシミュレーションとの不一致改善

- より高エネルギーでのcalibration
 - COOL-X: 約8 keVのX-ray source
- noiseがenergyに含まれてしまっている

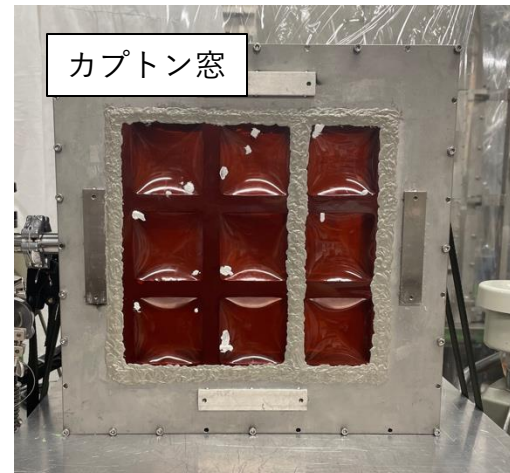
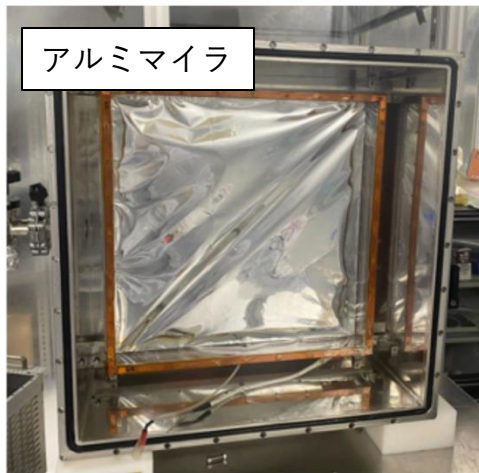
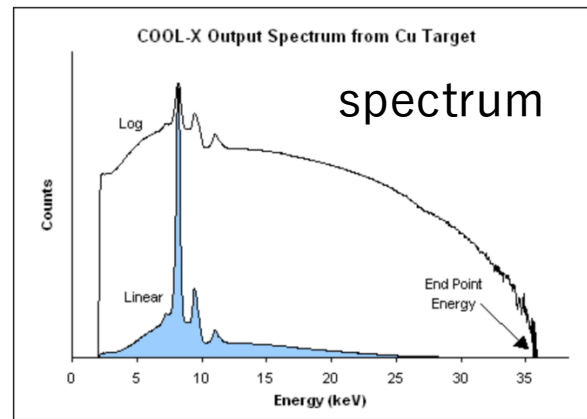


エネルギーの低閾値化

- protonの抑制



COOL-X (AMPTEK)



- 改良手段候補
 - アルミマイラ→鉄製のメッシュ
 - カプトン窓→縮小

結論

➤ まとめ・結論

- C/N-1.0に実装するModule-1の性能評価を行った
 - ゲインの要求値は検出器が安定な電圧で達成可能
 - 3週間の安定動作を確認（現在も稼働中、目標1ヶ月）
 - 宇宙線 μ を用いたドリフト速度評価：ドリフト速度5 cm/ μ s
- 再構成したtrackのパラメータにシミュレーションとの不一致が見られた。
 - シミュレーションの通りにゲインを補正した場合の検出効率は概ね理想的

➤ 今後の展望

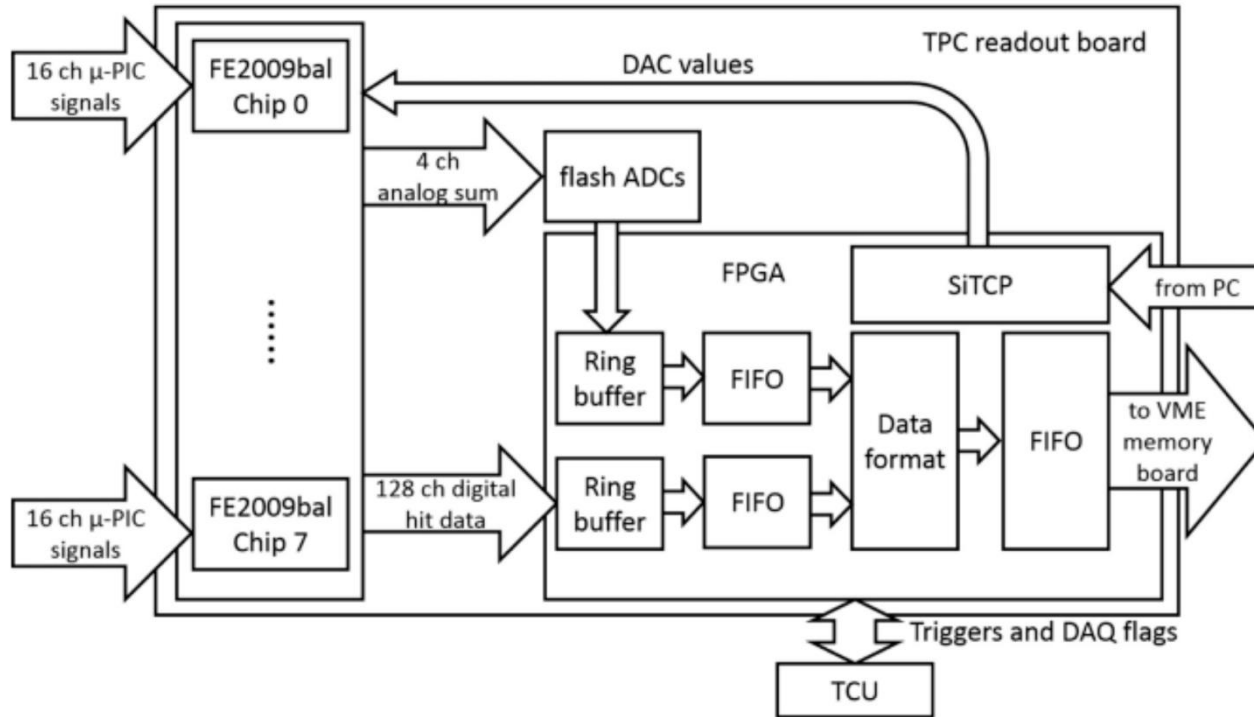
- trackのlength, energyパラメータが一致しない原因の調査
 - より高エネルギー領域でのcalibration方法の模索
 - エネルギーの計算からのノイズ除去
- protonの抑制
 - 検出領域にprotonが飛ばないように検出機の見直し

→ エネルギーの低閾値化、正確な検出効率の評価へ

Back up

FE2009bal μ -readout V3.1

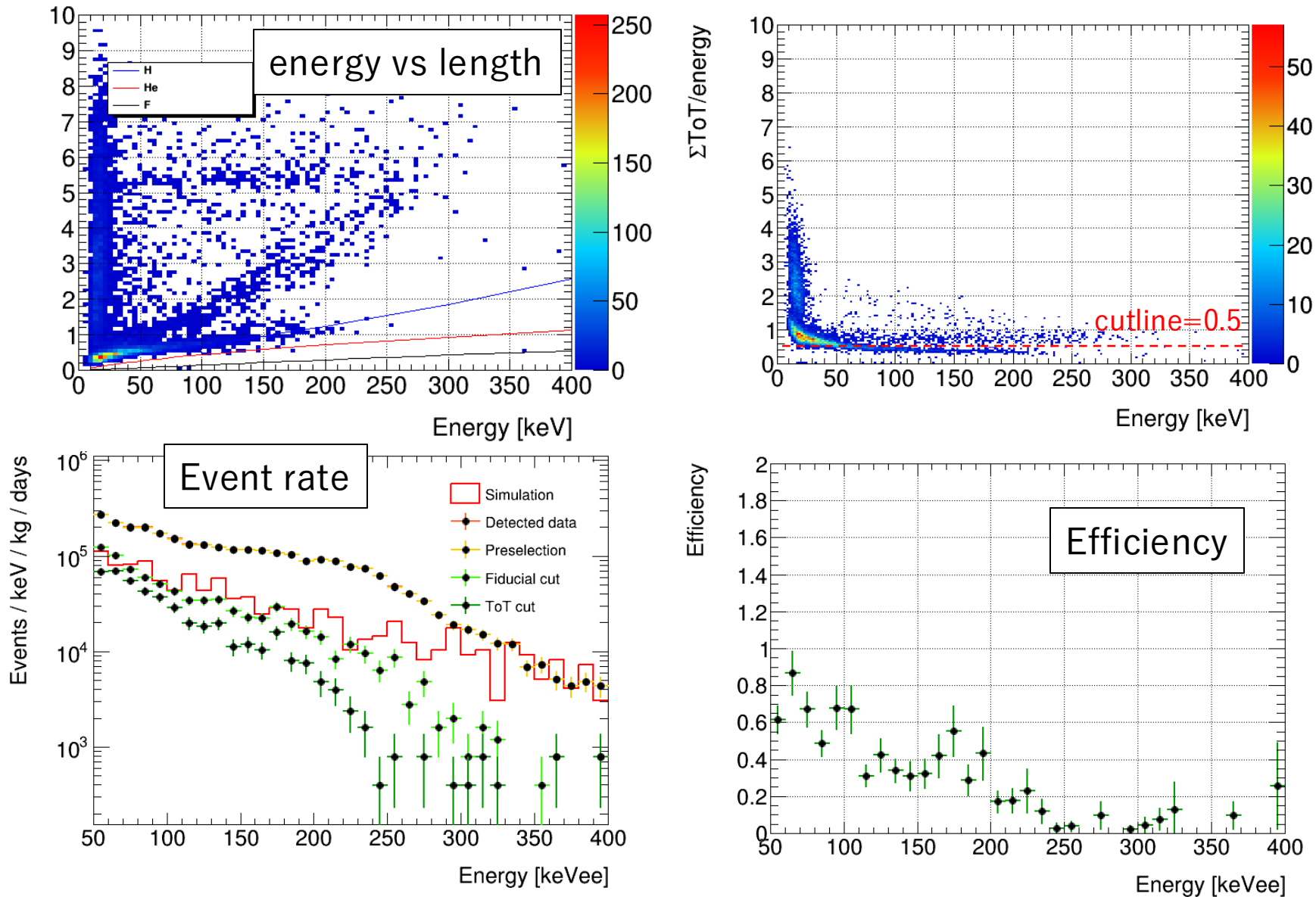
- SMILE実験（京都大）用に開発されたものを使用させていただいている
 - アンプ+エンコーダ



- hit情報
 - 128 ch
 - 100 MHz
- ADC waveform
 - 4 ch (Σ 32 ch)
 - 50 MHz

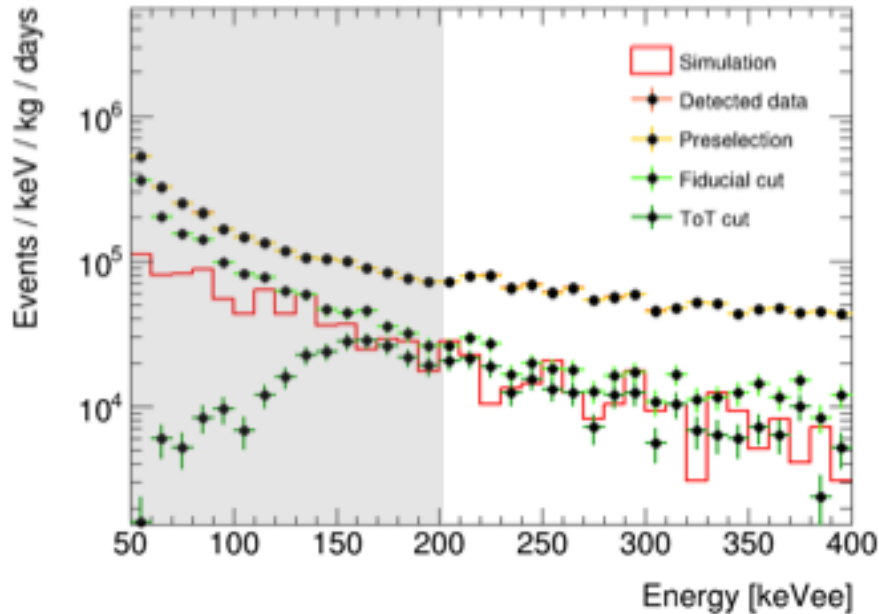
1. 128 ch hitデータと4 ch ADCデータをbufferに保存
2. Triggerがかかった場合、対応するデータをEthernet方式で出力

^{55}Fe calibrationによるefficiency



検出効率の評価

イベントレート



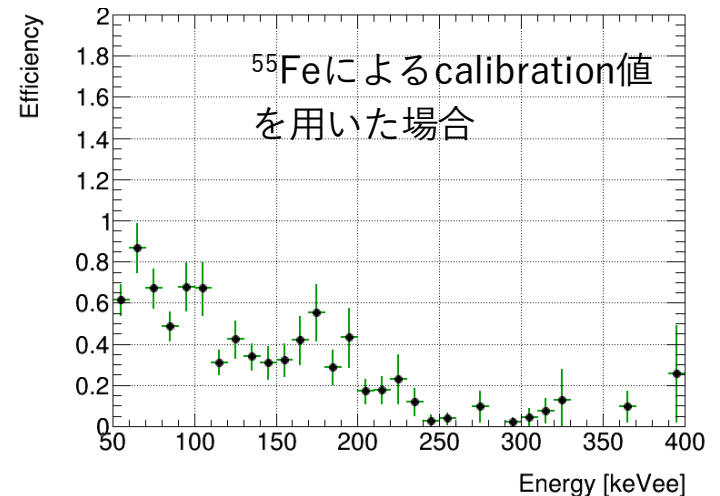
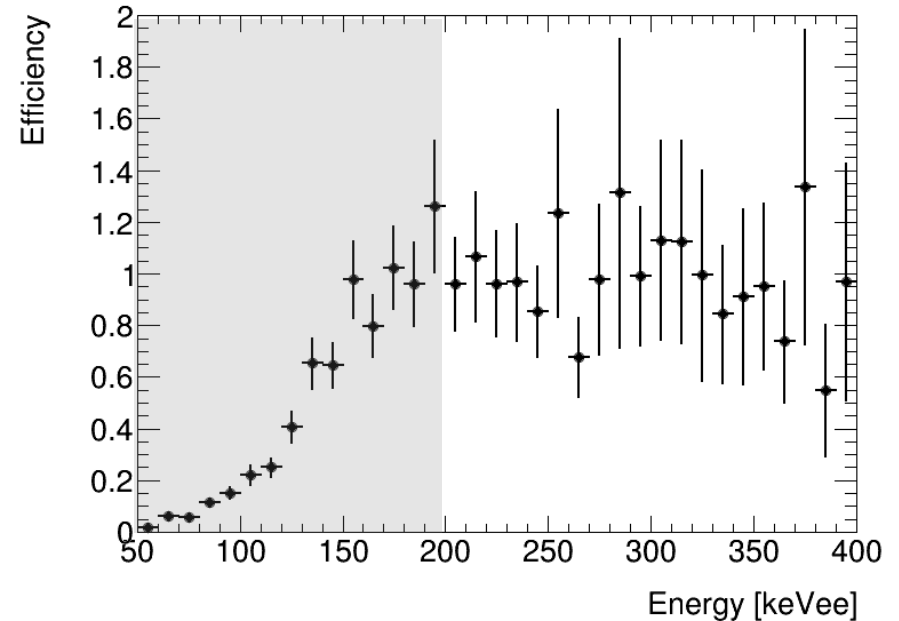
➤ simulation

- ¹⁹F, ¹²C原子核反跳イベントのみ
- Fiducial cut適用

➤ 検出効率

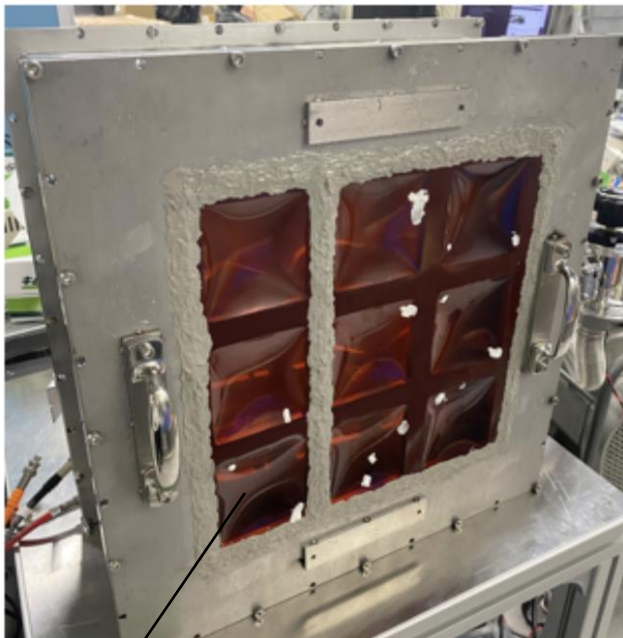
- 少統計だが1付近に収束する傾向
- ⁵⁵Feによるcalibration値を用いた場合は高エネルギー側で検出効率低下

反跳エネルギーごとの検出効率

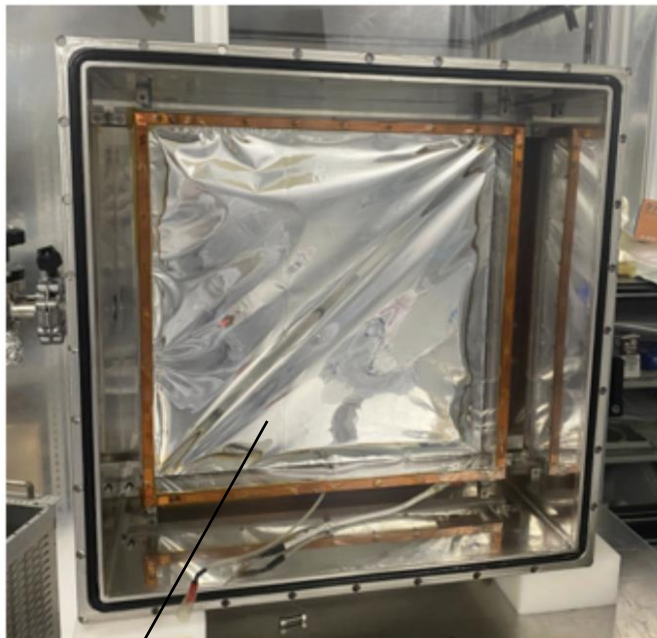


Proton源

fiducial cutで落としきれないproton源→Z方向からのイベント



Kapton窓



アルミマイラ (drift plane)

- X線によるenergy calibration用のカプトン窓、drift planeのアルミマイラに protonが含まれる
- 側面 (X, Y方向) からの中性子照射でも反射によって入射
- 構造変更, protonを含まない素材への換装などの対策が必要

CF₄中のドリフト速度

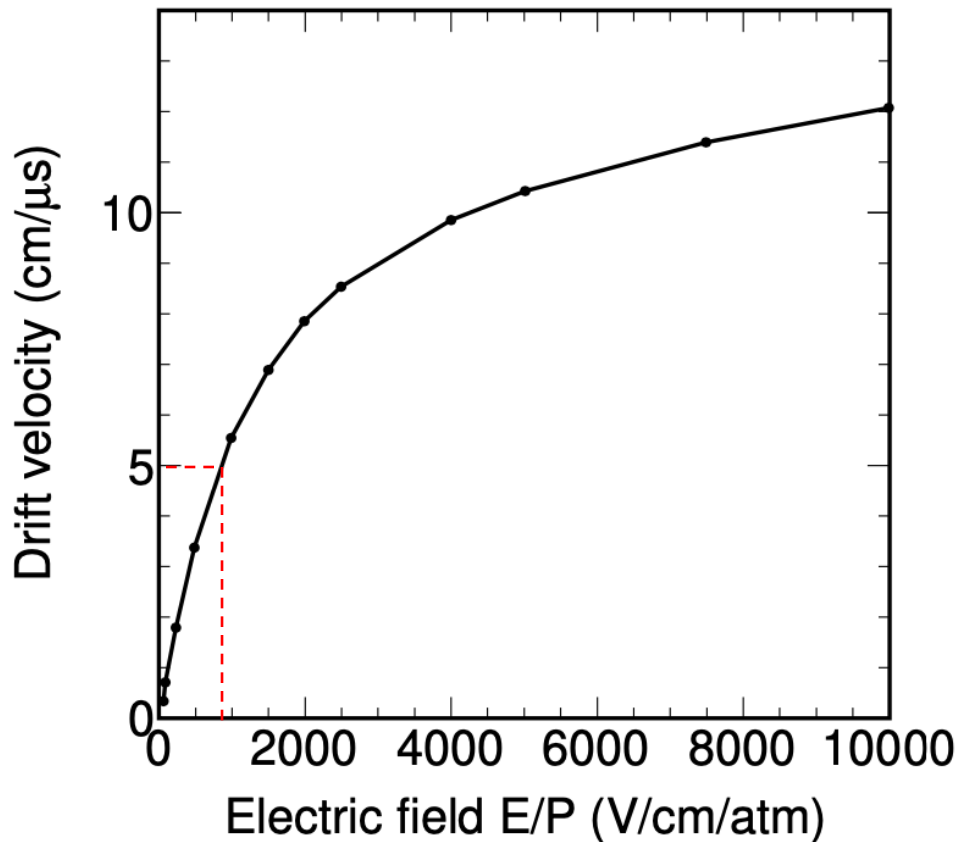
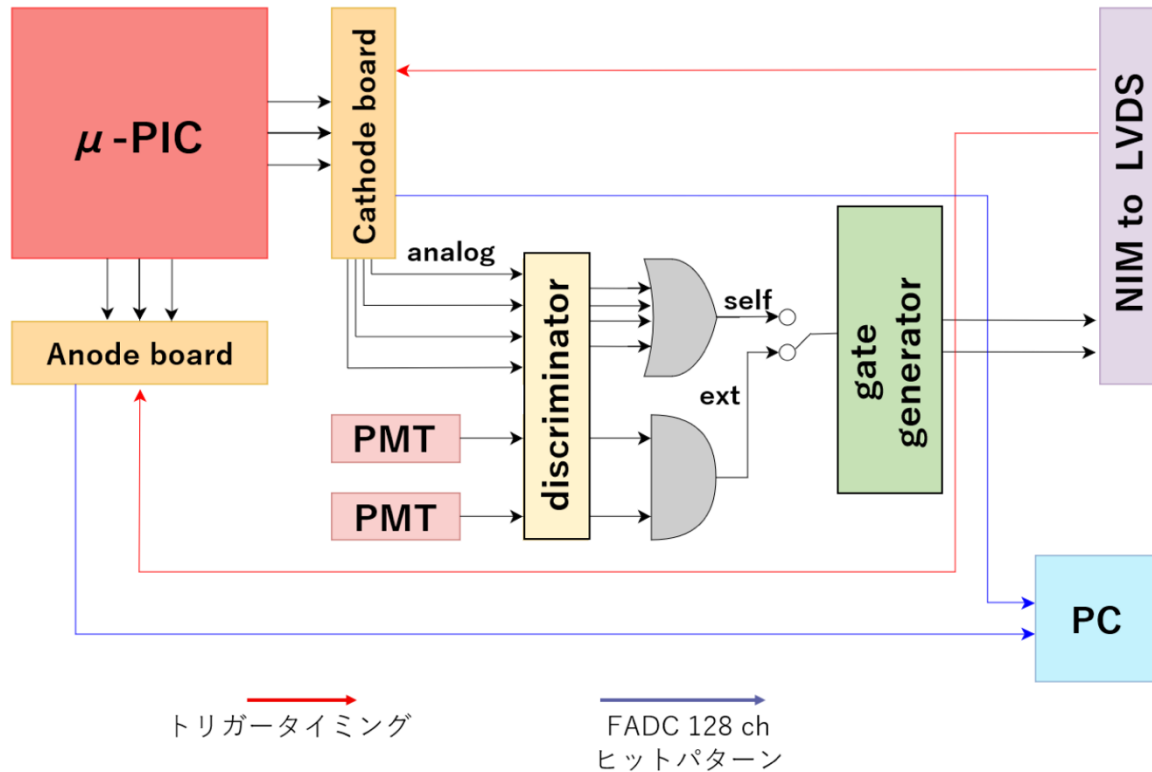


Figure 2.2.3: Drift Velocity of the electron in CF₄ gas calculated by MAG-BOLTZ simulation.

Module-1 読み出し



- トリガが発行されるとring Bufferに記録されたヒットパターンのデータを保存
 - self trigger (hit signalの波形がthresholdを超えた場合トリガ発行)
 - external trigger (外部からのsignalによるトリガ発行)