

# 陰イオンガスSF<sub>6</sub>を用いた 暗黒物質探索におけるμ-TPC開発

東野 聡<sup>A,D</sup>

身内 賢太郎<sup>A</sup> 石浦 宏尚<sup>A</sup> 島田 拓弥<sup>A</sup> 窪田 諒<sup>A</sup> 中山 郁香<sup>A</sup>

池田 智法<sup>B</sup> 坂下 健<sup>C,D</sup> 庄子 正剛<sup>C,D</sup>

神戸大理<sup>A</sup> 京大理<sup>B</sup> KEK<sup>C</sup> Open-It<sup>D</sup>

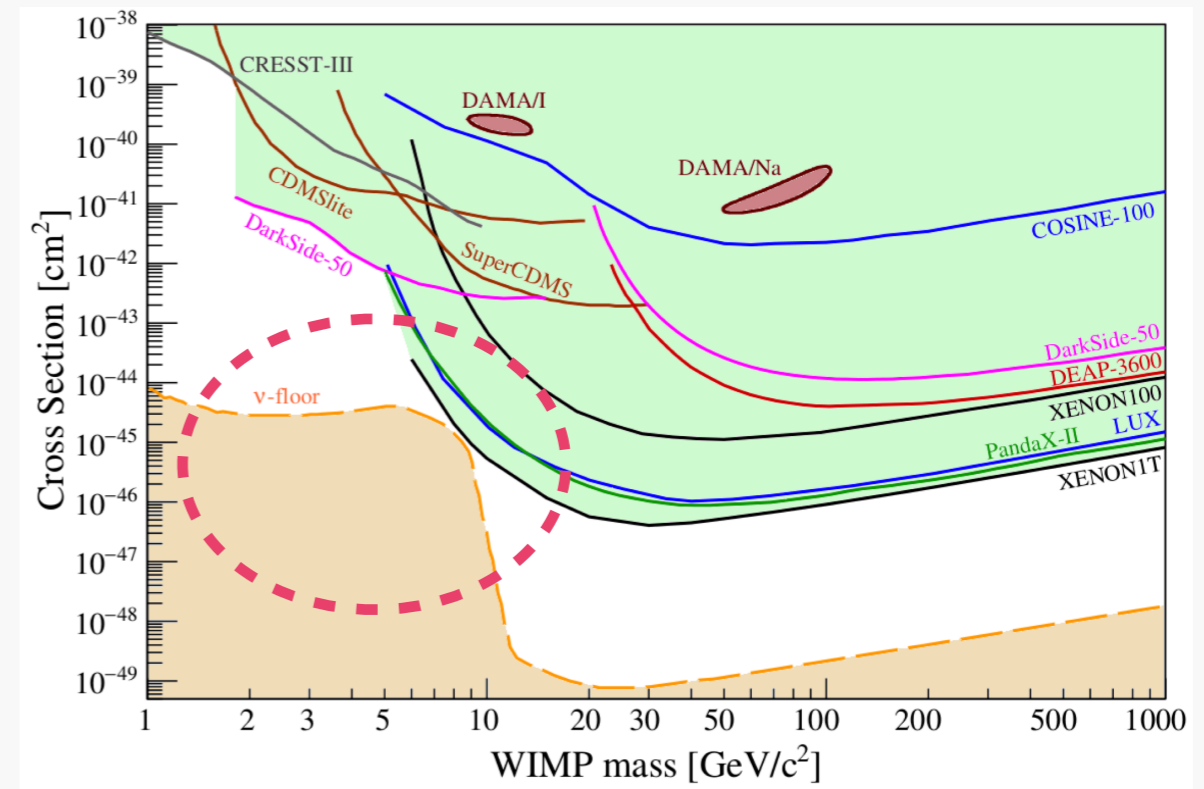
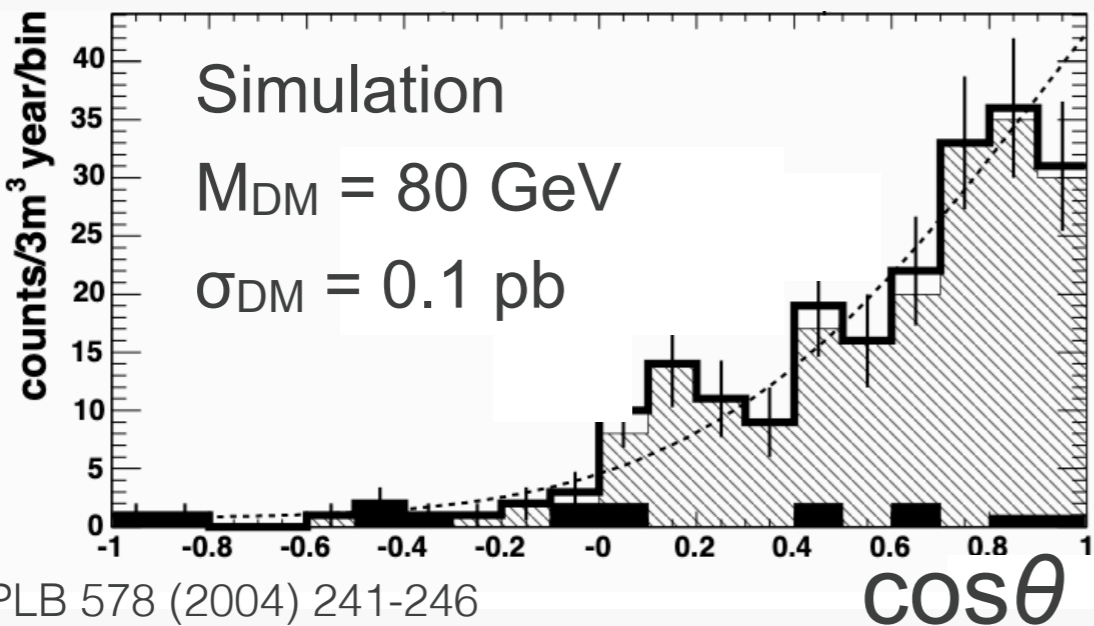
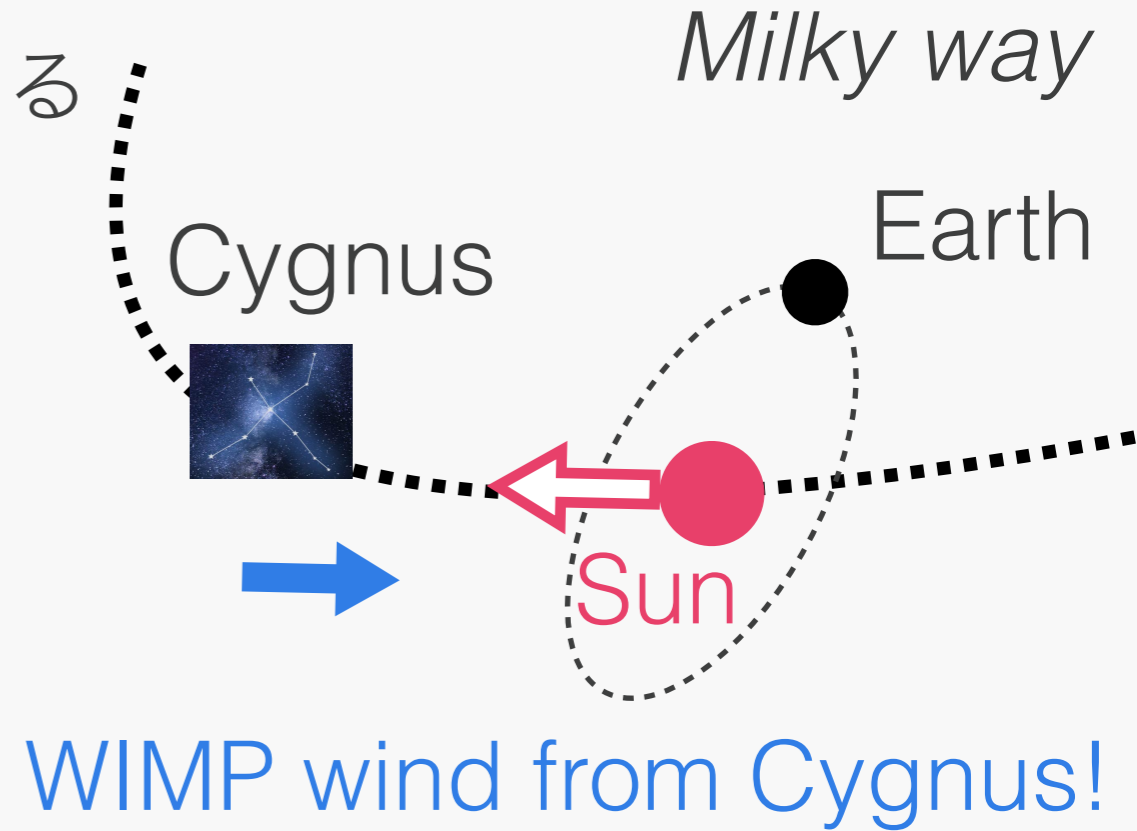
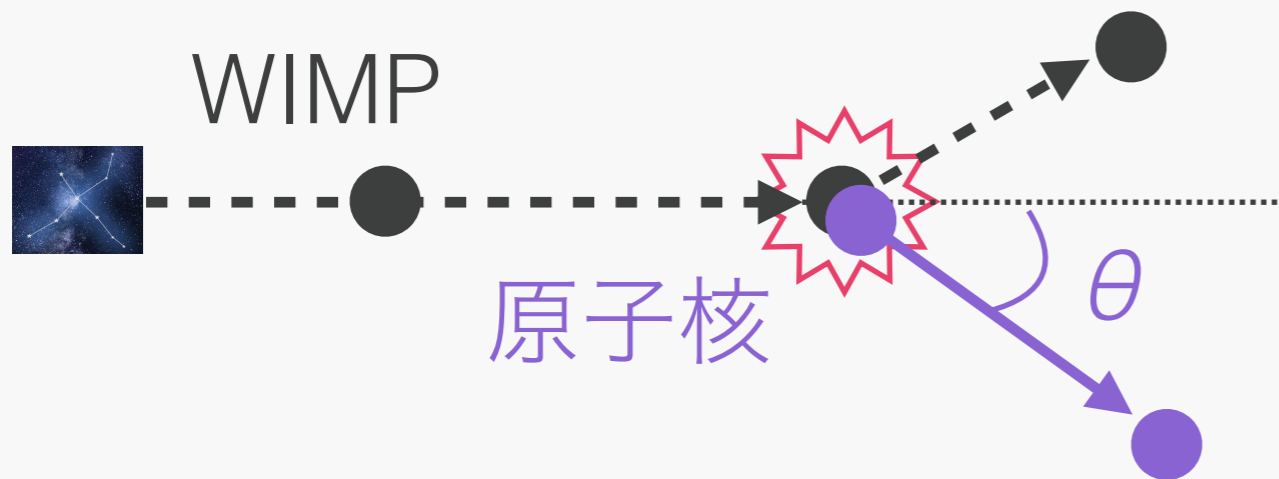
2021年 9月 14日

# 方向に感度を持つ暗黒物質 (DM) 直接探索

● 原子核反跳からDM (WIMP) 到来方向を知る

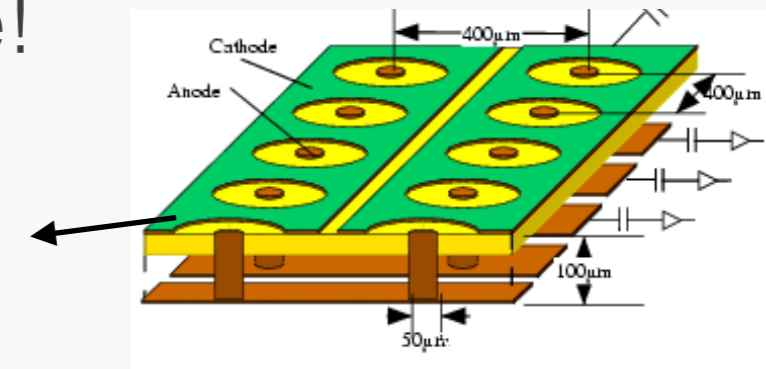
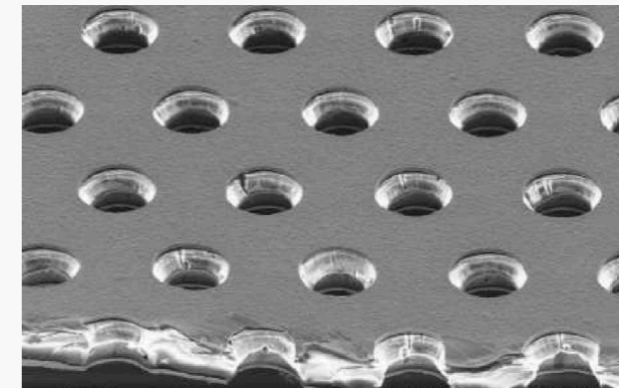
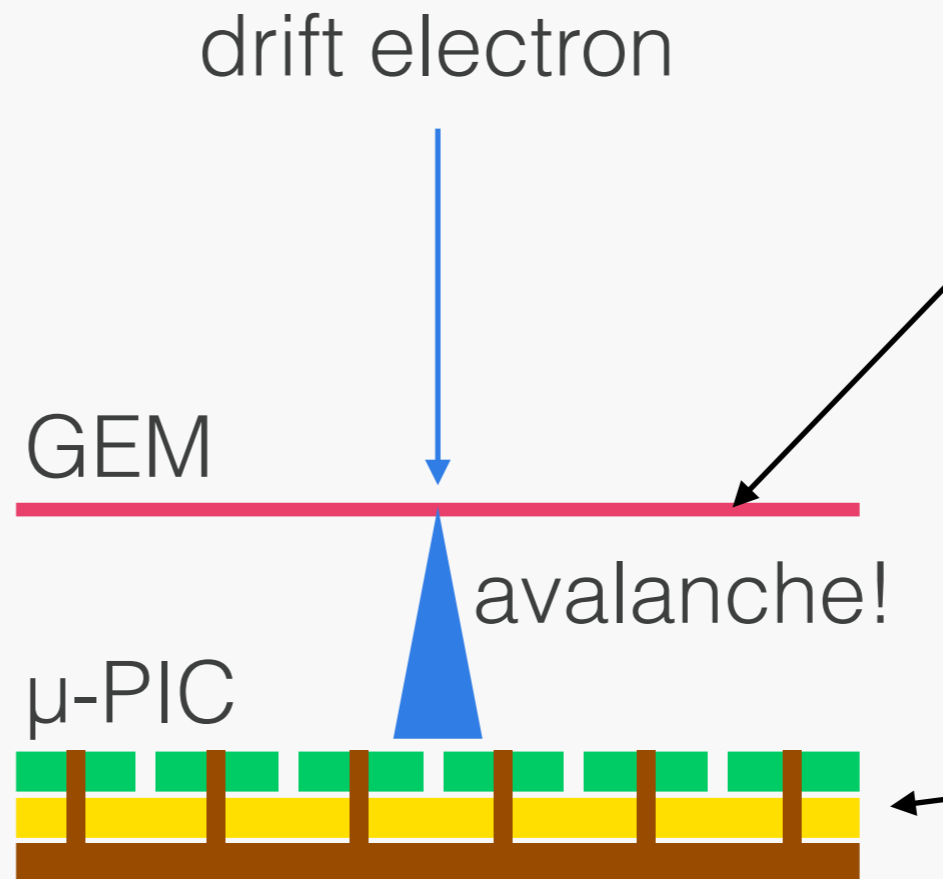
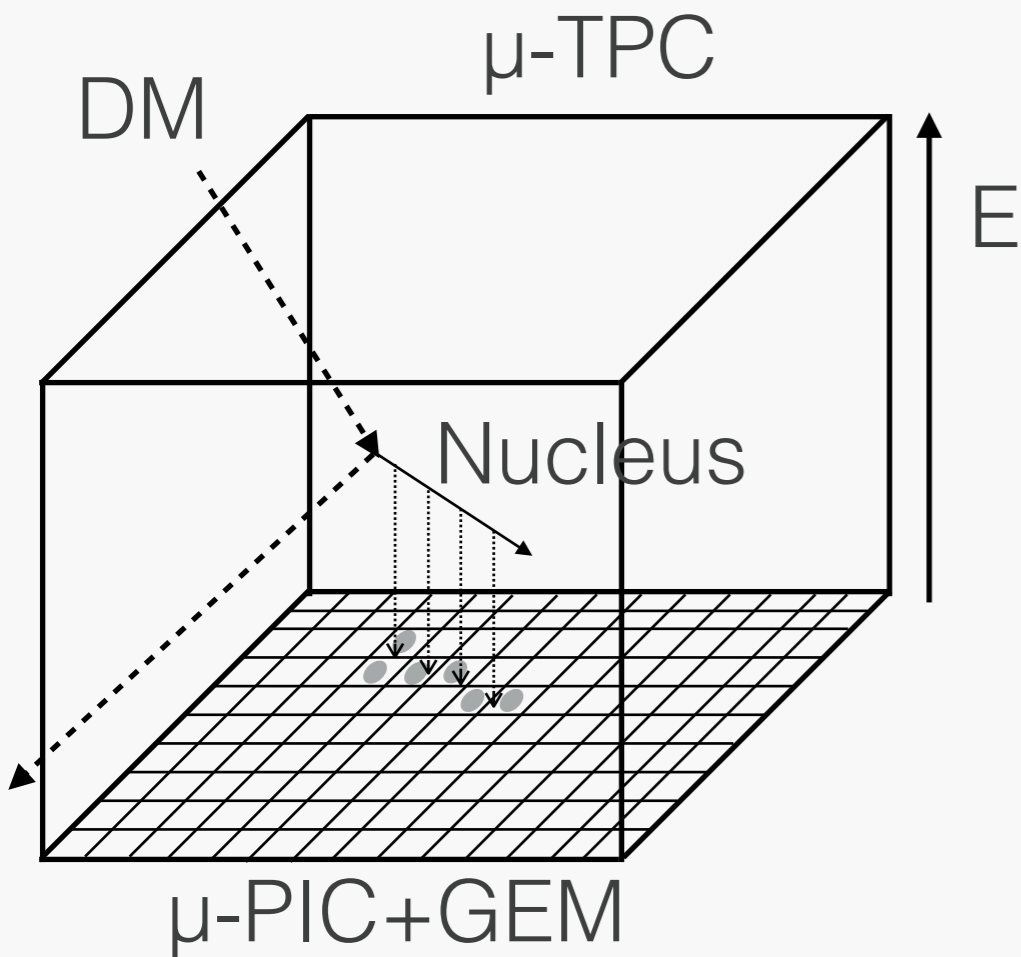
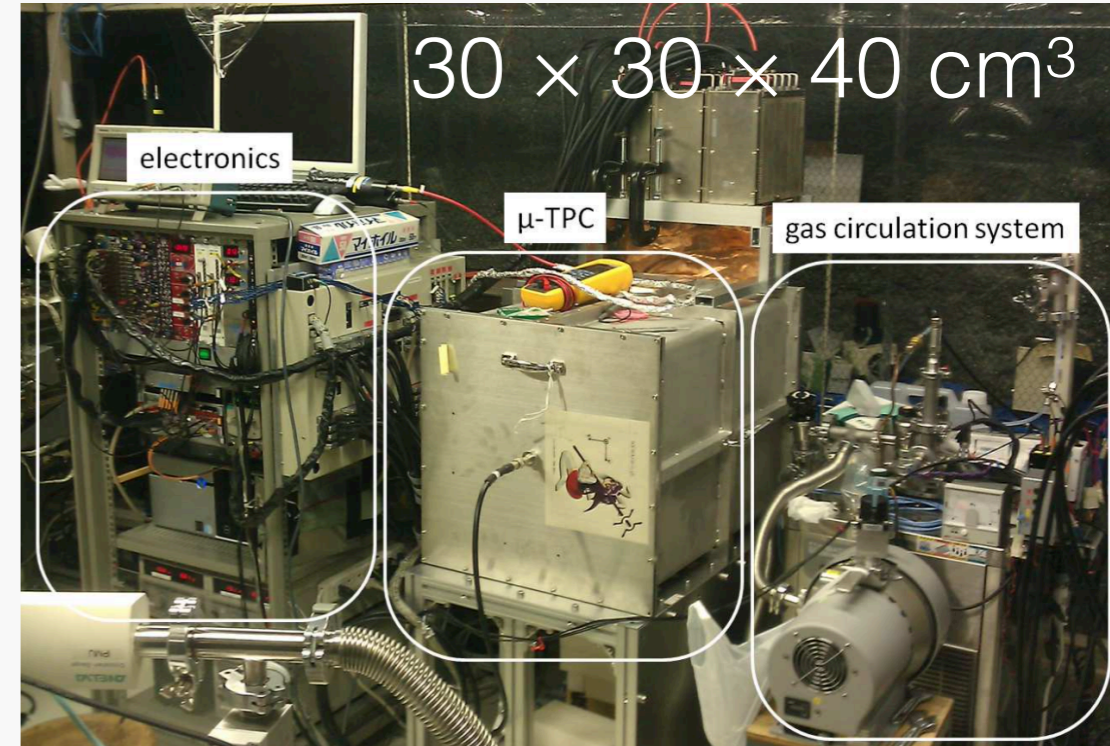
→ 異方性がDMの強い証拠に

→ ニュートリノBGとの分離も可能



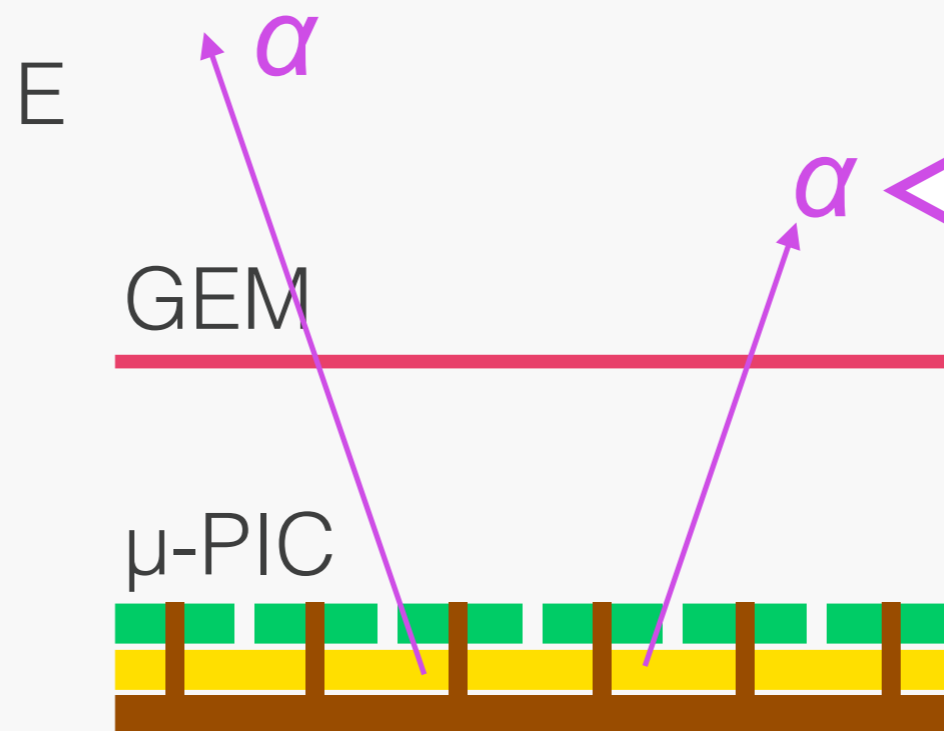
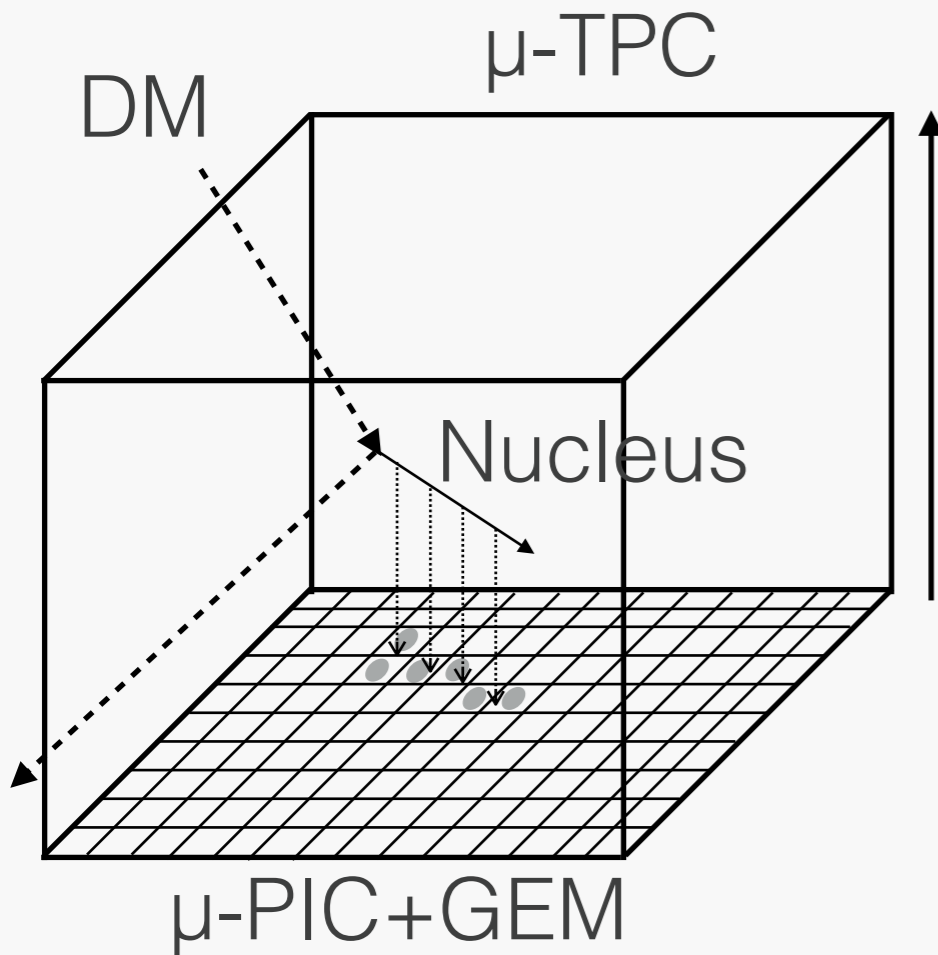
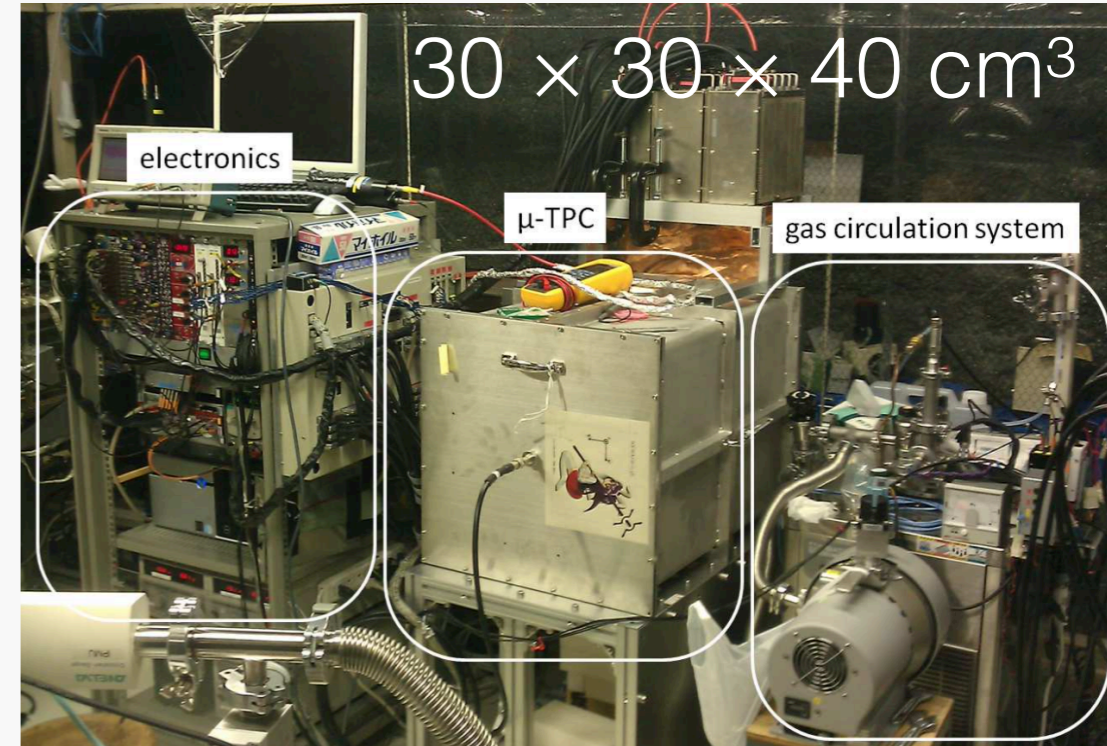
# NEWAGE

- 神岡にて反跳原子核の3次元飛跡検出
- ガスTPC + 400  $\mu\text{m}$  間隔ストリップ検出器 ( **$\mu\text{-TPC}$** )
  - ▶ 計 768 ch  $\times$  2 (2次元) 読み出し
- 測れるのは各ヒットの相対時間
  - ➔ ドリフト方向の絶対座標はわからない



# NEWAGE

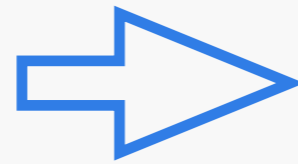
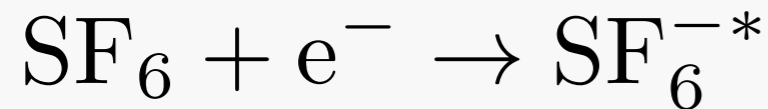
- 神岡にて反跳原子核の3次元飛跡検出
- ガスTPC + 400  $\mu\text{m}$  間隔ストリップ検出器 ( $\mu\text{-TPC}$ )
  - ▶ 計 768 ch  $\times$  2 (2次元) 読み出し
- 測れるのは各ヒットの相対時間
  - ➔ ドリフト方向の絶対座標はわからない



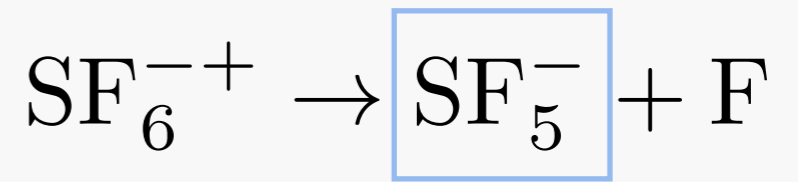
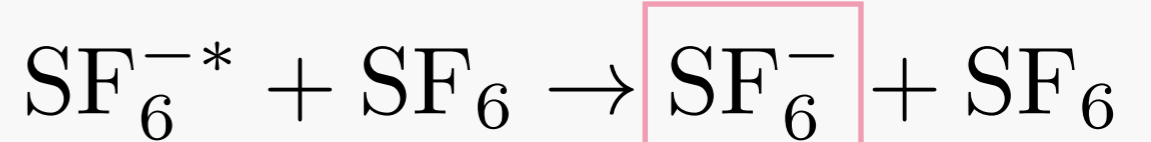
$\mu\text{-PIC}$ からの $\alpha$ 線  
(放射性不純物由来)  
をfiducial cutで  
減らしたい

# 陰イオンガス：SF<sub>6</sub>

電離した電子がアタッチ

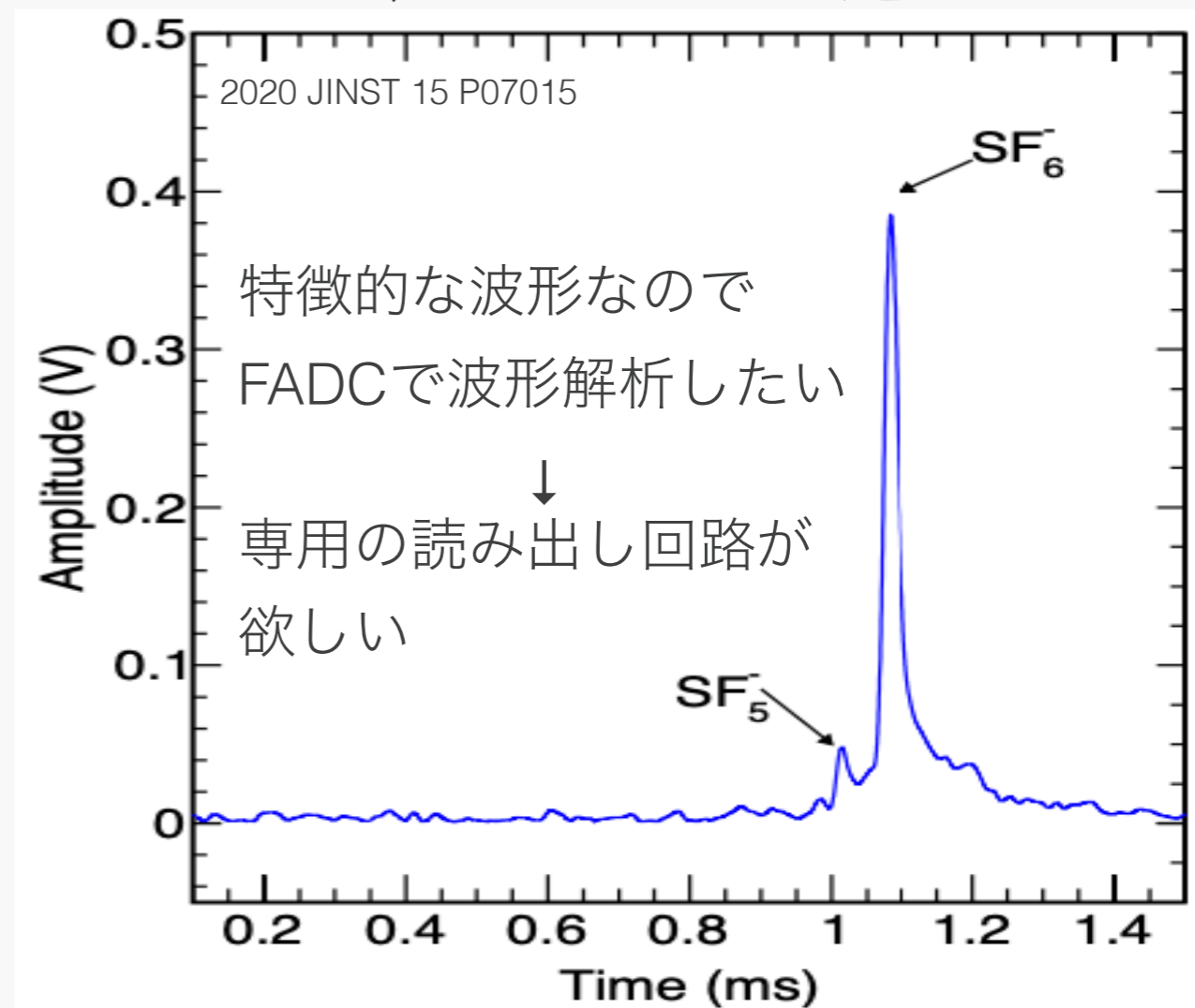
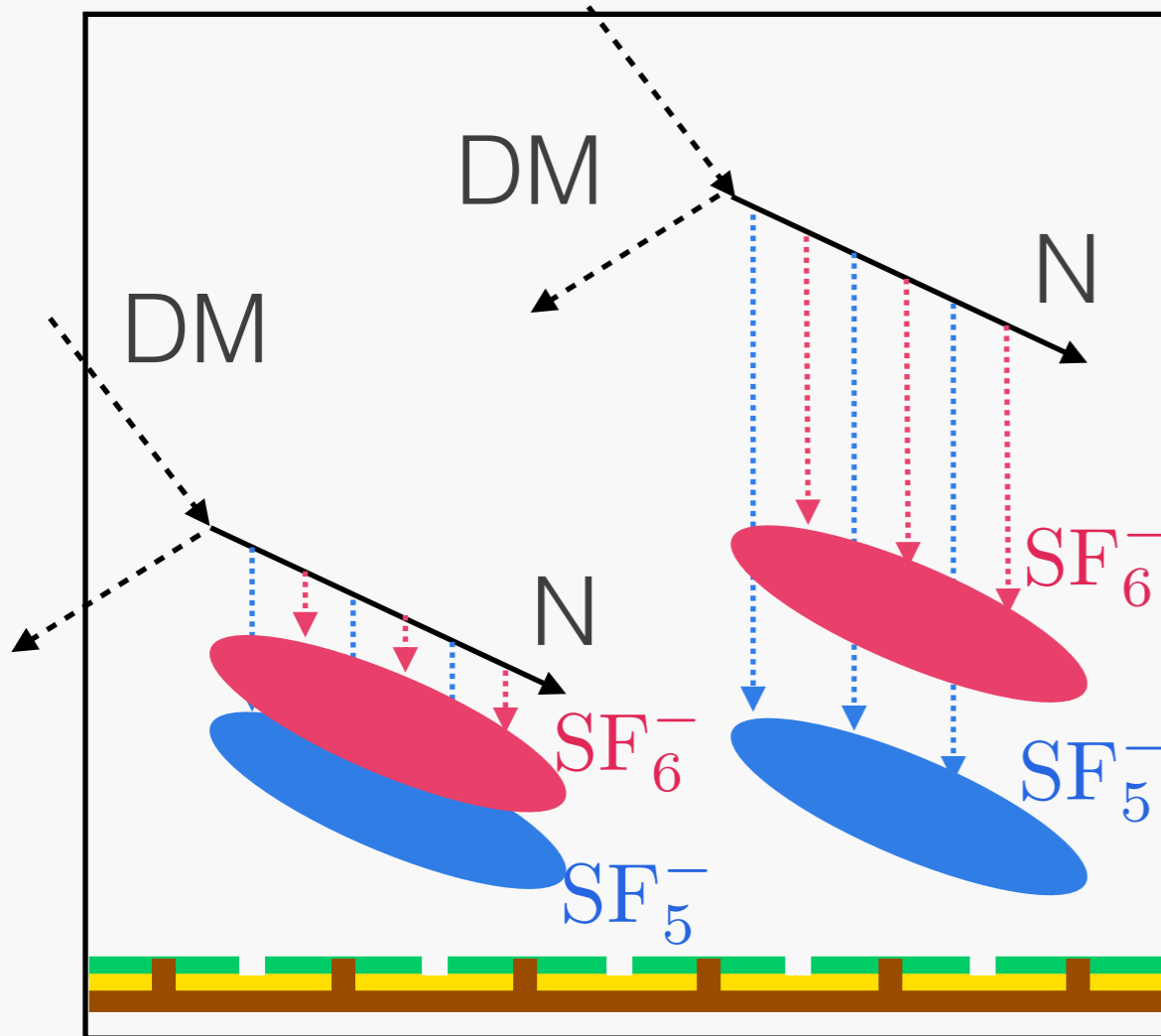


2種類の陰イオン形成



時間差を見ればドリフト方向の  
絶対位置も測定可能

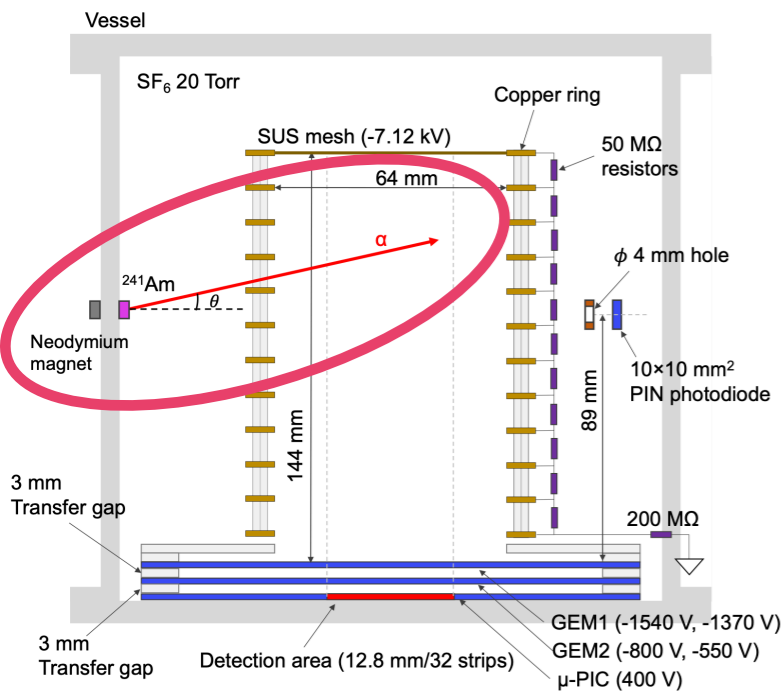
電子より重いので**低拡散**  
が、ドリフトは遅い



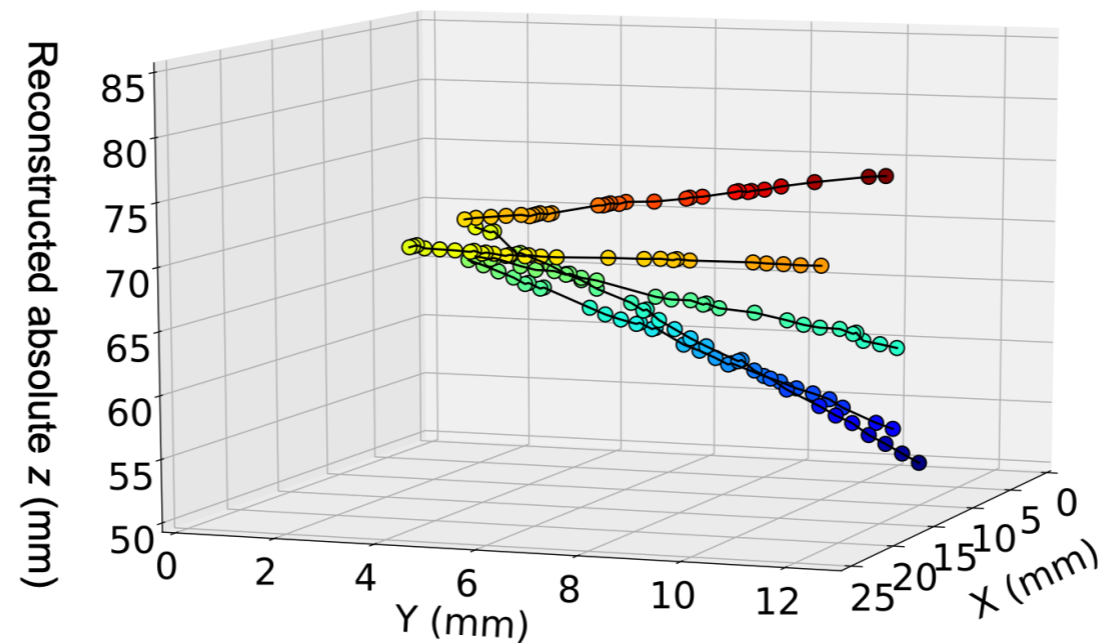
# これまでの取り組み

T. Ikeda et al 2020 JINST 15 P07015

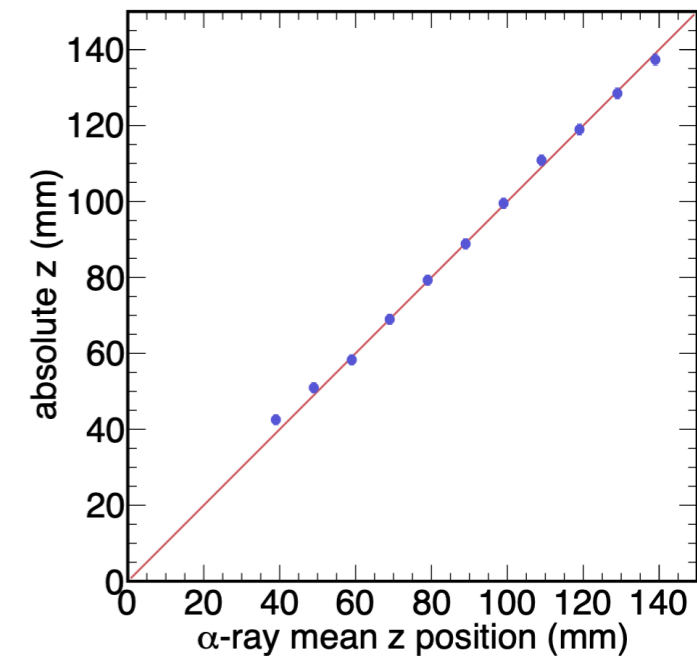
- 小型検出器開発、SF<sub>6</sub>ガスTPCの性能評価



Detector



3D track reconstruction

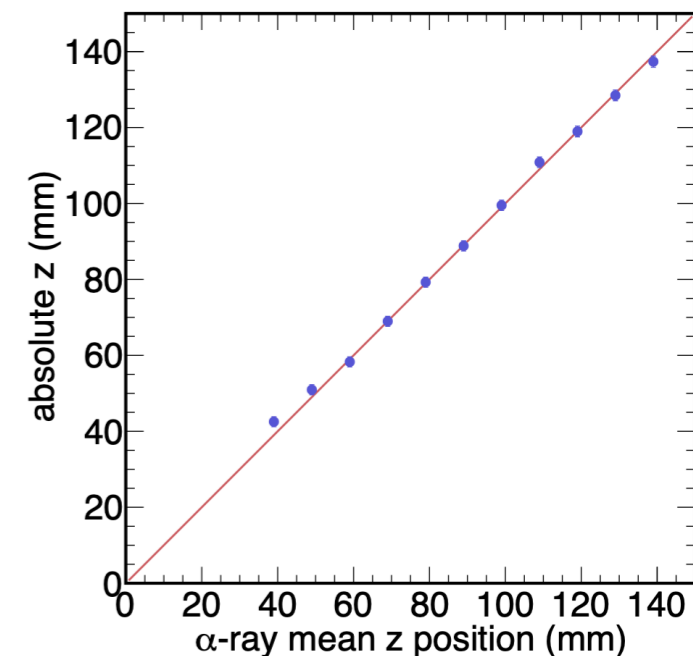
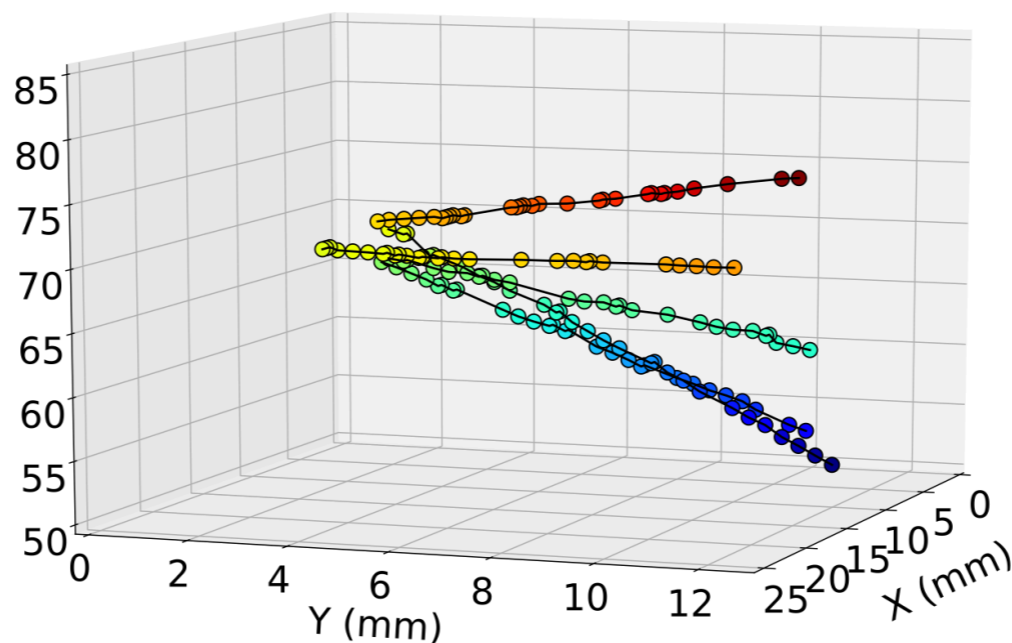
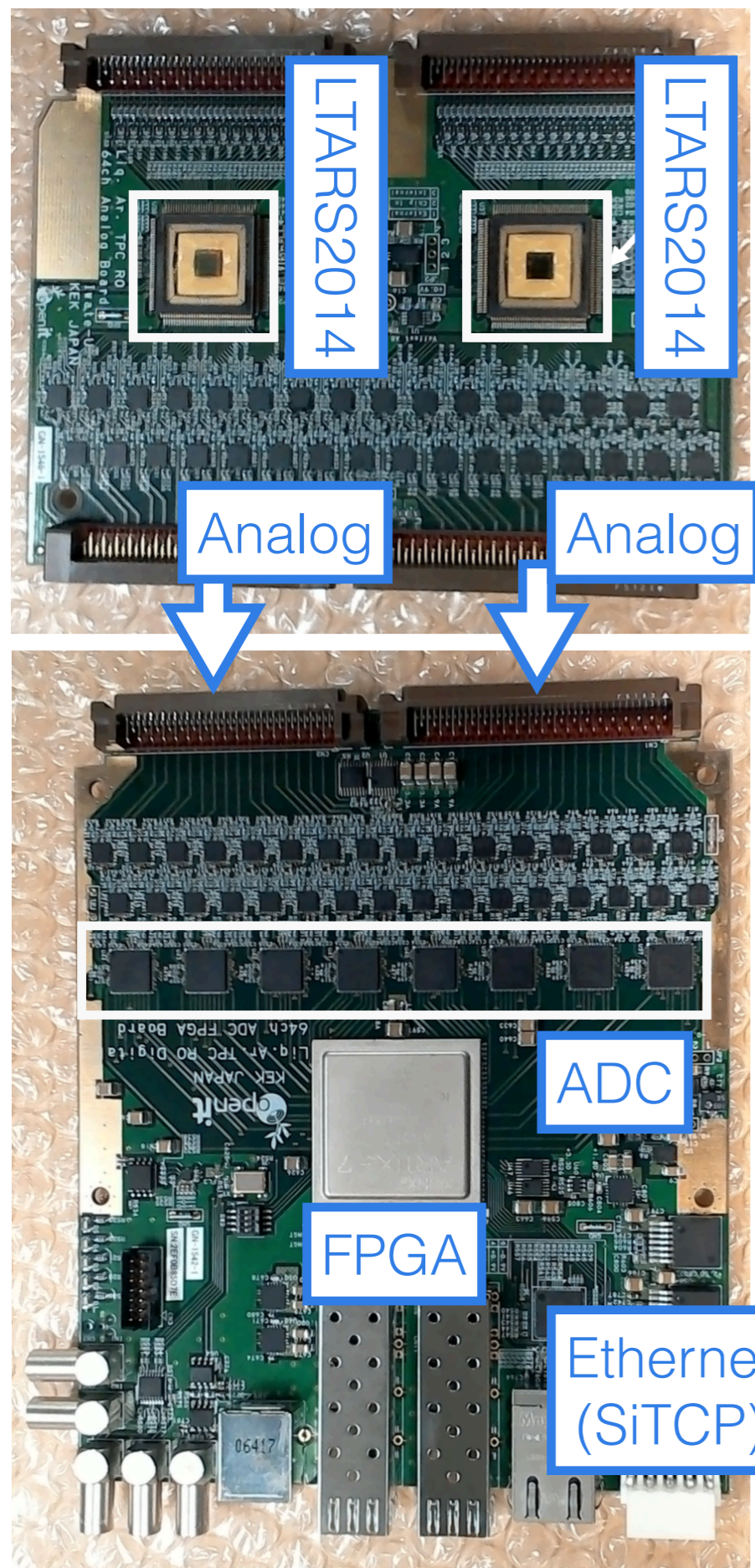


absolute Z position measurement

# これまでの取り組み

T. Ikeda et al 2020 JINST 15 P07015

## 併せて、SF<sub>6</sub>ガスTPCの性能評価



3D track reconstruction

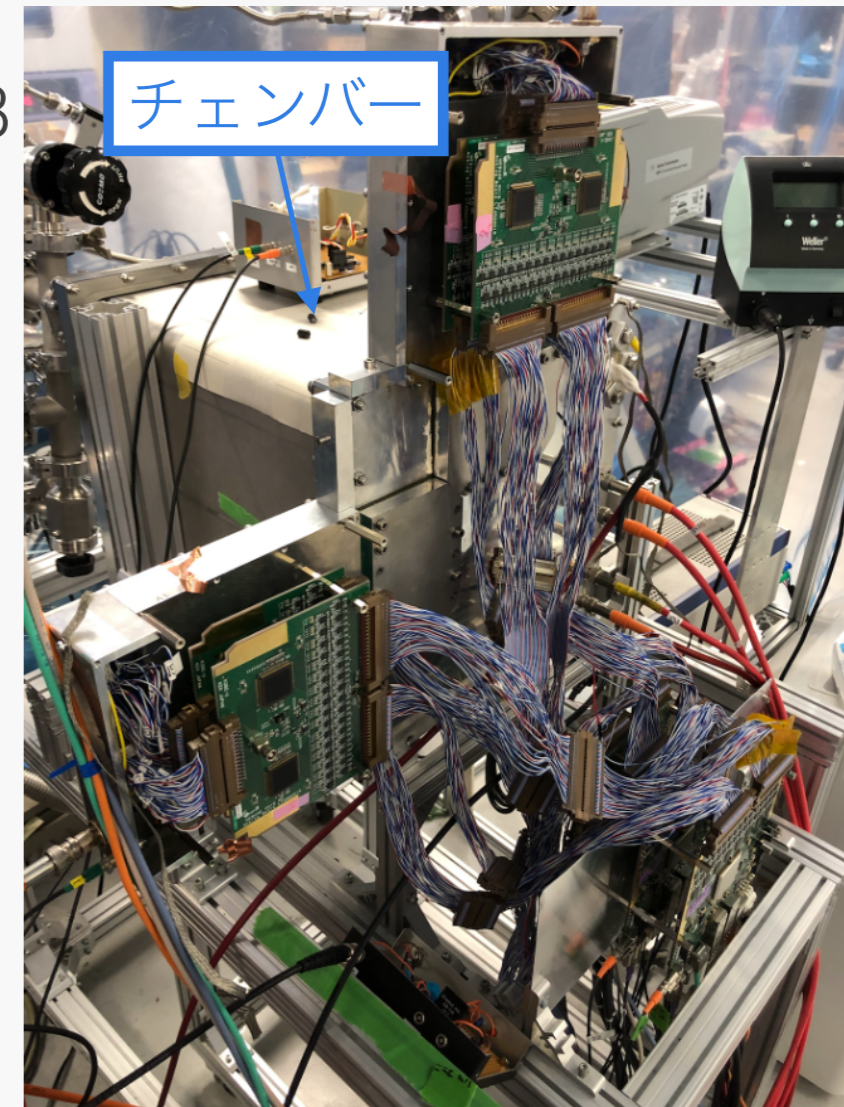
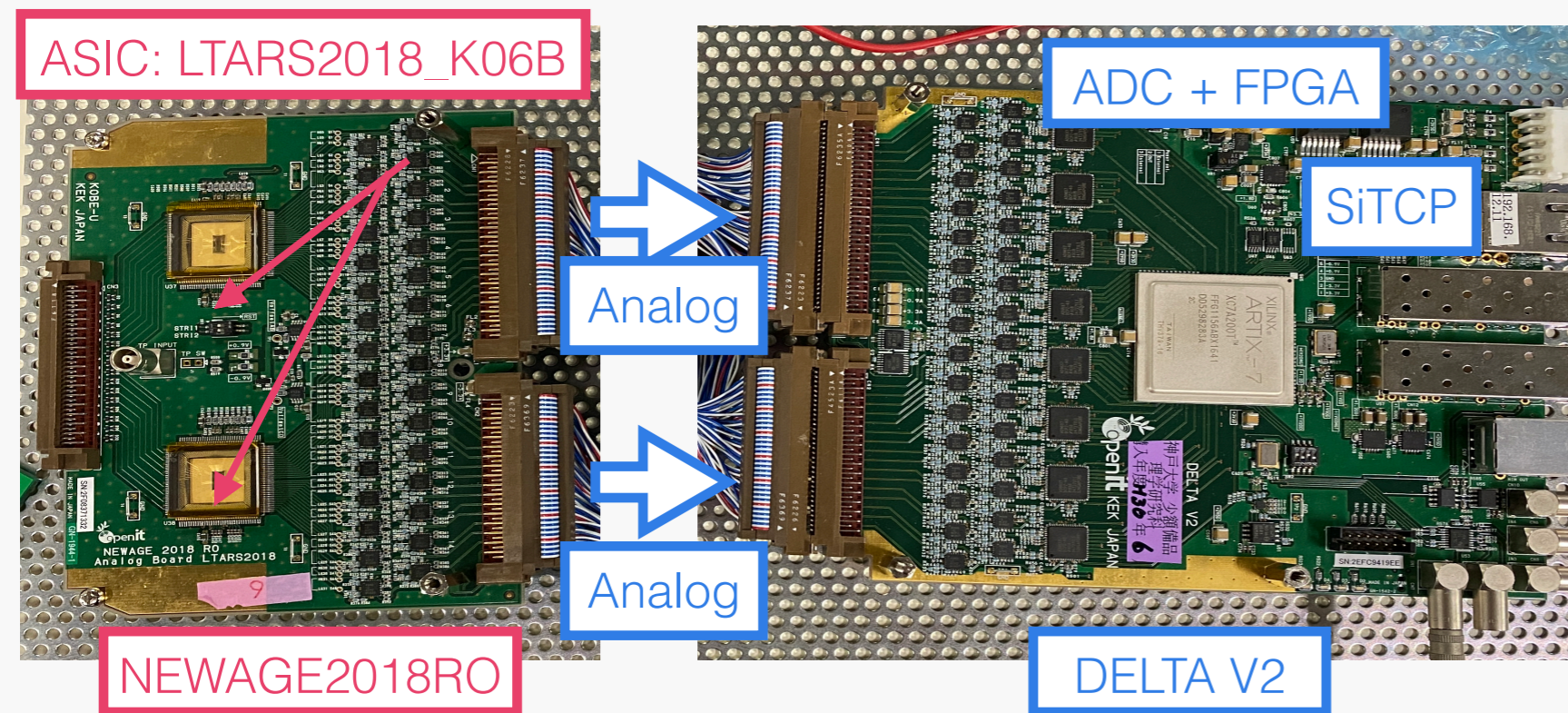
absolute Z position measurement

多チャンネルアンプASIC: LTARS2014 (KEK, 岩手大)

- ・ LAr TPC用に設計されたため、陰イオンガスTPC用に新規開発が必要
- ・ 時定数↑、S/N↓を要求

# 新規エレクトロニクス開発

- 時定数:  $4 \mu\text{s}$ ,  $S/N > 20$  を満たす新型ASIC: LTARS2018
  - T. Kishishita et al 2020 JINST 15 T09009

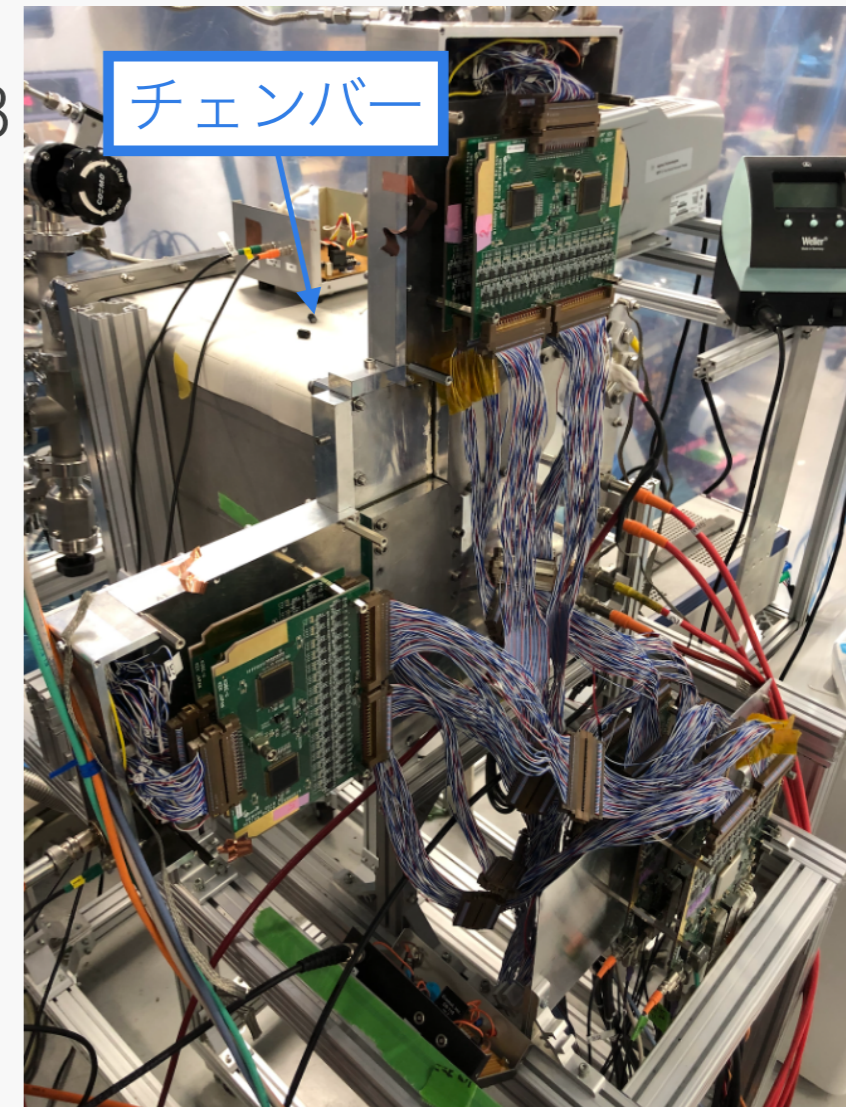
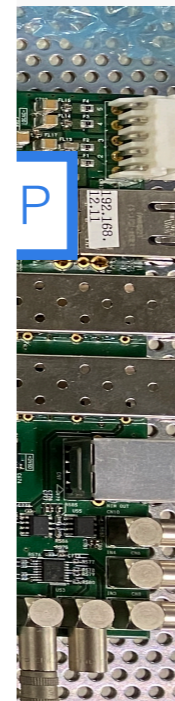
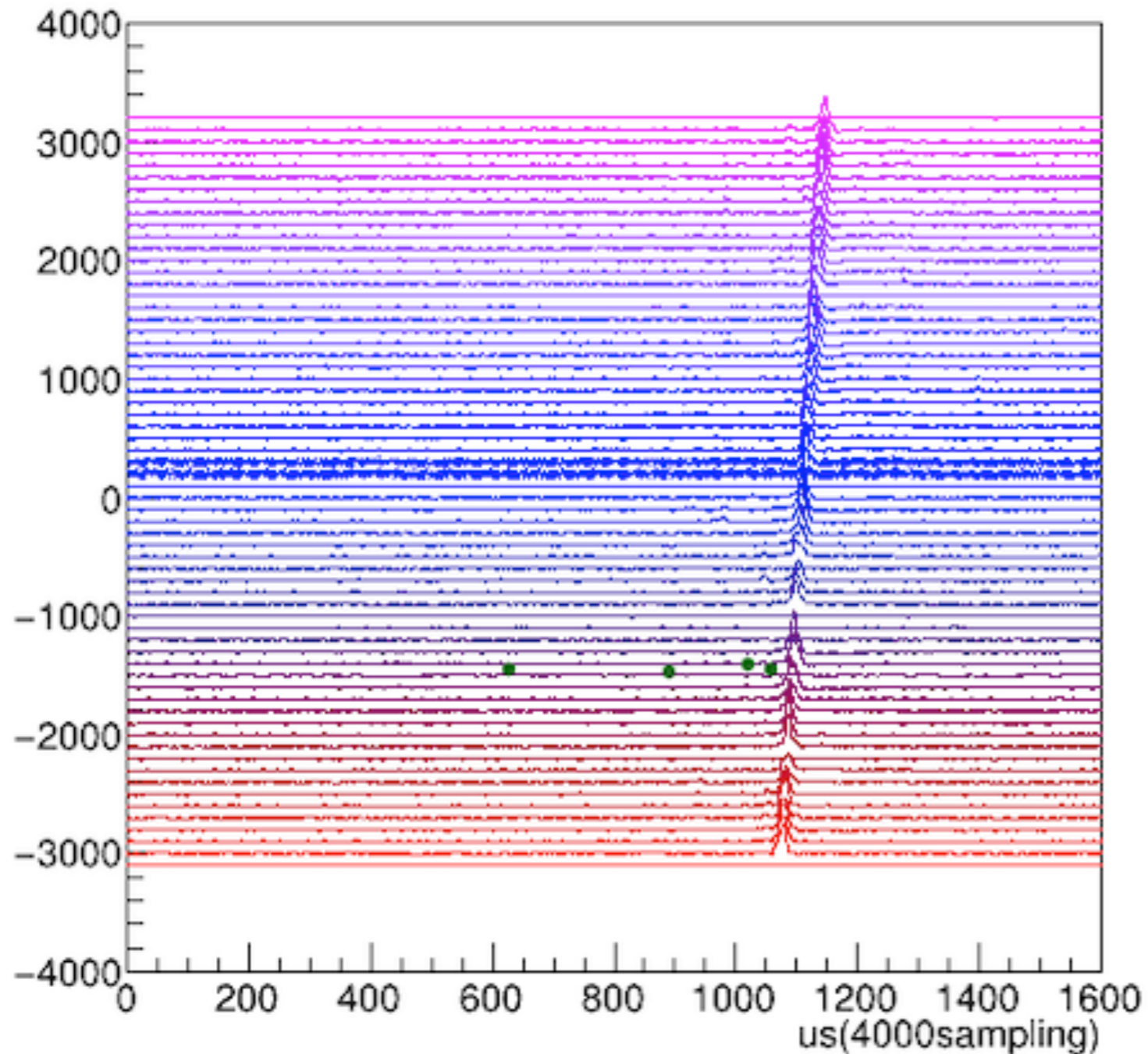




# 新規エレクトロニクス開発

- 時定数:  $4 \mu\text{s}$ ,  $S/N > 20$  を満たす新型ASIC: LTARS2018

→ T. Kishishita et al 2020 JINST 15 T09009



多チャンネル読み出しに成功！

(Sep. 2020 JPS 17pSF9 神戸大 窪田)

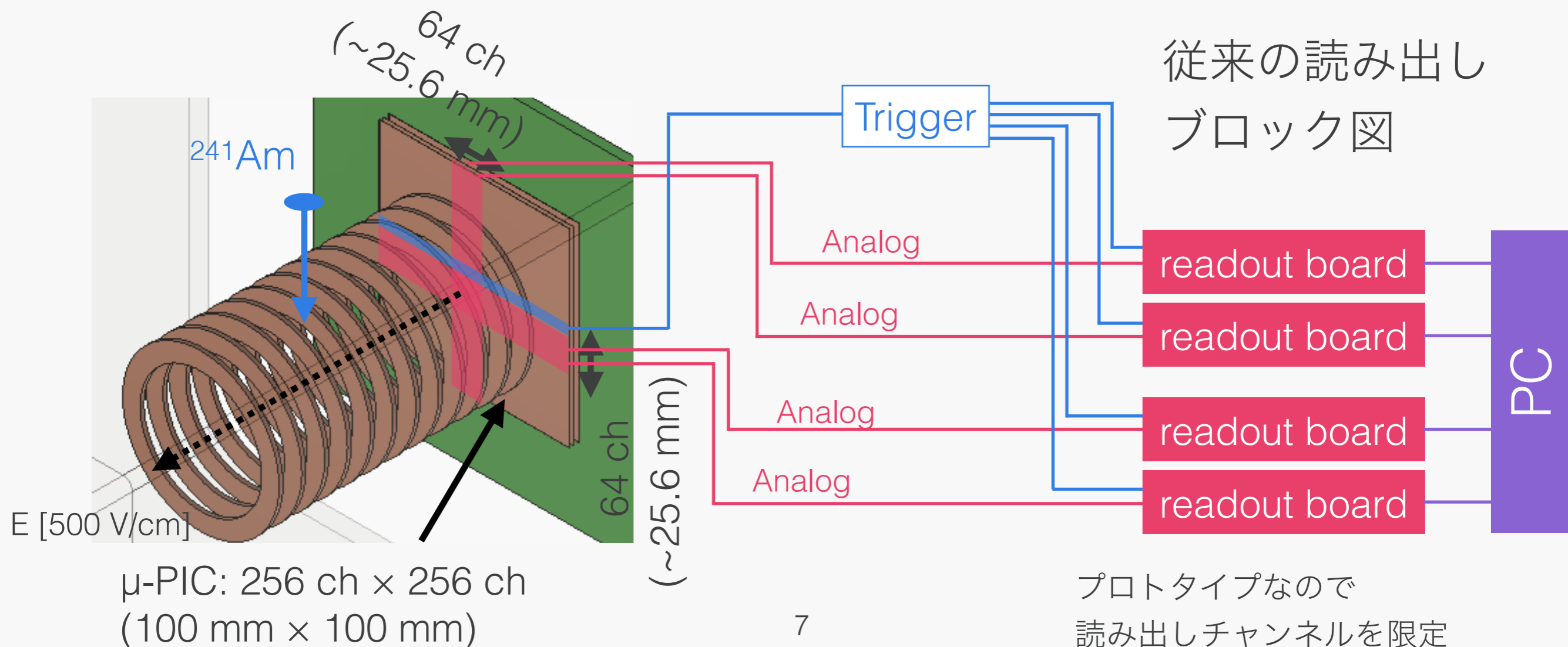


$\alpha$ 線信号を観測！

# 本研究の目的

## • DM探索実験に実用できる検出器開発

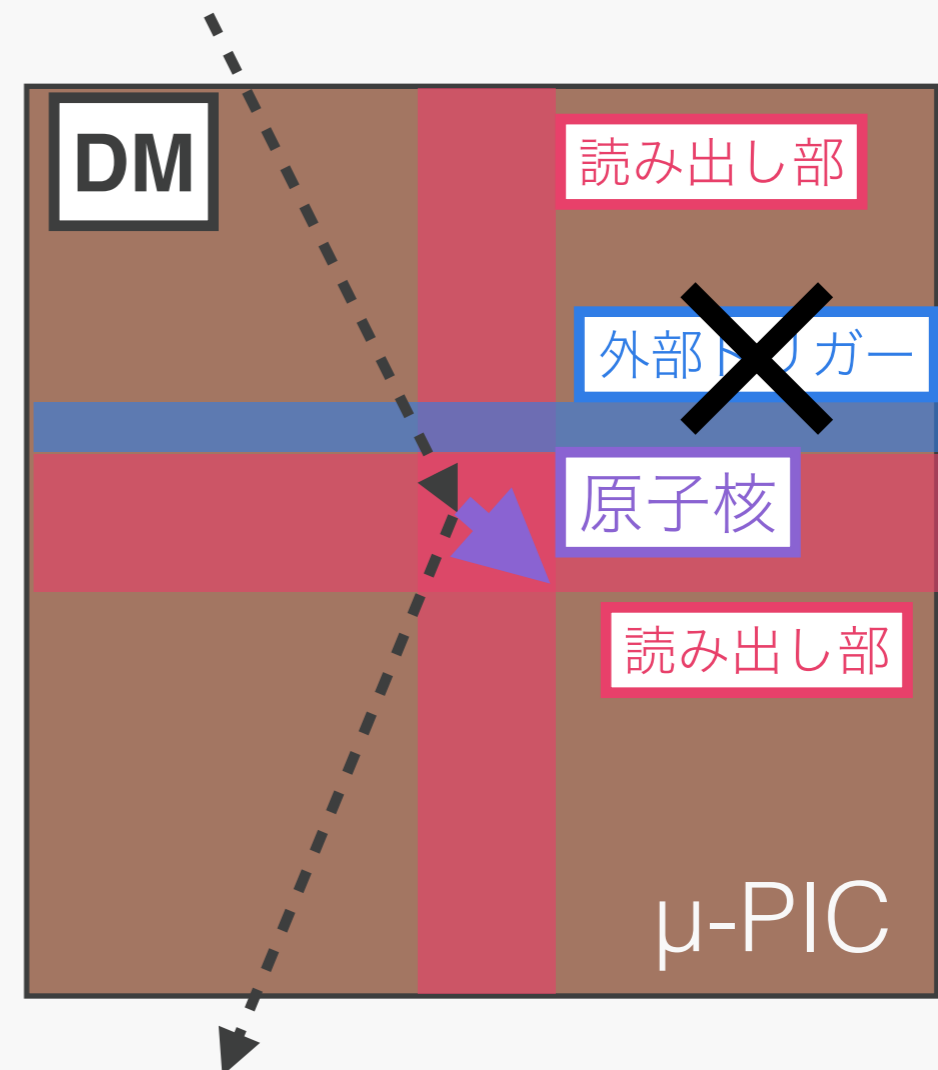
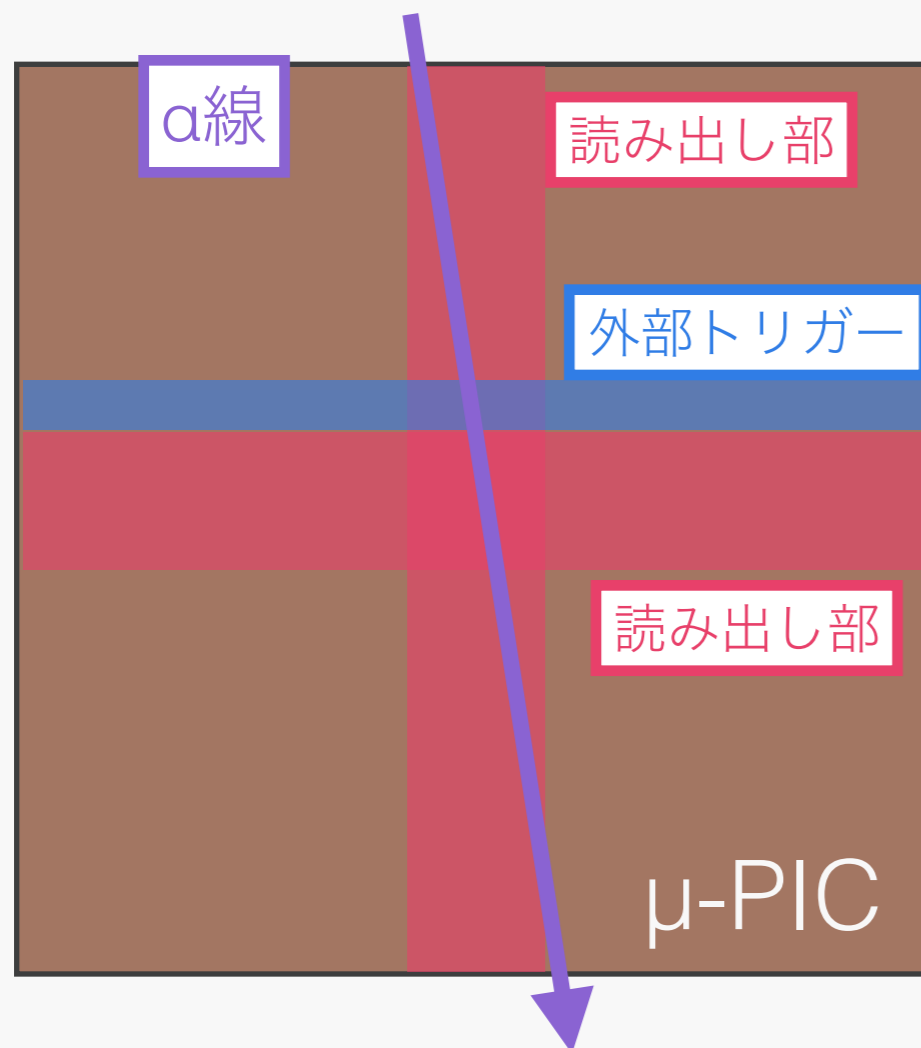
- ➔ 現状外部トリガーのみ → 長飛跡のα線のみに検出できていた
- ➔ セルフトリガーを実装し、原子核反跳を検出する



# 本研究の目的

- **DM探索実験に実用できる検出器開発**

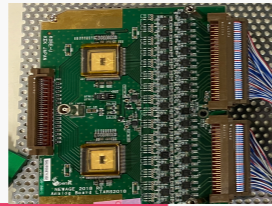
- ➔ 現状外部トリガーのみ ➔ 長飛跡の $\alpha$ 線のみ検出できていた
- ➔ セルフトリガーを実装し、原子核反跳を検出する



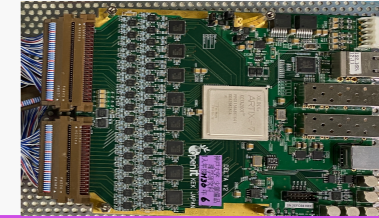
- セルフトリガー実装  
~ フォームウェア開発 ~
- 原子核反跳イベント測定  
~  $^{252}\text{Cf}$ 線源を用いたデータ収集 ~

# DAQシステム (簡略版)

Analog board  
(NEWAGE2018RO)



Digital board  
(DELTA\_V2)



PC

$\mu$ -PIC

... (64 ch)

ASIC  
(LTARS2018  
K06A)

AMP  
Shaper

... (64 ch)

ADC  
(AD9637)

2.5 MHz  
sampling  
(最大80 MHz)

... (64 ch)

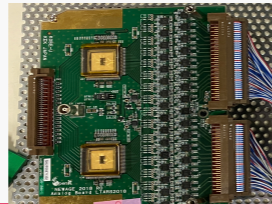
FPGA  
(Artix 7)

ADCの  
バッファ

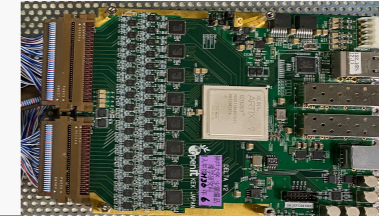
SiTCP

# DAQシステム (簡略版)

Analog board  
(NEWAGE2018RO)



Digital board  
(DELTA\_V2)



PC

$\mu$ -PIC

... (64 ch)

ASIC  
(LTARS2018  
K06A)

AMP  
Shaper

... (64 ch)

ADC  
(AD9637)

2.5 MHz  
sampling  
(最大80 MHz)

... (64 ch)

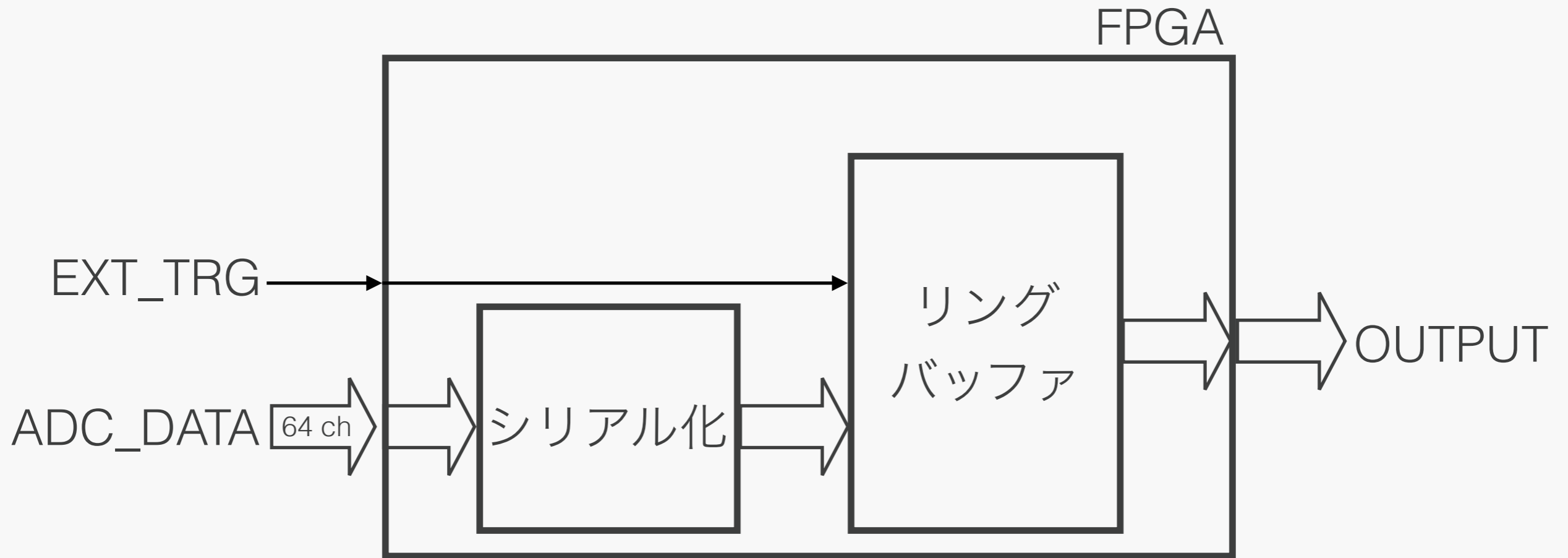
FPGA  
(Artix 7)

ADCの  
バッファ

SiTCP

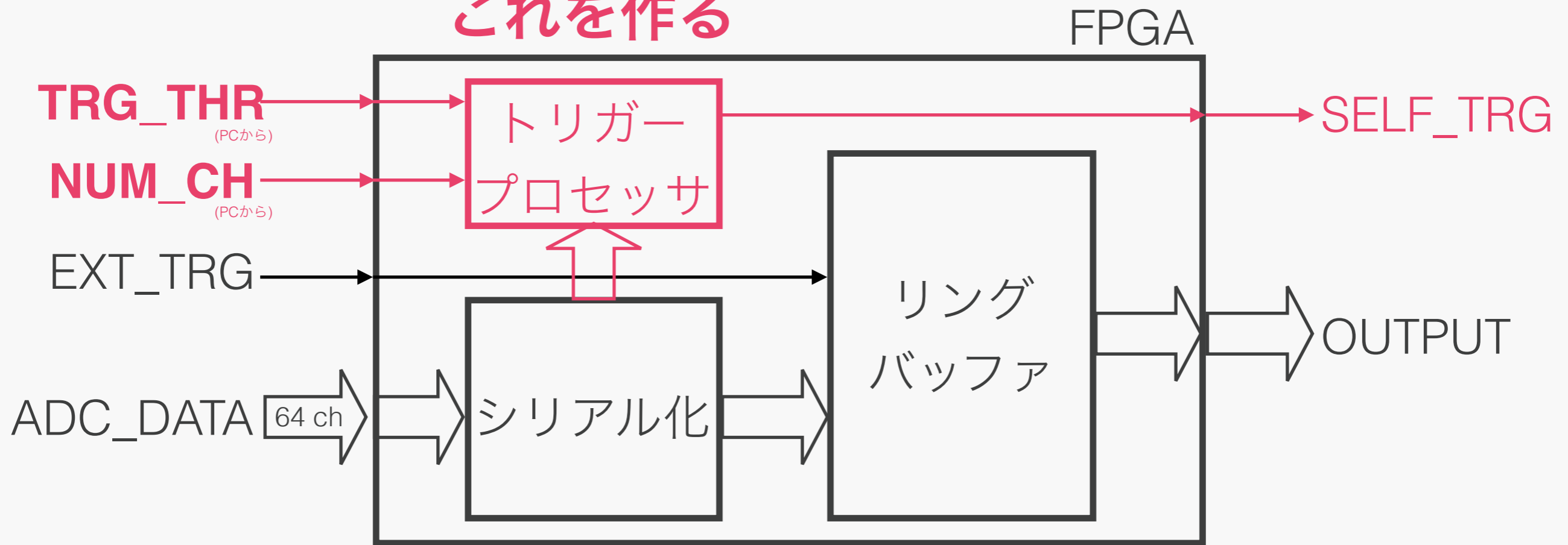
バッファのADC値  
からトリガー判定

# セルフトリガー機能 (トリガープロセッサ)



# セルフトリガー機能 (トリガープロセッサ)

これを作る



以下の条件を満たすときセルフトリガー発行

- あるチャンネルのADC値とoffset (常時計算) の差が[**TRG\_THR**]以上
- 上記を満たすチャンネルが[**NUM\_CH**]以上

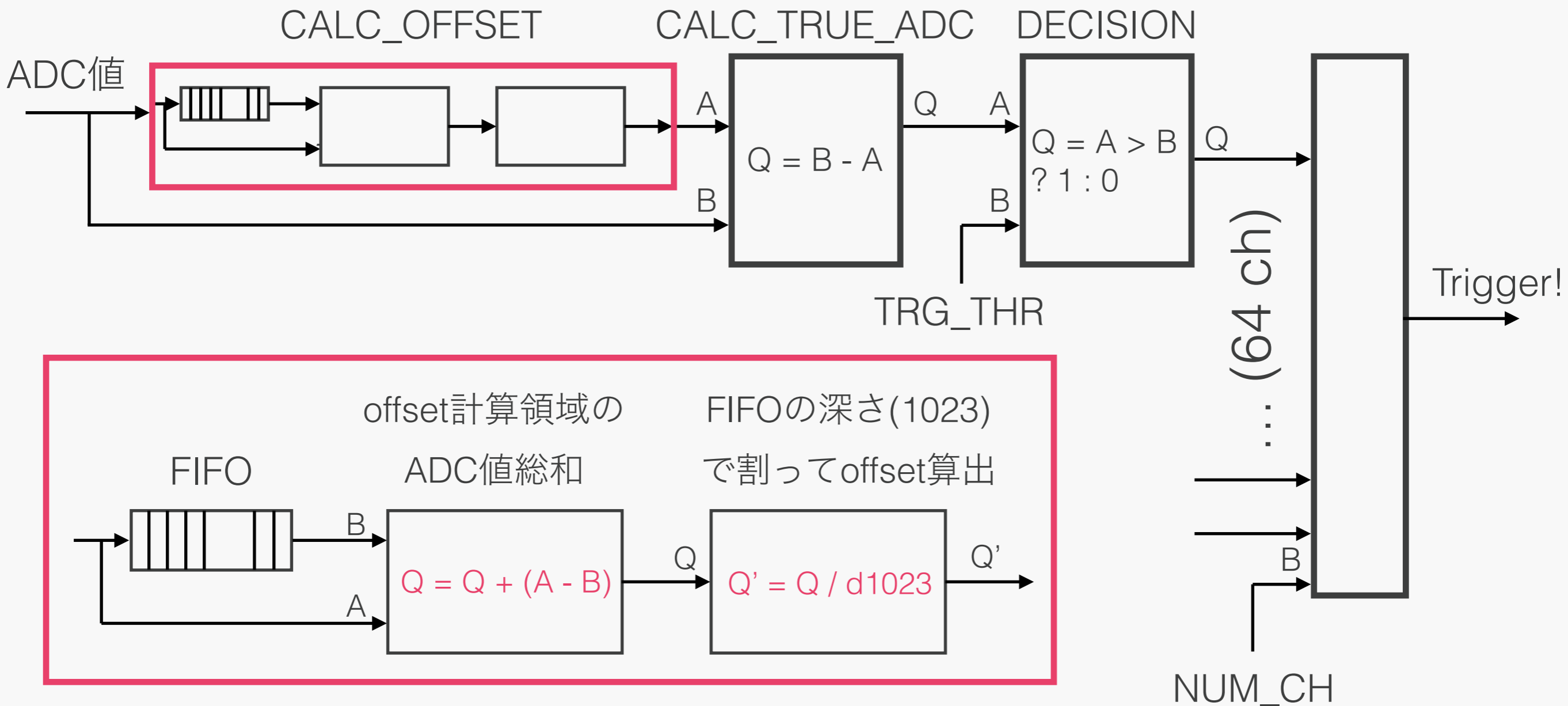
ソフトウェアから指定可



# トリガープロセッサ

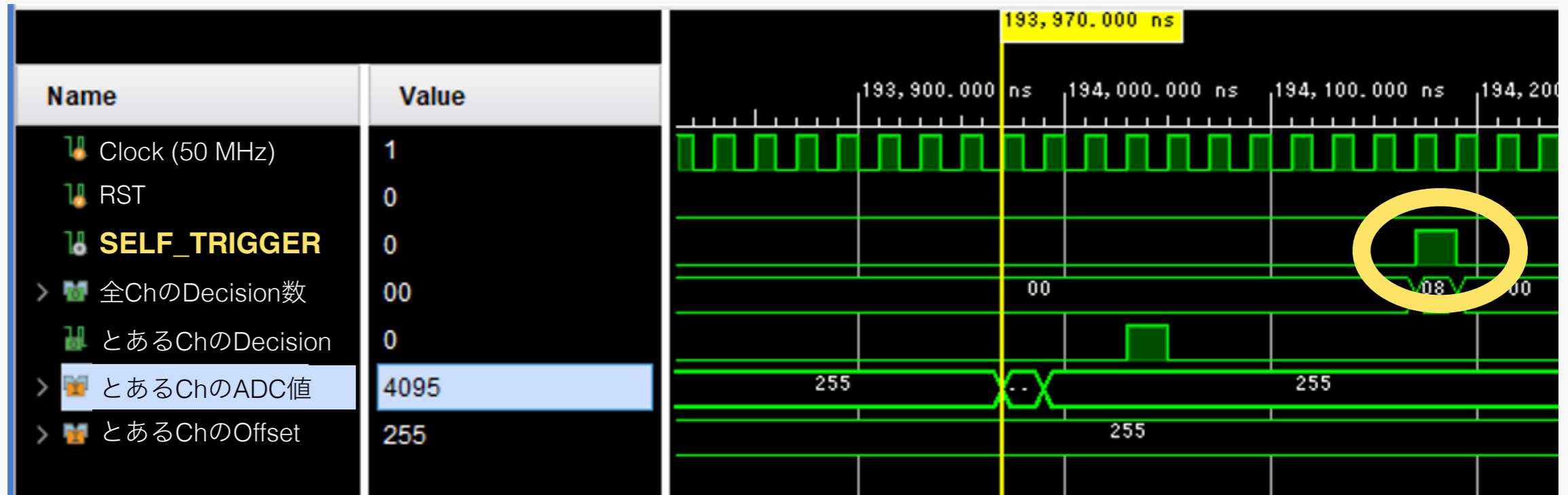
- トリガー判定の前の1023クロックぶんではoffset計算

→ DAQセッションではないので詳しい説明はスキップします



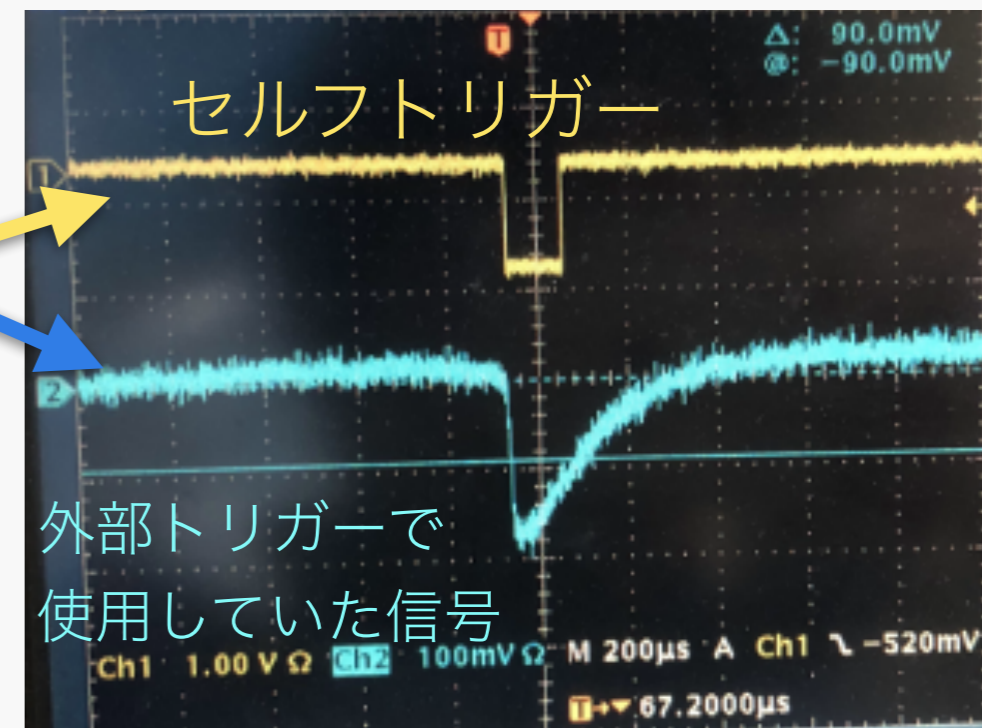
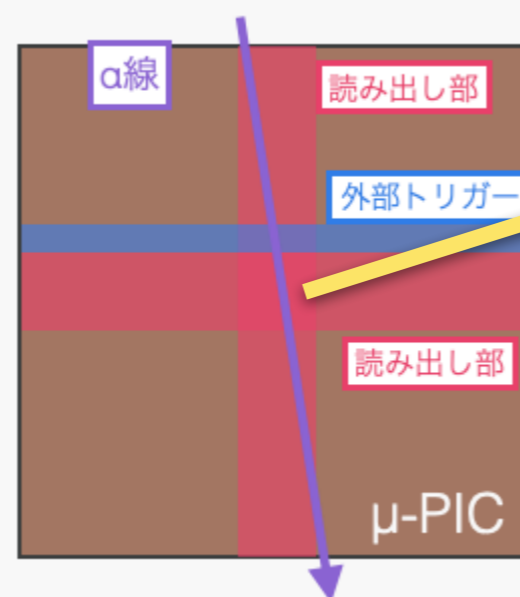
# トリガープロセッサの動作確認

## 1. ファームウェア開発ツール (Xilinx, Vivado) のSimulation



## 2. アルファ線照射実験 (実機に実装して確認)

**準備OK!**



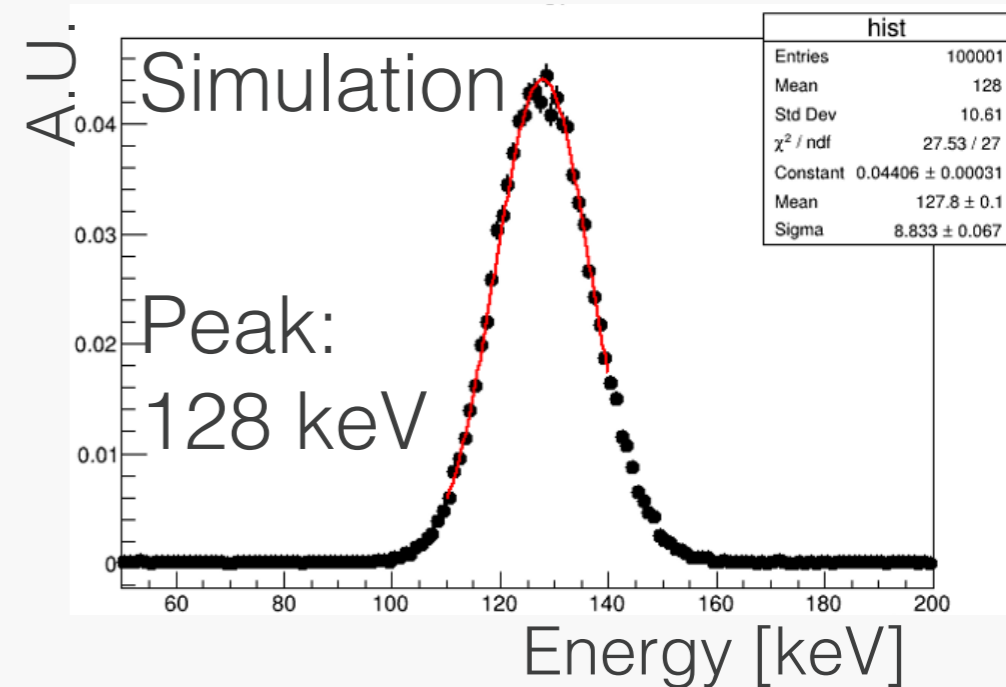
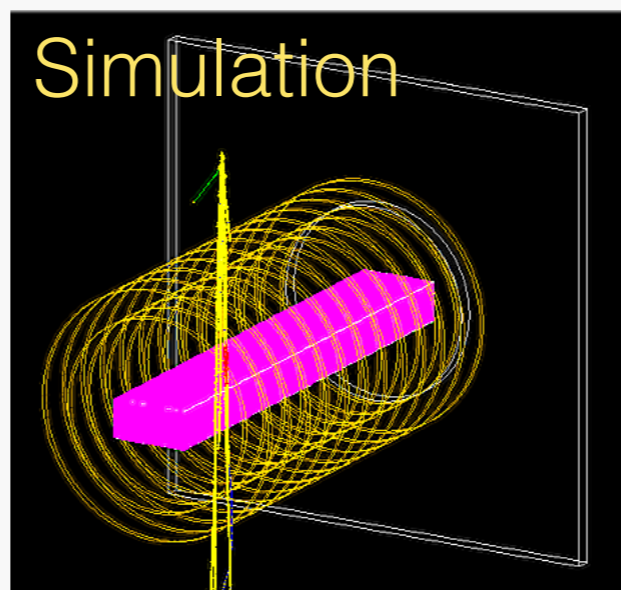
セルフトラッキングソフトウェア開発 ~

**Clear !**

- 原子核反跳イベント測定  
~  $^{252}\text{Cf}$ 線源 (中性子) を用いたデータ収集 ~

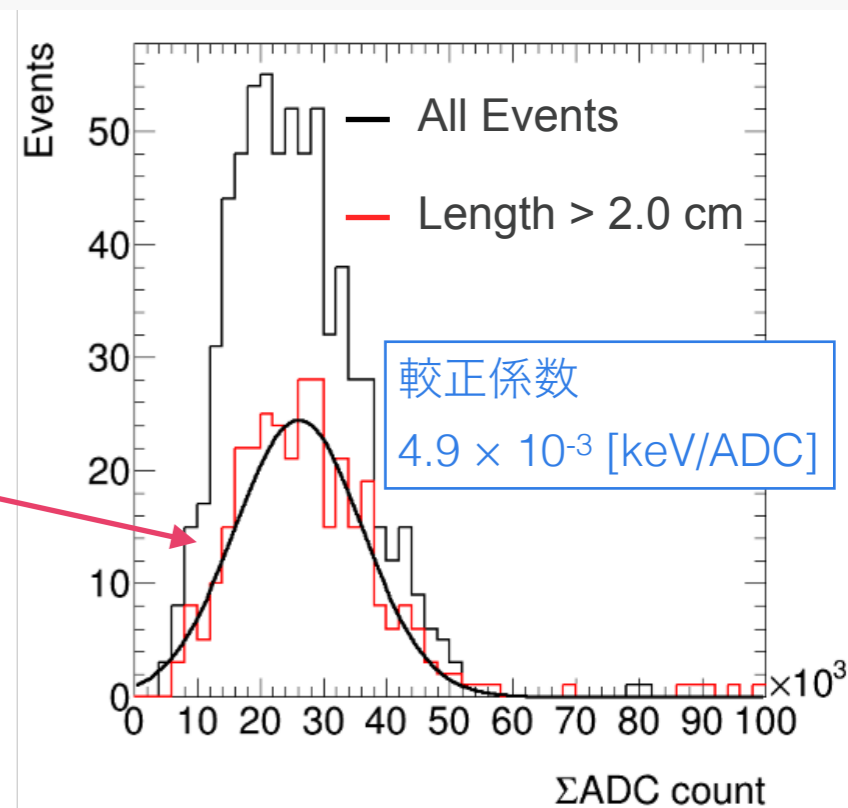
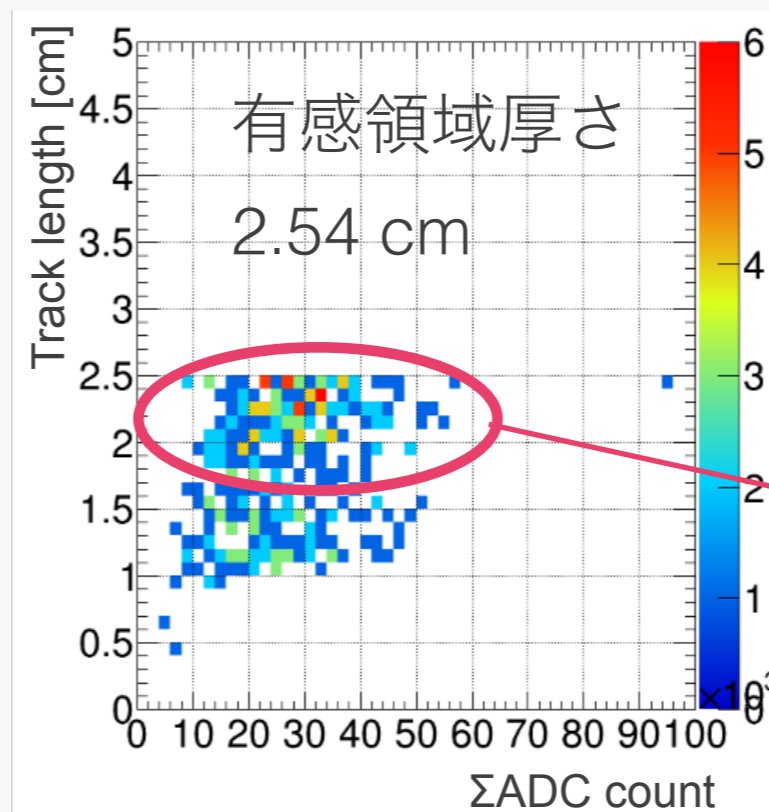
# (準備) エネルギー校正

- $\alpha$ 線が有感領域内で失うエネルギー計算  
→ Geant4 simulationを使用



- 測定した $\alpha$ 線事象に対しパルスの $\Sigma$ ADC値ピークを128 keVに校正

**エネルギー校正の手法確立**

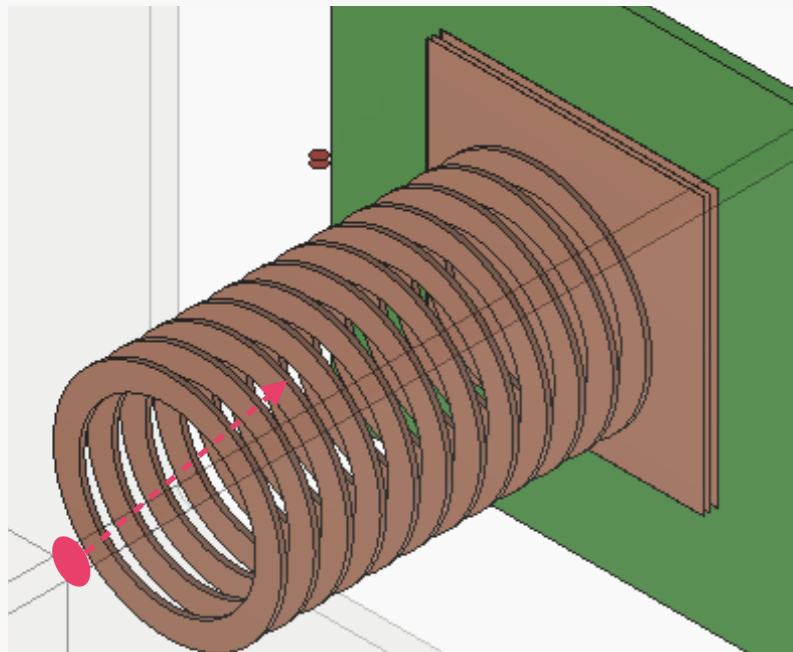


# $^{252}\text{Cf}$ 線源試験 @神戸大

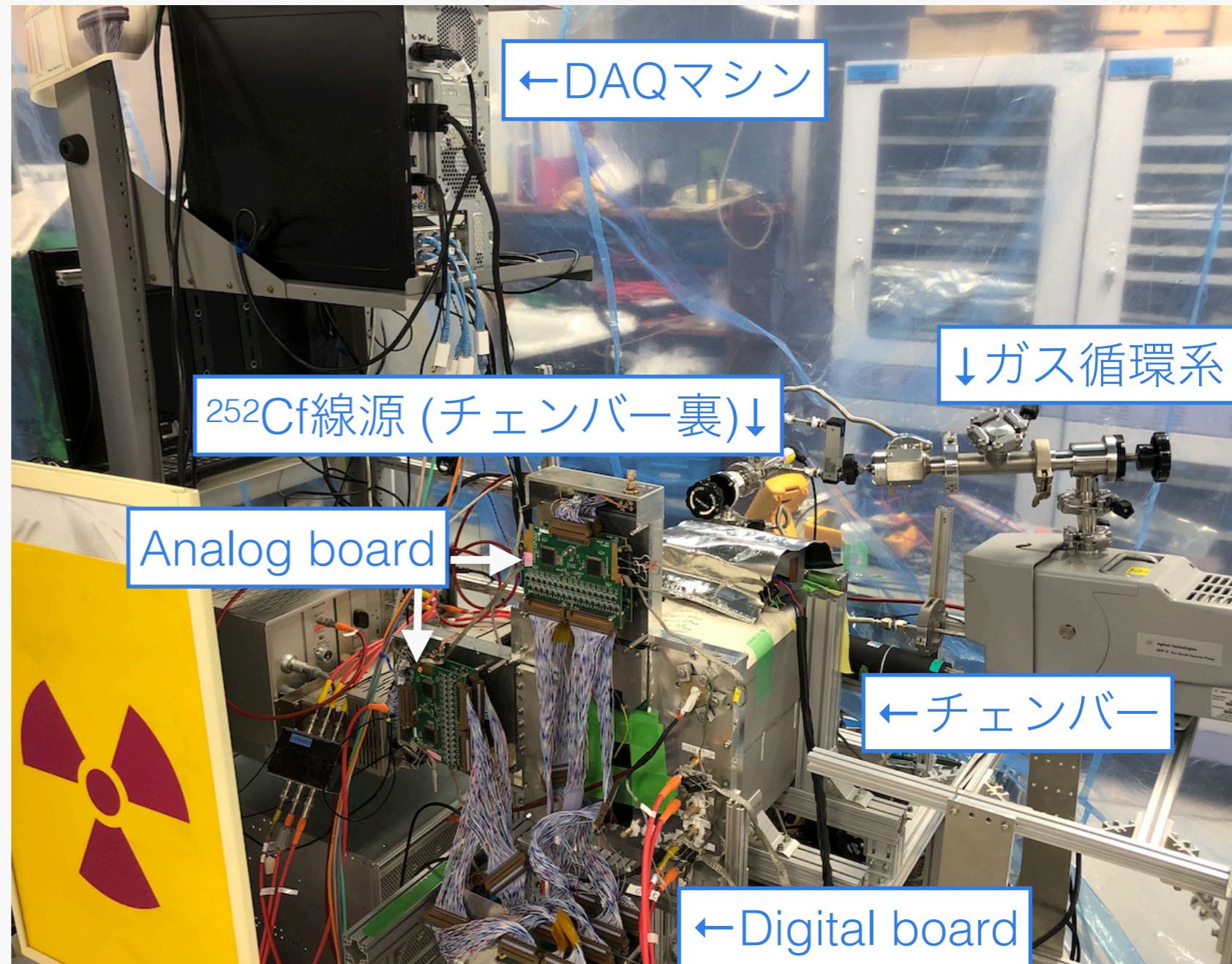
- 線源からの中性子が原子核反跳を起こす事象観測を目指す

セルフトリガー設定

- threshold: 150 mV
- ヒットチャンネル数: 3



$^{252}\text{Cf}$  線源

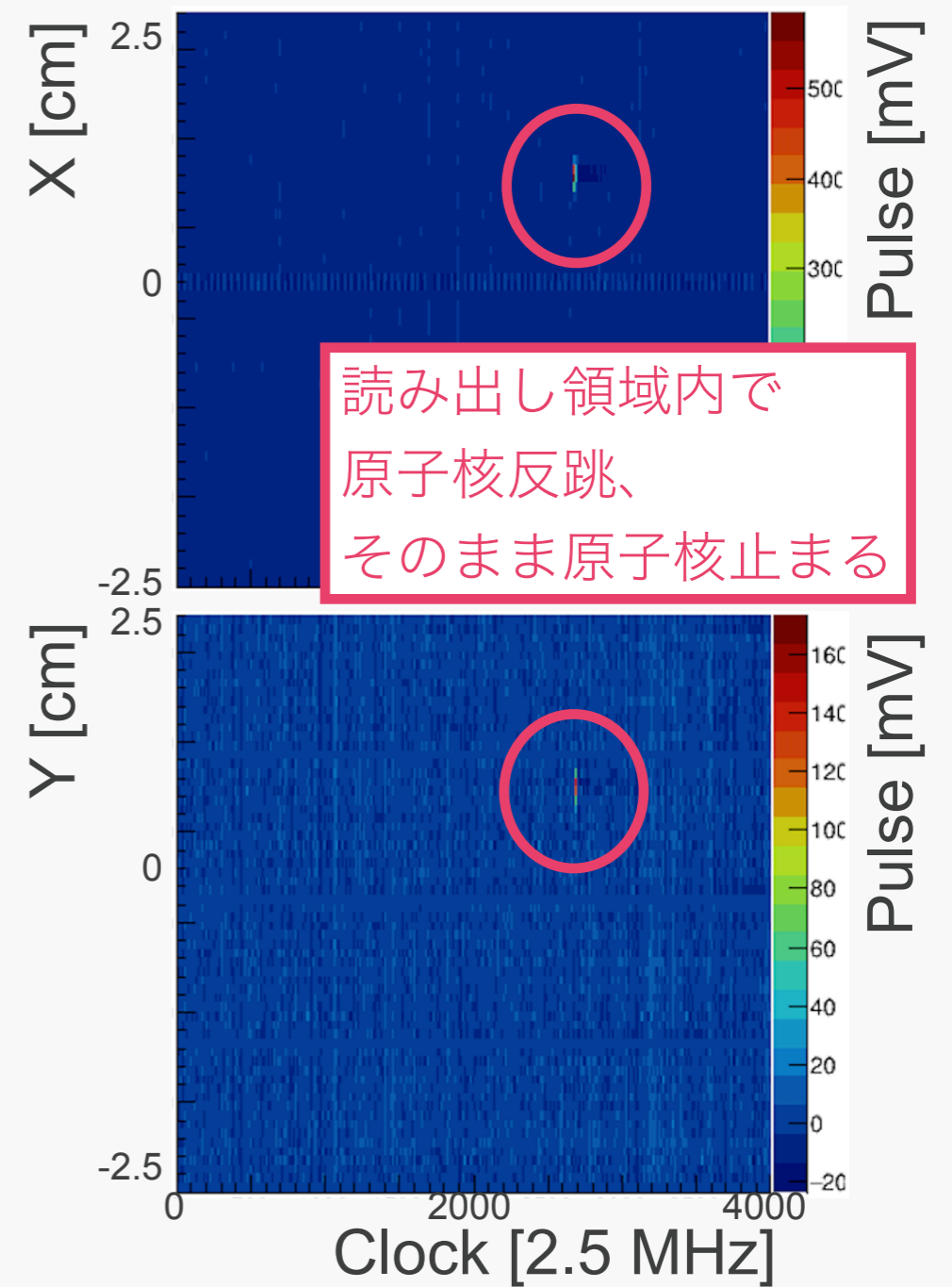
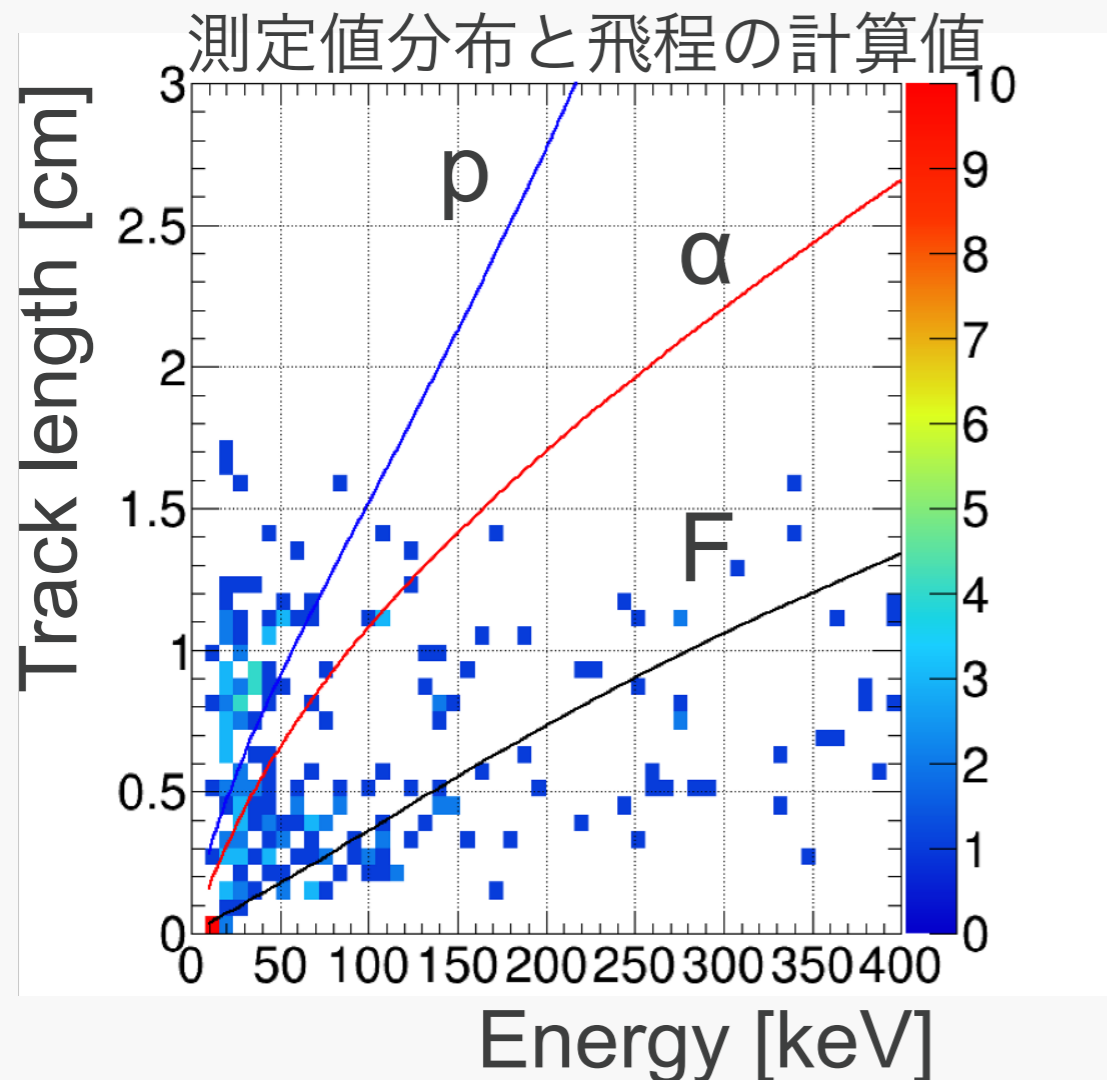


# 原子核反跳検出

- 飛跡長とエネルギー損失からフッ素原子核反跳同定

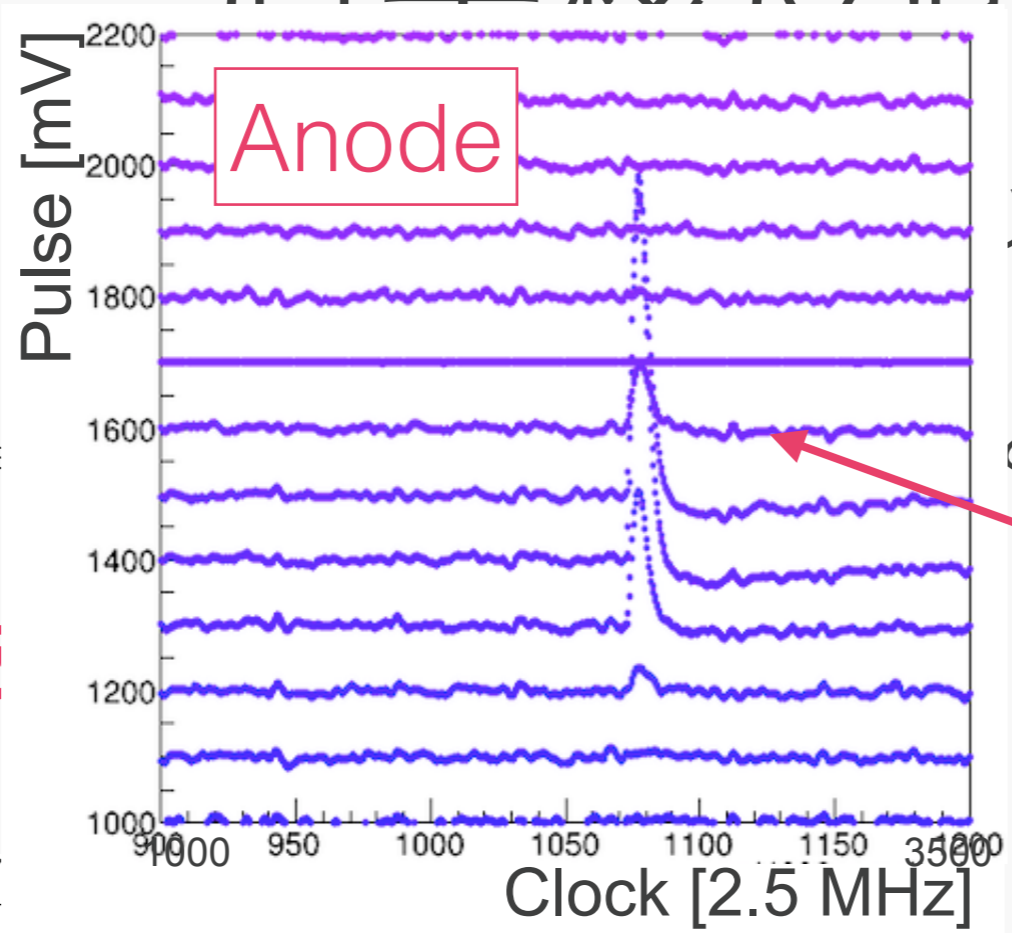
→ SRIM (シミュレーションソフトウェア) による計算値と比較

→ 原子核反跳検出を確認

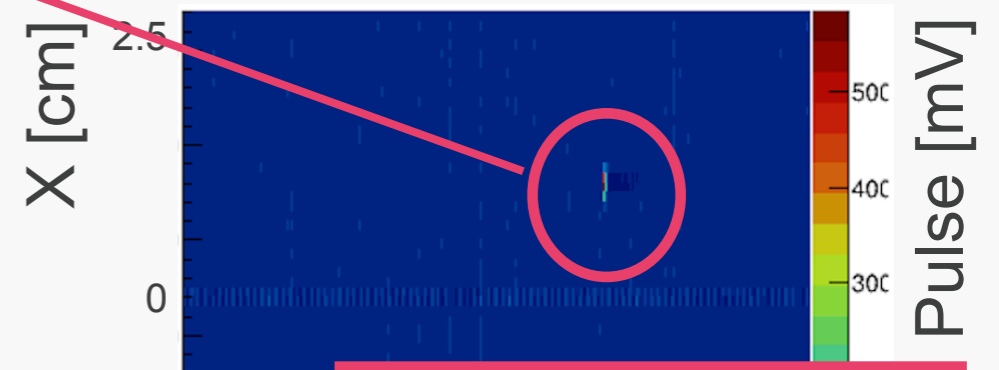
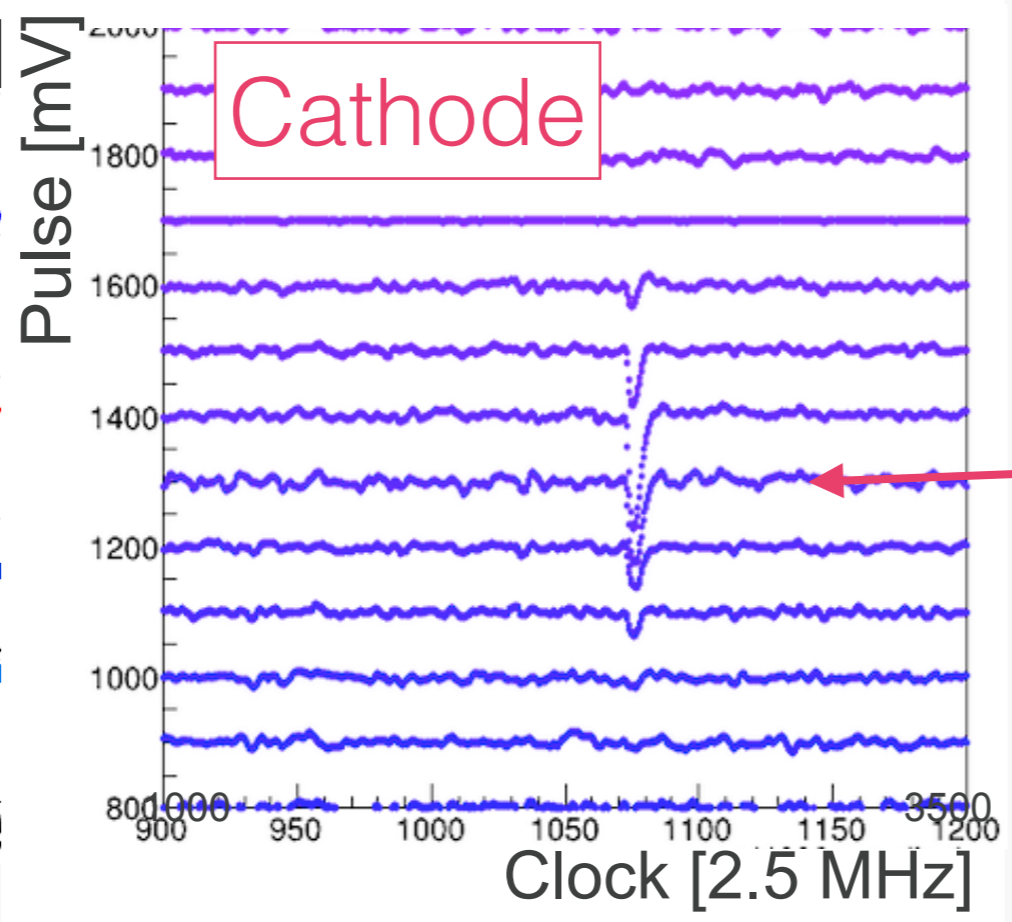
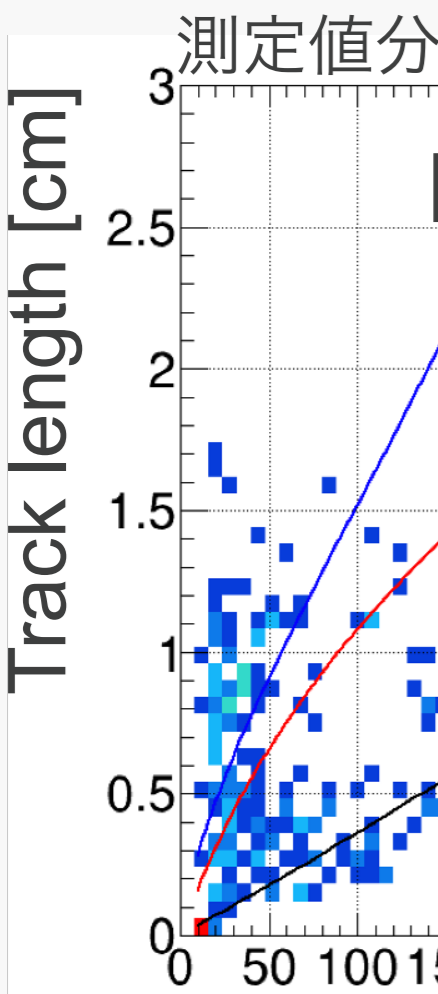


# 原子核反跳検出

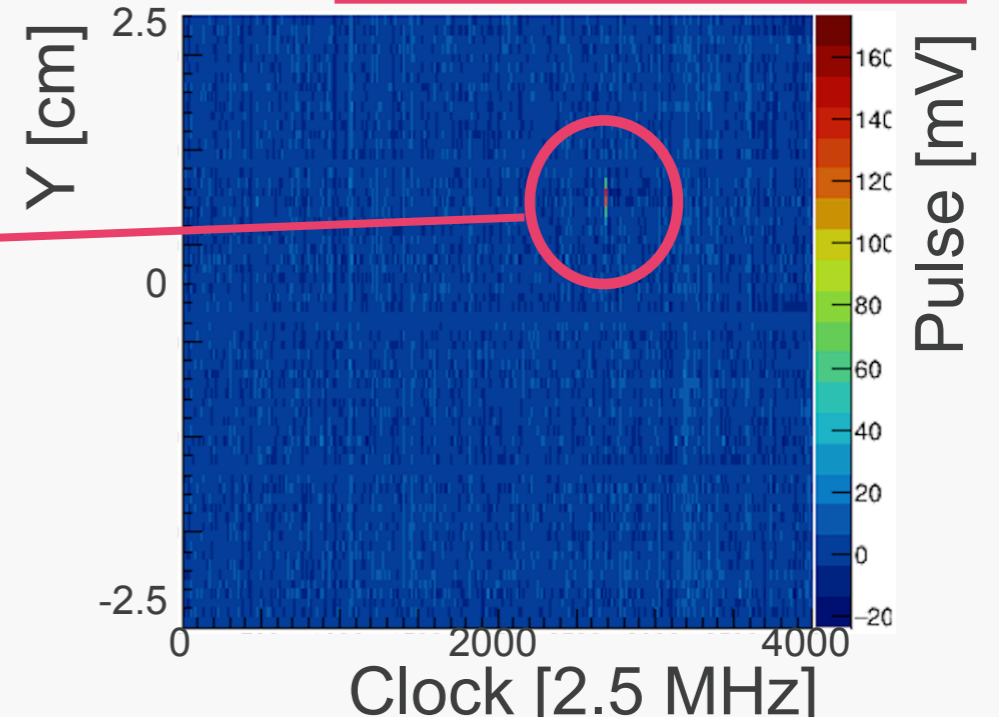
- 飛跡長と
- SRIM (シミュレーション)
- 原子核反跳



ソ素原子核反跳同定  
と比較



読み出し領域内で  
原子核反跳、  
そのまま原子核止まる

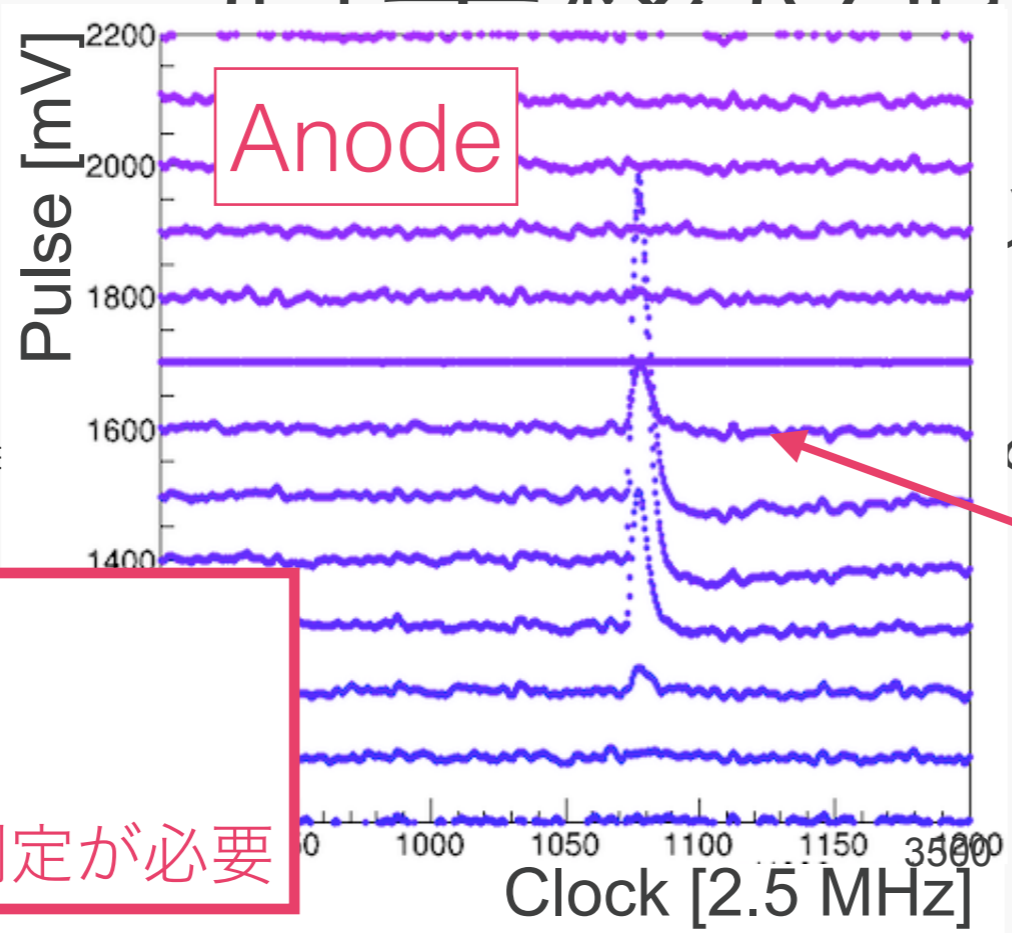


# 原子核反跳検出

● 飛跡長と

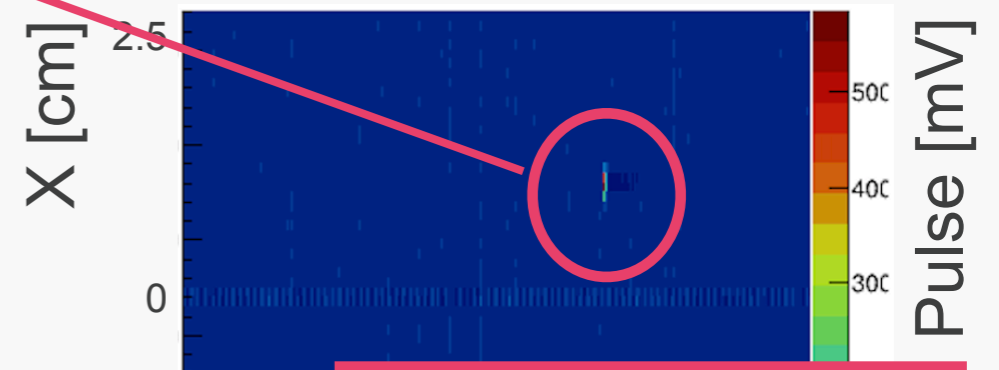
→ SRIM (シミュレーション)

課題1  
2パルス解析困難  
→ 高ガスゲイン測定が必要

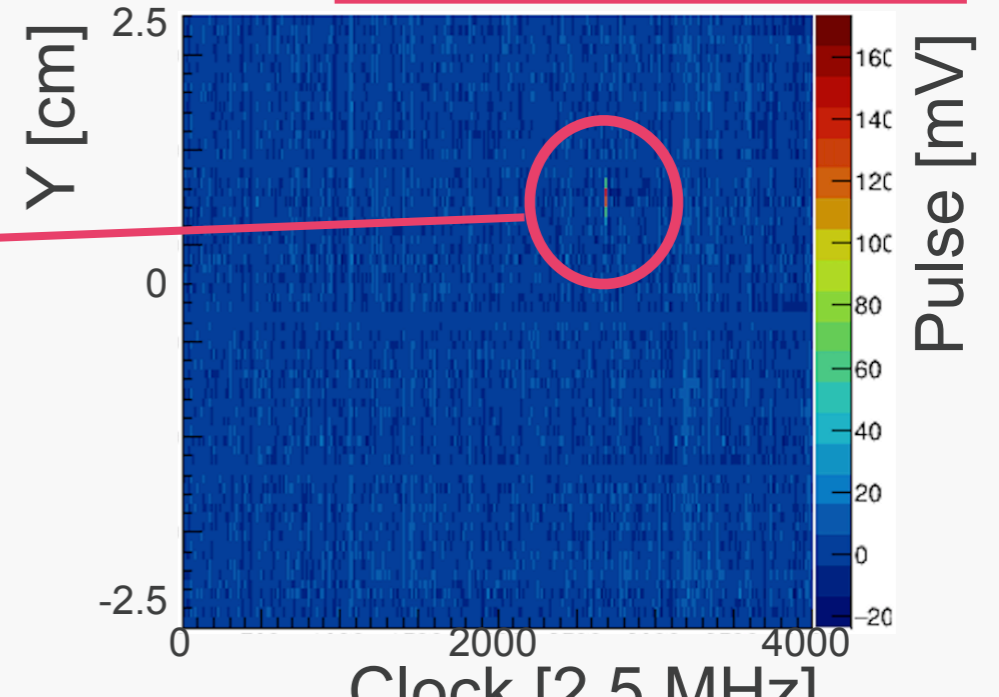
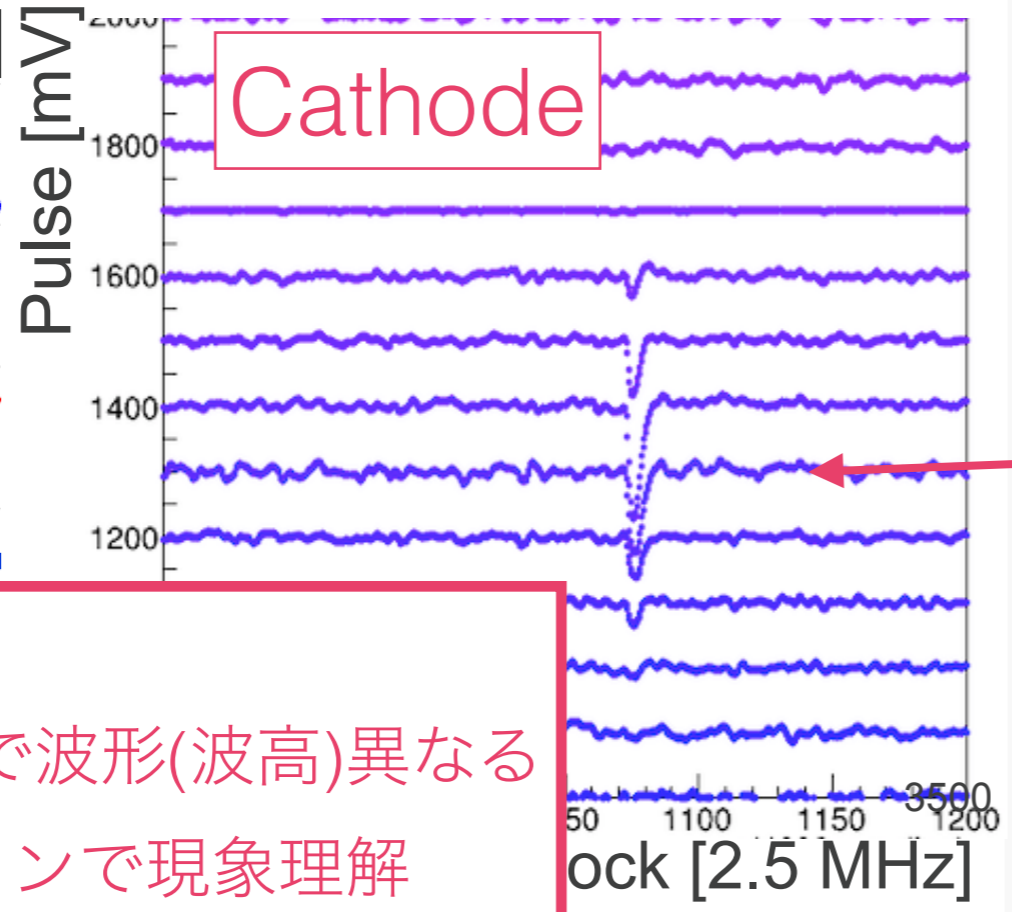
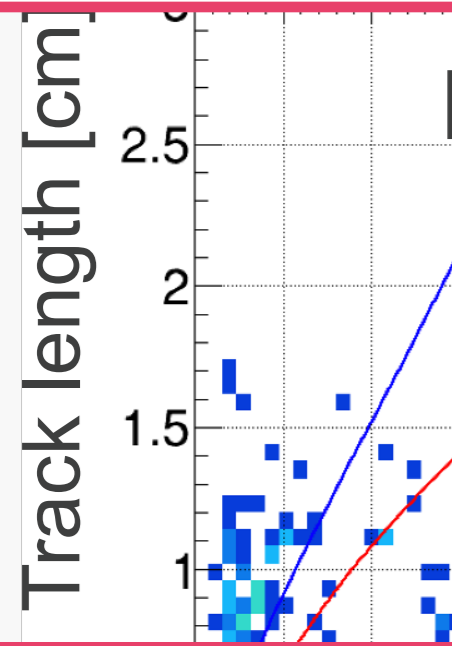


ソ素原子核反跳同定

と比較



読み出し領域内で  
原子核反跳、  
そのまま原子核止まる



課題2  
Anode, Cathodeで波形(波高)異なる  
→ シミュレーションで現象理解

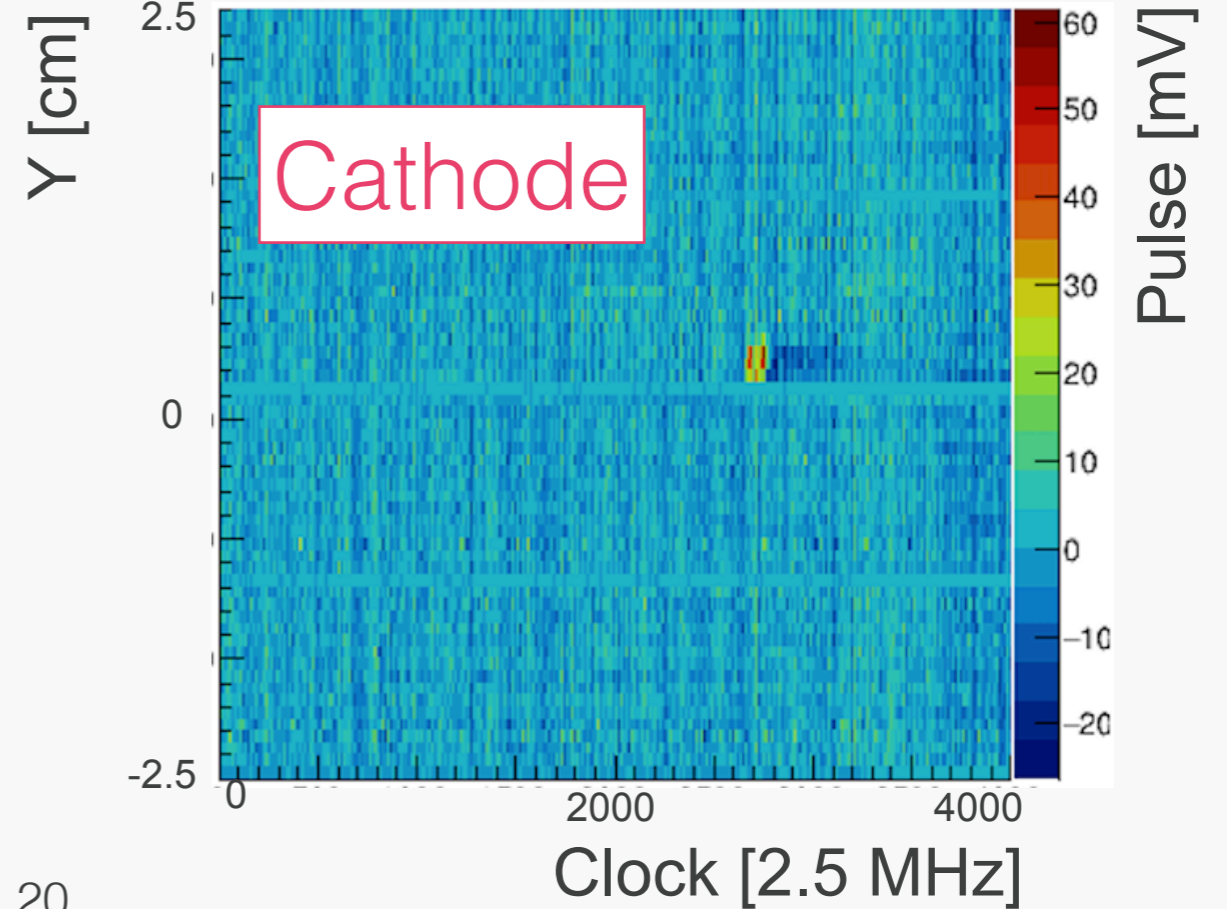
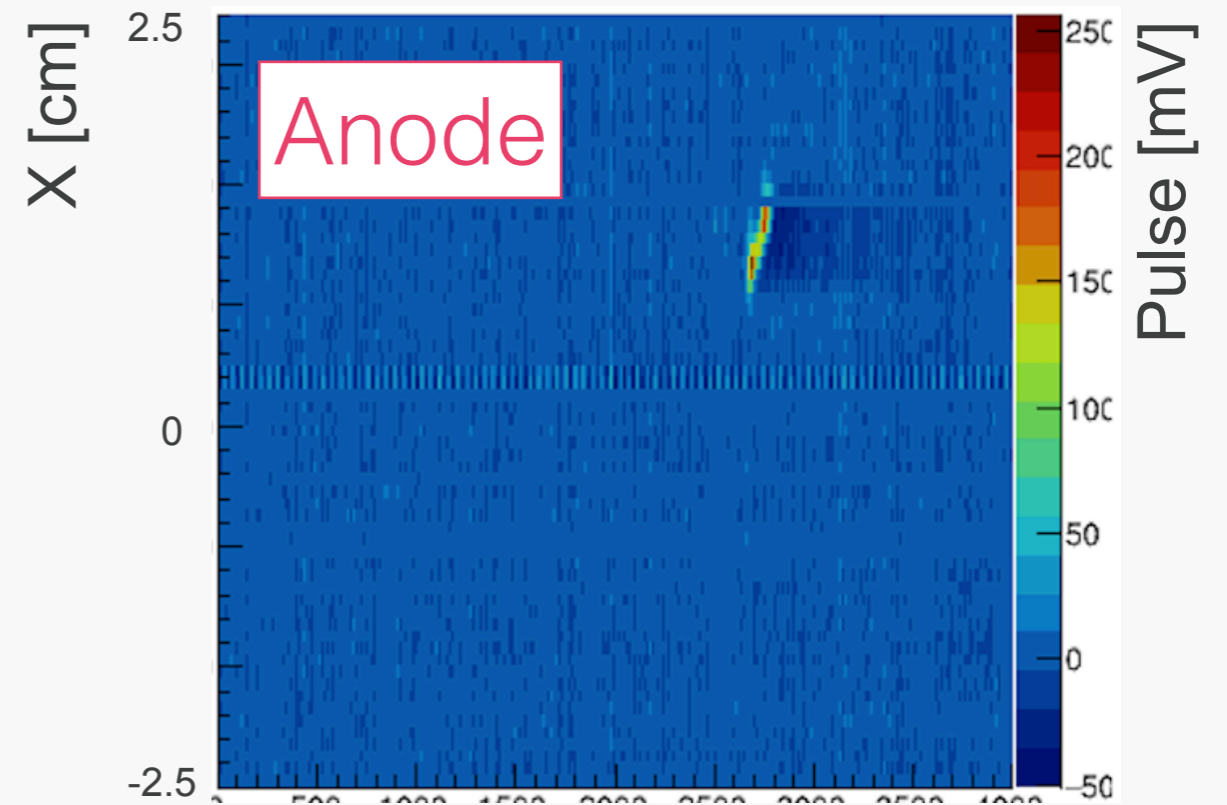
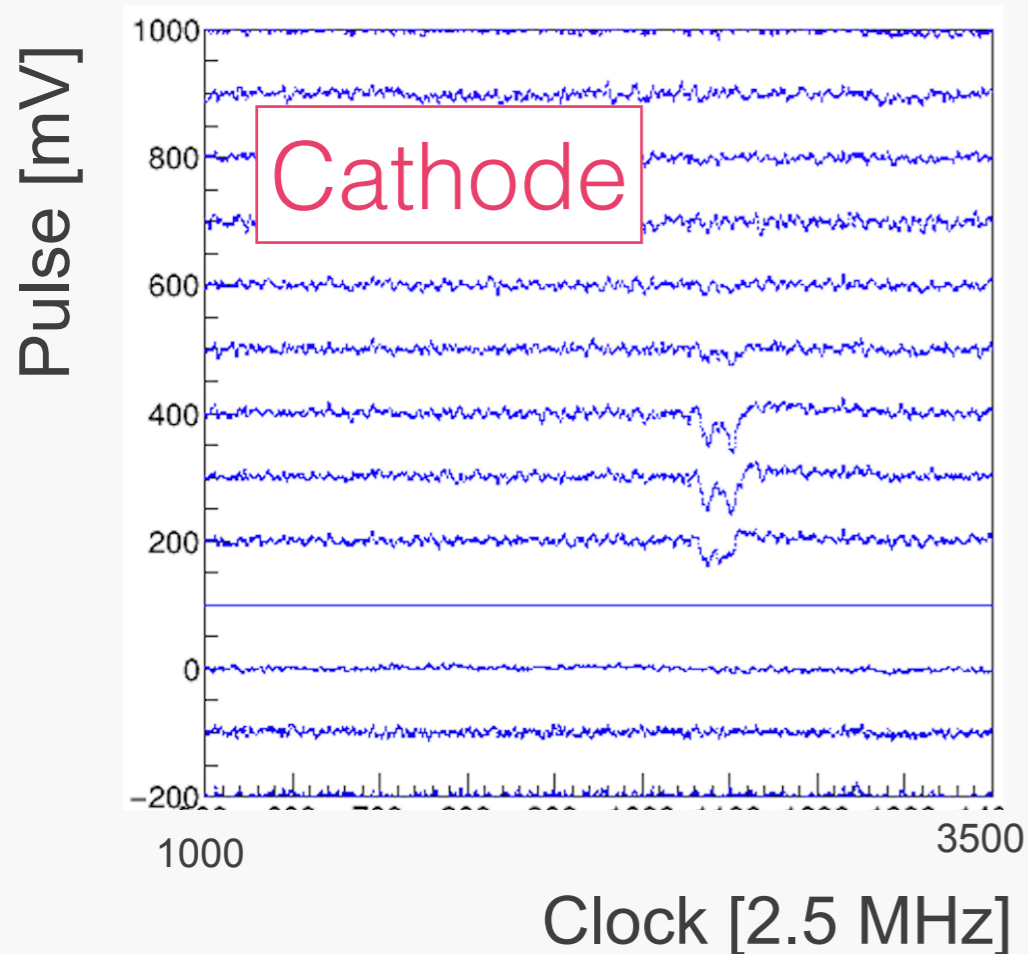
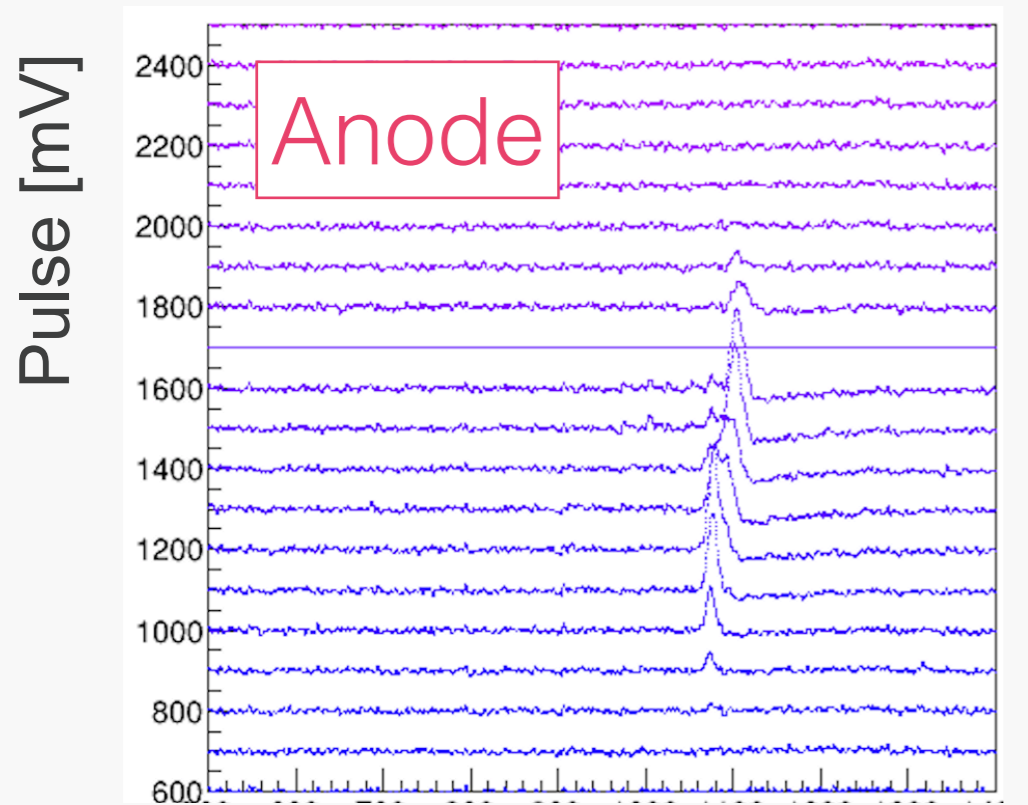


# 結論

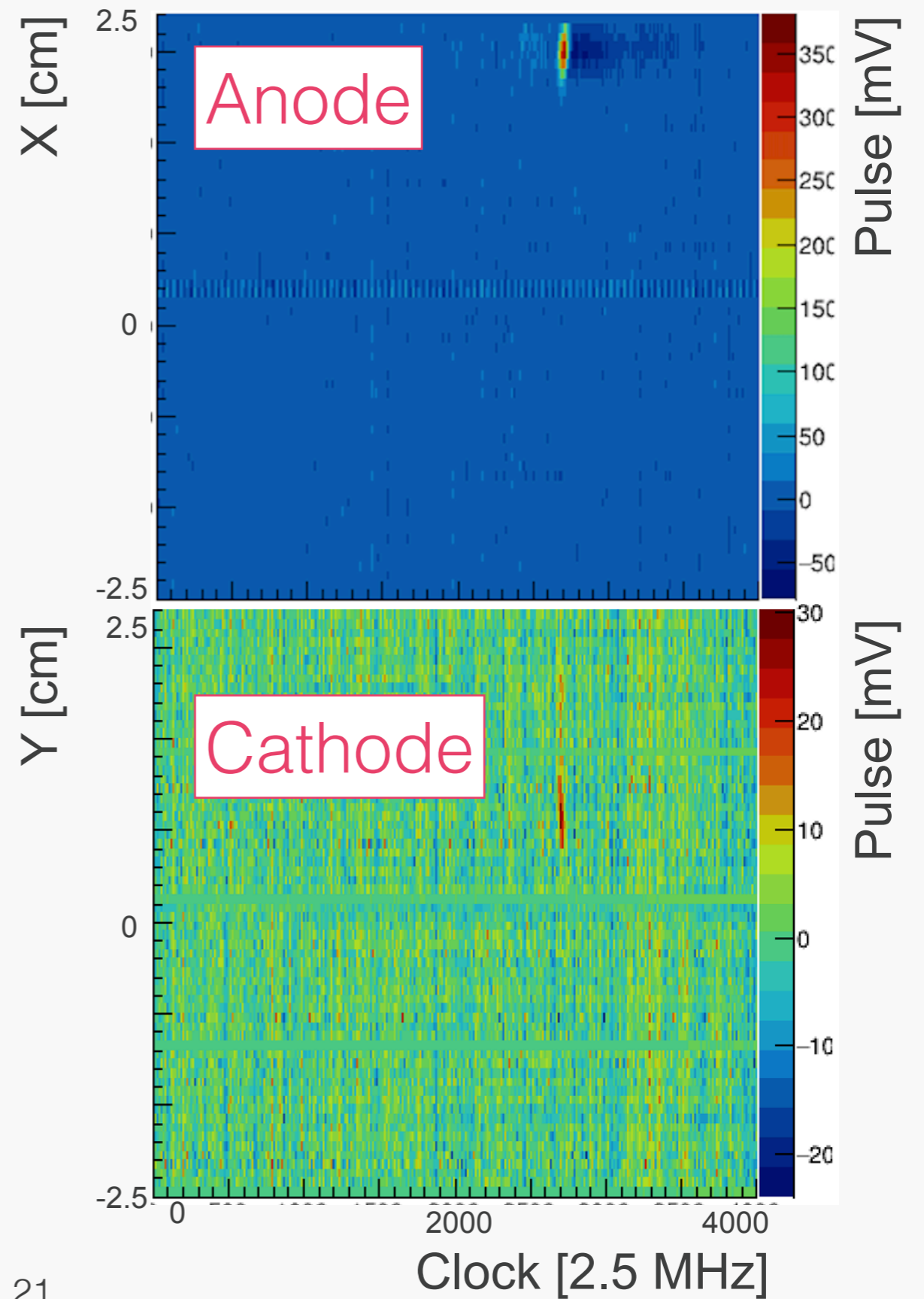
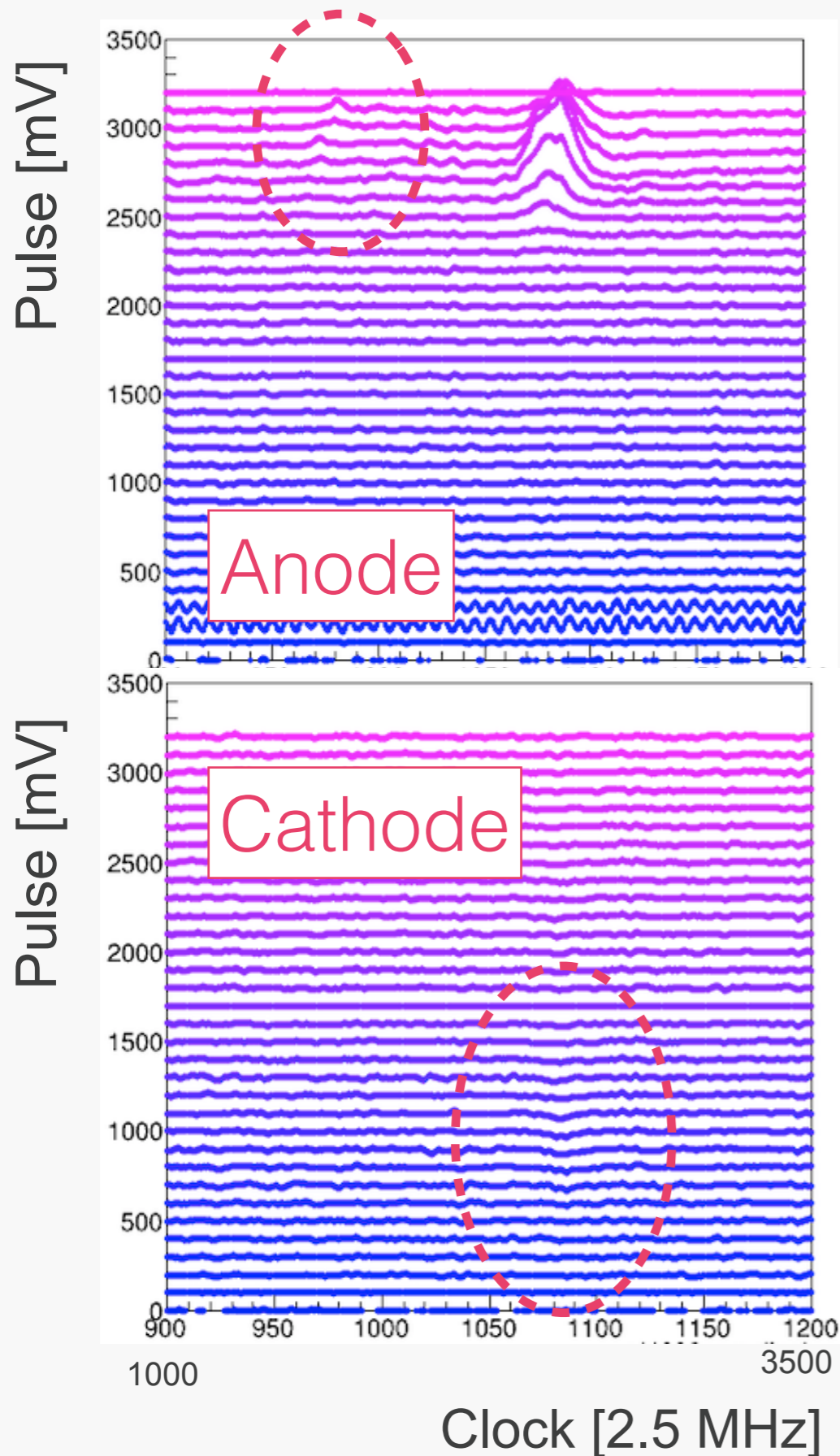
- 陰イオンガス $\mu$ -TPC開発、DM探索実験への実用化に向け整備中
  - ➔ 中性子線源を用いた原子核反跳でDM由来の信号をemulate
    - ▶ 信号を検出するためにセルフトリガー機構が必要
- セルフトリガーを実装すべくファームウェア開発実施
- 中性子線源を用いて動作確認し、原子核反跳の検出に成功！
  - ➔ **DM探索実験に実用できる検出器を開発した**
    - ▶ 今後はゲインを上げてダブルピークからドリフト方向の絶対位置決定を目指す

# Backup

# Event display (1)



# Event display (2)



# Expected limit

