



暗黒物質探索実験に向けた 陰イオンガスTPCの動作検証

神戸大 東野 聡

身内 賢太郎 中山 郁香 安 博充 大藤 瑞乃

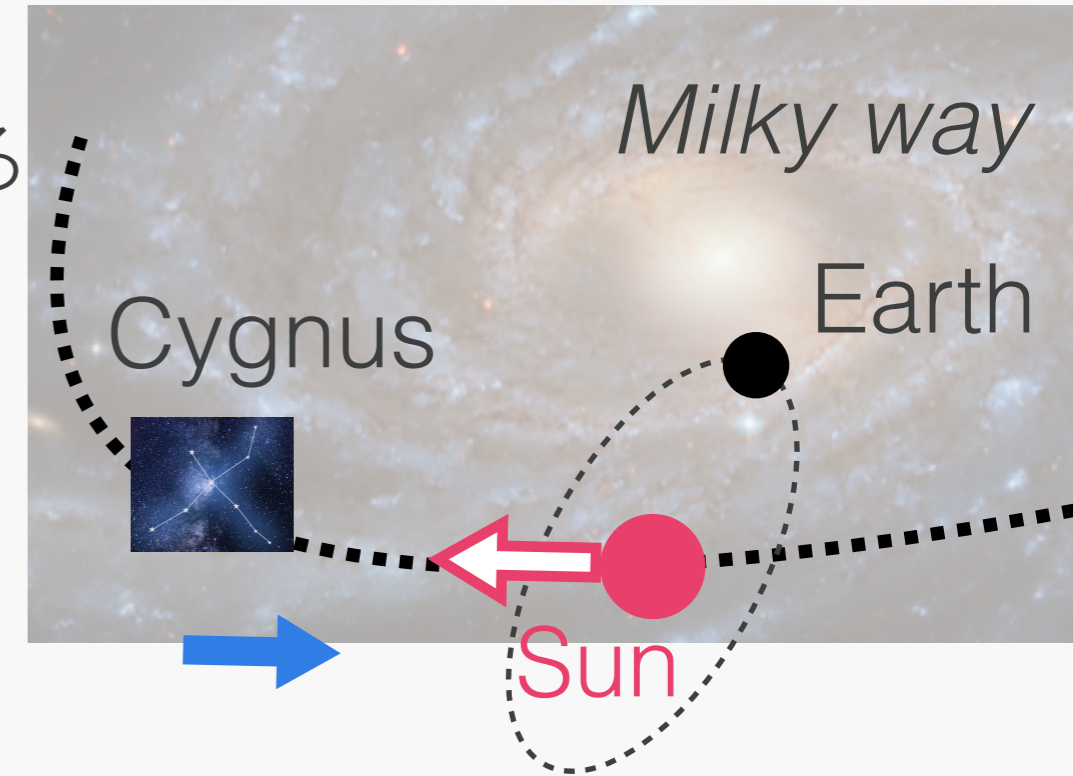
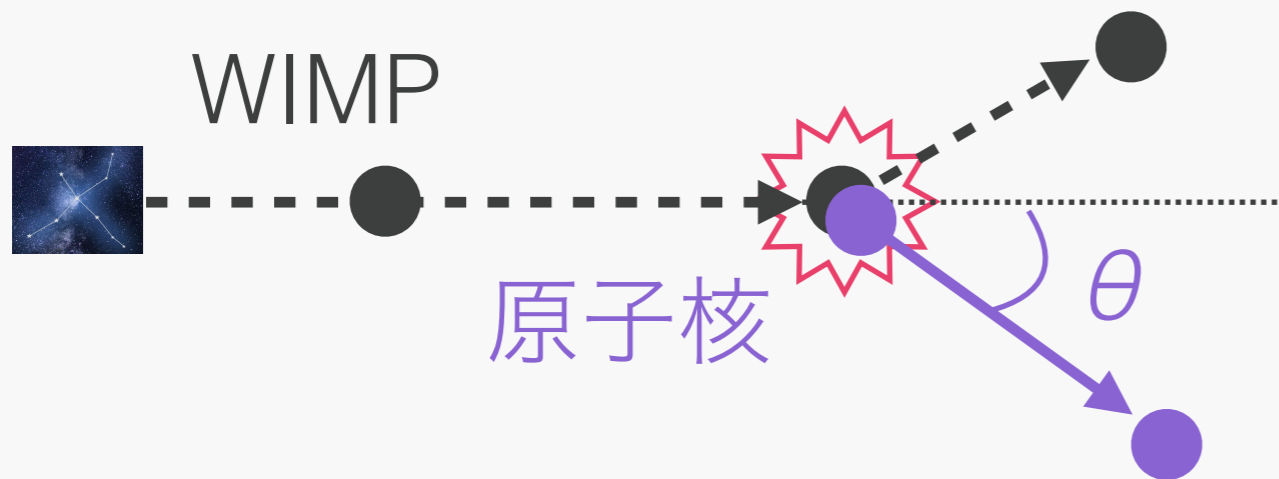
2022年 9月 6日

Introduction

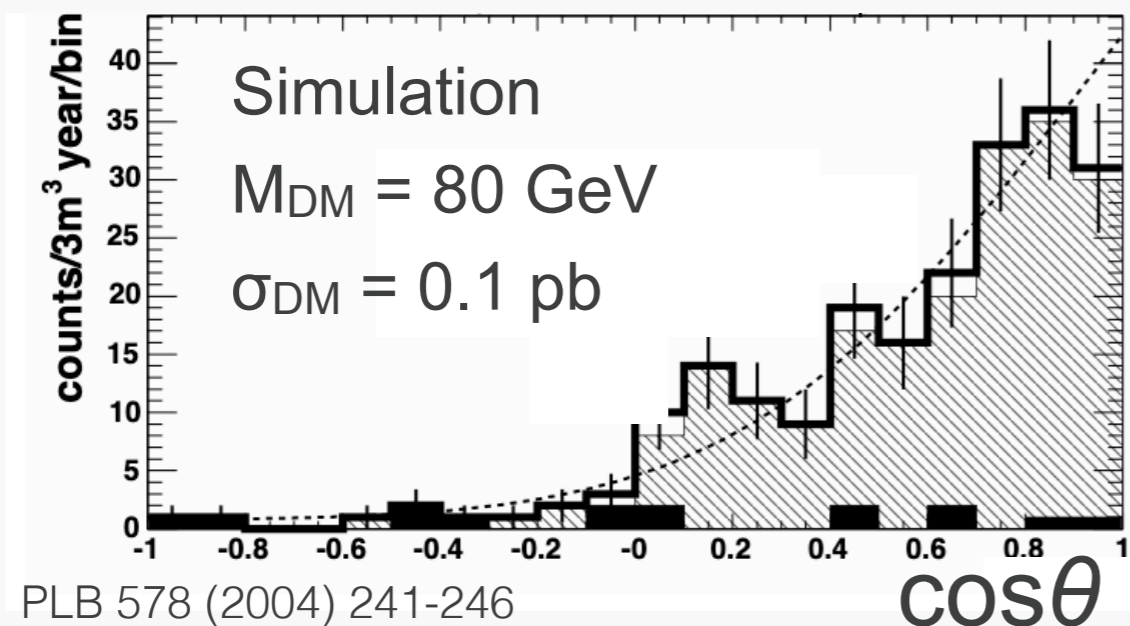
方向に感度を持つ暗黒物質 (DM) 直接探索

● 原子核反跳からDM (WIMP) 到来方向を知る

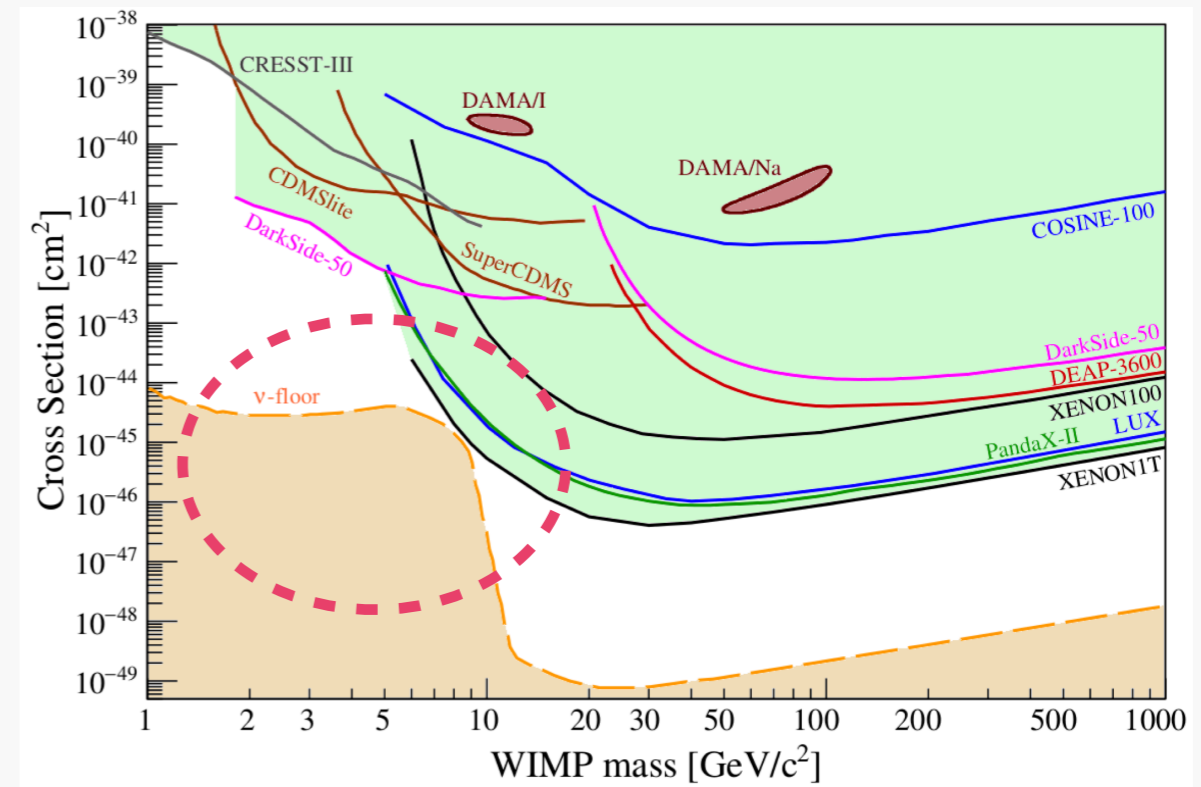
- 異方性がDMの強い証拠に
- ニュートリノBGとの分離も可能



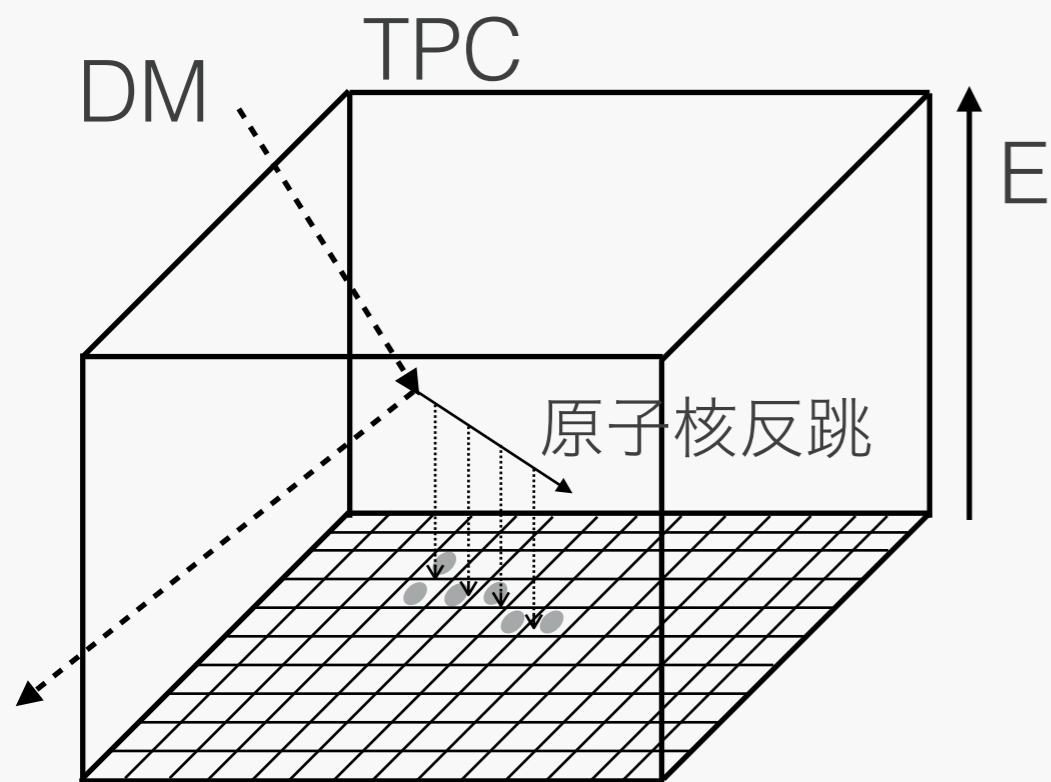
WIMP wind from Cygnus!



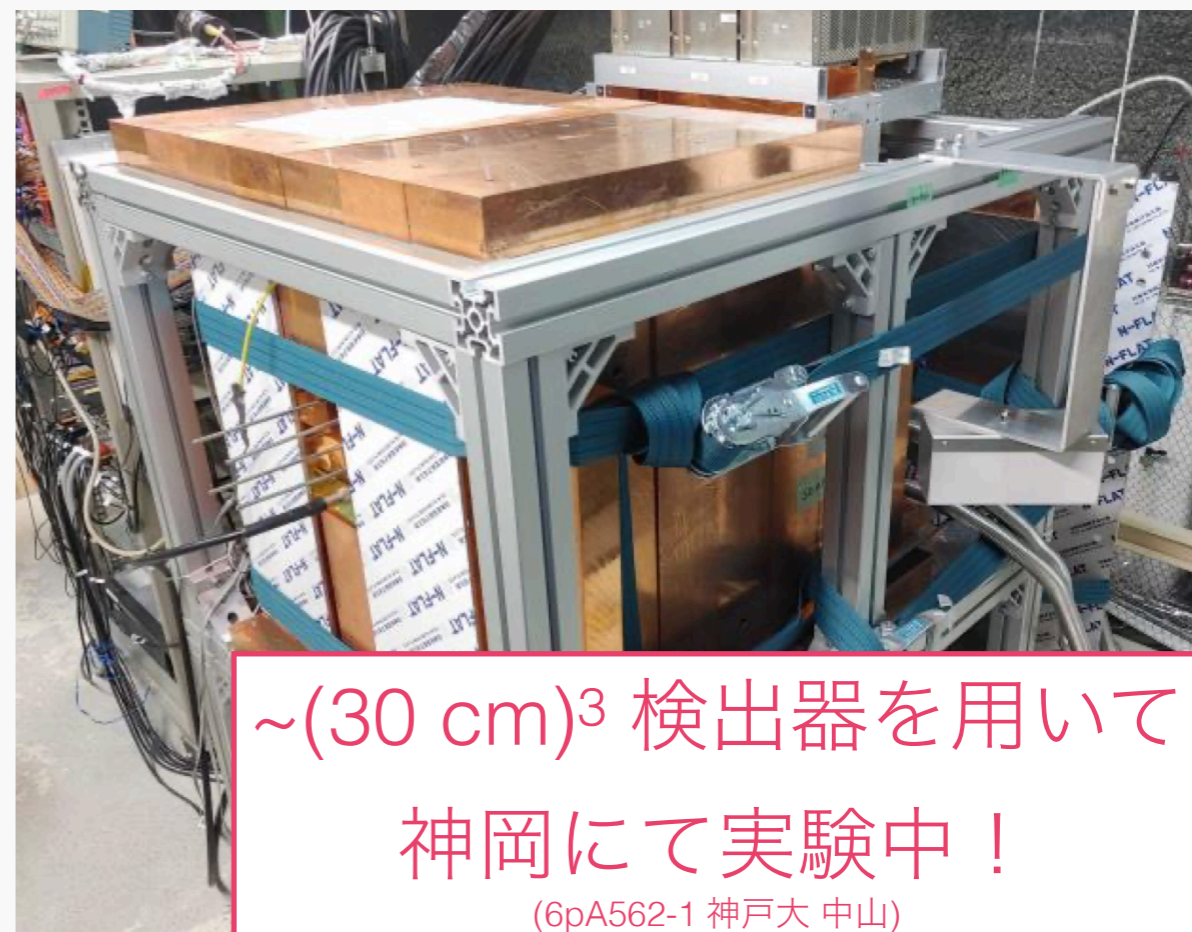
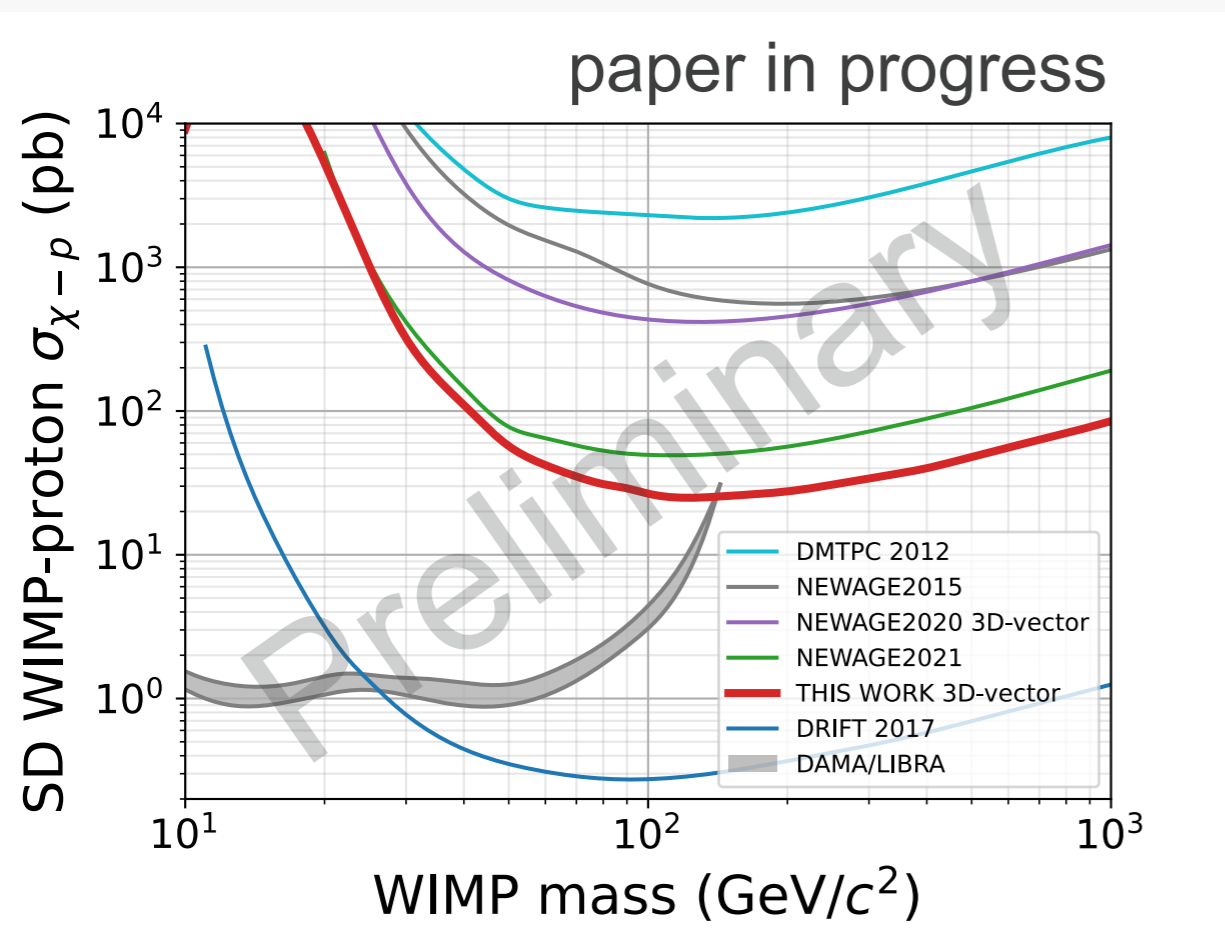
PLB 578 (2004) 241-246



NEWAGE: ガスTPCで原子核反跳の3次元飛跡検出



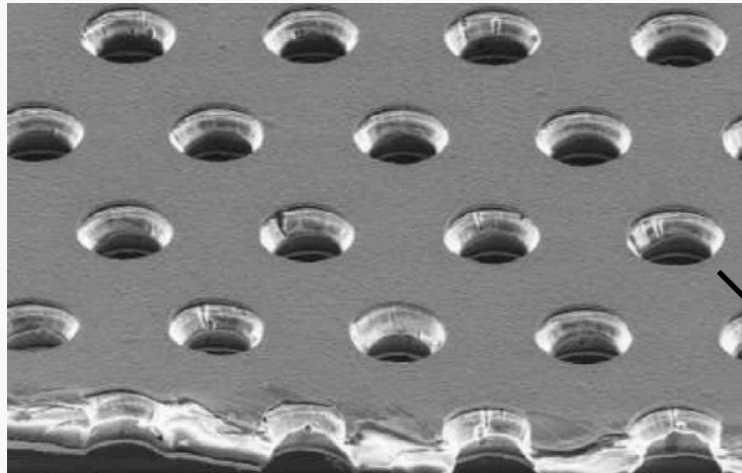
- TPC中のガス (現状CF₄) がターゲット
 - 飛跡から原子核反跳方向測定
- 2次元位置検出器 + ドリフト時間
→ 3次元飛跡でWIMP探索 (世界唯一)



現行検出器とその問題点

- μ -PICによる2次元読み出しとガス増幅 (GEMでさらに増幅)
 - ➔ 400 μm ピッチのストリップ読み出し、30 cm角の検出ボリューム
- 3次元飛跡のドリフト方向の成分は相対位置のみ
- 電子ドリフトの拡散により、特に短飛跡の再構成が困難 (後述)

GEM



drift electron

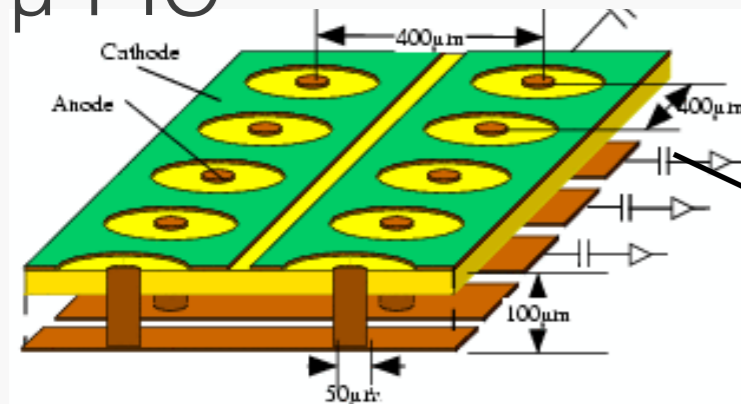
α

α

μ -PICからの α 線
(放射性不純物由来)
をfiducial cutで
減らしたい

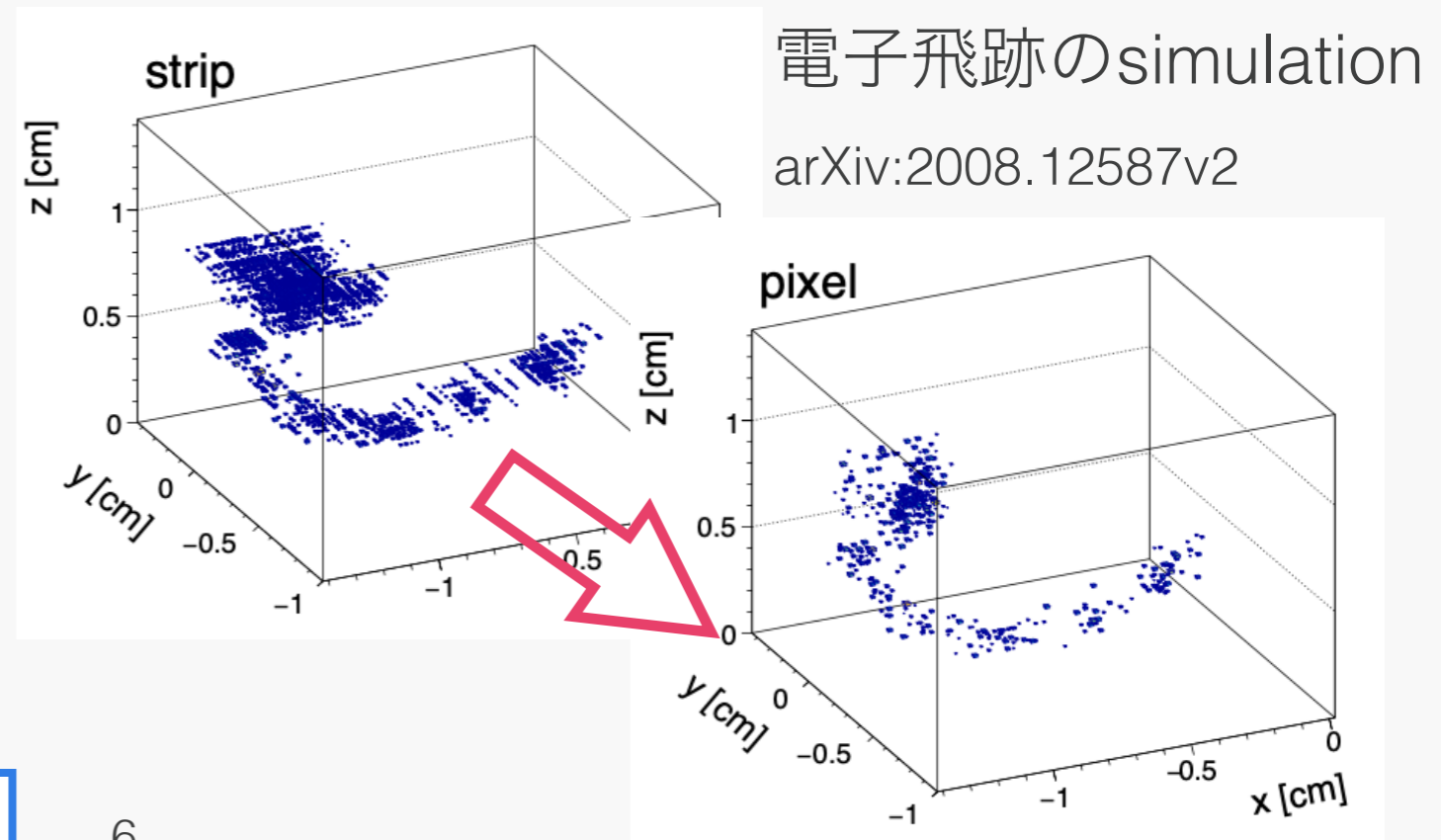
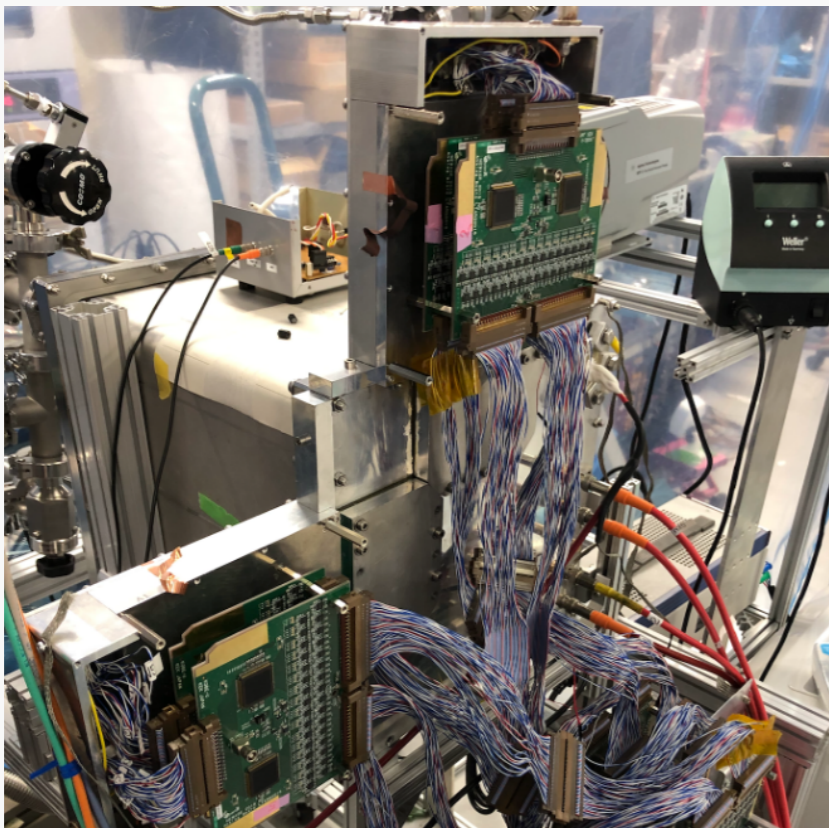
avalanche!

μ -PIC



本研究の目的

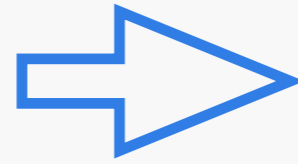
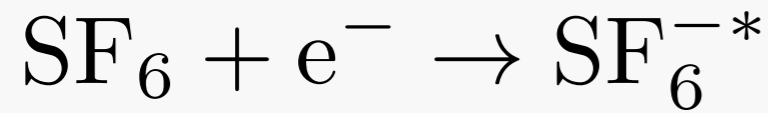
- 「陰イオンガス」のSF₆で諸々の問題解決の可能性
- 小型検出器を用いて**暗黒物質探索への実用化を検証**
- さらに陰イオンガスを利用した次世代微細読み出し検出器を構想
 - ➔ ピクセル読み出し型を目指した開発状況を報告



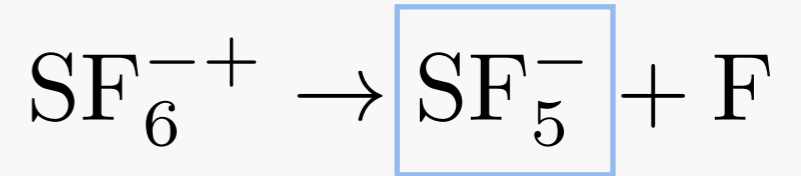
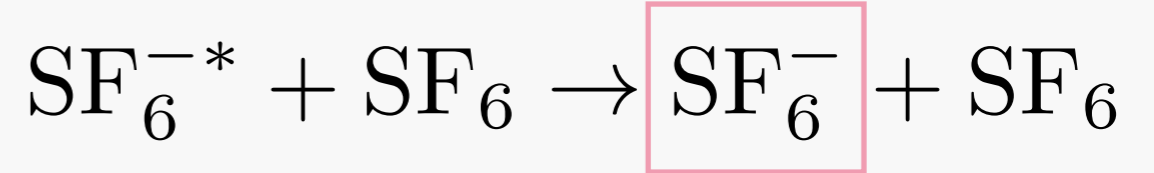
陰イオンガス：SF₆を用いた試験

陰イオンガス：SF₆

電離した電子がアタッチ

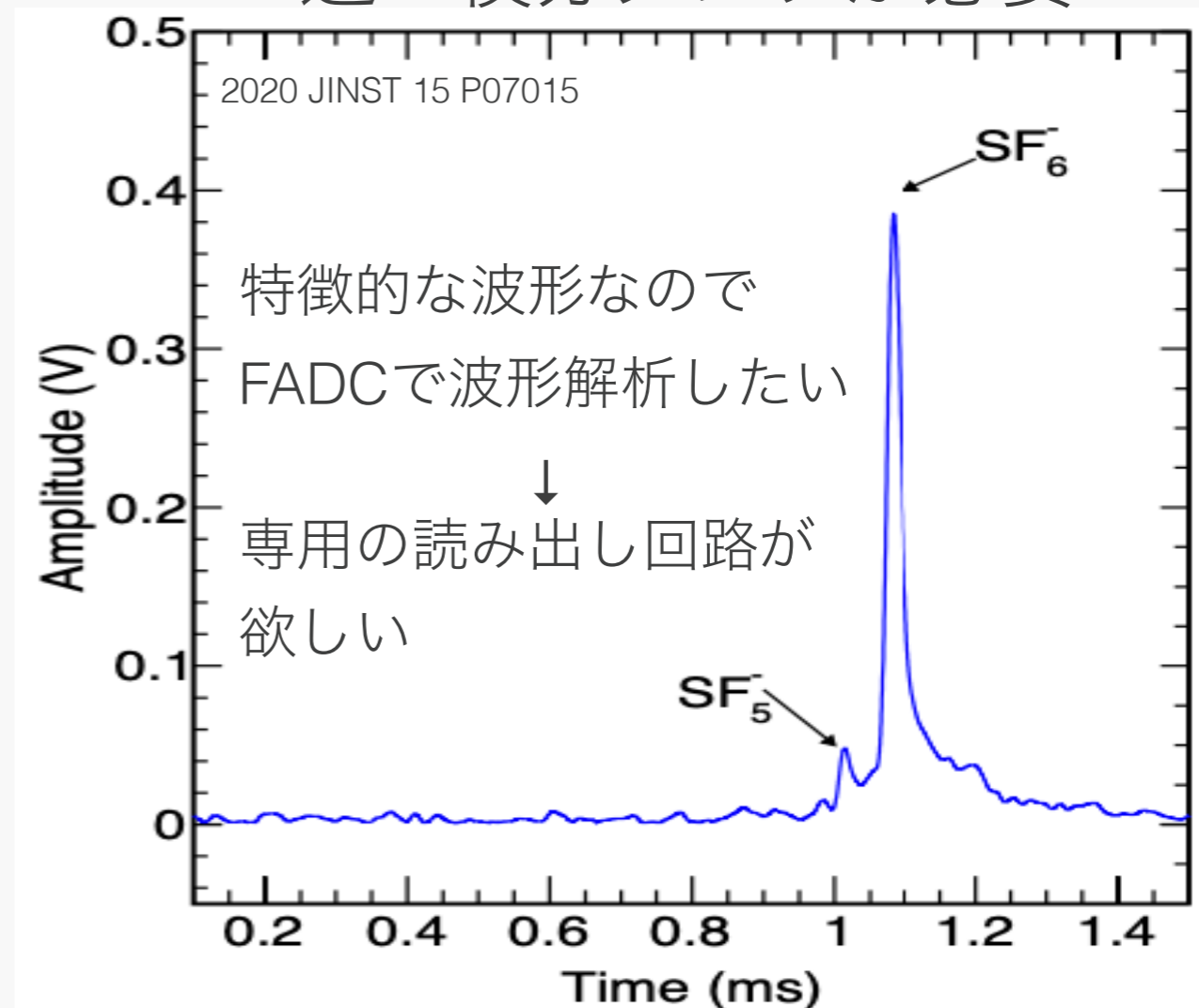
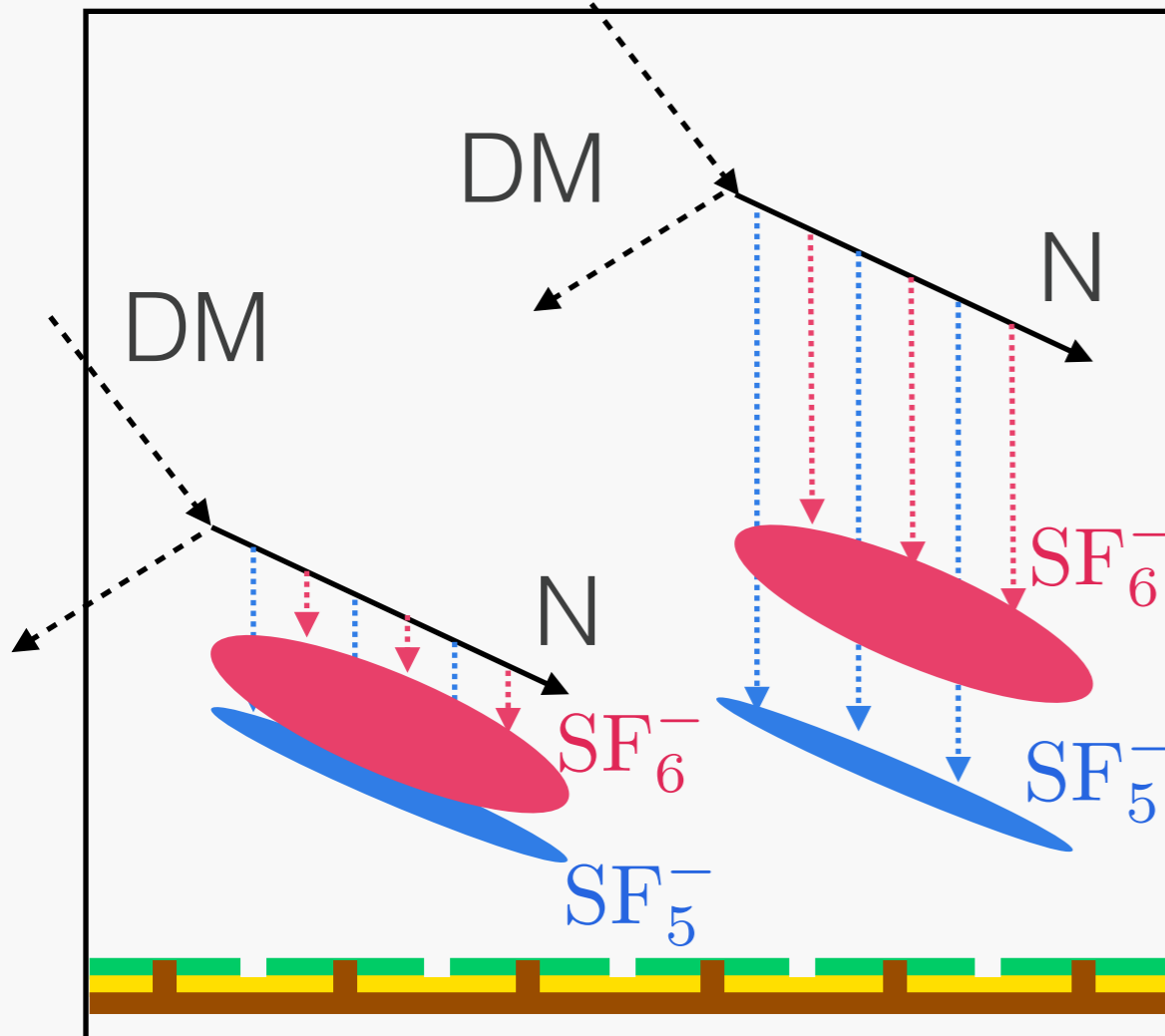


2種類の陰イオン形成



時間差を見ればドリフト方向の
絶対位置も測定可能

電子より重いのでドリフト遅い
→遅い積分アンプが必要



今までの進捗

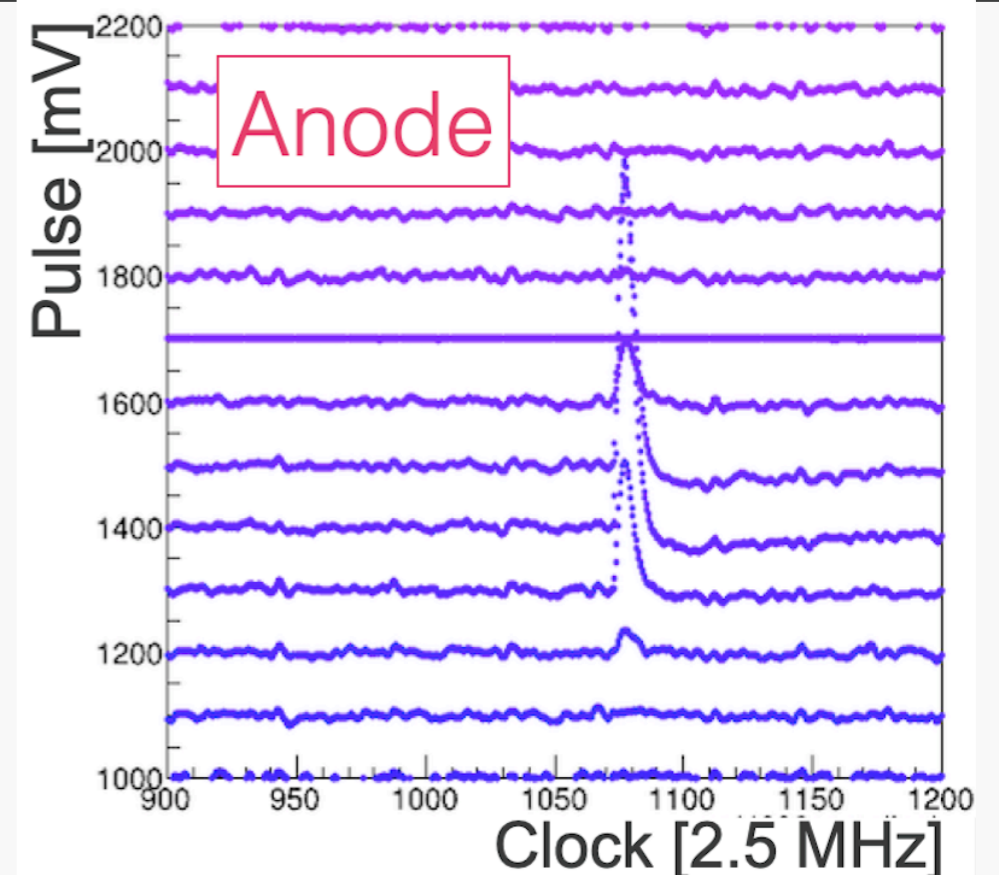
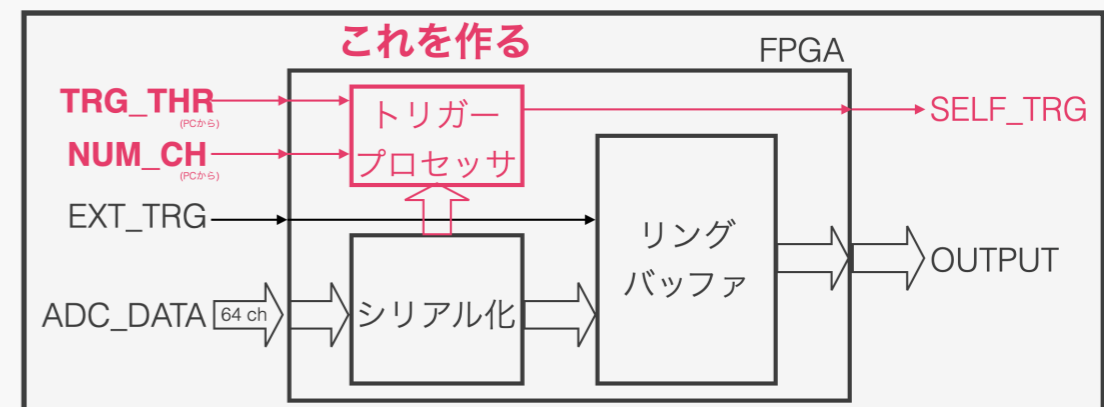
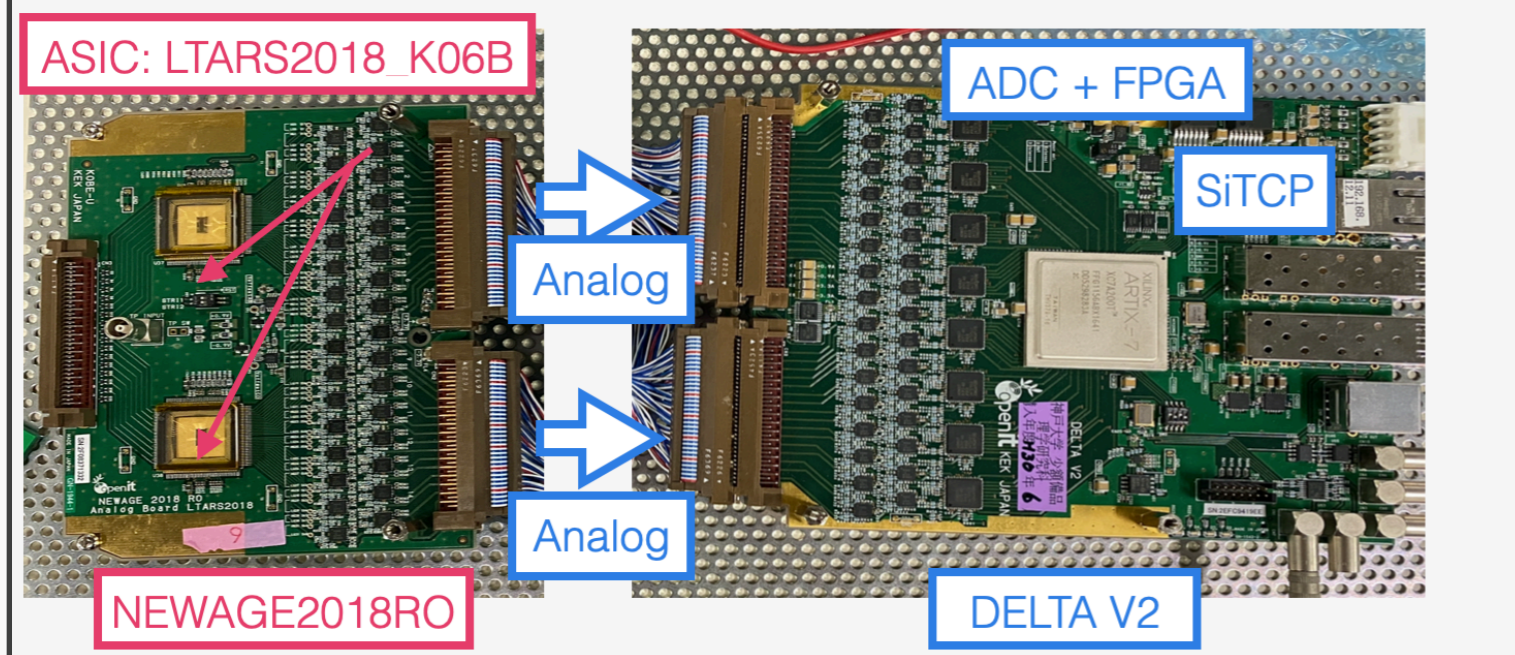
- DAQを改良、中性子線源を用いて**原子核反跳を初検出**

→ **単一パルスしか見えず**。ガスゲインの改善を試みることにした

JPS 2022年3月スライドより抜粋

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

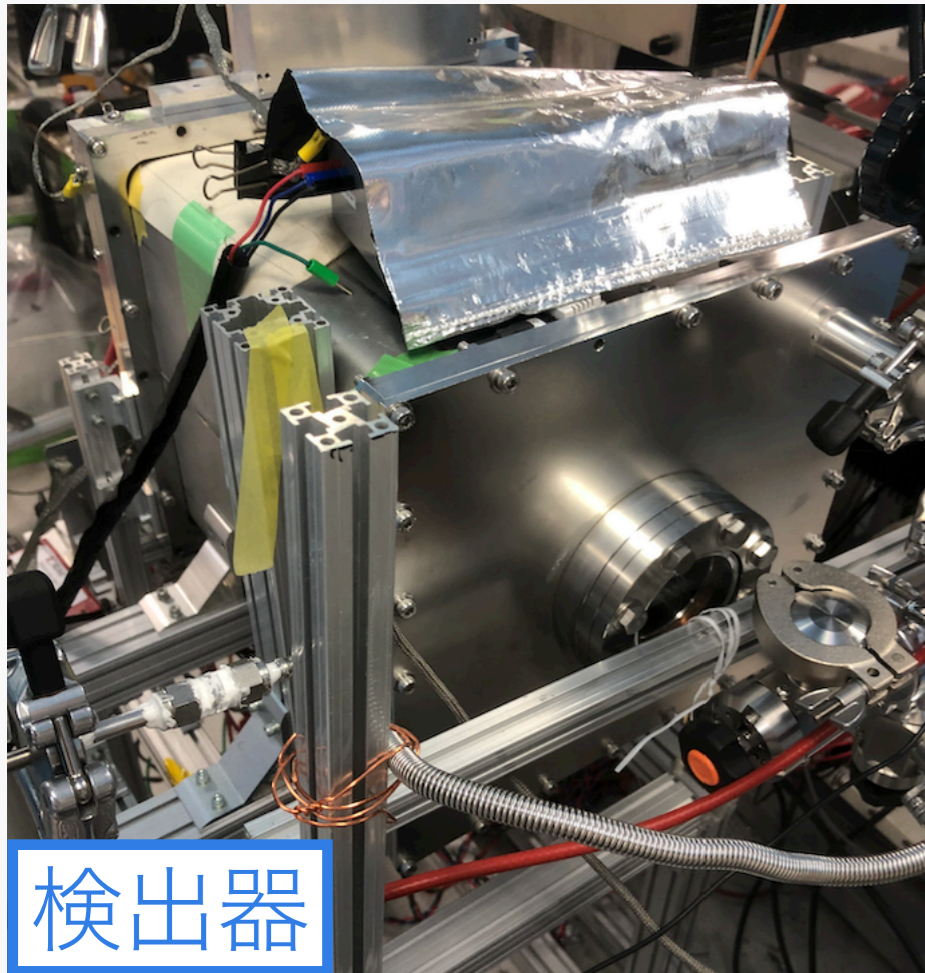
→ T. Kishishita et al 2020 JINST 15 T09009



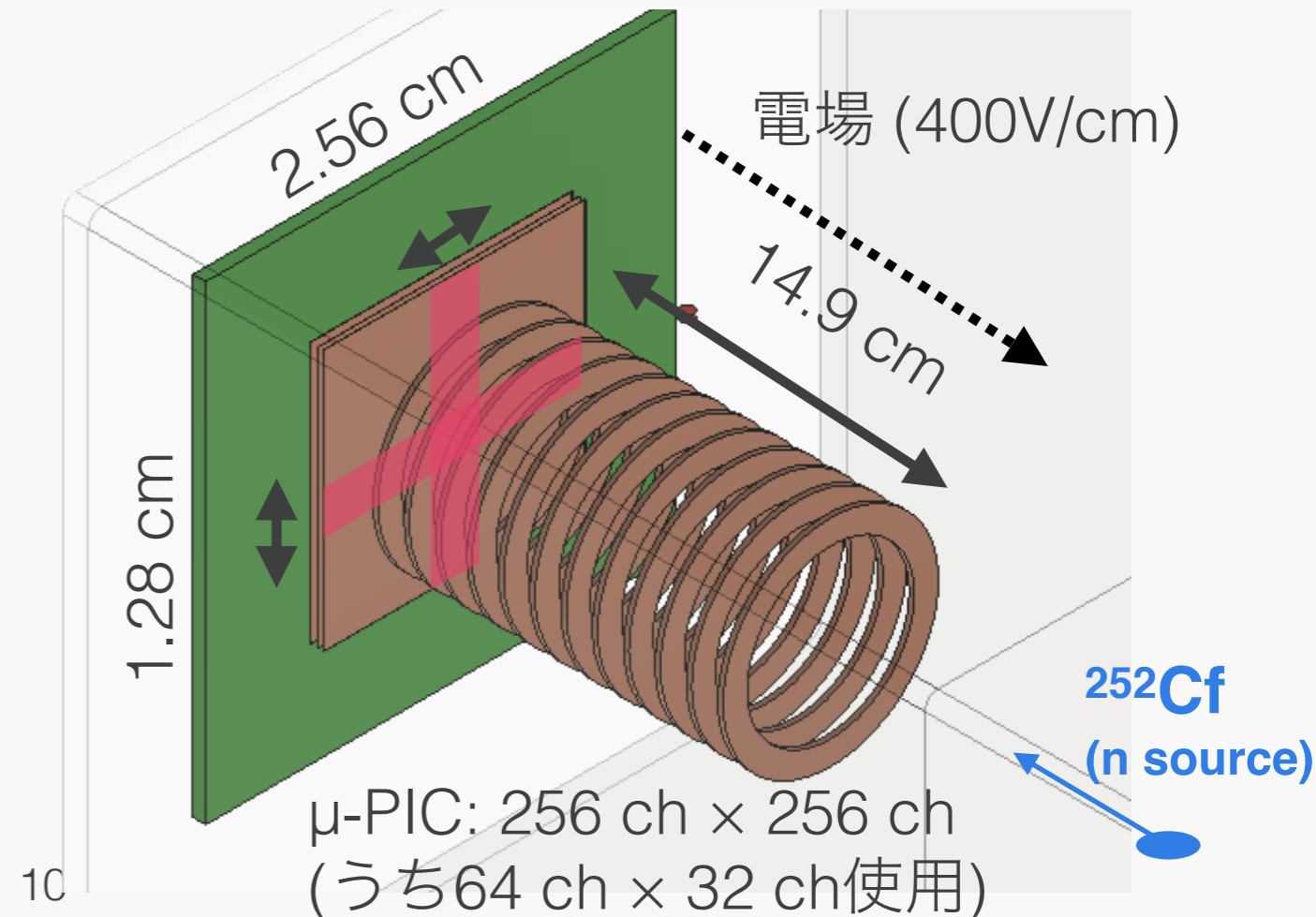
32 ch × 64 ch (2次元ストリップ) の
波形全取得で特徴的なパルス見る

高ゲイン測定

- $2.56 \times 1.28 \times 14.9 \text{ cm}^3$ 検出領域にSF₆ガス 20 torr導入
- 400 μm ストリップピッチの $\mu\text{-PIC}$ + GEM $\times 2$ (コンディション変更なし)
 - ➔ 前回測定から $\mu\text{-PIC}$ での増幅率向上 (印加電圧: 350 V \rightarrow 400 V)
- 中性子線源 (²⁵²Cf) 由来の原子核反跳検出を目指す

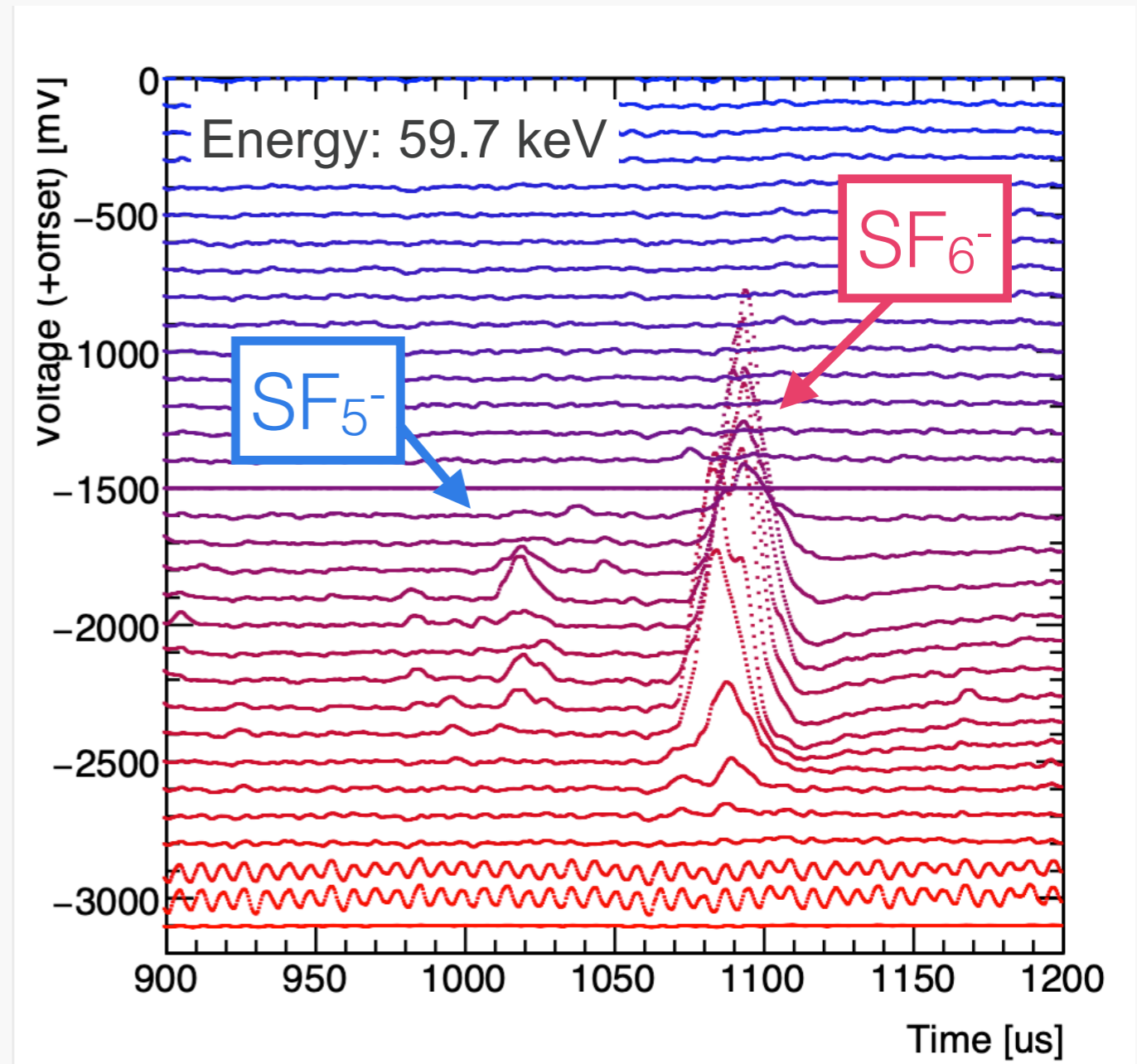
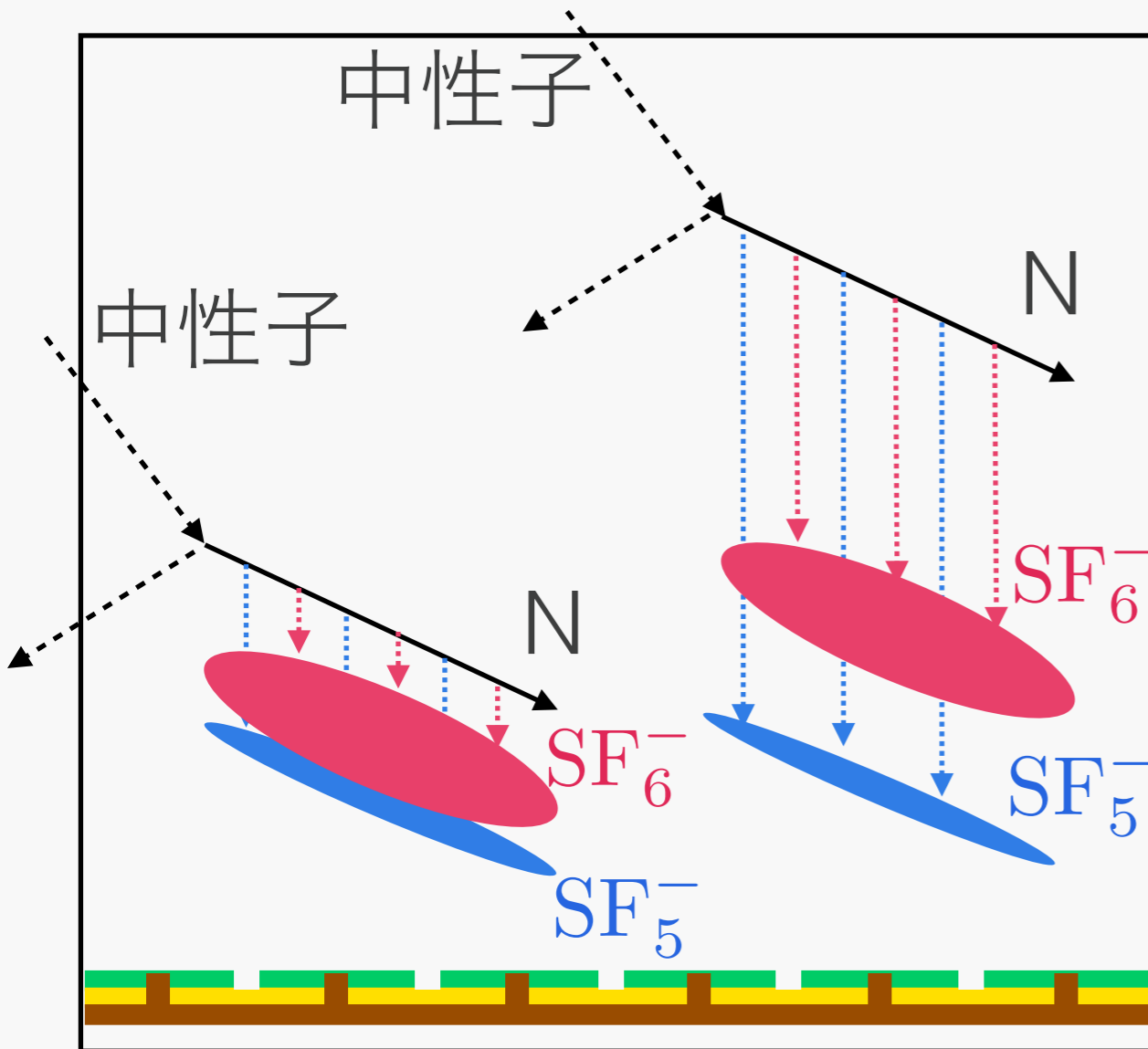


中の様子
↓



2ピーク事象の検出

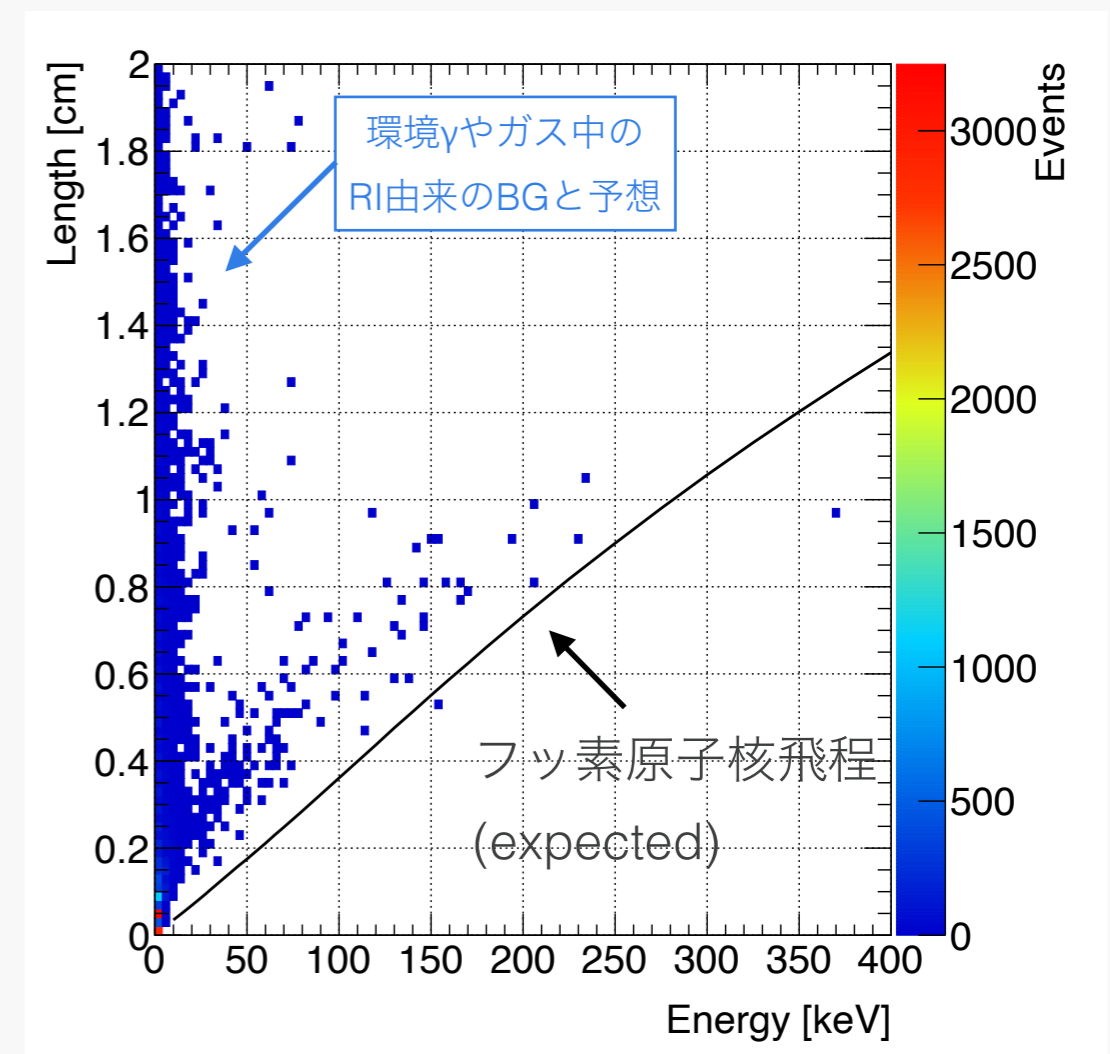
- 小さい成分 (SF_5^-) が見え始めた！



原子核反跳の同定

- 検出領域の端に信号があったイベントはBGとみなし除去
- 波形から飛跡長を計算し、飛程の期待値と比較
 - ➔ エネルギーごとに飛跡長カット
 - ▶ Expectedな飛程より長いのはドリフト拡散などが効いている可能性

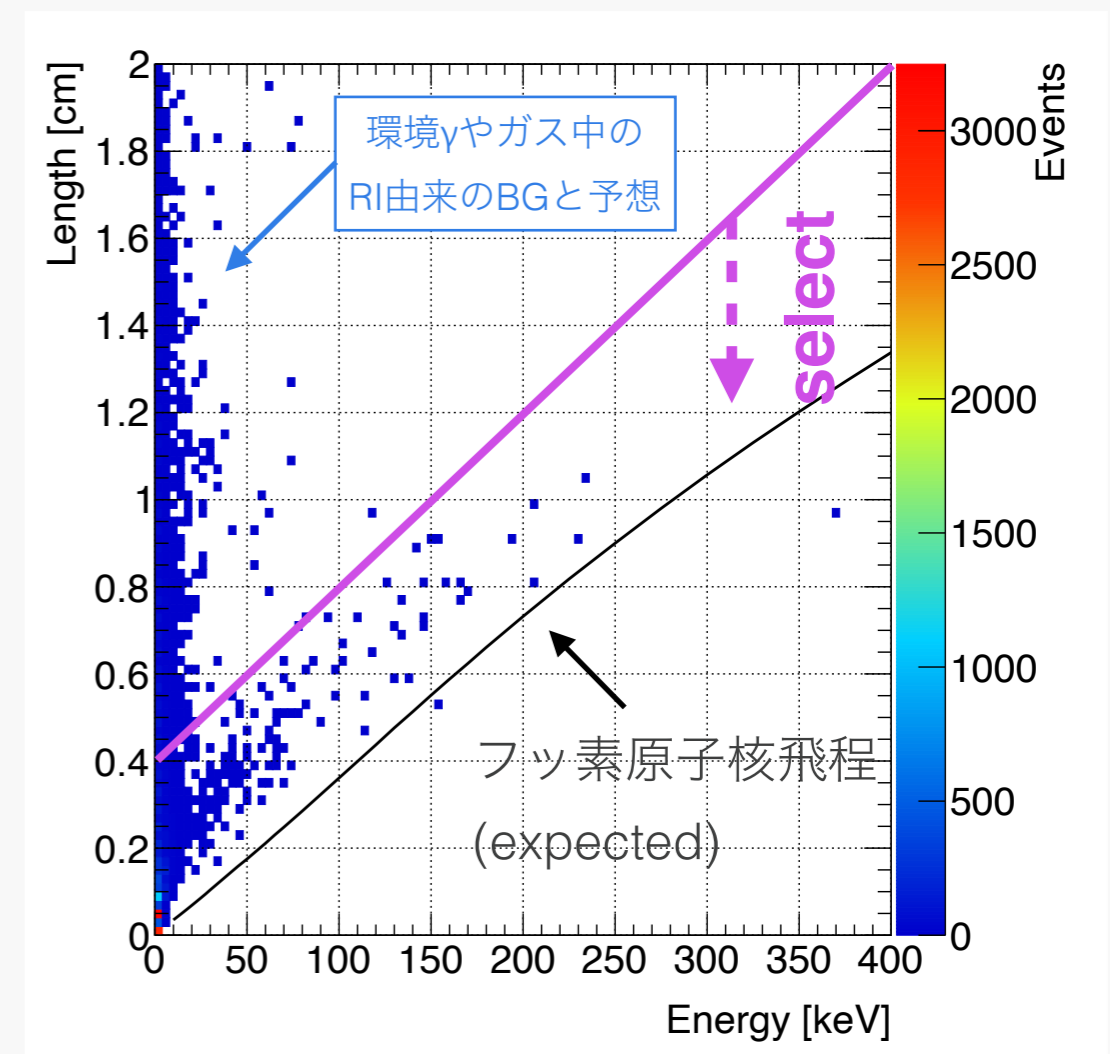
概念図



原子核反跳の同定

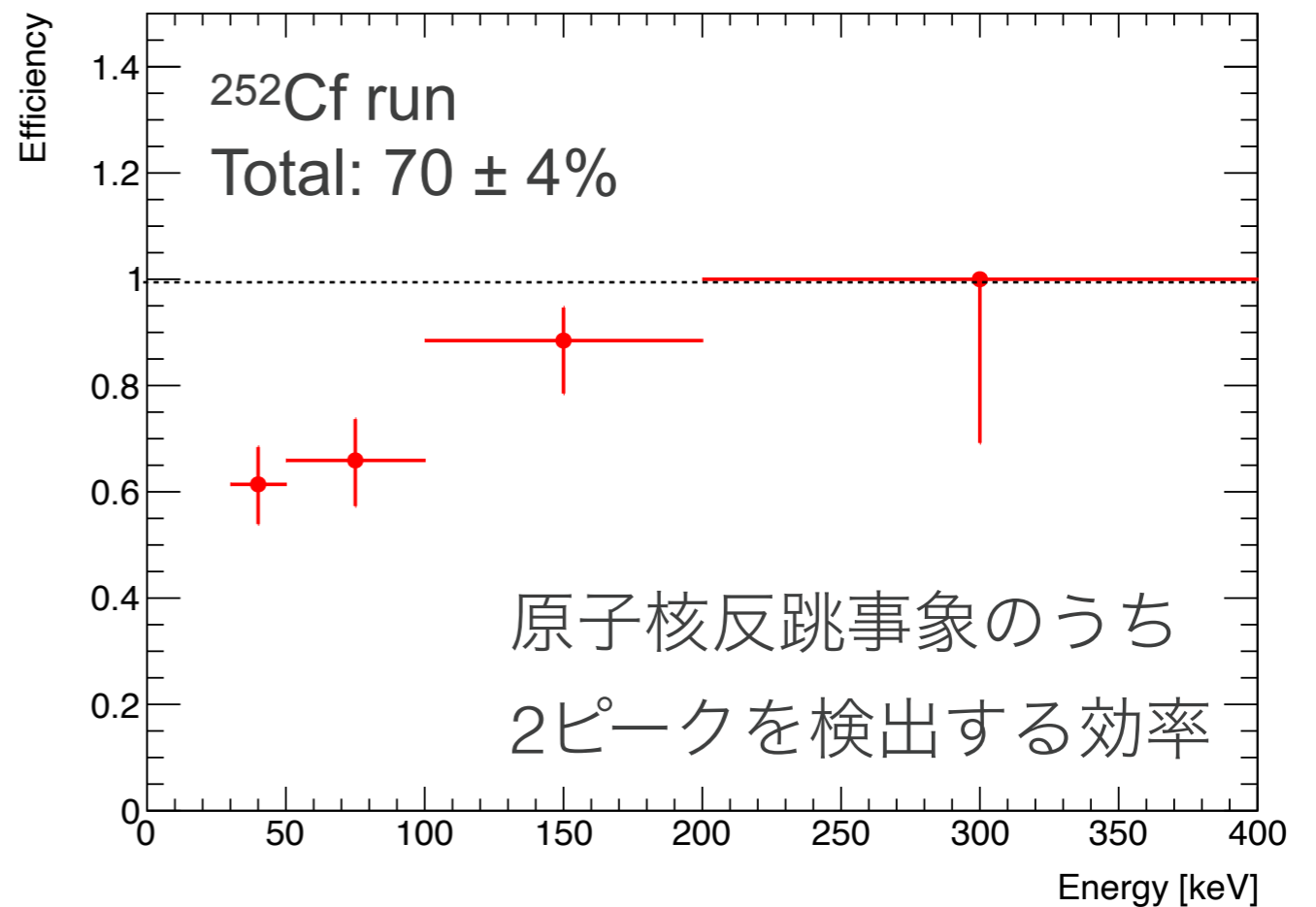
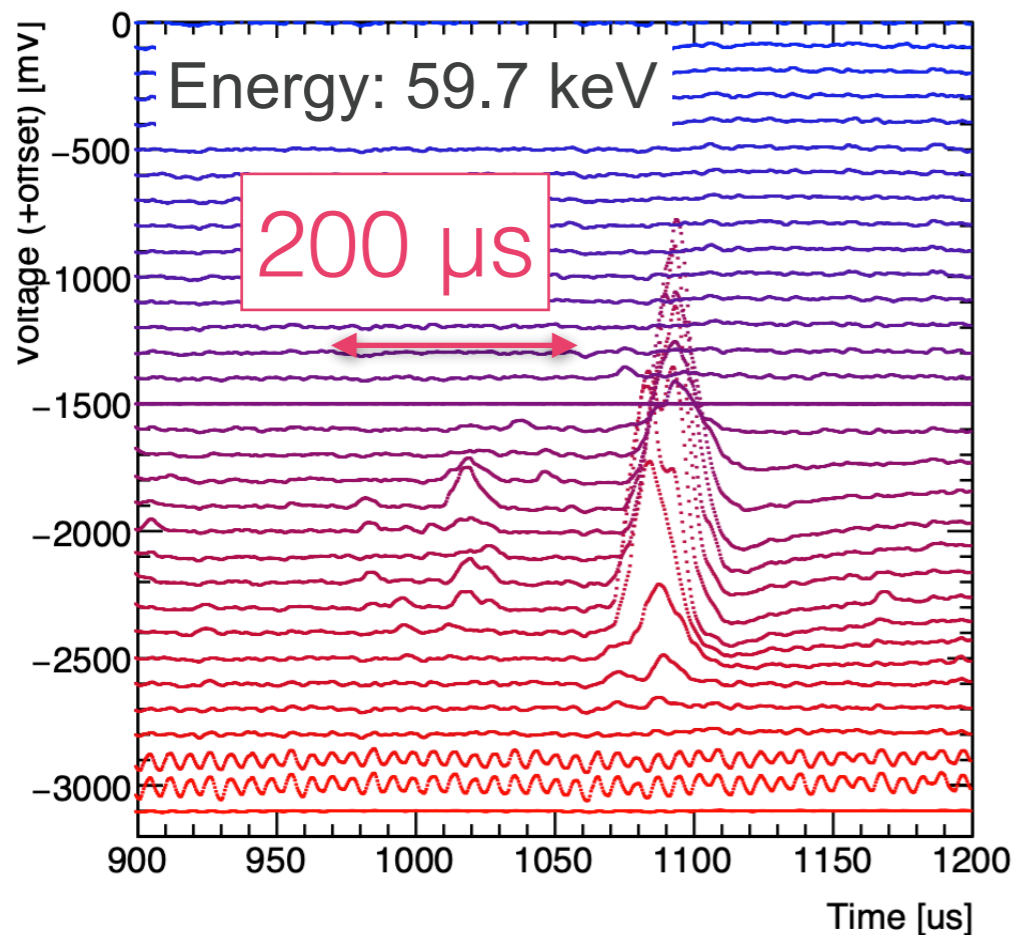
- 検出領域の端に信号があったイベントはBGとみなし除去
- 波形から飛跡長を計算し、飛程の期待値と比較
 - ➔ エネルギーごとに飛跡長カット
 - ▶ Expectedな飛程より長いのはドリフト拡散などが効いている可能性

概念図



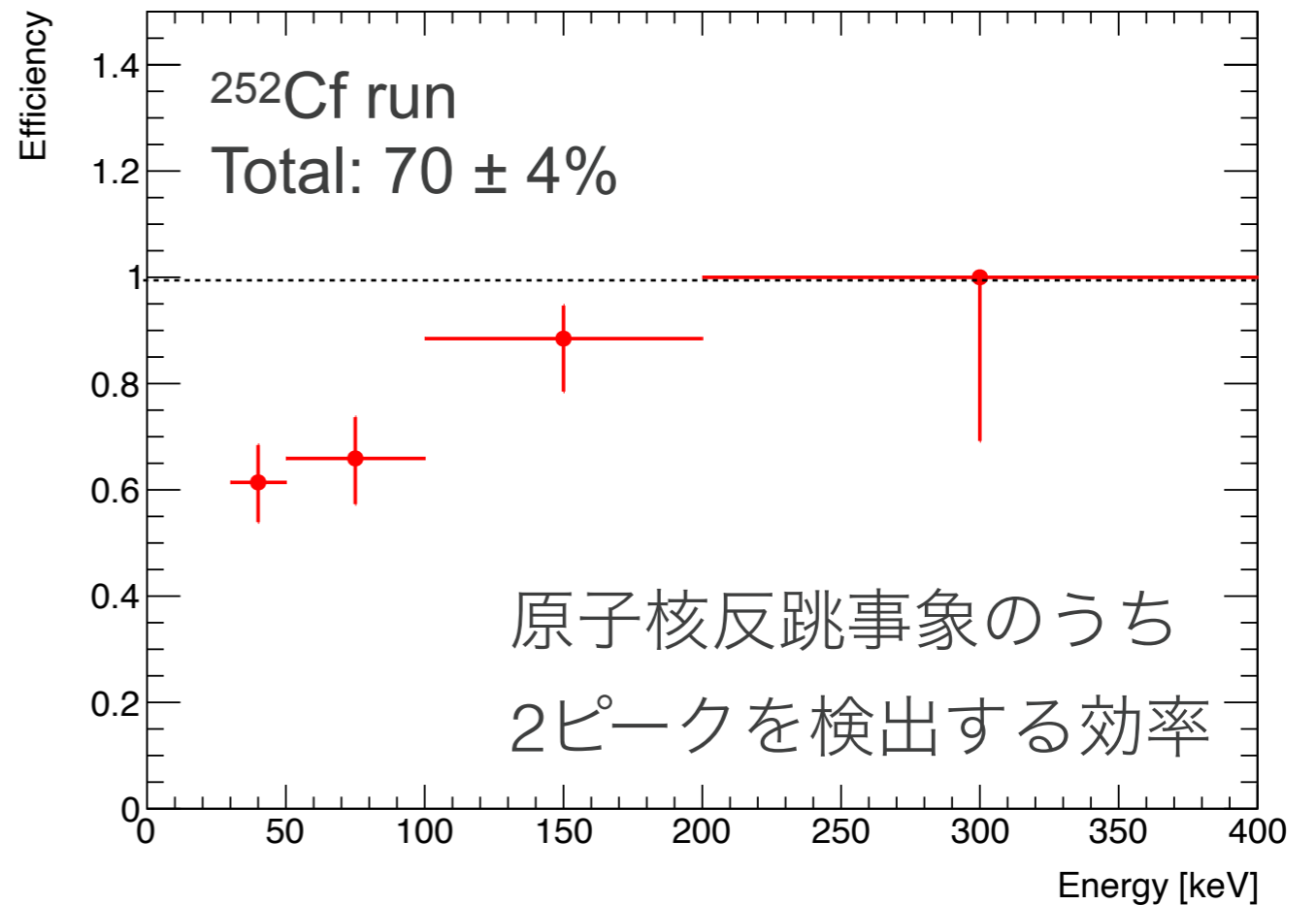
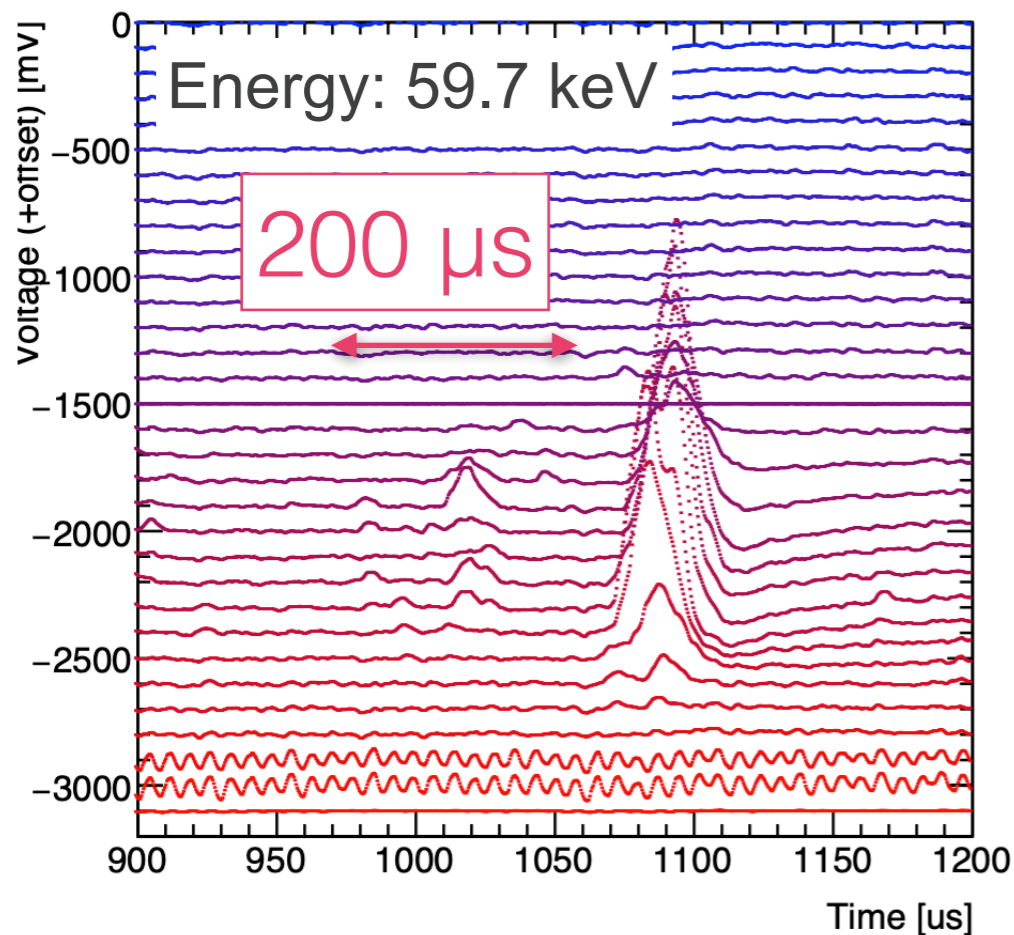
2ピーク事象の検出効率

- SF₆⁻ピーク以前のとある閾値以上のピークをSF₅⁻とみなす
 - ➔ ピークサーチは事前に測定したSF₆⁻, SF₅⁻のドリフト速度を考慮



2ピーク事象の検出効率

- SF₆⁻ピーク以前のとある閾値以上のピークをSF₅⁻とみなす
 - ➔ ピークサーチは事前に測定したSF₆⁻, SF₅⁻のドリフト速度を考慮

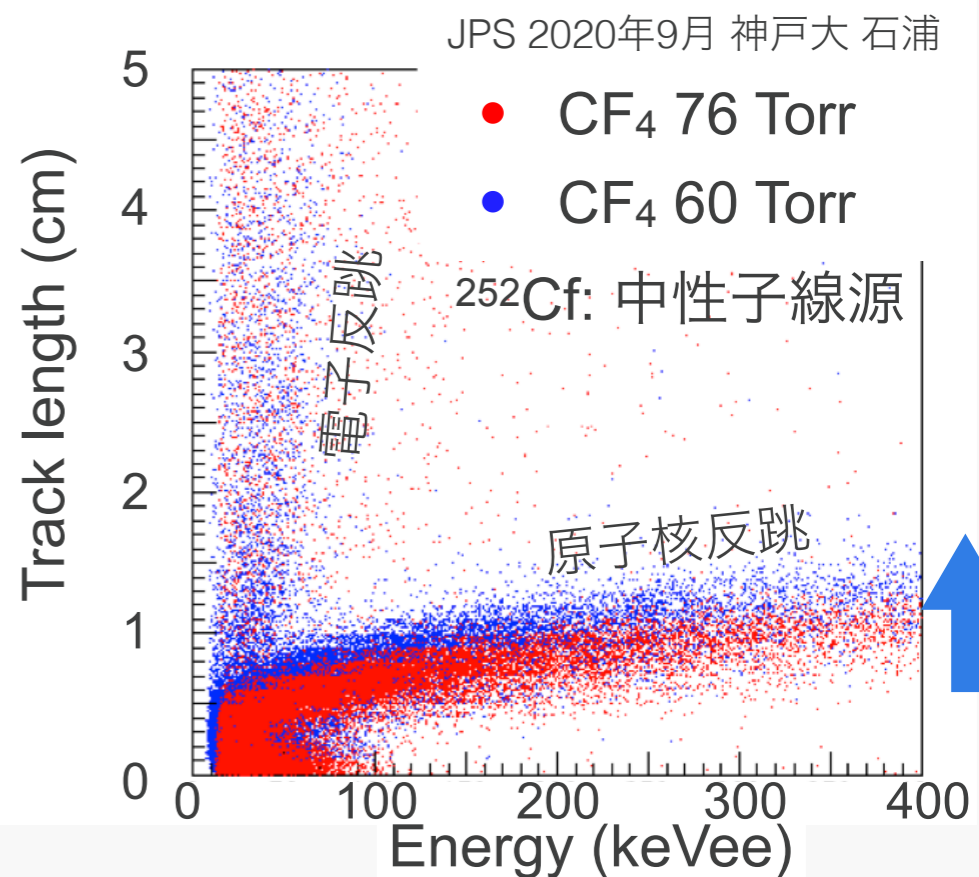
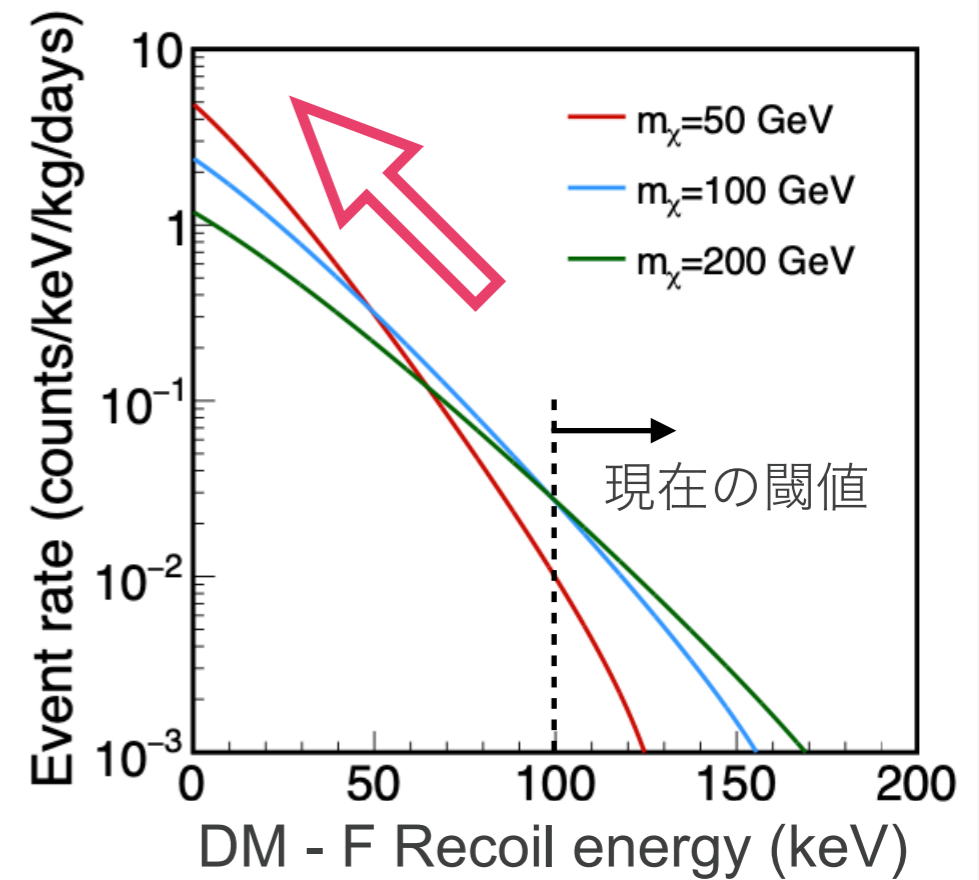


陰イオンガスはDM探索に実用可能！

次世代ピクセル型検出器開発

低質量DM探索に向けた次の一手

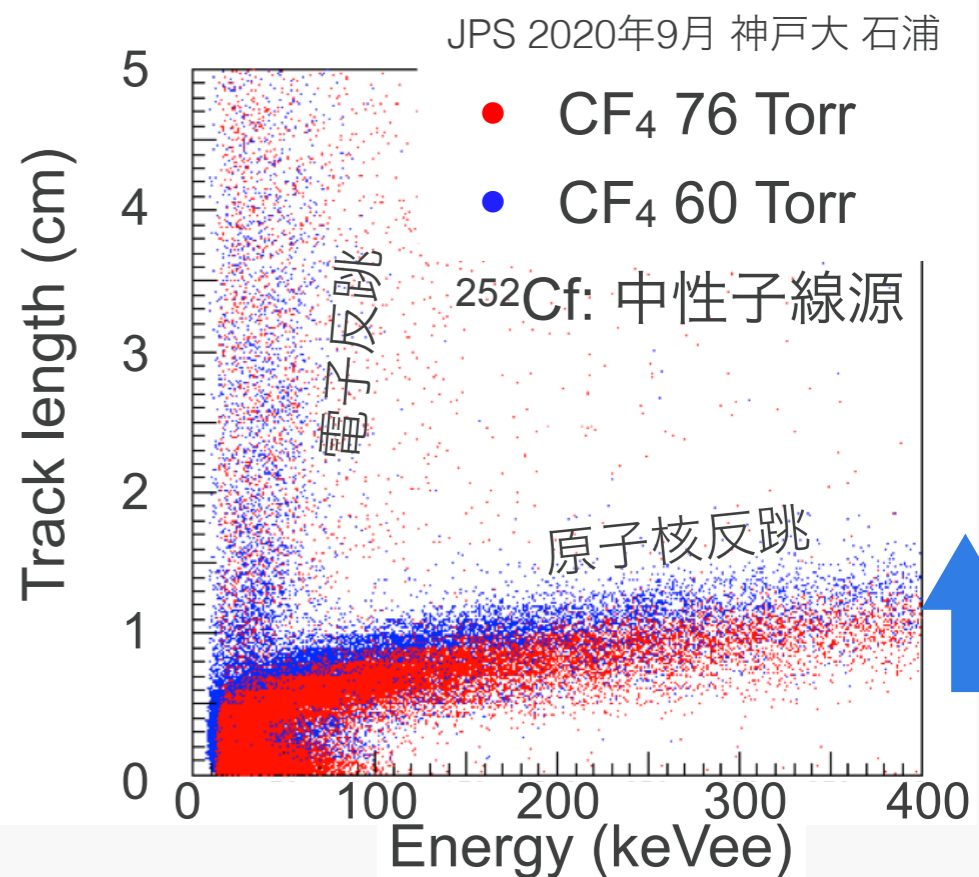
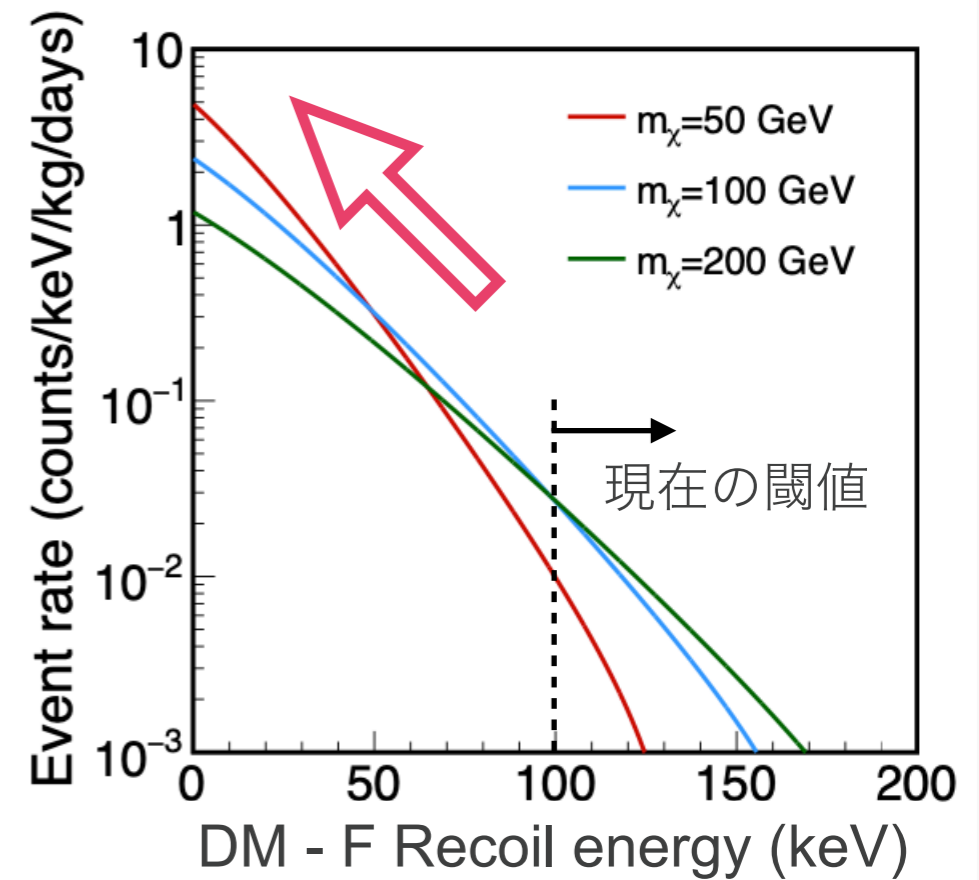
- 低エネルギーほど(特に低質量DM)高レート
- **短飛跡**のため再構成困難
 - ➔ 読み出しピッチ (400 um) で律速
- 方針は2つ
 - ➔ ガス圧下げる (飛跡のばす)
 - ➔ より微細な読み出し検出器作る



低質量DM探索に向けた次の一手

- 低エネルギーほど(特に低質量DM)高レート
- **短飛跡**のため再構成困難
 - 読み出しピッチ (400 um) で律速
- 方針は2つ
 - ガス圧下げる (飛跡のばす)
 - より微細な読み出し検出器作る

カンタン(もうやった)



低質量DM探索に向けた次の一手

- 低エネルギーほど(特に低質量DM)高レート

- **短飛跡**のため再構成困難

→ 読み出しピッチ (400 um) で律速

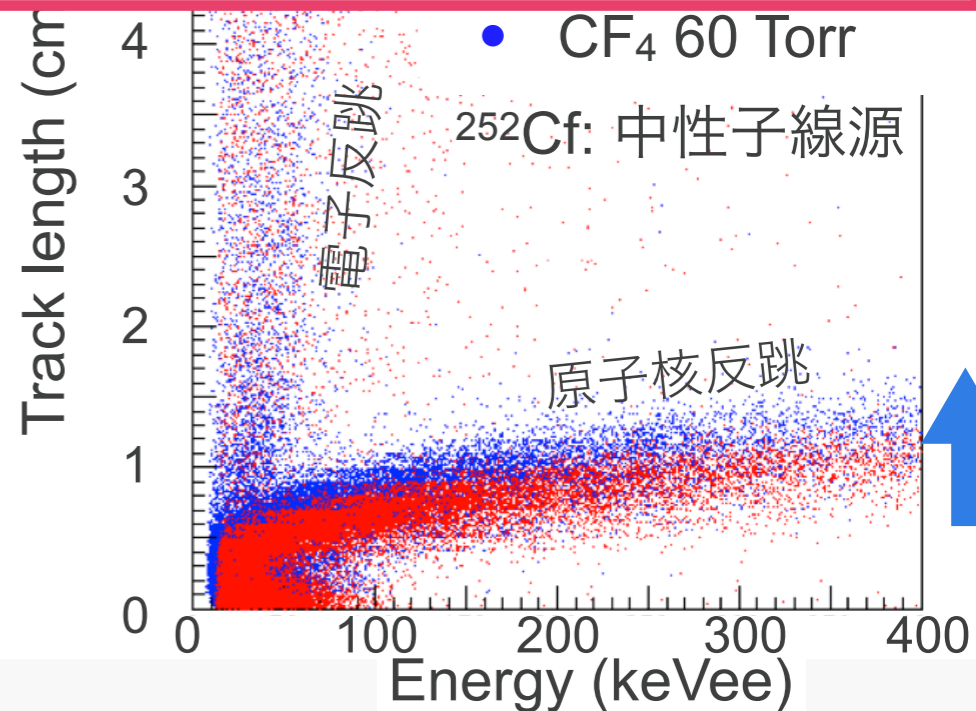
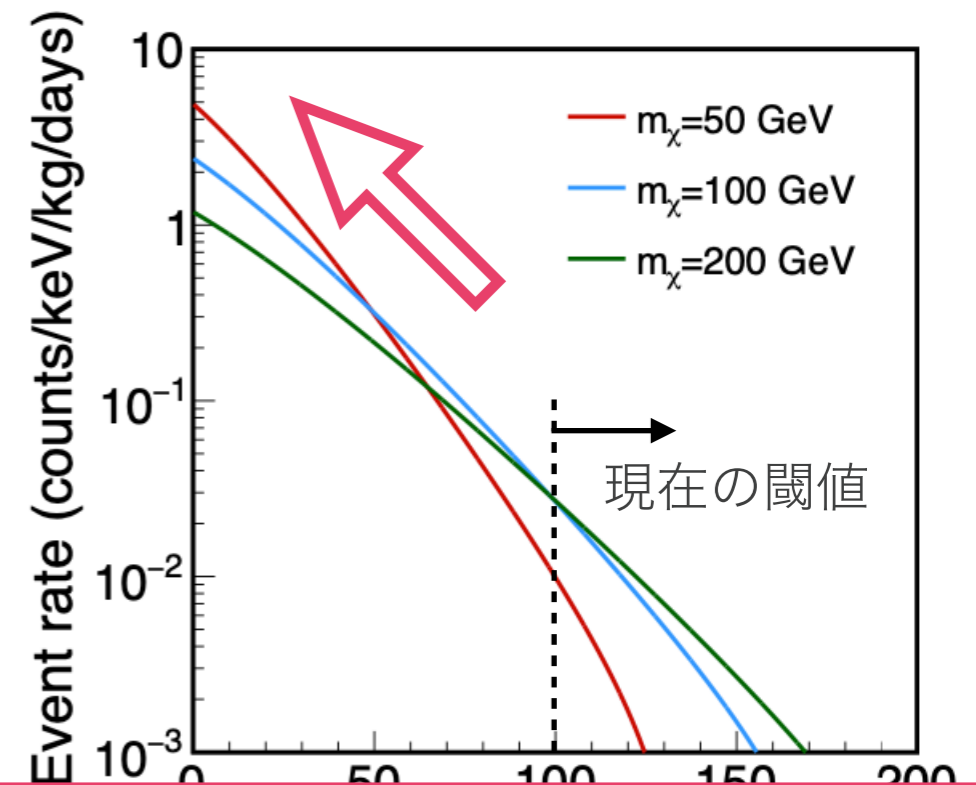
- 方針は2つ

→ ガス圧下げる (飛跡のばす)

→ より微細な読み出し検出器作る

カンタン(もうやった)

難しい(金も時間もかかる)
でも次の一手+技術革新に必要



低質量DM探索に向けた次の一手

- 低エネルギーほど(特に低質量DM)高レート

- **短飛跡**のため再構成困難

→ 読み出しピッチ (400 um) で律速

カンタン(もうやった)

- 方針は2つ

→ ガス圧下げる(飛跡のばす)

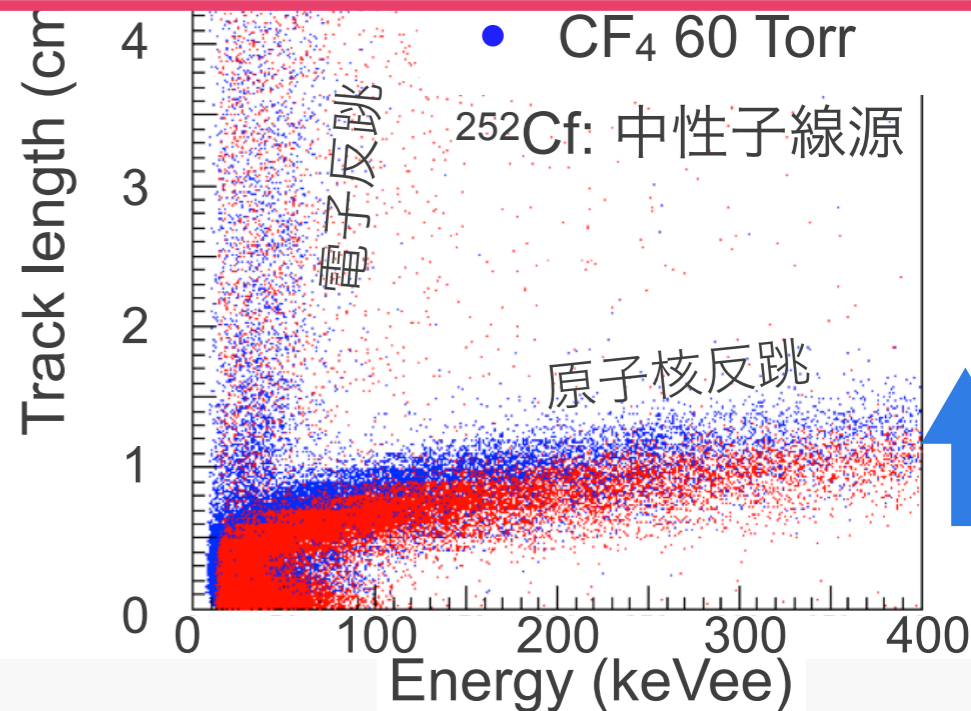
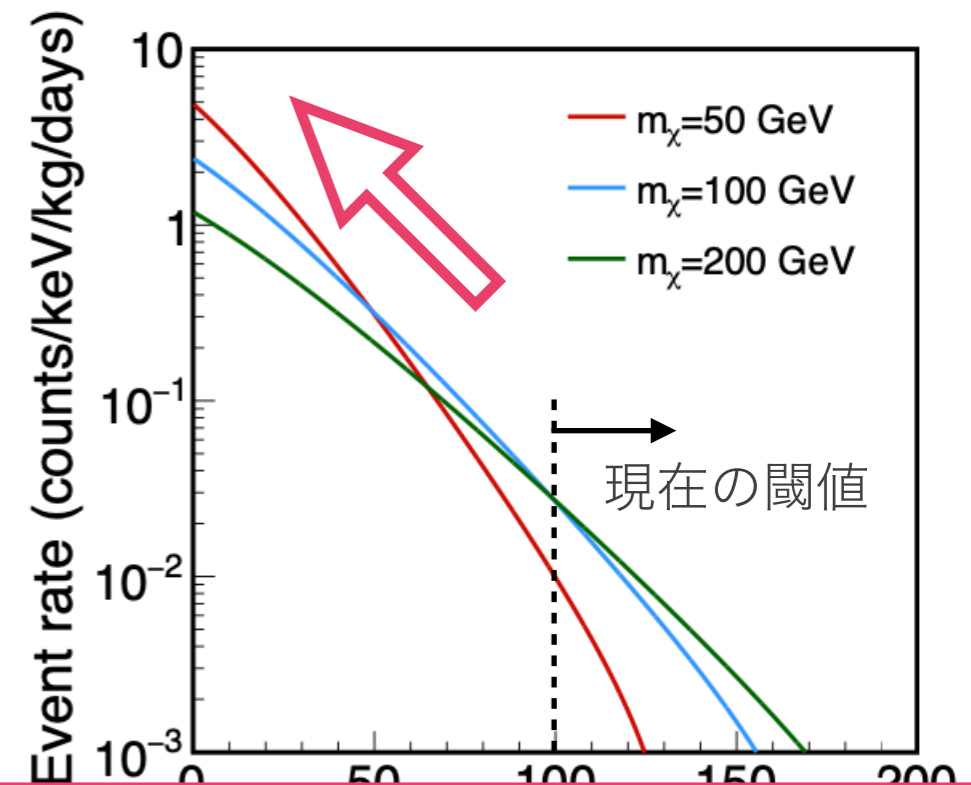
→ より微細な読み出し検出器作る

難しい(金も時間もかかる)
でも次の一手+技術革新に必要

今までドリフト電子散乱のせいでどうせぼやけた

→ 陰イオンガスで拡散抑制

微細読み出しの道が拓けた!

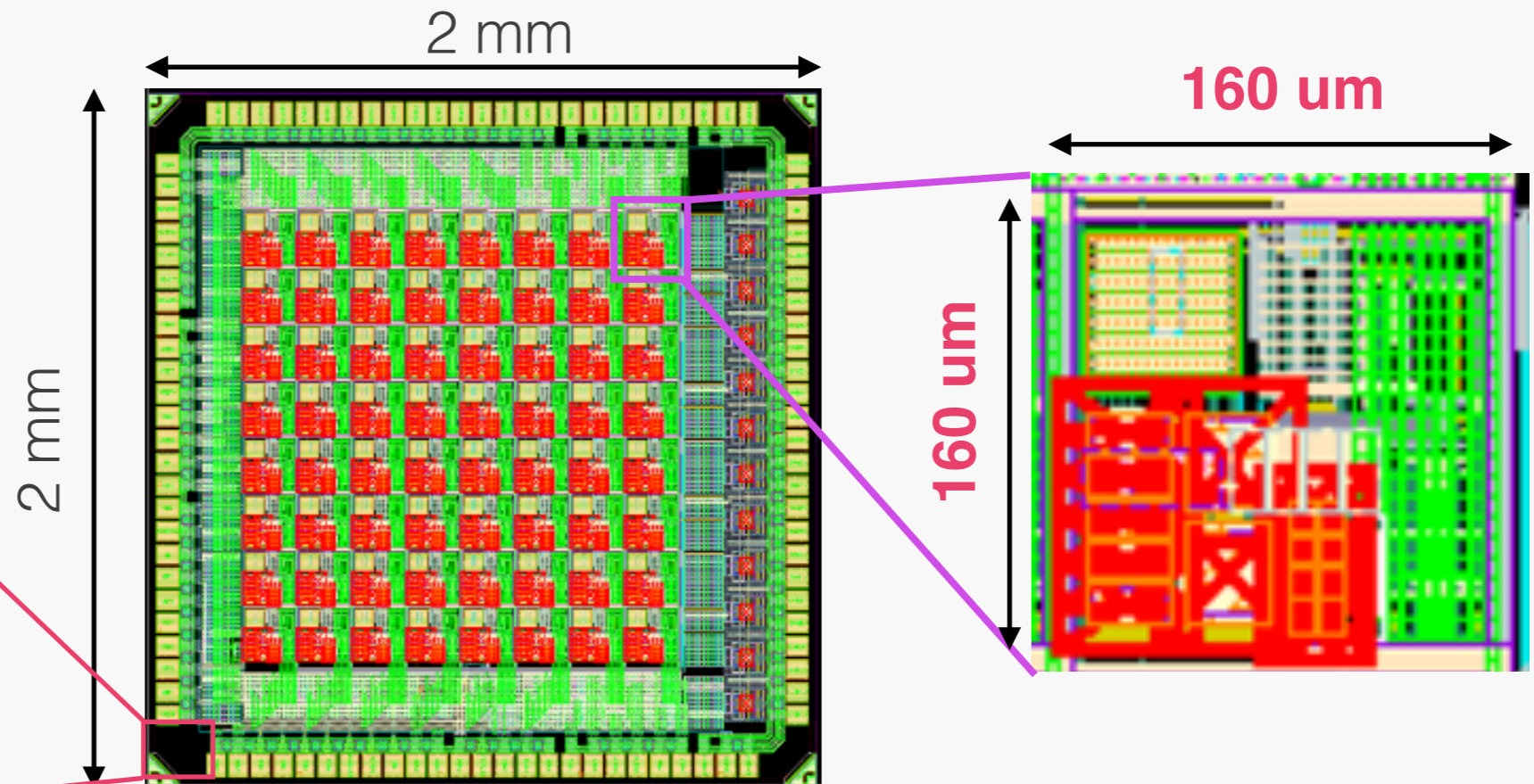


読み出しASIC: QPIX新規開発

- KEK E-Sys 宮原氏、田中氏、佐賀大 房安氏の大きなサポート
- プロトタイプASIC作成：ピクセルサイズ: $160 \times 160 \mu\text{m}^2$
 - $100 \mu\text{m}$ ピッチを目指しているがアナログ回路的に困難、試行錯誤中
- 将来的にはパッドに電極板をバンプボンディングして運用予定

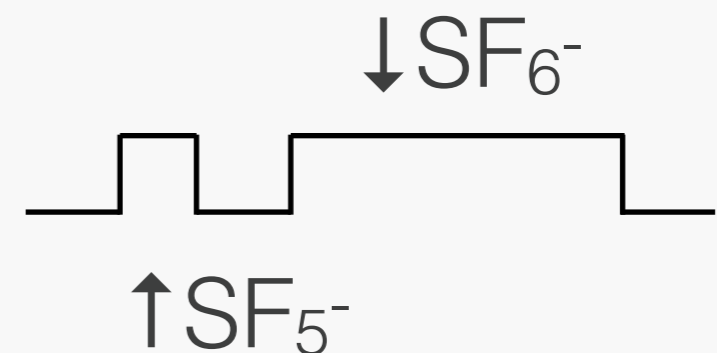
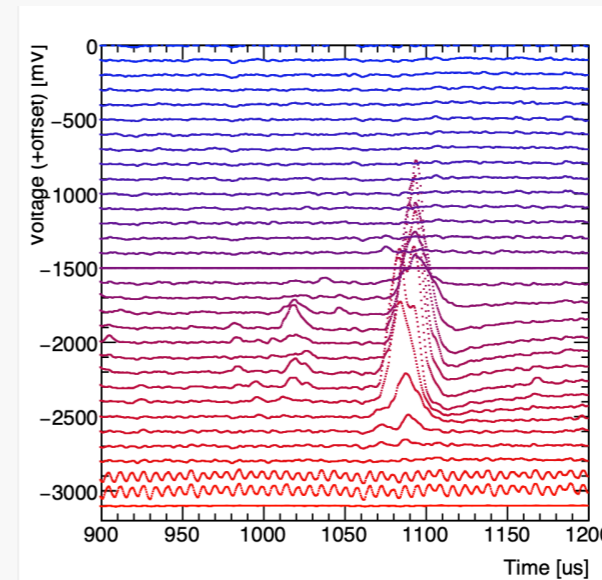
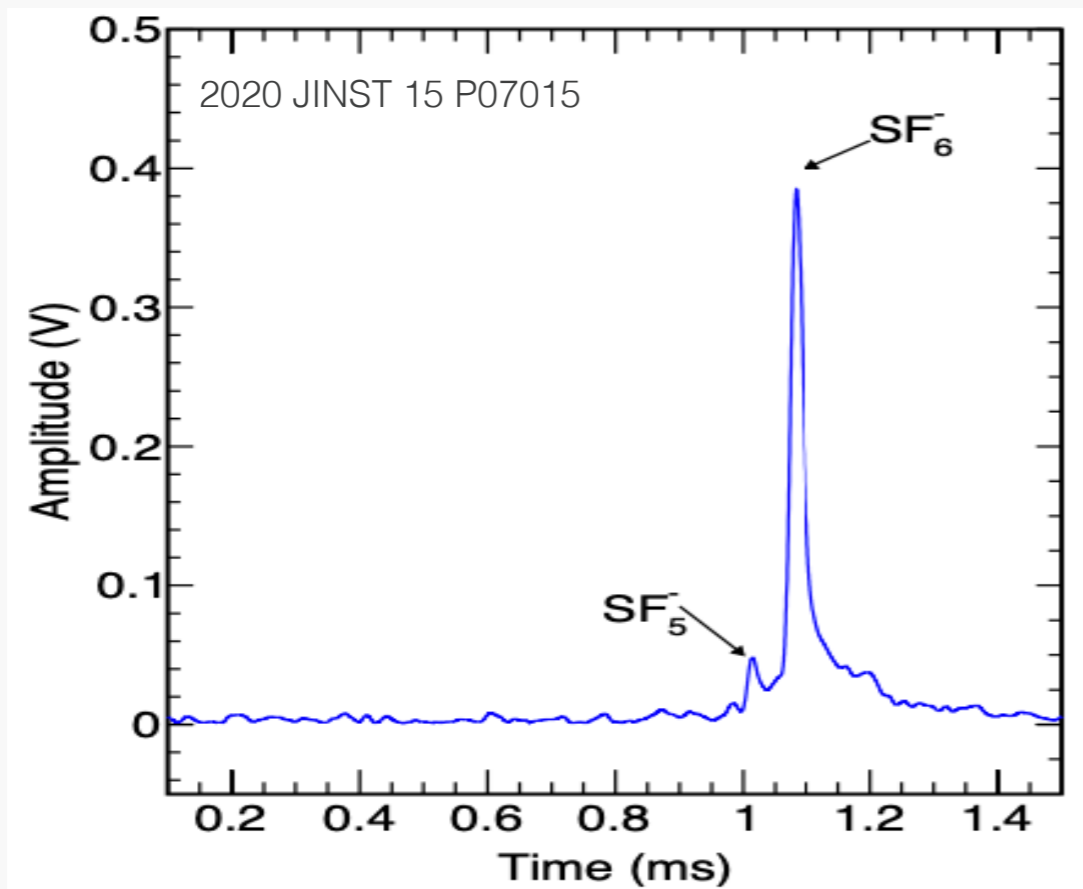
新QPIXの
レイアウト
(8×8 pixels)

KEK E-SYS
QPIX V.0



複数ヒット読み出し

- SF6ガスの特徴的な信号を読み出すため複数ヒット検出が必要
- プロトタイプとして2パターンの信号処理スキーム搭載
 - ➔ ADC出力による波形解析 (現行DAQのメソッド活かす)
 - ➔ コンパレータ出力による簡易化データ解析: 最大4ヒット記録



複数ヒット読み出し

- SF6ガスの特徴的な信号を読み出すため複数ヒット検出が必要

他実験への適用も積極的に考えたい

- プロトタイプ

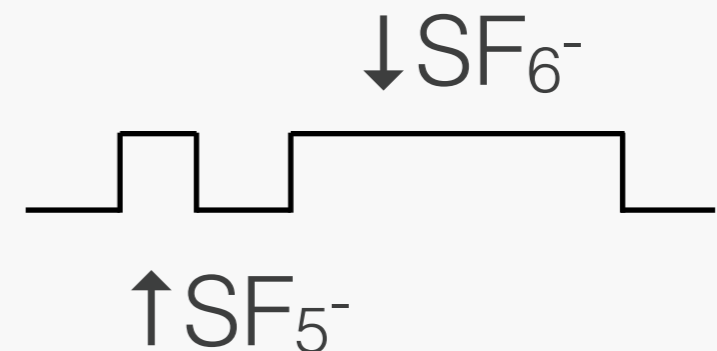
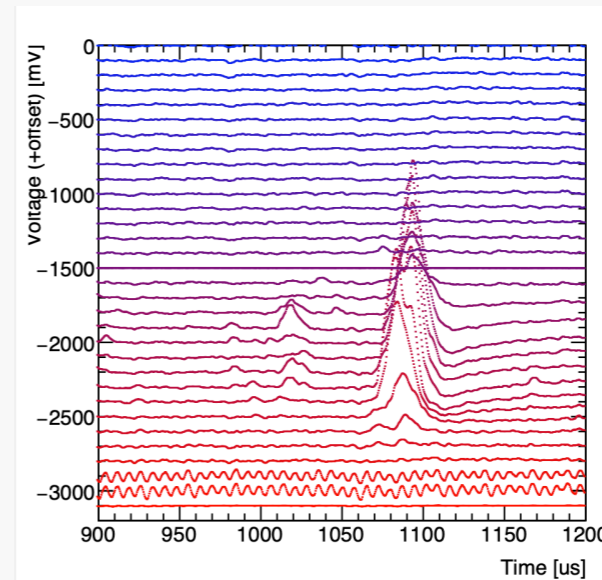
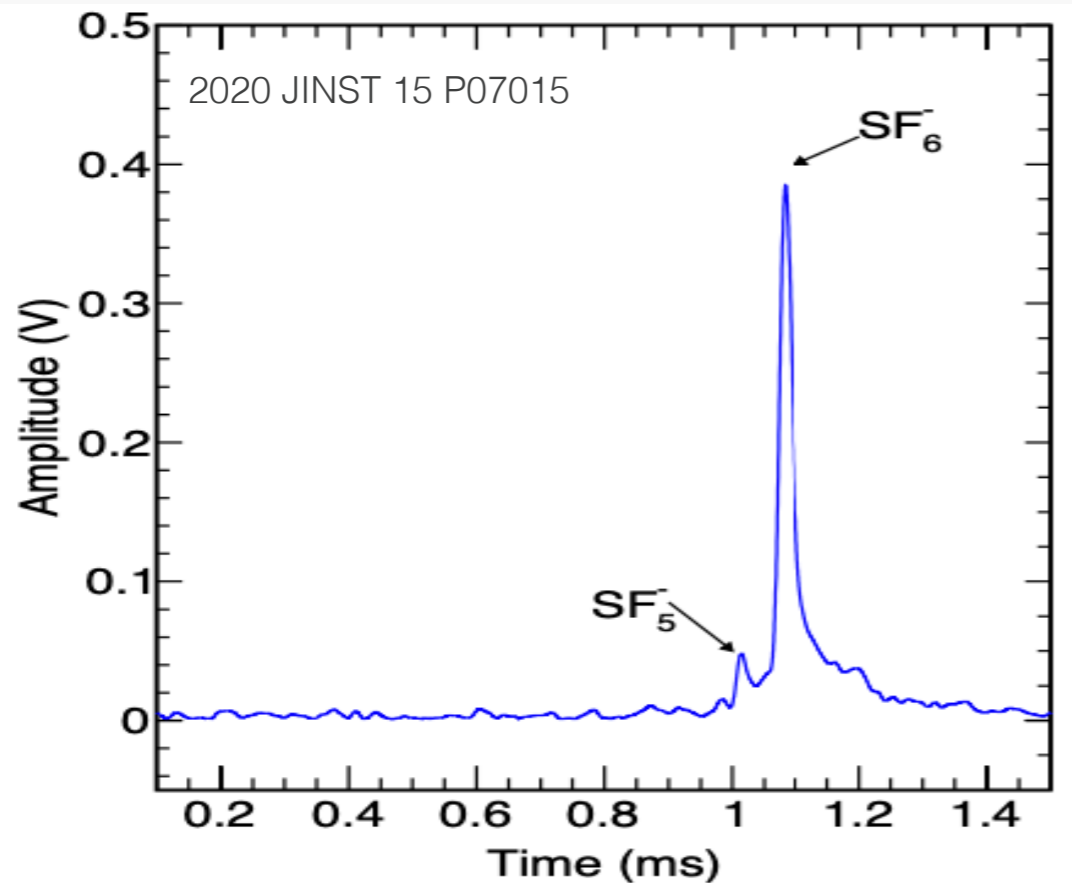
→ ADC出力

e.g. ビーム実験などでのガスTPC

複数トラック解析可能？

→ コンパレータ出力

コンパレータ出力による間欠化ノイズ解析. 取込4チャンネル記録



結論

- DM探索に向け、陰イオンガスTPCの小型機を用いた検証
 - ➔ 2種の陰イオンを形成するSF₆ガスを使用
 - ➔ 原子核反跳の検出に成功、原理的にDM探索に利用可能
- 低ドリフト拡散を生かした微細ピクセル検出器開発も進行中

