



Nuclear Emulsions for WIMP Search -  
directional measurement

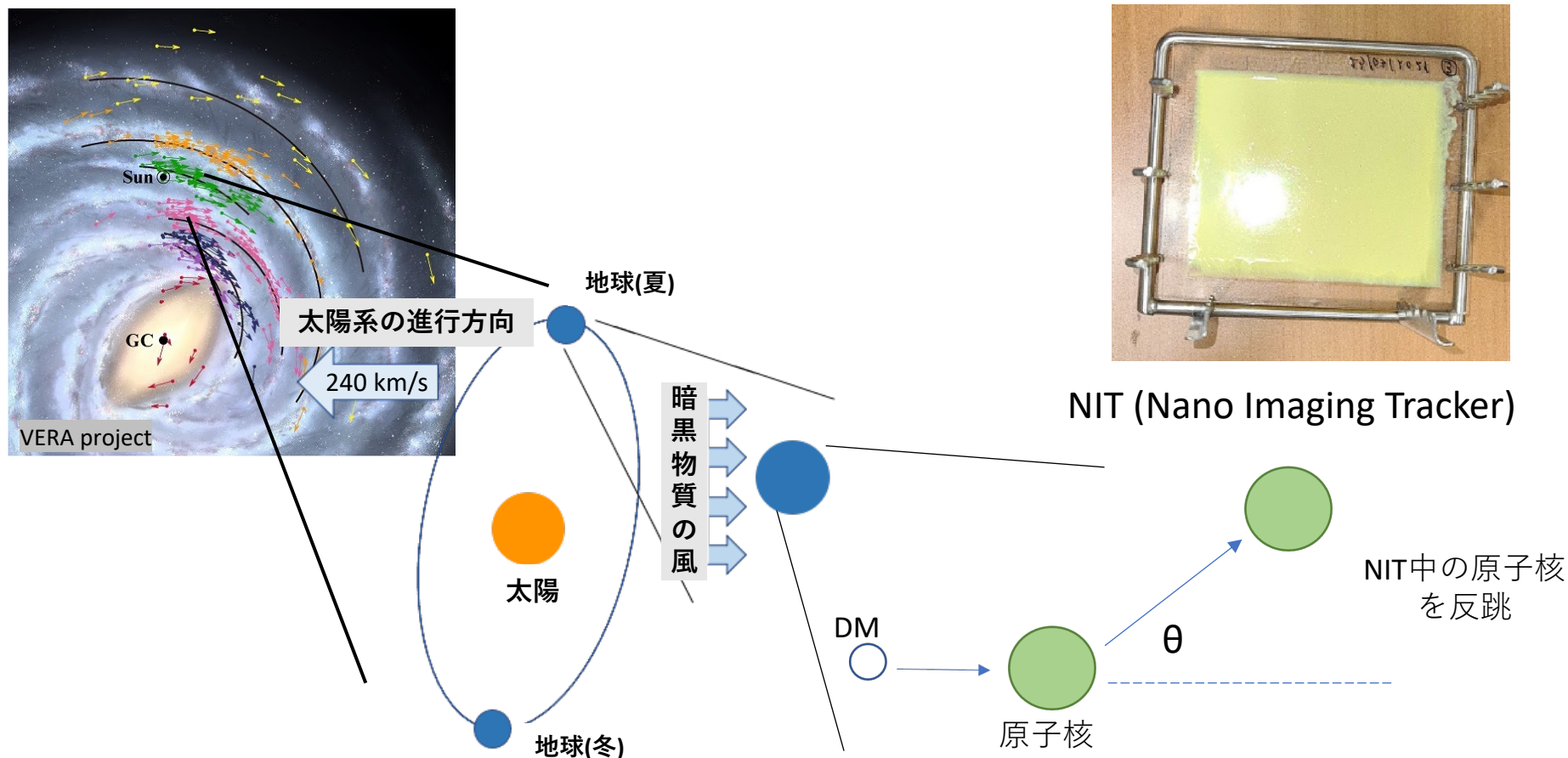
# 超微粒子原子核乾板NITの 低エネルギー陽子に対する 検出性能の評価

東邦大学

M1 ダウディ由莉香

# NEWSdm実験

- 超微粒子原子核乾板 (Nano Imaging Tracker, NIT) を用いた暗黒物質の方向直接探索実験
- WIMPsを想定しNIT中のC,N,O等の原子核反跳を信号として捉える



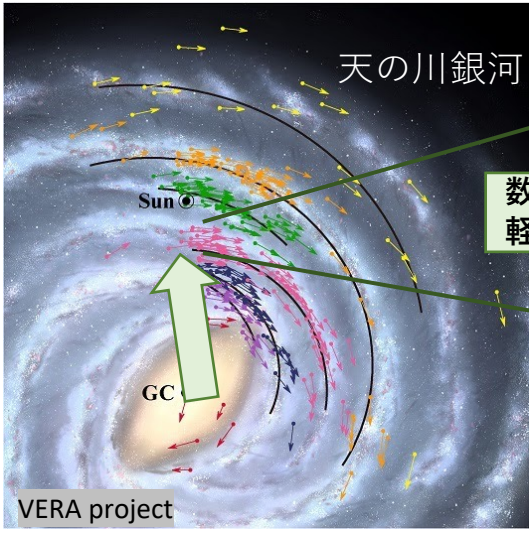
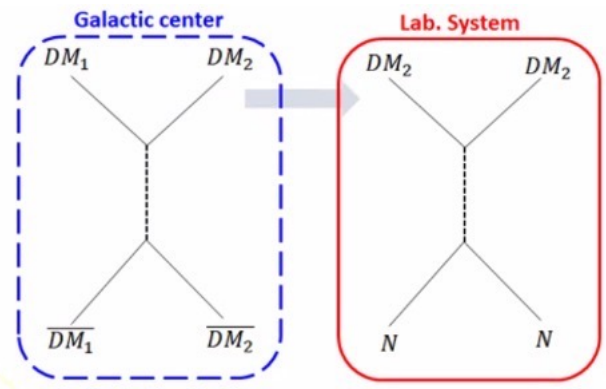
# 低エネルギー陽子

## Two (Multi) Component Dark Matter

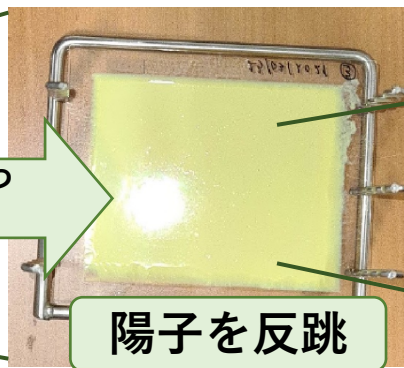
$$\phi \sim 1.6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \left( \frac{\langle \sigma v \rangle}{5 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}} \right) \left( \frac{5 \text{ MeV}/c^2}{M_1} \right)^2$$

<https://arxiv.org/pdf/1405.7370.pdf>

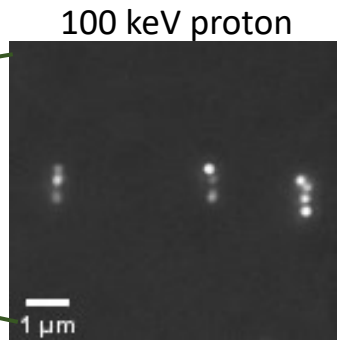
- $\sim O(1) / \text{cm}^2/\text{s}$  くらいのflux (地上で $10^{-3} / \text{cm}^2/\text{s}$ の環境中性子に比較しても多い)
- $DM_B$ はMeVスケールまで加速→陽子が $O(10) \text{ keV}$ 程度で反跳される



数MeVのエネルギーを持つ軽い暗黒物質



陽子を反跳



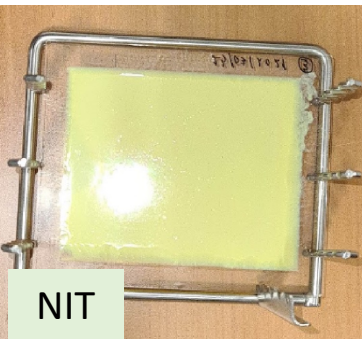
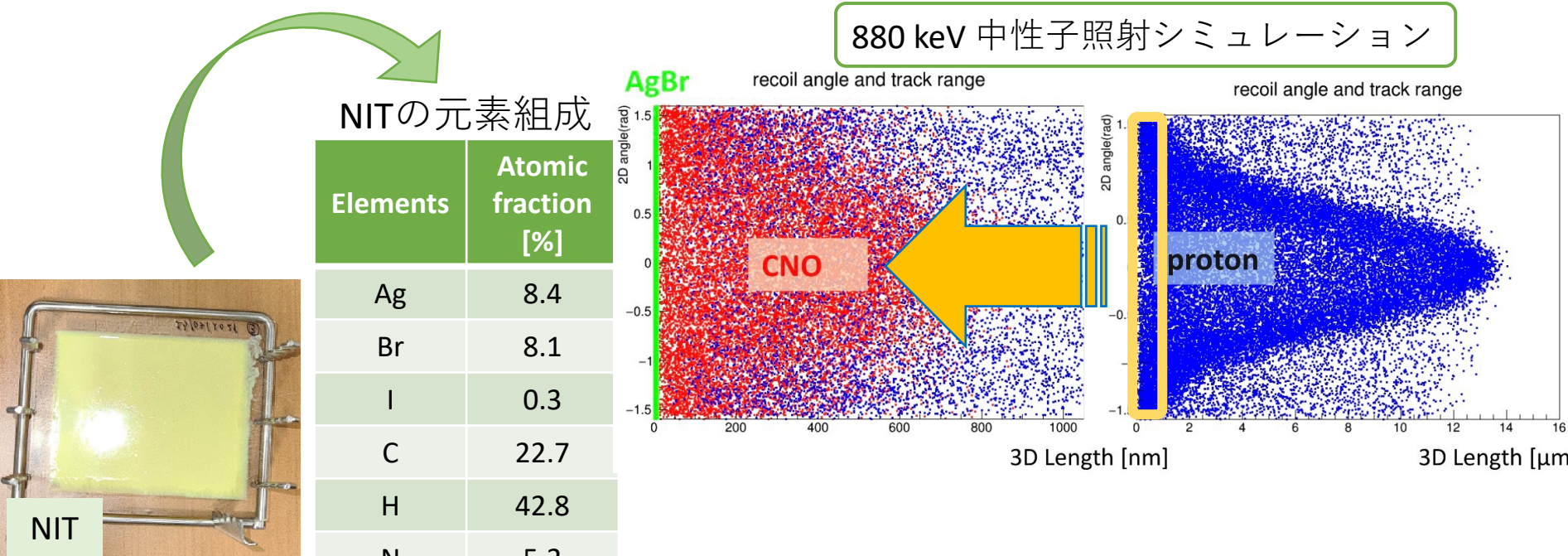
低質量領域の暗黒物質に対する感度を持ち得る  
 ➤ 100 keV以下の陽子の飛跡検出性能は未検証

想定

- ✓  $DM_1 \sim \text{MeV scale mass}$ ,  $DM_2 \sim \text{keV scale mass}$
- ✓  $DM_1$ はDM haloを主に構成、SM粒子から独立

# モチベーション

- 以前に880 keVの中性子を照射してCNO反跳の較正
- 反跳飛跡には中性子に反跳された陽子も混入



梅本 篤宏 名古屋大学博士論文 2020

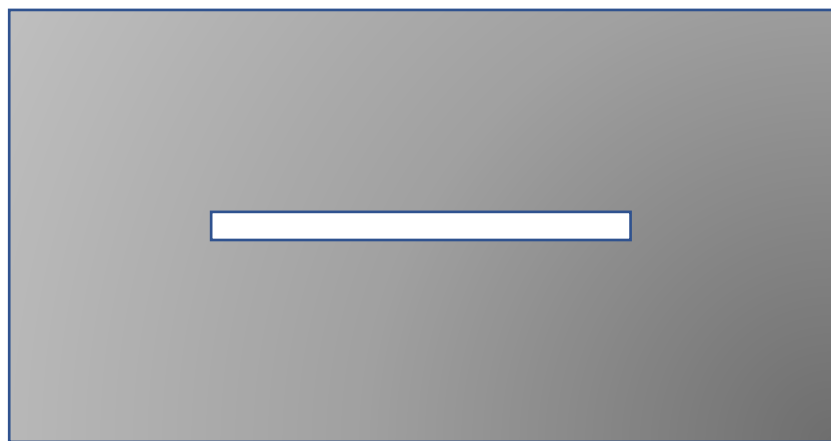
**NITのkeV領域陽子に対する**

- ✓ 飛跡検出、方向情報取得の原理実証
- ✓ 応答の理解

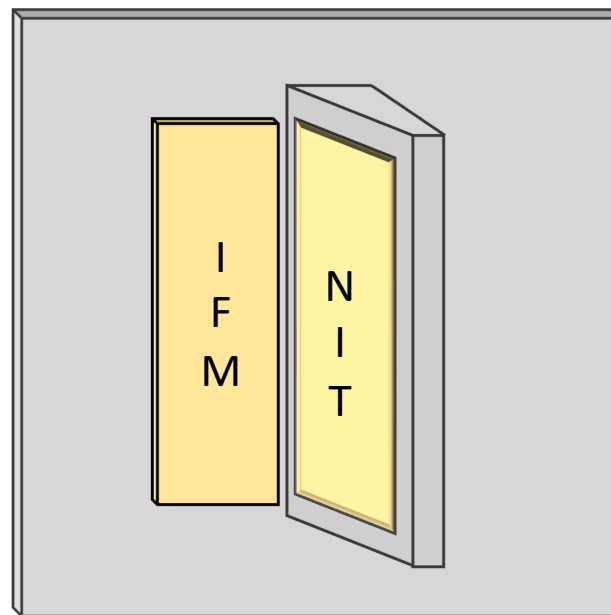
# イオン注入装置の実験セットアップ

陽子飛跡検出の原理実証のため、イオン注入装置で陽子を直接照射

マスク  
(アルミ板に穴を開けたもの)



照射台  
NITは10°で設置



NIT : AgBr(I)結晶サイズ 70 nm

IFM : Ion Flux Monitor

AgBr(I)結晶サイズ : 200 nm

イオン照射量のモニター用乾板

ion direction



emulsion film

10 degrees

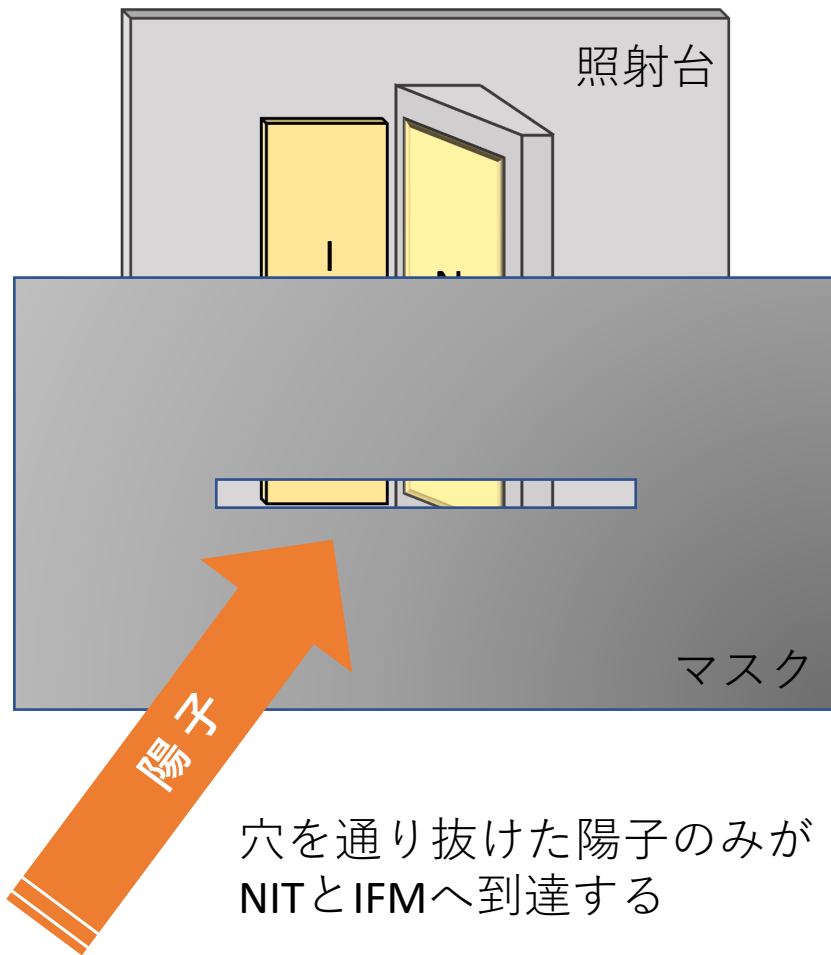
支持体 : スライドガラス

# 実験セットアップ

イオン注入装置@神奈川大 星野研究室

マスクを上下

真空チェンバー内に  
サンプル設置

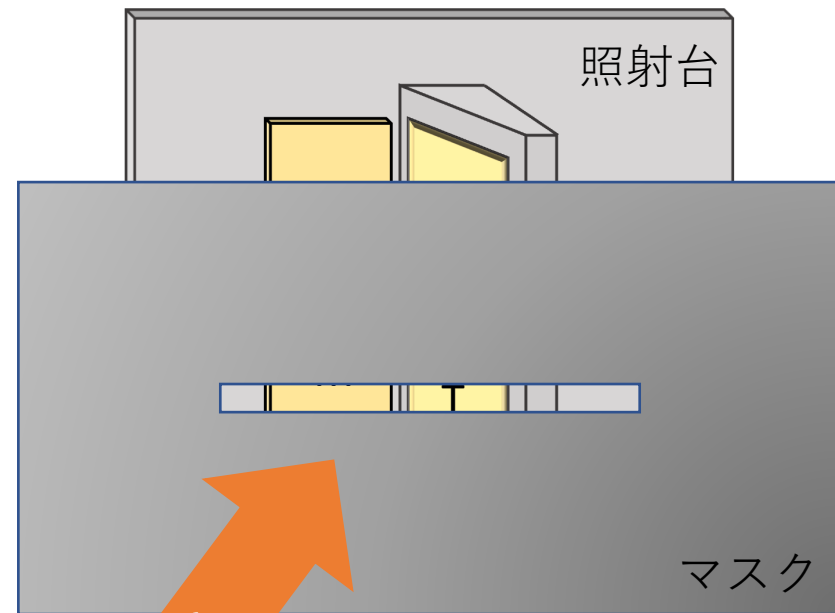


# 実験セットアップ

イオン注入装置@神奈川大 星野研究室

マスクを上下

真空チェンバー内に  
サンプル設置



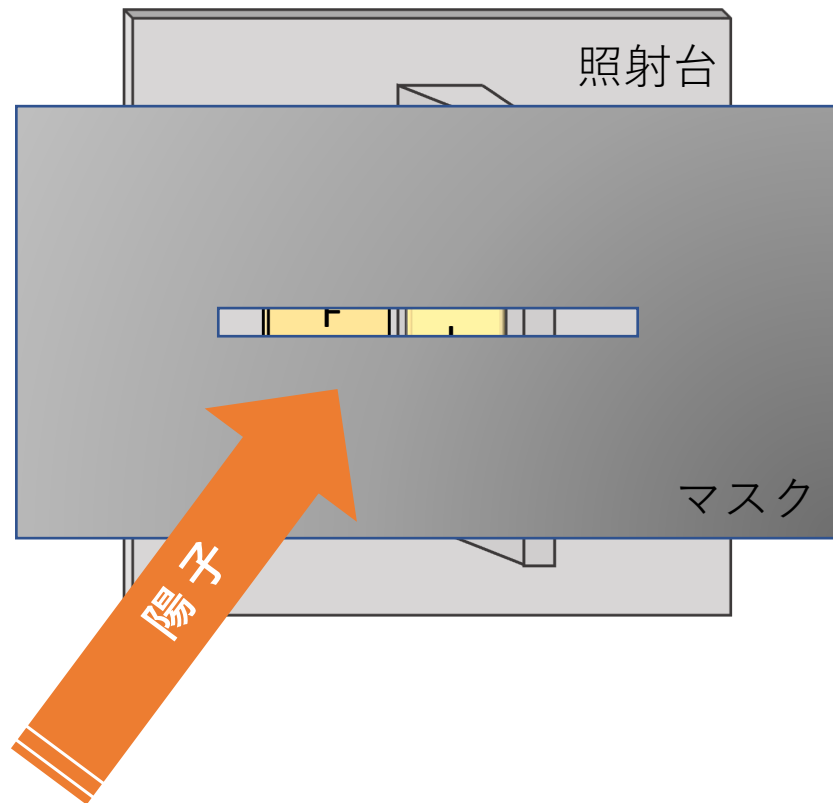
穴を通り抜けた陽子のみが  
NITとIFMへ到達する

# 実験セットアップ

イオン注入装置@神奈川大 星野研究室

マスクを上下

真空チェンバー内に  
サンプル設置



穴を通り抜けた陽子のみが  
NITとIFMへ到達する

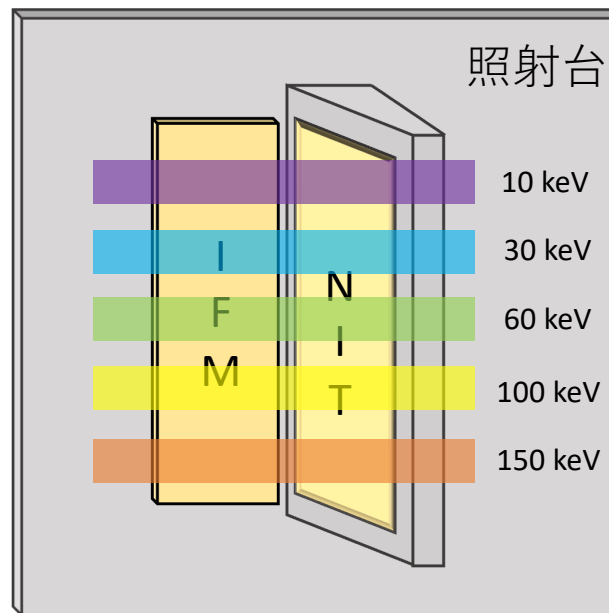


# 実験セットアップ

イオン注入装置@神奈川大 星野研究室

マスクを上下

真空チェンバー内に  
サンプル設置

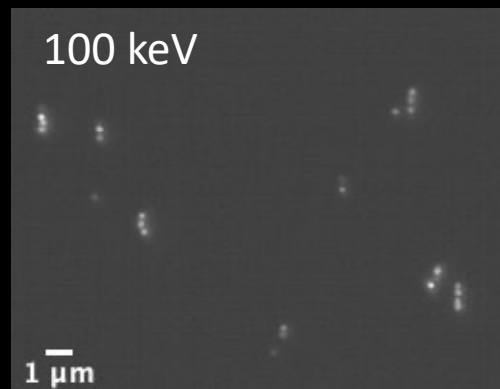
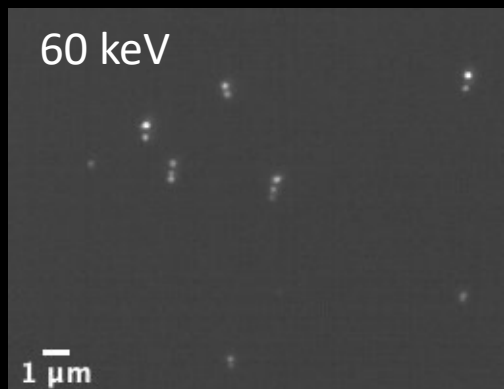
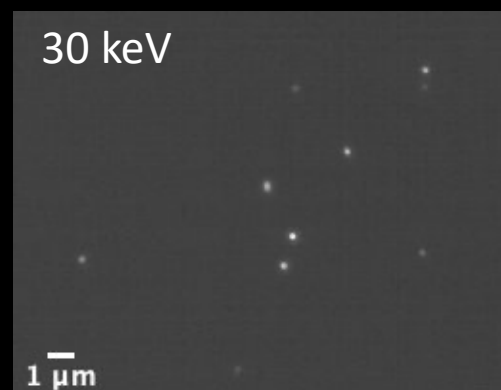


一度の真空引きで複数の  
エネルギーの陽子を照射可能

# 得られたサンプルと飛跡

得られるサンプル

Label
10 keV
30 keV
60 keV
100 keV
150 keV



# Tracks of protons and manual measurement

150 keV

1  $\mu\text{m}$

100 keV

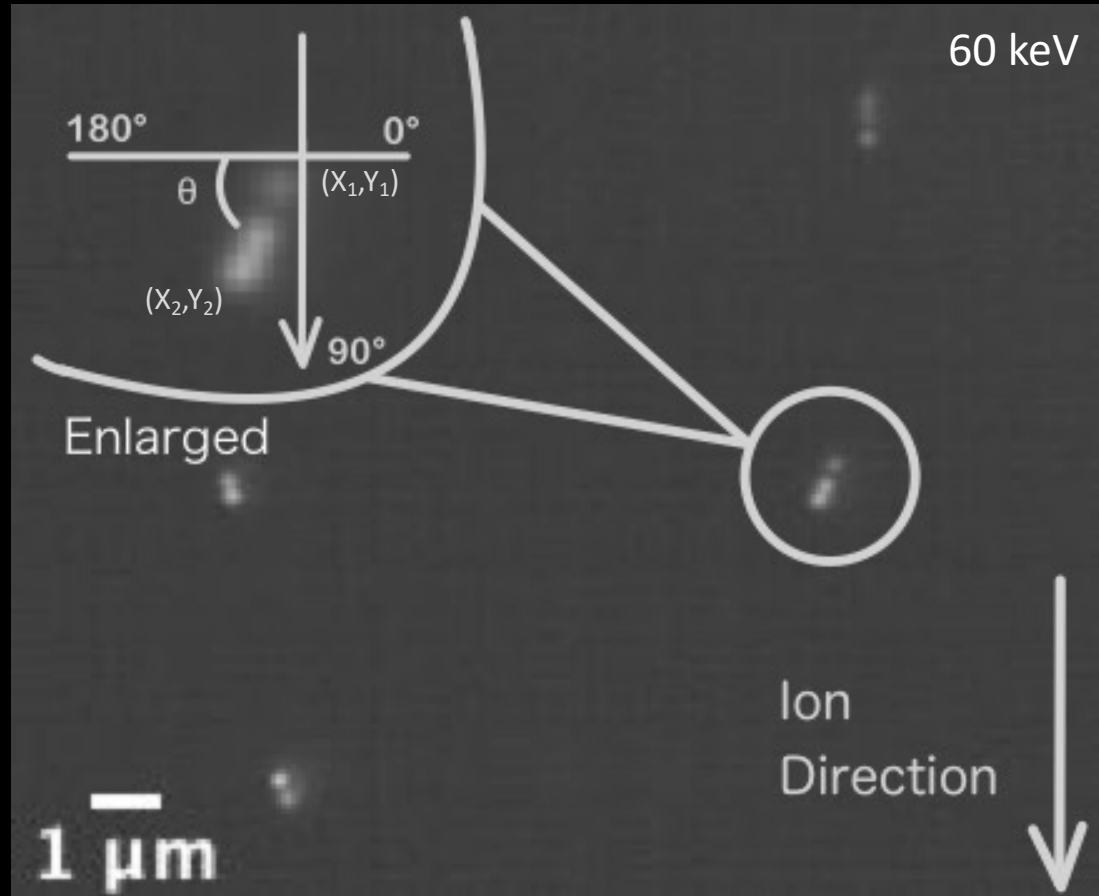
1  $\mu\text{m}$

60 keV

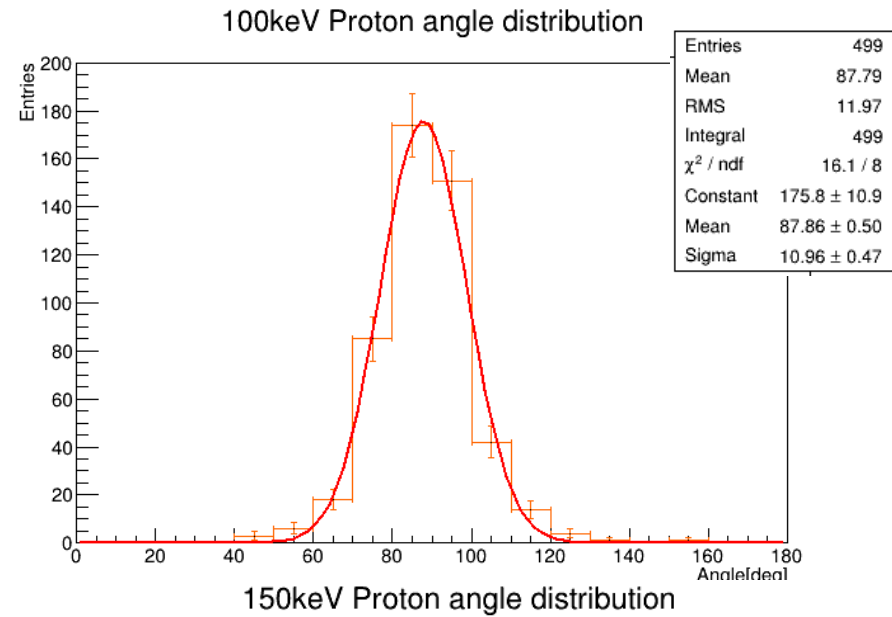
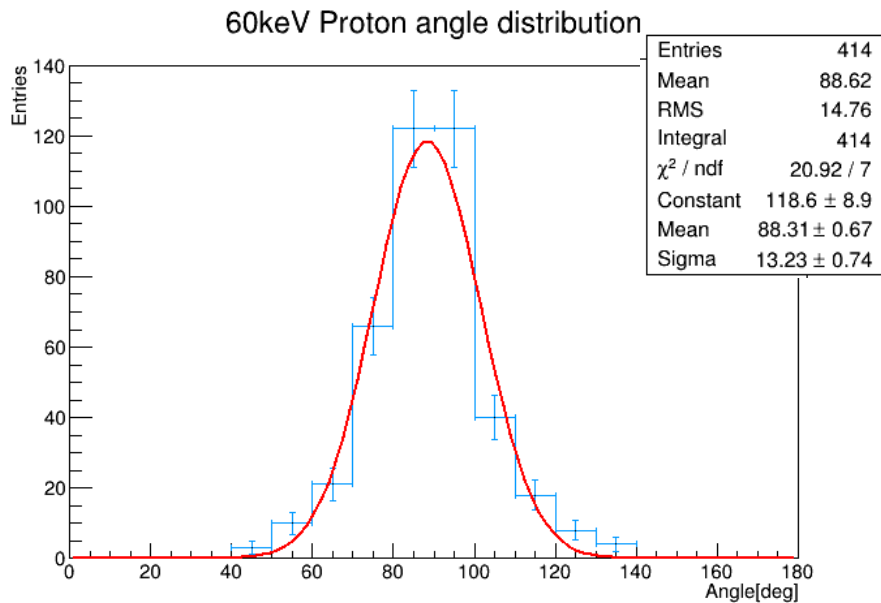
1  $\mu\text{m}$

現在の自動解析は陽子に最適化されていない

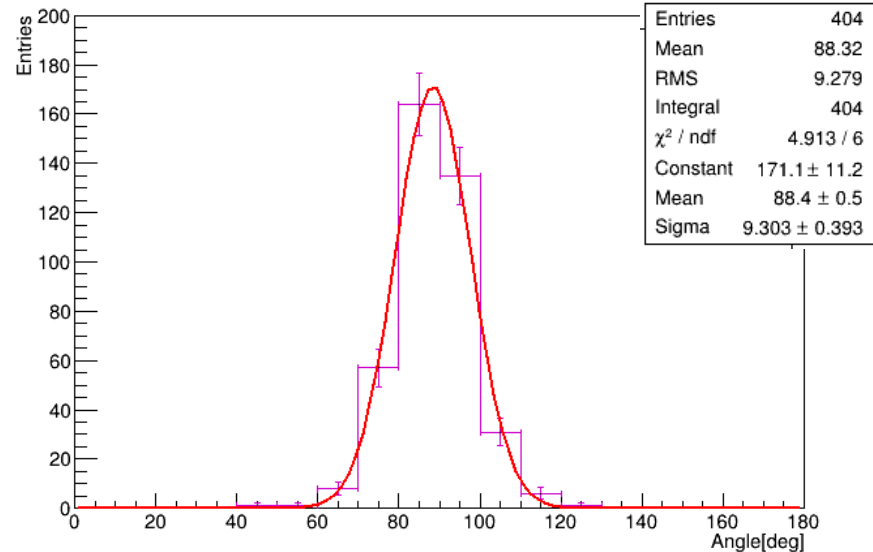
- エネルギーの高い陽子で事象の理解を進める
- 始点と終点の座標を手動で記録し飛程と角度を求める



# 角度分布 (60-150 keV、手動測定より)



入射方向の90° にピーク  
分布の幅は散乱が主な原因だと考えられる

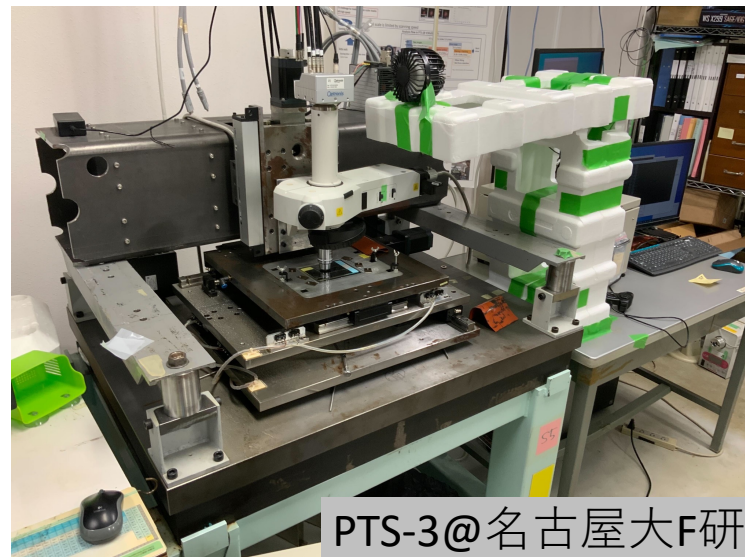


	角度
60 keV	$88.62 \pm 13.23 \text{ deg}$
100 keV	$87.79 \pm 10.96 \text{ deg}$
150 keV	$88.32 \pm 9.30 \text{ deg}$

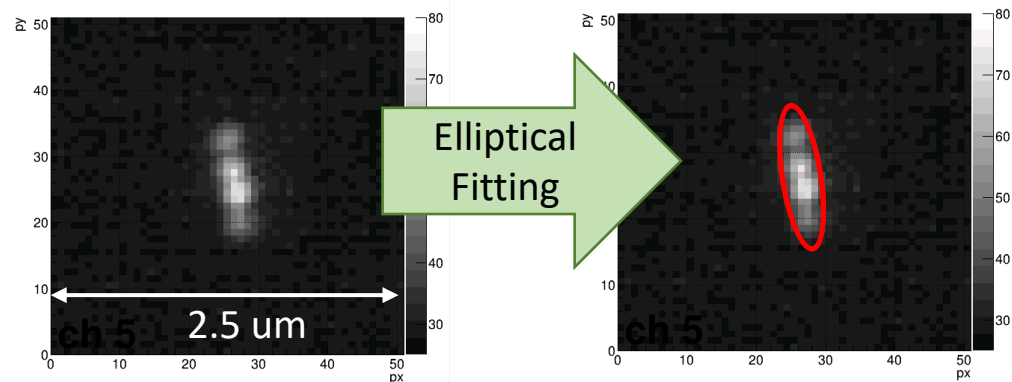
# 自動飛跡検出: 楕円解析

PTS-3 : 落射型顕微鏡の自動飛跡読み取り装置

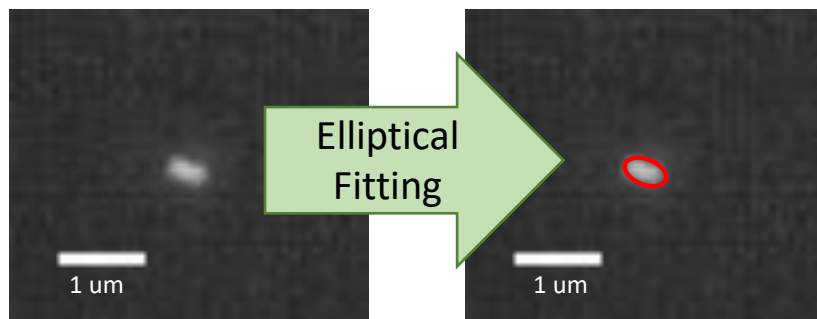
- イタリアでの地下実験のサンプルは PTS-3@名古屋大で解析
- 陽子のサンプルも実際の解析手法で更に低いエネルギーまで解析



example with 100 keV proton track



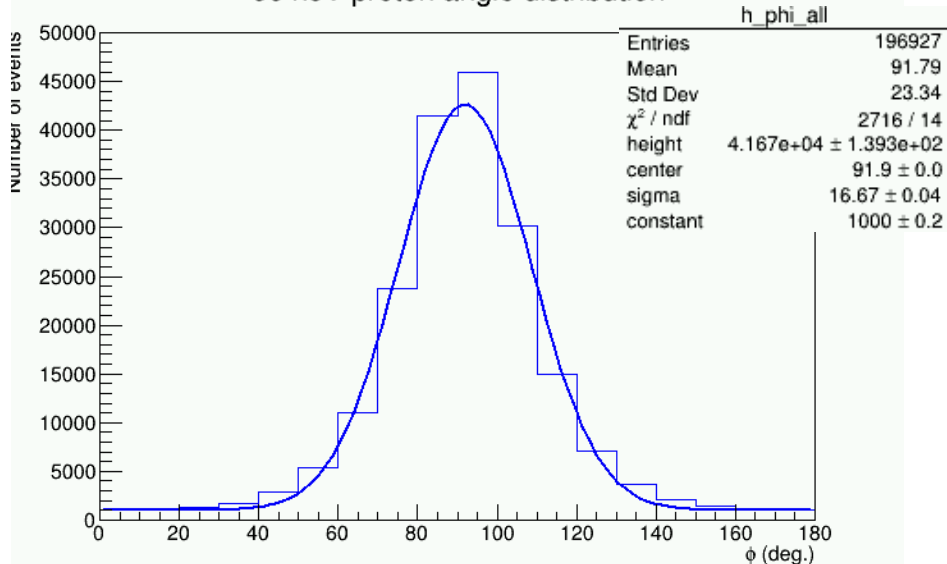
example with 10 keV proton track



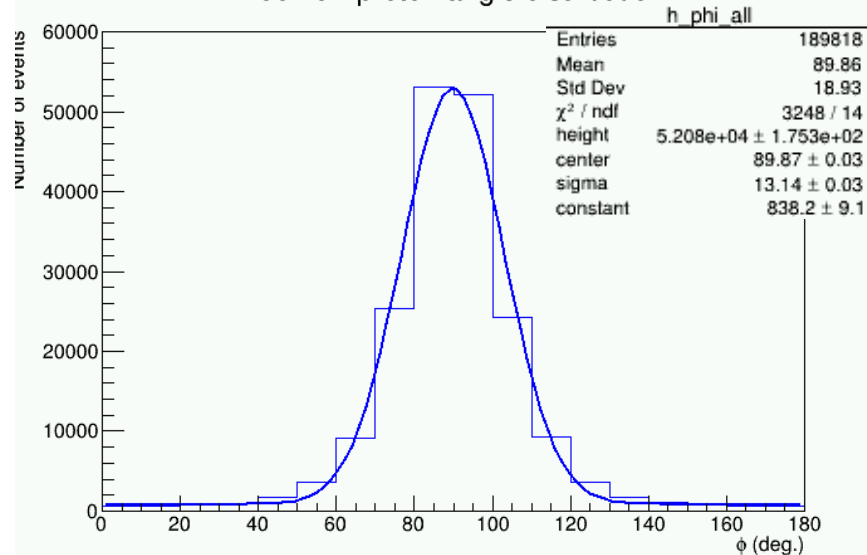
- 楕円形状と輝度をトリガーして飛跡の候補事象を自動取得
  - 楕円率 = (長軸/短軸)
  - 長軸方向が角度
  - ✓ 解析の流れ: 飛跡の取得 → 楕円解析 → CNNで判別 → eye check
- 今回はここまで

# 角度分布 (60-150 keV、楕円解析より)

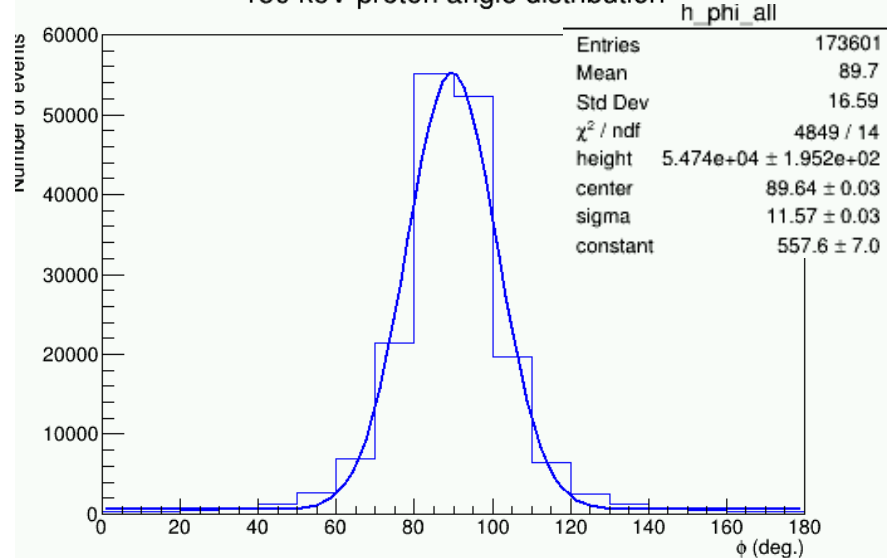
60 keV proton angle distribution



100 keV proton angle distribution



150 keV proton angle distribution

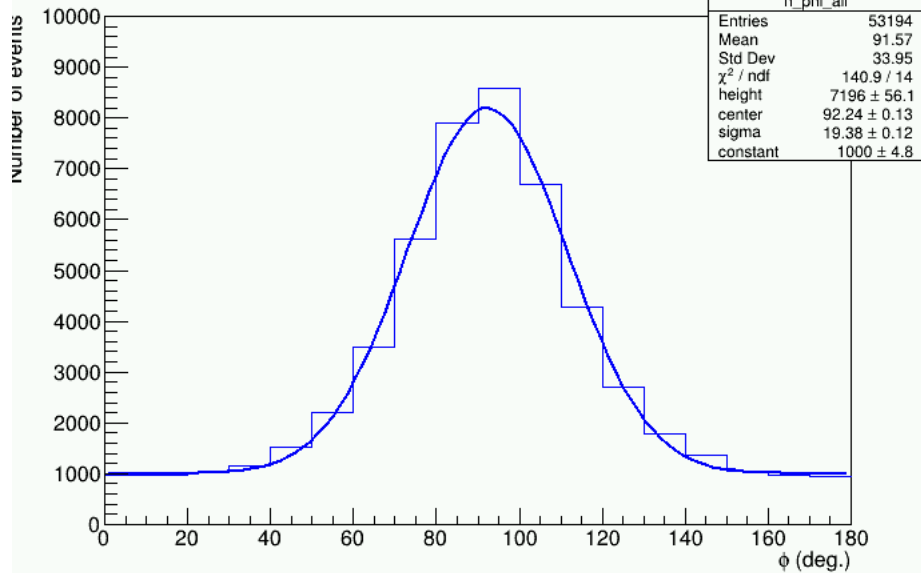


入射方向の90° にピーク  
 手動よりも分布の幅が3~4° 広がる  
 →1grainの飛跡も取得するため

	角度
60 keV	$91.79 \pm 16.67 \text{ deg}$
100 keV	$89.86 \pm 13.14 \text{ deg}$
150 keV	$89.70 \pm 11.57 \text{ deg}$

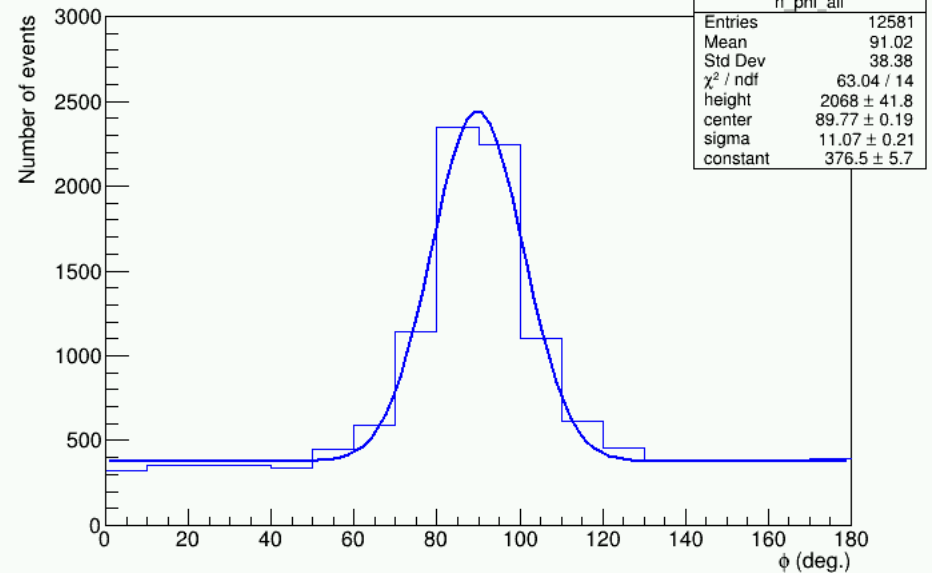
# 角度分布 (10,30 keV)

30 keV proton angle distribution



$91.57 \pm 19.38 \text{ deg}$

10 keV proton angle distribution

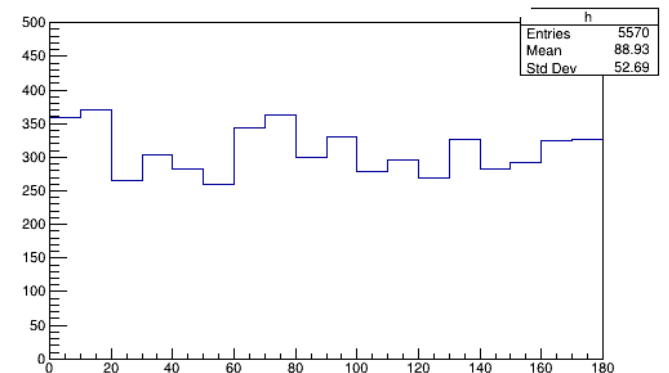


$91.02 \pm 11.07 \text{ deg}$

- 10 keVまで方向情報を取得

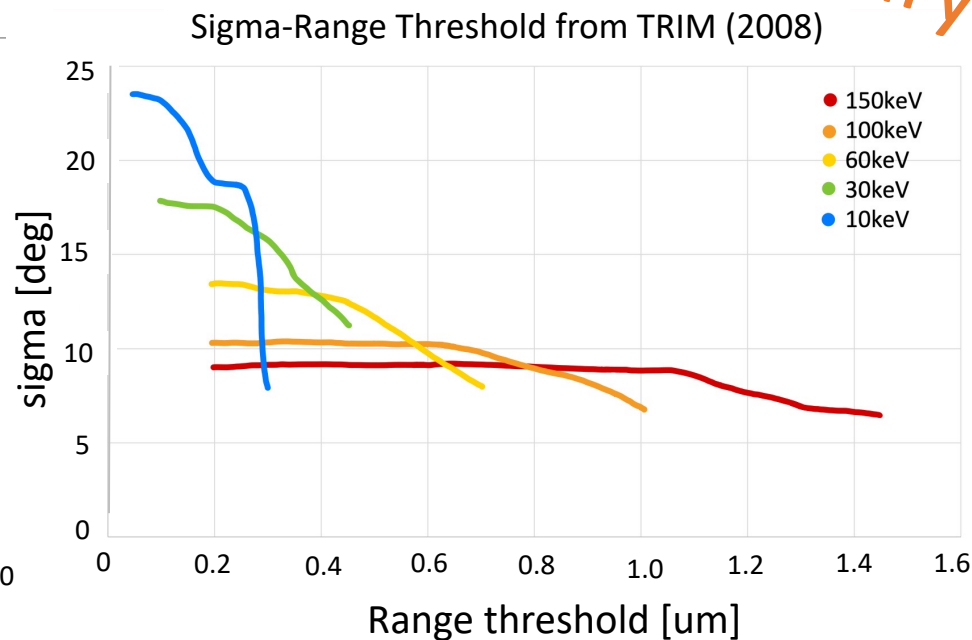
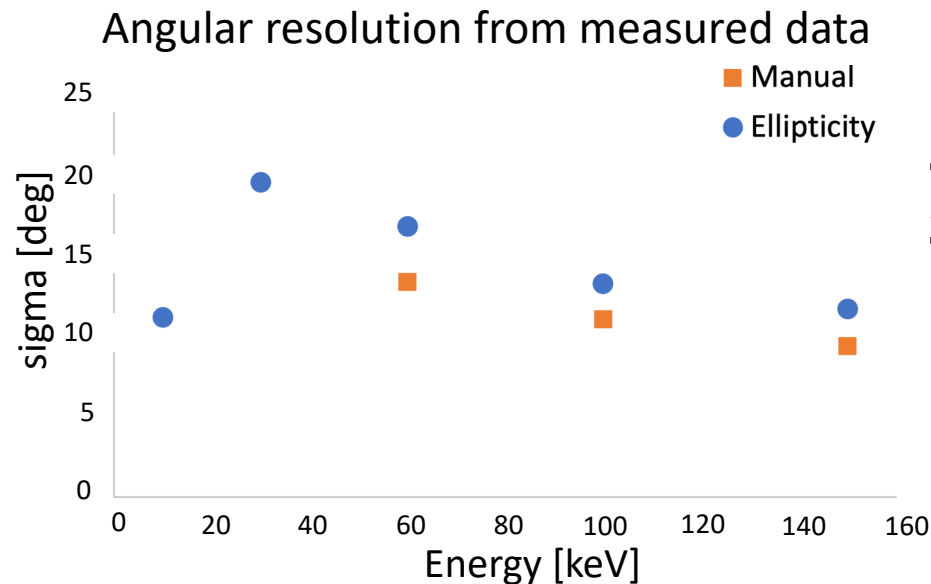
➤ Dark Matter Haloが陽子を反跳させた場合には反跳エネルギーは10 keV以下となる

非照射領域の角度分布



# 角度分解能の比較

Preliminary



現状の楕円解析のパラメータでの閾値：陽子に対しては250 - 300 nm程度と推測

10 keVまで角度分解能を得る

➤ 陽子に対して10 keVまで方向感度あり

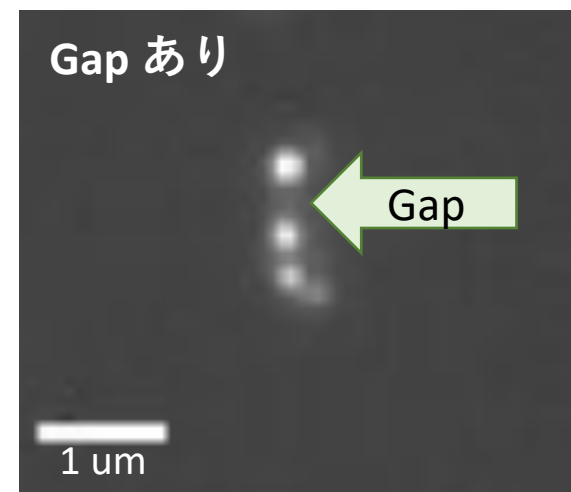


# 飛跡検出についての課題

## 検出効率

- 自動での解析 (数%) < 手動解析 (数十%)
- 100-150 keV陽子の検出効率が低い

gapの空いている飛跡は楕円率を取得していない  
結晶感度が低い可能性



150 keV proton

<改善に向けて>

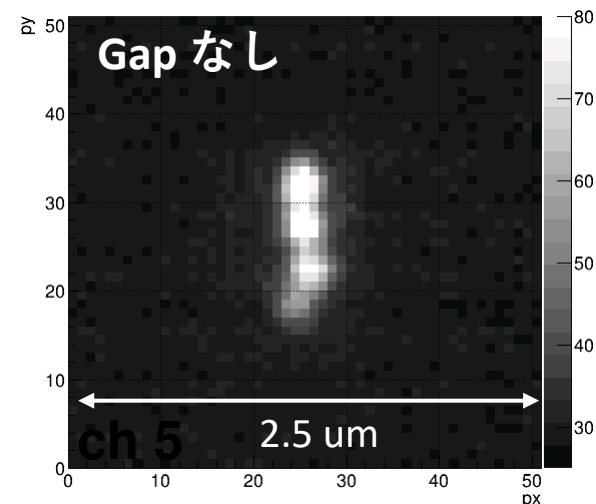
デバイス

✓結晶貫通数を増やす

➤乳剤の結晶密度up、結晶サイズを小さく

+

解析手法の最適化 (gapの空いた飛跡も取得)

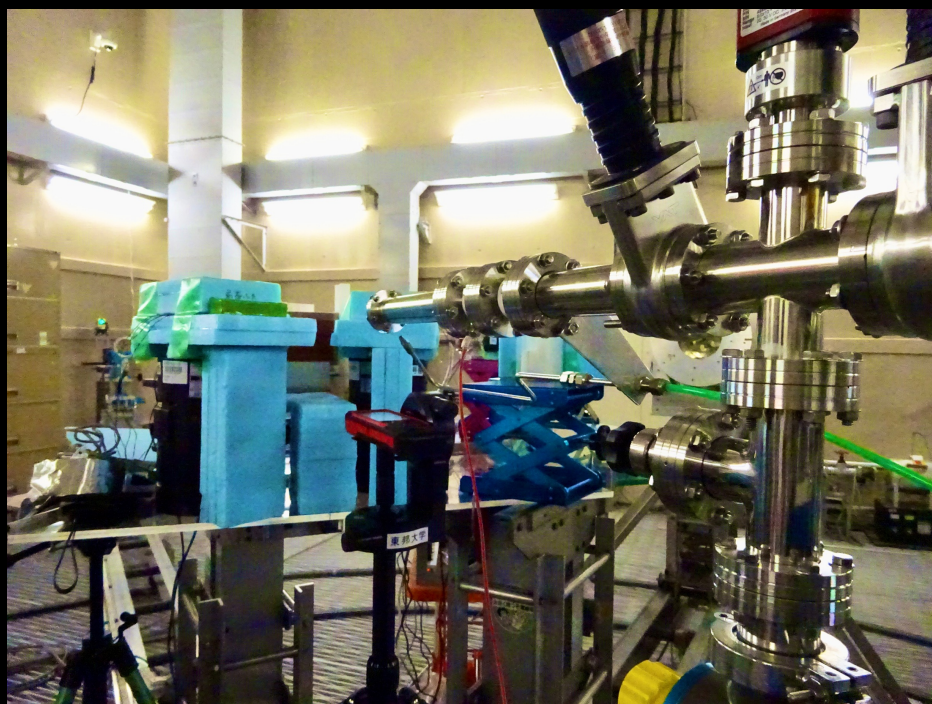


100 keV proton

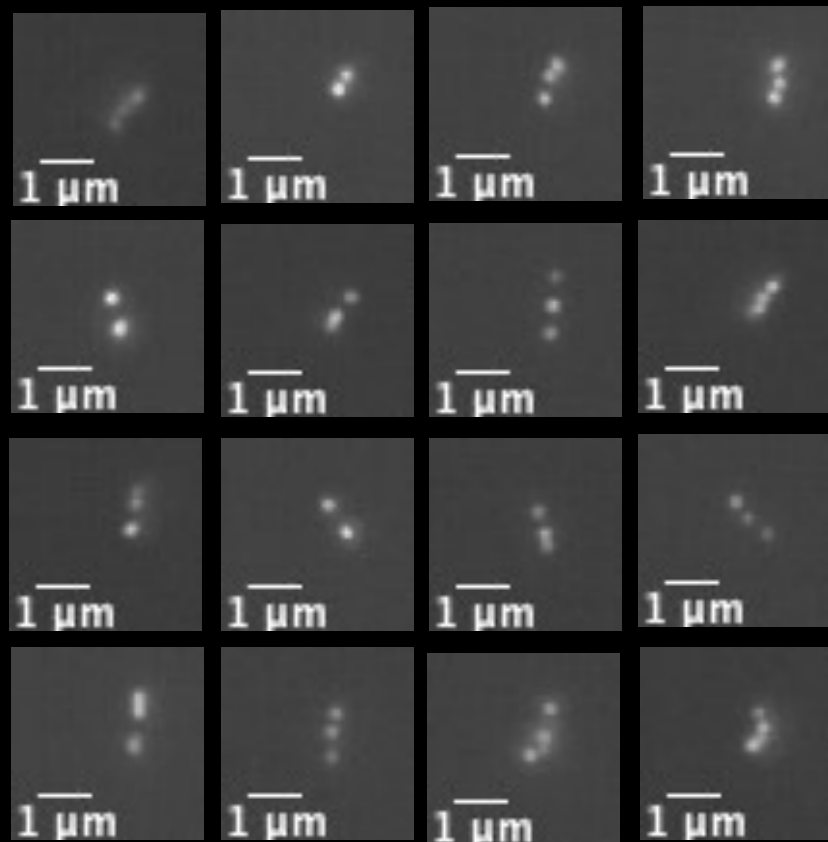
# 200 keV neutron exposure @AIST

200 keVの中性子をNITに照射(-25°C)

- 主に低エネルギー陽子反跳のみ  
CNO反跳事象を減らす



産総研での中性子照射



検出された反跳飛跡

# まとめ

- 100～数十keVの陽子の飛跡検出を実証
- 10 keV程度の低エネルギー陽子も方向を検出

# 展望

- 検出効率、結晶感度
- 200 keV中性子に反跳された低エネルギー陽子の反跳事象の解析
- 反跳陽子の検出性能評価
- これを機械学習(CNN)の教師データとし将来的には地下runに適用
- 更に検出閾値を下げる為にデバイス、解析手法の最適化