



Toho University

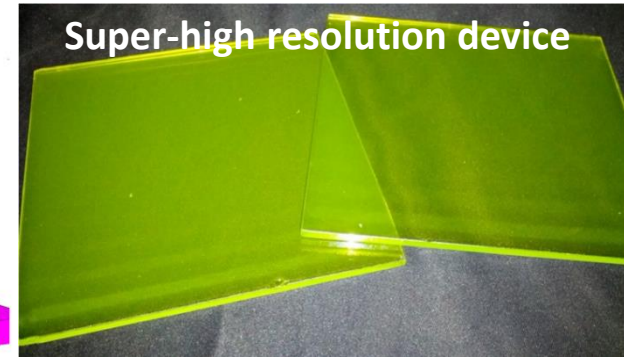
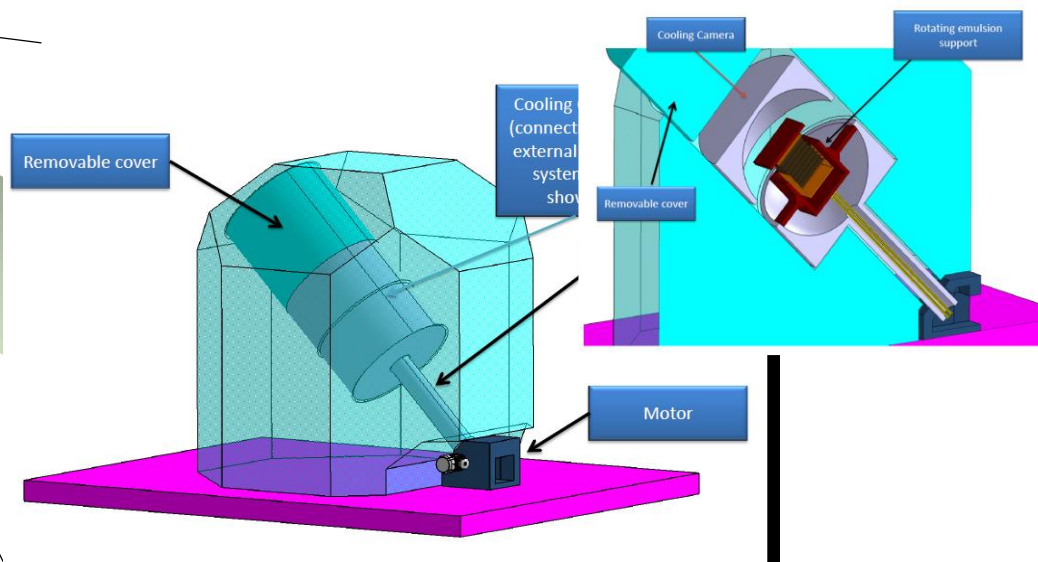
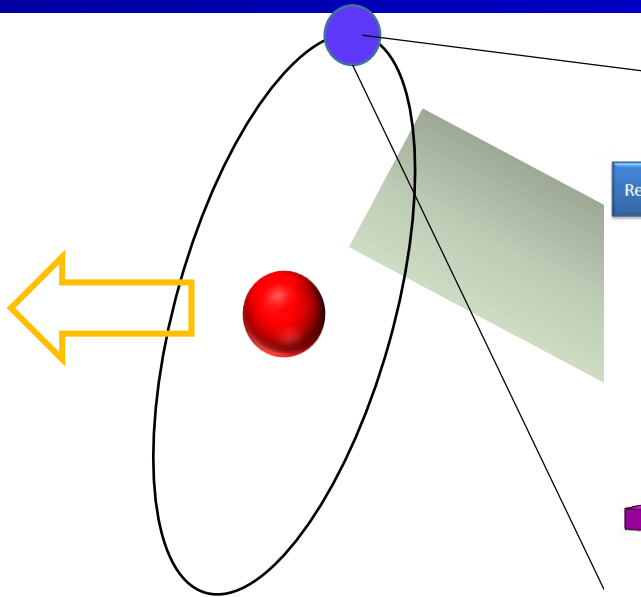


# NEWSdm実験

超高分解能原子核乾板による方向感度を持つ暗黒物質探索実験

中 竜大  
東邦大学

# Concept of NEWSdm experiment using very high resolution nuclear emulsion

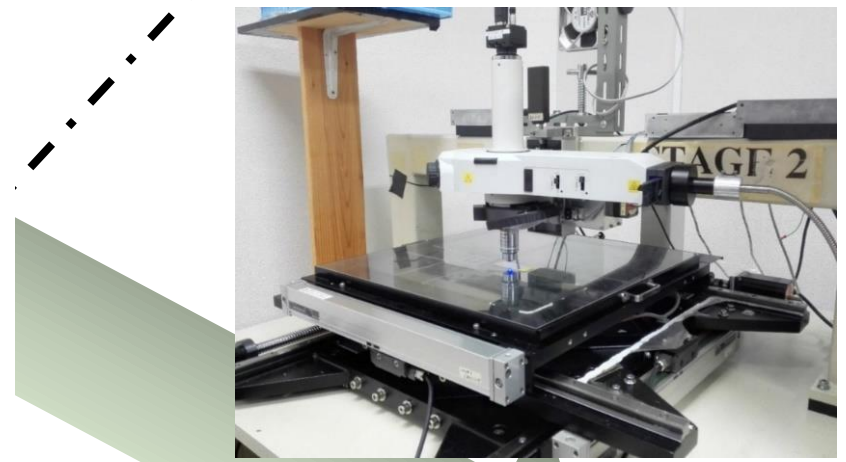
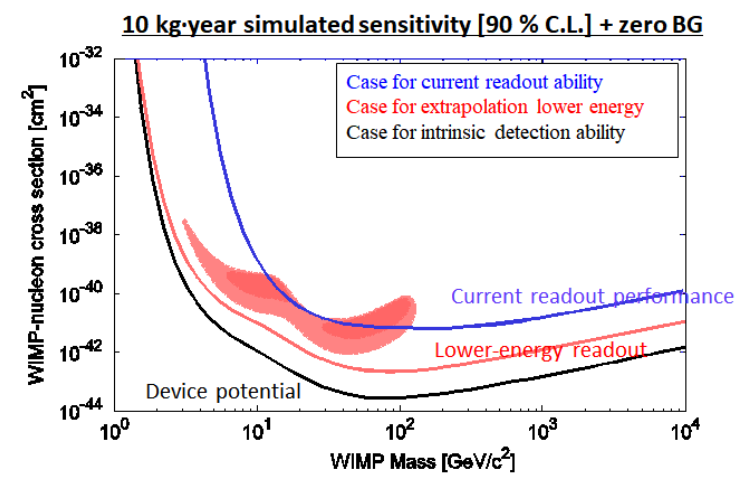


Surface laboratory

exposure using telescope

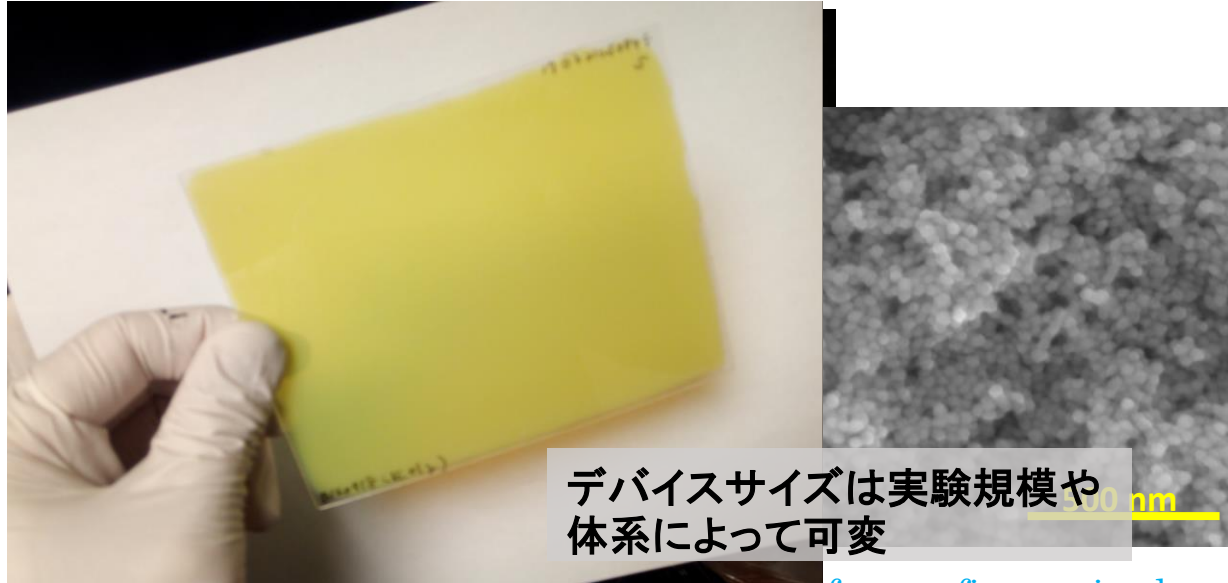
## Underground laboratory

- Device-self production in underground and clean room
- Exposure on the telescope with shield
- Chemical development treatment



Readout + analysis  
Using microscope techniques

# NIT device for dark matter experiment



デバイスサイズは実験規模や  
体系によって可変

“The development of super fine-grained nuclear emulsion”, PTEP (2017)063H01

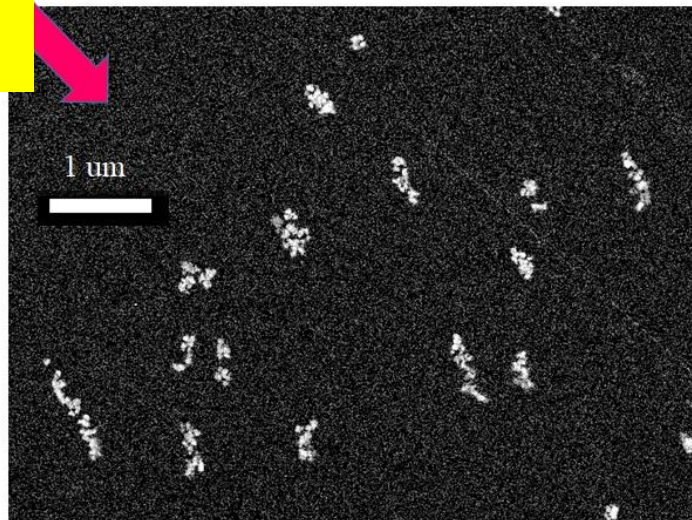
For low-mass DM For high-mass DM

## Elemental composition of NIT

	Mass fraction	Atomic Fraction
Ag	0.44	0.10
Br	0.32	0.10
I	0.019	0.004
C	0.101	0.214
O	0.074	0.118
N	0.027	0.049
H	0.016	0.410
S, Na + others	~ 0.001	~ 0.001

## Particle tracking with nano-scale

AgBr crystal



### ◆ Intrinsic radioactivity :

U-238	Th-232	K-40	Ag-110m	C-14
27	6	35	(~400)	24000

[mBq/kg]

### ◆ Intrinsic neutron emission:

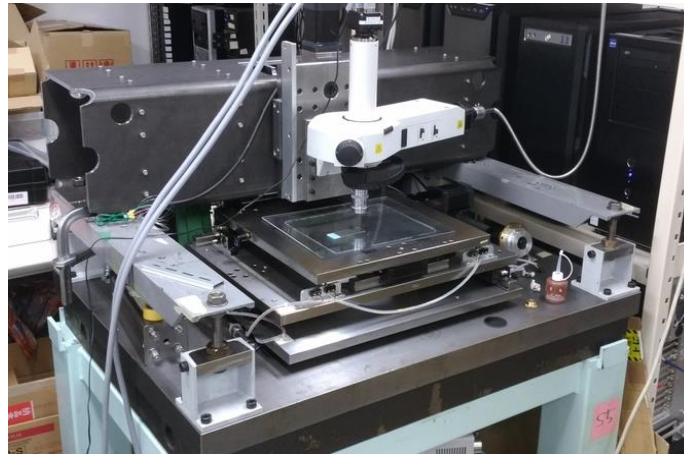
~ 1.2 /kg/y (by SOURCE simulation)

⇒ ~ 0.1 /kg/y (> 100 nm nuclear recoil)

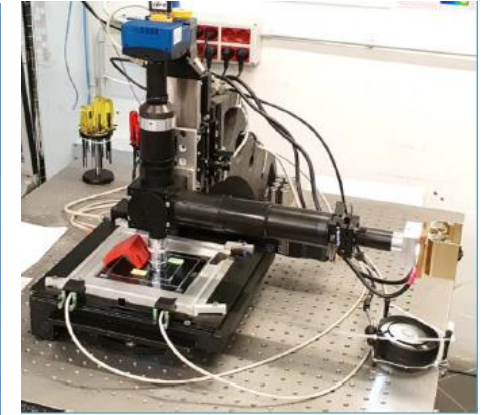
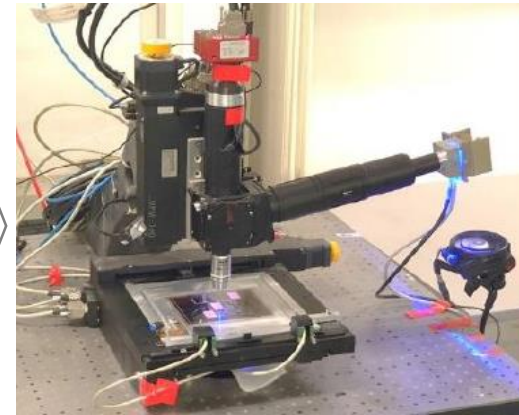


# Readout technologies

## Automatic optical microscope readout system for nano-tracking

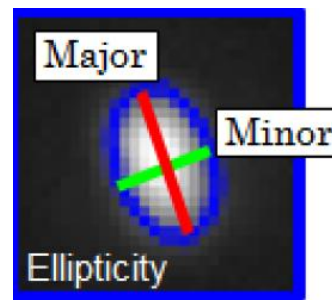
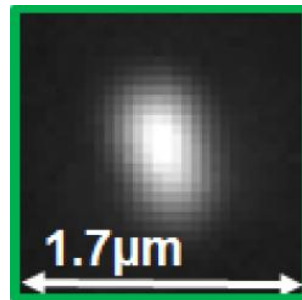


## Super-resolution plasmonics tracking



### First event trigger

- Elliptical shape selection
  - high-resolution optical condition
- ⇒ > 100 nm length tracking

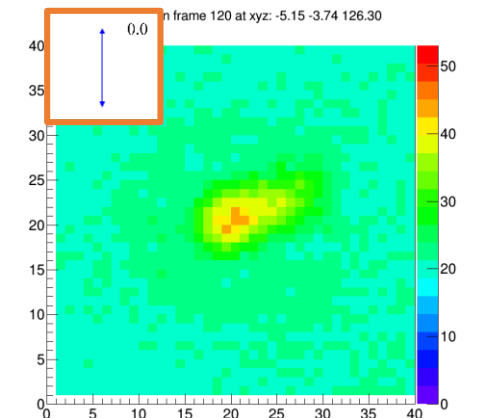


“Submicron track readout in fine-grained nuclear emulsions under optical microscopy”, Nucl. Inst. and Meth. A 680 (2012) 12-17

“New readout system for submicron tracks with nuclear emulsion”, JINST 12(2017)T04002,

### High precision measurement using LSPR

- 5 nm resolution was achieved
- Multi information in the nano-scale structure
- Machine learning



“Super resolution plasmonic imaging microscopy for submicron tracking emulsion detector” PTEP 2019, 013D02 (2019)

# 2019 + current activities

## Underground Activity

- ❑ Device production and study of quality
- ❑ Device handling environment
  - chemical handling
  - pure-water supply
  - clean condition
- ❑ Safety control
- ❑ Exposure system with telescope

## Readout system

- ❑ Scanning speed improved
- ❑ Selection efficiency and threshold improve
- ❑ Signal recognition improve

## Detector performance study

- ❑ Low-velocity ion calibration
- ❑ Nuclear recoil detection
- ❑ Background study
- ❑ Simulation study

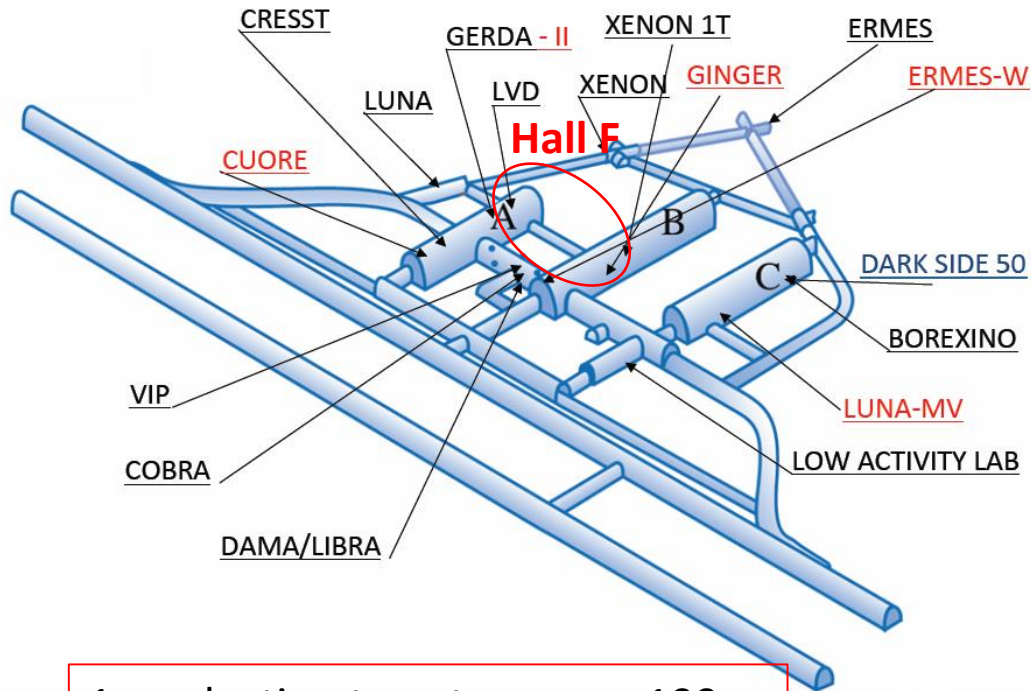


Dark matter search

Underground activities

# Underground laboratory at Hall F and Hall B, LNGS [2019 activity]

## New Underground facility concept @Hall F



1 production target mass :  $\sim 100$  g  
Time /production :  $\sim 3$  hours  
 $\Rightarrow 2$  production /day  
 $\Rightarrow \sim 1$  kg /week

Production facility as  
clean room@ Hall F



Ventilation system



Chemical development facility  
@ Hall F



Waste liquid system





# Status of underground laboratory

2019. 2月 : デバイス製造装置の設置とコミッショニング  
⇒ デバイス製造試験

すでに名古屋で製造していたものと同程度のものは製造可能

- 試薬等については、イタリアで調達可能なものに統一
- 製造からフィルム作成までの工程の効率化
- 性能評価体制の検討(線源利用、解析システム 等)

## ■ LNGSのセキュリティ規定の強化

- 廃液系システムの漏洩対策強化
- 製造装置そのものの安全対策
- 空調系の整備

➡ COVID-19の影響により、研究所での活動停止中



2019. Feb~ テストデバイス製造と性能評価試験をスタート



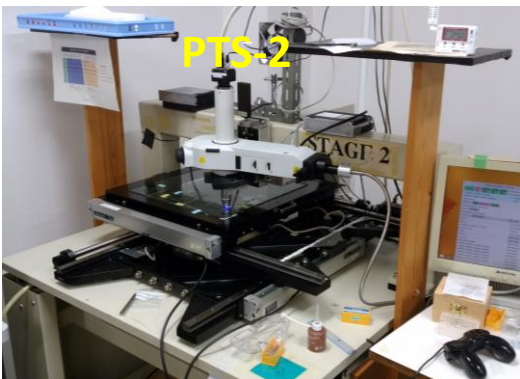
Scanning system @LNGS  
(for device quality check)



Readout system

# Nano-tracking readout system

Nagoya U.



## Standard scanning

画像処理の改善によってピクセルの影響を低減  
⇒ trigger thresholdを改善

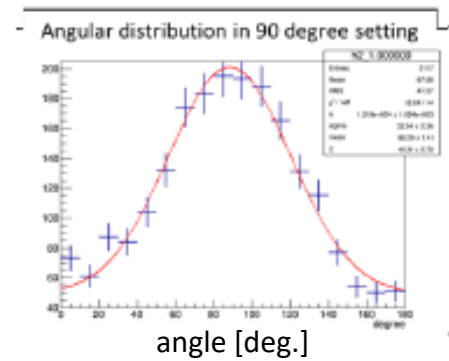
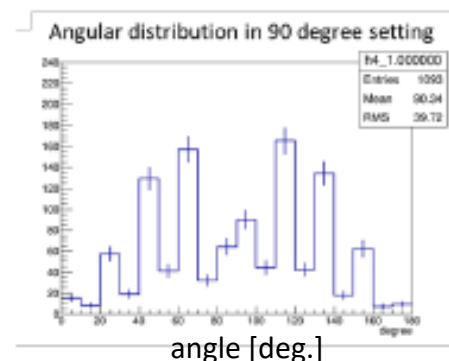


## Speed up study

Toho U.

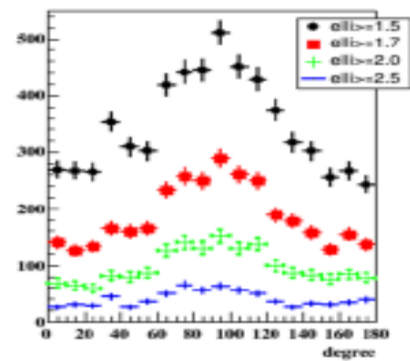


## Under commissioning



Bicubic + DFT

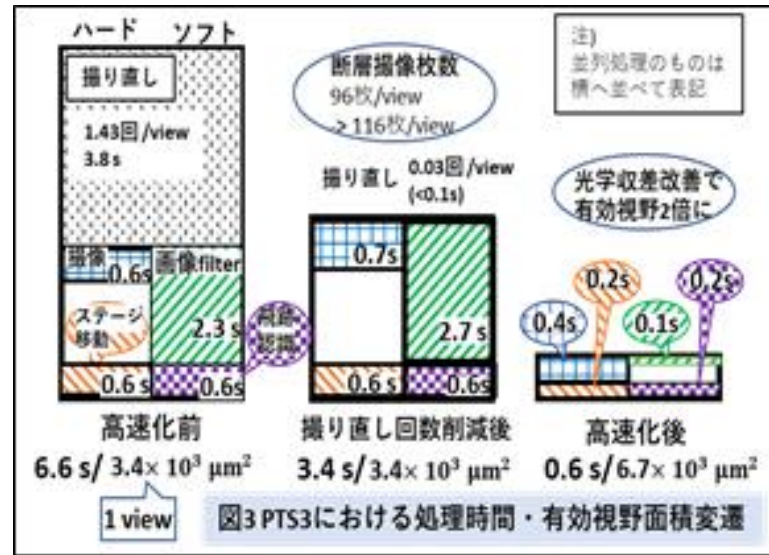
楕円率の小さい事象に対して画像認識制度を向上



Detected angular distribution for **30 keV carbon** (平均飛程100 nm)

⇒ trigger energy threshold improved  
[arXiv:2003.12740 \[physics.ins-det\]](https://arxiv.org/abs/2003.12740)

## Scanning speed



- ・データ取得+画像処理の効率化 ⇒ 10倍速度
- ・収差改善による有効視野の拡大 ⇒ 2倍

~ 50 g/y/machine

In this year  
カメラ撮像スピード

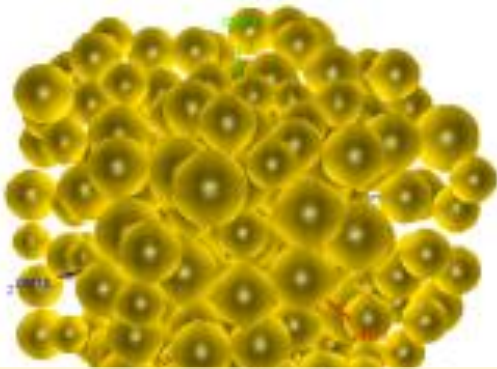
[300 fps ⇒ 906fps]

~ 100 g/y/machine

Detector performance

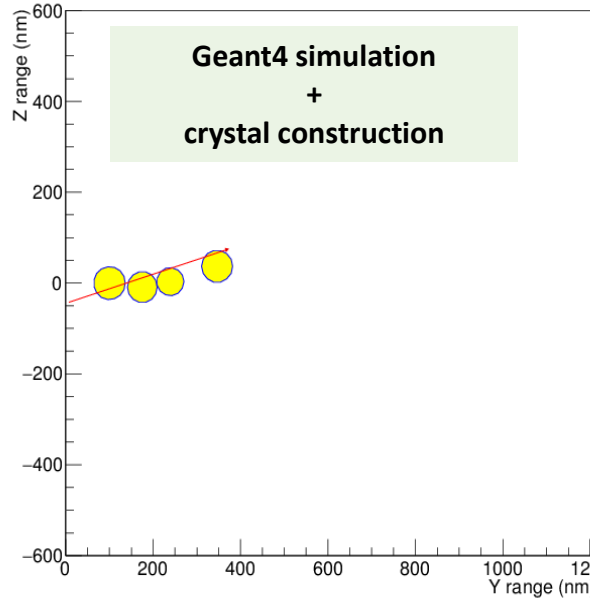
# NIT simulation demonstration

AgBr(I) Crystal structure (500 nm)<sup>3</sup>

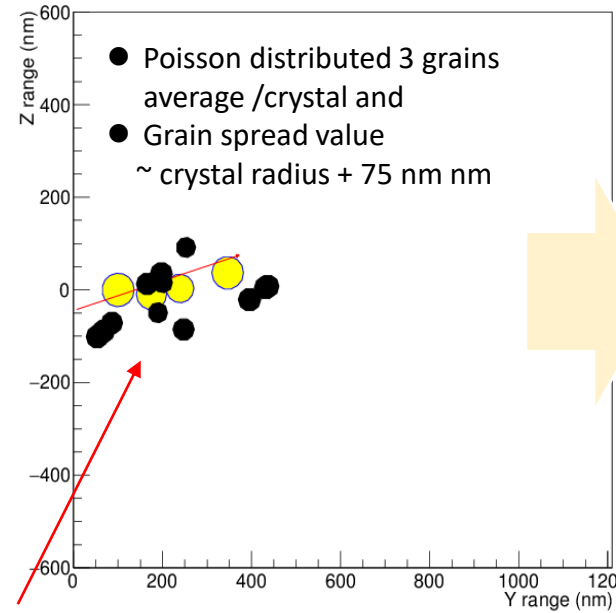


結晶サイズ分布および密度は、  
実際のデバイスの実測値を反映

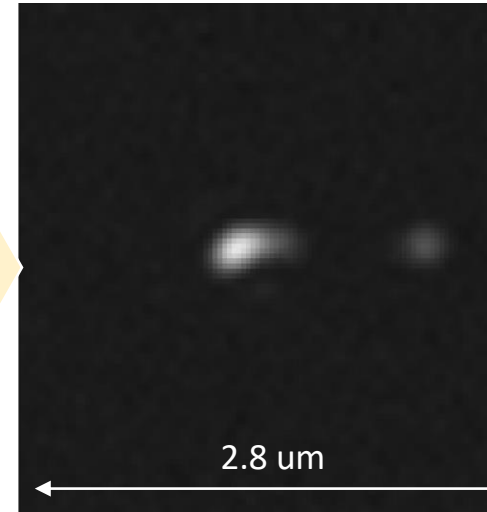
Track Projection of 3415 tag = 0



Track Projection of 3415 tag = 0

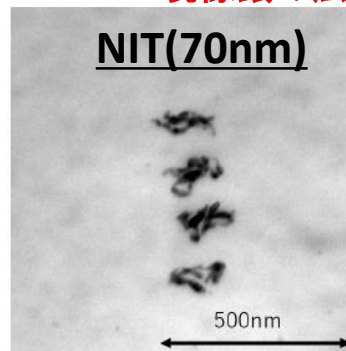


Simulation image

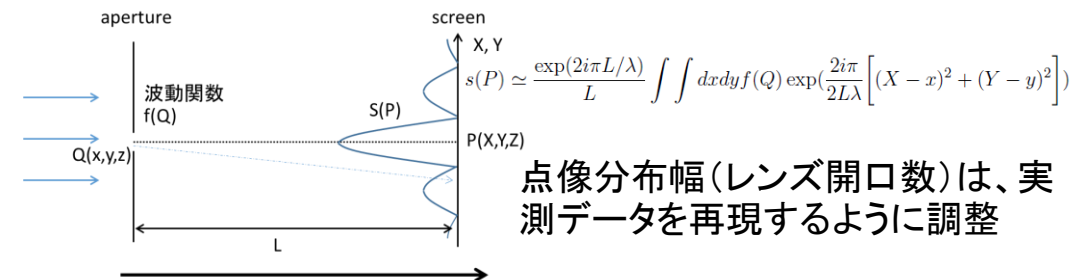


- Geant4ベースであらゆる粒子における飛跡光学像を再現
- シグナルの検出性能、バックグラウンドの除去性能を定量的に評価
- デバイス開発の定量的指針を与える

現像銀の広がり考慮



円形開口による点像分布関数 (対物レンズ系における回折像の再現)

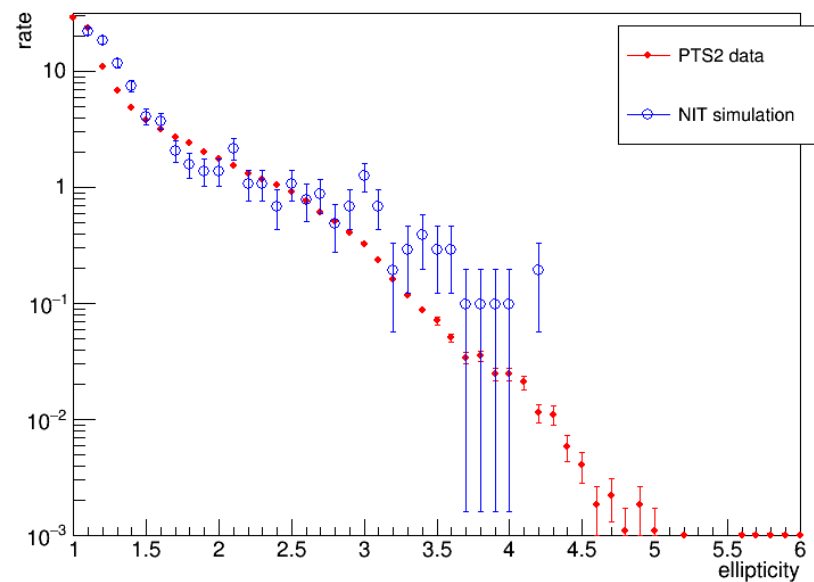


点像分布幅(レンズ開口数)は、  
実測データを再現するように調整

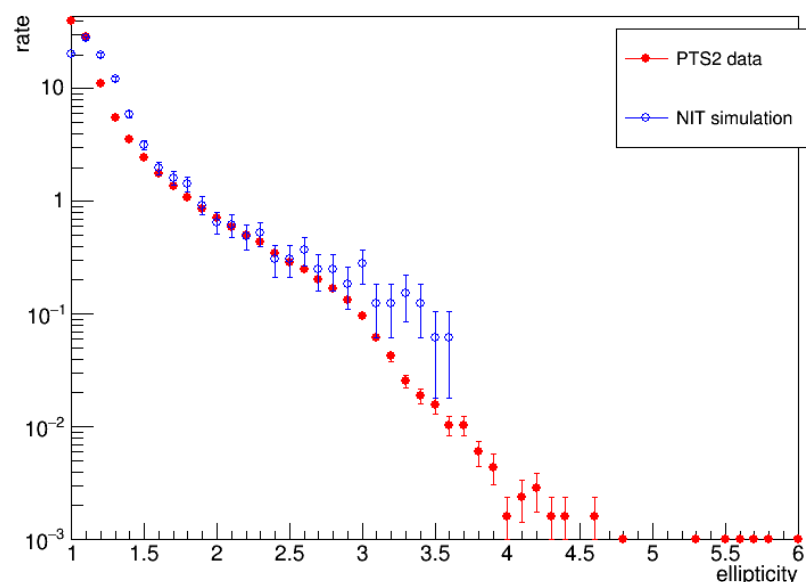


# Comparison of NIT simulation with low-velocity ion data

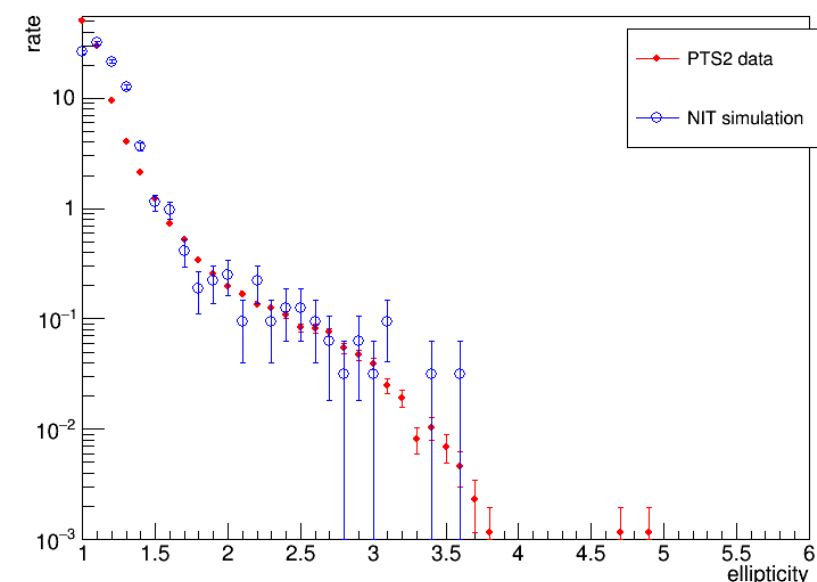
ellipticity distribution about Carbon 100 keV



ellipticity distribution about Carbon 60 keV



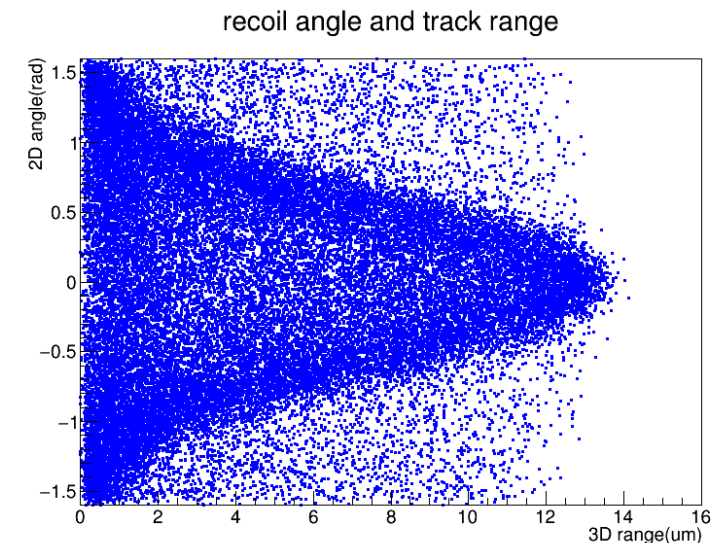
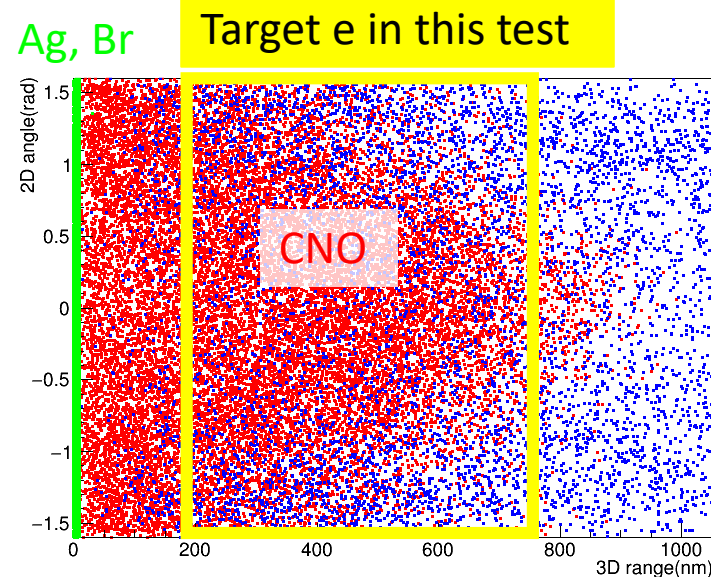
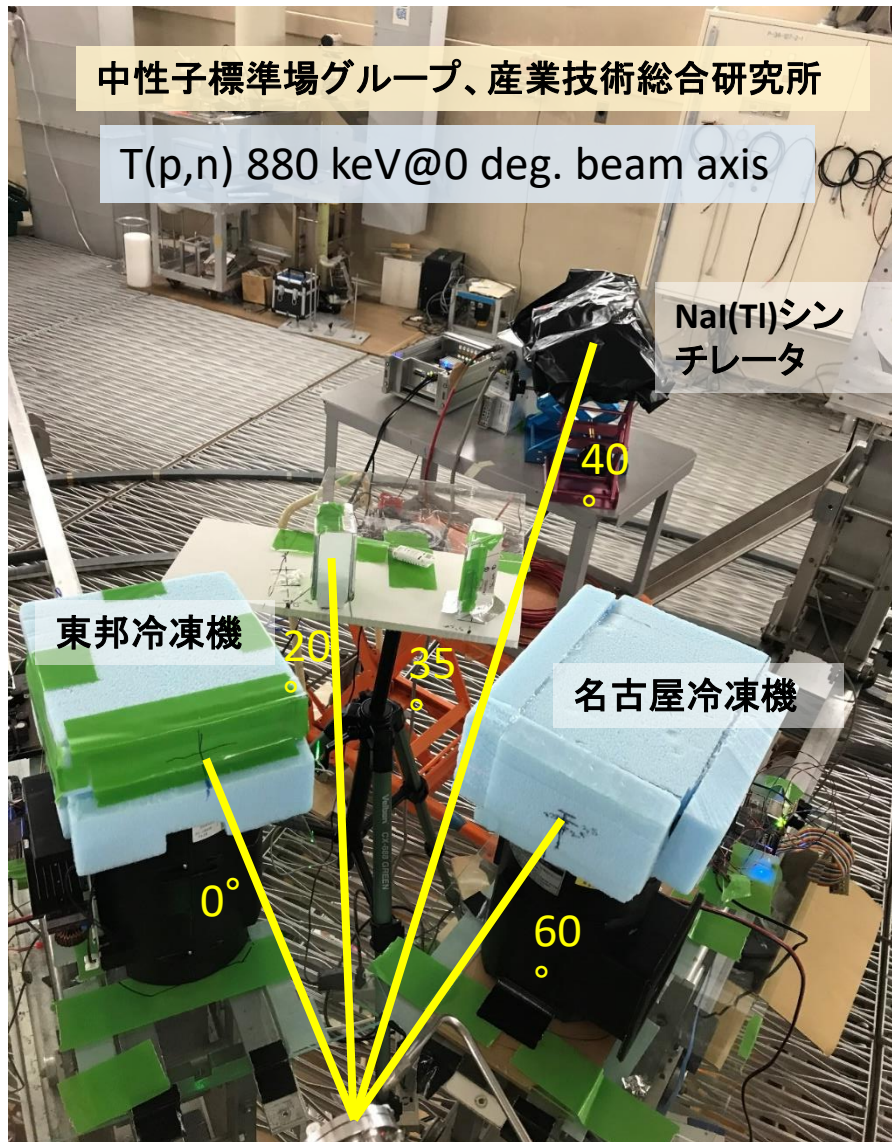
ellipticity distribution about Carbon 30 keV



楕円解析トリガーにおけるevent selectionでの楕円率スペクトラムはデータを再現  
⇒ AgBr(I)結晶感度が100 % consistentであることを支持  
⇒ イオン注入実験での直接測定結果と無矛盾

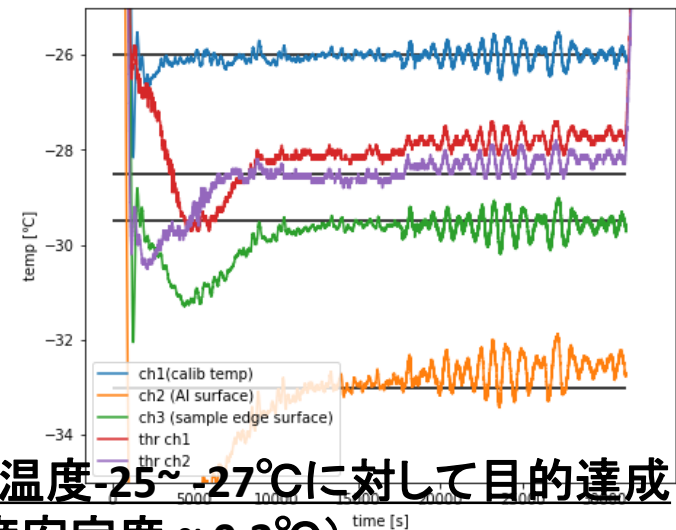
中性子実験、背景事象(特に、電子事象)、暗黒物質に適用

# Neutron experiment @中性子標準場グループ・産業技術総合研究所



Track length : 200 -800 nm  
Recoil energy @CNO : 50- 250 keV  
H: 10-200 keV

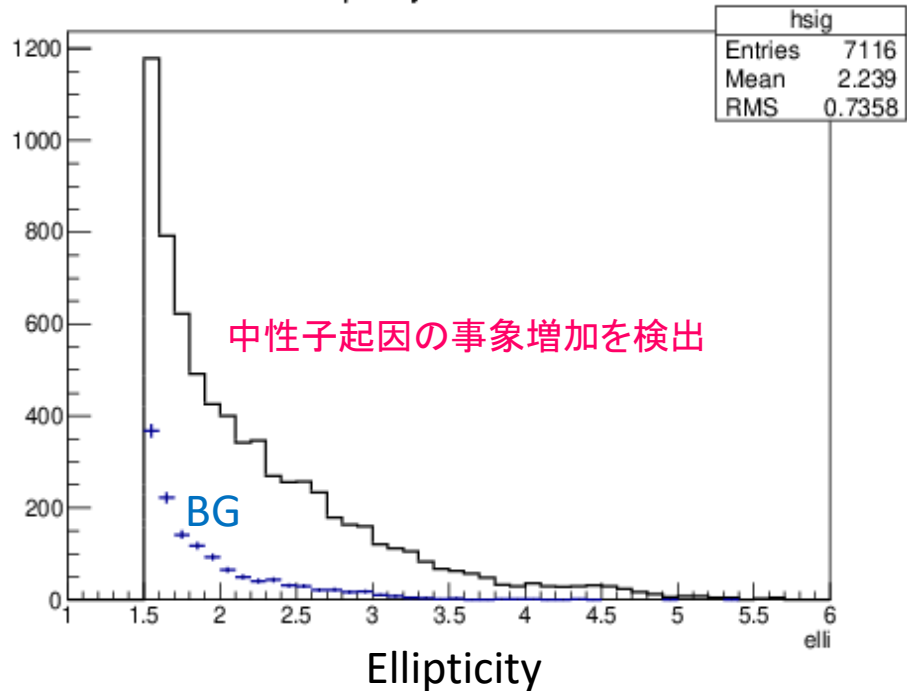
- 反跳原子核の測定
  - 解析+パフォーマンス較正法の確立
  - 低温環境下でオペレーション
- ⇒ LNGS実験環境と同等の条件



目標温度-25~-27°Cに対して目的達成  
(温度安定度 ~ 0.2°C)

# CNO recoil detection induced by Neutron of 880 keV

Ellipticity distribution as first selection trigger

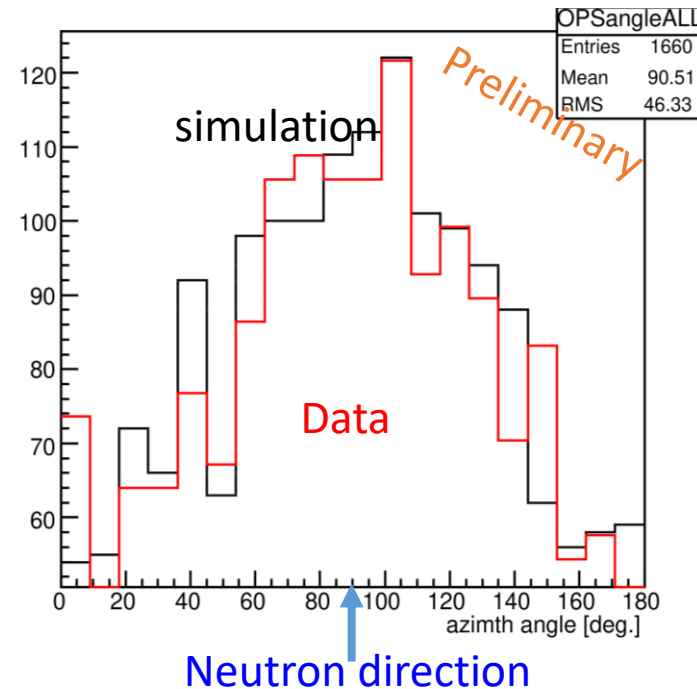


NIT device condition

Crystal size: 73.8 +/- 1.1 nm (サイズ分散 8.9 nm)

Density : 3.3 g/cm<sup>3</sup>

Comparison between data and simulation

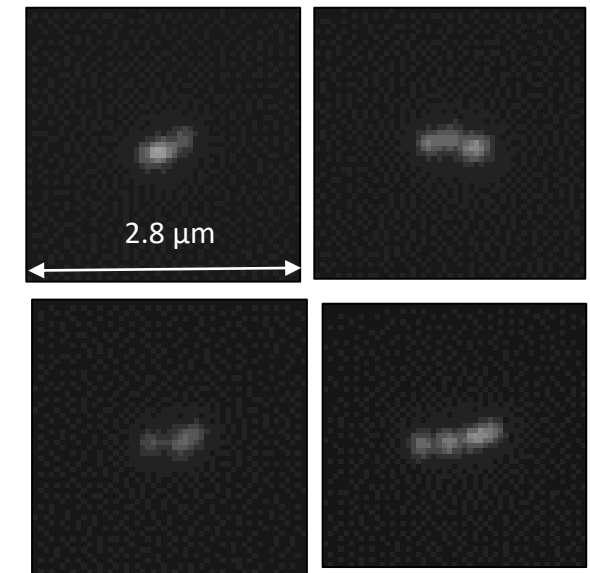


CNO recoil : 50 – 240 keV

H recoil : 10 – 200 keV

- Angular distribution has agreement with simulation
- Detection efficiency is under studying

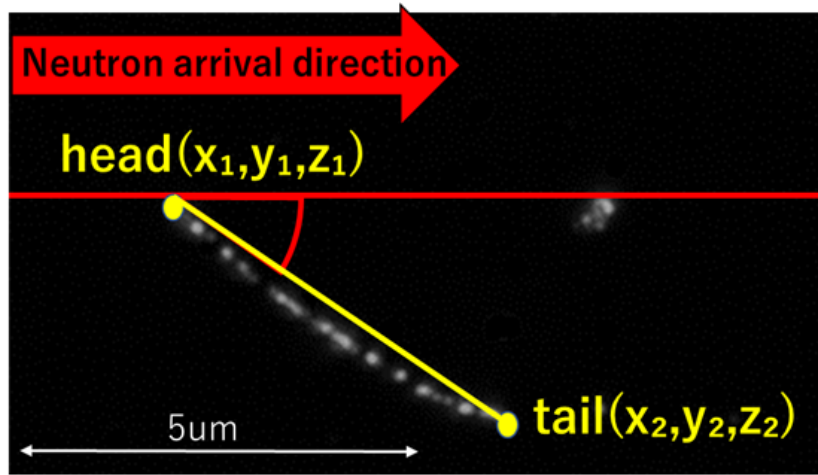
楕円解析でトリガーを書けた事象をさらにeye check



このカットで内部ダスト事象は現状、zero consistent

機械学習を用いた事象選別の効率化

# Sub-MeV neutron measurement as bi-product



測定から得られる情報

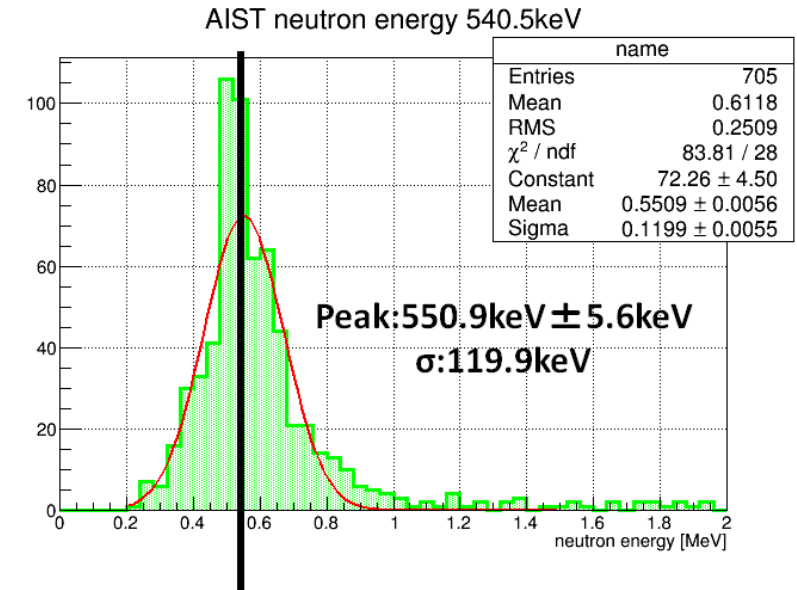
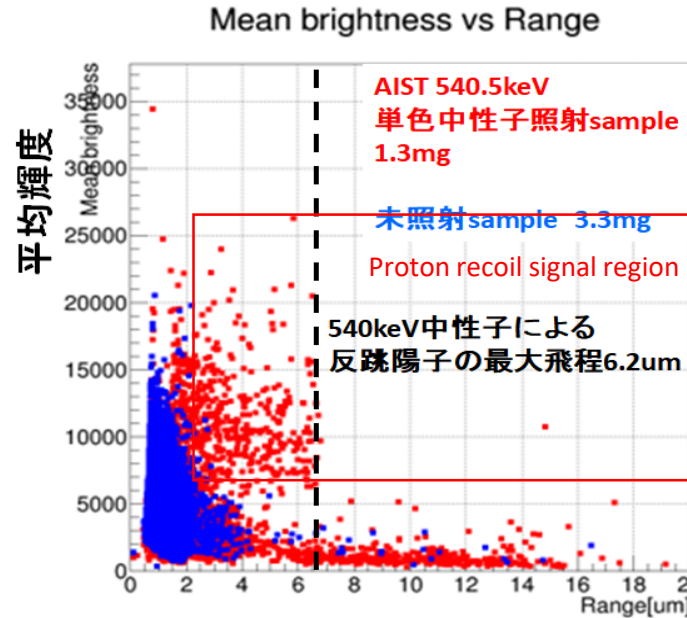
飛跡長[um]

検出器系における  
3次元角度

エネルギーへ変換

中性子到来方向を仮定

$$E_{neutron} = E_{proton} / \cos^2 \theta$$



AIST neutron beam energy  
 $540.5 \pm 12.7 \text{keV}$

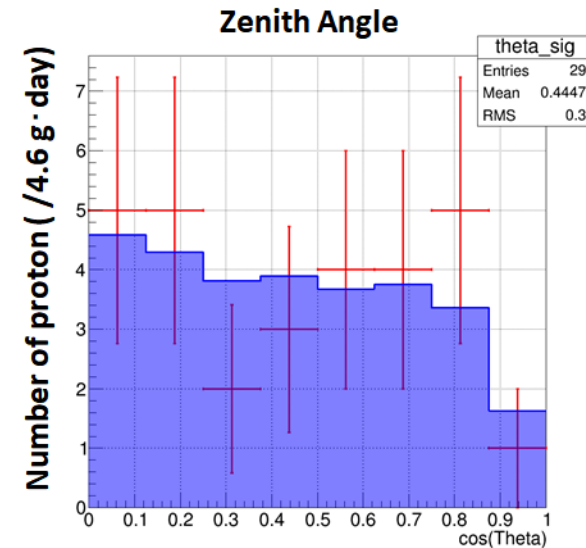
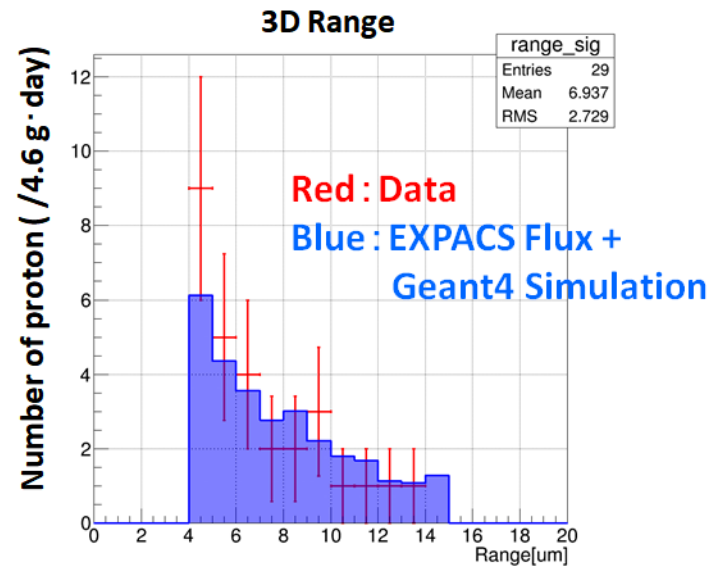
~  $\mu\text{m}$ のproton recoil trackの自動検出  
⇒ Sub-MeV帯の中性子フラックスと方向情報を取得



# 地上環境中性子測定デモンストレーション

目的: flux、スペクトル、角度分布の取得  
環境中性子に対する実証実験

LNGS地上→地下環境の約1000倍のflux



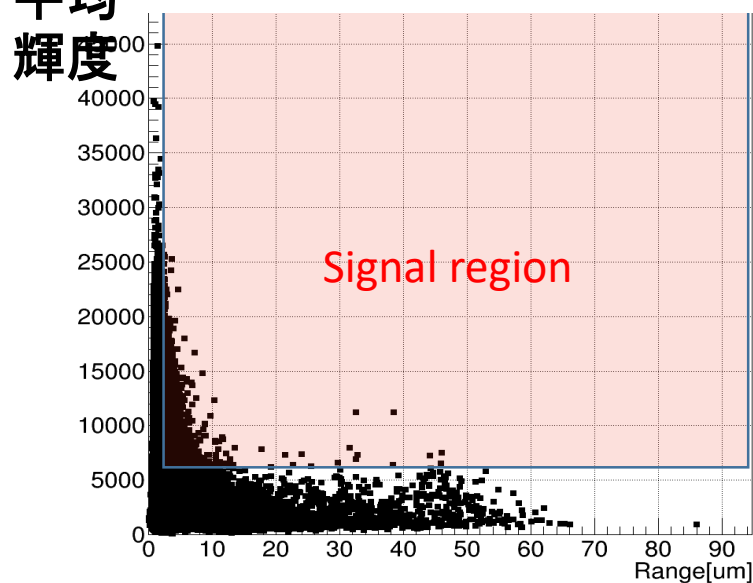
現状、最終的な事象選別において解析においてBGフリー  
 $\gamma(\beta)$ -ray: 結晶感度+トポロジカルな飛跡形状から除去  
 $\alpha$ -ray: 飛程(エネルギー)の上限設定で除去

Neutron flux @ LNGS surface lab

$(6.9 \pm 1.7) \times 10^{-3}$  [neutron/cm<sup>2</sup>/s]

@ 400keV~2.5MeV

平均輝度 Effective exposure : 4.5 g·day



# Background study

## □ 地上でのバックグラウンドランデータ解析を進行中

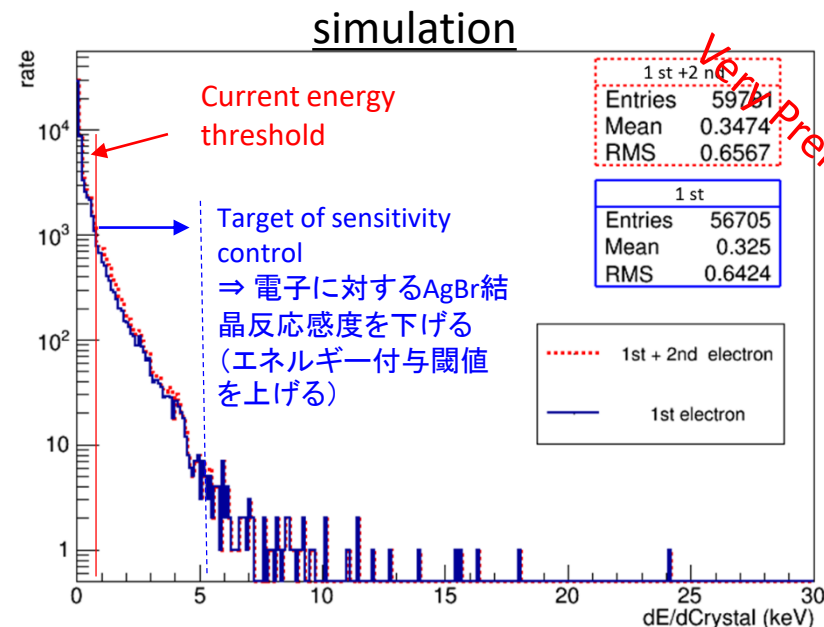
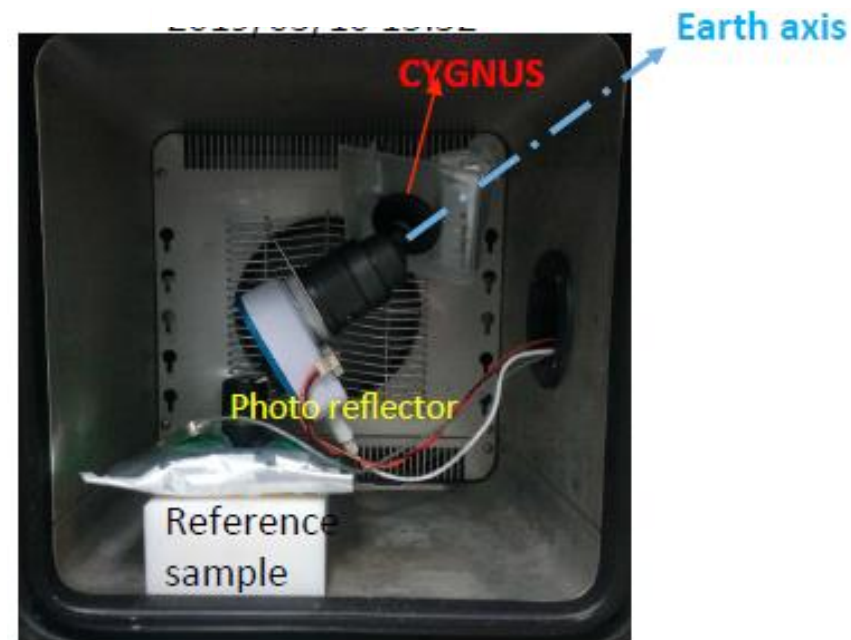
- 電子事象の理解
- 小スケール赤道儀試験

⇒ 事象選別をより高度化することで、これまで問題となっていた内部のコンタミしたダストは識別可能であることがわかってきた。(画像解析の効率化が必須)

## □ 電子事象の除去

- 結晶感度の最適化(より低感度化)
- 低温デバイスによる電子事象に対する低感度化
- 光学情報+飛跡トポロジー

\* 反跳原子核感度: イオン注入、中性子実験から現状100%と無矛盾 ⇒ 現状のAgBr(I)感度は高すぎる状態

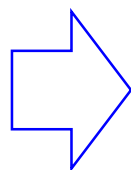


電子事象における一結晶あたりのエネルギー付与

# Conclusion

## □ LNGSのデバイス製造＋処理ファシリティの建設を進行中

- デバイス製造の運用⇒ 性能確認進行中
- セキュリティの強化で追加工事を実施
- コロナウィルスの影響で活動で現在は停止中



再開し次第、引き続きデバイス製造環境(評価体制含め)の構築を進める。  
→ > 10 g scaleの実験開始(DM実験におけるBackground study + sub-MeV中性子の測定)

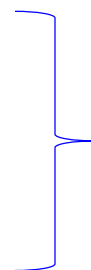
## □ NITのAgB(I)結晶の構造＋光学像を考慮したシミュレータの構築を進めている。

- 結晶感度100%状態での低速イオンの光学像の作成(データと概ね一致)
- バックグラウンドの影響、最適感度のデザイン設計



## □ 産業技術総合研究での単色中性子実験の実施

- CNO反跳原子核(50-250 keV)の飛跡検出を実証
- 詳細な性能評価を進めている。



- より精度を上げたDark Matter探索感度＋Background推定へ
- Background run解析
- 今後の定量的な最適デバイス感度設計

## □ sub-MeVの環境中性子測定を実施



LNGSでのDark matter探索実験と並行して、中性子フラックス＋方向測定の実施へ