

グランサツソ地下研究所での 超微粒子原子核乾板を用いた 環境中性子スペクトル測定とその応用

白石 卓也, 林 大晟 （神奈川大学）

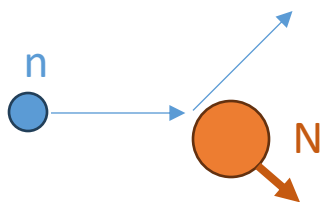
環境中性子測定のための目的

R. Bernabei et al., *Nucl. Phys. At. Energy* **19**, 307 (2018)

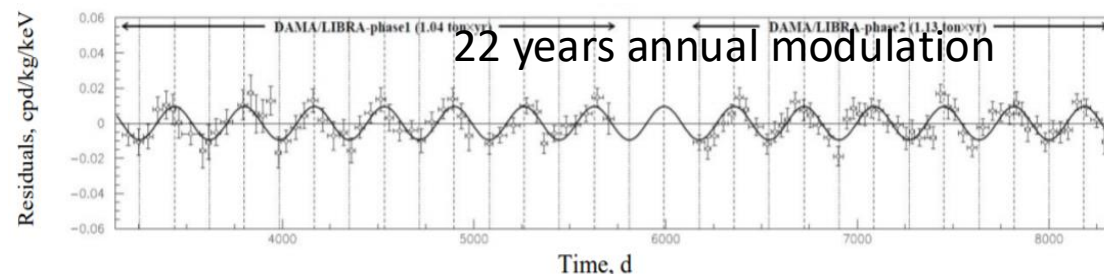
➤ バックグラウンド研究として

1. 中性子による原子核弾性散乱

→ 暗黒物質(WIMP)直接探索でのバックグラウンド



DAMA実験の主張する信号: 2 – 6 keVee



→ Na反跳と仮定すると、中性子エネルギーは 80 – 250 keV

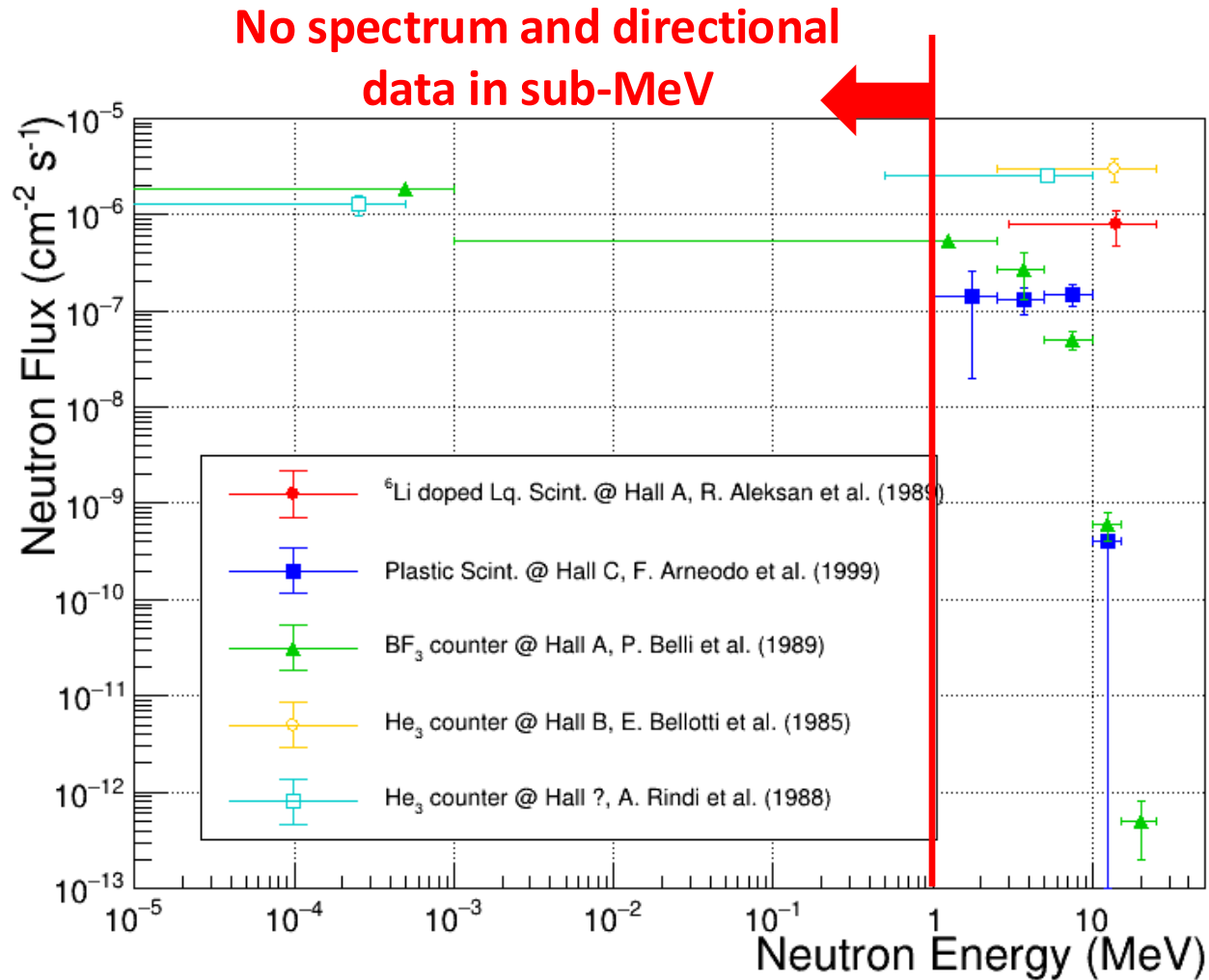
2. 熱中性子捕獲後の γ , p , α (e.g. $^A\text{N} + n \rightarrow ^{A+1}\text{N} + \gamma$)

→ 暗黒物質探索や $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索でのバックグラウンド

バックグラウンド研究として、広い範囲(特にsub-MeV)の中性子スペクトル測定が必要

➤ 低質量のBoosted Dark Matterの探索

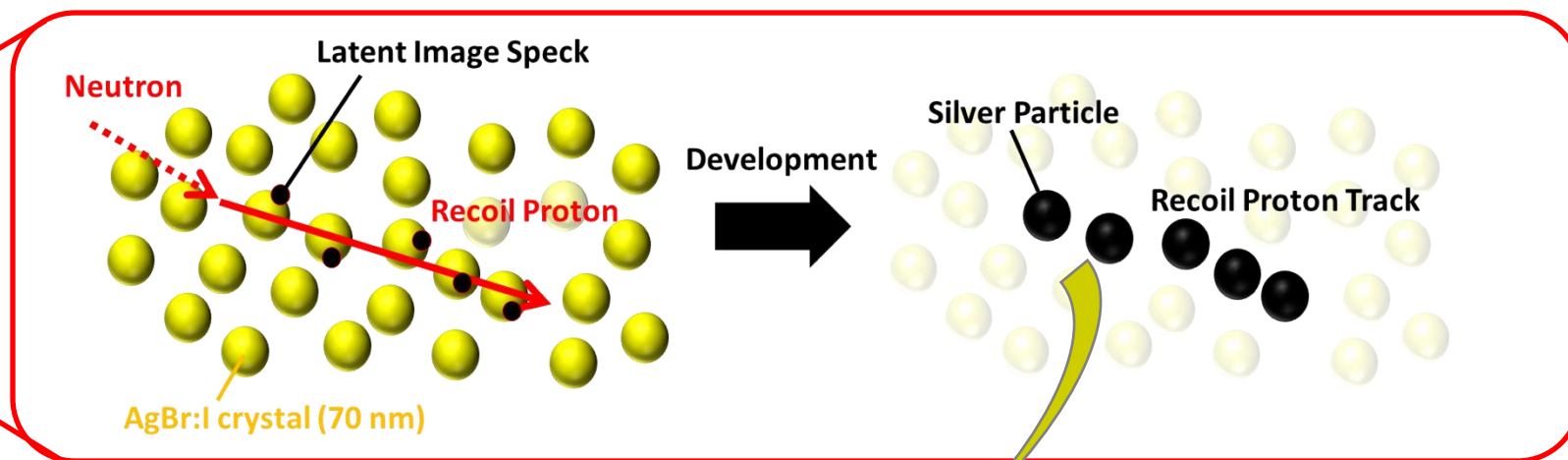
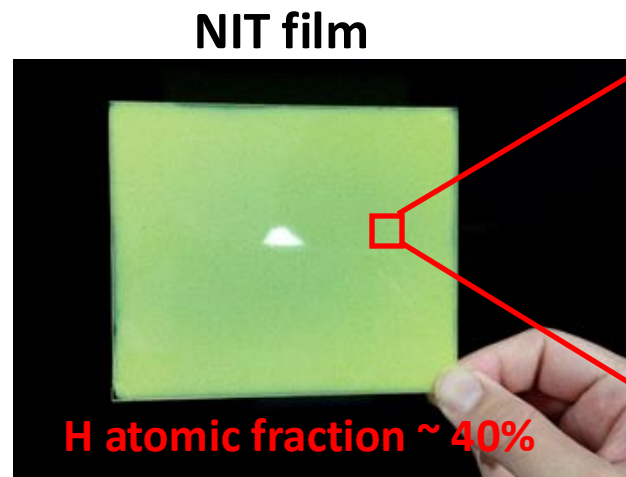
グランサツソ研究所での地下中性子測定



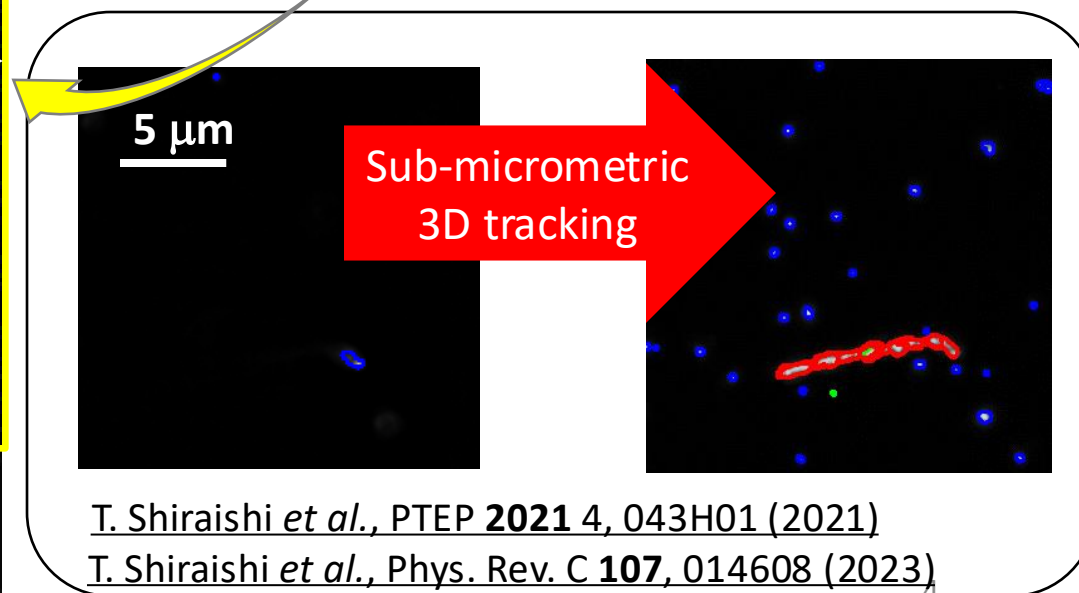
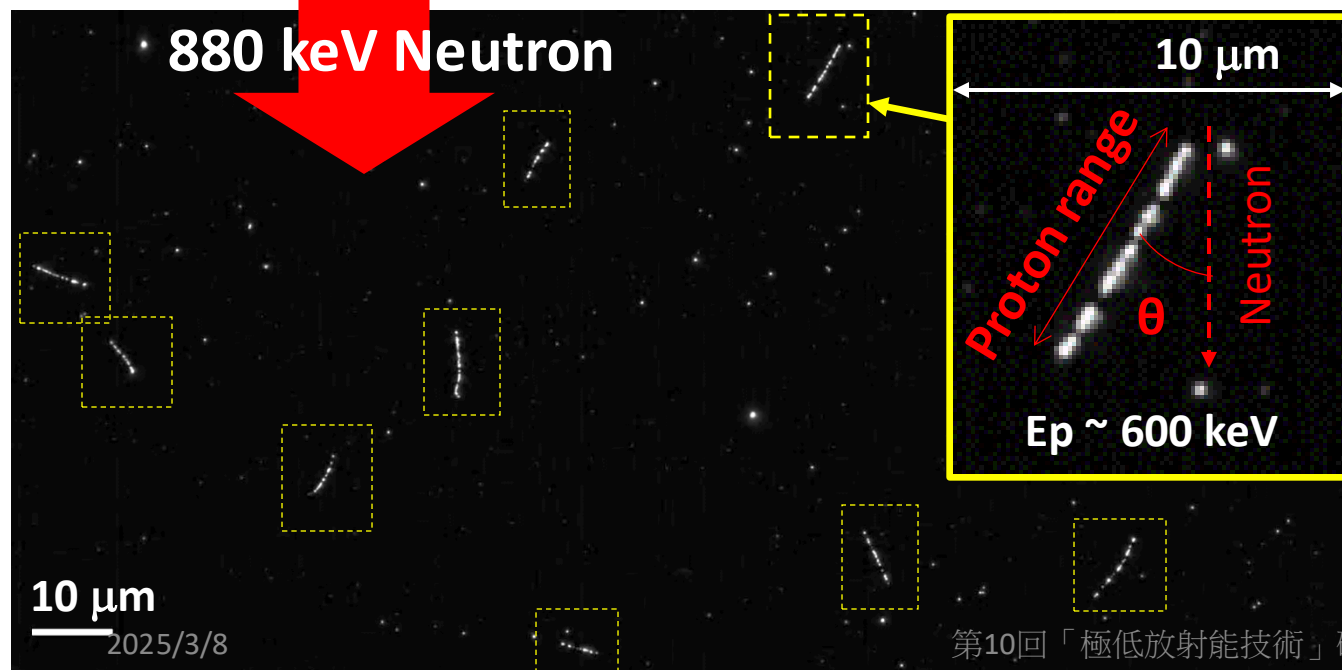
H. Wulandari et al., Astropart. Phys. **22** (2004) 313.

- ほとんどが減衰材＋熱中性子捕獲を使っている
→ 検出器自体のエネルギー分解能がない
→ 減衰材による不定性
- 角度分布は不明
- 測定ごとに中性子フラックスが異なる
→ 場所や、雨季/乾季の岩石中の水分量の変化が影響？

Neutron Detection Principle by Nano Imaging Tracker (NIT)



Optical Microscope Image

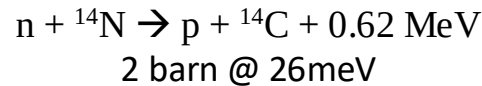
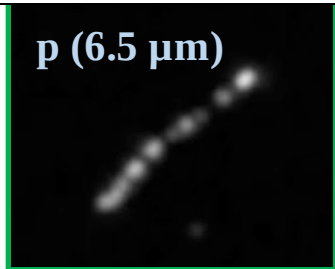


Neutron Detection Methods for Wide Energy Range

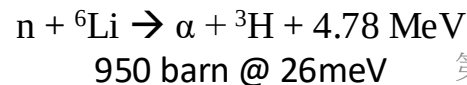
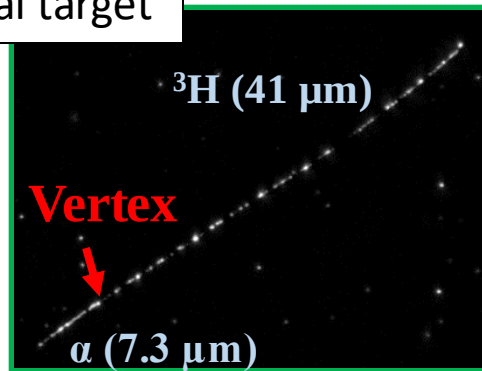
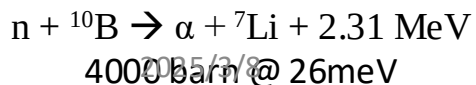
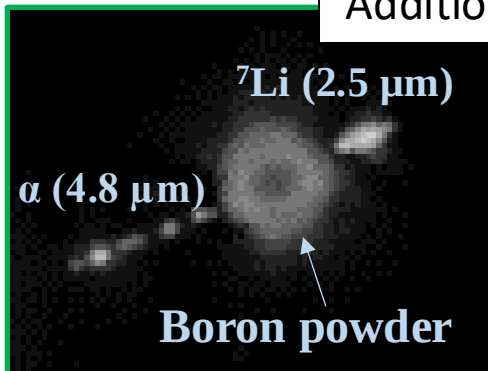
meV (thermal neutron) 100 keV ($\sim 1 \mu\text{m}$) Sub-GeV – **Neutron Energy**

Neutron Capture

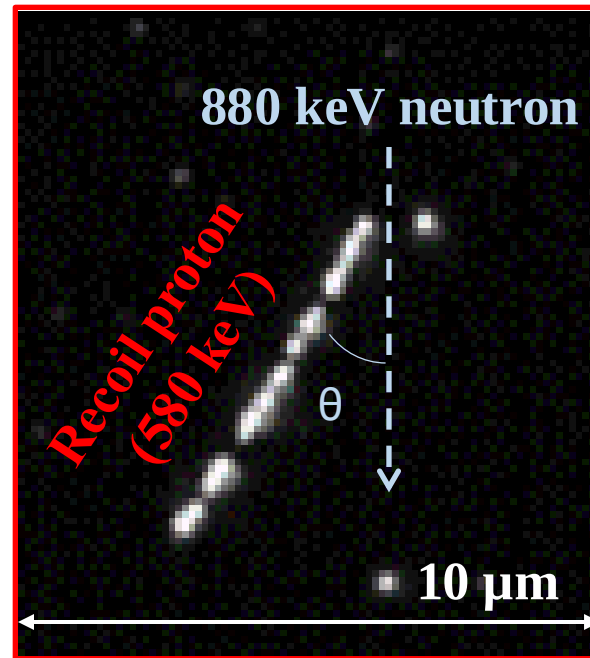
Self-contained target



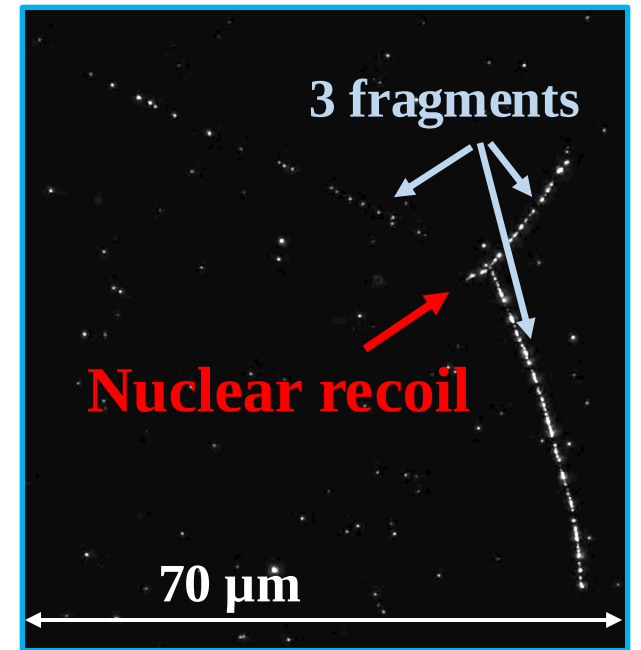
Additional target



Proton Elastic Scattering



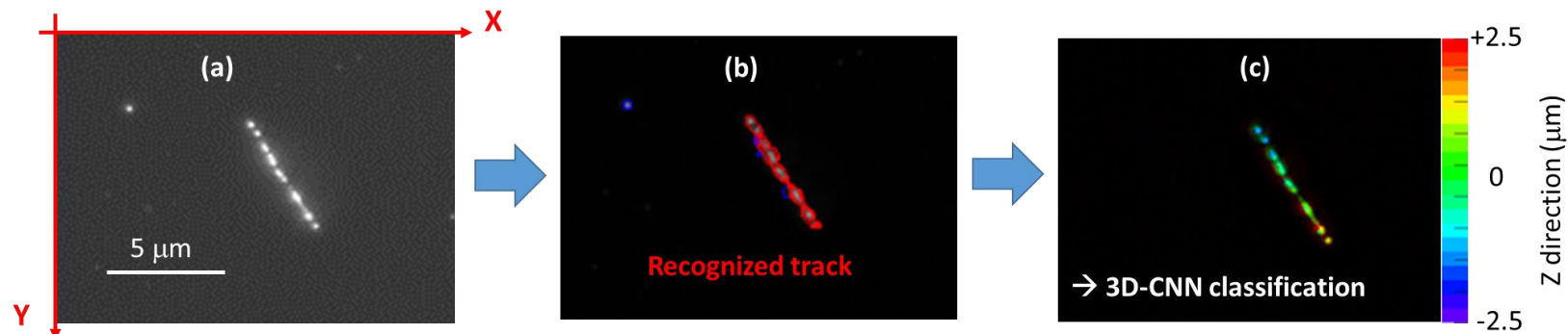
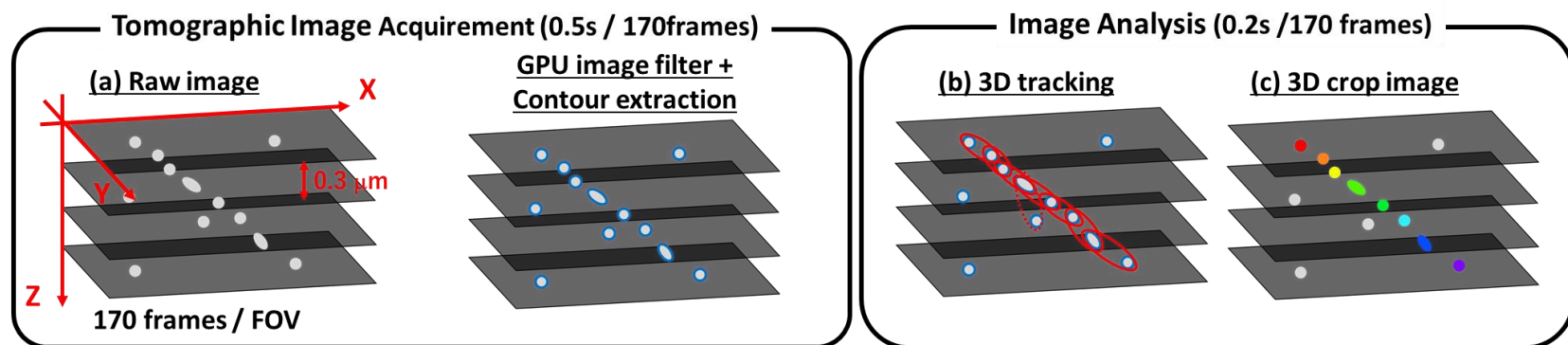
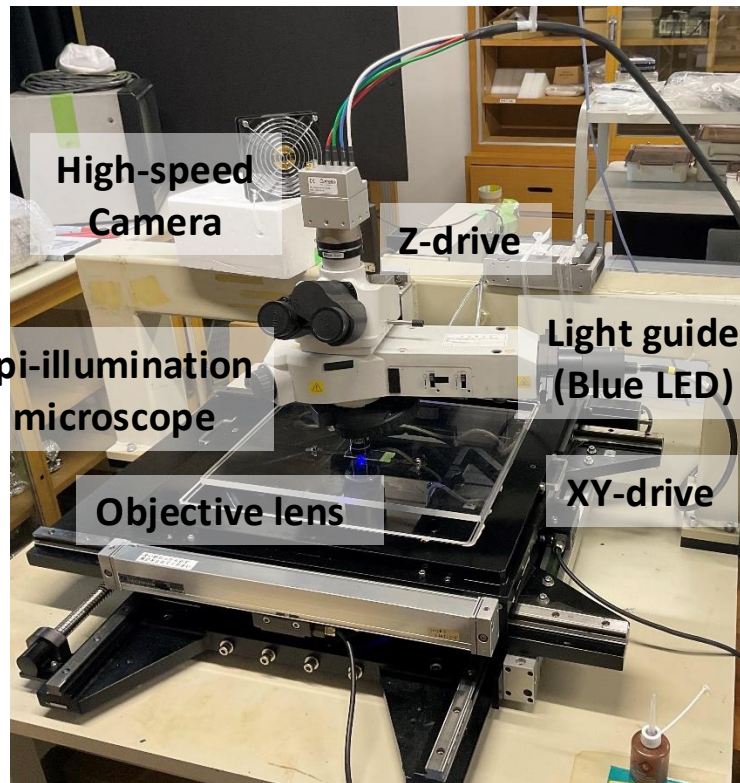
Deep Inelastic Scattering



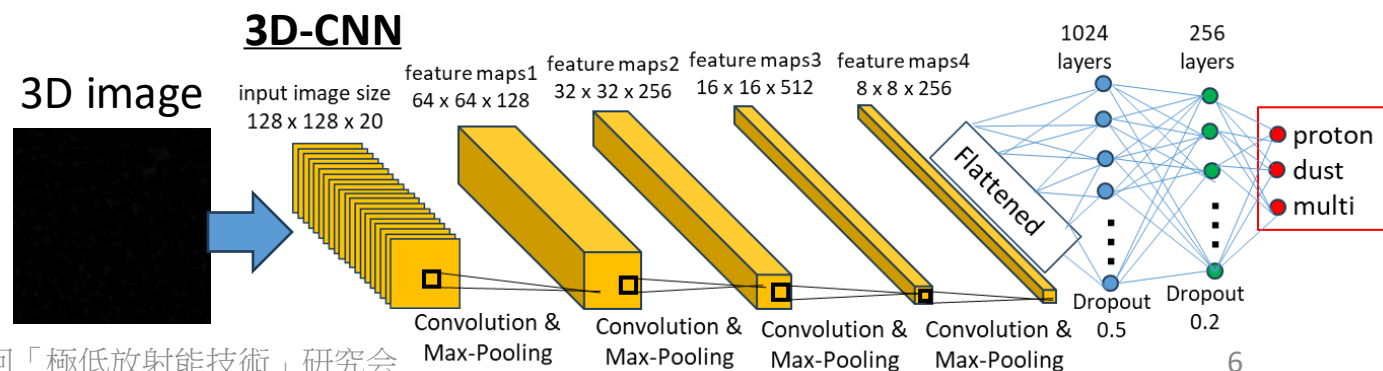
反跳エネルギーと方向による運動学的な分析が可能

マイクロスケール飛跡の高解像・高速3次元トラッキング

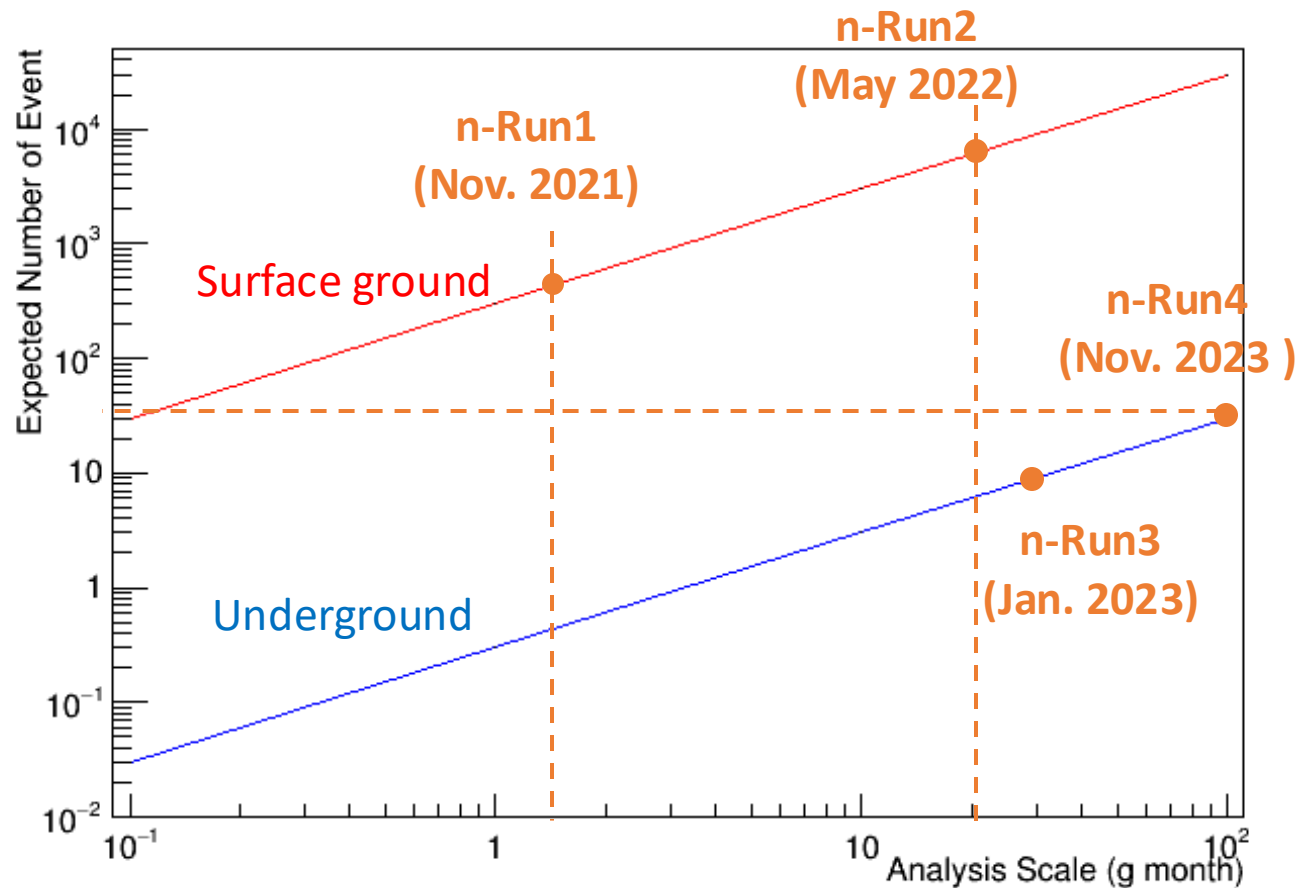
神奈川大学で開発中のステージ



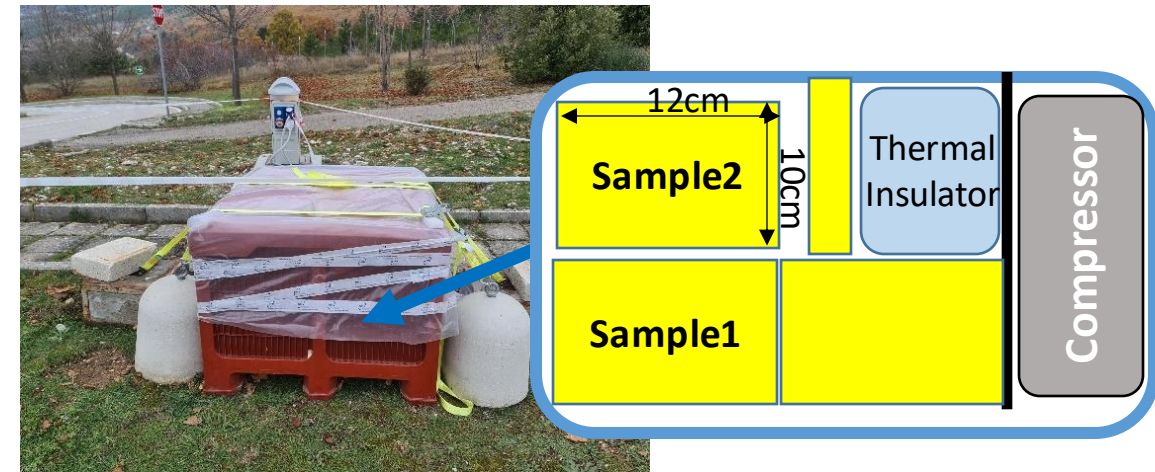
検出閾値 $1 \mu\text{m}$ (proton 100 keV相当)で
1台あたり 1.1 kg/yearの解析速度を達成



Environmental Neutron Measurement by NIT @ LNGS

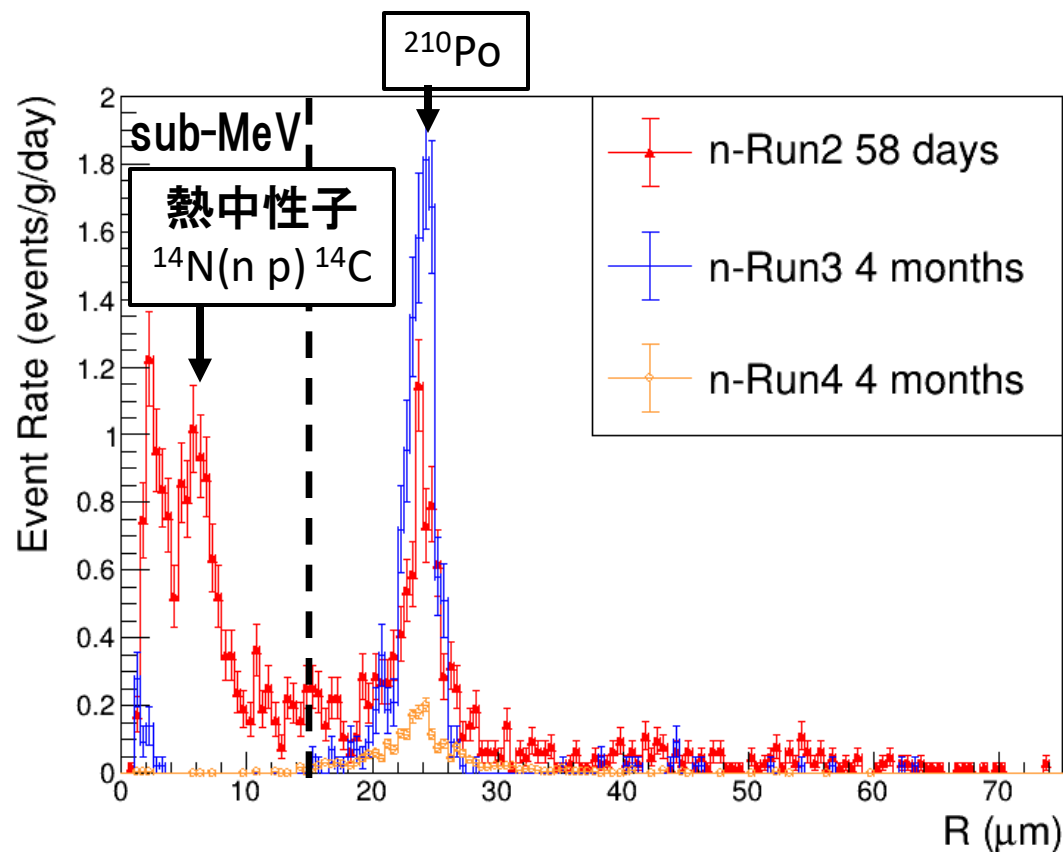


n-Run1 @ LNGS surface ground lab.



✓ **Without shielding!**
because of no sensitivity to muon and gamma

環境中性子測定

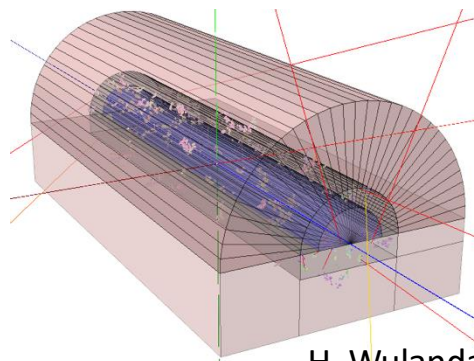


- ✓ Sub-MeV帯信号は地下Runで急激に減る
- ✓ 今のところsub-MeV帯＋熱中性子領域は予測と無矛盾

□ MeV領域はさらにラドン除去が必要

2025/3/8

MC Simulation using NeuCBOT, PHITS, and GEANT4

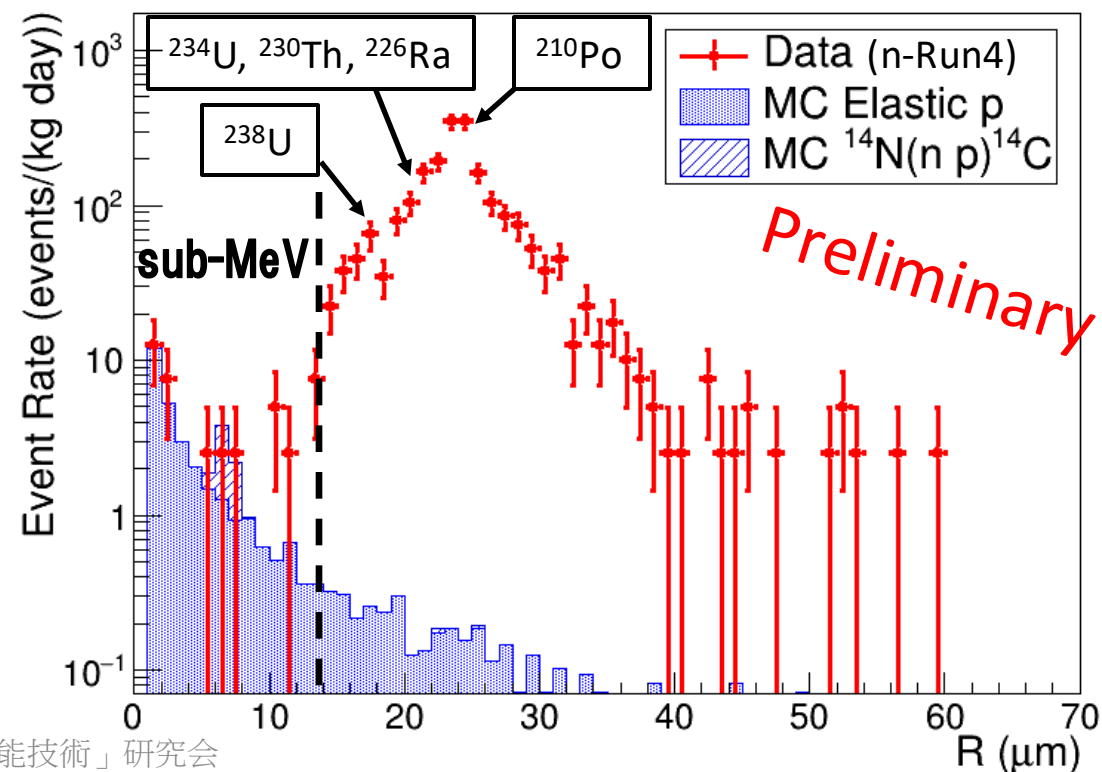


岩石中のU, Th系列の(αn)
反応と自発核分裂を考慮

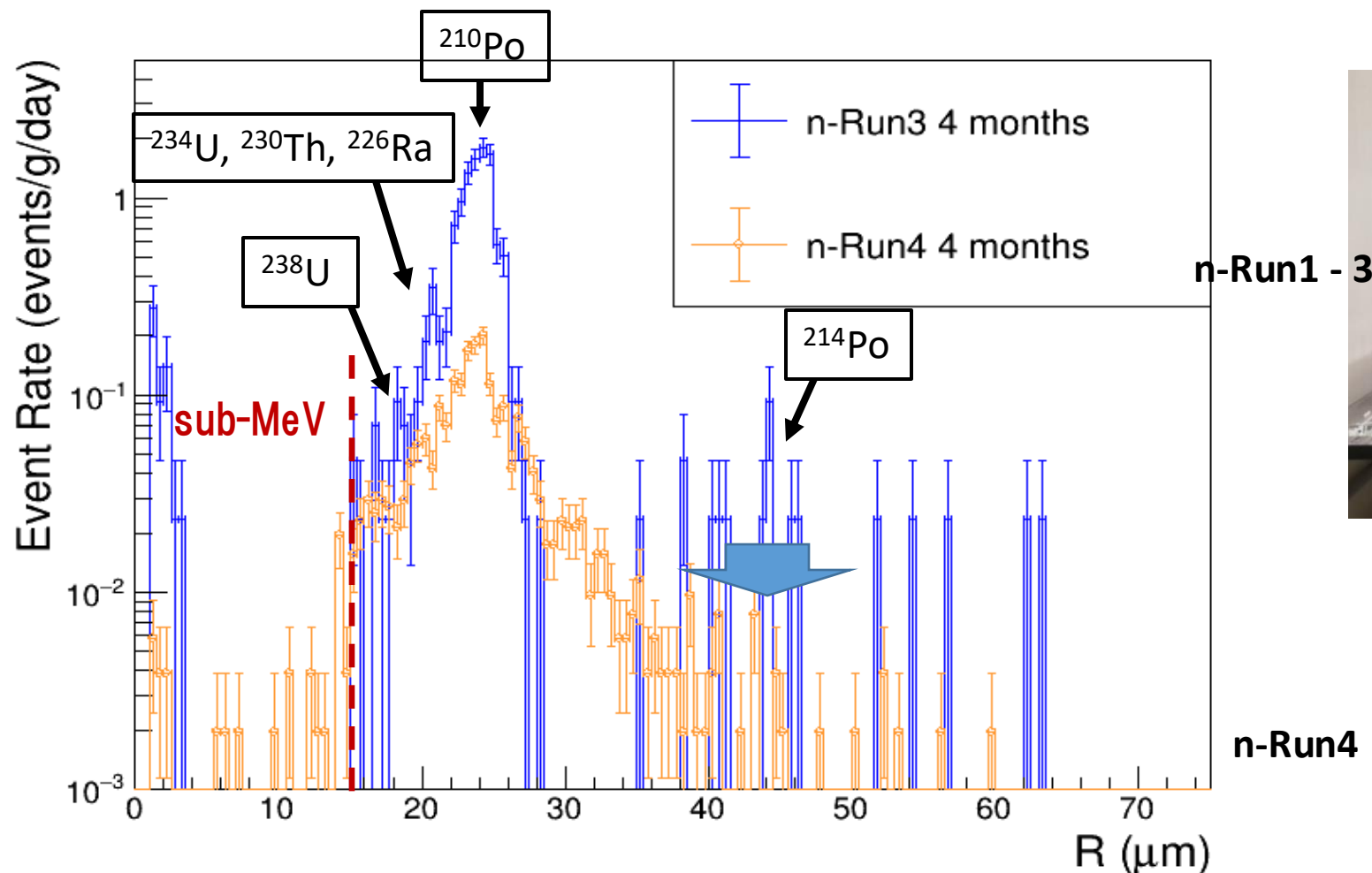
※トンネルコンクリート中の
水分を8%と仮定

H. Wulandari et al., Astropart. Phys., 22, 313-322 (2004)

n-Run4 0.52 kg*day分の解析結果



エネルギー分解能が悪化？



^{210}Po の量は減ったが、前回(n-Run3)よりもエネルギーが広がっている
→低湿度のCR1での急激な乾燥によるサンプルダメージか？

NEWSdm facility (@ Hall-F)



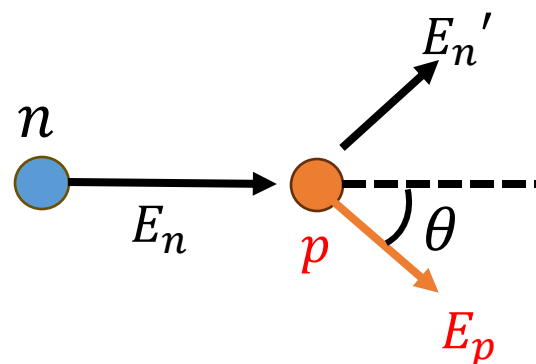
Radon free room (CR1 @ Hall-C)



→ さらにラドンを減らしつつ、加湿できる環境を検討中

中性子エネルギー再構成手法の確立

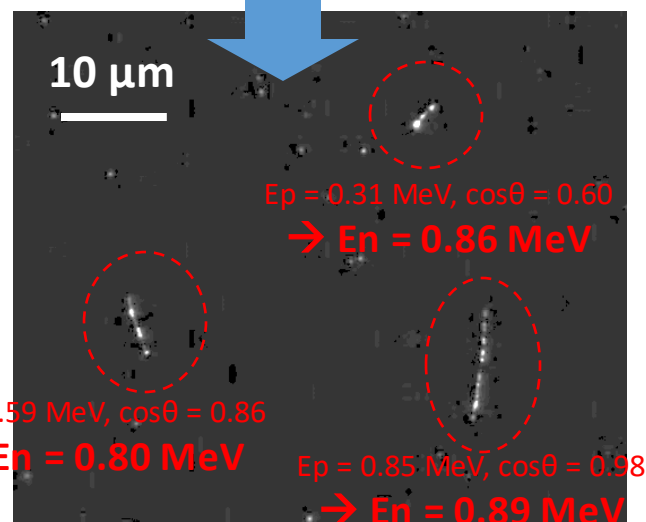
中性子到来方向が既知の場合



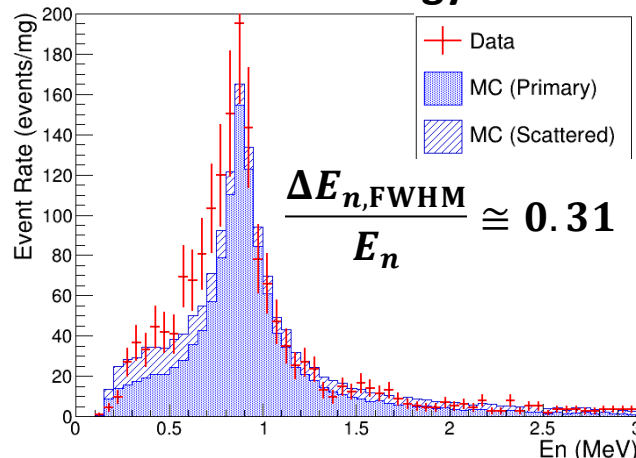
$$E_n \simeq \frac{E_p}{\cos^2 \theta}$$

✓ 反跳陽子1本1本ごとに運動学的に中性子エネルギーを決定できる

0.88 MeV neutron



Neutron Energy



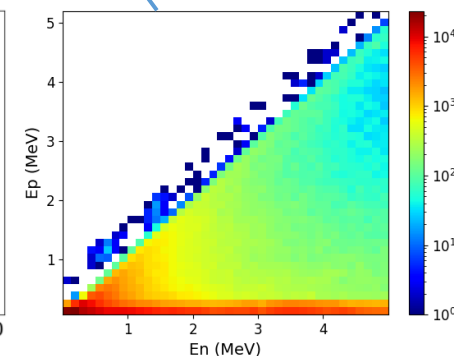
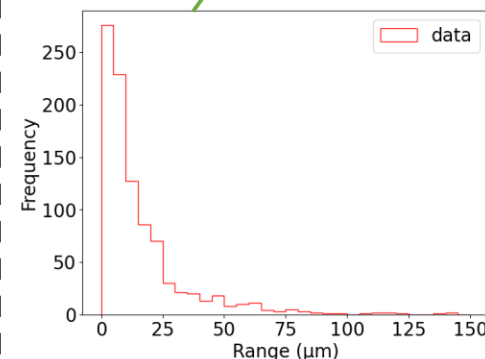
中性子到来方向が未知の場合

観測される E_p 分布から ベイズ推定に基づいた Unfolding法で E_n 分布を推定

➤ ^{252}Cf 自発核分裂からの中性子を使用

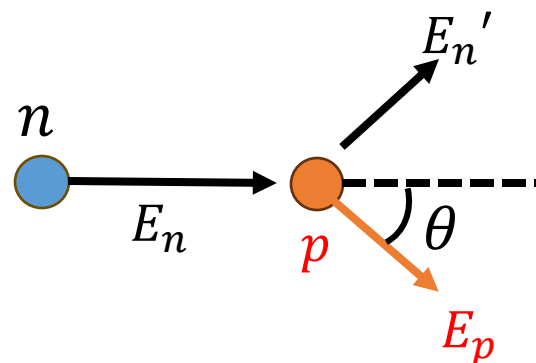
観測データ 応答関数 元のエネルギー分布

$$g(E_p) = \int R(E_p|E_n) \cdot f(E_n) dE_n$$



中性子エネルギー再構成手法の確立

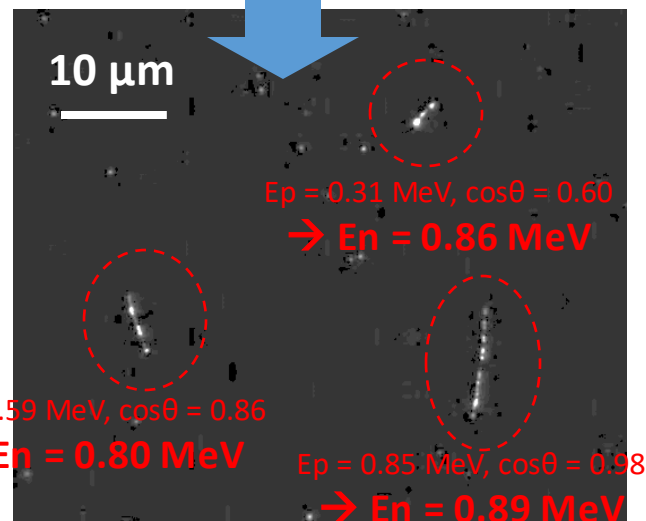
中性子到来方向が既知の場合



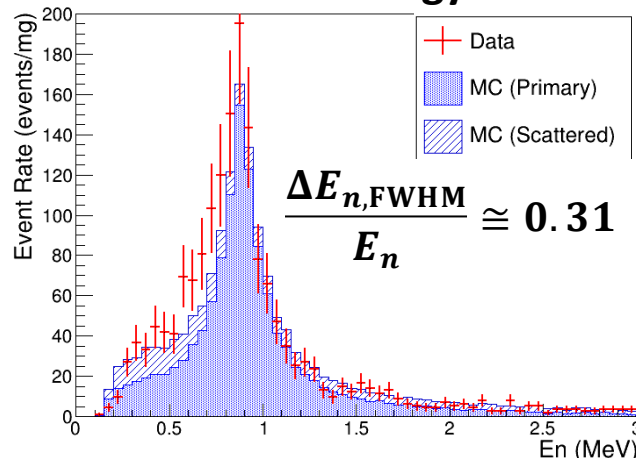
$$E_n \simeq \frac{E_p}{\cos^2 \theta}$$

✓ 反跳陽子1本1本ごとに運動学的に中性子エネルギーを決定できる

0.88 MeV neutron



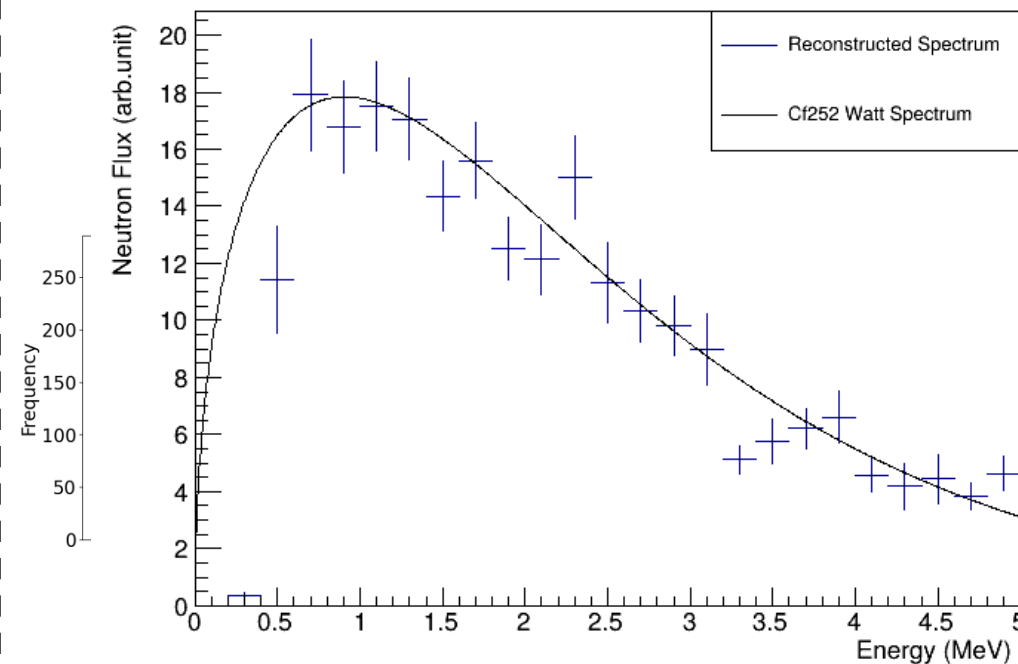
Neutron Energy



中性子到来方向が未知の場合

観測される E_p 分布から ベイズ推定に基づいた Unfolding法で E_n 分布を推定

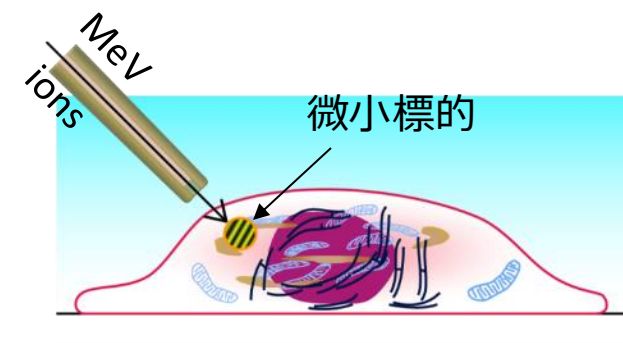
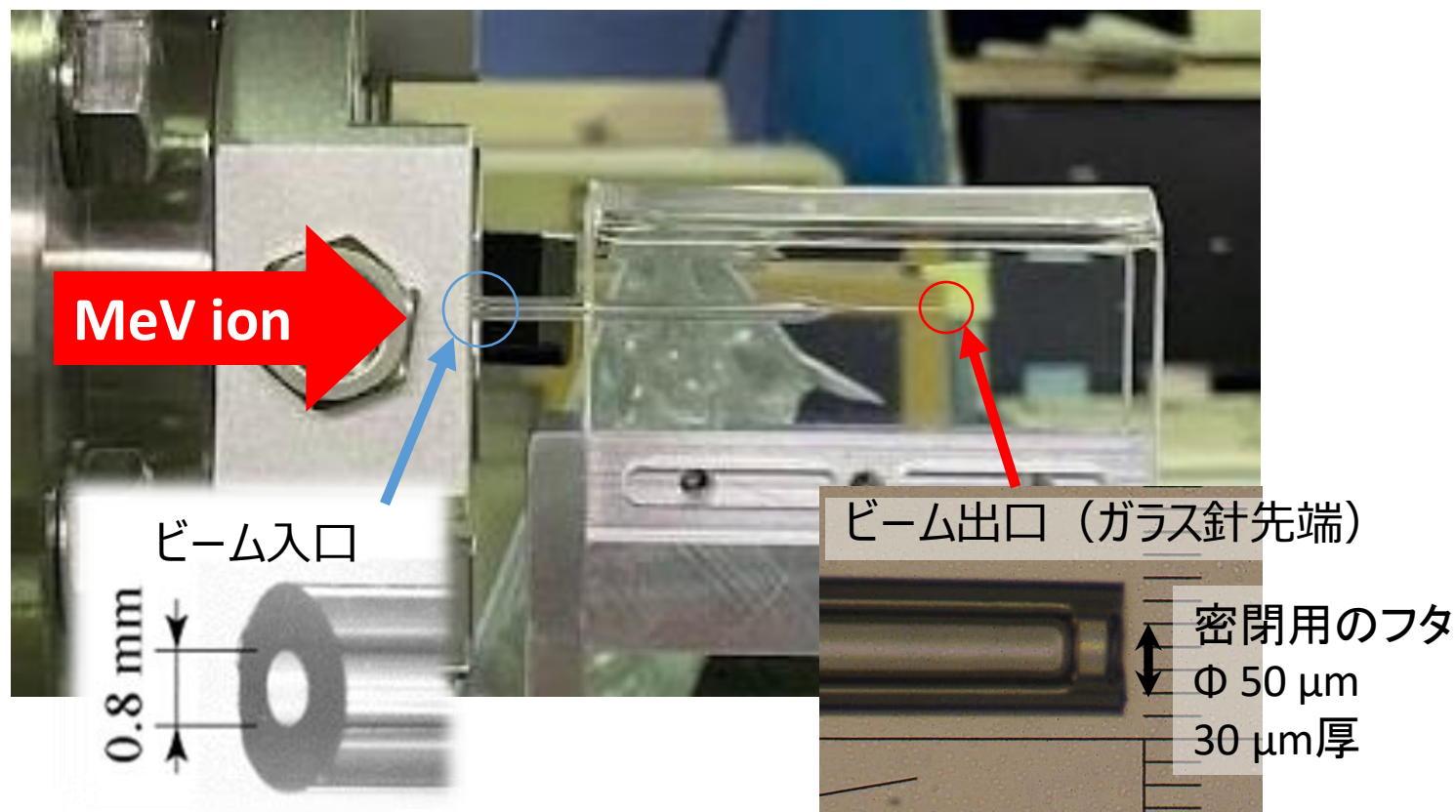
➤ ^{252}Cf 自発核分裂からの中性子を使用



大気取り出しMeVマイクロイオンビームの研究 (理化学研究所での共同研究)

ガラスキャピラリーによるマイクロイオンビームの生成

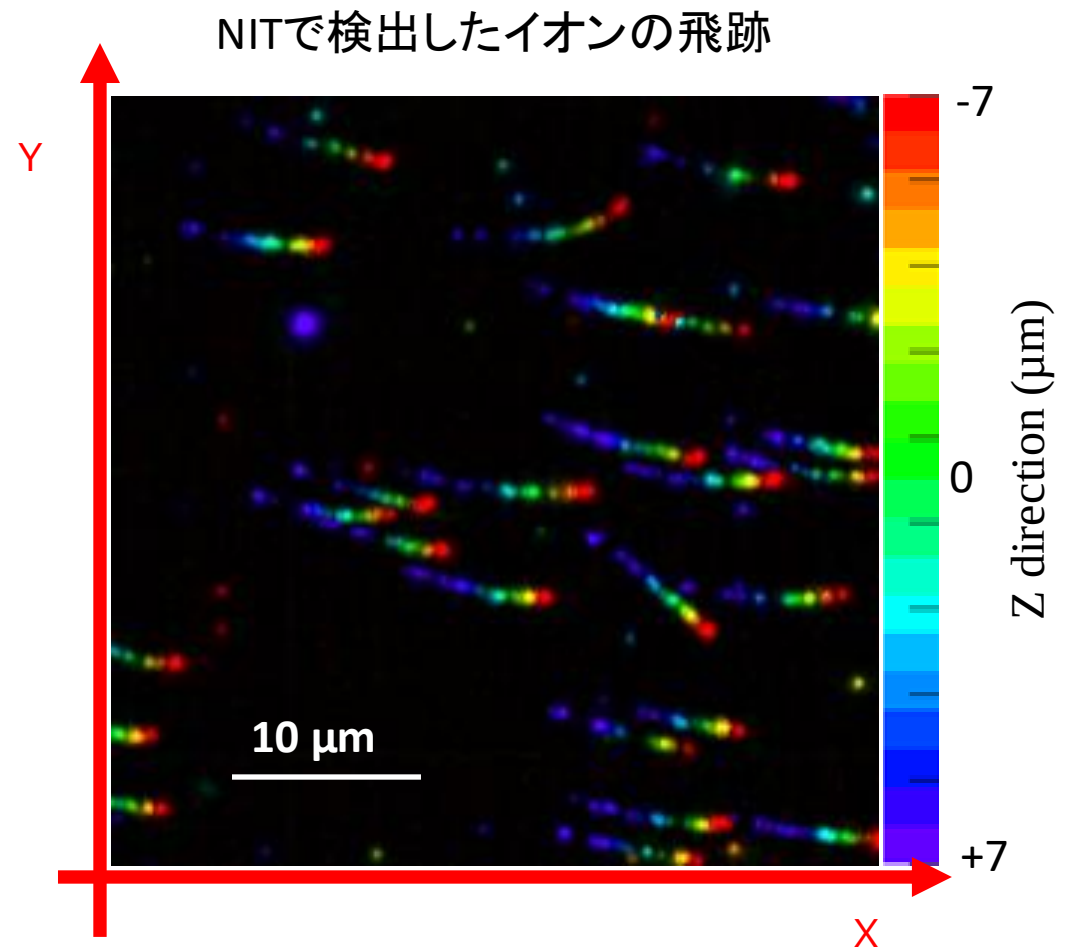
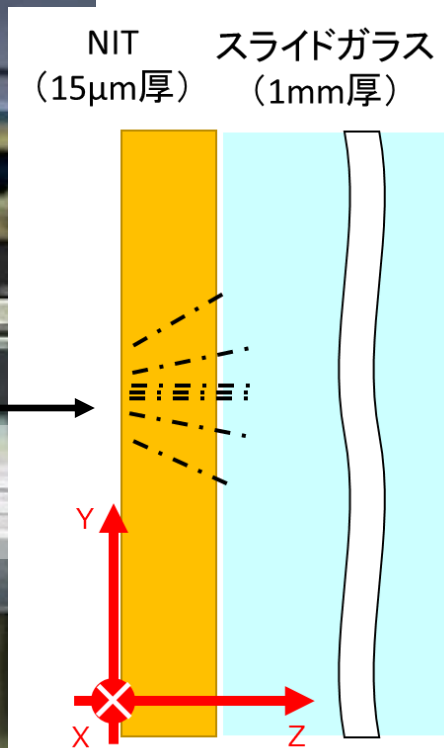
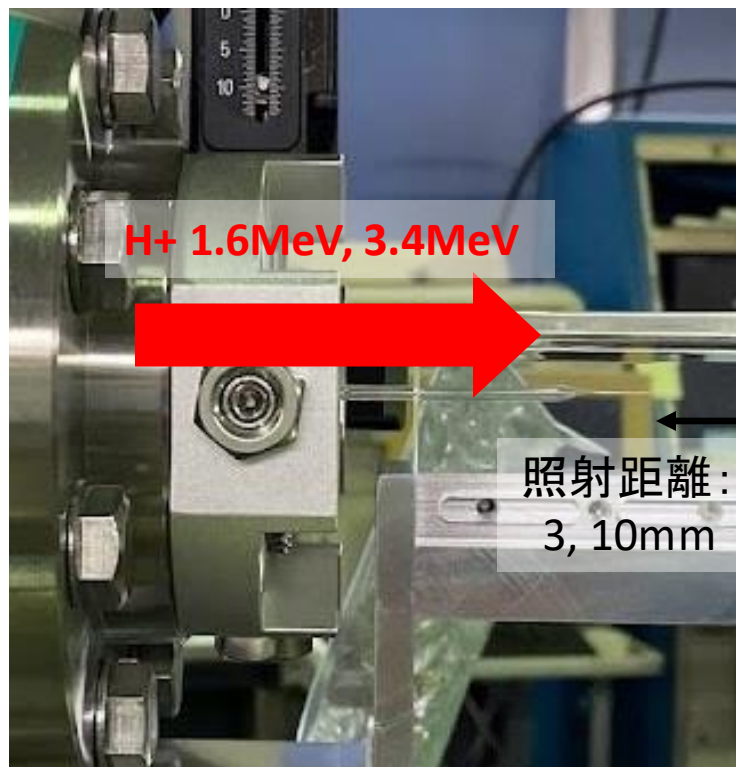
T. Ikeda, Quantum Beam Sci.4, 22 (2020).



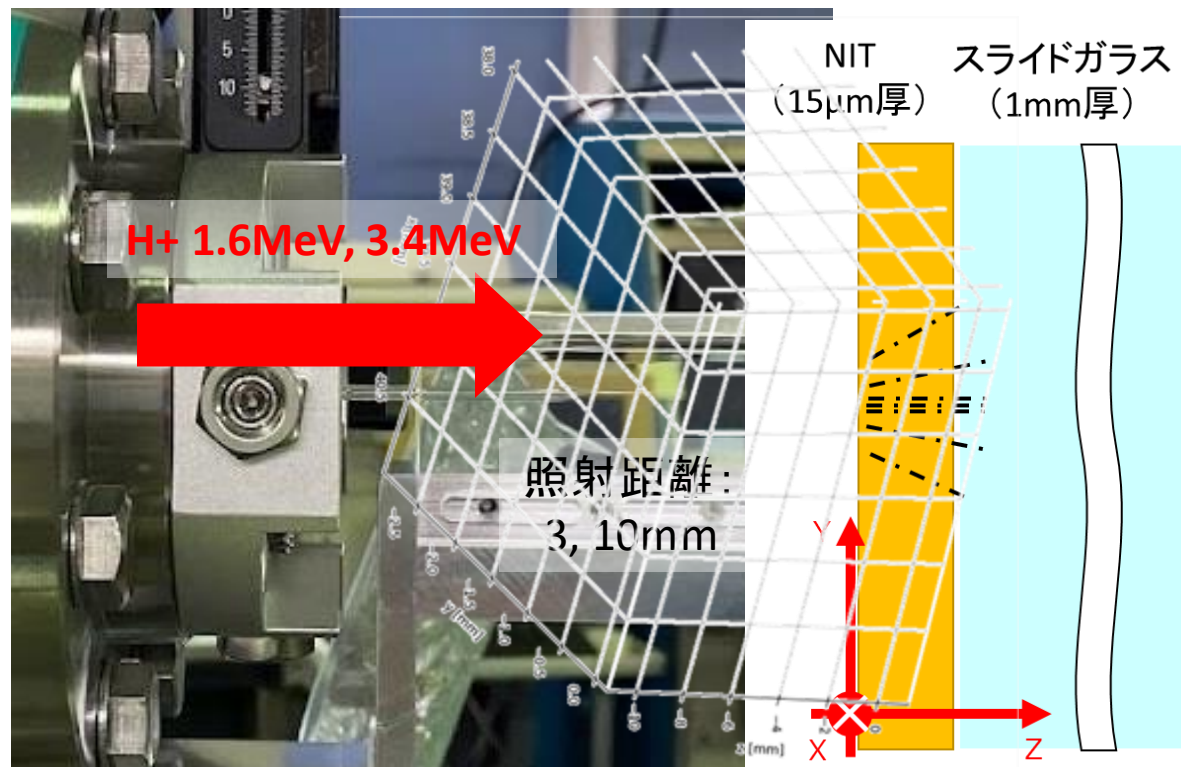
- がん細胞への照射
- 器官の一部を狙った照射
- 元素マッピング (μ -PIXE)

などへの応用が期待

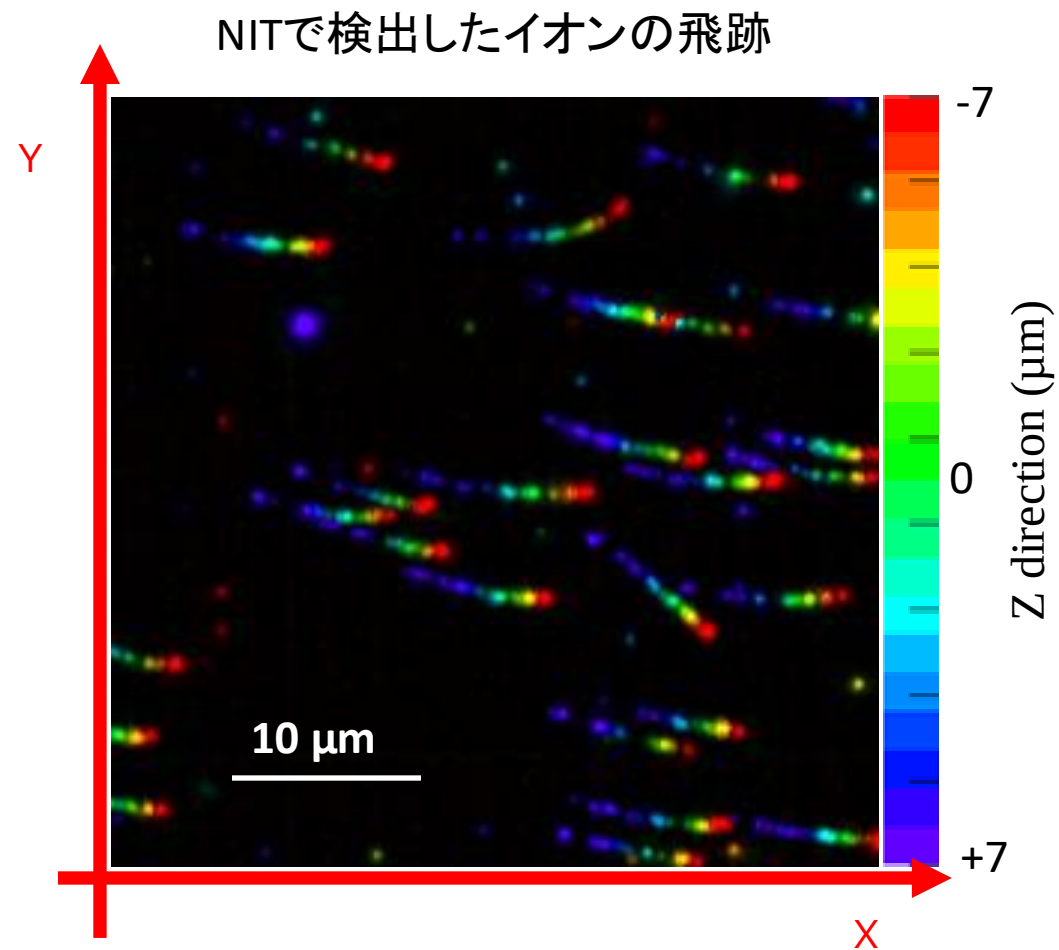
MeVマイクロイオンビームの照射



MeVマイクロイオンビームの照射



- マイクロスケール3次元トラッキングによって、ガラス先端部のビームプロファイル測定を行っている



Summary

- NIT中の飛跡解析のためにサブミクロン精度の高速3次元トラッキング技術を開発
 - 1 μm (proton 100 keV) 閾値で1台あたり 1.1 kg/year の解析速度を達成
→ 2025年度中に 1.5 kg/year までアップグレードする予定
- LNGS研究所での中性子測定
 - Underground run (n-Run3, nRun4) **ongoing**
 - 2.5 kg*day スケール実験を行い、0.52 kg*day分の解析が終わった
 - Sub-MeV帯+熱中性子領域に期待値程度の信号を観測
 - MeV帯の測定にはさらにラドン除去 & NIT塗布後乾燥時の湿度コントロールが必要
→ 小川洋氏(日大)から提供いただいた銀ゼオライトを用いたラドン除去システムを検討中
 - 中性子到来方向が未知の場合の中性子スペクトル再構成方法を確立
 - Prospect
 - ラドン除去+統計を増やして広いエネルギー範囲での地下中性子スペクトル測定を目指す
 - 実験場所や岩盤中の水分による中性子スペクトルへの影響の調査、未知事象の探索を行う
- 応用研究
 - 大気取り出しMeVマイクロイオンビームのビームプロファイル測定
 - 原子炉デブリや核融合反応からの中性子スペクトル測定