

個体飛跡検出器を用いた 精密中性子イメージング技術の 開発と展望 ～サブミクロンの位置分解能を実現～

理化学研究所 開拓研究所 齋藤高エネルギー原子核研究室
主任研究員 齋藤 武彦

2025年6月3日

中性子イメージングとは

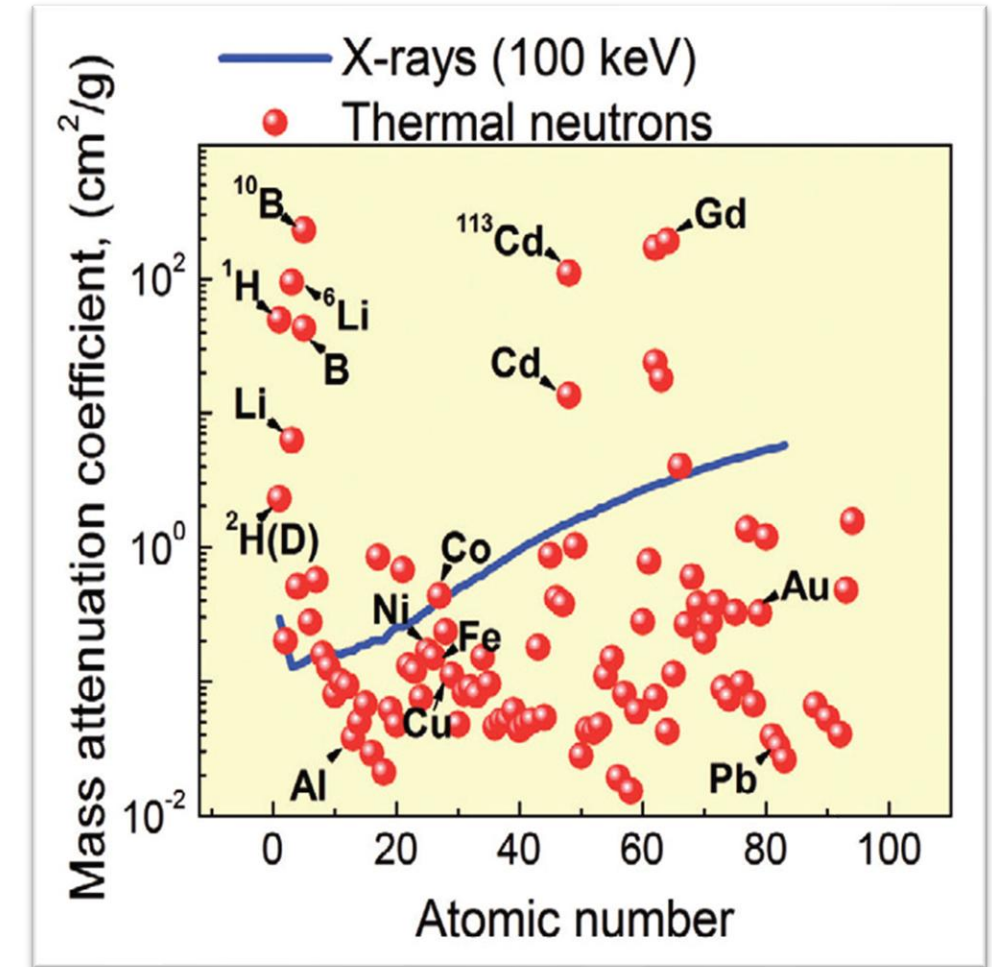
非破壊検査の手法

中性子吸収係数が高い元素から構成される構造体を観察できる

- 水素や水素化合物
- リチウムやホウ素などの軽元素
- CdやGdなどの重元素

比較：

X線イメージング：原子番号が大きいほど見やすい



図は

Banhar, J. Advanced tomographic methods in materials
Research and engineering. (Oxford: Oxf. Univ. Press. ((ed) 2008)
より引用

中性子イメージングとは

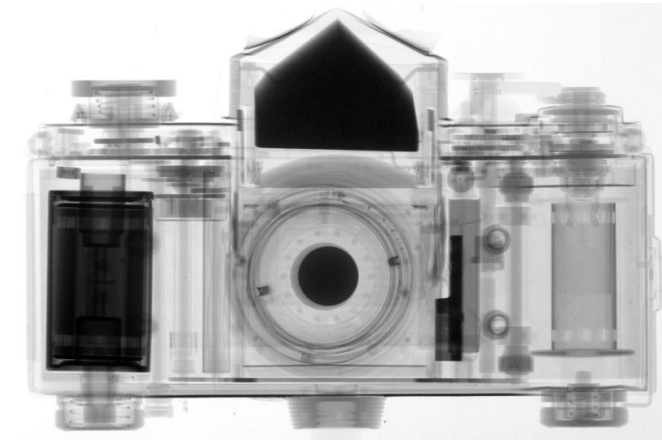
非破壊検査の手法

中性子吸収係数が高い元素から構成される構造体を観察できる

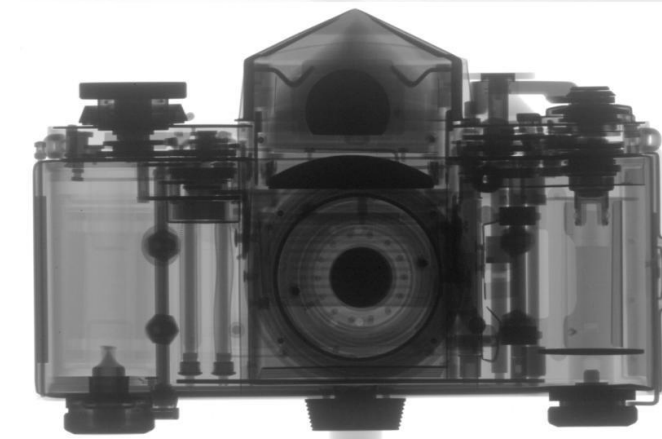
- 水素や水素化合物
- リチウムやホウ素などの軽元素
- CdやGdなどの重元素

比較：

X線イメージング：原子番号が大きいほど見やすい



中性子



X線

図は
<https://www.psi.ch/en/niag/what-is-neutron-imaging>
より引用

従来技術とその問題点(1)

中性子イメージングの現状（本開発前）

サイズ	~cm	~100 μ m	~10 μ m	~1 μ m	~10 nm	~1 nm	~0.01 nm
手法	<u>透過イメージング</u>				<u>小角散乱</u>		<u>中性子回折</u>
ニーズ	工業製品 複合材料				沈着物等 タンパク質解析		格子構造解析 応力計測

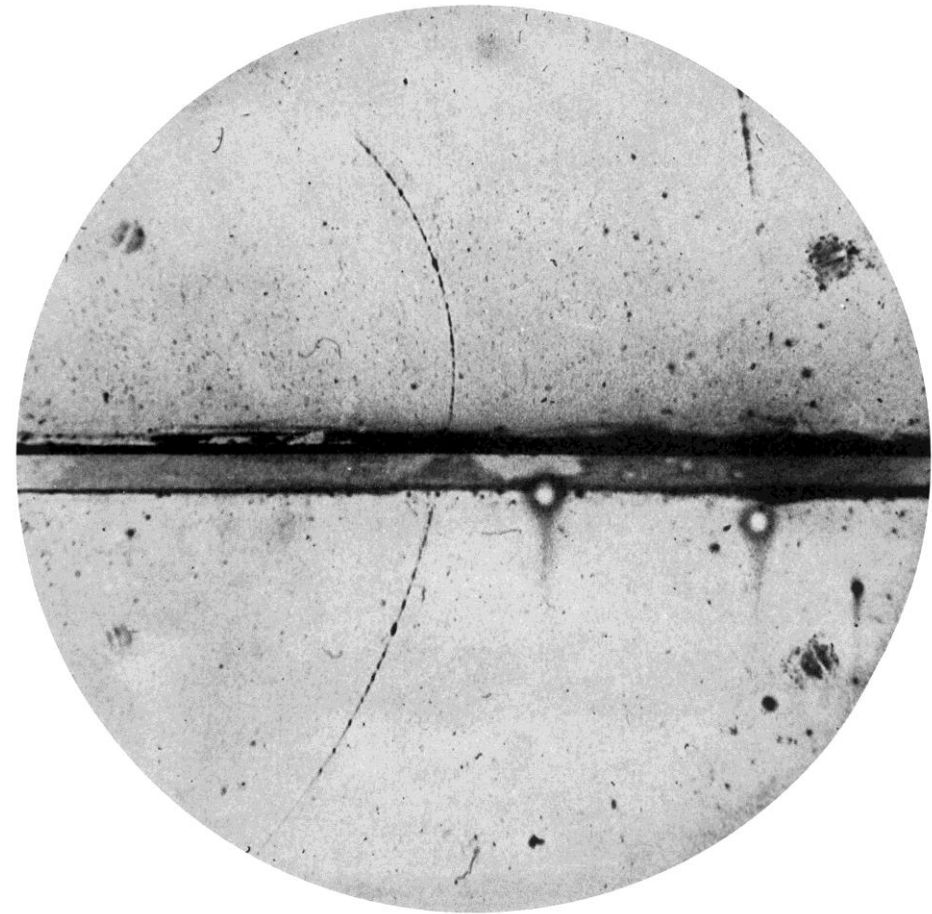
空白地帯

透過イメージング

粒子飛跡検出器とは？

荷電粒子の飛跡を記録

- 電子、陽電子
- 陽子、アルファ線、原子核
- ミュー粒子、中間子
- など



霧箱中の陽電子飛跡

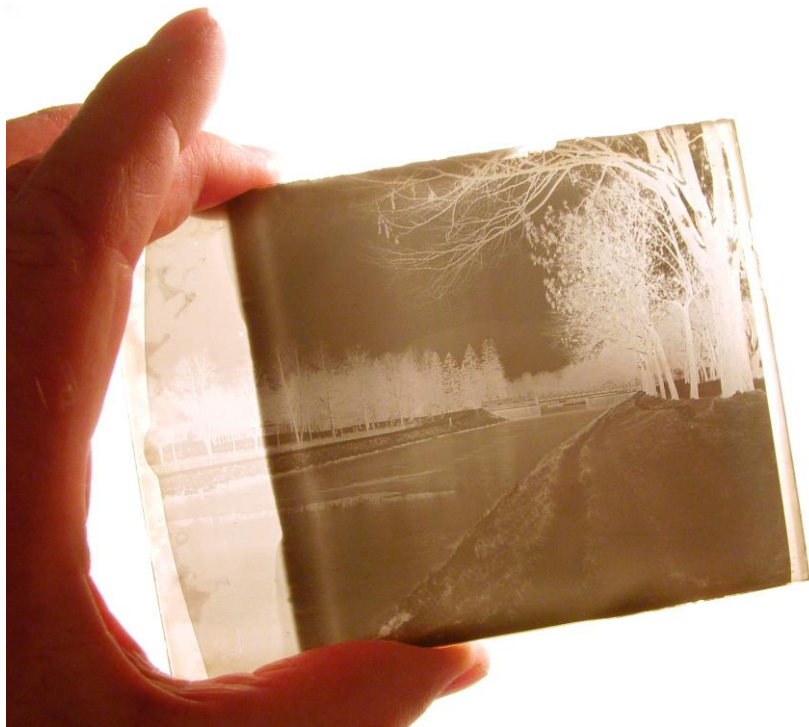
図は

Anderson, Carl D., Physical Review 43 (6): 491-494.

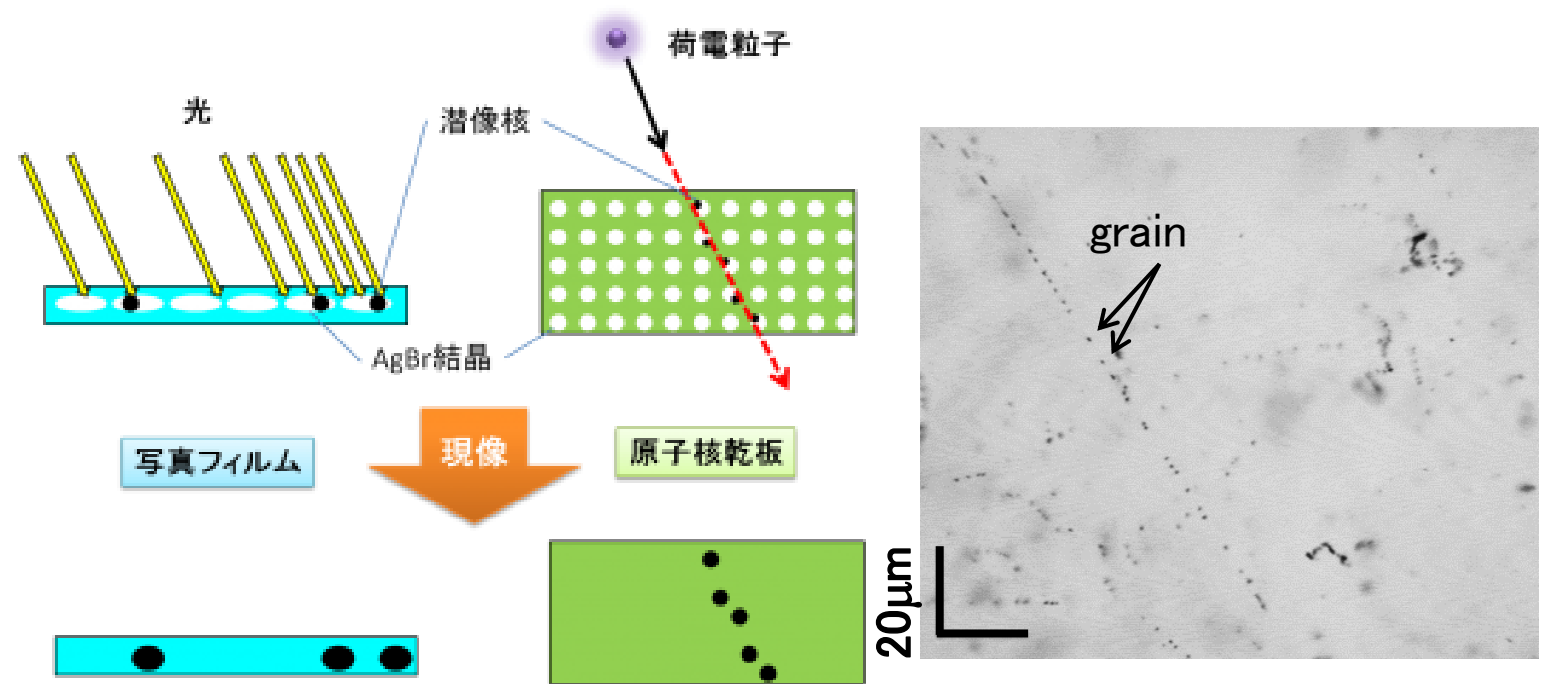
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3985488>

から引用

個体粒子飛跡検出器の例： 写真フィルムと原子核乾板



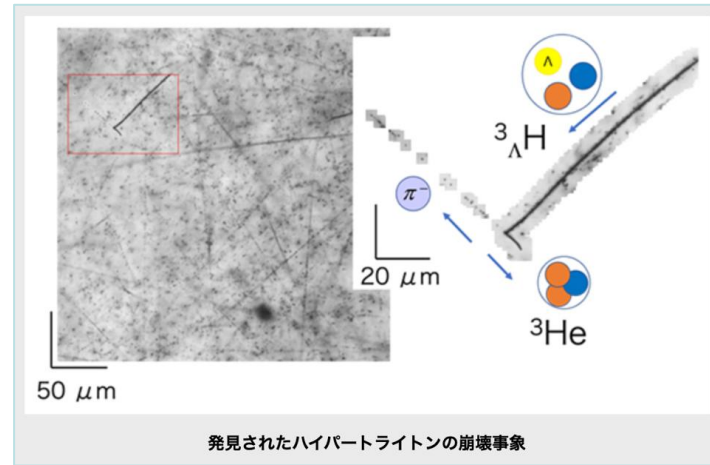
図は
Holger.Ellgaard,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10616951>
から引用



上図は名古屋大学F研のホームページより引用
https://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/tech/nuclear_emulsion/

原子核乾板を用いた研究例

- 宇宙線測定
- ミューオンラジオグラフィ
ピラミッド内部の透過
- 素粒子・原子核物理
ハイパー核



理研のプレスリリース(2021年9月14日)

https://www.riken.jp/press/2021/20210914_3/

【論文】T.R. Saito et al., Nature Reviews Physics 3, 803-813 (2021)

交通アクセス お問い合わせ English Site

報道関係者の方 理研在籍者・OBの方 理研寄附金

RIKEN 理化学研究所

Twitter YouTube RIKENメルマガ Google カスタム検索 検索

理研について 研究室紹介 研究成果（プレスリリース） 広報活動 産学連携 採用情報

Home > 研究成果（プレスリリース） > 研究成果（プレスリリース） 2021

いいね！ 77 ツイート

2021年9月14日
理化学研究所
岐阜大学
東北大学
立教大学

← 前の記事 ↑ 一覧へ戻る → 次の記事

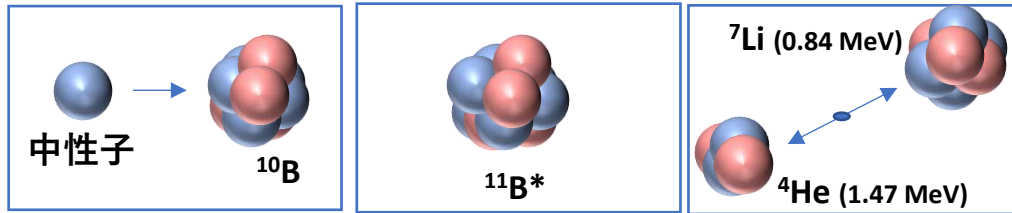
ハイパー核の束縛エネルギー精密測定へ ーハイパートライトンパズルの解明に向けてー

理化学研究所（理研）開拓研究本部齋藤高エネルギー原子核研究室の齋藤武彦主任研究員、岐阜大学教育学部・工学研究科の仲澤和馬シニア教授、東北大学大学院理学研究科の吉田純也助教、立教大学大学院人工知能科学研究科の瀧雅人准教授らの国際共同研究グループは、大強度陽子加速器施設「J-PARC」^[1]においてK中間子^[2]ビームが照射された写真乾板データを、独自に開発した機械学習^[3]モデルによって解析し、ハイパー核^[4]の一種である「ハイパートライトン^[4]」の生成と崩壊の事象を可視的に検出することに成功しました。

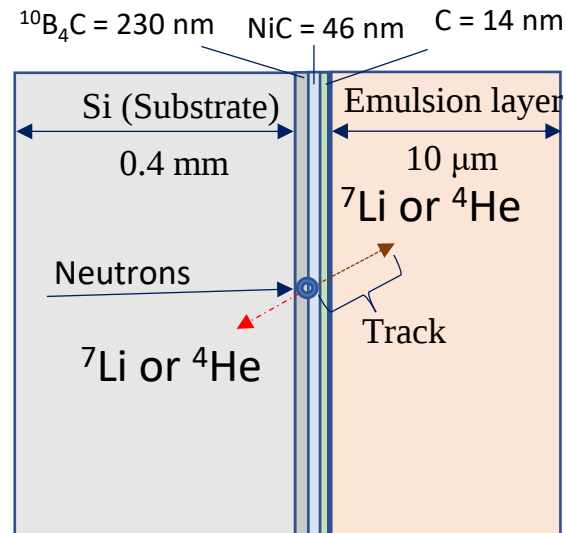
本研究成果は、写真乾板からハイパートライトンを大量に効率良く検出できることを示しており、その束縛エネルギー^[5]を世界最高精度で決定することで「ハイパートライトンパズル」と呼ばれる謎の解決への貢献が期待できます。

原子核乾板を用いた中性子検出器 (従来技術)

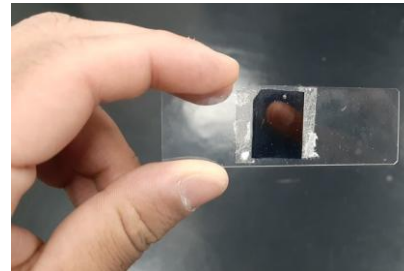
^{10}B 原子核の中性子吸収



中性子検出器の構造



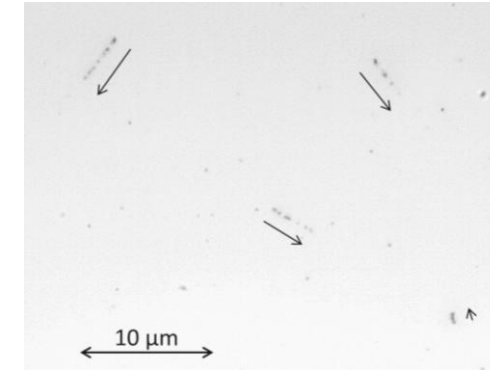
検出器の写真



先行研究

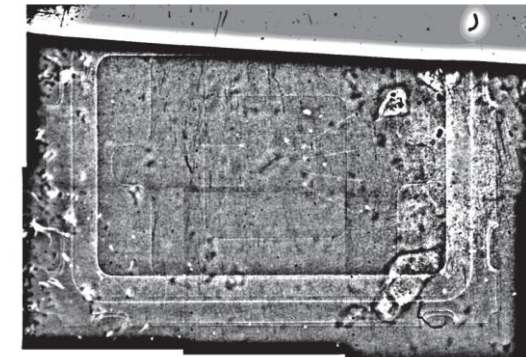
飛跡密度が低い場合

- 飛跡測定精度の評価 : $< 100 \text{ nm}$
Naganawa et al. Eur. Phys. J. C (2018) 78, 959



飛跡密度が高い場合: $3 \times 10^4 / (100 \text{ mm}^2)$

- 水晶振動子の中性子イメージング
Hirota et al. J. Imaging (2021) 7, 4
- 空間分解能は未評価**



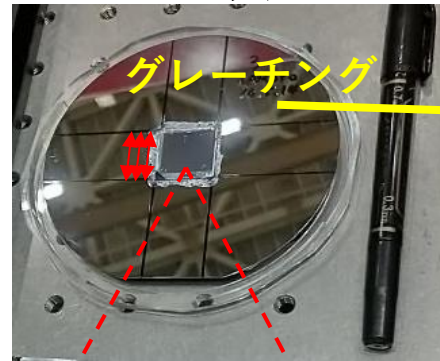
J-PARC MLFでの中性子照射

原子核乾板を用いた 中性子イメージングの分解能評価

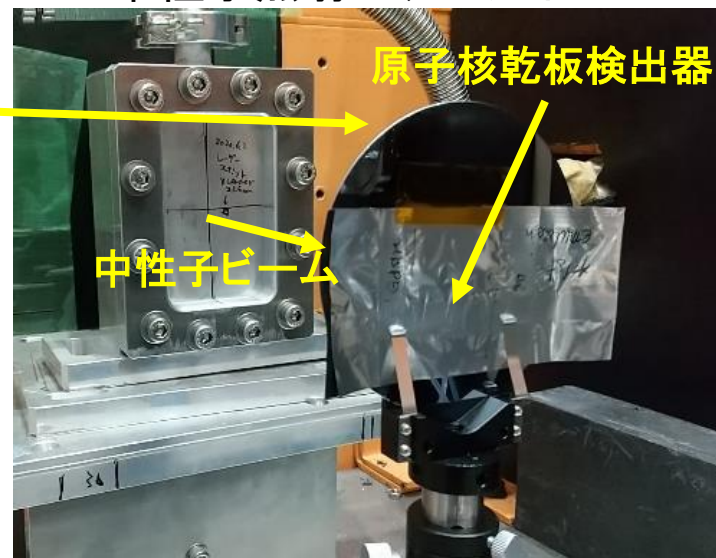
J-PARC MLF BL05での照射実験

Gdグレーティングスリットの中性子イメージング

Gdスリット

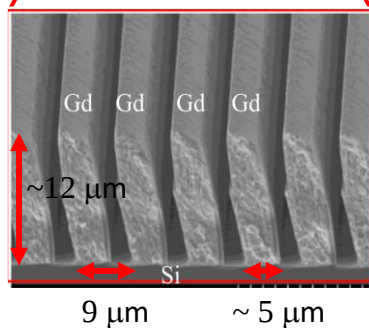


中性子照射ステーション



図は我々のScientific Reports誌より

Gdスリットの電子顕微鏡イメージ

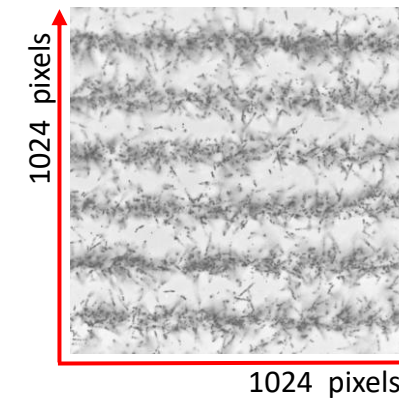


上図は以下から引用

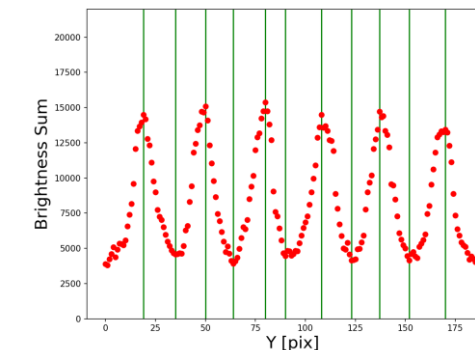
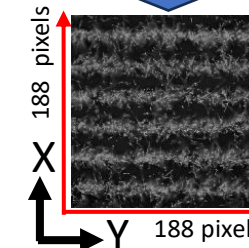
Tetsuo Samoto et al

Jpn. J. Appl. Phys. 58 2019) SDDF12

ビーム分散: $X = 0.3 \text{ mrad}$, $Y = 10 \text{ mrad}$
強度: $2 \times 10^6 \text{ n / cm}^2 / \text{sec}$ @ 700kW
GdスリットとB層の距離: $\sim 1.5 \text{ mm}$
照射時間: 3 hours

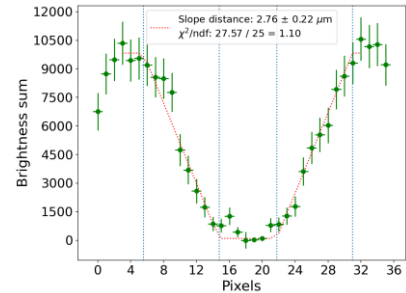


照射で得たイメージ

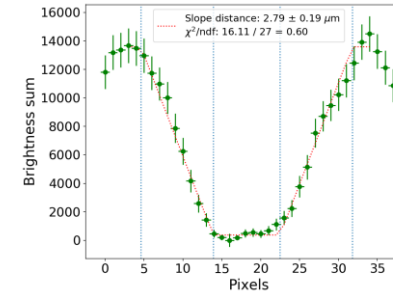


原子核乾板を用いた 中性子イメージングの分解能評価

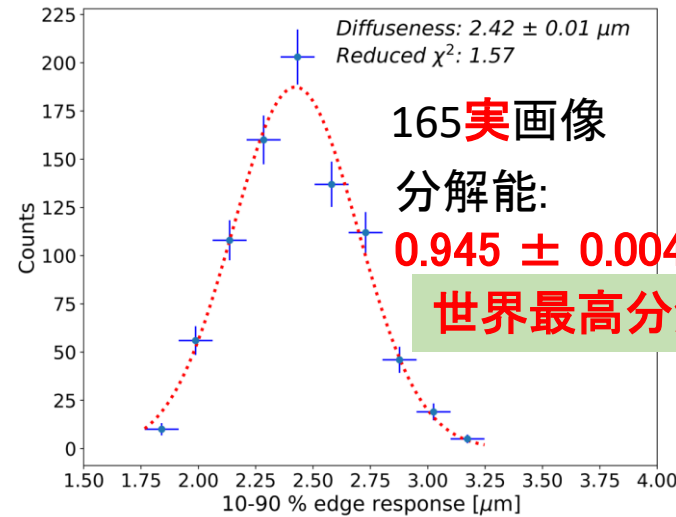
輝度値和の射影
台形フィッティング



実験データ



シミュレーション

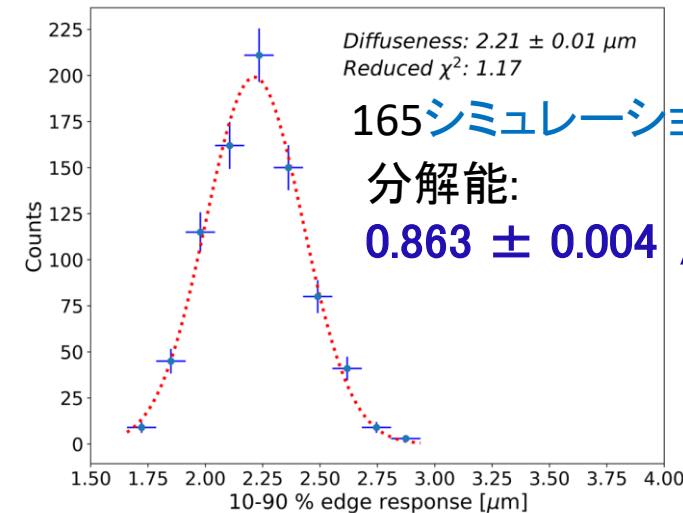


165実画像

分解能:

$0.945 \pm 0.004 \mu\text{m}$ (1σ)

世界最高分解能



165シミュレーション画像

分解能:

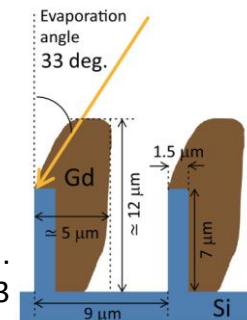
$0.863 \pm 0.004 \mu\text{m}$ (1σ)

実験値の分解能にはGdスリットの形状の不完全さが含まれる

A. Muneem *et al.*, Journal of Applied Physics, 133, 054902 (2023)

A. Muneem, 博士論文, GIK Institute, Pakistan, 2023

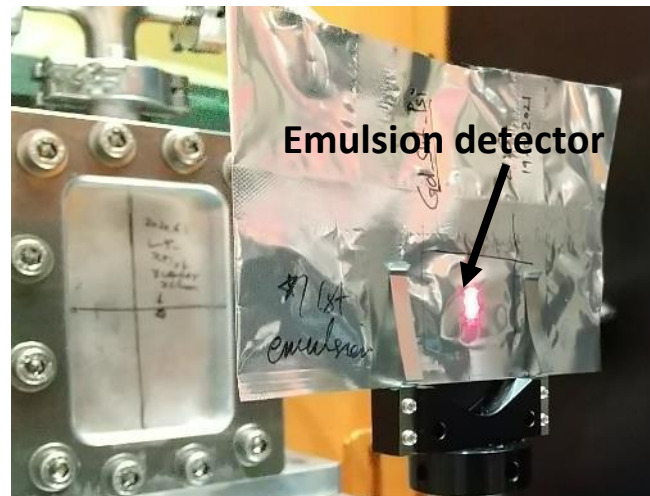
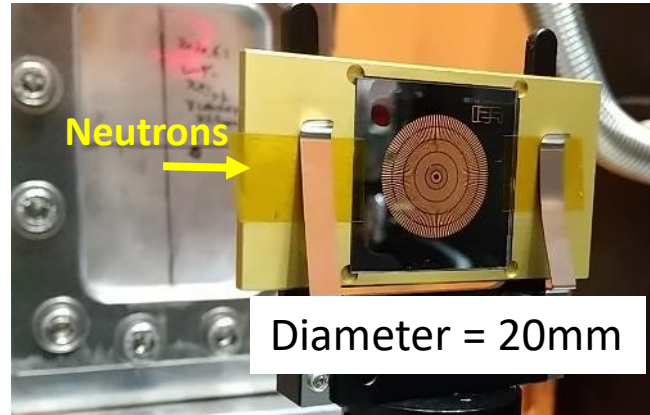
Yoshichika Seki *et al.*
Physics Procedia, 88 (2017) 217 - 223



Siemens Starの中性子による観測

スイスのPaul Scherrer
Institute (PSI)が開発した
Gdの微細構造体

128の放射状のスリット
中心部分は10 μm ピッチ



ビームコンディショニング

Divergence: X = 0.3 mrad, Y = 1.0 mrad

Estimated flux: 2×10^5 n / cm^2 / sec @ 700kW

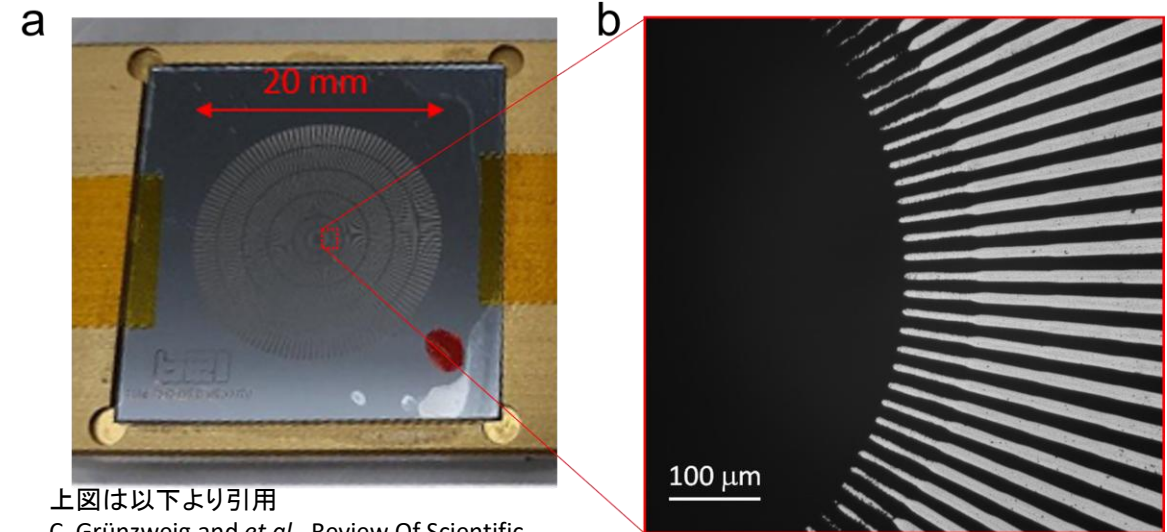
Distance between grating and B layer: ~ 1.5 mm

Neutron irradiation = 9 hours

A. Muneem et al.,

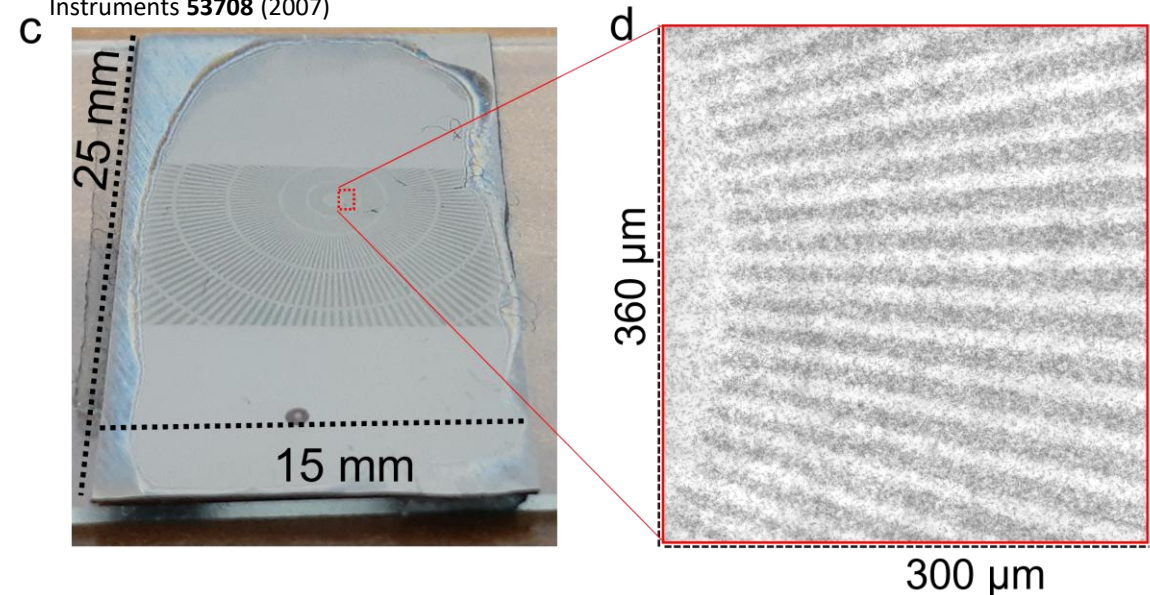
Journal of Applied Physics, 133, 054902 (2023)

図は全て上記論文から



上図は以下より引用

C. Grünzweig and et al., Review Of Scientific
Instruments **53708** (2007)



中心部の観測に世界で初めて成功

従来技術とその問題点(2)

原子核乾板を用いた中性子検出器

- コンパクトな中性子検出器の開発に成功
- イメージ解析の手法を開発
- 優れた空間分解能を達成
 - $0.945 \pm 0.004 \mu\text{m}$
 - 中性子検出器としては世界一を達成

一方、問題点（使いにくさ）もある

- 照射後に現像が必要（現状では手作業）
- 再利用できない

} 実用化に対しての大問題

もっと使いやすい検出器はないか？

蛍光飛跡検出器 FNTD (Fluorescent Nuclear Track Detector)

- アルミナにCとMgをドーピングした結晶 (Al₂O₃:C,Mg)
- 荷電粒子の飛跡を記録
- μmスケールの空間分解能が期待できる

M.S. Akselrod, G.J. Sykora / Radiation Measurements 46 (2011) 1671–1679

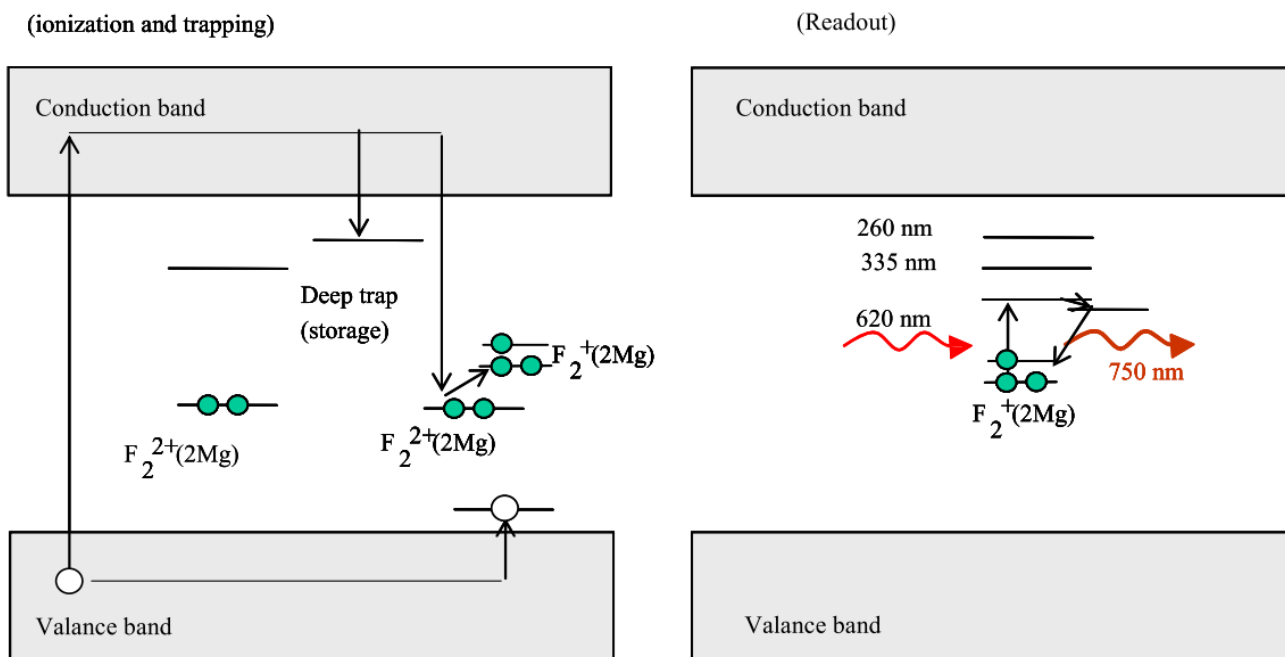


現像が不要

- 照射直後に共焦点顕微鏡を用いて読み出し

飛跡を消去し再利用が可能

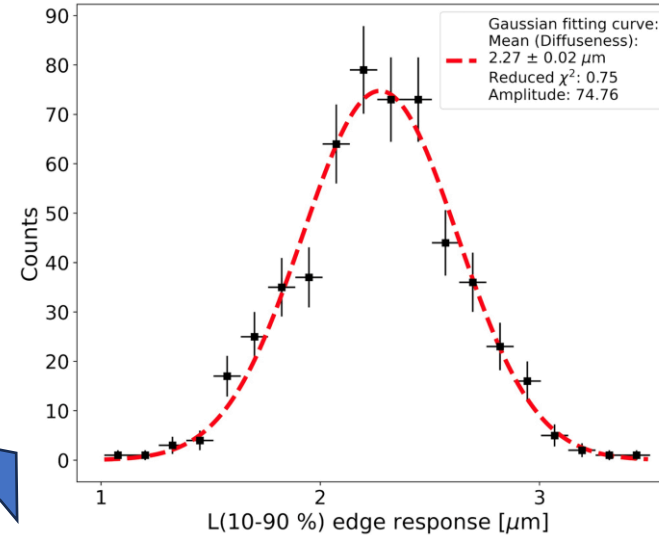
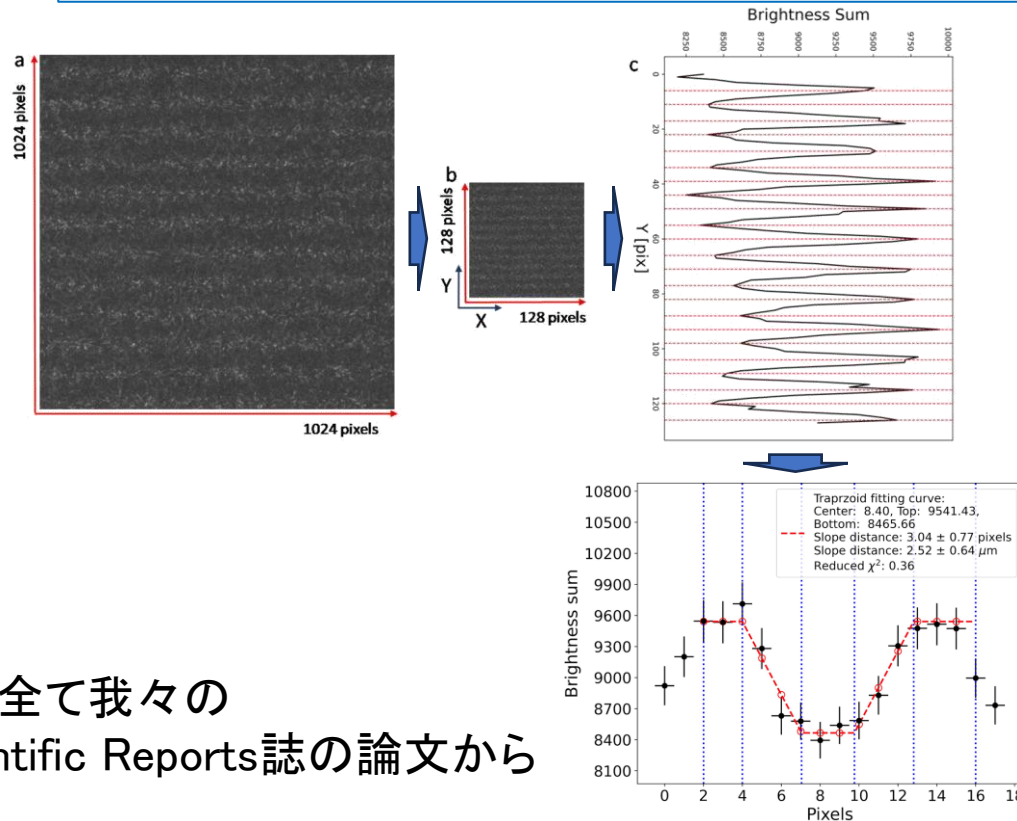
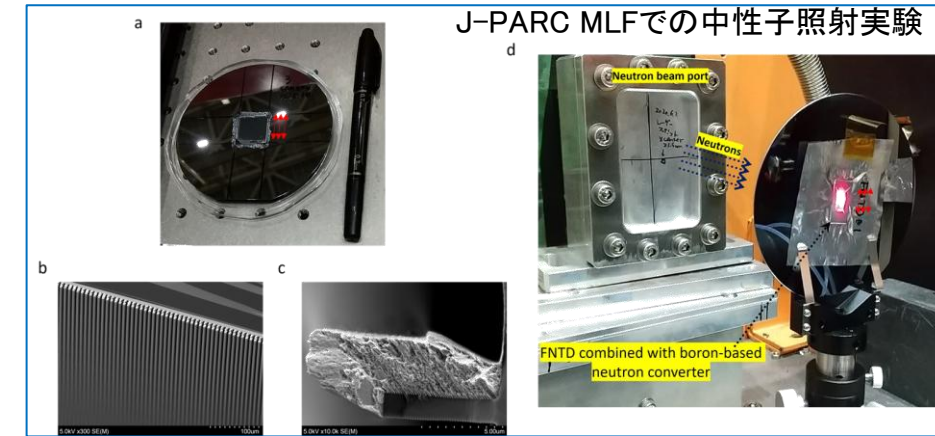
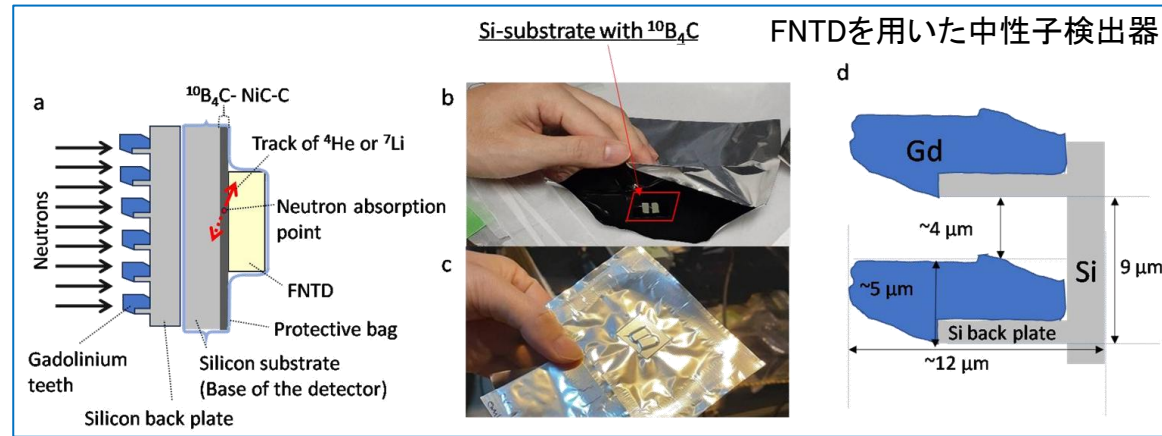
- 高温を用いた飛跡消去 (Akselrodら)
- UVレーザー(~355 nm)の二光子吸収過程で飛跡を消去可能 (我々の研究)



- FNTDを用いた中性子検出器を開発
- FNTDを用いた中性子イメージングの開発

既開発済みの原子核乾板を用いた中性子イメージング技術を適用できる

FNTDを用いた中性子イメージング



分解能: $0.887 \pm 0.009 \mu\text{m}$
我々の世界最高分解能を更新

図は全て我々の
Scientific Reports誌の論文から

A. Muneem et al., Scientific Reports 15 (2025) 2103
A. Muneem, 博士論文, GIK Institute, Pakistan, 2023

プレスリリース（理研、東北大）

2025年1月24日

理化学研究所

東北大学

[← 前の記事](#) [↑ 一覧へ戻る](#) [→ 次の記事](#)

世界最高精度の分解能を持つ中性子イメージング手法開発

ー水素・リチウム・ホウ素を含む製品の精密非破壊検査に期待ー



- [動画テキストファイル \(PDF 1.3MB\)](#)

理研のプレスリリース

2025年1月24日

https://www.riken.jp/press/2025/20250124_2/index.html

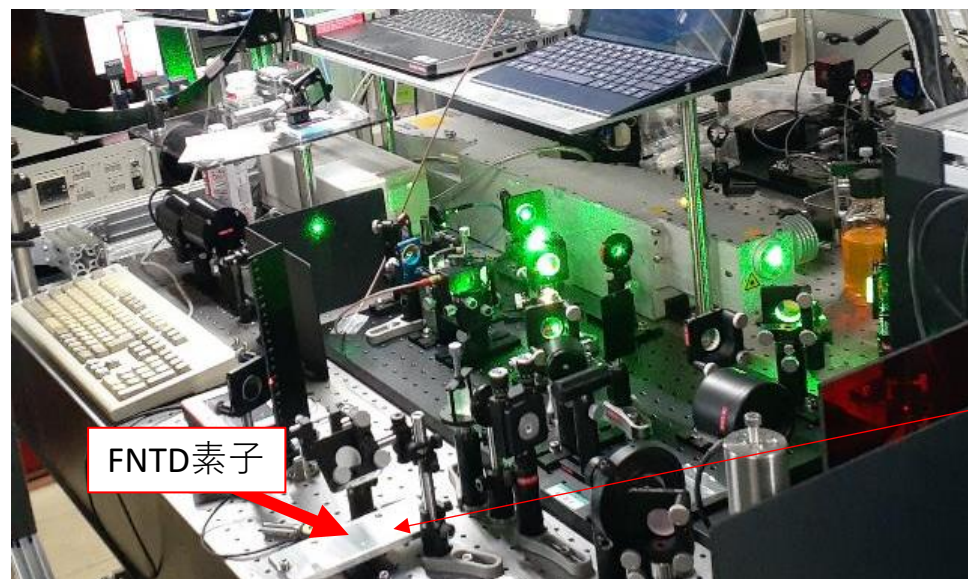
理化学研究所（理研）開拓研究本部 齋藤高エネルギー原子核研究室の齋藤 武彦 主任研究員、アブドゥル・ムニーム 国際プログラム・アソシエイト（研究当時、現 光量子工学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム 特別研究員）、東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センターの吉田 純也 准教授らの[国際共同研究グループ](#)は、1マイクロメートル（ μm 、1 μm は1,000分の1ミリメートル）よりも精細な世界最高精度の分解能を持つ中性子イメージング手法を開発しました。

本研究成果は、X線では可視化が困難だった[水素](#)^[1]、[リチウム](#)^[2]、[ホウ素](#)^[3]を含む製品の精密非破壊検査に貢献すると期待されます。

今回、国際共同研究グループは、高い空間分解能を持つ荷電粒子飛跡検出技術を中性子イメージングに応用し、炭化ホウ素薄膜と蛍光飛跡検出器を組み合わせた中性子検出器を開発しました。この検出器の分解能を定量的に評価したところ、中性子イメージングデバイスの中で世界最高精度でした。

本研究は、科学雑誌『Scientific Reports』オンライン版（1月24日付：日本時間1月24日）に掲載されました。

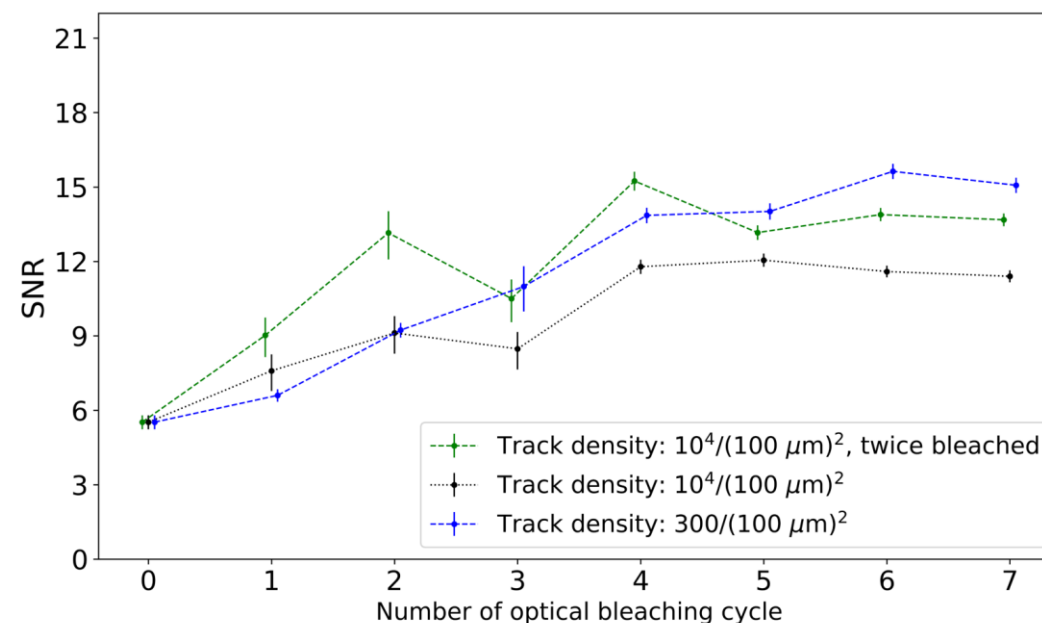
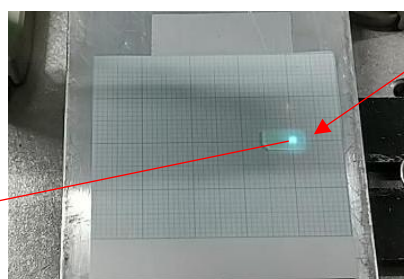
UVレーザーを用いた FNTDの飛跡消去システムの開発



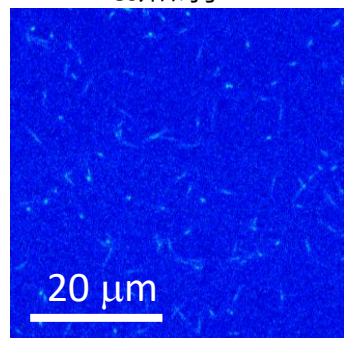
波長: 355nm (紫外線)
レーザーパルス幅: 16 n秒
周期: 3kHz
出力: 5mW

共同開発:
理研RAP・光量子制御技術開発チーム

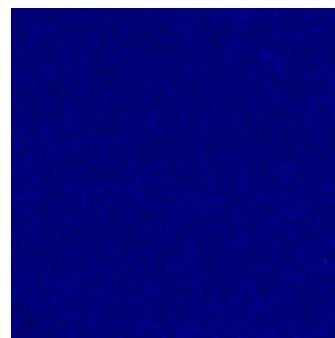
レーザースポット
 ϕ : $\sim 0.2\text{mm}$



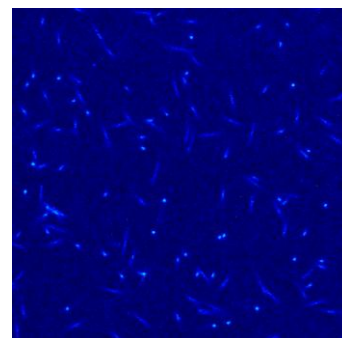
^{241}Am α 照射



UV 8分照射



^{241}Am α 照射



表面からの
深さ: $3\text{ }\mu\text{m}$

- 5mW・8分間の照射で α 線の飛跡が消去 → 再度 α 線の記録を確認

A. Muneem *et al.*, *Radiation Measurements* 158 (2022) 106863

A. Muneem, 博士論文, GIK Institute, Pakistan, 2023

本技術がもたらした 中性子イメージングの現状

サイズ	~cm	~100 μ m	~10 μ m	~1 μ m	~10 nm	~1 nm	~0.01 nm
手法	<u>透過イメージング</u>		原子核乾板 FNTD		<u>小角散乱</u>		<u>中性子回折</u>
ニーズ	工業製品 複合材料				沈着物等 タンパク質解析		格子構造解析 応力計測

透過イメージング

新技術の特徴・従来技術との比較

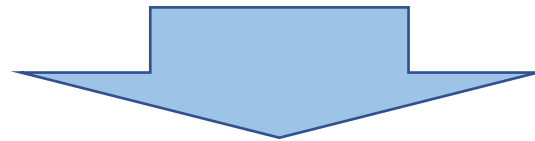
- 従来技術では不可能であった、サブミクロン～数十ミクロンの微細構造に対しての中性子を用いた非破壊検査を可能とした。
- 検出器本体が小型であり、多数の検出器を限られたスペースに配置することができる。
- FNTDを用いることにより、検出器の再利用ができる（原子核乾板は再利用不可）
- FNTDは安価であり、再利用をすることによりコストを大幅に削減できる。

想定される用途

- 金属物質内の含有物
例えば水素化合物の微細構造
- 樹脂金属接合などの評価
- 異種金属接合の劣化評価
- 半導体素子の内部構造（P型半導体）
- リチウム金属バッテリー内の非破壊観察
- 超伝導体ワイヤーの品質

10 – 50 μm 分解能

サブ μm – 数 μm 分解能



高速かつ精密な中性子CT

実用化に向けた課題

- FNTDの読み出しの高速化（Spinning disc共焦点顕微鏡などの活用）
- FNTD結晶の大型化と最適化
- 小型中性子源を用いた実装
中性子ビームの最適化

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	・FNTDと原子核乾板を用いたサブミクロン中性子イメージングの基礎技術の開発。FNTDのレーザーによる再利用化 ・FNTDのレーザーによる再利用化	
現在	・小型中性子源(理研RANS)を用いた実装 ・FNTDの読み出しの高速化	
1年後	・数十ミクロンオーダーでの中性子イメージング ・コンクリート中の水分分布 ・生物中の水分分布と吸水ダイナミクス	RANSを用いた数十ミクロンオーダーでの測定サービスの実現と提供
3年後	・数ミクロンオーダーでの中性子イメージング ・金属中の水素分布等の観測 ・リチウム(金属)バッテリー内の観察	RANSを用いた数ミクロンオーダーでの測定サービスの実現と提供
5年後	・サブミクロンオーダーでの中性子イメージング ・3D半導体の構造解析	RANSを用いたサブミクロンオーダーでの測定サービスの実現と提供

企業への期待

- どのような非破壊で観測をしたいか、どのくらいの分解能が必要なのかの要望をどんどん教えてほしい
- FNTD結晶の大型化の実現のために、結晶成長技術を有する企業との共同研究を希望
- FNTDに対してコンパクトで安価でかつ高速な読み出し装置開発のために、光学系の企業との共同研究を希望

企業への貢献、PRポイント

- 中性子イメージングを用いた非破壊検査を通して、企業の精密機器、触媒、半導体などの開発に貢献ができると考えている
- 我々の要請するコンパクトで高速な光学読み出し系を企業と開発することにより、コンパクトな光学系の宇宙利用の道を切り開くことができると考えている
- 企業との協力によりFNTD結晶の大型化に成功すれば、現在は一企業に独占されているマーケットの状況を変えることができると考えている。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 中性子位置記録装置及び飛跡画像生成方法
- 出願番号 : 特願2024-229328
- 出願人 : 理研、東北大学、名古屋大学、KEK
- 発明者 : 齋藤武彦、Muneem Abdul、吉田純也、
三島賢二、広田克也

お問い合わせ先

株式会社理研イノベーション

新技術説明会事務局

Email: license-contact@innovation-riken.jp