

超微粒子原子核乳剤を用いた高分解能 冷・超冷中性子 検出器の開発

長縄直崇

コラボレーター：栗野章吾, 梅本篤宏, 河原宏晃, 多田智美, 広田克也, 清水裕彦,
北口雅暁, 三島賢二, 日野正裕, 田崎誠司, 有賀智子

私は何故ここに？

Fundamental Particle Physics Laboratory
Graduate School of Science of Nagoya University
Division of Particle and Astrophysical Sciences

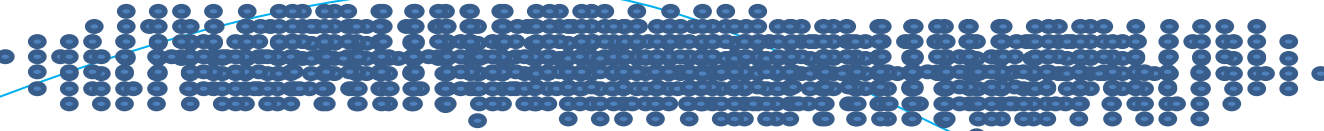
学部4年のとき、原子核乾板にハートを盗まれた。
素粒子飛跡1本1本、反応点が見えていた。
現代版 原子論、分子論 世界が粒子から成ることを実感させてくれた。
OPERAの原子核乾板を担当、
D2?のとき、研究会で坂本さんに誘われ、ICEPPシンポジウム初参加。
良い先輩、仲間たちとの良き出会い・・・感謝
高感度原子核乳剤を研究室で開発、
現在、原子核乾板を用いた超冷中性子検出器を開発。

超冷中性子とは？

	超冷中性子	極冷中性子	冷中性子	熱中性子	熱外中性子	高速中性子
温度[K]	3×10^{-3}	6×10^{-1}	2.3×10^1	3×10^2	1×10^5	6×10^9
エネルギー [eV]	3×10^{-7} 300[neV]!	5×10^{-5}	2×10^{-3}	2.5×10^{-2} 25 [meV]	1×10^1	$\geq 5 \times 10^5$ 0.5 [MeV]
速度 [m/s]	8	1×10^2	6×10^2	2.2×10^3	4.4×10^4	1×10^7
波長[m]	5×10^{-8} 500 atoms	4×10^{-9}	6×10^{-10}	1.8×10^{-10}	1×10^{-11}	4×10^{-14}

(表中の値は三島賢二氏の2013/01/18京大炉におけるビーム利用のための次期中性子源検討Work shopにおけるスライドより抜粋した。)

$$\lambda = h/mv$$



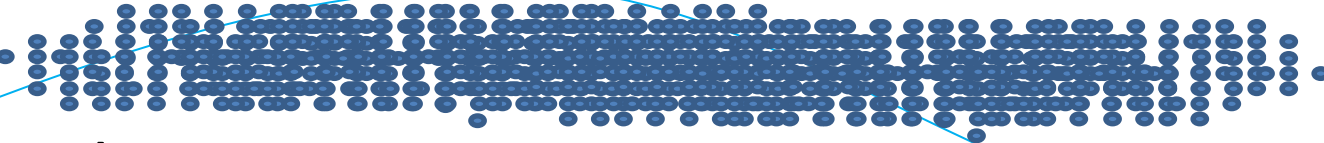
- ・ 極めて長波長
- ・ Niにより全反射 ミラー上の載せたりボトルに貯蔵可能。
- ・ 電荷を持たない。
- ・ 干渉、重力、寿命、EDM測定等・・・

超冷中性子とは？

	超冷中性子	極冷中性子	冷中性子	熱中性子	熱外中性子	高速中性子
温度[K]	3×10^{-3}	6×10^{-1}	2.3×10^1	3×10^2	1×10^5	6×10^9
エネルギー [eV]	3×10^{-7} 300[neV]!	5×10^{-5}	2×10^{-3}	2.5×10^{-2} 25 [meV]	1×10^1	$\geq 5 \times 10^5$ 0.5 [MeV]
速度 [m/s]	8 中級者 コース	1×10^2	6×10^2	2.2×10^3	4.4×10^4	1×10^7
波長[m]	5×10^{-8} 500 atoms	4×10^{-9}	6×10^{-10}	1.8×10^{-10}	1×10^{-11}	4×10^{-14}

(表中の値は三島賢二氏の2013/01/18京大炉におけるビーム利用のための次期中性子源検討Work shopにおけるスライドより抜粋した。)

$$\lambda = h/mv$$



- ・ 極めて長波長
- ・ Niにより全反射 ミラー上の載せたりボトルに貯蔵可能。
- ・ 電荷を持たない。
- ・ 干渉、重力、寿命、EDM測定等・・・

BEAM LINE



MOUNTAIN [エリアガイド]

①-1 位置情報看板
Location Sign

超上級者コース
Expert Course

上級者コース
Advanced Course

中級者コース
Intermediate Course

初・中級者コース
Upper Beginner Course

初級者コース
Beginner Course

パウダーエリア
Un groomed Area

ナイター
Night Skiing

咲花デビューチケット
咲花第2ペア咲花第3ペア
Sakka Debut Ticket Level1 & Sakka Kitaoze Quad

案内所
Information

AED

トイレ
Toilet

託児所
Day Care Room

スクール
School

売店
Shop

Wi-Fi

登山受付
Backcountry/Hikers Registration

駐車場
Parking

約1kmの
パウダーゾーン
裏黒 URUKURO
※裏面エリアルール参照
Please check reverse side.

New!
SKYLINE the
BANKS

北尾根高原
スノーラフティングパーク
Kitaoze Kogen
Snow Rafting Park

HAPPO
BANKS
THE SNOW PARK

咲花キッズパーク
Sakka Kids Park
営業期間
12月16日(土)~3月25日(日)
※営業状況による。

今シーズン
リニューアル
スノープラザ咲花
Snow Plaza at Sakka

図1. 白馬八方尾根MOUNTAIN GUIDEより抜粋したビームラインの図

高位置分解能 冷・超冷中性子検出器:

原子核乳剤(超微粒子)を用い、位置分解能1~2桁向上
 → (O(10) ~ O(100) nm)

用途: 中性子の干渉パターンを測定する実験等

例: 中性子の量子化状態

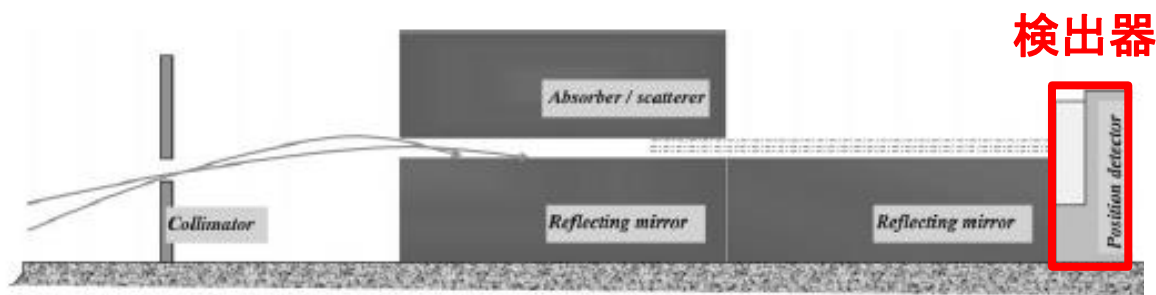


Fig. 3. General scheme of the experiment.

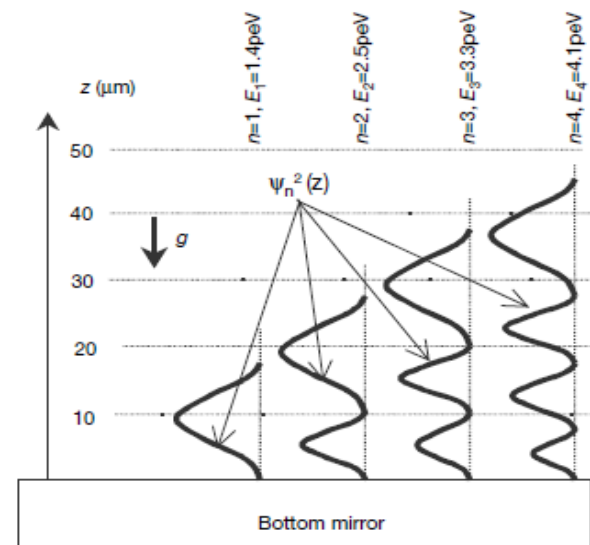


Figure 1 Wavefunctions of the quantum states of neutrons in the potential well formed by the Earth's gravitational field and the horizontal mirror. The probability of finding neutrons at height z corresponding to the n th quantum state, is proportional to the square of the neutron wavefunction $\psi_n^2(z)$. The vertical axis z provides the length scale for this phenomenon. E_n is the energy of the n th quantum state.

V.V. Nestizhetsky et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 440 (2000) 754–759

重力 {

逆二乗則

$$V(r) = G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha_G e^{-r/\lambda})$$

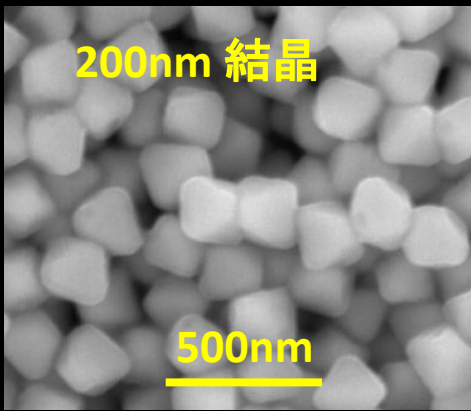
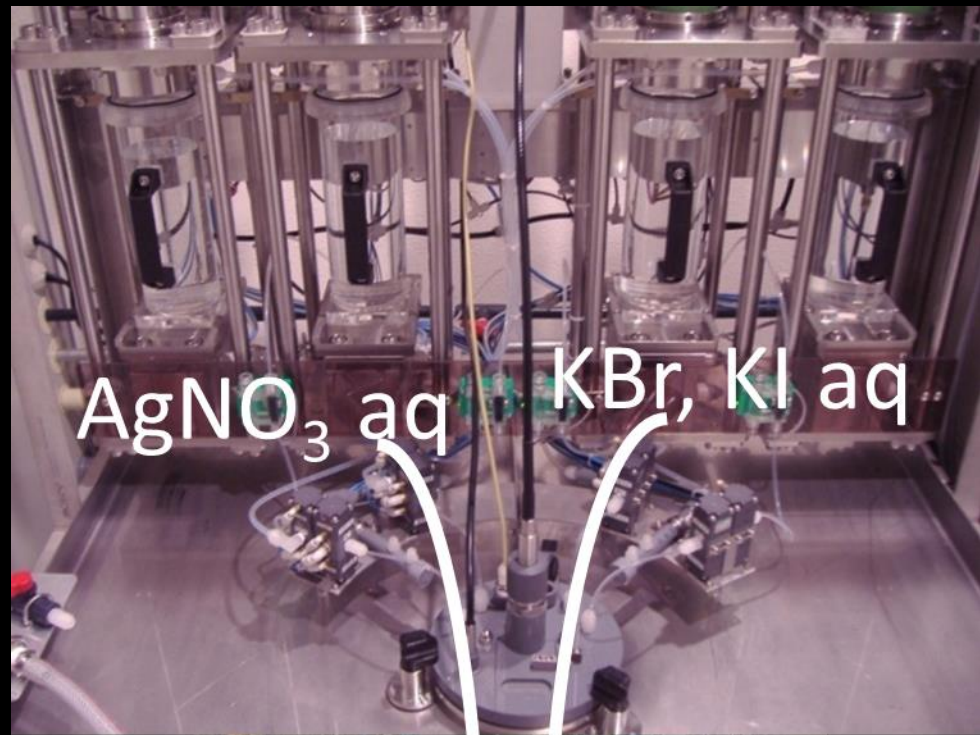
等価原理

Nesvizhevsky et al. Nature 415, 297 (2002)

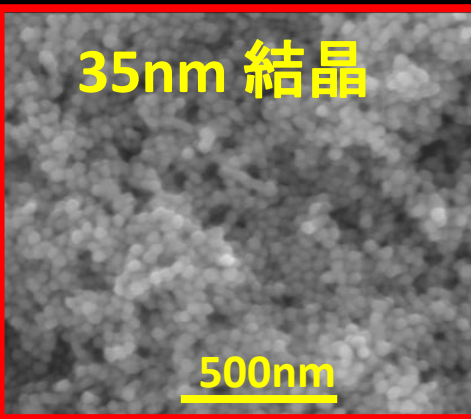
原子核乳剤とは...(実物)



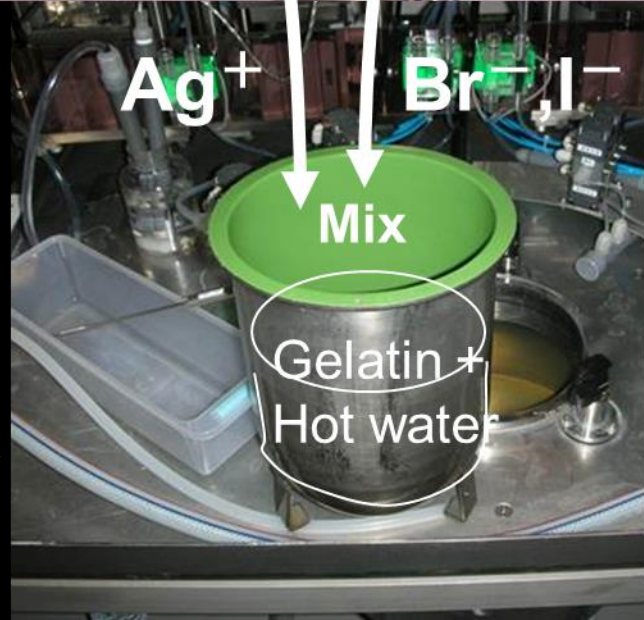
微粒子原子核乳剤 製造@名古屋大学 2010~



最小電離
粒子用



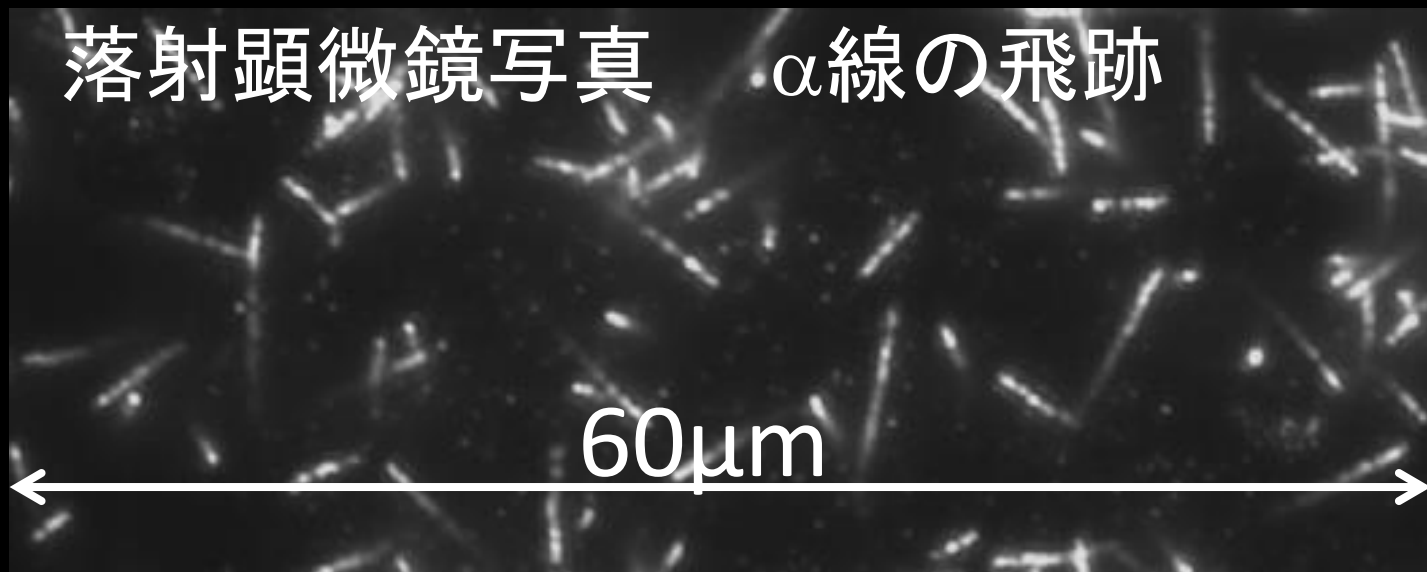
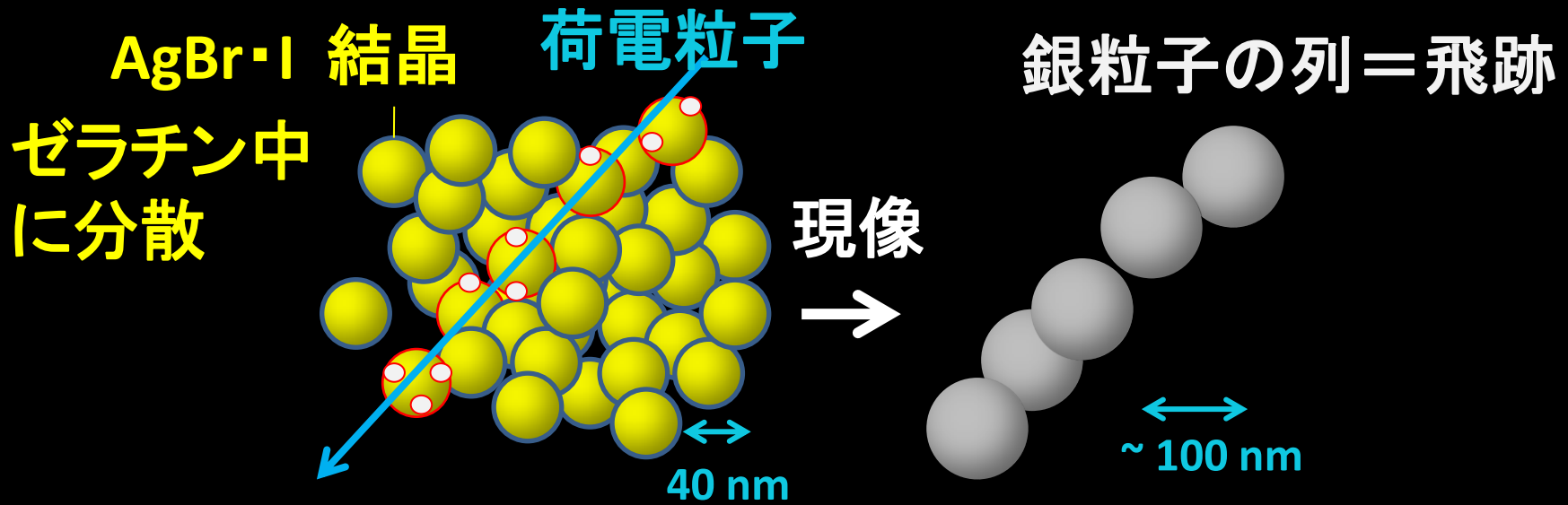
微粒子型
・35nm の検出素子の
 集団。
・最小電離粒子飛跡
 できない(γ に強い)



実際に作ってみよう！！

超微粒子原子核乳剤

高分解能3D飛跡検出器



中性子検出原理

核種による中性子吸収

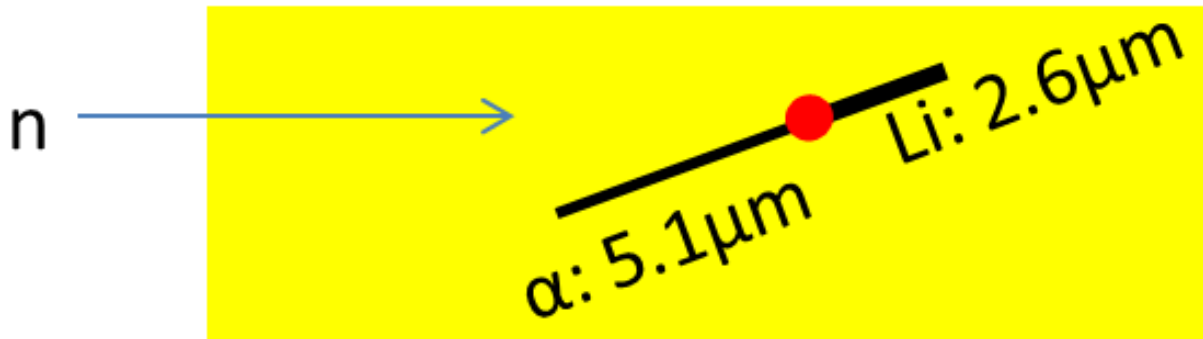
- ・ 中性子吸収断面積 大。
- ・ 吸収後 高dE/dx粒子を放出。

→ ^{10}B

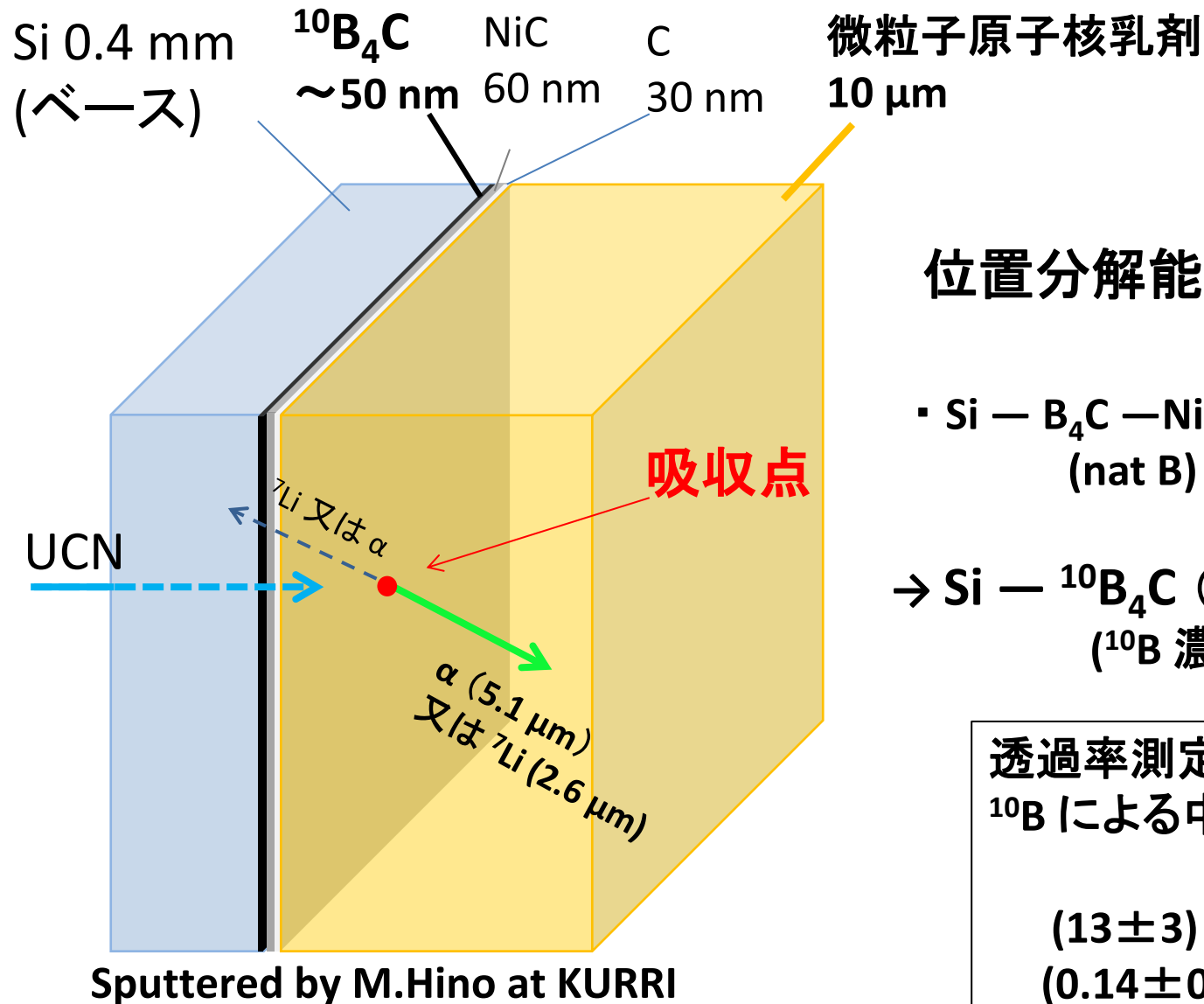
$^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)$ $\sigma=3835$ barn ($v_n=2200\text{m/s}$), 1.69×10^6 barn ($v_n=5\text{m/s}$)

$n + ^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + ^7\text{Li}$ (基底状態) + 2.79MeV (6%)

$\alpha + ^7\text{Li}$ (第一励起状態) + 2.31MeV (94%)



検出器構造



位置分解能 < 100nm を期待

▪ Si — B_4C — NiC — C
(nat B) 安定化成功

→ Si — $^{10}\text{B}_4\text{C}$ (~50 nm) — NiC — C
(^{10}B 濃縮度 ~ 96%)

透過率測定より

^{10}B による中性子吸収率:

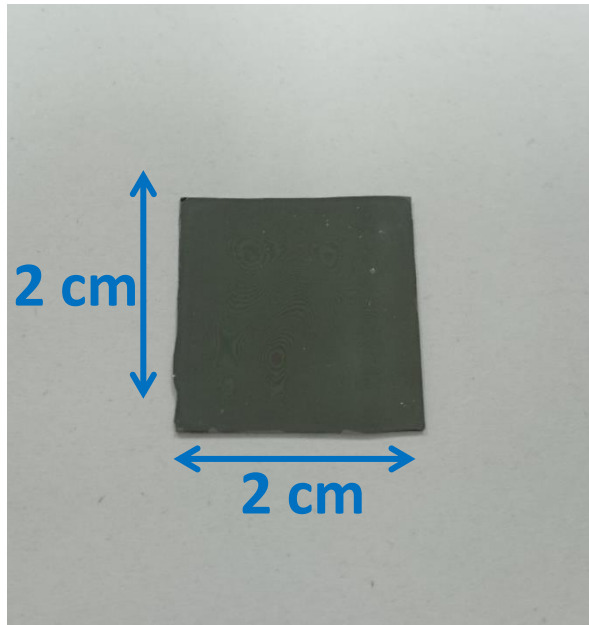
(13 \pm 3) % @ 10m/s

(0.14 \pm 0.04)% @ 1000m/s

検出器外観

微粒子原子核乳剤
塗布・乾燥後

アルミ箔2重で包み遮光



冷中性子 @J-PARC MLF BL05

ビームモニター

$n \sim 1000 \text{ m/s}$

3mm Φ Cd
ピンホール

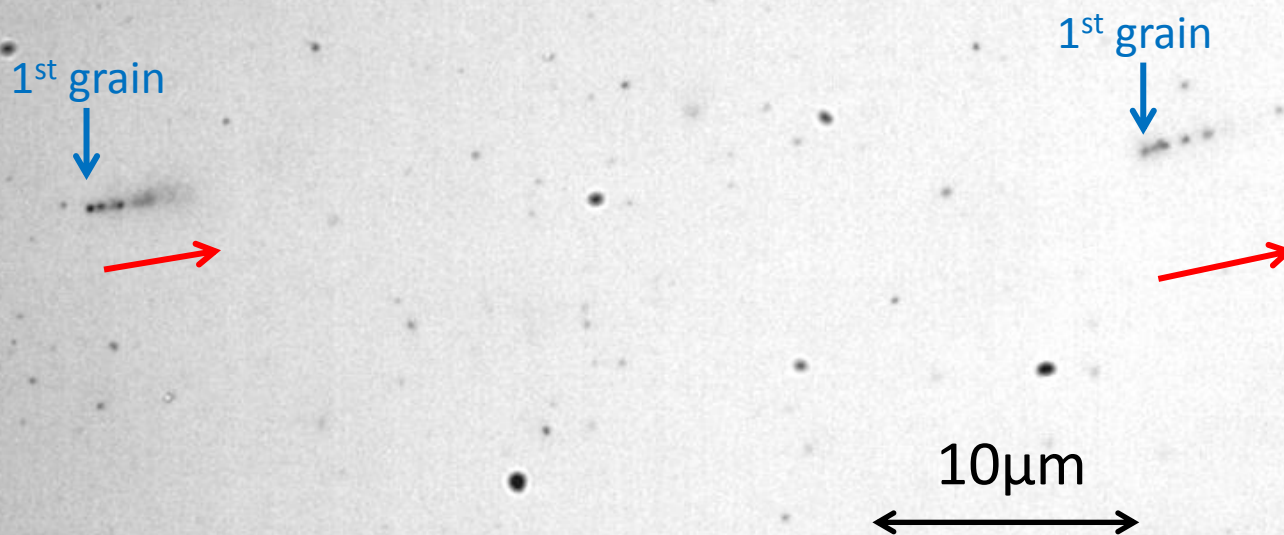
原子核乾板検出器

^3He 検出器

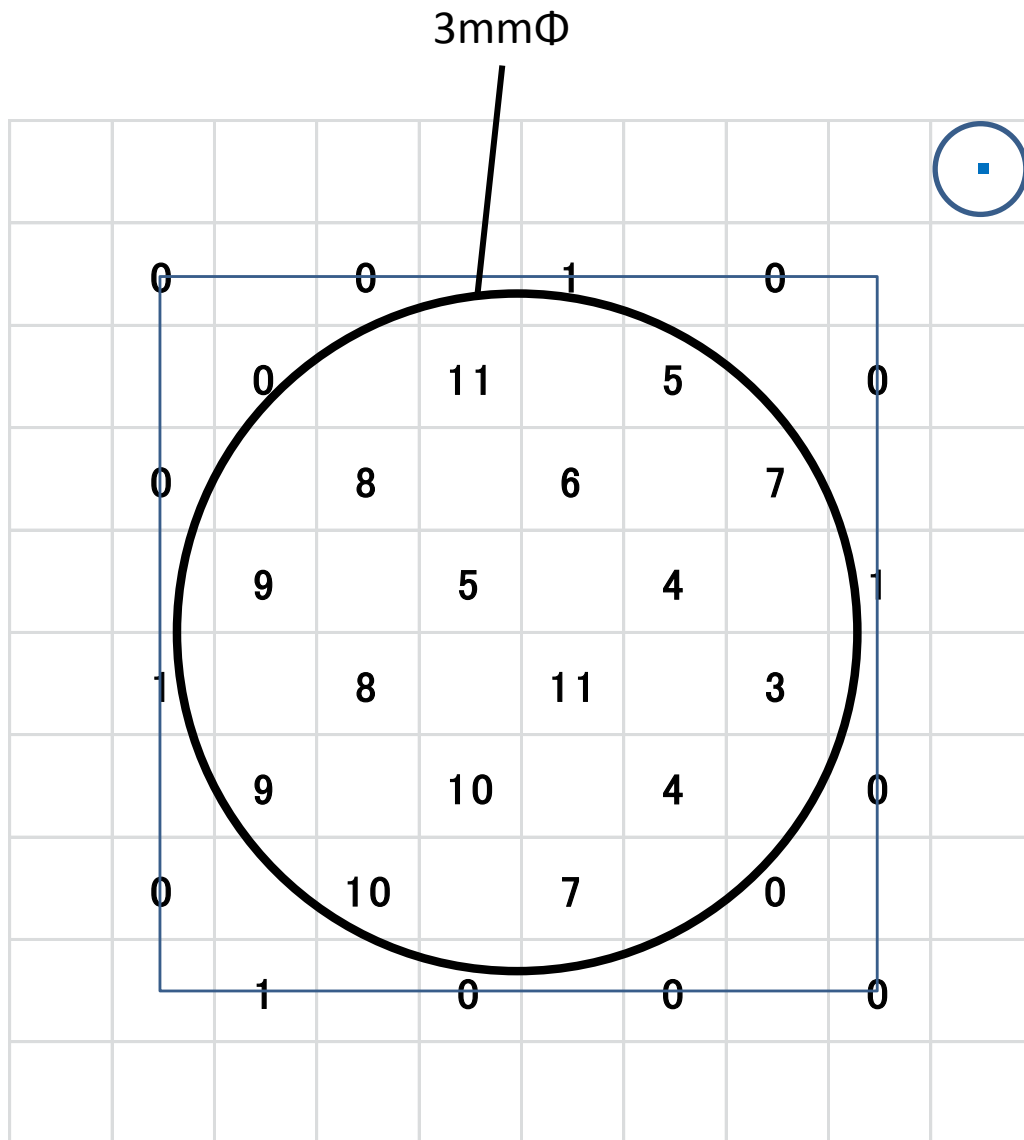
3mm Φ スリットを通し
 $(3.2 \pm 0.2) \times 10^6 \text{ n} / \sim 1300\text{s} / 3\text{mm}\Phi$ 照射

現像後ベース面(3mm Φ ピンホールの下流の顕微鏡写真)

- ・吸収からの飛跡を確認できた。



計数結果



- 3mmΦピンホール下流付近
32視野抽出、目視。

(450μm間隔、1視野=(100μm)²)

- 3mmΦ内の16視野で飛跡を計数

- 検出した飛跡:

118 本 / 16 視野

(118 ± √118)

= 7.4 ± 0.7 本 / 視野

入射中性子数:

(4.5 ± 0.2) × 10³ n / 視野

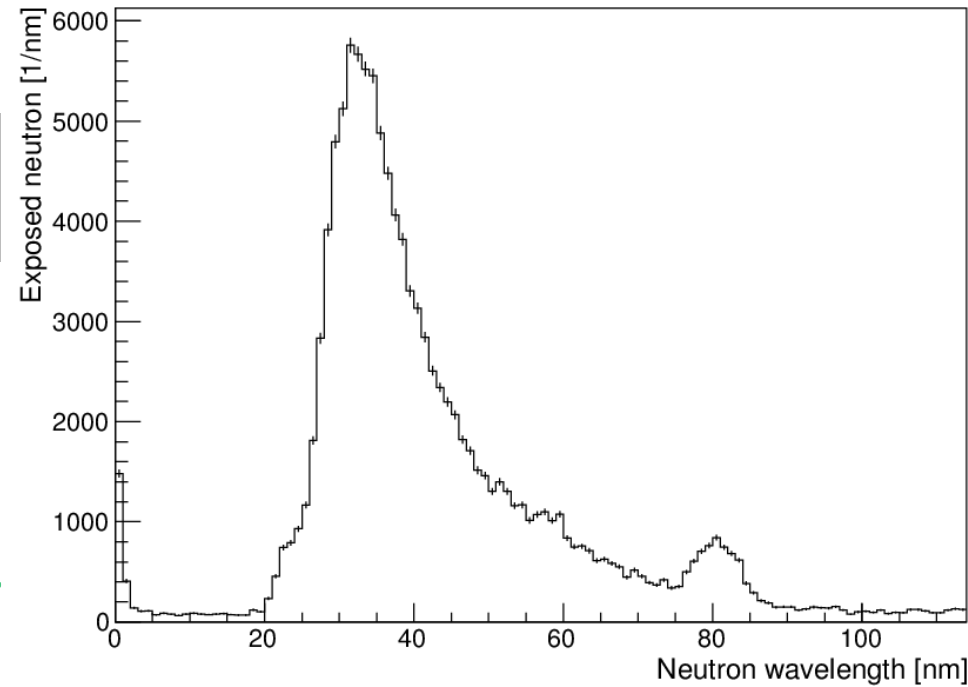
→ 検出効率: : (0.16 ± 0.02) %

(期待: (0.11 ± 0.03) %)

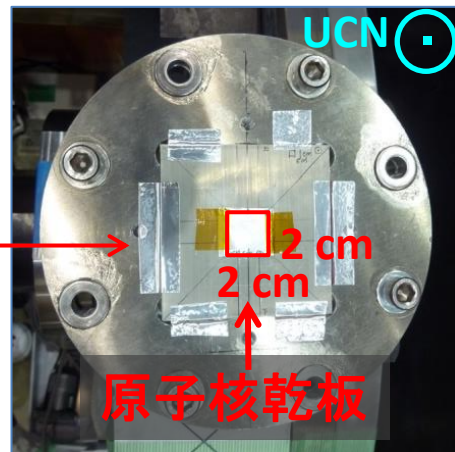
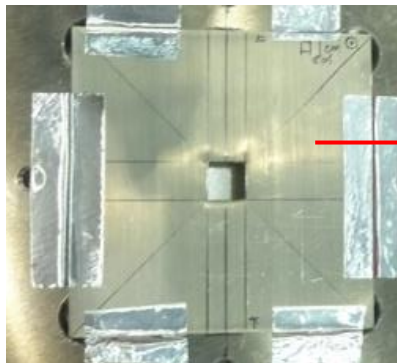
超冷中性子

@J-PARC MLF BL05

超冷中性子検出器で捉えた波長分布



Cd slit $\square 1\text{cm} \times 1\text{cm}$



期待検出効率: $(11 \pm 3) \%$

1cm \times 1cmのCdスリットを通して
原子核乾板に入射した中性子数:

$$1.25 \times 10^5 \text{ n/cm}^2$$

計数結果

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2	1	3	2	0	1	0
0	0	0	3	1	0	2	0	0
0	0	1	1	3	2	3	0	0
0	0	1	0	4	1	4	6	0
0	0	2	1	3	1	0	2	0
0	0	3	3	4	0	0	1	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0



$(1\text{cm})^2$

81視野を目視。

・ 1cm^2 の下流の42 視野で
計数

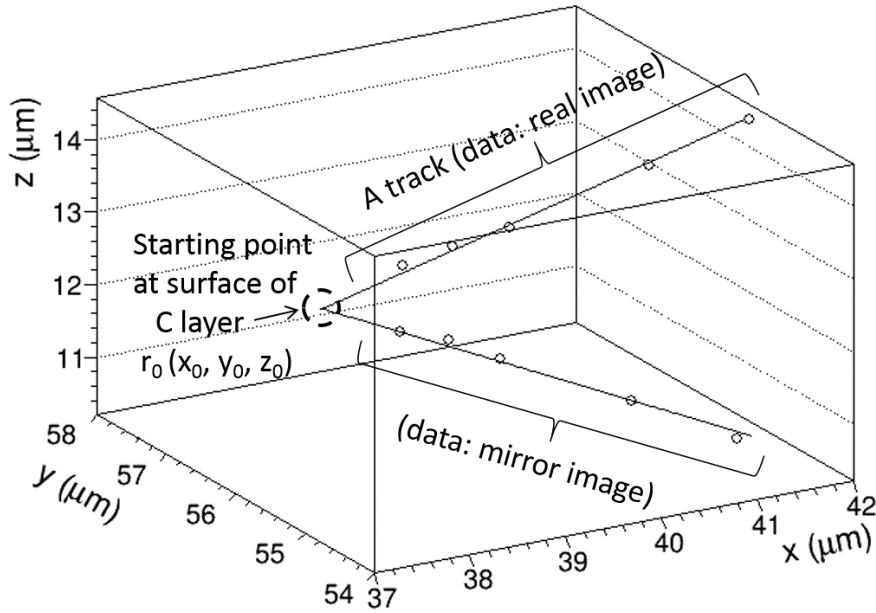
・ 検出した飛跡：
63本 / 42 視野
 $(63 \pm \sqrt{63})$
 $= (1.5 \pm 0.2)$ 本/視野

入射中性子数：
 (9.1 ± 0.6) n / 視野

→ 検出効率： $(12 \pm 2)\%$

(期待： $(11 \pm 3)\%$)

実際の飛跡を用いた分解能の見積もり



飛跡のグレインを直線フィット。



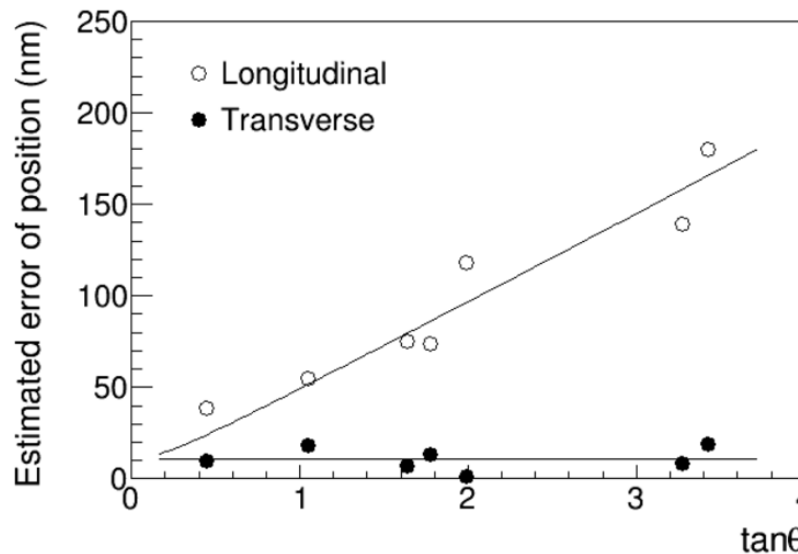
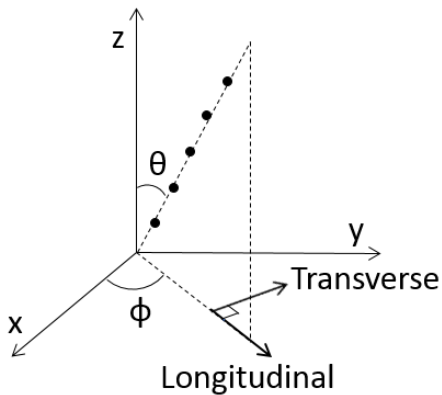
$^{10}\text{B}_4\text{C}$ 膜中央での位置の誤差。

Transverse方向
角度に依存しない
→分解能: 11 nm

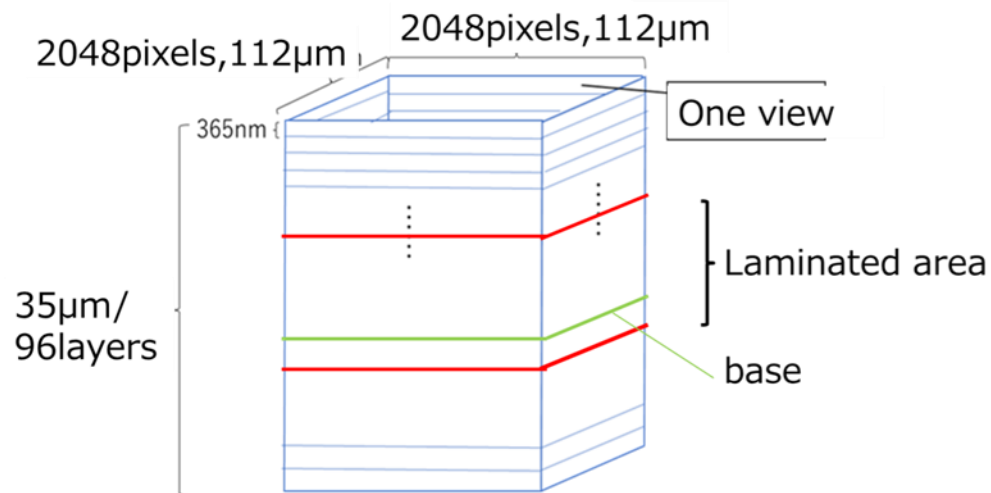
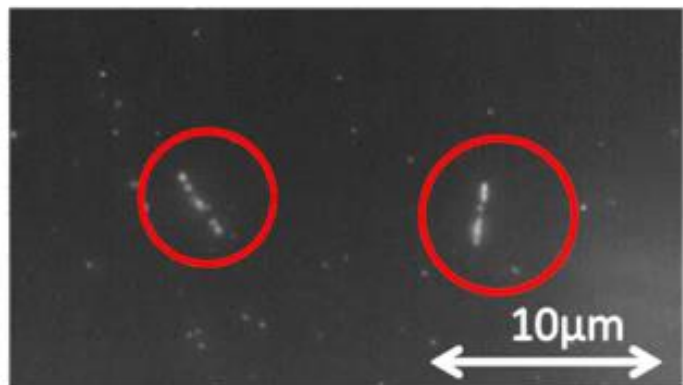
Longitudinal方向
角度依存。

全角度領域
→分解能: 11 nm~1 μm

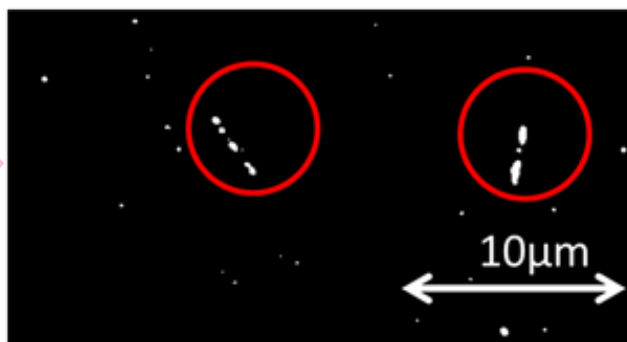
$\tan\theta < 1.9$ の飛跡
(全統計の34%)
→分解能: 11 ~ 99 nm



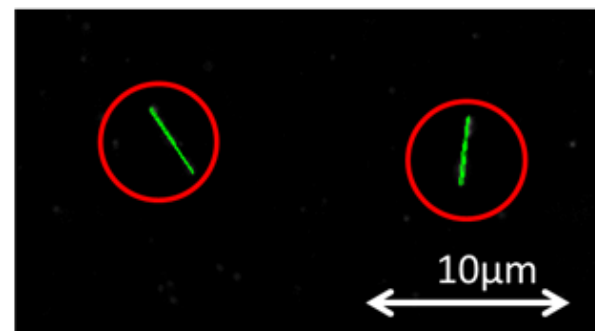
飛跡自動認識



binarization



Hough transformation



まとめ

- 超微粒子原子核乳剤と 中性子吸収後に dE/dx の大きい粒子を放出する核種を用い、従来よりも1~2桁高分解能な、100nm未満の分解能で使用可能な冷・超冷中性子検出器を開発した。
- Si基材上に安定な $^{10}\text{B}_4\text{C}$ (~50nm)-NiC-C層形成、超微粒子原子核乳剤を塗布。
- 検出効率を実測、
 - 冷中性子(~1000m/s)
検出効率 : $(0.16 \pm 0.02) \%$ (期待 $(0.11 \pm 0.03) \%$)
 - 超冷中性子(~10m/s)
検出効率 : $(12 \pm 2) \%$ (期待 $(11 \pm 3) \%$)
- 実際の飛跡を用いて分解能を見積もった。
 - 角度に依存しない方向の分解能: 11 nm
 - 角度に依存する方向の分解能 : 11 ~ 99 nm ($\tan\theta < 1.9$, 34%の統計)を得た。
- 専用の自動読み取りのアルゴリズムを開発中。
- 今後実戦投入していく。