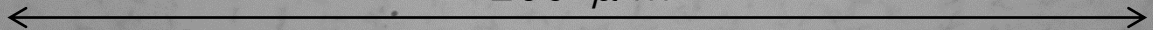


超高分解能 冷・超冷中性子検出器 の開発

[$^{10}\text{B}_4\text{C}$ 2 μm]
~4.5 trk/(3 μm)²

長縄直崇(名古屋大)

200 μm



Collaborators

栗野章吾, 梅本篤宏, 河原宏晃, 多田智美, 武藤直人, 市川豪, 北口雅暁, 広田克也,
清水裕彦, 日野正裕, 三島賢二, 田崎誠司, 有賀智子, 川崎真介, 關 義親

私は何故ここに？

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

私は学部4年のとき、原子核乾板にハートを盗まれました。
D2? のとき誘って頂き、ICEPPシンポジウムに初参加、出会いに感謝。
OPERA実験→高感度原子核乳剤を研究室で開発、
→原子核乾板の空間分解能を用いた冷、超冷中性子検出器を開発。

冷、超冷中性子とは？

よび方	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
速度 [m/s]	7	1×10^2	6×10^2	2.2×10^3	4.4×10^4	1×10^7
Energy [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
温度[K]	3×10^{-3}	6×10^{-1}	2.3×10^1	3×10^2	1×10^5	6×10^9
波長[m]	5×10^{-8} 500 atoms	4×10^{-9}	6×10^{-10}	1.8×10^{-10}	1×10^{-11}	4×10^{-14}

BEAM LINE



MOUNTAIN GUIDE [エリアガイド]

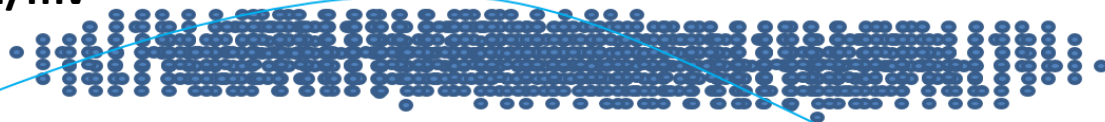
- ①-1 位置情報看板 ※ゲレンデ内
Location Sign 現在地を指
- ◆--- 超上級者コース
Expert Course
- 上級者コース
Advanced Course
- 中級者コース
Intermediate Course
- 初・中級者コース
Upper Beginner Course
- 初級者コース
Beginner Course
- パウダーエリア
Un groomed Area
- ▶ ナイター
Night Skiing
- リフト
Lift
- 咲花デビューチケットは
咲花第2ベア 咲花第3トリ
咲花北尾根クワッドに適用
Sakka Debut Ticket (valid at Sa
& Sakka Kitane 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
- 🏠 救急
SK
- 🏠 チ
Tic
- 🏠 レ
Re
- 🏠 多
Ac
- 🏠 キ
Ki
- 🏠 更
Ch
- 🏠 喫
Sm
- 🏠 A
AT
- 🏠 Ex
- 🏠 コ
Ce

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

冷、超冷中性子とは？

よび方	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
速度 [m/s]	7	1×10^2	6×10^2	2.2×10^3	4.4×10^4	1×10^7
Energy [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
温度[K]	3×10^{-3}	6×10^{-1}	2.3×10^1	3×10^2	1×10^5	6×10^9
波長[m]	5×10^{-8} 500 atoms	4×10^{-9}	6×10^{-10}	1.8×10^{-10}	1×10^{-11}	4×10^{-14}

$$\lambda = h/mv$$



- ・ 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...

高位置分解能 冷・超冷中性子検出器:

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の位置分布

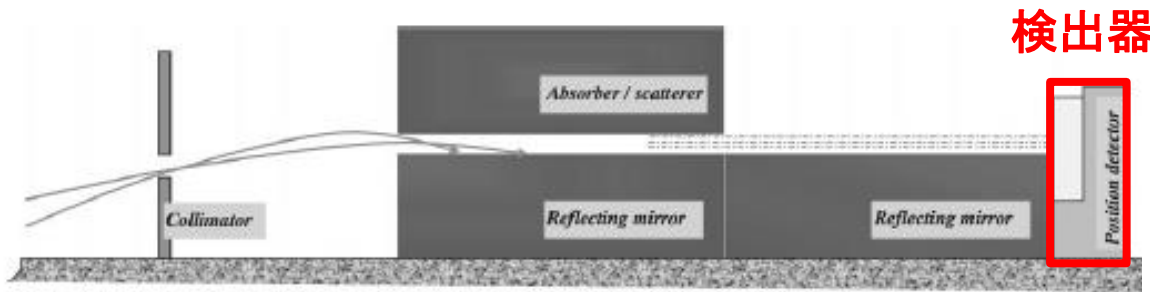


Fig. 3. General scheme of the experiment.

V.V. Nesvizhetsky et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 440 (2000) 754–759
 V.V. Nesvizhetsky et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 440 (2000) 127–137

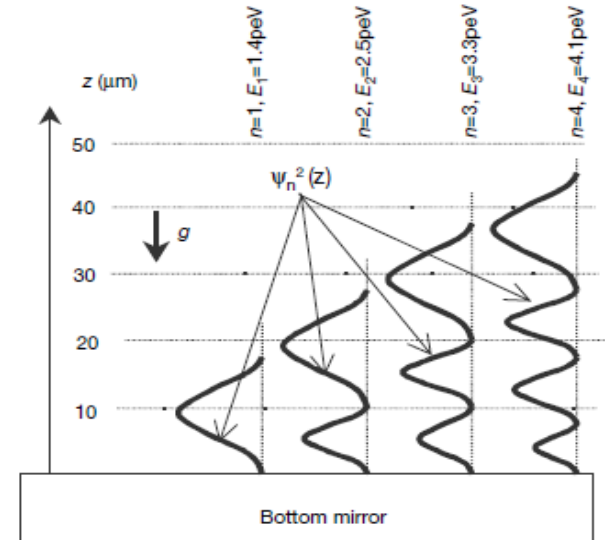
重力

逆二乗則

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

等価原理

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.



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

地上の一様近似の重力場中におけるシュレディンガー方程式

$$\hat{H} \psi = E \psi$$

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2} + V(z) \right) \psi(z) = E \psi(z)$$

ポテンシャル

$$V(z) = \begin{cases} mgz & (z > 0), \\ \infty & (z \leq 0) \end{cases}$$

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2} + mgz \right) \psi(z) = E \psi(z)$$

境界条件

$\psi(0) = 0, \psi(z) \rightarrow 0 (z \rightarrow \infty)$ を課すと、

$$\psi_n(z) = C_n Ai\left(\frac{z}{z_0} - \frac{E_n}{E_0}\right) \quad (C_n: \text{規格化定数})$$

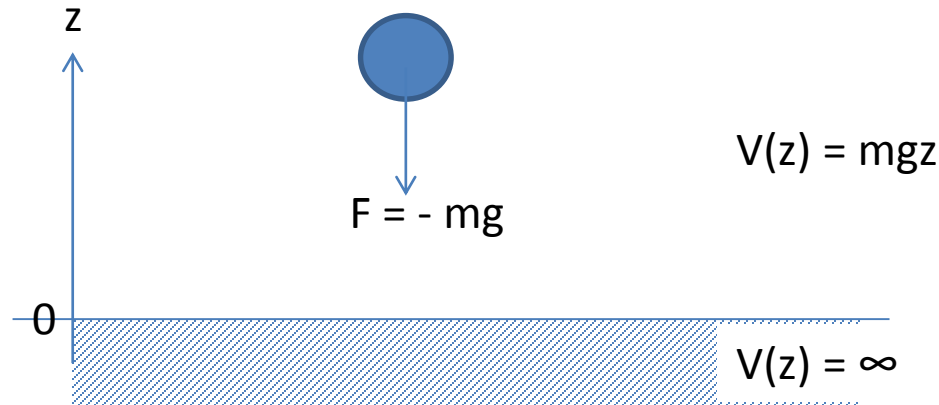
$Ai(x)$: Airy関数

$$Ai(x) \equiv \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \cos\left(\frac{t^3}{3} + xt\right) dt$$

地球上の中性子

$$z_0 \equiv \left(\frac{\hbar^2}{2m^2g}\right)^{1/3} \sim 5.87 \mu\text{m}$$

$$E_0 \equiv \left(\frac{mg^2 \hbar^2}{2}\right)^{1/3} \sim 0.602 \text{ peV}$$



中性子の存在確率
定在波

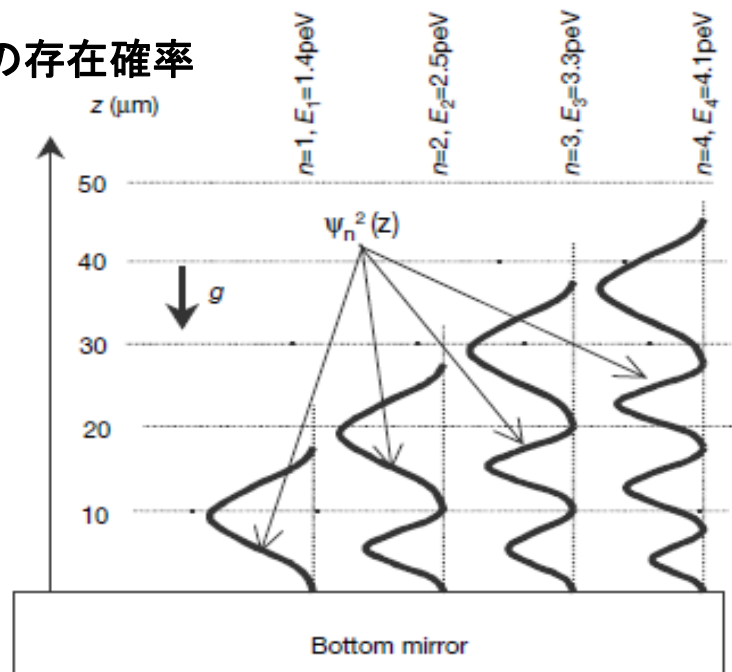
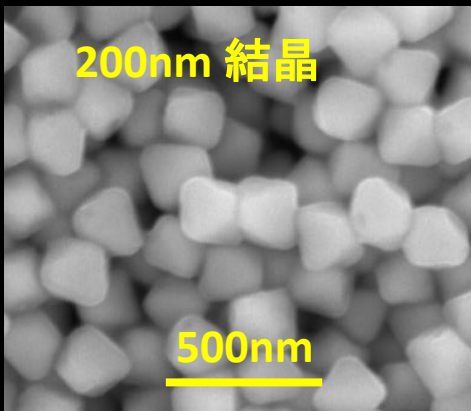
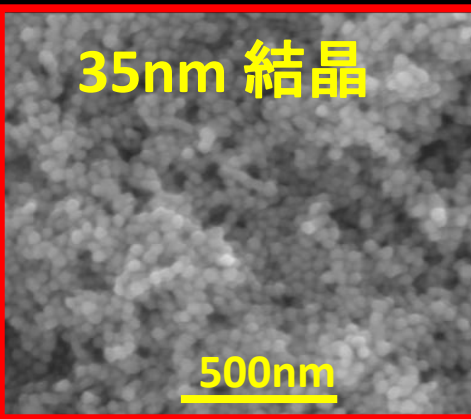


Figure 1 Wavefunctions of the quantum states of neutrons in the potential well formed by the Earth's gravitational field and the horizontal mirror. The probability of finding neutrons at height z , corresponding to the n th quantum state, is proportional to the square of the neutron wavefunction $\psi_n^2(z)$.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

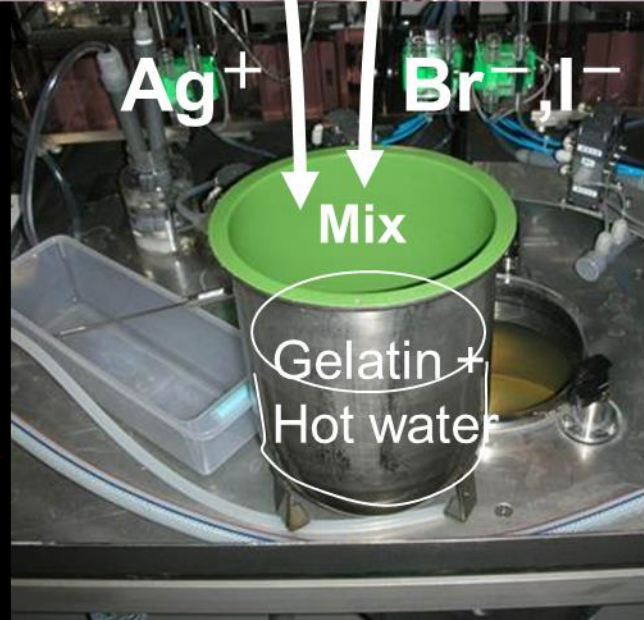
微粒子原子核乳剤 製造@名古屋大学 2010～



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)

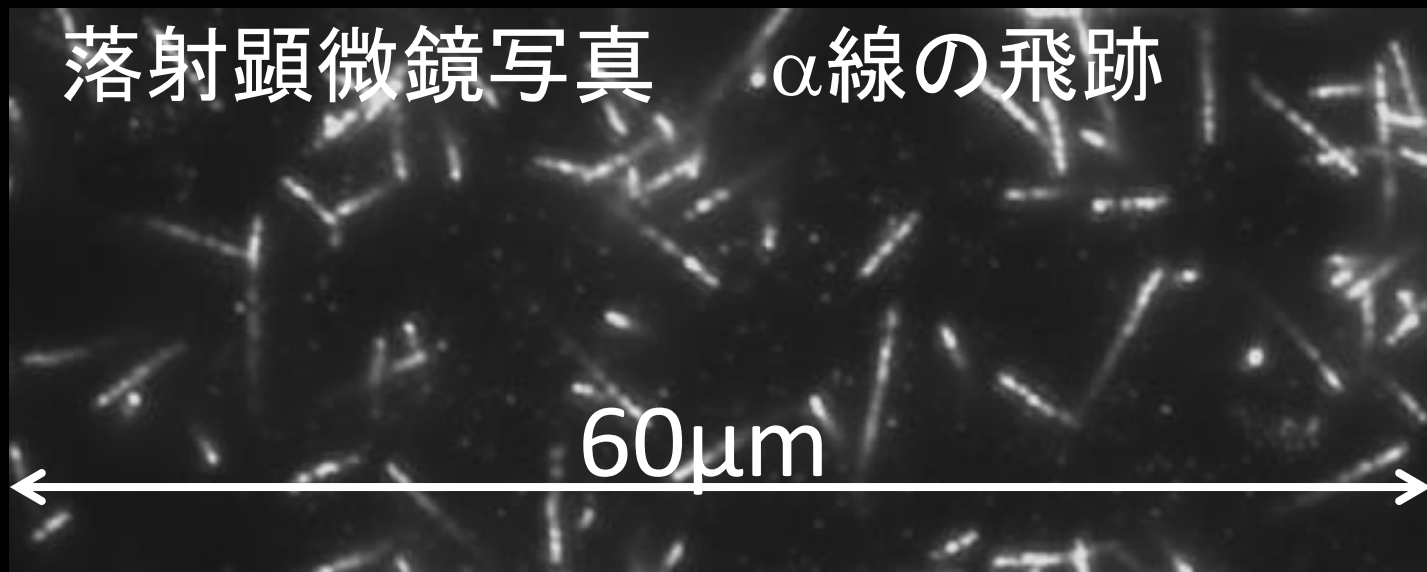
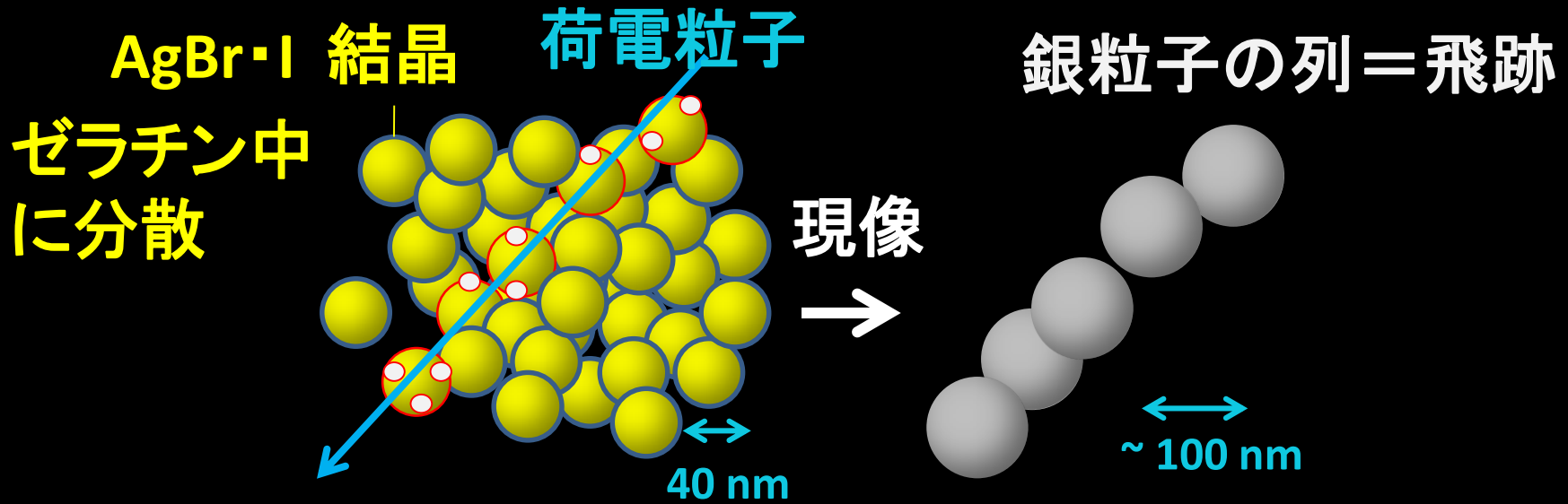


原子核乳剤とは



超微粒子原子核乳剤

高分解能3D飛跡検出器



中性子のおもな検出方法

原子核乾板の場合、荷電粒子に変換

よび方	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
速度 [m/s]	7	1×10^2	6×10^2	2.2×10^3	4.4×10^4	1×10^7
Energy [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
波長[m]	5×10^{-8} 500 atoms	4×10^{-9}	6×10^{-10}	1.8×10^{-10}	1×10^{-11}	4×10^{-14}
おもな 検出法	← 中性子を吸収しやすい核種による吸収			→ 水素原子核の散乱		



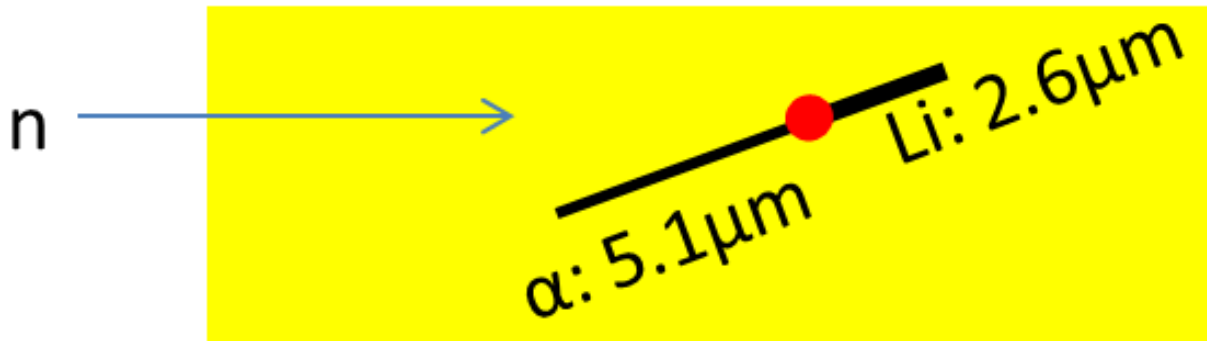
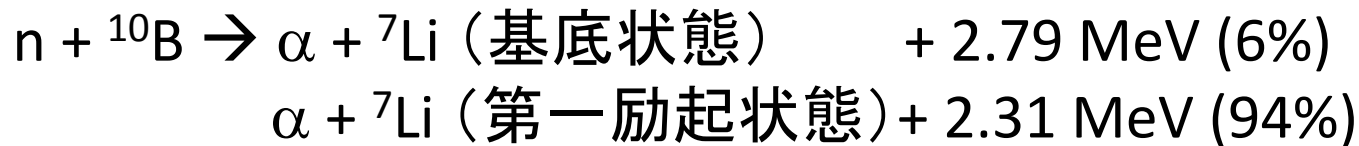
検出原理

核種による中性子吸収

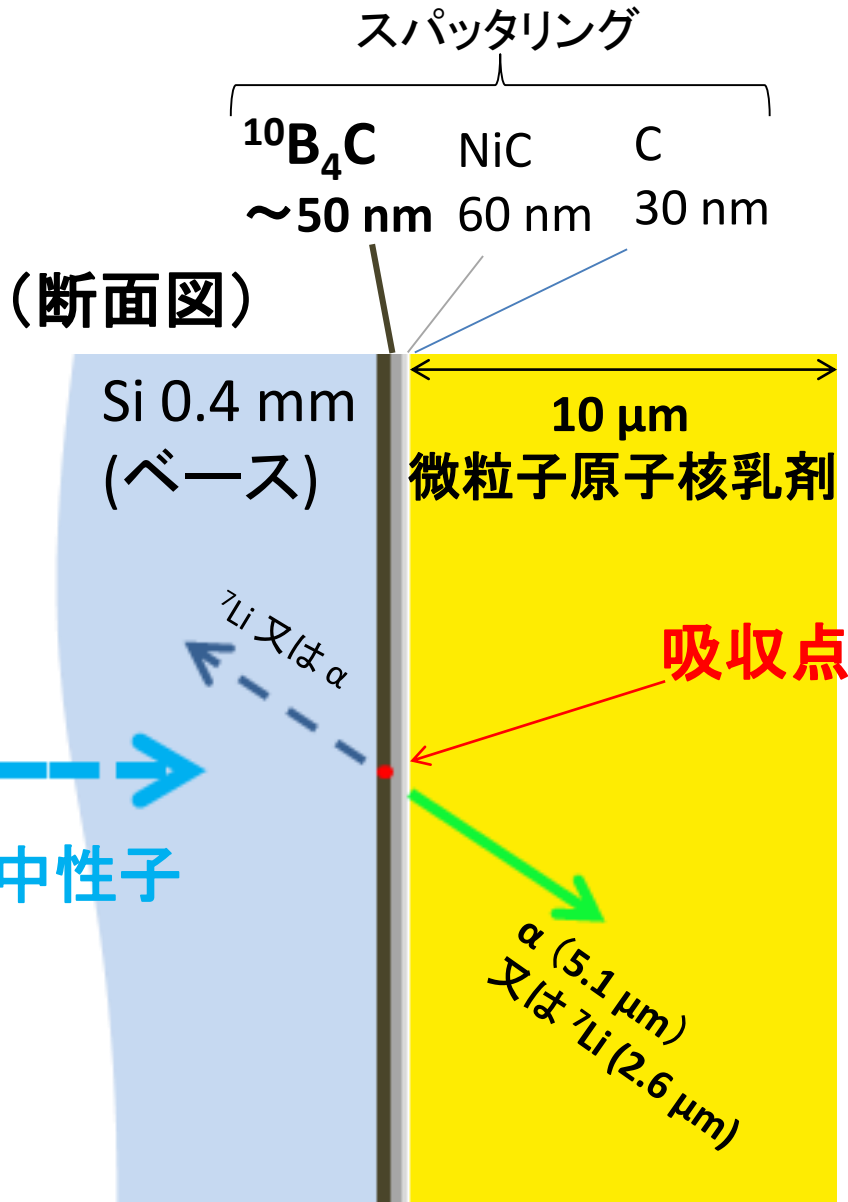
- 中性子吸収断面積 大。
- 吸収後 高dE/dx粒子を放出。

→ ^{10}B

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



検出器の構造



Si板に $^{10}\text{B}_4\text{C}$ (50nm)-NiC-C
薄膜をスパッターし、
乳剤を塗布

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

位置分解能 < 100 nm を期待

膜中の ^{10}B による中性子吸収率:
(透過率測定より実測)

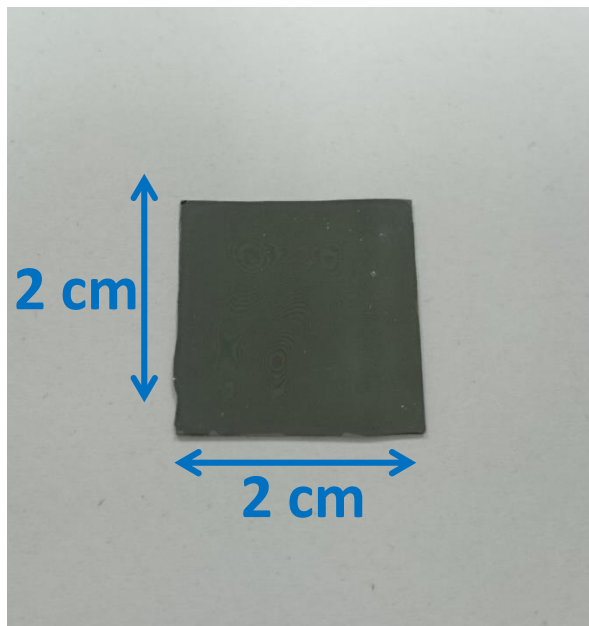
(13 \pm 3) % @ 10 m/s

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

検出器外観

微粒子原子核乳剤
塗布・乾燥後

アルミ箔で二重に包み遮光



吸収反応からの飛跡

現像後ベース面(3mm Φ ピンホールの下流の顕微鏡写真)

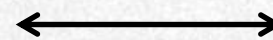
1st grain



1st grain

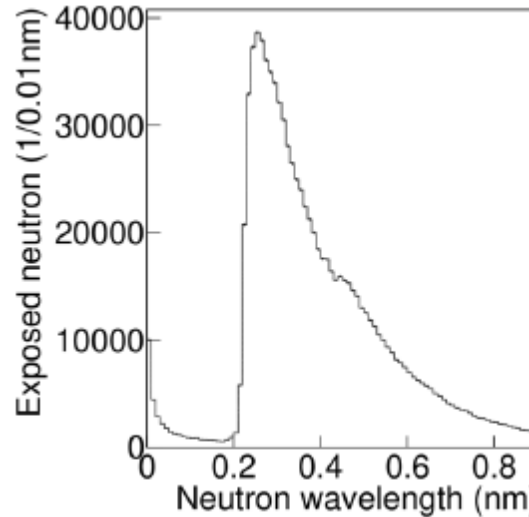
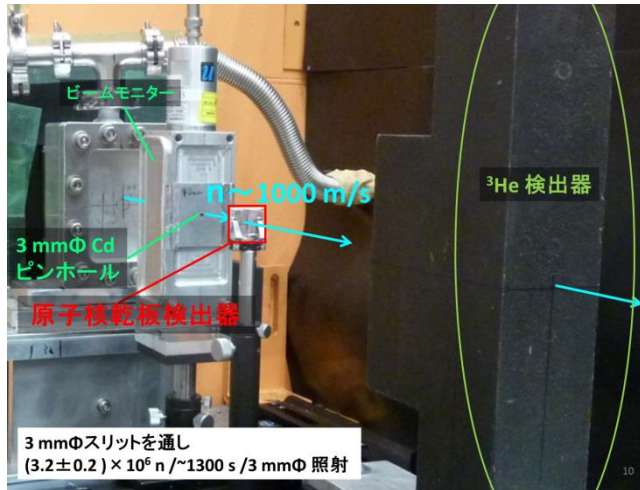


10 μ m



検出効率

冷中性子 (~ 1000 m/s 照射@ J-PARC MLF BL05)



現像後、飛跡を目視計数

検出効率 :

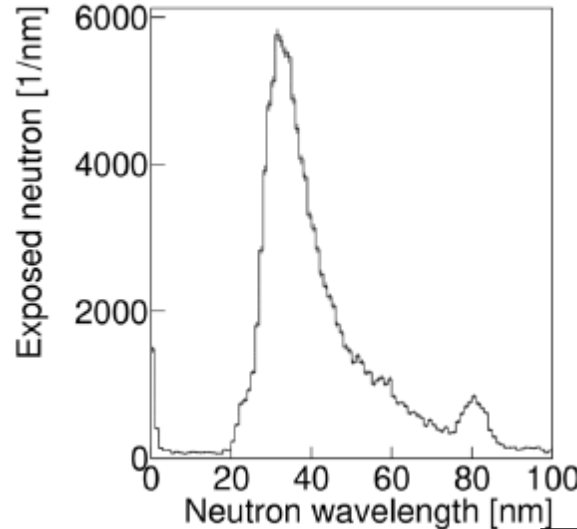
$$(0.163 \pm 0.015_{\text{stat}} \pm 0.013_{\text{sys}}) \%$$

(期待 :

$$(0.112 \pm 0.001_{\text{stat}} \pm 0.032_{\text{sys}}) \%$$

)

超冷中性子 (~ 10 m/s 照射@ J-PARC MLF BL05)



検出効率 :

$$(10.3 \pm 1.3_{\text{stat}} \pm 1.1_{\text{sys}}) \%$$

(期待 :

$$(10.2 \pm 0.1_{\text{stat}} \pm 2.7_{\text{sys}}) \%$$

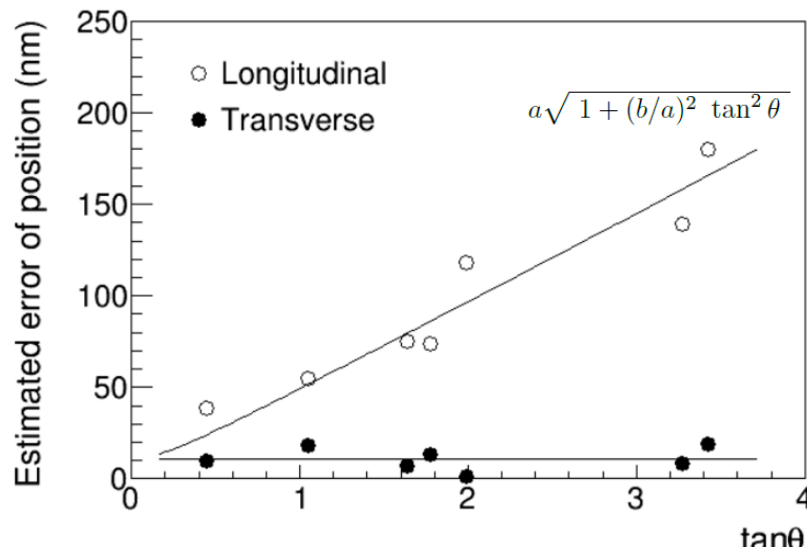
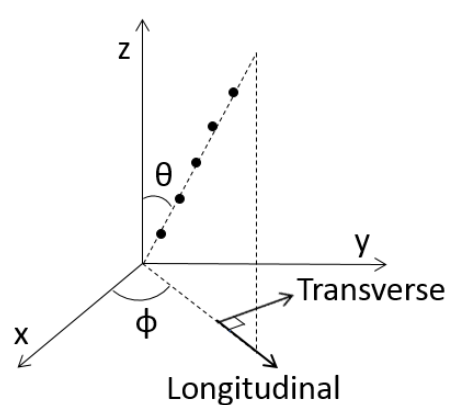
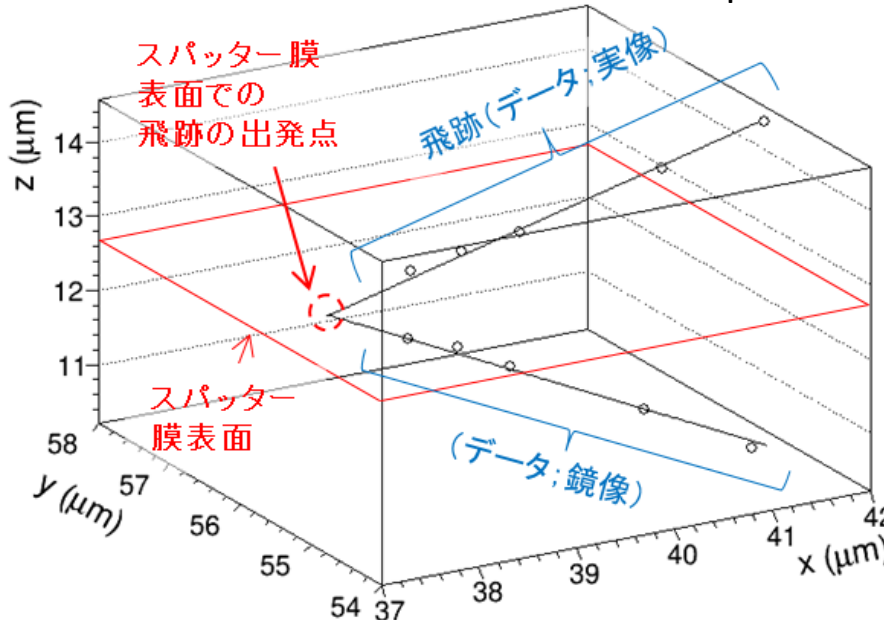
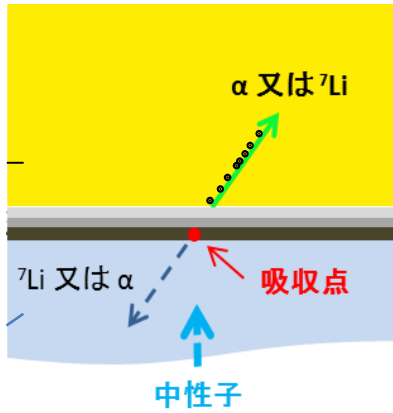
これらより外挿、

$$7 \text{ m/s} : (17.4 \pm 1.9) \%$$

$$2200 \text{ m/s} : (0.055 \pm 0.006) \%$$

実際の飛跡を用いた分解能の見積もり

飛跡の銀粒子を直線フィット → $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 膜中央での位置の誤差。



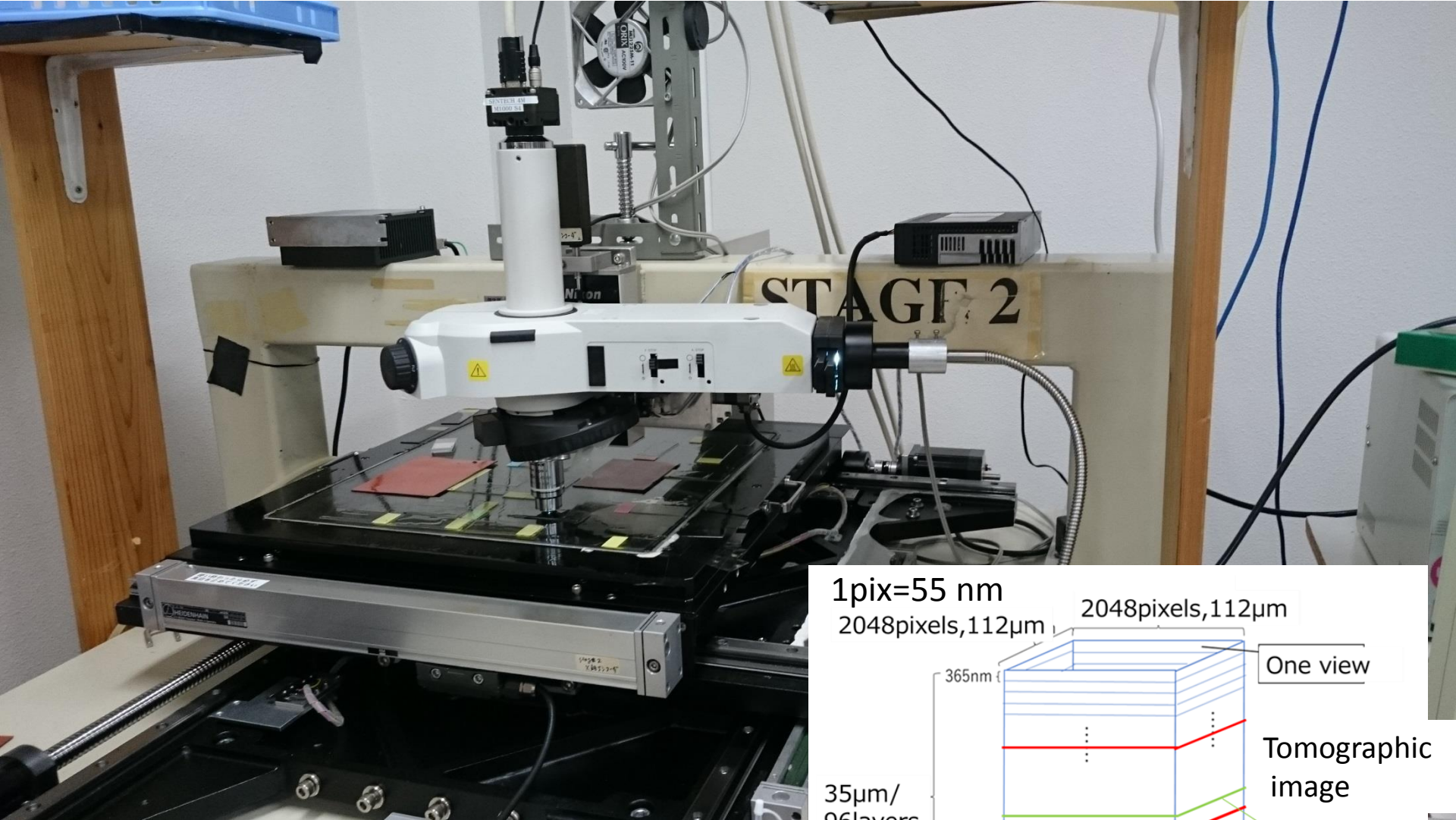
Transverse方向
 角度に依存しない
 →分解能: 11 nm

Longitudinal方向
 角度依存。

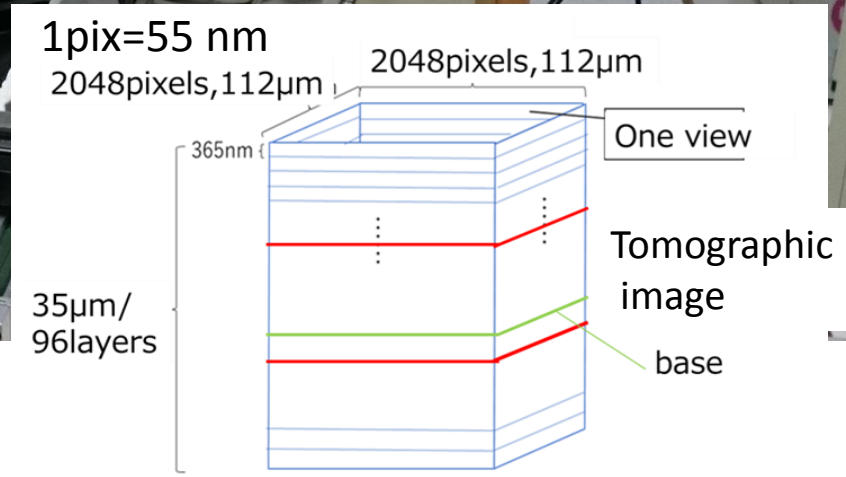
全角度領域
 →分解能: 11 nm~1μm

tanθ < 1.9 の飛跡
 (全統計の34%)
 →分解能: 11 ~ 99 nm

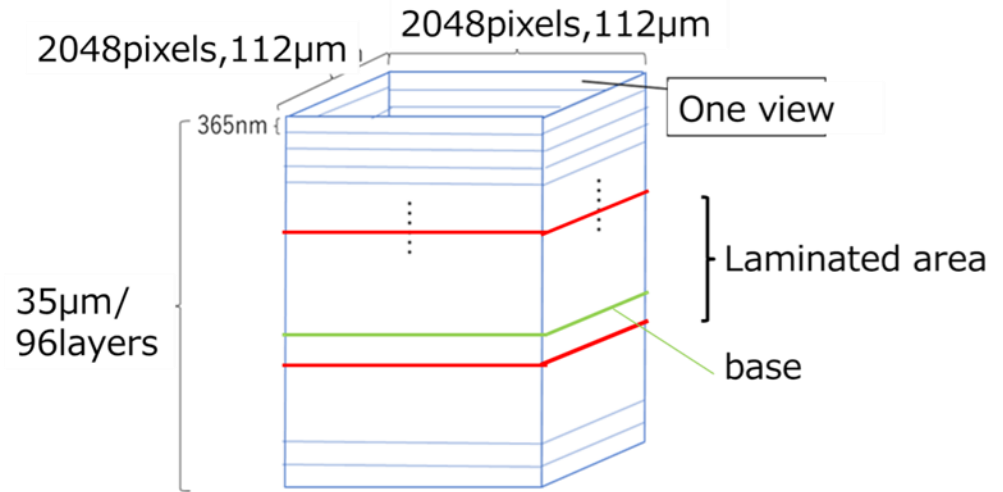
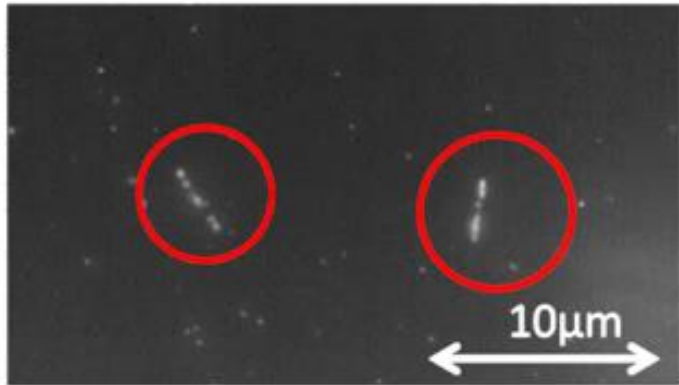
飛跡の顕微鏡画像の自動撮像



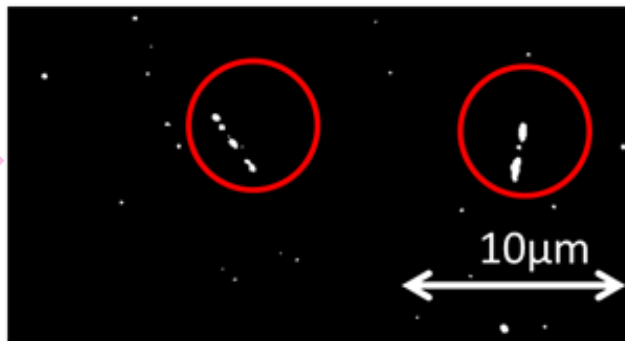
光学系： $\lambda = 390 \text{ nm}$ (LED光源)
NA(開口数) = 1.4
 n (媒質(オイル)の屈折率) = 1.5



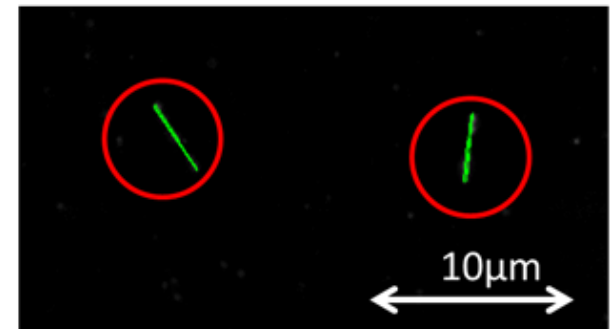
飛跡の自動認識アルゴリズム1



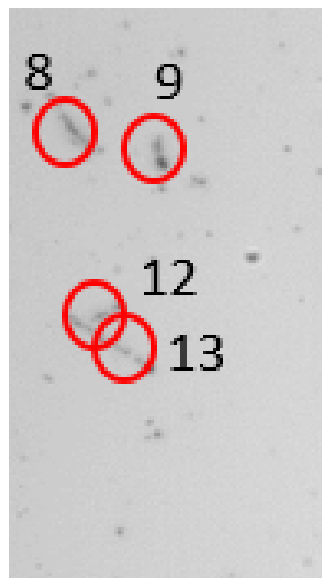
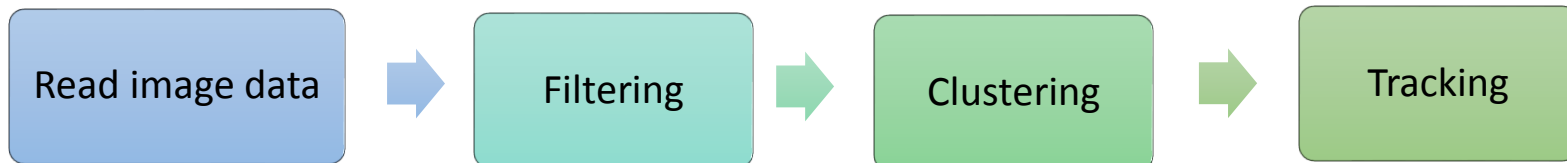
binarization



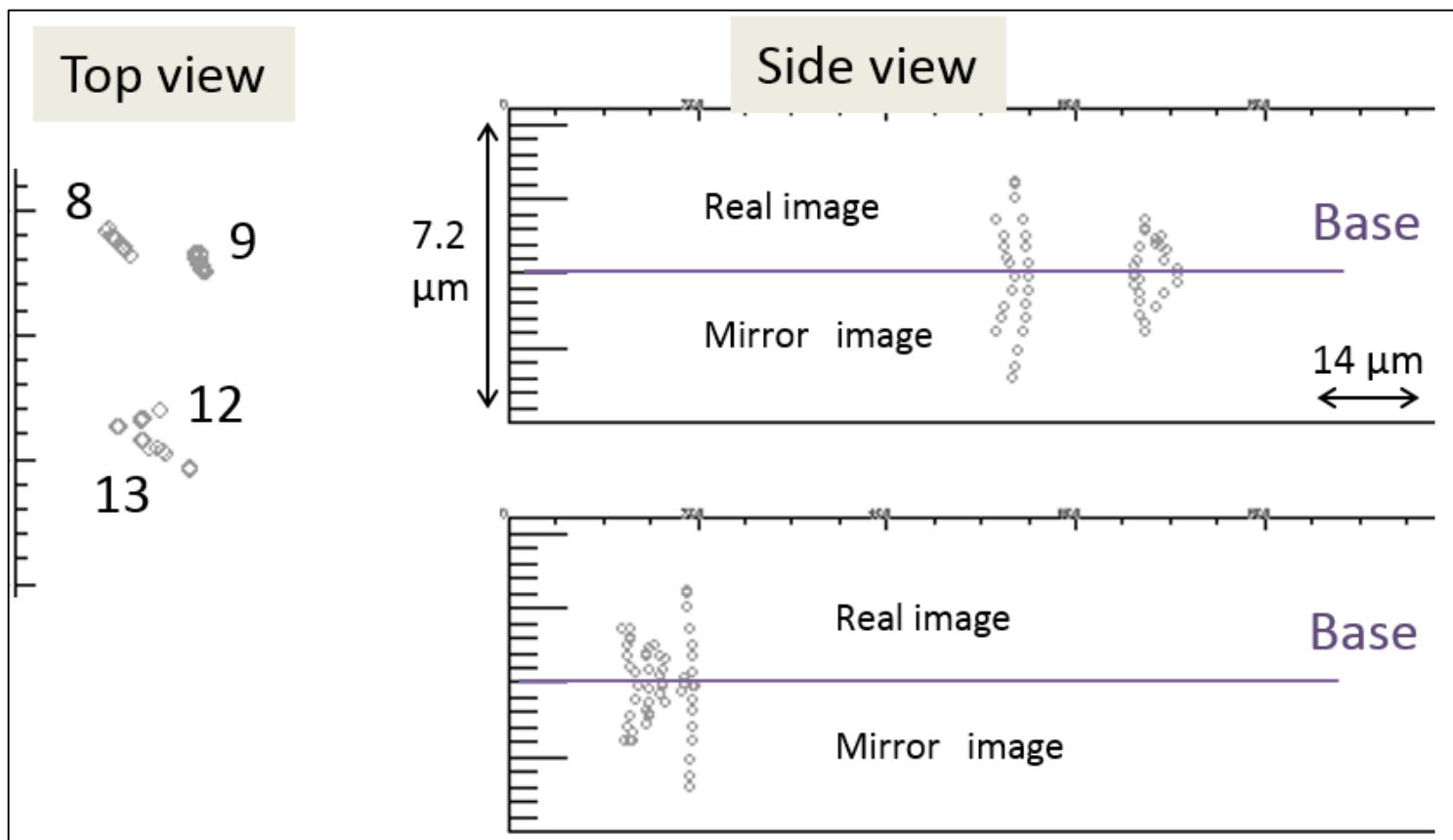
Hough transformation



飛跡の自動認識アルゴリズム2



5.1 μm



広範囲高精度視野接続のためのマーク

- ・ cmを超える距離に渡って100 nmオーダーの精度で接続したい



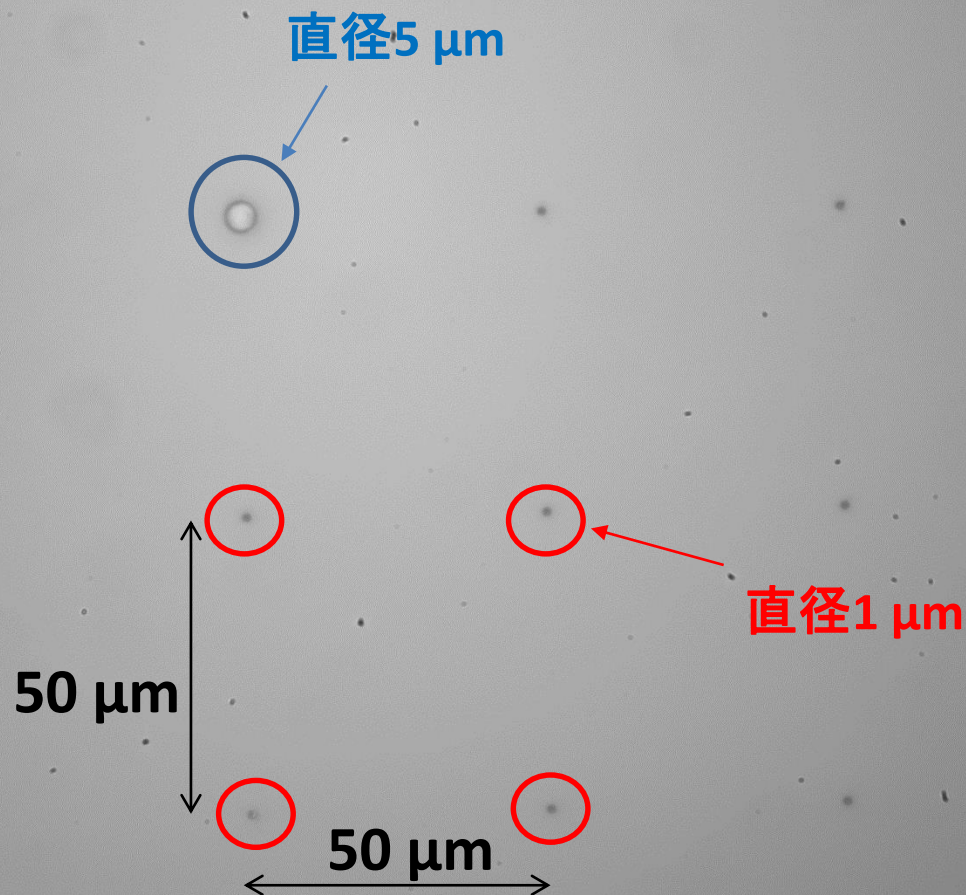
- ・ 各視野 $(100\mu\text{m})^2$ に座標値が既知の基準点(マーク)を打つ。
- ・ マークの直径は $\sim 1\mu\text{m}$ 以下。
- ・ 歪みにくい場所に打つ → 基材表面(Si板)に打つ。



電子線露光 + 反応性イオンエッチング

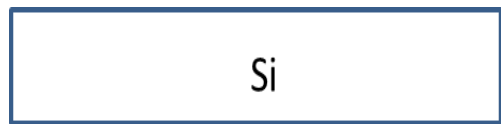
広範囲高精度視野接続のためのマーク

マークを打ったSi板表面 落射光学顕微鏡 低倍率

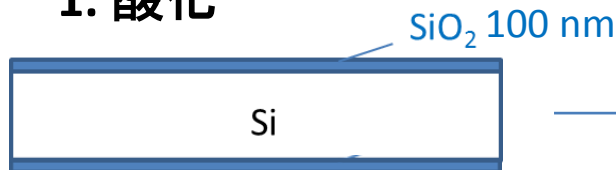


マーク試作(名大 微細加工プラットフォーム)

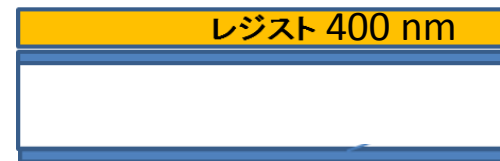
Siウェハ(3インチ、350 μ m厚)



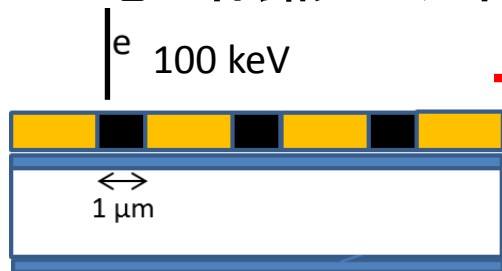
1. 酸化



2. レジスト塗布



3. 電子線露光+座標測定 (JBX6300FS)

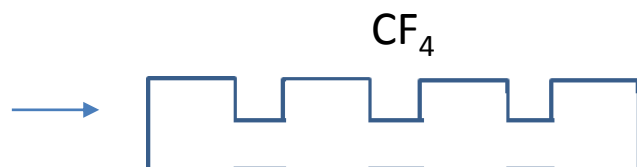
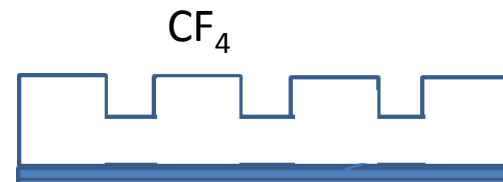
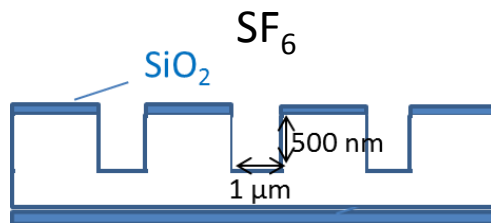
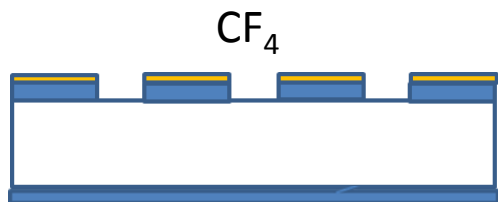


... 全マークの座標値を
20 nm以下の精度で得た。

4. レジスト現像



5. 反応性イオンエッチング



(\rightarrow 10B4C-NiC-C層のスパッタリング、乳剤塗布へ)

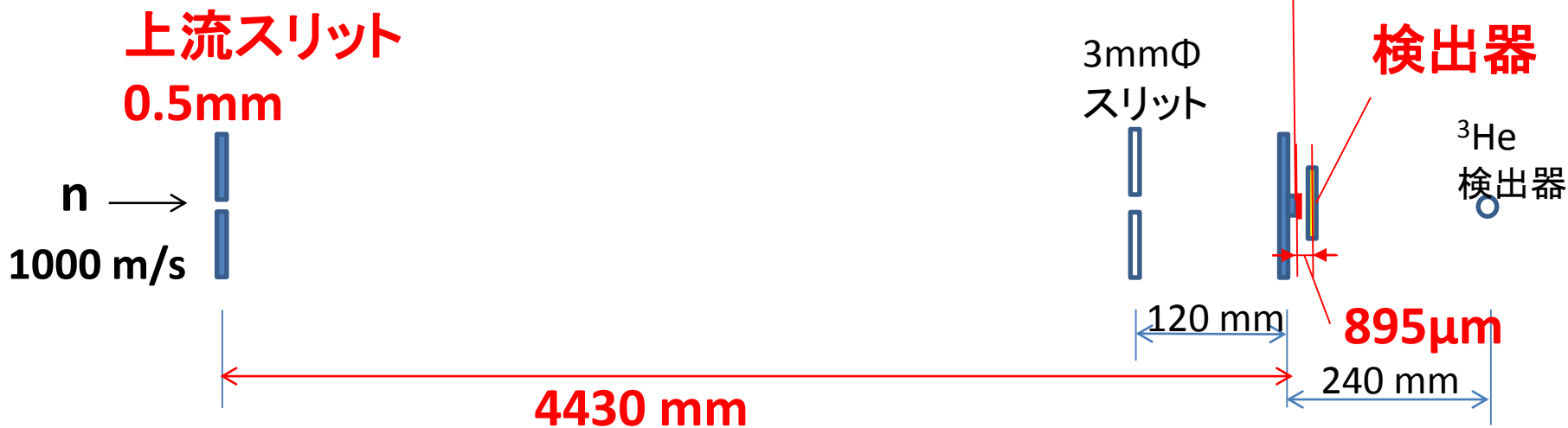
実際に μm オーダーの縞模様を撮る (J-PARC MLF BL05)

目的

- ・広範囲 ($\sim\text{cm}$) に渡る μm オーダーの構造の縞模様を撮る。
- ・精密マークを使った視野つなぎ、解析を実際に行う。

Gd格子
開口 $\sim 3\mu\text{m}$
ピッチ $9\mu\text{m}$

SET UP (TOP VIEW)

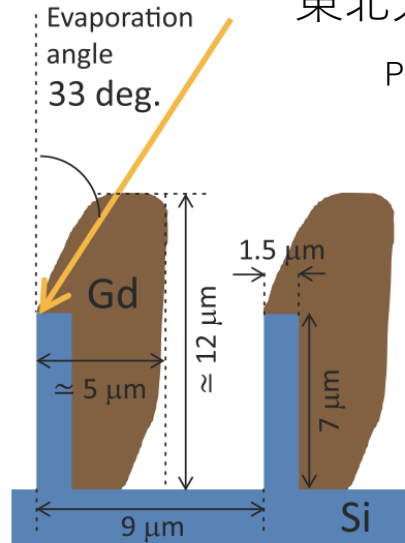


発散角 $\Delta\theta \sim \pm 0.056 \text{ mrad}$

使用したGd 格子

Si格子へのGdの真空斜め蒸着で作られている。

設計の模式図

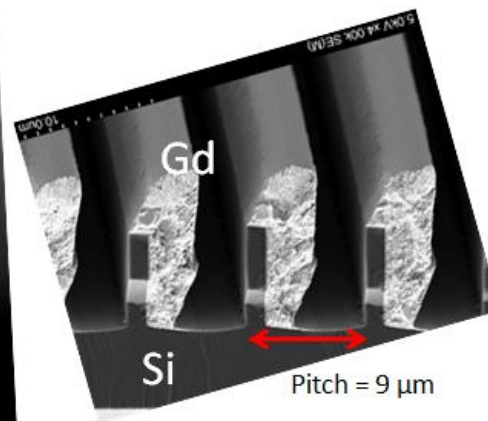
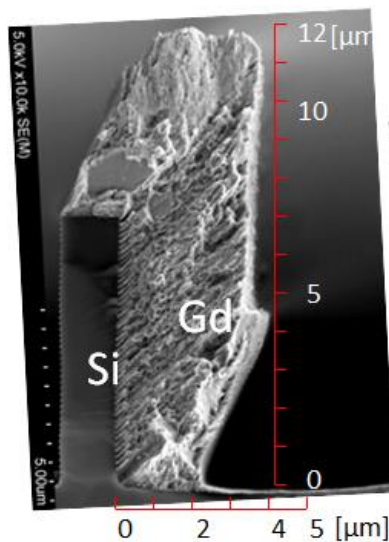


東北大 佐本哲雄さん作。

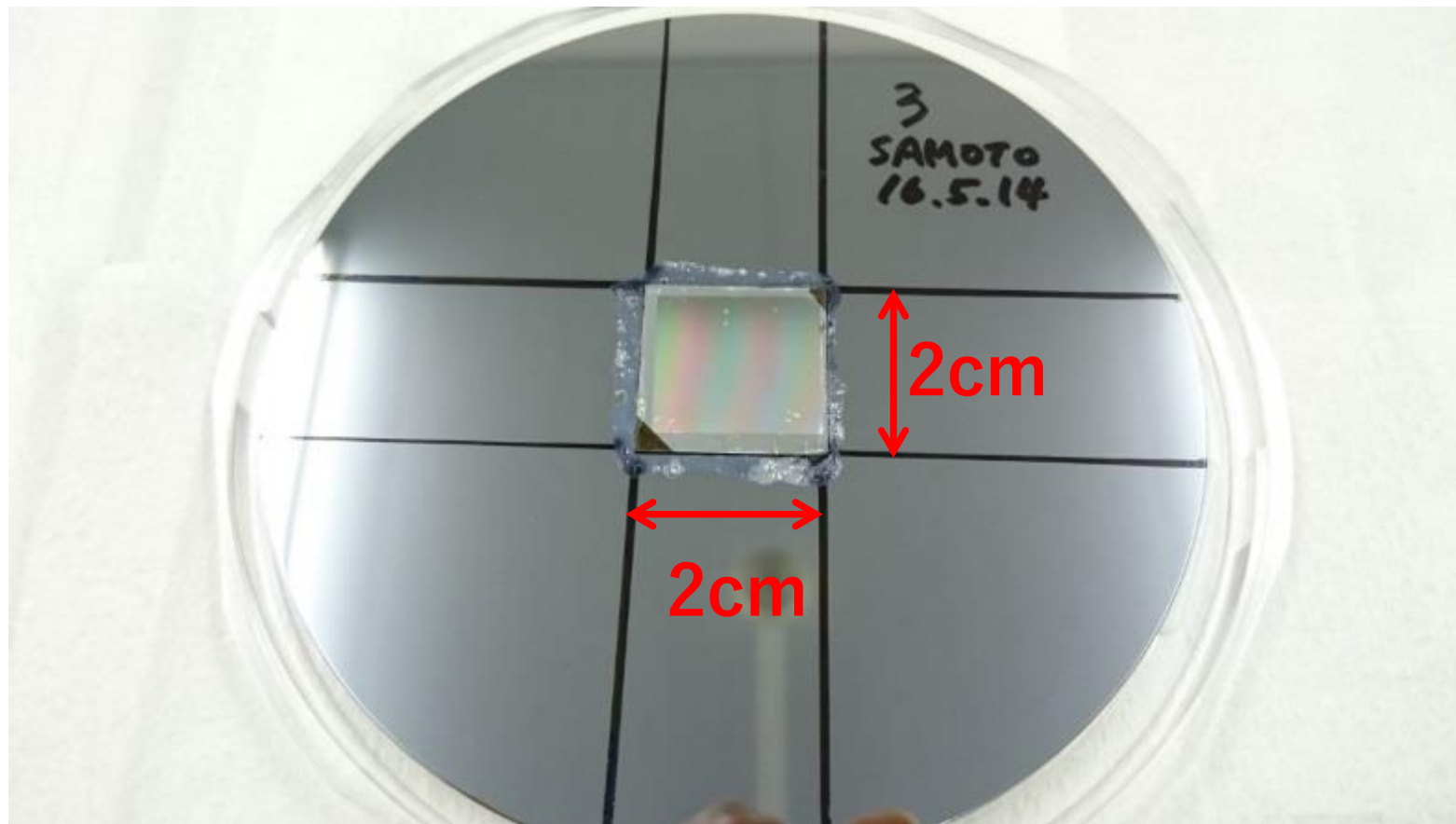
Physics Procedia 88 (2017) 217 – 223

開口 $\sim 3\mu\text{m}$
ピッチ $9\mu\text{m}$
の周期構造

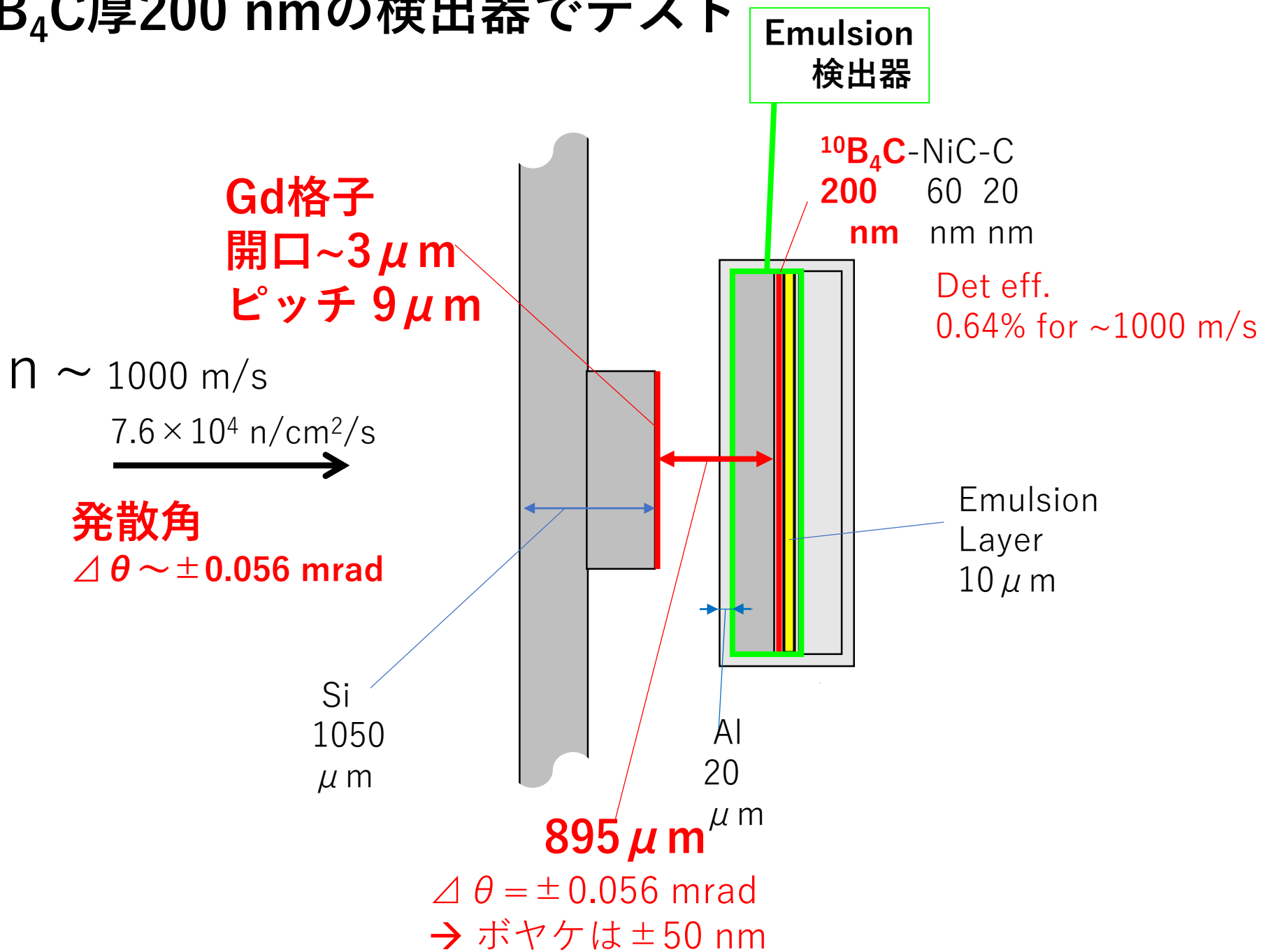
SEM像



Gd thickness = $9.8\mu\text{m}$



$^{10}\text{B}_4\text{C}$ 厚200 nmの検出器でテスト



「マーク③」

$^{10}\text{B}_4\text{C}$ 200 nm

5.6時間照射

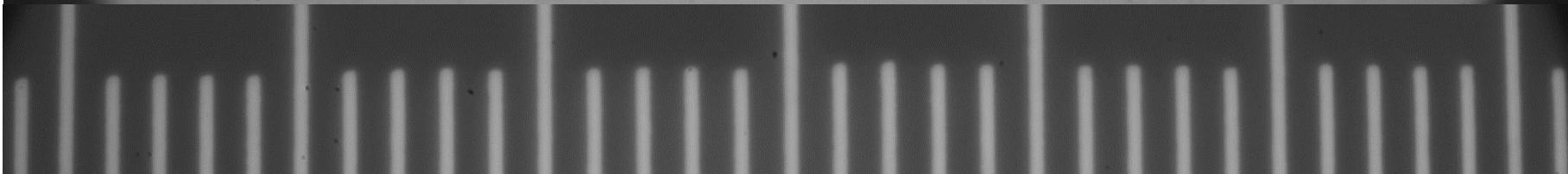
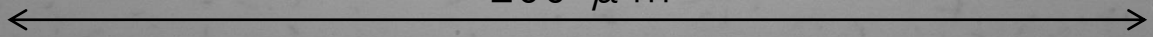
$\sim 1 \text{ trk}/(3 \mu\text{m})^2$

マニュアル顕微鏡

(視野つなぎ用
マークも見えている。)

スリットパターンが見えている。

200 μm



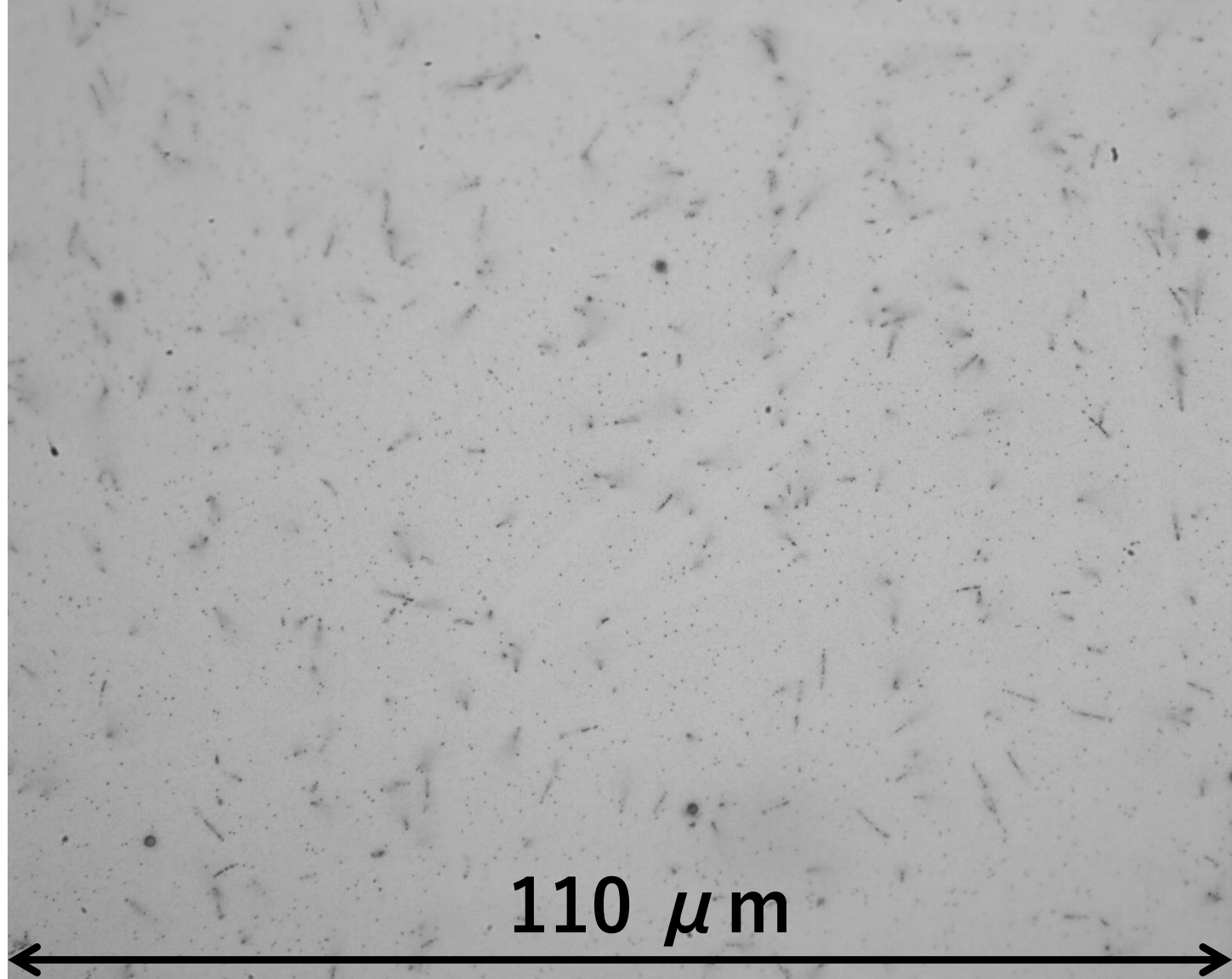
「マーク③」

$^{10}\text{B}_4\text{C}$ 200 nm

5.6時間照射

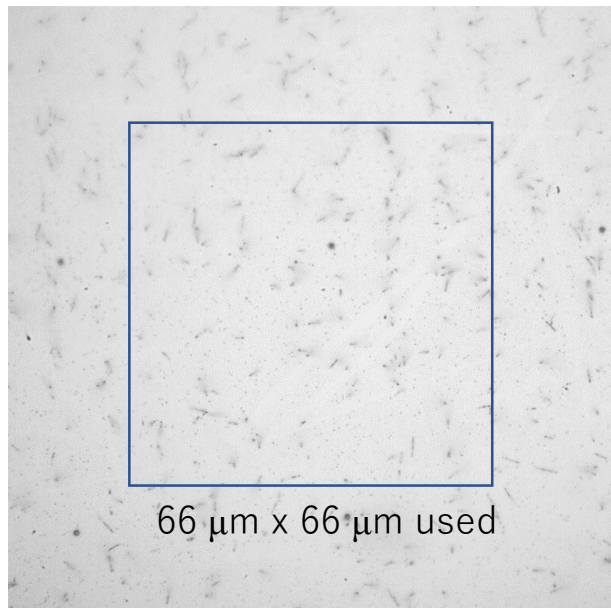
$\sim 1 \text{ trk}/(3 \mu\text{m})^2$

自動撮像顕微鏡(PTS2)画像 スパッター膜面付近

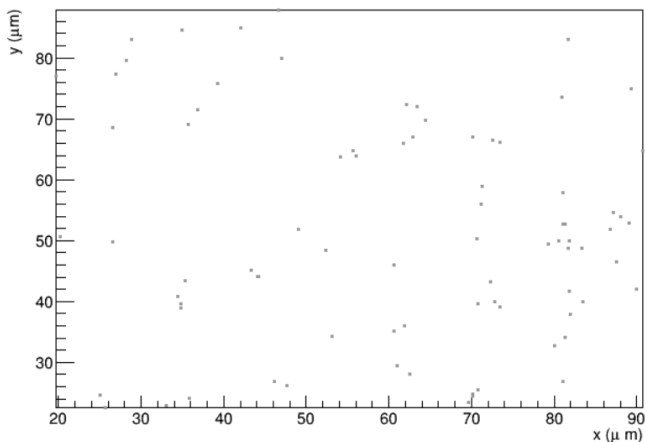


110 μm

飛跡の自動認識と 周期パターンの探索



ベース面での飛跡の位置
(アクセプタンス: $\tan \theta < 1.2$, 飛跡銀粒子数 > 4)

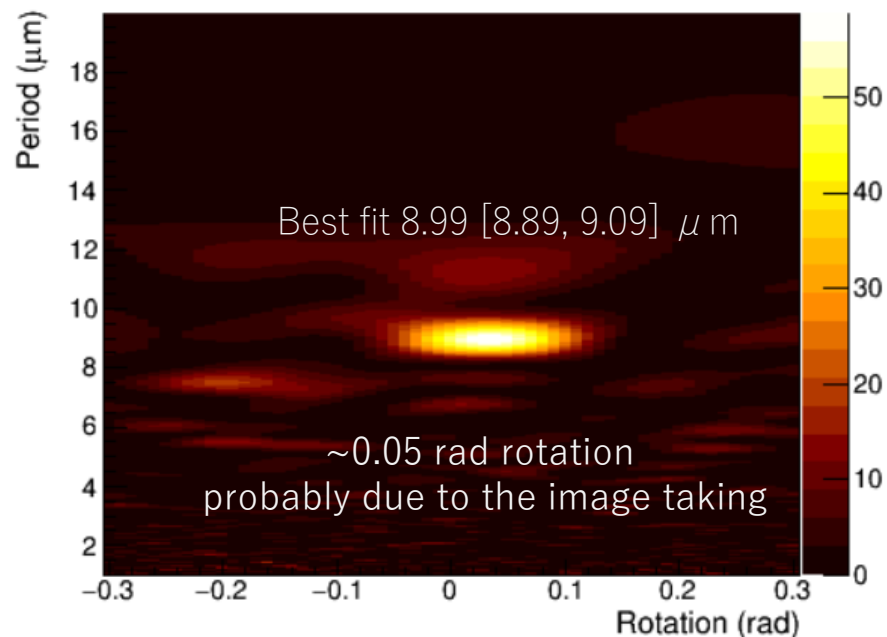


Rayleigh test:

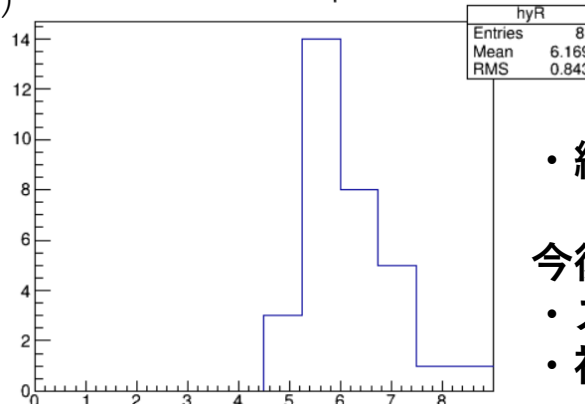
search for periodicity d and relative rotation α

Maximize $2/n [(\sum \sin(2\pi x_i/d))^2 + (\sum \cos(2\pi x_i/d))^2]$

where $x_i = x \cos \alpha + y \sin \alpha$



Data folded in a period

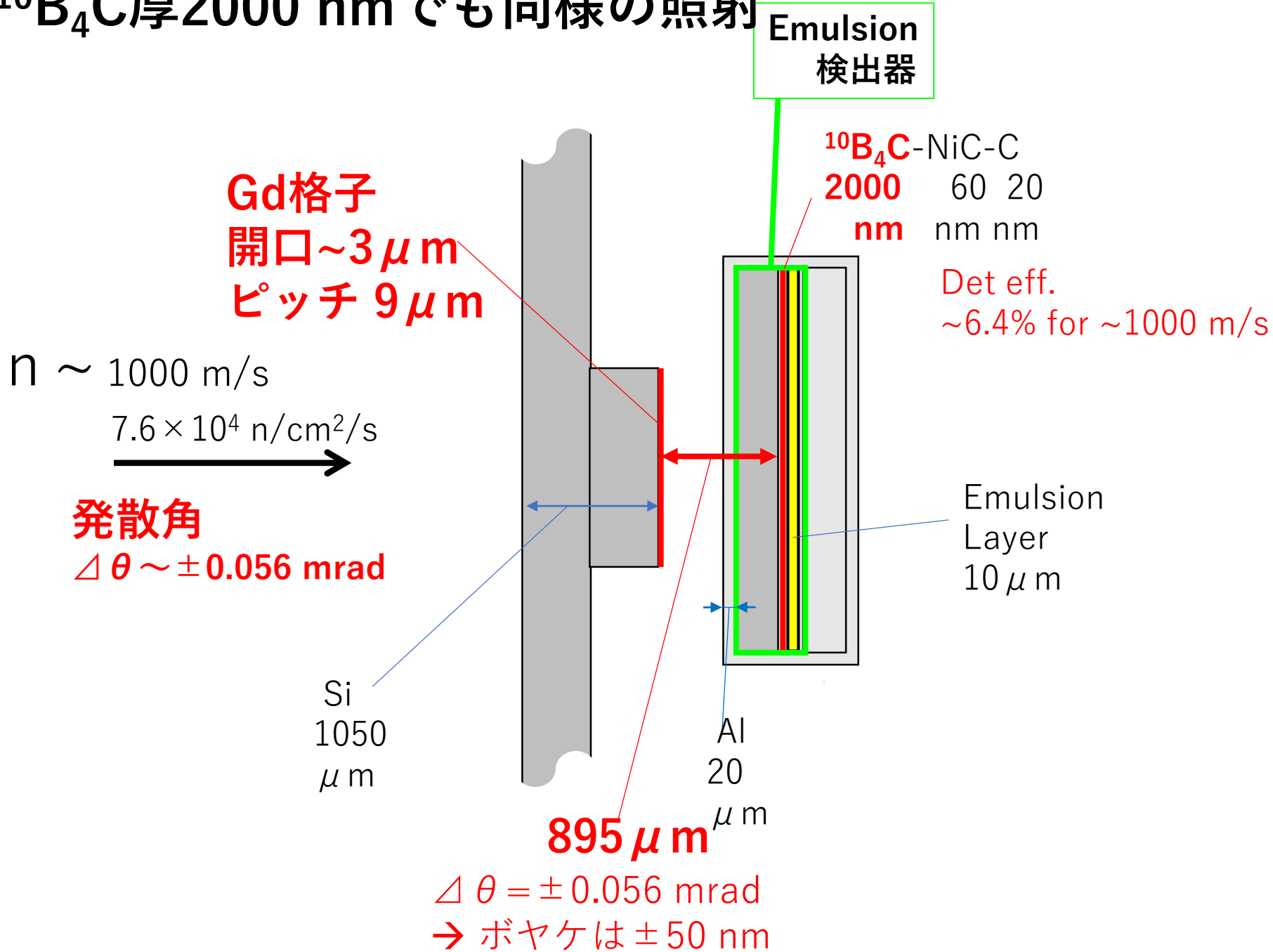


・縞模様を検出できている

今後

- ・スキャンを調整する
- ・視野を繋いだ解析を行う

$^{10}\text{B}_4\text{C}$ 厚2000 nmでも同様の照射



「 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 2 μm 」

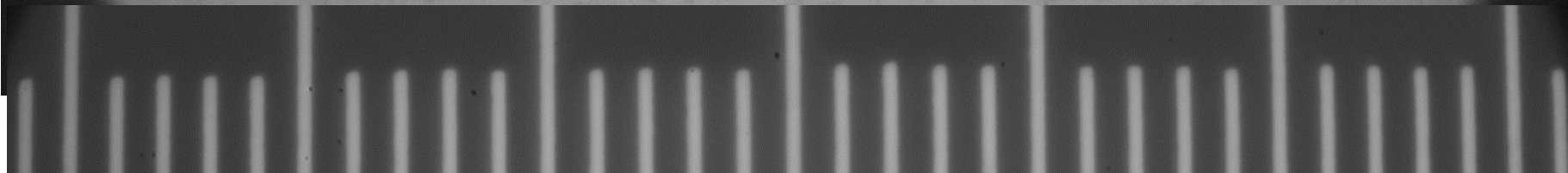
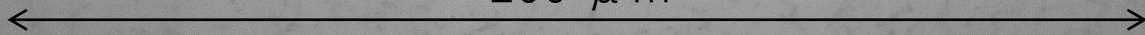
3時間照射

$\sim 4.5 \text{ trk}/(3 \mu\text{m})^2$

マニュアル顕微鏡

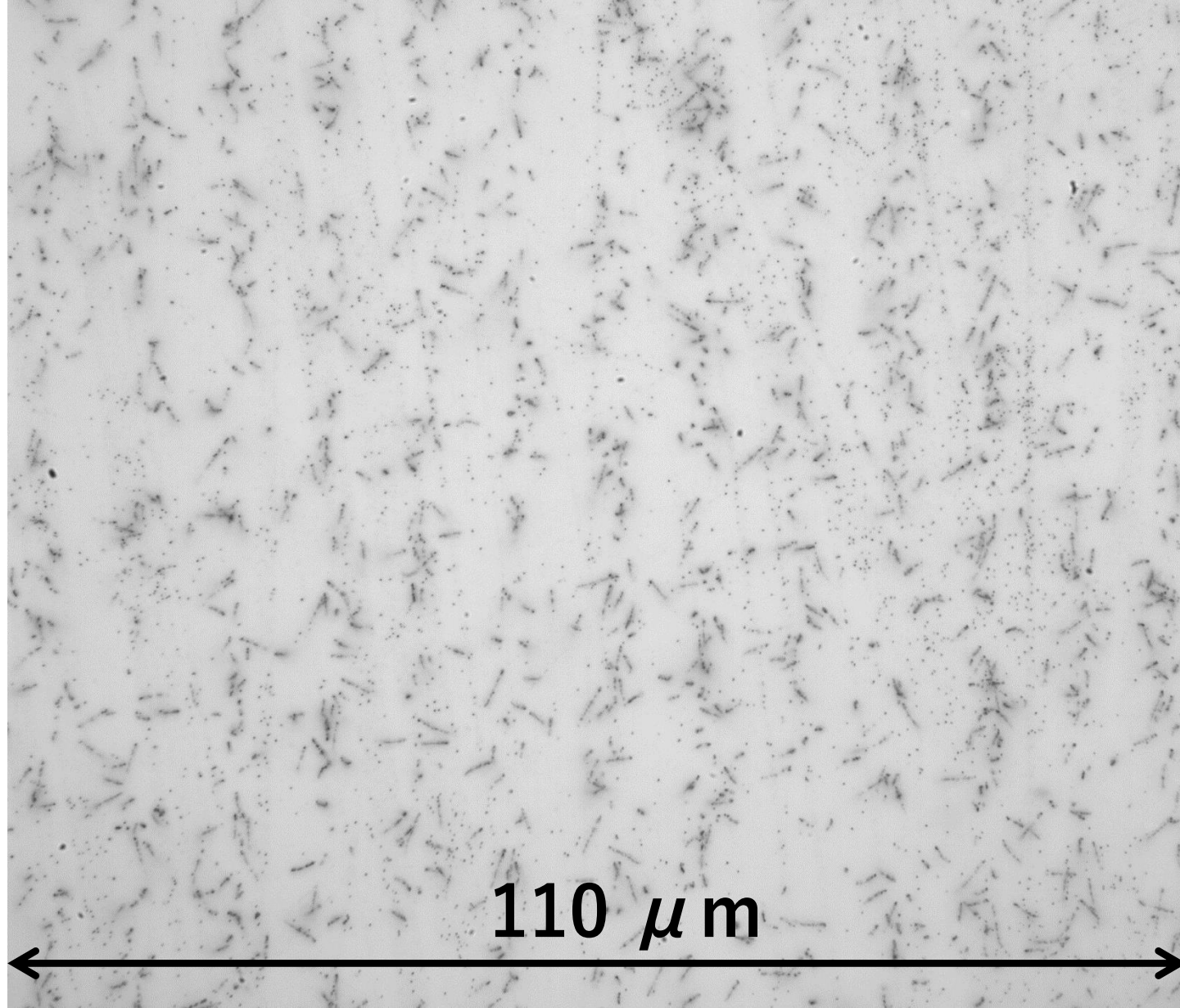
スリットパターンがクリアに見える。

200 μm

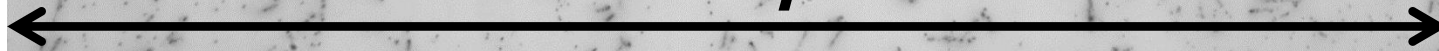


[$^{10}\text{B}_4\text{C}$ 2 μm]
3時間照射
~4.5 trk/(3 μm)²

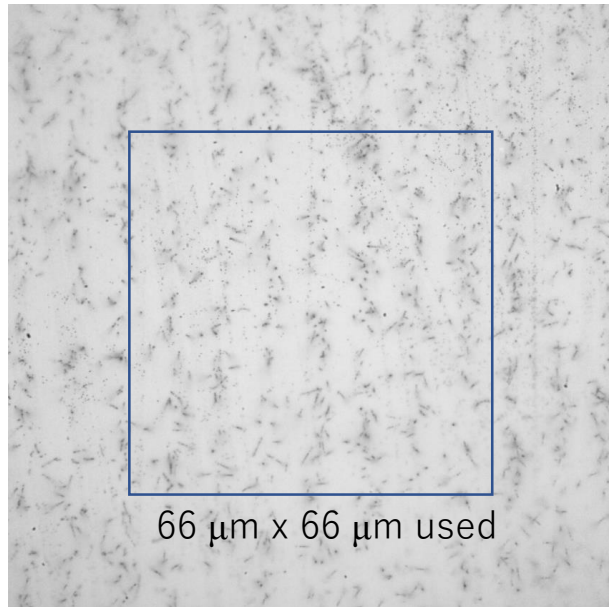
自動撮像顕微鏡(PTS2)画像 スパッター膜面付近



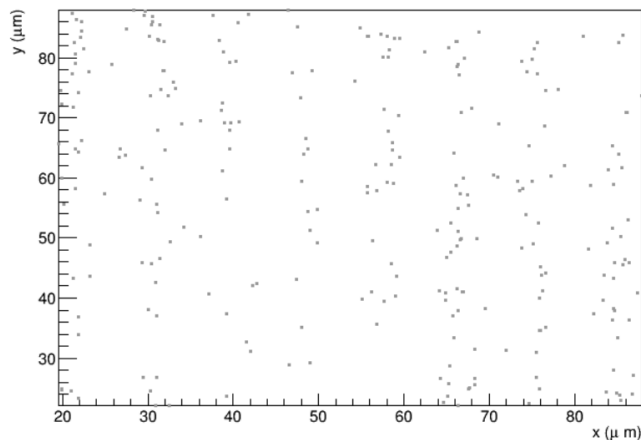
110 μm



飛跡の自動結果と 周期パターンの探索



ベース面での飛跡の位置
(アクセプタンス : $\tan \theta < 1.2$, 飛跡銀粒子数 > 4)

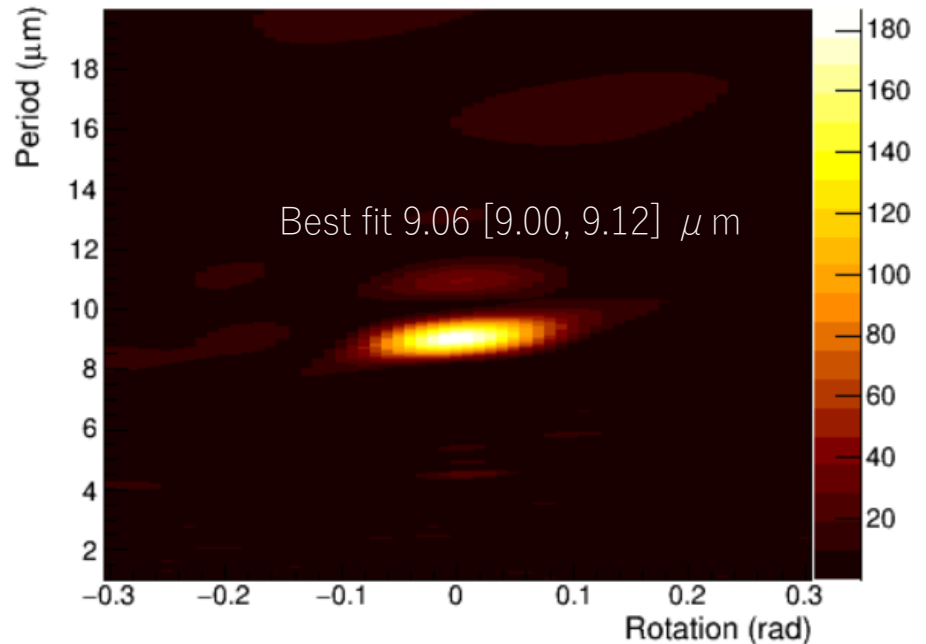


Rayleigh test:

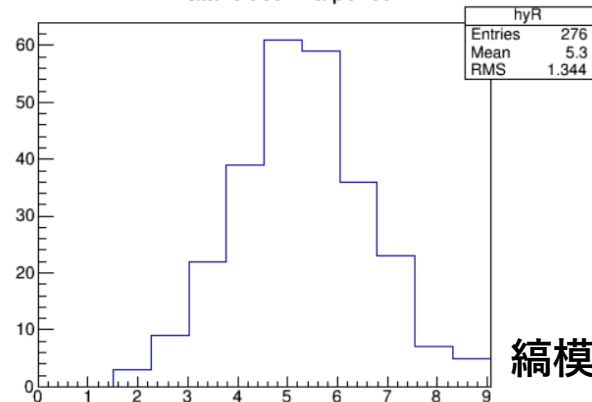
search for periodicity d and relative rotation α

Maximize $2/n [(\sum \sin(2\pi \cdot x_i/d))^2 + (\sum \cos(2\pi \cdot x_i/d))^2]$

where $x_i = x \cdot \cos \alpha + y \cdot \sin \alpha$



Data folded in a period



縞模様を検出できている

まとめ

- Si基材上に安定な $^{10}\text{B}_4\text{C}$ (50nm)-NiC-C層を形成、超微粒子原子核乳剤を塗布した検出器を開発し、最高で11 nm の分解能を得た。

- 検出効率(実測より外挿) :
7 m/s に対し (16±4) %
2200 m/s に対し(0.067±0.014) %

Eur. Phys. J. C (2018) 78:959

- 視野の広範囲高精度接続用マーク法を開発した。
- μm オーダーの幅の縞模様を認識できることを確認した。

($^{10}\text{B}_4\text{C}$ 膜厚200 nm、2 μm)

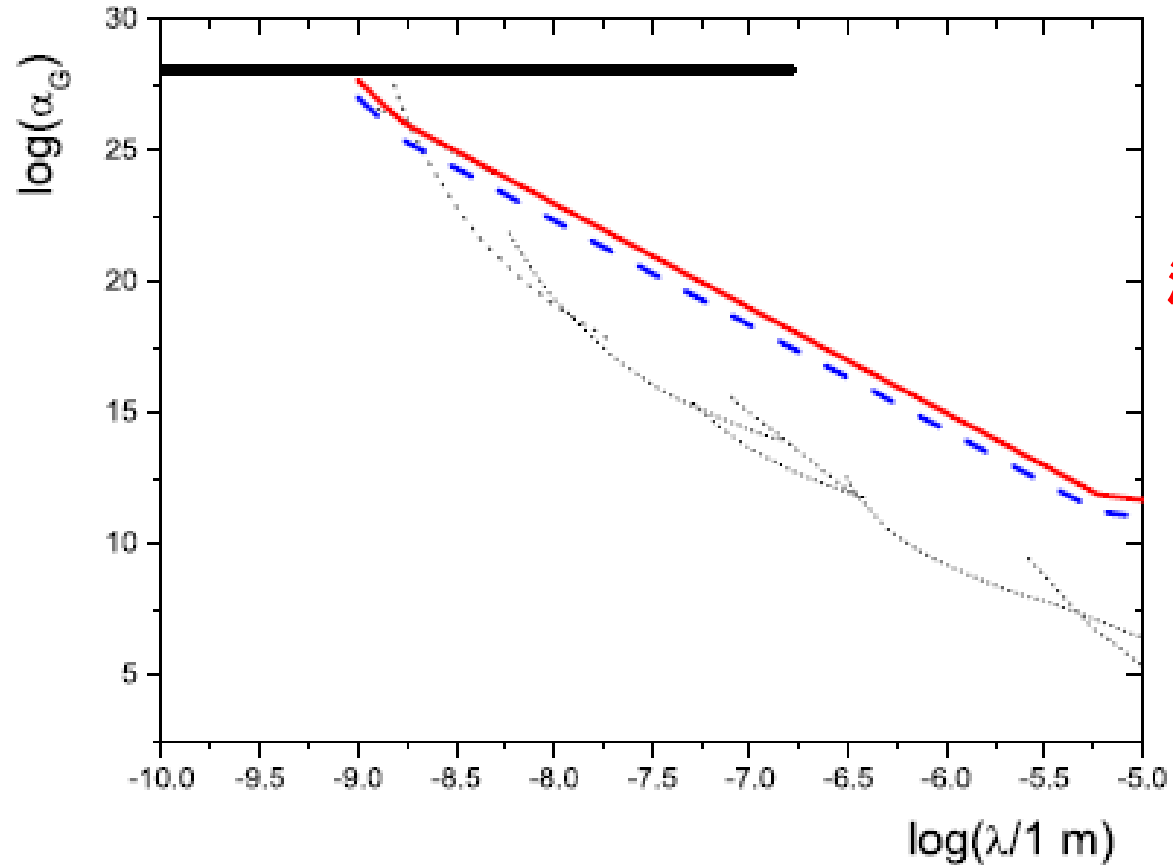
- 飛跡自動認識できている。(調整->質評価は今後)
- 今後cm程度の領域でマークを利用した高精度 \sim 100 nm視野接続をし、解析する。
- ILLの今年最初のサイクルで重力のパターンの照射を予定。

Protasov, Nesvizhevsky による湯川型近距離重力へのconstraint(2004)

Potentialとして $V = -U_0 e^{-z/\lambda}$ だけを考えている。
固有状態の存在条件のみから求められたもの。

$$(U_0 = 2\pi G \alpha_G m \rho_m \lambda^2)$$

λ : 湯川力の到達距離
 z : 鏡ミラーからの距離
 m : 中性子質量
 ρ_m : ミラー材料密度
 例: Ni



湯川型による固有状態が存在する

$$\alpha \lambda^4 > 7.67 \times 10^{-10} \dots (1)$$

$$\frac{U_0 m \lambda^2}{\hbar^2} \approx 0.72.$$

$$\alpha_G = 0.72 \frac{2}{\pi} \frac{\rho}{\rho_m} \frac{\hbar}{m g \lambda^2} \frac{\hbar}{m \lambda} \frac{R}{\lambda},$$

One obtains the following numerical boundary

$$\alpha_G = 1 \times 10^{15} \left(\frac{1 \mu\text{m}}{\lambda} \right)^4.$$

V V Nesvizhevsky¹ and K V Protasov²
 Class. Quantum Grav. 21 (2004) 4557–4566

Figure 3. The constraints on α_G following from the experiment [15] (the solid line) in comparison with that from the measurement of the Casimir and the van der Waals forces [10] (the short dashed lines). The long dashed line shows a limit which can be easily obtained by an improvement of this experiment. The solid horizontal line represents the limit established from the atomic experiment

2. 鏡上に膜($V_F = 0, 10 \mu\text{m}$ 厚)を形成する。右側開放、 $\alpha = 10^{17}$, $\lambda = 10^{-8} \text{ m}$

$|\psi(z)|^2$

唯一の固有状態 (- 63.78 feV) の中性子分布

鏡

膜

膜中: $\psi_A(z) = C_1 I_{iu}[b \exp[z/(2\lambda)]] + C_2 K_{iu}[b \exp[z/(2\lambda)]]$

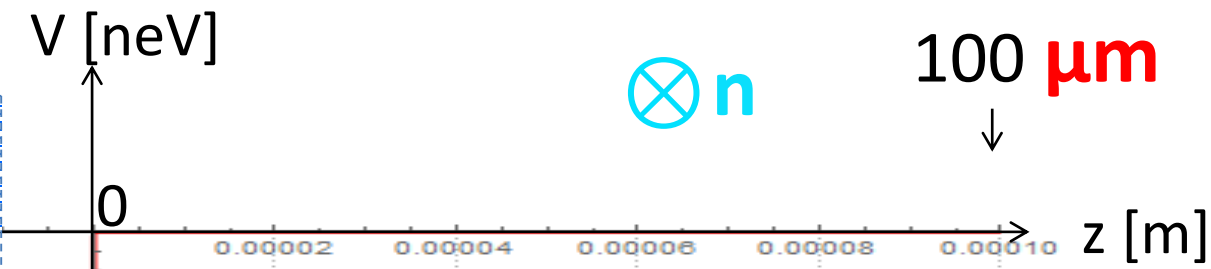
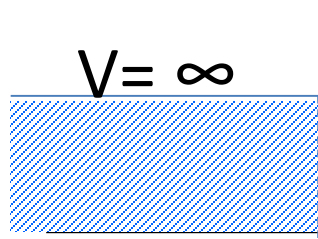
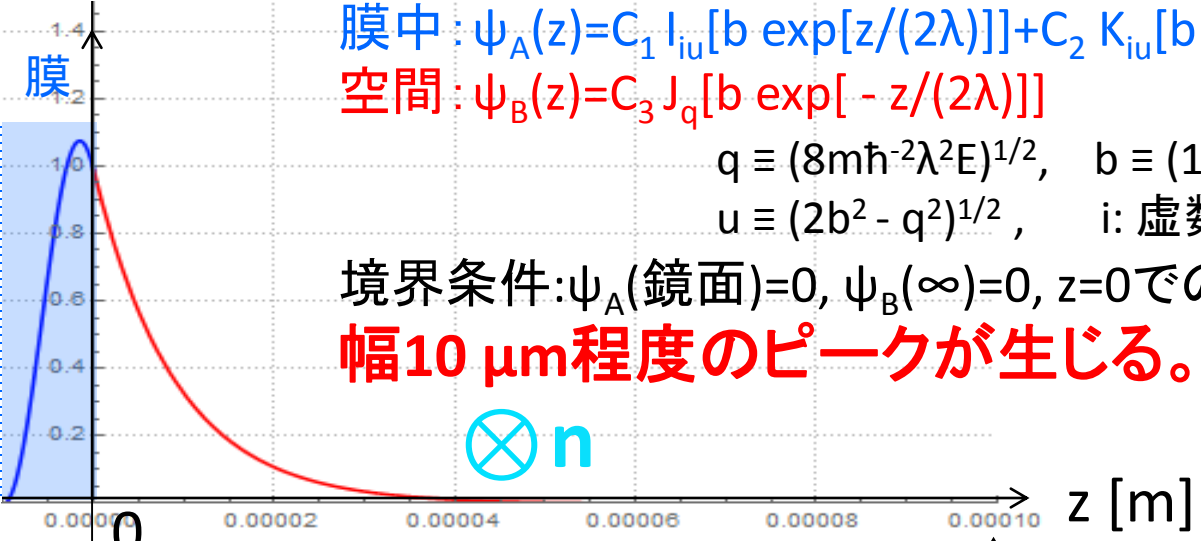
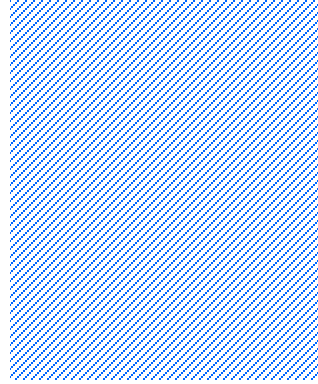
空間: $\psi_B(z) = C_3 J_q[b \exp[-z/(2\lambda)]]$

$q \equiv (8m\hbar^{-2}\lambda^2 E)^{1/2}, \quad b \equiv (16\pi m^2 \hbar^{-2} G \rho \alpha \lambda^4)^{1/2}$

$u \equiv (2b^2 - q^2)^{1/2}, \quad i: \text{虚数単位}$

境界条件: $\psi_A(\text{鏡面}) = 0, \psi_B(\infty) = 0, z=0$ での接続。

幅 $10 \mu\text{m}$ 程度のピークが生じる。



$V_B = -U_0 \exp(-z/\lambda)$

$U_0 = 2\pi G m \rho \alpha \lambda^2$

$V_A = U_0 \exp(z/\lambda) - 2U_0$

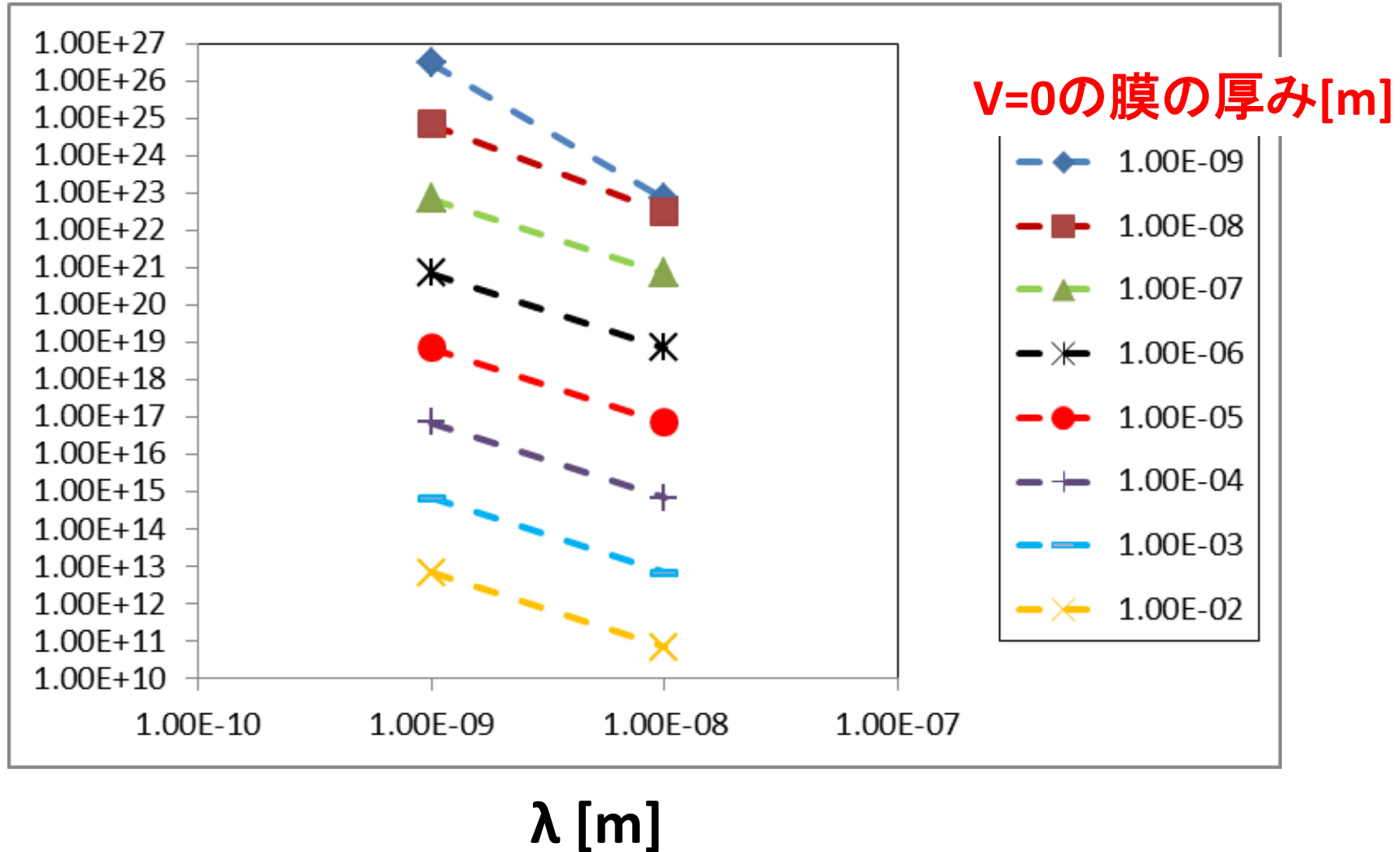
100 μm

V=0の膜の厚み毎に見た

$\exists \lambda$ に対して準位ができる下限の α

($\alpha = \text{整数値} \times 10^n$ についてのみ調べた。)

準位ができる下限の α



光学系: $\lambda = 450 \text{ nm}$ (Hg-Xeランプ)
NA(開口数) = 1.4
 n (媒質(オイル)の屈折率) = 1.5

x, y

$$\text{分解能: } d = \frac{0.61 \times \lambda}{NA} = 196 \text{ nm}$$

実測値: 230 nm (梅本データ)

z

$$\text{被写界深度: } \text{DOF} = \frac{n \times \lambda}{NA^2} + d \times \frac{n}{NA} = 554 \text{ nm}$$

冷中性子 @J-PARC MLF BL05

ビームモニター

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

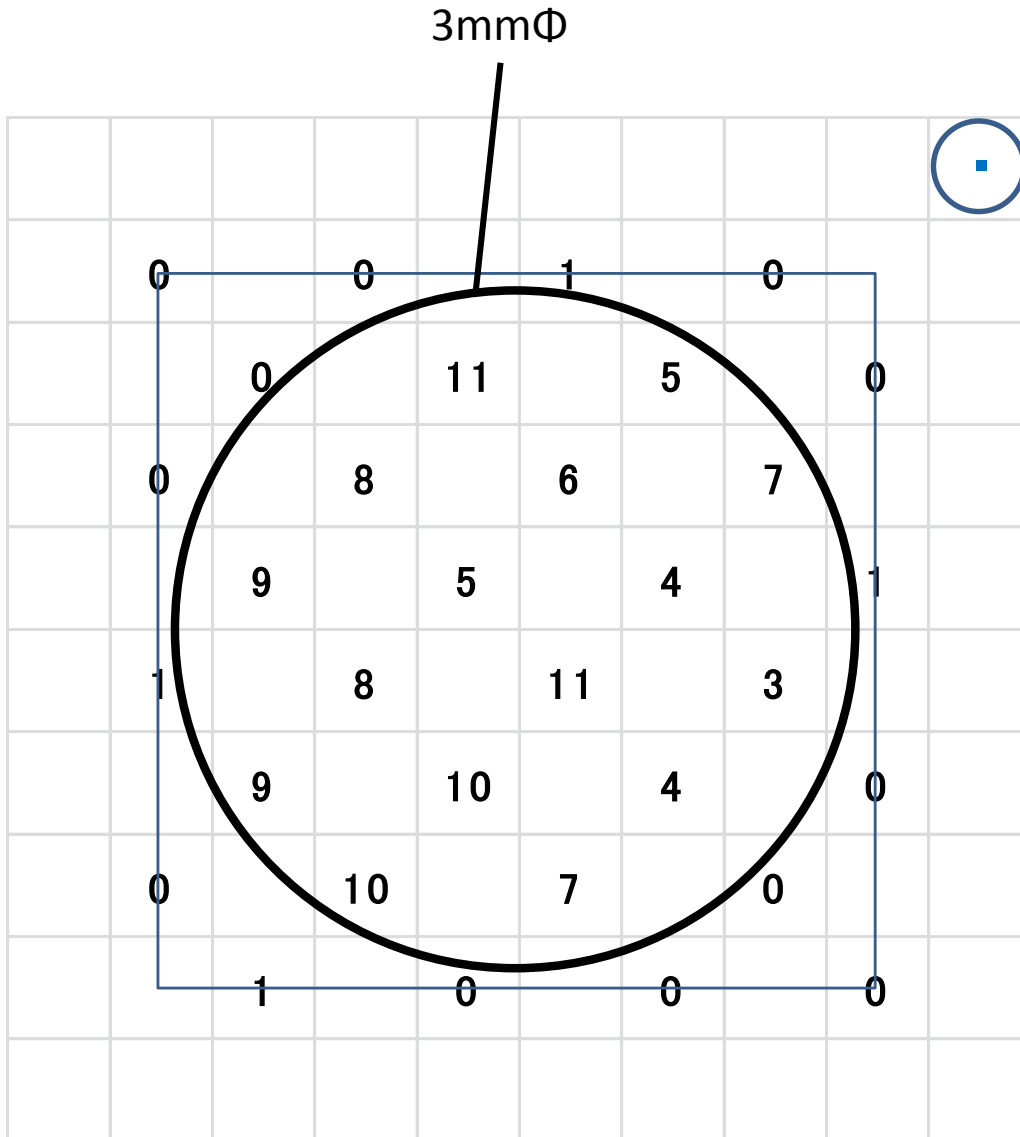
3mm Φ Cd
ピンホール

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

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

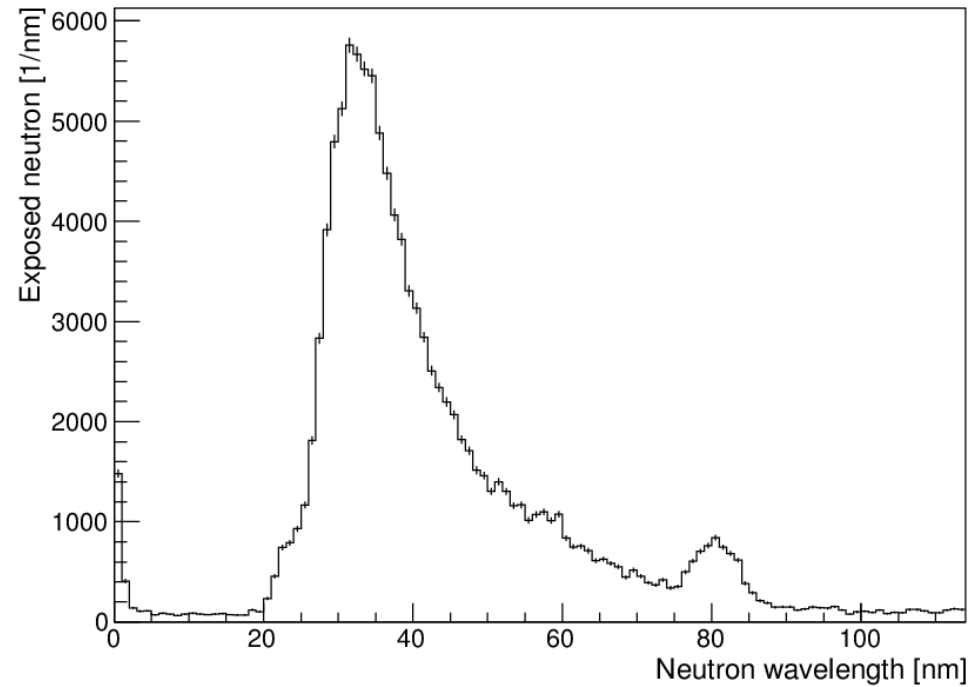
入射中性子数:
(4.5±0.2) × 10³ n / 視野

→検出効率: : (0.16±0.02) %
(期待:(0.11±0.03) %)

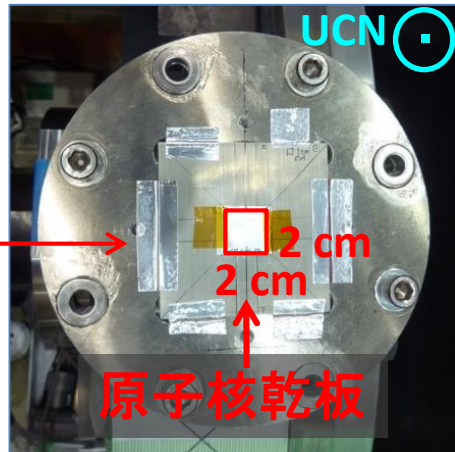
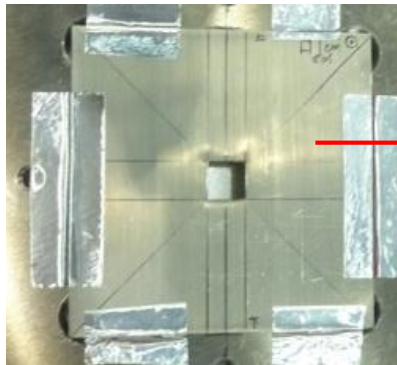
超冷中性子

@J-PARC MLF BL05

超冷中性子検出器で捉えた波長分布



Cd slit □1cm × 1cm



期待検出効率: (11 ± 3) %

1cm × 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

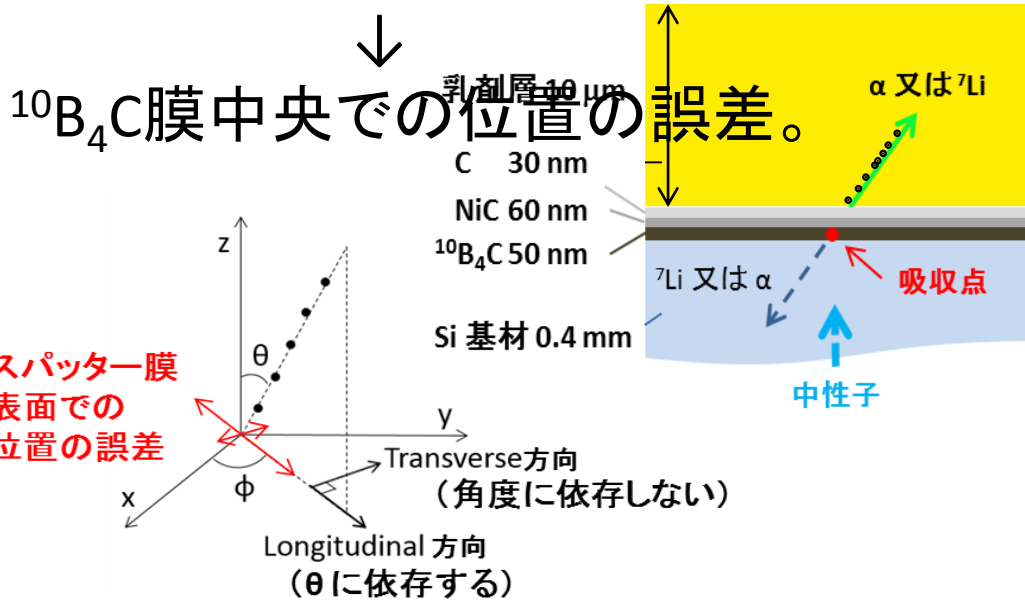
入射中性子数：
 (9.1 ± 0.6) n / 視野

→ 検出効率： $(12 \pm 2)\%$

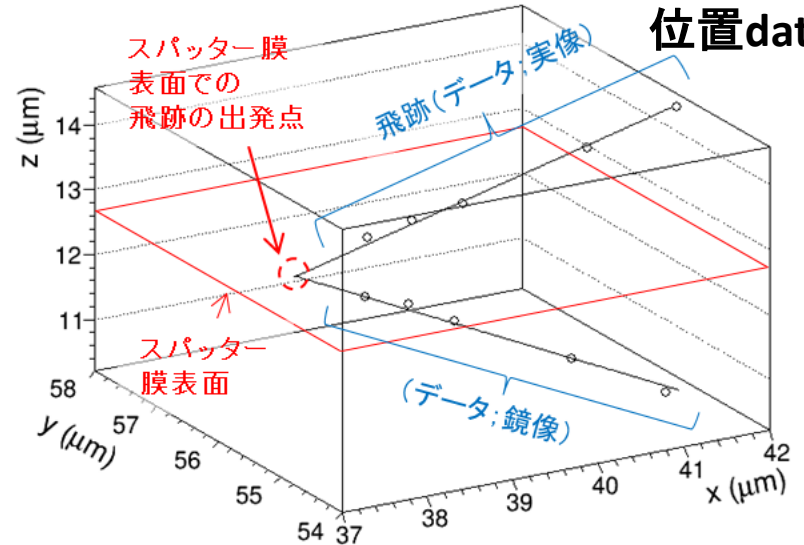
(期待： $(11 \pm 3)\%$)

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。

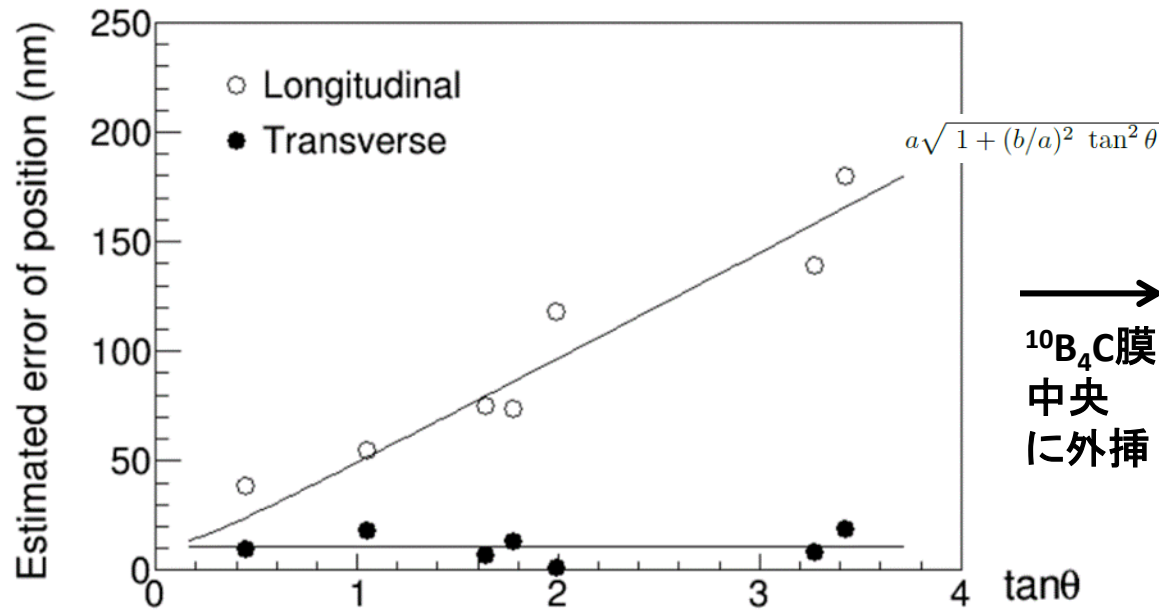


吸収からの α 線飛跡の銀粒子の位置data



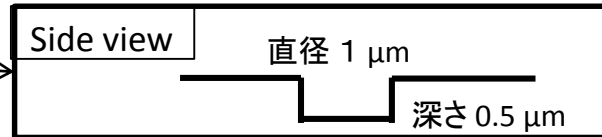
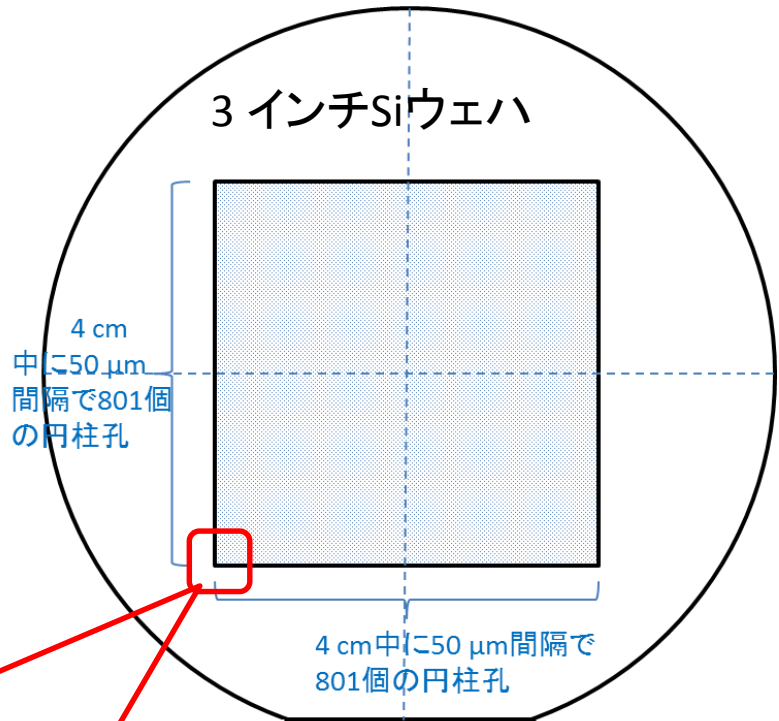
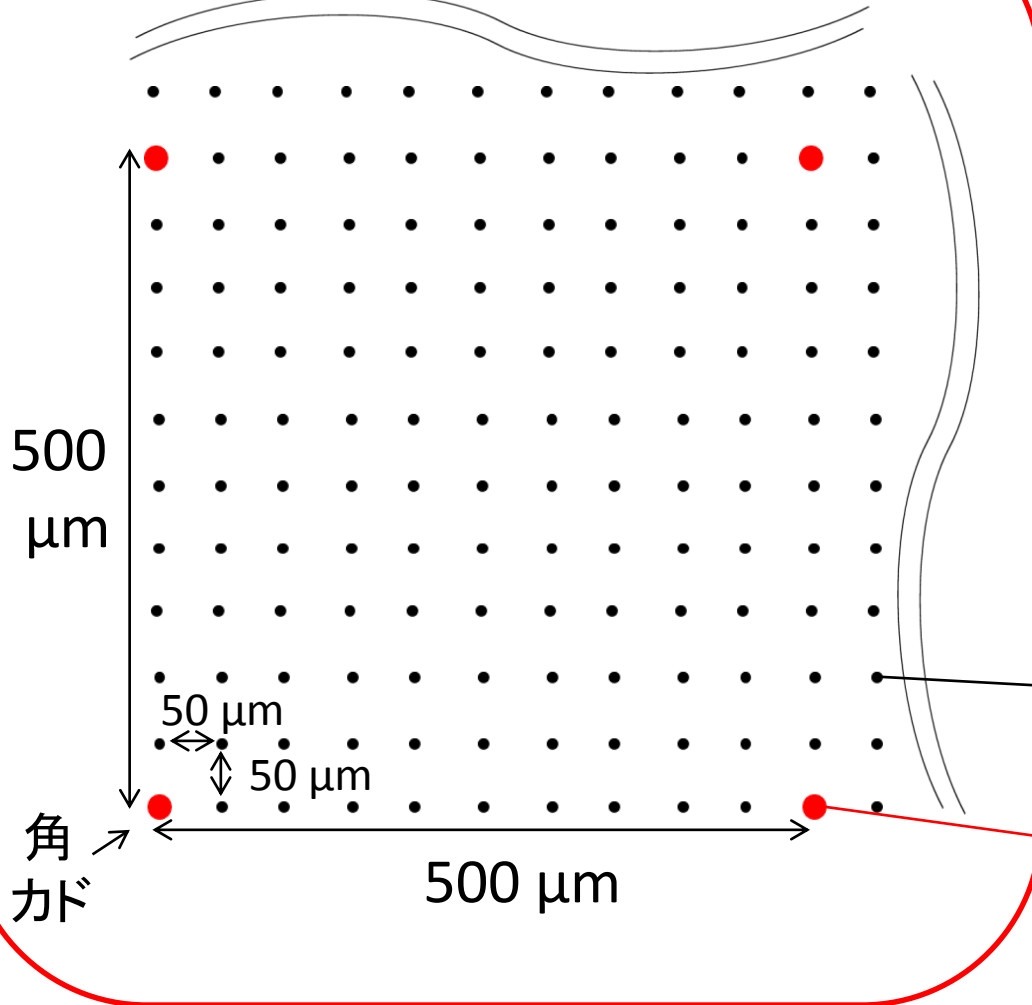
$^{10}\text{B}_4\text{C}$ 膜中央での位置の誤差:

- Transverse方向:
角度に依存しない → 分解能: 11 nm
- Longitudinal方向:
 θ に依存。
全解析角度領域 ($0 \leq \tan\theta \leq 13.8$)
→ 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



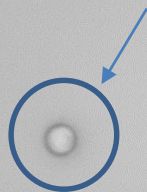
マーク設計

● 直径 5 μm 円柱孔 ● 直径 1 μm 円柱孔



マークを打ったSi板表面 落射光学顕微鏡 低倍率

直径5 μm



直径1 μm



50 μm



50 μm



コンバーター膜スパッター後のマーク

($^{10}\text{B}_4\text{C}$ 200nm-NiC 60nm-C 20nm) 落射光学顕微鏡

低倍率

明確に見えている！！

← 50 μm →

乳剤塗布→テスト現像後のマーク 落射光学顕微鏡 低倍率

明確に見えている！！
マークの打ち方を確立した。

← 50 μm →

「マーク③」

$^{10}\text{B}_4\text{C}$ 200 nm

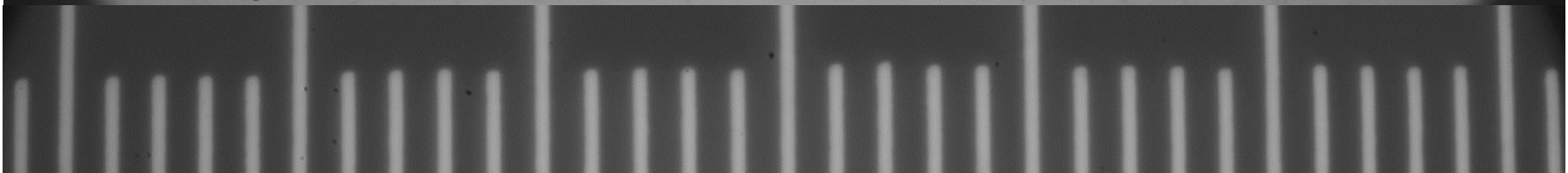
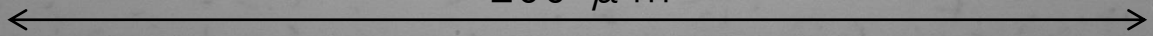
5.6時間照射

$\sim 1 \text{ trk}/(3 \mu\text{m})^2$

マニュアル顕微鏡

マークも見えている。

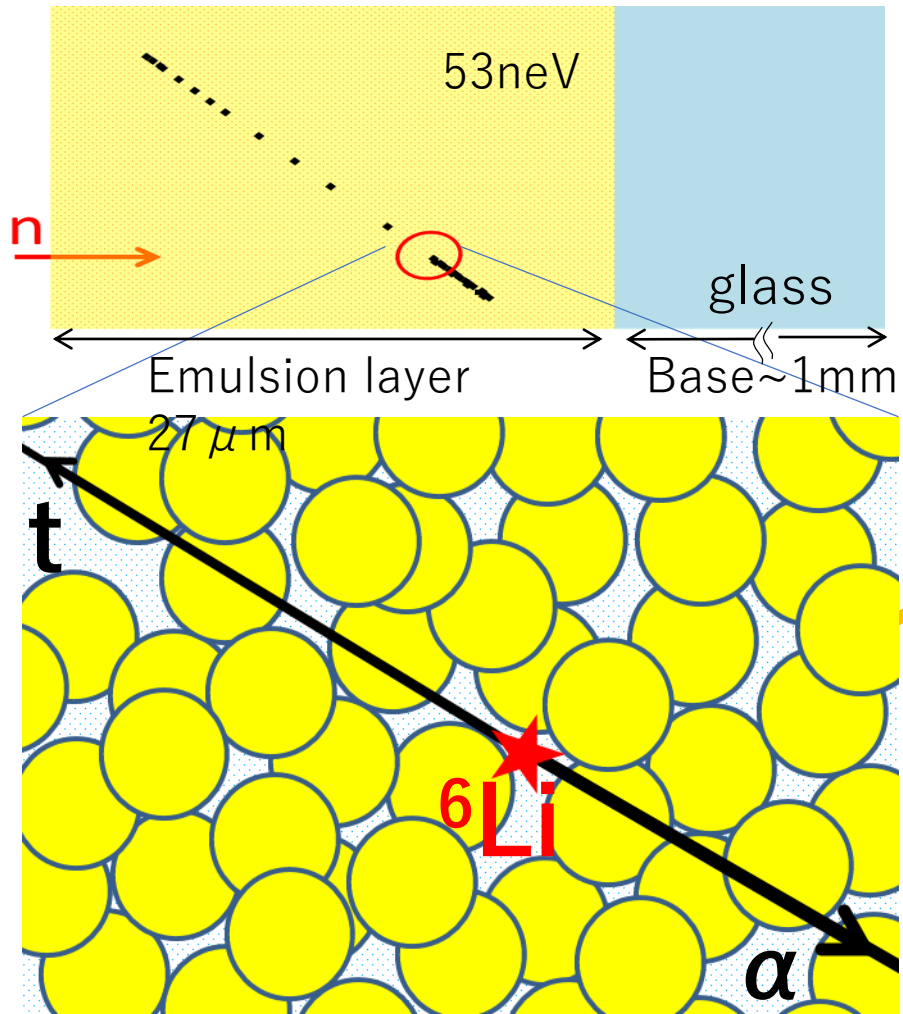
200 μm



(I) Doping type

LiNO₃ solution (natural Li) mixed into emulsion gel before coating.

cross sectional view



Amount of ⁶Li in the gel is 0.089% in atomic ratio.
(5m/s UCN

→ absorption eff. :

8%)

AgBr · I crystal

Range

(SRIM)

α 2.06 MeV

7.75

μm

Deciding absorption points from

density

grain

t - part :
32grains

α - part :
14grains

Ave. grain density
(1st grain ~ middle of tracks)
 0.37 ± 0.08 grains/ μm
(2.7 μm /grain)

Ave. grain density:
(1st grain ~ middle of tracks)
 1.4 ± 0.4 grains/ μm
(0.71 μm /grain)

10 μm

We expect spatial resolution of ~ 0.3 micron