

エマルション検出器を用いた 中性子イメージング

名古屋大学大学院 理学研究科
素粒子物性研究室
広田克也

共同研究者

名古屋大学：河原宏晃、北口雅暁、佐藤修、清水裕彦、長縄直崇、武藤直人

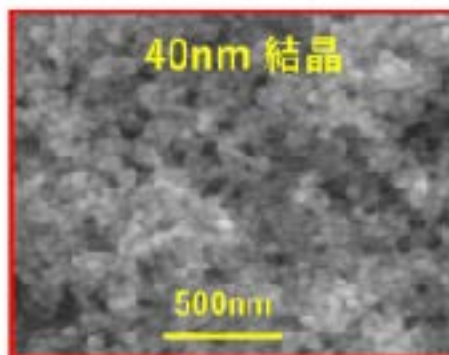
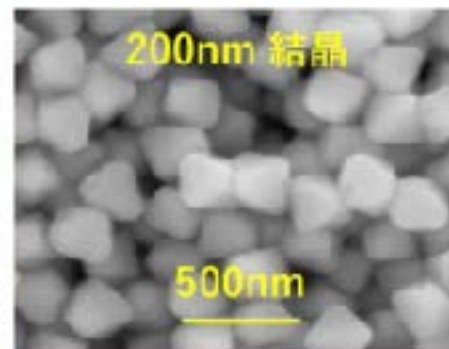
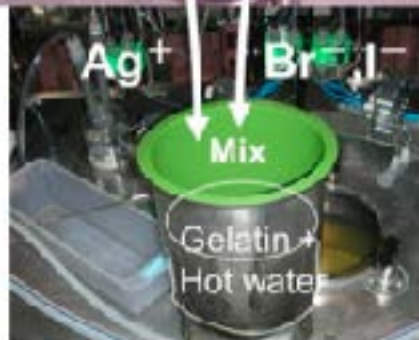
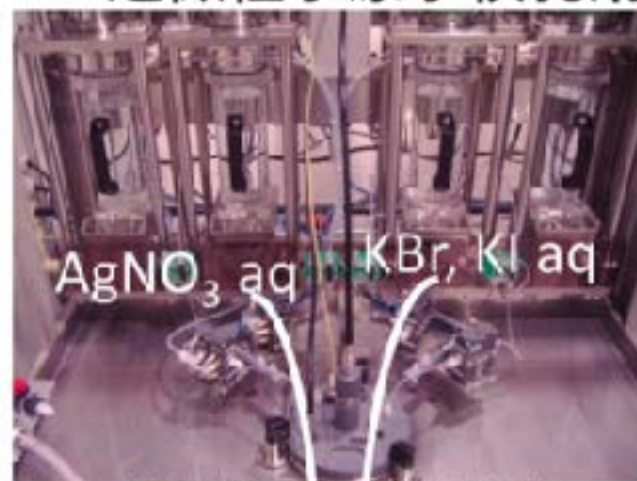
京都大学：日野正裕

九州大学：有賀智子

KEK：市川豪、川崎真介、三島賢二

理研：Abdul Muneem、江川弘行、笠置歩、齋藤武彦、中川真菜美、吉田純也

超微粒子原子核乳剤製造 名古屋大学2010～



最小電離
粒子用
(従来型)

これを使用

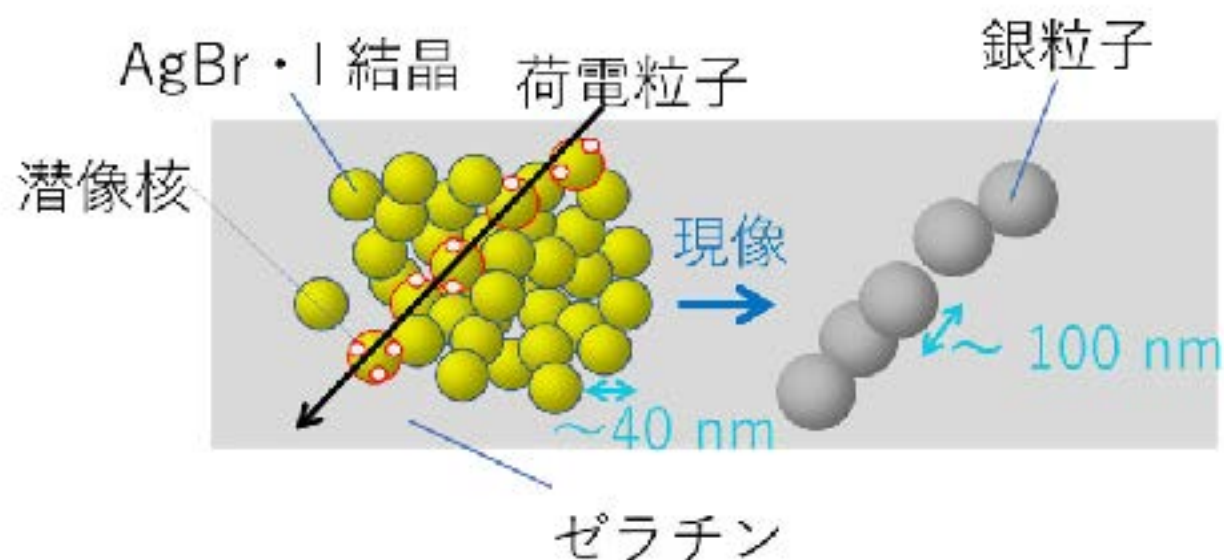
超微粒子型

- ・特に高分解能
- ・最小電離粒子飛跡
できない
(γ 線BGに強い)

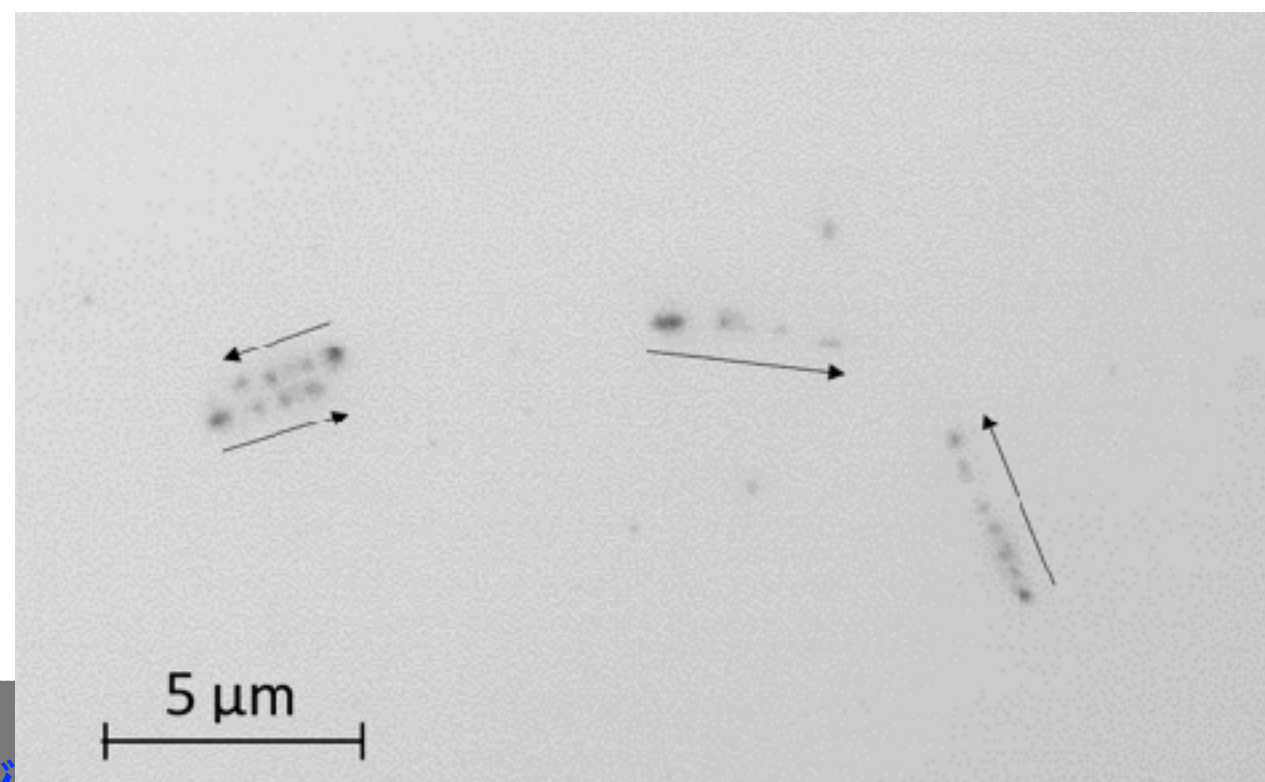
このnuclear emulsionを
中性子検出器として利用

- ・ UCNでの基礎物理実験
- ・ 中性子イメージング

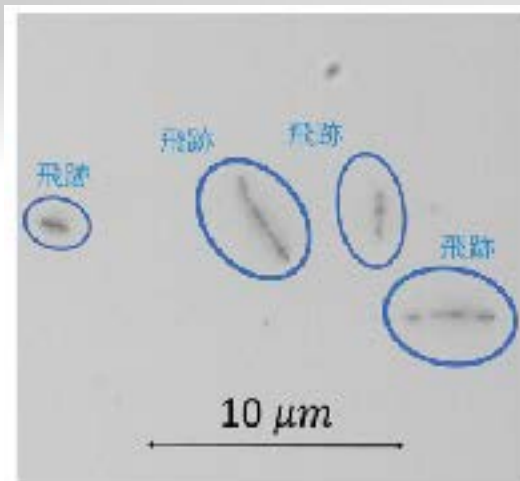
飛跡の生成



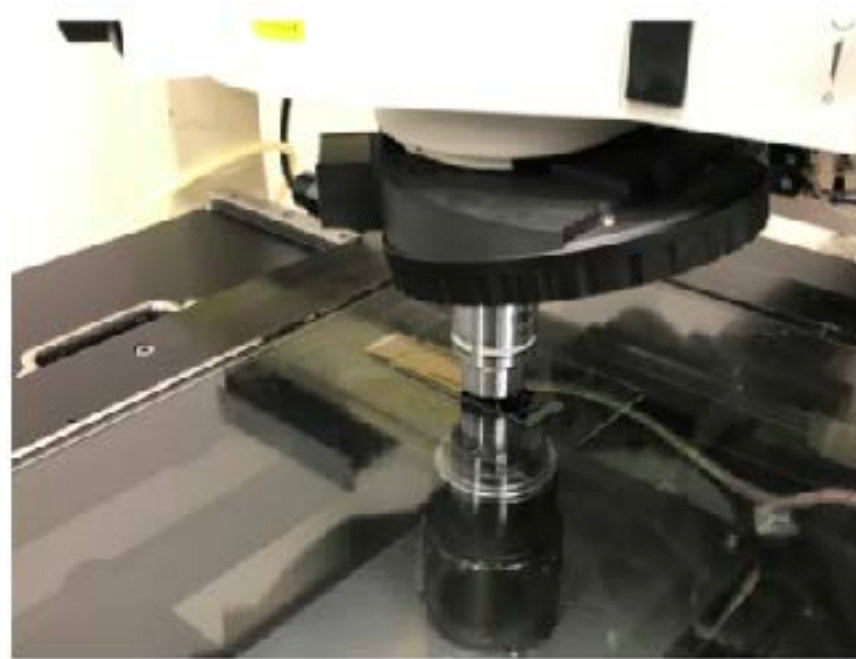
実際の画像



画像は3次元的に得られる



落射光学
顕微鏡



$^{10}\text{B}_4\text{C}$
スパッタ膜

現像後の
乳剤層

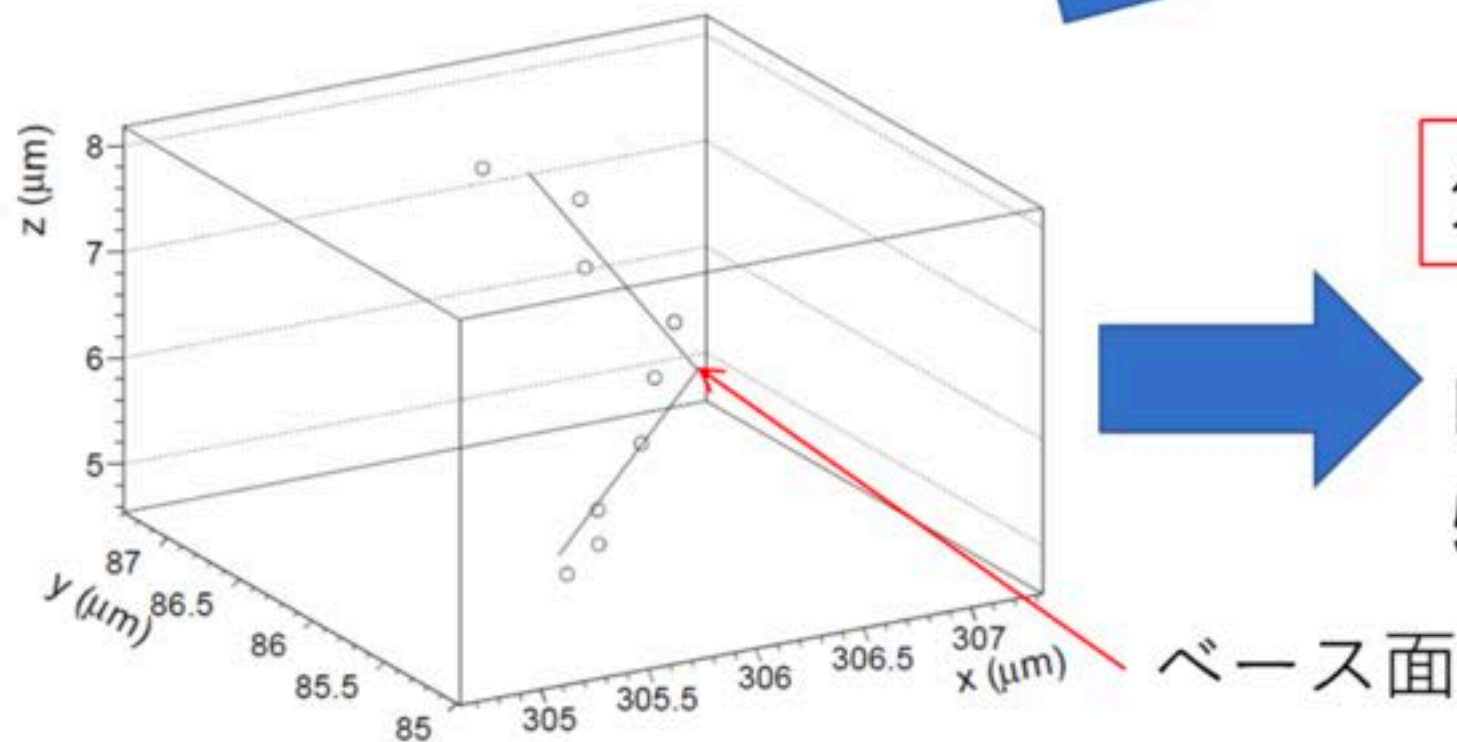
Si基板

焦点面

撮像の焦点面を
変化させて奥行き方向の情報を得る

見えた飛跡を解析して反応点を抽出

直線フィッティング



外挿

吸収点
特定

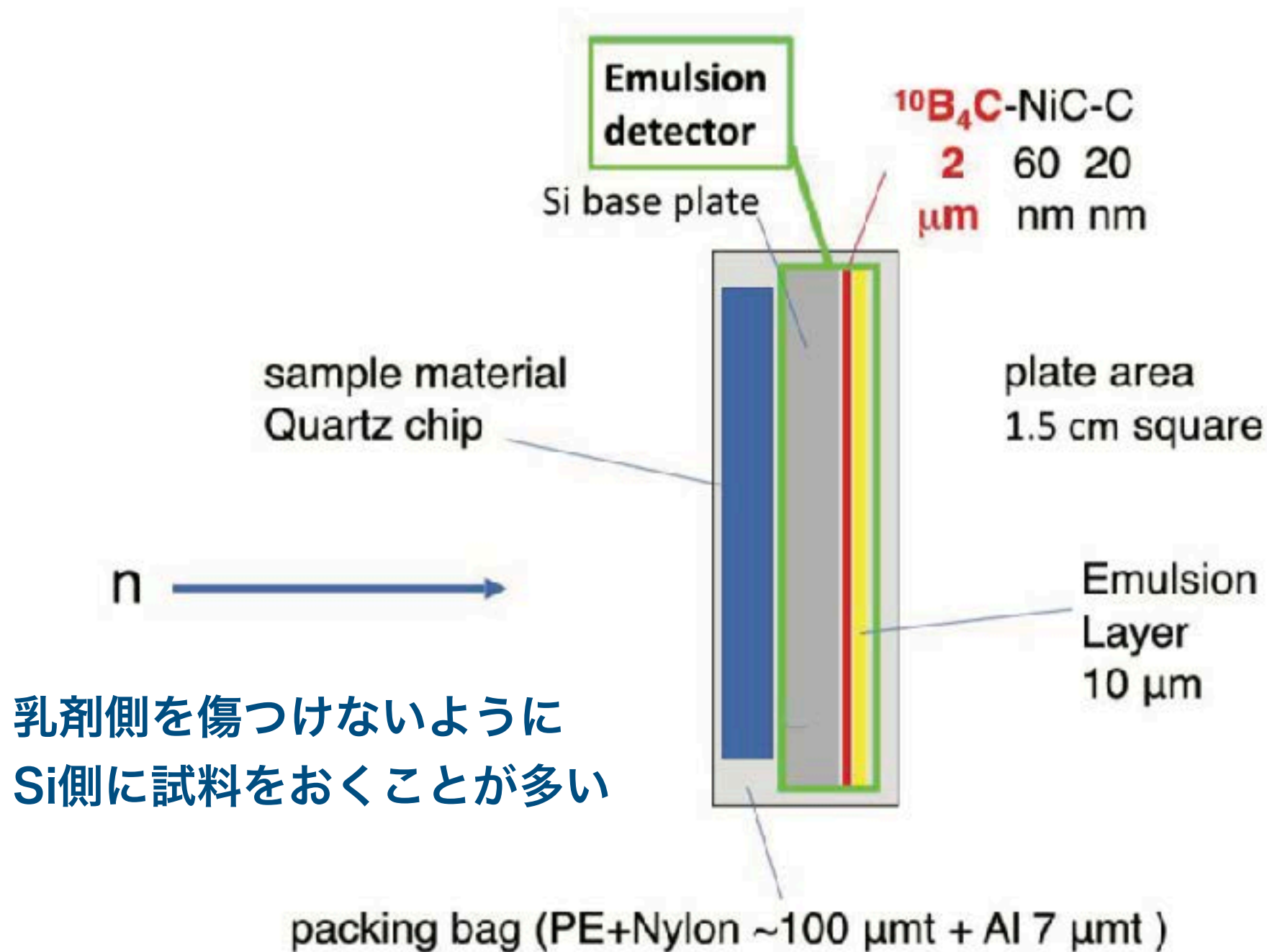
ベース面

使っているエマルジョン検出器の構造

B4Cの厚さを薄くすると

- ・ 検出効率が下がる
- ・ 位置分解能が良くなる

厚くしすぎると飛跡が見えない

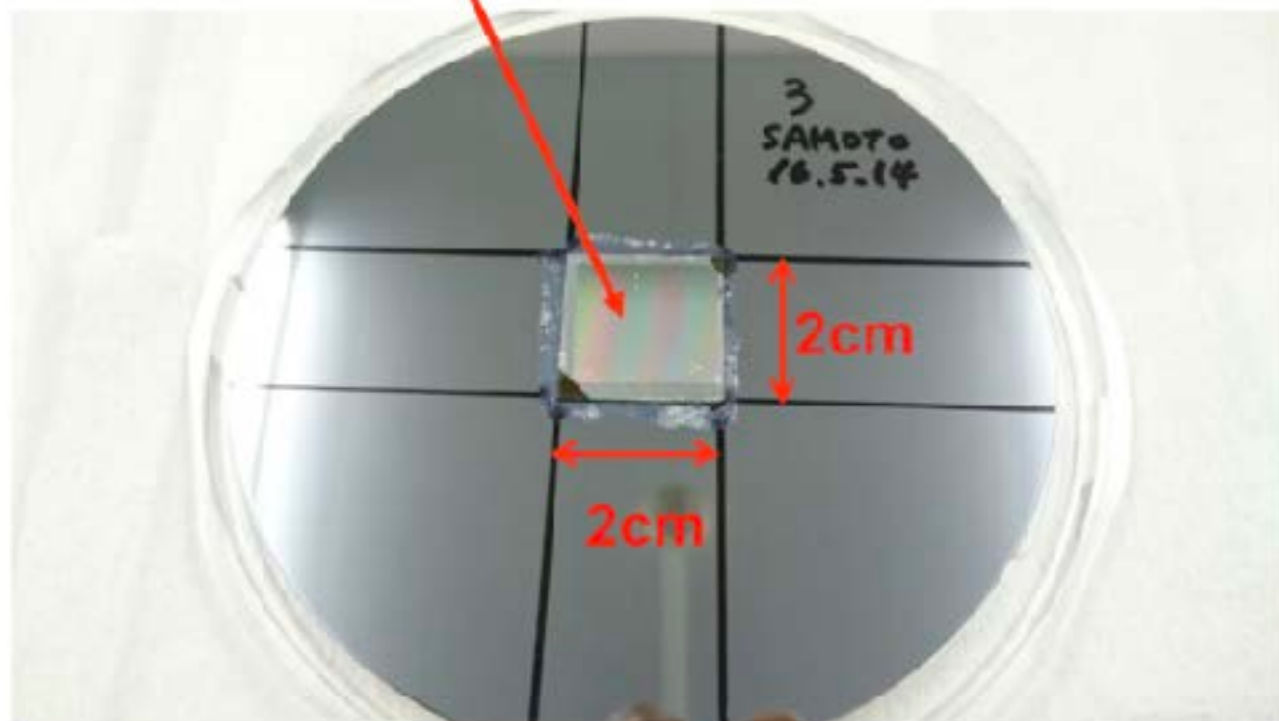


乳剤側を傷つけないように
Si側に試料をおくことが多い

全体を遮光フィルムで覆う

干渉イメージング用に製作したGd gratingの計測

Grating (area: 2cm *2 cm)
attached on a Si substrate

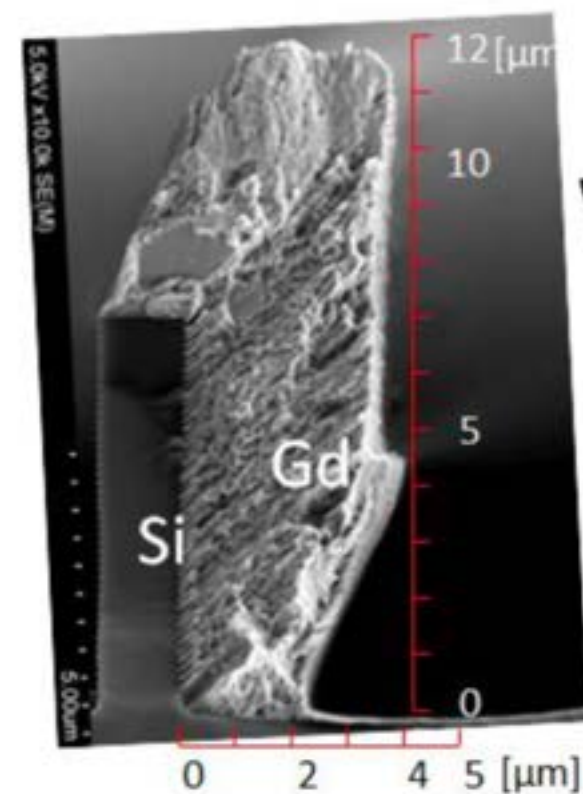
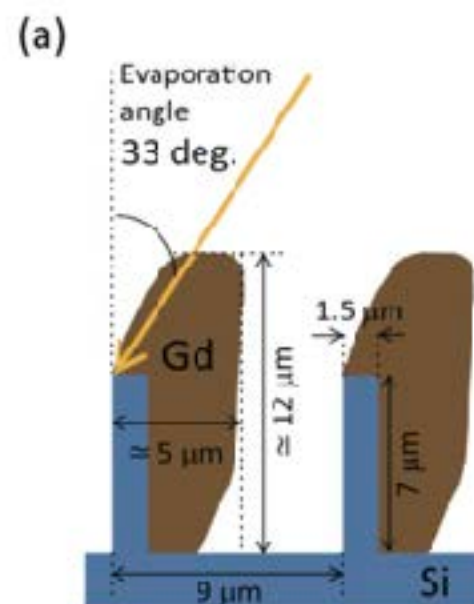


東北大佐本さん作製

Ref: Seki et al., Phys Proc 88(2017)217-223

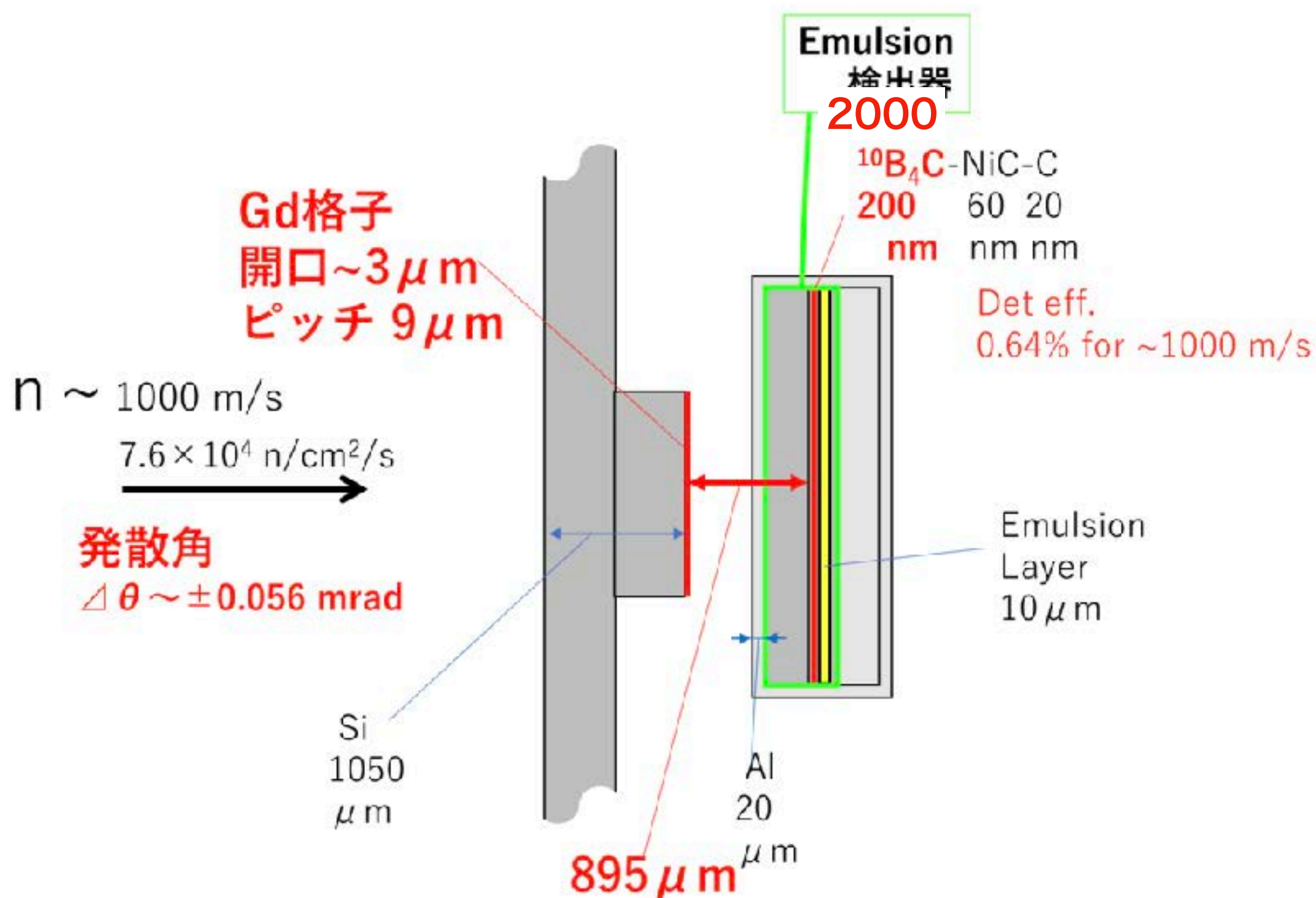
SEM像

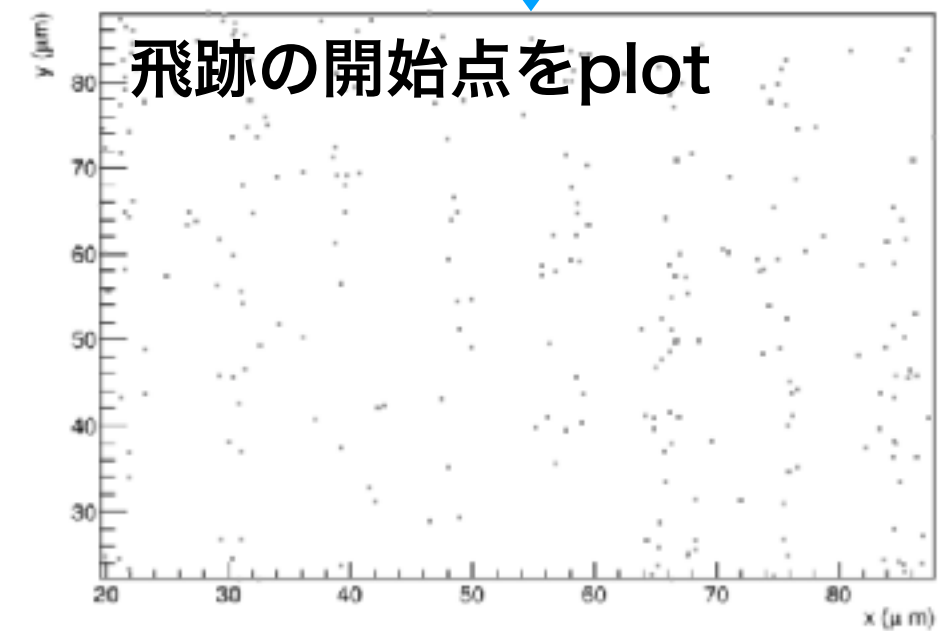
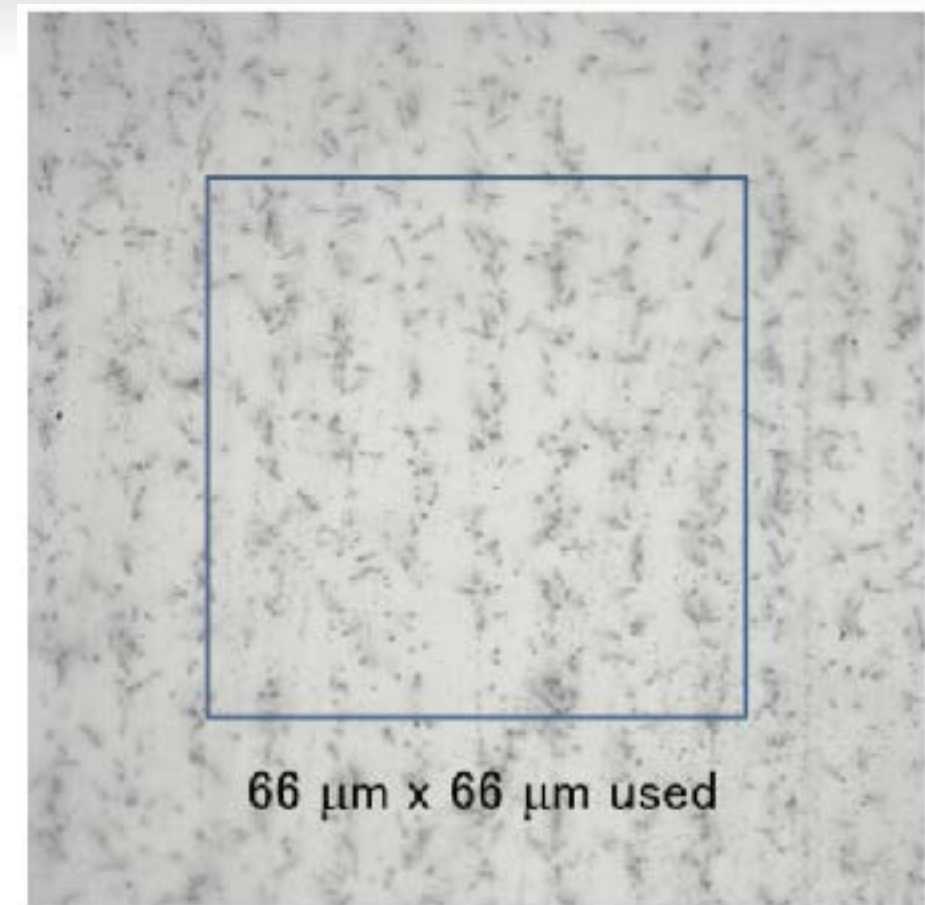
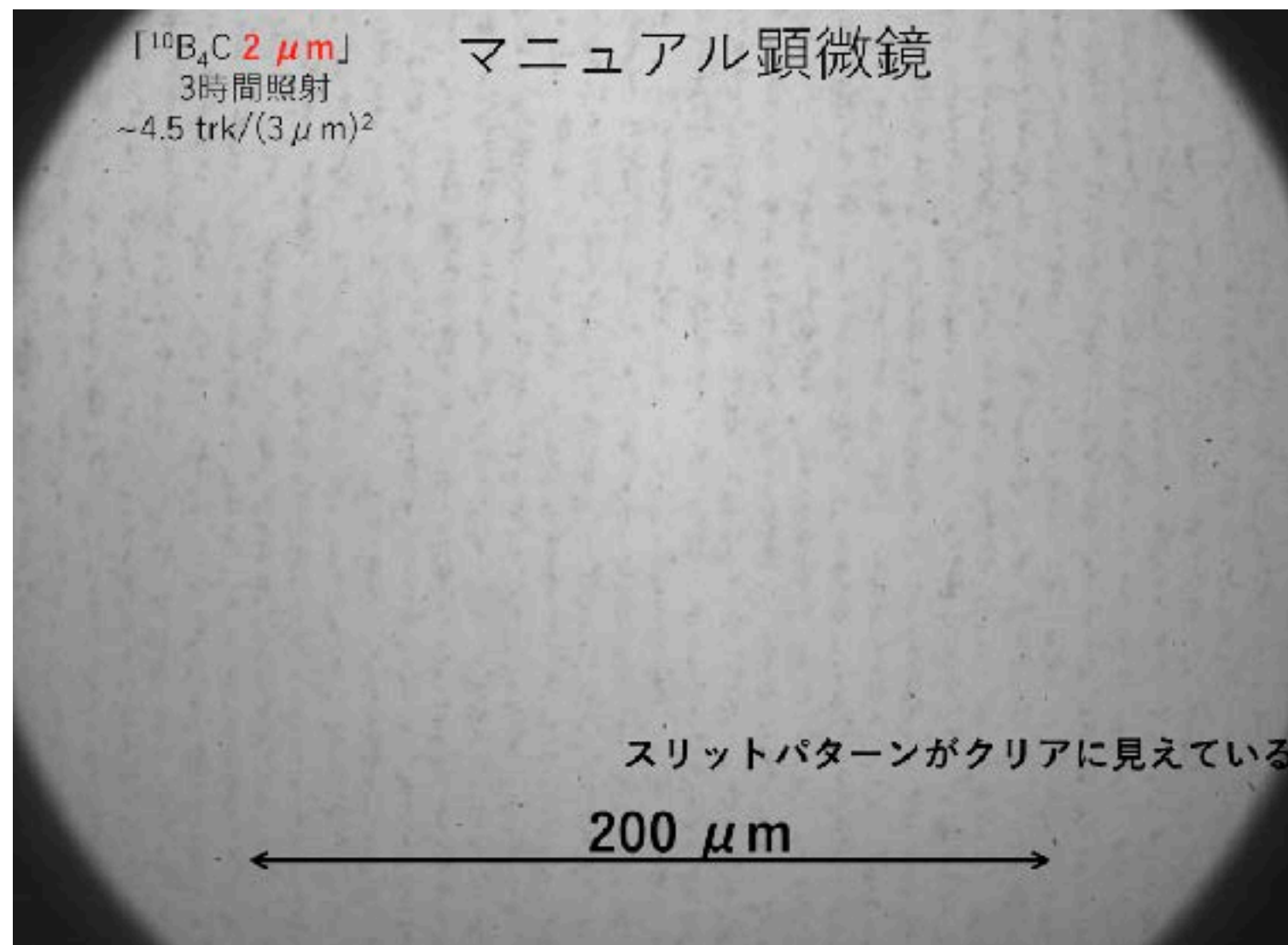
断面図



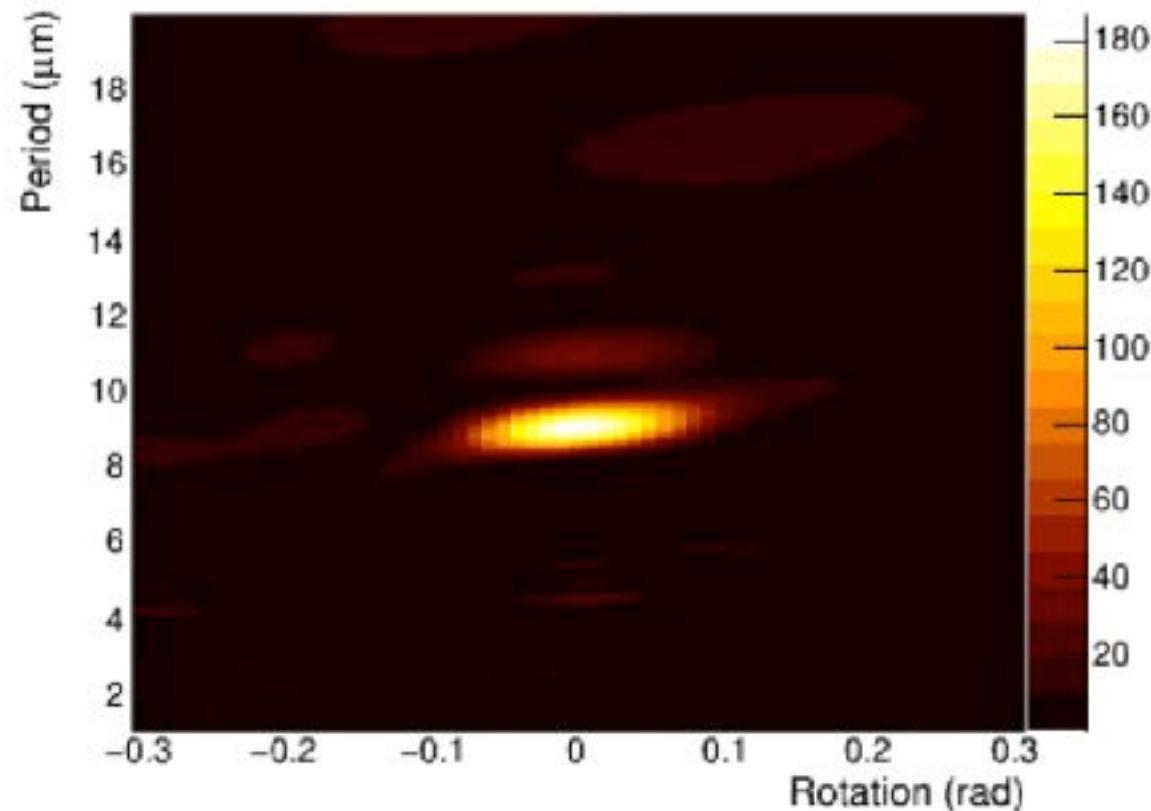
9 ミクロン間隔のスリット

計測のセットアップ MLF BL05





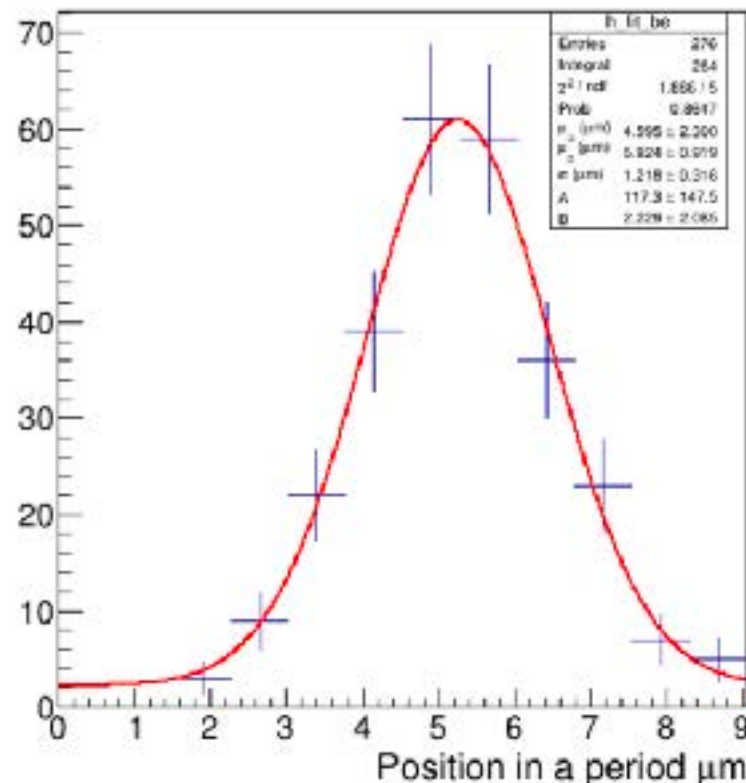
繰り返しの周期を確認するためのReyleigh test計算



$$F(d, \alpha) = \frac{2}{n} \left(\left(\sum_i^n \sin\left(\frac{2\pi}{d} \cdot x'_i\right) \right)^2 + \left(\sum_i^n \cos\left(\frac{2\pi}{d} \cdot x'_i\right) \right)^2 \right),$$

$$x'_i = x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha.$$

F(d, α)を最大にするような、周期d、回転角αを求める
d=9.06±0.06



周期が9μmとして中性子イベントをhistgram
error functionでfitする。

Fit function

$$f(x) = A \times \left(\frac{\text{erf}\left(\frac{x - \mu_\alpha}{\sqrt{2}\sigma}\right) + 1}{2} \times \frac{\text{erfc}\left(\frac{x - \mu_\beta}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{2} \right) + B$$

(erf(x): error function, erfc(x): 1 - erf(x))

Free parameter:

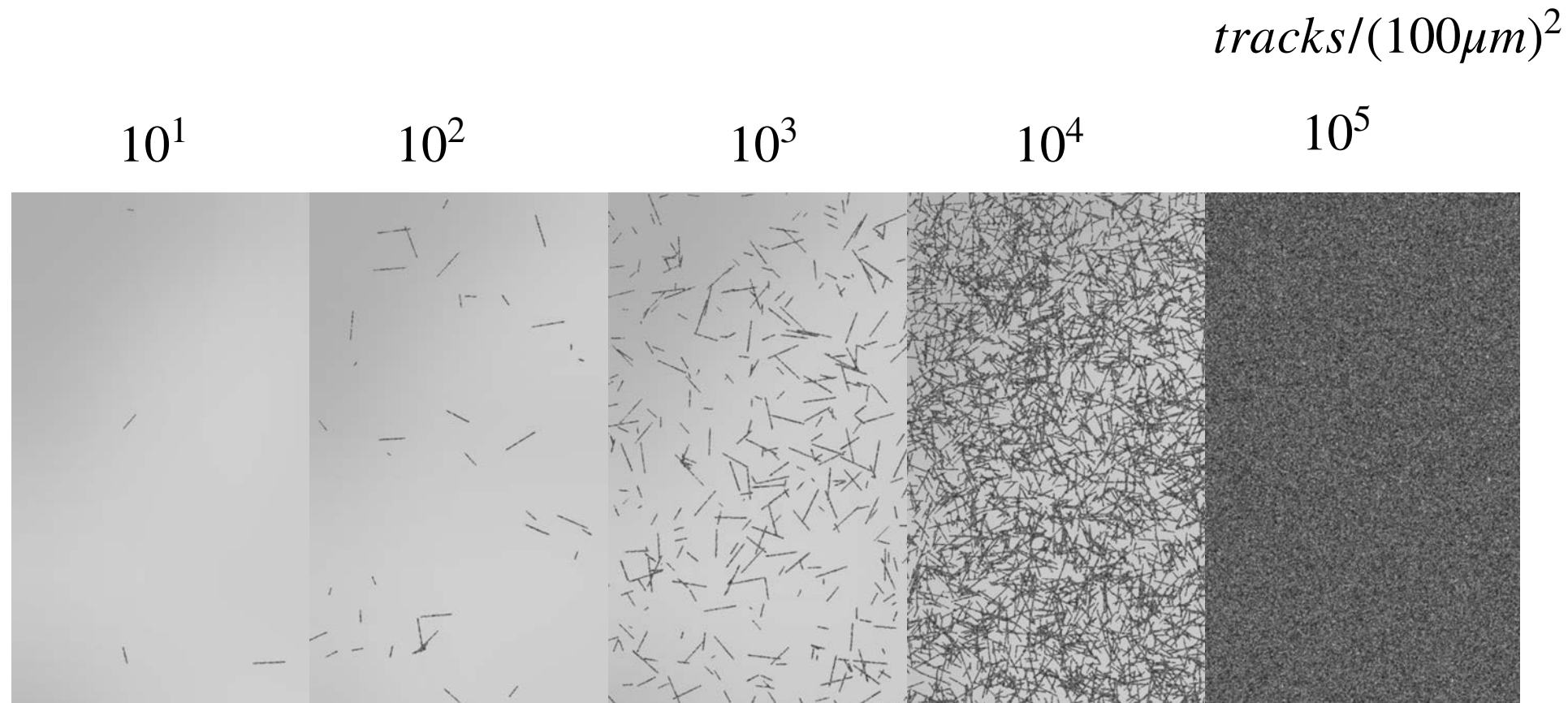
$$\mu_\alpha, \mu_\beta, \sigma, A, B (\mu_\alpha < \mu_\beta)$$

$$\sigma = 1.218 \pm 0.316 \text{ } \mu\text{m}$$

(この値がそのまま位置分解能に相当するわけではない)

照射する中性子量を増やすとどうなるか？

どんな感じで飛跡が識別できなくなるか

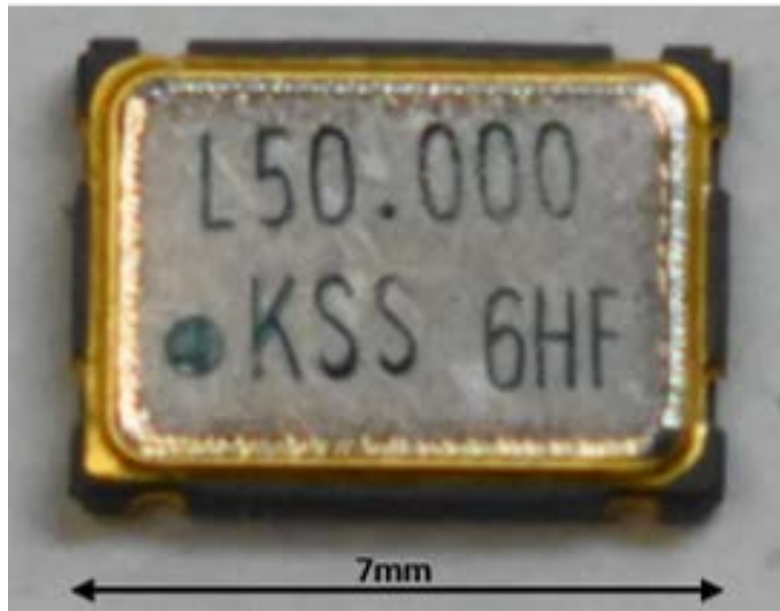


理研：吉田氏による飛跡のシミュレーション

照射する中性子量を増やすとどうなるか？

飛跡解析できないくらいの強度では
飛跡解析しない画像として評価する。
位置分解能は飛跡の長さ（より短い）程度が期待される
← Gd Gratingの画像から確認

コントラストがちゃんとつくか？

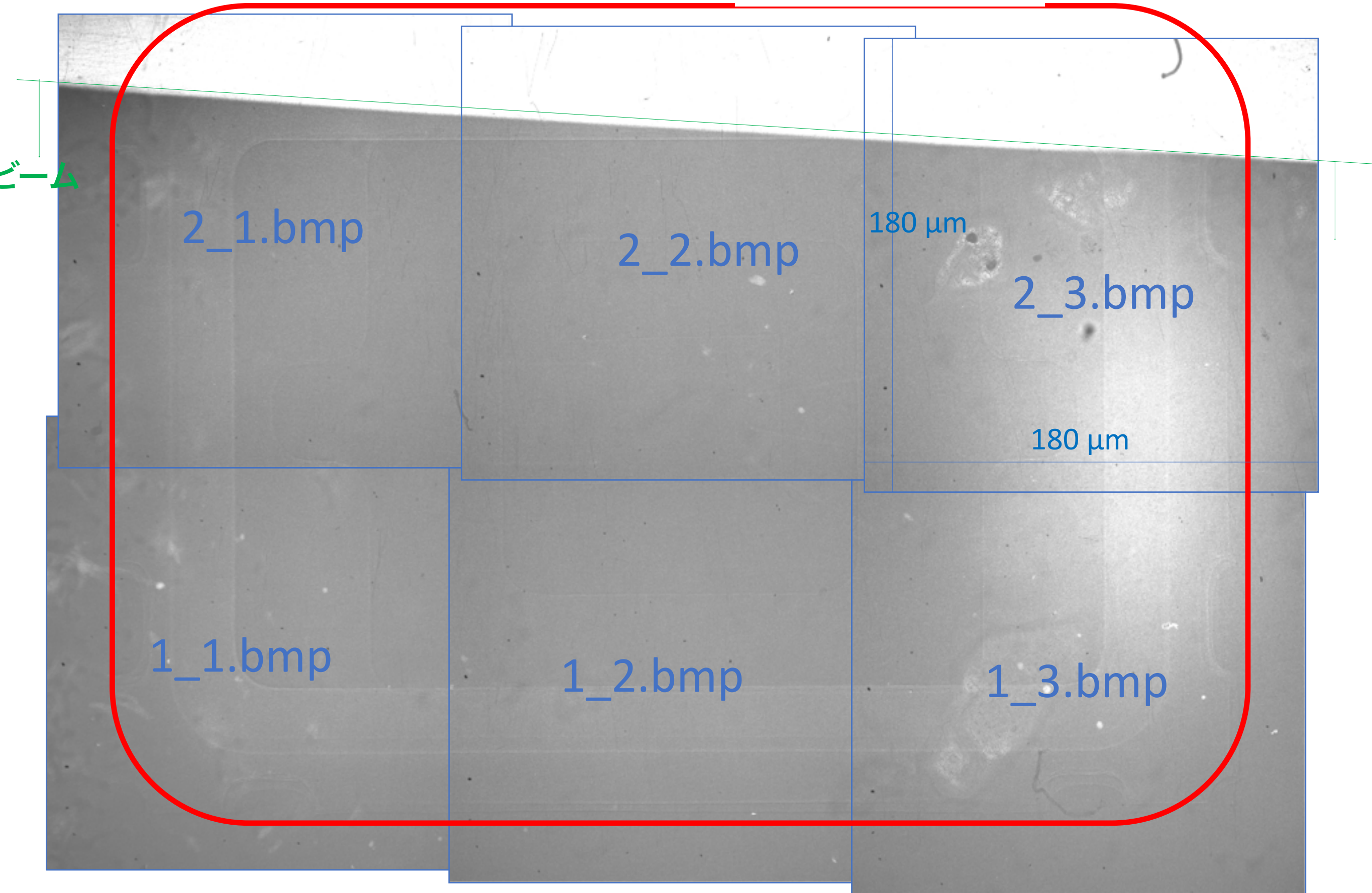


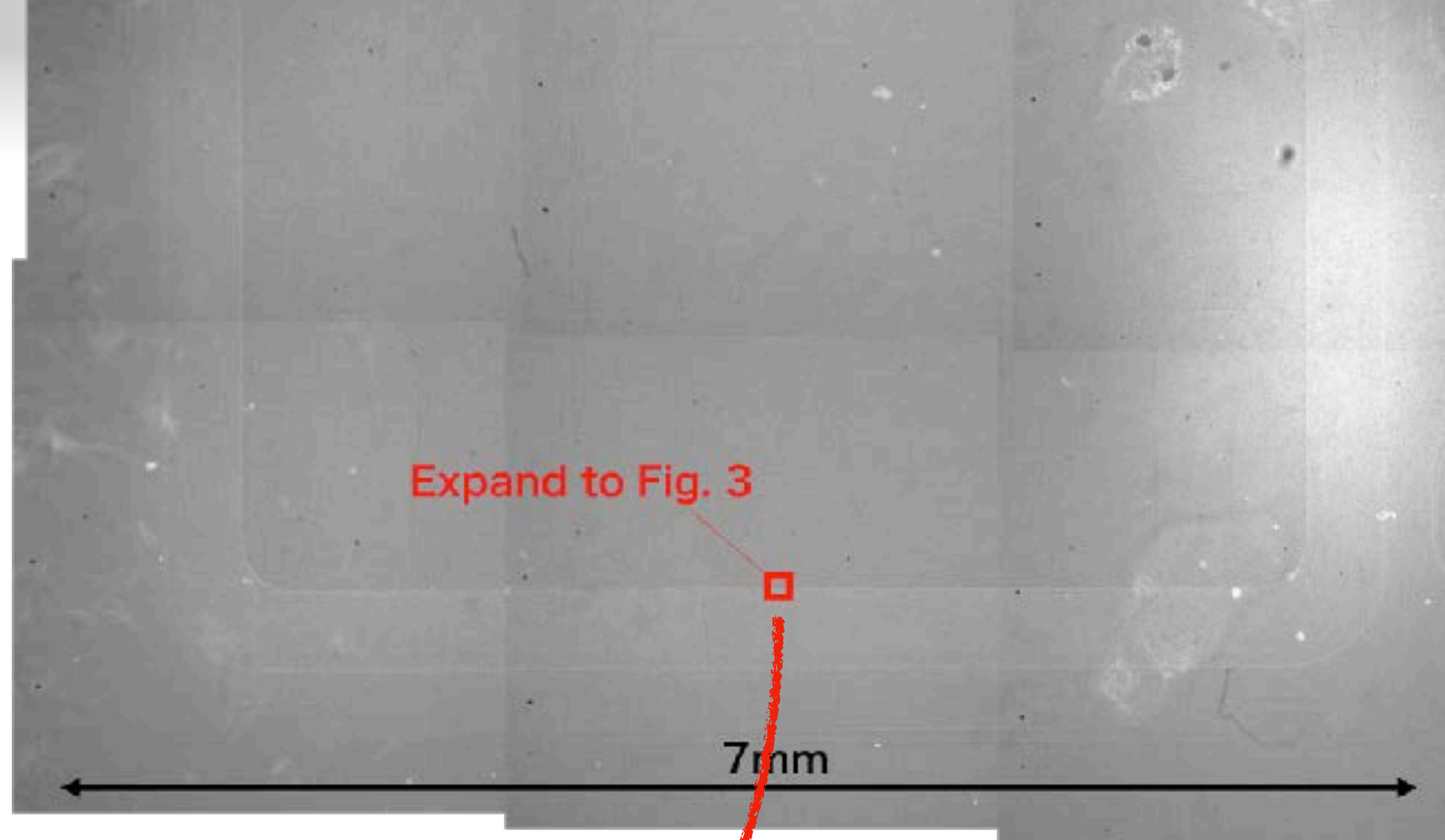
市販の水晶振動子チップを計測してみた

J-PARC BL05で照射 3時間
 3×10^8 tracks/cm²

位置関係

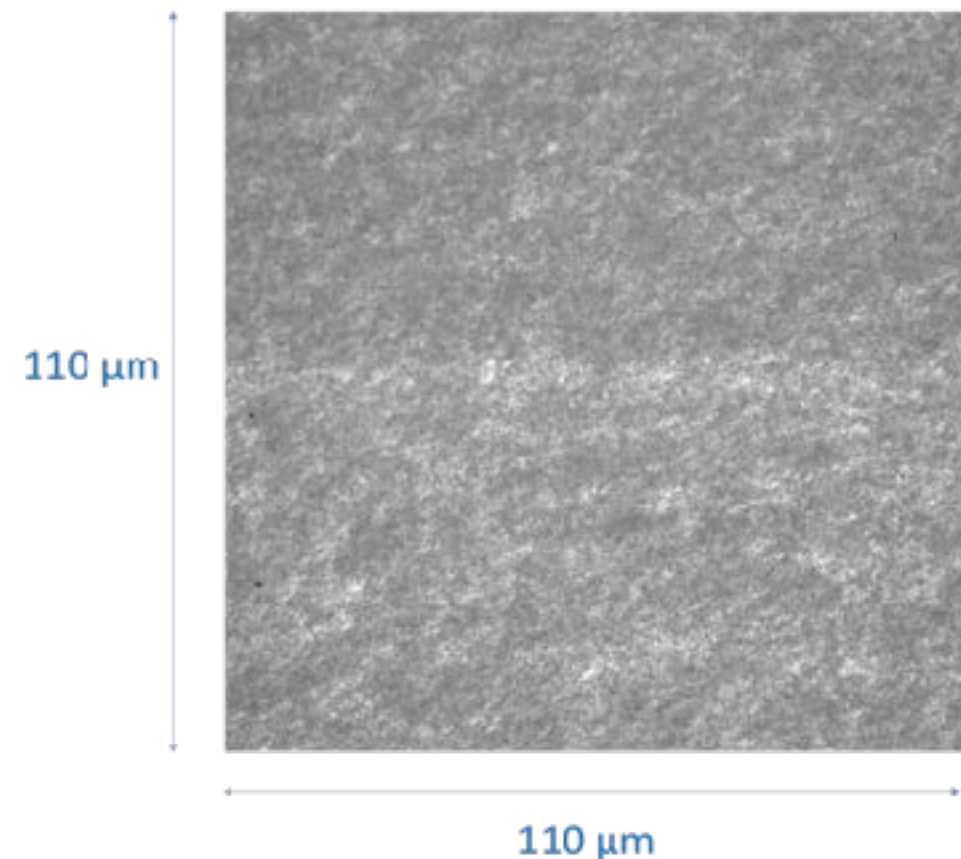
水晶振動子





Expand to Fig. 3

7mm



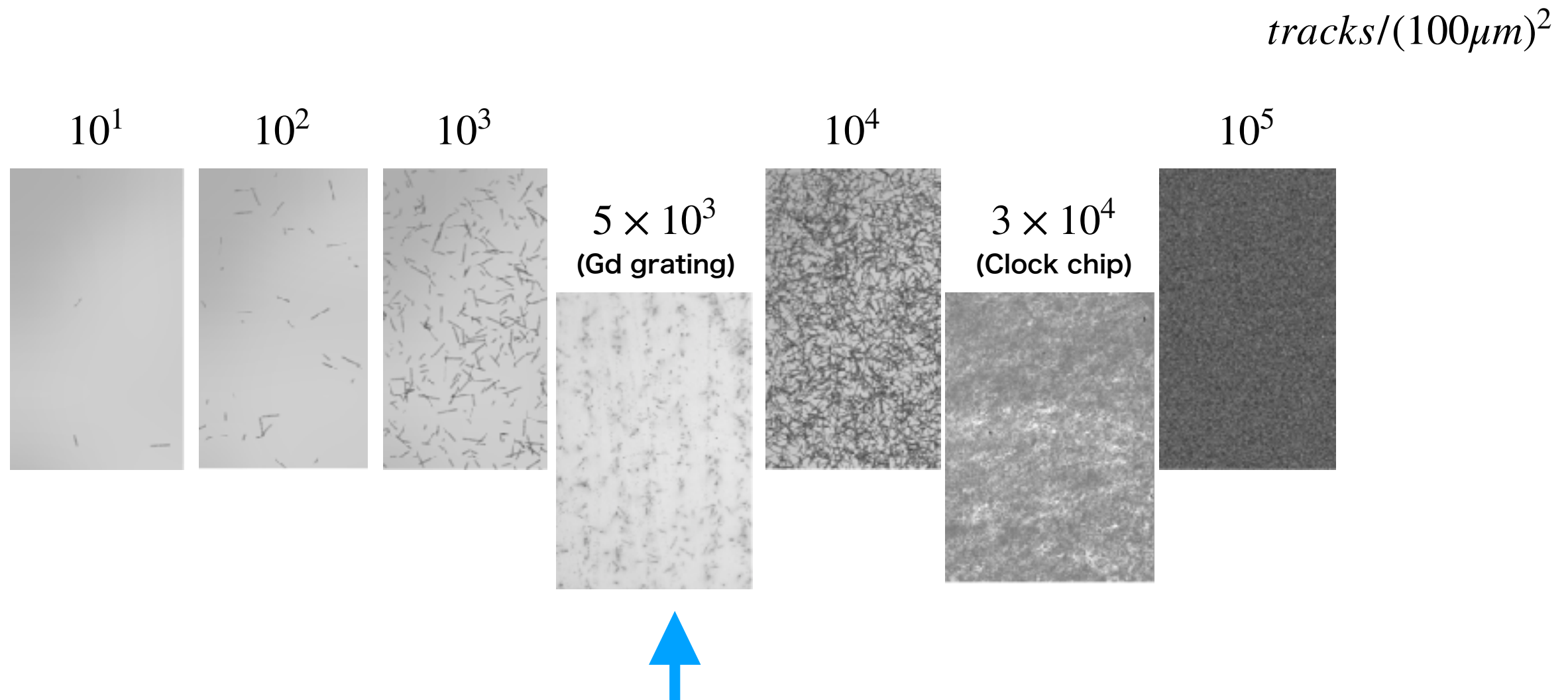
dark

bright

拡大して観察

個別のtrackはほとんど識別できない

照射する中性子量を増やすとどうなるか？



現状ではこのあたりから飛跡解析が難しくなる

- ・ 飛跡解析しないのでできること
- ・ 飛跡解析アルゴリズムの改善(→ 理研グループ)

まとめ

原子核乾板(Nuclear emulsion)検出器は、 μm 以下の位置精度で中性子検出が可能。

- ・ UCNでの基礎物理実験
- ・ Cold Neutron のイメージング

の2通りの利用法に関しての開発を進めている。

画像取得はMLF BL05, 基礎データはKUR CN3, E2を利用

イメージングにおいては

- ・ 数（2～3？） μm 程度の位置分解能は実現
- ・ 中性子強度の大きなところでの飛跡解析は難しい → 理研G解析
- ・ 飛跡解析しない画像取得可能
- ・ TOFには適用不向き（→原子炉での計測）
- ・ 現像、撮像、解析処理の手間
 - ・ 既存検出器との同時計測で、見たいところだけ高位置分解能評価

今回の内容はJournal of Imagingで発刊

Hirota et al., J. Imaging 2021, 7, 4