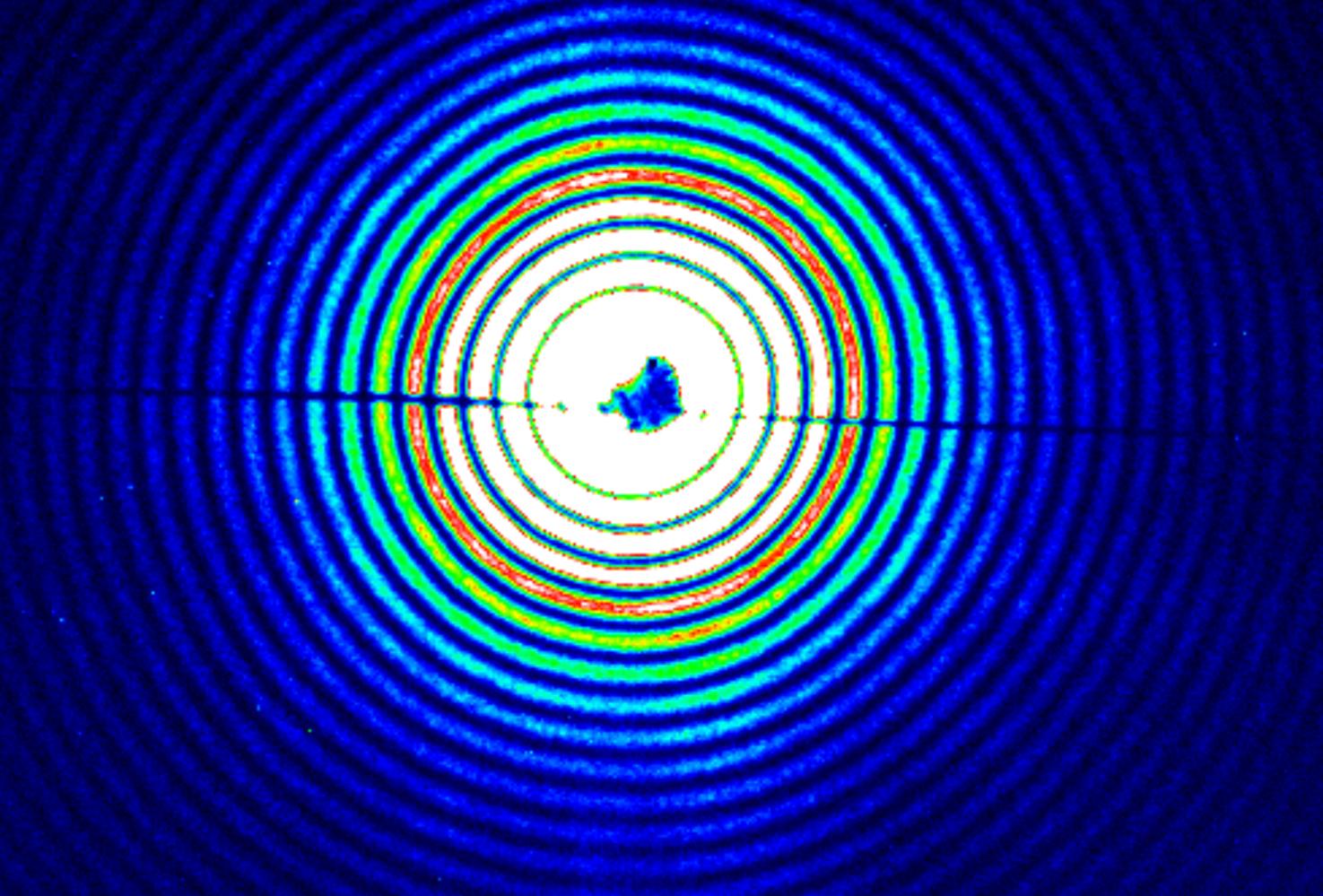


コヒーレント軟 X 線を用いたイメージング



高エネルギー加速器研究機構
小野寛太

共同研究者

装置開発・実験:	東大物性研	谷内敏之 小谷佳範
実験計画・解析	東大新領域	百生敦 矢代航 Sebastien Harasse
試料作製:	東北大金研 東北大工	水口将輝 角田匡清

謝辞

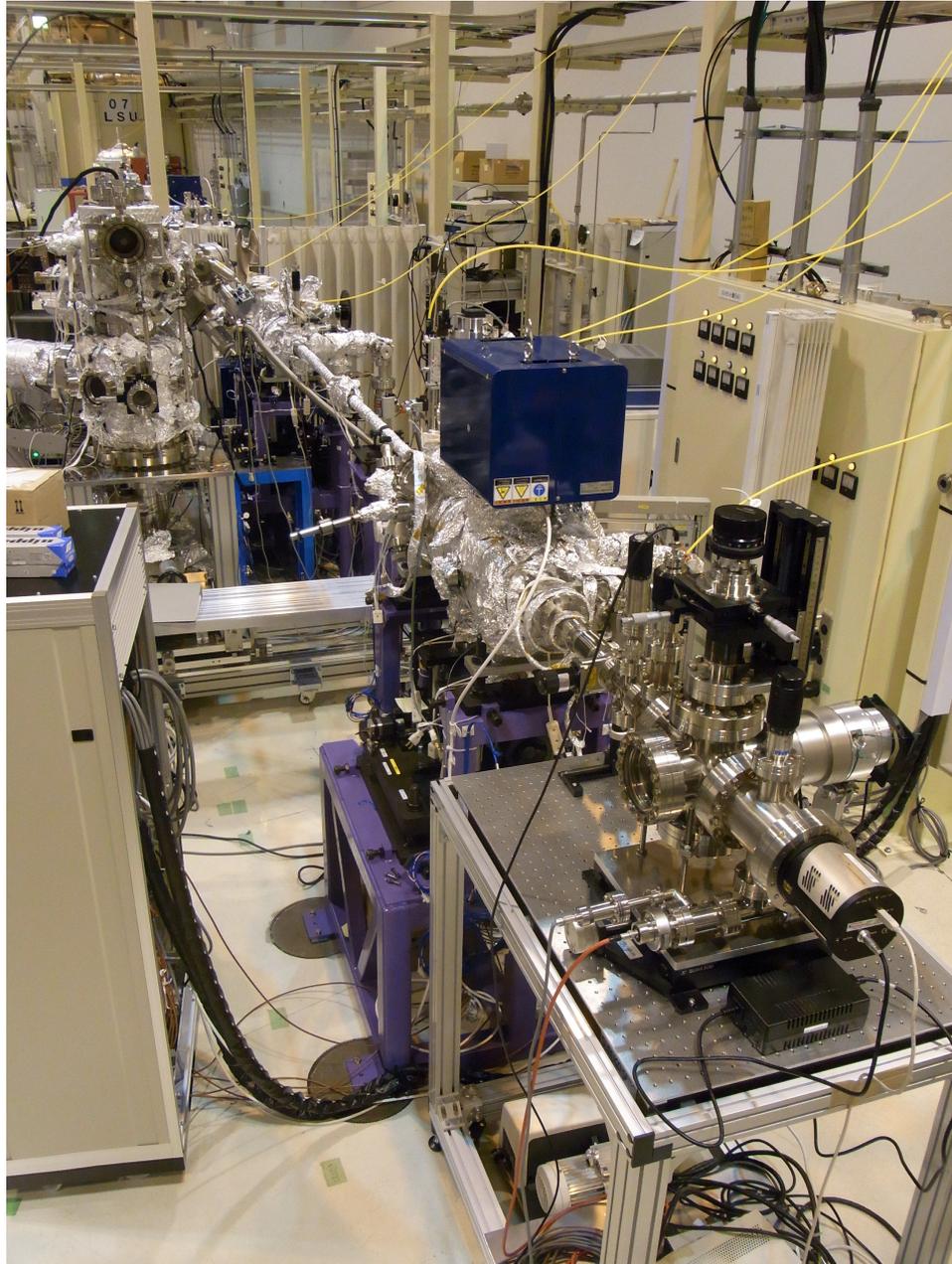
東大アウトステーション

東大物性研 山本達、藤澤正美、松田巖

発表内容

- 装置の概要
- BL07LSU でのコヒーレンス測定 (2010.02.15 ~ 16)
- コヒーレント軟X線回折顕微鏡テスト実験 (2011.02.01 ~ 03)
- 今後の計画

コヒーレント散乱イメージング装置



SPring-8 BL07LSU フリーポート

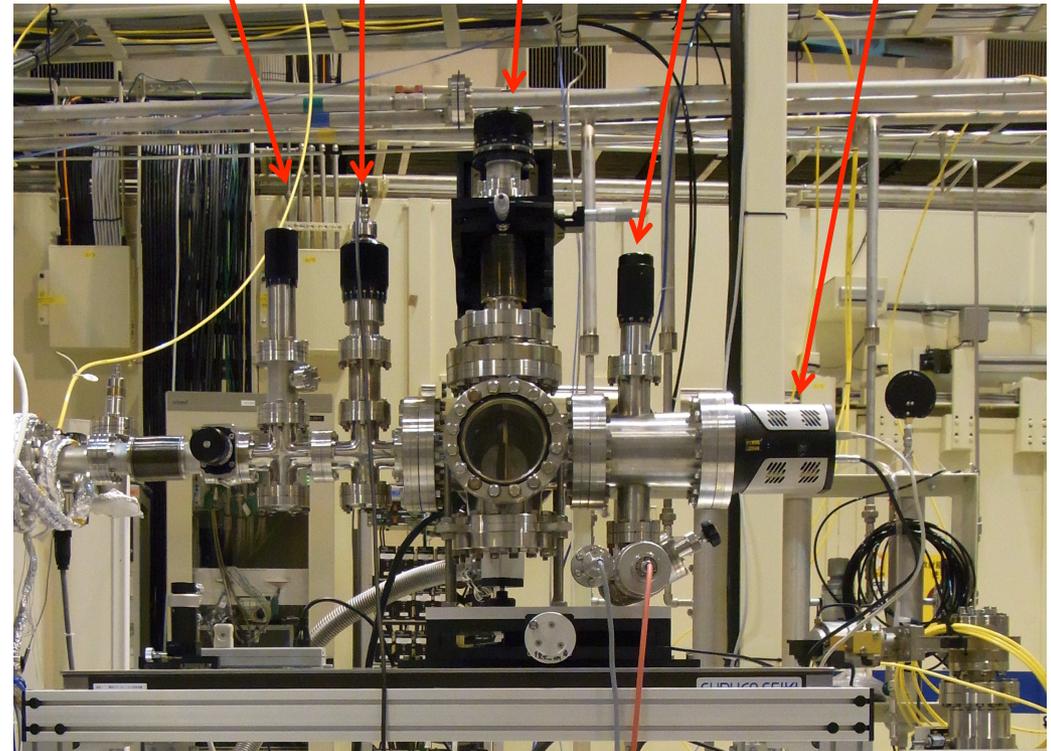
空間フィルタ
メカニカルシャッター

サンプル

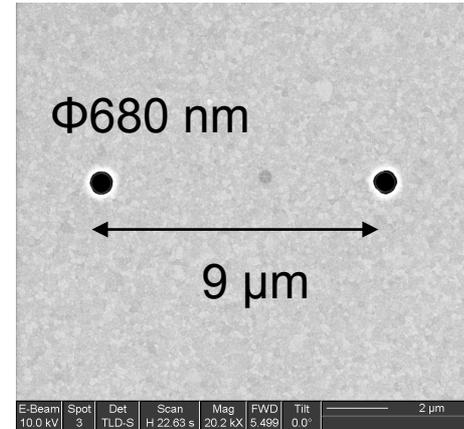
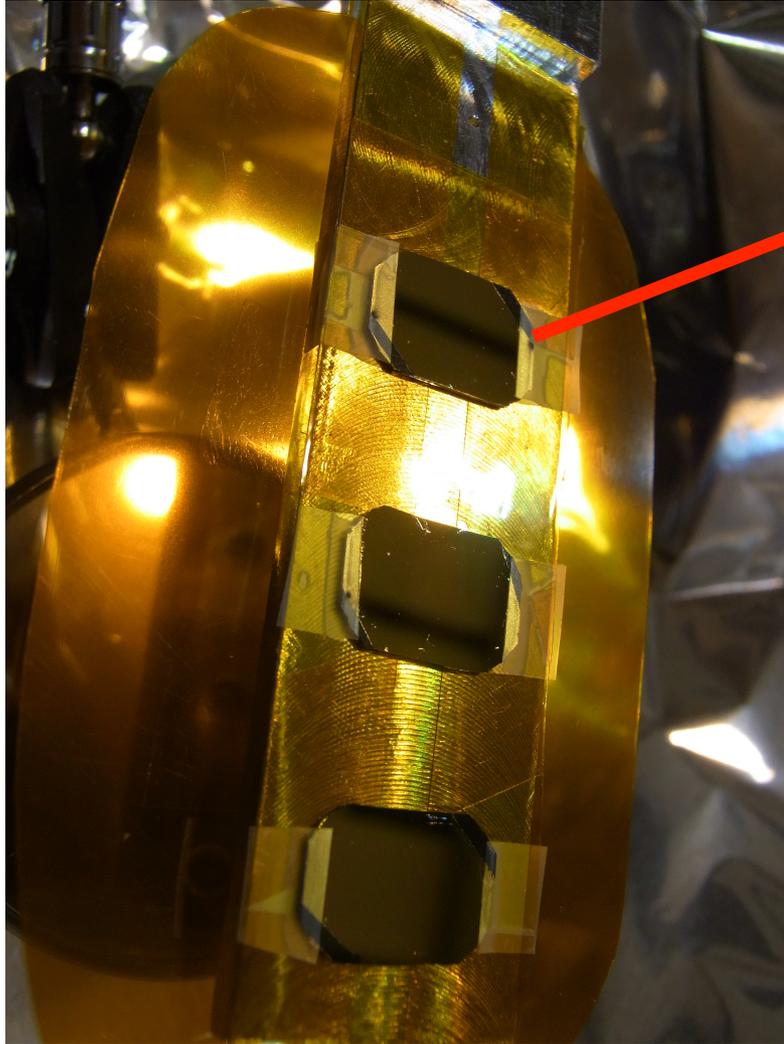
ビームストッパー

ビームモニタ

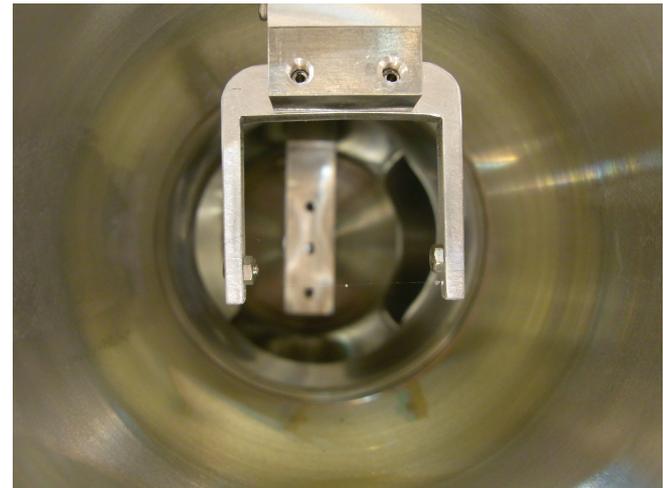
X線CCDカメラ
PIXIS-XO
2048 X 2048



サンプルとビームストッパー

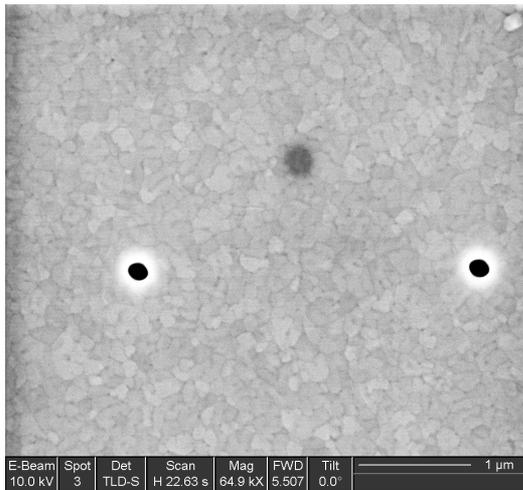


Au (360 nm) / SiN (150 nm) メンブレン

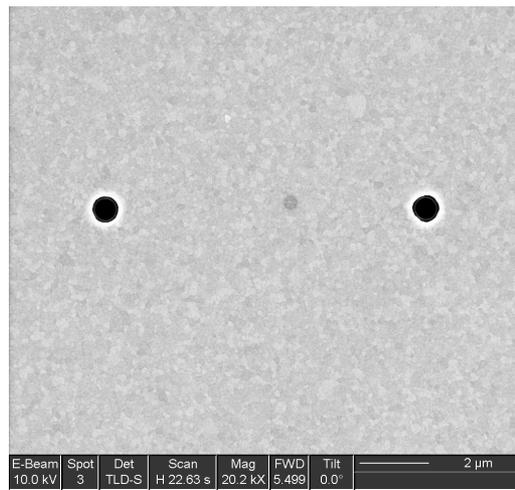


FIB加工後のSEM写真

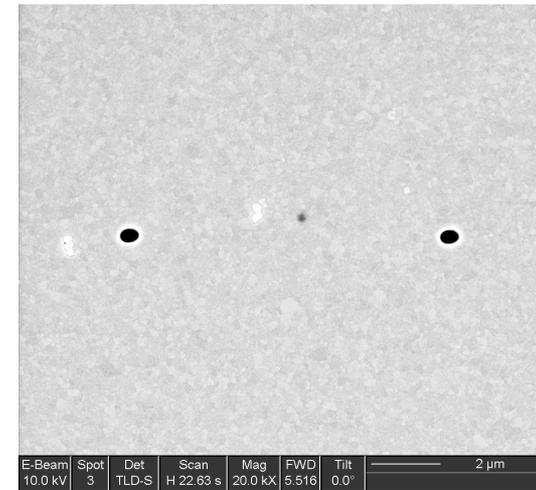
全てNTT-ATで金蒸着後の試料に金側から穴開け
→SEM観察も金側からなのでメンブレン側は穴がこれより小さくなっている可能性有り



sample#2
 $\Phi=170\text{nm}$, $d=3\mu\text{m}$



sample#3(a)
 $\Phi=680\text{nm}$, $d=9\mu\text{m}$

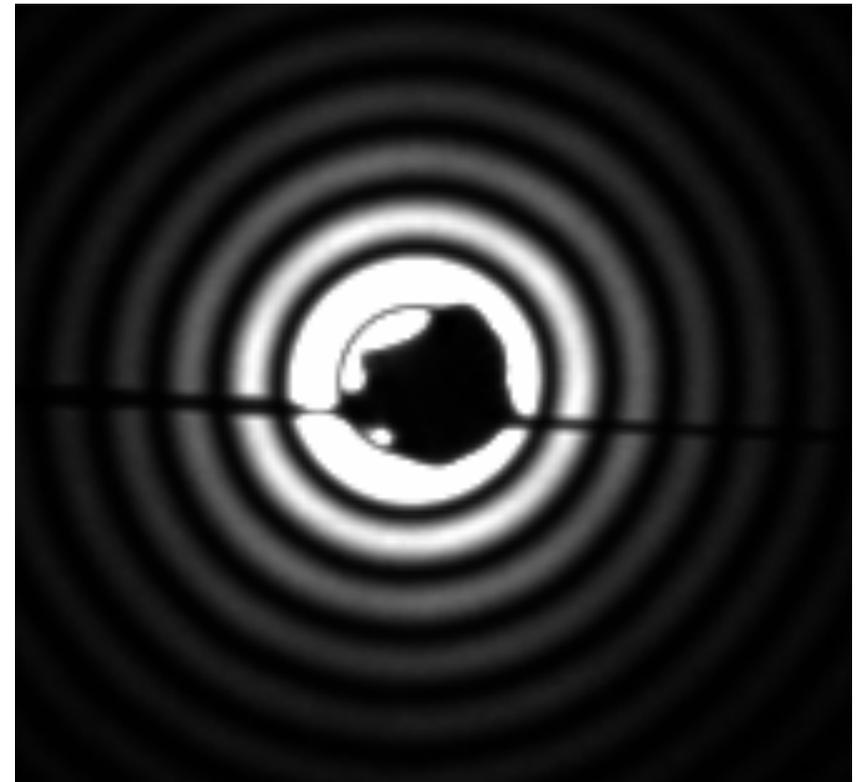
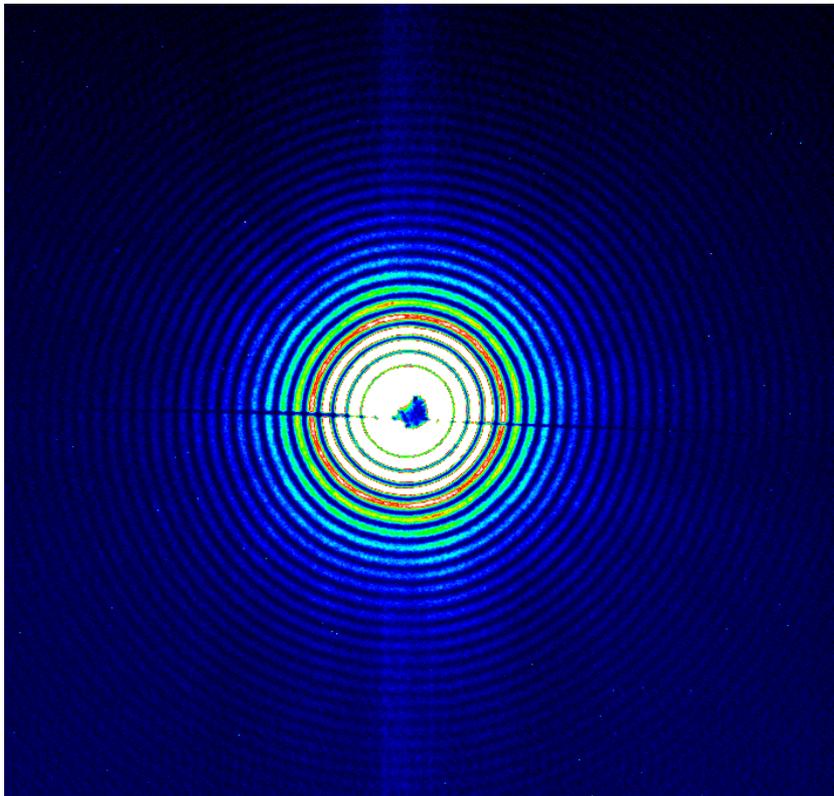


sample#3(b)
 $\Phi=350\times 480\text{nm}$,
 $d=9\mu\text{m}$

ピンホールによる Fraunhofer 回折

ピンホール 10 μm

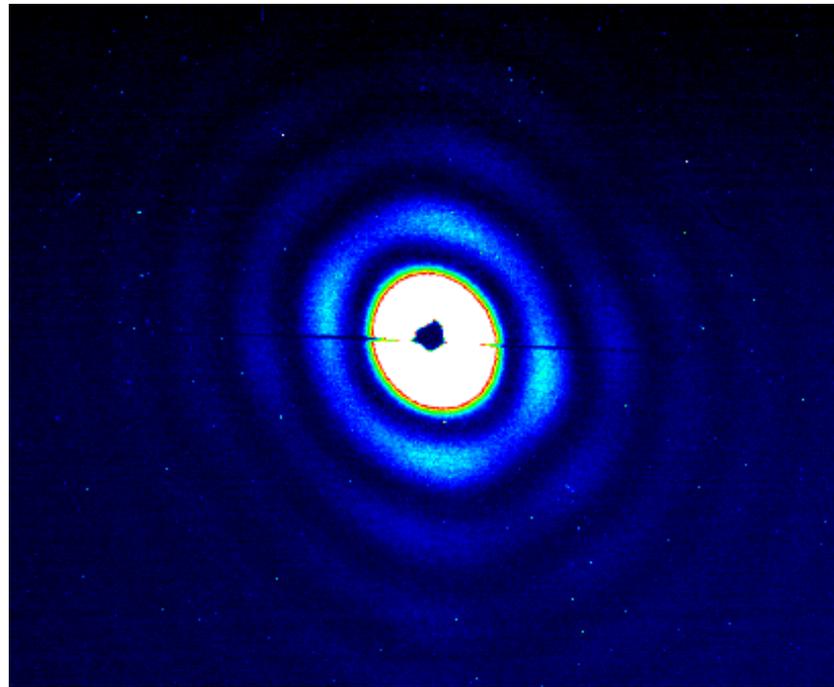
λ : 3.1 nm (400 eV)
スリット: 100 μm \times 100 μm
カメラ長: 560 mm



ピンホールによる Fraunhofer 回折

ピンホール 2 μm

λ : 3.1 nm (400 eV)
スリット: 100 μm \times 100 μm
カメラ長: 560 mm



上流(S2) 水平スリットの Fraunhofer 回折

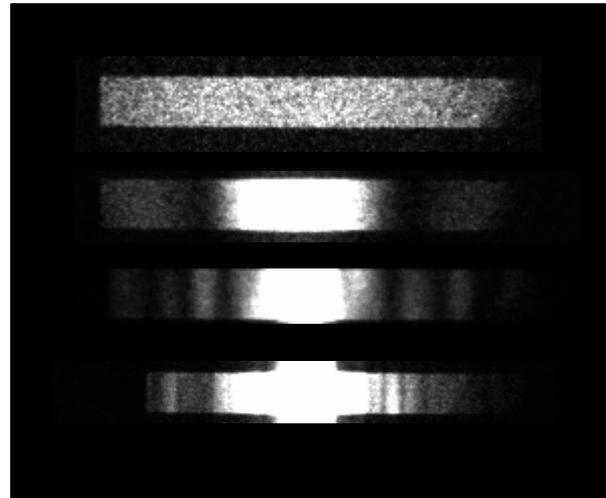
水平スリット

4 μm

16 μm

64 μm

256 μm



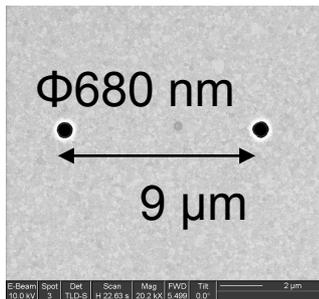
上流スリットの開口による Fraunhofer 回折をが観測される

Young Interferometer

ダブルピンホールによる干渉

サンプル 3(a)

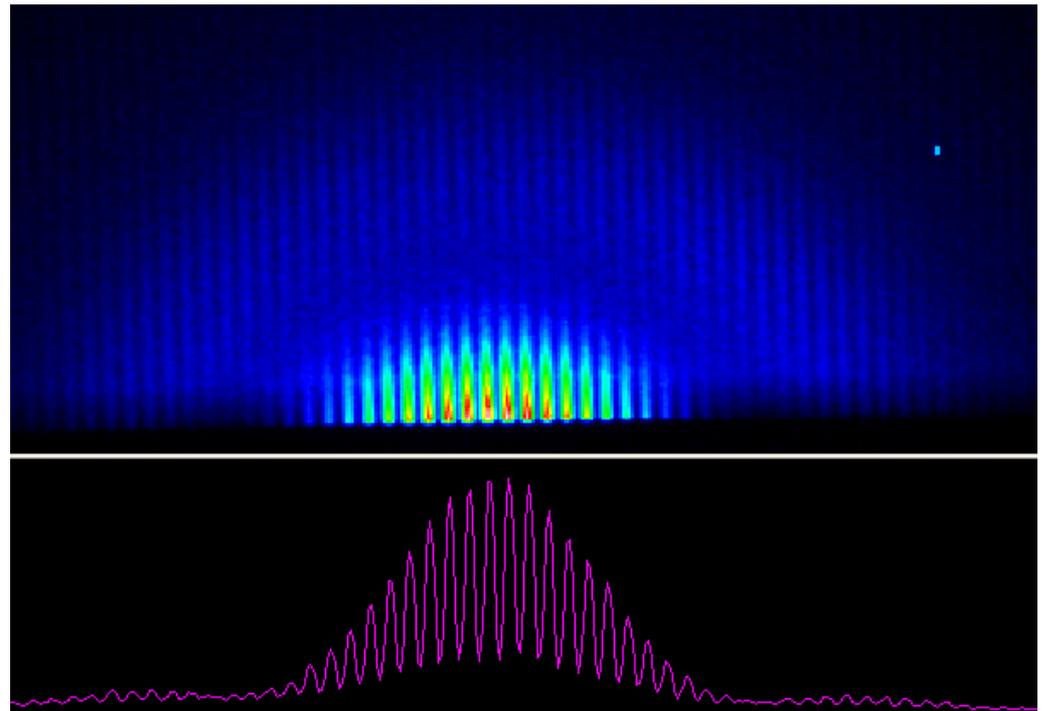
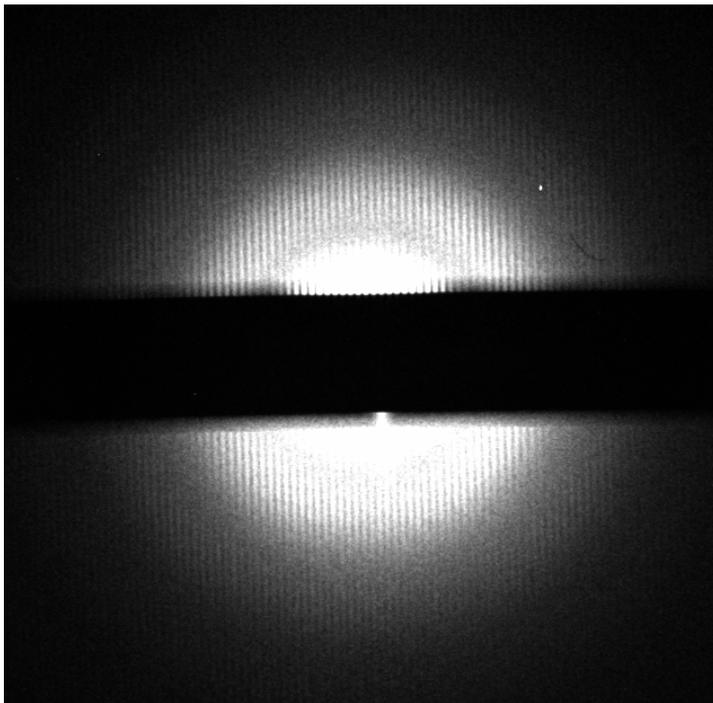
スリット $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$



transverse coherence length : $\zeta = \lambda R / w$

$\lambda = 3\ \text{nm}$, $R = 10\ \text{m}$, $w = 100\ \mu\text{m}$

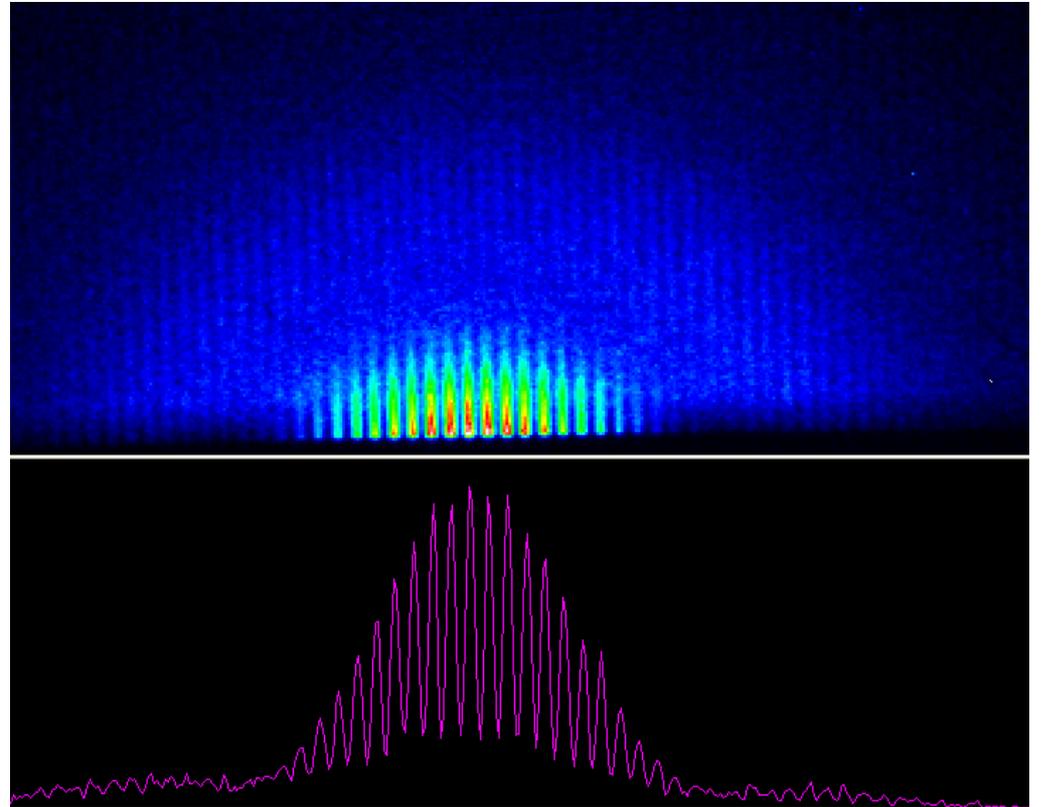
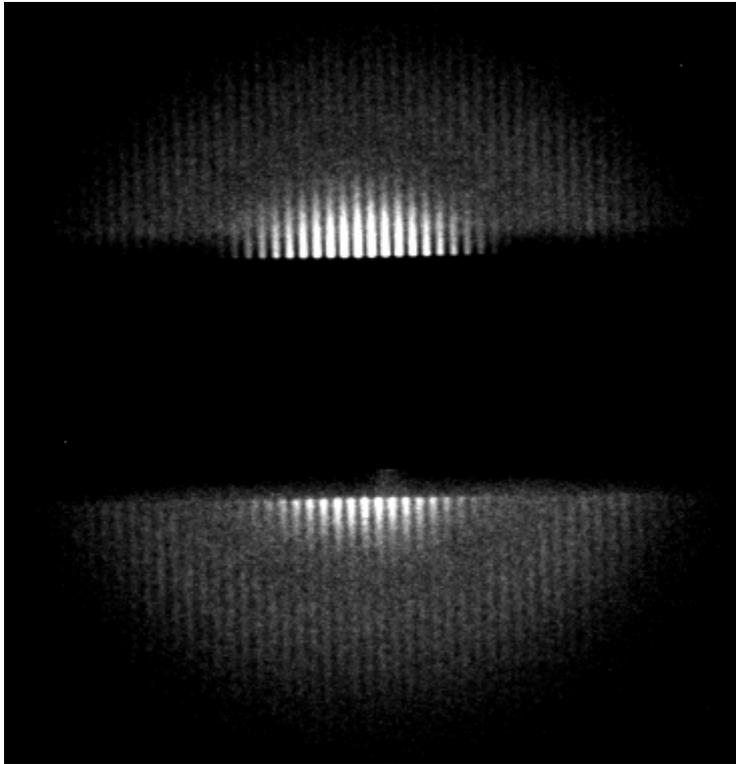
$\zeta = 300\ \mu\text{m}$: 非常に大きいコヒーレンス長が得られる



ダブルピンホールによる干渉

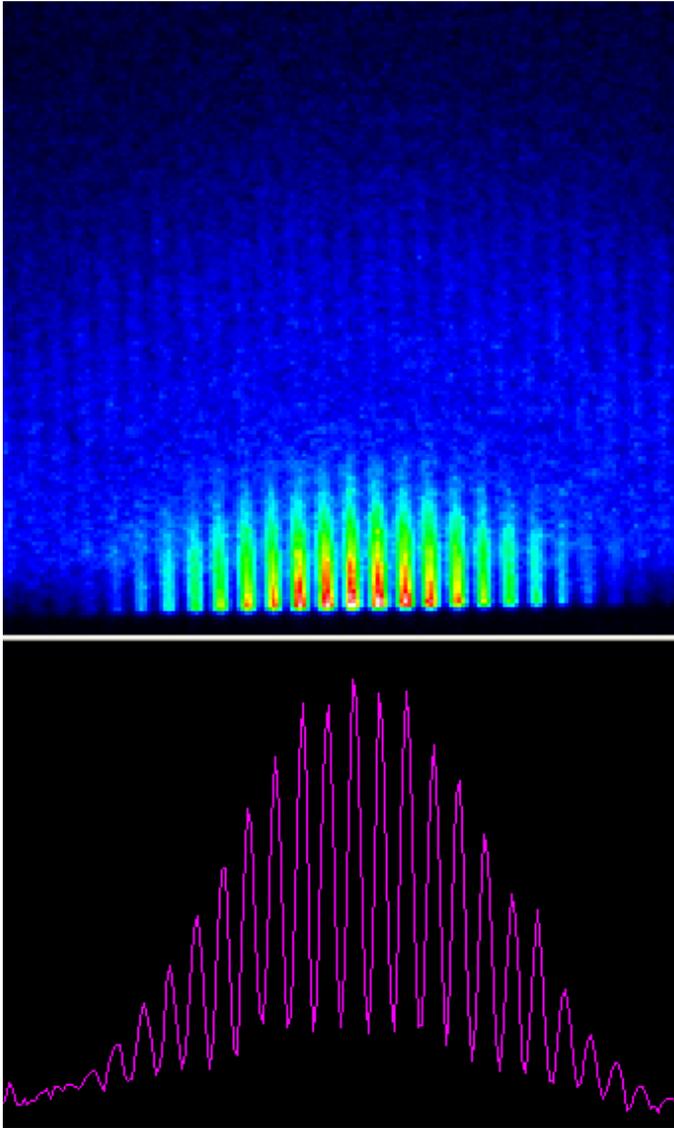
サンプル 3(a)

スリット $50 \mu\text{m} \times 52 \mu\text{m}$



SSRL との比較

BL07LSU
9 μm
400 eV



SSRL
BL 5-2
7 μm
420 eV

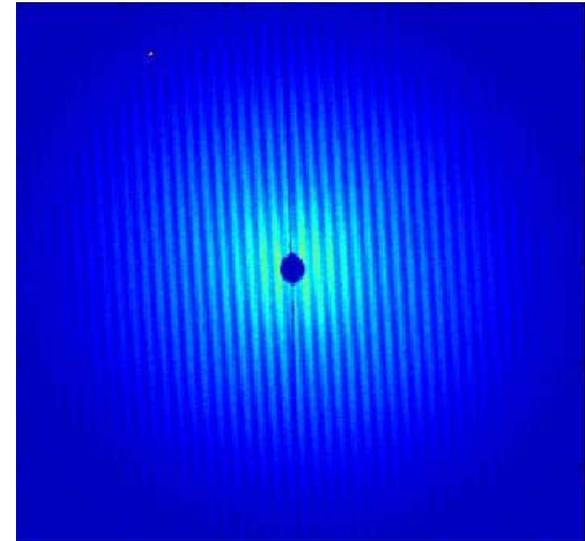


Figure 7: Colorized image from CCD for double pinhole with 7 μm separation distance at 12.7% Relative Intensity

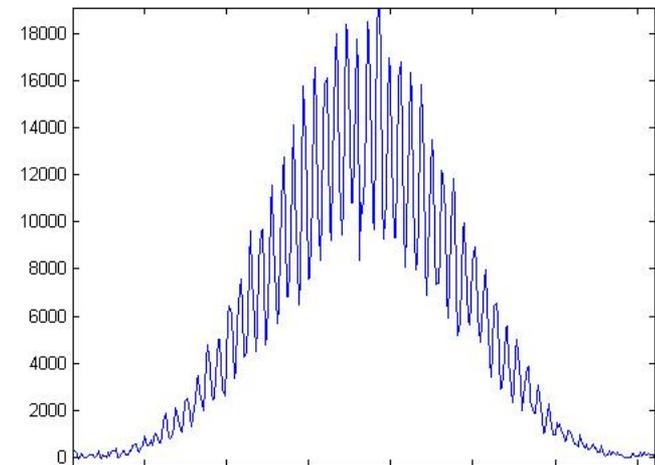


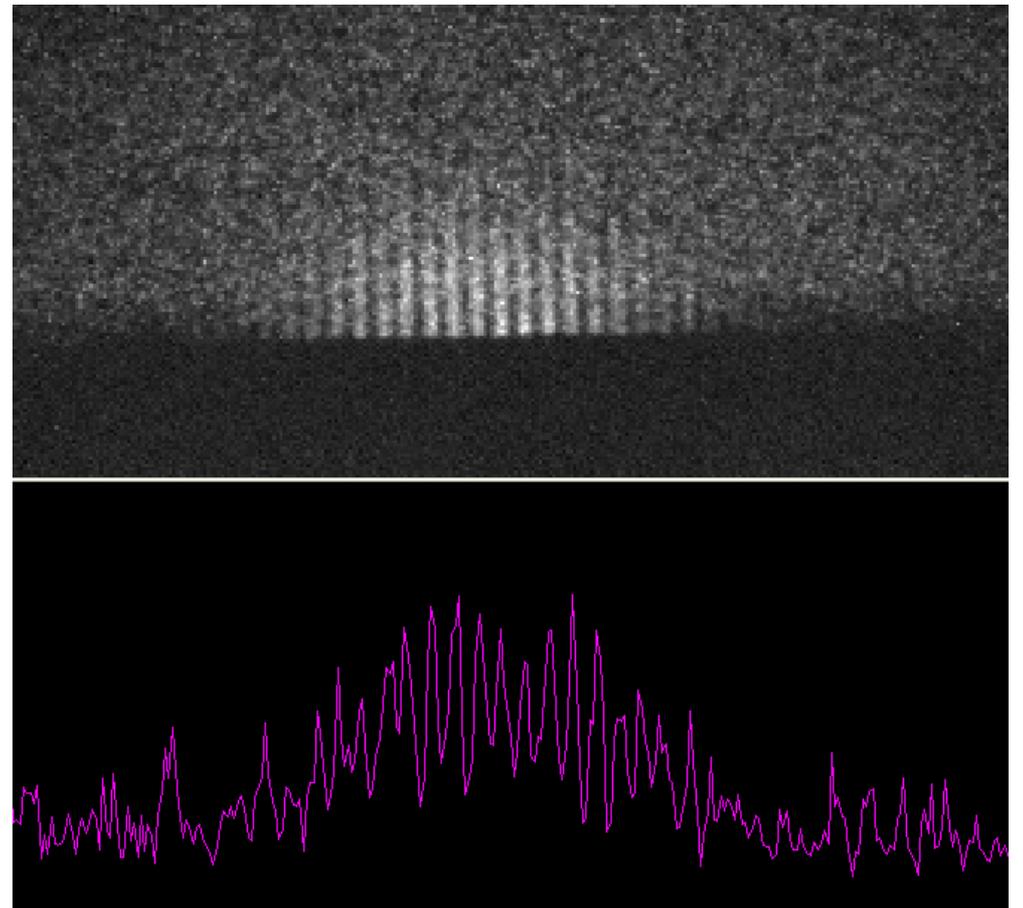
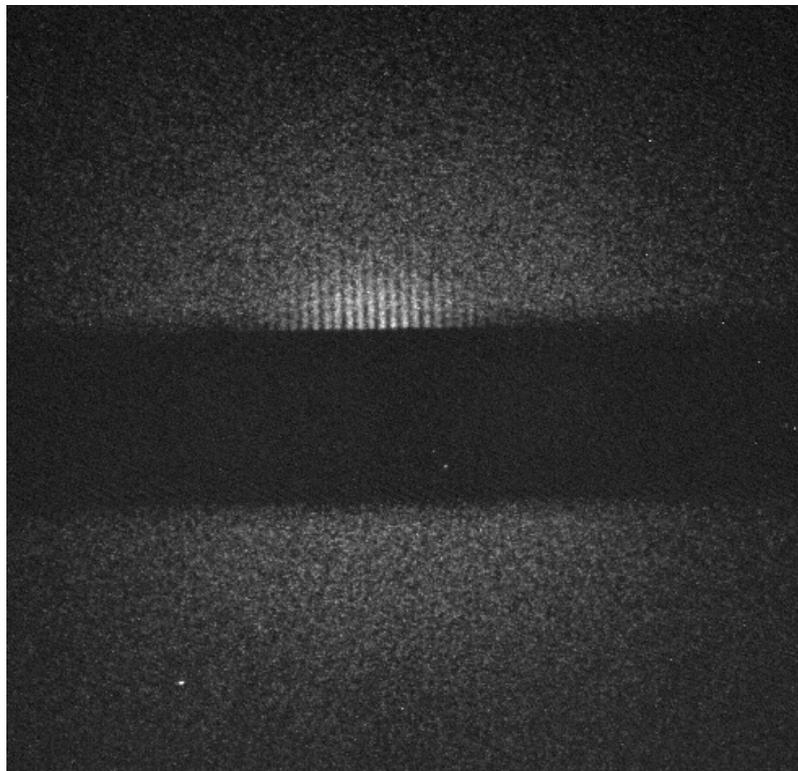
Figure 9: Horizontal line cut plot of intensity vs. position from 7.

当たり前のことではあるが、BL07LSU の Visibility は高い。

ダブルピンホールによる干渉

サンプル 3(a)

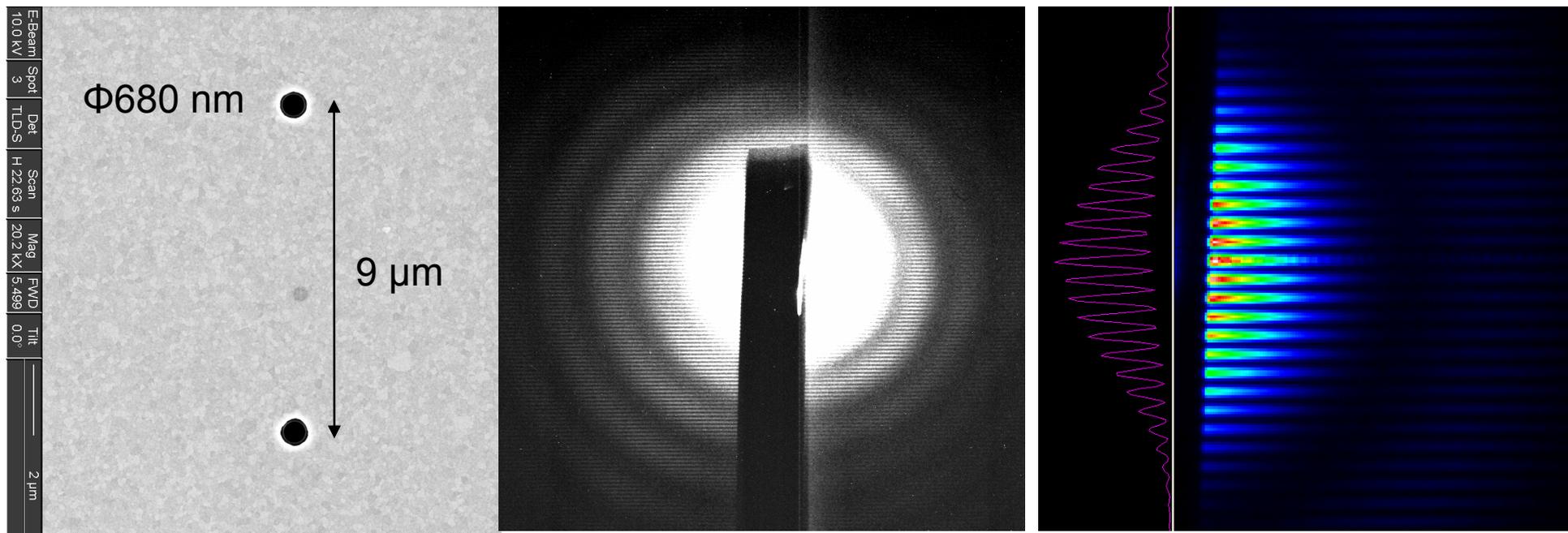
スリット $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$



ダブルピンホールによる干渉 垂直方向

サンプル 3(a)

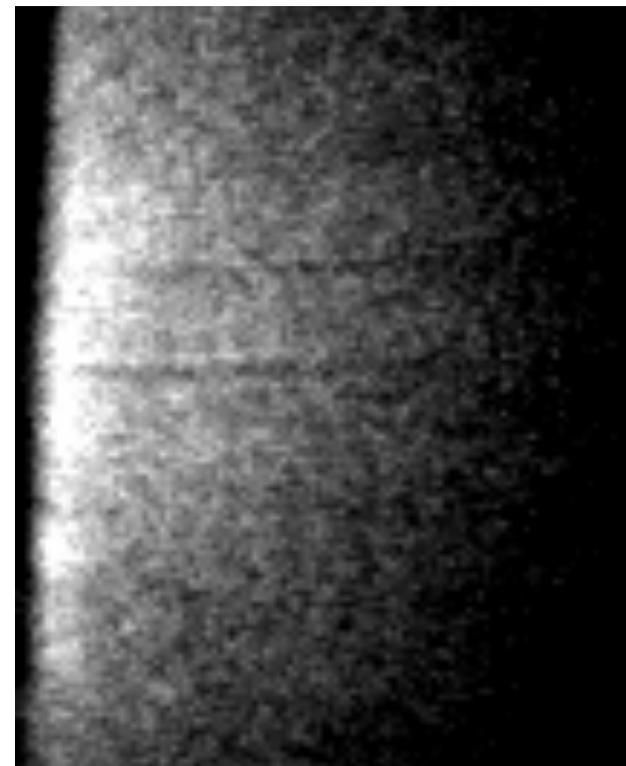
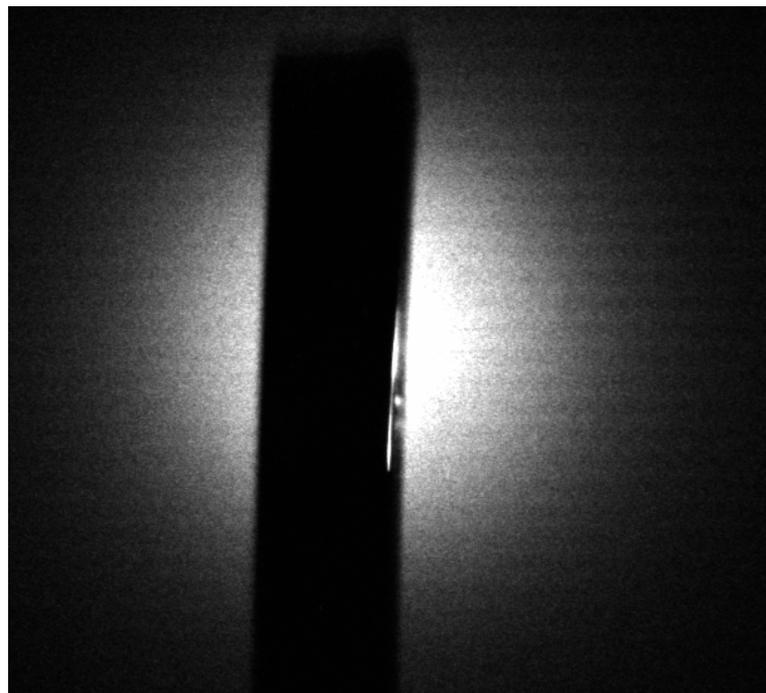
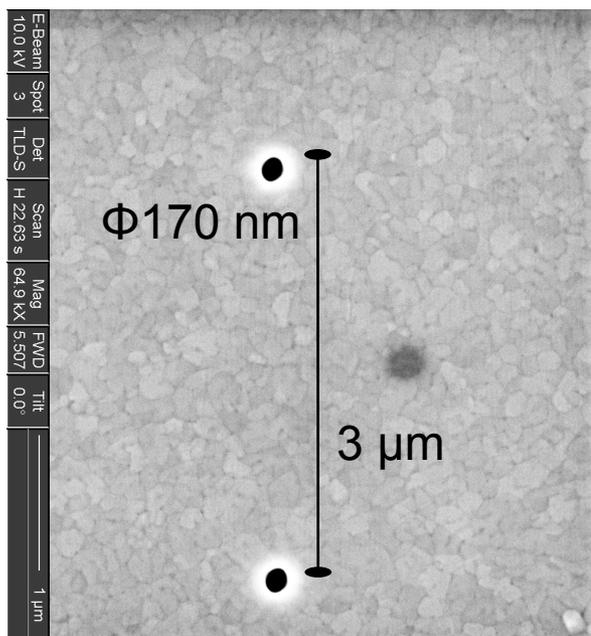
100 μm \times 100 μm



ダブルピンホールによる干渉 垂直方向

サンプル 2

スリット $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$



コヒーレンス測定実験のまとめ

十分なコヒーレンス長が得られることが分かった。

試料作製がきわめて難しい。
かなりの試行錯誤が必要。
50 nm 以下の加工には熟練が必要。

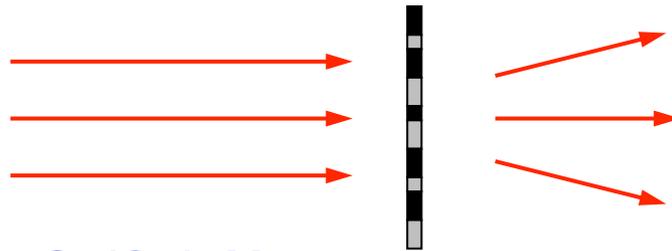
近い将来、集束イオンビーム (FIB) 装置を導入したい。

C より長波長では PF でも十分なコヒーレンス長が得られる。
例えば、 $\lambda = 10 \text{ nm}$, 1m 上流の $100 \mu\text{m}$ ピンホールを仮想光源とすると
コヒーレンス長 $\xi = 100 \mu\text{m}$

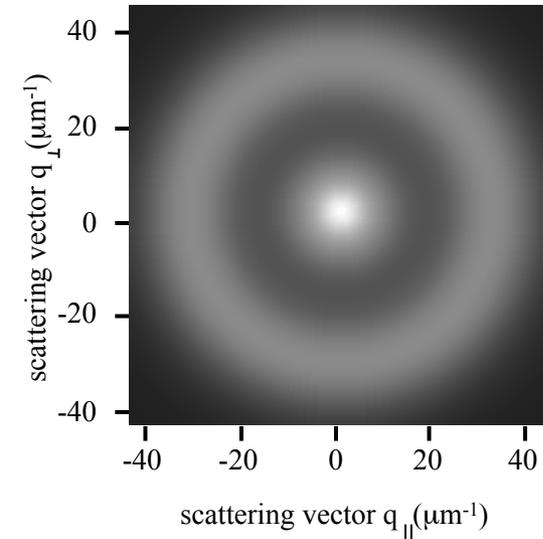
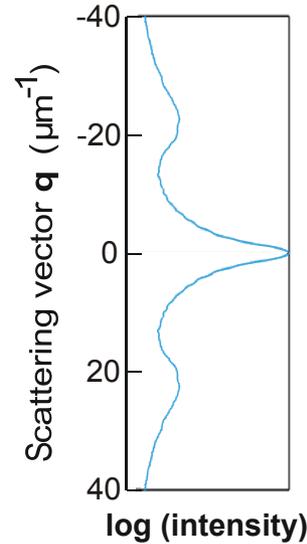
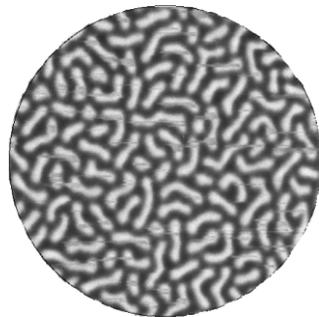
Use of coherent x-rays

Small Angle Scattering

Spot size > Coherence length > Domain size



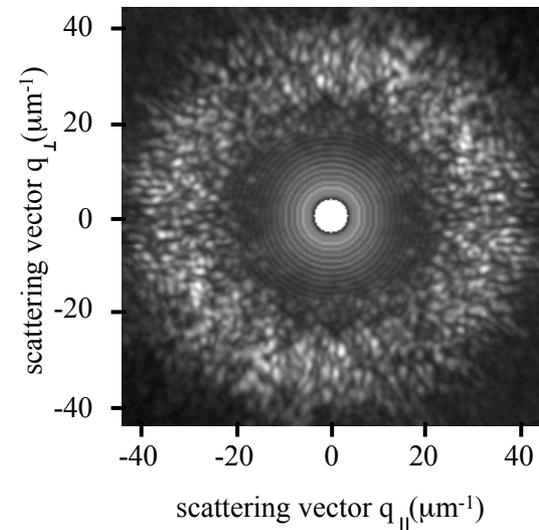
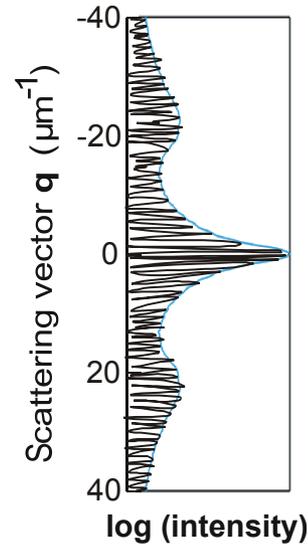
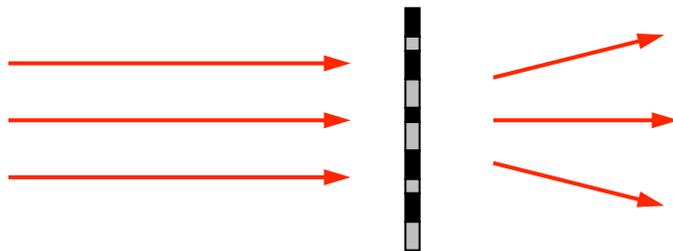
$$S(Q,t) = \langle Sc(Q,t) \rangle_V \rangle_c$$



Averaged structure

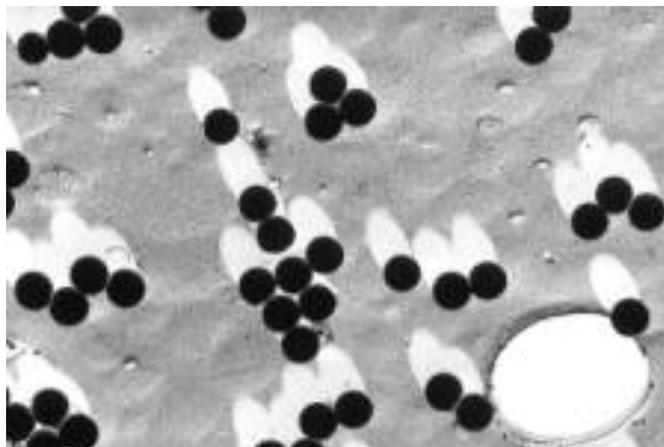
Speckle

Coherence length > Spot size > Domain size

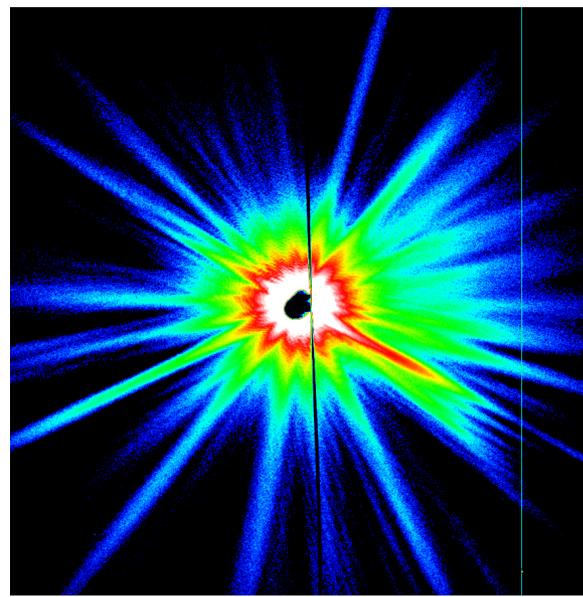
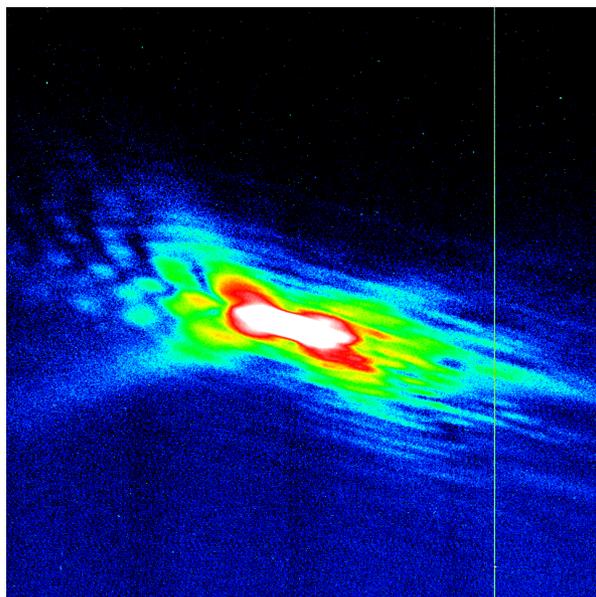


Real space structure

Pd/Pt Shadowed Polystyrene LATEX

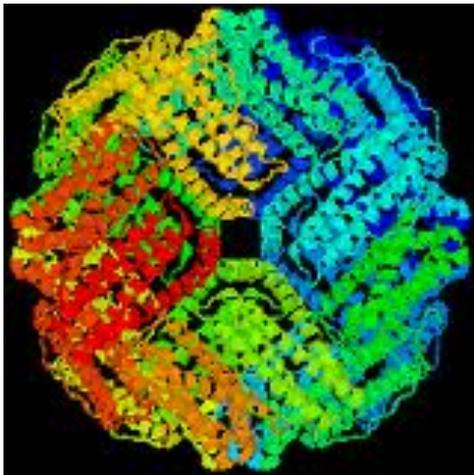
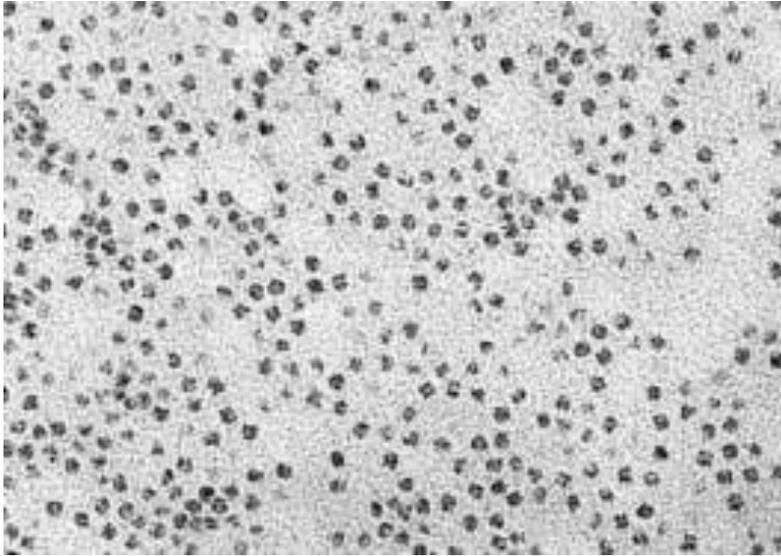


216 nm



Ferritin molecules

- Single molecular imaging -



12 nm

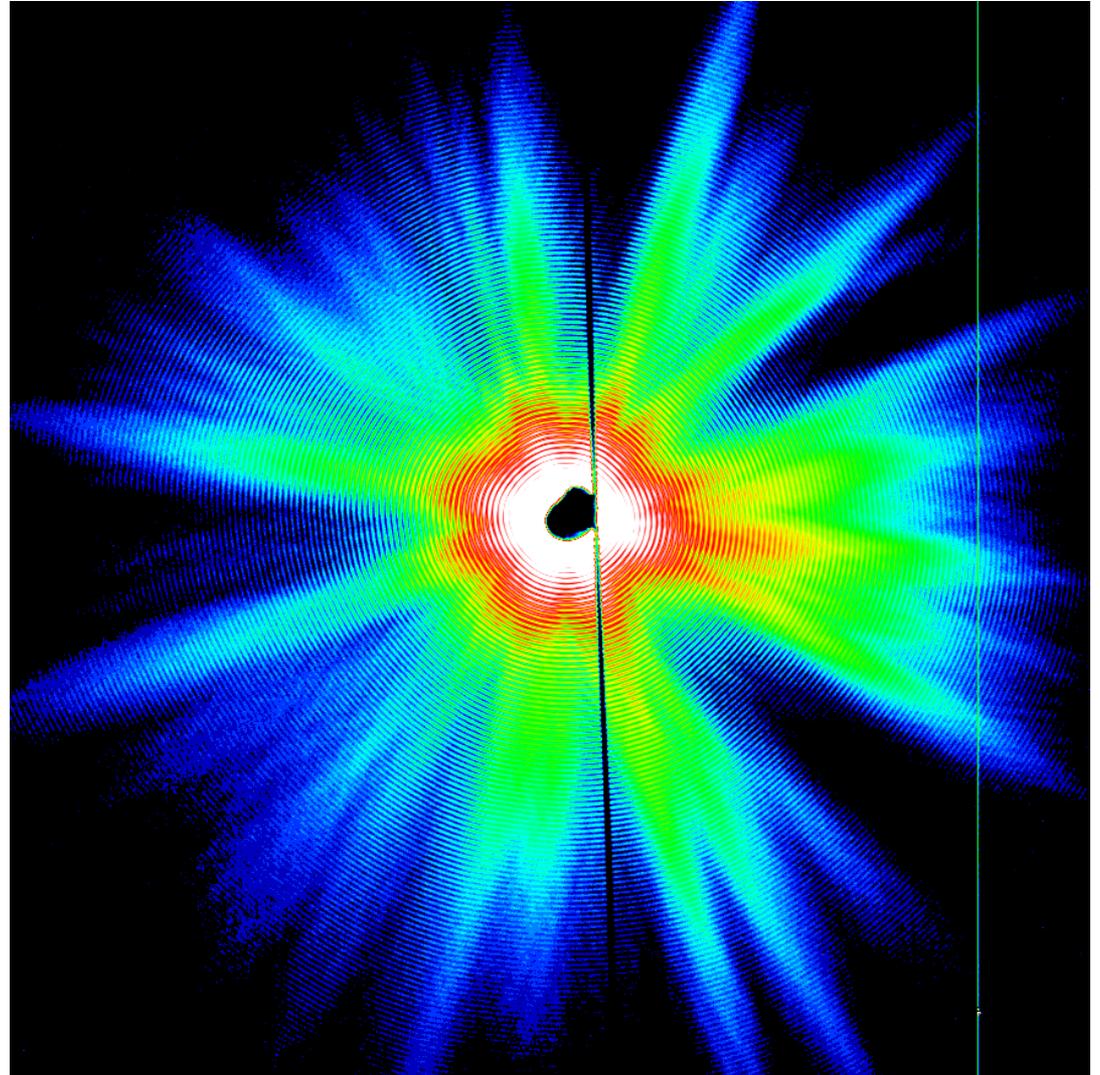
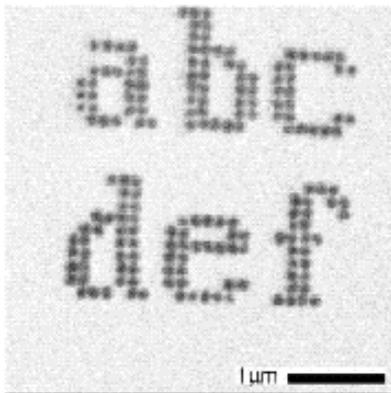


Image reconstruction from speckles

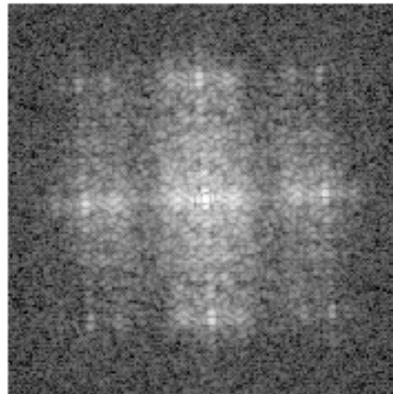
— Phase recovery —

Reconstruction from speckles (Phase recovery)

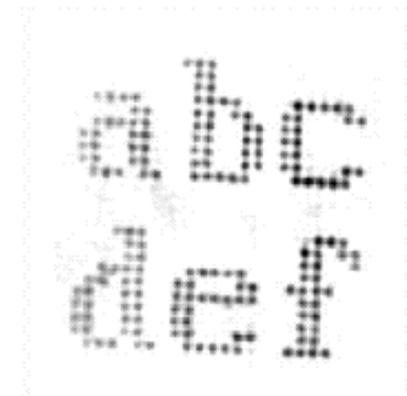
Reconstructed image



sample



speckles



reconstructed image

Au nano dots on SiN membrane $\lambda=17\text{\AA}$ coherent beam at X1A
(0.1 μm diameter, 80 nm thick) (NSLS), $1.3 \cdot 10^9$ ph/s 10 μm pinhole
24 μm x 24 μm pixel CCD

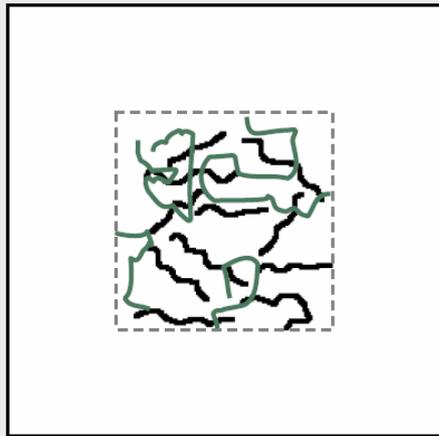
Oversampling reconstruction

Miao, Charalambous, Kirz, Sayre, Nature, 400 (1999)

Phase recovery

'Real' Space

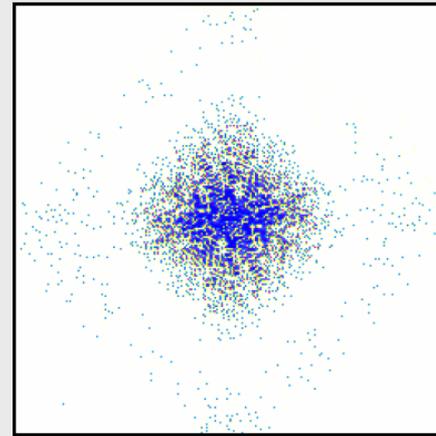
$N \times N$
Object in
 $2N \times 2N$
Matrix



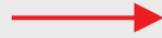
FFT



'K' Space



Force Intensity
Outside Of Object
to 'Known' Value



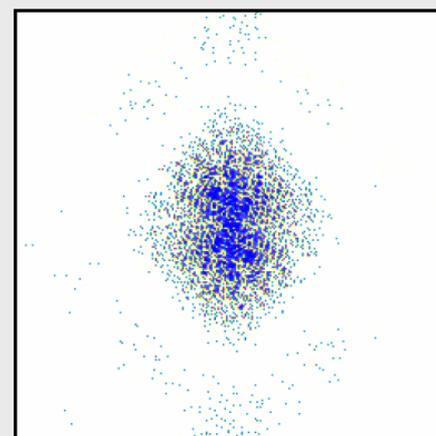
Set Magnitude
to Speckle Image



FFT⁻¹

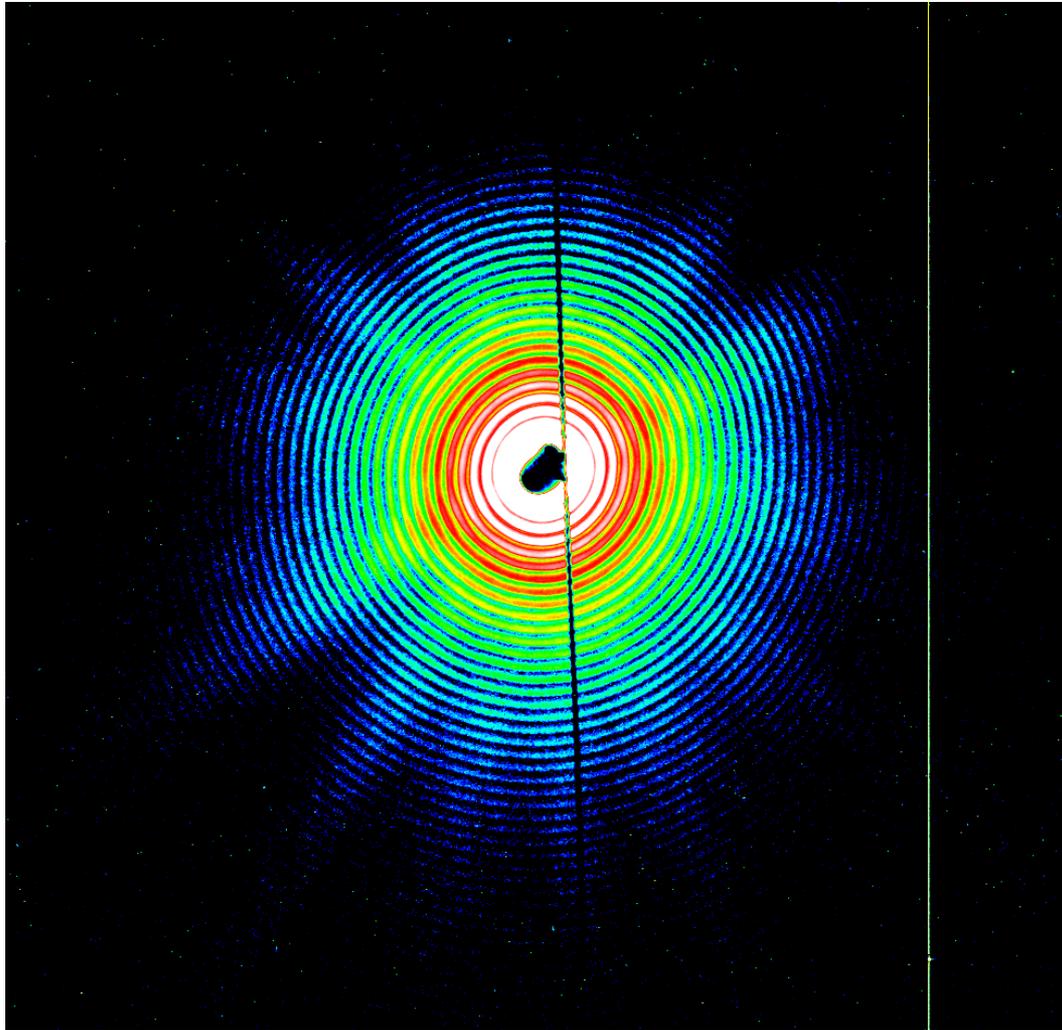


$2N \times 2N$
Detector
Pixel



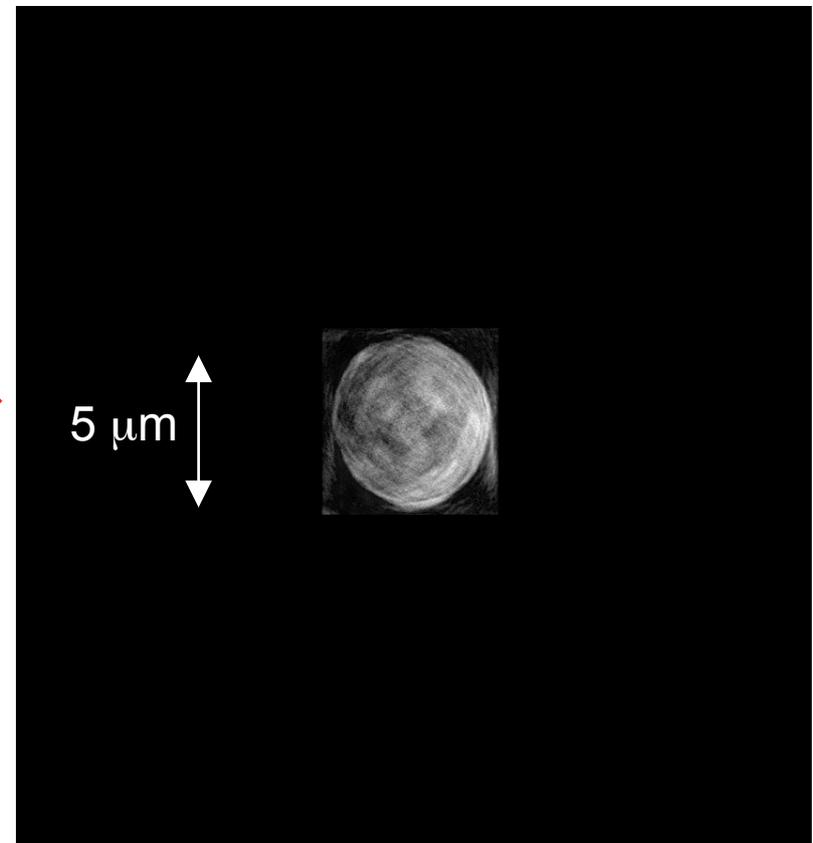
Random
Start Phase

Phase recovery test



5 μm pinhole, $\lambda = 1 \text{ nm}$

Fienup Hybrid Input Output
(HIO) algorithm



Courtesy Dr. Sebastien Harasse

今後の予定

1. NRA (Non Redundant Array), URA (Uniformly Redundant Array) を用いた空間コヒーレンスの定量評価
2. 軟X線フーリエ変換ホログラフィ (FTH) のテスト実験
3. Massively parallel holography (URA + FTH)
4. Coherent x-ray MAD imaging (FTH + MAD)
5. Keyhole coherent diffractive imaging (XCDI + Fresnel)
6. 3D diffractive imaging (XCDI + CT)
7. Phase contrast magnetic imaging

まとめ

コヒーレントX線散乱イメージング装置はほぼ完成した。

東大アウトステーションで Young 干渉実験を行った。

回折顕微鏡のテスト実験を行った。

今後はフーリエ変換ホログラフィ・回折顕微鏡の on site 解析の整備と実験を行う。

【参考】 PF との使い分け

PF BL-28B : $\lambda = 4 \text{ nm} \sim 10 \text{ nm}$

SPring-8 BL07LSU : $\lambda = 0.5 \text{ nm} \sim 4 \text{ nm}$

長波長では PF でも十分なコヒーレンス長が得られる。