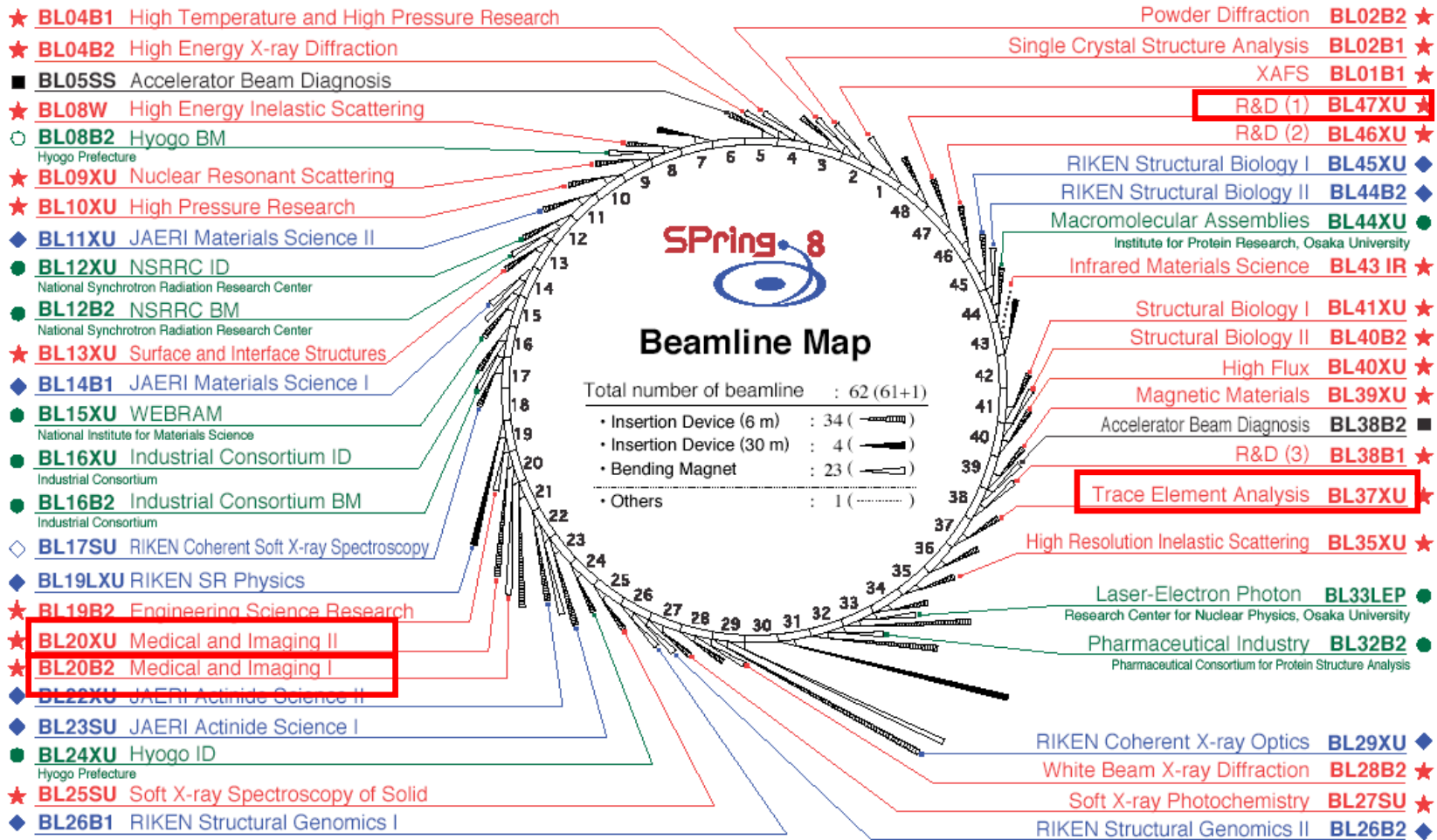


X線光学系 / 光学素子開発の 現状と展望

JASRI / SPring-8 竹内晃久

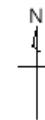
SPring-8のイメージングビームライン



BL: Beamline
 B1, B2: Bending Magnets
 XU: X-ray Undulator
 SU: Soft X-ray Undulator
 W: Wiggler
 IR: Infrared Radiation
 LEP: Laser-Electron Photon
 LXU: Long-length Undulator
 SS: Straight Section

WEBRAM: Wide Energy range Beamline for Research in Advanced Materials
 NSRRC: National Synchrotron Radiation Research Center

★ : Public Beamlines
 ● : Contract Beamlines
 ◆ : JAERI or RIKEN Beamlines
 ■ : Accelerator Beam Diagnostic Lines
 ☆ ○ ◇ □ : Planned or Under construction



April 1, 2004

コンテンツ

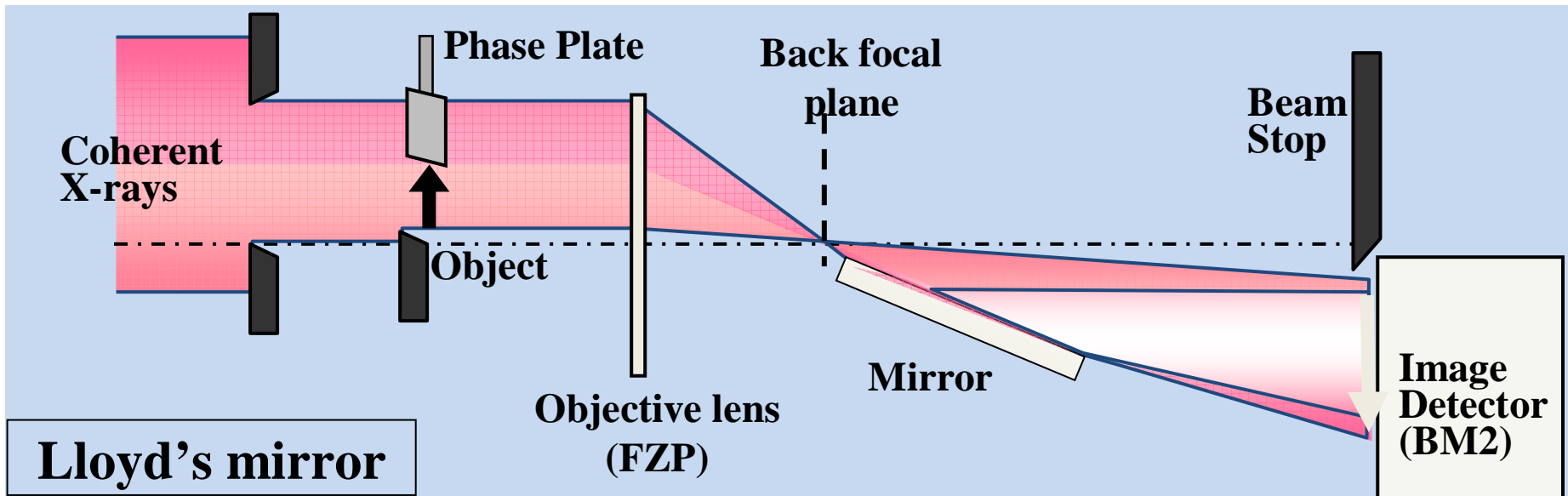
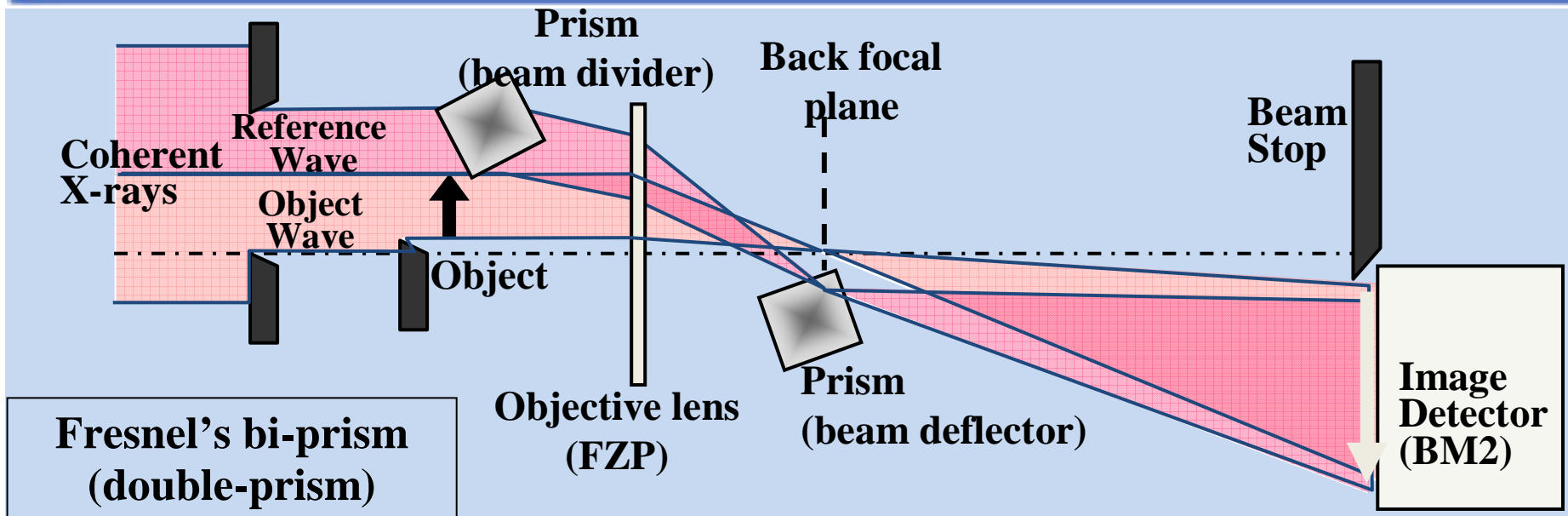
- 光学系の開発(位相イメージング)
 - コヒーレント結像光学: 2光束干渉計
 - 部分コヒーレント結像光学
 - ゼルニケ型
 - タルボ干渉計
 - CTへの応用
 - 走査型微分位相顕微鏡とCTへの利用
- 光学素子開発
 - フレネルゾーンプレート(FZP)
 - 全反射ミラー
 - 積層型FZP / キノホルム
- 分解能の限界について(X線CT)
- コヒーレントナノイメージングにおける課題点

ホログラフィ、位相イメージング

- 結像光学系
 - コヒーレント結像 @BL20XU
高い干渉性、強度犠牲
 - 2光束干渉顕微鏡（プリズム、ミラー、etc...）
 - 部分コヒーレント結像&CT @BL47XU, BL20XU
位相イメージングと大強度X線による高速イメージングを両立
 - タルボ干渉計
 - ゼルニケ型
 - 屈折コントラスト(defocus)
- 走査型光学系
 - 暗視野微分位相顕微鏡&CT @BL20XU
- 拡大Gabor型in-lineホログラフィ
 - 高いコヒーレンス且つスペckルフリー @BL20XU

- 光学系の開発(位相イメージング)
 - **コヒーレント結像光学: 2光束干渉計**
 - 部分コヒーレント結像光学
 - ゼルニケ型
 - タルボ干渉計
 - CTへの応用
 - 走査型微分位相顕微鏡とCTへの利用
- 光学素子開発
 - フレネルゾーンプレート(FZP)
 - 全反射ミラー
 - 積層型FZP / キノホルム
- 分解能の限界について(X線CT)
- コヒーレントナノイメージングにおける課題点

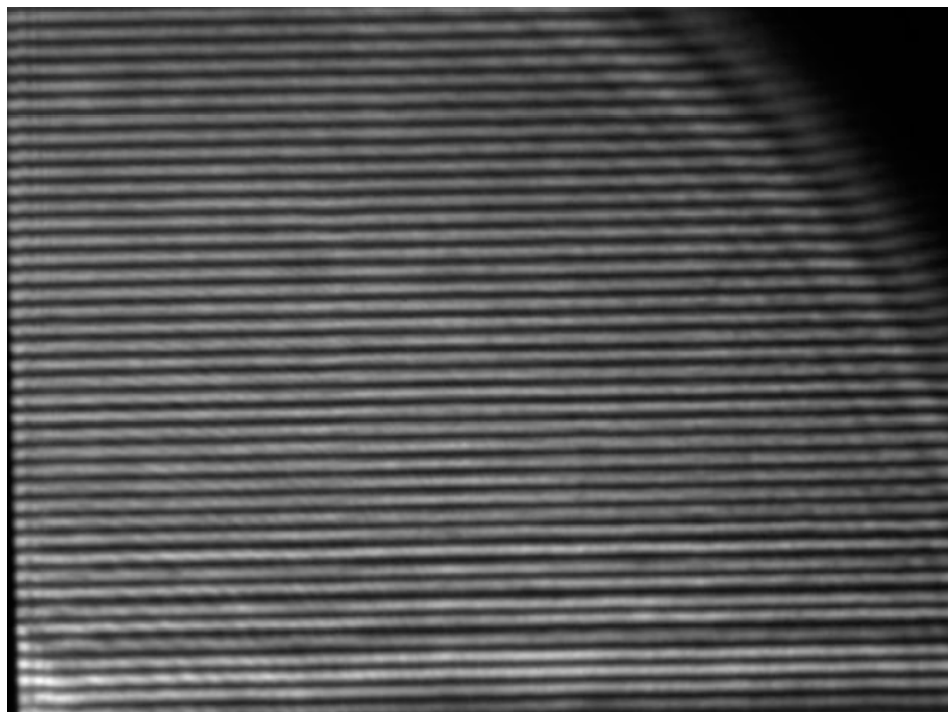
2光束干渉顕微鏡



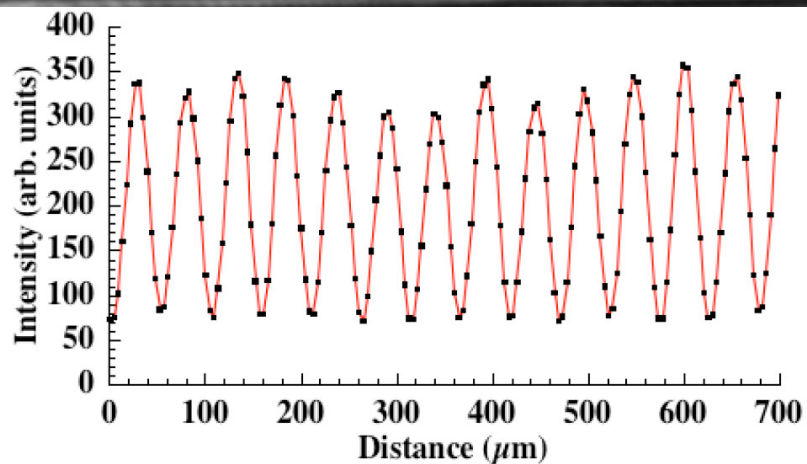
2光束干渉計:特徴

- 位相差の直接測定 → 高い位相感度
- 位相回復による定量測定が可能
 - 縞走査(フリンジスキャン)法、フーリエ変換法
- 高いコヒーレンス(視野程度, $\sim 100 \mu\text{m}$)が必要
第三世代光源では多くの強度を犠牲 coherent fraction $\sim 10^{-3}$
プリズム型、ロイドミラー型は1次元のコヒーレンスだけでよい
→ SPring-8のカップリングにマッチした光学系
- CTによる3次元測定
 - 実用上の問題点:
長い測定時間(\sim 数時間)、ドリフト
試料への空間的制限

ホログラム



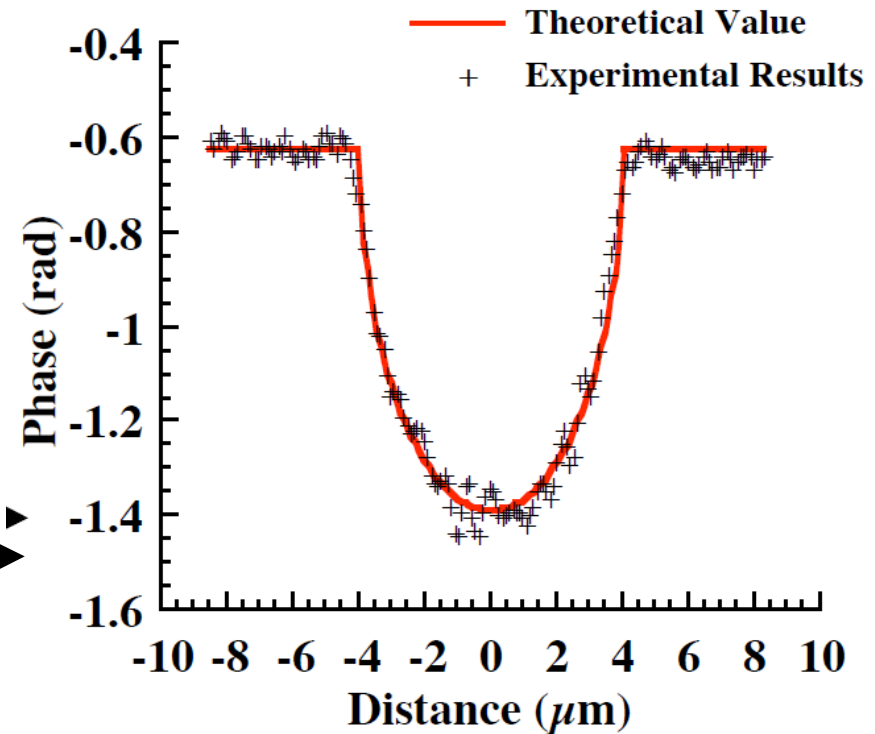
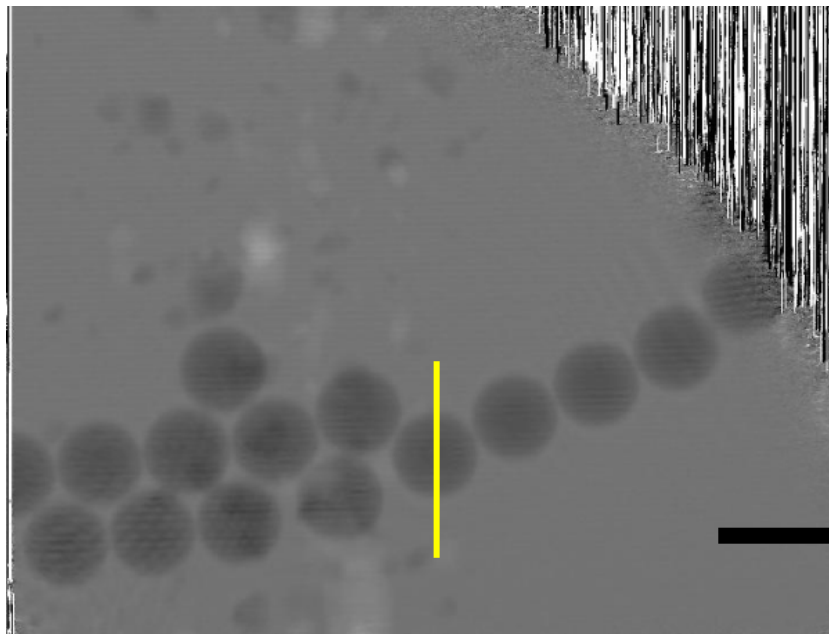
フリンジスキャン法や
フーリエ変換法で
位相像に変換



Visibility: ~70 %

定量性評価

試料: ラテックス(ポリスチレン)球 $8\ \mu\text{m}\phi$
BL20XU, 12.4 keV

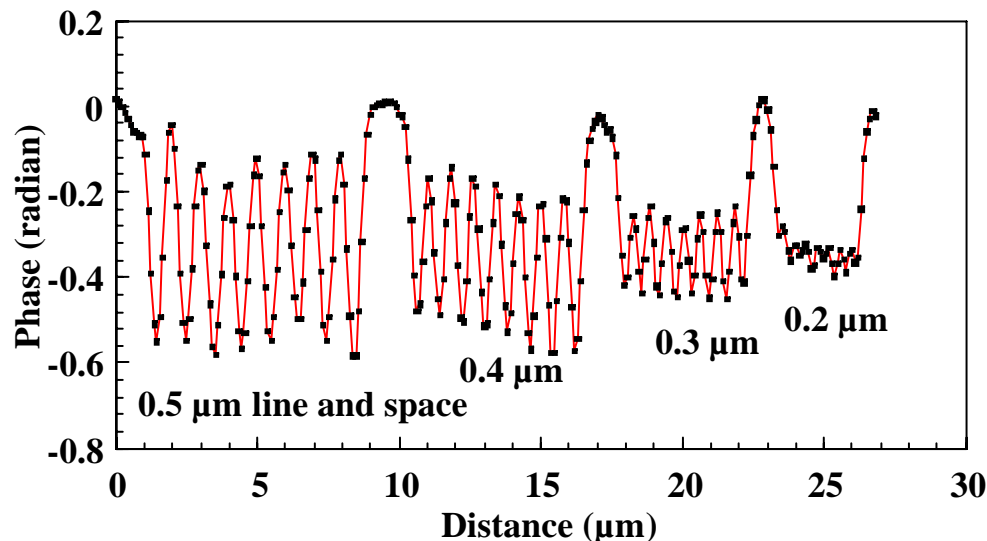
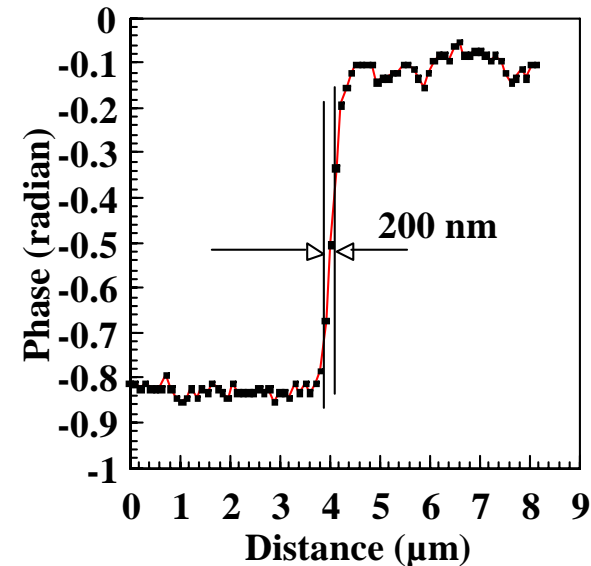
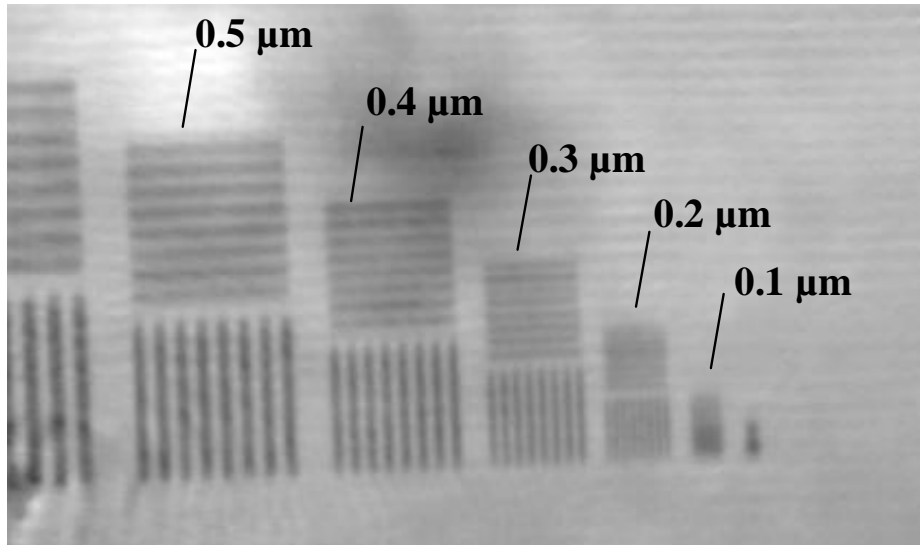


露光: 6sec/image
4ステップフリンジスキャン

定量的な位相回復

空間分解能、位相感度

試料: line-and-spaceパターン (Ta, 0.5 μm), BL20XU, 12.4 keV



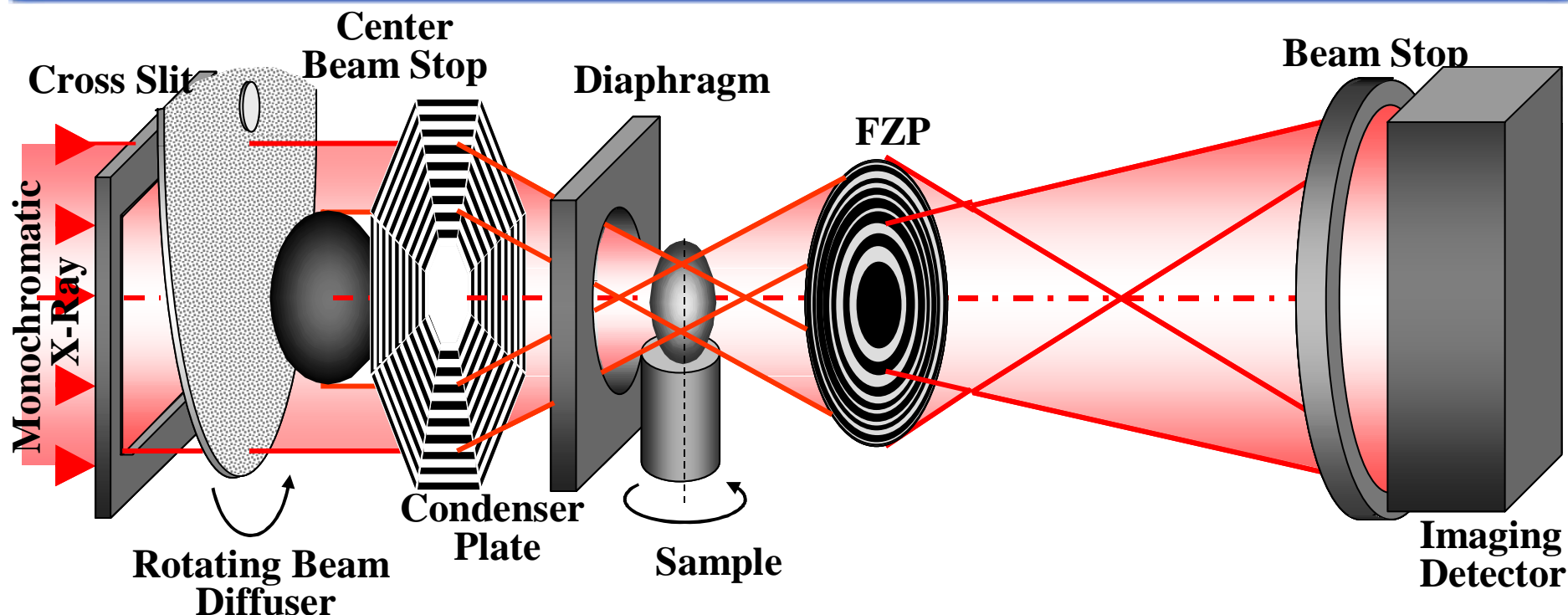
空間分解能 200 nm

位相感度:
 $3\sigma \sim \lambda/60 - \lambda/100$

露光 60 sec/image
→ 露光6secでも位相感度変化なし
4ステップフリンジスキャン

- 光学系の開発(位相イメージング)
 - コヒーレント結像光学: 2光束干渉計
 - **部分コヒーレント結像光学**
 - **ゼルニケ型**
 - **タルボ干渉計**
 - **CTへの応用**
 - 走査型微分位相顕微鏡とCTへの利用
- 光学素子開発
 - フレネルゾーンプレート(FZP)
 - 全反射ミラー
 - 積層型FZP / キノホルム
- 分解能の限界について(X線CT)
- コヒーレントナノイメージングにおける課題点

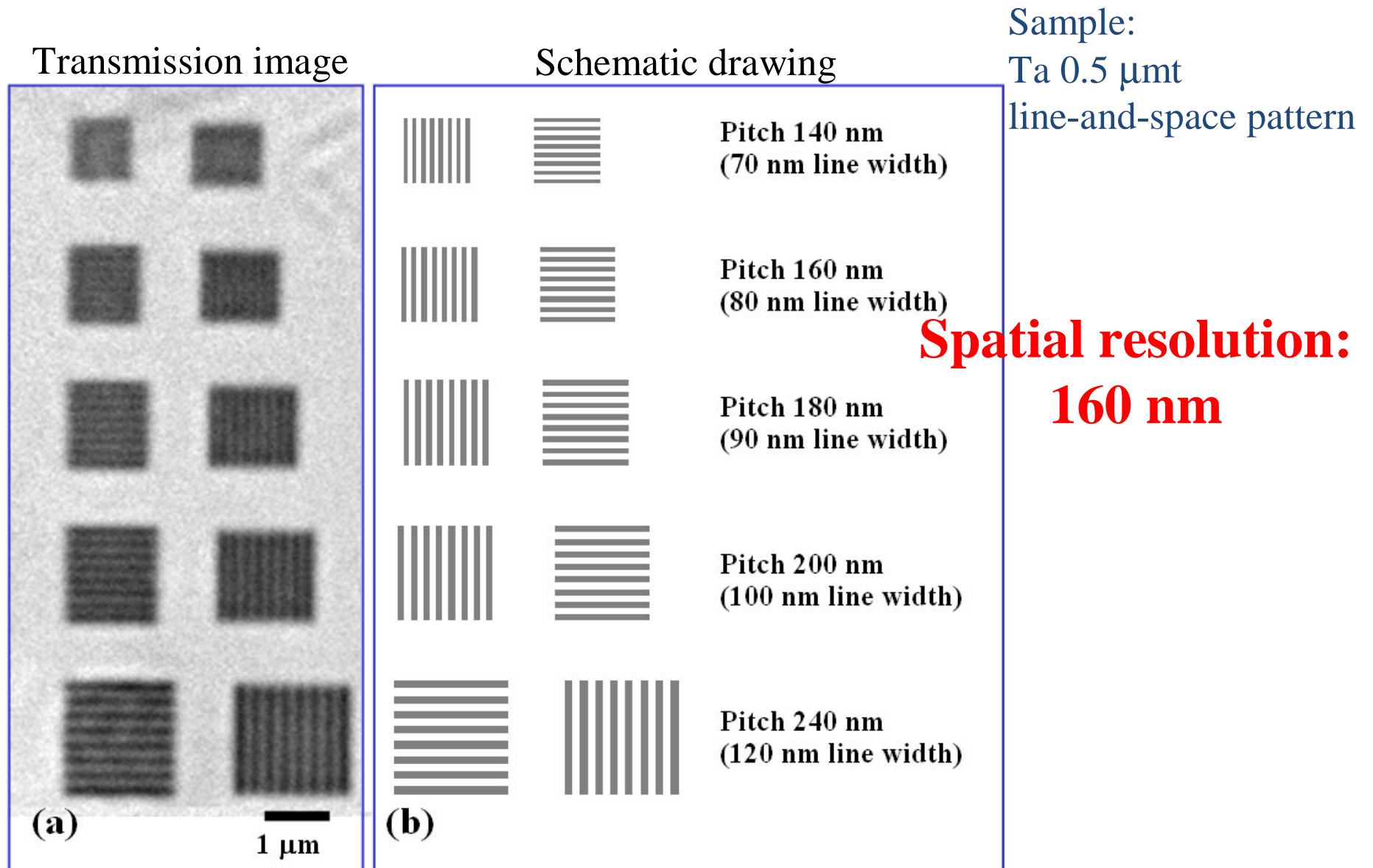
ケーラー照明によるX線結像顕微鏡 @BL47XU



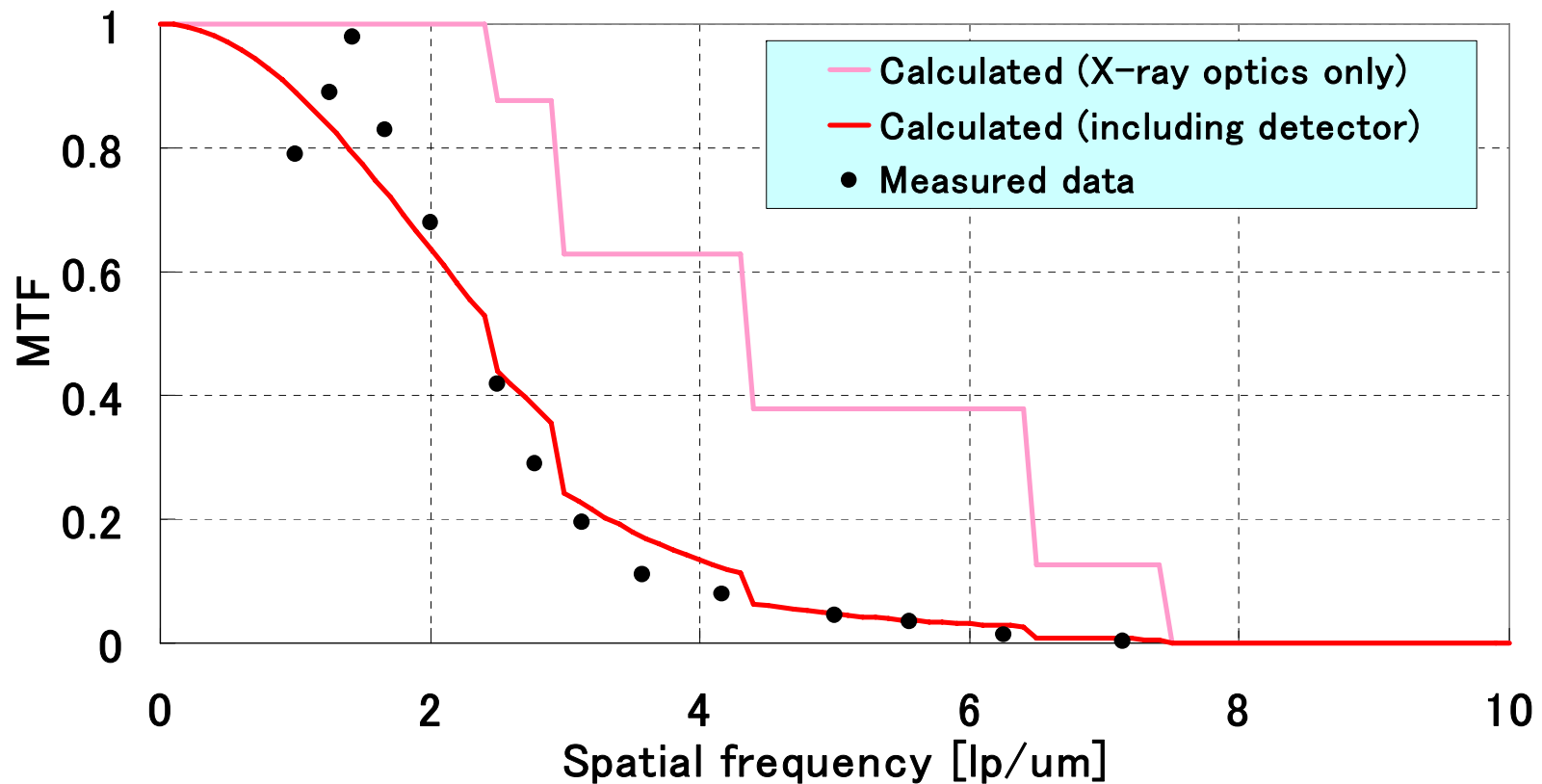
- ケーラー照明用コンデンサを利用した部分コヒーレント結像
- エネルギー領域: 6–12 keV (20 keVでの実験実績もあり)
- 位相、屈折イメージングも可
Zernike, Talbot, defocus
- 高分解能CTの基本光学系

主なパラメータ@8keV
FZP: NTT-ATN, $\Delta r_n=100$ nm
倍率: 70倍
ピクセルサイズ: ~45 nm
露光時間: 300msec

テストパターンによる空間分解能評価



光学系のMTF (Modulation Transfer Function)

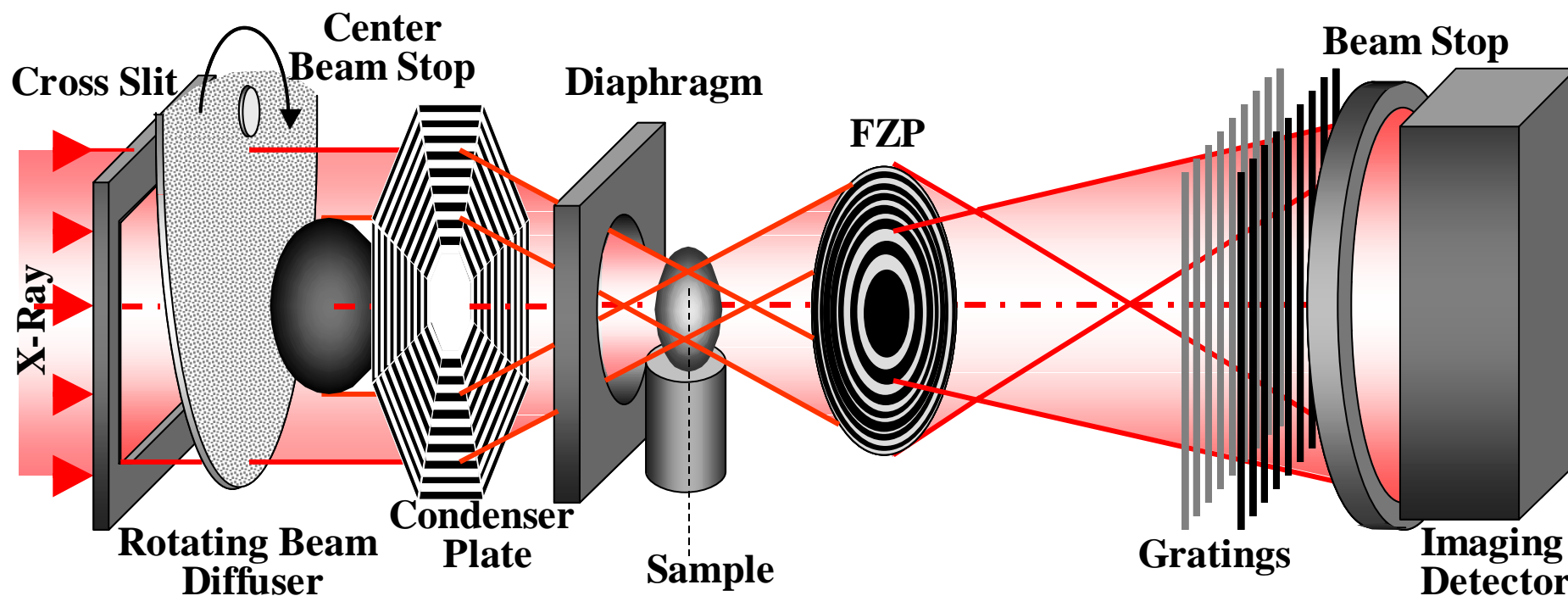


ピンク: 多角形コンデンサ + FZPのMTF (理想的な理論値)

赤線: 上記計算に、検出器の分解能、光学系の倍率の考慮を加えた計算値 (実際の理論値)

黒丸: 実験値 (テストパターン像のコントラスト)

タルボ干涉計＋結像光学系



- 試料を通るX線の屈折角変化を検出する微分位相像
- 位相回復による定量測定が可能
 - 縞走査法 (5step)、フーリエ変換法
- 高いコヒーレンス必要ない
 - 大強度による短時間露光が可能 (@SPring-8)
- CTによる3次元測定

主なパラメータ@8keV
倍率: 70倍
ピクセルサイズ: ~45 nm
露光時間: 300msec

Gratings:
NTT-ATN
5 μm pitch
Ta 0.96 μm t for G1
Ta 5 \times 2 μm t for G2

タルボ干渉計

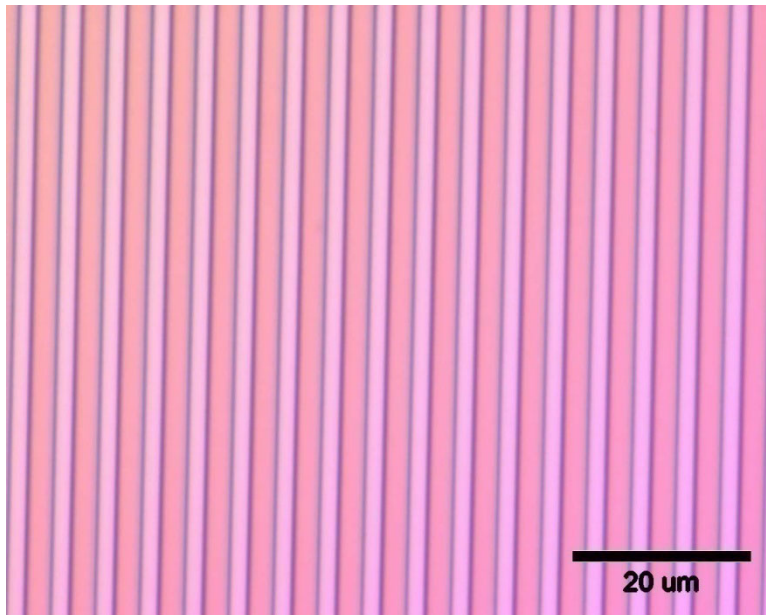
Gratings, (NTT-Advanced Technology Co., Japan)

E-Beam Lithography Technique

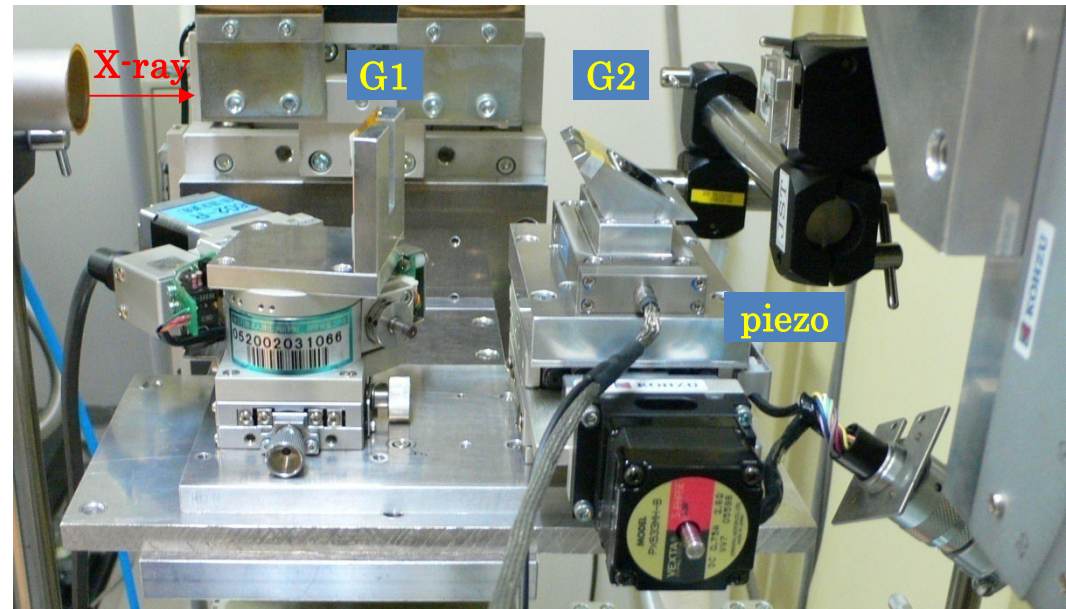
Material: Ta,

Pitch: 5 μm ,

Thickness: 0.96 μm (G1) and 5 μm (G2)

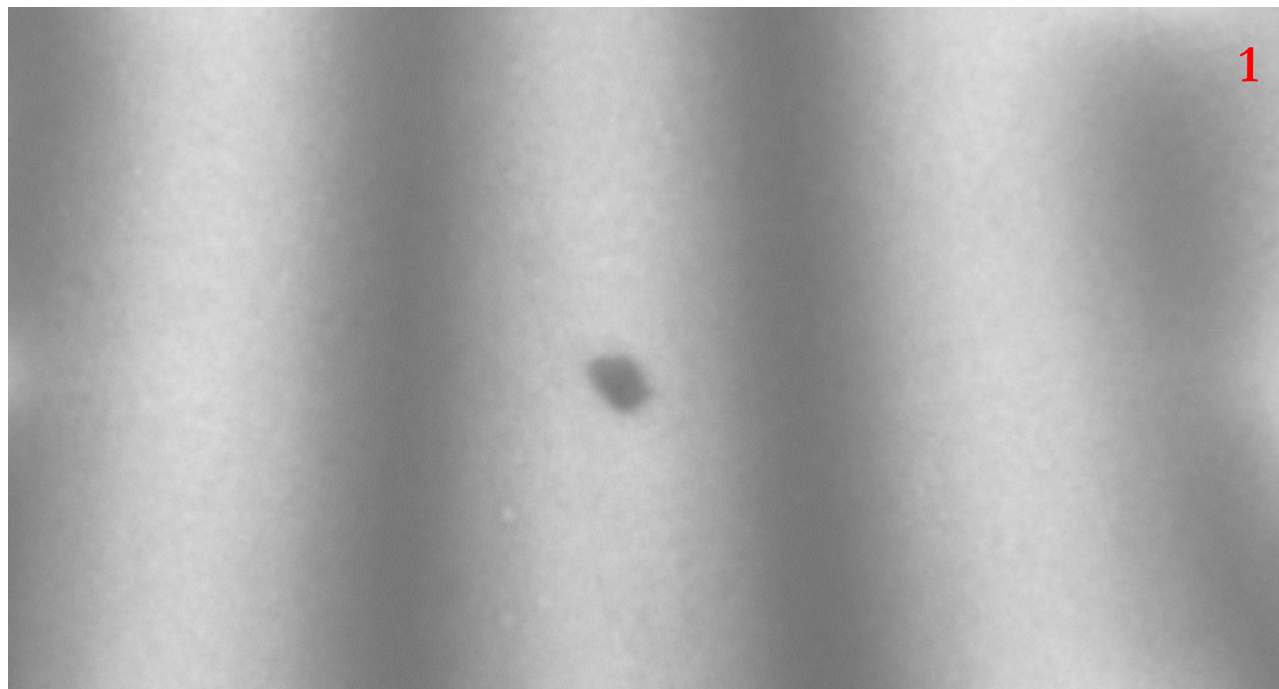


Optical micrograph of grating



G1: phase grating (rotated to adjust the pitch)
G2: absorption grating (inclined to increase effective optical path length)

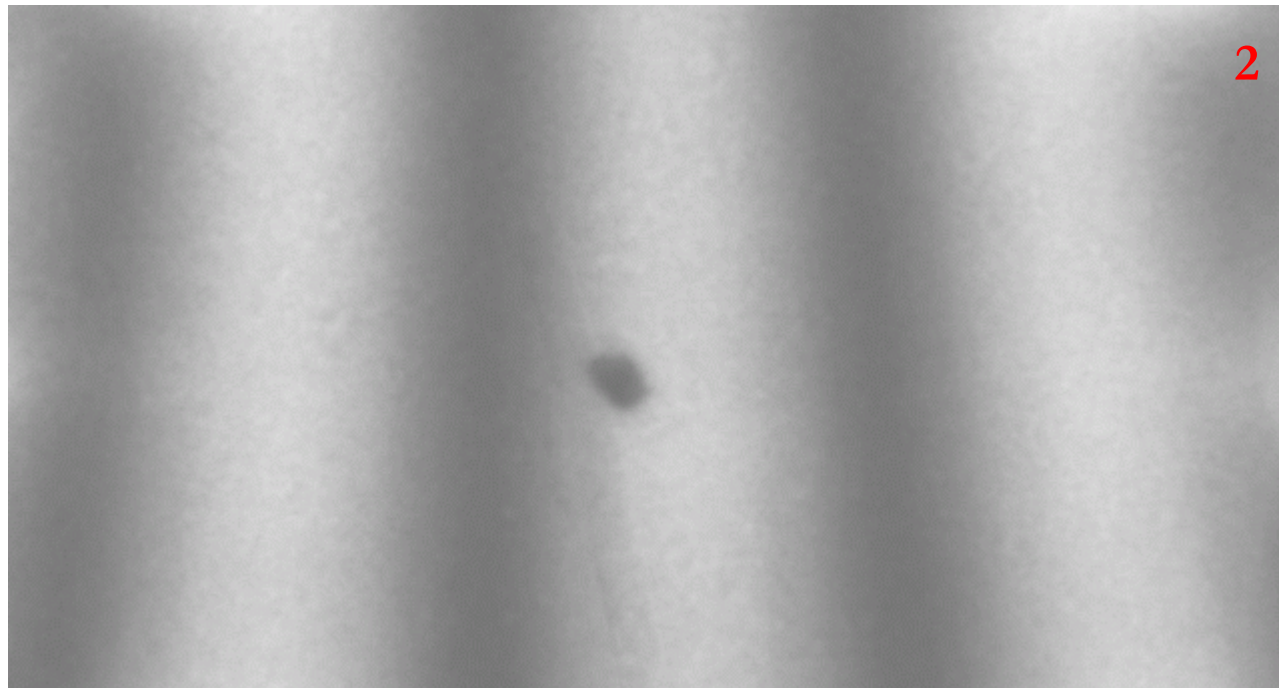
ターボ干渉計による位相回復：縞走査法



10um

- 吸収格子一周期の距離を5等分に分けてスキャン

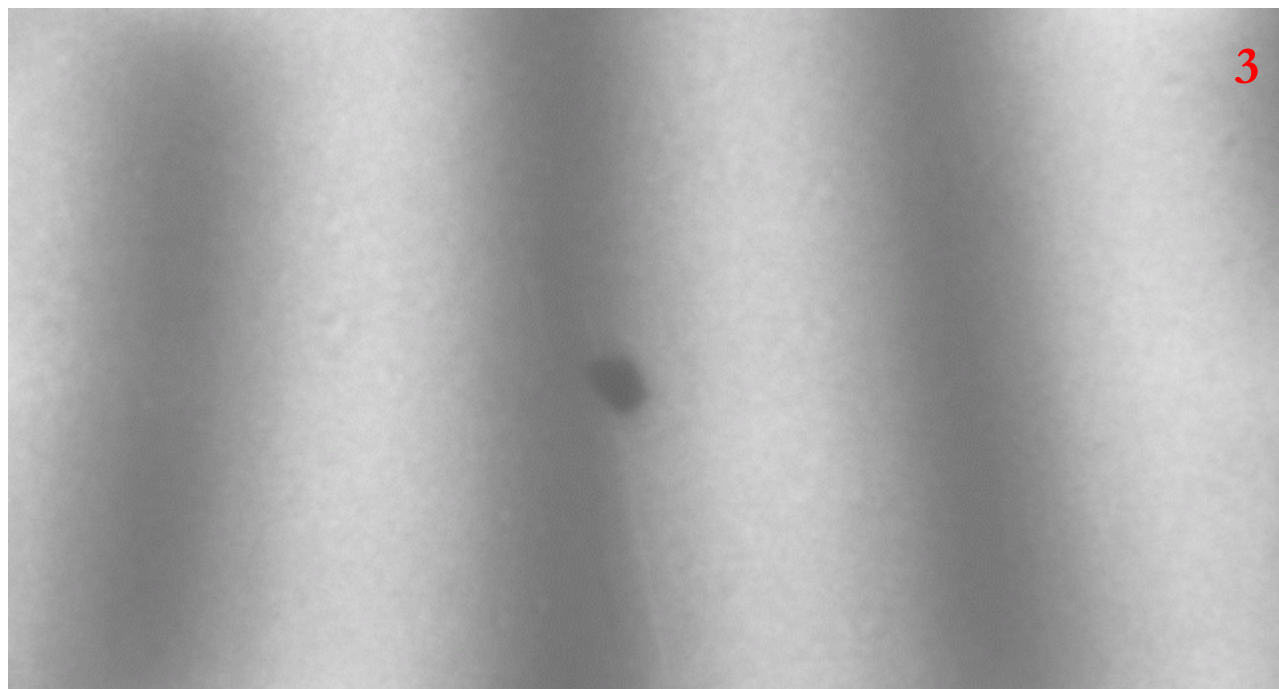
ターボ干渉計による位相回復：縞走査法



10um

- 吸収格子一周期の距離を5等分に分けてスキャン

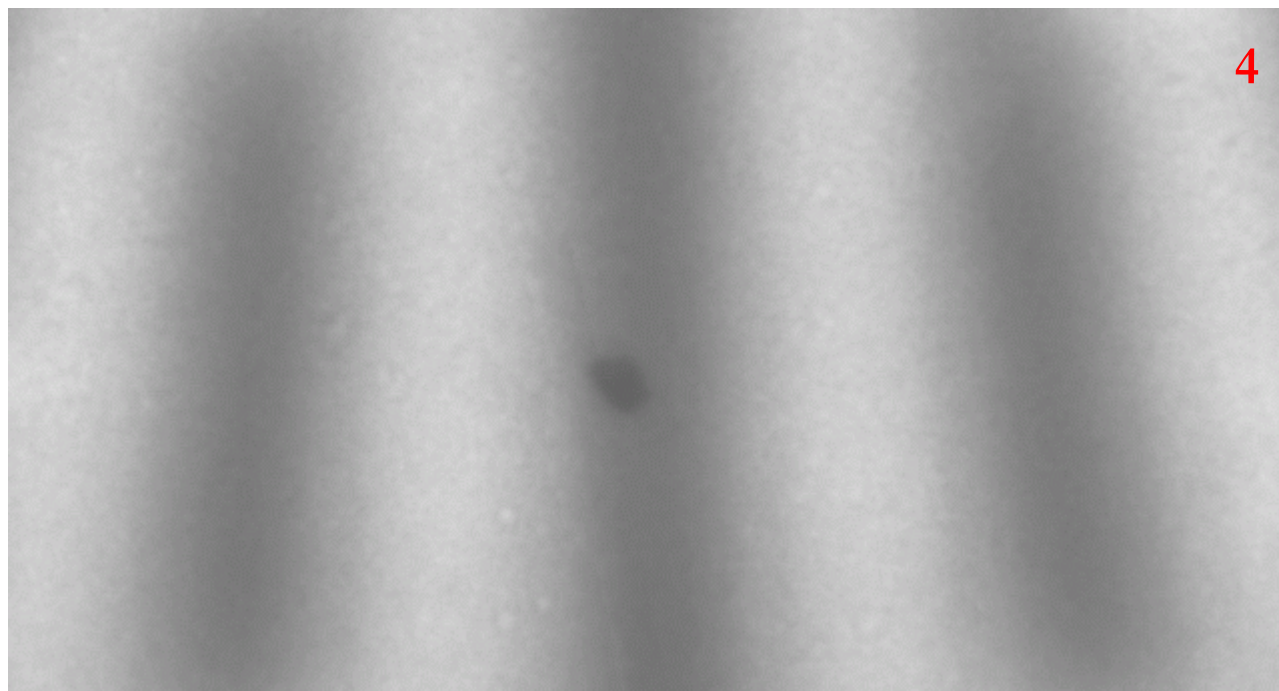
ターボ干渉計による位相回復：縞走査法



10um

- 吸収格子一周期分の距離を5等分に分けてスキャン

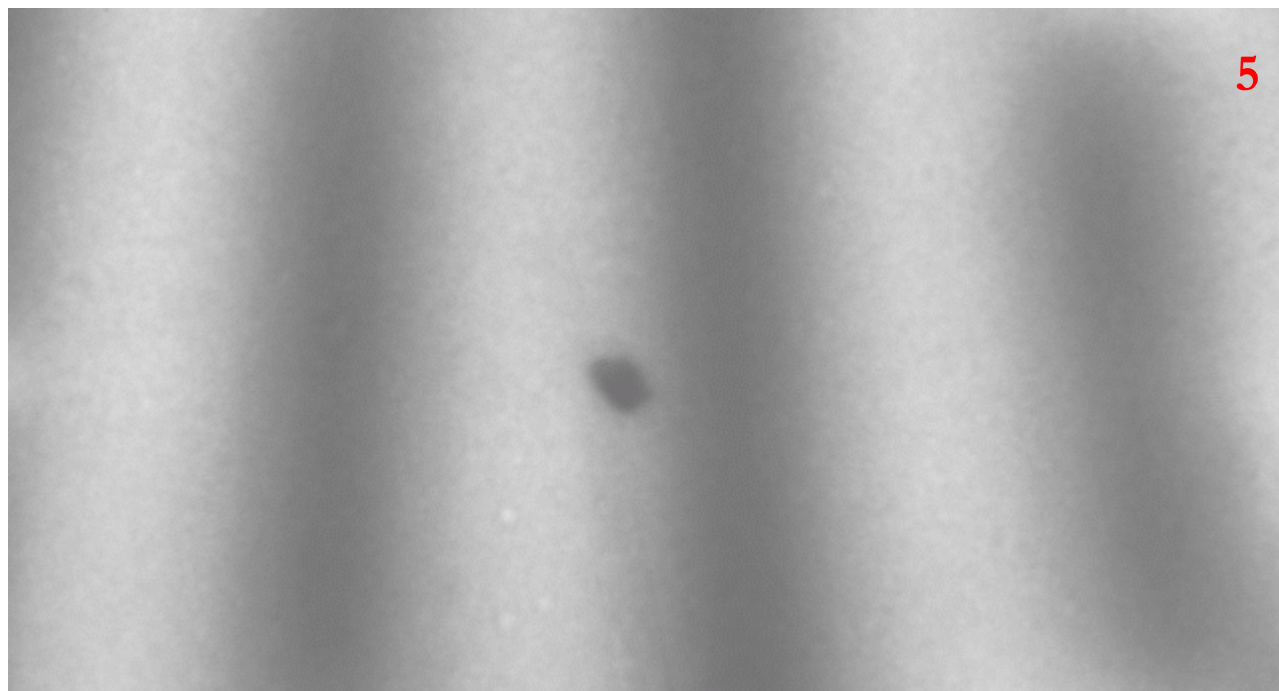
ターボ干渉計による位相回復：縞走査法



10um

- 吸収格子一周期の距離を5等分に分けてスキャン

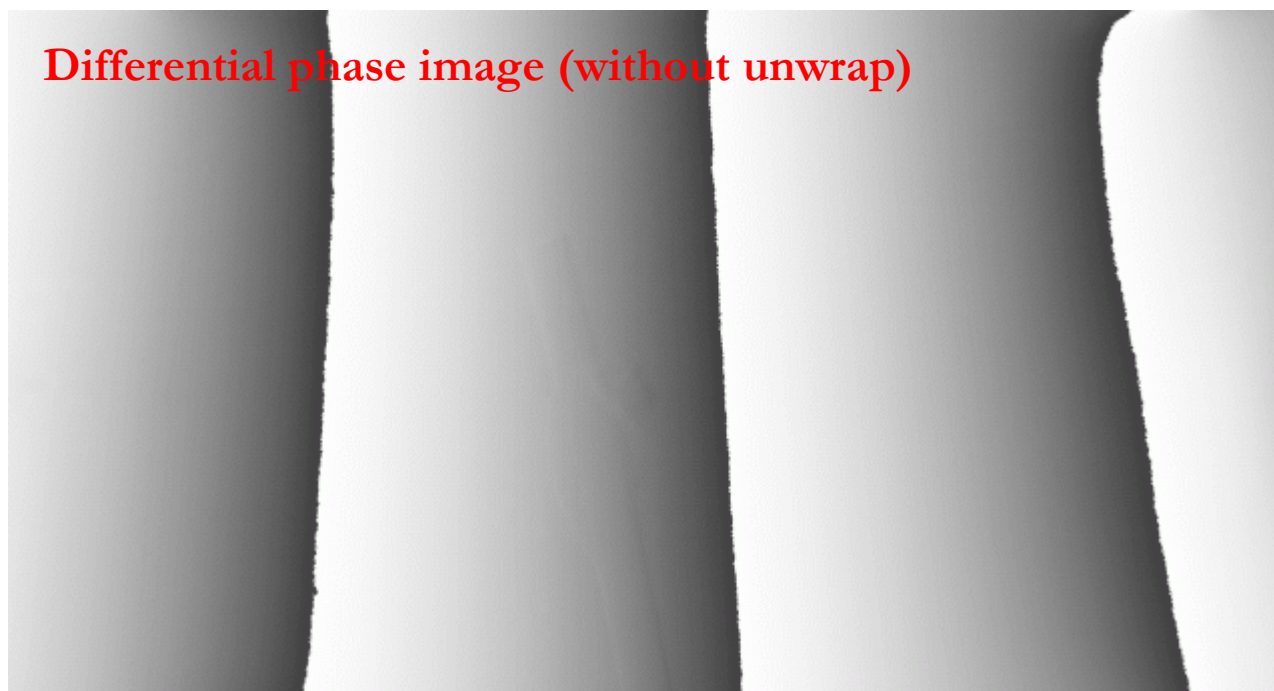
ターボ干渉計による位相回復：縞走査法



10um

- 吸収格子一周期の距離を5等分に分けてスキャン

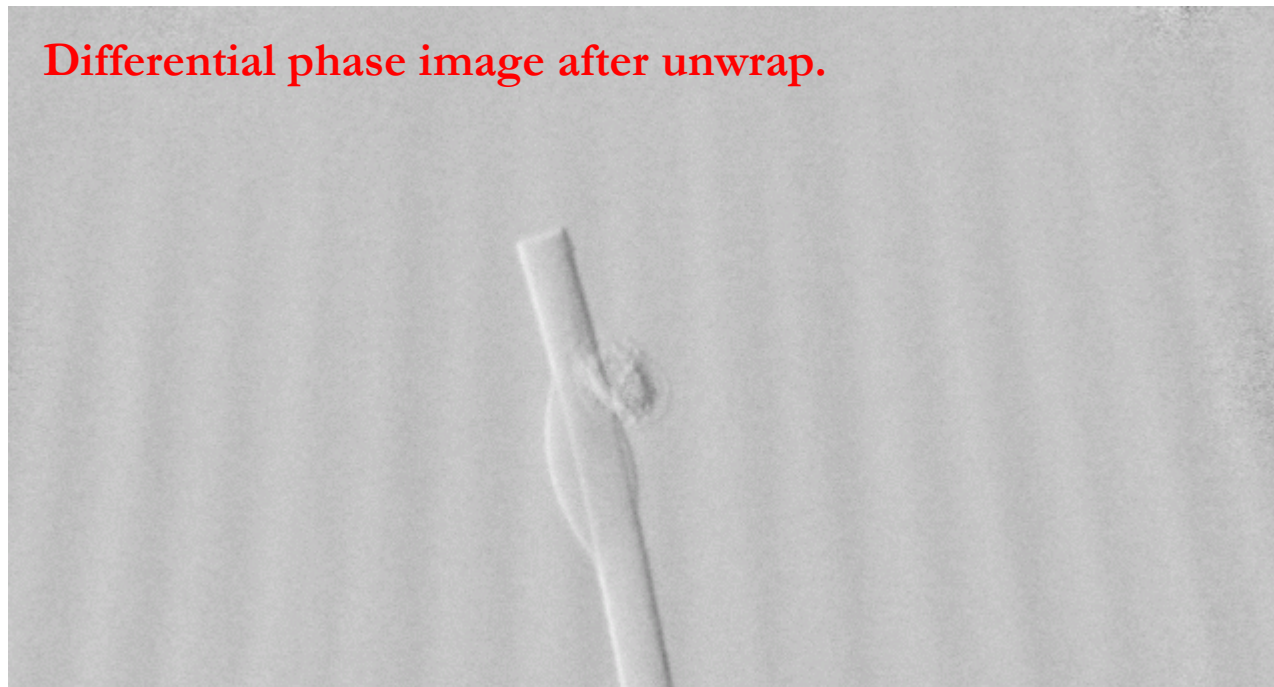
ターボ干渉計による位相回復：縞走査法



10um

- 吸収格子一周期の距離を5等分に分けてスキャン

ターボ干渉計による位相回復：縞走査法

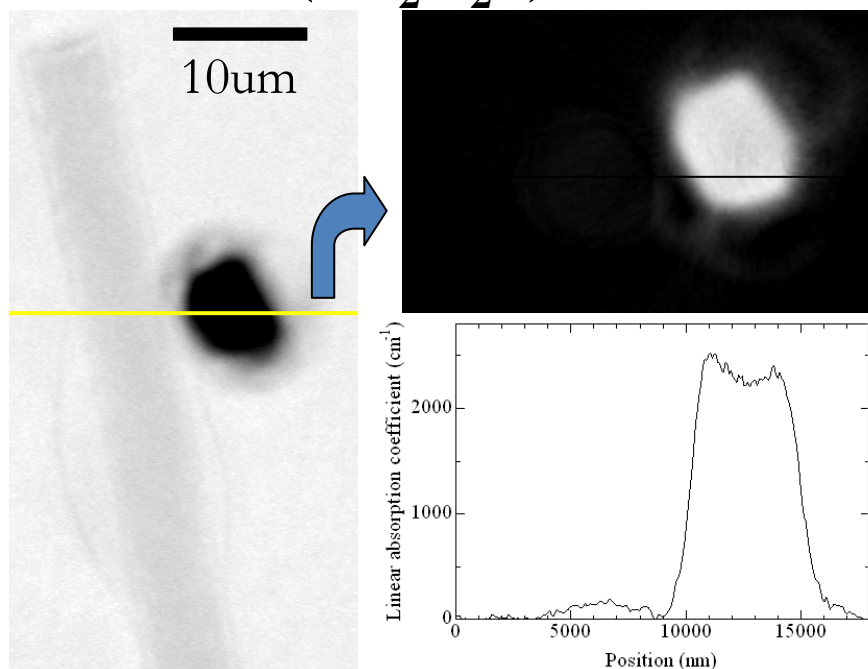


10um

- 吸収格子一周期の距離を5等分に分けてスキャン

タルボ干渉計: 吸収像と位相像の比較

試料: P43 ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$) + ガラスファイバー + のり, BL47XU, 8keV



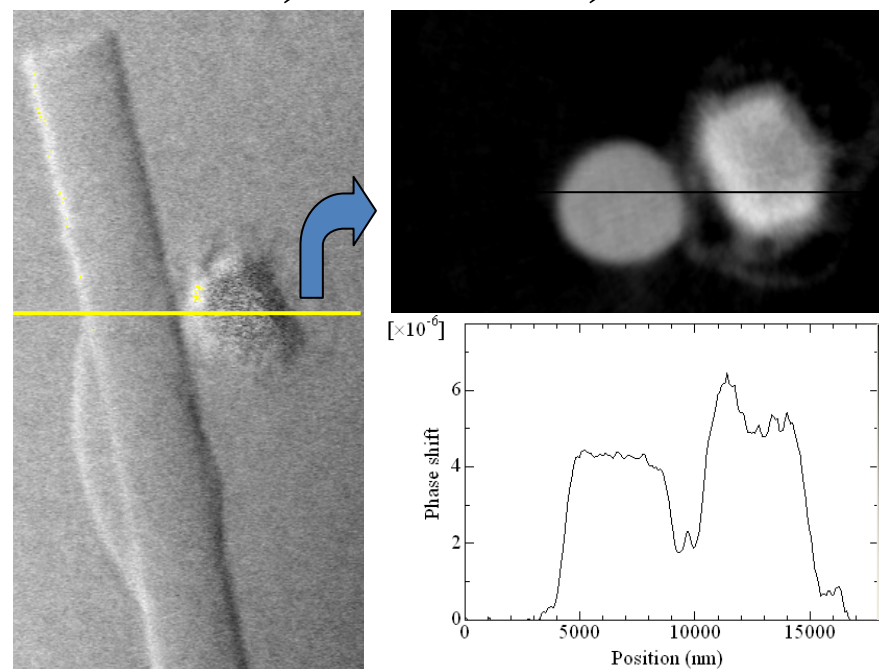
吸収コントラスト

Calc. Linear absorption coefficient @ 8keV

P43($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$): 2500cm^{-1}

Fiber(SiO_2): 80.0cm^{-1}

Glue($\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3 + \text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$): 9.9cm^{-1}



(微分)位相コントラスト

Calc. Refractive index @ 8keV

P43($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$): 1.71×10^{-5}

Fiber(SiO_2): 7.2×10^{-6}

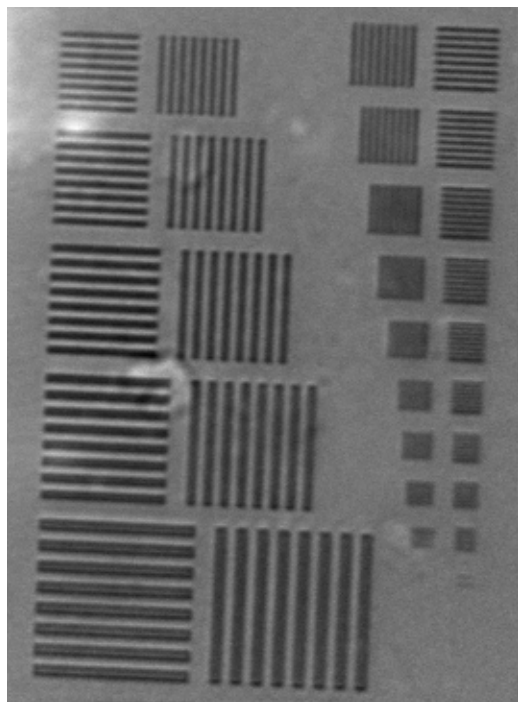
Glue($\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_3 + \text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$): 4.9×10^{-6}

軽元素に対して高い感度。重元素に対しての相対的な感度が上がる
→ δ/β 比が、軽元素で比較的大きいことに起因

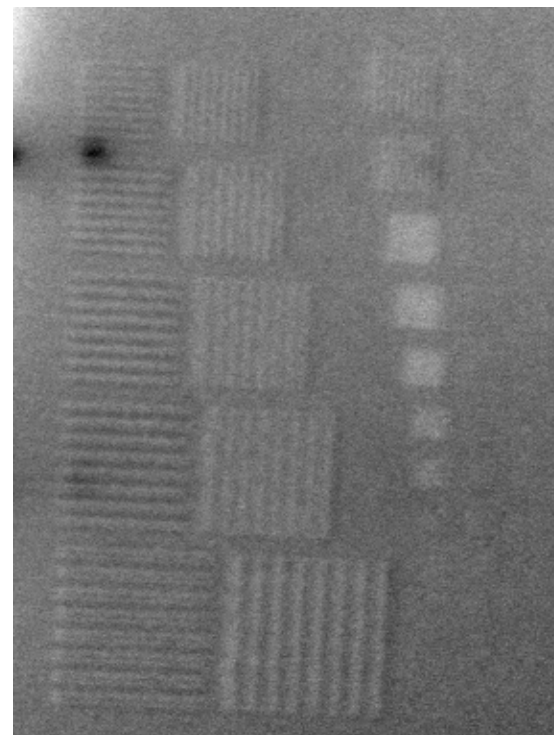
タルボ干渉計: 吸収像と位相像の比較2

試料: テストチャート (Ta 0.5 μm t)

BL47XU, 8 keV
Exposure: 0.15 sec
Pixel size: 47 nm
5 step fringe scan



吸収コントラスト



微分位相コントラスト

微分位相像の感度 (3σ) $\sim \lambda / 150$ /pixel

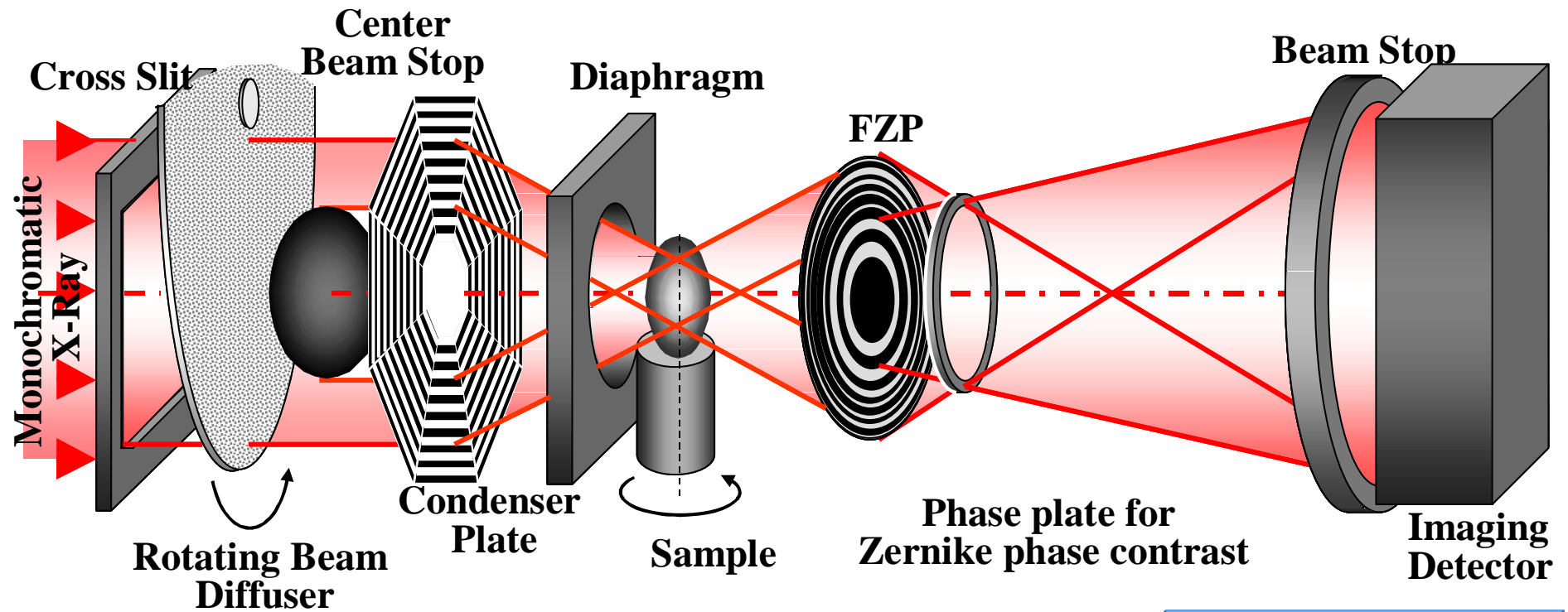
位相感度 (3σ): $\Delta\phi \sim \lambda / 4.65$

厚み感度: $\Delta t \sim 0.83 \mu\text{m}$

厚み感度 (3σ): $\Delta t \sim 0.1 \mu\text{m}$

重元素においては、吸収の方が感度が高い場合があるので注意が必要

ゼルニケ型位相差顕微鏡



- 光学的なフーリエフィルタリングによる位相検出
- 定量測定不可(弱位相物体にのみ近似的な測定が可)
- 高いコヒーレンス必要ない
→ 大強度による短時間露光が可能(@SPring-8)
- CTには向かないが、利用実験はされている。

主なパラメータ@8keV

倍率: 70倍

ピクセルサイズ: ~45 nm

露光時間: 300msec

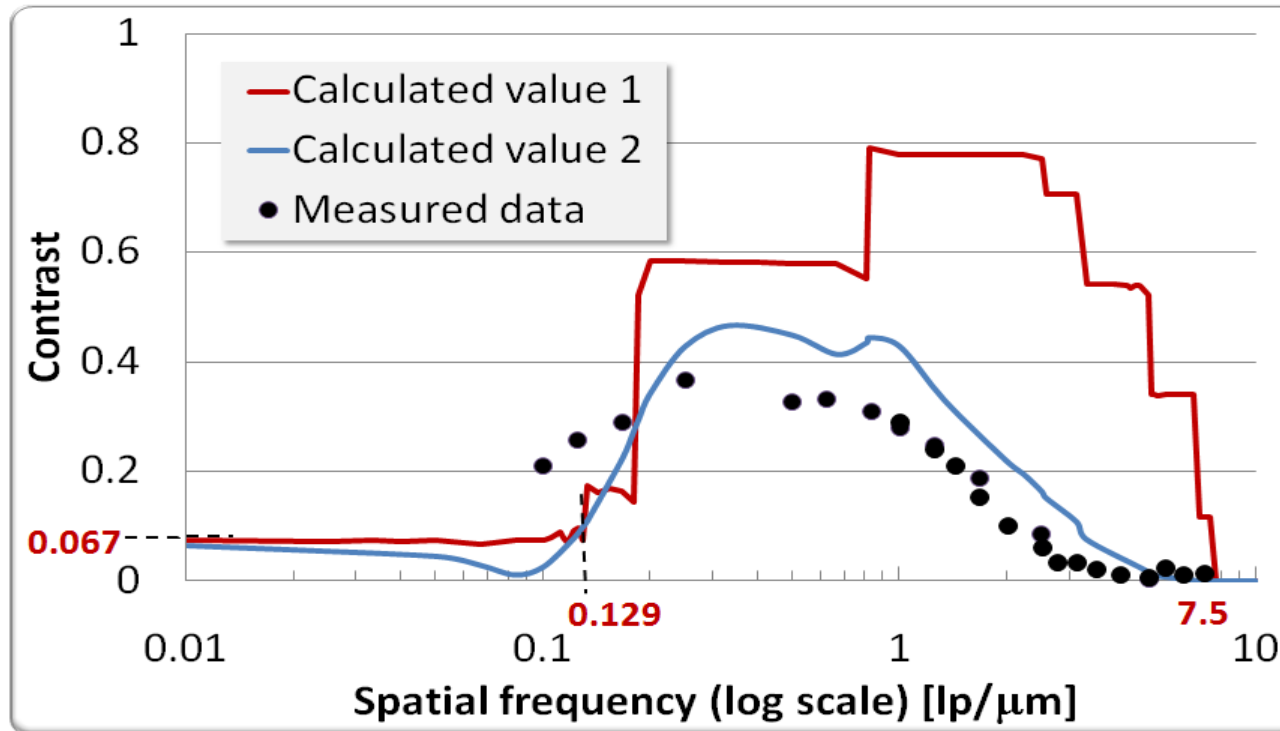
Phase plate:

NTT-ATN

Ta 0.96 μm ($\lambda/4$ for 8 keV)

4 μm width ring pattern

Contrast transfer function (CTF)



Ta 0.5 μm , 8 keV

$$\beta = 3.30 \times 10^{-6}$$

$$\delta = 4.03 \times 10^{-5}$$

$$a = 0.875$$

$$\Phi = 0.817 \text{ rad}$$

a : transmittance

Φ : phase shift

低周波数領域では、コントラストが低い(吸収と同じ)。

→暗視野のような像

高周波数領域では、通常のMTFと同じような曲線。

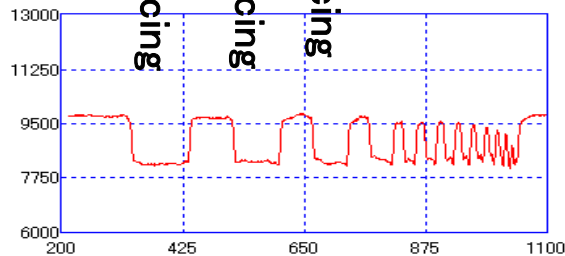
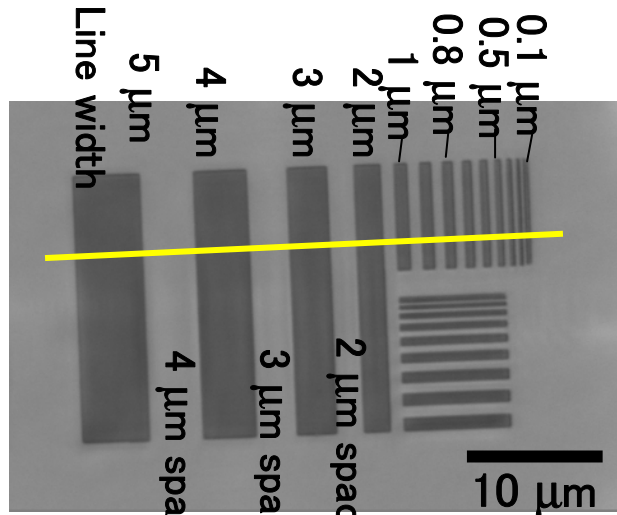
→空間分解能は変化なし。

理想的には最大で吸収より10倍以上の感度。実際には数倍

吸収像と位相像の比較1:重元素試料

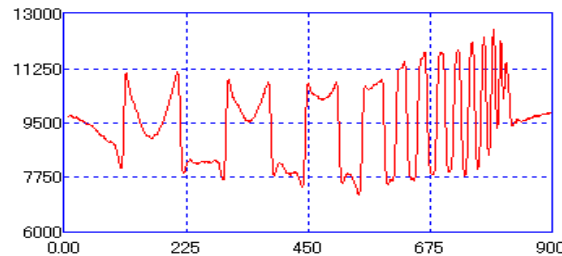
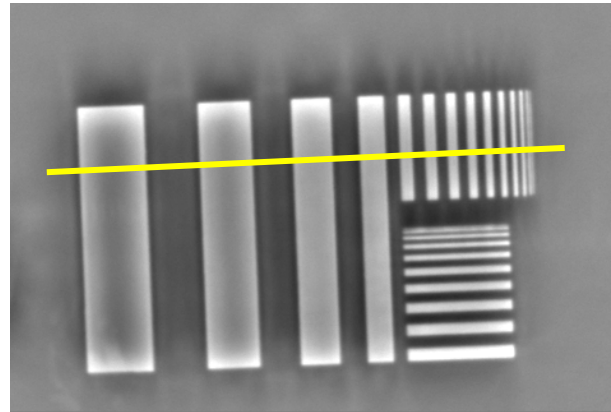
試料: テストチャート (Ta 0.5 μm t)

BL47XU, 8 keV
Exposure: 0.15 sec
Pixel size: 47 nm



Transmission

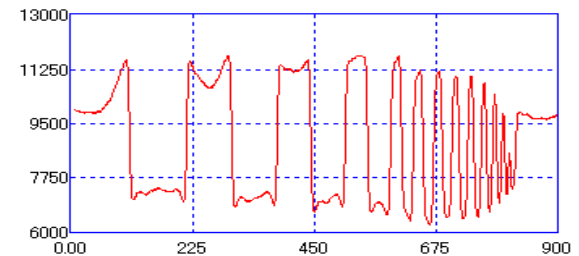
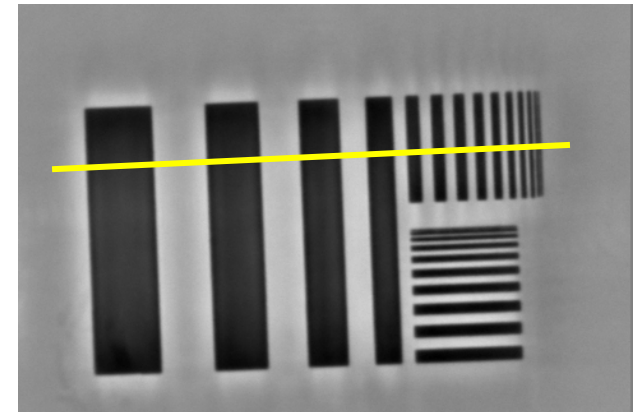
$$\Delta t \sim 0.1 \mu\text{m} (3\sigma)$$



Bright phase-contrast

$$\Delta\phi \sim \lambda / 108 (3\sigma)$$

$$\Delta t \sim 0.03 \mu\text{m} (3\sigma)$$

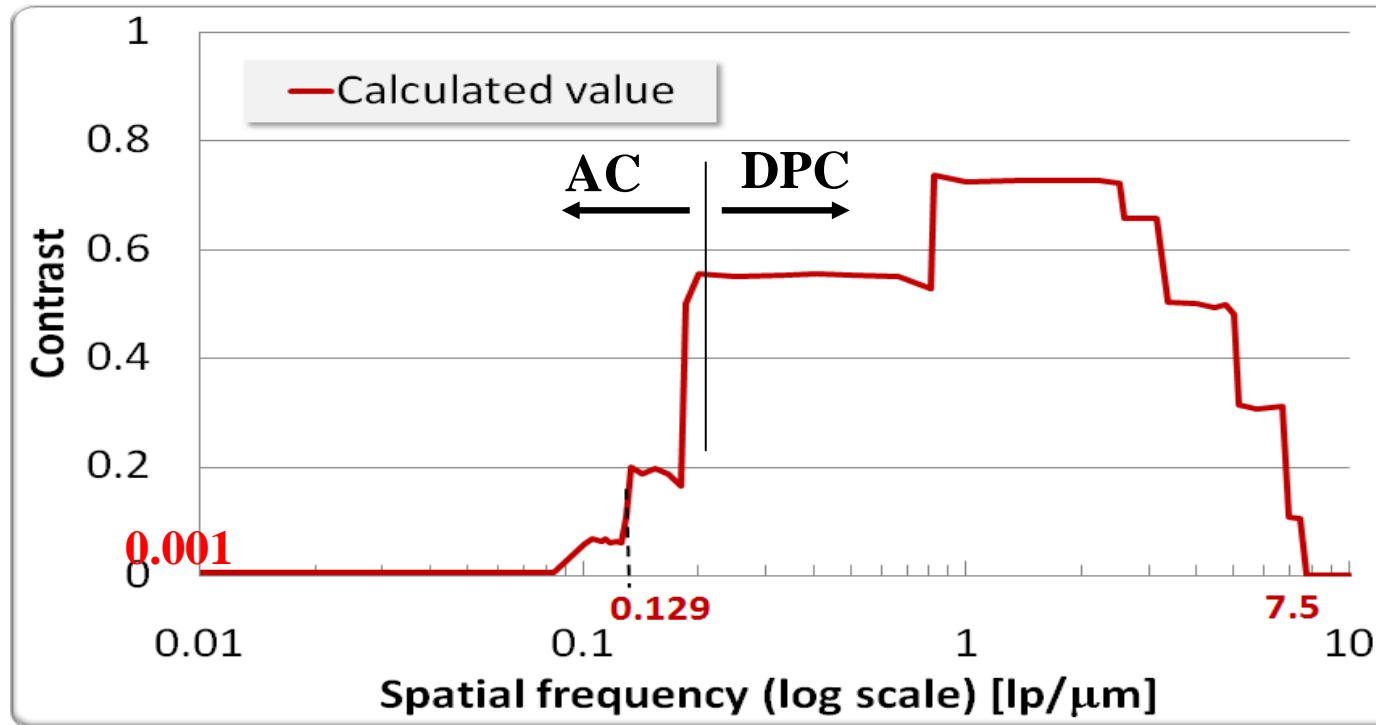


Dark phase-contrast

$$\Delta\phi \sim \lambda / 98 (3\sigma)$$

$$\Delta t \sim 0.04 \mu\text{m} (3\sigma)$$

Contrast transfer function (CTF) 2



Polystyrene

5 μmt, 8 keV

$$\beta = 5.29 \times 10^{-9}$$

$$\delta = 3.68 \times 10^{-6}$$

$$a = 0.9978$$

$$\Phi = 0.746 \text{ rad}$$

a : transmittance

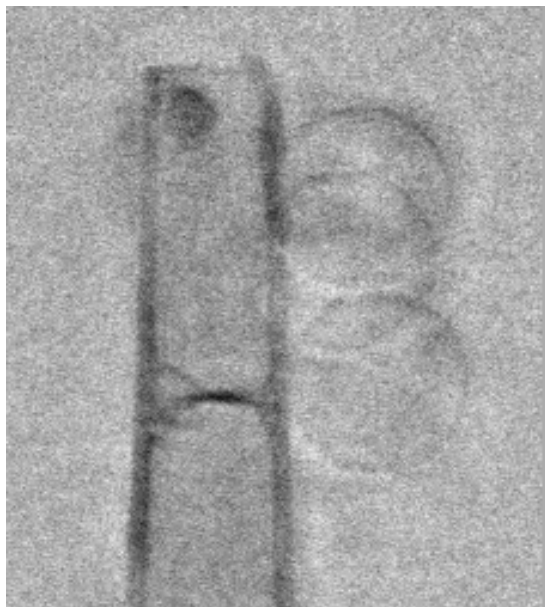
Φ : phase shift

理想では吸収より800倍程度感度が高い
実質の利得は70倍程度

吸収像と位相像の比較2: 軽元素試料

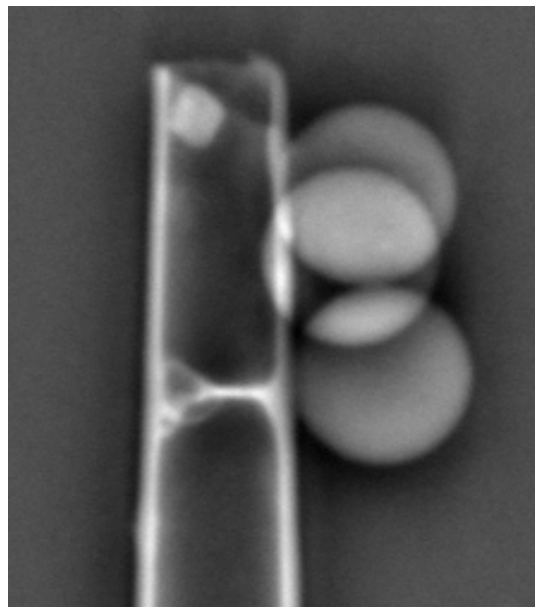
試料: ポリスチレン球 (8 $\mu\text{m}\phi$) + ガラスキャピラリ

BL47XU, 8 keV
Exposure: 0.15 sec
Pixel size: 47 nm



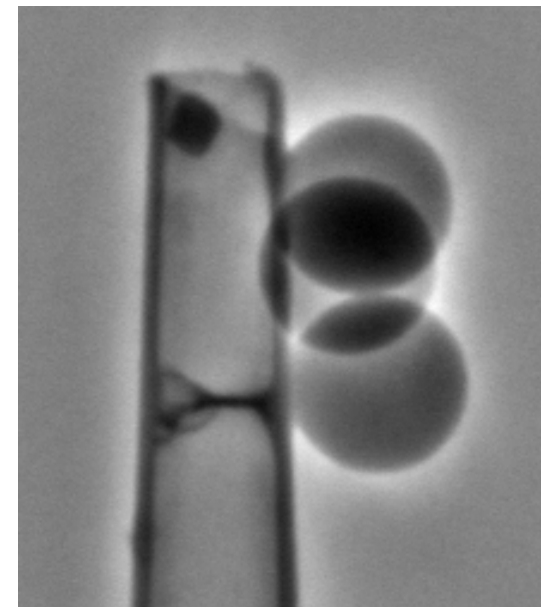
Transmission

ポリスチレン厚さ感度 (3σ):
 $\Delta t \sim 46.2 \mu\text{m}$



Bright phase-contrast

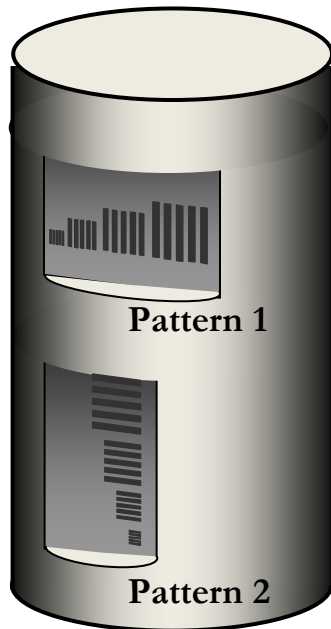
位相感度 (3σ):
 $\Delta\phi \sim \lambda / 64$
ポリスチレン厚さ感度 (3σ):
 $\Delta t \sim 0.66 \mu\text{m}$



Dark phase-contrast

位相感度 (3σ):
 $\Delta\phi \sim \lambda / 70$
ポリスチレン厚さ感度 (3σ):
 $\Delta t \sim 0.60 \mu\text{m}$

テストパターンによる3D像分解能評価

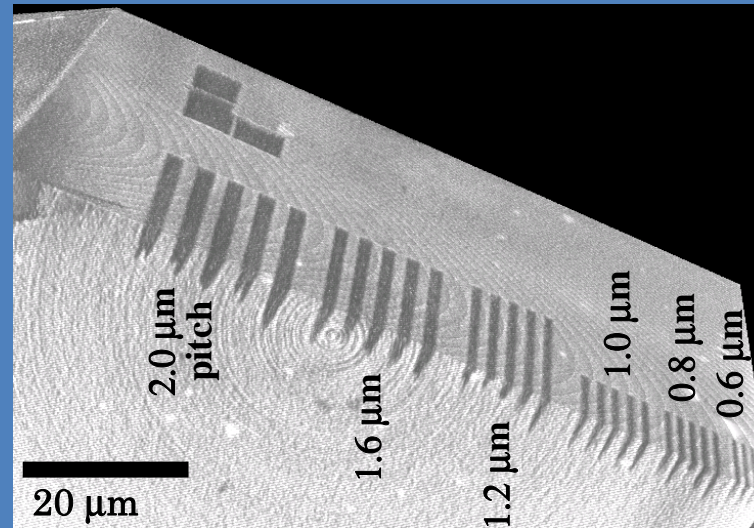


Sample:
Resolution test pattern
drawn on Al 300 $\mu\text{m}\phi$ wire
(FIB etching)

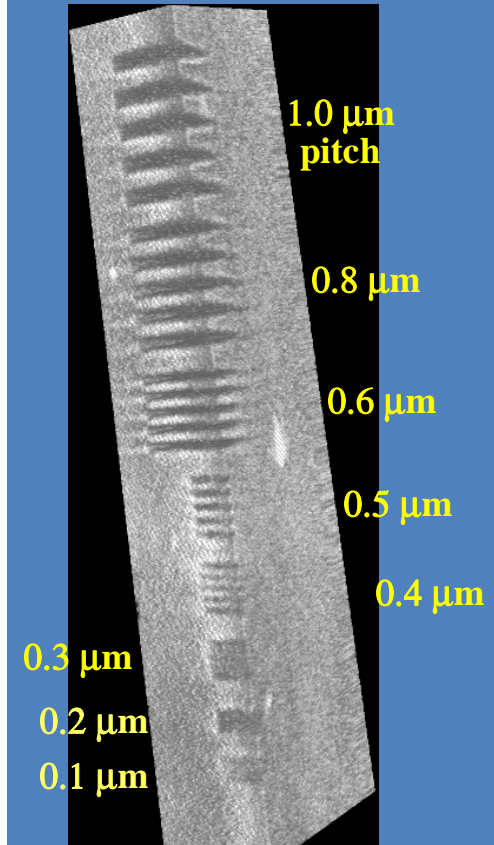
Local tomography

X-ray energy: 8 keV

Voxel size: 46.5 nm



Pattern 1:
1800 images / 180 deg
Exposure: 300 msec
Meas. time: 20 min

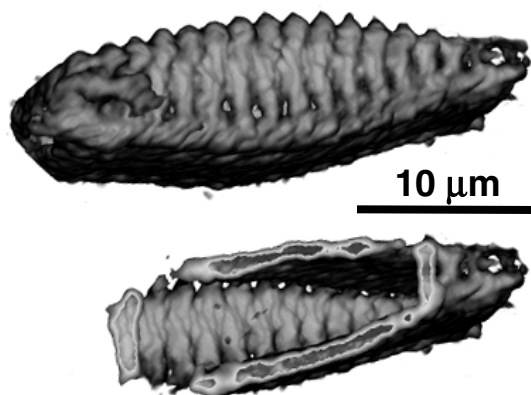


Pattern 2:
1800 images / 180 deg
Exposure: 70 msec
Meas. time: 20 min

空間分解能:
~200 nm

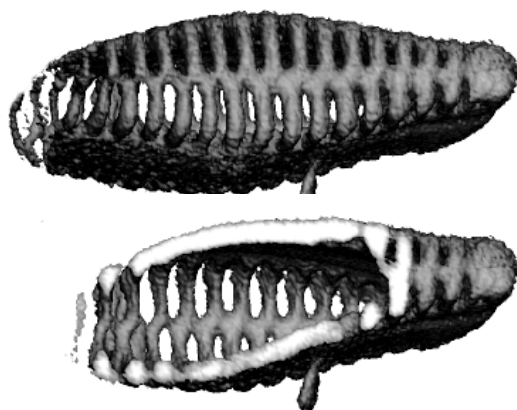
3D像空間分解能の変遷

サンプル: 珪藻土 (*Achnanthisdium lanceolata*) 「天然のテストチャート」



投影型CT

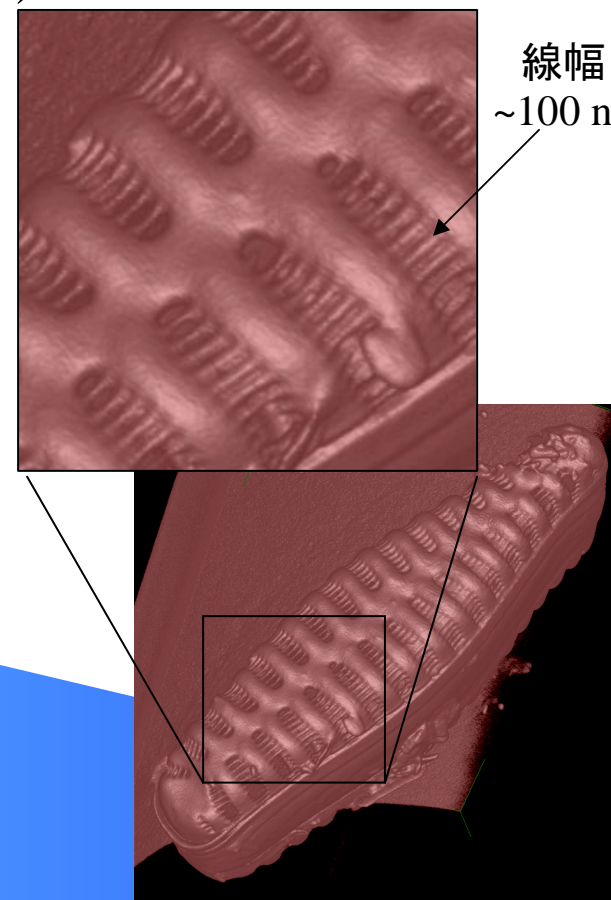
分解能 $1\mu\text{m}$ 、
測定時間30分



結像型CT

2001年

分解能 $0.6\mu\text{m}$ 、
測定時間6時間



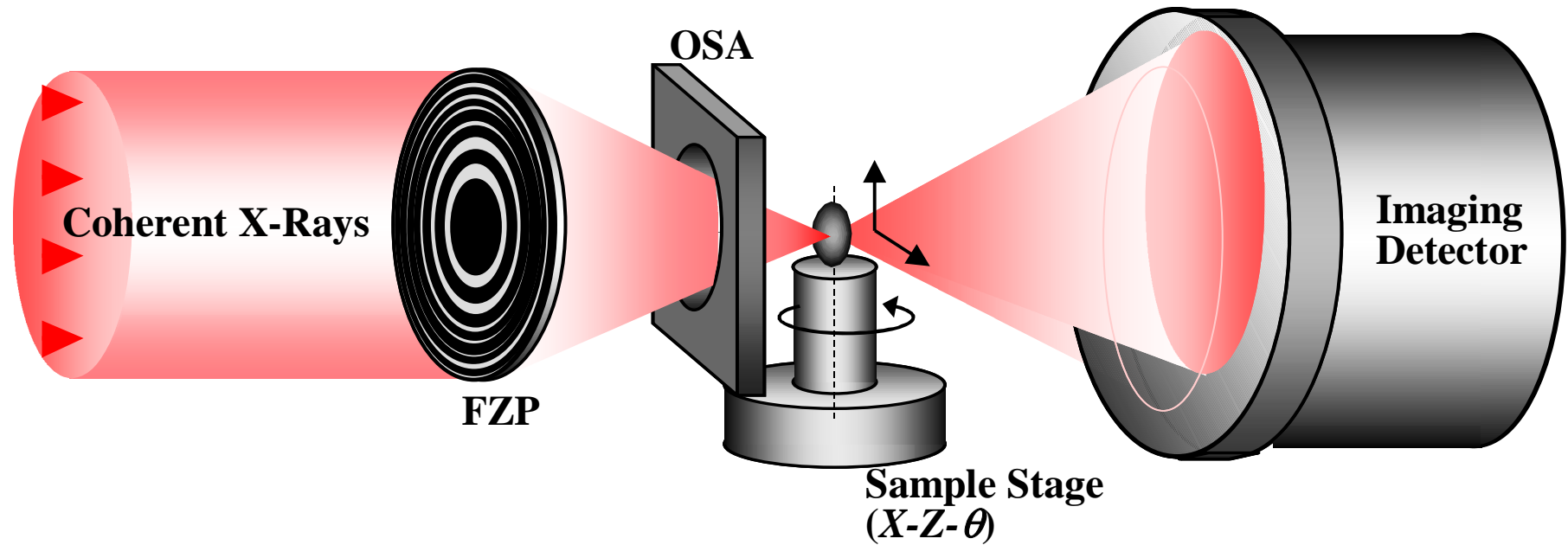
線幅
~100 nm

結像型CT(ゼルニケ) 現在

分解能 $0.2\mu\text{m}$ 、
測定時間30分

- 光学系の開発(位相イメージング)
 - コヒーレント結像光学: 2光束干渉計
 - 部分コヒーレント結像光学
 - ゼルニケ型
 - タルボ干渉計
 - CTへの応用
 - 走査型微分位相顕微鏡とCTへの利用
- 光学素子開発
 - フレネルゾーンプレート(FZP)
 - 全反射ミラー
 - 積層型FZP / キノホルム
- 分解能の限界について(X線CT)
- コヒーレントナノイメージングにおける課題点

走査型微分位相顕微鏡



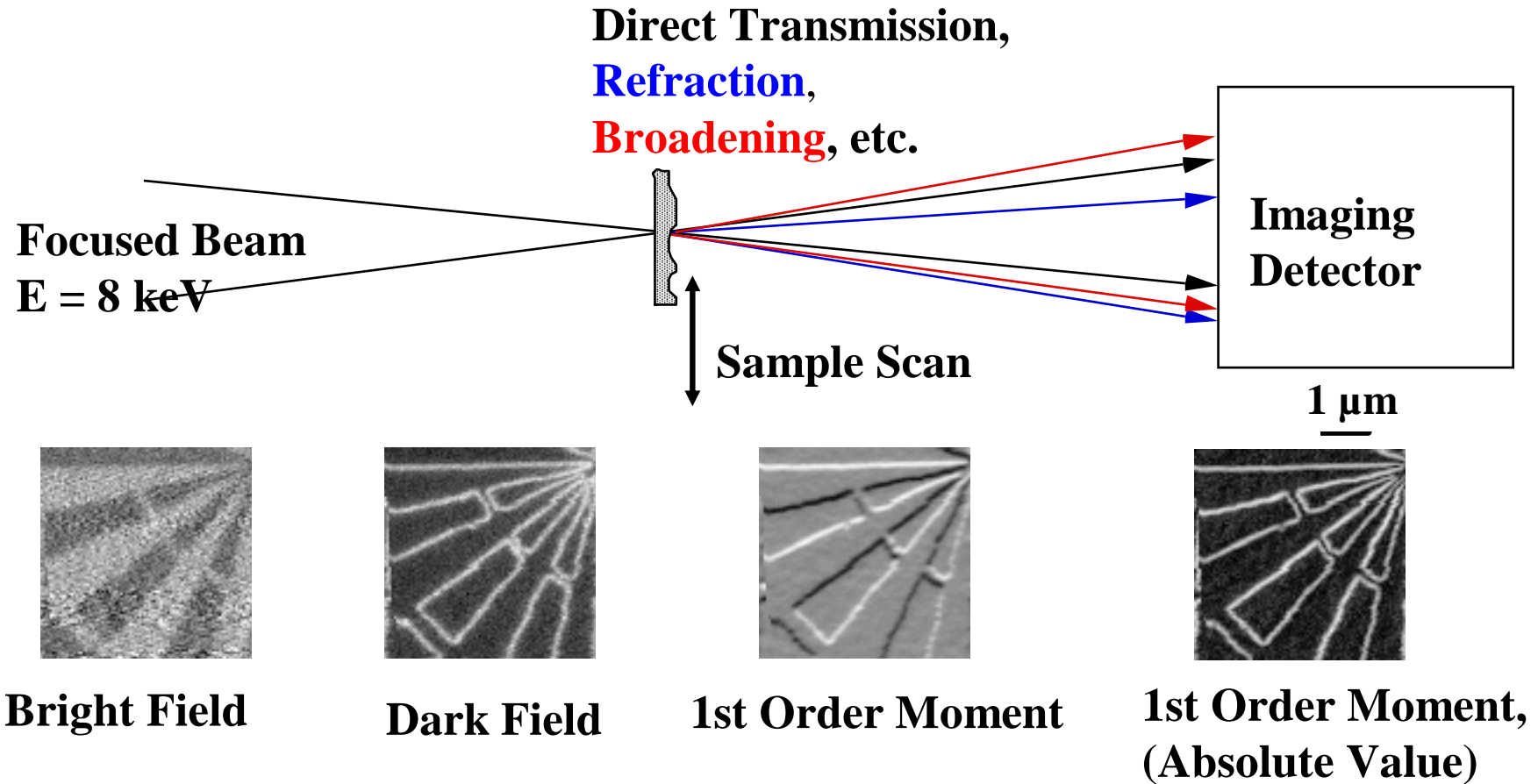
X線が物体を通ると、屈折する性質を利用。

試料透過後の強度(I)・・・吸収像 $\exp(-2\beta kt) = I/I_0$

試料透過後のビーム位置変化(Δx)・・・微分位相(屈折率変化) $\nabla_x(\delta) = L\Delta x$

- 高い位相感度 ($3\sigma < 10^{-2}\lambda$)
- 高い定量性
- × 測定時間長い → 高速化(~ 400 plots/sec)により2次元(raster, CT)は実用化

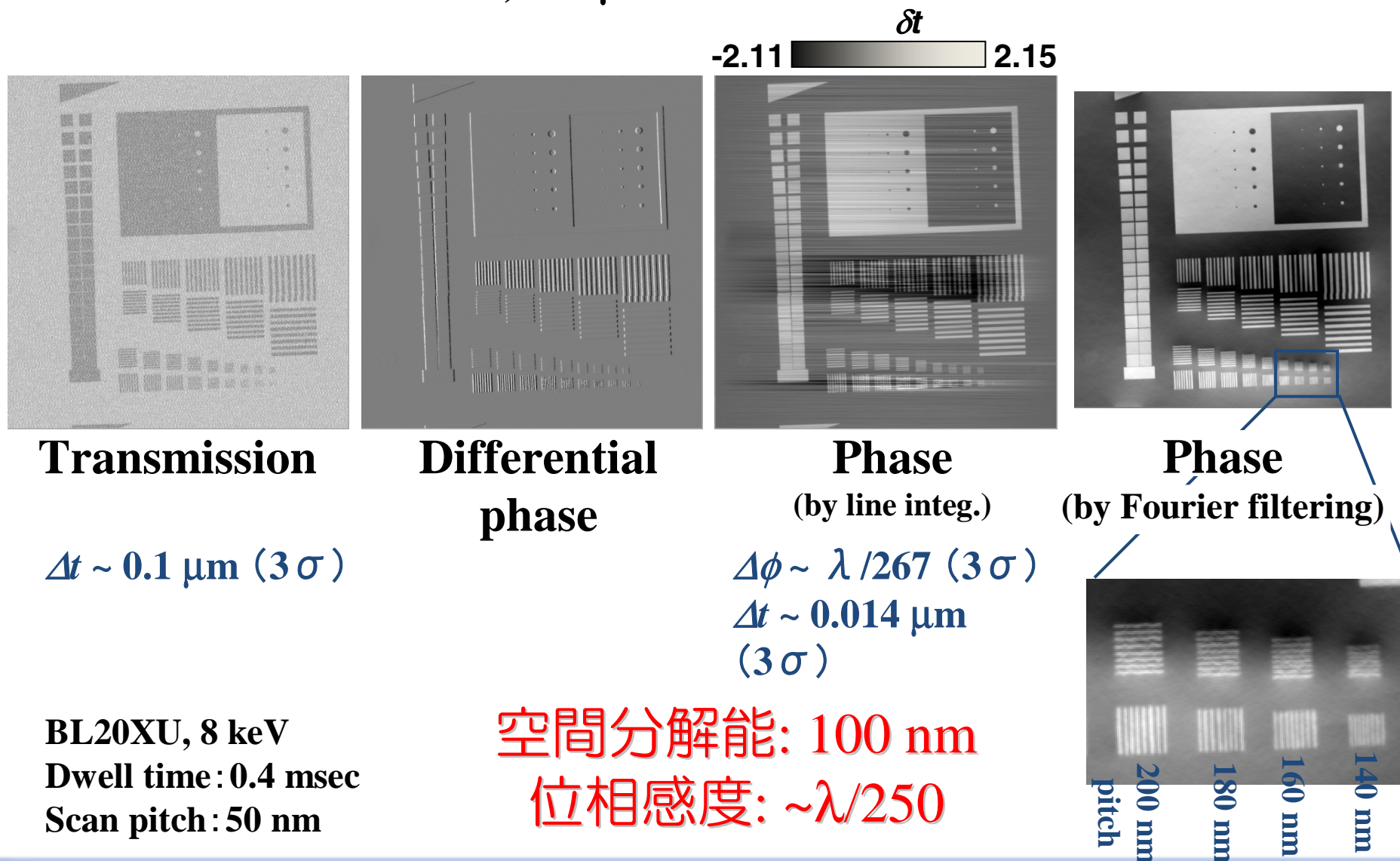
走査型微分位相顕微鏡



Differential-Phase-Contrast Imaging in Scanning Microscopy

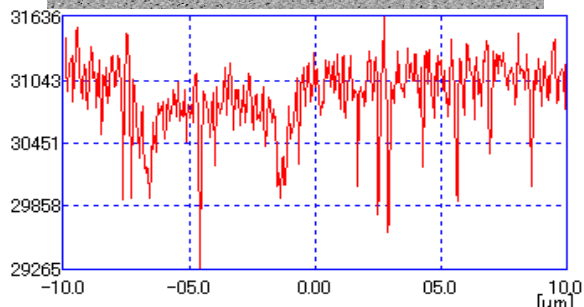
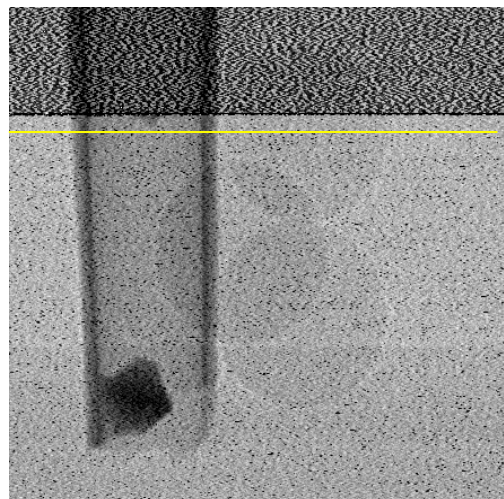
コントラスト比較1: 重元素試料

試料: テストチャート (Ta, 0.5 μm)



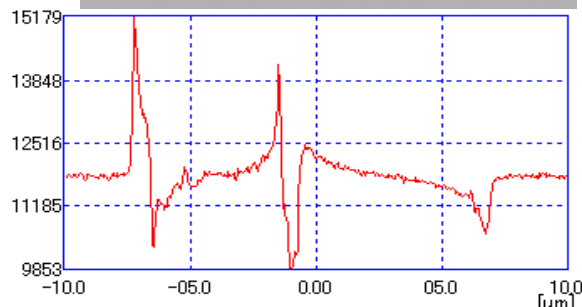
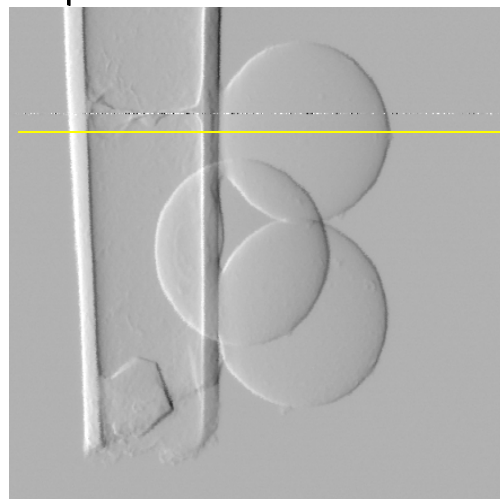
コントラスト比較2: 軽元素試料

試料: ポリスチレン球 (8 $\mu\text{m}\phi$) + ガラスキャピラリ

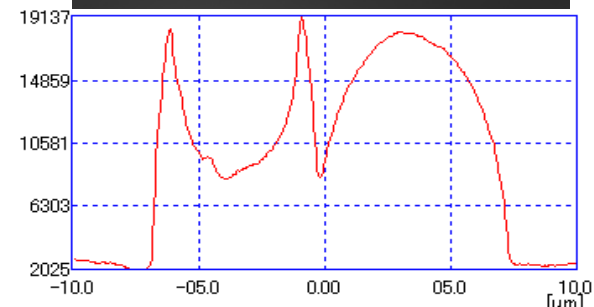
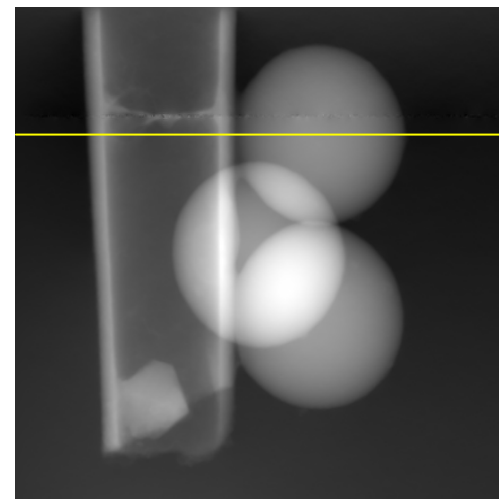


Transmission

ポリスチレン厚さ感度 (3σ):
 $\Delta t \sim 59.3 \mu\text{m}$



Differential phase



Phase

位相感度 (3σ):

$$\Delta\phi \sim \lambda / 267$$

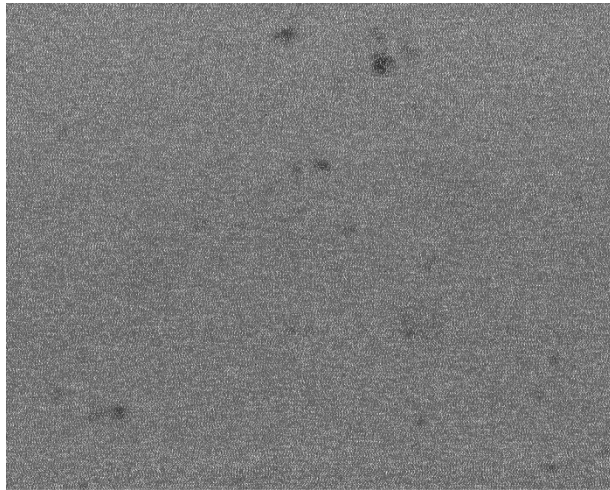
ポリスチレン厚さ感度 (3σ):

$$\Delta t \sim 0.16 \mu\text{m}$$

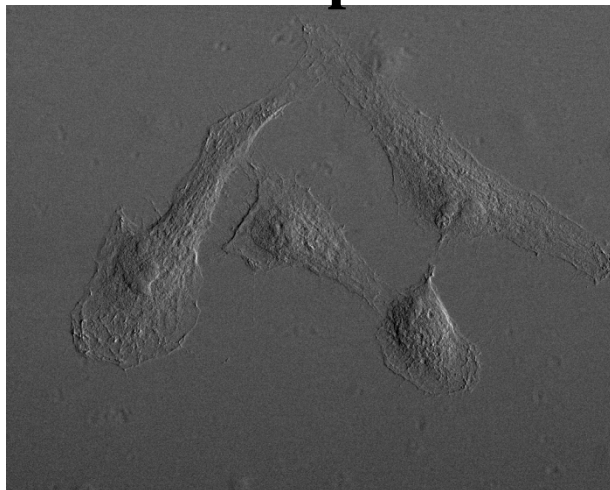
応用例: ヒト子宮頸癌 HeLa細胞

試料: グルタルアルデヒドにて固定後乾燥

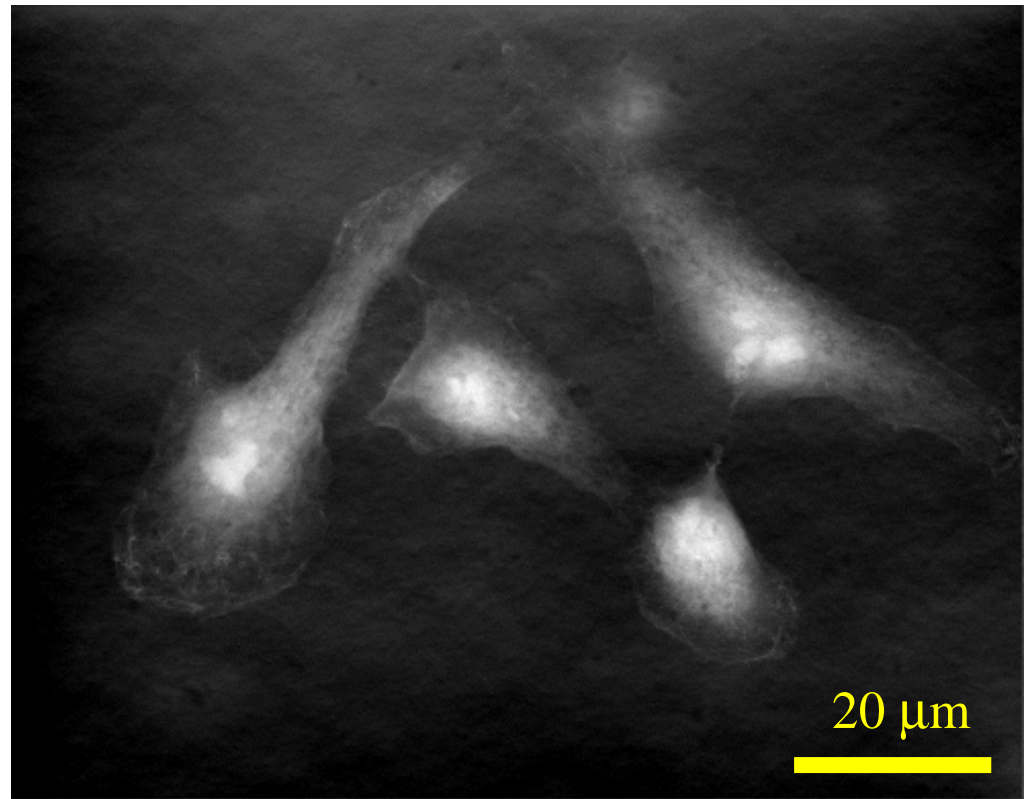
BL20XU, 8keV
Scan step: 50 nm × 50 nm
2000 × 1600 pixel
Exposure: 1 msec
Max. scan speed: 400 Hz
Measurement time: ~4 hours



Absorption



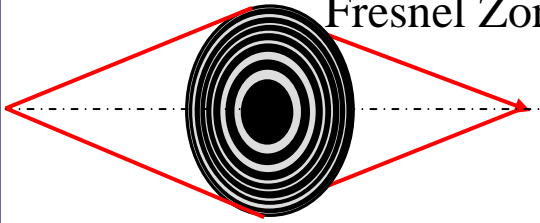
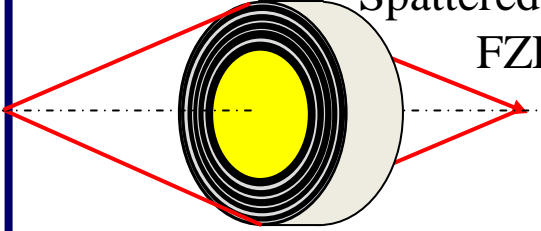
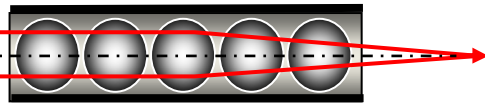
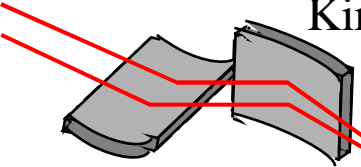
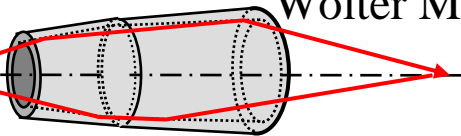
Differential phase



Phase image

- 光学系の開発(位相イメージング)
 - コヒーレント結像光学: 2光束干渉計
 - 部分コヒーレント結像光学
 - ゼルニケ型
 - タルボ干渉計
 - CTへの応用
 - 走査型微分位相顕微鏡とCTへの利用
- **光学素子開発**
 - フレネルゾーンプレート(FZP)
 - 全反射ミラー
 - 積層型FZP / キノホルム
- 分解能の限界について(X線CT)
- コヒーレントナノイメージングにおける課題点

X線光学素子

	名称	分解能 (FWHM)	エネルギー領域
回折	 <p>Fresnel Zone Plate</p>	<p>30 nm @8-10keV</p>	< 20 keV
	 <p>Spattered-Sliced FZP</p>	<p>< 0.2 μm @12.4keV</p> <p>0.5 μm @100keV</p>	8 - 200 keV
屈折	 <p>Refractive Lenses</p>	<p>0.57 μm @18keV</p>	6 - 30 keV
全反射	 <p>Kirkpatrick-Baez Mirror</p>	<p>110 nm @8-12keV</p> <p>< 0.5 μm @< 100keV</p>	<100 keV
	 <p>Wolter Mirror</p>	<p>0.7 μm @9keV</p>	< 10 keV

- 光学系の開発(位相イメージング)
 - コヒーレント結像光学: 2光束干渉計
 - 部分コヒーレント結像光学
 - ゼルニケ型
 - タルボ干渉計
 - CTへの応用
 - 走査型微分位相顕微鏡とCTへの利用
- 光学素子開発
 - フレネルゾーンプレート(FZP)
 - 全反射ミラー
 - 積層型FZP / キノホルム
- 分解能の限界について(X線CT)
- コヒーレントナノイメージングにおける課題点

CTでどの位大きい試料が見れる？ : FZPの収差

Optical path description:

$$\{(r_a - r_n \cos\phi)^2 + (r_n \sin\phi)^2 + a^2\}^{1/2} + \{(r_b + r_n \cos\phi)^2 + (r_n \sin\phi)^2 + b^2\}^{1/2}$$

$$= n\lambda/2 + (a^2 + r_a^2)^{1/2} + (b^2 + r_b^2)^{1/2},$$

歪曲: $3r_a^2 r_N^2 / f^3 < \lambda$

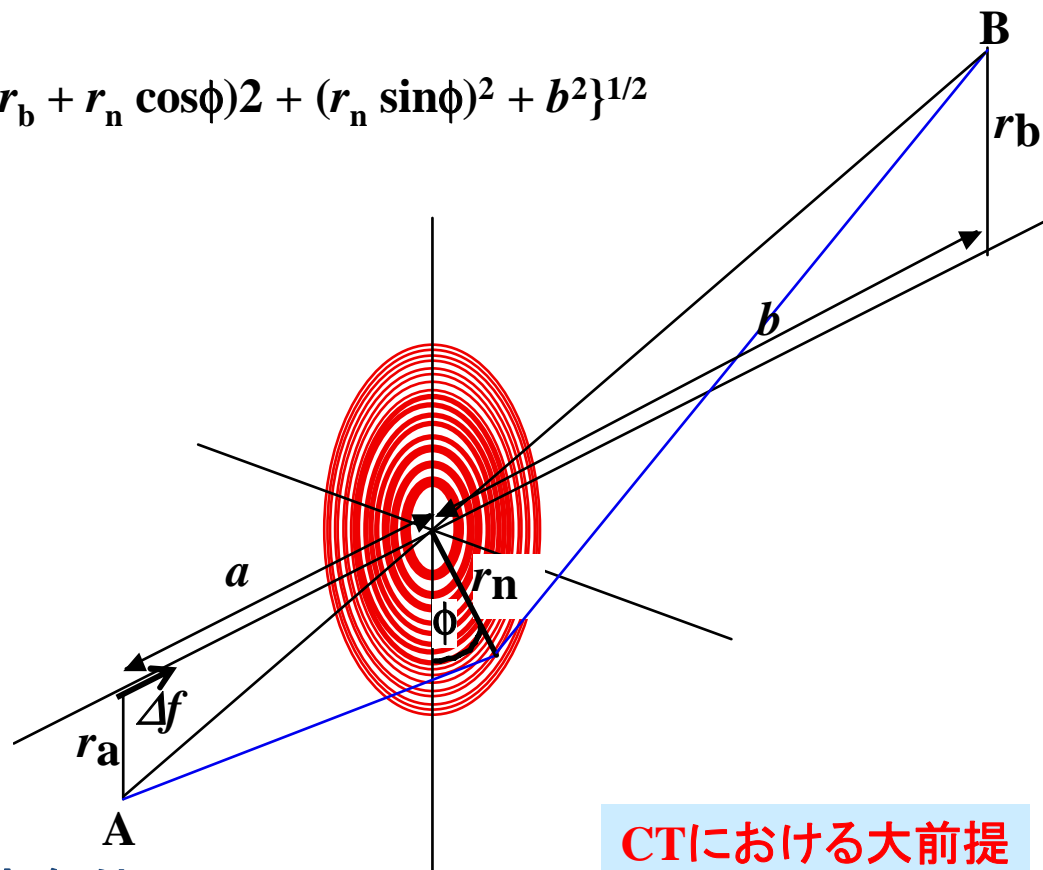
コマ: $2r_a r_N^3 / f^3 < \lambda$

球面収差: $1/2 r_N^4 / f^3 < \lambda$

色収差: $\Delta\lambda/\lambda < 0.61/N$

焦点深度: $3\Delta f r_N^2 / f^2 < \lambda$

CTでは試料は回転するので $\Delta f \Rightarrow r_a$



CTにおける大前提
「光は直進する」

分解能10 – 100 nm, $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$ の設定条件下では
焦点深度に関する条件が最も厳しい。

➡ 焦点深度がCTの視野を決定している。
つまり条件は他の光学系(投影、走査型、ホログラフィ等)でも同じ

X線CTの空間分解能はどこまでいくの？

焦点深度 Δf

$$2\Delta f = 0.61 \lambda / NA^2 = \Delta^2 / 0.61 \lambda$$

NA: 開口数、 Δ : 空間分解能

焦点深度は分解能の2乗に比例

→ 分解能の向上に伴い視野も急激に狭くなる...

例: 8keV

$$\Delta = 100 \text{ nm}, 2\Delta f \sim 100 \text{ }\mu\text{m}, N \sim 1000$$

$$\Delta = 30 \text{ nm}, 2\Delta f \sim 10 \text{ }\mu\text{m}, N \sim 300$$

$$\Delta = 10 \text{ nm}, 2\Delta f \sim 1 \text{ }\mu\text{m}, N \sim 100$$

$$N: \text{サンプリング数(ピクセル数)} \sim 2\Delta f / \Delta = NA^{-1}$$

目標とする分解能: (Sub)30 nm

3D-TEMまでの空間-分解能ギャップは埋められる

(3D-TEMの視野は数ミクロンが上限)。

それ以上... LocalCT、共焦点顕微鏡技術の併用。

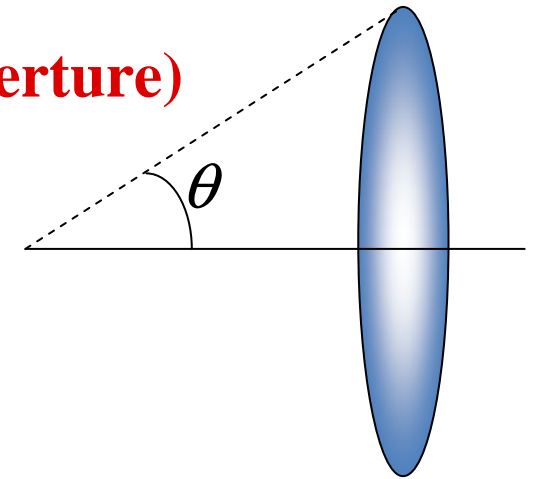
X線光学素子の分解能はどこまでいくの？

Diffraction limit for spatial resolution

$$\Delta = c\lambda/NA$$

$c \sim 1$ (typical 0.61 for circular aperture)

NA: numerical aperture $n \sin \theta$



Theoretical Resolution Limit of Total Reflection Mirror Optics, Wave-Guide, Refractive Lens, Fresnel Zone Plate

$$NA < \theta c \sim (2\delta)^{1/2}$$

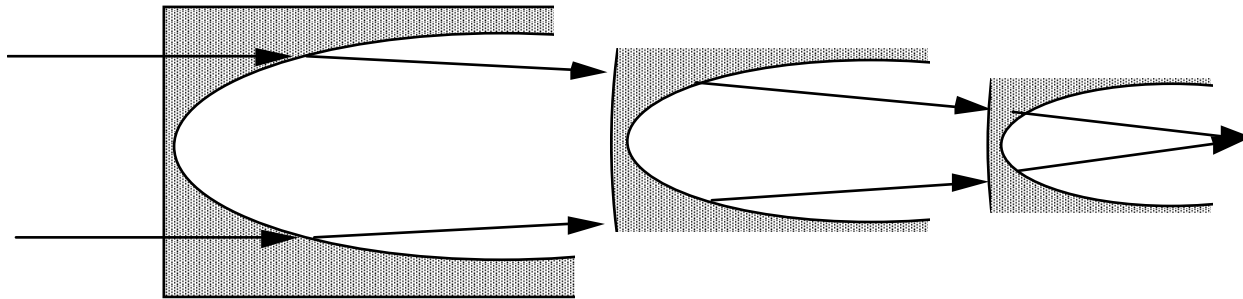
$\lambda/(2\delta)^{1/2} \sim 10 \text{ nm}$ in hard X-ray Region

cf. C. Bergemann, H. Keymeulen and J. F. van der Veen: Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 204801.

cf. Y. Suzuki, Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) 7311-7314.

nm分解能達成可能な光学系1

Combined Refractive Lens,



Diffraction Limited Resolution

$$\sim 0.61 \times \lambda / (N\theta c)$$

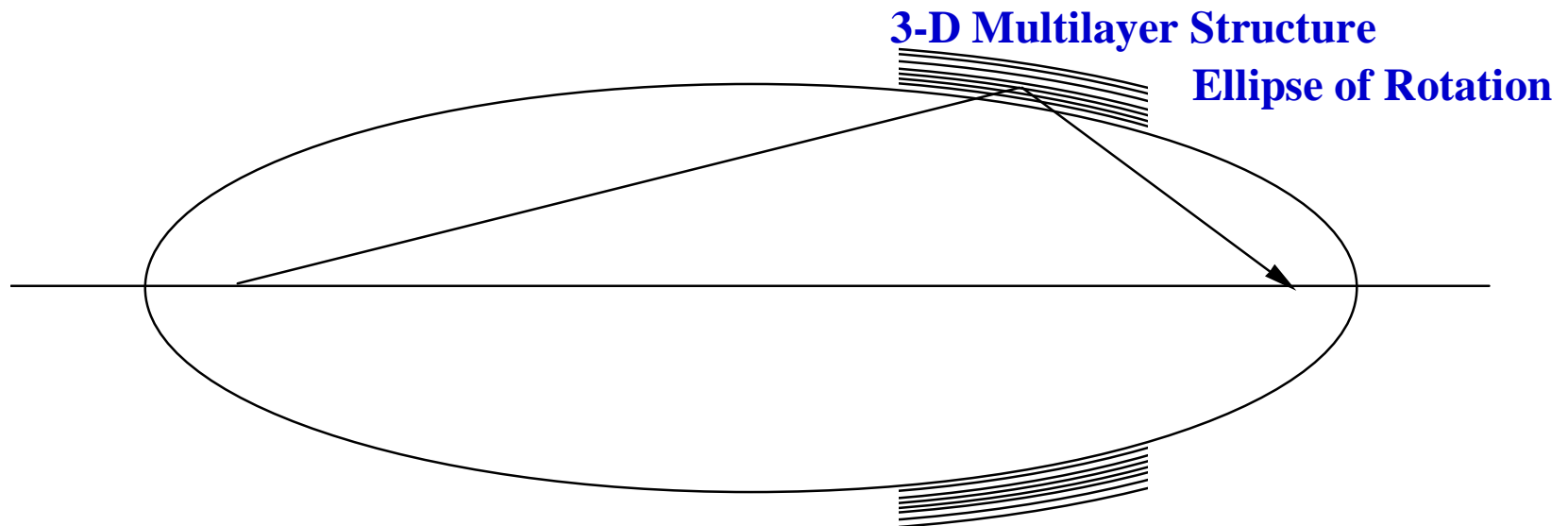
N: Number of Combined Lens

**Spherical lens might be feasible,
because smaller lens has smaller aberration.**

cf. C. Schroer and B. Lengeler, Phys. Rev. Let. 94 (2005) 054802

nm分解能達成可能な光学系2

Three Dimensional Zone Plate (Volume Zone Plate or Laue Lens)



**Nested Multilayer Structure of Ellipse of Rotation
with Optical Path Difference of $m\lambda$.**

Ideal only on Focusing Property.

**Next limit: atom size with $\lambda/4$ rule (Rayleigh limit)
~ 1 nm.**

H. C. Kang et al., Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 127401,
C. Schroer, Phys. Rev. B 74 (2006) 033405.

ERLコヒーレントナノイメージング実験における課題点

1. 振動：光学系、光源、地盤、建物

2. 温度安定性： $\sim 0.01^\circ\text{C}$ environment.



3. 放射線損傷、冷却：SPring-8の延長でいけるか？



4. ナノオーダーの計測法

・暗視野ナイフエッジスキャン法の開発



5. (試料起因でない) スペックル

: “No optics without any speckles.”

・Spatial filter

・Beam diffuser



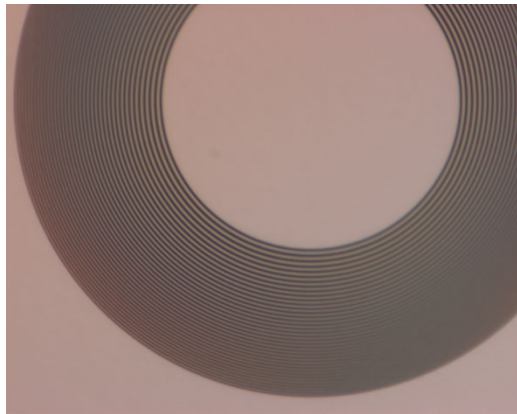
6. No optics is best optics?

ありがとうございました。

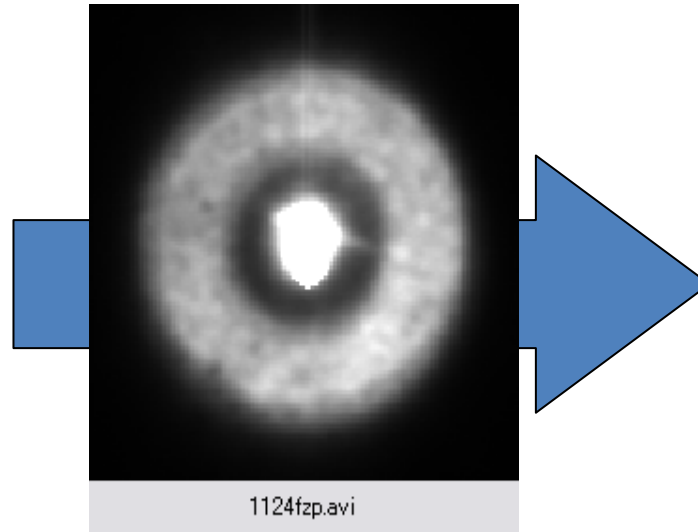
光学素子の放射線耐性



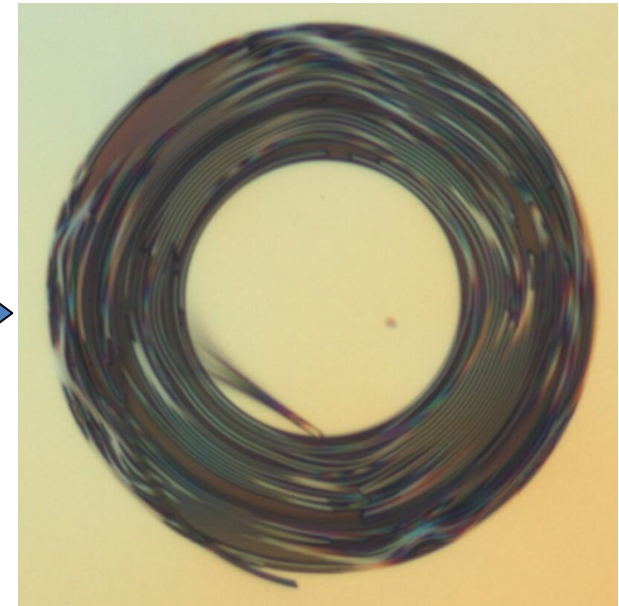
Ta-FZPの放射線照射に対するライフタイム
~ 空気中で3日 ($\sim 10^{19}$ phs/mm @BL47XU)



照射前



X線far-field像



照射後

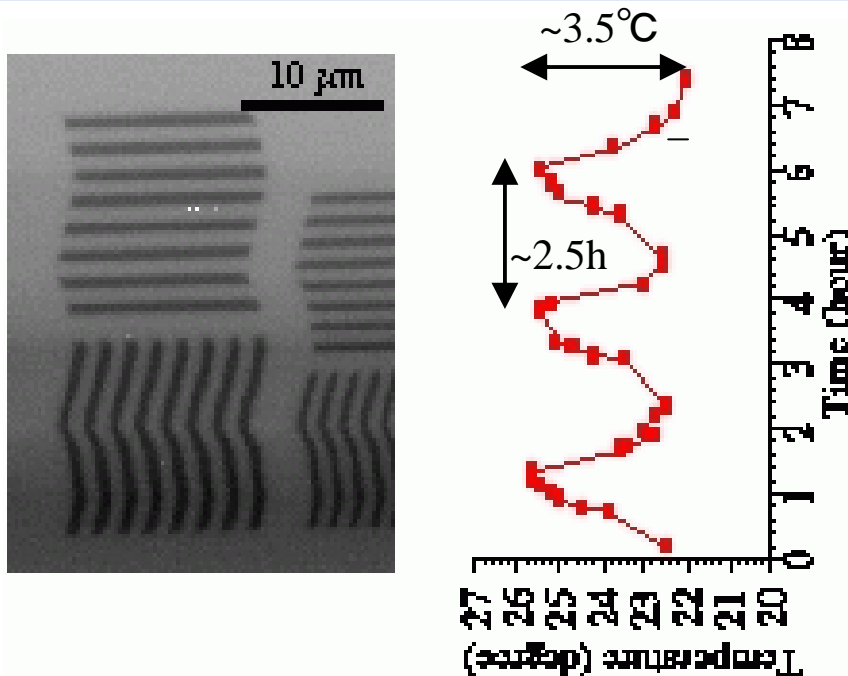
FZP: 100 $\mu\text{m}\phi$, 1 $\mu\text{m}t$
 $\Delta r_N = 0.25 \mu\text{m}$
Membrane: Si_3N_4
X-ray energy: 10 keV @BL47XU,
Flux density: $\sim 5 \times 10^{13}$ phs/s/mm

対策:

- ・真空中又はHe内に
- ・メンブレンを歪みの少ないSiCに

今のところ解決。

温度変化とドリフト



2~2.5時間周期の空調のフィードバックにより走査X線顕微鏡装置が熱膨張/収縮を繰り返している

1μm線幅のTaテストパターン
走査X線顕微鏡像 BL20XU in 2002

熱膨張率(室温)

アルミ: $23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

SUS304: $17 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

アルミ100mmの治具に対して、
2.3 μm/°Cの熱膨張

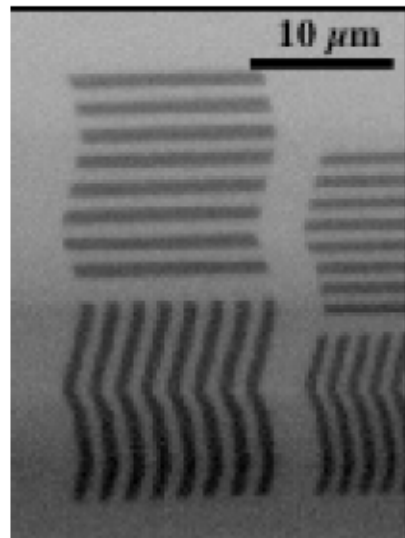
ナノイメージングには

0.01°Cの温度管理

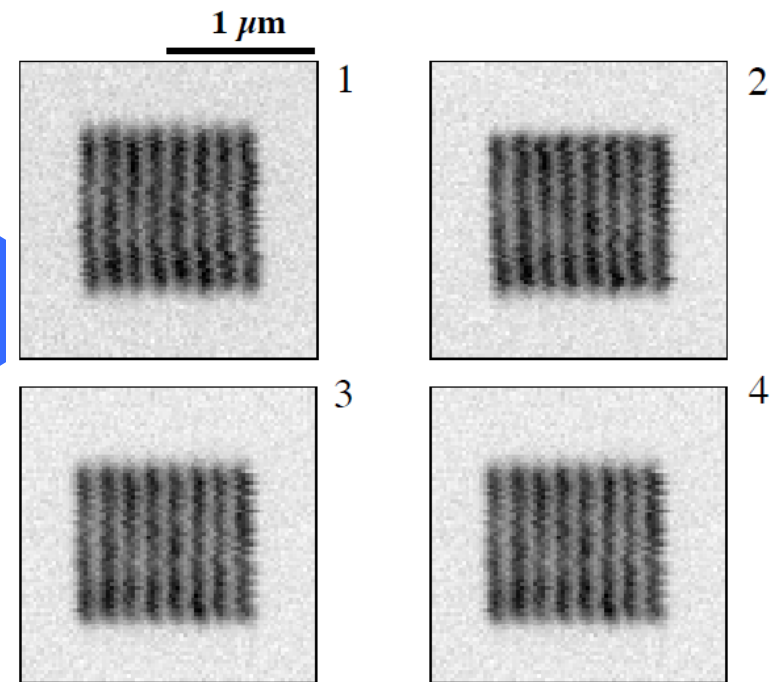
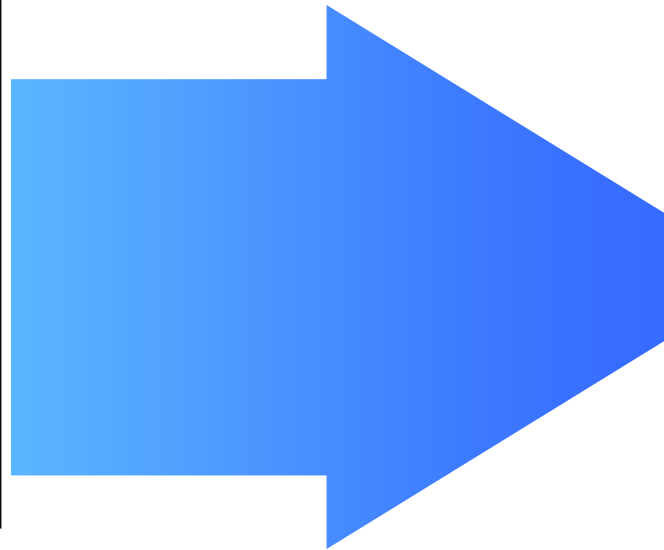
システムの小型・安定・一体化

熱源(モータなど)の排除

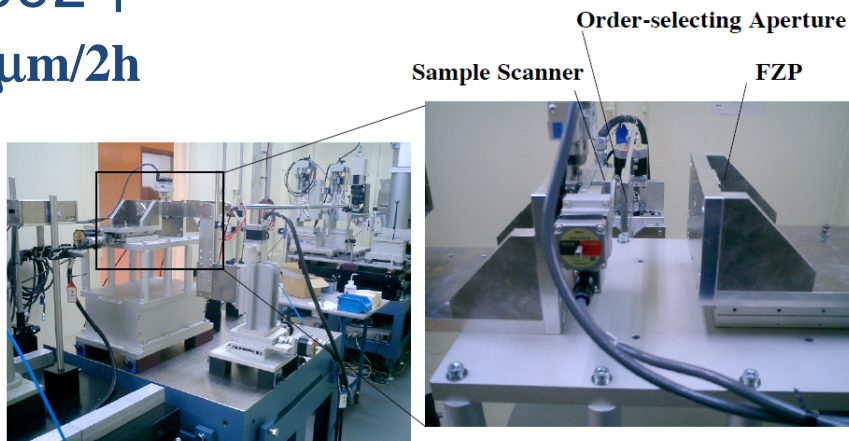
Stable nano-probe



2002年
数μm/2h



2007年
数十nm/数h



Stable Nano-probe

Experimental Setup of Scanning Microscopy
with Fresnel Zone Plate Optics at BL20XU SPring-8

BL20XU, 8keV

試料: Ta 80 nm line & space pattern
25 nm pitch, dwell time 0.1 sec

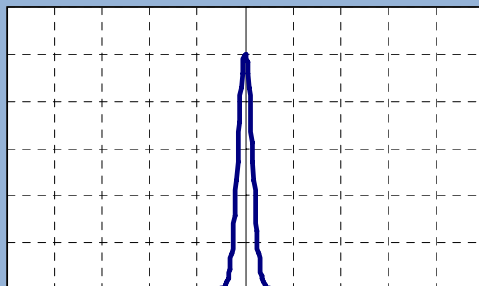
“ナノビーム”評価法の確立

ナイフエッジスキャン法の問題点:

硬X線領域ではもはや、ナノオーダーで理想的なナイフエッジが存在しない。

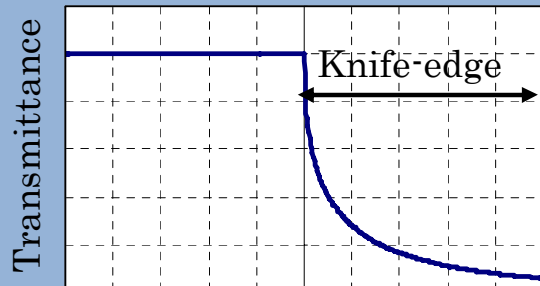
実測ビームプロファイル...

形が左右非対称
幅が実際より大きい
ノイズ

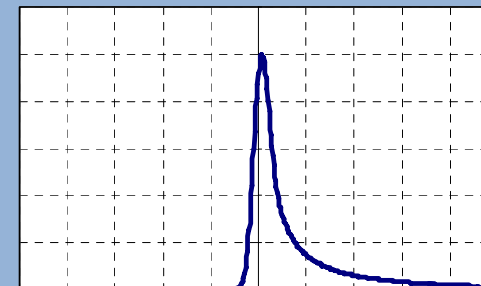


Original profile
of focused beam

×



Knife-edge with round shape



Measured beam profile

例えば...

X線エネルギー: 8keV

実際のビームサイズ: 17 nm

ナイフエッジ: 金ワイヤ (50 $\mu\text{m}\phi$)

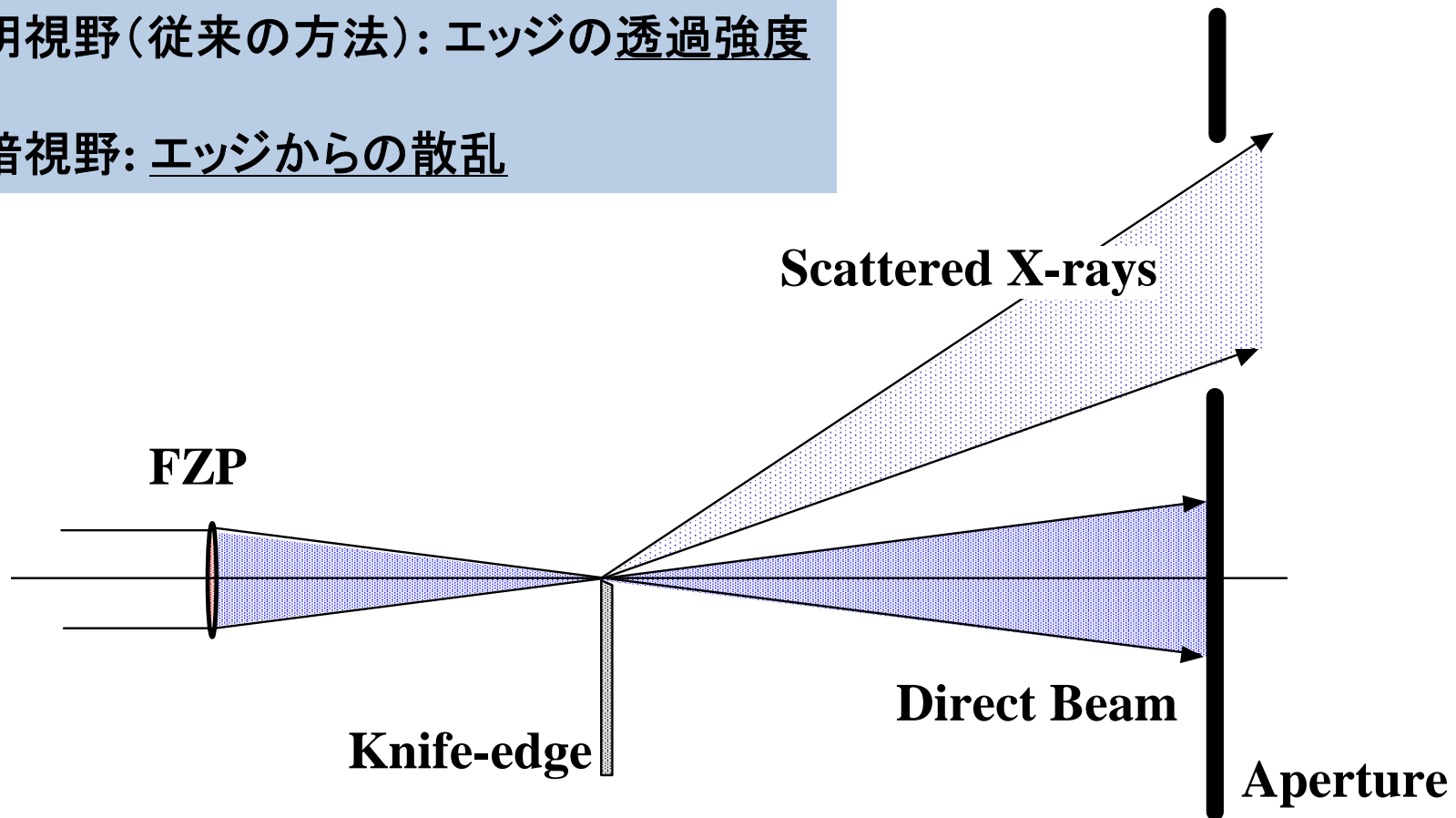
の場合、通常のナイフエッジスキャンで得られる半値幅は ~23 nm

新たな評価法の必要性

暗視野ナイフエッジスキャン法

明視野(従来の方法): エッジの透過強度

暗視野: エッジからの散乱



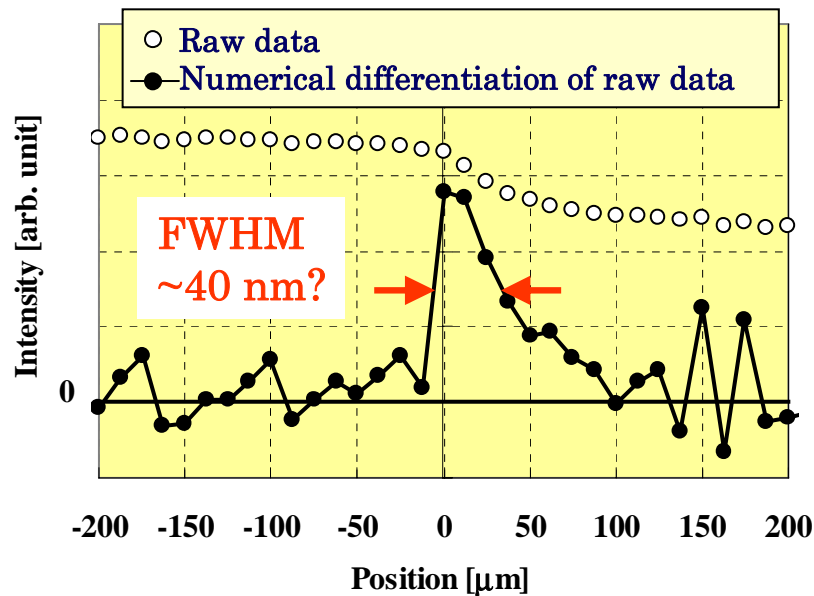
検出器前に置いたアパーチャによって、ナイフエッジからの透過光を遮り、散乱光だけを取り出す。

明視野法と暗視野法の比較



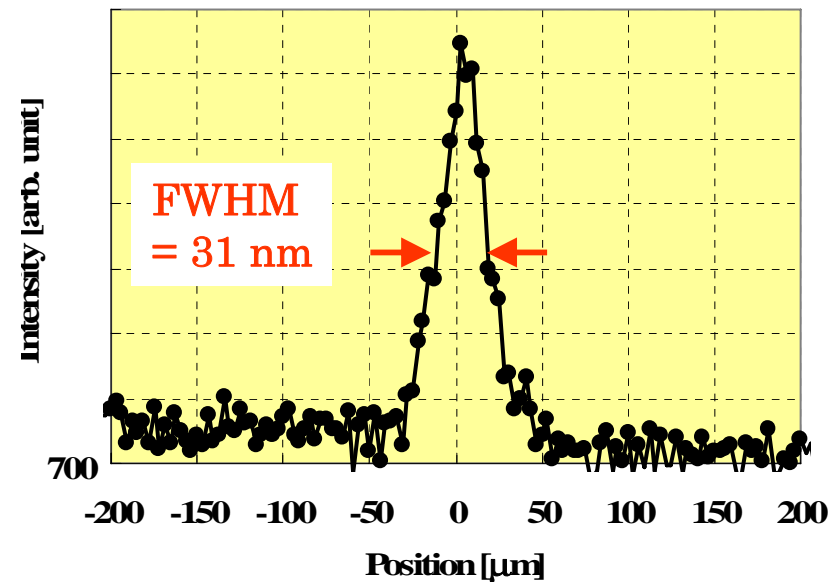
暗視野法の利点:

- エッジの材質を選ばない。位相物体でよい
 - 薄く鋭いエッジ、ガラス等軽元素でも可
- 差分等のデータ処理が不要
 - 高いSN、高精度の計測、高い再現性



明視野

ナイフエッジ: 金ワイヤ (50 $\mu\text{m}\phi$)
スキャンピッチ: 12.5 nm



暗視野

ナイフエッジ: Ta薄膜パタン (0.5 $\mu\text{m}t$)
スキャンピッチ: 3.125 nm

FZP(最外線幅 $\Delta r_N = 50 \text{ nm}$)の3次フォーカス評価