

J-PARC RADEN における パルス中性子による 定量的位相イメージング

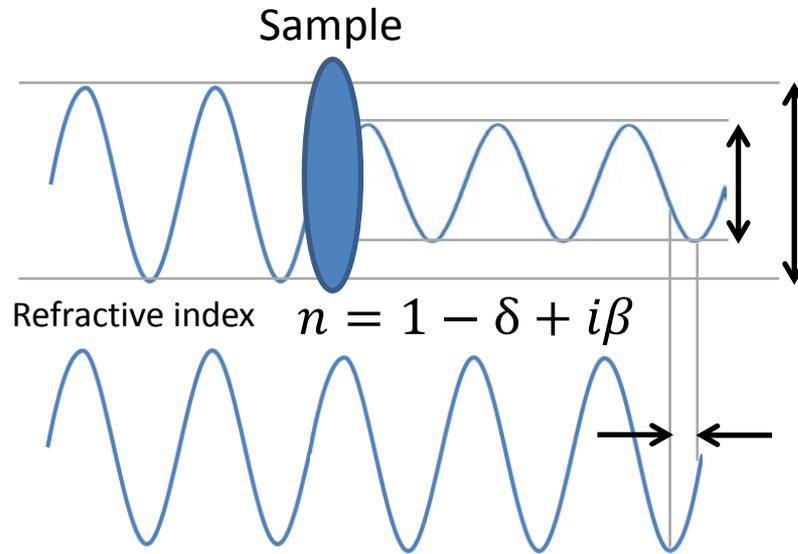
関義親¹, 篠原 武尚¹, 上野 若菜¹, J.D. Parker², 松本 吉弘²,
佐本 哲雄³, 矢代 航³, 百生 敦³

¹JAEA, ²CROSS, ³東北大多元研

- 導入
位相イメージングの特徴
Talbot-Lau干渉計の原理
- 波長分解型Talbot-Lau干渉計の開発
- 応用測定例

中性子ラジオグラフィと位相イメージング

Neutron interaction with matter



Radiography

Attenuation

$$\beta = \frac{N\lambda}{4\pi} (\sigma_a + \sigma_{incoh} + \sigma_{coh})$$

Phase shift

Interferometry

$$\delta = \frac{N\lambda}{4\pi} \sqrt{4b_c^2\lambda^2 - \sigma_a^2}$$

N : Number density

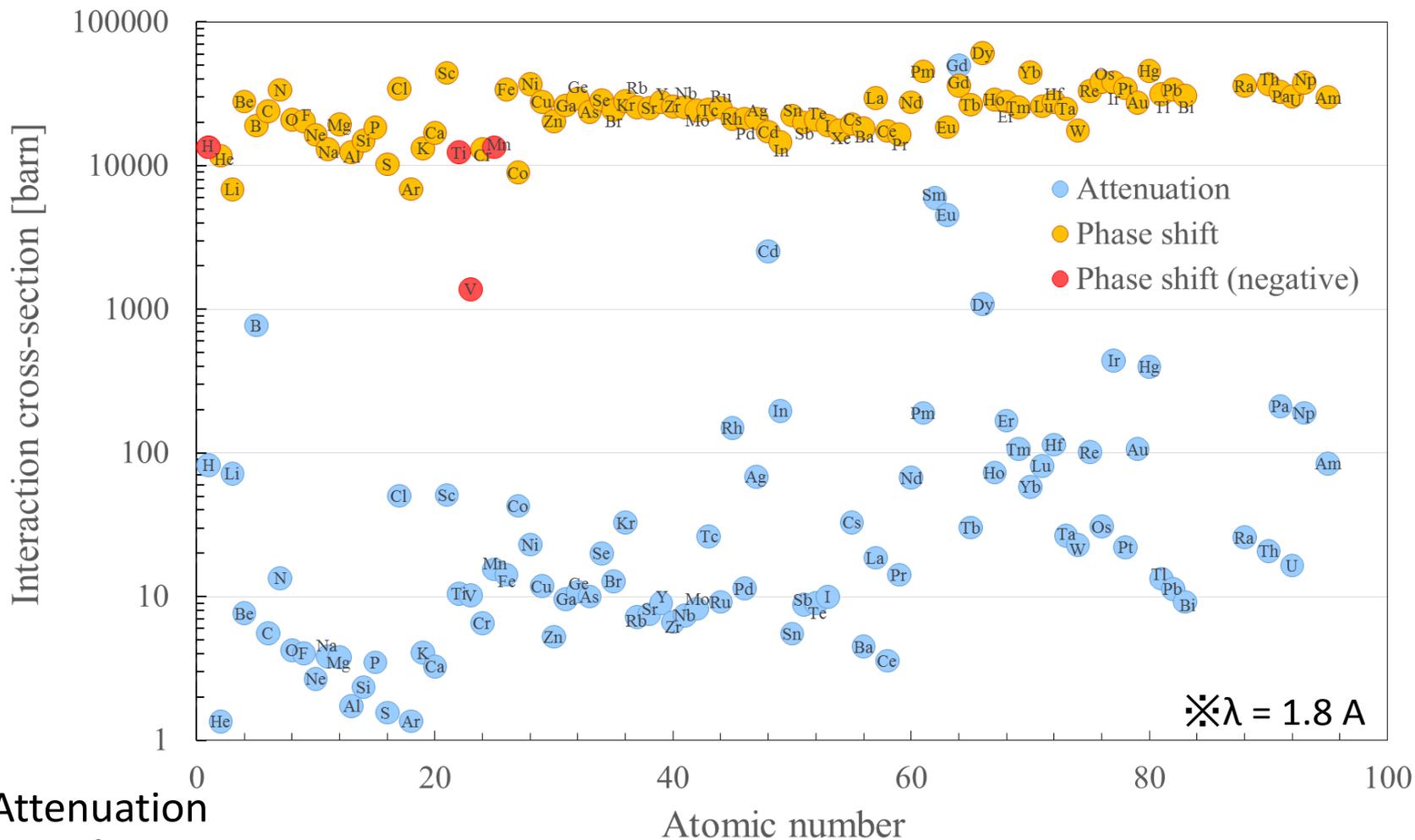
λ : Wavelength

σ_a : Absorption scattering cross section

σ_s : Total scattering cross section

b_c : Scattering length

中性子ラジオグラフィと位相イメージング



Attenuation

$$\beta / \left(\frac{N\lambda}{4\pi} \right) = \sigma_a + \sigma_{incoh} + \sigma_{coh}$$

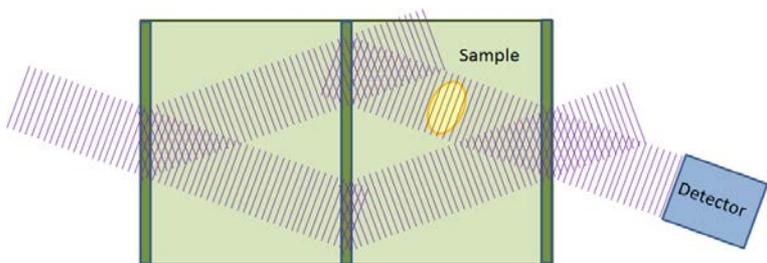
Phase shift

$$\delta / \left(\frac{N\lambda}{4\pi} \right) = \sqrt{4b_c^2 \lambda^2 - \sigma_a^2}$$

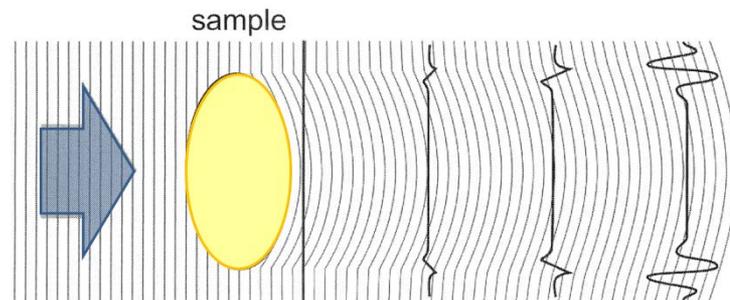
位相イメージングは吸収イメージングの
100-1000倍高感度

中性子位相イメージングの手法

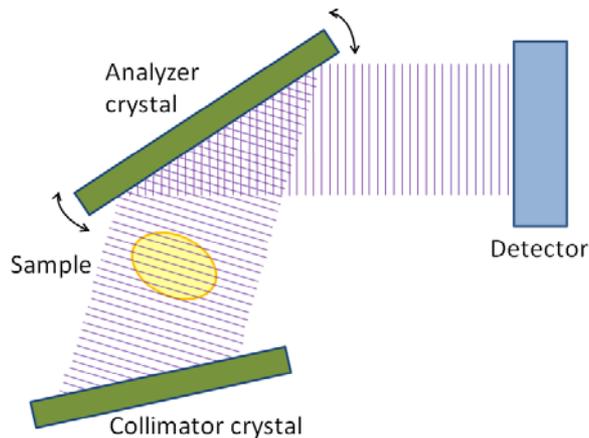
- Si単結晶干渉計 Φ



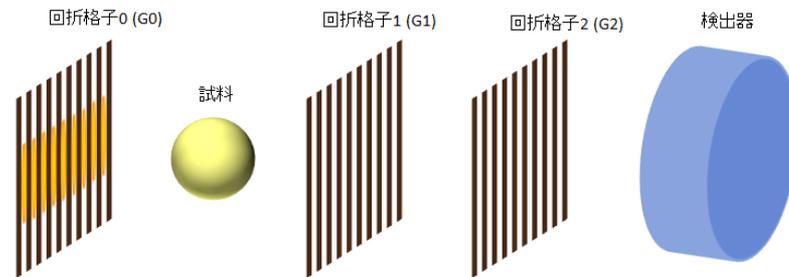
- 伝播法 $\nabla^2\Phi$



- Diffraction Enhanced Imaging $\partial\Phi/\partial x$

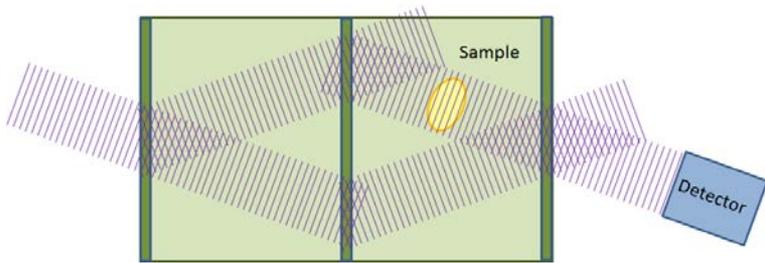


- Talbot-Lau 干渉計 $\partial\Phi/\partial x$

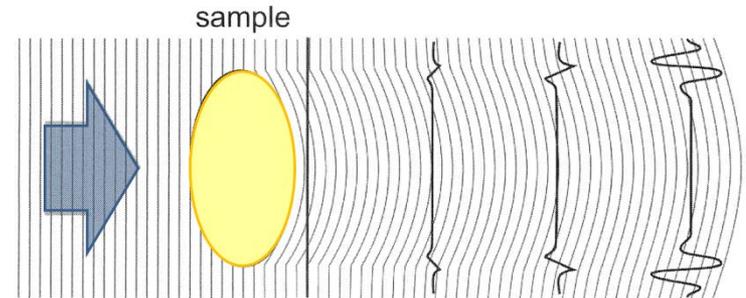


中性子位相イメージングの手法

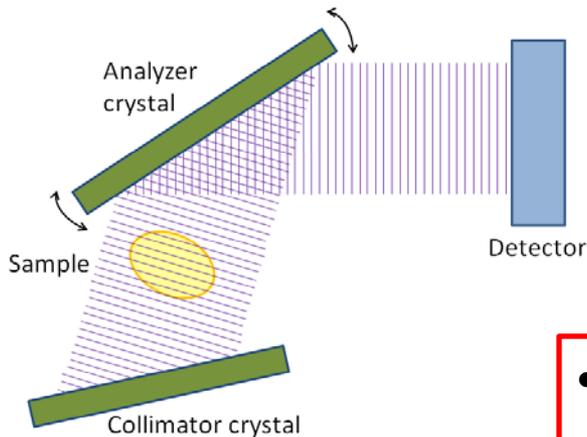
- Si単結晶干渉計 Φ



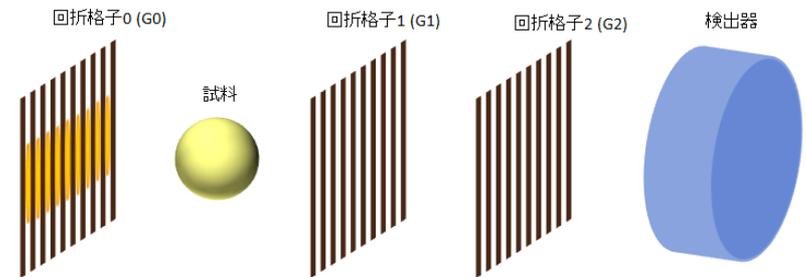
- 伝播法 $\nabla^2\Phi$



- Diffraction Enhanced Imaging $\partial\Phi/\partial x$

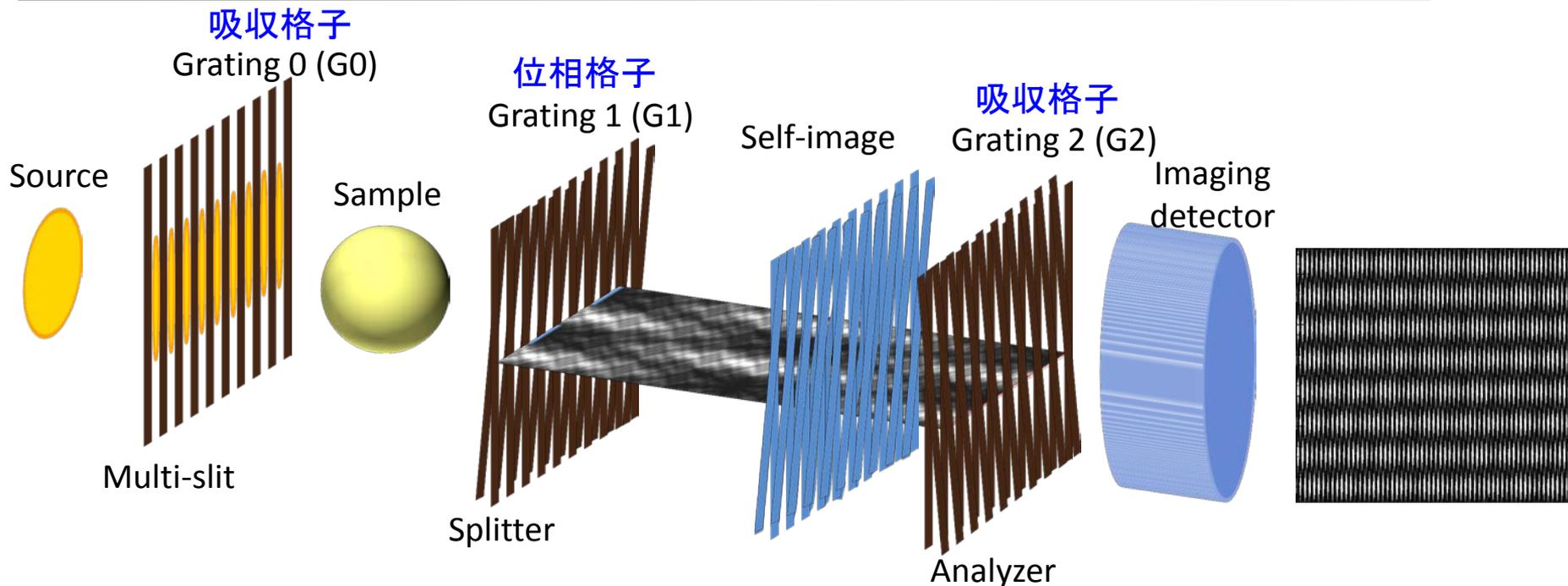


- Talbot-Lau 干渉計 $\partial\Phi/\partial x$

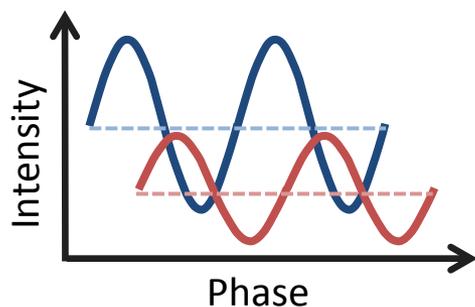


- 空間コヒーレンス要求が低い + コヒーレンスフィルタ機能
→ 光源を絞らなくてよい
- 時間コヒーレンス要求も低い
→ 白色ビームでも機能
- 格子の面積だけ大面積化が可能

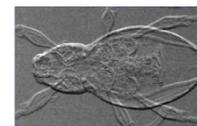
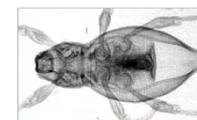
Talbot-Lau 干渉計の原理



Fresnel回折場→ G2位置にG1と同じ周期の強度分布：自己像
試料による自己像の歪みをG2とのモアレ縞で検出

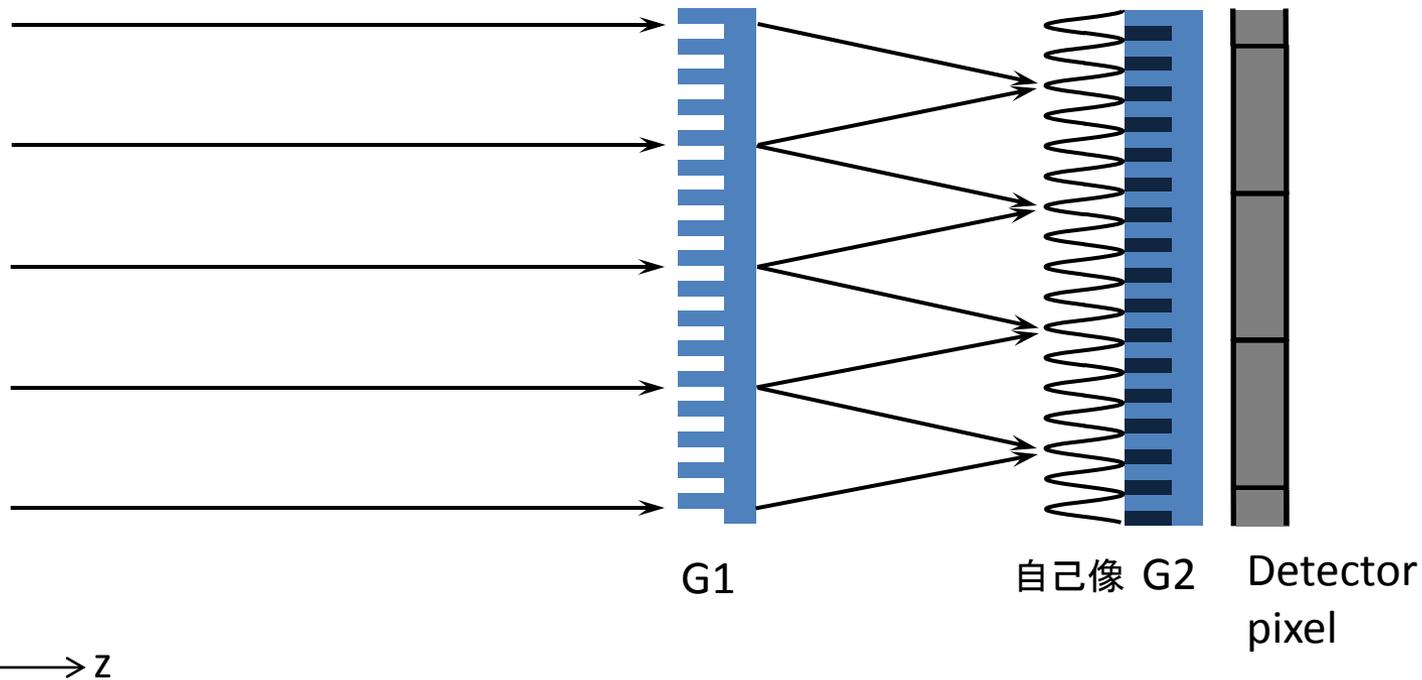


- 吸収コントラスト像
- 微分位相コントラスト像
- ビジビリティコントラスト像



測定される物理量：微分位相コントラスト像

微分位相イメージングは光線の屈折を測定する $\varphi_x \sim 1 \mu\text{rad}$



測定される物理量：微分位相コントラスト像

微分位相イメージングは光線の屈折を測定する $\varphi_x \sim 1 \mu\text{rad}$

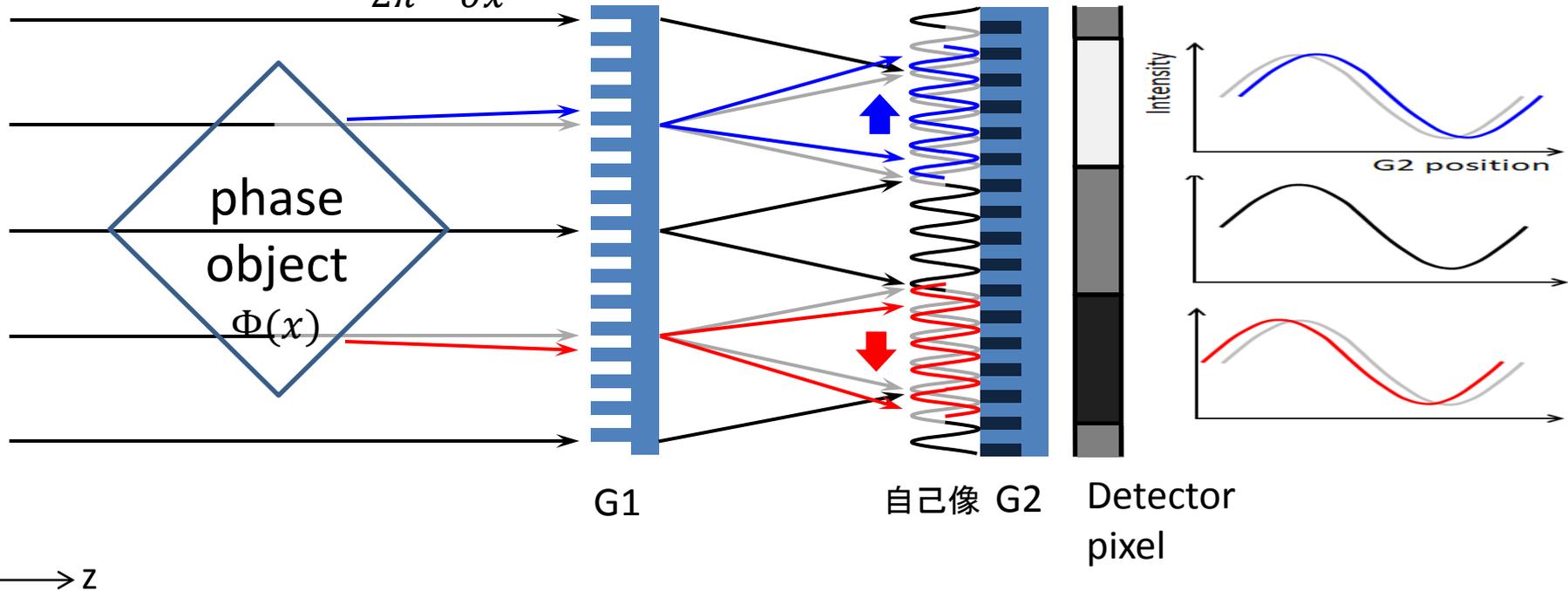
光線の屈折角

$$\varphi_x(x) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x}$$

自己像のずれ

モアレ縞の位相シフト

$$\Psi(x) \propto \varphi_x(x)$$

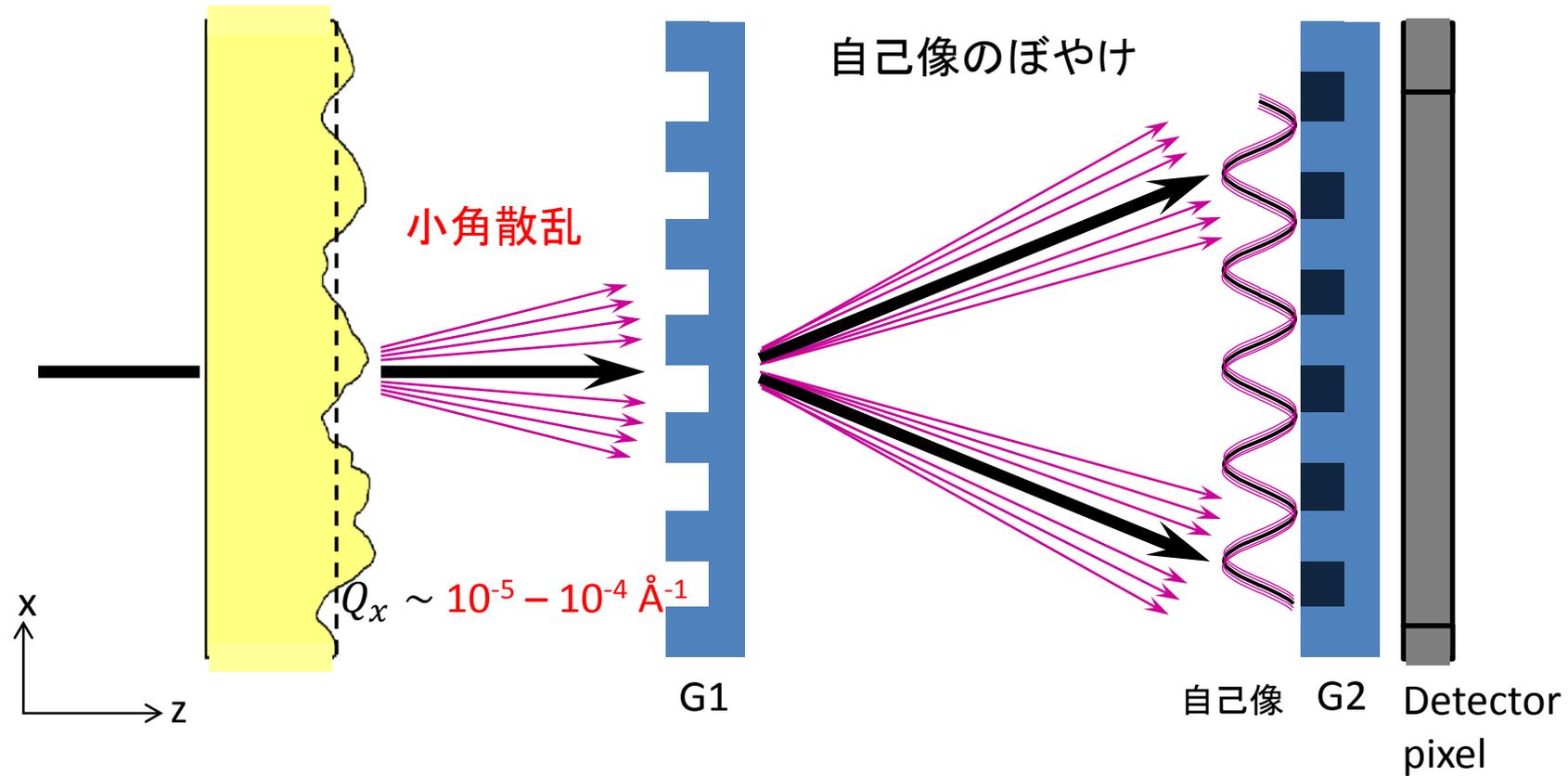


$$\Psi(x) \propto \varphi_x(x) \propto \lambda^2 \frac{\partial}{\partial x} \int b(x) \rho(x) dz$$

$b(x)$: 散乱長分布
 $\rho(x)$: 密度分布

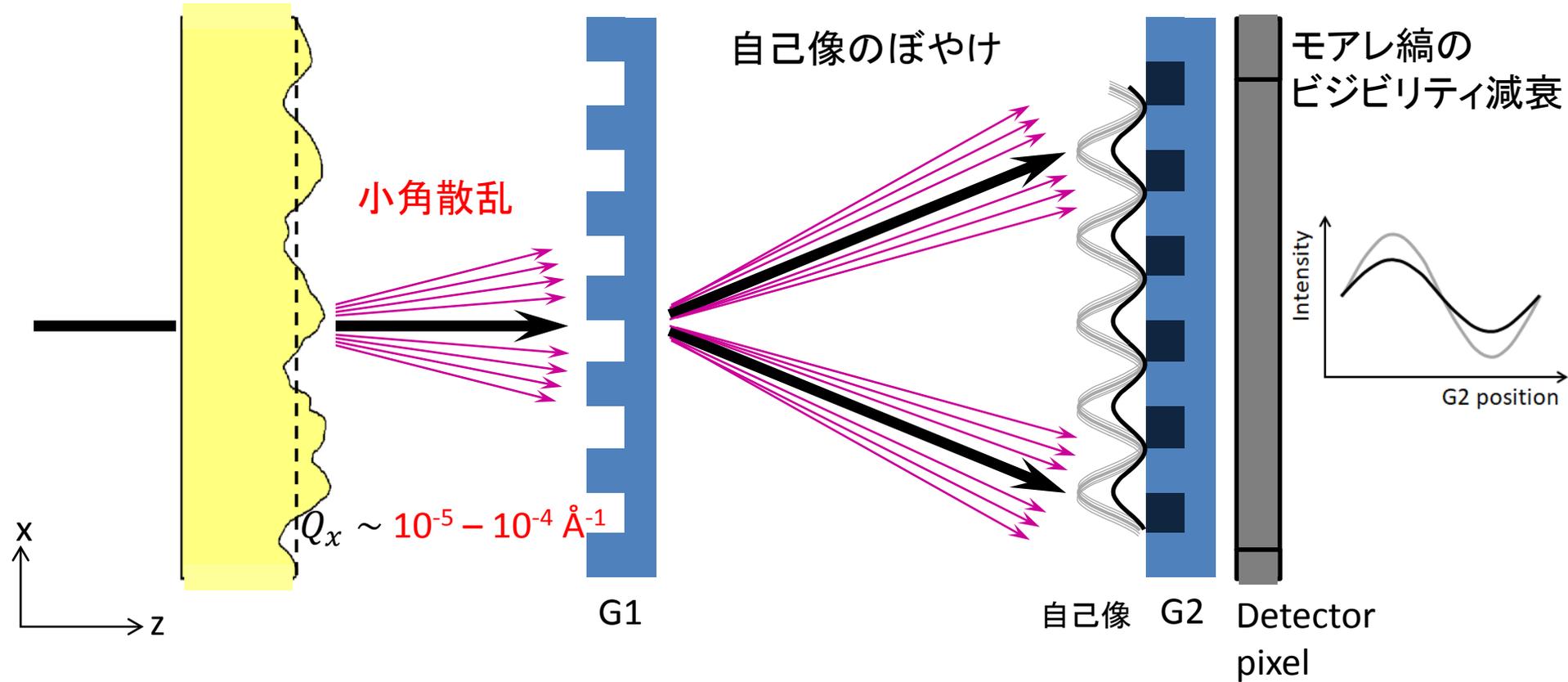
測定される物理量：ビジビリティコントラスト像

ビジビリティイメージングは”微小構造”の空間的ゆらぎの情報を取り出す



測定される物理量：ビジビリティコントラスト像

ビジビリティイメージングは”微小構造”の空間的ゆらぎの情報を取り出す



Damping factor of visibility $\eta \simeq \exp[-\sigma_\phi^2(x)\{1 - \gamma(x; -pd_1)\}]$

Autocorrelation function $\gamma(x; \Delta x) \simeq \exp\left[-\left\{\frac{|\Delta x|}{\xi(x)}\right\}^{2H}\right]$

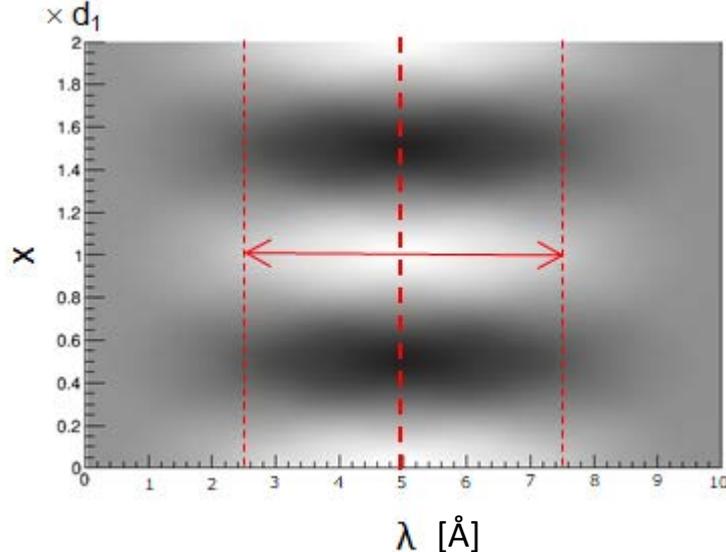
σ_ϕ^2 : Standard deviation of phase
 ξ : Correlation length
 H : Hurst parameter
 p : Interference order
 d_1 : Pitch of G1

波長分解型Talbot-Lau干渉計の開発

TL干渉計による位相イメージング + パルスビーム

Talbot-Lau干渉計は白色ビームでも機能

モアレ縞の波長依存性(数値計算)



- 格子位置固定
- G1: 中心波長5Åに対して $\pi/2$ 位相格子
- 空間コヒーレンス長 $\sim d_1$ (G1ピッチ)

→ モアレ縞は中心波長周辺の幅広い範囲
($\lambda = 2.5-7.5 \text{ \AA}$)で観測可能

対応波長幅 $\Delta\lambda/\lambda \approx 1$

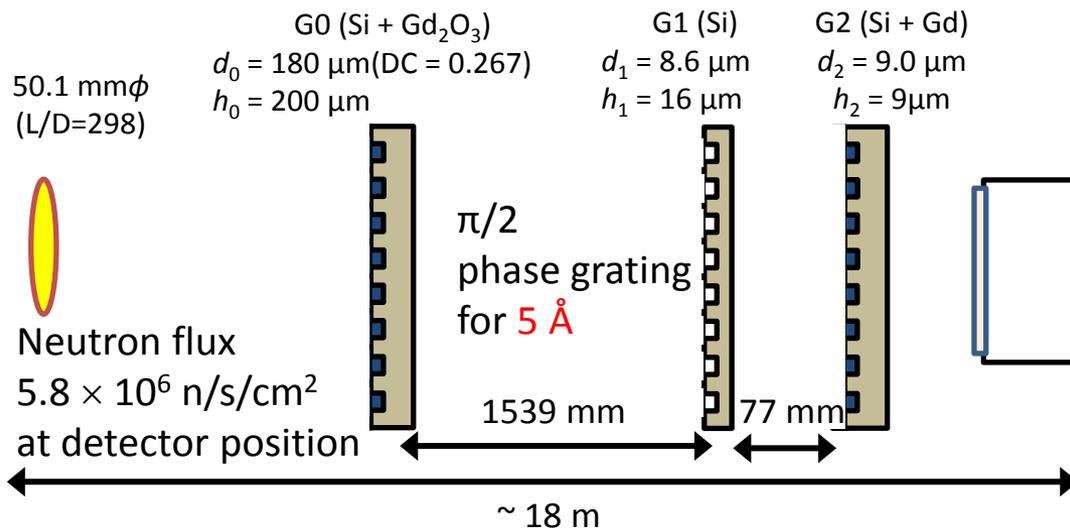
ただし、モアレ縞の位相シフトは波長の2乗に比例 → 位相分散

$$\frac{\Delta\Psi}{\bar{\Psi}} = 2\frac{\Delta\lambda}{\bar{\lambda}}$$

波長分解型Talbot-Lau干渉計の利点

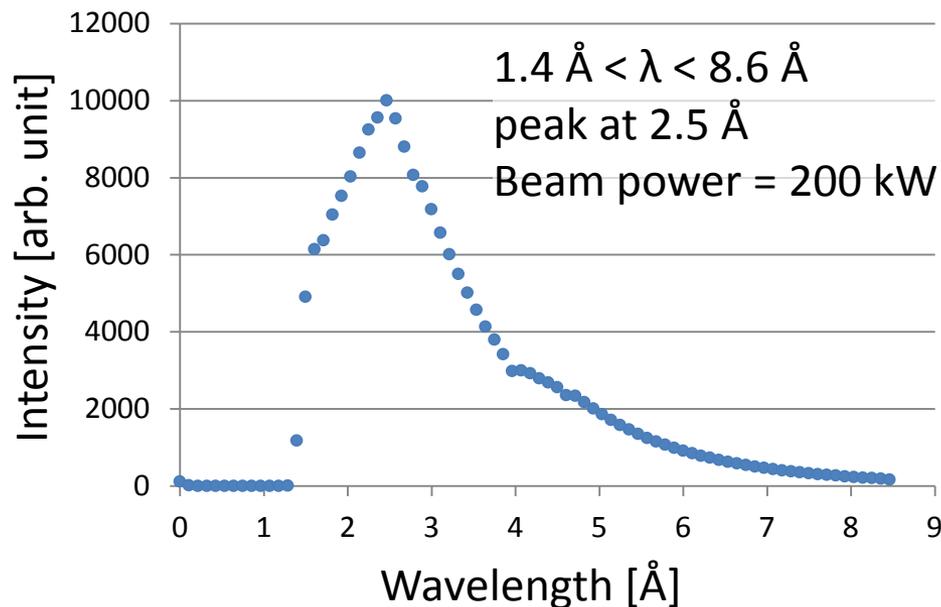
- 広波長幅を高波長分解能で測定可能
→ 高統計 + 位相分散回避 で効率的な位相イメージング
- 波長依存性を利用した解析によって定量的物理量の抽出

波長分解型 Talbot-Lau 干渉計



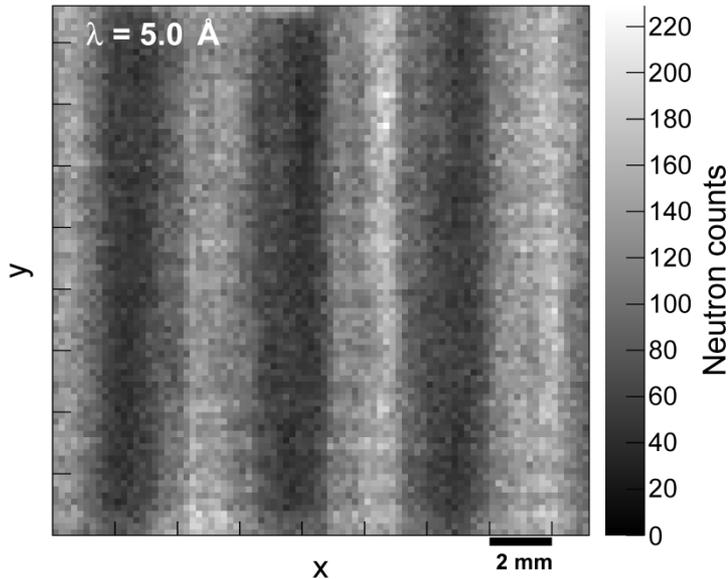
“ μ NID” detector
(Micro-pixel chamber + ³He gas)

$\Delta D = 0.2 \text{ mm}$ (512 \times 512 pix)
 $\Delta t = 0.5 \text{ ms}$
 $\Delta\lambda/\lambda = 4.5\text{-}1.3\%$ (2.5 – 7.5 \AA)
 Efficiency: 18% @ 25 meV

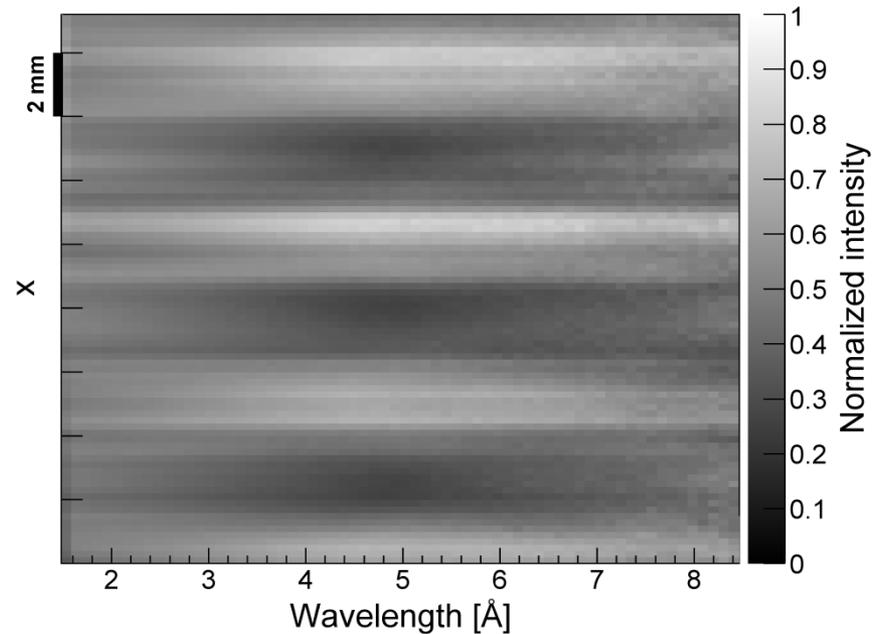


波長分解型Talbot-Lau干渉計のモアレ縞

モアレ縞の2次元分布

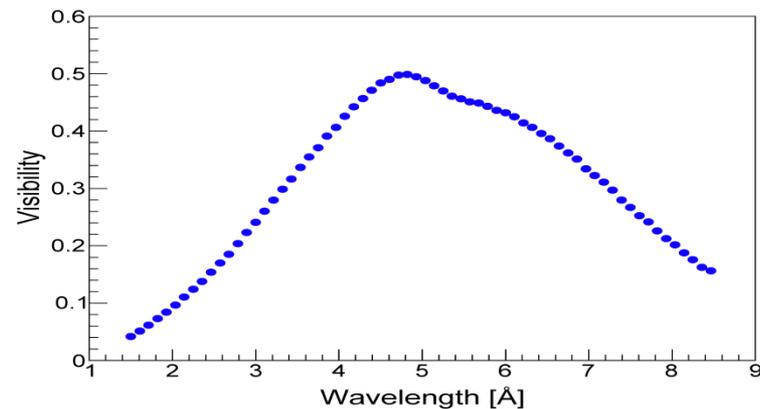


モアレ縞(projected)の波長依存性



モアレ縞は中心波長 5 \AA を中心に連続的に分布.

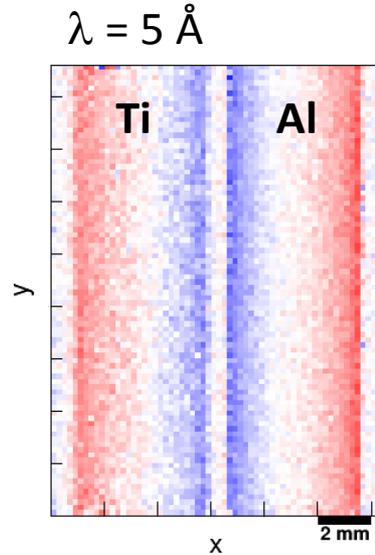
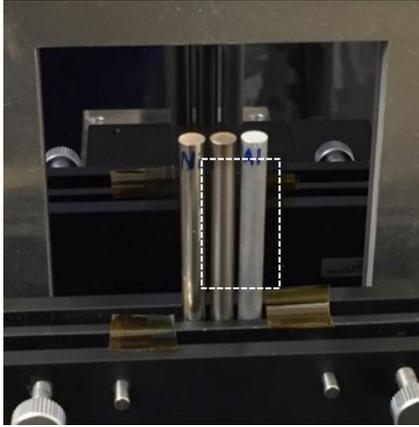
visibilityの波長依存性



微分位相像の波長分解解析

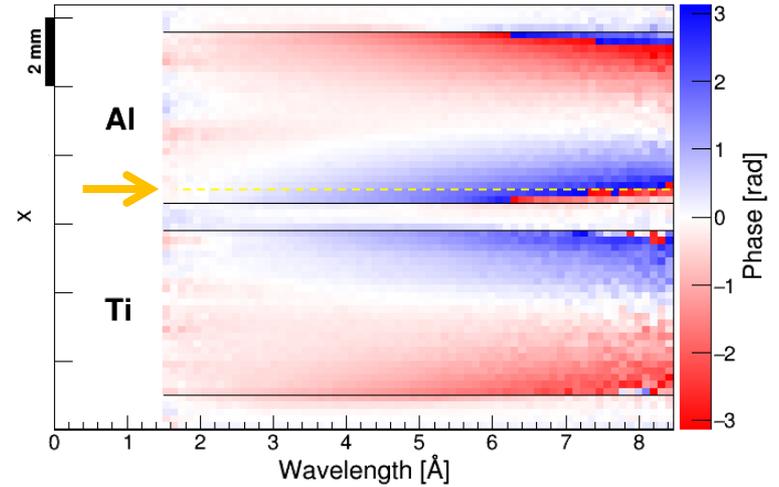
テストサンプル

(Ni,) Ti, Al rods ($\phi = 5$ mm)



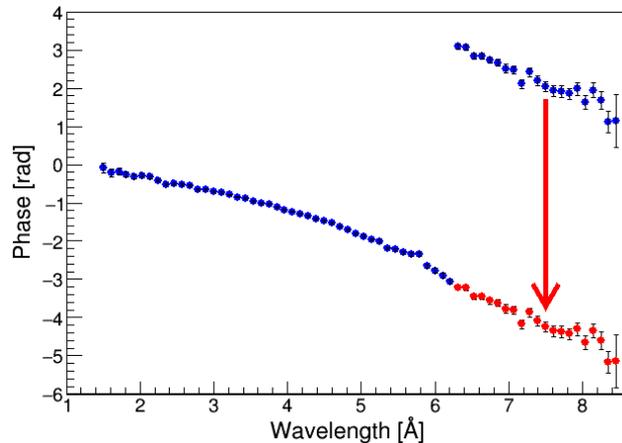
微分位相像 (projected) の波長依存性

微分位相 $\Psi \propto \lambda^2$



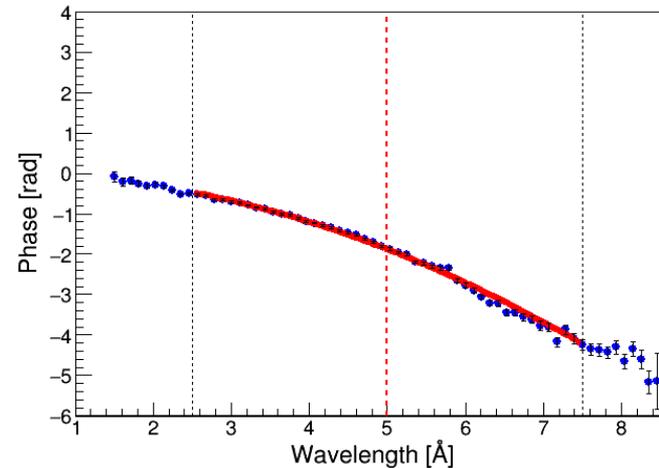
波長分解解析

1. $\Psi(\lambda)$ の 2π -wrapping を補正



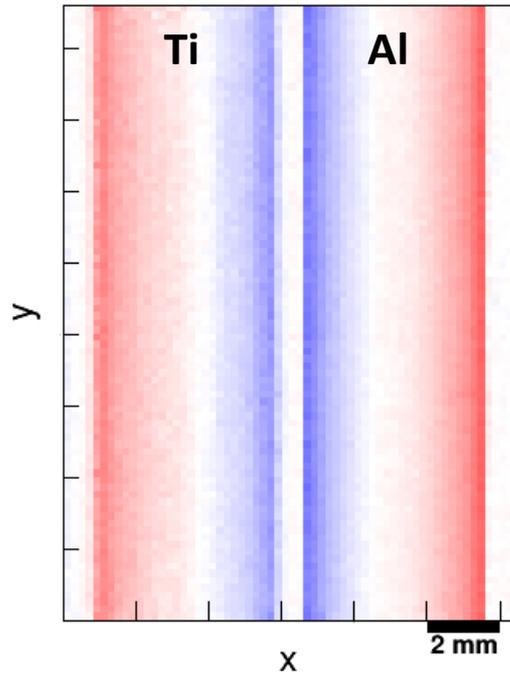
2. 放物線fitting

中心波長での微分位相 $\bar{\Psi} \equiv \Psi(\bar{\lambda})$ を計算

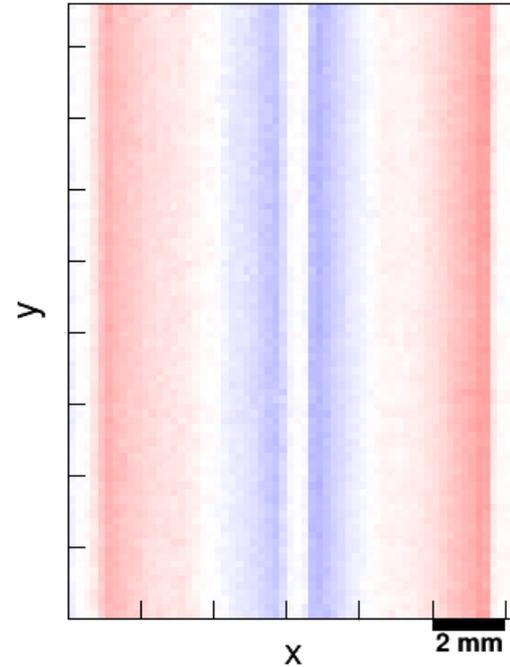


解析手法による微分位相像の定量性の比較

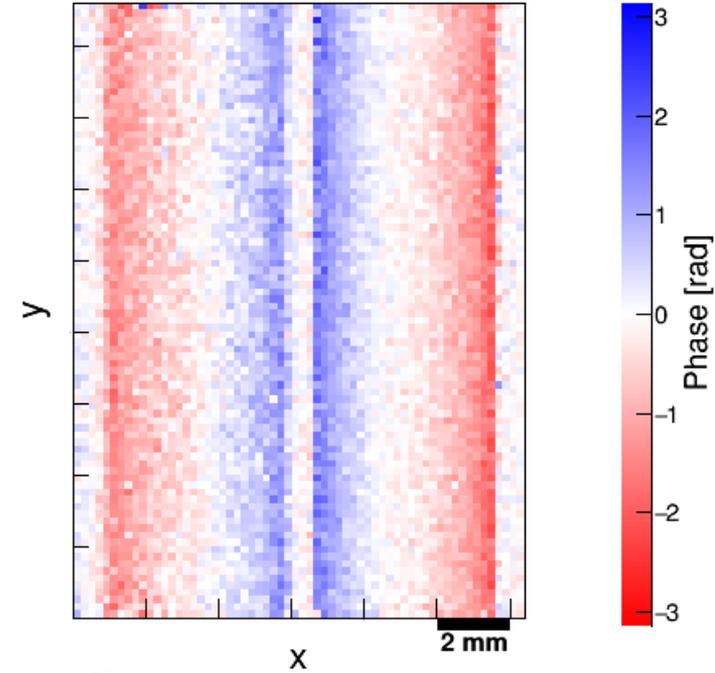
$\lambda = 2.5-7.5 \text{ \AA}$ (TOF)



$\lambda = 2.5-7.5 \text{ \AA}$ (integrated)



$\lambda = 5.0 \text{ \AA}$ (2%)



微分位相 Ψ の理論曲線をfittingして、
サンプルの光学ポテンシャルを求める。

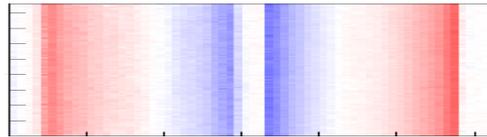
$$\Psi_{\text{th}} = -\frac{R_s}{R_1} \frac{z_{12}}{d_2} \lambda^{-2} \frac{m}{\pi \hbar^2} V_{\text{op}} \frac{x - x_0}{\sqrt{r^2 - (x - x_0)^2}}$$

V_{op} : 光学ポテンシャル
 $\bar{\lambda}$: 中心波長
 r : ロッド半径
 x_0 : ロッド中心位置
 R_s : サンプル位置
 R_1 : G1位置
 z_{12} : G1-G2間距離
 d_2 : G2ピッチ

解析手法による微分位相像の定量性の比較

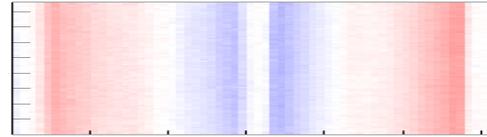
$\lambda = 2.5\text{-}7.5 \text{ \AA}$ (TOF)

$\bar{\lambda} = 5.0 \text{ \AA}$



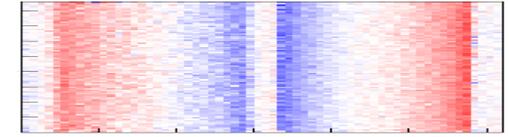
$\lambda = 2.5\text{-}7.5 \text{ \AA}$ (integrated)

$\bar{\lambda} = 3.8 \text{ \AA}$

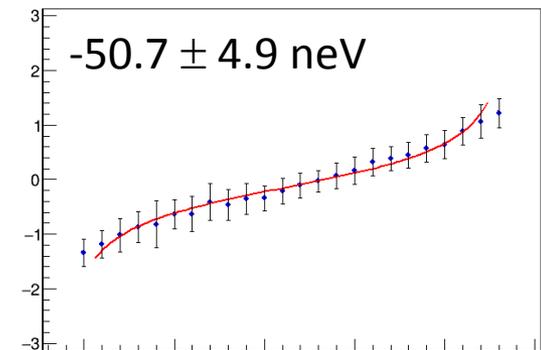
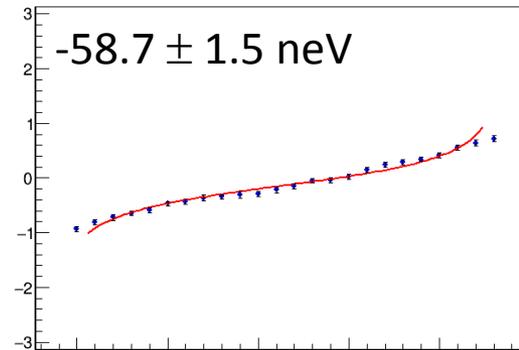
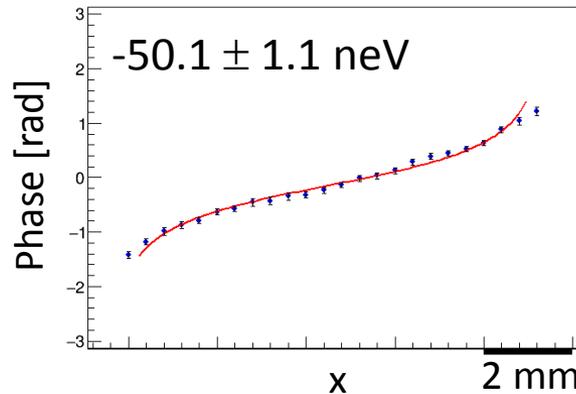


$\lambda = 5.0 \text{ \AA}$ (2%)

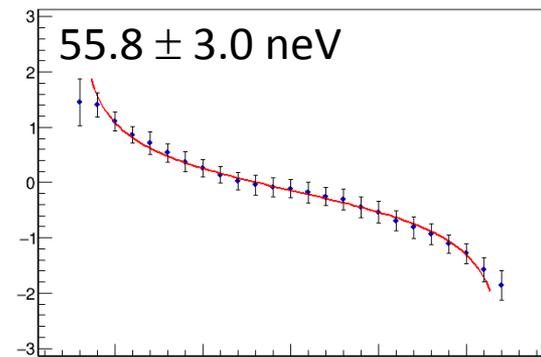
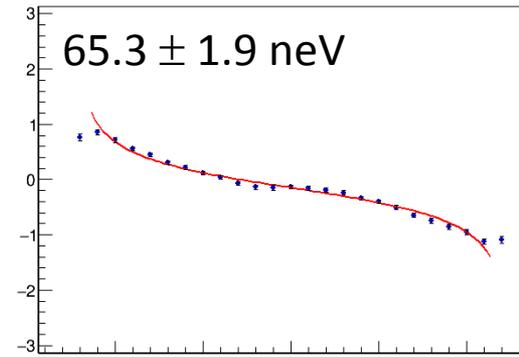
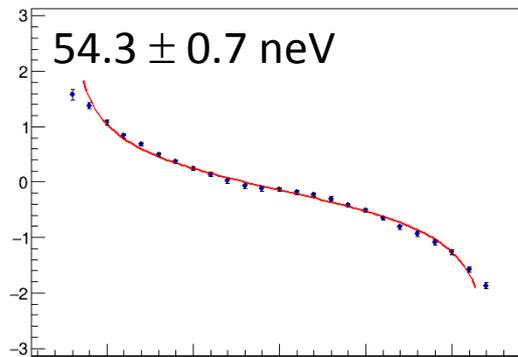
$\bar{\lambda} = 5.0 \text{ \AA}$



Ti (-50.7 neV)



Al (54.1 neV)



→ 波長分解測定によって、高精度かつ高確度な位相イメージングが実現

応用測定例

電磁鋼板サンプル1

中性子は磁気モーメントを持ち、
磁場に有感

磁気ポテンシャル 位相シフト

$$V_{\text{mag}} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}(\vec{r}) \quad \rightarrow \quad \Phi_{\text{mag}} = \frac{\mu B m \lambda D}{2\pi \hbar^2}$$

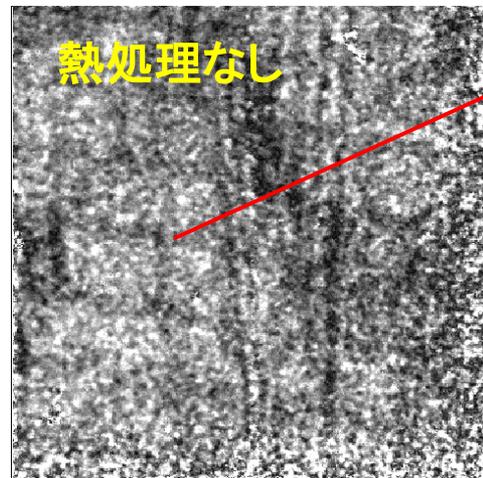
磁性体材料への応用が可能

熱処理加工による
電磁鋼板内部の
磁区構造の変化

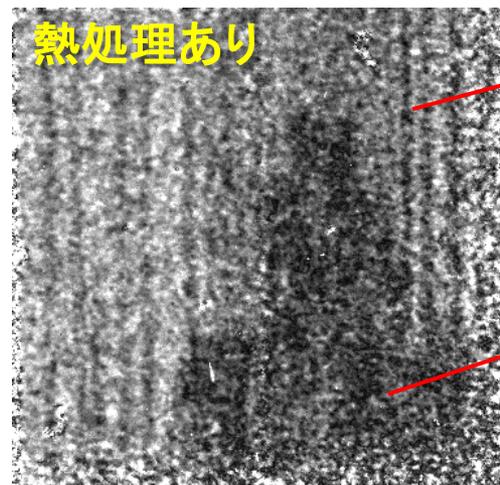
t = 0.25 mm



Visibility-contrast image

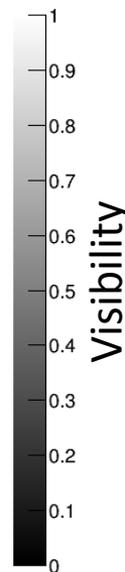


レーザー
加工痕



磁壁

補助
磁区

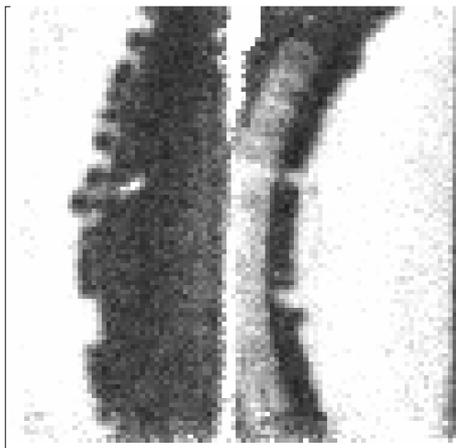


→ 熱処理による局所的な
補助磁区の形成を可視化

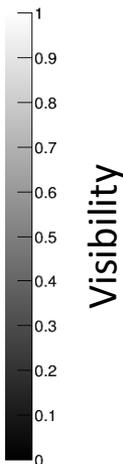
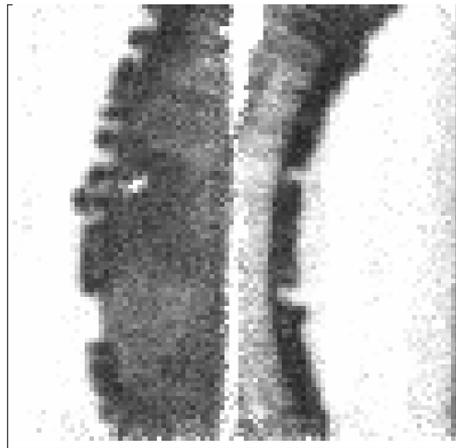
電磁鋼板サンプル2 (+ コイル)

磁場印加による磁区構造の変化

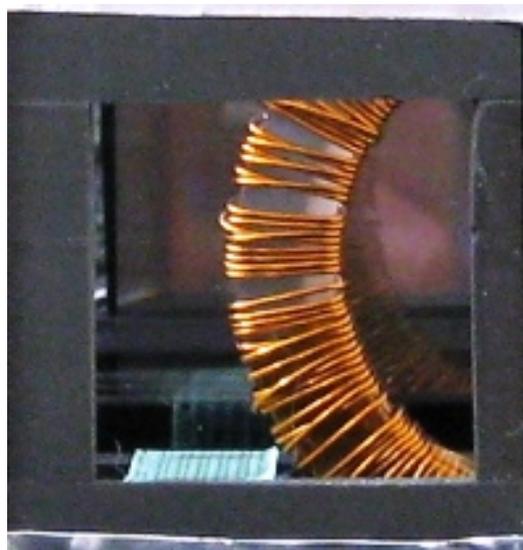
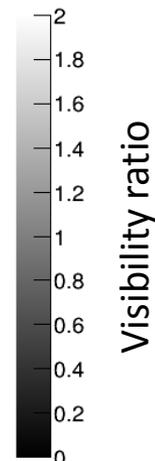
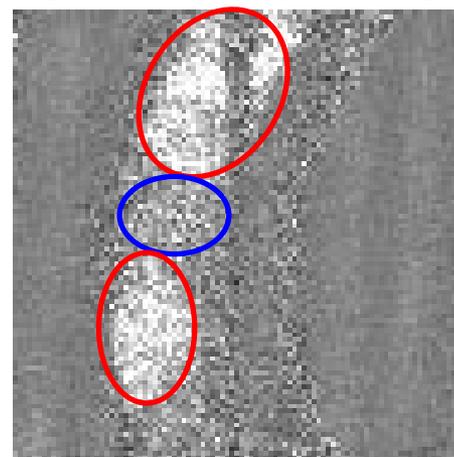
$I = 0 \text{ A}$



$I = 1.6 \text{ A}$



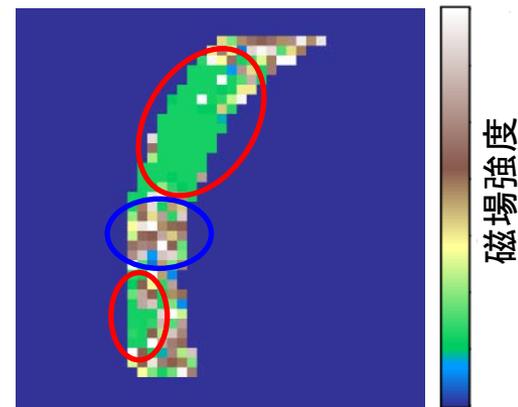
$(I = 1.6 \text{ A}) / (I = 0 \text{ A})$



形成される磁区構造のサイズの違いを可視化

大きな磁区 → visibility **向上**

微細磁区 → visibility **変化小**



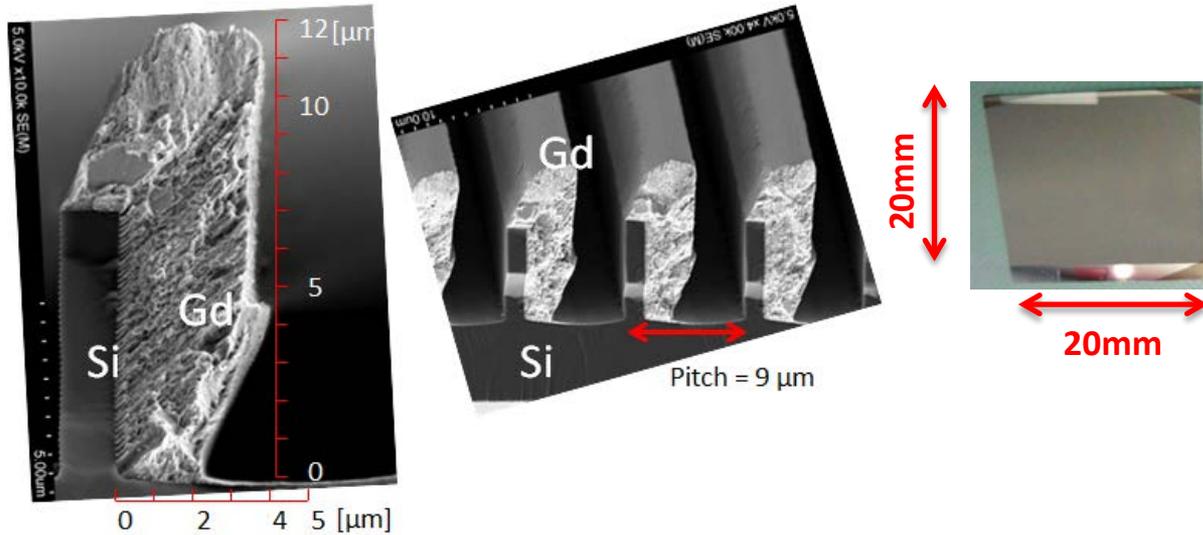
中性子偏極度イメージングの結果と一致

まとめ

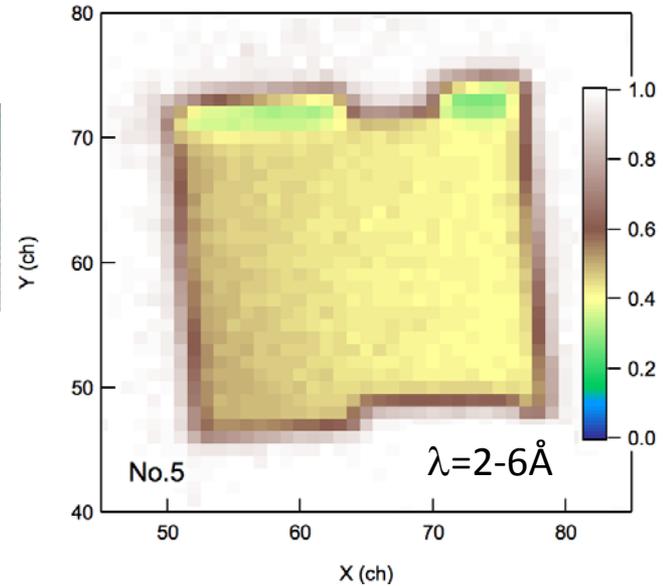
- J-PARC RADENにおいて、精密位相イメージングのための**波長分解型中性子 Talbot-Lau干渉計**の開発を進めている。
- 高アスペクト比吸収格子を開発し、幅広い波長域 ($\Delta\lambda/\bar{\lambda} \simeq 1$) にわたって明瞭なモアレ縞を観測することに成功した。
- 波長分解型Talbot-Lau干渉計を用いて、**広波長幅**(2.5-7.5 Å)と**高波長分解能**($\sim 3\%$)を同時に実現する測定を行い、**高精度かつ高確度**な金属ロッドの微分位相像を得た。
- 波長依存性を利用する位相解析手法はTalbot-Lau干渉計の**ダイナミックレンジ**を拡大することができる。
- ビジビリティイメージングにより、電磁鋼板の**磁区構造**を可視化できる。

Fabrication of absorption grating with fine pitch (G2)

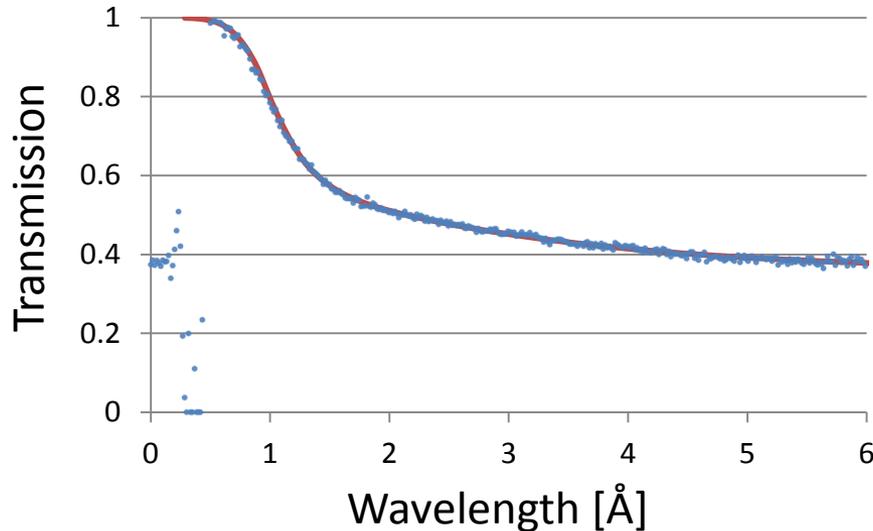
Gd evaporation method



Neutron transmission image



Wavelength dependence of neutron transmission



Effective Gd thickness **9.0 μm**
Duty cycle 0.36

(On the assumption of
ideal shape of Ronchi grating)



Fabrication of Absorption Grating



MOMOSE QUANTUM BEAM
PHASE IMAGING PROJECT



Gd based metallic glass imprinting

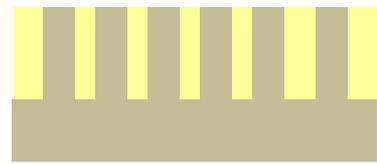
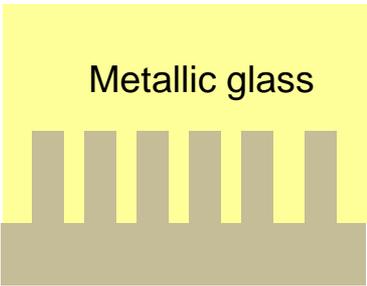
W. Yashiro et al., APEX, 7 (2014) 032501.

W. Yashiro et al., JJAP, 55 (2016) 048003.

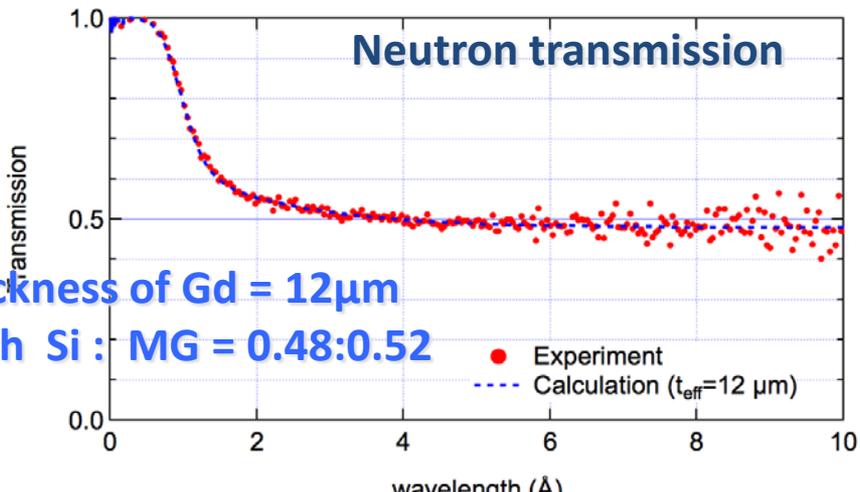
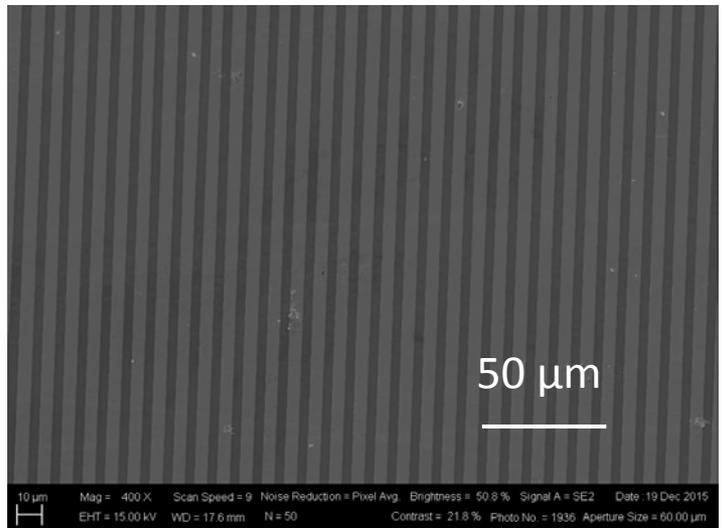
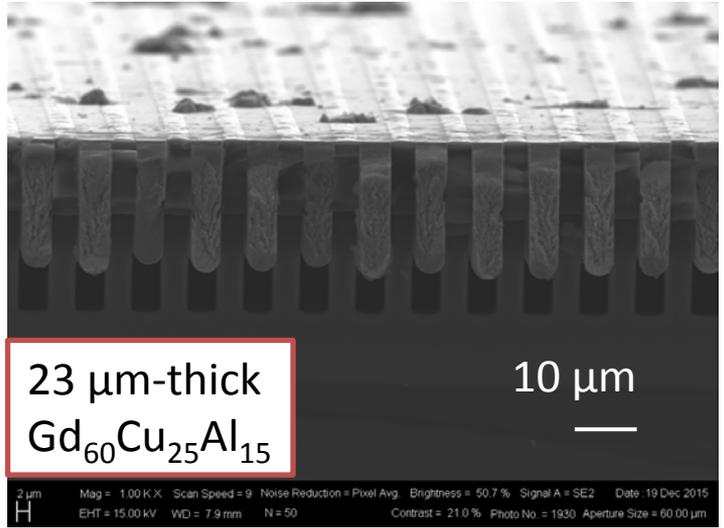
ICP etching



Imprinting



Etching extra glass
by ion beam
milling process



Effective thickness of Gd = 12 μm
Grating width Si : MG = 0.48:0.52



小型・中型中性子源での展開

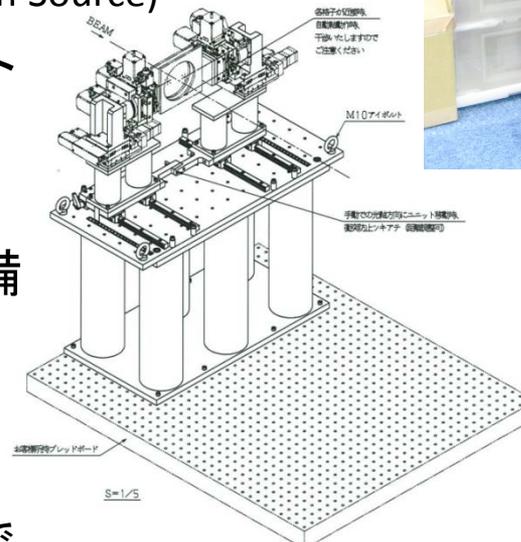
KUANS

(Kyoto University Accelerator-driven compact Neutron Source)

- 3.5 MeV 陽子ライナック + Be ターゲット
- Pulsed beam
- Thermal neutron flux $\sim 4 \times 10^4$ n/cm²/s

干渉イメージング実験のための環境を整備

- 可搬型干渉計ステージ
- 可搬型CCDカメラ + 暗箱
- G2透過率測定



来年度からは京大炉で
イメージング実験を行う

KURRI

(Kyoto University Research Reactor Institute)

- 低速中性子線評価ポート CN-3
- Continuous beam
- Thermal neutron flux $\sim 4 \times 10^6$ n/cm²/s @ 1 MW

J-PARC RADEN
Thermal neutron flux
 $\sim 6 \times 10^7$ n/cm²/s @ 1 MW

Talbot效果 (振幅格子)

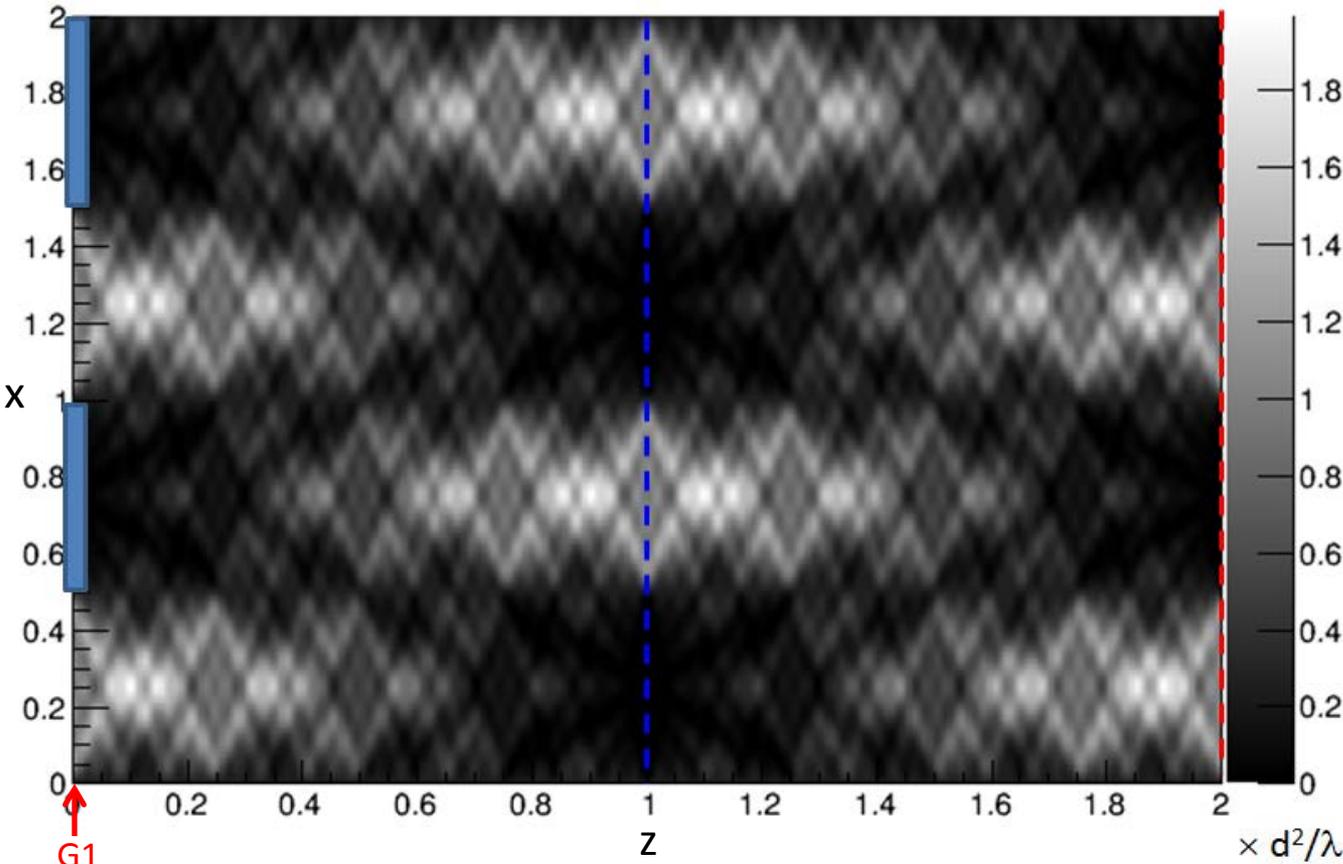
回折格子透過関数

$$T(x) = \sum a_n \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right)$$

Fresnel 回折積分

Fresnel 回折場

$$E(x, z) = \sum a_n \exp\left(-i\pi \lambda z \frac{n^2}{d^2}\right) \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right)$$

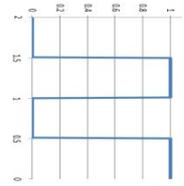
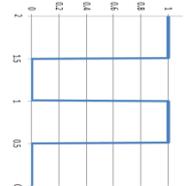
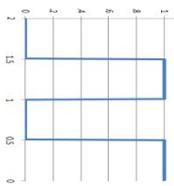


d : 回折格子周期
 λ : 波長

$$E(x, 2d^2/\lambda) = \sum a_n \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right) = T(x) \quad \text{自己像}$$

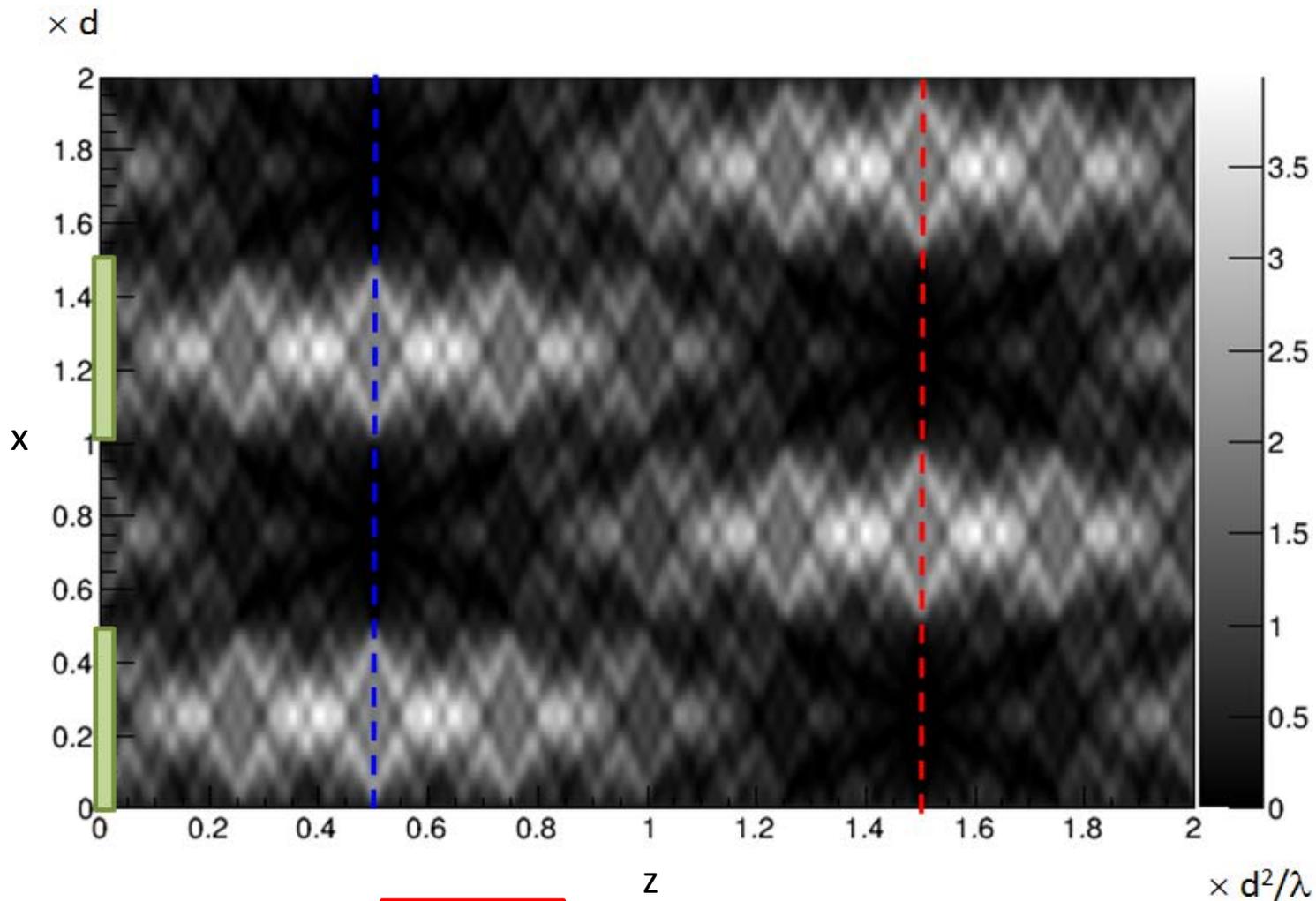
$$z = p \frac{d^2}{\lambda}$$

p : Talbot次数 (整数)



Talbot効果 (π/2位相格子)

Talbot-Lau干渉計には位相格子を用いる。

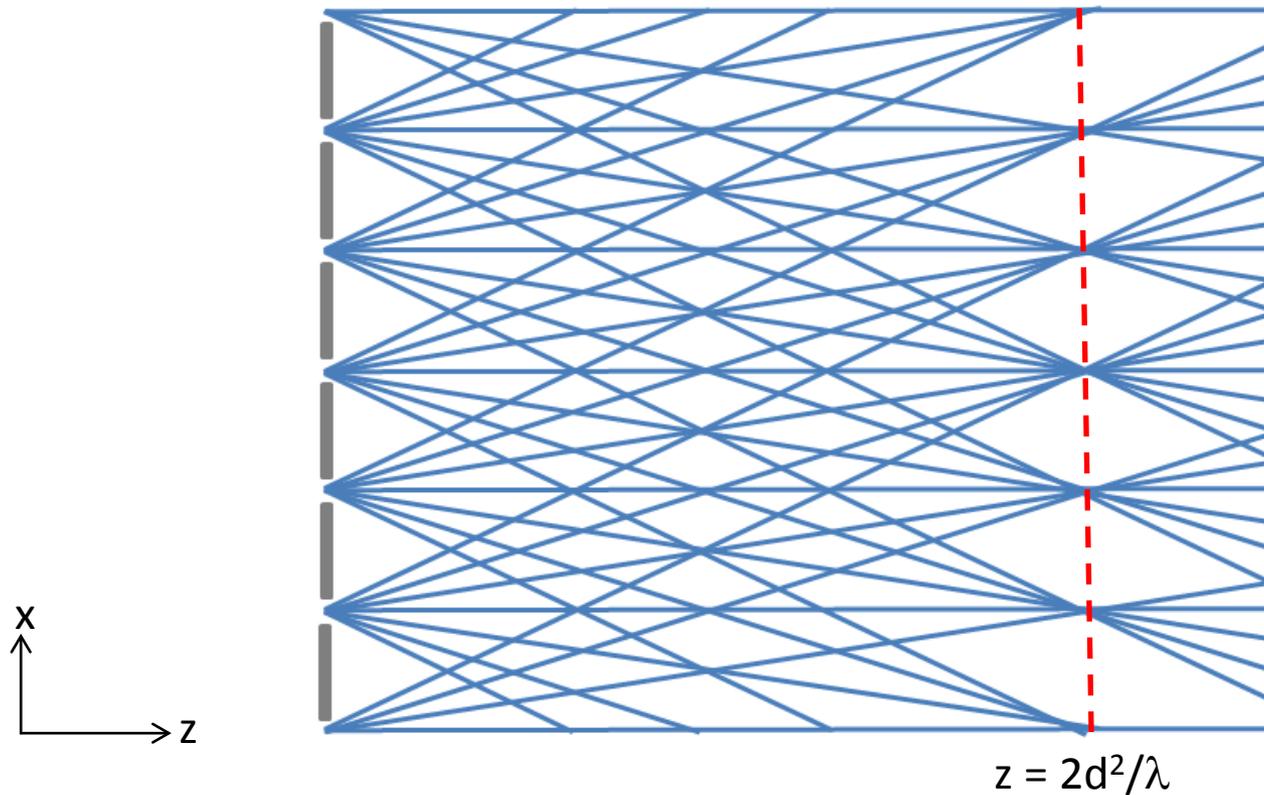


$$z = p \frac{d^2}{\lambda}$$

p: Talbot次数 (1/2, 3/2, ...)

Talbot効果の幾何光学的解釈

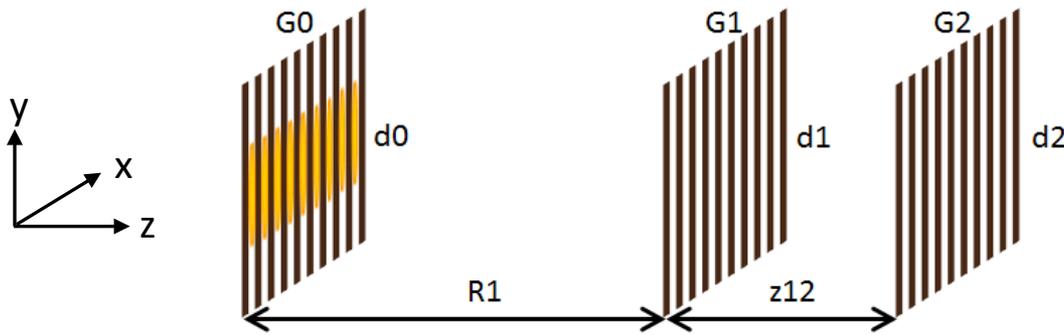
n次回折光足し合わせ



$$E(x, z) = \sum_n a_n \exp\left(-i\pi\lambda z \frac{n^2}{d^2}\right) \exp\left(i2\pi \frac{n}{d} x\right)$$
$$= \sum_n a_n \exp[i(k_{nz} - k)z] \exp[ik_{nx}x]$$

$$\left[\begin{array}{l} \theta_n = \lambda \frac{n}{d} : n\text{次回折角} \\ k_{nx} = k\theta_n \\ k_{nz} = k\left(1 - \frac{1}{2}\theta_n^2\right) \end{array} \right.$$

格子のアライメント条件



d_0, d_1, d_2 : Grating pitches
 R_1 : Distance G0-G1
 Z_{12} : Distance G1-G2
 λ : Wavelength
 p : Talbot order

- Talbot condition:
Put G2 on the self-image position.

$$z_{12} = p \frac{d_1^2}{\lambda} M$$

$p = 1$ (G1: Absorption grating)
 $1/2$ (G1: $\pi/2$ phase grating)
 $1/8$ (G1: π phase grating)

- Lau condition:
Superpose self-images from each line source of G0 constructively.

$$\frac{d_0}{d_2} = \frac{R_1}{z_{12}}$$

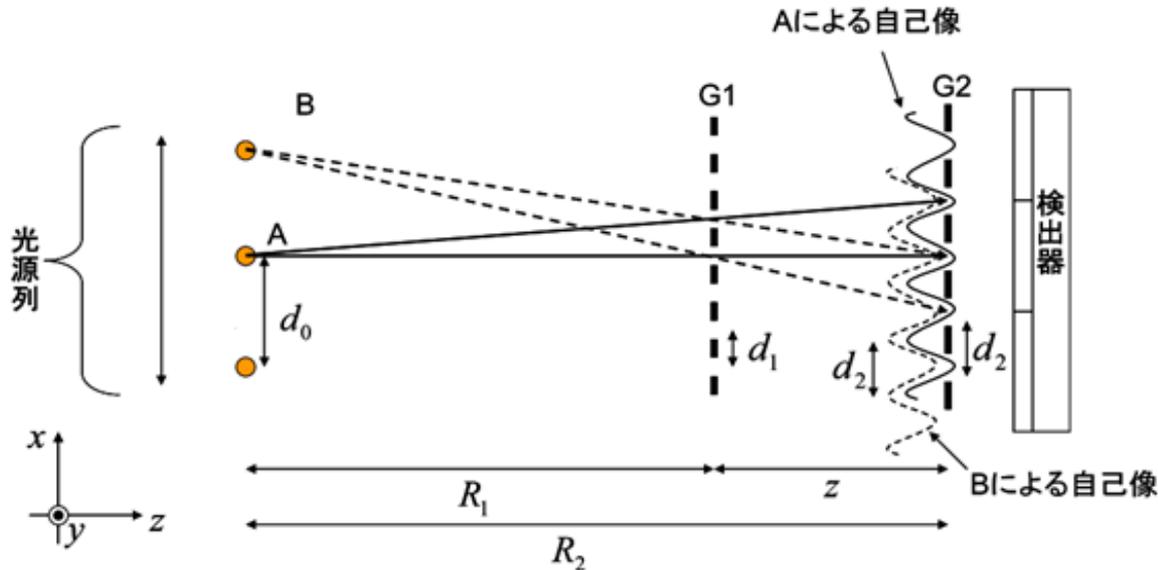
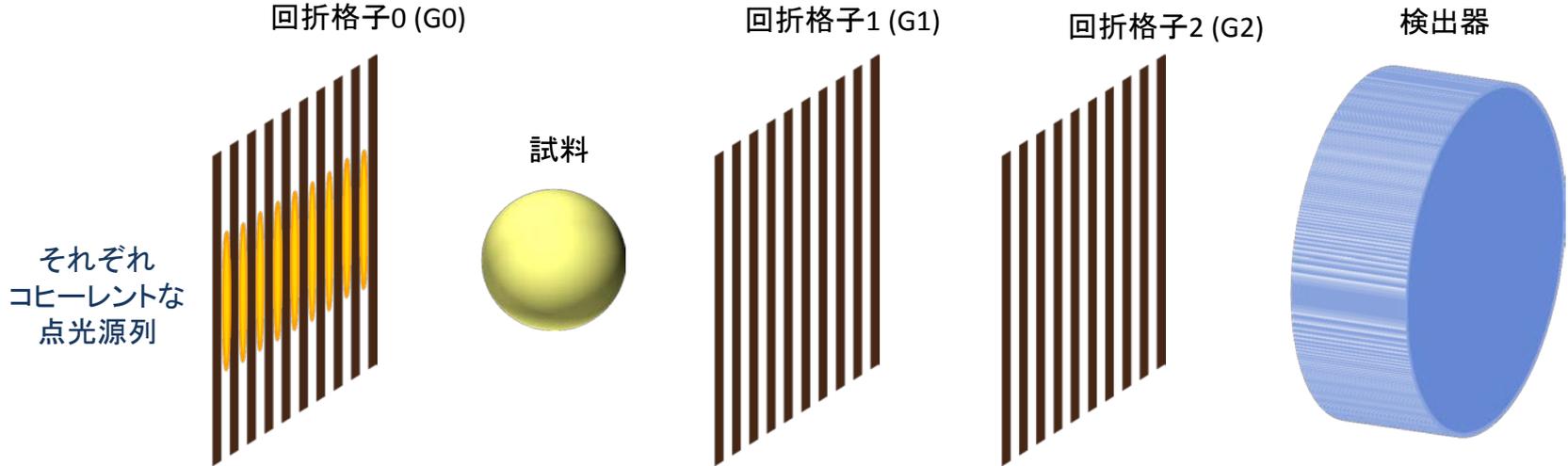
- Magnification due to spherical wave propagation

$$d_2 = d_1 M$$

$$M := \frac{R_1 + z_{12}}{R_1}$$

Lau 効果

Talbot効果の自己像をインコヒーレントにし合わせる → Talbot-Lau干渉計
 高統計化: 中性子では必須



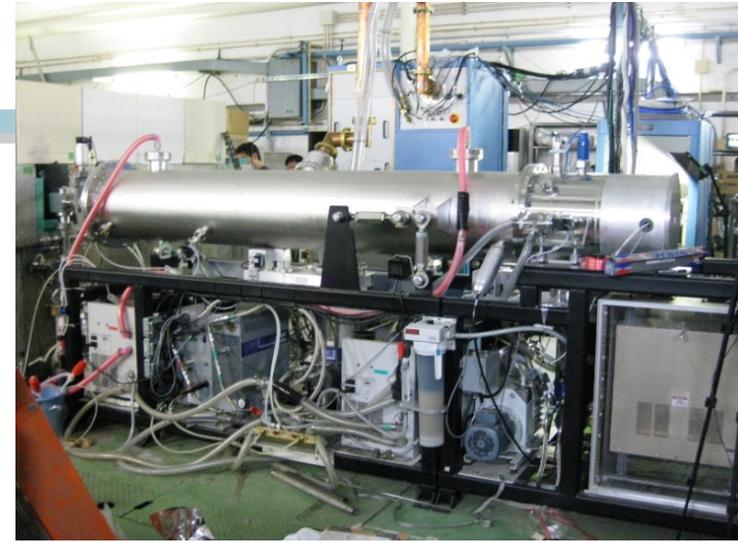
$$\frac{d_0}{d_2} = \frac{R_1}{z_{12}}$$

小型中性子源での展開

KUANS

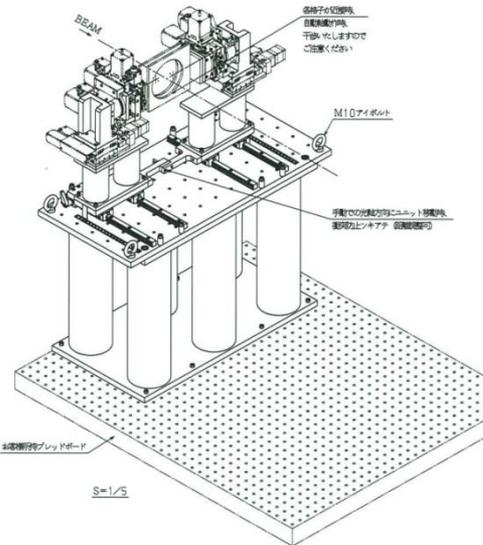
(Kyoto University Accelerator-driven compact Neutron Source)

- 3.5 MeV 陽子ライナック + Be ターゲット
- Total intensity $\sim 10^{11}$ n/s

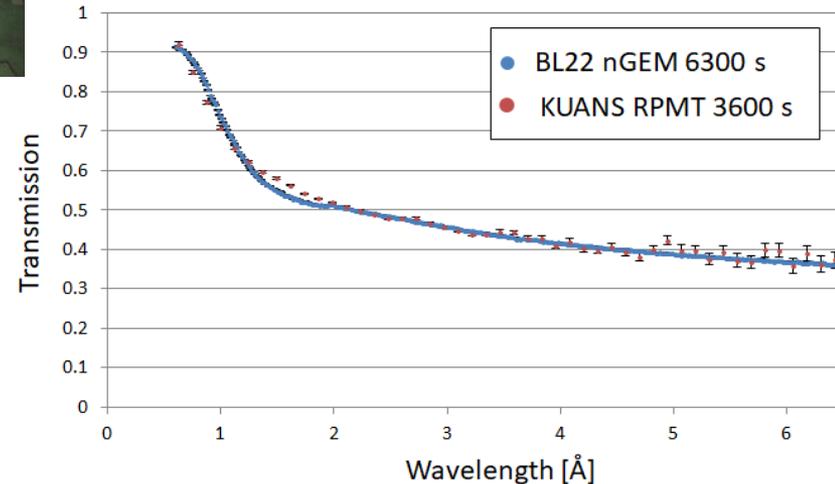


干渉イメージング実験のための環境を整備

- ・光学定盤
- ・可搬型干渉計ステージ
- ・可搬型CCDカメラ+暗箱

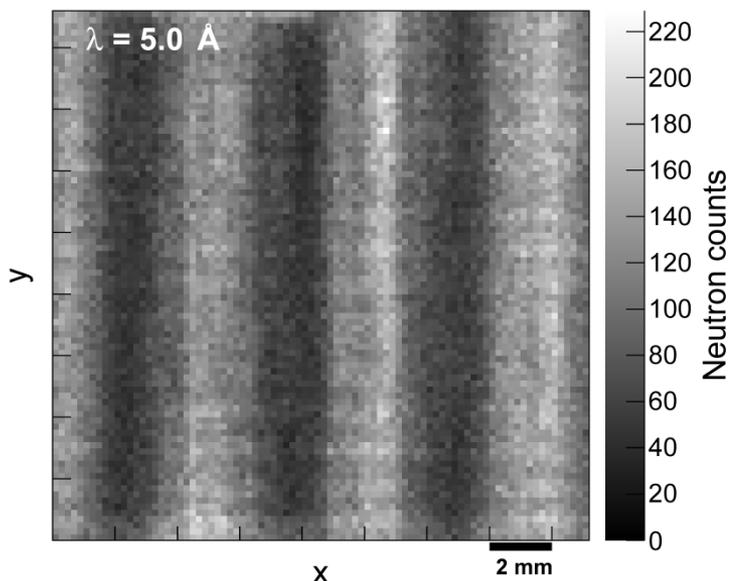


J-PARC RADENと同様の
波長分解による
G2透過率測定に成功

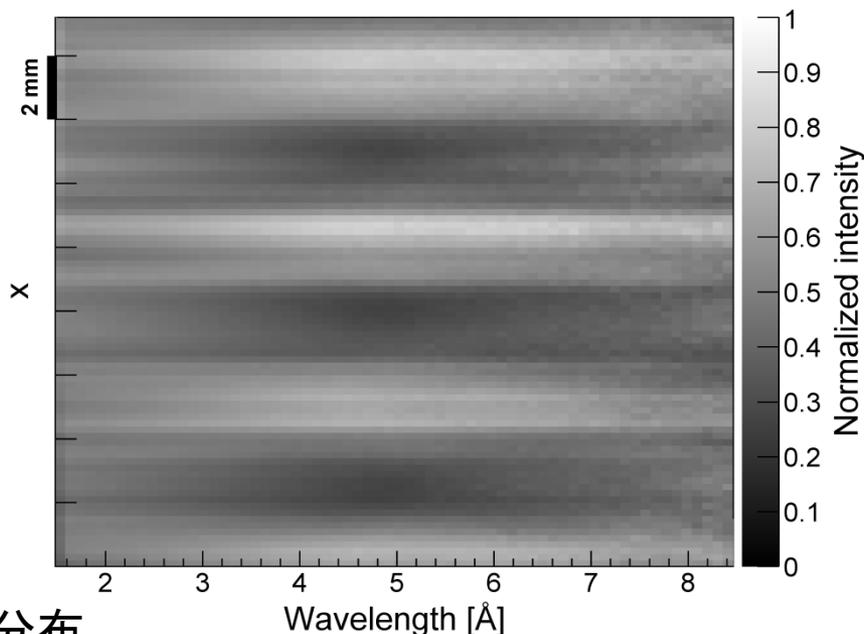


波長分解型Talbot-Lau干渉計のモアレ縞

モアレ縞の2次元分布



モアレ縞(projected)の波長依存性



モアレ縞は中心波長 5 \AA を中心に連続的に分布.

TOFによって,

広波長領域 ($2.5\text{-}7.5 \text{ \AA}$) を

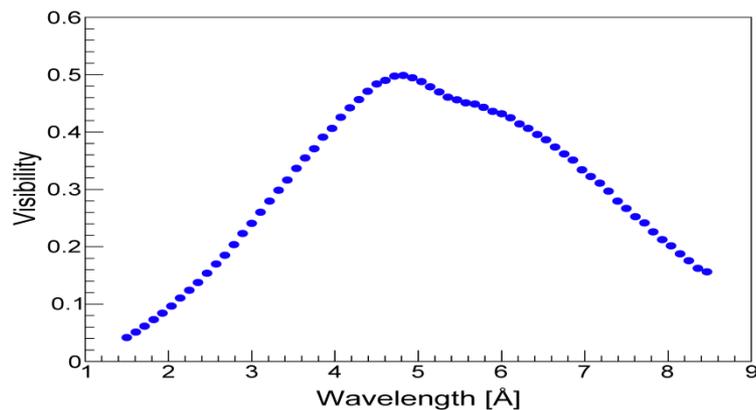
高波長分解能 ($4.3\text{-}1.4\%$) で測定する.



位相の系統誤差
を抑えつつ,
高統計を得る.

$$\Delta\Psi = \frac{2\Delta\lambda}{\bar{\lambda}} \bar{\Psi}$$

visibilityの波長依存性



測定される物理量

微分位相イメージング

Phase of moiré fringe $\varphi(x, y) \propto \lambda^2 \frac{\partial}{\partial x} \int b(x, y) \rho(x, y) dz$

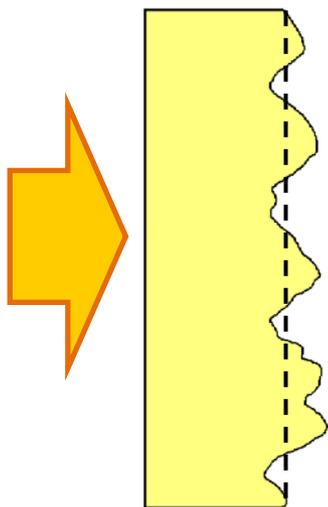
ビジビリティイメージング

Damping factor of visibility $\eta \simeq \exp[-\sigma_\Phi^2(x, y)\{1 - \gamma(x, y; -pd_1)\}]$

Autocorrelation function $\gamma(x, y; \Delta x) \simeq \exp\left[-\left\{\frac{|\Delta x|}{\xi(x, y)}\right\}^{2H}\right]$

[b : Scattering length, ρ : Atomic density,
 σ_Φ^2 : Standard deviation of phase, ξ : Correlation length, H : Hurst parameter

Neutron beam



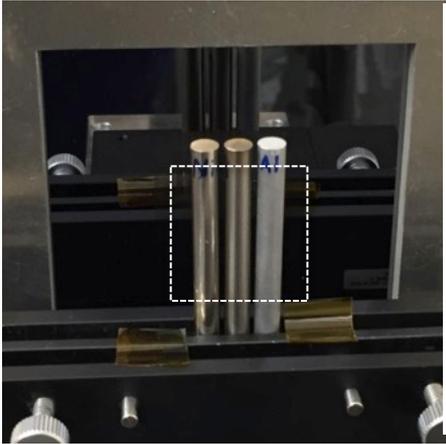
$$\Phi(x, y) = \underbrace{\Phi_s(x, y)} + \underbrace{\Phi_f(x, y)}$$

Phase shift
due to
averaged structure

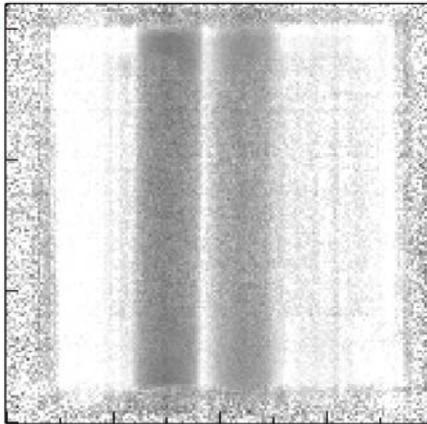
Phase shift
due to
microstructures

Phase imaging with TOF method

Ni, Ti, Al rods ($\phi=5\text{mm}$)

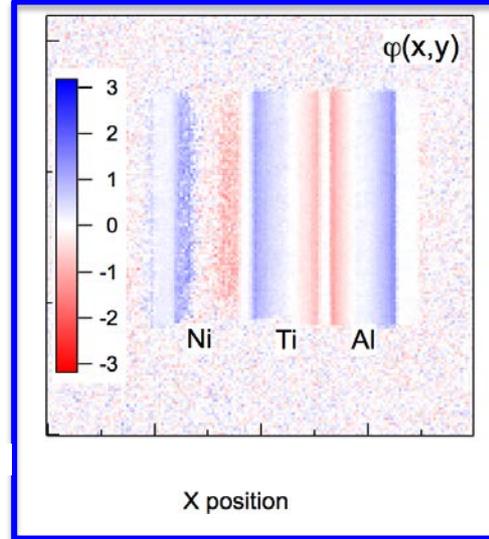


Absorption



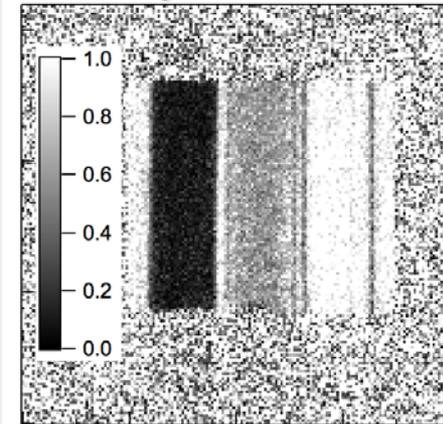
X position

Differential Phase



X position

Visibility



X position

