

# 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

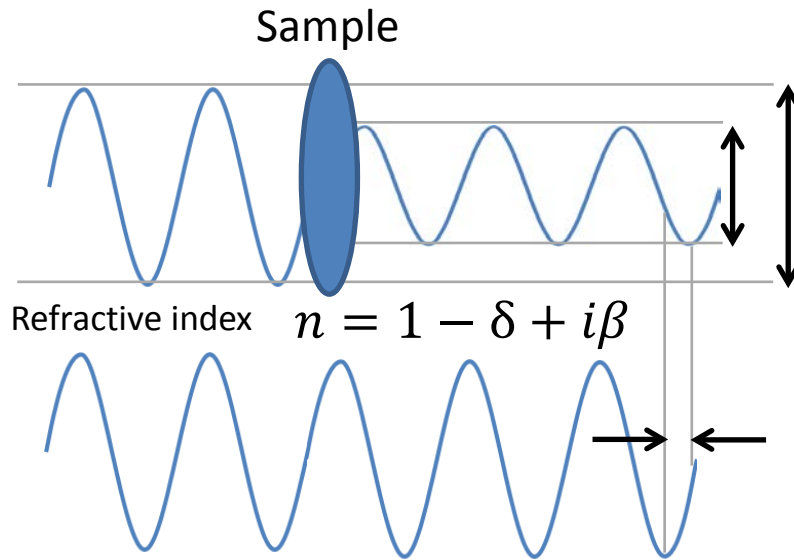
関義親<sup>1</sup>, 篠原 武尚<sup>1</sup>, 上野 若菜<sup>1</sup>, J.D. Parker<sup>2</sup>, 松本 吉弘<sup>2</sup>,  
佐本 哲雄<sup>3</sup>, 矢代 航<sup>3</sup>, 百生 敦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>JAEA, <sup>2</sup>CROSS, <sup>3</sup>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

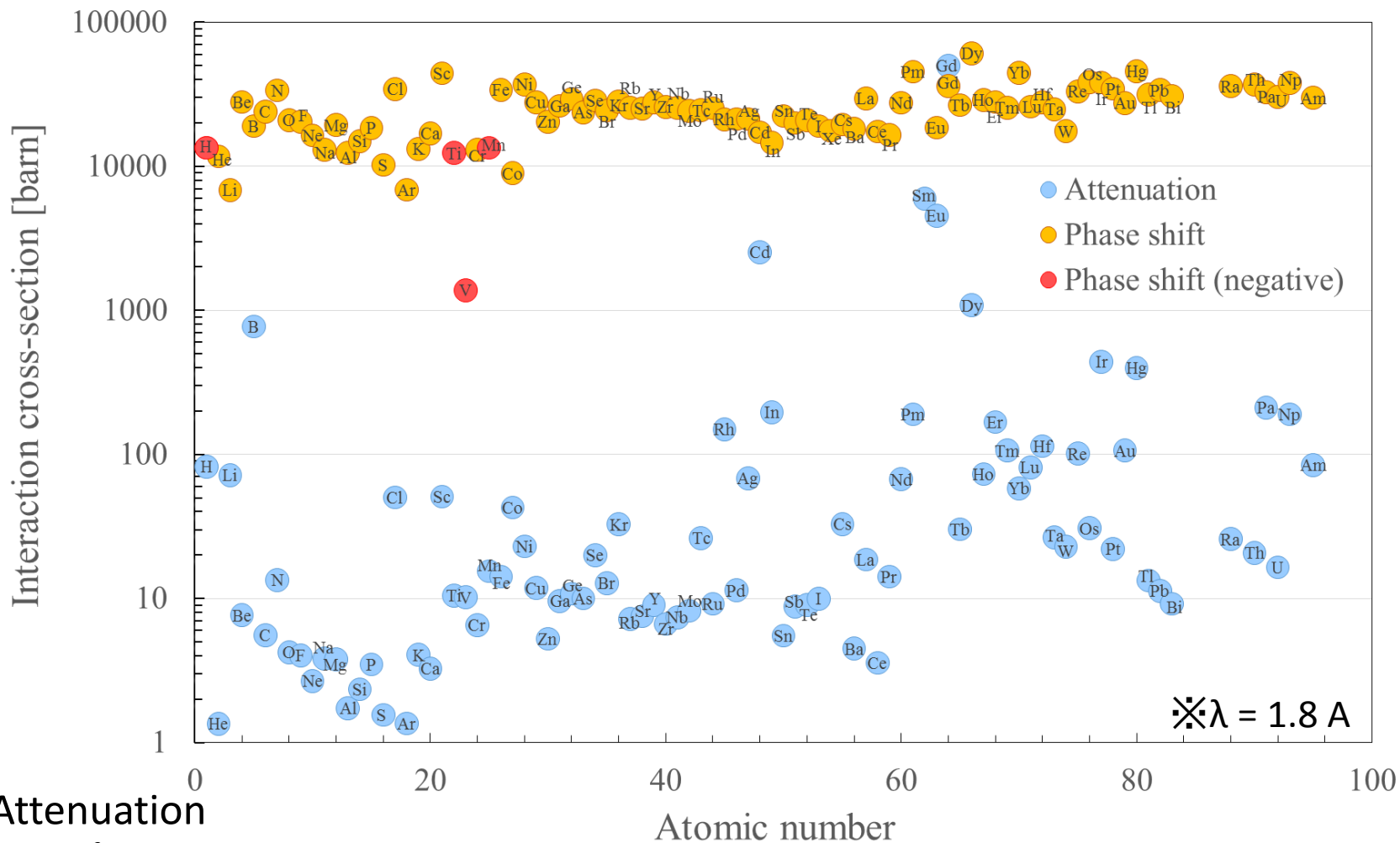
$\lambda$  : Wavelength

$\sigma_a$  : Absorption scattering cross section

$\sigma_s$  : 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

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

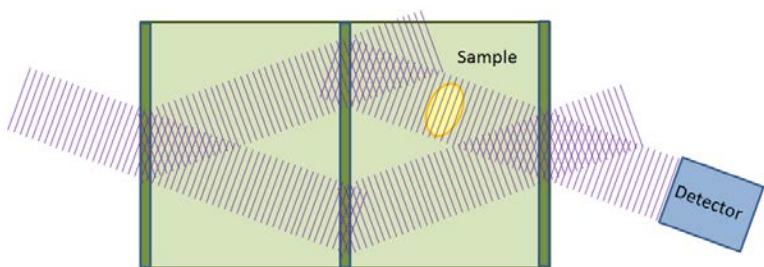
Phase shift

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

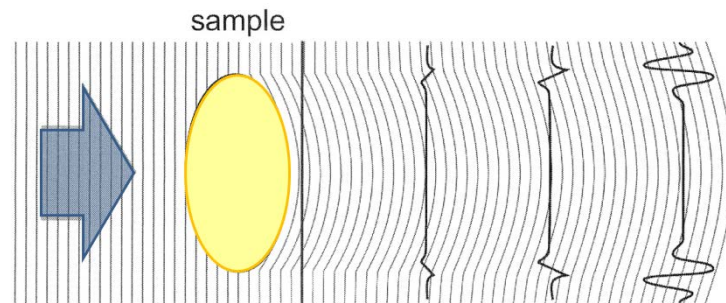
位相イメージングは吸収イメージングの  
100-1000倍高感度

# 中性子位相イメージングの手法

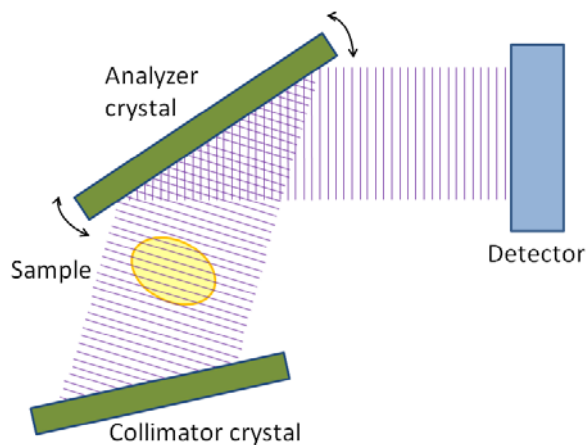
- Si単結晶干渉計  $\Phi$



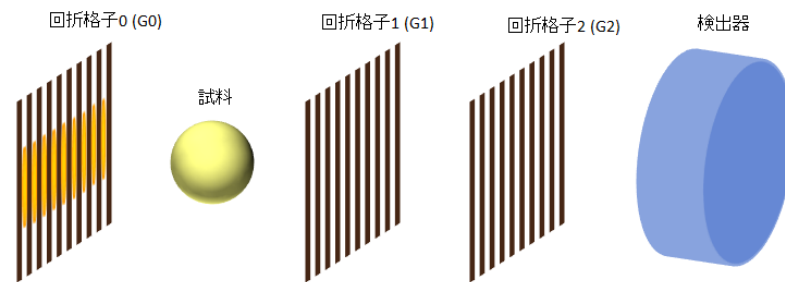
- 伝播法  $\nabla^2\Phi$



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

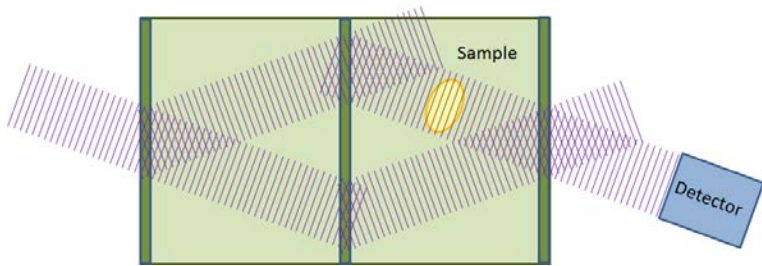


- Talbot-Lau 干渉計  $\partial\Phi/\partial x$

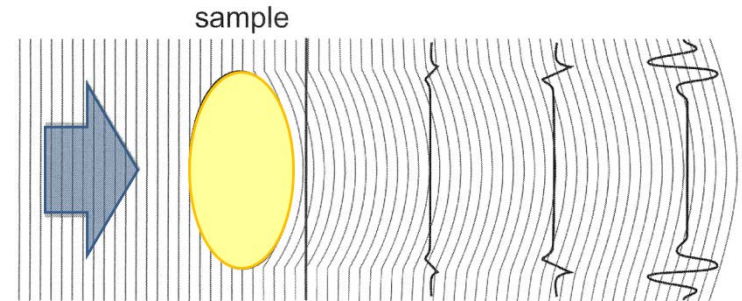


# 中性子位相イメージングの手法

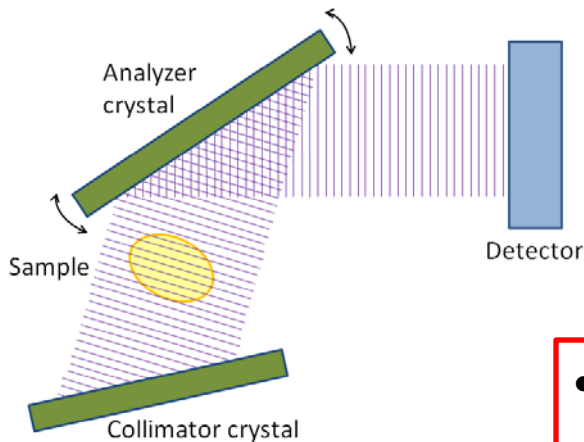
- Si単結晶干渉計  $\Phi$



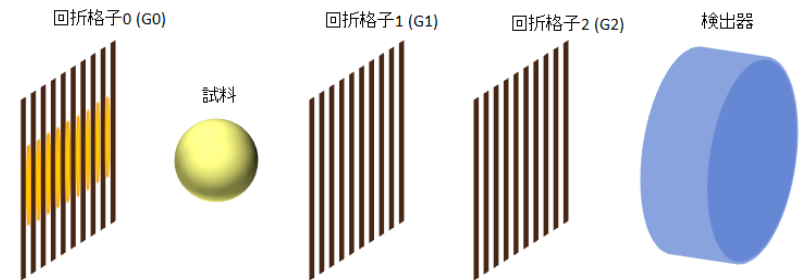
- 伝播法  $\nabla^2\Phi$



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

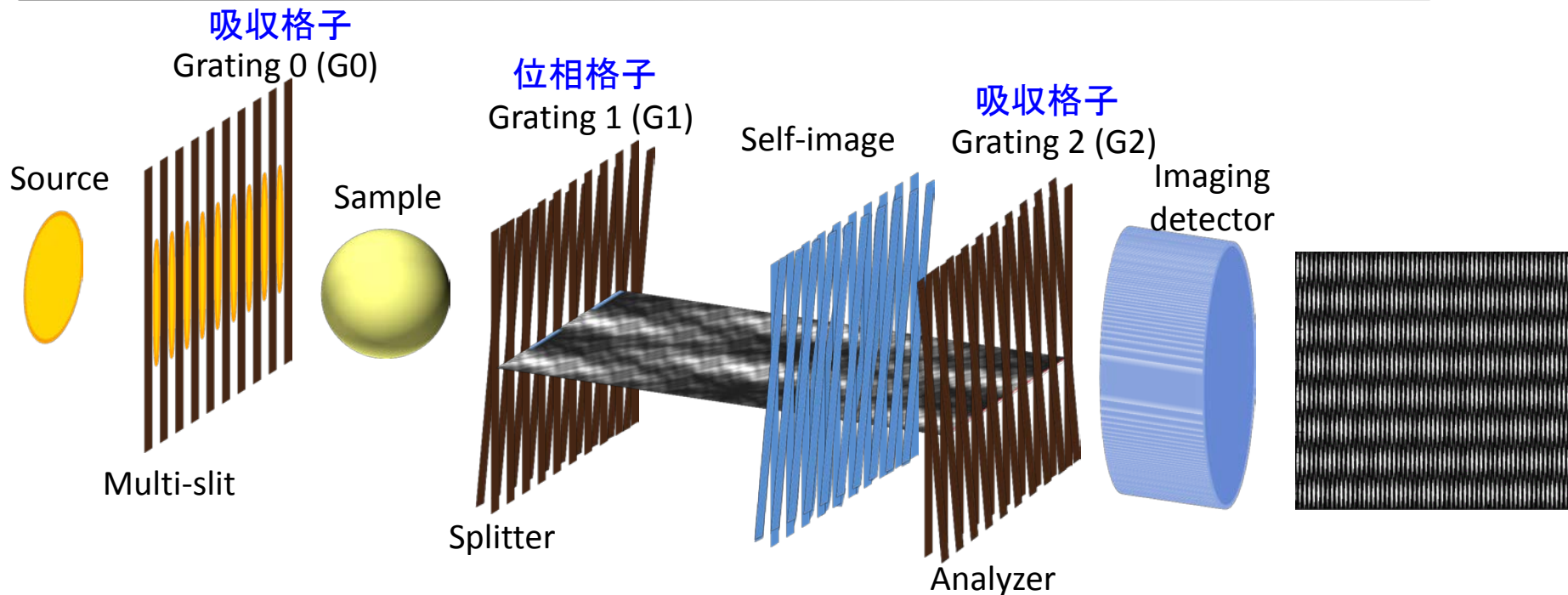


- Talbot-Lau 干渉計  $\partial\Phi/\partial x$

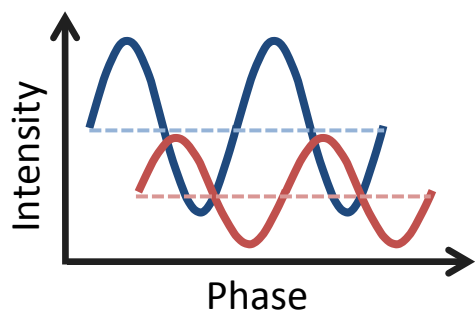


- 空間コヒーレンス要求が低い + コヒーレンスフィルタ機能  
→ 光源を絞らなくてよい
- 時間コヒーレンス要求も低い  
→ 白色ビームでも機能
- 格子の面積だけ大面積化が可能

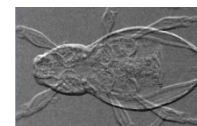
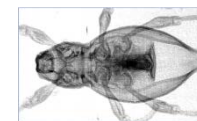
# Talbot-Lau 干渉計の原理



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

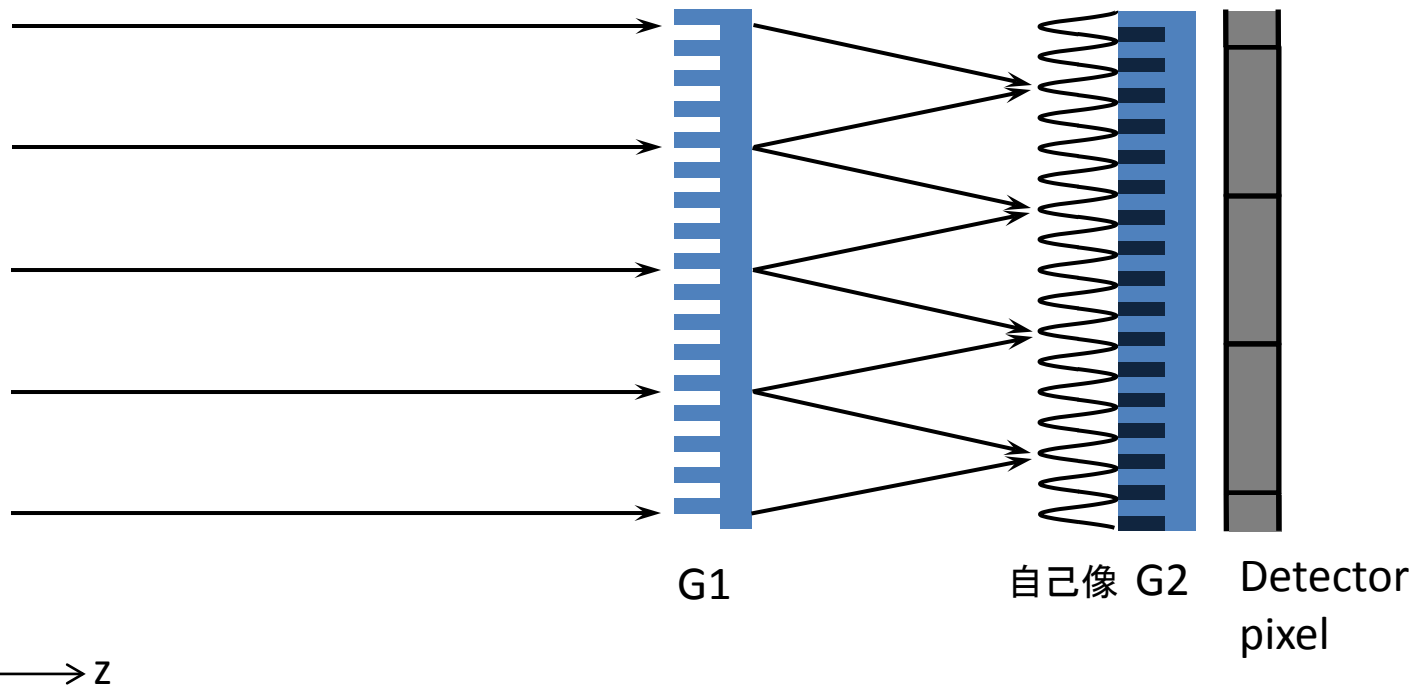


- 吸収コントラスト像
- 微分位相コントラスト像
- ビジビリティコントラスト像



# 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

$$\varphi_x \sim 1 \mu\text{rad}$$

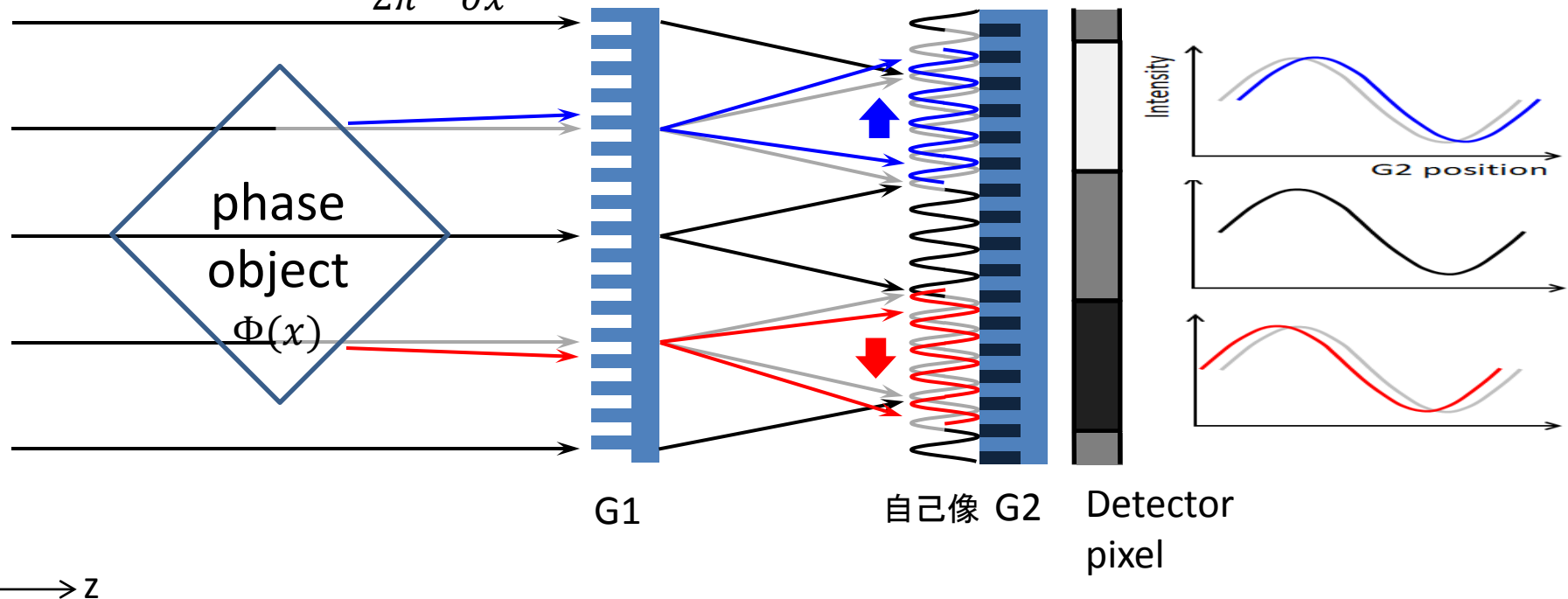
光線の屈折角

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

自己像のずれ

モアレ縞の位相シフト

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

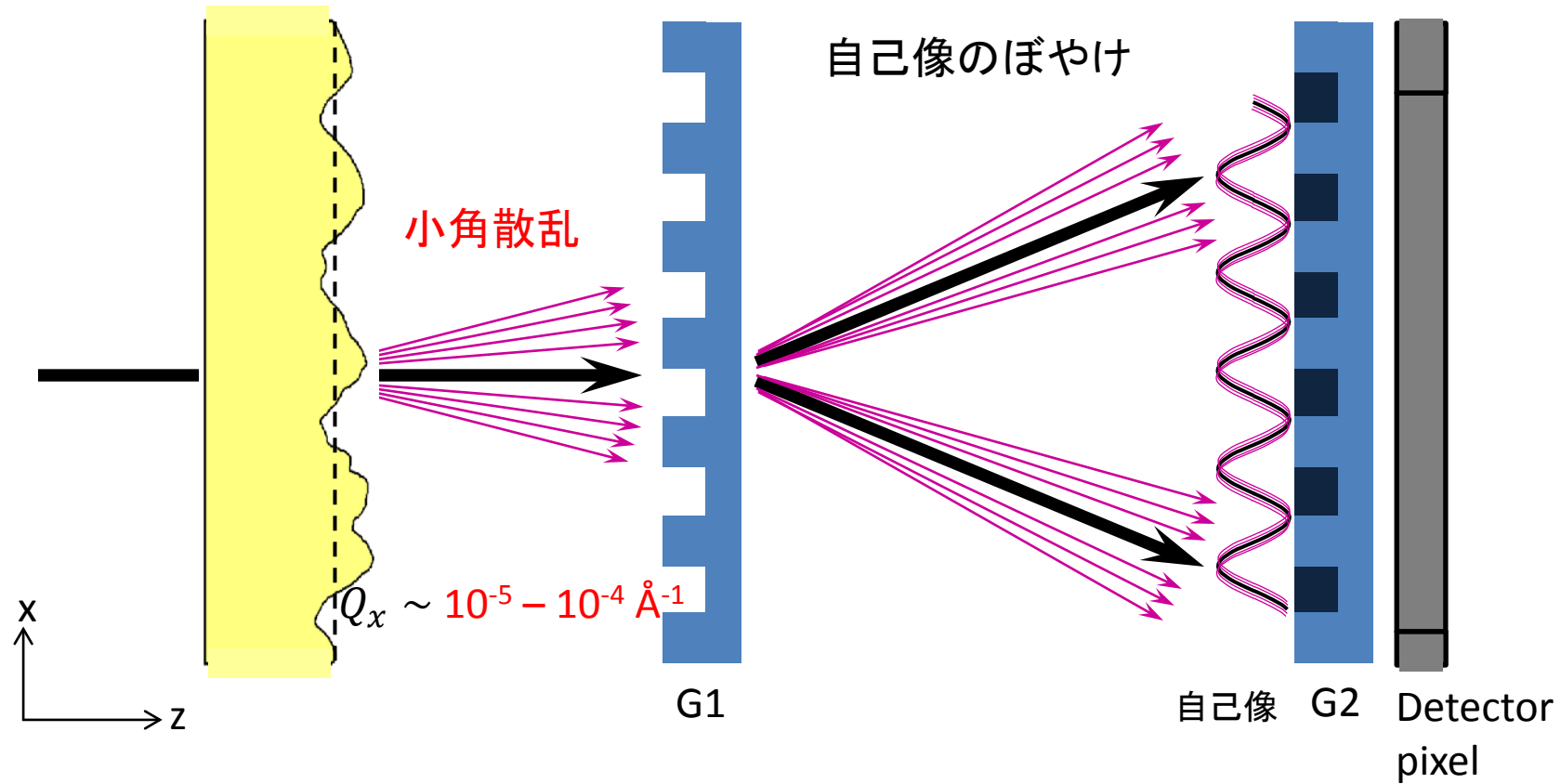


$$\Psi(x) \propto \varphi_x(x) \propto \lambda^2 \frac{\partial}{\partial x} \int b(x) \rho(x) dz$$

$b(x)$  : 散乱長分布  
 $\rho(x)$  : 密度分布

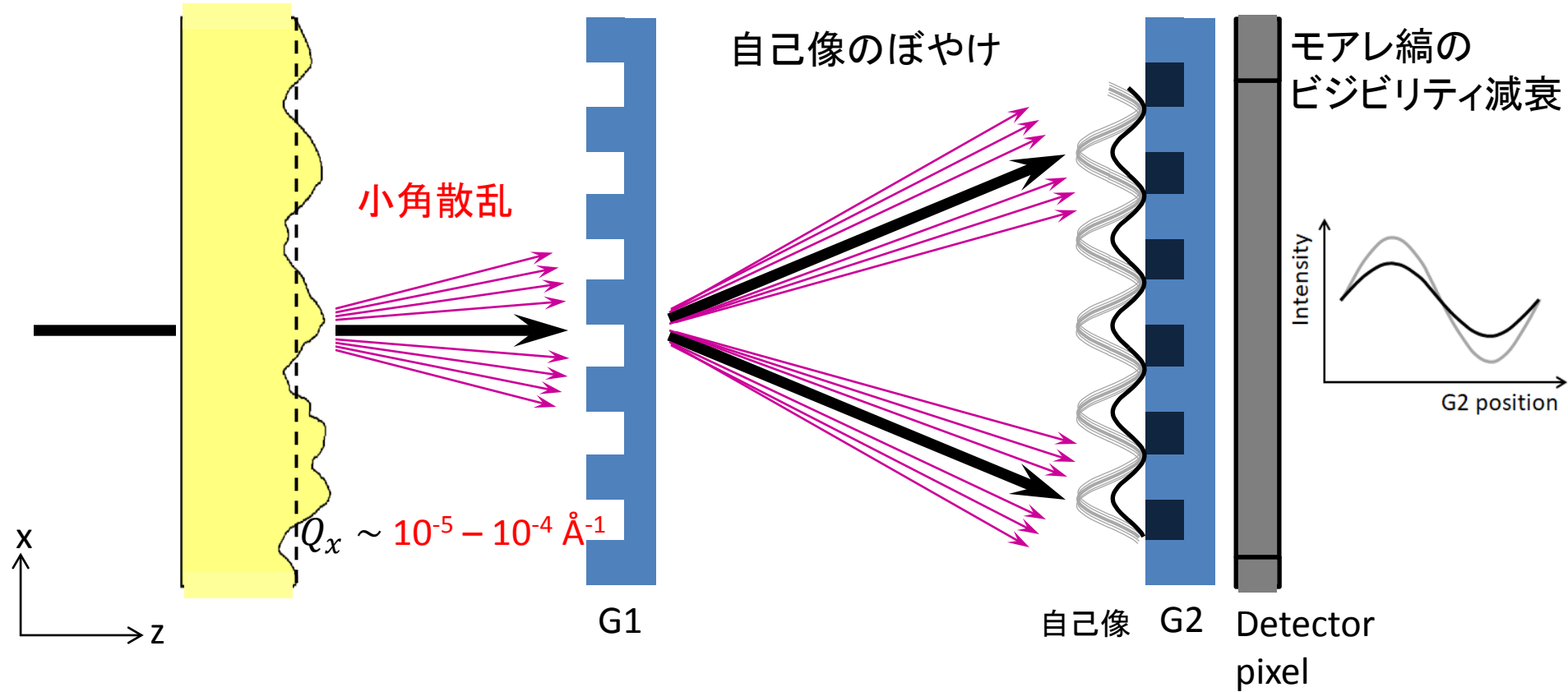
# 測定される物理量：ビジビリティコントラスト像

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

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

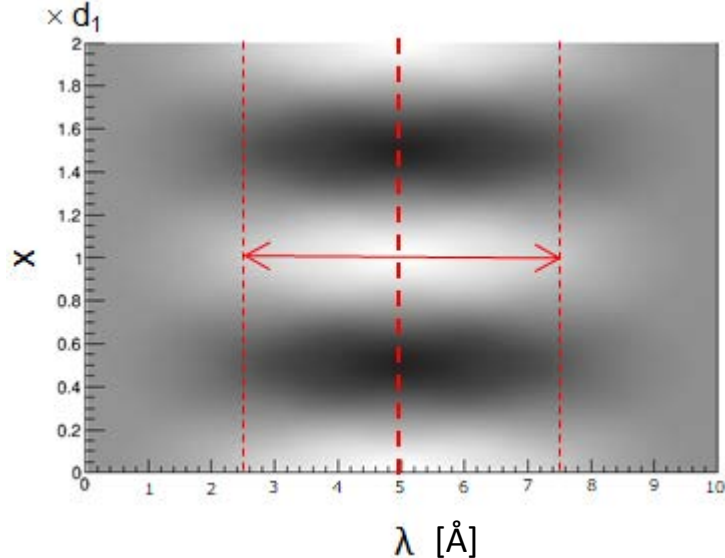
$\sigma_\phi^2$ : Standard deviation of phase,  
 $\xi$ : Correlation length  
 $H$ : Hurst parameter  
 $p$ : Interference order  
 $d_1$ : Pitch of G1

# 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  $\Delta\lambda/\lambda \approx 1$

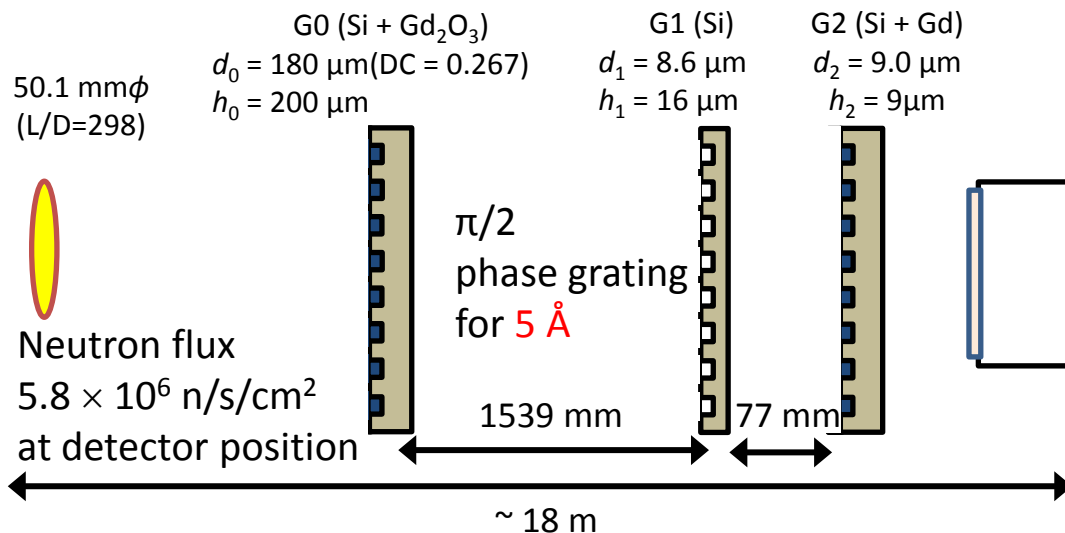
ただし、モアレ縞の位相シフトは波長の2乗に比例 → 位相分散

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

波長分解型Talbot-Lau干渉計の利点

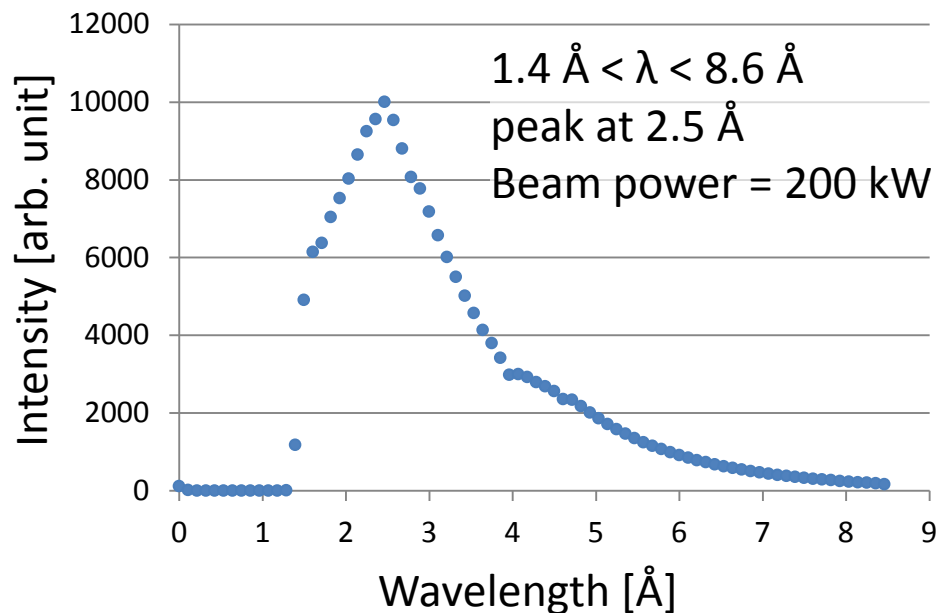
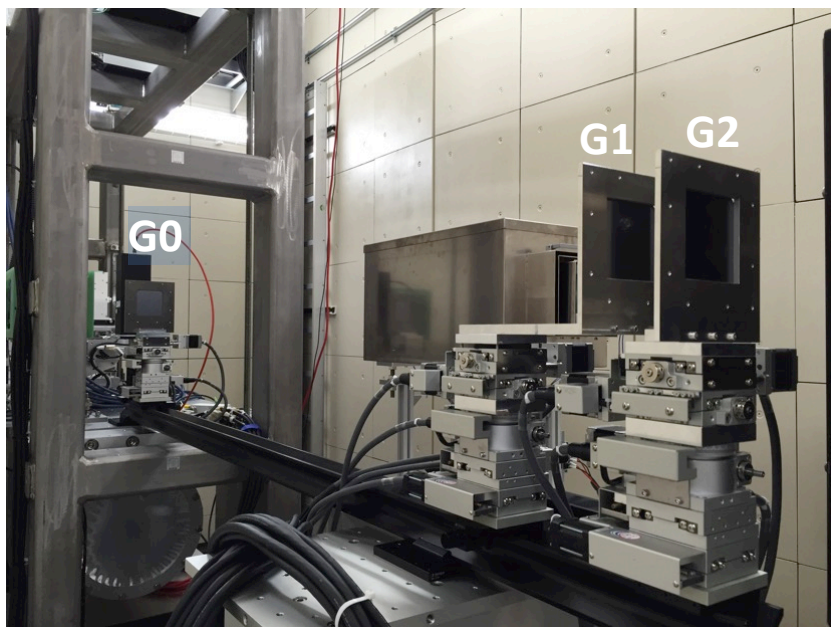
- 広波長幅を高波長分解能で測定可能  
→ 高統計 + 位相分散回避 で効率的な位相イメージング
- 波長依存性を利用した解析によって定量的物理量の抽出

# 波長分解型 Talbot-Lau 干渉計



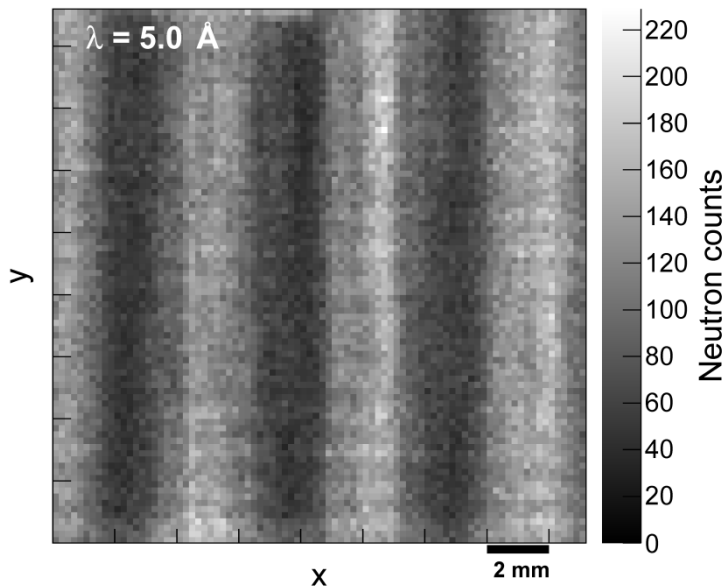
“ $\mu$ NID” detector  
(Micro-pixel chamber + <sup>3</sup>He gas)

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

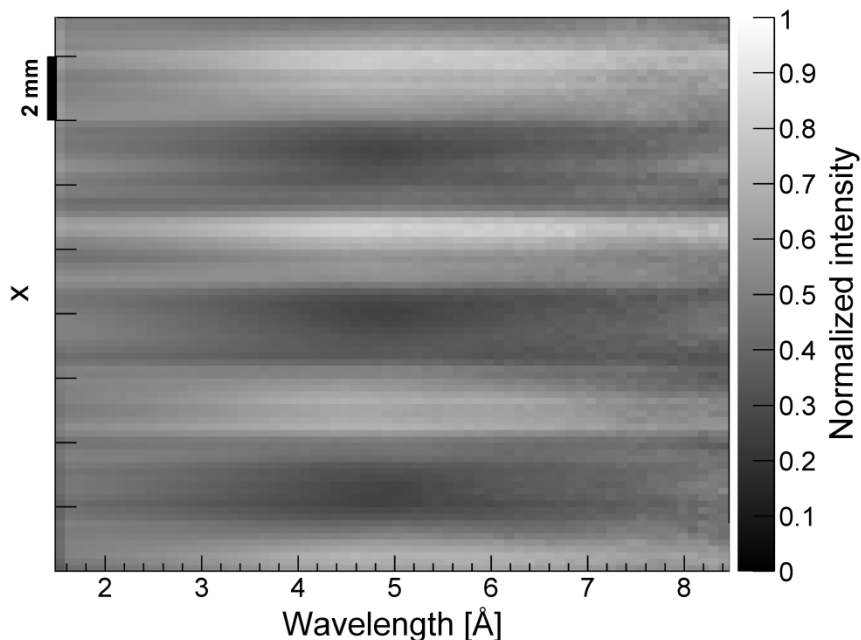


# 波長分解型Talbot-Lau干渉計のモアレ縞

## モアレ縞の2次元分布

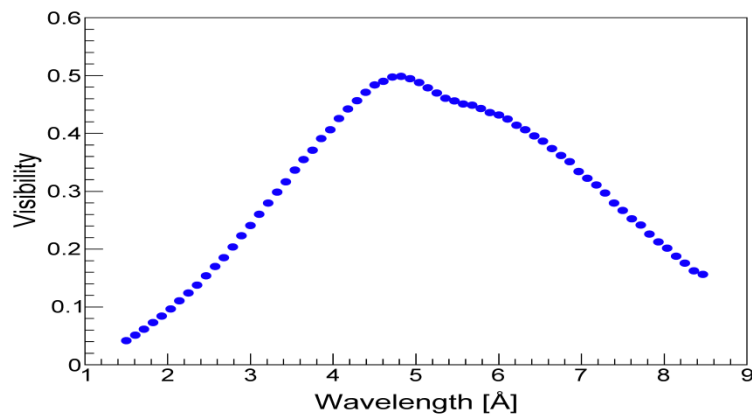


## モアレ縞(projected)の波長依存性



モアレ縞は中心波長  $5 \text{ \AA}$  を中心に連続的に分布.

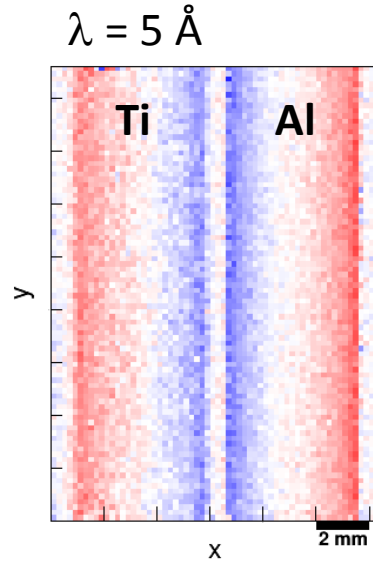
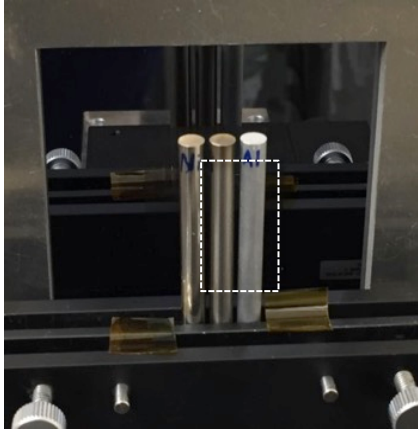
## visibilityの波長依存性



# 微分位相像の波長分解解析

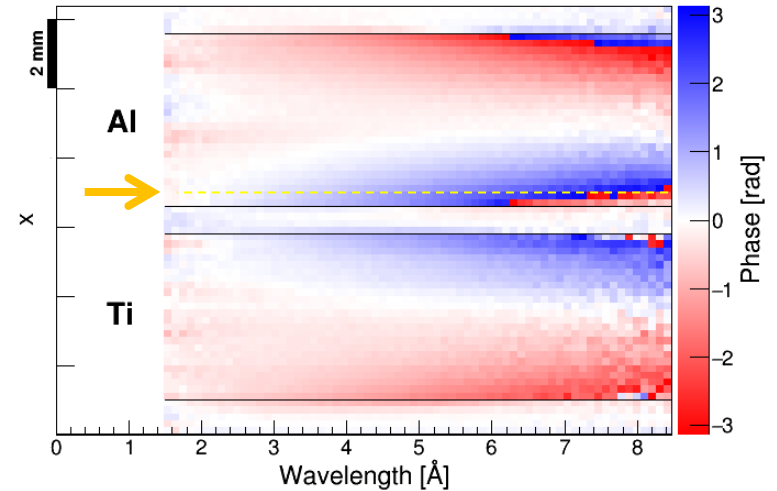
テストサンプル

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



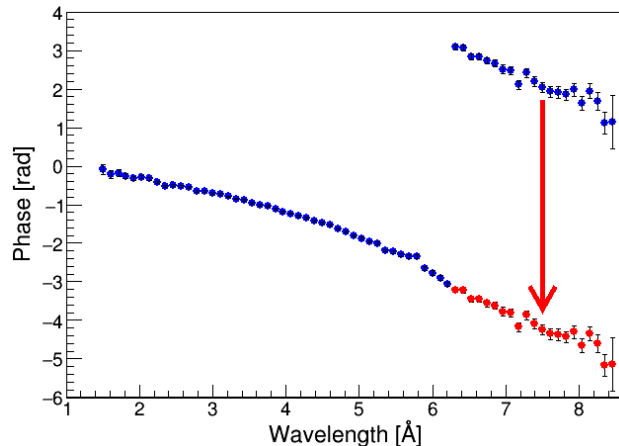
微分位相像 (projected) の波長依存性

微分位相  $\Psi \propto \lambda^2$



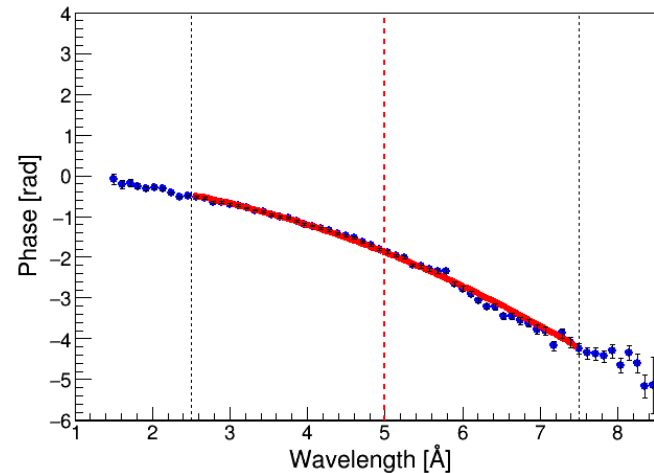
## 波長分解解析

1.  $\Psi(\lambda)$  の  $2\pi$ -wrapping を補正



2. 放物線fitting

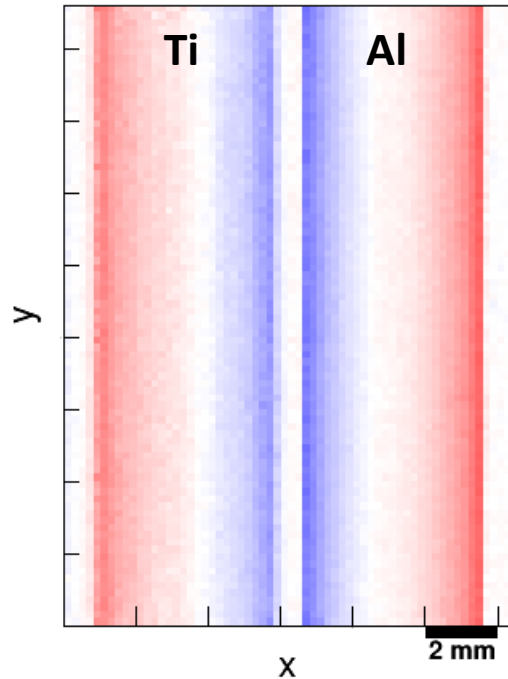
中心波長での微分位相  $\bar{\Psi} \equiv \Psi(\bar{\lambda})$  を計算



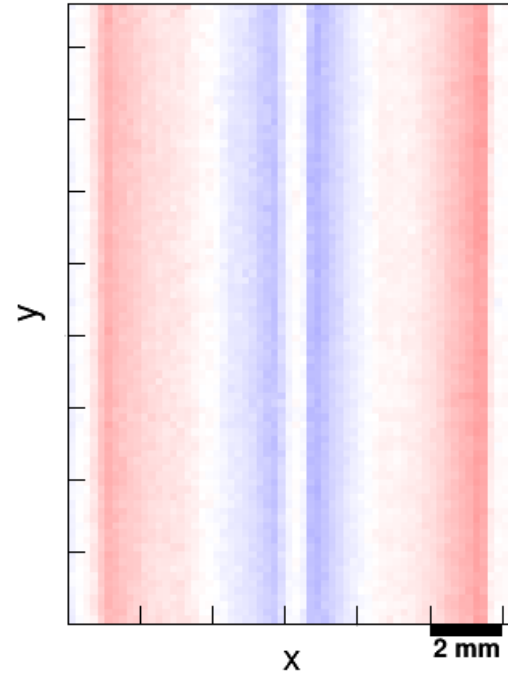


# 解析手法による微分位相像の定量性の比較

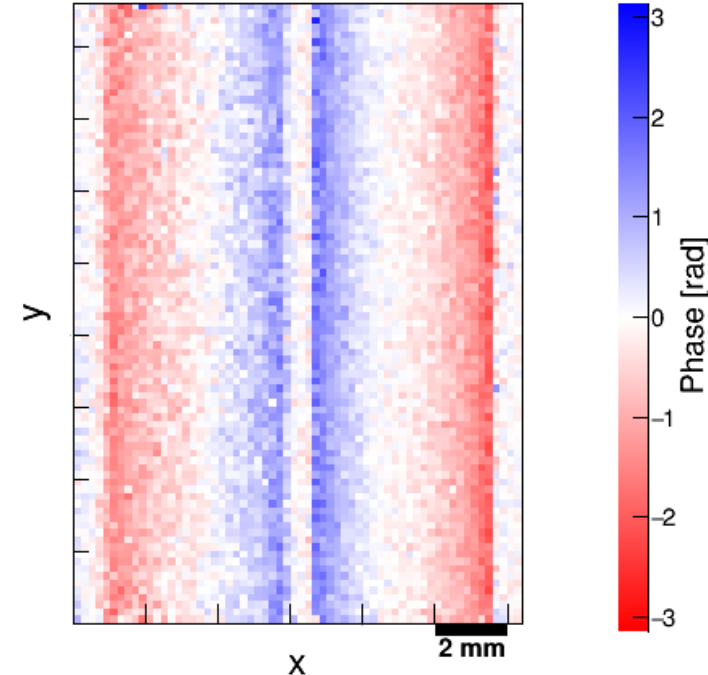
$\lambda = 2.5\text{-}7.5 \text{ \AA}$  (TOF)



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



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



微分位相 $\Psi$ 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。

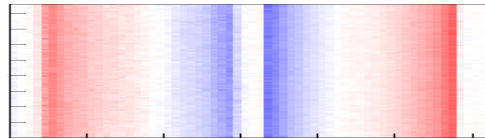
$$\Psi_{\text{th}} = -\frac{R_s}{R_1} \frac{z_{12}}{d_2} \lambda^{-2} \frac{m}{\pi \hbar^2} V_{\text{op}} \frac{x - x_0}{\sqrt{r^2 - (x - x_0)^2}}$$

$V_{\text{op}}$ : 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

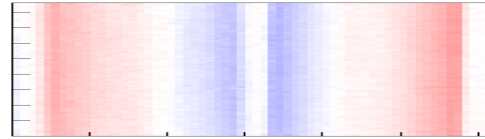
$\lambda = 2.5-7.5 \text{ \AA}$  (TOF)

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



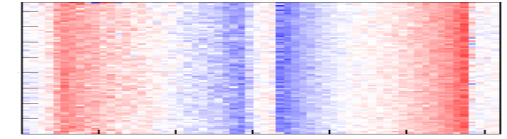
$\lambda = 2.5-7.5 \text{ \AA}$  (integrated)

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

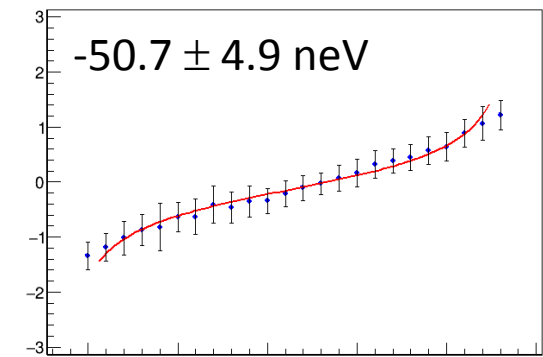
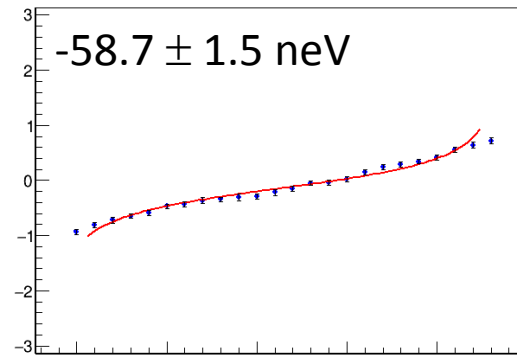
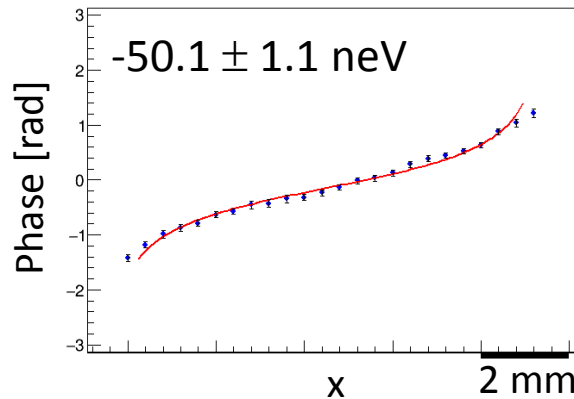


$\lambda = 5.0 \text{ \AA}$  (2%)

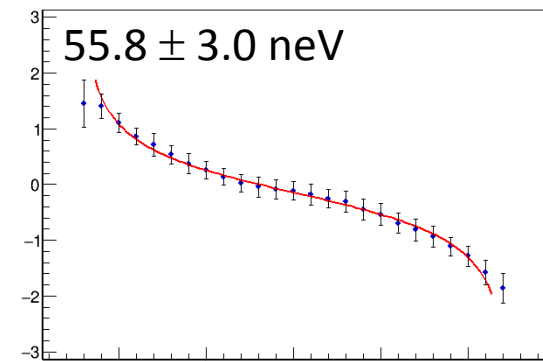
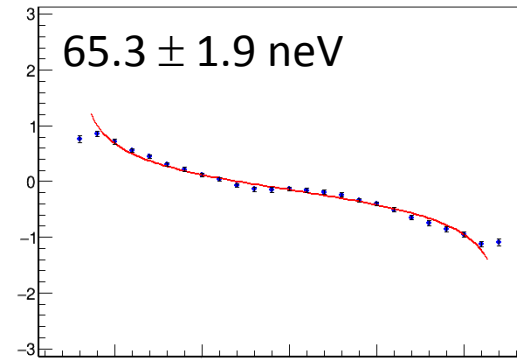
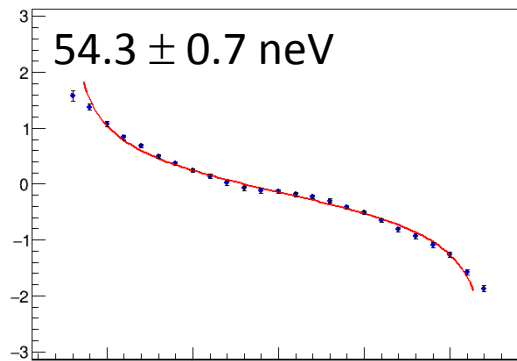
$\bar{\lambda} = 5.0 \text{ \AA}$



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

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

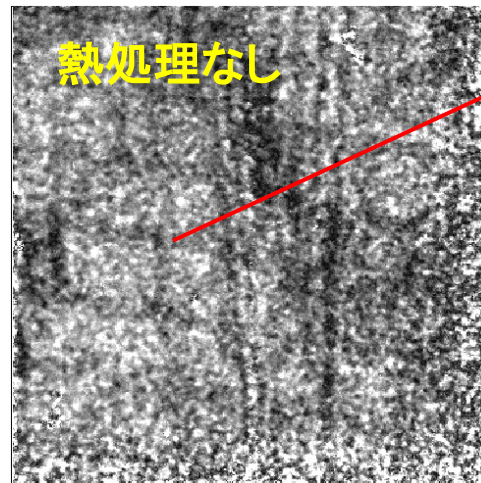
磁性体材料への応用が可能

熱処理加工による  
電磁鋼板内部の  
磁区構造の変化

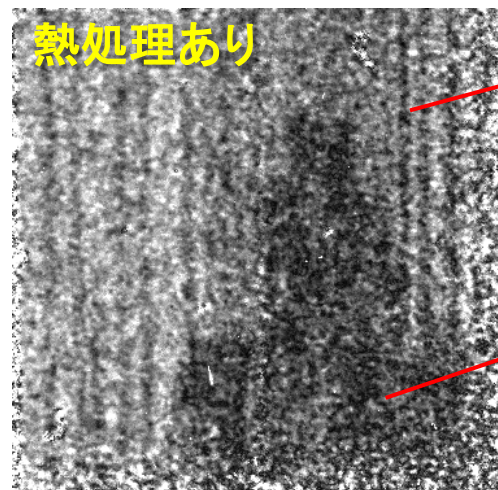
t = 0.25 mm



Visibility-contrast image

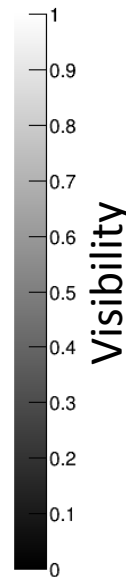


レーザー  
加工痕



磁壁

補助  
磁区

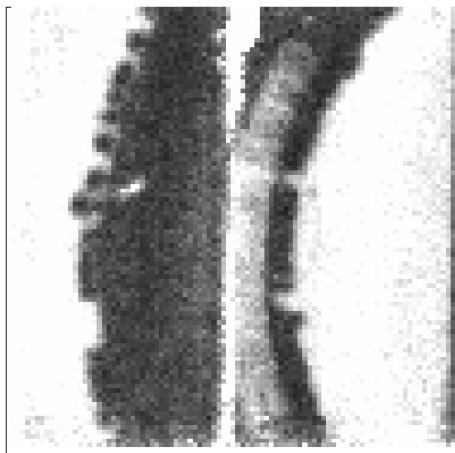


→ 熱処理による局所的な  
補助磁区の形成を可視化

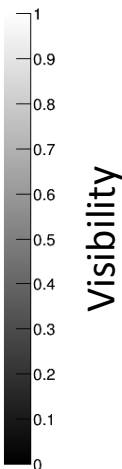
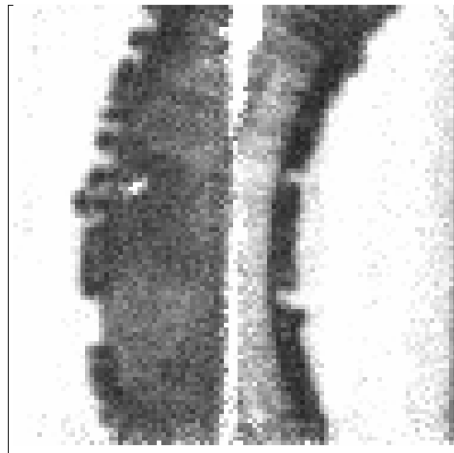
# 電磁鋼板サンプル2 (+ コイル)

## 磁場印加による磁区構造の変化

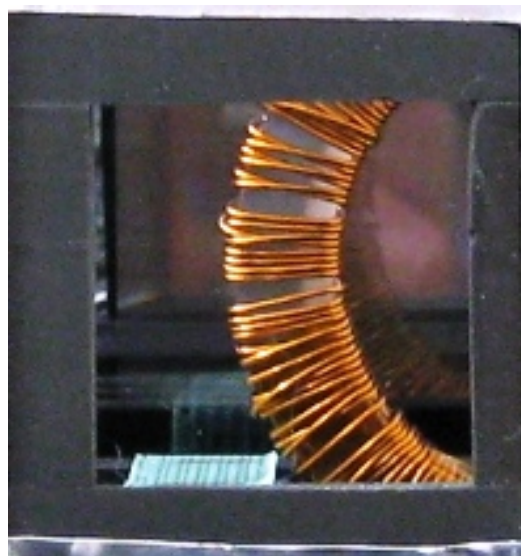
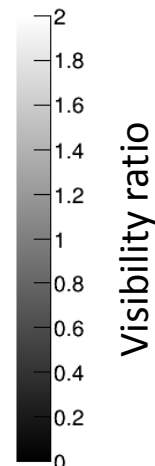
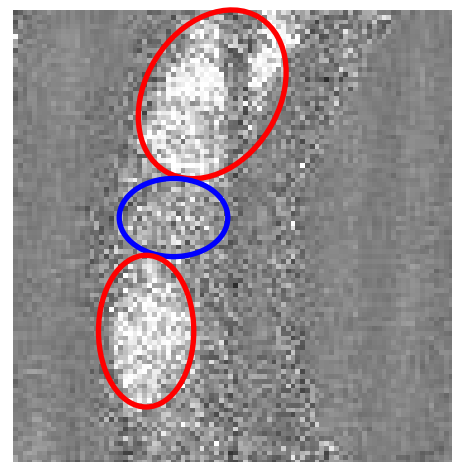
$I = 0 \text{ A}$



$I = 1.6 \text{ A}$



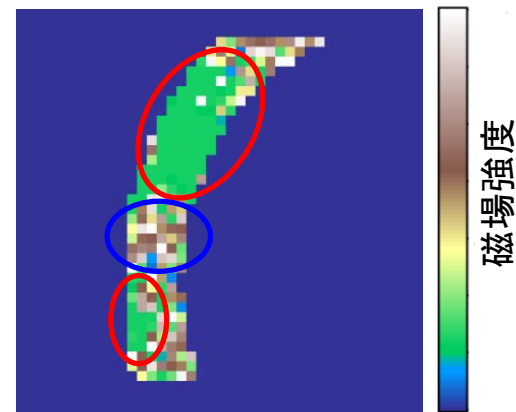
$(I = 1.6 \text{ A}) / (I = 0 \text{ A})$



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

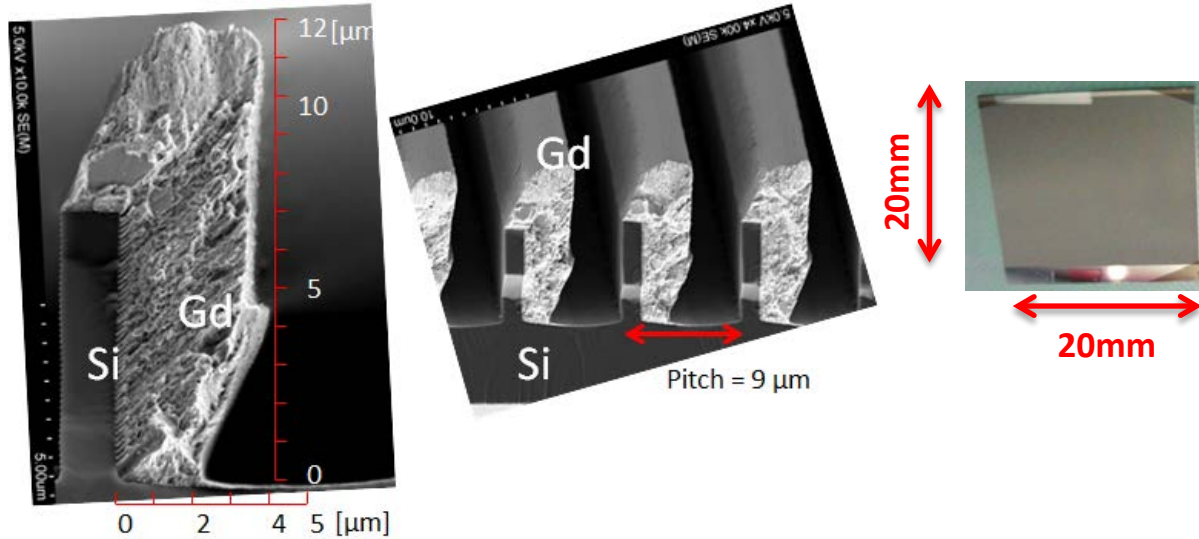
# まとめ

- 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 ( $\Delta\lambda/\bar{\lambda} \approx 1$ ) 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。

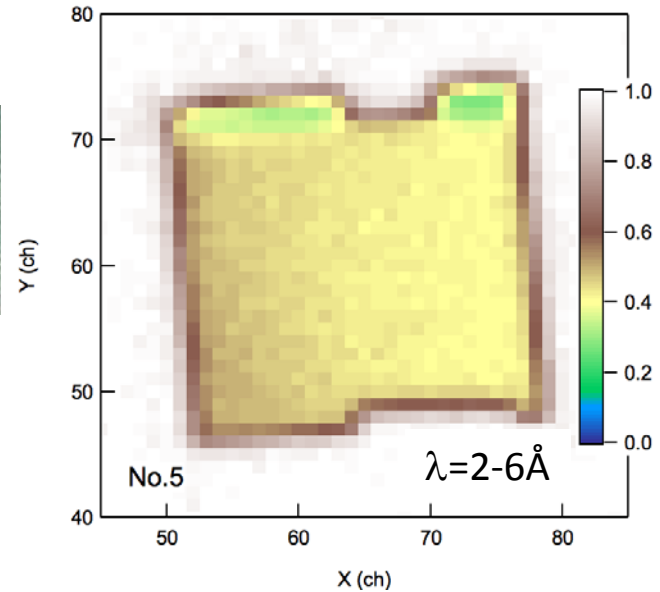


# Fabrication of absorption grating with fine pitch (G2)

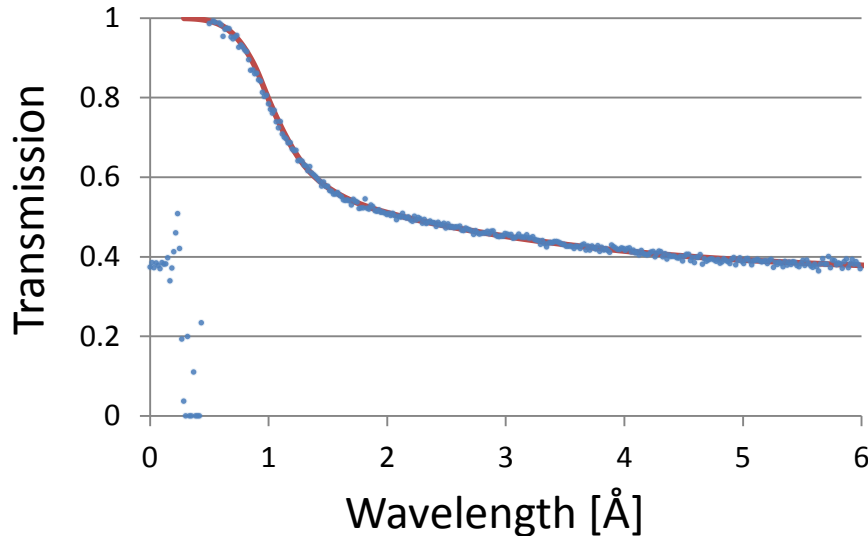
## Gd evaporation method



## Neutron transmission image



## Wavelength dependence of neutron transmission



Effective Gd thickness **9.0  $\mu\text{m}$**   
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

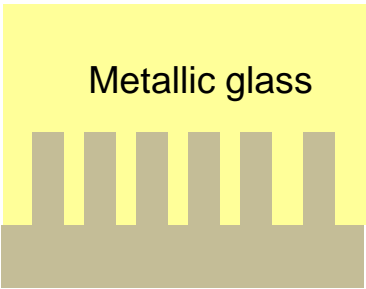
W. Yashiro et al., APEX, 7 (2014) 032501.

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

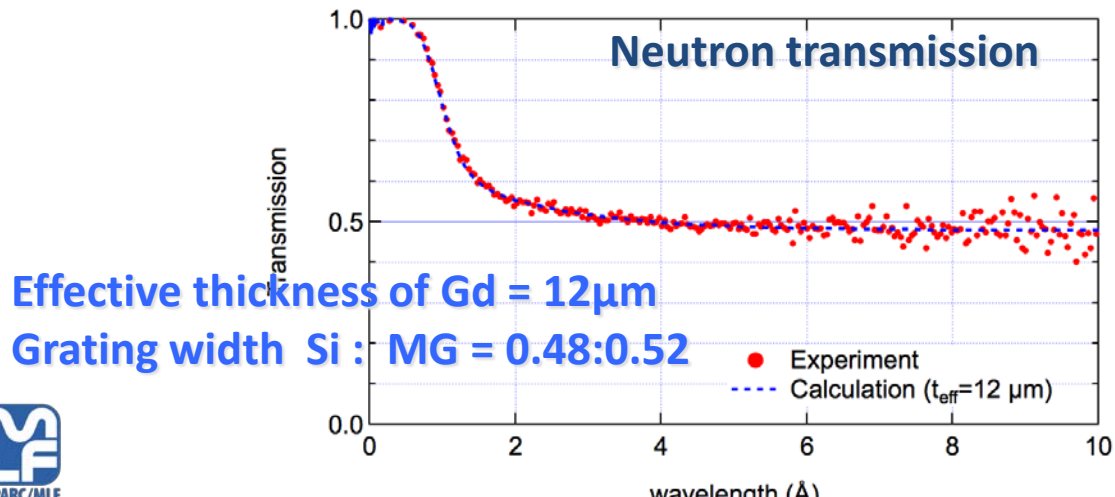
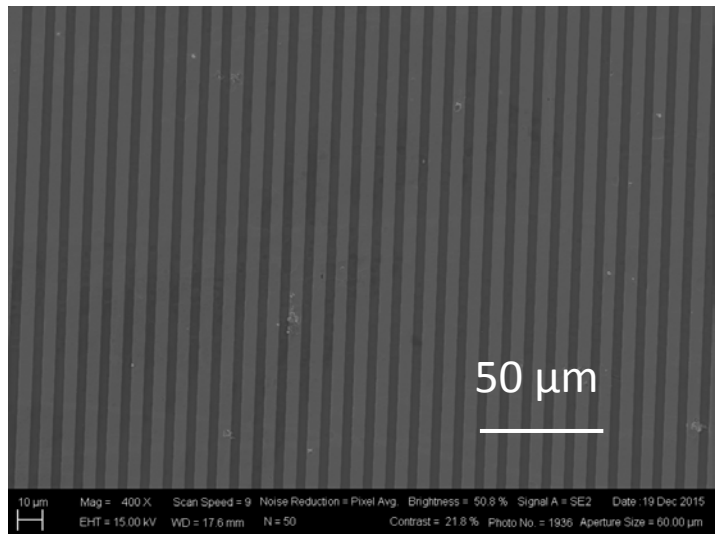
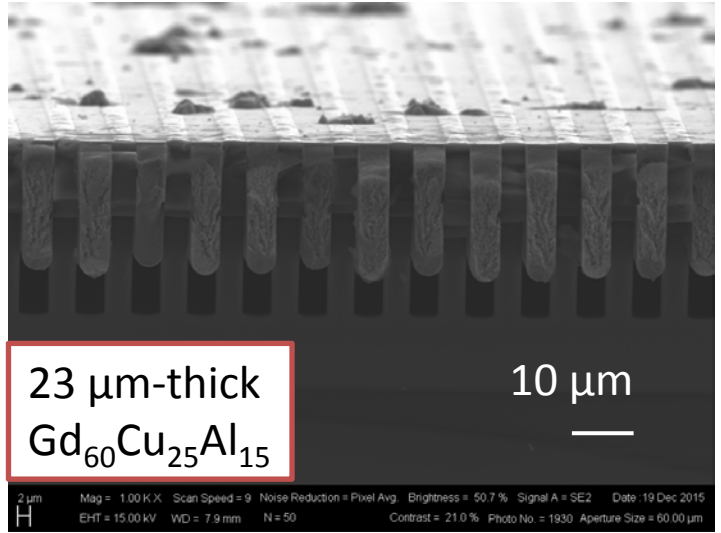
ICP etching



Imprinting



Etching extra glass  
by ion beam  
milling process



# 小型・中型中性子源での展開

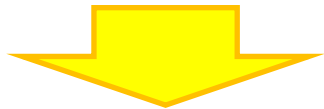
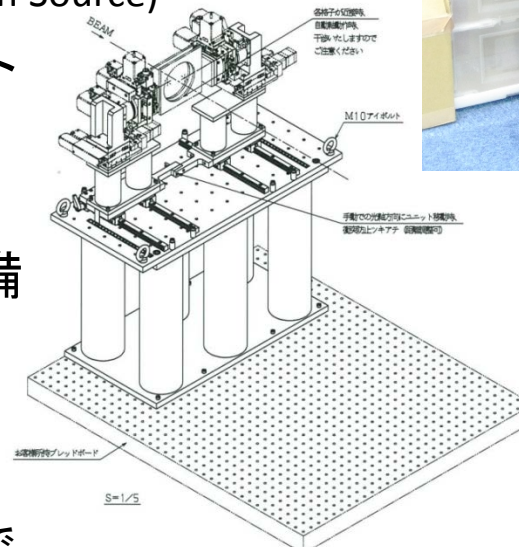
## KUANS

(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/cm<sup>2</sup>/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/cm<sup>2</sup>/s @ 1 MW

J-PARC RADEN  
Thermal neutron flux  
 $\sim 6 \times 10^7$  n/cm<sup>2</sup>/s @ 1 MW

# Talbot效果 (振幅格子)

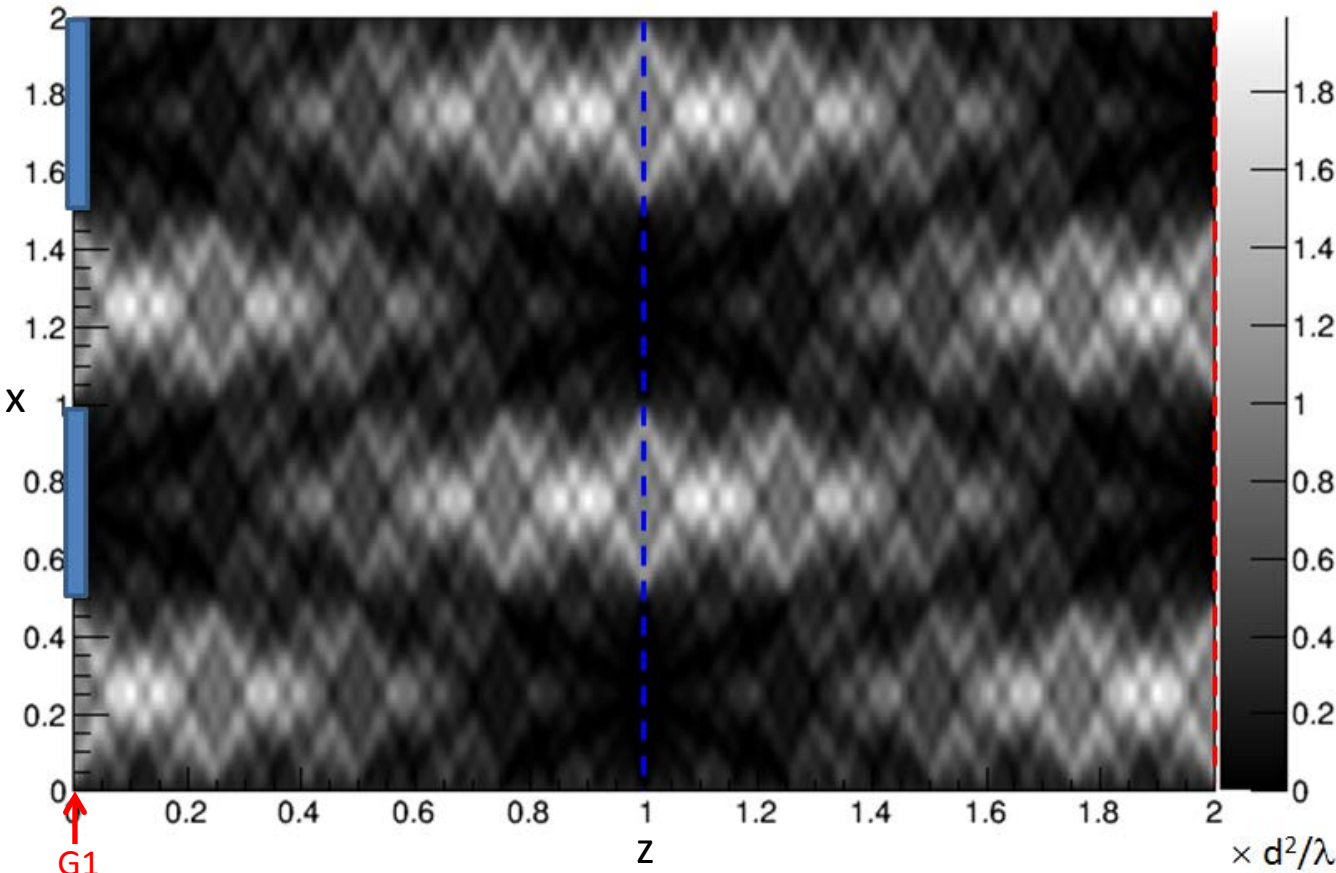
回折格子透過関数

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

Fresnel 回折積分

Fresnel 回折場

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

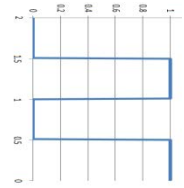
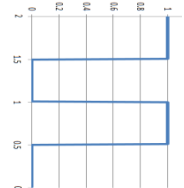
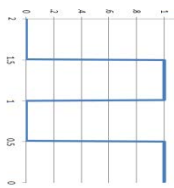


d: 回折格子周期  
λ: 波長

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

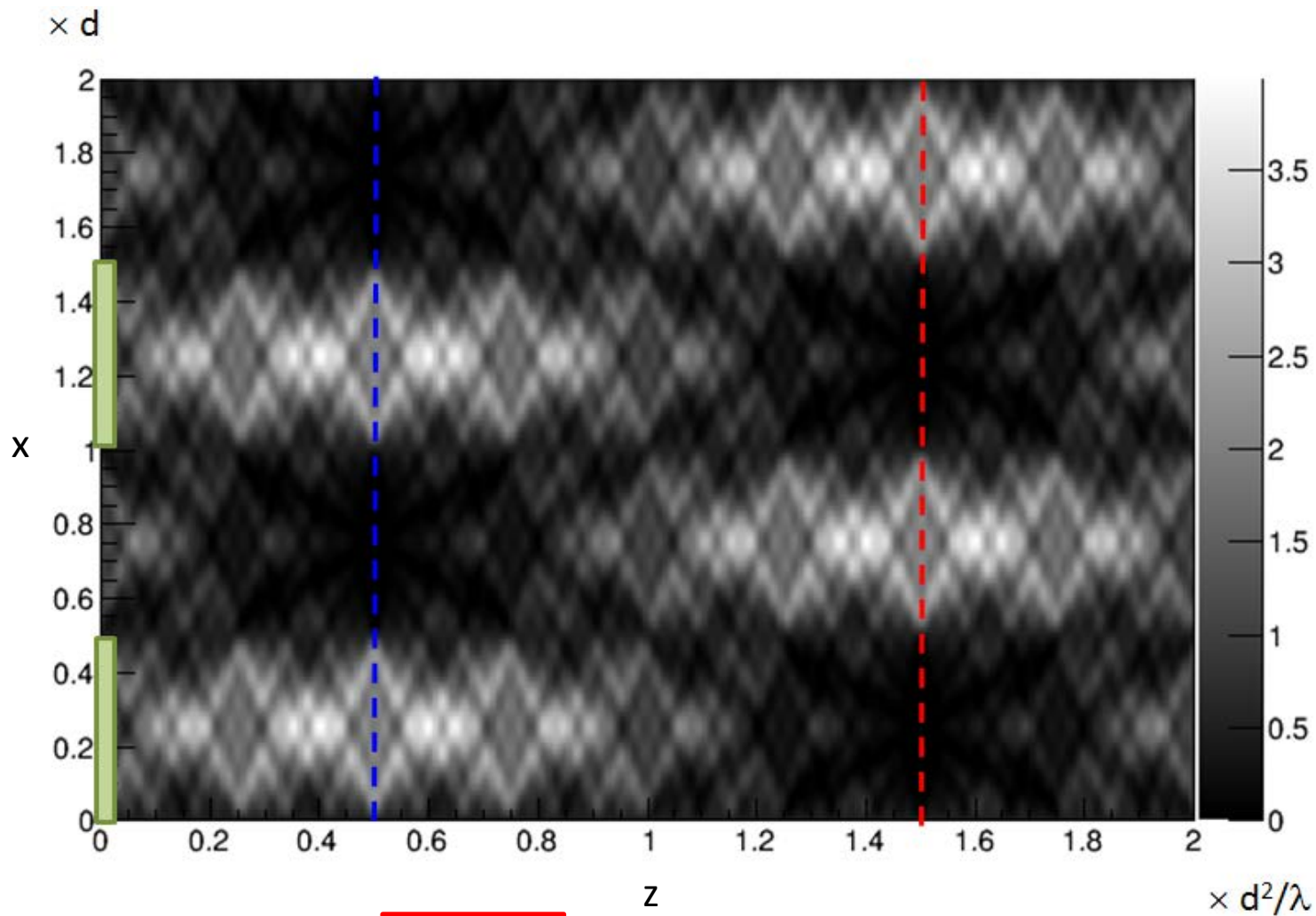
$$z = p \frac{d^2}{\lambda}$$

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。

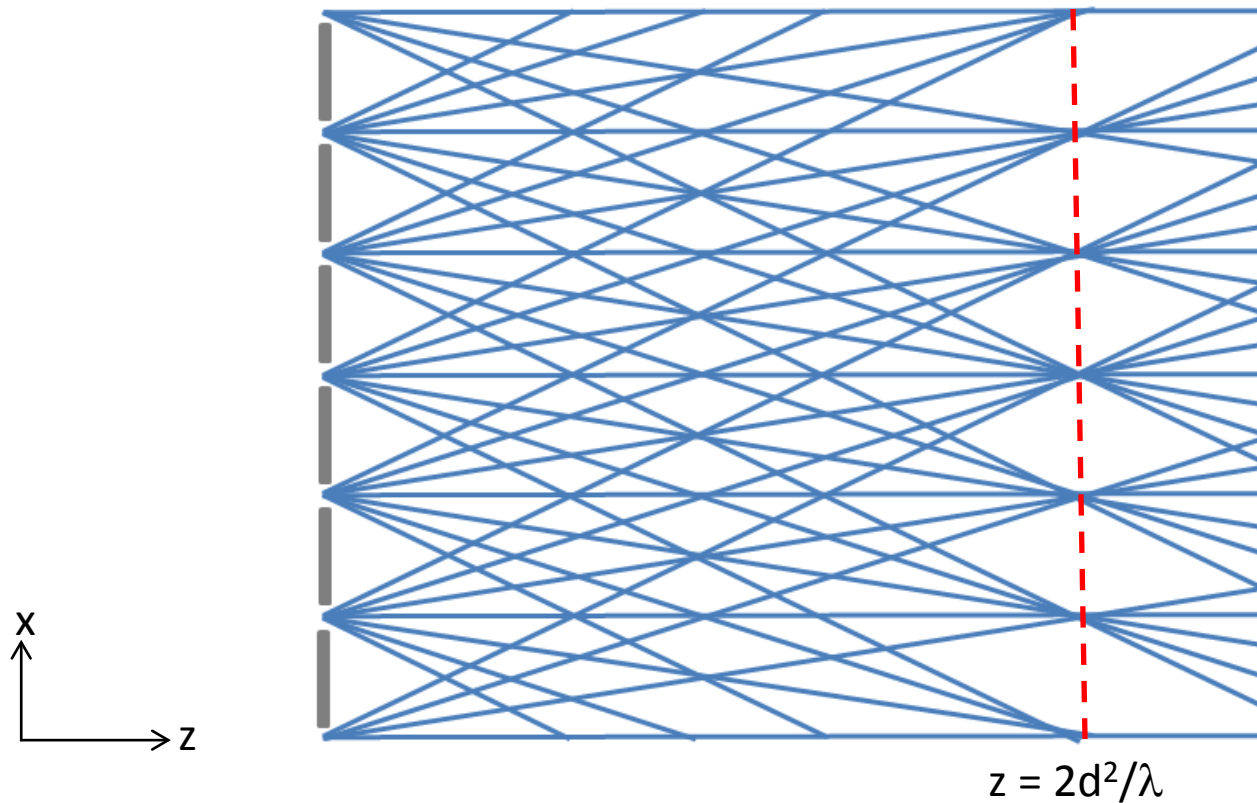


$$z = p \frac{d^2}{\lambda}$$

p: Talbot次数 (1/2, 3/2, ...)

# Talbot効果の幾何光学的解釈

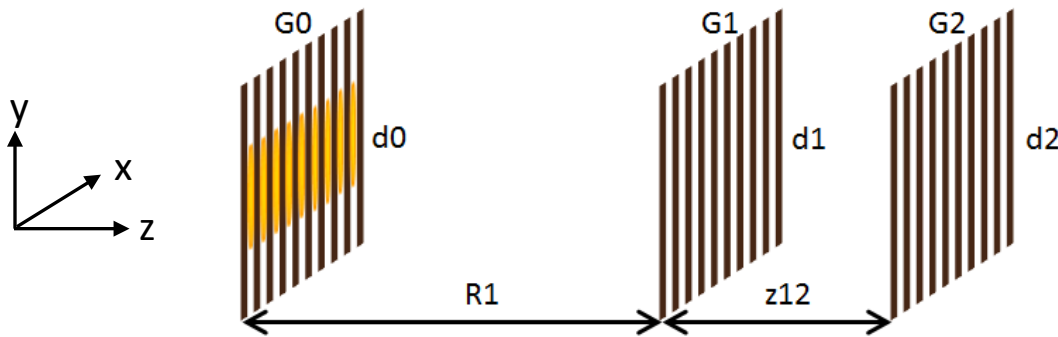
n次回折光足し合わせ



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

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

# 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  
 $\lambda$ : 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:  $\pi$  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

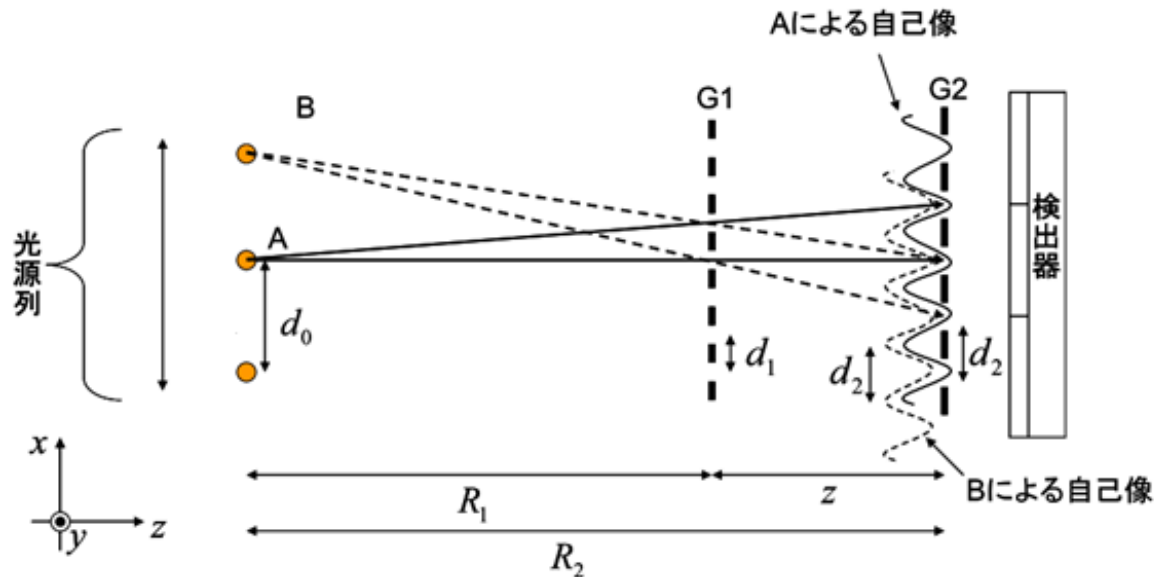
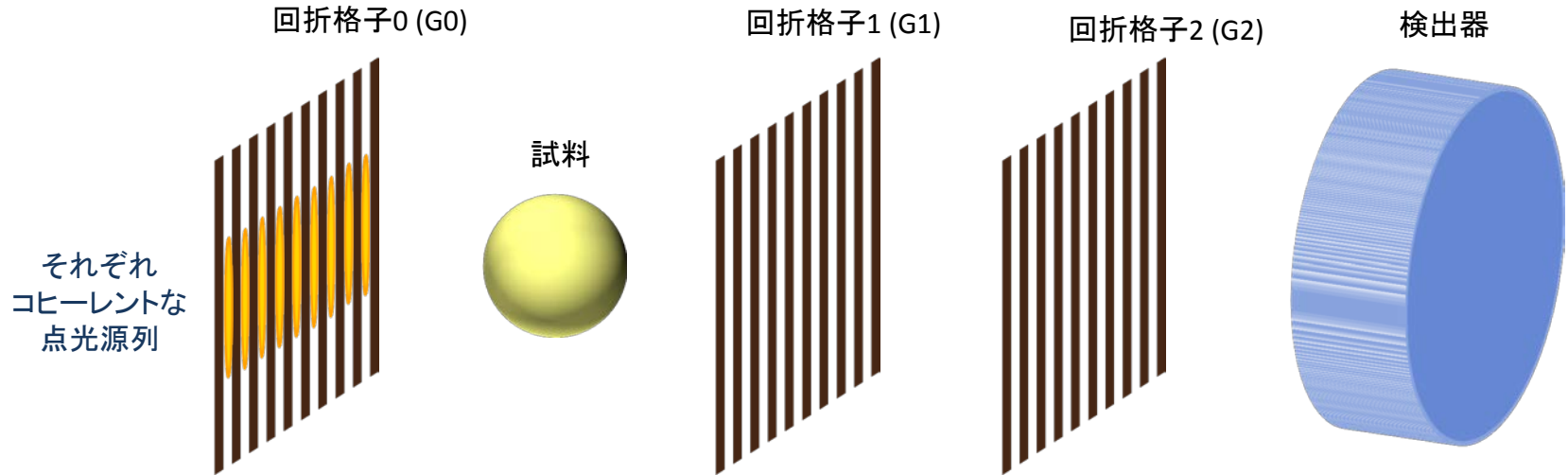
$$d_2 = d_1 M$$

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



# 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



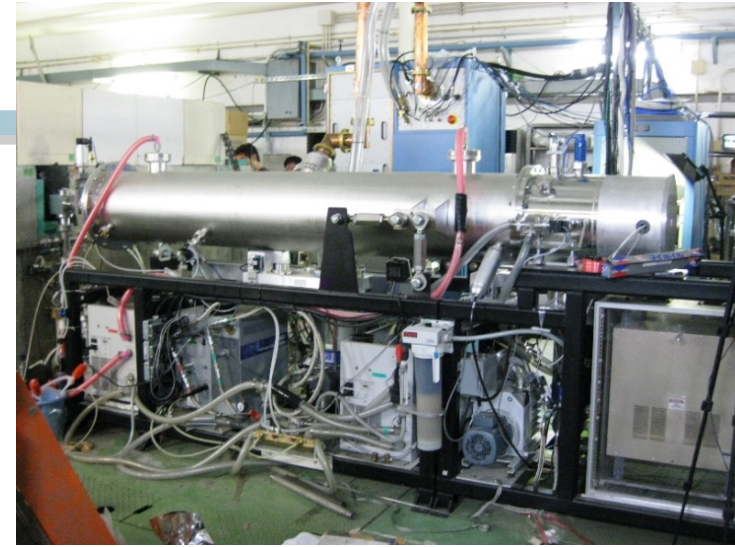
$$\frac{d_0}{d_2} = \frac{R_1}{z_{12}}$$

# 小型中性子源での展開

## KUANS

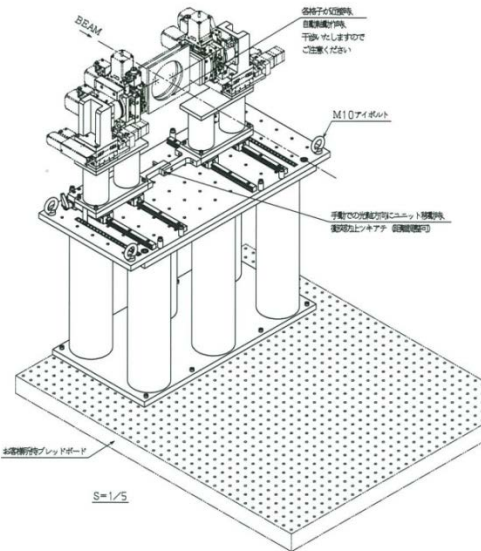
(Kyoto University Accelerator-driven compact Neutron Source)

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

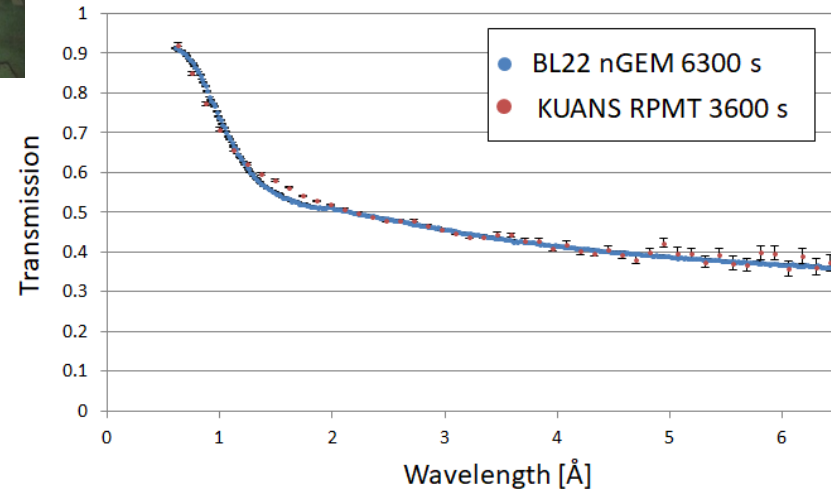


## 干渉イメージング実験のための環境を整備

- ・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

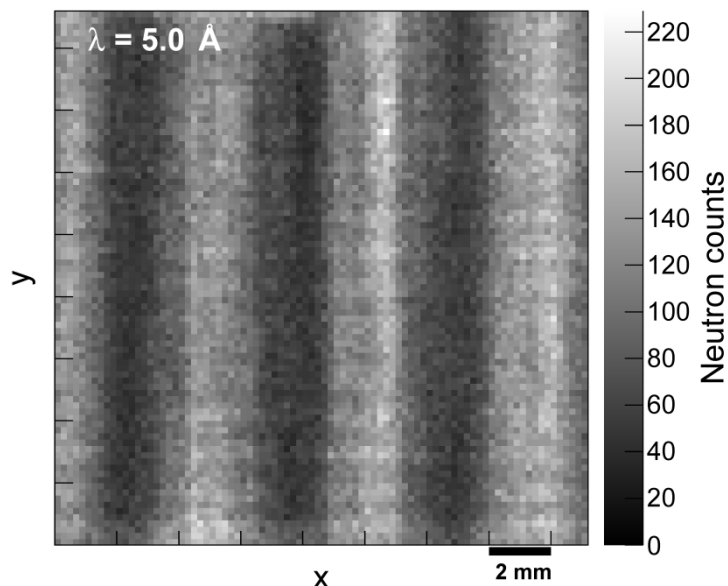




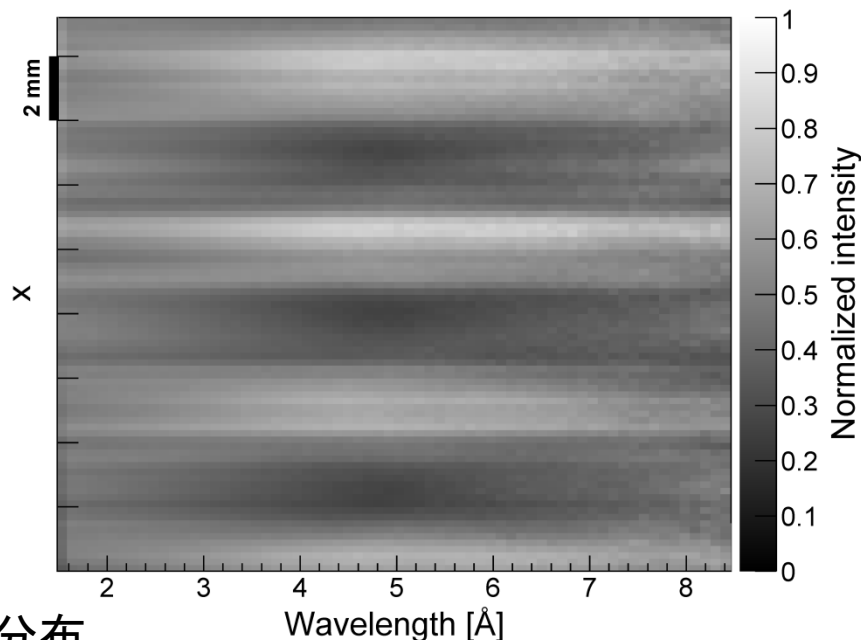


# 波長分解型Talbot-Lau干渉計のモアレ縞

## 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 Å を中心に連続的に分布.

TOFによって,

広波長領域 (2.5-7.5 Å) を

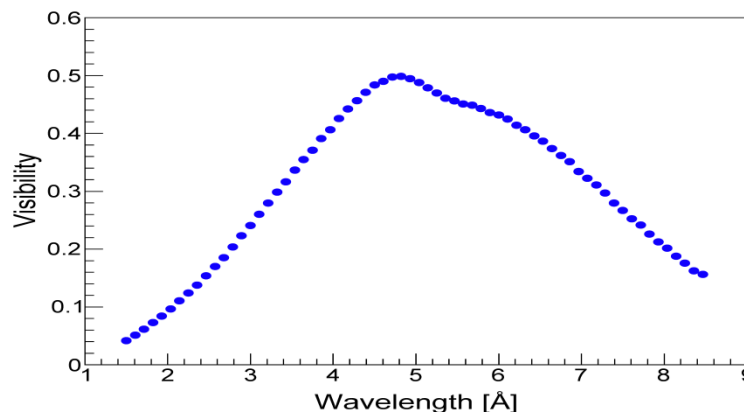
高波長分解能 (4.3-1.4%) で測定する.



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

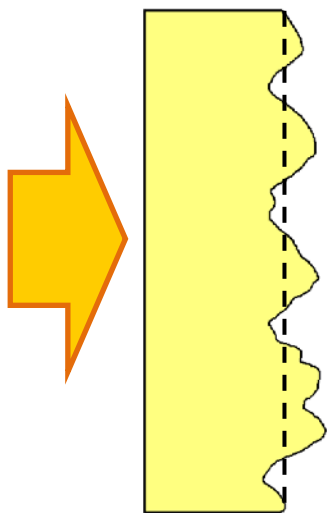
## ビジビリティイメージング

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,  $\rho$ : Atomic density,  
 $\sigma_{\Phi}^2$ : Standard deviation of phase,  $\xi$ : Correlation length,  $H$ : Hurst parameter

Neutron beam



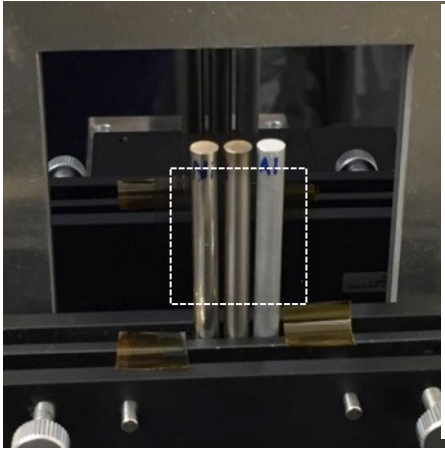
$$\Phi(x, y) = \underbrace{\Phi_s(x, y)} + \underbrace{\Phi_f(x, y)}$$

Phase shift  
due to  
averaged structure

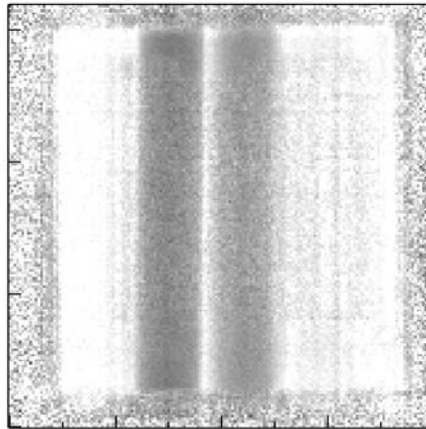
Phase shift  
due to  
microstructures

# Phase imaging with TOF method

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

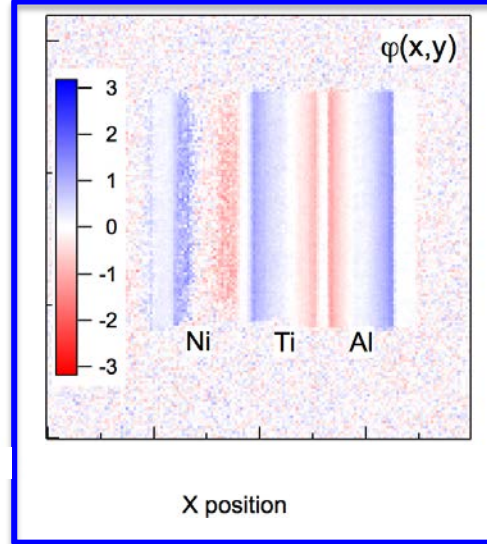


Absorption



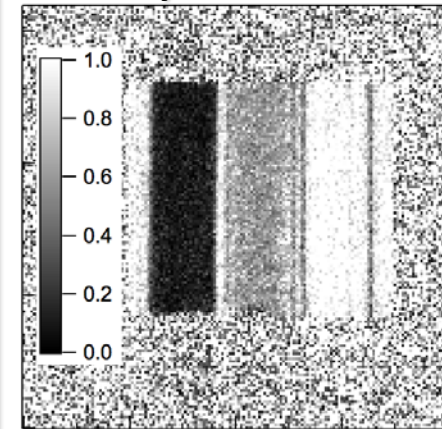
X position

Differential Phase



X position

Visibility



X position

