

ERLで展開可能となるX線イメージング研究

東京大学大学院
新領域創成科学研究科物質系専攻
矢代航

X-ray imaging

Imaging

Mapping signal in space

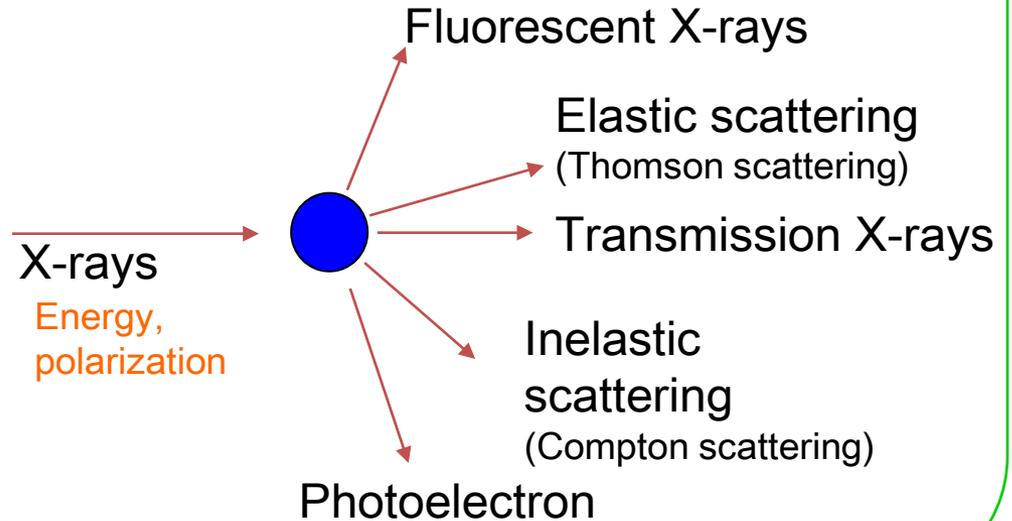


Mapping structure and /or property

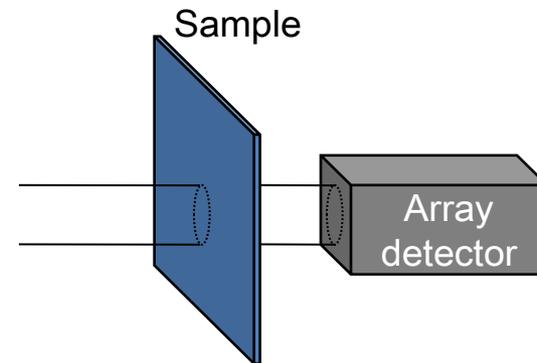
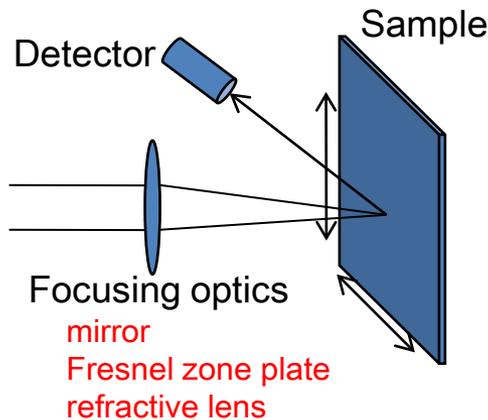


Understanding function

Interaction of X-rays with matter

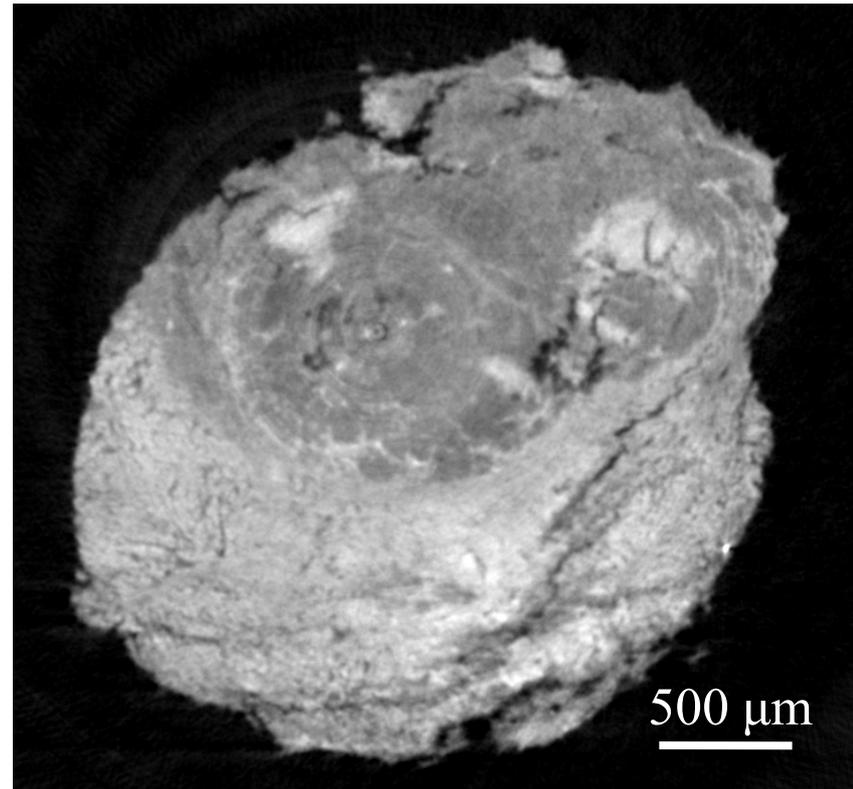


Ways for mapping



X線イメージングにおいて考慮すべきこと

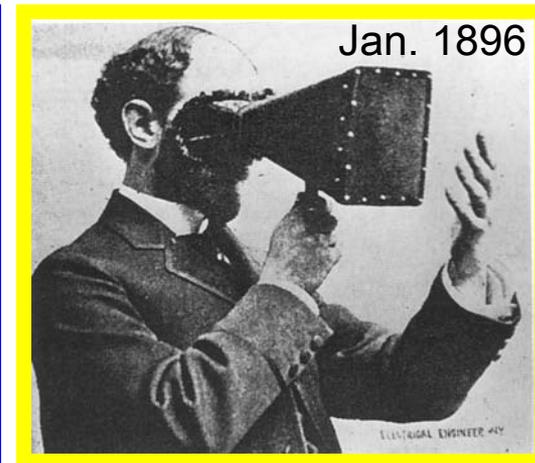
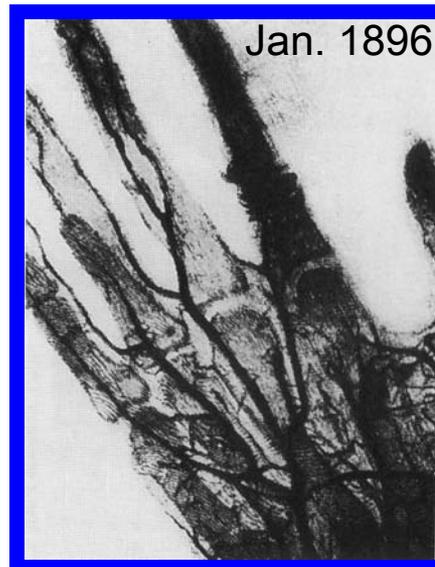
- 被写体位置における視野の大きさ
- 定量性の有無
- 空間分解能
- 密度分解能
- 時間分解能
- 2D or 3D?
- 元素選択性の有無
- X線のエネルギー
(試料の透過率など)
- 被写体の照射ダメージ
(非破壊、1ショット破壊など)



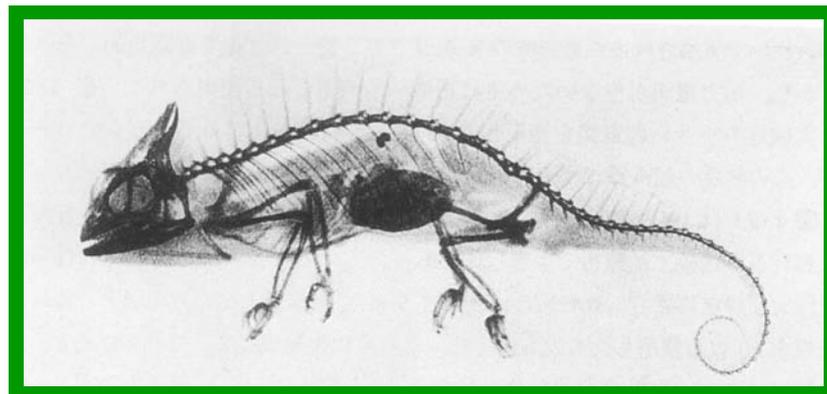
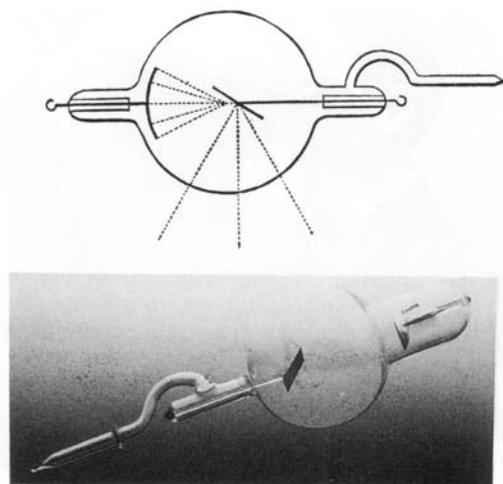
(うさぎの肝臓組織の位相トモグラム)

X-ray transmission imaging

Discovery of X-rays (Nov 1895 by W. C. Röntgen)

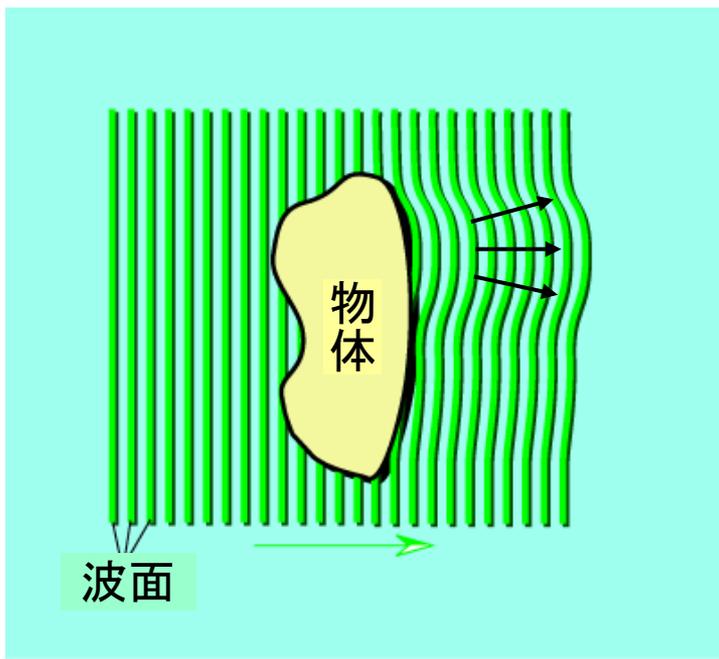
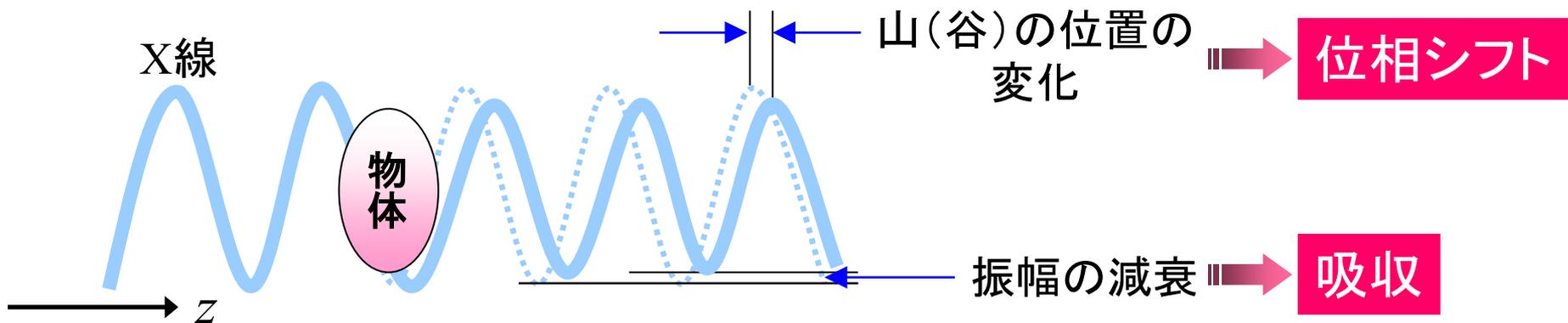


Fluoroscope



X線と物質との相互作用

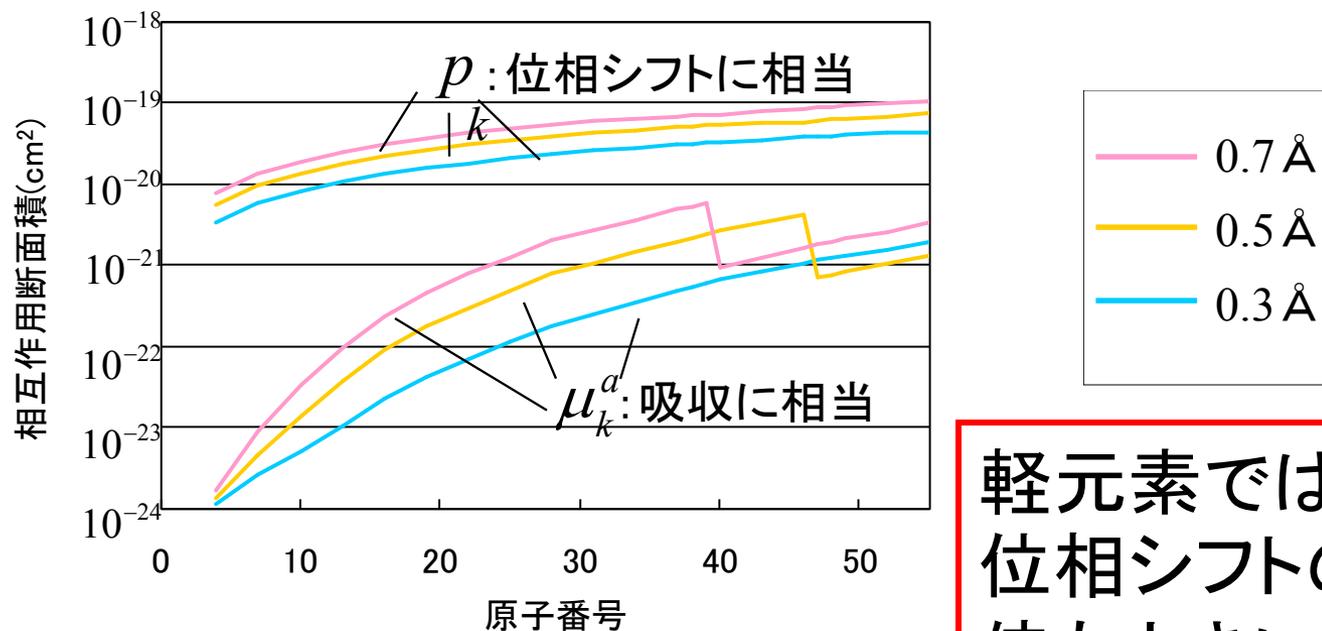
— X線位相イメージング



物体による屈折
(位相シフト)
↓
‘波面’の歪み
(傾き)



X線位相イメージングの利点



軽元素では吸収に比べて位相シフトの方が約1000倍も大きい！

物体による吸収を利用するよりも位相シフトを利用した方が格段に感度の高い測定が可能。

位相イメージ vs. 吸収イメージ

ラット小脳スライス(1mm厚)の例*
(X線の波長: 1 \AA (12.4keV))



干渉像

1 mm



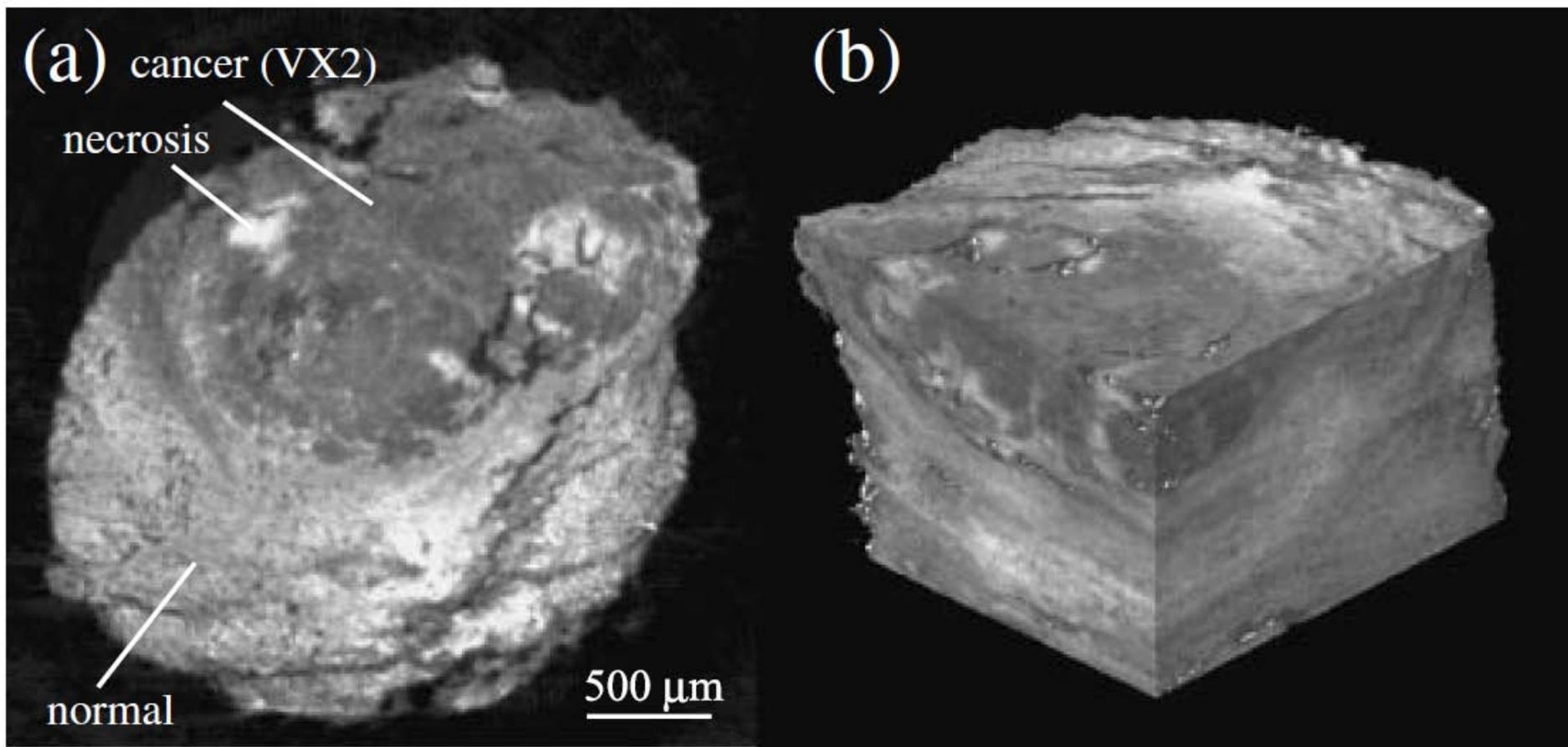
吸収像

1 mm

結晶干渉計による位相イメージ

X線Talbot干渉計によるトモグラフィの例

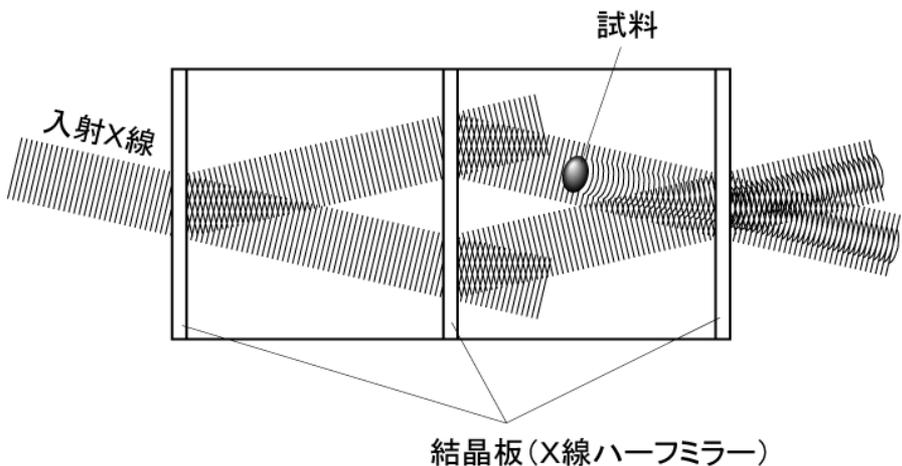
ウサギの肝臓組織



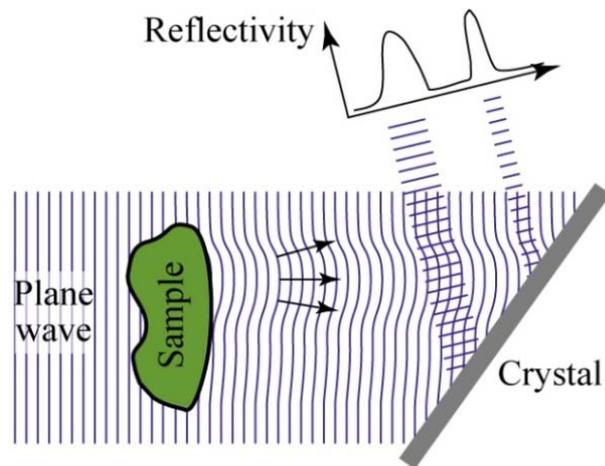
試料提供: 筑波大学付属病院武田徹先生

Techniques for X-ray phase imaging

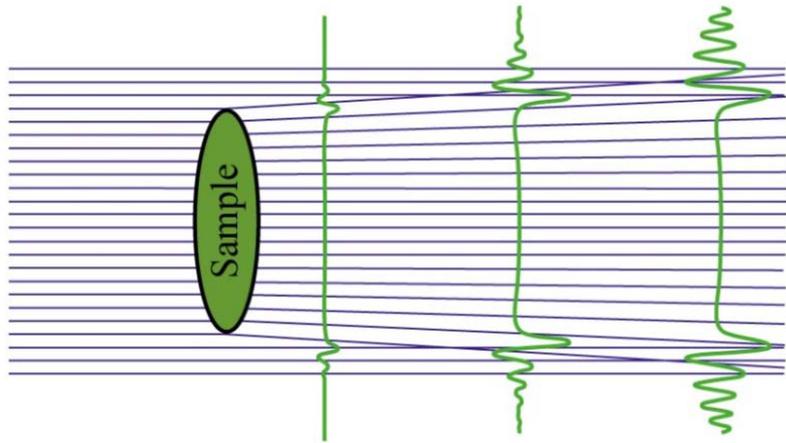
Crystal interferometry



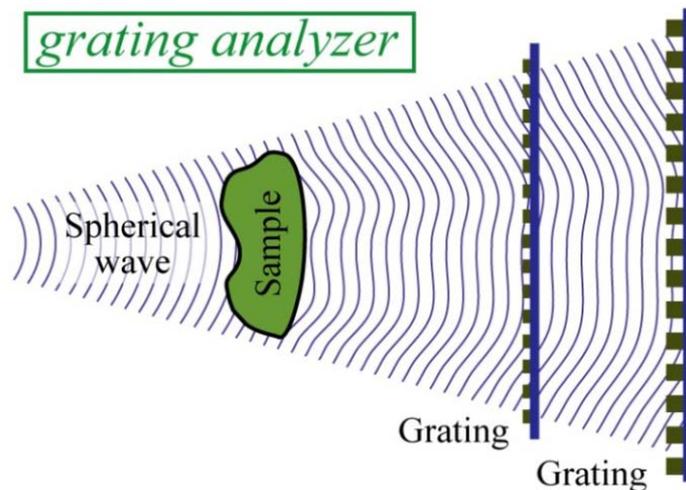
Diffraction Enhanced Imaging (DEI)



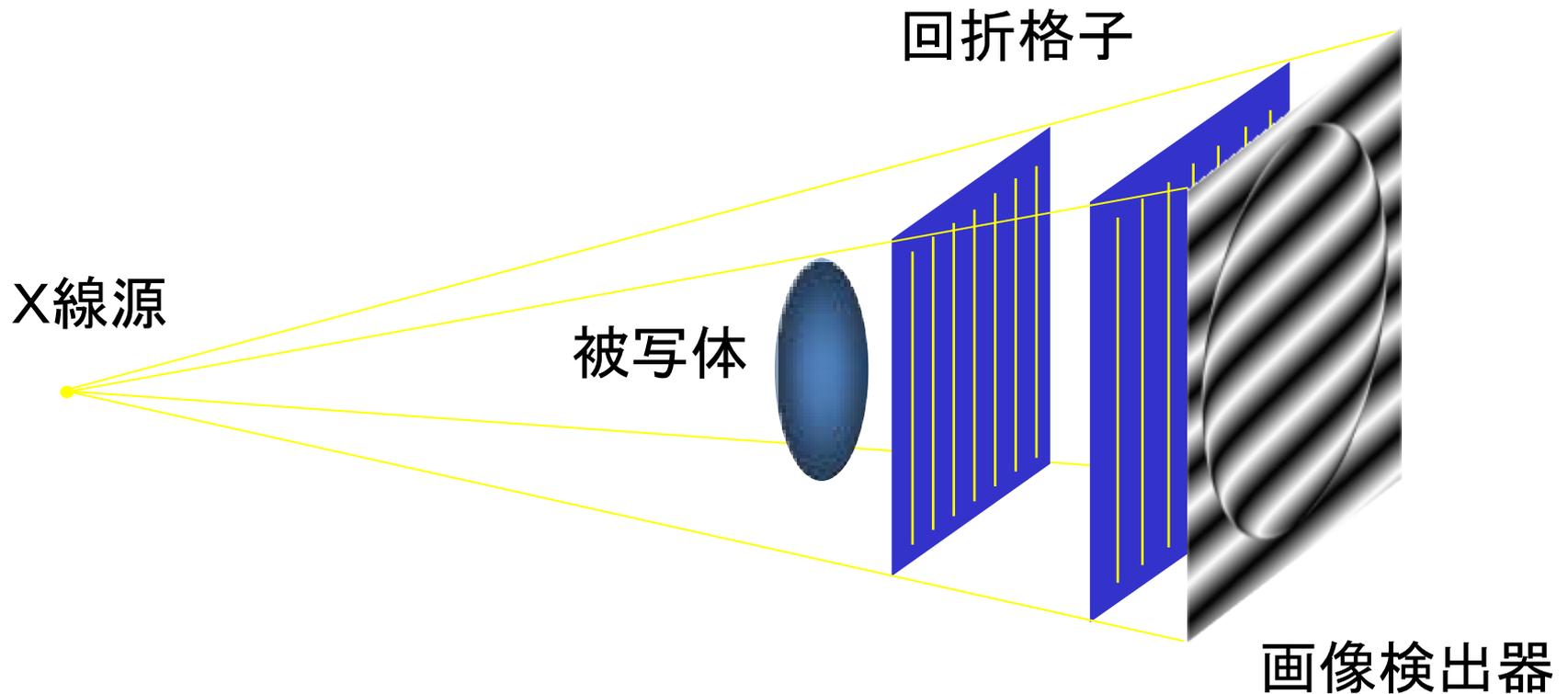
Propagation-based method



Grating interferometry (X-ray Talbot interferometry)



X線Talbot干涉計



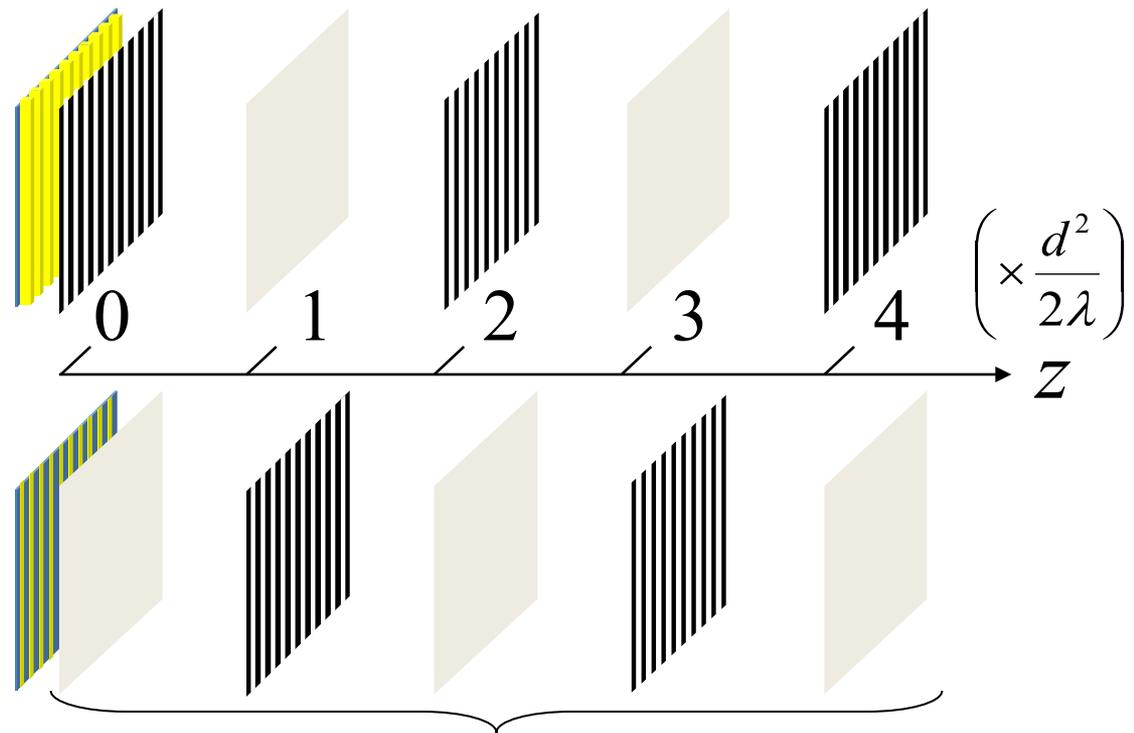
Talbot効果 (平面波)

— *H. F. Talbot* が1836年に発見

振幅回折格子

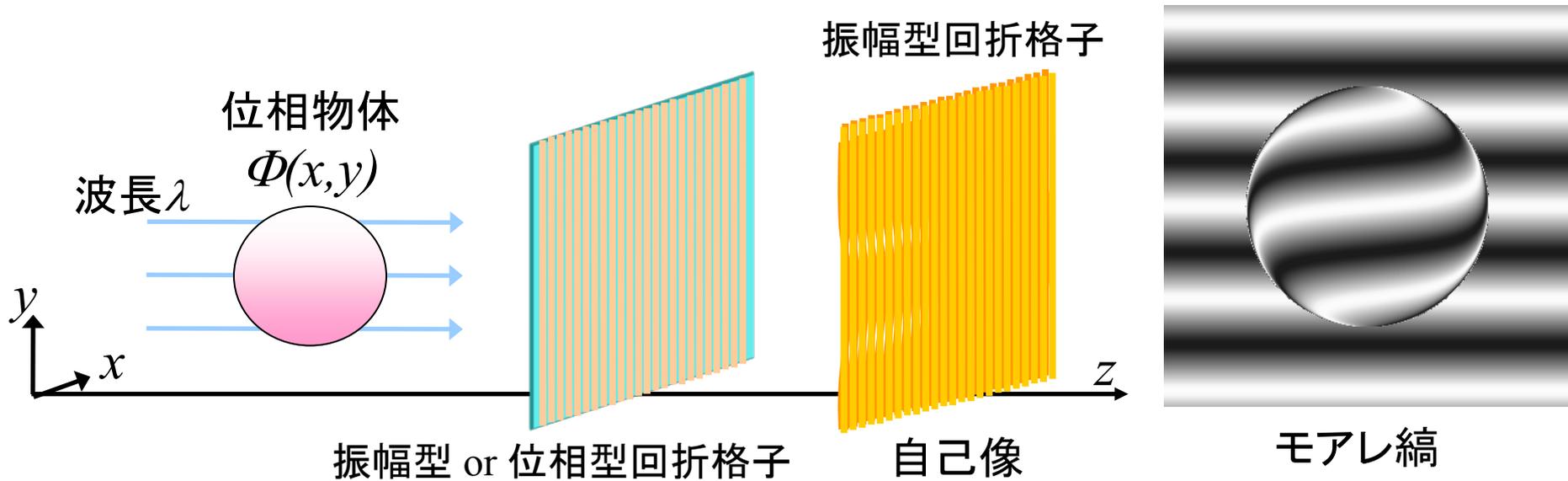
可干渉光

位相回折格子



空間に現れる強度分布

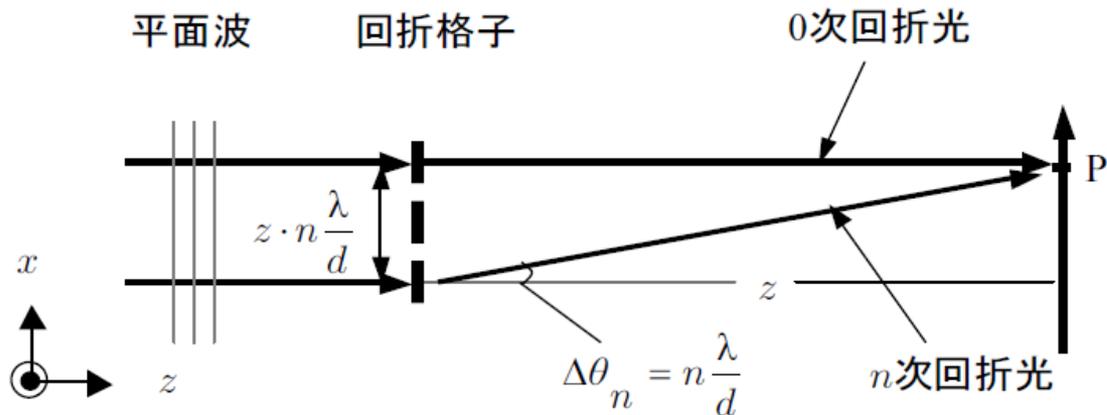
X線Talbot干渉計(平面波)



モアレ縞のゆがみ $\rightarrow \varphi_x(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x}$

空間コヒーレンスの影響

第一回折格子の位置での空間コヒーレンス長が有限の場合



$$I(x, y) = \sum_n \mu(pnd) b_n \exp\left(i2\pi \frac{n}{d} x\right)$$

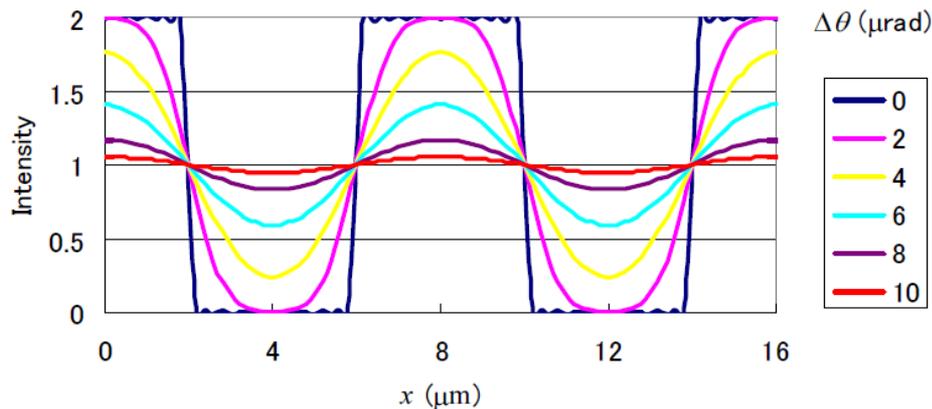
光源の強度分布をガウシアンと仮定

van Cittert-Zernikeの定理により

$$\mu(L) = \exp\left[-2 \left(\frac{\pi \Delta\theta}{\lambda} L\right)^2\right]$$

$$\Delta\theta = \sigma_s / R$$

自己像の強度プロファイルの $\Delta\theta$ 依存性



※第一回折格子による吸収を無視した場合

時間コヒーレンスの影響

平面波 位相型回折格子

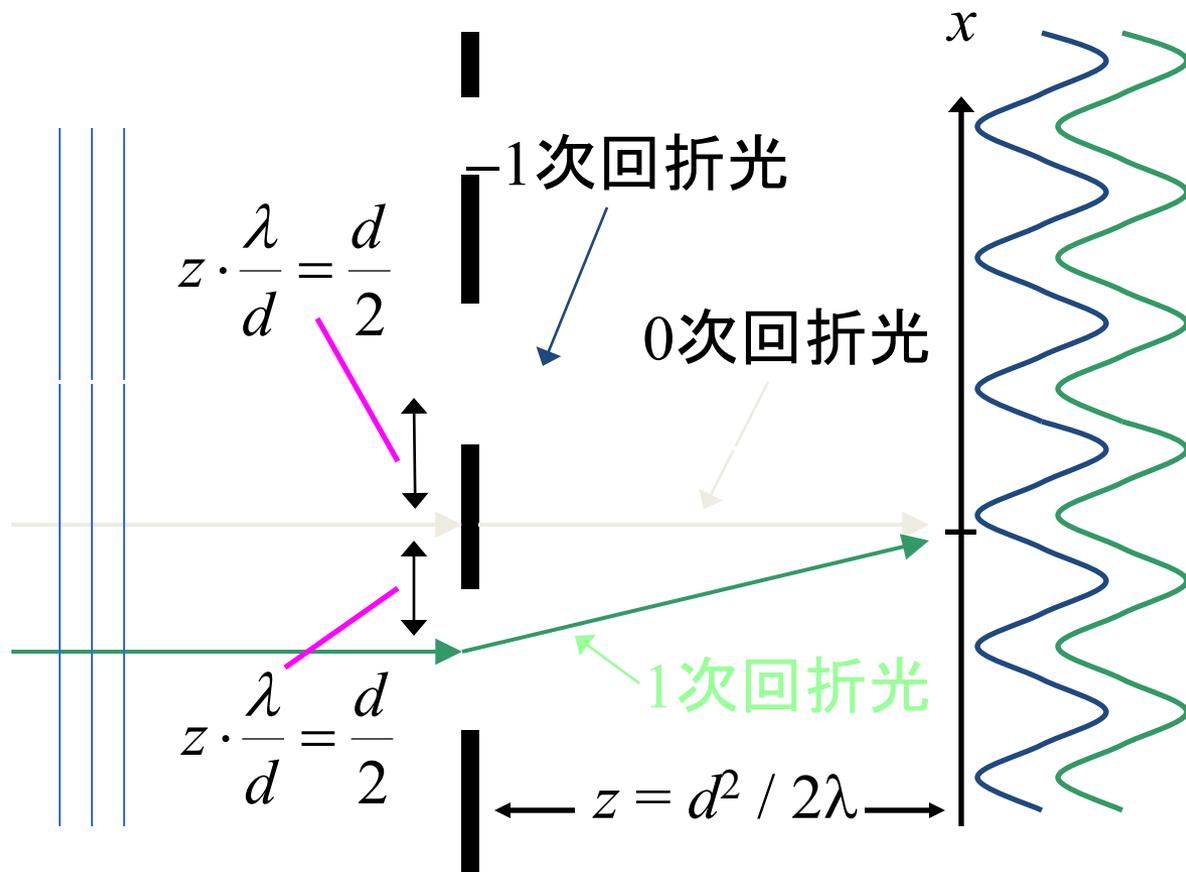
0次と1次の光路差は

$$l_t > z\lambda^2 / 2d^2$$

必要とされる時間的
コヒーレント長さ l は、

$$l > \lambda / 4$$

($p=1/2$ の場合)



時間コヒーレンスは自己像にほとんど影響を与えない。14

X線Talbot干渉計の特長

- 実験配置が非常にシンプル – 高い機械的安定性を必要としない
- 大面積のイメージングの可能性
- 連続X線(準単色X線)が利用できる
- 発散ビームが利用できる
- 試料まわりのスペースを大きくとれる

コンパクトな実験室光源の利用が可能

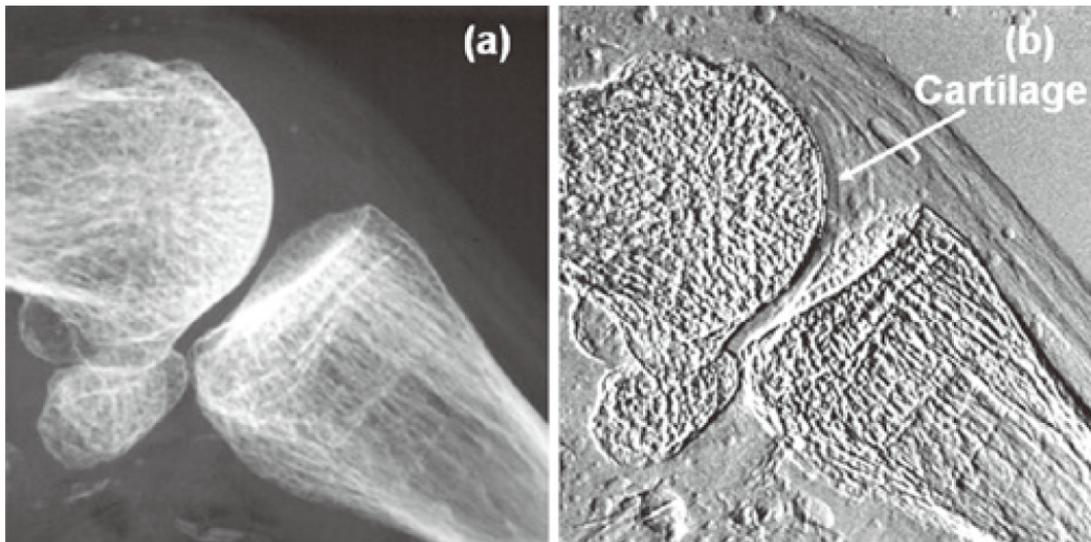


医療診断への応用に期待

リウマチ診断機器の開発

疾患の早期発見→薬による治療が可能

解剖献体の指関節



2011年2月プレスリリース

東京大学とコニカミノルタエムシーなどは16日、従来は難しかった軟骨を映すエックス線装置を開発したと発表した。エックス線が体内を透過する際に行方不明

新しいエックス線装置で得られる画像

軟骨映すX線装置開発

東大・コニカミノルタ系など

向が1万分の1度ずれる特性に注目。このわずかなずれを検出する仕組みを作り出した。11月にも関節リウマチ患者を対象とした臨床試験を実施、実用化を目指す。

透過時の「ずれ」検出

開発には埼玉医科大学、国立病院機構名古屋医療センター、兵庫県立大学も参加した。

新しいエックス線装置は、波の方向をそろえる「エックス線格子」を3つ組み合わせた。エックス線格子

研究グループは軟骨がける関節リウマチのほか、乳がんの早期発見や非破壊検査などに応用できるとみている。

は6センチ角のシリコンエハで表面は金メッキがされ、幅が約4〜20μm（μmは100万分の1）の溝が掘られている。このエックス線格子の組み合わせによって1万分の1度のずれも検出できる。ろになり、感度が従来に比べて1000倍向上。軟骨も見えやすくなったという。

回折格子を利用した X線位相イメージングの研究 — 世界的な動向

欧州

- ◆ミュンヘン工科大学
- ◆Paul Scherrer Institute (PSI)
- ◆Swiss Center for Electronics and Microtechnology (SCEM)
- ◆Institute for Microstructure Technology (IMT), Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
- ◆チェコ工科大学
- ◆コペンハーゲン大学
- ◆University College London (UCL)
- ◆ESRF
- ◆ANKA
- ◆Diamora

韓国

- ◆Dankook大学
- ◆Gwangju大学、Chosun大学
- ◆Pohang Light Source

中国

- ◆精華大学
- ◆BSRF
- ◆SSRF

日本

- ◆東京大学、兵庫県立大学、コニカミノルタMG
- ◆CANON
- ◆その他企業
- ◆JASRI

豪州

- ◆Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)
- ◆Monash大学

米国

- ◆National Institutes of Health (NIH)
- ◆University of Wisconsin-Madison
- ◆Johns Hopkins大学
- ◆Northwestern大学
- ◆APS
- ◆CHESS(コーネル大学)

X線Talbot干渉計の高度化の現状

回折格子配置

- Talbot干渉計
- Talbot-Lau干渉計
- Lau干渉計

スキャンモード

- イメージング (投影像)
- トモグラフィ
- ラミノグラフィ
- トモシンセシス

X線 Talbot 干渉計

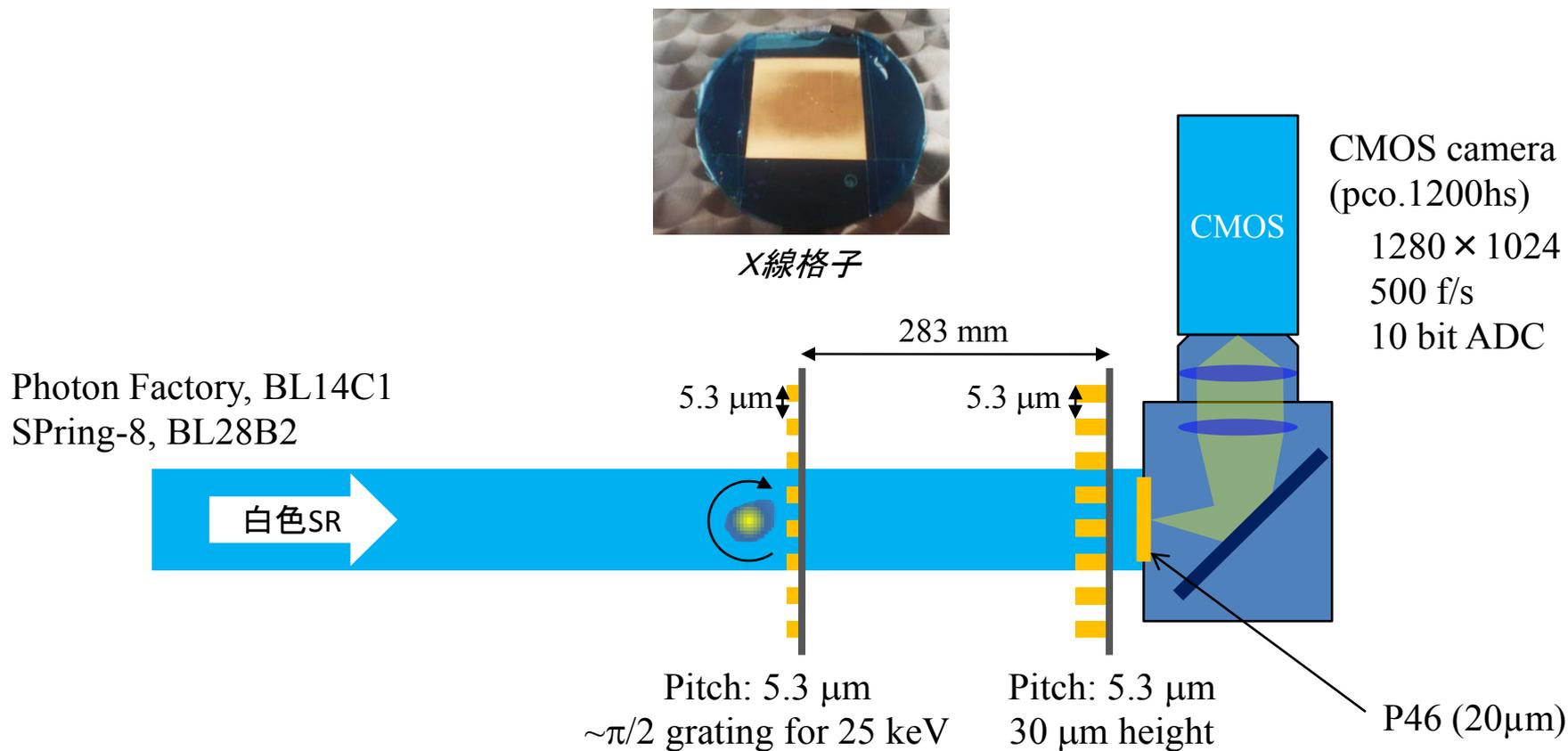
画像

- 吸収像
- 微分位相像
- Visibilityコントラスト像

撮影モード

- 白色放射光による高速撮影
- X線結像顕微鏡との組み合わせによる高解像度撮影

4D位相トモグラフィの実験配置



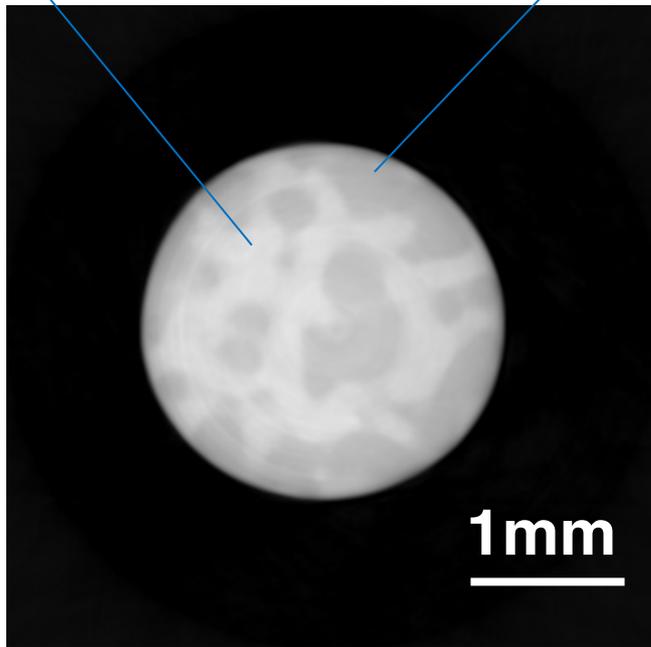
高速位相トモグラフィ

PS/PMMAポリマーブレンド

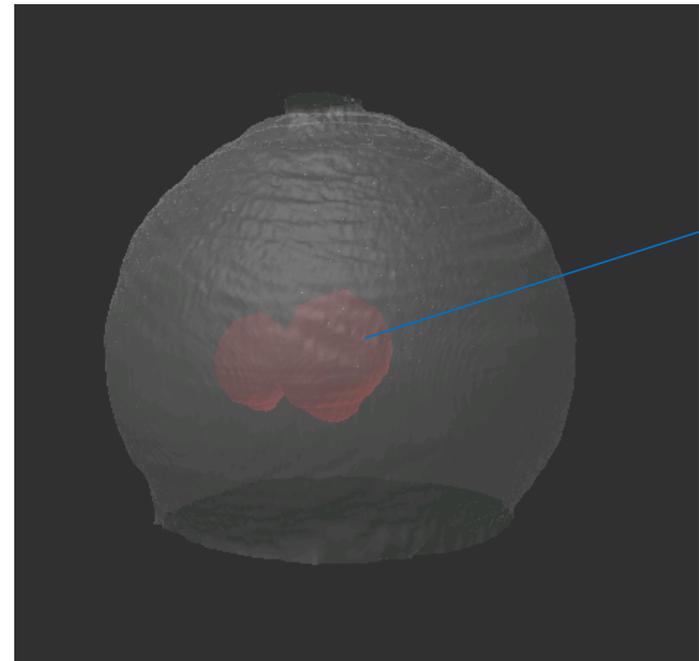
3/32インチPP球

PMMA-rich

PS-rich



Total scan time:
500 msec.

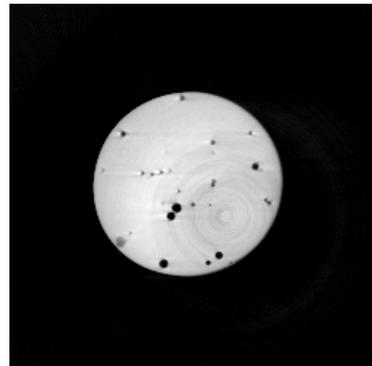


ボイド

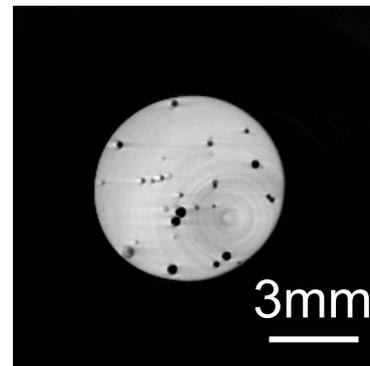
Total scan time:
125 msec.(single bunch mode)

接着剤の4D位相トモグラフィ

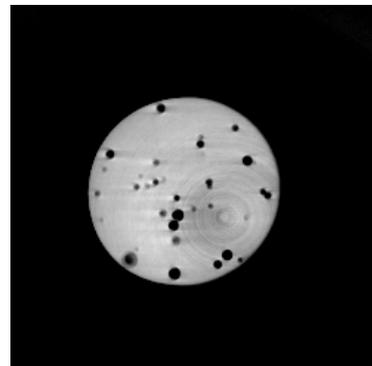
接着剤Scotch(3M社)の
4DCT(照射効果)



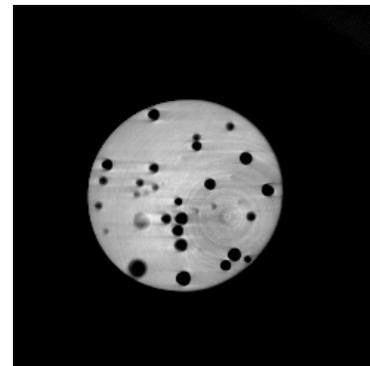
X線照射直後



2秒後



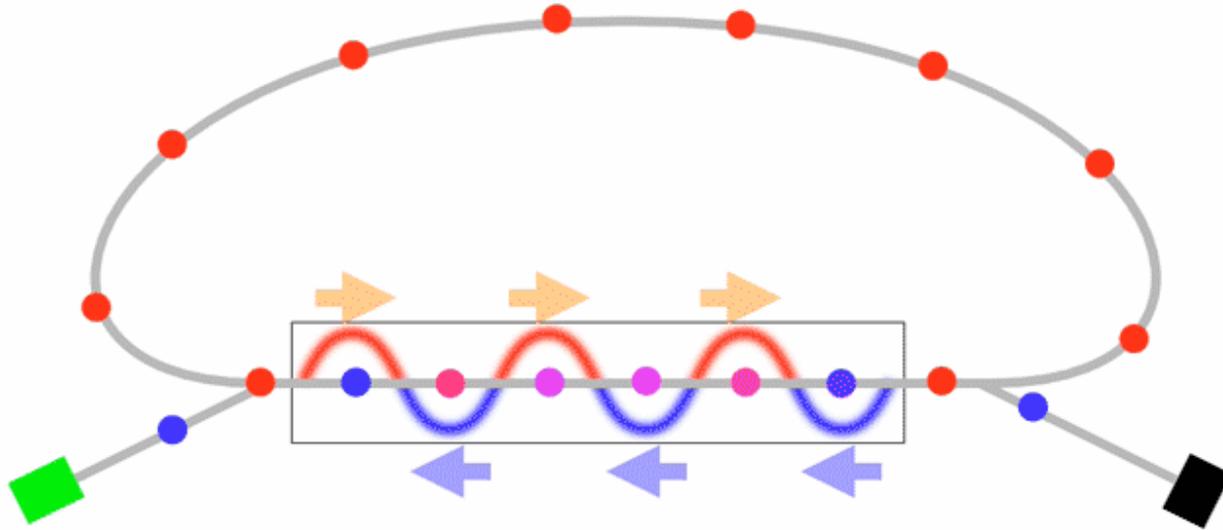
4秒後



6秒後

Exposure time: 1 ms/frame
0.25 sec/180 deg

ERLの特長



- 円に近い形状の微小光源
- 高空間コヒーレンス
- 高輝度X線
- サブピコ秒幅パルス
- 高い繰り返し周波数

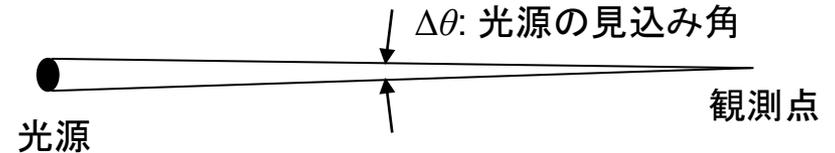
PF-ERLの特性

光のサイズと発散角

SR beam parameters	PF	SPring-8	ERL
	BL-3A	BL09XU	5m undulator
horizontal beam size (σ_x) (μm)	600	298	7.5
vertical beam size (σ_y) (μm)	12.1	6.6	7.5
horizontal beam divergence (σ'_x) (μrad)	92	12.7	3.5
vertical beam divergence (σ'_y) (μrad)	39.6	3.5	3.5

実験ハッチの位置:
光源から50 m下流とすると...

van Cittert-Zernikeの定理



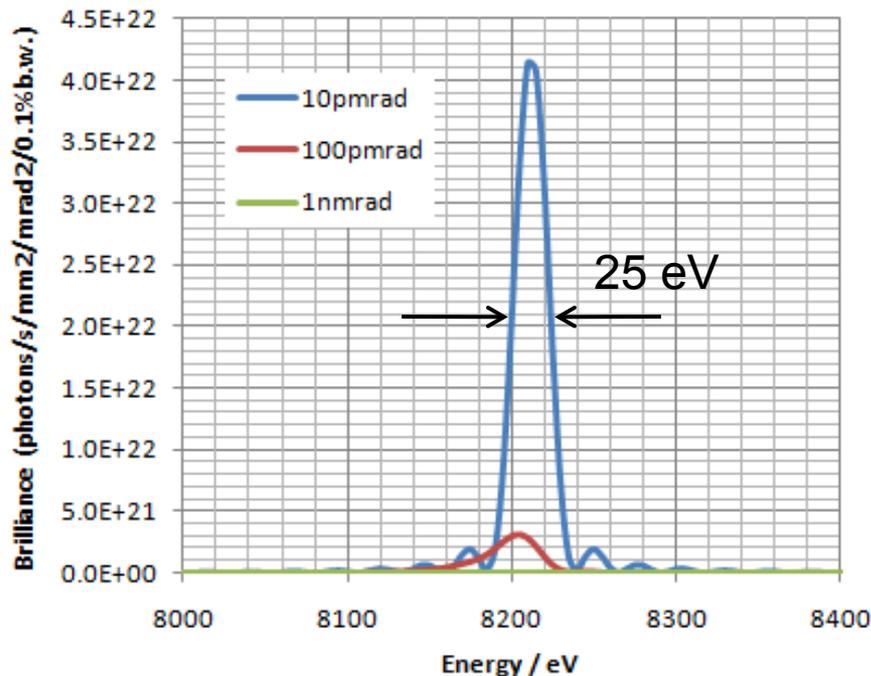
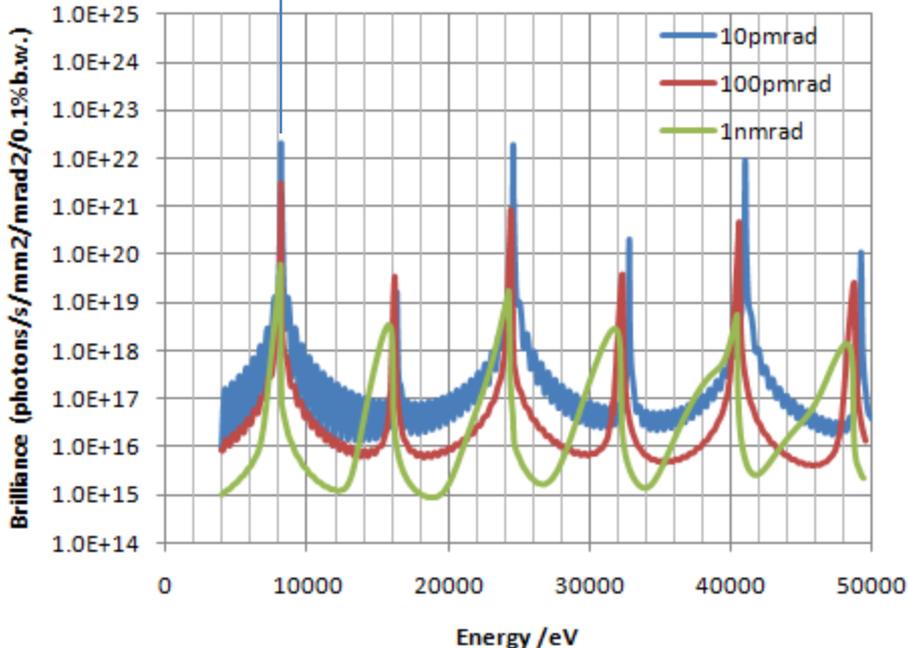
空間コヒーレンス長 $\sim \lambda / (2\pi\Delta\theta)$

➡ $160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$

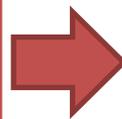
ビームサイズ ➡ $410 \mu\text{m} \times 410 \mu\text{m}$

ERL光源からのスペクトル

1次光 (8.2 keV)



$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 0.3\%$$



$$\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \approx 50 \text{ nm}$$

時間コヒーレンス長
(Wiener-Khintchineの定理)

利用可能なフォトン数の比較

8.2 keV、1次光の場合で比較(5 GeV)

	SPring-8 BL09XU 5 m undulator	PF ERL 5m undulator
Brilliance [cps/mm ² /mrad ² /0.1%b.w.]	2×10^{20}	4×10^{22}
Photon number [cps]	3×10^{15}	3×10^{15}
Beam size (@50 m) [mm ²]	1.5×0.4	0.4×0.4
Photon number density [cps/μm ²] (@ 50 m)	5×10^9	2×10^{10}

Si(111) double crystal
monochromator (111 対称反射)



$$\Delta\lambda \sim 9 \times 10^{-5} \text{ \AA}$$

	SPring-8 BL09XU 5 m undulator	PF ERL 5m undulator
Photon number [cps]	2×10^{13}	5×10^{13}
Beam size (@50 m) [mm ²]	1.5×0.4	0.4×0.4
Photon number density [cps/μm ²] (@ 50 m)	4×10^7	3×10^8
Photon number density [cps/μm ²] (@ 50 m, 40 mm × 40 mm)	1×10^4	3×10^4

非対称反射でビームサイズを広げた場合

モノクロ結晶が不要な方法

- X線Talbot干渉計
- 伝搬法

cf. PF VW#14(白色)の場合
~ 10^{13} cps (38 mm × 8 mm)
= ~ 10^5 cps/μm²

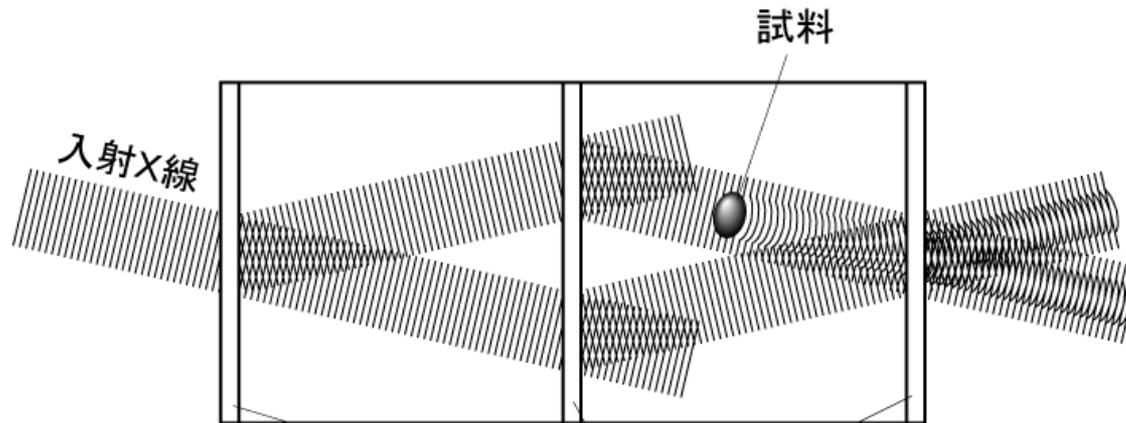
モノクロ結晶が必要な方法

- 結晶干渉計
- DEI

cf. PF VW#14(単色)の場合
~ 10^{10} cps (38 mm × 8 mm)
= ~ 10^2 cps/μm²

ERL光源によって可能になるイメージング — 結晶干渉計によるX線位相イメージングの場合

- 密度のダイナミックレンジの向上 (空間コヒーレンスの向上による)
→ PF VW#14に比べ約10倍
- 密度分解能あるいは時間分解能の向上 (フラックスの増加による)
→ PF VW#14に比べ約100倍
- エネルギー分解能の向上
→ 高空間分解能XAFSイメージングも可能

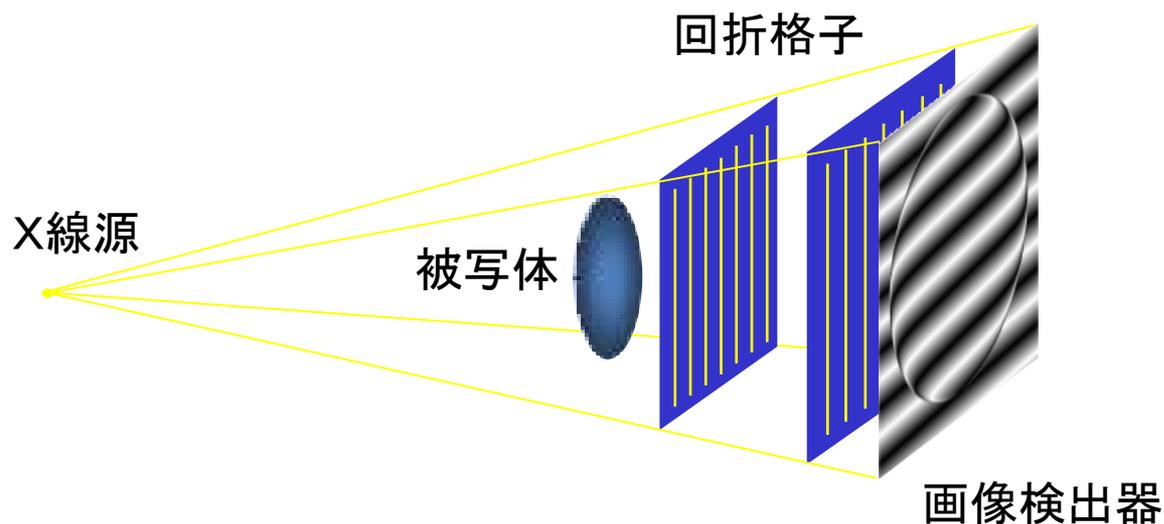


結晶板 (X線ハーフミラー)

※日立製作所 米山明男研究員とのディスカッションによる。

ERL光源によって可能になるイメージング — X線Talbot干渉計によるX線位相イメージングの場合

- 密度分解能、時間分解能の向上 (コヒーレントフラクシオンおよびフラックスの増加による)
→サブマイクロ秒高速位相イメージング & サブミリ秒4DCT?
- 周期の大きい回折格子が利用可能 → 位相差分イメージング
- 二次元Talbot効果が利用可能

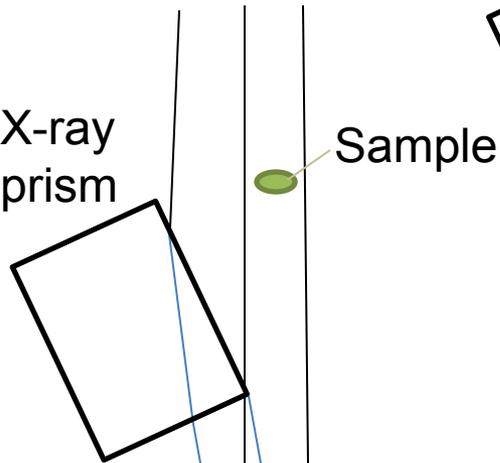


ERLの特性を活かした位相イメージング法

Two-beam interferometer with prism*

X-ray source

X-rays

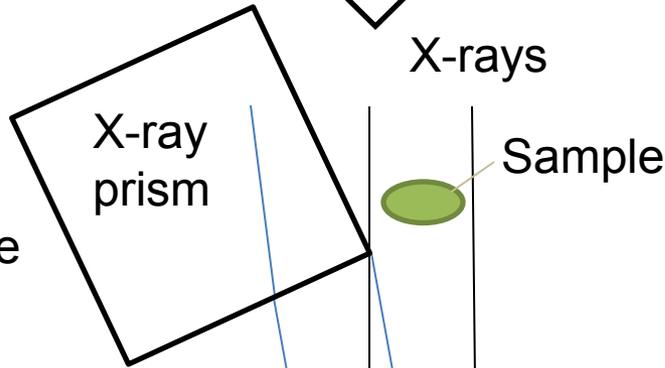


X-ray source



マルチスリット

X-rays



回折格子を利用した位相差分イメージング法(大面積)

非対称結晶で広げられたビーム

X-rays



Talbot効果による自己像



Detector

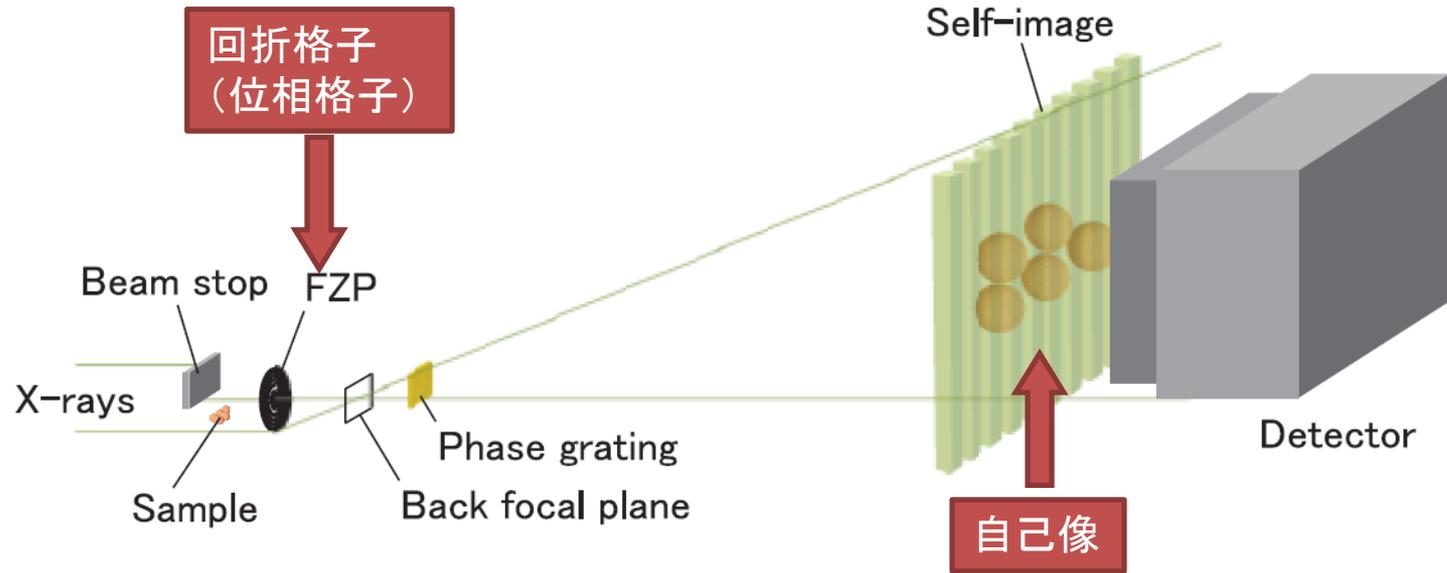
自己像を直接解像 \rightarrow 位相差分像

—高感度

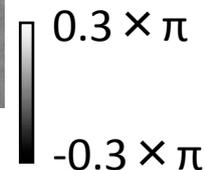
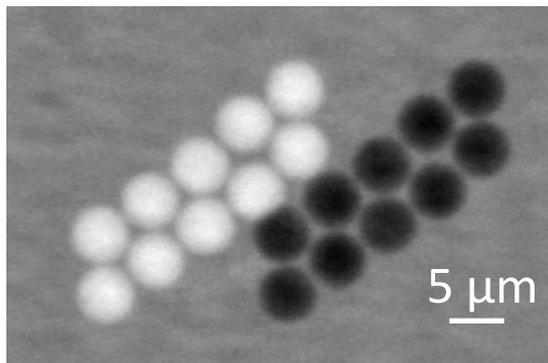
—吸収格子が不要

—伝搬法の情報も含む

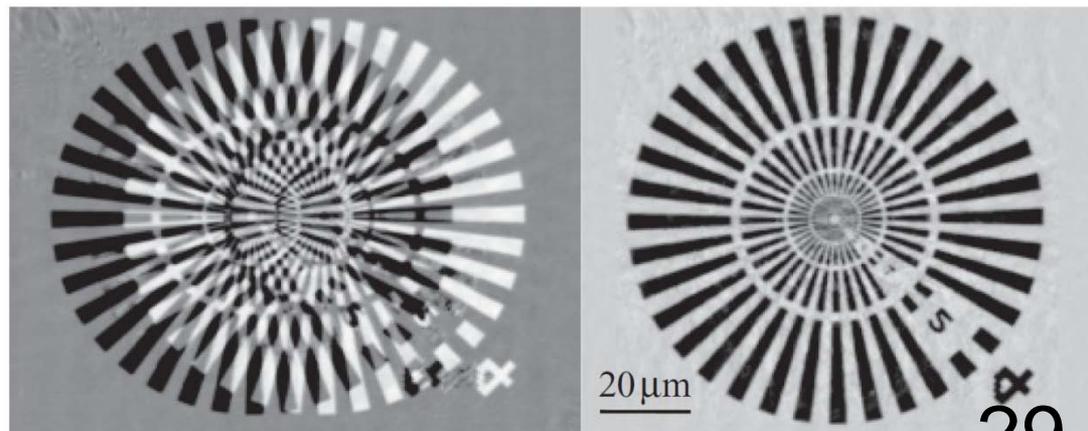
X線結像光学系とX線透過格子の組み合わせによる位相差分顕微鏡



PS球



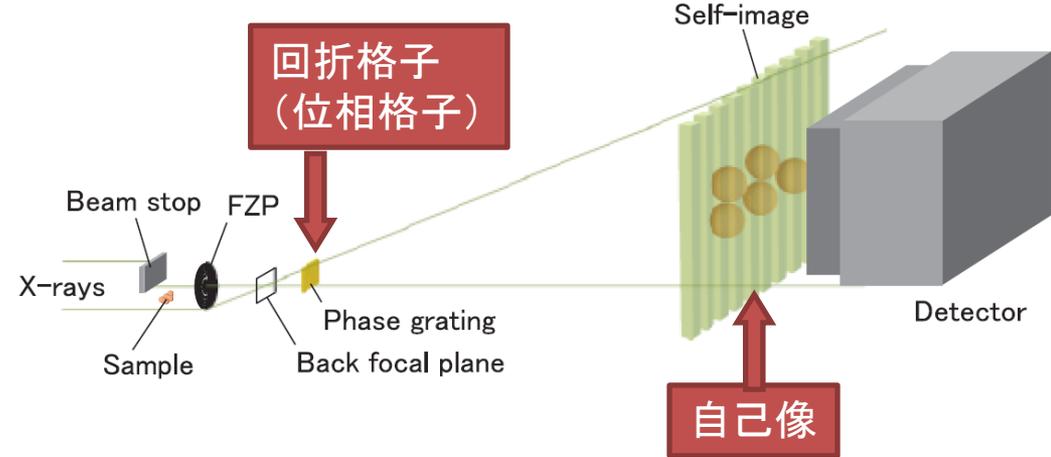
Siemens star chart



X線顕微鏡

結像顕微鏡

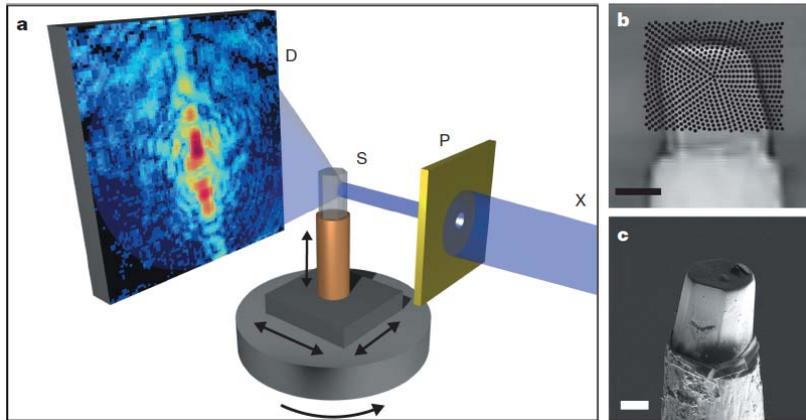
Talbot型位相差分顕微鏡



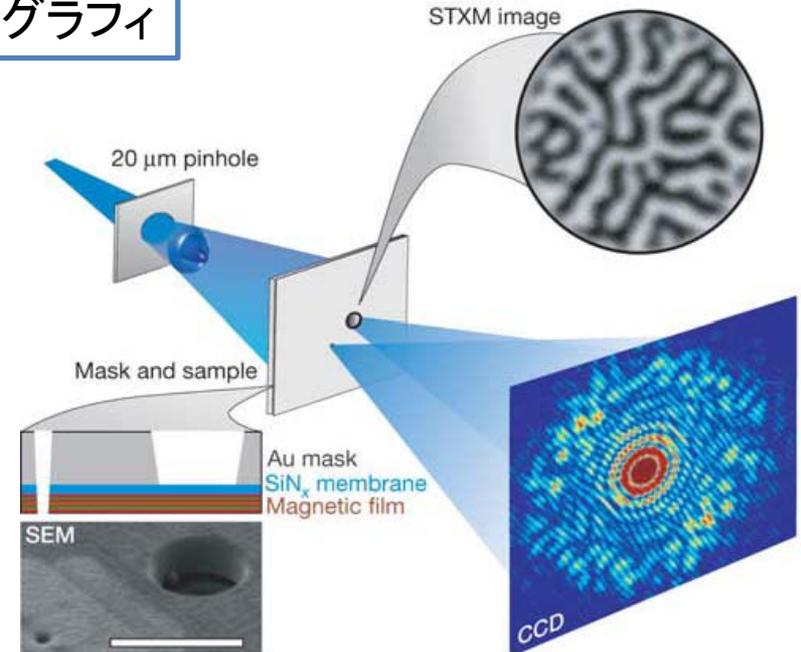
W. Yashiro *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **103** (2009) 180801.

回折顕微鏡

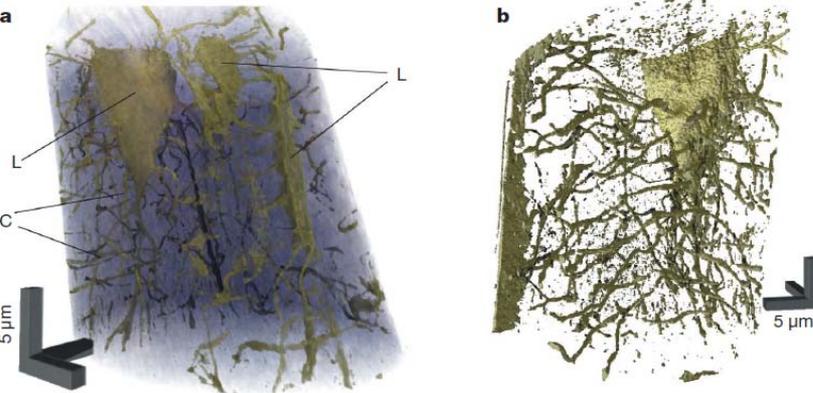
Ptychography



ホログラフィ



S. Eisebitt *et al.*, *Nature* **432** (2004) 885.



M. Dierolf *et al.*, *Nature* **467** (2010) 436.

まとめ

- ◆現在放射光施設で広く利用されているX線位相イメージング法について、ERL光源の出現によってどのようなことが展開可能か検討した。
- ◆光源からのビームを(分光結晶なしに)そのまま使用する場合にはサブマイクロ秒位相イメージング、サブミリ秒位相トモグラフィ(4DCT)が可能
- ◆非対称結晶でビームを広げて使用する場合でも、PF VW#14に比べて100倍程度のフォトン数密度(cps/ μm^2)を利用可能
- ◆高い空間コヒーレンスを利用して、特色あるイメージングが可能
- ◆特にX線集光素子(結像素子)を用いた実験においては、縦横方向に空間コヒーレンス度が高いことがフルに利用可能

さらに...

- ◆100フェムト秒パルスを利用したポンププローブ実験が可能
→パネルディスカッションへ
- ◆非線形光学現象を利用したイメージング？