

日大LEBRA-PXR線源を用いた コンピュータ断層撮像

日本大学量子科学研究所
電子線利用研究施設 (LEBRA)

早川 恭史

第15回日本加速器学会年会 (2018年8月9日, 長岡)

共著者

早川恭史¹, 早川建¹, 野上杏子¹, 境武志¹,
住友洋介¹, 高橋由美子¹, 田中俊成¹

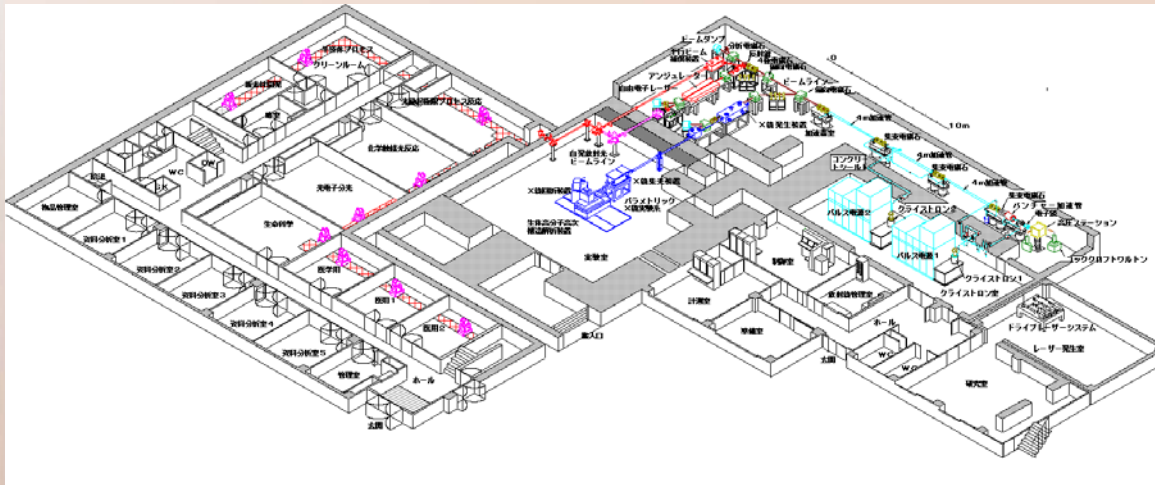
¹ 日本大学電子線利用研究施設
(LEBRA: Laboratory for Electron Beam
Research and Application)

Outlines

- PXRの特性とLEBRA-PXR線源の現状
- LEBRA-PXRを用いた単色X線CT撮像
- CT撮像におけるPXR線源の安定性
- 同時KES-CT撮像による元素イメージング
- まとめ

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA)

LEBRA: Laboratory for **E**lectron **B**eam Research & **A**pplication



125MeV 電子リニアックによる放射光源施設

電子エネルギー: 100MeV (使用許可条件)

平均ビーム電流: $< 5 \mu A$

光源: 近赤外自由電子レーザー (FEL)

パラメトリックX線放射 (PXR)

THz-コヒーレント放射 (CSR, CTR, CER)

LEBRAリニアックの仕様

電子エネルギー	50 – 100 MeV
加速周波数	2856 MHz
バンチ長 (rms)	0.5 – 3 ps
バンチ当たりの電荷量	~40 pC
マクロパルス幅	4 – 20 μ s
マクロパルス強度	~130 mA
マクロパルス繰返し	2 – 5 pps
平均ビーム電流	< 5 μ A
規格化エミッタンス	< 20 π mm mrad

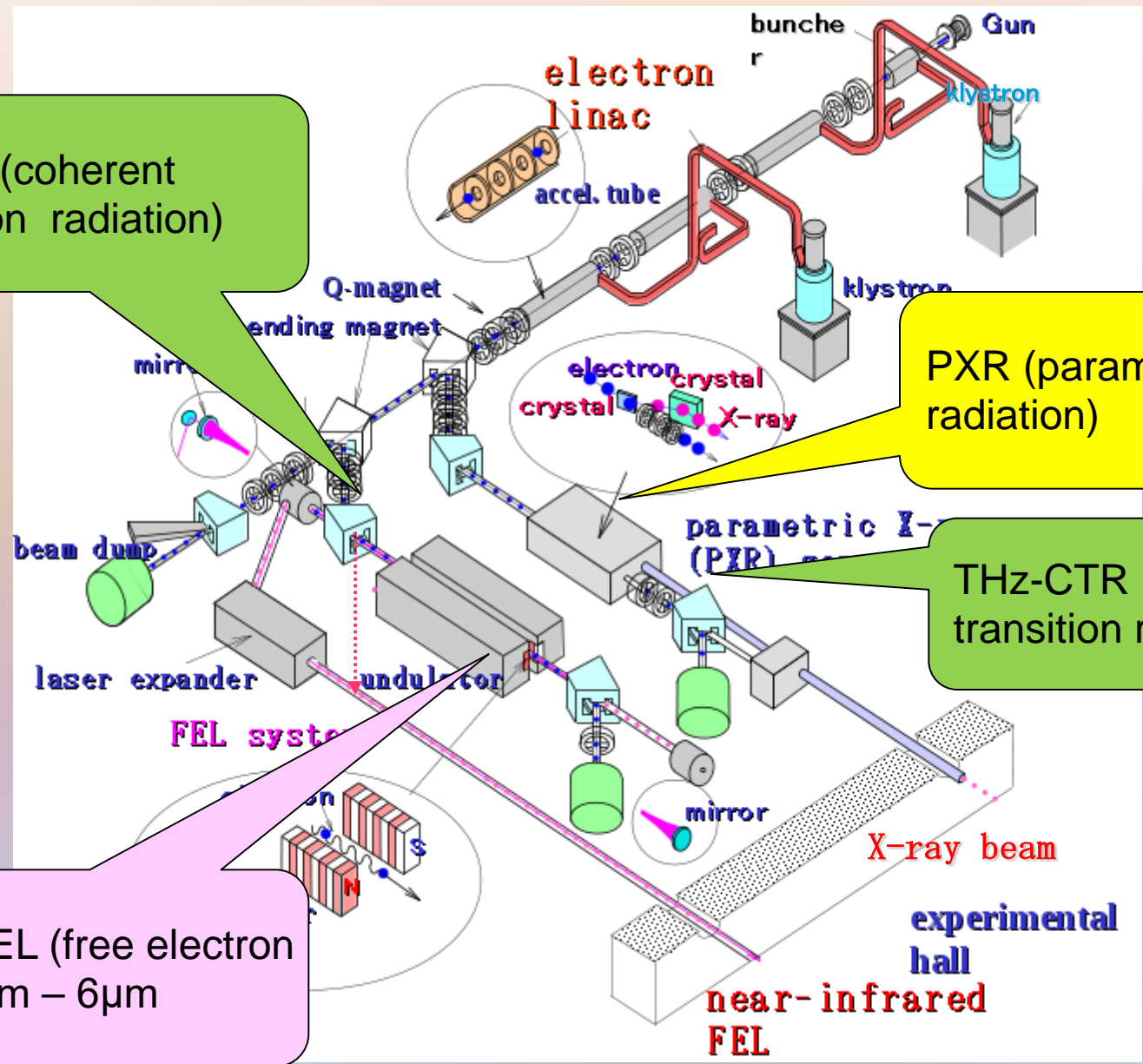
3種類の光源 (赤外, X線, THz波)

THz-CSR (coherent synchrotron radiation)

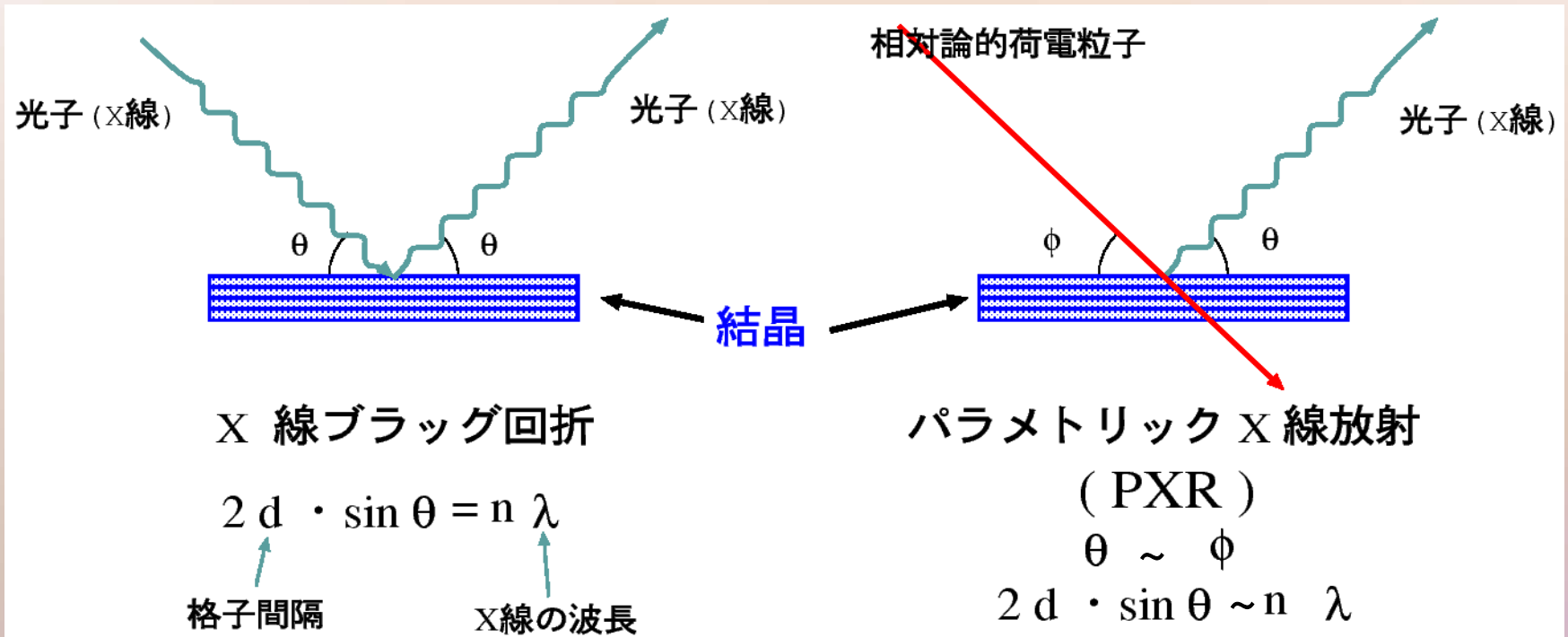
PXR (parametric X-ray radiation)

THz-CTR (coherent transition radiation)

infrared FEL (free electron laser) : $1\mu\text{m} - 6\mu\text{m}$



パラメトリックX線放射 (PXR)



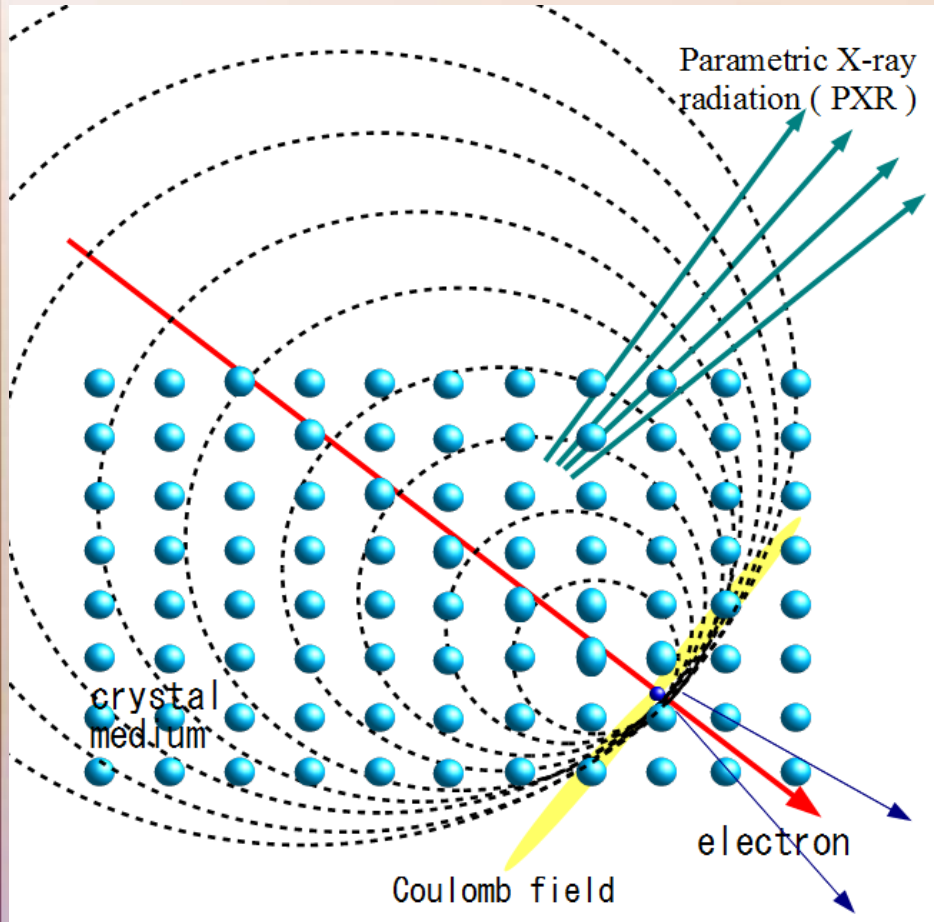
Parametric X-ray Radiation (PXR)

外見上はX線Bragg回折に似ている。

電子の電場を担う仮想光子のBragg回折に相当。

回折X線のエネルギー(波長)はBragg角により可変
(電子エネルギーに依存しない)

PXRの特性



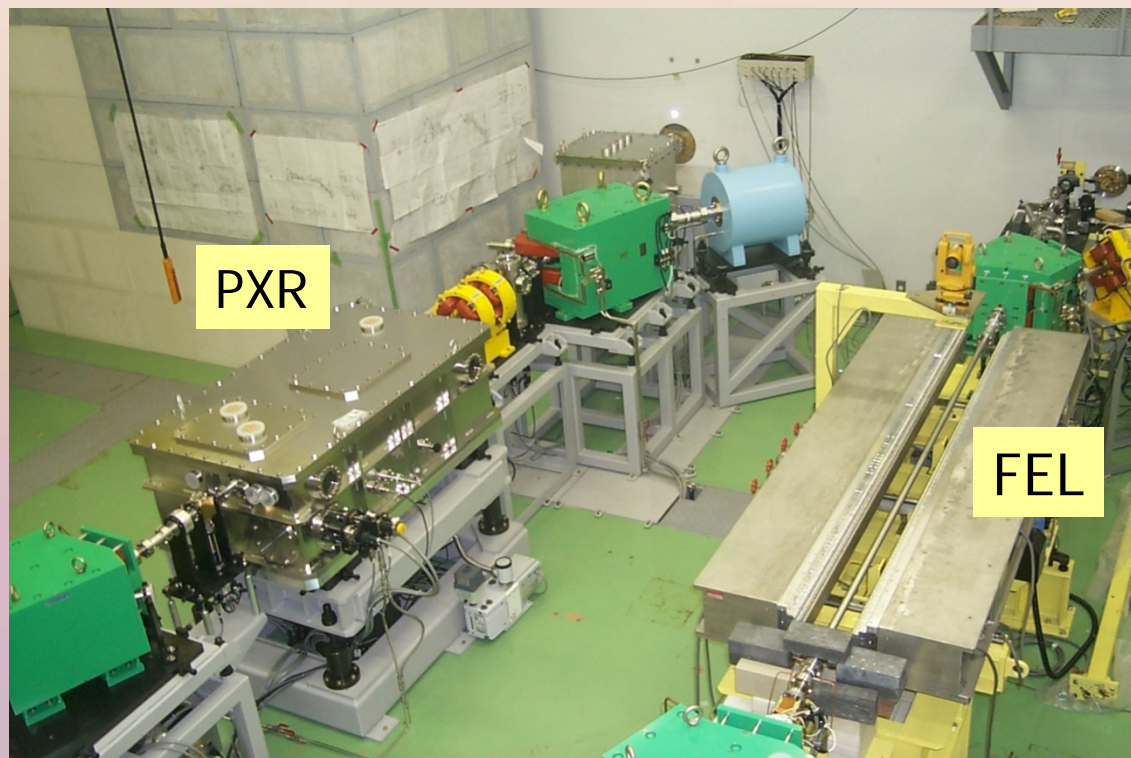
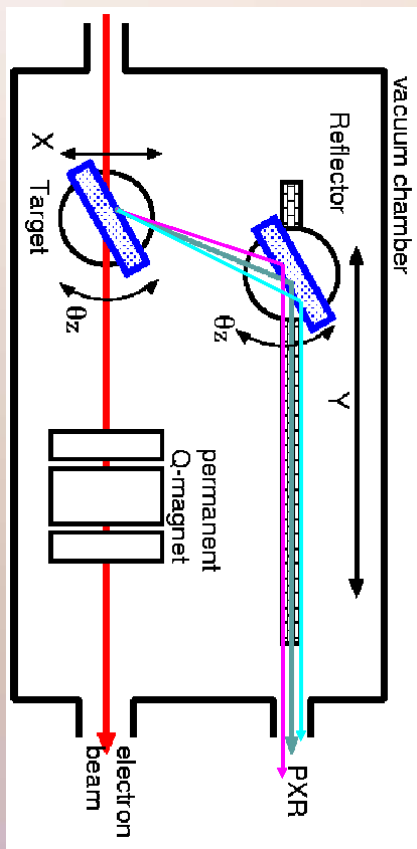
周期的に並んだ媒質原子が
電子の電場で分極して
線源(光源)となる

光速 ~ 荷電粒子の速さ
という条件で、波面が揃う
状況が生じる。

結晶の場合、周期長がÅ領域
なので、放射はX線領域

波面間隔・形状は結晶面の間隔・方位で決まり、
電子のエネルギーや速度への依存が小さい

LEBRAビームライン (FEL & PXR)



PXR線源：2結晶型システムを採用

遮蔽壁を通して実験室(常時立入可)へ輸送

LEBRA-PXR線源の仕様

電子エネルギー	100 MeV
PXR放射源	Si 単結晶
電子ビームサイズ (ターゲット上)	0.5 – 1mm (直径)
X線エネルギー	Si(111): 4 – 20 keV Si(220): 6.5 – 34 keV
照射野サイズ (取出し窓@実験室)	100 mm in dia.
X線光子数率	~ 10^7 /s @17.5keV

2004年に運用開始

LEBRA-PXR線源の特徴

- 単色性

 - 水平方向にエネルギー分散 $\sim 10\%$

 - 局所的な線幅 0.1%以下 (数eV)

- 連続エネルギー可変

 - ターゲット結晶の“Btagg角”のみで制御

- 広くて平坦な照射野

 - $1/\gamma$ に依存して広がる円錐ビーム

 - 直径100mm@X線取出し窓

- 空間コヒーレンス

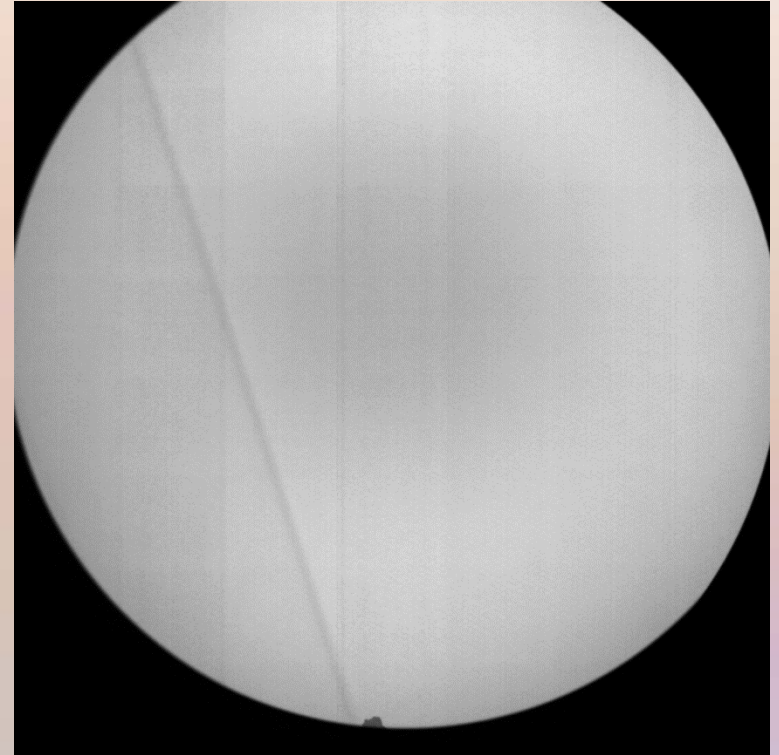
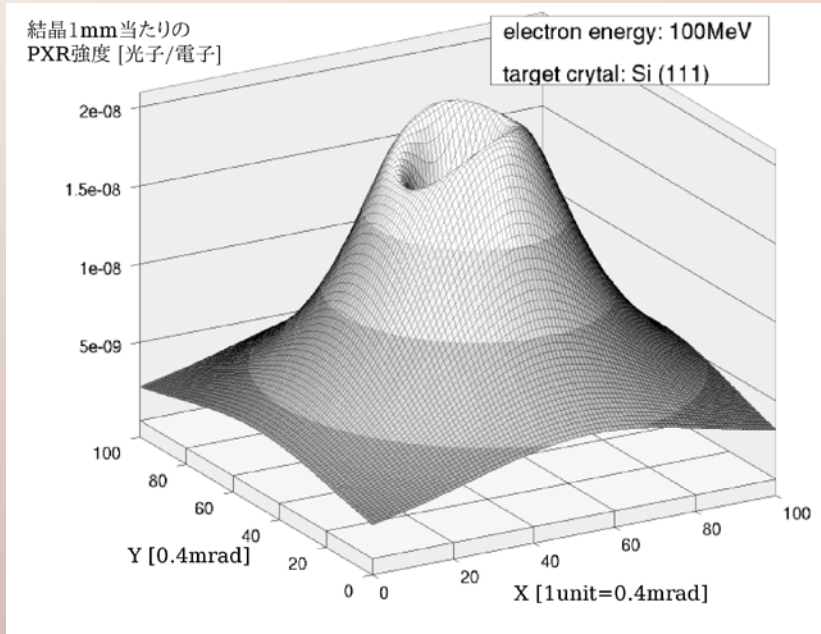
 - μrad オーダーの屈折・散乱を検出可能

- 安定性

 - 電子ビーム軌道を安定にすれば良い

 - X線量の少なさを長時間測定で補うことができる

PXRビームプロファイル



PXRの空間・角度分布

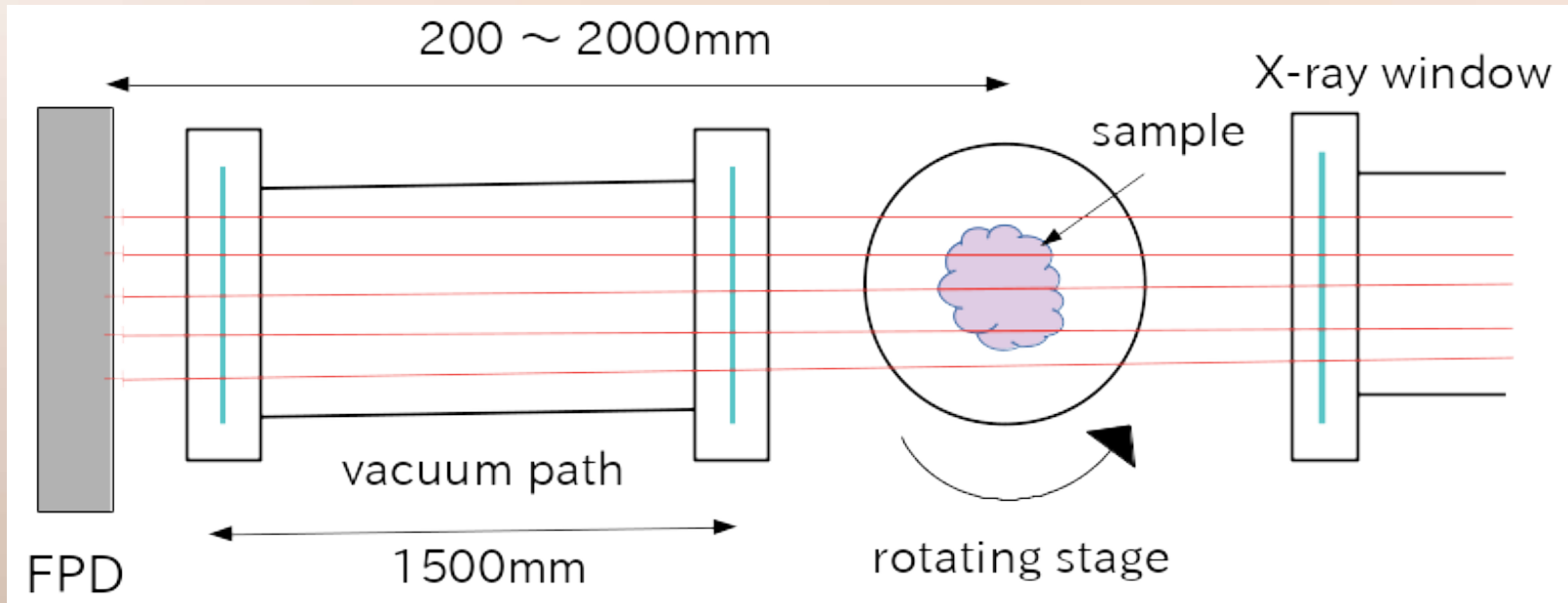
- ・中心に放射が無い
- ・円錐状の広がり ($1/\gamma$ に依存)

15keV PXRビーム(500s平均)
結晶内の電子ビーム発散の
効果でプロファイルが平坦に
なる(イメージング向き)

LEBRA-PXR線源の応用

- 通常のエネルギー可変単色X線イメージング
X線の吸収に基づくコントラスト
- 回折強調イメージング
(DEI: Diffraction-enhanced imaging)
数 μ radの屈折/散乱で画像のコントラストを形成
- X-ray absorption fine structure (XAFS)
分散型XAFS解析が可能
- コンピュータ断層撮像 (CT: Computed tomography)
単色・エネルギー選択性
伝搬型位相コントラストの効果による輪郭明瞭化

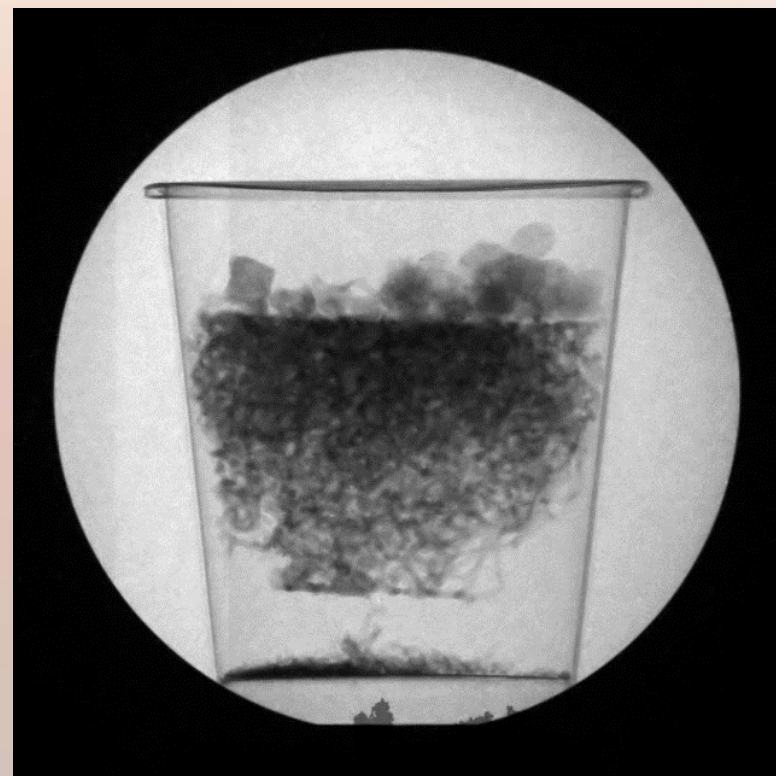
LEBRA-PXRを用いたCT測定系



試料を回転ステージで回転(0 – 180 deg.)
イメージセンサーにはフラットパネル検出器(FPD)を使用
(大面積・高感度 ピクセルサイズ100 μ m)
投影像を1枚当たり数秒～数10秒で撮像し、試料をステップ角
で回転、の繰り返し(ステップ・バイ・ステップ)
場合により、試料-FPD間の距離を取り、真空パスを設置する

PXRを用いたCT撮像の例

軽元素・低密度試料



PXR放射源: Si(220)

試料: 即席カップ麺

試料-FPD: 300mm

投影像枚数: 500枚(角度ステップ 0.36°)

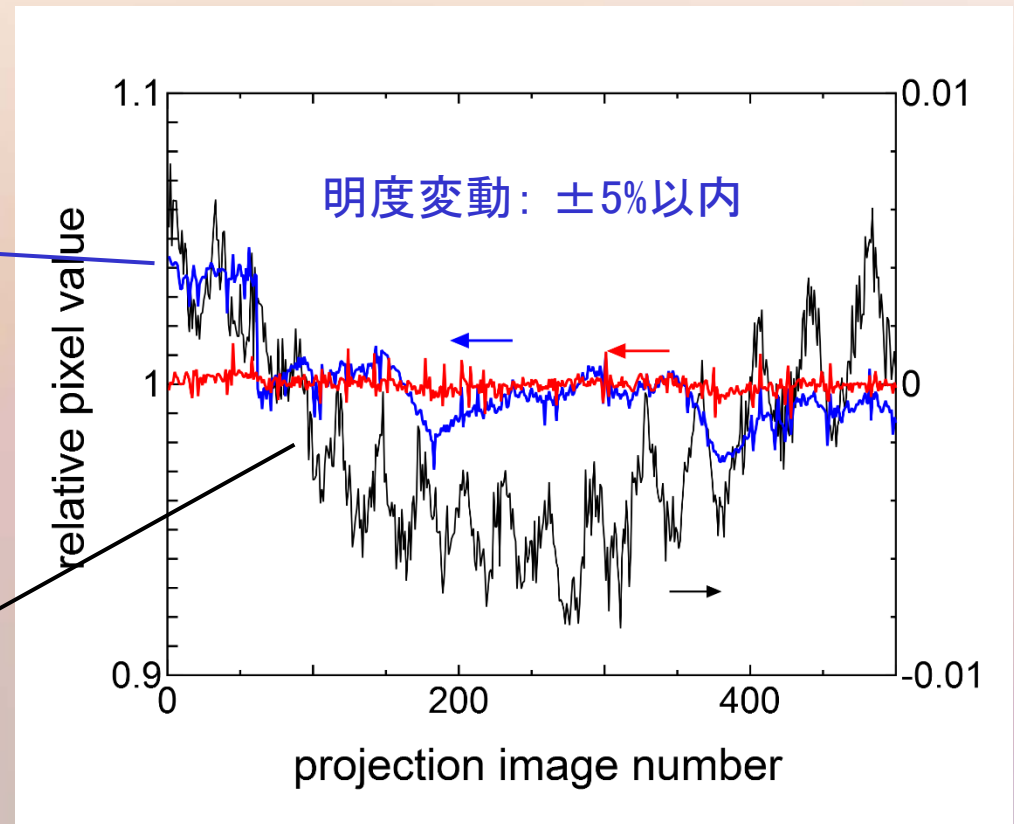
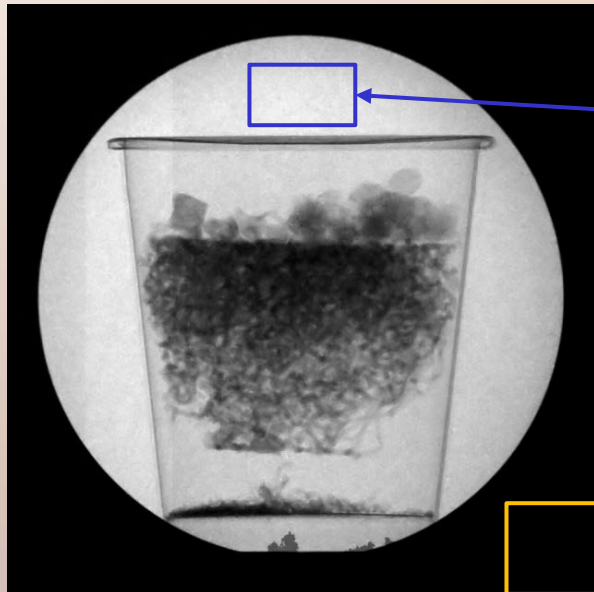
測定時間: 3.5時間 (net)

PXRエネルギー(中心): 22keV

FPD: Shad-o-Box 1280HS

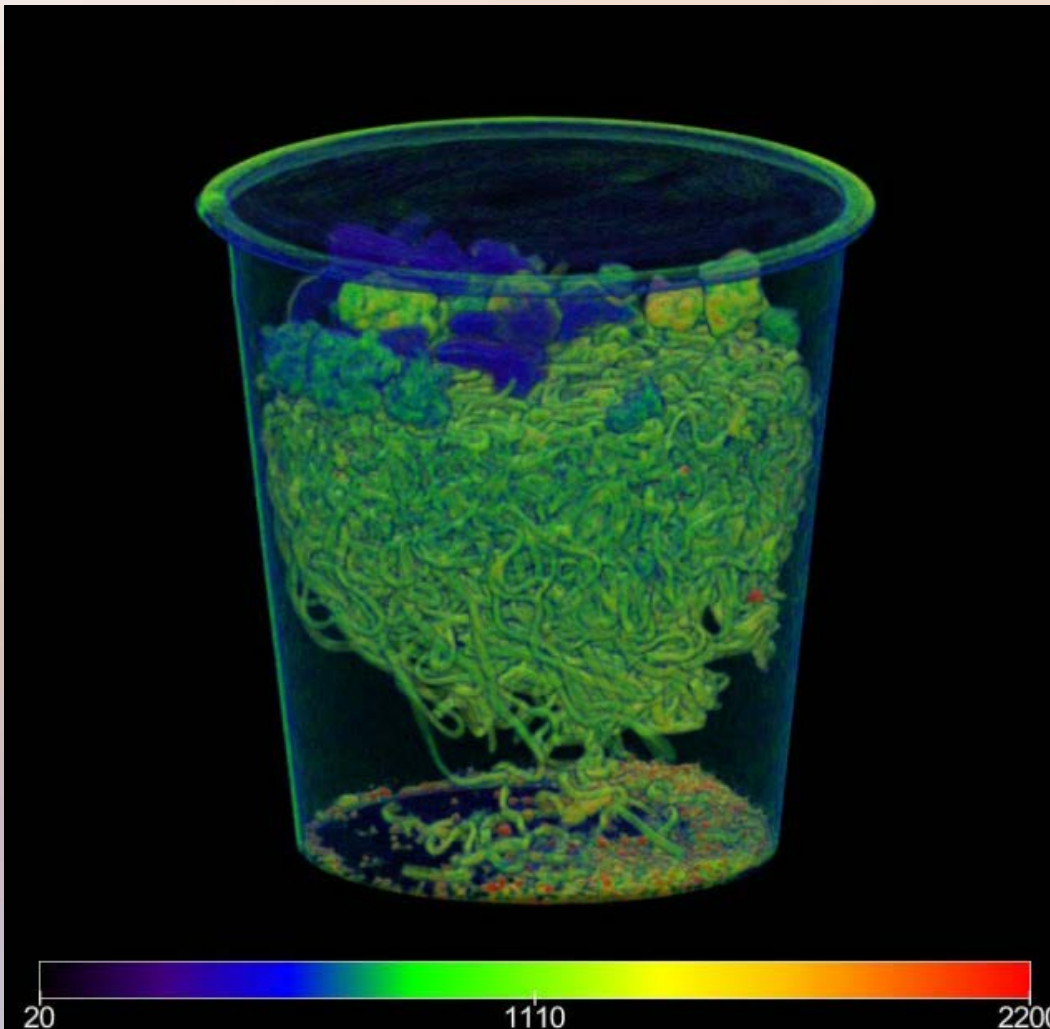
各投影像: 5s露光5回平均(25秒)

CT撮像中のPXRビーム変動



試料が無い明るい領域の明度値を投影像毎にプロット(青線)
室温変化などによるダークノイズの変動(黒線)
(共に明るい領域の500枚平均値に対する相対値)
ダーク変動:減算;明度変動:除算で補正 → 赤線

再構成結果 (ボリューム・レンダリング)

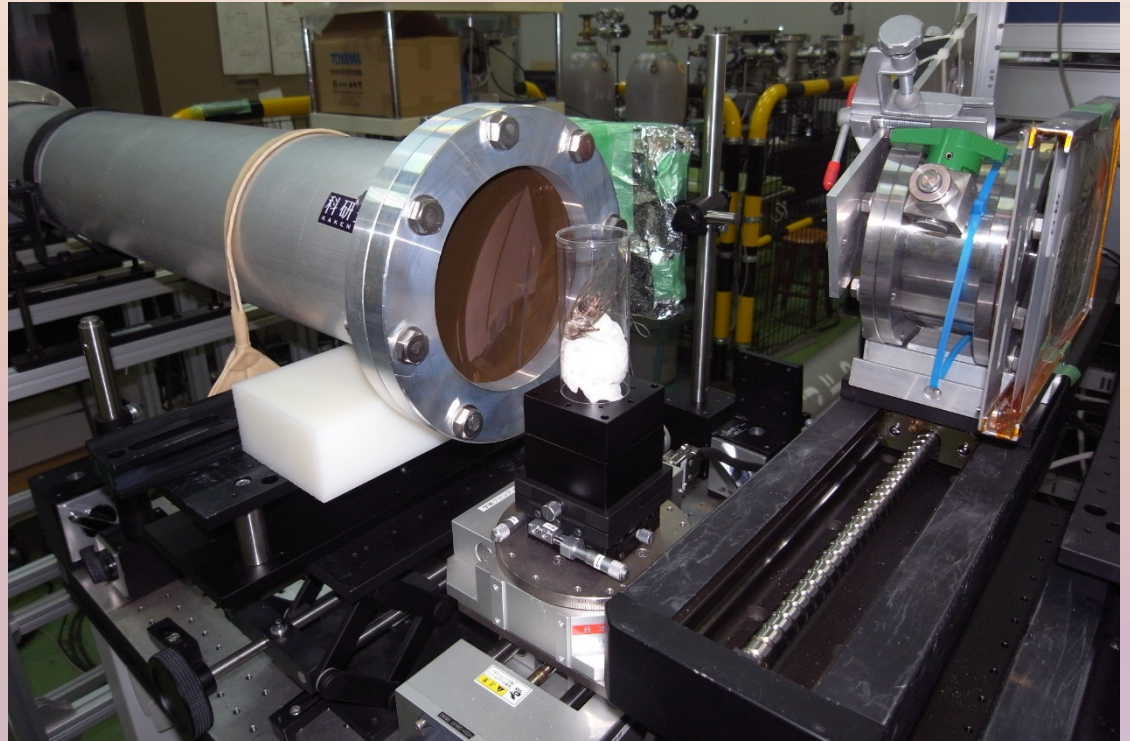


再構成手順

- ・ビームプロファイルで規格化
- ・対数を取って吸収能
- ・サイングラフへ変換
- ・ラドン変換
→ 3次元断層像

ラドン変換では一般的な
フィルター逆投影法 (FBP) を
用いている

生物標本に対するCT撮像



PXR放射源: Si(220)

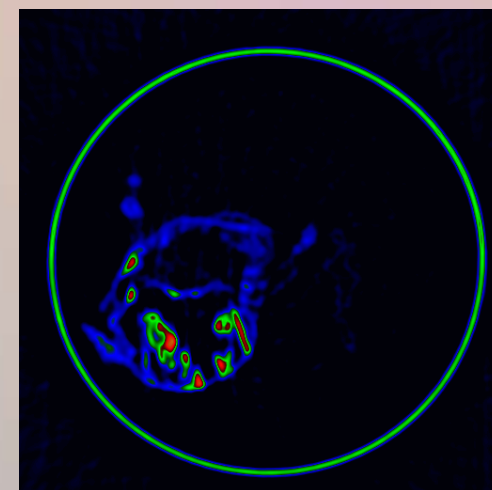
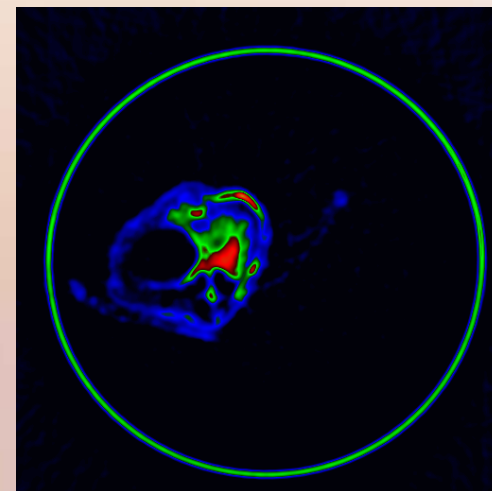
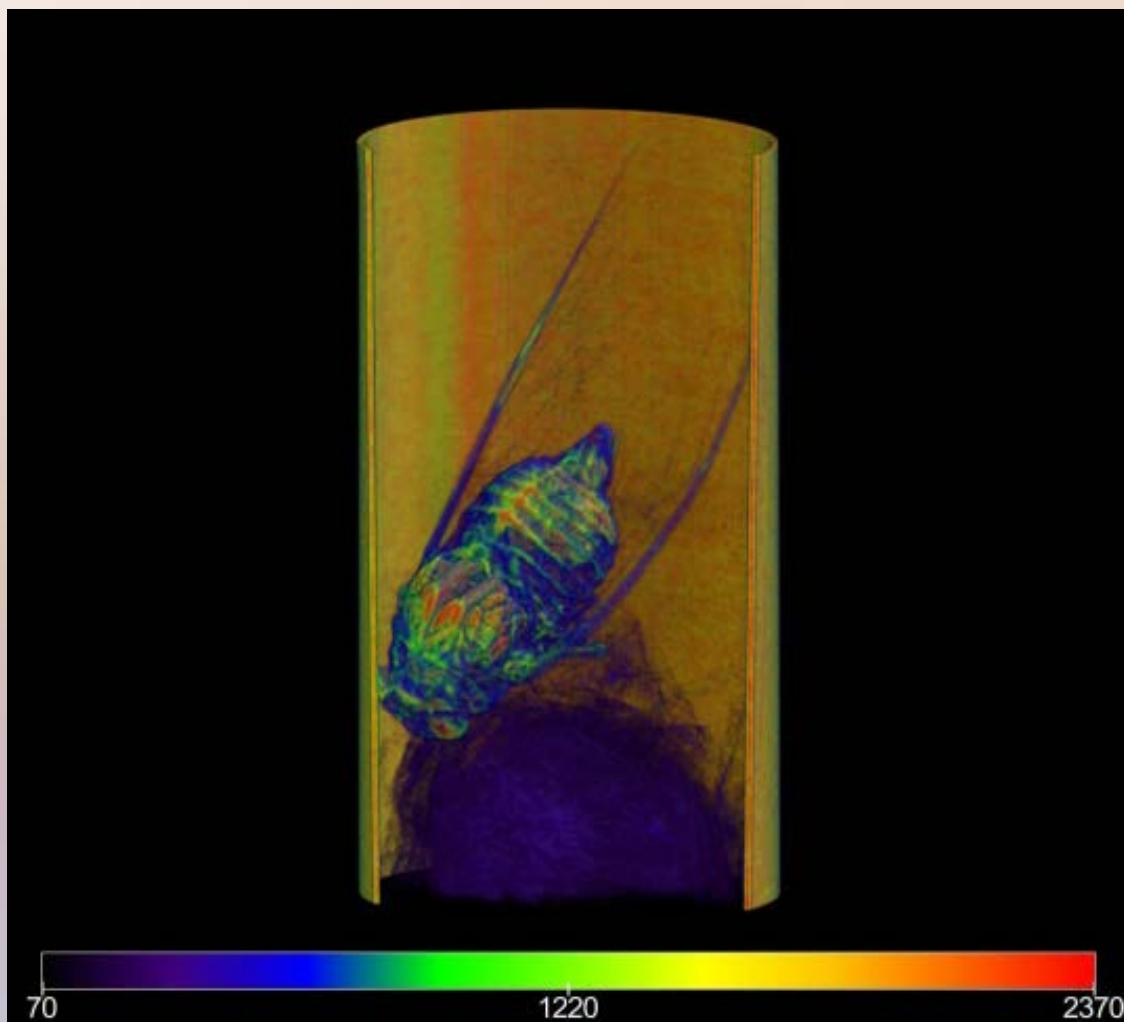
PXRエネルギー: 15.0keV

試料: セミ

投影像: 1s露光20回平均(20s) x 600枚

試料-FPD: 1900mm

CT撮像結果



K殻吸収端を用いた元素イメージング

ある元素のK殻吸収端では、その元素のみX線吸収が不連続的に変わる。



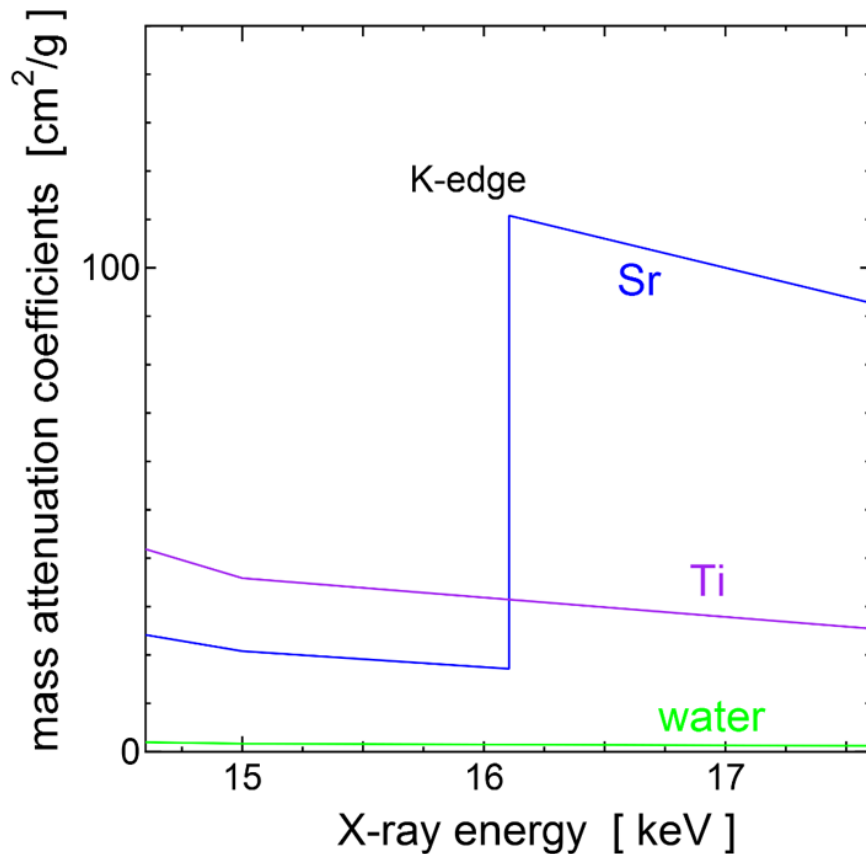
吸収端より高いエネルギーのX線で撮った像と、低いエネルギーで撮った像の差分を取る。



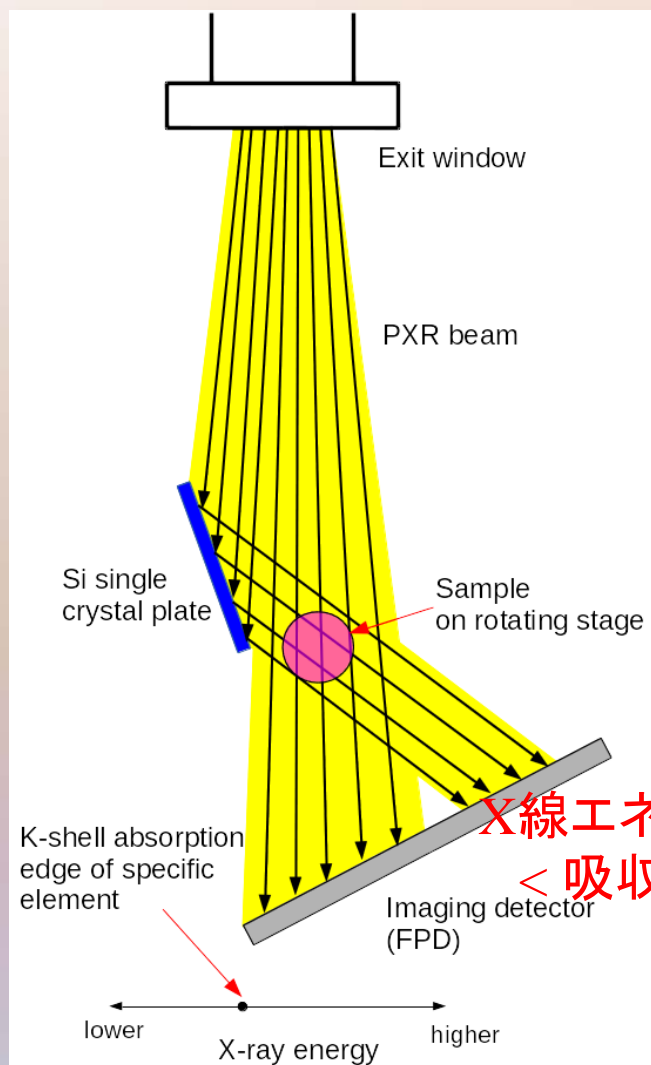
その元素の空間分布を示す画像が得られる。

KES(K-edge subtraction)法と呼ばれる。

Sr K端: 16.105 keV



PXRの特性を利用した2色交差ビーム



X線エネルギー
> 吸収端

PXRのエネルギー分散は円錐
広がりによる角度シフトとBragg
の回折条件で補償しあう関係

円錐ビームでありながら、平面
波的に回折される
(ピーク反射率 70~80%)

PXRビームの中心エネルギーを
特定元素のK殻吸収端に設定、
低エネルギー側のみ結晶で反射

↓
吸収端を挟んだ2色交差ビーム
が形成される

交差ビームを用いた同時KES-CT

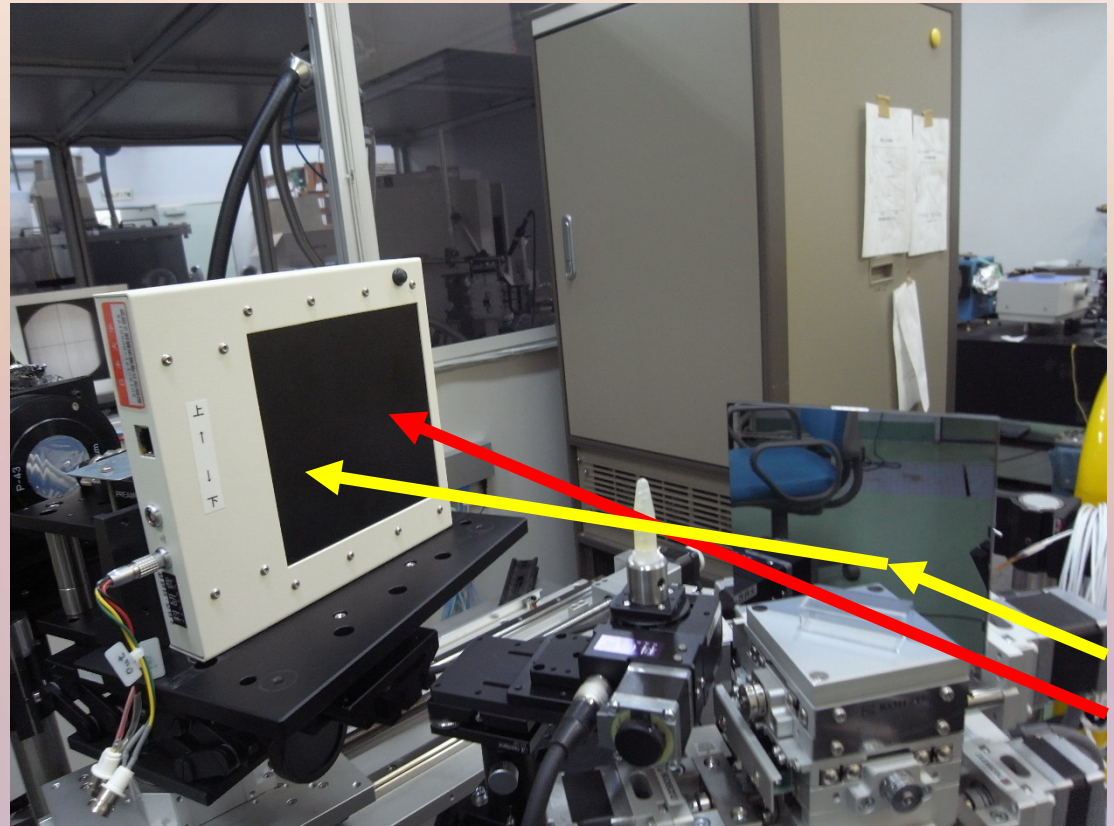


試料:

エポキシ樹脂

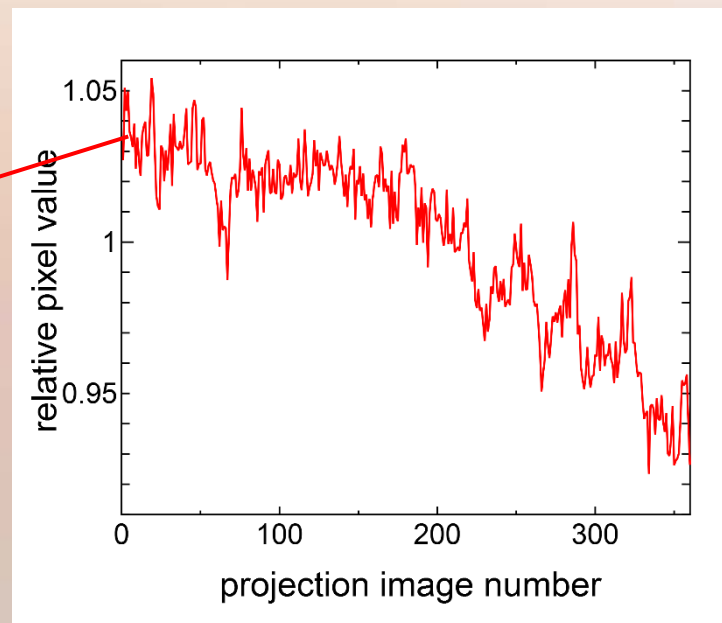
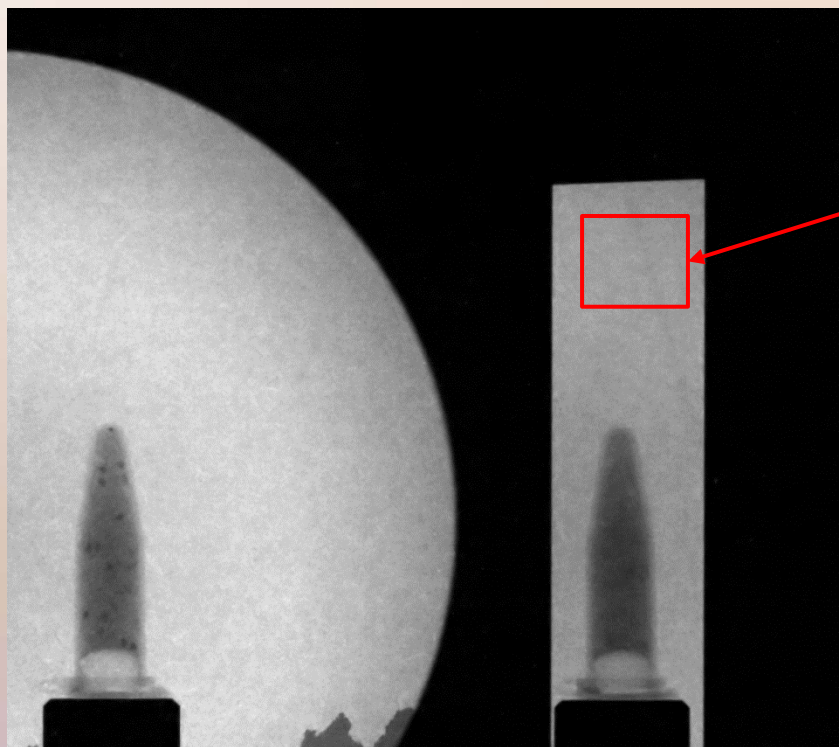
+

SrTiO₃ (STO)で
着色したポリエチ
レンの破片



PXR中心エネルギー: 16.1 keV
2色ビームの交差点に試料を設置すれば
同時にKES法に必要な2種類の像が得ら
れる。CT撮像も可能。

同時KES-CT投影像と安定性

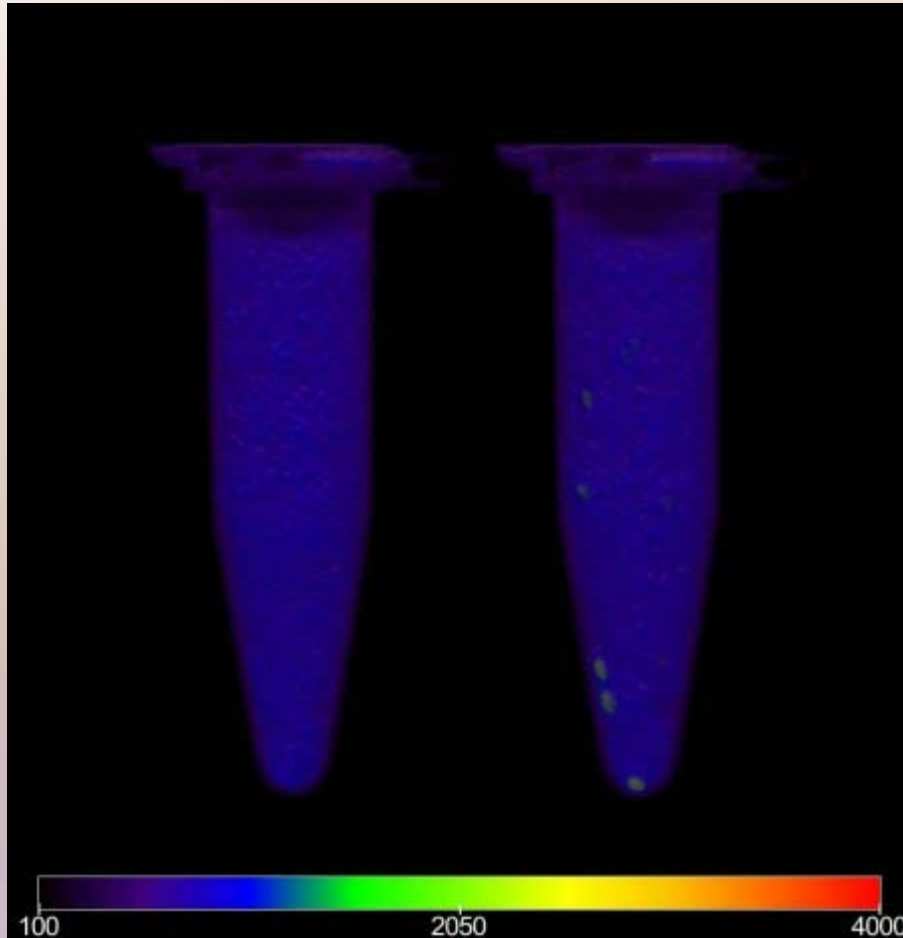


CT撮像の間、低エネルギー側の回折ビームによる明度値は10%程度低下(許容範囲とする)

投影像: 1s露光20回平均(20s) 360枚(0.5° ステップ)

回折幅 $\sim 0.001^\circ$ なので、システムの安定性の要求がシビア

同時KES-CTで得られた3次元Sr分布



(左) 低エネルギー
(~ 16.0 keV)

(右) 高エネルギー
(~ 16.2 keV)



差分として得られる
3次元Sr分布

エポキシ樹脂の領域の明度値が同じになるようにコントラストを規格化

まとめ

- LEBRA-PXR線源は単色・連続エネルギー可変・広く平坦な照射野という特徴があり、イメージングに適している。
- リニアックベースのX線としては非常に安定で、平均X線量が低いという難点を長時間測定で補える
- 比較定サイズの大きい、軽元素・低密度試料に対しては、比較的品質の良い3次元断層像が数時間で取得可能。
(リニアックのマシントイム内に現実的に収まる)
- PXRの特性を生かすことで、特定元素のK吸収端を挟んだ2色交差ビームを形成し、同時KESイメージングが可能
- 同時KES-CT測定により、特定元素の3次元分布取得が可能であり、PXRの応用としても有望

Acknowledgements

科研費 (25286087&16K05008)

ご清聴ありがとうございました

Appendix

PXRの空間分布

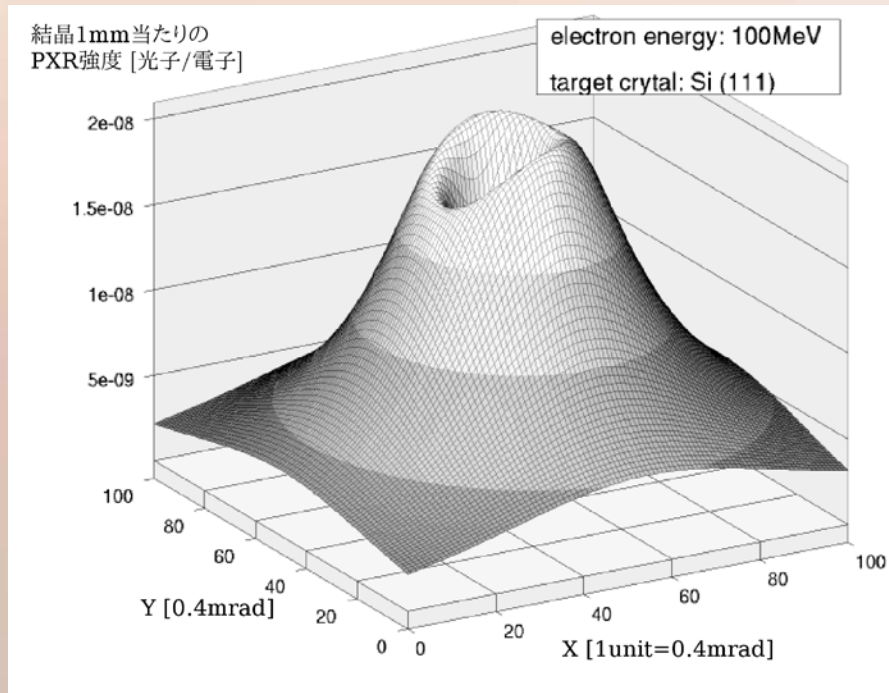
PXRの空間・角度分布

- ・中心に放射が無い
- ・円錐状の広がり ($1/\gamma$ に依存)

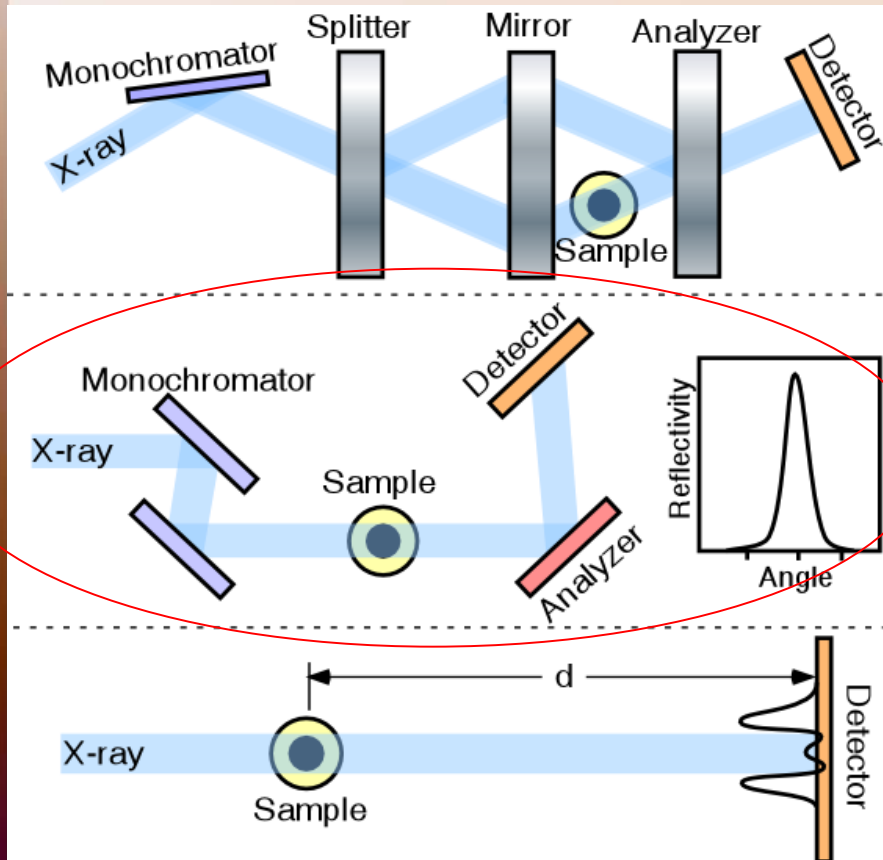
$$\frac{dN}{d\Omega} = \sum_{|g| \neq 0} \frac{e^2 \omega L |\chi(\omega)|^2}{2\pi \hbar \varepsilon^3 v (c - \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega})}$$

$$\times \frac{\left| \frac{\omega}{c} \boldsymbol{\Omega} \times \left(\frac{\omega}{c^2} \mathbf{v} + \mathbf{g} \right) \right|^2}{\left\{ \left| \frac{\omega}{c} \boldsymbol{\Omega}_{\perp} - \mathbf{g}_{\perp} \right|^2 - \left(\frac{\omega}{v} \right)^2 \left[\gamma^{-2} + \left(\frac{v}{c} \right)^2 (1 - \varepsilon) \right] \right\}^2}$$

total cross section: $10^{-5} \sim 10^{-4}$ photon/electron @ Si(111) 1mmt



Phase-contrast X-ray imaging



interferometer-based technique

Si perfect crystal interferometer
Talbot interferometer

analyzer-based technique

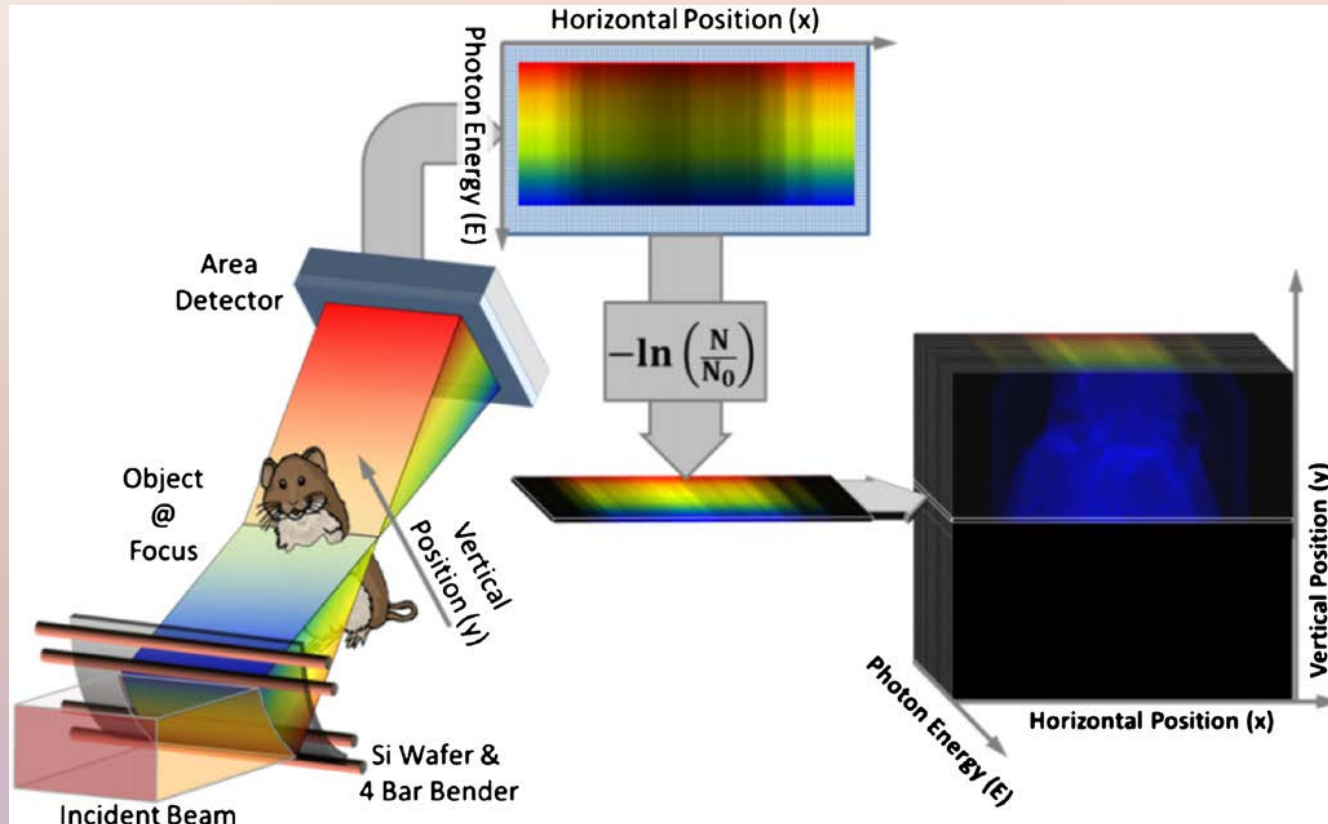
DEI: diffraction-enhanced
imaging

propagation-based technique

R. Fitzgerald: Phys. Today 53 (2000) 23

The narrow diffraction width means that DEI is possible using PXR.

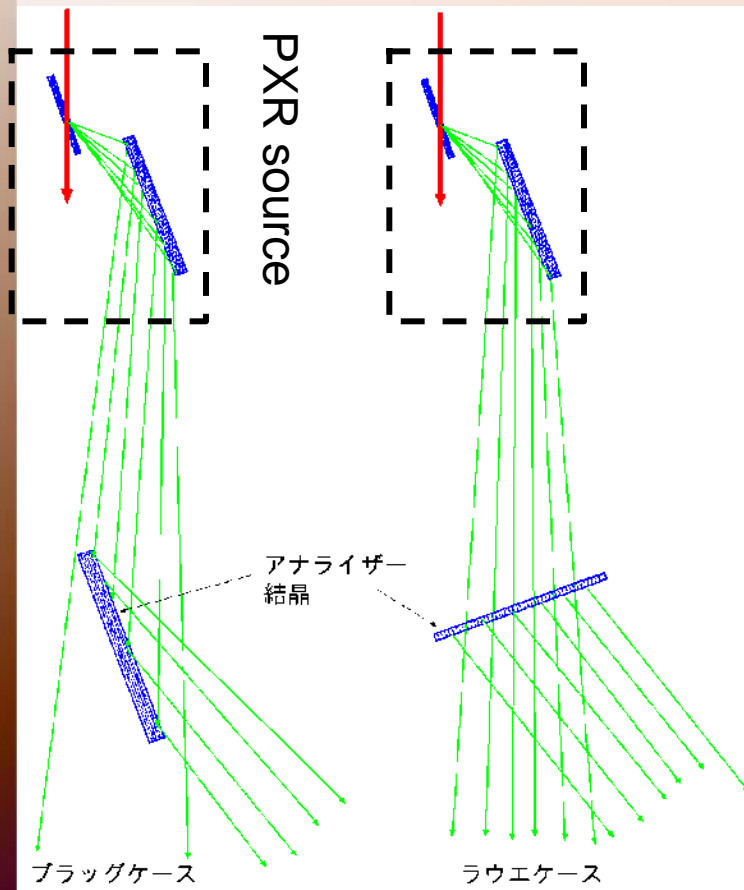
spectral-KES @ CLS



Y. Zhu, et al., Phys. Med. Biol. 59 (2014) 2485–2503.

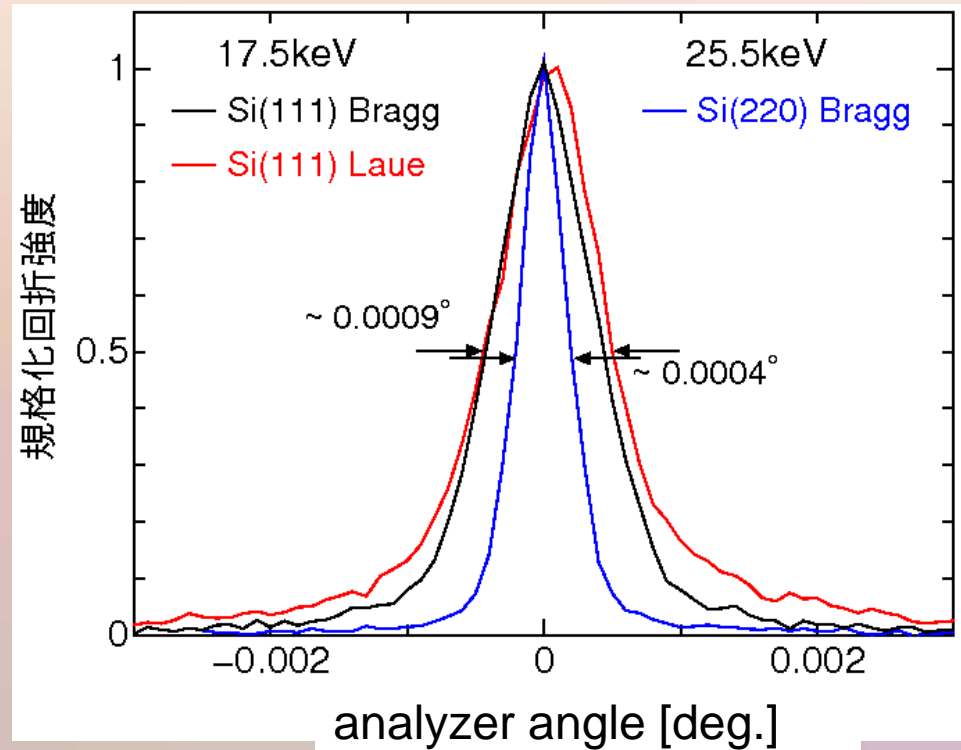
湾曲結晶光学系を用いた同時KES法@Canadian Light Source (CLS)

(+, -, +) arrangement



Bragg case

Laue case



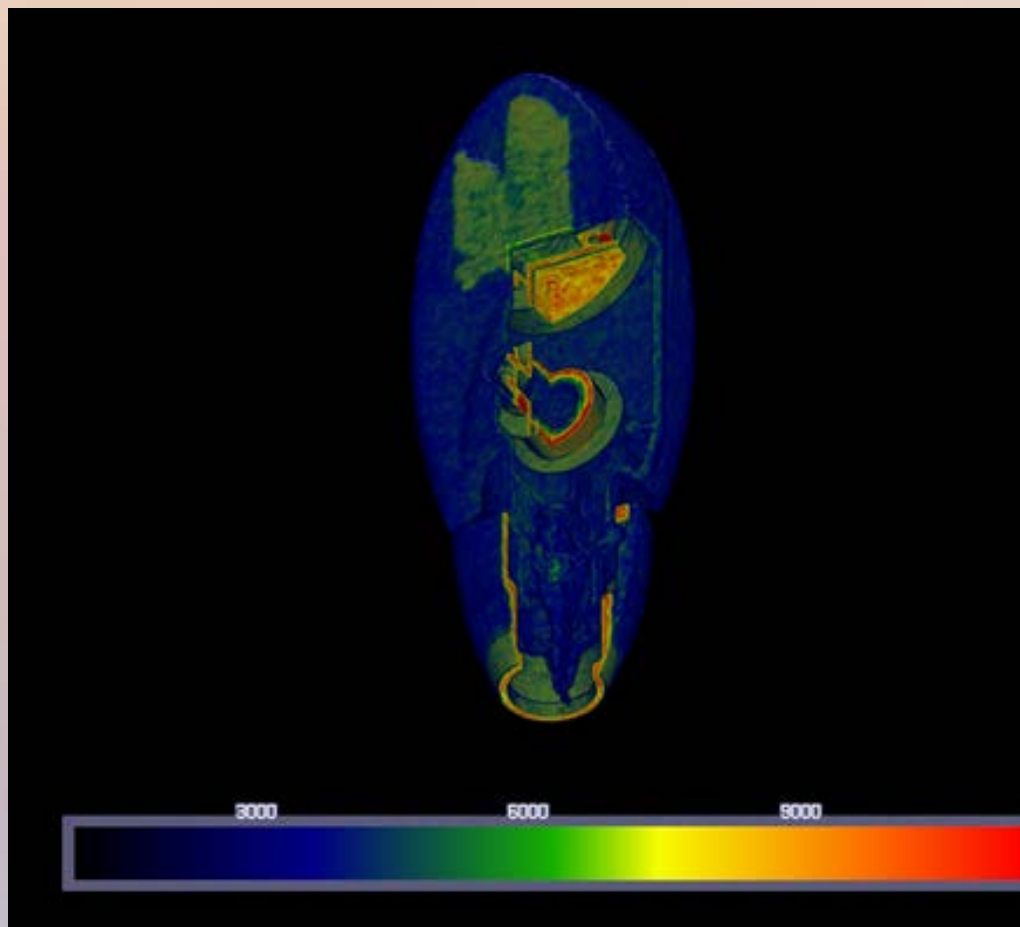
Using a 3rd analyzer crystal in the (+,-,+) arrangement, the whole of a PXR beam can be diffracted with a narrow angular width despite the cone-beam.

Bragg angle:

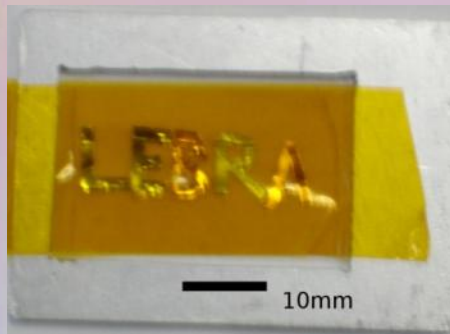
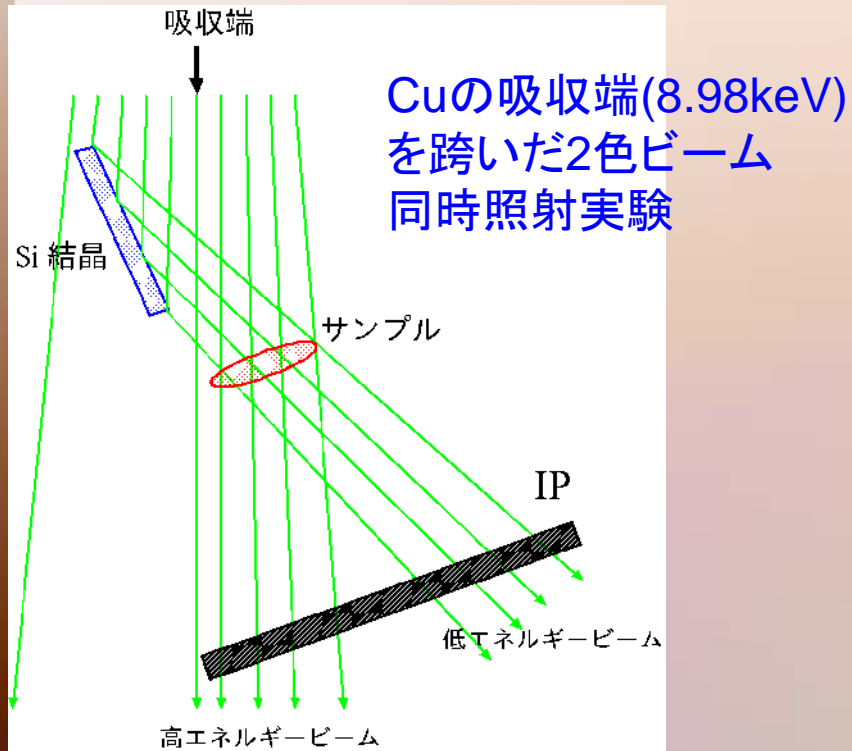
larger for longer wavelengths

smaller for shorter wavelengths (pseudo-plane wave)

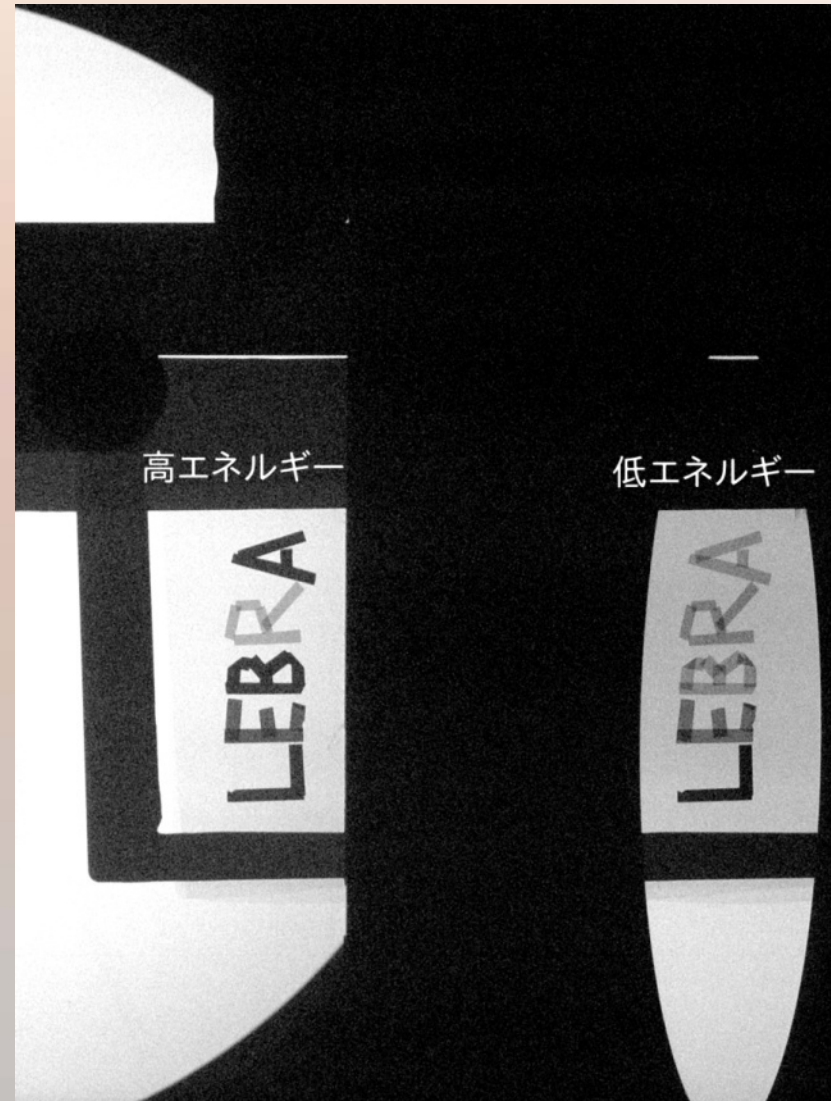
PXR source: Si(220) PXR energy: 20keV
sample: correction tape tool
measurement time: 20s x 180 (1 hour)
FPD: Shad-o-Box 3K HS (pixel size: 50 μ m)



2色同時撮像による元素イメージング



L : Ni (20 μ m)
E : Ni-Cu (10 μ m)
B, A : Cu (20 μ m)
R : Zn (25 μ m)



元素(Cu)検出を実証