

日大 LEBRA-PXR 線源を用いたコンピュータ断層撮像 COMPUTED TOMOGRAPHY UTILIZING LEBRA-PXR SOURCE AT NIHON UNIVERSITY

早川恭史^{*A)}、早川建^{A)}、野上杏子^{A)}、境武志^{A)}、住友洋介^{A)}、高橋由美子^{A)}、田中俊成^{A)}
Yasushi Hayakawa^{*A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Kyoko Nogami^{A)}, Takeshi Sakai^{A)}, Yoske Sumitomo^{A)},
Yumiko Takahashi^{A)}, Toshinari Tanaka^{A)}

^{A)}Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University,
7-24-1 Narashinodai, Funabashi 274-8501, Japan

Abstract

An X-ray source based on parametric X-ray radiation (PXR) is driven by employing the 125-MeV electron linac at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University. The X-ray source has advantages in the monochromaticity, the energy selectivity, the wide irradiation-area, and the spatial coherence. The sufficient stability of the LEBRA-PXR source allows computed tomography (CT) requiring several hundreds projection-images. Tomographic images with practical qualities have been actually obtained by utilizing the PXR source. In addition to usual monochromatic CT, element-sensitive CT is possible based on simultaneous K-edge subtraction (KES) imaging. The advanced image technique is one of the most promising applications at the LEBRA facility.

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA: Laboratory for Electron Beam Research and Application) では、125 MeV 電子リニアックを用いたエネルギー可変単色 X 線源を開発し運用している [1]。この X 線源はパラメトリック X 線放射 (PXR: parametric X-ray radiation) と呼ばれる、周期構造を持つ結晶性媒質と相対論的荷電粒子の相互作用で生じる X 線放射現象を利用している。日大 LEBRA の電子リニアックは常伝導でパルス型であるため、平均ビーム電流が数 μA に制約される。そのために得られる X 線光子数は高々 10^7 /s 程度であるが、安定で空間コヒーレンスに優れるという特徴を持つ。また実際に PXR 発生に使用される電子ビームのエネルギーは 100 MeV であるため、GeV クラスのシンクロトロン放射光源と比べると $1/\gamma$ に起因する放射円錐広がりが大きく、結果として広い照射野が得られことから、イメージングに適した X 線源となっている [2, 3]。

PXR を用いたイメージングとしては、その空間コヒーレンスを生かした回折強調型イメージング (DEI: diffraction-enhanced imaging) が特徴的であり、X 線の屈折でコントラストを得る位相コントラスト像や、試料媒質内の微細構造を反映した小角散乱像が実際に得られている [4, 5]。これらの成果は PXR の本質的な特徴として波面が揃い、数 μrad の屈折や散乱を測定可能であることを示しているが、リニアック基盤の光源としては非常に安定であることも、実際的な測定が可能となっている要因の一つである。X 線の平均線量の制約から、ある程度の品質の X 線像 1 枚を取得するために、先端的な X 線イメージセンサーを用いたとしても実時間で 10 秒か

ら数 10 分の照射時間が必要となる。特に DEI では、複数の画像に後処理を施し、画像のコントラストにおける屈折や散乱の寄与を吸収の寄与から分離する必要があり、測定時間内の X 線の安定性が厳しく求められる。PXR の安定性に関しては、線源の運用が始まった 2004 年から数年間は幾つかの問題が生じたが、2010 年以降はリニアック自体の安定性の向上もあり、DEI 測定に目立った問題は無くなった [6]。

PXR 線源の長時間安定性の改善により、PXR を用いたコンピュータ断層撮像 (CT: computed tomography) が現実的なものとなった。これにはフラットパネル検出器 (FPD: flat panel detector) のような大面積で高感度のイメージセンサーが市販で比較的安価に入手可能になったのも背景にある。PXR ビームの広い照射野は、数 cm 程度の比較的大きな試料が適している。実用的な強度が得られる X 線のエネルギーが 30 keV 以下であるため、密度の低い軽元素物質に限られるが、加速器の現実的なマシンタイム内で単色 X 線断層撮像が可能である。

2. LEBRA-PXR 線源

PXR は結晶媒質を相対論的な電子が通過する際に生じる X 線放射現象である。放射源となる結晶の逆光子ベクトルを \mathbf{g} とし、入射電子のエネルギーと運動量、速度をそれぞれ $E, \mathbf{p}, \mathbf{v}$ とすると、単位ベクトル $\boldsymbol{\Omega}$ に沿った方向に放射される PXR エネルギー $\hbar\omega$ はエネルギー・運動量保存則より、

$$\hbar\omega \approx \hbar \left(\frac{\omega}{c} \boldsymbol{\Omega} - \mathbf{g} \right) \cdot \frac{\mathbf{p}c^2}{E} = \frac{\hbar c |\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}|}{c - \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega}}, \quad (1)$$

となる [7, 8]。十分に相対論的な領域では、PXR のエネルギーは電子エネルギーにほとんど依存せず、結晶と電子ビーム軸の幾何学配置で決まるという特徴があり、この点で他の相対論的電子による放射現

* yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

象と大きく異なる。X線のエネルギーを変えるのに電子エネルギーを変える必要が無く、結晶を回転して結晶面と電子ビーム軸のなす角である Bragg 角を調整することにより、連続的にエネルギーを選ぶことができる。しかしながら、X線のエネルギーに応じて放射される方向も変わってしまう。加速器本体室の放射線量が高くなり、運転中に人が立ち入ることができないリニアック施設においては、固定的な輸送ラインでX線を取り出せないのは、実際の応用面で大きな支障となる。LEBRA-PXR線源では、この問題を解決するために2結晶型のシステムを採用し、電子エネルギー100 MeV固定で連続エネルギー可変を実現しつつ、固定的なポートから常時立ち入り可能な実験室への取り出しを可能としている [9]。

ターゲットとなる結晶から放出されるX線量は、結晶の種類やX線エネルギーにもよるが、電子1個当たりの光子数で $10^{-6} \sim 10^{-4}$ のオーダーである。LEBRA-PXRでは、ターゲット結晶としてシリコン単結晶を採用し、必要なX線エネルギー領域にあわせて(111)面または(220)面を用いている。第2結晶にはターゲット結晶と同じ結晶面を用い、ターゲットから放射されたX線を回折によって反射し、遮蔽壁を通して実験室まで輸送する役目を担わせる。その際、第2結晶での反射率、ダクト径での空間的カットオフ、ポリイミドまたはポリエステル膜の真空窓による吸収のため、実際に取り出せるX線量は発生量の $1/10 \sim 1/50$ 程度である。また、PXRビームは窓のところでダクト内径100 mm いったいに広がっており、取り出したX線ビームのプロファイルは直径100 mmで比較的一様性が高く、イメージングに適したものになっている。LEBRA-PXR線源の主な仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Specification of the LEBRA-PXR Source

Electron energy	100 MeV
Linac average current	$\sim 2.5 \mu\text{A}$
Macropulse duration	5 μs
Macropulse repetition rate	5 pps
PXR energy range	
Si(111) target:	4.0 – 20 keV
Si(220) target:	6.5 – 34 keV
Total X-ray photon rate	$\sim 10^7$ /s @17.5 keV

3. CT 投影像と PXR 線源の安定性

3.1 CT 測定の実験セットアップ

LEBRA-PXR を用いる CT 撮像は、医療機器の場合と異なり、X線の照射方向を変えることができないため、試料を回転しながら投影像を多数取得する必要がある。測定系の概略図を Fig. 1 に示す。X線イメージセンサーには大面積 FPD である Shad-o-Box1280HS (Teledyne DALSA 社製) が良く使われる。この検出器は酸化硫酸ガドリニウム (GOS) 系のシンチレータを用いたもので、ピクセルサイズは

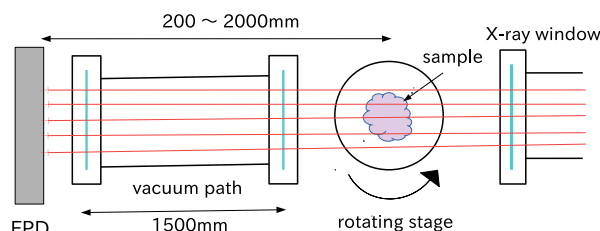


Figure 1: Schematic top view of the setup for CT experiments using the LEBRA-PXR source.

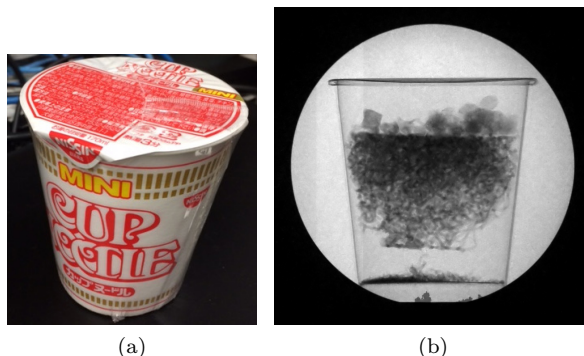


Figure 2: (a) A photograph of the sample (instant cup noodle). (b) A typical projection image of the CT measurement.

100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 、有効面積は128 mm \times 128 mm である。実験によっては、FPDを試料から2 m程度離し、その間に真空パスを設置して測定する。これは伝搬型位相コントラストの効果で像のエッジが明瞭化するのを狙ったものである。

今回、即席カップ麺 (Fig. 2a) を試料にした CT 撮像をデモンストレーションとして実施した。カップ麺は軽元素物質から成り金属等X線が透過しにくい物質を含まないため、断層像の再構成で強いアーチファクト (虚像) が生じにくいというのが試料として採用した理由の一つである。また、容器内が不可視であり内容物の形状も複雑であるため、3次元CTとしての性能がわかりやすく示される、ということも期待した。ここで、この試料は充填密度が比較的低いものの、麺が折り重なった箇所では実効的に厚みがあることから、低エネルギーX線では透過が弱くアーチファクトを誘発する可能性がある。そこで、PXRビームの中心エネルギーを22 keVに設定して実験を行った。

LEBRA-PXRの通常のマシントイムは1日8時間程度であり、準備等を考慮すると一つの試料に掛けられる時間は最大でも5~6時間である。従って、投影像1枚当たり数秒~数十秒、投影像の枚数として最大でも700~800枚というのが測定の目安となる。今回は投影像の撮像にShad-o-Box1280HSを用い、試料-FPD間の距離を300 mmにして測定した。露光時間5秒の像を5枚平均したものを1枚の投影像として用いた。すなわち、投影像1枚当たりの照射時間は25秒である。試料回転ステップを 0.36° とし、

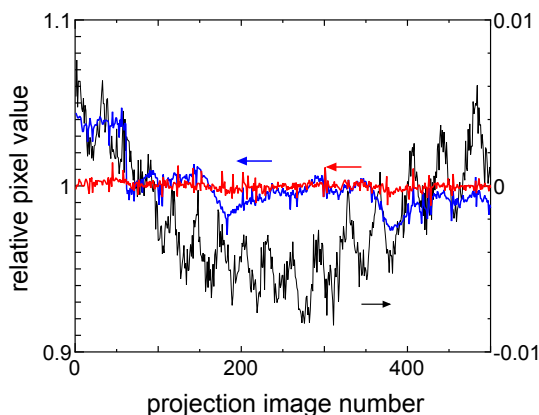


Figure 3: The blue line and the black line indicate the fluctuations of the brightness of the PXR beam and the FPD dark-noise, respectively, during the CT measurement. The values are measured relative to the average of the bright region. The red line means the result of the brightness compensation.

180°の範囲で計500枚の投影像をステップ・バイ・ステップで取得した。その際、MS-Windows用のスク립トツールを用いて測定の自動化行っている[10]。実効的な測定時間は約3.5時間であるが、ファイル保存などの時間がマージンとして加わるため、実時間としては4時間弱に及んだ。実際に取得された投影像の1枚をFig. 2bに示すが、これはFPDのダークノイズ減算処理とデジタルノイズフィルターを施した画像である。この段階ではPXRの空間プロファイルおよびFPD感度の空間不均一性が残っているため、別個に取得した試料が無い状態でのPXRビームプロファイル像で除算処理をして規格化する必要がある。

3.2 撮像中のPXR線源の安定性

LEBRA-PXRの線量ではCT撮像に数時間要するため、測定中の線源が不安定になると、断層像の再構成に支障が生じる。今回取得した500枚の投影像において、投影像毎のPXRビームの強度変動を試料の無い領域のピクセル強度値としてプロットしたのがFig. 3の青線である。また、黒線はX線ビームが当たっていない暗い領域の値を同様にプロットしたもので、FPDのダークノイズが室温の変化などを受けて変動している様子を示している。両者共に、画像の明るい領域における500枚の平均値に対する相対値として表されている。今回の測定において、画像の明度の変動は±5%に収まる程度であり、ダークノイズの変動も最大明度の1%に満たない程度であった。PXRの強度プロファイルやダークノイズは、空間的に変動する可能性があるが、変動幅が小さいことから空間的に様な変動と仮定して補正することにした。ダークノイズ変動に対し加減算処理で補正した後、Fig. 3の青線の値で除算することでX線強度補正に相当する処理とした。この処理の後に青線と同様のプロットをしたものが赤線である。

強度補正の後、PXRビームプロファイル像で除算

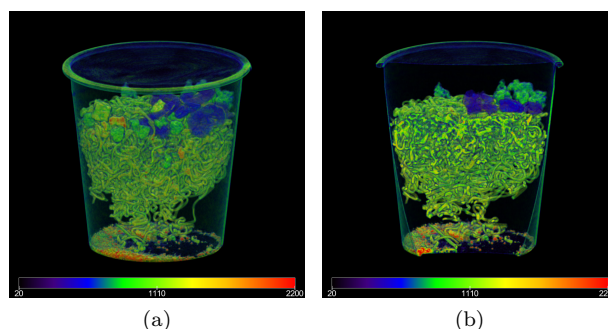


Figure 4: (a) The volume rendering for the tomographic image of the cup-noodle. (b) The cross-section of the cup-noodle demonstrated by the 3 image.

して空間的な規格化を行い、対数演算を施してX線吸収能のマップデータとした。全ての吸収能マップを試料回転角の順に束ねたものが投影像データセットとなる。

3.3 再構成処理で得られた3次元断層像

投影像データセットをサイノグラフと呼ばれるデータに変換し、ラドン変換によって断層像を再構成する流れは、一般的なCT像の処理と同様である[11]。再構成処理には、有名なフリーソフトであるImageJとそのプラグインを独自に修正したものを用いている[12,13]。この再構成ソフトウェアは、FBP(filtered back projection)法と呼ばれる、最も普及した再構成手法に基づいている[14]。その結果として得られた3次元断層像を、ボリュームレンダリングで表したものをFig. 4に示す。内容物の種類を断層像のコントラスト(擬似カラー)によって識別することができ、複雑に絡み合った麺の再構成にも概ね成功している。回転角ステップとピクセルサイズを考慮すると、周縁部の空間分解能は0.3mmが限界となるが、容器の部分も輪郭が極めて明瞭であり、伝搬型位相コントラストの恩恵が示唆される。

4. K端差分CT

PXR線源は連続的にX線エネルギーを調整できるため、KES(K-edge subtraction)法と呼ばれる方法で特定元素の空間分布を取得することができる。これは、標的とする元素のK殻吸収端より高いエネルギーの単色X線による像と、低いエネルギーの単色X線像の差を取ることで得られる[15]。一般的には、2種類の像を個別に撮像するが、PXRの特性を利用すると、2色のX線像を同時に撮像することが可能である。

結晶面と電子ビーム軸のなす角をBragg角 θ とすると、 $\phi = 2\theta$ となる方向がPXRビームの中心となり、そのエネルギーを $h\omega$ と表すことにする。ビームの中心から $\Delta\theta$ ずれた方向に放出されるPXRのエネ

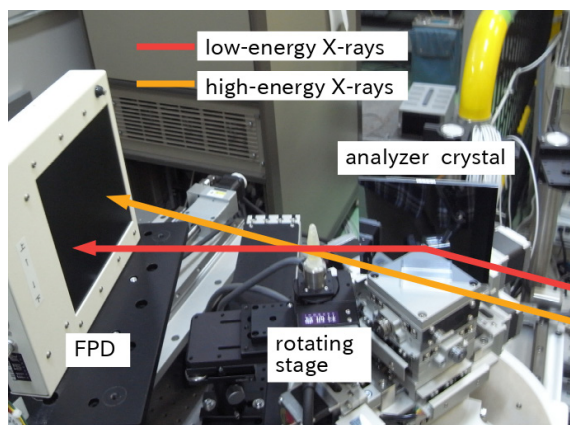


Figure 5: The measurement system simultaneous KES-CT using the LEBRA-PXR source.

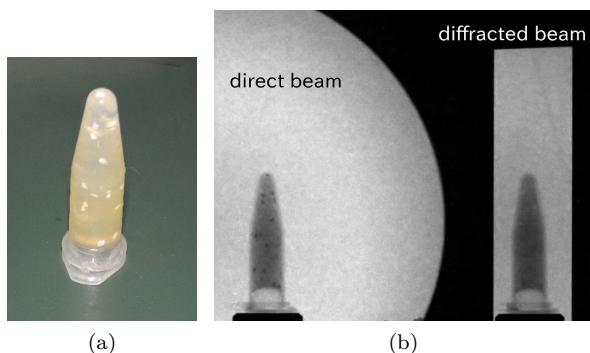


Figure 6: (a) A plastic tube filled with epoxy resin containing SrTiO₃ fragments. (b) A typical projection image of simultaneous-KES CT.

ルギー $\hbar\omega'$ は、Eq. (1) の近似式として

$$\begin{aligned}\hbar\omega' &\approx \hbar\omega \left(1 - \frac{\sin 2\theta}{1 - \cos 2\theta} \Delta\theta\right) \\ &= \hbar\omega \left(1 - \frac{\Delta\theta}{\tan \theta}\right),\end{aligned}\quad (2)$$

と表せる。ここで、 $\beta = |v|/c \approx 1$ という近似も用いているが、LEBRA-PXR においては、X 線ビームプロファイルの水平方向に 1 次関数的なエネルギーシフトがあることを意味する [16]。第 2 結晶での回折において、Eq. (2) のエネルギーシフトは放出方向のずれに伴う Bragg 条件の変化と補償関係にあり、PXR ビームの全体が平板結晶で回折される。この性質は 3 番目の結晶を設置して回折する場合にも引き継がれ、回折曲線のピークでの反射率は 70~80% になる。LEBRA-PXR の代表的な応用である DEI はこの特性を利用したものであるが、その実験系を流用して同時 KES イメージングが可能となる。その実験系の概要を Fig. 5 に示す。PXR ビームの中心エネルギーを検出したい元素の K 殻吸収端ちょうどに合わせ、その低エネルギー側のみを DEI で用いるアナライザー結晶で回折することにより、吸収端を挟んだ 2 色交差ビームを形成することができる。この交差

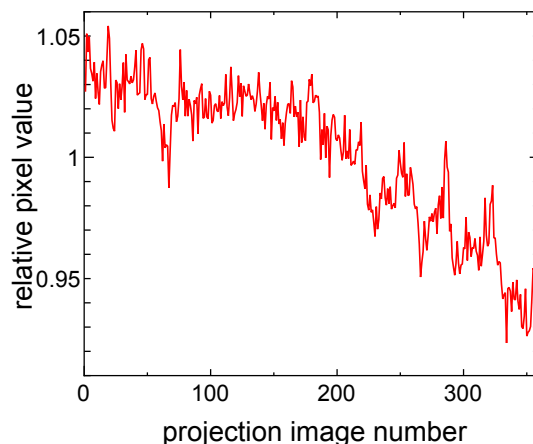


Figure 7: The intensity fluctuation of the diffracted X-ray beam during the simultaneous-KES CT measurement.

点に試料を置けば、2 色同時撮像が可能となる [17]。

Figure 6a に示されるストロンチウムを含んだ試料に対し、PXR ビームの中心エネルギーを Sr-K 端 16.1 keV に合わせて同時 KES イメージングを行うと、Fig. 6b のような像が得られる。同時 KES の取り組みは、Canadian Light Source などでも行われているが、このように直接的に 2 次元像が得られるのは、世界的にも LEBRA-PXR が唯一といって良い [18]。試料を回転ステージで回しながら同時 KES 像を取得していけば、3 次元 KES-CT 撮像となる。ここで問題となるのが、低エネルギー側の回折 X 線ビームの安定性である。アナライザー結晶での回折曲線の半値幅は 0.001° かそれ以下であり、回折ピークの状態を長時間維持するためには、加速器を含めたシステム全体が極めて安定であることが必要である。この同時 KES 法による投影像を 1 枚 20 秒で撮像し、0.5° ステップで 360 枚取得したときの回折 X 線ビームの強度変動が Fig. 7 である。実際の測定時間は 2 時間

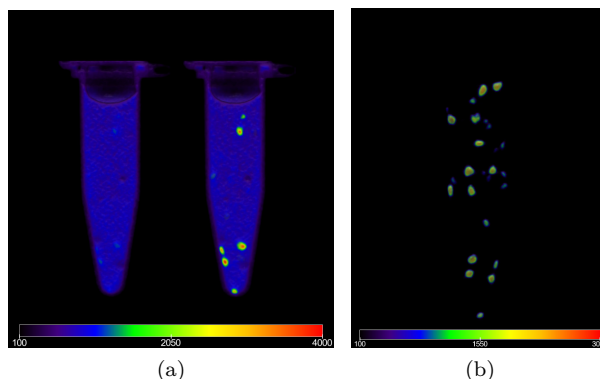


Figure 8: (a) Comparison between the two tomographic images taken by the simultaneous-KES CT measurement. (b) The 3D distribution of Sr element obtained from the subtraction between the two tomographic images.

以上掛かっているが、その間に低エネルギービームの強度が 10 % 程度下落している。変動が少ないのに越したことはないが、補正可能な範囲内であるとして、通常の CT と同様の再構成処理を 2 種類の像に対して行った。個別の再構成処理で得られた 2 つの断層像を並べて比較したのが Fig. 8a である。左が Sr-K 端より低いエネルギーの X 線ビームで得られた像で、右が高エネルギー側の像である。Sr を含まないエポキシ樹脂の部分の値が同じになるようにコントラストを調整してある。両者の差分を取ったものが Fig. 8b で、Sr 元素の 3 次元分布を意味している。X 線の吸収に基づく手法のため、標的元素の明瞭な分布を得るには 1 % 程度の濃度が必要であるが、比較的深くに位置する元素の検出が可能という点が特徴的である。

5. まとめ

LEBRA-PXR 線源は、連続エネルギー選択性と単色性、均一で広い照射野、という先端的イメージングに適した特性を有している。平均 X 線量が少ないことが難点であるが、リニアックベースの X 線源としては非常に安定であり、長時間撮像で X 線量の不足を補うことができる。数百枚の投影像撮像が求められる CT 撮像も数時間の測定時間を掛けることで可能であり、加速器のマシントイムの観点でも日常的なユーザ実験として対処できるものである。比較的サイズの大きい低密度・軽元素試料に対しては、実用的レベルの 3 次元断層像が実際に得られている。

通常の手法の延長上である単色 X 線 CT 撮像に加え、PXR の特性を生かした他に例の無い同時 KES イメージングによる CT 撮像も可能である。まだ開発途上の段階ではあるが、Sr の K 殻吸収端を利用した Sr 元素の 3 次元分布取得に成功している。この同時 KES-CT は、LEBRA-PXR において所謂キラーアプリーに成り得る応用であると期待している。

参考文献

- [1] 早川恭史, 加速器 **6** (2009) 166.
- [2] Y. Hayakawa *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. B **252** (2006) 102; doi:10.1016/j.nimb.2006.07.010
- [3] Y. Hayakawa *et al.*, J. of Instrumentation **8** (2013) C08001; doi:10.1088/1748-0221/8/08/C08001
- [4] Y. Takahashi, Y. Hayakawa *et al.*, X-Ray Spectrom. **41** (2012) 210; doi: 10.1002/xrs.2403
- [5] Y. Hayakawa *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **517** (2014) 012017; doi:10.1088/1742-6596/517/1/012017
- [6] 境武志, 非破壊検査 **57** (2008) 282.
- [7] V. G. Baryshevsky and I. D. Feranchuk, Nucl. Instrum. & Methods **228** (1985) 490.
- [8] H. Nitta, Phys. Lett. A **158** (1991) 270.
- [9] Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, Nucl. Instrum. and Meth. B **227** (2005) 32; doi: 10.1016/j.nimb.2004.06.028
- [10] HiMacroEx; <http://fefnir.com/soft/himacroex00.htm>
- [11] Y. Hayakawa *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. B **309** (2013) 230; doi:10.1016/j.nimb.2013.01.025
- [12] ImageJ; <https://imagej.nih.gov/ij/>

- [13] D. Farrell, Radon Transform; <https://imagej.nih.gov/ij/plugins/radon-transform.html>
- [14] G. N. Ramachandran, A. V. Lakshminarayanan, Proc. Nat. Acad. Sci. USA **68** (1971) 2236.
- [15] H. Suhonen, L. Porra, S. Bayat, A. R. A. Sovijärvi, P. Suortti, Physics in Medicine and Biology **53** (2008) 775; doi:10.1088/0031-9155/53/3/016
- [16] Y. Hayakawa *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. B **266** (2008) 3758; doi:10.1016/j.nimb.2008.02.042
- [17] Y. Hayakawa *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. B **402** (2017) 228; doi:10.1016/j.nimb.2017.03.014
- [18] Y. Zhu, N. Samadi *et al.*, Physics in Medicine and Biology **59** (2014) 2485; doi:10.1088/0031-9155/59/10/2485