

SPACE COHERENT X-RAY GENERATOR USING ELECTRON LINAC

Isamu Sato^{A)}, Takao Kuwada^{A)}, Takeshi Sakai^{A)}, Manabu Inagaki^{A)}, Ken Hayakawa^{B)}, Toshinari Tanaka^{B)},
Yasushi Hayakawa^{B)}, Keisuke Nakao^{B)}, Kyoko Nogami^{B)}, Yumiko Takahashi^{B)}, Hiroshi Okabe^{B)},
Naoki Sato^{B)}, Toshiro Sagae^{C)}, Atsushi Mori^{D)}, Shigeki Fukuda^{E)}, Atsushi Enomoto^{E)}, Satoshi Ohsawa^{E)},
Kazuo Furukawa^{E)}, Shinichiro Michizono^{E)}, Soichi Wakatsuki^{E)}, Shigeru Yamamoto^{E)}, Kimichiya Tsuchiya^{E)}

^{A)} Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities, Nihon University ;
Kudan-Kita 2-1-4, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0073

^{B)} Institute of Quantum Science, Nihon University ; 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501

^{C)} School of Dentistry at Matsudo, Nihon University ; 870-1 Sakaecho, Nishi-2, Matsudo, Chiba, 271-8587

^{D)} College of Pharmacy, Nihon University ; 7-7-2 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8555

^{E)} High Energy Accelerator Research Organization ; 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaragi, 305-0801

Abstract

In the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of the Nihon University, a 125MeV electronic linear accelerator is utilized and the research and development of the bright sources with tunable wavelength monochromatic light which aimed at utilization of a free electron laser (FEL) and parametric X-rays (PXR) [1] are performed. Recently, LEBRA has been tried to expand into range of energies from 5keV to 20keV for PXR. In the measurement experiment of the PXR characteristic, refraction contrast imaging which is an interference phenomenon of X-ray has been observed [2]. This paper reports that PXR is the source of the coherent X-rays.

電子リニアックによる空間干渉X線源

1 はじめに

1980年代の前半、高エネルギー電子線を単結晶に照射すると、単結晶原子の周りを蛇行運動しながら通り抜け、電子が単色に近いX線を放射する現象(チャネリング放射^[3])の理論的な探求が進められ、1980年代の後半、Tomskの電子シンクロトロンでは900MeV電子ビームで単結晶を照射するとブラック角近傍に単色に近いX線が放射される現象(パラメトリックX線放射^[4]:PXE)の実験的検証が進められていた。しかし、当時はシンクロトロン放射計画が脚光を浴び、PXEの存在は話題にならなかった。このX線が単色に近いことが実験的に確かめられると、次第にその特性が注目されるようになった。その後、A.V.Shchaginらは、Kharkovの電子リニアックと分解能の良いX線検出器を使って、そのX線の詳細特性^[5]を明らかにし、パラメトリックX線放射(PXR)と称した。日本では、1990年代の前半に核研の電子シンクロトロンを使って遠藤らグループ^[6]が、1990年代の後半に京大の電子リニアックを使って早川らのグループ^[7]が詳細なPXR特性の計測を行い、そのメカニズムの解明を試みていた。

一方、このX線源では陽子、中性子、 γ 線などの2次放射線も発生し、これらの放射線とX線の分離に困難が伴うことから、X線源としては活用されていなかった。日本大学では、PXRの優れた特性に着目し、早川らはX線源を活用できるシステムの開発研究^[1]を行い、2005年4月、その実用化に成功し、同

年7月から共同利用実験に供している。また、同年12月、PXRは準単色の高輝度で干渉性に富む理想的なX線であることが実験的に実証され、2007年3月、シンクロトロン放射光と同等の安定性が得られるようになり、干渉性に富むX線源として位相差イメージングの開発研究が積極的に進められている。

2 パラメトリックX線放射(PXR)

高エネルギー電子が物質に入射すると、電子は原子核や原子内殻電子と直接衝突、或いは相互作用反応により、陽子、中性子、電子、光子などの2次粒子を放射させると同時に、電子は原子核や原子の殻内電子の電荷と相互作用して制動を受け白色の電磁波(光子)を輻射(制動輻射)する。一方、物質が単結晶の場合、上述の事象以外に、図1に示すように、電子は通過する近傍の単結晶原子を摂動して、原子は分極振動して、波動ベクトル(電磁波)を放射(分極放射)する。この波動は、図2に示すように、単結晶中を伝搬し円形に拡散するが、原子振動数が高いと、波動ベクトルの速度は電子の速度より速い。

従って、波動はドップラーシフトし、その波長は伝搬方向によって変化する。一方、電子の進行方向に方位する波動ベクトルは波長が短縮され、結晶面でブラック条件(図3を参照)を満たす方位角(反射角)にX線として放射される。このX線をパラメトリックX線放射(PXR)と称している。

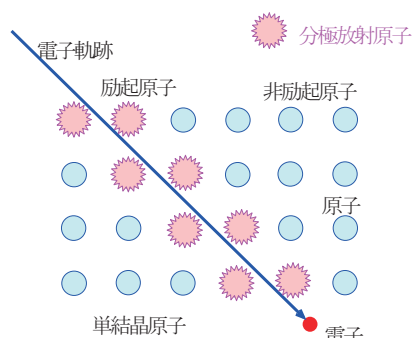


図1 単結晶の原子間を通過する電子

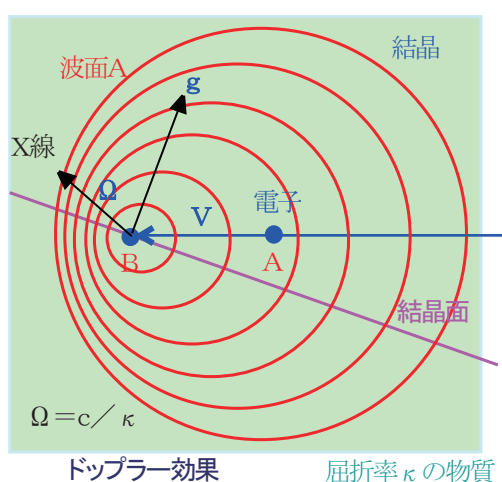


図2 単結晶原子が電子の摂動を受けて分極振動し、原子が放出する波動ベクトルが結晶面でブラッグ条件を満たす方位角に波長短縮されて放射されるX線。

PXRを定量的に取り扱うには、図2に示すように、速度ベクトル \mathbf{V} の高エネルギー電子が単結晶に波動ベクトル $\mathbf{\Omega}$ (電磁波) を発生させながら通過する状態を仮定する。A点を $\Delta t=0$ で通過する電子が Δt 時間後のB点を通る時、A点で電子の摂動を受けて、原子が放出した波動ベクトル $\mathbf{\Omega}$ の先端は波面Aに到達している。波面AとB点のスペース間隔: $\{(c/\epsilon^{1/2}) - \mathbf{V} \cdot \mathbf{\Omega}\} \Delta t$ にあらゆる波動ベクトルが存在する。波動ベクトルの波数を n 、その波長を λ とすると、この空間では

$$\{(c/\epsilon^{1/2}) - \mathbf{V} \cdot \mathbf{\Omega}\} \Delta t = n\lambda$$

を満たしている。ここで、 c は光速、 X 線領域における単結晶の屈折率 κ ($\kappa \sim \epsilon^{1/2}$)。

一方、電子速度 \mathbf{V} が、 $\mathbf{V} < (c/\kappa)$ の範囲では、 $\Delta t = 2\pi / (\mathbf{g} \cdot \mathbf{V})$ となる。但し \mathbf{g} は結晶面の垂直ベクトルである。

一方、電磁波エネルギー E_{CR} は、 $E_{CR} = h\nu = h\omega_{CR}$ であり $E_{CR} = nch(\mathbf{g} \cdot \mathbf{V}) / (c - \epsilon^{1/2} \mathbf{V} \cdot \mathbf{\Omega})$

で与えられる。ここで、 h はプランク定数、 ω は結晶中の波動ベクトルの振動数、 $\omega = (c/\epsilon^{1/2}) \cdot (2\pi/\lambda)$ である。

図4には、高エネルギー電子が薄い単結晶を通過した場合に、ブラッグ条件を満たすX線が最も単純なパラメトリックX線

ブラッグ条件: $2d \sin \theta = AB = n\lambda$ 、
 d : 結晶面の間隔、 λ : X線波長 ($n=1,2,3,\dots$)

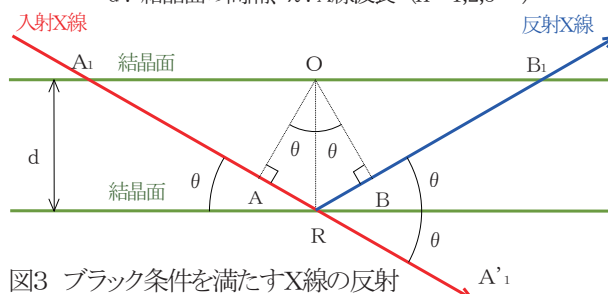


図3 ブラッグ条件を満たすX線の反射

放射の概念図を示す。ここでは、パラメトリックX線は電子から直接放射される制動輻射X線ではなく、単結晶原子の分極放射であることを強調しておく。

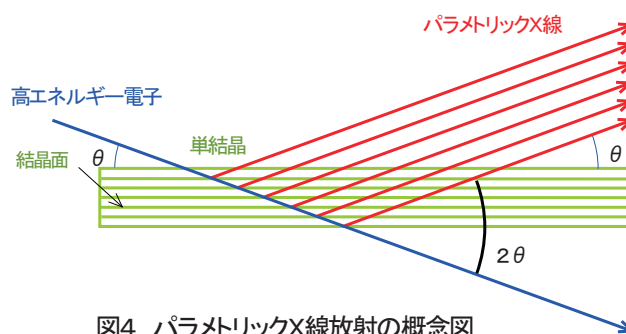


図4 パラメトリックX線放射の概念図

3 PXRは何故空間干渉X線なのか?

高エネルギー電子が単結晶原子を摂動し、原子が分極振動しその波動ベクトルが電子の進行方向に伝搬するとき、ドップラーシフトによって波長が短縮し結晶全体に拡散し、最終的にはX線として放射される。図5に示す如く、単結晶面に角度 θ で A_1 点に入射したX線は結晶面の R_1, R_2, R_3 で 2θ の方向にブラッグ反射してX線1, X線2, X線3として放射される。これらのX線はブラッグ条件を満たしており、 B_1, B_2, B_3 を結ぶ線上では同相である。従って、これらのX線は空間的にコヒーレントを保存している。一方、これらのX線は P_1, P_2, P_3, P_4 でX線の一部が再びブラッグ反射し、単結晶全体に拡散していく。これらのX線も図5の P_1R_2 と P_2R_3 を結ぶ線を逆にした構図でブラッグ条件のロジックを組み立てれば、前述と同じ状況にある。従って、空間コヒーレントX線になることは明らかである。更に、図5の入射X線を電子に置き換えてもロジックは変わらない。単結晶中でブラッグ条件を満たすX線は、結晶格子を反射面とするエタロンを伝搬する光の如く、多数の結晶面で反射を繰り返しながら単結晶の全体に拡散していく。

4 PXRは何故高輝度なのか?

単色X線であるPXRを光源にしてICカードや蜘蛛などの吸収コントラスト像や屈折コントラスト像をイメージングプレートで

撮像した。0.2mm厚の単結晶を100mAのパルス電子ビームで10分～30分照射している。ビーム電流は平均電流に換算すると4 μ Aであり、ビーム損失は数%以下である。実質的な照射時間は1パルス当たり170nxs (3ps \times 20 μ s / 350ps)である。30分の照射でも、積分露光時間は約612 μ s (170 μ s \times 2cps \times 1800shot)であり、この露光時間で、イメージングが撮像できるPXRは高輝度か否か?の判断である。

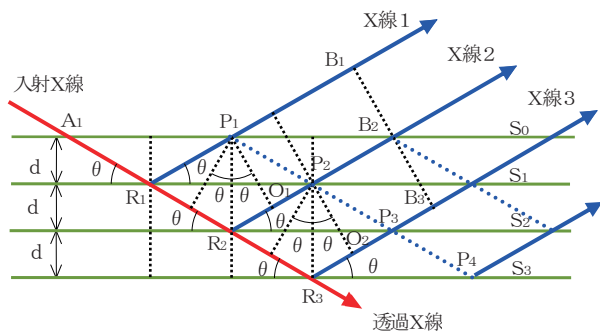


図5 単結晶に入射したX線がブラック反射したX線とその位相

高輝度であるとするなら、これは下記の理由に拠る。図5から、単結晶でブラック条件を満たすように入射するX線は空間コヒーレントを保ちながら結晶全体に拡散していくことが明らかである。ボルマン効果が見られる条件では、X線吸収が少ないために、単結晶に於けるX線の拡散範囲は拡大する。

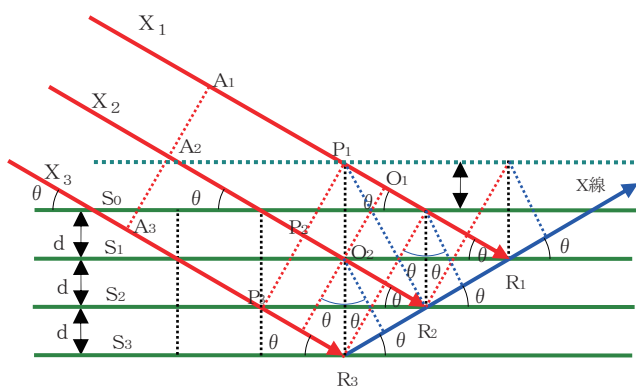


図6 空間干渉X線の重量

図6に示すように、単結晶に位相の揃った空間干渉X線(X_1, X_2, X_3, \dots)が入射すると、これらのX線は P_1, P_2, P_3 の線上で同相であり、結晶面の R_1, R_2, R_3 で反射するX線は P_1, O_2 を頂点とするブラック条件をそれぞれ満たしている。従って、ブラック反射した各々のX線は R_1, R_2, R_3 を結ぶ線上で同相となり各波動ベクトルは重畳して伝搬する。このX線は波動振幅が加算されその強度は増強される。これがPXRを高輝度にする大きな要因である。一方、単結晶中でブラック条件を満たすX線は高効率で伝搬することが可能となる。更に、単結晶を照射する電子ビームのエミッタンスが小さい場合には、特に、この効果が顕著になると予想される。図7には、イメージングプレートを使って

16keV のPXRで撮像した蜘蛛の画像である。屈折コントラスト像(左)は、蜘蛛の軟組織構造の画像が詳細に写しだされており、PXRが干渉性に富んだX線源であることを示唆している。

一方、電子のエネルギーが50MeV ($\gamma \sim 100$)になると、X線領域における制動放射と分極放射の強度は同程度になると評価されている。

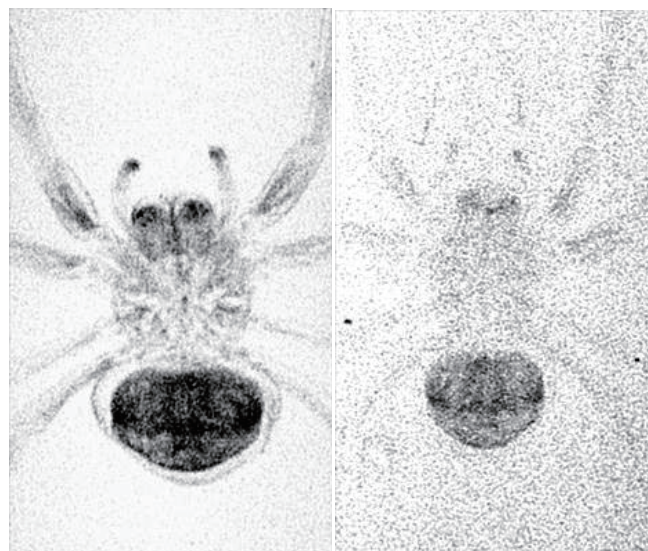


図7 PXRで撮像した蜘蛛のX線像、撮像時間は何れも30分、屈折コントラスト像(左)、吸収コントラスト像(右)

5 まとめ

完全周期構造の単結晶からブラック反射される単色X線の位相は揃っていることを意味する。また、このX線は各結晶格子から空間コヒーレントが保存されて放射される。

単結晶は平面上に広がる周期構造の無数の点光源から放射される位相の揃ったX線源を形成する。これは、短距離で平面波を構築する役割を果たし、シンクロトロン放射光でコリメートして放射されるX線と同様の平面波に近い干渉性の強い単色X線となる。これらのX線源は軽い元素からなる物質構造や生体の軟組織を観測するX線源として大変有用となる。

参考文献

- [1] Y. Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B227 (2005) 32.
- [2] T. Kuwada, et al., "Phase Contrast Imaging of Biological Materials Using LEBRA-PXR", SRI2006 The Ninth Inter. Conf. on Synchrotron Radiation, May 28-June, 2006 Daegu, Korea.
- [3] V. G Baryshevsky, Channeling, radiation and in crystals at high energies (BGU, Minsk, 1982)
- [4] A. N. Didenko et al., Phys. Lett. A 100 (1985) 177
- [5] A.V. Shchagin, V.I. Pristupa and N.A. Khizhnyak, Phys. Lett. 148 (1990) 485
- [6] I. Endo, et al., Phys.Rev. E 51 (1995) 6305.
- [7] Y. Hayakawa, et al., Phys. Soc. Jpn. 67 (1998) 1044.