

## THE FUTURE VIEW OF PARAMETRIC X RAY\*

I. samu Sato<sup>A)</sup>, K. Hayakawa<sup>B)</sup>, T. Tanaka<sup>B)</sup>, Y. Hayakawa<sup>B)</sup>; T. Kuwada<sup>A)</sup>, T. Sakai<sup>A)</sup>; K. Nogami<sup>B)</sup>,  
Y. Takahashi<sup>C)</sup>, K. Suzuki<sup>C)</sup>, Y. Tanaka<sup>D)</sup>, T. Sakae<sup>E)</sup>, A. Mori<sup>F)</sup>, K. Nakao<sup>G)</sup>, Y. Oku<sup>G)</sup>, M. Inagaki<sup>A)</sup>;

<sup>A)</sup> Advanced Res. Inst. for the Sciences & Humanities, Nihon Univ.;

<sup>B)</sup> Inst. of Quantum Science, Nihon Univ.; <sup>C)</sup> College of Science & Technology, Nihon Univ.;

<sup>D)</sup> School of Medicine, Nihon Univ.; <sup>E)</sup> School of Dentistry at Matsudo, Nihon Univ.;

<sup>F)</sup> College of Pharmacy, Nihon Univ.; <sup>G)</sup> Grad. School of Science & Technology, Nihon Univ.;

### Abstract

In the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University, it succeeded in world's first utilization of the parametric X-rays (PXR) using an electron linear accelerator in April, 2004. This success was largely responsible for the quality electron beam of the 125MeV electron linear accelerator for FEL.

The peculiarity of PXR is in strong directivity and semi-monochromaticity and is that the energy of X-rays is easily changeable further. Now, the use experiment which utilizes this peculiarity is tried variously. If the special peculiarity of PXR is utilized, in use of ordinary X ray equipments or a synchrotron orbital radiation institution, the experiment of a low possibility is usually possible. Here, some examples are taken up and the future view of parametric X-rays is described.

## パラメトリック X線の今後の展望

### 1. はじめに

周期的に変化する媒質を横切る粒子の放射は、1957年、ソ連の Ya. B. Fainberg と A. Khzhyak<sup>1)</sup>によって初めて考察された。この種の放射は、結晶に应用された如く、1970~1980年代に、濃縮された媒質中の高エネルギー電磁プロセス<sup>2)</sup>、高エネルギー粒子の結晶中のチャネリング、放射と反応<sup>3)</sup>、X線のトランジション放射現象<sup>4, 5, 6)</sup>として、加速器ある世界中の至るところで研究された。又、ソ連では、1980年代の後半から、ブラック角近傍の実験として、Tomsk の電子シンクロトロン900MeV電子ビームによるパラメトリックX線放出(PXE)<sup>7)</sup> 或いは Kharkov の電子リニアックの25MeV電子ビームによるパラメトリックX線放射(PXR)の大まかな特性<sup>8, 9, 10)</sup>が測定されていた。更に、A. V. Shchagin<sup>11)</sup>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、PXR特性を測定しその詳細構造を明らかにした。

PXE或いはPXRは高エネルギーの電子ビームで単結晶を照射すると、電子ビームが制動されて輻射する $\gamma$ 線以外に、単結晶中を荷電粒子が通過するときに発生する光子の振る舞いがチェレンコフ光によく似た性質のX線を発生するので quasi-Cherenkovとも呼ばれている。

PXRの存在は、シンクロトロン放射の陰に隠れて話題に上らなかったが、ソ連で1980年代に、このX線が単色に近い特性をもつことが実験的に確かめら

れると、次第に注目されるようになった。

日本では、学芸大の新田<sup>12)</sup>が結晶内の Maxwell 方程式の摂動解を基本に結晶内で相対論的電子からのコヒーレント放射(PXR)を解析的に表示すること試み、広島大の遠藤<sup>13)</sup>、京都大の早川<sup>14)</sup>のグループは、核研の電子シンクロトロンや京大の電子リニアックを使ってPXR計測実験を行った。

しかし、このX線は、発生源で $\gamma$ 線や中性子などの放射線も同時に発生するために、これらの放射線とX線の分離が困難なことから、X線源としては活用されていなかった。

### 2. PXR発生装置

日本大学研究施設<sup>15)</sup>では、PXRの優れた特性に注目し、FEL用電子ビームの特性を生かし、指向性の強い単色X線の実用化を試みることになった。

PXRは、図1に示すように、2枚の単結晶板にX線発生とX線反射の役割を分担させ、パラメトリックX線と $\gamma$ 線や中性子などの放射線と分離し、X線のみを実験室に輸送し、更に、電子ビームに対する単結晶面の照射角度を変えるとPXRのエネルギーが可変にできることから、エネルギー可変な単色X線発生装置を設計し、学術フロンティア推進事業がスタートした2000年4月に製作を開始し同年12月にPXR発生装置<sup>16)</sup>は完成した。しかし、FEL発振を最優先にしたために、PXRのテスト実験が大幅に遅れ、世界初のPXRの実用化は2004年4月にずれた。

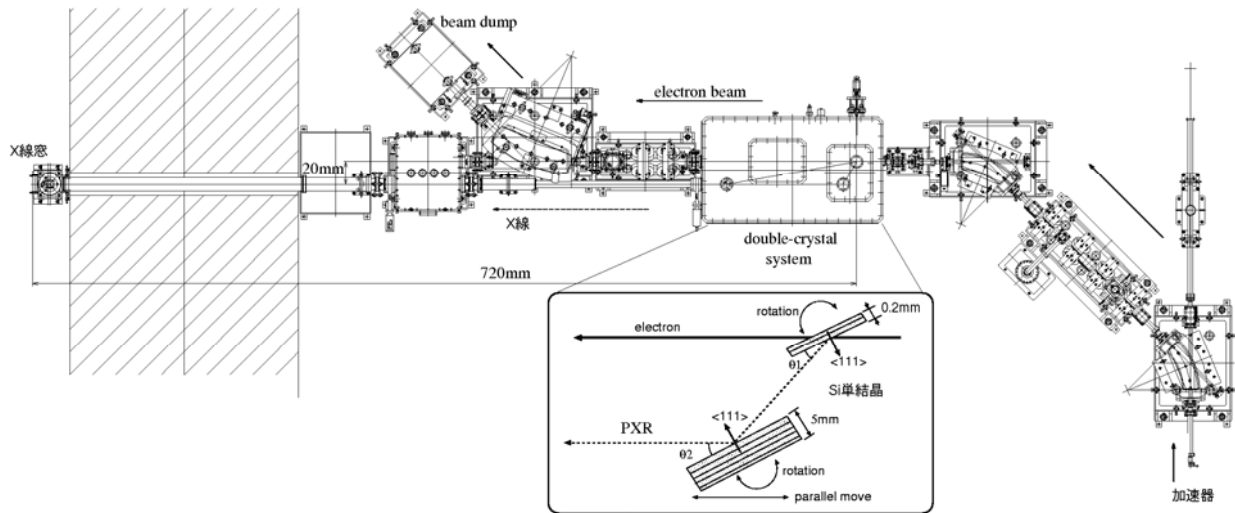


図1 PXRの配置図 : 電子ビームは紙面の右側下から供給され、45度偏向電磁石2台で左方向に90度曲げられ、薄いSi単結晶板(第1単結晶)を照射する。PXRは電子ビームの方向と第1単結晶面がブラッグ角を成す方向に放射され、第2単結晶で更にブラッグ角に方向に偏向され、電子ビームと平行に取り出され、実験室に輸送されている。

LEBRAは、短波長FELとパラメトリックX線を共用することにより、赤外線からX線までの広い領域で、可変波長の指向性の強い単色光を利用できる世界初のユニークな共同利用研究施設が誕生することになった。

### 3. PXRの特性

速度ベクトル $\mathbf{v}$ の電子が単結晶格子ベクトル $\mathbf{g}$ を通過するとPXRのエネルギー $E_x$ は、

$$E_x = \frac{h^* c^* |\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}|}{c^* - \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega}} \quad (1)$$

で表される。ここで、 $h$ はプランク常数で $h^* = h/2\pi$ 、 $\epsilon_0$ は結晶の誘電率で $c^* = c/\epsilon_0^{1/2}$ 、 $\mathbf{\Omega}$ はPXRが放出される方向の単位ベクトルである。

もし、入射電子の方向と出射X線の方向がブラッグ条件を正確に満足するとブラッグ回折によって散乱されるX線のエネルギーが(1)で表されるエネルギーと等しくなる。これは、PXRのエネルギーがブラッグ角で変わることを意味する。

Si単結晶の(111)面に100MeV電子ビームを7.5度の角度で照射したときのPXRのエネルギーと強度の変化の計算例を図2に示す。理想的なPXRはドーナツ状の空間分布(図2はその断面)をしているが、エネルギーが大きくなるにつれて分布は一様化する。

現在、PXRの可変エネルギー範囲は、長波長では窓や空気による吸収の問題とブラッグ角大きくなる

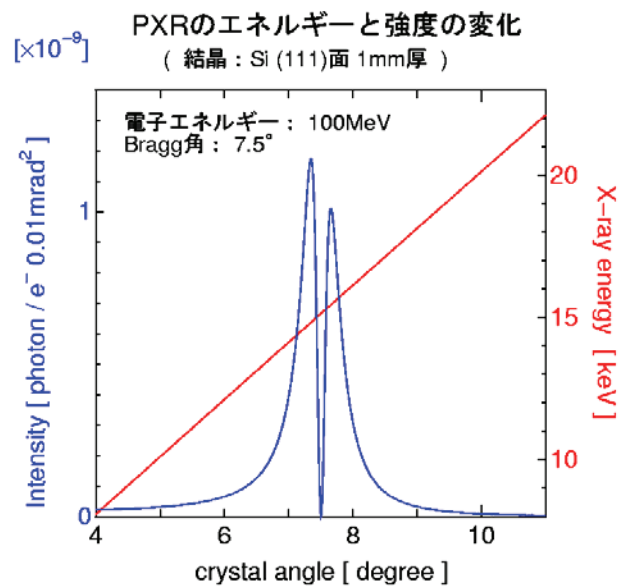


図2 ブラッグ角7.5度のPXRスペクトル

と結晶表面の電子ビームスポット寸法が小さくなり、結晶破壊が懸念されるため、6keV~20keVに制限している。

図3には、PXRのエネルギーを変えて真鍮とZnSeのX線吸収スペクトルを測定した例を示した。このように、PXRには、銅、亜鉛、セレンの吸収スペクトルが簡単に得られる特徴を持っている。

### 4. PXRの将来展望

パラメトリックX線(PXR)の実用化は、簡便にエネ

ルギーが変えられる単色X線光源の実現を意味し、又、指向性の強いコヒーレントX線の出現により、軽い元素で構成される有機物質が少ないX線線量で高コントラスト撮像が得られている。これは将来ガンなどの医療診断が的確にできることを示唆するとともに、これからのX線位相学の発展を飛躍させる可能性が非常に高い。更に、PXR が約1%の一次関数的なエネルギー分散を持つことから、特定物質のX線吸収微細構造(XAFS)映像が得られ、大型放射光施設でも長時間計測を要するXAFSを短時間で計測できる可能性が高い。又、FEL用電子リニアックの電子ビームは、マイクロビームパルス幅が、約0.5psであり、マクロビームパルスの電流が200mAの場合、尖頭電流は140Aになり、ある瞬間は、とてつもない明るいX線源である。

しかし、残念ながら、日大の100MeV電子リニアックは、マクロパルスが20  $\mu$ sの2Hz運転でデューティーが $2.5 \times 10^{-5}$ であり、且つ、 $40 \times 20\text{m}^2$ の占有面積を使用している。これがPXR普及の最大の障害であり、これを $4 \times 2\text{m}^2$ にする方法を検討中であり、又、紙数の制限から、この方法を講演で報告する。

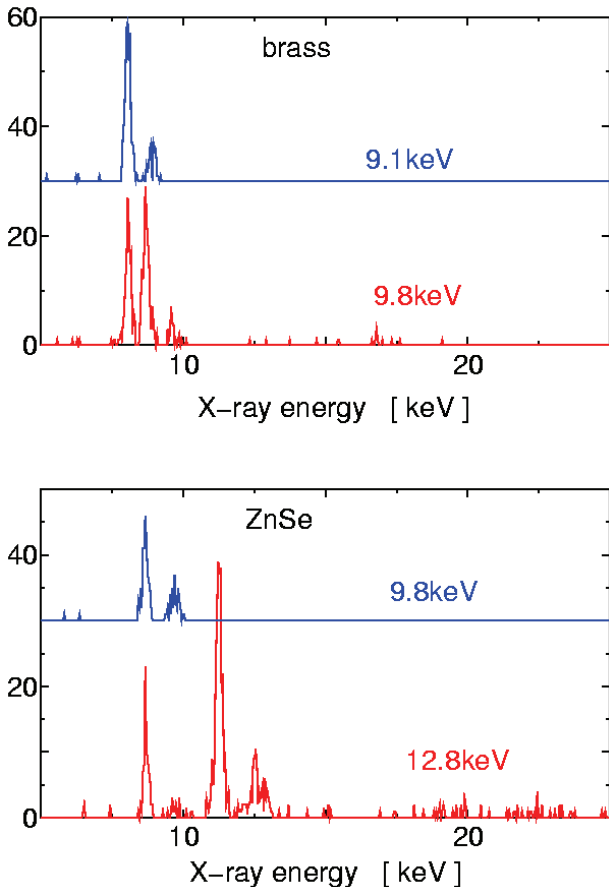


図3 K吸収端による合金物質の分別探索例

## 5. まとめ

100MeV電子リニアックによるPXRには、まだ未知の部分が多いが、電子軌道放射(SOR)や通常X線では得られない特性があり、XFELに類似する新世代のX線光源として、発展性が大きいと考えている。今後の普及のキポイントは、高負荷の小型電子リニアックの開発にあり、皮肉にも何時の時代も同じ課題を掲げている。

\*:この研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業(平成12年度~平成16年度)によるものあり、この機会を与えて呉れたことに深く感謝する。

## Reference

- 1) Ya. B. Fainberg and .A. Khzhyak, Zh.Eksp.Fiz.32 (1957) 883
- 2) M. L. Ter-Mikaelian, High-energy electromagnetic processes in condensed media, Interscience tracts on physics and astronomy (Wiley-Interscience, New York, 1972)
- 3) V. G. Baryshevsky, Channeling, radiation and in crystals at high energies (BGU, Minsk, 1982)
- 4) G. M. Garibyan and C. Yang, X-ray transitions radiation (Arm. SSR. Erevan, 1983 )
- 5) D. Dialetis, Phys. Rev. A 17 (1978) 1113.
- 6) I. D. Feranchuc and A. V. Ivashin, J. Phys. 46 (1985) 1981.
- 7) A. N. Didenko et al., Phys. Lett. A 100 (1985) 177.
- 8) Yu. N. Adishchev, et al., Nucl. Instr. Meth. B 21 (1987) 49.
- 9) R. O. Avakyan, et al., Pis'ma Eksp. Teor. Fiz. 45 (1987) 313.
- 10) D. I. Adejshvili, et. al., Dokl. Akad. Nauk SSSR 298 (1988) 844.
- 11) A.V. Shchagin, V.I. Pristupa and N.A. Khizhnyak, Phys. Lett. 148 (1990) 485.
- 12) H. Nitta, Phys Lett. A 158 (1991) 270-274.
- 13) I. Endo, et al., Phys.Rev. E 51 (1995) 6305.
- 14) Y. Hayakawa, et al., Phys. Soc. Jpn. 67 (1998) 1044.
- 15) I. Sato et al., The 13<sup>th</sup> Sym. on Accel. Sci. and Tech., Osaka, Japan, (2001) 117
- 16) Y. Hayakawa et al., Nucl. Instr. Meth. B 227 (2005) 32-40.