THE FUTURE VIEW OF PRAMETRIC X RAY*

I. samu Sato^A), K. Hayakawa^B), T. Tanaka^B), Y.Hayakawa^B); T. Kuwada^A), T. Sakai^A); K. Nogami^B),

Y. Takahashi⁽⁾, K. Suzuki⁽⁾, Y. Tanaka⁽⁾, T. Sakae^(E), A. Mori^(F), K. Nakao^(G), Y. Oku^(G), M. Inagaki^(A);

^A)Advanced Res.Inst. for the Sciences & Humanities, Nihon Univ.;

^BInst. of Quantum Science, Nihon Univ.; ^CCollege of Science & Technology, Nihon Univ.;

^{D)}School of Medicine, Nihon Univ.; ^{E)}School of Dentistry at Matsudo, Nihon Univ.;

^{F)}College of Pharmacy, Nihon Univ.; ^{G)}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、1 957年、ソ連の Ya.B.Fainberg と A.Khzhyak¹⁾によっ て初めて考察された。この種の放射は、結晶に応用 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²⁾、高エネルギー粒 子の結晶中のチャネリング、放射と反応3)、X線のトラ ンジション放射現象4,5,6)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の900MeV電子ビームによるパラ メトリックX線放出(PXE)⁷⁾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^{8,9,10)}が測定されていた。 更に、A.V.Shchagin¹¹⁾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 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¹²⁾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¹³⁾、京都大の早川¹⁴⁾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 ック使ってPXR計測実験を行った。

しかし、この X 線は、発生源で 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¹⁵⁾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2 000年4月に製作を開始し同年12月にPXR発生装 置¹⁶⁾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単結晶面がブラック角を 成す方向に放射され、第2単結晶で更にブラック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vの電子が単結晶格子ベクトルgを通 過するとPXRのエネルギーExは、

$$E x = \frac{h^* c^* | \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} |}{c^* - \mathbf{v}}$$
(1)

で表される。ここで、hはプランク常数でh*=h/2 、 。は結晶の誘電率でc*=c/ 。^{1/2}、 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線の方向がブラック 条件を正確に満足するとブラック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 等しくになる。これは、PXRのエネルギーがブラック 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に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ク角大きくなる



図2 ブラック角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×線光源の実現を意味し、 又、指向性の強いコヒーレント×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×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×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×線吸収 微細構造(×AFS)映像が得られ、大型放射光施設 でも長時間計測を要する×AFS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、ミ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× 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20µsの2Hz運転でデュウティ ーが2.5×10⁵であり、且つ、40×20m²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4×2m²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。 今後の普及のキイポイントは、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

 M. L. Ter-Mikaelian, High-energy electromagnetic processes in condenced 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 13th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Osaka, Japan, (2001) 117

16) Y. Hayakawa et al., Nucl. Instr. Meth. B 227 (2005) 32-40.