

パラメトリック X 線を利用した 新しい電子ビームプロファイルモニタの開発

高林雄一, 隅谷和嗣

九州シンクロトロン光研究センター

従来, リニアックの電子ビームの高精度プロファイルモニタとして, 可視遷移放射 (optical transition radiation : OTR) が用いられてきた. しかし, 最近, X 線自由電子レーザー (X-ray free electron laser : XFEL) 用のリニアックにおいて, ビームのバンチ長が短いために, OTR がコヒーレントになり, ビームのプロファイル測定に利用できないことが判明した[1,2]. また, 現在, 世界規模で開発研究が進んでいる国際リニアコライダー (International Linear Collider : ILC) のように, ビームサイズが可視光の波長より小さい場合にも OTR はコヒーレントになると考えられる.

コヒーレントになることを避けるには, より波長の短い光を利用する必要がある. そこで, 本研究では, パラメトリック X 線 (parametric X-ray radiation : PXR) の利用を提案する. PXR とは, 相対論的荷電粒子が結晶に入射した際に, ブラッグ条件を満たす方向に X 線が放射される現象である. 入射荷電粒子のまわっている擬似的光子が結晶によって回折される現象と解釈することができる.

本研究では, PXR を利用したビームプロファイルの測定法として, (1) 近接法, (2) ピンホール法, (3) フレネルゾーンプレート法という 3 つの手法を提案している.

(1) 近接法 :

2 次元の X 線検出器を光源点に接近させて PXR のプロファイルを測定し, 理論計算により, PXR のプロファイルからビームのプロファイルを導出する.

(2) ピンホール法 :

いわゆるピンホールカメラの原理に基づく手法である. 光源点と X 線検出器の間にピンホールを設置し, X 線検出器上にビームのプロファイルを再構成する.

(3) フレネルゾーンプレート法 :

X 線領域においてレンズとしての働きを持つフレネルゾーンプレートを光源点と X 線検出器の間に設置し, ビームのプロファイルを X 線検出器上に結像する.

実験は, 九州シンクロトロン光研究センター (SAGA Light Source : SAGA-LS) のリニアックからの 255 MeV 電子ビームを利用して行った. 標的として, 厚さ 20 μm の Si 単結晶を用いた. これまでに, 近接法とピンホール法の原理の検証実験に成功した[3,4]. 現在, 残るフレネルゾーンプレート法に関する研究を進めている.

参考文献

- [1] H. Loos *et al.*, Proc. of FEL08, 485 (2008).
- [2] 原徹ら, 第 8 回日本加速器学会年会プロシーディングス, 55 (2011).
- [3] Y. Takabayashi, Phys. Lett. A **376**, 2408 (2012).
- [4] Y. Takabayashi, K. Sumitani, Phys. Lett. A **377**, 2577 (2013).

パラメトリックX線を利用した 新しい電子ビームプロファイルモニタの開発

高林 雄一, 隅谷 和嗣
九州シンクロtron光研究センター

背景

従来、リニアックの電子ビームの高精度プロファイルモニタとして、可視遷移放射(optical transition radiation: OTR)が用いられてきた。しかし、最近、X線自由電子レーザー(X-ray free electron laser: XFEL)用のリニアックにおいて、ビームのパンチ長が短いために、OTRがコヒーレントになり、ビームのプロファイル測定に利用できないことが判明した[1,2]。また、現在、世界規模で開発研究が進んでいる国際リニアコライダー(International Linear Collider: ILC)のように、ビームサイズが可視光の波長より小さい場合にもOTRはコヒーレントになると考えられる。

コヒーレントになることを避けるには、より波長の短い光を利用する必要がある。そこで、本研究では、パラメトリックX線(parametric X-ray radiation: PXR)の利用を提案する[3,4]。PXRとは、相対論的荷電粒子が結晶に入射した際に、ブラッグ条件を満たす方向にX線が放射される現象である。入射荷電粒子のまわっている擬似的光子が結晶によって回折される現象と解釈することができる。

参考文献

- [1] H. Loos et al., Proc. of FEL08, 485 (2008).
- [2] 原徹ら, 第8回日本加速器学会年會プロシーディングス, 55 (2011).
- [3] Y. Takabayashi, Phys. Lett. A 376, 2408 (2012).
- [4] Y. Takabayashi, K. Sumitani, Phys. Lett. A 377, 2577 (2013).

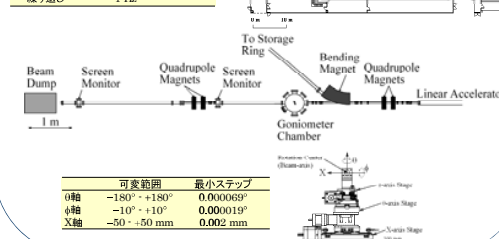
目的

PXRを利用した新しいビームプロファイルモニタの開発

- 近接法
- 遠隔法:ピンホール法, フレネルゾーンプレート法

SAGA Light Source (SAGA-LS)

蓄積リング	
周長	75.6 m
エネルギー	1.4 GeV
蓄積電流	300 mA
エミッタンス	25 nm-md
寿命	~7 hours @ 300 mA
電子エネルギー	1.9 keV
リニアック	
全長	30 m
エネルギー	255 MeV
平均電流	7 nA
繰り返し	1 Hz



可変範囲		最小ステップ
θ軸	-180° +180°	0.000069°
φ軸	-10° +10°	0.000019°
X軸	-50 +50 mm	0.002 mm

近接法

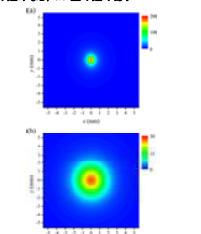
PXRのプロファイルは、PXRの角度分布と結晶上のビームプロファイル・ビームの角度分布との畳み込みにより形成される。X線検出器を結晶に接近させて測定した場合、ビームプロファイルによる畳み込みの効果が主となる。つまり、PXRのプロファイルからビームプロファイルの導出が可能。

$$I^{PXR}(\theta_x, \theta_y) = \iint I(\theta_x - s_x, \theta_y - s_y) G(s_x, s_y) G(s_x, s_y) ds_x ds_y$$

σ_x : 水平ビームサイズ
 σ_y : 垂直ビームサイズ
 L : 結晶からX線検出器までの距離

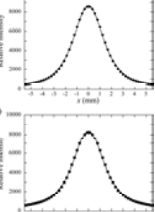
(220)面によるPXRの次元プロファイル(計算結果)

(a) ビームプロファイル($\sigma_x = \sigma_y = 1$ mm)による畳み込みなし, (b) 畳み込みあり



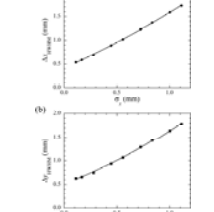
PXRのプロファイル(計算結果)

(a) 水平方向, (b) 垂直方向

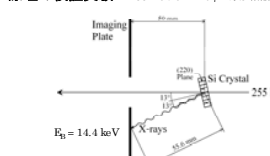


ビームサイズ対PXRプロファイルの半値幅

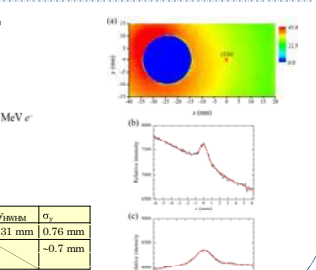
(Half Width at Half Maximum: HWHM)



原理の検証実験 255 MeV e⁻ → 20 μm厚Si結晶

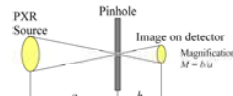


	Δs_{PXR}	σ_x	Δs_{PXR}	σ_y
PXRによる測定	0.57 mm	0.15 mm	1.31 mm	0.76 mm
蛍光板による測定 (100 μm厚アルミナ蛍光板)	-	-0.2 mm	-	-0.7 mm

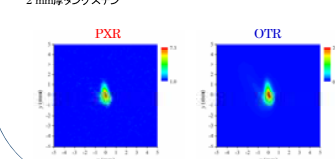
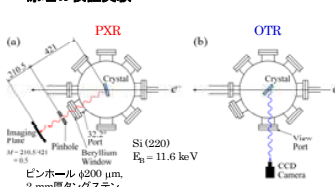


遠隔法:ピンホール法

近接法はシンプルな手法であるが、実験条件によっては検出器を結晶に近づけられない場合もある。そこで、X線検出器を結晶から遠い位置に設置する遠隔法を提案。この場合は、像を転送するための光学系が必要。ピンホールカメラの原理に基づく、ピンホール法を提案。



原理の検証実験



PXRによるビームサイズ測定結果

水平 (μm)	垂直 (μm)
$\sigma_{PXR,convol}$ 268 ± 3	$\sigma_{PXR,convol}$ 553 ± 9
$\sigma_{pinhole}$ 75 ± 0.1	$\sigma_{pinhole}$ 75 ± 0.1
σ_{Si} 97 ± 1	σ_{Si} 97 ± 1
σ_{PXR} 238 ± 3	σ_{PXR} 539 ± 9

OTRによるビームサイズ測定結果

水平 (μm)	垂直 (μm)
$\sigma_{OTR,convol}$ 278 ± 2	$\sigma_{OTR,convol}$ 616 ± 8
σ_{OTR} 125 ± 6	σ_{OTR} 125 ± 6
σ_{OTR} 248 ± 4	σ_{OTR} 603 ± 8

遠隔法:フレネルゾーンプレート法

この手法では、結晶上のPXRのプロファイルを、X線検出器まで転送するためのレンズが必要。本研究では、フレネルゾーンプレート(Fresnel zone plate: FZP)の利用を提案。FZPとは、X線の透過帯と不透過帯が交互に同心円状に並んだものであり、X線用のレンズとしての働きを持つ。第1歩として、FZP1枚のみを用いてPXRの集束実験を行う。



まとめ

PXRを利用した新しいビームプロファイルモニタの開発

- 近接法の原理の検証実験に成功
- ピンホール法の原理の検証実験に成功
- フレネルゾーンプレート法の原理の検証実験が進行中

謝辞

パラメトリックX線に関して議論いただいた、ウクライナのハリコフ物理学研究所のA.V. Shchagin 首席研究員、ロシアのトムスク工科大学のK.B. Korotchenko 准教授、Yu.L. Pivovarov 教授、T.A. Tukhfatullin 准教授に感謝いたします。本研究は、JSPS科研費24654078の助成を受けたものです。