

# 相対論的電子ビームと結晶の相互作用研究と加速器技術への応用

高林雄一

九州シンクロトロン光研究センター

相対論的電子ビームと結晶の相互作用に関する基礎研究と加速器技術への応用が本研究の目的である。(1) パラメトリック X 線 (parametric X-ray radiation : PXR) を利用したビームプロファイルモニタの開発と (2) 鏡面反射様チャネリングを利用したビーム偏向技術の開発に関して研究を進めている。

(1) 最近, X 線自由電子レーザー (X-ray free electron laser : XFEL) 用リニアックにおいて, 電子ビームのバンチ長が短いために可視遷移放射 (optical transition radiation : 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]. 本研究では, コヒーレントになることを避けるため, より波長の短い PXR の利用を提案している. ①近接法, ②ピンホールカメラ法, 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, ①と②の原理の検証実験[3,4]に成功したことを前回報告した. 今回は, フレネルゾーンプレート法の開発状況について報告する.

(2) 従来, チャネリングを利用したビーム偏向の研究では, 湾曲させた結晶 (bent crystal) が用いられてきた. しかし, 最近, イタリアのフェラーラ大学のグループが, 湾曲していない結晶を用いてもビームを効果的に偏向できることを示した[5]. 彼らは, 面チャネリングの振動の半波長に等しい厚さを持つ極薄の Si 結晶を用いることにより, 2 MeV の陽子ビームを鏡面反射方向に偏向させることに成功したのである. 本研究では, 電子ビームに関して検証を行うことが目的である. 最近, SAGA-LS のリニアックからの 255 MeV 電子ビームと厚さ 0.7  $\mu\text{m}$  の Si 結晶を用いて鏡面反射様チャネリングの観測[6]に成功したので報告する.

## 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).
  - [5] V. Guidi, A. Mazzolari, D. De Salvador, L. Bacci, Phys. Rev. Lett. **108**, 014801 (2012).
  - [6] Y. Takabayashi, V. G. Bagrov, O. V. Bogdanov, Yu. L. Pivovarov, T. A. Tukhfatullin, Nucl. Instrum. Methods B **355**, 188 (2015).
-

# 相対論的電子ビームと結晶の相互作用研究と 加速器技術への応用

高林 雄一

九州シンクロトロン光研究センター

## はじめに

結晶との相互作用を利用すると、従来不可能だった技術が可能になり、近年、精力的に研究が行われている。

- X線をつくる  
日本のグループは、パラメトリックX線を空間コヒーレンスの高い光源として、イメージング等に利用。
- $\gamma$ 線をつくる  
オーストラリアのグループは、超格子構造を利用して周期長0.41  $\mu\text{m}$ の超短周期アンジュレタ結晶を製作し、電子をチャネリングさせることによって $\gamma$ 線を生成することに成功。
- 陽電子をつくる  
CEFN-SPSでは、陽電子生成用の標的のタンガステン単結晶を採用し、チャネリング放射を利用して陽電子の収量を約25%増加させることに成功。
- ビームを曲げる  
CERN-SPSでは、湾曲させた結晶 (bent crystal) におけるチャネリングを利用して、高エネルギーのビームを偏向させる研究が行われている。LHCにおけるチャネリング実験も計画されている。
- ビームを加速する  
Fermilabでは、カーボンナノチューブチャネリングを利用したビームの加速試験 ( $\sim 1\text{TeV/m}$ ) が計画されている。

本研究の目的: 電子ビームと結晶の相互作用に関する基礎研究とビームモニタ・ビーム制御技術への応用研究

- (1) パラメトリックX線を利用したビームプロファイルモニタの開発
- (2) 鏡面反射様チャネリングを利用したビーム偏向技術の開発

## ビームライン

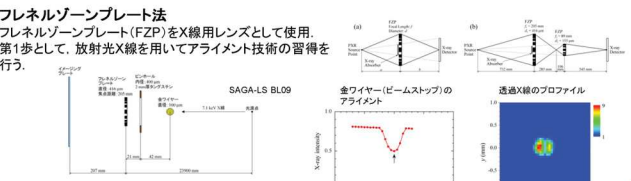
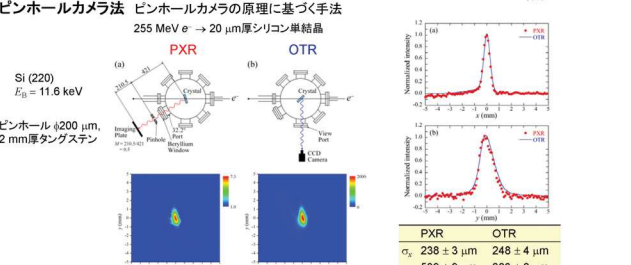
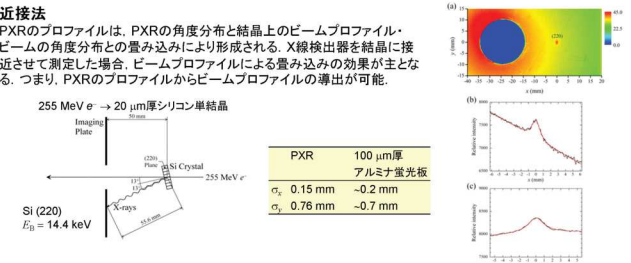


## パラメトリックX線を利用したビームプロファイルモニタ

**背景・目的**  
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、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、世界規模で研究開発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。入射荷電粒子のまどとている類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。

[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).

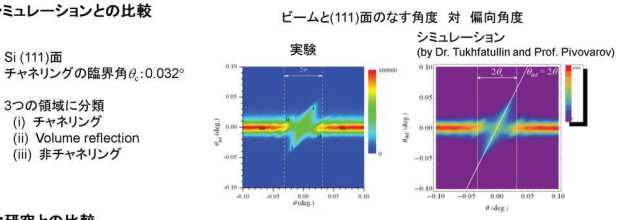
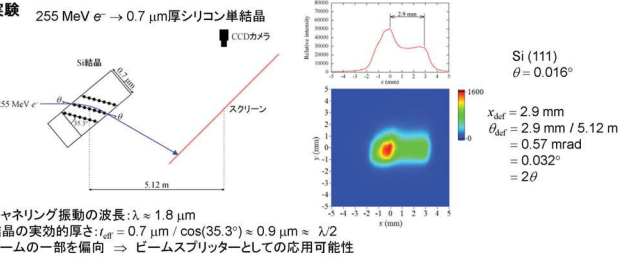


- まとめ**
- 近接法の原理の検証実験に成功
  - ピンホールカメラ法の原理の検証実験に成功
  - フレネルゾーンプレート法の原理の検証実験が進行中

## 鏡面反射様チャネリングを利用したビーム偏向

**背景・目的**  
従来、チャネリングを利用したビーム偏向の研究では、湾曲させた結晶 (bent crystal) が用いられてきた。ところが、2012年にイタリアのフェララ大学のグループは、湾曲していない結晶でもビームを効果的に偏向させることが可能であることを示した[1]。彼らは標的として、厚92 nmという極薄のシリコン単結晶薄膜を用いた。その厚さはチャネリング振動の半波長に等しいため、入射ビームはあたかも鏡面反射したかのように曲げられたのである。フェララ大学のグループは、2 MeVの陽子ビームを用いて実験を行った。しかし、電子ビームを用いた検証はまだ行われていない。そこで、本研究では、電子ビームを用いて鏡面反射様チャネリングによるビーム偏向の検証[2]を行うことが目的である。

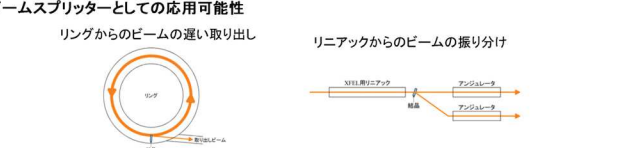
[1] V. Guidi et al., Phys. Rev. Lett. 108, 014801 (2012).  
[2] Y. Takabayashi, V. G. Bagrov, O. V. Bogdanov, Yu. L. Pivovarov, T. A. Tikhfatullin, Nucl. Instrum. Methods B 355, 188 (2015).



**他研究との比較**

ビームエネルギー	結晶	結晶の厚さ	最大偏向角	参考文献
SAGA-LS (日本)	255 MeV 非湾曲Si結晶	0.7 $\mu\text{m}$	1.1 mrad	本研究
MAMI (ドイツ)	855 MeV 湾曲Si結晶	30.5 $\mu\text{m}$	0.9 mrad	Phys. Rev. Lett. 112, 135503 (2014)
LCLS (アメリカ)	3.35 GeV, 6.3 GeV 湾曲Si結晶	60 $\mu\text{m}$	0.4 mrad	Phys. Rev. Lett. 114, 074801 (2015)
SAGA-LS (日本)	255 MeV 湾曲Si結晶	20 $\mu\text{m}$		実験準備中

鏡面反射様チャネリングによる偏向角度は、湾曲結晶チャネリングによるものに匹敵



- まとめ**
- 鏡面反射様チャネリングによる電子ビームの偏向にはじめて成功
  - 実験結果はシミュレーションとよく一致
  - 鏡面反射様チャネリングによる偏向角度は、湾曲結晶チャネリングによるものに匹敵
  - ビームスプリッターとしての応用可能性