

# 湾曲結晶チャネリングを利用したビーム操作技術の開発

高林雄一

九州シンクロトロン光研究センター

高速の荷電粒子が結晶の軸や面に沿って、ほぼ平行に入射すると、その荷電粒子は結晶の原子軸や原子面のつくる強力な電場によってガイドされながら結晶中を進むことが知られており、この現象はチャネリングと呼ばれている。そして、湾曲させた結晶を用いた場合、原子面も湾曲するため、原子面に沿ってチャネリングする荷電粒子は偏向されることになる。湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向法が提案されて以来、この研究は主に、高エネルギーの陽子など正の荷電粒子に関して行われてきた。2016年には、CERNのLHCにおいて、チャネリングの研究では世界最高エネルギーとなる6.5 TeV陽子を用いて、湾曲結晶チャネリングの研究が開始された。また、最近になり、アメリカのSLAC (3.35–20.35 GeV) [1]やドイツのMAMI (855 MeV) [2]では、高エネルギーの電子ビームを用いた研究も行われるようになってきた。電子のエネルギーが下がると、量子論的効果と結晶内における多重散乱の影響が大きくなることが知られており、より低エネルギー側の研究が興味深いと考えられる。そこで、本研究では、255 MeVの電子ビームを用いて、湾曲結晶チャネリングの研究を行うことにした。

実験は、SAGA-LS 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40  $\mu\text{m}$ の湾曲Si結晶を用いた。この結晶では、準モザイク効果を利用し、(111)面を半径約29 mmに湾曲させた。結晶透過後のビームの角度分布は、結晶から5.12 m下流に設置されたスクリーンモニタを用いて測定した。スクリーンモニタは、厚さ100  $\mu\text{m}$ のアルミナ蛍光板とCCDカメラから構成される。測定の結果、チャネリング条件下における電子の角度分布は、チャネリングして偏向された成分、チャネリングしなかった成分、デチャネリング成分の3成分に分類することができた。チャネリングして偏向された電子の割合は10%で、その偏向角度は1.4 mradであった。実験結果は、シミュレーション結果とほぼ一致していた[3]。ただし、今回の実験では、チャネリングした成分とチャネリングしなかった成分が大きく重なっており、両者の中間領域を占めるデチャネリング成分の割合を正しく評価することができなかった。今後、両成分の分離をよくするため、より湾曲角度の大きい結晶を利用して実験を行う予定である。

このように、湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向法では、一部のビームしか偏向されないため、ビームスプリッターとして応用可能であると考えられる。従来、高エネルギーのビームを偏向させるために電磁石が用いられてきたが、電磁石は全てのビームを曲げてしまうため、ビームスプリッターとして利用することはできない。よって、湾曲結晶チャネリングは、電磁石では実現不可能な新たなビーム操作技術に応用できるといえる。

## 参考文献

[1] U. Wienands, et al., Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 074801.

[2] A. Mazzolari, et al., Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 135503.

[3] Y. Takabayashi, Yu.L. Pivovarov, T.A. Tukhfatullin, Phys. Lett. A 382 (2018) 153.



# 湾曲結晶チャネリングを利用したビーム操作技術の開発

高林 雄一

九州シンクロtron光研究センター

## はじめに

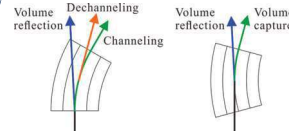
高速の荷電粒子が湾曲結晶を面チャネリングする場合、荷電粒子は湾曲した原子面に沿ってチャネリングするため、荷電粒子は偏向されることになる。この現象を利用したビーム偏向のアイデアは、1976年に提案[1]されて以来、主に陽子等のイオンビームに関して研究が行われてきた。最近では、CERNのLHCでビームのコリメーションを目的とし、6.5 TeV陽子の湾曲結晶チャネリングの実験が開始された[2]。一方、最近になり、ドイツのMAMI (855 MeV)[3]とアメリカのSLAC (3.35–14 GeV)[4]で、電子ビームを用いた研究も行われるようになってきた。

電子ビームのエネルギーが下がると、結晶中における多重散乱の効果と量子論的效果が大きくなることから知られており、今後の研究の方向性として、より低エネルギー領域での研究が興味深いと考えられる。そこで、本研究では、255 MeVの電子ビームを利用して湾曲結晶チャネリングの研究を行うこととした。実験は、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40 μmの湾曲シリコン結晶を用いた。準モザイク効果を利用して、結晶の(111)面を曲率半径約29 mmに湾曲させた。結晶から5.12 m下流にあるスクリーンモニタを用いてビームの角度分布を観測したところ、ビームの一部が1.4 mrad偏向されていることが確認された。この手法を用いれば、ビームの一部だけを偏向させることができるので、ビームスプリッターとして応用できる可能性がある。

本研究の目的: 255 MeV電子の湾曲結晶チャネリングの研究 → ビームスプリッターへの応用の可能性

- [1] E. N. Tsyanov, Preprint TM-682, TM-684, Fermilab, Batavia (1976).
- [2] W. Scandale et al., Phys. Lett. B 753 (2016) 129.
- [3] A. Mazzolari et al., Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 135503.
- [4] U. Wienands et al., Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 074801.

## 湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向

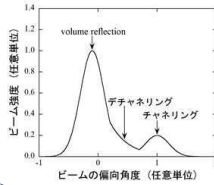


チャネリング: 湾曲した結晶面に沿ってチャネリングするため粒子は偏向される

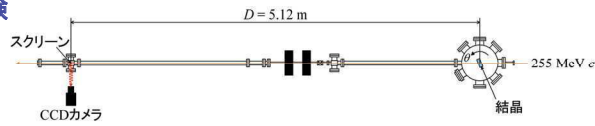
Volume reflection (VR): チャネリングとは逆方向に偏向される (臨界角 $\theta_c$ 程度)

Volume capture (VC): 多重散乱の影響により結晶内部でチャネリング状態に入る

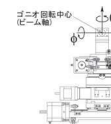
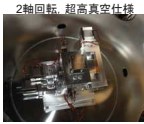
デチャネリング: 多重散乱の影響により途中でチャネリング状態から外れる



## 実験

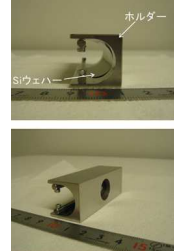
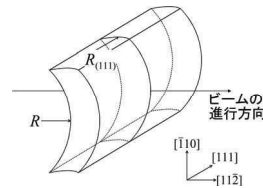


電子ビーム	エネルギー: 255 MeV, 平均電流: 7 nA, ビームの大きさ: $\phi 200 \mu\text{m}$ (コリメーターにより制限), ビームの角度幅が: $\sigma_x \approx 0.10 \text{ mrad}$ , $\sigma_y \approx 0.05 \text{ mrad}$
標的	40 μm厚湾曲シリコン単結晶
スクリーンモニタ	100 μm厚アルミナ蛍光板 + CCDカメラ (白黒, Giga-bit Ethernet)



駆動範囲	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

## 湾曲シリコン結晶



準モザイク効果  
 $R_{(111)} = 3.54R$

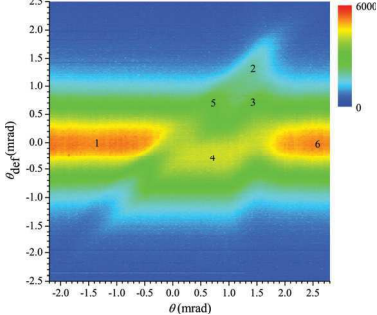
結晶面の湾曲角度:  $\theta_c = L/R_{(111)}$

L: 結晶の厚さ

実験結果から  
 $R_{(111)} = L/\theta_c \approx 40 \mu\text{m}/1.4 \text{ mrad} = 29 \text{ mm}$

## 結果

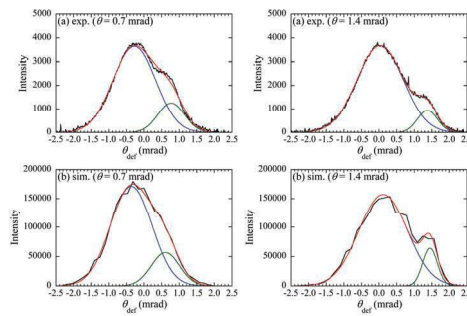
### ビームの偏向角度分布



θ: 結晶の回転角度,  $\theta_{def}$ : ビームの偏向角度

- 1と6: 非チャネリング
- 2: チャネリング
- 3: デチャネリング
- 4: volume reflection (VR)
- 5: volume capture (VC)

255 MeV電子がSi(111)面をチャネリングする場合の臨界角:  $\theta_c = 0.45 \text{ mrad}$



θ = 0.7 mrad	
	simulation
$\mu_1$	-0.36 mrad
$P_1$	82%
$\mu_2$	0.61 mrad
$P_2$	18%

θ = 1.4 mrad	
	simulation
$\mu_1$	0.12 mrad
$P_1$	89%
$\mu_2$	1.45 mrad
$P_2$	11%

**フィット式**

全成分 (赤色):  $I(\theta_{def}) = I_{VR}(\theta_{def}) + I_{CH}(\theta_{def}) + I_{DC}(\theta_{def})$

VR成分 (青色):  $I_{VR}(\theta_{def}) = \frac{P_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(\theta_{def} - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right)$

チャネリング成分 (緑色):  $I_{CH}(\theta_{def}) = \frac{P_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(\theta_{def} - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right)$

デチャネリング成分:  $I_{DC}(\theta_{def}) = \frac{1-P_1}{2\theta_c} \exp\left(-\frac{\sigma_1^2}{2\theta_c^2} - \frac{\mu_1 - \theta_{def}}{\theta_c}\right) \times \left[ \text{erf}\left(\frac{\mu_1 - \Delta\theta_{def}}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) - \text{erf}\left(\frac{\mu_1 - \Delta\theta_{def}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) \right]$

$P_2 = (1 - P_1) \exp\left(-\frac{L}{L_d}\right)$ ,  $\Delta\theta_{def} = \theta_{def} - \frac{\sigma_1^2}{\theta_c}$ ,  $\theta_c = \frac{L_c}{L} \theta_c$

$L_d$ : デチャネリング長  
 $P_1, \sigma_1, \mu_1, \sigma_2, \mu_2, L_d$ : フィットングパラメータ

### 他グループとの比較

	エネルギー	結晶厚	$R_{(111)}$	偏向角度
MAMI	855 MeV	30.5 μm	33.5 mm	0.91 mrad
SLAC	3.35–14 GeV	60 μm	150 mm	0.40 mrad
SAGA-LS	255 MeV	40 μm	29 mm	1.4 mrad

- 255 MeVという比較的低エネルギー領域では、結晶内における多重散乱の影響が大きく、チャネリング成分とVR成分(非チャネリング成分)が大きく重なっていた。
- シミュレーションには、ロシアのトムスク工科大学の理論グループがMathematicaを基に開発したBCMコードを使用。シミュレーション結果は、実験結果をほぼ再現。
- フィットの結果、デチャネリング成分は無視できるほど小さかった。
- チャネリング成分とVR成分(非チャネリング成分)が大きく重なっていることが原因として考えられる。

## まとめ

- 40 μm厚の湾曲シリコン結晶(曲率半径 $R_{(111)} \approx 29 \text{ mm}$ )の開発に成功。
- 湾曲結晶チャネリングにより、255 MeV電子を偏向させることに成功。
- 実験結果はシミュレーション結果とほぼ一致。
- 次のステップとして、チャネリング成分とVR成分(非チャネリング成分)の分離をよくするため、結晶面の湾曲角度をより大きく(曲率半径をより小さく)する予定。

## 謝辞

チャネリングのシミュレーションは、ロシアのトムスク工科大学のT.A. Tukhfatullin准教授とYu.L. Pivovarov教授のグループによって行われたものです。

本研究はJSPS科研費JP17K05483の助成を受けたものです。