

BEAM FOCUSING AND DEFOCUSING USING CHANNELING PHENOMENA

Y. Takabayashi ^{#,A)}, A. V. Shchagin ^{B)}

^{A)} SAGA Light Source

8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga 841-0005, Japan

^{B)} Kharkov Institute of Physics and Technology

Kharkov 61108, Ukraine

Abstract

If a charged particle is incident on a single crystal along its axis or plane, the motion of the charged particle is guided by the potential of atomic row or plane in the crystal. This phenomenon is called “channeling”. In this study, we propose a new method for beam focusing and defocusing using channeling phenomena in a bent crystal. As the first step, we have observed axial and planar channeling of 255-MeV electrons in a flat silicon crystal.

チャネリング現象を利用したビーム制御技術の提案

1. はじめに

荷電粒子が単結晶の軸や面に沿ってほぼ平行に入射すると、荷電粒子は原子列や原子面のつくるポテンシャルによってガイドされながら結晶中を進む（チャネリング現象）。原子列や原子面のつくる電場は強力で、磁場に換算すると数 100 テスラにも匹敵することが知られている。この特性に着目し、湾曲した結晶（Bent crystal）を用いて、CERN-SPS^[1]、Tevatron^[2]、RHIC^[3]等において、高エネルギーのイオンビームを偏向させる研究が行われてきた。日本でも、KEK-PS で陽子ビームを偏向させる実験が行われている^[4]。また、広島大学の電子周回装置（REFER）では、電子ビームを用いて偏向実験が行われた^[5]。

このように、ビームの偏向を目的とした研究が多く行われてきたが、本研究では、チャネリング現象を利用してビームをフォーカス・デフォーカスすることを提案する。はじめに、実験装置、チャネリングの実験結果について述べる。次に、チャネリング現象を利用したビームのフォーカス・デフォーカス技術について議論する。

2. 実験装置

2009 年度から、相対論的電子ビームと結晶の相互作用研究を目的としたビームラインの設計を開始し、2010 年 3 月に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

室への設置が完了した^[6]。図 1 にビームラインの概念図を示す。結晶の角度を制御するゴニオメーター、結晶透過後のビームプロファイルを観測するためのスクリーンモニタ、ベリリウム窓を備えた X 線取り出しポートなどから構成されている。

図 2 に結晶の角度を制御するゴニオメーターの概念図を、表 1 にその性能を示す。θは水平面内、φは鉛直面内における角度に対応する。

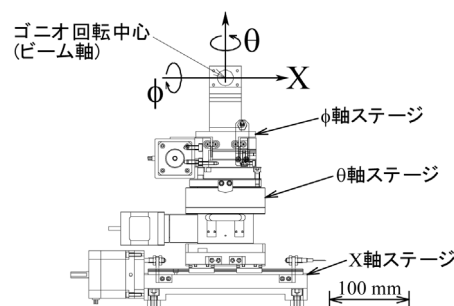


図 2：ゴニオメーターの概念図。

表 1：ゴニオメーターの性能。

	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

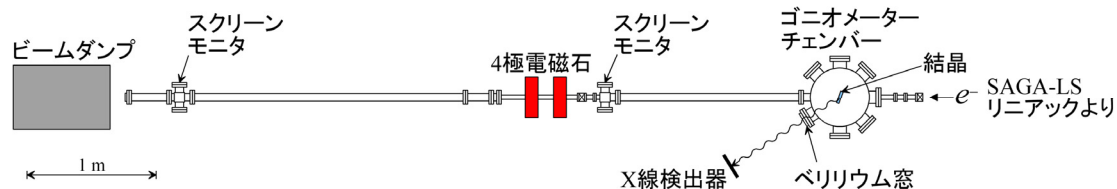


図 1：ビームラインの概念図（上面図）。

[#] takabayashi@saga-ls.jp

スクリーンモニタは、厚さ 100 μm のアルミナ蛍光板 (デマルケスト) と CCD カメラ (白黒, Giga-bit Ethernet 仕様) から構成されている。CCD カメラで取得した画像は、専用の LAN ケーブルと画像取得ボードを経由してパソコンで取得される。そして、水平(x)・垂直(y)方向のビームプロファイルは、オンラインでガウス関数によりフィットされ、ビームのピーク位置とビームサイズ σ が求められるようになっている。

X 線取り出しポートのベリリウム窓の直径は 30 mm、厚さは 250 μm である。本報告では詳しく述べないが、チャネリング電子からのパラメトリック X 線に関する研究も行っている。

3. チャネリングの観測

3.1 ビームパラメータ

Q スキャン法 (4 極電磁石の磁場の強さを変えていきビームサイズを測定する方法) を用いて、ビームの規格化エミッタンスとツイスパラメータの評価を行った^[6]。表 2 に結果を示す。また、これらの値を用いて、結晶位置におけるビームサイズと角度拡がり を計算した結果を図 3 に示す。計算は、結晶の上流に設置されている 4 極電磁石の K 値の関数として行った。図 3(b)の水平の実線は、255 MeV 電子がシリコン結晶の $\langle 100 \rangle$ 軸をチャネリングする場合の臨界角 ($0.044^\circ = 0.76 \text{ mrad}$) と(220)面をチャネリングする場合の臨界角 ($0.025^\circ = 0.43 \text{ mrad}$) を示す。広い範囲にわたってビームの角度拡がりは臨界角よりも十分小さいことが確認された。最終的に、矢印で示した設定値で、チャネリング実験を行った。

表 2 : Q スキャン法により求めた規格化エミッタンスと 4 極電磁石入口位置におけるツイスパラメータ。

	水平(x)	垂直(y)
ϵ_n ($\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	21	50
β (m)	3.5	11.8
α	4.9	-11.2

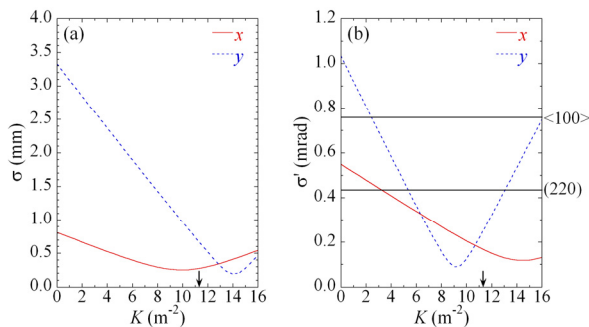


図 3 : 結晶位置における(a)ビームサイズと(b)ビームの角度拡がり。横軸は 4 極電磁石の K 値。

3.2 軸チャネリング

SAGA-LS リニアックからの 255 MeV の電子ビームを厚さ 20 μm のシリコン結晶に入射させ、チャネリング実験を行った。このシリコン結晶の $\langle 100 \rangle$ 軸は結晶表面に垂直であり、(220)面が水平となるように結晶を設置した。図 1 に示した上流側のスクリーンモニタを用いて、結晶透過後のビームプロファイルを観測した。結晶とスクリーンモニタ間の距離は 1.82 m であった。

図 4 に結晶の角度 θ をスキャンしたときの、結晶透過後のビームプロファイルを示す。 x は水平、 y

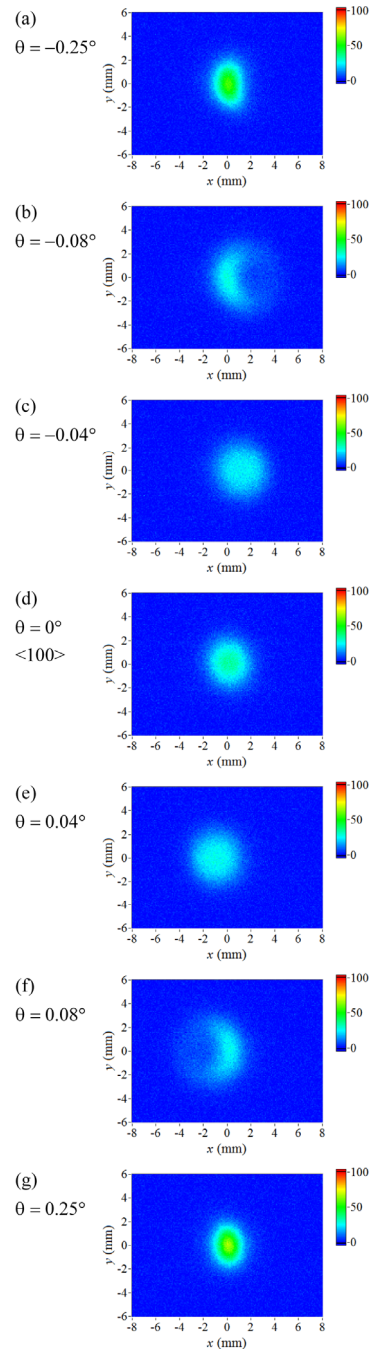


図 4 : $\langle 100 \rangle$ 軸チャネリング条件近傍における結晶透過後のビームプロファイル。

は垂直方向の位置である。 $\theta = 0^\circ$ が<100>軸チャネリング条件に対応する。 $\theta = \pm 0.04^\circ$ 付近では、ビームは<100>軸を傾けた方向 (x 方向) に偏向されていた。 $\theta = \pm 0.08^\circ$ 付近では、軸チャネリングに特徴的なドーナツ型のプロファイルが観測された。さらに θ を大きくしていくと、もはや電子はチャネリングしなくなり、 0° 方向 (もとの進行方向) に出射した。

図 5 に結晶の角度 θ 対ビームのピーク位置・大きさを示す。これらの値は、水平・垂直方向のビームプロファイルを、ガウス関数でフィットすることにより求めた。水平・垂直方向のプロファイルは、条件によっては複雑な形状を示したが、簡単のため、全てガウス関数でフィットを行った。図 5 の右側の縦軸には、ビームの偏向された角度 (ビーム位置の変化量を結晶とスクリーン間の距離 1.82 m で割った値) を示した。図 5 から、主に下記のことが見てとれる。(i) θ が臨界角付近で、ビームの偏向角は最大になった。その大きさは $\sim 0.8 \times |\theta|$ 程度であった。(ii) θ をさらに大きくしていくと、ビームは偏向されなくなった。(iii) $\theta = 0^\circ$ におけるビームサイズは、ランダム入射条件 (非チャネリング条件) 時の値よりも大きくなった。(iv) θ が臨界角を超えたところで、ビームサイズは最大になった。

なお、 ϕ 方向に関してもスキャンを行ったが、 x と y が入れ替わる以外、図 4・図 5 と同様の結果が得られた。

現在、ロシアのトムスク工科大学の理論グループが、チャネリングのシミュレーションを行っている^[7]。今後、実験とシミュレーションの比較を行う予定である。

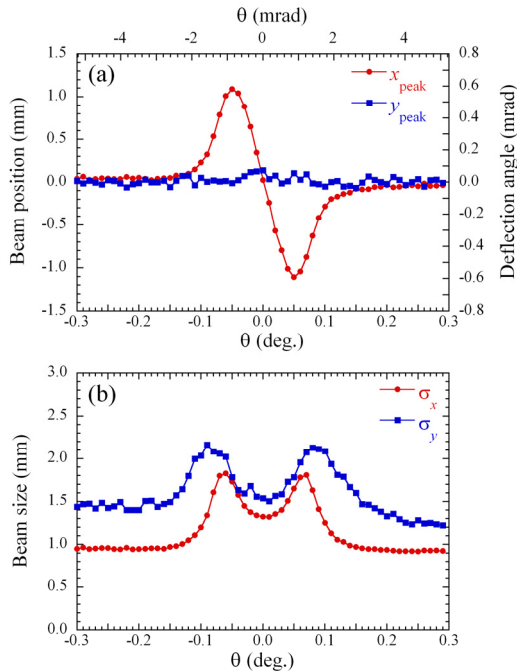


図 5 : 結晶の角度 θ 対(a)ビーム位置と(b)ビームサイズ。

3.3 面チャネリング

次に、同じセットアップを用いて、面チャネリングの観測も行った。前述したように、(220)面が水平となるように結晶を設置したので、(220)面のチャネリングを観測するため、角度 ϕ に関するスキャンを行った。図 6 に結晶透過後のビームプロファイルを、図 7 に結晶の角度 ϕ 対ビームの位置・大きさを示す。なお、このときの θ の値は -19.2° であった。 $\phi = 0^\circ$ が(220)面チャネリング条件に対応する。

図 6・図 7 からわかるように、面チャネリングの場合も、わずかではあるが、ビームの偏向される様子が観測された。また、 $\phi = 0^\circ$ において、 y 方向 (チャネリングの振動方向に平行) のビームサイズは最大となった。これは、チャネリング電子が原子核・電子密度の高い原子面付近を通過するため、大きく散乱されやすいことにより説明される。また、 $\phi = 0^\circ$ から少しずれたところで、 x 方向のビームサイズは減少した。 y 方向と同様、 x 方向のビームサイズも増大すると考えていたが、予想に反した結果が得られた。原因について現在検討中である。

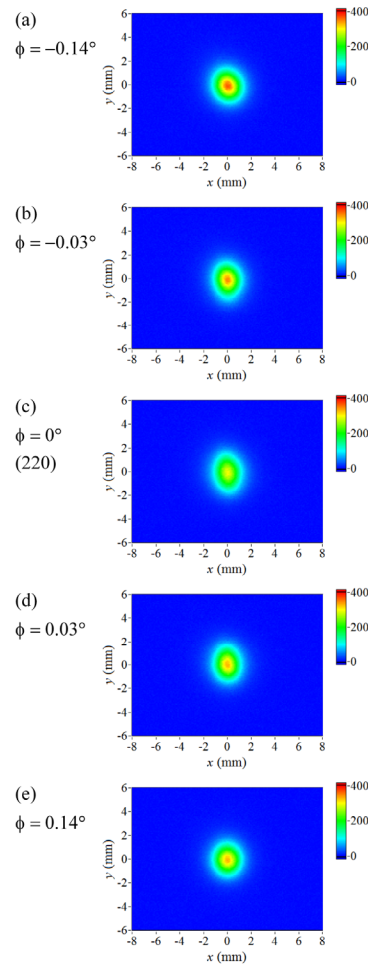


図 6 : (220)面チャネリング条件近傍における結晶透過後のビームプロファイル。

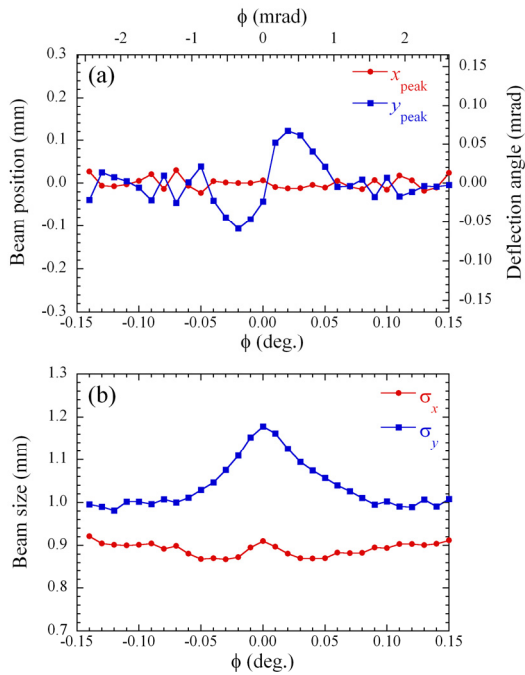


図7：結晶の角度 ϕ 対(a)ビーム位置と(b)ビームサイズ。

4. フォーカス・デフォーカス技術の提案

前節で議論したように、チャネリング現象を利用してビームを偏向させることが可能である。特に、軸チャネリングの場合の方が、その効果が大きいことが示された。この結果を踏まえ、湾曲した結晶を用いた、ビームのフォーカス・デフォーカス技術を提案する。図8に、その概念図を示す。図に示したように、結晶を湾曲させると、結晶の軸の方向が入射位置によって変化する。ビームは軸方向に偏向されると考えられるので、湾曲結晶に入射されたビームはフォーカス・デフォーカスされることが期待される。

本研究では今後、電子ビームを用いて、フォーカス・デフォーカス技術の検証実験を行う予定である。

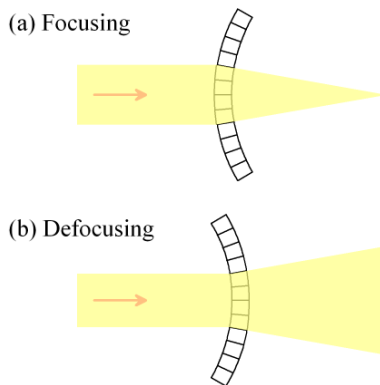


図8：湾曲結晶によるビームのフォーカス・デフォーカスの概念図。

しかし、電子を用いる場合、多重散乱の影響が大きいため、フォーカス・デフォーカスの効果ははっきりと現れない可能性がある。例えば、20 μm 厚シリコン結晶における 255 MeV 電子の多重散乱角は 0.5 mrad であり、これは入射ビームの角度拡がり 0.2 mrad よりも大きい。本研究の範囲を超えるが、多重散乱の影響の小さいイオンビームを用いた検証実験も重要であると考えられる。

また、湾曲結晶の作成方法も課題の1つである。現在、厚さ 20 μm のシリコン結晶を用いているが、この程度の厚さであれば、ある程度湾曲させることが可能である。第1案として、カーブ形状を持ったホルダーを作成し、それに沿わせて結晶を固定する方法を検討している。

本研究で提案した手法の特徴は、4極電磁石と異なり、電磁石電源が不要であることと、1方向のみのフォーカス・デフォーカスが行えることである。問題点は、前述したように、多重散乱の影響が大きいことである。しかし、有用な応用例としてビームの取り出し窓が考えられる。ビームを大気中に取り出す場合、取り出し窓による多重散乱の影響は避けられないが、その窓として湾曲結晶を利用すれば、ビームの拡がりを抑えられる可能性がある。

5. まとめ

SAGA-LS リニアックからの 255 MeV の電子ビームを厚さ 20 μm のシリコン結晶に入射し、 $\langle 100 \rangle$ 軸チャネリングと $\langle 220 \rangle$ 面チャネリングの観測を行った。結晶を傾けることにより、ビームの偏向される様子が観測された。この実験結果を踏まえ、湾曲結晶を用いて、ビームをフォーカス・デフォーカスする方法を提案した。今後、検証実験を行う予定である。

謝辞

チャネリングに関して理論面からの助言を下された、ロシアトムスク工科大学の Yu. L. Pivovarov 教授の理論グループに感謝いたします。

本研究を行う機会を与えて下さった、同センター加速器グループの江田茂グループ長、岩崎能尊副主任研究員、金安達夫副主任研究員、吉田勝英氏（前加速器グループ長）、富增多喜夫氏（前光源整備チームリーダー）に感謝いたします。

本研究の一部は科研費（21740217）の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] W. Scandale *et al.*, Phys. Rev. ST **11**, 063501 (2008).
- [2] R. A. Carrigan, Jr. *et al.*, Phys. Rev. ST **5**, 043501 (2002).
- [3] R. P. Fliller III *et al.*, Phys. Rev. ST **9**, 013501 (2006).
- [4] S. Stokov *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **76**, 064007 (2007).
- [5] S. Stokov *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B **252**, 16 (2006).
- [6] Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, Y. Iwasaki, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 623 (2010).
- [7] T. A. Tukhfatullin, K. Korotchenko, Yu. L. Pivovarov, private communication.