

機関番号：87202

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740217

研究課題名 (和文) 結晶を利用した加速器応用技術の開発

研究課題名 (英文) Development of New Beam Monitors Using Crystals

研究代表者

高林 雄一 (TAKABAYASHI YUICHI)

佐賀県地域産業支援センター九州シンクロトロン光研究センター・加速器グループ・研究員

研究者番号：50450953

研究成果の概要 (和文)：

結晶は原子が周期的に配列したものであり、高速の電子ビームが結晶に入射すると、その周期性を反映しユニークな放射現象が生じる。ある条件を満たすと回折チャネリング放射と呼ばれる新たな放射現象が生じることが理論的に予言されている。本研究の目的は、回折チャネリング放射の初観測とビームモニタへの応用である。本研究では、回折チャネリング放射の生成条件を探索するのに必要となる、結晶透過後の電子ビームの角度分布と結晶から放出される X 線の角度分布の測定装置を開発し、それぞれの観測に成功した。さらに実験を進め、回折チャネリング放射の初観測を目指している。

研究成果の概要 (英文)：

When an electron beam is injected into a crystal, a variety of radiation phenomena such as channeling radiation and parametric X-ray radiation (PXR) occur. If the energy of the channeling radiation coincides with the PXR energy, a new radiation process called diffracted channeling radiation (DCR) takes place. The purpose of the present work is to observe DCR and its application to beam energy measurement. We have developed an experimental setup for measuring beam profiles transmitted through a crystal and for detecting X-rays from the crystal. We have succeeded in observing channeling phenomena through measurements of the beam profiles. Also, we have succeeded in observing angular distributions of PXR from channeling electrons. As a next step, the experiment for observing DCR is in progress.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 3,200,000 | 960,000 | 4,160,000 |
| 2010年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,800,000 | 1,140,000 | 4,940,000 |

研究分野：加速器物理、放射線物理

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：相対論的電子ビーム、結晶、パラメトリック X 線、チャネリング、チャネリング放射、回折チャネリング放射

1. 研究開始当初の背景

高速の電子が結晶に入射すると、様々な興

味深い放射現象が生じる。1 つは、パラメトリック X 線 (Parametric X-ray Radiation:

PXR) である。PXR とは、高速の電子が結晶に入射したときに、ブラッグ条件を満たす方向に X 線が放出される現象である。電子のまわっている擬似的な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。

この他に、チャネリング放射と呼ばれる現象がある。チャネリングとは、荷電粒子が結晶の軸や面に沿ってほぼ平行に入射したときに、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、結晶中を進む現象である。入射粒子が電子の場合、電子はそのポテンシャルにトラップされ、横方向（進行方向と垂直な方向）のエネルギーは量子化される。このエネルギー準位間の遷移に伴って放射が生じるが、これがチャネリング放射と呼ばれる現象である。

チャネリング放射のエネルギーが PXR のエネルギーと一致すると、回折チャネリング放射 (Diffracted Channeling Radiation: DCR) と呼ばれる新たな放射現象が生じることが予言されている。これは電子のまわっている擬似的なチャネリング放射が、結晶によって回折される現象とみなすことができる。つまり、実光子として前方に放出されたチャネリング放射がその後、結晶によって回折されるのではなく、直接ブラッグ条件を満たす方向に放出される点が特徴である。

DCR は 1983 年、旧ソ連の Baryshevsky によって予言された[1]。2001 年には、新田らにより詳しい計算が行われた[2]。しかし、まだ実験的に観測されていない現象である。また、理論的に、DCR の強度・角度分布は、ビームエネルギーに敏感であることが示されている。この特性に着目し、DCR を新たなビームエネルギーの測定法に応用できるのではないかとこの着想に至った[3]。

2. 研究の目的

本研究の目的は、DCR の初観測とビームエネルギー測定法への応用である。前述したように、DCR はまだ観測されていない現象であり、まず検証実験を行う。DCR の観測に成功した場合、ブラッグ角の測定値から、ビームエネルギーの決定を行う。

3. 研究の方法

図 1 に実験を行うビームラインの概念図を示す。ビームラインは、九州シンクロトロン光研究センター (SAGA Light Source: SAGA-LS) のリニアック室に設置されており、その電子ビームを利用して実験を行う[4, 5]。



図 1 ビームラインの概念図 (上面図)。

図 2 に、結晶の角度を制御する 2 軸回転ゴニオメーターの概念図を示す。必要に応じて標的をビーム軸から退避できるように、水平移動可能なステージ上にゴニオメーターを搭載した。大気中でのビームの多重散乱を避けるため、ゴニオメーターは真空チャンバー内に収納した。このチャンバーは、真空的にリニアックとつながるため、リニアックの真空度 ($\sim 1 \times 10^{-6}$ Pa) と同等以上の真空度を維持しなければならない。そのため、ゴニオメーター及びチャンバーは超高真空仕様となるよう設計に注意を払った。

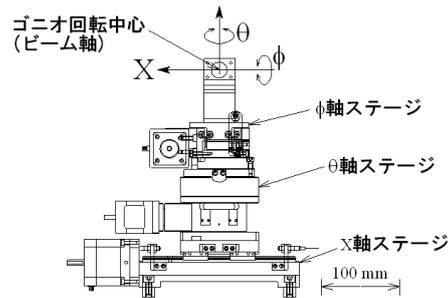


図 2 ゴニオメーターの概念図。

結晶をチャネリングした電子は、特徴的な角度分布を持つことが知られている。よって、結晶透過後の電子ビームのプロファイルを測定することにより、チャネリング条件を探索することができる。図 1 に示したように、電子ビームのプロファイルを測定するため、スクリーンモニタを設置した。スクリーンとして厚さ 0.1 mm のアルミナ蛍光板を採用した。スクリーンからの蛍光は、CCD カメラを用いて観測する。結晶透過後の電子ビームの角度ひろがり、ビームエネルギーや結晶の厚さによって変化する。様々な条件に対応できるように、結晶から近い位置と遠い位置の 2 か所に、スクリーンモニタを配置した。

図 3 に、DCR の概念図を示す。標的として、シリコン結晶を用いる。チャネリング面として (220) 面、回折面として (1 $\bar{1}$ 1) 面を採用する。ブラッグ角方向に X 線検出器を設置し、PXR と DCR の観測を試みる。X 線はベリリウム窓を通して、大気中に取り出す。本研究では、X 線検出器として、イメージングプレートを用いる。イメージングプレートは面積が広いいため、PXR と DCR を同時に捉え、識別するのに適している。

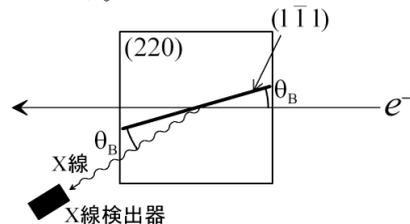


図 3 回折チャネリング放射 (DCR) の概念図。(220) 面は紙面に平行、(1 $\bar{1}$ 1) 面は垂直。

4. 研究成果

(1) ビームパラメータの測定

ビームと結晶の相互作用研究において、ビームの質は重要である。そこで、Q スキャン法（4 極電磁石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、ビームのエミッタンスとツイスパラメータ（ビームの光学的関数）の測定を行った。測定結果を図 4 に示す。なお、このときのビームエネルギーは 255 MeV であった。図 4 の実線は転送行列から求まる計算式へのフィットを示す。フィットの結果から、規格化エミッタンスは $\varepsilon_x = 21$ 、 $\varepsilon_y = 50 \pi\text{-mm}\cdot\text{mrad}$ と求められた (x は水平、 y は鉛直)。また、標的位置におけるツイスパラメータは、 $\beta_x = 1.8 \text{ m}$ 、 $\alpha_x = -0.4$ 、 $\beta_y = 4.6 \text{ m}$ 、 $\alpha_y = 1.3$ と求められた。これらの値からビームの角度ひろがり σ'_x 、 σ'_y は、両者とも 0.2 mrad と見積もられる。この値はチャネリングの臨界角よりも十分小さく、チャネリング実験に適していることが確認された。

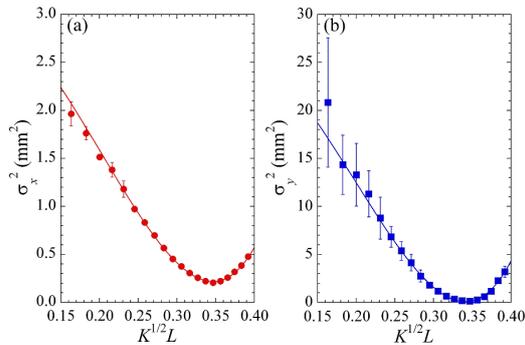


図 4 Q スキャン法の測定結果。(a) 水平方向と (b) 鉛直方向のビームサイズ σ の 2 乗。 K は 4 極電磁石の強さを表す K 値、 L は磁石長。

(2) 結晶の X 線回折実験

結晶を標的とする実験では、事前に結晶の構造を確認することは重要である。SAGA-LS の放射光ビームライン BL09A において、白色放射光を標的となるシリコン結晶 (20 μm 厚) に照射し、X 線回折実験を行った。得られた回折パターンを図 5 に示す。結晶の上流と下流側にイメージングプレートを設置し、前方と後方の回折パターンを同時に取得した。入射放射光を遮らないようにするため、イメージングプレートの中心に穴をあけた。回折パターンから、結晶方位 ($\langle 100 \rangle$ 軸が結晶表面に垂直であること) が確認された。

(3) チャネリングの観測

結晶透過後のビームプロファイルの測定を通し、チャネリング現象の観測を行った。用いた電子ビームのエネルギーは 255 MeV、標的は 20 μm 厚のシリコン結晶である。ビームプロファイルの測定には、図 1 に示した上

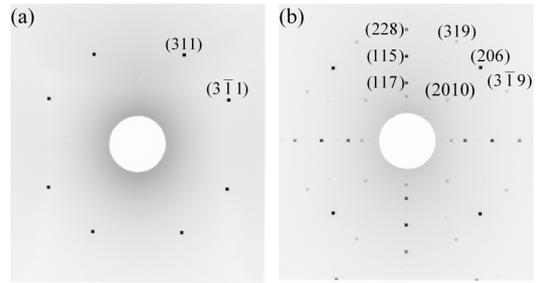


図 5 放射光を用いて測定した X 線の回折パターン。(a) 前方、(b) 後方のパターン。

流側のスクリーンモニタ（結晶からの距離 1.82 m）を用いた。図 6 に $\langle 100 \rangle$ 軸チャネリング条件近傍で、角度 θ をスキャンしたときのビームプロファイルを示す。 $\theta = 0^\circ$ が $\langle 100 \rangle$ 軸チャネリング条件に対応する。なお、チャネリングの臨界角は 0.044° である。原子列のポテンシャルによってビームがガイドされ、 $\langle 100 \rangle$ 軸を傾けた方向にビームも偏向される様子が観測された。また、チャネリング条件から少しずれたところ ($\theta = \pm 0.10^\circ$) で、典型的な三日月形のプロファイルが現れていた。

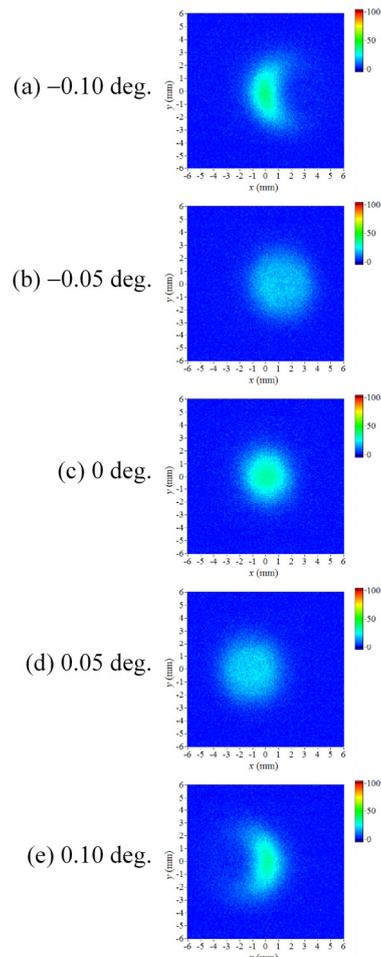


図 6 $\langle 100 \rangle$ 軸チャネリング条件近傍のビームプロファイル。

図7には、結晶透過後のビームのピーク位置とビームサイズ σ をプロットした。これらの値は、水平(x)・鉛直(y)方向に投影した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導出した。軸チャネリング条件付近でビームが偏向される様子や、ビームサイズが増大する様子がみてとれる。ビームサイズの増大は、チャネリングする電子が原子密度の大きい原子列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。

現在、ロシアのトムスク工科大学の理論グループとともに、実験結果を定量的に説明すべく、シミュレーションを行っている。

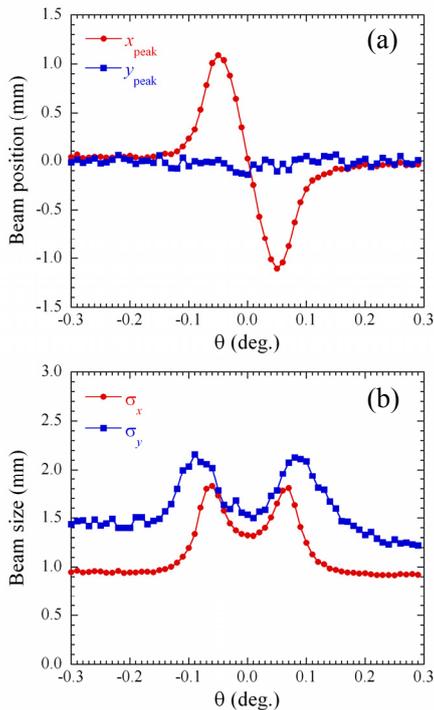


図7 結晶透過後のビームの(a)ピーク位置と(b)ビームサイズ。

(4) パラメトリック X 線 (PXR) の観測

255 MeV の電子ビームを 20 μm 厚のシリコン結晶に入射し、パラメトリック X 線の角度分布の測定を行った。回折面は(111)面、ブラッグ角 θ_B は 16.1°(観測角度 $2\theta_B$ は 32.2°)である。この条件で、PXR のエネルギーは 7.1 keV となる。X 線検出器として、イメージングプレートを用いた。結晶とイメージングプレートの距離は 1 m とした。図8に測定結果を示す。中心に穴のあいた、PXR に特徴的な角度分布が得られた。

図9には、図8に示した角度分布の中心部を通る水平(x)・鉛直(y)方向の断面図を示す。標的との距離は 1 m としたので、横軸の mm は角度に換算すると mrad に対応する。ランダム入射条件 (非チャネリング条件) と (220)

面チャネリング条件時の比較を示したが、大きな違いはみられなかった。チャネリングが PXR の角度分布に与える影響は小さいことが理論的に予測されている。このことが、本研究により、はじめて明確に実証された。

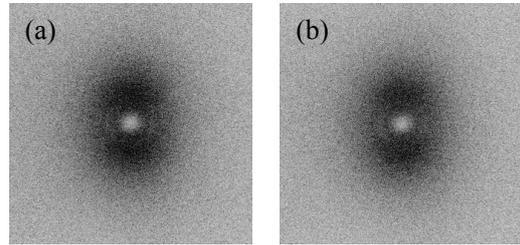


図8 パラメトリック X 線の角度分布。(a) ランダム入射条件 (非チャネリング条件)、(b) (220)面チャネリング条件。

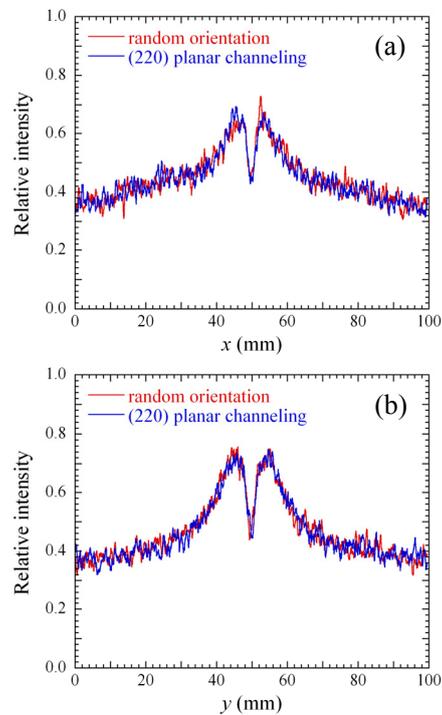


図9 図8に示した PXR の角度分布の中心部を通る断面図。(a) 水平方向、(b) 鉛直方向。赤線はランダム入射条件 (非チャネリング条件)、青線は(220)面チャネリング条件時のデータを示す。

(5) ビームエネルギーの調整

チャネリング放射のエネルギーは、電子ビームのエネルギーに強く依存し、ビームエネルギーとともに増加する。例えば、SAGA-LS のリニアックの標準エネルギーである 255 MeV では、チャネリング放射のエネルギーは MeV の領域にはいる。結晶における MeV 領域の γ 線の回折強度は、当然小さくなるので、DCR の観測には不向きである。ビームエネルギー

を10数MeV程度まで下げれば、チャネリング放射のエネルギーはkeV領域にはいり、回折されやすくなる。

そこで、リニアックのビームエネルギーを下げるマシンスタディを行った。SAGA-LSのリニアックは、主に6本の加速管から構成されている。上流の3本の加速管は通常通りの加速モードで使用し、下流の3本の加速管を減速モードで使用することにより、ビームのエネルギーを下げることを試みた。必要に応じて、4極電磁石・ステアリング電磁石の調整も行った。注意深く調整を行った結果、18MeVまでビームエネルギーを下げることに成功した。

その後、18MeVの電子ビームを用いて、チャネリングの観測にも成功した。

(6)回折チャネリング放射(DCR)の観測

PXRとチャネリング放射はすでに観測され、世界各地で精力的に研究が進められてきている。しかし、DCRはまだ観測されていない現象である。基礎物理の観点から、DCRの検証実験は重要であり、観測が待ち望まれている。

図8・図9に示したように、ビームエネルギーが255MeVの場合、PXRは観測されたが、予想通り、DCRは観測されなかった。前述したように、DCRの観測には、10数MeV程度のビームエネルギーが望ましい。すでに、18MeV電子のチャネリング実験に成功しており、間もなく、チャネリング電子から放出されるDCRの観測を開始する予定である。

参考文献

- [1] V. G. Baryshevsky and I. Ya. Dubovskaya, J. Phys. C **16**, 3663 (1983).
- [2] R. Yabuki, H. Nitta, T. Ikeda, and Y. H. Ohtsuki, Phys. Rev. B **63**, 174112 (2001).
- [3] Y. Takabayashi, AIP Conference Proceedings **1234**, 579 (2010).
- [4] 高林雄一, 金安達夫, 岩崎能尊, 第7回日本加速器学会年会プロシーディングス, 623 (2010).
- [5] “Development of a Beamline for the Study of Interactions between a Relativistic Electron Beam and Crystals at the SAGA Light Source”, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, and Y. Iwasaki, poster presentation at the International Conference Channeling 2010, (2010).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① “電子ビームと結晶の相互作用を利用した加速器応用技術開発用ビームラインの建設”, 高林雄一, 金安達夫, 岩崎能尊, 第7回日本加速器学会年会プロシーディングス, 623~627 (2010), 査読無
- ② “Parametric Channeling Radiation and its Application to the Measurement of Electron Beam Energy”, Y. Takabayashi, AIP Conference Proceedings **1234**, 579~582 (2010), 査読有

〔学会発表〕(計3件)

- ① “Development of a Beamline for the Study of Interactions between a Relativistic Electron Beam and Crystals at the SAGA Light Source”, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, Y. Iwasaki, Channeling2010, 2010年10月7日, イタリア フェラーラ
- ② “電子ビームと結晶の相互作用を利用した加速器応用技術開発用ビームラインの建設”, 高林雄一, 金安達夫, 岩崎能尊, 第7回日本加速器学会年会, 2010年8月4日, 姫路
- ③ “Parametric Channeling Radiation and its Application to the Measurement of Electron Beam Energy”, Y. Takabayashi, SRI2009, 2009年9月29日, オーストラリア メルボルン

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高林 雄一 (TAKABAYASHI YUICHI)
佐賀県地域産業支援センター九州シンクロトロン光研究センター・加速器グループ・研究員
研究者番号: 50450953

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし