

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 19 日現在

機関番号：87202

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05483

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)Development of beam handling techniques using bent crystal channeling

研究代表者

高林 雄一 (TAKABAYASHI, Yuichi)

公益財団法人佐賀県地域産業支援センター(産業振興部研究開発振興課、九州シンクロトロン光研究センター)
・加速器グループ・副主任研究員

研究者番号：50450953

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文): 湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向は、超伝導電磁石を凌駕する偏向能力とビームスプリッターへの応用が注目され、高エネルギーのイオンビームに関して研究が進んできたが、近年、GeV級の電子ビームに関する研究が行われるようになった。本研究では多重散乱と量子論的效果が顕著になる低エネルギー領域(255 MeV)において、湾曲結晶チャネリングの検証を目的とし研究を行った。(111)面が湾曲した厚さ40ミクロンのSi単結晶を用いて実験を行ったところ、入射ビームの10%が1.4 mrad偏向された。実験結果はシミュレーションによって再現され、低エネルギー領域における湾曲結晶チャネリングの検証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、湾曲結晶がビームスプリッターとして応用可能であることを示唆している。従来、高エネルギーのビームを偏向させるのに電磁石が用いられてきたが、電磁石の場合、全てのビームを曲げてしまうので、ビームスプリッターとしては利用できない。よって、本研究の成果は電磁石では実現不可能な新しいビーム操作技術に応用できる点に意義がある。

また、本研究では、デチャネリング長の導出までには至らなかったが、多重散乱の影響を抑制すればデチャネリング長を導出することが可能であり、測定値が古典的な理論値と一致せず、長年、議論の的となっているデチャネリング長について新たな知見を与えられる点にも意義がある。

研究成果の概要(英文): Since bent crystal channeling was first predicted, beam deflection techniques using this method have been studied mainly for high-energy positively-charged ions, because the magnetic field strength that corresponds to the beam deflection angle exceeds that achieved by superconducting magnets, and because this technique can be applied to beam splitters. Such studies have recently been extended to electrons with GeV energies. The purpose of the present study is to investigate this phenomenon in the lower-energy region, where multiple scattering and quantum effects become dominant. A 255 MeV electron beam was supplied from the SAGA-LS linac, and a 40 micron thick Si crystal was employed as a target. The (111) planes were bent with a radius of 29 mm due to a quasi-mosaic effect. The angular distribution of electrons transmitted through the crystal was observed using a screen monitor. Ten percent of the incident electrons were deflected by 1.4 mrad, which was also reproduced by simulation.

研究分野：加速器物理，放射線物理

キーワード：チャネリング 湾曲結晶

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高速の荷電粒子が結晶の軸や面に沿って、臨界角と呼ばれる角度よりも小さい角度で、ほぼ平行に入射すると、その粒子は結晶の原子列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、その現象はチャネリングと呼ばれている。そして、結晶を湾曲させると原子面も湾曲されるが、湾曲した原子面をチャネリングする粒子は、その原子面に沿って結晶中を進むため、原子面の湾曲角度と同じ角度だけ偏向されることになる[1]。図1に湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向の概念図を示す。チャネリングした粒子は湾曲した原子面に沿って進み偏向されるが、チャネリングしなかった粒子は、volume reflection [2]と呼ばれる効果により、チャネリング粒子とは反対方向に臨界角程度曲げられることが知られている。また、チャネリング粒子が、結晶内における多重散乱の影響により、チャネリング状態から外れるデチャネリングと呼ばれる現象も生じる。

この湾曲結晶チャネリングを利用したビーム偏向法は1976年に、Tsyganovによって理論的に予言されて以来[1]、超伝導電磁石を凌駕するビーム偏向能力やビームスプリッターへの応用可能性などが注目され、CERN、Tevatron、RHIC等の大型加速器施設において、主に高エネルギーの陽子等のイオンビームを用いて研究が行われてきた。2016年には、CERNのLHCで、6.5 TeV陽子を用いた実験が行われたが、これはチャネリング実験における最高エネルギーとなる。一方、2014年頃から、GeV級の電子ビームを用いた研究も精力的に行われるようになり、ドイツのMAMIで855 MeV [3]、アメリカのSLACでは3.35–20.35 GeV [4,5]の電子ビームを用いて実験が行われた。

2. 研究の目的

上述したように、近年、電子ビームに関して湾曲結晶チャネリングの研究が行われるようになってきたが、今後の研究の方向性として、多重散乱の効果と量子論的效果が顕著になる、より低エネルギー領域での湾曲結晶チャネリングの検証が興味深いと考えられる。そこで、本研究では、低エネルギー領域における湾曲結晶チャネリングの検証を目的とし、SAGA-LS リニアックからの255 MeV電子ビームを用いて研究を行うこととした。

3. 研究の方法

(1) 湾曲結晶の開発

図2に、湾曲結晶の概念図を示す。結晶として、 $\langle 112 \rangle$ 軸が結晶表面に垂直なものを採用し、 $[111]$ 軸のまわりに結晶を曲率半径 R で湾曲させた。この場合、quasi-mosaic 効果により、 (111) 面も湾曲され、その曲率半径は $R_{(111)} = 3.54R$ と見積もられる[6]。本研究では、この湾曲した (111) 面を用いて電子ビームの偏向を試みた。

本研究では、曲率半径固定タイプと曲率半径可変タイプの2種類の湾曲装置を開発した。曲率半径固定タイプの湾曲装置では、目的の曲率半径で湾曲したホルダーを作製し、その湾曲面に沿って結晶を固定することにより、結晶を湾曲させた。ただし、この方式では、結晶を取り付ける際に結晶が割れやすい、また、曲率半径を任意の値に変えることができないという問題点がある。そこで、次に、曲率半径可変タイプの湾曲装置の開発も行った。なめらかに曲率半径を変えられるよう試作を重ね、湾曲装置の最適化を行った。

(2) X線回折による湾曲結晶の評価

SAGA-LSの放射光ビームライン BL15において、ディフラクトメーターを用いて、ロッキングカーブを取得することにより、湾曲結晶の湾曲角度の評価を行った。

(3) 湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向実験

図3に実験装置の概念図を示す。SAGA-LS リニアックからの255 MeV電子ビームを用いて、湾曲結晶チャネリングによるビーム偏向実験を行った。結晶の上流に内径200 μm のタングステン製コリメーターを設置した。電子ビームの水平方向の角度拡がり $\sigma_x = 0.10$ mrad、垂直方向

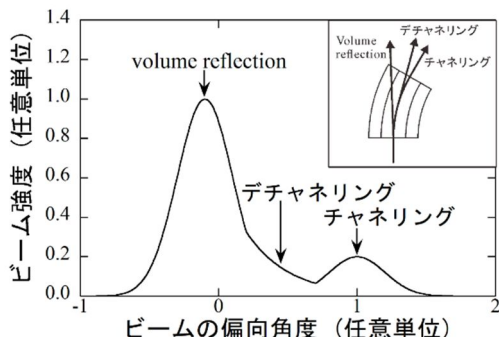


図1: ビームの偏向角度分布の概念図。挿入図は、湾曲結晶チャネリングの概念図。

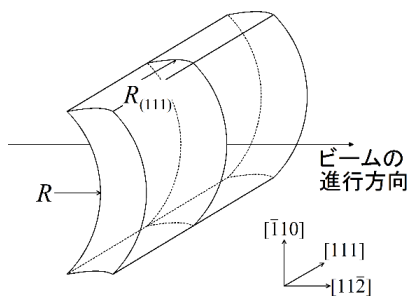


図2: 湾曲結晶の概念図。

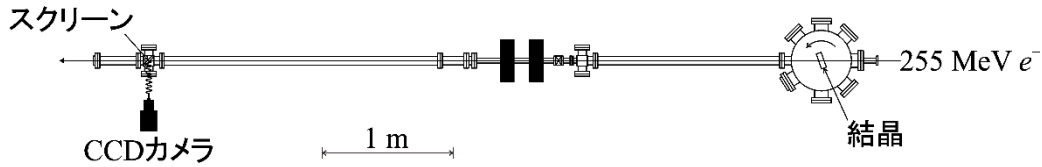


図 3：実験装置の概念図。

の角度拡がりは $\sigma_y = 0.05$ mradであった。これらの値は、(111)面チャネリングの臨界角 0.45 mrad より小さいので、チャネリングは十分観測され则认为られる。標的として、湾曲 Si 単結晶を用い、真空チェンバー内に設置された 2 軸回転ゴニオメーターにインストールした。結晶から 5.12 m 下流に設置されているスクリーンモニタを用いて、結晶透過後のビームの角度分布を測定した。スクリーンモニタは、厚さ 100 μm のアルミナ蛍光板と CCD カメラから構成される。CCD カメラで得られたビームプロファイルの 2 次元データは、フレームグラバーボードを經由してパソコンで取得し、オンラインで解析を行えるようになっている。また、CCD カメラによるデータの取得タイミングは、ビームの入射タイミングと同期させた。

(4) シミュレーション

チャネリングに関するシミュレーションは、海外共同研究者であるロシアのトムスク工科大学の理論グループが行った。彼らはすでに、Mathematica を利用した計算コード BCM を開発していたが[7]、本研究において、湾曲結晶のポテンシャルも扱えるよう計算コードの改良を行った。

4. 研究成果

(1) 湾曲結晶の開発

(111)面の湾曲角度 θ_b は、結晶の厚さを L 、(111)面の曲率半径を $R_{(111)}$ とおくと、幾何学的計算から $\theta_b = L/R_{(111)}$ と求められる。つまり、ビームの偏向角度を大きくするには、結晶を厚くするか、原子面の曲率半径を小さくする必要がある。ただし、結晶が厚いと、結晶内における多重散乱の影響が大きくなるため、本研究では、薄い結晶を用い、原子面の曲率半径を小さくする方針で検討を進めた。図 4 に、曲率半径固定タイプの湾曲結晶を示す。Si 結晶の厚さは 40 μm 、曲率半径 $R = 10$ mm である。次に、厚さ 15 μm の Si 結晶を用いて開発した湾曲結晶を図 5 に示す。曲率半径を 5 mm (図 5(b)) から小さくしていき、最終的に、曲率半径を 3 mm まで小さくすることに成功した(図 5(d))。曲率半径 3 mm は、この厚さにおいて、世界最小級である。

図 6 に、曲率半径可変タイプの湾曲結晶を示す。直径 2 インチ、厚さ 15 μm の Si 結晶を取り付けた(図 6(a))。少しずつ結晶を湾曲させることができるようになっており、最小の曲率半径は 4 mm である。曲率半径固定タイプ・可変タイプとも、研究代表者が独自に開発したものであり、今後、実験結果に応じて、すぐに改良を行えるというメリットがある。

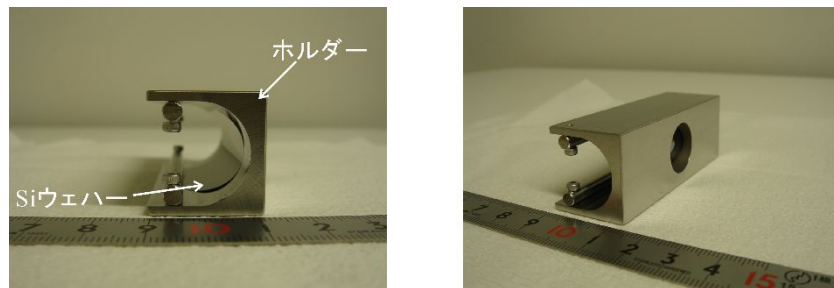


図 4：曲率半径固定タイプの湾曲結晶。厚さ 40 μm 、曲率半径 $R = 10$ mm。

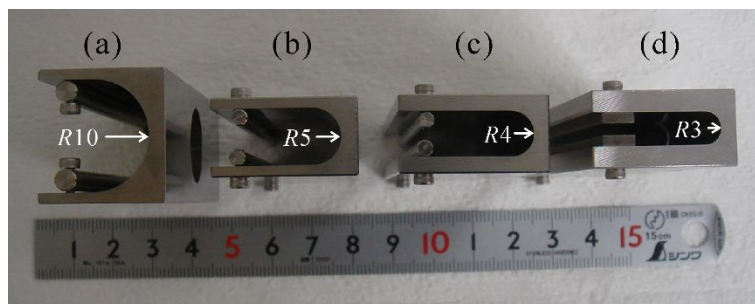


図 5：曲率半径固定タイプの湾曲結晶。(a)厚さ 40 μm 、 $R = 10$ mm。(b)厚さ 15 μm 、 $R = 5$ mm、(c) 厚さ 15 μm 、 $R = 4$ mm、(d) 厚さ 15 μm 、 $R = 3$ mm。図 5(a)の結晶は、図 4 のものと同じ。

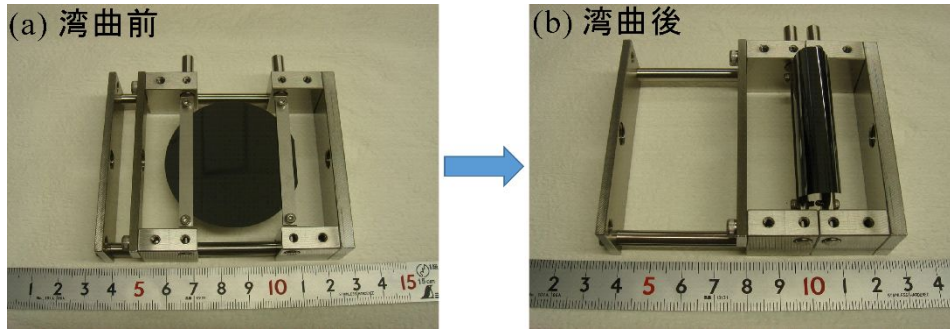


図 6：曲率半径可変タイプの湾曲結晶．(a) 直径 2 インチ，厚さ 15 μm の Si ウェハを取り付けたところ．(b) 結晶を曲率半径 $R = 4 \text{ mm}$ まで曲げたところ．

図 7(a)に，SAGA-LS 硬 X 線ビームライン BL15 のディフラクトメーター，図 7(b)に，それを用いて取得したロッキングカーブを示す．入射 X 線のエネルギーは 10 keV，試料は図 4 で示した湾曲 Si 結晶，回折面は(111)面である．ロッキングカーブのピーク幅から，(111)面の湾曲角度を見積もることができるが，ピーク幅は 0.0758° (1.32 mrad) であった．

(2) 湾曲結晶チャネリングによる 255 MeV 電子ビーム偏向の検証実験

図 8 に，図 4 で示した湾曲 Si 結晶を用いて測定した，ビームに対する結晶の角度 θ とビームの偏向角度 θ_{def} 分布の関係を示す．このように，3 角形状のプロファイルが得られることが知られている[3,4,5]．1 と 6 で示した領域が非チャネリング，2 がチャネリング，3 がデチャネリング，4 が volume reflection，5 が volume capture を示す．volume capture とは，チャネリングしていなかった粒子が結晶内でチャネリング状態に入る現象である[2]．

図 8 において $\theta = 1.4 \text{ mrad}$ (チャネリング条件) のときの偏向角度分布を図 9(a) に示す．主に，チャネリングによって偏向された成分とチャネリングしなかった成分の 2 成分が観測された．255 MeV という低エネルギー領域では予想された通り，入射電子の結晶内における多重散乱の影響が大きく，チャネリングした成分は非チャネリング成分と大きく重なっていた．非チャネリング条件下の多重散乱角は 0.78 mrad と見積もられるが，この値は測定結果とほぼ一致していた．また，偏向角度分布は近似的に，下記の式で表されることが知られている[5]．

$$I(\theta_{\text{def}}) = I_{\text{VR}}(\theta_{\text{def}}) + I_{\text{CH}}(\theta_{\text{def}}) + I_{\text{DC}}(\theta_{\text{def}}), \quad (1)$$

$$I_{\text{VR}}(\theta_{\text{def}}) = \frac{P_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(\theta_{\text{def}} - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (2)$$

$$I_{\text{CH}}(\theta_{\text{def}}) = \frac{P_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(\theta_{\text{def}} - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right), \quad (3)$$

$$I_{\text{DC}}(\theta_{\text{def}}) = \frac{1-P_1}{2\theta_d} \exp\left(\frac{\sigma_d^2}{2\theta_d^2} + \frac{\mu_1}{\theta_d} - \frac{\theta_{\text{def}}}{\theta_d}\right) \left(\text{erf}\left(\frac{\mu_2 - \Delta\theta_{\text{def}}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) - \text{erf}\left(\frac{\mu_1 - \Delta\theta_{\text{def}}}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) \right). \quad (4)$$

ここで， $I_{\text{VR}}(\theta_{\text{def}})$ は非チャネリング成分 (volume reflection)， $I_{\text{CH}}(\theta_{\text{def}})$ はチャネリング成分， $I_{\text{DC}}(\theta_{\text{def}})$ はデチャネリング成分を表す．また， $P_2 = (1 - P_1)e^{-L/L_d}$ ， $\Delta\theta_{\text{def}} = \theta_{\text{def}} - \sigma_d^2/\theta_d$ ， $\theta_d = \theta_b L_d/L$ ， $\text{erf}(\theta_{\text{def}})$ はエラー関数， L は結晶の厚さ， L_d はデチャネリング長， θ_b は結晶面の湾曲角度，そして， P_1 ， σ_1 ， μ_1 ， σ_2 ， μ_2 ， L_d がフィッティングパラメータである．図 9(a) の赤線は(1)式によるフィットを示し，青線は $I_{\text{VR}}(\theta_{\text{def}})$ ，緑線は $I_{\text{CH}}(\theta_{\text{def}})$ を示す．チャネリングして偏向された成分は 10%，偏向角度は 1.38 mrad であった．この値は，X 線回折で求めた結晶の湾曲角度 1.32 mrad とほぼ一致する．なお，多重散乱の影響が大きく，チャネリング成分と非チャネリング成分が大きく重なっていたため，デチャネリング成分を導出することはできなかった．

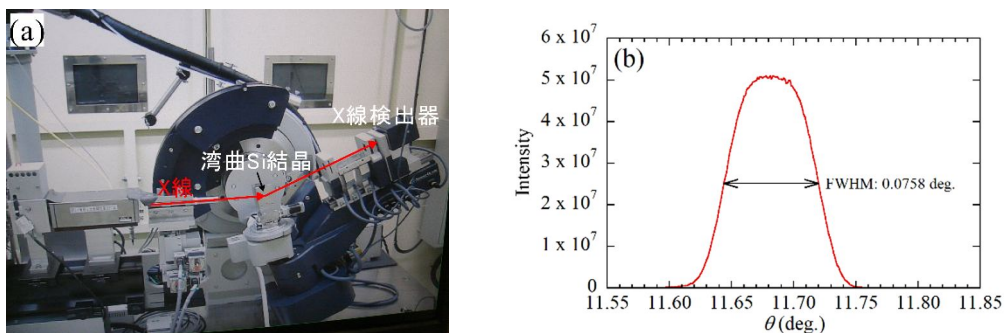


図 7：(a) SAGA-LS 硬 X 線ビームライン BL15 のディフラクトメーター．(b) 厚さ 40 μm ， $R = 10 \text{ mm}$ の湾曲 Si 結晶に関するロッキングカーブ．

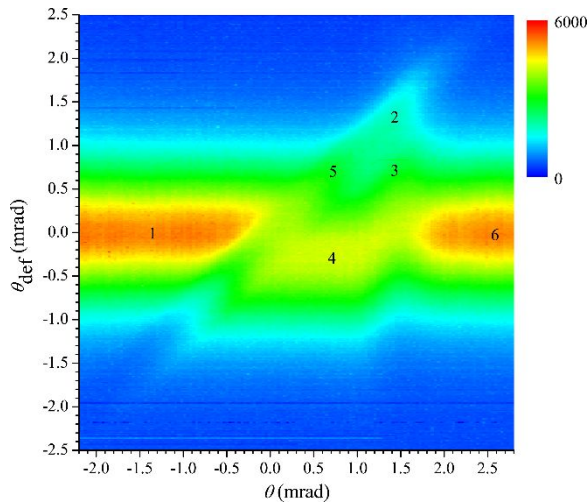


図 8: ビームに対する結晶の角度 θ とビームの偏向角度 θ_{def} 分布の関係. 1と6: 非チャネリング, 2: チャネリング, 3: デチャネリング, 4: volume reflection, 5: volume capture.

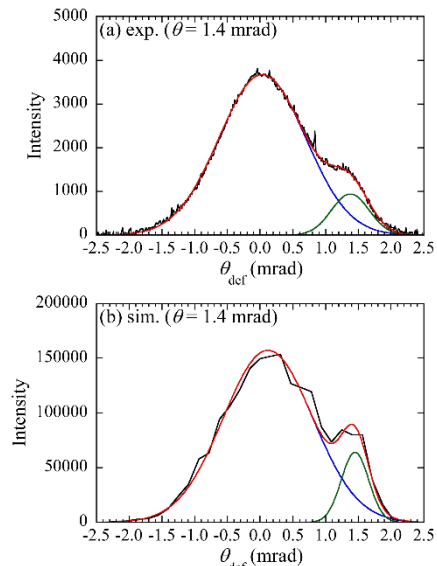


図 9: ビームの偏向角度分布. (a) 実験結果, (b) シミュレーション結果. 赤線: (1)式によるフィット. 青線: 非チャネリング成分. 緑線: チャネリング成分.

図 9(b)に, 計算コード BCM を用いたシミュレーションの結果を示す. 計算コードにはデチャネリング過程も取り入れられている. シミュレーションは測定結果をよく再現していた. シミュレーション結果に対しても実験結果と同様, (1)式によるフィットを行ったところ, チャネリングにより偏向された成分は 11%, 偏向角度は 1.45 mrad と求められたが, これらの値は測定結果とほぼ一致していた.

ビームの偏向角度分布において, チャネリング成分を非チャネリング成分から分離させるためには, 多重散乱による角度拡がりを抑制しなければならず, そのためには, より薄い結晶を用いる必要がある. 今後, 図 5・図 6 で示した厚さ 15 μm の Si 結晶を用いて研究を継続する予定である.

参考文献

- [1] E. N. Tsyanov, Preprint TM-682, TM-684, Fermilab, Batavia, 1976.
- [2] A. M. Taratin and S. A. Vorobiev, Phys. Lett. A **119**, 425 (1987).
- [3] A. Mazzolari *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 135503 (2014).
- [4] U. Wienands *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 074801 (2015).
- [5] T. N. Wistisen *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 071001 (2016).
- [6] R. Camattari, V. Guidi, V. Bellucci, and A. Mazzolari, J. Appl. Cryst. **48**, 977 (2015).
- [7] S. V. Abdrashitov, O. V. Bogdanov, K. B. Korotchenko, Yu. L. Pivovarov, E. I. Rozhkova, T. A. Tukhfatullin, and Yu. L. Eikhorn, Nucl. Instrum. Methods B **402**, 106 (2017).
- [8] Y. Takabayashi, Yu. L. Pivovarov, and T. A. Tukhfatullin, Phys. Lett. A **382**, 153 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Takabayashi, Yu. L. Pivovarov, T. A. Tikhfatullin	4. 巻 785
2. 論文標題 First observation of scattering of sub-GeV electrons in ultrathin Si crystal at planar alignment and its relevance to crystal-assisted 1D rainbow scattering	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 347-353
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2018.08.063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Takabayashi, Yu. L. Pivovarov, T. A. Tikhfatullin	4. 巻 382
2. 論文標題 Bent crystal channeling of 255 MeV electrons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 153-156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physleta.2017.11.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	隅谷 和嗣 (SUMITANI Kazushi) (10416381)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・回折・散乱推進室・研究員 (84502)	