

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：32410

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13411

研究課題名(和文)中性子ボルテックスビーム生成法の開発

研究課題名(英文) Development of a production method for neutron beams carrying orbital angular momentum

研究代表者

内田 正哉 (UCHIDA, MASAYA)

埼玉工業大学・付置研究所・教授

研究者番号：80462662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：研究開始時の最終目標は、世界でも報告のない、中性子波動関数(位相)の制御により「軌道角運動量をもつ中性子ビーム」を生成することであった。本研究では、その実現に必要な実験スキームを明らかにし、特殊な形状を有する回折格子や多角形スリット等の中性子光学素子の提案を行った。実際の中性子光学素子の作製では、プロトンマイクロビームを用いた超微細加工技術の開発を行い、その試作に成功した。本研究は軌道角運動量の自由度をもつ中性子ビーム生成実現への第一歩となるものである。

研究成果の概要(英文)：The final target of this study at the start was, hitherto unreported, the generation of neutron beams carrying orbital angular momentum (OAM) by controlling the phase of wavefunctions. Towards this goal, in this study we proposed some neutron optical elements such as forked diffraction gratings and polygonal slits. A prototype micrometer-sized forked diffraction grating has been designed with wave simulations and implemented using proton microbeams. The present results represent a first step toward neutron beams with OAM.

研究分野：ビーム物理、超微細加工

キーワード：中性子ビーム 量子ビーム 軌道角運動量 位相特異点 プロトンビーム 微細加工

1. 研究開始当初の背景

本研究代表者らにより、2010年、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」が世界で初めて生成された (Nature, 2010)。この研究以前では、利用されている電子ビームは軌道角運動量をもたない「平面波」のみであり、それ以外の伝播モードについて、実現はもちろん、考えられることもほぼ皆無であった。実は、波動関数 (位相) の制御による軌道角運動量をもつビームは、電磁波や音波などですでに実現されていた (図1)。光の分野では、1992年に軌道角運動量をもつ光ビームの存在が確認され、現在では、物質をトラップし、回転させる光ピンセットなどを始め、天文学、情報通信等の幅広い分野で種々の応用がなされている。

中性子も波としての性質をもつが、波動関数 (位相) の制御による軌道角運動量をもつ中性子ビームについては、研究開始時点で報告がなく、この実在を世界に先駆けて実験的に検証することは極めて重要な研究課題であると思われる。

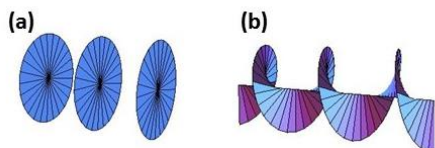


図1 (a)平面波波面, (b)軌道角運動量を与えるビーム波面。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」の研究を踏まえ、世界で初めてとなる波動関数 (位相) の制御による「軌道角運動量をもつ中性子ビーム」を生成することである。

研究開始時点で、軌道角運動量をもつ中性子ビーム生成に関する報告や技術はなく、本研究は多くの新たな開発を必要とする非常にチャレンジングな研究である。物質の磁気構造解析に使われる従来の中性子の磁気モーメントは、スピン角運動量に起因するものである。本研究で中性子に新たに軌道角運動量を付与することができれば、これに伴う磁気モーメントも期待される。軌道角運動量はスピン角運動量 (中性子の場合: $1/2\hbar$) の場合と異なり、任意の大きな値を付与できる。例えば、光の場合では1光子あたり $10000\hbar$ の、電子の場合では $100\hbar$ の軌道角運動量をもつビームがすでに実現されている。中性子ビームは、a) 物質との磁気相互作用 (磁気感受率) が大きく、本研究で軌道角運動量を持つ中性子ビームの生成が実現されると、特に、磁性材料における軌道角運動量の役割の解明が進む。 b) 使用する中性子ビームの波長は電子線の波長に比べ大きく (数Å)、巨大な軌

道角運動量をもつビームも期待される。このように、軌道角運動量をもつ中性子ビームが実現されれば、材料科学分野等で、多大な貢献をすることが期待される。

さらに、本研究は、中性子ビームの新しい空間伝播モード、すなわち波動関数 (位相) を制御しようとする初めての試みと捉えることもできる。この制御により、材料科学への応用のみならず、素粒子実験や物理基礎研究のための新しい量子プローブを創出することで、幅広い分野での新しい展開も期待される。

本研究では、まず、「軌道角運動量をもつ中性子ビーム」の生成および検出に必要な条件を明らかにし、実験スキームの構築、光学素子の提案・作製を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、「軌道角運動量をもつ中性子ビーム」を生成するのに不可欠な中性子ビーム用光学素子の提案および設計し、シミュレーションを含む詳細な検討を行う。実際の光学素子作製では陽子マイクロビーム、集束イオンビーム (FIB) 等の超微細加工技術を用いて光学素子の作製を試みた。

4. 研究成果

(1) 光学素子の提案・設計

2010年に世界で初めて「軌道角運動量をもつ電子ビーム」が生成されてから、「軌道角運動量をもつ電子ビーム」を生成するための種々の方法が提案・実現されてきた。位相板、ホログラムの原理に基づく回折格子、スパイラルゾーンプレート、電磁場レンズ、光、モノポール型磁場等を用いた方法がある。電子および光の場合も参考に、シミュレーションを含む詳細な検討を行った。作製難易度、日本の中性子実験施設における中性子ビームの強度やコヒーレンス性等を含めた検討の結果、現状での最有力候補は光や電子の場合でも使われているホログラムの原理に基づくフォーク型回折格子 (図2) であると考えた。このフォーク型回折格子は結晶格子における刃状転位のように、縞が枝別れしているのが特徴である。この枝別れの数により回折ビームのもつ軌道角運動量が決まる。このフォーク型回折格子の作製については後述する。また、フォーク型回折格子はその特殊形状および小ささゆえ、作製が困難であることが予想されたので、作製のよりし易いパターン (2種類) の検討も行った。1つは多角形スリット (図3) である。円環スリットから出射したビームが軌道角運動量をもたないベッセルビームを形成するのに対し、多角形スリットの場合では軌道角運動量 (ポルテックス) を含むビームが得られることを見出し提案した (図4)。このような多角形スリットは、われわれの知る限り、電子はもちろん

光の場合でも報告がなかった。実際に多角形スリットを作製し、電子ビームが軌道角運動量をもつことを実証し国際誌原著論文として纏めた(Microscopy, 2017)。また、(点状)ドットから構成されるパターンから軌道角運動量をもつビームが生成される条件を得るため、ドットがひまわりの種子配列のようならせん状をしているパターンの構造を数学的に調べた。この成果は国際誌原著論文として纏められた(Forma, 2017)。

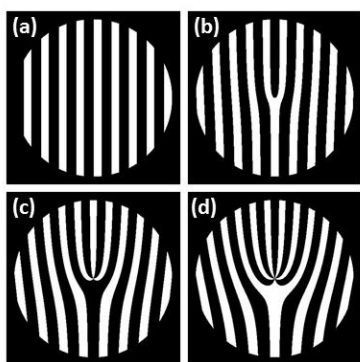


図2 計算機合成プログラム法によって得られた1次の回折ビームに軌道角運動量(m)を与えるフォーク型回折格子のパターン。(a) $m=0$, (b) $m=1$, (c) $m=3$, (d) $m=5$ 。

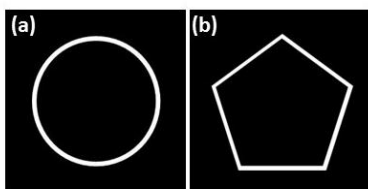


図3 (a) 軌道角運動量をもたないベッセルビームを生成する円環スリットパターン。(b) 軌道角運動量をもつベッセルビームを生成する五角形スリットパターン。

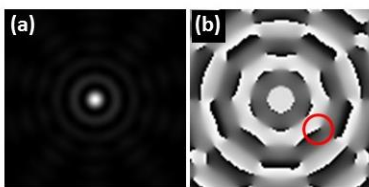


図4 正五角形スリットにより形成されるビームのシミュレーション結果。(a) 強度分布。(b) 位相分布。位相分布図において丸で囲まれる位置等に位相特異点(ボルテックス)が観察される。

(2) プロトンマイクロビームを用いたフォーク型回折格子の試作

中性子は高い物質透過性を有するため、透過型の回折格子として利用するためには、中性子吸収体を含む材料を十分な厚さで加工

する必要がある。そのため、大気照射可能であり、アスペクト比の高い微細加工が可能であるプロトンマイクロビームを利用した。具体的な手順として、中性子吸収体である酸化ガドリニウム(NaGdO₃)のナノ粒子を混入した紫外線硬化樹脂に対し、プロトンマイクロビームのパターン照射を行った(プロトンビームのエネルギーは3 MeV、電流1~2 pA、照射時間は10分以下)。照射後、エタノールで現像処理後、塩酸で未照射部位の酸化ガドリニウムをエッチングし、超臨界乾燥装置で乾燥処理を行った。また作製パターンは、中性子の回折強度を増強するため、図5(a)に示すようなフォーク型回折格子を多数並べたパターンとした。作製した回折格子に対し、光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡(SEM)による評価、およびガドリニウム(Gd)含有量の化学分析も実施した。図5(b, c)に、作製した回折格子の光学顕微鏡像を示す。これらの結果から、酸化ガドリニウムナノ粒子を含有する中性子ビーム用フォーク型回折格子(格子間隔:数 μm , アスペクト比:8~10, 図5(d))作製方法、技術を確立することができたものと考えられる。

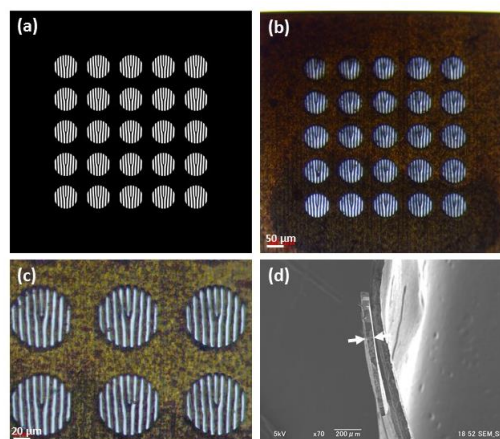


図5 (a) フォーク型回折格子を格子状に多数並べた場合の設計パターン(5×5)。(b) (a)を設計パターンとしてプロトンマイクロビームを照射し作製した多配列格子の光学顕微鏡像(超臨界乾燥後)。(c) (b)の一部拡大像。(d) 作製した回折格子の断面SEM像。約50 μm の試料厚みがあることが確認される。

(3) まとめと今後の課題

本研究により、「軌道角運動量をもつ中性子ビームの生成」に必要な中性子ビーム用光学素子を作製することができた。今後、中性子ビーム実験を行う予定である。本研究課題を開始して間もなく、Clarkらにより、軌道角運動量をもつ中性子ビームの生成が報告された(Nature, 2015年)。彼らは生成するのに位相板を用いたが、この結果については

中性子干渉コヒーレンス長等の点から未だ議論のあるところであり（例えば、Cappelletti ら、PRL, 2018）、回折格子等他の方法による軌道角運動量をもつ中性子ビームの生成が期待されている。

日本原子力研究開発機構・物質科学研究センター・一研究主幹

研究者番号：70370400

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし

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. Nambu Hiroki, Noguchi Yuuki, Saitoh Koh, Uchida Masaya, “Nearly nondiffracting electron lattice beams generated by polygonal slits”, *Microscopy*, **66**, 1 (2017).
2. Negishi Riichirou, Sekiguchi Kumiko, Totsuka Yuichi, Uchida Masaya, “Determining parastichy numbers using discrete Fourier transforms”, *Forma*, **32**, 19 (2017).

[学会発表] (計 3 件)

1. 酒井卓郎, 飯倉寛, 松林政仁, 山田尚, 佐藤隆博, 石井保行, 内田正哉, “プロトンマイクロビームによる中性子光学素子の作製”, 放射線利用フォーラム 2017 in 高崎 & 第 1 回 QST 高崎研シンポジウム (2017).
2. 酒井卓郎, 飯倉寛, 山田尚, 佐藤隆博, 石井保行, 内田正哉, “大気照射陽子マイクロビームによる中性子用回折格子の作製”, 第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会 (2017).
3. 酒井卓郎, 飯倉寛, 山田尚, 佐藤隆博, 石井保行, 内田正哉, “プロトンマイクロビームによる中性子光学素子の作製 II”, QST 高崎サイエンスフェスタ 2017 (2017).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 正哉 (UCHIDA, Masaya)

埼玉工業大学・附置研究所・教授

研究者番号：80462662

(2) 研究分担者

酒井 卓郎 (SAKAI, Takuro)