

令和 4 年 5 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20899

研究課題名(和文)電子顕微鏡によるベリー位相の実空間観察

研究課題名(英文)Real Space Observation of Berry Phase by Electron Microscopy

研究代表者

長尾 全寛(Nagao, Masahiro)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

研究者番号：80726662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：ベリー位相は種々の新規物性の起因として議論されている。しかし、これまで固体中のベリー位相の直接観測した研究は存在しない。そこで、本研究はローレンツ電子顕微鏡法を用いて固体中のベリー位相の分布を実空間で可視化に挑戦し、固体物理学に新展開をもたらすことを目的としている。ベリー位相に由来する巨大異常ホール効果が観測されているMn₃Snを対象に実験を実施した。その結果、ベリー位相に由来するコントラストは観測されなかった。この原因は、異常ホール効果の起因となるベリー位相が分布する運動量空間のエネルギー領域と80kV～200kVで加速された電子線のエネルギーが大幅に異なることが原因と考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体物理学においてベリー位相は種々のホール効果の起因として議論されている。しかし、これまで固体中のベリー位相の直接観測した研究は存在しない。ベリー位相分布を実空間で可視化することにより、固体中の量子現象において普遍的位相であるベリー位相のマクロな物性評価では分からない隠れた特性を明示することは、固体物理学のみならず工学的応用の発展においても重要である。残念ながら、本研究では、直接観察の成功には至らなかったが、本研究の実施により、使用する電子線のエネルギーをベリー位相が存在する運動量空間のエネルギーに調整することで、観測可能であるという結論が得られた。これは今後の装置開発の指針となる結果である。

研究成果の概要(英文)：In condensed-matter physics, the Berry phase is the origin of various novel physical properties such as the Hall effects. However, there has been no direct observation of the Berry phase in solids. In this study, we tried to visualize the Berry phase distribution in solids in real space.

We have used Lorentz transmission electron microscopy (LTEM) to visualize the Berry phase distribution on antiferromagnetic Mn₃Sn, in which the Berry phase generates the giant anomalous Hall effect. As a result, no contrast originating from the Berry phase was observed. The reason may be that the energy of an electron beam with an accelerating voltage of 80-200 kV in LTEM is significantly different from the energy of the momentum space where the Berry phase exists.

研究分野：固体物理学

キーワード：ベリー位相 電子顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

ある量子系に対して、外部パラメータを閉じた経路に沿って断熱的に変化させたとき、波動関数には、その経路に依存した付加的な位相因子が現れる。この位相がベリー位相である。ベリー位相と同様の機構を持つ位相は他にも知られており、それらを総称して幾何学的位相と呼ぶ。今日、ベリー位相は様々な量子現象で現れる普遍的な位相であることが広く認識されている。実際、固体物理においてベリー位相は、多彩な物質群で現れる種々のホール効果の起因として議論されている。これまで、固体中のベリー位相の直接観測は、アハラノフ・キャッシャー効果やシュブニコフ・ハース効果を利用した電気抵抗測定 (Nat. Commun. 4, 2526 (2013). Science 342, 1490 (2013)) の結果が報告されている。しかし、ベリー位相の分布 (ドメイン構造) を“実空間で観測”した研究は存在しない。固体物理分野において、実空間観察は、何処に・何が・どのように存在しているのかを直接明らかに出来るため、マクロな物性評価では分からなかった物性の発見や、その制御法開発に威力を発揮してきた。そのため、普遍的な位相であるベリー位相の実空間観察の実現は、固体物理学分野に大きな変革をもたらす潜在性を持っている。

2. 研究の目的

本研究は、ローレンツ電子顕微鏡法を用いて、固体中のベリー位相の分布 (ドメイン構造) を“実空間で可視化”することにより、固体中の量子現象において普遍的位相であるベリー位相の、マクロな物性評価では分からない隠れた特性を明示し、固体物理学に新展開をもたらすことを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、ローレンツ電子顕微鏡法の一つであるフレネル法を用いて、ワイル反強磁性体 Mn₃Sn のベリー位相の実空間観察を行う。研究方法のポイントは以下の3つである。

- (1) フレネル法は、アハラノフ=ポーム効果を基本の結像原理とする位相差顕微鏡法
- (2) アハラノフ=ポーム効果による波動関数の位相獲得とベリー位相は本質的に等価
- (3) 正味の磁化が無い反強磁性体 Mn₃Sn において、ベリー位相に起因した大きな異常ホール効果が出現

フレネル法は、磁区を形成している強磁性体中に電子線が入射した結果、電子線がローレンツ力を受けて偏光・伝搬し、結像面 (正焦点面) から焦点を外した面 (過焦点面・不足焦点面) で偏光電子を干渉させて、電子密度の疎密による明暗コントラスト (図 1 右上) を得る方法である。この明暗コントラストが磁壁と一致するため、磁気ドメイン構造を実空間で観察することになる。しかし、鉄のような強磁性体でもローレンツ力による偏光角は (膜厚 70nm の場合) 約 0.01 mrad と極めて小さく、得られる明瞭な明暗コントラストを説明できない。フレネル法は、定量的には、アハラノフ=ポーム効果を基とした結像原理で説明される。アハラノフ=ポーム効果は、量子粒子が電磁場の無い領域を通過するとき、ゲージ変換された電磁ポテンシャルに対するシュレーディンガー方程式のゲージ不変の要請から、波動関数の位相が変化するというものであり、幾何学的位相の効果の一つである。図 1 に示すように、ローレンツ電子顕微鏡内では、電子線源から放出された同じ位相を持つ電子が、異なる経路で磁性試料によるベクトルポテンシャル中を通過することで、その経路に依存して波動関数の位相が変化する。フレネル法は、これらの電子を結像面で干渉させることにより、位相差を反映した強度分布を得る方法である。(図 1 右上) つまり、フレネル法とはベクトルポテンシャルによって変化した電子の位相差を、コントラストに変換する位相差電子顕微鏡法である。また、強度輸送方程式法を用いると、得られたフレネル像からベクトルポテンシャルによる位相シフトのマップを得ることが出来る。

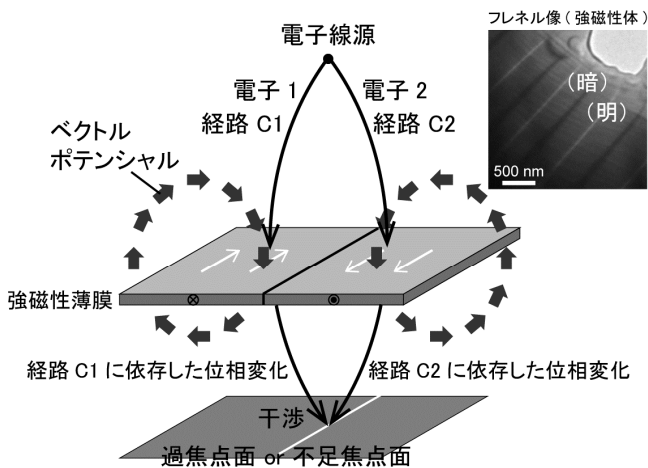


図 1. アハラノフ=ポーム効果を基としたフレネル法の結像原理図

図 1 に示すように、ローレンツ電子顕微鏡内では、電子線源から放出された同じ位相を持つ電子が、異なる経路で磁性試料によるベクトルポテンシャル中を通過することで、その経路に依存して波動関数の位相が変化する。フレネル法は、これらの電子を結像面で干渉させることにより、位相差を反映した強度分布を得る方法である。(図 1 右上) つまり、フレネル法とはベクトルポテンシャルによって変化した電子の位相差を、コントラストに変換する位相差電子顕微鏡法である。また、強度輸送方程式法を用いると、得られたフレネル像からベクトルポテンシャルによる位相シフトのマップを得ることが出来る。

さらに、アハラノフ = ボーム効果による波動関数の付加的な位相獲得とベリー位相は本質的に等価であるため、原理的には、ベリー位相の効果が発現し、正味のベクトルポテンシャルが存在しない物質において、フレネル法からベリー位相シフトのマップを得ることが出来る。Mn₃Snは、正味の磁化がゼロの反強磁性を示し、ベリー位相による巨大な(強磁性体に匹敵する)異常ホール効果が室温で観測されるワイル磁性体として注目を集めている物質である(Nature 527, 212 (2015))。そこで、本研究ではMn₃Snを対象に、フレネル法を用いてベリー位相シフトのドメイン構造の実空間観察を行った。

4. 研究成果

ローレンツ電子顕微鏡法は透過型電子顕微鏡法の一つであり、観察のためにバルク試料を薄片化する必要がある。最初に、試料薄片化はイオンミリング法で行ったが、図2に示すようにイオンビームによるダメージが深刻であった。図2左のようにイオンビームによる筋状の傷や図2右

のように酸化を示すドット状のコントラストが観測された。特にダメージによる筋状コントラスト(図2左)は、ローレンツ電子顕微鏡における線状コントラストと類似するため、重畳した場合に、ローレンツ・コントラストを見分けられなくなる恐れがある。そのため、冷却および低加速イオンビーム照射によって薄片化を行い、試料ダメージを低減することに成功した。作製した薄片試料は、ローレンツ電子顕微鏡までに、高真空装置の中で保管した。その次に、ローレンツ電子顕微鏡観察を実施した。装置は加速電圧

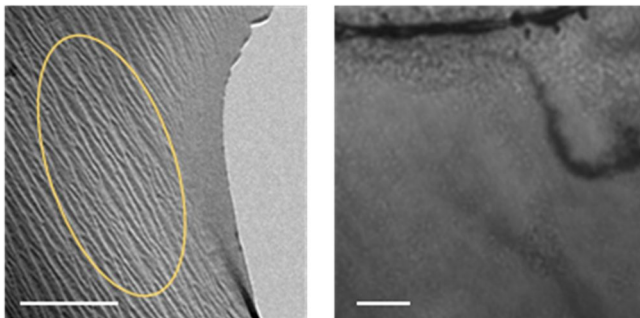


図2. ローレンツ電子顕微鏡像。スケールバーはそれぞれ、500 nm(左)、1 μm(右)

200kVの電子顕微鏡を用いた。実験の結果、ローレンツ電子顕微鏡像には、ベリー位相に由来するコントラストは観測されなかった(図3。黒い線はバンドコンターと呼ばれるブラッグ条件を満たした結晶構造由来のコントラスト)。この原因は、200kVで加速された電子線がベリー位相を獲得する確率が低いことが考えられた。そのため、電子線がベリー位相を獲得する確率を上げる方法が必要であり、非弾性散乱によるコントラスト形成も考慮して、加速電圧80 kVと1000 kVの低圧及び超高压電子顕微鏡を用いて観察に取り組んだが、残念ながら結果は200 kVの場合と同様にベリー位相由来のコントラストは観測されなかった。また、Mn₃Snは低温で異常ホール効果が大きくなるため、同時に低温での観察にも取り組んだが、結果は同様であった。

ローレンツ電子顕微鏡でベリー位相に由来するコントラストが観測できなかった原因は、異常ホール効果の起因となるベリー位相が分布する運動量空間のエネルギー領域と80kV~200kVで加速された電子線のエネルギーが大幅に異なることが原因と考えられた。本研究の結果を受けて、さらなる低加速電子を用いてベリー位相を検出する必要があると言える。

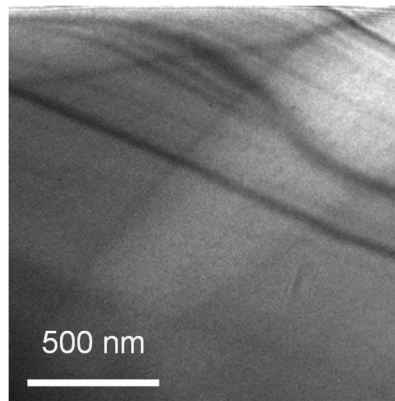


図3. ダメージを軽減した試料におけるローレンツ電子顕微鏡像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nagase Tomoki, So Yeong-Gi, Yasui Hayata, Ishida Takafumi, Yoshida Hiroyuki K., Tanaka Yukio, Saitoh Koh, Ikarashi Nobuyuki, Kawaguchi Yuki, Kuwahara Makoto, Nagao Masahiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Observation of domain wall bimerons in chiral magnets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3490
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-23845-y	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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水大瑚, 長瀬知輝, 肖英紀, 桑原真人, 五十嵐信行, 長尾全寛
2. 発表標題 ホイスラー物質における磁気スキルミオンとアンチスキルミオンの相互作用
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水大瑚, 長瀬知輝, 肖英紀, 桑原真人, 五十嵐信行, 長尾全寛
2. 発表標題 ローレンツ電子顕微鏡を用いた磁気スキルミオンとアンチスキルミオンの相互作用の解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第77回学術講演会
4. 発表年 2021年

〔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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------