

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔研究進捗評価用〕

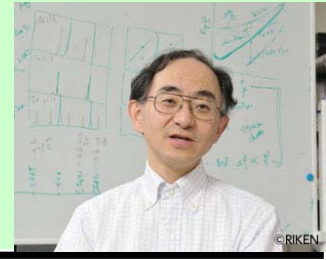
平成24年度採択分
平成27年3月20日現在

磁性体における創発電磁気学の創成
Emergent Electromagnetism in Magnets

課題番号：24224009

永長 直人 (NAGAOSA NAOTO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要

概念形成と第一原理計算を援用した理論設計を起点に、物質設計・試料作製、物性測定ของกลุ่มと、中性子散乱を主としたスピン構造、スピンドYNAMIXSの研究を行うグループを両翼として3者の密接な連携のもとに磁性体の創発電磁気学を建設する。

研究分野：理工系（数物系科学）

キーワード：創発電磁場、スキルミオン、トポロジカル絶縁体、マルチフェロイクス

1. 研究開始当初の背景

固体物理学における2大潮流、高温超伝導に端を発する電子相関の物理と量子ホール効果に始まるトポロジの両者がそれぞれ発展してきた。前者は、モット転移、スピン液体、巨大磁気抵抗効果、マルチフェロイクスなどの新規な集団現象の研究へと展開し、後者は量子ベリー位相に起因する諸現象—異常ホール効果、スピンホール効果、そしてトポロジカル絶縁体へと発展してきた。そして、これらの2つが合流するところに「創発性」という概念が構築されつつあり、この観点から超伝導体、磁性体、誘電体、などを見直そうとする動きが活発化していた。例えば、トポロジカル超伝導体はその代表例で、超伝導という多体現象とトポロジが結びつくことで、電子が分裂して粒子と反粒子が一致するマヨラナフェルミオンという新しい粒子が現れるという劇的な現象が予言されていた。磁性体でも、外部磁場を必要としない新しい量子ホール効果（量子化異常ホール効果）が予言され、その実験的検証が待たれていた。

2. 研究の目的

本研究は、このような背景下、固体中、特に磁性体中に焦点を絞ってベリー位相の概念を一般化した新しい電磁気学—創発電磁気学—の創成を行う。電子状態・スピン状態をトポロジの観点から理論・実験双方から研究し、(A)実空間における非自明なスピン構造（スキルミオン、モノポール、など）と

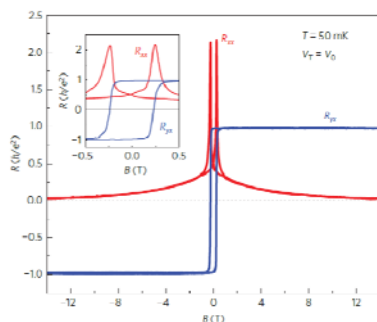
(B)運動量空間におけるベリー位相構造とを統一的に記述する理論的枠組みを構築するとともに、磁性、誘電性、量子輸送現象、光学特性、熱輸送現象における新現象を、新物質・超構造において第一原理計算を援用して予言し、その実験的検証を行う。トポロジカル磁性体の探索とともに、さらに(C)時間依存現象（ダイナミクス）に着目し、非散逸性電流による超低電力消費デバイスの基礎学理創成を目指す。

3. 研究の方法

(a)概念形成と第一原理計算を援用した理論設計を起点に、(b)物質設計・試料作製、物性測定ของกลุ่มと、(c)中性子散乱を主としたスピン構造、スピンドYNAMIXSの研究を行うグループを両翼として3者の密接な連携のもとに磁性体の創発電磁気学を建設する。(a)では、場の理論、第一原理計算、数値シミュレーションを組み合わせた重層な方法論を駆使して、新規現象・効果を予言するとともに実験からのフィードバックを受けて研究全体を主導する。(b)では化学気相成長法、ブリッジマン法、高圧合成法、分子線エピタキシー法などの高品質単結晶作製・デバイス作製と電気伝導や光学スペクトル測定、電子顕微鏡観察といった様々な物性測定を組み合わせる。(c)ではJ-PARCにおいて外場（電場、磁場、電流）下での中性子小角散乱測定環境を開発し、さらに分光器を開発することで外場下での超低エネルギー非弾性散乱を可能にし、創発電磁場のダイナミクスを調べる。

4. これまでの成果

(A)「空間構造によるトポロジカル磁性体」では多数のスピンのからなるトポロジカルスピントクスチャであるスキルミオン研究に大きな進展があった。(i)理論ではLLG方程式のシミュレーションによりスキルミオンの特異なダイナミクスを明らかにした。超低電流密度駆動ダイナミクス、熱揺動によるスキルミオンマイクロ結晶のラチェットの回転運動、などを見出した。さらにスキルミオンデバイスの設計学、光照射によるスキルミオンの生成・消去法の構築を行った。実験では様々な物質合成法による物質開拓と多角的な物性測定を用いることによって(ii)薄膜作製法や微細加工法を用いたスキルミオン形成機構についての系統的な研究、(iii)超音波吸収やマイクロ波の方向二色性応答といった未開拓物性の観測、(iv)スキルミオン候補物質 SrFeO₃ 薄膜作製の成功、MnGe における 3 次元スキルミオン状態や層状マンガン酸化物 La_{2-2x}Sr_{1+2x}Mn₂O₇ におけるスキルミオン分子状態といった新規トポロジカルスピントクスチャの開拓、を達成した。(B)「運動量空間でのベリー位相効果」では、(v)巨大ラッシュバ物質 BiTeI の第一原理計算を通じて、実験グループとの共同研究で、巨大な軌道磁性および磁気光学効果の予言・発見、磁気抵抗振動効果の解析によるベリー位相の検出、などに成功した。(vi)マグノンのベリー位相から生じるマグノンホール効果の理論を、種々の結晶構造へと拡張し、実験結果を説明することに成功した。(vii)トポロジカル磁性/非磁性絶縁体薄膜における表面状態と量子ホール効果の実験的観測を行い、中心課題の一つであるトポロジカル磁性絶縁体 Cr_{0.22}(Bi_{0.2}Sb_{0.8})_{1.78}Te₃ における外部磁場なく誘起される量子化異常ホール効果の観測に成功した。(下図)(C)「ベリー位相のダイナミクス」としては、(viii)らせん磁性体 CuFe_{1-x}Ga_xO₂ においてそのカイラルな磁性に起因したエレクトロマグノン由来のテラヘルツ光の 400%にも及ぶ巨大な方向二色性の観測に成功した。



ゼロ磁場量子化異常ホール効果

5. 今後の計画

理論研究では、京速コンピューターを使った 3 次元スキルミオン系のシミュレーション、第一原理計算によるスピン軌道相互作用の制御性に関する探究、実空間と運動量空間を統一的に扱う枠組みの構築、などを計画している。実験では磁気周期が短くかつ新奇スキルミオン形成が期待される MnGe などに対し、高分解能電子顕微鏡観察法・電子線ホログラフィ法を用いた 3 次元性を含めた実空間観察・実証を行う。トポロジカル物質においてもワイル半金属物質 Nd₂Ir₂O₇ について走査型マイクロ波インピーダンス顕微鏡を用いた表面金属状態の観測、トポロジカル絶縁体のエッジ流の走査型顕微鏡を用いた実空間観察法などを進める。中性子散乱を用いた研究では、既にビームタイムの申請が受理された海外の中性子施設での実験を含め、スキルミオンの相図とダイナミクスの研究を計画している。エレクトロマグノン研究においては工業的にありふれた磁性体であるヘキサフェライトでの室温エレクトロマグノンの二色性の最適化を行い、高強度レーザーを用いた磁性の制御や非線形応答を実現する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) 論文

“Trajectory of the anomalous Hall effect towards the quantized state in a ferromagnetic topological insulator”, *J. G. Checkelsky, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, Y. Kozuka, J. Falson, M. Kawasaki, and Y. Tokura, Nature Phys. **10**, 731-736 (2014)

“Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions”, N. Nagaosa, and Y. Tokura, Nature Nanotech. **8**, 899-911 (2013) 受賞

2013 年, 十倉好紀, 恩賜賞・日本学士院賞 「強相関電子材料の物性研究」

2014 年, 十倉好紀, 本多記念賞 「遷移金属酸化物における強相関電子機能の開拓」

2014 年, 永長直人, 文部科学大臣表彰科学技術賞, 「幾何学を用いた電子と光機能の理論的研究」

ホームページ等

<http://park.its.u-tokyo.ac.jp/nagaosa-lab/kibanS/link.html>