

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800184

研究課題名(和文) Dynamics of Topological Textures in Antiferromagnetic Nanostructures

研究課題名(英文) Dynamics of Topological Textures in Antiferromagnetic Nanostructures

研究代表者

Tretiakov Oleg (Tretiakov, Oleg)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：50643425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：反強磁性体の交替スピンの運動を記述する方程式を導出した[Phys. Rev. Lett. 110, 127208 (2013)]。これにより反強磁性スカーミオンの運動を記述した[Phys. Rev. Lett. 116, 147203 (2016)]。電流効果や温度効果は強磁性のそれと異なる。反強磁性体における磁壁の電気磁気効果とメモリーへ応用を論じた[Appl. Phys. Lett. 108, 132403 (2016)]。磁壁の移動度の最大値を電場の関数として求めた。Cr2O3などのデバイス応用には面内歪みを導入することで磁壁の歳差運動を防ぎ引き戻し効果に打ち勝つことを示した。

研究成果の概要(英文)：We derived equations of motion for the staggered dynamics in antiferromagnets by using collective coordinates approach [Phys. Rev. Lett. 110, 127208 (2013)]. Based on it we were able to describe the dynamics of antiferromagnetic skyrmions [Phys. Rev. Lett. 116, 147203 (2016)]. An antiferromagnetic Skyrmion is a compound topological object with a similar but of opposite sign spin texture on each sublattice, which results in the absence of topological Hall effect. We find that this composite nature gives rise to different dynamical behavior, both due to current and temperature effects. Another achievement is related to the study of domain wall dynamics in a magnetoelectric antiferromagnet and its implications for magnetoelectric memory applications [Appl. Phys. Lett. 108, 132403 (2016)]. We found that the domain wall mobility has a maximum as a function of electric field due to the induced gyrotropic coupling.

研究分野：物性理論

キーワード：反強磁性体 磁壁ダイナミクス トポロジカルスピントクスチャー スキルミオン

1. 研究開始当初の背景

現代のコンピューター技術および性能は高い物理的限界を伴うエネルギー消費によって妨げられている。次世代 IT 技術ではこれに代わる低電力コンピューターデバイスに置き換わることが要請される。幸いにもスピントロニクスデバイスの分野では、反強磁性体を用いた新たな発展がある [Brataas, et al., Nature Mater. 11, 372 (2012)]。

反強磁性体は秩序をもったスピン系であり、隣り合うスピンが相殺して、熱平衡状態で巨視的な磁化がないことがないことが特徴である。このような強磁性との顕著な違いにも拘らず反強磁性体は強磁性体に類似した多くの性質を有する。高温反強磁性半導体の実現、反強磁性ドメインウォールの実現可能性 [Logan, et al., Appl. Phys. Lett. 100, 192405 (2012)]、異方的トンネル磁気抵抗 (AMR) [Park, et al., Nature Mater. 10, 347 (2011)]、照射による反強磁性体の超高速スピン反転の可能性 [Kimel, et al., Nature Phys. 5, 727 (2009)]、および漏れ磁場がないなど、いくつかのスピントロニクス応用が挙げられる。

磁性体では電流が磁気モーメントにトルクを与える。強磁性体ではこれらのトルクは磁化を反転するために、磁気振動回路で安定な歳差運動を誘起するために、あるいは磁壁を動かすために用いられる。

理論的に [e.g., Haney and MacDonald, Phys. Rev. Lett. 100, 196801 (2008)] そして実験的にも [Wei, et al., Phys. Rev. Lett. 98, 116603 (2007)] 電流誘起トルク効果は反強磁性体にも存在し、強磁性体と同様の強さであることが指摘された。しかしながら強磁性体と反強磁性体ではいくつかの側面で異なる。例えば反強磁性体のダイナミクスは交替磁場と (非平衡) 磁化との結合方程式によって記述される。電流誘起トルクはこれらの変数に異なった形で影響を与える。反強磁性体では交替磁場は空間的に変化し、外部磁場や電流によって影響を受ける。これまでは、秩序変数の時間的および空間的変化の複雑な振る舞いを理解するためには多くの自由度に関して結合した方程式の組を解くことが要請された。本プロジェクトで我々は概念的によりシンプルな理論を定式化し、反強磁性体において外部の力が如何に交替磁場と磁化のダイナミクスに影響を与えるかを集団座標の方法で記述した。

我々の記述は反強磁性絶縁体に基づき電流と熱流を考慮に入れる現象論である [Hals, et al., Phys. Rev. Lett. 106, 107206 (2011)]。この方法は、空間的にゆっくりと変化する反強磁性体のスピントロニクスに対して、散逸や外部磁場、(断熱的) 反作用型および (非断熱的) 散逸型の電流誘起スピントルクを含む。

2. 研究の目的

反強磁性体ナノ構造におけるトポロジカルテクスチャーのダイナミクスに関する統一的なアプローチが研究の目的である。スキルミオンやドメインウォールを含む様々なタイプのトポロジカルテクスチャーを、電流、熱流、あるいは磁気トルクの下で調べることを目指した。

得られることが予想された結果からは、より正確かつ低電力消費の新しいメモリーそして論理デバイスへの応用が期待出来る。

反強磁性体はスピン情報の蓄積および制御に利用できるが、交替磁場と磁化の結合した方程式は極めて複雑である。我々は概念的シンプルな集団座標を用いる方法を用いて反強磁性体のテクスチャーダイナミクスを記述する。この理論は散逸、外部磁場、反作用型および散逸型電流誘起トルクの効果を含む。この理論を用いて我々は多くの異なった反強磁性体を調べる。これによってこれによって新奇現象および新メモリーおよび論理デバイスのコンセプトを提言する。

3. 研究の方法

我々は交替磁場と磁気秩序変数のダイナミクスを、拡張されたランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式によって研究する。乱れの影響を考慮に入れた、電流ないし熱流下の反強磁性体のトポロジカルテクスチャーの運動方程式を導いた。さらにスキルミオンの反強磁性構造の形成と安定性、温度やマグノンの効果を調べた。次世代デバイス・ナノ論理デバイスへの直接的応用のため、反強磁性ナノ構造におけるドメインウォールやその他のトポロジカルテクスチャーのダイナミクスが近年注目を集めている。我々は手段座標の方法を用いた反強磁性体テクスチャーの運動方程式を、電流、磁化、外部磁場、および温度勾配に対する線形近似を超えて導出した。強磁性体ではダイナミクスは時間微分の 2 次であることと対照的に、和絵 r 我はソフトモードを記述する有効粒子が質量を獲得し、時間依存外部磁場に対し線形項の寄与がないことを明らかにした。第 1 に、我々の理論を反強磁性テクスチャーが端で 90 度に固定され、ドメインでは 180 度に固定される 1 次元の単純な模型に適用した。

系のパラメータの中でドメインウォールの重心運動座標に対するズレと自然な振動数を発見した。こうして我々は反強磁性テクスチャーにおいては、(非断熱的) 散逸型の電流誘起トルクが支配的に重要な役割を担うことを明らかにした。我々は渦やスキルミオンおよびスキルミオン結晶など、その他の基本的なトポロジカル欠陥も調べた。

スキルミオンはスピンの 3 次元性に起因するトポロジカルなオブジェクトである。凝縮系物理学では、そのようなトポロジカル状態

は乱れや摂動に対し強固であるため、それらはスピントロニクス幅広い分野で応用が期待されている。

我々は(薄膜やナノストライプなどの)反強磁性体の中を運動するトポロジカルテクスチャーの問題を定式化し、反強磁性体における主なトポロジカル欠陥として、渦、反渦、スキルミオン、複合ドメインウォールを同定し、それらを各自由度と緩和時間に関連付けた。ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式を交替磁場と磁化に拡張して、これらのトポロジカル欠陥のダイナミクスを決定した。電流が大きい一般の場合に対し、ランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式を解いた。反強磁性体に対するランダウ・リフシッツ・ギルバート方程式の適用限界を明らかにした。反強磁性テクスチャーにおけるスピン軌道相互作用の効果を調べ、ジャロシンスキー守谷相互作用を有する反強磁性テクスチャーのダイナミクスを明らかにした。この作業の一部、非線型性ゆえに解析的に行うことが極めて困難な場合は、数値計算を用いて現象の定性的な描像を明らかにした。

我々は特定のトポロジカル欠陥に対して結合方程式を導き解いた。これらの解を用いて、ドメインウォールやスキルミオンのトポロジカル欠陥のドリフト速度を決定した。反強磁性体薄膜におけるスキルミオンテクスチャーの形成および崩壊のメカニズム、およびこの崩壊によって生成されるスピン波のエネルギー輸送を調べた。

4. 研究成果

(1)我々は反強磁性体における交替磁場のダイナミクスに対する運動方程式を集団座標の方法を用いて導いた[Phys. Rev. Lett. 110, 127208 (2013)].これによって初めて反強磁性スキルミオンのダイナミクスを記述することが可能となった。スキルミオンは磁性体の中でトポロジカルに保護された実態でありスピントロニクスで情報蓄積と処理に用いられる。強磁性体においてはスキルミオンの応用には、電流方向に運動する際の不安定生といった、幾つかの内因的困難が存在する。我々は反強磁性体においてはスキルミオンは安定であり制御可能であることを示した。反強磁性スキルミオンは類似した、しかし各副格子で逆符号のスピンテクスチャーからなる複合体であり、そのためトポロジカルホール効果をもたらさない。我々はこの複合体が電流効果および温度効果の双方で強磁性体とは異なった振る舞いを示すことを明らかにした[Phys. Rev. Lett. 116, 147203 (2016)].

(2) もう一つの成果は電磁結合した反強磁性体におけるドメインウォールのダイナミ

クスと電気磁気メモリーへの応用である[Appl. Phys. Lett. 108, 132403 (2016)].我々はドメインウォールの移動度がもつジャイロトロピック結合に起因する上限値を電場の関数として求めた。さらにCr2O3のような物質のデバイス応用には、面内歪みを導入することで、磁壁の歳差運動を防ぎ、主な引き戻し効果に打ち勝つことを示した

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計11件)

J. Barker and Oleg A. Tretiakov, Static and Dynamic Properties of Antiferromagnetic Skyrmions in the Presence of Applied Current and Temperature, Physical Review Letters 116, 147203 (2016), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.147203

K. D. Belashchenko, O. Tchernyshyov, A. A. Kovalev, and Oleg A. Tretiakov, Magnetoelectric domain wall dynamics and its implications for magnetoelectric memory, Applied Physics Letters 108, 132403 (2016), 査読有
DOI: 10.1063/1.4944996

U. Gungordu, R. Nepal, Oleg A. Tretiakov, K. Belashchenko, and A. A. Kovalev, Stability of skyrmion lattices and symmetries of quasi-two-dimensional chiral magnets, Physical Review B 93, 064428 (2016), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.93.064428

K. Sato and Oleg A. Tretiakov, Electrically controlled pinning of Dzyaloshinskii-Moriya domain walls, Applied Physics Letters, 108, 122403 (2016), 査読有
DOI: 10.1063/1.4944664

A. Goussev, J. M. Robbins, V. Slastikov, and Oleg A. Tretiakov, Dzyaloshinskii-Moriya domain walls in magnetic nanotubes, Physical Review B 93, 054418 (2016), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.93.054418

A. B. Cahaya, Oleg A. Tretiakov, and G. E. W. Bauer, Spin Seebeck Power Conversion, Invited review in IEEE Transactions on Magnetics, 51, 0800414 (2015), 査読有
DOI: 10.1109/TMAG.2015.2436362

O. A. Tretiakov and Ar. Abanov, Topologically protected dynamics of spin textures, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 383, 65 (2015), 査読有
DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.12.088

A. B. Cahaya, O. A. Tretiakov, and Gerrit E. W. Bauer, Spin Seebeck Power Generators, *Applied Physics Letters* 104, 042402 (2014), 査読有
DOI: 10.1063/1.4863084

D. Baasanjav, O. A. Tretiakov, and K. Nomura, Magnetoelectric effect in topological insulator films beyond the linear response regime, *Physical Review B*, 90, 045149 (2014), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.90.045149

O. A. Tretiakov, K. S. Tikhonov, and V. L. Pokrovsky, Spin resonance in a Luttinger liquid with spin-orbit interaction, *Physical Review B*, 88, 125143 (2013), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.88.125143

E. G. Tveten, A. Qaiumzadeh, O. A. Tretiakov, and A. Brataas, Staggered Dynamics in Antiferromagnets by Collective Coordinates, *Physical Review Letters* 110, 127208 (2013), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.127208

[学会発表](計46件)

Oleg A. Tretiakov, "Dynamical and Thermal Properties of Antiferromagnetic Skyrmions," Joint Spin Conversion Theory Meeting 2016, Ochanomizu, Tokyo, Japan (March, 2016)
Oleg A. Tretiakov, "Stability and Dynamics of Merons and Skyrmions in Magnetic Systems," Theory of Condensed Matter group seminar, Radboud University Nijmegen, Nijmegen, Netherlands (February, 2016).
Oleg A. Tretiakov, "Stability and Dynamics of Antiferromagnetic Skyrmions," Zernike Institute for Advanced Materials seminar, University of Groningen, Groningen, Netherlands (February, 2016)
Oleg A. Tretiakov, "Thermal and Dynamical Properties of Antiferromagnetic Skyrmions," 23rd Joint Interlaboratory Workshop on Nano-Magnetics, Akiu, Japan (February, 2016)

Oleg A. Tretiakov, "Skyrmion Dynamics in Ferromagnetic and Antiferromagnetic Systems," Zao Winter Physics Workshop 2016, Zao, Japan (February, 2016)
Oleg A. Tretiakov, "Spin Seebeck and Spin Spiral Systems," School of Natural Sciences seminar, FEFU, Vladivostok, Russia (December, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Static and Dynamic Properties of Antiferromagnetic Skyrmions," Condensed Matter seminar, RIKEN, Wako, Japan (December, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Magnetization Dynamics and Motion of Topological Spin Textures," lecture at TFC Elementary Spintronics School, Tohoku University, Sendai, Japan (November, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Spin Seebeck Thermoelectrics," ICSS 2015 conference, Phuket, Thailand (November 4 - 7, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Skyrmions, Dzyaloshinskii-Moriya interaction and other magnetic beasts" condensed-matter physics seminar, Far East Federal University, Vladivostok, Russia (October, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Ferromagnetic and Antiferromagnetic Skyrmions," seminar of School of Mathematics, University of Bristol, Bristol, United Kingdom (September, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Ferromagnetic and Antiferromagnetic Skyrmions," Condensed Matter Physics seminar, University of York, York, United Kingdom (September, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Static and Dynamic Properties of Antiferromagnetic Skyrmions," UniteMixte de Physique CNRS/Thales, Palaiseau, France (September, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Antiferromagnetic Skyrmions," International Baltic Conference on Magnetism and Biomedical Applications, Svetlogorsk, Russia (August 30 - September 2, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Antiferromagnetic Skyrmions," Solid State Physics seminar, University of Mainz, Mainz, Germany (July, 2015)
Oleg A. Tretiakov, "Antiferromagnetic Skyrmions," Condensed Matter Theory Seminar,

- University of Cologne, Cologne, Germany (July, 2015)
Oleg A. Tretiakov,
 “Antiferromagnetic Skyrmions,” 4th International conference on Theoretical Physics and its Applications, Moscow, Russia (July 2 - 6, 2015)
Oleg A. Tretiakov,
 “Antiferromagnetic Skyrmions,” International workshop on New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015), ISSP, University of Tokyo, Kashiwa, Japan (June 1 - 19, 2015)
Oleg A. Tretiakov, “Internal Skyrmion Dynamics and Antiferromagnetic Skyrmions,” International Workshop on Topological Structures in Ferroic Materials, UNSW, Sydney, Australia (May 19-21, 2015)
Oleg A. Tretiakov,
 “Dzyaloshinskii-Moriya Spin Textures with Curvature and Antiferromagnetic Skyrmions,” Condensed Matter Seminar, UCLA, Los Angeles, CA, USA (March, 2015)
- ②① Oleg A. Tretiakov,
 “Dzyaloshinskii-Moriya Spin Textures with Curvature and Antiferromagnetic Skyrmions,” Western Digital, San Jose, CA, USA (March, 2015)
- ②② Oleg A. Tretiakov,
 “Antiferromagnetic Skyrmions,” University of Texas at Austin, TX, USA (March, 2015)
- ②③ Oleg A. Tretiakov,
 “Antiferromagnetic Skyrmions,” 2nd Zao Spintronics International Workshop, Zao, Japan (January, 2015)
- ②④ Oleg A. Tretiakov, “Topologically Protected Dynamics of Dzyaloshinskii-Moriya Spin Textures,” ISSP seminar, University of Tokyo, Kashiwa, Japan (October, 2014)
- ②⑤ Oleg A. Tretiakov, “Statics and dynamics of Dzyaloshinskii-Moriya spin textures,” Zao Spintronics Workshop, Zao, Yamagata, Japan (October 6 - 8, 2014)
- ②⑥ Oleg A. Tretiakov, “Dynamics of Dzyaloshinskii-Moriya Spin Textures in Nanotubes,” Institute of Physics talk, Johannes Gutenberg - University Mainz, Mainz, Germany (September, 2014)
- ②⑦ Oleg A. Tretiakov, “Topological Dynamics of Dzyaloshinskii-Moriya Spin Textures in Curved Spaces,” condensed matter physics seminar, University of Konstanz, Konstanz, Germany (September, 2014)
- ②⑧ Oleg A. Tretiakov, “Statics and Dynamics of Dzyaloshinskii-Moriya Spin Textures,” Solid State Physics Seminar, Forschungszentrum Juelich, Juelich, Germany (September, 2014)
- ②⑨ Oleg A. Tretiakov, “Topological Dynamics of Dzyaloshinskii-Moriya Spin Textures,” SPINTEC seminar, SPINTEC, Grenoble, France (September, 2014)
- ③⑩ Oleg A. Tretiakov, “Magnetoelectric and Thermoelectric Properties of Topological Insulators,” IMPMC seminar, Sorbonne Universities, Paris, France (September, 2014)
- ③① Oleg A. Tretiakov, “Dynamics of Topological Spin Textures,” condensed matter seminar, Beijing Normal University, Beijing, China (July, 2014)
- ③② Oleg A. Tretiakov, “Topologically Protected Dynamics of Spin Textures,” Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2014, Moscow, Russia (June 29 - July 3, 2014)
- ③③ Oleg A. Tretiakov, “Spin Texture Dynamics in Ferromagnetic and Antiferromagnetic Structures,” ICC-IMR 20th REIMEI International Workshop “Spin Mechanics 2,” Sendai, Japan (June 21 - 24, 2014)
- ③④ Oleg A. Tretiakov, “Dynamics of Topological Spin Textures,” condensed matter seminar, Imperial College, London, UK (May, 2014)
- ③⑤ Oleg A. Tretiakov, “Topological and Spin Seebeck Thermoelectrics,” Condensed Matter Physics seminar, The University of York, York, UK (May, 2014)
- ③⑥ Oleg A. Tretiakov, “Topologically Protected Dynamics of Spin Textures,” Department of Mathematics seminar, Northumbria University, Newcastle, UK (May, 2014)
- ③⑦ Oleg A. Tretiakov, “Thermoelectrics based on topological insulators and spin Seebeck devices,” Department of Physics seminar, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong (April, 2014)
- ③⑧ Oleg A. Tretiakov, “Topologically Protected Domain-Wall Dynamics in Ferromagnets and Antiferromagnets,” condensed matter seminar, University

of Nebraska - Lincoln, NE, USA (March, 2014)

- ③⑨ Oleg A. Tretiakov, “ Thermoelectric power generators based on topological insulators and spin Seebeck devices,” Nebraska Center for Materials and Nanoscience Seminar, University of Nebraska, Lincoln, NE, USA (March, 2014)
- ④⑩ Oleg A. Tretiakov, “ Electron Spin Resonance in Quantum Wires with Spin-Orbit Coupling,” invited talk at RIKEN, Wako, Japan (February, 2014)
- ④⑪ Oleg A. Tretiakov, “ Spin Flip Resonance in Spin-Orbit Split Quantum Wires,” talk at the KITP Program “ Spintronics 2013”; KITP, UC, Santa Barbara, CA, USA (December, 2013)
- ④⑫ Oleg A. Tretiakov, “ Topologically Protected Domain-Wall Dynamics in Ferromagnets and Antiferromagnets,” talk at the International Workshop on Topological Quantum Phenomena in Condensed Matter with Broken Symmetries 2013; Okinawa, Japan (October 22 - 26, 2013)
- ④⑬ Oleg A. Tretiakov, “ Topologically Protected Domain-Wall Dynamics in Ferromagnets and Antiferromagnets,” invited talk at the SpinNet Minisymposium on Spintronics; JGU Mainz, Germany (September 6, 2013)
- ④⑭ Oleg A. Tretiakov, “ Domain-Wall Dynamics in Ferromagnets and Antiferromagnets,” invited talk at the JEMS 2013 Conference; Rhodes, Greece (August 26 - 30, 2013)
- ④⑮ Oleg A. Tretiakov, “ Spin Flip Resonance in Spin-Orbit Split Quantum Wires,” MSD seminar; Argonne National Lab, Argonne, IL, USA (August, 2013)
- ④⑯ Oleg A. Tretiakov, “ Domain-Wall Dynamics in Ferromagnets and Antiferromagnets,” plenary talk at the 3rd International Conference on Theoretical Physics “ Theoretical Physics and its Applications,” Moscow, Russia (June 24 - 28, 2013)

〔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〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/tretiakov/>

/

6 . 研究組織

(1)研究代表者

トレティアコフ オレグ

(TRETIAKOV, Oleg)

東北大学金属材料研究所・助教

研究者番号：5 0 6 4 3 4 2 5

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし