

トポロジカル物質ナノ構造の輸送現象

藤澤利正 / 東京工業大学大学院理工学研究科 教授

本計画研究では、半導体ヘテロ構造・低次元ナノ構造や超伝導体・強磁性体のハイブリッド構造をベースとした人工的な「トポロジカル物質ナノ構造」の輸送現象に注目しています。個々のバルク母材料にはない新奇なトポロジカル量子現象を引き出し、トポロジカル系に特有なエキゾチックな準粒子の振る舞いを明らかにすることや、準粒子を用いた新しいトポロジカル物質ナノ構造デバイスの基礎原理を提案し原理実証を行うことを目的としています。最近のトピックスを紹介します。

1. 一次元電子系の長寿命非平衡状態

藤澤 (CO1 代表者)、橋坂 (CO1 連携研究者)、村木 (CO1 分担者) らは、GaAs 系量子ホール効果におけるエッジチャンネルを結合した人工的な朝永ラッティンジャー流体において、非平衡状態が電子緩和よりも長い緩和長を有することを見出しました [1]。実験は、図 1 のようにエッジチャンネルを結合することにより、スピンドルで双方向の朝永ラッティンジャー流体を形成して行いました。量子ポイント接合 (PC) を用いて 1 つのエッジチャンネルに局所的な非平衡状態を形成させると、相互作用によって 4 つのエッジチャンネルに電子成功励起が発生します。この非平衡励起状態のエネルギー分光を行なうと、低温の電子と高温の電子が共存しているように観測されます。通常の液体であれば中間温度の熱平衡状態に移行すると考えられますが、朝永ラッティンジャー流体の場合には非平衡な励起状態に長く留まると考えられており、一次元系の特異な長寿命状態の観測に成功したものです。

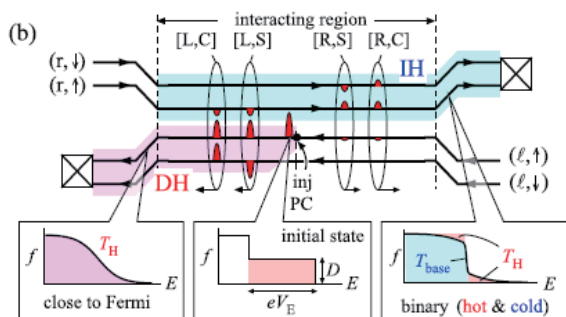


図 1. カイラル一次元チャンネル (矢印付き実線) を結合することにより朝永ラッティンジャー流体 (interacting region) を形成した。初期状態 (中央下挿入図) から、二成分温度をもつ非平衡状態 (右下挿入図) が形成される。

2. InAs/(In,Ga)Sb 歪み量子井戸による 2 次元トポロジカル絶縁体のバンドエンジニアリング

秋保 (CO1 連携研究者)、入江 (CO1 連携研究者)、村木 (CO1 分担者) らは、InAs/GaSb 系 type-II 量子井戸において、GaSb よりも格子定数の大きい In_{0.25}Ga_{0.75}Sb を用いることで、面内の圧縮歪によってバンド反転したトポロジカル相において従来よりも大きなバンドギャップが得られ、それによってバルクの抵抗率が従来の InAs/GaSb 系よりも 2 桁向上することを示しました (図 2) [2]。また、従来の InAs/GaSb 系においても、試料構造を工夫し、ゲート電界によってバルク伝導を抑制することで、単一エッジチャンネルのほぼ量子化した伝導を観測しました [3]。

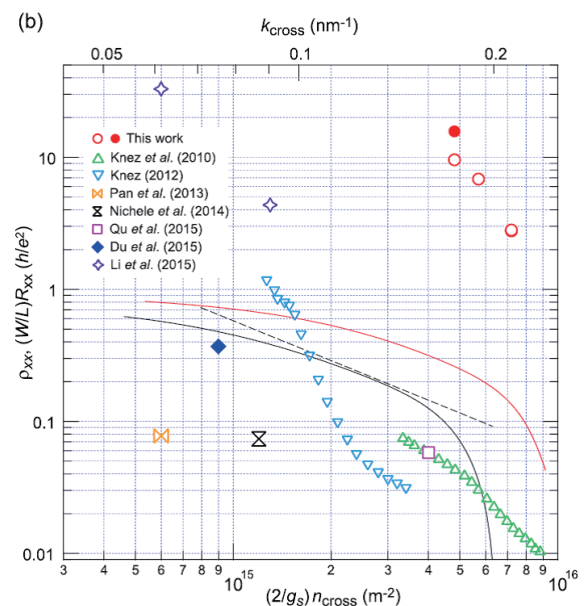


図 2. InAs/InGaSb 系 (赤丸) と従来の InAs/GaSb 系の電荷中性点における抵抗率の比較。横軸はバンド反転の大きさを示す。実線と破線は理論曲線。

3. バリステリック 2 次元電子系におけるアンドレーエフ反射とアンドレーエフ束縛状態

入江宏 (CO1 連携研究者) と村木 (CO1 分担者) らは、量子ポイント接合を単一モードの透過率可変なプローブとして、Nb を近接させた In_{0.75}Ga_{0.25}As 2 次元電子系においてバリステリック領域におけるアンドレーエフ反射とアンドレーエフ束縛状態を観測しました [4]。

TOPICS

4. 半導体中の永久スピン旋回状態のゲート制御

好田 (C01 分担者) らは、半導体において長距離スピン輸送が可能となる永久スピン旋回状態とその逆状態のゲート制御に成功しました [5]。(001) 量子井戸において、ラシュバおよびドレッセルハウススピン軌道相互作用が等しい場合、有効磁場が SU(2) 対称性を有するためスピン軌道相互作用の存在下であってもスピン緩和の抑制が可能となります。これは永久スピン旋回状態 (Persistent spin helix state; PSH) と呼ばれ、長距離スピン輸送とスピン制御を同時に兼ね備える魅力的な状態です。さらに、ラシュバスピン軌道相互作用の符号を正から負へと変えることでその逆状態 (i-PSH) も可能となり、PSH と i-PSH 状態を用いるとスピンを用いた相補型トランジスタの実現が可能となります。表面ゲート付き InGaAs/InAlAs 量子井戸構造を用いて、磁気輸送特性に表れる弱反局在解析からスピン緩和長のゲート (キャリア濃度) 依存性を求めました (図 3)。その結果、異なる 2 か所のキャリア濃度 ($1.2 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$, $1.5 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$) においてスピン緩和長が急激に増大することが分かり、PSH と i-PSH 状態をゲート電圧により切り替えることに成功しました。

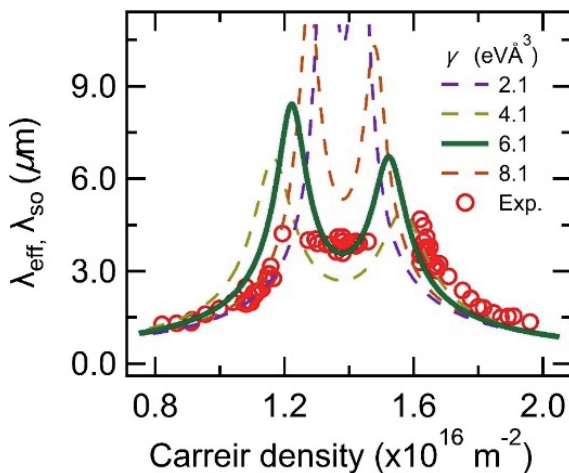


図 3. 弱反局在から求めたスピン緩和長のキャリア濃度依存性とバルクドレッセルスピン軌道相互作用係数 γ を変えたフィッティング結果。

5. ワイル半金属のスピン電磁応答

野村 (C01 分担者)、大湊 (C01 博士研究員) らは、強磁性秩序を有するワイル半金属の磁気輸送現象の研究に取り組み、磁性ワイル半金属を含む接合系では、スピン-運動量ロッキングにより 100% の異方的磁気抵抗が可能であることを明らかにしました (図 4 参照) [6]。

このほか、磁性ワイル半金属を含むデバイスでは、バイアス電圧による磁化の反転や振動電圧によるスピ

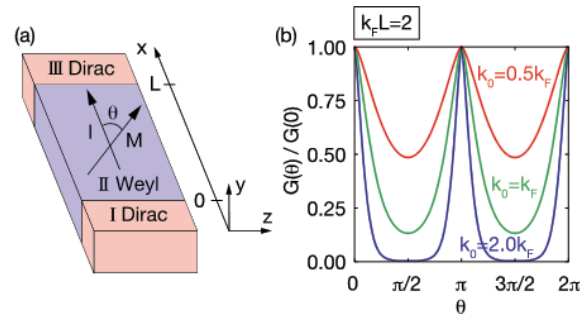


図 4 (a) 磁性ワイル半金属接合系。(b) 伝導度は電流と磁気モーメントのなす角に強く依存する。

ン流の生成が可能であることを提案し [7]、磁性ワイル半金属のスピン波や磁壁などのテクスチャー励起を記述する有効理論を導出しました [8,9]。

さらに、スピン軌道相互作用の強い反強磁性体が有するトポロジカル有効作用を導出し、ネールベクトルの空間変化による局所異常ホール電流や、時間変化によるカイラル磁気効果の存在を明らかにしました [10]。スピン軌道相互作用に起因するトポロジカル絶縁体の磁化率を求め [11]、熱量子ホール効果の微視的を構築しました [12]。

6. 三次元ハニカム格子の物理

江澤 (C01 分担者) は、ハイパーハニカム格子を含む三次元ハニカム格子を一般的に定義し、その性質を調べました [13]。グラフェンなどに代表されるハニカム格子は、低エネルギー現象がディラック方程式で記述されるなど、種々の美しい物理の発現の根源です。近年、ハニカム格子の三次元版であるハイパーハニカム格子が提案され、 β -Li₂IrO₃ で実験的に実現していることが高木 (A01 分担者) らによって報告されています。本研究 [13] では、ハイパーハニカム格子を含む三次元ハニカム格子を一般的に定義し、その性質を調べました。図 5 に示す単位胞のすべてに対し、フェルミ面が一次元のリング状であるループ・ノード半金属であることを解析的に示しました。これはディラック半金属やワイル半金属がポイント・ノードであることと対照的です。表面状態はループ・ノードを境界とするような部分平坦バンドを持ち、ドラム・ヘッド状態と名付けられています。エッジ状態は、両端がジグザグの場合にはループの外側に平坦バンドが生じますが、両端がベアードの場合にはループの内側に平坦バンドが生じます。一方、ジグザグとベアードで終端した場合には完全平坦バンドの表面状態になります。以上の様に、ハニカム格子の物理が自然に三次元に拡張できることが分かりました。

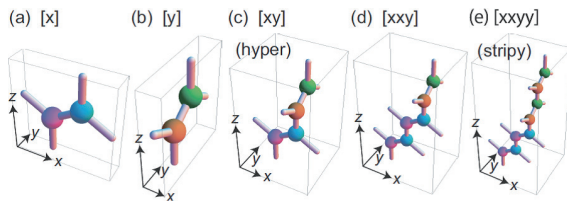


図5. 三次元ハニカム格子の単位胞。

7. トポロジカル物質の理論

江澤 (C01 分担者) は、様々なトポロジカル物質の理論を構築しました。二層スキルミオンでスキルミオン・ホール効果が消失し直進する事や [14]、トポロジカル絶縁体と磁性トポロジカル絶縁体との界面でスキルミオンが安定化する事 [15] を示し、電氣的にスキルミオンを検出する方法を提案しました [16]。

また、パッカード構造の新しいエッジ状態の提案 [17]、高いトポロジカル数を持つスキルミオンが安定化する機構の提案 [18] を行い、4-6 族の単原子層半導体が直接バンドギャップを持つこと [19]、多層系でスキルミオンが安定化すること [20] を示しました。さらに、反強磁性体中で実現するスキルミオンを提案し [21]、砂時計フェルミオンと呼ばれる新奇な状態をノンシンモルフィック対称性に基づき解析的に導出しました。 [22]。スキルミオニウムと呼ばれるスキルミオン複合構造の制御法を提案し [23]、擬スピン 3/2 のフェルミオンが三色立方格子で実現する事を示しました。 [24]。ゲルマネンでのディラック分散の兆候を STM で観測しました [25]。

- [1] "Long-lived binary tunneling spectrum in the quantum Hall Tomonaga-Luttinger liquid", K. Washio, R. Nakazawa, M. Hashisaka, K. Muraki, Y. Tokura, and T. Fujisawa, *Phys. Rev. B* **93**, 075304-1-11 (2016).
- [2] "Engineering quantum spin Hall insulators by strained-layer heterostructures", T. Akiho, F. Couëdo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 192105-1-5 (2016).
- [3] "Single-edge transport in an InAs/GaSb quantum spin Hall insulator", F. Couëdo, H. Irie, K. Suzuki, K. Onomitsu, K. Muraki, *Phys. Rev. B* **94**, 035301-1-5 (2016).
- [4] "Andreev reflection and bound state formation in a ballistic two-dimensional electron gas probed by a quantum point contact", H. Irie, C. Todt, N. Kumada, Y. Harada, H. Sugiyama, T. Akazaki, K. Muraki, *Phys. Rev. B* **94**, 155305-1-6 (2016).
- [5] "Gate-controlled Switching between persistent and inverse persistent spin helix states", K. Yoshizumi, A. Sasaki, M. Kohda, and J. Nitta, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 132402 (2016).
- [6] "Anisotropic magnetotransport in Dirac-Weyl magnetic junctions", Y. Ominato and K. Nomura, arXiv:1611.05236.
- [7] "Voltage-driven magnetization switching and spin pumping in Weyl semimetals", D. Kurebayashi and K.

- Nomura, *Phys. Rev. Applied* **6**, 044013 – 1-6 (2016).
- [8] "Spin textures and spin-wave excitations in doped Dirac-Weyl semimetals", Y. Araki and K. Nomura, *Phys. Rev. B* **93**, 094438 – 1-12 (2016).
- [9] "Universal charge and current on magnetic domain walls in Weyl semimetals", Y. Araki, A. Yoshida, and K. Nomura, *Phys. Rev. B* **94**, 115312 – 1-7 (2016).
- [10] "Chiral Magnetic Effect and Anomalous Hall Effect in Antiferromagnetic Insulators with Spin-Orbit Coupling", A. Sekine and K. Nomura, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 096401 – 1-5 (2016).
- [11] R. Nakai and K. Nomura, "Crossed responses of spin and orbital magnetism in topological insulators", *Phys. Rev. B* **93**, 214434 – 1-8 (2016).
- [12] "Finite-temperature effective boundary theory of the quantized thermal Hall effect", R. Nakai, S. Ryu, and K. Nomura, *New J. Phys.* **18**, 023038 – 1-12 (2016).
- [13] "Loop-nodal and Point-nodal Semimetals in Three-dimensional Honeycomb Lattices" M. Ezawa, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 127202 (2016).
- [14] "Magnetic bilayer-skyrmions without skyrmion Hall effect" Xichao Zhang, Yan Zhou and Motohiko Ezawa, *Nature Communications* **7**, 10293 (2016).
- [15] "Geometric Hall effects in topological insulator hetero-structures" K. Yasuda, R. Wakatsuki, T. Morimoto, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Ezawa, M. Kawasaki, N. Nagaosa and Y. Tokura, *Nature Physics* **12**, 555 (2016).
- [16] "Purely electrical detection of a skyrmion in constricted geometry" Keita Hamamoto, Motohiko Ezawa, Naoto Nagaosa, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 112401(2016).
- [17] " Tunable skewed edges in puckered structures" Marko M. Grujic, Motohiko Ezawa, Milan Z. Tadic, Francios M. Peeters, *Phys. Rev. B* **93**, 245413 (2016).
- [18] "High-Topological-Number Skyrmion and Topologically Protected Dissipative Structure" Xichao Zhang, Yan Zhou and Motohiko Ezawa, *Phys. Rev. B* **93**, 024415 (2016).
- [19] "Direct Band Gaps in Group IV-VI Monolayer Materials: Binary Counterparts of Phosphorene" C. Kamal, Aparna Chakrabarti and Motohiko Ezawa, *Phys. Rev. B* **93**, 125428 (2016).
- [20] "Thermally stable magnetic skyrmions in multilayer synthetic antiferromagnetic racetracks" Xichao Zhang, Motohiko Ezawa and Yan Zhou, *Phys. Rev. B* **94**, 064406 (2016).
- [21] "Antiferromagnetic Skyrmion: Stability, Creation and Manipulation" Xichao Zhang, Yan Zhou and Motohiko Ezawa, *Scientific Reports* **6**, 24795 (2016).
- [22] "Hourglass Fermion Surface States in Stacked Topological Insulators with Nonsymmorphic Symmetry" M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **94**, 155148 (2016).
- [23] "Control and manipulation of a magnetic skyrmionium in nanostructures" Xichao Zhang, Jing Xia, Yan Zhou, Daowei Wang, Xiaoxi Liu, Weisheng Zhao, Motohiko Ezawa, *Phys. Rev. B* **94**, 094420 (2016).
- [24] "Pseudospin 3/2 Fermions, Type-II Weyl Semimetals and Critical Weyl Semimetals in Tricolor Cubic Lattice", M. Ezawa, *Phys. Rev. B* **94**, 195205 (2016).
- [25] "Scanning tunneling spectroscopy study of the Dirac spectrum of germanene" C.J. Walhout, A. Acun, L. Zhang, M. Ezawa and H.J.W. Zandvliet, *Journal of Physics: Condensed Matter* **28**, 284006 (2016).