

計画研究 C01

トポロジカル絶縁体におけるディラック電子性質の解明とラシュバ型スピン軌道相互作用の強い表面超伝導の発見

鄭 国慶 / 岡山大学大学院自然科学研究科 教授

本計画班では空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用 (SOI) が織り成す新奇なトポロジカル量子現象を、(1) 空間反転対称性の破れた超伝導体、(2) 電場誘起表面超伝導体、(3) トポロジカル絶縁体、において探究します。ここでは、本年度に大きな進展のあった研究課題 (2) と (3) のトピックスについて紹介します。

1. トポロジカル絶縁体

ここ数年、トポロジカル絶縁体と呼ばれる従来の物質の状態とは全く異なる新しい状態が発見され、大きな話題になっています。トポロジカル絶縁体は、バルクは絶縁体であるのに対して、そのエッジ (表面) に特殊な金属状態が現われ、電子は質量ゼロのディラック電子となってディラックコーンと呼ばれるエネルギー状態を形成します。これまでに提案されているトポロジカル絶縁体を利用した革新的なデバイスの多くは、このディラック電子に意図的に質量を持たせてその運動を制御する事を必要とします。またこれが実現されると、半整数量子ホール効果や磁気単極子等の様々な特異量子現象が実現される可能性も理論的に指摘されています。しかしながら、ディラック電子に質

量を持たせる事は非常に困難で、これまでは、結晶に磁性不純物を添加したり強磁場を印加したりして、時間反転対称性を破る事が唯一の方法と考えられてきました。

今回、C01 班の東北大学の佐藤と大阪大学の瀬

川・安藤らの共同研究グループは、トポロジカル絶縁体 TlBiSe_2 と、通常の絶縁体 TlBiS_2 の固溶系である $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ の高品質大型単結晶の育成に成功し、高分解能角度分解光電子分光 (ARPES) によってディラックコーンのエネルギー分散を高精度で決定しました (図 1)。その結果、この系は、 $x=0.5$ を境にしてトポロジカル相 ($x > 0.5$) から非トポロジカル相 ($x < 0.5$) への量子相転移を示す事が明らかになりました。また、図 2 に示すように、 $\text{TlBiSe}_2 (x = 1.0)$ においてディ

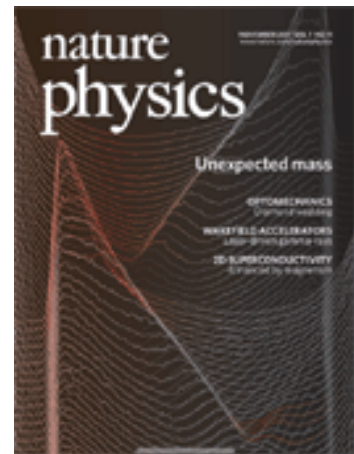


図 1 : Nature Phys. の表紙を飾った佐藤氏らの成果

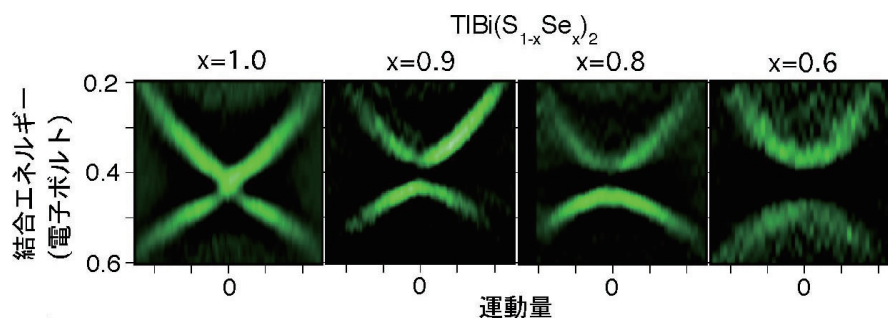


図 2 : ARPES によって決定した $\text{TlBi}(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_2$ のトポロジカル相における τ 点近傍の表面バンドのエネルギー分散。明るい部分がバンドに対応する

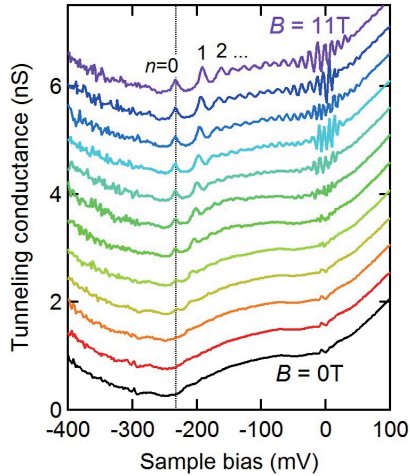


図3：トンネルスペクトルに現れる Bi_2Se_3 の Landau 準位

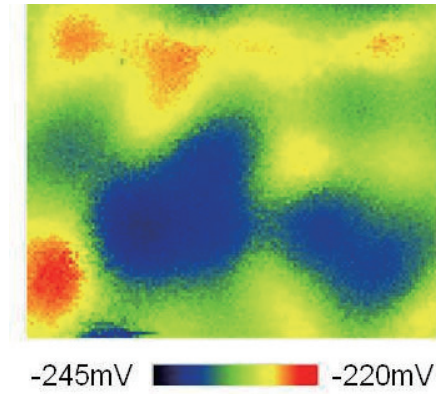


図4： Bi_2Se_3 の Dirac 点エネルギーの空間分布

ラックコーン的なX字型を示す表面バンドのエネルギー分散が、S置換によってバンドが上下に分裂してエネルギーギャップが生じることがわかりました。また、エネルギーギャップの大きさは、xの減少に伴い単調に増加する事もわかりました。このことは、 TlBiSe_2 のSeを非磁性不純物であるSで置換しただけで結晶表面におけるディラック電子が質量を獲得し、さらにS/Se組成比の調整によってその質量を自在に制御できることを示しています。以上の実験結果は、これまでの常識を覆して時間反転対称性を明示的に破らなくてもディラック電子が質量を持つ事を初めて示したものです。

一方、理研の花栗らの研究グループは、STM/STSを用いてDirac電子の性質を調べています。STM/STSを用いると表面状態を選択的に測定できる他、磁場効果の研究や、高い空間分解能を生かした不純物状態のイメージングも可能にしています。

代表的なトポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 に対して磁場中でトンネル分光を行い、トンネルスペクトル

に多数のLandau準位を観測しました(図3)。これらの準位は、1) 最低Landau準位が磁場に依存せず、2) その他の準位のエネルギーが準位指数と磁場の関数としてsub-linearな振る舞いを示すことから、表面Dirac電子に起因すると結論できます。分光イメージングを行い、電子状態の空間分布を詳細に調べることにも成功しました。最低Landau準位エネルギー、すなわち、Dirac点のエネルギーをマッピングしたところ、Dirac点が深く局所的な電子濃度が高い場所は、Se欠損と思われる欠陥が多い場所と対応していることがわかりました。この結果は、Se欠陥がドナーとして働き、ポテンシャル分布を決定していることが示唆されます。さらに、実空間におけるLandau軌道はポテンシャルの極小点、あるいは極大点に巻きつくように局在し、Landau準位エネルギーではドリフト状態を形成するという、量子Hall状態で期待される振る舞いも観測されています。

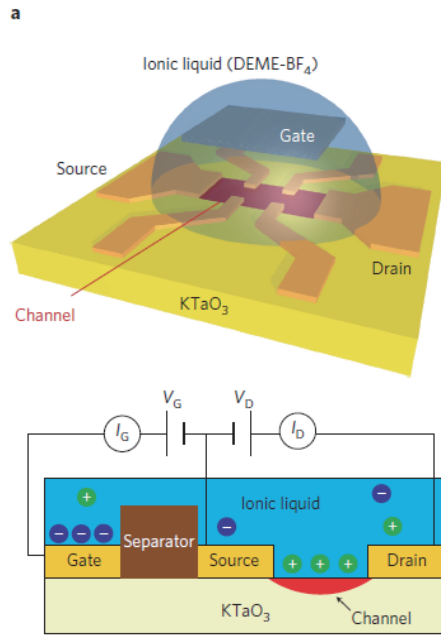
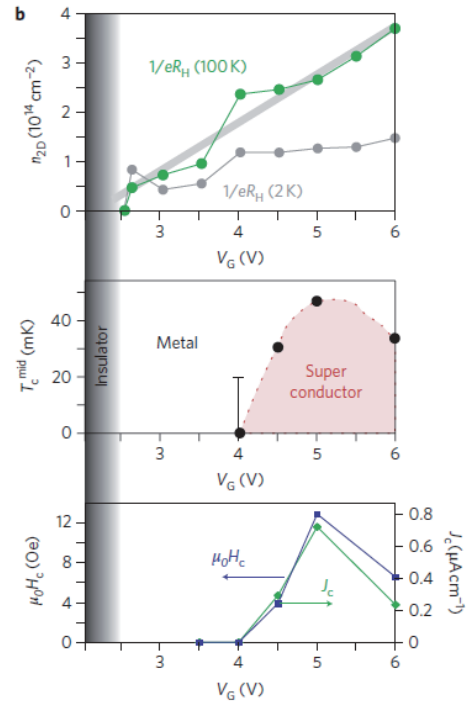


図5：電気二重層トランジスタ

2. 電場効果による表面超伝導

上野と野島のグループは電気二重層トランジスタ構造(図5)をSrTiO₃(100)表面上に作製することにより、電界効果のみで絶縁体表面を超伝導体に変換することに成功してきました(図6) [1]。最近では、化学ドーピングの方法では観測例のない、KTaO₃(100)表面の超伝導も電界効果により発見しました [2]。これらは本研究手法が新超伝導物質探索にも優れたポテンシャルを発揮することを示しています。一方、電界誘起超伝導の母体となる二次元電子ガス系に目を向けると、電場(三角ポテンシャル)によって電子が束縛され空間反転対称性が破れている(ラシュバ型スピン軌道相互作用が働く)という、従来の金属薄膜超伝導体とは本質的に異なる下地が整っており、新奇な超伝導状態および発現機構が期待されます。その一つとして注目しているのが、超伝導の自己組織化ともいふべき現象です。SrTiO₃(100)の電界誘起超伝導の性質を詳しく調べると、超伝導有効厚さや超伝導転移温度が、常伝導状態でのキャリア面密度にほとんど依存しないとい

図6：KTaO₃(100)表面超伝導の転移温度と輸送特性

う、特異な性質が観測されます。系が超伝導に転移する際、エネルギー的に最適になるよう(最も T_c が高くなる場所を目指して)、その電子状態が自己組織化的に変調すると仮定すると実験結果をうまく説明できます(論文執筆中)。

[1] "Electric-field-induced superconductivity in an insulator", K. Ueno, *et al.*, Nature Mater. **7**, 855 (2008).

[2] "Discovery of superconductivity in KTaO₃ by electrostatic carrier doping", K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, H. T. Yuan, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa and M. Kawasaki, Nature Nanotech. **6**, 208 (2011).