

超伝導における疎と密のクロスオーバーを実現 — 2次元結晶を用いて素粒子の普遍的な性質を明らかに —

1. 発表者：

中川 裕治 (研究当時：東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程)

笠原 裕一 (京都大学 大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 准教授)

野本 拓也 (東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 助教)

有田 亮太郎 (東京大学 大学院工学系研究科物理工学専攻 教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター計算物質科学研究チーム チームリーダー)

野島 勉 (東北大学 金属材料研究所 准教授)

岩佐 義宏 (東京大学 大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター、同研究科物理工学専攻 教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発デバイス研究チーム チームリーダー)

2. 発表のポイント：

- ◆ 2次元結晶 (注1) を電圧で制御することで、超低電子密度超伝導を実現した。
- ◆ 通常の超伝導体が属する電子の高密度状態 (バーディーン・クーパー・シュリーファー極限) から、低密度状態 (ボース・アインシュタイン凝縮極限) へのクロスオーバーが起きていることを実証した。
- ◆ 超伝導のみならず、電子と類似する素粒子への理解を深めるための重要な基点となる。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター、物理工学専攻の岩佐義宏 教授 (理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発デバイス研究チーム チームリーダー兼任)、中川裕治 大学院生 (研究当時) らの研究グループは、同研究科の有田亮太郎 教授 (理化学研究所創発物性科学研究センター計算物質科学研究チーム チームリーダー)、野本拓也 助教、京都大学大学院 笠原裕一 准教授、東北大学金属材料研究所 野島勉 准教授らと共同で、層状窒化物・塩化窒化ジルコニウム ($ZrNCl$) 2次元結晶の超伝導状態を、イオンゲート法 (注2) によって電子密度を制御することにより、通常の超伝導体が属する、電子が高密度の極限から、低密度極限への移り変わり (クロスオーバー) を実現しました。

電気抵抗がゼロになることで知られる超伝導は、物質中の電子が対を組むことで引き起こされます。通常の超伝導体では、電子が高密度に存在し、電子対が無数に重なり合った状態にあります。一方で、電子の密度が小さく電子対の重なりが無い場合、超伝導は異なる機構で生じると考えられています。これら2種の超伝導の間の移り変わりを1つの物質で実現することは、これまでになされていませんでした。

本研究では、 $ZrNCl$ の電子数を精密に制御することで、電子密度を減らし、クロスオーバー領域に到達したことを実証しました。電子が高密度な領域では、電子は対を作ると同時に超伝導になります。ところが、電子密度を小さくするにつれ、電子が対を形成しても超伝導にならない状態が見られるようになります。そしてより温度を冷却して初めて抵抗がゼロの超伝導に転移することが明らかになりました。このように、密度を極限まで小さくすると超伝導の様相が大きく変化することは、超伝導に普遍的な現象であると考えられます。これらの研究成果

は、電子をはじめとするフェルミ粒子（注3）の集合体の本質的な性質を解明したもので、より高い転移温度を持つ超伝導体を探求するための礎となることが期待されます。

本研究成果は、米国科学雑誌「Science」（3月18日付）に掲載されました。

4. 発表内容：

①背景

超伝導は、医療機器やリニアモーターカー、量子コンピューターへの応用が期待されている現象です。そして、電気抵抗がゼロになる、磁場が外に押し出されるといった性質を持つ、最も劇的な物理現象の1つです。著名なBCS理論（注4）によって説明されるような通常の超伝導は、電子の密度が非常に高い状態で実現します。このとき、超伝導に重要な電子間の引力は非常に弱く、電子対（クーパー対）は大きく広がっており、互いに重なり合っています（BCS極限、図1左）。一方で、電子の密度が低くなってゆくと、電子間の距離が大きくなり、電子間の結合は相対的に強くなります。そのため、電子対が重ならず存在する状態になり、ボース・アインシュタイン凝縮（BEC、注5）による超伝導が起こると考えられています（BEC極限、図1右）。BCS極限からBEC極限へのクロスオーバーの実現は、高い超伝導転移温度を目指すため、また超伝導の性質を詳らかにするために待望されていました。しかし、電子の数を減らすことは超伝導そのものを消失させることにつながるため、これまで超伝導体におけるBCS-BECクロスオーバーは実現されていませんでした。

②研究内容

本研究では、2次元結晶として知られる、層状窒化物・塩化窒化ジルコニウム（ZrNCl）に着目しました。図2に示すように、ZrNClをデバイスに加工し、イオンゲート法によって層間に挿入するリチウムの量を調整することで、精密な電子数制御を行いました。これにより、これまでにない低電子密度領域での超伝導を実現しました。このデバイスに、電子対の形成を検出するためのトンネル分光と呼ばれる測定が可能な仕組みを加え、電気抵抗測定と組み合わせることで、電子の振る舞いを系統的に調べました。その結果、電子の密度を低下させてゆくと、電子間の相対的な結合の強さを表す指標（ Δ/E_F ）が、BCS極限とBEC極限のクロスオーバー領域を示す値に達したことを確認しました。

電子密度が高く、電子間の結合が弱い時は、電子は一つ一つばらばらに存在している状態から、一気に電子対を作って超伝導になります（図3）。一方、電子密度が低くなり、電子間の結合が強くなってゆくと、電子がいったん対を組んでも超伝導にならない、擬ギャップと呼ばれる相が高温に表れます。超伝導は、さらに温度を下げて初めて現れることを明らかにしました（図3）。しかも超伝導転移温度は、電子密度を低くすると上昇する傾向を示し、これらの振る舞いは、理論的に予想されていた傾向とよく一致しています。

ZrNClのような2次元超伝導体では、超伝導転移温度を電子の運動エネルギーで規格化した値に上限があることが知られています。すなわち、ある電子密度に対して、実現される超伝導転移温度には限りがあります。本研究における超伝導転移温度は、その上限値に到達しており、BCS-BECクロスオーバー領域において、電子数に対する超伝導転移温度を最大化できることがわかりました。

③今後の展望

本研究ではZrNClをデバイス化し、電圧によって電子数を変化させ、BCS-BECクロスオー

バーを実現しました。このような手法で電子密度を制御し、BCS 極限から BEC 極限への連続的な移り代わりを実現できることは、超伝導への理解を深める上で重要な基点となります。そこで転移温度が最大化されるという知見は、さらに高い転移温度を目指すために重要です。

BCS-BEC クロスオーバーは、電子が生じる超伝導だけでなく、冷却原子気体や、宇宙における中性子星においても議論されている普遍的な現象です。物性物理だけでなく、物理学の発展に幅広く寄与するものと期待できます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Science」（3月18日オンライン速報版）

論文タイトル：「Gate-controlled BCS-BEC crossover in a two-dimensional superconductor」

著者： Yuji Nakagawa, Yuichi Kasahara, Takuya Nomoto, Ryotaro Arita,
Tsutomu Nojima, Yoshihiro Iwasa*

論文 URL*：<https://science.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.abb9860>

*URL は現地時間の 3 月 18 日（木）中に有効化されました。

6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター
教授 岩佐 義宏（いわさ よしひろ）

<報道に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

京都大学 総務部広報課 国際広報室

東北大学 金属材料研究所 情報企画室広報班

理化学研究所 広報室

7. 用語解説：

注1： 2次元結晶

層状の構造を持つ結晶のこと。特に、層の間が弱い分子間相互作用によって形成されているものを指す。グラフェンのように単層まで薄くした際の特異な物性が注目されている一方、複数層ある場合は、層の間にアルカリ金属などを挿入することで電子状態を変化させることができる。

注2： イオンゲート法

電界効果トランジスタ（FET）における絶縁層を電界液で置き換えたデバイス構造を用いた、物性制御手法。測定対象となる試料を FET におけるチャネル部として用いる。電解液中のイオンはゲート電圧によって制御され、チャネル表面に集まる、チャネル表面を削る、チャネルが層状物質の場合、層間に入り込む（本研究）といった様々な動作を行う。

注3： フェルミ粒子

素粒子はフェルミ粒子とボース粒子に大別される。電流を担う電子は、フェルミ粒子に分類される。

注4： BCS 理論

超伝導を説明する最も基本的な理論。BCS とは、提唱者のバーディーン、クーパー、シュリーファーの頭文字。電子が、クーパー対と呼ばれる対を作ることによって、超伝導が生じることを示し、スズのような単元素金属における超伝導の性質を、定量的に説明することに成功した。BCS 理論によって説明される超伝導を、従来型超伝導などと呼ぶ。

注5： ボース・アインシュタイン凝縮

ボース粒子が、低温で最低エネルギー状態に凝集すること。電子はフェルミ粒子であるが、対を組むと、ボース粒子と見なせるようになる。ボース・アインシュタイン凝縮によって、超伝導状態となる。

8. 添付資料：

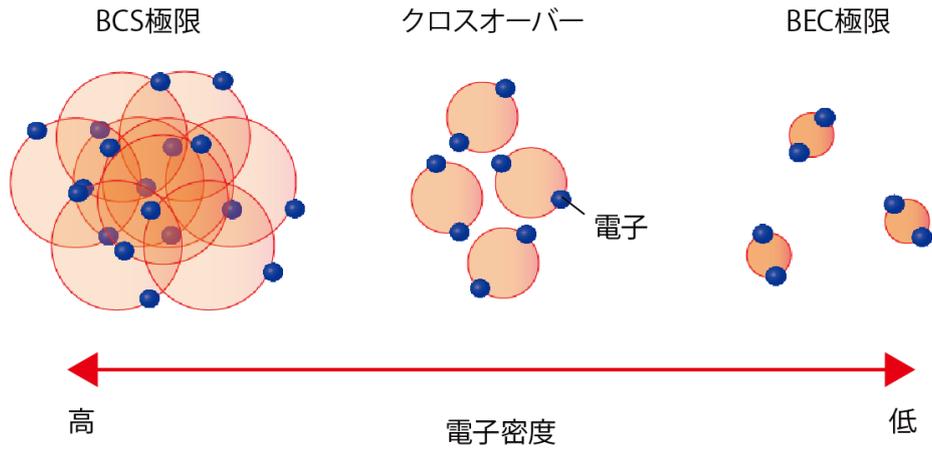


図1. BCS 極限、BEC 極限、その移り変わり（クロスオーバー）の模式図。超伝導状態では電子が対を組んでおり、その重なりが電子密度によって異なる。

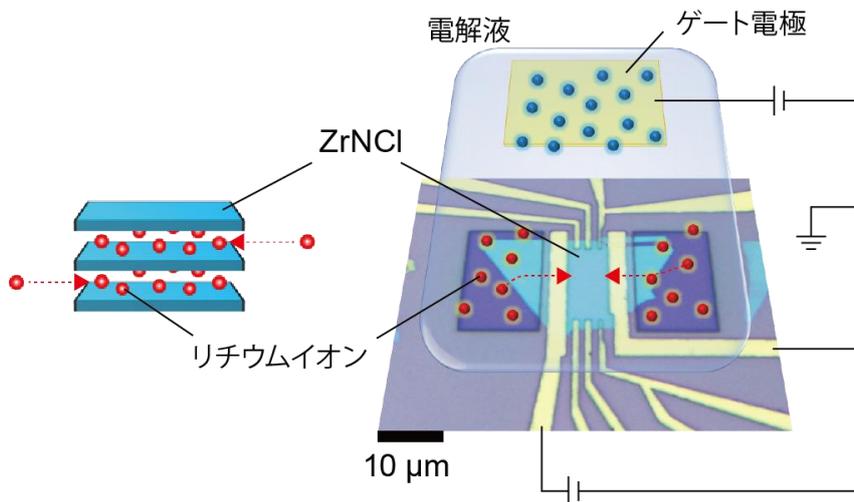


図2. ZrNCI を用いたイオンゲートデバイスの模式図。ZrNCI の層間に入るリチウムイオンの量を、ゲート電圧によって制御することができる。

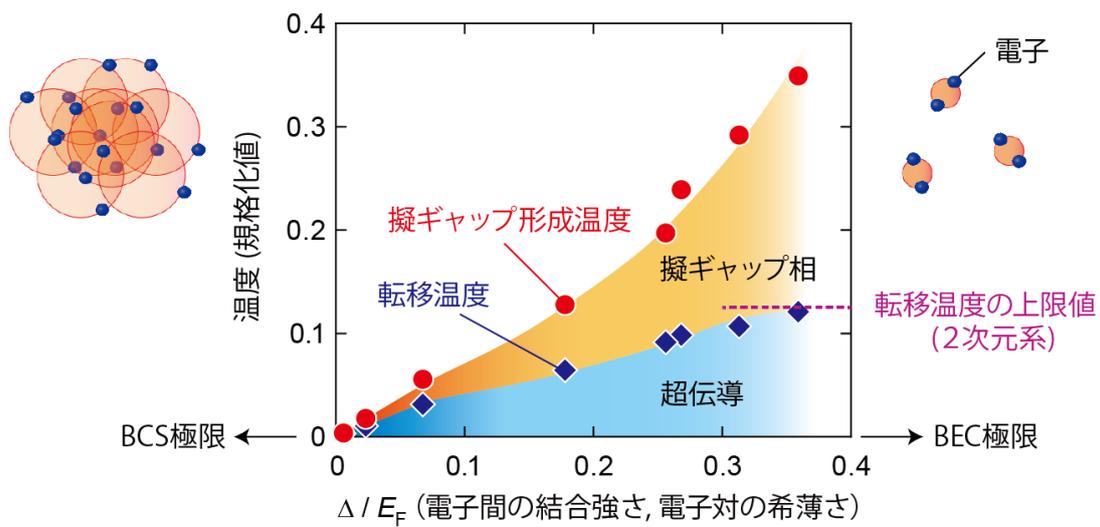


図3. 本研究で得られた ZrNiCl の超伝導相図。縦軸は電子の運動エネルギーで規格化された温度、横軸は電子間の結合の相対的な強さ、すなわち電子対の希薄さを表すパラメータである。電子対の重なりが小さくなった BCS-BEC クロスオーバー領域で、転移温度の上限値（紫破線）に到達している。枠外の図は BCS 極限、BEC 極限における電子対の模式図。