

220 K まで局在するクーパー対を発見

～高温超伝導の理解につながるボースグラス状態を実証～

ポイント

- ・ 約 220 K の高温まで局在したクーパー対の存在を示すボースグラス状態を実証。
- ・ β 関数スケーリング解析により、新しいボソン局在状態を明らかに。
- ・ 高温超伝導体の電子状態の理解に新たな視点。

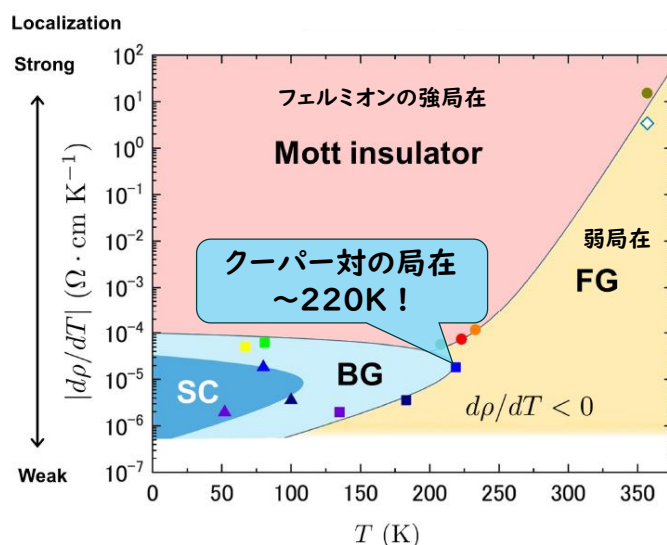
概要

北海道大学大学院理学研究院の延兼啓純助教らの研究グループは、ルテニウム酸化物 Ca_2RuO_4 ナノ薄膜において、電子対（クーパー対）*1 が約 220 K という高温まで局在した状態で存在することを示すボースグラス*2 状態を発見しました。これまでボースグラス状態は主に極低温で研究されてきましたが、強い電子相関*3 を有する酸化物で高温まで存在するかは明らかになっていませんでした。

研究グループは、膜厚を精密に制御したナノスケール試料の電気輸送測定と β 関数スケーリング解析*4 を行い、電子が局在するフェルミグラス状態と、クーパー対が局在するボースグラス状態を明確に識別しました。さらに、超伝導相・ボースグラス相・強局在相を結ぶ新しい電子相図を構築するとともに、電子相関、 RuO_6 八面体*5 の構造変化、低次元性が協調して電子の基底状態を決定することを明らかにしました。

本研究は、高温で局在するクーパー対の存在を示す新しい知見を提供するとともに、高温超伝導体である銅酸化物やニッケル酸化物で議論されている超伝導前駆状態や擬ギャップ状態を理解する新たな視点を与える成果です。高温超伝導発現機構の解明や、新しい量子材料の設計指針につながることを期待されます。

なお、本研究成果は、2026 年 9 月 16 日（水）公開の Communications Materials 誌にオンライン掲載されました。



膜厚を制御することで電子相関の強さが変化し、超伝導（SC）、ボースグラス（BG）、フェルミグラス（FG）、モット（Mott）絶縁体の各状態が現れる。ボースグラス相は約 220 K まで広がり、高温で局在したクーパー対の存在を示唆する。

【背景】

超伝導は、電子が二つ一組になった「クーパー対」が試料全体で協調して運動することで、電気抵抗が完全にゼロになる量子現象です。しかし近年、超伝導になる前の段階でもクーパー対そのものは存在し、それらが局在して自由に動けない状態が存在する可能性が注目されています。この状態は「ボースグラス状態」と呼ばれ、超伝導発現の前駆状態として重要視されています。

これまでボースグラス状態は、1990年代から盛んに研究されてきた二次元超伝導体の超伝導-絶縁体転移や、近年の二次元遷移金属ダイカルコゲナイドなど、比較的弱い電子相関を持つ物質を中心に研究されてきました。一方、銅酸化物やルテニウム酸化物などの強相関電子系では、電子同士の強い相互作用がクーパー対の形成や局在にどのような役割を果たすのかはほとんど分かっていませんでした。

近年、研究グループでは銅酸化物薄膜において β 関数スケーリング解析を用いることで、クーパー対が局在したボースグラス状態を報告しました (K. Takahashi *et al.*, Scientific Reports 13, 12434 (2023))。本研究では、ルテニウム酸化物 Ca_2RuO_4 ナノ薄膜の膜厚を制御することで電子相関の強さを変化させ、ボソン局在の発現条件を系統的に調べました。その結果、局在したクーパー対が約 220 K という従来の常識を超える高温まで存在することを明らかにしました。

【研究手法】

強い電子相関を有するルテニウム酸化物 Ca_2RuO_4 のナノスケール単結晶を作製し、電子ビームリソグラフィ技術を用いて微細電極を形成することで、膜厚の異なる輸送測定デバイスを作製しました (図 1)。また、比較試料として分子線エピタキシー (MBE) 法により高品質な Ca_2RuO_4 薄膜を作製し、膜厚や結晶構造を精密に制御しました。異なる作製手法で得られた試料を比較することで、電子状態が膜厚だけでなく結晶構造とも密接に関係していることを検証しました。

これらの試料について、室温から極低温まで電気抵抗の温度依存性を詳細に測定するとともに、輸送現象を解析する β 関数スケーリングを適用しました。この解析により、電子が局在した「フェルミグラス状態」と、電子対 (クーパー対) が局在した「ボースグラス状態」を定量的に識別することが可能になります。

【研究成果】

測定の結果、室温から約 120 K までの電気抵抗の変化率から、さらに低温で実現する電子の基底状態を予測できることを見いだしました。膜厚を変えることで電子相関の強さを制御でき、その結果として超伝導相、ボースグラス相、フェルミグラス相、モット絶縁体相へと電子状態が系統的に変化することを明らかにしました。

電子輸送の解析から、フェルミグラス状態では電気伝導率が $\ln T$ に比例して変化するのに対し、ボースグラス状態では電気抵抗率が $\ln(1/T)$ に比例するという、互いに対照的な温度依存性を示すことを発見しました。これは、電子が局在した状態と、電子対 (クーパー対) が局在した状態とを区別する新しい指標となります。

また、本研究では、伝導現象を特徴づける β 関数スケーリング解析を適用しました。その結果、ボースグラス状態において従来の電子局在では見られない「垂直フロー (Vertical Flow)」と呼ばれる特徴的なスケーリング挙動を見いだしました (図 1)。この結果は、クーパー対が局在したまま輸送を担う「ボソン輸送」の存在を強く支持するものです。さらに、この解析から、超伝導相とボースグラス相、及びボースグラス相と強局在相との間に二つの量子臨界点が存在することも明らかになりました (図 2)。

これらの結果は、クーパー対が超伝導転移温度よりはるかに高い約 220 K まで局在した状態で存在する可能性を示しています。ルテニウム酸化物 Ca_2RuO_4 ナノ薄膜では、膜厚によって電子相関の強さが変化し、それに RuO_6 八面体の構造変化や低次元性が組み合わさることで、電子の基底状態が決定されることを明らかにしました。本研究は、高温における局在クーパー対の存在を示すとともに、強相関電子系における新しい量子状態の理解につながる重要な成果です。

【今後への期待】

今回明らかになった「高温で局在するクーパー対」は、ルテニウム酸化物のみならず銅酸化物やニッケル酸化物など高温超伝導体で議論されている超伝導前駆状態や擬ギャップ状態の理解にも新たな視点を与えると期待されます。さらに、局在したボソンを利用した新しい量子輸送現象の開拓や、高温超伝導発現機構の解明、新たな量子材料設計への展開が期待されます。

【謝辞】

本研究は稲盛財団、池谷科学技術振興財団、サムコ科学技術振興財団、八洲環境技術財団、日本板硝子材料工学助成会、住友財団の支援を受けて行われました。

論文情報

論文名 Bose glass in Ca_2RuO_4 nanofilms (Ca_2RuO_4 ナノ薄膜におけるボースグラス)
著者名 延兼啓純^{1, 2}、廣瀬耕大³ (研究当時)、磯野 翔³ (研究当時)、東泉瑞希⁴ (研究当時)、迫田将仁^{2, 5}、高橋是清⁴ (研究当時)、丹田 聡^{2, 5} (研究当時) (¹北海道大学大学院理学研究院、²北海道大学量子トポロジー理工学教育研究センター、³北海道大学大学院理学院、⁴北海道大学大学院工学院、⁵北海道大学大学院工学研究院)
雑誌名 Communication Materials (物理学の専門誌)
DOI 10.1038/s43246-026-01325-4
公表日 2026 年 9 月 16 日 (水) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 助教 延兼啓純 (のぶかねひろよし)

T E L 011-706-4431 F A X 011-706-4927 メール nobukane@sci.hokudai.ac.jp

U R L <https://sites.google.com/eis.hokudai.ac.jp/nobukane>

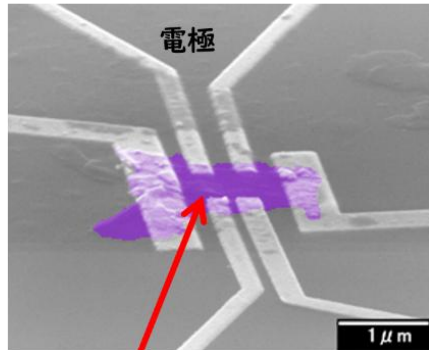
配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

ナノスケール単結晶デバイス



Ca_2RuO_4 試料

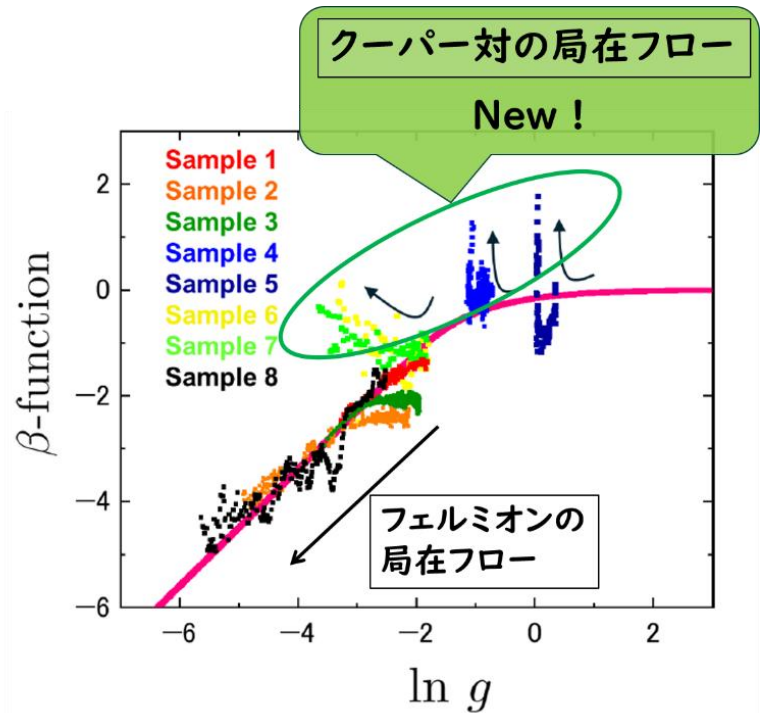


図 1. Ca_2RuO_4 ナノ薄膜デバイスとボースグラス状態を示す β 関数スケーリング解析。

- (左) ナノスケール単結晶 Ca_2RuO_4 を用いた輸送測定デバイスの走査電子顕微鏡 (SEM) 像。電子ビームリソグラフィーにより微細電極を形成し、膜厚の異なる試料の電気輸送特性を測定した。
- (右) β 関数スケーリング解析で観測されたボースグラス状態に特徴的な垂直フロー。この特徴的なスケーリング挙動は、電子ではなく局在したクーパー対によるボソン輸送を示しており、本研究で発見したボースグラス状態の決定的な証拠となった。

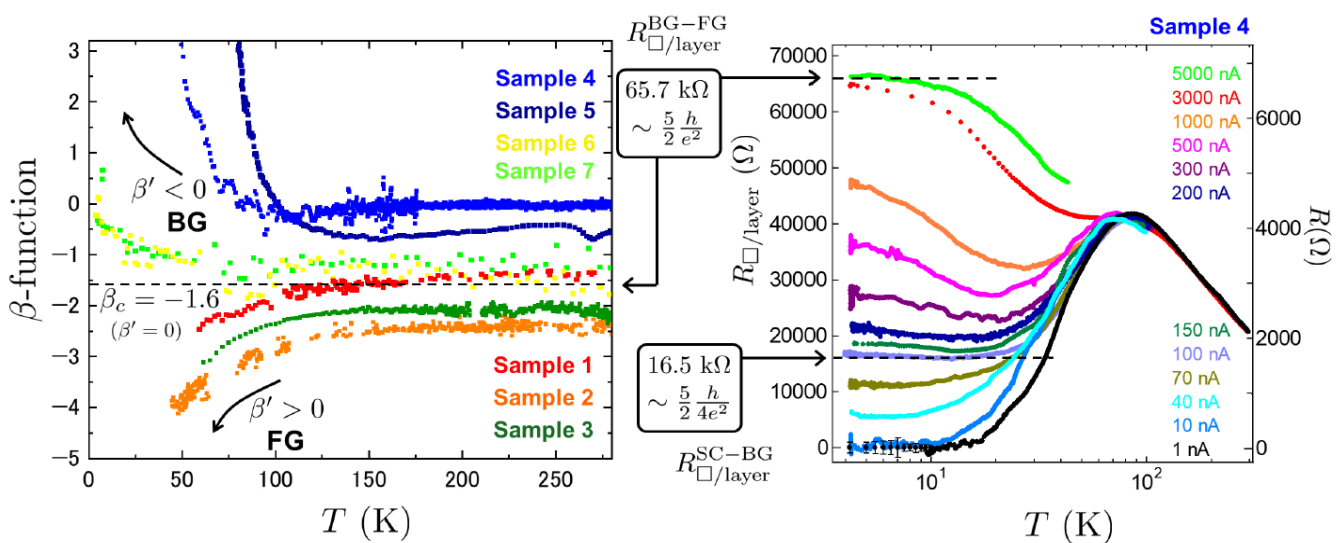


図 2. β 関数の温度依存性 (左) とシート抵抗の温度依存性 (右)。

【用語解説】

- *1 電子対（クーパー対） … 電子同士が引力によって対を形成した状態。超伝導では、この電子対が集団として運動することで電気抵抗がゼロになる。
- *2 ボースグラス … 電子対（クーパー対）が存在するものの、電子相関やフラストレーションによって局在し、試料全体として超伝導になれない量子状態。
- *3 電子相関 … 電子同士が互いに強く影響し合う性質。電子相関が強い物質では、通常の金属とは異なる超伝導や絶縁体など多様な量子状態が現れる。
- *4 β 関数スケーリング解析 … 電気伝導の変化をスケール則に基づいて解析する手法。電子輸送を支配する物理機構や量子臨界点を調べるために用いられる。本研究では、フェルミグラス状態とボースグラス状態を識別する重要な解析手法として用いた。
- *5 RuO₆八面体 … ルテニウム（Ru）原子の周囲を6個の酸素（O）原子が取り囲んだ結晶構造の基本単位。この八面体の傾きや回転は電子の運動や電子相関の強さを変化させ、物質の性質に大きな影響を与える。