

隠れた電子ネマティック秩序をもたらす異常金属状態

[1] 要旨

強相関電子系において、しばしば電気抵抗率が低温領域で温度に比例して変化する振る舞いが観測される。これは金属中の電子状態を取り扱う標準理論では完全には説明できず、異常金属と呼ばれその機構は謎に包まれている。これまで、この異常金属状態は反強磁性状態が現れる近傍でみられることがほとんどだったのに対し、本研究は、鉄系超伝導体 $\text{Ba}_{1-x}\text{Rb}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ において反強磁性相から十分離れた領域で異常金属的振る舞いが現れることを明らかにした。そこでは、電子系が回転対称性を破ろうとする揺らぎが臨界的に発達していると考えられ、それと観測された異常金属との関係が示唆された。

[2] 本文

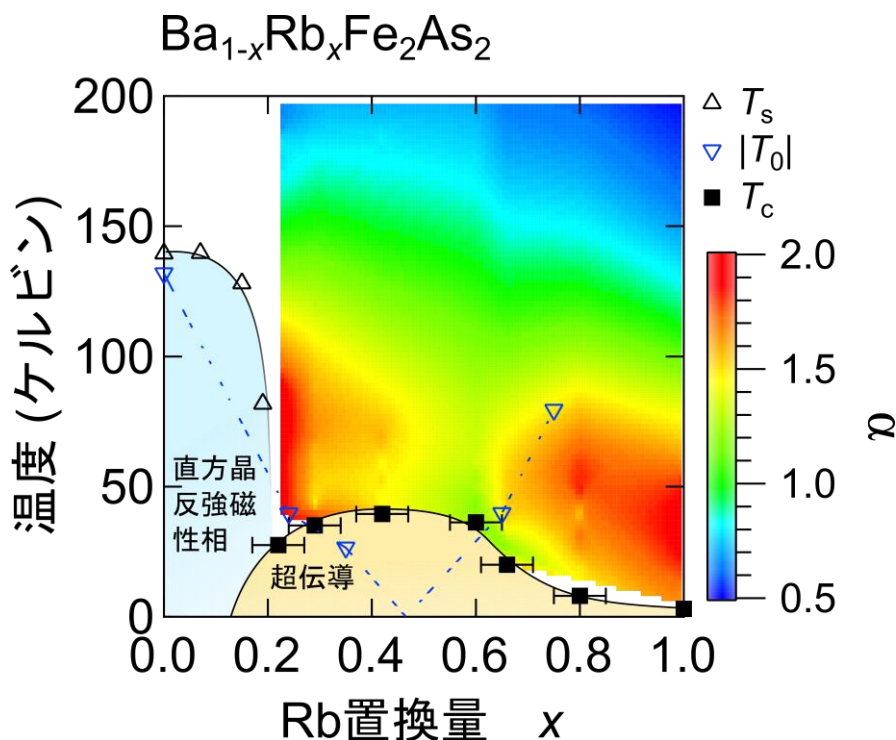
金属の電気抵抗率とはどのくらいその物質が電気を流しやすいかを表す重要かつ基本的な物理量である。これは身近で一見単純なものに思えるが、実はその背後には非常に奥深い物理が潜んでいる。微視的に考えると、電気抵抗が生じるのは電場下で流れている電子が他の何かにぶつかり、散乱されることに起因する。結晶中で電子をこのように散乱させ得るものは、主として他の電子か結晶格子 (phonon) である。これらの散乱機構を考慮すれば、単体金属の電気抵抗の温度依存性はおおよそ理解できるということがよく知られている。

しかしながら、電子間の Coulomb 反発が強く働く強相関電子系においては低温領域で電気抵抗率が温度に比例して変化していることがしばしば観測される。この温度領域では結晶格子の振動は小さく、主に電子同士の散乱が電気抵抗の温度依存性を決めている。金属の電子状態を記述する標準理論として知られる Fermi 液体論によれば、電子が Fermion であることに由来して電気抵抗率は温度の 2 乗に比例して変化することが期待される。ところが観測された電気抵抗率は温度に比例しており、この標準理論では説明できず、異常金属状態と呼ばれている。異常金属状態の原因解明は今も固体物理学分野における重要課題の 1 つである。これまで、異常金属状態は反強磁性状態への相転移がちょうど絶対零度付近まで抑制されて消失した状態の近傍で頻繁に観測されていた。それらにより、強く発達している反強磁性状態への揺らぎが温度に比例した電気抵抗率の要因ではないかというアイデアを生み、その詳しいメカニズムを説明する理論が構築され理解が大きく進んできた。

この問題に対し、最近、東京大学、産業技術総合研究所の共同研究グループは、鉄系超伝導体 $\text{Ba}_{1-x}\text{Rb}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ の様々な組成の単結晶を合成し、それらの電気抵抗率の温度依存性を系統的に測定した。母物質である BaFe_2As_2 は低温で反強磁性状態へ転移すると同時に 4 回回転対称性を持つ正方晶から 2 回対称な直方晶へ回転対称性を破る構造相転移を示す。そこでは、測定の結果、Ba の一部を Rb に置換していき反強磁性状態が完全に消失した後、さらに置換量を増やした組成近傍において電気抵抗率が温度に比例して変化する領域が現れることが明らかにされた。この組成では反強磁性への不安定性は弱まっていると考えられる。その一方で、構造相転移は消失しているものの、電子系が回転対称性を破ろうとする不安定性は依然として強く残っていることが最近他の実験から報告されており、その不安定性が観測された異常金属的振る舞いに関係している可能性が示唆された。この成果は、JPSJ の 2022 年 10 月号に掲載された。

何らかの微視的機構により電子系が自発的に回転対称性を破った状態は、液晶におけるネマティ

ック秩序との類推から電子ネマティック秩序と呼ばれ、最近様々な強相関電子系で報告されている。本研究はそのような電子ネマティック秩序への不安定性が $\text{Ba}_{1-x}\text{Rb}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ の異常金属状態を生じさせている可能性を実験的に提示するものであり、異常金属状態の原因として反強磁性状態以外の例としては数少ないものである。しかしながら、超伝導転移温度が比較的高い組成においてはより低温までの電気抵抗率の測定をすることが非常に困難であるため、今後さらなる実験や、その微視的なメカニズムを説明する理論の構築が期待される。



(図 1) 鉄系超伝導体 $\text{Ba}_{1-x}\text{Rb}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ の Rb 置換量 x に対する電子状態の相図。カラープロットは電気抵抗率のべき α ($\rho(T) = \rho_0 + AT^\alpha$) を表している。 T_0 は先行研究で得られた電子ネマティック秩序と関連した揺らぎが発散する温度を表し、その温度の絶対値 $|T_0|$ が示されている。べき α が 1 に近い領域が反強磁性・構造相転移温度 T_s が消える組成ではなく T_0 が 0 K となる組成付近を中心として現れていることがわかる。

原論文 (2022 年 9 月 30 日公開済)

Charge Transport in $\text{Ba}_{1-x}\text{Rb}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ Single Crystals

Masaya Tsujii, Kousuke Ishida, Shigeyuki Ishida, Yuta Mizukami, Akira Iyo, Hiroshi Eisaki, Takasada Shibauchi: J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 104706 (2022).

<情報提供：石田浩祐*¹ (東京大学)、芝内孝禎 (東京大学) >

*¹ 現所属 (Max-Planck-Institute for Chemical Physics of Solids)