HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	A mechanism of high-temperature superconductivity from orbital nematic fluctuations and its possibility in iron pnictides and chalcogenides [an abstract of entire text]
Author(s)	我妻, 友明
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 http://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第13124号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/73640
Type	doctoral thesis
File Information	Tomoaki_Agatsuma_summary.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 約

博士の専攻分野の名称　博士（理　学）　氏　名　　我妻 友明

学 位 論 文 題 名

A mechanism of high-temperature superconductivity from orbital nematic fluctuations and its possibility in iron pnictides and chalcogenides

（軌道ネマチック揺らぎによる高温超伝導機構と
鉄ニクタイド・カルコゲナイドにおけるその可能性）

2006 年に Kamihara らによって発見された鉄系超伝導体は、銅酸化物高温超伝導体と同様に超伝導層とブロック層が積層した構造であり、銅酸化物高温超伝導体に次ぐ高い超伝導転移温度を示す物質群である。鉄系超伝導体の典型的な相図において、反強磁性金属相と超伝導相が隣接しているため、この系では反強磁性揺らぎが高温超伝導を引き起こすという理論が考えられてきた。この理論では、離れた 2 つのフェルミ面ポケットのネスティングによって反強磁性揺らぎが発達し、$s_{\pm}$波の対称性を持つ超伝導が発現する。一方で、同じ相図において、系の方向対称性のみが破れる電子ネマチック相も存在している。この電子ネマチック相の方が反強磁性相よりも超伝導相の近くに存在しているため、電子ネマチック揺らぎも鉄系超伝導体の高温超伝導に重要であることが期待される。

そこで、本学位論文では、軌道の自由度に起因する電子ネマチック、つまり軌道ネマチックに着目して、その揺らぎによる超伝導メカニズムを解明することを第一の課題とする。実際の物質では、スピンの揺らぎも存在しているために、軌道ネマチックと同じ理論の枠組みでスピン揺らぎによる超伝導メカニズムも明らかにすることが第二の課題である。さらに、両者の揺らぎが存在した場合の超伝導メカニズムも明らかにし、鉄系超伝導体の高温超伝導メカニズムに理論的知見を与えるのが第三の課題である。本学位論文は、この３課題から成る。

先行研究として、2010 年の Yanagi, Yamakawa, Ōno による Eliashberg 理論を用いた研究がある。その研究によって、軌道ネマチック揺らぎが s_{++}波の対称性を持つ超伝導を引き起こすことが明らかになった。しかし、電子の自己エネルギー効果を無視しており、近似の粗さから、超伝導転移温度は非現実的な高温となった。そのため、軌道ネマチック揺らぎによる超伝導が高温超伝導になるかどうかについては、明らかにならなかった。2013 年に Yamase と Zeyher は、電子の自己エネルギー効果を考慮した Eliashberg 理論を用いたところ、軌道ネマチック揺らぎによって現実的な超伝導転移温度が得られることが分かり、軌道ネマチック揺らぎが新しい高温超伝導メカニズムになる可能性を明らかにした。しかしながら、超伝導ギャップ関数がフェルミ面上で等方的だと仮定されていたため、超伝導ギャップの構造については明らかになっていなかった。超伝導ギャップは角度分解光電子分光で観測されるので、軌道ネマチック揺らぎによる超伝導ギャップの構造が明らかになれば、鉄系超伝導体において軌道ネマチック揺らぎによる超伝導の可能性をさらに踏み込んで議論できる。

本研究では、軌道ネマチックのミニマル模型である二バンド模型を用いて、軌道ネマチック揺らぎによる高温超伝導機構の理論を確立する。そのため、鉄系超伝導体で観測されている典型的

なホールポケットと電子ポケットを再現するバンドパラメタを用いて、電子の自己エネルギー効果と超伝導ギャップ関数のフェルミ面上での波数依存性の両方を考慮して Eliashberg 方程式を解析した。ノーマル状態から超伝導転移する場合、超伝導のギャップ関数は各フェルミ面ポケット上でほぼ等方的であり、等方的な超伝導ギャップを仮定した先行研究と定量的にもほぼ一致することが分かった。軌道ネマチック状態では、軌道ネマチック揺らぎは抑制されるが、その揺らぎによっても超伝導転移が可能である。この場合、電子ポケット上では超伝導ギャップはほぼ等方的である一方、ホールポケット上では大きな異方性が生じることが分かった。超伝導ギャップの異方性は、フェルミ面ポケットを占める軌道成分で理解出来、軌道ネマチック秩序によってエネルギーの下がった電子軌道が主要となる領域でギャップが大きくなることが分かった。超伝導ギャップの大きな異方性にも拘らず、超伝導転移温度は等方的な超伝導ギャップを仮定した場合とほぼ同じであった。

次に、同じ近似の範囲でスピン揺らぎによる超伝導不安定性を調べた。既に知られているように、離れたフェルミ面ポケットのネスティングによって反強磁性揺らぎが発達し、その揺らぎによって $s_{\pm}$波の対称性を持つ超伝導が誘起される傾向がある。しかし、電子の自己エネルギー効果、およびネスティングベクトルから大きくずれた小さな波数成分を持つ弱いスピン揺らぎによって、超伝導不安定性が劇的に抑制され、反強磁性相の近傍でも超伝導が生じないことが分かった。特に、後者の超伝導の抑制効果は驚くような理論的発見であった。スピン揺らぎによって超伝導は生じないものの、ギャップ関数の波数依存性を評価すると、ノーマル状態ではホールポケット上でほぼ等方的であり、電子ポケット上では大きな異方性が生じることが分かった。更に、軌道ネマチック状態では電子ポケットとホールポケットの両方で大きな異方性が生じる。

更に、軌道ネマチック揺らぎとスピン揺らぎを同時に考慮した時の超伝導不安定性も調べた。両者は競合的に働き、軌道ネマチック揺らぎによる超伝導不安定性がスピン揺らぎによって抑制されることが分かった。超伝導不安定性は、軌道ネマチック揺らぎによるもので、ギャップの対称性やその波数依存性に対するスピン揺らぎの効果は弱いことが分かった。ただし、反強磁性のごく近傍では、スピン揺らぎの効果によって、ギャップの対称性が s_{++}波から $s_{\pm}$波に変化する場合がある。

一般に超伝導ギャップの波数依存性は超伝導メカニズムの同定に重要である。現在得られている角度分解光電子分光のホールポケット上での実験結果は、軌道ネマチック揺らぎ、またはスピン揺らぎのいずれの超伝導メカニズムでもある程度よく理解出来ることが分かった。一方、電子ポケット上での実験結果は、スピン揺らぎよりも軌道ネマチック揺らぎの方が重要であることを示唆している。更に、超伝導転移温度に対して決定的に重要な点は、軌道ネマチック揺らぎによってのみ実験結果に相応しい超伝導転移温度が得られることである。この意味においても、軌道ネマチック揺らぎがスピン揺らぎよりも重要である。本研究で得られたこのような知見は、全く新しいものであり、鉄系超伝導体の高温超伝導メカニズムの解明に大きく貢献することが期待される。