

## 角運動量 $J=2$ のクーパー対が担う超伝導

### [1] 要旨

角運動量が  $l=1$  である複数の  $p$  波原子軌道をスピン  $s=1/2$  の電子が占有するような状況に、スピン軌道相互作用が働けば、合成角運動量  $j=l+s=3/2$  によって特徴づけられる電子系が実現する。そのような金属が低温で超伝導を発現したとすると、超伝導を担うクーパー対は  $J=2$  や  $J=3$  という大きな合成角運動量を持つことになる。 $j=3/2$  の電子がクーパー対を作って凝縮した超伝導体に固有な物理現象とは一体何だろうか？ その一つとしてスピン磁化率が考察されている。

### [2] 本文

超伝導現象を担うのは、二電子間に引力が働くことによって出来たクーパー対である。スピン  $s=1/2$  を持つ電子はフェルミ統計に従うために、クーパー対の波動関数に当たる二電子相関関数は二電子の入れ替えに関して奇の対称性を持つ。その結果、一様な超伝導秩序の対称性はスピン一重項・偶パリティか、あるいはスピン三重項・奇パリティにクラス分けされる。スピン軌道相互作用によってできた合成角運動量  $j=3/2$  という擬スピンを持つ電子がクーパー対を組んだ場合には、これら従来の対称性クラスの外に、擬スピン五重項・偶パリティや擬スピン七重項・奇パリティという角運動量の大きなクラスが新たに加わる。ハーフ・ホイスラー金属  $\text{YPtBi}$  で発現する超伝導がこのような新しいクラスに属するのではないかとされているが[H. Kim, et al., *Science Advances* **4**, eaao4513 (2018)]、更なる実験的検証が必要である。大きな角運動量をもつクーパー対に固有の物理現象を理論的に示すことができれば、実験的検証の際に強力な指針となりうる。

最近、北海道大学工学研究院応用物理学部門と理化学研究所創発物性科学研究センターとの共同研究により、 $J=2$  という擬スピン五重項・偶パリティ超伝導体のスピン帯磁率が理論的に調べられた。熱力学的に安定でありかつ時間反転対称性を守っている超伝導秩序パラメータをいくつか仮定して、スピン帯磁率を計算したところ、磁化率の対角成分が大きな異方性を持つことや非対角成分が有限に残ることなどが明らかになった。この成果は *JPSJ* の 2023 年 5 月号に掲載された。

スピン  $1/2$  の超伝導体ではスピン磁化率に非対角成分が現れない。スピン一重項の場合にはクーパー対がスピンを持たないことがその原因である。スピン三重項超伝導の事情は少し複雑である。まず、秩序を記述する三次元の  $d$  ベクトルの内、2つ以上の成分が有限であることが有限な非対角成分のために必要である。これに加えて、それら成分の積をフェルミ面の上で角度積分した結果が零にならない事も必要である。しかし奇パリティである関数の積を角度平均すれば、往々にして零になってしまう。まとめると、 $s$  波対称性のクーパー対がスピンを持たないことが  $s=1/2$  超伝導体のスピン磁化率に非対角成分が現れない理由である。 $j=3/2$  超伝導では、擬スピン五重項対称性のなかに、 $s$

波でありながら合成角運動量  $J=2$  を持つ超伝導秩序が可能である。もしそのような超伝導状態が安定に存在するならば、磁化率に非対角成分が現れると結論できる。

$j=3/2$  超伝導でのスピン帯磁率の計算結果を図に示す。五重項の超伝導秩序は五次元の  $\eta$  ベクトルを用いて表すことができる。 $\eta$  ベクトルの5成分の内、2つ以上の成分が有限であるとき、非対角成分が現れる。また、 $s$  波対称であるため、それら成分をフェルミ面上で角度積分した結果は零にならない。図はこの性質を確かめるために行なった計算結果の一例であり、議論を簡潔にするために  $\eta$  ベクトルの5成分のうち (a)では3成分、(b)では2成分、(c)では1成分とした。(a)と(b)では、磁化率に非対角成分(破線)が現れ、対角成分の異方性は(a)(b)(c)の順に大きくなっていることがわかる。 $\eta$  ベクトルの成分の数が減少すると、対角成分の異方性が大きくなる傾向は、 $s=1/2$  電子系のスピン三重項超伝導の場合と同様である。

$j=3/2$  超伝導は電子系が内部自由度を持つという意味で、多軌道/多バンド超伝導に含まれると考えることもできる。たとえば、時間反転対称性を破った超伝導状態のうち、フェルミ準位に準粒子が残るような状態の存在が指摘されている。ボゴリューボフ・フェルミ面と呼ばれる、この準粒子状態の存在は電子系が内部自由度を持つ超伝導体に共通する特徴であり、その物理的な性質を調べるのも今後の課題の一つである。

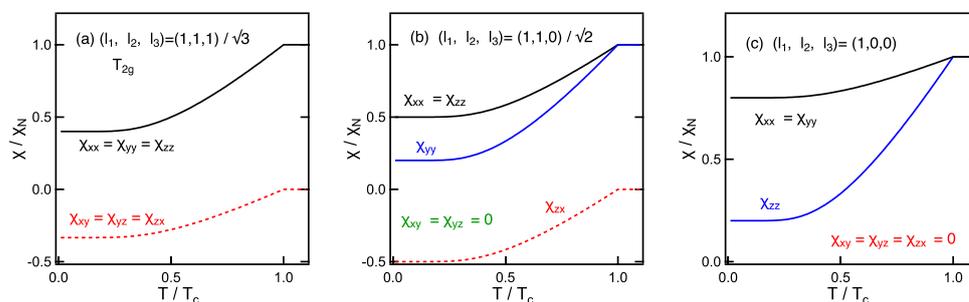


図 (原論文の Fig.2) : 磁化率の計算例。

原論文 (2023 年 4 月 7 日公開済)

[Spin Susceptibility of a J=3/2 Superconductor](#)

D. Kim, T. Sato, S. Kobayashi, and Y. Asano, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 054703 (2023).

<情報提供 : 浅野泰寛 (北海道大学工学研究院・応用物理学部門)

小林伸吾 (理化学研究所創発物性科学研究センター) >