

強磁性超伝導現象を記述する格子GLの 数値シミュレーションによる研究

名古屋工業大学大学院工学研究科
小澤秀敏

1 概要

2000年以降発見が続く強磁性超伝導物質は、新奇超伝導物質の一つとして多くの実験および理論物理学者の関心を集めている。これは従来強磁性と超伝導は相容れない物性であると信じられていた常識を覆すもので、競合する秩序の共存という普遍的な問題に深く関連するためである。本研究においてはこの現象を記述するために町田・大見氏により提唱されたGinzburg-Landau理論を空間格子上で再構築し、その格子GL理論を主に数値計算法により調べた。特に超伝導物質中には磁化が存在するため、自発的にvortex励起の出現が起こり、平均場近似等が適用できないためである。

2 強磁性超伝導を記述する格子GLモデル

強磁性超伝導における波動関数は、磁化下において2電子からなるクーパーペアが図1のように支配的なペアと弱いペアに分かれるので、2成分で表すことができる。今回は内部磁場を加えることで強磁性と見なし、その相構造の変化を調べた。

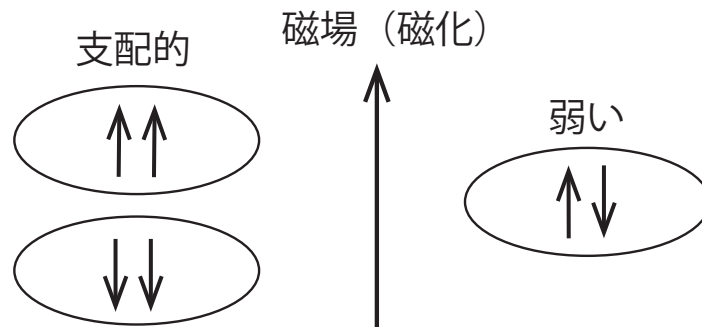


図 1: 強磁性超伝導の波動関数

続いて、実際のモデルについて触れる。まず、クーパーペアの波動関数をオーダーパラメーターとした超伝導自由エネルギーは

$$F = \int \left[\frac{\hbar^2}{4m} \left| \left(\nabla - \frac{2ie}{\hbar} A(r) \right) \psi(r) \right|^2 + \alpha |\psi(r)|^2 + \frac{\beta}{2} |\psi(r)|^4 \right] d^3r \quad (1)$$

のように与えられる。これを空間格子上に再構築すると、

$$\begin{aligned} F &= (\text{クーパーペアと磁化の相互作用}) \\ &\quad + (\text{ゼーマン効果}) + (\text{クーパーペアの密度ゆらぎ調整}) \\ &= -c_1 (R_{x+\mu} R_x \bar{z}_{x+\mu} e^{iA_{x,\mu}} z_x + c.c) - c_3 M_{x,\mu\nu} \cdot S_x + G(R_x^2 - 1)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、式(1)の ψ を

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow\uparrow} \\ \psi_{\downarrow\downarrow} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} z_{\uparrow\uparrow} \\ z_{\downarrow\downarrow} \end{pmatrix}, |z_{\uparrow\uparrow}|^2 + |z_{\downarrow\downarrow}|^2 = 1 \quad (3)$$

のように書き直し、 R をクーパーペアの密度ゆらぎ、 z を位相とした。

磁場中の超伝導現象では vortex が発生しており、その内部では常伝導になりクーパーペアが存在していないため、クーパーペアの密度ゆらぎを取り入れている。

さらに、今回の研究で重要な項であるゼーマン効果について触れておく。通常、磁化下においてはその方向によって $\psi_{\uparrow\uparrow}$ と $\psi_{\downarrow\downarrow}$ のどちらかが支配的になる。つまり、 $\psi_{\uparrow\uparrow} \neq \psi_{\downarrow\downarrow}$ となり、クーパーペアが作る磁気モーメントが発生する。これを

$$S_x = |z_{x\uparrow\uparrow}|^2 - |z_{x\downarrow\downarrow}|^2 \quad (4)$$

として組み込むことで縮退している軌道エネルギーが磁気モーメントと磁化の相互作用によって分裂する。これがゼーマン効果である。

今回は以上のようなモデルに対してモンテカルロシミュレーションを行った。

3 結果

クーパーペアの密度ゆらぎを調整するパラメーター G や、ゼーマン効果の大きさ c_3 を変えたときの超伝導転移温度の変化の様子を図2に示す。

図2はそれぞれ磁化が無い場合、磁化がある場合(ゼーマン効果なし)、磁化がある場合(ゼーマン効果あり)のものであり、各線において左側が超伝導相、右側が常伝導相である。これを見ると G が小さい、つまりクーパーペアの密度ゆらぎが大きい方が転移温度が高くなっていることが分かる。また、ゼーマン効果を入れるとその転移温度がより高くなっていることが分かる。

これより、ゼーマン効果が強磁性超伝導の存在に大きく寄与しているということが言える。

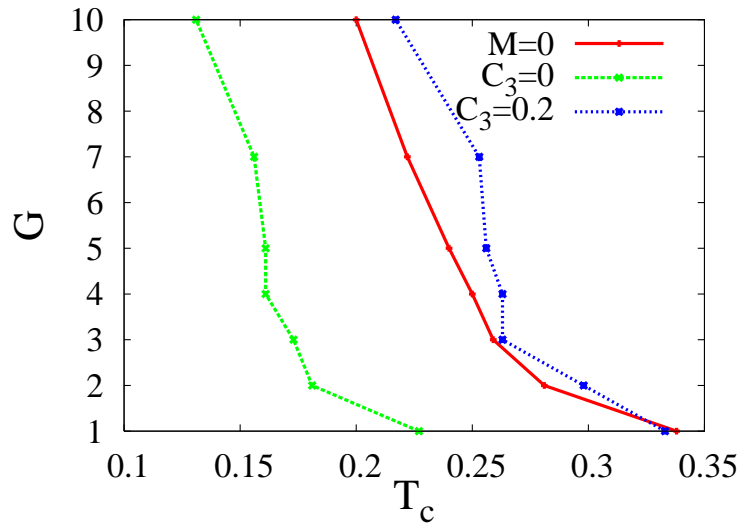


図 2: 転移温度の変化

参考文献

- [1] Akihiro Shimizu, Hidetoshi Ozawa, Ikuo Ichinose, and Tetsuo Matsui, Phys. Rev. B 85, 144524 (2012)