

## 論文内容の要旨

### 論文題目

Staggered-flux order and Fermi arc  
in the Pseudogap phase of High-Tc cuprates

(銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ相における交替磁束秩序とフェルミ弧)

氏名 濱田 晃一

高温超伝導現象は、反強磁性秩序を持つモット絶縁体にホールをドーブすると起こる現象である。この物質はドーブ量と温度の変化によって、フェルミ流体相、超伝導相、異常金属相、擬ギャップ相、反強磁性絶縁相など様々な相を含んでいる。高い超伝導転移温度は衝撃的なことであるが、この物質の異常な性質のひとつに過ぎない。特に、金属状態が異常である。非常に高ドーブ側では、通常のフェルミ流体で記述される金属状態になっているが、ドーブ量を減らすにつれて、異常な金属相に変化する。さらにドーブ量を減らしていくと、ついには金属状態であるのに、スピン励起や準粒子励起にギャップが生じる(擬ギャップ相)。

この擬ギャップ現象は、高温超伝導の発現機構と深く関連する現象として、実験的にも理論的にも長らく研究がなされてきたが、いまだ未解決の問題である。最近、高温超伝導の擬ギャップ現象を説明するひとつのシナリオとして、交替磁束秩序状態が注目を集めている。この秩序状態では、電流が自発的にブラケットごとに交互に逆向きに流れており、もし交替磁束秩序が電子のものであれば時間反転対称性も破れている。この状態は金属状態であるが、擬ギャップ領域の実験で観測されているものと同じ  $d_{x^2-y^2}$  波ギャップの励起構造を持ち、さらに  $(\pi/2, \pi/2)$  近傍の弧の形をしたフェルミ面を再現する可能性を秘めている。

スレイブボゾン法(電子を、補助的なフェルミ粒子のスピンとボーズ粒子であるホロンの積で表現する方法)でホロンのボーズ凝縮を仮定したスピノンの交替磁束についての提案や、現象論的な電子の交替磁束相のシナリオが提案されているが、次のような問題が未解決である: 1 (スピノンではなく) ‘電子の’ 交替磁束状態は存在するのか? どのような状況で現れるか? 2 . どのような関係が、電子の交替磁束相とスピノンの交替磁束

相にはあるのか？ 3 . 交替磁束秩序と  $d$  波超伝導秩序は共存できるのか？ 4 . スピノンの交替磁束相で電子の自発的交替電流は存在するのか？(物理的に観測されるのは、もちろん、スピノン・カレントではなく電子による電流である。) 5 . 擬ギャップ相の角度分解光電子分光で観測されている弧の形をしたフェルミ面の起源は何か？ 6 . 高温超伝導体の低ドーピング領域で観測される、波数  $(0, \pi)$  での励起ギャップおよびフェルミ面の変化は、交替磁束秩序状態を考えることにより、理解できるか？ 7 . 交替磁束秩序相でのエネルギー構造はどのように移り変わっていくか？

本論文ではこれらの問題を解明する。

## I . 交替磁束秩序と $d$ 波ペアリング秩序の競合

我々は交替磁束秩序状態と  $d$  波ペアリング状態の競合について、微視的なモデルからの解析を行った。高温超伝導体の微視的モデルである 2 次元  $t$ - $J$  モデルを用い、 $U(1)$  スレイブボゾン平均場理論に基づき、ボーズ凝縮を仮定せずに解析を行った。我々が解明したことを 6 つ挙げる。

### 1. 物理的な電子の交替磁束秩序と非物理的なスピノンの交替磁束秩序の関係：

我々はスピノンだけでなくホロンの交替磁束秩序を導入し解析を行なうことにより、「物理的な」電子の交替磁束状態とスピノンの交替磁束状態の対応関係を与えることに成功した。我々の定式化では、電子の飛び移り期待値はスピノンの飛び移り期待値とホロンの飛び移り期待値の積で記述することができる。また電子の交替磁束はスピノンの交替磁束とホロンの交替磁束の差で記述される。

### 2. 相図：

我々が得た新たな相図の特徴を 3 つ挙げる。(i) 電子の交替磁束秩序相が存在する。(ii) 交替磁束秩序と  $d$  波ペアリング秩序は共存しない。(iii) 基底状態は純粋な  $d$  波の超伝導状態である。

### 3. 電子の交替磁束秩序相とスピノンの交替磁束秩序相：

ハーフフィリング近傍の有限温度領域に存在するスピノンの  $\pi$  磁束秩序相では、ホロンの磁束秩序もまた  $\pi$  になる。スピノンおよびホロンの磁束が互いに打ち消しあうので、電子の交替磁束秩序はゼロになっている。しかし、ドーピング量が増えるにつれスピノンの交替磁束が  $\pi$  からずれると、ホロンの交替磁束もスピノンの交替磁束から値がずれる。2 つの磁束が完全には打ち消されなくなり、電子で見ても交替磁束秩序が有限な相(電子の交替磁束秩序相)になる。したがって、スピノンの  $\pi$  磁束秩序相とスピノンの交替磁束秩序相との転移は、物理的な電子で見ると実は 2 次転移になっている。その転移を特徴づける秩序変数は電子の交替磁束秩序変数である。

### 4. 電子の自発的交替電流：

また我々は、電子の自発的交替電流とスピノンの自発的交替カレントの関係も明らかにした。スピノン・カレントとホロン・カレントの局所的な打ち消し合いは、電子の自発的交替電流の存在を排除しない。電子の自発的交替磁束および自発的交替電流のドーピングによる発達の仕方も明らかになった。

### 5. 交替磁束秩序と $d$ 波ペアリング秩序が共存できないことの証明：

我々は交替磁束秩序と  $d$  波ペアリング秩序が共存しないことについて、数値的に相図を導出しただけでなく、解析的な証明も行った。2 つの秩序状態が共存するための条件式も求め、全ての状況でこの共存条件が満たされないことを示した。

## 6. 安定性 / 不安定性の解析 :

また我々は、この2つの状態それぞれの安定性 / 不安定性についても明らかにした。

## II . 交替磁束秩序状態におけるフェルミ弧の変化

我々は、交替磁束秩序を含む相図における低エネルギー励起構造の変化、および交替磁束秩序相におけるフェルミ弧の変化の非自明な振る舞いを明らかにした。

### 1. 交替磁束秩序を含む相図における低エネルギー励起構造の変化:

#### 1-1. 波数 $(0, \pi)$ での励起ギャップの温度変化:

交替磁束秩序状態と  $d$  波ペアリング秩序状態は定性的にも違う状態であるのに、2つの状態間の転移において、 $(0, \pi)$  での励起ギャップの大きさの移り変わりは連続的である。

#### 1-2. フェルミ面の温度変化:

一様 RVB 相 (異常金属相に対応する) での「大きなフェルミ面」は、温度を下げていくと交替磁束相への転移点で、「弧の形をしたフェルミ面」(フェルミ弧) に変わり、さらに温度を下げていくと、フェルミ弧は小さくなっていき、 $d$  波ペアリング相への転移点で点のフェルミ面に移り変わる。

### 2. 交替磁束相でのフェルミ弧 :

我々は、交替磁束秩序相でのフェルミ面が、擬ギャップ相で観測されているような弧になることを示した。交替磁束秩序相でのフェルミオンのゼロエネルギー・ラインは楕円になっているが、フェルミ面の形は弧になる。スペクトル関数の強度が運動量空間で異方的になっており、 $|k_x| + |k_y| \geq \pi$  での強度が小さくなるからである。

これらの振る舞いは角度分解光電子分光の実験で観測されている振る舞いと一致している。

### 3. 交替磁束相におけるフェルミ弧の非自明な振る舞い :

我々は交替磁束秩序相でのフェルミ弧のドーピング依存性および温度依存性を解析し、その結果、フェルミ弧の非自明な振る舞いを得た。それらの非自明な振る舞いは、交替磁束秩序相での低エネルギー励起が、実は  $(2+1)$  次元の「異方的な」massless Dirac fermions で記述されることに起因する。

#### 3-1. 低温側でのドーピング依存性 (絶対零度温度での解析):

絶対零度ではフェルミ面の面積は  $\pi^2\delta$  になる (ここで  $\delta$  はホールのドーブ量である)。しかしながら、弧の発展は非自明である。弧の長さは、非常に低ドーブ領域では  $\sqrt{\delta}$  に比例するが、他の領域では異なった振る舞いをする。その原因は、ドーブが増えるにつれて、交替磁束状態での励起構造が、半分まで満たされた等方的な massless Dirac fermions がドーブされた異方的な massless Dirac fermions に移り変わっていくことにある。

#### 3-2. 高温側でのドーピング依存性 (有限温度での解析):

$T \gg \mu$  ( $T$ : 温度、 $\mu$ : 化学ポテンシャル) の領域ではフェルミ・ポケットの面積は  $\delta^2$  で立ち上がり、弧の長さおよびフェルミ・ポケットの幅は両方ともドーブ量  $\delta$  に比例する。この振る舞いは「粒子正孔対称性がある系に正孔 (または粒子) をドーブすると  $T \gg \mu$  の領域では、 $\mu \propto -\delta (+\delta)$  となる」ことに起因する。

#### 3-3. 温度依存性 :

交替磁束秩序相では、フェルミ面に強い温度依存性が存在する。その依存性はこの相での massless Dirac fermions の「円錐の形をした低エネルギー励起構造」に起因している。

もし高温超伝導の擬ギャップ相が交替磁束秩序相であるならば、これらの非自明なフェルミ弧の振る舞いが角度分解光電子分光の実験で観測されるはずである。