

物性理論研究室年次報告 (平成 12 年度)

1. メンバー

大川房義	011-706-2694	fohkawa@phys.sci.hokudai.ac.jp
北 孝文	011-706-2687	kita@phys.sci.hokudai.ac.jp
研究生 佐藤寛之	011-706-3219	hsatoh@phys.sci.hokudai.ac.jp
DC2 安井甲次	011-706-3219	yasui@phys.sci.hokudai.ac.jp

2. 研究成果

大川房義

遍歴電子磁性と局在モーメント磁性の統一理論の完成は磁性の分野に於ける大きな課題である。この問題解決のためには何よりもまず、強相関電子系における局所量子スピン揺動効果を如何に正確に考慮するかという問題を解決しなければならない。局所量子スピン揺動効果を正確に考慮することは、近藤効果の有効模型であるアンダーソン模型を解く問題に帰着できることは既に示している。この事実を利用して、局所量子スピン揺動効果を正確に考慮できる理論として、近藤効果を出発点としてサイト間スピン揺動効果を摂動で考慮する摂動理論を開発した。この摂動理論は数学的には無限次元からの展開、空間次元数を d とすると、 $1/d$ 展開として定式化される。物理的には近藤格子の理論と呼ぶべき理論である。近藤効果については、我が国を中心にした従来の研究でほとんど完全に理解されている問題である。既に理解されている近藤効果についての理論結果を利用して、次のテーマについて研究を続行中である。

- (1) 磁気交換機構による超伝導機構 (佐藤寛之氏との共同研究)
- (2) 遍歴電子強磁性機構
- (3) 遍歴電子磁性体でのキュリーワイス則の機構
(北海道大学電子科学研究所の宮井英次氏との共同研究)
- (4) 重い電子系のメタ磁性機構 (佐藤寛之氏との共同研究)
- (5) 遍歴電子磁性体の磁気構造

北 孝文

今年度は山田科学振興財団海外派遣研究員として、ドイツ連邦共和国のカールスルーエ大学 (4月–9月) とバイロイト大学 (10月–3月) に滞在中、チュービンゲン大学やヘルシンキ工科大学も訪れ、これらの大学の人々との議論に大いに啓発され、主に以下のような研究を行なった。

- (1) 超流動 ^3He の渦糸構造の理論的説明 [T. Kita: Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 834]
 - 回転場 Ω 中の超流動体には、下部臨界角速度 Ω_{c1} と上部臨界角速度 Ω_{c2} の間に、磁場中の第二種超伝導体と同様の渦糸状態と呼ばれる興味深い相が存在する。
 - 通常の第二種超伝導体の渦糸状態では、量子化された渦糸が周期的に並んだ状態がエネルギー的に最も安定であり、その他の構造は観測されていない。その渦糸の中心(コ

ア)では、波動関数の一価性により、超伝導秩序変数の振幅がゼロとなる事が結論される。実際STMにより、このコア領域の明確な映像が得られている。

- 一方、9つの超流動秩序変数をもつ超流動³Heでは、通常の超伝導体とは全く事なる多様な渦糸構造が可能である。実際、ヘルシンキ工科大学のグループにより、 $\Omega \leq 3$ rad/sでの渦糸構造が精力的に調べられ、コアのない渦糸状態や超流動コアをもつ渦糸状態など、既に7つの異なる渦糸構造が発見されている。しかし、 $3 \text{ rad/s} \leq \Omega \leq \Omega_{c2}$ の高速回転場中において、どのような渦糸状態が実現されるかに関しては、理論的にも実験的にも未解明のままであった。
- カールスルーエ大学滞在を利用し、 $\Omega_{c1} \leq \Omega \leq \Omega_{c2}$ の全領域の渦糸構造の解明をめざした研究に着手した。具体的には、ランダウ準位展開法を用いて、9つの超流動秩序変数に対するGinzburg-Landau自由エネルギー汎関数を直接最小化し、安定な構造を決定した。その結果、 p - Ω 相図上(p :圧力)において、少なくとも5つの異なる渦糸構造が存在することを理論的に明らかにした。
- 東京大学物性研究所には高速回転クライオスタットが建設され、高速回転場中での超流動³Heの研究が始まっているが、この理論はその実験的研究に大いに役立つと考えている。またこの理論的研究により、(i)渦糸構造研究における有力な理論的一手法が確立でき、(ii)複数の秩序変数をもつ超伝導体においてどのような渦糸構造が可能であるかについての示唆も得られた。

(2) 超伝導ド・ハース-ファン・アルフェン効果の理論的研究——超伝導ギャップの異方性と振動の減衰因子との関係 (K. Yasui and T. Kita: cond-mat/0103336)

- 1976年にGraebnerとRobbinsは、NbSe₂において、超伝導状態においてもド・ハース-ファン・アルフェン振動が持続することを初めて観測した。その後1990年代になって、超伝導ド・ハース-ファン・アルフェン効果を示す物質が数多く見付き、ド・ハース-ファン・アルフェン効果は超伝導体においても一般的に起こりうる事が研究者の間での共通の認識となっている。
- この現象は多くの理論家の興味を引き、活発な研究が行なわれてきた。しかし未だ確立した理論はなく、特に「なぜ鋭いフェルミ面のない超伝導状態においてド・ハース-ファン・アルフェン振動が観測されるのか」等の基本的な点に関しても、明確な物理的描像のないのが現状である。
- そこで数値的研究と解析的研究を組み合わせ、超伝導ド・ハース-ファン・アルフェン振動の理論的解明をめざし、特に超伝導ギャップの異方性とド・ハース-ファン・アルフェン振動の減衰との関係に注目した研究を行なった。
- この研究の背景にあるのは、YNi₂B₂Cについての実験結果である。この物質においては、 $0.2H_{c2}$ という低磁場までド・ハース-ファン・アルフェン振動が持続することが寺嶋らにより報告された。一方、この物質のゼロ磁場における比熱は、低温において T^3 の挙動を示し、超伝導ギャップに異方性のあることが明らかになっている。
- 直観的には、極値軌道の超伝導ギャップの大きさと振動の減衰との間に密接な関係があることが予想される。この関係を明らかにすること、そして振動の減衰に対し明確な物理的描像をあたえることを研究の主な目的とした。
- ゼロ磁場のエネルギーギャップが、(i)等方的な場合(s 波)、(ii)極値軌道上の4つの点でギャップが閉じる場合(d 波)、(iii)極値軌道上でギャップがなくなる場合(p 波)、という3つのモデルについて、渦糸状態のド・ハース-ファン・アルフェン振動の数値計

算を行なった。その結果、振動の減衰が、極値軌道上の平均エネルギーギャップと密接に関係しているという結果を得た。またこの数値計算結果を用いて、これまで提出されてきた理論式の評価を行なった。しかし、いずれの理論式も数値計算結果を再現できないという結論を得た。

- 次に、振動の減衰に対する解析的表式の導出を行った。この理論式は、上記3つの数値計算をよく再現し、(i) 振動の減衰が磁気ブリルアンゾーン内での準粒子のエネルギー分散の増大に起因すること、(ii) この減衰因子がゼロ磁場の極値軌道上での平均エネルギーギャップの大きさに比例していること、を明確に示している。この理論式を用いれば、極値軌道上でのエネルギーギャップの大きさが評価でき、「ド・ハース-ファン・アルフェン振動による超伝導ギャップ・スペクトロスコピー」に道を開くことができたと考えている。

(3) 超伝導準古典理論におけるゲージ不変性とホール項 (T. Kita: cond-mat/0103520)

- 超伝導渦糸状態のホール効果に関しては、研究開始から35年以上を経ても、未解決の問題が数多く残っている。例えば、Nb、V、また高温超伝導物質等で観測されている渦糸状態におけるホール係数の符号反転は、現象論的な Bardeen-Stephen 理論や Nozières-Vinen 理論では説明ができず、渦糸の電場下での動力学とも絡んだ未説明の問題である。また運動する単一渦糸に働く力に関しても、未だに共通の理解が得られておらず、理論的な論点の一つとなっている。
- この状況の背景には、渦糸の動力学を微視的・数値的に取り扱おうる方程式が未だに確立されていないことがある。特に、超伝導の動力学で最も強力な基礎方程式となっている「超伝導準古典方程式」は、ホール効果を記述できないことが知られてきた。この方程式は、例えば準粒子の寿命が短くても使える点など、フェルミ流体論における Landau-Boltzmann 方程式よりもその適用範囲がはるかに広い。従って、この方程式をホール効果が記述できるように拡張することは、大いに意義のあることである。
- パイロイト大学滞在中における D.Rainer 教授との議論に触発され、超伝導準古典方程式を、ホール効果をも記述できるように拡張することを試みた。
- 出発点は Dyson-Gor'kov 方程式である。そして、拡張された方程式の導出における核心は、その南部グリーン関数に変換を施し、ゲージ変換が重心座標のみで記述できるようにしたことである。この変換されたグリーン関数を用いて Dyson-Gor'kov 方程式を書き換え、その後は標準的な手法に従って準古典方程式を導いた。
- 導出された方程式は、重心の時間・空間座標に関してゲージ不変である、という望ましい性質を有している。またホール効果に関与する項も自然に出てくる。
- この拡張された準古典方程式は、今後における渦糸動力学の解明に際して、その出発点として基本的な重要性を持つものと期待される。

3. 成果発表

〈原著論文〉

1. H. Satoh and F. J. Ohkawa: Physica B 282 & 282 (2000) 187-188.
A theory of the metamagnetic crossover in CeRu₂Si₂.
2. E. Miyai and F. J. Ohkawa: Physica B 282 & 282 (2000) 851-852.
On the Curie-Weiss law for ferromagnetic metals.

3. F. J. Ohkawa and H. Satoh: Physica **B 282 & 282** (2000) 859-860.
Are high-temperature superconductors Kondo lattices.
4. E. Miyai and F. J. Ohkawa: Phys. Rev. B **61** (2000) 1357-1365.
Curie-Weiss law for almost localized itinerant-electron ferromagnets,
5. F. J. Ohkawa: *Frontiers in magnetism*, J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000) Supplement A, 13-24. Kondo effect even in the Mott-transition and high-temperature superconductivity.
6. T. Kita: Physica **B284-288** (2000) 531.
Vortex states of the E_u model for UPt_3 .

〈解説〉

1. 大川房義: 日本物理学会誌 55 巻 7 号 (2000) 535-539.
スピン揺動と磁気的交換相互作用のクーパ対形成は別機構か?

4. 学術講演

〈招待講演〉

1. F. J. Ohkawa,
Spin and charge density wave in itinerant electron magnets characterized as Kondo lattices, Japanese-German Symposium on Spin, Charge and Orbital Fluctuations in Strongly Correlated Electron Systems, September 11-14, 2000, Sapporo.
2. 北 孝文
「異方的超伝導体の磁束格子構造と準粒子状態—磁場中におけるク - パ - 対の性質」
2000 年日本物理学会春の分科会 (関西大学) 講演番号 24pZP-6
(講演概要集 55 巻第 1 号第 3 分冊 540 ページ)

〈一般講演〉

- 1 安井甲次・北 孝文
「3次元超伝導状態における de Haas - van Alphen 振動」
2000 年日本物理学会春の分科会 (関西大学) 講演番号 24aZN-4
(講演概要集 55 巻第 1 号第 3 分冊 531 ページ)

5. 科研費・助成等の取得状況

北 孝文 山田科学振興財団海外派遣研究員 [2000 年 4 月-2001 年 3 月、ドイツ連邦共和国
カールスルーエ大学 (4 月-9 月)、同国バイロイト大学 (10 月-3 月)]