

物性理論研究室年次報告 (平成 11 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 宮井英次	011-706-3219	miyai@phys.sci.hokudai.ac.jp
DC3 佐藤寛之	011-706-3219	hsatoh@phys.sci.hokudai.ac.jp
DC1 安井甲次	011-706-3219	yasui@phys.sci.hokudai.ac.jp
MC2 清水寛文	011-706-3219	shim@phys.sci.hokudai.ac.jp
MC2 夏目一主	011-706-3219	natsume@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、近藤効果の有効モデルであるアンダーソン模型を解く問題に帰着できる。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。これまでの研究成果を利用して、遍歴電子磁性と局在モーメント磁性とがまさにクロスオーバーする領域を除いて、次の個々のテーマについて議論を進展させた。

- (1) 磁気交換機構による超伝導
- (2) 遍歴電子磁性におけるキュリーワイス則
- (3) 重い電子系のメタ磁性
- (4) multiple Q-SDW の磁気構造
- (5) 非整合 SDW と CDW の共存、いわゆるストライプ状態

URu₂Si₂ は $T_N \simeq 17.5$ K でいわゆる tiny-moment magnetism への二次相転移を示す。この相転移に伴う比熱異常は大きい、観測される飽和秩序磁気モーメントの大きさは極めて小さい。例えば、観測される秩序磁気モーメントの大きさは中性子散乱に依ると $(0.02-0.04) \mu_B$ 程度、 μ SR に依ると $0.003 \mu_B$ 程度であり、NMR では磁気モーメントの存在が示唆されていない。 $T_N \simeq 17.5$ K の二次相転移が通常の磁気転移でないことは確かであり、この相転移の正体を明らかにすることは長年の懸案であった。 $p_c \simeq 1.5$ GPa での圧力下の 1 次転移を示唆する北大物理専攻強相関電子磁性グループの最近の中性子散乱実験に刺激され、一つのシナリオを提案した。提案したシナリオは $p_c \simeq 1.5$ GPa 以下では四重極秩序状態、 $p_c \simeq 1.5$ GPa 以上では二重極秩序状態が実現しているというものである。このシナリオは多数の実験データを定性的に説明する。

北 孝文

昨年度に引き続き、磁場中の超伝導体の渦糸構造とその準粒子状態についての研究を、ランダウ準位展開法を用いて行った。

(1) 超伝導体のド・ハース-ファン・アルフェン効果の理論的研究 (安井甲次氏との共同研究)

- 超伝導体には鋭いフェルミ面がないので、ド・ハース-ファン・アルフェン (dHvA) 振動は観測されないようにも思える。しかし実際には観測できるのである！ これは1976年にNbSe₂で最初に示され、大きな驚きをもって迎えられた。その後1990年代に入り、CeRu₂やYNi₂B₂C等、数多くの超伝導体で次々と観測され、今ではクリーンな第二種超伝導体に共通の性質と見なされている。
- 正常状態のdHvA効果は、金属のフェルミ面を決定するために必要不可欠な手段となっている。一方、幾つかの実験グループは、超伝導状態のdHvA効果を用いてエネルギー・ギャップの大きさの方向・バンド依存性が解明できないか、という着想の下に実験を開始した。もしこれが可能であれば、ギャップの異方性の直接観測という、dHvA効果にとって新たな領域が開拓されることになる。
- 正常状態のdHvA効果については、1953年のリフシッツ・コセビッチ理論が実験解析上の基礎として確立している。一方、超伝導体のdHvA効果については、準古典近似を用いる真木理論等があるものの、実験結果全てを説明するには不満足な状態にある。実際、フェルミ面のない超伝導状態で何故dHvA効果が観測されるのか？、dHvA効果が観測される時の準粒子状態はどうなっているのか？、などの基本的な点についても未だ論争中の段階である。ましてや、ギャップの異方性がdHvA効果で本当に観測できるのか？、という点についてはほとんど未解明のままであった。
- 磁場中の超伝導体に対する基礎方程式はボゴリユボフ-ド・ジャン方程式である。そして、上記の問題に対しては、数値解法、特に磁気並進群の固有関数展開法(ランダウ準位展開法)が大変有効である。この方法によれば、超伝導体を全ての温度・磁場領域で統一的に扱うことができ、磁気振動も自然に出てくる。現在まで得られた数値計算により、ギャップの異方性に依存して、振動の減衰の様子が大きく異なることが明らかになった。つまりdHvA効果によるギャップの異方性の観測に肯定的結果が得られたことになる。今後は、数値解の詳細な解析を通して、実験結果を解析しうる定量的な表式の導出をめざす予定である。

(2) 複数のオーダー・パラメータを持つ超伝導体の渦糸状態の理論的解明

- 超伝導UPt₃は少なくとも2つのオーダー・パラメータを持つことが実験的に明らかになっており、またSr₂RuO₄でもその可能性が指摘されている。一般に2つ以上のオーダー・パラメータを持つ系では、通常とは全く異なる渦糸格子が実現される可能性がある。しかし、その渦糸状態の全磁場領域における詳細は、未だ明らかになっていなかった。
- 磁気並進群の固有関数展開法を用いて2つのオーダー・パラメータを持つ系の渦糸状態を詳細に研究し、(通常とは全く異なった)コアの無い渦糸格子が可能であること、またこの状態はNMR等により磁場分布を測ることで検証できることを示した。この渦糸格子が発見されれば、渦糸状態の物理に新たな1ページが開かれることになる。既にいくつかのグループによりこの検証実験が開始されている。

3. 成果発表

〈原著論文〉

1. F. J. Ohkawa: Phys. Rev. B **59** (1999) 8930.
Relevance and irrelevance of three effective Hamiltonians for high-temperature superconductors with CuO_2 planes.
2. F. J. Ohkawa and H. Shimizu: J. Phys. Condens. Matter **11** (1999) L519.
Quadrupole and dipole orders in URu_2Si_2 .
3. T. Kita: Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 1846.
Vortex states of the E_u model for Sr_2RuO_4 .
4. K. Yasui and T. Kita: Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 4168.
Quasiparticles of d -wave superconductors in finite magnetic fields.
5. T. Kita: J. Phys. Soc. Jpn. **68** (1999) 3740.
An exact entropy expression for a many-body problem.

〈解説〉

1. 大川房義: 固体物理, 1999年34巻8号675頁
「高温超伝導やモット転移においても近藤効果」

4. 学術講演

〈招待講演〉

1. F. J. Ohkawa
「Kondo effect even in the Mott-Hubbard transition and high-temperature superconductors」
The workshop on Frontier in Magnetism, October 4-7, 1999, Kyoto
2. T. Kita
「Vortex structures and quasiparticles in unconventional superconductors」
International Workshop on "Microscopic Structure and Dynamics of Vortices in Unconventional Superconductors and Superfluids" (2000年2月28日—3月3日, Dresden, Germany)
3. 北 孝文
「異方の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. E. Miyai and F. J. Ohkawa
On the Curie-Weiss law for ferromagnetic metals,
The LI-st Yamada Conference on Strongly Correlated Electron Systems, August 24-28, 1999, Nagano, 講演番号 W pP71, (講演概要集 159 ページ)
2. H. Satoh and F. J. Ohkawa
A theory of the metamagnetic crossover in CrRu_2Si_2 ,
The LI-st Yamada Conference on Strongly Correlated Electron Systems, August 24-28, 1999, Nagano, 講演番号 W pP73, (講演概要集 160 ページ)

3. F. J. Ohkawa and H. Satoh
Are high-temperature superconductors Kondo lattices ?,
The LI-st Yamada Conference on Strongly Correlated Electron Systems, August
24-28, 1999, Nagano, 講演番号 F aP20, (講演概要集 183 ページ)
4. 北 孝文
「Vortex States of the E_u Model for UPt_3 」
XXII International Conference on Low Temperature Physics
(Helsinki University of Technology, Finland) 講演番号 6N12
(Abstracts 196 ページ)
5. 北 孝文
「 UPt_3 の渦糸状態の理論」
1999 年日本物理学会秋の分科会 (岩手大学) 講演番号 26aYP-8
(講演概要集 54 巻第 2 号第 3 分冊 547 ページ)
6. 安井甲次・北 孝文 「超伝導渦糸状態における de Haas-van Alphen 振動」
1999 年日本物理学会秋の分科会 (岩手大学) 講演番号 26aYP-9
(講演概要集 54 巻第 2 号第 3 分冊 548 ページ)
7. 北 孝文
「複数の秩序変数を持つ超伝導体の渦糸構造— UPt_3 と Sr_2RuO_4 を中心として」
「高温超伝導体における渦糸状態」研究会 (1999 年 12 月 13 日—15 日, 東北大学)
8. 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

大川房義 日独科学協力事業共同研究、 $3d$ 遷移金属及び $4f$ 希土類金属合金の強相関電子系におけるスピンドYNAMICS、分担者 (研究代表者、大阪大学大学院理学研究科 都 福仁)

北 孝文 科研費 基盤研究 (C)(2)(新規) 代表 1,500 千円

「渦糸状態の微視的解明をめざして — 異方的超伝導体の理論的研究」