

物性理論研究室

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
DC3 安井甲次	011-706-3219	yasui@phys.sci.hokudai.ac.jp
MC1 渡辺浩一	011-706-3219	watanabe@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。また、この問題の解決は、強相関電子系の一つである銅酸化物における高温超伝導の解決につながる可能性もある問題である。

この問題解決のためには、強い電子間相関効果・スピン揺動効果を正確に記述できる理論を作らねばならない。局所熱スピン揺動やサイト間量子・熱スピン揺動の取り扱いには比較的容易である。最も困難な点は局所量子スピン揺動効果を如何に正確に考慮するかである。格子系の局所熱・量子スピン揺動効果を厳密に考慮すると、問題は希薄磁性合金系（近藤効果）の有効模型であるアンダーソン模型を自己無撞着に決定し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てきた。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。局所スピン揺動とワイスの分子場により引き起こされる磁気秩序が $1/d$ の零次効果であり、サイト間スピン揺動は高次効果である。一方、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、Kondo の論文に始まる 10 余年の活発な研究でほとんど完全に理解されている問題である（我が国の貢献は極めて大きい）。例えば、局所スピン揺動の典型的温度（エネルギー）尺度として近藤温度 T_K ($k_B T_k$) が定義される。 $T \gg T_K$ の高温では局所熱スピン揺動が主で、強相関電子は局在モーメントとして振る舞う。一方、 $T \ll T_K$ の低温では局所量子スピン揺動が主で、ランダウの正常液体として振る舞う、等が明らかにされている。この結果は、格子の強相関電子系が遍歴電子（ランダウの正常液体）と局在モーメントという対照的の性質を示す本質である。開発した理論枠組みは、近藤効果についての理論結果を利用できる枠組みであるので、理論展開は比較的容易である。次のテーマについて研究成果を投稿・受理あるいは査読中、あるいはまた研究続行中である。

(1) 遍歴電子強磁性機構の理論

金属強磁性は量子力学誕生直後から研究されている問題であるが、いまだ未解決の重要な問題である。この問題に関連して、次の成果を得た。従来、超交換相互作用は絶縁体状態を仮定して導出されていたので、高温超伝導の引力機構と関連して、金属状態でも働くことに疑問が出されていた。このため、絶縁体が金属かに関係なく有効な枠組み、場の理論の枠組み、で超交換相互作用が上部・下部ハバードバンド間の対励起の仮想交換からも導かれることを示し、金属状態でも働くことを示し

た。また、多バンド構造で Hund 結合が強い場合は、超交換相互作用が強磁性的になることを示した。特に多バンドの極限（無限のバンド枚数）では、非零の Hund 結合があればかならず強磁性的である。

準粒子の対励起を仮想交換する過程から生じる新しい型の交換相互作用の存在をすでに指摘している。この交換相互作用の温度変化が、遍歴電子強磁性体・反強磁性体のキュリー・ワイス則を与えることは既に示している。ここで、注意すべきはこのキュリー・ワイス則の機構はワイスの磁氣的分子場の温度変化に他ならず $1/d$ の零次効果で空間次元が無限大の系でも働く機構である。従来広く受け入れられてきたサイト間スピン揺動のモード・モード結合効果の温度変化は、これと対照的に、 $1/d$ の高次効果で無限大次元では働かない効果である。ワイスの磁氣的分子場の温度変化が、現実の $d = 3$ 次元系の機構であるとの主張の正当性を示す事実を模索中であり、これに関連して次の成果を得た。

キュリー・ワイス則の機構は強磁性の機構そのものと密接な関係があるのではとの素朴な期待にしたがい、次の事実を確認した。現実の遍歴電子強磁性体は、分散関係に平坦なバンドがあり、そこにフェルミ準位がある flat-band 模型、あるいはフェルミ準位がバンド端にある band-edge 模型が妥当である。これらの模型では、新しい型の交換相互作用も強磁性であることを示した。Hund 結合のある多バンド模型を採用し、強磁性的超交換相互作用と新しい型の交換相互作用の二つの強磁性的交換相互作用による、 $1/d$ の零次効果としての、遍歴電子の強磁性の出現機構を提案した。その成果は Physical Review 誌に投稿・受理された。

(2) 遍歴電子反強磁性体の磁気構造の理論

従来、局在モーメント系ではヘリカル磁気構造、遍歴電子系ではスピン密度波 (SDW) 構造と信じられてきた。フェルミ面のネスティングが有効でなくても化学ポテンシャルがバンド中心付近にある時、先に述べた新しい型の交換相互作用は反強磁性的である。ネスティングが有効でない場合の新しい型の交換相互作用や超交換相互作用により磁気秩序が引き起こされる場合、遍歴電子磁性体でもヘリカル構造が出現することを指摘した。ネスティングが有効な場合も、新しい型の交換相互作用は反強磁性的で強い。この場合は、従来から信じられてきたとおり、SDW 構造になる。(ただし、SDW を引き起こす相互作用として、超交換相互作用も一般には無視できない。たとえば、Cr の SDW では双方が効いている可能性が高い。)

非整合 SDW の場合、秩序ベクトルとして同等なベクトルが複数存在する場合がある。この場合で磁化の大きさが小さい場合、必ず複数の秩序ベクトルが共存する multiple SDW 構造となることを示した。磁気異方性が無視でき、かつ multiplicity が 3 より小さい場合、共存する SDW 磁化の方向は互いに直交することを予言した。また秩序ベクトルが非整合の場合、必ず電荷密度波 (CDW) を伴うこと、CDW の振幅には近藤効果が関与していることを示した。高温超伝導体で観測されるいわゆるストライプ構造、Cr や CeAl_2 での SDW が multiple SDW 構造である可能性を示した。成果は投稿・査読中である。

(3) 磁氣的交換相互作用による高温超伝導理論

クーパ対形成の引力機構として超交換相互作用を考えた $d\gamma$ 波超伝導理論を、世界に先駆けて 1987 年春に既に発表している。その後、さきに述べた新しい型の交換相互作用も、超交換相互作用に加え、クーパ対形成の引力機構として働くこと

も発表した。一方、スピン揺動による引力機構という提案もある。この2つの引力機構は、ボーズ粒子（ボーズ粒子的励起）の仮想交換により引き起こされるという場の理論の枠組みで統一的に理解できること、そして磁氣的交換相互作用による引力機構は近藤格子（＝強相関電子系）においてはその主要項であることを明らかにした。これらにより高温超伝導現象は、近藤格子系で大きく繰り込まれた準粒子が磁氣的交換相互作用により $d\gamma$ 波クーパー対凝縮を起こす、という理論枠組みでその本質は解明できた可能性が極めて高いと考えている。現在、この枠組みの正当性を示すため、高温超伝導の周辺の重要な現象、いわゆるスピンギャップ現象あるいは上に述べたストライプ秩序等、の解明を進行中である。

北 孝文

(1) 超伝導ド・ハース-ファン・アルフェン効果の理論的研究

昨年度に引き続き、超伝導ド・ハース-ファン・アルフェン効果の研究を行い、超伝導ギャップの異方性と振動の減衰の関係を調べた。まず、磁気ブリルアン域内における準粒子スペクトルを調べ、振動の減衰が、ペア・ポテンシャルの発達に伴う準粒子スペクトルの分散の増大に起因することを明らかにした。そして、減衰の大きさが、極値軌道上の平均エネルギーギャップにより決まることを結論づけた。また、減衰に対する解析的表式を導出し、この表式を用いて、様々な物質のエネルギーギャップの異方性を評価した。特に、 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ においては、 α 軌道上のエネルギー・ギャップが、かなり小さくなっていることを明らかにした。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。

(2) スピノール Bose-Einstein 凝縮系の量子渦構造 (cond-mat/0203242)

中性原子気体の Bose-Einstein 凝縮 (BEC) 系においては、実験技術の急速な発展により、今まで思考実験でのみ可能であったような現象が次々と実現されている。1998年に、JILA のグループは、磁気トラップされた系において、初めて量子渦の生成に成功した。また、近年、MIT のグループは、同じく磁気トラップされた系において、130 を越える量子渦を生成し、その美しい三角格子像を発表した。一方、MIT のグループは、 ^{23}Na において、光学トラップ法を利用することにより、内部自由度 (3成分) を持った BEC を実現した。近い将来、この3成分系においても、渦生成が可能になることが予想される。超流動 ^3He の例でも明らかのように、内部自由度を持った系においては、通常とは全く異なる渦が可能である。3成分 BEC 系の渦構造を、絶対零度の Gross-Pitaevskii 方程式と、転移点近傍の Ginzburg-Pitaevskii 方程式を用いて調べた。その結果、渦が一つの場合には、角運動量の方向が空間変化するにより渦ができる「Mermin-Ho 構造」が安定に存在することを示した。また、渦が数多くできた状態においては、秩序変数の振幅が空間的にほぼ一様な渦、すなわち、通常の Abrikosov 格子とは全く異なる渦構造が安定になることを見いだした。

(3) 非平衡定常状態の密度行列 (cond-mat/0203005)

非平衡系の熱力学・統計力学を建設することは、凝縮系物理学・統計力学の大きな課題の一つである。この目的に向けて、近年、大野らにより「非平衡定常状態の熱力学」の一つの枠組みが提案された。非平衡定常状態では、必然的に、散逸に伴う定常的な熱の発生がある。大野らは、この定常発生熱を取り除くことで、平衡状態とほぼ同様の熱力学が構築できる可能性のあることを示した。この熱力学は、発生する熱が、キャレンのいう「隠された自由度」によって運び去られると考えることで自然に理解できる。すなわち、定常発生熱の運び手を、熱浴に含める試みとも考えることができる。このような着想に基づき、「非平衡定常状態の統計力学」の基礎となる密度行列を提案した。この密度行列は、「非平衡定常状態の熱力学」と矛盾しない。その形は、平衡状態と同様、ガウス分布となり、非平衡状態を特徴づける示量変数が巨視的変数として加わっている。この密度行列を用いると、非平衡定常状態における様々な物理量が計算でき、「非平衡定常状態の熱力学」の妥当性を検証できる。

3. 成果発表

〈原著論文〉

1. H. Satoh and F. J. Ohkawa: Physical Review B **64** (2001) 184401 (1-8)
Theory of the metamagnetic crossover in CeRu_2Si_2 .
2. T. Kita: Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 834.
Vortex-lattice phases of superfluid ^3He in rapid rotation.
3. T. Kita: Phys. Rev. B **64** (2001) 054503.
Gauge invariance and Hall terms in the quasiclassical equations of superconductivity.
4. K. Yasui and T. Kita: J. Phys. Soc. Jpn. **70** (2001) 2852.
Gap anisotropy and de Haas-van Alphen effect in type-II superconductors.

〈解説〉

1. 大川房義: 日本物理学会誌 56 巻 1 号 (2001) 41.
守谷先生のご批判に答える

4. 学術講演

〈一般講演〉

1. 安井甲次・北 孝文 「3次元超伝導状態における dHvA 効果の定量的解析」
2001 年日本物理学会秋の分科会 (徳島大学) 講演番号 18pZB1
2. 北 孝文 「超伝導準古典方程式におけるゲージ不変性とホール項」
2001 年日本物理学会秋の分科会 (徳島大学) 講演番号 18pZB2
3. 北 孝文 「超流動 ^3He の高速回転場における渦糸相図」
2001 年日本物理学会秋の分科会 (徳島大学) 講演番号 18pWB2
4. 北 孝文 「超流動 ^3He の高速回転場中における渦相図」
物性研究所短期研究会「量子凝縮系の超流動と量子渦」(2001 年 10 月 18 日-19 日)

5. 北 孝文 「多成分系の量子渦構造」
物性研究所短期研究会「高温超伝導体におけるボルテックス・マターの物理」(2001年12月10日-11日)

5. 科研費・助成等の取得状況

- 大川房義 科学研究費補助金(新規) 基盤研究 (C)(2) 1,700 千円
1/d 展開による近藤格子の理論的研究
- 北 孝文 科学研究費補助金(新規) 基盤研究 (C)(2) 900 千円
超伝導渦糸状態の理論的研究
- 北 孝文 北海道大学プロジェクト研究(新規) 分担 5,000 千円
ナノ・トポロジカル新物質の発見に基づく、その物質の量子物性と量子機能素子の研究