

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540341

研究課題名（和文） 臨界点近傍の遍歴電子磁性体の磁化曲線に及ぼすゆらぎの効果

研究課題名（英文） Effects of fluctuations on magnetic isotherms of itinerant electron magnets around their critical points.

研究代表者

高橋 慶紀 (Takahashi Yoshinori)

兵庫県立大学・物質理学研究科・教授

研究者番号：90143544

研究成果の概要（和文）：申請者はこれまで遍歴電子強磁性体を理解するためのスピンゆらぎ理論の構築を行ってきた。本課題は、臨界点近傍の磁化曲線の振る舞いに特に着目し、金属の磁性についての理論のさらなる発展を意図したものである。本課題の成果として、軸性の磁気異方性が存在し、磁気ゆらぎの成分が主に1成分に限られる場合の取り扱いが可能となり、実験で得られる磁気的性質の定量的な理解が可能となった。またこれがきっかけで、量子臨界点近傍でよく発現するメタ磁性転移の現象を説明するための新たな展望を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：I have been involved in developing the spin fluctuation theory to understand various magnetic properties of itinerant electron magnets. This subject was planned for further developing the theory paying particular attention on magnetization curves around the critical temperature. As a result, I have succeeded in extending the theory that enables our treatments of axial magnetic anisotropies in itinerant magnets even quantitatively. It also brought us a foresight for understanding the metamagnetic transitions observed well around the quantum critical points.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物性II

キーワード：磁性、遍歴磁性、スピンゆらぎ

1. 研究開始当初の背景

(1) 遍歴電子磁性の理論において、磁化率のキュリー・ワイス則の温度変化の説明に成功したという点で SCR スピンゆらぎ理論が特に有名であるが、その後の研究の進展によって、この理論にもいろいろな不都合のあることが現在では知られている。その原因は、この理論が磁化曲線の Arrott プロット (M^2 vs H/M) の直線性を仮定し、ゼロ点ゆらぎの影

響を無視したことによるものである。申請者によってもたらされたその後のスピンゆらぎ理論の発展によって、これらの不都合はほとんど解消し、磁気異方性が無視できる等方的な金属磁性に関しては、一般的な理解がかなり進んでいる。

(2) 一方で依然として未解決の問題も残されている。例えば、最近関心を集める遍歴電子メタ磁性転移の従来理論の基本となる考

え方が、新たなスピンゆらぎ理論とは矛盾することがわかっている。大きなゆらぎが発生すると考えられる、フラストレーションの存在する系や、擬低次元金属磁性体についての理解も未だ十分とは言えない。低対称の結晶でよく現れる磁気異方性の取り扱いの問題も残されている。これら多くの問題が臨界点近傍の磁化曲線の取り扱いと密接に関係している。

2. 研究の目的

上の「研究開始当初の背景」で述べた問題を解決するか、またはそのための道筋をつけようとするのが本課題の研究目的である。当初は次に挙げる問題の解決を目標とした。

(1) 最近では層状化合物などで現れる低次元磁性体に関心が集まっているが、多くの場合に純粋に低次元系の問題として理論的な取り扱いがなされている。申請者はすでに過去に、実験との比較の観点から、擬2次元系の遍歴電子磁性の問題を取り扱った論文を発表したが、そのとき用いた動的磁化率の波数、周波数依存性の仮定には、少し問題が残っていた。この仮定の妥当性も含め、この系の理論的な取り扱いについて再検討を行う。

(2) 臨界温度の極めて低い遍歴磁性体について、低温極限では通常の場合とは異なる相転移現象が発生することが知られ、量子相転移と呼ばれている。この状況では熱ゆらぎと量子ゆらぎが互いに競合し、古典的な臨界現象に影響を与える。多くのこれまでの研究では量子臨界点における特異性に主な関心があった。これに対し、特に磁化曲線のふるまいに着目し、臨界点だけにとどまらず系が近傍にある場合に、温度や外部磁場が変化することによる古典-量子相転移の移り変わりの様子をスピンゆらぎ理論の立場から明らかにする。

(3) 等方的な系に対する従来のスピンゆらぎ理論を、磁気異方性の存在する場合に拡張する。現象として異方性は磁化曲線として表れ、また特に低温極限の磁化曲線がゼロ点ゆらぎの磁場による抑制効果に支配されることが知られている。系の対称性と矛盾しない異方的なスピンゆらぎの存在に関連付けて、磁化曲線に現れる異方性を明らかにする。

(4) これまでに発展させたスピンゆらぎ理論と矛盾しない、メタ磁性転移の理論の構築を目指す。現在の理論の考え方に従えば、基本的にスピンゆらぎの磁場による抑制効果に支配されて磁化曲線が決まると考えられている。これは低温極限の場合にも当てはまる。この考え方に基づく限り、現象の発現に都合のよい磁化曲線を仮定することができず、したがってメタ磁性転移を説明することは極めて難しい。従来の理論に新たな発想を付け加え、この問題の解決を目指す。

3. 研究の方法

この課題で取り上げようとしたどの問題も、等方性を仮定した従来の理論を、それぞれの問題にどのように拡張するかに関係がある。より具体的な研究方法を下記に示す。

(1) これまでの等方的なゆらぎの理論を1軸異方性をもつ場合に拡張する。その際に、適切な磁化曲線が得られることに常に留意する必要がある。この考えに基づき、等方的な場合と質的、量的な面でどのような類似や相違があるかを解析的な手法と数値計算の実行によって得られる温度依存性などの比較によって明らかにする。理論のモデルに対応すると考えられる適当な系があれば、測定結果との定量的な比較によって理論の検証を行う。

(2) メタ磁性転移について、磁気的自由度以外の隠れた自由度による影響を調べる。スピンゆらぎの寄与だけを考慮する限り、自由エネルギーに対して転移の発現に必要なとされるような負の非線形項の存在を仮定することは困難であるように思われた。したがって、以前から隠れた自由度の有力な候補として磁気体積効果の影響の可能性を考えていた。この考えを推し進め、特に系が磁気不安定点にある場合の磁化曲線に対し、体積変化の影響を詳しく解析する。

(3) 遍歴電子磁性の問題に対する量子ゆらぎの重要性をいち早く指摘したのは申請者による論文が最初である。実際に観測される低温磁化曲線が、定量的にもその影響で説明できることが明らかになっている。申請者のスピンゆらぎ理論は、明瞭な形で量子ゆらぎと熱ゆらぎの寄与が両方含まれている。そこで、系が量子臨界点近傍に近づいたときに、熱的な成分と量子ゆらぎ成分との間にどのような競合が起こるかについて詳しく解析する。

(4) 擬2次元遍歴磁性の問題について用いる動的な磁化率について、簡単なエネルギーバンドのモデルを用いてその波数、周波数依存性についての数値計算を行ってみる必要があるのではないかと現在では考えるようになっている。

4. 研究成果

(1) Ising的な異方性を有する遍歴磁性のスピンゆらぎ理論を確立することができた。等方的なこれまでのスピンゆらぎの理論を拡張することにより、1軸的な異方性を有する遍歴磁性体の磁気的、熱的な性質を取り扱うための理論を構築した。特に興味深い結果として、ゆらぎの成分が減ったことから、自発磁化が臨界温度で一般に不連続な温度変化を示す結果が導かれた。数値的に求めた温度変化の結果を次のページの図に示す。この図では異なるパラメータ比 T_c/T_0 に対する計算結

果が示されていて、この比の値が小さいほど不連続性が弱まる傾向が示されている。ほぼ平行して、NMR, NQR の手法を用いた京都大学の石田等の実験グループによって、層状ウラン化合物 UCoGe の自発磁化が、臨界温度近傍のある温度範囲で常磁性と強磁性の共存を示唆する報告が現れた。これは、不連続な自発磁化の理論の結果に対応する可能性がある。この他、自発磁化の温度変化や磁化率の温度依存性について、実験と比較可能な定量的な性質を明らかにした。実際に UCoGe の低温の自発磁化の実験結果は、理論の結果と定量的にほぼ一致することが、その後の名古屋大学の出口等の実験によって明らかにされている。

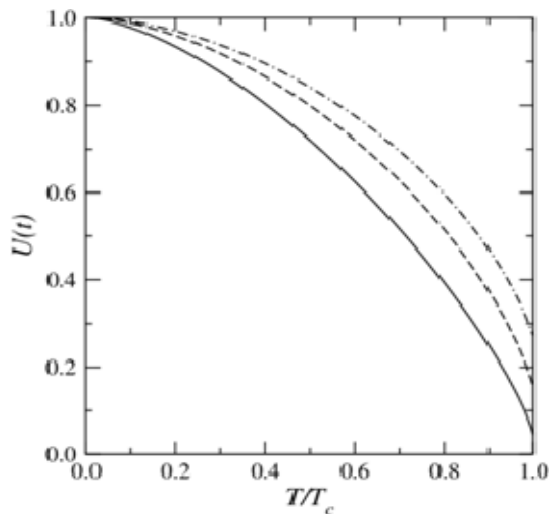


図: 基底状態の値で規格化した自発磁化の 2 乗 $M^2(T)$ の温度変化理論の研究と (2) メタ磁性転移の新たな起源を提案できた。遍歴電子強磁性体の磁気不安定点近傍でよく観測されるメタ磁性転移の起源として、従来はフェルミ準位近傍の特異な状態密度曲線の形状にその原因があり、自由エネルギーの磁化に関する展開の 4 次項の係数が負になるためと考えられている。一方で、これまでの多くの低温磁化曲線の Arrott プロットによる定量的な解析から、スピンのゼロ点ゆらぎの磁化曲線への支配的な影響が確認されている。これまでのメタ磁性転移の考えとは相容れない結果である。そこで、磁性以外の自由度として、体積変化の磁性への影響を考慮に入れることにより、従来と同じような説明が可能であることを示した。今後はこの考えをさらに推し進め、実験結果とのより詳細な比較を含めた検討が必要である。

(3) スピンゆらぎ理論の整合性についての検証。磁氣的相転移点においても、通常の相転移と同様に種々の磁氣的性質の異常な温度、磁場効果の間にスケーリング則が成り立つはずである。従来は、このような観点からの理論の内部矛盾についての検討はほとんど

なされていなかった。実際にチェックをした結果、SCR 理論ではスケーリング則が破綻し、その原因が臨界温度における磁化曲線の取り扱いにあることが明らかになった。申請者による理論ではこの関係が満たされ、この点においても矛盾のないことがはっきりした。これは、磁気相転移の理論的な取り扱いにおける磁化曲線の重要性を改めて示唆する点で重要な結果である。

(4) 臨界温度が極めて低い、いわゆる量子臨界点の近傍における磁氣的なふるまいについて以前から大きな関心が寄せられているが、それらの多くは系が臨界点にある場合の性質に主な関心があった。そこで、スピンゆらぎの理論の観点から、磁性体が量子点に限らずその近傍にある場合のクロスオーバー現象についての検討を行った。つまり、古典的な臨界現象と量子臨界現象と呼ばれる性質との間の移り変わりについて、熱ゆらぎと量子ゆらぎのどちらが支配的な影響の移り変わりを調べることによって明らかにした。その結果、遍歴磁性の場合は両方の性質の移り変わりが起こるのではなく、両方が常に同時に存在し、片方、たとえば熱ゆらぎの寄与の消滅が高温相で存在する量子効果が表に表れることにつながることを明らかにした。

(5) 期間中に特異な磁化曲線が観測される磁性体を実験的に見出された。その 1 つは FeSb_2 で、この物質は以前から関心がもたれた FeSi と同様な半導体的な伝導性を示し、また磁化率の温度変化についてもほぼ同様である。実験家と協力してこの物質の磁化曲線の解析から、自由エネルギーの磁化についての 4 次の展開係数がバンド理論の予測と異なる正の値であることを見出し、その温度変化も FeSi の場合と極めて類似することも明らかにした。申請者のスピンゆらぎ理論を支持する結果である。この他に、フラストレーションの存在が期待される磁性体 $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{N}$ について、交換相互作用行列の固有値の波数依存性や、静的磁化率の波数依存性についての計算を行い、実験結果の解析や解釈などの面で協力した。

(6) 磁氣的な性質を理解する観点からの磁化曲線の重要性に対する一般的な認識は未だ不十分である。この状況を改善する目的で、平成 21 年度では、京都大学の大学院で行った特別講義で用いた講義の内容を、「物性研究」に講義ノートとして公開した。これとは別に、我が国の磁性の分野の研究者に役立つため、京都大学の吉村教授と共著で専門書を執筆し平成 24 年の春に出版した。

当初は、擬 2 次元系の問題も計画に一部に含まれていたが、磁気異方性に関わる興味深い実験系が見出されたことなどが原因で、この系については今回の期間内では十分検討す

る余裕がなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Y. Takahashi, Magnetic isotherm of itinerant electron magnets – A new approach to itinerant electron meta magnetism, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, Vol. 344, 2012, 012002/1-10, DOI: 10.1088/1742-6596/344/012002
- ② N. Hatayama, R. Konno, and Y. Takahashi, Effect of dimensionality crossover on magnetovolume properties of quasi one-dimensional weakly antiferromagnetic metals, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, Vol. 344, 2012, 012015/1-7, DOI: 10.1088/1742-6596/344/012015
- ③ T. Waki, S. Terazawa, T. Yamazaki, Y. Tabata, K. Sato, A. Kondo, K. Kinodo, M. Yokoyama, Y. Takahashi, and H. Nakamura, Interplay between quantum criticality and geometrical frustration in Fe₃Mo₃N with stella quadrangula lattice, *EPL*, 査読有, Vol. 94, 2011, 37004-1-6, DOI: 10.1209/0295-5075/94/37004
- ④ T. Koyama, H. Nakamura, T. Kohara, Y. Takahashi, Magnetization process of a narrow gap semiconductor FeSb₂, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol. 79, 2010, 093704-1-4, DOI: 10.1143/JPSJ.79.093704
- ⑤ T. Waki, Y. Umemoto, S. Terazawa, Y. Tabata, A. Kondo, K. Sato, K. Kinodo, S. Alchonchel, F. Sapina, Y. Takahashi, and H. Nakamura, Itinerant Electron Metamagnetism in eta-Carbide-Type Compound Co₃Mo₃C, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol.79, 2010, 093703-1-4, DOI: 10.1143/JPSJ.79.093703
- ⑥ Y. Takahashi, First-Order Magnetic Phase Transitions in Itinerant Electron Ferromagnets, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol.79, 2010, 083707/1-4, DOI: 10.1143/JPSJ.79.083707
- ⑦ 高橋慶紀, 講義ノート: 遍歴電子磁性とスピン揺らぎ理論、物性研究, 査読無、94巻, 2010, 531-648

[学会発表] (計 10 件)

- ① 高橋慶紀, 臨界点近傍の遍歴電子強磁性とスピン揺らぎ, 日本物理学会第 61 回年次大会, 2012 年 3 月 26 日, 関西

学院大学

- ② 高橋慶紀, 異方的スピン揺らぎの遍歴磁性への影響 (領域 8, 3 合同シンポジウム), 日本物理学会 2011 年秋季大会 (招待講演), 2011 年 9 月 23 日, 富山大学
- ③ 高橋慶紀, Ising 的な遍歴強磁性体の磁気比熱, 2011 年 3 月 25 日, 新潟大学
- ④ 高橋慶紀, Fe₃Mo₃N 化合物磁性の交換相互作用行列の波数依存性, 2010 年 9 月 25 日, 大阪府立大学
- ⑤ 奥田祐希, 異方的遍歴磁性体の自発磁化の温度依存性, 2010 年 9 月 24 日, 大阪府立大学
- ⑥ 中村裕之, 星型四面体格子のフラストレーションと Fe₃Mo₃N のスピン液体状態, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 23 日, 大阪府立大学
- ⑦ 高橋慶紀, 異方的遍歴電子磁性体の秩序状態のスピン揺らぎ理論, 日本物理学会第 65 回年次大会, 平成 22 年 3 月 22 日, 岡山大学
- ⑧ 奥田祐希, 遍歴磁性体の異方的磁化過程の理論, 日本物理学会第 65 回年次大会, 平成 22 年 3 月 20 日, 岡山大学
- ⑨ 寺澤慎祐, Fe₃Mo₃N の非フェルミ流体的挙動, 日本物理学会第 65 回年次大会, 平成 22 年 3 月 20 日, 岡山大学
- ⑩ 高橋慶紀, 鉄系化合物にみられる弱い遍歴磁性とその理論 (領域 3 シンポジウム), 日本物理学会 2009 年秋季大会, 平成 21 年 9 月 27 日, 熊本大学

[図書] (計 1 件)

- ① 高橋慶紀, 吉村一良, 内田老鶴圃, 遍歴磁性とスピン揺らぎ, 2012, 272 頁

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 慶紀 (Takahashi Yoshinori)
兵庫県立大学・物質理学研究科・教授
研究者番号: 90143544