

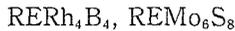
氏名・(本籍)	すずきみちたか 鈴 木 道 孝
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 1032 号
学位授与年月日	昭 和 62 年 4 月 30 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 物理学専攻
学位論文題目	強磁性超伝導体の磁化過程
論文審査委員	(主査) 教 授 立 木 昌 教 授 糟 谷 忠 雄 助 教 授 前 川 禎 通

論 文 目 次

第一章	導 入
第二章	臨界磁場と磁化曲線の傾き
第三章	種々の磁化過程
第四章	まとめと結論
	謝 辞
付録A	超伝導系の自由エネルギー密度 f_s の導出
付録B	$D=0$ の場合の漸近展開
付録C	マイスナー状態へのスピン分極の効果
	参考文献
	図

論文内容要旨

磁性と超伝導は、低温での代表的な秩序状態であり、同一の物質内で磁気秩序と超伝導秩序が共存し得るかという問題は古くから興味を持たれていた。1977年に、大きな局在スピンの格子点に並び、且つ、超伝導の性質を示す磁性超伝導体が発見され、この共存は現実に可能であることが確証された。その後、一連の磁性超伝導体が続々と発見され、これらの物質を手掛りとして、磁性と超伝導の間の相互作用の研究は、実験的にも、理論的にも盛んに行われるようになってきている。これらの磁性超伝導体の代表的なものは、次の公式で表わされる。



ここで、RE は、稀土類元素を表わす。このうち、 ErRh_4B_4 と HoMo_6S_8 の場合は、一つの物質で、温度によって、超伝導相と強磁性常伝導が現れる。これらの物質は強磁性超伝導体と呼ばれる。特に、 ErRh_4B_4 では単結晶が作成されており、異常な磁化曲線が報告されている。

強磁性超伝導体 ErRh_4B_4 の異常な磁気的性質は、以下のようにまとめられる。温度が下がるとつれ、超伝導臨界温度 T_{c1} (8.7 K) 以下で超伝導相になり、さらに T_{c2} (0.7 K) で超伝導が壊れ、強磁性常伝導相になる。磁気的異方性が強く、容易軸方向で際立った磁気的異常が見られる。上部臨界磁場 H_{c2} は、 T_{c1} より温度が下がるにつれ、一旦上昇するが、5.5 K で極大値をとり、その後、徐々に下降し、 T_{c2} で零になる。一方、 H_{c1} は単調に増加し、1.4 K で H_{c2} と値を同じくする。それ以下の温度では、混合状態は消え、タイプ I の磁化過程を示す。 ErRh_4B_4 における最も特異な現象は、容易軸方向の磁化曲線に見られる。 T_{c1} 付近の超伝導領域の温度で、通常の非磁性超伝導体とは反対の上向き凸の曲率が現れる。この傾向は温度が下がるにつれ、一層顕著になり、3.3 K では磁化曲線に不連続が現れる。以下、この不連続は増大し、タイプ I に移行する。

強磁性超伝導体では、その他にも通常の超伝導体では見られない、特異な磁気的性質が起こる可能性が理論的に指摘されている。たとえば、 H_{c1} においても、一次相転移が起こる可能性が指摘されている。また、外部磁場が零で、超伝導体に自発的に渦糸が入り込む自己誘導渦糸状態の可能性が指摘されている。これらを考え併せると、強磁性超伝導体では変化に富んだ磁化過程が出現可能なことになる。タイプ II の磁化過程においては、 H_{c1} で一次相転移を示すもの、 H_{c2} で一次相転移を示すもの、そのどちらにおいても一次相転移を示すもの、などが考えられる。これらの磁化過程は、 H_{c1} での相転移の次数を i とし、 H_{c2} での相転移の次数を j とし、タイプ II/ i - j ($i, j=1, 2$) と整理できる。この記法を用いて、 ErRh_4B_4 の磁化過程は、温度下降に伴い、常伝導常磁性、タイプ II/2-2、タイプ II/2-1、タイプ I/1、常伝導強磁性と変遷するということができる。これら 4 種類のタイプ II に加えて、タイプ I と自己誘導渦糸状態を含め、計 6 種類の磁化過程が考えられる。これらの磁化過程は、それぞれ、どのような状況のもとで現れるのかを本研究は統一的な観点で調べた。また、それらの現象の起こる機構を明らかにした。

ErRh₄B₄で観測されている異常現象を理解するためには、強磁性超伝導体中の稀土類イオンの持つ大きな局在スピンの超伝導電子との相互作用が重要であると考えられる。この相互作用としては次の二種類のものが重要であると考えられる。一つは超伝導電子による反磁性電流の作る磁場と局在スピンの間の電磁相互作用であり、もう一つは超伝導電子スピンと局在スピンの相互作用(s-f 交換相互作用と呼ぶ)である。これらの相互作用は、ErRh₄B₄において、同程度の大きさであり、両者とも強磁性超伝導体における異常現象を説明するために欠かすことができない。

本研究では、まず、H_{c1} (T), H_{c2} (T) 曲線および H_{c2}での混合状態側での磁化曲線の傾きを調べた。これらは、s-f 交換相互作用と電磁相互作用を考慮することにより実験結果を矛盾なく説明することができる。

H_{c2}での一次相転移について、Maki らは、強い外部磁場のもとで、外部磁場と超伝導電子スピンの相互作用によって生じる可能性を指摘している。しかしながら、強磁性超伝導体においては、H_{c2}の値はそれ程大きくなく、外部磁場と超伝導電子スピンの直接の相互作用は小さい。そのかわり、s-f 交換相互作用を通じて、稀土類イオンの大きな局在スピンの分子場と伝導電子スピンの相互作用が重要になる。

一般によく知られているように、一次相転移の起こる現象を解析するには、自由エネルギーを秩序変数で展開したとき、その4次の係数が負になることがあるので、6次の項まで採り入れる必要がある。従来のGLAG理論では、超伝導系の自由エネルギーを超伝導秩序変数で展開し、6次以上の項を無視している。したがって、必然的に、これを拡張して、高次の項の効果を取り入れる必要が生じる。しかしながら、GLAGの方法で高次の項の係数を正確に計算することは困難であるので、本研究では、以下に述べる方法でこれを行った。空間的に一様で、最大の超伝導秩序変数の値を持つマイスナー状態については、展開を用いずに正確にその超伝導秩序変数と自由エネルギーを計算できる。本研究では、8次の項までを採り入れ、6次と8次の係数はマイスナー状態の性質を矛盾なく満足できるように決定した。

本研究では、超伝導電子の他に局在スピンの自由エネルギーを求めることが必要であるが、これは以下のように行った。まず、全体の系を超伝導電子と局在スピンの二つの部分系に分けて考える。そして、s-f 交換相互作用は、それらの部分系の間働く分子場として扱う。このようにして得られた全系の自由エネルギーを、超伝導秩序変数、ベクトル・ポテンシャル、局在スピン磁化、伝導電子スピン磁化、の各変数で変分をとることによって、解くべき連立微分方程式を得る。磁化曲線の全体の形状、特に混合状態の領域を知るために、これをボーテックス型の解について数値的に解いた。これにより、磁化曲線の形状、特に、H_{c1}, H_{c2}の値やそこでの相転移の次数を知ることができる。

こうして得られた磁化曲線は ErRh₄B₄の異常な磁化曲線の振舞いを矛盾なく説明できる。また、一般的なパラメタについて、強磁性超伝導体で種々の磁化過程が現れる可能性があることが明らかになる。磁化過程は、一つの強磁性超伝導体においても、温度によって様々に変遷す

る。温度の他にも、磁化過程に影響するパラメタは、s-f 交換相互作用、スピン軌道相互作用、局在スピン間相互作用の有効距離などがある。それらの効果は、本研究で以下のように明らかになった。

s-f 交換相互作用が非常に大きいときは、超伝導の安定領域は消失するが、それ程大きくない範囲では、s-f 交換相互作用は H_{c2} での相転移を一次相転移にする効果を持つ。これは、s-f 交換相互作用による分子場が超伝導電子対を壊すように働くため、超伝導と強磁性の真向からの共存状態を不安定化し、準安定状態とするからである。これに対して、スピン軌道相互作用は、伝導電子のスピンを反転させる散乱を引き起こすため、s-f 交換相互作用の超伝導対破壊の効果を弱める。したがって、スピン軌道相互作用が強い系では、 H_{c2} での相転移は通常の二次転移になる。これらの相互作用は H_{c1} の相転移の回数には大きな影響を及ぼさない。

H_{c1} の相転移については、その回数を決定的に左右する因子は、局在スピン間相互作用の有効距離である。この距離がロンドンの侵入距離と同程度以上になったときには、ポーテックス間の相互作用は単純に斥力にはならなくなる。ポーテックス間の相互作用が引力になると、複数個のポーテックスが一度に、マイスナー状態にある超伝導体に入り込むので、 H_{c1} での相転移は一次相転移になる。

自己誘導渦糸状態は、渦糸状態の一種であるので、ランダウ・パラメタが大きいときに安定化するが、その他、s-f 交換相互作用に大きく左右される。s-f 交換相互作用が強くなると、自己誘導渦糸状態は急激に不安定化する。ErRh₄B₄ で H_{c2} で一次相転移が起こる場合のように、s-f 交換相互作用がある程度大きい場合には、自己誘導渦糸状態は起こりにくくなる。

ErRh₄B₄ は、磁性と超伝導が共存することからして、通常の磁性体と比して、s-f 交換相互作用は小さいと考えられる。しかし、自己誘導渦糸状態が現れないことや、 H_{c2} で一次相転移が起きることなどからして、ある程度効いていると考えられる。同じことから、スピン軌道相互作用は弱いと考えられる。 H_{c1} で一次相転移が見られないことから、局在スピン間相互作用の有効距離はロンドンの侵入距離に比して短いと考えられる。

以上まとめると、本研究で、強磁性超伝導体において、通常の超伝導体とは異なる種々の磁化過程が起こり得ることが理解できた。それらの磁化過程は、タイプ II/i-j (i, j=1, 2) の 4 種類、それから、タイプ I、自己誘導渦糸状態が現れる場合などである。これらの内のどの磁化過程が実現するかは、主に、温度、s-f 交換相互作用、スピン軌道相互作用、局在スピン間相互作用の有効距離に依存する。強磁性超伝導体 ErRh₄B₄ において観測されている磁化過程の異常な温度変化も本理論を用いて満足の行くよう説明することができた。

論文審査の結果の要旨

稀土類イオンを含む超伝導体で、大きな磁気モーメントをもつ稀土類イオンが格子点に規則的に並んだものを磁性超伝導体と呼んでいる。最近、この磁性超伝導体が数多く発見され、それが示す特異な性質の起源を解明するための研究が活発になされている。磁性超伝導体の中では稀土類イオンの大きな磁気モーメントと超伝導電子の相互作用によって普通の超伝導体では見られない変わった現象が起ることが期待出来る。鈴木道孝君はその中で特に磁化過程が普通の第2種超伝導体のものとは非常に異なったものになることを予測してその理論的研究を行った。

実際にこの研究の途中で強磁性超伝導体である ErRh_4B_4 という化合物の磁化曲線の実験結果が出たが、これは普通の第2種超伝導体のものとは似もつかない奇妙なものであった。磁化の容易方向に磁場をかけたとき、超伝導転移温度 T_c より温度を下げるに従って、磁化曲線に顕著な上に凸な曲率が現れ、ある温度以下では上部臨界磁場 H_{c2} で磁化の飛びが出現する。さらに温度を下げるとこの飛びは増大し、ある温度以下で第2種超伝導体から第1種超伝導体へ変化する。鈴木君の理論的研究の結果は上述のふるまいをよく説明することが出来る。

磁化の異常なふるまいが起るのは T_c よりずっと低い温度なので従来の理論は適用できない。鈴木君はまず低温まで通用する超伝導の近似理論を開発した。低温まで通用する自由エネルギーを求め、これを変分することによって磁化、超伝導秩序パラメタ、ベクトル・ポテンシャルに関する連立微分方程式を導く。これを解くことによって、 ErRh_4B_4 に見られる異常な磁化過程を説明できると同時に、一般の強磁性超伝導体において、温度や、s-f相互作用、スピン軌道相互作用等系のパラメタによっていろいろの磁化過程が現れることを示した。これらの磁化過程には H_{c2} で磁化に不連続が現れるもの、下部臨界磁場 H_{c1} で磁化に不連続の現れるもの、両方に不連続が現れるもの、それに第1種、自己誘導渦糸状態が現れるものがある。

計算が困難なために普通の第2種超伝導体の磁化過程の理論もあまりない現状であるが、鈴木君は磁性超伝導体という複雑な系の磁化を計算することのできる理論を作りこれを用いてこの系の磁化曲線を計算し、この分野に有用な知見をもたらした。この研究は鈴木君が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。

よって鈴木道孝提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。