

第2種超伝導体の表面臨界磁場に及ぼす境界形状依存性

鹿大・工 加藤龍蔵

1. はじめに

第2種超伝導体をデバイスとして利用する際には、磁場中での超伝導状態を安定させることが重要であり、超伝導体中に侵入した量子化した磁束をピン止めすることが必要となる。

有限系での超伝導体においては、超伝導体と外部との境界によるピン止め力が、超伝導体内部に存在するピン止めポテンシャルよりも大きいことがわかっている。この超伝導体表面でのピン止めポテンシャルは、超伝導体の形状に依存するため、超伝導体を任意の大きさの有限要素に分割し、ギンツブルグ・ランダウ方程式に基づき、シミュレーションが可能となる有限要素法プログラムを開発し、このプログラムにより、様々な形状の超伝導体の磁束密度分布をシミュレーションして、境界形状が表面臨界磁場や表面でのピン止めポテンシャルに及ぼす影響を明らかにすることが、本研究の目的である。

2. 研究経過

三角要素の2次元有限要素法によりロンドン方程式を数值的に解くプログラムを完成させた。このプログラムにより、一様な外部磁場中における円柱状超伝導体の内外の磁束密度の空間分布を数值的に求め、解析的に求められる結果と一致することを確認した。印加する外部磁場は、円柱状超伝導体の中心軸に垂直な場合と平行な場合の2通りについて解析を行った。なお、解析対象の要素分割は、デローニ分割により3角要素に分割するプログラムを開発した。また、ゼロ磁場での非線形項を含むギンツブルグ・ランダウ方程式に基づく有限要素法プログラムを開発した。今後、任意の磁場中での超伝導体内の磁束密度分布を解析可能なプログラムを完成させ、任意形状の超伝導体の表面臨界磁場をシミュレーションするプログラムを作成する予定である。

3. 研究成果

2次元有限要素法により、一様な外部磁場中における円柱状超伝導体の内外の磁束密度の空間分布を数值的に求めた。右図は、円柱状超伝導体の中心軸に垂直な一様な磁場中での超伝導体表面近傍での磁束密度の空間分布をベクトル図で表したものである。

マイスナー効果により磁束が排除された結果、超伝導体表面での磁束密度の最大値は、外部磁場による磁束密度の2倍となり、解析解と一致した。また、超伝導体外部の磁束密度の中心軸から2乗に反比例する結果も解析解と一致し、有限要素法により超伝導体表面近傍での磁束密度をシミュレーションすることが可能となった。

4. まとめ

マイスナー効果により超伝導体内部から排除された磁束により空間的に不均一になった磁束密度分布をロンドン方程式に基づいた2次元有限要素法により数值的にもとめることができた。

5. 発表（投稿）論文

「マイスナー効果に及ぼす超伝導体形状の影響」

加藤龍蔵，日本物理学会第63回年次大会、平成20年3月

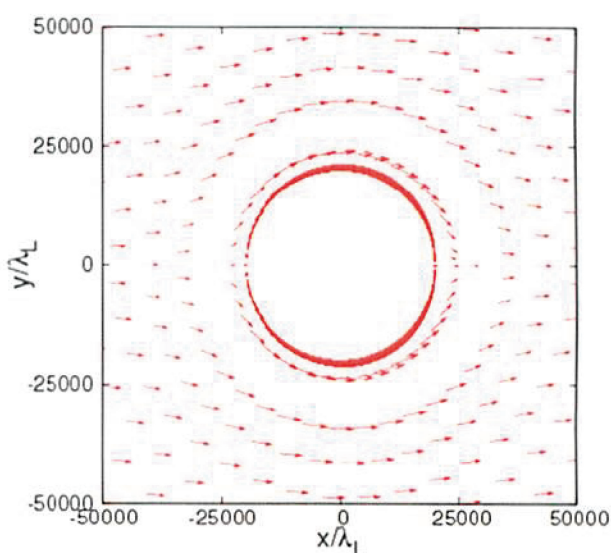


図 円柱状超伝導体における磁束密度の空間分布

エキゾチックメタルにおける超伝導近接効果の理論

北大・工 浅野泰寛

1. はじめに

超伝導体に普通の非超伝導金属（常伝導体）を接合したとき、超伝導を担うクーパー対が超伝導体から常伝導体へ染み出す現象は近接効果と呼ばれている。1970年代初頭から始まる超伝導近接効果の研究の歴史は長いが、1990年代半ば以降ヨーロッパを中心として急激に競争の激しい研究分野になっている。超伝導デバイスは量子ビットの有力候補になっていることがその原因である。研究競争の中で超伝導近接効果の多彩な側面が次々に明らかになり、そうした基礎物理の豊富さも近接効果が魅力的な理由である。この研究では金属における超伝導（スピン 1 重項 s 波超伝導）のクーパー対が、常伝導金属や強磁性金属に染み出す近接効果に焦点が絞られている。驚くべき事は、こうした単純な接合にもかかわらず近接効果は温度、常伝導金属の電気伝導率、強磁性体の交換エネルギーなどパラメータの変化に伴い極めて多彩な性質を示すという事実である。

2. 研究経過

我々はスピン 3 重項 p 波超伝導体の近接効果が、極めて異常であることを 2005 年から主要してきたが、なぜ異常なのかを理解するには時間を要した。解析の結果、金属中に染み出すクーパー対の対称性が奇周波数対称性によって特徴づけられることを明らかにした。クーパー対の周波数依存性はこれまであまり顧みられなかった性質である。それは現在実験的に確認されている超伝導は全て偶周波数超伝導だからである。奇周波数超伝導・超流動は凝縮エネルギーを稼ぐことが難しく、どのような物質系で発現が期待できるかなど、現在でも理論的な予想の範囲を超えていない研究領域である。しかし、奇周波数クーパー対の存在は近接効果においては 2001 年ごろから着目されはじめた。当初強磁性金属と超伝導体の接合で議論されたが、我々は奇周波数ペアを作る別のルートを示したことになる。

3. 研究成果

異常近接効果の知見に基づき、スピン 1 重項超伝導体とスピン 3 重項超伝導体を峻別する新たに実験法を提案するに至った。従来この目的のための実験法は NMR, μ SR, をはじめとし数多くあるが、決定的な実験というのが欠けている。我々は電見伝導という比較的精度の高い実験データの得られる観測手段を用い、T 字型接合と我々が呼んでいる微細接合における非平衡電気伝導から判定するという提案を行った。現在産総研の研究グループと連携して、本研究の理論予想を確かめるべく実験を行っている。

4. ま と め

超伝導近接効果は古くからの研究課題であるが、我々の研究成果により、極めて新しい側面が明らかになった。本課題では電気伝導に及ぼす影響を調べたが、今後磁気的な応答に焦点を当てた研究を予定している。

5. 発表（投稿）論文

“Conductance Spectroscopy of Spin-triplet Superconductors”,
Y. Asano, Y. Tanaka, A. A. Golubov, and S. Kashiwaya,
Phys. Rev. Lett. 99, (2007) 067005(1)-(4).

“Odd-frequency Pairs and Josephson Current through a Strong Ferromagnet”,
Y. Asano, Y. Tanaka, and A. A. Golubov,
Phys. Rev. B, 76, (2007) 224525(1)-(11).

研究課題名： La 系銅酸化物のストライプ構造に対する圧力効果

埼玉大 片野 進
東北大・金研 藤田 全基、山田 和芳

1. はじめに

高温超伝導は Mott 絶縁体に電荷をドーピングする事で発現する。そのため反強磁性的に相関したスピンの揺らぎが超伝導発現に重要な役割を果たしていると考えられている。一方、La-214 型高温超伝導体に対する中性子散乱実験では、超伝導発現の舞台となる二次元 CuO_2 面において、ドーピングされた電荷が一次的に配列(ストライプ秩序)することが明らかになっている。しかもこのストライプ秩序状態は三次元の結晶構造とも密接に関係している。従って、外的要因を加えてストライプ秩序や結晶構造を制御し、そのときに起こるであろう磁気相関の変化と超伝導特性との関係を調べれば、機構解明に繋がる重要な情報が得られると期待される。Nd や Eu を置換して低温正方晶構造(LTT)を安定化させた LSCO 単結晶においては、超伝導転移温度(T_c)の異方的圧力効果が示されている。この相ではスピンと電荷のストライプ秩序が存在するので、一軸圧力印可によりストライプ秩序が如何に変化するかを調べれば、超伝導とストライプ秩序の関係が明確になると期待される。

2. 研究経過

これまでの粉末試料を用いた研究により結晶構造が変化する圧力は 5kbar 程度と低いことがわかっている。そこで本研究では比較的低い圧力を十分大きな単結晶試料に掛けることが可能な試料セルを作成し、中性子散乱による磁気秩序の圧力変化を観測することを試みた。測定には浮遊帯域熔融法で作成した Nd をドーピングした LSCO の大型単結晶を用いた。また、中性子散乱実験は、東北大学金属材料研究所が日本原子力研究所に所有する三軸分光器 AKANE で行った。

3. 研究成果

0.5cc の $\text{La}_{1.58}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_{0.12}\text{CuO}_4$ 単結晶試料に対して中性子弾性散乱実験を行った。圧力セルに試料を封入した状態で、零圧力下の低温 10K で磁気秩序に対応する格子非整合な Bargg ピークを観測した。そこで、圧力に対するこのピークの変化を調べたところ、0.83kbar ではピーク位置は変化せず、散乱強度が極端に弱くなることを見いだした。圧力セルからくるバックグラウンドが磁気シグナルに比べて大きいため、定量的な解析は困難ではあるが、定性的には圧力印加により磁気秩序が弱められ、それと競合する超伝導が復活するという描像と合致する結果を、散乱実験で示すことに初めて成功した。

4. ま と め

銅酸化物で見られる格子非整合磁気秩序状態の圧力効果を、中性子散乱実験で調べた。圧力印加により磁気秩序状態が不安定化することを、散乱実験で示すことに初めて成功した。今後は、バックグラウンドの改善により、磁気秩序だけではなく電荷秩序に関する圧力効果の情報も引き出せると考えられる。

5. 発表(投稿)論文

なし。

ウラン系磁性超伝導における磁性と超伝導の相関の研究

名古屋大学・理学研究科 佐藤 憲 昭、 東北大・金研 佐藤 伊 佐 務

1. はじめに

ウラン系磁性超伝導体における磁気秩序と超伝導の共存・競合の問題は、固体電子論の主要な研究テーマの1つとなっている。特に、昨年発見報告された「強磁性と超伝導の共存・競合を示す UCoGe」(Huy *et al.*, Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 067006) が注目を集めている。従来の固体電子論によれば、強磁性を作り出す巨大な内部磁場は超伝導クーパ対を破壊すると考えられるが、UCoGe は、この常識に反し、約 2.5 K のキュリー温度をもつ強磁性体でありながら、約 0.5 K の転移温度をもつ超伝導体でもある。この特異な物質の中で、これら 2 つの競合的な長距離秩序は、如何に「共存」しているのだろうか。

2. 研究経過

この問題を解明するため、金研アルファ放射体実験室に設置されているテトラーク炉を用い、多結晶試料を作成した。これを名古屋大学に送付し、種々の基本的物性測定を行った結果、確かに、強磁性と超伝導がマクロに共存していることを確認した。さらに、ミクロな情報を得るため、京大・石田氏らとの共同研究により、NMR/NQR 実験を行った。次に、異方性などの情報を得るため、上記テトラーク炉を用い、引き上げ法により単結晶の育成を行った。これを名古屋に送付し、基礎物性の測定、特に、2 つの長距離秩序の相関の解明を目指し、圧力下の実験を行った。

3. 研究成果

図 1 に圧力を固定した場合の交流磁化率の温度依存を示す。常圧で 2.5 K 付近に見える強磁性に伴う大きなピークは、圧力の増大とともに低温側にシフトする。一方、超伝導に対応する反磁性は、圧力の増大とともに高温側にシフトする。現時点までの測定 (最大 5.1 kbar) で、キュリー温度と超伝導転移温度が丁度交差するところまで達した。今後さらに圧力を増大させることにより、超伝導と強磁性が独立であるか否かについて情報を得ることができよう。また、NMR/NQR の実験から、次の 2 点、すなわち、核磁気緩和率において超伝導ギャップの形成を反映した成分と磁気的な成分の 2 成分が存在すること、および、「自己誘導渦糸」の存在を指摘した (下記発表論文を参照)。

4. まとめ

以上のように、所期の目的であった UCoGe の結晶育成は達成された。また、それを用いたマクロおよびミクロ実験のいずれにおいても、超伝導と強磁性が確かめられ、その共存の仕方として自己誘導渦糸が指摘された。この自己誘導渦糸は、磁性と超伝導の (理論的には知られていたが) 実験的には新しい共存状態であり、さらなる研究が必要である。

5. 発表論文

“Ferromagnetic quantum critical fluctuations and anomalous coexistence of ferromagnetism and superconductivity in UCoGe revealed by Co-NMR and NQR studies”, T. Ohta, Y. Nakai, Y. Ihara, K. Ishida, K. Deguchi, N.K. Sato, I. Satoh, J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 023707-1-5.

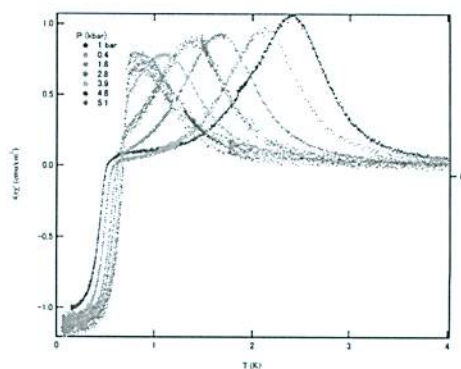


図 1 : UCoGe 単結晶の圧力下交流磁化率 (実部) の温度依存。磁化率の単位は、 emu/cm^3 である。2.5 K 付近に見られる大きなピークは、常圧における強磁性転移に対応し、圧力の増大とともに、低温側にシフトする。一方、超伝導による反磁性から決定される超伝導転移温度は、圧力とともに増大する。