

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 24 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13501

研究課題名(和文)精密磁気トルク測定による高温超伝導揺らぎの研究

研究課題名(英文) Investigation of the superconducting fluctuation in high-Tc superconductor by precise torque magnetometry

研究代表者

高橋 英幸 (Takahashi, Hideyuki)

神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・助教

研究者番号：10759989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導転移温度よりも高温から現れる、超伝導揺らぎの性質について研究した。超伝導揺らぎに伴い現れる微弱な磁化変化を観測するために、光干渉変位検出を応用した高感度磁気トルク測定装置を開発した。この装置により鉄系超伝導体FeSeの超伝導揺らぎ由来の磁化を正確に評価した。先行研究で期待されているようなBCS-BECクロスオーバーに起因する巨大な超伝導揺らぎは観測されなかった。一方で、銅酸化物高温超伝導体の超伝導揺らぎと類似した振る舞いが観測された点は興味深い。これは超伝導揺らぎが発現機構に依らず普遍的な性質を持つことを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導揺らぎはいわば超伝導の前兆現象であるので、その研究は超伝導発現のメカニズムを探るうえで重要である。しかし超伝導揺らぎにより生じる巨視的な物性の変化は極めて小さく検出が難しいため、その研究を難しくしていた。

今回新たに開発した磁気トルク装置はこれまでにない精度で超伝導揺らぎ由来の磁化変化を追跡できる。微小試料の測定も可能なため、研究期間内に測定した物質以外の物質にも応用できるため、今後超伝導揺らぎの研究の発展に貢献できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have studied the properties of superconducting fluctuations that emerge at higher temperatures than the superconducting transition temperature. We have developed a high-sensitivity torque magnetometry based on optical interferometric displacement detection to observe the weak magnetization changes that appear with superconducting fluctuations. We have succeeded in precisely characterizing the fluctuation magnetism of the iron-based superconductor FeSe. Giant superconducting fluctuations due to the BCS-BEC crossover, which was expected for this material, were not observed. On the other hand, it is interesting to note that the observed behavior is similar to that of superconducting fluctuations in high-Tc cuprate superconductors. This suggests that the superconducting fluctuations have universal properties regardless of the superconducting pairing mechanism.

研究分野：物性物理

キーワード：超伝導 超伝導揺らぎ 磁気トルク測定 鉄系超伝導体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超伝導体では、ゼロ抵抗で定義される超伝導転移温度よりも高い温度から、短い空間・時間スケールで関連したクーパ対が現れ、超伝導揺らぎを生じる。従来型の超伝導体では、超伝導揺らぎは超伝導転移温度 (T_c) 直上の非常に限られた温度範囲でのみ観測される。しかし、銅酸化物高温超伝導体では、短いコヒーレンス長と低次元性のために揺らぎの効果は増強され、様々な実験手法(ネルンスト効果、磁気トルク、高周波伝導度測定)で検証が可能である。超伝導揺らぎはいわば超伝導の前兆現象であるので、その研究は超伝導発現のメカニズムを探るうえで重要である。

もう一つの高温超伝導体のシリーズである鉄系超伝導体では、これまでとは異なった側面から超伝導揺らぎが注目されている。とくに、角度分解高電子分光により Fe(Se, Te) において超伝導ギャップがフェルミエネルギーとほぼ同じ大きさになっていることが明らかになって以来、鉄カルコゲナイド系の超伝導揺らぎが研究者の興味を引き付けている。このような条件は、冷却フェルミ気体のアナロジーとして、“BCS-BEC クロスオーバー”領域にあると表現される。二つの異なる物理系が同様の理論的枠組みで扱えるかというのは非常に興味深い問題であるが、その可能性を検証するための手段として、超伝導揺らぎの測定が提案されている。BCS-BEC クロスオーバー領域では、温度が下がるにつれ、擬ギャップ相に入る。この相では強く相互作用したフェルミオンは preformed pair を形成し、超伝導揺らぎを増強すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では FeSe の超伝導揺らぎにフォーカスして研究を進めた。研究開始以前から FeSe 単結晶 ($T_c \approx 9$ K) を用いて超伝導揺らぎの研究が活発に行われていたが、コンセンサスは得られていない状況にあった。磁気トルク測定により巨大な反磁性が 20 K 付近から観測されたとの報告があり、核磁気緩和率にも、その付近でかすかな異常が観測されていた。一方で、後発の磁化測定では巨大な反磁性は観測されず、高周波伝導度の測定でも見る揺らぎも異常といえるほどの大きさではなかった。

各実験結果の大きな違いは低 T_c 超伝導体の超伝導揺らぎの評価がいかに難しいかをもの語っている。先行の磁気トルク測定では、市販のピエゾ抵抗検出型カンチレバーが用いられていたが、我々は、光干渉によりカンチレバーの変位を検出する方法を用いてより精密な測定を行った。

3. 研究の方法

我々が開発した磁気トルク測定法の基本的なセットアップを図1に示す。平板上の試料を AFM 用カンチレバーに少量のエポキシ樹脂で接着した。FeSe の場合、 c 軸方向と ab 面内の「磁化率の異方性 $\Delta\chi = \chi_c - \chi_{ab}$ 」により磁気トルクが生じる。試料の c 軸が B 方向から θ 傾いたとき、磁気トルクの大きさは、

$$\tau = kl\Delta d = \frac{1}{2\mu_0} \Delta\chi V B^2 \sin 2\theta$$

となる。

変位 Δd はカンチレバーと接近させた光ファイバー端面とのあいだに構成したファブリーペロー干渉計の干渉強度の変化として読み取る。干渉強度 I はカンチレバー ファイバー間の距離 d とレーザー波長 λ の関数で、

$$I = \frac{I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}}}{2} - \frac{I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}}{2} \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

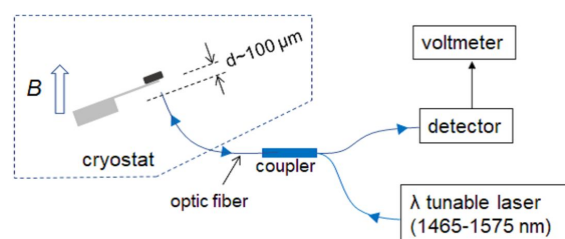


図 1. 実験セットアップの模式図。

とかける。ここで $I_{MAX}(I_{MIN})$ は干渉強度の極大(極小)値である。光源として 1465-1575 nm の波長可変レーザーを用いて、干渉計を感度が最大となる $d/\lambda = 1/8 + n/4$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) となるようにチューニングした。レーザー波長が参照スケールとなるため、複雑な較正をしなくとも変位の絶対値を正確に求められるのがこの手法の特長である。

試料温度は近くに置いたセルノックス温度計で測定した。試料と温度計位置の温度差が生じないように実験はヘリウムガス中で行った。ガスの流量を極力抑えることで、カンチレバーの振動ノイズは peak-to-peak で 0.1 nm 程度まで低減された。

4. 研究成果

図 2 は FeSe 単結晶の磁気トルク測定の結果である。ゼロ磁場下でバックグラウンド信号をあらかじめ取得し(図 2(a))、各磁場での測定データから差し引いた。観測されたカンチレバーの変位は磁場の 2 乗に比例している、測定の信頼性を表している。図 2(c),(d) は超伝導揺らぎ由来の反磁性シグナル $M^{fluc} = kl\{d(T, B) - d(T, 0)\}/VB\sin\theta$ の温度依存性である。 T_c 以上から反磁性シグナルが現れる様子が明確になっている。そのオンセット温度 T_t^* は磁場印加につれて高くなり、 $B = 10$ T においては $(1.6 \pm 0.05)T_c$ だった。 T_c 以下では、各磁場の $M^{fluc}(T)$ がある一点で交わっている。これは銅酸化物超伝導体でも観測されている磁化クロッシングと呼ばれる現象である。理論的には lowest-Landau-level 近似により再現でき、超伝導揺らぎの普遍的な性質の一つともいえる。

ここで、我々が観測した M^{fluc} の振る舞いは、先行のカンチレバー磁化測定で報告されたものと定性的にも定量的にも異なっていることを強調しておきたい。先行研究では超伝導揺らぎは低磁場領域で増強されると報告されているが、我々の結果では揺らぎが顕著になるのはむしろ強磁場領域である。さらに、強磁場領域でさえ、トータルの磁化に対して揺らぎの寄与は非常に小さい。図 2(a) に示したように、 $T = 10$ K、 $B = 10$ T では M^{fluc} により生じたカンチレバーの変位は 13 nm であるが、これは図 2(b) に示したトータルのトルク信号の 0.4% に過ぎない。これらの実験結果の大きな違いは、試料の質の違いのような些細な問題では説明できない。一方で、我々の結果は振動型磁力計を用いた磁化測定による結果とはコンシステントで、磁化クロッシングのような振る舞いもかなり似ている。

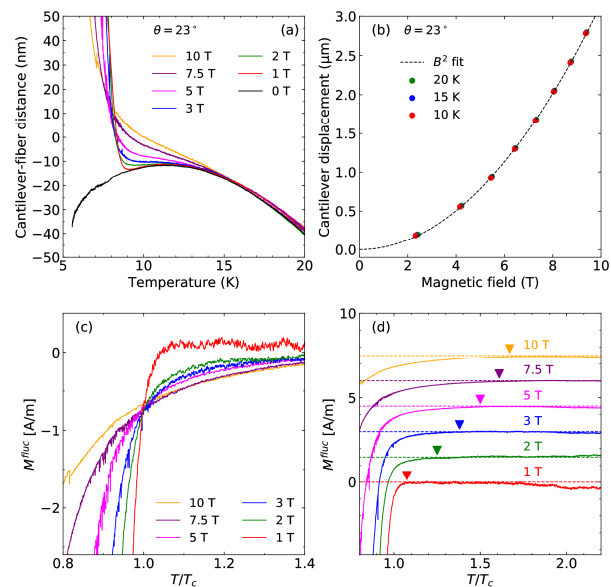


図 2. (a) $\theta = 23^\circ$ で測定した変位の温度依存性。ゼロ磁場でのデータは熱膨張により生じる干渉計のバックグラウンドを示している。(b) 強磁場領域でのカンチレバーの変位の磁場依存性。(c) (a) のデータから求められた超伝導揺らぎ由来の磁化成分 M^{fluc} 。(d) (c) のデータをオフセットして並べた。▼ は揺らぎのオンセット温度を示している。

図 3 に今回得られた T_{τ}^* を温度 磁場相図上にプロットした。我々の結果により、先行研究で報告されている揺らぎの相図は書き換えられた。FeSe の T_{τ}^*/T_c 自体は大きく、オーダーとしては銅酸化物の値と近い。銅酸化物では、高い T_c と二次元性のために揺らぎが広い温度領域で観測可能になっている。FeSe は T_c が低く二次元性が弱いにも関わらず、定性的に類似した振る舞いが観測されたことは一見驚きである。しかし、超伝導ギャップとフェルミエネルギーの比 Δ/E_F が大きいことを考慮すると、決して異常ではないことがわかる。Ginzburg-Landau 理論の枠組みでは、揺らぎの影響により熱力学的諸量が変化する温度領域は、Ginzburg-Levanyuk 数 G_1 で与えられる。クリーンな三次元的超伝導体では転移温度とフェルミ温度の比を用いて $G_1 \approx 80(T_c/T_F)^4$ と近似される。従来超伝導体を含め、多くの場合、 $G_1 \ll 1$ であるが、FeSe の場合は超伝導ギャップのエネルギーとフェルミエネルギーが拮抗するために $G_1 = 0.1 - 1$ となる。この値は二次元極限で計算される銅酸化物の値と同程度である。

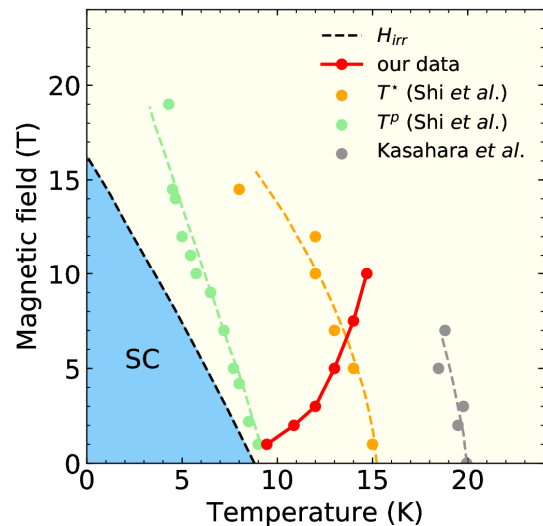


図3. 磁気トルク測定で決定した超伝導揺らぎのオンセット温度（赤線）と先行研究で主張された特徴温度との比較。

以上のように、光干渉変位検出を磁気トルク測定に応用することで、FeSe の超伝導揺らぎを正確に評価することに成功した。この物質に期待されているような BCS-BEC クロスオーバーに起因する現象は観測されなかったが、銅酸化物高温超伝導体の超伝導揺らぎと類似した振る舞いが観測された点は興味深い。超伝導揺らぎが発現機構に依らず普遍的な性質を持つことを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takahashi Hideyuki, Nabeshima Fuyuki, Ogawa Ryo, Ohmichi Eiji, Ohta Hitoshi, Maeda Atsutaka	4. 巻 99
2. 論文標題 Superconducting fluctuations in FeSe investigated by precise torque magnetometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 060503/1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.99.060503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋英幸, 大道英二, 太田仁, 小川亮, 鍋島冬樹, 前田京剛
2. 発表標題 光干渉変位検出方式のカンチレバー磁化測定によるFeSeの超伝導揺らぎ磁化の評価
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----