

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 1 月 14 日現在

機関番号：13201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610124

研究課題名(和文)磁場を用いた微粒子の空間捕捉 - 超伝導性の探査 -

研究課題名(英文)Trapping of superconducting microparticle using magnetic field

研究代表者

森脇 喜紀 (Yoshiki, Moriwaki)

富山大学・その他の研究科・教授

研究者番号：90270470

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウム中で超伝導物質表面をレーザーアブレーションすることにより微粒子を生成し、その微粒子を四重極磁場を用いて空間的に捕捉した。液体ヘリウムの温度を上昇させ微粒子が捕捉されなくなる温度 T_c を測定し、In、Reにおいて固体の超伝導転移温度と異なることを見出した。また、捕捉解放された微粒子の電子顕微鏡による観察により、微粒子は球形であり、その大きさは $1\mu\text{m}$ 以下に多く分布していることが分かった。同様な方法で生成された細線の電流電圧特性の温度依存からも T_c に同じ依存性が見出された。

研究成果の概要(英文)：Superconducting submicron particles, having been produced by laser ablation of metal samples in superfluid helium, have been spatially trapped in a quadrupole magnetic field. The breakdown temperature of the trap can be attributed to the critical temperature T_c for these particles. We have measured the T_c of particles produced from indium and rhenium, which have been changed from the T_c for the bulk metal. Particle sizes have been measured by the electric microscope and they are mostly around submicron meter. We have also produced wire structures by the laser ablation of metals in superfluid helium. Their T_c measured from the temperature dependence of their resistance have been in good agreement with those of the particles.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：微粒子 超伝導 微細線構造 レーザーアブレーション ラゲルガウスビーム

1. 研究開始当初の背景

原子・分子の空間捕捉の技術は急速に発展してきており、遷移周波数の精密測定、低温衝突、準位の寿命等や、ボース凝縮やフェルミ縮退等の量子統計に関わる物理現象が解明されつつある。一方、粒子に関しては誘電体球や金属球が強いレーザー光による分散力によって空間捕捉されている。我々は低温で現れる超伝導性に着目し、完全反磁性に基づき磁場を利用して微粒子を空間捕捉することを提案する。超伝導物質は、完全反磁性による磁場との相互作用により、不均一磁場中でその極小となる領域に空間捕捉することが可能である。一方、超伝導物質の温度が上昇し臨界温度 T_c を超えると超伝導性が破れ閉じ込めから解放される。ナノ領域までスケールの範囲を広げることにより、低次元系での超伝導転移温度のサイズ依存などを測定し超伝導揺らぎなどの物理を明らかにしていくことが可能であると考えられる (K.Yu.Arutyunov et al. Physics Report 464,1(2008))。

一方、微粒子の生成方法としてレーザーアブレーション法は極めて有力である。真空状態、低温環境など様々な状況下配置された試料から微粒子等を生成することが可能である。超流動ヘリウム中でのアブレーションによる微粒子生成法は、基本的にどのような金属試料に対しても適用できること、環境に酸素などの不純物がないこと、生成された微粒子がほぼ真球の形状をもつ等の特徴がある。また、軌道角運動量をもつモードのレーザー光を用いると、レーザーから物質へ角運動量を移送することが可能となっている (Toyoda et al. Phys.Rev.Lett. 110, 143603 (2013)). このようなレーザーを用いてアブレーションすることにより、超流動ヘリウムに渦 (vortex) を生成し、それを利用した 1 次元構造を生成することも可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、磁場を用いて超伝導微粒子を空間に閉じ込め、その微粒子の物性を明らかにする。超流動ヘリウム中でバルクの試料をレーザーアブレーションすることにより、ほぼ真球の微粒子を生成することができる。超伝導状態にある微粒子を不均一磁場のゼロ磁場に生成することにより、超伝導による完全反磁性により、微粒子を空間捕捉する。温度や微粒子のサイズをパラメータとして、微粒子の捕捉・脱離を調べ微粒子の超流動性に関する物性を明らかにする。このような微粒子の生成、空間捕捉、検出の手法を開発するのが本研究の目的である。具体的には以下のことを明らかにする：

a. 超流動ヘリウム中でのレーザーアブ

レーションにより超伝導微粒子を作成し、その超伝導転移温度のバルク状態からの変化を調べる。

b. 超流動ヘリウムの渦を用いた微細な 1 次元構造の新たな生成方法の開発。細線の電気抵抗等の温度依存を調べる。

c. 上で作成した微粒子・線構造について、X 線回折・電子顕微鏡により結晶構造や形状の情報をえる。

3. 研究の方法

超伝導微粒子の磁場トラップ

理論

原子、分子、中性子などを磁場を用いて空間捕捉することが実現されてきている。磁気双極子モーメントが反磁性的である量子状態が、磁場勾配の反対方向に力を受け、磁場の空間的極小点に閉じ込められる。超伝導体は磁場中で完全反磁性を示すため、これらの粒子と同様に、磁場の空間的極小点に閉じ込められると考えられる。微粒子の体積を V とすると磁気双極子モーメント M は、 $M = -BV$ であり、微粒の大きさのオーダーで磁場の変化が緩やかな場合には、ポテンシャルエネルギー U は、 $U = B^2V / (2\mu_0)$ となる。ここで μ_0 は真空の透磁率である。したがって、微粒子に作用する力 F は、 $F = -BV dB/dz e_z$ となる。ここで、 z は磁場の勾配方向 e_z (単位ベクトル) への変位である。液体ヘリウム中では、微粒子に粘性力が作用するので、微粒子は磁場の極小点へいきつく。トラップを実現するためには、この磁場による力が微粒子に作用する重力よりも大きい必要がある。この条件から、トラップの中心から鉛直下方向への変位 z が、 $z = 2\mu_0 g (dB/dz)^{-2}$ で与えられる。ここで、 ρ は超伝導体の質量密度、 g は重力加速度の大きさである。この変位がトラップ磁場の領域内であれば、磁場トラップを実現することができる。

トラップの実験装置

実験装置の概略図を図 1 に示す。磁場強度の極小点を持つような磁場構成として、永久磁石を用いた四重極磁場を考える。直径 10mm、長さ 10mm の円柱型で表面磁束密度が 520 mT のネオジウム磁石 2 個を 10mm の間隔で N 極を向かい合わせに固定する。有限要素法の計算によると、中心部分に $dBz/dz = 65T/m$ 、 $dBr/dr = 38T/m$ の磁場勾配をもつ四重極磁場が作られることが分かる。ここで、 z 、 r は磁石の対称軸を軸とする円筒座標系の中心軸、および動径方向の成分である。液体ヘリウム温度で典型的な超伝導物質であるインジウム (In)、レニウム (Re) の超伝導転移温度はそれぞれ 3.4K、1.7K であり、また z の値はそれぞれ 21 μm 、61 μm であり、トラップ磁場の領域に収まる。

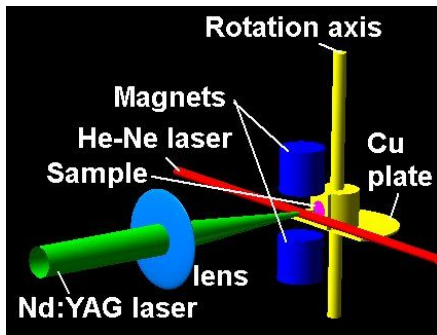


図1 磁気トラップ装置図

超流動ヘリウム中で固体をレーザーアブレーションすることにより球状の微粒子を生成することができる。上記のトラップ磁石をヘリウムクライオスタット中に設置する。クライオスタットには液体ヘリウムを満たし、最初その温度を 1.5K に設定する。

In, Re 金属片がトラップ磁場中心から 5mm 程度離れたところに固定されており、波長 532nm, パルス幅 5ns の Nd:YAG レーザーを $f=100\text{mm}$ のレンズで金属片に集光し 1 パルスから数パルス照射し、微粒子を生成する。生成された微粒子は液体ヘリウムにより冷却され、またその粘性抵抗を受けて磁場トラップの中心付近で磁場に捕捉される。トラップ磁場の中心には He-Ne レーザーを通しておき、また、レーザーアブレーションの後 Nd:YAG レーザー集光用のレンズを取り外し、顕微鏡を設置して、He-Ne レーザーの微粒子による散乱光像を CCD で検出することができる。

トラップされた微粒子の観測とその特性

このようにして検出された捕捉された微粒子の像を図 2 に示す。レーザーパルスエネルギーが数 mJ 程度の場合には多くの微粒子が同時にトラップされるが、パルスエネルギーを小さくしていき 1mJ 程度では、1 個の微粒子のみが観測される確率を高くできる。複数個のトラップされている場合には、パワー 1W の Nd:YAG レーザー (SHG, cw) を微粒子に照射することにより微粒子を加熱して微粒子の温度を高め超伝導を破壊することで、中心以外の微粒子をトラップからはずすことができる。トラップされた微粒子は安定であり 1 時間以上のトラップが可能である。

液体ヘリウムの温度 T を少しずつ高めてヘリウムの超流動-常流動転移温度を超えると、それ以下では完全に止まっていた微粒子が

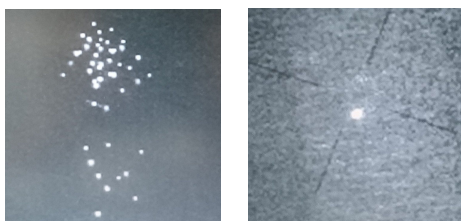


図2 磁気トラップされた微粒子によるレーザー散乱像 左：多数の Re 微粒子, 右：1 個の In 微粒子

ふらふらと中心付近で揺れ動くようになる。これは常流動により液体ヘリウムに対流や泡が生じているためであると考えられる。さらに、 T が高くなると、ある温度で微粒が落下する。この温度で微粒子の超伝導性が破れたと考えられるため、この温度がこの微粒子の超伝導-常伝導転移温度 T_c であると考えられる。一方、He-Ne レーザーの散乱光による像の大きさから微粒子の大きさを見積ることができる。後に述べる微粒子をクライオスタットから取り出して電子顕微鏡で観測しその大きさを測定する方法に比べて、レーザーの散乱光像からその大きさを測定する方法は精度が悪いが、その大きさの順序について測定できるものと考えられる。このような方法により、微粒子の大きさと転移温度 T_c を In について測定した。微粒子の大きさが小さくなるにしたがって T_c が小さくなる傾向が得られている。一方、我々の実験装置での最高温度 4.2K (ヘリウムの 1 気圧での沸点) まで T を高めても、中心にトラップされた Re 微粒子は落下しないため、Re 微粒子の T_c は 4.2K 以上であると考えられる。この点は Re のバルクの T_c が 1.7K であることから考えると極めて特異なことである。

中心にトラップされた微粒子の形状やその組成を調べるために、トラップされた微粒子のみを取り出して電子顕微鏡による観察を行う。レーザーアブレーションにより生成したがトラップされなかった多くの微粒子とは区別して、中心部分にトラップされた微粒子のみを選別するために、図 1 に示すような回転機構をもつ銅製の回収板を用いた。この板は、中心にトラップされた微粒子が T_c で落下するときにトラップ領域に移動させその微粒子を回収できる。その他の微粒子を回収しないよう、それ以外のときは覆いの下に置かれる。このようにして回収された微粒子を電子顕微鏡 (SEM, Hitachi TM3030) により解析しその大きさの分布を調べた (図 3)。その結果、最も分布数が多いのは In, Re それぞれで $0.6\sim 0.8\mu\text{m}$, $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ であることが分かった。また、X 線蛍光分析により微粒子の元素構成も確認された。

In における T_c のサイズ依存性や、Re の微粒子がバルクに比べて大幅に T_c が高くなっている点については、これからさらに調べる必要がある。レーザーアブレーションにより

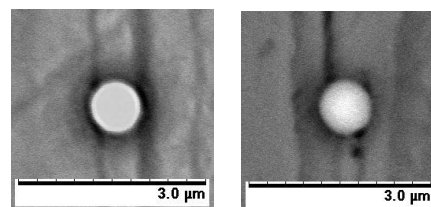


図3 磁気トラップされたのち T_c で落下した微粒子の電子顕微鏡像 左：Re 微粒子, 右：In 微粒子

生成された微粒子結晶の欠陥や、不純物の延享などについてがそのターゲットになると考えられる。

超流動ヘリウム中での微細線の生成とその超伝導性の測定

超流動ヘリウム中で金属固体をレーザーアブレーションすることにより、微粒子同士が連なった微細線構造を作ることができる。アブレーションの母材を In, ガリウム(Ga)としてそれぞれの微細線の電流電圧特性の温度依存性を測定することにより、微細線の超伝導転移温度 T_c を調べた。In では、バルクに比べて T_c は下がっており、微粒子と同様の傾向がある。一方、Ga では測定のみならず T_c が大幅に高くなっているも測定された。

LG ビームによる微細構造の形成

スパイラル位相板を用いて Nd:YAG レーザー(SHG)のガウスビームを LG ビームに変換した。LG ビームを用いて金属サンプルをレーザーアブレーションしたところ、アブレーション跡のビームの中心部分にスパイラル構造の尖塔ができていることが確認された。また、このように光から物資に角運動量を転写する場合にビームを集光するレンズとターゲットとの位置が重要であることが分かった。すなわち、液体ヘリウム中でのレーザーアブレーションするためには、ヘリウム中のターゲットを防振することが重要である。

4. 研究成果

超流動ヘリウム中でレーザーアブレーションによりサブミクロンサイズの微粒子を生成し、超伝導微粒子のみを選択的に磁気トラップする手法を開発した。トラップ中心にトラップされた 1 粒子以外をレーザー照射による加熱によりトラップから離脱させ、微粒子の臨界温度 T_c を測定した。その結果、バルクと比較して微粒子の T_c は、In では低下し、Re では大幅に上昇していることが分かった。また、トラップされた微粒子を取り出し電子顕微鏡で大きさや元素構成を調べることができるようになった。微粒子の T_c の温度依存性については結晶構造の欠陥や不純物についても検討していく必要があると考えられる。

今回開発した方法は、1 個のサブ μm の球形微粒子を生成し、非接触でその磁氣的性質を測定できるという、長所をもっている。様々な物質の磁氣的性質を測定できることが期待される。

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 5 件)

蓑輪陽介, 芦田昌明, 半導体ナノ粒子の光

輸送, レーザー研究, 42, (10) 771-775 (2014).

S.Okamoto, K.Inaba, T.Iida, H.Ishihara, S. Ichikawa and M. Ashida, Fabrication of single-crystalline microspheres with high sphericity from anisotropic materials, Sci. Rep. 4, 5186 (2014).

Y. Minowa, R. Kawai and M. Ashida, Optical levitation of a microdroplet containing a single quantum dot, Optics Letters, 40, 906-909 (2015)

S. Okamoto, S. Ichikawa, Y. Minowa, M. Ashida, Lasing Properties of Semiconductor Microspheres with High Sphericity Fabricated by Laser Ablation in Superfluid Helium, Conference Digest - 2015 The European Conference on Lasers and Electro-Optic, CE_11_5(2015).

Y. Takahashi, J. Suzuki, N. Yoneyama, Y. Tokawa, N. Suzuki, F. Matsushima, M. Kumakura, M. Ashida, and Y. Moriwaki, Magnetic Trapping of Superconducting Sub-Micron Particles Produced by Laser Ablation in Superfluid Helium, Applied Physics Express in print.

[学会発表](計 18 件)

Y. Takahashi, J. Suzuki, N. Yoneyama, Y. Tokawa, N. Suzuki, M. Kumakura, M. Ashida, F. Matsushima, and Y. Moriwaki, Magnetic Trapping of Superconductor Micro-Particles Produced by Laser Ablation in Liquid Helium, 3rd OPTICAL MANIPULATION CONFERENCE (OMC '16) (Yokohama, Japan) 2016 年 5 月 18-20 日.

蓑輪陽介, 豊田侑助, 二階堂新也, 芦田昌明, 光浮遊中微粒子の被接触内部温度測定手法の開発, 日本物理学会 第 71 回年次大会(2016 年) (東北学院大学 泉キャンパス) 2016 年 3 月 19-22 日

M. Ashida, Single-crystalline microspheres with high sphericity fabricated by laser ablation in superfluid helium, The 4th International Workshop on Microcavities and Their Applications (WOMA2015) (Hokkaido, Japan) 2015 年 12 月 1-4 日.

木南安寿花, 大岡謹吾, 熊倉光孝, CdSe 半導体量子ドットのサイズ選択的光励起, 2015 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会(金沢大学) 2015 年 11 月 28 日

鈴木淳平,高橋佑太,松島房和,熊倉光孝,芦田昌明,森脇喜紀,超流動 He 中で生成された金属微粒子の超伝導性, 2015 年度日本物理学会北陸支部学術講演会(金沢大学) 2015 年 11 月 28 日

小國友也, 杉本良平, 蓑輪陽介, 芦田昌明, ZnO マイクロ微小球の低温における光学特性評価, 日本物理学会 2015 年秋季大会(関西大学千里山キャンパス) 2015 年 9 月 16-19 日.

鈴木淳平,高橋佑太,榎本勝成,松島房和,熊倉光孝,芦田昌明,森脇喜紀,レーザーアブレーションにより生成した微粒子の超伝導性 II, 日本物理学会 2015 年秋季大会 大阪・関西大学 2015/9/16-19

Y. Minowa, R. Kawai, M. Ashida, Optical trapping of microdroplet containing a single nanomaterial in helium gas, SPIE Optics + Photonics 2015, Optical Trapping and Optical Micromanipulation XII (San Diego, USA) 2015 年 8 月 9-12 日.

芦田昌明, レーザによる半導体真球作製, レーザ加工学会第 83 回講演会(大阪大学吹田キャンパス) 2015 年 6 月 11-12 日.

S. Okamoto, S. Ichikawa, Y. Minowa and M. Ashida, Lasing Properties of Semiconductor Microspheres with High Sphericity Fabricated by Laser Ablation in Superfluid Helium, CLEO/Europe-EQEC 2015 (Munich, German) 2015 年 6 月 21-25 日.

Y. Minowa, R. Kawai and M. Ashida, Optical trapping of a microdroplet containing a nanomaterial, Optical manipulation and its satellite topics (OMC'15) (Yokohama) 2015 年 4 月 22-24 日.

S. Okamoto, Y. Minowa and M. Ashida, Lasing of single-crystalline microspheres with high sphericity fabricated by laser ablation, Optical manipulation and its satellite topics (OMC'15) (Yokohama) 2015 年 4 月 22-24 日.

M. Ashida, S. Okamoto, S. Ichikawa and Y. Minowa, Fabrication and Lasing Properties of Single-Crystalline Semiconductor Microspheres with Anisotropic Crystal Structures, 2014 MRS Fall Meeting and Exhibit (Boston, Massachusetts) 2014 年 11 月 30 日-12 月 5 日.

木南安寿花, 大岡謹吾, 熊倉光孝, 気体中のナノ粒子に対する輻射力による運動操作

の検討, 2014 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会(福井大学) 2014 年 12 月 13 日

川井諒一, 蓑輪陽介, 芦田昌明, 単一量子ドット液滴系の光トラッピング, 日本物理学会 2014 年秋季大会 中部大学春日井キャンパス 2014 年 9 月 7-10 日.

鈴木淳平, ハゲノ下陽哉, 米山直弥, 榎本勝成, 松島房和, 熊倉光孝, 芦田昌明, 森脇喜紀, レーザーアブレーションにより生成した微粒子の超伝導性, 日本物理学会 2014 年秋季大会 春日井・中部大学春日井キャンパス 2014 年 9 月 7-10 日.

S. Okamoto, Y. Minowa and M. Ashida, Optical fabrication of single-crystalline microspheres with high sphericity, 1st OPTICAL MANIPULATION CONFERENCE (OMC '14) (Yokohama, Japan) 2014 年 4 月 22-25 日.

Y. Minowa, H. Tahara and M. Ashida, Optical manipulation of quantum dots in superfluid He, 1st OPTICAL MANIPULATION CONFERENCE (OMC '14) (Yokohama, Japan) 2014 年 4 月 22-25 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森脇喜紀 (MORIWAKI, Yoshiaki)
富山大学・大学院理工学研究部(理学)・教授
研究者番号: 90270470

(2) 研究分担者

松島房和 (MATSUSHIMA, Fusakazu)
富山大学・大学院理工学研究部(理学)・教授
研究者番号: 40142236

芦田昌明 (ASHIDA, Masaaki)
大阪大学・基礎工学研究科・教授
研究者番号: 60240818

熊倉光孝 (KUMAKURA, Mitsutaka)
福井大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 30324601