

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23684033

研究課題名(和文) 強相関フェルミ原子気体の二流体现象の観測と輸送係数の測定

研究課題名(英文) Observation of two-fluid phenomena and measurement of transport coefficients for strongly correlated Fermi gases

研究代表者

堀越 宗一 (Horikoshi, Munekazu)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00581787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,800,000円、(間接経費) 5,640,000円

研究成果の概要(和文)：金属超伝導やヘリウム超流動で見られる二流体现象を冷却フェルミ原子系で研究する為、リチウム6原子とリチウム7原子の同時レーザー冷却システムを開発した。両原子は30秒で1億個磁気光学によって集められた。200Wの高強度レーザーを用いる事により、冷却原子を磁気光学トラップから光トラップへ5%の効率で移行できた。蒸発冷却後、10万個のフェルミ原子が $T/T_F=0.05$ 程度まで冷却され、超流動転移が確認された。さらに、リチウム7原子を温度計として光トラップに混ぜる事により、相互作用しているリチウム6原子の温度をBCS極限で測定した。これにより二流体现象を研究する準備が整った。

研究成果の概要(英文)：We developed a simultaneous laser cooling system of lithium 6 atoms and lithium 7 atoms in order to investigate two-fluid phenomena which have shown in metal superconductors and superfluid helium. Both atomic species were collected up to one hundred million atoms within 30s. We succeeded in loading cold atoms from a MOT into an optical dipole trap with an efficiency of 5%. After an evaporative cooling process, 100,000 of atoms reached a temperature down to  $T/T_F=0.05$  and they showed a superfluid phase transition. Furthermore, we measured a temperature of interacting lithium 6 atoms by mixing lithium 7 atoms in an optical trap as a thermometer at a BCS interaction regime. We are ready to investigate two-fluid phenomena.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス 超流動 状態方程式 熱力学 レーザー冷却 ボース凝縮 フェルミ縮退 BCS-BECクロスオーバー

### 1. 研究開始当初の背景

冷却フェルミ原子の散乱長を制御する事により、幅広い相互作用領域でフェルミ超流動が実現できるようになった。さらにトラップ中の局所的な熱力学量の観測技術等の発展により、強く相互作用しているフェルミ粒子系の状態方程式が、我々の実験を皮切りに決定されてきた。定常状態の熱力学特性が明らかになる中、超流動密度に起因するダイナミクス、特に超流動密度と常流動密度の二流体现象は実験的に確認されていない。同様の量子系として超流動ヘリウムや金属超伝導体があり、数多くの物理現象がランダウの二流体モデルで説明できているが、原子気体のフェルミ超流動が同じ物性を示すかは明らかになっていない。そもそも冷却原子系で超流動密度を評価する技術が未発達であり、時代は二流体现象の観測から超流動密度を決定する方針で進んでいる。単純で自由度の多い原子気体系において二流体现象が観測されれば、超流動という物性の理解とメカニズムを加速させることは間違いない。

私個人の学術的な興味としては「二成分フェルミ粒子系に散乱長を与えるだけで生まれる豊かな量子多体効果をミクロな現象とマクロな現象を関係付けて美しく理解したい」というものである。

### 2. 研究の目的

極低温リチウム原子気体を用いてフェルミ超流動を実現し、常流動と超流動による二流体现象を観測する。具体的には、気体の圧力勾配や温度勾配に依存した粒子の流速や熱輸送量が測定できるシステムを開発し、温度や相互作用に依存した粘性率、熱伝導率の測定を行う。さらに、二流体现象として代表される第二音波、噴水効果等の観測に挑戦し、超流動ヘリウムとの比較や、ランダウの二流体モデルの妥当性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1)相互作用可変な超流動状態の実現

①6Li-7Li 同時レーザー冷却装置の開発：本研究を行うに当たり実験室、実験装置の立ち上げを行う。先の東北大地震による電力制限もあり、低エネルギー動作が可能な装置開発を行う。6Li 原子によるフェルミ超流動の温度は 7Li 原子を混ぜて評価する為、6Li-7Li 同時レーザー冷却を行う。

②高安定な磁場による相互作用制御：本研究は外部磁場により 6Li 原子間の相互作用を制御する (フェッシュバハ共鳴)。外部磁場はコイルに電流を流すことにより発生させるが、電流の揺らぎが磁場の揺らぎ、即ち相互作用の揺らぎになるため、コイルの電流の安定化を行う。印加磁場の値や安定度は、6Li 原子のゼーマン分裂を rf 分光する事により行う。

③高出力マルチモードレーザーによる光ト

ラップ：レーザー冷却された冷却原子はその後光トラップに移行され、蒸発冷却過程を経て超流動状態と成る。通常レーザー冷却後の原子は、光トラップの体積とトラップ深さが十分でないため、磁場トラップや光共振器トラップの過程を経て、予備冷却後に光トラップに移行される。本研究では実験手順を減らしシステムを簡素化させるため、高出力マルチモードレーザーによる冷却原子の直接移行を試みる。

④超流動状態の実現：光トラップによって保持された冷却原子を蒸発冷却によって極低温まで冷却し、超流動状態を実現する。超流動状態は、フェルミ対の重心運動量分布を評価し確認する。

⑤温度計原子による温度の評価：相互作用している粒子系の温度評価法は、特に極低温領域で確立していない。先行研究で東大、パリ、MIT の三つのグループにより、二粒子間の散乱長が発散しているユニタリー極限で状態方程式が測定されたが、ゼロ温度近傍でデータの不一致が見られている。三者間では温度評価法が異なり、これが一つの原因ではないかと考えられている。我々はこれら三者の温度評価を一度に行える実験系を実現する。そのため、パリのグループが用いた、7Li 原子による温度評価の準備を行う。

#### (2)二流体现象の探査

①集団モード中の二流体现象の探査：我々の先行研究により、集団モード中の常流動と超流動中に、集団モードの周波数とは異なる周波数で振動する成分が発見されている。集団モードとは、トラップの形を変化させたときに、個々の粒子が自由に動くわけではなく、粒子系全体が集団的に振動する固有モードの事である。未だこの未知の振動成分の起源は明らかになっていないが、超流動を実現しているクーパ対が新しいダイナミクスの起源になっている可能性が有る。我々は追試実験を行い、この現象のメカニズムの解明を行う。

②局所的な加熱による二流体现象の探査：液体ヘリウムで見られる二流体の劇的現象として、熱対向流、超熱輸送がある。これはエントロピーを持たない超流動体がエントロピーの大きい方向へ流れ、反対方向に常流動が流れる現象である。これまでの原子気体系での研究では、フェルミ粒子系のみならず、ボース粒子系においても、このような超流動のダイナミクスは観測されていない。我々は局所的に加熱する技術を開発し、エントロピー勾配が駆動する超流動の動きを観測する。

③周期ポテンシャルを用いた二流体现象の探査：近年超流動密度を実験的に評価する方法として、周期ポテンシャル中での原子気体のブロッホ振動を測定する方法が提案されている。我々は冷却原子でないと実現不可能なアプローチで新たな超流動の物性解明に挑む。

#### 4. 研究成果

##### (1)相互作用可変な超流動状態の実現

①6Li-7Li 同時レーザー冷却装置の開発：本事業の研究費を用いて、レーザーシステム、真空システム、制御システムを構築した。図 1(a)に本プロジェクト開始時の実験室の様子、図 1(b)に現在の実験室の様子、図 1(c)に開発したリチウム原子のレーザー冷却用真空チャンバーの概略図を示した。永久磁石を用いた二次元磁気光学トラップ(2D MOT)を導入する事により、消費電力を大幅に減少させた。本実験システムを用いる事により、三次元磁気光学トラップ(3D MOT)中に6Li原子と7Li原子を同時に、30秒以内に $10^8$ 個集める事に成功した。

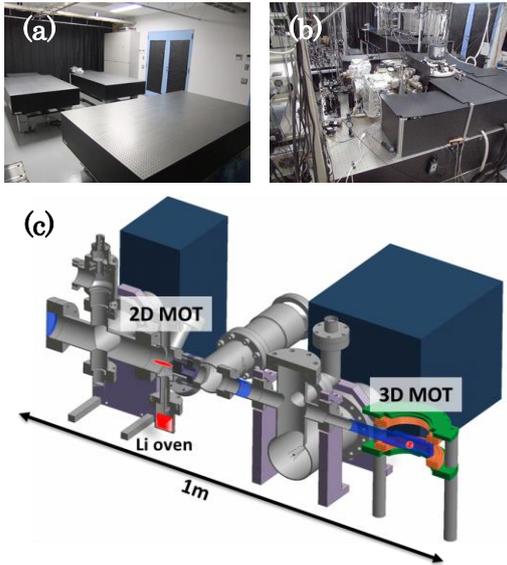


図 1：実験装置

②高安定な磁場による相互作用制御：6Li 原子間の s 波散乱長は外部磁場制御可能である (フェッシュバツハ共鳴)。粒子間の相互作用パラメータは散乱長で与えられるため、高精度な磁場の制御が必須となる。散乱長が発散する共鳴磁場は、6Li の場合 832Gauss に存在する。本研究ではスイッチング電源から 300A 程度の電流をコイルに流し共鳴磁場を生成しているが、200mGauss に相当する電流ノイズが存在し、安定な相互作用を冷却原子系に与える事が出来ない。そこで我々は図 2(a)に示す電流安定化システムを導入した。動作原理はホールセンサーでコイルに流れている電流を測定し、設定値と一致するようにフィードバックをかけている。これにより 300A 流れているときの電流ノイズを 5mGauss 相当にまで改善した。原子が感じている磁場の絶対値は、ゼーマン分裂した超微細構造間のエネルギーを rf 分光する事により行った。典型的な実験データを図 2(b)に示した。例えばこのデータより、中心周波数共鳴周波数 = 76.3180MHz から磁場 = 869.300 Gauss と決定でき、先行研究より s 波散乱長 =  $-12782a_0$  と決定できる。

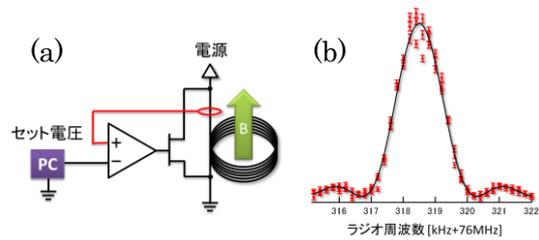


図 2：電流安定化と rf 分光

③高出力マルチモードレーザーによる光トラップ：我々は波長 1070nm、出力 200W の CW 高出力マルチモードファイバーレーザーを用いて 3D MOT 中の冷却リチウム原子を直接光トラップへ移行する手法を試みた。図 3(a)に光学系の概略図を示した。ファイバーレーザーからの出力は、高強度光トラップ (HP) と低強度光トラップ (LP) に分けられ、真空ガラスセル中の MOT に照射される。図 3(b)に MOT から HP トラップへ移行されていく様子を示した。高出力に伴う光学素子の熱レンズ効果が再現性を不安定にしていたが、熱レンズ効果が起きにくいような光学配置を取ることにより問題解決した。また、MOT から光トラップへ移行しやすいように磁場勾配とレーザー冷却光の強度と周波数の時間的な変化曲線を工夫する事により (圧縮 MOT)、MOT から光トラップへの移行効率が向上した。結果として、86W を  $40\mu\text{m}$  のビームウエストに絞って MOT に照射したところ、 $5 \times 10^6$  個の冷却原子が光トラップに移行された。移行効率は 5% に達し、先行研究の 5 倍の効率を得た。この簡易で高効率な手法は、今後の冷却原子の研究を加速させると期待できる。HP トラップでの捕獲後、冷却原子は空間モードが光ファイバーによってクリーニングされている LP トラップへ受け渡される。本研究で用いているファイバーレーザーの線幅は仕様書によると  $3\text{nm}$  であり、コヒーレンス長は約  $400\mu\text{m}$  となる。計算上では HP と LP の二つの光はそれ以上の光路差を持っているので干渉しない筈であるが、光トラップ中の寿命は両者の相対的な偏光角度に大きく依存する事が判った。我々は  $\lambda/2$  板で相対的な偏光角度を変え、最も交差型光トラップの寿命が長くなるように最適化を行った。結果として 40s の寿命が得られた。また、HP トラップの強度をゼロにし、LP トラップのみで保持した場合、寿命は 90s と長く、超流動を実現するに当たり十分な原子数と寿命を得た。

④超流動状態の実現：LP 光トラップで捕獲された冷却原子は蒸発冷却によりさらに冷却される。蒸発冷却は光ポテンシャルの深さを徐々に減らすことで、エネルギーの高い粒子を選択的にトラップから逃し行う。この際、フェッシュバツハ共鳴により粒子間の散乱長を無限大 (ユニタリー極限) にし、蒸発冷却中の熱平衡状態に達する効率を向上させた。結果として、 $1 \times 10^6$  個のフェルミ原子が

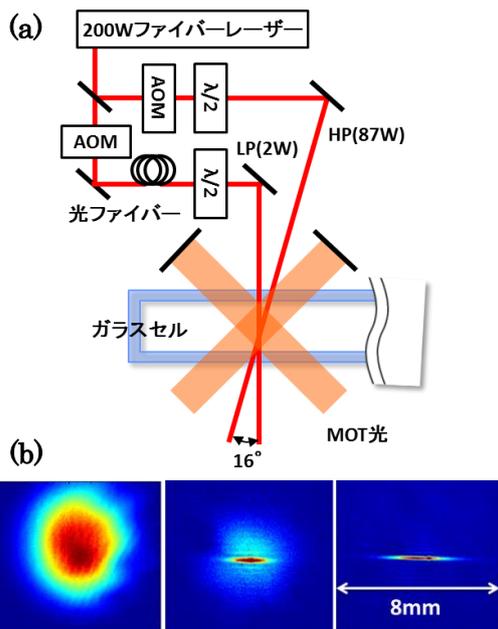


図 3 : (a) 光学系 (b) 冷却原子の MOT から光トラップへの移行 (赤色になるほど原子密度が大きい)

$T/T_F=0.05$  程度まで冷却された。超流動状態になっている事を確認する為には、フェルミ対の重心運動量分布が凝縮している事を確認する必要がある。ユニタリー極限ではフェルミ対は運動量空間で対を成している(クーパー対)ため、トラップから解放して運動量分布を測定すると、クーパー対は壊れてしまい重心運動量を確認する事は出来ない。そこで我々は相互作用を二体の束縛状態がある BEC 領域に相互作用を素早く変化させ、クーパー対を分子に変換し、生成された分子の運動量分布を測定した。分子の運動量分布は相互作用を変化させる前のクーパー対の重心運動量分布を反映しているため、超流動状態にあれば、分子の運動量分布に熱的分布と凝縮分布のバイモーダル分布が確認される。実験結果を図 4 に示す。図 4 の左から右にかけて温度が下がっている。図を見て明らかにわかるように、ある温度以下で重心運動量がゼロの成分が劇的に成長する。これにより フェルミ粒子である 6Li 原子のクーパー対による超流動転移が確認された。

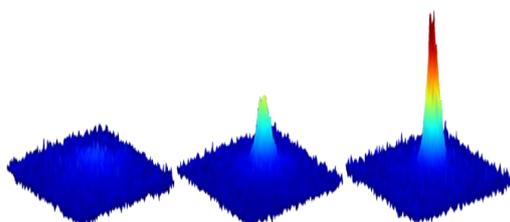


図 4 : 超流動転移の様子

⑤ 温度計原子による温度の評価：温度差で駆動する二流体のダイナミクスを評価する為には、相互作用しているフェルミ粒子系の温度を評価する必要がある。温度評価のため 7Li 原子を温度計として 6Li 原子系に混ぜ、

熱接触により同じ温度になった 7Li 原子の温度を、7Li 原子の運動量分布で評価する。強く相互作用している 6Li 原子系の温度評価までは至らなかったが、予備実験として、弱く相互作用している BCS 極限において両者の温度を比較した。この領域では 6Li 原子系の温度も運動量分布より評価できるため、両者の温度が一致しているか簡単に評価ができる。実験は光トラップ中に両原子を閉じ込め蒸発冷却を行い、トラップを切った後のそれぞれの原子気体の広がり方から温度を評価した(図 5)。得られた 両者の温度はエラーバーの範囲で一致した。 図 5 で同じ温度であるのに広がり速度が異なるのは、6Li と 7Li で質量が僅かに異なるからである。これにより、様々な相互作用領域のフェルミ超流動の温度評価の準備が整った。

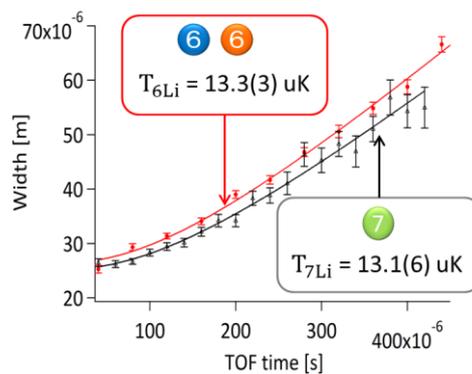


図 5 : TOF による 6Li と 7Li の温度評価

## (2) 二流体現象の探査

成果はまだ上がっていない。

## 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 1 件)

### ① 堀越宗二、向山敬、上田正仁

「ユニタリー極限におけるフェルミ原子気体の普遍的熱力学」, 日本物理学会誌(査読有), 67 巻 第 4 号 257-261, 2012 年

[学会発表] (計 1 2 件)

① 堀越宗二, 「冷却原子実験による核物理へのアプローチ」, 基研研究会「量子情報の新展開」(招待講演), 京都大学, 2014 年 3 月 25 日

② 池町拓也、伊藤亜紀、堀越宗二、五神真, 「相互作用する極低温フェルミ多体系の温度評価」, 日本物理学会, 徳島大学, 2013 年 9 月 27 日 (学生プレゼン賞受賞)

③ 伊藤亜紀、池町拓也、堀越宗二、五神真、小芦雅斗, 「Atomic shot noise 観測による実効的な撮像分解能の評価」, 日本物理学会, 徳島大学, 2013 年 9 月 27 日 (学生プレゼン賞受賞)

④富樫康平、伊藤亜紀、堀越宗一、五神真、  
「 $6\text{Li}$ - $7\text{Li}$  混合系における量子凝縮相の実現」、日本物理学会、横浜国立大学、2012 年 9 月 19 日

⑤堀越宗一、「冷却フェルミ原子の実験を通じて中性子物質を探る」、基研研究会「熱場の量子論とその応用」(招待講演)、京都大学、2012 年 8 月 24 日

⑥ Munekazu Horikoshi, 「Simulation of neutron-rich dilute nuclear matter using ultracold Fermi gases」, APCTP Focus Program on Quantum Condensation (QC12) (招待講演), APCTP, Pohang, Korea, 2012 年 8 月 18 日

⑦富樫康平、乙津聡夫、Jonas Metz、堀越宗一、小芦雅斗、五神真、「冷却原子系の任意散乱長で熱力学決定」、日本物理学会、関西学院大学、2012 年 3 月 27 日

⑧堀越宗一、「冷却原子系を用いた希薄中性子物質の研究」、日本物理学会、関西学院大学、2012 年 3 月 26 日

⑨堀越宗一、「冷却フェルミ気体における普遍的熱力学関数の決定」、日本物理学会(若手奨励賞招待講演)、関西学院大学、2012 年 3 月 25 日

⑩堀越宗一、「BCS-BEC クロスオーバー全域に渡る E O S の実験的決定手法」, Ultracold Gases : Superfluidity and Strong Correlations (USS-2012) (招待講演), 東京理科大学、2012 年 1 月 12 日

⑪堀越宗一、「ユニタリー極限の冷却原子系の実験」、日本物理学会、富山大学、2011 年 9 月 22 日

⑫ Munekazu Horikoshi, 「Thermodynamics and Hydrodynamics of a unitary Fermi gas, INT symposium “Fermions from Cold Atoms to Neutron Stars : Benchmarking the Many-Body Problem” (招待講演), ワシントン大学、2011 年 5 月 19 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等  
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀越 宗一 (Munekazu Horikoshi)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号：00581787

(2) 研究分担者

(なし)

(3) 連携研究者

(なし)