

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月12日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21310084

研究課題名（和文） 超伝導アトムチップによる中性原子の量子状態制御

研究課題名（英文） Quantum state control with superconducting atom chips

研究代表者

向井 哲哉（MUKAI TETSUYA）

日本電信電話株式会社 NTT物性科学基礎研究所・主任研究員

研究者番号：70393775

研究成果の概要（和文）：超伝導永久電流アトムチップを用いて、閉じ込め強度が数百 kHz まで可能な磁場ポテンシャル中に、ルビジウム原子を捕捉して冷却することで、ボース・アインシュタイン凝縮を達成した。また、超伝導体にピン留めされた磁束を用いて、原子を捕捉する新しい磁場トラップを開発し、超伝導磁束の樹枝状崩壊に起因する不連続な変化を起こす温度と磁場との関係を実験的に明らかにすることで、超伝導アトムチップの安定動作条件を見出した。

研究成果の概要（英文）：With a persistent current superconducting atom chip, which can trap atoms in a hundred kHz strong magnetic confinement, we achieved a Bose-Einstein condensate in rubidium atoms. We also invented a new stable trap for neutral atoms with magnetic fluxes pinned in a superconducting disc. With precise measurements of the critical change of the magnetic flux pattern, we clarified the condition to realize a stable operation of the superconducting atom chips.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 マイクロ・ナノデバイス

キーワード：マイクロ光デバイス、アトムチップ

1. 研究開始当初の背景

（1）電流近傍での熱や電磁気的なノイズの影響の点で従来型の常伝導アトムチップを凌駕する超伝導アトムチップによる原子の捕捉が成功し、これを用いて原子を制御する技術の開発が始まろうとしていた。

（2）超伝導アトムチップが原子を捕捉できる寿命は、常伝導アトムチップに比べ、何桁も改善されると理論的には予想されながら、

実験的には1桁程度の改善に留まり、その原因について十分な理解は得られていなかった。

（3）超伝導体に侵入しピン留めされる磁束の振る舞いや原子トラップへの影響に関しては、Bean's モデルの範囲でしか考慮されておらず、このモデルでは説明できない超伝導磁束の樹枝状崩壊現象に関しては、超伝導アトムチップの研究では全く考慮されてい

なかった。

(4) 超伝導線に外部電源から電流を供給する開ループ型アトムチップでのボース・アインシュタイン凝縮は実現されていたが、閉ループ型でループを貫くフラクソイドという保存量を持ち、原理的に安定な超伝導永久電流アトムチップでのボース・アインシュタイン凝縮は達成されていなかった。

2. 研究の目的

(1) 多数の原子が強く結合した固体ではなく、原子気体を用いて、その量子性を活用するデバイス開発の基盤技術を確立する。

(2) 中性原子を強く安定に捕捉できる超伝導アトムチップを応用した原子制御技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 超伝導線の近傍で発生する強い磁場勾配を利用して、原子の強い閉じ込めを実現する。そのポテンシャル中で、閉じ込めポテンシャルの量子化エネルギーギャップよりも捕捉原子の運動エネルギーが小さくなるまで原子を冷却することで、原子の外部自由度を量子化する。これにより、内部自由度と合わせて全量子的に制御可能な状態を作る。この時、位相空間密度が1のオーダーを超える場合には、ボース・アインシュタイン凝縮となる。超伝導チップ上で全量子的に制御された原子を用いて、量子制御・量子計測への応用を目指す。

(2) 上記の研究の過程で新たに見出される物理現象を解明し、可能であれば、それを利用した超伝導アトムチップの新しい可能性を探求する。

4. 研究成果

当初予定していたマイクロベースボール型チップを用いる方法は、原子の予備冷却および観測の困難さから断念せざるを得なかったが、これを代替する方法として永久電流型超伝導チップでのボース・アインシュタイン凝縮を達成した。これを用いれば、チップ上での全量子的な原子制御や導波路型の原子干渉計の開発が可能になる。また、当初十分に理解が進んでいなかった超伝導磁束のアトムチップへの影響（侵入・ピン留め・樹脂状崩壊）について明らかにし、超伝導アトムチップの安定動作条件を見出したことは、超伝導チップの応用の観点で非常に重要である。また、超伝導体にピン留めされた磁束を用いる原子トラップの実現は世界初である。ゼロの電気抵抗を利用した高い電流密度とは異なるアプローチで、平板なディスク形状

の超伝導体を利用する試みは、原子と超伝導表面との相互作用を計測する等の新たな可能性へと繋がる成果である。以下、各々の成果について簡潔に記す。

(1) 「超伝導アトムチップへの磁束の侵入の確認」超伝導アトムチップでの、原子の強い閉じ込めを試みる過程で、トラップ中心位置のバイアス磁場依存性の計測結果から、超伝導電流の分布が、超伝導体の完全反磁性を仮定するマイスナー電流分布とは異なることを見出した。この結果は、第2種超伝導体のバルクが示す臨界磁場 H_{c1} よりも一桁以上小さい磁場でも完全反磁性ではないことを示しており、超伝導薄膜の特徴と考えられる。それまで超伝導アトムチップの実験では、完全反磁性からのズレに関する報告例は無く、この実験結果は、超伝導アトムチップへの磁束の影響を考慮する必要性を明らかにする契機となった。

また、永久電流を駆動する度に变化する原子の損失率から、超伝導アトムチップのポテンシャルに超伝導磁束が複雑に影響していることを実験的に確認した。

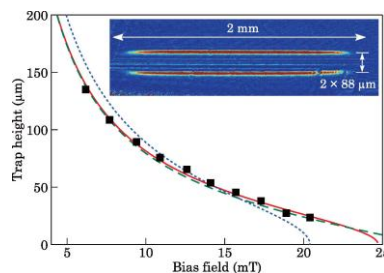


Fig.1 トラップ高さのバイアス磁場依存性 ■は測定値、青点線は完全反磁性の計算値、赤実線、緑破線は磁束の侵入を仮定した計算値。

(2) 「超伝導ディスクトラップの開発」

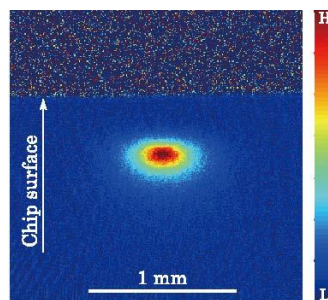


Fig.2 新型の超伝導アトムチップに捕捉された原子集団の吸収画像

磁束が第2種超伝導体の内部にピン留めされる効果を利用して、ディスク形状の超伝導薄膜に垂直な方向に磁場を加えることで原

子を安定に捕捉できる新型アトムチップを開発した。このトラップの開発により、以下に記す磁束の影響評価が可能となった。

(3) 「Beans モデルでは説明不可能な樹枝状崩壊現象を超伝導アトムチップにより計測」超伝導の転移温度よりも低い温度域では、低温になる程、超伝導の特性が改善するとの予想に反し、特定の温度以下で不連続に磁場ポテンシャルの形状が変化することを見出した。超伝導分野での磁気光学撮像法による研究結果と比較することで、この不連続なポテンシャルの変化が、磁束の樹枝状崩壊現象で説明できることを見出した。この結果より、超伝導アトムチップを安定に動作可能な条件を見出した。

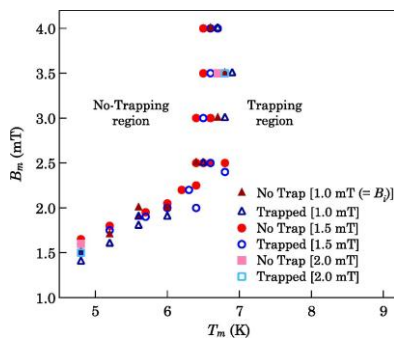


Fig. 3 磁束パターンの樹枝状崩壊により磁束が安定な領域 (右下) と不安定な領域 (左上) との境界を冷却原子により計測。

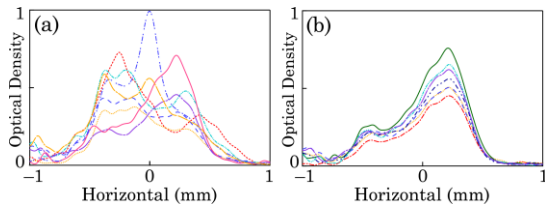


Fig. 4 樹枝状崩壊温度より低温・高温に於ける磁束パターンの変化。低温(a)では磁束パターンが変化し、高温(b)では変化しない。

(4) 「100 kHz を超える強い閉じ込めで原子の捕捉に成功」超伝導アトムチップを安定温度領域で動作させることで、4.5A の電流が流れる超伝導線から 30 マイクロメータの位置に原子を捕捉することに成功した。この時、捕捉ポテンシャルの閉じ込め周波数は、調和振動子型のポテンシャルを仮定すると数百 kHz に相当する。

(5) 「超伝導チップの 2 つの損失率と表面での蒸発冷却効果の確認」超伝導アトムチップに捕捉された原子集団には、2 つの損失率が存在することを見出した。その 1 つはバックグラウンドガスとの衝突に寄るものであり、

他の一つは、原子と超伝導体表面との衝突に寄るものと考えられる。即ち、高い温度の原子が選択的にトラップから失われ、それに続く原子間衝突の熱平衡化によって、蒸発冷却効果が働くこと (温度の低下) を確認した。

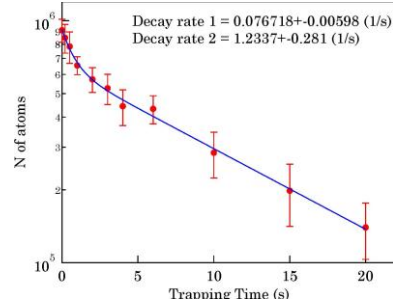


Fig. 4 超伝導アトムチップに捕捉された原子の時間変化。初期の急速な減少は表面との衝突に、数秒後からの緩慢な減少はバックグラウンドガスとの衝突によると推定される。

(6) 「超伝導永久電流アトムチップでのボース・アインシュタイン凝縮の生成」超伝導アトムチップで捕捉した数百万個のルビジウム原子に対し、RF 磁場を照射・掃引することで蒸発冷却を行い、ボース・アインシュタイン凝縮の生成に成功した。これにより、当初の目的の一つであった超伝導アトムチップ上での外部自由度の量子化が実現し、全量子的な制御が出来る状態を超伝導アトムチップ上に実現した。

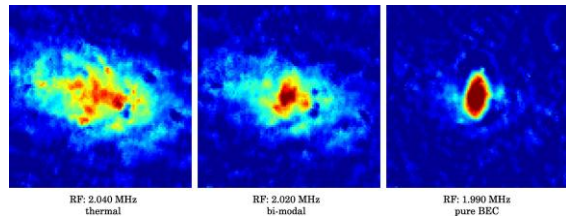


Fig. 5 超伝導アトムチップ上でのボース・アインシュタイン凝縮状態への転移 (トラップから解放後 20 ms の吸収画像)。RF 磁場掃引の最終周波数に依存して、熱平衡状態の左画像から、凝縮体の特徴 (高い原子密度、閉じ込めの強い方向への異方的広がり) を持つ右画像へと変化し、ボース・アインシュタイン凝縮への転移が確認された。

最後に、本研究の成果、すなわち、「他の方法では事実上到達不可能な強い磁場勾配中のボース・アインシュタイン凝縮」を用いた、量子制御・量子計測以外の応用としては、蒸発冷却の高速化と擬凝縮状態、及び、多体相互作用の研究、低次元 (1D) 磁場ポテンシャル中の量子縮退現象の研究に寄与するこ

とが期待できる。

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2件)

- ① Fujio Shimizu, Christoph Hufnagel, and Tetsuya Mukai, “Stable Neutral Atom Trap with a Thin Superconducting Disc”, *Physical Review Letters*, 査読有り, vol.103, (2009), 253002
- ② Hufnagel Christoph, Tetsuya Mukai, and Fujio Shimizu, “Stability of a superconductive atom chip with persistent current”, *Physical Review A*, 査読有り, vol. 79, (2009), 053641

[学会発表] (計29件)

- ① 丹治はるか, 向井哲哉, “超伝導アトムチップ近傍におけるトラップ寿命の測定”, 日本物理学会第67回年次大会, 2012/3/26, 関西学院大学, 26pSA-14
- ② 向井哲哉, 丹治はるか, “積層マイクロディスク型超伝導アトムチップ”, 日本物理学会第67回年次大会, 2012/3/26, 関西学院大学, 26pSA-13
- ③ 向井哲哉, 今井弘光, “コヒーレントに原子を輸送するための湾曲原子導波路”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/9/24, 富山大学, 24pEE-12
- ④ Tetsuya Mukai, “Superconducting Atom Chip towards Single-mode Atomic Waveguide”, *International Conference on Laser Spectroscopy 2011*, 2011/05/31, Hameln Germany, Poster T-12
- ⑤ Tetsuya Mukai, “Superconducting Atom Chip in NTT: from persistent current to flux investigation”, *QC-Seminal in Eberhard Karls Universitat Tuebingen*, 2011/05/27, Tuebingen Germany, Invited Talk
- ⑥ 向井哲哉, “超伝導磁束で捕捉する原子・原子で見る超伝導磁束”, 阪大 G-COE 第6回領域融合ワークショップ, 2012/04/12, 大阪大学, Seminal Talk
- ⑦ Tetsuya Mukai, “Productive Role of Magnetic Fluxes on Superconducting Atom Chips”, *International Symposium on Nanoscale Transport and Technology 2011*, 2011/01/11, Atsugi Japan, Contributed Talk We-15
- ⑧ 向井哲哉, “超伝導アトムチップ”, 量子エレクトロニクス研究会「冷却原子系で探求する新しい物理と極限的技術」, 2010/12/18, 上智大学軽井沢セミナーハウス, Invited Talk
- ⑨ Tetsuya Mukai, “Superconducting Atom Chip as a Resource for Quantum Information Processing”, *Updating Quantum Cryptography and Communications 2010*, 2010/10/18, Tokyo Japan, Poster P-24
- ⑩ 向井哲哉, “冷却原子による超伝導磁束の計測”, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010/9/23, 大阪府立大学, 23aRD-5
- ⑪ Tetsuya Mukai, Christoph Hufnagel, and Fujio Shimizu, “Loss Mechanism of Superconducting Atom Chips”, *22nd International Conference on Atomic Physics 2010*, 2010/07/26, Cairns Australia, Poster Tu71
- ⑫ Fujio Shimizu, Christoph Hufnagel, and Tetsuya Mukai, “Superconducting Atom Chip”, *10th European Conference on Atoms Molecules and Photons 2010*, 2010/07/5, Salamanca Spain, Poster P564
- ⑬ 向井哲哉, “中性原子を用いた量子情報処理へのアプローチ”, 第7回原子・分子・光科学(AMO)討論会, 2010/06/11, つくば国際会議場, Invited Talk
- ⑭ Tetsuya Mukai, “Stable Trap for Neutral Atoms with a Superconducting Disc”, *The 41st Annual Meeting of the American Physical Society Division of Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2010/5/29, Houston USA, Contributed talk W5.00010
- ⑮ Tetsuya Mukai, “Investigating Magnetic Flux with Superconducting Atom Chip”, *JST CREST 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology*, 2010/4/7, Tokyo Japan, Presentation ID: 7W-19
- ⑯ 向井哲哉, フフナーゲルクリストフ, 清水富士夫, “超伝導ディスクを用いた中性原子のトラップ”, 日本物理学第65回年次大会, 2010/3/23, 岡山大学, 23aTD-7
- ⑰ 向井哲哉, フフナーゲルクリストフ, 清水富士夫, “超伝導アトムチップの捕捉安定性”, 日本物理学 2009 年秋季大会, 2009/9/27, 熊本大学, 27aZF-1
- ⑱ Tetsuya Mukai, “Trapping Stability of Superconducting Atom Chip”, *International Conference on Quantum Foundation and Technology: Frontier and Future*, 2009/7/17, Shanghai China, Contributed Talk 16:20
- ⑲ Tetsuya Mukai, Christoph Hufnagle, Kouichi Semba, and Fujio Shimizu, “Superconductive Atom Chip towards

Quantum Operations”, The 12nd International Superconductive Electronics Conference, 2009/6/16, Fukuoka Japan, Contributed Talk SP-O2

- ⑳ Tetsuya Mukai, Christoph Hufnagle, and Fujio Shimizu, “Superconductive Atom Chip: Property and Prospect”, 19th International Conference on Laser Spectroscopy, 2009/6/9, Hokkaido Japan, Poster II-10

〔産業財産権〕

○出願状況（計2件）

- ① 名称：原子捕捉装置および原子捕捉方法
発明者：向井哲哉
権利者：日本電信電話株式会社
種類：特許
番号：特願 2010-027350
出願年月日：2010年2月10日
国内外の別：国内
- ② 名称：原子捕捉装置および原子捕捉方法
発明者：向井哲哉、丹治はるか
権利者：日本電信電話株式会社
種類：特許
番号：特願 2011-270105
出願年月日：2011年12月9日
国内外の別：国内

〔その他〕

アウトリーチ活動

- ① 向井哲哉，サイエンスアカデミー1：「量子の不思議を体験してみよう」，2011/10/11，青森県立三本木高等学校・附属中学校（SSH Super Science High School）
- ② 向井哲哉，「アトムチップ」，総合デザイン工学特別講義A，2009/5/15，慶應義塾大学理工学部

ホームページ情報

<http://www.brl.ntt.co.jp/people/tetsuya/exp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向井 哲哉 (MUKAI TETSUYA)

日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・主任研究員

研究者番号：70393775

(2) 研究分担者

清水 富士夫 (SHIMIZU FUJIO)

電気通信大学レーザー新世代研究センター

研究者番号：00011156

C Hufnagel (HUFNAGEL CHRISTOPH)

日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・研修生

研究者番号：70470341

(2009年6月10日まで)