

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 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540408

研究課題名（和文） 緩和のない原子運動制御法の開発と原子波動光学への応用

研究課題名（英文） Relaxation-less control of atomic motion and its applications to atom-optics

研究代表者

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・共同研究員

研究者番号：00011156

研究成果の概要（和文）：強力で、正確に定義されたコヒーレントな原子線源を作ることには原子光学の科学への応用を広げるための重要な課題である。我々はこの課題研究で以下の二項の成果を得た。まず、ナトリウム原子を形状を正確に製作できる超伝導ニオブウム薄膜の上にトラップして、よく定義された原子波源を作るための基礎を築いた。次に、我々が従来から利用してきた極低温準安定状態ネオン原子ビームの生成方法を定量的に解析、改善することで従来の10倍以上ビーム輝度を向上させることに成功した。

研究成果の概要（英文）：Generation of an intense well-defined coherent atomic source is indispensable for various scientific applications of atomic waves. First, we established the method to control sodium atomic waves on the algebraically well-defined superconductive niobium film. Second, we developed an intense ultra-cold continuous metastable neon beam, which can be used for various atom-interferometric applications.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子光学、レーザー冷却、ナトリウム、希ガス原子

1. 研究開始当初の背景

1990年以降、原子気体を極低温まで冷却できるレーザー冷却技術の進歩のおかげで、様々な原子光学、あるいは原子量子光学研究が展開されてきた。特に、1994年に達成されたアルカリ原子のボーズ・アインシュタイン凝縮は大きな注目を集め、その後の15年

間にこれに関連したバラエティー豊かな研究が行われている。これは、今まで光波のみで可能であった、波動のコヒーレントな制御が原子（波）でも可能になったことを意味する。しかし、光（光子）は互いに相互作用を及ぼさないが、原子は互いに影響を及ぼす点で決定的な違いがある。このため、現在まで

の研究は、純粋な波動光学的研究やその応用、また多光子の量子光学的研究よりも、相互作用の結果出現する多体量子効果の研究に興味の重点が置かれてきた。さらに光学との大きな違いは、原子光学で使われる原子の数は光学で使われる光子の数より何桁も小さいこと、および原子は質量を持っていることである。

このため、原子波では正確に定義された環境で精度の高い研究を行うことがは困難であった。

2. 研究の目的

以上の状況に鑑み、我々はいっと精度よくコントロールされた原子波を開発し、物理関係の研究、原波動工学的な応用のための手段を提供することを目的としている。

3. 研究の方法

我々は以下の2項目について開発を行った。

(1) まず、ポテンシャルでガイドされたコヒーレントな原子波の開発である。ポテンシャルによる原子のガイドは長い歴史があり、光双極子ポテンシャルによる方法や磁気四重極子による方法が一般的であるが、いずれもコヒーレント原子波に要求される単一横モードの伝搬をさせるにはほど遠い状況である。このうち最も有望なのが固体表面に金属のパターンを描き、電流を流した磁気ガイドである。(このようなデバイスはアトムチップとよばれている。)ここで、常温金属に流れる電流を使ったのでは熱的緩和のために原子を長時間コヒーレントに保つことができない。我々が提案するのは、アトムチップを液体ヘリウム温度まで冷却し、常温電流の代わりに超伝導電流を用いる方法である。この方法はデコヒーレンスの問題を軽減するだけでなく、永久電流を用いることで幾何学的により正確な電流を作れるし、第2種超伝導体を使うことでより多彩なガイドを作る可能性がある。

(2) 第2の方法は自由空間中にできる限り輝度の高い原子線を作ることである。レーザー冷却による超低温原子線の出現よりずっと以前から、原子線の輝度は常に原子間の衝突(相互作用)で制限されてきた。レーザー冷却技術により、輝度の高い原子トラップが出来るようになってもこの事情は変わらない。原子特有の事情として、中性原子は一般に検出効率が悪いこともある。したがって、特定の原子種である必要がない場合は検出効率を考慮して原子を選ぶべきである。これらのことを考慮して我々は以下のようにして高輝度原子線を開発した。

①まず、原子種に準安定状態にあるネオン原

子を選んだ。この原子はイオン検出用の検知器を用いて50%以上の量子効率で検出できる。

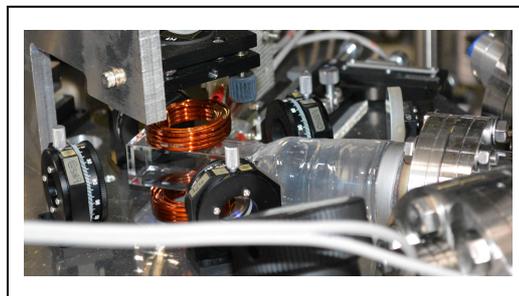
②準安定状態ネオン原子を出来る限り輝度の高いトラップにトラップする。このためには放電によって低速の準安定状態原子を生成する、レーザーを用いて原子ビームをコリメータとする、ゼーマン法での縦速度の減速、高い磁場紅梅を供えた磁気光学トラップに原子をトラップする、という複数の手順を最適化する必要がある。

③トラップされた原子が衝突で失われないように素早く解放する。われわれはトラップされた原子の状態とは異なったもう一つの準安定状態に光ポンピングで移すことで、この要求をまんどくさせた。解放された原子は保存ポテンシャル勾配下で加速することによって差奥戸分散を圧縮した。(原子と同じ速度で動く座標で見れば冷却したことになる。干渉実験ではこの解釈でよい。)

4. 研究成果

(1) 超伝導原子チップによる原子操作の研究。

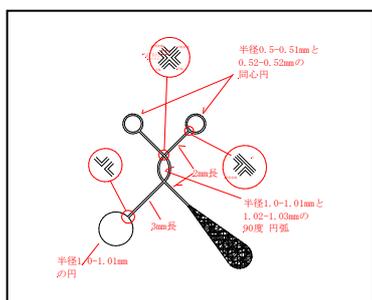
①操作を行う原子雲を作るための、ナトリウム磁気光学トラップ、原子の運送装置、チップを液体ヘリウム温度に冷却、温度コントロールを行うための装置、の設計製作を行い、基本的な動作の確認を行った。



上図はこの装置の一部である。中央のコイルにはさまれた部分がトラップ、原子は右に伸びている管を通して原子チップなどが装填されている右側の真空タンクに導かれる。

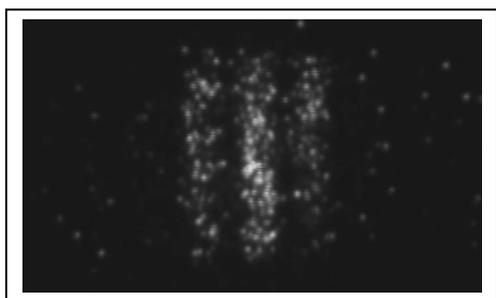
②超伝導原子チップの設計と製作。製作の協力を求めた企業が2011年の震災の影響を受けたため、第一次試作品までしか製作できなかったが、我々の考案によるチップの構成を述べる。基本的な考えは電流導入のための配線を使わず、永久電流で原子ガイド用の磁場を作り幾何学的に正確で精度が高く、かつ微細なデバイスを作ることにある。ガイドの磁場パターンを決める永久電流は超伝導転移温度以上であらかじめ一様な外部磁場を印加しておくことで誘起し、超伝導回路の各部分の電流制御はレーザー光で回路の一部を加熱して永久電流を遮断するか、転移温度の

異なる材料で回路を作ることで達成できる。精度は落ちるが、第2種超伝導体に浸入する磁束を使うことも出来る。試作した回路の例（マッハゼンダー型原子干渉計）を下図に示す。



(2) 自由空間中での高輝度原子線の開発。

我々は準安定状態ネオン原子の高輝度連続原子線を開発した。原子束は約 10^6 /sec、原子源から 1 m の距離でビームの断面は 1 cm^2 以下、温度は約 100 マイクロケルビンを達成した。これは簡単な原子干渉パターンならば“実時間”（すなわち通常のムービーの一コマの時間）で描ける画期的な輝度である。



上に示した図は回折格子(大きさ $3 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 、ピッチ 2 マイクロメータ)からの回折像を 1/30 秒で撮影した画面である。このような原子線を得るには装置の各部の構成について新しいアイデアと綿密な設計が必要である。

- ① 準安定状態原子を作るには、まず、原子を励起しなければならない。我々は液体窒素温度 (77 K) に冷却したサファイアのキャピラリー中で放電を起こして励起した。また、キャピラリーに入ってくる原子の加熱を抑えるために、気体の一部をキャピラリー中の流れと逆向きに流した。これらの工夫によって原子の温度を約 1/2 に下げることが成功した。これは原子線の密度を 2 倍にあげたことに相当する。
- ② さらに強度を上げるため、原子を直角方向から共鳴光を当てることで平行にコリメートする方法で、次に述べるトラップ強度を約 30 倍高めることが出来た。球面鏡 4 枚を使ったこのシステムも我々の発明である。

③ 原子線は通常の方法でゼーマン減速され、磁気光学トラップにトラップさせるのであるが、輝度を高めるためには、トラップ中の原子密度を出来るだけ高く、かつ、サイズを小さくする必要がある。我々はトラップを構成する四重極磁場の磁場勾配を一般より約一桁大きい最大 100 G/cm (軸方向) を用いた。この結果、トラップ直径が約 50 ミクロンメートル、温度が 100 マイクロ K 以下の原子雲を作ることが出来た。このとき、原子密度は 10^{13} cm^{-3} に達しているはずで、衝突断面積から判断してほぼ限界の輝度が得られていると考えられる。

④ トラップされたネオン原子を自由空間に放出するには光ポンピングを使った。トラップされた原子は $1s_5$ 状態に在るが、これをもう一つの準安定状態であり、磁場やトラップ用レーザー光の影響を受けない $1s_3$ 状態に移すことで重力以外の影響を受けない自由な原子波にする。重力は原子波をコヒーレントに加速することで速度分散を圧縮する。

⑤ 以上で一応高輝度原子線は完成であるが、さらに、我々は原子線に赤方離調したレーザー光を重ねてビームに横方向の断熱冷却を行った。これは輝度に影響を与えるものではないが、原子線の単位断面積あたりの強度を任意に強めることが出来る。

⑥ 以上が我々が開発した準安定状態ネオン原子線の概要である。今後、若干の物理学的解析を終えた段階で詳しい記述を公表する予定である。また、この技術をアルカリ原子など、ボーズ凝縮に成功している原子に適用することは興味深い課題であると考えられる。

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 4 件)

① Ramachandrarao Yalla, Fam Le Kien, M. Morinaga, and K. Hakuta, Efficient Channeling of Fluorescence Photons from Single Quantum Dots into Guided Modes of Optical Nanofiber, *Phys. Rev. Lett.* (査読有), 109, 063602 (2012)

② Dmitrii Kouznetsov, Makoto Morinaga, "Guiding of Waves between Absorbing Walls", *Journal of Modern Physics* (査読有), 3(7), 553-560, 2012

③ Manoj Das, A. Shirasaki, K. P. Nayak, M. Morinaga, Fam Le Kien, and K. Hakuta, "Measurement of fluorescence emission spectrum of few strongly driven atoms using an optical nanofiber", *Optics Express* (査読有), 18, 17154-17164, 2010

④ 森永 実, "冷却原子と相関計測", 素粒子

〔学会発表〕(計3件)

- ① Fujio Shimizu, Intense slow metastable neon beam, Workshop on Continuous Sources of Quantum Matter, 11-13 March 2013, Freudenstadt, Germany.
- ② 森永実, ピンホール列による光のガイド、日本物理学会第68回年次大会、27pEE8、2013年3月、広島大学
- ③ 森永実, “不透明マスク列によるビームの横モード操作”, 電気学会光・量子デバイス研究会資料, OQD-10, 46-54(15-18), 2010年12月、大阪市立大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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・共同研究員

研究者番号: 00011156

(2) 研究分担者

森永 実 (MORINAGA MAKOTO)

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・助教

研究者番号: 60230140