

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610123

研究課題名(和文)量子気体中における回折限界を超えた局所操作

研究課題名(英文)Local manipulation of a quantum gas beyond the diffraction limit

研究代表者

岸本 哲夫(Kishimoto, Tetsuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：70420239

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)：本研究の目的は、量子気体中における回折限界を超えた局所操作法の開発にある。今回、それを実現するための新しい提案と必要となる要素技術の開発を行った。ここでの鍵は、3準位を利用した不均一光シフトと87Rb原子の特定の超微細構造準位間のマイクロ波遷移を組み合わせる点にあり、特定の1つの基底状態磁気副準位はその局所操作レーザー光を全く感じない(光シフトをしない)条件を見出すことが不可欠となる。その条件は、局所操作レーザーを特殊な波長に設定することで実現できると考え、その波長の同定と光シフトが全く起きない条件を見出すことが最も重要となる。本課題では、その条件を見出すことに主眼をおき、研究を行った。

研究成果の概要(英文)：Our goal is to locally manipulate a quantum gas beyond the diffraction limit. We take advantage of the fruitful multiple internal states of an atom to approach beyond the diffraction limit. Spatially inhomogeneous light shift engineering on one of the hyperfine ground state of an alkali atom and the microwave transition between another hyperfine ground state will be the key element in this concept. While light shift occurs on one state, the other state should not have any light shift. If the light shift laser is focused, only the limited region where the microwave is resonant between these two states can be manipulated, so one will be able to approach beyond the diffraction limit. This could be realized by using a so called "tune-out wavelength" for the light shift (manipulation) laser. We also proposed a simple method to spectroscopically measure this tune-out wavelength using thermal 87Rb vapor gas, and experimentally performed this method.

研究分野：数物系科学

キーワード：量子エレクトロニクス ポース・アインシュタイン凝縮

### 1. 研究開始当初の背景

回折限界以下の量子気体の空間分布構造を観測する場合、捕獲ポテンシャルから原子を解放してその分布を広げて観測を行う飛行時間法を用いるのが一般的である。光学顕微鏡では、SIL(Solid Immersion Lens)を用いることにより、空気中での回折限界以上に空間分解能を得る方法がある。近年になってこのSILの技術を量子気体に適用し、2次元系における量子気体顕微鏡の開発や、それを用いた量子シミュレータや量子コンピュータの実現へ向けた研究が盛んに行われるようになってきた。ただ、一般にSILの特性から光軸方向の焦点作用範囲はSIL底面から近接場領域の波長オーダー以下しか望めず、擬2次元的范围での実用となってしまう。またこの手法を用いる場合の制約として、真空槽へ特殊形状の半球型レンズ(SIL)を装着する必要がある点や、SIL底面近傍に量子気体系を用意しなければならない点が挙げられる。

一方、2電子系原子を用いることで峽線幅遷移を使って局所励起できることを生かし、励起状態を不均一エネルギーシフトさせながら、励起状態と共鳴した範囲の原子のみを観測することで高空間分解能を得る方法が最近提案され、研究が進められている。また、SILとこの2電子系原子を組み合わせた方法で量子シミュレータを目指す提案もされている。2電子系原子では不可欠な線幅超狭窄化された光源や励起状態を不均一エネルギーシフトさせるための特殊な磁場コイルが必要となるなど、技術的難しさもあり、研究開始当初時点でまだ実現に至っていなかった。

これらの状況において、本提案のような3次元への拡張が容易になる回折限界を超えた局所操作の新奇手法の開拓も重要であり、手法の確立が急務になっている。

### 2. 研究の目的

今回の提案手法は、2014年度のノーベル化学賞の回折限界を超えた超解像顕微鏡の考え方の一部をヒントに、複数の内部状態を原子が有することを巧みに利用して局所操作につなげる発想を得ている。従来、量子気体の局所操作にはレーザー光を絞り込んだ焦点付近での光シフト(光双極子ポテンシャル)を直接用いるのが一般的で、その結果として回折限界で決まるサイズ以下の局所操作は難しいとされていた。また、量子気体の分布を観測する際にも結像系の開口数で決まる回折限界以下のイメージングも不可能であった。本提案では、これらの難しいとされてきた部分を打破し、回折限界を超えた局所操作やイメージング法の提案とその実現に向けた要素技術開発を目的としている。特に、その中で重要となる局所作用レーザーの特殊波長(Tune-out波長)を同定するた

めの簡便な測定方法の提案と実証実験を進めた。

### 3. 研究の方法

(1) SILのような特殊なレンズを使わずに開口数0.5程度の市販の結像系(作動距離~50mm)を用い、従来同様に回折限界程度まで絞った光シフト光を使いつつ、回折限界を超える量子気体中の局所操作を実現可能にする方法の提案を行う。

(2) 提案手法で必要となる特殊波長(Tune-out波長)の簡便な測定および同定方法を提案する。

(3) 局所作用レーザーによる光シフト量の波長依存性およびガウシアン強度分布の影響の見積もりを行う。

(4) 局所操作のための光シフトレーザーおよび分光で用いる光源の開発を行う。

(5) 吸収分光法を用いて観測した光シフト量の結果とその結果を基にした今後の指針について検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 回折限界を超える局所操作法の提案

まず、SILのような特殊なレンズを使わずに開口数0.5程度の市販の結像系(作動距離~50mm)を用い、従来同様に回折限界程度まで絞った光シフト用レーザーを使うが、回折限界を超える局所操作を行えるようになる。

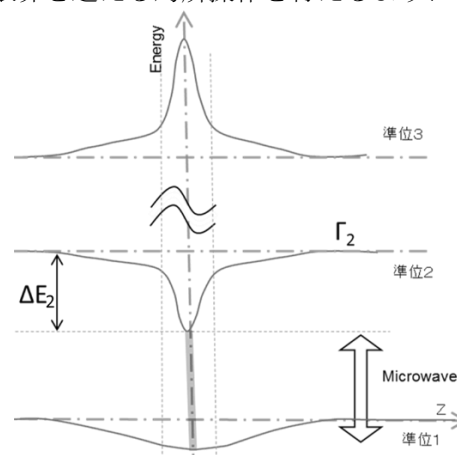


図1: 準位2に対する不均一光シフトの概念図

違いは、準位1の状態にある量子化遺体に対して、従来は準位1をエネルギーシフトさせて量子気体操作を行っていたのに対して、本提案は、図1に示されるように準位2に対してエネルギーシフトを起こさせる点にある。位置に依存した不均一なエネルギーシフトを与えると準位1-2間の共鳴遷移周波数が位置によって異なってくる。準位2の自

然幅  $\Gamma_2$  に比べて十分大きいエネルギーシフト  $\Delta E_2$  が可能であれば、 $\Delta E_2$  が最大となる中心部分近傍だけで共鳴になるため、実効的に原子の内部状態を操作する領域を小さくすることが可能となる。この場合、結像系の回折限界が数  $\mu\text{m}$  でも、実効的には数  $\mu\text{m} \times \Gamma_2 / \Delta E$  程度の空間領域(図中：グレーの帯の領域)のみで操作可能となる。

特に、アルカリ金属原子の場合、基底状態の超微細構造準位間の遷移は磁気双極子遷移であるため超微細構造の励起状態の寿命は極めて長い ( $\sim 10^{18}\text{s}$ , 逆数である線幅は極めて狭くなる)。現実には、外部の環境から受ける場の揺らぎによって、経験的に kHz 程度の精度で超微細構造準位間のマイクロ波周波数を合わせることで、準位 1 から準位 2 へ局所的に移すことになる。そのため、100kHz 程度のエネルギーシフト  $\Delta E_2$  が生じれば、回折限界を超える局所操作が可能と大凡見積もられる。

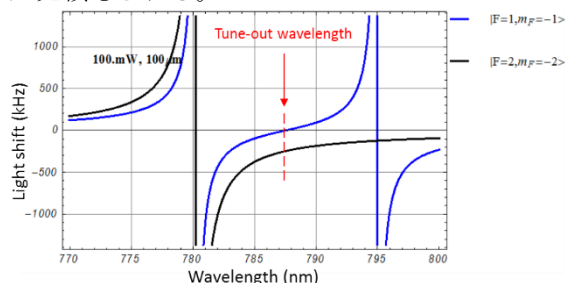


図 2 :  $^{87}\text{Rb}$  の  $5S_{1/2}$  準位の光シフト量の局所操作レーザー波長依存性 ( $\sigma^-$  偏光)

また、準位 1 と準位 2 を基底状態超微細構造準位のそれぞれ  $5S_{1/2}$  ( $F=1, m_F=-1$ ) 準位と  $5S_{1/2}$  ( $F=2, m_F=-2$ ) 準位とし、局所操作レーザーを  $\sigma^-$  偏光にすることで、これらの準位間で異なるエネルギーシフト (光シフト) が生じるようになり (図 2)、特殊波長 (Tune-out 波長) が D1 (795nm) と D2 (780nm) 遷移の間に存在することが予想される。これは、D1 と D2 遷移の全磁気副準位からの寄与を考慮して遷移強度の和を求めると、全体で差が生じることによる。

これらの理由から、回折限界を超えた量子気体中の局所操作が可能になるとの提案を行った。

## (2) 特殊波長の簡便な測定方法の提案

一般には、準位間のエネルギーシフト差を観測する場合、冷却原子やボース凝縮体を用いて分光による観測を行う。今回の場合、特定の基底状態超微細構造エネルギー準位間の光シフト差を観測すればよいため、室温原子による分光が可能と考えた。これは、光学遷移に対する室温原子のドップラーシフト量は GHz 程度だが、マイクロ波遷移に対するそれは、10kHz 以下となるため、操作レーザーによって 100kHz 前後の光シフト差が生じれば十分に観測可能なことで推測される。本提案ではこのことを利用して、単純に Rb

ガスセル中 (室温) にプローブ光を入射させ、同軸入射する操作レーザー (光シフト光) の有無による各マイクロ波遷移の吸収ピークのシフト量を観測してエネルギーシフト差を測定し、操作レーザーの特殊波長の探索ができる提案となっている。

## (3) エネルギーシフト差の波長依存性

分光実験では、特定の基底状態超微細構造準位間のエネルギー差を観測することになるため、光シフト光によって生じるズレ (光シフト量差) を見積もると図 3 のような結果が得られると予想される。

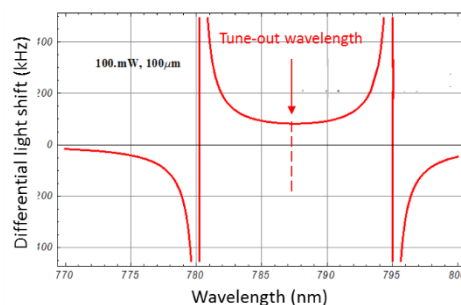


図 3 :  $^{87}\text{Rb}$  の  $5S_{1/2}$  ( $F=1, m_F=-1$ ) 準位と  $5S_{1/2}$  ( $F=2, m_F=-2$ ) 準位間の光シフト量差の局所操作レーザー波長依存性 ( $\sigma^-$  偏光)

実験では、局所操作レーザー (光シフト光) はガウシアン強度分布をしており、プローブ光も同様の強度分布を持つため、その影響も考慮する必要がある。ここで、これらの光は波長が近いので、完全に重なるように同じ SM ファイバへ結合して実験は行うものとする。

ガスセル中を透過する際、光軸の中心近傍とビームの外縁では、光シフト量が異なるため、これらすべての寄与を積分すると分光結果は、マイクロ波遷移の共鳴周波数のシフトは均一ならず、ドップラーシフトに起因したガウシアン分布からずれた非対称な曲線の形でシフトすることが見積もられる。

## (4) 各種光源の開発

### ・局所操作レーザー

局所操作 (光シフト) レーザーには、Thorlabs 社製の半導体レーザー (LD785-SE400; 785P400K02.B02) を用いて出力数百 mW の光源を構築し、D1 線 (795nm) から D2 線 (780nm) までの帯域内で波長ごとにシングルモード発振する最適な電流・温度条件を割り出し、帯域内全体で波長選択可能にした。

### ・分光用光源

まずは、プローブのために 2 つの外部共振器レーザーをビートロックして、マイクロ波遷移の 2 光子分光の光源とした。実験では、各マイクロ波遷移は観測可能だったものの、10kHz レベルの光シフト変化を観測するには

SN が不十分で、また、毎回のデータの揺らぎが大きく、この光源セットでの光シフト差の観測には至らなかった。

そこで、後述のように、1 光源から 2 周波数を取り出せるように、外部共振器レーザーにマイクロ波周波数の電流変調を印加してサイドバンドを生成する手法をとることとした。通常、マイクロ波周波数領域での電流変調は非常に難しく、数%程度のサイドバンドしか生成できない。そこで、今回、サイドバンド周波数に合うように共振器のFSRを設計し、サイドバンド光の増強を図った。また、マイクロ波の掃引は、定常周波数のマイクロ波信号源と任意波形発生器からの掃引周波数を組み合わせることで可能とした。

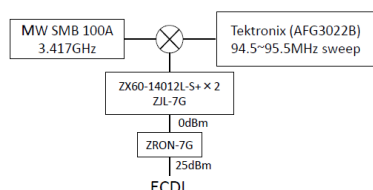


図4：外部共振器レーザーを電流変調するマイクロ波周波数の掃引方法

### (5) 観測結果と今後の指針

マイクロ波遷移の分光方法として、いくつか試みた。まず、直接マイクロ波を照射して周波数を掃引しながら、吸収曲線を観測した。この場合、操作用レーザーの有無でマイクロ波遷移のピークのずれが、SNの範囲内では観測できなかった。

そこで、次に、ビートロックされた2光源を用いた2光子遷移によるマイクロ波遷移分光を試みた。ここでは、まず3重磁気シールド内の<sup>87</sup>Rb原子ガスセルに対してマイクロ波時計遷移 ( $mF=0 \Rightarrow mF'=0$ ) を観測し、手始めとして、シールド内で数ガウスまでの均一な磁場を印可したところ、587Hz/G<sup>2</sup>で変化する10kHz程度までの2次ゼーマンシフトの観測が確認できた。これは、ブライト・ラビの公式から見積もられる575Hz/G<sup>2</sup>という係数と良く一致しており、シフト量10kHz程度の分光精度は十分得られるようになっていることを示している。この方法では、分光精度が2本のレーザーの相対線幅によって決まり、各レーザー自身の線幅に制限されない特徴があり、結果的に相対線幅がマイクロ波発生器の周波数精度のみで決められるようになる。また、相対線幅が狭い2本の光と原子が相互作用することで暗状態が形成され、ドップラー幅に依存しない、高い精度の分光が可能となる (Coherent population Trapping)。ビートロックによる2光源を用いた2光子分光では、十分な分光精度があることは確認できたが、まだ信号強度の揺らぎが大きく、SNの改善が必要であった。

そのため、外部共振器型半導体レーザーに3.4GHzの電流変調を加えてサイドバンド光を発生させ、その際に、フリースペクトラル

レンジが3.4GHzに共鳴するような共振器長(約44mm)に改造を行った。このことにより、サイドバンド強度が数%から数十%へ増強され、さらに、1次サイドバンド光間の周波数差および強度差の揺らぎが大幅に軽減されて、吸収信号とバックグラウンドの比が改善し、基底状態超微細構造準位間での光シフト差が観測可能となった(図5)。

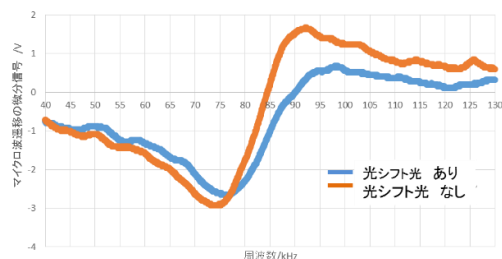


図5：局所操作光(光シフト光)の有無によるマイクロ波遷移の微分信号の変化

前述のように、光がガウシアン強度分布を持つため、非対称なシフトが生じている。尚、プローブ光の吸収量を測定する際には、光シフト光が約100mWに対してプローブ光が10μWオーダーなので、同軸入射されたこれらの光を干渉フィルタに往復2回透過させることで、光シフト光の強度揺らぎがプローブ光の吸収量検出にかからないようにした。さらに、ロックイン検波することで、SNの向上を図っている。

図3で見積もられたように tune-out 波長近傍では光シフト量の差の変化は波長依存性が鈍化する。そのため、本来生じない他要因による余分な勾配バックグラウンドが足されてしまう場合、Tune-out 波長の同定を誤ってしまう。今回、まだこの余分な勾配が付加された信号になってしまっており、原因を調査中である(図6)。

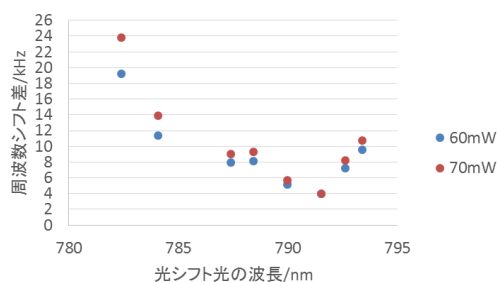


図6：局所操作光(光シフト光)によるマイクロ波遷移の周波数シフト差の観測結果

本実験では、光シフト光として半導体レーザーを使用しているが、自然放出増幅光(ASE)および不要な自励発振モードによって余分な勾配を信号に付加している可能性が考えられる。また、この余分な光シフトが残っていると、前述の準位1へ不要なエネルギーシフトを生じてしまうため、この除去が重要となる。そのため、今後、他研究グループから単一周波数のチタンサファイヤレーザーを借りて原因の追究を行い、その後、精

度の高い Tune-out 波長同定を行い、その波長を用いて、量子気体中の回折限界を超えた局所操作の実験へ繋げていきたい。

#### 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 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① Tetsuo Kishimoto, “Towards multi-stage cooling of 87Rb atoms by spatial light-shift engineering”, The 4<sup>th</sup> MIPT-LPI-UEC Joint Workshop on Atomic, Molecular, Optical Physics. (Invited)  
2017年3月27日  
電気通信大学 (東京都調布市)
- ② Wataru Okamoto and Tetsuo Kishimoto, “Towards spectroscopic measurements of 87Rb tune-out wavelength using vapor cell”, The 4<sup>th</sup> MIPT-LPI-UEC Joint Workshop on Atomic, Molecular, Optical Physics.  
2017年3月27日  
電気通信大学 (東京都調布市)
- ③ Wataru Okamoto and Tetsuo Kishimoto, “Towards spectroscopic measurements of 87Rb tune-out wavelength using vapor cell”, The IRAGO Conference 2016.  
2016年11月1-2日  
電気通信大学 (東京都調布市)
- ④ Tetsuo Kishimoto and Yuta Yoshino, “Laser cooling of 87Rb atoms using 5S1/2-6P3/2 transition”, The 25<sup>th</sup> International Conference on Atomic Physics.  
2016年7月25日  
Seoul (Korea)

[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  
<http://klab.pc.uec.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

岸本 哲夫 (KISHIMOTO TETSUO)  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・  
准教授  
研究者番号：70420239