

# 研究報告書

## 「連続発振原子波レーザーの開発と微細加工技術への応用」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成22年10月～平成26年3月

研究者: 岸本 哲夫

### 1. 研究のねらい

原子と光子の相互作用を巧みに利用することで、熱運動する原子を冷却したり、その原子を捕獲可能な保存場ポテンシャルを形成したりすることが可能である。レーザー技術の発展と共に、実際にレーザー光を利用して極低温まで原子気体を冷却する方法(レーザー冷却)が確立され、さらに極低温原子間の衝突によって熱平衡化させた後に高い運動エネルギーの原子集団のみを強制的に排除(強制蒸発冷却)することで、絶対零度近傍で相転移が生じ、ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)することが既に実験的に示されている。この BEC 生成の成功以降、凝縮系の物理に関する実験は多岐に渡って精力的に研究されてきた。ただ、どの原子や分子でもこの絶対零度が達成できるわけではなく、現実には限られた原子種やそれらの組み合わせから成る分子でのみしか実現できていない。その中においても、複雑なエネルギー構造を持つ分子などでも、シュタルクシフトを利用して減速させたり、He バッファースガスとの衝突を利用して冷やしたりする方法は研究が進んでいる。特にバッファースガス冷却法は冷却できる粒子の種類を格段に増やした点で、非常に強力な手法である。ただ、残念ながら到達できている温度にミリケルビンの壁というものがあり、この手法のみでは分子の絶対零度を達成するに至っておらず、この温度を実現可能な別の新たな冷却手法の構築が課題として残されている。

そこで本研究では、全光学的手法によって連続的な高繰り返しボース・アインシュタイン凝縮(BEC)生成法を新たに提案し、真の原子波レーザーの実現を狙った。この生成され続ける絶対零度の冷媒と所望の粒子を接触させることで、複雑なエネルギー構造を持つ粒子をもミリケルビンの壁を越えて冷却し、絶対零度まで落とし込むことが可能となる。また、ここで生成された粒子線源は高いフラックスとその単色性から粒子線描画技術の分解能の飛躍的向上が期待され、延いては微細加工技術への応用へとつながると考えられる。

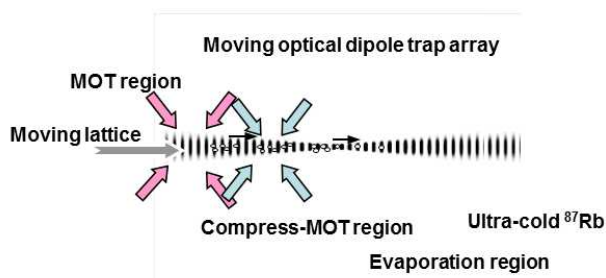


図1. 研究開始当初の実験概念

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究は開始当初、図1に示されるように従来の時間的操作を空間的に配置することで連続的に BEC を実現する計画であった。しかし、実際に実験を進めると、単純に既存の時間操作手順を空間的に横につなげても効率的に極低温・高密度な原子集団を生成し続けることが

難しいことが明らかになり、当初の手法から見直すこととした。そこで(A)まず、光子の散乱力を利用したレーザー冷却領域から、蒸発冷却の際に必要な光子の双極子力を利用した保存場による捕獲領域への連続的な受け渡し手法を新たに見出した。さらに、そこで必要な原子の温度と密度の条件を実験的に調査した[論文 1]。(B)次に、これらの条件に見合うような、さらなる低温化・圧縮高密度化が連続的に可能な手法を新しく考案し、計算から光双極子トラップなどの必要条件を予測した。(C)そして、この提案で使われる光双極子トラップの特殊波長の存在を実験的に初めて検証し、その波長を同定した。(D)また、通常の閉じた2準位系と異なり、他準位への緩和が存在する系でのレーザー冷却[論文 2]を用いることで、圧縮高密度化をする提案となっているため、実験でこの遷移を用いたレーザー冷却が可能であることを初めて示した。一方、残された研究期間で当初計画の最終段階まで取り組むことはできなかったものの、上記(A)-(D)の成果によって時間的操作を踏まらずに、高い位相空間密度の原子集団を連続的に供給し続ける道筋をつけた。これらによって、真の原子波レーザーの実現に向けての基盤技術を確立することはできた。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A 「レーザー冷却領域から保存場捕獲領域への連続的な受け渡し手法の確立」

図1に示したように、磁気光学トラップ(MOT)過程と圧縮 MOT(CMOT)過程の領域を空間分離し、さらに レーザー冷却過程から“外れて”保存場ポテンシャルへ原子集団を連続的に捕獲する手段を見つける必要があった。そこで、通常MOTの中心にCMOT領域を配置することで、冷やされた原子の圧縮を図り、また、レーザー冷却サイクルから外す方法として、暗状態を利用することとした。

本研究で用いる  $^{87}\text{Rb}$  原子の場合、励起状態の線幅と超微細構造分裂幅の関係から、光子を吸収・自然放出する冷却サイクル( $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$ )から  $5S_{1/2}(F=1)$ 準位に外れる(depump)レートが十分でなく、Na 原子の実験で用いる dark-spot MOT と呼ばれる手法が適用できない。そこで、本研究の場合、( $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=1)$ )や( $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=2)$ )へ depump 光を当てることで、depump レートを上げた。また、通常は時間的に repump 光強度を 1/1000 程度にして圧縮 MOT することで高密度化する代わりに、空間的に MOT 領域の中心でだけ repump 光強度が小さくなる dark-spotMOT の手法を“併用”することで高密度化出来ることを実証した。このことは、原理的には、時間操作なく、空間的に中心対称に各過程を分離配置することで連続的に原子を光双極子トラップへロード出来る可能性を示している。但し、今回の実験では、実際には depump 光を照射する直前に磁場勾配だけは増加させ、圧縮を図っているため、完全に時間操作のない手法には至らなかった。したがって、ここでは圧縮方法に関しては先の課題として残し、depump 光と dark-spotMOT の併用によって主としてレーザー冷却領域から保存場捕獲領域への連続的な受け渡し手法を確立したといえる[論文 1]。

### 研究テーマ B 「さらなる低温化・圧縮高密度化が連続的に可能な手法を新しく考案」

研究テーマ A でレーザー冷却サイクルから外して極低温原子を保存場に捕獲可能な手法を見出したが、蒸発冷却を行う前段階としてはまだ温度と密度共に不十分であった。そこで、独

自の手法を新たに考案する必要があった。

まず図2に  $^{87}\text{Rb}$  原子のエネルギー準位図を示す。新しく考案した手法では、通常用いる 780nm 遷移以外に、 $(5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=3))$  の狭線幅冷却遷移を用いる。この遷移の励起状態の自然線幅は 780nm 遷移のその 1/4 程度であるため、ドップラー冷却の限界温度 ( $\propto$  自然線幅) が下がる大きなメリットがある。また、冷却光の波長が短くなるため、吸収断面積 ( $\propto \lambda^2$ ) が小さくなり、冷却過程で自然放出光の再吸収によって制限される限界密度を向上させることが可能となる。これらのことから、蒸発冷却を始める際の初期位相空間密度 ( $\propto$  密度/温度 $^{3/2}$ ) が 2 桁以上上がることが期待される[論文 2]。さらに、図2中に示される 4D 準位や 7D 準位などが存在するため、光双極子トラップに 1560nm 近傍のレーザーを用いることにより、780nm 遷移に対しては非常に大きく、420nm 遷移に対してはほぼゼロの光シュタルクシフト差を生じさせることが可能なことが計算によって初めて示され、マジック波長の存在を予測した。

そこで、これらすべてを組み合わせることで、空間的に MOT の外側領域で通常の冷却をし、内側領域でさらなる低温化と圧縮高密度化を図り、中心近傍で完全に暗状態に落ち込ませ、極低温原子を連続的に溜めこむ機構を実現できる手法を新しく考案できたと考えている。

### 研究テーマ C 「光双極子トラップの特殊波長の存在の実験的検証とその波長の同定」

研究テーマ B で考案した手法を実際に用いる上で、まずその 1560nm 近傍と計算で予測したマジック波長の存在を示す必要があった。ただ、光シュタルクシフトを計算で見積もる際には、各遷移に対する実験や理論計算の文献値を利用したが、必要な準位に対する値が参考文献によってば

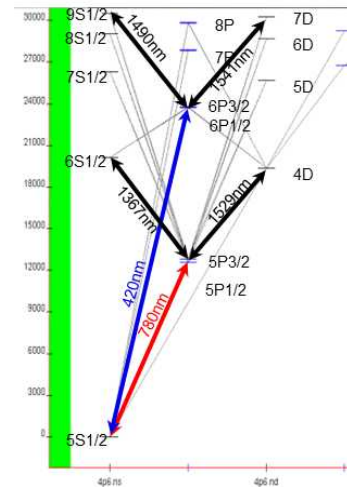


図2.  $^{87}\text{Rb}$  原子のエネルギー準位図

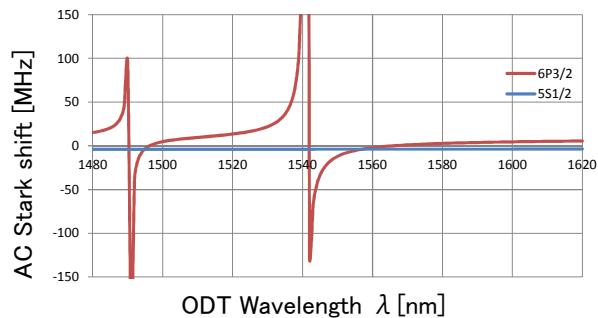


図3. エネルギー準位に対する光シュタルクシフトの波長依存性

[ODT の条件:  $P=5\text{W}$ ,  $r(1/e^2)=40\ \mu\text{m}$ ]

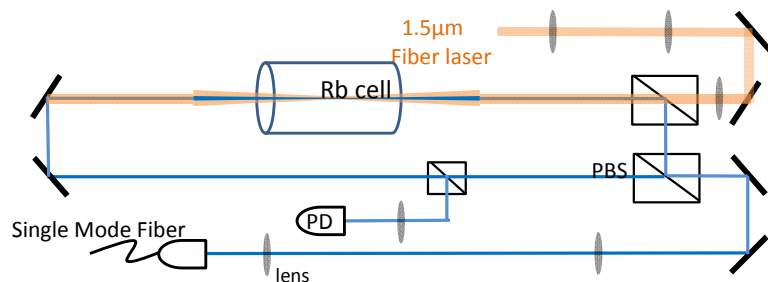


図4. 飽和吸収分光法によるマジック波長探索の実験配置図

らつきがあったため、マジック波長の同定を行うには、精度が不十分であり、実際に実験で探すことが不可欠だった。そこで、室温で動き回る原子(ドップラーシフト量: 500MHz~1GHz)でも自然幅の分解能(~MHz)で分光可能な飽和吸収分光法を用いて、このマジック波長の探究を行った(図4)。通常この分光法では、室温原子集団に対し probe 光と pump 光を対向させ、その吸収信号から原子の超微細構造を観測する。この飽和吸収分光の系に 1.5  $\mu\text{m}$  波長のレーザーを重ねて、超微細構造の分光信号の周波数軸上のシフト量を観測することで 1.5  $\mu\text{m}$  レーザーの波長に対する光シュタルクシフト量の差の依存性を調べた(図5中の右上写真)。

40nm の範囲に渡って分光実験を行った際の飽和吸収信号のシフト量をプロットしたものを図5に示した。フィッティングから 5S-6P 遷移に対するマジック波長は、1557nm から 1560nm の間に存在することが確定した。このことで、このマジック波長の光双極子トラップを用いて、MOT の中心領域で原子のエネルギー準位をシュタルクシフトさせるが、基底状態と励起状態を等しくシフトさせることでより冷却効果が期待できる 5S-6P 遷移間による冷却が可能になりつつ、5S-5P 遷移間のシュタルクシフトは大きいために 780nm 冷却光を感じさせない状況を作り出すことができるようになる。

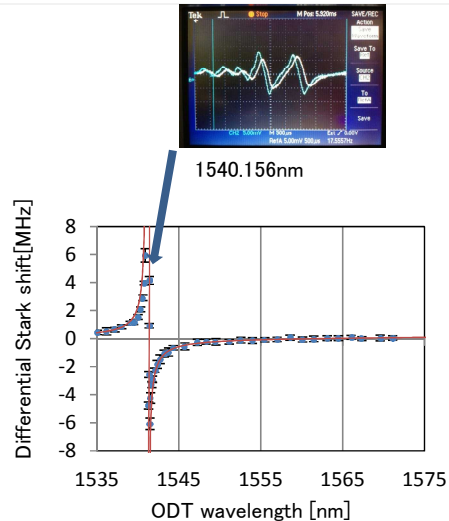


図5. 光トラップのマジック波長同定のための飽和吸収分光結果

#### 研究テーマD 「他準位への緩和が存在する系でのレーザー冷却の実証と圧縮高密度化」

次に、5S-6P 準位間の狭線幅遷移における  $^{87}\text{Rb}$  原子に対する冷却効果はまだ実証されていなかったため、この波長でのレーザー冷却の実証が不可欠となった。通常の吸収・放出を繰り返す2準位系で考える冷却サイクルと異なり、5S-6P 準位間では他準位への緩和が存在するため、効率的な冷却が可能かどうか不明な点があった[論文 2]。そこで、まず自作の周波数安定化された外部共振器型半導体レーザーを用いて1次元 MOT によって離調周波数や光強度、偏光などのパラメータに対する冷却到達温度や密度を調べた。そして得られた条件を基に、通常の 780nm での MOT 光に重ねる形で 420nm の3次元 MOT を配置し、実験を行った結果を図6に示した。

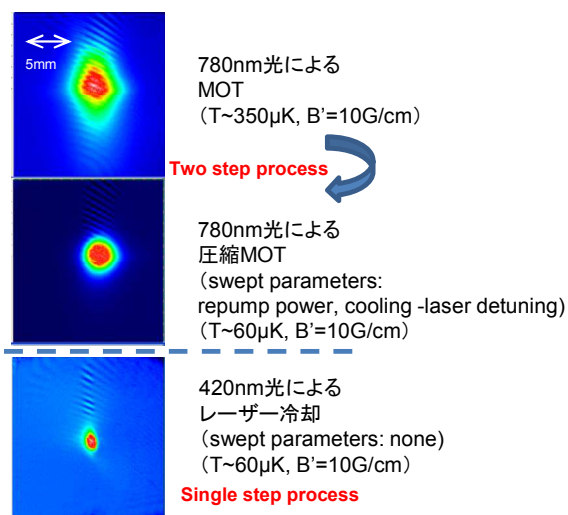


図6. 420nm 光による原子集団のさらなる冷却と圧縮高密度化

図から見て明らかのように、420nm でのレーザー冷却に成功し、さらに圧縮高密度化にも成功



していることが分かる。冷却到達温度も時間操作を行う通常の CMOT の時と同程度であり、また、原子集団の大きさも通常行う CMOT と同程度まで圧縮されている(注: 図中の CMOT は磁場勾配を時間的に変化させなかった時のデータ。BEC 生成実験では通常、磁場勾配も変化させることで圧縮高密度化させる)。420nm 光を用いることでさらに冷却が進むことが実証され、しかも磁場勾配を 780nm の MOT の時と同じままで変化させずとも圧縮高密度化が可能なることを示せたことは、時間的操作を経ずして高い位相空間密度の原子気体集団を連続的に生成できることを示唆しており、これらの結果は極めて大きな一歩である。

### 3. 今後の展開

本研究により、高い位相空間密度の状態で原子集団を保存場に連続的に供給し続けるための基盤技術が確立できたと考えている。今後これらを組み合わせることで、マジック波長の光双極子トラップを利用した2色同時 MOT によって異なる温度・密度領域を作り出し、続く蒸発冷却によって連続的に BEC 生成を実現できるようにする。この系は既存の蒸発冷却と異なり、加熱された原子を排除せず、外側領域で光子によって再度冷却されるリサイクルシステムとなっているため、原子間衝突の時間で制限されてきた蒸発冷却時間の大幅な短縮も図られると期待される。

その先の展開としては、この連続供給型絶対零度原子線源を冷媒として用いることで、冷却できる原子や分子の選択枝が格段に増やすことができる。また、この真の原子波レーザーが実現すると、温度(単色性)・位置(指向性)ともに良く制御されていることを利用して、中性原子の状態あるいはイオン化させることで微細加工技術への応用が広がると考えている。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

本研究では、全光学的手法によって連続的な高繰り返しのボース・アインシュタイン凝縮(BEC)生成法を確立し、真の原子波レーザーを実現するという壮大な目標をもって臨んだ。当初は、既存の時間的冷却操作手順を空間軸に置き換えることで目標達成可能であるという指針を立てていたが、詳細部分で理論的に詰めて予想できておらず、盤石な研究計画でスタートしたとは言えなかった。研究を進めていく過程で、既存のステップを空間軸に置き換える工夫だけでは、得られる位相空間密度において大きな飛躍を見込めないと感じ、全く新しい視点からのアプローチを考案する必要性に迫られた。考案に至るまでの試行錯誤に時間を要したが、この新しいアプローチの各仮説が正しいことを順に実験的に証明しながら、着実に進んできたことと評価できる。しかし、本研究期間中における自分のアウトプットは十分とはいえない。今後、本研究成果を踏まえて、マジック波長の光双極子トラップと2色 MOT による組み合わせで、いままでの時間的冷却操作手順を全て MOT 空間内に配置し、コンパクトかつ非常に効率的な方法を確立すべく取り組んでいく所存である。ただ、今後計画通りに実現した暁には冷媒とし

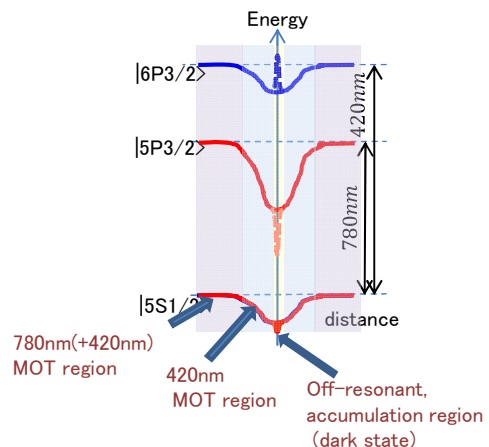


図7. 2色同時 MOT によって異なる温度・密度領域を実現させる系

て用いることで、飛躍的に冷却可能な粒子の選択肢が広がる可能性を秘めており、非常に今後の展開が楽しみだと考えている。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

レーザー技術の発展に伴い、レーザー光を用いて運動している原子を減速し、また冷却させた原子を空間に保持することが可能となり、これらの技術を利用して位相空間密度を上げて多数原子を基底状態まで落とし込んだボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成が実現された。BEC は様々な量子物理現象の研究に用いられてきたが、その生成にはいくつかの工程を切り替えて適用していく必要があり、また用いられる冷却手法は万能ではなく、それを適用できる原子種も限られていた。

これに対し岸本研究者は、すべての工程を光学的手法で可能とし、BEC を連続的に実現するアプローチをさきがけ研究として提案した。この手法では、連続的な高繰り返しBEC が実現できる可能性がある。各工程の検証を実験的に一つ一つ行い、それらの工程の可能性を実証し、これらの各工程を組み合わせることにより、連続的に BEC 原子集団の供給ができることを示した。これは新しいレーザーすなわち原子波レーザーの実現に道を開いた事になる。

現在、技術要素開発が一通り終了したところで、実際に全行程がアイデア通りに実現できるかどうかについては、今後の課題として残された。さきがけに採択された時点でのアイデアの見直しや、実験に必要な原子の特性の実測など、遭遇した課題を着実に解決した経験を今後の研究活動にも生かして、近い将来、原子波レーザーを実現してもらいたい。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. T. Kishimoto, "Towards Continuous Loading of Dense and Cold Rubidium Atoms into an Optical Dipole Trap", proceedings of the 10th Asian International Seminar on Atomic Molecular Physics, Taipei, Taiwan (2012), pp.56-58
2. R. Kouno, Y. Yoshino, and T. Kishimoto, "Laser Cooling of Rubidium Atoms Using the 5S-6P Transition", proceedings of the 10th Asian International Seminar on Atomic Molecular Physics, Taipei, Taiwan (2012), pp.223-224

### (2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件

1.

発 明 者: 岸本哲夫・牧野剛博

発明の名称: 「光学素子保持装置および光学素子保持装置の製造方法」

出 願 人: 国立大学法人電気通信大学、シグマ光機株式会社

出 願 日: 2012/4/17

出 願 番 号: 特願 2012-094257

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

[国際会議招待講演]

1. T. Kishimoto, “Towards Continuous production of BEC”, International Workshop on Control of Cold Atoms and its Applications, Tokyo, Japan (2014)
2. T. Kishimoto, “Towards Continuous Loading of Dense and Cold Rubidium Atoms into an Optical Dipole Trap”, proceedings of the 10th Asian International Seminar on Atomic Molecular Physics, Taipei, Taiwan (2012)

[国際会議発表]

3. R. Kouno, Y. Yoshino, and T. Kishimoto, “Laser Cooling of Rubidium Atoms Using the 5S-6P Transition”, proceedings of the 10th Asian International Seminar on Atomic Molecular Physics, Taipei, Taiwan (2012)

[国内会議発表]

吉野 悠太、岸本 哲夫、“ $^{87}\text{Rb}$  の5S-6P 遷移におけるマジック波長探索”、日本物理学会 2013 年秋季大会(2013)

吉野 悠太、河野 壘、岸本 哲夫、“光双極子トラップを用いた効率的な Bose-Einstein 凝縮体の生成に向けて”、第9回農工大・電通大合同シンポジウム「ナノ未来材料とコヒーレント光科学」(2012)