

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610114

研究課題名(和文)冷却原子による極性分子の協同冷却

研究課題名(英文) Sympathetically cooling polar molecules by thermal contact with atoms

研究代表者

井上 慎 (Inoue, Shin)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10401150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ルビジウム原子と同時にKRb分子を光トラップした後、蒸発冷却されるルビジウム原子との熱接触を用いてKRb分子をさらに冷却することを狙ったプロジェクトである。KRb分子は振動・回転の基底準位にある必要があるが、これはルビジウム原子とカリウム原子にレーザー冷却を行い、次に光会合と誘導ラマン断熱遷移(STIRAP)を用いて用意する。まず振動・回転の基底準位のKRb分子の数の安定化のために、環境磁場の精密測定を行った。次に分子と原子を効率良くトラップするために、共振器増幅光トラップの作成を行った。所望の増強因子は達成したが、機械的振動の問題が明らかになり、それを回避するための治具を各種試行した。

研究成果の概要(英文)：The goal of the project was to trap ultracold KRb molecules and ultracold Rb atoms in the same trap and cool molecules via thermal contact with atoms. Evaporative cooling is used for cooling atoms in the trap. In order to avoid inelastic losses, molecules have to be in the rovibrational ground state. This is achieved by first laser-cooling rubidium and potassium atoms, and then combining those atoms by photo-association and STIRAP (Stimulated Raman Adiabatic Passage). In order to stabilize the number of KRb molecules in the rovibrational ground state, we did a careful adjustment for cancelling the magnetic field from the environment. Next, we constructed a cavity-enhanced optical trap for achieving an optical trap whose volume and depth are large enough for capturing large number of molecules. Although we achieved enhancement factor large enough to capture molecules, we could not stabilize it because of mechanical noise.

研究分野：量子縮退気体

キーワード：量子エレクトロニクス 原子・分子物理 低温物性

1. 研究開始当初の背景

冷却分子は量子エレクトロニクスにおける新たなフロンティアとして注目を集め、理論・実験の両面から新しい試みが次々となされている。例えば、冷却原子系では衝突による近距離相互作用しか現れないのに対し、極性分子を用いれば距離の3乗に反比例して減衰する長距離の電気双極子-双極子相互作用を実現できるため、量子縮退気体を用いた物性探索の領域を大きく広げることができる。精密測定においては、冷却分子の振動準位間の遷移周波数が電子・陽子質量比に敏感であることを利用して、電子・陽子質量比の恒常性の検証に用いる計画や、分子における内部電場の増強を利用して、電子のEDM(電気双極子)を測る測定が提案された。特に後者は冷却 YbF 分子を用いた実験結果が報告され、注目を集めた。しかし、そもそもどのように分子を冷却するかという方法論においては、冷却原子気体においては磁気光学トラップ (Magneto-Optical Trap, "MOT") と蒸発冷却という一つの完成形があるのに対して、分子の場合はレーザー冷却が効きにくいこともあり、まだ万能と言える解が見つかっていないのが実情である。

分子を直接冷却する手法としては、バッファガスによる方法、電場勾配による減速を用いる方法(シュタルク減速)の2つが有名である。バッファガスによる冷却の特徴は、冷やす分子の種類を全く選ばないことである。バッファガスとして用いるヘリウムやネオン原子との衝突で冷却されるため、分子の大きさ、極性のあり・なしによらず冷却できる。シュタルク減速は外部電場による分子の分極を用いるため、もともと分極を持ち、外場によって分極の方向を揃えられる極性分子が望ましい。しかしバッファガス、シュタルク減速いずれも到達温度は 1mK 程度と量子縮退を達成するには高すぎるのが実情である。近年、Yale 大学のグループが「閉じた」光学遷移が構築可能な、特殊なエネルギー準位構造を持つ分子を使って、分子のレーザー冷却を実現した。これは非常に興味深い進展であり、分子に対する冷却法としてポピュラーになる可能性が大いにある。しかし、レーザー光の散乱による加熱は避けられないので、直接、レーザー冷却だけで量子縮退に到達するにはかなりの困難が予想される。

これに対し、分子を冷却原子から作る方法としてはフェッシュバツハ共鳴(Feshbach resonance)でゆるく束縛した分子を作り、次に誘導ラマン断熱遷移(Stimulated Raman Adiabatic Passage, "STIRAP")を用いて振動・回転基底準位に移す、という方法がある。フェッシュバツハ共鳴を用いると、高密度で量子縮退に近いサンプルが得られるが、現在のところ極性分子で量子縮退を達成した例はまだない。これに対し、光会合(Photo Association, "PA")を用いてゆるく束縛した

分子を作る方法もある。光会合とは、磁気光学トラップに cw 光を照射するだけの簡単な方法である。cw 光の周波数を原子の共鳴から少し赤に離調しておく、原子対はレーザー光から光子を吸収した後、自然放出によって光子を吐き、ゆるく束縛した分子になる。この場合、「ゆるく束縛した分子」を作るプロセスに自然放出が含まれているので、量子状態を選んで分子を作り込むことはできない。また、作った分子気体の密度もフェッシュバツハ共鳴の場合に比べてはるかに低くなってしまふ。しかし、そのかわり実験ステップに蒸発冷却を含まない分、実験のサイクルを非常に速く保てる(蒸発冷却を使う実験が、イメージングも含めると典型的には 100 秒のオーダーで時間がかかるのに対し、光会合では実験全体が 0.1 秒程度で済む)という利点がある。実際、S/N(信号とノイズの比)を考えると、冷却分子の分光には光会合が有利な場合も多い。本研究ではゆるく束縛した分子の作成方法に光会合を利用した。

2. 研究の目的

本研究では混合気体の磁気光学トラップ中で光会合を行った後、誘導ラマン断熱遷移によって低密度の振動回転基底準位の冷却分子を作成し、さらに冷却原子との協同冷却によって冷却・高密度化することを狙っている。振動回転基底準位の KRb 分子の場合、カリウム原子とは $\text{KRb} + \text{K} \rightarrow \text{K}_2 + \text{Rb}$ の化学反応をおこしてしまうが、基底状態のルビジウム原子との衝突の場合は $\text{KRb} + \text{Rb} \rightarrow \text{Rb}_2 + \text{K}$ はエネルギー的に禁じられているため、この反応は起こらず「化学的に安定」と言える。また、光トラップ中でのルビジウム原子の蒸発冷却は確立した技術であり、新たに開発する必要はない。問題は KRb 分子をトラップできるほど十分な深さの光トラップを用意できるかであり、後に述べるように、具体的には共振器によってどれだけファイバーレーザーの光を安定的に増幅できるかにかかっている。このような技術的ハードルが越えられるか精査することも本研究の目的と言える。

3. 研究の方法

井上研では 2010 年に光会合と誘導ラマン断熱遷移(STIRAP)を用いて振動・回転基底準位にある極低温冷却分子を作成する系を確立したので引き続きその装置を用いる。ただし、今度は作成した分子数の安定度も要求されるため、種々の環境変化に対する敏感度も測定するとともに、磁場勾配のキャンセルや温度安定化を導入して環境変数の変動を系から取り除く。また、ロックに用いる電子回路も標準化してノイズの低減化に努める。

分子のトラップ方法であるが、先行研究により、振動・回転基底準位の KRb 分子の波長 1 μm の光に対する分極率が大きいいため、KRb

分子の光トラップに適していることが分かっている。しかし極低温分子といっても温度にして100uK程度の運動エネルギーを持っているため、十分なトラップ寿命とトラップ体積を得るためには1000W程度のパワーが必要である。そこで我々は真空槽の両側に共振器用の高反射率ミラーを置き、光を共振器効果によって増強する「共振器増幅光トラップ」を作成することにした。真空槽の窓はコーティングをしない窓材をプリユスター角で取り付け、入射光をP偏光とすることで光の反射によるロスを避けることにした。5Wのレーザー光を入射し、増強因子200が得られれば分子の位置での実効強度1000Wを達成することができる。

4. 研究成果

・補正コイルによる環境磁場の補正の実現

冷却分子を用いると電磁場との相互作用時間を長くとれるため、精密分光が容易になる。冷却KRb分子のマイクロ波分光において、磁場に敏感な遷移の線幅を用いることで、観測領域における磁場勾配の大きさを割り出すことが可能である。我々はKRb分子のスピン1重項-3重項間のマイクロ波遷移周波数を用いて、バイアス磁場、及び磁場勾配の実時間検出に成功した。検出されたバイアス磁場及び磁場勾配を元に補正コイルに電流を流すことで、それらの環境磁場をキャンセルすることに成功した。

・1 μ mファイバーレーザーを用いた共振器増幅光トラップの構築

本来、レーザーの周波数さえ十分安定ならば、共振器で200倍程度の増幅を実現することは比較的容易なはずである。今回、光源としてはInnolight社のMephisto(線幅1kHz以下)をファイバーアンプで増幅したものをを用いており、光源の周波数安定度としては全く問題ないと考えられる。

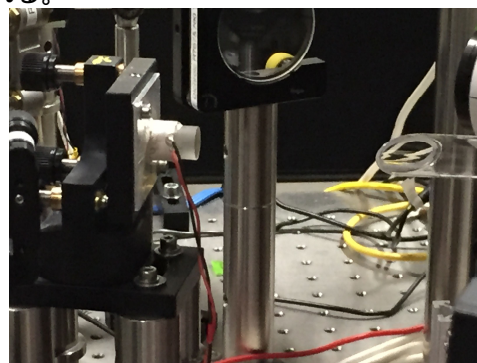
共振器の設計で中心となるのは共振器ミラーの反射率と曲率半径の決定である。フィネスとして200程度を得るために、フロント側のミラーの反射率を99%、バック側のミラーの反射率を99.9%とした。さらに真空槽の大きさのために共振器長が700mm程度になる。共振器の安定条件から曲率半径は350mm以上となるが、トラップの体積を稼ぐためにはトラップ中心でのビーム径もあまり小さくならないほうが良いので、曲率半径は2枚のミラーとも1000mmにした。また、共振器からの戻り光によるレーザーの不安定化を防ぐため、ファイバーアンプの出射口にアイソレーターを配置した。共振器のロックにPound-Drever-Hall法を用いるため、入射光はEOM(電気光学素子)を通して15MHzで位相変調し、共振器からの反射光をフォトダイオードで検出した。反射光強度の15MHzでの

強度変調成分の振幅をエラー信号として積分回路で受け、バック側のミラーの円筒ピエゾにフィードバックした。共振器中の電場強度は共振器の透過光強度から見積もった。

実際に共振器を構築して分かったことは、機械的な振動によるロックの不安定化が予想以上に厳しいことである。共振器長は約65cmもあり、さらに定盤からの共振器ミラーの高さは約20cmとなっている。共振器ミラーのマウント同士をつなぐ方法がなく、ミラーをそれぞれ定盤にしっかり固定する以外方法がないこと、ミラーの安定度は高さの4乗に比例して悪くなると言われることから、苦戦が予想された。実際、初期の共振器ロックの試みではロックのための信号自体をほとんど検出することができなかった。

共振器の透過光がほとんど検出できなかったため、共振器内部のロスがミラーでのロスを上回っていると推察される。システムを精査すると、プリユスター角に設置した真空槽の窓が汚れていることが判明した。 Etaノールで窓を清掃すると透過光ははっきりとした共鳴信号を示すようになり、共鳴での増幅率も200倍を示唆するようになった。

共振器から機械的振動の影響を全て取り除くことはできないが、振動を2つのミラーの長さを変えるモード(相対運動のモード)と変えないモード("Common mode")に分解したとき、相対運動のモードの振幅を制限する構造物を作ることができる。具体的には金属の治具で2つのミラーのミラーマウントの鏡側を橋のようにつなげれば良いと考えられる。



図：共振器増幅光トラップ用の共振器ミラー(左)とプリユスター角の窓(右)

ミラーには円筒ピエゾがついており、電圧をかけることで共振器長を変えることができる。右に見えるガラス管は真空槽の窓で、管に鉛直に入射した光が、ガラス面に対してはプリユスター角を為すように設計してある。回転方向の自由度が存在するため取り付け角度の誤差による有限の反射率が心配されるが、実験したところその影響は観測されなかった。

実際にこのような金属治具を作成し、ロックの実験を行った。治具は他のビームや真空槽を避けて65cm離れたミラーマウントを繋

ぐ必要があるため、形状に厳しい制約がある。作成した治具の形状は、真空槽を避けるために2つのミラーマウントからそれぞれ10cm程度鉛直上方に逃げ、その先を直線状に結ぶ橋のような構造である。真空槽に上から入るビームのアクセスを確保するため、中央に1インチ径の穴を開けてある。この形状はシンプルで作りやすかったが、高さが高すぎたためか、振動を有効に除去できず、安定的なロックには成功しなかった。

考えらえる対応策としては、真空槽から高さ方向に逃げるのではなく、横に迂回するタイプの治具を作成して実験する、使用するミラーマウントのバネを硬いものに交換する、などが考えられる。

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0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(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:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等:

<http://ultracold.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 慎 (INOUE, Shin)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 10401150

(2)研究分担者: なし

(3)連携研究者: なし