

フェムト秒光パルスを用いた冷却 Rb 原子の光会合

(分子科学研究所¹, 総合研究大学院大学², 岩手大学³)○武井宣幸^{1,2}、Giorgi Veshapidze¹、千葉寿^{1,3}、大森賢治^{1,2}

【序】近年、極低温までレーザー冷却された原子気体に対する研究が盛んに行われるようになった。もし分子集団の冷却が達成された場合には、その豊富な自由度から、基礎物理定数の超精密測定に基づく物理法則の検証、量子コンピュータのスケーリング、化学反応の制御など様々な分野において、より革新的な発展が期待される。よって、極低温まで冷却された高密度な分子気体を実現することは、物理分野と化学分野の両方において大きな展望を開くと考えられる。極低温分子を生成するには大きく分けて、次の2つの方法がある。1つはバッファガス冷却やシュタルク減速器などを用いる方法で、既存の安定分子について、その並進運動を冷却するものであり、1mK程度まで冷却したという報告がなされている。 μK あるいはnKまで冷却した分子を形成するには、もう1つの方法である冷却原子を磁場あるいは光トラップ中で会合する手段が有効である。その実現のために、光会合あるいはフェッシュバッハ共鳴を利用した会合が精力的に研究されてきた。

一方、我々の研究室ではこれまでに、ヨウ素分子といった気相孤立分子の電子振動波束に対して、アト秒精度で制御されたレーザー電場の位相情報を完全に転写するという方法を用いて、分子内の波束干渉の時空間模様を、ピコメートルレベルの空間分解能とフェムト秒レベルの時間分解能で加工し可視化する技術を確立してきた[1-6]。我々が培ったこの超高速コヒーレント制御を、レーザー冷却技術によって100 μK 程度の極低温まで冷却されたルビジウム(Rb)原子に対して適用し、量子状態の新たな制御技法を探求したいと考えている。つまり、これまで別々に発展してきた極低温物理と超高速化学を融合させた新たな量子状態制御を模索している。

我々は現在、時間幅100フェムト秒程度のパルス整形された超短パルスレーザーを用いた光会合によって、レーザー冷却されたRb原子からRb₂分子を生成する研究を行っている。光会合とは、基底状態にある2つの原子が衝突する際に、基底状態から励起状態の分子振動準位へと共鳴する光を照射することで、励起状態にある分子を励起・生成する現象である。この光会合過程において、パルスレーザーによるコヒーレント制御がどの程度まで有効に働くのか、といったことに関心がある。特に、励起状態において、その寿命よりも短い時間スケールでの系のコヒーレントな時間発展を研究対象としている。パルスレーザーのスペクトルの広さから、複数の振動準位に分子が会合され、励起状態に振動波束が形成される。その時間発展を観測・制御することができれば、その波束と振動基底状態のフランクコンドン因子が大きくなる核間距離・タイミングに合わせてもう一つのパルス光を照射することで効率的に基底状態へと遷移させることができ、基底状態にある冷却分子の生成が可能となるであろう。

【実験】まず、実験対象である ^{85}Rb 原子を磁気光学トラップ(MOT)により捕獲する。反ヘルムホルツコイルを用いて四重極磁場を発生させ、D2 線 (波長 780nm) の $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=3) \rightarrow ^2\text{P}_{3/2}(\text{F}=4)$ 遷移の共鳴から 20MHz ほど赤方に離調をとった対向する 6 本のビームにより、その中心に Rb 原子集団を補足する。吸収撮像を用いた Time of Flight 法により、その温度は $130 \mu\text{K}$ 程度、大きさは直径約 1mm と見積もることができ、また捕獲された原子数は 2×10^7 個、密度は 1×10^{10} 程度であった。

光会合実験は次のように進める。まず、MOT 用のトラップビームを遮断する。その後、1 μ 秒の時間をあけて、光会合パルスを照射する。励起状態の寿命は、26nsec であるから、この 1 μ 秒の間に全ての原子は電子基底状態へと減衰する。光会合用のパルスには時間幅 100 フェムト秒程度で中心波長 800nm のチタンサファイアレーザーを用いた。このパルス光による原子の共鳴励起を避けるため、Rb の D1 線 (波長 795nm) よりも短い波長をカットした。そのために、回折格子と凹面鏡を用いた 4f 構造をとり、そのフーリエ面にアルミ板を立てた。そして、795nm よりも長い波長成分による光会合によって励起状態に形成される振動波束の観測を試みた。

振動波束を測定するために、波長 480nm の別のフェムト秒パルスを用いて励起状態からのイオン化を行った。これら 2 つのパルスの時間間隔を掃引することで励起状態の振動波束の時間発展の観測を行った。MOT を挟むようにして間隔 30mm でメッシュ電極を 2 つ配置し、片方に正の高電圧をかけて、生成したイオンを MCP 方向へと押し出した。Rb⁺と Rb₂⁺の質量の違いから分子イオンのみを選択的に測定することができる。

本講演では、これらの実験の詳細および今後の展望について報告する。

- [1] K. Ohmori, *Ann. Rev. Phys. Chem.* 59, 319 (2008).
- [2] H. Katsuki, H. Chiba, C. Meier, B. Girard, and K. Ohmori, *Phys. Rev. Lett.* 102, 103602 (2009).
- [3] H. Katsuki, K. Hosaka, H. Chiba, and K. Ohmori, *Phys. Rev. A* 76, 013403 (2007).
- [4] H. Katsuki, H. Chiba, B. Girard, C. Meier, and K. Ohmori, *Science* 311, 1589 (2006).
- [5] K. Ohmori *et al*, *Phys. Rev. Lett.* 96, 093002 (2006).
- [6] K. Ohmori, Y. Sato, E. E. Nikitin, and S. A. Rice, *Phys. Rev. Lett.* 91, 243003 (2003).