

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19840021
 研究課題名（和文） 時間変化するマイクロ波定在波を用いた極性分子気体の減速と捕捉
 研究課題名（英文） Deceleration and trapping of polar molecules by using a time-varying standing wave of a microwave field
 研究代表者
 榎本 勝成（ENOMOTO KATSUNARI）
 富山大学・理工学研究部（理学）・助教
 研究者番号：50452090

研究成果の概要：

本研究の目的は、共振器中で増強されたマイクロ波の定在波を時間的にスイッチすることで、その中を通過する極性分子気体を減速・捕捉して極低温分子気体を生成することであった。本報告書の提出時点において、減速を行うための円形導波管を使用した空洞共振器の作成及び性能評価を行った。また、その円形導波管共振器を用いて分子の並進運動を制御して分子ビームを「集光」させるという実験を現在進行中である。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,350,000	0	1,350,000
2008 年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	405,000	3,105,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード： 原子・分子物理、原子分子処理、化学物理

1. 研究開始当初の背景

1995 年における希薄ボーズ原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) の実現や 2004 年の希薄フェルミ原子気体の BEC-BCS クロスオーバーの観測に代表されるように、原子のレーザー冷却技術は原子物理学、量子エレクトロニクス分野だけにとどまらず幅広い分野に強いインパクトを与え、今なお冷

却原子気体の研究は急速な勢いで発展し続けている。しかしながら、レーザー冷却は基本的に閉じた光学遷移を必要とするため、原子で、しかも限られた種類のものにしか適用できない。そのため、電子・振動・回転という多くの自由度を有し、電子遷移が閉じない分子には、異なる冷却方法を用いなければならない。

分子は多くの自由度を有し、極性分子は永久電気双極子モーメントを持つ。これらの性質により、冷却分子集団は冷却原子以上に豊富な物理を有することになる（図1）。具体的には、分子の電気双極子モーメントにより、分子同士は非等方で遠距離まで強く働く双極子-双極子相互作用をする。そのため、例えば極性分子を光格子中に捕捉すれば、インジウムモデルのシミュレータとなり、物性物理学の興味深い研究対象となる。これ以外にも、超固体相の発現や、BEC 状態の安定性に与える影響、量子コンピュータへの応用などが議論されている。また、極低温分子の衝突は3つ以上の原子が関与する量子系であり、複雑だが興味深い研究対象である。極低温では衝突に量子性が顕著に表れ、共鳴的な散乱断面積の変化や、閾での振舞いと呼ばれる弾性・非弾性衝突断面積の一般的なエネルギー依存性が現れる。さらに、冷却原子と同様に、磁場などを用いて散乱断面積を操作することが可能になる。また、レーザー冷却技術がセシウム原子時計の精度を飛躍的に向上させたように、分子の冷却・捕捉は分子の超高分解能分光を可能にし、カイラル分子のエネルギー差、電子の永久電気双極子モーメントの影響、微細構造定数の経年変化など、分子の遷移周波数に微弱な影響を与える宇宙論的、素粒子論的効果を調べることができるようになることが期待される。

冷却分子の生成方法には大きく分けて2種類ある。1つは冷却原子気体から光会合やフェッシュバツハ共鳴を用いて、冷却分子を生成する方法で、もう1つは分子をそのまま冷却する方法である。前者は極低温分子が実現しているが、非常に限定された種類の分子しか生成できない。後者は未だ 1 mK 前後の温度までしか到達していないが、多原子分子を含む多種多様な分子を冷却できる。後者の方法としては、低温ヘリウムガスとの衝突で分子を冷却して磁気トラップに導入するバッファガス冷却法や、静電場を分子の位置にあわせてスイッチして分子を減速させるシュタルク減速法、静電場を用いて遅い速度成分の分子のみを選択的に抽出するシュタルクガイド法などが挙げられ、1990年代後半から盛んに研究が行われている。こうした分

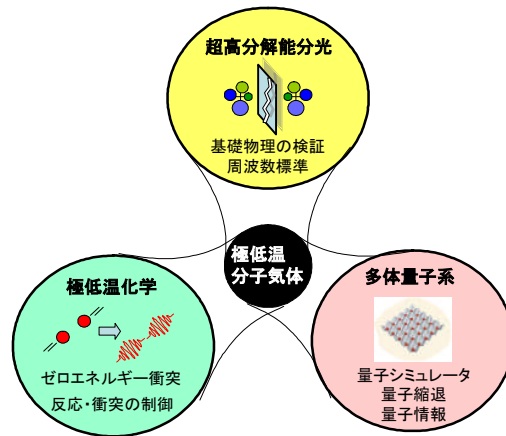


図1：極低温分子気体の応用分野

子を直接的に冷却する方法は、世界で十箇所程度の研究機関が様々な手法を開発して成果を挙げているが、未だどの手法も他と比べて決定的に優れているとは言えない状況である。

2. 研究の目的

このように原子のレーザー冷却に基づかずに直接的に分子を冷却する確固たる手法が確立していない状況を受け、本研究ではマイクロ波を用いた全く新しい分子の減速・捕捉方法による極低温分子気体の生成を目指した。共振器中で増強されたマイクロ波の定在波を時間的にスイッチすることで、その中を通過する極性分子気体を減速し、そのまま定在波中に捕捉してミリケルビン程度の低温分子気体を得ることを目的とした。この方法は、現段階の最有力な手法の一つであるシュタルク減速法に比べ、10 K 程度の予備冷却が必要であるという欠点を有する反面、小さい静電シュタルクシフトしか起こさない分子にも適用可能という利点を持っており、同程度の分子数を減速させることが可能であると考えている。また、減速後はマイクロ波の定在波が作るポテンシャルに分子は自動的に捕捉されるが、その分子は静電トラップや磁気トラップの場合などと異なり、電磁場が強い所ほど低いエネルギーを持つ最低エネルギー状態にあるため、分子のロスの原因となる非弾性衝突が抑制されることが期待される。このため、原子の最終的な冷却法と

して用いられる蒸発冷却法が有効に行えることが期待される。このようにマイクロ波による減速方法は、すでに開発が行われている分子冷却方法に比べ、広い適用範囲と蒸発冷却における優位性を有しており、mK の温度領域以下に多様な分子気体を冷却する方法の有力な候補となりうる。

3. 研究の方法

実験の原理と必要な実験装置の説明は以下の通りである。

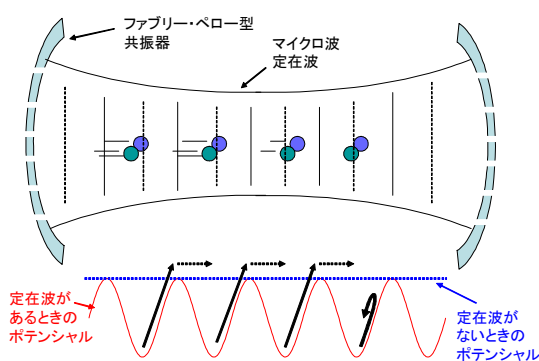


図2：マイクロ波による分子減速の原理図。

実験の原理を図2に示す。極性分子は永久電気双極子モーメントを持つため、電場と相互作用をする。そして電場の周波数が分子の回転遷移の周波数に近い場合、その交流電場によるシュタルクシフトは大きく働く。回転遷移の場合、その共鳴周波数は典型的に1-100 GHz のマイクロ波の領域である。また、電場の周波数を回転遷移の周波数より小さくすることで、交流電場が強い所にいる分子ほど低いポテンシャルエネルギーを持つことになる。図2では例としてファブリー・ペロー型共振器を考えている。共振器中ではマイクロ波は増強された定在波になるが、その共振器の中心軸を飛行する極性分子は、マイクロ波が形成するポテンシャルの山と谷の連続を感じるようになる。そのため、飛行する分子がポテンシャルの坂を登る間はマイクロ波の定在波を生成し、坂を下る間は定在波を消滅させることで、分子は並進エネルギーを失い続け、最後に定常的な定在波が作り出す 100 mK 程度の深さのポテンシャルに分子は捕捉される。この実験のためには数十 W

程度以上のマイクロ波発振源と、それを強度変調する装置、高い Q 値を持つ共振器が必要になる。

また、この手法で分子を捕捉するためには、分子をある特定の振動回転状態（例えば振動回転基底状態）に集めておく必要があり、現有の 20 W の強度のマイクロ波源を用いる場合、並進運動の運動エネルギーを数 K 程度まで落としておく必要がある。そのため、低温ヘリウムガス中で分子を生成して、ヘリウムガスとの衝突によって分子の振動・回転と並進運動の双方の自由度について 4 K 程度まで冷却を行うバッファガス冷却法などにより、予備冷却を行う。

4. 研究成果

分子ビーム源に対し 4 K 程度のヘリウムガスと衝突させて分子を同程度の温度まで予備冷却するバッファガス冷却を行う予定であったが、そのために必要なクライオスタットの購入に時間がかかり、クライオスタットは本年3月に納入される運びとなった。また、マイクロ波による分子減速には、ファブリー・ペロー型共振器よりも円形導波管で作成した空洞共振器の方が適していると判断したため、空洞共振器を使用することにした。このため、バッファガス冷却が不要な範囲で可能な実験を行うという目的から、空洞共振器内のマイクロ波定在波が作るポテンシャルで超音速ジェットから得られる分子ビームをフォーカス（集光）させるという実験を現在進めている。

実験の装置図を図3に示す。パルスノズルにより分子気体を小孔から噴射させることで、断熱膨張により、分子の並進運動エネルギーは室温相当であるが振動回転の内部自由度については 10 K 程度まで冷却されているという状況を作り出すことができる（超音速ジェット）。この分子ビームを円筒状の導波管共振器に、軸と平行に導入する。導波管共振器内では中心軸に近いほど電場が強い TE_{11} モードの定在波を発生させることで、共振器の中心軸に向いた方向の力が分子ビームに働く。この効果により分子ビームは集光され、その集光効果を分子ビームの延長上に

置いた四重極型質量分析計で検出する。

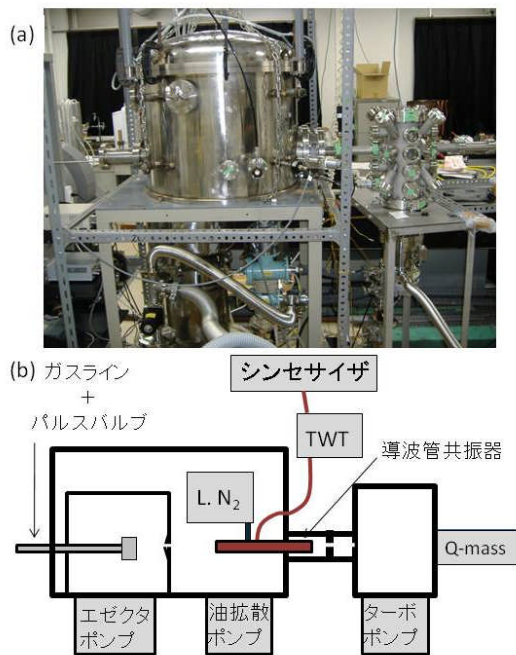


図 3 : (a) 実験装置の写真。(b) 装置の概略図。

実験装置の中心となる導波管共振器の設計・作成は本実験において非常に重要であり、長い時間を要した。試行錯誤の結果、現段階では図 4 のような構造の共振器を採用している。胴体部に直径 14 mm、長さ 30 cm の銅製の円形導波管（一部真鍮製）を使用し、金メッキを施した銅のメッシュ（線径 0.28 mm、開き目 1.28 mm）でその両端を塞いでいる。メッシュを使用することで、マイクロ波を共振器に閉じ込めつつ、分子ビームを共振器内へ通すことができる。各メッシュは四隅についたバネ付きねじで挿入深さや角度を変えることができる。共振器へのマイクロ波の導入は共振器の胴体に垂直に突き出たアンテナから行われる。このアンテナの挿入深さと、2 枚のメッシュの挿入深さ・角度を変えることで、希望する周波数において高い Q 値を持って共鳴するように共振器を調整できる。共振器の共鳴信号の一例を図 5 に示す。これは共振器にマイクロ波を導入した時に、その共振器から反射してきたマイクロ波強度を見たものであり、横軸にマイクロ波の周波数、縦軸に反射強度を示している。この共鳴線幅から得られる共振器の Q 値は 3×10^3 であり、共鳴周波数ではマイクロ波がほぼ 100 % 共振器内に導入されていることがわかる。なお、

銅で内壁が完全に囲まれた同じ寸法の円筒形空洞共振器について Q 値の理論値を計算すると 15×10^3 であり、まだある程度の改善の余地があると考えられる。

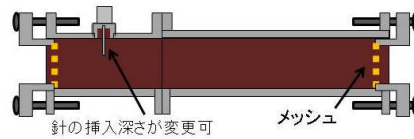


図 4 : 導波管共振器（空洞共振器）の構造。

この導波管共振器に、進行波管 (TWT) によって 20 W に増幅されたマイクロ波を導入する試験も行い、特に問題なく導入が行えている。

分子ビームの集光実験ではサンプル分子として、アセトニトリル (CH_3CN 、電気双極子モーメント 3.9 Debye、遷移周波数 18.4 GHz) を用いている。これは室温でも十分な蒸気圧があり、双極子モーメントが大きいためマイクロ波との相互作用が強いためである。これを窒素や六フッ化硫黄 (SF_6) などのガスと共に、パルスノズル（開口径 0.8 mm）から噴出させることで、分子の振動回転自由度が冷却された超音速ジェットビームが得られる。パルスノズルの位置は真空装置の外から調整できる。ノズルが置かれている領域はエゼクターポンプによって真空引きされ、分子ビーム噴出時でも 10 Pa 以下になっている。分子ビームはスキマーによって一部の立体角成分が切り出され、導波管共振器内に導入され

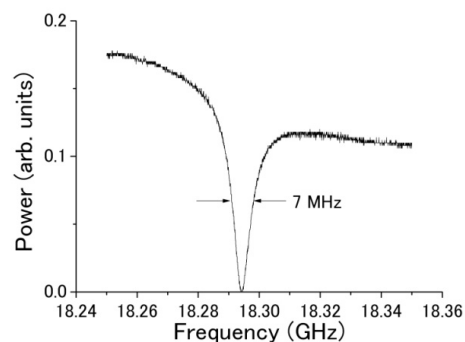


図 5 : 共振器からのマイクロ波の反射強度。

導波管共振器内のマイクロ波の電場が最大になるのは共振器の中心軸上の定在波の腹の所であり、その電場は上述の 3×10^3 の Q

値、20 W の入力パワーの場合、アセトニトリルに対し約 20 mK のシュタルクシフトを引き起こす。これは中心軸に対して 0.5° の角度をなして飛んでくる分子ビームを導波管壁から反発させる程度のシフトの量である。導波管共振器が置かれている領域は油拡散ポンプによって引かれ、 10^{-2} Pa 以下になっている。

導波管共振器を通過することで進行方向が曲げられた分子は、差動排気のための穴を通過し、四重極質量分析計で検出される。分子ビームの集光が行われることで、検出される分子の量が増えることが期待される。四重極質量分析計は最小 2 ms の時間分解能で分子を検出でき、四重極質量分析計が置かれている領域はターボ分子ポンプにより 10^{-5} Pa 程度まで真空引きされている。

実際に実験を行ったところ、四重極質量分析計に分子ビームが入射してくることは確認した。しかし、マイクロ波を共振器に導入した場合としていない場合で、入射強度に差が出ることはまだ確認できていない。原因の一つに、分子ビームの量のふらつきが大きいことが考えられるため、パルスノズル部の温度の安定化などの改良を行う予定である。また、数値シミュレーションの結果、共振器の位置が最適な位置にないことが判明したため、今後は真空チャンバーを拡張し、共振器の位置を最適な位置にして、再度実験を行う予定である。また、新たに購入したクライオスタットを用いてバッファーガス冷却による分子の予備冷却を行い、マイクロ波による分子の減速・捕捉実験を行う予定である。

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 5 件)

① 榎本勝成

"Determination and Control of the Scattering Length of Yb atoms with photoassociation / Control of Polar

Molecules with Microwave "

Mini-Symposium "Control of Atoms and Molecules"

京都大学 2008 年 9 月 18 日

② 榎本勝成、楯田雄介、小林かおり、森脇喜紀、松島房和

「マイクロ波を用いた分子ビームの並進運動の制御器の開発」21aZA-6

日本物理学会 2008 年秋季大会 (岩手大学)

2008 年 9 月 21 日

③ 楯田雄介、浅井宗紀、小川俊輔、野口拓、榎本勝成、小林かおり、森脇喜紀

「マイクロ波を用いた極性分子のガイド装置の開発」C-a4

日本物理学会北陸支部 (福井大) 2008 年 11 月 29 日

④ 榎本勝成

「マイクロ波定在波を用いた分子減速・捕捉法の開発」

日本物理学会北陸支部特別講演会、福井大学、2008 年 11 月 19 日

⑤ 楯田雄介、小川俊輔、野口拓、小林かおり、松島 房和、森脇喜紀、榎本勝成

「マイクロ波を用いた分子ビームのコリメーション」

第 9 回分子分光研究会 (富山大) 2009 年 5 月 16 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎本 勝成 (ENOMOTO KATSUNARI)
富山大学・理工学研究部 (理学)・助教
研究者番号: 50452090

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者