

令和元年5月23日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05500

研究課題名(和文)超伝導マイクロ波共振器による極低温分子気体のトラップ

研究課題名(英文)Trap of ultracold molecules by using superconducting microwave resonators

研究代表者

榎本 勝成(Enomoto, Katsunari)

富山大学・大学院理工学研究部(理学)・准教授

研究者番号：50452090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導マイクロ波共振器中の強いマイクロ波定在波を用いて、分子の並進運動の操作の研究を進めた。サンプルに一酸化鉛(PbO)分子を用い、まず400-430 nm付近の電子遷移の分光を高精度に行い、その後、低温低速PbO分子ビームの集束を実演した。これにより、静電場を用いる従来の手法と違い、電場が強い方に引かれる回転基底状態などの集束が可能になった。また、トラップされた分子や分子イオンを用いた精密測定について、様々な理論研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極低温分子気体の実現には、極低温化学や、精密測定による素粒子論的・宇宙論的研究などの、各種基礎科学研究に対する様々な波及効果が期待されている。その実現に向け、我々が研究を進めているマイクロ波を用いた分子の集束・減速・捕捉方法は、電場が強い方に引かれる状態の分子に対し、数少ない有効な手法である。本研究では超伝導マイクロ波共振器を用いることの有効性を実験で明らかにした。また、高精度分光の実験技術を開発した。また、周波数標準等の面での極低温分子気体の有望性を理論的に示した。

研究成果の概要(英文)：We have developed methods to control the translational motion of molecular beams by using intense standing waves of microwave in superconducting resonators. We have performed spectroscopy in 400-430 nm with a high accuracy. We have also demonstrated the focusing of cold and slow PbO beams. High field seeking states such as rotational ground states can be focused by our method. We have also investigated theoretically about precision measurements using trapped molecules and molecular ions.

研究分野：原子分子物理学

キーワード：低温分子 分子ビーム 分子分光 超伝導 マイクロ波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子のレーザー冷却研究に続き、分子気体を冷却する研究も今世紀に入ってから世界中で精力的に進められている。極低温分子気体には、極低温化学、特異な量子縮退系の研究、精密測定による素粒子論的・宇宙論的研究などの、各種基礎科学研究に対する裾野の広い波及効果が期待されている。極低温分子気体を生成する方法は、レーザー冷却された原子気体から間接的に生成する方法と、電磁場などを用いて分子ビームを直接的に減速・冷却させる方法の、2つに大別される。後者の直接的冷却法については、これまでに様々な手法が開発されてきたが、個々の分子に対して適した方法というものはそれぞれ異なり、ある手法が決定的に優れているという状況ではない。当研究代表者は、この直接的冷却法の新たな手法として、マイクロ波定在波を用いた低温分子ビームの減速法を提唱し、その第一歩として通常導体のマイクロ波共振器を利用した分子ビームの集束を、海外との共同研究で実現した。

2. 研究の目的

マイクロ波を用いる手法は、回転基底状態などの電場が強い方へ引きつけられる状態 (high field seeking (HFS) 状態) の分子の集束・減速・捕捉 (トラップ) において、非常に効果的である。本研究では、これまで行ってきたマイクロ波を用いた分子の並進運動の操作の研究をさらに進めて、極低温分子気体のマイクロ波トラップの実現を目指す。マイクロ波トラップには光学的アクセスの良い、ファブリーペロー型の超伝導共振器を用いる。超伝導共振器を用いることで非常に強いマイクロ波定在波が得られ、極性分子に対して温度換算で 1 K 程度の深さを持つトラップポテンシャルが容易に得られる。さらに、トラップされた分子を用いて、極低温分子衝突の実験を行い、理論計算との比較をすることも目指す。

3. 研究の方法

極低温分子気体についての実験は主に、代表者 (榎本)・分担者 (小林) が所属する富山大学で行うとともに、代表者の共同研究先であるカナダのプリティッシュコロンビア大学とも提携して進めた。また、極低温分子の性質や応用についての理論研究を、分担者 (梶田) が担当した。

マイクロ波による分子トラップに向けての手順として、ヘリウムバッファーガス冷却による低温分子ビームの生成、超伝導マイクロ波共振器を用いた分子の集束と減速、超伝導マイクロ波共振器を用いた分子のトラップ、の3段階がある。この各ステップについて、以下のように研究を行った。

の低温分子ビームの生成は、パルスレーザーを集光して固体ターゲットに照射し、局所的・瞬間的に気化させて分子気体を得るレーザーアブレーション法と、液体ヘリウム温度まで冷やされたヘリウムガスとの衝突でその分子気体を冷却するバッファーガス冷却法の組み合わせで行った。対象となる分子は、これまでに研究を進めてきた一酸化鉛 (PbO) をまず用いた。この低温分子ビームの生成法の最適化を進めるのと同時に、超低膨張素材でできた光共振器 (エタロン) を周波数参照として高精度な分光研究を行った。

の分子の集束・減速のために、全長約 45 cm の超伝導円筒空洞共振器を作成した。熱伝導の良い銅で円筒空洞を作成し、超伝導転移温度が約 7 K の鉛と錫の合金でその内壁をメッキし、この共振器の 2/3 ほどの長さの部分に液体ヘリウムに浸すことで、超伝導マイクロ波共振器を実現した。この共振器は、定在波のモードを選ぶことで、集束用にも減速用にも用いることができるが、本研究では主に集束の実験を行った。

のマイクロ波トラップについては、常伝導体のファブリーペロー共振器を用いて基礎特性を富山大学で評価する傍ら、延べ半年ほど代表者がプリティッシュコロンビア大学に滞在し、超伝導ファブリーペロー共振器の作成と評価を行った。

また、理論研究では、分担者 (梶田) が分子振動遷移周波数の超精密計測の可能性を検討した。原子の遷移周波数の測定精度は最近非常に進歩しているが、分子遷移周波数では 15 桁以上の精度はまだ得られていない。国際会議における欧米の研究者との議論を通じて、リニアトラップ内の分子イオンやレーザー冷却された分子の振動遷移周波数が電場や磁場から受けえるシフトの大きさから到達可能な精度の理論的検討を行った。2018 年にドイツ物理工学研究所を訪問して更なる議論を行った。

4. 研究成果

バッファーガス冷却法で得られた低温低速で高流量の PbO 分子ビームを用いて、400-430 nm 程度の波長領域にある $X(0)(v''=0)-B(1)(v'=3-6)$ 状態間の電子遷移分光を行った [4]。過去のフーリエ変換型分光計を用いて行われた高分解能分光研究では、この波長領域の共鳴線は調べられておらず、本研究では青色半導体レーザーを用いたレーザー誘起蛍光法で 3 種類の Pb の安定同位体の計

表 1 : PbO の B(1) 状態の分光定数

v'	B (cm ⁻¹)			A (cm ⁻¹)
	²⁰⁶ PbO	²⁰⁷ PbO	²⁰⁸ PbO	²⁰⁷ PbO
3	0.254695(7)	0.25460(2)	0.254463(6)	0.1725(3)
4	0.23564	0.23466	0.23375	0.0767
5	0.249611(8)	0.249537(7)	0.249470(6)	0.1714(5)
6	0.247445(11)	0.247364(12)	0.247284(7)	0.1723(4)

約 140 本の共鳴線について測定を行った。低温低速分子ビームを用いることで、50 MHz 程度の狭い共鳴線幅で測定することが可能であり、Rb 原子と Yb 原子の共鳴線で較正された超低膨張エタロンとの比較により、Pb0 の共鳴線の絶対周波数を 10 MHz の精度で決定した。

表 1 に得られた分光定数の一部を示す。4 つの振動状態のうち、 $v' = 4$ の状態は他と大きくことなる超微細分裂係数 A をもち、回転係数 B についても他とかなり異なり、かつ同位体間の比較では換算質量比とは異なる比になっていることがわかった。これは近接する $a(1)(v' = 19)$ 状態による摂動 (状態の混合) で説明できることがわかった。

この分子分光研究を行う傍ら、分子ビームの生成法を最適化し、次の Pb0 分子ビームの集束の実験を行った [1]。図 1 のようにバッファガス冷却法による分子ビーム源 (セル) と超伝導円筒空洞共振器を配置し、共振器を通過した後のこれらをつなぐ直線上にある観測点 (図の 135 cm の所の星印) での Pb0 分子ビームのフラックス密度を測定した。共振器に分子の $J=0-1$ の回転遷移 (18.37 GHz) よりわずかに低い周波数 (18.29 GHz) のマイクロ波で TM_{010} モードの定在波をたてると、 $J=0$ の回転基底状態にある分子は 1 次の交流シュタルクシフトにより共振器の中心軸に向かう向きの力を受ける。この TM_{010} モードによって分子が感じるポテンシャルは軸対称の調和振動子形になり、マイクロ波定在波は回転基底状態の分子ビームに対して、凸レンズのように働き、分子ビームを集束することができ、観測点での分子ビームフラックス密度を増大させることができる。こうした分子ビームに対してレンズのように働く装置として、6 重極電極などが昔から利用されているが、これは電場が弱い方へ引きつけられる状態 (low field seeking 状態) の分子に作用するものであり、回転基底状態のような HFS 状態には適用できない。また、代表者がこれまでの共同研究で実現してきた常伝導マイクロ波共振器のものとは比べ、超伝導共振器は $Q=10^6$ という約 2 桁大きい Q 値を持っており、Pb0 のような重い分子さえも効率よく集束することができる。図 2 は実験結果を示す。観測点での Pb0 分子の量を分子生成用パルスレーザー照射後の時間に対して表したもので、黒線が実験結果、赤線がシミュレーション結果を表す。このようにわずか 1 W に満たないマイクロ波入力パワーでも、Pb0 分子ビームを集束させて、フラックス密度を約 10 倍にしていることが確認できた。

また、分子の減速・捕捉に向けた、より軽い分子での低温低速分子ビームの生成や、トラップ用の超伝導共振器の開発などの研究をおこなっており、これらは今後も引き続き研究を進めていく。

理論研究では、分担者 (梶田) がまず O_2^+ 分子イオンの振動遷移周波数が電場、磁場から受けるシフトが非常に小さく 18 桁の確度が到達可能であることを理論的に示した [5]。更に O_2^+ 分子イオンの 2 種類の振動遷移周波数の比較から参照となる原子時計を用いないで陽子電子質量比の変化の有無を検出できることを示した [6]。その一方で、極性分子イオンを用いた測定でも磁場制御さえすれば 18 桁の確度を得られることを理論的に示した [2]。また、レーザー冷却された後でレーザー光の定在波にトラップされた CaF 分子の振動遷移周波数も 17 桁程度の確度で測定できることを示した [3]。

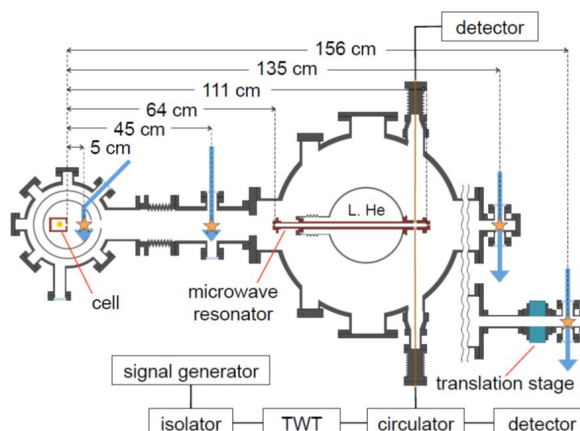


図 1 : 分子集束の実験装置。

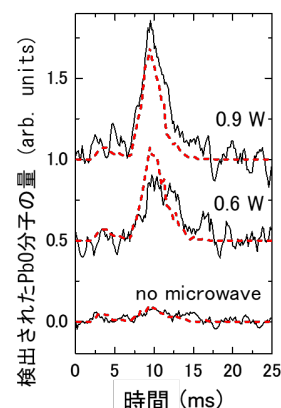


図 2 : 分子集束の実験結果。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- [1] K. Enomoto, N. Hizawa, Y. Furuta, N. Hada, and T. Momose
“ Focusing of a cold Pb0 molecular beam with a superconducting microwave resonator ”
Journal of Physics B: At. Mol. Opt. Phys. **52**, 035101-1-7 (2019). 査読有
DOI: 10.1088/1361-6455/aaf666
- [2] M. G. Kokish, P. R. Stollenwerk, M. Kajita, and B. C. Odom
“ Prospects for a polar molecular ion optical probe of varying proton-electron mass ratio ”
Phys. Rev. A **98**, 052513 1-12 (2018). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevA.98.052513
- [3] M. Kajita
“ Precise Measurement of Transition frequency of Optically Trapped CaF Molecules ”

Journal of Physical Society of Japan **87**, 104301 1-3 (2018). 査読有
DOI:10.7566/JPSJ.87.104301

- [4] K. Enomoto, A. Fuwa, N. Hizawa, Y. Moriwaki, and K. Kobayashi
“Spectroscopy of the B(1)($v=3-6$)-X(0⁺)($v=0$) transitions of PbO with 10-MHz precision” Journal of Molecular Spectroscopy 339, 12-16 (2017). 査読有
DOI: 10.1016/j.jms.2017.07.004
- [5] M. Kajita
“Accuracy estimation of the O₂⁺ transition frequencies targeting the search for the variation in the proton-electron mass ratio”
Physical Review A 95, 023418 1-6 (2017). 査読有
DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.023418
- [6] M. Kajita
“Search for the variation in (m_p/m_e)” Using Two Vibrational Transition Frequencies of Molecular Ions”
Journal of Physical Society of Japan **87**, 123301 1-3 (2017). 査読有
DOI:10.7566/JPSJ.86.123301

〔学会発表〕(計 19 件)

- [7] 羽田尚之, 樋沢奈紀沙, 古田裕司, 百瀬孝昌, 榎本勝成
「超伝導マイクロ波共振器を用いた低温 PbO 分子ビームの集束」
日本物理学会 2018 年秋季大会 2018 年
- [8] 不破秋夜, 樋沢奈紀沙, 小林かおり, 榎本勝成
「PbO 分子の X(0)($v=0$)-B(1)($v=3-6$)遷移の 10MHz 精度での分光」
第 17 回分子分光研究会 2017 年
- [9] M. Kajita
“Prospect of Molecular Clocks”
Workshop “Current Trend and Future Directions in Relativistic Many Electron Theories” Tokyo (2016) (invited)

〔図書〕(計 2 件)

- [10] M. Kajita
“Measuring Time: Frequency measurements and related developments in physics”
IOP Expanding Physics ISBN: 978-0-7503-2122-8
- [11] M. Kajita
“Measurement, Uncertainty and Lasers”
IOP Expanding Physics ISBN:978-0-7503-2326-0

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 富山大学理学部物理学科電波物理学研究室
<http://www.sci.u-toyama.ac.jp/phys/4ken/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 梶田 雅稔
ローマ字氏名: Masatoshi Kajita
所属研究機関名: 国立研究開発法人情報通信研究機構
部局名: テラヘルツ連携研究室
職名: 嘱託
研究者番号(8桁): 50359030

研究分担者氏名: 小林 かおり
ローマ字氏名: Kaori Kobayashi
所属研究機関名: 富山大学
部局名: 大学院理工学研究部(理学)
職名: 教授
研究者番号(8桁): 80397166

(2)研究協力者

研究協力者氏名：百瀬 孝昌

ローマ字氏名：Takamasa Momose

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。