

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 11 日現在

機関番号：13201

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24684031

研究課題名(和文)超電導共振器中のマイクロ波を用いた低温分子ビームの操作と基礎物理研究への応用

研究課題名(英文)Control of translational motion of cold molecular beams by using microwave in a superconducting resonator and its application to researches on fundamental physics

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) 20,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、精密測定を通じた高エネルギー物理学の研究に供することを目的に、低温低速の分子ビーム源の開発や、分子ビームの減速器・集束器となる超伝導マイクロ波共振器の開発を行った。また、常電導体のマイクロ波共振器を使用して、実際に分子の集束を実演した。また、低温低速分子の検出のためにレーザー周波数の安定化が必要であるが、そのために超低膨張素材でできたエタロンを作成し、それを用いて400 nm帯の主要な原子共鳴線について絶対周波数を測定した。

研究成果の概要(英文)：To improve precision measurements using cold molecules for high-energy physics, we have developed cold and slow molecular beams and a superconducting microwave resonator to focus and decelerate the molecular beams. We have also demonstrate the focusing of a molecular beam using a microwave resonator made of a normal conductor. To stabilize the frequency of the detection laser, we have built an ultralow expansion etalon. Using this etalon, we have measured absolute frequencies of some major atomic lines around 400 nm.

研究分野：物理学

キーワード：原子分子物理学 低温分子 マイクロ波 素粒子実験 超伝導

1. 研究開始当初の背景

中性分子の並進運動の制御方法は、1世紀前の Stern-Gerlach の時代から研究が続いている、分光学・分子物理学における重要な基盤技術である。その一例として、六極の電極による電場勾配によって分子ビームを集束させる静電集束器がある。しかし、静電場は真空中に極大点を持つことができないというアンショーの定理からもわかるように、この静電集束器は電場が弱い所ほどエネルギーが低くなる状態 (low field seeking (LFS) state) を集束させるものであり、high field seeking (HFS) state を集束させることはできない。回転基底状態や回転定数の小さい分子の低回転状態は実質的に HFS 状態であり、HFS 状態を効果的に集束させる方法の開発は極めて重要である。

また、現代的視点から言えば、原子のレーザー冷却技術に基づく極低温原子気体の研究に続き、低温分子気体の並進運動を制御して減速・冷却・捕捉する研究が世界的に脚光を浴びている。その中の一つの応用分野として、精密測定による基礎物理の検証が挙げられる。レーザー冷却技術がセシウム原子時計の精度を大きく向上させたように、分子の減速・冷却・捕捉は分子の精密測定を可能にし、分子のエネルギー準位に微弱な影響を与える宇宙論的、素粒子論的效果を調べることができる。その中でも電子・核子の永久電気双極子モーメント (EDM) の測定は、素粒子標準模型を超えた素粒子理論を検証できる重要な実験である。2011 年の段階では、ついに分子を用いた電子の EDM の測定精度が原子を用いた測定を上回り、低温分子を用いた精密測定の有効性が明らかになった。

私はこれまで NH 分子のバッファガス冷却やレーザー冷却された Yb 原子の光会合分光など、一貫して冷却分子気体の研究を行ってきた。また、マイクロ波を用いた低温分子ビームの減速法を提唱し、その原理実証実験の第一歩として通常導体のマイクロ波共振器を用いた低速アンモニア分子の集束を実演した。このマイクロ波を用いる手法は、HFS 状態の分子の集束・減速において、非常に効果的である。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに私が進めてきたマイクロ波を用いた分子の並進運動の制御の研究を飛躍的に進め、超伝導共振器中で大幅に増強されたマイクロ波を用いて低温分子ビームを集束・減速し、高指向性・低速の低温分子ビームを実現することを目的としている。こうして得られた分子ビームは EDM の測定精度をさらに高め、超対称性模型など素粒子標準模型を超えた各種素粒子模型の

選定に寄与することが期待される。

3. 研究の方法

本研究で開発を進めた、超伝導マイクロ波共振器による分子集束・減速実験装置は、以下の3つの要素から構成される。

- (1) ヘリウムバッファガス冷却による予備冷却された分子ビーム源。
 - (2) 超伝導マイクロ波共振器。
 - (3) レーザー誘起蛍光による検出系。
- これらについて、装置の概要や特長を以下に述べる。

(1) 予備冷却された分子ビーム

固体ターゲットに強いパルスレーザーを集光させて照射することで、ターゲットを瞬間的・局所的に気化させ、分子気体を得ることができる (レーザーアブレーション法)。また、こうして得られた分子気体を 4 K 程度の低温ヘリウムガスに金属セル中で衝突させ、セルに開けた穴から真空中に噴出させることで、4 K 程度に冷えた分子気体を得ることができる (バッファガス冷却法)。この手法で我々は予備冷却された PbO (一酸化鉛) 分子ビームを生成した。PbO 分子は電子の EDM の測定に適した分子の1つとして知られている。これは、Pb のような重い原子と O のような高い電気陰性度の原子からなる 2 原子分子では、相対論的效果と分子内の強い電場により電子の EDM によるエネルギーの変化が大きく現れるからである。

(2) 超伝導マイクロ波共振器

共振器内部では増強されたマイクロ波の定在波が得られ、そのマイクロ波の電場は極性分子に対し ac シュタルクシフトを引き起こし、それが分子のポテンシャルエネルギーとなる。

円筒型空洞共振器の TM_{010} モードを例にとると、マイクロ波の周波数が回転遷移周波数よりもわずかに低い場合、HFS 状態となる基底状態の分子は電場が強い方へ引き寄せられ、共振器の中心軸方向へ向かう力を感じる。共振器に開けた穴がマイクロ波の波長より十分小さい場合、その穴は共振器の Q 値をほとんど低下させない。このため、共振器の軸上に開けた穴を通じて極性分子は共振器内を通過することができ、分子はマイクロ波によって、凸レンズを通過した光のように集束される。

また、共振器中の TE_{11p} モードのマイクロ波定在波は中心軸上で電場が最大になり、軸上を飛行する分子は p 個のポテンシャルの山と谷の連続を感じる。分子パケットのタイミングに合わせてマイクロ波定在波を強度変調させることで、シュタルク減速器の原理により、そのパケットをポテンシャル深さの p 倍の程度だけ減速することができる。実際の

減速においては横方向の閉じ込めを行いながら縦方向の減速を行う必要があるが、我々のマイクロ波を用いる手法はこの2つの要請の両立が容易である。このように、マイクロ波を用いる分子ビームの集束・減速方法は、HFS 状態の分子に対して効果的である。

共振器内で得られるマイクロ波の電場の大きさは、マイクロ波の入力パワーと共振器の Q 値の積の平方根に比例する。通常導体（例えば室温の銅）の共振器は 10^3 - 10^4 程度の Q 値でしかないが、我々が使用している Pb/Sn メッキの超電導共振器は 10^6 程度の Q 値を持つ。

(3) レーザー誘起蛍光による検出系

分子ビームの検出はレーザー誘起蛍光法によって行う。指向性の高い分子ビームでは、垂直に励起レーザーを照射したときにドップラー幅が狭くなるため、その幅に近い程度までレーザー周波数を安定化させる必要がある。その目的のために、熱膨張係数がある温度（ゼロクロス温度）でほぼ 0 になる、安定なファブリーペロー光共振器（エタロン）を作成した。スペーサーにはオハラ社のクリアセラム Z を使い、真空中に設置して、ゼロクロス温度（今回の装置では約 30 °C）に温度を安定化させた。また、エタロンのフィネスを高くしながらも、自由スペクトル領域（FSR）を広い波長範囲で一定にするために、ミラーには低分散ミラーを用いた。0.2 MHz/day のほぼ一定な共鳴周波数のドリフトがあるものの、非常に安定な周波数標準としてこの超低膨張エタロンを用いることができる。

(1) の分子ビーム源の改良実験を兼ねて、Ca, In, Ga, Yb の低温原子ビームを生成し、この超低膨張エタロンを用いてこれらの原子の共鳴線の絶対周波数を決定した。同様に、Rb, K 原子についても蒸気セルを用いた飽和吸収分光により、絶対周波数を測定した。

4. 研究成果

(1) 予備冷却された分子ビーム

バッファーガス冷却法に基づく低温低速分子ビーム源の改良を継続的に行い、分子ビームのフラックスを大幅に増やすことができた。これにより、ビーム源から 40 cm 離れた位置においても十分な量の PbO 分子を検出することができた。改良の要点は以下の通りである。

- ・ヘリウムガスと衝突させる空間（金属セル）の容積を小さくした（ 270 cm^3 → 41 cm^3 ）。
- ・金属セルから真空中に噴出させる開口を大きくした（直径 2 mm → 5 mm）。
- ・アブレーションレーザーの照射強度を最適化した（約 10 mJ/mm^2 ）。
- ・金属セル周囲の活性炭吸着ポンプをできるだけ増やし、輻射シールドに開けた穴

を小さくして（直径 30 mm → 20 mm）、差動排気の効率を高めた。

(2) 超伝導マイクロ波共振器

ブリティッシュコロンビア大学との共同研究により、集束・減速器用の超伝導マイクロ波共振器の開発を行った。試作用の 16 cm の長さの共振器について、共振器の Q 値の測定などの性能評価を行い、論文 にまとめた。図 1 に使用した共振器の断面図を示す。

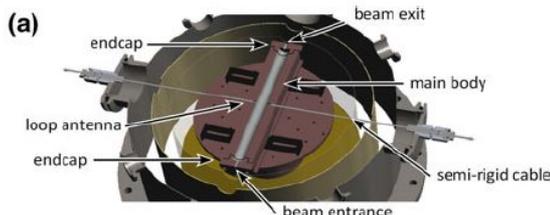


図 1：共振器の性能評価の実験装置図。

共振器の温度を 2.7 K まで冷却し、側面からループアンテナ 2 本を挿入して、円筒形の共振器内にマイクロ波の定在波を立てた。18 GHz のマイクロ波に対して 10^6 程度の Q 値が得られ、5 W、数十 ms の強いマイクロ波パルスを入射してもほとんど Q 値は低下しないことを確認した。これは 10 kV/cm 以上の電場強度の定在波が得られていることを示し、分子の集束・減速を行うのに十分な強度である。

この成功をうけて、実際に分子を減速・集束するための全長約 50 cm のマイクロ波共振器を作成し、液体ヘリウムクライオスタットに組み込んで性能評価を行い、ほぼ同様の成果が得られた。

(3) レーザー誘起蛍光による検出系

図 2 に示すような実験装置を組み、超低膨張エタロンによる高精度レーザー周波数測定計を用いて 400 nm 帯の原子の分光を行い、論文 にまとめた。

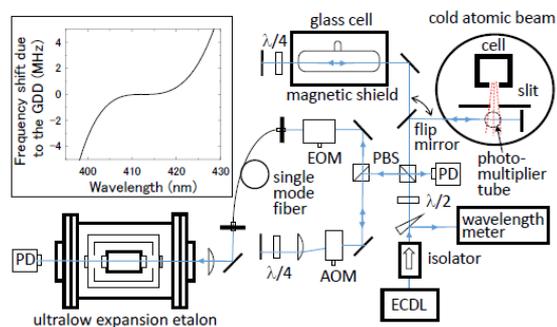


図 2：原子の分光の実験装置図。

エタロンの共鳴周波数は、既知の Ca 原子の共鳴線（423 nm）と Rb 原子の共鳴線（422 nm）で較正し、他の原子の共鳴線について、周波数の比の形では数 MHz 相当の精度で、絶対周波数の形では数 MHz ~ 数十 MHz の精度で、共鳴周波数を決定した。こうした共鳴線のデータは原子物理学においてよく利用される重

要なものでありながら、これまでに数百 MHz の精度でしか測定されていないものも多く、我々の測定により、その精度が大きく向上した(図3)。

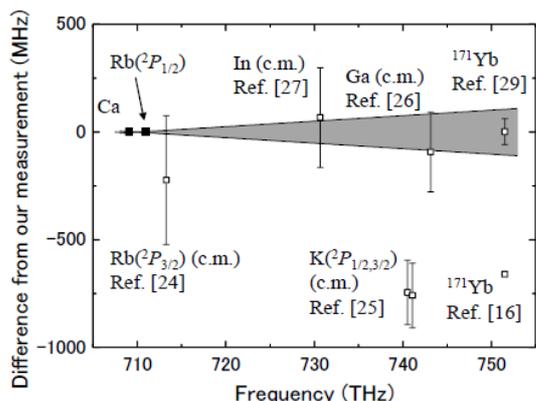


図3：従来の測定と我々の測定結果の差。グレーの領域は我々の測定精度を示す。

(4) 分子ビームの集束実験

ブリティッシュコロンビア大学との共同研究により、逆回転ノズルと呼ばれる別種の低温低速分子ビーム源と、液体窒素温度の銅製のマイクロ波共振器を用いて(図4)、分子の集束の実演を行い論文にまとめた。

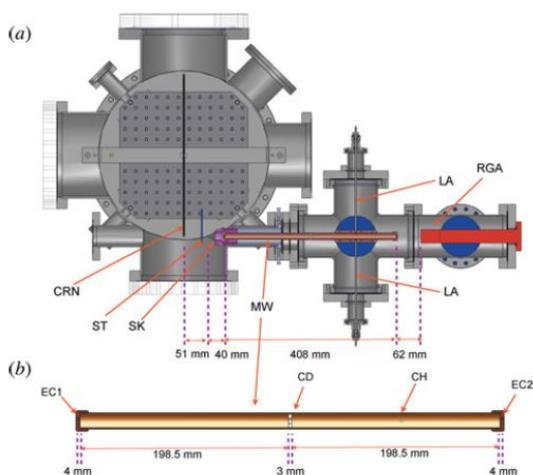


図4：分子の集束の実験装置図。

分子にはアセトニトリル(CH_3CN)を用い、これを回転するノズルから噴出し、質量分析計で検出した。途中に設置された円筒形の共振器中に強いマイクロ波定在波を立てた時に分子の検出量が増えることを見て、分子の集束効果を確認した。

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 3 件)

K. Enomoto, N. Hizawa, T. Suzuki, K. Kobayashi, and Y. Moriwaki

"Comparison of resonance frequencies of

major atomic lines in 398-423 nm" Applied Physics B (accepted), 査読有 DOI: 10.1007/s00340-016-6400-5

S. Spieler, W. Zhong, P. Djuricanin, O. Nourbakhsh, I. Gerhardt, K. Enomoto, F. Stienkemeier, and T. Momose

"Microwave lens effect for the $J = 0$ rotational state of CH_3CN "

Molecular Physics **111**, 1823-1834 (2013), 査読有

DOI: 10.1080/00268976.2013.798044

K. Enomoto, P. Djuricanin, I. Gerhardt, O. Nourbakhsh, Y. Moriwaki, W. Hardy, and T. Momose

"Superconducting microwave cavity towards controlling the motion of polar molecules" Applied Physics B **109**, 149-157 (2012), 査読有

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00340-012-5192-5>

[学会発表](計 10 件)

樋沢奈紀沙, 鳥飼優輝, 岡元一晃, 不破秋夜, 小林かおり, 松島房和, 森脇喜紀, 榎本勝成

「超低膨張エタロンを用いた 400 nm 帯の K, Ga, In 原子の精密分光」

日本物理学会北陸支部、金沢大学(石川県金沢市) 2015年11月28日

鳥飼優輝, 樋沢奈紀沙, 岡元一晃, 不破秋夜, 小林かおり, 松島房和, 森脇喜紀, 榎本勝成

「Pb0 の $X(0)[1+](v=0) B(1)[3](v=5)$ 遷移の精密分光」

日本物理学会北陸支部、金沢大学(石川県金沢市) 2015年11月28日

榎本勝成, 鳥飼優輝, 樋沢奈紀沙, 不破秋夜, 鈴木誉大, 松島房和, 森脇喜紀, 小林かおり

「超低膨張エタロンを用いた 400nm 帯の原子分子精密分光」

日本物理学会 2015 年秋季大会、関西大学(大阪府吹田市) 2015年9月18日

鈴木誉大, 杉山貴紀, 小林かおり, 松島房和, 森脇喜紀, 榎本勝成

「サブ MHz 精度の分子分光に向けた超低膨張率ガラス光共振器の開発」

日本物理学会北陸支部、福井大学(福井県福井市) 2014年12月13日

榎本勝成, 吉原隆之昌, 米澤大介, 小林かおり, 松島房和, 森脇喜紀

「マイクロ波分子減速に向けた低温低速 Pb0 分子ビーム源の開発」

第 14 回分子分光研究会、東京大学(東京都目黒区) 2014年5月17日

米澤大介, 吉原隆之昌, 北越洋介, 松本知也, 小林かおり, 松島房和, 森脇喜紀, 榎本勝成

「超伝導マイクロ波共振器を用いた分子ビーム集束器の開発()」

日本物理学会北陸支部、富山大学（富山県富山市）2013年11月23日

米山直弥，帆ノ下陽哉，榎本勝成，松島房和，森脇喜紀

「四重極速度セクターによる低速分子のガイド」

日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学（徳島県徳島市）2013 年 9 月 27 日

吉原隆之昌，米澤大介，大平歩，北越洋介，松本知也，森脇喜紀，榎本勝成

「バッファースガス冷却法による低温一酸化鉛分子気体の生成」

日本物理学会 2013 年秋季大会、徳島大学（徳島県徳島市）2013 年 9 月 27 日

米澤大介、吉原隆之昌、大平歩美、小林かおり、松島房和、森脇喜紀、榎本勝成

「超伝導マイクロ波共振器を用いた分子ビーム集束器の開発」

日本物理学会北陸支部、金沢大学（石川県金沢市）2012 年 12 月 1 日

吉原隆之昌、米澤大介、大平歩美、小林かおり、松島房和、森脇喜紀、榎本勝成

「バッファースガス冷却法による低温一酸化鉛分子気体の生成」

日本物理学会北陸支部、金沢大学（石川県金沢市）2012 年 12 月 1 日

〔図書〕(計 1 件)

Annual review of cold atoms and molecules, Vol. 1, K.W. Madison, Y. Wang, A. Maria Ray, and K. Bongs (eds.), World Scientific, Singapore, 2013.

Chapter 1. "Ultracold Ytterbium: Generation, Many-body Physics, and Molecules", pp.3-52

S. Sugawa, Y. Takasu, K. Enomoto and Y. Takahashi

〔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

<http://www.sci.u-toyama.ac.jp/phys/4ken/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

森脇 喜紀 (MORIWAKI, Yoshiki)

富山大学・大学院理工学研究部（理学）・

教授

研究者番号：90270470

松島 房和 (MATSUSHIMA, Fusakazu)

富山大学・大学院理工学研究部（理学）・教授

研究者番号：40142236

小林 かおり (KOBAYASHI, Kaori)

富山大学・大学院理工学研究部（理学）・准教授

研究者番号：80397166