

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23684034

研究課題名（和文）電子・陽子質量比の微小時間変化の検出に向けた冷却分子の精密分光

研究課題名（英文） Precision spectroscopy of ultracold molecules for the detection of the temporal variation of the electron-to-proton mass ratio

研究代表者

小林 淳 (KOBAYASHI JUN)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：50579753

研究成果の概要（和文）：電子と陽子の質量比は物理定数として知られており、その値は 1/1836 程度である。このような無次元の物理定数の値の恒常性を調べることで、アインシュタインの等価原理の検証が行える。我々は極低温 KRb 分子の精密分光により、電子・陽子質量比の恒常性検証に最も適した準位を特定し、その準位の精密な分光に成功した。我々の測定の統計誤差はこれまでに行われた実験の精度を上回っている。

研究成果の概要（英文）：The electron-to-proton mass ratio is known as a dimensionless physical constant, which is about 1/1836. By the test of the stability of such dimensionless physical constants, we can test the Einstein equivalence principle. With the precision spectroscopy of the ultracold KRb molecules, we have succeeded in specifying the levels which are most suitable for the test of the stability of the electron-to-proton mass ratio, and succeeded in the precision spectroscopy of them. The statistical error of our measurement exceeds the accuracy of the experiments done by other groups so far.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|------------|
| 2011 年度 | 5,200,000 | 1,560,000 | 6,760,000 |
| 2012 年度 | 4,300,000 | 1,290,000 | 5,590,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 9,500,000 | 2,850,000 | 12,350,000 |

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

キーワード：レーザー冷却・精密測定

1. 研究開始当初の背景

レーザー冷却技術によって極低温の原子気体の研究は幅広く行われていたが、分子は振動・回転という原子にはない自由度を持つためにレーザー冷却が困難であり、極低温分子の研究は行われていなかった。研究開始当初は、極低温原子を会合させて極低温分子を生成する手法が開発されたばかりであり、その後分子特有の性質を生かした研究が行われると期待されていた時期であった。

2. 研究の目的

分子には原子にはない様々な性質があるが、我々は分子の振動エネルギーが電子・陽子質量比の変化に対して敏感に変化することに注目した。本研究の目的は極低温分子の振動エネルギーを精密に測定することによって、電子・陽子質量比の恒常性(もしくは非恒常性)を高精度に検証することである。電子・陽子質量比($\approx 1/1836$)や微細構造定数($\approx 1/137$)などの無次元物理定数の恒常性検証実験は、『どの時間どの場所でも物理法則は変

わらない』とする基本原理の検証実験となっており、これを高精度に検証する意義は非常に大きい。

3. 研究の方法

本研究は、本研究が開始される以前に我々が開発していた極低温分子生成法を用いて生成した KRb 分子の分光によって行われる(図1)。具体的にはまず、磁気光学トラップ(MOT)によってレーザー冷却された K 原子および Rb 原子を生成し、そこにレーザー光による遷移(光会合)によって浅い束縛状態($X^1\Sigma^+$, $v=91$)の KRb 分子を生成する。その後誘導ラマン断熱遷移(STIRAP)を使って任意の振動状態へと分子を遷移させ、パルスレーザーを使ったイオン化によって分子をイオン化して観測する。この手法では分子生成のプロセスによる加熱はほとんどないため、極低温の分子が生成される。また、この手法は同時期に開発された Feshbach 共鳴を使った極低温分子生成法に比べて 1000 倍も分子生成が速いという特徴を持っており、分子の精密分光に非常に適した手法となっている。

電子・陽子質量比の恒常性検証に適した準位とは、(1)電子・陽子質量比に感度が高いことに加え、(2)外場による影響が小さいこと、(3)測定に用いる周波数の安定度としてそれほど高いものを必要としないこと、(4)測定に用いる遷移の遷移強度が十分に大きいこと、などいくつかの条件がある。このような値は実際に分光してみることで明らかになるものであるため、STIRAP を用いて分光実験を行うことで、どの準位が適しているのかを特定することができる。

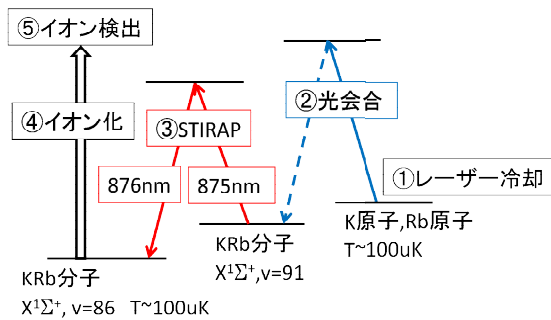


図 1: 極低温分子生成の概略図

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

我々は、上記の研究の方法に書いた手法によって、電子・陽子質量比に最適と考えられる準位および測定に用いる遷移を特定した(図2)。それは具体的には $X^1\Sigma^+$, $v=86$, $J=0$, $F=0$, $mF=0 \rightarrow a^3\Sigma^+$, $v=16$, $J=0$, $F=1$, $mF=0$ という遷移である。この遷移は上記の4つの条件をすべて満たしている。

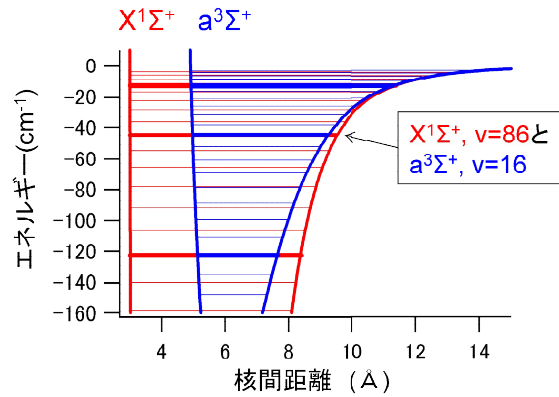


図 2: μ の恒常性検証に最適な振動準位

その後、我々はこの遷移の遷移周波数を精密に測定する実験を行った。この遷移の周波数はおよそ $f=635\text{MHz}$ であるが、これを統計誤差として $\Delta f/f=2.3 \times 10^{-10}$ で測定した(図3)。これは電子・陽子質量比(μ)に対しては $\Delta\mu/\mu=1.6 \times 10^{-14}$ の精度に相当している。これまでに、他のグループで行われた μ に対する測定として最も精度が高い実験は SF_6 分子の分子ビームによる測定である。彼らは μ に対して $\Delta\mu/\mu=4.2 \times 10^{-14}$ の精度で測定しているが、我々の統計誤差は彼らの精度を上回っている。ただし、我々の測定では電場によるシフトや衝突によるシフトなどの評価がまだ不十分であり、現在これらの系統誤差の評価を進めている状況である。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究の成果は極低温分子を使った精密分光実験における初めの大きな成果と言える。これまでの分子の精密分光実験では分子ビームを用いた測定が行われていた。しかし分子ビームを用いた測定では分子の進行方向への速度が大きいため、測定時間を長くすることが難しく、観測できる信号の線幅が 100Hz 以上に制限されていた。3次元方向に冷却されている極低温分子を使った分光で

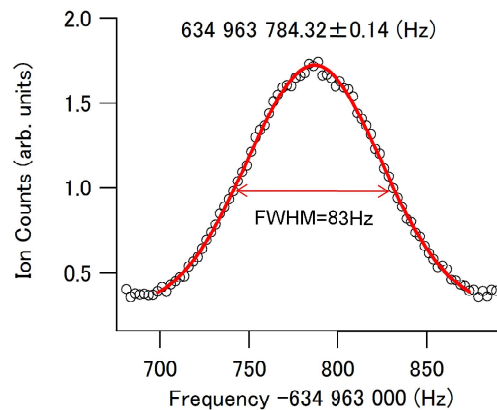


図 3: μ の変化に敏感な振動準位の分光

は観測時間を長く取れるため、より線幅の細かい分光が可能となる。実際の我々の分光線幅は 83Hz とすでに分子ビーム実験を上回っており、今後さらに線幅を細くすることも可能である。このように、新しい手法による分光実験によってより線幅の細かい分光が可能になったということは、分子の精密分光実験において革新的なことである。今後、我々と同様な手法をによる、極低温分子を使った分子分光実験が広く行われるようになるであろう。

分子の原子にはない特有な性質は幾つも持つため、電子・陽子質量比の恒常性検証実験以外にも、分子の精密分光に期待されている研究は幾つもある。例えば、YbF や ThO などの極性分子において分子の内部電場が非常に強くなることを利用して、電子の電気双極子モーメント (EDM) を増幅して検出しようという試みがなされている。また、2 原子分子系が近距離に 2 つの大きな質量 (原子核) が置かれているというモデル化しやすい系であることを利用して、近距離における重力の逆 2 乗則を検証しようとする試みもある。これらの実験に対しても極低温分子を使った実験が有力視されているが、我々の研究はそれらに一歩先んじたものとなっている。

(3) 今後の展望

今後はより線幅の細かい分光を行うことで、電子・陽子質量比の恒常性検証実験の精度をさらに向上させていく。現在の観測時間は分子の熱的拡散によって制限されている。生成している分子の温度は 100uK 程度であるが、このとき分子雲は 100mm/s 程度の速さで拡散してしまい、観測領域から逃げてしまう。そのため、分子の温度をさらに下げてやれば観測時間をさらに長くし、より線幅の細かい信号が得られるようになる。

我々のこれまでの研究で KRB 分子の $X^1\Sigma^+, v=0 \rightarrow b^3\Pi_0, v=0$ 遷移を観測している。その分光結果から、この遷移を使った分子のレーザー冷却によって分子の温度をさらに 1uK にまで冷却可能であることを見出している。今後はこのレーザー冷却を実現し、1Hz 程度の線幅の細かい分光を実現したいと考えている。これによって分光精度はさらに 2 桁程向上させられる。現在は μ に対して 14 桁程の測定であるが、今後は 16 桁以上の精度を実現したいと考えている。

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 11 件)

① 小林淳, 荻野敦, 大久保弘樹, 井上慎, 『冷却 KRB 分子の超微細構造解析』, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島, (2013. 3), 口頭発表

② Jun Kobayashi and Shin Inouye, "Toward the laser cooling of photoassociated KRB molecules using the $^1\Sigma^+ \rightarrow ^3\Pi_0$ intercombination transition", 5th International Workshop on Ultracold Group II Atoms, 東京, (2012. 10), ポスター発表

③ Jun Kobayashi and Shin Inouye, "Toward the test of the stability of the electron-to-proton mass ratio using photoassociated KRB molecules", Fundamental Physics Using Atoms 2012, 仙台, (2012. 9), ポスター発表

④ 小林淳, 井上慎, 『KRB 分子のレーザー冷却実現に向けた $X^1\Sigma^+ \rightarrow b^3\Pi_0$ 遷移の精密分光』, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 神奈川, (2012. 9), 口頭発表

⑤ Jun Kobayashi, Masahito Ueda and Shin Inouye, "Toward laser cooling of photoassociated KRB molecules", 23rd International Conference on Atomic Physics (ICAP2012), France, (2012. 7), ポスター発表

⑥ Jun Kobayashi, "Toward the laser cooling of photoassociated KRB molecule", Workshop on eEDM with Molecules, 東京, (2012. 5), 招待講演.

⑦ 小林淳, 上田正仁, 井上慎, 『電子・陽子質量比変化に敏感な分子準位の観測』, 日本物理学会第 67 回年次大会, 兵庫, (2012. 3), 口頭発表

⑧ 小林淳 『分子のレーザー冷却実現に向けた KRB 分子の精密分光』, レーザー学会第 32 回年次大会, 仙台, (2012. 1), 招待講演

⑨ 小林淳 『分子のレーザー冷却を使った精密分光への展望』, Fundamental Physics Using Atoms 2011 Satellite Meeting, 岡山, (2011. 10), 招待講演

⑩小林淳, 大麻浩平, 相川清隆, 上田正仁, 井上慎, 『極低温 KRb 分子の超微細構造のマイクロ波分光』, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, (2011.9), 口頭発表

⑪Jun Kobayashi, "All-optical formation of ultracold molecules in the rovibrational ground state", 第 8 回 AMO 討論会, 東京, (2011.6), 招待講演

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 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 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林淳 (KOBAYASHI JUN)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号 : 50579753

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし