

平成 30 年 4 月 24 日現在

機関番号：32621

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13545

研究課題名(和文)陽子-電子質量比の時間依存性研究のためのCaH<sup>+</sup>の振動回転定数の決定研究課題名(英文)Measurements of rovibrational constants of CaH<sup>+</sup> for studying possible time variation of electron-proton mass ratio

研究代表者

岡田 邦宏 (Okada, Kunihiro)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：90311993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、陽子-電子質量比の時間依存性研究のための有力な候補であるCaH<sup>+</sup>の回転基底状態を生成し、その振動回転定数を実験的に決定することである。本研究ではその実現に必要な中赤外レーザーによる振動遷移励起と、紫色レーザーによる電子遷移励起を組み合わせたCaH<sup>+</sup>のレーザー誘起蛍光(LIF)観測系を完成させた。また、CaH<sup>+</sup>振動回転定数の決定において重要なCaH<sup>+</sup>の光解離反応の観測に波長帯283-287 nmで初めて成功した。本研究成果によって、光解離を用いたCaH<sup>+</sup>の電子遷移波長の測定が可能となり、LIF観測によるCaH<sup>+</sup>振動回転定数の測定へ向けて道筋をつけることができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present work is determination of rovibrational constants of CaH<sup>+</sup>, which is one of the best candidates for studying possible time variation of the proton-electron mass ratio by ultraprecise vibrational spectroscopy. In order to measure the rovibrational constants, we have constructed a cryogenic linear Paul trap for rotational cooling of Coulomb crystallized CaH<sup>+</sup> ions and laser spectroscopy system consisting of a mid-infrared laser and a violet semiconductor laser. We also performed a photodissociation experiment in order to determine the rovibrational constants. We successfully observed the photodissociation reaction CaH<sup>+</sup> + hν → Ca<sup>+</sup> + H. The lower limit of the photodissociation cross section was determined by the measurement of the photodissociation rate. This experimental progress paved the way to measure the rovibrational constant of CaH<sup>+</sup> through LIF measurements.

研究分野：原子分子・量子エレクトロニクス

キーワード：イオントラップ クーロン結晶 分子イオン 陽子-電子質量比 CaH<sup>+</sup> レーザー冷却 光解離

### 1. 研究開始当初の背景

近年、基礎物理定数である微細構造定数 $\alpha$ や電子-陽子質量比 ( $\beta = m_p/m_e$ ) の時間依存性の検証、及び電子の電気双極子モーメント (EDM) 探索を目的とした、原子・分子・イオンの超精密分光研究が盛んに行われている [1]. その理由は、基礎物理定数の時間変動の検出による標準模型を越えた効果の観測、及び大統一理論構築の手がかりを得るという基礎物理的興味による側面と、LHC に代表される巨大科学と同等の研究を、研究室レベルの施設によって成し得る魅力によるところが大きい。その中でも微細構造定数 $\alpha$ の時間変動に関する研究は盛んに行われているが、電子-陽子質量比については未だ十分な不確かさでの検証は行われていない。

そのような背景のもと、 $\beta$ に高い感度をもつ分子イオンに関心が集まり、水素化カルシウムイオン ( $\text{CaH}^+$ ) の振動準位間遷移の超精密分光実験が情報通信研究機構 (NICT) の梶田らのグループにより提案された [J. Phys. B **44**, 025402 (2011)]. 提案された実験系では、分子イオンの並進温度をミリケルビン程度の極低温状態にし、さらに振動回転基底状態  $1^1\Sigma (v=0, J=0)$  へ冷却する方法を確立する必要がある。実際に精密測定を行う場合、何らかの光原子時計 (例えば Sr 光格子時計) の電子遷移周波数と、 $\text{CaH}^+$  の振動遷移の精密測定を同時に行い、その比の時間依存性を長期に亘って測定することになる。 $\text{CaH}^+$  の精密測定の手法としては、量子論理分光法 [P. O. Schmidt *et al.*, Science **309**, 749 (2005)] が最有力候補である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、陽子-電子質量比の時間依存性研究のための有力な候補である  $\text{CaH}^+$  の回転基底状態を生成し、レーザー誘起蛍光 (LIF) の直接観測によってその振動回転定数を実験的に決定することである。その実現のため、中赤外レーザー光源による振動遷移励起 ( $1^1\Sigma: v=0, J=2 \rightarrow v=2, J=1$ ) と、405 nm 紫色レーザーによる電子遷移励起  $1^1\Sigma (v=0, J) \rightarrow 2^1\Sigma (v=1, J)$  を組み合わせた  $\text{CaH}^+$  のレーザー誘起蛍光 (LIF) 観測系の構築を行った。また、信号強度が弱いことが予想される LIF 法の代替手法として、高感度な  $\text{CaH}^+$  の光解離法の導入と光解離測定を行った。

### 3. 研究の方法

#### 3-1. 冷却線形ポルトラップの概要

実験で使用した冷却イオントラップは、ロッド電極 (直径 $\phi 5$  mm, 長さ 14 mm) とプレート電極から構成されている。イオントラップ周囲を極低温に維持するために、冷凍機の第 1 ステージ (38 K) 及び第 2 ステージ (10 K) と熱接触させた 2 重の放射シールドでイオントラップ全体を囲む構造となっている。

イオントラップを設置している基盤には 10 K 冷凍機の第 2 ステージが接触しており、温度測定のためのシリコンダイオードが取り付けられている。線形ポルトラップに印加する高周波電圧は周波数約 4.7 MHz, 振幅は 200 V 以下であり、エンド電極の電圧は 10 V 以下に設定している。

製作した冷却線形ポルトラップ内の環境温度は約 2 時間後に 12.8 K に達した。室温における  $\text{CaH}^+$  の回転基底状態の占有率は、黒体放射による励起によって約 2% しか存在しないが、本研究では約 55% にまで高めることができたと推定される。

#### 3-2. $\text{CaH}^+$ レーザー誘起蛍光検出系

図 1 にレーザー誘起蛍光 (LIF) 検出系を示す。観測窓には赤外カットフィルターが取り付けられており、放射による熱流入を極力抑えるように工夫してある。真空槽に取り付けられたレーザー入射用のビューポートには、 $\text{CaH}^+$  振動遷移分光用のレーザー波長である中赤外 (3.5  $\mu\text{m}$ ) と、 $\text{CaH}^+$  の光解離用のレーザー波長となる紫外 ( $> 280$  nm) 域において比較的透過率の高い合成石英製を用いた。また、 $\text{Ca}^+$  からの LIF (波長 397 nm) と  $\text{CaH}^+$  における電子遷移  $2^1\Sigma \rightarrow 1^1\Sigma$  の脱励起に伴う LIF の観測を同時に行うため、ハーフミラーを備えた C マウント・倍率 10 のテレセントリックレンズを用いた。レンズに付属する照明用のポートに石英ライトガイドを取付け、出射部に可視バンドパスフィルターを用いることによって  $\text{CaH}^+$  からの LIF (430–630 nm) を観測できる。また、 $\text{Ca}^+$  からの LIF は冷却 CCD カメラに直接送られ、2 次元画像によって観測される。

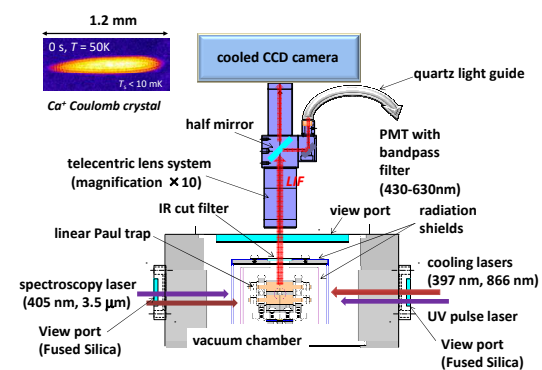


図 1 レーザー誘起蛍光検出系. 左上に示した画像は、冷却 CCD カメラによって撮像された約 5000 個の  $\text{Ca}^+$  イオンから構成されるクーロン結晶の LIF 画像である。

#### 3-3. $1^1\Sigma \rightarrow 2^1\Sigma$ 遷移のレーザー励起による $\text{CaH}^+$ からのレーザー誘起蛍光観測法

本研究では、レート方程式を用いた数値シミュレーションの結果に従って、パルス化した 405 nm レーザー照射による電子遷移励起

$1^1\Sigma \rightarrow 2^1\Sigma$ を行い、 $\text{CaH}^+$ イオンの LIF 観測を試みた。具体的な測定手順は以下の通りである。

- ①  $\text{Ca}^+$ クーロン結晶中に  $\text{CaH}^+$ を生成した後、約 13 分保持し回転基底状態 (約 55%) を生成する。
- ② 分光レーザー (波長 405 nm) をパルス的に入射し、 $\text{CaH}^+$ からの LIF (430~630 nm) を光電子増倍管 (PMT) で観測する。このとき 2 台の高速シャッター (UNIBLITZ 社製, High speed shutter Model LS2) を用いて冷却用レーザー 397 nm と分光レーザーを交互に照射し、分光レーザーの照射時間 (ゲート時間~1 ms) だけ  $\text{CaH}^+$ から放出される LIF を観測する。
- ③ 測定①~②を分光レーザーの波長を変化させて繰り返し、LIF スペクトルを測定する。以上の測定法によって得られる LIF スペクトルの数値シミュレーション結果を図 2 に示す。 $\text{CaH}^+$ イオン数が 1000 個以上あれば、LIF 信号を観測できるものと予測している。

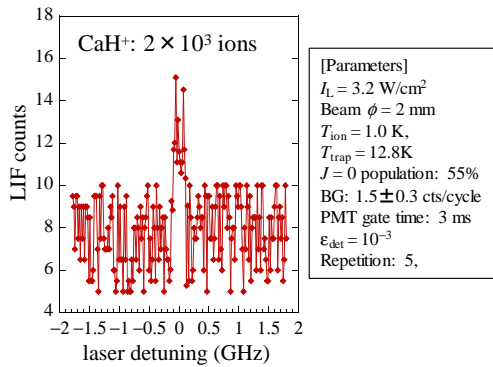


図 2. レート方程式によって求められた  $\text{CaH}^+$  の LIF シミュレーションスペクトル。初期回転基底準位の占有密度が 55%、環境温度 12.8 K、バックグラウンド信号 1.5 counts/cycle、検出効率を  $10^{-3}$  と仮定した。

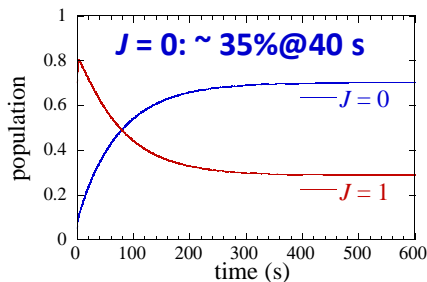


図 3. 分光レーザー (405 nm) OFF 後の回転準位  $J=0,1$  の時間変化。振動遷移励起 ( $1^1\Sigma, v=0, J=2 \rightarrow v=2, J=1$ ) に  $10^4 \text{ s}^{-1}$  の励起レートを加えてシミュレーションを行った。

なお、レーザーによって電子励起された  $\text{CaH}^+$  は、電子基底状態の様々な振動回転準位に脱励起するが、振動遷移に比べて回転遷移の自然放出レートは  $10^{-3}$ – $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  と非常に遅いため、LIF の観測には、 $1^1\Sigma (v=0, J=0)$  の占有密度

を、短時間で如何に高めることができるかが鍵となる。そこで、中赤外レーザー照射による振動準位間の励起を利用した回転温度冷却のシミュレーションを行った。シミュレーションでは LIF 観測のための分光用レーザー (405 nm) による励起をパルス照射 ( $10^{-3} \text{ ms}$ ) した後、中赤外レーザーに相当する  $1^1\Sigma, v=0, J=2 \rightarrow v=2, J=1$  遷移 (波長 3.5  $\mu\text{m}$ ) を励起する条件で、 $1^1\Sigma (v=0, J)$  の占有密度の時間変化を計算した。シミュレーション結果を図 3 に示す。回転基底状態の占有率を~35%まで高めるために要する時間は約 40 秒となり、自然放出だけの場合に比べてかなり短縮できる。極めて有効な方法ではあるが、あらかじめ  $v=0 \rightarrow v=2$  遷移の共鳴波長を知っておく必要がある。この共鳴波長は回転温度冷却用中赤外レーザー光源 (図 4) を用いて探索する。

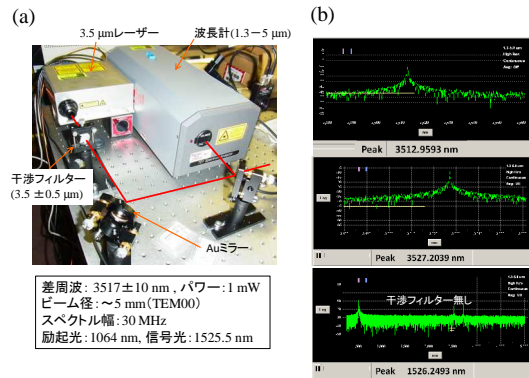


図 4(a) 中赤外レーザーシステムの概観。(b) 波長計で測定した中赤外レーザー (~3.5  $\mu\text{m}$ ) のスペクトル。下段では干渉フィルターを外してシグナル光 (~1.5  $\mu\text{m}$ ) を観測した。

### 3-4. $\text{CaH}^+$ の光解離実験

レート方程式の計算によると、 $\text{CaH}^+$  からの LIF を感度良く測定するためにはイオン数が少なくとも  $10^3$  個でなければならない。つまり、振動回転定数が未知の状態では、 $\text{CaH}^+$  からの LIF 観測は困難である。そこで本研究では、より感度の高い測定手段として、 $\text{CaH}^+$  の光解離を試みた。後に示すように、波長 283–287 nm の紫外パルスレーザーを照射すると、 $\text{CaH}^+$  の光解離が観測される。

## 4. 研究成果

### 4-1. $\text{CaH}^+$ の LIF 観測実験

数値シミュレーションの結果から、 $\text{CaH}^+$  の LIF 観測には  $10^3$  個以上のイオンが必要である。そこで、実験ではなるべく多くの  $\text{Ca}^+$  イオンをトラップ・冷却したのち、 $\text{CaH}^+$  の生成を行った。測定によって得られた信号の例を図 5(a) に示す。バックグラウンドを低く抑えるため、 $\text{Ca}^+$  冷却用レーザー (397 nm) を切った後、分光レーザー (405 nm) を照射し、 $\text{CaH}^+$  からのレーザー誘起蛍光 (波長 430–630

nm) を測定する. クーロン結晶状態を維持するため, 冷却レーザーを切る時間は約 3.5 ms とした. 分光レーザーの照射時間は約 1.7 ms である. 分光レーザーが照射されている時間をゲート時間とし, 数回繰り返した後, 蛍光強度の積算値を PC に取り込む. 分光レーザーの波長を変化させながら同様の測定を行うことによって,  $\text{CaH}^+$  の LIF スペクトルを測定する.

図 5(b) に LIF スペクトルの測定例を示した (横軸は波長, 縦軸は遷移強度). 測定値の中心付近にピークが見られるが, 残念ながら信号の再現性は得られていない. 今回測定した波長範囲は, 図 5(c) に示した理論予測における電子遷移波長 ( $v''=0-v'=1$ ) に近く,  $\text{CaH}^+$  による LIF の可能性もある. 測定シーケンスを再検討し, 今後も地道に同様の実験を行っていく予定である.

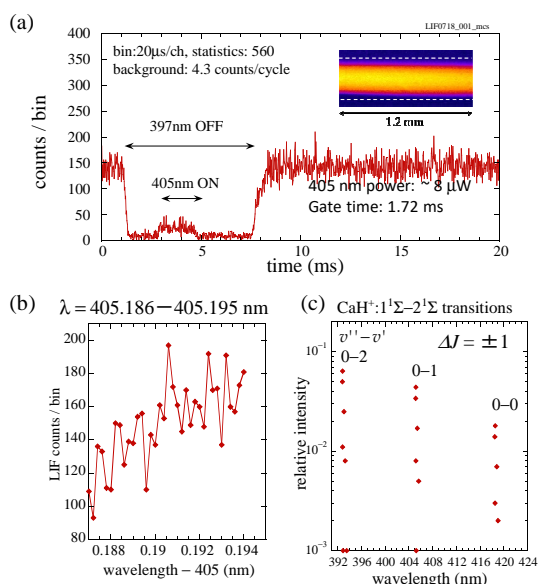


図 5. (a) LIF 観測時に記録される波長 430–630 nm の PMT 信号の時間変化 (b)  $\text{CaH}^+$  の LIF スペクトル観測例. 1 点は 20 回の積算値, 分光レーザーのパワーは約  $8 \mu\text{W}$  である (c) 理論計算[M. Abe *et al.*, Chem. Phys. Lett. 521, 31 (2012)]から見積られた電子遷移波長.

#### 4-2. $\text{CaH}^+$ の光解離実験

振動遷移分光に必要な  $\text{CaH}^+$  の振動回転定数はこれまで測定されていないため, 本研究では紫外パルスレーザーと中赤外レーザーを用いた  $\text{CaH}^+$  の二重共鳴光解離スペクトルの測定を提案し, その第一歩として, 紫外パルスレーザーを用いた  $\text{CaH}^+$  の光解離実験を試みた.

$\text{Ca}^+$  と  $\text{CaH}^+$  からなる混合クーロン結晶を生成した後, 紫外パルスレーザー ( $\lambda = 287 \text{ nm}$ ) を照射して LIF 画像の変化を観測する (図 6(a)). 光解離反応  $\text{CaH}^+ + h\nu \rightarrow \text{Ca}^+ + \text{H}$  が生

じると, LIF 画像における暗部が減少し, 元の画像に戻っていく様子が観測される. 本研究では, 光解離レートを求めるために, 本代表者が独自に開発した分子動力学 (MD) シミュレーションプログラムを利用して, 実験で得られた LIF 画像を再現し (図 6(b)), イオン数を決定した. 直線の傾きから光解離レートは  $2.3(0.5) \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  と求められた (図 7). また MD シミュレーションの結果から, レーザー誘起反応後の混合クーロン結晶における  $\text{CaH}^+$  イオン数を  $64 \pm 4$  個と決定した. 同様の測定を比較的大きなクーロン結晶 (イオン総数: 約  $4 \times 10^3$  個) に対しても行い, 光解離断面積の下限値を  $\sigma > 1.1 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$  と決定した.

一方本研究では, 数個の  $\text{Ca}^+$  からなる数珠状クーロン結晶でも光解離実験を行い, 単一  $\text{CaH}^+$  の生成と, その光解離反応について確認することにも成功した (図 8). 以上のように, 原理的に単一  $\text{CaH}^+$  イオンを用いた分子分光が可能であることを実証した.

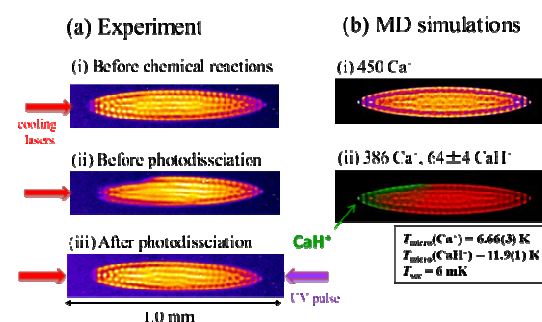


図 6. (a) (i)  $\text{Ca}^+$  クーロン結晶の LIF 画像. (ii)  $\text{CaH}^+$  生成後の LIF 画像, (iii) 光解離レーザー照射後 ( $\lambda = 287 \text{ nm}$ ,  $\sim 1.3 \text{ mJ/pulse}$ , 360 pulses) の LIF 画像. (b) 分子動力学 (MD) シミュレーションによって再現した反応前の  $\text{Ca}^+$  クーロン結晶の画像と反応後の  $\text{Ca}^+ - \text{CaH}^+$  混合クーロン結晶の画像.

#### 4-3. まとめ

以上まとめると, 本研究では  $\text{CaH}^+$  の振動回転定数を測定するために必要な中赤外レーザー光源による振動遷移励起と 405 nm 紫色レーザーによる電子遷移励起  $1^1\Sigma (v=0, J) \rightarrow 2^1\Sigma (v=1, J)$  を組み合わせた  $\text{CaH}^+$  の LIF 観測系を完成させた. 電子遷移波長が未知のために  $\text{CaH}^+$  の LIF 観測には未だ至っていないが, 振動回転定数の決定において重要な試金石となる  $\text{CaH}^+$  の光解離反応の観測に波長帯 283–287 nm で初めて成功した. また光解離レートを測定することによって, 光解離断面積の下限値を決定した. 一方, 単一イオン分光のデモンストレーションとして, 単一  $\text{CaH}^+$  を生成しその光解離の観測にも成功した. 本研究成果によって, 光解離を用いた  $\text{CaH}^+$  の電



子遷移波長の決定が可能となり，LIF 観測による  $\text{CaH}^+$  振動回転定数の測定へ向けて道筋をつけることができた。

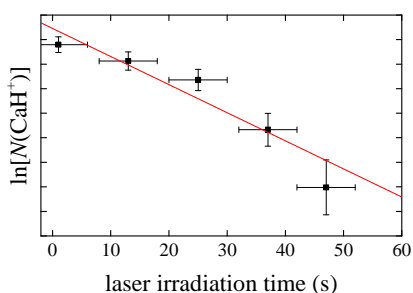


図 7. 紫外パルスレーザー照射による  $\text{CaH}^+$  光解離レートの測定結果 (図 6 の実験結果に対応). レーザーの照射時間に対する  $\text{CaH}^+$  イオン数の対数プロットを示した。

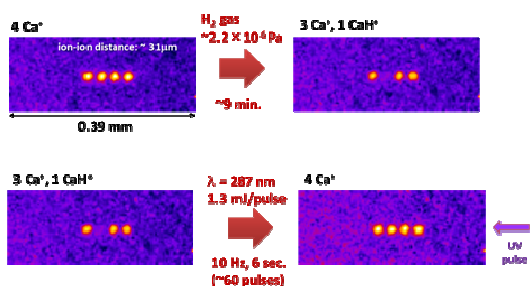


図 8. 4 個の  $\text{Ca}^+$  数珠状クーロン結晶中に生成した単一  $\text{CaH}^+$  イオンの光解離実験。

今後は，冷却イオントラップ中で生成した  $\text{CaH}^+$  の光解離によって，室温イオントラップでは不可能な，回転準位を分離した  $\text{CaH}^+$  の光解離スペクトルの測定を行なう。具体的な方法は以下の通りである。まず冷却イオントラップ中に十分な量 ( $> 10^3$  個) の  $\text{CaH}^+$  を  $\text{Ca}^+$  クーロン結晶中に生成する。  $\text{CaH}^+$  の存在は，  $\text{Ca}^+$  クーロン結晶の LIF 画像の暗部として確認でき，画像解析によって  $\text{CaH}^+$  イオン数を正確に推定できる。既に説明したように，まず光解離レーザーを照射して LIF 画像の暗部が再び  $\text{Ca}^+$  に戻る様子を観測し，  $\text{CaH}^+$  の光解離レートを測定する。引き続き水素ガスを導入し，同じクーロン結晶を用いて再度  $\text{CaH}^+$  を生成した後，光解離レーザーと中赤外レーザー ( $\lambda = 3.5 \mu\text{m}$ ) を同時に照射し，中赤外レーザーの波長に対する光解離レートの変化を測定する。以上の測定を繰り返すことによって，  $\text{CaH}^+$  の振動回転遷移 ( $v = 0, J = 0, 1 \rightarrow v = 2, J$ ) スペクトルを測定する。  $J', J''$  をそれぞれ回転準位の上準位，下準位の回転量子数，  $\omega_e, \alpha_e$  をそれぞれ調和振動数と非調和定数，  $B_e$  を回転定数とすると，振動回転遷移周波数は

$$\nu_{2-0}(J', J'') \cong 2\omega_e + (B_e - 3\alpha_e/2)J'(J'+1) - (B_e - \alpha_e/2)J''(J''+1)$$

と与えられるので，3 つ以上の振動回転スペクトルを測定すれば，未知定数 ( $\omega_e, \alpha_e, B_e$ ) を求めることができる。振動遷移波長を特定した後，今度は電子遷移励起レーザー ( $\lambda = 405\text{nm}$ ) と中赤外レーザー ( $\lambda = 3.5 \mu\text{m}$ ) の同時照射を行うことによって，  $\text{CaH}^+$  からのレーザー誘起蛍光スペクトルの観測を行い，最終目的である  $\text{CaH}^+$  の振動回転定数の測定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 12 件)

1. K. Okada, *et al.*, “Development of a wavy Stark velocity filter for studying interstellar chemistry”, *Review of Scientific Instruments* **88**, 083106 (2017) (11 pp.) 査読有  
<https://doi.org/10.1063/1.4997721>
2. M. Kajita, “Search for the Variation in ( $m_p/m_e$ ) Using Two Vibrational Transition Frequencies of Molecular Ions”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 123301 (2017) (3 pp.) 査読有  
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.123301>
3. M. Kajita, “Accuracy estimation of the  $^{16}\text{O}_2^+$  transition frequencies targeting the search for the variation in the proton-electron mass ratio”, *Phys. Rev. A* **95**, 023418 (2017) (6 pp.) 査読有  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.023418>
4. Y. Yano, S. Goka, M. Kajita, “Two-step pulse observation to improve resonance contrast for coherent population trapping atomic clock”, *Appl. Phys. B* **123**, 67 (2017) (6 pp.) 査読有  
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00340-017-6650-x>
5. S. Nagano, M. Kumagai, H. Ito, M. Kajita, Y. Hanado, “Phase-coherent transfer and retrieval of terahertz frequency standard over 20 km optical fiber with  $4 \times 10^{-18}$  accuracy”, *Applied Physics Express* **10**, 012502 (2017) (4 pp.) 査読有  
<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/APEX.10.012502/meta>
6. N. Kimura, M. Kajita, K. Okada, “Photodissociation of sympathetically crystallized  $\text{CaH}^+$ ”, *Journal of Physics: Conference Series* **875**, 022042 (2017) (1 p.) 査読有  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/875/3/022042/meta>
7. M. Kajita, “Evaluation of variation in ( $m_p/m_e$ ) from the frequency difference between the  $^{15}\text{N}_2^+$  and  $87\text{Sr}$  transitions”, *Appl. Phys. B* **122**, 203 (2016) (5 pp.) 査読有  
<https://doi.org/10.1007/s00340-016-6479-8>
8. M. Kajita, “Prospect of molecular clocks”, *Asian Journal of Physics Vol. 25*, No 9, 1051-1059 (2016) (9 pp.) 査読有

- <http://gibo11-asianjou-primary.hostgator.co.in/content2/vol-25-2016/vol-25-no-9>
9. M. Kajita, “N<sub>2</sub><sup>+</sup> quadrupole transitions with small Zeeman shift”, *Phys. Rev. A* **92**, 043423 (2015) (6 pp.) 査読有  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.043423>
  10. K. Okada and M. Kajita, “Toward laser spectroscopy of rotationally cooled CaH<sup>+</sup> ions trapped in a cryogenic linear Paul trap”, *Journal of Physics: Conference Series* **635** 032060 (2015) (1 p.) 査読有  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/635/3/032060>
  11. K. Okada, M. Ichikawa, M. Wada, “Characterization of ion Coulomb crystals for fundamental sciences”, *Hyperfine Interactions* **236**: 87 (2015) (8 pp.) 査読有  
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10751-015-1188-y>
  12. Kunihiro Okada, Masanari Ichikawa, Michiharu Wada, and Hans A. Schuessler, “Quasi-equilibrium characterization of mixed ion Coulomb crystals”, *Phys. Rev. Appl.* **4**, 054009 (2015), (11 pp.) 査読有  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.4.054009>
- [学会発表] (計 14 件)
1. N. Kimura, M. Kajita, K. Okada, “Photo-dissociation of sympathetically crystallized CaH<sup>+</sup>”, XXX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2017), Cairns, Australia, July 26th- August 1st, 2017.
  2. M. Kajita, “Search of the variation in the proton-to-electron mass ratio using two vibrational transition frequencies of molecular ions”, 10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2018), Nagoya University, Japan, January 8-9, 2018
  3. 梶田雅稔, “陽子-電子質量比変化の観測を目指した O<sub>2</sub><sup>+</sup>遷移周波数の確度見積もり”, 日本物理学会第 72 回年次大会, 20aH31-12, 大阪大学, 2017 年 3 月
  4. M. Kajita, “Search of the variation in the proton-to-electron mass ratio using two vibrational transition frequencies of molecular ions”, 9th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2017), Kyoto, Japan, Jan.9-10, 2017
  5. 梶田雅稔, “同種核二原子分子の振動遷移周波数精密計測”, 第 2 回超精密周波数計測とその比較技術による回路技術調査専門委員会, 2016 年 12 月 2 日, 金沢大学
  6. 梶田雅稔, “<sup>15</sup>N<sub>2</sub><sup>+</sup> と <sup>87</sup>Sr の遷移周波数差による陽子-電子質量比変化の高感度検出”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 14aKK-12, 2016 年 9 月 13-16 日, 金沢大学角間キャンパス
  7. M. Kajita, “Prospect of molecular clocks”, Workshop “Current Trend and Future Directions in Relativistic Many Electron Theories” 2016 年 9 月 28 日, 東京工業大学 (招待講演)
  8. 梶田雅稔, “周波数精密計測が現代物理に与える役割”, 電子回路委員会, 2016 年 9 月 12 日, 情報通信研究機構
  9. M. Kajita, “Precise measurement of N<sub>2</sub><sup>+</sup> vibrational transition frequencies”, European Conference on Trapped Ions, Aug. 29, 2016, Arosa, Switzerland
  10. 梶田雅稔, “窒素分子イオン四重極遷移周波数の精密計測” 日本物理学会第 71 回年次大会, 20pBK-6, 東北学院大学, 2016 年 3 月 20 日.
  11. 岡田邦宏, 梶田雅稔, “クーロン結晶化した極低温分子イオン CaX<sup>+</sup> (X = O, H) の光解離”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 21pBK-2, 東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日.
  12. K. Okada and M. Kajita, “Toward laser spectroscopy of rotationally cooled CaH<sup>+</sup> ions trapped in a cryogenic linear Paul trap”, XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC2015), FR-144, July, 2015, Toledo, Spain.
  13. 岡田邦宏, “陽子-電子質量比測定のための冷却 CaH<sup>+</sup> のレーザー分光: 現状と展望”, 第 8 回光領域および精密周波数発生回路技術調査専門委員会, 情報通信研究機構, 2015 年 12 月 8 日 (依頼講演)
  14. 梶田雅稔, “Precise measurement of N<sub>2</sub><sup>+</sup> vibrational transition frequency”, International Conference on "Fundamental Physics Using Atoms", 理化学研究所, 2015 年 12 月 1 日 (招待講演)
- [図書] (計 1 件)
- 梶田雅稔, 現代物理学の謎は原子時計で解決される, (84 pp.) 風詠社, 2015 年
- [その他]  
ホームページ等  
<http://www.ph.sophia.ac.jp/~ttak-ken/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
岡田 邦宏 (OKADA KUNIHIRO)  
上智大学・理工学部・教授  
研究者番号: 90311993
- (2) 研究分担者  
梶田 雅稔 (KAJITA MASATOSHI)  
国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所時空標準研究室・主任研究員  
研究者番号: 50359030