

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287100

研究課題名(和文)ハイブリッド光トラップにおける極低温アルカリ原子とSr原子混合系の研究

研究課題名(英文)Study of a mixture of ultracold alkali and Sr atom in a hybrid optical trap

研究代表者

青木 貴稔 (AOKI, Takatoshi)

東京大学・総合文化研究科・助教

研究者番号：30328562

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、ハイブリッド光トラップ中でのアルカリ原子とSr原子の研究を行った。光トラップのために、Sr原子の689 nmレーザー冷却用光源を開発し、MOTに成功した。また、各レーザー光の大強度化、および準安定状態の分光に成功した。

光トラップ中のアルカリ原子を用いたアナポールモーメントの測定方法について研究し、磁場揺らぎの影響をキャンセルする手法を研究した。また、光トラップ中でのパリティ非保存効果誘起の光シフトを研究し、TeVスケールの物理が探索できることを示した。

冷却CaH分子、窒素分子イオン、酸素分子イオンの振動回転遷移周波数を用いて10のマイナス17乗以降の効果を抑える方法を考案した。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the alkali atoms and Sr atoms in a hybrid-optical dipole-trap. For optical trapping, we have developed laser sources for 689 nm laser cooling, and have succeeded in a magneto-optical trapping of Sr using cooling lights with a wavelength of 689 nm. Moreover, we have succeeded in increasing the laser intensities and a spectroscopy of meta stable state in Sr.

We have studied a method to measure a nuclear anapole moment using alkali atoms in an optical-dipole trap, and to cancel a magnetic fluctuation. Furthermore, we have studied light shifts induced by parity nonconservation effect in an optical-dipole trap. Our results enable us to measure the light shifts in TeV scale.

We have investigated a method to suppress effects in 10 to -17 level using rotational and vibrational transitions in ultracold CaH, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, and O<sub>2</sub><sup>+</sup> molecules.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：レーザー冷却 精密分光 光トラップ 冷却分子 基本対称性

### 1. 研究開始当初の背景

近年、極低温分子の研究が注目されている。特に異種原子から成る「異核分子」は電気双極子モーメントを持つため、極低温では双極子間で長距離相互作用する新しい凝縮相が予言されている。

最近、アルカリ原子とアルカリ土類原子から成る極性分子が注目されている。Li-Kのような従来のアルカリ原子から成る極低温分子と異なり、振動基底状態で電子スピンを持つことから、新しい量子相が予言されており、研究分担者の梶田氏より分子光格子時計が提案され、我々も EDM など精密計測への応用を提案している。しかし、このような電子スピンを持つ極低温の極成分子生成は、世界ではまだ誰も実験的に実現していない。

そこで我々の研究室では、電子スピンを持つ極低温の極性分子生成を目指して、Sr 原子のレーザー冷却装置を開発し、磁気光学トラップ (MOT) に成功した。そして最近、Rb と Sr の同時 MOT、および Li と Sr の同時 MOT にも成功した。この Rb と Sr および Li と Sr の同時レーザー冷却とトラップは、アルカリ原子とアルカリ土類原子の組み合わせで、世界で初めてのことである。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記の研究をさらに発展させて、アルカリ原子とアルカリ土類原子 Sr の同時量子縮退実現や冷却分子生成を目指すため、ハイブリッド光トラップを行うことや、冷却原子・冷却分子研究について理論面からも研究を行うことを目的としている。

### 3. 研究の方法

アルカリ原子と Sr 原子から成る極低温分子生成を目指して、我々は既に Rb 原子と Sr 原子のレーザー冷却用光源と真空装置を有しており、Rb と Sr の同時 MOT にも成功している。冷却分子生成のためには、原子間相互作用や分子構造の解明が必要であるが、明らかになっていない。そこで、本研究ではハイブリッド光トラップ中で、Rb と Sr および Li と Sr の原子間相互作用を実験的に解明し、量子縮退混合系の実現や分子構造解明を目指しており、以下の実験を行う。

(1) 光トラップへ向けて、アルカリ原子と Sr 原子のレーザー冷却を行う。

(2) ハイブリッド光トラップを実現し、アルカリ原子と Sr 原子の振舞いを研究する。また、光トラップ中の原子について、理論面からも研究を行う。

(3) フェッシュバハ共鳴や光会合によりアルカリ原子と Sr 原子から成る分子生成を行う。また、理論面から冷却分子研究を行う。

### 4. 研究成果

(1) 原子のレーザー冷却

アルカリ原子と Sr 原子混合系として、Rb と Sr の同時トラップに成功し論文発表した。

ただ、我々は波長 461 nm のレーザー冷却に成功しているが温度は 2-4 mK 程度であり、光トラップを行うためにはさらなる冷却が望ましい。波長 689 nm のレーザー光を用いた 2 段階目の MOT を行えば、温度 1 マイクロ K 程度へとさらに冷却することで光トラップが容易になる。そこで波長 689 nm の光源システムの開発と MOT 実験を行った。

Sr 原子の 689 nm 光の遷移は自然幅が 7.4 kHz 程と非常に狭いため、レーザー光の線幅狭窄化が必要である。そのため、リットマン型外部共振器型半導体レーザーを構築し、ULE 共振器を立ち上げ PDH 法を用いることで、線幅狭窄化を行った。Sr 原子のヒートパイプを作製して 689 nm の飽和吸収分光を行い、ULE 共振器との差周波数とそのドリフトを測定した。

次に、この光源システムを用いて、Sr 原子の 2 段階目のレーザー冷却を行った。689 nm レーザー光を 461 nm で磁気光学トラップされた原子集団へ照射し、MOT に用いる磁場勾配を下げることで、689 nm 光を用いたレーザー冷却に成功した (図 1)。図 1 (a) は、689 nm MOT を行う前の、461 nm MOT の蛍光画像、(b) は、689 nm MOT を行った後に、461 nm のレーザー励起による蛍光画像である。

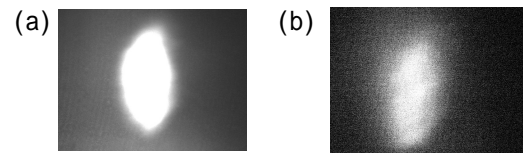


図 1 Sr 原子のレーザー冷却  
(a)461 nm MOT、(b)689 nm MOT

(2) 冷却原子の光トラップを目指した実験、および光トラップ中の原子の理論研究

689 nm のレーザー冷却に成功したが、効率の改善や最適化を行う必要がある。具体的には、原子数、キャプチャー速度、リポンプ効率の改善であり、そのために、波長 461 nm、689 nm、497 nm の光源システムにテーパランプ 3 台を導入し、大強度レーザー光源システムを構築した。これにより、レーザーパワーを大幅に改善し、特にリポンプ光パワーが増大することで、リポンプ光により原子数を増大させ、MOT 原子数を飽和させることができた (図 2)。

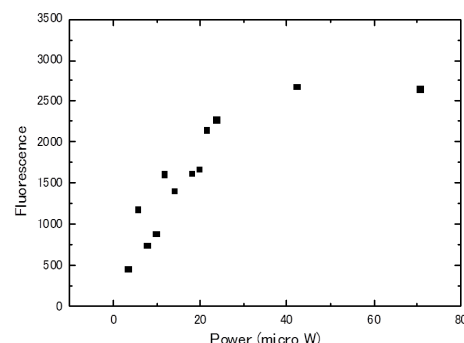


図 2 MOT 原子数の 497 nm 光パワー依存性

689 nm のレーザー冷却に成功したこと、レーザーパワーの改善について学会発表を行った。その後、レーザーの周波数安定化の改善を行い、特に振動揺らぎの効果の除去に成功し、ハイパワーかつ周波数安定な光源システムを構築することができた。しかし、真空について不具合もあり、現在改善中である。

Sr 用のレーザー光の周波数安定化に必要なガルバノセルについて、ガス種に依存した分光を行った。これにより、2種類のバッファガスでガス圧を下げたときに、線幅が細く信号が大きいスペクトルが得られる条件をつきとめた。これらをまとめて学会発表を行った。また、準安定状態で modulation transfer 分光を行った。2種類のバッファガスでガス圧を下げたときに、さらに信号を大きくすることに成功し、学会発表を行った(図3)。

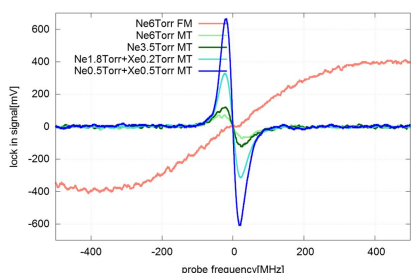


図3 Sr 原子の準安定状態  $^3P_2$  の modulation transfer 分光

バッファガス圧力と気体種類や混合比を調節することで、JILA では見られなかった  $^3P_0-^3S_1$ ,  $^3P_1-^3S_1$  のホローカソードランプ分光に初めて成功した。これらにより、497 nm のリポンブ遷移から逸脱した場合でも、リポンブのサイクルに戻すことができ、準安定状態からのリポンブ遷移の直接的な周波数安定化を行うことができる。

また、FrSr 分子 EDM の基礎となる Fr 原子について、学会発表や論文発表を行った。特に光トラップ中での Fr について、インドの Sahoo 先生との国際共同研究により、光トラップ中でのアナポールモーメントの測定方法について提案し、磁場揺らぎをキャンセルする方法を含め、論文発表を行った(図4)。

また、パリティ非保存(PNC)誘起の光シフトの「標準模型を超える新物理」への感度を評価し、論文発表を行った。光トラップの元となる光シフトの応用例であり、原子で光シ

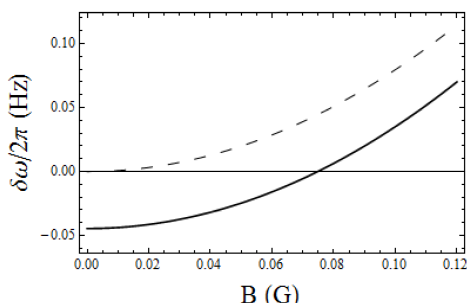


図4 アナポールモーメントと光シフト

フトの精密分光を行うことで、TeV スケールの物理が探索できることを示したことは、基礎物理学上、極めて意義が大きい(図5)。

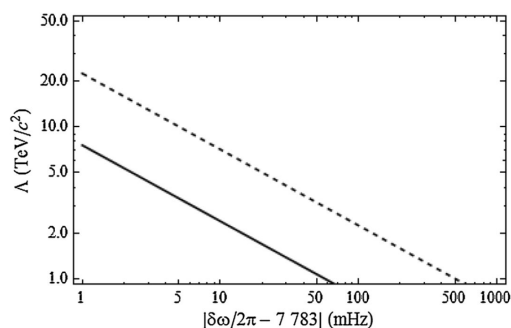


図5 PNC 光シフトと TeV の新粒子質量

### (3) 冷却分子の実験と理論研究

実験的に分子生成までは至らなかったが、下記のように、分子の理論研究を進展させた。

応用である電子 EDM 探索について、アルカリ原子とアルカリ土類原子 Sr から成る FrSr 分子について、連携研究者阿部氏、Geetha 氏の理論計算により、分子ポテンシャルを求め、有効電場計算を行い、分担者梶田氏と共に分極率を計算し、FrSr 分子 EDM 測定の感度について評価した。また、光トラップの可能性も評価し、これらを国際会議で発表した。

分担者の梶田氏は、レーザー冷却後に光トラップされた CaH 分子の振動遷移周波数の精密計測の可能性を検討し、17 桁の確度が得られると結論付けた。

また、クーロン結晶内の  $N_2^+$  分子イオンの  $Q(0)$  振動遷移周波数も、Zeeman シフトや電氣的四重極シフトがゼロである上に、Stark シフトが非常に小さいので 17 桁以上の確度で測定できることを示した。 $Q(0)$  遷移は一光子禁制なのでそれぞれ正負のシフトを起す 2 本のレーザーを用いて全シフトをゼロにする形での Raman 遷移が可能である。その一方で一光子遷移が可能な  $Q(2)$  遷移でも 16 桁程度の確度が得られることを示した。さらに  $Q(1/2)$  遷移でも  $N_2^+$   $Q(0)$  遷移と同じようにこれまで開発された原子時計よりも高い確度を得られる可能性があることを示した。

その一方で、微小原子時計の周波数安定度を与えるためレーザー光をパルス状で照射する方法を考案し、論文にまとめた。またその条件を解析し、論文にまとめた。

以上、まとめると、ハイブリッド光トラップまでは実現できなかったが、そのための 689 nm レーザー冷却実験・MOT 原子数のさらなる改善・分光実験にそれぞれ成功した。そして、光トラップ中の原子の PNC 光シフトを研究し、特にアナポールモーメントと TeV スケールでの新物理探索の測定感度を明らかにした。分担者梶田氏は、冷却分子の振動回転遷移について理論研究を行い、 $10^{-17}$  の測定感度を得た。そして原子分子の精密計測を本にまとめた。今後、以上の成果を融合させ、光トラップ中で分子生成を行う予定である。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 39 件)

[1] T. Aoki, Y. Torii *et al.* (15 人中 1 人目), "Parity-nonconserving interaction induced light shifts in the  $7S_{1/2} - 6D_{3/2}$  transition of the ultracold  $^{210}\text{Fr}$  atoms to probe new physics beyond the standard model",

Appl. Phys. B **123**, 120-1-11 (2017).

( 査読有り )

DOI: 10.1007/s00340-017-6673-3

[2] Y. Yano, S. Goka, M. Kajita, "Two-step pulse observation to improve resonance contrast for coherent population trapping atomic clock"

Appl. Phys. B **123**, 67-1-8(2017).

( 査読有り )

DOI: 10.1007/s00340-017-6650-x

[3] M. Kajita, "Accuracy estimation of the  $^{160}\text{D}^+$  transition frequencies targeting the search for the variation in the proton-electron mass ratio"

Phys. Rev. A **95**, 023418-1-6(2017).

( 査読有り )

DOI: 10.1103/PhysRevA.95.023418

[4] S. Nagano, M. Kumagai, H. Ito, M. Kajita and Y. Hanado, "Phase-coherent transfer and retrieval of terahertz frequency standard over 20 km optical fiber with  $4 \times 10^{-18}$  accuracy"

Appl. Phys. Express **10**, 012502-1-4(2017).

( 査読有り )

DOI: 10.7567/APEX.10.012502

[5] T. Aoki, Y. Torii *et al.* (15 人中 1 人目), "Light shifts induced by nuclear spin-dependent parity-nonconserving transitions of ultracold Fr for detection of nuclear anapole moment",

Asian J. Phys. **25**, 1247-1258 (2016).

( 査読有り )

<http://asianjournalofphysics.in/content/2/vol-25-2016/vol-25-no-10>

[6] M. Kajita, "Prospect of molecular clocks", Asian J. Phys. **25**, 1051-1059 (2016). ( 査読有り )

<http://asianjournalofphysics.in/content/2/vol-25-2016/vol-25-no-9>

[7] 青木貴稔, 鳥井寿夫他(15 人中 1 人目), "精密周波数測定によるアナポールモーメントの検出方法"

電子回路研究会 ECT-016-067-1-4(2016).

( 査読無し )

<https://www.ieej-ect.org/ect/ectp/2016/>

p16-09-12.html

[8] 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**, 203-1-5(2016).

( 査読有り )

DOI: 10.1007/s00340-016-6479-8

[9] B. K. Sahoo, T. Aoki, B. P. Das, and Y. Sakemi, "Enhanced spin-dependent parity-nonconservation effect in the  $7s^2_S_{1/2} - 6d^2D_{5/2}$  transition in Fr: A possibility for unambiguous detection of the nuclear anapole moment",

Phys. Rev. A **93**, 032520-1-6 (2016).

( 査読有り )

DOI: 10.1103/PhysRevA.93.032520

[10] K. Harada, T. Aoki *et al.* (25 人中 2 人目), "Laser frequency locking with 46 GHz offset using electro-optic modulator for magneto-optical trapping of francium atoms",

Appl. Opt. **55**, 1164-1169 (2016).

( 査読有り )

DOI: 10.1364/AO.55.001164

[11] K. Harada, T. Aoki *et al.* (15 人中 2 人目), "Development of a Magneto-Optical Trap System of Francium Atoms for the Electron Electric-Dipole-Moment Search", J. Phys.:Conf. Ser. **691**, 012017-1-7 (2016).

( 査読有り )

DOI: 10.1088/1742-6596/691/1/012017

[12] M. Kajita, "N $^{2+}$  quadrupole transitions with small Zeeman shift", Phys. Rev. A **92**, 043423-1-6(2015).

( 査読有り )

DOI: 10.1103/PhysRevA.92.043423

[13] H. Kawamura, T. Aoki *et al.* (24 人中 13 人目), "Towards the Measurement of the Electric-Dipole Moment of Radioactive Francium using Laser-Cooling and Trapping Techniques",

JPS Conf. Proc. **6**, 030068-1-4 (2015).

( 査読有り )

DOI: 10.7566/JPSCP.6.030068

[14] T. Inoue, T. Aoki *et al.* (26 人中 13 人目), "Development of Magnetometer Based on the Nonlinear Magneto-Optical Rotation Effect Toward the Measurement of the Electron Electric Dipole Moment",

JPS Conf. Proc. **6**, 030070-1-4 (2015).

( 査読有り )

DOI: 10.7566/JPSCP.6.030070

[15] K. Harada, T. Aoki *et al.* (22人中13人目), "Development of Laser Light Sources for Trapping Radioactive Francium Atoms Toward Tests of Fundamental Symmetries", JPS Conf. Proc. **6**, 030128-1-5 (2015). (査読有り)

DOI: 10.7566/JPSCP.6.030128

[16] T. Inoue, T. Aoki *et al.* (26人中13人目), "Experimental search for the electron electric dipole moment with laser cooled francium atoms", Hyperfine Interact. **231**, 157-162 (2015). (査読有り)

DOI: 10.1007/s10751-014-1100-1

[17] Y. Yano, S. Goka, and M. Kajita, "Two-step pulse observation for Raman-Ramsey coherent population trapping atomic clocks"

Appl. Phys. Express **8**, 012801-1-4(2015). (査読有り)

DOI: 10.7567/APEX.8.012801

[18] M. Kajita, "Suppression of AC Stark shift in Raman spectroscopy of optically trapped molecules"

Jpn. J. Appl. Phys. **53**, 128001-1-3(2014). (査読有り)

DOI: 10.7567/JJAP.53.128001

[19] Y. Yano, W. Gao, S. Goka, and M. Kajita "Theoretical and experimental investigation of the light shift in Ramsey coherent population trapping"

Phys. Rev. A **90**, 013826-1-6(2014). (査読有り)

DOI: 10.1103/PhysRevA.90.013826

[20] G. Gopakumar, M. Abe, M. Hada, M. Kajita, "Dipole Polarizability of Alkaline-Earth-Metal (Ca, Sr)-Alkali-Metal (Na, K, Rb) Polar Molecules: Prospects for Alignment"

J. Chem. Phys. **140**, 224303-1-8(2014). (査読有り)

DOI: 10.1063/1.4881396

[21] T. Hayamizu, T. Aoki *et al.* (25人中15人目), "Laser Cooled Francium Factory for the Electron Electric Dipole Moment Search", JPS Conf. Proc. **1**, 013065-1-6 (2014). (査読有り)

DOI: 10.7566/JPSCP.1.013065

[22] M. Kajita, G. Gopakumar, M. Abe, and M. Hada, "Characterizing of variation in the proton-to-electron mass ratio via

precise measurements of molecular vibrational transition frequencies" J. Mol. Spectr. **300**, 99-107(2014). (査読有り)

DOI: 10.1016/j.jms.2014.03.009

[23] T. Inoue, T. Aoki *et al.* (24人中15人目), "Development of the Measurement System for the Search of an Electric Dipole Moment of the Electron with Laser-Cooled Francium Atoms",

EPJ Web of Conf. **66**, 05008-1-4 (2014). (査読有り)

DOI: 10.1051/epjconf/20146605008

[24] H. Kawamura, T. Aoki *et al.* (24人中15人目), "Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom",

EPJ Web of Conf. **66**, 05009-1-4 (2014). (査読有り)

DOI: 10.1051/epjconf/20146605009

[25] T. Sato, T. Aoki *et al.* (24人中15人目), "Development of francium atomic beam for the search of the electron electric dipole moment",

EPJ Web of Conf. **66**, 05019-1-4 (2014). (査読有り)

DOI: 10.1051/epjconf/20146605019

[26] T. Inoue, T. Aoki *et al.* (24人中13人目), "Search for the electron EDM using laser cooled radioactive francium atoms", (査読無し)

Proceedings of 7th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2014, edited by N. Sasao (Okayama University, Tokyo, Japan, 2014), pp.30-36 (2014).

[27] T. Aoki *et al.* (14人中13人目), "Observation of a small number of trapped Rb atoms by a CCD camera", (査読無し)

Proceedings of 7th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2014, edited by N. Sasao (Okayama University, Tokyo, Japan, 2014), pp.76-79 (2014).

[28] T. Hayamizu, T. Aoki *et al.* (14人中5人目), "Optical dipole trap towards the electron EDM search using francium atoms", (査読無し)

Proceedings of 7th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2014, edited by N. Sasao (Okayama University, Tokyo, Japan, 2014), pp.136-139 (2014).

[29] T. Ishikawa, T. Aoki *et al.* (15人中13人目), "Performance evaluation of a neutralizer for the electron EDM search

using laser-cooled francium atoms",  
( 査読無し )  
Proceedings of 7th International Workshop  
on Fundamental Physics Using Atoms2014,  
edited by N. Sasao (Okayama University,  
Tokyo, Japan, 2014), pp.140-143 (2014).

[30] K. Harada, T. Aoki *et al.* (22 人中 13  
人目), "Magneto-optical trap for francium  
atoms towards the electron electric dipole  
moment search",  
( 査読無し )  
Proceedings of 7th International Workshop  
on Fundamental Physics Using Atoms2014,  
edited by N. Sasao (Okayama University,  
Tokyo, Japan, 2014), pp.147-150 (2014).

[31] M. Kajita, G. Gopakumar, M. Abe, M.  
Hada, and M. Keller,  
" Test of mp/me changes using vibrational  
transitions in N<sub>2</sub><sup>+</sup> "  
Phys. Rev. A **89**, 032509-1-6(2014).  
( 査読有り )  
DOI: 10.1103/PhysRevA.89.032509

[32] H. Arikawa, T. Aoki *et al.* (24 人中  
14 人目), "Radioactive ion beam transport-  
tation for the fundamental symmetry study  
with laser trapped atoms",  
Rev. Sci. Instrum. **85**, 02A732-1-3 (2014).  
( 査読有り )  
DOI: 10.1063/1.4852218

[33] H. Kawamura, T. Aoki *et al.* (21 人中  
11 人目 ), "Laser-cooled radioactive  
francium factory at CYRIC",  
Nucl. Instrum. Meth. B **317**, 582-585  
(2013).  
( 査読有り )  
DOI: 10.1016/j.nimb.2013.07.038

[34] H. Ito, S. Nagano, M. Kumagai, M.  
Kajita, and Y. Hanado,  
" Terahertz frequency counter with uncerta-  
inty at the 10-17 level "  
Appl. Phys. Express **6**, 102202-1-3(2013).  
( 査読有り )  
DOI: 10.7567/APEX.6.102202

[35] T. Aoki, Y. Yamanaka, M. Takeuchi, Y.  
Sakemi, and Y. Torii,  
"Photoionization loss in simultaneous  
magneto-optical trapping of Rb and Sr",  
Phys. Rev. A **87**, 063426-1-5 (2013).  
( 査読有り )  
DOI: 10.1103/PhysRevA.87.063426

[36] Y. Shimada, Y. Chida, N. Ohtsubo, T.  
Aoki, M. Takeuchi, T. Kuga, and Y. Torii,  
"A simplified 461-nm laser system using

blue laser diodes and a hollow cathode lamp  
for laser cooling of Sr",  
Rev. Sci. Instrum. **84**, 063101-1-7 (2013).  
( 査読有り )  
DOI: 10.1063/1.4808246

[37] S. Nagano, H. Ito, M. Kumagai, M.  
Kajita and Y. Hanado,  
" Microwave Synthesis From a Continuous-  
wave Terahertz Oscillator Using a Photo-  
carrier Terahertz Frequency Comb "  
Opt. Lett. **30**, 2137-2139(2013).  
( 査読有り )  
DOI: 10.1364/OL.38.002137

[38] T. Inoue, T. Aoki *et al.* (21 人中 12  
人目), "Search for electron EDM with laser  
cooled radioactive atom",  
AIP Conf. Proc. **1533**, 134-139 (2013).  
( 査読無し )  
DOI: 10.1063/1.4806789

[39] G. Gopakumar, M. Abe, M. Hada, and M.  
Kajita,  
" Ab initio study of ground and excited  
states of 6Li40Ca and 6Li88Sr molecules "  
J. Chem. Phys. **138**, 194307-1-14(2013).  
( 査読有り )  
DOI: 10.1063/1.4804622

[ 学会発表 ] ( 計 78 件 )  
省略 ( 各年度の実績報告書を参照 )

[ 図書 ] ( 計 1 件 )  
(1) 梶田雅稔,  
" 現代物理学の謎は原子時計で解決され  
る ",  
( 風詠社, 発行年 2015 年, 総ページ数 84p)

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
青木 貴稔 (AOKI Takatoshi)  
東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
研究者番号: 3 0 3 2 8 5 6 2
- (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: 5 0 3 5 9 0 3 0
- (3) 連携研究者  
ギータ ゴパクマル (GEETHA Gopakumar)  
首都大学東京・理工学研究科・研究員  
研究者番号: 7 0 6 4 9 3 8 4
- 阿部 穰里 (ABE Minori)  
首都大学東京・理工学研究科・助教  
研究者番号: 6 0 5 3 4 4 8 5