

令和 5 年 9 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01929

研究課題名(和文) レーザー光会合による冷却分子 EDM 探索

研究課題名(英文) Search for EDM in ultracold molecule using laser photoassociation

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：30328562

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー冷却技術を用いて原子・分子で電子の電気双極子能率(EDM)を $10^{(-29)}$ 乗 ecm まで測れば超対称性粒子の探索が可能である。そこで、我々は、強い内部電場を持つ LiSr 分子実験を提案した。本研究では、分子生成のための光会合用レーザーシステムの作製、分子分光のため、461 nm 光のインジェクションロックおよび大強度 ECDL の作製、イメージインテンシファイアによる原子からの蛍光増幅に成功した。新しい EDM 測定手法として、世界初となる量子エンタングル状態を用いた EDM 測定法の論文が出版され、現在の上限値を2桁改善できることを示した。理論計算により、分子周波数および EDM の研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、第1には、分子生成および分子分光のための光会合用レーザーを自作して、超狭線幅のレーザーシステムを構築できた、ということである。光会合用実験では、分子生成のために数kHzつまり、1000億分の1の精度で光周波数を制御する必要があり、研究の結果、200 Hz、つまり、1兆分の1の精度のレーザーシステムの構築に成功した。第2には、新しい EDM 測定法の開発に成功したことであり、量子コンピュータの中心技術である量子エンタングル状態を素粒子物理学へ応用することで、世界初となる方法で現在の電子 EDM の測定精度を2桁改善することができることを示した。

研究成果の概要(英文)：Measurement of electron electric dipole moment (EDM) down to $10^{(-29)}$ e cm, using laser cooling technique of atoms and molecules, enables us to search for supersymmetry particles. Therefore, we proposed the LiSr molecule experiment with strong effective electric field of 2.0 GV/cm. In this work, we developed the laser system for the photoassociation spectroscopy, and the injection lock and high power ECDL with a wavelength of 461 nm. We demonstrated the amplification of fluorescence from the trapped atoms using the image intensifier. We suggested the new method to measure the electron EDM using the entangled quantum state. It shows the method can improve the current upper limit of the electron EDM by two order of magnitude. The theoretical molecular frequency and EDM enhancement factor have been investigated.

研究分野：実験核物理

キーワード：実験核物理 量子エレクトロニクス 原子・分子物理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

レーザー冷却技術を用いて原子・分子で電子の電気双極子能率 (EDM) を 10^{-29} e cm まで測れば超対称性粒子の探索が可能である。そこで、我々は、強い内部電場 2.0 GV/cm を持つ LiSr 分子を生成し冷却トラップすることで、従来の分子 EDM 実験と比べて相互作用時間を 1000 倍へと改善し、電子 EDM 測定精度を飛躍的に向上させる方法を提案した。

2. 研究の目的

本研究では、Sr 分子生成技術を確立し、LiSr 分子を用いた EDM 測定を目指す。我々は既に Li と Sr の同時レーザー冷却に成功しており、本研究計画にて LiSr 分子生成を目指す。本研究では、第 1 の目的として、レーザー冷却され同時トラップされた Li と Sr に、光会合分光により極低温 LiSr 分子を生成する。第 2 の目的として、生成された冷却分子の分子分光を行い、分子構造を解明する。

3. 研究の方法

冷却分子生成のためには、光会合による分子生成や分子分光を行うため、パルス固体レーザーとパルス色素レーザーが必須である。しかし、パルス固体レーザーおよびパルス色素レーザーのメーカーが販売中止したことにより、代替品レーザーを検討したが、こちらが当初の予定よりかなり高額であることに加え、当初想定していなかった極端な円安の進行により、海外から輸入レーザーを購入するのは不可能となり、希望していた高額の光源は購入することができなかった。そのため、研究計画のうち、第 1 の目的である光会合で重要となる光会合用レーザー光源を自作し、光会合用光源システムを作製した。また、第 2 の目的である分子分光では、分子数の増大が鍵をにぎるが、その元となる Sr 原子数増大のため、レーザー冷却光源の高強度化に集中する。また、分子分光のために、観測時間の短縮が重要だが、そのためにイメージンテンシファイアによるトラップ原子の蛍光強度の増幅を行う。

これらのために、以下の研究を行った。

【実験】

- (1) 689 nm 光会合用レーザーとして、干渉フィルター型 ECDL (外部共振器型半導体レーザー) を作製し、オフセットロックにより線幅狭帯化を行う。
- (2) 461 nm 光パワー増大のため、インジェクションロックによる光パワー増幅と、大強度 ECDL システムの構築を行う。分担者の東條氏との共同研究である。
- (3) 分子生成のために、原子数と温度評価が重要だが、そのとき短い観測時間が要求される。そこで、イメージンテンシファイアを用いて、トラップ原子の蛍光信号を 100 倍へと増幅し、観測時間を 1/100 へと短縮する。

【新しい EDM 測定方法の提案】

- (4) 新しい EDM 手法として、量子エンタングル状態を用いた EDM 測定方法を提案し、現在の EDM 上限値である 1×10^{-29} e cm を超えることを目指す。分担者の酒見氏との共同研究である。

【分子 EDM に関する理論研究】

- (5) 分担者 梶田氏による分子遷移の理論研究
- (6) 分担者 阿部氏による分子構造計算の理論研究を行う。

4. 研究成果

(1) 光会合用 689 nm 光源を干渉フィルター型 ECDL で作製し、ULE 共振器で線幅を狭帯化した別の ECDL 光源とオフセットロックをすることで、ビート周波数の線幅を 200 Hz 以下へ狭帯化することができた (図 1)。

また、ECDL のマウントの材質は、スーパーインバーを用いることで、従来のアルミ製の ECDL に比べ、周波数ドリフトを約 1/9 に抑制できた (図 2)。

以上の結果を学会発表した。

(2) 461 nm 光源として、従来は、波長 922 nm の光を、非線形光学結晶を用いた第 2 次高調波発生により、461 nm 光を生成していたが、光パワーが大きい方が望ましい。そこで、461 nm 光のパワーを、インジェクションロックによる光増幅を行った。PPLN で生成した 461 nm 光を、LD によるインジェクションロックで増幅し、40~50 mW の出力が得られた。この光源を用いて、Sr 原子の MOT 実験を行った。

しかし、温度調整やアライメントなど、繊細な取り扱いが必要であった。そこで、これらの光

源システムの代わりに、大強度の LD チップを用いた 461 nm の ECDL を作製し、200 mW 以上の出力を得ることができた (図 3)。

これは、従来の第 2 次高調波による光パワー 170 mW を上回るものであり、インジェクションロックを用いる必要もなく、ECDL 1 台だけで、大強度の 461 nm 光を生成することができる。また、この新しい ECDL システムを用いて、Sr 原子の FM 分光を行い、分散型信号を得ることができた (図 4)。

これは、新 ECDL システムが、単一周波数で安定に発振している証拠であり、大強度でも多モードにならずに、単一モードで安定であることを示せた。これにより冷却原子実験を高安定に行うことができる。

以上、分担者の東條氏との共同研究である。東條氏は、時間結晶や Sr 分光についても議論した。

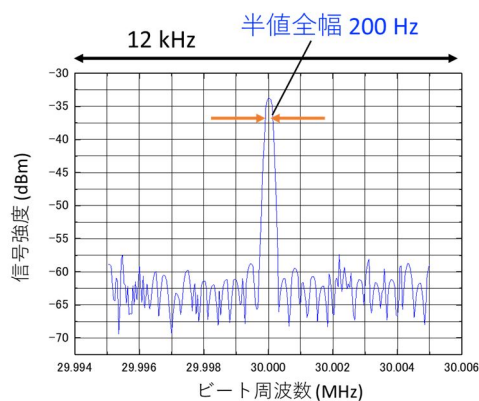


図 1 オフセットロックによるビート周波数

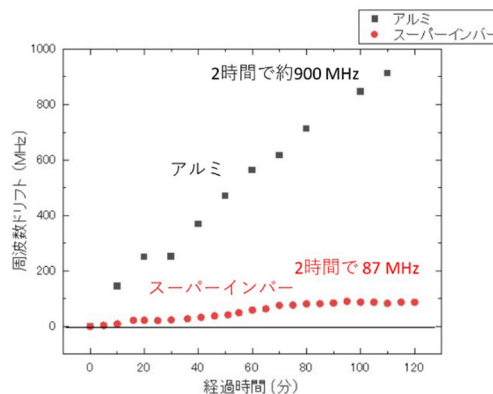


図 2 ECDL 周波数のドリフト測定結果

(3) イメージインテンシファイアによる冷却原子からの蛍光の増幅

分子生成のために、原子数と温度評価が重要だが、そのとき短い観測時間が要求される。そこで、イメージインテンシファイアを CCD に取り付け、MOT からの蛍光を増幅した。ゲインを 10² 程度にすることで、冷却原子からの蛍光を 100 倍へと増幅し CCD で観測した (図 5)。

その結果、通常時と比べて、観測時間を約 1/100 へと短縮化することができた。また、461 nm MOT の次の段階である、689 nm MOT や分子生成で、小数個の原子や分子を測定する必要があるが、蛍光増幅の実験結果はそのような小数個測定で極めて重要となる。

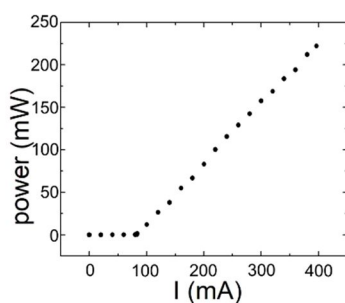


図 3 461 nm ECDL の出力特性

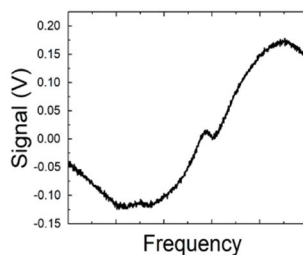


図 4 Sr 原子の FM 分光信号



図 5 Sr MOT ICCD 画像

(4) 電子 EDM の新しい測定法として、原子の量子エンタングル状態を用いた方法を提案し、EDM を 10⁻³⁰ ecm 以下で測定できることを示した (図 6)。これは、現在の EDM 上限値を 2 桁更新できることを意味しており、論文として発表した。

この成果は、研究開始当初は、全く予想しなかったことであり、量子エンタングル状態を電子 EDM 測定に利用した世界初の論文である。そのため、電子 EDM の snowmass 白書 (<https://arxiv.org/abs/2203.08103>) にて、新しい EDM 測定手法として Advanced quantum control という節に取り上げられた。

そして、日本語の論文が出版され、電子 EDM、Sr 分光、基本対称性について、国際会議や国内学会などで発表した。

これらは、国際共同研究として、インドの B. K. Sahoo 氏、フランスの A. Kastberg 氏との研究であり、さらに原子を用いた基礎物理や光格子実験などについて議論し、論文発表した。

以上、分担者の酒見氏との共同研究である。酒見氏は、EDM 測定手法と EDM 理論、およびパリティの破れについても議論を行い、EDM 実験で重要となる光ファイバー伝送についても研究した。

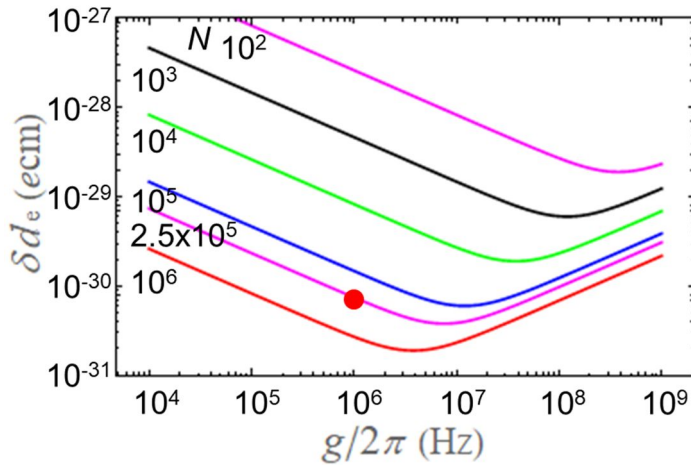


図6 新手法による電子 EDM の不確かさ。現在の上限値 1×10^{-29} ecm を遙かに上回ることができる画期的な手法である。

(5) 分担者の梶田氏は、分子 EDM 実験で重要となる周波数の安定度について、要素技術として分子の周波数標準の研究を行った。

希ガスと水素を結合させた分子イオンの回転遷移によるテラヘルツ領域の周波数標準、振動遷移による光・赤外領域の周波数標準に関して理論的検討を行い、論文発表した。その一方で、窒素分子イオンの核スピン選別法を検討した。

核スピンのゼロの窒素分子イオンの振動遷移は精密計測に非常に有用であると思われる。しかし $^{14}\text{N}_2^+$ では核スピンの他に 2 も存在する。2 種類の核スピンのうちゼロの核スピンの分子イオンを量子情報的手法で選別することを提案し、論文発表した。その一方で、二価イオンである Yb^{2+} イオンの遷移周波数の精密計測を論文にした。更に分子イオン遷移周波数の精密計測全般のレビューを招待講演で発表した。

テラヘルツ領域の周波数の 16 桁以上の確度を得る可能性を分子イオンの開店遷移周波数や光格子内の CaF 分子の振動遷移周波数を中心に検討した。その結果を解説記事や著書にまとめている。今年度特に新しいのは光格子内の CaF 分子の遷移周波数に与える隣接する格子内の分子の双極子モーメントから受けるシュタルクシフトで二光子遷移では 17 桁目のシフトであるのに対して一光子遷移では 15 桁目のシフトであることを結論づけた。

その他、電子の双極子モーメント検出に重要になる、分子の分極率に考察を加えた。

(6) 分担者の阿部氏は、相対論量子化学計算を行った。分子を用いて電子 EDM を求めるためには、EDM 相互作用に起因するエネルギーシフトの実験的計測とともに、相対論量子化学による有効電場の理論計算が必要になる。

近年注目を浴びている多原子分子における電子 EDM の測定感度を検討するために、 HgOH 分子等に対する電子 EDM の有効電場について理論計算を行い、学術誌に発表した。また核の EDM について、従来の電子状態項の表現が不十分であることを指摘し、よりよい近似式の提案を学会発表で行った。

超重元素である Lr を含む分子系 (LrO , LrF^+ , LrH^+) の電子 EDM に対する有効電場が 250 ~ 340 GV/cm であることを理論計算から明らかにし、学術誌に発表した。核 EDM の理論計算の研究成果に関して国際会議や国内会議で講演を行い、学術論文執筆を行った。

核 EDM の一つであるシッフモーメントについて、電子状態項に対するより厳密な表現式を導出した。また多電子の波動関数を高精度に計算する結合クラスター法に対して本手法を適用するプログラムを開発した。TIF 分子の数値計算から、従来のシッフモーメントの表現では、核表面付近での記述が不十分であることを明らかにし、国際会議や国内会議にて発表を行った。海外の研究者と議論した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Nakamura K, Nagase S, Nakashita T, Hayamizu T, Aoki T, Nagahama H, Ozawa N, Sato M, Yamane K, Fukase M, Uehara D, Takamine A, Sakemi Y	4. 巻 2249
2. 論文標題 Development of a Laser Frequency Stabilization and an Optical Transmission System for the Francium Electric Dipole Moment Search	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012010 ~ 012010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2249/1/012010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Nakamura, S. Nagase, T. Nakashita, T. Hayamizu, T. Aoki, H. Nagahama, N. Ozawa, M. Sato, K. Yamane, M. Fukase, D. Uehara, A. Takamine and Y. Sakemi	4. 巻 CTuP7C-03
2. 論文標題 400-m-Long Polarization-Maintaining Fibers for Magneto-Optical Trapping of Francium Atoms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 青木貴稔, 佐藤拓海, 池田英彦, 岡本直大, 鳥井寿夫, 中村圭佑, 永瀬慎太郎, 長濱弘季, 小澤直也, 佐藤幹, 中下輝士, 山根風樹, 松田恭幸, 酒見泰寛, 早水友洋, 大塚未来, 高峰愛子, 上野秀樹, 羽場宏光, 田中香津生, 原田健一, 川村広和, 井上壮志, 内山愛子, 畠山温, 市川 雄一, 田中聡, 松尾由賀利, Rithvik Sreekantham et al.	4. 巻 ECT-22
2. 論文標題 量子エンタングル Fr 原子を用いた電子 EDM の量子センシング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会 電子回路研究会	6. 最初と最後の頁 043-17-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 梶田雅稔	4. 巻 19
2. 論文標題 解説記事「テラヘルツ領域周波数標準」	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 しょうとつ	6. 最初と最後の頁 54-61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Aoki T, Sreekantham R, Sahoo B K, Arora Bindiya, Kastberg A, Sato T, Ikeda H, Okamoto N, Torii Y, Hayamizu T, Nakamura K, Nagase S, Ohtsuka M, Nagahama H, Ozawa N, Sato M, Nakashita T, Yamane K, Tanaka K S, Harada K, Kawamura H, Inoue T, Uchiyama A, Hatakeyama A, Takamine, H. Ueno et al.	4. 巻 6
2. 論文標題 Quantum sensing of the electron electric dipole moment using ultracold entangled Fr atoms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Quantum Science and Technology	6. 最初と最後の頁 044008-1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2058-9565/ac1b6a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Sakemi Yasuhiro, Harada Ken-ichi, Itoh Masatoshi, Ito Saki, Uchiyama Aiko, Inoue Takeshi, Kawamura Hirokazu, Aoki Takatoshi, Hatakeyama Atsushi, Takahashi Yoshiro, Hisano Junji	4. 巻 35
2. 論文標題 Fundamental Physics with Cooled Radioactive Atoms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 011016-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.35.011016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hayamizu Tomohiro, Haba Hiromitsu, Nakamura Keisuke, Aoki Takatoshi, Nagahama Hiroki, Tanaka Kazuo S., Ozawa Naoya, Ohtsuka Miki, Sakemi Yasuhiro	4. 巻 63
2. 論文標題 Development of Ultracold Francium Atomic Sources Towards the Permanent EDM Search	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 11-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-021-01710-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sato Takumi, Hayakawa Yusuke, Okamoto Naohiro, Shimomura Yusuke, Aoki Takatoshi, Torii Yoshio	4. 巻 39
2. 論文標題 Birefringent atomic vapor laser lock in a hollow cathode lamp	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 155-159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.442465	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Alarcon, J. Alexander, V. Anastassopoulos, T. Aoki et al.	4. 巻 2203
2. 論文標題 Electric dipole moments and the search for new physics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 08103-1-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2203.08103	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mitra R., Prasanna V. S., Ruiz R. F. Garcia, Sato T. K., Abe M., Sakemi Y., Das B. P., Sahoo B. K.	4. 巻 104
2. 論文標題 Towards CP-violation studies on superheavy molecules: Theoretical and experimental perspectives	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 062801-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.062801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kajita Masatoshi	4. 巻 90
2. 論文標題 Detection of Nuclear Spin of $^{14}\text{N}^{2+}$ Molecular Ion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 044302-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.044302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishino Hitoshi, Yano Yuichiro, Hara Motoaki, Toda Masaya, Kajita Masatoshi, Ido Tetsuya, Ono Takahito	4. 巻 46
2. 論文標題 Reflection-type vapor cell for micro atomic clocks using local anodic bonding of 45° mirrors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2272-2275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.424354	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kimura Naoki, Kajita Masatoshi	4. 巻 90
2. 論文標題 Prospect for Precision Measurement of the Yb2+ 1S0-3P0 Transition Frequency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 064302-1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.064302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kastberg Anders, Sahoo Bijaya Kumar, Aoki Takatoshi, Sakemi Yasuhiro, Das Bhanu Pratap	4. 巻 12
2. 論文標題 Analysis of an Optical Lattice Methodology for Detection of Atomic Parity Nonconservation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 974-1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym12060974	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kajita Masatoshi, Bala Renu, Abe Minori	4. 巻 53
2. 論文標題 Attainable accuracies of QH+ rotational transition frequencies (Q: 40Ca, 24Mg, 202Hg)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 085401-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/ab7425	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Abe Minori, Tsutsui Takashi, Ekman J?rgen, Hada Masahiko, Das Bhanu	4. 巻 118
2. 論文標題 Accurate determination of the enhancement factor X for the nuclear Schiff moment in 205TlF molecule based on the four-component relativistic coupled-cluster theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Molecular Physics	6. 最初と最後の頁 e1767814-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00268976.2020.1767814	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Prasanna V. Srinivasa, Sahoo Bijaya K., Abe Minoru, Das Bhanu P.	4. 巻 12
2. 論文標題 Significance of Non-Linear Terms in the Relativistic Coupled-Cluster Theory in the Determination of Molecular Properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 811-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym12050811	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mitra Ramanuj, Prasanna V. Srinivasa, Sahoo Bijaya K., Hutzler Nicholas R., Abe Minoru, Das Bhanu Pratap	4. 巻 9
2. 論文標題 Study of HgOH to Assess Its Suitability for Electron Electric Dipole Moment Searches	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 7-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms9010007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kajita Masatoshi, Kimura Naoki	4. 巻 89
2. 論文標題 Prospect for Vibrational Transition Frequency Measurement of Rare-gas Hydride Ions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114301-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.114301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kajita Masatoshi, Kimura Naoki	4. 巻 53
2. 論文標題 Prospects in rare-gas hydride ions for terahertz frequency standards	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics	6. 最初と最後の頁 135401-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/ab894b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計41件(うち招待講演 15件/うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Naohiro Okamoto, Takumi Sato, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii
2. 発表標題 Birefringent atomic vapor laser lock for laser cooling experiments
3. 学会等名 Ultracold Atoms Japan 2022 (Okinawa, Japan, 12-14 April 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Nakamura, Shintaro Nagase, Teruhito Nakashita, Tomohiro Hayamizu, Takatoshi Aoki, Hiroki Nagahama, Naoya Ozawa, Motoki Sato, Kazeki Yamane, Mirai Fukase, Daisuke Uehara, Aiko Takamine, and Yasuhiro Sakemi
2. 発表標題 400-m-Long Polarization-Maintaining Fibers for Magneto-Optical Trapping of Francium Atoms
3. 学会等名 The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2022) Sapporo Japan 31 August - 5 September 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Aoki, R. Sreekantham, B. K. Sahoo, Bindhya Arora, A. Kastberg, T. Sato, H. Ikeda, N. Okamoto, Y. Torii, T. Hayamizu, K. Nakamura, S. Nagase, M. Ohtsuka, H. Nagahama, N. Ozawa, M. Sato, T. Nakashita, K. Yamane, K. S Tanaka, K. Harada, H. Kawamura, T. Inoue, A. Uchiyama, A. Hatakeyama et al.
2. 発表標題 Quantum sensing of the electron electric dipole moment using ultracold entangled Fr atoms
3. 学会等名 14th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2022), (online, 24-25th November 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minori Abe
2. 発表標題 New representation of electronic terms for Schiff moment in molecules
3. 学会等名 Searches for Electric Dipole Moments: From Theory to Experiment, 2nd March 2023, Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe (KMI), Nagoya University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masatoshi Kajita
2. 発表標題 Precision Frequency Measurement of Molecules
3. 学会等名 Scholars International Conference on Optics, Photonics and Lasers Berlin (2022.6.23) (Keynote) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masatoshi Kajita
2. 発表標題 Precision measurement of molecular vibrational rotational transition frequencies
3. 学会等名 The 9th Conference of Analytix 2023 " Sapporo(2023.1.10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H.Nagahama et al.
2. 発表標題 Searching for the permanent electric dipole moment using laser cooled francium atoms
3. 学会等名 PS12022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Nagase, Y.sakemi et al.
2. 発表標題 Development of a novel comagnetometer for high precision measurement of the electric dipole moment using laser cooled Fr atoms
3. 学会等名 PS12022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Fukase, Y. Sakemi et al.
2. 発表標題 Search for permanent EDM by using Fr atoms
3. 学会等名 FPUA2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Krzysztof Giergel, Ali Zaheer, Arpana Singh, Chamali Gunawardana, Tien Tran, Satoshi Tojo, Andrei Sidorov, Krzysztof Sacha, Peter Hannaford
2. 発表標題 Condensed Matter Physics in Big Time Crystals
3. 学会等名 24th Australian Institute of Physics Congress, Dec. 11-16, 2022, University of Adelaide, (Adelaide, Australia) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tojo, Krzysztof Giergel, Andrei Sidorov, Krzysztof Sacha, Peter Hannaford
2. 発表標題 Big Time Crystals in a Bouncing BEC
3. 学会等名 24th Australian Institute of Physics Congress, Dec. 11-16, 2022, University of Adelaide, (Adelaide, Australia)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木貴稔, 鳥井寿夫, 早水友洋, 中村圭佑, 長濱弘季, 田中香津生, 原田健一, 内山愛子, 畠山 温, 高峰愛子, 上野秀樹, 市川雄一, 松田恭幸, 羽場宏光, 酒見泰寛
2. 発表標題 量子エンタングルFr原子を用いた電子EDMの量子センシング
3. 学会等名 電気学会 電子回路研究会 (情報通信研究機構) 2022年9月8日
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M.Sato, Y.Sakemi et al.
2. 発表標題 Search for permanent EDM by using Fr atoms
3. 学会等名 RCNP研究会「中性子と原子で探る基礎物理」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中聡, 西野仁, 小野崇人, 松尾由賀利, 酒見泰寛, 鳥井寿夫, 青木貴稔
2. 発表標題 量子センサーのためのCs原子マイクロセル分光
3. 学会等名 第39回「センサ・マイクロマシンと応用システム」(アクティ徳島) 16P2-P-19, 2022年11月16日
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中聡, 石川知輝, 河西壱輝, 岡本直大, 早水友洋, A. Kastberg, B. K. Sahoo, B. P. Das, 西野仁, 小野崇人, 羽場宏光, 東條賢, 酒見泰寛, 松尾由賀利, 鳥井寿夫, 青木貴稔
2. 発表標題 ダークマター探索のためのCs原子の磁気光学トラップ
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会 24aA1-4 2023年3月24日
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小澤直也, 長濱弘季, 中村圭佑, 佐藤幹, 中下輝士, 永瀬慎太郎, 上原大祐, 深瀬実来, 青木貴稔, 山口敦史, 高峰愛子, 上野秀樹, 酒見泰寛
2. 発表標題 永久電気双極子能率探索を目指した冷却フランシウム原子源の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会 24aV1-3 2023年3月24日
4. 発表年 2023年

1. 発表者名	深瀬実来, 長濱弘季, 中村圭佑, 小澤直也, 佐藤幹, 中下輝士, 永瀬慎太郎, 上原大祐, 高峰愛子, 上野秀樹, 酒見泰寛
2. 発表標題	フランシウム原子の永久電気双極子能率探索に向けた高周波二重極質量フィルターの開発
3. 学会等名	日本物理学会 2023年春季大会 24aV1-4 2023年3月24日
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	上原大祐, 長濱弘季, 中村圭佑, 佐藤幹, 中下輝士, 小澤直也, 永瀬慎太郎, 深瀬実来, 青木貴稔, 山口敦史, 高峰愛子, 上野秀樹, 酒見泰寛
2. 発表標題	レーザー冷却フランシウム源実現に向けた金属表面における中性脱離反応の研究
3. 学会等名	日本物理学会 2023年春季大会 24aV1-5 2023年3月24日
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	戸田智渚、阿部穰里
2. 発表標題	シッフモーメントに対する電子状態項のより厳密な表現の検討
3. 学会等名	2022 重元素化学研究会, 2023 年 3 月 20 日 (月) ~ 21 日 (火) 場所: あわら市商工会芦原支所 講習会室
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	T. Aoki, R. Sreekantham, B. K. Sahoo, Bindiya Arora, A. Kastberg, T. Sato, H. Ikeda, N. Okamoto, Y. Torii, T. Hayamizu, K. Nakamura, S. Nagase, M. Ohtsuka, H. Nagahama, N. Ozawa, M. Sato, T. Nakashita, K. Yamane, K. S Tanaka, K. Harada, H. Kawamura, T. Inoue, A. Uchiyama, A. Hatakeyama, A. Takamine, H. Ueno et al.
2. 発表標題	Quantum sensing of the electron electric dipole moment using quantum entangled atoms
3. 学会等名	International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies (ISNTT2021) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	K. Nakamura, S. Nagase, T. Nakashita, T. Hayamizu, T. Aoki, H. Nagahama, N. Ozawa, M. Sato, K. Yamane, M. Fukase, D. Uehara, A. Takamine, and Y. Sakemi
2. 発表標題	Development of a Laser Frequency Stabilization and an Optical Transmission System for the Francium Electric Dipole Moment Search
3. 学会等名	The 29th annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'21) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	N. Ozawa, Y. Sakemi, H. Nagahama, K. Nakamura, Y. Kotaka, K. Kamakura, S. Nagase, M. Fukase, D. Uehara, K. S. Tanaka, T. Aoki, M. Sato, T. Nakashita, K. Yamane, H. Ueno, H. Haba, A. Takamine, T. Hayamizu, Y. Ichikawa, Y. Matsuo, A. Kastberg, R. Calabrese, K. Jungmann, L. Willmann
2. 発表標題	Present status of the electron EDM search using laser-cooled francium
3. 学会等名	13th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Minoru Abe, Takashi Tsutsui, Jorgen Ekman, Bhanu Das, Masahiko Hada
2. 発表標題	Electronic enhancement factor for nuclear Schiff moment in heavy-element molecules
3. 学会等名	The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem2021) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Masatoshi Kajita
2. 発表標題	Prospect for the Precision Measurement of Transition Frequencies of Molecular Ions
3. 学会等名	Meeting on 2nd International Summit on Optics, Photonics, and Laser Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 Masatoshi Kajita and Naoki Kimura
2. 発表標題 Frequency Standard in THz region using Molecular Ions
3. 学会等名 XXXIII General Assembly and Scientific Symposium (GASS) of the International Union of Radio Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masatoshi Kajita
2. 発表標題 Precision Measurement of Transition Frequencies of Molecular Ions
3. 学会等名 International Meet & Expo on Lasers, Optics and Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小澤直也、酒見泰寛、長濱弘季、中村圭祐、小高康熙、鎌倉恵太、上野秀樹、羽場宏光、早水友洋、大塚未来、高峰愛子、永瀬慎太郎、田中香津生、青木貴稔、佐藤幹
2. 発表標題 フランシウム原子の電気双極子能率探索のための表面電離イオン源の開発
3. 学会等名 重元素核化学ワークショップ (ELPH研究会 C027)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中下輝士、松田恭幸、酒見泰寛、長濱弘季、中村圭祐、早水友洋、青木貴稔、永瀬慎太郎、山根風樹、小澤直也、佐藤幹、深瀬実来、上原大祐、高峰愛子
2. 発表標題 フランシウムの電気双極子能率探索に向けた冷却原子制御系の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永瀬慎太郎, 酒見泰寛, 長濱弘季, 中村圭佑, 早水友洋, 青木貴稔, 中下輝士, 山根風樹, 小澤直也, 佐藤幹, 深瀬実来, 上原大祐, 高峰愛子
2. 発表標題 原子の電気双極子能率探索に向けたレーザー冷却フランシウム源の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高村昭吉, 青木貴稔, 鳥井寿夫
2. 発表標題 PyrexガラスセルにおけるRb原子の光誘起脱離の特性
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡本直大, 佐藤拓海, 青木貴稔, 鳥井寿夫
2. 発表標題 Srのホロカソードランプを用いた複屈折原子気体レーザーロック
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山根風樹, 佐藤幹, 羽場宏光, 酒見泰寛, 長濱弘季, 中村圭佑, 早水友洋, 青木貴稔, 小澤直也, 中下輝士, 永瀬慎太郎, 深瀬実来, 上原大祐, 松田恭幸
2. 発表標題 永久電気双極子能率探索に向けたアクチニウム-225電着基板を用いたフランシウム-221原子線源の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村圭佑、永瀬慎太郎、中下輝士、早水友洋、青木貴稔、長濱弘季、小澤直也、佐藤 幹、山根風樹、深瀬実来、上原大祐、高峰愛子、酒見泰寛
2. 発表標題 フランシウム原子の電子電気双極子能率探索のためのレーザー周波数安定化機構と光伝送系の開発
3. 学会等名 第82回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部穰里
2. 発表標題 電子と原子核の相互作用に関連する3つの理論的研究
3. 学会等名 2021年度日本放射化学会 第65回討論会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takatoshi Aoki
2. 発表標題 Light shift induced by atomic parity nonconservation using ultracold Fr and Cs: nuclear anapole moment and new physics beyond the standard model
3. 学会等名 Fundamental Sciences and Quantum Technologies using Atomic Systems (FSQT2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Minoru Abe
2. 発表標題 Diatomic molecular electronic wavefunction inside a nucleus for measurement of nuclear Schiff moment
3. 学会等名 Fundamental Sciences and Quantum Technologies using Atomic Systems (FSQT2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Hayamizu, H. Haba, K. Nakamura, T. Aoki, H. Nagahama, K. Tanaka, N. Ozawa, M. Ohtsuka, and Y. Sakemi
2. 発表標題 Development of ultracold francium atomic sources towards the permanent EDM search
3. 学会等名 Yamada Conference LXXII: The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minori Abe
2. 発表標題 Reconsideration of the electronic term of the Schiff moment in closed-shell molecules
3. 学会等名 Yamada Conference LXXII: The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 君塚大樹, 池田英彦, 岡本直大, 鳥井寿夫, 酒見泰寛, 青木貴稔
2. 発表標題 狭線幅光会合を用いた極低温Sr2分子生成のための高安定な光源開発
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田英彦, 佐藤拓海, 鳥井寿夫, 早水友洋, 長濱弘季, 酒見泰寛, 青木貴稔
2. 発表標題 電場の量子センシングに向けたSrリドベルグ原子の分光
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小澤直也, 長濱弘季, 早水友洋, 中村圭佑, 佐藤幹, 永瀬慎太郎, 小高康熙, 鎌倉恵太, 田中香津生, 大塚未来, 青木貴稔, 市川雄一, 高峰愛子, 羽場宏光, 上野秀樹, 酒見泰寛
2. 発表標題 フランシウム原子の電気双極子能率探索のための表面電離イオン源の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 Masatoshi Kajita	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Institute Of Physics Science (IOP Science)	5. 総ページ数 123
3. 書名 Ion Traps: A gentle introduction	

1. 著者名 Masatoshi Kajita	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Bentham Science Publishers	5. 総ページ数 157
3. 書名 Fundamentals of Analysis in Physics	

1. 著者名 Masatoshi Kajita	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Institute Of Physics Science	5. 総ページ数 146
3. 書名 Cold Atoms and Molecules	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	梶田 雅稔 (Kajita Masatoshi) (50359030)	国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所・嘱託 (82636)	
研究分担者	阿部 穰里 (Abe Minori) (60534485)	広島大学・先進理工系科学研究科(理)・准教授 (15401)	
研究分担者	酒見 泰寛 (Sakemi Yasuhiro) (90251602)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	
研究分担者	東條 賢 (Tojo Satoshi) (30433709)	中央大学・理工学部・教授 (32641)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
インド	Physical Research Laboratory		
フランス	University Cote d'Azur		