

令和元年5月30日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220705

研究課題名(和文) 光格子によるレーザー冷却放射性元素の次世代電気双極子能率探索

研究課題名(英文) Search for the electric dipole moment with laser cooled radioactive atoms in the optical lattice

研究代表者

酒見 泰寛 (Sakemi, Yasuhiro)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：90251602

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 152,700,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙初期では物質と反物質が等量存在していたと考えられるが、この冷えた宇宙において、どのように反物質が消失していったのか、この物質・反物質対称性(CP対称性)破れの機構を解明するための高精度量子計測手法・光格子重元素干渉計を開発した。電子の永久電気双極子能率(EDM)は、CP対称性を破る重要な観測量であり、その電子EDMの増幅度は、原子量最大のアルカリ原子・フランシウムで最大となる。本研究では、フランシウムの核融合反応による生成・レーザー冷却・原子干渉計の技術を確立した。更に、系統誤差の大きな要因である磁場変動、光シフトを抑制するために、2種原子を用いた共存磁力計の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により開発した光格子重元素干渉計は、大規模な加速器実験と相補的に、宇宙における物質創成機構や暗黒物質の素粒子物理学の実体を探るテーブルトップ実験の研究手法を提供する。本成果で実現した光格子重元素干渉計により、量子補正効果により生じる効果を「間接的」に調べ、未知素粒子の性質を超精密に評価することで、直接探索に必要な大型実験装置のデザインを確度の高いものにすることができ、基礎科学の進展を加速することができる。さらに、開発に成功した共存磁力計は、0.1 μ Tの磁場測定精度を実現しており、磁気シールド等の増強を行うことで、ライフサイエンスでも重要になっている室温で動作する脳磁計の実現も可能になる。

研究成果の概要(英文)：An Electric Dipole Moment (EDM) of the elementary particle is a good probe to observe the phenomena beyond the Standard Model. A non-zero EDM shows the CP violation, which is one of the important signals to understand the mechanism how the matter-antimatter asymmetry has been produced in our universe. A heaviest alkali element francium (Fr) has the largest enhancement factor of the electron EDM. The laser cooling techniques are important to realize the high accuracy measurement of EDM, which can be achieved with the long interaction time using the optical lattice. The experimental technique to produce, laser cooling, atomic interferometer to measure the EDM was established. We also succeeded in developing the co-magnetometer with Rb trapped together with Fr, to reduce the systematic error for magnetic field change and light vector shift drastically.

研究分野：原子核物理・基礎物理

キーワード：基本対称性 CP対称性 電気双極子能率 光格子重元素干渉計

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙開闢当初、物質と反物質は等量あったと考えられているが、135億年以上の宇宙の歴史の中で、どのように反物質が消失していったのか、この物質・反物質対称性の破れの機構解明は、素粒子標準理論を超える新物理探索にも繋がっており、常に関心が持たれている。階層問題の解決、ゲージ結合定数の統一、暗黒物質の素粒子物理的実体等を解決する考え方の一つである超対称性理論 (SUSY) では、標準理論において登場する素粒子各々に、統計性が異なる相棒粒子 (SUSY 粒子) の存在が予言され、大型加速器実験によりこの未知素粒子探索が進んでいる。この高エネルギー実験と相補的な役割を果たすのが、超低エネルギー精密実験である。未知素粒子を直接観測しないが、不確定性原理の範囲内で未知素粒子が生成・伝搬・消滅を繰り返す量子補正効果を精密に検出することで、未知素粒子の存在や反物質消失の謎に迫る新しい実験手法である。この量子補正効果は一般的に極めて小さく検出に困難を極めるが、本研究で推進した「精密量子計測」による原子の永久電気双極子能率 (EDM) 探索実験手法は、国際的に関心が持たれていた。EDM は SUSY 粒子の質量や物質・反物質対称性 (CP 対称性) の破れを示す物理的パラメータである CP 位相と相関を持つ。常磁性原子や反磁性原子等の多彩な原子の EDM 測定により、物質を構成するレプトンとクォークの各々の相棒粒子となる SUSY 粒子に関する情報を得ることが可能であり、高エネルギー実験で到達困難な重い質量領域を探索し、新物理の方向性を示唆する観測量として常に注目されている⁽²⁾。本研究では、国際的にも独創的な放射性同位元素を加速器で生成しながらオンラインでレーザー冷却し、光格子に閉じ込めた重元素・フランシウム (Fr) 原子干渉計を用いて EDM 精度向上の限界を乗り越える技術確立を目指す。

2. 研究の目的

CP 対称性の破れの源泉を探るためには、物質を構成するクォーク・レプトンが有する EDM と、CP を破る基本相互作用を解明することが必要である。しかしクォークを単独で取り出すことは難しく、その多体系である核子、原子核、原子が観測対象となる。一般に反磁性原子では核子 EDM に感度が高く、不對電子をもつ常磁性原子では相対論効果により原子番号の 3 乗に比例して電子 EDM が増幅される事が理論的に示されている。相対論的結合クラスター理論による電子相関を含めた第一原理計算では、原子番号最大のアルカリ原子・フランシウム (Fr) における電子 EDM 増幅度は 895 倍にも達し、電子 EDM 探索の格好の対象となる^(6,7)。

EDM は、偏極した原子を用意し、外場の中で自由に歳差させ (相互作用時間)、その時間発展を測定する。この時、磁場に対して電場の向きを平行、反平行にしたときのスピン歳差周期の差を測ることで、磁場と結合する磁気モーメントの寄与を差し引き、電場と結合する EDM を抽出する。EDM 測定感度は、EDM 増幅度 (K)、原子数 (N)、印加電場 (E)、相互作用時間 (τ)、測定時間 (T) が大きいほど測定感度が向上する。これまで世界最高感度を達成している実験は、高温オープンからの高速原子・分子ビームを有限の長さの電極を通過させて測定しており、相互作用時間がミリ秒程度と限界があった。同種元素・多彩な同位体によるレプトン・クォーク EDM の高精度測定を実現するために、レーザー冷却・トラップされた冷却 RI を用いて相互作用時間を～秒程度に格段に伸ばし、EDM 測定感度の向上を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、加速器で短寿命 RI を製造しながら、オンラインでレーザー冷却・EDM 測定を行う技術を開発した。実験装置は大強度 Fr ビーム (1)、レーザー冷却 Fr 源 (2)、EDM 測定装置 (3) の 3 つから構成される。

(1) 大強度 Fr ビーム：Fr 生成は、表面電離イオン源を用いて、サイクロトロンから供給される ^{18}O ビームと ^{197}Au 標的による核融合反応を用いる。反応断面積が最大となるクーロンバリアを少し超える加速エネルギー 100 MeV のビームにより高温の金標的中で Fr を生成し、熱拡散により標的表面に Fr を引き出す。特に、この表面電離イオン源の金標的を融解させて動作させることで、より短時間で高効率 (～30%) の Fr 引き出しに成功した。

(2) レーザー冷却 Fr 源：MOT (図 1 左下) では、原子を冷却・捕獲するためのトラップ光とともに、自然放出等でトラップ光に反応しない準位に落ち込んだ原子を再び冷却サイクルに戻すためのリポンプ光が必要となる^(3,4)。このレーザー冷却サイクルを閉じるため、トラップ光とリポンプ光の 2 本のレーザー光の周波数を参照し、安定化する必要があるが、安定原子と違って RI では、蒸気セルを用いた飽和吸収分光等による周波数安定化を行うことができない。今回周波数オフセットロックによるリポンプ光の周波数安定化を行った。Fr のトラップ光とリポンプ光の周波数差は 46.1 GHz である。そこで 4.6 GHz の RF を EOM に入力し、トラップ光をその EOM に通して 10 次のサイドバンドを発生させ、トラップ周波数に対して 46 GHz 離れた周波数 (ν_{10}) を発生させた。 ν_{10} とリポンプ光の周波数差はおおよそ 0.1 GHz 程度になり、2 本のレーザー光の周波数差 46.1 GHz をビート信号としてモニターする。この 0.1 GHz のビート信号を自己遅延ホモダイン検出により検出し、トラップ光源にフィードバックすることで、リポンプ光の周波数が変動してもトラップ光の周波数が自動的に追従し、2 本のレーザー光の周波数を同時に掃引できる。この手法は安定同位体が存在しない原子を MOT で捕獲するために有効である。

(3) **EDM 測定装置**: MOT は勾配磁場と光との組み合わせで向心力を持たせるため、偽 EDM 信号の要因である磁場変動が生じ測定には不向きである。そこで光双極子トラップ (ODT) と光の定在波で形成される格子ポテンシャルにトラップする光格子 (OL) が重要となる。OL は光の波長程度の格子間隔をもつため、原子衝突が抑制され相互作用時間が長くなる。今回、高強度ファイバーレーザーを導入し、ODT/OL の形成を Rb で確認した。また単原子トラップにより寿命を測定し、隣接原子の擾乱がない OL の場合、10 秒以上のトラップ寿命が達成可能なことを示した (図 1 上左図)。原子に高電場を印加する電極開発も予定通り進み、50kV/cm 電場中での MOT Rb 原子のシュタルクシフト観測に成功した。さらに、環境磁場変動によるゼーマンシフト、トラップ光の変動電場から生じる AC シュタルク効果 (光ベクトルシフト) など、偽 EDM 信号の大きな要因となる効果をモニターし EDM を高精度に決定するため、国際的にも初めての挑戦となる 2 種原子 (^{85}Rb , ^{87}Rb) 同時トラップによる共存磁力計の開発を行う (図 2 参照)。

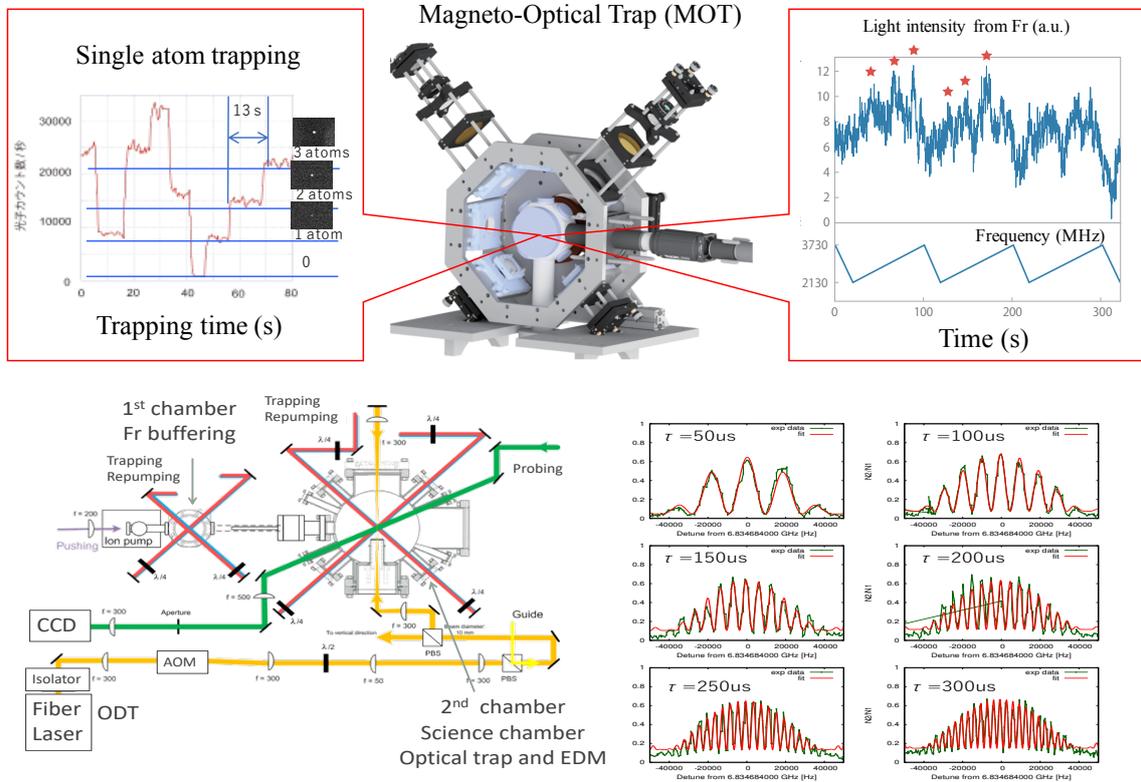


図 1 上中央は、磁気光学トラップ装置 (MOT) を示す。上左のグラフは、一原子トラップを示しており、10 秒以上のトラップ時間を実現した。右上図は Fr のトラップを示す。右下の図は、原子干渉計によるラムゼー共鳴の図を示しており、相互作用時間が長くなるとともに、測定分解能が高くなることを確認している。

4. 研究成果

本事業により、提案時の目標を以下のとおり全て達成した。特に、EDM 測定の系統誤差の主要な要因である磁場変動と外場によるエネルギーシフトを抑制するための 2 種原子共存磁力計の開発は世界に先駆けた実現であり、この磁力計の実装により、現状では系統誤差で限界があった電子 EDM 測定精度 $\sim 10^{-27}$ ecm を向上させ、系統誤差を 10^{-30} ecm まで抑制することが可能となった。

(1) **レーザー冷却 Fr 源の実現** (2, 4, 6, 8, 9) : Fr には安定同位体が存在しないため、飽和吸収分光によりガラスセル中のヨウ素分子の超微細構造準位を観測し、それをレーザー光の周波数安定化の信号として用いた。ヨウ素分子には広い波長範囲にわたって豊富な回転-振動準位が存在し、また電気四重極能率があるため超微細構造が存在する。Fr の共鳴遷移 718. 2164 nm 付近にもヨウ素の回転-振動準位が存在し、その信号の観測を行った。迷光等からのバックグラウンドを差し引くことでトラップ Fr の観測、 10^3 個以下の蓄積を確認した。表面電離イオン源よりイオンとして引き出された Fr は、電子を再結合させて中性 Fr 原子に変換するため中性化装置内のイットリウム標的表面上で停止される。図 1 の右上のグラフでは、イットリウム標的で一定時間 Fr を停止・蓄積した後、MOT の磁場を印加した状態で、標的を加熱し Fr 原子を MOT のガラスセル内に導入することで、MOT 中のトラップ Fr 原子数が増大していることが観測される。国内で初めて、冷却 Fr 源の安定生成技術を実現し、RI 生成・レーザー冷却・トラップ技術を確認した。

(2) EDM 測定装置の開発^(10, 11, 12): EDMは電場と結合して、原子の励起準位に微小な周波数シフトを生じる。この変位を高精度で測定するために、原子干渉計を用いた高分解能分光装置を開発した。スピン偏極した原子に対してRFパルスを照射し、外場と垂直な平面内でスピン歳差させ、再度RFパルスを照射して偏極分布を測定する。照射RFを共鳴周波数から離調させることで干渉パターンが生じ、そのパターン幅が自由歳差させる相互作用時間に反比例して狭くなり周波数分解能が高くなる。今回、冷却原子系に対して相互作用時間300usまで測定し、 $\sim 10^2$ Hz (図1の右下のグラフ)の分解能を達成した。光格子は10秒程度の相互作用時間を達成できるので、EDM測定精度に必要な分解能 \sim mHzは着実に実現できる。さらに、Frと、共存磁力計として用いる複数の原子(Rb/Cs等)を共存トラップし、かつ、原子間の相互作用が影響しないよう、光格子技術を実現し、同時に、光格子同様、周りの原子との衝突や擾乱の影響がない単一原子トラップの捕獲寿命測定により、EDM測定に必要な10秒以上の寿命を実現することを確認した。

(3) 2種原子共存磁力計の原理実証^(1, 2): 光格子に捕獲されている原子は、高強度レーザー(外場 \sim 電場・磁場)の影響を受け、磁場によるエネルギー変位(ゼーマンシフト)、光によるベクトル光シフト、そしてEDMによるエネルギー変位の3種類の変位を生じる。今回開発した2種原子共存磁力計は、Fr原子とともに、EDMが無視できる2種の原子: $^{85}\text{Rb}/^{87}\text{Rb}$ を共存トラップし、周波数測定を行うことで、磁場の時間変化と、ベクトル光シフトを精密に測定する技術を国際的に初めて確立し、主要な系統誤差を抑制できることを確認した。

以上、提案時の目標は、全て達成し、2種原子を用いた共存磁力計の開発・実現により、主要な系統誤差をオンラインで測定・補正する手法に見通しをたて、当初目標の 10^{-29} ecmを一桁超えて、 10^{-30} ecmのEDM測定精度を実現可能にした。また、EDM探索のための光格子重元素干渉計の開発を進めた若手が、2015年に第32回・井上科学振興財団・井上研究奨励賞を受賞、2016年KEK第6回測定器開発優秀修士論文賞を受賞、2018年に東北大学・青葉理学振興会・黒田チカ賞等、総計6件を受賞した。さらに、この基盤研究(S)で開発を行った実験装置を用いて、中高生対象に、JSPSひらめきときめきサイエンス「加速キッチン」を行い、2018年度の優良実施課題として評価され、JSPSのホームページで紹介されるとともに、若手の人材育成を進めた。

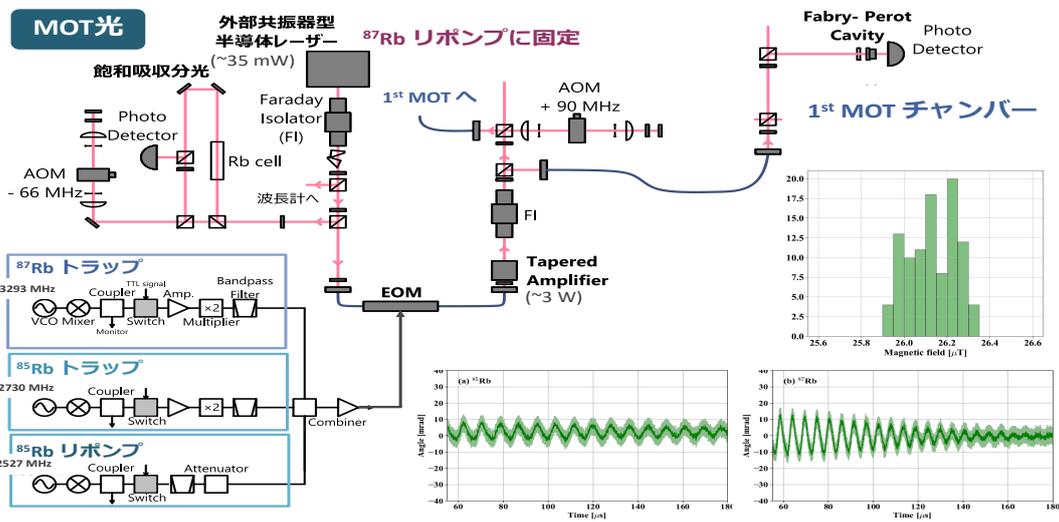


図2 2種原子共存磁力計の光学系実験装置図。右図は磁場測定のRbスピン歳差周期測定結果。このデータから右中央のグラフにあるように磁場測定精度を評価し、0.1uTの精度を確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 26 件)

- ① Effective multiple sideband generation using an electro-optic modulator for a multiple isotope magneto-optical trap A. Uchiyama, K. Harada, K. Sakamoto, U. Dammalapati, T. Inoue, M. Itoh, S. Ito, H. Kawamura, K. S. Tanaka, R. Yoshioka, Y. Sakemi, Review of Scientific Instruments 89(2018) 123111, <https://doi.org/10.1063/1.5054748> 査読あり
- ② 冷却原子を用いた電子の電気双極子能率の探索, 酒見泰寛, 光学 47 (2018) 301 査読あり
- ③ Parity nonconserving interaction induced light shifts in the $7S_{1/2} - 6D_{3/2}$ transition of the ultracold ^{210}Fr atoms to probe new physics beyond the standard model T. Aoki, Y. Torii, B. K. Sahoo, B. P. Das, K. Harada, T. Hayamizu, K. Sakamoto, H. Kawamura, T. Inoue, A. Uchiyama, S. Ito, R. Yoshioka, K. S. Tanaka, M. Itoh, A. Hatakeyama, and Y. Sakemi, Appl. Phys. B 123(2017) 120, DOI: 10.1007/s00340-017-6673-3 査読あり
- ④ Magic and tune-out wavelengths for atomic francium, U. Dammalapati, K. Harada, and Y. Sakemi Phys. Rev. A 93 (2016) 043407 査読あり

- ⑤ Enhanced spin-dependent parity-nonconservation effect in the $7s2S1/2 \rightarrow 6d2D5/2$ transition in Fr: A possibility for unambiguous detection of the nuclear anapole moment B. K. Sahoo, T. Aoki, B. P. Das, Y. Sakemi Phys. Rev. A93 (2016) no. 3, 032520(2016-03-30)DOI: 10.1103/PhysRevA.93.032520 査読あり
- ⑥ Laser frequency locking with 46 GHz offset using an electro-optic modulator for magneto-optical trapping of francium atoms K. Harada, S. Ando, Takahiro Aoki, Takatoshi Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, T. Hayamizu, K. Imai, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, S. Ito, K. Kato, H. Kawamura, T. Murakami, H. S. Nataraj, K. Sakamoto, T. Sato, Y. Shimizu, A. Uchiyama, T. Wakasa, H. P. Yoshida, and Y. Sakemi, Appl. Opt. 55(2016) 1164-1169 <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-55-5-1164> 査読あり
- ⑦ Correlation Trends in the Hyperfine Structures of 210, 212Fr B. K. Sahoo, D. K. Nandy, B. P. Das, Y. Sakemi Phys. Rev. A91 (2015) no. 4, 042507(2015-04-21)DOI: 10.1103/PhysRevA.91.042507 査読あり
- ⑧ Transportation of a radioactive ion beam for precise laser-trapping experiments Hirokazu Kawamura, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, K. Kato L. Köhler, K. Sakamoto, A. Uchiyama, Y. Sakemi Rev. Sci. Instrum. 87 (2015) no. 2, 02B921(2015-11-03) DOI: 10.1063/1.4935013 査読あり
- ⑨ Magneto-optical trapping of radioactive atoms for test of the fundamental symmetries H. Kawamura, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, K. Kato L. Köhler, J. Mathis, K. Sakamoto, A. Uchiyama, Y. Sakemi Hyperfine Interact. 236 (2015), 53-58 DOI: 10.1007/s10751-015-1193-1 査読あり
- ⑩ Experimental search for the electron electric dipole moment with laser cooled francium atoms T. Inoue, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Ishikawa, M. Itoh, K. Kato H. Kawamura, A. Uchiyama, T. Aoki, K. Asahi, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, H. S. Nataraj, T. Sato, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida, A. Yoshimi, Y. Sakemi Hyperfine Interact. 231 (2015) no. 1-3, 157-162(2014-12-02)DOI: 10.1007/s10751-014-1100-1 査読あり
- ⑪ Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom Hirokazu Kawamura, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, M. Itoh, K. Kato, T. Kato, H. S. Nataraj, T. Sato, A. Uchiyama, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida, Y. Sakemi EPJ Web Conf. 66 (2014) 05009, DOI: 10.1051/epjconf/20146605009 査読あり
- ⑫ Development of the Measurement System for the Search of an Electric Dipole Moment of the Electron with Laser-Cooled Francium Atoms T. Inoue, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Ishikawa, M. Itoh, K. Kato, T. Kato, H. Kawamura, H. S. Nataraj, T. Sato, A. Uchiyama, T. Aoki, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida, Y. Sakemi EPJ Web Conf. 66 (2014) 05008, DOI: 10.1051/epjconf/20146605008 査読あり

[学会発表] (計 36 件)

- ① 酒見泰寛, 「光格子重元素干渉計による基本対称性の研究」, 理化学研究所「物質階層原理・ヘテロ界面」研究会, 2018 年 (招待講演)
- ② T. Aoki, Parity-nonconserving interaction-induced light shifts in the $7S_{1/2} - 6D_{3/2}$ transition of the ultracold 210Fr atoms to probe new physics beyond the standard model, The 26th International Conference on Atomic Physics (ICAP2018), (Barcelona, Spain, 22-27th July 2018), 26th July 2018
- ③ K. S. Tanaka, Laser trapping of francium for the electron Electric Dipole Moment search, 第 5 回日米物理学会合同核物理分科会, 2018 年, ハワイ (招待講演)
- ④ Yasuhiro Sakemi, Fundamental Physics using cooled heavy elements, LEAPONP2017, Mainz, Germany, 2017 May (招待講演)
- ⑤ Yasuhiro Sakemi, Search for EDM with laser cooled Fr, 理化学研究所 光量子工学研究領域セミナー(2016) (招待講演)
- ⑥ 酒見泰寛, 「レーザー冷却重元素を用いた素粒子物理の展開」 日本原子力機構東海・重イオン科学シンポジウム(2016) (招待講演)
- ⑦ Takeshi Inoue, Search for the electron EDM with laser-cooled Francium atoms 26th International Nuclear Physics Conference (INPC2016) オーストラリア
- ⑧ Takeshi Inoue, Development of the measurement system toward the electron EDM search with laser cooled Fr atoms PSI2016 スイス
- ⑨ 酒見泰寛, 「レーザー冷却 RI による原子核物理研究」放射化学会(2015)東北大学 (招待講演)

〔図書〕(計 1 件)

①「電子の永久電気双極子能率の上限値を更新」, 酒見泰寛, パリティ(丸善出版株式会社)30(2015)

〔その他〕

(1) ホームページ:

・ <http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/index.php?Research%2FEDM> (東大)

・ <https://inst.cyric.tohoku.ac.jp> (東北大)

(2) 平成 30 年度・日本学術振興会・ひらめきときめきサイエンス「加速キッチン～マイクロ流地球にない原子～」を実施し, 優良実施課題として, JSPS のホームページに掲載.

https://www.jsp.go.jp/hirameki/ht30000_jisshi/ht30017jisshi.pdf

(3) 国際ワークショップ「Fundamental Physics Using Atoms: FPUA」を毎年主催: 2014 年・岡山大学, 2015 年・東京未来科学館, 2016 年・理研, 2017 年・名古屋大, 2018 年・沖縄 OIST

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 青木 貴稔

ローマ字氏名: (AOKI, Takatoshi)

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 総合文化研究科

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 30328562

研究分担者氏名: 畠山 温

ローマ字氏名: (HATAKEYAMA, Atsushi)

所属研究機関名: 東京農工大学

部局名: 工学研究科

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 70345073

研究分担者氏名: 田中 香津生

ローマ字氏名: (TANAKA, Kazuo)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 20780860

研究分担者氏名: 伊藤 正俊

ローマ字氏名: (ITOH, Masatoshi)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 30400435

研究分担者氏名: 川村 広和

ローマ字氏名: (KAWAMURA, Hirokazu)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 学際科学フロンティア研究所

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 50586047

研究分担者氏名: 井上 壮志

ローマ字氏名: (INOUE, Takeshi)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 学際科学フロンティア研究所

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 80637009

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 高橋 義朗

ローマ字氏名: (TAKAHASHI, Yoshiro)

研究協力者氏名: 久野 純治

ローマ字氏名: (HISANO, Junji)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。