

令和 3 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18762

研究課題名（和文）レーザー冷却分子干渉計を用いた反物質消失機構解明の新しい研究手法の開拓

研究課題名（英文）Development of an interferometer with laser cooled molecules to study the mechanism of anti-matter disappearance

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：物質・反物質対称性（CP）の破れの起源を探るために、極性分子において、不対電子の永久電気双極子能率（EDM）が、分子内有効電場により、大きく増幅されることに着目し、FrとSrの冷却分子生成とEDM測定技術の開発を進めた。特に、赤外線ヒーターによる非接触加熱方式を用いた表面電離イオン源と、ヨウ素分子と高精度波長計を用いた周波数安定化を行うことで、核融合反応による大強度レーザー冷却Fr源の技術を確立した。さらに、2種類のRb同位体の共存トラップ技術を確立するとともに、Fr-Sr内部の有効電場を相対論的結合クラスター理論により評価することで、Fr-Sr分子EDM測定に向けた基盤技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子内の有効電場が大きい極性分子において、電子EDMが格段に増幅されることを利用し、分子EDM研究が注目されている。しかし分子EDM測定は、ビーム実験のみであり、測定感度は外場との相互作用時間数ミリ秒程度に制限されている。今回、2種類の冷却原子を準備して、それらを会合することで、冷却分子を生成することを目指しており、長い相互作用時間を実現できるため、EDM測定精度の限界を打ち破ることが可能となり、学術的に重要と考えられる。さらに、生成するFr-221のgeneratorであるAc-225は、内包治療薬剤としても注目されており、この大強度Ac製造は社会的にも重要な意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate the origin of matter-antimatter symmetry (CP) violation, we focused on the fact that the permanent electric dipole moment (EDM) of unpaired electrons in the polar molecule is greatly enhanced by the intramolecular effective electric field and its relativistic effect. We performed the developments to realize the cold Fr-Sr molecules for the accurate EDM measurement. In particular, we have established a technique for a high-intensity laser-cooled Fr source by using the nuclear fusion reaction with a surface ionization ion source by a non-contact heating method with an infrared heater to produce Fr and the frequency stabilization with an iodine molecule and a high-precision wavemeter. Furthermore, by establishing a coexistence trapping technique for two types of Rb isotopes and evaluating the effective electric field inside Fr-Sr by relativistic coupled cluster theory, we have established a basic technique for Fr-Sr molecule EDM measurement.

研究分野：原子核物理

キーワード：レーザー冷却分子干渉計 永久電気双極子能率 CP対称性 超対称性

1. 研究開始当初の背景

これまで物質・反物質対称性破れ (CP の破れ) の起源を解明するために、CP を破る観測量である基本粒子の永久電気双極子能率 (EDM) 探索実験が行われてきている。CP の破れが、どのような機構で発現するのか、強い相互作用と電弱相互作用の各々において理解するために、クォーク色電荷 EDM、およびレプトン EDM、そしてそれらの相互作用により生じる CP の破れを、多彩な素粒子、量子多体系において調べる必要がある。EDM は、素粒子標準理論の物理過程から生じるバックグラウンドが極めて小さく、新物理に対する感度が高いと考えられている。そこで、標準理論から予測される EDM の寄与 $\sim 10^{-37} \text{e cm}$ に至る 10 桁、さらに現代物理が対象とすべきエネルギー上限であるプランクスケールまで 15 桁に及ぶ未踏領域を探索する実験技術が必要となっている。LHC では質量 125 GeV のヒッグス粒子発見という重要な結果が得られ、現状では超対称性 (SUSY) 粒子の兆候は観測されず、重い SUSY 粒子が示唆されている。SUSY 粒子等の未知粒子の伝搬により生じる量子補正効果から EDM が発現するが、この EDM 測定では、現在の加速器で到達困難な重い質量領域 ($\sim 10 \text{ TeV}$ 以上) が探索可能である。さらに、カラー電荷を持つ粒子に感度がある LHC 実験とは相補的に、カラー電荷を持たない SUSY 粒子への感度が高い電子 EDM 測定の重要性は高まっている。先行研究では、電子やクォーク・核子を構成要素にもつ量子多体系：原子・分子を対象に、蓄積セルやビーム等を用いて EDM が探索されてきた。EDM の測定精度は、測定粒子にかかる有効電場、スピン偏極保持時間 (相互作用時間)、EDM 増幅度等が大きいほど向上する。現在、この有効電場が大きい量子多体系を見出し、長い相互作用時間を達成できる CP の破れの「高解像度顕微鏡」の実現が注目されている。

2. 研究の目的

EDM は、標準理論を超える模型において、SUSY 粒子をはじめとする未知素粒子が、クォークやレプトン等の素粒子の周りを伝搬することにより生じると考えられ、この微小な量子補正効果の中に、未知素粒子の質量や CP を破る新しい位相パラメータの情報が含まれている。今回、CP の破れの起源を解明するため、「レーザー冷却 RI 分子」(RI: 放射性同位元素) Fr-Sr を用いた次世代 EDM 測定技術を確立する。特に CP の破れが、極性分子等の複合粒子・量子多体系において相対論効果等により増幅されることに着目する。分子は、内部電場や回転、振動励起など、様々な自由度を持っており、複雑な多体系であるが、量子多体系を制御する多彩な自由度を持っているとも考えられる。そこで、重元素・RI 冷却技術と相対論的結合クラスター理論による原子・分子の精密理論計算技術を駆使し、分子内の電子 EDM を増幅させるよう、観測の擾乱となる自由度は全て凍らせるような量子制御技術を確立する。2 種原子の同時トラップ・フェッシュバッハ共鳴による冷却 Fr-Sr 分子生成と EDM 測定を実現するために必要となる基盤技術：大強度レーザー冷却 Fr 源と異種原子共存トラップ技術を確立する (図 1)。

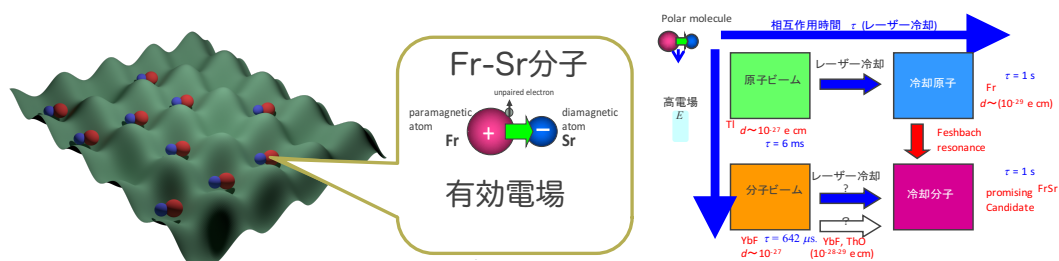


図 1 : 冷却 Fr/Sr 原子を MOT 中に共存トラップして、冷却 Fr-Sr 分子源を生成する。

3. 研究の方法

分子 EDM の測定には、(1) 大強度 Fr 生成と、(2) 異種原子共存トラップの技術確立が必要である。さらに、分子 EDM から、電子 EDM を抽出するためには、(3) 分子内の不對電子にかかる有効電場の高精度計算が必要となる。そこで、以下の 3 つの柱に沿って、研究を進める：

- (1) 大強度 Fr 生成：理化学研究所・仁科加速器センターの AVF サイクロトロンを用いて、2 種類の Fr 同位体における大強度生成技術を確立する。核融合反応による ^{210}Fr 生成と、アクチニウム： ^{225}Ac (^{221}Fr の Generator、寿命約 10 日) 製造による ^{221}Fr 高強度線源の開発を行う。
- (2) 異種原子共存トラップ：Fr と Sr の共存トラップの技術確立を行う。生成 Fr のオンラインレーザー冷却・トラップ技術を実現する。さらに、異種原子トラップとして、ルビジウムの 2 つの同位体 (^{85}Rb , ^{87}Rb) を用いた共存トラップとスピン歳差周期測定技術を確立する。
- (3) Fr-Sr 内の有効電場に関して、相対論的結合クラスター理論による精密計算を行う。

以上、これらの 3 つの研究開発を有機的に連携することで、分子 EDM による電子 EDM 抽出の研究手法の確立を進める。

4. 研究成果

Fr-Sr 分子の EDM 測定に向けて、その基盤となる大強度 Fr 生成、異種原子共存トラップ、分子内有効電場の精密評価を行ない、以下のように、分子 EDM 測定の基盤技術を確立した。

(1) 大強度 Fr 生成 :

Fr-Sr 分子生成には、分子を構成する Fr と Sr の双方の冷却原子が十分に磁気光学トラップ (MOT) 中で捕獲されることが鍵となる。今回、放射性同位元素 (RI)・Fr を構成要素にもつ RI 分子を生成するにあたって、分子生成効率を考慮すると、MOT 中で $\sim 10^8$ 個の Fr 捕獲数を実現する必要がある。そこで、 ^{18}O ビーム (加速エネルギー 110MeV) と ^{197}Au 標的による核融合反応により ^{210}Fr 生成を行うための表面電離イオン源の開発を行った。これは、融点近くまで金標的を加熱することで、Fr を熱拡散により表面に移動させるとともに、表面電離現象により Fr^+ として引き出す。これまでの研究により、加熱用ヒーターの長時間動作が困難であり、また加熱により放出される各種導電性元素の付着により、Fr 引き出し電極のリーク電流が増加するため、長時間の Fr 安定供給が困難であった。そこで、標的加熱を赤外線ヒーターで行う非接触方式に変更し、さらに、電極の構造を 2 分割して、Fr イオンの引き出しとステアリングの機能を兼ね備えるコンパクトな構造とした。その結果、引き出し電極のリーク電流がなく、大強度 Fr の安定供給を可能とする表面電離イオン源の開発に成功した。さらに、一次ビーム強度 $\cdot 2\text{puA}$ において、国内で最大収量 $\cdot \sim 10^7\text{Fr}^+/\text{s}$ を達成した。このことで、Fr-Sr 分子生成に必要な Fr 収量を実現する表面電離イオン源の技術を確立した (図 2)。

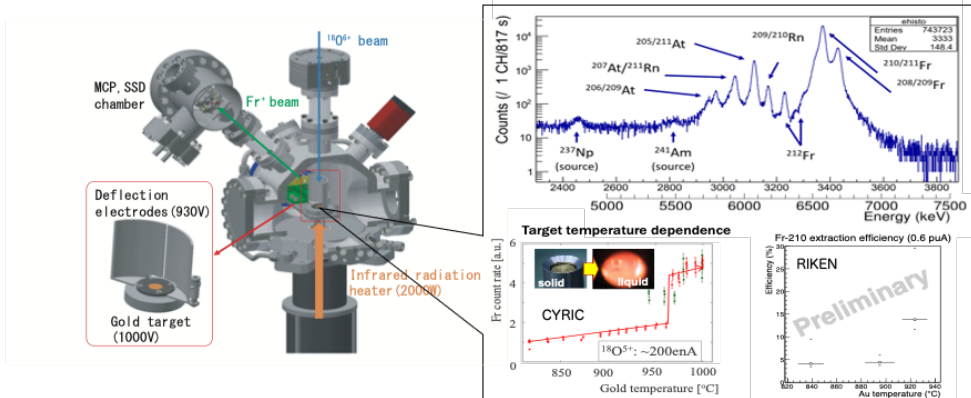


図 2 : 赤外線ヒーター加熱による表面電離イオン源の構造を左に示す。右図は、融合反応により引き出された RI の α 崩壊エネルギースペクトルを示す。 ^{210}Fr を中心に、Fr の同位体が生成されていることが確認される。下左図は CYRIC での Fr 収量の温度依存性を示しており、下右図は、理研での同様のデータを示す。融点近辺で収量の増加が見られる。

さらに、 ^{210}Fr の同位体である ^{221}Fr の高強度線源の開発を進めた。これは、 ^{221}Fr の generator となる ^{225}Ac (寿命 ~ 10 日) を大強度で生成しておき、化学処理を施して高強度 ^{221}Fr 線源を製造し、オフラインでも常時、Fr 供給を行えるようにする新しい実験手法の確立を目指すものである。今回、理研の冷却 Fr 源ビームラインと同じビーム輸送系に、 ^{225}Ac を生成する標的照射装置を設置した。本装置では、 ^{226}Ra ($p, 2n$) ^{225}Ac 反応により ^{225}Ac を生成するが、高放射線の ^{226}Ra 標的はタンタル製の密閉容器に格納され、ビーム照射中、循環水と循環ヘリウムによって冷却される。 ^{226}Ra を模擬した $^{\text{nat}}\text{Ba}$ 標的を用いて、 $^{\text{nat}}\text{Ba}$ (p, xn) 反応で La 同位体を生成・性能評価試験を行い、安全に RI 製造が行えることを確認した。現在、規制庁から Ac 製造の許可がおりるのを待っており、Ac/Fr 大強度製造の準備は万端である

(2) 異種原子共存トラップ :

分子生成を行うために、Fr と Sr 等、複数の異種原子を磁気光学トラップ (MOT) で同時に冷却・トラップする必要がある。今回、限られた Fr 収量のもと、この分子生成技術を実証するために、Fr の MOT の技術確立を行い、同時に Rb の 2 種類の同位体 (^{85}Rb , ^{87}Rb) の共存トラップ技術の開発を進め、分子生成の基盤技術を確立した。Fr-MOT の実験は、東北大・CYRIC にて、これまで整備を進めてきた Fr 生成ビームラインで行なった。MOT は、原子を冷却・捕獲するためのトラップ光と、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。この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、安定化するために、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。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 ($\nu 10$) を発生させた。Fr のトラップ光とリポンプ光の周波数差は 46.1 GHz であり、 $\nu 10$ とリポンプ光の周波数差はおよそ 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 に捕獲するために有効である。その結果、Fr

の MOT を確認し、トラップ個数は、一次ビーム強度に依存して、 10^3 個以下と限定的なものの、理研での大強度一次ビームにより、所定の Fr 蓄積個数達成に見通しをつけた (図 3)。

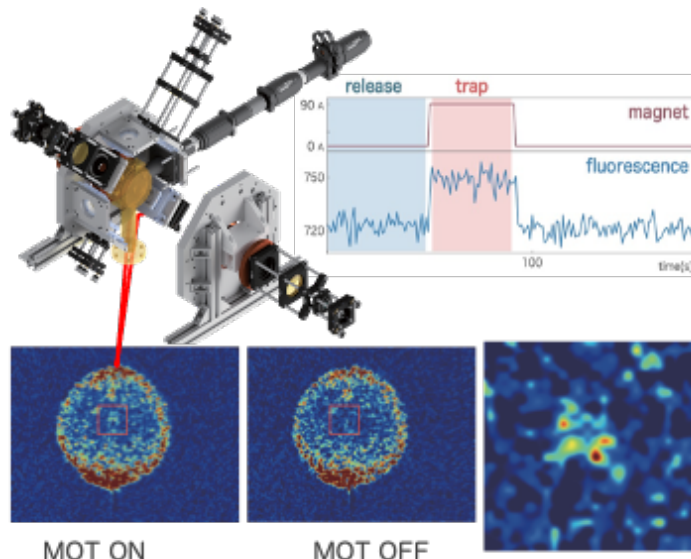


図 3 : 東北大 CYRIC での実験。MOT でトラップされた Fr から蛍光を示す。MOT ON/OFF は、MOT の磁場を ON/OFF を示す。上のプロットに示すように、トラップ原子からの蛍光信号が確認され、Fr のトラップ技術確立を進めた。

また、理研において大強度 Fr-MOT を行うため、光源として、 ^{210}Fr の D2 トラップ光 (波長 718.216 nm、チタンサファイアレーザー: TiS-1)、D2 リポンプ光 (718.137 nm、ECDL: 外部共振器レーザー)、D1 リポンプ光 (817.099 nm、TiS-2)、 ^{87}Rb 原子の D2 トラップ光 (780.246 nm、ECDL)、D2 リポンプ光 (780.234 nm、ECDL)、D1 リポンプ光 (794.969 nm、DFBL) の開発・整備を完了した。さらにこの 6 つの光源を 1 台の高精度波長計を用いて同時に周波数安定化するフィードバック制御機構を開発した。これは、将来的に、2 つの Fr 同位体 (^{210}Fr ・ ^{221}Fr) 共存トラップを実現する上で、Fr の広範囲にまたがる D2 線の同位体シフト周波数の高精度測定が重要となってくる。本開発により、トラップ光源の制御に任意の波長でロック可能な波長計を用い、先述のヨウ素分子の吸収線にロックしたレーザーを用意し、両者間のビートを取ることで同位体シフトを高精度に測定し、共存トラップを可能にするものである。また、異種原子を用いた共存磁力計開発のために、2 種類の Rb 同位体の同時トラップを実現し、そのスピン歳差周期測定も実証した。なお、すでに、Rb-Sr の共存トラップの研究開発は進んでおり、これらの 3 つの技術を組み合わせることで、Fr-Sr 分子生成が可能となる。

(T, Aoki, K. Umezawa, Y. Yamanaka, N. Takemura, Y. Sakemi, Y. Torii, JPSJ81(2012)034401)

(3) 分子内有効電場 :

Fr-Sr のような極性分子を用いて、分子を構成する不対電子の EDM を抽出するには、電子にかかる分子内での有効電場の理論的評価が重要となる。この有効電場が大きいほど、電子 EDM の測定感度は高くなる。本研究では、これまで Fr 原子の電子 EDM 増幅度の高精度評価を進めてきた相対論的結合クラスター理論をベースに、この Fr-Sr における有効電場の評価を行った。その結果、4.2 GV/cm の有効電場が分子内部で実現されることがわかった。これは、電子 EDM の世界最高感度を実現している ThO 分子 (80 GV/cm) には及ばないものの、本研究では、Fr も Sr もレーザー冷却されたトラップ原子を用いて冷却分子を生成・トラップするため、その相互作用時間は、最大、Fr の寿命程度～分を実現できる。ThO は、バッファーガスによる ThO 分子ビームの冷却によりビームを減速させることで、相互作用時間を長くする工夫を進めているが、m 秒のオーダーであり、EDM 測定感度のさらなる改善が困難である。一方で、Fr-Sr と ThO は、電子 EDM と電子・原子核の CP を破る相互作用の相関が異なるため、電子 EDM を分解して抽出するには相補的に重要であることが示された。

これらの 3 つの基盤技術の連携のもと、Fr の収量が 10^8 個以上、MOT 中に蓄積できれば、所定の Fr-Sr 分子 EDM の測定が可能になる。今回、 180 の一次ビーム強度 $\sim 2\text{puA}$ では、Fr イオンの収量は 10^7 個/s を実現しており、MOT 中での蓄積個数は、 10^6 個が可能になっている。一次ビーム強度を 10puA まで増強し、また、MOT へ Fr を導入するチューブ内壁に、Fr が吸着しないような DLC (ダイヤモンドライクコーティング) コーティングを施すことで、1 桁の MOT 蓄積個数増強は確実である。また、MOT に導入する前に、高温 Fr 原子をレーザー冷却・コリメートすることで、MOT でのトラップ効率を向上させることで、所定の 10^8 個のトラップは可能と考えられる。以上の研究開発により、Fr-Sr 分子による電子 EDM 測定の基盤技術を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kastberg A., Aoki T., Sahoo B. K., Sakemi Y., Das B. P.	4. 巻 100
2. 論文標題 Optical-lattice-based method for precise measurements of atomic parity violation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 050101(R)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.100.050101	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 Uchiyama A, Harada K, Inoue T, Kawamura H, Tanaka K S, Itoh M, Aoki T, Hatakeyama A, Takahashi Y, Sakemi Y	4. 巻 1206
2. 論文標題 Development of a Dual Isotope Co-Magnetometer Using Laser Cooled Rubidium Toward Electron Electric Dipole Moment Measurement Using Francium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012008 ~ 012008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1206/1/012008	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 Uchiyama A, Harada K, Inoue T, Kawamura H, Tanaka K S, Itoh M, Aoki T, Hatakeyama A, Takahashi Y, Sakemi Y	4. 巻 1206
2. 論文標題 Development of a Dual Isotope Co-Magnetometer Using Laser Cooled Rubidium Toward Electron Electric Dipole Moment Measurement Using Francium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012008 ~ 012008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1206/1/012008	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 酒見泰寛	4. 巻 47
2. 論文標題 冷却原子を用いた電子の電気双極子能率の探索	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 光学（一般社団法人・日本光学会）	6. 最初と最後の頁 301
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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yasuhiro Sakemi
2. 発表標題 Fundamental physics with cold radioactive atoms
3. 学会等名 APPC14 (14th ASIA-PACIFIC PHYSICS CONFERENCE) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Sakemi
2. 発表標題 Fundamental physics with laser cooled atoms
3. 学会等名 36th Mazurian Lakes Conference on Physics (Probing fundamental laws of nature with exotic nuclei and atoms) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒見泰寛
2. 発表標題 人工RI結晶による基本対称性の研究
3. 学会等名 研究会「超重元素研究の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒見泰寛
2. 発表標題 光格子重元素干渉計による基本対称性の研究
3. 学会等名 理研「物質階層原理&ヘテロ界面」研究報告会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒見泰寛
2. 発表標題 Fundamental physics with laser cooled heavy elements
3. 学会等名 2019重元素化学ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学原子核科学研究センター・基本対称性研究室 https://sites.google.com/cns.s.u-tokyo.ac.jp/fundamental-symmetry-group</p>
--

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	長濱 弘季 (Nagahama Hiroki) (00804072)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (12601)	
研究分担者	大前 宣昭 (Ohmae Noriaki) (60615160)	国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・ 研究員 (82401)	
研究分担者	田中 香津生 (Tanaka Kazuo) (20780860)	東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・ 助教 (11301)	

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2件

国際研究集会 12th Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2020)	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 11th Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2019)	開催年 2019年～2019年

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			
オランダ	フローニンゲン大学			
イタリア	フェラーラ大学			
フランス	ニース大学			