

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05601

研究課題名(和文)光格子重元素干渉計による基本対称性破れの発現機構の解明

研究課題名(英文) Study for the violation mechanism of fundamental symmetry using the cold atom/molecular interferometer with 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) 154,200,000円

研究成果の概要(和文)：物質・反物質対称性(CP対称性)の破れの起源を探るため、未知素粒子の伝搬により発現するCP対称性を破る観測量・電気双極子能率(EDM)の新しい量子計測手法を開発した。電子EDM増幅度が原子系で最大となる放射性同位元素(RI)・フランシウム(Fr)を対象に、核反応とレーザー冷却技術を駆使した光格子原子干渉計を開発し、電子EDM測定感度 $10^{-29}$  ecmを実現する技術に見通しをつけた。さらに量子もつれの状態を用いたEDM量子計測技術により、 $10^{-31}$  cmの精度を得ることを示し、超対称性粒子をはじめとする10TeVを超える重い未知素粒子の質量階層構造を調べる次世代精密基礎物理の方法を開拓した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙太古の歴史の中で、どのように反物質が消失していったか、その起源を探るために、量子補正効果として発現する極めて微小な物質・反物質対称性の破れのシグナル(EDM)を増幅して超精密測定する新しい量子計測手法を編み出した。この光格子原子干渉計と呼ばれる量子センサーは、EDMを高精度で測定すると同時に、偽EDM信号の要因となる環境磁場変動を超高精度で測定できるため、脳の磁気センサー(脳磁計)として、脳神経医学への応用展開も可能である。

研究成果の概要(英文)：To explore the origin of the violation of the matter-antimatter symmetry (CP symmetry), a new quantum measurement method was developed to measure the permanent electric dipole moment (EDM). An optical lattice atomic interferometer was developed to search for the radioactive isotope heavy element francium (Fr), which has the maximum electron EDM enhancement factor in atomic systems, using nuclear reactions and laser cooling techniques, with the EDM measurement sensitivity of  $10^{-29}$  ecm. Furthermore, by using the state of quantum entanglement, a method for EDM quantum sensing was demonstrated to achieve an accuracy of  $10^{-31}$  cm, paving the way for investigating the mass hierarchy structure of heavy unknown particles exceeding 10 TeV, including supersymmetric particles, in the next-generation precision fundamental physics.

研究分野：実験核物理

キーワード：基本対称性 電気双極子能率 バリオン生成 光格子重元素干渉計 レーザー冷却分子

1. 研究開始当初の背景

原子が空間に孤立しておかれた状態は、量子力学の草創期以来、物理学の基本法則を試す理想的な実験場の一つであり続けている。また、レーザーが出現して以来、様々な冷却・トラップ技術と組み合わせて、超高精度の量子計測が可能になってきた。その背景をふまえ、原子系における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、重元素では相対論効果や原子核の変形効果により、電子や核子の EDM が格段に増幅されることに着目し、これらを観測する手法の一つとして、レーザー冷却原子を用いた超精密量子計測を検討し、光格子に、EDM が格段に増幅される第 7 周期の重元素・放射性同位元素をトラップし、素粒子標準理論を超える新物理探索を目指した超高感度量子センサーを実現することを着想した (図 1 参照)。さらに、重い質量領域に存在する暗黒物質に対して、標準理論を超える考え方の一つである超対称性模型 (Split SUSY 等) では、未知素粒子の質量は TeV スケールと示唆されており、電弱相互作用をする暗黒物質が導く EDM の精密探査が注視されている (arXiv:2203.08103[hep-ph])。電弱バリオン数生成のシナリオでは、電弱対称性の破れが一次相転移で、かつ、CP 対称性の破れが十分大きければバリオン数が生成されるが、EDM はこの CP 対称性の破れの大きさに制限を与える。現在、EDM 上限値 $\sim 10^{-29}$ ecm を考慮すると、摂動的に定義されている電弱バリオン数生成の考え方は厳しくなっており、電子 EDM を一桁向上させることで、バリオン数生成の起源に関する知見を得る事が注視されている (Phys.Lett.B755(2016)491-497)。

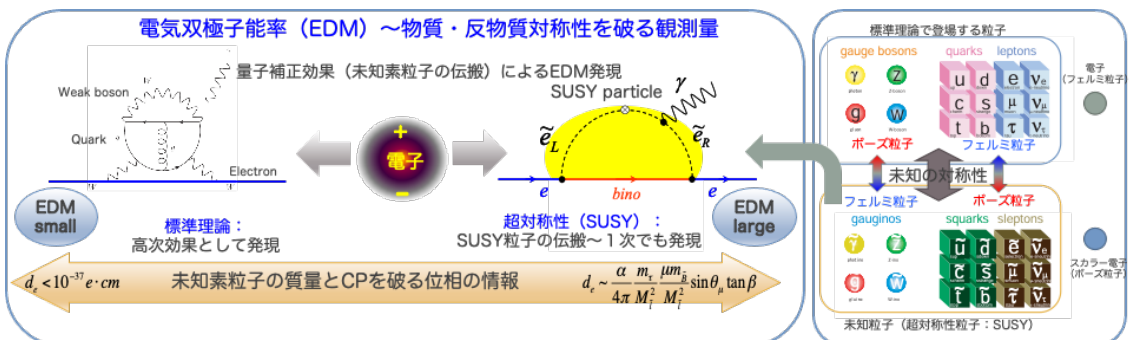


図 1 : 標準理論と超対称性理論による EDM の寄与を示す。標準理論では、EDM は高次効果で発現するため、その値は極めて小さく、EDM は新物理探索の魅力的なプローブとなっている。

2. 研究の目的

宇宙進化の過程で破れてきた CP 対称性は、K・B 中間子の崩壊により観測され、その現象は小林・益川理論で理解され、素粒子標準理論 (SM) として発展した。しかし反物質消失機構は十分には説明できず、ゲージ結合定数の統一や暗黒物質の素粒子的実体を解決する根源的な枠組みが必要となっている。その候補の一つである超対称性理論では、各素粒子と統計性が異なる相棒粒子 (SUSY 粒子) の存在が示唆される。素粒子の周りに SUSY 粒子が伝搬すると、そのスピン軸方向に正負の電荷分布の偏りが生じ、量子補正効果として電気双極子能率 (EDM) が発現する。本研究では、量子情報・周波数標準等でも研究が進む「光格子」を駆使し、レーザー冷却した Fr を一原子ずつ、格子状のポテンシャルセルに閉じ込め、原子間の衝突を抑制し、スピン減偏極を抑え、測定精度向上の鍵となる外場との相互作用時間を長くする工夫を施し、 $10^{-29}$ ecm の測定精度を実現する技術を確認する。特に重い原子系においては、相対論効果により電子 EDM が大きく増幅され、相対論的結合クラスター理論による計算では、原子量最大のアルカリ原子・放射性同位元素・フランシウム ( $^{210}\text{Fr}$ ) では、800 倍近く電子 EDM が増幅されることを見出した。また Fr の同位体である  $^{221}\text{Fr}$  のような 8 重極変形が著しい極端な構造をもつ原子核では、核力の CP 非保存成分から生じる原子核 EDM (シッフモーメント) が増幅され、クォークの色電荷 EDM の抽出が可能である。この 2 種類の同位体 ( $^{210}\text{Fr}/^{221}\text{Fr}$ ) を対象に、加速器・放射化学・量子エレクトロニクス技術を連携し CP の破れの起源を高感度で探る (図 2 参照)。

3. 研究の方法

本研究では、重元素 Fr の 2 つの同位体： $^{210}\text{Fr}$  と  $^{221}\text{Fr}$  を対象に、光格子干渉計による EDM 精密量子計測技術 (EDM 測定精度 $\sim 10^{-29}$ ecm 以下) を確立する。 $^{210}\text{Fr}$  は、電子 EDM に感度が高い原子であり、 $^{221}\text{Fr}$  は中性子数の増加に伴い原子核の 8 重極変形効果が大きくなり、原子核 EDM (クォーク色電荷 EDM) の感度が高くなる。 $^{210}\text{Fr}$  は 3 分程度の寿命により、加速器を用いた融合反応によるオンライン Fr 生成・レーザー冷却技術の確立が必須となり、 $^{221}\text{Fr}$  は、その generator となる  $^{225}\text{Ac}$  が 10 日ほどの寿命をもつため、オフラインでのテーブルトップ実験が可能となる。また、 $^{221}\text{Fr}$  を用いて卓上での Fr-Sr 分子生成を実現できる。そこで、これらの中核となる以下の装置 ((1)大強度 Fr ビームライン、(2)レーザー冷却 Fr 源、(3)光格子干渉計) を開発し (図 2 に装置構造を示す)、冷却重元素を用いた新しい EDM 測定技術を実証する。

(1) 大強度 Fr ビームラインの開発 :

$^{210}\text{Fr}$  は、 $^{18}\text{O}$  ビームと  $^{197}\text{Au}$  ターゲットによる核融合反応を用いて生成する。理研では、大強度一次ビーム ( $^{18}\text{O}$ : 100MeV: 2pA 以上) の供給が可能であり、国内最高強度を達成できる。標的との電氣的接触がない加熱方法として、赤外線ヒーターを用いた表面電離イオン源を開発し、長期的に大強度 Fr イオンを供給できるビームラインを構築する。また  $^{221}\text{Fr}$  の製造には、 $^{226}\text{Ra}$  (p, 2n) 反応後の  $^{226}\text{Ra}$  標的を酸で溶解し、液体クロマトグラフィー法によって、標的や副反応生成物、不純物元素から  $^{221}\text{Fr}$  の generator である  $^{225}\text{Ac}$  を化学精製する。

(2) レーザー冷却 Fr 源の開発：

Fr 光格子実現には、Fr イオンの電子再結合による原子生成効率（現在、1%程度）と、レーザー冷却・トラップする磁気光学トラップ (MOT) 効率（現在、0.1%程度）の増強が鍵である。中性 Fr 原子の引き出し効率を向上させるために、高周波質量分析装置を開発・導入し、高純度 Fr ビームを電子再結合標的 (イットリウム・Y) 表面に局所的に集積させ、効率よく Fr 原子を引き出す方法を開発する。磁気光学トラップ装置 (MOT) の内壁、そして Y 標的から MOT までの輸送経路内壁に、Fr が吸着しないようなコーティングを開発し、トラップ効率を向上させる。

(3) 光格子干渉計の開発：

光格子では、原子同士はレーザー光の波長程度離れて存在するため、原子衝突によるスピン減偏極は抑制され、測定精度を支配するスピン偏極保持時間を伸ばし、EDM 測定感度  $10^{-29-30}\text{ecm}$  を実現する。しかし、原子には EDM によるエネルギーシフトの他に、環境磁場変動や光格子の高強度電磁場によるゼーマンシフトとベクトル光シフトの2つの寄与が生じる。本研究では、 $^{85}\text{Rb}$  と  $^{87}\text{Rb}$  を Fr とともに光格子中に共存トラップし、この2種 Rb のスピン歳差周期を同時に測定して、3種のエネルギーシフトを高精度に抽出する高感度共存磁力計を開発する。この技術を展開しフェッシュバハ共鳴による光会合技術を用いて、Fr-Sr 分子 EDM 測定技術を確立する。以上の3つの装置開発を行い、光格子磁力計の実装と総合運転を行い、相対論的結合クラスター理論による電子 EDM 増幅度と密度汎関数理論による極性分子有効電場の高精度計算を行う。実験データの解析を進め、超対称性粒子の質量階層構造等の議論を深める。

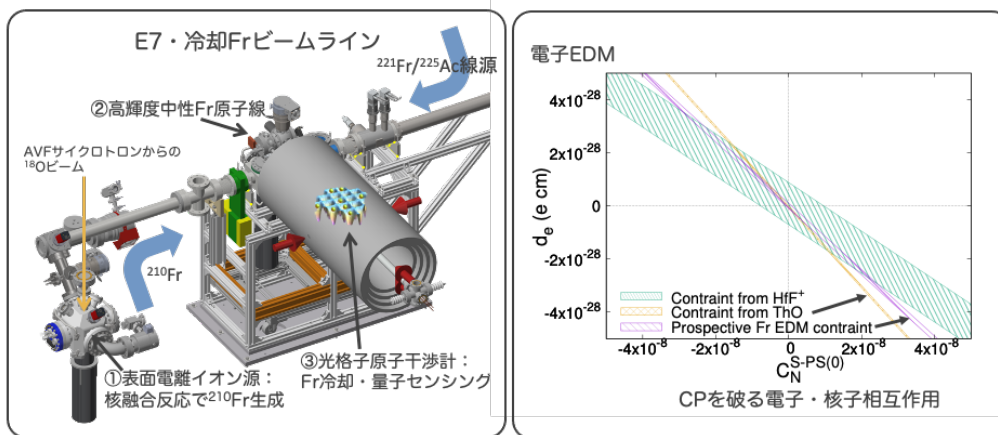


図2： 左はレーザー冷却 Fr ビームライン。右は、相対論的結合クラスター理論による、Fr を含む様々な EDM 感度を示す。EDM 増幅度の効果により Fr の精度が高く、EDM と CP を破る相互作用に関して、他粒子系とは異なる相関を示す。

4. 研究成果

(1) 本研究課題による研究成果

本研究により、レーザー冷却 RI を用いた次世代 EDM 探索技術を開発し、目標である電子 EDM 測定感度  $\sim 10^{-29}\text{ecm}$  を実現する技術を確立した。さらに、量子もつれの状態を用いた EDM 量子計測技術により、 $10^{-31}\text{cm}$  の精度を得ることを示し、本計画の目標を超えることを示した。

中間評価では、磁気光学トラップから開放された冷却原子集団のラムゼー共鳴による EDM 測定手法により、相互作用時間が短く ( $\sim 10$  ミリ秒程度)、測定精度は  $\sim 10^{-27}\text{ecm}$  と評価された。その後、下記に示すように、長時間の相互作用時間 ( $\sim 1$  秒程度) を実現する光格子形成のための高強度レーザー光源の開発に成功した。この実現により EDM 測定精度を一桁向上させ、 $10^{-28}\text{ecm}$  の探索技術を開発した。今後、放射線管理によるビーム強度や Ac 線量の取り扱い数量の制限を増強することで、当初目標の  $10^{-29}\text{ecm}$  達成が確実となる。さらに、偽 EDM 信号となる系統誤差の支配的な要因であるゼーマンシフトと光ベクトルシフトに関して、Fr とともに、電子 EDM の寄与がゼロとみなせる軽いアルカリ原子: Rb/Cs を光格子中に同時にトラップし、それらのスピン歳差周期を同時に測定する共存磁力計の開発を行った。

以下に各研究開発項目の達成状況を報告する。

① 大強度 Fr ビームラインの建設：



理研・仁科加速器科学研究センターにおいて、FR 生成用表面電離イオン源の開発を進め、国内最大収量の Fr 生成 ( $\sim 10^7 \text{Fr}^+/\text{s}$ ) に成功し、世界最高水準の Fr 引出し効率 ( $\sim 20\%$ ) を実現した。特に、表面電離による Fr 引き出し効率を向上させるための標的加熱方法として、標的と電氣的・熱的接触を行わずに、赤外線ヒーターと一次ビームによる非接触加熱による温度制御を実現し、放電やリーク電流増加による引出し効率悪化が全くない  $^{210}\text{Fr}$  ビーム ( $\sim 10^7$  個/s) の長期安定供給に成功した。さらに、高温金標的表面から放出される K, Ca 等の不純物を除去し、高純度の Fr ビームを実現するため、高周波質量分析装置の開発を行なった。また、Fr 収量のさらなる増強を目指し、一次ビーム  $^{18}\text{O}$  の強度を増強するため、ECR イオン源の高度化を進め、プラズマチャンバー内に導入するサポートガスの流量最適化によりイオン源出口で  $3000\text{euA}$  を達成し、 $5\mu\text{A}$  の一次ビーム強度と Fr 収量  $\sim 10^8 \text{Fr}^+/\text{s}$  に見通しをたてた。

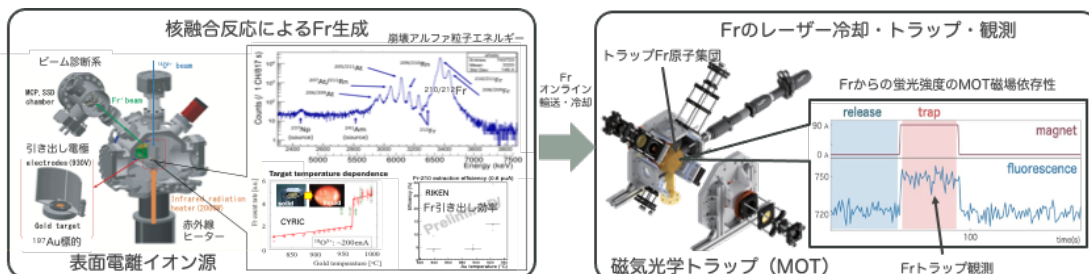


図3： 左図は、新規開発した表面電離イオン源による高強度 Fr 生成を示す。高温にターゲットを加熱することで、Fr 引き出し効率 (下グラフ) を向上させている。この Fr を右図の磁気光学トラップ (MOT) で捕獲・Fr からの蛍光を確認しており、冷却 Fr 源の技術は確立した。

② 冷却 Fr 源と共存磁力計の開発：

Fr 冷却と共存磁力計に必要なレーザー光源、周波数安定化等の精密光学系を開発した。光源として、 $^{210}\text{Fr}$  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)、 $^{87}\text{Rb}$  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) を開発した。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。同位体 ( $^{210}\text{Fr}$ ・ $^{221}\text{Fr}$ ) 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である。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、本研究グループで技術確立した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した。また、フレキシブルなステンレス管に7本の偏波保持ファイバーを取めた多芯構造をもつ光ファイバーを製作し、レーザー分光室から Fr ビームラインまで、400m の長距離伝送を実現した。さらに、EDM 系統誤差の主要な要因となる、磁場変動によるゼーマンシフト、光格子中におけるベクトル光シフトを直接測定するため、Fr と共に二種類の原子を光格子中に捕獲し、同時にスピン歳差周期の測定からエネルギーシフトを高精度モニターする共存磁力計を開発した。その結果、磁場測定精度は  $100 \text{ nT}$  以下を実現した。さらに、Cs 原子のトラップも実現し、Rb/Cs の異種原子共存磁力計により、さらなる精度向上を実現している。また、光格子中に Fr 原子を数秒間にわたって保持するために、1064 nm の CW レーザー光を 10 W 以上まで増幅する Yb 添加ファイバー増幅器 (YDFA) を開発した。放射線環境下においては YDFA を構成する半導体レーザー光源や光ファイバーが損傷を受けるリスクがあるため、容易に入手可能な部品を組み合わせ、ファイバー融着技術を駆使して自作し、放射線損傷による破損の際にも自前で普及できる構造とした。また、ラムゼー共鳴による EDM 測定原理実証を行い、相互作用時間に依存して、測定感度が向上することを確認するとともに、本計画での装置構成では、 $10^{-28} \text{ ecm}$  の測定精度と評価した。

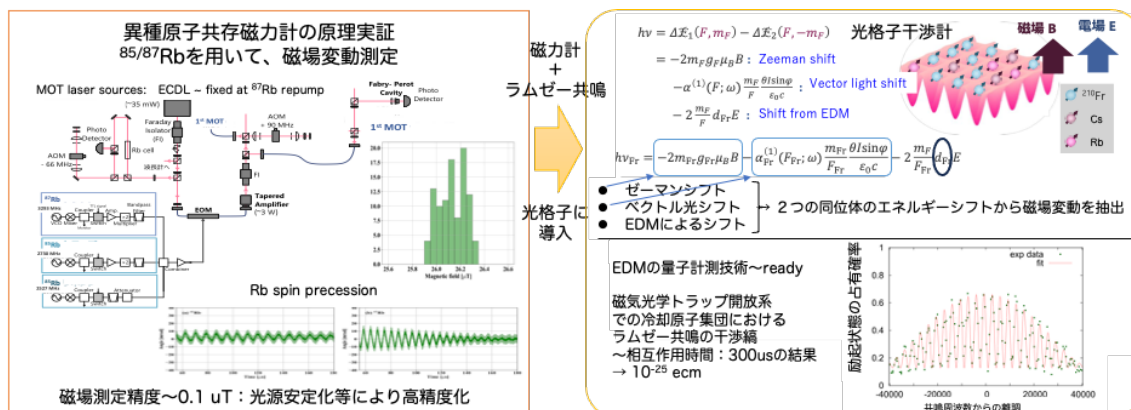


図4： 左は、Rb 同位体での磁力計による磁場測定原理実証の結果。右は、本計画で開発した共存磁力計の原理と、下図はラムゼー共鳴による EDM 量子計測の原理実証を示す。

③ 冷却 Fr-Sr 分子生成の技術開発：

これまで、Fr に化学的性質が類似する Rb を用いて、Rb と Sr を MOT 中で共存トラップを実現した。さらに冷却分子分光のための光源開発を行い、共振器に安定化したレーザー光との差周波数をオフセットロックすることに成功した。また、量子化学計算により、LiSr 分子の EDM 測定の有効電場を求め論文にまとめた。EDM 実験で重要な電場を精密に評価するために、リドベルグ原子を用いた電場の量子センシングに成功した。EDM 測定の系統誤差評価で重要となる Mx 磁力計を開発し、1 nT レベルでの磁場測定に成功した。

④  $^{221}\text{Fr}$  の generator 線源開発：

クォーク色電荷 EDM に感度が高い  $^{221}\text{Fr}$  の generator となるアクチニウム： $^{225}\text{Ac}$  (半減期 $\sim$ 10 日) の高純度高強度線源の開発を進めた。 $^{225}\text{Ac}$  は、理研の AVF サイクロトロンを用いて陽子 (19 MeV) を放射性  $^{226}\text{Ra}$  標的に照射し、 $^{226}\text{Ra}(p, 2n)^{225}\text{Ac}$  反応によって製造する。これまで、AVF サイクロトロンの垂直照射ビームラインを整備し、 $^{226}\text{Ra}$  標的照射装置を開発した。本装置では、高放射線の  $^{226}\text{Ra}$  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。さらに  $^{226}\text{Ra}(p, xn)$  反応で Ac 同位体を生成し、Ac の高強度製造を実証した。さらに、東北大学・金属材料研究所・アルファ放射体実験室において、Th からの Ac 精製分離技術を確立し、生成した硝酸  $^{225}\text{Ac}$  溶液の分子電着法により、最大 5 MBq の高強度・高純度 Ac/Fr 線源の制作技術を確立した。この線源を用いて、低速中性 Fr 原子ビーム生成に成功し、グローブボックス内に配置できるコンパクトなレーザー冷却・トラップ装置を開発し、オフラインでの  $^{221}\text{Fr}$ -EDM 実験を実現した。この装置による EDM 測定精度は、グローブボックスが設置されているホットラボでの Ac 使用数量 $\sim$ 5MBq で制限されているが、今後、200MBq 程度の取り扱い数量の変更申請が認められることで、 $^{221}\text{Fr}$  に関しても $\sim 10^{-29}$  ecm の精度を達成することができる。

⑤ 電子 EDM と CP を破る相互作用の抽出に関する理論解析：

実験で観測される Fr 原子の EDM は、電子 EDM： $d_e$  と CP を破る電子・核子 (クォーク) 間の相互作用： $C_N^{S-PS}$  が主要な寄与となる。これまで相対論効果による電子 EDM の原子系での増幅に関して、相対論的結合クラスター理論による精密波動関数計算の研究を進めてきた。本研究では、この考察をさらに深めて、協力研究者・東工大・B. P. Das 教授とともに、CP を破る相互作用を含めるよう拡張し、また標準理論を超えるモデルとして、two-Higgs doublet model をとりいれ、CP を破る相互作用と電子 EDM の各寄与の相関を評価した。その結果、 $^{210}\text{Fr}$  原子 EDM は、 $D_a=799 d_e + 10.5 \times 10^{-18} C_N^{S-PS}$  ecm と示すことができ、電子 EDM と相互作用の寄与を精度よく抽出する解析手法を確立した。さらに、Fr-EDM と、世界で計画が進む分子 EDM、イオン EDM の相関が、量子多体系の構造により異なることを示し、各 CP を破る寄与を高精度で決定することを示した。これらの研究成果をふまえて、CP の破れとともに、原子系でのパリティの破れに関する増幅度とその系統誤差に関する評価を行なった。

(2) 当初に予見していなかった新たな展開等によって得られた研究成果

本研究により、新物理を高精度で探索する「量子もつれ」状態を用いた新しい量子センシング技術の着想を得て研究が進んだ。また超重元素領域での電子 EDM 増幅度に関する研究を展開した。

① 量子もつれを用いた新しい EDM 量子センシング技術の研究：

2022 年のノーベル賞受賞でも話題になった「量子もつれ・エンタングルメント」状態を用いて、Fr の収量 (N 個) を変えることなく、EDM 測定感度の限界を超えることを着想した。本研究での EDM 測定手法であるラムゼー分光法での測定感度は、通常のトラップ原子では、標準量子限界 ( $N^{-1/2}$ ) で規定されるが、これは、個々のトラップ原子に量子相関がない場合の精度である。そこで、これらのトラップ原子を量子エンタングル状態 (負の相関をもたせる) にすることで、測定精度はハイゼンベルグ限界 ( $N^{-1}$ ) となる。この量子相関の状態を、光共振器を用いた原子スピンスクイーミング技術を利用し、原子間の相互作用を増強することができて、量子エンタングル状態を効率的に実現できることを示した。実際の実験系に関して、数値計算を行い、トラップ個数 $\sim 10^5$ 、相互作用時間 1 秒で、1 日の測定により、標準量子限界では  $10^{-29}$  ecm であるが、ハイゼンベルグ限界では、 $10^{-31}$  ecm と評価され、本研究の当初目標を超えることを示した。

② 超重元素ローレンシウム (Lr) を用いた EDM に関する研究：

重い原子においては、相対論効果により電子 EDM が原子番号の 3 乗に比例して増幅されることが示唆されている。今回、重い原子である第 7 周期の超重元素領域で、かつ、寿命もある程度長く、放射化学分野における先行研究においてイオン化ポテンシャル等の化学的性質が測定されている Lr に着目し、その Lr を構成要素にもつ極性分子における EDM 増幅度を相対論的結合クラスター計算で評価した。その結果、極めて高い電子 EDM 増幅度をもつことを示し、将来的に、加速器ビーム強度の増強していくときに、EDM 探索精度を向上させ、未知素粒子の質量探索領域を拡大していく重要な戦略であることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 3件）

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>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 | 4. 巻<br>-         |
| 2. 論文標題<br>400-m-Long Polarization-Maintaining Fibers for Magneto-Optical Trapping of Francium Atoms   | 5. 発行年<br>2022年   |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim  | 6. 最初と最後の頁<br>1-2 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし  | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Ozawa N., Nagahama H., Sakemi Y.  | 4. 巻<br>94                    |
| 2. 論文標題<br>Francium ion source with novel methods of target heating and beam characterization | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Review of Scientific Instruments  | 6. 最初と最後の頁<br>023306 ~ 023306 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/5.0118754  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Sato Motoki, Yamane Kazeki, Nagahama Hiroki, Ozawa Naoya, Nagase Shintaro, Nakashita Teruhito, Uehara Daisuke, Fukase Mirai, Nakamura Keisuke, Hayamizu Tomohiro, Haba Hiromitsu, Sakemi Yasuhiro, Matsuda Yasuyuki | 4. 巻<br>37          |
| 2. 論文標題<br>Development of Neutralization Apparatus and Francium Source for the Francium Electric Dipole Moment Search   | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>JPS Conf. Proc.   | 6. 最初と最後の頁<br>20605 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.7566/JSPSC.37.020605  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>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<br>2249                  |
| 2. 論文標題<br>Development of a Laser Frequency Stabilization and an Optical Transmission System for the Francium Electric Dipole Moment Search      | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Physics: Conference Series  | 6. 最初と最後の頁<br>012010 ~ 012010 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1088/1742-6596/2249/1/012010   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Tanaka K S, Harada K, Hayamizu T, Kita R, Kono R, Maruta K, Nagahama H, Ozawa N, Sakemi Y, Sugimori R                         | 4. 巻<br>57                    |
| 2. 論文標題<br>An accelerator experiment for junior and senior high school students to improve students' involvement in fundamental physics | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Physics Education   | 6. 最初と最後の頁<br>045013 ~ 045013 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-6552/ac510a  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>青木貴稔 et al.                        | 4. 巻<br>22-043    |
| 2. 論文標題<br>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<br>2022年   |
| 3. 雑誌名<br>ECT (電気学会・電子回路研究会)                 | 6. 最初と最後の頁<br>1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし               | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Mitra R., Prasanna V. S., Ruiz R. F. Garcia, Sato T. K., Abe M., Sakemi Y., Das B. P., Sahoo B. K. | 4. 巻<br>104         |
| 2. 論文標題<br>Towards CP violation studies on superheavy molecules: Theoretical and experimental perspectives   | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review A  | 6. 最初と最後の頁<br>62801 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevA.104.062801  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>Hayamizu Tomohiro, Haba Hiromitsu, Nakamura Keisuke, Aoki Takatoshi, Nagahama Hiroki, Tanaka Kazuo S., Ozawa Naoya, Ohtsuka Miki, Sakemi Yasuhiro | 4. 巻<br>63      |
| 2. 論文標題<br>Development of Ultracold Francium Atomic Sources Towards the Permanent EDM Search  | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>Few-Body Systems  | 6. 最初と最後の頁<br>1 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s00601-021-01710-4  | 査読の有無<br>有      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Tanaka K.S., Dammalapati U., Harada K., Hayamizu T., Itoh M., Kawamura H., Nagahama H., Nakamura K., Ozawa N., Sakemi Y.       | 4. 巻<br>1017                  |
| 2. 論文標題<br>Two-dimensional beam profile monitor for the detection of alpha-emitting radioactive isotope beam                             | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment | 6. 最初と最後の頁<br>165803 ~ 165803 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.nima.2021.165803   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>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<br>35          |
| 2. 論文標題<br>Fundamental Physics with Cooled Radioactive Atoms   | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>JPS Conf. proc.  | 6. 最初と最後の頁<br>11016 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JSPSC.35.011016  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

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

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Sakemi Y., Aoki T., Calabrese R., Haba H., Harada K., Hayamizu T., Ichikawa Y., Jungmann K., Kastberg A., Kotaka Y., Matsuda Y., Matsuo Y., Nagahama H., Nakamura K., Otsuka M., Ozawa N., Tanaka K. S., Uchiyama A., Ueno H., Willmann L. | 4. 巻<br>2319        |
| 2. 論文標題<br>Fundamental physics with cold radioactive atoms   | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>AIP Conference Proceedings   | 6. 最初と最後の頁<br>80020 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0037134  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |



|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Sakemi Yasuhiro, Harada Ken-ichi, Itoh Masatoshi, Ito Saki, Uchiyama Aiko, Inoue Takeshi, Kawamura Hirokazu, Aoki Takatoshi, Hatakeyama Atsushi, Takahashi Yoshio, Hisano Junji | 4. 巻<br>35          |
| 2. 論文標題<br>Fundamental Physics with Cooled Radioactive Atoms  | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>JPS Conference Proceedings  | 6. 最初と最後の頁<br>11016 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JSPSC.35.011016   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Tanaka K.S., Dammalapati U., Harada K., Hayamizu T., Itoh M., Kawamura H., Nagahama H., Nakamura K., Ozawa N., Sakemi Y.       | 4. 巻<br>1017                  |
| 2. 論文標題<br>Two-dimensional beam profile monitor for the detection of alpha-emitting radioactive isotope beam                             | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment | 6. 最初と最後の頁<br>165803 ~ 165803 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.nima.2021.165803   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Aoki T, Sreekantham R, Sahoo B K, Arora Bindiya, Kastberg A, Takamine A, Ueno H, Ichikawa Y, Matsuda Y, Haba H, Sakemi Y et al. | 4. 巻<br>6                     |
| 2. 論文標題<br>Quantum sensing of the electron electric dipole moment using ultracold entangled Fr atoms                                      | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Quantum Science and Technology  | 6. 最初と最後の頁<br>044008 ~ 044008 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/2058-9565/ac1b6a  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|   |                  |
|---|------------------|
| 1. 著者名<br>Hayamizu Tomohiro, Haba Hiromitsu, Nakamura Keisuke, Aoki Takatoshi, Nagahama Hiroki, Tanaka Kazuo S., Ozawa Naoya, Ohtsuka Miki, Sakemi Yasuhiro | 4. 巻<br>63       |
| 2. 論文標題<br>Development of Ultracold Francium Atomic Sources Towards the Permanent EDM Search  | 5. 発行年<br>2021年  |
| 3. 雑誌名<br>Few-Body Systems  | 6. 最初と最後の頁<br>11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s00601-021-01710-4  | 査読の有無<br>有       |
| オープンアクセス<br>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<br>-        |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Mitra R., Prasanna V. S., Ruiz R. F. Garcia, Sato T. K., Abe M., Sakemi Y., Das B. P., Sahoo B. K. | 4. 巻<br>104         |
| 2. 論文標題<br>Towards CP Violation Studies on Superheavy Molecules: Theoretical and Experimental Perspectives   | 5. 発行年<br>2021年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review A  | 6. 最初と最後の頁<br>62801 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevA.104.062801  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Kazuo Tanaka, Kenichi Harada, Tomohiro Hayamizu, Masatoshi Itoh, Hirokazu Kawamura, Hiroki Nagahama, Naoya Ozawa, Yasuhiro Sakemi, Atsuki Terakawa, Aiko Uchiyama | 4. 巻<br>2019          |
| 2. 論文標題<br>Two-dimensional Beam Profile Monitor for Alpha Emitter   | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>IBIC  | 6. 最初と最後の頁<br>355-357 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.18429/JACoW-IBIC2019-TUPP023   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Yasuteru Kotaka, Akira Goto, Kichiji Hatanaka, Nobuaki Imai, Masayuki Kase, Hideshi Muto, Takashi Nagatomo, Takahide Nakagawa, Jun-ichi Ohnishi, Yukimitsu Ohshiro, Yasuhiro Sakemi, Susumu Shimoura, Hidetoshi Yamaguchi, | 4. 巻<br>2019          |
| 2. 論文標題<br>Development of the Calculation Method of Injection Beam Trajectory of RIKEN AVF Cyclotron with 4D Emittance Measured by the Developed Pepper-Pot Emittance Monitor  | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>IBIC   | 6. 最初と最後の頁<br>351-354 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.18429/JACoW-IBIC2019-TUPP022  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Kastberg A., Aoki T., Sahoo B. K., Sakemi Y., Das B. P.                           | 4. 巻<br>100         |
| 2. 論文標題<br>Optical-lattice-based method for precise measurements of atomic parity violation | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review A   | 6. 最初と最後の頁<br>50101 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevA.100.050101                                     | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Uchiyama A, Harada K, Inoue T, Kawamura H, Tanaka K S, Itoh M, Aoki T, Hatakeyama A, Takahashi Y, Sakemi Y                                   | 4. 巻<br>1206                  |
| 2. 論文標題<br>Development of a Dual Isotope Co-Magnetometer Using Laser Cooled Rubidium Toward Electron Electric Dipole Moment Measurement Using Francium | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Physics: Conference Series  | 6. 最初と最後の頁<br>012008 ~ 012008 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1742-6596/1206/1/012008  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

[学会発表] 計26件 (うち招待講演 12件 / うち国際学会 15件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>K.Nakamura, Y.sakemi et al.   |
| 2. 発表標題<br>400-m-Long Polarization-Maintaining Fibers for Magneto-Optical Trapping of Francium Atoms |
| 3. 学会等名<br>The 15th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2022) (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2022年  |

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

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>H.Nagahama et al.  |
| 2. 発表標題<br>Searching for the permanent electric dipole moment using laser cooled francium atoms |
| 3. 学会等名<br>PSI2022 (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>S. Nagase, Y. Sakemi et al.  |
| 2. 発表標題<br>Development of a novel comagnetometer for high precision measurement of the electric dipole moment using laser cooled Fr atoms |
| 3. 学会等名<br>PSI2022 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

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

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小澤直也                           |
| 2. 発表標題<br>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<br>日本物理学会・春季大会                    |
| 4. 発表年<br>2023年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>深瀬実来                                     |
| 2. 発表標題<br>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<br>日本物理学会・春季大会                              |
| 4. 発表年<br>2023年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>上原大祐                                 |
| 2. 発表標題<br>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<br>日本物理学会・春季大会                          |
| 4. 発表年<br>2023年                                 |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K.Nakamura, Y.Sakemi et al.  |
| 2. 発表標題<br>Development of a laser frequency stabilization andnan optical transmission system for the francium electric dipole moment search |
| 3. 学会等名<br>29th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'21) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>N.Ozawa, Y.Sakemi et al.  |
| 2. 発表標題<br>Current status of the electron EDM search using laser-cooled francium atoms             |
| 3. 学会等名<br>13th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2021) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K,Nakamura, Y.Sakemi et al.                    |
| 2. 発表標題<br>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<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会                              |
| 4. 発表年<br>2021年   |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>M.Sato, Y.Sakemi et al.                    |
| 2. 発表標題<br>Search for permanent EDM by using Fr atoms |
| 3. 学会等名<br>SPIN2021 (招待講演) (国際学会)                     |
| 4. 発表年<br>2021年                                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>S.Nagase, Y.Sakemi et al.          |
| 2. 発表標題<br>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<br>第77回日本物理学会年次大会                     |
| 4. 発表年<br>2021年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T.Nakashita, Y.Sakemi et al.   |
| 2. 発表標題<br>フランシウムの電気双極子能率探索に向けた 冷却原子制御系開発 |
| 3. 学会等名<br>第77回日本物理学会年次大会                 |
| 4. 発表年<br>2021年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K.Yamane, Y.Sakemi et al.                          |
| 2. 発表標題<br>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<br>第77回日本物理学会年次大会                                     |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Hayamizu  |
| 2. 発表標題<br>Development of ultracold francium atomic sources towards the permanent EDM search                          |
| 3. 学会等名<br>Yamada Conference LXXII: The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB2020) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小澤直也                              |
| 2. 発表標題<br>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<br>重元素核化学ワークショップ (ELPH研究会 C027)      |
| 4. 発表年<br>2021年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中村圭佑   |
| 2. 発表標題<br>Development of a laser frequency stabilization and an optical transmission system for the francium electric dipole moment search |
| 3. 学会等名<br>29th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'21) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小澤直也  |
| 2. 発表標題<br>Present status of the electron EDM search using laser-cooled francium                   |
| 3. 学会等名<br>13th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2021) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>酒見泰寛  |
| 2. 発表標題<br>Fundamental physics with cold radioactive atoms                   |
| 3. 学会等名<br>APPC14 (14th ASIA-PACIFIC PHYSICS CONFERENCE) マレーシア (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>酒見泰寛   |
| 2. 発表標題<br>Fundamental physics with laser cooled atoms  |
| 3. 学会等名<br>36th Mazurian Lakes Conference on Physics(Probing fundamental laws of nature with exotic nuclei and atoms)、ポーランド (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>羽場宏光   |
| 2. 発表標題<br>ラジオアイソトープの製造と応用 - 新元素の探索からがんの診断・治療まで -                         |
| 3. 学会等名<br>019年度日本アイソトープ協会シンポジウム「PET・イメージング研究の最前線～ライフサイエンスと理工学の融合～ (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>羽場宏光  |
| 2. 発表標題<br>12.RI production - Chemistry of new elements to diagnosis and treatment of cancer |
| 3. 学会等名<br>Tsukuba Conference 2019 (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>羽場宏光  |
| 2. 発表標題<br>Production and Applications of Radioisotopes at RIKEN RI Beam Factory |
| 3. 学会等名<br>SHE Science Symposium、米国（招待講演）（国際学会）                                  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|                              |
|------------------------------|
| 1. 発表者名<br>酒見泰寛              |
| 2. 発表標題<br>レーザー冷却重元素による基礎物理  |
| 3. 学会等名<br>第58回核化学夏の学校（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2019年              |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>田中香津生   |
| 2. 発表標題<br>Two-dimensional beam profile monitor for alpha emitter              |
| 3. 学会等名<br>8th International Beam Instrumentation Conference、スウェーデン、ポスター（国際学会） |
| 4. 発表年<br>2019年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学CNS基本対称性研究室  
<https://sites.google.com/cns.s.u-tokyo.ac.jp/fundamental-symmetry-group>

## 6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                              | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 長濱 弘季<br>(Nagahama Hiroki)<br>(00804072) | 東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教<br><br>(12601)              |    |
| 研究分担者 | 青木 貴稔<br>(Aoki Takatoshi)<br>(30328562)  | 東京大学・大学院総合文化研究科・助教<br><br>(12601)                  |    |
| 研究分担者 | 羽場 宏光<br>(Haba Hiromitsu)<br>(60360624)  | 国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・室長<br><br>(82401)     |    |
| 研究分担者 | 高峰 愛子<br>(Takamine Aiko)<br>(10462699)   | 国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員<br><br>(82401)           |    |
| 研究分担者 | 田中 香津生<br>(Tanaka Kazuo)<br>(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・リサーチフェロー<br><br>(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4件

|   |                    |
|---|--------------------|
| 国際研究集会<br>The 14th international workshop on fundamental physics using atoms (FPUA2022) | 開催年<br>2022年～2022年 |
| 国際研究集会<br>The international workshop on Atomic Parity Violation (APV2022)               | 開催年<br>2022年～2022年 |
| 国際研究集会<br>The 13th international workshop on fundamental physics using atoms (FPUA2021) | 開催年<br>2021年～2021年 |
| 国際研究集会<br>Fundamental Physics using Atoms (FPUA2019)                                    | 開催年<br>2020年～2020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                      |             |  |  |
|---------|------------------------------|-------------|--|--|
| スイス     | チューリッヒ工科大学                   | ポール・シェラー研究所 |  |  |
| カナダ     | ブリティッシュコロンビア大学               |             |  |  |
| インド     | Physical Research Laboratory |             |  |  |
| 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    | ENSI -Caen                   | ニース大学       |  |  |