

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分
平成29年3月10日現在

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

Search for the electric dipole moment with laser cooled
radioactive atoms in the optical lattice

課題番号：26220705

酒見 泰寛 (SAKEMI YASUHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授



研究の概要：物質優勢宇宙の創成機構を探るために、物質・反物質対称性（CP）の破れの機構解明を目指し、「光格子」を用いたレーザー冷却放射性同位元素（RI）による電気双極子能率（EDM）測定技術を確立する。本研究では重元素・フランシウム（ ^{210}Fr ）において電子 EDM が最大に増幅されることに着目し、3次元光格子原子干渉計による測定精度 $\sim 10^{-29}\sim 30\text{ecm}$ の EDM 探索から、標準理論を超える未知粒子の質量階層構造に迫る実験技術を開拓していく。

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核（実験）・素粒子実験・電気双極子能率・レーザー冷却・光格子

1. 研究開始当初の背景

これまで素粒子標準理論（S.M.）が着実に検証されながらも、理論の持つパラメータの多さは不自然であり、反物質消失機構は十分には説明できず、さらに根源的な枠組みが必要となっている。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と考えられる S.M. を越える理論では、一般に CP 非保存の源となる新しい位相角を含む。その候補の一つである超対称性理論（SUSY）では、S.M. における素粒子各々に統計性が異なる相棒粒子（SUSY 粒子）が予測され、大型加速器実験によりこの未知粒子探索が進んでいる。そして、大規模実験と相補的な役割を果たすのが、EDM 探索による超低エネルギー精密量子計測実験である。EDM は SUSY 粒子の質量や新しい CP 位相と相関を持っており、現在の加速器実験で到達困難な重い質量領域を間接的に探索できるため国際的にも注目されている。

2. 研究の目的

本研究は、電子 EDM 増幅度が最大（ ~ 895 倍）で原子量最大のアルカリ原子（RI） $\cdot ^{210}\text{Fr}$ に着目し、量子シミュレーション分野で研究が進む「光格子」に Fr をトラップして、現在の上限值を 2 桁を超える測定精度 $\sim 10^{-29}\text{ecm}$ の光格子 EDM 探索を実施する。未知粒子を真空から「直接」生成する超高エネルギー加速器実験とは異なり、基本粒子の周りに生成・消滅する SUSY 粒子等の伝搬により生じる電荷分布の偏り $\cdot \text{EDM}$ を測定することで、「間接」的に未知粒子の性質を調べる。

3. 研究の方法

EDM と電場が結合することで原子系に生じる微小なエネルギー変位を精密量子計測する原子干渉計の技術を確立する。特に、原子同士をレーザー波長程度に格子状に並べ、原子間で相互作用が働かず相互作用時間を長くするとともに減偏極を抑制する理想的な状態で測定を行う光格子を実現する。重イオンビーム（ ^{18}O ）と金標的の核融合反応により ^{210}Fr を生成し、磁気光学トラップ（MOT）、磁気双極子トラップ（ODT）、光格子（OL）の 3 種類の技術を駆使して、急速に $\sim \mu\text{K}$ 程度までレーザー冷却・トラップし、原子スピンの歳差周期を測定する（図 1）。さらに、相対論的結合クラスター理論で電子 EDM 増幅度を高精度に評価し、Fr EDM から電子 EDM を抽出し、標準理論を超える物理、SUSY 粒子等の質量階層構造に迫る実験技術を開拓する。



図 1：開発実験装置の概観。

4. これまでの成果

事業開始後 3 年間、次世代 EDM 探索実験

装置の開発を進めた。実験装置は、大強度 Fr 生成装置、レーザー冷却 Fr 源、光格子原子干渉計の 3 つから構成される。Fr 生成に関して、 ^{18}O ビーム (100MeV) と ^{197}Au 標的の核融合反応により Fr を生成する融解標的型表面電離イオン源の高度化・安定運用に成功し、この手法では上限に近い引出し効率の性能 $\sim 30\%$ を実現した。また新規導入したウィーンフィルター、およびイメージインテンシファイアと CCD カメラを組み合わせた位置感応型ビームモニターを開発しイオン光学の最適化を行ってビーム透過効率を向上させた⁽⁶⁾。

生成 Fr をトラップするための磁気光学トラップ (MOT) を開発し、蓄積 Fr 由来の蛍光を観測した^(4,7)。さらにトラップに必要なレーザー光源の周波数オフセットロック技術とヨウ素分子を用いた周波数安定化技術を確立し⁽³⁾、これらの技術により Fr 蓄積個数 10^6 個を実現しつつある。また、EDM を測定するために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) を開発した。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。さらに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。EDM により生じる原子の励起準位の微小な周波数シフトを高精度で測定する原子干渉計を用いた高分解能分光装置を開発した。今回、冷却原子系に対して相互作用時間 300us まで測定し、 $\sim 10^2\text{Hz}$ 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 $\sim \text{mHz}$ は着実に実現できる⁽⁴⁾。

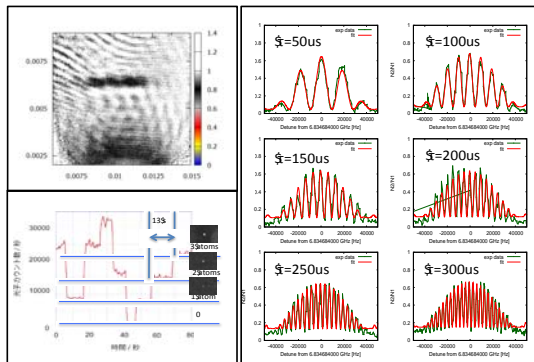


図 2：左上は光格子でトラップした原子の吸収分光。左下は単原子による寿命測定結果。右は原子干渉計の周波数分解能測定結果。

さらに相対論的結合クラスター理論による Fr における電子 EDM 増幅度の計算評価を進めて、1%以内の計算精度で増幅度を 895 倍と評価した^(2,5)。以上の装置開発により 3 次元光格子原子干渉計の基盤技術が整備され、所定の精度で電子 EDM を抽出する準備が進んでいる。

5. 今後の計画

これまで開発を進めた装置群を統合し、総合動作試験、系統誤差評価の実験を進めていく。特に、偽 EDM 信号の要因である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光ベクトルシフトの効果をモニターし、EDM を高精度に決定するため、 ^{85}Rb 、 ^{87}Rb の 2 種の同位元素を Fr とともに光格子にトラップする国際的にも初めての挑戦である共存磁力計の開発を進める。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- (1) 'Magic and tune-out wavelengths for atomic francium', U.Dammalapati, K.Harada, and Y.Sakemi, Phys. Rev. A93 (2016) 043407
- (2) '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)032520(2016-03-30)
- (3) 'Laser frequency locking with 46 GHz offset using an electro-optic modulator for magneto-optical trapping of francium atoms', K.Harada, Y.Sakemi et al., Appl. Opt. 55(2016)1164-1169
- (4) 'Light shifts induced by nuclear spin-dependent parity-nonconserving transitions of ultracold Fr for detection of nuclear anapole moment', T.Aoki, Y.Sakemi et al., Asian J. Phys. 25, 1247-1258 (2016).
- (5) 'Correlation trends in the hyperfine structures of $^{210,212}\text{Fr}$ ', B.K.Sahoo, Y.Sakemi et al., Phys.Rev. A91 (2015) no.4, 042507(2015-04-21)
- (6) 'Transportation of a radioactive ion beam for precise laser-trapping experiments', H.Kawamura, Y.Sakemi et al., Rev.Sci.Instrum. 87 (2015) no.2, 02B921(2015-11-03)
- (7) 'Magneto-optical trapping of radioactive atoms for test of the fundamental symmetries', T.Inoue, Y.Sakemi et al., Hyperfine Interact. 236 (2015) no.1-3, 53-58(2015-05-22)
- (8) 第 32 回・井上科学振興財団・井上研究奨励賞 (2016 年・大学院生受賞)
- (9) KEK 第 6 回測定器開発優秀論文賞 (2016 年・大学院生受賞)

ホームページ等

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