

**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**

Study for the violation mechanism of fundamental symmetry  
using the cold atom/molecular interferometer with optical lattice

課題番号：19H05601

**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（4行以内）

物質・反物質対称性（CP）の破れの起源を探るため、量子多体系における永久電気双極子能率（EDM）の精密量子計測技術を確認する。相対論効果や原子核8重極変形効果による基本粒子EDM・CPを破る相互作用の各項に敏感な重元素・フランシウム（Fr）の多彩な同位体・分子の光格子干渉計を実現し、重い超対称性粒子等の質量階層構造を明らかにする技術を開拓する。

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

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

1. 研究開始当初の背景

ヒッグス粒子の発見によって、物質の質量獲得機構をはじめ、素粒子物理学は大きく発展した。この基盤となる素粒子標準理論が着実に検証されながらも、物質・反物質対称性（CP）の破れのメカニズムは十分には説明されていない。素粒子の階層問題、ゲージ結合定数の統一、暗黒物質の素粒子物理学の実体等をも解決する有力な考え方では、超対称性粒子（SUSY）等の未知粒子・対称性の存在が予言されている。素粒子の周りに未知素粒子が伝搬すると、そのスピン軸方向に正負の電荷分布の偏りが生じて電気双極子能率（EDM）が発現するが、このEDMはCP破れの起源を探る重要な観測量として注目されている。

2. 研究の目的

本研究では、フランシウム（Fr）等の量子多体系を極端な量子状態にすることで、「量子補正」として発現する未知の対称性の破れや超対称性粒子等の伝搬による微小効果EDMを量子増幅し、光格子干渉計によるEDM精密量子計測を実現する。特に、重元素であるFrは多くの同位体を有し、中性子数が増大するとともに、原子核の八重極変形の効果が顕著になり、クォーク色電荷EDMへの感度が高くなるのが理論的に示唆されている。そこで大強度冷却Fr源を生成し、レプトン（電子）・クォーク（原子核）各セクターに関するCPの破れに対して、 $^{210}\text{Fr}$ 、Fr-Sr、 $^{221}\text{Fr}$ の3つの量子多体系を用いたEDM測定技術を確認し、CPの破れの起源、超対称性粒子の質量階層構造に迫る。

3. 研究の方法

電子EDM測定感度を向上し、SUSY粒子等の質量探索領域を拡充する（ $> 10\text{TeV}$ ）ため、光格子を用いた $^{210}\text{Fr}$ -EDMと、フェッシュバハ共鳴による冷却分子生成（Fr-Sr）を実現し、世界最高感度 $10^{-30}\text{ecm}$ を乗り越える。さらに、アクチニウム（ $^{225}\text{Ac}$ ：寿命 $\sim 10$ 日間程度）をgeneratorとする $^{221}\text{Fr}$ 線源を実現し、光格子干渉計による電子EDMとクォーク色電荷EDMを抽出する手法を開拓する。

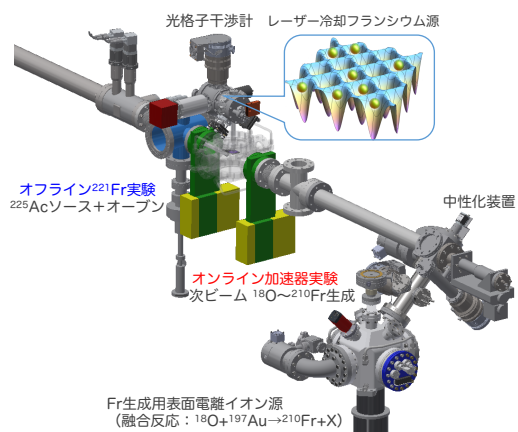


図1：Frビームライン実験装置の概観

4. これまでの成果

Frビームラインを理研・E7実験室に構築完了した。国内で最大収量のFr生成（ $\sim 10^7\text{Fr}^+/\text{s}$ ）を実現し、高いFr引出し効率 $\sim 20\%$ を達成した。ビームラインの心臓部である表面電離イオン源において、AVFサイクロトロンから供給される $^{180}\text{O}^+$ ビームと $^{197}\text{Au}$ 標的を

用いた核融合反応により Fr を生成するが、金標的を融点程度に加熱する必要がある。今回、赤外線ヒーターと  $^{18}\text{O}$  ビームによる非接触加熱による温度制御を行い、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  $^{210}\text{Fr}$  の長時間安定供給に成功した。さらに、高温金標的の表面から放出される不純物を除去するため、表面電離イオン源の引出し電極に高周波をかけて質量分離を行い高純度 Fr ビーム実現の技術を確立している。

次に、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、Fr トラップと、共存磁力計に必要な Rb トラップに必要な 6 種類の光源を 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となる。今回、トラップ光源の制御に任意波長でロック可能な波長計を用い、これま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によって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。さらに、EDM 測定の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トラップし、同時にスピン歳差周期を高精度モニターする共存磁力計を開発し、原理実証を行った。

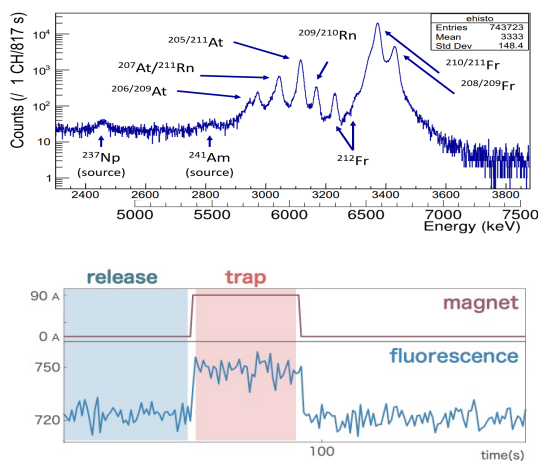


図 2：上は生成 Fr の  $\alpha$  崩壊スペクトル。下は MOT 中の Fr からの蛍光信号を示す。

冷却極性分子 Fr-Sr による EDM 測定を行うため、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 EDM 測定で重要な電場を精密に評価するため、413 nm 光源を開発し、リドベルグ原子を用いた分光を行うことで、電場によるシュタルクシフトの観測を確認した。さらに、クォーク色電荷 EDM に感度が高い  $^{221}\text{Fr}$ -EDM 探索

を行うため、 $^{221}\text{Fr}$  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。また、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。相対論的結合クラスター理論による精密波動関数計算を進め、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 をとり入れ、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、 $D_e = 799 d_e + 10.5 \times 10^{-18} C_N^{S-PS} \text{ ecm}$  と示され、電子 EDM と相互作用の寄与を精度よく抽出する方法を開発した。

## 5. 今後の計画

光格子干渉計を用いた EDM 探索の技術確立に向けて、高強度冷却 Fr 源 (MOT 中に  $10^6$  個) の増強を進める。さらに光格子トラップを形成するレーザー光の周波数を異なる値にずらすことにより進行波を形成し、MOT からラムゼー分光を行うためのマイクロ波キャビティを導入した光格子に Fr を輸送し、原子干渉計による EDM 量子計測技術を開発する。さらに、相対論的結合クラスター理論計算、原子核の殻模型理論および密度汎関数理論を用いて、Fr 原子・分子の EDM から、CP の破れの源泉を抽出する解析手法を確立する。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. K. Tanaka, K. Harada, T. Hayamizu, M. Itoh, H. Kawamura, H. Nagahama, N. Ozawa, Y. Sakemi, A. Terakawa, A. Uchiyama, Two-dimensional Beam Profile Monitor for Alpha Emitter, IBIC2019 (2019), 355-357
2. A. Kastberg, B. K. Sahoo, T. Aoki, Y. Sakemi, and B. P. Das, Analysis of an Optical Lattice Methodology for Detection of Atomic Parity Nonconservation, Symmetry 12, 974-1-22, 2020
3. A. Kastberg, T. Aoki, B. K. Sahoo, Y. Sakemi, B. P. Das, An optical lattice based method for precise measurements of atomic parity violation, Phys. Rev. A 100, 050101(R) (2019)
4. A. Uchiyama, K. Harada, T. Inoue, H. Kawamura, K. S. Tanaka, M. Itoh, T. Aoki, A. Hatakeyama, Y. Takahashi and Y. Sakemi, Development of a Dual Isotope Co-Magnetometer Using Laser Cooled Rubidium Toward Electron Electric Dipole Moment Measurement Using Francium, Journal of Physics: Conf. Series 1206 (2019) 012008

## 7. ホームページ等

<https://sites.google.com/cns.s.u-tokyo.ac.jp/fundamental-symmetry-group>