

# 論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	内山 愛子	提出年	平成30年
学位論文の 題目	電子の電気双極子能率探索のための 冷却原子を用いた共存磁力計		

## 論文目次

### 第1章 序論

- 1.1 はじめに
- 1.2 EDM の起源
- 1.3 複合粒子の EDM
- 1.4 常磁性原子・分子による電子 EDM 探索
- 1.5 本研究の目的

### 第2章 Fr 原子を用いた電子 EDM 探索

- 2.1 Fr イオンの生成と中性化
- 2.2 Fr 原子の磁気光学トラップ
- 2.3 冷却原子を用いた EDM 測定系の開発

### 第3章 原子と外場の相互作用

- 3.1 外場中での原子
- 3.2 磁気光学効果

### 第4章 光学磁力計と二種共存磁力計

- 4.1 光学磁力計
- 4.2 冷却原子を用いた二種共存磁力計

### 第5章 Rb 原子の二核種磁気光学トラップ

- 5.1 MOT の実験系
- 5.2 単一のレーザー光源を用いた二核種 MOT
- 5.3 二台のレーザー光源を用いた二核種 MOT

### 第6章 冷却ルビジウム原子による磁場測定

- 6.1 実験系
- 6.2 Larmor 歳差運動の観測
- 6.3 磁場の時間変動

### 第7章 Fr 原子 EDM 探索に向けた検討

- 7.1 今後の開発が磁場測定に及ぼす影響

7.2 磁場測定精度のシミュレーション

7.3 Fr 原子 EDM 測定精度

第 8 章 結論

付録 A 原子の計算に使用した値

付録 B 磁気光学トラップの原理

## 論文要旨

電子の電気双極子能率探索のための  
冷却原子を用いた共存磁力計東北大学大学院 理学研究科 物理学専攻  
内山 愛子

平成 30 年

素粒子の電気双極子能率(EDM)は、時間反転(T)対称性と空間反転(P)対称性の破れを表す物理量である。荷電共役変換(C)と T と P を組み合わせた CPT 定理に基づく、T 対称性の破れは CP 対称性の破れを意味する。核子や原子の EDM は、素粒子の EDM や CP 対称性を破る相互作用によって発現する。これまでに、ミューオン、中性子、原子の EDM 探索や、極性分子を用いた EDM 探索が行われてきたが、いずれの値も極めて小さいことが分かっており、有限値の測定には至っていない。このうち、電子 EDM は、常磁性原子・分子を用いて探索が行われてきた。フランシウム(Fr)原子は最も重いアルカリ原子で、電子 EDM の増幅率が大きい原子として知られている。また、レーザー冷却・トラップが可能な原子である。そこで本研究では、Fr 原子 EDM に着目し、Fr 原子 EDM 探索により電子 EDM の探索上限値を更新するために必要な高精度探索技術の確立を目指して研究を行った。

Fr 原子 EDM を高精度に探索するために、Fr 原子をレーザー冷却することにより低速にし、さらに光格子中にトラップした上で EDM 探索を行うことを計画している。原子 EDM を測定する場合には、原子に磁場と電場を平行に印加した場合と、反平行に印加した場合の共鳴周波数をそれぞれ測定し、その差から原子 EDM の値を抽出する。この測定においては、磁場の変動が大きな系統誤差を生むため、磁場を精密に測定することが重要となる。このために、EDM 測定中の磁場を観測する、共存磁力計が重要となる。また、光格子中では原子は光双極子力によりエネルギーシフトを受ける。この中でも、EDM や磁場と同様に、磁気量子数に比例するベクトル光シフトは、磁場と似た系統誤差を生む。このために本研究では、Fr 原子と共に二種類の原子を光格子中にトラップし、Fr 原子と同様に周波数測定を行うことで、磁場とベクトル光シフトを精密に測定する、二種共存磁力計を新たに提案した。二種共存磁力計により、磁場とベクトル光シフトの効果を精度よく切り分けるためには、ルビジウム(Rb)原子とセシウム原子などの組み合わせが望ましいが、本研究ではこの原理検証のために、Rb 原子の二つの安定同位体である  $^{85}\text{Rb}$  と  $^{87}\text{Rb}$  を用いた開発を行った。 $^{85}\text{Rb}$  と  $^{87}\text{Rb}$  では、磁場とベクトル光シフトの効果を切り分けるのは難しい一方で、共存磁力計としての系統誤差を評価するには優れた組み合わせである。

二種共存磁力計の実現のためには、二種の原子を光双極子トラップ中に捕獲するために、レーザー冷却する必要がある。この際に重要となるのが、磁気光学トラップ(MOT)である。アルカリ原子の MOT には、閉じた遷移を用いて光の吸収・放出を繰り返し引き起こして原子を冷却させるトラップ光と、トラップ光を吸収できる準位に原子を集めるリポンプ光が必要となる。二核種 Rb MOT を効率よく実現するために、一台のレーザー光源と電気光学変調器(EOM)を用いた手法の開発を行

った。この手法では、EOMにRF信号を入力することにより、RF信号の周波数に相当する周波数のサイドバンドを発生させ、そのサイドバンドをトラップ光やリポンプ光として利用する。ただし、この手法においては、複数のサイドバンドを発生させるために、複数のRF信号を結合してEOMに入力した際に、和周波数や差周波数のサイドバンドが形成されるために、必要な周波数のサイドバンドのパワーが落ちるといった課題があった。そこで、これを改善するために、入力するRF信号を高速で切り替えながら入力するRFスイッチングという手法を新たに提案した。この手法を適用することにより、トラップ原子の個数をRFスイッチングを行わない場合と比較して約2倍に増加させられることが分かった。

さらにトラップ個数を増加させ、さらに真空度の高い領域でのトラップを実現するために、二台のレーザー光源とEOMを用いた手法の開発を行った。一度MOTした原子に対して共鳴光を照射し原子を低速のビームとして引き出し、さらに真空度の高い領域でMOTした。この手法では、一台の光源のキャリア周波数を $^{85}\text{Rb}$ の共鳴周波数、もう一台の光源のキャリア周波数を $^{87}\text{Rb}$ の共鳴周波数に合わせた。サイドバンドを形成させない場合には、それぞれの共鳴周波数の光を得ることができる。これにより、吸収イメージング法を用いて原子集団を撮影することで、二核種MOT中のそれぞれの核種の個数をそれぞれ測定することができ、トラップ原子数は、 $^{85}\text{Rb}$ が $(3.2 \pm 0.3) \times 10^6$ 個、 $^{87}\text{Rb}$ が $(4.2 \pm 0.5) \times 10^5$ 個であることが分かった。

また、 $^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ のそれぞれのMOTした原子を用いた磁場観測を行った。MOT中の原子に共鳴光を照射し、真空度の高い領域でMOTした後に、MOTに利用した四重極磁場を切り、磁場中の原子を光ポンピングした。このことにより、磁場中の原子は磁場に対してスピン歳差運動を始める。原子が磁場中で歳差運動をすると、その原子により屈折率が歳差運動の周期に合わせて変動する。ここに、直線偏光のプロブ光を照射すると、この偏光面が屈折率によって決まる角度に回転するため、偏光面が歳差運動の周期に合わせて周期的に変動する。この偏光面の回転の周波数からその空間の磁場を測定することができる。コイルに一定の電流を印加した場合の $^{85}\text{Rb}$ と $^{87}\text{Rb}$ のそれぞれの測定結果は一致し、現状での磁場測定精度は $0.1 \mu\text{T}$ を達成している。

今後、磁気シールドの導入や、光格子中に原子を捕獲することにより、周波数精度を向上させることができると見込んでいる。また、実際のFr EDM探索においてはラムゼー共鳴法の測定時間2秒間にわたって継続的に磁場測定を行う必要がある。この場合には、偏光面の回転角度は、原子のデコヒーレンスにより小さくなるため、再度光ポンピングすることが有効である。具体的に、2秒間の測定中に40回のポンピングを行うことを想定すると、周波数精度約 $120 \mu\text{Hz}$ を達成することができる見込みである。これは $^{87}\text{Rb}$ での磁場測定に換算すると $18 \text{ fT}$ に相当する。この測定手法を二種原子磁力計に応用することで、Fr EDM測定における磁場とベクトル光シフトに起因する誤差を $\delta d_{\text{Fr}} \sim 2.8 \times 10^{-26} \text{ ecm}$ まで抑制することができると見込んでいる。Fr原子EDMはこれまでに測定された例はないが、他の原子や分子の測定結果からも $|d_{\text{Fr}}| < 2.8 \times 10^{-26} \text{ ecm}$ の領域は、棄却されていない領域である。二種原子共存磁力計を用いたFr原子EDM探索という、電子EDMの探索範囲をさらに広げる測定技術を確立できた。

## 論文審査の結果の要旨

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(CYRIC)で進められている冷却フランシウム(Fr)原子を用いた電子の電気双極子能率(EDM)探索のための新たな共存磁力計の開発研究をまとめた博士論文である。

電子のような素粒子の EDM は、現在の素粒子物理学を説明する標準模型を超える物理モデルと密接に結びついている重要な物理量と考えられている。これまで、ミューオン、中性子、原子核、原子、極性分子を用いて EDM 探索が行われてきたが、いずれも有限値の測定には至っていない。そのような状況の中で CYRIC では電子 EDM を約 900 倍に増幅して測定できる放射性同位元素・Fr 原子に着目し、サイクロトロンからの酸素 18 ビームと金 197 の核融合反応で生成した Fr 原子を、レーザー冷却することで減速・捕獲し、さらに電磁場と長時間相互作用させることが可能な光格子中に Fr 原子をトラップした上で、EDM 探索を行うことを計画している。

原子 EDM の測定では、原子に磁場と電場を平行に印加した場合と反平行に印加した場合の共鳴周波数をそれぞれ測定し、その差から原子 EDM の値を抽出する。この測定では磁場の変動が大きな系統誤差を生むため、Fr 原子の EDM を高精度に探索するためには光格子中にトラップされた Fr 原子近傍の磁場を精密に測定することが重要となり、Fr の EDM を測定するとともに、同時に磁場変動を測定する共存磁力計が不可欠となる。また、光格子中ではトラップに用いる光の円偏光成分によって有効磁場が生じ、ベクトル光シフトと呼ばれるエネルギーシフトを引き起こすため、これも系統誤差の要因となる。内山氏は、この磁場変動とベクトル光シフトが偽 EDM 信号の大きな要因になることに気づき、応答の異なる二種の原子を用いた共存磁力計によって磁場によるゼーマンシフトとベクトル光シフトを測定することで、系統誤差を抑制する方法を新たに提案した。また、ルビジウムの同位体 85 と 87 の原子を用いた二種原子共存磁力計を開発し、この二種原子による共存磁力計を用いた Fr 原子による高精度 EDM 探索の原理実証に成功した。内山氏は、さらに、開発した二種原子共存磁力計の結果から Fr 原子による EDM 探索に向けた検討を行い、磁気シールドと光格子トラップを組み合わせることによって、Fr 原子 EDM が  $|d_{Fr}| < 2.8 \times 10^{-26}$  ecm という現在の電子 EDM の世界最高精度での測定上限値  $|d_e| < 1.1 \times 10^{-29}$  ecm と同程度の領域で EDM 探索が可能なことを示した。

このように内山氏は独立して研究活動を行うのに必要な高度な研究能力と学識を有することが示されている。したがって、内山愛子氏提出の博士論文は、博士(理学)の学位論文として合格と認める。