

機関番号： 82401  
 研究種目： 基盤研究(B)  
 研究期間： 2008 ～ 2010  
 課題番号： 20340067  
 研究課題名（和文） 核スピンの精密制御を用いた原子の電気双極子モーメント探索  
 研究課題名（英文） Search of atomic EDM with precise control of nuclear spin  
 研究代表者  
 吉見 彰洋 (YOSHIMI AKIHIRO)  
 独立行政法人理化学研究所・偏極 RI ビーム生成装置開発チーム・研究員  
 研究者番号： 40333314

## 研究成果の概要（和文）：

素粒子の崩壊において発見され、宇宙の物質・反物質非対称性の原因と考えられている CP 対称性非保存の起源は現代物理学の未解明の謎である。この CP 対称性を破る永久電気双極子モーメント(EDM)の探索に向け、希ガス元素  $^{129}\text{Xe}$  の核スピン歳差周波数を超精密に測定する開発研究を行った。様々な変動要因の研究及び高感度磁力計の開発を行い、低周波核スピンメーザーの周波数安定度を向上させ、 $5 \times 10^{-28} \text{ ecm}$  の EDM 感度 (45,000 秒測定、電場強度  $E=10 \text{ kV/cm}$  を仮定)を達成した。

## 研究成果の概要（英文）：

The origin of CP violation, which was discovered in particle decay and is considered to be one of sources for matter-antimatter asymmetry in universe, is one of important objectives in modern physics. In order to search for atomic EDM violating CP symmetry, the research and development have been conducted for ultra-high precision measurement of nuclear spin precession of  $^{129}\text{Xe}$ . The various fluctuations to the spin system have been investigated, high sensitivity magnetometer have been developed, leading to improvement of frequency stability for low-frequency nuclear spin oscillator. The sensitivity of  $5 \times 10^{-28} \text{ ecm}$  for atomic EDM of  $^{129}\text{Xe}$  has been achieved (with a measurement time of 45,000 s) assuming the electric field strength of 10 kV/cm.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
総計	10,400,000	3,120,000	13,520,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： 原子核（実験）、原子を利用した基本的対称性

## 1. 研究開始当初の背景

K、B 中間子の崩壊で発見されている CP 非保存現象は、素粒子標準模型で現象論的に説明されている一方、その対称性の破れの起源

に関しては解明されいない。またこの標準模型における CP 非保存では、現宇宙の物質・反物質の非対称性を説明することはできない。一方、超対称性理論などの標準模型を超

える理論が提唱されており、新粒子の発見や CP 非保存現象の精密検証を通じて、理論の検証が試みられている。CP 対称性に直結する時間反転対称性を破る EDM は標準模型では極めて小さい値が予言されているが、超対称性などの拡張理論では測定が可能な程度の値を予言する。このため EDM 探索実験は標準模型を超える素粒子理論のプロープとして重要なテーマと考えられている。

## 2. 研究の目的

原子の EDM を標準模型を超える理論が予言する値の領域まで探索することによって、標準理論の限界および CP 非保存の起源、標準理論を超えた物理に迫る。このため、当グループで開発した「光学的核スピン検出による低周波核スピンメーザー」を用いて、 $^{129}\text{Xe}$  原子の EDM を  $10^{-28} - 10^{-29}$  ecm の感度で探索できる実験手法・装置の構築を行う。

## 3. 研究の方法

極めて小さな EDM の探索を行うためにはスピン歳差周波数を精密に測定することを可能とする装置を実現し、様々な外乱のもとでその装置を安定して維持することが必要となる。そのため、これまで開発を行ってきた mG レベルの低磁場で半永久的にスピン歳差を維持する  $^{129}\text{Xe}$  低周波核スピンメーザーの周波数安定度に関する研究を行う。この周波数安定度に影響を及ぼす原因としては、静磁場を生成するマグネット電流源の変動、環境磁場変動、試料セルの温度変動などが考えられる。これら各々の変動起源がメーザー周波数に変動を与える相関関係を明らかにし、それぞれの変動を抑制するための装置を構築する。また究極的な EDM 実験に必要な高感度磁力計の開発を行う。この究極的な磁力計に関しては、 $10^{-29}$  ecm の感度の EDM 実験における磁場変動検出を行うため、1 pG の磁場感度を実現する必要がある。そのため、高感度が期待され、形状もコンパクトで、室温で計測可能な磁力計の原理として期待されるアルカリ原子の非線形磁気光学効果を利用し、高感度磁場計測系の開発を行う。以上を総合的に行い、1 nHz の周波数決定精度 ( $1 \times 10^{-28}$  ecm に相当) を実現し、高感度 EDM 実験が可能になる段階まで進める。

## 4. 研究成果

当グループが提案し、開発を進めてきた低磁場で発振可能な新しいタイプの核スピンメーザーを実現し、図 1 に示すように  $^{129}\text{Xe}$  核スピンの半永久的な歳差維持を実現できた。ここでは静磁場 30.4 mG において核スピン歳

差がプローブレザーで光学的に検出され、外部フィードバックにより、スピンメーザーが周波数 34.0 Hz で発振し、その発振振幅が 1 日に渡って安定していることが示されている。この低磁場での発振の実現により、磁場変動による周波数揺らぎを従来の核メーザーに比べて 3-4 桁小さくすることが可能になり、また、低磁場ゆえに高感度の磁場計測法を導入することができるようになった。

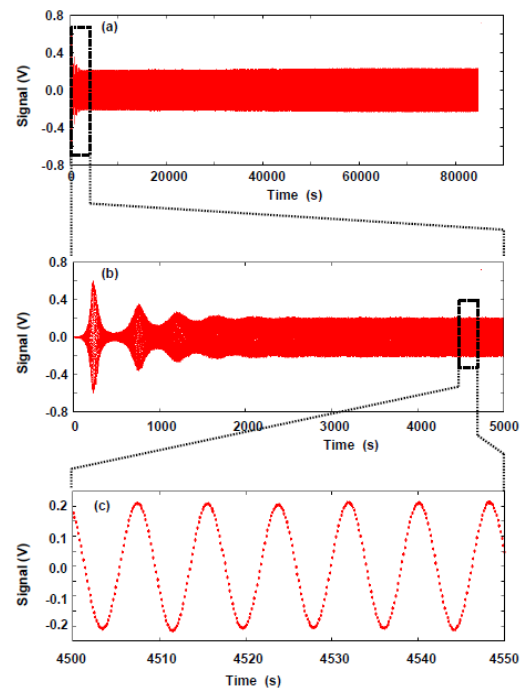


図 1：低周波核スピンメーザー発振シグナル。(a) 1 日間持続した発振シグナル。(b) 発振の立ち上がりに見られる過渡シグナル。(c) 安定発振シグナルを拡大したものの。

このメーザー周波数の安定度に着目した場合、これまで製作してきた電流源のおかげで 30,000 秒程度までは数 ppm で安定している一方、それを超える長期の観測時間においては数十 ppm 以上 (>1mHz) のドリフトが観測された。これは長時間に渡る温度ドリフトが電流源の出力に及ぼす影響であることが判明した。このドリフトを回避するために、高精度電圧計と標準抵抗で読み出した電流値を安定化するフィードバック系を構築した。これにより、30,000 秒を超える長時間で現れていた 300 nA 程度の電流ドリフトを 1nA の幅で安定化させることができた。これによる静磁場の変動は 4 nG で、 $^{129}\text{Xe}$  周波数変動幅に直すと  $5 \mu\text{Hz}$  である。この改善により、なお残るメーザー周波数変動が環境磁場変動と相関をもっていることを明らかにすることができた。フラックスゲート磁力計によ

る環境磁場の測定値をもとに、メーザー周波数を補正し、測定時間に対する周波数決定精度をプロットしたものが図2である。この図が示しているように、環境磁場の変動を補正した場合の周波数決定精度は、 $t=45,000$  秒において最高の  $5 \text{ nHz}$  に到達している。これは印加電場  $10 \text{ kV/cm}$  における EDM の測定感度として、 $5 \times 10^{-28} \text{ ecm}$  であり、現在報告されている  $^{129}\text{Xe}$  の原子 EDM 上限値  $3 \times 10^{-27} \text{ ecm}$  を超える感度が実現できている。

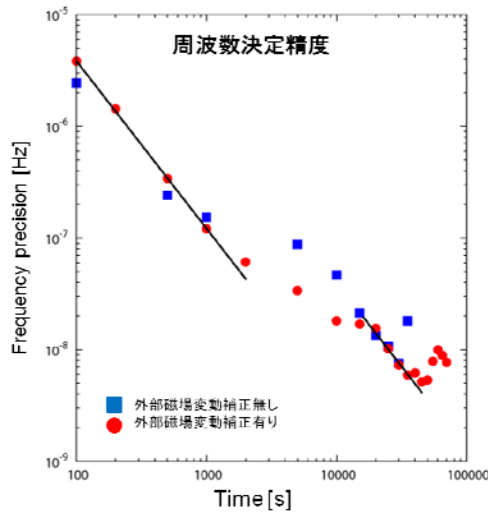


図 2: 低周波核スピンメーザーで得られた周波数決定精度。

以上の研究に加え、究極的な EDM 実験が必要になる、高感度で磁場変動を検知する磁力計の開発を行った。僅かな磁場における大きな光学回転角度が実現できる Rb 原子の非線形磁気光学回転現象 (NMOR) に着目し、これを磁力計に応用するための基礎研究を遂行した。好感度な磁力計を実現するためには Rb 原子のスピンコヒーレンス時間を長く延ばし、狭い幅の NMOR スペクトルを実現することが必要である。4重磁気シールド、3軸コイル系、および内壁をパラフィンコートした Rb ガラスセル等、NMOR 測定系に必要な要素を構築し、現在までに、図3に示すように大きさ  $\phi 35 \times 35 \text{ mm}$  の円筒型 Rb セルを用い、幅  $300 \mu\text{G}$  の NMOR スペクトルを観測するまでに至った。この系による計測磁場感度として、 $30 \text{ nG}/\sqrt{\text{Hz}}$  を達成しており、最終的な EDM 実験に組み込む前段階として、EDM 測定実験装置に導入した磁力計開発・研究に着手できる段階に至った。

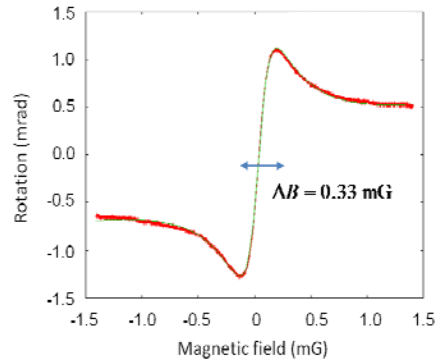


図 3: 高感度磁力計に向けた Rb 原子の NMOR 測定スペクトル。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- 1) A. Yoshimi, T. Nanao, T. Inoue, T. Furukawa, M. Uchida, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Chikamori and K. Asahi: “Development of NMOR magnetometer for spin-maser EDM experiment”, Physics Procedia (2011) 印刷準備中、査読有。
- 2) T. Inoue, T. Furukawa, T. Nanao, A. Yoshimi, K. Suzuki, M. Chikamori, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida, and K. Asahi: “Experimental search for  $^{129}\text{Xe}$  atomic EDM with nuclear spin maser technique”, Physics Procedia (2011)、印刷準備中、査読有。
- 3) T. Inoue, M. Tsuchiya, H. Hayashi, T. Nanao, K. Suzuki, A. Yoshimi, T. Furukawa, M. Uchida, and K. Asahi: “Search for an EDM in diamagnetic atom  $^{129}\text{Xe}$  with nuclear spin maser technique”, Proc. Int. Nuclear Physics Conference 2010, 印刷準備中、査読有。
- 4) T. Furukawa, T. Inoue, T. Nanao, A. Yoshimi, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida and K. Asahi: “Magnetic Field Stabilization for  $^{129}\text{Xe}$  EDM search Experiment”, Proc. Int. Nuclear Physics Conference 2010, 印刷準備中、査読有。
- 5) T. Nanao, A. Yoshimi, T. Inoue, T. Furukawa, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida, K. Asahi: “Development of highly

- sensitive NMOR magnetometry for an EDM experiment”, Proc. Int. Nuclear Physics Conference 2010, 印刷準備中、査読有.
- 6) T. Inoue, M. Tsuchiya, T. Furukawa, H. Hayashi, T. Nanao, A. Yoshimi, M. Uchida, Y. Matsuo and K. Asahi: “Frequency characteristics of a nuclear spin maser for the search for the electric dipole moment of  $^{129}\text{Xe}$  atom”, Physica E **43** (2011) 847-850、査読有.
  - 7) K. Asahi, T. Inoue, T. Nanao, H. Hayashi, T. Furukawa, A. Yoshimi, M. Uchida, H. Ueno, Y. Matsuo, and T. Fukuyama: “Search for Electric Dipole Moment in  $^{129}\text{Xe}$  atom Using a Nuclear Spin Oscillator”, Proc. 4th Int. Workshop on ‘Fundamental Physics Using Atoms 2010’ (2010) 24-28、査読無.
  - 8) A. Yoshimi, K. Asahi, T. Inoue, M. Uchida, N. Hatakeyama, M. Tsuchiya and S. Kagami: “Nuclear Spin Maser at Highly Stabilized Low Magnetic Field and Search for Atomic EDM”, AIP Conf. Proc. 1149 (2009) 249-252、査読有.
  - 9) A. Yoshimi, T. Inoue, M. Uchida, N. Hatakeyama and K. Asahi: “Optical-coupling nuclear spin maser under highly stabilized low static field”, Hyperfine Int. **181** (2008) 111-114、査読有.

[学会発表] (計 8 件)

- 1) 吉見彰洋: “EDM測定における磁力計について”、中性子制御デバイスとその応用 IV、京都大学原子炉実験所、2 月 23 日 (2011).
- 2) A. Yoshimi: “Magnetometer in EDM experiments”, Workshop on Atomic Magnetometry and Fundamental Physics, Tokyo, Japan, 31th January, 2011.
- 3) 吉見彰洋: “EDM探索実験の現状”、日本大学原子核理論コロキウム、日本大学、9 月 17 日 (2010).
- 4) A. Yoshimi: “Development of NMOR magnetometer for spin-maser EDM experiment”, Physics of fundamental Symmetry and Interactions (PSI2010), Paul Scherrer Institute, Switzerland, 12th October, 2010.
- 5) 吉見彰洋: “非線形磁気光学効果を利用した高感度 Rb 磁力計の開発”、日本物理学会第 65 回年次大会、岡山、3 月 23 日 (2010).
- 6) A. Yoshimi: “Development of Rb atomic magnetometer for EDM experiment with  $^{129}\text{Xe}$  spin maser”, 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (Hawaii 2009), Hawaii, USA, 16th October, 2009.

- 7) A. Yoshimi: “Nuclear spin maser at highly stabilized low magnetic field and search for atomic EDM”, The 18<sup>th</sup> International Symposium on Spin Physics (SPIN2008), Virginia, USA, 9th October, 2008.
- 8) 吉見彰洋: “核スピンメーザーを用いた  $^{129}\text{Xe}$  原子 EDM の探索”、東北大学 CYRIC 研究会 “Fundamental physics using atoms”、仙台、8 月 19 日 (2008).

[その他]

ホームページ等

<http://ribf.riken.jp/~yoshimi>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉見 彰洋 (YOSHIMI AKIHIRO)

独立行政法人理化学研究所・偏極 RI ビーム生成装置開発チーム・研究員

研究者番号：40333314

### (2) 研究分担者

旭 耕一郎 (ASAHI KOICHIRO)

東京工業大学大学院・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：80114354

### (3) 連携研究者

内田 誠 (UCHIDA MAKOTO)

東京工業大学大学院・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：90397042