

新型核スピンメーザーによる ^{129}Xe の電気双極子モーメントの 超高感度探索

Ultrahigh-Sensitivity Search for an Electric Dipole Moment of ^{129}Xe atom
by Means of Nuclear Spin Maser with Artificial Feedback

旭 耕一郎 (Koichiro Asahi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授



研究の概要

素粒子の崩壊において見出され、また宇宙の物質・反物質非対称の原因ともいわれる CP 非保存の起源は謎のままである。標準理論は CP 非保存を K-M 行列要素の位相として組み込むが、この形の CP 非保存は電気双極子モーメント (EDM) に非常に小さな値しか与えない。本研究は新しいタイプの核スピンメーザーを用いた感度の高い原子 EDM 探索手法を開発することによって、CP 非保存を通して標準理論の限界に迫る。

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： (G) 原子核実験、(F) 素粒子実験

1. 研究開始当初の背景・動機

初め K 中間子で見出された CP の非保存現象は、B 中間子にも起こることが最近確かめられた。CP 非保存は素粒子の標準理論に特定の形で組み込まれており、上記の現象はこれでよく説明される。しかし同じく CP を破る観測量である EDM に対して、標準理論は測定にかからないほど小さな値しか予言しない。一方、超対称理論など標準理論を超える理論では EDM は有限な値をとることができる。

2. 研究の目的

原子の EDM を、標準理論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り、標準理論の限界と CP 非保存の起源、標準理論を超えた物理に迫る。このような領域は現在の実験的上限の 1~2 桁下にある。このため新しい EDM 測定法「外部フィードバック型核スピンメーザー法」を導入し、その確立と装置の構築を行なって EDM 探索に求められる性能を実現する。

3. 研究の方法

極めて微小な Xe 原子 EDM を探索するためには精密なスピン歳差周波数測定装置を実現し、電場反転の際の歳差周波数の変化を検出する必要がある。このため光ポンピング法で偏極した ^{129}Xe 原子核スピンの歳差を mG レベルの低磁場において半永久的に維持する核スピンメーザーを開発する。この新型スピンメーザーを EDM 測

定に応用するために、環境磁場の遮蔽、ソレノイド磁場の高い空間的均一性と時間的安定度の実現、高精度の磁場計測技術と、それでも残る磁場不定性に起因した擬似効果のキャンセル手法の開発を行なう。これら一連の開発を経て、現在の ^{129}Xe 原子 EDM 実験上限値の 1-2 桁下の領域の探索への目途を立てる。

4. 研究の主な成果

(1) 光検出-外部フィードバック型核スピンメーザー法の確立

当グループにより提案されたこのスピン歳差測定法を、EDM 測定用として実機に実現した。その結果、図 1 に示すとおり、 ^{129}Xe 核スピンの歳差が、光検出され、セル内スピン緩和時間 $\tau_2 = 350$ s が実現

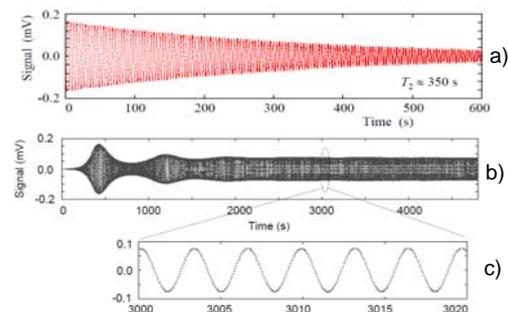


図 2. メーザー発振シグナル。(a) Feedback ON 時、(b) Feedback ON 時の歳差信号。(c) は (b) の一部を拡大したもの。

した[図 1(a)]. ついでフィードバックを開始して、減衰することなくスピン歳差が持続する「スピンメーザーモード」への移行が確認された[図 1(b)].

本結果は EDM 実験において歳差持続時間からの制約がなくなり測定時間の $-3/2$ 乗で周波数誤差が小さくできることを意味し、EDM 探索実験にとり画期である。また、本装置は $B_0 = 28 \text{ mG}$ という低磁場 (= 低周波) で運転された。光による歳差検出のため低周波化に原理的制限はなく、i) B_0 の変動から来る周波数揺らぎを従来より 3-4 桁小さくできる、ii) 低磁場ゆえに最近出現した原理に基づく高感度の磁場計測法を組み入れることが可能になる、という点からも本結果は重要な意味を持つ。

(2) EDM 探索に向けたメーザーの高度化

$d \sim 10^{-28} \text{ ecm}$ の検出を目標として、上記で立ち上げた核スピンメーザーに対して磁場の安定化、メーザー発振の安定化、歳差シグナル S/N 比の向上等の改良を進めた結果、図 2 の結果が得られた。 $T = 30000 \text{ s}$ の測定時間で $\Delta\nu = 9.3 \text{ nHz}$ の周波数精度を得た。これは $\Delta d = 9 \times 10^{-28} \text{ ecm}$ の EDM 決定精度に相当する。また得られた周波数精度は $\Delta\nu \propto 1/T^{1 \sim 1.5}$ の依存性を示すことが確認された。この結果、10 日のオ

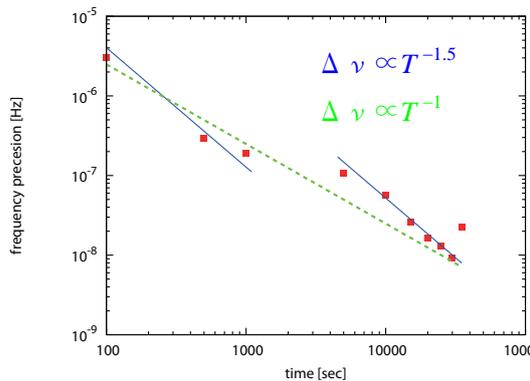


図 2. メーザー周波数決定精度

ーダーの測定時間をかけることによって、本研究の目標、現在の上限 $d < 4 \times 10^{-27} \text{ ecm}$ の 1-2 桁下の領域までの探索が充分可能との見通しが得られた。現在残る課題として、昼間の外部ノイズへの対策と電場印加系の整備、精密磁束計整備と擬似 EDM 効果の分離手法開発を進めている。

(3) 不安定核原子への適用にむけた基礎技術の開発

不安定核領域に目を転ずると、 ^{223}Rn , ^{223}Ra など八重極振動による EDM の増幅が期待される核が浮上する。不安定核への本方法の適用を狙い、核反応で生成した不安定核の停止・収集・引き出しの技術を開発し、4% の効率を達成した。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

光検出-外部フィードバック型核スピンメーザーは当グループ独自の方法であり、世界でも初めてのものである。その EDM 測定における特徴は i) 周波数精度が測定時間とともに大きく改善すること、ii) 超低磁場で働き、通常問題となる静磁場の変動の影響が格段に軽減されること、という圧倒的有利点を有している。これが実機として立ち上がり周波数安定化への目途が立ったことで EDM の実験的研究に与えるインパクトは大きい。EDM の現在の上限は超対称理論等の予言する領域まであと一歩であり、本手法によって重要な段階を切り開ける可能性は充分あると思われる。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

- 1) H. Yoshimi, M. Uchida, T. Inoue, N. Hatakeyama, and **K. Asahi**, "Optical-coupling nuclear spin maser under highly stabilized low static field", *Hyperfine Interact.*, accepted.
- 2) **K. Asahi**, M. Uchida, A. Yoshimi, T. Inoue, and N. Hatakeyama, "Search for Atomic EDM with Optical-Coupling Nuclear Spin Oscillator", *AIP Conf. Proc.* **915**, 206-211 (2007).
- 3) A. Yoshimi, H. Ueno, T. Sugimoto, K. Shimada, D. Nagae, J. Murata, H. Kawamura, D. Kameda and **K. Asahi**, "Developments of atomic beam resonance method with RI beams", *AIP Conf. Proc.* **915**, 849-852 (2007).
- 4) A. Yoshimi, **K. Asahi**, S. Emori, M. Tsukui, and S. Oshima, "Nuclear spin maser oscillation of ^{129}Xe by means of optical-detection feedback", *Hyperfine Int.* **159**, 401-405 (2005).
- 5) A. Yoshimi, **K. Asahi**, S. Emori, M. Tsukui, and S. Oshima, "Low-frequency nuclear spin maser and search for atomic EDM of ^{129}Xe ", *Proceedings of 16th International spin physics symposium* (World Scientific, Singapore, 2005), pp. 247-250.
- 6) A. Yoshimi, **K. Asahi**, S. Emori, "Nuclear spin maser and atomic electric dipole moment of ^{129}Xe ", *Czech. J. Phys.* **54 Suppl.**, B417-B424 (2004).
- 7) A. Yoshimi, **K. Asahi**, and K. Yogo, "Nuclear spin maser with an artificial feedback for fundamental physics", *Czech. J. Phys.* **53 Suppl.** B227-B233 (2003).

ホームページ等

<http://yap.nucl.ap.titech.ac.jp/AsahiLabJ/EdmGroup.html>