

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340052

研究課題名(和文) EDM精密測定実験のための原子磁力計の開発研究

研究課題名(英文) Development of atomic magnetometry for precision EDM experiment

研究代表者

吉見 彰洋 (Yoshimi, Akihiro)

岡山大学・その他部局等・准教授

研究者番号：40333314

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では時間反転対称性を破る原子の電気双極子モーメント探索実験に必要な安価・コンパクトな精密磁力計の開発研究を行った。蒸気 Rb 原子をスピン緩和抑制コーティングを施したガラスセルに封じ込め、D1 吸収波長の単一波長レーザー光を照射した際の偏光面の回転を精密に観測することによる磁力計を構築した。実際の EDM 実験を想定した静磁場 5 mG において $\mu\text{G}/\text{Hz}$ の磁場感度を実現し、ショットノイズによる到達可能な限界値が $30\text{pG}/\text{Hz}$ であることを示し、EDM 実験における磁力計の実現に道筋を付けることができた。

研究成果の概要(英文)：The high-sensitive magnetometer was developed for search of electric dipole moment which indicates direct evidence of time reversal symmetry. Rubidium atoms were confined in a glass cell whose inner surface was coated with paraffin. The cell was irradiated by a single frequency laser beam and the rotation of beam polarization after passing the cell was analyzed to probe the magnetic field. The magnetic sensitivity of $\mu\text{G}/\text{Hz}$ was achieved, and the shot-noise limit of $30\text{pG}/\text{Hz}$ was evaluated. This paved the way for introducing this type of magnetometry in EDM experiments.

研究分野：原子核物理実験

キーワード：永久電気双極子モーメント 高感度磁力計 非線形磁気光学効果

1. 研究開始当初の背景

時間反転対称性を破る電気双極子モーメント(EDM)探索実験は現代の素粒子物理研究における重要なテーマの1つである。特に近年、素粒子・原子核から原子・分子まで幅広く実験領域が拡大してきて EDM の測定上限値が年々向上している。このような状況で、磁場の変動によるスピン歳差周波数変動が EDM の検出感度を決めている重要な要因のひとつになっている。実際 EDM 測定に関わる原子スピン系と磁場変化をプローブするための別の原子スピン系を混在させる、あるいは別の原子スピン系を近距離に設置して磁力計として用いられることが多い。従ってコンパクトで安定であり、かつ高感度な原子磁力計を用意することが現代・次世代の EDM 精密測定実験に最も重要な要素であると言って良い。

2. 研究の目的

磁場中の Rb 原子スピンと単一波長レーザー光との間の非線形磁気光学回転効果(NMOR)を利用した高感度原子磁力計の構築を行う。特に磁力計の感度に直結するパラメータである Rb 原子スピンのセル内でのデコヒーレンス特性の研究を展開する。また EDM 実験では $B_0 = 5 - 10$ mG 程度の静磁場が印加された状態で行うのが一般的なので、この磁場領域で磁力計を動作させるために周波数変調したレーザー光を用いた原子磁力計の開発研究を行う。ゼロ磁場での磁場感度および背景磁場 5mG 程度における磁場感度の比較を行い EDM 実験において NMOR 型原子磁力計を導入する検討を行う。

3. 研究の方法

Rb 原子の D1 吸収波長に合わせた直線偏光レーザーを Rb 原子蒸気セルに照射すると、原子の基底状態は $m = \pm 1$ の副準位の線形結合で表されるスピン整列状態を形成する。今検出したい磁場の方向(z 軸)にレーザー進行方向を一致させると、このスピン整列状態は z 軸の周りに歳差運動をする。CW レーザー光を用いている場合、このスピン整列軸は歳差周波数とスピン緩和レートで決まる角度だけ入射光偏光面から傾きを保つことになる。この傾いたスピン整列軸に応じて入射偏光面から回転した透過光の偏光面が観測できる。この偏光回転角度は磁場の大きさに対して分散型スペクトルをとるので、偏光面の角度を測定することにより磁場の大きさを測定できることになる。このスペクトルの幅が磁場測定感度に直結するが、これはスピン整列状態が緩和する速さ、つまりスピン緩和時間で決まる。従って Rb 原子を封じ込めるガラスセルの内壁にスピン緩和コーティング(パラフィン)を施して、幅の狭いスペクトルを実現する。長い緩和時間を実現でき

て小さい磁場変化を検出する場合、このままではゼロ磁場付近における磁場変化しか測定できないので、入射レーザーの周波数あるいは振幅を変調する。EDM 実験のようにある大きさの背景磁場のもとでの微小磁場変化を検出したい場合、変調周波数をそれに応じて適切に合わせることによって高感度磁場検出が可能になる。以上を踏まえて、Rb 原子の非線形磁気光学回転の測定実験系の実現、スピン緩和機構と磁場感度に関する系統的研究、周波数変調を用いた磁気光学磁力計の研究を展開し、EDM 測定実験にこの型の磁力計を導入する道筋を付ける。

4. 研究成果

パラフィンで内壁をコーティングしたガラスセルに Rb 蒸気を封入したセルを円筒型 3 重磁気シールド内に設置し、NMOR 測定実験を行うシステムを構築した(図 1 参照)。光源として単一周波数発振する外部共振器半導体レーザー(794.7nm)も構築した。この実験系で NMOR スペクトルの幅の系統的研究を行い、Rb 原子のスピンコヒーレンス時間(T_2)が 3.6 ms と見積もることができた。またこのコヒーレンス時間 T_2 を決めている要因について考察するために、スピン緩和時間(T_1)の測定を独立に行い 10 ms であることを確認した。これは Rb 原子がセル内壁に平均 100 回衝突する時間スケールに相当し、コーティングによる壁衝突緩和と抑制がある

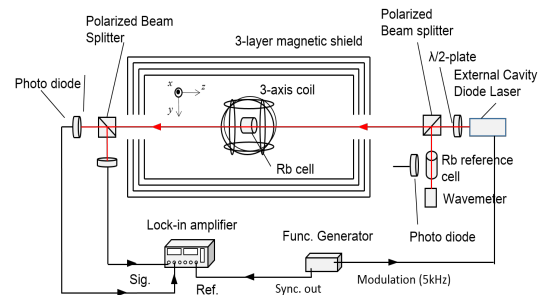


図 1: NMOR 型磁力計の実験セットアップ。Function Generator は FM-NMOR 動作のため。

程度は効いていることが分かった。また、 T_2 が T_1 より若干短いことから、壁衝突以外のデコヒーレンス機構、例えば磁気シールド内の残留磁場によるものが効いていることが分かった。

有限背景磁場のもとでの磁力計を実現するために、レーザー光の周波数を変調させた FM-NMOR 測定実験も行った。測定の際、磁場を掃引する際に、分散型スペクトルピークがゼロ磁場以外にも変調周波数 $\Omega_m = 5.0$ kHz に対応する磁場 $B = 5.3$ mG にも現れる(図 2 参照)。この 5.3 mG で観測された FM-NMOR スペクトルの幅はゼロ磁場で観測される幅とほぼ同じ 3.8 ms であった。従って構築し

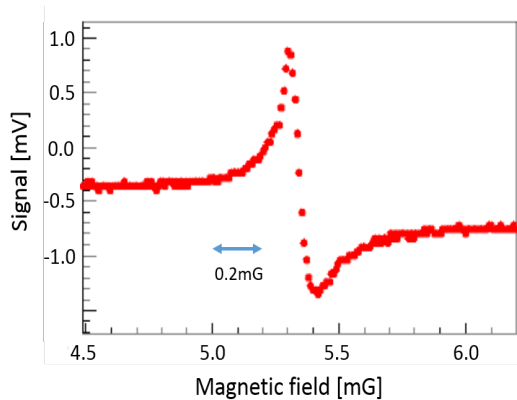


図 2: $B=5.3$ mG における FM-NMOR スペクトル。

た FM-NMOR 実験系により EDM 測定で一般的に使用する静磁場強度において高感度磁場測定を実現することができたと言える。またスペクトルの回転角度と磁場との関係及びノイズスペクトルから、現状での磁場感度は $7\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ であった。一方現状のスペクトルパラメータから算出されるショットノイズによる磁場感度の限界値は $30\text{ pG}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、スペクトルの S/N 比等、いくつかの改善を要するものの、EDM 測定環境での有限磁場における高感度磁力計の実現に道筋を付けることができたと言える。

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 7 件)

- 1) T. Sato, Y. Ichikawa, Y. Ohtomo, Y. Sakamoto, S. Kojima, C. Funayama, T. Suzuki, M. Chikamori, E. Hikota, M. Tsuchiya, T. Furukawa, A. Yoshimi, C. P. Bidinosti, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, K. Asahi: “EDM measurement in ^{129}Xe atom using dual active feedback nuclear spin maser”, *Hyperfine Interact.* **230** (2015) 147-153.
- 2) T. Inoue, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Ishikawa, M. Itoh, K. Kato, H. Kawamura, A. Uchiyama, T. Aoki, K. Asahi, T. Furukawa, A. Hatakeyama, K. Hatanaka, K. Imai, T. Murakami, H. S. Nataraj, T. Sato, Y. Shimizu, T. Wakasa, H. P. Yoshida, A. Yoshimi, Y. Sakemi, “Experimental search for the electron electric dipole moment with laser cooled francium atoms”, *Hyperfine Interact.* **231** (2015) 157-162.
- 3) K. Asahi, Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, E. Hikota, T. Suzuki, T. Inoue,

- T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo and T. Fukuyama, “Search for Electric Dipole Moment in ^{129}Xe Atom Using a Nuclear Spin Oscillator”, *Physics of Particles and Nuclei* **45**, No. 1 (2014) 199-201.
- 4) Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, E. Hikota, Y. Sakamoto, T. Suzuki, C.P. Bidinosti, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama, and K. Asahi, “Search for electric dipole moment in ^{129}Xe atom using active nuclear spin maser”, *EPJ Web of Conferences* **66** (2014) 05007
- 5) K. Asahi, Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, E. Hikota, T. Suzuki, T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, T. Ino, H. Ueno, Y. Matsuo and T. Fukuyama: “Search for Electric Dipole Moment in ^{129}Xe Atom Using a Nuclear Spin Oscillator”, *Phys. Part. Nucl.* **45** (2014) 199-201.
- 6) T. Inoue, T. Furukawa, A. Yoshimi, Y. Ichikawa, M. Chikamori, Y. Ohtomo, M. Tsuchiya, N. Yoshida, H. Shirai, M. Uchida, K. Suzuki, T. Nanao, H. Miyatake, H. Ueno, Y. Matsuo, T. Fukuyama and K. Asahi, “Nuclear spin maser and experimental search for ^{129}Xe atomic EDM”, *Hyperfine Interact.* **220** (2013) 59-63.
- 7) A. Yoshimi, T. Inoue, T. Furukawa, T. Nanao, K. Suzuki, M. Chikamori, M. Tsuchiya, H. Hayashi, M. Uchida, N. Hatakeyama, S. Kagami, Y. Ichikawa, H. Miyatake and K. Asahi, “Low-frequency ^{129}Xe nuclear spin oscillator with optical spin detection”, *Phys. Lett. A* **376** (2012) 1924-1929.

〔学会発表〕(計 3 件)

- 1) 内山愛子、井上壮志、青木隆宏、石川泰佑、加藤浩、川村広和、坂本幸祐、早水友洋、原田健一、青木貴稔、旭耕一郎、吉見彰洋、酒見康寛、「フランシウムを用いた電子 EDM 探索に向けたルビジウム磁力計の開発」、2015 年 3 月、早稲田大学。
- 2) 吉見彰洋、「マクロコヒーレンス生成に向けた Xe 準安定状態に関する分光実験」、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月、高知大学。
- 3) A. Yoshimi, “Neutrino mass spectroscopy with atoms”, 7th International Conference on Fundamental Physics

Using Atoms, Sendai, Japan, October
2012.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉見彰洋 (Akihiro Yoshimi)

岡山大学・極限量子研究コア・准教授

研究者番号 : 40333314

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

旭耕一郎 (Koichi Asahi)

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