

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17676

研究課題名(和文) 超高感度磁場計測に向けた光格子磁力計の開発

研究課題名(英文) Development of an optical lattice magnetometer for high-sensitivity magnetic-field detection

研究代表者

原田 健一 (Harada, Ken-ichi)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・講師

研究者番号：00515447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、極低温まで冷却されたアルカリ原子を光格子に閉じ込めることで、高感度で高空間分解能を有する磁力計の開発を行った。磁気光学トラップによってルビジウム原子の予備冷却を行い、偏光勾配冷却による冷却温度の更なる改善を行うことで、原子を光格子中に捕獲することに成功した。また新たにレーザー光源や周波数安定化システムの開発を行うことで、磁場を測定するための非線形磁気光学回転の実験系の構築を行うことができた。これらの開発によって光格子磁力計を実現するために必要とされる技術の確立を行うことができた。

研究成果の概要(英文)： We developed a magnetometer with high sensitivity and high spatial resolution by using alkali atoms trapped in an optical lattice. By trapping rubidium (Rb) atoms in magneto-optical trap and improving the temperature of cold atom clouds by polarization gradient cooling, we succeeded in trapping Rb atoms in the optical lattice. Moreover, we constructed an experimental system of nonlinear magneto-optical rotation for measuring a magnetic field by developing a laser light source and frequency stabilization system. We established several techniques required to realize the optical lattice magnetometer.

研究分野：量子エレクトロニクス、素粒子・原子核

キーワード：光格子 光学磁力計

1. 研究開始当初の背景

磁気現象を高感度かつ高い空間分解能で測定する技術は、電子の電気双極子能率の探索などの基礎物理学分野から、脳磁計や心磁計などの医学分野にわたり幅広い領域で必要とされている。近年、高感度磁力計として注目を集めているものに、超伝導量子干渉計(SQUID)やガラスセル中のアルカリ金属原子気体、冷却原子を用いたものなどがある。SQUID は高感度でかつ 30 cm 程度の比較的小型のものが報告されている。ガラスセル中のアルカリ金属原子気体原子は、アルケン系のコーティングに改良を施し、そのガラスセル内にルビジウム(Rb)原子を封入したもので最大 60 s のコヒーレンス緩和時間を達成している。またガラスセルを高温にして原子密度を増加させることで、スピン交換緩和がない(SERF)状態を作り、長いコヒーレンス時間を実現している。冷却原子を用いたものでは、ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)状態を用いた磁力計の開発が行われており、高感度かつ空間分解能の高い磁場検出が行われている。しかしながら、SQUID やガラスセルを用いた磁力計は cm 以下に空間分解能を高くすることが困難であり、また BEC を用いた磁力計はスピンエコー法を用いているため交流磁場の測定に適しており、かつ BEC 状態を測定に用いるためには多くの時間が必要とされる。

2. 研究の目的

本研究では、光格子と呼ばれる周期的なポテンシャルに閉じ込められたアルカリ原子を用いることで、局所的でかつ原子同士の衝突がない高精度な磁力計の開発を行うことを目的とする。光格子はあらかじめ数 $10 \mu\text{K}$ 程度に予備冷却された原子集団を光の定在波の節、もしくは腹に捕獲する方法で、非共鳴なレーザー光を用いているため光との相互作用がなく高分解な分光が可能である。また定在波の節や腹は波長の半分程度空間的に離れているため原子同士の衝突も大幅に減らすことができる。さらに光格子の捕獲領域は非常に小さいため磁場の空間的な不均一性も抑えられ、磁場変動を補正する領域も限りなく小さくなる。これらの利点を用いることで、高感度で高空間分解能を有する磁力計の開発を行う。

3. 研究の方法

まず Rb 原子の予備冷却を行うため磁気光学トラップ(MOT)、偏光勾配冷却(PGC)を行った。光源には温度と電流が精密に制御された外部共振器型半導体レーザー(ECDL)が用いられ、その出力光はテーパアンプによって約 1 W まで増幅された。このレーザー光の一部は、光源の周波数変動を安定化するために

分けられ、Rb 蒸気セルを用いた周波数変調分光法によって ECDL にフィードバックがかけられた。残りのレーザー光は MOT のために真空チャンバー内に照射された。MOT で捕獲されている原子集団はレーザー光の吸収、放出を繰り返しているため、Charge Coupled Device (CCD)カメラを用いることで原子集団からの蛍光を観測することができ、個数や大きさを見積ることが可能となる。

次に光格子によって捕獲される原子数を増強するため、PGC による更なる冷却を行った。PGC はレーザー光によって生じる光シフトを利用した冷却法であり、MOT によって捕獲された原子の速度をさらに遅く(冷却)することが可能になるが、このためには環境磁場を限りなく小さくし、ゼーマン効果による磁気副準位の分裂を抑える必要がある。現在の実験室ではイオンポンプによる磁場と地磁気による影響が大きいため、MOT チャンバーの周りに 3 軸のヘルムホルツコイルを設置し、精密に電流源を制御することで調整を行った。原子集団がどの程度冷却されたかを確認するために飛行時間法(TOF 法)を用いるが、その画像を取得する手段として吸収イメージング法を導入した。吸収イメージング法は、一様に広げたイメージング光と呼ばれる共鳴光を原子集団に入射することで、原子集団が吸収した部分だけが影として CCD カメラによって撮像される方法で、原子集団の個数や半径、密度などを推定することができる。

光格子、光双極子カトラップ(ODT)は、共にレーザー光と原子に生じた電気双極子モーメントとの相互作用によって生じるポテンシャルに捕獲される。まずは ODT によって原子を捕獲することを目指した。1064 nm のファイバーレーザーより発振された光のビーム直径をレンズによって 10 mm まで拡大し、焦点距離 250 mm のレンズによりチャンバー内の原子集団の中心で集束点が来るように入射させた。入射パワーは約 35 W であるため、反対側のポートから出射したところで光ダンパーによって止められた。チャンバーへ入射する光のアライメントにおいては、原子に共鳴する 780 nm の光をガイド光として用い、1064 nm の光路と重ねて冷却原子へ入射した。こうすることでガイド光により捕獲された原子が吹き飛ばすため、これをカメラで観測しながら最適な地点を探すことができる。その後ガイド光をビームストッパーで遮断し、1064 nm の光のみを入射して実験を行った。またアライメントの際に考慮する事項として、ビームを可能な限り水平にすることが要求される。これは、レーザー光の光路が水平から傾斜すると、重力ポテンシャルによってトラップポテンシャルが傾き、結果として深さが減少するためである。これらに留意しながら実験を行った。また光格子の実験系は、反対側のポートに設置された光ダンパーを取り外し、250 mm のレンズとミラーを設置し、光を原子に戻すことで構築された。

NMOR 測定を行うための観測光には、ECDL が用いられた。レーザー光強度の安定化のために音響光学素子、電気光学素子を用いたフィードバックを行うことで、安定化レーザーシステムを構築した。冷却原子を通過してきた観測光を偏光ビームスプリッタによって分けて強度の差を取り、偏光面の回転度合いをロックイン検出器によって測定するための光学系の構築を行った。

4. 研究成果

まず MOT によって捕獲された原子集団を CCD カメラによって観測し、画像を取得した (図 1)。この画像より得られた蛍光強度からおよそ 10^9 個の原子数が捕獲されていると見積られた。これは光格子を行う上で十分な原子数を達成できたと言える。またこの時のチャンバー内の真空度は 10^{-9} Pa であった。

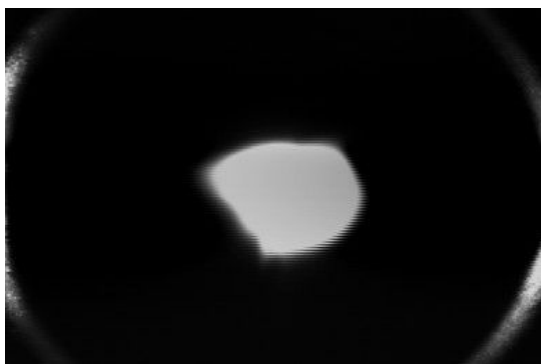


図 1. MOT によって捕獲された Rb 原子の蛍光画像。

次に PGC による冷却効果を検証するために、MOT のための光や四重極磁場などをすべて切った後、イメージング光を入射する時間を変えながら、原子集団が拡散していく様子を観測した。このとき光を切るタイミングを $t=0$ 、解放してから経過した時間を t として、原子集団の半径を t の関数としてプロットした (図 2)。このデータをフィッティングすることで原子の温度が約 $20 \mu\text{K}$ であることが分かった。この結果は MOT によるドップラー限界温度よりも冷却されているため、環境磁場の補正が精密にできたことで PGC の効果がよく表れていることを示している。しかしながら PGC による理論的な限界温度へはまだ到達しておらず、磁場の補正、周波数の離調、光強度の調整などの更なる改善を行う必要がある。

ODT の実験においては、MOT によって原子を蓄積し、PGC を行った後に、ODT 光のみで原子を捕獲し観測を行った。ODT 中に冷却原子を数 10 ms 程度保持し、イメージング光を照射することで CCD カメラによって吸収画像を取得した。このようにすることで、ODT によって捕獲されなかった原子は、重力によって落下し位置がずれるか、徐々に拡散し薄くなるため、はっきりと ODT に捕獲された原子

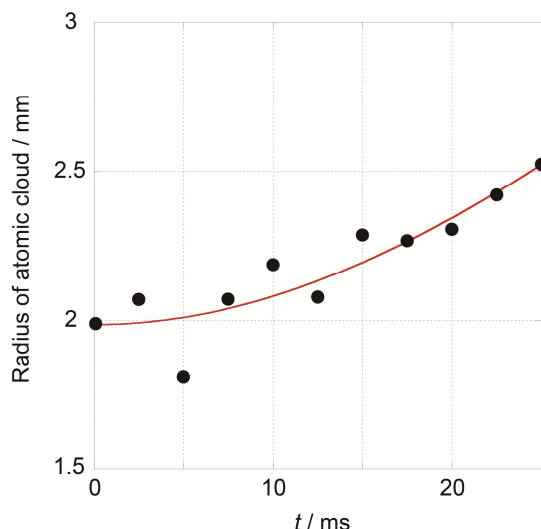


図 2. 時間 t 秒後における原子雲の半径の測定データ。

を確認することができる。図 3 は ODT で捕獲された原子を吸収イメージングによって撮像した吸収画像である。画像の中心にある吸収部分が ODT により捕獲された原子を表している。また Y は重力方向を示している。この時の ODT 光の強度は 35 W であった。この画像から ODT 中に捕獲された原子数は、約 3×10^6 個であることが分かった。また次に、光格子の実験系に組み替えて原子を捕獲する実験を行うことで、吸収イメージングによる原子の観測に成功した。

NMOR を測定するための光源として、2 台の ECDL の開発を行った。偏光の回転角度観測のためのプローブ光源と、Rb 原子の磁気副準位に偏極するためのポンプ光源を反射防止コーティングの施された半導体素子を用いて製作し、両方共に Rb 原子に共鳴する 780 nm の波長の光を発振させることに成功した。また Rb 蒸気セルを用いた周波数変調分光法の実験系の構築を行い、周波数安定化回路にこの信号を入力することで、ECDL へのフィードバック信号を得ることができ、周波数安定化を行うことが可能となった。ポンプ光を原子

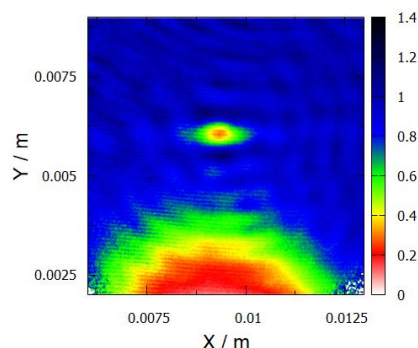


図 3. ODT 光によって 35 ms 間保持された後の原子の吸収画像。下部の大きな吸収は ODT によって捕獲されずに重力によって落下している原子集団を表している。

に照射後、ポンプ光の偏光と同じ偏光を有するプローブ光を入射することで透過光強度の変化を観測することができ、原子が磁気副準位に偏極されていることを確認できた。またプローブ光の偏光面の回転度合を検出するため、偏光ビームスプリッタによって光を分け、その強度差を観測するための測定系の構築も行うことができた。

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6件)

U. Dammalapati, K. Harada, T. Hayamizu, K. Sakamoto, K. Kato, T. Aoki, S. Ito, T. Inoue, A. Uchiyama, H. Kawamura, M. Itoh, T. Aoki, A. Hatakeyama, Y. Sakemi, Francium: Tool for Fundamental Symmetry Investigations, JPS Conf. Proc., Vol.18, 011046, 2017, 査読有, <https://doi.org/10.7566/JPSCP.18.011046>

U. Dammalapati, K. Harada, T. Inoue, S. Ito, H. Kawamura, K. Sakamoto, K. Tanaka, A. Uchiyama, R. Yoshioka, Y. Sakemi, Frequency Measurement of Tellurium Lines Near Calcium, J. Phys. Soc. Jpn., Vol.86, 124301, 2017, 査読有, <https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.124301>

M. Itoh, S. Ando, T. Aoki, H. Arikawa, S. Ezure, K. Harada, T. Hayamizu, T. Inoue, T. Ishikawa, K. Kato, H. Kawamura, Y. Sakemi, A. Uchiyama, Measurement of the 3- decay from the Hoyle and the broad 10 MeV states in ^{12}C , J. Phys. Conf. Ser., Vol.863, 012019, 2017, 査読有, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/863/1/012019>

T. Aoki, Y. Torii, B. K. Sahoo, B. P. Das, K. Harada, T. Hayamizu, K. Sakamoto, H. Kawamura, T. Inoue, A. Uchiyama, S. Ito, R. Yoshioka, K. S. Tanaka, M. Itoh, A. Hatakeyama, Y. Sakemi, Parity-nonconserving interaction-induced light shifts in the $7S_{1/2} - 6D_{3/2}$ transition of the ultracold ^{210}Fr atoms to probe new physics beyond the standard model, Appl. Phys. B, Vol.123, 120, 2017, 査読有, DOI 10.1007/s00340-017-6673-3

T. Aoki, Y. Torii, B. K. Sahoo, B. P. Das, K. Harada, T. Hayamizu, K. Sakamoto, H. Kawamura, T. Inoue, A. Uchiyama, S. Ito, R. Yoshioka, K. S. Tanaka, M. Itoh, A. Hatakeyama, Y. Sakemi, Light shifts induced by nuclear

spin-dependent parity-nonconserving transitions of ultracold Fr for the detection of nuclear anapole moment, Asian J. Phys., Vol.25, 1247, 2016, 査読有,

U. Dammalapati, K. Harada, Y. Sakemi, Magic and tune-out wavelengths for atomic francium, Phys. Rev. A, Vol.93, 043407, 2016, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevA.93.043407

[学会発表](計20件)

内山愛子、原田健一、坂本幸祐、伊藤沙希、伊藤正俊、井上壮志、川村広和、田中香津生、U. Dammalapati、吉岡里紗、青木貴稔、畠山温、高橋義朗、酒見泰寛、電子の永久電気双極子能率探索に向けた冷却 ^{85}Rb 、 ^{87}Rb 原子の同時スピン緩和時間測定、日本物理学会 第73回年次大会、2018年3月

田中香津生、吉岡里紗、U. Dammalapati、原田健一、伊藤正俊、伊藤沙希、井上壮志、川村広和、坂本幸祐、内山愛子、酒見泰寛、電子 EDM 探索に向けたフランシウムの磁気光学トラップ、日本物理学会 第73回年次大会、2018年3月

川村広和、原田健一、井上壮志、伊藤沙希、田中香津生、内山愛子、上野恭裕、小澤直也、山本広平、杉森龍宇、皆川幸穂、酒見泰寛、表面電離を用いた放射性フランシウムのイオンビーム生成、日本物理学会 第73回年次大会、2018年3月

K. Harada, A. Uchiyama, T. Inoue, H. Kawamura, K. S. Tanaka, S. Ito, U. Dammalapati, T. Aoki, A. Hatakeyama, Y. Sakemi, Laser frequency stabilization using iodine molecule spectroscopy with frequency modulation at 3.5 GHz for magneto-optical trapping of francium atoms, 10th International workshop on Fundamental Physics Using Atoms, 2018年1月

A. Uchiyama, K. Harada, K. Sakamoto, T. Inoue, S. Ito, M. Itoh, H. Kawamura, K. S. Tanaka, U. Dammalapati, R. Yoshioka, Y. Sakemi, Dual isotope transfer in a double magneto-optical trap system for cooled rubidium co-magnetometer toward search for electron electric dipole moment, 10th International workshop on Fundamental Physics Using Atoms, 2018年1月

K. Harada, Development of a Double Magneto-optical Trap System toward Electron Electric Dipole Moment Search in an Optical Lattice, BIT's 1st Annual Conference of Quantum World, 2017年

10月

川村広和、原田健一、井上壮志、伊藤沙希、田中香津生、内山愛子、酒見泰寛、電子 EDM 探索に向けた冷却不安定原子生成の研究、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月

青木貴稔、鳥井寿夫、B. K. Sahoo、B. P. Das、原田健一、早水友洋、坂本幸祐、川村広和、井上壮志、内山愛子、伊藤沙希、吉岡里紗、田中香津生、伊藤正俊、畠山温、酒見泰寛、アナポールモーメント検出のための冷却 Fr パリティ非保存相互作用誘起の光シフト、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月

U. Dammalapati、K. Harada、T. Inoue、S. Ito、H. Kawamura、K. Sakamoto、K. Tanaka、A. Uchiyama、R. Yoshioka、Y. Sakemi、Atomic calcium and molecular tellurium spectroscopy with a 423 nm diode laser system、日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月

伊藤沙希、川村広和、伊藤正俊、井上壮志、内山愛子、田中香津生、U. Dammalapati、坂本幸祐、原田健一、吉岡里紗、酒見泰寛、電子 EDM 探索のための融解金表面におけるフランシウムイオン生成の研究、日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月

田中香津生、吉岡里紗、U. Dammalapati、原田健一、伊藤正俊、伊藤沙希、井上壮志、川村広和、坂本幸祐、内山愛子、酒見泰寛、フランシウムを用いた電子 EDM 探索に向けた 2 次元ビームプロファイルモニタの開発、日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月

坂本幸祐、原田健一、U. Dammalapati、内山愛子、伊藤沙希、伊藤正俊、井上壮志、川村広和、田中香津生、吉岡里紗、青木貴稔、畠山温、酒見泰寛、冷却原子を用いた電気双極子能率探索のための光双極子力トラップ装置の開発、日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月

吉岡里紗、田中香津生、U. Dammalapati、原田健一、井上壮志、伊藤沙希、伊藤正俊、川村広和、坂本幸祐、内山愛子、酒見泰寛、電子電気双極子モーメント探索に向けた二次元ビームプロファイルモニタの開発、日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月

内山愛子、原田健一、坂本幸祐、U. Dammalapati、井上壮志、伊藤沙希、伊藤正俊、川村広和、田中香津生、吉岡里紗、青木貴稔、畠山温、高橋義朗、酒見泰寛、電子の永久電気双極子能率探索のための冷却ルビジウム共存磁力計に向けた ^{85}Rb 、 ^{87}Rb の同時磁気光学トラップ、日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年 3 月

K. Harada、K. Sakamoto、U. Dammalapati、T. Aoki、K. Kato、T. Hayamizu、H. Kawamura、T. Inoue、K. S. Tanaka、A.

Uchiyama、S. Ito、R. Yoshioka、M. Itoh、A. Hatakeyama、Y. Sakemi、Development of optical dipole force trap system toward the electron electric dipole moment search using laser-cooled francium atoms、9th International workshop on Fundamental Physics Using Atoms、2017 年 1 月

A. Uchiyama、K. Harada、K. Sakamoto、T. Inoue、S. Ito、M. Itoh、H. Kawamura、K. S. Tanaka、U. Dammalapati、R. Yoshioka、Y. Sakemi、Development of a dual isotope co-magnetometer using laser-cooled rubidium toward electron electric dipole moment search using francium、9th International workshop on Fundamental Physics Using Atoms、2017 年 1 月

K. Harada、Laser frequency locking with 46 GHz offset by using an electro-optic modulator for magneto-optical trapping of francium atoms、5th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics and Photonics、2016 年 11 月

A. Uchiyama、K. Harada、K. Sakamoto、U. Dammalapati、T. Inoue、S. Ito、M. Itoh、H. Kawamura、K. Tanaka、R. Yoshioka、Y. Sakemi、Development of a dual isotope rubidium co-magnetometer toward electron EDM search using laser-cooled francium、Physics of fundamental Symmetries and Interactions、2016 年 10 月

K. Sakamoto、K. Harada、U. Dammalapati、A. Uchiyama、T. Aoki、S. Ito、M. Itoh、T. Inoue、H. Kawamura、K. Tanaka、A. Hatakeyama、R. Yoshioka、Y. SAKEMI、Development of an optical dipole force trap system towards search for an electron EDM using laser-cooled francium、Physics of fundamental Symmetries and Interactions、2016 年 10 月

A. Uchiyama、K. Harada、T. Inoue、U. Dammalapati、M. Itoh、S. Ito、H. Kawamura、K. Sakamoto、K. S. Tanaka、R. Yoshioka、T. Aoki、A. Hatakeyama、K. Asahi、A. Yoshimi、Y. Sakemi、Search for the permanent electric dipole moment of laser cooled francium atom、High Sensitivity Experiments Beyond the Standard Model、2016 年 6 月

〔その他〕
ホームページ等

CYRIC 測定器研究部
<http://inst.cyric.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 健一 (HARADA, Ken-ichi)
東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソト
ープセンター・講師
研究者番号：00515447

(4) 研究協力者

酒見 泰寛 (SAKEMI Yasuhiro)
東京大学・原子核科学研究センター・教授

井上 壮士 (INOUE Takeshi)
東北大学・学際科学フロンティア研究所・助
教

内山 愛子 (UCHIYAMA Aiko)
東北大学大学院・理学研究科・博士後期課程