

微弱磁場検出のための光格子を用いた 超高感度磁力計の開発

所属： 東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

助成対象者：原田 健一

共同研究者：東京大学 原子核科学研究センター 酒見 泰寛

東北大学 学際科学フロンティア研究所 井上 壮志

概要

本研究の目的は、高感度かつ高空間分解能が期待される光格子磁力計へ向けた技術開発を行うことである。まず光格子に原子を捕獲するための予備冷却を行った。実験セットアップ MOT1 を改造することにより、MOT2 で捕獲される原子数を 10^8 個から 1×10^{10} 個にまで増強することができた。また原子集団の温度を約 $20 \mu\text{K}$ の極低温まで冷却することができた。これによって光双極子力トラップ中に捕獲された原子数を 100 倍程度改善することができ、本研究の目的の 1 つを達成することができた。また冷却原子に対して 6.8 GHz のマイクロ波を照射することで、ラムゼー干渉縞を観測することができ、その周波数分解能は kHz 程度であることが分かった。

abstract

The purpose of this research is to develop the technologies for a high-sensitive and high-spatial-resolution magnetometer using alkali atoms in an optical lattice (OL). We performed magneto-optical trapping (MOT) and polarization-gradient cooling as a pre-cooling method for loading atoms into an OL. By remodeling the experimental setup of MOT1, we increased the number of trapped atoms in MOT2 from 10^8 to 1×10^{10} . Moreover, the temperature of the

atomic cloud was reduced by about 20 μ K. As a result, the number of trapped atoms in the optical dipole force trap was increased by about 10^2 in magnitude. By applying the radio frequency of 6.8 GHz corresponding to the hyperfine splitting, we successfully observed Ramsey interference fringes with a frequency resolution of less than a few kilohertz.

研究内容

「背景」

高感度かつ高空間分解能で磁場を測定する技術は、電気双極子能率探索などの基礎物理学分野を始め、地震や火山の調査などの地球科学分野、生体磁気イメージング、脳磁計などの医学分野まで幅広い領域で必要とされている。磁場を測定する方法には、誘導起電力を利用した探りコイルやホール素子などがあるが、近年国内外で精力的に開発されている主なものとしては、超伝導量子干渉計 (SQUID) [1]やガラスセルに封入されたアルカリ金属原子気体[2, 3]、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) 状態の原子[4]を用いたものが挙げられる。またダイヤモンド中の窒素空孔中心の電子スピン状態を用いた高感度ナノ磁場センシングの研究も盛んに行われており、量子技術を用いる磁力計として注目を集めている[5]。SQUIDに関しては、岩手大学の小林らによって比較的小型のものを用いた空間分解能の高い磁力計の開発が行われている。この SQUID の大きさは 30 cm 程度であり 10^{-12} T/Hz^{1/2} の感度を得られているが、超伝導状態を利用した計測機構であるため液体ヘリウムによる冷却システムを必要とし、システムの運転・維持に多大なコストを要する。また冷却に必要なヘリウムが不足し手に入りにくい問題もある。アルカリ金属原子気体の磁力計として、プリンストン大学の Romalis らや京都大学の小林らのグループが原子密度を高くすることでスピン偏極の緩和レートが小さくなる状態 (SERF) を利用した磁力計の開発を行っている。しかしながら SERF 状態はガラスセルを高温にする必要があるため測定対象に近接できない問題がある。またバークレー大学の Budker らは、ガラス内壁へ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) 原子を封入した磁力計の開発を行っている。このコーティングは最大 60 s のコヒーレンス緩和時間を達成しているが、製作したガラスセルの緩和時間にバラつきが生じており、再度同じ性能を持つコーティングが達成されたとの報告はない。またガラスセルを用いた磁力計の空間分解能は原子の拡散や

ガラスセルのサイズによって制限されるため局所的な磁場を測定することは難しい。冷却原子を用いたものは高い空間分解能でかつ高感度を実現できるため注目を集めており、学習院大学の平野らのグループによって BEC 状態の Rb 原子を用いた磁力計の開発が行われている。BEC 原子に対してスピネコー法を用いて交流磁場の測定を行っており、測定感度は $12 \times 10^{-12} \text{ T/Hz}^{1/2}$ を達成している。しかし BEC 状態の原子を生成するためには数 10 秒程度かかるため、連続した磁場変動の測定には向いていない。

「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冷却された原子を閉じ込めることにより、衝突によるコヒーレンスの緩和やスペクトルの広がりや抑制され、局所的な磁場測定が可能であることに着目し、高感度で高い空間分解が期待される光格子磁力計 (OLM) へ向けた技術開発を行った。光格子はあらかじめ約 $100 \mu\text{K}$ 以下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となる。また 0.1 m^3 程度の空間に 10^6 程度の原子が局在化しているため大きな信号を得ることができ、さらに捕獲するために必要な時間は BEC 生成よりも格段に短い。これらの利点によって高感度で高空間分解能を実現でき、従来までの磁力計の不得意な点を克服できると考え本研究に着手した。

「結果」

まず光格子に原子を導入するための予備冷却として、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が用いられた。原子を捕獲するシステムは 2 つの真空チャンバーから構成され、1 つは Rb アンプルから供給された原子を捕獲するための真空チャンバー (MOT1) で、もう 1 つは光格子を用いたラムゼー共鳴観測を行う超高真空チャンバー (MOT2) である。この 2 つのチャンバーは差動排気を行うため細いチューブでつながっており、MOT1 に捕獲されている原子が共鳴する波長をもつプッシュ光によって押されることで、細いチューブを通過して MOT2 へと輸送され、再トラップされる。今回 MOT1 のチャンバーを改造し、 10^8 個から 10^{10} 個に捕獲原子数を改善することで、従来よりも約 100 倍の原子数を MOT2 で捕獲することが可能となった。実際に個数を見積る手段として吸収イメージン

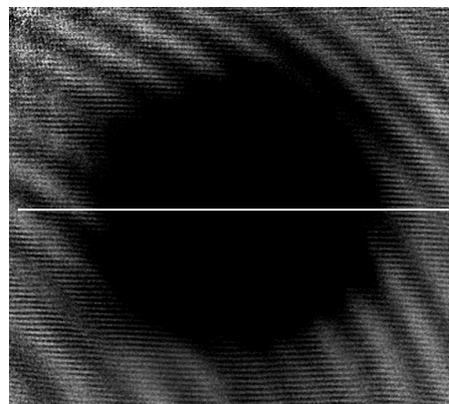


図 1. 吸収イメージングによる原子雲

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、密度などを見積ることができる(図 1)。この方法で測定したところ、MOT2 での原子の捕獲個数が 1×10^{10} 個を達成していることが分かった(図 2)。

次に原子集団の温度を下げ、光格子に捕獲するための効率を向上させるために、PGC による更なる冷却を行った。MOT によるドップラー冷却には限界温度があり、 ^{87}Rb では $140 \mu\text{K}$ になる。この温度は今回使用するファイバーレーザーの出力パワーによって作られる光格子のポテンシャルと比較して十分低いとは言えない。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 MOT2 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、原子集団が拡散していく様子を観測した。光を切るタイミングを 0 秒として、解放してからの原子集団の半径を時間の関数としてプロットした(図 3)。このデータをフィッティングすることで原子集団の温度が約 $20 \mu\text{K}$ であることが分かった。これは MOT によるドップラー限界温度よりも冷却されており、PGC の効果が表れていることを示している。チャンバーの改良による 1×10^{10} 個の個数達成と、冷却温度 $20 \mu\text{K}$ の成功によって、光双極子カトラップに捕獲される原子数を 100 倍程度改善することができた。これは光格子に 10^6 個捕獲するために十分な性能である。

磁場変動は、ゼーマン効果による原子のエネルギー準位のシフトを精密に測定することで見積もることができるが、この方法にラムゼー共鳴法を用いた。ラムゼー共鳴信号を観測するために用いたのは、 ^{87}Rb 原子の $5S_{1/2}, F = 1 \rightarrow 5S_{1/2}, F = 2$ 間の 6.8 GHz の遷移である。MOT で捕獲した冷却原子のこの遷移に対してマイクロ波を照射することで、ラムゼー干渉縞を取得できることを確認した。現在は MOT を切った解放系で測定を行っているた

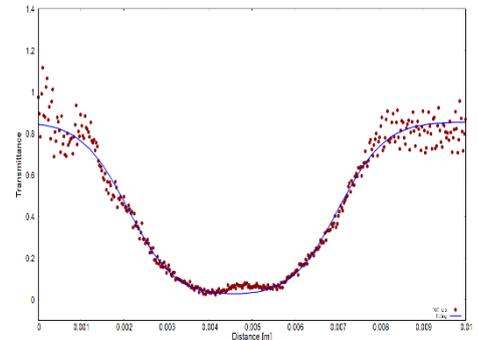


図 2. 吸収イメージング画像のプロファイル(図 1 中の白線)

めに原子が拡散し、1 ms 以下のコヒーレンス時間しか得られていない。今後は光格子や光双極子カトラップ中に捕獲された原子を用いることで、1 s 以上のコヒーレンス時間を達成することが可能となり、精度の向上が見込まれる。また測定データの誤差を小さくするために、新しい安定な光源を導入した。その光源の周波数と強度の安定性を調べ、さらにフィードバック回路を製作することで、磁場を高精度に測定することが可能となった。

「今後」

本研究では光格子磁力計を用いた高感度磁場検出に向けて、光格子のための装置開発と高感度磁場検出を可能にするためのラムゼー共鳴法の開発を行った。光格子については、捕獲個数が十分ではないという問題点を克服することができたため、光格子中の原子のコヒーレンス時間等の評価を行う。ラムゼー共鳴法については、冷却原子を用いた測定に成功しており、kHz 程度の周波数分解能が得られている。また新しい安定な光源を導入することで、測定データの誤差を改善することが可能となった。今後は ODT と光格子でのラムゼー共鳴測定を行うことで更なる周波数分解能の向上を目指し、磁場測定の感度と空間分解能の評価を行う。

引用文献

- [1] K. Kobayashi *et al.*, IEEE transactions on magnetics **39**, 3378 (2003).
- [2] I. K. Kominis *et al.*, Nature **422**, 596 (2003).
- [3] M.V. Balabas *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 070801 (2010).
- [4] Y Eto *et al.*, Phys. Rev. A **88**, 031602(R) (2013).
- [5] J. M. Taylor *et al.*, Nature Physics **4**, 810 (2008).

本助成に関わる成果

[口頭発表]

・ 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 at Atlanta, USA, Nov. 28-30 (2016).

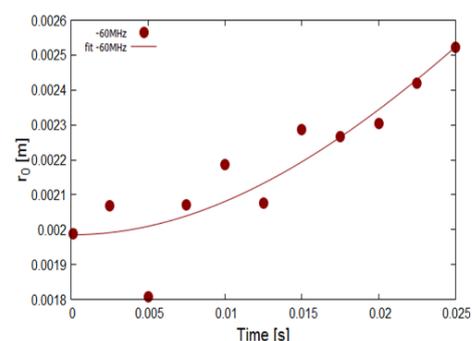


図 3. PGC を行った時の TOF のグラフ。

Ken-ichi Harada (Invited).

- ・電子 EDM 探索に向けた光双極子トラップ中の捕獲効率の向上

坂本幸祐, 原田健一, 青木貴稔, 早水友洋, U.Dammalapati, 加藤浩, 青木隆宏, 伊藤沙希, 井上壮志, 内山愛子, 川村広和, 酒見泰寛

日本物理学会, 22aAX-2 (第 71 回年次大会) (2016).

- ・レーザー冷却フランシウム原子による電子 EDM 探索に向けた電場印加システムの開発

井上壮志, 石川泰佑, 内山愛子, 原田健一, 川村広和, 早水友洋, 加藤浩, 青木隆宏, 坂本幸祐, 伊藤沙希, 青木貴稔, 酒見泰寛

日本物理学会, 22aAX-3 (第 71 回年次大会) (2016).

- ・フランシウム原子を用いた電子 EDM 探索に向けたルビジウム磁力計の研究

内山愛子, 井上壮志, 青木隆宏, 伊藤沙希, 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, 酒見泰寛

日本物理学会, 22aAX-4 (第 71 回年次大会) (2016).

[ポスター発表]

- ・Development of the magneto-optical trap system for radioactive francium atoms toward an electron electric dipole moment search

K. Harada, T. Aoki, K. Kato, K. Sakamoto, T. Hayamizu, H. Kawamura, T. Inoue, T. Aoki, A. Uchiyama, S. Ito, M. Itoh, A. Hatakeyama, and Y. Sakemi

8th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2015) at RIKEN, Japan, Nov. 30 - Dec. 1 (2015).

[その他]

- ・Present Status of the Development of an Optical Dipole Force Trap System towards the Electron Electric Dipole Moment Search

CYRIC Annual Report 2014-2015 in press (2017).