

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02027

研究課題名(和文) 光格子中の冷却Sr原子を用いたmHz級レーザーの開発

研究課題名(英文) Development of a mHz-level laser using Sr atoms in an optical lattice

研究代表者

鳥井 寿夫 (Torii, Yoshio)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：40306535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,200,000円

研究成果の概要(和文)：線幅がmHz級のレーザーを光格子中に閉じ込められたストロンチウム原子を用いて実現するための基礎研究を行った。そのスタートとして、簡便なストロンチウム原子のレーザー冷却技術の開発を行った。一つ目として、基底状態のみならず、励起状態のストロンチウム原子のドップラーフリー分光をホローカソードランプを用いて実現できることを実証した。また、適切に外部磁場をホローカソードランプに加えることにより、レーザー光に変調を加えることなく、レーザー冷却に十分な安定度でレーザー周波数を安定化する技術も開発した。また、ゼーマン減速器を用いず、直接熱的原子をガラスセル内でレーザー冷却する技術も開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光格子時計の精度は300億年に1秒であり、これは1cmの高低差による時計の進み方の違い(重力による赤方偏移)を検出できるレベルである。光格子時計は、将来の秒の定義の最有力候補であるのみならず、地殻変動の検知や地震予知など重要な社会インフラとなる可能性を秘めている。実際、セシウム原子時計によって維持されているGPSは、我々の生活になくしてはならない社会インフラとなった。しかしながら、光格子時計はセシウム原子時計に比べて格段に装置が複雑であり、社会インフラとなるための大きな障害となっていた。本研究により光格子時計の構築を格段に簡略化することが可能となり、社会インフラへの道が大きく開けたといえる。

研究成果の概要(英文)：We have studied basic techniques to develop a mHz-level laser using cold strontium atoms in an optical lattice. As a first step to this goal, we develop a simple technique for laser cooling of strontium. We experimentally proved that a hollow cathode lamp, which is originally designed for spectroscopy of the ground state atoms, can offer a Doppler-free spectroscopic signal for the excited states of strontium. Moreover, by applying an appropriate magnetic field to the hollow cathode lamp, we could obtain an error signal suitable for laser frequency stabilization. Finally, we have developed a technique to magneto-optically trapping strontium atoms in a glass cell without resorting to a Zeeman slower, which is a significant simplification of vacuum apparatus.

研究分野：原子物理学

キーワード：レーザー冷却 ストロンチウム 原子時計 光格子時計 レーザー周波数安定化 ホローカソードランプ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光格子時計の精度は 300 億年に 1 秒であり、これは 1 cm の高低差による時計の進み方の違い(重力による赤方偏移)を検出できるレベルである。光格子時計は、将来の秒の定義の最有力候補であるのみならず、地殻変動の検知や地震予知など重要な社会インフラとなる可能性を秘めている。実際、セシウム原子時計によって維持されている GPS は、我々の生活になくてはならない社会インフラとなった。しかしながら、光格子時計はセシウム原子時計に比べて格段に装置が複雑であり、社会インフラとなるための大きな障害となっていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、光格子時計が GPS と同様に重要な社会インフラとなりうるように、光格子時計の構築を格段に簡略化することである。具体的には、ストロンチウムのレーザー冷却に必要な光源システム、および真空システムを簡便化することである。

### 3. 研究の方法

一つ目として、レーザー冷却に必要なレーザー周波数安定化に、通常は基底状態の原子蛍光分光に用いられるホローカソードランプを効果的に用いることである。もう一つは、通常はゼーマン減速器を用いて、熱的原子線を減速してからレーザー冷却を超高真空チャンバー内で行うところを、ゼーマン減速器を排して熱的原子ビームから直接ガラスセルでレーザー冷却する手法の確立である。

### 4. 研究成果

#### (1) ホローカソードランプを用いたレーザー冷却遷移の t-DAVLL 分光

ストロンチウム原子の冷却遷移に用いる  $(5s^2)1S_0 - (5s5p)1P_1(461 \text{ nm})$  にレーザー周波数を簡便に安定化するために、磁場によって原子の複屈折性を誘起し、誤差信号を得る transversal dichroic atomic vapor laser lock (t-DAVLL) をホローカソードランプ (HCL) 内で行った(図 1)。ネオジム磁石を用いた磁気回路を作製し、1440 G から 3220 G の範囲で外部磁場を HCL に印加した。実験で得られた t-DAVLL の信号(図 2)を理論曲線と比較することにより、ホローカソード内部に入り込んだ磁場の大きさを推定した。その結果、ホローカソードによる磁気シールド効果は、1500 G 程度で飽和し、それ以上の外部磁場を印加するとホローカソードの内部に磁場が侵入することが分かった。外部磁場が 3220 G のときのホローカソード内部の磁場は 1114 G であり、これは t-DAVLL の誤差信号の勾配が磁場に依存しない領域に入っている。これにより、実現できる最大の信号勾配でレーザー周波数を長時間(半日以上)安定化することができた。安定化されたレーザー周波数のシフトは、HCL の電流値が 6 mA から 8 mA の範囲で、離調周波数の 5% 以内であった。これは、磁気光学トラップ実験のために十分な安定度である。

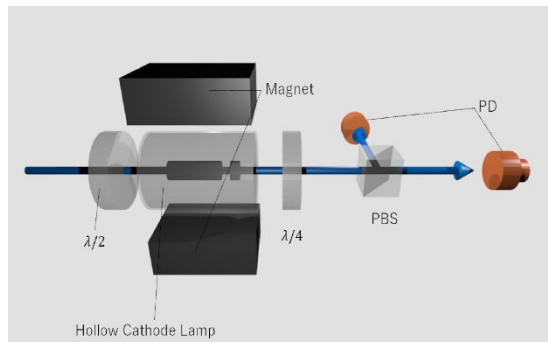


図 1 ホローカソードランプと横磁場を用いた t-DAVLL の実験配置

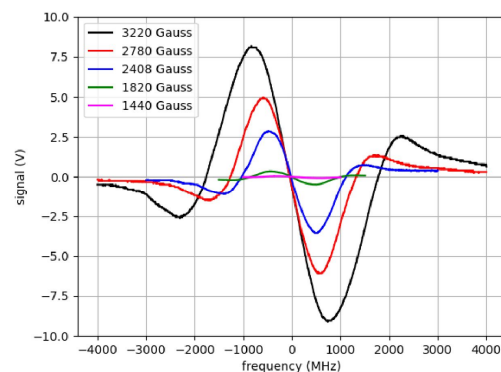


図 2 得られた t-DAVLL 信号

#### (2) ホローカソードランプを用いた準安定ストロンチウム原子の分光

次に、バッファガスの圧力を下げた特注の HCL (Ne 0.5 Torr + Xe 0.5 Torr) を用意し、ストロンチウム原子のレーザー冷却のリポンプ光に用いられる準安定状態の分光を周波数安定化に十分な S/N 比で行うことを試みた。変調周波数 20MHz の FM 分光を HCL 内の準安定状態 Sr 原子に対して行ったところ、 $(5s5p)3P_2 - (5s5d)3D_3(496 \text{ nm})$  遷移に関しては、市販の HCL (Ne5-10 Torr) に比べて振幅が約 50 倍の誤差信号を得ることができた。この理由としては、スパッタされた基底状態の Sr 原子の平均自由行程が長くなり、プラズマが主に分布するホローカソードの中心に Sr 原子が届きやすくなった結果、準安定状態の生成効率が上昇したこと、および速度変化衝突の影響が小さくなったことが挙げられる。バッファガスの全圧を低くしたことで圧力広がりが増え、Lamb dip の線幅は、市販の HCL の 77 MHz から 27 MHz (自然幅 10 MHz の約 3 倍)まで狭くなった。これにより、 $86\text{Sr}$  の同位体シフト (-46.6 MHz) および  $87\text{Sr}$  の超微細構造が観測された。同様に  $(5s5p)3P_2 - (5s5d)3D_2(497 \text{ nm})$  遷移に関しても高い S/N 比で FM 分光信号を

得ることができ、86Sr の同位体シフト(-47.5 MHz)が観測された。また、496 nm 遷移と 497 nm 遷移の信号強度比 (5:1) が LS 結合モデルから予想される遷移強度比 (28:5) と矛盾しないことを確認した。先行研究においてレーザー周波数安定化に十分な S/N 比で分光が行えなかった (5s5p)3P0-(5s6s)3S1 (679 nm) 遷移および (5s5p)3P1-(5s6s)3S1 (688 nm) 遷移についても特注の HCL を用いた分光実験を行った。その結果、レーザー周波数安定化に十分な S/N 比での FM 分光信号の生成に成功した。87Sr における (5s5p)3P2-(5s5d)3D3 (496 nm) 遷移の超微細構造の情報は、87Sr の磁気光学トラップを実現する上で重要であるが、先行研究では、観測された遷移は全 15 本中 4 本にとどまり、また、それらの遷移のアサインメントは不確かであった。本研究で、特注の HCL で行われた 496 nm 遷移の FM 分光では、9 本の超微細構造間の遷移が観測され、各信号強度比が理論から予想される遷移強度比と良い一致を示したことで、遷移のアサインメントが確定できた。また、観測された 9 本の遷移周波数から、87Sr の(5s5d)3D3 状態の磁気双極子相互作用定数および電気四重極子相互作用定数を、それぞれ  $A = -156.9(2)$  MHz、 $Q = -2(6)$  MHz と決定した。これは、先行研究で推定された値  $A = -156.9(3)$  MHz、 $Q = 0(30)$  MHz と矛盾しない。

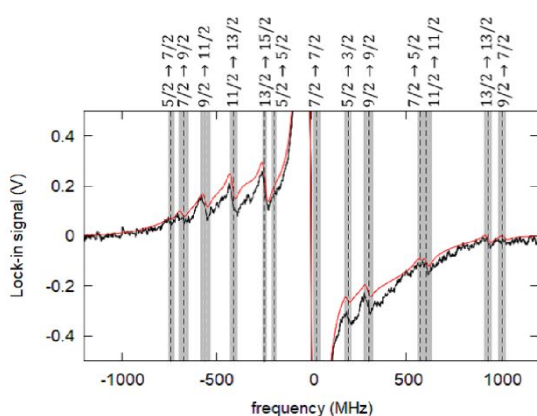


図3 87Sr の(5s5p)3P2-(5s5d)3D3 遷移の FM 分光信号

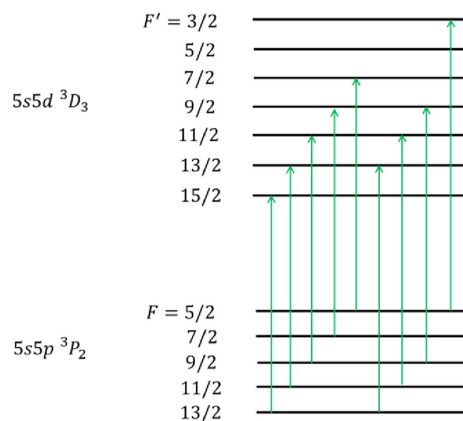


図4 観測された9本の超微細構造遷移

### (3) ガラスセルと熱的原子ビームを用いたストロンチウムの磁気光学トラップの実現

ホローカソードランプ内で t-DAVLL によって安定化された 461 nm 光源を用いておよび 497nm 光源を用いて、ストロンチウム原子の磁気光学トラップを構築した。光学系は持ち運び可能な 60 cm x 75 cm のブレッドボード上にすべて配置することができた。

蒸気圧が低いストロンチウム原子の場合、通常は原子オープンで生成された熱的原子ビームをゼーマン減速器で減速し、超高真空チャンバーで磁気光学トラップされる。我々は、ストロンチウム原子の低い蒸気圧を逆手にとり、またストロンチウム金属膜のゲッター作用を巧みに利用して、単一の真空チャンパー内(50L/s のイオンポンプのみ)で原子オープンを駆動しながら超高真空 ( $10^{-9}$  Torr) を維持し、熱的原子ビームに含まれる低速なストロンチウム原子をガラスセル内で直接レーザー冷却することに成功した。得られた原子数は  $10^6$  個程度で、容易に肉眼で確認できる。トラップされなかった熱的原子ビームはガラスセルの先端に堆積するが、ストロンチウム金属の蒸気圧は低いため問題にならない(むしろゲッター作用により、超高真空の維持に寄与する)。これは蒸気圧の高いアルカリ金属にはない、アルカリ土類原子の利点である。

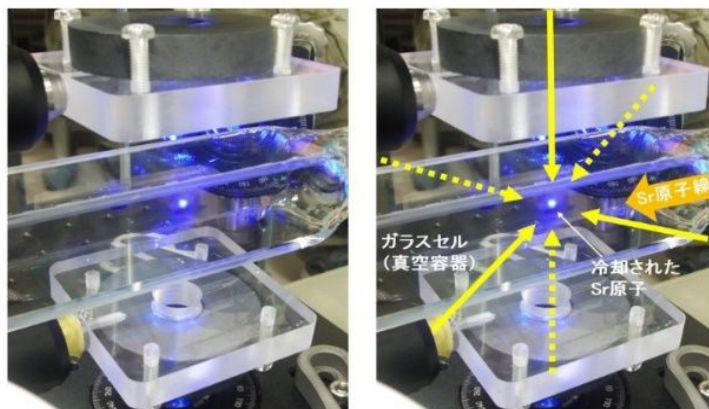


図5 ガラスセル内で磁気光学トラップされたストロンチウム原子

本研究により得られた以上の成果により、光格子時計の構築を格段に略化することが可能となり、社会インフラへの道が大きく開けたといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yusuke Hayakawa, Takumi Sato, Chika Watanabe, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii	4. 巻 57
2. 論文標題 Doppler-free spectroscopy of metastable Sr atoms using a hollow cathode lamp	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 1450-1454
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1364/AO.57.001450">https://doi.org/10.1364/AO.57.001450</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 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, and Y. Sakemi	4. 巻 123
2. 論文標題 parity-nonconserving interaction-induced light shifts in the $7S_{1/2}$ - $6D_{3/2}$ transition of the ultracold $^{210}\text{Fr}$ atoms to probe new physics beyond the standard model,	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. B 123, 120-1-11 (2017)	6. 最初と最後の頁 120-1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00340-017-6673-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐藤拓海, 早川悠介, 青木貴稔, 鳥井寿夫
2. 発表標題 ホローカソードランプを用いたSr+イオンの $5S_{1/2}$ - $5P_{1/2}$ 遷移のドップラーフリー分光
3. 学会等名 日本物理学会 2019年年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Sato, Yusuke Hayakawa, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii,
2. 発表標題 Measurement of the hyperfine structure of the $5s5d\ 3D_3$ state in $^{87}\text{Sr}$ using a hollow cathode lamp
3. 学会等名 The 26th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤拓海, 早川悠介, 青木貴稔, 鳥井寿夫
2. 発表標題 ホローカソードランプを用いた $87\text{Sr}$ 原子 $5s5d\ 3D3$ 準位の超微細構造の測定
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusuke Hayakawa, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii
2. 発表標題 Doppler-free spectroscopy of metastable Sr atoms using a hollow cathode lamp,
3. 学会等名 The 25th International Conference on Atomic Physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 早川悠介、青木貴稔、鳥井寿夫
2. 発表標題 ホローカソードランプを用いた準安定Sr原子のドップラーフリー分光
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 早川悠介、青木貴稔、鳥井寿夫
2. 発表標題 ホローカソードランプを用いたSr原子のmodulation transfer分光
3. 学会等名 日本物理学会2015年秋季大会
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----