

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610113

研究課題名(和文)原子コヒーレンスを用いた線幅1Hz級レーザーの開発

研究課題名(英文)Development of laser sources with 1-Hz linewidth using atomic coherence

研究代表者

鳥井 寿夫(TORII, Yoshio)

東京大学・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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーの周波数を安定化させる手法として、ガラス製の光共振器を用いる従来の手法とは異なり、ストロンチウム原子のコヒーレンスを用いる手法の開発を行った。この手法を実現するためには、十分な密度の(レーザー光の吸収量が50%程度の)原子気体を用意する必要がある。そのために、まず原子オーブンの開発を行ったが、射出口のステンレスハニカムチューブ内の原子間衝突によって10%以上の吸収を得ることが難しいことが判明した。またストロンチウム原子のホローカソードランプ用いた実験では、バッファガスの条件を最適化しても1%程度の吸収しか得ることができないことがわかった。

研究成果の概要(英文)：We aimed to develop a method to stabilize the laser frequency not by a traditional optical resonator made of glass but by atomic coherence of strontium atoms. To realize this method, we need to prepare an atomic sample with a sufficiently large spatial density (about 50% laser light absorption). For this purpose, we first developed a special atomic oven. However it was difficult to obtain more than 10% absorption due to inter-atomic collisions inside the stainless honeycomb tube at the oven exit. We also tried hollow cathode lamps as atomic sources, but we could obtain no more than 1% absorption even after the optimization of the buffer gas.

研究分野：原子物理学

キーワード：レーザー 量子エレクトロニクス ホローカソード放電 ストロンチウム レーザー分光

1. 研究開始当初の背景

(1) 周波数が安定化されたレーザーの利用価値は、「超高分解能分光」「レーザー冷却」「原子・分子のコヒーレント制御」「波長分割多重通信」「高精度周波数標準」「重力波検出」など、枚挙に暇がない。現在最も普及している周波数安定化法は、1983年に John Hall らによって開発された光共振器を用いた Pound-Drever-Hall (PDH) 法である。PDH 法では、周波数の基準となる高フィネスのファブリペロー共振器に位相変調されたレーザー光を入射し、その反射光の位相を DBM (double balanced mixer) によって誤差信号に変換する。この周波数安定化法の最大の特徴は、寿命の長い共振器内の光電場が、過去の時刻に入射していたレーザー光の“位相メモリー”として働き、これによってレーザー光の急激な位相変化が俊敏に(共振器の緩和時間より早く)検出され、高帯域なフィードバックが可能となる点である。

(2) PDH 法によって実現できるレーザー線幅は、当然用いる共振器の安定性によって制限される。PDH 法で 1Hz 級の周波数安定度を得るには、熱膨張率の極めて小さい ULE (ultralow heat expansion) 共振器を真空チャンバー内に設置し、その真空チャンバー自身も厳重に防振しなければならない、非常に大掛かりな装置を必要とする。

(3) 我々は PDH 法以外の、外部の ULE 共振器に頼ることのない簡便なレーザー周波数安定化法の必要性を強く感じ、2011-2012 年に挑戦的萌芽研究の助成を受け、気体原子の偏光分光信号を用いたレーザー線幅を狭窄化に関する理論および実験的研究を行った。その研究の過程で、偏光分光信号の物理的起源としてスピン偏極および飽和効果の 2 種類が存在することを実験的に示し (Ohtsubo *et al.*, *Opt. Lett.* **37**, 2865 (2012))、どちらの起源においても偏光分光法と PDH 法が(原子が線形応答する近似の範囲では)数学的に等価であることを見出し、図 1 に示すように、偏光分光においても PDH 法と同様に周波数基準器の緩和時間(原子の自然放出寿命)に制限されない広帯域な周波数フィードバックが可能であることを実験的に確認していた (Torii *et al.*, *Phys Rev. A* **86**, 033805 (2012))。

2. 研究の目的

本研究では、PDH 法のような外部の共振器を用いず、代わりに機械的振動の影響を受けない真空中の原子気体を周波数基準とする狭線幅(1 Hz 級)レーザーの開発を目的とした。本研究目的が達成されれば、多くの研究者が容易に 1 Hz 級レーザーを自らの研究のために作成することができる。特に光格子時計の分野では、装置の簡略化および高精度化をもたらし、光格子時計による秒の再定義、重力による赤方偏移測定を用いた相対論

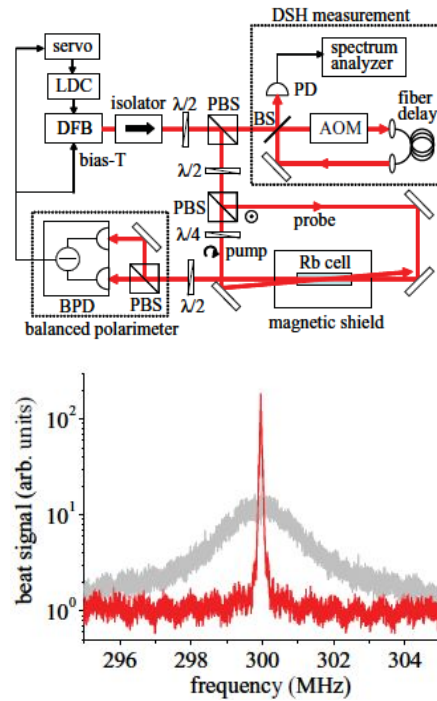


図 1 Rb 原子気体の偏光分光信号を用いたレーザー線幅狭窄化のためのセットアップ(上)と自己遅延ヘテロダイン法を用いたレーザー線幅測定結果(下)

的測地学の開拓、光格子時計の GPS 衛星への搭載などの応用が期待される。

3. 研究の方法

(1) 我々が既に原理検証実験として行ったルビジウム原子気体の偏光分光を用いた DFB レーザーの線幅狭窄化は、用いた原子遷移の線幅が 6 MHz であり、レーザー周波数揺らぎの高周波領域(原子の輻射寿命、つまりコヒーレンス時間より早い時間スケール)における安定化は働くが、kHz 領域の注入電流ノイズによる周波数ジッターや、周波数の長期的変動(ドリフト)は抑えることは難しく、結果的に 1Hz までの線幅狭窄化は困難である。現在、1Hz 級のレーザーを PDH 法で実現する際に用いられている ULE 共振器の典型的な共鳴幅は 10kHz 程度であり、偏光分光法においても、この程度の共鳴幅の原子遷移を用いるのが望ましい。将来の光格子時計への応用も鑑み、本研究では具体的にストロンチウムのスピン禁制遷移 $^1S_0 - ^3P_1$ (波長 689nm、線幅 7.1 kHz) を用いることにする。レーザー光源には外部共振器型半導体レーザー (ECLD) を用いる。

(2) 基本的な光学系は我々の 2012 年の論文と同様である(図 1 上)。円偏光のポンプ光とファラデー回転を受ける直線偏光のプロブ光は対向しておりドップラーフリー分光の配置となっている。プロブ光の回転角を電圧信号に変換するバランスドディテクターには、高感度、広帯域の差分増幅ディテクターを用いる。差分増幅ディテクターが

らの信号のうち、高い周波数成分(>MHz)は、適当な位相フィルターを通した後に、バイアスTによって半導体レーザーの注入電流にフィードバックする。低周波成分(DC~数百kHz)は半導体レーザー電流源の外部変調端子(もしくはECLDの場合、グレーティングのPZT素子に)フィードバックする。

(3)ルビジウム原子とストロンチウム原子は質量が同程度であり、また遷移波長も100nm程度しか離れていない。従って、原子気体のドップラー広がりも両者で同程度である。それに対して、遷移の幅はルビジウムD線の6MHzに対してストロンチウムの 1S_0 3P_1 遷移は7.1kHzであるから、その比は1000対1である。これは、同じ気体原子の密度なら、ストロンチウムの光学密度(もしくはファラデー回転角)がルビジウム原子の1000分の1となることを意味する。更に、ストロンチウムの常温における蒸気圧はルビジウムに比べて著しく低く、偏光分光に十分な光学密度を得るには、原子サンプルを500程度に加熱しなければならない。従って、蒸気圧の低いストロンチウム原子気体の分光用サンプルとして何を採用するかを決定することが、本研究の1つのサブテーマとなる。高密度な原子サンプルを得る典型的かつ簡便な方法は、両側に光学ウィンドウのついた長い(~1m)ステンレス製パイプ内に原子サンプルを置き、そのパイプ全体を暖める手法(heat pipe)であるが、装置がかさばるという欠点を持つ。放電によって原子サンプルを気化させるホローカソードランプもサイズもコンパクトで手軽であるが、放電管という環境の下でスピン禁制遷移の線幅が影響を受ける可能性がある。原子オープンから開口によって原子ビームを取り出し、ビームの方向と垂直に(ドップラーフリーに)分光する手法は、最もエレガントであるが、十分な原子密度を得るにはヒートパイプ以上の温度が必要になる。これら全てを試し、偏光分光に最適な手法を決定する。

4. 研究成果

(1)ストロンチウムの 1S_0 3P_1 遷移において十分な光学密度を得るためのストロンチウム原子オープンの開発を行った。オープンの容積は5cm³で、タンタル線で加熱する。また、ステンレス製の輻射シールドでオープン全体を覆った。原子ビームの指向性および寿命の向上のため、原子ビーム出射口にステンレスハニカム(材質:SUS304、アウターパイプ:外径6mm×内径5mm×長さ10mm、インナーパイプ:外径0.4mm、内径0.3mm、約130本)を採用した(情報通信研究機構の蜂須氏より提供していただいた)。到達温度は、2.5Aの電流(消費電力40W)で、約600であった。これはイタリアのTinoグループが開発した40Wで450に達する原子オープン(M. Schioppo *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **83**, 103101 (2012))に比べて効率がよい。3Aの

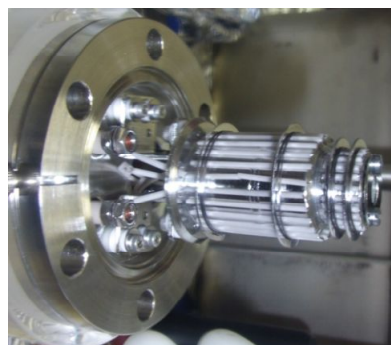
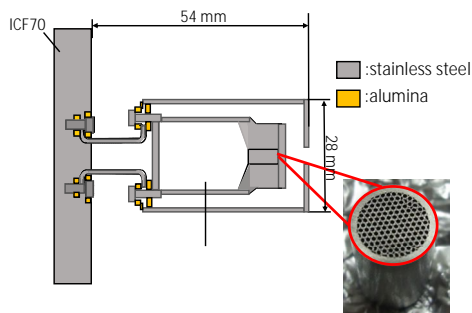


図2 開発したストロンチウム原子オープン

電流を流せば750までの加熱が可能であるが、オープンの寿命は数時間に減少してしまうので、この温度での駆動は現実的ではない。689nmの外部共振器半導体レーザーを用いて、600のオープンから射出されるストロンチウム原子ビームのスピン禁制遷移 1S_0 3P_1 における分光を試みた。射出口から約5mmの位置における線形吸収(光学密度)は10%程度で、吸収スペクトルは幅が約300MHzの広いガウシアン分布と、幅が約70MHzの狭いガウシアン分布の和でよくフィットすることができた(図3)。この結果は、ストロンチウム原子が細かいキャピラリー内で互いに衝突し、キャピラリーの形状で決まる指向性を持った原子ビームが取り出せていないことを示唆している。

直径10mmのポンプ光およびプローブ光を用いた飽和吸収スペクトルを図4に示す。異なる磁気副準位の吸収線を分離するために、ポンプ光およびプローブ光の偏向方向に対

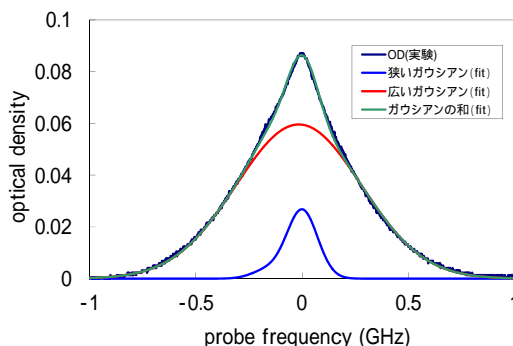


図3 オープンから射出されたストロンチウム原子の線形吸収スペクトル

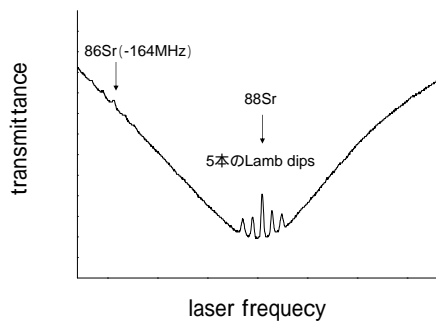


図4 オープンから射出されたストロンチウム原子の飽和吸収スペクトル

して 45 度傾いた方向に数ガウスのバイアス磁場を印加してある。 3P_1 が 3 つの磁気副準位を持つことを反映して、5 本のラムディップが観測された。また、 ^{86}Sr の同位体シフト (-164MHz) も観測することができた。各ラムディップの線幅は数 MHz で、これは相互作用時間で決まる線幅 (数百 kHz) に比べて 1 桁程度広いと、レーザーの線幅を反映していると考えられる。この実験結果より、光共振器を用いたレーザー線幅の予備的な狭窄化が必要であることが明らかになった。また、十分な光学密度を得るためには、原子ビームオープンでは不十分で、原子ヒートパイプの開発が必要であることも明らかになった。

(2) ストロンチウム原子のホローカソードランプ (図5) を用いた 1S_0 - 3P_1 遷移の分光も試みた。市販のホローカソードランプ (バッファガス圧力: Ne 6Torr 程度) を用いたが、許容電流 (20mA) の範囲では原子密度が低すぎて吸収は観測されなかった。そもそも 6Torr の圧力では、衝突広がりによって自然幅に近い分光信号を得ることは難しい。そこで、低いバッファガス圧力で高い原子密度を実現できるようなバッファガス条件を実験的に探った。その結果、次のことが判明した。

バッファガスが純粋な Ne のみの場合、圧力が 3Torr 以下では放電しなかった。Ne と Xe を同じモル比で混合したバッファガスの場合、全圧を 1 Torr 程度にまで下げても放電することがわかった。Ne:0.5Torr + Xe:0.5Torr のバッファガスの場合、20mA の放電電流で 1S_0 - 3P_1 遷移において 1% 程度の吸収を観測することができた。しかしながら、



図5 ホローカソードランプ (浜松ホトニクス社製、L2783 - 38NE-SR)

10 分以上放電すると吸収量が顕著に減衰した。放熱の役割もあるバッファガスの圧力を下げることによってホローカソードの温度が上昇し、熱電子放出が支配的になるためと推測される。これらの事実から、ホローカソードランプを用いた 1S_0 - 3P_1 遷移の分光は現実的でない判断できた。

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)

[学会発表](計 5 件)

早川悠介、青木貴稔、鳥井寿夫、ホローカソードランプを用いた modulation transfer 分光、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 16 日 ~ 19 日、関西大学千里山キャンパス (大阪府・吹田市) 征矢直記、青木貴稔、鳥井寿夫、Sr 原子の 689nm 異重項間遷移を用いた偏光分光、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 7 日 ~ 10 日、中部大学春日井キャンパス (愛知県・春日井市)

渡邊千嘉、青木貴稔、鳥井寿夫、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 II、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 9 月 7 日 ~ 10 日、中部大学春日井キャンパス (愛知県・春日井市)

島田陽介、青木貴稔、久我隆弘、鳥井寿夫、ホローカソード放電を用いた準安定ストロンチウム原子生成の最適化、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27 日 ~ 30 日、東海大学湘南キャンパス (神奈川県・平塚市)

渡邊千嘉、島田陽介、長沢仁、青木貴稔、竹内誠、久我隆弘、鳥井寿夫、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、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 25 日 ~ 28 日、徳島大学常三島キャンパス (徳島県・徳島市)

[その他]

ホームページ等

<http://photon.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/>

6. 研究組織

(1) 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