

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03699

研究課題名(和文) 分子振動準位の精密分光に向けた光共振器によるマイクロ波基準に同期した光源の開発

研究課題名(英文) Development of a light source synchronized with microwave standards by optical resonator for precision spectroscopy of molecular vibrational levels

研究代表者

小林 淳(Kobayashi, Jun)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：50579753

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、レーザー周波数の安定度に対する需要が高まっている。本研究の目的は、高安定かつ高フィネスな光共振器の共鳴周波数間隔(FSR)の精密な測定技術を開発し、安価・安定・容易な『光共振器型の光コム』を実現し、さらにそれを原子・分子の精密分光実験へと応用することである。

研究期間中に、高安定な光共振器へのレーザー周波数の安定化技術を開発し、Yb原子の狭線幅遷移を高安定に励起できる光源の開発に成功し、投稿論文で報告した。さらに、高フィネス光共振器により光増幅された、3次元光格子中でのレーザー冷却実験を行い、理論的な冷却限界である反跳限界温度へ冷却を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究期間内に開発したYb原子の狭線幅遷移に対するレーザー光源開発技術について、投稿論文で発表した。発表後にはすぐに多くの研究者から詳細についての問い合わせを受けるなど、本研究分野に対して重要な役割を果たしている。また、光共振器増幅された3次元光格子中でのレーザー冷却実験は、本研究で行った新奇性の高い研究であり、従来行われてこなかった新しい研究を開拓する研究である。理論的な冷却限界温度への冷却を実現したことは、その重要な第1歩であり、今後の発展が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Recently, demands on the stability of laser frequency have been increased. The research object is to develop a measurement method for the free spectral range(FSR) of high finesse cavity and to realize a "cavity-type optical frequency comb", which is cheap, stable, and easy, in order to apply it to the atomic and molecular precision spectroscopy.

In the research period, we developed a technique to stabilize the laser frequency to the highly-stable optical cavity and succeeded in developing a laser source, which can stably excite the Yb ultranarrow line transition. And we reported it in a paper. Moreover, we performed a laser cooling experiment in a cavity-enhanced 3D optical lattice, and we have succeeded in the cooling into the theoretical cooling limit.

研究分野：冷却原子

キーワード：光共振器 光コム 精密分子分光 レーザー冷却

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年のレーザー冷却技術の発展により、極低温の原子や分子を用いた精密分光技術が大きく発展してきている。特に原子分光においては、光格子時計を初めとする超精密な分光手法が開発され、18桁の分光精度が実現されている。このような分光実験の鍵となる技術として、高安定な光共振器を使った光周波数の安定化技術や、光周波数コムを使ったマイクロ波—光周波数の周波数比較技術など、最先端の技術開発が行われている。

このような技術発展に伴い、高安定で高フィネスな光共振器は容易に入手可能となってきた。高安定な光共振器を用いてレーザー周波数を安定化することによって、レーザー周波数の短期安定度としては10Hz以下、すなわち13桁以上の安定度を得ることができる。ところが光共振器には、必ずゆっくりとしたドリフトが存在しており、光共振器だけでは長期安定度は得られない。

他方で、GPS衛星からの電波信号を受信することにより、12桁のマイクロ波周波数の長期安定度は容易に得られる。ところがこの周波数精度を光の周波数へ移すことは容易ではない。モードロックパルスレーザーを利用した光周波数コムを用いれば可能であるが、まだまだ技術的には困難が多いため手軽には利用できず、通常の実験室では市販の波長計を用いる。例えば400万円程度の高級な波長計を購入しても、その精度は数10MHz程度であり、光周波数としては7桁の精度に過ぎない。マイクロ波では12桁の安定度が得られているのに対して、光周波数では、わずか7桁の精度しかないというのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高安定かつ高フィネスな光共振器の共鳴周波数間隔(FSR)の精密な測定技術を開発することにより、従来のモードロックレーザー型の光コムに変わる、安価・安定・容易な『光共振器型の光コム』を開発することである。モードロックパルスレーザーによる光コムを使うには、もちろん高価な光コムが新たに必要であり、かつその運用面においても、安定なパルスレーザー発振を維持し続ける必要があるなどの技術的困難がある。それに対し高安定な光共振器は、短期安定度を得るために元々必要とされているものであり、かつ2枚のミラーを向かい合わせに貼り付けただけの単純な構造のため非常に安定で、運用面においても非常に容易であるなど、安定・安価・容易といった優れた特徴を持つ。

光共振器の共鳴周波数は1GHz程度のマイクロ波周波数の間隔でほとんど等間隔に並んでいる。(図1)そのため、共鳴周波数間隔(以下ではFSR)を目盛とすることで光周波数をマイクロ波周波数に分割できる。そこで、このFSRを精密に測定することで、マイクロ波周波数と光周波数がリンクされ、光周波数の安定化や光周波数の高精度な比較などの『光コム』の機能が実現される。

私のこれまでの実験で、9桁の精度でのFSR測定を実現している。これをKRb分子の分光実験へと適用することで、2.2THzの振動準位間隔を9桁の精度で評価することに成功している。波長計を用いた評価では4桁の精度であったのに対して、5桁もの高精度化を実現しており、『光共振器型の光コム』として有効に働くことをすでに確認している。そこで本研究では、高フィネスな光共振器のFSRを、より高精度に評価するための実験技術の開発を行う。特に12桁の精度での測定を目標としている。

これによって、GPS信号で容易に得られる12桁のマイクロ波周波数の安定度を、光周波数の安定度へと移すことが可能になる。本研究ではさらに、この技術を原子・分子の精密分光実験へと応用することを目指している。

3. 研究の方法

本研究では、高フィネス光共振器のFSRの測定精度の高精度化を行う。これまでの研究ではいくつかの要因によって、測定精度に限界があった。そのため、本研究ではそれらの要因を取り除くため、以下の3つのことを行う。

1つは、FSRの測定法の改善である。FSRを測定するために、まず、レーザー周波数を光共振器の共鳴周波数に安定させておく。さらにそのレーザーに対してFiberタイプのEOMを用いてサイドバンドを励起する。サイドバンド励起の周波数をFSRと一致させることによって、その励起されたサイドバンドがすべて光共振器に共鳴させることができる。レーザー光を共振器に安定化させるための標準的な手法としてPDH法(Pound-Drever-Hall法)が知られており、この手法を本研究でも採用する。しかし、PDH法では使用する光学部品の表面反射等による一種の

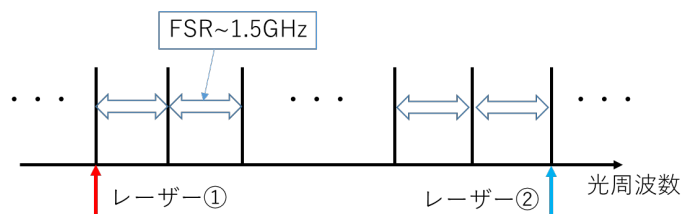


図1：光共振器の共鳴周波数分布を利用し、光周波数差をマイクロ波周波数に分割して測定する。

エタロン効果によって、数 Hz 程度の揺らぎが生じてしまうことが知られている。これまでの実験でも、その影響により FSR 測定に影響を与えていた。

そこで本研究では、このエタロン効果を抑制するための手法を採用する。それは光共振器に安定化した際に共振器を透過するレーザーを、再度光共振器に入射させるというものである(図2)。この手法によって、FSR 測定を測定すると同時にエタロン効果による揺らぎも同時に評価することが可能となり、FSR 測定の精度を向上させることが期待できる。

2つ目は、光共振器自体の安定度の向上である。これまでの実験では光共振器を真空中に置くことで、共振器自体の揺らぎを抑えていた。本研究ではさらに、熱膨張係数の小さい ULE ガラスを使った光共振器を用いること、真空チャンバー自体を高性能な除振テーブルに乗せること、さらにその除振テーブル全体を防音 BOX で囲うなどによって、光共振器自体の安定度を向上させる。

3つ目は、変調周波数の高周波数化である。例えば FSR の 10 倍の周波数で測定を行えば 10 倍の精度で FSR を測定できると期待される。

また、FSR 測定の高精度化に加え、分子の高精度分光実験に向けた研究も進める。特に極低温分子を光格子中に大量に高速に生成することが分子の精密分光実験にとって重要となる。そこで、高フィネス光共振器中での大きな光増幅効果を利用した、3次元光格子中でのレーザー冷却実験を進める。

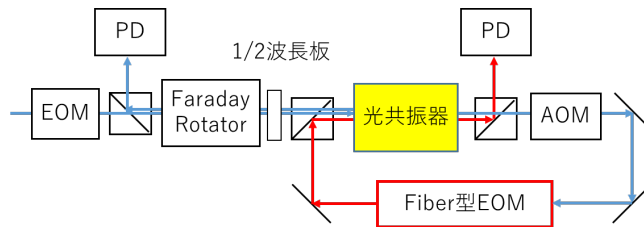


図2：FSR 測定法の概略図。光共振器の透過光に変調を加え、再度光共振器へ入射する。

4. 研究成果

令和元年度は、京都大学量子光学研究室との共同研究により、高安定な光共振器へのレーザー周波数の安定化技術を開発した。その結果、レーザーの短期線幅として 5Hz 以下という安定度を実現することができた。さらに Yb 原子の狭線幅遷移を高安定に励起することにも成功し(図3)、研究成果を Review of scientific instruments 誌へ投稿し掲載された。Yb 原子を用いた冷却原子実験は近年ますます注目を集めており、この研究分野において、非常に重要となる技術となっている。論文の掲載直後から何人もの研究者からの問い合わせがあるなど、分野にとって重要な実験技術となっている。

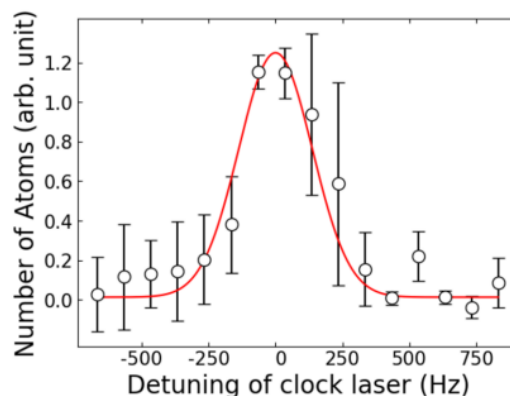


図3：作成した狭線幅レーザーを用いた Yb 原子の 1S0-3P0 遷移の観測

令和2年度は、私自身の異動に伴い、北海道大学での実験装置の開発を進めた。さらに令和3年度では、移設後の装置において、高フィネス光共振器により光増幅された、3次元光格子中でのレーザー冷却実験を行い(図4)、理論的な冷却限界である反跳限界温度へ冷却を実現した。

この研究を通して以下の4つの実験技術を開発した。1. 狭線幅光共振器に対する、レーザー周波数の自動的な安定化システムの実現。2. レーザー周波数の安定化維持したまま、共振器内の光強度を5桁のダイナミックレンジで、かつ数 10us という高速な時定数での強度変調可能なシステムの開発。3. 光共振器に安定化されたレーザー光の透過光の周波数測定による、共振器自体の短期振動の評価。4. FiberEOM によるサイドバンド励起を使った共振器の FSR の長期変化の評価。

これらの実験技術は、今後の極低温分子生成や精密分光実験に必須となる技術であり、研究期間内に大きな進展が得られた。

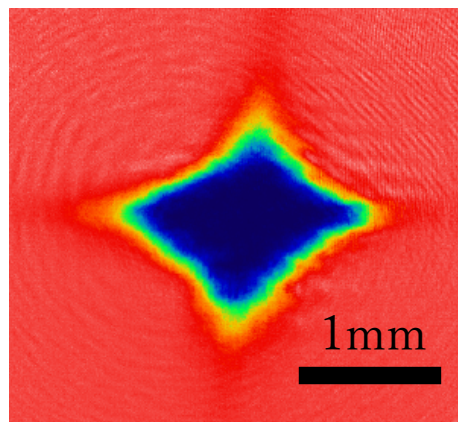


図4：高フィネス光共振器により光増幅された、3次元光格子中の Rb 原子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Y. Takata, S. Nakajima, J. Kobayashi, K. Ono, Y. Amano, and Y. Takahashi	4. 巻 90
2. 論文標題 Current-feedback-stabilized laser system for quantum simulation experiments using Yb clock transition at 578 nm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 83002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5110037	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Jun Kobayashi
2. 発表標題 Research on ultracold few-atomic molecules using ionization detection
3. 学会等名 第3回クラスター階層領域研究会(オンライン)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 淳
2. 発表標題 光共振器増幅された3次元光格子中での原子気体のレーザー冷却と圧縮
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会（オンライン）
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------