

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04973

研究課題名(和文) 永久電気双極子モーメント測定を目指したルビジウム-セシウム分子の研究

研究課題名(英文) Research for Rb-Cs molecules toward EDM measurement

研究代表者

本多 和仁 (HONDA, Kazuhito)

静岡大学・教育学部・准教授

研究者番号：70408706

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)：セシウム原子の磁気光学トラップに必要な852nm単一波長レーザー光源を修理、改善したうえで、セシウム原子の磁気光学トラップを試み、成功した。このとき用いた光学素子がルビジウム原子に用いる波長780nmの光専用のもので、セシウム原子の磁気光学トラップができたため、セシウム原子とルビジウム原子の同時捕捉の実験を簡便に行うことができると予想される。

それと並行して、セシウム原子とルビジウム原子を光双極子カトラップに捕捉するのに必要なNd:YVO4レーザーの設計と作成を行い、レーザーの発振を試み、試行錯誤を繰り返したのち、1064 nmのレーザー光を発振させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

永久電気双極子モーメント(EDM)が測定できれば、この宇宙では反物質よりも物質のほうが多く生成されている原因の解明に大きく近づくことができる。重い原子や分子が足底には有利なため、これを用いたEDM測定が試みられてきたが、未だ測定されていない。

この研究はセシウム原子やルビジウム原子を、精密測定に有利なレーザー冷却技術を用い、セシウム-ルビジウム異種原子分子を作成し、EDM測定を目指す研究である。この研究ではセシウム原子とルビジウム原子を扱う光学素子は異なるが、波長が近いので、少なくとも光学素子を共有でき、より簡便に異種原子のレーザー冷却や精密測定がおこなえることを示した。

研究成果の概要(英文)：After we repaired and improved our 852 nm single-mode lasers, we tried and succeeded magneto-optical trapping of cesium atoms with those lasers. In this case, we used optical elements for 780 nm light required in trapping of rubidium atoms. Thus we expect that the same optical elements can be used for the trapping of cesium atoms and rubidium atoms, and it is easy to trap cesium atoms and rubidium atoms simultaneously. At the same term, we designed and built Nd:YVO4 laser oscillator for optical-dipole-force trapping of cesium atoms and rubidium atoms. After several trial and error, we succeeded in oscillating 1064 nm laser light.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：磁気光学トラップ セシウム原子 ルビジウム原子 光ピンセット Nd:YVO4レーザー レーザー冷却  
波長安定化

## 1. 研究開始当初の背景

この宇宙は最初、高いエネルギーの塊であり、ここから物質と反物質が対で生成されたはずである。ところが、この宇宙は普通の物質のみで構成されており、反物質が消えてしまっている。物質のほうが多く作られているのである。

1964年に発見された「CP対称性の破れ」によってその謎の一端は解明された。しかし、加速器実験などを用いた精密測定により、CP対称性の破れから予想される物質の量よりもこの宇宙内の物質の量が多いことが分かった。どうやら、別の機構により物質が反物質より多く作られたらしい。それを明らかにするための新しい理論が数多く提唱されているが、どれも実証されておらず、宇宙の物質の起源は解明されていない。

この背景と永久電気双極子モーメント (EDM) とは結びついており、実際、提唱されている新しい物理理論はそれぞれ異なる、大きな EDM を予言している。そのため、EDM を測定することでどの物理理論が正しいか選別し、物質が多く作られた原因を明らかにすることができる。このため、EDM 測定は重要な研究であり、世界中でさまざまな研究が進められている。この EDM は素粒子の持つ性質であり、中性子を用いた測定もあるが、重い原子内で EDM は増幅され、原子の電気双極子としても現れる。このため、原子を用いると精度の高い EDM 測定ができると考えられ、実際に測定が行われてきた。一方で、分子を用いれば、より精密に測定できるだろうと言われていた。しかし、分子を取り扱うことが技術的に困難であったために、原子を用いた測定の精度の方がよかった。

2011年、原子や分子を用いた EDM 測定に新しい進展があった。フッ化イッテルビウム (YbF) 分子を用いた EDM 測定がそれまでの測定限界を打ち破ったのである (Nature 473, 493 (2011))。これにより分子を用いることで EDM 測定精度が向上することが実証され、以降さまざまな分子を用いた測定が試みられている。しかし、原子や分子、中性子など、いずれの測定でも EDM の上限しか決定できていない。つまり、EDM 測定精度が求められる水準よりも低いために、宇宙の物質の起源は明らかになっていない。そのため、より高精度な EDM 測定が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、精密測定に使用可能な状態のルビジウム セシウム (Rb-Cs) 分子を生成することである。それにより、Rb-Cs 分子を用いた永久電気双極子モーメント (EDM) 測定を行うことができるようになり、この宇宙を構成する物質がどのように生成されたかという疑問の答えに近づくことができる。

量子エレクトロニクス分野では 2 原子分子作成技術が進展しており、量子気体の物性研究を促進している。一方で、近年 EDM 測定では、分子を用いた測定が成果を挙げている。その 2 つを結びつけ、精密測定に有用な分子を生成、操作する技術の確立が本研究の主題である。

分子を用いた測定では、化学的に生成された分子を冷却、制御している。その制御には、原子のレーザー冷却などに用いられる原子制御技術を用いることが困難である。もし、その技術を応用できれば、数十  $\mu\text{K}$  程度まで冷却された気体を真空中に数十秒程度保持できるため、精密測定に有利なはずである。

さて、そのレーザー冷却分野では極限まで冷却された原子気体による量子凝縮気体の物性研究が盛んである。その研究には粒子どうしの相互作用が重要であり、高磁場を印加することで引き起こされるフェッシュバハ共鳴現象などを用いて、原子間相互作用を変化させたり、分子を作成したりしている。

これは、量子凝縮を起こすほど冷却された原子を分子にできるということである。この分子を EDM などの精密測定に応用すれば高精度の測定が期待できる。その測定が本研究の最終目標である。

しかし、問題がある。EDM 測定には 2 つの異なる原子で作られた分子 (異種原子分子) が必要なのだが、異種原子分子間で衝突すると分子を構成する原子が入れ替わり、同じ原子からなる分子 (同種原子分子) になってしまう。これは量子気体の物性研究には致命的である。しかし、本研究の目的は精密測定であり、量子凝縮や分子間相互作用は必要なく、分子を真空中に保持するトラップの形状やタイミング、原子の密度を工夫することで異種原子分子の衝突や相互作用を起こさせない工夫をすれば問題ないとする。

そもそも、研究代表者はその研究当初からレーザー冷却と永久電気双極子モーメント (EDM) などの精密測定に興味をもって研究を行ってきた。その中で、レーザー冷却可能なセシウム原子 (Cs) を EDM 測定対象とし、同時に測定するルビジウム原子 (Rb) との差から EDM を検出することを着想し、Cs 原子と Rb 原子を同時に測定する実験装置を組み立てていた。しかし、その研究を進めていく中で、H. S. Nataraj から Cs 原子と Rb 原子からなる分子が EDM 測定に有利であ

ることを教えられた (Phys. Rev. Lett., 101. 033002 (2008)). 分子の測定にレーザー冷却の技法を用いることができれば高精度の測定が見込まれており, 自分がそれに近い装置を持っていることになる. そこで, 方針を転換し, 分子を用いた EDM 測定を目指すこととした.

### 3. 研究の方法

まず, 磁気光学トラップと呼ばれるレーザー冷却技術で Rb 原子, Cs 原子, それぞれでの原子が捕捉, 冷却されていることを確認した後, Rb 原子と Cs 原子の同時磁気光学トラップを行う. これには本来, Rb 原子, Cs 原子, それぞれに対応する波長のレーザー光の両方に同じように作用する高価な光学部品を用意する必要がある. しかし, 本実験ではそこまで原子数が必要ではないため, 手に入らない場合には一般の光学素子で代用可能である.

その一方で, 光双極子力トラップ用のレーザーの開発を進める. 光双極子力トラップは真空度が良ければ原子を長く保持し, また原子のコヒーレンスを乱しにくいため, 本研究に適合している. このトラップには Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーを自作し, その 1064 nm 光を用いる.

その後, 大きな光学除振台の上で真空装置, レーザー光源を組み立てなおす. それと並行して, レーザー冷却用のレーザー光源をもう 1 セット作成する. これらの装置を用い, 磁気光学トラップを 2 度行う二重磁気光学トラップによって, より多くの原子を長時間 捕捉することができる. 以前行った時には数十  $\mu$ K の Rb 原子を数百億個捕捉, 保持できたが, 前述のように, Rb 原子と Cs 原子の両方にある光学素子を用いないと, 捕捉する原子数は通常の 10 %程度である数十億個程度を予想している. この段階の実験にはこれで十分であるが, より多くの原子を捕捉しなければその後の実験を進めることが困難なため, Rb 原子と Cs 原子の両方にある光学素子を用いたい.

同時二重磁気光学トラップを確立したのち, 作成した Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーで光双極子力トラップを行う. この光にレンズで焦点を作ることによって, 焦点に原子や分子が捕捉される. 本研究ではこのトラップに千万個程度の原子を捕捉することを目指す.

このトラップした原子集団に磁場をかけ, フェッシュバツハ共鳴により Rb-Cs 分子を作成する. Rb-Cs 分子に関する情報は不足しているので, まずはその性質を調べる. 特に, Rb-Cs 分子が衝突により Rb<sub>2</sub> 分子と Cs<sub>2</sub> 分子になる条件などを測定する.

### 4. 研究成果

まず, セシウム原子の磁気光学トラップを目指した. しかし, その前に, セシウム原子の磁気光学トラップに必要な 852nm 単一波長レーザー光源 2 台のうち, 1 台の状態が悪かったため, その原因を突き止めることにした. その結果, 元となる半導体レーザーの品質にブレがあることが原因だと分かった. 今後は事前に検査をすることで不具合を回避できるのではないかと予想している. この結果に基づいて作成したレーザー光源は波長操作が正常に行えた. また, 飽和吸収分光も問題なくできたため, 単一波長であることも確認できた. このようにレーザー光源が新たに 1 台準備できたので, この光源とすでに正常に動作をしていたレーザー光源の計 2 台を用いてセシウム原子の磁気光学トラップを試み, 成功した. この実験において用いた光学素子はルビジウム原子に用いる波長 780nm の光専用のものであったが, この実験の結果, セシウム原子に用いる 852nm の光で用いても磁気光学トラップができることが分かった. この結果から, セシウム原子とルビジウム原子の同時捕捉には同じ光学系でできることが分かり, 実験を簡便に行うことができると予想できる. しかし, セシウム原子やルビジウム原子のレーザー冷却に用いるレーザーに関してはそれぞれの原子の共鳴周波数への波長固定が必要であり, そのための負帰還回路と光学装置の設計をおこない, 波長固定を行った.

同時に進めたのがセシウム原子とルビジウム原子を光双極子力トラップに捕捉するのに必要な Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーの作成である. これにはレーザー発振用の光共振器が必要なため, 学生とともに光共振器の設計を行った. 設計した光共振器に必要な鏡とネオジムを添加した YVO<sub>4</sub> 結晶を入手し, これの温度を制御するための温度安定装置, この結晶に励起エネルギーを与える高強度半導体レーザー光源の電源を用意し, Nd:YVO<sub>4</sub> 結晶を固定ながら温度を均一に保ちつつコントロールできる治具を設計, 作成した. これらは大量の熱を発生させるため, これを水冷するための冷却水循環装置を入手し, これを用いてレーザー光源や温度安定化装置を水冷できる装置を設計, 作成した. また, 強いレーザー光を扱うので, 全体を覆うシールドを設計, 作成した. これらを組立て, Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーの発振を試み, 試行錯誤を繰り返したのち, 1064 nm のレーザー光を発振させることに成功した.

しかし, この状態では発振波長やレーザーの進行方向が安定しない. そこで, 温度安定化などによる波長安定化やさまざまな発振制御を比較検討した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------