

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540422

研究課題名(和文) 3次元青方離調光格子中の原子を用いた精密測定

研究課題名(英文) precision measurement with atoms in blue-detuned 3D optical lattice

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：この研究で研究代表者は東京工業大学から静岡大学へと異動した。そのため、この研究では先の研究を引き継ぎ、さらにすすめることを目標とした。それまではルビジウム原子で研究を行ってきた。そこで本研究ではセシウム原子のレーザー冷却を目指して研究をすすめた。セシウム原子を操作するためのレーザーを作成し、セシウム原子のガラスセルを用いた分光によって、レーザーが期待通りの性能を持つことを確かめた。また、セシウム原子に関する基礎的な実験を行い、セシウム原子の特徴を確かめた。一方で、それまで行ってきたルビジウム原子のレーザー冷却が再現できることを確かめた。

研究成果の概要(英文)：The principal investigator was transferred from Titech to Shizuoka Univ. at the start of this research. So it was a purpose of this research to reappear the previous research and to develop that. In the previous research, our main object was rubidium atoms. In this research we would attend to develop a laser cooling system of cesium atoms. We produced laser systems for manipulation of cesium atoms, and recognized that the laser systems work as expected by spectroscopy with a cesium glass cell. Then, we performed several experiments and recognized features of the cesium atoms with that laser system. On the other hand, we recognized that we realized laser cooling of rubidium atoms in this research, which was performed in the previous research.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：半導体レーザー セシウム原子 外部共振器型半導体レーザー 852 nm ルビジウム原子

1. 研究開始当初の背景

現代の素粒子物理学においてパリティ反転 (P)、荷電共役 (C)、時間反転 (T) に対する対称性は重要な役割を果たしている。特に 1964 年に中性 K 中間子の崩壊において発見された CP 対称性の破れは我々の宇宙において物質が反物質よりも多いこと説明する上でも重要な事象である。この CP 対称性の破れを説明する小林・益川理論は、現在までにさまざまな実験により実証されているが、我々の宇宙での物質と反物質の非対称性は小林・益川理論からの予想よりも大きいことが分かっている。そのため、これを説明するような新たな理論が数多く提唱されている。そこで永久電気双極子モーメント (EDM) が注目される。

スピンを持つ素粒子が EDM を持っていれば、それは T 対称性と P 対称性が破れていることを示している。この EDM が重要な理由はそれだけではなく、新たに提唱されている複数の素粒子理論では EDM に対してそれぞれ異なった値を予言していることにある。これにより、EDM 測定によって素粒子理論を選別することができる。そのため、EDM 測定は素粒子理論にとって重要な研究である。

実際、現在も盛んに研究されており、2011 年にはフッ化イッテルビウム分子を用いた電子 EDM 測定によって上限値が更新された。しかし、より精度の高い測定が求められている。

2. 研究の目的

この研究の目的は、レーザー冷却技術、特にこの 10 年間で発達した光格子トラップを用いることで達成される低緩和な原子スピンを用いて精密測定を行うことである。特に、原子の永久電気双極子モーメント (EDM) 測定を高精度に行い、新しい素粒子論の選別を行う。EDM 測定にはセシウム原子 (Cs) を用いる。一方、EDM 測定には高性能な磁力計が必要であり、ルビジウム原子 (Rb) でこれを開発する。また、原子を捕捉する光の影響を小さくするため、光のないところに原子を捕捉し、しかも、光による原子への影響が小さくなる魔法波長に近い 532nm のレーザー光を用いて原子を捕捉する。このような技術は他の精密測定にも有用である。

原子を用いた精密測定では測定値を原子スピンとして読み出すことが多い。また、量子情報処理においては情報を保持する物質媒体の重要な候補の一つが原子スピンである。このように、量子エレクトロニクス分野で原子スピンは重要な役割を果たしている。この原子スピンを用いるとき、そのスピン状態が緩和しないことが望ましい。しかし、現実には磁場の不均一や原子間衝突によりそのスピン状態は緩和してしまう。

したがって、磁場の不均一に影響されない

原子を用い、原子間衝突を防げばスピン状態の緩和を防ぐことができる。例えば、電子軌道が閉殻構造で、基底状態ではスピンのみに由来する水銀原子では、ガラスセルの中でもそのスピンの緩和時間は 100 秒程度と長い (参考文献 1)。また、閉殻構造を持つストロンチウム原子を光格子トラップで一個ずつ別々のポテンシャルに捕捉し、衝突を防いだ場合、衝突が起こる場合に比べて緩和時間が伸びたという報告がある (参考文献 2)。

しかし、これらの実験では、スピンは核スピン由来であり、電子スピン由来ではない。電子スピンの磁気双極子モーメントは核スピンの磁気双極子モーメントのおよそ 1000 倍の大きさであり、量子情報処理では高速なスピン操作が期待できる。また、磁場を高精度に測定するには電子スピンが適している。そして、電子の持つ性質を精密測定する場合も、電子スピンを持つ原子が必要である。これらの研究では、電子由来の原子スピンの横緩和が長いことが重要である。私が現在研究を進めている、電子の永久電気双極子モーメント (EDM) の精密測定もその一つである。

現代の素粒子物理学においてパリティ反転 (P)、荷電共役 (C)、時間反転 (T) に対する対称性は重要な役割を果たしている。特に 1964 年に中性 K 中間子の崩壊において発見された CP 対称性の破れは我々の宇宙において物質が反物質よりも多いこと説明する上でも重要な事象である。この CP 対称性の破れを説明する小林・益川理論は、現在までにさまざまな実験により実証されているが、我々の宇宙での物質と反物質の非対称性は小林・益川理論からの予想よりも大きいことが分かっている。そのため、これを説明するような新たな理論が数多く提唱されている。そこで EDM が注目される。

スピンを持つ素粒子が EDM を持っていれば、それは T 対称性と P 対称性が破れていることを示している。なぜならば、この粒子に時間反転、あるいは空間反転すると、スピンは逆向きになるが EDM は同じ向きのままになるため、その粒子は元の粒子とは異なった性質の粒子になるからである。

この EDM が重要な理由は、新たに提唱されている複数の素粒子理論では EDM に対してそれぞれ異なった値を予言していることにある。これにより、EDM 測定によって素粒子理論を選別することができる。そのため、EDM 測定は素粒子理論にとって重要な研究である。実際、現在も盛んに研究されており、2011 年にはフッ化イッテルビウム分子を用いた電子 EDM 測定によって上限値が更新された。しかし、横緩和の長い原子を用いればこの測定を超えると考えられる。

電子由来の原子スピンの横緩和は壁や原子同士の衝突、磁場の不均一による。その結果、特殊な場合を除き、原子集団の横緩和はこれまで数 10 ms 程度であった。

一方、レーザー冷却された原子集団は位置運動量空間においても狭い領域にあり、コヒーレンスが高いために様々な精密測定の精度を向上させてきた。特に光格子トラップに原子集団を捕捉すれば、数秒程度原子集団を保持することができ、横緩和の原因である衝突を防ぐことができる。したがって、このレーザー冷却を用いれば、低速な原子集団を閉じ込め、長時間原子スピンを観測できる。しかし、レーザー冷却と原子スピンの横緩和には相反する性質があり、困難であった。

1. 多くの原子数が必要
2. レーザー冷却では不均一磁場を用いる
3. 光格子トラップ中での冷却と原子スピンの運動

まず、これまでのセルや原子ビームを用いた実験では原子数が多く、測定誤差を小さくしやすいが、レーザー冷却によって集められる原子数はそれに比べると小さい。そこで、本研究では、この 10 年間に発達した原子のボース・アインシュタイン凝縮に用いられる二重磁気光学トラップを用いる。これにより、原子の個数と測定時間を増大させることができる。

2. は大きな問題である。レーザー冷却の第一歩である磁気光学トラップでは大きな不均一磁場を必要とするため、原子スピンの観測のときにその磁場が残っていると原子の横緩和が速くなる。そこで、これまでに大きな磁気シールドを用意し、磁気光学トラップの電磁石を小さくすることでシールドの磁化を小さく抑えることを試み、磁場の不均一を小さくした。また、原子を光双極子力にトラップした後なら、磁気シールドを消磁できる可能性がある。

3. も問題である。光格子トラップ中で原子を冷却するためには工夫が必要である。また、トラップに用いる光が原子スピンの運動を変えてしまうことが考えられる。この問題を解消するために、本研究では、光のないところに原子を捕捉する青方離調光格子トラップを用いる。これにより、トラップ中で冷却することが可能で（参考文献 3）、しかも、トラップ光が測定に影響しないようになることが知られている（参考文献 4）。

これらにより、これまで両立が困難と考えられた原子スピンの観測とレーザー冷却を組み合わせる実験が可能になり、精密測定精度を向上させることが期待できる。

これまでにルビジウム原子を磁気シールド内の青方離調光格子トラップに捕捉することに成功した。現在、トラップされた原子のスピンを観測しようとしている。

しかし、現在の光格子トラップの拘束力は 20 μK までの原子しか捕捉できないほど小さい。また、私は来年度から他大学に移るため、これまで用いてきた光格子トラップ用の YVO₄ 倍波レーザーを使い続けることはできない。

そこで、YVO₄ 倍波レーザーを開発してこれを用いる。これにより拘束力を数倍にし、より多くの原子を長く観測する。その後、ルビジウム原子の磁力計を開発し、これとセシウム原子を組み合わせ、EDM 測定を行う。

前述のとおり、この研究は均一な低磁場と電子由来の原子スピンを組み合わせた研究であり、両立が困難だと考えられていた技術の両立を目指した研究である。この研究の結果、原子スピンの操作性や安定性が高まることにより、精密測定や量子情報への応用が広がることが予想される。また、EDM 測定は宇宙の起源にとって重要な研究であり、特に、重要な素粒子論の一つである超対称性理論の予言値は現在の測定値に近いと、EDM 測定は素粒子論に多大な影響を与える。

参考文献

- 1 W. C. Griffith, M. D. Swallows, et. al., Phys. Rev. Lett. 102, 101601 (2009)
- 2 T. Akatsuka, M. Takamoto and H. Katori, Nature Physics 4, 954 - 959 (2008)
- 3 T. Kinoshita, T. Wenger, and D. S. Weiss, Phys. Rev. A 71, 011602(R) (2005).
- 4 M. V. Romalis and E. N. Fortson, Phys. Rev. A 59, 4547 (1999).

3. 研究の方法

(1) YVO₄ 倍波レーザーを開発するとともに、ルビジウム原子とセシウム原子の同時レーザー冷却を実現する

(2) 新しい YVO₄ 倍波レーザーを用いて原子を捕捉、スピン歳差運動を観測し、磁気シールドによりコヒーレンス時間が長くなるのを観測する。

(3) 最終的に EDM 測定をおこなう

YVO₄ レーザーは 1064 nm、十数 W のレーザー連続光を発振する高強度レーザー光源の一つである。この光を周波数が倍の光に変換する LBO 結晶と組み合わせた 532 nm のレーザー光源 (YVO₄ 倍波レーザー) が市販されており、この光源も十数 W のレーザー光を発振するので、他のレーザー光源の発振させる源として用いられたい、その高強度を利用した実験などに用いられている。私はこれまでに商用の YVO₄ 倍波レーザーにより数千万個のルビジウム原子を光格子トラップに捕捉している。しかし、この実験で得られたトラップの捕捉力は、20 μK 程度の原子しか捕捉できないほど弱く、今後の実験にはより強いレーザー光が望ましい。しかし、千数百万円と高価であるのが問題である。

一方、1064 nm の YVO₄ レーザーは百数十万円で作成することが可能である。東京大学の井上研究室や電気通信大学の向山研究室ではこのレーザーを開発し、これを用いて実験を行っている。また、私が平成 23

年度までお世話になる東京工業大学の上妻研究室でもこのレーザーを開発し、私もこの開発に携わっている。しかし、これらのレーザー光源は 1064 nm を発振するものであり、532 nm では発振しない。私が研究しようとしている、青方離調光格子トラップには YVO_4 倍波レーザーの発振する 532 nm の高強度なレーザー光が必要である。

私は移転するため、これまで用いてきた商用の YVO_4 倍波レーザーを用いることができなくなる。そこで、1064 nm で発振する YVO_4 レーザーと LBO 結晶を用いて 532 nm のレーザーを発振する装置を新たに開発し、より長時間、原子スピンを観測できるようにする。

原子スピンを観測する対象はルビジウム原子とセシウム原子である。EDM はセシウム原子で測定する予定だが、セシウム原子のスピンは磁場でも変動してしまうので、EDM が小さいルビジウム原子で磁力計を構成し、磁場を測定することで、EDM に由来するスピン運動だけを抽出する。

私はこれまで冷却ルビジウム原子を用いた実験を行ってきた。その結果、ルビジウム原子を青方離調 3 次元光格子トラップに捕捉することに成功している。平成 24 年度にはセシウム原子のレーザー冷却も行う。また、移転に伴いルビジウム原子を操作する実験装置も用いることができなくなるため、その実験装置も構築する。

その後、スピン歳差運動の観測を行う。この時、スピンのコヒーレンスが高い必要がある。そこで、この測定を行う場所を磁気シールドで覆い、数 nT 程度の磁場の均一性、安定性を図る。さらに、内部に磁気センサーを設置し、動的にも磁場の均一・安定性を作り出す。これによるスピン・コヒーレンス時間は数秒を目指す。数秒のコヒーレンスを達成できれば EDM 測定への大きな前進であるだけでなく精密測定全体としても大きな成果となる。

一方で、セシウム原子を用いた実験も準備する。ルビジウム原子を磁力計として用い、セシウム原子で EDM を測定することで、EDM 測定精度を高める。そのためには、ルビジウム原子とセシウム原子を同時に青方離調光格子光双極子カトラップに捕捉し、それぞれの原子スピンを同時に測定する必要がある。また、原子によって磁場に対する運動が異なるので、ルビジウム原子とセシウム原子の磁場に対する運動の差を精密に測定する必要がある。

ここまで来れば、電場を印加し、EDM 測定を行うことができる。電場は石英セルの外側から印加する予定である。すでにパイレックスのセルで電場を印加する実験を行っている。このときには磁場や電場の安定度や青方離調光格子光双極子カトラップに用いているレーザー強度の揺らぎなどが測定誤差として現れてくると考えられる、こ

れらの揺らぎの原因を把握し、除去する地道な作業が必要になる。また、測定結果の精度を上げるには、多くの実験データの積算が必要である。例えば、水銀の EDM 測定では 1 年程度の実験データの蓄積を行っている。本研究でも長時間の実験データの蓄積が必要となるだろう。

4. 研究成果

この研究で研究代表者は東京工業大学から静岡大学へと異動した。そのため、この研究では先の研究を引き継ぎ、さらにすすめることを目標としている。それまではルビジウム原子で研究を行ってきた。そこで本研究ではセシウム原子のレーザー冷却を目指して研究をすすめ、セシウム原子を操作するためのレーザーを作成し、セシウム原子のガラスセルを用いた分光によって、レーザーが期待通りの性能を持つことを確かめた。また、セシウム原子に関する基礎的な実験を行い、セシウム原子の特徴を確かめた。一方で、それまで行ってきたルビジウム原子のレーザー冷却が再現できることを確かめた。

平成 24 年度より研究代表者は東京工業大学から静岡大学へと異動した。これにより、東京工業大学上妻研究室という恵まれた環境を離れ、新たな研究環境を一から作る事となった。これまで行ってきた研究を続行するとともに、学生向けの新しい研究も始める必要があった。これまでの研究を続行するために YVO_4 レーザーを作成することが必要である。そこで、その励起レーザーであるマルチモードのファイバカップル半導体レーザーを購入した。また、同様の YVO_4 レーザーを上妻研究室より借り、その構造や特性を調べた。これにより、当研究での YVO_4 レーザー作成の準備が整った。また、磁気光学トラップをするための外部共振器型半導体レーザーも借り、構造を調べる一方で、このレーザーの素材である半導体レーザーを購入した。この一方で、研究室の環境を整えた。恒温性を保つためのエアコン、工具や薬品をおさめるための棚などを設置した。また、他の研究者から除振台をゆずり受け、これを研究室へと搬入した。しかしながら、この除振台は当研究が必要とする大きさには小さく、どのように研究を続けるのは困難であった。

しかしながら、ルビジウム原子に対するレーザー冷却の最初のステップである、磁気光学トラップによって、真空中でルビジウム原子気体を捕捉することの再現に成功した。また、次の目標である、セシウム原子のレーザー冷却のために必要なレーザー光源を作成し、セシウム原子の基礎的な情報を集めた。

ルビジウム原子の磁気光学トラップを行う真空槽に使う部品はこれまでに購入していたので、これを組立て、真空を引き、熱処理を行うことで大気圧の 10 兆分の一程度の超高真空を実現することができた。また、ルビジウム原子のレーザー冷却に必要なレー

レーザー光源を作成したり貸与を受けることで、磁気光学トラップに必要な強度と波長のレーザー光を得ることができた。これにより、ルビジウム原子の磁気光学トラップの再現に成功した。

一方、次の目標である、セシウム原子のレーザー冷却に必要なレーザー光源を準備した。本研究者はルビジウム原子を扱ったことがあるがセシウム原子は初めてであった。そこで、ルビジウム原子のレーザー光源を参考にしてセシウム原子のレーザー光源を設計した。これに基づいてセシウム原子のレーザー光源を作成した。また、同時にルビジウム原子用のレーザー光源も作成した。結果、どちらのレーザー光源も予期したとおり動作し、ルビジウム原子レーザー光源は前述の磁気光学トラップに用いた。一方、セシウム原子のレーザー光源は、セシウム原子の基礎情報を得るのに用いた。セシウム原子気体の入ったガラスセルにレーザー光を通し、レーザー光が特定の波長で吸収され、磁場によって吸収波長が変化するのを観測した。

ここまで、レーザーの操作は簡単な機能しかない電気装置を組み合わせ、ほとんど手動で行っていた。もし、磁気光学トラップやさらに進んだレーザー冷却を行うには、複数のレーザー装置を同時に制御する必要があるため、これらを自動で行う電気回路が必要である。本年度はこの電気回路を作成し、予定したとおりの動作をすることを確認した。

さらに、これを用いて、セシウム原子に対して偏光分光という分光を行い、どのような信号がえられるか確認した。一般に偏光分光法はレーザー冷却では用いられないが、実際に磁気光学トラップでは使えないか、今後検討したい。一方、磁気光学トラップを行うには、このレーザー光源では光強度が足りない。そこで、半導体テーパーアンプという、レーザー光強度を増幅する装置を組み立てた。

このころ、実験に必要な、大きな光学除振台を譲り受けることができた。これにより、セシウム原子とルビジウム原子の二重磁気光学トラップを行う準備ができた。しかし、ここで、セシウム原子を操作するレーザーの光源である半導体レーザーが不調となった。半導体レーザーは経年劣化があることが知られており、780nmのルビジウム用半導体レーザーでも劣化するが、我々の852nm半導体レーザーは劣化が早かった。また、これを取り替えるために852nm半導体レーザーを新たに購入したが、製品毎に波長のばらつきが大きかった。これは、780nmの半導体レーザーがCDプレーヤーなどの民生用に製造されており、研究・開発が十分に行われて品質が高い一方、852nmは研究用として作成されており、製造工程が洗練されていないためと思われる。こういったことに対応するため、852nm半導体レーザーの性能に関して熟知する必要を感じたため、外部共振器型半導体レーザーが温度や電流に関してどのように変

化するのかを詳細に調べた。

こうした実験を進める一方で、量子情報関係の実験の準備として、レーザーポインターやナトリウムランプを利用し、光学的な基本操作から光干渉計、光共振器、コヒールレンズ、レーザー光の横モードといった最先端にいたる光学的実験を行った。

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)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本多 和仁 (Kazuhito Honda)
静岡大学・教育学部・准教授
研究者番号：70408706

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：