

令和元年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06603

研究課題名（和文）フェムト秒光周波数コムを用いた冷却粒子の超精密分光

研究課題名（英文）Precision spectroscopy of cold particles using femto-second optical frequency comb

研究代表者

蔡 恩美 (Chae, Eunmi)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：90801332

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は光と物質の相互作用を用い、現代物理学では説明のできない現象 - 物質・反物質対称性の破れやダークマターなど - を解明できる鍵を見つけることを目標とした。そのためにまず物質として磁場と光を利用して絶対零度近くまで冷やしたCs原子集団を用意した。光源は多様な波長を含み、さらにそれらの波長が一定な間隔で正確に定まっている光周波数コムというものを用意した。これらを合わせ、Cs原子が吸収する複数の光の波長と吸収量を精密に測定できるセットアップを構築できた。今後これらの値を精密に測定・比較することで現代物理学理論の検証を行う予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代物理学の標準模型は電磁気力、弱い相互作用、強い相互作用を統一的に記述しており、実験室で行われている実験結果のすべてを説明できる優れたものである。しかし、物質・反物質の非対称性やダークマターの存在など、標準模型では記述できない現象もある。本研究は標準模型の限界を実験的に見つけることで新しい理論の創出を助け、この世界の理解を深めることを目指している。本研究で用いた最先端の光周波数コムはこの研究に新しい知見を与えられると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research utilizes the interaction between light and matter to find a clue for solving inexplicable physical phenomena, such as matter-antimatter asymmetry and dark matter. As a matter, we prepared a cold sample of Cs atoms at around absolute zero temperature by tailoring the magnetic fields and the light. As a light, we employed an optical frequency comb which has various colors of wavelengths with regular spacing and finely determined values. By combining these two elements, we constructed a setup for measuring the wavelengths and the amount of the light absorptions of electrical transitions in Cs atoms. Tests of current physics paradigms will be performed by precisely examining these values.

研究分野：物理

キーワード：精密分光 光周波数コム 冷却原子

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

精密計測は物質を成している相互作用のプローブとして古くからよく活用されている。その中でも精密分光測定は対象の内部電子準位間の遷移を直接観測することで、その内部準位エネルギー値に寄与する様々な要因—内部状態量子数、スピン軌道相互作用、外場の影響などを調べることができる。原子や分子の電子遷移は一見シンプルに見えるが、複数の基本粒子の相互作用が絡んでおり、精密に測定することで物理定数の時間変化[1]やダークマターの探索[2]など物理の標準模型では説明の付かない新しい現象までも観測できると期待されている。

多様な原子や分子の遷移を精密に測定するためには正確な‘周波数の物差し’、つまり光周波数コムが必要不可欠である。近年絶対周波数が18桁のレベルで定まる光原子時計技術の発達に伴い[3, 4]、その不確定性をより広い周波数域まで伝搬できる、同程度もしくはより安定な光周波数コムが要求されている。申請者が所属している東京大学吉岡研究室では、同学香取研究室の正確な時計レーザーを学内光ファイバーネットワークを経由して受信し、独自に開発したチタンサファイアモード同期レーザーをその時計レーザーに同期させることで世界最高レベルである1秒当たり18桁の不確定性を持った光周波数コムの開発に成功している。この成果により、光原子時計を保有しない研究室で今までにない精度の精密分光実験ができる環境が整った。

申請者は今までに、二原子分子のレーザー冷却、冷却原子を用いた量子シミュレーションの研究履歴を持ち、冷却粒子の分光・操作を数多く行ってきた。すぐれた光周波数コムの技術と冷却原子分子の技術を両方専門とする研究室は世界的にもそう多くない。当研究室の光周波数コム技術と申請者の冷却原子・分子の経験を組み合わせることで、超精密分光研究において独自の発展ができるものと期待される。

2. 研究の目的

本研究ではまずアルカリ原子の超精密分光実験を行うことを目標とした。そのために絶対零度付近まで冷却されたアルカリ原子を用意し、正確な遷移周波数、遷移確率を抽出する。特に光周波数コムが持つ広帯域な周波数成分を生かし複数の遷移を同時に測定することによって実験環境などから由来するシステムティックエラーを減らし、極低温原子間相互作用、及び外場との相互作用の精度の高い推定ができると期待した。

3. 研究の方法

(1) 冷却原子の用意

本研究の目的であるアルカリ原子の超精密分光実験のため、絶対零度付近まで冷却されたアルカリ原子Csを磁気光学トラップを用いて用意した。そのために必要な超高真空系の構築、トラップ用のレーザーの作製とその周波数の安定化、必要な磁場の設計および磁場生成用コイルの構築を行った。

(2) 光周波数コムの長期安定化の達成

冷却原子の精密分光のためには光周波数の基準となる光周波数コムの長期安定化が必須である。そのため、申請者が所属している研究室が開発した世界最高レベルの不確定性を持つ光周波数コムを長期的に運転できるようにした。具体的な作業としては、オシレーターケースの強化、環境雑音（音、振動など）の除去、制御パラメーターの最適化などがある。

(3) 冷却原子の精密分光計測

(1) で完成した冷却原子集団を用いて実際冷却原子の精密分光を行う。そのため、最初の分光対象であるCs原子の6s-7p遷移に対応する459 nmの分光用レーザーを作製した。また、そのレーザーの周波数安定化のため、近赤外の光周波数コムの倍波を取るセットアップを用意した。光周波数コムの倍波に分光用レーザーをヘテロダインビートも用いて位相同期することで、分光用レーザー周波数の正確なコントロールができるようになる。Cs原子集団の複数の遷移を同時に測定することで遷移確率の精度を上げるべく、同時測定ができるようなセットアップを完成した。

4. 研究成果

(1) 冷却原子のセットアップ完成

目標である冷却原子の分光のため、Csの真空チャンバーを立ち上げた。冷却原子の実験には超高真空度が必要であり、それを実現するためのメインチャンバーと真空ポンプ、その他必要な部品（窓、小型真空部品など）を揃えながらそれらを組み立てた。超高真空度を達成するにはチャンバー全体をベーキングするが、その際の窓材の歪や破損を防ぐため、均一な加熱や冷却レートの調整に慎重を期した。熱が均等に行き渡ってないと窓が割れたりする恐れがあり慎重に進めていく必要があった。最終的に到達した真空度は 10^{-7} pa台となり、冷却原子を十分維持できるレベルに達した。

真空チャンバーの立ち上げと同時に磁気光学トラップに必要な光源も用意した。Csの遷移波長は半導体レーザーを容易に調達できる波長であるので、自作の外部共振器型半導体レーザーExternal Cavity Diode Laser (ECDL) を作製した。原子の超微細構造により二つの波長を用意す

る必要があるため、冷却用に合計2つのECDLを作製した。

レーザー周波数の安定化のためには、それぞれのレーザーを原子遷移を基準としてロックする必要がある。それには原子セルの飽和吸収スペクトルを利用した。室温原子の吸収スペクトルはドップラー効果により数百 MHz と非常にブロードな形をしており、ロックに使うには困難である。しかし、飽和吸収スペクトルでは、ブロードな吸収の中心に鋭いピークが現れるので、レーザー安定化に適している。レーザー作製後は原子セルの飽和吸収スペクトルを観測し、PIDループを用いてレーザー周波数の安定化を施した。

磁気光学トラップに必要な残りの要素は磁場である。最終的なチャンバーの大きさの応じ、必要な電流値を考慮しコイルの設計、製作を行った。

(2) 光周波数コムの長期安定化の達成

精密分光に欠かせない長期的な光周波数安定化に向けて、光周波数コムの長期安定化を施した。光周波数コムの不安定要因となる環境雑音（音、振動）を最小限にし、さらにそれらを遮断できるようオシレーター容器を改良した。これらの結果、モード同期状態が数日間問題なく続くような頑丈な光周波数コムを作ることができた。また、光周波数コムを電氣的に操作する際の制御パラメーターを最適化することで1時間程度では光の位相が乱れることのない長期安定性を持つ光周波数コムを完成した（図1）。これより、広い波長帯において長期的な精密分光測定を可能とする光周波数基準ができた。この結果は国際雑誌論文誌 Optics express へ掲載された [5]。

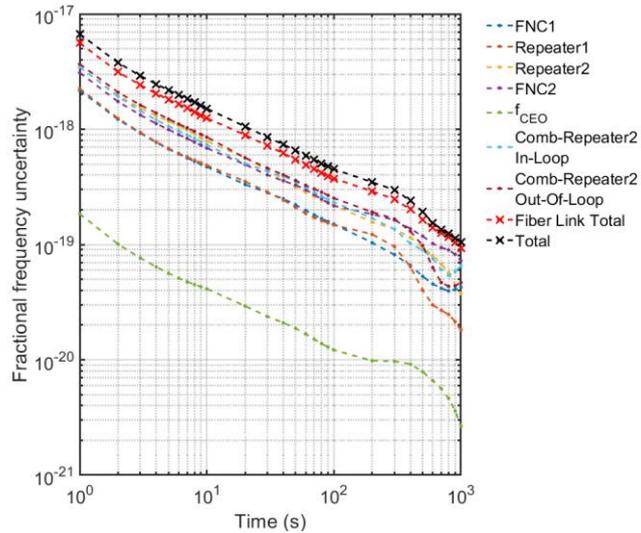


図1. 光周波数コムの周波数安定性 [5]。

(3) 冷却原子の精密分光計測

(1) で立ち上げた Cs 冷却原子を対象に精密分光実験を行っている。そのため、最初の目標遷移である 6s-7p 遷移にあった 459 nm の青色分光用 ECDL を新たに構築した。この分光用 ECDL の周波数安定化には光周波数コムを用いる予定である。現在の光周波数コムは緑色の波長から近赤外の波長を持っているため、青色の ECDL を安定化するためには光周波数コムの近赤外領域の倍波を取る必要がある。そのために必要な倍波結晶などを選定し用意した。今後分光用 ECDL を光周波数コムで安定化することにより、光格子時計に対して 18 桁の相対精度、すなわち長期積算のもとでは光領域で mHz レベルの不確定性を絶対周波数を持った分光用レーザーを準備できると期待される。

また、遷移中心周波数、線幅、スペクトルの形状を系統誤差なく今までにない精度で測定するために、冷却原子の複数の遷移を同時に測定できるセットアップを構築した。用いられた遷移は参照用の Cs 6s-6p 遷移と測定用の Cs 6s-7p 遷移である。これらの多彩なスペクトル情報から、残留電場や残留磁場に伴う遷移周波数の系統誤差を除去する試みを行う。得られた結果を用いて weak charge の値などの基礎物理量の導出を行うことで、標準模型の検証に繋がると期待される。これらの進捗は日本物理学会第 74 回年次大会で発表された [6]。

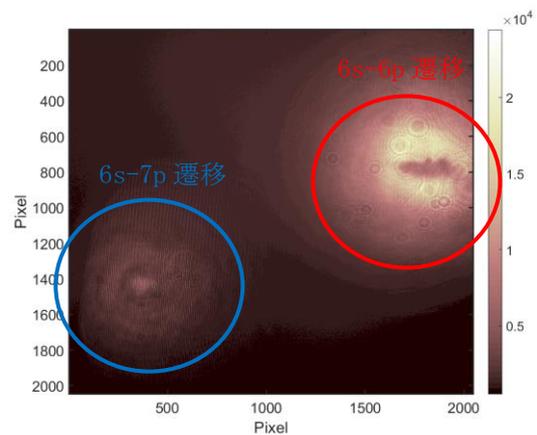


図2. 二つの周波数による冷却 Cs 原子の吸収イメージング [6]。

<引用文献>

- ① T. Rosenband et al., Science 319, 1808 (2008).
- ② A. Derevianko and M. Pospelov, Nature Physics 10, 933 (2014).
- ③ B. J. Bloom et al., Nature 506, 71 (2014).
- ④ I. Ushijima et al., Nature Photonics 9, 185 (2015).
- ⑤ E. Chae et al., Optics Express 27, 15649 (2019).

⑥ 井上真之 他、日本物理学会 第 74 回年次大会 講演番号：17pK304-9、2019 年.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① Eunmi Chae, Kota Nakashima, Takuya Ikeda, Kei Sugiyama, and Kosuke Yoshioka, “Direct phase-locking of a Ti:Sapphire optical frequency comb to a remote optical frequency standard”, Optics Express **27**(11), 15649 - 15661 (2019). 査読有

〔学会発表〕（計 1 件）

- ① 井上真之、蔡恩美、吉岡孝高、“標準模型の検証に向けた冷却セシウム原子の 6s-7p 遷移双極子モーメントの評価”、日本物理学会 第 74 回年次大会 講演番号：17pK304-9、2019 年

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8 桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。