

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23684032

研究課題名(和文) 極低温原子集団を用いた量子原子光学の新規開拓

研究課題名(英文) Exploration of quantum atom optics using ultracold atoms

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) 21,800,000円

研究成果の概要(和文)：量子原子光学の新規開拓に向けて、ルビジウム原子、リチウム原子、およびストロンチウム原子の同時レーザー冷却システムを構築した。ストロンチウム原子のレーザー冷却光が、レーザー冷却されたルビジウム原子に与える影響(光イオン化によるロス)を初めて定量的に見積もった。ストロンチウム原子のレーザー冷却のための光学系の大幅な簡素化を行い、ホローカソードランプを用いたストロンチウム原子の基底状態および準安定状態の分光方法を確立した。

研究成果の概要(英文)：We constructed a system for simultaneous laser cooling of rubidium, lithium, and strontium for the exploration of quantum atom optics. For the first time, we quantitatively evaluate the effect of the cooling laser of Sr on the laser-cooled Rb atoms (photo-ionization loss). We also developed a variety of methods to simplify the optical setup for laser cooling of Sr, and established a way of spectroscopy of Sr both in the ground and the excited states using a hollow-cathode lamp.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：レーザー冷却 レーザー分光 偏光分光 ホローカソードランプ ストロンチウム リチウム ルビジウム 光イオン化

1. 研究開始当初の背景

1995年の気体原子のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)の実現によって、人類はコヒーレントな物質波、つまり原子レーザーを手にし、コヒーレント原子波光学という研究分野がスタートした。我々東京大学のグループは、1998年に日本で初めて気体原子のBEC生成に成功し、翌年には、このBECをコヒーレントに分割または反射させる手法を実現し、そして世界初のコントラスト100%のBEC干渉計を実現した(Phys. Rev. A **61**, 041602 (2000))。また同年、光が利得媒質中を伝播しながら増幅される過程の原子版(原子波増幅)を世界に先駆けて実現した(Science **286**, 2309 (1999))。この他、BECの四光波混合やソリトン伝播といった非線形原子光学の実験も米国のグループにより行われている。これらの実験は、原子波の波動性に立脚したものであり、ある意味1960年代のレーザーの発明の初期に行われていた実験の、原子への“焼き直し”ともいえる。原子の波動性ではなく量子性に立脚した「量子原子光学」と呼べるような実験はBECの出現以降もほとんど行われていないのが実情であった。

2. 研究の目的

光の研究が「波動光学」から「量子光学」へと発展したことにより、非局所性、量子限界、観測の理論といった量子力学の本質に迫る実験的研究が促進され、自然界に対する我々の理解をより深いものにした。また量子情報科学という新しい学問分野を生み出した。原子波の研究も、これまでの波動性に着目した「原子波光学」から、原子の量子性が本質的な役割を果たすような「量子原子光学」へと発展していくのは自然な流れである。豊富な内部自由度を持つ原子は、光子に比べ明らかに柔軟性の高い“量子”であり、この原子を用いた「量子光学」、つまり「量子原子光学」が、従来の光を用いた「量子光学」より多様性のある実験を可能にすることは想像に難くない。本研究は、未だ開拓されていない「量子原子光学」の基盤となる技術の確立を目的とした。

3. 研究の方法

極低温原子集団を用いた量子原子光学の開拓のためには、極低温原子集団の生成が容易であり、かつ十分長いコヒーレンス時間が保障される必要がある。研究開始時点では、ルビジウム原子のレーザー冷却装置のみが既存であったが、フェルミオンの同位体を持たず、散乱長の調節が難しいルビジウム原子集団では、可能な実験が大きく制限される。そこで、フェルミオンの同位体を持つリチウム、またスピン禁制遷移を持ち、レーザー冷却のみで極低温($\sim \mu\text{K}$)が実現可能なストロンチウム原子のレーザー冷却システムを同時に構築することとした。

4. 研究成果

(1)ルビジウム、リチウム原子、ストロンチウム原子の同時レーザー冷却システム構築した(Physical Review A **87**, 063426 (2013))。図1(a)に示すように、既存のルビジウム原子のレーザー冷却装置に、新たにリチウム原子およびストロンチウム原子のレーザー冷却システムを組み込む形で改良を行った。リチウム原子とストロンチウムを同時にゼーマン減速できるコイルを設計し、原子オーブは両者で共通にした。磁気光学トラップ(MOT)されたリチウム原子(図1(b))の個数は、フェルミ縮退を実現するのに十分な 10^8 個程度であった。この装置を用いて、3種類の原子種を任意の組み合わせでレーザー冷却することも可能となった(図1(c))。

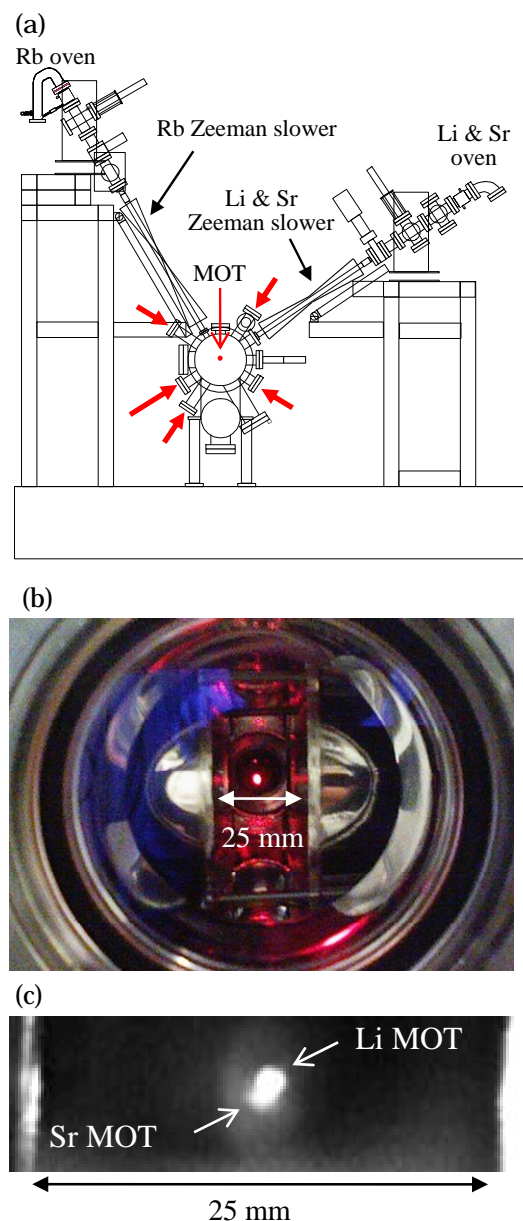


図1 (a) 3原子種同時レーザー冷却システム。(b)レーザー冷却されたリチウム原子集団。(c)リチウム原子とストロンチウム原子の同時レーザー冷却。

ルビジウム原子とストロンチウム原子の同時レーザー冷却では、ストロンチウム原子のレーザー冷却光である461nmレーザーによるルビジウム原子の光イオン化(図2)によるロスが問題になる可能性があったが、実際に光イオン化レートを実験的に求め、同時レーザー冷却の障害にはならないことを確認した。

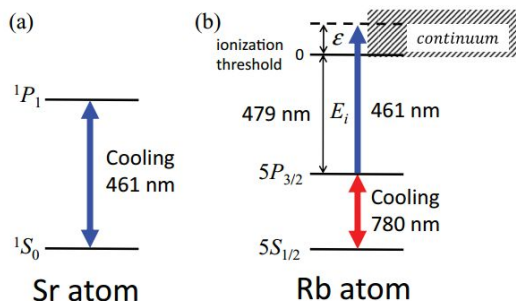


図2 461nm光によるルビジウム原子の光イオン化過程。

(2)リチウム原子のレーザー冷却のための新しい周波数安定化法を開発した(Optics Letters 37, 2865 (2012))。常温では蒸気圧の低いリチウム原子の分光には、通常ヒートパイプ(図3(a))が用いられるが、ビューポートにリチウムを付着させないためにアルゴンバッファガスを入れるのが普通である。本研究では、このバッファガスの存在が、真空中では見え難かった偏光分光信号を増強させることを実験的に見出し、理論的にそのメカニズムを解明した。図3(b)にリチウム6原子の典型的な偏光分光信号を示す。このように観測される3本の遷移のどれも周波数安定化に十分な分散型信号を得ることができた。

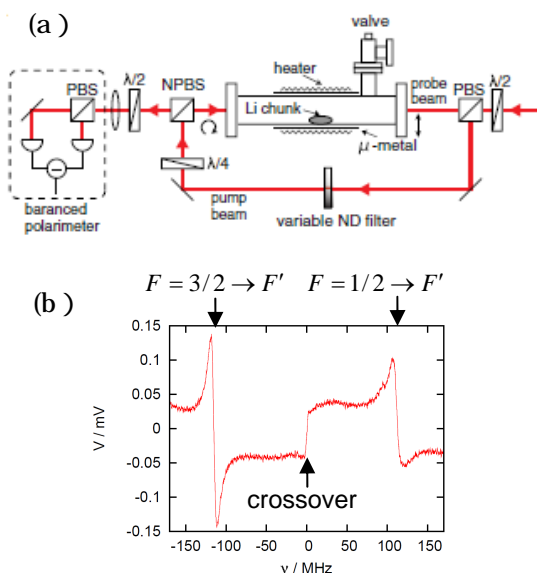


図3 (a)リチウム6原子の偏光分光のためのセットアップ。(b)アルゴンバッファガスが50 mTorrのときのリチウム6原子の偏光分光信号。

(3)青色レーザーダイオードを用いた簡便なストロンチウムレーザー冷却システムを構築した(Review of Scientific Instruments 86, 063101 (2013))。これまでストロンチウム原子のレーザー冷却に必要な461nm光は、非線形光学結晶による第二高調波発生を用いており、光学系が複雑であった。2012年に450-460nm帯の青色半導体レーザーが市販されるようになり、この青色半導体レーザーの諸特性を評価したところ、出力パワーおよび周波数制御性ともにストロンチウム原子のレーザー冷却に十分適用できることがわかった。また、基底状態、励起状態ともにドップラフリー分光が可能であるようなホローカソードランプのバッファガスの条件(Ne:0.5 Torr + Xe:0.5 Torr)を実験的に発見した(図4)。

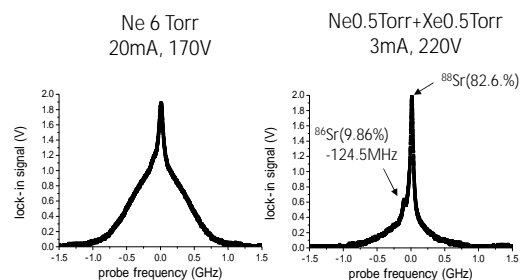


図4 青色半導体レーザーとホローカソードランプを用いたストロンチウム461nm遷移のドップラフリー分光信号。Ne:6 Torrのバッファガスでは観測できなかったSr86の同位体シフトが、全圧が1Torr(Ne:0.5 Torr + Xe:0.5 Torr)のバッファガスでは観測された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Takatoshi Aoki, Yuki Yamanaka, Makoto Takeuchi, Yasuhiro Sakemi, Yoshio Torii, Photoionization loss in a simultaneous magneto-optical trap of Rb and Sr, Physical Review A 87, 063426 (2013), 査読あり,

DOI: 10.1103/PhysRevA.87.063426

Yosuke Shimada, Yuko Chida, Nozomi Ohtsubo, Takatoshi Aoki, Makoto Takeuchi, Takahiro Kuga, Yoshio Torii, A simplified 461-nm laser system using blue laser diodes and a hollow cathode lamp for laser cooling of Sr, Review of Scientific Instruments 86, 063101 (2013), 査読あり,

DOI: 10.1063/1.4808246

Yoshio Torii, Hideyasu Tashiro, Nozomi Ohtsubo, and Takatoshi Aoki, Laser phase and frequency stabilization using atomic coherence, Physical Review A 86, 033805 (2012), 査読あり,

DOI: 10.1103/PhysRevA.86.033805

Nozomi Ohtsubo, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii, Buffer-gas-assisted polarization spectroscopy of 6Li , *Optics Letters* **37**, 2865 (2012), 査読あり,

DOI: 10.1364/OL.37.002865

Takatoshi Aoki, Kotaro Umezawa, Yuki Yamanaka, Naotomo Takemura, Yasuhiro Sakemi, and Yoshio Torii, A 461 nm Laser System and Hollow-Cathode Lamp Spectroscopy for Magneto-Optical Trapping of Sr Atoms, *Journal of the Physical Society of Japan* **81** 034401 (2012), 査読あり,

DOI: 10.1143/JPSJ.81.034401

〔学会発表〕(計 14 件)

征矢直記, 青木貴稔, 島井寿夫, 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 9 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, 島井寿夫, 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 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 9 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, 島井寿夫, 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 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, 長澤仁, 青木貴稔, 竹内誠, 久我隆弘, 島井寿夫, 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, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 27 日、徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市)

長澤仁, 青木貴稔, 酒見泰寛, 島井寿夫, 極低温 LiSr 分子生成に向けた Sr 原子の $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_1$ 遷移を用いたレーザー冷却, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 27 日、徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市)

青木貴稔, 酒見泰寛, 島井寿夫, Rb 及び Sr 原子の同時磁気光学トラップ, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日、広島大学東広島キャンパス (広島県東広島市)

Yoshio Torii, Laser phase and frequency stabilization using atomic coherence, NICT Workshop on the Optical Frequency Standard, 2013 年 02 月 07 日, 情報通信研究機構(東京都小金井市)

Simultaneous magneto-optical trapping of Rb and Sr, Takatoshi Aoki, Yuki Yamanaka, Yasuhiro Sakemi, and Yoshio

Torii, ICAP2012, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, Poster Tu-183, 24 July 2012.

High-performance apparatus for simultaneous laser cooling of 87Rb and 6Li , Nozomi Ohtsubo, Daisuke Ikoma, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii, ICAP2012, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, Poster Mo-181, 23 July 2012.

大坪望, 生駒大祐, 青木貴稔, 島井寿夫, Rb 原子を用いた ^6Li 原子の協同冷却, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス (兵庫県西宮市)

山中優輝, 青木貴稔, 酒見泰寛, 島井寿夫, Rb 及び Sr 原子の同時磁気光学トラップ, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス (兵庫県西宮市)

生駒大祐, 大坪望, 青木貴稔, 島井寿夫, Rb-Li 及び Sr-Li 原子混合系実現のための ^6Li 原子の磁気光学トラップ, 日本物理学会, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 24 日、富山大学 (富山県富山市)

山中優輝, 青木貴稔, 酒見泰寛, 島井寿夫, Rb 及び Sr 原子の同時磁気光学トラップ, 日本物理学会, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 24 日、富山大学 (富山県富山市)

大坪望, 生駒大祐, 青木貴稔, 島井寿夫, Ar バッファガス中での 6Li 原子の偏光分光, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 22 日、富山大学 (富山県富山市)

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島井 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

(2) 研究協力者

青木 貴稔 (AOKI TAKATOSHITORII)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教
研究者番号: 30328562

竹内 誠 (TAKEUCHI MAKOTO)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教
研究者番号: 60552106

久我 隆弘 (KUGA TAKAHIRO)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授
研究者番号: 60195419