

論文の内容の要旨

論文題目

可搬型ストロンチウムレーザー冷却装置の 開発

氏名 佐藤拓海

1 研究背景

レーザー冷却された Sr 原子は、重力測定、光格子時計など様々な精密測定のプローブとして用いられている。特に光格子時計による重力赤方偏移の測定は、地下資源や地殻の変動等の調査に向けた測地的な応用が考えられており、可搬型装置の開発が進められている。たとえば、2020 年には東京大学の香取らによって、東京スカイツリーに可搬型 Sr 光格子時計 2 台が設置され、上層部と地上部間の重力赤方偏移の測定が行われた [1]。この時搬入された 1 台の光格子時計につき、複数台のラックに光学系、電源、真空装置が搭載されており、更なる小型化が望まれる。

本研究の目的は、 ^{88}Sr のレーザー冷却を簡便にする技術開発を行い、コンパクトなシステムを構築することである。特に、 $5s5p\ ^3P_2 - 5s5d\ ^3D_3$ 遷移のレーザー冷却による偏光勾配冷却によって、光格子へのローディングを簡便化するのが目標となる。そのための、レーザー周波数安定化の光学系の簡便化、真空装置の簡便化、冷却手順の簡便化という 3 つの要素で研究を行なった。

1.1 BAVLL による光周波数安定化技術の簡便化

Sr のレーザー冷却は、冷却光に加えて準安定状態からの遷移を起こすリポンプ光という複数のレーザー光を用いる事で行われる。これまでに、レーザー周波数安定化のためにはレーザー周波数変調法が一般的に用いられている。この方法は、レーザーの変調のために電気光学変調器や音響光学素子等が用いられるが、装置を複雑なものにしている。このような変調を用いない簡便な手法として、Dichroic atomic vapor laser locking (DAVLL)[2] や、transversal-DAVLL (t-DAVLL)[3] もしくは Birefringent atomic vapor laser lock (BAVLL)[4] がある。本研究では BAVLL を用いた周波数安定化を行なった。

これまでに、Sr の 461 nm 遷移に対する BAVLL 分光を行なった実験は行われてきたが [5]、周波数安定化に関する報告はなされていなかった。本研究では、BAVLL による周波数安定化を長時間行い、その安定度を測定した (図 1)。20 時間にわたる測定の結果、周波数の変化は 1 MHz 以内で、Sr の $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^1P_1$ 遷移の線幅である 30 MHz と比較して十分に安定している事が分かった。また、これまで 461 nm 遷移のみに適用されて

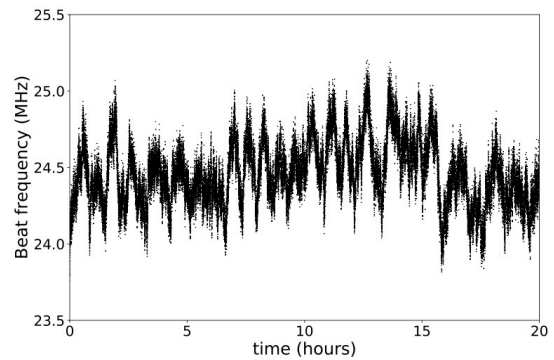
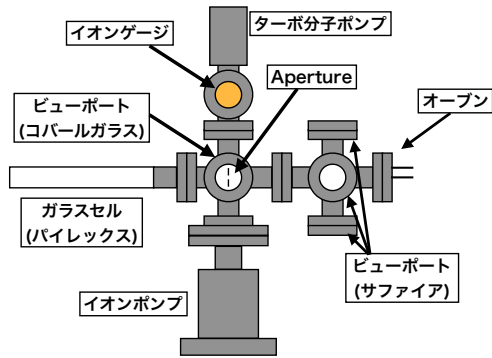


図 1 安定度測定の結果

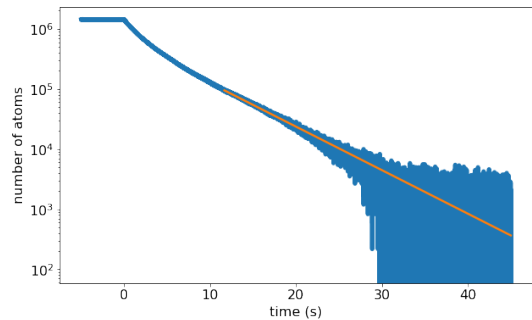
きた本手法だが、本研究ではリポンプ遷移として用いられている $5s5p\ ^3P_2 - 5p^2\ ^3P_2$ (481 nm) 遷移、 $5s5p\ ^3P_0 - 5s5d\ ^3D_1$ (483 nm) 遷移、 $5s5p\ ^3P_2 - 5s5d\ ^3D_3$ (496 nm) 遷移、 $5s5p\ ^3P_0 - 5s6s\ ^3S_1$ (679 nm) 遷移にも適用し、良い S/N 比で信号を得られる事が分かった。

1.2 真空装置の簡便化

蒸気圧の低い Sr の MOT は、オープンによって Sr の蒸気圧をあげて、供給される。その際の真空度悪化を回避するために、現在用いられているのが、ゼーマン減速器、もしくは 2D-MOT による原子供給である。これらは、差動排気によって、オープン (原子供給源) からトラップ領域に侵入する背景ガスを最小限に抑えながら高い流量の Sr 原子をトラップ領域に供給する手法である。しかし、オープンとトラップ領域の間隔を確保する必要があり、新たなコイルや光源といった追加の装置を要するため、装置サイズのコンパクト化との間にトレードオフの関係があるといえる。これまで、真空度悪化が予想されるため、オープンから直接 MOT へとローディングをしたという報告はなされていなかった。



(a)



(b)

図 2 (a) 真空装置の構成要素、(b) MOT の寿命測定 (330 °C)

しかし、本研究で我々が開発した真空装置では、差動排気せずに高い真空度を保ちながら十分な Sr 原子 ($\sim 10^6$ 個) を供給できることが分かった。図 2(a) に真空装置の構成を示す。我々の装置ではオープンが 360 °C で加熱しているにもかかわらず、真空装置内の圧力は 10^{-10} Torr を維持するものとなっている。461 nm 遷移による MOT の寿命測定を行なったところ、オープンの温度 330 °C で 9×10^{-11} Torr の真空度で 6 秒の寿命がある事が分かった。

1.3 冷却方法の簡便化

光格子へ Sr 原子をローディングするためには、線幅の狭いスピン異重項間遷移である $5s^2 \ ^1S_0 - 5s5p \ ^3P_1$ (689 nm) 遷移による 1 μ K 程度までの冷却が用いられてきた。線幅の狭い遷移を扱うため、レーザーシステムや、冷却手順が煩雑なものになっている。これまでに東京大学の赤塚らによって、2.7 μ m の光による準安定 ^{88}Sr の偏光勾配冷却を行う事で、689 nm 遷移の冷却に匹敵する冷却効果が得られた [6]。赤塚らによると、496 nm 遷移による MOT においても、同様に偏光勾配冷却が働くことが期待されるが、その詳細については報告がなされていない。我々は、496 nm 光による偏光勾配冷却によって、496 nm 光の反跳温度程度までの冷却が可能であると考えている。本研究では、461 nm の MOT (blue MOT) から 496 nm の MOT (green MOT) への移行を試みた。blue MOT に 496 nm 遷移によるリポンプとして用いる



図 3 観測された green MOT

ため、従来用いられてきた 497 nm の遷移と 481 nm の遷移でのリポンプとの比較実験を行なった。また、準安定状態 Sr の冷却のためには $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_1$ 遷移による緩和を防ぐ必要があり、 $5s5p\ ^3P_1 - 5s5d\ ^3D_2$ 遷移 (487 nm) を用いた。blue MOT から green MOT への移行を試みたところ、green MOT を観測する事ができた (図 3)。461 nm の光を切った際の寿命は 68 ms であり、先行研究 [6] で示された 13 ms という結果に比べて長い事が分かった。

2 結論と今後の展望

我々は、 ^{88}Sr のレーザー冷却を簡便にする技術開発を、レーザー周波数安定化の光学系の簡便化、真空装置の簡便化、冷却手順の簡便化という 3つの要素に着目して行い、コンパクトなシステムを構築した。レーザー周波数安定化では、BAVLL を用いる事で、簡便な方法でありながらも長期的に安定であることを示し、準安定状態からの遷移に適用することで十分な S/N 比の信号を得る事ができた。真空装置の簡便化では、ガラスセルへの熱的原子ビームによる供給によって、十分な寿命を得る事ができた。また、準安定 Sr 原子を磁気光学トラップすることに成功し、その寿命は 68 ms であった。今後、green MOT から偏光勾配冷却への移行を行うことで、496 nm の反跳温度まで冷却を行う事が可能である。

参考文献

- [1] M. Takamoto *et al.*, “Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks,” *Nature Photonics*, vol. 14, no. 7, pp. 411–415, 2020.
- [2] K. L. Corwin *et al.*, “Frequency-stabilized diode laser with the zeeman shift in an atomic vapor,” *Appl. Opt.*, vol. 37, pp. 3295–3298, May 1998.
- [3] T. Hasegawa and M. Deguchi, “Laser frequency locking by dispersive response of atoms in transversal magnetic field,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 26, pp. 1216–1220, Jun 2009.
- [4] T. Sato, *et al.*, “Birefringent atomic vapor laser lock in a hollow cathode lamp,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 39, pp. 155–159, Jan 2022.
- [5] 早川悠介, “博士学位論文「レーザー冷却のためのホローカソードランプを用いた sr 原子の分光」,” 2019.
- [6] T. Akatsuka *et al.*, “Three-stage laser cooling of sr atoms using the $5s5p^3p_2$ metastable state below doppler temperatures,” *Phys. Rev. A*, vol. 103, p. 023331, Feb 2021.