

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏名 早川悠介

1 研究背景

近年、アルカリ土類原子のスピン禁制光学遷移 (線幅 \sim mHz) を用いた原子時計の実現により、いまやセシウム原子のマイクロ波遷移を用いた SI 秒の定義の持つ不確かさを 3 桁上回る精度での周波数測定が可能である。現在の最も正確な原子時計は 18 桁の精度で周波数を測定することができ、1 cm の重力ポテンシャルの差を数秒というタイムスケールで読みだすことが理論上可能となっている。この原子時計を実現する上では中性原子のレーザー冷却技術が基礎となっており、その改良、簡便化は最高精度の原子時計のアプリケーションを開拓するうえで非常に重要である。

この観点から、ホローカソードランプはレーザー周波数安定化のための分光用の原子源として非常に便利である。放電を用いて原子をスパッタすることで得るため、オープンなどの高温が不要であり、電流を流すことで瞬時に分光に必要な原子を得ることができる。さらに、原子オープンなどとは違い、基底状態だけでなく準安定状態の原子やイオンも生成されるというメリットもある。

本研究では、シンプルでコンパクトな Sr レーザー冷却システムの構築のため、ホローカソードランプを用いた様々な Sr 原子の光学遷移に対する分光法及びレーザー周波数の安定化法を開発した。

2 冷却遷移 $(5s)^2\ ^1S_0 - (5s5p)^1P_1(461\text{nm})$ の分光及び周波数の安定化

レーザー周波数の安定化に必要な誤差信号を得る簡便な方法として、Dichroic Atomic Vapor Laser Locking(DAVLL)[1] や t-DAVLL[2] と呼ばれるゼーマンシフトを用いた方法がある。前者はホローカソードの軸方向の、後者はそれに直行する方向の磁場を用いる。ところで、ホローカソードは磁性体でできており外部からの磁場がシールドされるため、軸方向への磁場の設計が難しい。そのため、我々は軸方向に直行する方向へ磁場をかける方法 (t-DAVLL) を用いて冷却遷移 $(5s)^2\ ^1S_0 - (5s5p)^1P_1(461\text{nm})$ の分光及び周波数の安定化を行った。この方法では適切な磁場の強さの上限がなく広いキャプチャーレンジを実現できる上、内部に入り込む磁場も単純なモデルを用いることで計算できるというメリットもある。t-DAVLL 信号を磁場の強さを 1440 G から 3220 G まで変化させて観測することで、印加した磁場とホローカソードの内部に入り込んだ磁場の関係を調べた (図 1)。その結果、ホローカソード内部に入り込む磁場は外部磁場が $B \sim 1500$ G まではほとんど遮蔽されるが、2000 G を超えたあたりから急激に増加することが判明し、ホローカソードの磁氣的な飽和がおおよそ 2000 G で起こることが分かった (図 2)。また、信号の振幅はゼーマンシフトがドップラー幅の 2 倍程度になるまで増え続けるので、印加する磁場は 2000 G 以上が望ましいことがわかった。これらの情報はホローカソードランプを用いた DAVLL または t-DAVLL の磁場の設計のために重要である。

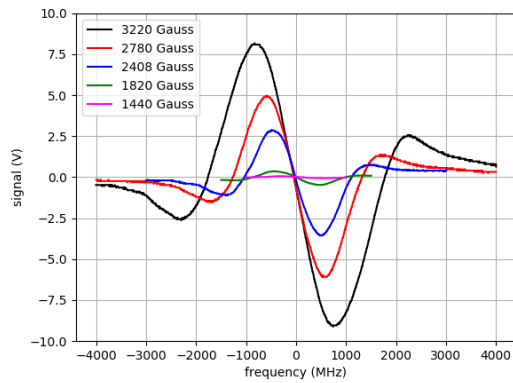


図 1: t-DAVLL 信号の磁場依存性

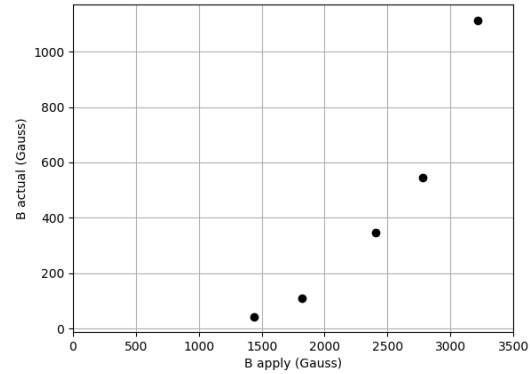


図 2: 印加した磁場とホローカソード内部に入り込む磁場の関係

3 準安定 Sr の分光

冷却遷移 $(5s)^2\ ^1S_0 - (5s5p)^1P_1(461\text{nm})$ は完全には閉じておらず、準安定状態へ緩和した原子はリポンプして冷却サイクルに戻す必要がある (図 3)。リポンプ遷移として $(5s5p)^3P_2 - (5s5d)^3D_3$ (496 nm)、 $(5s5p)^3P_2 - (5s5d)^3D_2$ (497 nm)、 $(5s5p)^3P_2 - (5s6s)^3S_1$ (707 nm)、 $(5s5p)^3P_0 - (5s6s)^3S_1$ (679 nm) などの遷移が使用できる。また、 $(5s5p)^3P_2 - (5s5d)^3D_3$ (496 nm) 遷移はほとんど閉じているため、この遷移を用いたレーザー冷却を行うことによって、角運動量を持たない基底状態を用いたドップラー冷却と違い、偏光勾配冷却が働き、ドップラー限界温度を超えて冷却することが

できると考えられる。従って、従来用いられてきた $(5s)^2\ ^1S_0 - (5s5p)^3P_1$ 遷移を用いた狭線幅冷却を置き換えることで冷却スキームをさらに簡便化できる可能性がある。

しかしながら、これらの遷移に対するレーザー周波数の安定化は、従来トランスファーキャビティ法や波長計を用いて行われており、これらの間接的な周波数安定化には、キャビティの機械的不安定性やドリフトなどの困難が付きまとう。このことこそがレーザー冷却技術を煩雑にしている要因の一つであり、理想的にはレーザー冷却の対象原子を用意して直接的な分光により周波数安定化を試みるべきである。しかしながら、通常の原子気体セルでは準安定状態の原子を生成できないため、リポンプ光レーザーの分光による周波数安定化は困難である。

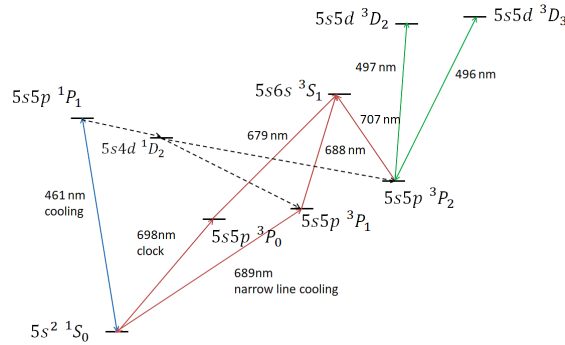


図 3: Sr 原子のエネルギー準位図

本研究では、この困難を解決すべく、バッファガスとして Ne 0.5 Torr と Xe 0.5 Torr の混合ガスを用いたホローカソードランプを用いた Sr 原子の分光に関する研究を行った。ホローカソードランプのバッファガスとして Ne 0.5 Torr と Xe 0.5 Torr を用いた理由は、比較的低い電圧でグロー放電を保ちつつ、バッファガスの全圧を小さくするためである。バッファガスの圧力を下げることにより、Sr 原子の平均自由行程を長くすることができ、プラズマが主に分布するホローカソードの中心部に到達する原子が多くなることで、より多くの準安定 Sr 原子が生成される。この研究の結果、 $(5s5p)^3P_2 -$

$(5s5d)^3D_3$ (496 nm)、 $(5s5p)^3P_2 - (5s5d)^3D_2$ (497 nm)、 $(5s5p)^3P_1 - (5s6s)^3S_1$ (688 nm) および $(5s5p)^3P_0 - (5s6s)^3S_1$ (679 nm) 遷移のドップラーフリー分光による誤差信号の生成に成功した。また、特に $(5s5p)^3P_2 - (5s5d)^3D_3$ (496 nm) 遷移においては、7%の自然存在比をもつ同位体 ^{87}Sr からの信号も確認された (図 4)。 ^{87}Sr 同位体は、核スピン $I = 9/2$ を持つため、超微細構造をもつ。これまで、 ^{87}Sr の $(5s5d)^3D_3$ 状態の超微細構造に関する情報は、磁気トラップされた $(5s5p)^3P_2$ の準安定原子集団を用いて 15 本の遷移のうち 4 つを観測した例 [3] のみが知られていたが、その遷移がどの超微細構造間の遷移に該当するかは不確かであった。この準位に関する超微細構造の情報は、フェルミ同位体の磁気光学トラップを実現するうえで、リポンプ遷移または冷却遷移として重要である。我々は 15 本のうち 9 本の遷移を本研究における分光実験によって観測することに成功した。また、実験結果を理論から予測されるモデルによってフィッティングすることにより、観測された共鳴がどの超微細構造間の遷移かを同定し、その共鳴周波数から $(5s5d)^3D_3$ 状態の超微細構造を決める磁気双極子結合定数 (A) 及び電気四重極子結合定数 (B) をそれぞれ $A = -156.9$ (1) MHz、 $B = -2$ (4) MHz と求めることにも成功した [4]。

4 まとめ

本研究では、横磁場を用いた分光法をホローカソードランプに対して適用することで、新たにシンプルでロバストなレーザー周波数の安定化法を開発した。また、適切なバッファガスを封入したホローカソードランプを用いることで、準安定 Sr の光学遷移をレーザー周波数の安定化に十分な S/N で分光することに成功した。さらに、この分光実験により、今まで詳しく知られていなかった

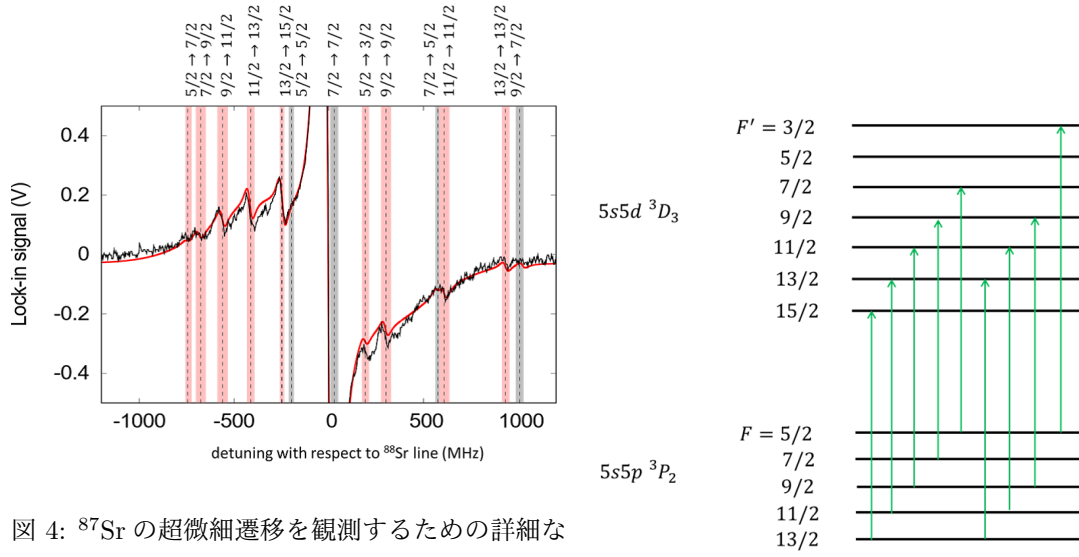


図 4: ^{87}Sr の超微細遷移を観測するための詳細な FM 分光. 8 回のスキャンを平均した. 点線は計算された超微細遷移 ($F \rightarrow F'$) の位置を表す. 図 5: $(5s5p)^3P_2$ および $(5s5d)^3D_3$ 状態の超微細赤及び灰色の範囲は不確かさを表す. 赤の範囲に含まれる遷移は観測された遷移である. 赤い線は最小二乗法によりフィッティングされたモデルである.

Sr の高励起状態のうちの一つの超微細構造を明らかにすることに成功した。

参考文献

- [1] Kristan L. Corwin, Zheng-Tian Lu, Carter F. Hand, Ryan J. Epstein, and Carl E. Wieman. Frequency-stabilized diode laser with the zeeman shift in an atomic vapor. *Appl. Opt.*, 37(15):3295–3298, May 1998.
- [2] Taro Hasegawa and Mitsuyasu Deguchi. Laser frequency locking by dispersive response of atoms in transversal magnetic field. *J. Opt. Soc. Am. B*, 26(6):1216–1220, Jun 2009.
- [3] Simon Stellmer and Florian Schreck. Reservoir spectroscopy of $5s5p \ ^3P_2$ - $5snd \ ^3D_{1,2,3}$ transitions in strontium. *Phys. Rev. A*, 90:022512, Aug 2014.
- [4] Yusuke Hayakawa, Takumi Sato, Chika Watanabe, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii. Doppler-free spectroscopy of metastable sr atoms using a hollow cathode lamp. *Appl. Opt.*, 57(6):1450–1454, Feb 2018.