

^{87}Rb の光誘起衝突過程が抑制された D1 遷移用光ポンピング光源の開発

岸本研究室 福田大起

1. 研究背景・目的

今日では量子計測の分野において極低温の冷却原子集団であるボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を用いた様々な物理量の測定が行われている。BEC の生成過程はレーザー冷却や磁気光学トラップ(MOT)、蒸発冷却などを組み合わせることによって室温程度の原子を極低温まで冷却することにより行われている。特に、蒸発冷却の過程では MOT によって生成された冷却原子集団の位相空間密度を上昇させる役割を担っている。しかし、BEC の生成における時間の大部分はこの過程によるものであり、蒸発冷却には数十秒程度の時間を要している。BEC を用いた高感度な量子計測では測定の度に BEC を破壊する必要があるため、生成過程に要する時間の制約によって連続的な測定には適していない。そのため、本研究室では蒸発冷却の過程を行わず、レーザー冷却や MOT を用いて BEC を生成することを目的としている。

レーザー冷却の手法の一つにドップラー冷却と呼ばれる手法がある。この手法は原子の進行方向と対向する光を原子に吸収させることによって原子を減速させる手法である。原子は原子の持つ複雑なエネルギー準位のうちの 2 準位間の遷移に対応した共鳴周波数を持っており、冷却に用いる光の周波数は原子の運動によるドップラー効果を考慮し、共鳴周波数よりも低い周波数(赤方離調)の光を用いる。原子は光を吸収後、自然放出による放出光によって反跳を受けることにより加速される。そのため、ドップラー冷却には冷却限界温度が存在する。そこで、光ポンピングを行うことによって、反跳の過程を生じさせない状態に原子を集めることが可能になる。しかし、MOT 中の原子集団のような高密度な原子集団では個々の原子が独立した状態ではなく、原子集団中の他の原子と相互作用を生じてしまう。そのため、相互作用によって生じるポテンシャルにおける、原子の光の吸収と放出の過程において加熱が生じてしまう光誘起衝突過程と呼ばれる過程が存在する。この加熱によるエネルギーが MOT のトラップ強度よりも大きくなってしまった際に、トラップ内の原子集団の原子数損失につながる。また、光誘起衝突過程による自然放出光を原子集団内の他の原子が吸収することによって加熱されてしまい、同様に MOT から脱離してしまう。光誘起衝突過程には周波数による依存性があり、先行研究では光会合分光を行ったのち、光誘起衝突過程による影響が抑制された周波数の探索を行っている[1]。そこで、本研究では光ポンピングを行うための光源として、 ^{87}Rb 原子の D1 遷移に対応し、周波数の掃引が可能な光源を作成することを目的とし実験を行う。

2. 原理

・光ポンピング

磁場中の原子はゼーマン効果によって縮退しているエネルギー準位が分裂することにより磁気副準位が誘起される。磁気副準位において原子が吸収する光は遷移選択則に従い、光の偏光状態に依存している。光の偏光状態を定義するための基準として磁場の正方向を量子化軸とし、量子化軸に対して右回りの偏光を σ^+ 、左回りの偏光を σ^- とすると遷移選択則による遷移は図1のようになる。遷移選択則を利用することにより、原子集団に対して σ^+ 偏光の光を照射することにより、原子は図2のように光の吸収と放出を繰り返しながら磁気副準位が増加する方向に掃き寄せられ、最終的に光と相互作用しない暗状態へと集められる。このような光による原子の状態の掃き寄せを光ポンピングと呼ぶ。

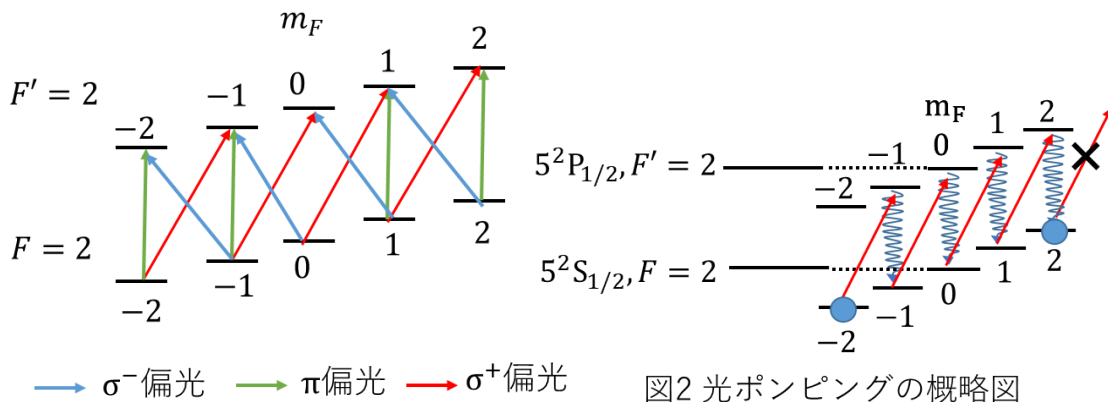


図2 光ポンピングの概略図

図1 光の変更状態による遷移

・光誘起衝突過程

磁気光学トラップ(MOT)中の原子集団において原子間距離 R が原子の共鳴周波長 λ_0 に対して、 $R < \lambda_0/2\pi$ のとき原子の共鳴エネルギーは原子間の双極子-双極子相互作用によって以下のようなポテンシャルを得る[2]。

$$V_{\pm}(R) \sim \pm C_3/R^3$$

V_{\pm} は双極子-双極子相互作用によるポテンシャルを表しており、 C_3 は励起分子のポテンシャルを特徴づける定数、 R は原子間距離を表している。原子の励起状態のエネルギーは原子間相互作用によって上記の式で与えられる量だけ上下にシフトする。レーザー冷却では共鳴周波数に対して赤方離調の光を用いるため、赤方離調に対応したエネルギーシフトである $V_{-}(R)$ による影響について考える。基底状態の原子ペアが光を吸収する

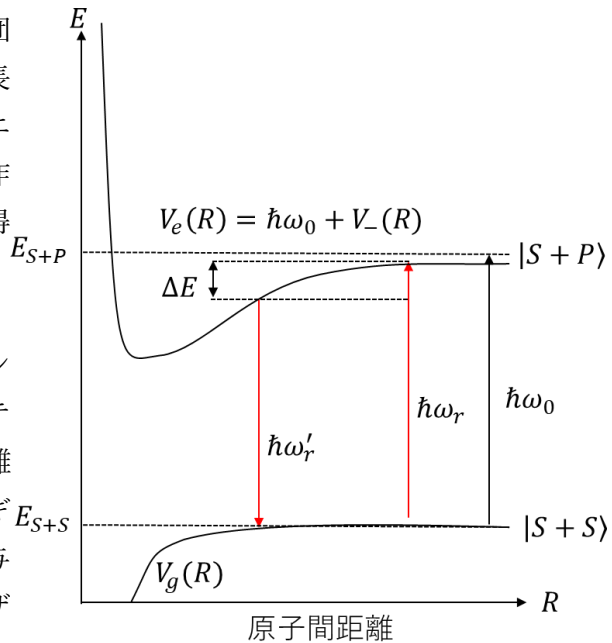


図3 赤方離調における光誘起衝突過程の概要

基底状態の原子ペアが光を吸収する

よる信号において期待した位置に生成されたサイドバンドによる信号が表れることを確認する。

その後、ファイバー結合型 EOM を透過させた光を FM サイドバンド分光の系へ入射し、目的としている ^{87}Rb 原子の D1 遷移による吸収線に外部共振器レーザー (ECDL) の周波数を調整する。今回実験に用いている外部共振器レーザーは図 5 のような構成になっており、 piezo 素子に与える電圧を線形に変化させることによって共振器長を変化させ、LD の発振周波数を掃引している。

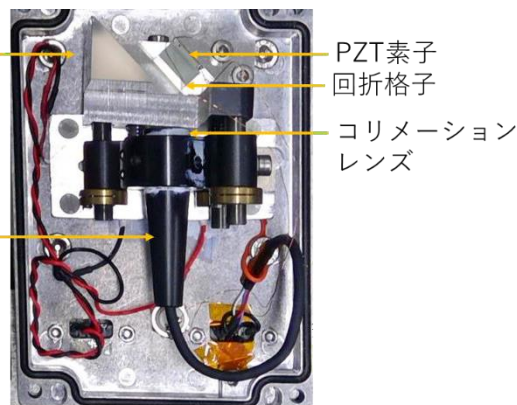


図5 ECDLの構造

最後に、ファイバー結合型 EOM によるサイドバンドによる ^{87}Rb の D1 遷移に対応した吸収線を確認するために、ファイバー結合型 EOM に変調を与え、サイドバンドによる吸収線の確認を行う。

4. 結果

初めに、ファイバー結合型 EOM によるサイドバンドの生成の様子を確認する。実験で用いたファブリペロー共振器は研究室で作成したものであり、フリースペクトルレンジ (FSR) は 1GHz であるため、変調の影響を解析しやすいよう 800MHz の変調を与えた。その結果、図 6 のような信号が得られた。

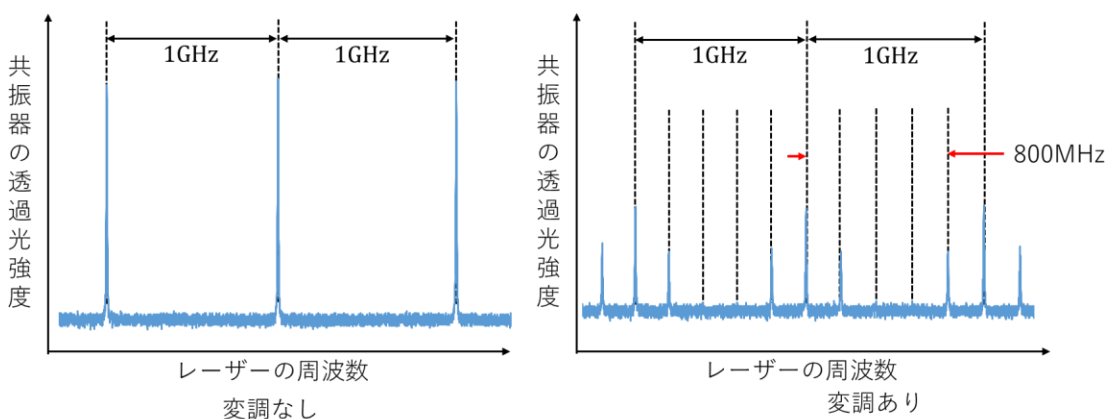


図6 ファブリペロー共振器による実験結果

ファブリペロー共振器の FSR が 1GHz であるため、キャリアの信号の間隔を基準にとると、 $\pm 800\text{MHz}$ の位置にファイバー結合型 EOM による ± 1 次のサイドバンドを確認することができた。

次に、ファイバー結合型 EOM からの透過光を用いて FM サイドバンド分光を行う。ファイバー結合型 EOM による変調は与えず、 ^{87}Rb 原子の D1 遷移に対応した吸収線に合うよう ECDL の共振器長を調整した。結果は図 7 のようになった。

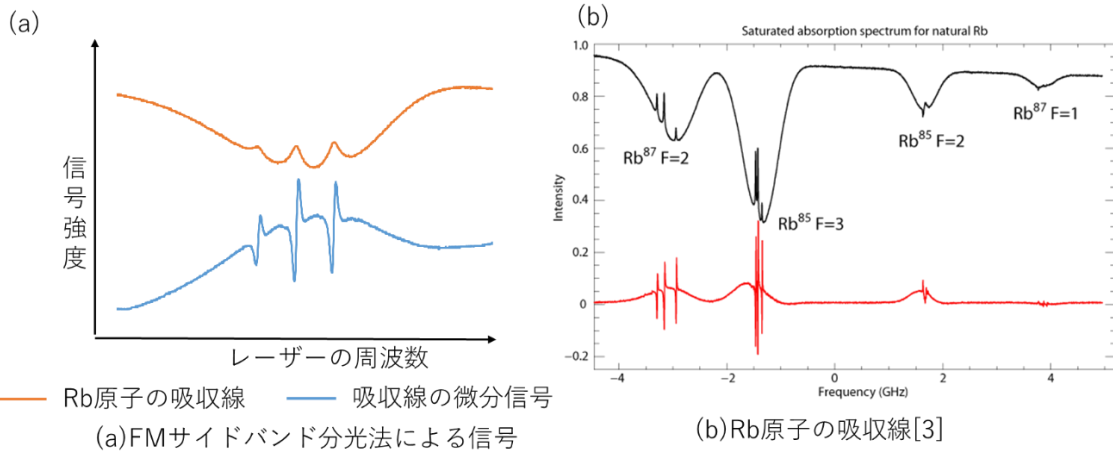


図7 FMサイドバンド分光法による信号とRbの吸収線

得られた吸収線は Rb の吸収線のデータと比較した際に ⁸⁷Rb の D1 遷移による信号と同様の傾向が確認できることから、今回目的としている周波数に調整できていることが確認できる。

最後に、ファイバー結合型 EOM によって生成されたサイドバンドによって ⁸⁷Rb の D1 遷移に対応した吸収線による微分信号が得られるかの確認を行う。先の FM サイドバンド分光によって得られた吸収線は $5S_{1/2}, F = 2$ から $5P_{1/2}, F = 2, 3$ とこれらの遷移間のクロスオーバーによる信号であり、 $5P_{1/2}, F = 2, 3$ の間の共鳴周波数差は約 816.6MHz であるからキャリアによる吸収線にサイドバンドによる吸収線が干渉しないよう、ファイバー結合型 EOM による変調を 900MHz に設定し、サイドバンドによる吸収線の様子を確認した[4]。その結果が図 8 であ

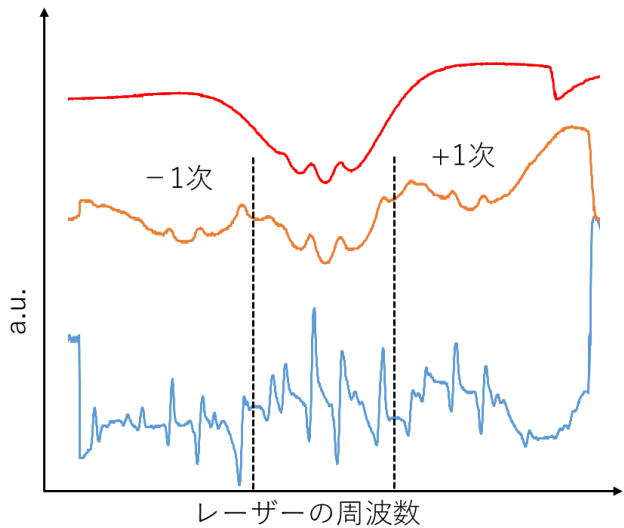


図8 サイドバンドによる吸収線と微分信号

る。±1 次のサイドバンドによる吸収線を確認することができ、また、FM サイドバンド分光法による微分信号も確認することができた。

5. まとめと今後の展望

本研究では光誘起衝突過程を抑制するための光源開発を目的としている。光誘起衝突過程を抑制した周波数を探索するために、先行研究では光会合分光後、最もトラップ中の原子の存在確率が高い周波数を中心に 1GHz の領域を 10MHz 間隔で掃引することによって光

誘起衝突過程による原子数損失の影響を観測していた[1]。そのため、本研究では先行研究と同様に 1GHz 程度の領域を自由に掃引することが可能な光源の開発を目的としていた。実験では周波数掃引のためのファイバー結合型 EOM の動作確認を行い、また、生成されたサイドバンドによる吸収線とその微分信号を確認することができた。今後はこの微分信号を用いてレーザーの周波数を安定化し、実際に MOT 中の原子集団に対して照射することによって原子数損失の様子を観測する。また、現在は FM サイドバンド分光法によって微分信号を得ているが、今後は吸収線のオフセットの影響を受けない変調移行分光法を用いることを予定している。現在では、周波数安定化のために有用な S/N 比の微分信号が得られていないため、ロック回路やフォトディテクターなどの周辺機器のノイズ対策や、分光に用いている系のパス調整などの改善を行っている。

参考文献

- [1] Alban Urvoy et al. Direct Laser Cooling to Bose-Einstein Condensation in a Dipole Trap. *Phys. Rev. Lett.* **122**, 203202 (2019).
- [2] W. John. *Cold and Ultracold Collisions in Quantum Microscopic and Mesoscopic Systems*. Cambridge University (2003).
- [3] moglabs 社 DLC Performance
- [4] D. A. Steck. *Rubidium 87 D Line Data*. Oregon Center for Optics and Department of Physics, University of Oregon (2001).