

# 少数光子非線形効果の観測に向けた Rb 原子の磁気光学トラップの作製

丹治研究室 孫東根

## 1. 背景と目的

レーザーが発明された以来、多くの分野で応用されてきた。レーザーを用いて量子力学的な現象が実験的に検証されてきており、数多くの研究分野が新たに生まれている。状態の重ね合わせを利用して光子によって並列処理を行う量子計算や、測定によって光子の状態に擾乱が生じることを逆手に取った量子暗号通信などがその具体例として挙げられる。特に量子計算の場合、量子計算機を用いた演算には、計算に使用する各ビットの状態を任意に設定できることに加えて2量子間に働く相互作用を必要とする。一方のビットが他方のビットの状態により決定される量子ゲートにおいては2つのビット同士が効率よく相互作用する必要がある。量子暗号通信においては光子が量子ビットの有力な候補であるが、光同士は相互作用が働かず、媒介物質として非線形性物質が必要である。通常は非線形物質で非線形効果を観測するには高強度の光が必要であり、またロスも大きくなる。少数光子に対する非線形性を高い効率で観測するには、物質と光を強く相互させる必要があり、さらにその過程に発生するロスも小さくする必要があり、2つ条件を満たすことは非常に難しく、光を用いた量子情報処理の大きな問題点となっている。我々の研究室ではこれらの問題を解決し、少数光子非線形効果を観測するために cavity QED を用いるが、その際に非線形物質として用いる冷却原子を作るために磁気光学トラップが必要である。本論文では磁気光学トラップの作製と特性評価を目的とした。

## 2. 原理

### 2.1 ドップラー冷却

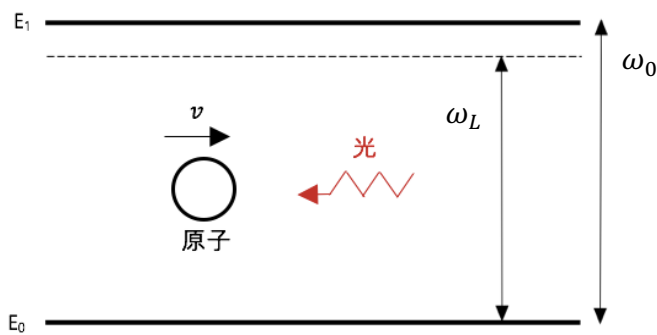


図1：2準位原子の光吸収のドップラー効果

原子にある特定の周波数のレーザーを当てることにより原子を冷却することができる。図1のように、対向する光はドップラー効果によって原子が感じる周波数が高くなる。そのため原子は共鳴周波数より小さい周波数 $\omega_L$ の光を照射すると、対向する光を選択的に吸収することができる。この散乱過程を繰り返すと原子はエネルギーを失い、冷却される。

## 2.2 磁気光学トラップ (magneto-optical trap; MOT)

原子を捕獲するには、原子のエネルギーに位置依存性を持たせる必要がある。その位置依存力は、適切に偏光されたレーザー光を用いること、トラップ領域に不均一な磁場をかけることによって生じさせることができる。

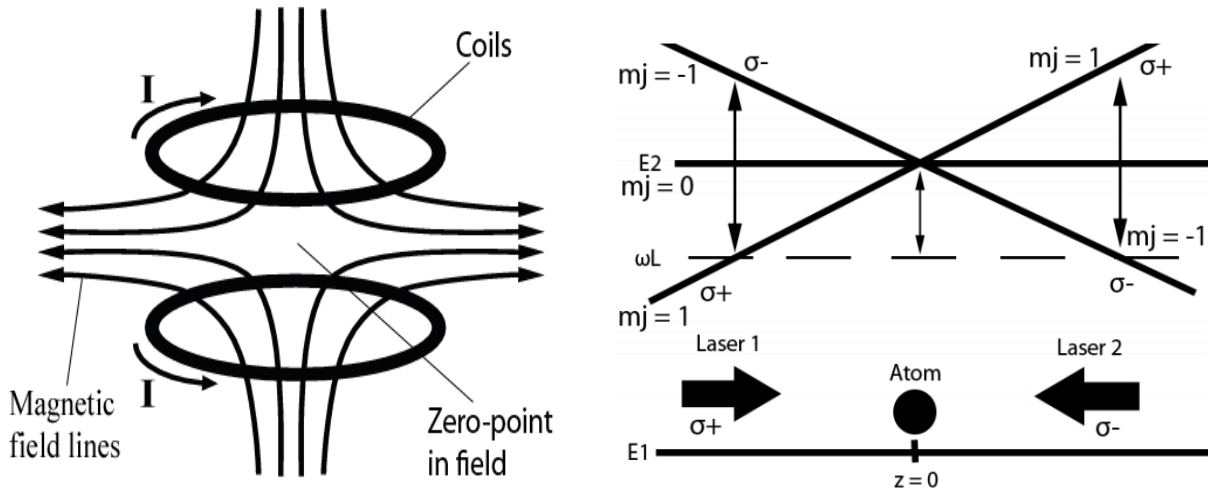


図 2：四重極磁場（左）、ゼーマン効果による原子準位のシフト（右）

不均一磁場により生じるの位置に依存したゼーマンシフトにより、位置に応じて原子は特定のビームからの光子を選択的に散乱する。その結果、原子は空間の特定の点（磁場 0 の点）に押し戻され、磁場 0 の点におけるトラップが実現する。これは MOT の原理である。

## 2.3 周波数安定化

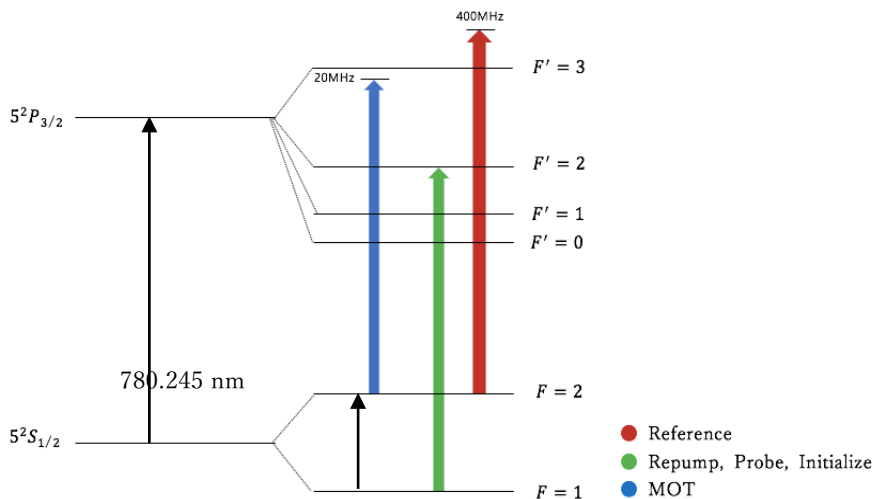


図 3：MOT 作製のための必要な光源の安定周波数

本研究で取り扱う光源は 3 つである。MOT を作製するための光源は MOT 光と Repump 光であり、MOT 光と Repump 光をそれぞれ安定化させるための基準となる光源として Reference 光を用いる。まず、Reference 光を Doppler-free DAVLL という手法を用いて原子の吸収線に対して安定化させ、それを基準に MOT 光と Repump 光を Delay-line 法を用いて安定化させる。

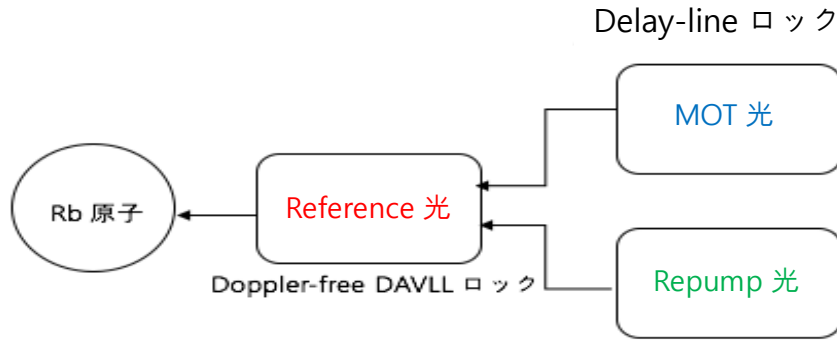


図 4：光源の周波数安定化の流れ

### 3. 実験

#### 3.1 Reference 光の周波数安定化

Reference 光の安定化には本実験では Doppler-free DAVLL という手法を用いた。Doppler-free DAVLL は直交する円偏光による飽和吸収分光のスペクトルに磁場をかけることによってわずかな周波数差を生じさせ、その 2 つの差分信号からエラー信号を得てロックする手法である。



図 5：Doppler-free DAVLL の飽和吸収エラー信号

この手法を用いて実際に得られた信号は次のようになる。

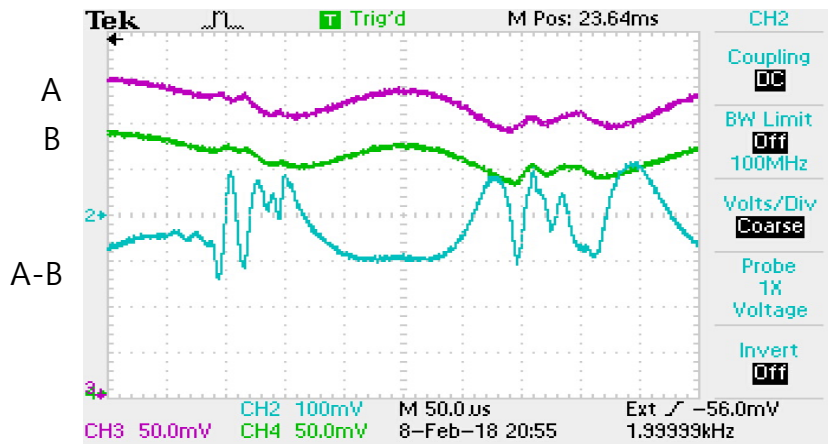


図 6：Doppler-free DAVLL 法から得られた一信号

#### 3.2 MOT 光と Repump 光の周波数安定化

安定化された Reference 光を用いて MOT 光と Repump 光を安定化させることができる。本実験では Delay-line 法を用いた周波数オフセットロックを行った。

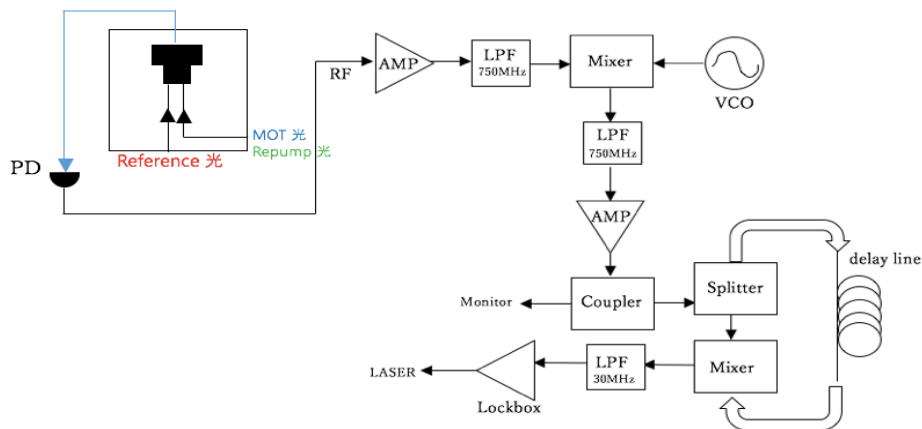


図 7 : Delay-line 法のための回路

2つの光のビート信号を2つに分け、一方を delay line に通し、他方と干渉させることでエラー信号を得ることができる。得られた信号 (図 8) を用いてレーザーにフィードバックをかけてロックすることで MOT 光と Repump 光を安定化させる。

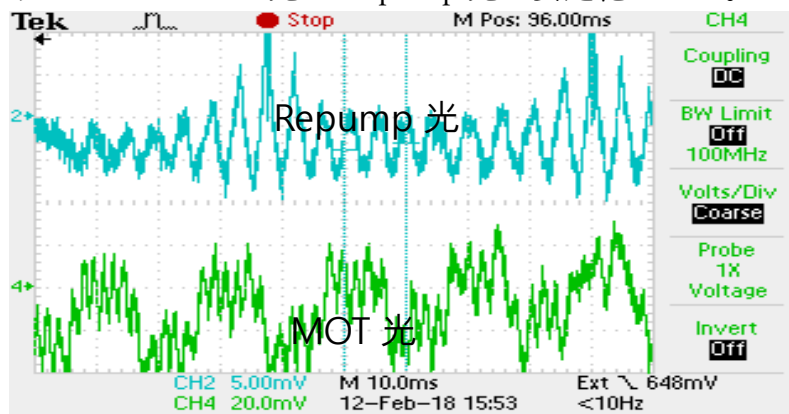


図 8 : MOT 光 (黄緑) と Repump 光(水色)のエラー信号

### 3.3 真空チャンバー

安定化された光を真空チャンバーの中に入射することによって磁気光学トラップが実現される。

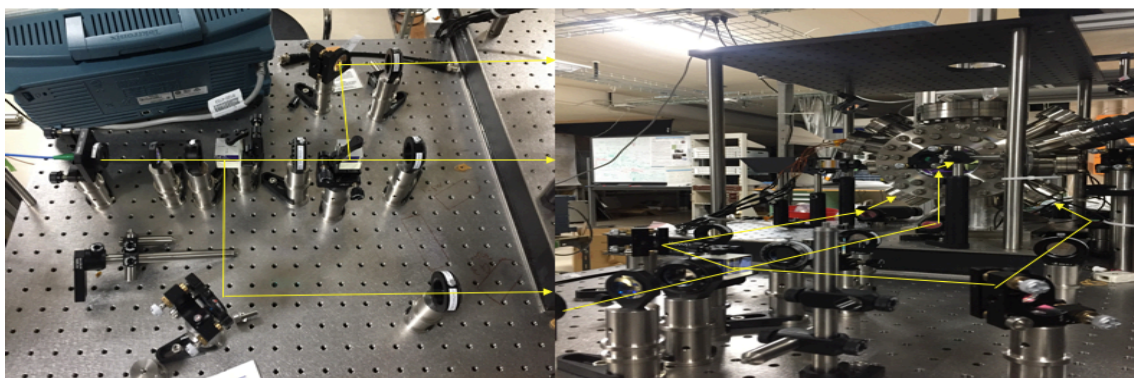


図 9 : 安定化された光の偏光調整 (左)、真空チャンバーに入射 (右)

チャンバーの真空度は $5 \times 10^{-9}$  Torr であり、四重極磁場のコイルの半径は 5cm、距離は 10 cm、巻き数は 120 回、コイルに流れる電流は 3.5A の時磁場は 11G/cm であった。

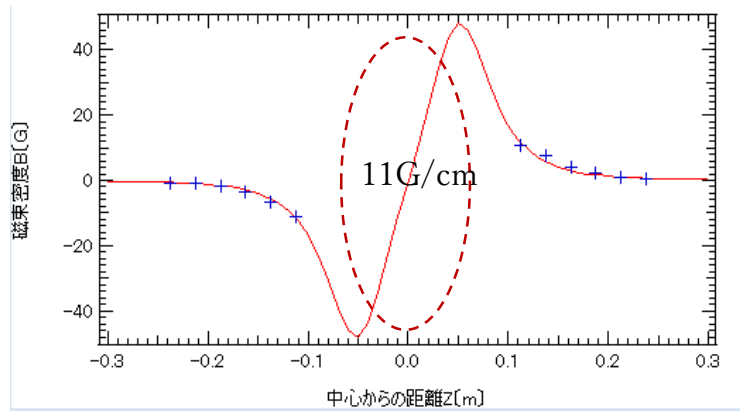


図 10：コイルによる磁場の Fitting グラフ

しかしながら、これまでのところ MOT の観測には至っていない。その原因として考えられるのは 1 つ目は、光の周波数が正しい所にロックされていることである。2 つ目は、安定化された光をチャンバーに入れる際の偏光調整が正しいことである。さらに、チャンバーの真空度が適切であることと、原子数が十分であることなどが考えられる。

#### 4. 結果と展望

3.3 節で述べたように、磁気光学トラップの実現条件が満たされていないため本実験では磁気光学トラップの実現ができなかった。特に、MOT 光の周波数安定化がうまくいかなかった点が最大の原因だったと考えられる。今後は、トラップを作製することとさらに、磁気光学トラップの特性評価をすることである。

#### 参考文献

- [1]: Rubidium 87 D Line Data (Daniel Adam Steck: Oregon Center for Optics and Department of Physics, University of Oregon)
- [2]: Laser Cooling of atoms (D. Wineland, W. Itano, Phys. Rev. A 20, 1521 (1979))
- [3]: Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor: a new scheme for laser frequency locking (T. Petelski, M. Fattori, G. Lamporesi, J. Stuhler, and G.M. Tino, Eur. Phys. J. D 22, 279–283 (2003))
- [4]: Simple scheme for tunable frequency offset locking of two lasers (1999 American Institute of Physics S0034-6748(99)00201-4)
- [5]: Laser Cooling and Trapping (Halod J. Metcalf, Peter van der Straten. Springer 出版)