

原子-光子相互作用の制御に向けた磁気光学トラップの作製と評価

2023年3月7日

丹治研究室 一寸木新

1 序論

1.1 背景

近年、量子情報技術の研究が盛んに行われている。これらの研究においては、単一光子レベルの微弱な光を用い、その量子的な性質を情報伝達や処理に活用する。特に量子情報の処理においては、非線形光学効果が重要な役割を果たす。そして、微弱光でこれを観測するためには、物質と光子の強い相互作用が必要となる。これを実現する方法の一つとして、原子を光共振器内に捕捉し、光共振器中に閉じこめた光子と相互作用させることが考えられる。当研究室では、このような系において光共振器中の原子の位置を制御することにより、その相互作用の強さを自在に制御することを目指している。

1.2 研究の目的

本研究では、上述の目標に向けて、磁気光学トラップ (MOT) で冷却された原子集団を作製し、その特性評価を行った。

2 磁気光学トラップ (MOT)

2.1 ドップラー冷却

MOT においては、ドップラー冷却により原子を冷却し、四重極磁場により原子を捕捉する。ここではその原理について説明する。図 1 のように x 軸の正方向に速度

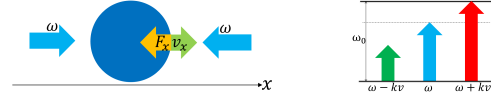


図 1 ドップラー冷却

図 2 周波数の変化

v_x で運動する原子に対して、原子の進行方向と同じ向きと逆向きに、原子の共鳴角周波数 ω_0 から負に離調した角周波数 ω の光を照射する。この時、原子が感じる角周波数は図 2 のように変化し、対向する光の角周波数が ω_0 に近づく。よって原子は対向する光をより強く吸収し、その後ランダムな方向に放出する。この吸収と放出を繰り返すことで原子の運動エネルギーが減少して原子が冷却される。この時に原子に作用する力 F は、原子の速度 v に比例した摩擦力のような力である。

$$\begin{aligned} F &= -\alpha v \\ \alpha &= 2 \frac{\partial F}{\partial \omega} k \\ &= \frac{8\hbar k^2 \Delta}{\gamma} \frac{I/I_s}{[1 + I/I_s + (2\Delta/\gamma)^2]^2} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $\Delta = \omega_0 - \omega$ 、 γ は原子の自然放出レート、 I はレーザーの強度、 I_s は飽和吸収強度である。

2.2 四重極磁場による原子のトラップ

MOT は図 3 のように三軸のレーザー光と、図 4 のようなアンチヘルムホルツ型のコイル対によって生じる四重極磁場を用い

て原子をトラップする方法である。図4のようにz軸を定義すると図5のようなゼーマンシフトが生じる。 $\omega < \omega_0$ のとき、遷移の選択則により、 $z < 0$ にある原子は σ_+ の光を主に吸収し、 $z > 0$ にある原子は σ_- の光を主に吸収する。これによって復元力が生じ、磁場0の点に原子を捕捉することができる。MOTでは、磁場による復元力とドップラー冷却の摩擦力が同時に原子に作用することで原子が冷却されトラップされる。

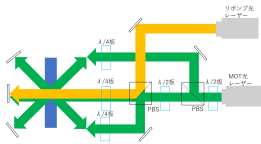


図3 磁気光学トラップの構造

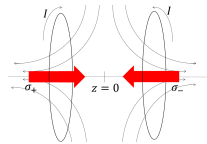


図4 z軸方向のトラップ

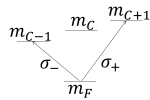


図5 ゼーマンシフトした準位

3 光源

MOTを実現するためには、レーザー冷却を行うためのMOT光と冷却サイクルから外れた原子を元に戻すためのリポンプ光の二つのレーザー光を用いる。さらに、これらの光の周波数を安定化させるために、参照光であるリファレンス光を用いる。これら三つのレーザー光の周波数は図6のようにになっている必要がある。そこで、リファレンス光の周波数を ^{87}Rb の D_2

線 ($|5^2P_{1/2}, F = 2\rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F' = 3\rangle$) に対して Doppler-free DAVLL 法 [1] を用いて安定化させる。さらに、MOT 光とリファレンス光の周波数差が 420 MHz、リポンプ光とリファレンス光の周波数差が 6.172 GHz になるよう、delay-line 法 [2] を用いて MOT 光とリポンプ光の周波数を安定化させる。

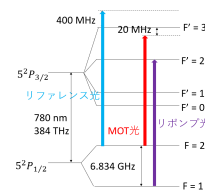


図6 レーザー光の周波数

3.1 Doppler-free DAVLL 法

Doppler-free DAVLL 法とは飽和吸収分光法と DAVLL 法を組み合わせ、レーザーの周波数を安定させるためのエラー信号を得る方法である。まず、原子に磁場を引加した状態で飽和吸収スペクトルを観測する。すると、ゼーマンシフトにより図7のように周波数がシフトした σ_+ と σ_- の光による飽和吸収スペクトルが得られる。図7の二つの飽和吸収スペクトルの差分をとると、図8のような信号が得られる。このエラー信号は単調に変化し、0を通過する点で周波数をロックすることができる。この方法で周波数をロックすると、周波数シフトした二つの飽和吸収スペクトルがパワーゆらぎに対して同じようにゆらぐのでパワーゆらぎに対して安定である。

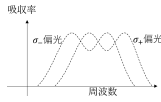


図 7 周波数差のある信号

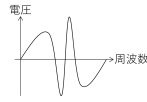


図 8 飽和吸収スペクトルの差

り生成したエラー信号を図 11 に示す。これを用いてリファレンス光の周波数を安定化させた結果、周波数安定度は 2.12 MHz となった。

3.2 Delay-line 法

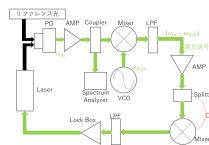


図 9 Delay-line 法の実験系

Delay-line 法は周波数基準となるリファレンス光と、周波数を安定化させたい光源との間のビート信号からエラー信号を得る方法である。この方法では、ビート信号と voltage-controlled oscillator(VCO) からの信号を混合したものをスプリッターで分け、片方のみ delay line にすることで位相差を生じさせる。その後、二つの信号をミキサーで混合する。 ω_{VCO} を変えることで任意の ω_{in} でエラー信号を 0 V とすることができる。VCO が無い場合には、ロックできる周波数は delay-line の長さによって決まってしまうが、上述のように VCO を用いて入力信号の周波数を変化させることで、任意の周波数差でレーザーを安定化させることができる。

4 実験結果

4.1 レーザー周波数の安定化

図 10 に示す ^{87}Rb の飽和吸収スペクトルを用いて Doppler-free DAVLL 法によ

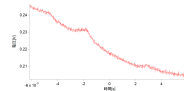


図 10 ^{87}Rb の飽和吸収スペクトル

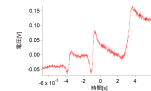


図 11 ^{87}Rb のエラー信号

Delay-line 法を用いて生成した MOT 光安定化用のエラー信号は、図 12 のようになった。これを用いて MOT 光の周波数をロックした結果、周波数安定度は 2.85 MHz となった。また、ロック後のビート信号が 420 MHz であることを確認した。一方、delay-line 法を用いて生成したリポンプ光安定化用のエラー信号は、図 13 のようになった。これを用いてリポンプ光の周波数をロックした結果、周波数安定度は 5.76 MHz となった。またロック後の周波数が 628 MHz であることを確認した。

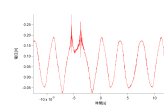


図 12 MOT 光とリファレンス光のエラー信号

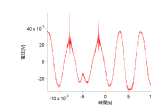


図 13 リポンプ光とリファレンス光のエラー信号

4.2 MOT の観測と原子数の見積り

これらの安定化したレーザーを図 3 の光学系に入射させた結果、図 14 のような原子集団を観測した。CMOS カメラは Sony 社: U3-3040CP-M-GL、レンズは興和オプ

トロニクス社: LM35JC3M2(焦点距離:35 mm, 最大 F 値:2) を用いた。MOT 光の共鳴周波数からの離調を Δ_p 、入射光強度を I とすると、散乱レート Γ_{SC} は

$$\Gamma_{SC} = \frac{\gamma_e}{2} \frac{I/I_{sat}}{1 + I/I_{sat} + (2\Delta_p/\gamma_e)^2} \quad (2)$$

と表される。t をカメラの露光時間、 κ をカメラの量子効率、 C_{px} を 1 ピクセルごとのカウント数、 Ω を立体角とすると原子数は

$$N_{atom} = \frac{\kappa}{\left(\frac{\Omega}{4\pi}\right)\Gamma_{SC}t} \sum_{px} C_{px} \quad (3)$$

と求められる。カメラの量子効率は、ゲインが 1 のとき $\kappa = 188$ であった。レンズの有効半径を r 、被写体とレンズの距離を l とすると $\omega/4\pi \cong r^2/l^2$ と近似できる。また、レンズの有効直径を Φ_{lense} 、焦点距離を f とすると $\Phi_{lense} = f/F$ と表せる。CMOS カメラで撮影した原子集団の蛍光強度を 1 ピクセルごとのカウント数を足し合わせるにより見積もり、これを用いて N_{atom} を求めた。MOT 光の離調を変え、それぞれの離調での原子集団の原子数を式 (2)、(3) を用いて見積った結果を図 15 に示す。この結果から、-12.5 MHz のときが最も原子数が多いことが分かった。



図 14 観測した原子集団

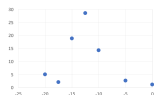


図 15 原子数と離調の関係

5 まとめと展望

5.1 まとめ

MOT で原子集団を生成するためには安定した二つの光源が必要である。そこで本研究では、まず Doppler-free DAVLL 法で ^{87}Rb の D_2 線に対してリファレンス光を安定化させた。さらにリファレンス光を基準として MOT 光、リポンプ光を delay-line 法で安定化させた。これらのレーザー光を用いることで MOT に捕捉された原子集団を確認することができた。また、原子集団の密度を見積もった結果、離調-12.5 MHz で最大 $2.8 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ が得られることも分かった。

5.2 展望

今後は MOT において最低温度を達成するためのレーザー光の強度と離調の条件について調べる予定である。

参考文献

- [1] T. Petelski et al, Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor: a new scheme for laser frequency locking, THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL, p.279-283, 2003
- [2] U. Schünemann, H. Engler, R. Grimm, M. Weidemüller, and M. Zielonkowski, Review of Scientific Instruments, p.242-243, 1999