

結合強度可変な共振器 QED 系のための光学系の設計と特性評価

丹治研究室 鈴木悠世

2024 年 3 月 7 日

1 序論

1.1 背景

近年、量子の性質を積極的に利用することで従来にない機能を持たせた、量子情報処理技術が注目されている。これらの技術において必要となる、光子に対する非線形な操作を行うためには、物質との相互作用を介した、光子間の実効的な相互作用が不可欠である。しかし、このような非線形光学効果を得るためには、一般には高強度の光が必要であり、量子情報処理技術で用いるような微弱光でこの効果を観測するのは困難である。これを解決する方法の一つに、光共振器中への光子の閉じ込めによる光子と原子との相互作用の強化が挙げられる。

1.2 目的

上述のような背景のもと、我々の研究室では、高反射ミラーによって構成される高フィネス光共振器のモード中での原子と光子の結合強度を時間変化させることを目指している。そのためには、光共振器モード中で原子の共鳴波長よりも十分小さい領域に原子を捕捉する必要がある。そこで本研究では、光共振器中で磁気光学トラップと微小光双極子トラップを同時に実現する光学系を作製しその特性評価を行うことを目的とする。

2 原理

2.1 磁気光学トラップ

磁気光学トラップ (magneto-optical-trap; MOT) とは四重極磁場による復元力と、レーザー光によるドップラー冷却を併用して原子をトラップする手法である。まず、復元力を与えるためのゼーマンシフトを発生さ

せるためには、図 1 のような一対のアンチヘルムホルツコイルを利用する。

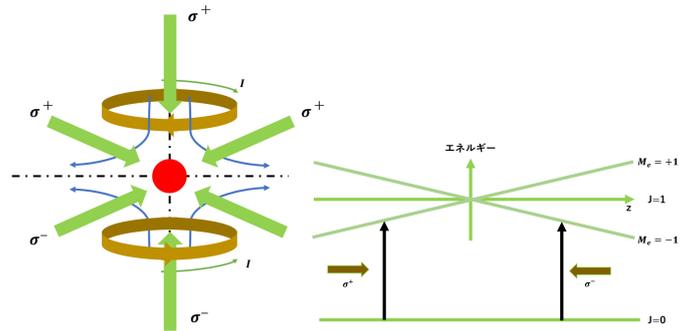


図 1: MOT の概略図

図 2: ゼーマンシフトによる復元力

アンチヘルムホルツコイルを利用することで中心で磁場が 0 となり、中心付近では距離に対して磁場が線形に変化する四重極磁場を作り出すことができる [1]。これを利用すると、原子のエネルギー準位は図 2 のようにゼーマン分裂を起こし、磁気副準位の縮退が解ける。ここで、 J は全角運動量、 M_j は磁気量子数である。ここに、赤方離調した σ^+ 偏光と σ^- 偏光を相対する方向から入射することで、原子が放射圧を受け、式 (1) で表されるように、冷却力及び原子をトラップ中心に押し戻す復元力が生じる。これにより原子をトラップすることができる。

$$F = -\alpha v - \frac{\alpha\beta}{k} z \quad (1)$$

2.2 光双極子トラップ

光双極子トラップ (optical-dipole-trap; ODT) とは、誘起された電気双極子モーメントと光場の強度勾配との分散的相互作用から生じる双極子力を利用したトラップ手法である。以下では [2] を参考にして、双極子ト

ラップの原理を説明する。

角周波数 ω' のレーザー光の中に原子が存在するとき、その電場 \vec{E} が双極子モーメント \vec{p} を誘起する。この双極子モーメントは、分極率を α としたとき、

$$\vec{p} = \alpha \vec{E} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、分極率 α は角周波数 ω' に依存する。

これによる相互作用ポテンシャルは、

$$U_{dip} = -\frac{1}{2} \langle \vec{p} \vec{E} \rangle = -\frac{1}{2\epsilon_0 c} \Re \alpha I(\vec{r}) \quad (3)$$

である。 $\langle \rangle$ は時間平均を表し、 $I(\vec{r})$ は電場強度である。 U_{dip} の勾配が双極子力 F_{dip} となり、式 (4) のように表される。

$$\vec{F}_{dip}(\vec{r}) = -\nabla U_{dip}(\vec{r}) = \frac{1}{2\epsilon_0 c} \Re \alpha \nabla I(\vec{r}) \quad (4)$$

ここで、質量 m 、電荷 e 、電子について、共鳴周波数 ω の電子状態の運動方程式 $\ddot{x} + \Gamma \dot{x} + (\omega^2) = -eE(t)/m_e$ を解くことにより、分極率 α は

$$\alpha = \frac{e^2}{m_e} \frac{1}{\omega^2 - \omega'^2 - i\omega'\Gamma_\omega} \quad (5)$$

と求まる。ここで

$$\Gamma_\omega = \frac{(e\omega')^2}{6\pi\epsilon_0 m_e c^3} \quad (6)$$

は放射エネルギー損失による減衰率を表す。

式 (6) と、 $\Gamma = \Gamma_{\omega_0} = (\omega_0/\omega)^2 \Gamma_\omega$ より、

$$\alpha = 6\pi\epsilon_0 c^3 \frac{\Gamma/\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i(\omega^3/\omega_0^2)\Gamma} \quad (7)$$

となる。式 (3) に式 (7) を代入することにより、

$$U_{dip}(\vec{r}) \simeq -\frac{3\pi c^2}{2\omega_0^3} \left(\frac{\Gamma}{\omega_0 - \omega} + \frac{\Gamma}{\omega_0 + \omega} \right) I(\vec{r}) \quad (8)$$

を得る。つまり、赤方離調において双極子ポテンシャルの符号は負であり、ポテンシャルの極小は電場強度が最大の位置となる。

3 共振器中での MOT と ODT の共存系

共振器中で、MOT と ODT を共存させる系について考える。光双極子トラップ光を共振器内で強く集光させるために、表 (1) に示す Thorlabs 社製のレンズを用いる。このレンズを利用して作製する光双極子トラップと磁気光学トラップを空間的に重ねるために、図 3 と図 4 に示す二通りの方法が考えられる。ここで、赤い点線が ODT 光、黄色い線が MOT 光を示す。

表 1: 使用したレンズ

レンズ名	NA	焦点距離/mm
AL2520H-B	0.52	20

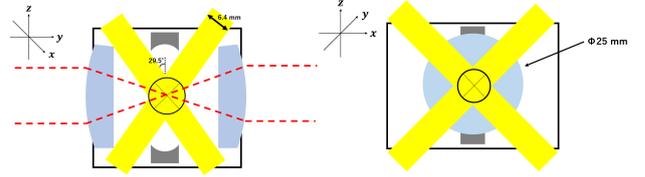


図 3: パターン 1

図 4: パターン 2

まず、図 3 の配置について考える。一軸は紙面に垂直にレンズとレンズの間を通るように、残りの二軸はそれに直交する面内で入射させた配置である。この配置では、ミラーとレンズを避けて入射させた二軸の光の相対的な角度が 59 度と、90 度よりも小さくなり、ビーム径の上限が 6.4mm となる。さらに、レンズと共振器を一体として保持するマウントにおいてレンズの上下に穴をあける必要があり、マウントの機械的な安定性が低下してしまう。一方、図 4 の配置は、一軸方向をレンズを通して入射させ、それに直交するように残りの二軸を入射させたものである。このようにすることで、ビームを互いに直交して入射させることができ、図 3 の配置と比べて、より大きなビーム径が許容される。さらに、機械的安定性も低下しない。ただし、この場合、光双極子トラップ光を小さく集光することを優先させるため、レンズを通る MOT 光に対して、レンズが本来使うべき向きと逆になってしまう。これが、この配置の欠点となる可能性がある。

4 光線追跡シミュレーション

図4の配置が可能であるかを検証するために、まずはZemaxというシミュレーションソフトを用いて、光線追跡シミュレーションを行った。シミュレーションを行った光学系は図5に示した通りである。この光学系では、光共振器の内部に相当する位置でMOTとODTを重ねた上で、ODT中の原子から放出された光をカメラで撮影できる必要がある。このうち、本研究の対象であるMOT光のみを抜き出したものを図6に示す。また、Zemaxにより得られた、各素子の位置におけるビーム径の計算結果を表2に示す。ここでビーム径とは、ビームの最大強度の $1/e^2$ の位置での直径を表す。

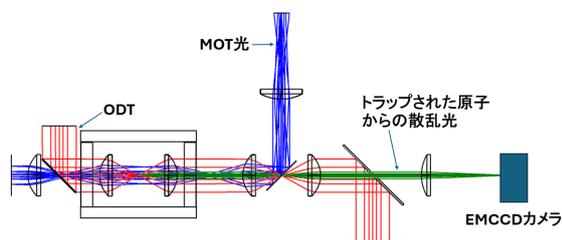


図5: 光学系の概要

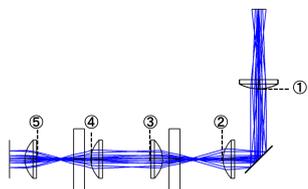


図6: MOT光に関するシミュレーション

表2: シミュレーションによって得られたビーム径

素子番号	ビーム径			
	X/mm(反射前)	Y/mm(反射前)	X/mm(反射後)	Y/mm(反射後)
①	9.36358	9.36358	2.59288	2.59288
②	9.36896	9.36896	9.2273	9.2273
③	8.25506	8.25506	15.46732	15.46732
④	10.728	10.728	4.55608	4.55608
⑤	6.4037	6.4037	13.1326	13.1326

MOTを作製する位置は、共振器内に対応する素子③、④の間の位置である。表2より、この位置でのビーム径は、8 mm から 10 mm であることが予測され、MOTを作製するのに十分なビーム径が得られることが見込まれる。

5 試験用光学系の作製と特性評価

シミュレーション結果に基づいて、試験用光学系を作製した。今回は、レンズの中心軸を合わせて理想的な光線について評価するために直線的な光学系を作製した。図7および図8にその設計図と作製した試験用光学系をそれぞれ示す。ここで、図6と図7の素子番号は互に対応している。今回使用したレンズと焦点距離を表3に示す。使用したレンズは全てThorlabs社製である。

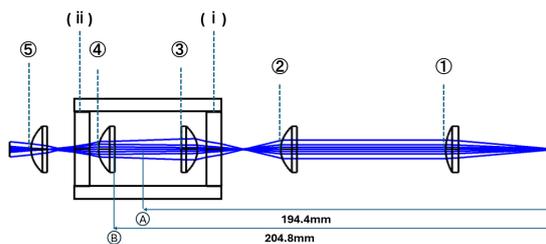


図7: 試験用光学系の設計図

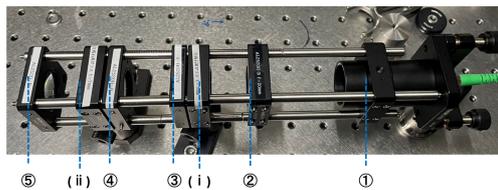


図8: 作製した試験用光学系

表3: 使用したレンズ

使用したレンズ		
素子番号	レンズ名	焦点距離/mm
②、③、④	AL2520H-B	20
⑤	AL2520-B	20
①	AL2550H-B	50

作製した光学系について、ビームプロファイラで光路の空間プロファイルの評価を行った。図9および表4に、図7に示した距離におけるビームプロファイルとビーム径を示す。ビーム径については、表2で予測した値と近い得られたと考えた。しかし、図9(a)、(b)のプロファイルには円形の境界が鮮明に見てとれる。これは、シミュレーションでは考慮しきれなかった非球面レンズの収差が影響していると考えた。そこで、レンズを正しい向きで配置した場合についても空間プ

ロファイルの評価を行った。図 10 と表 5 に、レンズを正しい向きで配置した光学系について、図 9 と同様の位置でのビームプロファイルとビーム径を示す。

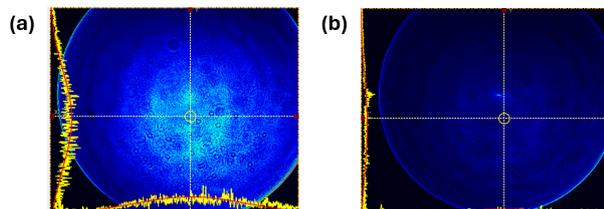


図 9: (a)Ⓐと (b)Ⓑの位置におけるビームプロファイル

ビーム径/mm		
位置/mm	X 方向	Y 方向
Ⓐ	7.9	6.7
Ⓑ	8.0	7.0

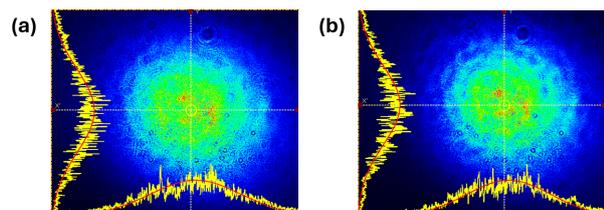


図 10: (a)Ⓐと (b)Ⓑの位置におけるビームプロファイル

以上の結果から、図 9 と図 10 のプロファイルの形状に差がみられた。従って、図 9 ではレンズを本来用いる向きとは逆向きで用いたことによる収差の影響ではっきりとした円形の境界を持つプロファイルが得られてしまっていると考えた。また、図 9 のプロファイルにおいては、図 10 と比べて、ビーム強度が低下しているように見えたため、それぞれのプロファイルから中心付近でのビーム強度を計算し、比較を行った (表 6)。

この結果から、レンズを正しい向きで配置した場合に比べて、中心付近でのビーム強度の低下がみられるものの、レーザーの出力を考慮すると、MOT を作製するうえで必要なビーム強度は得られると考えた。

表 5: 得られたビーム径

ビーム径/mm		
位置/mm	X 方向	Y 方向
Ⓐ	7.0	6.1
Ⓑ	6.8	5.9

表 6: 中心付近でのビーム強度

ビーム強度/ $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$		
位置/mm	図 9 のプロファイル	図 10 のプロファイル
Ⓐ	12	16
Ⓑ	10	16

6 まとめと展望

本研究では、光線追跡シミュレーションによって磁気光学トラップと光双極子トラップ、原子から放出される光の観測をすべて満たすような光学系の設計を行い、試験用光学系を作製して MOT 光の空間プロファイルの評価を行った。その結果、プロファイルの形状には、収差による影響と思われるものが見られたが、MOT を作製するのに十分なビーム径およびビーム強度が得られることがわかった。

今後の展望として、収差の影響を抑えるために MOT 光のビーム径を小さくしたり、空間光変調器を用いたりして、今後の実験で使用するための最適な光学系を決定し、光共振器中での原子の光双極子トラップを目指す。

参考文献

- [1] 堀江遥人, 磁気光学トラップの位置制御に向けた補正磁場コイルとその制御回路の作製と評価, 2022 年度卒業論文.
- [2] R.Grimm, M.Weidemüller and Y. B. Ovchinnikov: "Optical Dipole Traps for Neutral Atoms", *Advance in Atomic Molecular and Optical Physics*, **42**, pp.95-170(2000).