## 光共振器中のルビジウム原子を用いた単一光子発生に向けた実験系の構築

丹治研究室 松山佳生

電気通信大学 レーザー新世代研究センター

## 1. 研究の目的

光子は高速で移動する性質があり、 現代では光ファイバーなどの通信手段 として利用され、情報伝達には最適な ものである。そのため、従来の技術の 限界を打ち破ることが期待される量子 情報通信[1]においても光子が通信媒 体としての最有力候補である。量子情 報通信・処理技術においては光の量子 状態制御が重要な役割を担う。我々の 研究室では、光の量子状態制御の重要 な要素として、高効率な単一光子発生 を目指している。ここで単一光子とい うのは、特定の空間モードである時間 幅で観測したときに必ず1個のみの光 子がいるような状態のことである。

本研究の目的は、単一光子発生に向 けた光共振器と冷却原子集団の作製で ある。以下でこれらの実験系の構築に ついて述べる。

## 2. 共振器の設計



単一光子発生は、ルビジウム原子の

Rydberg 状態を使って行う。Rydberg 状態にある原子は大きな双極子モーメ ントを持つため、Rydberg 原子間の強 い双極子相互作用によってある範囲内 では、一つの原子のみしか Rydberg 状 態 に あ げ ら れ な い と い う 性 質 (Rydberg blockade)がある。この性質 を利用し、単一の Rydberg 励起状態を 単一光子に変換するという手法による 単一光子発生を目指している。

まず単一光子発生に向けて共振器の 設計を行った。単一光子を cavity mode から取り出す確率 $P_{sp}$ は、

$$P_{\rm sp} = \frac{N\eta}{1 + N\eta + N'\eta} \times \frac{1}{1 + N'\eta}$$

と表せる。ただし、Nは blockade 範囲 内の Rb 原子数、N'は blockade 範囲外 の Rb 原子数、 $\eta = \frac{4g^2}{\kappa \gamma}$ は協働パラメー タである。協働パラメータは原子と光

子の結合の強さを表す[2]。ここでは簡 単のためにN' = 0とする。 $P_{sp} > 99 %$ にしたいとすると、

 $N\eta \gtrsim 100$ 

となる。

単一光子を単一空間モードに取り出 すためには、cavity の片側から取り出 す必要がある。そこで透過率の異なる 2 枚のミラーを用いた非対称な Fabry-Perot 共振器を考える。光子を取り出 す方のミラーの透過率を $T_1$ 、もう一方 のミラーの透過率を $T_2$ とすると、光子 が片側のミラーから出る確率 $P_{ss}$ は

$$P_{\rm ss} = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \simeq 1 - \frac{1}{\alpha}$$

となる。ただし、 $\alpha \equiv \frac{T_1}{T_2}$ である。この時、

パワー透過率T<sub>tot</sub>は、

$$T_{\rm tot} = \frac{T_1 T_2}{\left(L + \frac{T_1 + T_2}{2}\right)^2} = \frac{4}{\alpha}$$

となる。この 2 式から最適な $\alpha$ の値を 検討した結果 $\alpha = 100$ とする事にした。 ここから

P<sub>ss</sub> ≃ 99 %, T<sub>tot</sub> ≃ 4 % が得られるので、ミラーのロスを 10 ppmとしてそれぞれの透過率を

 $T_1 = 1000 \text{ ppm}, T_2 = 10 \text{ ppm}$ と見積もった。以上のことから光子を Cavity の片側から取り出せる確率 $P_f$ は

 $P_{\rm f} = P_{\rm sp} \times P_{\rm ss} > 98 \%$ となる。これらの結果から最低限必要な原子密度を算出していく。ミラーの透過率、ロスの値からフィネス $\mathcal{F}$ は

 $\mathcal{F} \simeq 6300$ 

原子の共鳴を考慮したときの共振器長 及びミラーの曲率半径は、

L = 44 mm, R = 50 mm

 $w_0 \simeq 79 \ \mu m$ 

となる。得たパラメータを協働パラメ ータに代入すると

$$\eta = \frac{24}{\pi w_0^2 k^2} \mathcal{F} \simeq 0.12$$

となる。 $N\eta \gtrsim 100$ より、

である。Blockade 半径を10 µmとする

と必要な原子密度nは

 $n > 2.1 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ 

となる。これは圧縮磁気光学トラップ (cMOT)で実現可能な値である[3]。

以上から、高効率な単一光子源作製 のための原子集団は cMOT により実 現可能であることが分かったので、以 下では磁気光学トラップ (MOT) 実現 に向けた実験系の構築について述べる。

# 3. 磁気光学トラップ(MOT)の実現に向け たアンチヘルムホルツコイルの設計

MOT はドップラー冷却と四重極磁 場を利用して行う。ドップラー冷却は 原子がレーザー光を吸収するときに起 こるドップラーシフトを利用して原子 を冷却する手法である[4]。



四重極磁場を利用することでレーザ ーの偏光によって原子が受ける力に位 置依存性を持たせることができる。こ の時、磁場を発生させるためにはアン チヘルムホルツコイルが必要となる。 アンチヘルムホルツコイルとは、半径 aの2つのコイルを2aの間隔に設置し 逆向きに電流を流したものである。今 回は20 Aの電源(KIKUSUI, PAN 60-20 A)を使用し、コイル同士の中間点 において最大20 G/cmの磁場勾配をか ける必要があるため、この時に必要と なるコイルの巻き数を求めた。半径aの N巻き円形コイル(電流I,円の面積S) がコイルの中心軸上で中心からの距離 rの位置に作る磁場は、ビオ・サバール の法則から

$$B(r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{IS}{(r^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} N$$

となる。コイルの中心の中間点を原点 Oとする(図3)と、2つのコイルが つくる磁場は、

$$B_{\text{total}}(r) = B(r+a) + B(r-a)$$
$$= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{-IS}{((r+a)^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} N$$
$$+ \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{IS}{((r-a)^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} N$$

となり、これからr = 0における磁場勾 配 $\frac{dB(0)}{dr}$ を導出すると、

$$\frac{dB(0)}{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{8} \frac{\mu_0 IS}{\pi a^4} N$$

となる。

a = 0.05 m、I = 20 A、磁場勾配  $\frac{dB(0)}{dr} = 20$  G/cmとして1個あたりのコ イルの巻き数を求めると

#### N = 36卷

となった。したがって、それぞれ 36 巻 以上のコイルを作製すれば、必要な磁 場勾配が得られることがわかった。



図 3 アンチヘルムホルツコイル

#### 4. MOT 用の真空系の構築

今回、MOT はガラスセル内に設置 した共振器中で作製する。そのため、 ガラスセルを超高真空状態にするため の真空チャンバーをつくる必要がある。 そこで MOT を実現するためにガラス セルや Rb 供給源、イオンポンプとい った様々な機器をすべて接続できるよ うな構造を既製品で構築した。その上 で、高真空の妨げとなるチャンバー内 の不純物を排気するためにベーキング を行った。真空チャンバー全体にヒモ 状のヒーターを巻き、その上からアル ミホイルを何重にも重ねて温めた。今 回はガラスセルを除いた装置全体に対 して1週間かけて平均270℃の温度で ベーキングをした。現時点での真空度 はターボポンプのみの使用で室温にお いて4.0×10<sup>-6</sup> Paに到達している。今 後はイオンポンプも合わせて最終的に 10<sup>-8</sup> Pa前半の真空度を目指していく。



図 4 真空チャンバー
 上記と並行して 3D CAD ソフトを
 用いて、真空チャンバーを安定的に支
 える保持部材を設計、製作をした。



図 5 3DCAD で設計したチャンバー



図 6 設計・製作した保持部剤

#### 5. まとめ展望

実験を行うために必要な cavity の 様々なパラメータを導出した。最終的 に得た必要な原子密度は cMOT で実 現可能な値であることがわかった。次 に MOT の真空機器の配置を決め、そ れらの機器を安定に固定するために保 持部材を設計し、製作した。さらに四 重極磁場発生のために使用するアンチ ヘルムホルツコイルの設計では必要な コイルの巻き数を算出し、一つのコイ ルにつき 36 巻が必要であるというこ とがわかった。今後はさらに詳細なパ ラメータを導出し、実際に cavity の製 作を行っていく予定である。また、タ ーボポンプでの排気で得た真空度は十 分なものではないため、今後は排気を よくするために再度ベーキングを行い、 MOT に必要な真空度を得るのが目標 である。

## 6. 参考文献

- [1] NICT 国立研究開発法人 情報通 信研究機構 HP (<u>http://www.nict.go.jp/quantu</u> <u>m/index.html</u>)
- [2] Erwan Bimbard. *et al.*,
  "Homodyne Tomography of a Single Photon Retrieved on Demand from a Cavity-Enhanced Cold Atom Memory"Phys. Rev. Lett. **112**, 033601 (2014)
- [3] Wolfgang Petrich, et al.,
  "Behavior of atoms in a compressed magneto-optical trap"J. Opt. Soc. Am. B 11, 1332-1335 (1994).
- [4] Christpher J. Foot, "Atomic Physics" (OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2011)