

## 修士論文要旨

「レーザー冷却原子の光双極子カトラップ」

The Optical Dipolar Trap of Laser Cooling Atoms

中央大学大学院 理工学研究科 物理学専攻

学籍番号：12N2100026B

藤田 翔平

### 1. レーザー冷却原子について

1990年初頭、量子論が誕生し急速に発展した。量子論は、波動性と粒子性を統一することで古典論では証明できなかった問題を解決し、ミクロな物理現象を説明する基本的な理論となった。量子論により原子と光の相互作用の解明が進み、レーザー技術が進歩した。

原子物理においては、レーザーを用いて原子を冷却、捕縛する技術が1980年代に飛躍的に発展した。冷却することで原子は低い運動エネルギー準位に縮退し、量子性が顕著になる。この冷却原子を使って精密分光、原子時計、原子波光学などが発展した。1997年レーザー冷却の発展に大きく貢献したCohen-Tamnoudgi、Chu、Phillipsにノーベル物理学賞が授与された。そして、レーザーによる冷却と捕縛、さらに磁場や光を用いた蒸発冷却を組み合わせる原子団の温度を数百nKまで冷却することが可能となり、1920年アインシュタインが予言していたBose-Einstein凝縮（ボーズ粒子においてはある温度以下では最低エネルギー準位を占める粒子数が巨視的な大きさになる）の実現に成功した。これは、1995年に3人の物理学者Ketterle、Cornell、Wiemanらのグループが実現し、2001年にノーベル物理学賞を受賞した[1,2]。このBECはFreshbach共鳴による相互作用制御[3]、光格子を使った結晶格子の実現などを高い操作性を持って行える魅力的な系である。また、冷却フェルミ粒子では低いエネルギー準位に粒子が集まりフェルミ縮退が起こる[4]。このフェルミ縮退では原子間の相互作用をFreshbach共鳴によって変えていくことでBCS-BEC crossoverが観測されその研究が急速に進んでいる。以上のように冷却原子は理想できない量子縮退系として幅広い分野で用いられている。

### 2. 研究目的

私達の研究室ではこの冷却原子を使い、局所空間における遷移強度の制御、高次効果の解明を目的とし実験的研究を行っている。本研究の目的は第一段階として

1. Rb原子のレーザー冷却装置の設計
2. 空間制御の為に光双極子カトラップの実現

この2つのことを達成させることである。1に関しては多重極子相互作用のような応答を観測する為には、原子の運動量を低く保つ必要があるからである。これはドップラー効果による影響が大きい。光のドップラー効果は

$$\omega' = \frac{\sqrt{1 - (v_L/c)^2}}{1 - (v_L/c)} \omega$$

で与えられる。これを、室温原子速度  $v_L = 300$  m/s で 800 nm の波長 ( $3.5 \times 10^{14}$  Hz) の波として計算するとこのドップラー幅の広がり広がり350 MHzとなりこれは自然幅10 MHzよりもかなり大きい値となる。つまり、原子の運動量が高いと、ドップラー効果による線幅の広がりが大きく、測定スペクトル内に複数のスペクトルが含まれてしまい精密測定が困難になってしまう。

2に関しては本実験装置では近接場にある原子を冷却することは、冷却の為に用いられるレーザー光の損失が大きく、冷却効率が下がってしまうなど技術的に難しい。よって、一度冷却原子を別の場所へ作り、そこから保持して近接場まで運ぶ必要がある。また、冷却光学系は原子の種類や装置の条件により冷却限界温度が決まるが、冷却光を用いる方法では限界温度が数 100  $\mu\text{K}$  と比較的高い。冷却原子を温度の低い原子団をトラップすることで熱平衡による温度減少を起し、原子の冷却を助けるという為にも有用である。

本論文ではまず原子冷却の為にドップラー冷却の理論から簡単な冷却原子の温度測定を行う。その後、冷却原子を光双極子カトラップで捕縛し吸収イメージング法による精密な原子の温度評価とトラップの評価を行う。

### 3. レーザー冷却装置の実現

レーザー冷却を議論する上ではまず気体原子の温度について理解しておく必要がある。気体原子の温度は

$$\frac{3}{2}k_B T = \frac{1}{2}M \langle \Delta v^2 \rangle = \frac{\Delta p^2}{2M}$$

のように、気体原子系の運動量分布の幅で定義されるで与えられる。このことから、原子気体系の温度を下げることは、この運動量分布の幅を狭くすることに対応する。今研究においては光と原子の相互作用に注目し、原子を減速させ温度低下を目指す。そして、Doppler 冷却装置を作成し、 $^{85}\text{Rb}$  のレーザー冷却に成功した。



図1：磁気光学トラップされた $^{85}\text{Rb}$  原子を撮影したもの。

### 4. 光双極子カトラップの実現

冷却原子を空間的コントロールを行う為には光双極子トラップを用いる。光双極子カトラップ( Far Off Resonance optical dipole force Trap : FORT) は、光 (振動場) と光によって誘起される原子の双極子モーメント (分極) を利用したトラップである。光によって原子が双極子モーメントを誘起している場合、電場  $E_{FORT}(r)$  中に置かれた原子にはポテンシャルは

$$U_{dip}(r) = -\frac{3\pi c^2 \Gamma}{2\omega_0^3 \delta} I(r)$$

と与えられる。光双極子力で原子をトラップする為にはレーザー光の強度に勾配を持たせなければならない。レーザー光の離調を正としたときでは、強度に極小点を、負にしたときでは、強度に極大点を持たせることで、トラップが可能になる。特に、負離調の場合には、ガウス関数である強度分布がレーザー光をレンズで絞れば光の進行方向にも強度の極大点ができるので空間中にトラップできる。また、ポテンシャルを大きくするには光の強度が大きく、離調が小さい光 (レーザー) を用いれば良いことがわかる。

今回使用するレーザー光は 1064 nm と  $^{85}\text{Rb}$  の共鳴波長 (780 nm) に対し、負の離調をとったレーザーを用い、これを用いて、冷却原子の捕獲に成功した。

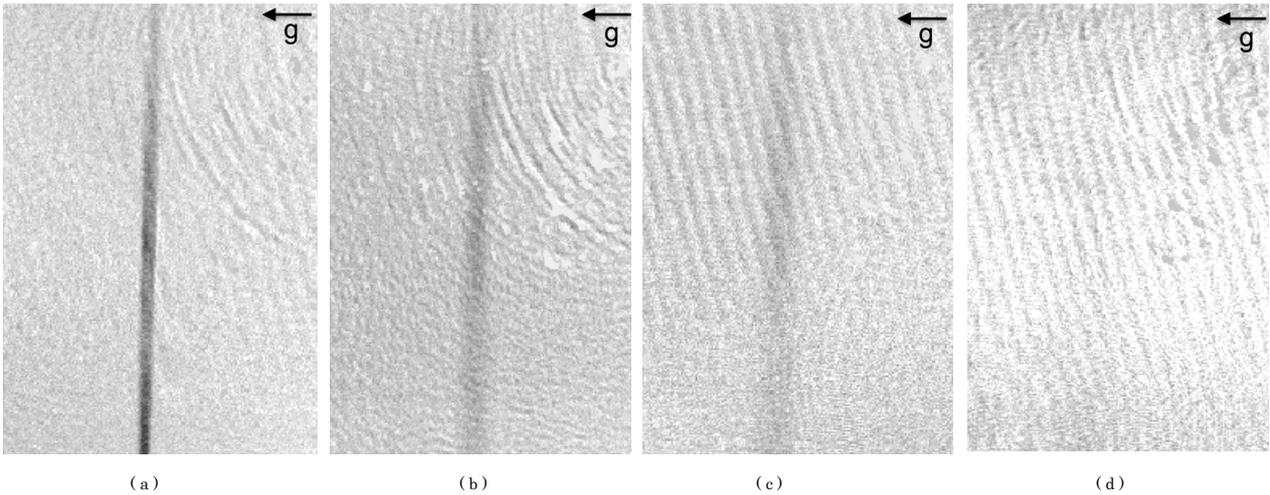


図2 吸収イメージング法により観測した光双極子カトラップ原子集団。重力方向は左向きである。  
 トラップ時間 (a) 20 $\mu$ s、(b) 300  $\mu$ s、(c) 500  $\mu$ s、(d) 1ms

## 5. レーザー冷却原子の温度評価

今回の原子の温度評価には原子の速度分布を空間中の密度分布に焼き直して測定する方法であるTime of Flight 法。観測には 原子団に対して照射したプローブ光をCCDカメラの素子上に結像させ、2 次元的なイメージを取る方法である。これを用いて冷却原子、トラップ原子の評価を行った。

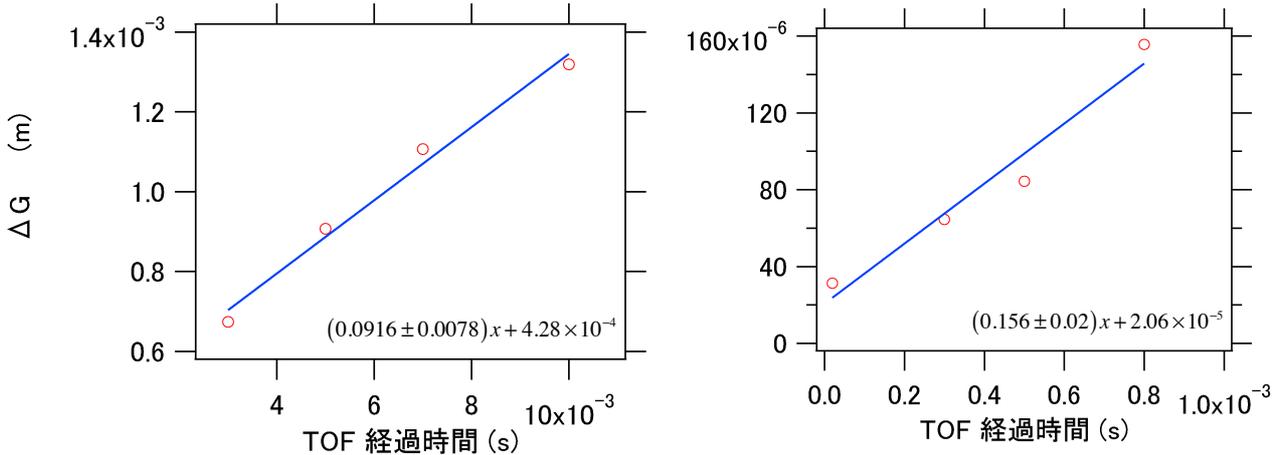


図3 Time of Flight 法による原子の広がり。左が冷却原子、右がトラップ原子。

このグラフの切片が原子の初期の空間分布、傾きが原子集団の平均速度を表す。この平均速度を用いて原子温度を求めると冷却原子温度は84  $\mu$ K、トラップ原子温度は 240  $\mu$ Kと成ることがわかった。

## 6. 光双極子トラップ特性測定

光双極子カトラップ特性を調べる為に、トラップレーザーの強度やTime of Flight待機時間のパラメータを変化させてトラップされた原子数の比較を行う。まず、レーザー強度15Wの光双極子カトラップ原子数の時間変化を評価した。その結果、トラップ原子数は指数関数的に減少していることが分かった。よって、時定数を求めることで実際のこのトラップの捕獲可能時間を求める。図はレーザー強度ごとの時定数の強度変化をプロットしたものである。強度が強くなるに従って時定数は高い値になり、原子を長時間捕獲することが可能になるといえる。レーザー強度と共に双極子力が強くなり、トラップの深さが深くなるからである。

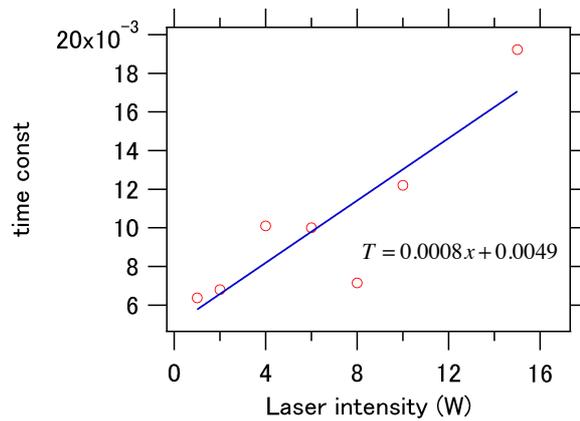


図4：レーザー強度によるトラップ原子時定数の比較。実践が実験値、破線が理論値。

## 7. 結論

原子数の時間依存性に関して同種原子の多体衝突過程を考えてみる。一般的に密度の時間変化は

$$\frac{dn}{dt} = -K_1 n - K_2 n^2 - K_3 n^3$$

というの微分方程式で記述できる。 $n$  は原子密度、 $K_1$  1体の衝突係数、 $K_2$  は2体の衝突係数、 $K_3$  は3体の衝突係数である。今回観測している原子の体積は一定であるので、 $N \propto n$  という関係式が導ける。実験の結果、このトラップ原子は一次の指数関数的に減少しているの、この冷却原子系は一体衝突が支配されている系であると考えられる。つまり原子は他の何かと衝突していることにより、減少している。

衝突しているものと考えていくとトラップレーザーの光子、セル内の室温原子の二つが考えられる。時定数の光強度との関係を見てみると、時定数減少は光の強度に比例しているように見える。これより、衝突の相手は光であると推定した。図は時定数の光強度との関係にトラップレーザーの寿命を光の散乱レートから算出したものである。冷却原子が光子を吸収してトラップから脱落したと仮定すれば、この光双極子カトラップの寿命は波線となる。また、レーザー強度0で初期の時定数(このグラフの切片)が等しくなる。実験で得られた時定数はこの計算値との差があることから、衝突しているものは光子ではなくセル内に存在する室温原子であると考えられる。

今後は原子との衝突を防ぐ為に、セル内の室温の原子密度を低下させ、光双極子カトラップの寿命を伸ばしていく必要がある。

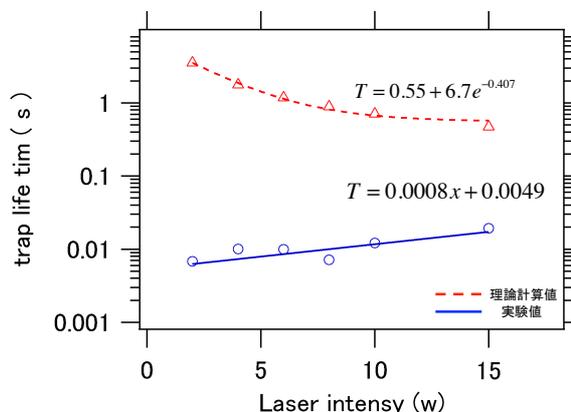


図5：トラップレーザーの寿命。実践が計算値、破線が実験値

## 参考文献

- [1]K. B. Davis , Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 3969 .
- [2]M. H. Anderson et al., Science 269, 198 (1995) ,
- [3]S.Inoue , Nature392, 151 (1998)
- [4]C.A.Regal , Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 040303 .