

準安定状態アルゴン原子トラップの研究

量子・物質工学科 清水研究室
0313016 白倉潤

1. 目的

我々の研究室では準安定状態アルゴンの冷却原子を用いて、固体表面との相互作用の研究を目指している。第一段階として準安定状態アルゴン原子をレーザー冷却し、磁気光学トラップ(MOT)によりトラップする必要がある。本研究の目的は、MOTのための実験装置を構築し、トラップを生成することにある。

2. 方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。まずソースチャンバー内で放電によってアルゴン原子を励起させ、トラップチャンバーへ射出する。この際、準安定状態アルゴン原子の最確速度を抑える

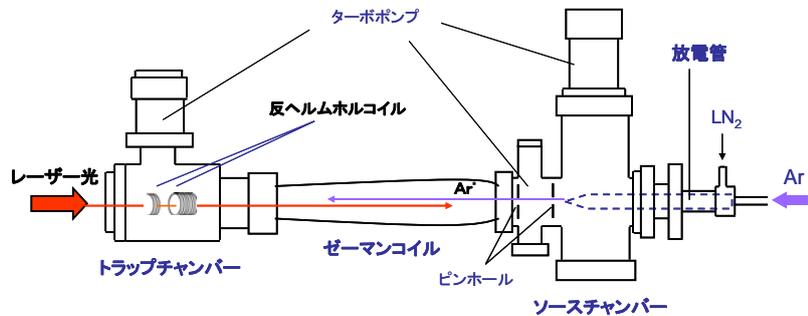


図1 実験装置概要

ため液体窒素で冷やす。次に原子はゼーマンコイル内を通り、ドップラーシフトをゼーマンシフトで補償されながら、正面から対向に照射した共鳴レーザー光によって冷却される。その後、冷却した原子はトラップチャンバー内でMOTによりトラップされる。

2.2 レーザー冷却

図2はアルゴンのエネルギー準位図である。基底状態と第一励起状態の差が大きいため、放電により励起する。第一励起状態の準安定状態である全角運動量 $J=2$ の準位と、第二励起状態の $J=3$ の準位の閉じた遷移間を冷却に用いる。この冷却遷移波長は 811.754nm である。

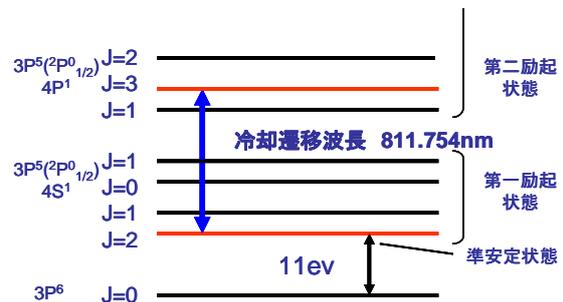


図2 アルゴンのエネルギー準位図

表1は準安定状態アルゴン原子のレーザー冷却に関する諸特性を示したものである。

$T=500\text{K}$ としたときの停止するまでの距離は 46cm で、ゼーマンシフトで補償する実際のコイルの長さは 70cm なので冷却のためには十分な長さであると考えられる。

表1 準安定状態アルゴン原子のレーザー冷却に関する諸特性

反跳速度	$V_R = h/m\lambda$	1.2×10^{-2} [m/s]
最大減速度	$\alpha_{max} = h/2m\lambda\tau$	2.3×10^5 [m/s ²]
飽和パワー	$I_0 = 2\pi\lambda^3\tau$	8.6 [mW/cm ²]
停止するまでの 吸収・放出回数	$N = Vm\lambda/h$	37000 [回]
停止するまでの時間	$t = 2N\tau$	2.0 [ms]
停止するまでの距離	$l = Vt/2$	46 [cm]

冷却遷移波長： $\lambda = 811.754$ [nm]
 原子遷移の上準位の寿命： $\tau = 27$ [ns]
 原子質量： $m = 6.63 \times 10^{-26}$ [kg]
 自然幅： $\gamma = 5.9$ [MHz]
 マクスウェルボルツマン分布での
 $T=500$ Kにおける最確速度：
 $V = \sqrt{2k_B T/m} = 460$ [m/s]

2.3 ゼーマン同調法

図3に測定した磁場分布のグラフを示す。

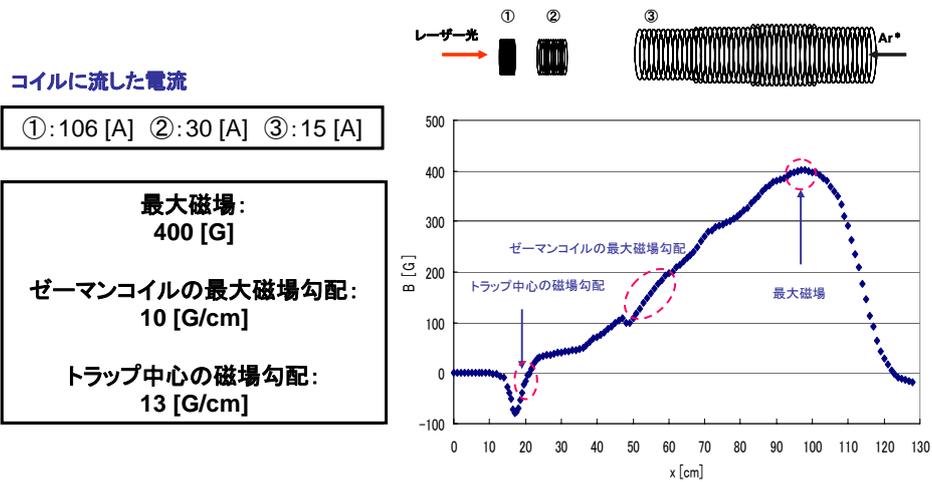


図3 磁場分布

最大磁場より計算すると、460m/s以下の速度の原子をゼーマンコイルで補償できると見積もった。また最大磁場勾配より磁場勾配の限界を考えると、条件を満たし共鳴から外れることなく冷却される計算となった。

2.4 磁気光学トラップ(Magneto-Optical Trap : MOT)

MOTとは、不均一磁場によるゼーマン効果と円偏光による遷移の選択則を利用して、原子の位置に依存する復元力を生み出すトラップである。本実験では4本レーザーによるMOTを試み、円偏光にした減速兼トラップレーザーと、逆回りの円偏光にした3本のトラップレーザーが正四面体の各頂点から重心に向かって入射し、各方向

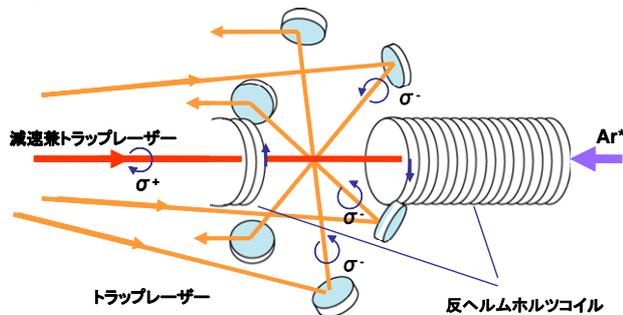


図4 4本レーザーによるMOT図

成分の合計がトラップの中心で釣り合うようにした。ここで、減速兼トラップレーザーは冷却効率を上げるため放電管前のピンホールに焦点を合わせた。そして、反ヘルムホルツコイルのつくる四重極磁場のゼロ点はトラップの中心に合うようにした。トラップ中心でのレーザーのパワー密度とビーム径は表2のようになっており、準安定状態アルゴンの飽和パワー密度 8.6mW/cm^2 を満たす値を得ている。また、トラップ中心の磁場勾配は 13G/cm で目標の 15G/cm に近い値を得ている。

表2 トラップ中心でのパワー密度

	減速兼トラップ	トラップ①	トラップ②	トラップ③	Ar の飽和パワー密度
パワー密度 [mW/cm^2]	10.2	10.2	10.2	10.2	$8.6 [\text{mW/cm}^2]$
ビーム径 [cm]	1.8	2.0	2.0	2.0	

3. 実験

3.1 ビートの測定

MOT を生成する際は、レーザー光の周波数を共鳴周波数より $10\sim 20\text{MHz}$ (アルゴンの自然幅の $2\sim 3$ 倍) 程度負に、 $1\sim 2\text{MHz}$ 精度で離調する必要がある。プローブ光として独立したレーザーを共鳴周波数にロックして、マスター光とのビートの周波数差を測定することにより、目的の周波数を得られるようにした。

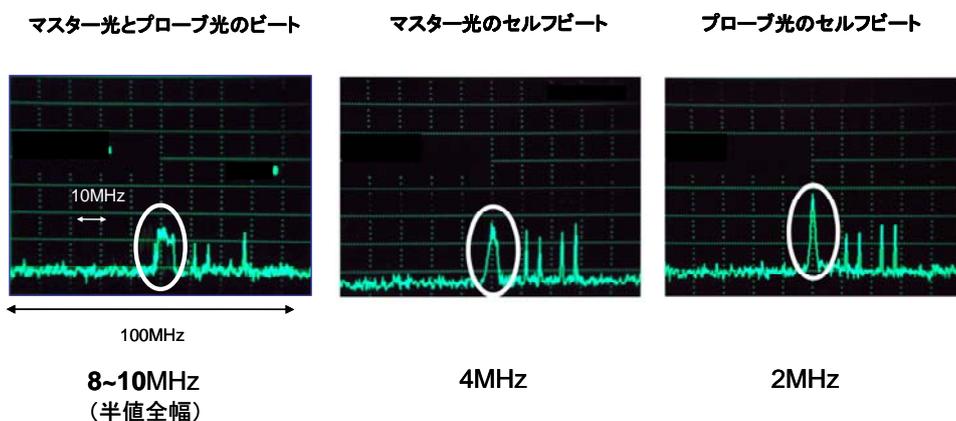


図5 観測したビートスペクトル

図 x はビート測定の光学系図と観測したビートの画像である。マスター光とプローブ光のビートを観測したところ、スペクトル幅が $8\sim 10\text{MHz}$ に広がっていた。トラップのためにはもっと狭いスペクトル幅が必要で、広がる原因を探るためマスター光、プローブ光それぞれのセルフビートを測定した。セルフビートは AOM でレーザーを 2 つに分

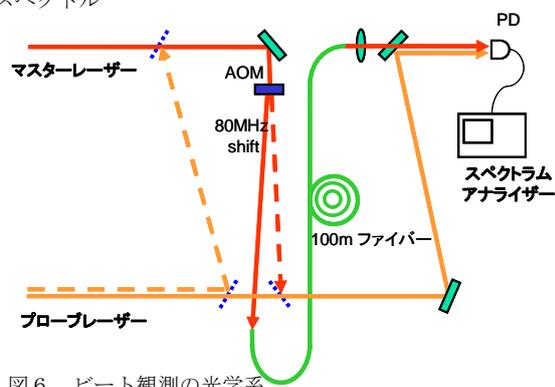


図6 ビート観測の光学系

け片方の周波数を 80MHz ずらし、さらに 100m の光ファイバーに通しコヒーレンスを悪くすることで測定できるようにした。その結果スペクトル幅は、アルゴンの自然幅から考えると 1~2MHz となるどころ、マスター光が 4MHz、プローブ光が 2MHz となっていた。スペクトル幅が広がる原因としては、半導体レーザーの共振器の振動、温度の揺らぎ等の影響が考えられ改善していく必要がある。

3.2 MOT 生成の試み

以上に述べたような条件下でレーザー周波数をゆっくりとスキャンして CCD カメラで MOT された準安定状態アルゴン原子の吸収の蛍光を観測できる値を探した。またそれと同時にコイルに流す電流を少し増減させて磁場のゼロ点を調整したり、 $\lambda/4$ 板を動かし円偏光の向きを変えてみたりした。しかし蛍光は観測できなかった。

次に MOT 生成の観測手段として、マイクロチャンネルプレート(MCP)を用いることにした。原理としては、MOT が生成されたとすれば、MOT 内で準安定状態 Ar^* の密度が上昇し、 Ar^* 同士が衝突してペニングイオン化($Ar^* + Ar^* \rightarrow Ar^+ + e^- + Ar$)を起こす。これによって生成された Ar^+ は、表面が負に印加された MCP に衝突して MCP 内部に電子をたたき出し、これを電流として検出し、アンプを通して光子カウンターでこの信号を測定する。MOT が生成されていない場合、まっすぐに飛来してきた Ar^* がチャンバー内の残留ガスに衝突して Ar^+ を生成するため常に信号が見られるが、仮に MOT が生成されればその瞬間から急激に信号が上昇するはずなので、MOT が生成されたことが確認できる。

しかし MCP 入力電圧に -2kv をかけて、蛍光を観測する時と同じようにレーザー周波数をゆっくりスキャンしてみたが、MOT が生成されたと確認できるような信号の増加は見られなかった。

またここで、アルゴンの圧力、放電管にかける電圧を変化させた時 MCP で検出される信号に再現性がないこと、また放電の色が変化してしまうこと、さらに放電管の出口で吸収の蛍光により確認した Ar^* の最確速度が、放電管を液体窒素で冷やしても変化しないことが判明した。このことから放電管が不具合を生じているか、構造上に問題点がある可能性があるため、放電管を作り直すことにした。

4. 今後の課題

MOT 生成に向けて今後の課題として、

- ・半導体レーザーの出力の強化、スペクトル幅の狭窄化
- ・放電管の作成
- ・ディフレクターの設置

を考えている。