

準安定状態アルゴン原子のレーザー冷却およびトラップ

電気通信大学大学院 電気通信学研究科 量子・物質工学専攻 清水研究室
倉茂孝道

1 研究の背景と目的

1975年にレーザー冷却の原理が考案されて以来、1985年にナトリウム原子の3次元的なレーザー冷却が初めて実現し、1987年にはレーザー光と磁場を組み合わせた中性原子の磁気光学トラップ(Magneto Optical Trap:MOT)が実現、さらに1988年には偏光勾配冷却が考案されるなど、1980年代後半にはレーザー冷却の研究が飛躍的に発展し、1997年にこれらの業績などによりS.Chu,C.Cohen-Tannoudji,W.D.Phillipsにノーベル物理学賞が与えられた。

現在はアルカリ金属や希ガスなど、多数の原子での磁気光学トラップが生成されており、磁気光学トラップによってトラップされた原子は、原子干渉計や量子反射など様々な物理学実験における原子源として用いられている。

本研究の目的は準安定状態アルゴン原子の磁気光学トラップを生成することである。

磁気光学トラップのために、飽和吸収分光法による周波数ロック、必要なレーザー出力を得るための注入同期レーザーの製作、真空装置の組み立て、準安定状態アルゴン原子ビームの生成、ゼーマン同調法用磁場、磁気光学トラップ用磁場の最適化を行う。

トラップされた原子は、原子干渉計の原子源や気体と表面との相互作用の研究に用いる。

2 Ar* 原子について

Ar* 原子を用いる利点として

1. 超微細構造がある原子はリポンプ光を用いて optical pumping を避ける必要があるが、Ar* に関しては超微細構造がないので冷却波長が1つで良い。
2. マイクロチャンネルプレート(MCP)を用いて容易に検出することができる。
3. 原子干渉計の回折格子などの装置や、サンプルなどに気体が付着しない。
4. 半導体レーザーで冷却遷移周波数を実現することができる。

等の点があげられる。

2.1 Ar* 原子のエネルギー準位

図1はAr*のエネルギー準位図である。

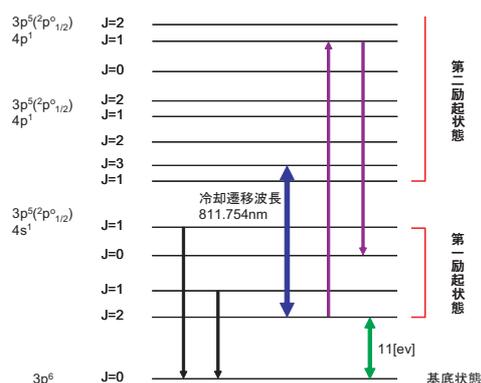


図1: Ar*のエネルギー準位図

第一励起状態の電子配置は $3p^5 4s^1$ と表され、全角運動量 J の異なる4つの状態がある。そのうち $J=0, J=2$ の準位が準安定状態である。 $J=1$ へ励起した原子は基底状態へと落ちる。Ar* 原子の基底状態と第一励起状態のエネルギー差は11eVであり、放電により励起する。第一励起状態とその上準位の間では赤外領域の吸収があり、選択則により $3p^5 4p^1$ $J=3$ の原子は $3p^5 4s^1$ $J=2$ へしか自然放出が起こらないために閉じた遷移となるので、冷却に用いることができる。この冷却遷移の波長は811.754nmである。 $3p^5 4s^1$ $J=2$ から、 $3p^5 4p^1$ $J=1$ へ励起させ、そこから $3p^5 4s^1$ $J=0$ へ自然放出した原子を生成し、角運動量0の磁場に依存しない原子を用いることも可能となる。磁場に依存しない原子を用いることは、原子干渉計を使って位相変化を測る際など様々な物理学実験を行う上で必要となる。

2.2 Ar* 原子の諸特性

Ar* 原子のレーザー冷却を行う場合に重要な諸特性を計算する。Ar* 原子の冷却遷移波長は $\lambda=811.754\text{nm}$ 、原子遷移の上準位の寿命は $\tau_s = 27\text{ns}$ であり、 m をアルゴン原子一個あたりの質量 ($m=6.64 \times 10^{-26}\text{kg}$)、 h をプランク定数、 c を真空中の光速とすると、反跳速度、最大減速度、飽和パワーは表1ようになる。Ar* 原子の速度を熱平衡状態での $T=300\text{K}$ における最確

速度 $v = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} = 353 \text{ m/s}$ として (実際には放電により、原子の温度はさらに高くなる)、飽和パワーよりも十分大きなパワーのレーザーを照射したときに Ar^* 原子が停止するまでの吸収・放出回数、時間、距離の計算結果は表 2 のようになる。

反跳速度	$v_R = \frac{h}{\lambda m}$	1.2(cm/s)
最大減速度	$a = \frac{h}{2\tau_s m \lambda}$	$2.3 \times 10^5 (\text{m/s}^2)$
飽和パワー	$I_{\text{sat}} = \frac{2\pi c h}{\lambda^3 \tau_s}$	8.6(mW/cm ²)

表 1: Ar^* の反跳速度、最大減速、飽和パワー

吸収・放出回数	$N = \frac{mv}{h/\lambda}$	29000(回)
時間	$t = 2N\tau_s$	1500(μs)
距離	$l = \frac{1}{2}vt$	26(cm)

表 2: Ar^* が停止するまでの吸収・放出回数、時間、距離

2.3 ゼーマンシフト

本研究では原子の減速の際に生じる原子のドップラシフトをゼーマンシフトで補償するゼーマン同調法を用いている。

静止した原子の共鳴周波数を ν_0 とすると、ランダの g ファクター $g_j=1$ 、磁気量子数 $m_j=1$ のときドップラシフトとゼーマンシフトはそれぞれ次式で与えられる。

$$\nu_{\text{dop}} = \frac{v(z)}{c} \nu_0 \quad (1)$$

$$\nu_{\text{zeeman}} = \mu_B B(z) \quad (2)$$

ここで μ_B はボーア磁子である。原子の初速度を v_0 とし、一定の減速度 α で減速させていく場合、原子の速度は場所の関数として

$$v(z) = \sqrt{1 - \frac{2\alpha z}{v_0^2}} \quad (3)$$

で表される。磁場の空間分布が

$$B(z) = B_0 \sqrt{1 - s} \quad (4)$$

であれば、ソレノイド中を進んで減速される原子のドップラシフトはゼーマンシフトにより打ち消され、原子は常にレーザー光を吸収することができる。

Ar^* 原子の $J=2$ から $J=3$ の冷却波長間の遷移でのゼーマンシフトは、最大磁場を B_0 とすると

$$\delta\nu_{\text{zeeman}} = \frac{(m_2 g_2 - m_1 g_1) \mu_B B_0}{h} \quad (5)$$

となる。ランダの g ファクター g_j は

$$g_j = 1 + \frac{J(J+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2J(J+1)} \quad (6)$$

(量子数 J, l, s) であり、 g ファクター g_j と磁気量子数 m_j は

$$J=2 \text{ の準位で、} g_1 = \frac{3}{2} (J=2, l=1, s=1) \quad m_1 = 2$$

$$J=3 \text{ の準位で、} g_1 = \frac{4}{3} (J=3, l=2, s=1) \quad m_1 = 3$$

である。

また、磁場勾配の上限値は

$$\frac{d\nu}{dB} \frac{dB}{dz} \cdot v(z) \leq \frac{a_{\text{max}}}{\lambda} \quad (7)$$

で与えられ、この条件式を満たせば、原子はゼーマンコイル内で共鳴から外れることなく減速される。ここで a_{max} は最大減速度である。 $\frac{d\nu}{dB}$ はゼーマン効果に因る値であり、 Ar^* 原子の冷却遷移で $\frac{d\nu}{dB} = \frac{(m_2 g_2 - m_1 g_1) \mu_B}{h} = 1.4 \times 10^6 \text{ Hz/G}$ である。

3 光源

マスターレーザーにより注入同期をかけた 2 台のスレイブレーザーを Ar^* 原子の MOT の光源として使用する。また、MOT の光源は負に離調したレーザーを用いる必要があり、マスターレーザーの周波数に離調をかけるために共鳴周波数にロックしたプローブレーザーを使用する。これらの 4 台のレーザーは半導体レーザーであり、そのうちマスターレーザーとプローブレーザーは外部共振器型半導体レーザーである。

3.1 注入同期レーザー

MOT に必要なレーザー出力を得るため、注入同期法を用いることによりレーザー出力の増加を計る。図 2 は注入同期の光学系である。

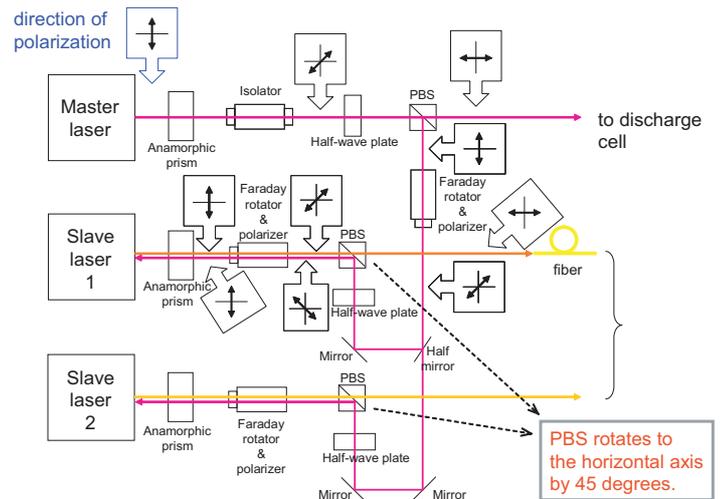


図 2: 注入同期の光学系

マスター光を出た光はアナモルフィックプリズムで円形にし、その先のアイソレータで戻り光を防止して

いる。 $\lambda/2$ 板を通り、偏光ビームスプリッター (PBS) により直線偏光になり放電セルへ向かう光と注入同期用の光に分けられる。また、 $\lambda/2$ 板とPBSによりそれぞれの光強度を変えることが出来るようにしている。注入同期用の光はファラデーローテータによりレーザー光の偏光方向を 45° 回転させ、ハーフミラーにより反射光がスレイブレーザー 1 へ、透過光がスレイブレーザー 2 へ向かうように調整している。その後、それぞれの光は $\lambda/2$ 板、PBS、ファラデーローテータを通りスレイブレーザーへ注入される。ここでのPBSは偏光方向の調整のために水平軸に対して 45° 回転させている。注入がかかったスレイブレーザーからの光はアナモルフィックプリズム、ファラデーローテータ、PBSを通り、MOT用の光源として用いる。スレイブレーザー 1 の光に関してはファイバーに通している。スレイブレーザー 1、2 に注入同期がかかる時の電流値、温度、注入パワーと得られるレーザー出力を表 3 に示す。(ただし室温 20°C の場合。室温が変わると条件も変わってしまうため適宜調整が必要である。)

レーザー	電流 (mA)	温度 (°C)	注入パワー (mW)	出力 (mW)
マスターレーザー	95.3	24	-	36
スレイブレーザー 1	180.0	41.0	2.6	74
スレイブレーザー 2	180.8	36.0	2.8	72

表 3: 注入同期がかかる条件とその時の出力

LDの破損を防ぐため電流値のリミットをスレイブレーザー 1、2 に対してそれぞれ 210mA、200mA に設定してある。スレイブレーザー 1 は減速兼トラップ用の光源として、スレイブレーザー 2 は先の光学系で 3 本に分け、トラップ用の光源として用いる。スレイブレーザーから出射した光はミラーやレンズなどの複数の光学部品を介すので、パワーを損失しながら MOT 装置のトラップチャンバーへ入射する。それぞれのレーザー光のトラップの位置におけるビーム径と出力を表 4 に示す。

レーザー	ビーム径 (mm)	パワー密度 (mW/cm^2)
スレイブレーザー 1(減速兼トラップ)	16	10.2
スレイブレーザー 2(トラップ×3本)	17	10.2

表 4: トラップの位置でのビーム径と出力

ビーム径 16mm では Ar^* の飽和パワー $8.6\text{mW}/\text{cm}^2$ を満たしており、MOT が可能である。

3.2 レーザー周波数の安定化

図 3 は周波数ロックのための光学系である。

マスターレーザーの光はアナモルフィックプリズム、アイソレータ、 $\lambda/2$ 板を通った後、PBSにより、放電

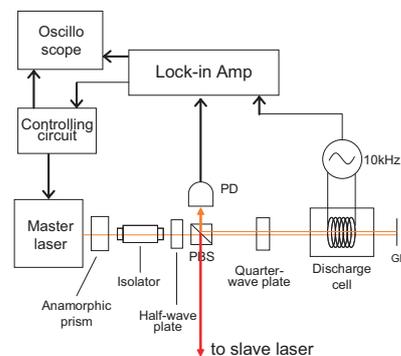


図 3: 周波数ロックの光学系

セルへ向かう光と注入同期用の光に分けられる。注入同期用の光路は 3.1 節の注入同期の光学系で述べた通りである。一方、放電セルへ向かう光は $\lambda/4$ 板で円偏光になり放電セルを通り抜けた後、その先のガラスプレートで反射した光はさらに光路が重なるように再び放電セルを通り、PDで検出され飽和吸収信号を得る。飽和吸収信号と変調信号をロックインアンプへ入力し、得られた誤差信号を制御回路に入力し、外部共振器型半導体レーザーのPZTにフィードバックをかけることにより、周波数をロックする。図 4 はマスターレーザーとプローブレーザーについて得られた飽和吸収信号と誤差信号の波形と周波数ロック後の波形である。

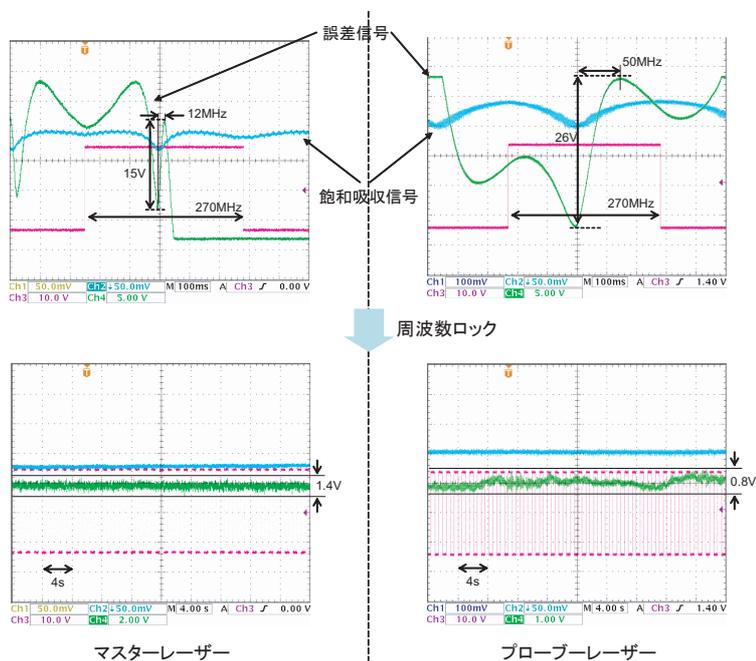


図 4: 周波数ロック

水色の信号が飽和吸収信号、緑色の信号が誤差信号であり、誤差信号の傾きの逆数はマスターレーザー、プローブレーザーについてそれぞれ $0.8\text{MHz}/\text{V}$ 、 $1.9\text{MHz}/\text{V}$ となっている。これらの値から、周波数ロック後の安定度はそれぞれ 1.1MHz 、 1.5MHz 程度となっ

ていることが分かる。

3.3 光源側

図 5 は光源側全体の光学系である。

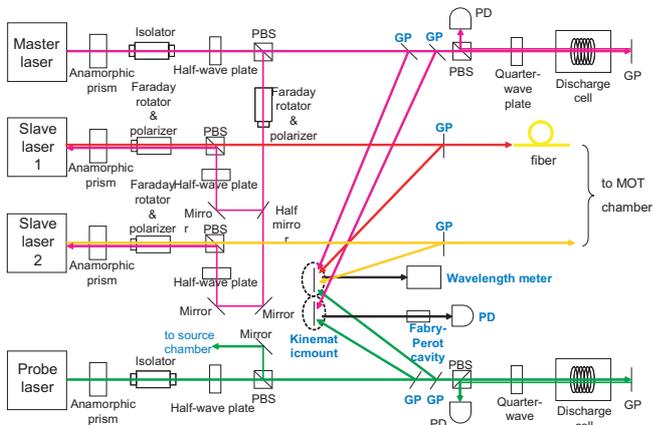


図 5: 光源側の光学系

各々のレーザー光のパスの途中で 2 枚のガラスプレートを設置し、それぞれの反射光が 2 台のキネマティックマウントへ向かい、キネマティックマウント上のミラーを取り替えることによって、一方は波長計に入射し、他方はファブリーペロー共振器に入射した後に PD で検出され、波長とモードを同時に見ることができるよう調整してある。プローブレーザーの光については、 $\lambda/2$ 板の先にある PBS で放電セルへ向かう光と、ソースチャンバーでの蛍光の観測のためなど、多目的に使用するための光に分けられる。

3.4 MOT 装置側

図 6 は MOT 側の光学系である。

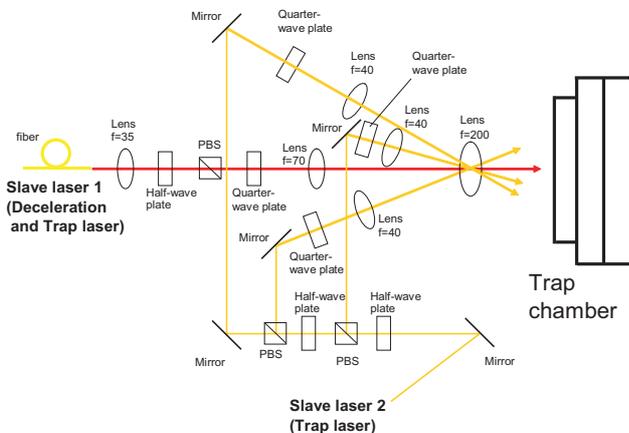


図 6: MOT 装置側の光学系

MOT 装置側には、スレーブレザー 1、2 の光が入射する。スレーブレザー 1 はトラップ兼減速のレーザーとして使用している。ファイバーから出射したレーザー光は $f=35\text{mm}$ のレンズでビームをコリメートし、 $\lambda/2$ 板と PBS により出力を調整、かつ直線偏光にしている。その先の $\lambda/4$ 板で円偏光にし、 $f=70\text{mm}$ のレンズによりビーム径を広げた後、 $f=200\text{mm}$ のレンズでソースチャンバーの放電管の先のピンホールに焦点を合わせてトラップチャンバーへ入射する。スレーブレザー 2 は残り三本のトラップレーザーとして使用している。レーザー光は二組の $\lambda/2$ 板と PBS を用いて三本のトラップレーザーに分け、一本ずつの出力が均等になるように調整し、かつ直線偏光にする。また、それぞれその先の $\lambda/4$ 板で円偏光にし、 $f=40\text{mm}$ のレンズでビーム径を広げた後、 $f=200\text{mm}$ のレンズでコリメートされ、トラップチャンバーに入射する。

4 MOT 装置

図 7 は MOT を生成するための装置である。

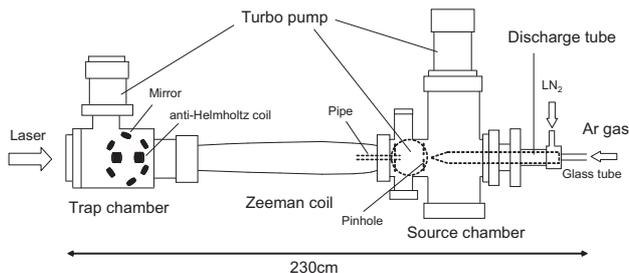


図 7: MOT 装置

装置はソースチャンバー、ゼーマンコイル、トラップチャンバーの 3 つの部屋で構成されており、全長は約 230cm である。ソースチャンバーとトラップチャンバーに合計 3 台のターボポンプを用いて差動排気を行っている。Ar ガスを流す前の真空度はソースチャンバーで $1.4 \times 10^{-6}\text{torr}$ 、トラップチャンバーで $7.0 \times 10^{-9}\text{torr}$ となっている。ソースチャンバー内には、Ar を準安定状態に励起させるための放電管を設置している。差動排気により真空度を保つために直径 1mm のピンホールと内径 12mm、長さ 12cm のパイプを設置している。トラップチャンバー側からレーザー光を入射し、ソースチャンバー側から Ar ガスを流して放電管により Ar^* 原子を生成する。放電管より飛来してきた原子ビームはゼーマンコイル内でドップラーシフトをゼーマンシフトで補償され、減速される。ゼーマンコイルの長さは約 70cm であり、電源により電流を流し、必要なゼーマンシフトを発生させるだけの磁場をかける。電流を流す際にはコイル内に冷却水を流し、水冷している。十分に減速された原子ビームはトラップチャ

ンバー内の2つのアンチヘルムホルツコイルによる四重極磁場と四面体の構成の4本のレーザーによってトラップされる。

図8はトラップチャンバー内の配置である。

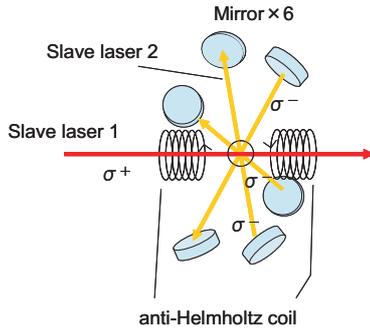


図8: トラップチャンバー内の配置

減速兼トラップレーザーはトラップチャンバーへ入射し、トラップの中心を通った後に減速ビームとしてソースチャンバー側へ向かう。残りの3本のレーザー光はトラップチャンバーへ入射し、それぞれミラーに当たりトラップの中心を通った後、チャンバー内における光の散乱を避けるために反対側のミラーへ当たりチャンバーの外へ出て行くようにアライメントを行い、4本のレーザー光が正四面体の各頂点からトラップの中心にレーザー光が向かうように設置している。アンチヘルムホルツコイルはゼーマンコイルと同様にコイル内に冷却水を流すことにより水冷している。

5 ビートの観測

磁気光学トラップ生成のためには負に離調したレーザーを用いる。そのために実験を行う際にはマスターレーザーと共鳴周波数にロックしたプローブレーザーの周波数の差を確認する必要がある。そこでビートの観測を行った。観測の方法として、マスターレーザーとプローブレーザーの光が重なるハーフミラーの先から光路を2m間で一致させたのち、2つのレーザー光をPDで検出してスペクトラムアナライザーに入力した。また、マスター、プローブレーザー自身のセルフビートも同時に見ることが出来るセットアップにしている。

図9はビートを観測するための光学系である。実線で描かれたレーザーの光路はマスター光とプローブ光のビートを見るための光学系である。マスター光とプローブ光のビートを観測するためには、マスター光をAOモジュレータに入射し、80MHzシフトした一次回折光を、コヒーレンスを悪くするために100mファイバーに通し、レンズによりコリメートした光をプローブ光と一致させてPDで検出する。マスター光のセル

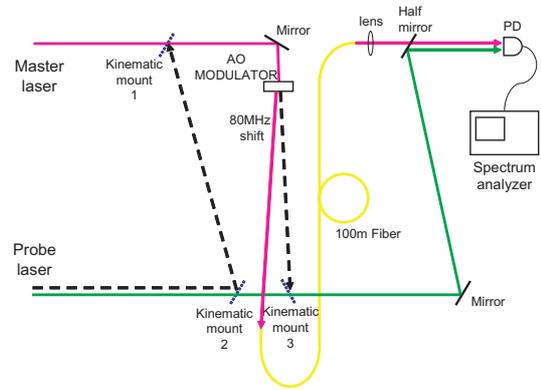


図9: ビートスペクトルを観測するための光学系

フビートを観測するためには、キネマティックマウント3にミラーを設置し、AOモジュレータに入射して、その0次回折光と100mファイバーに通した1次回折光をPDで検出する。プローブ光のセルフビートを見るためにはキネマティックマウント1、2にミラーを設置し、マスター光のセルフビートの光路に一致させて同じ手順で観測する。

スペクトラムアナライザーによって得られた信号を図10、11に示す。

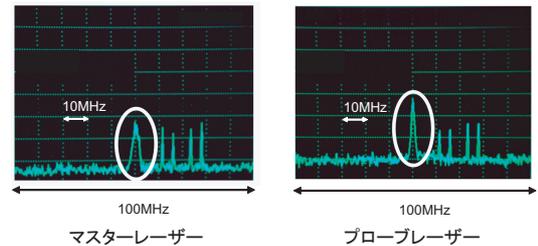


図10: マスター光、プローブ光のセルフビート

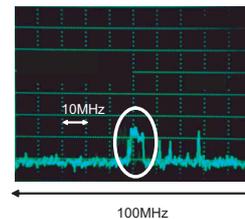


図11: マスター光、プローブ光のビート

ここでスペクトラムアナライザーはSPANを100MHz、バンド幅を100kHz、ビデオバンド幅(スペクトラムアナライザー自体の分解能)を3MHzに設定している。マスター、プローブ光のセルフビートは80MHzの位置に生じており、スペクトル幅は半値全幅でそれぞれ2MHz、1MHzであった。マスター光とプローブ光のビートは7MHzであった。

6 コイルの磁場分布測定

共鳴を外れないよう原子を減速をさせるためにコイルの磁場分布を知る必要がある。そこで反ヘルムホルツコイル (1)(2) とゼーマンコイル (3) 間で磁場分布が滑らかにつながるように電流値をそれぞれ 106A、30A、15A に設定し、ガウスメーターを用いてトラップチャンバーの入り口から磁場分布を測定した。(図 12)

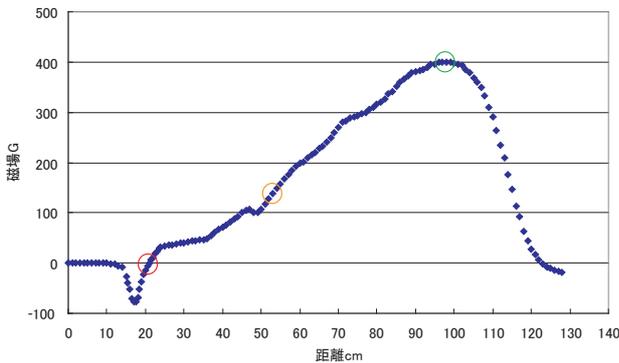
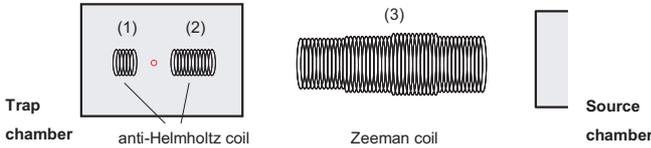


図 12: 反ヘルムホルツコイル、ゼーマンコイルの磁場分布

トラップの中心の磁場勾配は 13.8G/cm (21cm 地点)、最大磁場は 401G (97cm 地点)、ゼーマンコイルの最大磁場勾配は 10G/cm (53cm 地点) であった。測定した磁場分布の最大磁場 (401G) での Ar* 原子の冷却遷移でのゼーマンシフト (5) 式を計算すると 561MHz となり、原子のドップラーシフト (2) 式により初速度 $v_0=455\text{m/s}$ 以下の原子を減速することができる。ゼーマンコイルの最大磁場勾配と、その位置での原子の速度 ((3) 式) はそれぞれ $\frac{dB}{dz}=10\text{G/cm}$ 、 $v(44)=80\text{m/s}$ であるのでレーザー強度を飽和パワーよりも十分大きい値として考えた場合、(7) 式を変形した

$$v(44) \leq \left(\frac{dv}{dB} \frac{dB}{dz} \right)^{-1} \frac{a_{max}}{\lambda} = 201\text{m/s} \quad (8)$$

式に当てはめると条件を満たしており、共鳴から外れることなく減速が可能であることが分かる。

7 蛍光の観測

ソースチャンバーの放電管により Ar* 原子を生成し、原子線に対してソースチャンバーに対して垂直方向の

窓からレーザー光を照射して、ソースチャンバーの水平方向の窓から CCD で蛍光を観測した。(図 13)

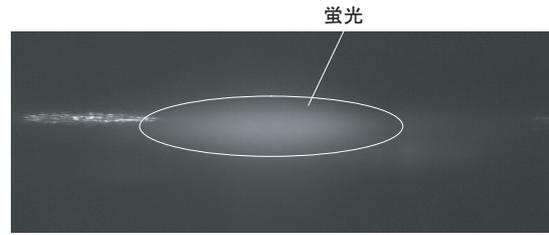


図 13: ソースチャンバー側の蛍光

このときの真空度はソースチャンバー側で $0.4 \times 10^{-3}\text{torr}$ 、トラップチャンバー側で $2.4 \times 10^{-8}\text{torr}$ である。より多くの Ar ガスを流入したいが、放電管内の圧力を上げていき、ソースチャンバー側を $1.0 \times 10^{-3}\text{torr}$ まで上げると蛍光は見えなくなる。その際のトラップチャンバー側の真空度は $2.5 \times 10^{-8}\text{torr}$ である。

8 まとめ

Ar* 原子の MOT 生成のために

- MOT 装置の組み立て、光学系のアライメント、トラップビームの偏光の調整を行った。
- マスターレーザーに周波数ロックをかけ、注入同期レーザーを 4 本ビームに用いて MOT に必要な出力を得た。
- マスターレーザーとプローブレーザーのビート周波数を観測した。
- ゼーマンコイル、トラップコイルの磁場が滑らかにつながるような磁場分布測定を行った。

9 今後の展望

- マスターレーザーとプローブレーザーのビートスペクトルはゆらぎが生じており不安定で、スペクトル幅は 7MHz よりもさらに広がる場合もある。これは半導体レーザーの共振器の振動などによる可能性があるため、改善してスペクトルの狭窄化を行う必要がある。
- 4 本のレーザー光をトラップチャンバーから入射し、CCD によりトラップの中心で原子の蛍光を観測し、MOT の生成を試みる。