

ヘリウム原子に関するレーザー冷却の研究

清水（富）研究室

笠島誉功

[目的]

我々の研究室では現在ネオン原子を用いて量子反射の実験が行われている。我々は、ネオンの代わりにヘリウム原子を用いて量子反射の実験を行うことを目標にしているが、その為にはまず原子波源として準安定状態ヘリウム原子の磁気光学トラップ (MOT) を生成する必要がある。よって本研究では、ヘリウム原子の MOT の生成を目標としている。

ヘリウム原子を用いて量子反射の実験を行いたい理由としては、質量の軽い原子の方が量子反射においてより高い反射率を得られることが解っており、現在我々の研究室で量子反射の実験に用いられているネオン原子をヘリウム原子に置き換えた方が、より量子反射の観測には有利であると言えるからである。

また、我々は以前にネオン原子の MOT を生成して原子光学の実験を行っており、その時の装置を改造してヘリウム原子の MOT を生成することを目指した。

[原理・概要]

図 1 にヘリウム原子のエネルギー準位図を示す。ヘリウム原子もネオンと同じ希ガスであり、基底状態とその上の第一励起状態との間のエネルギー差は非常に大きく (ヘリウムの場合 19.8 eV)、真空紫外域なのでこれに代わるレーザーは存在しないので、この遷移を用いてレーザー冷却を行うことはできない。そこでまず基底状態 $1S_0$ から準安定状態 $3S_1$ へ放電によって励起させ、その上の状態 $3P_2$ との間の閉じた遷移をレーザー冷却に用いる。この遷移波長は 1083 nm である。また、原子の初速度を抑える

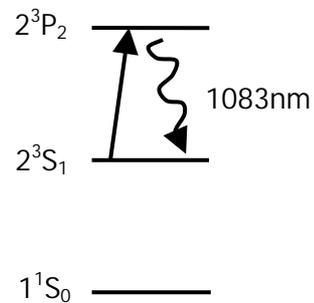


図1 ヘリウムのエネルギー準位図

ために、放電の出口部分を液体窒素で冷やしている。原子はその後ゼーマンコイルの中を通り、ゼーマンシフトによってドップラーシフトを補償されながらレーザー光によって減速され、その先に作られた四重極磁場によってトラップ

される。トラップのためのレーザー光は4本ビームを用いており、1本は正面からクーリング光と兼ねて用いられ、残りの3本は装置外から入射して中の鏡によって折り返し、トラップの中心を通過してさらに鏡で反射させて装置の外へ出ていくようになっている。

表1にネオン原子とヘリウム原子のレーザー冷却に関する各諸量を比較したものを示してある。この表からわかるように、ヘリウム原子の場合はネオン原子よりも初速度は大きい(2倍)が減速度は小さく、停止するまでに要する時間は約4倍で、その距離は約9倍と長い。そのためヘリウム原子を減速・トラップするためには、以前にネオン原子のMOTを生成するために用いていたコイル(約30cm)より長いゼーマン冷却用コイルが必要になる。

ゼーマンシフトによってドップラーシフトを補償しながら原子を減速させていく為の磁場の形状は以下のように求まる。いま原子がz軸上を原点から正の方向に向かって運動しているとする。原子が一定加速度で減速されながらz=lに到達した時に速度がv=0となるならば、位置と速度の関係は

$$v = \sqrt{2\alpha(l-z)} \quad \dots(1)$$

となる。遷移エネルギーのドップラーシフト量は速度vの関数である。

$$\Delta E_{doppler} = \hbar kv = \frac{h\nu}{\lambda} \quad \dots(2)$$

一方、ゼーマンシフト量は磁場の大きさの関数であり、磁気量子数 m_l の準位から磁気量子数 m_l' の準位への遷移の場合には、

原子	$^4\text{He}^*$	$^{20}\text{Ne}^*$
原子質量 (kg)	6.64×10^{-27}	3.32×10^{-26}
自然幅 γ (MHz)	1.6	8.2
吸収・放出の1サイクルに要する時間 2τ (ns) $\tau = 1/\gamma$	2×100	2×19.5
原子の受ける減速度 $a = \frac{h}{2\pi m \lambda}$ (m/s ²)	4.6×10^5	8.0×10^5
原子の初速度 $v = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$ (m/s) (300Kでの最確速度)	1100	500
停止までに要する時間 $t = 2\tau v$ (ms)	2.4	0.63
停止距離 $l = \frac{1}{2} v t$ (cm)	135	15.6
遷移波長 (nm)	1083 ($2^3\text{S}_1 - 2^3\text{P}_2$)	640 ($1\text{S}_5 - 2\text{P}_9$)

表1 ヘリウム原子とネオン原子のレーザー冷却に関する各諸量

$$\Delta E_{zeeman} = \mu_B (m_u g_u - m_l g_l) B(z) \quad \dots(3)$$

となる。ここで、 μ_B はボーア磁子、 g_u, g_l はランダウの g 因子である。

式 (1) ~ (3) より、ゼーマンシフト量がドップラーシフト量を補償し、

$\Delta E_{doppler} = \Delta E_{zeeman}$ が保たれるような磁場の形状は、

$$B(z) = \frac{h}{\mu_B (m_u g_u - m_l g_l) \lambda} v = \frac{h}{\mu_B (m_u g_u - m_l g_l) \lambda} \sqrt{2\alpha(l-z)} \quad \dots(4)$$

で与えられる。本研究のヘリウムの場合、 $m_u g_u - m_l g_l = 1$ となるので

$$B(z) = \frac{h}{\lambda \mu_B} \sqrt{2\alpha(l-z)} \quad \dots(5)$$

である。また、レーザーパワーが飽和光強度に比べ十分に大きい時、レーザー光による原子の減速度は

$$\alpha \cong \frac{h\Gamma}{\lambda m} \quad \dots(6)$$

で表せる。今回、我々は約 30 cm だった以前の coils に約 1 m の coils を付け足して全体のゼーマン coils の長さを約 140 cm にすることにした。この場合、上記の式を用いて我々はゼーマン coils の入り口の磁場を 400 Gauss にして初速 600 m/s 以下の原子をトラップできると見積もった。

[装置の製作]

・ He 放電管の製作

レーザーの周波数を安定化させるために飽和分光法を用いるので、飽和吸収曲線を取り出すために He の放電管を製作した。先にも述べたように、He は希ガスなので放電で励起させる必要がある。以前に用いていたネオンも同様だったので、その時のセルと同様に製作したところ、わずか 1 日程で放電しなくなったので少し改良して製作しなおした。(図 2)

< 改善点 >

1 : 陰極側の電極を大きくした。これによって高いエネルギーを持つイオンがガラス管の壁に衝突して不純物を叩き出すのを防ぐことができる。また、放電を開始する電圧も下げることができる。He-Ne レーザーの内部も同様な仕組みになっている。

2 : 製作の際、He 気体を封入する前に 400 °C で 24 時間ベーキングした。これによって元々のガラス管内

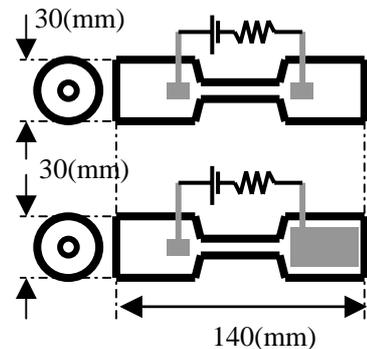


図 2 He 放電管

部の不純物をできる限り取り除き、He の純度を上げることができる。
 また、この他の変更点としては He 気体の充填圧力はネオンの約 0.5Torr から約 1.2Torr となった。これは 1kV で放電するように製作した為である。これによって現在は間に 23M の抵抗を入れて、放電電流約 44 μ A で使用している。このように製作した He 放電管は半年以上が経過しても放電を続け、まだ使用可能な状態である。

・ゼーマンコイルの延長

以前にも述べたように、今回新たに約 1m のゼーマンコイルを以前に使用していたものに付け足してコイルの全長を約 140cm にした。(図3) これに、予め計算して求めた磁場になるように電流を流して、実際に磁場を測定した結果を図4に示す。

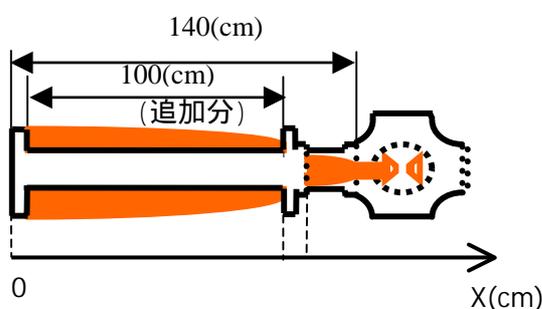


図3 ゼーマンコイル

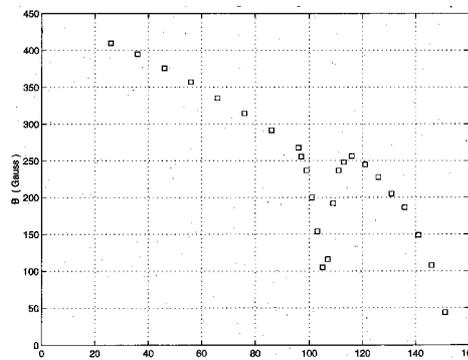


図4 磁場分布の測定

[実験]

・光学系

レーザーは市販の半導体レーザーを用いており、1083nm の光をシングルモードで発振する最大 50mW のレーザーである。この光を同じく市販の Yb ファイバーアンプに入力し、増幅させる。この増幅器は最大 2 W までの光を出すことができる。実験では出力は約 200mW で用いた。この光を 40MHz の音響光学素子(AOM)に通して、その+1 次光を $^3S_1-^3P_2$ の共鳴線にロックすることにより、-40MHz に離調された 0 次光を cooling 光と trap 光として用いた。レーザー周波数をロックするために前節で述べた He 放電管を用いて検出した飽和吸収曲線の dip とそれをもとに lock-in-amplifier から得られた微分信号を表示させたものを図5に示す。微分信号の極値間の幅は約 70MHz であり、真ん中に見えるノイズの乗った線が飽和吸収曲線である。He はドップラー幅が非常に大

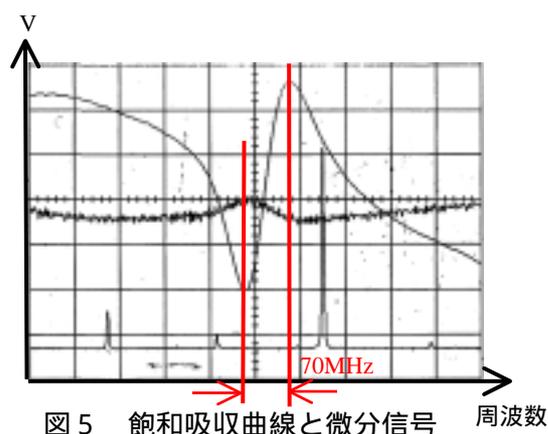


図5 飽和吸収曲線と微分信号

きく(300Kで約5.2GHz)衝突幅も大きい。レーザー周波数の安定度は約2MHz程度である。

・実験装置

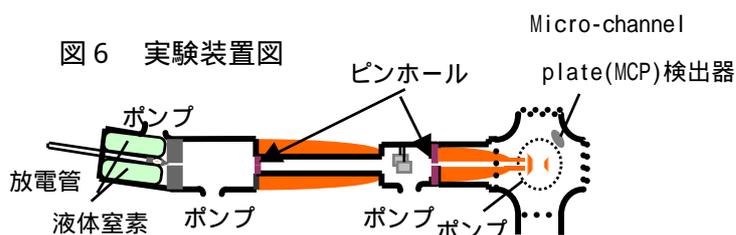
図6は実験装置の概略図である。装置の全長は約320cmであり、合計4台のポンプで排気して高真空を保っている。さらにピンホールを2枚入れて真空度の向上を図っている。また、2枚の金属板の電極を入れることによって電場を作りだし、放電管から飛来してくる粒子のうちイオンや電子を偏向させてMOTチャンバー内へ進入するのを防いだ。MOT生成の観測手段としては、1083nmの光を肉眼で観測するのは不可能なのでmicro-channel-plate(MCP)検出器を用いることにした。仮にMOTが生成されたとすれば、MOT内で準安定状態 He^* の密度が上昇し、 He^* どうしが衝突してペニングイオン化($\text{He}^* + \text{He}^* \rightarrow \text{He}^+ + e^- + \text{He}$)を起こす。これによって生成された He^+ は、表面が負に印加されたMCPに衝突してMCP内部に電子を叩き出し、光電子増倍管によって増幅された電子を電流として検出し、Amp.を通してphoton-counterでこの信号を観測する。MOTが生成されていない場合、まっすぐに飛来してきた He^* が装置正面のガラス窓に衝突して He^* を生成するため常に信号は見られるが、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。

・MOT生成の試み

以上に述べたような装置でMOTの生成を試みた。放電管から最初のピンホールまでの間の真空槽の真空度は約 2×10^{-7} になるように放電電圧を調整した。これは以前にネオンのMOTを生成していた時と同じ値である。またMOTチャンバー内の真空度は約 2×10^{-8} であった。電極には-160Vの電圧をかけることによってphoton-counterの値は半減したので充分効果があったと思われる。カウント数はだいたい毎秒数百個だった。この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photon-counterの信号が急激に上昇する値を探した。またそれと同時にコイルに流す電流を少し増減させたり、光学系を微量ずつ動かしてみた。しかしながら、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。

・原子ビームの測定

MOTの生成ができなかったので、放電管からどれくらいの He^* がどのような速度分布で飛来してきているのかを測定することにした。長さ20mm、内径25mmのアルミ筒の底にステンレス製のアンテナ(長さ20mm)を取り付けたフ

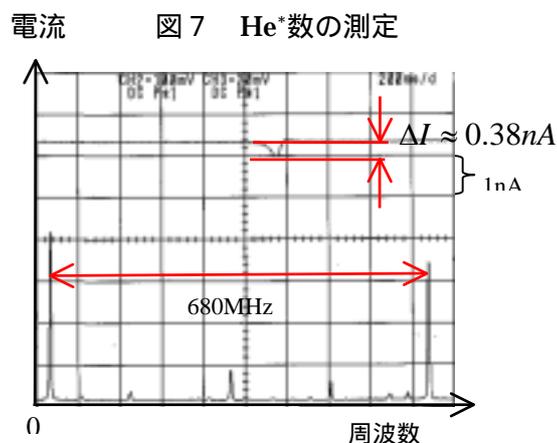


ファラデーカップを製作して、電極の後に設置しアンテナに正の高電圧をかけて、アルミ筒にはピコアンメーターを取り付けた。放電管から飛来してくる粒子にはイオン He^+ 、電子 e^- 、準安定状態 He^* 、基底状態の He が考えられる。もし He^* がファラデーカップに衝突すれば高いエネルギーを持っているので、 e^- を放出して He^+ になる。 e^- はアンテナに吸い寄せられ He^+ はアルミに吸い付きピコアンメーターに正の電流を流す。もともと飛来してくる He^+ は電極に負の高電圧をかけることでファラデーカップに衝突するのを防ぐことができる。基底状態の He がファラデーカップに衝突しても運動エネルギー程度しか持っていないのでイオン化は起こらず電流は検出されない。

1: He^* 数の測定

原子ビームに対して垂直にレーザー光を照射して周波数を共鳴付近でゆっくりとスキャンすると、周波数が共鳴に一致した付近でファラデーカップの検出する電流が減少する。この減少分を I とすれば、原子ビーム中の He^* の個数は最低でも I/e と見積もることができる。この測定で得られた信号を図7に示す。下に周波数マーカーとしてエタロンの信号を表示させている。定常的に流れていた電流は約 6.4nA であり、これより見積もった He^* の個数は 2.4×10^9 個/s であった。

図7 He^* 数の測定



2: 速度分布の測定

今度は2本のレーザー光を原子ビームに対して照射する。1本は原子ビームに対して垂直に、もう1本は角度 θ をつけて照射すると電流が減少する所が2箇所現れる。この2つの電流減少ピーク間の距離 $\Delta\omega$ がドップラーシフト $\Delta\omega = kv\cos\theta$ である。この測定で得られた信号を図8に示す。図7と同様に周波数マーカーとしてエタロンの信号を下に表示させてある。測定は $\theta = 87^\circ$ で行った。これより見積もられた He^* の最確速度は 970m/s だった。また、これを温度に換算すると約 230K となり、原子の初速度を下げるための液体窒素が十分に働いていることが解る。

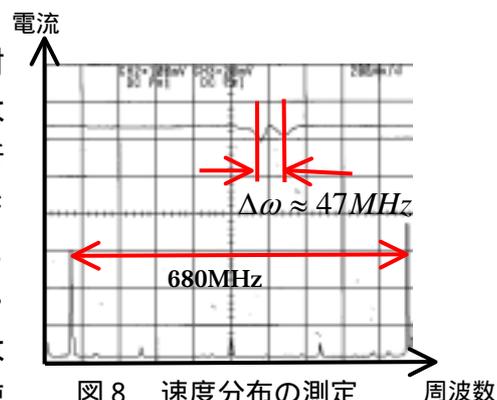


図8 速度分布の測定

[まとめ]

以前にネオンのMOTを生成していた装置を改造してヘリウムのMOT生成用の装置を製作した。また、原子ビームの特性を測定した。現在もヘリウムMOTの生成に向けて努力中である。