

ヘリウム原子のレーザー冷却・トラップの研究

量子・物質工学科 清水和子研究室 亀山 喬史

1. 目的

我々の研究室では、レーザー冷却により超低速に減速した準安定状態のヘリウム原子のビームを用いた固体表面における量子反射を測定、観察を行いヘリウム原子と固体表面の相互作用を見ることにより、原子の波動性の証明、Van der Waals 相互作用における r^{-3}, r^{-4} 項などの係数の決定、固体表面の構造の観察などが出来ると考えている。また、トラップした準安定ヘリウム原子の散逸の時定数による極高真空状態の評価も予定している。

本卒業研究ではこの第一段階である準安定ヘリウム原子の磁気光学トラップの生成を目的とした。

2. 実験内容

- 2-1. DC 放電により準安定状態のヘリウム原子(He^*)を生成する。
- 2-2. ディフレッタによりトラップ領域に飛んでくる He^* の数を増やす。
- 2-3. ゼーマン減速法により He^* を減速し、MOT により原子を捕獲する。
- 2-4. トラップした原子を下方に叩き落とし MCP を用いて原子を観測する。

3. 原理

3-1. ディフレッタ

He^* は DC 放電により生成されるが、生成効率は約 0.1% 程度と悪くそのほとんどは基底状態のヘリウム原子になる。基底状態のヘリウム原子がトラップ領域にとんでくる場合、それらは残留ガスとなり He^* と衝突して底状態に落としてしまう。これを防ぐ為にディフレッタを用いて選択的に準安定ヘリウムの進行方向を曲げ、トラップできる原子を増やしている。また、ディフレッタを用いることで準安定ヘリウム原子の横方向への広がりを押さえて軌道を平行化することができ、効率良く冷却を行うことができる。

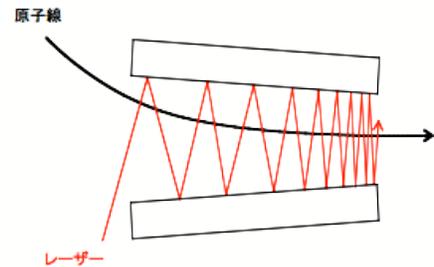


図 1. ディフレッタの構造

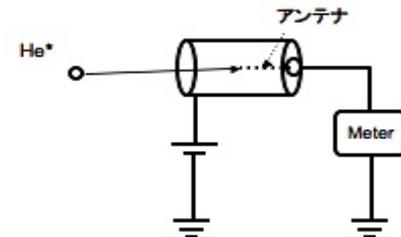


図 2. ファラデーカップの構造

ディフレクターの効果は、ファラデーカップを用いて確認する。高エネルギーの準安定ヘリウム原子がファラデーカップに衝突すると、イオン化を起し、電子とヘリウムイオンが放出される($\text{He}^* \rightarrow \text{He}^+ + e^-$)。アンテナに正の電圧をかけておくと、電子はアンテナに吸い寄せられカップには He^* による電流が流れる。この電流を微小電流計でモニターしオシロスコープに表示している。オシロスコープの横軸がスペクトルに相当し、谷になっているところが最も多くの He^* が発生している周波数であることを示している。



図 3. ファラデーカップの信号

3-2. 冷却の原理

原子を減速し冷却する手段として、ゼーマン同調法を用いた。レーザー冷却に用いる準位はヘリウム原子の $2^3S_1 \leftrightarrow 2^3P_2$ の閉じた遷移であり遷移波長は 1083nm ($\Gamma \approx 1.6[\text{MHz}]$)である。DC 放電により準安定ヘリウム原子(He^*)を生成($2^1S_0 \leftrightarrow 2^3S_1$)しトラップ領域に向けて飛ばす。ここに冷却遷移に共鳴した σ^+ 偏光の光を飛んでくる原子に対向するように照射すると、放電部から放出されたとき均等に分布している原子の磁気量子数が光ポンピングにより上準位 $m_j=2 \leftrightarrow$ 下準位 $m_j=1$ に偏る(図4)。 He^* は光子から進行方向とは逆向きの運動量を受け取り減速し始める。(図5)

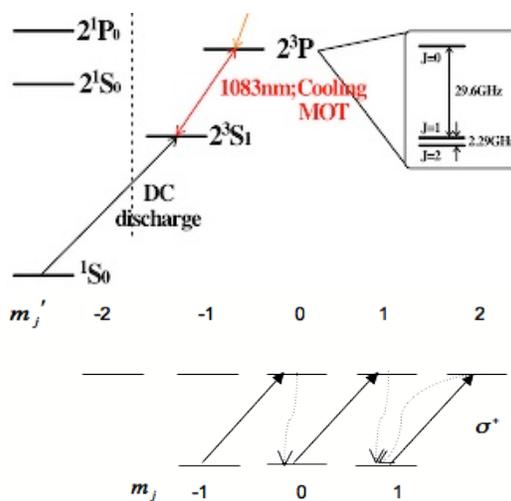
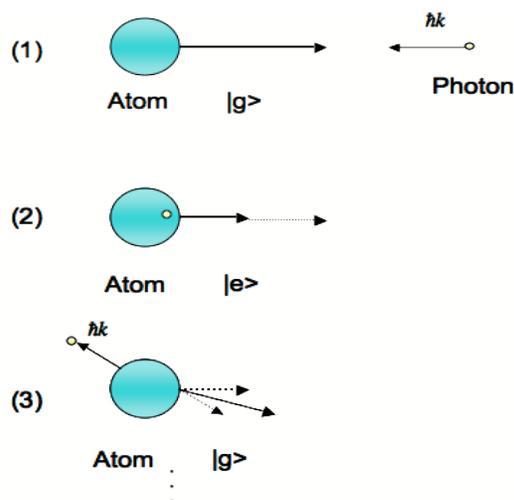


図 4 He 原子のエネルギー準位

さらにこのとき準安定ヘリウム原子のドップラーシフトのため正面から対抗してくる光の波長を短く感じる。このドップラーシフトによって継続的に冷却が出来なくなるので、レーザーが原子の共鳴周波数からずれないようにするために位置により磁場の大きさが変化するよう設計されたコイルを用い、放電部からトラップ領域までの各点におけるドップラーシフトを補正をしている。



3-3. 磁気光学トラップ

減速された原子は、トラップ領域では 4 重極磁場と 3 本のトラップレーザーを用いて捕獲する。トラップレーザーと冷却光は飽和吸収セルに磁場を掛けることで共鳴周波数よりも低く離調している。レーザーの周波数を低く離調することで、例えば、図 6 のように右方向に進行する原子に対向して σ^- 偏光、進行方向と同じ方向から σ^+ 偏光を入射したとき、 σ^- を吸収し上準位 $J=1$ へと遷移する確率が高く正面から対向してくる光をより多く吸収しトラップの中心方向へと力を受ける。図 6 で左向きに速度を持つ原子については、逆に σ^+ を吸収する確率が高くなるのでやはり中心方向へ力を受ける。

この力の影響下では、トラップの中心付近で原子の運動は減衰調和振動になる。このとき原子に掛かる力は

$$F \approx \frac{4\hbar k(I/I_0) \cdot (2\delta_L/\Gamma) \cdot (kv + \beta z)}{[1 + (2\delta_L/\Gamma)^2]} \quad (\because kv, \beta z \ll \Gamma)$$

であり、運動方程式は原子の進行方向に z 軸をとると

$$\ddot{z} + \gamma \dot{z} + \omega_{trap}^2 z = 0$$

となる。今、我々の実験条件では、 $2\delta/\Gamma = 5$ 、 $k = 2\pi/1083[\text{nm}]$ 、 $m = 6.67 \times 10^{-27}[\text{kg}]$ 、 $I/I_0 = 20$ 、MOT の地場勾配が $40[\text{G/cm}]$ であるので $\beta = 28[\text{MHz/cm}]$ 、以上より

$$\frac{\gamma}{2\pi} = 49.8[\text{kHz}], \quad \frac{\omega_{trap}}{2\pi} = 1.9[\text{kHz}]$$

となり過減衰気味に力が働いていることが分かる。また、このときのトラップポテンシャルは $U_{trap} = \frac{1}{2} m \omega_{trap}^2 z^2 = k_B T$ であるので、トラップの中心から 0.5cm のところでの深さは、

$$U_{trap} \approx 906[\text{mK}]$$

となる。

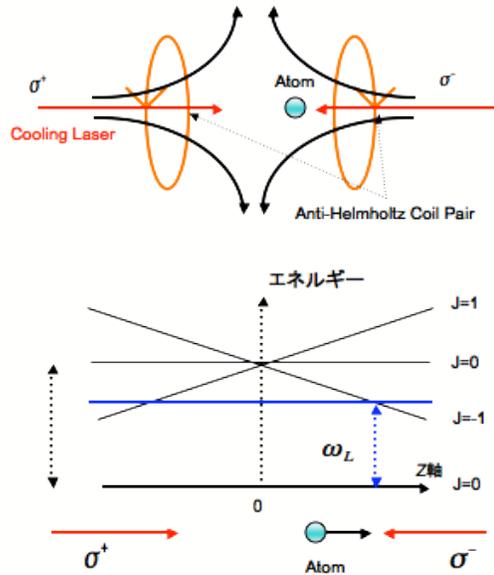


図 6 一次元 MOT

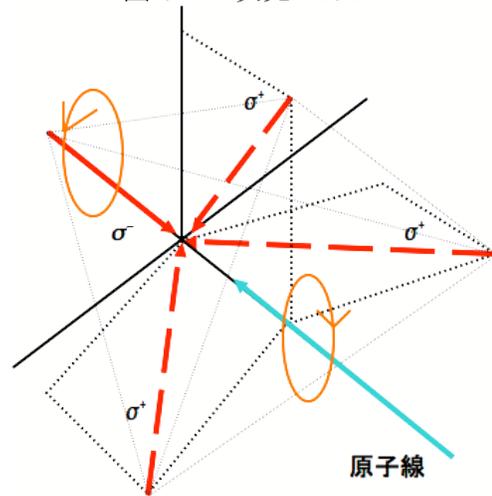


図 8 3次元 MOT の構成

4. 課題

課題には以下の点が上げられる。

- 4-1. MOT レーザーの出力の安定化
- 4-2. トラップ光のアライメントの安定化(ファイバーを用いた伝送)
- 4-3. 高出力 ECLD の周波数安定化
- 4-4. 放電の安定化

レーザーの安定化については MOT のレーザー系にあるアイソレーター(IO-5-YAG-HP)を取り除くと出力が安定することから、このアイソレーターに出力の時間変動の原因があるとみてアライメントを試みている。これが改善された後、ビームの広がりを抑える為にファイバーを用いて冷却レーザーを伝送できるかを検討する。

放電については、放電管の先端を整形し直し準安定ヘリウム原子が放出される様に修正した。先端にはサファイアの結晶を用いているが、現在はシリコングリスで接着しているので、試験的に放電をして問題ないかを検討する。

ECLD の安定化には、温度・電流の管理、グレーティングの調整を行い実現を目指している。