

ゼーマン効果によるレーザー周波数の安定化

電子物性工学科

清水(和)研究室

伊東 嗣音

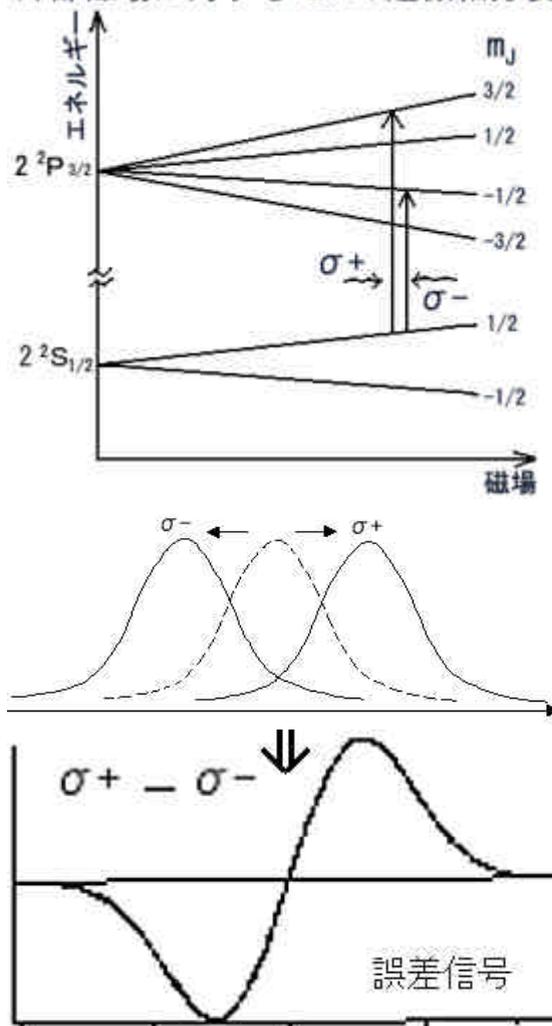
1. 実験目的

本研究の目的は、Li 原子のトラップに使用するレーザーの周波数を安定させることである。

2. ゼーマン効果を利用した誤差信号

誤差信号はドップラー吸収信号をゼーマン効果によって分離させ、その差をとることで発生させる。この誤差信号で安定化を行った時の利点は、ドップラー吸収を用いることで捕捉範囲が広くなり、周波数のロックが外れにくいことである。さらに、光学的または電気的にオフセットを加えることで周波数をシフトさせることができる。

外部磁場に対する⁷Liの超微細分裂



ゼーマン効果とは、原子のエネルギー準位が磁場をかけることで分裂することである。分裂した準位のエネルギー間隔の変化は、かけた磁場の大きさに比例し、 $E = \mu_B B$ となる (μ_B : ボーア磁子)。遷移の起こる準位間のエネルギー間隔が変化したことによって、共鳴の起こる周波数がシフトする。下準位から上準位への遷移は、 σ^+ 偏光を入れた場合は $m_J = +1$ 、 σ^- 偏光の場合は $m_J = -1$ の遷移しか起こらない。ドップラー吸収の中心周波数は σ^+ 偏光と σ^- 偏光とでは逆方向にシフトする。この原理を利用して、逆方向にシフトした二つの吸収信号を出し、その差をとることで誤差信号が得られる。

なお、図には例として $2s$ の $1/2$ から $2p$ の $-1/2$ と $3/2$ への遷移を表記している。

3. 振幅吸収定数

体積 V 中に含まれる原子の数 N は理想気体の状態方程式より

$$N[\text{個}] = n N_A = P V N_A / R T \quad \dots (1)$$

ただし、 N_A : アボガドロ定数、 R : 気体定数、 P : 気体の蒸気圧、である。

気体の蒸気圧を求める式は、

$$\text{Log } P = -A / T + B + C \text{Log } T + 2.125 \quad \dots (2)$$

と表される。ただし、 P : 蒸気圧、 T : 絶対温度、 $A \cdot B \cdot C$ は元素固有の値で、 Li の場合は $A = 8415$ 、 $B = 11.34$ 、 $C = -1.0$ である。

振幅吸収定数 は次のように表される。

$$a \cong \frac{(N_L - N_U) e^2}{4 e_0 m c} \times \frac{g}{(w - w_0)^2 + g^2} \quad \dots (3)$$

N_L は下準位の原子数、 N_U は上準位の原子数、 $1 / \tau = 2g$ (τ : 自然寿命 [Li : 27.2nsec]) で、 w はレーザーの周波数、 w_0 は原子の共鳴周波数である。

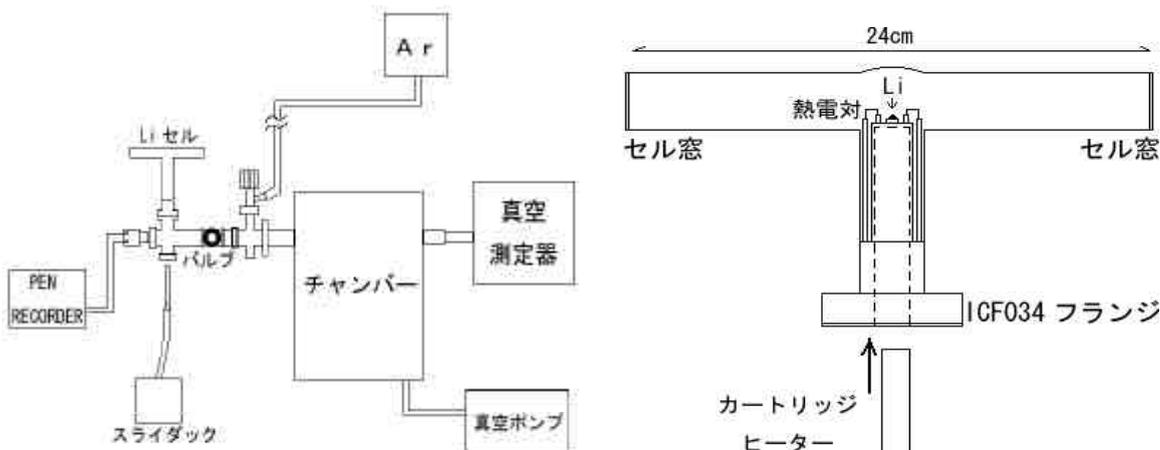
$N_L - N_U$ は高周波(光)または低温のとき、 N_L と近似でき、上式は次のように変形できる。

$$a \cong \frac{N_L e^2}{4 e_0 m c} \times 2t \quad \dots (4)$$

振幅吸収定数は、(4) 式の N_L に (1) 式で求めた N を代入して計算する。

4. Li 気体セルの製作

真空にされたパイレックスセルには、 Li がセルに付着するのを防ぐために 50mTorr の Ar バッファガスが入れられる。 Li 金属は中央の銅棒に取り付けられ、点線部分の空洞から銅棒にカートリッジヒーターを差し込んで加熱し、スライダックで温度を調節する。セル内の温度はクロメル - アルメル熱電対で測定し、ペンレコーダーに記録される。

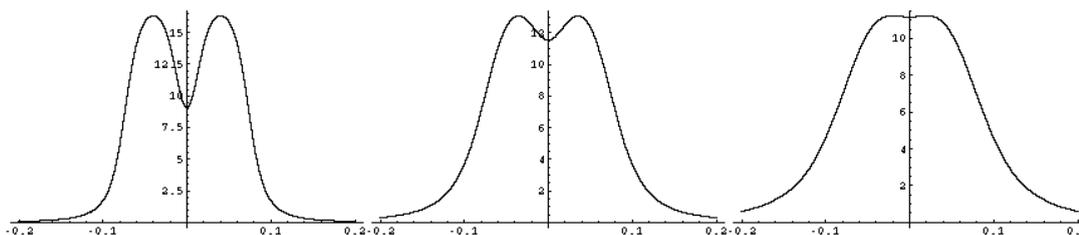


実験に使用する時はバルブを閉じ、バルブのチャンバー側から先を切り離して他の装置に固定し、使用する。

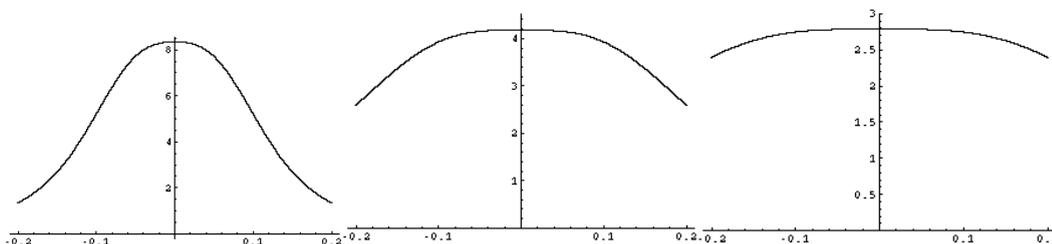
5. 一様な磁場を発生させるためのコイルの製作

磁場の大きさは分裂させる微細構造のエネルギーの間隔（つまり吸収信号のシフトの度合い）に影響するので、ロックしやすい誤差信号を得るためには一様な磁場が要求される。また、吸収が起こりやすいのは、一番蒸気圧が高いセルの中心付近である。ここでは、セルが T 字型であることを前提に、セルの中心付近にできるだけ長い範囲で一様な磁場を発生させることを考える。

両側からソレノイドコイルを取り付ける方法と、ヘルムホルツコイルを使用する方法を計算値で比較した。



ソレノイドコイルの磁場分布グラフ（縦軸：磁束密度[Gauss]、横軸：セルの中心からの距離[m]）、セルの中心から 1.2 cm の部分から外側に向けて 2 mm 直径の銅線を隙間なく 30 回巻いたコイルに、電流 3 A を流す。コイルの半径は、左から 2 cm、4 cm、6 cm。



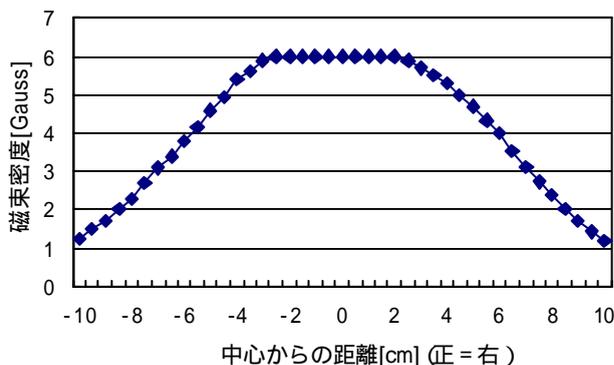
ヘルムホルツコイルの磁場分布グラフ（縦軸：磁束密度[Gauss]、横軸：セルの中心からの距離[m]）、直径 2 mm の銅線で 30 回巻きのヘルムホルツコイルに電流 3 A を流す。コイルの半径は左から 10 cm、20 cm、30 cm。

この 2 つのコイルの計算値より、サイズと電流が比較的小さくてより大きな磁場を得られるソレノイドコイルを作製し、実験に使用することにした。

右のグラフは、実際に作成したコイル（半径 5.5 cm、銅線の直径 1.6 mm、25 回巻）を動作位置に固定し、1.5 A の電流を流して、中心軸上の磁束密度の大きさを測定したものである。

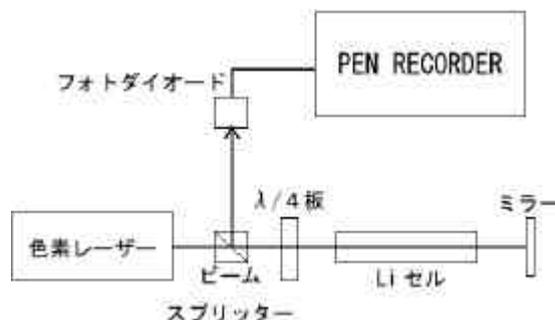
セルの中心付近に約 4.5 cm の範囲で磁場が一様になっていることがわかった。

コイルの磁場分布



6.飽和吸収測定実験

実際の温度と吸収の度合いを計算値と比較するために、図のような装置を用いてセルにレーザーを通しながらセルを加熱し、吸収と温度を測定した。



7.実験結果

熱電対が 4.5mV (405K) を示したあたりから、セルの中心に約 6 cm にわたって共鳴光が観測できた。レコーダーで記録された吸収によると、443K で 7% の吸収が見られた。計算値では、443K では蒸気圧が低く、吸収は起こらないという結果になった。

8.考察

熱電対が内部のどこかに接触することがあるため、正確な温度を常時示すことができていないことが考えられる。セルを外部から軽い衝撃を加えると、ペンレコーダーの温度を示す針が触れるので、熱電対による温度測定の不確かさを考慮に入れる必要がある。

9.まとめ

- ・ 作製したコイルに電流を流すことによって発生する磁場の大きさが一様な範囲は、2つのコイル間の中心部に約 4.5 cm であり、共鳴光が見られた範囲はセルの中心付近に約 6 cm である。よって、セルの中心付近に約 4.5 cm の範囲で共鳴周波数のシフトを起こすことができると考えられる。
- ・ Li の蒸気圧を高めるためにセル内の温度を上げすぎると、アルゴンバッファガスを入れていても壁面に Li が付着してしまうことが実験からわかった。Li が付着した壁面は黒くなり、セル内部の観察が困難になる。しかも、高温はセルの寿命を縮めるため、できるだけ低温で動作させることが好ましい。したがって、セル内の温度を正確に測定できるように改善することが今後の課題になる。