

# カリウム原子のレーザー冷却用光源の開発

量子・物質工学科 0223016 豊永匡利

## 1 背景・目的

本研究室では $^{40}\text{K}$ によるフェルミ縮退の生成を目指している。フェルミ粒子は同一スピン状態では高い密度においても原子間相互作用がなく、干渉計等への応用において有利となる面が大きい。しかし原子間相互作用が無いということは粒子同士の衝突が無いことを意味し、フェルミ粒子単体では極低温への冷却が難しい。したがってこの問題を解決するためにボーズ粒子に $^{87}\text{Rb}$ 、フェルミ粒子に $^{40}\text{K}$ を用いた共同冷却を行う必要がある。本研究ではそのために必要なカリウム原子のレーザー冷却用光源の開発を目的とした。

## 2 方法

カリウムには $^{39}\text{K}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{41}\text{K}$ の3つのアイソトープが存在する。このうち $^{39}\text{K}$ と $^{41}\text{K}$ はボーズ粒子であり、 $^{40}\text{K}$ はフェルミ粒子である。これらの粒子の自然界での存在比率は $^{39}\text{K}$ (93.25%)、 $^{41}\text{K}$ (6.73%)、 $^{40}\text{K}$ (0.0012%)でありフェルミ粒子である $^{40}\text{K}$ は自然界にはほとんど存在しない。この状態でカリウムの飽和吸収線を表した図が図1である。

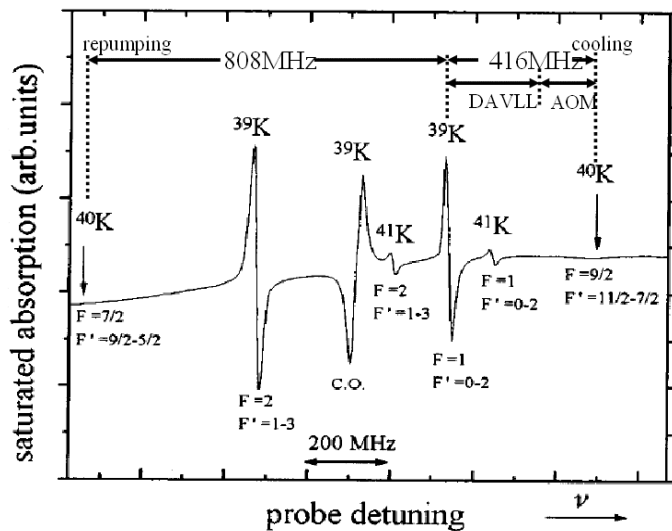


図1、カリウムの飽和吸収線図 [1]

これまで、飽和分光を用いた周波数安定化法としては図1の $^{39}\text{K}$ のような飽和吸収線のディップを基にロックインアンプを用いてこの微分信号を取り出し、この信号を誤差信号としてピエゾヘフィードバックをかける方法が主にとられてきた。しかし今回安定化を目指す $^{40}\text{K}$ の自然界での存在比が極めて低いため $^{40}\text{K}$ のディップが確認できず、このままでは安定化を行うことができない。特別に $^{40}\text{K}$ の存在比の大きいセルを用いて直接 $^{40}\text{K}$ の共鳴周波数域で安定化を行うことも可能だが、今回はこのままの存在比で周波数安定化を試みる事とした。

おおまかな方針としては、大きな吸収信号の期待できる $^{39}\text{K}$ ( $F=1 \sim F=0-2$ )を基準に DAVLL法[2]と AOM を用いて $^{40}\text{K}$ ( $F=9/2 \sim F=11/2-7/2$ )の共鳴周波数域まで周波数をシフトさせ安定化を実現するものとなる。DAVLL 法については後に述べる。

この間の周波数差は 416MHz あり、光の制御のために使用する AOM にて 200MHz、残りの

216MHz を DAVLL を用いてシフトさせた領域で安定化させることにした。

## 2.1 DAVLL(Dichroic Atomic Vapor Laser Lock) [2]

DAVLL 法とは、磁気サブレベルをもつ準位に磁場をかけるとゼーマン効果により図2のように準位の縮退が解けることを利用し、縮退の解けた準位に共鳴する光の吸収信号の差分を取ることにより安定化に必要な誤差信号を得るものである。この時のエネルギーシフト量は次式で表される。

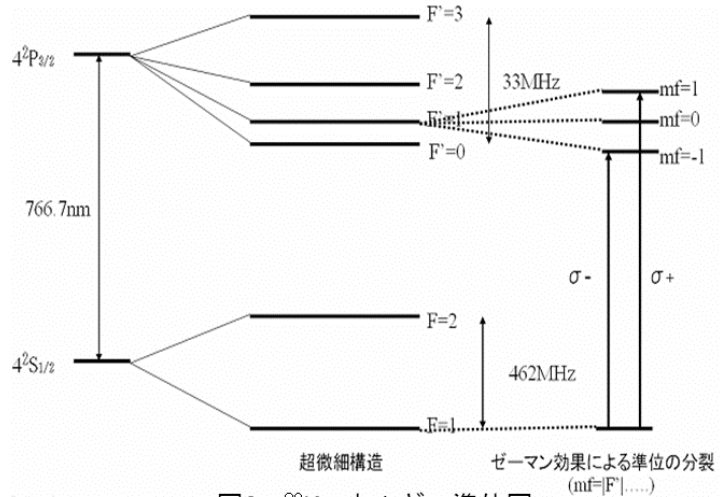


図2、<sup>39</sup>Kエネルギー準位図

$$\Delta E = g_F \mu_B m_F B$$

$g_F$  : Landeのg因子  
 $\mu_B$  : ボーア磁子

原子に共鳴する光の円偏光の向きによって原子のもらう角運動量は異なり +の光で原子は  $mF=+1$  の準位へ、 -の光で  $mF=-1$  の準位へ励起される。これは +は正の -は負の角運動量を持っているためこの光を吸収すると原子にその角運動量に移る。この状態を吸収線で見たとのが図3である。

+と -の光で得られた吸収信号はそれぞれ図3の(c)(b)となりこの2つの信号の差を取ったものが(d)となり、この差分信号を基に安定化を行うことができる。

この方法で安定化を行う利点は、オフセットを変化させることにより図3(d)の差分信号幅内において任意の周波数域で安定化を行うことができる点にある。さらにこの差分信号は +と -のドップラーの差分を基にした信号であるため図3(d)の peak to peak の幅は <sup>39</sup>K のドップラーの半値全幅に近い広さがある。これはドップラーの中心から非常に幅広い領域での安定した周波数の選択ができることを意味する。

この時の差分波形は <sup>39</sup>K のドップラー幅に比

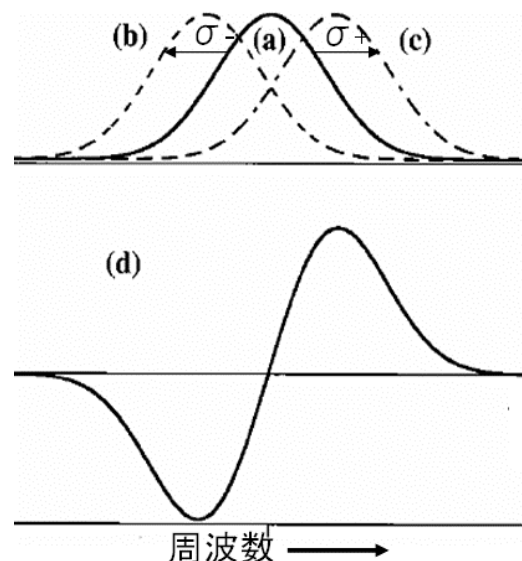


図3、(a) <sup>39</sup>Kの吸収線  
(b)  $\sigma^-$  偏向のゼーマンシフトした吸収線  
(c)  $\sigma^+$  偏向のゼーマンシフトした吸収線  
(d) (b)と(c)の差分を取ったときの信号

ベゼーマンシフト量が十分小さい時、ガウス関数の微分波形と近似できる。ガウス関数の半値半幅(HWHM)とそのガウス関数の微分波形の比は次のようになる。

$$\text{HWHM} : a = 1 : 1/(2\ln 2)^{1/2} \quad (\text{式 1})$$

また  $^{39}\text{K}$  のドップラー広がり  
の半値半幅(HWHM)は式 2 で表され、  
式 1 と式 2 より図 3 (d) の中心か  
らピークの幅は 340MHz(peak to  
peak:680MHz) と見積もることが  
できる。

$$\Delta\nu = \nu \left( \frac{2 k_B T \ln 2}{mc^2} \right)^{1/2}$$

$\lambda$ : レーザーの波長  
 $k_B$ : ボルツマン定数  
 $T$ : 温度  
 $m$ : 原子の質量

式2、ドップラー 広がり の半 値半 幅

さらに、オフセットの変更は 2 つのディテクターから来る電圧の比を変化させることにより行うこととした。

## 2.2 実験

作成した装置の概略図は図 4 の通りである。LD から出た光は磁場のかけたカリウムセルを通過し  $\lambda/4$  板で直線偏光から円偏光にした後、ポラライザで + と - の光に分けそれぞれのディテクターで光を検出する。検出された 2 つの信号の差を取り、作成した制御回路によってピエゾへフィードバックをかけている。

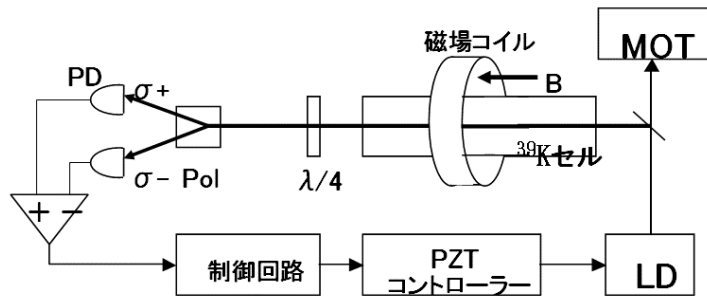


図4、装置概略図

この時、カリウムは常温ではセル内に固着してしまうのでセルは約 50  $^{\circ}\text{C}$  に保たれている。磁場は 70G にて実験を行った。

## 3 結果

実験の結果得られた差分信号は図 5 の通りである。差分信号のピーク幅は 680MHz、電位差は 20mV である。

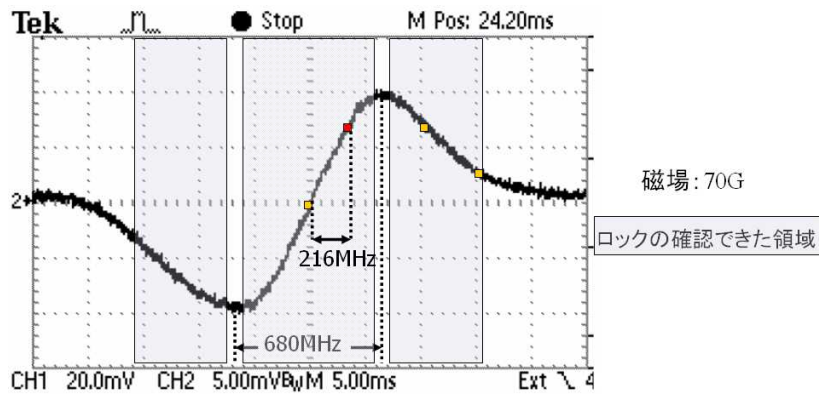


図5、差分信号

今回 DAVLL に要求される周波数シフト量、すなわち  $^{39}\text{K}$  ( $F=1 \sim F=0-2$ ) のドップラーの中心から 216MHz シフトされた周波数域(図 5 の赤点)で安定度の評価を行った結果は図 6 の通りである。この図は実際の信号を約 50 倍に増幅したものである。

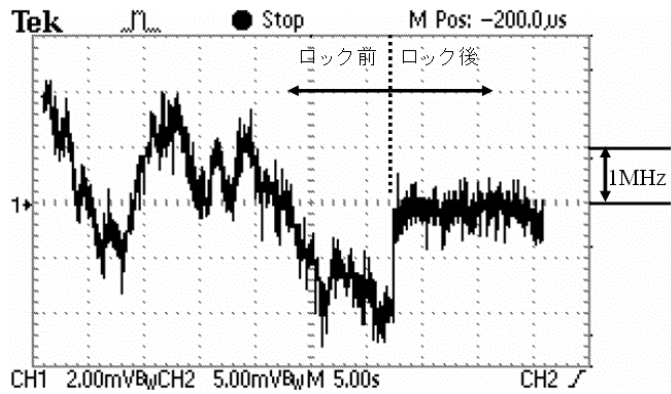


図6、216MHz付近でのエラーシグナルの変化

これにより図 5 の傾きから図 6

より安定化後の周波数ゆらぎが 1.1MHz 程度に抑えられていることが分かった。

同様の実験を図 5 の黄点で行った結果は次のようになった。

中心からの距離	0Hz	216MHz	570MHz	850MHz
安定度	1MHz	1.1MHz	1.5MHz	1.1MHz

#### 4 まとめ

- ・ DAVLL にて 0Hz ~ ±850MHz(差分波形のピーク付近を除く)の領域で周波数安定化に成功した。

- ・ 今回の目的であるドップラーの中心から DAVLL にて 216MHz 程度シフトさせた領域で 1.1MHz 以内の周波数安定化に成功した。

#### 5 今後の展望

実際に MOT を組みの  $^{40}\text{K}$  光が正確に得られているかの評価を行い、カリウム、ルビジウム の同時トラップ、 さらに  $^{40}\text{K}$  のフェルミ縮体の生成を試みたい。

#### 参考文献

[1]F. S. Cataliotti: “ Magneto -optical trapping of Fermionic potassium atoms ” 1998 The American Physical Society

[2]Kristan L. Corwin: “ Frequency stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor ” 20 May 1998

APPLIED OPTICS (Vol. 37, No. 15)