

冷却 Rb 原子によるラマン遷移測定と原子干渉計への応用

電子物性工学科 中川研究室 中島 弥磨雄

1.背景

当研究室では、重力測定などを目的とした原子干渉計の製作を進めており、その干渉信号は誘導ラマン遷移を用いて測定する。この測定の為に、干渉計全体の制御や信号測定系が必要となる。

2.目的

PC で干渉計全体の制御・測定が同時に行えるような系を製作する。そしてこれらを利用し、実際にラマン遷移の測定を行う。

3.ラマン遷移の原理

図1のように、冷却原子に対し、誘導放出光と誘導吸収光を照射することにより、原子のエネルギー状態が図2のようにF=2からF=1へと移る誘導ラマン遷移が起こる。今回の実験では、この誘導吸収光の周波数を掃引し、その透過光強度を測定する。

ここで、予想される信号の幅を計算より求める。誘導放出光、誘導吸収光の周波数をそれぞれ ω_s 、 ω_M 、そしてF=2とF=1の周波数差を ω_{hfs} とし、ここで、次のような d を定義する。

$$\omega_s - \omega_M = \omega_{hfs} - d \quad (1)$$

また、冷却原子におけるラマン遷移吸収信号がピーク値を取るとき d の値は、

$$d = \frac{\hbar(k_M + k_S)^2}{2m} + v(k_M + k_S) \quad (2)$$

より求まる。但し v は

$$v = \sqrt{\frac{2k_B T}{M}} \quad (3)$$

である。全ての原子のエネルギー状態がF=2に揃い、冷却原子の温度は $20 \mu\text{K}$ になっていると仮定し、(1)式より d を計算すると、 70kHz と求まる。また、その半値全幅はおよそ 500kHz である。

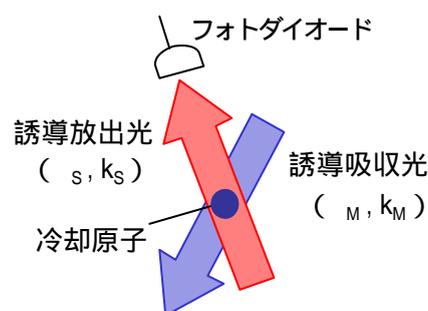


図1 吸収・放出概念図

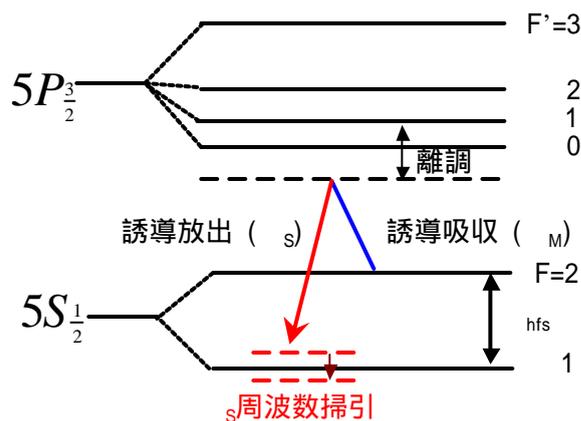


図2 ^{87}Rb エネルギー準位図

4.制御・測定系の製作

干渉計全体の制御・測定はPCを利用して行うこととした。その為、制御にデジタル出力ボード(Interface社製PCI-2472C)、測定にアナログデジタル変換ボード(Interface社製PCI-3513)を用いた。PCI-2472Cのバスマスター転送、PCI-3513のFIFOメモリをそれぞれ利用することにより作動時はCPUの能力に依らずに出力や入力を行うことが可能となっている。また、これらの為にVisualBasicでプログラムを製作した。制御プログラムは100 μ s単位の制御、測定プログラムは1 μ s毎の信号取込を可能とし、共に繰り返し動作を前提としている。PCI-3513は、PCI-2472Cからのトリガ信号によって取込のタイミングを取っている。また、測定データはバイナリファイルで保存される為、バイナリファイルからカンマ区切りファイルへの変換プログラムも同時に作成した^[1]。

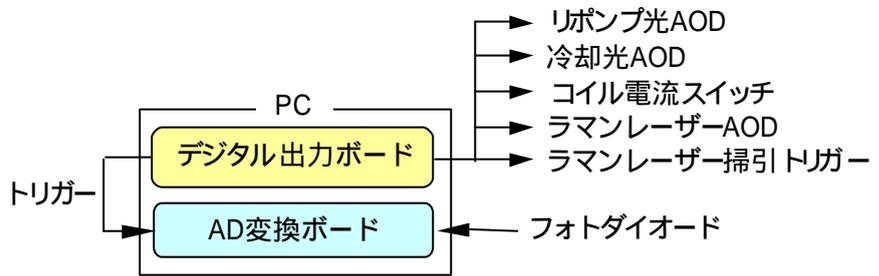


図3 PC接続図

5.ラマン遷移用レーザー

ラマン遷移測定実験に用いた誘導吸収、誘導放出用レーザーは、光位相同期回路を利用し、その周波数差を正確に調整できるようになっている^[2]。

6-1.Rbセルを用いたラマン遷移測定

冷却原子を用いたラマン遷移測定を行う前に、Rbセルを用いてCoherent Population Trapping現象(以下CPT)の確認を行った。この現象は、 $S^-_{M=0} = h\nu_s$ 、つまり $\omega = 0$ MHzの条件を満たすとき、原子干渉効果により、一部の原子が2つの準位($F=2, F=1$)のコヒーレントな重ね合わせの状態にトラップされたままとなる現象である。この重ね合わせの状態と仮想準位の間での光学的遷移は禁制であり、光学的に結合しなくなる^[3]。よって、 $\omega = 0$ MHzのときには透過光強度が最大となるはずである。

実験配置図を図3に示す。2本のレーザー光をビームスプリッターで重ね合わせ、Rbセルに照射した後、フォトダイオードでその透過光強度を検出する。Rbセルには磁気シールドを施し、周りの磁場を遮断している。

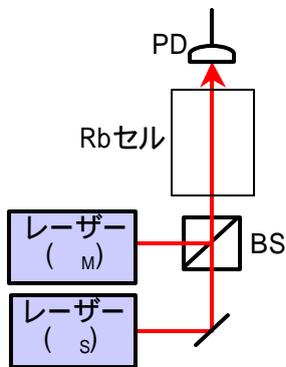


図3 CPT実験配置図

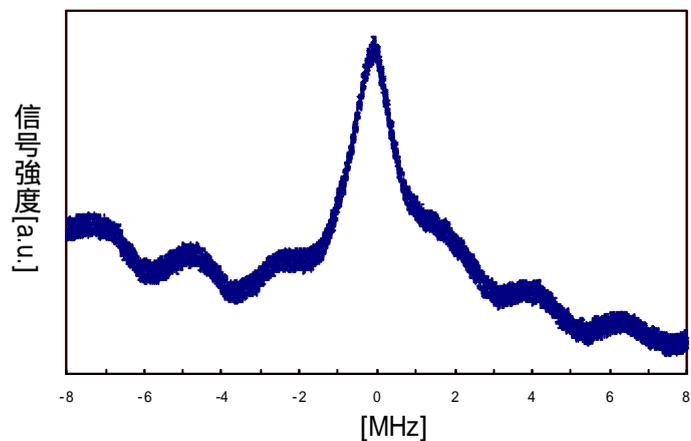


図4 CPT実験結果

実験結果を図 4 に示す。このグラフは 10 回の測定値を積算したものである。0MHz 付近で透過光強度が最大となっており、理論と合致していることから、Rb セルを用いたこの測定ではラマン遷移を確認できたと判断した。

6-2.冷却 Rb 原子を用いたラマン遷移測定

次に、磁気光学トラップ(以下 MOT)を用いて冷却した Rb 原子の誘導ラマン遷移測定を試みた。実験配置を図 5 に示す。冷却光は直交する 6 方向から照射し、誘導吸収用、誘導放出用レーザーは図で示すように上下から対向して原子に照射している。冷却原子集団の直径は約 2mm、ビーム径は約 3mm、それぞれのレーザー光強度は約 $6.3\text{mW}/\text{cm}^2$ である。

MOT で冷却した原子に対し、更に 2ms 偏向勾配冷却を行い、およそ $20\ \mu\text{K}$ まで温度を下げる。内部状態を $F=2$ へ揃える為のリバンプ光も常に照射しているが、PGC を遮断した 1ms 後にリバンプ光も遮断し、この直後からラマン用レーザー光を照射、同時に ν_s 周波数掃引と測定を開始する。測定条件は、測定時間を 5ms、 ν_s 周波数掃引範囲を $\pm 5\text{MHz}$ とした。

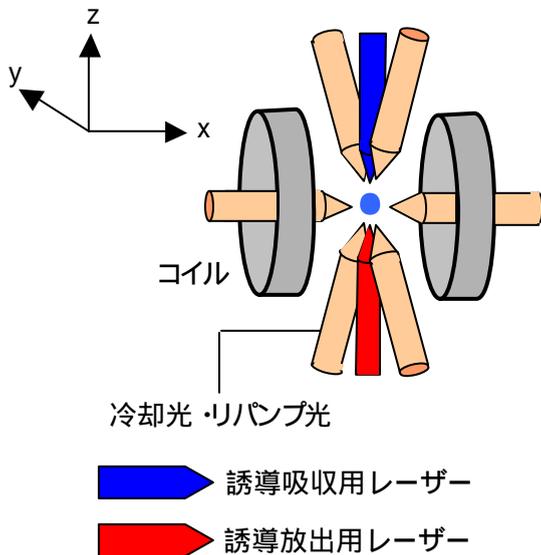


図5 MOT配置図

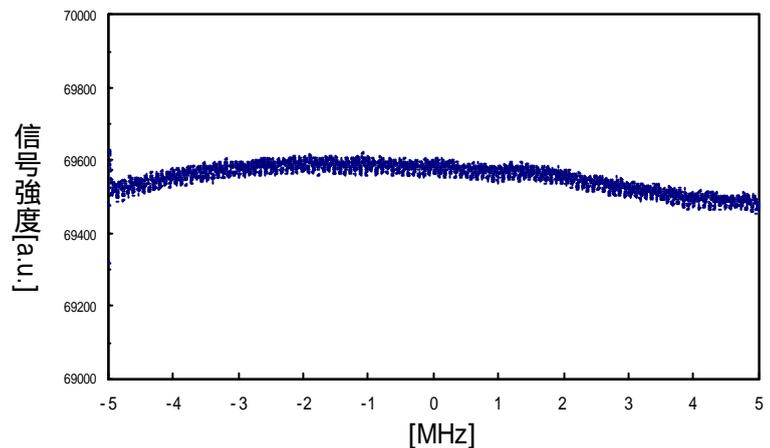


図6 CPT実験結果

測定結果の 1 つを図 6 に示す。このグラフでは $\pm 70\text{kHz}$ において信号のピークは見られず、先に予想した信号とは異なっていることが分かる。また、測定の度に異なる信号が得られ、今一つ再現性に欠けている。

7.実験結果

今回、2 種類のラマン遷移測定を行った。Rb セルを利用した CPT の測定では、理論通り $\nu=0\text{MHz}$ で透過強度が最大になるという結果が得られ、ラマン遷移が起きていることを確認することができた。冷却 Rb 原子を用いた測定では、想定された信号と異なる結果が得られ、ラマン遷移を確認できるに至らなかった。

8.考察

冷却 Rb 原子における測定実験で、想定された信号が得られなかった原因については、以下のことが挙げられる。

- ・ ラマン用レーザー光照射によって、原子集団が吹き飛ばされている。
- ・ 吸収信号がラマン用レーザーのパワー揺らぎに埋もれている。

9.まとめ

- ・ PC を利用して干渉計全体を制御、信号測定を行う為の系を製作し、動作することを確認した。
- ・ Rb セル内でのラマン遷移は確認できたが、冷却 Rb 原子を用いた測定では遷移を確認できなかった。

10.今後の課題

- ・ ラマン用レーザーの周波数揺らぎを抑える為、別に周波数安定化を施したレーザーに同期する。
- ・ ラマン遷移測定実験の条件見直し

[参考文献]

- [1]伊藤健一：ルビジウム原子気体のボースアインシュタイン凝縮生成，
学習院大学大学院自然科学研究科修士論文 (2001)
- [2]堀越宗一：光位相同期による原子干渉用光源の開発とその評価，
電気通信大学電気通信学部電子物性工学科卒業論文 (2001)
- [3]仁木秀明 井澤靖和：応用物理 61, 927 (1992)