

# 誘導ラマン遷移を用いた原子干渉計の開発

量子・物質工学科(9913101) 中川研究室 村石 桂一

<はじめに>

原子干渉計とは、原子の内部状態をレーザーによって変化させ、干渉パターンを観測することによってさまざまな物理量を測定できることができる装置である。光の干渉計との一番の違いは、原子は光子と違って質量があることである。このことを利用すると、重力加速度  $g$  や、4桁ほどしか確定していない万有引力定数  $G$  を測定することができる。我々の研究室では、この原子干渉計を開発し、まずは重力加速度を精密に測定することを目標にしている。

<原子干渉計とは>

光の干渉計では、1つのビームをビームスプリッターで分け、ミラーを使って再び重ねることによって、干渉縞が光の空間的な強度分布に現れる。原子干渉計も光の干渉計と同じ原理である。1個の原子をビームスプリッターでわけ、ミラーを使って再び重ねる。このとき、原子にとってのビームスプリッター、ミラーに相当するのがレーザー（誘導ラマンパルス）である。原子は、二準位間をラビ周波数で運動していて、状態  $|e\rangle$  に存在する確率は、二準位原子のハミルトニアンを解くと、

$$|C_e|^2 = \frac{1}{2}(1 - \cos \Omega_{eg} \tau) \quad (\Omega_{eg}: |e\rangle, |g\rangle \text{間のラビ周波数}, \tau: \text{パルス幅の時間})$$

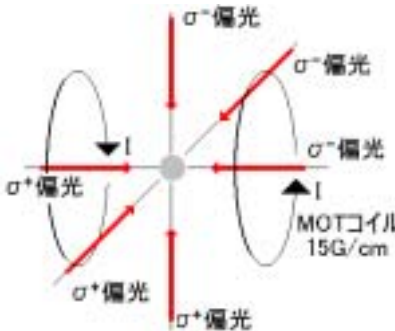
この式より、 $|C_e|^2 = 1/2$  のときは状態が半分だけ変化するので、ビームスプリッターとして働き、 $|C_e|^2 = 1$  のときは状態がすべて変化するのでミラーとして働くことになる。

<実験>

原子干渉計には、冷却原子と、誘導ラマン光が必要であることがわかる。まず、冷却原子をどのようにして用意するのかを説明する。

(MOT・PGC)

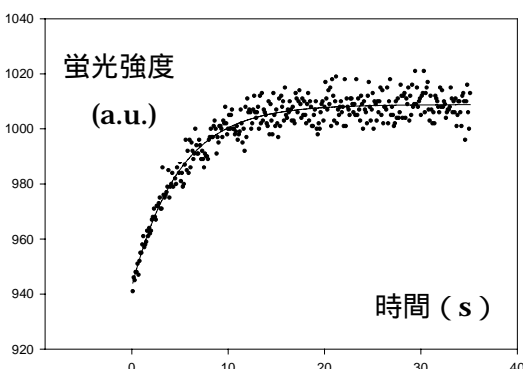
大量の原子を捕獲・冷却する為に、最初に MOT を行う。



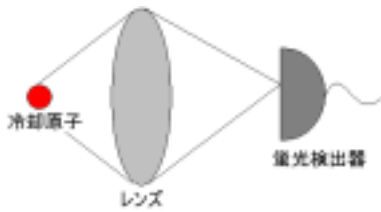
左図の様に六本のレーザーを対向して入れ、その中心で磁場が極小になるようにする。すると、ドップラー冷却が働き、原子は冷却され、磁場によってトラップされる。このとき、レーザーの離調は-16MHz、磁場勾配は 15G/cm となっている。

原子をより冷却するために、偏光勾配冷却も行っている。MOT の後に磁場を切り、離調を-48MHz にする。すると原子は、磁場がないため広がっていくが、離調を大きくとっているため、原子が冷却されていく。

MOT の Loading 時間



MOT が出来るまでの時間は、左のグラフのようになっている。Loading 時間 ( $1/e$  のときの時間) は 5 s であった。



MOT・PGC を行い、どのくらいの原子がトラップされたのか。そして、温度はどのくらいなのかということの評価しなければならない。原子の個数の評価としては、共鳴光を入れたときの原子が放つ蛍光を検出することによって求めることができる。左図の様に検出器をセットして、立体角を計算する。1 原子あたりどれくらいの蛍光を放つかということは理論的にわかっているので、これを計算することでトラップされている原子の個数を求めることができる。計算式は、

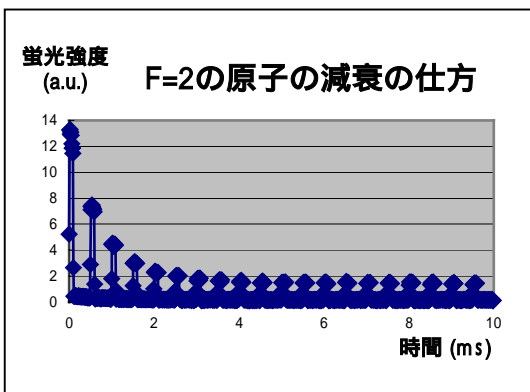
$$N = P * \frac{\lambda}{hc} * \frac{1}{\gamma} [1 + \frac{I_s}{I} \{1 + (\frac{\delta}{\gamma})^2\}] * \frac{4\pi b^2}{\pi a^2}$$

P : 蛍光強度、  $\lambda$  : 自然幅、 I : レーザー強度、  $I_s$  : レーザー飽和強度、  $\delta$  : 離調、  
b : 原子からレンズまでの距離、 a : レンズの半径

今回の実験では、およそ  $10^7$  個の原子を集めることが出来た。

温度の評価は、TOF を用いて行った。MOT・PGC を行った後に、数 ms 待ち、原子を自由落下させる。すると原子は、落下しながら広がっていく。この一連の流れをビデオに録画し、原子の広がりを測ることによって温度を求めることができる。実験では、MOT のみだと  $400 \mu K$ 。PGC (10ms) 後であると、 $60 \mu K$  であることがわかった。

( 光ポンピング )

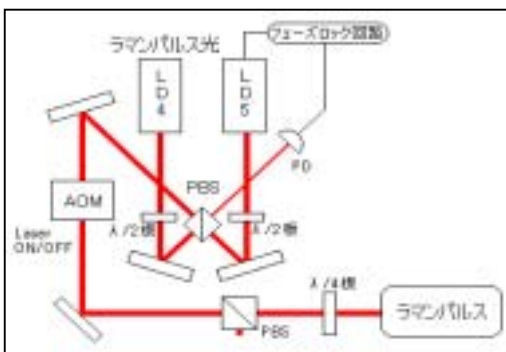


原子干渉計を動作させるためには状態の揃った原子が必要になってくる。今回の実験では MOT・PGC をした後に、リバンプ光を切り、クーリング光のみを入れる。すると、 $F=2$  にいる原子は吹き飛ばされてしまうため、 $F=1$  の状態の原子のみが存在することになる。左のグラフから、 $5000 \mu s$  ほどクーリング光を入れることによって原子が完全に  $F=2$  の原子は存在しないことが分かる。

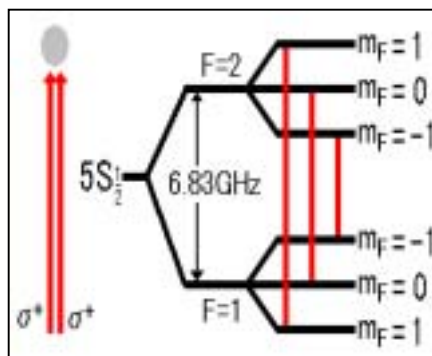
( ラマン光の準備 )

原子の為の BS、ミラーに相当する誘導ラマン光のセットアップをした。それが下図である。

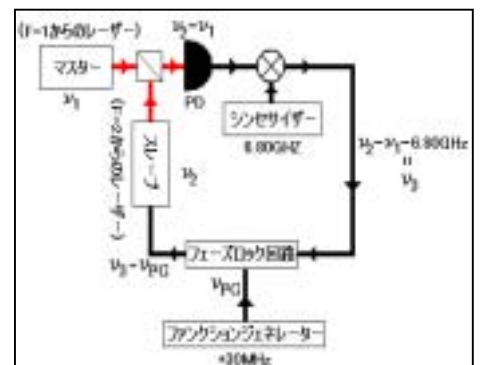
誘導ラマン光のセットアップ



原子の選択則

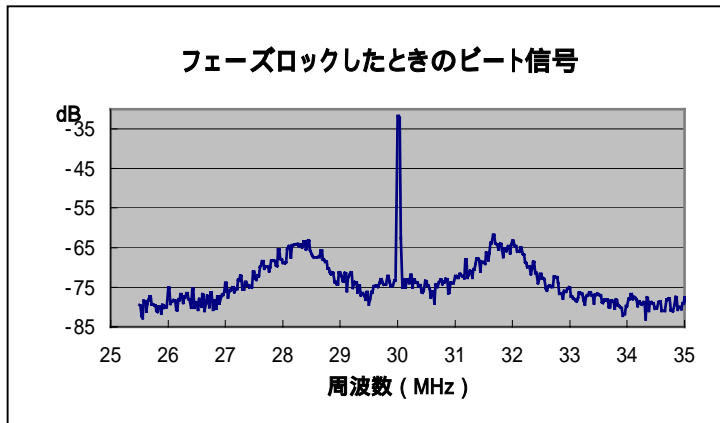


フェーズロックのセットアップ



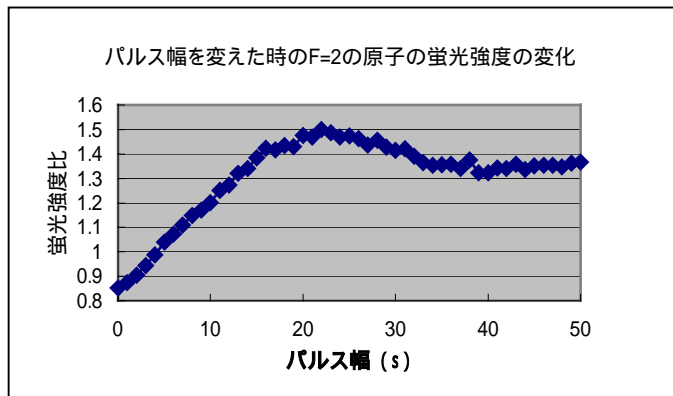
$F=1, mF=0$  から  $F=2, mF=0$  に遷移させるには、選択則から  $+$   $-$   $+$  の偏光のレーザーが必要である。それゆえ、 $\lambda/4$  板が入っている。そして、誘導ラマン遷移を起こす為には、LD4 と LD5 の周波数差を  $6.83 \text{GHz}$  に保たないといけない為、フェーズロックを行った。LD4 と LD5 の周波数差からシンセサイザーから出力される  $6.80 \text{GHz}$  を引いた  $30 \text{MHz}$  をスペクトルアナライザーで検出する。そして、ファンクションジェネレーターが

ら不足分の 30MHz を加えることによって 6.83GHz をモニターでき、フェーズロックの回路によってレーザーの電流に加えられ、LD4 と LD5 の間の周波数差を 6.83GHz に保つことができ、ロックさせる。



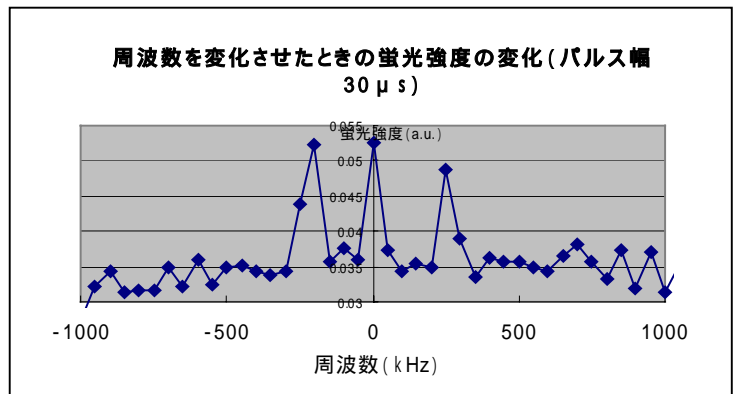
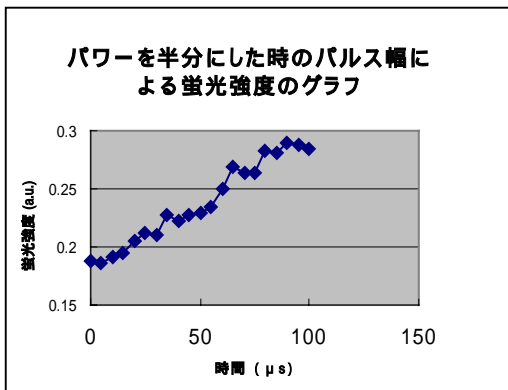
(ラマン光の照射)

光ポンピングで  $F=1$  に原子を揃えた後に、プローブ光を入れ  $F=2$  の原子の個数を測り、ラマン光を  $0\mu s$  から  $100\mu s$  まで変化させていれ、ラマン光を入れた直後の個数を測り、その増加の割合をプロットしたのが下のグラフである。



このグラフから パルスの時間が  $25\mu s$  と求められる。

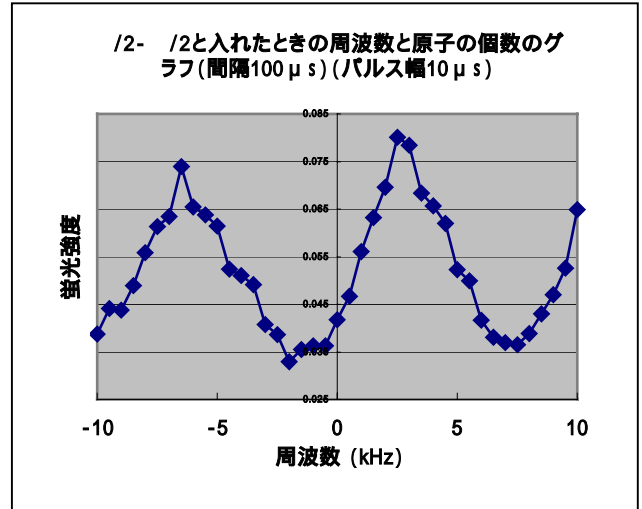
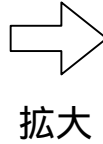
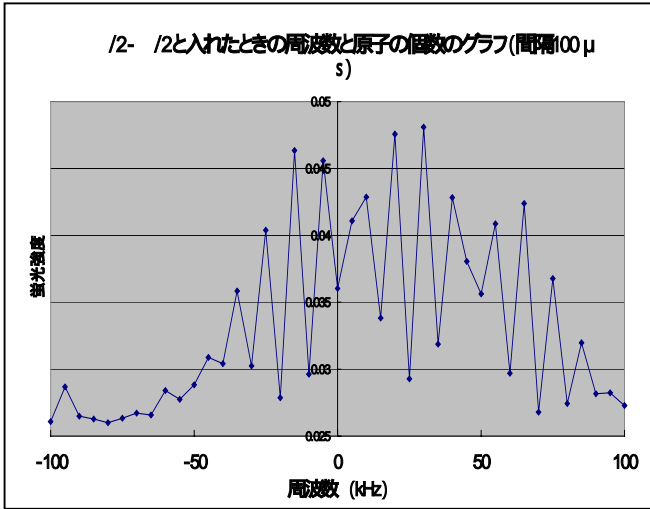
しかし、グラフを見ると、 $F=2$  の状態から  $F=1$  に落ちて来ない為、誘導ラマン遷移が起きているかどうか分からない。そこで、レーザー強度依存性、周波数依存性を調べてみた。



グラフからパワーを半分にした時は周期が伸びていることが分かる。また、周波数を  $F=1$  と  $F=2$  の周波数差である 6.83GHz からどれだけ離れたかというのが左のグラフなのだが、3回大きく変化しているのだが、これは、左が  $F=1, m_F=-1$  から  $F=2, m_F=-1$  の遷移、真中が  $F=1, m_F=0$  から  $F=2, m_F=0$  の遷移、右が  $F=1, m_F=1$  か

ら  $F=2, m_F=1$  の遷移である。(偏光依存性なども調べた結果。) によって確かにこの実験で誘導ラマン遷移が起きていることが分かる。

(Ramsey Fringe)



実際に  $1/2- 1/2$  というラマンパルスを入れ、そのとき、周波数 (6.83GHz) を変化させたのが左上のグラフである。(パルス間隔 100 $\mu$ s、パルス幅 10 $\mu$ s) 最初の  $1/2$  パルスで状態を二つに分け、次の  $1/2$  パルスで再び重ね合わせることで、Ramsey Fringe が見えた。そして、1 個の波を観測したものが右上のグラフで、周波数を計算で求めることができ、これがおよそパルス幅の逆数になるので 10kHz となり、グラフと一致していることがわかる。

(今後の課題)

ラマン光を原子に当てたときに  $F=2$  から  $F=1$  に落ちてこないのが一番の課題である。これをクリアすれば干渉計として動作すると思われる。この現象の原因としては、自然放出による  $F=2$  の状態の原子の増加が考えられる。この自然放出が線形に増えていくと仮定すると、 $\sin^2 t$  に線形に増える項を足したものが実験で得たグラフと考えることができるが、その辺りは、いまだ原因はわかっていない。もし、この自然放出が原因だとすると、ラマン光の離調をとることで自然放出を抑えることができる。しかし蛍光強度が減ってしまう。この辺りをもうすこし煮詰めていけば、原始干渉計の完成は近いと思われる。この二光子ラビ運動の観測が出来たら、 $1/2 - 1/2$  と原子にラマン光をいれてみて、ラムゼー分光の信号の観測。また、ラマン光を 7 ミラーで折り返し、運動量の差を利用した重力加速度の計測も今後の課題である。

(参考文献)

edited by Paul R.Berman"Atom interferometr" 363-405(Academic Press)

修士論文 田村誠道“冷却ルビジウム原子を用いた原子干渉計の開発”電気通信大学 電子物性工学専攻(2001)