

レーザー冷却 Rb 原子を用いた原子干渉計

量子・物質工学科 0013072 中藪 剛

【目的・背景】

原子干渉計とは原子の状態を2つに分け、その2つの状態を再び重ね合わせる事によって、光の干渉計と同じように干渉縞を観測する装置のことである。また、原子には質量があるために光の粒子とは異なり、重力を感じる事ができるので原子干渉計を用いれば重力加速度を測定することが可能となる。我々の研究室では、原子干渉計を用いて重力加速度を測定することを目的としている。

【原理】

光の干渉計では、ビームスプリッターとミラーを用いれば2つに分け、再び重ねあわせることができるが原子にはもちろんこれらは使えない。原子干渉計ではこの光の干渉計のビームスプリッターとミラーに相当するものとして光パルスを利用し、マッハ・ツェンダー型の干渉計を構成する。双極子力を受けている2準位間のハルミトニアンから原子が状態 $|e\rangle$ にいる確率はラビ周波数 Ω_{eg} を用いて

$$|C_e(\tau)|^2 = \frac{1}{2}(1 - \cos \Omega_{eg} \tau)$$

で表され、 $\Omega_{eg} \tau = \pi$ のときに確率は1、 $\pi/2$ のときには確率は1/2となり、それぞれパルス、 $\pi/2$ パルスと呼ぶ。この2つのパルスがミラー、ビームスプリッターの役割を果たす。

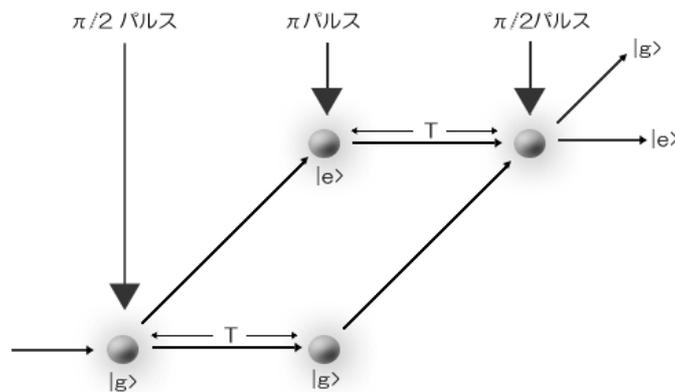


図 1.マッハ・ツェンダー型干渉計原理図

【実験手順】

実験の流れとしては、まず冷却原子を得るために磁気光学トラップ (MOT) を用いて原子をおよそ 10^8 個捕獲し、偏光勾配冷却 (PGC) でさらに原子を数 μK にまで冷却させる。次に原子の状態を揃えるために、光ポンピングで原子の内部状態を $5S_{1/2} F = 1$ に揃える。そして、ラマンパルスを原子集団に照射し、照射後に Probe 光を照射して $F=2$ の原子の蛍光を測定し、内部状態の変化から位相シフトを計算する。ラマンパルスには位相同期されたマスターとスレーブの2つレーザーで誘導ラマン遷移を起こしたものをを用いる。

【実験準備】

今までの装置ではマッハ・ツェンダー型干渉計のミラーの動作を担うパルスを動作させることが困難であった。これは実効的ラビ周波数 Ω_{eff} が $5P_{3/2} F' = 0$ からの離調 Δ (図2) によって変化したが、この離調の制御をしていなかったためである。この離調 Δ の制御を行い、確実にパルスを動作させるために吸収線に安定化されたクーリングレーザーとラマンパルスのマスターレーザーを位相同期させて Δ を制御した。実効的ラビ周波数 Ω_{eff} は以下の式で表される。

$$\Omega_{eff} = \frac{\Omega_e^* \Omega_g}{2\Delta} \approx \frac{\Gamma^2 I}{4\Delta I_{sat}}$$

自然幅: $\Gamma = 2\pi \times 6.065 \times 10^6 \text{ Hz}$ 飽和強度: $I_{sat} = 1.67 \text{ mW} / \text{cm}^2$

I : ラマンパルスの2つの光の平均パワー密度

Δ の制御については、以下のように光学系システムを組んだ。

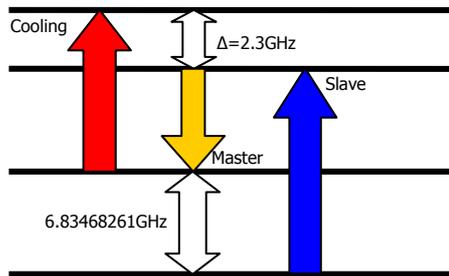


図3.エネルギー準位間の離調のイメージ図

まず、位相同期については誘導ラマン遷移を起こすために、Master・Slave間(以下 M&S)に Phase Lock Loop (PLL) が組まれているが離調 Δ を制御するために Cooling・Master間(以下 C&M)にも M&S と同様に PLL を組んだ。M&S には $5S_{1/2} F = 1$ と $F = 2$ 間の遷移周波数 6.8346826128 GHz を保つために発振器の 6.8 GHz を引いた 34 MHz を Spectrum Analyzer で検出し、足りない 34.6826128 MHz を Function

Generator で補う。C&M は離調を制御するだけなので Synthesizer の 2.3 GHz から引いた 40 MHz を Spectrum Analyzer で検出し、Function Generator で 40 MHz を補ってやる。

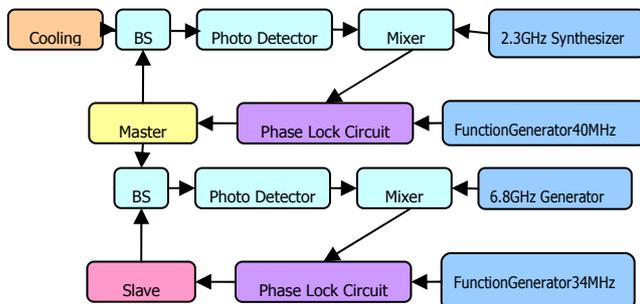


図4. Double Phase Lock Loop System

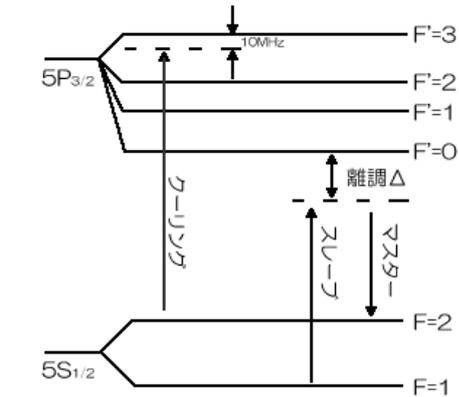


図2. Rb^{87} のエネルギー準位図

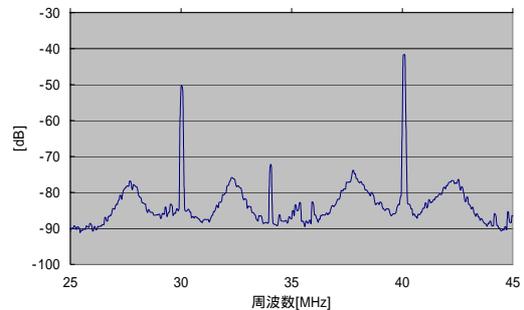


図5. Phase Lock spectrum 図

以上のようなシステムを組むことによって右上図のように 34 MHz と 40 MHz のビート信号を Spectrum Analyzer にて monitor でき、(注: 図5では 30 MHz と 40 MHz になっているが、実験は 34 MHz で行った) それぞれの周波数に Lock する。

【実験】

初めに、パルス・ $\pi/2$ パルスを決めるためにラビ周波数の測定を行った。冷却原子集団にラマンパルスを照射する時間を0から $100\mu\text{s}$ まで変えていき Probe 光を照射し、 $F=2$ の蛍光強度を測定し、図6のようなラビ周波数を得た。

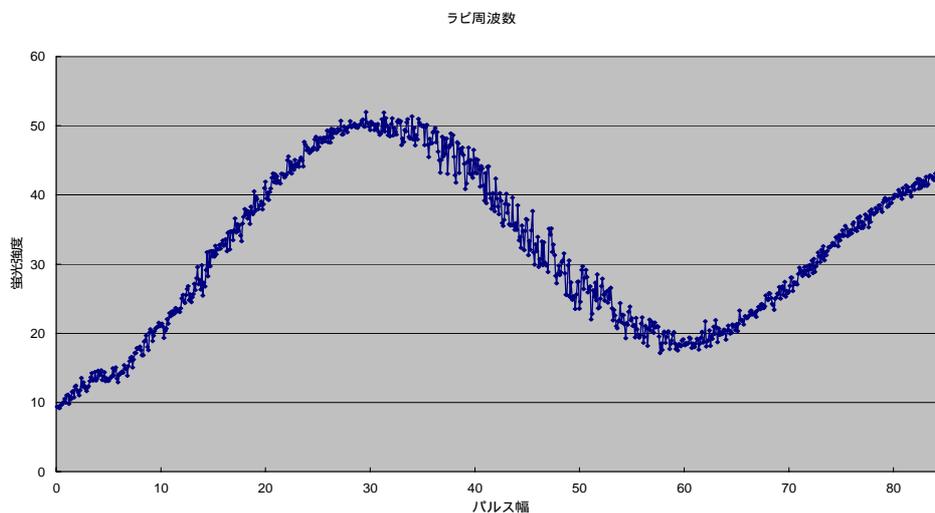


図6.ラビ周波数の測定

このラビ周波数からパルスと $\pi/2$ パルスを決めてやることができる。上のグラフではパルスは $28\mu\text{s}$ 、 $\pi/2$ パルスは $14\mu\text{s}$ となる。

次に $\pi/2 - \pi/2$ ($\pi/2$ のパルス幅は $10\mu\text{s}$ で行った)とラマンパルスを照射して Ramsey signal の観測を行った。最初の $\pi/2$ パルスで原子の状態は2つに分かれるが、2つの状態の経路はほぼ同じなのでもう一度 $\pi/2$ パルスを入れてやることで干渉が起こる。また、2つのパルス間の時間は $200\mu\text{s}$ で実験を行った。下のグラフは横軸にラマン遷移を起こす 6.834GHz の周波数を変えていき、縦軸に $F=2$ にいる原子の蛍光強度をとったものである。

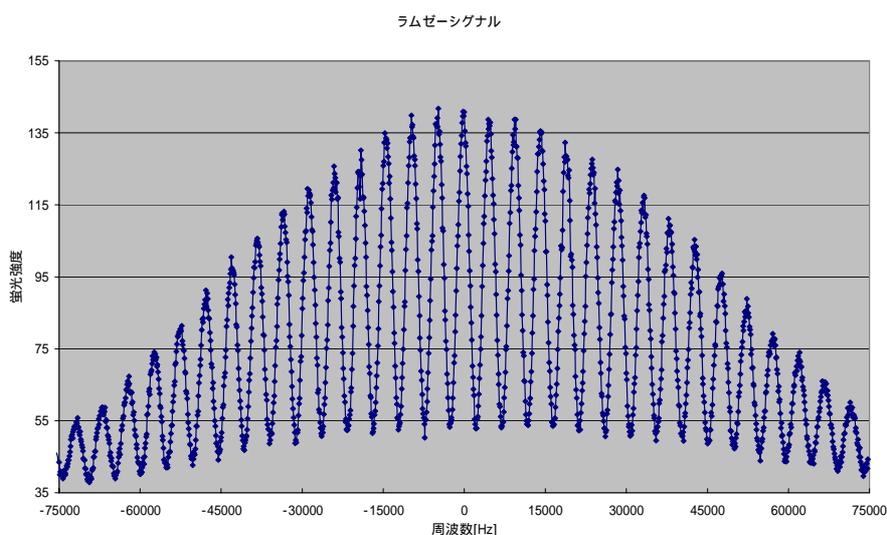


図7.ramsey signal の測定

干渉縞はパルス間の時間 $200\mu s$ の逆数として計算できるが上のグラフでも 5kHz 周期に見えており、計算と一致している。

最後に $\pi/2 - \tau - \pi/2$ とラマンパルスを照射してマッハ・ツェンダー型干渉計を構成し、パルスのパルス幅は $28\mu s$ 、 $\pi/2$ パルスは $14\mu s$ 、パルス間の時間は $200\mu s$ で実験を行った。グラフは図7の Ramsey signal の観測と同様に縦軸に $F=2$ の蛍光強度、横軸に周波数をとったものである。

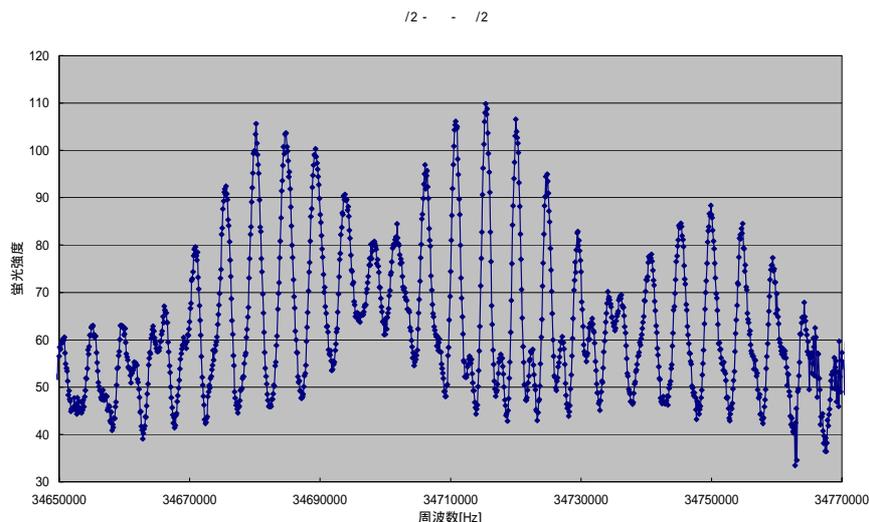


図8.マッハ・ツェンダー型干渉計

計算によると中心の山は見えず、左右の山の干渉縞だけが見えるはずであるが、結果としては3つの干渉縞の山が見えた。これはまだ正確にパルスを照射することができず、Ramsey signal の一部分が中心の山の干渉縞となって見えているものと推測される。

【これからの課題】

まず第一点目に $\pi/2 - \tau - \pi/2$ とパルスを照射したときの動作を確立させることである。これらの実験においてパルスは対向に照射せず同方向から照射した。これを対向方向から照射し、干渉縞を得ることができれば、原子干渉計としての動作は確実なものとなり、重力加速度の測定もできるであろう。第二点目にラマンパルスに用いる Master と Slave のレーザーがあまり安定していない点である。Phase Lock をかけるにも欲しい波長がなかなか出ずに苦労することが多々あった。また、Spectrum Analyzer で Monitor するときに必要なピーク信号が多数見えてしまう。これは C&M の Photo Detector に Slave 光が入ってしまうため、光学系の改良も考えられる。

【参考文献】

- [1] 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)
- [2] 黄表紙 村石桂一 “誘導ラマン遷移を用いた原子干渉計の開発”:電気通信大学 量子・物質工学科(2002)