

光周波数コムを用いたレーザーの絶対周波数測定

中川研究室 平井 秀一

2009年3月5日

1 背景

原子干渉計やシングルアトムを用いた量子相関を研究する際、我々の研究室ではレーザーを用いて原子を冷却、または励起している。この時、原子の外部及び内部状態を制御するため、レーザーには、その絶対周波数が定まっていて、かつ、 10^{-9} 程度の周波数精度が要求される。

このようなレーザーの絶対周波数および安定度を評価するためには、光周波数コムを使うと便利だということが分かっている。

2 本研究の目標

本研究では、周波数の基準として用いる光周波数コムを 10^{-10} で安定化した。この安定化した光周波数コムを用いて $\lambda = 960\text{nm}$ のレーザーの絶対周波数を 10^{-9} の精度で測定した。

3 原理

3.1 光周波数コム

光周波数コムとは、周波数軸上で図1のような一定間隔にスペクトルが並んだレーザーのことです。この間隔を繰り返し周波数 f_{rep} 、この間隔のまま周波数が0のところまで仮想的に延長したときのオフセット周波数をキャリア・エンベロープ・オフセット (Carrier-Envelope Offset) 周波数 f_{ceo} という。

この時、 N 番目のスペクトルの周波数は、式 (1) となる。

$$f_N = \pm f_{ceo} + N f_{rep} \quad (1)$$

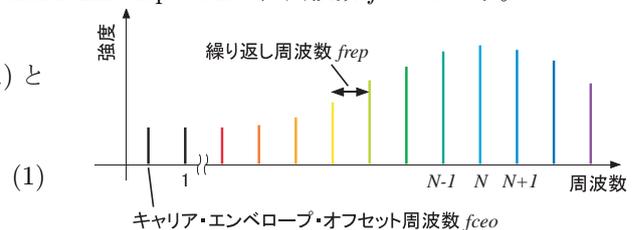


図1 光周波数コム

3.2 f_{ceo} の測定

f_{ceo} は仮想的な周波数なので、観測するためには N 番目のスペクトルを SHG (Second Harmonic Generation) 結晶で第二高調波を発生させ、 $2N$ 番目のスペクトルと重ね合わせることで f_{ceo} を観測することができる。

$$2f_N - f_{2N} = (\pm 2f_{ceo} + 2N f_{rep}) - (\pm f_{ceo} + 2N f_{rep}) = \pm f_{ceo}$$

3.3 絶対周波数測定

この光周波数コムと $\lambda = 960\text{nm}$ のレーザーを重ね合わせると、図 2 のようになる。

このビート周波数 δ を使うと、レーザーの絶対周波数 f_{960} は、式 (2) となる。

$$f_{960} = \pm f_{ceo} + N f_{rep} \pm \delta \quad (2)$$

光周波数コムを用いるメリットは、この f_{rep} 、 f_{ceo} 、 δ がマイクロ波領域の信号であるため観測が容易になる。

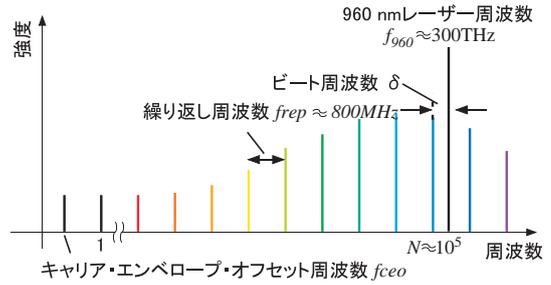


図 2 光周波数コムとビート周波数

3.4 光周波数コムの必要精度

光周波数コムには、 10^{-10} の精度を要求するとき、 f_{rep} および f_{ceo} に必要な精度を見積もると

$$\frac{\Delta f_N}{f_N} = \frac{\Delta f_{ceo} + N \Delta f_{rep}}{f_{ceo} + N f_{rep}} = 10^{-10}$$

$$\therefore \frac{\Delta f_{rep}}{f_{rep}} \simeq 10^{-10}, \quad \frac{\Delta f_{ceo}}{f_{ceo}} \simeq 10^{-10} \times N \frac{f_{rep}}{f_{ceo}} = 2 \times 10^{-5}$$

4 実験

実験は、図 3 のような構成で行った。

Nd:YAG レーザーを励起光として、Ti:Sapphire モードロックレーザーを発生させ、PFC で帯域を広げる。

繰り返し周波数 f_{rep} は、Rb 原子時計を基準として、Ti:Sapphire モードロックレーザーの共振器内のピエゾにフィードバックして制御している。また、オフセット周波数 f_{ceo} は、原理 3.2 で観測した後、分周器で 32 分周し、励起用レーザーのパワーを変調することで制御している。ここで分周器は、 f_{ceo} が急峻に変化するので、その変化を緩やかにし、PLL フィードバックの帯域を変えるために用いた。ただし、分周した分だけ情報が失われるが、原理 3.4 から f_{ceo} には f_{rep} ほどの精度が必要ないため、ここでは問題とならなかった。

f_{rep} 、 f_{ceo} 、ビート周波数は、いずれも周波数カウンターで測定した。

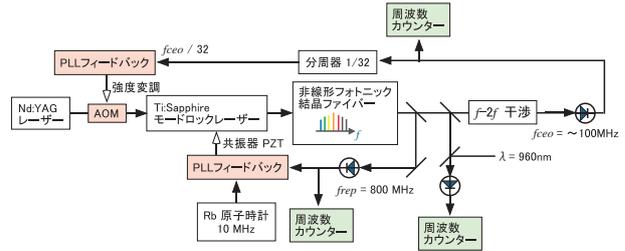


図 3 実験系

5 結果および考察

5.1 f_{rep} の実験結果

f_{rep} の時間変化は、図 4 となった。また、これをアラン分散を用いて評価すると図 5 となった。

図 4 を見ると、中心周波数から大きく外れるところがあるが、これは一瞬ロックが外れかけているが、カウンターのカウントミスであると思われる。

図 5 から、 f_{rep} の精度は 10^{-12} までは達成されていることが分かる。

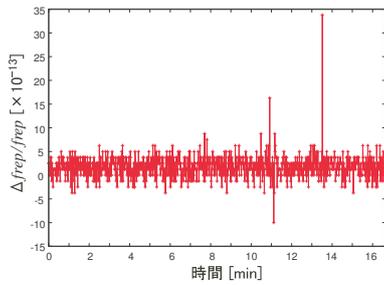


図 4 f_{rep} の時間変化

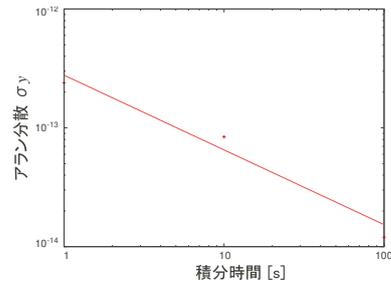


図 5 f_{rep} のアラン分散

5.2 f_{ceo} の実験結果

f_{ceo} の時間変化は、図 6 となった。また、これをアラン分散を用いて評価すると図 7 となった。

図 6 を見ると、6 分を過ぎた辺りから周波数の変動が大きくなっている。これは、 f_{rep} のフィードバックに引きずられて f_{ceo} のフィードバック帯域から外れてしまったためである。

図 7 から、 f_{ceo} の精度は 10^{-6} までは達成されていることが分かる。

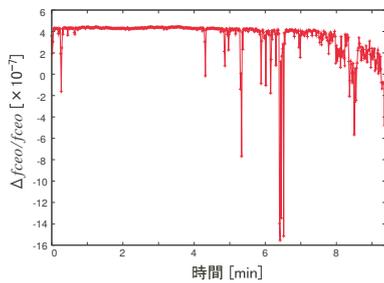


図 6 f_{ceo} の時間変化

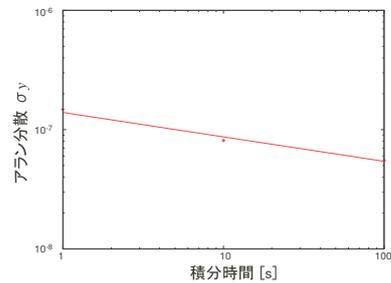


図 7 f_{ceo} のアラン分散

5.3 光周波数コム不安定度

これまでの結果から、光周波数コムとしての不安定度は、表 1 となった。ただし、基準として用いている Rb 原子時計の周波数精度が 10^{-11} 程度なので、ボトルネックは Rb 原子時計の周波数精度となっていることが考えられる。

表 1 光周波数コム不安定度

積分時間 [s]	アラン分散 σ_y		
	1	10	100
繰り返し周波数 f_{rep}	2.4×10^{-13}	8.4×10^{-14}	1.3×10^{-14}
オフセット周波数 f_{ceo}	1.5×10^{-7}	8.1×10^{-8}	5.5×10^{-8}
光周波数コム不安定度	3.1×10^{-13}	1.2×10^{-13}	3.9×10^{-14}

5.4 絶対周波数測定

絶対周波数の時間変化は、図 8、10 となった。また、これをアラン分散を用いて評価すると図 9、11 となった。

図 8、10 を見ると、常に周波数が大きく変動しているが、これはロックが不安定なのかカウンターの測定ミスなのかは分からない。

図 9、11 から、 $\lambda = 960\text{nm}$ のレーザーは 10^{-9} の精度で安定化されていることが分かった。

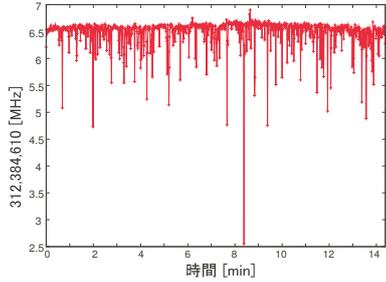


図 8 $\lambda = 960\text{nm}$ の絶対周波数の時間変化 1

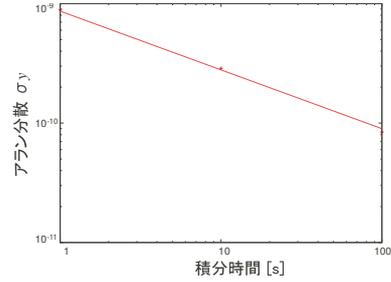


図 9 $\lambda = 960\text{nm}$ の絶対周波数のアラン分散 1

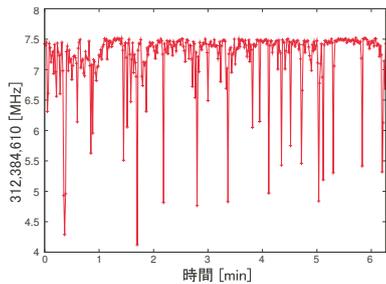


図 10 $\lambda = 960\text{nm}$ の絶対周波数の時間変化 2

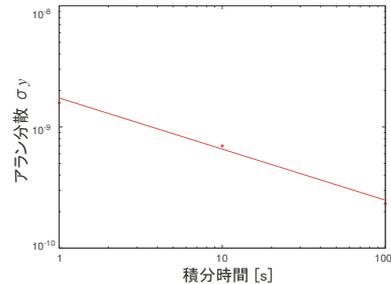


図 11 $\lambda = 960\text{nm}$ の絶対周波数のアラン分散 2

図 8、10 の範囲でデータを平均化し、絶対周波数を決定した。その結果は、表 2、3 となった。

表 2 絶対周波数測定まとめ 1

繰り返し周波数 f_{rep} [MHz]	798.67322000
オフセット周波数 f_{ceo} [MHz]	148.29120
オフセット周波数の符号	+1
繰り返し次数 N	3991129
ビート周波数 δ [MHz]	210.40226
ビート周波数の符号	+1
960nm の絶対周波数 f_{960} [THz]	312.38461656

表 3 絶対周波数測定まとめ 2

繰り返し周波数 f_{rep} [MHz]	799.25833000
オフセット周波数 f_{ceo} [MHz]	114.56000
オフセット周波数の符号	-1
繰り返し次数 N	390843
ビート周波数 δ [MHz]	208.50345
ビート周波数の符号	+1
960nm の絶対周波数 f_{960} [THz]	312.38461742

6 まとめと今後の展望

本研究で、光周波数コムを 10^{-10} 以上の精度で安定化できた。この安定化した光周波数コムを使って 960nm レーザーの絶対周波数を測定でき、その安定度が 10^{-9} 以上であることを評価できた。

今後の展望として、現在 10 分以上ロックできないオフセット周波数 f_{ceo} を長時間安定化できるようにする。また、現在原子の吸収線を使ってロックしている 960nm レーザーを今回安定化した光周波数コムを用いてロックすることで、より安定で精度の良いレーザーにできるのではないかとと思われる。