

マイケルソン干渉計を用いた波長計測システムの開発

鈴木 慎悟

平成 29 年 2 月 27 日

1 序論

レーザー光は DVD などの読み取りやマウスなど一般の生活に欠かせない一方で、レーザー冷却など冷却原子系で実験する者たちにとっては必要不可欠なものである。

一般的に実験室において波長を測定する場合、回折格子を用いて回折された角度を測定することによって波長を求めることが一般的である。

また原子やイオンの実験においては、原子の吸収スペクトル幅が通常 0.01nm[1] であることから 10^{-6} ほどの精度が要求される。

回折格子を用いた波長計は駆動部がないため振動に強いという特性があるが、精度があまりよくなく 10^{-5} ほどの精度の物が多い。一方で、マイケルソン干渉計では駆動部があるため、安定性というものを十分に考慮する必要があるが、波長精度は 10^{-7} ほどのものまで存在している。

企業から一般に販売されているものではこれら以上の精度を持つものはあるが、それは非常に複雑で実際に作るのは非常に難しい。また、今回の研究において要求されているスペックは 10^{-6} ほどの精度があれば十分であることを鑑みれば種々の干渉計のみを用いた波長計で十分な精度は得られると考えられる。

さらに、マイケルソン干渉計のメリットとして、波長計測の精度をあげるのにミラーの可動距離を長くすれば良いという魅力がある。干渉縞をしっかりと観測出来る安定性があれば、ミラーの移動距離を長くすればそれだけ波長精度が良くなるというのは、光路を構成する上で非常に楽ができるといえるだろう。

そこで、本研究においては光路が単純なマイケルソン干渉計を用いた波長測定システムの開発を目的とする。

2 原理と実験装置

マイケルソン干渉計は、干渉させる光をビームスプリッターにより互いに直角な 2 方向に分け、それぞれの光をミラーで反復往復させ、片方のミラーを本研究ではピエゾあるいはスライドステージによって動かし光路差を与えることで干渉縞の変化を調べることができる。往復した光路を構成するため、得られる干渉縞は光路差が使用光源の $1/2$ 波長に相当すると変化する [2][3]。この時に得られた干渉縞の数とミラーの移動距離から波長を求めることが出来る。片方のミラーを動かした距離を d その時の明暗の回数を n 、測定したい波長を λ で表すと

$$\lambda = \frac{2d}{n} \quad (1)$$

となり、波長を求めることが出来るが、実際の系においてこのミラーの移動距離を正確に測ることは困難でこの問題を解消するために一つの波長の分かっているレーザーを用いてその干渉縞の数を数えることによってミラーの移動距離を算出しそこから求めたいレーザーの波長を得る。図にマイケルソン干渉計の光路図を示す。

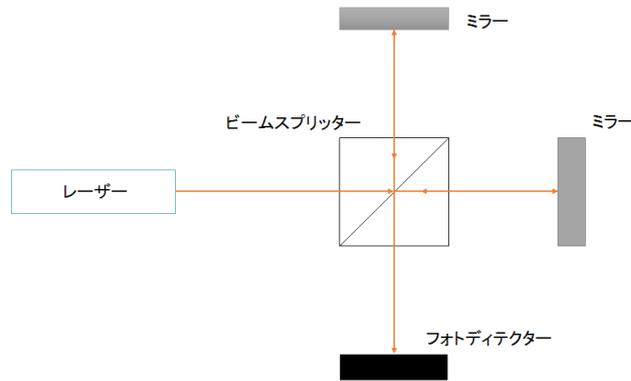


図 1: マイケルソン干渉計

干渉縞をはっきりと観測するためには、レーザー光が実験の系において平行と近似出来るようでない干渉縞が小さいあるいは一部で見えないなどの問題が生じるため、必要に応じてレンズで補正してあげる必要があった。

2.1 測定の精度について

本実験の精度は、測定した波長をどれだけ正確に測定できるか、またミラーをどのくらい動かしたかによって決まる。レーザーの半波長が干渉縞を観測するためのミラーの移動距離であるため、波長 670.976nm の色素レーザーにおいては 335.488nm ミラーを動かすと干渉縞を一つ観測することが出来る。しかし現実にはミラーの移動距離を正確に測ることは困難である。明暗の数え間違いがないとすれば、本実験で要求されている精度を求めめるためには 10^6 個の明暗の数を数え上げる必要がある。また、レーザーを二つ用いれば移動距離に関係なく測定することができる。これは基準として波長の分かっているレーザーを用いることによって、ミラーの移動距離が求まり、そこから波長を求めたいレーザーの波長が分かるということである。このミラーの移動距離をどれだけ正確に求められるかということが干渉縞の数を多量に数える意味となっている。基準とするレーザーの波長を λ_a 、明暗の回数を n_a 、測定したいレーザーの波長を λ_b 、明暗の回数を n_b とすると、(2.1) 式より基準とするレーザーの移動距離は

$$2d = \frac{\lambda_a}{n_a} \quad (2)$$

と表され、測定したいレーザーの移動距離は

$$2d = \frac{\lambda_b}{n_b} \quad (3)$$

で表される。同時に測定を行っているとき、二つの移動距離は同じであるので (2.2) 式に (2.3) 式を代入すると

$$\lambda_b = \lambda_a \times \frac{n_a}{n_b} \quad (4)$$

となり、移動距離によらず波長を測定することができる。また波の数を数え上げる方法としてデジタル IC を用いている。これはデジタル信号を入力するとその信号の High と Low を何回切り替わったかを数え上げるものである。

デジタルカウンターの強みは非常に高速に動作するところにある。本研究において求められる精度のためには干渉縞を多量に数えなくてはならず、かつ長時間測定しては波長を表示してほしいときに未だ測定中という自体になることも十分に考えられるため出来得る限り高速で動作できるデジタルカウンターが必須であった。また、IC の数を増やせばそれだけ計測できる数が増えていくというのも非常に魅力的である。CLK に入力された矩形波はその立ち下がりをうけて別の端子 A の立ち上がりとなる、そして A の立ち下がりがまた B の立ち上がりとなり次々と連鎖していく。最終的にそれぞれの端子の信号 High か Low かを読み取ることによってどのくらいの High と Low の変化があったかを調べることが出来る。CLR に High を入れることによってカウンターの初期化が出来る。

3 実験

測定の速度と測定可能なデータ点数を増やすためにデジタルカウンターでの測定に変更する。デジタルカウンターでは出力の端子の数を m としたとき、波長の数を 2^{m-1} まで数え上げることが出来る。すなわち要求されているデータ点

数 1.6×10^6 個を出すには

$$2^{20} < 1.6 \times 10^6 < 2^{21}$$

より 21 個の出力端子があればよく、これを満たすために出力端子が 12 個あるデジタルカウンター IC を 2 つ用いて測定することにする。

測定に関してスライドステージを自動で動くようにした。スライドステージを動かした直後まで CRK に High をいれてカウンターが動作しないようにしておき、スライドステージの移動速度がほぼ等速直線運動になったら測定を始めた。その後スライドステージの端にぶつかる前に測定を終了しカウンターの数値を読み取った。

波長の決定精度は山二つのタイミングによる誤差はどうしても避けられない。このため、波長の決定精度は一回で波長を求めるときは山の数 4.0×10^4 点であるアナログボードの時で最大 0.04nm の不確かさを持つ。本実験では、波長の数をおよそ 8.0×10^5 点数えているので、数え間違いによる誤差は 0.002nm となるはずである。実際に測定した結果の測定回数を横軸、その時の波長を縦軸にとってグラフ化すると以下のようになった

この時平均値とその相対不確かさは $628.886 \pm 0.004\text{nm}$ であった。しかし結果の図を見てみると、綺麗に 2 つに分断さ

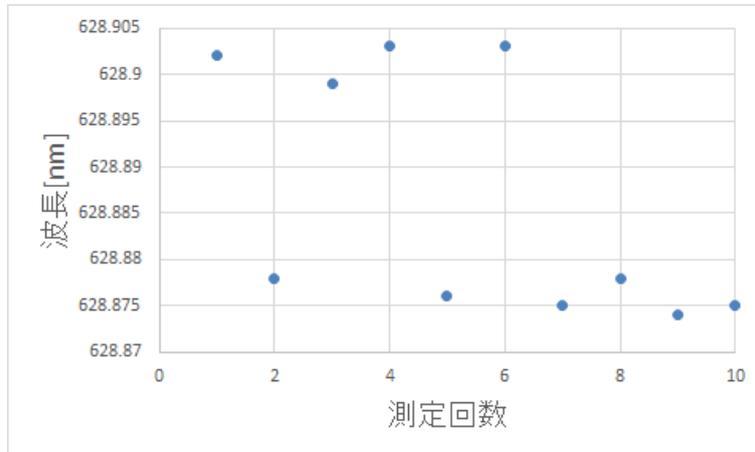


図 2: 10 回の測定結果

れており、平均値の上の部分と下の部分だけで見てみると、小数点以下三桁目が少しふらついているだけで、予想されていた精度は出ている。なぜこのような問題が起きているのか考えてみると、一番最初に考えられることは端子が断線しているのではないかということである。今回の測定の数値とデータ点数だと数値にして 32 つまり 6 番目の端子が断線していると今回の測定データのようなことが起きると考えられる。また他にも、測定におけるノイズによって数値を数え間違えることが波長の決定精度に大きな影響を与えていると考えられる。

4 He-Ne の安定度診断

基準となるレーザーとして He-Ne レーザーを用いることが出来るのか調べるため、つまり長時間の可動によってどの程度波長が変化するかを調べるために測定を 3 日連続で行った。測定は、一回につき 10 回波長を測定し、その平均と相対誤差を求めた。まずレーザーのスイッチを切らずに常につけっぱなしのまま 3 日測定し、その後測定が終わる度に、一度スイッチを落として 3 日測定を行った。3 日連続で測定を行った結果表のようになった。

1 日目は波長が $630.23 \pm 0.02\text{nm}$ 、二日目は $629.9 \pm 0.1\text{nm}$ 、三日目は $629.886 \pm 0.006\text{nm}$ となった。

初日、二日目の不確かさが大きくなっている要因としては、動き初めてから測定をスタートするまでの時間が短く動き始めの振動のノイズを計測していたために大きくなってしまったと考えられる。結果として、3 日連続で測ると波長にして 1nm 近くずれることがわかった。

次に、測定が終わるとレーザーの電源を落とし、測定の前に電源をつけ発振が安定するのを待って計測を始めるという方法で 3 日連続で測定を行った。

結果は 1 日目は $629.289 \pm 0.006\text{nm}$ 二日目は $628.893 \pm 0.006\text{nm}$ 三日目が $628.886 \pm 0.004\text{nm}$ となった。

日によって測定した He-Ne レーザーの波長は大きくずれることがわかった。また、そのズレはレーザーの電源を付けたままであろうが、一度電源を落とそうが変わらず変化する。

5 まとめと展望

デジタルボードによる測定においても小数点以下 2 桁目の精度しか出ていない。アナログボードにおける不確かさより、理論的には測定に 54cm を動かせばスペックを満たすはずであったが、およそ 25cm を動かしたところで、波長の精度として要求されていたものの三倍近く精度が悪い。この精度の悪い要因としては、コンパレーターの仕様上ノイズが基準電圧を超えるようになってしまうとそれを干渉縞として数えてしまっていることが考えられる。また、He-Ne レーザーは想定していたよりも安定度がないことも分かり。最大で 1nm もずれてしまうことが分かった。このため He-Ne レーザーを基準のレーザーとして使用することは困難であり、本研究ではグレーティング式波長計を用いて Li_6 の原子線にロックされた色素レーザーを基準のレーザーとして用いた波長計の複製のようなものになった。しかし、我々の実験室においては色素レーザーは日常的に使われており、常に基準のレーザーとして使用できるという意味では、波長測定システムを開発したと言えるであろう。今後の課題として測定精度を上げるための方法としては、スライドステージを図 6.1 のように動かすことによって光路差を今までの二倍にすることで、データが増え精度が上昇すると考えられる。

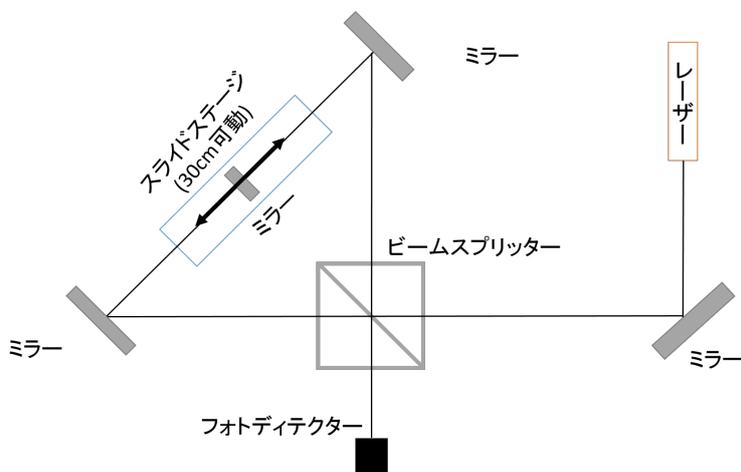


図 3: 改良光路

参考文献

- [1] 原子吸光光度計基礎講座 第 4 回 光源と試料室について
,<http://www.hitachi-hightech.com/hhs/products/tech/ana/aa/basic/aa_course4.html>
(2017/1/30 アクセス)
- [2] 堺洋貴 村田義光, マイケルソン干渉計を用いた波長計の製作, 卒業論文
- [3] 中西聡志, マイケルソン干渉計を用いる水中超音波の可視化, 修士論文