

A5 レーザー干渉を利用した基礎実験

1. 実験の目的

レーザーの重要な性質として、可干渉性が良いことが上げられる。この性質を利用し、レーザーの干渉計測を用いて様々な物理量の計測が試みられている。本実験では2つの干渉計、マイケルソン干渉計及びマッハ・ツェンダー型干渉計を組み、レーザー干渉の様子から空気の屈折率を求める。

2. 原理

2.1 光の干渉

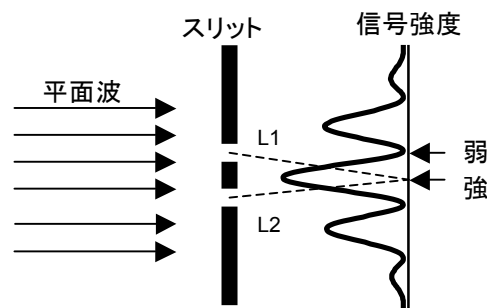
光とは波であり、波の位相関係によって強め合ったり弱めあったりする。まず平面波を考え、2本の平行スリットに入射する場合を考えよう。平行スリットから距離 L だけ離れた所に置いたスクリーンには、明暗の縞模様が観測できる。この現象は光の干渉と呼ばれ、このとき、2本のスリットと明暗の位置を考えると、各スリットからの距離が等しい、または光の波長の整数倍であるとスクリーン上で明るい縞が見え、逆に距離が $(m+1/2)\lambda$ (m は任意の整数)であれば暗い縞となる。

これを光路内に任意の屈折率 n をもった長さ L の物質が存在する場合に一般化すると、光学的距離 $D = nL$ の差が上記の条件の時、干渉により強めあったり弱めあったりする。まとめると、

$$\text{強めあう場合： } \Delta D = (n - n_0)L = m\lambda$$

$$\text{弱めあう場合： } \Delta D = (n - n_0)L = (m + 1/2)\lambda$$

である。

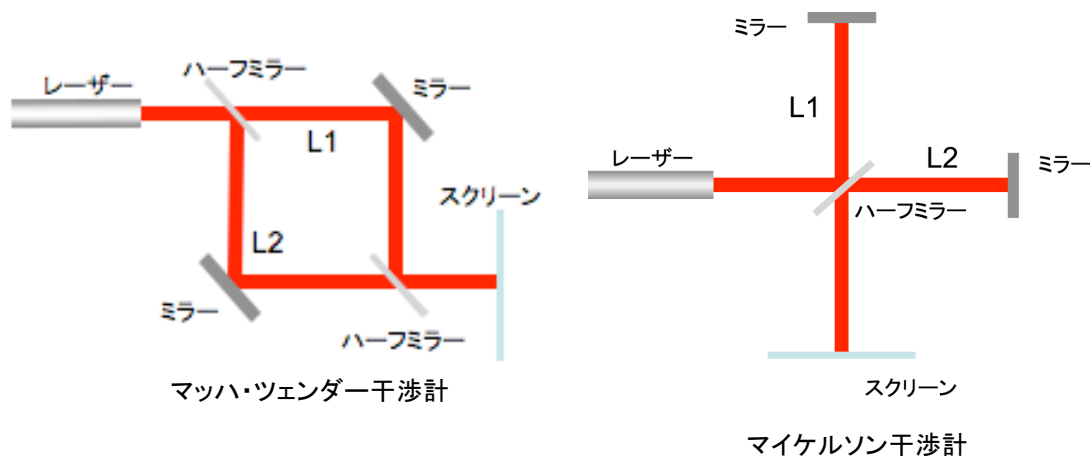


2.2 干渉計

上記のような光の性質を利用し、干渉縞を観測することで様々な物理量を計測することが出来る。このような装置は干渉計と呼ばれ、対象測定物に応じて様々な手法がとられている。一般によく知られているのは、レーザーの波長や微小距離を計測するマイケルソン干渉計、流体の計測に用いられるマッハ・ツェンダー干渉計、光学素子の波面歪み計測を行う。フィゾー干渉計などである。本実験では、レーザー波長を求めるためマイケルソン干渉計を組み立て、さらに空気の屈折率の気圧依存性を計測する目的でマッハ・ツェンダー干渉計を組み立てる。

2.3 マッハ・ツェンダー干渉計の原理

レーザーを一旦2つの光路に分けた後、再度1つに重ね合わせると、光路差に応じて干渉縞が生じる。この干渉縞のパターンを観察することにより、2つの光路の微妙な相違を測定する。マッハツェンダー干渉計は、下の図中の光路L1とL2の光路差を利用した干渉計で、L1とL2の距離を同一にしておき、一方の光路に透明体（固体・液体・気体）の被測定物を入れると、その屈折率に応じて干渉縞が変化する。その変化量を観測し、物質の所得性を計測することが可能となる。



2.4 マイケルソン干渉計の原理

マイケルソン干渉計は一つのハーフミラーでレーザーを2つの光路に分けた後、それぞれをミラーで折り返して最終的に一つに重ねることで干渉縞を生じさせる。L1 または L2 のどちらかに光路差を与えると、光路差 $1/4$ 波長分に

つき干渉縞がひとつ動く。微小な距離の測長、光波長及び波長比の測定、屈折率、分散率の測定などや、重力波検出などにも応用されている。

3. 実験の注意事項

本実験では2班に分かれ、各班がマイケルソン干渉計とマッハ・ツェンダー型干渉計を組み立て、干渉縞の観察を行う。実際のレーザーや光学素子を使用することは初めてである学生が多いと思われるので、以下に本実験の注意事項を記す。

3.1 レーザーを直接見ない

実験は5mWの出力があるクラス3Rのヘリウムネオンレーザーを使用する。クラス3Rのレーザーはレンズで集光して目に入れると一時的あるいは恒久的に目に障害が出るおそれがあるため、絶対レーザーを直視しないこと。ミラーからの反射光も同様に危険である。危険を避けるため、レンズの調整時は必ずNDフィルターを入れておくこと。またミラーの反射光が目にはいるのを避けるため、ミラー類は必ず下で指定された部分のみさわること。

3.2 ミラー面を直接手で触れない

使用するミラー類は面の平坦度が数百ナノメートルの非常に精密な物を使用する。そのため、手で触れ指紋がつくと、干渉縞が見えなくなる。ミラー調整をするときマイクロメータを回すが、絶対ミラー面にさわらないこと。調整時にビニール手袋を必ず使用する。

3.3 光学架台によりかからない

干渉縞は振動があると不安定に動く。そのため、光学架台ではよりかかった体重をかけたりしない。ノートや筆記用具は別の台に置くこと。

3.4 実験室の物をさわらない

実験室では高額な機器がおいてあり、様々な研究が行われている。本実験用に準備されている物以外は絶対さわらないこと。

4 実験の手順

2 班に分かれ、それぞれがマイケルソン干渉計及びマッハ・ツェンダー干渉計の組み立てを行う。各班がそれぞれの干渉計を使った 2 つの計測を交代で行う。ただしレーザーの光源は共有であるので、以下のレーザー光源の設置を行った後、5 章マイケルソン干渉計の組み立て、6 章マッハ・ツェンダー干渉計の組み立てに従って干渉計を組み立て、観測を行う。それぞれの観測が終了次第、それぞれもう一つの干渉計で計測を行う。

4.1 レーザー ON

実験ではダイオードレーザー、またはヘリウムネオンレーザーのどちらかを用いる。ダイオードレーザーの場合、レーザーモジュールは右図のような外観をしている。コードの反対側からレーザーが出るので絶対観かないこと。

ここからレーザーが出るので観かない



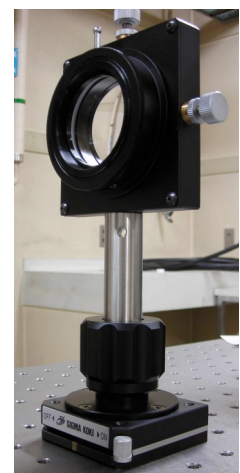
レーザーのスイッチは下図のコントローラーを用いる。まず右側の「POWER」スイッチを押し緑色のランプがついたことを確認した後、左側の「LD」スイッチをオンにし、赤色のランプが点灯すればレーザーが照射される。

ヘリウムネオンレーザーの場合、右図のような外観をしており、この場合もコードの反対側がレーザー出口なので気をつけること。レーザーのスイッチは右図のようなコントローラーのキーを「O」から「II」に回すことで青色のインジケータが点灯しレーザーがでる。

4.2 凸レンズの設置

レーザーはあらかじめセットされている対物レンズに入った後集光され、その後拡がりながら伝搬する。ここで凸レンズを光路に入れ平行ビームを作る。

まずレンズの中心にレーザーがくるように高さを調節する。レーザーがどこに来ているかの確認は、紙などにあてて光を見ること。絶対に覗き込んではいけない。定盤と光学素子はマグネットベースで固定されているため、一番下の四角いベースのレバーを、ON にすれば固定され、OFF にすれば解放される。また高さの調節は銀色のロッドを上下に動かすことで行う。マグネットベー



スを固定し、銀色のロッドをしっかりと持ち、ロッドが刺さっている黒いノブを時計回りに回すと固定が解放され、ロッドを上下に動かすことが出来るようになる。ロッド位置調整、逆方向にとまるまでしっかりと回せば固定される。

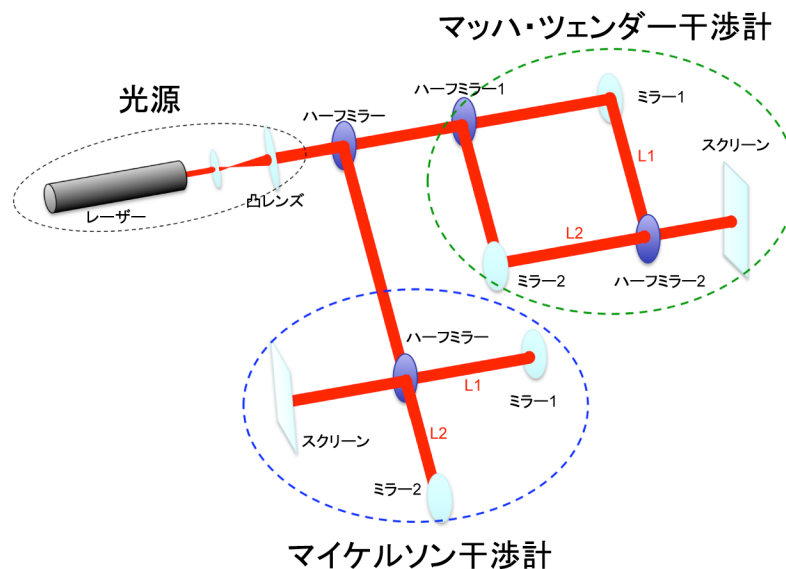
レーザーはレンズホルダーの飛び出た方から入れる。レーザー軸に対してレンズを前後に動かし、ビームの大きさが近い位置でも遠方で観測しても変わらなくなるような位置にレンズを動かし、固定する。

5 マイケルソン干渉計

使用物品：

ハーフミラー 2ヶ

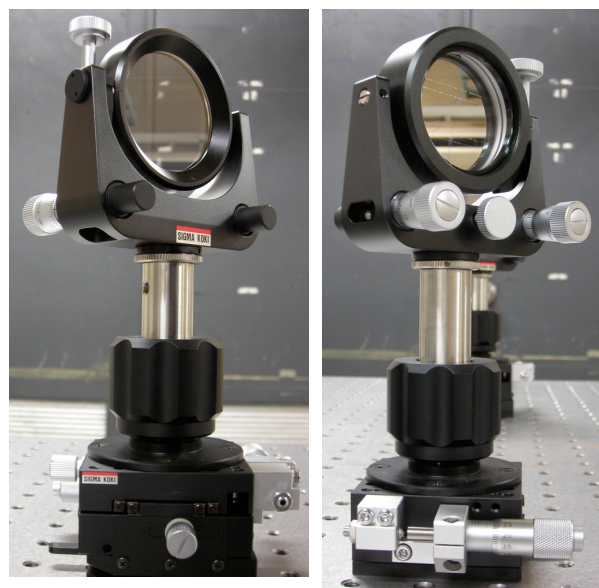
ミラー 2ヶ



5.1 光路L1の設置

次に光路の片側を設置する。再度注意するが、絶対ミラー面に素手でふれないこと！

手順としては先ずハーフミラーを置き、マイケルソン干渉計とマッハ・ツェンダー干渉計のビームを分割する。次にマイケルソン干渉計用にハーフミラーを置き、反射されたレーザーを同



じ方向に折り返すようミラーを設置する。

右図の左側がハーフミラーで、右側がミラーである。実際にはホルダーの厚さが厚い方がハーフミラーである。またどちらも裏表があるので注意すること。ミラー面の下側につまみが3つ並んでいる方が裏側である。レーザーの反射面は必ず表面とすること。また、反射光が目に入らないよう十分注意して作業すること。

凸レンズからのレーザーにハーフミラーを於いて透過光、反射光の2つの光路を作る。ビームが欠けないよう両方のパターンを見ながら設置する。マグネットベース及びロッドの高さ調整の方法は凸レンズの場合と同じである。同様にしてマイケルソン干渉計のハーフミラーを設置する。

続いてミラーを設置する。レーザー反射方向に適当な場所（20cm程度）にミラーを置き、入射レーザーに反射レーザーが重なるようにミラーの角度を調整する。同様に反射光が欠けないようにミラーの位置を調整し、マグネットベースで固定する。

5.2 光路L2の設置

反対側の光路を設置する。レーザー透過側にL1で置いた位置と同じくらいの距離に反射角度が180度になるよう調整しマグネットベースを固定して設置する。このときにデジタルマイクロメータがついてあるミラーを使用すること。

5.3 干渉パターンの観測

L1から戻ったレーザーがハーフミラーを透過し、またL2からのレーザーがハーフミラーで反射することで、L1と逆方向でレーザーが重なり、2つの光軸がほぼ完全に重なり合っていれば干渉縞（明暗の線が交互に並ぶ）が確認できる。ハーフミラーを出た直後と数mm離れたところの2カ所で光がきちんと重なるようL1及びL2のミラーのつまみを回し調整する。

ミラーの動かし方は、ミラー下部の3つのつまみの内、端の2つを用いる。上方に縦つまみがついている方のつまみがミラーを上下方向に傾けるつまみで、もう一方が左右方向に傾けるつまみである。光軸が重なり始めたら干渉縞が見え始める。干渉縞の明暗の間隔が1mm程度になれば干渉縞の動きを観察しやすくなる。

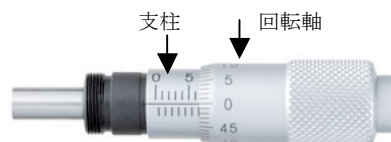
＜考察 1＞

ミラーの傾きをさわることで干渉縞がどう変わるかを観測し、干渉縞が出来る仕組みとなぜそうなるかを考察せよ。

＜考察 2＞

ミラーのマグネットベース上のマイクロメータは、ミラーを平行に動かすことが出来る。どちらかのミラーのマイクロメータを1目盛り動かしたとき、干渉縞がどれだけ動くかを観察する。移動量と目盛りの関係からレーザーの波長を求めること。必要に応じてスクリーンや方眼紙で観察し、また必要であればデジタルビデオカメラで撮影してデータを備え付けのPCで取り出すこと（USBケーブルカメラとPCにつなぎ、カメラの電源を入れるとカメラ内のデータにアクセスできる）。文献等でオレンジ色レーザーの波長を調べ、実験結果と比較し、その妥当性を論ぜよ。

＊ マイクロメータの読み方：支柱と回転軸両方に目盛りが打ってあり、ノギスと同じ原理で移動量を読み込む。写真では支柱は0.5mm 間隔で目盛りが打っており、回転軸はその50分割である。実験で使用する2連マイクロメータはさらに内側に微動マイクロメータがついており、支柱は25 μm 間隔の目盛りで、回転軸は同じくその50分割である。



6 マッハ・ツェンダー干渉計

使用物品：

ハーフミラー 2ヶ

ミラー 2ヶ

6.1 光路 L1 の設置

マッハ・ツェンダー干渉計用に分配されたレーザーに、光路を2つに分けるためさらにハーフミラーを設置する。続いて透過光側に20cm程度の距離を置いてミラーを置き、レーザーを直角に反射させる。ビームの欠けがないよう注意して設置し、また同様にミラー・ハーフミラーの表裏に注意すること。

6.2 光路 L2 の設置

反対側の光路を設置する。レーザー透過側に前置いた位置と同じくらいの距離に反射角度が90度になるよう調整しマグネットベースを固定して設置する。

最後に2つのレーザー光路が重なる位置にハーフミラーを設置する。

6.3 干渉パターンの観測

重なり合った2つの光軸がほぼ完全に重なり合っていれば干渉縞（明暗の線が交互に並ぶ）が確認できる。最終ハーフミラーを出た直後と数m離れたところの2カ所で光が重なるようミラー及びハーフミラーのつまみを回し調整する。

調整方法は、片方の光軸を固定し、もう片方の軸を動かすが、光軸を完全に重ねるためには2カ所のミラーを調整する必要がある。同じ軸上の任意の2組のミラー・ハーフミラーを用いる事が出来るが、出口に近い方のミラーを用いて遠い位置でビームが重なるよう調整し、遠い方のミラーを用いて近い位置でビームが重なるよう調整する。これを繰り返し行うことによって光軸を重ねることが出来る。

6.4 セルの設置

2本の光路の片方にステンレス製の差圧計付き空圧セルを入れる。レーザーはセルのウィンドウを通し、空気弁は開けておく。空気弁のコネクタに、注射器がついているチューブを接続する。予め注射器の押し手は外しておく。セルを入れることによって干渉縞の間隔が変わらないことを確認しておく。



6.5 干渉縞のシフト量の計測

始めに現在の干渉縞をデジタルカメラで撮影しておく。次に干渉縞を見ながら注射器の押し手を押し込んでいく。前節と同様に適宜干渉縞を撮影し、データはPCで取り込むこと。

< 考察 3 >

明るい縞が一つ分動いたところで押し込むのを止め、その時の圧力を記入する。同様に明るい縞が2つ、3つ・・・と整数回動いたそれぞれの地点での大気圧を差圧計から読み取った数値より求め記入し、グラフ化して提出すること。必要に応じてノブを開閉して圧力を観測すること。ただし圧力の単位としては $1 \text{ Pa} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ torr}$ であり、1 気圧は 760 torr である。

< 考察 4 >

大気圧と屈折率の関係は Edlén's equation と呼ばれ

$$n - 1 = \frac{P(n_0 - 1)}{720.775} \times \frac{1 + P(0.817 - 0.0133T) \times 10^{-6}}{(1 + 0.0036610T)}$$

の式で与えられる。ここで n_0 は標準大気屈折率、 P は大気圧 (単位は torr)、 T は温度 (単位は °C) である。また、1 気圧、温度 15 °C の時の大気屈折率は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} n_0 - 1 = & 8.34213 \times 10^{-5} \\ & + 2.40603 \times 10^{-2} / [130 - 1/(\lambda[\mu\text{m}])^2] \\ & + 1.5997 \times 10^{-4} / [38.9 - 1/(\lambda[\mu\text{m}])^2] \end{aligned}$$

上式で得られたプロット点も同時にと比較してグラフ化したものを提出すること。さらに考察2で求めたレーザー波長と考察3で求めたグラフよりフリンジシフトから各圧力における空気の屈折率を同時にグラフ上に記すこと。

< 考察 5 >

以上の結果から、なぜ大気圧の変化で屈折率が変化するかを考察せよ。また上式 Edlén's equation は温度変化によっても屈折率が変化することを表しているが、なぜそうなるか簡単に述べよ。

7 レポート

レポートは個人単位で提出する。考察1から考察5までの回答、及びこの実験に対する感想またはレーザーに関して知っていることを記入し、総合研究棟3Fの田中研秘書室（G1-309）で提出すること。実験終了後、1週間以内に提出すること！

参考文献

「レーザーハンドブック」レーザー学会編 オーム社

「現代光科学1—光の物理的基礎」大津元一著 朝倉書店

「工学系の物理学実験」廣川、小倉共編 学術図書出版社