

1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 12 月 9 日木曜日 午後 1 時～午後 3 時半

天気 晴

気圧 1005hPa

気温 25.2℃

湿度 28.5%

2 実験の目的

レーザーの重要な性質である可干渉性を利用したマイケルソン干渉計及びマッハ・ツェンダー型干渉の構造を理解し、実際に組み立て、レーザー干渉の様子から空気の屈折率を求める。

3 実験の原理

3.1 光の干渉

光とは波の一種であり、波の位相関係によって強め合ったり弱めあったりする。はじめに平面波を考え、2本の平行スリットに入射するヤングの実験を考える。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。この現象が光の干渉で、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か光の波長の整数倍であるときスクリーン上で明るい縞が見え、逆に距離が $D = (m + 1/2)\lambda$ (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。

以上より、光路差 ΔD と明暗の縞模様との関係は

$$\Delta D = (n - n_0)L = m\lambda \quad (\text{明線条件}) \quad (1)$$

$$\Delta D = (n - n_0)L = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad (\text{暗線条件}) \quad (2)$$

ただし m は任意の整数である。

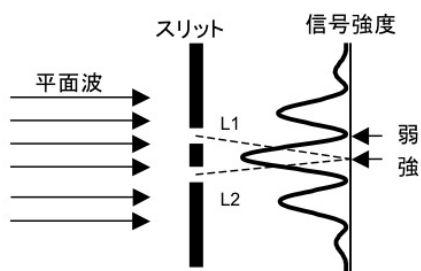


図1 ヤングの実験

3.2 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。このような装置を干渉計と呼び、対象測定物に応じて様々な手法が考案されている。一般によく知られているものに、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がある。それぞれ、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ことで光路差を作って干渉縞を生じさせる。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できる。

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。

3.3 マッハ・ツェンダー干渉計の原理

マッハ・ツェンダー干渉計の概略を図2に示す。レーザーを一旦ハーフミラーを通して同一距離の $L_1 \cdot L_2$ 2つの光路に分ける。そして、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光学的距離が変化し、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。

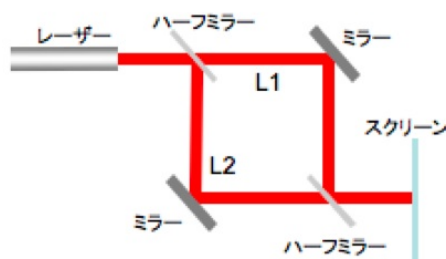


図2 マッハ・ツェンダー干渉計

3.4 マイケルソン干渉計の原理

マイケルソン干渉計の概略を図3に示す。1つのハーフミラーでレーザーを2つの光路 $L_1 \cdot L_2$ 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。 L_1 か L_2 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。

3.5 Edlén's equation

大気の圧力と屈折率の関係は Edlén's equation と呼ばれ、

$$n - 1 = \frac{P(n_0 - 1)}{720.775} \times \frac{1 + P(0.817 - 0.0133T) \times 10^{-6}}{(1 + 0.0036610T)} \quad (3)$$

で表される。ただし、 n_0 ：標準大気の屈折率、 P ：大気圧 [torr]、 T ：温度 [°C] である。

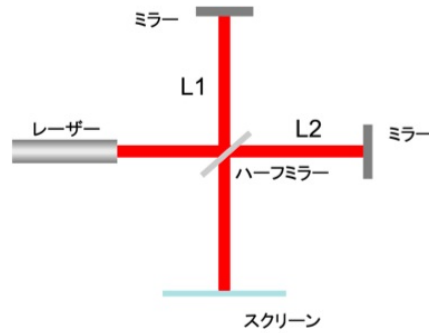


図3 マイケルソン干渉計

また 1 気圧、温度 15 °C の時の大気の屈折率 n_0 は

$$n_0 - 1 = 8.34213 \times 10^{-5} + \frac{2.40603 \times 10^{-2}}{130 - \frac{1}{(\lambda[\mu m])^2}} + \frac{1.5997 \times 10^{-4}}{38.9 - \frac{1}{(\lambda[\mu m])^2}} \quad (4)$$

で与えられる。

4 使用器具及び装置

- 光学架台
- ミラー
- 凸レンズ (f=200)
- ハーフミラー
- He-Ne 気体レーザー (出力 5mW、クラス 3R)
- スクリーン
- 空圧セル
- マイクロメーター
- チューブ
- 注射器
- デジタルカメラ
- パソコン

5 実験結果

実験器具を図 4 のように設置した。レーザーを ON にし、レーザーを出た光が平行ビームになるよう凸レンズを設置した。2 つの干渉計に光を入力するため、ハーフミラーで光路を分けた。その先は図 2・3 で示したように干渉計を準備した。

実験 1：マイケルソン干渉計 はじめにハーフミラーを設置し、反射波を 20cm 程離して置いたミラー 1 でハーフミラーに返すように調整した。同様にミラー 2 もハーフミラーから 20cm 離れた位置に置き、入

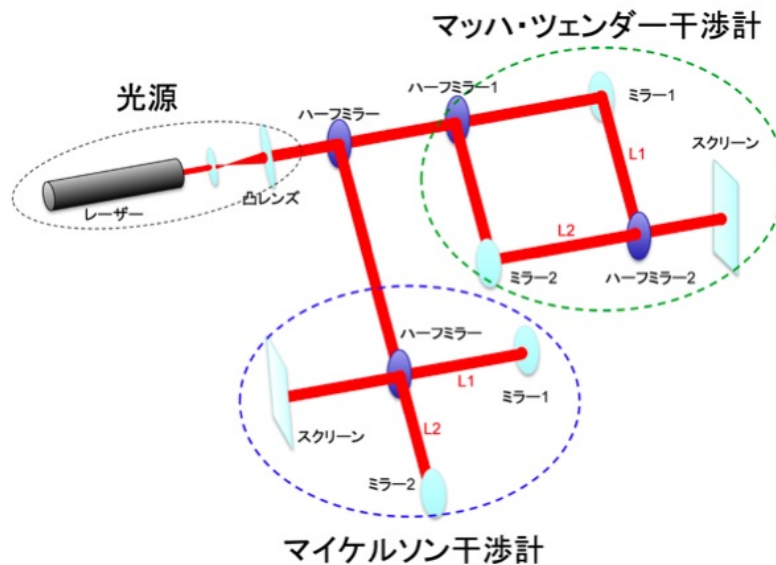


図4 実験装置

射波と反射波が重なるように調整した。この時スクリーンに向かう光軸が重なり、干渉縞が出来ていることを確認した。

次にミラー2を上下左右に動かして、干渉縞の明暗間隔が1mmになるよう調整した。この状態で、さらにミラーを動かして干渉縞の模様がどのように変わるかを観察したところ、干渉縞の幅が大きくなったり小さくなったりし、同時に縞の角度も変化した。ミラーを動かした角度と縞の動いた角度の間には関係はなかった。さらにマイクロメーターを $5\mu\text{m}$ 動かして、干渉縞がどれだけ移動するかをデジタルカメラの動画機能を使って撮影しカウントした。すると、干渉縞は明暗が13本移動したことが分かった。

実験2：マッハ・ツェンダー干渉計 はじめにハーフミラー1を置いて、そこで分けられた透過光側に20cm程離してミラー1を設置しレーザーを直角に反射させた。同様に反射光側もミラー2を設置して、この2つの光路が重なる位置にハーフミラー2を設置した。ハーフミラー1・2とミラー1・2を動かして、スクリーンに干渉縞が見えることを確認した。

次にハーフミラー1とミラー1の間にセルを設置した。セルに接続した注射器を押し込んで、干渉縞の明線がもとの位置から2・3・4本分移動した時のセルの差圧計の値を測った。干渉縞の移動本数とセル内の圧力の関係を表1に示す。

6 考察

1. 干渉縞が出来る仕組みについて述べる。光は横波であるが、図5の様に位相が揃った光が重なった時、節はもともと振幅0のため重なっても0のままで、腹は強め合って振幅が元の2倍になる。その波形を図6に示す。これが空間的に連続的に並ぶことで干渉縞の明点を成す。
同様に位相が π ずれた図7のような光が入射した時は、一方の波の腹ともう一方の波の節が重なって0となるので、合成波は図8のような振幅0の一定波となる。これが干渉縞の暗点である。

表 1 干渉縞の移動本数とセル内の圧力の関係

明るい縞の移動数	差圧計読み [hPa]	気圧 [hPa]	気圧 [torr]	平均気圧 [torr]
2	7	1012	759.0	759.3
2	8	1013	759.8	
2	7.2	1012.2	759.2	
3	12.5	1017.5	763.1	762.8
3	11.5	1016.5	762.4	
3	12	1017	762.8	
4	15	1020	765.0	764.9
4	14.5	1019.5	764.6	
4	15	1020	765.0	

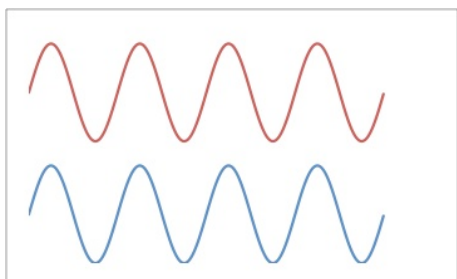


図 5 位相の揃った sin 波が入射した場合

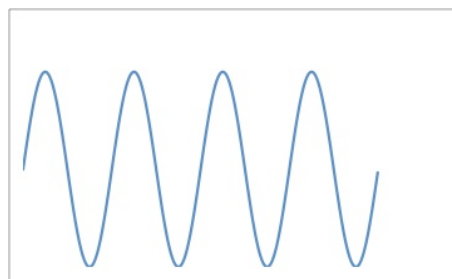


図 6 2つの sin 波が重なると強め合う

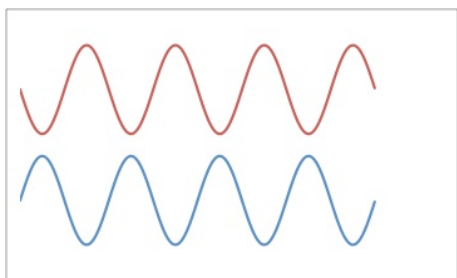


図 7 位相が π ずれた sin 波が入射した場合

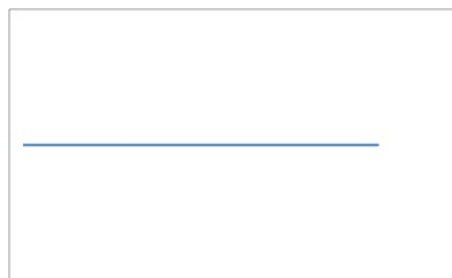


図 8 2つの sin 波が打ち消し合う

よって、干渉縞の明暗は光の位相がどれだけずれるか、すなわち 2つの光の光路差によって決まることが分かる。実験ではミラーの角度をずらすことで、僅かながらレーザー光の跳ね返る角度が変わり、光路差が変化したと考えられる。したがって、干渉縞の間隔と角度（向き）が変化したと考えられる。

2. レーザー光の波長を実験結果より求める。実験原理の章より、明線条件は式 1 である。マイクロメーターで $5\mu\text{m}$ 動かしたとき、すなわち光路差を $10\mu\text{m}$ 変化させたときに明線が 13 本移動したので、

$$\lambda = \frac{\Delta D}{13} = \frac{10[\mu\text{m}]}{13} = 769[\text{nm}] \quad (5)$$

となる。赤色レーザーの波長は約 660nm であるから、実験結果は理論よりも 100nm 以上赤外領域に
よっていることが分かる。このずれの原因として、干渉縞の移動は目測で観察したため、縞の移動数に

誤差があったことが考えられる。ほかに、デジタルマイクロメーター自体の誤差も考えられる。今回の実験ではメーターが表示できる最小の桁のみで動かしたので、有効数字は1桁であった。より精度良く実験を行うためには、マイクロメーターで動かす距離を大きくして有効数字を2桁以上取り、縞の移動数を増やして何度か繰り返して計測することが望ましい。

3. 干渉縞の移動数と大気圧の関係を調べる。表1をもとに、グラフにプロットしたものを図9に示す。プロットした点を通る1次関数を求めたところ、(平均気圧 [torr]) = $2.7875 \times (\text{縞の移動数}) + 753.95$ の関係が得られた。

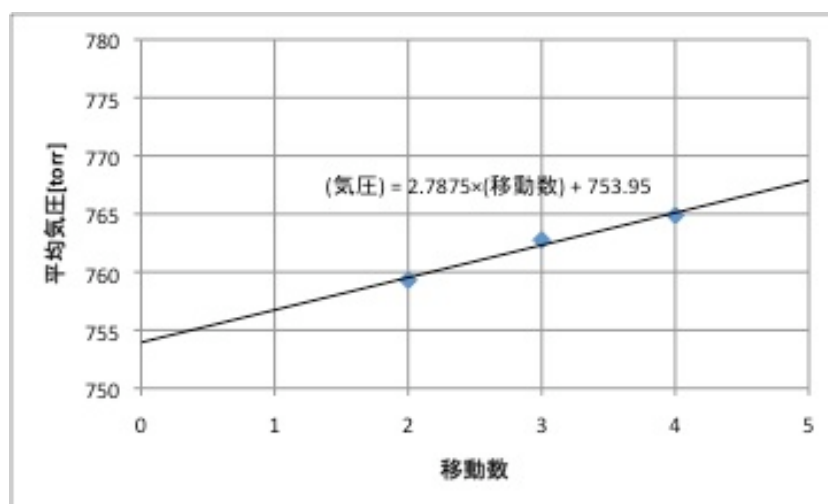


図9 干渉縞の移動本数とセル内の平均圧力の関係

4. 考察2で得られた実験結果より、レーザー光の波長は769[nm]であるから、これを式4に代入すると、 $n_0=1.00027252$ を得た。この値と温度 $T=25.2[^\circ\text{C}]$ を式3に代入し、気圧 $P[\text{torr}]$ の変化によって屈折率がどう変わるかを計算で求めたところ、表2が得られた。

表2 気圧と屈折率の関係

明るい縞の移動数	気圧 [torr]	屈折率
2	759.3	1.000262933
3	762.8	1.000264129
4	764.9	1.000264865

これを図示すると図10のようになった。プロットした点を通る線形近似の式は (屈折率) = $0.000000346412 \times (\text{気圧} [\text{torr}]) + 0.999999903140$ となった。このグラフより、気圧が高くなると、屈折率は比例して大きくなると考えられる。

5. 大気圧が増加すると、単位体積あたりの分子数が多くなり、密度が高い状態となる。なぜなら、気体の状態方程式 $PV=nRT$ より、 P : 圧力、 V : 体積、 n : 分子数、 R : 気体定数、 T : 温度、 d : 密度とすると、

$$d = \frac{n}{V} = \frac{P}{RT} \quad (6)$$

となり、密度は圧力に比例することが示される。さらに上式より、密度は温度に反比例することも証明

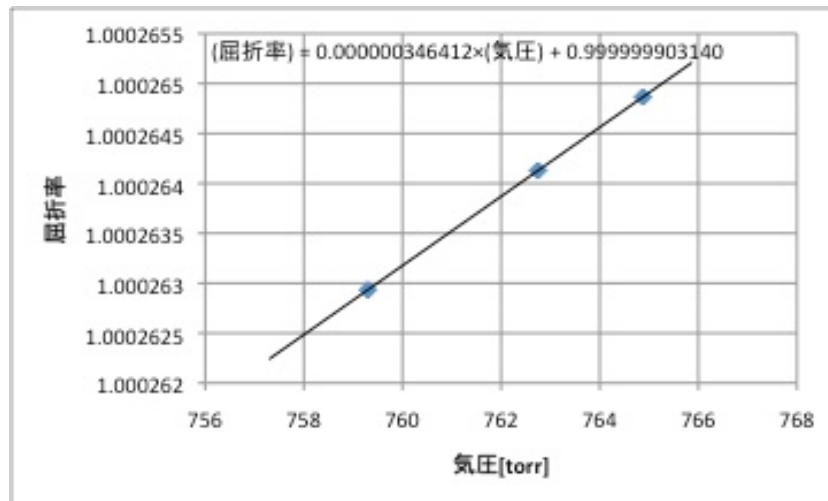


図 10 気圧と屈折率の関係

できる。ただし、この議論は理想気体にのみ成り立つので、実在気体では補正が必要だと考えられる。電磁波にとって気体分子の存在は抵抗となり、圧力が高いほど媒質中で進みにくくなる。屈折率は媒質中の電磁波の進みやすさを表すパラメータであるので、結果的に大気圧が高くなると屈折率も増加すると言える。

7 結論

1. 干渉は 2 つの光の光路差がずれることによって、強め合ったり弱め合ったりして干渉縞を生ずる現象である。
2. 干渉計は故意に光路差を作ることで干渉を起こし、フリンジシフトによって光の性質を調べることができる。
3. 屈折率は大気圧に比例する

8 感想

教科書で習ったことのあるマイケルソン干渉計やマッハ・ツェンダー干渉計を組み立てて、実際に干渉が生じることを確認できて、非常に有意義な実験であった。屈折率の実験値は考察で求めたとおりであるが、セルの幅を測っておけば、式 1 より屈折率の理論値を求めることができたので、実験値と比較することができて良かったと思う。また、干渉縞のシフトを数える時はできるだけ複数回繰り返して、誤差のない計測に努めたい。

9 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の 6 人と、丁寧に指導して下さった先生方・TA の方々に感謝申し上げたい。

10 参考文献

- 実験テキスト「A5. レーザー干渉を利用した基礎実験」
- 「現代光科学 I ―光の物理的基礎」 大津元一著 朝倉書店
- 「大阪大学物理学実験 2008」 大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第 2 版第 1 刷 第 2 編
- 「 \LaTeX 2_ε 美文書作成入門 改訂第 4 版」 奥村晴彦著 技術評論社 第 4 版第 6 刷

以上