

レーザー マイケルソン干渉計

富山大学理学部物理学科

2022 年 3 月 24 日

Contents

1 はじめに	2
2 マイケルソン干渉計の基礎知識	3
2.1 マイケルソン干渉計の構成	3
2.2 マイケルソン干渉計内の光	3
2.3 ビームスプリッター (BS)	4
2.4 スクリーン上の干渉光	4
2.5 マイケルソン干渉計とエネルギー保存則	6
2.6 アラインメント調整	6
2.7 その他の干渉を阻害する要因	8
2.8 課題 1	8
3 実験	9
3.1 第 1 日: マイケルソン干渉計の組み立て	9
3.1.1 概略	9
3.1.2 干渉計組み立て	9
3.1.3 アラインメント調整	11
3.1.4 エネルギー保存則の確認	13
3.1.5 波長の測定 (余力がある場合)	14
3.2 第 2 日: 熱膨張率の測定	16
3.2.1 実験の目的	16
3.2.2 測定原理	16
3.2.3 実験方法	17
3.2.4 課題 2	19

1 はじめに

干渉計は光の干渉を利用した測定装置であり、物差しで言う目盛りは光の波長に相当するため、精度の高い測定が可能である。干渉計はいろいろな種類があるがここでは A. Michelson¹ が考案したマイケルソン干渉計に関する実験を行う。様々な精密測定で用いられているが、基礎物理の観点から最も有名な例は特殊相対性理論の基本原則である光速不変の原理の検証（Michelson-Morley の実験、1887 年）と一般相対性理論が予言する重力波の検出（2015 年²）である。

この実験では実際にマイケルソン干渉計を組み立て、その基本的性能を学ぶ。またマイケルソン干渉計を用いた測定として、アルミの熱膨張率の測定に取り組む。

¹1907 年ノーベル物理学賞。なお自然科学部門では初のアメリカの受賞である。

²2017 年にノーベル物理学賞

2 マイケルソン干渉計の基礎知識

2.1 マイケルソン干渉計の構成

マイケルソン干渉計の測定原理について説明する（図 1）。右の laser と書かれた光源から発せられたレーザー光は中央部にあるビームスプリッター (Beam splitter、以下では BS) で直行する 2 方向に分割される。その後それぞれのビームは鏡で反射され、再びビームスプリッターに戻りスクリーンに干渉光として映し出される。

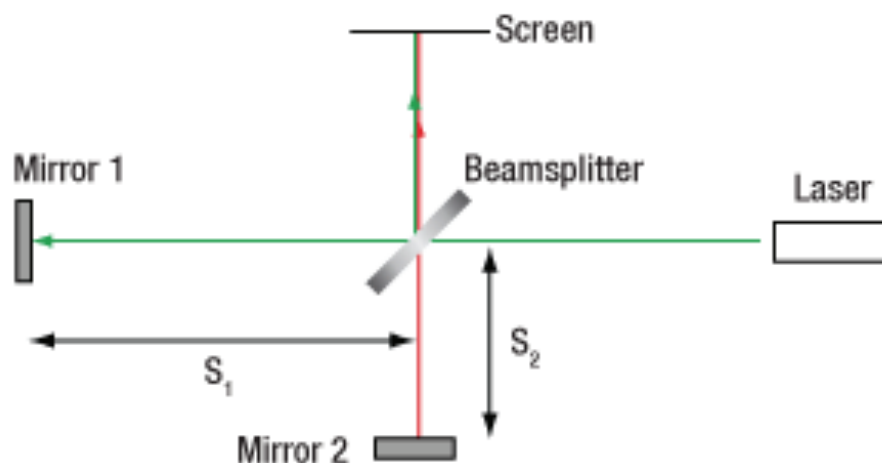


Figure 1: マイケルソン干渉計概要図: 右のレーザーから光が緑線にそってビームスプリッター (BS) まで進む。ここで BS を透過する光と反射する光の二手に分かれる。BS で透過 (反射) した光は緑 (赤) の線に沿って進み、鏡 1 (2) で反射されて BS に戻る。分かれていた光は再結合し、図の上方のスクリーンに向かう。

2.2 マイケルソン干渉計内の光

光源からの入射光 (の電場) を

$$E_{\text{in}} = E_0 \exp(i\omega t) \quad (1)$$

とする。 ω は光の角周波数。 i は虚数単位である³。Mirror1, Mirror2 での振幅反射率を 1、BS での振幅反射率、振幅透過率を各々 $1/\sqrt{2}$, $1/\sqrt{2}$ とすれば⁴スクリーンに当たる光 $E_{1,2}$ の振幅は次のように書ける。なお $E_{1(2)}$ は BS をまず透過して（反射されて）、鏡 1（2）で反射され、BS を反射されて（透過して）スクリーンに当たる光の電場である。

$$E_1 = \frac{1}{2} E_0 \exp [i(\omega t - \phi_1)] \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} E_0 \exp [i(\omega t - \phi_2)] \quad (3)$$

$1/2$ の係数は $E_{1(2)}$ いずれも BS の 1 回反射され ($1/\sqrt{2}$ 倍)、1 回透過したこと（さらに $1/\sqrt{2}$ 倍）に由来する。 $\phi_{1(2)}$ は BS で分割された後、鏡 1（2）まで往復して BS に戻ってくるまでに光が経験した位相である。鏡 1（2）の反射は位相に影響を及ぼさないとすると

$$\phi_{1(2)} = \frac{4\pi S_{1(2)}}{\lambda} \quad (4)$$

$S_{1(2)}$ は図 1 にあるようにビームスプリッターと鏡 1（2）との距離、 λ は光の波長である。

2.3 ビームスプリッター（BS）

ここで話を進める前に少しビームスプリッター (BS) の説明をしておこう。図 2 はキューブ型の BS の構造を示している⁵。キューブ型の BS は 2 つの直角型のプリズムの斜面に BS として光を 1:1 に分割する光学薄膜を蒸着し、斜面同士を接合したものである。この BS の左から来て上に反射される場合光の位相が変化しないと仮定すると右から来て下に反射される場合は位相が $180^\circ (\pi \text{ radian})$ ずれる。これは前者の振幅反射率を $1/\sqrt{2}$ とすると後者は $-1/\sqrt{2}$ であることを意味している。屈折率が異なる物質の境界面での反射でも同じようなことが起きる⁶がこれは BS も含め一般的に成立する法則である⁷。

2.4 スクリーン上の干渉光

スクリーンに現れる光の強度 I は E_1 と E_2 が干渉した光の振幅の絶対値の 2 乗であるから

$$I = |E_1 - E_2|^2 = \frac{1}{2} E_0^2 [1 - \cos(\phi_1 - \phi_2)] \quad (5)$$

³ このように振動を虚数を引数とする指数関数で表すことが多い。実数を引数とする三角関数より扱いやすい

⁴ ちょっと妙に見えるかもしれない。しかし BS は光のエネルギー（もしくはパワー）を 2 分割する。エネルギーは電場振幅の 2 乗に比例することを思い出すと納得できるであろう。

⁵ AR coating は Anti Reflection coating のことであり、反射防止膜を意味する。また BS coating は Beam-Splitters coating のことであり、BS として光を 1:1 に分割するための膜を意味する。

⁶ 高校の物理で屈折率が異なる境界で屈折率の大きい方で反射する場合と小さい方で反射する場合の違いについて議論したことを思い出してほしい。

⁷ 詳細は省略するが、この関係はエネルギー保存則と物理法則の時間反転対称性から導くことができる。

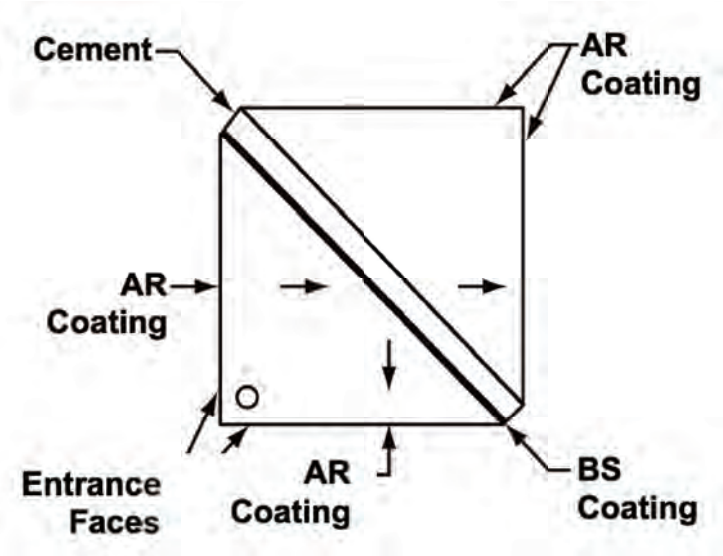


Figure 2: BS の構成図。2つの直角型のプリズムの斜面に BS として光を 1:1 に分割する光学薄膜 (BS coating) を蒸着し、斜面同士を接合したものである。AR coating とは反射率をほぼ 0 にする coating である。BS 上の矢印が光源から来た光が進む方向である。

である。 E_1 と E_2 の光はそれぞれ一度だけ BS と反射しているが、反射面が異なる。ここでは E_1 の光は反射で位相が変わらないと仮定した。先ほどの議論からこの場合 E_2 の光は位相が 180° ずれるので符号が異なる。式 (4) を代入すると

$$I = |E_1 - E_2|^2 = \frac{E_0^2}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi(S_1 - S_2)}{\lambda} \right) \right] \quad (6)$$

これからわかるように I は $S_1 - S_2$ に依存する。たとえば鏡 1 がビームスプリッターに近づいて、鏡 2 が遠ざかると I は変化するが、両方の鏡が同じ距離近づくと変化しない。

マイケルソン干渉計は両腕の長さの差 ($S_1 - S_2$) を検出することが出来る。さらに半波長 $\lambda/2$ を周期とする周期関数であるので半波長を 1 目盛りとした物差しと同等である。可視光の場合波長は $1 \mu\text{m}$ より短いので精度の高い測定が可能になる。

2.5 マイケルソン干渉計とエネルギー保存則

マイケルソン干渉計は精密な測定装置であることは理解できたが、エネルギー保存則の点から少し妙な点がある。鏡が動くことによってスクリーン上の光の強度 I 、つまり光のパワーが変化する。一方レーザー光源からの光のパワーは変わらず一定である。式 (6) によると $I = 0$ とすることも可能であるがこのとき光のパワーはどこへ行ってしまったのだろうか。実はスクリーンに行かないパワーはレーザー光源の方に戻っている。図 1 を見るとわかるように鏡 1 で反射されてレーザー光源に戻る光はビームスプリッターを 2 回透過する（反射することはない）。一方鏡 2 を反射してレーザー光源に戻る光はビームスプリッターの同じ面で 2 回反射される。つまり反射で位相が 180° 変わるとしても 2 回の反射で相殺される。このためレーザー光源に戻る干渉光の強度 I_{back} は以下ようになる。

$$I_{\text{back}} = |E_1 + E_2|^2 = \frac{E_0^2}{2} [1 + \cos(\phi_1 - \phi_2)] \quad (7)$$

$I + I_{\text{back}}$ を計算すると E_0^2 となる。これは光源からの光のパワーであるのでエネルギー保存則が成立していることがわかる。

2.6 アラインメント調整

マイケルソン干渉計の基本原則を説明してきたが、現実のマイケルソン干渉計において光の干渉を実現させるのは実は容易でない。その理由の一つが鏡 1, 2 の向きが適正でない場合である。まず大きく鏡の向きがずれていればスクリーン上でビームスポットが重ならない。鏡 1 と 2 で反射された光がビームスプリッターを通ったあときちんと重なる（スクリーン上でスポットが重なるだけでなく進行方向も同じ）様にする必要がある。これを実現するための鏡 1, 2 の傾き調整をアラインメント調整と呼び、干渉計実験の肝となっている。

図 1 において Mirror 2 がごくわずかに傾いたとしよう。スクリーン上で Mirror 2 からのビームと Mirror 1 からのビームの位置がずれるがそのずれはビームよりずっと小さいとする。このような場合何が起こるであろうか。図 3 は Mirror 2 のみ拡大したものである。図 1 ではビームは線であるが、現実には幅を持っているので図 3 では幅を持つこと（ビーム直径）を強調している。点線は傾いていない鏡を表し、実線が傾いた鏡を表す。Mirror 2 が傾いたことで、ビームの右の部分は左の部分より BS と Mirror 2 との間の往復距離が短くなっている。短くなった往復距離がちょうど光の波長の半分としよう。さらにビームの左の部分がスクリーンに到達したとき、Mirror 1 からの光との干渉の結果が明るいとする。ビームの右の部分と Mirror 1 からの反射光の干渉は Mirror 2 からの反射光の位相が 180° ずれることにより相殺して暗くなる。傾きが倍になるとビームの右と左の端は明るく、真ん中が暗くなる。このように傾きが大きくなると干渉光のビームの中に縞が現れ、その数が大きくなる。

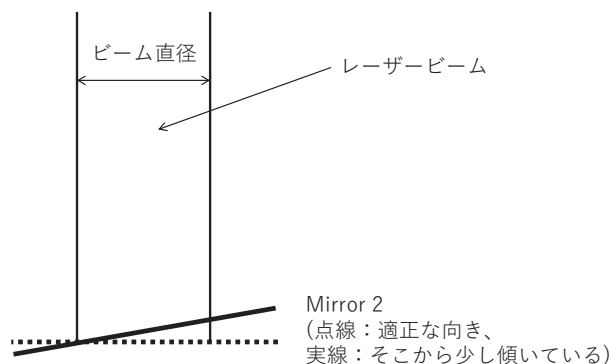


Figure 3: Mirror 2 がわずかに傾いたときに生じる、光の往復距離の変化。点線が適正な方向を向いた Mirror 2 で、実線がそれからすこし傾いた場合。傾いたことによりビームの左端では光の往復距離は変わらないが右端では少しだけ短くなる。これはスクリーン上の干渉に影響を及ぼす。

鏡を適正な向きからわざとずらした場合を考えたが、現実には鏡の角度を調整するときは逆でアラインメント調整を行うと縞が現れ始める。これは光が干渉するようになった証拠であり、鏡の向きは完璧ではないがそれなりに適正な方向を向いている。そのような状態になったら慎重に鏡の角度を調整し、縞の数が少なくなるようにする。縞の線が縦のときは鏡の左右方向を調節し、横のときは上下方向を調節する。全体の明るさが均一になったら向きが完全に適正になったとみなしてよい。ただし鏡面の歪みなどにより一様な明るさとならないこともある。

この実験では鏡の向きを完全に揃えたあとわざと少しずらす便利ことがある⁸。干渉光の明暗の変化を観察するとき、全体が一様に明るくなったり暗くなったりするより、数本の縞がずれる方が観測しやすい。鏡の向きを保ったまま鏡の位置を平行移動させると縞が移動する。明るい線が隣の明るい線の位置まで移動したとすると、これが鏡の位置が波長の半分（往復距離が波長分）ずれたことに相当する。

⁸このわざと傾ける方法は Michelson-Morley の実験でも採用された。現在は光の強度に比例した電流を発生させる光検出器があるので、アラインメントは完全に調整する。例えば重力波検出の場合は如何に速やかにアラインメントを調整し、適正な状態を維持させつづけるかということが重要な課題の一つとなっている。

2.7 その他の干渉を阻害する要因

鏡の不適切な角度以外にも光の干渉を阻害する要因は以下のようなものがある。いずれも腕の長さの差 $S_1 - S_2$ が大きいときに生じうる問題である。このためマイケルソン干渉計は必要がなければ極力 S_1 と S_2 をなるべく同じようになるようにしている。

コヒーレント長

レーザーは理想的な波動に極めて近いが完璧に同等というわけではない。光は励起状態にある原子や分子がより低いエネルギー状態に遷移するときに放出される。このような光の持続時間は 10^{-9} 秒程度である。このような光を干渉計の光源として使うと両腕を往復する時間がこの時間以上ずれていると干渉しない。干渉可能な時間差に光速をかけたものをコヒーレント長とよぶ。干渉計の腕の長さの差がコヒーレント長より長ければ干渉しない。レーザーは誘導放出という現象を利用しているため、コヒーレント長は長くなっている。具体的な値はレーザーの種類によるがこの実験で使うレーザーは腕の長さの差が 1 cm 以下なら問題ない。

ビーム径の違い

光は長い距離を伝搬すると回折によって徐々にビーム径が広がっていく。マイケルソン干渉計の腕の長さが大きく異なると鏡 1 と 2 で反射されてスクリーンに到達した光は伝搬距離の差によって、ビームの大きさが異なってしまう。これは干渉の効率を下げることになる。

2.8 課題 1

スクリーン上の干渉光の強度を表す式 (5)、およびレーザー光源に戻る光の強度を表す式 (7) を式 (2)、(3) から計算せよ。過程も記すこと。

3 実験

この実験のスケジュールは以下の通りである。

- 第1日：マイケルソン干渉計の組み立て。実際に干渉計を組み立てて、光の干渉を実現させる。基本的な性能などを確認する。さらに光の波長を測定する。
- 第2日：熱膨張係数の測定。片方の鏡をアルミ棒につけてこの棒をヒーターで温めて熱膨張係数を見積もる。

3.1 第1日：マイケルソン干渉計の組み立て

3.1.1 概略

マイケルソン干渉計を組み立てて、光の干渉を実現する。エネルギー保存則が成立することを確認する。余力があれば光の波長を測定する。なお第2日目にも共通する注意として測定中は机やブレッドボードには触れないようにする。干渉計は非常に感度が高いためわずかにふれてもその影響が無視できない場合がある。

3.1.2 干渉計組み立て

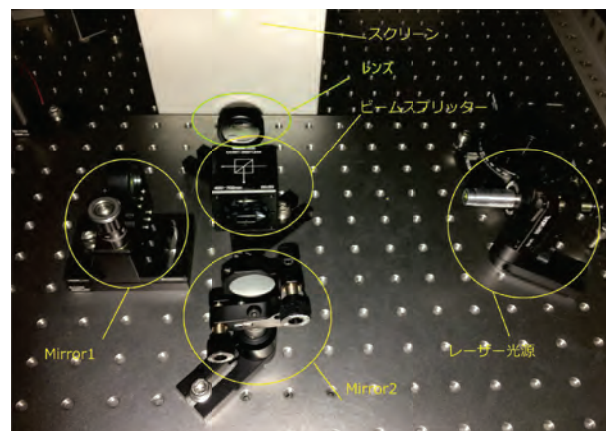


Figure 4: くみ上げたマイケルソン干渉計の写真。

図 1,4 を参考にマイケルソン干渉計を組み立てる（実験開始の時点では完全に片づけられている）。図 4 のようにブレッドボード上に組み立てる。これは M6 のネジ穴が 25mm 間隔で開けられている。M6 のネジをつかって鏡やレンズをとりつけた支持系をブレッドボードに固定する（磁石のおかげである程度の力を加えてもボード上を動かないようになっているが、調整が終わって本格的な測定の前はきちんと締めること）。ネジを締める（赤い取っ

手の) レンチがあるので利用してほしい。図 1 にはないが、図 4 にあるようにスクリーンのすぐ前にレンズを置くこと。ただしレンズを置くのは Mirror 1 と 2 からの反射光がスクリーン上で大体重なってからでよい。

各部品の説明は図 5、6、7、8、9 を参考にせよ。

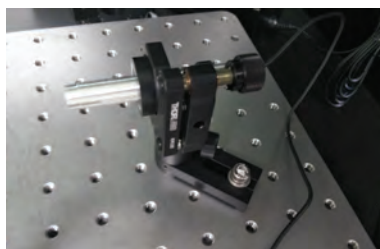


Figure 5: レーザー光源：写真で金属の灰色の筒の左端から光が出る。覗き込まないこと。また左端に手を触れないこと。筒の右端から電源コードがつながっている。このコードは途中 DC アダプタを介して 100V のコンセントにつながっている。このアダプタにスイッチがあるので、レーザーの on、off はこれを利用する。この筒を固定しているホルダにネジがあるが、これを回すことでレーザーの向きを微調整できる。最初はこれを使わずに大体 BS の表面の真ん中に当たるように手で調整してネジで固定する。

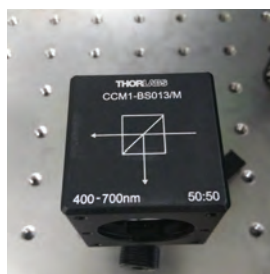


Figure 6: キューブ型 BS：この BS は黒い筐体の中に BS が入っている。筐体には大きな穴があいていて光を通すようになっている。この写真は上から撮ったものである。正方形に一本の対角線が入った図があるがそれが中の BS の向きを表している。この写真の場合右側から BS に光を入れることになる。

図 7 は Mirror1 を示している。Mirror1 では鏡面の前後（光軸に沿った方向）の移動が可能であり、干渉計の腕の長さを調整できる。また図 8 は Mirror2 を示しており、Mirror2 では鏡面の裏側にある 2 つのネジを回すことで鏡面の角度を調整することができる。

干渉計を設置する際の注意点として

- レーザーの出射口は覗きこまない。またカーテンを必要最低限閉めること。



Figure 7: Mirror1 の写真。右上にマイクロスクリーウがありこれを回転させると鏡を前後に平行移動できる。



Figure 8: Mirror2 の写真。左上に黒いつまみのついたネジがる。影に隠れているがもう一つある。この2つの回転させることで鏡の向きを微調整できる。

- 鏡面やレンズ、レーザーの出射口（細長い棒状であるが、電源ケーブルがついていない端）を触らないように注意する。
- レーザー光がビームスプリッター、Mirror のほぼ中心部に当たることを確認する。横方向はもちろん鉛直方向でもある。鉛直方向の調整の仕方は教員に聞くこと。
- ビームスプリッターと Mirror1,2 の距離を同じ長さにする。これは光の干渉を実現するために必要なことである。
- ビームスプリッターからレーザー光源方向に戻る光が光源に入らないようにする。つまり少しだけでよいのでわざとずらす。

3.1.3 アラインメント調整

以上を確認した後スクリーン上で Mirror1,2 で反射したビームのスポットが重なるように Mirror2 の鏡面の角度を調整する。例えば Mirror 1 もしくは 2 の前に手をかざして、光をさえぎるとスクリーン上のどのスポットが Mirror 1 もしくは 2 からもどってきたかわかる。大きくずれていたばあいは Mirror 1 もしくは 2 の指示を固定しているネジを緩めて角度を調



Figure 9: レンズ：ビームを拡大するために利用。

整して大体重なるようにする。このあとネジを締める。必要であれば図 8 の説明にあるように Mirror 2 の向きを微調整する。重なったら、図 4 にあるようにレンズをスクリーンの前に置いて、スクリーン上のスポットを拡大する。レンズやスクリーンの位置を調整するとスクリーン上のスポットの大きさが変わる。再度 Mirror 2 の向きを微調整する。調整がうまく行けば干渉縞を観測できる。もしこのとき Mirror1,2 で反射した光が BS の後に平行になっていない（図 3 とその前後の説明参照）と鏡面の傾きによる位相差が生じ、間隔の狭い干渉縞が多数現れる。干渉縞の間隔を広めるためには Mirror2 の 2 つのネジで鏡面の傾きを小さくする必要がある。このアラインメント調整は各実験のセッティング時に必ず行うこと。

うまく alignment を調整するとスクリーン上に干渉縞が現れることが確認できる。写真を撮って、レポートに載せること。また Mirror1 をマイクロスクリューを使って前後に動かすことなにごおるか確認せよ（可能であれば違いがわかる写真を撮る）。わざと少しだけ Mirror 2 の向きを変えるとわかりやすい写真になるかもしれない（そのときはその旨明記）。

3.1.4 エネルギー保存則の確認

マイケルソン干渉計でエネルギー保存則が成立していることを説明した。このことを確認してみよう。このためには光源に戻る光もスクリーンに投影するのがわかりやすい。図 10 のようにビームスプリッターとレーザーの間に板状のビームスプリッター（図 11）を設置した。ただし、スクリーンの前のレンズをまずレーザーの前に移動させ、BS から直接スクリーンに到達する干渉光がうまく見えるようになってから、板状の BS をレンズとキューブ型 BS の間に挿入する。



Figure 10: 光源に戻る光をスクリーンに映し出している写真



Figure 11: 板状の BS：形はキューブ型（図 6）と異なるが BS である。むしろレンズ（図 9）特別がつかないかもしれない。ラベルを貼っておくが、もしなかった場合は覗きこんでみて、風景が歪んでいる方がレンズである。

例えば図 12 のような左側の干渉縞はスクリーンへ向かった光による干渉縞で、右側の干渉縞は光源へと戻る光による干渉縞である。2つの干渉縞の明暗は反転していることが確

認でき、レーザー光のエネルギーは保存していることがわかる。写真を撮りレポートに載せること。Mirror 1 をマイクロスクリューを使って動かすと何が起こるのか観測せよ。

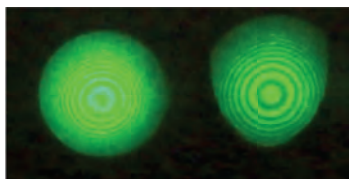


Figure 12: 左側は透過光、右側は反射光による干渉縞の写真

3.1.5 波長の測定（余力がある場合）

ここでは干渉計を利用して波長を測定してみよう。式 (6) によるとスクリーン上の光の強度 I は $S_1 - S_2$ の周期関数でその周期は波長 λ の半分である。つまり片方の鏡のみ移動させたとき、そしてその移動距離がわかっているとき、 I の変化の周期から波長を見積もることができる。

マイケルソン干渉計の一方の鏡（ここでは Mirror1）を動かす場合、干渉計の腕の長さが変わり、干渉縞の明暗パターンに変化が生じる。Mirror1 の移動によって生じる腕の長さの変化分を ΔS とし、干渉縞が明 $\rightarrow$ 暗 $\rightarrow$ 明（または暗 $\rightarrow$ 明 $\rightarrow$ 暗）と変化した回数を N fringe と定義すれば (1 fringe は式 (6) の 1 周期に相当する。 $\Delta S = S_1 - S_2$ とすれば、式 (6) は ΔS に対して $\lambda/2$ の周期をもつ。これが 1 fringe)、次のような関係を持つ。

$$N\lambda = 2\Delta S \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{2\Delta S}{N} \quad (9)$$

係数の 2 倍はレーザーが往復することに起因する。

実験の手順は以下の通り。BS、レーザー間にあるレンズと板状 BS を取り除き、レンズをスクリーンの前に移動させ、図 4 と同じ状況にする。Mirror 1 を動かしスクリーン上の明るさの変化から fringe を数える。既に述べたように、Mirror 2 をすこし傾けて縞がでるようにしてその縞が移動（明るい線が隣に明るい線に移動したら 1 fringe）の方が全体の明暗よりわかりやすいかもしれない。この場合直線を書いたテープをスクリーンにはると縞の移動の数を数えやすい。やってみてやりやすい方法を採用する。その間に Mirror1 が動いた距離を測定し式 (9) の関係式より波長を求める。Mirror1 は鏡台についているマイクロスクリュー (図 7 の) をひねることで前後に動かす事ができ、動いた距離はマイクロメーターから読み取ることができる。ただし、マイクロスクリューの 1 目盛りは 1 マイクロメートルに

相当する。手でマイクロスクリューを回すことは可能であるが、手を離したときに予期せぬ鏡の移動が起こりうる（実際にやってみよ）。そこで図 13 のように六角レンチを指し、これでスクリューを回すとその影響を小さくすることができる。

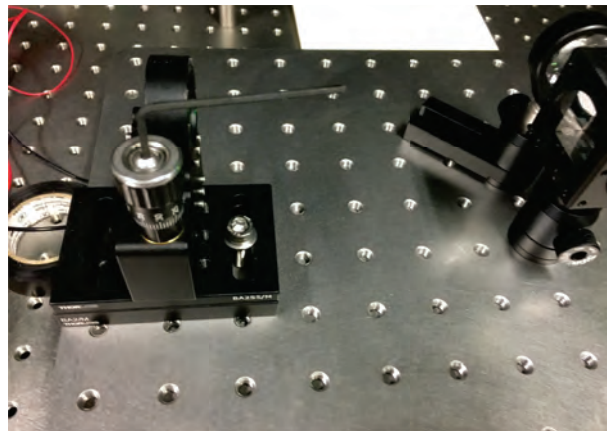


Figure 13: 可動鏡上部に六角レンチを指した写真

まず Mirror1 が動いた距離とその間の fringe 数を表とグラフにまとめよ。さらに最小 2 乗法を使って、グラフの傾きと式 (9) から波長を計算せよ。

レーザーの色からわかるように波長は 532 nm である。計算した値と一致するか確認せよ。誤差について検討せよ。

3.2 第2日：熱膨張率の測定

3.2.1 実験の目的

固体の温度が上昇すると熱膨張し、物体の大きさが変わる。この実験では物体の長さの変化を干渉計の腕の長さの変化に関連付けることで干渉の変化から熱膨張率を決定する。

3.2.2 測定原理

温度を T 、熱膨張率を α 、物体の長さを L とすれば、熱膨張率 α は次のように定義される。温度が T から $T + dT$ に上がった時に物体の長さが L から dL に伸びたとする。 $dT \ll T$ 、 $dL \ll L$ とする。

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (10)$$

α 自体が温度に依存するが、それほど大きく温度が変わらなければ一定としてよい。その前提で温度 T で長さ L の物体は温度が dT だけ上がると

$$L = L_0(1 + \alpha dT) \quad (11)$$

温度 ΔT による物体の長さの変化分を ΔL とすると

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (12)$$

膨張させる固体をマイケルソン干渉計の一方の鏡 Mirror1 に取り付ける。こうすることで固体の膨張による長さの変化は干渉計の腕の長さの変化分に置き換えることができ、固体が膨張すれば、干渉の明暗パターンが移動する。よって、式 (8)、(12) より

$$N\lambda = 2\alpha L_0 \Delta T \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{N\lambda}{2L_0 \Delta T} \quad (14)$$

となりマイケルソン干渉計を利用して熱膨張率が決まる。

3.2.3 実験方法

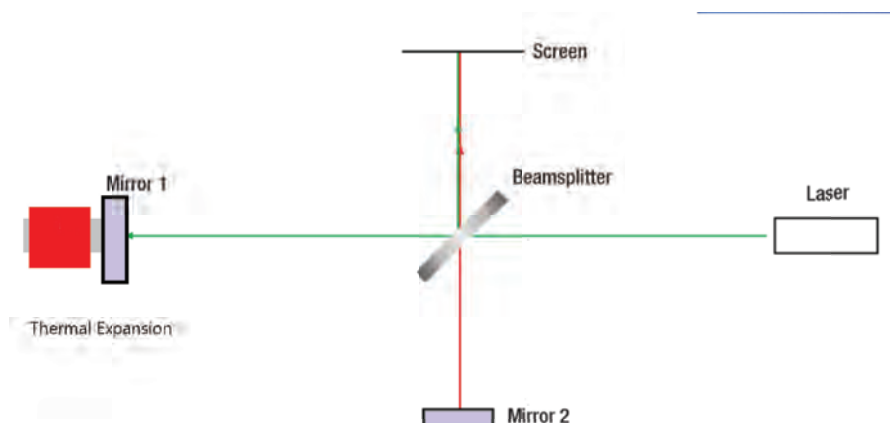


Figure 14: 熱膨張測定の模式図：Mirror1 はアルミ棒に取り付けられている。この棒にはヒーターがまかれており（図の赤）棒を温めることができる。

図 14、15 にあるように Mirror1 の代わりにアルミ棒付きの鏡を取り付けた上で alignment を調整する。スクリーン上にレンズを置いてビームを拡大する。

本実験では熱膨張測定の試料として長さ 9 cm のアルミ製の棒を扱った。アルミ製の棒の先端には鏡（図 16 の右側）が取り付けられており、棒自体に外部電源につないだヒーターを巻きつけることで（図 16 の右側で鏡が着いた棒に巻かれた黄色いシートがヒーター）アルミ棒を加熱する。外部電源から電流を流すことでヒーターを加熱し、アルミ棒は膨張する。結果として干渉計の腕の長さが変わり、スクリーン上の干渉縞が移動を始める。アルミ棒の鏡を取り付けてない端には温度計を差し込む穴があり、温度計を差し込む（図 16 の左側）。温度を温度計で測定し、fringe の回数と温度の関係から熱膨張率を計算する。

まず電源（図 17）のスイッチ（power on と output on の両方とも）off になっていること、右下のつまみ（output voltage adjust）が左に回し切っていることを確認する。さらに電源の-端子と GND 端子（図 17 だと左下で黒いケーブルで繋がられているのが-端子と GND

端子) がきちんと接続されているか確認する。電源の左下の+と-にヒーター (図 16 の右側の鏡がついているアルミ棒にまかれた黄色いシート) からの赤い線、黒い線をそれぞれ接続する。まず power on とし、その次に output on とする。これで電圧を出せるがこの時はまだ 0V である。右下のつまみを右に回すことで電圧が増える。右上のメーターが電圧を示している。5 V から 15 V が適正なようである。各自が測定しやすい電圧に調整してよい。

アルミ棒の鏡が付いていない端の穴に温度計を差し込む。温度計の電源 (図 16 の左側) の on のスイッチを押すと液晶に温度が表示される。

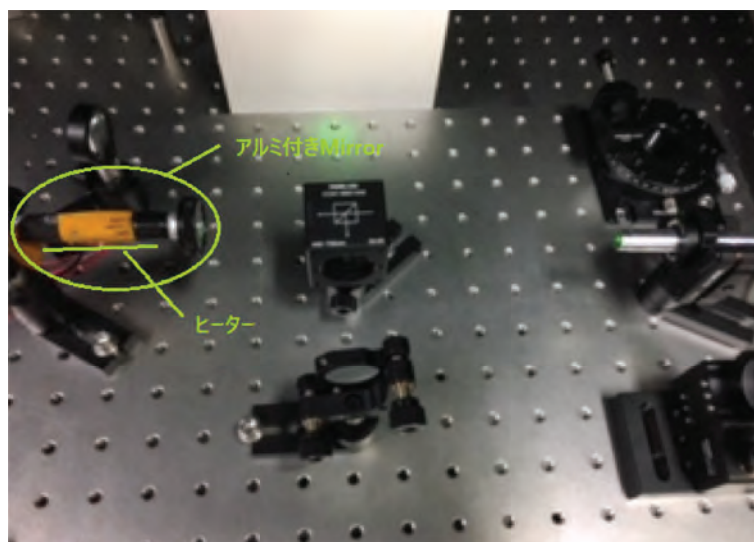


Figure 15: 熱膨張測定の装置の写真：図 16 も参照。

温度は 50 度程度まであげることができる。まずヒーターのスイッチを入れる前の温度を記録し、ヒーターのスイッチを入れる。fringe を数えるのを担当する人と、温度計を見るのを担当する人を決めて、数えていく。30 度になるまでは様子をつかむための練習としてもよい。例えば 2 度あがるごとに何 fringe 移動したかを数える。50 度に到達したらヒーターを切る。温度が下がっていく過程で測定することも可能である。余力があったらやってみること。

実験が終了したあと、温度計の電源を切ること。電源はつけるときと逆でつまみを左に回し切り、output on を切り、power on を切ること。

表とグラフに温度と fringe 変化の関係をまとめる。それをもとに熱膨張率を見積もること。アルミの熱膨張率の文献値と比較せよ。誤差についても考察せよ。



Figure 16: アルミ棒、ヒーター、温度計：図の右側に鏡が着いた棒があり黄色いシートがまかれている（図 15 も参照）。棒がアルミであり、シートがヒーターである。アルミ棒の鏡が付いていない端には温度計を差し込む穴がありそこに温度計を差し込む。図の左側は温度計の電源で on のスイッチを押すと温度が液晶に表示が表示される。

3.2.4 課題 2

50 度まで温度を上げられるとするとこの実験ではどの程度の大きさの熱膨張率まで測定できるか考察せよ（非常に熱膨張が小さいと 50 度になるまでに伸びずに干渉計で測れない。どのくらい小さいと測定できないか考察せよ）。この干渉計で測定できないほどの熱膨張の小さい材質があるか調べてみよ。

発展問題

（余力がある人は考えてみてください）19 世紀末において光（波）の媒質としてエーテルというものが考えられていた。地球はこのエーテルの中を移動しているため相対的にエーテルは地表からみて流れているように見える（エーテルドリフト）。このドリフトの速さは少なくとも地球の公転速度と同じく 30 km/s あると予想される。Michelson と Morley は彼らの有名な実験において、Michelson 干渉計を用いてエーテルドリフトの速さを測定しよう

としたが、検出できなかった（これは現代の観点からは特殊相対論の光速不変の原理の検証となっている）。このエーテルドリフトが仮に存在した場合、今回の実験装置で検出できるであろうか。もしくは難しいとしたらどのようにすれば検出できるか。



Figure 17: 電源：ヒーターの電流源となる。