

提出日：2023 年 1 月 18 日



Tokyo Tech

# 光子の干渉

## 第一章 光

鈴木泰雅 (Taiga Suzuki)

物理学実験 A 実験レポート

学籍番号：21B00817

実験日：

一日目：2022 年 1 月 5 日

二日目：2022 年 1 月 12 日

共同実験者：関谷知怜，高野日向



# 目次

|       |                                      |   |
|-------|--------------------------------------|---|
| 1     | 実験目的                                 | 1 |
| 2     | 実験の原理                                | 1 |
| 2.1   | 光増倍管に関して                             | 1 |
| 2.2   | マイケルソン干渉計に関して                        | 1 |
| 3     | 実験装置および実験方法                          | 3 |
| 3.1   | 実験装置に関して                             | 3 |
| 3.1.1 | マイケルソン干渉計に関して                        | 3 |
| 3.1.2 | 光検出器に関して                             | 4 |
| 3.2   | 実験方法に関して                             | 5 |
| 3.2.1 | マイケルソン干渉計のオシロスコープでの観測                | 5 |
| 3.2.2 | 干渉縞がある場合とそれぞれのミラーを遮光した場合とバックグラウンドの測定 | 5 |
| 4     | 実験結果                                 | 6 |
| 4.1   | オシロスコープでの結果                          | 6 |
| 4.2   | ミラーの遮蔽と遮蔽しない場合の実験結果                  | 7 |
| 4.2.1 | 両方のミラーを遮蔽しなく、光に干渉があった時               | 7 |
| 4.2.2 | M1 のミラーを遮蔽した場合                       | 7 |
| 4.2.3 | M2 のミラーを遮蔽した場合                       | 9 |
| 4.2.4 | 両方のミラーを遮蔽した場合                        | 9 |

---

|       |                          |    |
|-------|--------------------------|----|
| 5     | 考察                       | 11 |
| 5.1   | 誤差に関して . . . . .         | 11 |
| 5.1.1 | 不感時間に関して . . . . .       | 11 |
| 5.1.2 | 環境要因の誤差に関して . . . . .    | 12 |
| 5.1.3 | 再度, 不感時間に関する考察 . . . . . | 14 |
| 5.2   | 位置に関して . . . . .         | 14 |
| 6     | 課題                       | 16 |
| 6.0.1 | 凹レンズに関して . . . . .       | 16 |
| 6.0.2 | 凸レンズに関して . . . . .       | 18 |
| 7     | 文献                       | 24 |

# 1 実験目的

ヤングの実験では、光源から出た光はスクリーン上で干渉縞ができる。これは光の粒子性を保証した実験であるが、光電効果などにより光 (光子) には粒子性があることが分かってくる。ヤングの実験では、それぞれのスリットにそれぞれ別の光子がいてそれらが干渉を起こすと考えられる。本実験ではその粒子性を光増倍管を使用し確かめるとともに、干渉を起こした波の定量的な議論をし光の性質を掘り下げることが実験目的とする。

# 2 実験の原理

このセクションの参考文献は、授業中の板書である。

## 2.1 光増倍管に関して

光増倍管の原理としては、まず、光子が光増倍管に入り、その光子のエネルギーで光面を叩き出しそこで複数の電子がはじき出される。そして、その中でまたそれらの電子はエネルギーを得て、ダイノードに衝突し、再度より多くの数の電子がはじき出される。これを繰り返すことによって、最終的に電子 (つまり電流) を測定し、結果的には光子を増倍させることができる。

## 2.2 マイケルソン干渉計に関して

マイケルソン干渉計として今回使った装置は図 (3.1) である。この装置を使うことによって、光の干渉を作り出すことができる。以下のように、M2 のを  $\theta$  だけ回転させたとする。

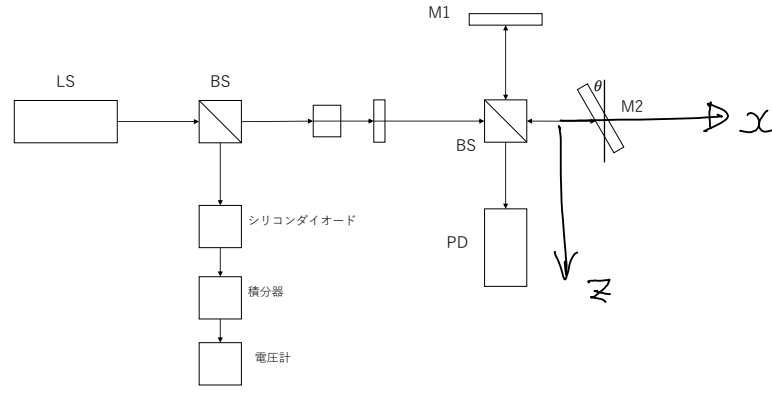


図 2.1: マイケルソン干渉計

すると, BS に当たった波の波数ベクトルは, PD への向きを  $z$  軸, M2 への向きを  $x$  軸とすると,

$$\mathbf{k}_2 = (k \sin 2\theta, 0, k \cos 2\theta) \quad (2.1)$$

となり, それぞれ M1 から来る電磁波と M2 から来る電磁波を,

$$E_1 = a_1 e^{i(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})} = a_1 e^{i(\omega t)}, \quad E_2 = a_2 e^{i(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r})} = a_2 e^{i(\omega t - k \sin 2\theta \cdot x)} \quad (2.2)$$

とした時, ( $\mathbf{r} = (0, 0, x)$  としている.) 重ね合わせの波は,

$$I \propto \Re |E_1 + E_2|^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(k \sin 2\theta x) \quad (2.3)$$

であることが分かる. また, 明線は,

$$k \sin 2\theta \cdot x = 2\pi \times (\text{整数}) \quad (2.4)$$

の時であり, ここで, 波数と波長の関係式

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

と代入し, 整数が 1 の時の  $x$  の値を  $d$  とすると,

$$d \sin 2\theta = \lambda \quad (2.6)$$

が成立する.

## 3 実験装置および実験方法

### 3.1 実験装置に関して

本実験では，簡略化したマイケルソン干渉計と，オシロスコープ，カウンタなどを用いた．図 (3.1) と図 (3.3) が主に使用した実験装置の簡略図である．それぞれに関して順を追って説明する．

#### 3.1.1 マイケルソン干渉計に関して

以下の図が使用したマイケルソン干渉計の簡略図である．**LS** は，レーザーであり，**BS** がビームスプリッタ，**L1,L2** がそれぞれレンズであり，**M1,M2** がそれぞれミラーである．また，**PD** が光検出器である．

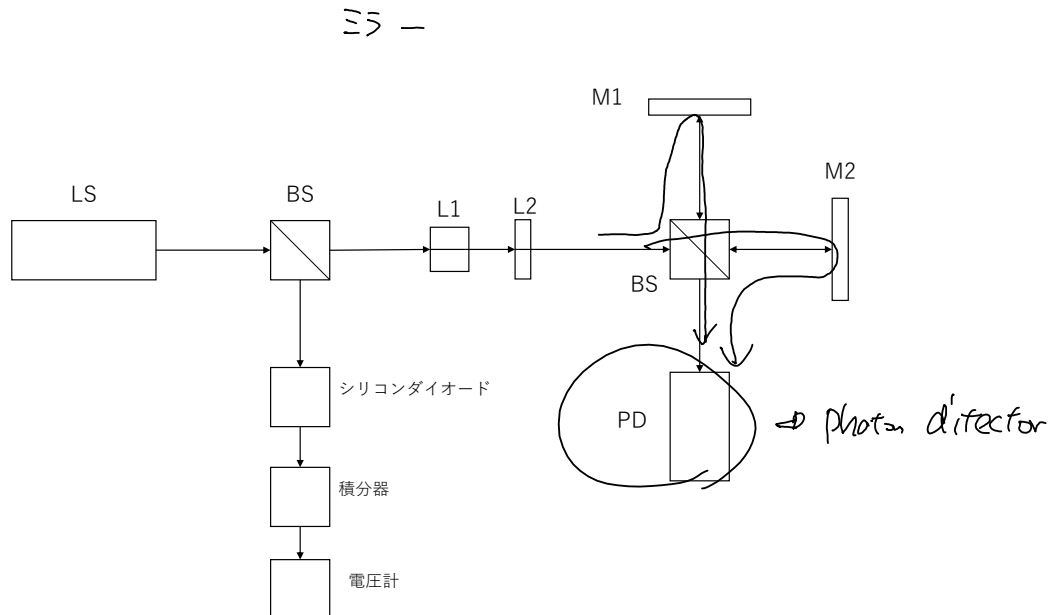


図 3.1: マイケルソン干渉計の実験装置

まず，LS から出たレーザー光が BS によって，直進する光とシリコンダイオードに入る光で分かれる．シリコンダイオード内ではフォトンが通過することによってその衝突したエネルギーによって絶縁体バンド上の電子が叩き出され局所的に伝導体となり，電流が流れる．そして，積分器によって，

$$V = (\text{定数}) \times \int_0^T i dt \quad (3.1)$$

となり，電圧計で電圧を測定できる．この電圧は，観測されるカウンタのカウントがレーザーのゆらぎの影響を少なくするために使用する．

直進した光に関してはそのままレンズ L1 と L2 を通過する．これは，エクステンダーと呼ばれており，以下図 (3.2) が示すように入射光を光の進行方向を保ったまま拡大させる性質がある．

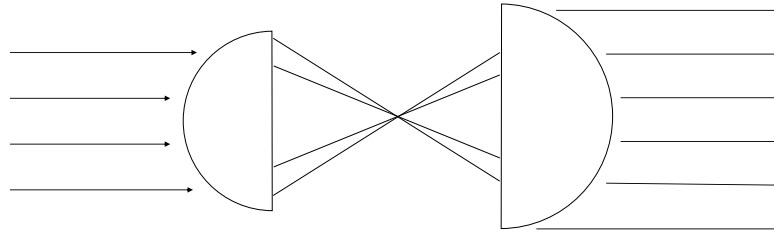


図 3.2: マイケルソン干渉計の実験装置

これによって，観測した干渉縞が現れる幅が大きくなる．

そして，拡大されたレーザー光が BS によって，M2 に行くものと，M1 に行くものに分かれる．それぞれ，M1 に行った光は再度 BS に戻り直進をし PD に向かい，M2 に行った光は再度 BS に戻り反射し，PD に向かう．つまり，これは位相がこの BS からそれぞれのミラーまでの差の距離分だけある状態で干渉が起きる．

### 3.1.2 光検出器に関して

以下が光検出器に繋いでいる装置の図である．

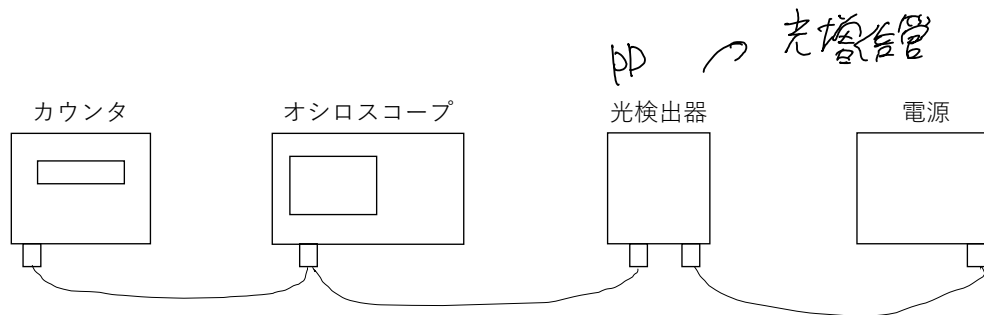


図 3.3: 光検出器の実験装置

先ほど説明したように，M1 と通った光と，M2 を通った光の重ね合わせが光検出器に入る．この装置は実際に入った光子は観測をすることができないので，フォトンを電荷の持つ電子に変えることによって測定をする装置である．実際に一つの光子に対して，

$$G(\text{増幅率}) = \lambda^n, \quad \lambda: 1 \text{ 回の光子のダイノードへの衝突で叩き出される電子の数}, \quad n: \text{ダイノードの数} \quad (3.2)$$



が増幅率として与えられ、本実験では、 $\lambda \sim 3$ ,  $n \geq 10$  であるので、 $G$  は約  $10^6$  である。そして、実際に電子の数を一つのパルスとして、オシロスコープで観測し、そのピークの数カウンタで測定する。ここで、パルスが不感時間を持っていることに注意をする。

## 3.2 実験方法に関して

まず、図 (3.1) のように、マイケルソン干渉計とシリコンダイオードを設置する。そして、光検出器とカウンタなどを図 (3.3) のように繋ぐ。そして、うまく M1 と M2 を調節し、光検出器にうまく干渉が起きるようにする。

### 3.2.1 マイケルソン干渉計のオシロスコープでの観測

まず、オシロスコープとカウンタを同時に使い、と出力パルス波形をモニタリングし、1 パルスの不感時間、計測によって得られた計測数を記録する。

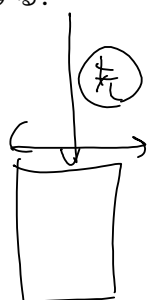
### 3.2.2 干渉縞がある場合とそれぞれのミラーを遮光した場合とバックグラウンドの測定

光検出器の位置を変化させることによって以下表に応じてカウントとシリコンダイオードに入る電圧を同時に測定する。

表 3.1: シートでミラーを隠した場合の測定項目

| 計測項目        | 光検出器の計測幅  | 何ミリごとに計測するか |
|-------------|-----------|-------------|
| 干渉縞があり      | 0 から 10mm | 0.25mm ステップ |
| M1 のみシートで隠す | 0 から 10mm | 0.25mm ステップ |
| M2 のみシートで隠す | 0 から 10mm | 0.25mm ステップ |
| 両方シートで隠す    | 0 から 10mm | 1.0mm ステップ  |

そして、それぞれの結果にそれぞれの時点での電圧を割り、 $x$  軸を光検出器の最初の位置からのずれ、 $y$  軸を先ほど計算した (カウンタ数)/(電圧) としてグラフを作成する。



## 4 実験結果

### 4.1 オシロスコープでの結果

以下が得られた観察の結果である。

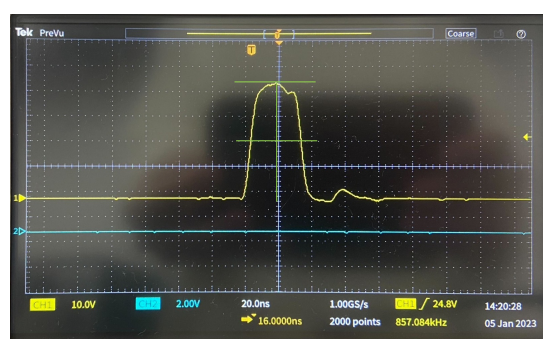
1. レーザーを光検出器に当てた状態で観察すると、実際にオシロスコープで得られる結果を観察すると、ディスプレイに数百ほどの目では数えられないほどにピークがまばらに消えたり現れたりしていた。
2. レーザーを手で覆い、光検出器に光が入りにくくすると、ピークの出現と消滅のまばらさは不変であったが、ピーク数は明らかに減った。

また、レーザーを厚紙で覆い、レーザーがほとんど光検出器入らないようにしたときのオシロスコープでの一つのパルスのみを取り出した時の図は以下の通りになった。

(a) 1 パルスのオシロスコープでの様子



(b) 1 パルスのオシロスコープに説明を加えた図



この図にあるように、このオシロスコープの横軸の DIV の値が、20ns であるので、ここに半値幅を導入しその値を不感時間とすると、以下の図のようになる。半値幅が  $7.8 \times \frac{20ns}{5} = 31.2ns$  である。よって、この実験でのパルスの不感時間は、**31.2ns** であることが分かった。

$$\Rightarrow \text{不感時間} = \text{パルス幅} \times \frac{7.8}{5} = 31.2ns$$

## 4.2 ミラーの遮蔽と遮蔽しない場合の実験結果

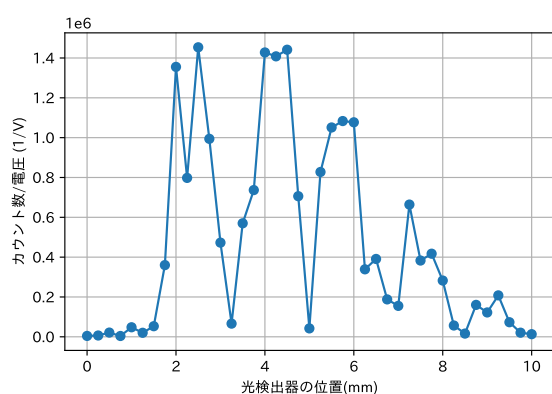
### 4.2.1 両方のミラーを遮蔽しなく、光に干渉があった時

(カウント数)/(計測したシリコンダイオードでの電圧)を縦軸，計測器の位置をずらした時の差分であるとする，それぞれ以下の図を添付している．左の図はそのままのデータでの結果であり，左の図は，

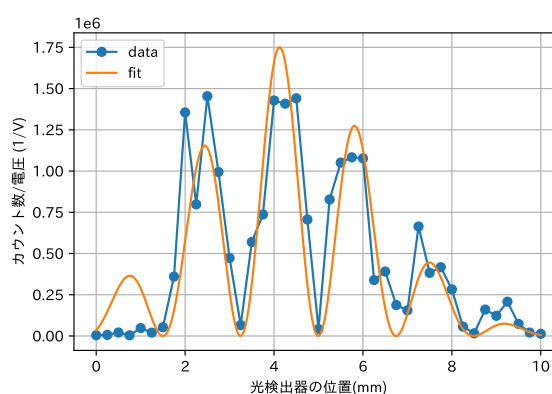
$$G(x) = a \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x-b)^2}{c^2}\right) \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi(x+e)}{d}\right)\right) \quad (4.1)$$

でフィッティングをしている．

(a) 光の干渉がある場合の実験結果



(b) フィッティングした場合



なお，得られたフィッティング関数のそれぞれの係数の値は以下ようになった．

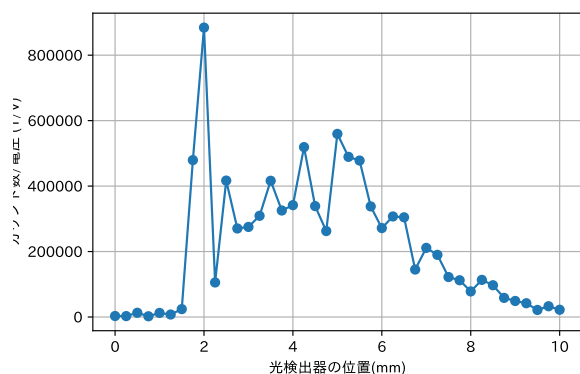
表 4.1: フィッティング関数の係数の値

| 係数 | 実際に求められた値          |
|----|--------------------|
| a  | 876609.5434805471  |
| b  | 4.239119825428577  |
| c  | 2.0032542069789065 |
| d  | -1.748729851812073 |
| e  | 2.8734901555972034 |

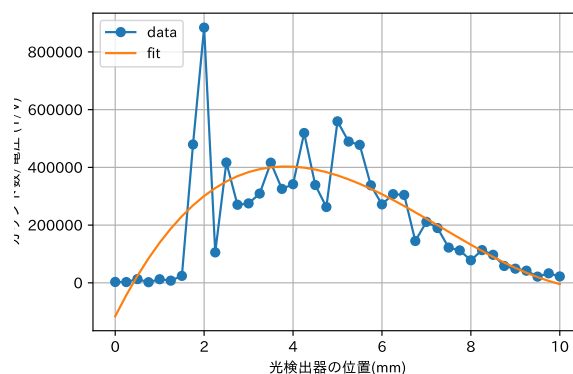
### 4.2.2 M1 のミラーを遮蔽した場合

先ほどと同様に生データとフィッティングした図を以下に載せた．

(a) M1 のミラーを遮蔽した場合の実験結果



(b) フィッティングした場合



フィッティング関数は,

$$372067 - 251044(-1.0 + 0.2x) - 432110(-1.0 + 0.2x)^2 + 306842(-1.0 + 0.2x)^3 \quad (4.2)$$

なお、フィッティング関数は今回は  $n$  次多項式を用いており、解析の結果 3 次関数を採用した。方法は、得られた生データを検証データと評価データに 1 対 10 の割合でランダムに分割し、ハイパーパラメータとして  $n$  を用いている。そして、平均二乗誤差を MSR としてそれぞれ検証データと評価データで出力すると以下のようになった。なお、縦軸のそれぞれの検証データと評価データはスケールが大きいので  $\log$  を取って解析をしている。なおグラフは対数スケールに変換していない。

表 4.2: フィッティング関数の解析データ

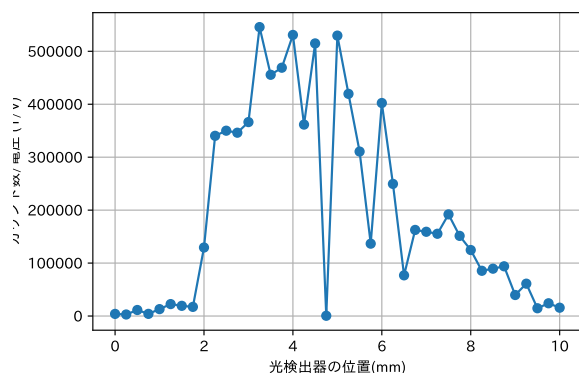
| n の値 | 検証データの MSR   | 評価データの MSR        |
|------|--------------|-------------------|
| 1    | 2.4431343510 | 1.4961130444      |
| 2    | 0.6305011267 | 71.8374794281     |
| 3    | 0.4407427526 | 4.2245121791      |
| 4    | 0.4365356184 | 20.9602473388     |
| 5    | 0.4164481403 | 391.2407018284    |
| 6    | 0.3487007446 | 3149.3850319325   |
| 7    | 0.2885966330 | 20016.4660158797  |
| 8    | 0.2617912505 | 51928.5631641042  |
| 9    | 0.2573498499 | 399213.6074240892 |

よって、フィッティング関数として 3 次関数を採用した。

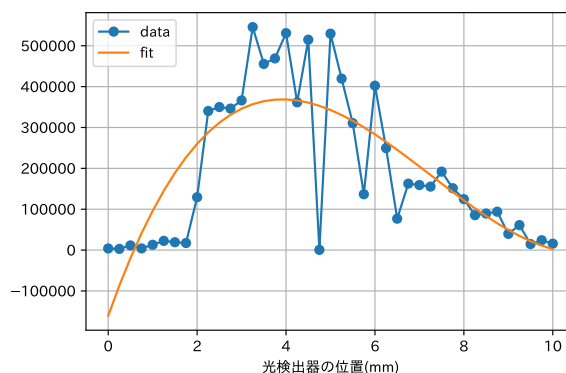
### 4.2.3 M2 のミラーを遮蔽した場合

先ほどと同様に生データとフィッティングした図を以下に載せた.

(a) M2 のミラーを遮蔽した場合の実験結果



(b) フィッティングした場合



上記のフィッティング関数は 3 次関数を採用した. こちらも先ほどと同様に検証データと評価データに分け, ハイパーパラメータとして  $n$  次多項式の  $n$  を採用すると以下の表を得た.

表 4.3: フィッティング関数の解析データ

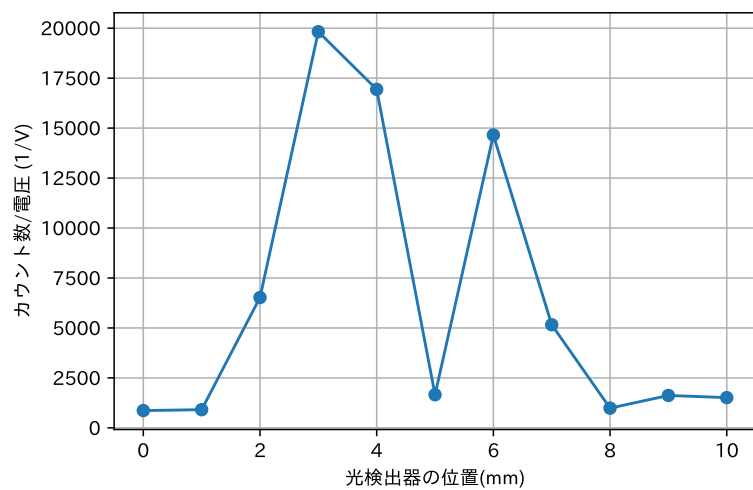
| n の値 | 検証データの MSR   | 評価データの MSR        |
|------|--------------|-------------------|
| 1    | 2.7617291761 | 3.3616458014      |
| 2    | 1.5277992724 | 22.2953051067     |
| 3    | 1.4460019678 | 1.8544721600      |
| 4    | 1.4305257096 | 23.9788811795     |
| 5    | 1.3559289891 | 671.9240245022    |
| 6    | 1.2637039500 | 1469.6495139600   |
| 7    | 1.2637035272 | 1441.8471864352   |
| 8    | 1.1787269768 | 211887.0691253251 |
| 9    | 1.1726318884 | 4613.8037387579   |

よって, 評価データの MSR が小さくなる 3 次関数を採用した.

### 4.2.4 両方のミラーを遮蔽した場合

先ほどと同様に生データを図を以下に載せた.

図 4.5: BG での実験結果



## 5 考察

### 5.1 誤差に関して

干渉データに関して、フィッティングをしたところ、セクション (4.2.1) であるように、多少の誤差があるものの、生成したモデルに対してほとんどのデータが大きく外れることなくフィットした。しかし、多少の誤差あるため、それについての考察を行っていく。まず、今の状態の下で、誤差を算出する。誤差としてはフィッティング関数からの差を二乗した物の和の平均値 (以後：MSR と呼ぶ) を用いる。この場合の MSR は約

$$\text{MSR} = 424164 \quad (5.1)$$

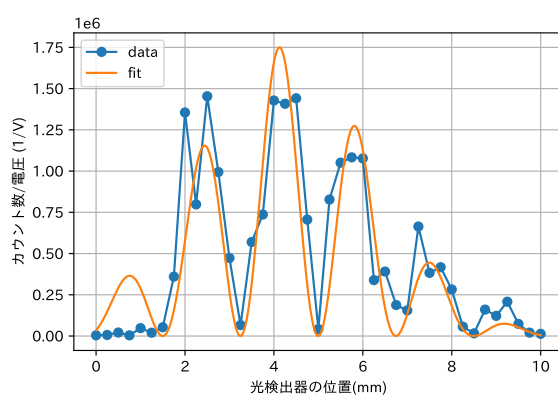
であった。

以下のそれぞれの誤差に関してそれらの操作を考慮した結果誤差が小さくなればそれらが原因として誤差が生じたと考えることができる。

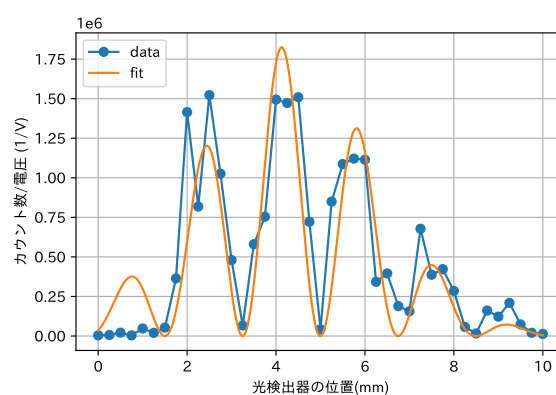
#### 5.1.1 不感時間に関して

これは、後の課題 1 の内容である。実際の不感時間を使用しどのように補正するかに関してはセクション (6) でまとめている。実際に補正をする前と補正をした後でのグラフを表すると以下ようになる。

(a) 光の干渉がある場合の実験結果 (補正前)



(b) 光の干渉がある場合の実験結果 (補正後)



この補正後のグラフの MSR を実際に計算すると、

$$\text{MSR} = 438636 \quad (5.2)$$

である。これは、式 (5.1) よりも大きな値であり、予想の小さくなることに反している。これが起きた原因としては、他の誤差が伝搬した可能性が高い。再度他の誤差を考慮したモデルを生成し、そしてその次に補正をし、MSR を算出し比較をすることにする。

### 5.1.2 環境要因の誤差に関して

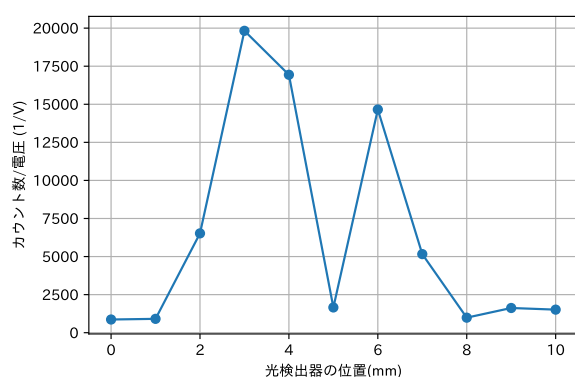
まず、考えられる誤差としてはそもそもの環境にあると考えられる。レーザーを使用し干渉を作り出した際に、部屋を最大限に暗くしたものの、PC の明るさや、他の光が入ってくることが原因でこの実験データに誤差を与えている場合がある。何より、レーザー以外の光が干渉モデルのちょうど中央の位置にあればそれほど影響はないものの、どちらかに偏ればそれだけ偏ったデータが出ることになる。以下はそれを実験データとともに修正していく。

まず、得られた実験データは、セクション (4.2.4) で示した通りである。しかし得られたグラフのプロットは 10 個のみしかなく、 $x=5$  の値を異常値として認識するか、それは異常値ではなく、レーザー以外の波源が大きく二つあったとも見るかによって話は変わってくる。ここでは二つに分けて話を進めていく。

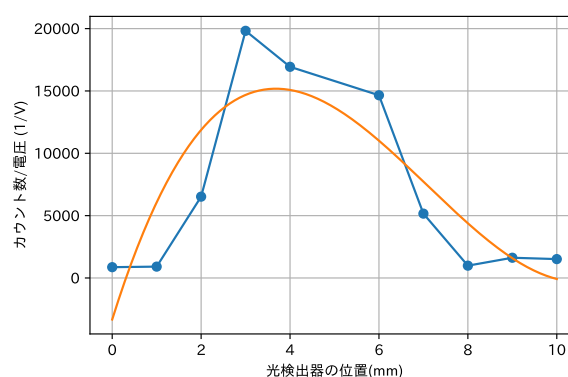
#### $x=5$ の値が異常値と判断した時

まず、以下に  $x=5$  の値を入れた時と除外した時 (またフィッティング関数も含め) 表示をすると以下ようになる。

(a) バックグラウンドの実験結果 (除外前)



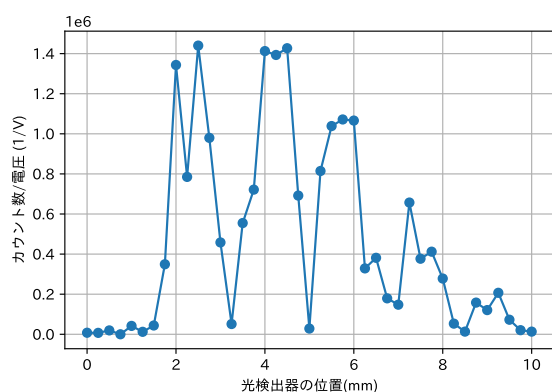
(b)  $x=5$  の値を除外した場合とフィッティング関数



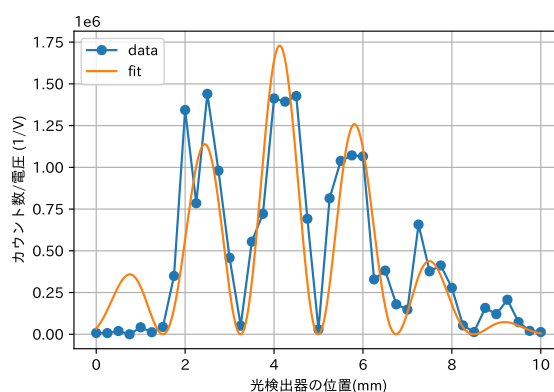
なお、フィッティング関数の次数は他の例に習い、3 とした。ここで、このフィッティング関数のデータの縦軸の値を先ほどの干渉データから差し引くと以下のグラフのようになった。



(a) バックグラウンドを差し引いた場合



(b) フィッティング関数を入れた場合



このフィッティング関数の MSR を求めると以下ようになった。

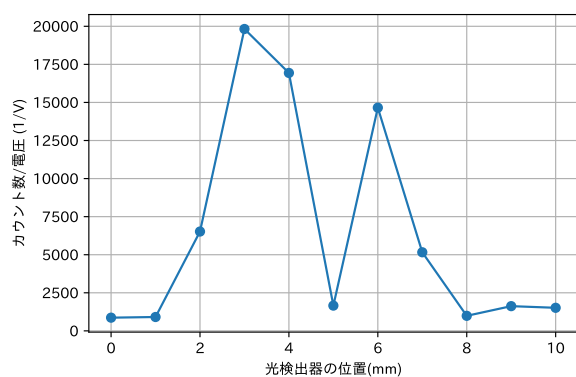
$$\text{MSR} = 418571 \quad (5.3)$$

となる。よって式 (5.1) と比較して小さな値を作ることができた。

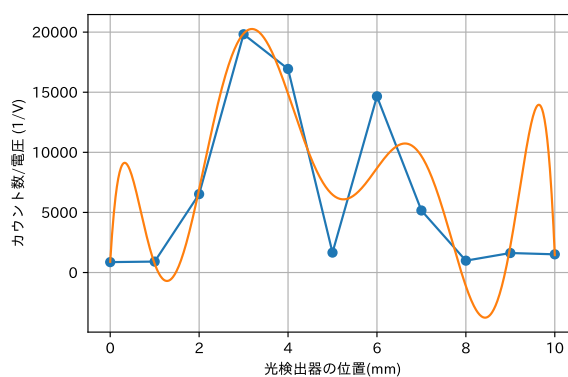
#### $x=5$ の値が正常値と判断した場合

そのままのデータとそれにフィッティング関数を載せた値を表示すると以下ようになる。ここで、

(a) バックグラウンドのデータ



(b) フィッティングした場合



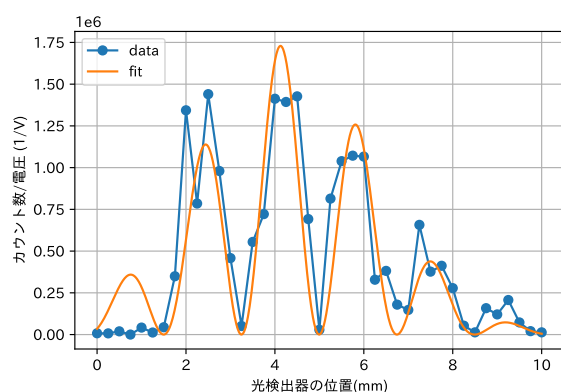
以上を見て分かるように、過学習をしてしまっている。しかし、他の多項式ではうまく真ん中にくぼみを作ったモデルを生成することができず (できたとしても時間が足りない) ここでは先ほど MSR を小さくすることによって成功した  $x=5$  を異常値としてみなした場合を適用していく。仮に、 $x=5$  を異常値としてみなすことが間違いであったとしても、二つのレーザー以外の波源の重ね合わせは少なくとも  $x=5$  でもある程度の値を持つはずであり、 $x=5$  を異常値としてみなした場合でもそうでない場合でも最終的にはフィッティング関数が、 $x=5$  を異常値としてみなした場合に帰結する

ことになる.

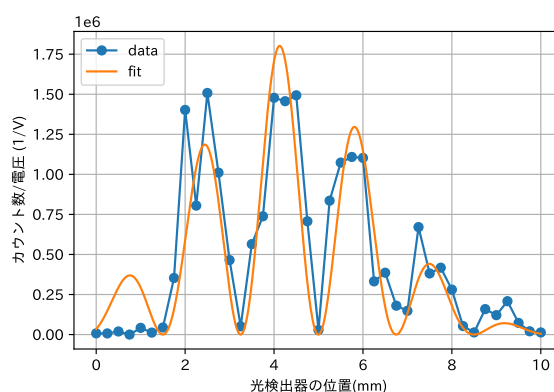
### 5.1.3 再度、不感時間に関する考察

以上の誤差の考慮に得られた新たなデータを下に、不感時間を考慮した場合、より MSR が小さくなるかを考察していく．新たに生成されたデータに不感時間を考慮し、図示すると以下ようになった．

(a) BG を引いた補正前のグラフ



(b) BG を引いた補正後のグラフ



この MSR を実際に計算すると、

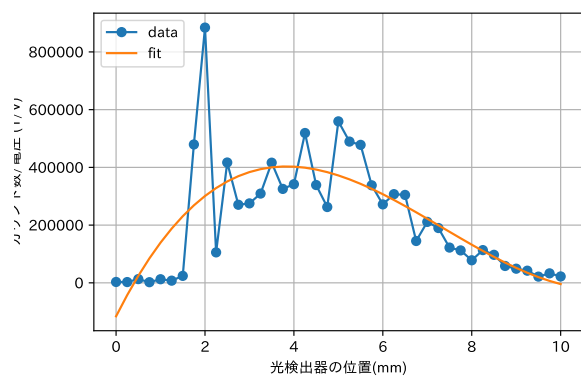
$$\text{MSR} = 432708 \quad (5.4)$$

となった．もとの式 (5.1) よりは大きな値となってしまうものの、式 (5.2) に比べては小さな値となっており、バックグラウンドの効果があると言することができる．しかし、不感時間が原因で誤差が起きているかということに関してはこのデータだけでは判断ができないということがこの誤差のセクションの結論である．

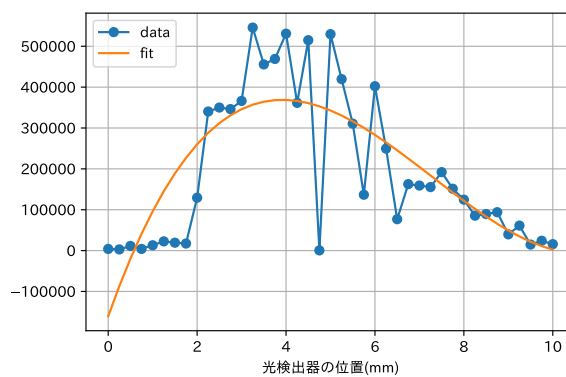
## 5.2 位置に関して

実験結果の図から分かるように、今回の結果で得られた図は中心の位置が  $x=5$  からずれている．実際に先ほど得られた補正後のフィッティング関数の、式 (4.1) の  $b$  の値を求めると、約  $b = 4.24$  であり、この式 (4.1) から見て分かるように、 $b$  は中心からのずれを表している．よって、中心は、 $x = 5$  ではなく、4.24 であり、たしかに、M1 や M2 を隠した時の図は、

(a) M1 を遮蔽した時の実験結果とフィッティング関数



(b) M2 を遮蔽した時の実験結果とフィッティング関数



フィッティング関数のピークが、ちょうど  $x = 4.24$  付近にいることが分かる。よって、この位置のずれは正しいと判断できる。この位置のずれがあるゆえに、それぞれのグラフの  $x=0$  から  $x=2$  の部分が光がほとんど当たっておらず外れてしまっていることが分かる。

## 6 課題

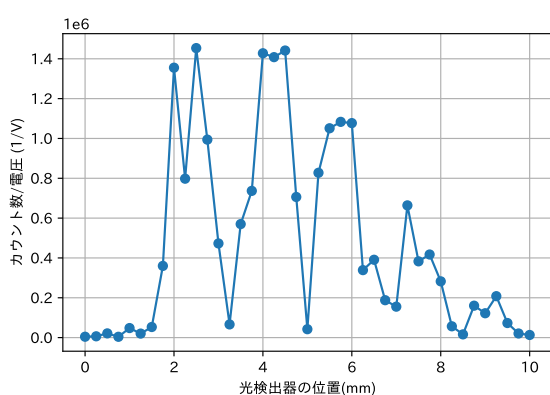
### 課題 1

不感時間としては，実験結果で述べたように，(セクション (4.1)) より， $\tau = 31.2 \times 10^{-9} s$  であった．よって，教科書中の真の計測数と実際の計測数の関係式より，

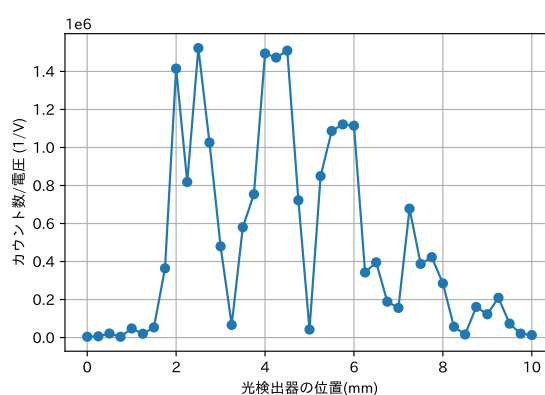
$$n = \frac{m}{1 - m\tau} = \frac{m}{1 - m \times (31.2 \times 10^{-9})} \quad (6.1)$$

この式を使い，実験データすべてにこの値を掛けて，グラフとして出力すると補正前と補正後の干渉がある際のグラフは以下ようになった．

(a) 光の干渉がある場合の実験結果 (補正前)



(b) 補正後のグラフ



以上のグラフから見て分かるように，補正後のデータは全体的にスケールが伸びているが，計測されたデータ自体が  $10^{-9}$  にくらべてオーダーが  $10^6$  スケールであったため，大きな変化がない．これは他の実験データに関しても言及することができる．なお，それぞれのグラフの誤差がどのように変わったかに関しては考察の誤差のセクション (5.1) で述べている．

### 課題 2

#### 6.0.1 凹レンズに関して

以下のようにそれぞれ変数を設定する．なお，対称性より今回はレンズの上半分に関して考える．つまり，すべての  $\theta$  が 0 から  $\frac{\pi}{2}$  の範囲を通り，すべての三角関数の値は正である．

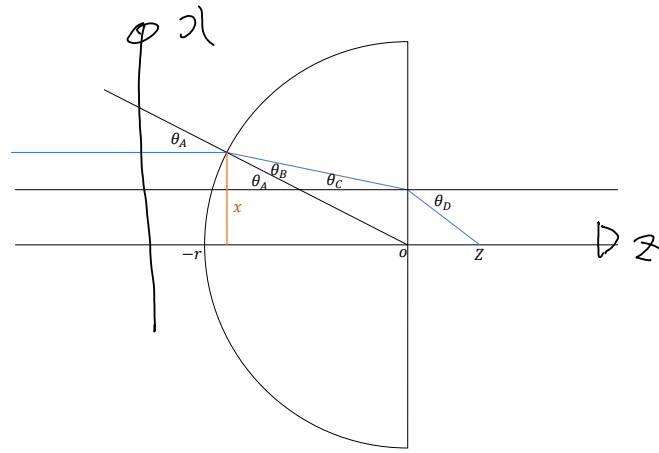


図 6.2: 凹レンズ

手順としては,  $x$  と  $Z$  の関係式を立て, それをプロットし, 全体の平均値からのずれの二乗誤差を観測する. まず, スネルの法則より,  $n$  を屈折率として,

$$\frac{\sin \theta_A}{\sin \theta_B} = \frac{\sin \theta_D}{\sin \theta_C} = n \quad (6.2)$$

である. また, 角度の関係式より図から,

$$\theta_A = \theta_B + \theta_C, \quad \sin \theta_A = \frac{x}{r}, \quad \tan \theta_D = \frac{x - r \sin \theta_C}{Z} \quad (6.3)$$

が成立するので,

$$Z = \frac{x - \frac{r}{n} \sin \theta_D}{\tan \theta_D}, \quad \theta_D = \sin^{-1} \left\{ n \sin \left( \sin^{-1} \left( \frac{x}{r} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{1}{n} \frac{x}{r} \right) \right) \right\} \quad (6.4)$$

であるので, これを屈折率=1.5, 半径=4cm の下で,  $x$  の範囲を 0 から半径で実際にプロットすると以下のようになった. なお,  $x=0$  の値は除いてプロットしている.

①は変数変換である

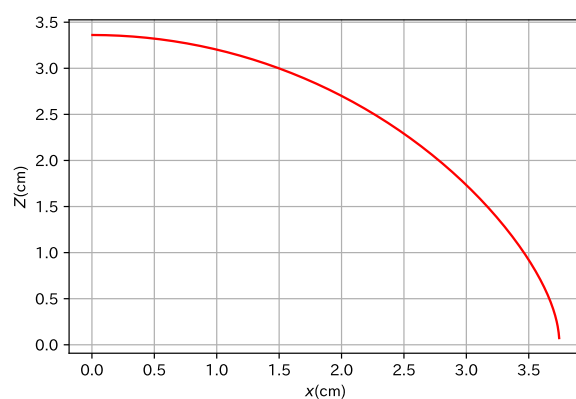


図 6.3: 凹レンズのグラフ

## 6.0.2 凸レンズに関して

図示すると以下のようなになる．

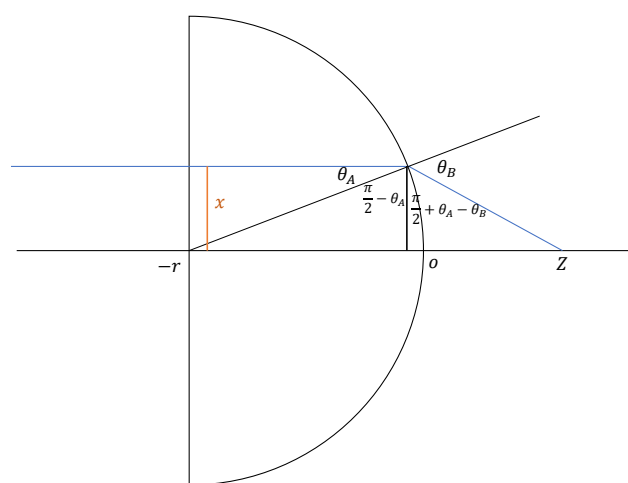


図 6.4: 凸レンズ

ここで、スネルの法則が成立するので、

$$\frac{\sin \theta_B}{\sin \theta_A} = n \quad (6.5)$$

であり、これと図から

$$Z = x \tan \left( \frac{\pi}{2} - \theta_A \right) + x \tan \left( \frac{\pi}{2} + \theta_A - \theta_B \right) - r, \quad \theta_A = \sin^{-1} \left( \frac{x}{r} \right), \quad \theta_B = \sin^{-1} \left( n \frac{x}{r} \right) \quad (6.6)$$

であるので、これを屈折率=1.5, 半径=4cm の下で、 $x$  の範囲を 0 から半径で実際にプロットすると以下のようなになった．なお、 $x=0$  の値は除いてプロットしている．

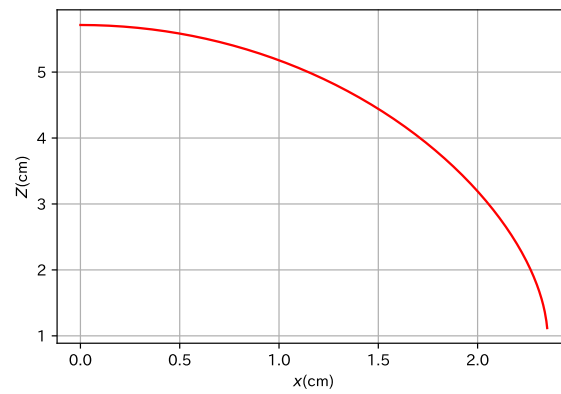


図 6.5: 凸レンズのグラフ

この図は凹レンズの場合と違い、 $x$  の値が約 2.3cm あたりで止まっている。これは  $x$  が大きすぎるとレンズがないで全反射と起こしてしまい  $z$  の値が存在しないためである。

## 二つのレンズの比較

さて、二つのレンズを比較する上で、凸レンズが  $x$  の限界値が存在したため、両方を  $x$  を 0 から 2cm までの値として、プロットすると以下のグラフを得た。

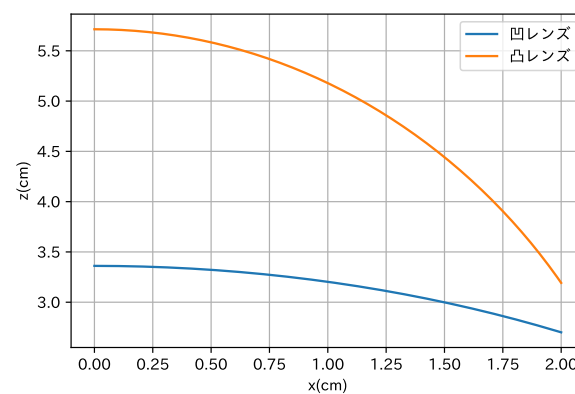


図 6.6: それぞれのレンズを比較した図

よって、この図から明らかであるように、凹レンズの場合の方が凸レンズに比べて  $z$  の変位が小さい。つまり、凹レンズの場合の方が収差が小さいことが分かる。よって、本実験で光をエクスパンドする場合は平行光線から見て凹レンズになるようにすれば良い。つまり、

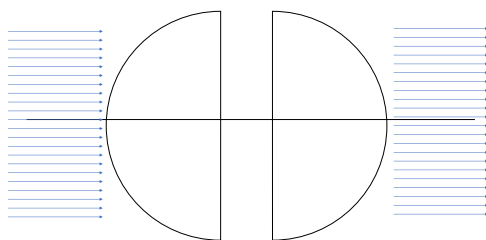


図 6.7: エクスパンダーを模式的に表した図

のようにレンズを配置すれば良い。

### 課題 3

ヤングの干渉実験を図で表すと以下ようになる。また、マイケルソン干渉計は、実験装置のセクションで述べたように、図 (3.1) である。

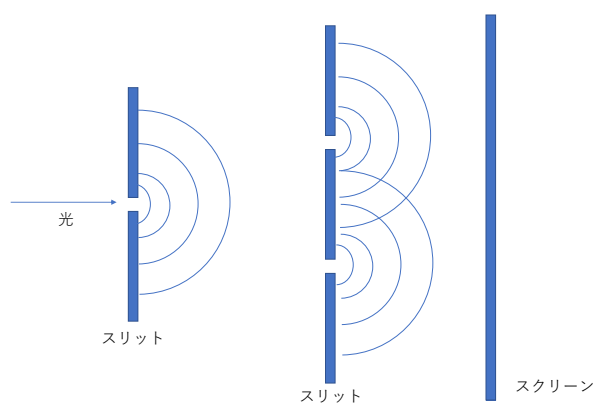


図 6.8: ヤングの実験の模式図

上図とマイケルソン干渉計から見て分かるように、マイケルソン干渉計では干渉を起こす波はそれぞれの別のミラーを通った波でありそれぞれのミラーが独立している。ゆえに片方のみの位相を変えたい場合などに簡単に操作することが可能である。しかし、以上の図にあるヤングの干渉実験では、片方のみの波動の位相を変えることが難しく、例えば第一のスリットの位置を上を動かしたりなどすると、第二のスリットに入る波の両方の位相が変化してしまう。よってマイケルソン干渉計のほうが片方の波動の位相を操作しやすい点がある点である。



## 課題 4

まず、単位時間当たりのレーザーから放出される光子数を求める。これはレーザーの出力のエネルギーを 1 光子のエネルギーで割れば良いので、

$$N := \frac{W}{h\nu} = \frac{W}{2\pi\hbar c/\lambda} = \frac{0.5 \times 10^{-3} / (1.602 \times 10^{-19}) [eV/s]}{2\pi \times 197.3 [eVnm] / 633 [nm]} \quad (6.7)$$

← 単位の変換を忘れない

である。ここで、ミラーなどの損失を無視して、片方のパスのみを考えるのでこの数の光子が毎秒ピンホールの前に来ることになる。ここで、レーザービームの半径は、5mm であり、ピンホールの半径は  $7.5\mu m$  であるので、実際にピンホールに入っていく光子数  $n$  は、

$$n = \frac{\pi(7.5\mu m)^2}{\pi(5mm)^2} \times N \approx 9.20 \times 10^9 [1/s] \quad (6.8)$$

← 面積比でね

である。ここで、光電子放出効率を 1 パーセントと仮定すると、

$$n \times 0.01 \approx 9.20 \times 10^7 [1/s] \quad (6.9)$$

である。よって、毎秒の出力パルス数は、約  $9.20 \times 10^7$  と見積もることができる。

## 課題 5

ミラーを  $\theta$  だけ動かしたとき、位相の差分として、 $2\theta$  分の差がでることに注意をする。また、それぞれの  $d_1$ ,  $d_2$  の時の  $\theta$  値の差分が今回動かす値  $\theta$  であるので、

よって、干渉縞の周期を 1mm から 2mm に変えた時の関係式は、 $d_1 = 1mm$ ,  $d_2 = 2mm$ ,  $\lambda = 633nm$  として、

$$d_1 \sin 2\theta_1 = \lambda, \quad d_2 \sin 2\theta_2 = \lambda, \quad \therefore \theta := |\theta_2 - \theta_1| = \theta_1 - \theta_2 \quad (6.10)$$

であり、 $\varphi$  を調節ねじの 1 回転とすると、調節ねじのピッチが  $a = 0.24mm$  とすると、

$$z = a \frac{\varphi}{2\pi} \quad (6.11)$$

であり、これによって動く  $z$  方向の変位が  $\theta$  回転によって動く変位と同じであるので、調節アーム長を  $r = 15mm$  とす

ると,

$$r\theta = a\frac{\varphi}{2\pi}, \quad \therefore \varphi = r\theta\frac{2\pi}{a} \quad (6.12)$$

となるので,

$$\varphi = r \left[ \frac{1}{2} \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{d_1} \right) - \frac{1}{2} \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{d_2} \right) \right] \frac{2\pi}{a} \quad (6.13)$$

である. よってそれぞれの値を代入すると,

$$\varphi \approx 3.56(\text{回転}), \quad \therefore 360^\circ \times \varphi = 1.3 \times 10^3(\text{度}) \quad (6.14)$$

である. よって, 約  $1.3 \times 10^3$  度回すことになる.

## 課題 6

コントラストの定義は以下の通りである.

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (6.15)$$

ここで,  $I$  はそもそも

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\delta) \quad (6.16)$$

と求めることができる. よって,

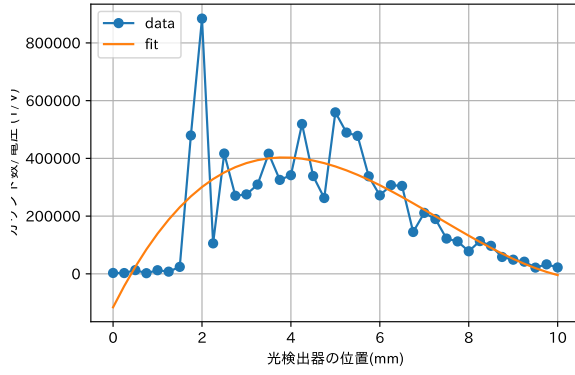
$$I_{\max} = I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2, \quad I_{\min} = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \quad (6.17)$$

であるから, これを  $\gamma$  の式に代入すると,

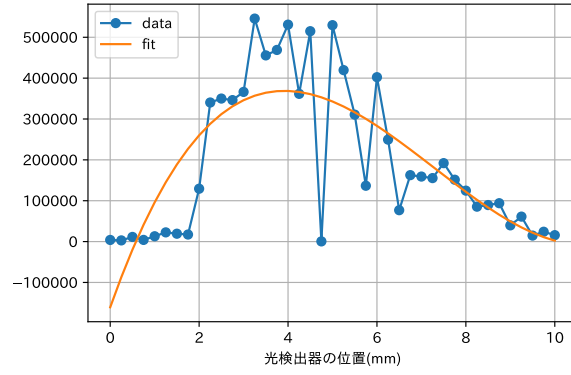
$$\gamma = \frac{2a_1a_2}{a_1^2 + a_2^2} = \frac{2r}{1 + r^2}, \quad r := \frac{a_1}{a_2} \quad (6.18)$$

である. これらの  $a_1$  と  $a_2$  のデータは, 実験結果より, それぞれの M1 と M2 のミラーを隠した時のそれぞれのピークの値の比である. 実際に実験結果を見てみる. 実際のフィッティング関数を入れた図は以下の二点である.

(a) M1 のミラーを遮蔽した場合の実験結果



(b) M2 のミラーを遮蔽した場合の実験結果



ここで、それぞれ、 $x$  の値が約 3.5 から 4 のあたりにピークが来ており、それぞれの比と取ると、M1 を  $a_2$ 、M2 を  $a_1$  とすると、

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{360000}{400000} \approx 0.9 \quad (6.19)$$

であり、実際の干渉が会った際のデータは (遮蔽しなかった場合)、最小と最大値はそれぞれ、

$$\max = 1453717, \quad \min = 4120 \quad (6.20)$$

であり、ここからコントラストを求めると、

$$\gamma = \frac{1453717 - 4120}{1453717 + 4120} = 0.99 \quad (6.21)$$

である。これは、 $\frac{a_1}{a_2}$  の値とそれほど離れていない。誤差は、そもそも実験データのプロット数が少なく、グラフを見て取れるように、異常値と判断できるような値があったからとも判断できる。それを考慮した上で小数点 1 桁まで等しいのでこれは、理論的な予想と実際の結果が結びついていると判断することができる。

## 7 文献

### 参考文献

[1] 初回授業で配布された物理学実験 A/B のテキスト