

## IPhO2009

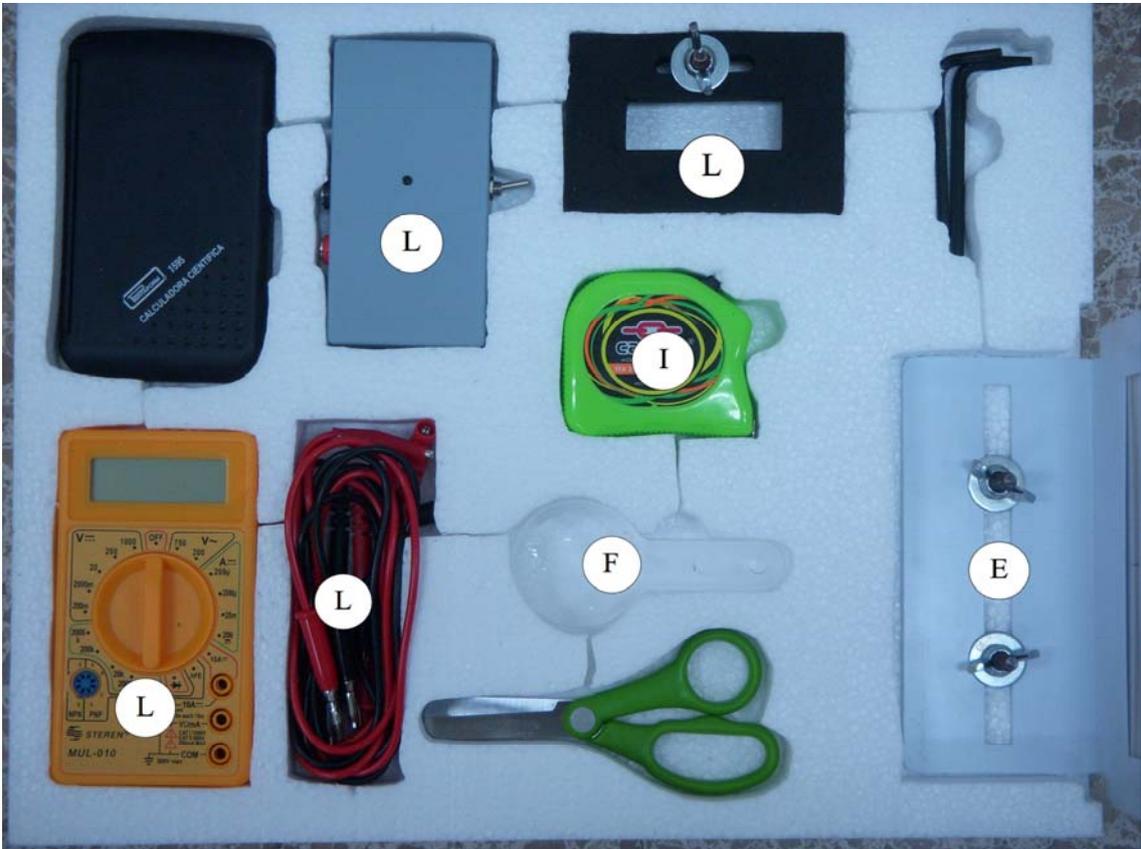
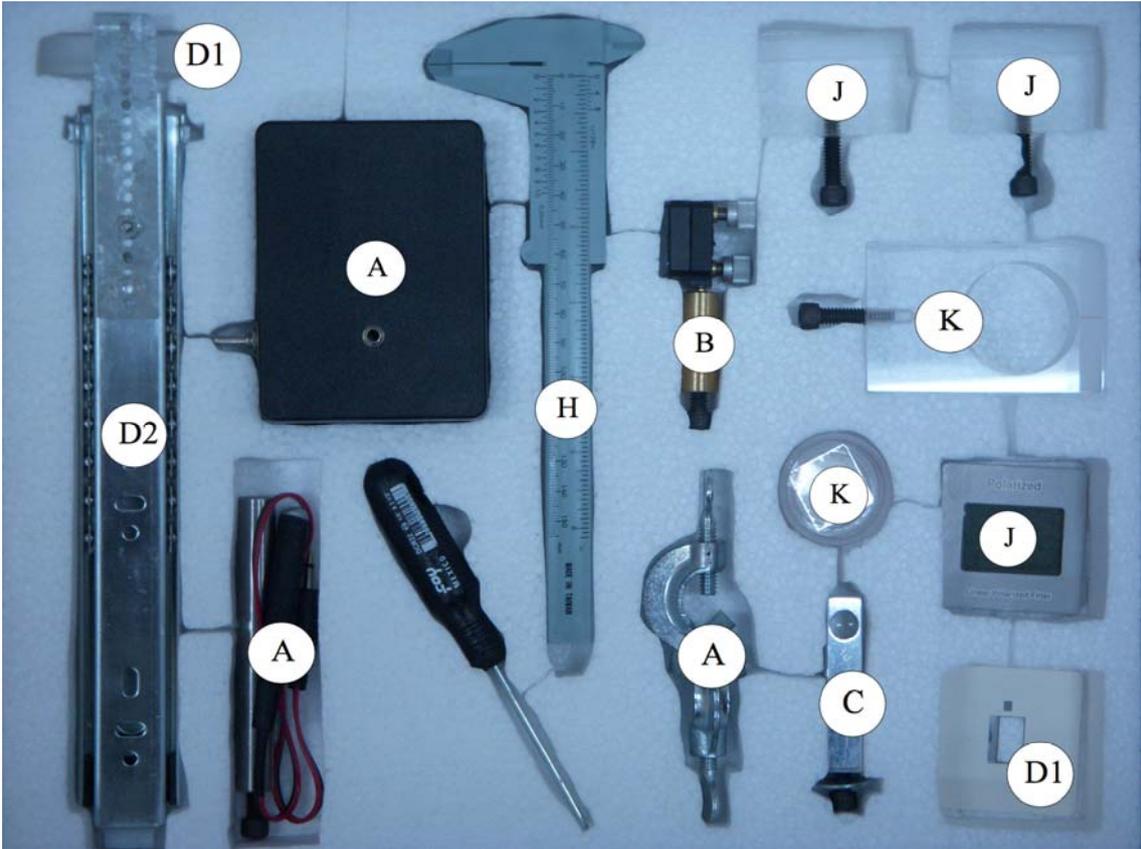
実験試験

2009年7月15日水曜日

本オリンピックの実験問題は2部構成です。問題1では、レーザーダイオードの波長を決定することが目的です。問題2では、雲母の複屈折を測ることが目的です。

### 最初にこれを読みなさい:

1. 実験試験の時間は5時間です。
2. 解答は必ず与えられた鉛筆を使いなさいこと。
3. 解答用紙の表（おもて）のみを使いなさい。裏面は使わない。
4. それぞれ問題は**質問形式**で示されており、その紙の左上には **Q** が印刷されています。
5. 解答は左上に **A** と印刷されている**解答用紙**にまとめて書きなさい。単位も忘れずに書きなさい。
6. さらに、**W** と左上に印刷された一組の**下書き用紙**には、途中経過を書きなさい。評価対象になります。
7. さらに、**問題番号**(1 または 2)を**解答用紙**と**下書き用紙**すべてに書きなさい。
8. 下書き用紙には、その問題で解答を得るために考えたことを何でも書きなさい。言葉での説明は少しにして、自分の考えを主に計算式、数値、図、プロットを多用し、説明しなさい。
9. それぞれの問題に対して、また、すべての問題、解答、下書き用紙についてすべてに**学生番号** (Student code) と、それぞれの**ページ番号** (Page No.) とそれぞれの**トータル番号** (Total No. of pages) を各用紙上部の枠内に書き込みなさい。下書き用紙に書いたことがらを採点対象としたくないものは、破棄するのではなく、用紙全体に大きな×印を書き、ページ数には**入れない**ようにしなさい。
10. 実験試験の最後に、すべての用紙を問題ごとに、**以下のように**まとめなさい:
  - 解答用紙(図やプロットを含む),
  - 用いた下書き用紙を順番通りに,
  - 採点対象としたくない、大きな×印を書いた下書き用紙,
  - 使用していない下書き用紙,
  - 印刷された問題用紙問題ごとにフォルダに入れ、何も持たずに部屋から出なさい。いかなる用紙も、実験部品も持ち出してはいけません。
11. 実験部品と材料は**二段の層**に梱包され、箱に入っています。次のページに梱包された部品セットの写真があります。部品のいくつかには、**装置記号**が付いています。それぞれの実験で、すべてのものが箱の中にあるか、調べなさい。もし、**実験途中に、部品がうまく動かないときは、遠慮なく交換を申し出て**ください。



ダイオードレーザーと可変ミラー

問題 1 と問題 2 の両方の実験装置の組み立てでは、ダイオードレーザー、レーザーのホルダー、レーザー電源と可変機構に取り付けられたミラーが必要です。

最初の問題に取り掛かる前に、図 0 中(A)，(B)で示されている個所にレーザー(A)とミラー(B)を取り付けなさい。ここでは以下の器具を用いなさい。

1) 木製光学台  
2) ダイオードレーザー装置。ダイオードレーザーと S 字型をしたクランプとレーザーの電源ボックス(装置番号 A)。次のページの取り付け方法の写真を参照しなさい。S 字クランプでレーザーを強く締め付けると壊れるので注意して下さい。**絶対レーザー光を直接見てもはいけません。**

3) 可変機構と調整ノブの付いたミラーと支柱(装置記号 B)。次のページの取り付け方法の写真を参照しなさい。**重要な注意：まず、カバー紙を取らないで、ミラーのミラー部分を触らないようにしてミラー付き支柱を木製光学台に取り付けなさい。台に取り付けた後ミラー部分を触らないでカバー紙を取りなさい。常にミラーには触らないことが大切です。**

上記の装置の位置を図 0 に示す場所に取り付けなさい。光学台にレンズ支柱を立てたときのレンズ中心までの高さ、光学台に検出器を立てたときの検出穴までの高さを調べなさい。次にレーザー光のアライメント(常にレーザー光を、反射レーザー光が光学台に水平になるようにミラーの高さ中心に当てる、また図 0 に示すようにミラーからの反射レーザー光が光学台の厳密に穴の真上を通るように、ミラー上の照射レーザー光の水平位置を調整すること)は、取り付け後に厳密に行う。注意：光学台への取り付けでは、箱内に六角レンチをつけているが、すべて手締めでよい。

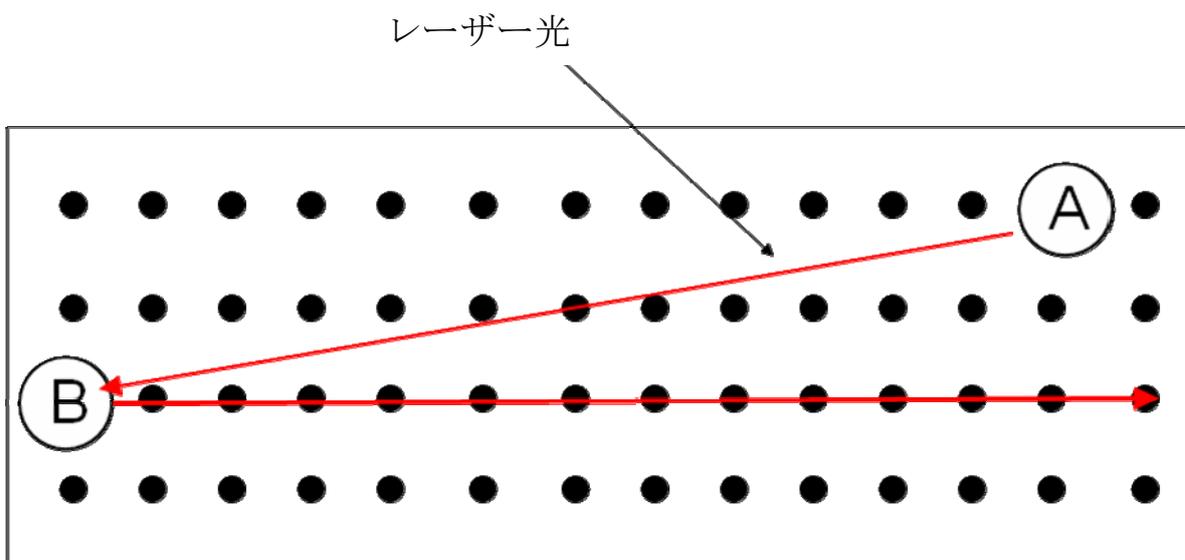
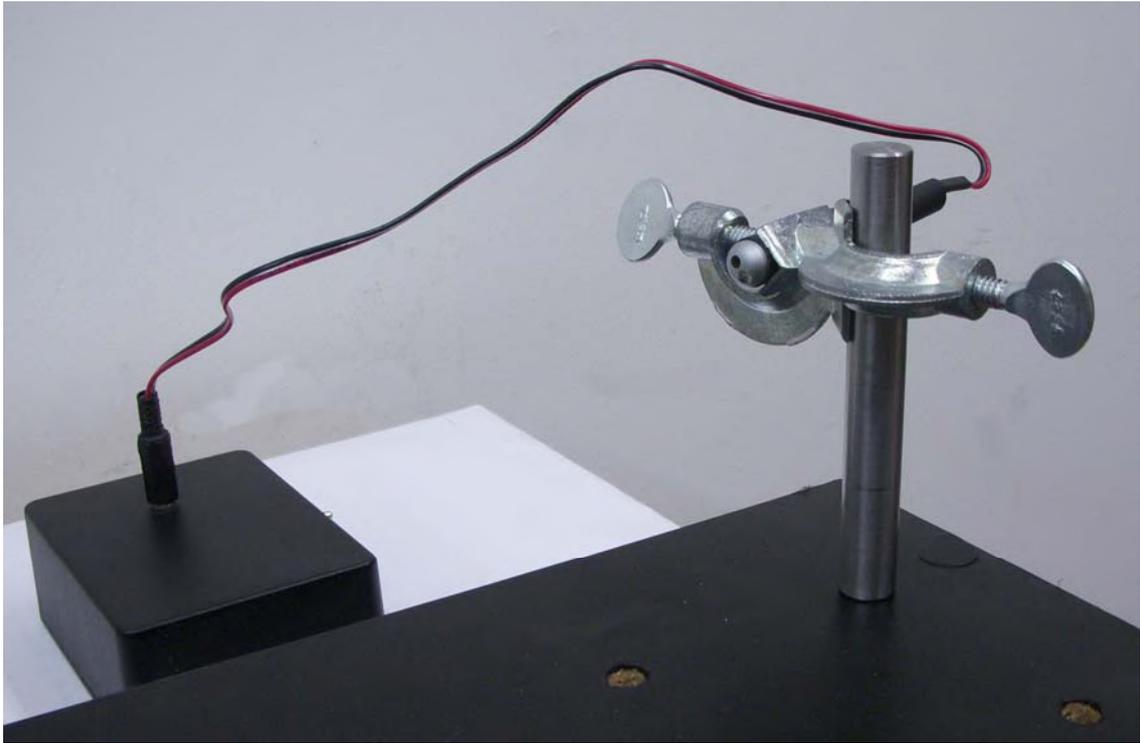


図 0 レーザーとミラーの取付位置と穴の真上を通る反射レーザー光



ダイオードレーザー，支柱，S字クランプとその電源ボックス(装置記号 A)。



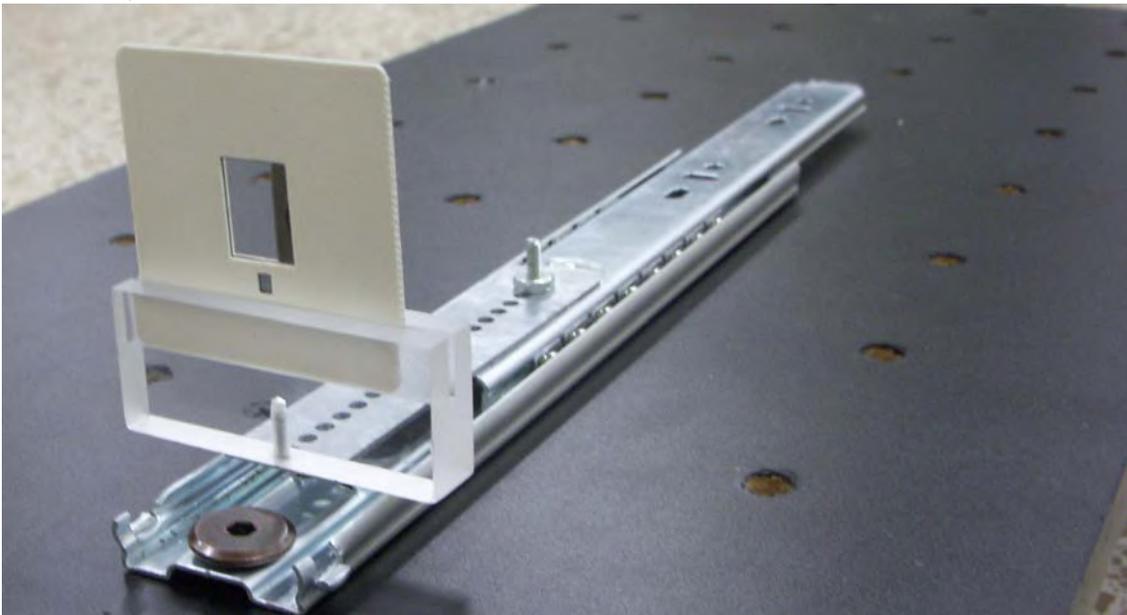
可変機構と調整ノブの付いたミラーと支柱(装置記号 B)。カバー紙が付いた状態で取り付ける。

## 実験問題 1

### ダイオードレーザーの波長の決定

#### 器具

- 1), 2), 3) 以外に以下のものを使用する。
- 4) 四角の支柱に取り付けられたレンズ(部品写真の装置記号 C).
- 5) スライド枠に固定されたカミソリの刃と、これを差し込むためのアクリル支持台(装置記号 D1)。さらにそれらを載せた滑り支持台(装置記号 D2)。必要ならば強く固定するためにねじ回しを使うこと。下の写真参照。
- 6) 副尺 (1/20mm の精度) がついた観測用のスクリーン(装置記号 E)。
- 7) 拡大鏡(装置記号 F)。
- 8) 30 cm のものさし(装置記号 G)。
- 9) ノギス(装置記号 H)。
- 10) 計測用巻き尺(装置記号 I)。
- 11) 電卓。
- 12) ハガキ大の白カード, 粘着テープ (masking tape) , 剥離粘着紙, はさみ, 三角定規セット。
- 13) 鉛筆, 紙, グラフ用紙。



アクリル支持台(装置記号 D1)を滑り支持台 (装置記号 D2) の先端に差し込み、図のようにねじ留めし、ミラー(装置記号 B)から4番目の穴に滑り支持台を固定する。スライド枠に固定されたカミソリの刃をアクリル支持台に差し込む。

## 実験方法

ここで、ダイオードレーザーの波長を決定する。この測定の特徴は、厳密な微小測定器（例えば、規格ものの回折格子など）を使わないことである。測定する最小の長さはミリメートル領域である。カミソリの刃の鋭い縁による光の回折を使って、波長が測定される。

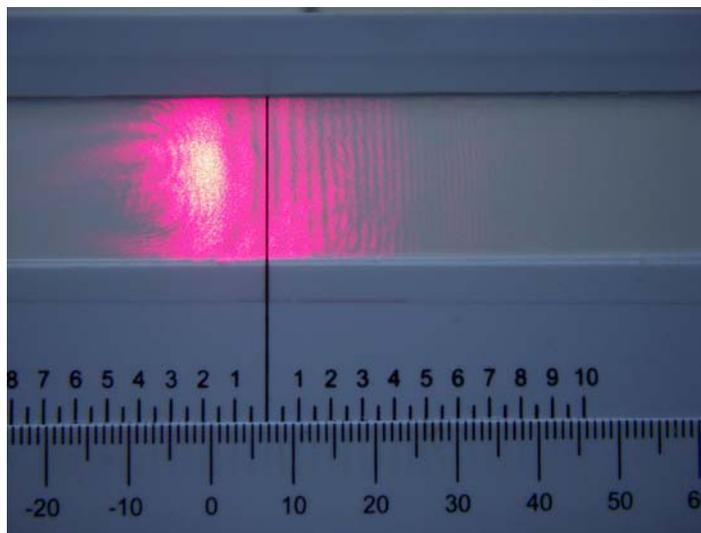


図 1.1 典型的な干渉縞パターン

レーザー光は、ミラー(装置記号 B)で反射されてからレンズ (装置記号 C) をカミソリの刃の直前で通るようにする。レンズは**数センチメートル**の焦点距離をもつため、カミソリの刃をレンズに近づけたときアクリル台がレンズ支柱に当たるようにする。焦点は、球面波を放射する光源とみなすことができる。レーザー光は、レンズを通ったあと、光路に沿って進み、障害物である鋭いカミソリの刃の縁に衝突する。その縁も、球面波を放射する光源とみなすことができる。これら二つの波が前方で干渉しあい、スクリーン上で干渉パターンをつくる。これを観測する。図 1.1 には典型的な干渉パターンの写真を示す。

ここで図 1.2 と 1.3 にあるように 2 つの場合があることが重要である。

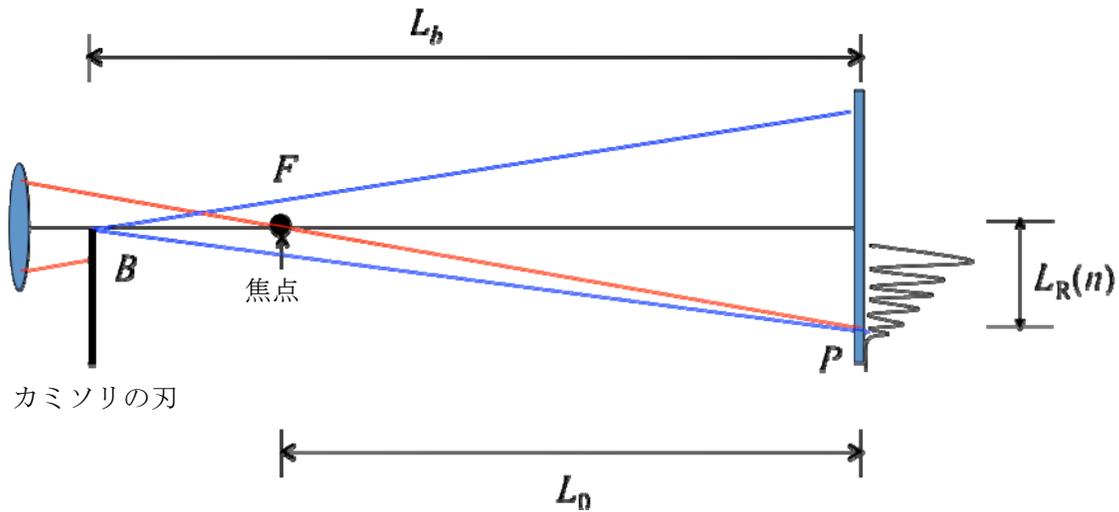


図 1.2. 場合 (I). カミソリの刃がレンズの焦点の**前方**にある場合。図は実際の縮尺ではない。

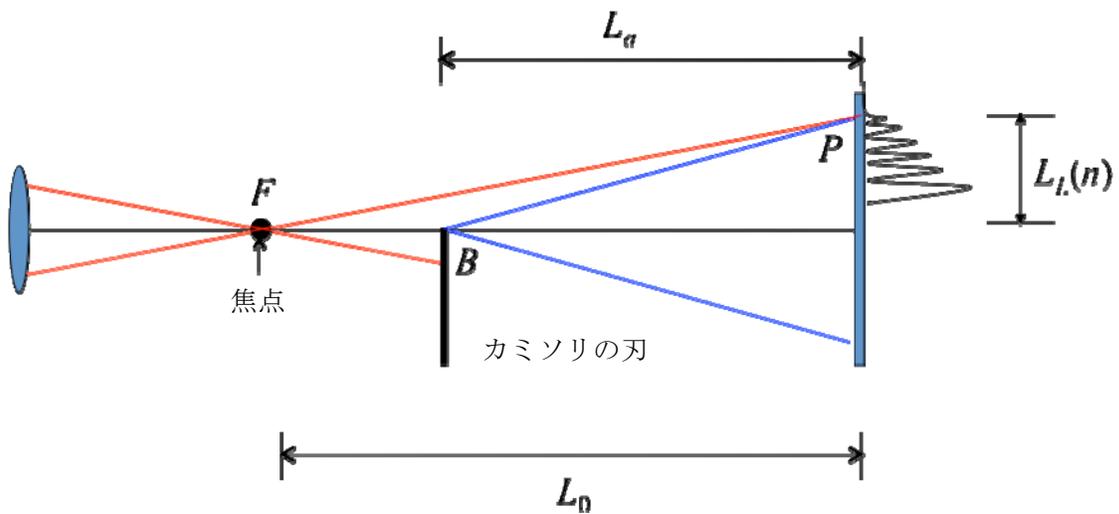


図 1.3. 場合 (II). カミソリの刃がレンズの焦点の**後方**にある場合。図は実際の縮尺ではない。

## 実験装置の組み立て

### 課題 1.1 実験装置組み立て(1.0 点).

上述した干渉パターンを得るために実験装置の配置を設計しなさい。焦点からスクリーンまでの距離  $L_0$  は焦点距離よりも十分長くせよ。

- 光学台が書いてある図の上に、自作した実験装置の配置を詳しく書き写しなさい。異なる装置には、それぞれの**装置記号**をその光学台が書いてある図の中に書きなさい。ここで自分の設計を説明する簡単な図を加えてもよい。
- ハガキ大の白カードを用いて、反射レーザー光の光路をたどることによって、アライメント調整(光学台の厳密に穴の真上を通るように)せよ。
- 十分調整した後、光学台が書いてある図の上にレーザー光の光路を描きなさい。また、レーザー光の光学台からの高さ  $h$  を各所で確かめ、それらなるべく一致するようにして、その値を書きなさい。

**警告:** 時々出る大きなリングパターンを無視せよ。これはダイオードレーザーそのものからの効果である。

レーザー光の光路組み立ては重要であり、時間をかけて最適なアライメントにせよ。そうして 10 本以上の垂直な直線の縞(しま)模様がスクリーン上で見えるように組み立てなさい。読み取りは、縞模様の**暗線**の位置とせよ。縞模様をよりはっきり読み取るために、虫眼鏡(拡大鏡)を用いてよい。**縞模様は、光っているスクリーン(部品写真の装置記号 E)のレーザー光の来る方向とは反対の側から読み取るとよい。**そのため、スクリーンの副尺付き目盛りの文字は外側から読めるように配置せよ。もし、配置がうまくいっていれば、レーザー光を半分隠すカミソリの刃(装置記号 D1)を滑り支持台(装置記号 D2)上で滑らせるだけで、両方のパターン(図 1.2 の場合 I も図 1.3 の場合 II も)が見えるはずである。

## 理論的考察

前述の図 1.2 と 1.3 を見なさい。次の 5 つの基本的な長さがある。

$L_0$ : 凸レンズの焦点からスクリーンまでの距離

$L_b$ : カミソリの刃からスクリーンまでの距離, 場合 I

$L_a$ : カミソリの刃からスクリーンまでの距離, 場合 II

$L_R(n)$ : 場合 I の  $n$  番目の**暗線**の位置

$L_L(n)$ : 場合 II の  $n$  番目の**暗線**の位置

場合Ⅰでも場合Ⅱでも、はじめの暗線は最も広がっている。これを  $n = 0$  の暗線とする。

実験装置の組立では、場合Ⅰは  $L_R(n) \ll L_0, L_b$ 、場合Ⅱは  $L_L(n) \ll L_0, L_a$  となるようにしなければならない。

1点から発せられる光波の干渉は、光路差（位相差）により生じる。位相差により、互いに打ち消すと暗線を生じ、互いに強め合うと明線を生じる。

暗線を生じる条件は、これらの光波の詳細な解析により、次の条件で与えられる。場合Ⅰに対して

$$\Delta_I(n) = \left(n + \frac{5}{8}\right)\lambda \quad \text{ただし,} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.1)$$

場合Ⅱに対して

$$\Delta_{II}(n) = \left(n + \frac{7}{8}\right)\lambda \quad \text{ただし,} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.2)$$

ここで、 $\lambda$  はレーザー光の波長、 $\Delta_I$ 、 $\Delta_{II}$  はそれぞれの場合の光路差である。

場合Ⅰの光路差は、

$$\Delta_I(n) = (BF + FP) - BP \quad \text{それぞれの } n = 0, 1, 2, \dots \text{ について} \quad (1.3)$$

場合Ⅱの光路差は、

$$\Delta_{II}(n) = (FB + BP) - FP \quad \text{それぞれの } n = 0, 1, 2, \dots \text{ について} \quad (1.4)$$

### 課題 1.2 光路差の表式(0.5 点).

場合Ⅰに対して  $L_R(n) \ll L_0, L_b$ 、場合Ⅱに対して  $L_L(n) \ll L_0, L_a$  を仮定して、(1.3) (1.4) 式（実験の組立でこの条件が満たされているか確かめよ）より、光路差  $\Delta_I(n)$  と  $\Delta_{II}(n)$  を  $L_0, L_b, L_a, L_R(n), L_L(n)$  を用いて表せ。ただし、 $x \ll 1$  のときの近似式  $(1+x)^r \approx 1+rx$  を用いてよい。

上の式を用いる際の実験的な難しさは、 $L_0, L_R(n), L_L(n)$  を正確に測定することができない点にある。はじめの量  $L_0$  を定める上での難しさは、レンズの焦点の位置を見つけるのが容易ではないことにあり、次の2つの量  $L_R(n), L_L(n)$  を定める上での難しさは、光学装置を直線的に並べるのが非常に難しいことにある。

$L_R(n)$  と  $L_L(n)$  を求める際の困難を解決するために、すべての縞模様の原点としてスクリーンの目盛り（装置記号 E）上にゼロ点をまず決めなさい。次に  $L_R(n)$  と  $L_L(n)$  の位置を定めるために、未知の位置を  $l_{0R}$  ,  $l_{0L}$  とし、 $l_R(n)$  ,  $l_L(n)$  を上で決めたゼロ点から測った暗線の位置とする。

$$L_R(n) = l_R(n) - l_{0R} \quad \text{と} \quad L_L(n) = l_L(n) - l_{0L} \quad (1.5)$$

が成り立つ。

## 実験の実行. データ解析.

### 課題 1.3 暗線の位置とカミソリの刃の位置の測定 (3.25 点).

- 場合 I と場合 II の両方について、縞の番号  $n$  の関数として、暗線の位置  $l_R(n)$  ,  $l_L(n)$  を測定せよ。そして測定値を表 1 に記せ。それぞれの場合について少なくとも 8 回の測定を行うこと。
- 同様にカミソリの刃の測定に最適の位置として  $L_b$  と  $L_a$  の値を記せ。そしてそれらの位置を測った装置を、装置記号で示せ。
- **重要な示唆:** 解析を簡単にし精度を上げるために、距離  $d = L_b - L_a$  を直接測定せよ。そうすると、 $L_b$  と  $L_a$  の精度よりもよい精度が得られる。すなわち、 $L_b$  と  $L_a$  の測定値から計算することをしない。ここで、距離を測った装置を、装置記号で示せ。

答には、測定の不確定性（誤差）を必ず入れること。

### 課題 1.4 データ解析. (3.25 点).

上記のすべての情報から、 $l_{0R}$  と  $l_{0L}$  の値を求めることができ、さらに波長  $\lambda$  が求められる。

- これらの値を求めるための手続きを考案せよ。必要な表式、方程式を書き出せ。
- 誤差の解析を含めよ。表 I を用いるか別の表を用いて、見いだしたことを報告せよ。すなわち、作った表の各欄の内容が明確に分かるように記せ。
- 解析した変数を、与えられたグラフ用紙を用いてプロットせよ。
- $l_{0R}$  と  $l_{0L}$  の計算値を誤差も含めて書き出せ。

### 課題 1.5 $\lambda$ を計算する. (2 点).

$\lambda$  の計算値を記せ。誤差とそれを得るための誤差解析も含めよ。**示唆:**  $\lambda$  についての公式において、 $(L_b - L_a)$  が現れたら、 $d$  で置き換えて、その  $d$  に測定値を用いること。

## 実験問題 2 雲母の複屈折

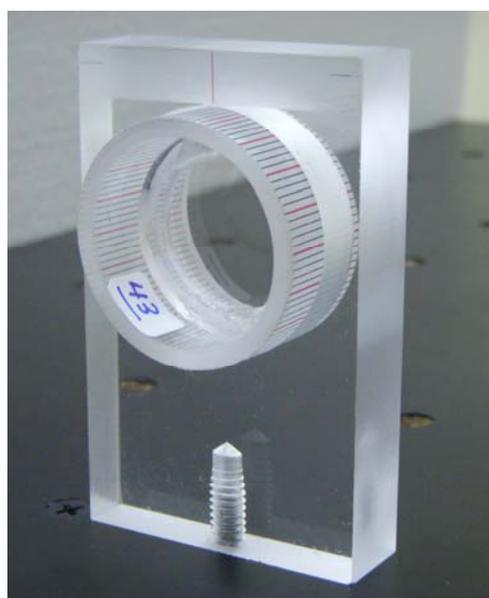
この実験では雲母（光を偏光させる光学装置で広く使われる結晶）の複屈折を測定する。

### ・器具

- 1), 2), 3)以外に以下のものを使用する。
- 14) スライド枠に取り付けた 2 つの偏光板がそれぞれアクリル支持台（装置記号 J）によって支えられている。組み立てについては写真を見よ。
- 15) 雲母の薄膜がプラスチック製の円筒に取り付けてあり、円筒には数字のない目盛りがついている。円筒はアクリル支持台（装置記号 K）で支えられている。組み立てについては写真を見よ。
- 16) 光検出器はプラスチック製の箱に入っている。コネクタ、発泡スチロール製支持台、光検出器の電圧を測定するマルチメータ（テスター）（装置記号 L）の組み立てについては写真を参照。
- 17) 電卓
- 18) ハガキ大のカード、粘着テープ（masking tape）、剥離粘着紙、はさみ、三角定規セット
- 19) 鉛筆、紙、グラフ用紙



スライド枠に取り付けた偏光板がアクリル支持台（装置番号 J）に支えられている



雲母の薄膜を取り付けた円筒には数字のない目盛りがついていて、円筒はアクリル支持台（装置記号 K）に支えられている。



プラスチック箱の中にある光検出器，コネクタ，発泡支持台，光検出器（装置記号 L）の電圧を測定するマルチメータ。ここに示しているように接続する。

#### ・現象の説明

光は横波の電磁波であり，その電場は光の伝播方向に垂直な面上で，光の進行と共に時間的に振動する。

電場の振動の向きが一定のとき，その光波は直線偏光，または，単に偏光と呼ばれる（図 2.1）。

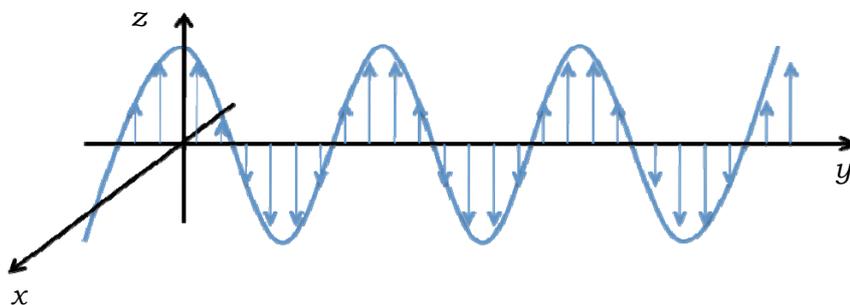


図 2.1  $z$  軸方向へ偏光した  $y$  軸方向へ伝播する光波

偏光フィルム（偏光板）は、その表面に平行な特別な軸，すなわち，透過した光がその軸方向の偏光となる軸をもつ物質である。特別な軸の方向を（+），その軸に垂直な方向を（-）で表す。

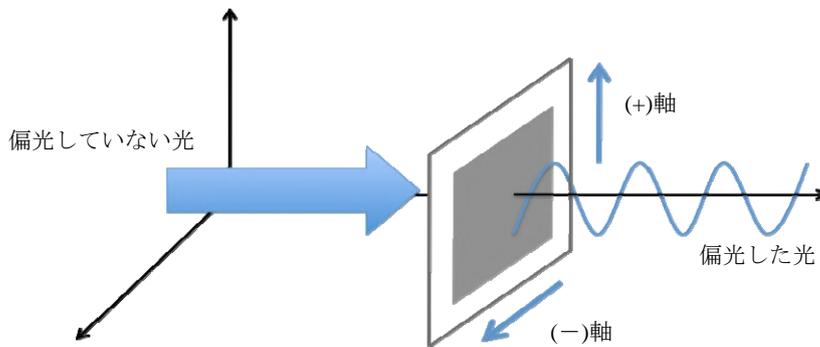


図 2.2 偏光していない光が偏光板に垂直に入射する。透過光は偏光板の（+）方向に偏光する。

ガラスのような通常の透明物質は、入射光と同じ偏光の光を透過する。その屈折率は入射光の偏光方向によらない。しかし、雲母を含む多くの結晶は、光波の電場方向に敏感である。表面に垂直方向の伝播に対し、雲母の薄い平板には特別な2つの直交軸がある。それを軸1，軸2と呼ぶ。これにより複屈折と呼ばれる現象が起こる。

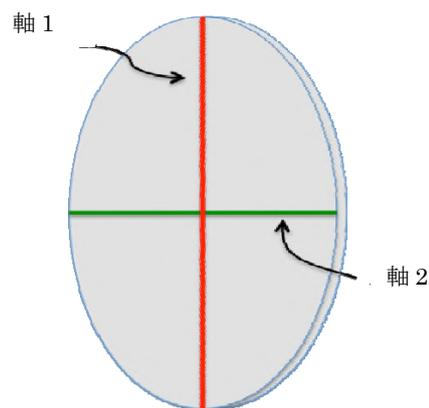


図 2.3 軸1（赤）と軸2（緑）という2つの軸をもつ雲母の薄い板。

複屈折の例として、2つの簡単な例を解析する。鉛直方向へ偏光した光波が、雲母の薄い板の表面に垂直に入射するとする。

**場合1)** 軸1または軸2が入射波の偏光方向に平行であるとする。透過光はその偏光方向を変えずに通過するが、物質の屈折率が $n_1$ あるいは $n_2$ であるかのように伝播する(図2.4, 図2.5)。

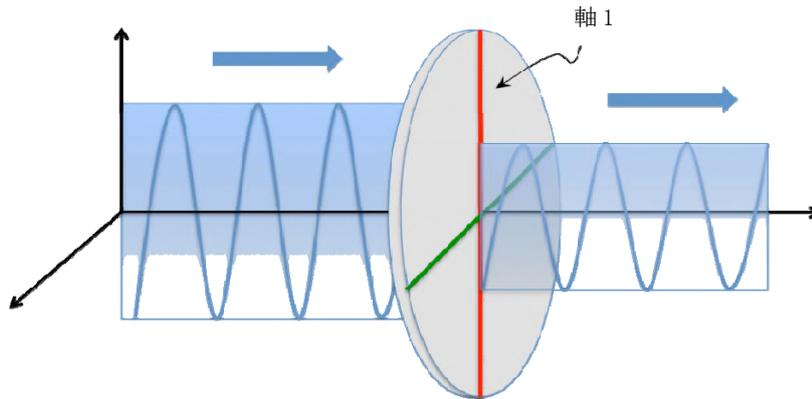


図2.4 軸1が入射光の偏光方向に平行である場合、屈折率は $n_1$ である

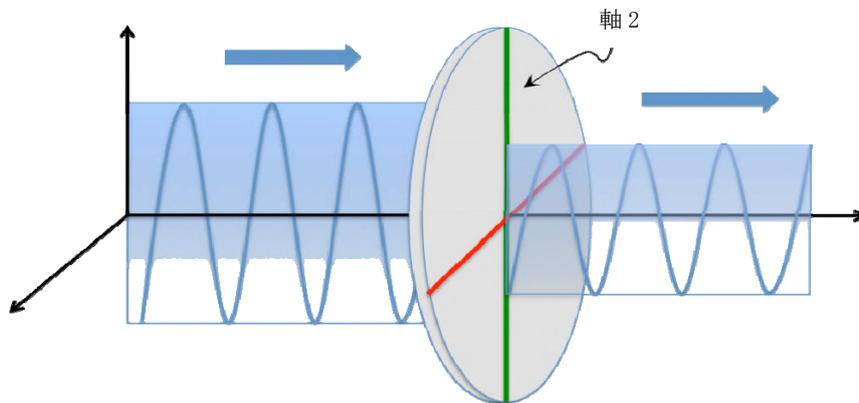


図2.5 軸2が入射光の偏光方向に平行である場合、屈折率は $n_2$ である

**場合2)** 軸1が入射光の偏光方向と角 $\theta$ をなすとする。透過光の偏光状態はさらに複雑である。しかし、この光波は次の2つの光波の重ね合わせで表される。1つは入射光の偏光に平行な方向(すなわち、鉛直方向)に偏光した光波であり、

もう1つは、入射光の偏光に垂直な方向（すなわち水平方向）に偏光した光波である。

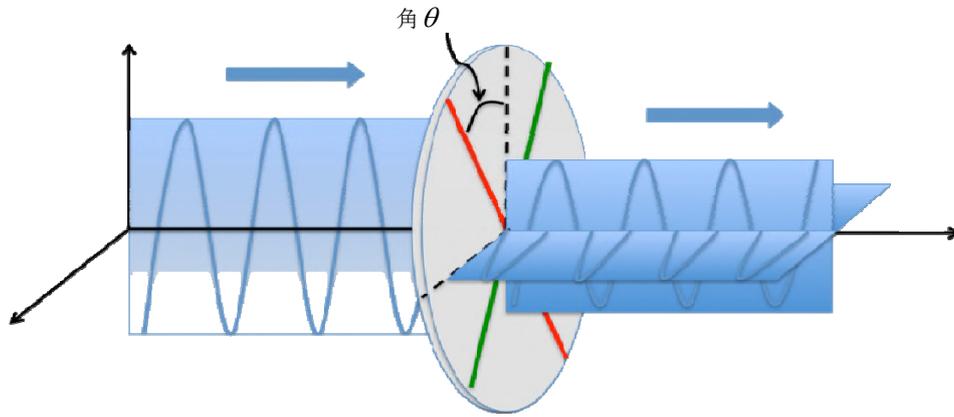


図 2.6 軸 1 が入射光の偏光方向と角  $\theta$  をなしている

入射光の偏光に平行な方向に偏光した透過光の強度を  $I_p$ ，入射光の偏光に垂直な方向に偏光した透過光の強度を  $I_o$  とする。これらの強度は、角  $\theta$  と光源の波長  $\lambda$ ，平板の厚さ  $L$ ，および、屈折率の差  $|n_1 - n_2|$  に依存する。この最後の量は、物質の複屈折率と呼ばれる。この問題のゴールは、複屈折率を測定することである。偏光板と複屈折の性質を示す物質は、共に、光の偏光状態を調整するのに用いられる。

ここで、光検出器は偏光状態とは独立に、入射光の強度を測定することを指摘しておく。

$I_p(\theta)$  と  $I_o(\theta)$  の角  $\theta$  依存性は、雲母による入射光の吸収率のように、これまで考えてこなかったような効果にも依存して複雑である。しかし、

$$\bar{I}_p(\theta) = \frac{I_p(\theta)}{I_p(\theta) + I_o(\theta)} \quad (2.1)$$

および、

$$\bar{I}_o(\theta) = \frac{I_o(\theta)}{I_p(\theta) + I_o(\theta)} \quad (2.2)$$

で定義される規格化された強度  $\bar{I}_p(\theta)$  と  $\bar{I}_o(\theta)$  に対する非常に簡単な表現だけは近似的に求められる。これらの規格化された強度はそれぞれ、

$$\bar{I}_p(\theta) = 1 - \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\phi) \sin^2(2\theta) \quad (2.3)$$

および

$$\bar{I}_o(\theta) = \frac{1}{2}(1 - \cos\Delta\phi)\sin^2(2\theta) \quad (2.4)$$

で与えられる。また、 $\Delta\phi$ は、平行および垂直な透過光の位相差であり、

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda}|n_1 - n_2| \quad (2.5)$$

と表される。ここで、 $L$ は雲母の平板の厚さ、 $\lambda$ は入射光の波長、 $|n_1 - n_2|$ は複屈折率である。

## 実験装置の組み立て

### 課題 2.1 強度測定のための実験装置の組み立て

透過波の強度  $I_p$  および  $I_o$  を 図 2.6 に示すような光学軸の角度  $\theta$  の関数として測定するための実験の組み立てを設計しなさい。その際に、光学台の図にそれぞれの装置の装置記号を記すこと。 偏光板の向きを記号 (+) および (-) で表しなさい。あなたの考えた設計を分かりやすくするために簡単な書き込みをしてもよい。

課題 2.1 a)  $I_p$  の測定のための実験装置の組み立て(0.5 点).

課題 2.1 b)  $I_o$  の測定のための実験装置の組み立て(0.5 点).

### レーザー光のアライメント調整

レーザー光が光学台と平行になるようにして、雲母を支えている円筒の中心にレーザー光が入射するようにする。白カードを使って光路を追うことによって、レーザー光の向きを調整するとよい。微小な調整は可動の鏡を使って行う。

### 光検出器とマルチメータ

光検出器は光が入射すると電圧を生じる。マルチメータを用いてこの電圧を測定しなさい。電圧は光の強度に比例しているため、光の強度を光検出器に生じた電圧で表す。光検出器にレーザー光が入射しないときも、光検出器の背景光強度を測定する可能性がある。しかし、この強度は 1 mV より小さいはずである。光強度の測定をするときに、この背景強度の補正をしないこと。

**注意:** レーザー光は部分的に偏光しているが、どの方向を向いているかは分からない。強度の読みが十分できる程度の偏光を得るためには、(+) 軸あるいは (-) 軸をもつ偏光器を垂直方向にして、他の光学機器がない状況で最大の透過光強度を得るようにする。

## 強度測定

### 課題 2.2 角度目盛りの設定

雲母が取り付けられている円筒は角度を測るための目盛りがついている。最小間隔（すなわち、隣り合う目盛り線の間）に対応する角度を書け (0.25 点)。

### (近似的に) $\theta$ の零点と雲母の軸の位置を求めること

解析を進めるためには、角度の零点（すなわち強度がゼロとなる角度）を近似的に求めることが重要である。まず、雲母の一つの軸を特定することを勧める。これを軸 1 と呼ぶことにしよう。この角度の位置が円筒上の目盛りと一致することはまずない。よって、雲母円筒の目盛り線のうちもっとも近い目盛り線を暫定的な角度の原点とすることにする。その原点からの角度を  $\bar{\theta}$  と表すことにする。以下では、もっと正確な  $\theta$  の零点を求めることが要求される。

### 課題 2.3 $I_p$ と $I_o$ の測定

あなたが必要と思う数だけの角度  $\bar{\theta}$  に対して、強度  $I_p$  と  $I_o$  を測定せよ。測定結果を表 I に報告せよ。雲母を取り付けた円筒について、同じ設定で、すなわち固定した角度  $\bar{\theta}$  について、強度  $I_p$  および  $I_o$  を測定せよ (3.0 点)。

### 課題 2.4 $\theta$ の近似的な零点を求めること

軸 1 の位置が角度  $\theta$  の零点を決める。上に述べたように、軸 1 が雲母を取り付けた目盛り線と一致することはまずない。角度の零点を求めるには、グラフで調べるか数値で調べるかのいずれかの方法をとる。極大点あるいは極小点の近傍では、次のように関係式は二次曲線で近似できる。

$$I(\bar{\theta}) \approx a\bar{\theta}^2 + b\bar{\theta} + c$$

極大点あるいは極小点は以下で与えられる。

$$\bar{\theta}_m = -\frac{b}{2a}.$$

上記の選択をすると、課題 2.3 の表 I に与えられている全ての数値にずれ  $\delta\bar{\theta}$  を生じる。そうすると、数値は近似的な零点からの角度  $\theta = \bar{\theta} + \delta\bar{\theta}$  として表される。ずれの角度  $\delta\bar{\theta}$  の値を書け (1.0 点)。

### データ解析.

### 課題 2.5 適当な変数の選択

位相差  $\Delta\phi$  を見つける解析をするための  $\bar{I}_p(\theta)$  あるいは  $\bar{I}_o(\theta)$  を選び、用いる変数を明記せよ (0.5 点)。

### 課題 2.6 データ解析と位相差

- 課題 2.5 で定めた変数を用いて、 $\Delta\phi$  を見出すために表 II を完成せよ。角  $\theta$  に対して補正された値を用いよ。表 II に誤差を含めよ。グラフ用紙にそれらの変数をプロットせよ (1.0 点)。

- 位相差  $\Delta\phi$  を求めるのに必要な解析をせよ。誤差を含む結果を記せ。解析に使われる表式を書け。あなたが得た結果をグラフ用紙にプロットせよ。(1.75 点)。
- 位相差  $\Delta\phi$  を、誤差を含めてラジアンで計算せよ。区間  $[0, \pi]$  で位相差の値を求めよ(0.5 点)。

### 課題 2.7 複屈折率 $|n_1 - n_2|$ の計算

位相差  $\Delta\phi$  に  $2N\pi$  ( $N$  は整数) を加えても、あるいは、位相の符号を変えても強度の値は変化しない。しかし、複屈折率の値  $|n_1 - n_2|$  は変化するであろう。こうして、課題 2.6 で求めた  $\Delta\phi$  の値を用いて複屈折率の値を正しく計算するには、以下のことを考えなければならない。

$$L < 82 \times 10^{-6} \text{ m} \quad \text{ならば} \quad \Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2|$$

あるいは、

$$L > 82 \times 10^{-6} \text{ m} \quad \text{ならば} \quad 2\pi - \Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2|$$

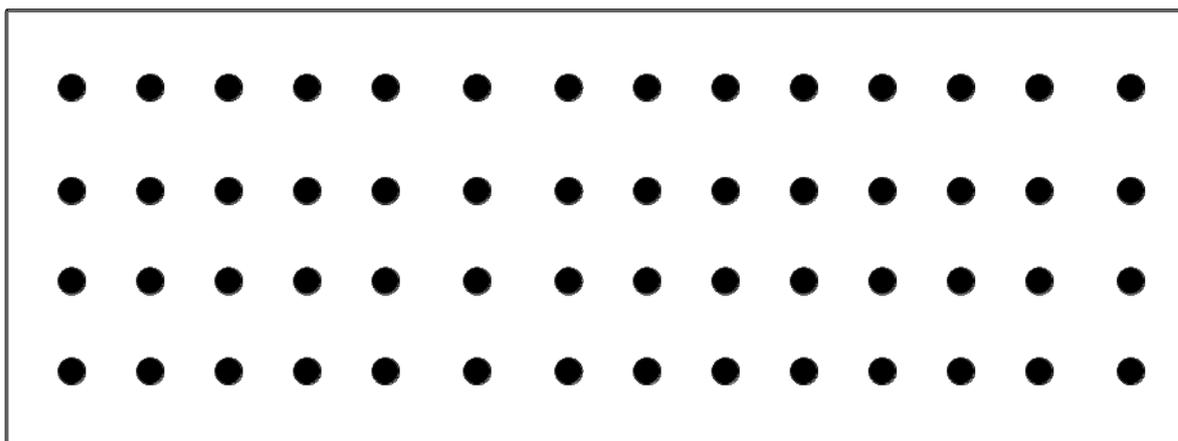
ここで、雲母平板の厚さ  $L$  の値は、それを取り付けてある円筒に書かれている。この数値は、マイクロメートル (1マイクロメートル =  $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) を単位としている。  $1 \times 10^{-6} \text{ m}$  を  $L$  に対する誤差とせよ。レーザー光の波長については、問題 1 で求めた値、あるいは、  $620 \times 10^{-9} \text{ m}$  と  $750 \times 10^{-9} \text{ m}$  の間の平均値 (可視光の赤色の波長) を用いよ。  $L$  と  $\lambda$  の値および複屈折率  $|n_1 - n_2|$  を誤差を含めて書け。また、誤差を計算するのに用いた公式を記せ (1.0 点)。

解答用紙

実験問題 1

ダイオードレーザーの波長

課題 1.1 実験装置組み立て.



1.1	レーザー光の光路も図に描き、光学台から測ったレーザー光の高さ $h$ を書きなさい。 $h =$	1.0
-----	---	-----

課題 1.2 光路差の表式.

1.2		0.5
-----	--	-----





## 課題 1.4 データ解析.

1.4		3.25
-----	--	------

1.4		
-----	--	--

課題 1.5  $\lambda$  の計算.

1.5	<p><math>\lambda</math> の値を書きなさい.</p> <p><math>\lambda =</math></p>	2
-----	---	---

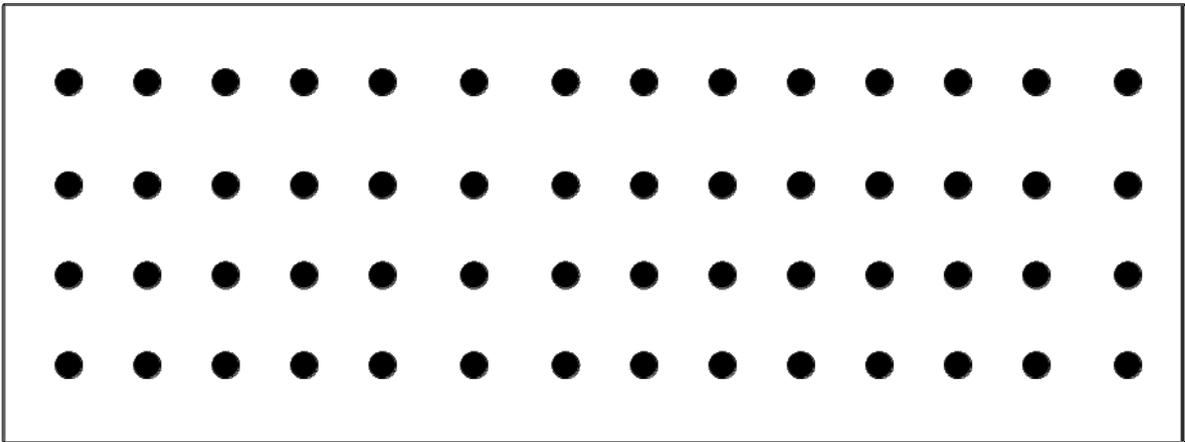


解答用紙

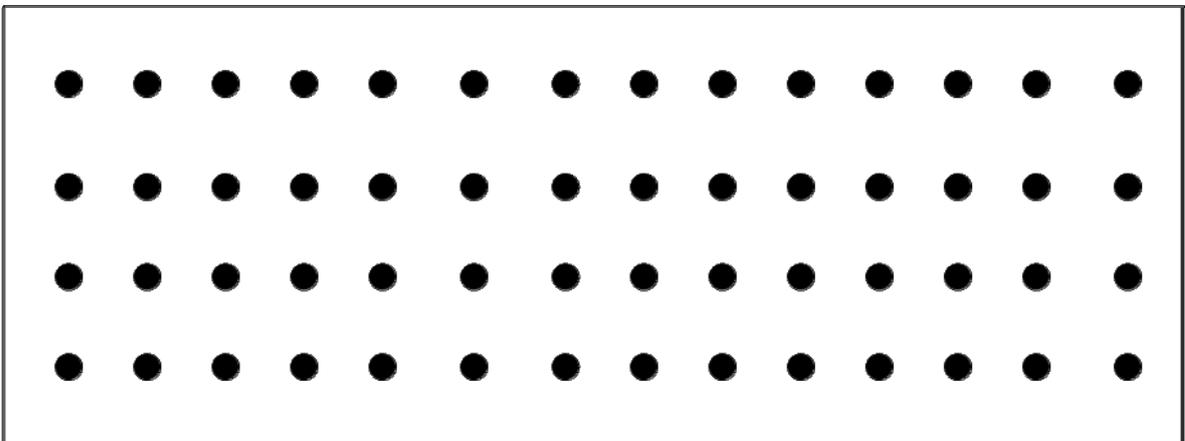
実験問題 2

雲母の複屈折

課題 2.1 a)  $I_p$  の測定のための実験装置の組み立て. (0.5 points)



Task 2.1 b)  $I_o$  の測定のための実験装置の組み立て. (0.5 points)







課題 2.4  $\theta$ の近似的な零点を求めること.

2.4		1.0
-----	--	-----

課題 2.5 適当な変数の選択.

2.5		0.5
-----	--	-----

## 課題 2.6 データ解析と位相差.

2.6		3.25
-----	--	------

2.6		
-----	--	--

2.6

0.5



課題 2.7 複屈折率 $|n_1 - n_2|$ の計算.

2.7	<p>用いた雲母平板の厚さを書くと,</p> $L =$ <p>用いた波長を書くと,</p> $\lambda =$ <p>複屈折率の計算</p> $ n_1 - n_2  =$ <p>複屈折率の誤差の計算に用いた公式を書け.</p>	1.0
-----	---	-----