

実験 見えないものを見る (20 points)

導 入

多くの物質は、光学的な非等方性を示すため、屈折率が光の伝搬方向や偏光方向に依存する。もともとは光学的に等方的な物質でも、力学的応力や非一様な加熱、電場の印加などによって非等方性を示すことがある。しかし、非等方な物質で観察される複屈折（下で述べる）が起こらない（等方性を示す）結晶の軸が存在し、これは光学軸と呼ばれる。

光学的な非等方性を調べるための古典的な実験方法（図1参照）を考える。この **Experimental competition** でもこの方法を用いる。

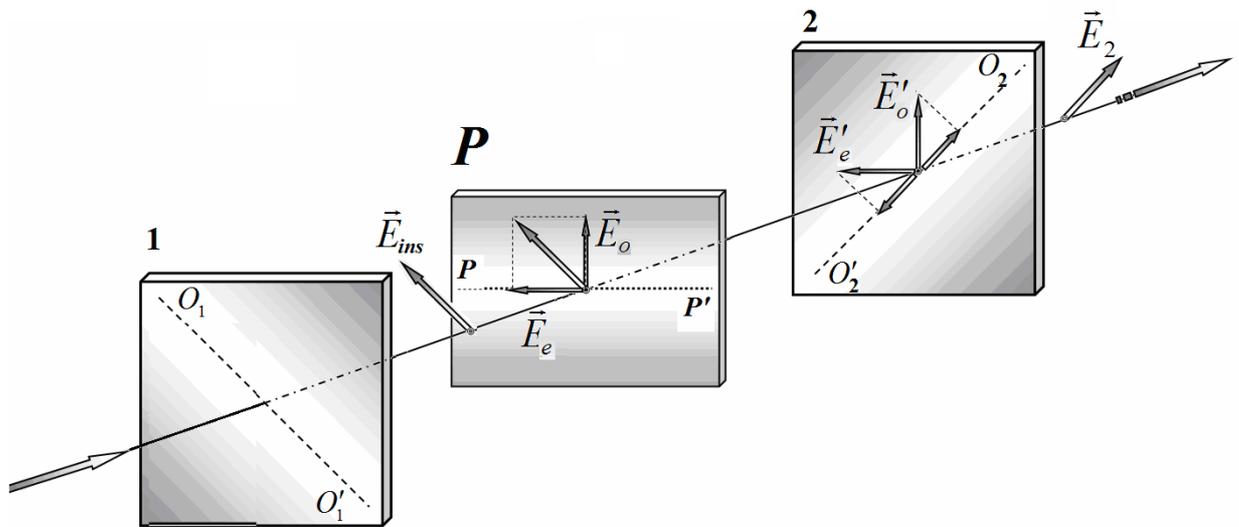


図1. 光学的非等方性を調べるための実験方法

光線が、 O_1O_1' 方向の偏光軸を持つ偏光板 1 に入射してくる。偏光板 1 を透過した光線は、直線偏光の状態となり、その電場ベクトル \vec{E}_0 は偏光板の偏光軸方向に振動する。次に、直線偏光した光線は、光学的な非等方性を持った板（非等方板） P に入射する。ここで、この板の光学軸 PP' は偏光板 1 の透過面と 45° の角度をなしておかれている。この時、非等方板 P の中で二種類の光波が発生する。一つは通常光 \vec{E}_o 、つまり非等方板の光学軸に対して垂直に偏光した電場ベクトルをもつ光。もう一つは異常光 \vec{E}_e 、つまり非等方板の光学軸に沿って偏光した電場ベクトルをもつ光。これら二つの光波に対する屈折率には差が生じる。これを複屈折という。その屈折率の差を $\Delta n = n_o - n_e$ で表す。この差により、非等方板を通過し終わるときには、二つの光波に位相差 $\Delta\varphi = 2\pi h \Delta n / \lambda$ が生じる(ここで h は板の厚さ、 λ は考えている光の波長である)。この位相差のため、非等方板を出ていく光線は楕円偏光に変わる。最後に、この光線は偏光板 2 に入射する。この偏光板の偏光軸 O_2O_2' は、偏光板 1 の偏光軸と直交している。

非等方板 P と偏光板 2 を通過した後、光線の強度は次のような式で表される:

$$I_2 = k I_0 \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (1)$$

ここで I_0 は（一枚目の偏光板を通過し）非等方板 P に入射する光線の強度、 k は非等方板 P と偏光板 2 を通過する透過係数、 $\Delta\varphi$ は非等方板 P を通過した後の、通常光と異常光の位相差を表す。

この実験では特に求められない限り、誤差を評価しないこと！

装置の説明は Appendix A

Part 1. 定性的観測！ (3.5 points)

Part 1.1. 偏光板 (0.8 points)

1.1	机の上に与えられた実験器具を自由に用いて、偏光板 1 と 2 の偏光軸が、図の斜線のどちらであるか見つけよ。これらの方向を、解答用紙の図の中に示せ。(0.8 points)
-----	--

Part 1.2. 定規 (1.0 points)

このパートにおいては、発光ダイオード(LED)を光源として用いよ。

LED をスタンドに固定し、電源に接続しなさい。二つの偏光板スタンドの表面(数字 1 や 2 が書いてある面)を光源のほうに向けて取付けなさい。この時、二つの偏光板の透過面が互いに直交していること、つまり光が二つの偏光板を透過してこないことを確かめておくこと。次に、Appendix B の図 1B の矢印で示すように、白い紙で一枚目の偏光板を覆いなさい。

二枚の偏光板の間にプラスチック定規を置きなさい。手で定規を自由に動かしてよい。

1.2.1	プラスチック定規の中央付近での考えられる光学軸の方向を見つけ、解答用紙の図にそれらの方向をすべて示せ。(0.4 points)
1.2.2	定規 1 のみの時、二つの定規を合わせた時、それぞれについて青い光の変化に対応する位相差が 2π 変わるときの定規に沿った長さを近似的に求めよ。(0.6 points)

Part 1.3. リボン (0.8 points)

1.3.1	プラスチックリボンの考えられる光学軸の方向を見つけ、解答用紙の図にそれらの方向をすべて示しなさい。(0.4 points)
-------	---

長くて曲げられるプラスチックリボンを洗濯バサミでスクリーンに固定する。リボンの左右の端がスクリーンの端と一致するようにする。リボンは曲がるはずである(図 3B)。リボンを取り付けたスクリーンを二つの偏光板の間に設置する。スクリーンを動かし、リボンの色の変化を観察しなさい。図 3B の矢印で示されているように、スクリーンに付いている目盛で、リボン上の点の x 座標を測る際、スクリーンホルダーの左端を原点としなさい。

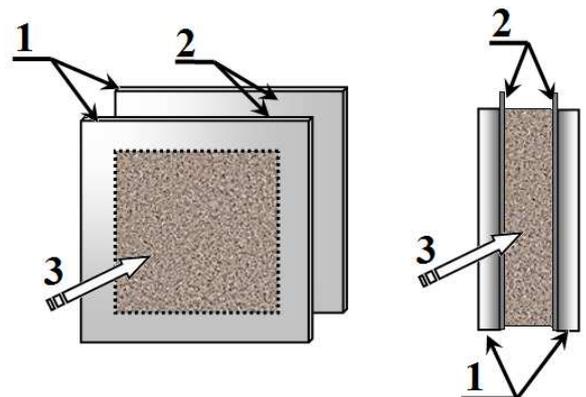
今後、座標はスクリーン上の目盛で測定する。目印として、図 3B の矢印で示されているようにホルダの左端を原点とせよ！

1.3.2	リボンに見えている二つの暗い帯の中央の座標をそれぞれ測定せよ。左側の点の座標を x_L とし、右側の点の座標を x_R とする。(0.4 points)
-------	--

Part 1.4. 液晶セル (0.9 points)

液晶(LC)は、結晶した固体とアモルファス液体の中間の物質状態である。その分子の方向は、電場をかけることによって、簡単に整列させ、コントロールすることができる。液晶セルは、2つの主屈折率により特徴付けられる光学的非等方性現象を示す。この効果の大きさは、印加する交流電圧に依存する。液晶セルは、内側の表面に透明な導電体 2 を塗布した 2 枚のガラス板 1 で構成されている。その間には、液晶状態にある溶液 3 の薄い(およそ 10 ミクロン)層がある。交流電源につなぐために、プレートに導線がはんだ付けされている。

電圧がかかっていないとき、液晶の長い分子鎖(棒状)の向きは、板と平行である。分子鎖の方向は、結晶の光学軸と一致する。



液晶セルを二枚の偏光板の間に入れ、電源につなぐ。液晶セルにかかる電圧を変化させることで透過光の色が変わることを観察せよ。

1.4.1	電圧をかけない場合とかけられる最大電圧の場合それぞれについて、液晶セルの光学軸として考えられる方向を見つけ、解答用紙の図にそれらの方向をすべて示せ。ただし、 z 軸は鉛直方向を向いている。(0.6 points)
1.4.2	セルにかかる電圧を変化させていったとき、液晶の分子鎖の向きが急に 90° 変化する。この時、セルにかけている電圧 U_{cr} を測定せよ。マルチメーターは確実に交流電圧にセットしておくこと。(0.3 points)

Part 2. 測定せよ! (16.5 points)

ここでLEDを電源から取り外し、LEDと白い紙を装置から取り除く。

このPartでは、光源としてレーザー光を用いる。レーザーをきちんと電源につなげること!

レーザー、偏光板1、スリットの付いたスクリーン、受光器(光ダイオード)を光学台のホルダーに固定する。偏光板とスクリーンのスリットを通過したレーザー光線が、光ダイオードにきちんと当たるように光学系を調節する。ネジ5cを使って光線の幅を調節し、受光器上のスポットの大きさが5~6mm程度になるようにせよ。

レーザーが放出するのは、直線偏光である。レーザーの偏光面を回転させるためのリング5aを用いて、レーザー光線が1つ目の偏光板をほぼ完全に通過し、かつ楕円形のスポットの長軸が鉛直方向に一致するようにせよ。以下の実験のため、固定用ネジ5dと15cを使って、レーザーと受光器の向きが動かないように固定せよ。次に、偏光板2を、偏光板1と偏光面が直交するように設置する。スクリーンも含めた全体のセットアップは、図4Bに示されている。

Part 2.1. 光ダイオードを調べる(3.2 points)

光の強度の測定には、光ダイオードの起電力を用いる。この起電力は、入射光強度の複雑な関数となっている。そのため、光の強度を測定するために、図2に示す回路を用いる。マルチメーターで測定される直流電圧は、入射光の強度と抵抗器の抵抗値で決まる。このPartの主な目的は、抵抗器にかかる電圧が、光ダイオードに入射する光の強度に比例するような最適な抵抗値を選ぶことである。

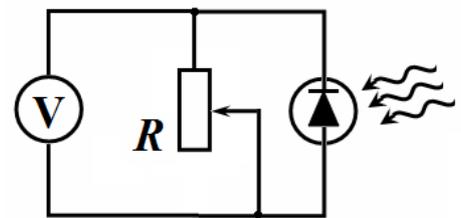


図2. 光ダイオードの起電力を測定する回路

このPartの測定を行うときは、2つ目の偏光板とスクリーンを光学台から取り外すこと。光線の強度を弱めるフィルターを取り付ける際は、図5Bに示すように、偏光板の裏面に洗濯バサミで固定すること。

最低でも300 mV以上の電圧まで測定を行うこと。

マルチメーターを用いると、抵抗器の抵抗値やそれにかかる電圧を測定することができる(もちろん、そのためにはマルチメーターのレンジを適切に選ぶ必要がある)。与えられたスイッチを適切に配置することで、同じマルチメーターで抵抗値と電圧の両方を測定できるようにせよ。つまり、スイッチのオン/オフ、および、マルチメーターの調節によって、回路の切断なしに測定が行えるようにせよ。

2.1.1	抵抗器にかかる電圧と抵抗値を同時に測定できるようにスイッチを取り付けた回路図を示せ。(0.2 points)
2.1.2	入射光の強度が、最大(フィルターの枚数 $n = 0$)の場合と、最小(フィルターの枚数 $n = 5$)の2つの場合について、抵抗器にかかる電圧を、その抵抗値の関数として測定せよ。結果のグラフはひとつの図にまとめて示せ。その電圧の差が最大となる抵抗値の大きな範囲を答えよ。(1.0 point)
2.1.3	光ダイオードに入射する光の強度を弱めたときに抵抗器にかかる電圧 U を、フィルターの枚数 $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ の関数として測定せよ。測定は、3つの異なる抵抗の値(おおよそ $R = 30\text{ k}\Omega$, $R = 20\text{ k}\Omega$ および $R = 10\text{ k}\Omega$) に対して行うこと。結果はひとつのグラフにまとめて描け。縦軸の目盛は、抵抗器にかかる電圧が光ダイオードへの入射光の強度に対して直線的に変化する様子が分かるように選ぶこと。測定を行った3つの抵抗値から、このあと光の強度を測定するのに用いる最適な抵抗値 R_{opt} を選べ。(1.0 point)
2.1.4	ここで得られたデータから、フィルターの透過率 $\gamma = I_{tr}/I_{inc}$ を計算し、その誤差を評価せよ。ここで、 I_{tr} は透過光の強度、 I_{inc} は入射光の強度である。必要であれば追加で測定を行ってもよい。(1.0 point)

これ以降の測定はすべて、上で選んだ最適な抵抗値で行うこと!

以下では、光の強度の相対値は、抵抗器にかかる電圧(単位は mV) に等しいものと仮定する。

Part 2.2 プラスティック定規を透過する光 (5.4 points)

プラスチック定規を2枚の偏光板の間に置きなさい。手で定規を動かすことができます。その後、スリット付きスクリーンに洗濯バサミで固定しなさい(図 2B を見よ)。定規の下端はスクリーンに引かれた線に合っており、目盛が上側になければいけない。与えられた定規のどちらも複屈折を示すことを確認しなさい。定規の上にもう一つの定規を重ねた時にも光が見えることを観察しなさい。

この Part では、Part 1.2 および図 4B で示した光学系を用いる。定規がスクリーン上の Part 1.2 で示した位置に固定されていることを確認せよ。

2.2.1	透過光の強度 (mV 単位) を、光が定規に入射する点の座標 x の関数として測定せよ。 x の範囲は 0 から 10 cm とする。測定は、与えられた2枚の定規それぞれ、および2枚の定規を重ねたものについて行うこと。それぞれの測定において電圧の最大値を記録せよ。対応するグラフも同じ図にプロットせよ。(2.0 points)
2.2.2	2つの定規のそれぞれについて、通常光と異常光の位相差 $\Delta\varphi$ を、 x が 0 から 7 cm の範囲で計算し、得られた $\Delta\varphi(x)$ のグラフをプロットせよ。計算に用いた式を示すこと。(1.2 points) 位相差は、式 (1) のみからは一意に求まらない。従って、位相差を正しく決定するにはさらに別の物理的仮定が必要である。
2.2.3	定規 1 と 2 のそれぞれについて $\Delta\varphi(x)$ が線形、すなわち $\Delta\varphi_1 = a_1x + b_1,$ $\Delta\varphi_2 = a_2x + b_2,$ と表されると仮定し、各係数の具体的な値を計算せよ。(1.0 point)
2.2.4	Part 2.2.1-2.2.3 で得られたデータを用いて、2枚の定規を重ねたときに、それを透過する光の強度の理論値を計算せよ。計算に用いた式も示すこと。理論的に得られた位置依存性を、Part 2.2.1 と同じ図にプロットせよ。(1.2 point)

Part 2.3 液晶セルを透過する光(4.5 points)

図 6B に示すように、液晶セルを 2 枚の偏光板の間に置きなさい。

これからの実験で調べる関係は、値が急に変化する領域を含んでおり、まったく単調ではない。

測定を行う際はこの点に留意すること。

液晶セル電源の交流電圧や受光器の直流電圧を測定するときは、適切な導線を直接マルチメーターにつなぐこと。

2.3.1	透過光の強度を、液晶セルにかける電圧の関数として測定せよ。対応するグラフも示せ。(2.0 points)
2.3.2	液晶セルから電源を取り外したときの、通常光と異常光の位相差 $\Delta\varphi_0$ を計算せよ。(1.5 points)
2.3.3	液晶セルにかける電圧の十分広い範囲において、通常光と異常光の位相差は、かける電圧のべき乗則で与えられる： $\Delta\varphi = CU^\beta.$ 得られたデータを用いて、この表式が成り立つ範囲と指数 β の値が分かるようなグラフをプロットせよ。そのグラフから読み取れるこの式の適用範囲を明示し、パラメータ β の値を求めよ。(1.0 point)

Part 2.4 曲がったリボンを透過する光 (3.4 points)

Part1.3.で示した通りにプラスチックリボンを固定する。

2.4.1	光学系を透過する光の強度を、光がリボンに入射する点の座標 x の関数として、リボンの中央から $\pm 20\text{ mm}$ の範囲で測定せよ。対応するグラフも示せ。(1.2 point)
2.4.2	曲がっていないリボンを透過する通常光と異常光の位相差 $\Delta\varphi_0$ を計算せよ。ただし、 $\Delta\varphi_0$ は 10π から 12π の間にあることが知られている。(1.2 points)

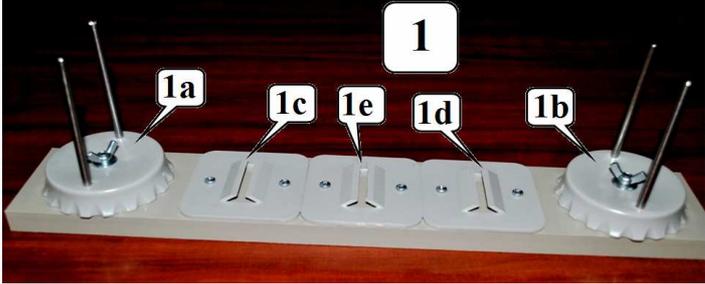
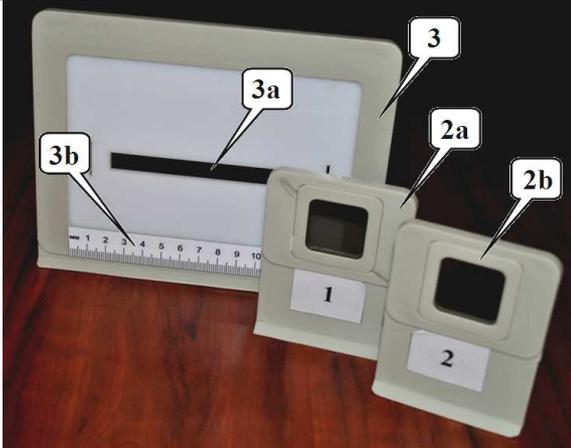
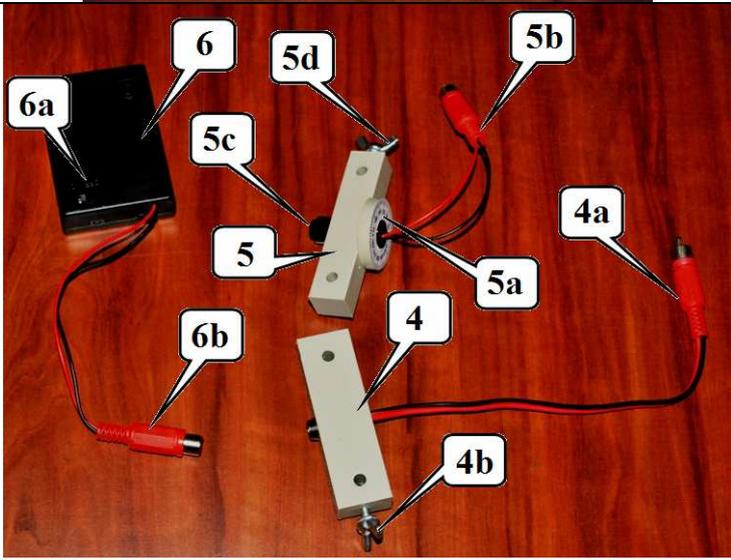
リボンの中心付近では、その形は半径 R の円弧で近似できる。 $z \ll R$ のときの中心からの距離 z に対する位相差 $\Delta\varphi$ の理論的な関係式は以下となる。

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 \left(1 + \frac{z^2}{2n^2R^2} \right),$$

ここで、 $n = 1.4$ はリボンの屈折率である。

2.4.3	これまでの Part で得られたデータを用いて、リボンの中央付近での曲率半径 R を計算せよ。リボンの屈折率は $n = 1.4$ である。(1.0 points)
-------	--

Appendix A. 実験装置

<p>ホルダー付き光学台 1a – ネジ止めする光源支持部 1b – ネジ止めする光検出器支持部 1c, 1d – 偏光板スタンド取付け部 1e – スクリーンと液晶セルの取付け部</p>	
<p>2a, 2b – 偏光板の付いたスタンド それらには表（おもて）面に1と2の番号が付けてある。 <u>偏光板は、光源の方へ表面が向くように取り付けること！</u> 偏光板の偏光軸は、水平から45°になるようにしてある。</p> <p>3 – スリット (3a) と目盛 (3b) の付いたスクリーン</p>	
<p>光源 4 – 発光ダイオード (LED) 4a – 電源装置につなぐための導線 4b – 固定用ネジ</p> <p>5 – レーザー 5a – レーザーを回転させる目盛付きリング (目盛は使わない) 5b – 電源装置につなぐための導線 5c – ビームの幅を調整する, 先端を回すネジ 5d – 固定用ネジ</p> <p>6 – 光源のための電源装置 6a – スイッチ 6b – 光源につなぐための導線</p> <p><u>電源装置のスイッチを入れておくのは測定をしている間だけにしなさい！</u> <u>非常に危険ですので、目にレーザービーム入れてはいけません！</u></p>	

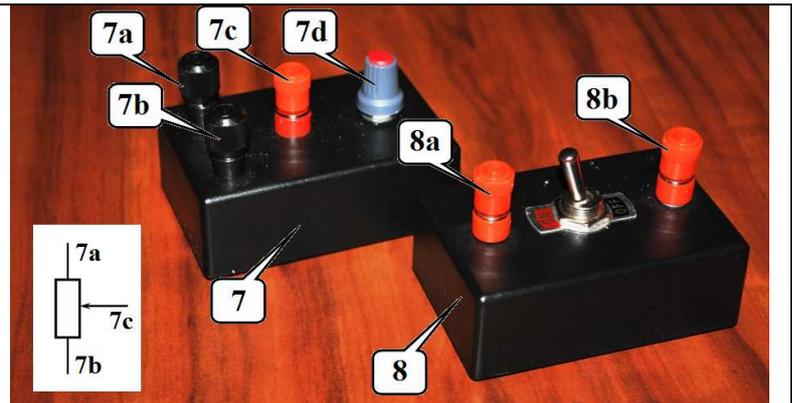
7 – 可変抵抗器

7a, 7b, 7c – 接続端子

7d – 回して抵抗値を変化させるつまみ

8 – スイッチ

8a, 8b – 接続端子



9a – ホルダー (9b)に取り付けられた液晶セル, 9c – 電源装置につなぐための導線

10 – 液晶セルのための電源装置

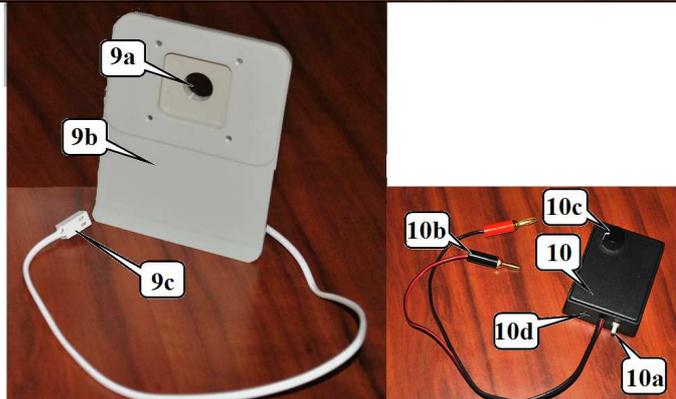
10a – 液晶セルをつなぐ電源コネクタ

10b – 出力電圧を測定するための導線

10c – 出力電圧調整用つまみ

10d – スイッチ

電源装置のスイッチを入れておくのは測定をしている間だけにしなさい!



11 – マルチメーター

“HOLD”ボタンを押さないこと。

11a – 電気抵抗の測定用レンジ (200 kΩ)

11b – 直流(DC)電圧の測定用レンジ (2V)

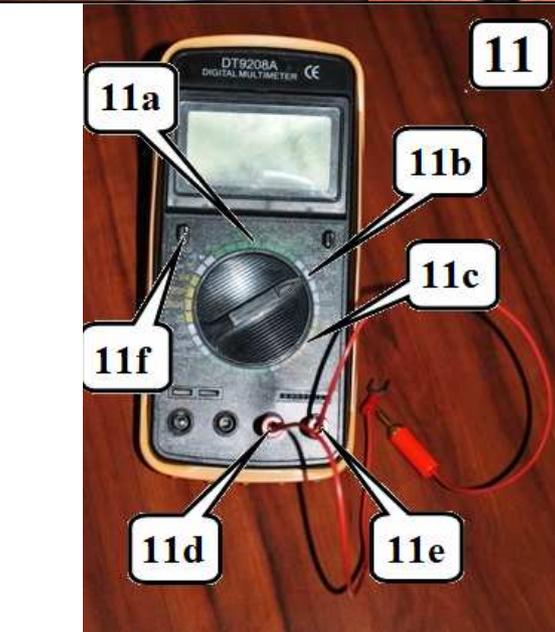
11c – 交流(AC)電圧の測定用レンジ (20V)

11d, 11e – 測定端子の接続部

11f – 電源ボタン

もし, ”sleep”モードのときは, 電源ボタンを一度押し, 一旦電源を off してから, もういちど電源ボタンを押して on にしなさい。

マルチメーターを用いて電気抵抗を測定するときには, 素子は電源装置から切り離しておかないといけません。



調べるための光学素子

12 – プラスティック定規:

12a – No. 1 (目盛 0 から 14 cm)

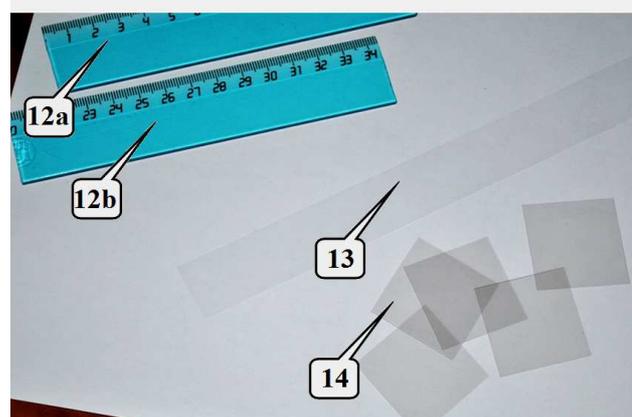
12b – No. 2 (目盛 20 から 34 cm)

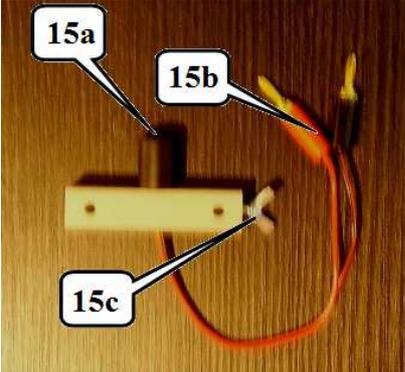
13 – 曲げられるプラスチックリボン

14 – 同じフィルターのセット

フィルターとリボンは別々の封筒に入っている。

定規とリボンは光学軸がその平面内にあり複屈折を示す。



<p>15 受光器 (光ダイオード)</p> <p>15a – 受光部</p> <p>15b – 出力電圧を測定するための導線</p> <p>15c – 固定用ネジ</p>	
<p>接続する導線, 洗濯バサミ, 紙ナプキン, 紙。</p>	

光学素子の光が通る部分には触れないようにして下さい!
必要に応じて, 紙ナプキンで拭きなさい!

Appendix B. 実験装置の完成写真



図 1B プラスティック定規の複屈折を観測するためのセットアップ



図 2B プラスティック定規のスクリーンへの取り付け方



図 3B プラスティックリボンのスクリーンへの固定の仕方



図 4B プラスチック定規を通して光の透過度を測定するためのセットアップ

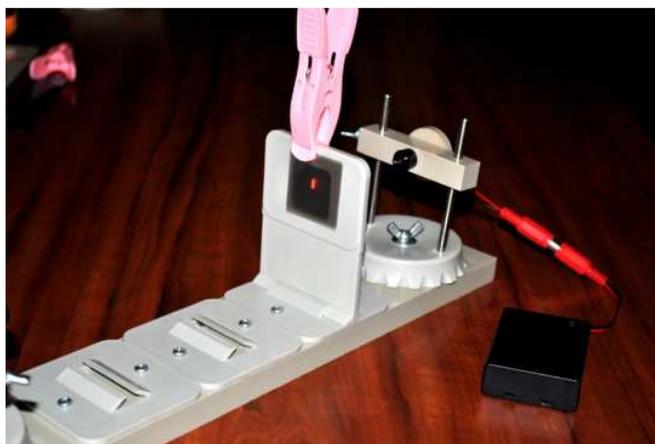


図 5B 偏光板へのフィルターの取り付け方



図 6B 液晶セルの特性を測定するためのセットアップ