

## I.3 光の波動的性質

### I.3.1 はじめに

幾何光学（波動光学、古典光学ともいう）のいくつかの法則を検証する。光の古典的側面は、全て Maxwell 方程式（と境界条件）から演繹できるが、ここでは厳密な取り扱いは避け（この態度はいけない）、古代ギリシャやルネサンス期の賢人達の議論の種にもなっていた光学の諸原理に慣れ親しんでもらう。

### I.3.2 実験の前に

本実験では、様々の光学部品を組み立てて測定を行う。各々のパーツの使い方をインストラクターから教わると同時に、パーツが全部揃っているかを初めに確認してほしい。光学製品は「高額な」製品であり、慎重な取り扱いが要求される。以下がパーツの一覧である。

表 1: 本実験に使用する光学製品。

品名	仕様	マウント形状
半導体レーザー（使い方注意！）	波長 630 nm, 出力 1 mW	あおりホルダー
凸レンズ	焦点距離 ? mm, 径 50 mm	
スクリーン 2枚	紙の衝立です	
Al コート・ミラー	径 30 mm	あおりホルダー
偏光子 (polarizer)		回転ホルダー
1/2 波長板 (half wave plate)	633 nm 用	回転ホルダー
1/4 波長板 (quarter wave plate)	633 nm 用	回転ホルダー
直角プリズム		
強度減衰 (ND) フィルター	透過率 10%, 径 25 mm	
Si フォトダイオード (PD)	受光感度 0.35 A/W	$\mu$ A メーターに結線
並進ステージ付きのマグネットベース (1台)		
回転ステージ付きのマグネットベース (1台)		
ポール立てのみが付くマグネットベース (3台)		
ポール立て (1台)		
30 cm の定規 (1本)		

ミラー、レンズ等の光学部品は、**表面を手で触れてはならない**。間違っても触れた場合には、指紋を拭き取ろうとすると目に見えないキズが広がることになる。二次災害を最小にするために、有機溶剤を用いてクリーニングを行うこと（指示を仰ぐこと）。

実験で用いるレーザーは研究開発段階の製品であり、家電製品の感覚で取り扱おうと間違いなく素子が壊れてしまう。使い方を学んでから電源を入れること。

### I.3.3 レンズの公式

凸レンズで太陽光を集光し、紙を燃やした経験があると思う。同じ凸レンズで物を覗きこむと、物が大きく見えるのも当たり前の事実である。この2つの経験事実は、どのように関連しているのだろうか？ 私達の眼にも（凹レンズではなく）凸レンズが付いている。眼に見えるとはどういうことかを、文字通り視覚的に理解してほしい。

#### 実験 1 焦点距離の決定

凸レンズの焦点距離（focal length）とは、平行光がレンズに入射したとき、光束が結ばれた点からレンズまでの距離として定義される。レーザー光を平行光とし、与えられたレンズの焦点距離を求めよ（図 1 参照）。

- レーザーポインターの回転リングを回し、ビームを平行光に設定する。（無限遠で絞られるように）
- まぶしくて焦点が判別できない場合は、減衰フィルターを挟むとよい。

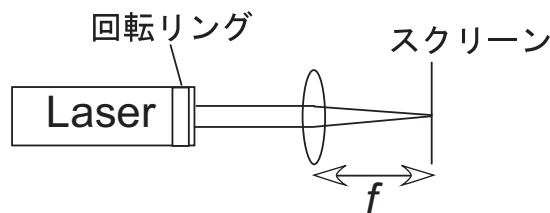


図 1: 実験 1 の配置。

#### 実験 2 レンズの式の検証

点光源からの光束は、凸レンズを通過すると、ある一点に結ばれることになる。この時、焦点距離  $f$  と距離  $a, b$  の間にレンズの式:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$

が、成り立つことを検証せよ（図 2 参照）。（ $a = \infty$  の時が平行光であり、 $b$  は焦点距離に一致する）

- 点光源には、レーザーをスクリーンに照射した際の散乱光を用いる。
- その際、レーザー光がスクリーン上で絞られるように回転リングを調整する。

少なくとも 5 組の  $a, b$  について距離を測ること。

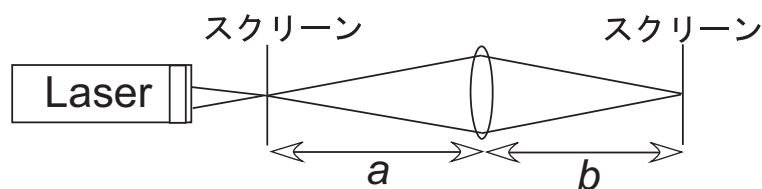


図 2: 実験 2 の配置。

### 実験 3 結像と倍率

$a, b$  を適当に設定し、点光源を左右に移動すると、その像も結像を保ったまま移動することを確認せよ (図 3 参照)。(平面像は、平面の像に射影されることを意味する)

- 点光源移動には、並進ステージに乗せたレーザーを移動すればよい。

点光源の移動量  $x$  に対する像の移動量  $y$  を測定し、結像の倍率と  $a, b$  の関係を求めよ。少なくとも 5 組の  $a, b$  にわたって行うこと。(この結果が示していることは、我々の眼には、距離に逆比例して遠くのもの小さく見えるということである。)

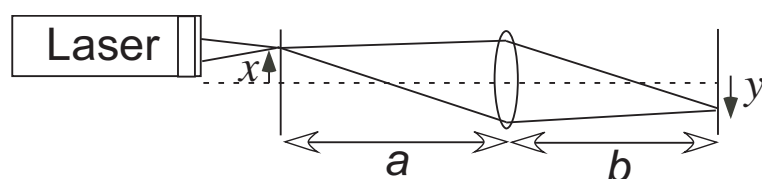


図 3: 実験 3 の配置。

#### 1.3.4 偏光

光の放出とは、ミクロに眺めてみると、原子核をめぐる電子の双極子振動に他ならない。双極子の振動が直線運動の場合、電場ベクトルも一定方向を保ち、ある特定の向きに波打つ横波電磁波が作られる。

ところで、通常物質からの発光 (白熱電灯など) は、数多くの電子が勝手に振動しているものであり、そのため電場ベクトルの方向は一定ではなく、時間的にも空間的にも乱雑なものとなる。自然界では、このように電場方向が乱れている光がむしろ普通であるが、そうではなく電場方向が定まっている光の状態を、波面が偏った光と称して**直線偏光 (linear polarization)**と呼ぶ (偏向とも書く)。(図 4 参照)

乱れた偏光の光を直線偏光にするために、**偏光子 (polarizer)** が使われる。ここで用いる偏光子は、透明基板の上に高分子が整列した、ごく細かい「すだ

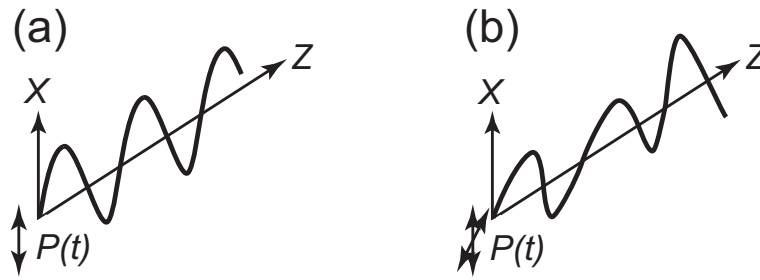


図 4: (a)  $x$  方向に振動する分極は、 $x$  に偏った直線偏光の光を放出する。(b) 通常、分極の振動方向は一定ではなく、偏光は乱れている。

れ」のような構造を持つものである。すだれの向きに沿った直線偏光の光は、狭いすきまを通り抜けて透過し、すだれに垂直な偏光成分は吸収されると考えてよい<sup>1</sup>。従って、乱雑な偏光の光を偏光子に通すと、ある方向に傾いた直線偏光の光が透過することになる。

偏光子は回転ホルダーの中に納めてあり、「すだれ」の方向を白線でマークしてある。便利のために、**回転ホルダーの目盛りが  $0^\circ$  (もしくは  $180^\circ$ ) の時、鉛直方向に偏光した光が透過するように設定してある。**

#### 実験 4 直線偏光と偏光子

多くのレーザーは、直線偏光の光を放出する。図 5 に示すように実験装置を組み、

1. 実験で用いるレーザーも、実際に偏光していることを示せ。  
(hint: 偏光方向を見出すには、偏光子を回転し、透過光が一番暗くなる角度を見出すのがわかりやすいだろう。偏光面は、その角度から  $90^\circ$  傾いているはずである。)
2. レーザー光のスポット形状は楕円形であるが、どの向きに偏光しているか。  
(注意: ビームを覗いてはいけない! 射出口付近に紙にあてて見よ)

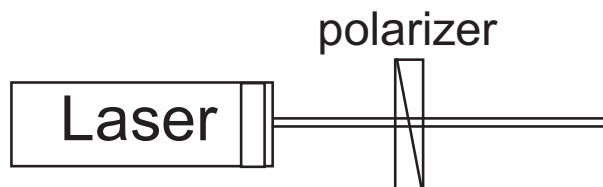


図 5: レーザー光が直線偏光していることを確かめるための実験の設定。

<sup>1</sup>本当は逆であり、すだれ構造に平行な入射偏光成分が吸収されるため、すだれ構造の向きと透過偏光面は垂直になる。

直線偏光の光に対し、偏光面の方向を変えるためには **1/2 波長板 (half-wave plate)** を用いる。これは次のような働きを持つものである。(図 6 参照)

- 波の進行方向を  $z$  にすると、全ての横波は  $x$  成分と  $y$  成分の重ね合わせで記述できる。
- 偏光面を斜め  $45^\circ$  にあるとする。これは、 $x$  方向の波と  $y$  方向の波が、同じ振幅・位相で重なっていると考えてよい。
- この状態で、 $y$  方向成分の波だけを  $1/2$  波長 (波の半周期分) 遅らせる。
- そうすると二つの波の重ね合わせは、 $x, -y$  方向、斜め  $-45^\circ$  に傾くことになる。
- 言い換えると直線偏光面を  $90^\circ$  回転させるためには、斜め  $45^\circ$  の偏光成分を  $1/2$  波長遅らせればよいということになる。

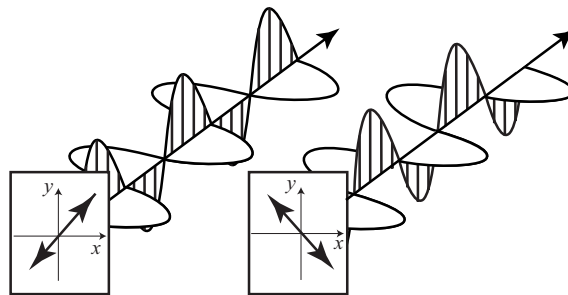


図 6: 偏光面に対して  $45^\circ$  の偏光成分を  $1/2$  波長遅らせると偏光面は  $90^\circ$  傾く。

ある偏光成分の波を遅らせるためには、異方性結晶 (原子が、ある方向には密に配列していて、その他の方向には疎な結晶) に光を通せばよい。このような物質は、偏光方向によって屈折率が異なり、従って物質内部の光の波長が偏光方向によって異なる。異方性結晶を適当な厚さで切り出し、2つの直交する偏光に対して、透過光の光路差が  $1/2$  波長になるようにしたものが、 $1/2$  波長板である。つまり結晶軸  $y$  とその垂直な軸  $x$  方向の屈折率をそれぞれ  $n_y$ 、 $n_x$  とし、結晶の厚さと光の波長を  $d$ 、 $\lambda$  とすれば、

$$(n_y - n_x)d = \lambda/2,$$

となるような条件を異方性結晶が満たすときに  $1/2$  波長板となる。

本実験で用いる  $1/2$  波長板は、便利のため、回転ホルダーの目盛り  $0^\circ$  の方向に結晶軸が向くように設定してある。言い換えると、目盛り  $0^\circ$  の方向に偏光した光は、目盛り  $90^\circ$  の方向に偏光した光より  $1/2$  波長遅れて透過することになる。

## 実験 5 1/2 波長板（直線偏光面の回転）

1/2 波長板を用いて、直線偏光の偏光面が回転することを、次の手順で確かめよ。

1. レーザー光の偏光面の角度を、偏光子を用いて測定する（実験4と同じ）。
2. 図7のように1/2波長板を配置する。1/2波長板を回転し、結晶軸（目盛り0°の方向）をレーザーの偏光面と平行にする。波長板にレーザー光を通し、透過光の偏光面の角度を測定する。どうなるか。
3. 波長板の軸方向をレーザーの偏光面に垂直に置く。偏光角はどうなるか。
4. 波長板の軸を偏光面に対して45°に置く。偏光角はどうなるか。
5. 次に、軸方向を入射光の偏光面に対して10°, 20°, 30°...と変化させてみる。透過光の偏光はどうなるか。何故そうなるのか考察せよ。（hint: 波長板の働きを理解するためには、結晶の軸に平行な偏光成分と垂直な偏光成分とに入射波を分解し考えればよい。）

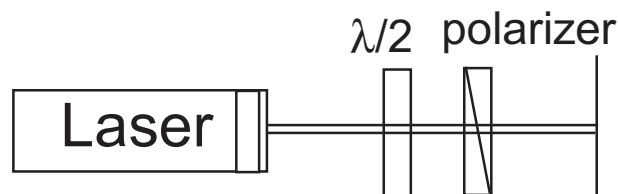


図 7: 1/2 波長板の性質を確かめるための実験の設定。

前節では、光路が1/2波長ずれる場合、直線偏光面が傾くことを確かめたが、任意の光路差がつく場合には、一般に透過光は直線偏光ではなくなる。この時、光路差が1/4波長の場合は特別であり、偏光面が光の周波数で回転する偏光状態となる。これを**円偏光（circular polarization）**という。

直線偏光の光を円偏光にするために、**1/4波長板（quarter-wave plate）**を用いる。1/2波長板の考え方と同じく、入射光の直線偏光面に対して波長板の軸を斜め45°に設定し、軸方向の偏光成分を1/4波長遅らせると円偏光となる（図8参照）。

一方、軸方向の成分を1/4波長進ませても円偏光となるが、この場合、偏光面の回転が逆向きである。両者を、右回り（あるいは左回り）の円偏光とか、+（-）円偏光と呼んで区別することも多い。

右回り円偏光と左回り円偏光は、直交している状態であり、言い換えると、全ての横波は二つの円偏光の重ね合わせで記述できることになる。例えば、同じ振幅の右回り円偏光と左回り円偏光は、重ね合わせると直線偏光となる。円偏

光を基底として光の波を考えることは、光と物質との相互作用を学ぶ際に重要となる。

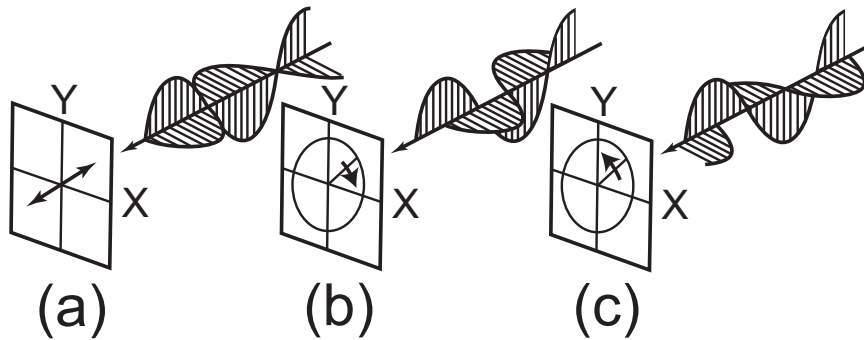


図 8: (a) 直線偏光。(b) X 偏光を  $1/4$  波長遅らせた場合。(c) X 偏光を  $1/4$  波長進ませた場合。(b) と (c) は円偏光となるが、回転方向は逆である。

## 実験 6 1/4 波長板と円偏光

次の手順で  $1/4$  波長板の働きを確かめよ。

1.  $1/4$  波長板の結晶軸（目盛り  $0^\circ$  の方向）を、レーザー光の偏光面と平行にする。波長板にレーザー光を通し、偏光子を用いて、直線偏光が保存していることを確認する。
2. 波長板の軸方向を、偏光面に対して  $45^\circ$  におく。偏光はどうなっているか。
3. 波長板の軸方向を、偏光面に対して  $10^\circ$  におく。偏光はどうなっているか。この状態を楕円偏光とよぶ。何故このような偏光状態となるのか。
4. 波長板の軸方向を、偏光面に対して  $-45^\circ$  におく。偏光はどうなっているか。  $45^\circ$  の場合との違いはなにか。
5. 次にミラーを用いて、実験装置を図 9 に示すような配置にする。  $1/4$  波長板の回転に伴い、ミラーからの反射光が消えることを確認せよ。その時の条件を見出し、何故そうなるのか考察せよ。

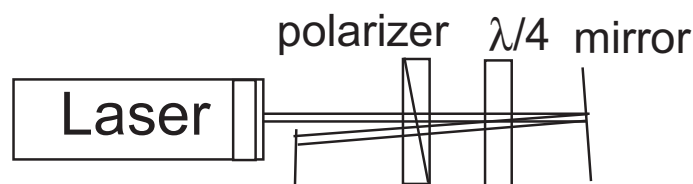


図 9:  $1/4$  波長板の働きを確かめる為の実験の設定。

### I.3.5 反射

図 10 のように屈折率  $n_1$  の媒質中から屈折率  $n_2$  の媒質に光が入射する場合を考える。ここで、入射面 (図では紙面) に平行な偏光を  $p$ -偏光 (parallel)、垂直な偏光を  $s$ -偏光 (perpendicular, 独語で senkrecht) と呼ぶ。このとき Maxwell 方程式とその境界条件からその反射、屈折公式が得られ、反射光の振幅反射率の  $s$ -偏光成分  $r_s$  と  $p$ -偏光成分  $r_p$  はそれぞれ、

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}, \quad r_p = \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1}, \quad (1)$$

となりフレネルの反射公式と呼ばれている。

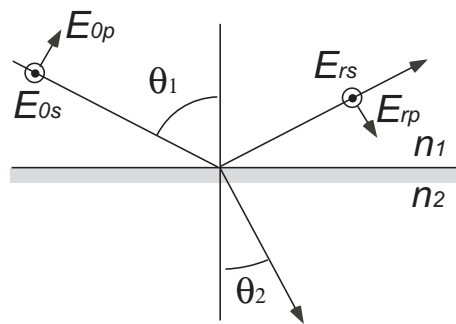


図 10: 光の反射と屈折

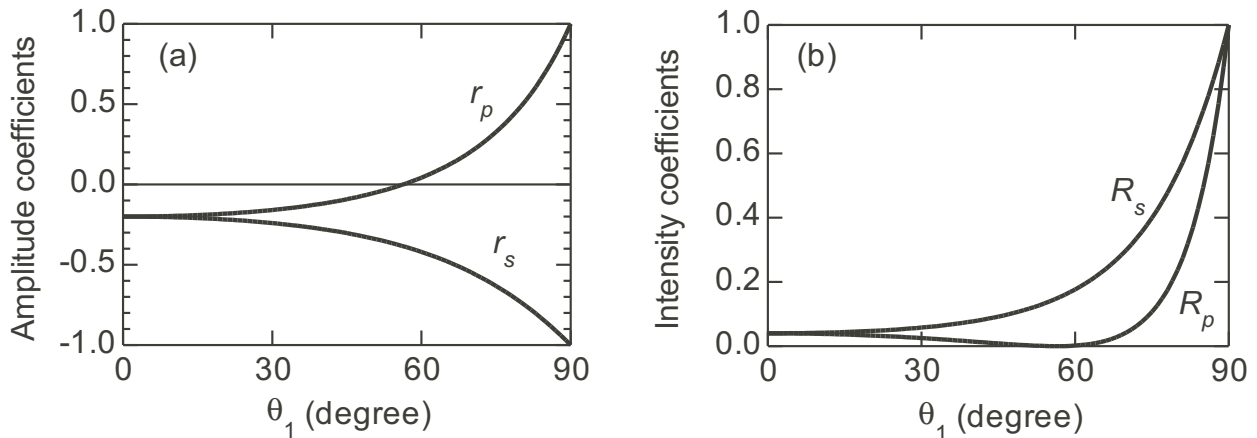


図 11: 振幅反射率 (a) と強度反射率 (b) の入射角依存性

ここで、振幅反射率は入射光電場の振幅  $E_0$  に対する反射光電場の振幅  $E_r$  の比であり、

$$r_s = E_{rs}/E_{0s}, \quad r_p = E_{rp}/E_{0p},$$

となる。ただしフォトダイオードなどで測定する物理量は光の強度である。そのため測定できる反射率は強度反射率 (入射光の強度  $I_0$  に対する反射光の強度



$I_R$ の比)となる。光の強度は電場の振幅の二乗に比例することから、強度反射率の  $s$ -偏光成分  $R_s$  と  $p$ -偏光成分  $R_p$  はそれぞれ、

$$R_s = I_{Rs}/I_{0s} = |E_{rs}/E_{0s}|^2 = |r_s|^2,$$

$$R_p = I_{Rp}/I_{0p} = |E_{rp}/E_{0p}|^2 = |r_p|^2,$$

となる。適当な屈折率の透明媒質の振幅反射率と強度反射率の入射角依存性は図11のようになり、 $s$ -偏光と  $p$ -偏光ではその振る舞いが大きく異なることが分かる。

### 実験 7 ガラスの垂直反射率測定

図12のような実験配置で、ガラス製プリズムにレーザー光を出来るだけ垂直に照射し、入射光強度  $I_0$  と反射光強度  $I_R$  を測定する。強度測定はフォトダイオード (PD) を用い、電流計が振り切れた場合にのみ 10% 透過の減衰フィルター (ND) を用いる。観測した強度反射率 ( $R = I_R/I_0$ ) を用いて、フレネルの反射公式よりガラスの屈折率  $n_2$  を決定する。空気の屈折率を1、垂直入射なので入射角と屈折角はともに0とすると、 $n_1 = 1, \theta_1 = \theta_2 = 0$  だから、

$$R = \left| \frac{1 - n_2}{1 + n_2} \right|^2.$$

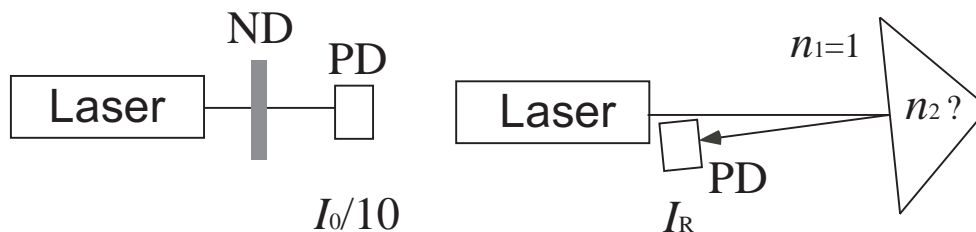


図 12: 垂直反射の実験配置。

### 実験 8 斜め入射と Brewster の法則

斜めに入射した際の反射率は、試料面に対する光の偏光状態で異なる。

1.  $p$ -偏光に対しては、反射率がゼロとなる入射角 (**Brewster 角**  $\theta_B$ ) が存在する。図13のような実験配置で、はじめに  $1/2$  波長板で  $p$ -偏光を作る。偏光子は本来ならば不要だが、より良い  $p$ -偏光を作るために、入れたままにしたほうが良い。ガラスの Brewster 角を測定し、得られた Brewster 角からガラスの屈折率を求める。なお入射角0度は、ガラスの表面反射がレーザーに戻る時の角度となる。空気とガラスの屈折率をそれぞれ1、 $n_2$  とし、

ガラス中の屈折角を  $\theta_2$  とすれば、 $r_p = 0$  の条件と Snell の公式から、

$$\cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_B = 0,$$

$$\sin \theta_B = n_2 \sin \theta_2.$$

これよりガラスの屈折率  $n_2$  は、

$$n_2 = \tan \theta_B. \quad (2)$$

2.  $s$ -偏光 および  $p$ -偏光の斜め入射時の強度反射率  $R_s, R_p$  を、入射角  $\theta_1$  の関数として測定する。つまり図 11(b) と同様なグラフを完成させる。

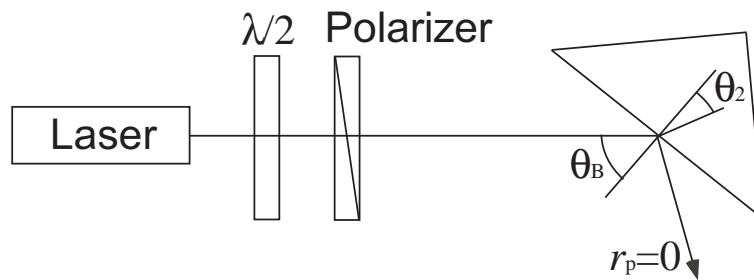


図 13: Brewster 角を確認する実験配置。

### 実験 9 全反射と臨界角

屈折率の大きな媒質 ( $n_2$ ) から、屈折率が小さな媒質 ( $n_1$ ) に光が入射するとき (例: 水から空気)、ある臨界角 ( $\theta_c$ ) より浅い入射では、光は 100% 反射する。(図 14 参照)

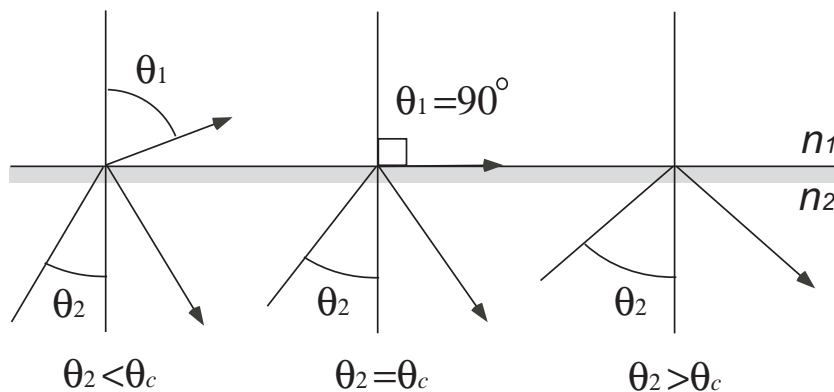


図 14: 全反射と臨界角。

直角プリズムは、100% の反射率で光を  $90^\circ$  曲げるために用いる。

1. プリズム内の反射が全反射であることを確認する (図 15(a))。

2. プリズムを回転し、臨界角の存在を確認する (図 15(b)).  
 (hint: 全反射条件が成り立たないときには、透過光と反射光の両方が確認出来る (図 15(c)). プリズムを回転し全反射条件が成り立つと、透過光が消えるはずである。)

3.  $\theta_1$  から、ガラスの屈折率を求める。  
 プリズムへの入射面での屈折に注意して、図 15(b) のように角度を取る。空気とガラスの屈折率をそれぞれ 1、 $n_2$  とすると、Snell の公式とプリズムが直角二等辺三角形であることから、

$$\sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2,$$

$$n_2 \sin \theta_c = 1,$$

$$\theta_c + \theta_2 = 45^\circ.$$

$\theta_2$  が小さいときガラスの屈折率は、

$$n_2 \sim \sqrt{2} + \sin \theta_1.$$

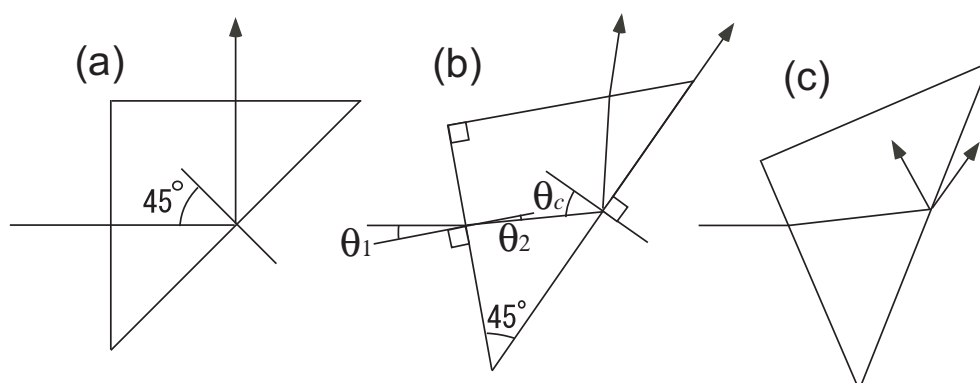


図 15: 臨界角を確認する実験配置。

## レポート

- 各実験について、その目的、手段、結果、考察などについて簡潔に記述せよ。ただし実験手順の詳細 (テキストの丸写しなど) を書く必要はない。
- レーザー光が  $0^\circ$  方向 (鉛直) の直線偏光であるときに、このレーザー光が  $45^\circ$  の偏光子と  $90^\circ$  (水平) の偏光子を順番に透過するとする。透過光の偏光状態と強度はどうなるか。

3. レーザー光が  $0^\circ$  方向 (鉛直) の直線偏光であるときに、このレーザー光が結晶軸  $45^\circ$  の  $1/4$  波長板を透過し (円偏光になる)、さらに結晶軸  $\theta^\circ$  の  **$1/4$  波長板** を透過するとする。透過光の偏光の  $\theta$  依存性はどうか。
4. 同様に、レーザー光が  $0^\circ$  方向 (鉛直) の直線偏光であるときに、このレーザー光が結晶軸  $45^\circ$  の  $1/4$  波長板を透過し (円偏光になる)、さらに結晶軸  $\theta^\circ$  の  **$1/2$  波長板** を透過するとする。透過光の偏光の  $\theta$  依存性はどうか。
5. フレネルの反射公式 (式(1))、または屈折率と Brewster 角の関係式 (2) のいずれかを導け。
6. 半導体レーザーから放出される光のスポット形状が楕円形であるのはなぜか。

## 参考書

簡単な光学の参考書として以下を挙げておく。

- 山口茂雄「屈折率」物理学 One Point14, 共立出版.
- 石黒浩三「光学」基礎物理学選書 23, 裳華房.
- 石黒浩三「光学」共立全書 56, 共立出版.