

## 第5章 光

光学は、光の扱い方で幾何光学、波動光学、量子光学などに分類される。幾何光学はユークリッド幾何学にちなんでつけられた名称で、光の直線性と反射・屈折の幾何学のみに基づいてレンズ、鏡などの働きを説明し、各種の光学機器の設計に適用できる。幾何光学で重要な屈折に関するスネルの法則は17世紀に定式化されている。光の本性についての論争では、Huygensが波動説、Newtonが粒子説を唱えた。Newtonは「光学 Opticks」を著し、ニュートンリング、プリズムによる分光などの研究を行ったが、これらの光学現象を粒子説の立場で説明した。Newtonの権威によって粒子説が主流となったが、19世紀になるとYoungやFresnelによる干渉・回折現象の解析を通して波動説が有力になっていった。特に、屈折現象を説明するために、粒子説では水中の光速は空気中より速いと仮定するのに対して波動説ではその逆になるが、Foucaultによって水中の光速が空気中より遅いことが示され、光が波動であることが決定的となった。さらに、電磁気学の立場からMaxwellが光が電磁波の一種であることを示した。20世紀に入ると光の本性について新たな展開があり、量子力学によって光は粒子(光子)であると同時に波動でもあり2面性を持っているとされた。この新しい量子光学の応用は、レーザーの発明とともに長足の進歩を遂げている。

## § 5.1 光速の測定

### 1 - A) 高速回転ミラーを用いた光速測定

a: ~ 100 mm    b: ~ 1028 mm (≈レンズの焦点距離  $f$ )

c: ~ 1028 mm    d: ~ 2056 mm (1028 mm × 2)

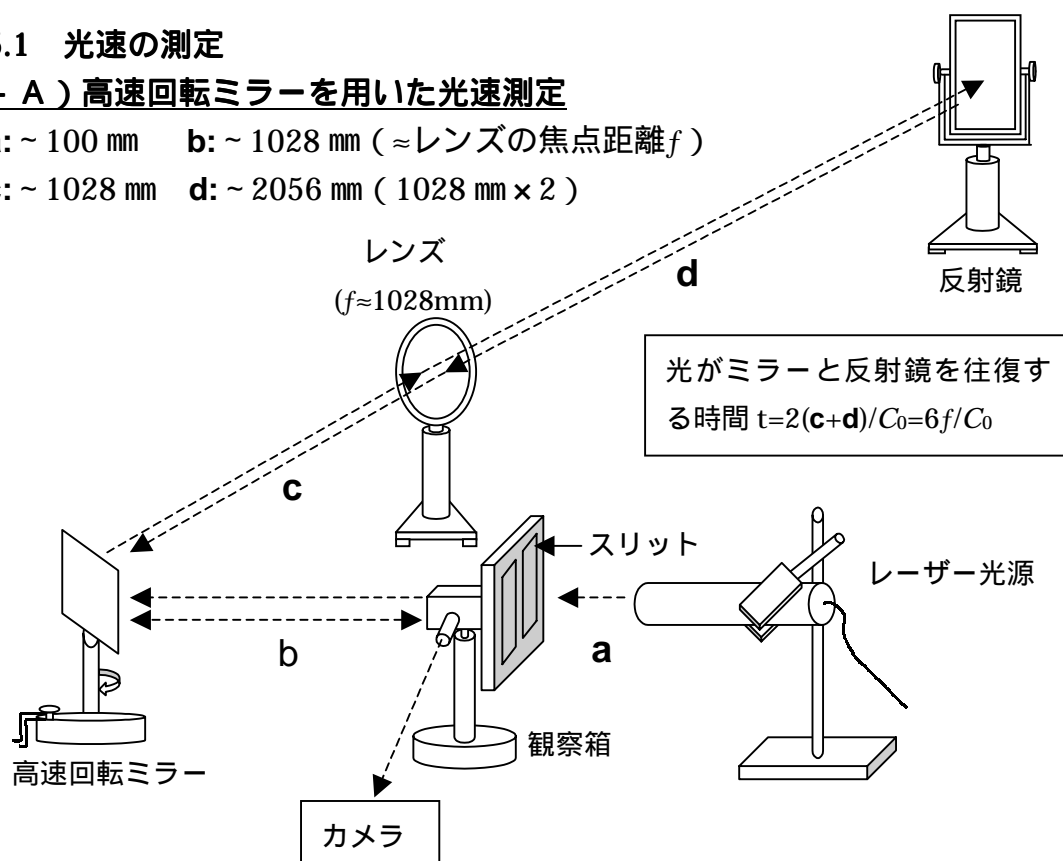


図 5-1 光速測定装置 <(株)内田洋行>

レンズから  $2f$  の位置にスリットと反射鏡を置くことにより、スリット像を観察箱の位置に作る (3-F (3) 参照)。

#### 実験方法及び原理

回転ミラーが静止しているときと高速 (約 2000Hz) で回転させたときの反射光による映像がずれる。光速  $C_0$  は非常に速いが、ミラーを高速回転させることで光が回転ミラーと反射鏡を往復する間の微小時間による像のずれを得ることができる。

ミラーの回転周波数を  $N$  [Hz] とすると、反射光が戻ってくるまでにミラーは  $\alpha = 2\pi N(6f/C_0)$  [rad] だけ回転する。像のずれる距離  $\delta$  は、ミラーと観察箱の距離  $b=f$  を用いて  $\delta = 2\alpha f = 24\pi Nf^2/C_0$  と計算される。ミラーの回転方向を変えて測定すると、

$$C_0 = \frac{24\pi f^2 (N_1 + N_2)}{\delta}$$

$N_1$  : 正方向の回転周波数  
 $N_2$  : 逆方向の回転数周波数  
 $\delta$  : 正方向回転での像と逆方向回転での像のずれ幅

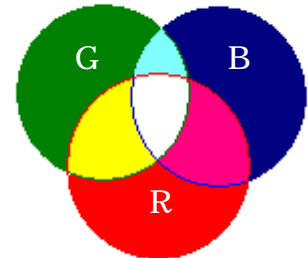
## § 5.2 光源と色

### 2 - C ) 3 原色

#### ( 1 ) 光の混合

光の三原色は赤(R)・緑(G)・青(B)で、この三色を混ぜ合わせると、ほとんどすべての色を作り出すことができる。

光の混合は光の足し算つまり混合した色(スペクトル)の和の光が見える。これを**加法混色**という。



< 加法混色 >

たくさんの単色光を混ぜ合わせていくと、光の量と波長の種類が増え、光は次第に明るくなり、ついには白色光になる。

赤 + 青 = マゼンタ(赤紫)      赤 + 緑 = イエロー  
青 + 緑 = シアン(青紫)      赤 + 青 + 緑 = 白

応用例：カラーテレビ

#### < 実験装置 >



図 5-4 実験装置概観(Minolta Mini35)



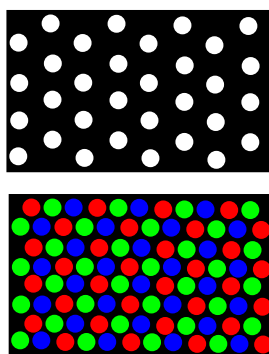
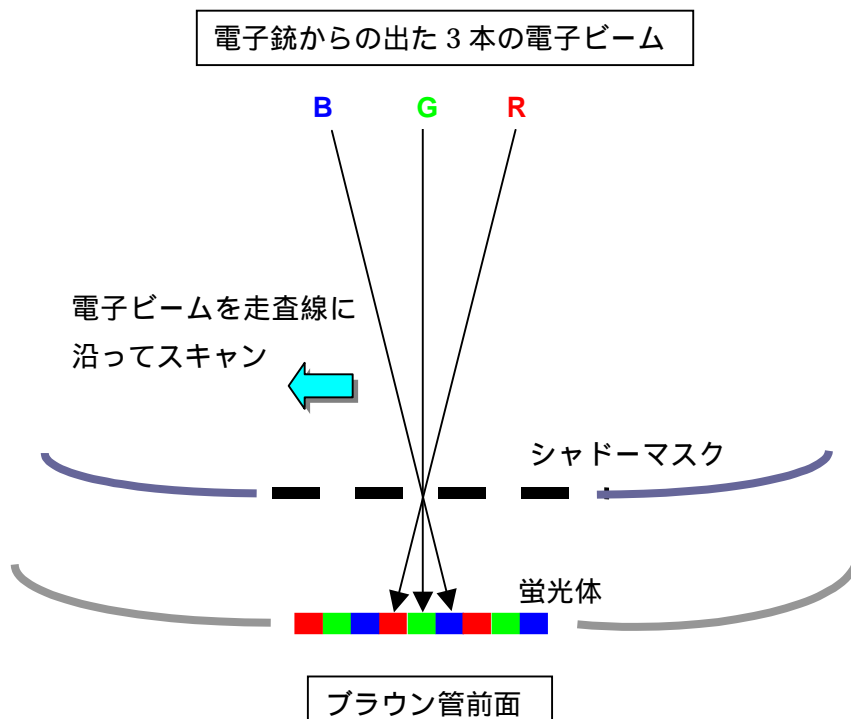
図 5-5 光源フィルター部分詳細

3つの光源(プロジェクターランプ)を光の3原色である各フィルター(色ガラスフィルター又は干渉フィルター V-R3(赤) V-B2(青) V-G1(緑))に通し、光の強さを調節してスクリーンに投映する。

例)植物の葉が緑色に見えるのは、植物が赤い(マゼンタ)光を吸収するためである。

#### ( 3 ) カラーTVの原理

カラーテレビでの色再現システムは、カメラによる撮影・信号の伝送・受像機での再現の過程に分けられる。



d

図 5-6 カラーTVの原理

ここでは、一般的なブラウン管式カラーテレビのカラー画像の再現のしくみを簡単に説明する。テレビの画面を拡大すると、赤(R)・緑(G)・青色(B)の3色がびっしり並んでいて、この三色の明るさをうまく調整して混ぜることによって、さまざまな色に見える。画面を拡大して見える赤・緑・青色の部分には、それぞれ赤・緑・青色に光る蛍光物質が塗ってある。

ブラウン管の一番奥にある電子銃( 細い電子ビームを射出する装置 )から色信号 R、G、B の強度に応じて射出された電子ビームは、シャドーマスクを通して蛍光面 (画面) 上の R、G、B の点状の蛍光物質を発光させる。人が見る色はこれらの光を混合したものである。

## § 5.3 幾何光学

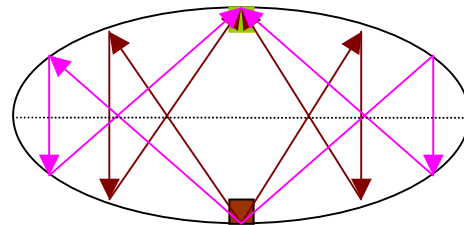
### 3-A) 光の反射

#### (2) 凹面鏡：ミラージュ

2枚の凹面鏡を合わせ、その反射により底に置いた物体があたかも凹面鏡の穴の上にあるかのように見える。



全体の外観



2枚の凹面鏡（放物面鏡）の中心に相手の焦点来るように配置する

図 5-14 ミラージュ



図 5-15 ミラージュ内部(底とふた)

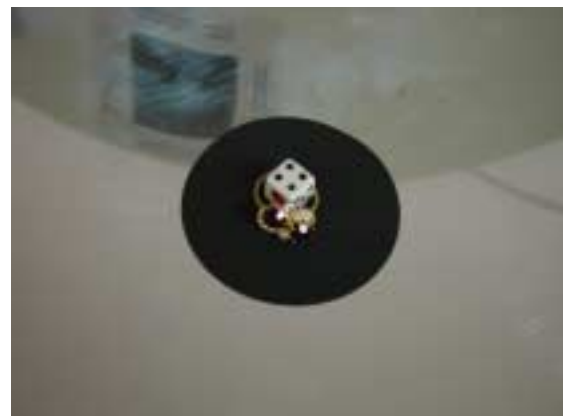


図 5-16 底に置いた物体

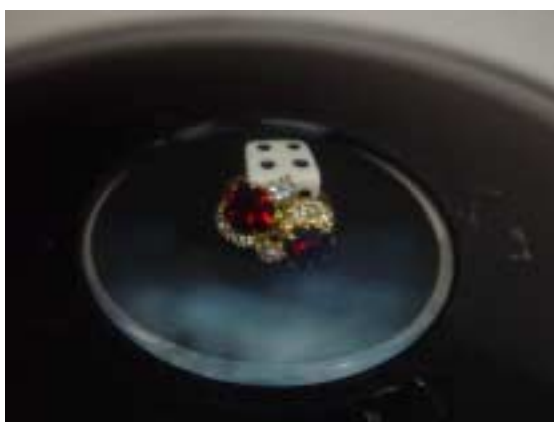


図 5-17 凹面鏡のふたの穴の部分に浮いているように見える



図 5-18 つかめない(実物はない)

### 3 - B ) 空気と水の界面における光の屈折と反射

屈折率の大きい媒質 1(水)から屈折率の小さい媒質 2 (空気)に光が進む時、入射光の一部は境界面で屈折し、一部は反射する。

入射角が小さい時は境界面で屈折する割合が大きいが、入射角を次第に大きくしていくと、反射する光が次第に増加していく。やがて臨界角に達すると、入射光は媒質 2(空気)には全く光が出てこなくなる。光は境界面をかすめるだけになる。さらに、入射角を臨界角以上にすると入射光は全反射(全て反射)する。

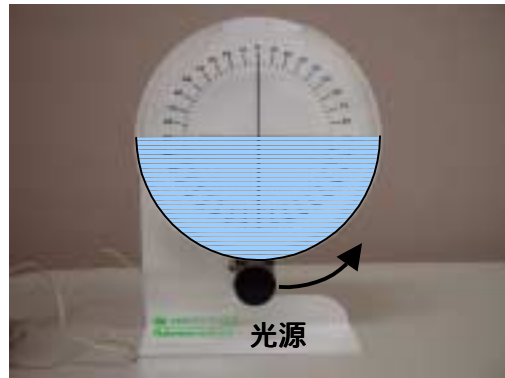


図 5-21 光学用水槽  
< 中村理科工業(株) >

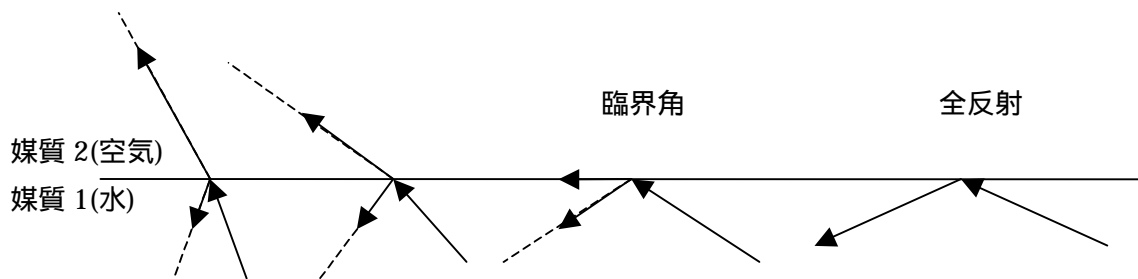


図 5-22 空気と水の界面における光の屈折と反射



図 5-23 空気と水の界面における光の屈折と反射の実写真

### 3 - C ) 光の屈折：屈折率の測定

#### ( 1 ) 焦点位置の移動を利用した屈折率の簡単な測定法

## 実験方法（水の屈折率の測定）

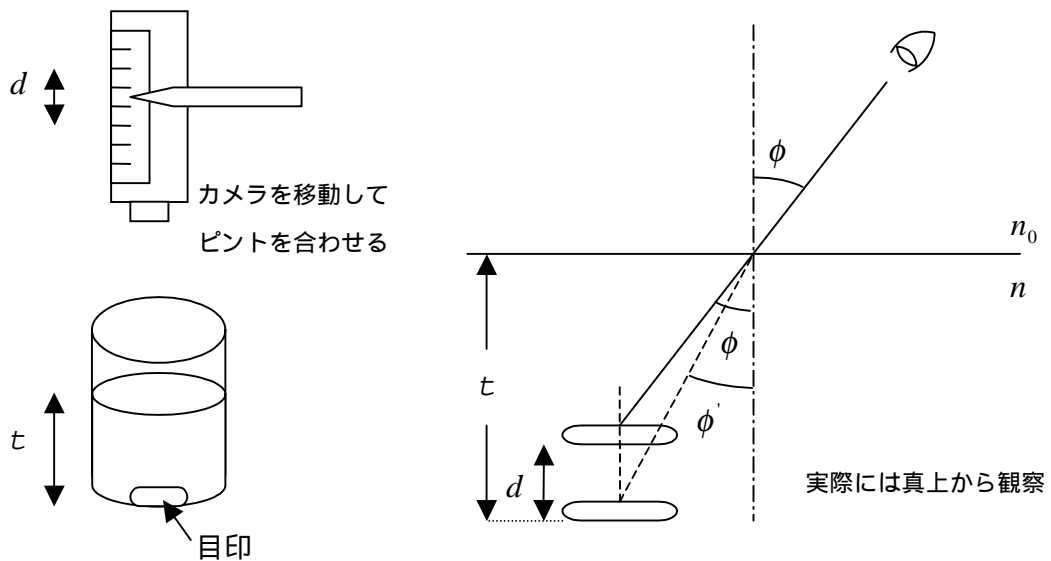


図 5-24 カメラの焦点移動による水の屈折率の測定

(水を入れる前に)ビーカーの底の目印にカメラの焦点を合わせておく。  
次にビーカーに水を注ぎ、カメラを移動して焦点を合わせる。このときの焦点のずれ(カメラの移動距離)  $d$  と水の深さ  $t$  を測る。

実験値

$$t = 10.7 \quad d = 2.8 \quad \text{より} \quad \text{水の屈折率は} \quad n = \frac{10.7}{10.7 - 2.8} = 1.354 \quad 1.35$$

### 3 D) 光の屈折：プリズム

#### ((2) プリズムによる光の分散

虹：雨が降った後の空気中には、たくさんの小さな球状の水滴が漂っており、この水滴がプリズムと同じような役割をして光を分散させ、その結果虹ができる。

#### プリズムによる光の分散

光は空気中からプリズムに入るときとプリズムから出るときの2回屈折するが、このとき波長によって屈折角が異なるために各々の色の光に分かれて出てくる。

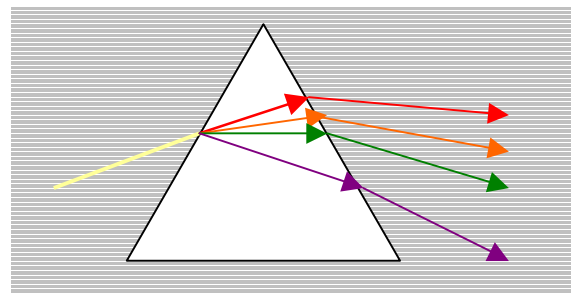


図 5-28 プリズムによる光の分散

### 3 F) 光の屈折：レンズ

#### (2) レンズの色収差と補正

凸レンズに白色光を照射し、スクリーンの位置を前後させると、スクリーンがレン

ズに近い位置では像の周囲（縁）が赤く見え、遠い位置では青（紫）に見える。これをスペクトルの波長による色収差という。

スペクトルの色によって屈折率が違うので、焦点距離が変化する。

プロジェクターを用いたレンズの色収差実験

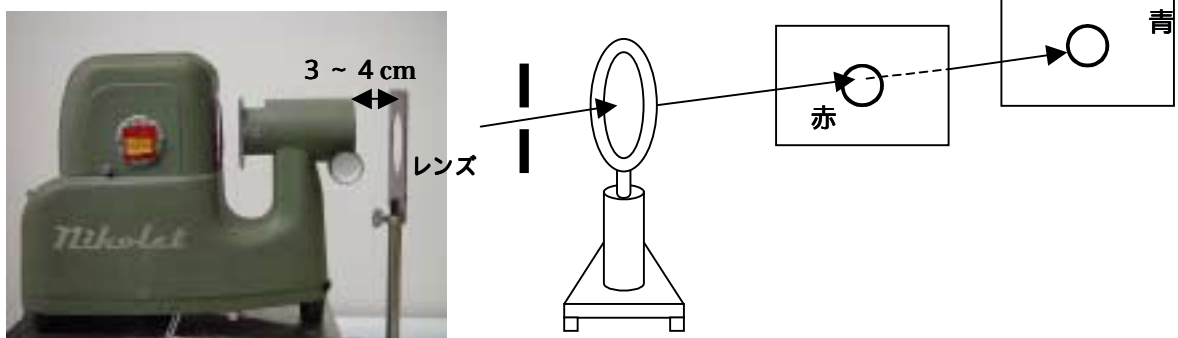


図 5-37 光源とレンズの配置

色消レンズ

色消レンズで色収差を補正すると像の周りに着色しなくなる。

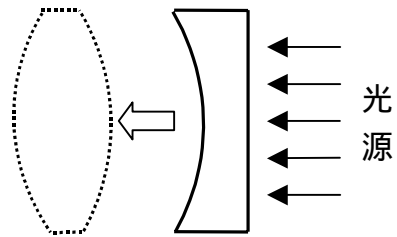
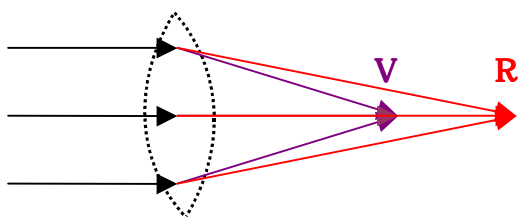
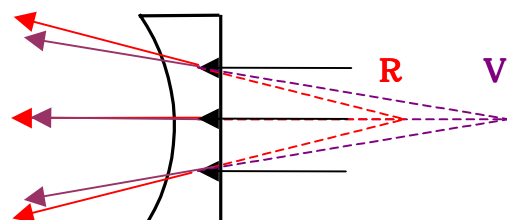


図 5-38 2枚の屈折率の異なる材質のレンズの組み合わせによる色消レンズ



( a ) 凸レンズのみでの焦点



( b ) 補正用レンズのみでの焦点

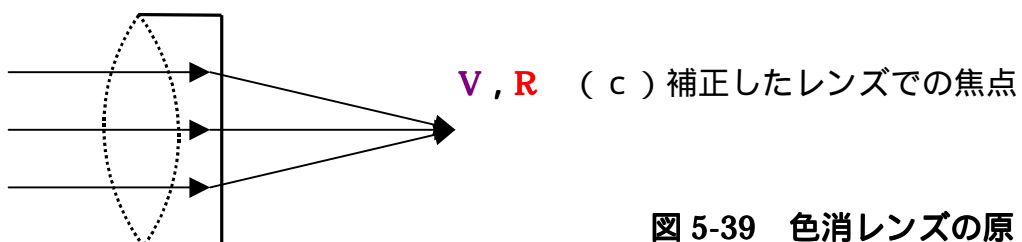


図 5-39 色消レンズの原



### (3) レンズによる結像

凸レンズに物体(光源にセットした矢印型ホール)から光を入射したとき物体とレンズ間の距離による像のでき方について確認する。

$f_1 \cdot f_2$  : レンズの焦点距離

$p$  : 光源とレンズ間の距離

$q$  : 像とレンズ間の距離

物体(光源)と像の位置関係

$$\frac{f_1}{p} + \frac{f_2}{q} = 1$$

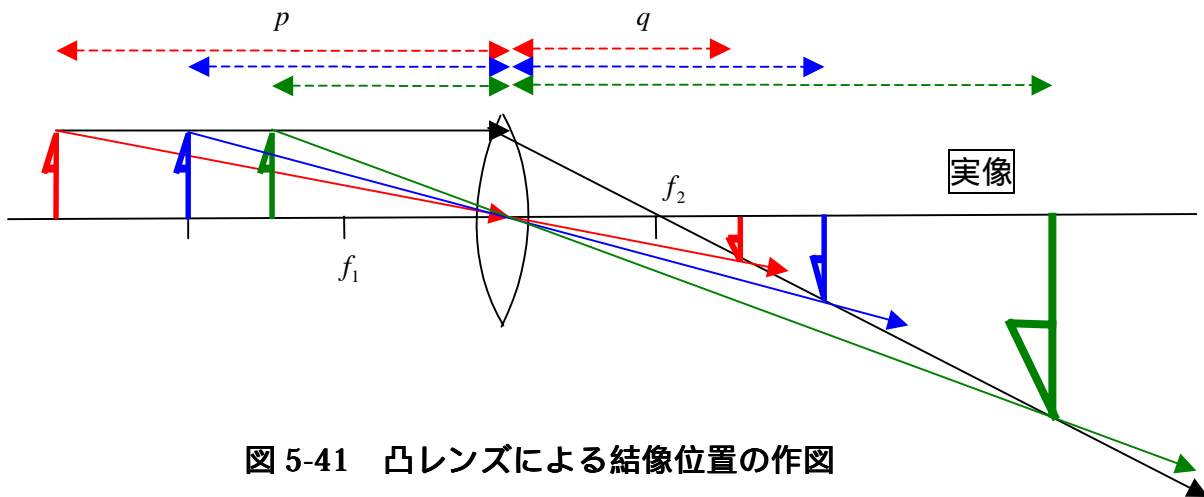


図 5-41 凸レンズによる結像位置の作図

(a)  $p > 2f_1$  のとき

$f_2 < q < 2f_2$  の位置に元の物体より小さい倒立の実像ができる。

(b)  $p = 2f_1$  のとき

$q = 2f_2$  の位置に元の物体と同じ大きさの倒立の実像ができる。

(c)  $f_1 < p < 2f_1$  のとき

$q > f_2$  の位置に元の物体より大きい倒立の実像ができる。

(d)  $p = f_1$  のとき

像は結ばない。

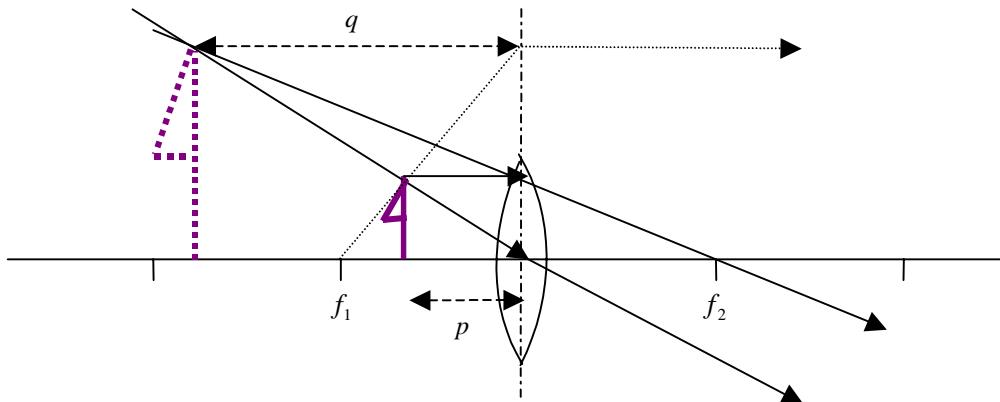


図 5-42 凸レンズによる虚像位置の作図

(e)  $0 < p < f_1$  のとき

$q > p$  の位置に虚像

(4) レンズの後側焦平面

レンズに同じ角度で入射した光線は、レンズの後側焦平面で一点に収束する。このことを利用して、フラウンホーファー回折を簡単に観察することができる (§ 5.4)。

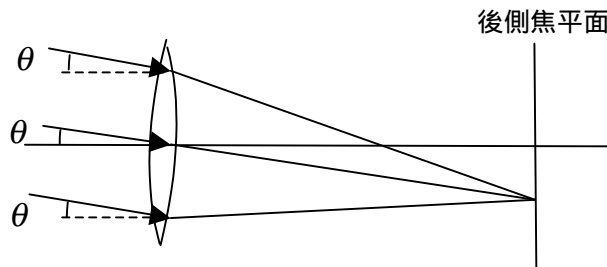


図 5-43 平行光線の後側焦平面への収束

(5) レンズのいろいろ

(b) 顕微鏡：2 個の凸レンズ

対物レンズ  $L_1$  倍率  $m_1$

接眼レンズ  $L_2$  倍率  $m_2$

焦点距離  $f_1 < f_2$

全体の倍率  $m = m_1 m_2$

対物レンズと接眼レンズの光学的な配置は、対物レンズによる像の位置を接眼レンズの焦点のやや内側になるようにしている。

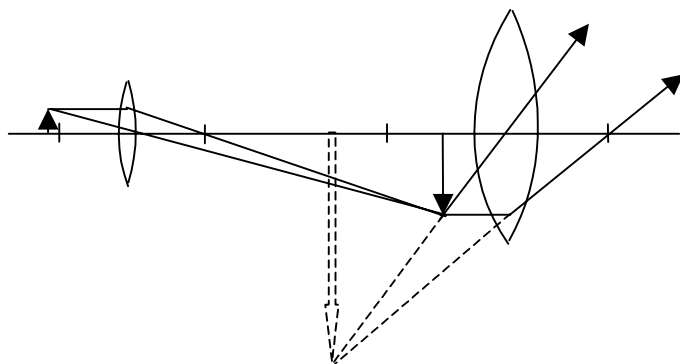


図 5-45 顕微鏡のレンズ系

(c) 望遠鏡：2個の凸レンズ

観察する物体は遠距離にあるので、対物レンズに入る光はほとんど平行光線と考えられ、物体の像は対物レンズの焦平面 ( $f_1$  の位置) 上に生ずる。物体の視角を  $\theta$ 、対物レンズの焦点距離を  $f_1$  とすれば、

$$(\text{像の大きさ}) = f_1 \cdot \tan \theta \cong f_1 \theta$$

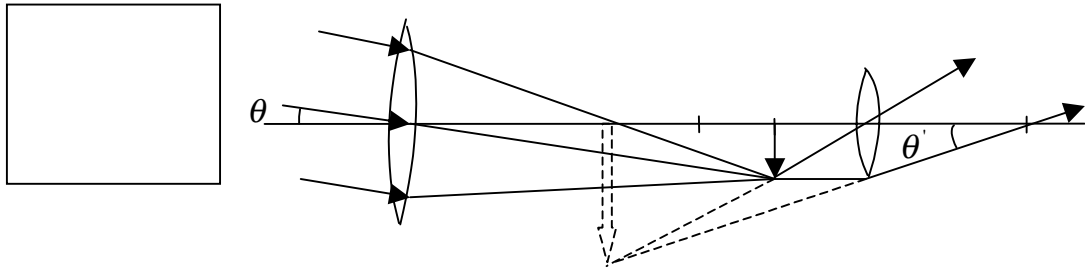


図 5-46 望遠鏡のレンズ系

対物レンズによる像を接眼レンズで拡大して見る。虚像の視角を  $\theta'$ 、接眼レンズの焦点距離を  $f_2$  とすると、

$$\theta' \cong \frac{(\text{像の大きさ})}{f_2} = \frac{f_1}{f_2} \theta$$

よって望遠鏡の視角倍率  $M$  は

$$M = \frac{\theta'}{\theta} \cong \frac{f_1}{f_2}$$

例)  $f_1=85 \text{ cm}$ 、 $f_2=2.5 \text{ cm}$  の  
凸レンズで望遠鏡を作ると、  
その視角倍率  $M$  は

$$M = \frac{85}{2.5} = 34 \text{ 倍}$$

## § 5.4 波動光学

### 4 B) 散乱による偏光

#### レイリー散乱の実験：夕日のモデル

チオ硫酸ナトリウム溶液に希硫酸を加えると、化学反応によって徐々に硫黄の微粒子が沈殿(白色)し始める。この混合液中にスライドプロジェクターから光を照射する。

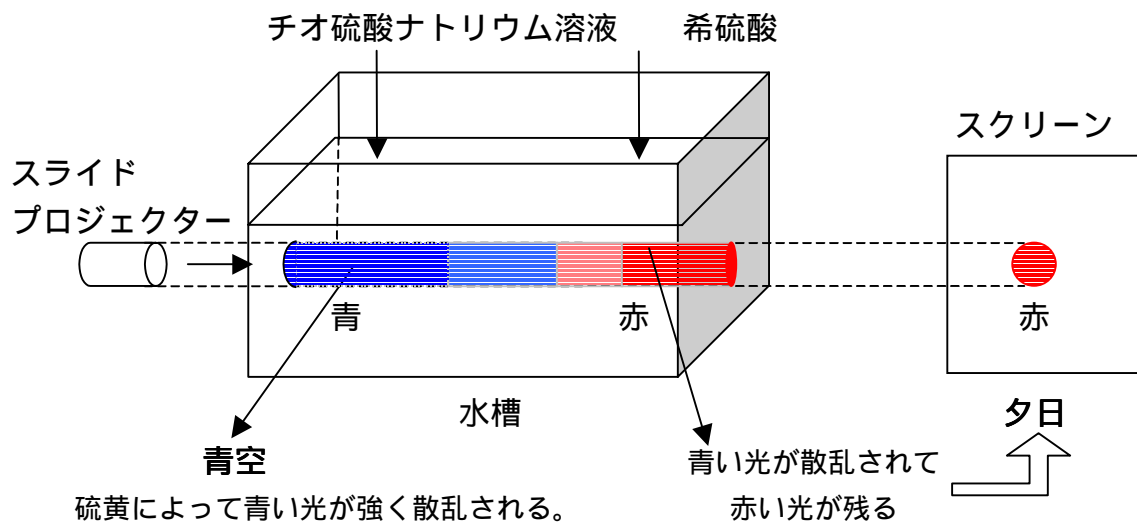


図 5-57 レイリー散乱の波長依存性

夕方は、太陽光線が大気圏（空気中）を通過する距離が日中よりかなり長く（約 35 倍）なるので、青い光のほとんどが散乱されてしまい、残った赤色が夕日の色として見える。

#### 偏光板による散乱光の観察

いろいろな角度から来る散乱光を、偏光板を通して観察する。散乱光は、散乱角が大きいほど偏光しており、 $90^\circ$  方向では直線偏光となっている。

#### 4 - C) 光の干渉、回折

光が波動であることを示す典型的な現象は、光の干渉と回折である。干渉と回折は、本質的に同じ現象であるが、ここでは少数の光束の間の重ね合わせの場合を干渉、多数の光線の干渉を積分して扱う場合を回折として区別する。

##### (a) V 字スリットを用いたヤングの実験

干渉縞を観測し、光の波動性を検証するためにヤングが行った 2 光束の干渉実験を簡単にしたものを示す。

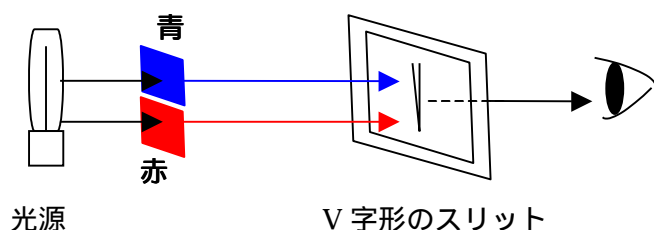


図 5 - 59 V 字スリットによる干渉実験

電灯の光(白色光)を青と赤のフィルターに通して、青い光と赤い光を作る。実際の実験では青と赤のセロハン紙を貼り付けた電灯を使用し、上側に青い光・下側に赤い光が入射するようにする。

このとき、目をスリットに近づけて遠くを見るようにする。こうすることによって、目のレンズを利用して網膜上に干渉縞を作る(レンズの後側焦平面とフラウンホーファー回折の項参照)。

### 原理

光源から出た波長  $\lambda$  の光は、2つの近接したスリット  $S_1, S_2$  に同位相で達したのち、さらに回折して広がるので、 $S_1$  と  $S_2$  から出た光の波は、スクリーン上の各点で重なり合って干渉する。もし2つの光の波の山と山(谷と谷)が重なれば、明るくなるが、山と谷が重なれば暗くなる。重ね合わせるのは振幅であるのに対して、観測される明るさは、光の強度(振幅の2乗に比例)であることに注意する。

光源に波長  $\lambda$  の単色光を用いると、スクリーン上には、明暗の縞ができる。これを干渉縞という。単色光の代わりに白色光を用いると、干渉する位置が波長によって異なるので、着色した干渉縞を生じる。

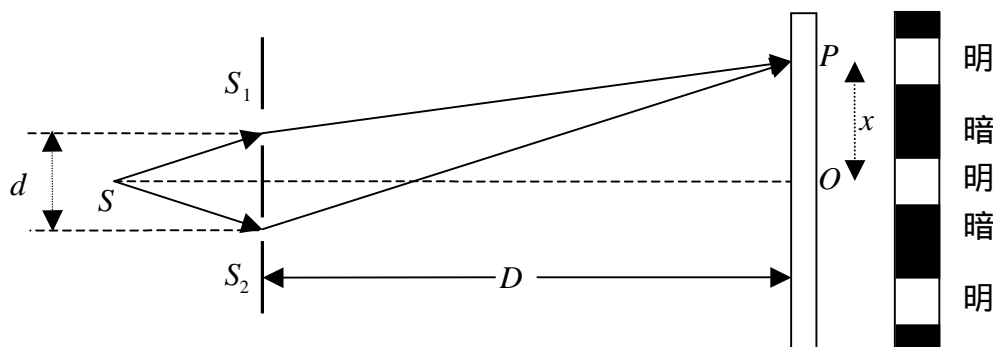


図 5-60 干渉縞の間隔の計算原理

(1) 点 P が明線になる条件：光路差が半波長の偶数倍(波長の整数倍)のとき

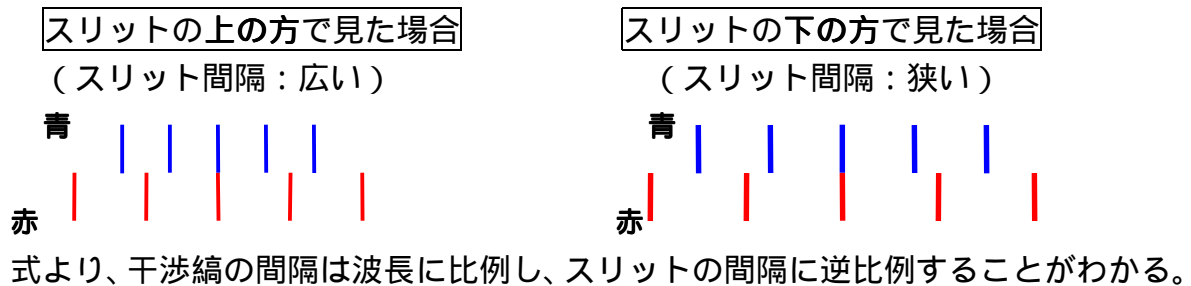
$$\text{式より} \quad \frac{dx}{D} = m\lambda \quad \dots \quad \left( x = \frac{m\lambda D}{d} \right)$$

$$\text{明線の間隔 } \Delta x \text{ は、} \Delta x = \frac{(m+1)\lambda D}{d} - \frac{m\lambda D}{d} = \frac{\lambda D}{d} \quad \dots$$

(2) 点 P が暗線になる条件：光路差が半波長の奇数倍のとき

$$\text{式より} \quad \frac{dx}{D} = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad \dots$$

## 実際の見え方



## (6) 光回折

### (b) 1つの小穴による回折 エアリー像

He-Ne レーザー ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ ) からの光線をエキスパンダーで 1cm 程度の平行光線に広げ、直径が 1mm 以下の円形の穴を開けた試料に入射する。試料からの回折光を焦点距離 1m のレンズに入射し、その後側焦平面にスクリーンまたはレンズを付けないカメラを置いて回折像を観察する。1つの円形の小穴によるフラウンホーファー回折像は、エアリー像と呼ばれる同心円状のパターンとなる。エアリー像の強度がゼロの位置は、等間隔ではなくベッセル関数によって記述される。

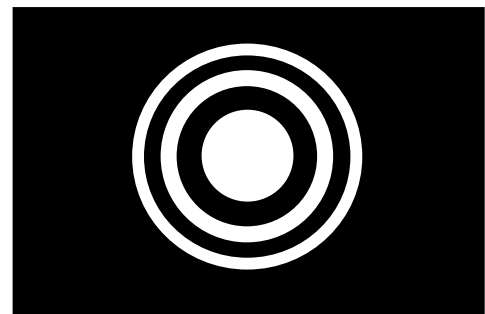


図 5-69 エアリー像

(設問) このとき、試料の位置を上下左右に動かすと回折像はどうなるか。

### (c) スリットによる回折

(b) と同様に細いスリットの回折像を観察する。スリットの幅を変えてみると、幅が狭いほど、回折像の反射ピークの間隔が広がる。

V字スリットによるヤングの実験とは違い、スリットに垂直方向に細く伸びた回折像になっていることに注意する。これは、光源の可干渉性(光の位相がどのくらいよく揃っているかに対応する)の違いによっている。レーザー光は普通の電灯の光に比べて位相が非常によく揃っており、スリットと平行方向にも干渉が起こるために、このような違いが生じる。

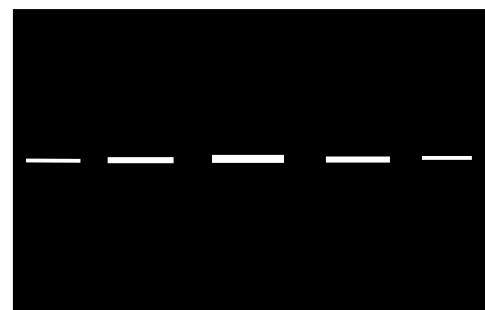


図 5-70 スリットの回折像

## § 5.5 量子光学

### 5 - A ) 原子スペクトル

1900年のPlanckによる量子仮説の発表以来、ミクロな世界の物理学は量子力学として発展し、エレクトロニクスをはじめとする現代科学技術を基礎付けてきた。ミクロな原子内の電子状態の情報は、そこから放出される光(原子スペクトル)を調べることによって得られる。ここでは放電管からの光を回折格子を用いて分光することにより、原子のエネルギーレベルと放出される光の関係について理解する。

#### 実験

水銀ランプ、Naランプ、ネオン管などを用意し、スリットを通したこれらの光源からの光を反射回折格子に入射する。回折光は、カメラで検出する。

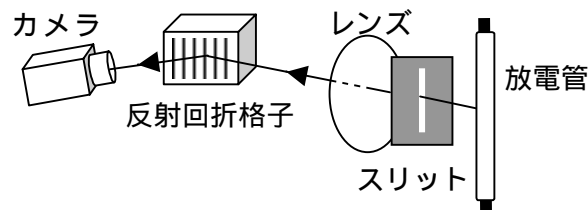


図 5-74 回折格子を用いた原子スペクトルの観察

原子に特有の輝線スペクトルが観察でき、原子のエネルギーレベルが飛び飛びであることがわかる。

### 5 - B ) レーザー光

現代光学は、レーザー光源抜きには考えられない。Townesらの理論に基づき、1960年Maimanが実際にルビーレーザー(694.3nmのパルス光)を発光させて以来、レーザー(LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)は急速発展し、様々な分野で応用されている。

#### (2) レーザー光の広がり(電灯との比較)

光エネルギーが光源からの距離によってどのように変わるか測定することによって、レーザー光の特徴を探る。

### 実験装置

光検出ダイオード、デジタルボルトメータ（またはエネルギーメータ）  
200 ワット電球、 5mW ヘリウム-ネオンレーザー、ものさしなど

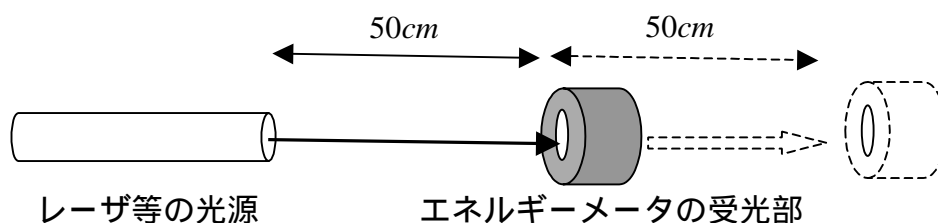


図 5 - 76 光エネルギーの測定実験

### 実験手順

- 光源として電球をセットし、光源から 50 cm、100cm の所に検出ダイオードをおいて電流の目盛りを読む。測定した電力が  $1/4\pi r^2$  に比例することを確認する。
- 同じことをレーザーの出口からの距離を変えて行う。
- 2m の位置でどちらのエネルギーが大きいのか？また波長 10nm あたりのエネルギー(波長に対するエネルギー密度)で考えよ。He-Ne レーザーは波長 632.8nm の単色光であるのに対して、電球の光の波長は 200 ~ 1000nm に広がっている。



図 5 - 77 エネルギーメータ  
(受光部の直径 8 mm)