

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)

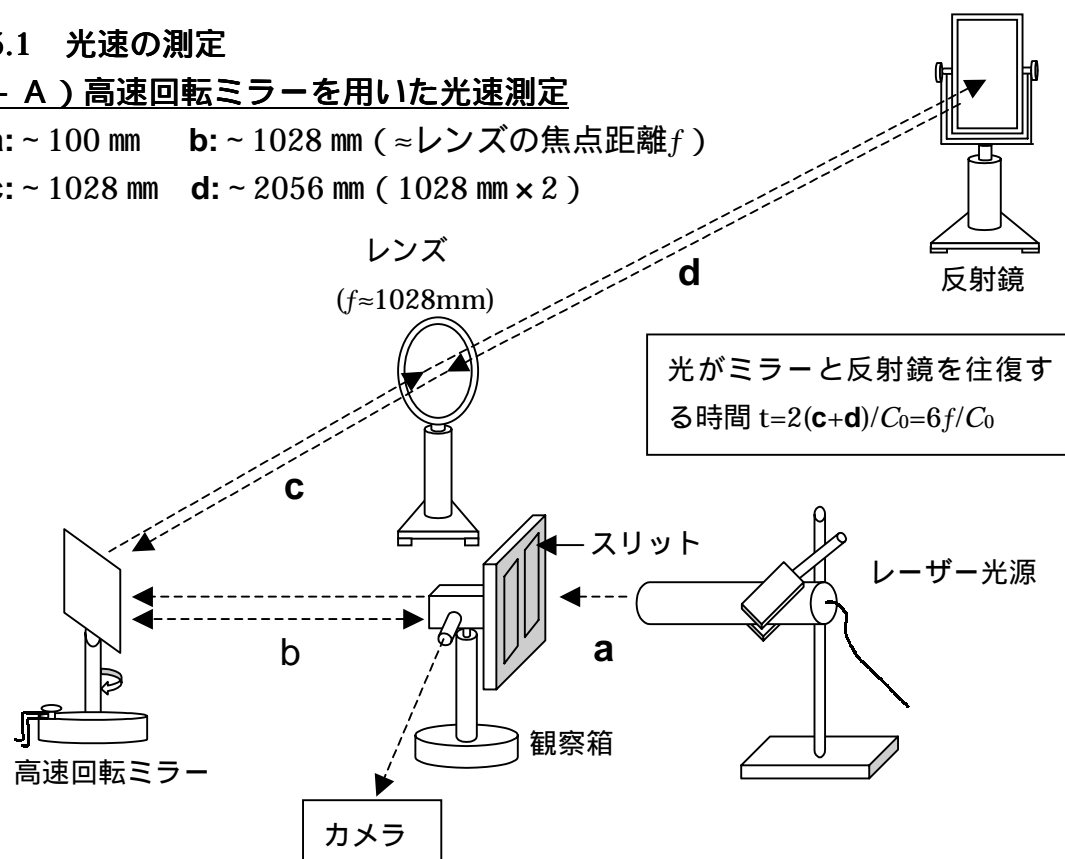


図 5-1 光速測定装置 <(株) 内田洋行>

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 δ 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、

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

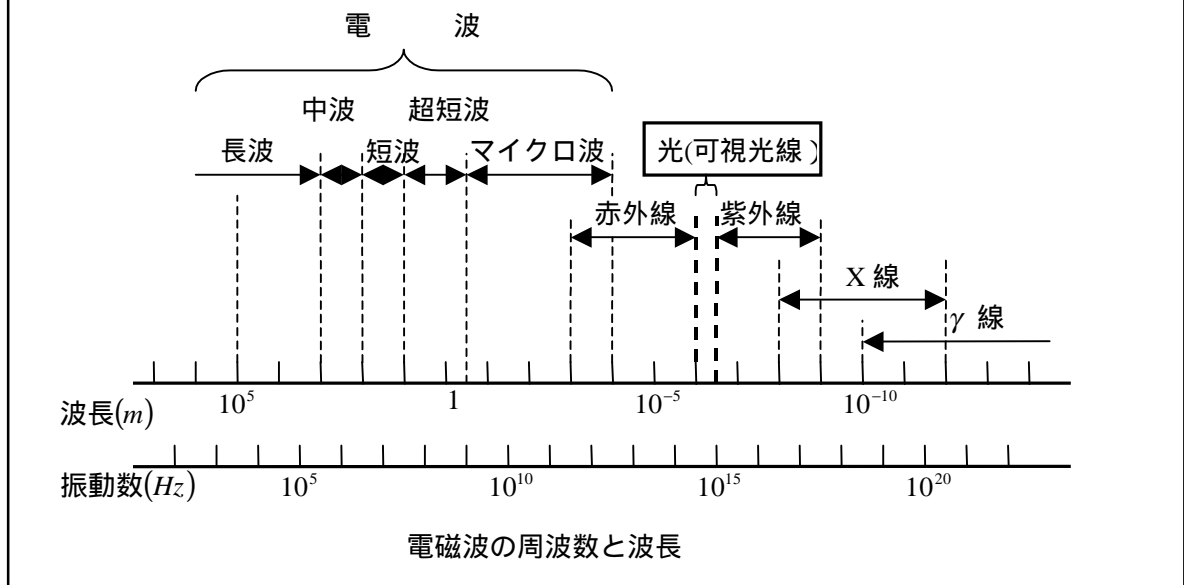
N_1 : 正方向の回転周波数
 N_2 : 逆方向の回転数周波数
 δ : 正方向回転での像と逆方向回転での像のずれ幅

§ 5.2 光源と色

2 - A) 電磁波の分類 光は目に見える電磁波である。

<参考>

電磁波はラジオ波から X 線まで広い範囲に及ぶが、その中で、目に見える波長が 380 (紫) ~ 780 (赤) nm の範囲のものを光(可視光線)と呼ぶ。



太陽光の波長と色

人は、光の波長によってそれぞれちがった色に感じる。特定の波長の光を単色光と言い、太陽光や電灯の光のように、様々な色光を含んだ光は(色合いを示さないで)、白色光という。

波長 (nm)	780	640	590	550	490	430	380
光の色	赤	橙	黄	緑	青	紫	

2 - B) 光源の種類

光源の種類は大きく分けて次の3つになる。

(1) 温度放射 (熱放射): 温度が十分高くなった物体からの発光。

温度が低いときは赤っぽく見え、温度が上がると白っぽく見えてくる。

例) 太陽、電球のフィラメント、高温の炉等

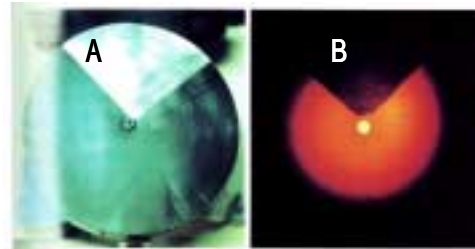
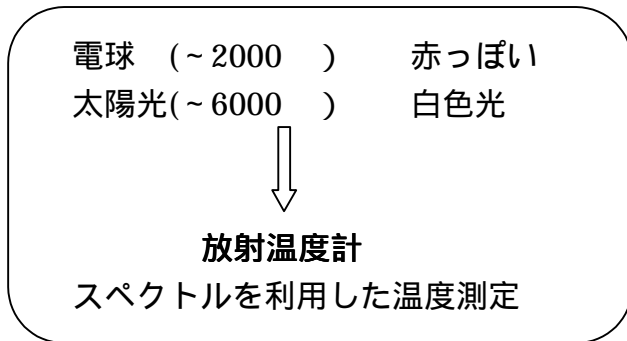


図 5-2 熱放射による色の変化

(A)低温 (B)高温

(2) 高電圧による放射: 気体中の放電にともなう発光。

例) 真空放電、火花放電

(a) 水素



(b) ヘリウム



(c) ネオン



(d) 窒素



図 5-3 放電管 (真空放電)

< 掲載写真: 実験物理学辞典 (講談社) より >

実際の実験では島津製の放電管を使用 (高圧電源3008位の電極用意)

ガラス管の両端に金属線電極を封じ込み、真空ポンプで管内の気圧を減らした後、電極間に十分高い電圧をかけると、希薄な気体原子がイオン化して放電が起き、美しい光を出す。このような放電管は、1859年プリュッカーが硝子工ガイスラーに依頼して作ったのが最初であることから、ガイスラー管ともプリュッカー管ともいう。ガイスラー管から放電中に放出される光の色は、気圧や管の太さによっても変わるが、封入する気体の種類によつての変化が最も著しい。例えば、窒素は赤紫、ヘリウムは黄、水素は赤もしくは赤みがかった白、ネオンは華やかな橙赤、水銀は白みがかった青である。

(3) 光の刺激による放射：高熱を伴わない放射。

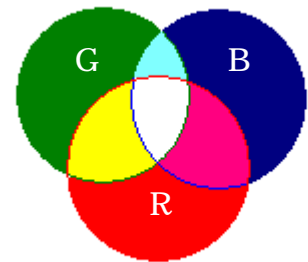
例) 蛍光、燐光等

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)



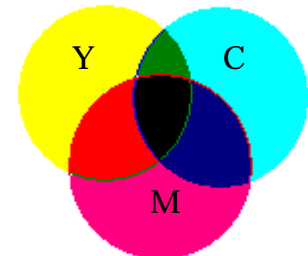
図 5-5 光源フィルター部分詳細

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射する。

（2）色の混合

色の3原色はシアン(C)・マゼンタ(M)・イエロー(Y)で、光の3原色と同様にこの3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。

色の混合は光の引き算である。これを**減法混色**という。



< 減法混色 >

絵の具は光の吸収体なので、絵の具を混ぜ合わせると、吸収される光が増え、絵の具で反射して目に届く光の量と波長の種類が減るために黒ずんでいく。

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

応用例：カラー印刷、カラー写真

<< 参考 >> 補色

特定の二つの単色光を混ぜ合わせると白色の光になる。このような色の組み合わせを補色という。

・赤とシアン ・緑とマゼンタ ・青とイエロー

人が見ることができるのは、吸収光の補色である。

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。

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。

しかし一瞬一瞬では、電子ビームは蛍光面の特定部分にしか当たってないので、電磁石で電子ビームの向きをコントロールして電子ビームを走査(電子ビームが当たる場所を画面の左上の端から右端へ、上から下へと動かす)している。1画面の走査にかかる時間はわずか 1/30 秒程度である。

以上のように電子ビームによる蛍光物質の発光と走査によって画面に像が描かれる。さらに、このような描画を 1 秒間に 30 回繰り返すことで、動く映像を表現している。

また、現在のテレビの走査線は 525 本、ハイビジョンでは 1125 本である。

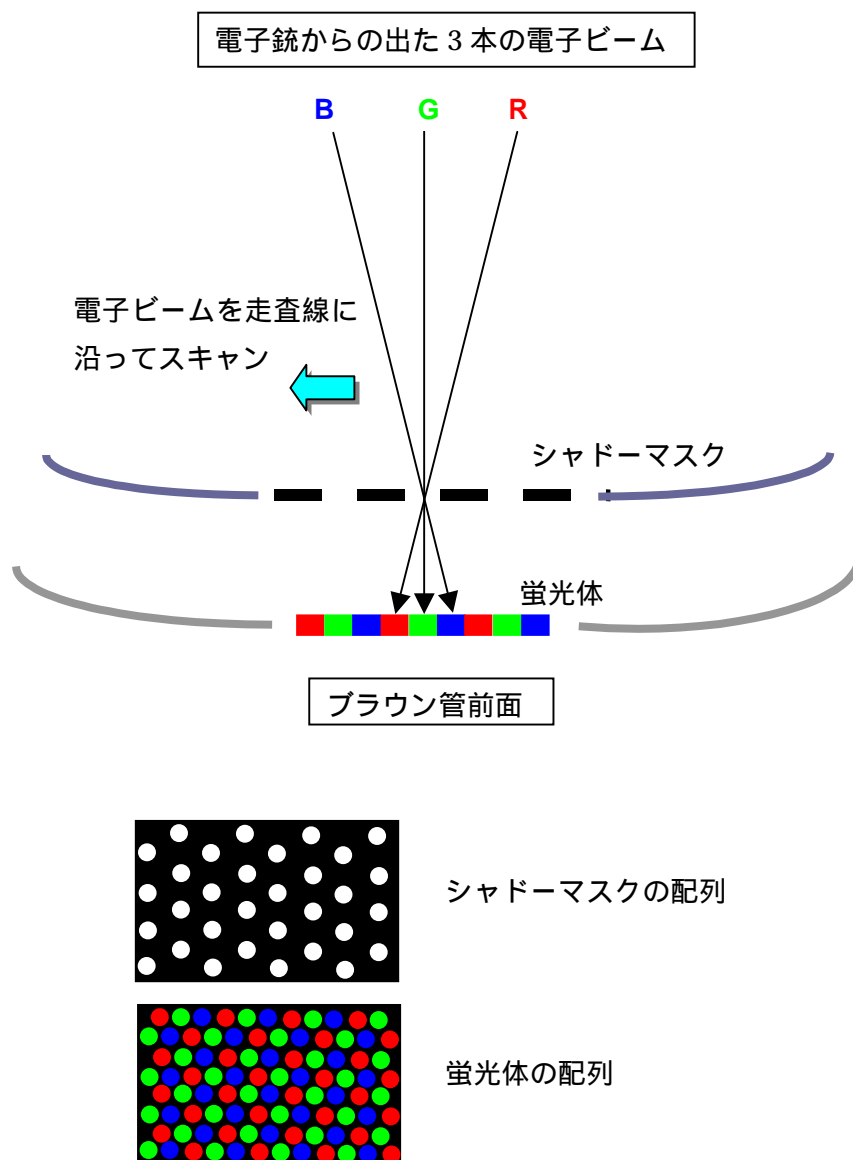


図 5-6 カラー TV の原理

2 D) 色ガラスフィルターとその吸収スペクトル フィルターによるスペクトルの選択

色ガラスフィルターや干渉フィルターは、特定の光を選択的に透過させる。色ガラスフィルターは相当に広い範囲の波長を含んでいるのに対し、干渉フィルターは波長選択性能に優れ、波長範囲が狭い“単色”の透過光が得られる。

厚さ d , 屈折率 n の平行平板に垂直に平行光線を照射したときの透過光の強さ

$$m\lambda = 2dn \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots$$

を満たす波長が極大の強さを示す

$$\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = 2dn \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots$$

を満たす波長が極小の強さを示す

板の片面または両面の反射能を、銀やアルミニウムの薄膜を蒸着させる等の方法で増してやると、強さの極小が0に近づくと同時に、極大を中心とする波長の範囲(スペクトル線の幅)がだんだん狭くなる。

干渉フィルターの製法 < 東芝硝子(株) >

ガラス板の上に、蒸着法で半透明の金属膜をつけ、次に水晶のような透明物質を同じく蒸着法で薄く附着させて、さらに、半透明の金属膜をかぶせたのち、ガラス板で保護する。

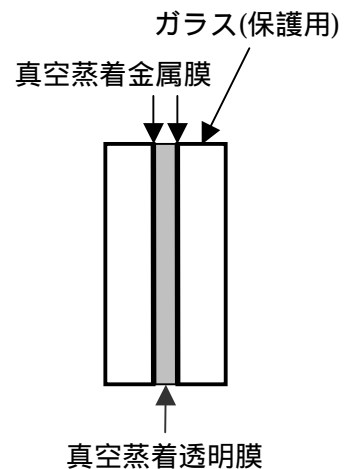
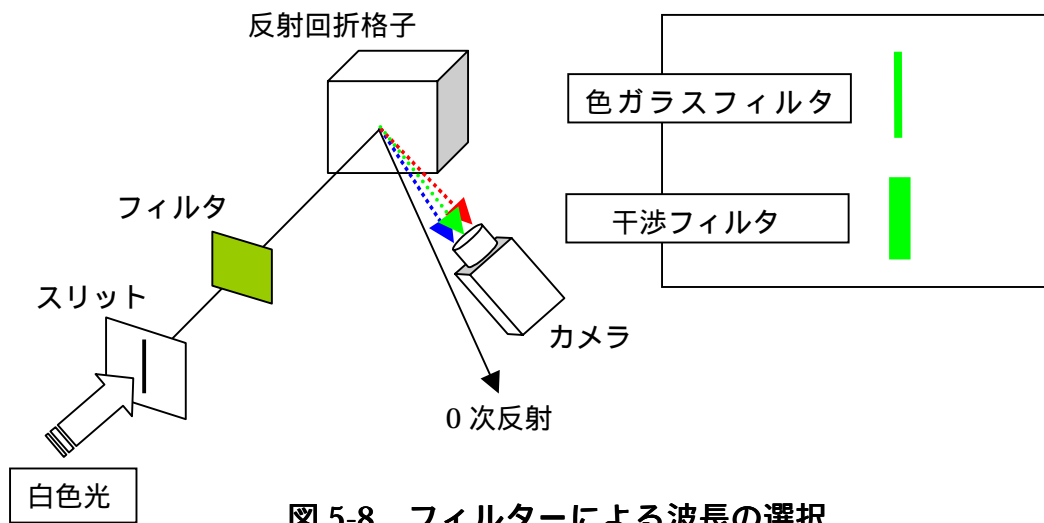


図 5-7 上：色ガラスフィルター
下：干渉フィルター

フィルターを光源と回折格子の間に入れると特定の波長範囲の光だけが透過していることを確認できる。



§ 5.3 幾何光学

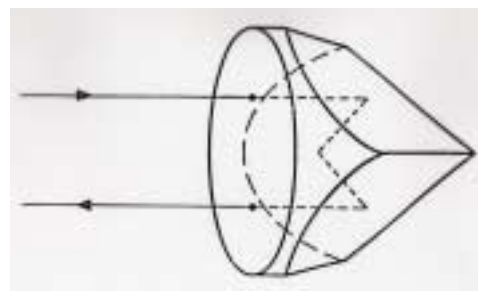
3-A) 光の反射

(1) コーナーキューブ

3枚の平面鏡を互いに直角に配置したもので、入射光は正確にもとの方向に反射される。



ガラスの立方体の一隅を切り取った形のもの



コーナーキューブの反射のしくみ

図 5-9 コーナーキューブ

コーナーキューブにレーザー光を当てて反射光の様子を見る。どの方向からレーザーを当てても、反射光はもとの位置(レーザー光の出口)に戻ってくる。

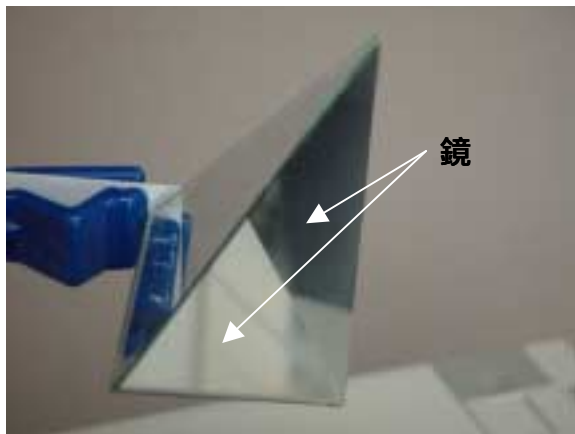


図 5-10 コーナーキューブの模型

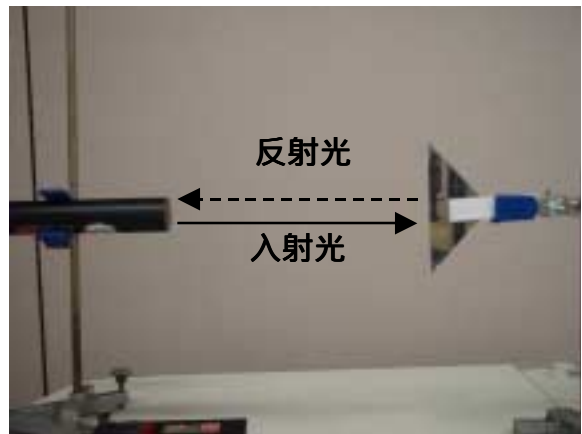


図 5-11 装置全体図

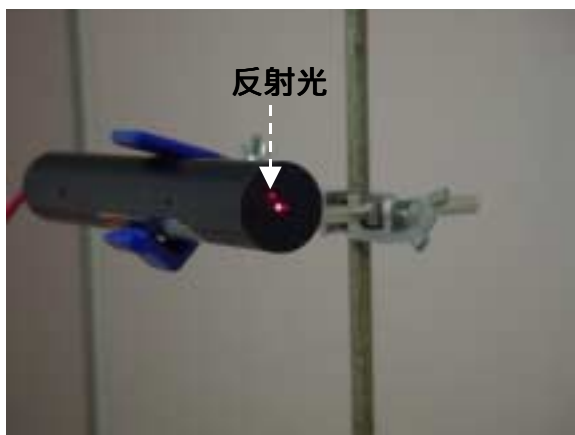


図 5-12 反射光の位置



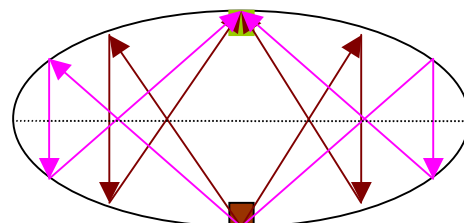
図 5-13 応用例：テイルランプ
コーナーキューブは自動車や自転車のテイルランプ等に利用されている。

(2) 凹面鏡：ミラージュ < 島津製 >

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)

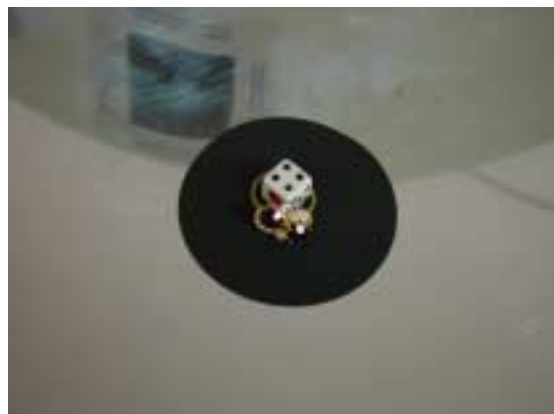


図 5-16 底に置いた物体

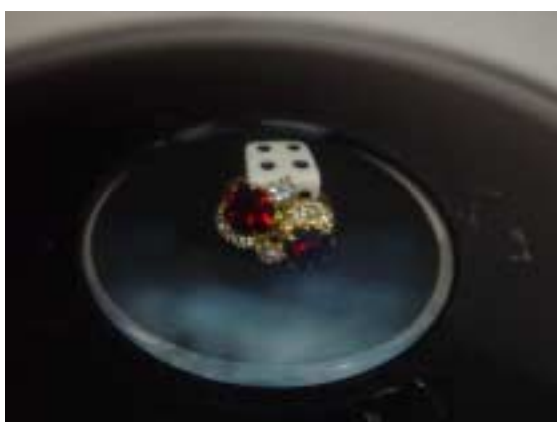


図 5-17 凹面鏡のふたの穴の部分に
浮いているように見える



図 5-18 つかめない(実物はない)

(3) 凹面鏡の非点収差

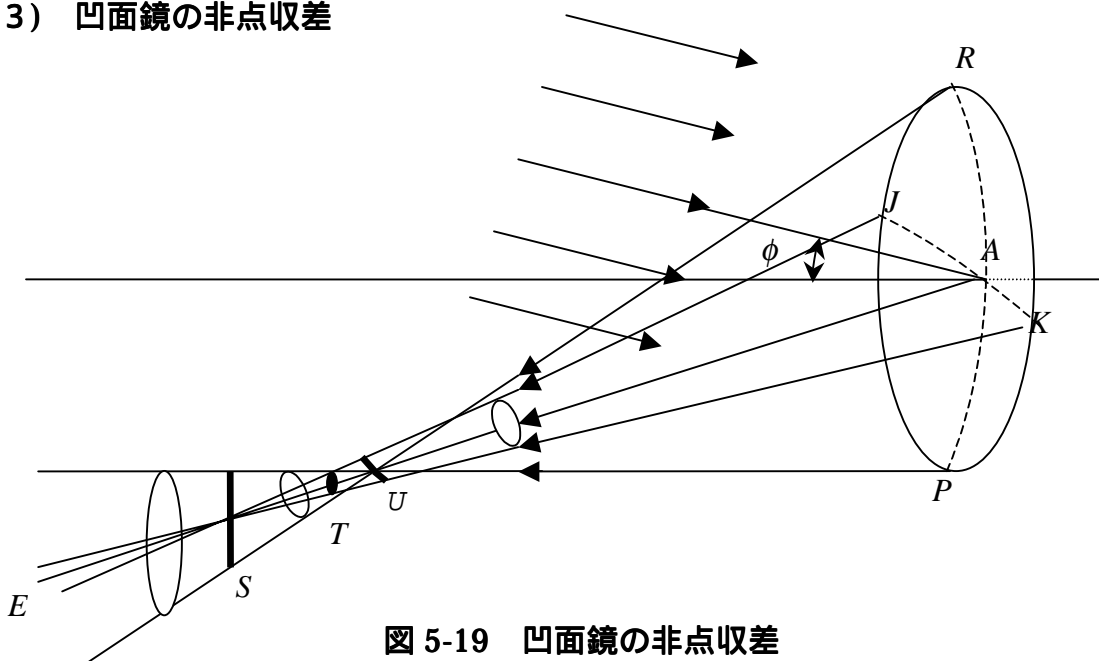


図 5-19 凹面鏡の非点収差

実験：スライドプロジェクターに約 3mm のピンホールのホルダーをセットし、凹面鏡に向けて、光を照射する。凹面鏡での反射光はスクリーンの位置によって、違った形の像として観察できる。

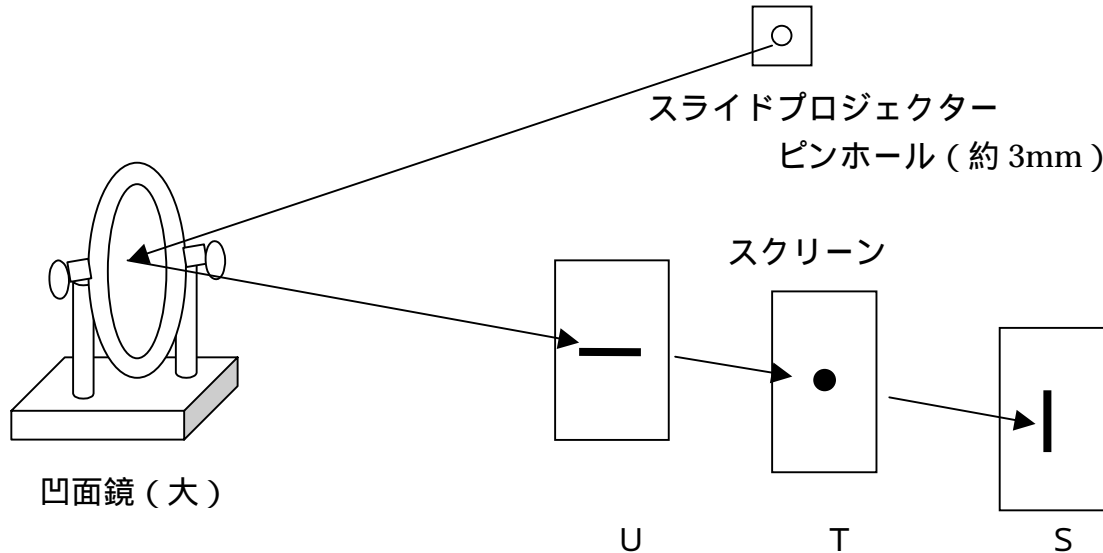


図 5-20 凹面鏡の非点収差の観察

スクリーンの場所による像の説明

スクリーンが手前のとき 図 5-19 の位置 U

縦軸方向のピントが最も合うために、像は横長になる。

スクリーンを から遠ざける 図 5-19 の位置 T (最小錯乱円)

縦軸・横軸両方のピントが同じくらいにはずれた状態で、像は円形になる。

スクリーンをさらに遠ざける 図 5-19 の位置 S

縦軸方向のピントが最も合うために、像は横長になる。

の像と の像は互いに垂直である

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ですが、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。

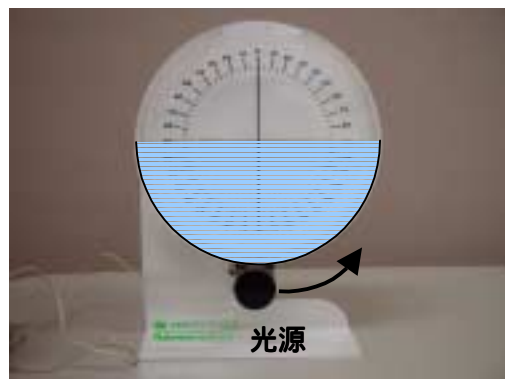


図 5-21 光学用水槽
< 中村理科工業(株) >

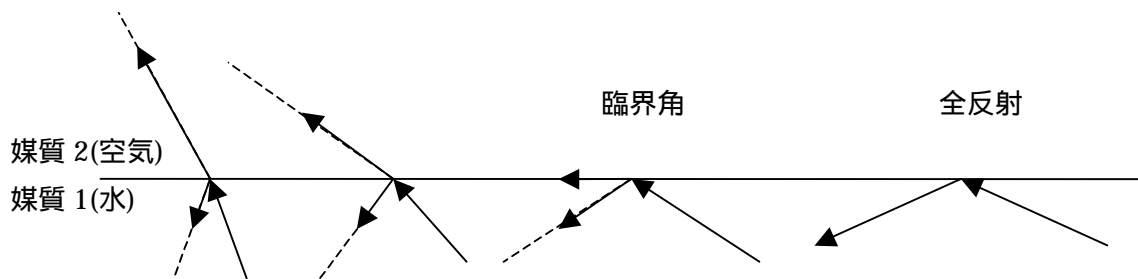


図 5-22 空気と水の界面における光の屈折と反射



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

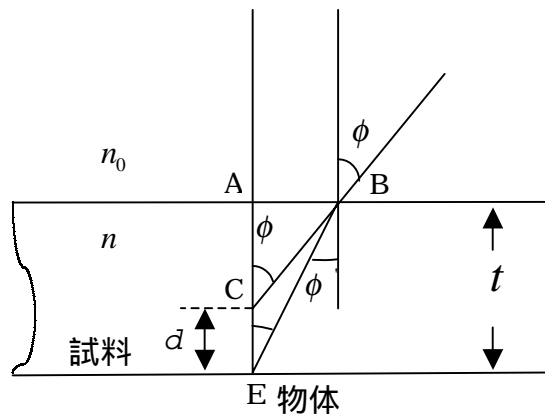
Snell の法則より

$$\frac{n}{n_0} = \frac{\sin \phi}{\sin \phi'} = \frac{BE}{CB}$$

真上から観察したのとき

BE=AE, CB=AC より

$$\frac{n}{n_0} = \frac{AE}{AC} = \frac{t}{t-d}$$



d : E に置かれた物体の実際の位置と見かけの位置との差

d を測定することによって、屈折率を求めることができる。空気中で観測するとき、 $n_0 = 1$ より、試料の屈折率 n は

$$n = \frac{t}{t-d}$$