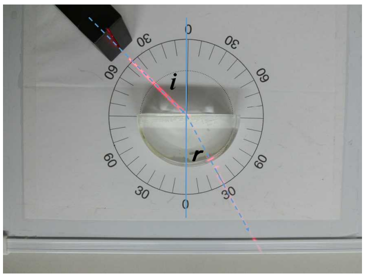
【観察・工作・実験】光の性質に関する実験

1　光の屈折

入射側の媒質に対する屈折側の媒質の屈折率は，次式によって定義される。

$\boldsymbol{n = \sin i \,/\, \sin r}$



右図はガラスに空気中からレーザー光を入射させたものである。$i = 45°$，　$r = 30°$

であるから，ガラスの屈折率は

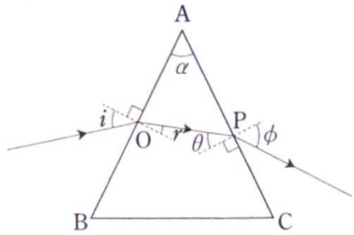
$n = \sin 45° / \sin 30° = \sqrt{2} \fallingdotseq 1.4$

である。

<u>→【実験】屈折率の測定と全反射</u>

(1)プリズム

プリズムによって屈折した光は波長による屈折率の違いでスペクトルが見られる。



原理　図のような，屈折率 n の媒質でできたプリズムに入射角 i で AB 面に入射した光線が，屈折角 ϕ で AC 面を出たとする。

$1 \cdot \sin \boldsymbol{i} = n \cdot \sin \boldsymbol{r}$　　　・・・①

$n \cdot \sin\boldsymbol{\theta} = 1 \cdot \sin \phi$　　　・・・②

$\boldsymbol{\theta} = \alpha - \boldsymbol{r}$　　　・・・③

より，

$\sin \phi = n \cdot \sin(\alpha - r) = \sin \alpha \sqrt{(n^2 - \sin^2 \boldsymbol{i})} - n \cdot \cos \alpha \sin \boldsymbol{i}$

頂角 α の小さい（薄い）プリズムでは i, r, θ, ϕ も小さい。x が小さいとき $\sin \boldsymbol{x} \fallingdotseq \boldsymbol{x}$ と近似できるので，①②は，$i = nr$，$n\theta = \phi$ である。よって③より，

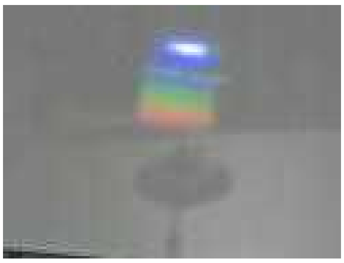
$\boldsymbol{\phi = n \alpha - i}$　　　・・・④

と近似できる。ここで，プリズムによって光線の向きがどの程度変わるかという量 δ を用いると，図より，$\delta = \phi + i - \alpha$　であることがわかるので，④より

$\boldsymbol{\delta = (n - 1)\, \alpha}$　　　・・・⑤

となる。，**屈折率が大きいとプリズムによる屈折角が大きくなる**ことがわかる。

【演習】①②③式から⑤式を求めよ。



実際には，波長 $\lambda = 400$nm（紫）のとき屈折率 $n = 1.470$，$\lambda = 600$nm（赤）のとき $n = 1.457$ である。$\alpha = 10°$ のプリズムでは，$\delta_{紫} = 4.7°$，$\delta_{赤} = 4.6°$ と屈折率の大きい紫色の光が屈折角が大きくなる。。

【実験】プリズムを使って，色によって屈折角が異なることを観察せよ。

(2)光の分散

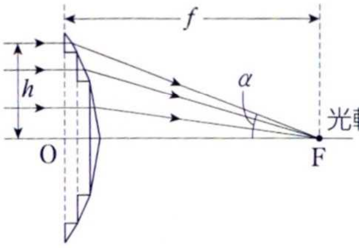
なぜ屈折率は周波数によって違うのか。詳しい経過は省略するが，光は電磁波であり，物質内を光が通過するとき，物質内の陽イオンや陰イオンの分布の影響を受ける。対をな

す単位正電荷と単位負電荷の組を電気双極子といい，電磁波の影響で電気双極子が振動をして光学的な性質が表れるという考え方によると，物質の単位体積中に電気双極子の数が N 個あり，電子の質量と電荷を m，e とし真空誘電率を ε_0 で表すとき，屈折率 n は

$$\boldsymbol{n^2 = 1 + (Ne^2 / \varepsilon_0 m)(\omega_0{}^2 - \omega^2)^{-1}}$$

（ただし，ω は角振動数　$\omega = 2\pi\nu$）という式で表されることが知られている。この式は希薄なガスで有効であるが，固体の場合においても，$(\omega_0{}^2 - \omega^2)^{-1}$ が関与し ω_0 に ω が近づくと屈折率 n は大きくなり，発散するという性質がある。可視光線の領域の振動数においても，振動数が大きくなる（赤よりも青の方が振動数は大きい）と屈折率が大きくなるので，⑤式より δ が大きく，**青の光の方がプリズムでよく曲げられる。**

(3) フレネルレンズ



図のように片側が平面で他面が球面の平凸レンズは，形状の異なる直角三角形のプリズムの組み合わせと見なすことができる。光軸から高さ h に位置するプリズムに直接入射する光線は屈折して，

$n\sin\theta = 1 \cdot \sin r$　…⑥

という関係がある。この光線が光軸となす角を α とするとき，$\alpha = r - \theta$ である。F が焦点であるので，焦点距離を f とすると，

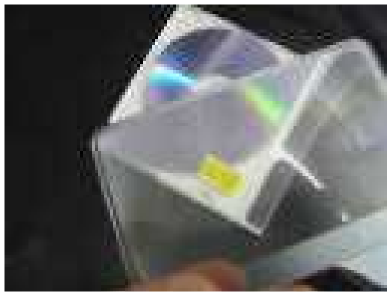
$\tan\alpha = h / f$ だから，

$f = h / \tan(r - \theta)$ …⑦

$r \fallingdotseq 0$，$\theta \fallingdotseq 0$ のとき，⑥，⑦は

$f = h / (r - \theta)$ および $n\theta = r$ と書き換えられるので，

$$\boldsymbol{\theta = h / \{(n-1)f\}} \quad \cdots ⑧$$



フレネルレンズで CD を拡大

である。光軸側より間隔 Δh の間隔で区切ったとき，m 番目のプリズムの高さは $m\Delta h$ であるので，$\theta_m = m\Delta h / \{(n-1)f\}$ となるようなプリズムを並べれば，プリズムの集合体で焦点距離 f のレンズを作ることができる。これが**フレネルレンズ**である。

【演習】⑥⑦より⑧を求めよ。

(4) 虹

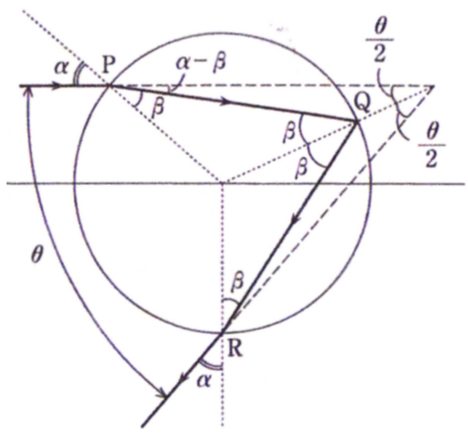
虹は細かい水滴に太陽光が入射し、屈折と反射を繰り返し、屈折角の違いでいわゆる虹の七色を見ることができる。図は水滴を球形と仮定した場合、光路を球の中心を通る平面を断面として描いている。P 点で入射角 α で入射した太陽光の屈折は，屈折角 β で水滴内に入り，空気の屈折率を 1，水の屈折率を n とすると，①の関係がある。太陽光の方向 P と観測者に向かう方向 R となす角 θ は，図から $\beta = (\alpha - \beta) + \theta / 2$ より，

$$\boldsymbol{\theta = 4\beta - 2\alpha} \qquad \cdots ⑨$$

という関係がある。

A 点に入射した太陽光は，赤い光の屈折角を β，青色の光の屈折角を β' とすると，青い光の方が屈折率が大きいので，①より $\beta' > \beta$ となり，進行方向の変化は赤い光の θ に比べて青い光の θ' のほうが大きい。

$\boldsymbol{\theta}'$（$=4\boldsymbol{\beta}'-2\alpha$）$>\boldsymbol{\theta}$（$=4\boldsymbol{\beta}-2\alpha$）



観測者に届く光が最も明るく感じられるのは，入射光の方向が変わっても，観測者に届く方向がほとんど変化しないときである。よって，その条件が，

$\boldsymbol{\theta}_0=4\boldsymbol{\beta}_0-2\alpha_0$　…⑨'

のときであるとすると，入射角 $\alpha_0+\Delta\alpha$ ，屈折角 $\boldsymbol{\beta}_0+\boldsymbol{\Delta\beta}$ に変化したとき，$\Delta\theta\fallingdotseq 0$ と考えればよい。よって⑨式より，

$\boldsymbol{\theta}_0+\varDelta\boldsymbol{\theta}_0$

$=4(\boldsymbol{\beta}_0+\boldsymbol{\Delta\beta})-2(\alpha_0+\Delta\alpha)$

$0=4\boldsymbol{\Delta\beta}-2\boldsymbol{\Delta\alpha}$

よって，$\boldsymbol{\Delta\alpha}=2\boldsymbol{\Delta\beta}$ である。また，$x\fallingdotseq 0$ において，$\cos x\fallingdotseq 1$，$\sin x\fallingdotseq x$ と近似すると

$n=\sin\alpha_0/\sin\boldsymbol{\beta}_0$

$=\sin(\alpha_0+\Delta\alpha)/\sin(\boldsymbol{\beta}_0+\boldsymbol{\Delta\beta})$

$=(\sin\alpha_0\cos\boldsymbol{\Delta}\alpha+\cos\boldsymbol{\alpha}_0\sin\boldsymbol{\Delta}\alpha)/(\sin\boldsymbol{\beta}_0\cos\boldsymbol{\Delta\beta}+\cos\boldsymbol{\beta}_0\sin\boldsymbol{\Delta\beta})$

$\fallingdotseq(\sin\alpha_0+\boldsymbol{\Delta}\alpha\cos\alpha_0)/(\sin\boldsymbol{\beta}_0+\boldsymbol{\Delta\beta}\cos\boldsymbol{\beta}_0)$

$=(\sin\alpha_0+2\boldsymbol{\Delta\beta}\cos\alpha_0)/(\sin\boldsymbol{\beta}_0+\boldsymbol{\Delta\beta}\cos\boldsymbol{\beta}_0)$

よって，　$\sin\boldsymbol{\beta}_0(\sin\alpha_0+2\boldsymbol{\Delta\beta}\cos\alpha_0)=\sin\alpha_0(\sin\boldsymbol{\beta}_0+\boldsymbol{\Delta\beta}\cos\boldsymbol{\beta}_0)$

$\cos\alpha_0=\cos\boldsymbol{\beta}_0\sin\alpha_0/(2\sin\boldsymbol{\beta}_0)$　すなわち，$\cos\alpha_0=n\cos\boldsymbol{\beta}_0/2$

また，

$\cos\alpha_0=\sqrt{(1-\sin^2\alpha_0)}$

$=\sqrt{(1-n^2\sin^2\boldsymbol{\beta}_0)}=n\cos\boldsymbol{\beta}_0/2$

となるので，

$(1-n^2\sin^2\boldsymbol{\beta}_0)=n^2\cos^2\boldsymbol{\beta}_0/2$

$=n^2(1-\sin^2\boldsymbol{\beta}_0)/4$

$\sin^2\boldsymbol{\beta}_0=(4-n^2)/3n^2$　…⑩

$\sin^2\alpha_0=(4-n^2)/3$　…⑪

虹の見える角

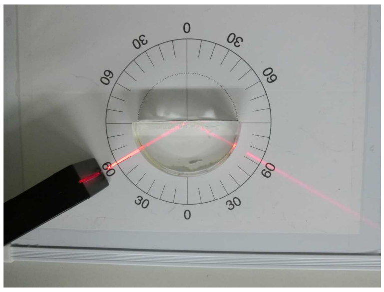
	水	アクリル
n	1.33	1.50
α_0	59.5°	49.8°
β_0	40.4°	30.6°
θ_0	42.6°	22.8°

⑨⑩および⑨'で虹が見える角度 θ_0 を計算している。

【工作】　図のような装置を作って虹を観察せよ。

空気中に細かい水滴にがあり，太陽光が屈折すると虹を見ることができる。太陽を背にして霧吹きを使っても観察することができるが，0.2mm 径のビーズ玉を黒い紙に糊を噴霧して貼り付け、アクリルシートで覆う。太陽を背にして見るとどの辺りに虹が見えるか。

２　光の反射（全反射）



光は，別の媒質に進むとき反射する。このとき**入射角** $\boldsymbol{i}$ **＝屈折角** $\boldsymbol{j}$ という関係があり，反射の法則という。光が屈折率の大きな媒質（絶対屈折率 n_1）から屈折率の小さな媒質（絶対屈折率 n_2）にすすむとき，屈折の法則 $\boldsymbol{n_1 \sin i = n_2 \sin r}$ を満たすが，$\boldsymbol{n_1 > n_2}$ のため，$\boldsymbol{i < r}$ となる。$\boldsymbol{i}$ を大きくしていくと，i が $90°$ になるまでに $\boldsymbol{r} = 90°$ になる。このときの入射角を $\boldsymbol{i_0}$ とすると，$\boldsymbol{i > i_0}$ の入射角で全反射がおきる。$\boldsymbol{i_0}$ は臨界角である。

$\boldsymbol{n_1 \sin i_0 = n_2 \sin 90°}$ より　$\sin \boldsymbol{i_0} = \boldsymbol{n_2} ／ \boldsymbol{n_1}$

【演習】光りが水中から空中に出る場合，全反射する入射角を求めよ。

水から空気に光が出る場合，　$\sin \boldsymbol{i_0} = 1 ／ 1.33 = 0.75$　$\boldsymbol{i_0} \fallingdotseq 48.6°$
となる。

試験管に物体を入れ水中に沈める。浅い角度から試験管をみると表面が全反射で銀色に見え、中の物体が見えない。試験管内からの光は角度によって，外から入射した光が水槽の水を通り，試験管内の空気に入射する際に全反射を起こしているためである。

試験管内に物体を入れる。

試験管内が見える。

試験管内は見えない。

４　光は横波

①偏光板

２枚の偏光板を偏光軸を変えて重ね，外からの光を通して見ると，透過光の明るさが変わることが観察できる。

θ＝０°

０＜θ＜９０°

θ＝９０°

1 枚目の偏光板（偏光子）によって透過した光は，電界（電場）の振動面がある方向に揃っている。この光の電界（電場）の大きさをＥ$_0$をとすると，１枚目の偏光板の結晶面が θ だけ傾いた２枚目の偏光板（検出子）で透過したとき，透過光の電場の大きさは，

$E_0\cos\theta$ になる。光の強度 I は振幅の２乗に比例するので，$I \propto \cos^2\theta$ という関係になる（マリューの法則）。

図のように２枚の偏光板を重ねて回していくと，θ の変化につれて明るさが変化する。したがって偏光という現象は光が横波である証拠である。

②結晶による偏光面の回転

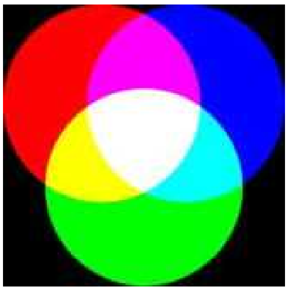
方解石の結晶を新聞の上に置いて観察をすると，文字が２重に見える。これは，方解石の結晶中を光が２つの経路を辿って目に届くからであり，複屈折という。方解石を回転させると，一方の文字は動かないが他方の文字は動く。動かない方の光の経路を辿った光線を常光線，動く方の光が辿った光線を異常光線という。結晶ではその分子の並び方によって光の振動面を変えるという性質がある。図は２枚の偏光板の間にセロハンテープを貼ったアクリル板を挟んで透過光を観察したものである。アクリル板やセロハンテープは製造過程で構成分子の並び方にひずみが入り複屈折性を示すからである。

５　光の色と振動数

光の３原色として赤(R)，緑(G)，青(B)が知られている。これは，この 3 色の混合でほとんどの色が作り出せるからである。左の図では，白，黒も加えて８色になっているが，強度（明るさ）の情報も加えて様々な色を出している。実際には，強度も加えて３原色の混合色として R(*180/256*), G(*38/256*), B(*38/256*)という具合に表現する。分母が *100* になっていないのは，コンピュータで色を合成する場合に *2* 進数（$256 = 2^8$）の方が便利だからである。青色 LED が開発されたことで LED によってあらゆる色の表現が可能になったといわれるのはこの所以である。

【工作】図のように LED を組み合わせて，色の混合を観察せよ。

赤（R)、緑（G)、青（B)の LED ６個使い三角形状に配置する。上からピンポン玉を光が漏れないように被せて、ピンポン玉の中心軸をずらしてみると，配合率が変わりいろいろな色が観察できる。LED は動作電圧が異なるので抵抗を入れて明るさを同じようになるよう調節する。（この実験は，2015 年物理教育学会で霜田光一先生が紹介していただいたものである。）



光りの３原色

LED を配置

ピンポン玉を被せる（橙？）