

【15 光の性質】

・ 屈折の法則：変形ver

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 v_1 = n_2 v_2$$

$$n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2$$

・ 写像公式 (レンズの公式)

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad m = \left| \frac{b}{a} \right|$$

虚像のときは $-b$ に、凹レンズのときは $-f$ にする。

・ 光の干渉

$$\text{明：光路差} = \frac{\lambda}{2} \times 2m = m\lambda$$

$$\text{暗：光路差} = \frac{\lambda}{2} \times (2m + 1) = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

1、ヤング 2、回折格子 はこの通り。

3、薄膜 4、くさび型 5、ニュートンリング

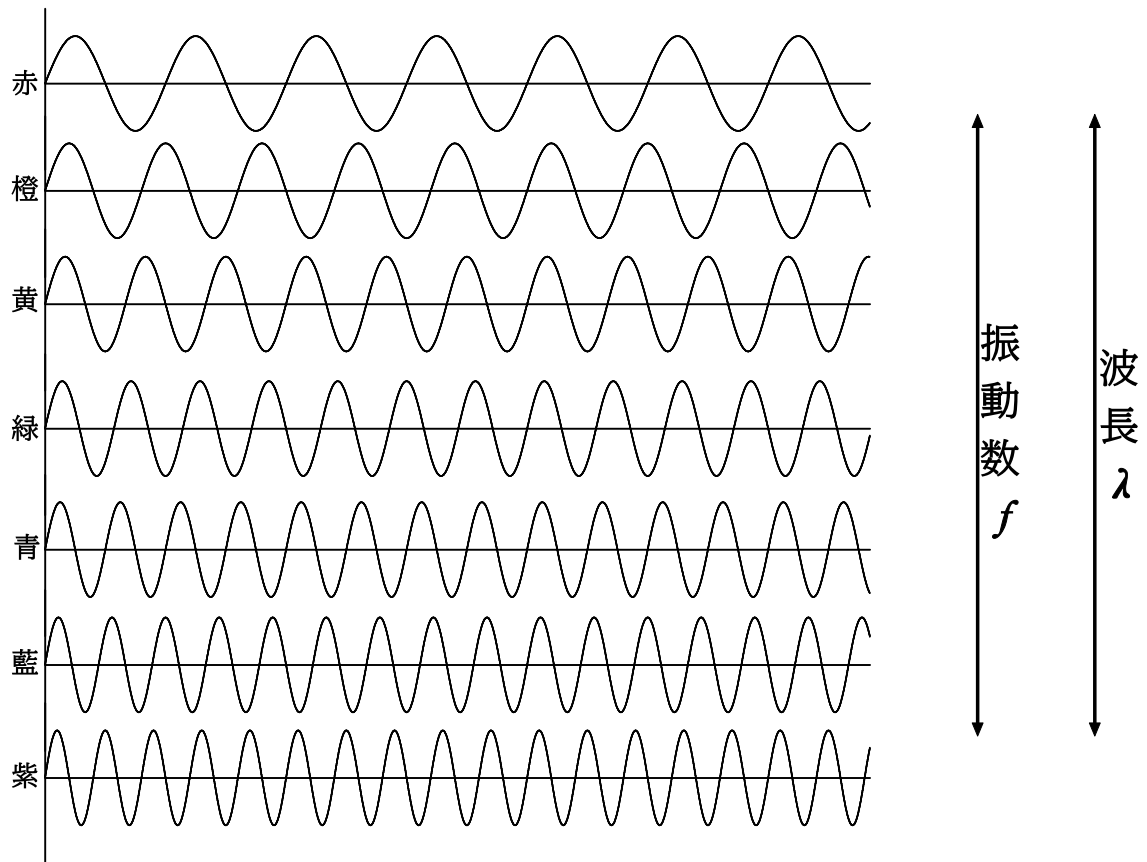
は条件式を入れ替える。(※反射の仕方により入れ替えない場合もある。)

()年 ()科 ()組 ()番 名前()

第3章 光

1. 光の性質

A 光とその種類



赤は、あたたかくてやさしいイメージですよね → 波長が長く、振動数が小さい

紫は、どくどくしくてとげとげしたイメージですよね → 波長が短く、振動数が大きい

また、これらの色の光が全部合わさると、「 」色になります。

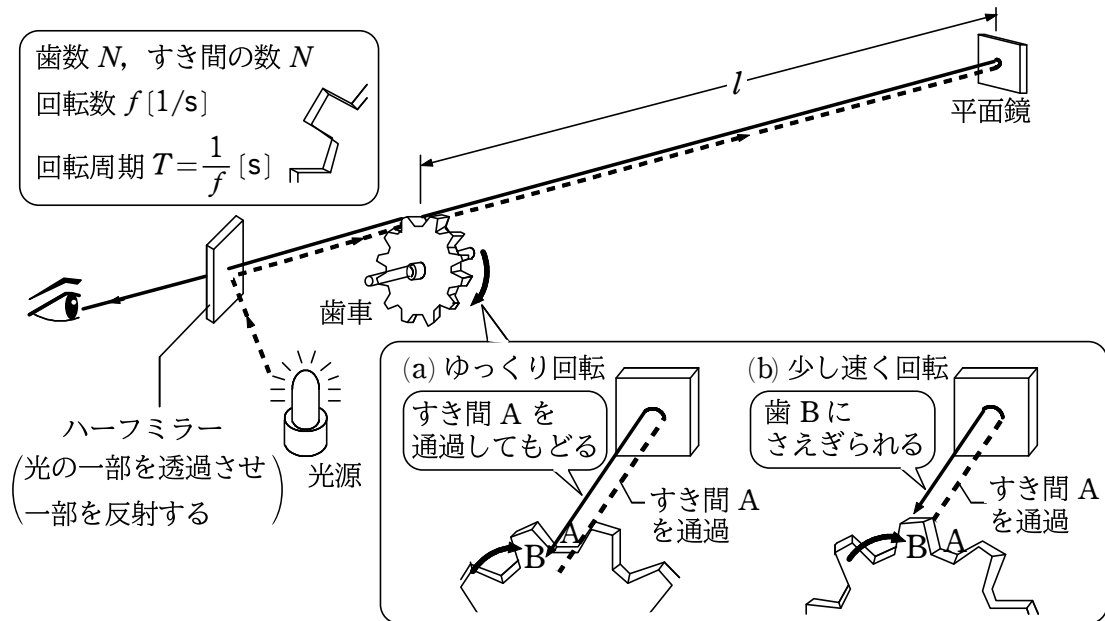
光の速さは「光速： c 」と表します。

その速さは、「 」です。

いわゆる、1秒間に地球を7周半できる速さですよね。(ちなみに 地球1周は約4万km)

B 光の速さ

フィゾーの実験



(i) 鏡に反射してから戻ってくるまでの時間は、

(ii) 歯車が歯 1 つ分だけ回転する時間は、

(i) と(ii)でかかる時間が同じになるときを考えればいいので、

フィゾーが行った測定では、図において、 $l = 8633 \text{ m}$, $N = 720$, $n = 12.6 / \text{s}$ であった。光の速さは何 m/s と予想されるか。

C 光の屈折・反射

媒質 1

媒質 2

屈折の法則は、分数の形よりも次の形で覚えておきましょう。

【屈折の法則：変形ver】

=

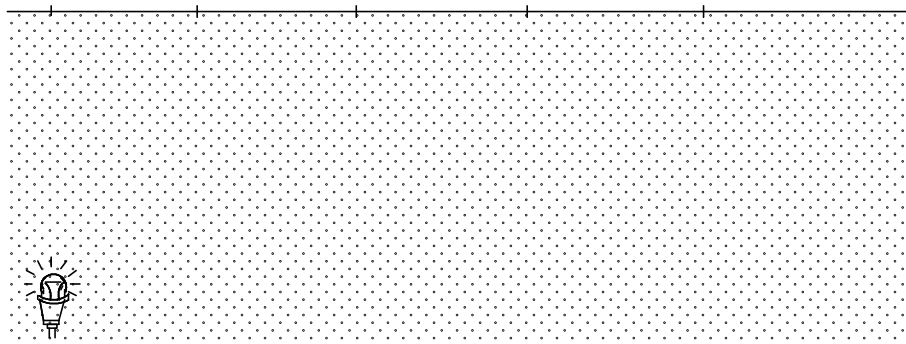
=

=

その媒質の屈折率 × ○○ = その媒質の屈折率 × ○○

まとめると、分数の形 → $n_{12} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$ ← 分数にすると
ここがやっかい。

D 全反射



屈折後の角度が90°になるときの入射角のことを「」といいます。このときの屈折の法則は、「」となり、「」となります。

さらに、臨界角よりも入射角が大きくなるともはや屈折せずに全て同じ媒質内に反射して戻ってきます。この現象を「」といいます。中学校で習ったよね。

- 1 次の色の光を、波長が長いものから順に並べよ。(赤, 青, 黄, 緑, 紫, 橙)

【解答】 赤, 橙, 黄, 緑, 青, 紫

- 2 真空中から屈折率 1.3 の水中へ、真空中での波長 $6.5 \times 10^{-7} \text{ m}$ の光が入射した。水中での光の波長は何 m か。

水中での光の波長を λ [m] とする。

$$[\lambda' = \frac{\lambda}{n}] \text{ より } \lambda = \frac{6.5 \times 10^{-7}}{1.3} = 5.0 \times 10^{-7} \text{ m}$$

- 3 真空中から屈折率 1.5 のガラス中へ、真空中での波長が $6.0 \times 10^{-7} \text{ m}$ の光が入射した。ガラス中での光の速さ v [m/s], 波長 λ [m], 振動数 f [Hz] はいくらか。真空中の光の速さは $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ であるとする。

屈折の法則を用いる。

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.0 \times 10^8}{1.5} = 2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{6.0 \times 10^{-7}}{1.5} = 4.0 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$[v = f\lambda] \text{ より } f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2.0 \times 10^8}{4.0 \times 10^{-7}} = 5.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

【参考】 屈折で振動数は変わらないので、真空中での値を用いて求めてもよい。

- 4 真空中で波長 $\lambda = 5.2 \times 10^{-7} \text{ m}$ の単色光を、真空中から物質中 (屈折率 1.3) に入射角 $i = 30^\circ$ で入射させる。

次の問いに答えよ。なお、真空中での光の速さを $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ とする。

- (a) 屈折角を r とし、 $\sin r$ の値を求めよ。
 (b) 物質中での光の速さ v [m/s] を求めよ。
 (c) 物質中での光の波長 λ' [m] を求めよ。

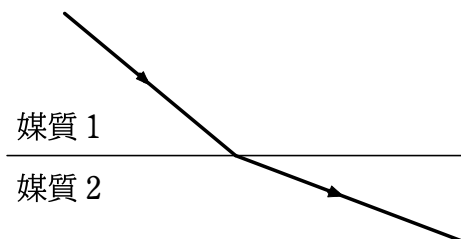
$$\text{屈折の法則より } \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{c}{v} = \frac{\lambda}{\lambda'} = n \quad (n \text{ は物質の屈折率を表す。})$$

$$(a) \frac{\sin 30^\circ}{\sin r} = 1.3 \text{ より } \sin r = \frac{1}{2} \times \frac{1}{1.3} \approx 0.38$$

$$(b) \frac{3.0 \times 10^8}{v} = 1.3 \text{ より } v = \frac{3.0 \times 10^8}{1.3} \approx 2.3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$(c) \frac{5.2 \times 10^{-7}}{\lambda'} = 1.3 \text{ より } \lambda' = \frac{5.2 \times 10^{-7}}{1.3} = 4.0 \times 10^{-7} \text{ m}$$

- 5 屈折率が異なる媒質 1 と媒質 2 がある。媒質 1 から媒質 2 に光を入射させると光は屈折して図の方向に進んだ。媒質 1 と媒質 2 で光が速く伝わるのはどちらか。



【解答】 媒質 2

- 6 プールの壁の水深 h [m] の点 P をほぼ真上の空気中から見ると、P の水深は h' [m] に見えた。 h' [m] を求めよ。空気の屈折率を 1、水の屈折率を n とする。ただし、角 θ がきわめて小さいとき、 $\sin \theta \doteq \tan \theta$ が成りたつとする。

【指針】 点 P から出た光は、水面で屈折して空気中に進む。このとき、観測者の目に届く

光は、屈折光線の延長線上の点 P' から出たように見える。

【解答】 図のように、P を出て水面で屈折して観測者に届く光は、点 P' の方向からくるように見える。水中から空気中に進む光の入射角を i 、屈折角を r とすると、屈折の法則より

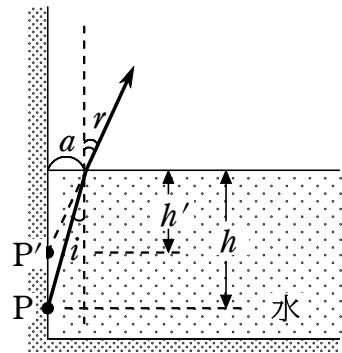
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n} \quad \text{よって} \quad n \sin i = \sin r$$

観測者は P のほぼ真上から見ているので、角 i 、 r はきわめて小

さい。図より $\tan i = \frac{a}{h}$ 、 $\tan r = \frac{a}{h'}$ であるから

$$\sin i \doteq \tan i, \sin r \doteq \tan r \text{ より } n \cdot \frac{a}{h} \doteq \frac{a}{h'}$$

$$\text{よって } h' \doteq \frac{h}{n} \text{ [m]}$$



- 7 水の入った水槽の側面上、水面から高さ 0.20 m の位置に点 P がある。P のほぼ真下の水中にある点からは、P が水面から h' [m] の位置に見える。 h' [m] を求めよ。空気の屈折率を 1.0 とし、水の屈折率を 1.3 とする。ただし、角 θ がきわめて小さいとき、 $\sin \theta \doteq \tan \theta$ が成りたつとする。

図のように、P を出て水面で屈折して観測者に届く光は、点 P' の方向からくるように見える。空気中から水中に進む光の入射角を i 、屈折角を r とすると、屈折の法則より

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1.3}{1.0}$$

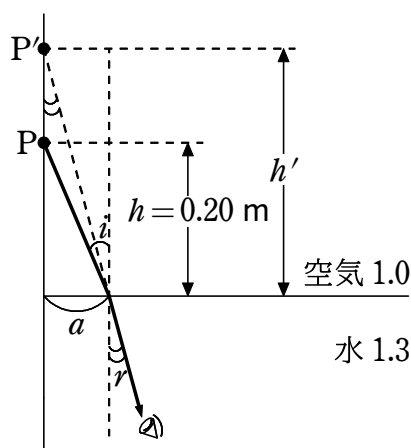
$$\text{よって } 1.0 \times \sin i = 1.3 \times \sin r$$

観測者は P のほぼ真下から見ているので、角 i 、 r はきわめて小さい。

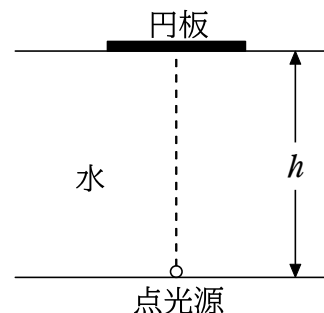
$$\text{図より } \tan i = \frac{a}{h}, \tan r = \frac{a}{h'} \text{ であるから}$$

$$1.0 \times \frac{a}{h} \doteq 1.3 \times \frac{a}{h'}$$

$$\text{よって } h' \doteq 1.3 \times h = 1.3 \times 0.20 = 0.26 \text{ m}$$



- 8 深さ h [m] の池の底に点光源がある。水面に円板を浮かべて、この点光源からの光が空気中に出ないようにしたい。これに必要な、円板の最小の半径 R [m] を求めよ。空気の屈折率を 1、水の屈折率を n とする。



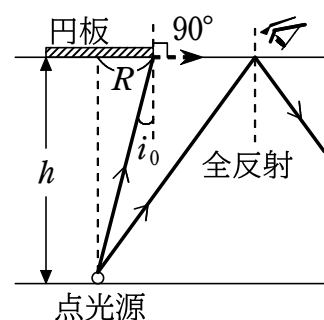
【指針】 円板の外側では、点光源から出た光が全反射するようにすればよい。

【解答】 点光源から出て、円板の外側の水面に当たる光の入射角が、臨界角よりも大きくなるようにすれば、光は全反射して空気中に出ない。水中から空気中に進む光の臨界角を i_0 とすると、屈折の法則より

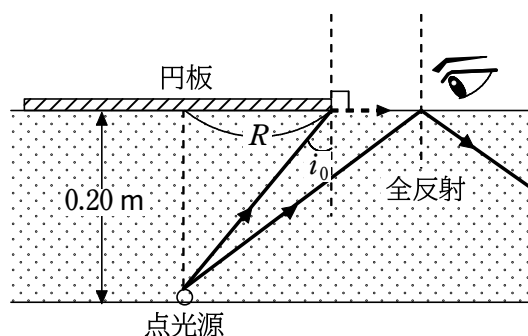
$$\frac{\sin i_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n} \quad \text{よって} \quad \sin i_0 = \frac{1}{n}$$

ゆえに、図より

$$R = h \tan i_0 = h \frac{\sin i_0}{\cos i_0} = h \frac{\sin i_0}{\sqrt{1 - \sin^2 i_0}} = \frac{h}{\sqrt{n^2 - 1}} \text{ [m]}$$



- 9 屈折率 $\sqrt{2}$ の液体中の深さ 0.20 m の位置に、点光源がある。点光源の真上に円板を浮かべて、点光源からの光が空気中に出ないようにしたい。これに必要な、円板の最小の半径 R [m] を求めよ。空気の屈折率を 1 とする。



点光源から出て、円板の外側の水面に当たる光の入射角が、臨界角よりも大きくなるようにすれば、光は全反射して空気中に出ない。水中から空気中に進む光の臨界角を i_0 とすると、屈折の法則「 n_{12}

$$= \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$
」より

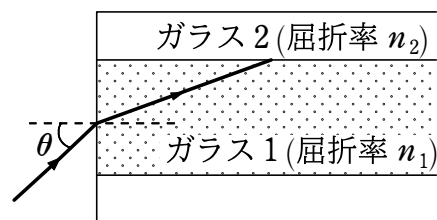
$$\frac{\sin i_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\text{よって} \quad \sin i_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

ゆえに $i_0 = 45^\circ$

したがって、図より $R = 0.20 \tan 45^\circ = 0.20 \text{ m}$

- 10 図のように、屈折率 n_1 のガラス1を屈折率 n_2 ($n_2 < n_1$) のガラス2でおおった円柱状の繊維が、空気中に置かれている。円柱の中心軸に垂直な端面に、中心軸と θ をなす角で入射させた光は、2つのガラスの境界面に臨界角で入射した。空気の屈折率を1として、 $\sin \theta$ を求めよ。



ガラス1からガラス2への臨界角を θ_0 とすると、
屈折の法則より

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{よって} \quad \sin \theta_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

図 a より、空気中からガラス1への屈折角は $\frac{\pi}{2} - \theta_0$ となるから、屈折の法則より

$$\frac{\sin \theta}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right)} = \frac{n_1}{1}$$

よって $\sin \theta = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \dots\dots ①$

$$\text{ここで} \quad \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) = \cos \theta_0 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_0} = \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = \frac{1}{n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

であるから、これを ① 式に代入して $\sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

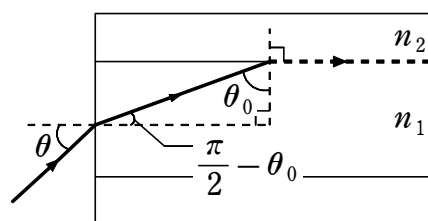
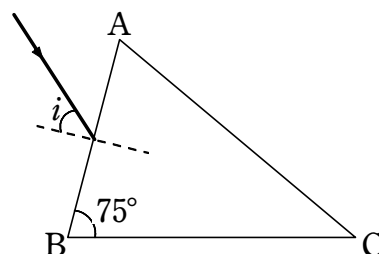


図 a

- 11 図のように、空気中に置かれたガラスの AB 面に角 i (i は入射角) で入射した光が、BC 面に臨界角で入射した。空気の屈折率を1、ガラスの屈折率を $\sqrt{2}$ として、角 i を求めよ。



ガラスから空気への臨界角を θ_0 とすると、屈折の法則より

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \text{よって} \quad \sin \theta_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

ゆえに $\theta_0 = 45^\circ$

空気中からガラスへの屈折角を r とし、図のように角 α を定めると

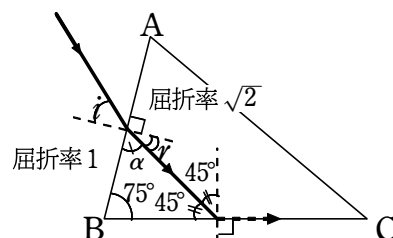
$$\alpha + 75^\circ + 45^\circ = 180^\circ \quad \text{より} \quad \alpha = 60^\circ$$

$$r = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$$

よって、屈折の法則より

$$\frac{\sin i}{\sin 30^\circ} = \frac{\sqrt{2}}{1} \quad \text{したがって} \quad \sin i = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

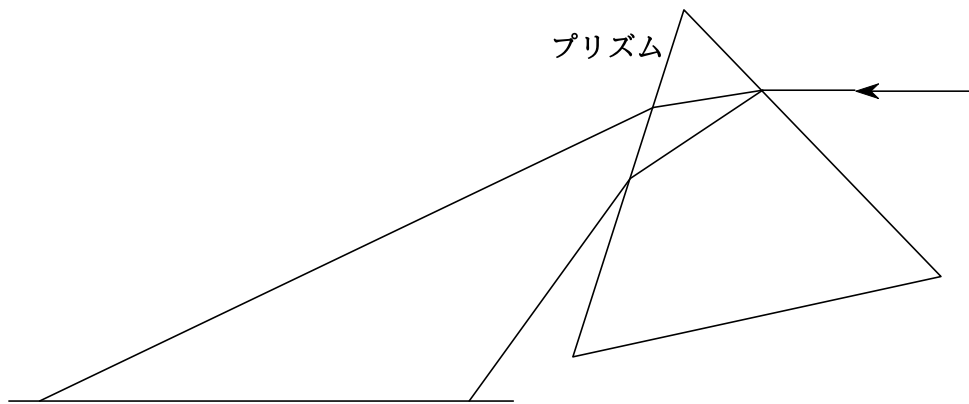
ゆえに $i = 45^\circ$



E 光の分散とスペクトル

・光の分散

プリズムを通過したときに屈折率の違いによって様々な色に分かれることを「分散」といいます。



屈折率が波長によって異なるので、このようになります。

(赤色は屈折しにくい。紫色は屈折しやすい。)

・スペクトル

光をその波長によってわけたもの。

・連続スペクトル

太陽の光のように連続的に波長が分布しているもの。

・線スペクトル

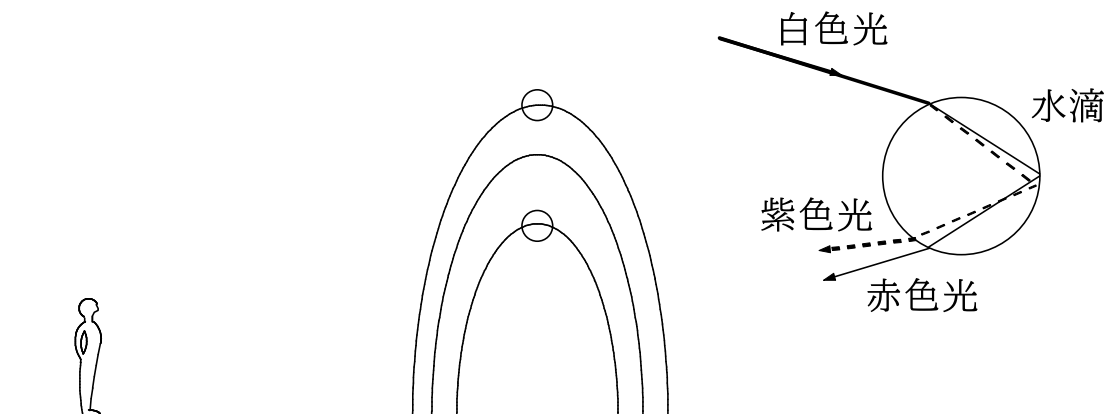
連続ではなくとびとびでスペクトルが分布しているもの。

・吸収スペクトル

連続スペクトルをもつ光が、気体中を通過するとき、その気体特有の光が吸収されたために生じるスペクトル。

(特に太陽光の中にみられる暗線のことを「フラウンホーファー線」といいます。この暗線の情報から太陽が何の原子からできているかを知ることができたんですよ。すごいですね。)

・虹のできるしくみ



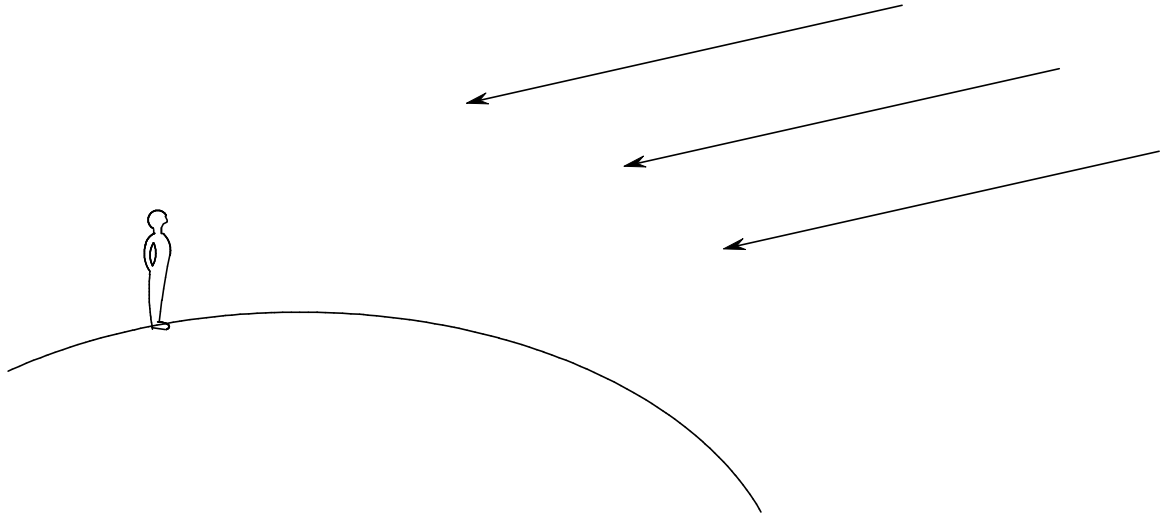
F 光の散乱

・空が青い理由

上空で青色の光だけが大気的气体分子によってあっちこちに散らばり、いろんな方向から青い光が目が届くから。

・夕やけが赤い理由

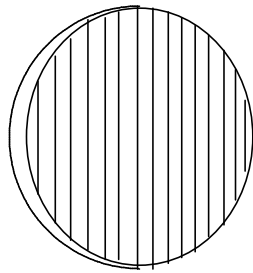
夕方になると太陽光が大気を通過する距離が増えるので、赤以外の光はけっこう散乱してしまい、赤の光がほかの光よりも多く目が届くから。



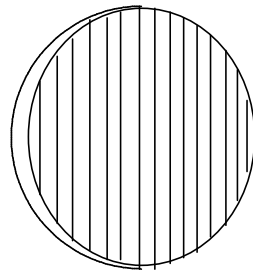
G 偏光

光の振動面がある特定の方向に偏ることがあって、そのときの光を偏光と言います。水面とか、フロントガラスとか、PCの画面とかは偏光です。

・偏光板と偏光の向きが平行な向きのときは通過する。



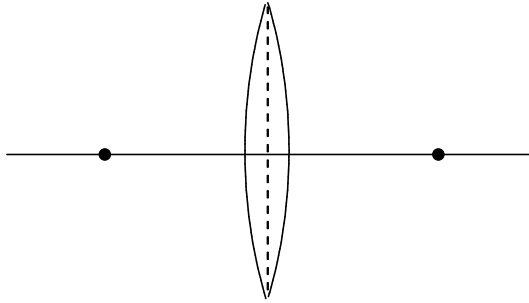
・偏光板と偏光の向きが垂直な向きの時は遮られる。



2 レンズと鏡

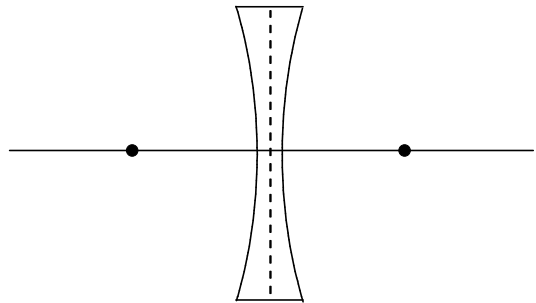
A 凸レンズ・凹レンズ

凸レンズ



軸に平行な光は、後方の_____を
通って進む。

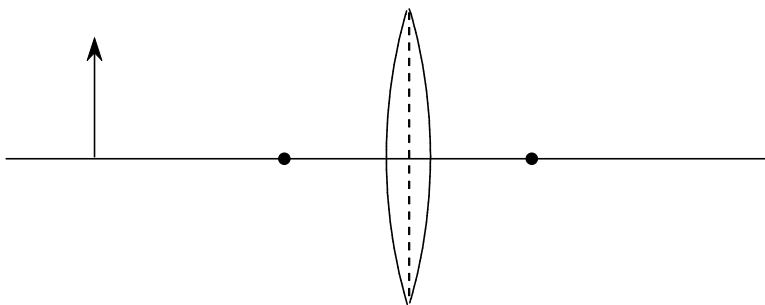
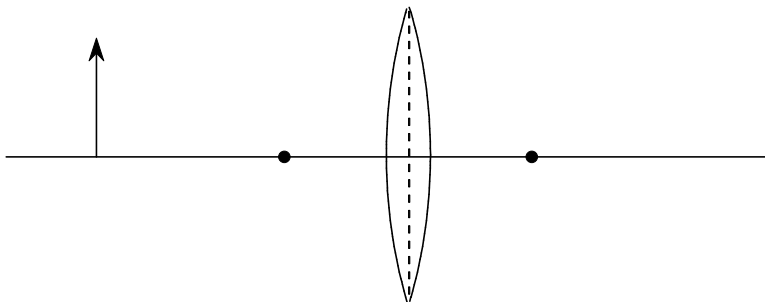
凹レンズ



軸に平行な光は、前方の_____
から出てきたように進む。

写像公式（レンズの公式）の証明

a ... 物体とレンズとの距離、 b ... レンズと像との距離、 f ... 焦点距離

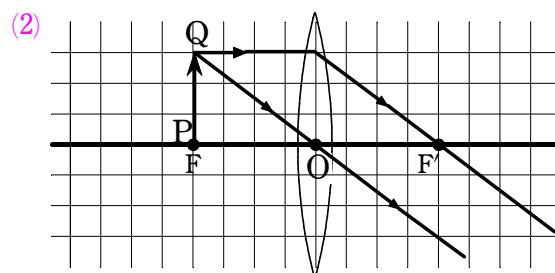
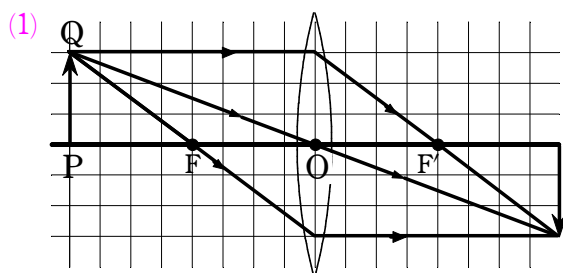
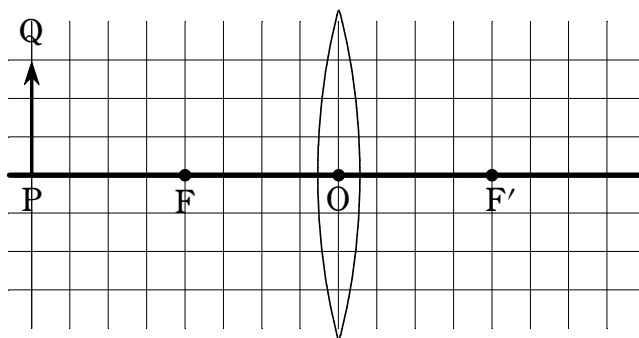


【写像公式】

【倍率】

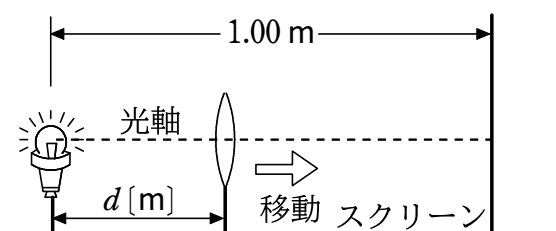
レンズで覚えるのはこの式だけ！！

- 1 図のように、物体 PQ と、F、F' を焦点とする凸レンズがある。
- (1) 凸レンズによって生じる物体 PQ の像を作図せよ。
- (2) 物体 PQ が F の上にあるとき、像はできるか。



(2) 物体 PQ が F の上にあるときは、凸レンズを通過した光は平行光線となり、像はできない (上図)。

- 2 光源とスクリーンを 1.00 m 離して固定する。この間を、凸レンズを図のように光軸と平行に移動させたところ、スクリーン上に実像が 2 度生じた。1 度目の光源とレンズの距離は 0.10 m であった。2 度目の光源とレンズの距離 d [m] を求めよ。



レンズからスクリーンまでの距離は $(1.00 - d)$ [m] である。レンズの焦点距離を f [m] とすると、写像公式より

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{1.00 - d} = \frac{1}{f}$$

$d = 0.10$ m のとき最初の像ができるので

$$\frac{1}{0.10} + \frac{1}{0.90} = \frac{1}{f} \quad \text{ゆえに} \quad f = 0.090 \text{ m}$$

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{1.00 - d} = \frac{1}{0.090}$$

より d の値を求めると

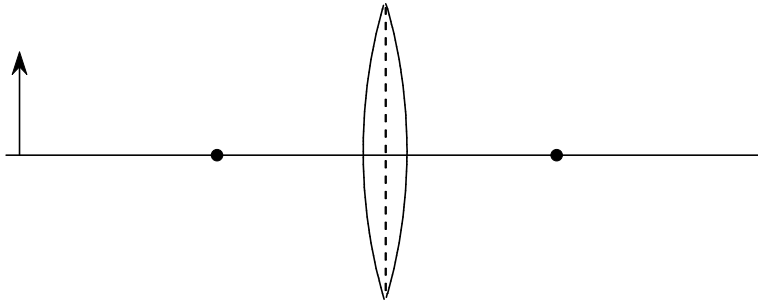
$$d^2 - d + 0.090 = 0 \quad (d - 0.10)(d - 0.90) = 0$$

より $d = 0.10$ m, 0.90 m よって、2 度目の実像ができるときは $d = 0.90$ m

- 3 凸レンズの焦点の外側に物体を置くと、スクリーン上に実像ができた。このとき、レンズの上半分を黒い紙で覆うと像はどうなるだろうか。理由とともに説明してみよう。

物体から出た光は周囲に球面波としてひろがっていく。この場合、レンズを通った光はレンズのどの部分を通った光も実像の位置に集まり、像を結ぶ。レンズの面積が小さくなれば、レンズを通る光の量は少なくなる。

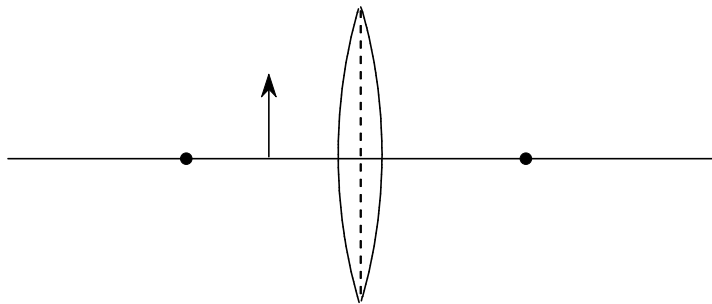
B 凸レンズによる実像



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

$$m = \left| \frac{b}{a} \right|$$

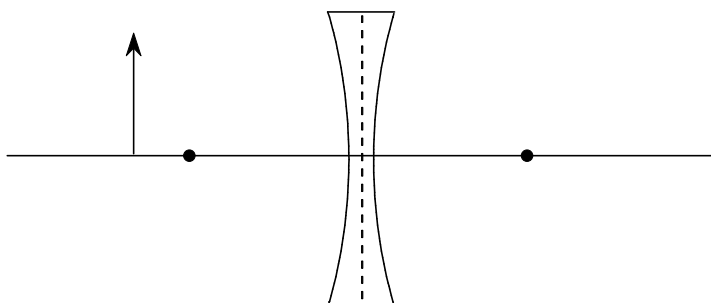
C 凸レンズによる虚像



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

$$m = \left| \frac{b}{a} \right|$$

D 凹レンズによる虚像

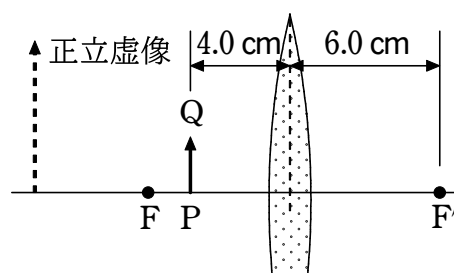


$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$$m = \left| \frac{b}{a} \right|$$

※凹レンズは虚像しかつくれません。それから、この3パターンをいちいち暗記するのは愚かな行為です。レンズの公式一つ覚えて、そこから作れるようにしましょう。虚像は $-b$ 、凹レンズは $-f$ 。

- 1 焦点距離が 6.0 cm の凸レンズから 4.0 cm の位置に物体 PQ を置き、反対側から凸レンズに目を近づけて見たところ、正立虚像が見えた。このときの倍率 m を求めよ。



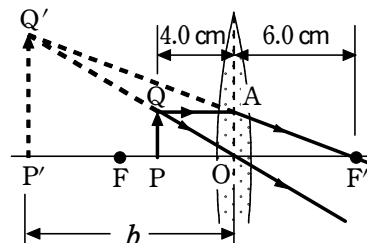
レンズと物体との距離を a [cm], レンズと像との距離を b [cm], レンズの焦点距離を f [cm] として

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

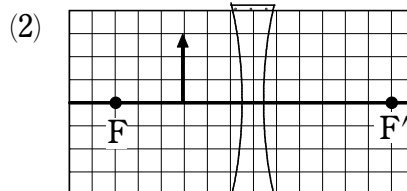
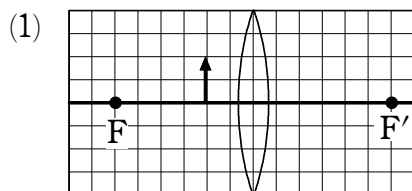
ここで, $a = 4.0$ cm, $f = 6.0$ cm を代入すると

$$b = 12.0$$

$$\text{ゆえに } m = \frac{b}{a} = \frac{12.0}{4.0} = 3.0 \text{ 倍}$$

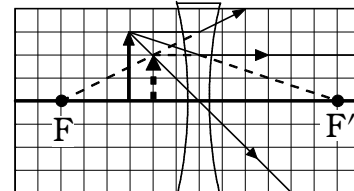
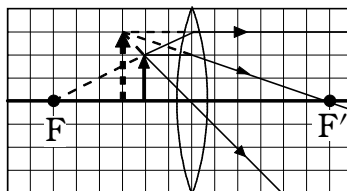


- 2 次の (1), (2) のように, 矢印で表した物体と, F, F' を焦点とするレンズがあるとき, それぞれのレンズによって生じる物体の像を作図せよ。



(1) 正立虚像が生じる。(左図)

(2) 正立虚像が生じる。(右図)



- 3 次の各場合にできる像の位置, 種類, 高さを求めよ。

- (1) 焦点距離 6.0 cm の凸レンズの前方 10 cm の光軸上に, 高さ 3.0 cm の物体を光軸に垂直に置く。
- (2) 焦点距離 12 cm の凸レンズの前方 4.0 cm の光軸上に, 高さ 2.0 cm の物体を光軸に垂直に置く。
- (3) 焦点距離 12 cm の凹レンズの前方 6.0 cm の光軸上に, 高さ 3.0 cm の物体を光軸に垂直に置く。

(1) $\frac{1}{10} + \frac{1}{b} = \frac{1}{6.0}$ よって $b = 15$ cm 倍率 $m = \frac{15}{10} = 1.5$ (倍)

以上より, レンズの後方 15 cm のところに, 高さ $3.0 \times 1.5 = 4.5$ (cm) の倒立実像ができる。

(2) $\frac{1}{4.0} + \frac{1}{b} = \frac{1}{12}$ よって $b = -6.0$ cm 倍率 $m = \left| \frac{-6.0}{4.0} \right| = 1.5$ (倍)

以上より, レンズの前方 6.0 cm のところに, 高さ $2.0 \times 1.5 = 3.0$ (cm) の正立虚像ができる。

(3) $\frac{1}{6.0} + \frac{1}{b} = \frac{1}{-12}$ よって $b = -4.0$ cm 倍率 $m = \left| \frac{-4.0}{6.0} \right| = \frac{2}{3}$ (倍)

以上より, レンズの前方 4.0 cm のところに, 高さ $3.0 \times \frac{2}{3} = 2.0$ (cm) の正立虚像ができる。

- 4 焦点距離 8.0 cm の凸レンズがある。この凸レンズの前方 10.0 cm の位置に物体を置いたとき、どこにどのような像が生じるか。また、そのときの倍率はいくらか。

【指針】 写像公式「 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ 」に、 $f = 8.0 \text{ cm}$ 、 $a = 10.0 \text{ cm}$ を代入して、 $b [\text{cm}]$ を求める。

【解答】 凸レンズであるから、写像公式で $f = 8.0 \text{ cm}$ 、 $a = 10.0 \text{ cm}$ とおくと

$$\frac{1}{10.0} + \frac{1}{b} = \frac{1}{8.0} \quad \text{よって} \quad b = 40 \text{ cm}$$

$b > 0$ であるから、凸レンズの後方に倒立実像ができる。

また $\left| \frac{b}{a} \right| = \left| \frac{40}{10.0} \right| = 4.0$ より、倍率は 4.0 倍である。

レンズの後方 40 cm の所に倍率 4.0 倍の倒立実像ができる。

- 5 焦点距離 40 cm の凹レンズがある。この凹レンズの前方 60 cm の位置に物体を置いたとき、どこにどのような像が生じるか。また、そのときの倍率はいくらか。

凹レンズであるから、写像公式で $f = -40 \text{ cm}$ 、 $a = 60 \text{ cm}$ とおくと

$$\frac{1}{60} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{40}$$

よって $b = -24 \text{ cm}$

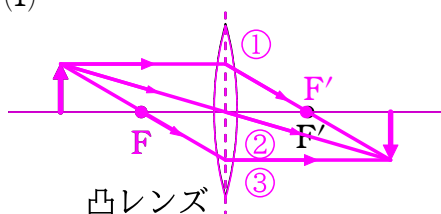
倍率 $m = \left| \frac{b}{a} \right| = \left| \frac{-24}{60} \right| = 0.40$ 倍

$b < 0$ であるから、凹レンズの前方に正立虚像ができる。

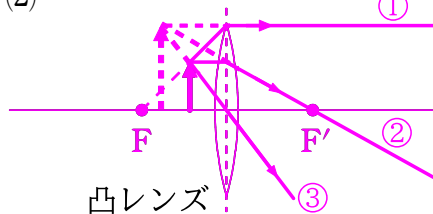
レンズの前方 24 cm の所に倍率 0.40 倍の正立虚像ができる。

- 6 次の (1)～(4) のように、矢印で表した物体と、F、F' を焦点とするレンズがある。それぞれのレンズによって生じる物体の像を作図して、像の種類 (実像または虚像) を答えよ。

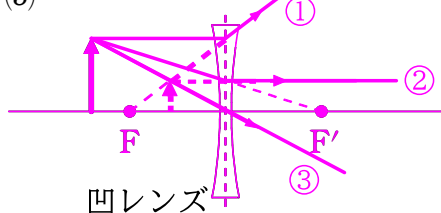
(1) 実像



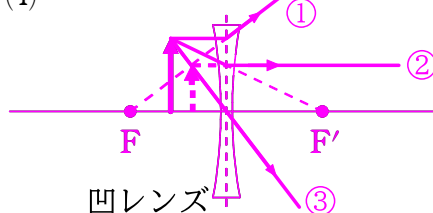
(2) 虚像



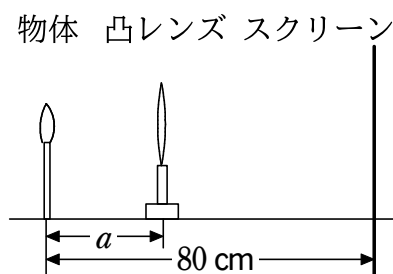
(3) 虚像



(4) 虚像



- 7 (1) 図のように、物体とスクリーンを 80 cm 離して固定し、その間に焦点距離 15 cm の凸レンズを置いて水平方向に動かす。物体とレンズの距離を a [cm] とするとき、スクリーン上に実像が生じるような a をすべて求めよ。



- (2) (1) において、スクリーンを取り除き、凸レンズを通して図の右側から物体を見る。倍率 3.0 倍の虚像が見えるときの a を求めよ。

- (3) (2) において、凸レンズのかわりに、焦点距離 30 cm の凹レンズを通して図の右側から物体を見る。倍率 0.50 倍の虚像が見えるときの a を求めよ。

- (1) 写像公式で、 $b = 80 - a$ [cm], $f = 15$ cm として、 $a > 0$, $b > 0$ となる a の値を求める。

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{80 - a} = \frac{1}{15}$$

$$a^2 - 80a + 1200 = 0$$

$$(a - 20)(a - 60) = 0$$

よって $a = 20$ cm, 60 cm

- (2) 倍率が 3.0 倍であるから $\left| \frac{b}{a} \right| = 3.0$

また虚像であるから $b < 0$ である。したがって、 $b = -3.0a$ [cm], $f = 15$ cm を写像公式に代入して

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{3.0a} = \frac{1}{15}$$

$$\frac{2}{3a} = \frac{1}{15}$$

よって $a = 10$ cm

- (3) 焦点距離が 30 cm の凹レンズであるから、 $f = -30$ cm であり、倍率が 0.50 倍である

から $\left| \frac{b}{a} \right| = 0.50$

また凹レンズであるから $b < 0$ で $b = -0.50a$ [cm]

したがって

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{0.50a} = -\frac{1}{30}$$

$$-\frac{1}{a} = -\frac{1}{30}$$

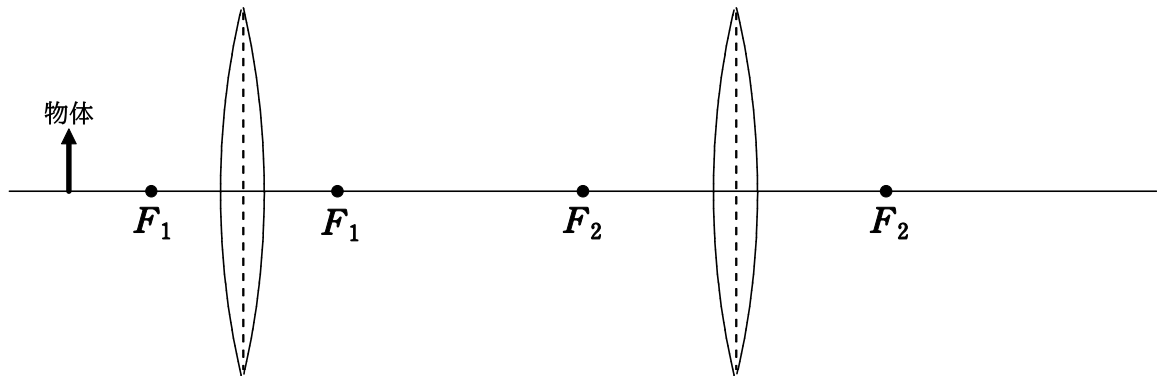
よって $a = 30$ cm

F 組み合わせレンズ

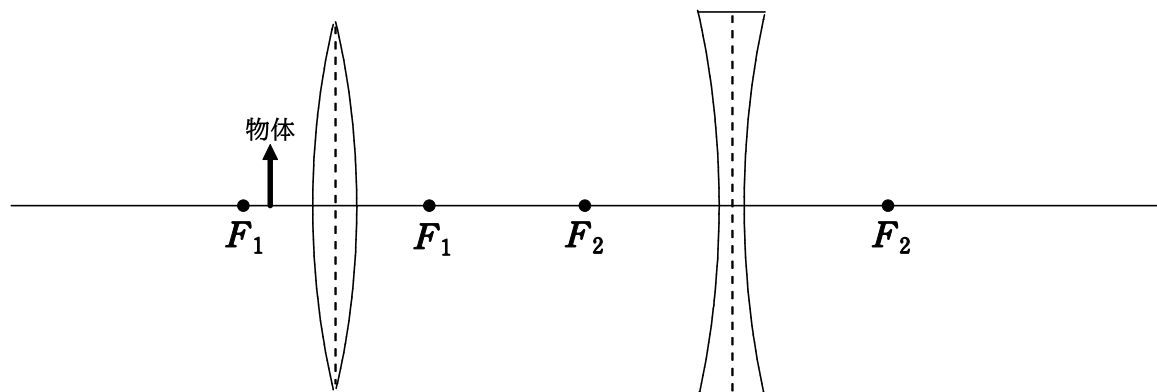
<作図の手順>

- ①まず手前のレンズで像を作る。
- ②その像を物体と見立てて後方のレンズで像を作る。

I 凸レンズと凸レンズ

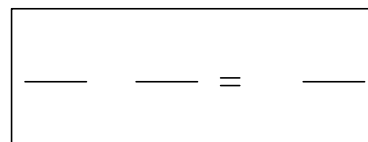
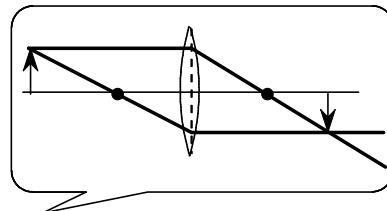
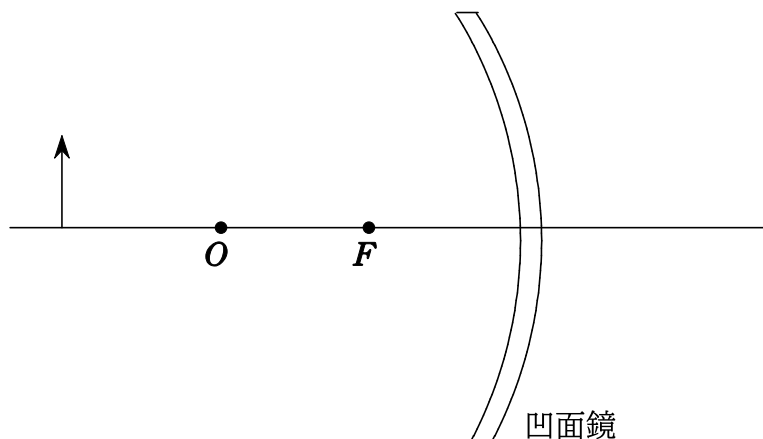


II 凸レンズと凹レンズ



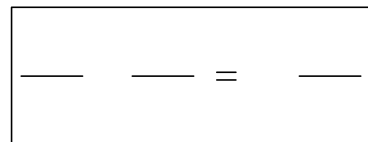
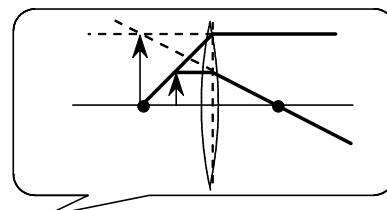
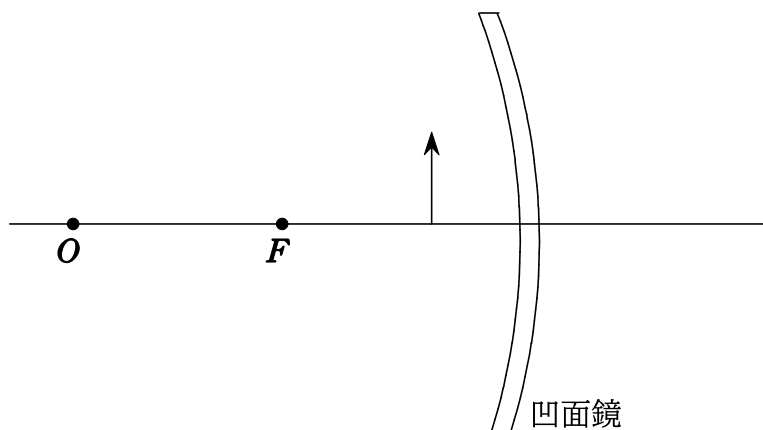
G 平面鏡と球面鏡 H 球面鏡による像

- ・凹面鏡による実像 (→光が集まるので凸レンズの実像と同じ)



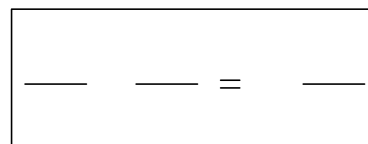
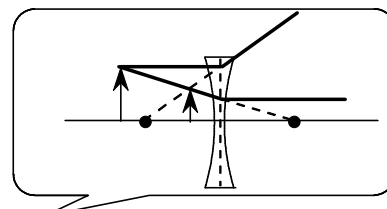
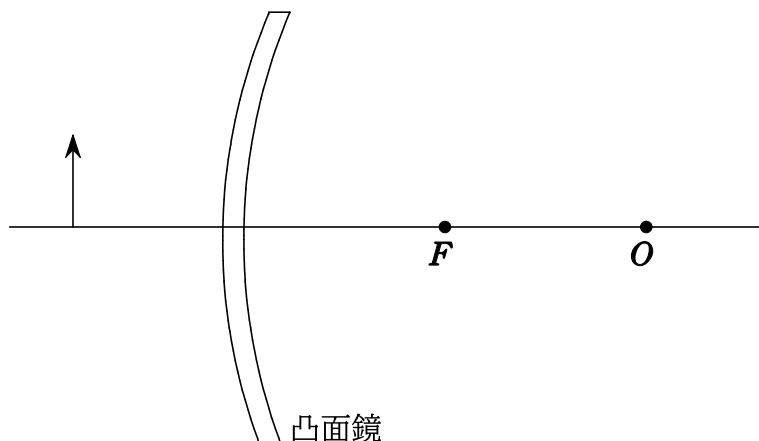
$$m = \left| \frac{b}{a} \right|$$

- ・凹面鏡による虚像 (→光が集まるので凸レンズの虚像と同じ)



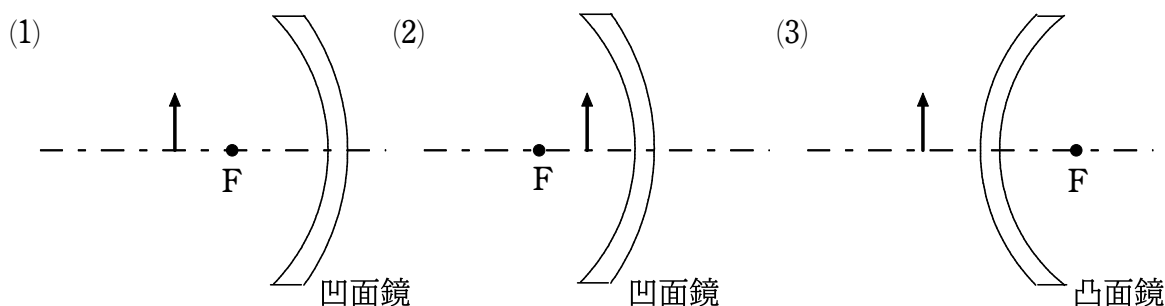
$$m = \left| \frac{b}{a} \right|$$

- ・凸面鏡による虚像 (→光が発散するので凹レンズの虚像と同じ)



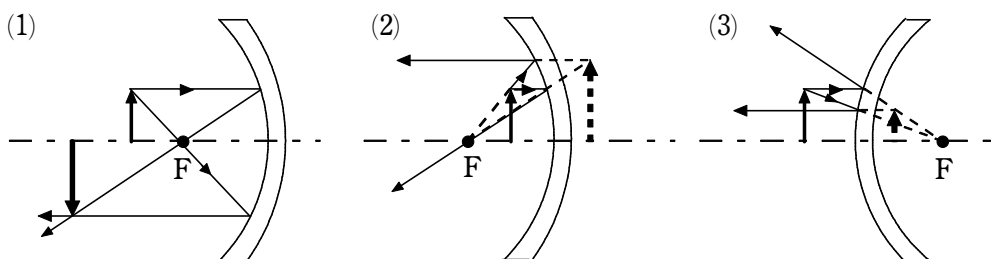
$$m = \left| \frac{b}{a} \right|$$

- 1 次の(1)～(3)のように、矢印で表した物体と、Fを焦点とする凹面鏡または凸面鏡があるとき、それぞれの球面鏡によって生じる物体の像を作図せよ。



凹面鏡：主軸に平行な光は、反射後焦点を通り、焦点を通る光は、反射後主軸に平行に進む。

凸面鏡：主軸に平行な光は、反射後焦点から出たように進み、焦点へ向かう光は、反射後主軸に平行に進む。



- 2 (1) 焦点距離が 30 cm の凹面鏡の前方 20 cm の位置に大きさ 2.5 cm の物体を置いたとき、凹面鏡がつくる像の位置、大きさ、種類を求めよ。
 (2) 焦点距離が 30 cm の凸面鏡の前方 20 cm の位置に大きさ 2.5 cm の物体を置いたとき、凸面鏡がつくる像の位置、大きさ、種類を求めよ。

- (1) 凹面鏡であるから、写像公式で $f = 30 \text{ cm}$, $a = 20 \text{ cm}$ とおくと

$$\frac{1}{20} + \frac{1}{b} = \frac{1}{30}$$

よって $b = -60 \text{ cm}$

$$\text{倍率 } m = \left| \frac{b}{a} \right| = \left| \frac{-60}{20} \right| = 3.0 \text{ 倍}$$

$b < 0$ であるから、凹面鏡の後方に正立虚像ができる。凹面鏡の後方 60 cm の所に大きさ 7.5 cm の正立虚像ができる。

- (2) 凸面鏡であるから、写像公式で $f = -30 \text{ cm}$, $a = 20 \text{ cm}$ とおくと

$$\frac{1}{20} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{30}$$

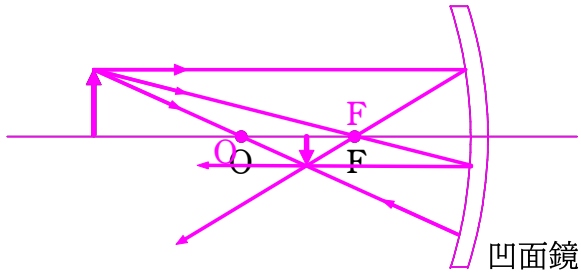
よって $b = -12 \text{ cm}$

$$\text{倍率 } m = \left| \frac{b}{a} \right| = \left| \frac{-12}{20} \right| = 0.60 \text{ 倍}$$

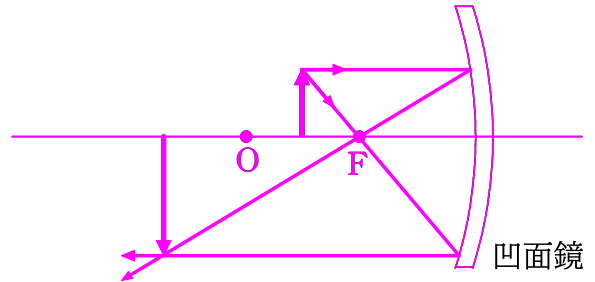
$b < 0$ であるから、凸面鏡の後方に正立虚像ができる。凸面鏡の後方 12 cm の所に大きさ 1.5 cm の正立虚像ができる。

- 3 次の(1)~(4)のように、矢印で表した物体と、Fを焦点、Oを球面の中心とする球面鏡がある。それぞれの球面鏡によって生じる物体の像を作図して、像の種類(実像または虚像)を答えよ。

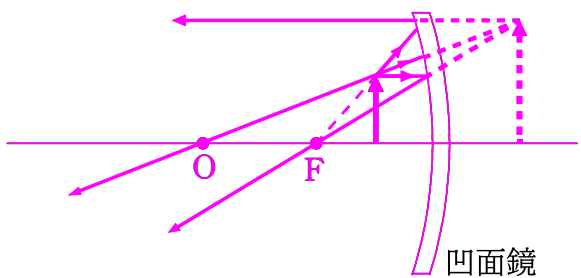
(1) 実像



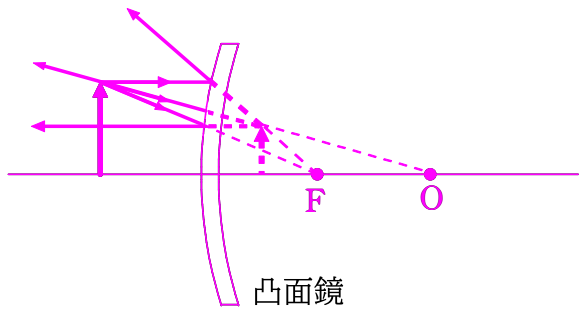
(2) 実像



(3) 虚像



(4) 虚像



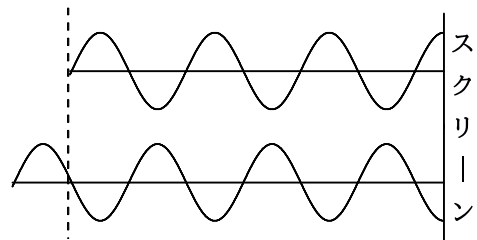
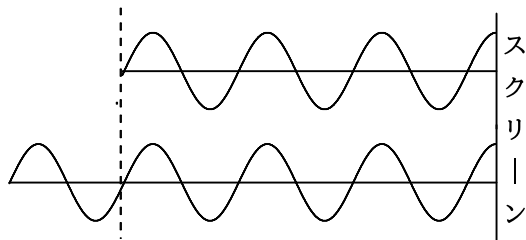
3 光の干渉

A ヤングの実験



明線条件

暗線条件



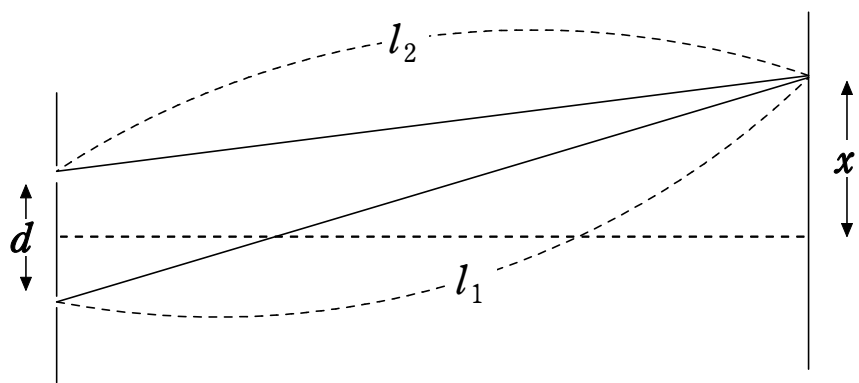
明線条件

暗線条件

$$(m = 0, 1, 2 \dots)$$

まずは「ヤングの実験」が全ての基本です。干渉がわからない人は、とりあえずこれをマスターしましょう。すると、5種類ある干渉はだいたい同じだということに気づくので、楽になると思います。

a ヤングの実験の経路差 $|l_1 - l_2|$ の求め方



それぞれの三角形で三平方の定理より、 l_1 と l_2 を求めると

$l_1 = \qquad \qquad \qquad = \qquad \qquad \qquad =$

$l_2 = \qquad \qquad \qquad = \qquad \qquad \qquad =$

ここで $a \ll 1$ のとき近似式 $(1+a)^n \doteq 1+na$ を使うと、

$l_1 = \qquad \qquad \qquad = \qquad \qquad \qquad =$

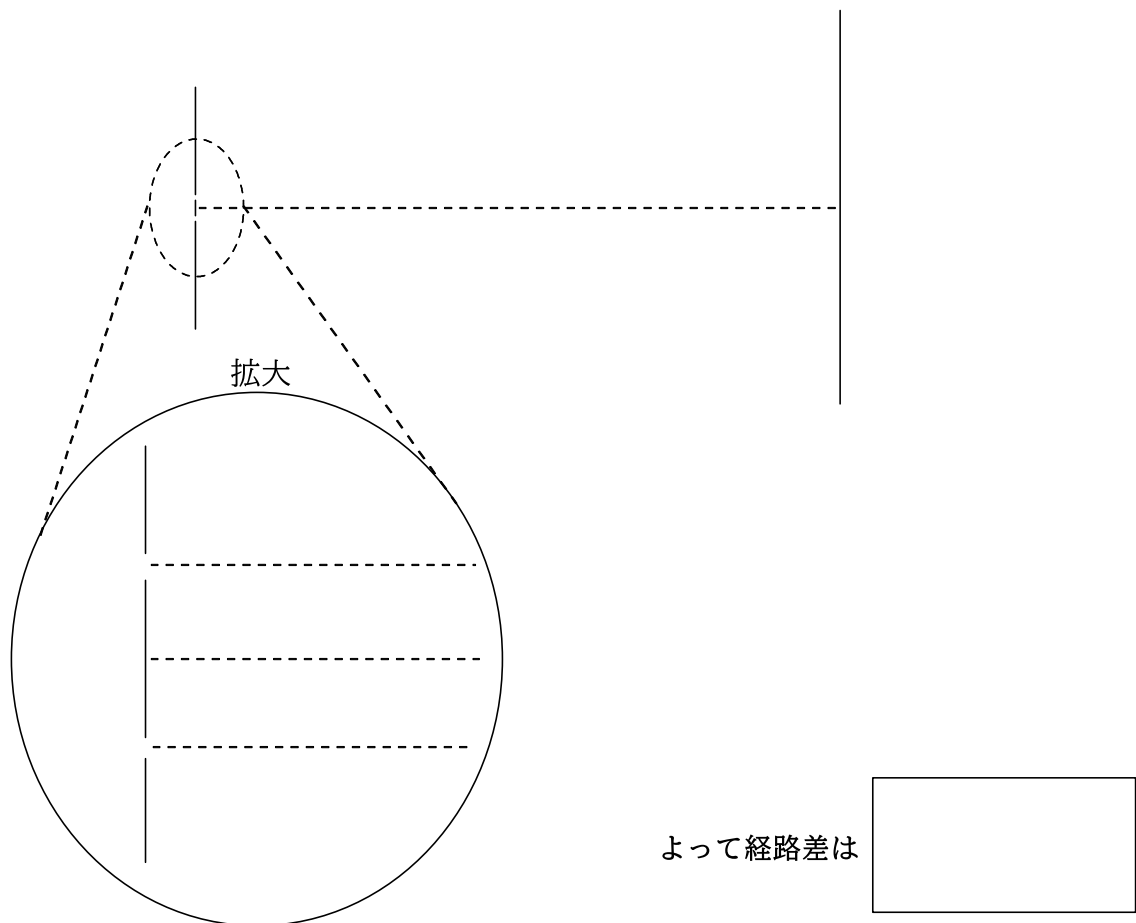
$l_2 = \qquad \qquad \qquad = \qquad \qquad \qquad =$

すると経路差は、

$l_1 - l_2 =$

よって経路差は

b ヤングの実験の経路差 $|l_1 - l_2|$ の求め方



以上より、ヤングの実験の明線・暗線条件をもっと具体的に書くと

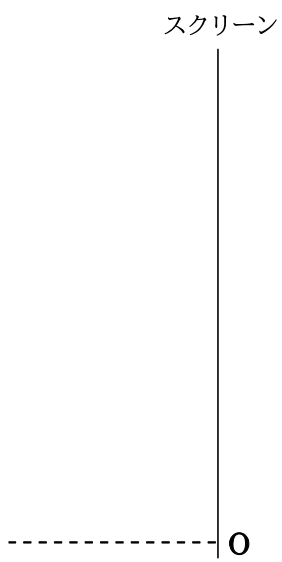
明線条件

$$=$$

暗線条件

$$=$$

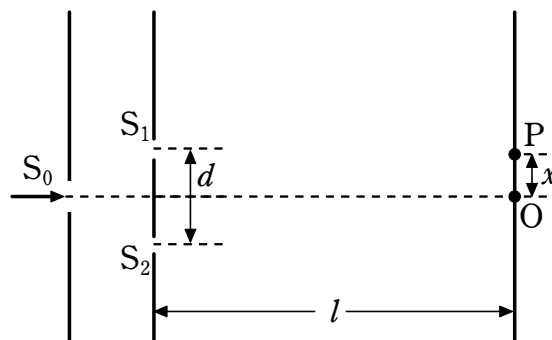
明線間隔



明線(暗線)間隔

$$=$$

- 1 図のように、スリット S_0 と複スリット S_1, S_2 に波長 λ [m] の単色光を通すと、スクリーン上に明暗の縞ができた。 S_1 と S_2 は間隔が d [m] で、 S_0 から等距離にある。複スリットとスクリーンの距離を l [m]、スクリーンの中央 O から距離 x [m] の位置にある点を P とすると、 S_1P と S_2P の距離の差は $\frac{d}{l}x$ とみなせる。



- (1) 隣りあう暗線の間隔 Δx [m] を求めよ。
- (2) l を大きくすると、暗線の間隔は小さくなるか、大きくなるか。
- (3) d を小さくすると、暗線の間隔は小さくなるか、大きくなるか。

解答 (1) 点 P で暗線となる条件式は、 m ($m=0, 1, 2, \dots$) を用いると

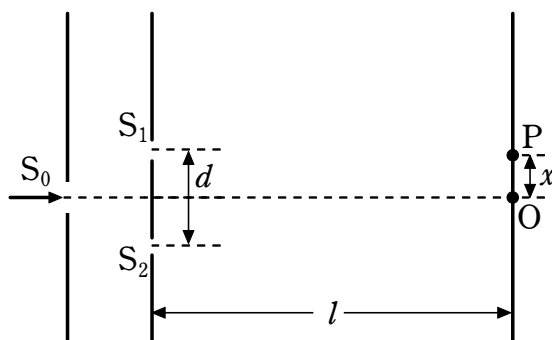
$$\frac{d}{l}x = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{よって} \quad x = \left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{l\lambda}{d} \quad \dots\dots \textcircled{1}$$

点 P のすぐ外側の暗線の位置 x' [m] は、 $\textcircled{1}$ 式の m を $m+1$ に置きかえた式で表されるから

$$\Delta x = x' - x = \left(m + 1 + \frac{1}{2}\right)\frac{l\lambda}{d} - \left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{l\lambda}{d} = \frac{l\lambda}{d} \text{ [m]}$$

- (2) (1) より、 Δx は l に比例する。したがって 大きくなる。
- (3) (1) より、 Δx は d に反比例する。したがって 大きくなる。

- 2 図のように、スリット S_0 と複スリット S_1, S_2 に波長 λ [m] の単色光を通すと、スクリーン上に明暗の縞ができた。 S_1 と S_2 は間隔が d [m] で、 S_0 から等距離にある。複スリットとスクリーンの距離を l [m]、スクリーンの中央 O から距離 x [m] の位置にある点を P とすると、 S_1P と S_2P の距離の差は $\frac{d}{l}x$ とみなせる。



- (1) 波長 6.9×10^{-7} m と 4.6×10^{-7} m の単色光を用いたときの暗線の間隔をそれぞれ $\Delta x_1, \Delta x_2$ [m] とすると、 Δx_1 は Δx_2 の何倍か。
- (2) 複スリットとスクリーンの間を屈折率 n の液体で満たしたとき、暗線の間隔は何倍になるか。

- (1) 暗線の間隔 Δx は $\Delta x = \frac{l\lambda}{d}$ であるから

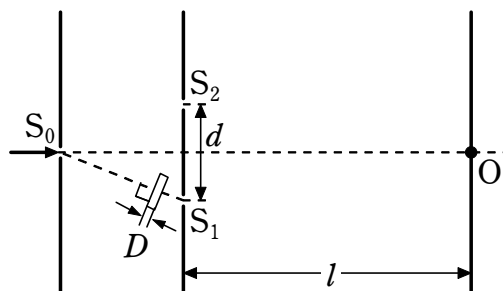
$$\Delta x_1 = \frac{l \times (6.9 \times 10^{-7})}{d} \quad \Delta x_2 = \frac{l \times (4.6 \times 10^{-7})}{d} \quad \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} = \frac{6.9 \times 10^{-7}}{4.6 \times 10^{-7}} = 1.5 \quad \text{よって} \quad 1.5 \text{ 倍}$$

- (2) 屈折率 n の液体中での光の波長を λ' とすると、暗線の間隔 $\Delta x'$ は $\Delta x' = \frac{l\lambda'}{d}$ となる。

$$\text{また、屈折の法則より} \quad \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{n}{1.0} \quad \text{したがって} \quad \lambda' = \frac{1}{n}\lambda$$

$$\Delta x' = \frac{l \left(\frac{1}{n}\lambda \right)}{d} = \frac{1}{n} \left(\frac{l\lambda}{d} \right) = \frac{1}{n} \cdot \Delta x \quad \text{よって} \quad \frac{1}{n} \text{ 倍}$$

- 3 単色光をスリット S_0 と複スリット S_1, S_2 に通すと、後方のスクリーン上に明暗の縞ができ、スクリーン中央の点 O で最も明るかった。 S_1 と S_2 は間隔が d [m] で、 S_0 から等距離にある。複スリットとスクリーンの距離を l [m] とする。



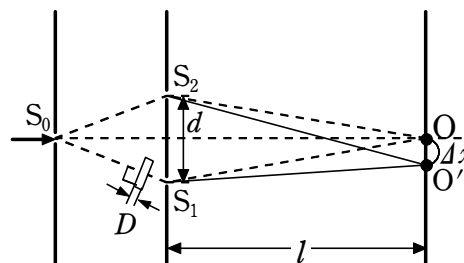
- (1) 図のように、スリット S_1 の手前に、屈折率 n ($n > 1$)、厚さ D [m] の薄い透明板を S_0S_1 に垂直に置いたとき、 S_0 から回折して、 S_1 に達する光と、 S_2 に達する光の光路差 Δs [m] を求めよ。
- (2) 初め、スクリーン上の点 O にあった明線は、透明板を置いた後、図の上向きに移動するか、下向きに移動するか。
- (3) (2) の移動距離 Δx [m] を求めよ。ただし、点 O から x [m] 離れたスクリーン上の点を P とすると、 S_1P と S_2P の距離の差は $\frac{d}{l}x$ と表される。

- (1) $S_0S_1 = S_0S_2 = s$ とする。

$$\begin{aligned} S_0S_1 \text{ の光路長} &= (s - D) + nD \\ &= s + (n - 1)D \end{aligned}$$

$$S_0S_2 \text{ の光路長} = s$$

$$\begin{aligned} \text{光路差 } \Delta s &= \{s + (n - 1)D\} - s \\ &= (n - 1)D \text{ [m]} \end{aligned}$$



- (2) 透明板がないとき、光が $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow O$ と進む光と $S_0 \rightarrow S_2 \rightarrow O$ と進む光の光路差はない。次に、透明板を置いたとき、光路差がなく両経路を通った光が到達するスクリーン上の点を O' とする。透明板を置くと、 S_0S_1 の光路長 $>$ S_0S_2 の光路長となるので、

$$S_1O' \text{ の光路長} < S_2O' \text{ の光路長}$$

となる。すなわち、下向きに移動する。

- (3) $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow O'$ と進む光と $S_0 \rightarrow S_2 \rightarrow O'$ と進む光の光路長が等しくなるから

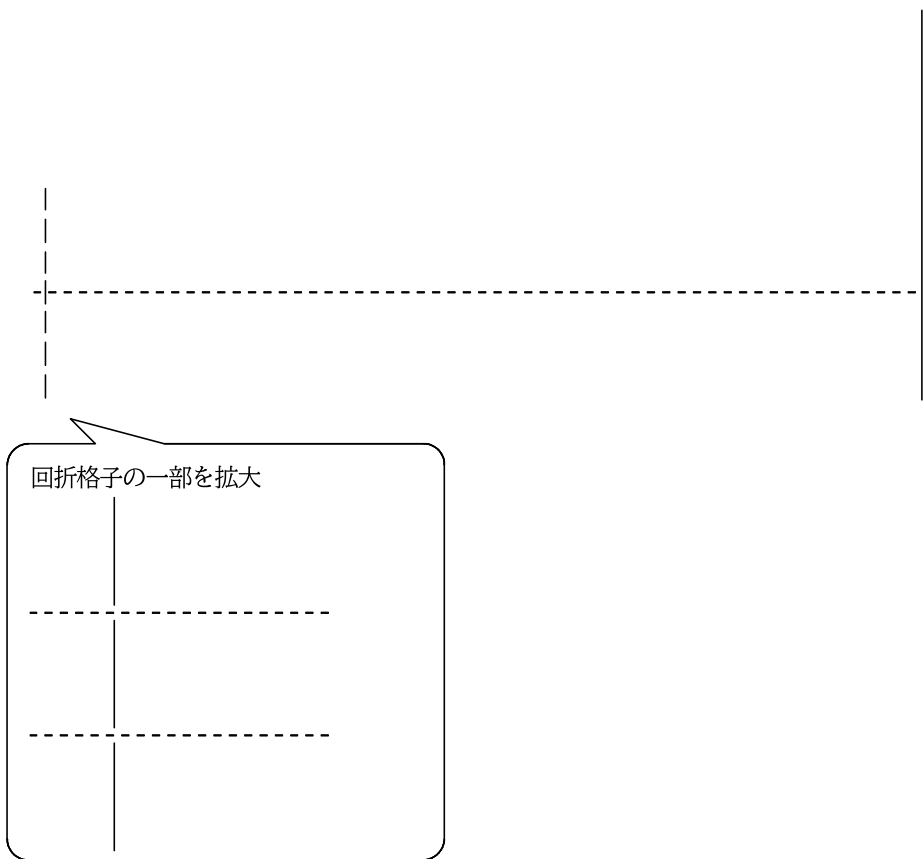
$$s + (n - 1)D + S_1O' = s + S_2O'$$

$$(n - 1)D = S_2O' - S_1O'$$

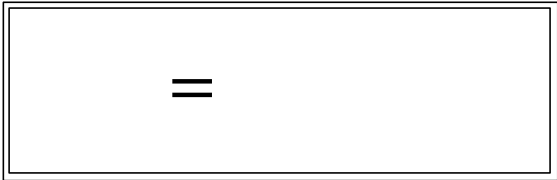
$$(n - 1)D = \frac{d\Delta x}{l}$$

$$\text{よって } \Delta x = \frac{(n - 1)Dl}{d} \text{ [m]}$$

B 回折格子



明線条件



明線間隔は、

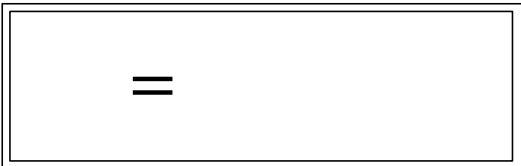
暗線条件



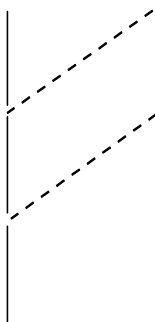
白色光を入ると

スクリーンには

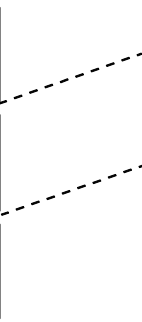
明線(暗線)間隔



赤の光



紫の光



- 1 1 cm 当たり 350 本の筋が入った回折格子に、単色光を垂直に入射すると、回折格子の後方 2.0 m の位置で入射方向と垂直に張ったスクリーンの中央付近に 3.5 cm 間隔で明線が並んだ。この単色光の波長は何 m か。

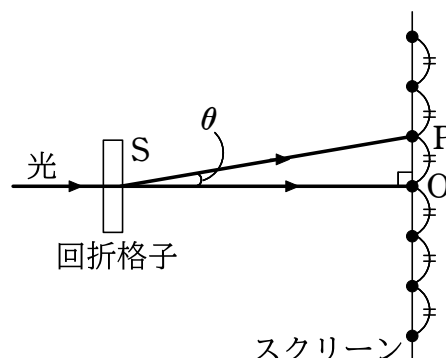
回折格子の格子定数 d は $d = \frac{1.0 \times 10^{-2}}{350} \text{ m}$

図のように、入射光線の延長線上のスクリーンの点を O、その隣の明線を P、 $\angle PSO = \theta$ とする。

スクリーン上の明線は $d \sin \theta = m \lambda$

($m = 0, 1, 2, \dots$) の条件を満たす。

$$\begin{aligned} \lambda &= d \sin \theta = \left(\frac{1.0 \times 10^{-2}}{350} \right) \times \frac{3.5 \times 10^{-2}}{2.0} \\ &= 5.0 \times 10^{-7} \text{ m} \end{aligned}$$



- 2 次の各場合、回折格子による明線の間隔は広がるか、狭くなるか。

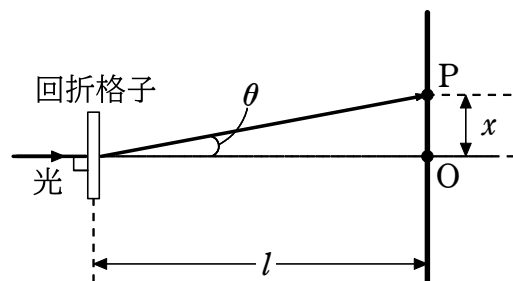
- (1) 波長の長い光に変える。 (2) 格子定数の大きな回折格子に変える。

格子定数が d の回折格子に垂直に入射した波長 λ の光が、入射方向から角 θ の方向で強めあう条件

は $d \sin \theta = m \lambda$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) であるから $\sin \theta = \frac{m \lambda}{d}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$)

- (1) d が一定のとき、同じ m に対する $\sin \theta$ の値は λ に比例する。すなわち、 θ の値は λ が増すと大きくなるので、明線ができる間隔は広がる。
- (2) ある λ のとき、同じ m に対する $\sin \theta$ の値は d に反比例する。すなわち、 θ の値は d が増すと小さくなるので、明線ができる間隔は狭くなる。

- 3 格子定数 d [m] の回折格子に、波長 λ [m] の緑色の光を垂直に当てると、後方 l [m] の位置にあるスクリーンに明暗の縞ができた。スクリーンの中央 O から、距離 x [m] 離れたスクリーン上の点 P に向かう光と入射光のなす角を θ とする。ただし、 θ はきわめて小さく、 $\sin \theta \doteq \tan \theta$ が成りたつとする。



- (1) 点 P に明線ができるための条件式を、 d, λ, l, x, m ($m = 0, 1, 2, \dots$) を用いて表せ。
- (2) 隣りあう明線の間隔 Δx [m] を、 d, λ, l を用いて表せ。
- (3) (a) 緑色の光を、赤色の光にかえると、明線の間隔は小さくなるか、大きくなるか。
- (b) 単位長さ当たりの筋の本数が 2 倍の回折格子にかえると、明線の間隔は何倍になるか。

- (1) 点 P に明線ができる条件は、経路差 $d \sin \theta$ が波長 λ の整数倍となるときであるから $d \sin \theta = m \lambda$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) ①

θ はきわめて小さく、 $\sin \theta \doteq \tan \theta$ が成りたち、図から $\tan \theta = \frac{x}{l}$ であるから

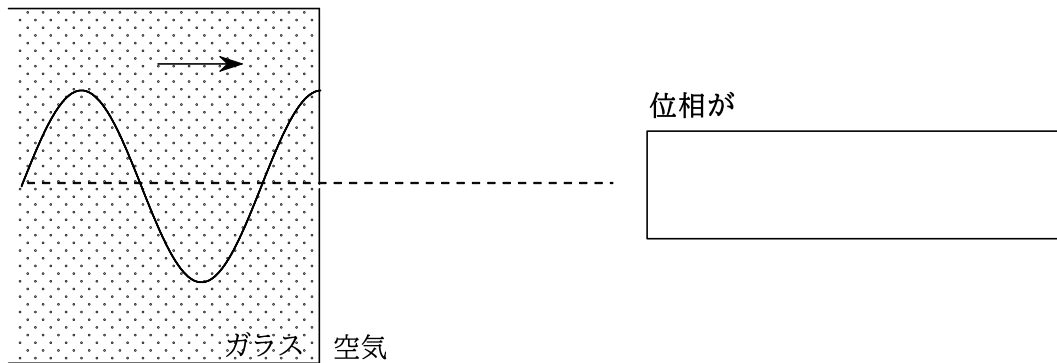
$$d \sin \theta \doteq d \frac{x}{l} \quad \text{これを ① 式に代入して} \quad d \frac{x}{l} = m \lambda$$

- (2) (1) の結果より $x = m \frac{l \lambda}{d}$ よって $\Delta x = x' - x = \frac{l \lambda}{d}$ [m]

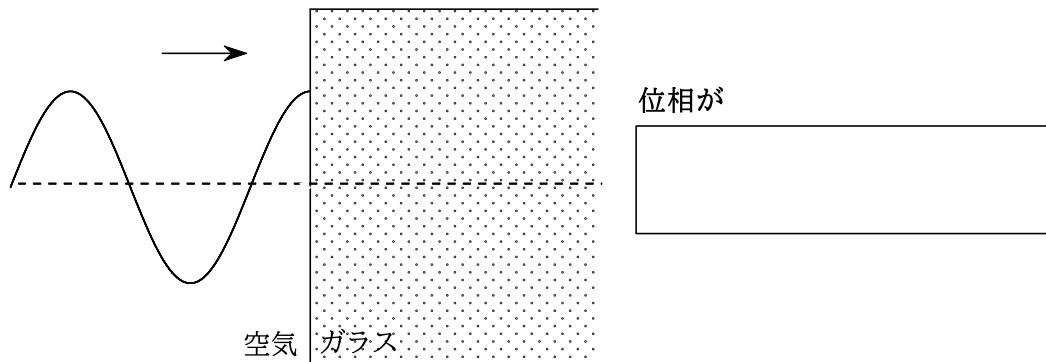
- (3) (a) 明線の間隔は大きくなる。 (b) 明線の間隔は 2 倍になる。

ここから裏ステージ！！(残り3タイプの干渉は、条件式が反転します)

自由端反射 屈折率の大きいほうから小さいほうに光が進むとき

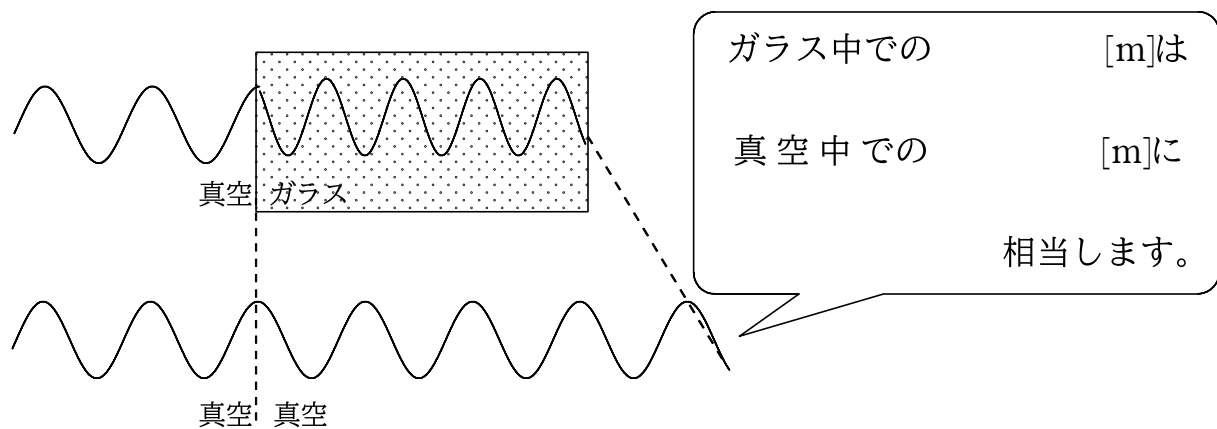


固定端反射 屈折率の小さいほうから大きいほうに光が進むとき



光路長・・・ ガラス中の長さを真空中の長さに置き換えたもの

l [m]のガラスを光が通過するとき、

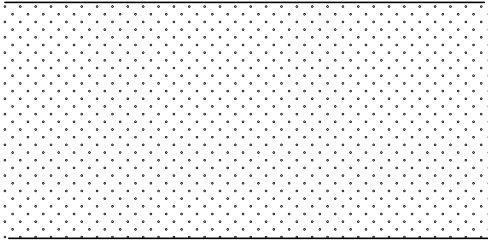


このように、もし真空中だったと置き換えた長さのことを光路長と言います。

光路長 =

C 薄膜による光の干渉

<垂直Ver>



経路差は だけど、

空気中の波長が何個入るかを考えているので、光路差を考えないといけない。

光路差は媒質中の長さを n 倍した長さに相当するので、

光路差は になる。

また、固定端反射が途中で1回起こるので、あえて光路差で半波長ずらすと逆に強め合う。

よって条件式は今までの逆になる！！

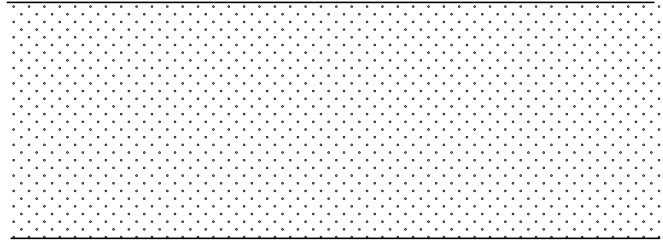
明線条件

$$2nd = m\lambda$$

暗線条件

$$2nd = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

<斜めVer>



経路差は だけど、

光路差は になる。

明線条件

$$2nd \cos \theta = m\lambda$$

暗線条件

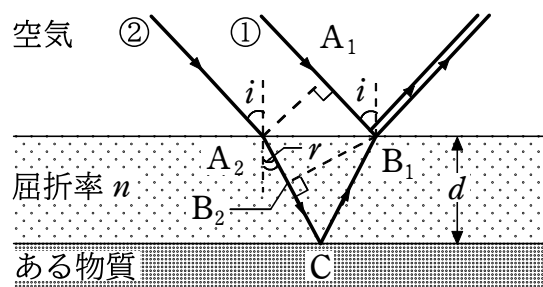
$$2nd \cos \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

- 1 真空中を距離 d [m] 進んだ光と、屈折率 n の媒質中を距離 d [m] 進んだ光の光路差を求めよ。

「光路長 = 屈折率 × 距離」より、光路差は

$$nd - d = (n - 1)d \text{ [m]}$$

- 2 図のように、屈折率 n ($n > 1$)、厚さ d [m] の薄膜が、ある物質の表面をおおっており、波長 λ [m] の単色光が真空中から薄膜に入射角 i で入射した。このとき、薄膜の上面で反射する光 ① と、薄膜の上面において屈折角 r で屈折し、薄膜の下面で反射する光 ② の干渉を考える。



これらの光は、図中の点 A_1 、 A_2 において同位相であった。ただし、ある物質の屈折率は n より大きいものとする。

- 光 ① は図中の点 B_1 での反射によって、位相が π 変化するか、それとも変化しないか。また、光 ② は図中の点 C での反射によって、位相が π 変化するか、それとも変化しないか。
- 点 B_1 で反射した光 ① と、点 A_2 に入射して、点 C で反射して点 B_1 を通過した光 ② の光路差を、 n 、 d 、 r を用いて表せ。
- 光 ① と光 ② が弱めあうための条件式を、 n 、 d 、 r 、 λ 、 m ($m = 0, 1, 2, \dots$) を用いて表せ。
- 単色光が垂直 ($i = 0$) に入射するとき、光 ① と光 ② が弱めあうための最小の膜の厚さ d_0 [m] を求めよ。

- (1) 空気より薄膜のほうが屈折率が大きいため、光 ① は点 B_1 での反射の際、位相が π 変化する。

また、薄膜よりある物質のほうが屈折率が大きいため、光 ② は点 C での反射の際、位相が π 変化する。

- (2) 光 ① と光 ② の光路差は図より

$$n \times (B_2D) = n \times 2d \cos r = 2nd \cos r$$

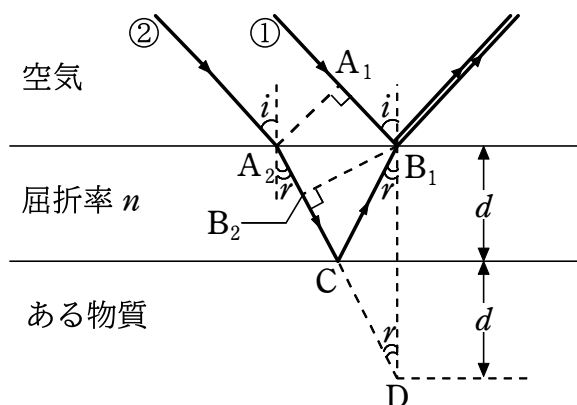
- (3) (1) より、反射による光 ① と光 ② の間の

位相のずれは生じない。よって (2) の結果と干渉の条件式から

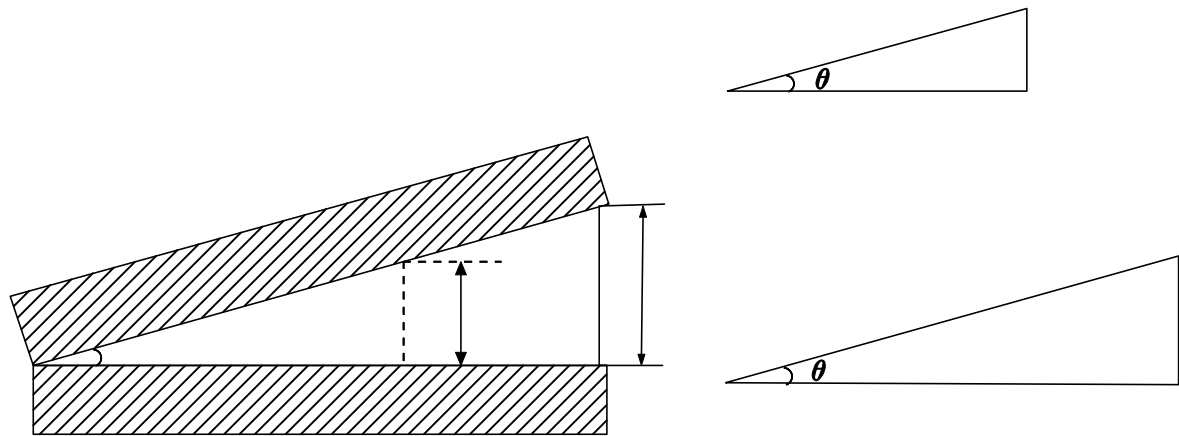
$$2nd \cos r = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

- (4) $i = 0$ のとき $r = 0$ となる。また、 $m = 0$ のとき、 d は最小値 d_0 となるから

$$2nd_0 \cos 0 = \left(0 + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad \text{よって} \quad d_0 = \frac{\lambda}{4n} \text{ [m]}$$



D くさび形空気層における光の干渉



明線条件

$$=$$

or

$$=$$

暗線条件

$$=$$

or

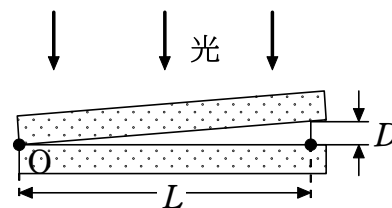
$$=$$

暗線間隔は、

明線(暗線)間隔

$$=$$

- 1 2枚の平面ガラスを重ねて、ガラスが接している点 O からの距離 L [m] の位置に厚さ D [m] の薄い紙をはさむ。真上から波長 λ [m] の光を当てて上から見ると、明暗の縞が見えた。このとき、縞の間隔 Δx [m] を求めよ。



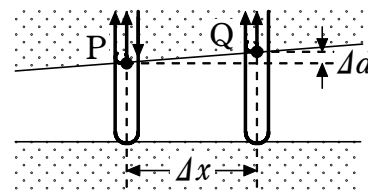
【指針】 隣りあう明線の位置で空気層の厚さの差が Δd [m] のとき、経路差の違いは $2\Delta d$ [m] となる。

【解答】 点 P, Q を隣りあう明線の位置とする。

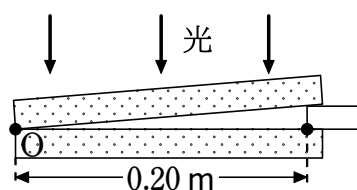
これらの位置での空気層の厚さの差を Δd [m] とすると、2点間の経路差の違いは $2\Delta d$ であり、これが1波長分に等しいので $2\Delta d = \lambda$ …… ①

また、三角形の相似の関係より $L : D = \Delta x : \Delta d$ …… ②

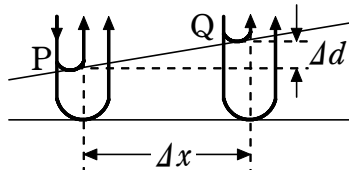
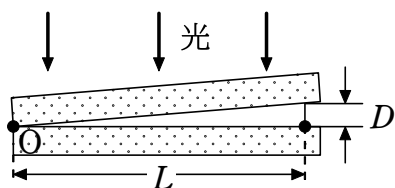
$$\text{①, ② 式より } \Delta x = \frac{L\Delta d}{D} = \frac{L\lambda}{2D} \text{ [m]}$$



- 2 2枚の平面ガラスを重ねて、ガラスが接している点 O からの距離 0.20 m の位置に薄い紙をはさむ。真上から波長 6.5×10^{-7} m の光を当てて上から見ると、明暗の縞が見えた。このとき、縞の間隔が 1.3 mm であったとすると、紙の厚さは何 m か。



紙の厚さを D [m]、光の波長を $\lambda = 6.5 \times 10^{-7}$ m、縞の間隔を $\Delta x = 1.3 \times 10^{-3}$ m、点 O から紙までの距離を $L = 0.20$ m とする。



点 P, Q を隣りあう明線の位置とする。これらの位置での空気層の厚さの差を Δd [m] とすると、2点間の経路差の違いは $2\Delta d$ であり、これが1波長分に等しいので

$$2\Delta d = \lambda \quad \dots\dots \text{①}$$

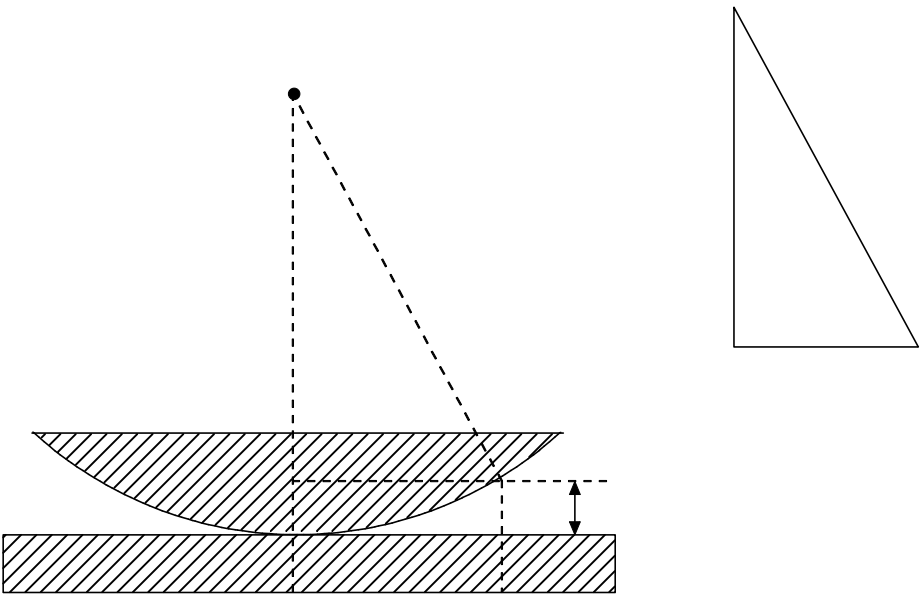
また、三角形の相似の関係より

$$L : D = \Delta x : \Delta d \quad \dots\dots \text{②}$$

①, ② 式より

$$D = \frac{L\Delta d}{\Delta x} = \frac{L\lambda}{2\Delta x} = \frac{0.20 \times (6.5 \times 10^{-7})}{2 \times (1.3 \times 10^{-3})} = 5.0 \times 10^{-5} \text{ m}$$

E ニュートンリング



明環条件

=

or

=

暗環条件

=

or

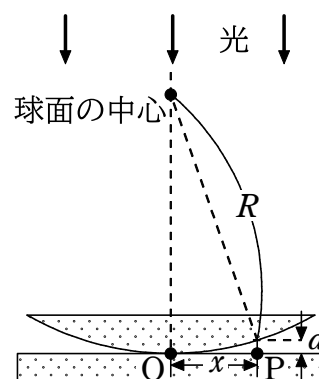
=

暗環の出現する半径は、

暗環のできる半径

=

- 1 図のように、球面半径 R [m] の平凸レンズを平面ガラスの上にのせ、上から平面に垂直に波長 λ [m] の赤い単色光を当てた。このときの反射光を上から観察すると、レンズとガラス板との接点 O を中心とする同心円状の明暗の縞模様が見えた。点 O から x [m] 離れた点 P での空気層の厚さを d [m] とする。



- (1) 点 P の位置で暗くなるための条件式を、 d , λ , m ($m=0, 1, 2, \dots$) を用いて表せ。
- (2) 点 O 付近では明るくなるか、暗くなるか。
- (3) 点 P の位置で暗くなるとき、 x を R , λ , m を用いて表せ。ただし、 $2d = \frac{x^2}{R}$ が成り立つものとする。
- (4) 青い光を用いて同じ実験を行ったとき、内側から数えて m 番目の暗環の半径は、赤い光の場合と比べて大きくなるか、小さくなるか。
- (5) レンズとガラスの間を屈折率 n ($n > 1$) の液体で満たしたとき、内側から数えて m 番目の暗環の半径は、液体がない場合の半径の何倍になるか。ただし、 n はレンズとガラスの屈折率より小さいものとする。

- (1) 光線 ① は反射の際に位相は変化しないが、光線 ② は位相が π ずれる。また、両光線の経路差は $2d$ であるから、点 P の位置で暗くなるための条件式は $2d = m\lambda$

- (2) 点 O 付近は $d=0$ であり、(1) の暗くなるための条件式で $m=0$ の場合であるので、暗くなる。

- (3) $\frac{x^2}{R} = m\lambda$ よって $x = \sqrt{m\lambda R}$ [m]

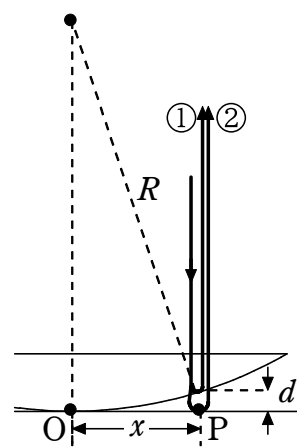
- (4) 暗環の半径 $x = \sqrt{m\lambda R}$ で、青い光のほうが赤い光より波長 λ が短いので、半径は小さくなる。

- (5) 屈折率 n がレンズとガラスの屈折率より小さいので、反射光 ① と ② の位相のずれ方は変わらない。液体中での光の波長 λ' は

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{n}{1} \quad \text{よって} \quad \lambda' = \frac{1}{n}\lambda$$

$$\begin{aligned} \text{したがって} \quad \frac{\sqrt{m\lambda'R}}{\sqrt{m\lambda R}} &= \frac{\sqrt{m \cdot \frac{1}{n}\lambda R}}{\sqrt{m\lambda R}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{n}} \end{aligned}$$

$$\text{よって} \quad \frac{1}{\sqrt{n}} \text{ 倍}$$





「不屈不撓の物理」