36. 目的 :光速の測定について, 図, 文よりしっかりと考える力をつける。

光の速さはあまりにも速すぎるので, その測定は非常に困難であった。しかし, 1849 年フィゾーは, 図 1 で示すような装置を用いて, 地上ではじめて光の速さを測定することに成功した。

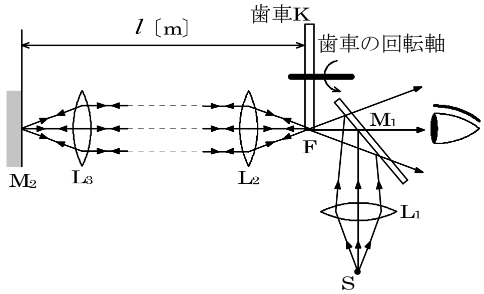


図1　フィゾーによる光の速さの測定

この図で, 光源 S から出た光は, 凸レンズ L_1 を通り, 薄くメッキされた半透明のガラス板 M_1 に当たって反射した後, 回転する歯車 K のふち F 点に焦点を結ぶようにする。次に, 図 2a のように F 点で歯車 K の歯と歯の間のすきまを通りぬけた光は, 図 1 のように, 凸レンズ L_2 で平行光線となり, 遠距離にある凸レンズ L_3 を通ってから, 鏡 M_2 で反射して同じ経路を逆進した後, 再び F 点に焦点を結ぶようにする。このとき, 鏡 M_2 で反射してきた光が, 歯車 K の歯と歯の間のすきまを通りぬけるなら, 図 1 の右方で観測した場合, 視野は明るくなるが, たとえば図 2b のように歯車 K の歯にさえぎられて通過できないなら, 視野は暗くなる。なお, 歯車の歯と歯の間のすきまの長さと 1 個の歯の円周にそった長さとは等しいとする。

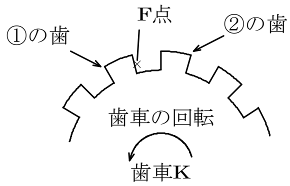


図2a　F点で光が通過する場合

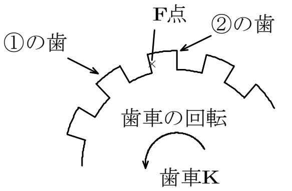


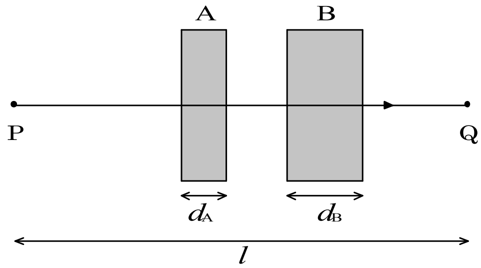
図2b　F点で, M_2による反射光が歯車の歯でさえぎられる場合

いま, 歯車 K の回転数を歯車の回転軸上に描かれている矢印の向きに徐々に増していき, 視野がはじめて最も暗くなったときの歯車の回転数を n〔Hz〕, 歯車 K の歯数を N〔個〕, 大気中での光の速さを c〔m/s〕, 歯車 K と鏡 M_2 との間の距離を l〔m〕とすると, 光が K と M_2 の間を往復する時間[ア]〔s〕と, 歯車の歯が 1 つ分だけ回転するのに要する時間[イ]〔s〕(つまり, 歯車が図 2a の歯の状態から図 2b の歯の状態にまで回転する時間)とが等しい。

フィゾーは, 上で述べた方法で, $l = 8.63\times10^3$m, $N = 720$ 個, $n = 12.6$Hz のとき, はじめて視野が最も暗くなるのを観測した。これらの実験値から, 光の大気中での速さの値は約[ウ]m/s と算出される。

37. 目的:光学距離の意味をよく考える。

図のように, 屈折率がそれぞれ n_A, n_B, 厚さが d_A, d_B の 2 枚の平行平面の透明媒質 A, B が, 真空中に平行に置かれている。これらの媒質に垂直に点 P の位置から単色光をあてたところ, 点 Q の位置を通過した。真空中の



光速をc, 波長をλ, PQ 間の距離をlとし, 媒質 A, B の表面から光の反射はないものとして, 次の各問いに答えなさい。

媒質 A, B がない場合について考えてみよう。

(1)1 波長を波 1 個と数えるとき, PQ 間における波の数を求めなさい。

(2)PQ 間を光が通過する時間を求めなさい。

次に, 媒質 A, B がある場合を考えてみよう。

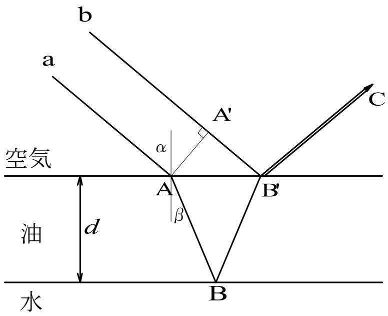
(3)媒質 A 中の波長を求めなさい。

(4)PQ 間における波の数を求めなさい。

(5)PQ 間を光が通過する時間を求めなさい。

(6)以上の結果より, PQ 間の距離は, 真空中ではいくらの距離に相当すると考えられるか求めよ。

38. 目的:薄膜の干渉も波の数の差で考えられる。位相変化も。そして, 公式にたどり着くはず。



図のように, 水に浮かんだ一様な厚さdの油の薄膜に, 同位相の平行光線が入射角αで斜めに入射する。光線 a は点 A で屈折し, 点 B で反射して, 点 B'で再び屈折して観測者の目 C に達する。光線 b は点 B'で反射して直接 C に達する。光線 a と b が強め合う条件を以下の手順で求めてみよう。ただし, 空気, 油, 水の絶対屈折率をそれぞれ 1.0, $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$とし, 点 A での屈折角をβとする。

まず, 光の波長を空気中と油中でそれぞれλ, λ'とすると, λ'はλの[　(1)　]倍である。

光線 a, b が点 B'を通過した後に同位相であれば干渉して強め合う。$\overline{\mathrm{AB}}+\overline{\mathrm{BB'}}$が油中の波長$\lambda'$の$j$倍であり, $\overline{\mathrm{A'B'}}$が空気中の波長λのk倍であるとする。2 つの光線が強め合う条件は, 整数l($l=0, 1, 2, \cdots$)を用いて表すと, $j-k=$[　(2)　]となる。

ここで, 図より$\overline{\mathrm{A'B'}}=\overline{\mathrm{AB'}}\cdot\sin\alpha$, $\overline{\mathrm{AB'}}=2d\cdot\tan\beta$であり, また, 屈折の法則を用いると, $\overline{A'B'}=2d\cdot\tan\beta\cdot\frac{3}{2}\sin\beta=\frac{3d}{\cos\beta}\sin^2\beta$となる。したがって, $k=\frac{\overline{\mathrm{A'B'}}}{\lambda}=\frac{3d}{\lambda\cos\beta}\sin^2\beta$である。

同様にして, d, λ, βを用いてjを表すと, $j=\frac{\overline{\mathrm{AB}}+\overline{\mathrm{BB'}}}{\lambda'}=$[　(3)　]となる。

いま, 黄色($\lambda=5.8\times10^{-7}$m)の平行光線を$\alpha=30$度で入射させると, 反射光が強め合うための最小の膜厚は$d=$[　(4)　]m である。

ただし, $\sqrt{2}=1.41$, $\sqrt{3}=1.73$, $\sqrt{5}=2.24$, $\sqrt{7}=2.65$として計算せよ。

36.(解説) フィゾーは光が一定の距離を往復する時間を，歯車を使って測定し，光速の測定に成功した。光が往復する時間が，歯車の隙間が回転する時間と一致すると，光は M_1 に戻って来ることが出来ない。問題の説明をよく読み，しっかり考えてほしい。

(1)距離 l を往復する時間 t であるので　$t=\dfrac{l}{c}$　…(答)

(2)問題の図で，歯車が回転して F 点が①の歯車の陰から出ると，光は鏡 M_2 に向かって進んでいく。この光の先頭が M_2 で反射して歯車の位置に戻ってきたとき，ちょうど F 点が②の歯車の端の位置になる場合，光は歯車で遮られて視野は暗いままである。したがって求める時間 t は，歯車の隙間が回転する時間と考えられる。歯車が 1 回転する時間は $\dfrac{1}{n}$ である。歯は N 個あり，隙間はさらにその半分なので

$$t=\frac{1}{2nN}\qquad\cdots(答)$$

(3)(1)と(2)の時間が同じなので

$$\frac{2l}{c}=\frac{1}{2nN}$$

$$\therefore\quad c=4nNl=4\times12.6\times720\times8.63\times10^8=3.131\cdots\times10^8\fallingdotseq3.13\times10^8\,\mathrm{m/s}\qquad\cdots(答)$$

37. (解説)真空中での光の速度を c，波長を λ とする。絶対屈折率 n の媒質中では速度と波長はそれぞれ $\dfrac{c}{n}$，$\dfrac{\lambda}{n}$ となる。このため，真空と同じ距離を通過する時間，含まれる波の数はいずれも n 倍になる。これを速度や波長が変わったのではなく，絶対屈折率 n の媒質中では距離が n 倍になったと考えると計算に便利なことが多い。これを光学距離と呼ぶ。この問題を通して，この考え方をしっかりと理解しよう。

(1)波 1 個の長さが λ と考えればよいので，波の個数 m_0 は　$m_0=\dfrac{l}{\lambda}$　…(答)

(2)時間 t_0 は　$t_0=\dfrac{l}{c}$　…(答)

(3)媒質 A 中の波長 λ_A は　$\lambda_A=\dfrac{\lambda}{n_A}$　…(答)

(4)媒質 B 中の波長 λ_B は $\lambda_B=\dfrac{\lambda}{n_B}$ であるので，PQ 間の波の個数 m は

$$m=\frac{l-d_A-d_B}{\lambda}+\frac{d_A}{\lambda_A}+\frac{d_B}{\lambda_B}=\frac{l-d_A-d_B}{\lambda}+\frac{d_A}{\frac{\lambda}{n_A}}+\frac{d_B}{\frac{\lambda}{n_B}}=\frac{l+(n_A-1)d_A+(n_B-1)d_B}{\lambda}$$

…(答)

(5)媒質 A，B 中の速度 v_A，v_B はそれぞれ　$v_A=\dfrac{c}{n_A}$，$v_B=\dfrac{c}{n_B}$ であるので時間 t は

$$t=\frac{l-d_A-d_B}{c}+\frac{d_A}{v_A}+\frac{d_B}{v_B}=\frac{l-d_A-d_B}{c}+\frac{d_A}{\frac{c}{n_A}}+\frac{d_B}{\frac{c}{n_B}}=\frac{l+(n_A-1)d_A+(n_B-1)d_B}{c}$$

…(答)

(6)m，t を m_0，t_0 とをそれぞれ比べると，波長や速度が変わらずに，距離が

$$l+(n_A-1)d_A+(n_B-1)d_B\qquad\cdots(答)$$

に相当する距離を光が通過したと考えればよい。

(つまり媒質 A で距離が $d_A\to n_Ad_A$ に，媒質 B で距離が $d_B\to n_Bd_B$ になったと考えればよい。)

38. (解説)屈折率 n，厚さ d の薄膜に斜めに入射した光の光路差は，屈折角を r として

$$2nd\cos r$$

で，これに反射の際の位相変化を考えて干渉条件を考えるのが定番であるが，この問題のような考え方もある。当然，結論は同じになることに注意しよう。違った結論が出てくるということは，どこかに誤りがあるということである。

(1) $\lambda'=\dfrac{\lambda}{\frac{4}{3}}=\dfrac{3\lambda}{4}$　　ゆえに　$\dfrac{3}{4}$ 倍　…(答)

(2) $\overline{AB}+\overline{BB'}$ 間に波の数が j 個，$\overline{A'B'}$ 間に波の数が k 個ということである。さらに B'での反射では，屈折率の大小関係より位相が π 変化し，これは波 $\dfrac{1}{2}$ 個に相当することも考慮に入れて波の数の差を考えて，それが整数になれば同位相であるので

$$j-\left(k+\frac{1}{2}\right)=l \qquad \therefore\quad j-k=l+\frac{1}{2} \qquad \cdots①\quad\cdots(答)$$

(3) $\overline{AB}=\overline{BB'}=\dfrac{d}{\cos\beta}$　である。油中の波長は $\dfrac{2\lambda}{3}$ であるので

$$j=\frac{\frac{2d}{\cos\beta}}{\frac{2\lambda}{3}}=\frac{3d}{\lambda\cos\beta} \qquad \cdots(答)$$

(4)屈折の法則より

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{3}{2} \qquad \therefore\quad \sin\beta=\frac{2}{3}\sin\alpha$$

$$\cos\beta=\sqrt{1-\sin^2\beta}=\sqrt{1-\left(\frac{2\sin\alpha}{3}\right)^2}=\frac{2\sqrt{2}}{3}$$

①式より

$$j-k=\frac{3d}{\lambda\cos\beta}-\frac{3d}{\lambda\cos\beta}\sin^2\beta=\frac{3d}{\lambda\cos\beta}\left(1-\sin^2\beta\right)=\frac{3d\cos\beta}{\lambda}=l+\frac{1}{2} \qquad \cdots②$$

$$\therefore\quad d=\frac{\lambda}{3\cos\beta}\left(l+\frac{1}{2}\right)$$

d を最小にするのは，$l=0$ である。$\cos\beta$ を代入して

$$d=\frac{5.8\times10^{-7}}{3\times\frac{2\sqrt{2}}{3}}\times\frac{1}{2}=\frac{5.8\times10^{-7}}{4\times1.41}=1.028\cdots\times10^{-7}=1.0\times10^{-7}\,\mathrm{m} \qquad \cdots(答)$$

(注)②式に従って計算すると，強めあって明るく見える条件は

$$3d\cos\beta=\frac{\lambda}{2}\left(2l+1\right)$$

となり，これは，解説に示した薄膜の斜めの干渉の式ともちろん一致する。