物理ﾁｬﾚﾝｼﾞ理論問題解答

第１問

［Ｉ］

問１　点Ｂに置かれた時計で時刻t_{B}にＢから発せられた光を点Ａの時計で観測する時刻t'_{A}は,

$$t'_{\mathrm{A}} = t_{\mathrm{B}} + \frac{l}{c}$$

$$= \left(t_{\mathrm{A}} + \frac{l}{c}\right) + \frac{l}{c} = t_{\mathrm{A}} + \frac{2l}{c}$$

となる。

一方，時刻t_{A}に点Ａから発せられた光が点Ｂに置かれた鏡で反射し，点Ａで反射光を観測する時刻t''_{A}は，光がＡ，Ｂ間を往復する時間$t = \dfrac{2l}{c}$を用いて,

$$t''_{\mathrm{A}} = t_{\mathrm{A}} + t = t_{\mathrm{A}} + \frac{2l}{c} = t'_{\mathrm{A}}$$

［II］

問２　点Ｏで発せられた光が先端Ａに達するまでの間に，Ａは距離vT_{A}だけ前方へ進むから(図ａ),

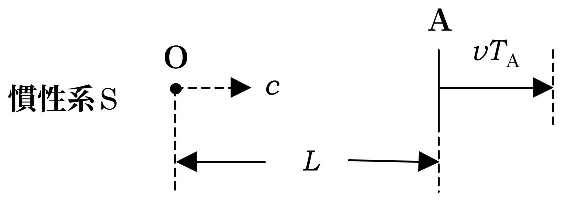
$$cT_{\mathrm{A}} = L + vT_{\mathrm{A}}$$

$$\therefore \quad T_{\mathrm{A}} = \frac{L}{c-v}$$

光が後端Ｂに達するまでの時間T_{B}は,

$$cT_{\mathrm{B}} = L - vT_{\mathrm{B}}$$

$$\therefore \quad T_{\mathrm{B}} = \frac{L}{c+v}$$



図ａ

これより，求める時間差DTは,

$$DT = T_{\mathrm{A}} - T_{\mathrm{B}} = \frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v} = \frac{2Lv}{c^2 - v^2} = \frac{\frac{v}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}}\frac{2L}{c}$$

問３　慣性系Ｓで観測すると，光は前方へcT_{A}だけ進み，後方へcT_{B}だけ進むから，求める距離L_0は,

$$L_0 = \frac{c(T_{\mathrm{A}} + T_{\mathrm{B}})}{2} = \frac{c^2 L}{c^2 - v^2} = \frac{L}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

問４　$L = kL'$とおく。慣性系 S で見ると，長さ$2L'$の電車が速さvで右向きに動いてい

るときの長さが$2L$である。慣性系S′で見ると，長さ$2L_0$の棒が速さvで左向きに動いているときの長さが$2L'$であるから，

$$L' = kL_0$$

が成り立つ。よって，

$$L = kL' = k^2 L_0 \quad \therefore \quad k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

これより，(ⅰ)式を得る。

問５　慣性系S′の時計で，点Oから発せられた光が先端Aあるいは後端Bで反射した光を観測するまでの時間T'は，

$$T' = \frac{2L'}{c}$$

であり，慣性系Sの時計で計った時間Tは，(ⅰ)式を用いて，

$$T = T_{\mathrm{A}} + T_{\mathrm{B}} = \frac{2cL}{c^2 - v^2} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \frac{2L}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{2L'}{c} = \frac{T'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

こうして，(ⅱ)式を得る。

[III]

問６　ここでは，光速cで１時間に進む距離をl_0とする。まず，宇宙船Aに固定された慣性系で考える。宇宙船Aに対して速さ$0.6c$で運動する宇宙船Bの時計の進み方は，Aの時計の進み方の$\sqrt{1 - 0.6^2} = 0.8$倍となるから，BからAに向けて光信号を発する時刻は，Aの時計では，午前９時＋$\dfrac{1}{0.8}$＝９時＋1.25時＝10時15分となる。このとき，BはAから距離$l_1 = 0.6c \times 1.25 = 0.75l_0$だけ離れている。この距離$l_1$を光が伝わるのにかかる時間は，$\dfrac{3}{4}$時間＝45分であるから，AでBからの信号を観測するAの時計の時刻は，10時15分＋45分＝11時，すなわち，<u>午前11時</u>である。

次に，宇宙船Bに固定された慣性系で考える。宇宙船Bから宇宙船Aに向けて光信号を発するとき(Bの時計で午前10時)，AはBから距離$l_2 = 0.6c \times 1 = 0.6l_0$だけ離れている。この距離$l_2$を信号は，Aに対して相対的速さ$c - 0.6c = 0.4c$で進むから，信号がAに達する時刻は，Bの時計で，午前10時＋$\dfrac{0.6l_0}{0.4c}$時＝10時＋1.5時＝11時30分となる。AからBへの返答の信号は，BからAまで信号が伝わったのと同じ距離空間を戻ってくるのであるから，その時間は1.5時間であり，Bが返答を受け取る(Bの時計の)時刻は，11.5時＋1.5時＝13時となり，<u>午後１時</u>である。

【参考】

宇宙船Bが宇宙船Aからの返答の信号を受け取る時刻を，宇宙船Aに固定された慣性系で考えてみる。

宇宙船AからAの時計で午前 11 時に返答が発せられるとき，宇宙船BはAから，

$l_3 = 0.6c \times 2 = 1.2l_0$ の距離にいる。この距離 l_3 を信号は相対的速さ $c - 0.6c = 0.4c$ で進むから，信号がBに達する(Aの時計の)時刻は，11 時＋$\dfrac{1.2l_0}{0.4c}$ 時＝14 時（午後２時）となる。

宇宙船Aから見れば，宇宙船Bの時計の進み方は0.8倍であるから，返答信号がBに達するまでに，Bの時計は，午前９時から５時間×0.8＝４時間たって午後１時であり，問６の最後の結果に一致する。

[IV]

問７　慣性系Ｓで速さ v で動いている電子の間隔が a であるから，慣性系S′で静止している電子の間隔は，$a_- = \underline{\dfrac{a}{k}}$ である。また，慣性系Ｓで静止している正イオンの間隔が a であるから，慣性系S′で速さ v で動いている正イオンの間隔は，$a_+ = \underline{ka}$ である。よって，慣性系S′では，正イオンの単位長さあたりの電荷(電荷線密度)は $r_+ = \dfrac{r_0}{k}$，電子の電荷線密度は $r_- = -kr_0$ となる。よって，帯電した導線の電荷線密度は，

$$r = r_+ + r_- = \underline{\left(\frac{1}{k} - k\right) r_0}$$

問８　慣性系S′では，帯電した導線によって電場がつくられる。$k < 1$ より，$r > 0$ であるから，点Ｐには図３ｂの紙面上方(y 軸正方向)へ，強さ

$$E = \frac{r}{2pe_0 r} = \left(\frac{1}{k} - k\right)\frac{r_0}{2pe_0 r}$$

の電場ができる。よって，点電荷 q には，<u>紙面上方(y 軸正方向)</u>へ，大きさ

$$f' = qE = \frac{1}{k}\frac{\left(1 - k^2\right) r_0}{2pe_0 r} q$$

の静電気力がはたらく。ここで，$c = \dfrac{1}{\sqrt{e_0 m_0}}$ を用いると，

$$f' = \frac{1}{k}\frac{v^2}{c^2}\frac{r_0 q}{2pe_0 r}$$
$$= \underline{\frac{1}{k}\frac{m_0}{2p}\frac{r_0 q v^2}{r}}$$

となる。

また，慣性系Ｓでは，導線の周囲に電場は生じておらず，点Ｐには紙面表→裏(z 軸負方向)の向きに，大きさ

$$B = \frac{m_0 I}{2p\, r} = \frac{m_0 r_0 v}{2p\, r}$$

の磁束密度ができる。よって，点電荷 q には，紙面上方(y 軸正方向)へ，大きさ

$$f = qvB = \frac{m_0 r_0 q v^2}{2p\, r}$$

の力がはたらく。よって，$f' = \dfrac{1}{k} f$ と表され，f' は f の $\underline{\dfrac{1}{k}}$ 倍となる。

問９　単位体積中の自由電子数を n , 電子の速さを v とすると, 導線を流れる電流の強さ I は,

$$I = enAv$$

電子の銅原子１モルの体積は $\dfrac{M}{s}$ と表されるから，単位体積の導線中に含まれる自由電子の数(すなわち Cu 原子の数) n は,

$$n = \frac{N_{\mathrm{A}}}{M/s} = 8.3 \times 10^{28} \quad 〔1/\mathrm{m}^3〕$$

となる。これより，電子の速さ v は,

$$v = \frac{I}{eAn} = \underline{7.5 \times 10^{-5}〔\mathrm{m/s}〕}$$

すなわち，電流と逆向きに動く電子の速さは，非常に遅いことがわかる。

次に，与えられた近似式で $a = \dfrac{1}{2}$ として,

$$k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{1 - 6.25 \times 10^{-26}} \qquad 1 - 3.1 \times 10^{-26}$$

また，$a = -1$ として,

$$\frac{|f' - f|}{f} = \frac{1}{k} - 1 \qquad \underline{3 \times 10^{-26}}$$

よって，慣性系 S と S′ で，電荷 q にはたらく電磁気力にほとんど変化はない。

こうして，慣性系 S′ において，慣性系 S と同程度の電磁気力が電荷 q にはたらくことが，相対論によって説明される。通常，相対論は光速 c に近いような高速の運動において，その影響が顕著に現れると考えられている。しかし，上で述べたように，電流が流れているときの電子の速さと同程度の非常にゆっくりした速さで運動する電荷にはたらく電磁気力においても, 相対論が本質的な役割を果たしていることがわかる。

【参考】　帯電した直線導線の周囲の電場

問題文中[IV]の b)で述べた「電荷を帯びた直線導線から距離rだけ離れた点にできる電場の大きさ」の式

$$E = \frac{r}{2pe_0 r}$$

は，ガウスの法則を用いて求められる。

1．ガウスの法則

電気力線とその密度

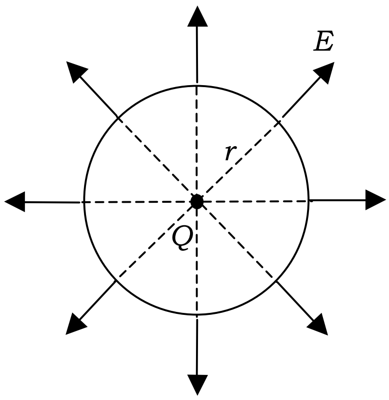
電場の生じている空間内において，電場ベクトルの方向が接線となるような曲線を考え，これを電気力線と呼ぶ。電気力線は，電場の大きさがEのところでは，電場の向きに，「電場に垂直な単位面積あたりE本引く」と約束する。

点電荷から出る電気力線の数

図bのように，正の点電荷Qを中心に半径rの球面を考える。クーロンの法則の比例定数を真空の誘電率e_0を用いて$k = \dfrac{1}{4pe_0}$と表すと，球面上での電場の大きさEはどこでも等しく，

$$E = k\frac{Q}{r^2} = \frac{Q}{4pe_0 r^2}$$

と表される。上に述べた電気力線の本数に関する約束を用いると，この球面から外へ出る電気力線の数Nは，半径rの球の表面積$S = 4pr^2$より，



図b

$$N = ES = \frac{Q}{4pe_0 r^2} \times 4pr^2 = \frac{Q}{e_0} \qquad \cdots ①$$

と求められる。ここで，①式の最右辺は球面の半径rによらないので，電荷Qから出る電気力線の数は電荷の値のみで決まり，$\dfrac{Q}{e_0}$〔本〕となることがわかる。また，電荷Qが負の場合には，電荷Qが$\dfrac{|Q|}{e_0}$〔本〕の電気力線を吸収すると約束する。

ガウスの法則

一般に，

「任意の閉曲面（球面や直方体面など）から外へ出る電気力線の数は，その閉曲面の中の全電気量をQとすると，

$$\frac{Q}{e_0}$$

に等しい」

が成り立つ。これをガウスの法則という。

2．電荷を帯びた直線導線のまわりに生じる電場

直線導線上に，単位長さあたりrの正電荷が一様に分布しているとき，導線から距離rだけ離れた点に生じる電場の大きさEを求めよう。

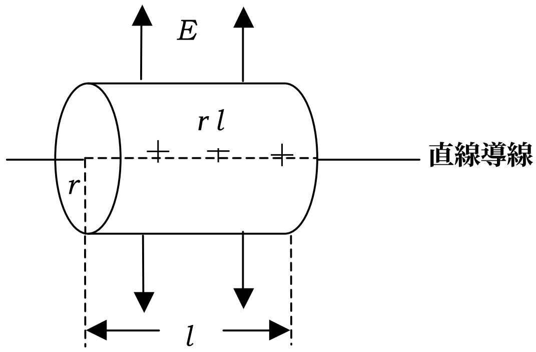
導線が十分長ければ電場は導線に垂直に，導線を軸として対称に生じる。そこで，導線を中心軸とした半径r，長さlの円柱を考えると，電気力線は，円柱の側面のみから側面に垂直に円柱の外へ出る(図**c**)。円柱の側面積は$2prl$であるから，側面上の電場の大きさをEとすると，円柱内の電荷$r\,l$を用いると，ガウスの法則は，

$$\frac{r\,l}{e_0} = 2prl \times E$$

と表され，電場の大きさEは，

$$E = \frac{r}{2pe_0 r}$$

と求められる。



図**c**

第２問

［Ｉ］

問１　微粒子の濃度nとボルツマン定数kを用いて，状態方程式は，

$$p=\frac{N}{V}\frac{R}{N_{\mathrm{A}}}T=nkT \quad \therefore \quad p=\underline{nkT}$$

問２　高度hと$h+Dh$での状態方程式は，それぞれ，

$$p=kTn\,,\quad p+Dp=kT(n+Dn)$$

となるから，これらより，

$$Dp=\underline{kTDn}$$

問３　微粒子にはたらく力のつり合いは，

$$(p+Dp)A+nmg\cdot ADh=pA \quad \therefore \quad Dp=\underline{-nmg\cdot Dh}$$

問４　問２，問３の結果を用いて，

$$\frac{Dn}{Dh}=\underline{-\frac{nmg}{kT}}$$

［II］

問５　微粒子が一定速度で下降するとき，微粒子にはたらく重力と抵抗力がつり合うから，

$$mg=Cau=Ca\cdot Bmg \quad \therefore \quad B=\underline{\frac{1}{Ca}} \qquad \cdots①$$

［III］

問６　微粒子の濃度は容器の下方の方が濃いので，拡散の流れ$-D\dfrac{Dn}{Dh}$は下方から上方へ向かう。上方への拡散の流れと一定速度の下降の流れ$J=nBmg$が等しくなることより，

$$D\frac{nmg}{kT}=nBmg \quad \therefore \quad \underline{D=kTB} \qquad \cdots②$$

問７　①，②式より，

$$D=\frac{1.38\times10^{-23}\times293}{2.00\times10^{-2}\times1.0\times10^{-6}}=\underline{2.0\times10^{-13}\ \mathrm{m^2/s}}$$

［IV］

問８　位置xにおける断面の単位面積あたり単位時間に，左の領域から右の領域へ移動する微粒子の数と右から左へ移動する微粒子の数の差である$J(x)$は，

$$\begin{aligned}J(x)&=\frac{1}{6}\bar{v}n(x-l/2)-\frac{1}{6}\bar{v}n(x+l/2)\\&=\frac{1}{6}\bar{v}\left\{\left(n(x)-\frac{l}{2}\cdot\frac{Dn}{Dx}\right)-\left(n(x)+\frac{l}{2}\cdot\frac{Dn}{Dx}\right)\right\}\\&=-\frac{1}{6}\bar{v}l\frac{Dn}{Dx}\end{aligned}$$

これを(ｉ)式と比較して，

$$D = \underline{\frac{1}{6}\bar{v}l}$$

[V]

問９　(iii)式において，微粒子の変位は不規則であり，毎回変位は独立である。したがって， $Dx = v_x t_{\mathrm{m}}$ **と** $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$ **より，**

$$\overline{x^2} = N\overline{(Dx)^2} = N\overline{v_x^2}t_{\mathrm{m}}^2 = \frac{1}{3}\frac{t}{t_{\mathrm{m}}}\overline{v^2}t_{\mathrm{m}}^2$$

また， $l = \bar{v}t_{\mathrm{m}}$ 　$\sqrt{\overline{v^2}}\,t_{\mathrm{m}}$ **および** $6D = \bar{v}l$ 　$\sqrt{\overline{v^2}}\,l$ **を用いて，**

$$\overline{x^2} = 2Dt \quad \therefore \quad \sqrt{\overline{x^2}} = \underline{\sqrt{2Dt}}$$

注）例えば， $N = 3$ **のとき，(iii)式は，**

$$\overline{x^2} = \overline{(Dx_1 + Dx_2 + Dx_3)^2}$$

$$= \overline{(Dx_1)^2} + \overline{(Dx_2)^2} + \overline{(Dx_3)^2} + 2\left(\overline{Dx_1 Dx_2} + \overline{Dx_2 Dx_3} + \overline{Dx_3 Dx_1}\right)$$

と表される。ここで，各変位の方向が独立で不規則であることから，

$$\overline{(Dx_1)^2} = \overline{(Dx_2)^2} = \overline{(Dx_3)^2} \neq 0$$

となるが，

$$\overline{Dx_1 Dx_2} = \overline{Dx_1} \cdot \overline{Dx_2} = 0$$

$$\overline{Dx_2 Dx_3} = \overline{Dx_2} \cdot \overline{Dx_3} = 0$$

$$\overline{Dx_3 Dx_1} = \overline{Dx_3} \cdot \overline{Dx_1} = 0$$

となる。

問 10 **前問９の結果より，**

$$t = \frac{\overline{x^2}}{2D}$$

ここで，微粒子の２乗平均変位 $\sqrt{\overline{x^2}}$ **が** 10cm **程度になれば，微粒子は容器全体に広がると考えられる。そこで，** $\sqrt{\overline{x^2}} = 10\,\mathrm{cm} = 0.10\,\mathrm{m}$， $D = 2.0\times10^{-13}\ \mathrm{m^2/s}$ **として，**

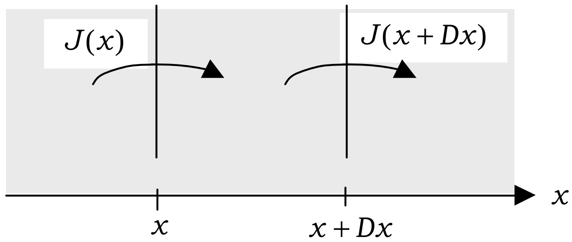
$$t = \frac{0.10^2}{2\times2.0\times10^{-13}} = \underline{2.5\times10^{10}\ \mathrm{s}} \quad 790\ \text{年}$$

この結果は，かき混ぜないかぎり，粉末は容器全体にほとんど広がらないことを意味する。

【参考】　拡散方程式とその解

微粒子の濃度は，特別な微分方程式を満たすことがわかる。

いま，濃度nが位置xのみの関数とする。図aのように，単位面積の面xと$x+Dx$で挟まれた領域の微粒子の数nDxの変化は，単位時間あたりに面xの左側から飛び込む微粒子の数$J(x)$と面$x+Dx$の右側へ飛び出す微粒子の数$J(x+Dx)$の差に等しい。よって，



図a

$$\frac{D}{Dt}(nDx)=J(x)-J(x+Dx)$$

ここでDxを微小量として，

$$J(x+Dx)=J(x)+\frac{DJ}{Dx}Dx$$

を用いると，

$$\frac{Dn}{Dt}Dx=-\frac{DJ}{Dx}Dx \quad \therefore \quad \frac{Dn}{Dt}=-\frac{DJ}{Dx}$$

ここで，(ｉ)式を代入し，$Dx\to\partial x$などとすると，

$$\frac{\partial n}{\partial t}=D\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \qquad \cdots③$$

③式を拡散方程式という。ここで，$\dfrac{\partial n}{\partial t}$は，$t$と$x$の関数である$n$を，$x$を定数とみなして$t$で微分することを表し，偏微分と呼ばれる。また，$\dfrac{\partial^2 n}{\partial x^2}$は，$n$の$x$に関する２階の偏微分を表す。

③式を満たす$n(x,t)$は，

$$n(x,t)=\frac{1}{\sqrt{4pDt}}e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

で与えられ，時間tの間のx方向の２乗平均変位$\sqrt{\overline{x^2}}$は，

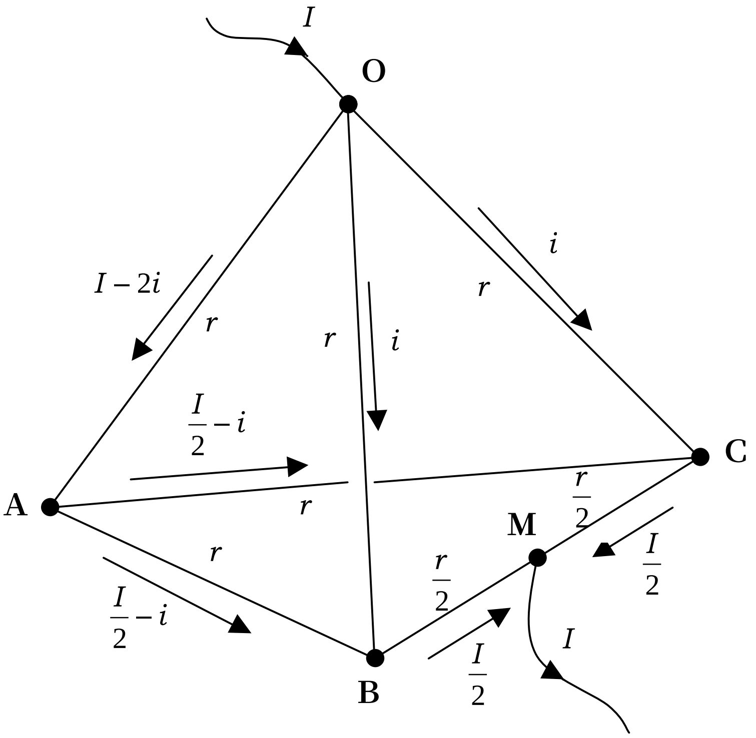
$$\sqrt{\overline{x^2}}=\sqrt{2Dt} \qquad \cdots④$$

で与えられることが知られている。

第３問

A

問１



図ａ

図ａのように各電流をおくことができる。キルヒホッフの法則より，

$$ri = r\left(\frac{I}{2} - i\right) + r(I - 2i) = r\left(\frac{3}{2}I - 3i\right) \qquad \therefore \quad i = \underline{\frac{3}{8}I}$$

したがって，OC，OA，AB，AC，BM，CM **の各区間に流れる電流は，それぞれ，**

$$\text{OC：}\ i = \underline{\frac{3}{8}}I, \quad \text{OA：}\ I - 2i = \underline{\frac{1}{4}}I,$$

$$\text{AB：}\ \frac{I}{2} - i = \underline{\frac{1}{8}}I, \quad \text{AC：}\ \frac{I}{2} - i = \underline{\frac{1}{8}}I,$$

$$\text{BM：}\ \underline{\frac{I}{2}}, \quad \text{CM：}\ \underline{\frac{I}{2}}$$

問２　OM **間の合成抵抗を** R **とすると，上記の電流が流れているとき，**OM **間の電圧が** V **なので，**

$$V = \frac{r}{2}\cdot\frac{I}{2} + ri = \frac{rI}{4} + r\cdot\frac{3}{8}I = \frac{5}{8}rI$$

$$\therefore \quad R = \frac{V}{I} = \frac{\frac{5}{8}rI}{I} = \underline{\frac{5}{8}r}$$

（別解）

回路の対称性より，点 B と点 C の電位は等しい。このことから，図 1 の回路を図 b の等価回路に書き直すことができ，直列と並列の合成抵抗の計算より，次のように，OM 間の合成抵抗 R を求めることができる。

点 A と点 BC の間の抵抗は，$\dfrac{r}{2}$ であるから，点 O と点 BC 間の合成抵抗 R_1 は，

$$\frac{1}{R_1}=\frac{1}{r}+\frac{1}{r+\frac{r}{2}}+\frac{1}{r}\qquad\therefore\quad R_1=\frac{3}{8}r$$

点 BC と点 M 間の合成抵抗は，$R_2=\dfrac{r}{4}$ であるから，

$$R=R_1+R_2=\underline{\frac{5}{8}r}$$

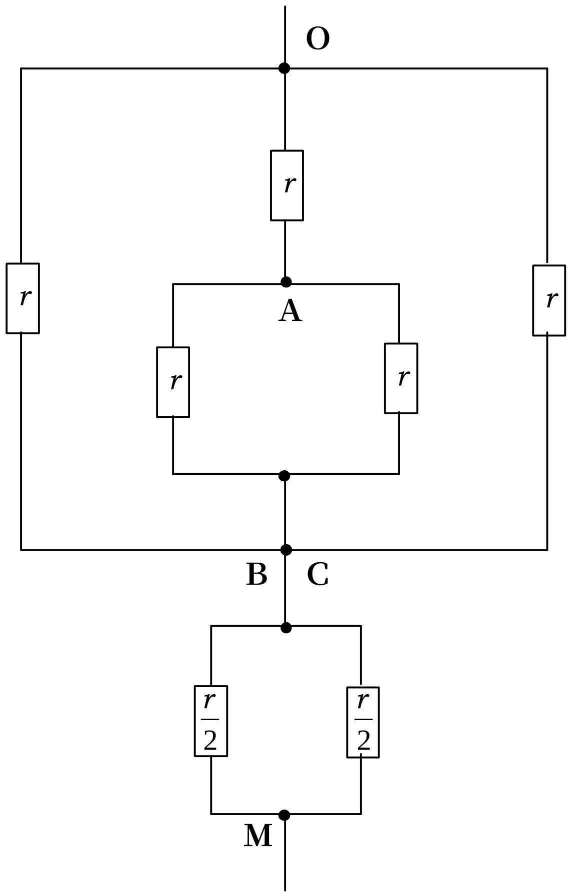


図 b

B

問１　１波長の位相差が$2p$ であるから，光路差dの位相差f は，

$$f=\underline{\frac{2p}{l}d}$$

問２　点Ｐで光源Ｏからの球面波の振動は，振幅の減衰を無視して，

$$y_2 = A\sin(wt-f)$$

点Ｐでの平面波と球面波の合成波の振動は，

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \\ &= 2A\cos\frac{f}{2}\sin\left(wt-\frac{f}{2}\right) \end{aligned}$$

これより，

$$B=\underline{2A\cos\frac{f}{2}},\quad q=\underline{\frac{f}{2}}$$

問３　点Ｐでの透過光の振幅A'は，

$$A' \propto B^2 \propto \cos^2\frac{f}{2} \propto \frac{1+\cos f}{2}$$

となり，透過光の振動は，Kを適当な比例定数として，

$$\begin{aligned} y_{\mathrm{t}} &= A'\sin wt \\ &= K(1+\cos f)\sin wt \\ &= \underline{K\left\{\sin wt+\frac{1}{2}\sin(wt-f)+\frac{1}{2}\sin(wt+f)\right\}} \end{aligned} \qquad \cdots①$$

問４　①式最右辺の第１項は，入射光と同位相の平面波であり，第２項は，第１項の平面波より位相がf だけ遅れ，光源Ｏからの球面波の点Ｐでの振動y_2と同位相の光波であるから，Ｈ面の左側で点Ｃから$\overline{\mathrm{CO}}$に等しい距離だけ離れた点O′にあたかも光源があるかのように進む球面波を表す。第３項は，第１項より位相がf だけ進んでいるから，点O′とＨ面に関して対称な点O″に収束する球面波を表す(図ａ)。

したがって，Ｈ面の右側で，直線O′Cから少し離れた方向からフィルム面を見ると，点O′に光源があるかのような像が見える。その際，①式最右辺の第１項と第３項の光波を遮れば，点O′の像が見やすくなる。

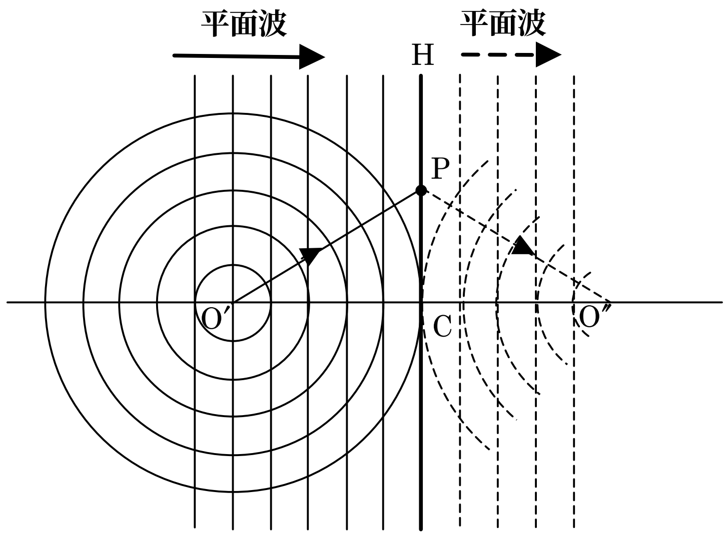


図 a

C

問１　水蒸気は軽いので，水蒸気を多く含んだ空気塊は上昇する。上昇すると，断熱膨張して温度が下がる。その温度での飽和水蒸気圧がその水蒸気圧以下となれば，水蒸気の一部は凝結して水滴となる。こうして水蒸気と微小な水滴の集団として雲が形成される。

問２　雲の中は微小な水滴と水蒸気で満たされている。水蒸気は空気より軽いが，水滴と水蒸気を平均すると，雲の密度は空気の密度と等しくなり，雲は浮いている。

問３　雲の中では重い水滴は下降し，水蒸気は上昇する。この相対運動の際に，粘性力がはたらく。水滴にはたらく粘性力は，その半径と相対的速さとの積に比例する。水滴にはたらく重力は，半径の３乗に比例するため，水滴が小さければ，周囲の水蒸気に対して降下する相対的速さが遅く，水滴は雲の中に留まる。水滴が大きくなると，降下する相対的速さが速くなり，水滴は雲から飛び出して落下する。これが雨である。

【解説】

上の解答は，下記の事柄に着目して書かれている。

・雲の中の空気は微小な水滴と飽和水蒸気で満たされている。

・水蒸気は空気より軽い。

水分子(H_2O)の分子量は 18 で，空気の平均分子量 29 より小さいため，水蒸気（気体）の密度は，空気の密度より小さい。

・気体が断熱膨張すると，温度は低下する。

気体の一団が上昇すると，上空ほど気圧が低いので膨張する。その際，気体は熱を伝えにくいので，断熱的に膨張する。気体が膨張すると，外部に仕事をするため，その分，内部エネルギーが減少し，気体の温度が低下する。

・温度が下がると，飽和蒸気圧は低下する。

水蒸気圧が，飽和水蒸気圧（水と共存できる水蒸気の分圧の最大値）より高くなると，水蒸気は液体になり水滴が生じる。

・水滴が気体中を相対的に運動すると，水滴には，その半径と相対的な速さとの積に比例する抵抗力（粘性力）がはたらく（ストークスの法則）。

・水滴にはたらく重力は半径の３乗に比例する。

さらに，水滴が成長する過程では，次のようなことも考えられる。

水滴は大気中で電荷を帯びるため，水滴どうしに電気的反発力が作用する。その結果，水滴どうしは結合せず，大きくなることが妨げられる。しかし，雷が発生すると電荷が放電され，反発力が消滅する。そのため，水滴が結合して急激に大きくなり，雨となって落下する。これが雷雨である。また，水滴が周囲の水蒸気を吸収して成長する際，水滴の半径が小さい間は，水が気化する割合が大きく，水滴は小さくなって消滅する可能性があるが，いったん半径がある値より大きくなると，水蒸気の液化により水滴が急激に成長する可能性が大きくなる。