物理 A1

(1) 物体 B に働く重力の y 成分は $-mg\cos\theta$ であり（物体 B は y 軸方向には移動しないので）これと求めるべき力がつりあっているから、答えは $mg\cos\theta$。以下では、もっぱら x 軸方向の力学だけについて述べる。

(2) 物体 B に働く重力の x 成分は $-mg\sin\theta$ であり、バネが自然長から（x 軸方向に）d だけ縮んだ位置でつりあったのだから、$kd - mg\sin\theta = 0$ が成立するので、$k = mg\sin\theta/d$。

(3) バネの伸びが $x_B - L$ と書けることに注意すると物体 B が受ける x 方向の力は、$-k(x_B - L) - mg\sin\theta = -k(x_B - L + d)$ となる。これは $x = L - d$ を中心とする復元力だから $\omega = 2\pi/T$（T は周期）は、$\omega^2 = k/m$ を満たす。よって、$T = 2\pi\sqrt{m/k}$。

(4) 物体 B は、初速 0 での振動開始時に $x = L - 3d/2$ の位置にあり、これを釣り合いの位置 $x = L - d$ と比べると、振動開始時のバネの縮みが $d/2$ であることがわかる。つまり、物体 B は、釣り合い位置を中心に振幅 $d/2$ の単振動をするので x_B の最大・最小は、それぞれ、$L - d/2$ と $L - 3d/2$ となる。一方、求める力を N と置くと、静止している物体 A については、釣り合いの式

$$N + k(x_B - L) = mg\sin\theta \tag{1}$$

が成立する。これらのことから求める最大値と最小値は、それぞれ、$(5/2)kd$ と $(3/2)kd$ となる。

(5) 前問の物体 A の釣り合いの式で $x_B = L + d$ のときに $N = 0$ となること、および、物体 B は、$x = L - d$ の周りに振幅 $4d$ の単振動をすることから、$x_B = L + d$ のとき、すなわち、バネの伸びが d のときに物体 A は支え台の面から離れる。このときとはじめ $5d$ だけバネを縮めていたときを考えて、エネルギー保存則を考えると、求める速さを v として

$$k(5d)^2/2 + mg(L - 5d)\sin\theta = kd^2/2 + mg(L + d)\sin\theta + mv^2/2 \tag{2}$$

が成立する。これより、$v = 2d\sqrt{3k/m}$。

(6) バネの伸びは $x_B - x_A - L$ であるから、物体 A にバネから働く力は、x 方向に $k(x_B - x_A - L)$ となり、物体 B にはこれと逆向きの力が働く。またどちらにも重力の x 成分 $-mg\sin\theta = -kd$ が働く。したがって、それぞれの運動方程式は

$$ma_A = k(x_B - x_A - L - d) \tag{3}$$
$$ma_B = -k(x_B - x_A - L + d) \tag{4}$$

となる。

(7) 前問の 2 つの運動方程式の差をとると

$$m(a_B - a_A) = -2k\Delta \tag{5}$$

となる。Δ の加速度が $a_B - a_A$ になることから、この式は Δ が単振動し、$\omega = 2\pi/T$（T は周期）は、$\omega^2 = 2k/m$ を満たすことを示す。よって、$T = \pi\sqrt{2m/k}$。

物理 A2

(1) 点 Q に到達する二つの光を合成した光の波 $A\sin\omega t +\ A\sin(\omega t-\delta-\pi)$ は、与えられた公式を使うと、

$$2A\cos((\pi+\delta)/2)\sin(\omega t-(\pi+\delta)/2) \tag{1}$$

と書ける。これは時間 t の関数としてみると振幅の絶対値が $2A\cos((\pi+\delta)/2)$ の波となっている。

(2) 周期 T の間に波長 λ 進むので、$\lambda = cT$。これと、$\omega = 2\pi/T$ より、$\lambda = 2\pi c/\omega$。

(3) 1 波長 λ で位相差が 2π 進むので、$2\pi\Delta/\lambda$ を 2π で割った余り。

(4) 問い (1) における振幅最大がスポットに相当するので、$\cos((\pi+\delta)/2)$ の絶対値が 1 になるとき、つまり、n を整数として $(\pi+\delta)/2 = n\pi$ が満たされる H にスポットが現れる。これより、問い (3) の答えを使うと

$$kh^\alpha H^\beta L^\gamma = \frac{2n-1}{2}\lambda \tag{2}$$

を得る。これより、スポットが現れる H は $(n-1/2)^{1/\beta}$ に比例するので、スポットが等間隔に並ぶことから、

$$\beta = 1 \tag{3}$$

となる。

(5) 式 (2) と (3) より、

$$H = \frac{1}{kh^\alpha L^\gamma}(n-1/2)\lambda \tag{4}$$

となるので、

$$D = \frac{\lambda}{kh^\alpha L^\gamma} \tag{5}$$

を得る。これより、h を 2 倍にすると、間隔 D が半分になるならば、$\alpha = 1$ となることが分かる。これと式 (3) と $\alpha+\beta+\gamma = 1$ より、$\gamma = -1$ となる。

(6) これまでの考察により、

$$D = \frac{L}{kh}\lambda \tag{6}$$

となることが分かった。したがって、間隔 D を実験によって測れば、k を決めることができる。

（注）物理Ａ２－（３）の解答例を、より適切なものに差替えました。
なお採点時には、差替前後のいずれの解答についても考慮していたので、採点結果に変更はございません。

（R6.4.19追記）

物理B $\boxed{1}$ 解答例

(1) 圧力と体積が分かっているので、

$$T_{\mathrm{A}} = \frac{P_0 V_0}{nR}, \quad T_{\mathrm{B}} = \frac{P_0 V_1}{nR}.$$

(2) 気体が吸収する熱量を Q、気体が外部にする仕事を W、内部エネルギーの変化を ΔU とすると、$Q = \Delta U + W$. 状態 B から状態 C までの温度変化 ΔT_{BC} は、$Q_1 = \frac{3}{2} nR \Delta T_{\mathrm{BC}}$ より、$\Delta T_{\mathrm{BC}} = \frac{2Q_1}{3nR}$.

$$T_{\mathrm{C}} = T_{\mathrm{B}} + \Delta T_{\mathrm{BC}} = \frac{P_0 V_1}{nR} + \frac{2Q_1}{3nR} = \frac{3P_0 V_1 + 2Q_1}{3nR}.$$

状態 C の圧力 P_{C} は、$P_{\mathrm{C}} V_1 = nRT_{\mathrm{C}}$ より、

$$P_{\mathrm{C}} = \frac{nR}{V_1} T_{\mathrm{C}} = P_0 + \frac{2Q_1}{3V_1}.$$

(3) 過程 C→D では熱の出入りは無いので、$\Delta U_{\mathrm{CD}} = -W_{\mathrm{CD}}$. この間、気体の体積は増加したのだから $W_{\mathrm{CD}} > 0$、したがって $\Delta U_{\mathrm{CD}} < 0$ であり、$T_{\mathrm{D}} < T_{\mathrm{C}}$ である.

(4) $T_{\mathrm{D}} = T_{\mathrm{A}}$ とすると、状態 A と D は体積が等しく温度も等しいので、圧力も等しく同じ状態であるといえる. 断熱変化では PV^γ は一定だから、$P_{\mathrm{C}} V_1^\gamma = P_0 V_0^\gamma$ となり、

$$P_{\mathrm{C}} = P_0 \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^\gamma.$$

一方、問 (2) の結果から $P_{\mathrm{C}} = P_0 + \frac{2Q_1}{3V_1}$ である. この 2 式から

$$P_0 + \frac{2Q_1}{3V_1} = P_0 \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^\gamma, \quad Q_1 = \frac{3P_0 V_1}{2} \left\{ \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^\gamma - 1 \right\}.$$

(5) 各過程で気体が吸収する熱量 Q、気体が外部にする仕事 W と内部エネルギーの変化 ΔU の間に $\Delta U = Q - W$ の関係が成り立つことと、A→B が定圧過程、B→C が定積過程、C→A が断熱過程であることに注意すれば計算できる. 例えば、C→A では熱の出入りが無いため $Q = 0$ であり、$W_{\mathrm{CA}} = -\Delta U_{\mathrm{CA}}$ となる.

$$\begin{aligned} W_{\mathrm{CA}} = -\Delta U_{\mathrm{CA}} &= -\frac{3}{2} nR (T_{\mathrm{A}} - T_{\mathrm{C}}) \\ &= \frac{3}{2} P_0 V_1 + Q_1 - \frac{3}{2} P_0 V_0 \\ &= -\frac{3}{2} P_0 (V_0 - V_1) + Q_1. \end{aligned}$$

結果は以下の表のようになる.

	Q	W
A→B	$-\frac{5}{2}P_0(V_0-V_1)$	$-P_0(V_0-V_1)$
B→C	Q_1	0
C→A	0	$Q_1-\frac{3}{2}P_0(V_0-V_1)$

(6) 問 (5) の結果から正味の仕事は $W = W_{\mathrm{AB}} + W_{\mathrm{CA}} = Q_1 - \frac{5}{2}P_0(V_0 - V_1)$.

$$\begin{aligned} e &= \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{5P_0(V_0-V_1)}{2Q_1} \\ &= 1 - \frac{5P_0(V_0-V_1)}{3P_0V_1}\left\{\left(\frac{V_0}{V_1}\right)^{\gamma} - 1\right\}^{-1} \\ &= 1 - \frac{5}{3}\frac{a-1}{a^{\gamma}-1}, \quad a = \frac{V_0}{V_1} > 1. \end{aligned}$$

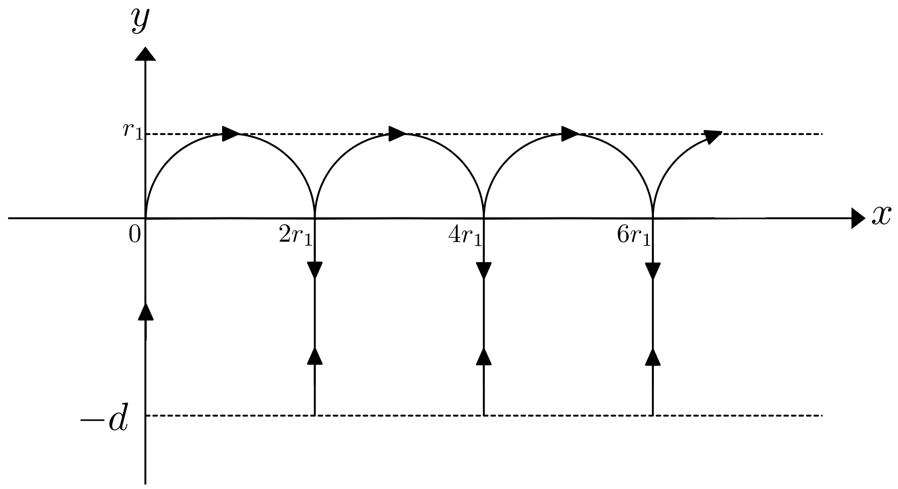
物理Ｂ［２］

(1) 荷電粒子の加速度の大きさは $a = QE/M$ なので、$\frac{1}{2}at_1^2 = d$ と $v_1 = at_1$ より、$v_1 = \sqrt{\frac{2QEd}{M}}$、$t_1 = \sqrt{\frac{2Md}{QE}}$ である。また、x 軸方向には力は働かないので $x_1 = 0$ である。

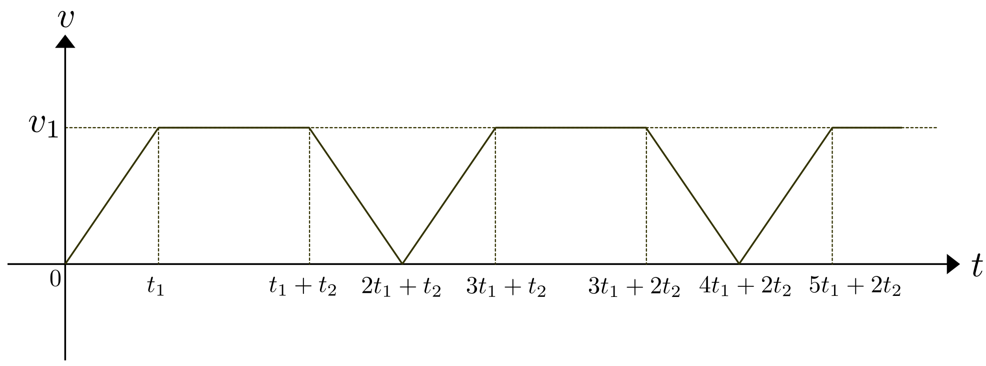
(2) 磁場領域ではローレンツ力と遠心力の釣り合いより $QBv_1 = Mv_1^2/r_1$ より、円運動の半径 r_1 は $r_1 = Mv_1/QB$ である。よって、$t_2 = \pi r_1/v_1 = \pi M/QB$ である。また、$x_2 = 2r_1 = \frac{2}{B}\sqrt{\frac{2MEd}{Q}}$、$v_2 = v_1 = \sqrt{\frac{2QEd}{M}}$ である。

(3) $0 = v_1 t_2 - \frac{1}{2}at_2^2\ (t_2 \neq 0)$ より、$t_2 = 2t_1 = 2\sqrt{\frac{2Md}{QE}}$ である。

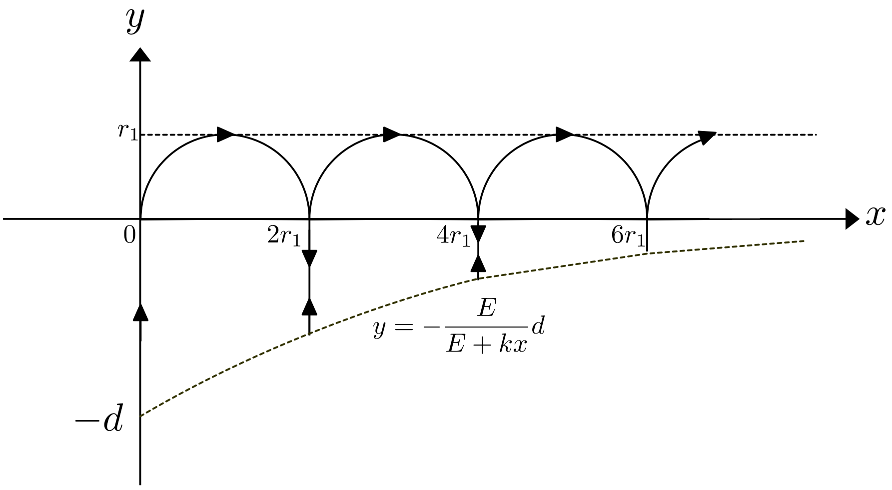
(4) 荷電粒子の xy 平面上での軌道の概略図は次の通りである。（おおよその特徴を捉えた図が書けていれば正解とした）



(5) 電場領域では加速度 $\pm a$ の等加速度運動、磁場領域では速さ v_1 の等速円運動するので、荷電粒子の速さの時間依存性は次のグラフのようになる。（おおよその特徴を捉えた図が書けていれば正解とした）



(6) 荷電粒子の x 座標が x のとき、その加速度の大きさは $a' = \frac{Q(E+kx)}{M}$ である。荷電粒子が電場領域に存在する時間を $2t_1'$ とすれば、$0 = v_1 - a't_1'$ より、$t_1' = \frac{Mv_1}{Q(E+kx)} \leq t_1$ となる。また、y 座標の最小値は $y = -d'$ である。ただし、$d' = \frac{E}{E+kx}d \leq d$ である。磁場領域では速さ v_1 の等速円運動のままである。荷電粒子の xy 平面上での軌道の概略図は次の通りである。（問 (4) との違いとして、y 軸方向の負の領域への侵入距離 d' が小さくなっていくことに言及し、おおよその特徴を捉えた図が書けていれば正解とした）



(7) $k > 0$ の場合、磁場領域での運動は $k = 0$ の場合と同じであるが、電場の領域に存在する時間は点電荷の x 座標に依存して短くなる。また、荷電粒子は電場の領域では x 軸方向には移動しない。よって、荷電粒子が x 軸を $n\ (\geqq 3)$ 回通過するのに要する時間は短くなる。