

目 次

電 磁 気

| | |
|-----------------------|----|
| 1 電 界 | 2 |
| 2 直 流 回 路 | 9 |
| 3 電 流 と 磁 界 | 17 |
| 4 電 磁 誘 導 と 交 流 | 22 |

原 子 物 理

| | |
|---------------------|----|
| 1 電 子 と 光 子 | 32 |
| 2 原 子 と 原 子 核 | 38 |

| | |
|---------------|----|
| 演 習 問 題 | 44 |
|---------------|----|

| | |
|-----------------|----|
| 休 講 日 一 覧 | 72 |
|-----------------|----|

電 磁 気

1 電 界

〔1〕 静電気力によるクーロンの法則

電気量が q_1 , q_2 の帯電体間の距離が r のとき、互いに及ぼし合う力の大きさを F とすると、

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \therefore F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

ただし、同種の電気ของときは斥力、異種の電気的时候は引力である。真空中では F に N, r に m, q_1 , q_2 にクーロン (C) なる単位を用いるとき、 k を k_0 とし、 $k_0 = 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ となるので、

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9.0 \times 10^9 \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

〔2〕 電界の強さ

電界内に置いた単位正電荷の受ける力である。したがって電界内に電荷 q [C] を置いたとき受ける力を \vec{F} [N] とすると、電界の強さ \vec{E} [N/C] は、

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \therefore \vec{F} = q \vec{E}$$

〔3〕 電 位

電界内で単位正電荷のもつ静電気力による位置エネルギー（基準は理論的には帯電体から無限遠のところ、実用上は地球）である。電位の単位は J/C であるが、これをボルト (V) とよぶ。

$$\text{点電荷による電位 } V \text{ は、} V = \pm \frac{k_0 q}{r}$$

（正電荷のとき +, 負電荷のとき -）

〔4〕 電界の強さと電位差（電圧）

電気力線にそって d [m] だけ離れた 2 点 A, B の電位をそれぞれ V_A, V_B [V] ($V_A > V_B$), 電界の強さを E [N/C] とすれば,

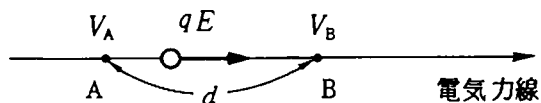


図 1

$$W_P = -(U_2 - U_1)$$

を用いると,

$$qE \cdot d = -(qV_B - qV_A)$$

$$E = \frac{V_A - V_B}{d} = \frac{V}{d} \quad (V_A - V_B = V)$$

V は電位差（電圧）で、単位はボルト (V) である。したがって、電界の強さの単位は V/m としてもよい。 ($N/C = V/m$)

〔5〕 コンデンサの公式

コンデンサに蓄えられている電気量を $\pm q$ [C], 両極間にかかる電圧を V [V] とすれば,

$$q \propto V \quad \therefore q = CV$$

比例定数 C がコンデンサの電気容量で、単位は C/V で、これをファラド (F) とよぶ。

$$\mu F = 10^{-6} F, \quad pF = 10^{-12} [F]$$

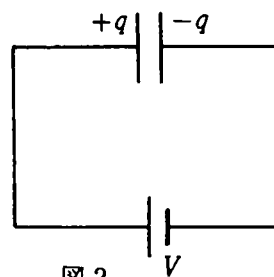


図 2

〔6〕 平行板コンデンサの電気容量

面積 S [m²] の平行板の距離を d [m], 絶縁体の誘電率を ϵ , 電気容量を C [F] とすると,

$$C = \frac{\epsilon S}{d}$$

真空の誘電率を ϵ_0 ($= \frac{1}{4\pi k_0} = \frac{1}{4 \times 3.14 \times 9.0 \times 10^9} = 8.86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

とすると, $C = \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \cdot \frac{S}{d} = 8.86 \times 10^{-12} \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \cdot \frac{S}{d}$

ϵ/ϵ_0 を比誘電率とよぶが、真空の比誘電率は 1 である。

〔7〕 コンデンサのつなぎ方

電気容量が C_1 , C_2 のコンデンサを直列または並列につないだときの合成容量を C とすれば,

(a) 直列 $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

$$\therefore C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$(V_1 : V_2 = \frac{q}{C_1} : \frac{q}{C_2} = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2})$$

(b) 並列 $C = C_1 + C_2$

$$(q_1 : q_2 = C_1 V : C_2 V = C_1 : C_2)$$

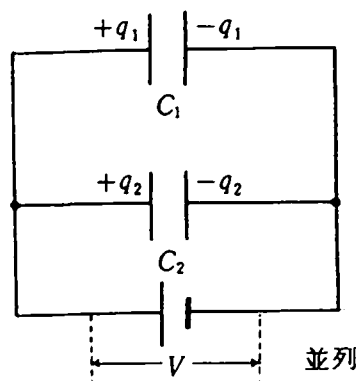
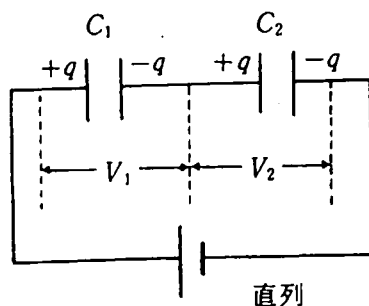


図3

〔8〕 コンデンサの静電エネルギー

電気容量 C [F] のコンデンサに, $\pm q$ [C] の電気を与えるとき, 両極間の電圧が V [V], 蓄えられた静電エネルギーが U [J] になったとすれば,

$$U = \frac{0 + V}{2} q = \frac{1}{2} q V = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

〔9〕 電荷からの電気力線の総数

電荷 q , q' が r の距離にあるとき q が q' に及ぼす力の大きさを F , q' の位置での電界の強さを E とすると,

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_0} \quad \therefore k_0 = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \text{ である。}$$

$$\text{したがって, } F = k_0 \frac{qq'}{r^2} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{qq'}{r^2}$$

$$\therefore E = \frac{F}{q'} = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 r^2} \dots\dots \textcircled{1}$$

電荷 q から出ている電気力線の総数を N とすると, 電界の強さ E は単位面積あたりの電気力線の数 $N/4\pi r^2$ に等しいので,

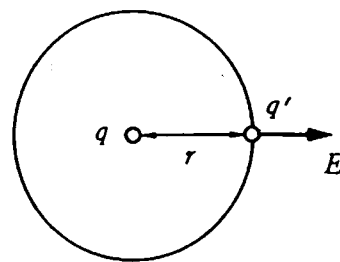


図4

$$E = \frac{N}{4\pi r^2} \quad \therefore N = 4\pi r^2 E = 4\pi r^2 \times \frac{q}{4\pi \epsilon_0 r^2} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \dots\dots ②$$

平行板コンデンサーの極限の間隔が d ，蓄電量を $\pm q$ とする。このとき，極板の間には一様な電界ができるが， $+q$ から出ている電気力線の総数を N とすると，②式から

$$N \propto q \quad \dots\dots ③$$

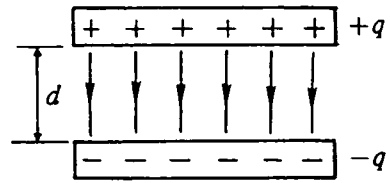


図5

極板の面積を S とすると，③により， $E \propto \frac{N}{S} \propto \frac{q}{S}$

以上のことから，コンデンサーでは， q が一定のときは E は d によらない。

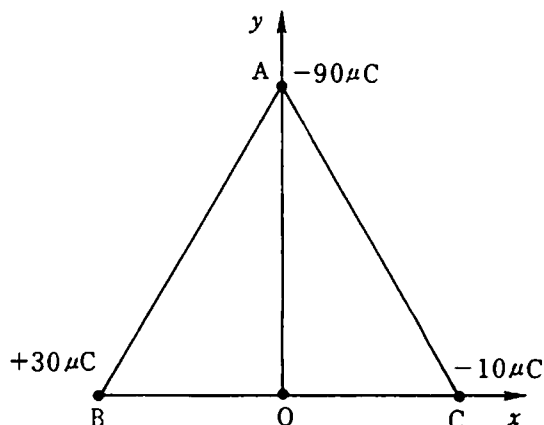
〔10〕 MKSA 単位

基本単位として，長さにメートル (m)，質量にキログラム (kg)，時間に秒 (s)，電流の強さ (電線の断面を単位時間に通過する電気量で，単位は C/s を用い，これをアンペアとよぶ。) にアンペア (A) を用いる単位である。これまで出てきた C， $N/C = V/m$ ，V，F などはずべて MKSA 単位である。

問 題

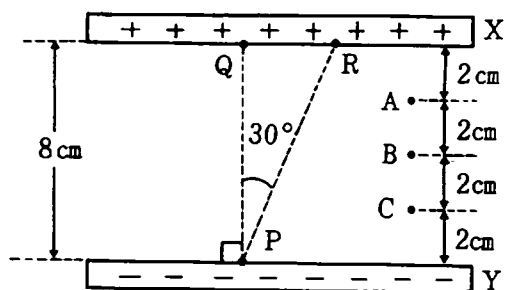
【 1 】 1 辺の長さ 50 cm の正 3 角形 の頂点 A に $-90 \mu\text{C}$ ，頂点 B に $+30 \mu\text{C}$ ，頂点 C に $-10 \mu\text{C}$ の点電荷があるとする。

辺 BC の中点 O の電界ベクトルを求めよ。ただし，O を原点とし， $O \rightarrow C$ の向きに x 軸， $O \rightarrow A$ の向きに y 軸をとるものとする。



【 2 】 真空中に右図のように平行な 2 枚の極板 X, Y が 8 cm 隔てて置いてあり，X, Y 間には 200 V の電圧がかけてある。重力の影響を無視して，次の問に答えよ。

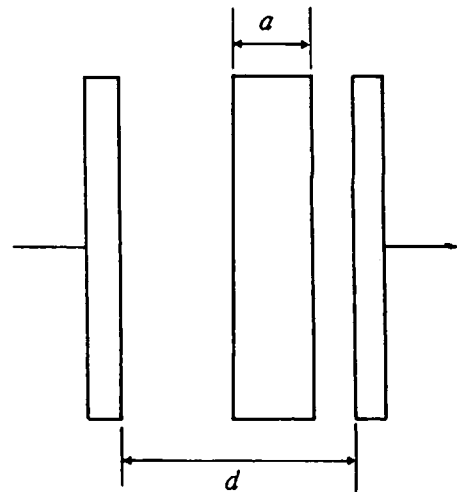
- (1) 極板間の電界の強さを求めよ。
- (2) 極板 Y の電位を 0 とするとき，右図の A, B, C の電位はいくらか。ただし，X, A, B, C, Y の間隔はそれぞれ 2 cm である。



- (3) 極板 Y の近くの点 P から正の電気量 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ の電荷を図の点線に沿って極板 X 上の点 Q まで運ぶのに必要な仕事を求めよ。
- (4) (3) と同じ電荷を図の P から R まで運ぶのに必要な仕事を求めよ。

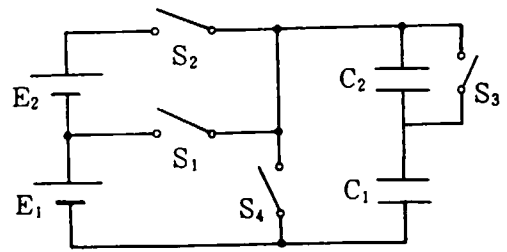
【 3 】 極板間の距離が d [m] で電気容量が C [F] の平行板コンデンサーが空気中に置かれている。

- (1) このコンデンサーの極板間に、厚さが a [m] で面積が極板と同じ金属板を極板と平行に入れると、電気容量はいくらになるか。
- (2) 極板間に入れた金属板の厚さが非常に薄いときには、電気容量はいくらになるか。



【 4 】 空気中で、2枚の大きさの等しい金属板が距離 5 mm を隔てて置かれ、平行板コンデンサーを形成して、その電気容量は C [F] である。この金属板の間に、比誘電率が 21 で、厚さが 3 mm の誘電体を片方の金属板面をおおうように挿入した。誘電体を挿入した後の電気容量はいくらになるか。

【 5 】 右図のような電気回路がある。 E_1 , E_2 はいずれも電圧が $2V$ の電池, C_1, C_2 は電気容量が各々 $4\mu F, 6\mu F$ のコンデンサー, S_1, S_2, S_3, S_4 はスイッチである。



- (1) S_1 と S_4 が開き, S_2 と S_3 が閉じた状態で, C_1 に蓄えられている電気量はいくらか。
- (2) 次に, S_2, S_3 を開き, そのあとで S_1 を閉じた。この状態で C_1 にかかる電圧はいくらか。
- (3) さらに, S_1 を開いてから S_4 を閉じると, C_1 にかかる電圧はいくらか。

【 6 】 面積 $s [m^2]$, 極板間距離 $d [m]$, 誘電率 $\epsilon_0 [F/m]$ のコンデンサーに電荷 $q [C]$ を与えた。

- (1) q を一定にしたままで, 極板間距離を $\Delta x [m]$ だけ増すのに必要な仕事はいくらか。
- (2) 極板間にはたらく力の大きさを求めよ。

2 直 流 回 路

(1) 電 流

- (a) 電流の強さ（電流）：導線の断面を単位時間に通過する電気量。時間 Δt [s] の間に通過した電気量を Δq [C] とすれば、電流の強さを i とすると、

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

電流の強さの単位は C/s であるが、これをアンペア (A) とよぶ。

- (b) 電流の流れる向き：正電荷の移動する向き。

(2) オームの法則

導線に V [V] の電圧をかけたとき、これを流れる電流の強さを i [A] とすると、

$$V \propto i \quad \therefore V = Ri$$

比例定数 R は導線の電気抵抗で、その単位は V/A であるが、これをオーム (Ω) とよぶ。

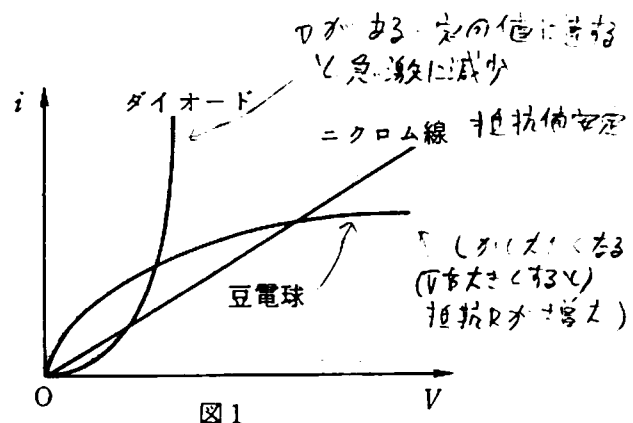
(3) 抵 抗 率

長さ l [m]、断面積 S [m²] の金属導線の電気抵抗を R [Ω] とすると、

$$R \propto \frac{l}{S} \quad \therefore R = \rho \frac{l}{S}$$

ρ は抵抗率で、その単位は、

$$\Omega \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = \Omega \text{m} \text{ である。}$$



抵抗部分で消費されるエネルギー
(電力) 増大

〔4〕 電気抵抗の温度変化

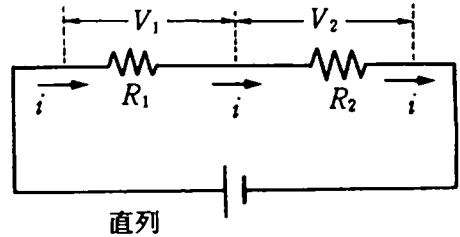
0°C , $t^{\circ}\text{C}$ のときの導線の電気抵抗をそれぞれ R_0 , $R[\Omega]$ とすれば,

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

α は抵抗の温度係数で, 単位は $1/\text{K}$ である。

〔5〕 電気抵抗のつなぎ方

電気抵抗が R_1 , R_2 の導線を直列または並列につないだときの合成抵抗を R とすれば,



(a) 直列

$$R = R_1 + R_2$$

$$(V_1 : V_2 = R_1 i : R_2 i = R_1 : R_2)$$

(b) 並列

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \therefore R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$(i = i_1 + i_2, \quad i_1 : i_2 = \frac{V}{R_1} : \frac{V}{R_2} = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2})$$

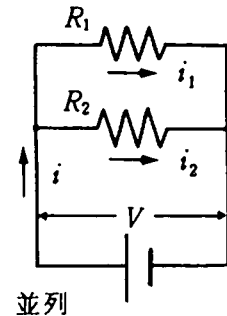


図 2

〔6〕 電流のする仕事

電池を電気抵抗などの負荷につないだとき, 負荷にかかる電圧が $V[\text{V}]$ で, 電流が $i[\text{A}]$ であるとし, 時間 $t[\text{s}]$ の間に電池を通過した電気量を $q[\text{C}]$ とする。このとき電流が負荷でなした仕事 $W[\text{J}]$ は,

$$W = Vq = Vit \quad (\because i = q/t)$$

〔7〕 電 力

負荷において電流が単位時間にする仕事。単位は J/s でこれをワット $[\text{W}]$ とよぶ。

電力 P は,

$$P = Vi = Ri^2 = \frac{V^2}{R}$$

〔8〕 ジュールの法則

$R[\Omega]$ の電気抵抗に $V[V]$ の電圧をかけたとき流れる電流を $i[A]$, 消費する電力を $P[W]$, 時間 $t[s]$ の間の発熱量を $H[cal]$ とすれば,

4.19[J] = 1[cal]であるから,

$$H = \frac{1}{4.19} P t = \frac{1}{4.19} V i t = \frac{1}{4.19} R i^2 t = \frac{1}{4.19} \frac{V^2}{R} t$$

〔9〕 電池の公式

起電力 E , 内部抵抗 r の電池に電気抵抗 R をつないだとき, この回路を流れる電流を i , 電池の端子電圧を V とすれば,

$$R i = V = E - r i \quad (\text{電池は電源})$$

$$\therefore i = \frac{E}{R+r} \quad \text{または} \quad E = i(R+r)$$

電池が負荷になっているときには, 電池の端子電圧 V は,

$$V = E + r i$$

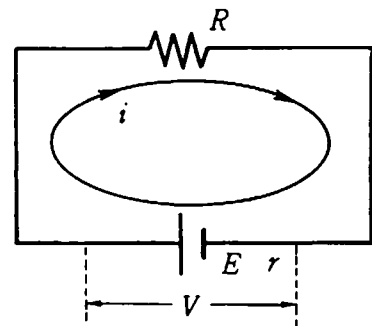


図3

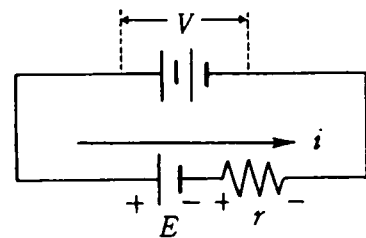


図4

〔10〕 電池のつなぎ方

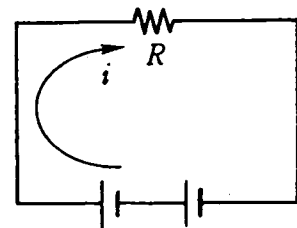
起電力 E , 内部抵抗 r の電池を n 個直列または並列につないだ電源に電気抵抗 R をつないだとき, R を流れる電流を i とする。

(a) 直列

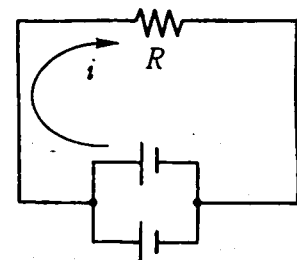
$$i = \frac{nE}{R + nr}$$

(b) 並列

$$i = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}$$



直列



並列

図5

〔11〕 電流計・電圧計のつなぎ方

電流計や電圧計は図6のようにつなぐ。電流計や電圧計をつながないときの電流 i 、電圧 V は、

$$i = \frac{E}{R+r}$$

$$V = Ri = \frac{ER}{R+r}$$

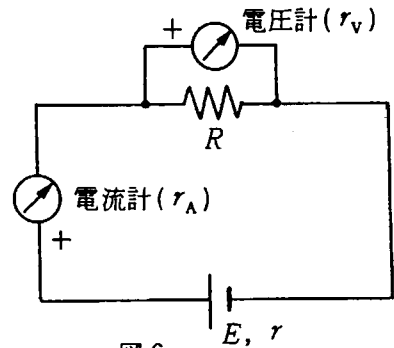


図6

内部抵抗 r_A の電流計だけをつないだときの電流 i' は

$$i' = \frac{E}{(R+r) + r_A} = \frac{\frac{E}{R+r}}{1 + \frac{r_A}{R+r}}$$

$$\Rightarrow \frac{E}{R+r} = i \quad (\Rightarrow \text{は } r_A \ll R+r \text{ のとき})$$

内部抵抗 r_v の電圧計だけをつないだときの電圧 V' は

$$V' = \frac{E}{\left(\frac{Rr_v}{R+r_v}\right) + r} \times \left(\frac{Rr_v}{R+r_v}\right) = \frac{E\left(\frac{R}{R/r_v + 1}\right)}{\left(\frac{R}{R/r_v + 1}\right) + r}$$

$$\Rightarrow \frac{ER}{R+r} = V \quad (\because r_v \gg R)$$

〔12〕 キルヒホッフの法則

電流 i_1, i_2, i_3 は図7の向きと仮定する。

- (a) Aに流入する電流の和はAから流出する電流の和に等しい。

$$i_1 = i_2 + i_3$$

- (b) 1つの閉じた回路を右まわり(時計式) または左まわり(反時計式)にまわるとき、上昇した電位は降下した電位に等しい。

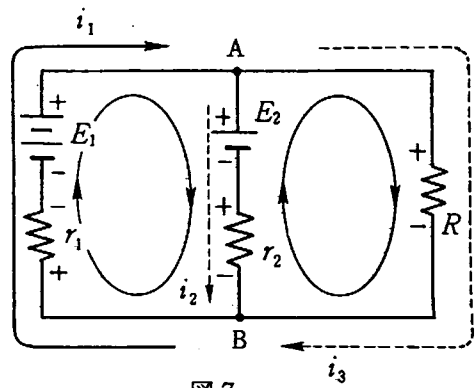


図7

閉回路 $E_1 \rightarrow A \rightarrow E_2 \rightarrow r_2 \rightarrow B \rightarrow r_1 \rightarrow E_1$ $(E_1 = r_1 i_1 + E_2 + r_2 i_2)$

閉回路 $E_2 \rightarrow A \rightarrow R \rightarrow B \rightarrow r_2 \rightarrow E_2$ $(r_2 i_2 + E_2 = R i_3)$

問 題

【 1 】 電気抵抗が10オームの銅線に電池をつないだとき、その端子電圧は1.6ボルトであった。

- (1) 銅線の断面を通過する電気量は毎秒何クーロンか。
- (2) 銅線中に含まれる自由電子が一方向に移動するものとするば、銅線の断面を通過する自由電子の数は毎秒何個か。ただし、自由電子1個の電気量を 1.6×10^{-19} クーロンとする。
- (3) また、このとき、自由電子がすべて一定の速さをもっているとする、その速さはいくらか。ただし、銅の中に含まれる自由電子の個数を 3.18×10^{28} 個/m³、この銅線の半径は0.1mmとする。

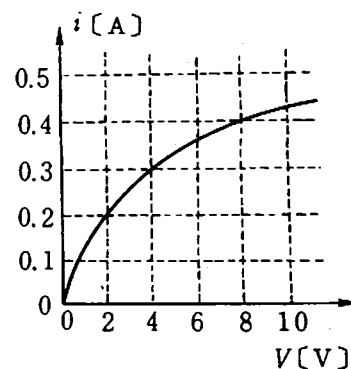
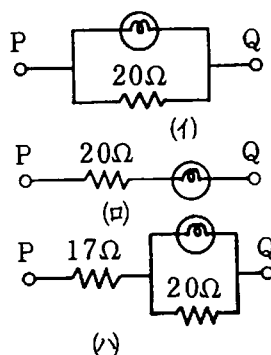
【 2 】 電流のする仕事が $W = Vit = Vq$ で与えられることを示せ。

【 3 】 豆電球にかかる電圧 V と電流 i の関係が右図に示されている。

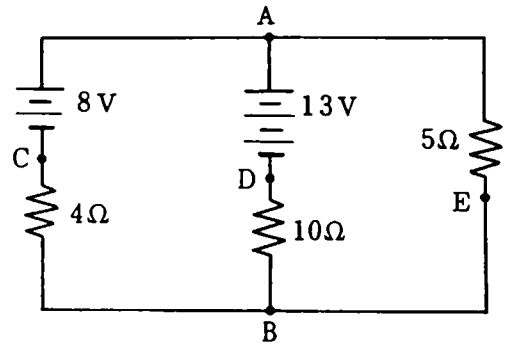
(1) この豆電球と 20Ω の電気抵抗を図(イ)のように並列にして、P、Q間に $8V$ の電圧をかけると全体でいくらの電流が流れるか。

(2) 豆電球に 20Ω の電気抵抗を図(ロ)のように直列につないで P、Q間に $8V$ の電圧をかけるとき流れる電流はいくらか。

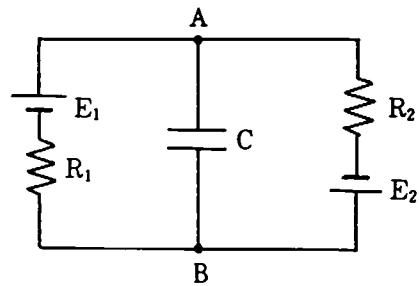
(3) 豆電球に 20Ω と 17Ω の電気抵抗を図(ハ)のようにつないで、P、Q間に $8V$ の電圧をかけると、 17Ω の電気抵抗を流れる電流はいくらか。



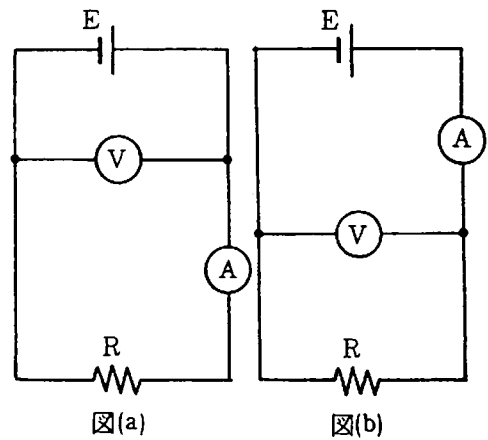
【 4 】 起電力 8V ，内部抵抗 0 の電池，起電力 13V ，内部抵抗 0 の電池と 4Ω ， 10Ω ， 5Ω の電気抵抗を右図のようにつないである。3つの電気抵抗に流れる電流はそれぞれいくらであるか。



【 5 】 図において， E_1 は起電力 6V ，内部抵抗 0 の電池， E_2 は起電力 12V ，内部抵抗 0 の電池である。 R_1 ， R_2 は電気抵抗で，その抵抗値はそれぞれ 16Ω ， 20Ω であり， C は電気容量 $2\mu\text{F}$ のコンデンサーである。コンデンサー C の A 側の極板にはどんな電気がどれだけ蓄えられているか。



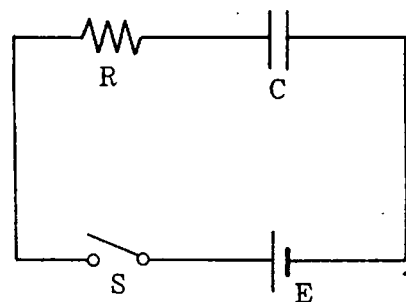
【6】 電池 E ，ミリアンペアメートル A ，ボルトメートル V および抵抗 R がある。これらを図(a)のようにつないだら V は1.5ボルト， A は12.5mAを示した。次に図(b)のようにつなぎかえしたら V は1.23ボルト， A は13.5mAを示した。電池の内部抵抗はないものとして，次の各問に答えよ。



- (1) 電池の起電力はいくらか。
- (2) 抵抗 R の値はいくらか。
- (3) ミリアンペアメートル A の内部抵抗はいくらか。
- (4) ボルトメートル V の内部抵抗はいくらか。

【7】 図において， E は起電力 E ，内部抵抗0の電池， R は抵抗値 R の電気抵抗， C は電気容量 C のコンデンサー， S はスイッチである。

S を閉じたとき R を流れる電流 i は時間 t とともにどのように変化するか。



3 電流と磁界

〔1〕 磁気力に関するクーロンの法則

磁気量（磁荷）が m_1 , m_2 の磁極間の距離が r のとき、互いに及ぼし合う力の大きさを F とすると、

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \therefore F = k \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

ただし、同種の磁気するときには斥力、異種するときには引力である。真空中（近似的には強磁性体でないところ）では F に N, r に m, m_1 , m_2 にウェーバー (Wb) を用いるとき、 k を k_0 とし、

$$k_0 = \frac{10^7}{(4\pi)^2} = 6.3 \times 10^4 \text{ Nm}^2/\text{Wb}^2 \text{ となるので、}$$

$$F = k_0 \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.3 \times 10^4 \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$\text{なお、 } k_0 = \frac{1}{4\pi\mu_0} = \frac{10^7}{(4\pi)^2} [\text{Nm}^2/\text{Wb}^2]$$

$$\text{真空の透磁率： } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$$

〔2〕 磁界の強さ

磁界内に単位の N 極を置いたとき、これの受ける力である。したがって、磁気量 m [Wb] を置いたとき受ける力を \vec{F} [N] とすると、磁界の強さ \vec{H} [N/Wb] は、

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m} \quad \therefore \vec{F} = m\vec{H}$$

〔3〕 電流が磁界から受ける力（電磁力）

磁束密度（真空または強磁性体でないところでは H に比例し $\mu_0 H$ ただし、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ） \vec{B} [$\text{Wb/m}^2 = \text{T}$: テスラ] の磁界中に強さ i [A] の電流が流れているとき、長さ l [m] の電流の受ける力を \vec{F} [N] とすると、

$$F = B i l \sin \theta$$

この力 \vec{F} の方向は i , \vec{B} に垂直で、その向きは左手の中指、人差指、親指にそれぞれ i (電), \vec{B} (磁), \vec{F} (力) が対応する。（フレミングの左手の法則）

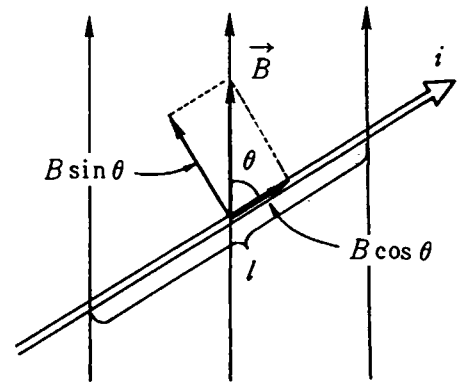


図1

〔4〕 運動する帯電粒子の磁界から受ける力（ローレンツ力）

磁束密度 \vec{B} [Wb/m^2] の磁界中を電気量 q [C] の帯電粒子が速度 \vec{v} [m/s] で動くとき、この磁界から受ける力を \vec{F} [N] とすると、

$$F = B q v \sin \theta$$

\vec{F} の方向は \vec{v} と \vec{B} に垂直で、その向きは正電荷のときは、左手の中指、人差指、親指にそれぞれ \vec{v} , \vec{B} , \vec{F} が対応する。

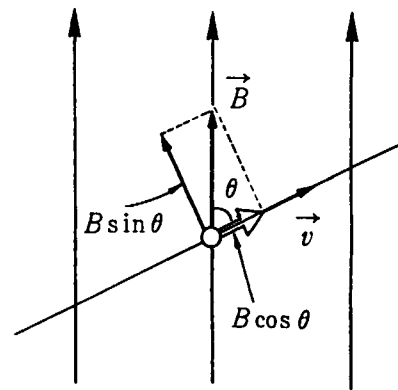


図2

〔5〕 長いソレノイドコイル内の磁界

単位長さあたりの巻き数が n [回/m] のソレノイドコイルに強さ i [A] の電流を流したとき、コイル内の磁界の強さ \vec{H} [$\text{A/m} = \text{N/Wb}$] は、 $H = i n$
 \vec{H} の向きに右ねじを進ませるとき、右ねじをまわす向きが電流の向きとなる。

〔6〕 長い直線電流による磁界

強さ i [A] の直流電流から r [m] の距離の点の磁界の強さを \vec{H} [A/m] とすると、

$$H = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{i}{r} \quad (\text{磁力線の形は半径 } r \text{ の円周})$$

\vec{H} の方向は電流と磁界を考える点を含む面に垂直で、その向きは右ねじを電流の向きに進ませるとき、それをまわす向きである。

〔7〕 円電流による円の中心での磁界

半径 r [m] の円形導線に強さ i [A] の電流が流れているとき、円の中心における磁界の強さを \vec{H} [A/m] とすれば、

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{i}{r} \quad (\text{磁力線の形は直線であるから、円周に関する } \pi \text{ をとる})$$

\vec{H} の方向は円の面に垂直で、その向きは、電流の向きに右ねじをまわすとき、その進む向きである。

問 題

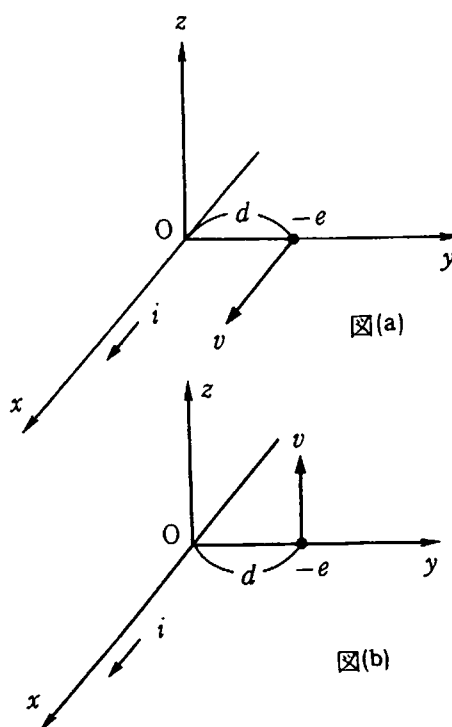
【1】 南から北に向かって直線電流の流れている導線に、小磁針をその真下から近づけた。小磁針と導線との距離が1.73mのとき、小磁針が南北の方向から 30° だけ振れた。

小磁針が南北の方向から 45° の角度だけ振れたときには、小磁針と導線との距離はいくらであるか。

【2】 右図のように、 x 軸に沿って細長い導線に強さ i [A]の電流を流し、 y 軸上に原点 O から d [m]のところから1個の電子がある。このとき電子の電荷の大きさを e [C]とする。また、電子の周囲は真空になっている。

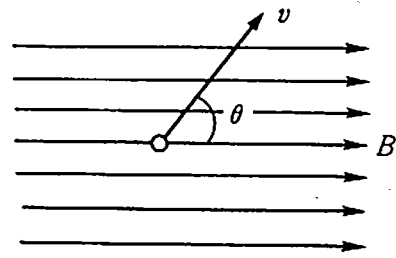
(1) 図(a)のように電子を x 軸と平行に v [m/s]の速さで運動させた瞬間、この電子に働く力の大きさはいくらか。また、その力の方向も示せ。

(2) 図(b)のように電子を z 軸と平行に、 v [m/s]の速さで運動させた瞬間、この電子に働く力の大きさはいくらか。



【 3 】 真空中の広い一様な磁束密度

B [Wb/m²] の磁界のなかに、磁束密度 B と θ の角をなす方向に質量 m [kg]、正の電荷 q [C] をもつ荷電粒子が速度 v [m/s] で飛びこむと、らせん運動をする。



- (1) このらせんの円の半径はいくらか。
- (2) 回転の周期はいくらか。
- (3) らせんの線と線の間隔はいくらか。

4 電磁誘導と交流

〔1〕 ファラデーの法則

図1の ϕ を磁束とよび、そのMKSA単位は $\text{Wb}/\text{m}^2 \cdot \text{m}^2 = \text{Wb}$ である。

コイルを通る磁束が時間 Δt [s] の間に $\Delta\phi$ [Wb] だけ変化し、コイルの巻き数が n 回のコイルに生じる誘導起電力を V [V] とすると、 $\text{Wb}/\text{s} = \text{V}$ であるので、

$$V = -n \frac{d\phi}{dt}$$

ただし、コイルを通る磁束（磁力線）の向きに右ねじを進ませるとき、それをまわす向きを起電力の正の向きとする。

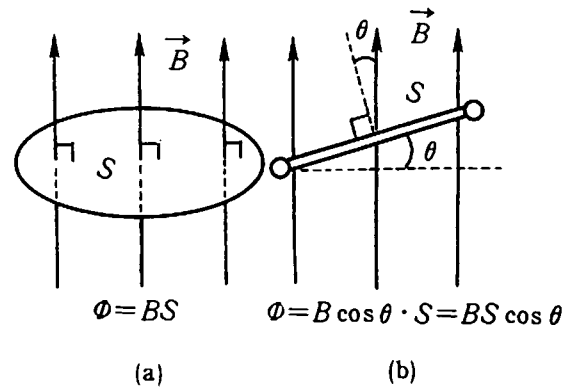
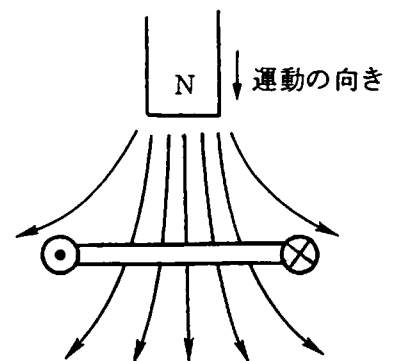


図1

〔2〕 レンツの法則

誘導電流は、コイルを通る磁束（磁力線の数）の変化を妨げる向きに流れる。また、コイルと磁石とが相対的に運動するときには、誘導電流は、この相対運動を妨げるような力を磁石とコイルに及ぼす。



〔3〕 導体棒の運動による誘導起電力

図3のように導体棒が磁界
 \vec{B} [Wb/m²] 中を速さ v [m/s] で動くとき
 の誘導起電力の大きさ V [V] は、

$$V = Bvl \quad (V = -nB \cos\theta \frac{dS}{dt})$$

起電力の向きは、右手の親指、人差指、
 中指にそれぞれ、 v (力)、 B (磁)、
 V (電←起電力または電界) に対応さ
 せるとよい。(フレミングの右手の
 法則)

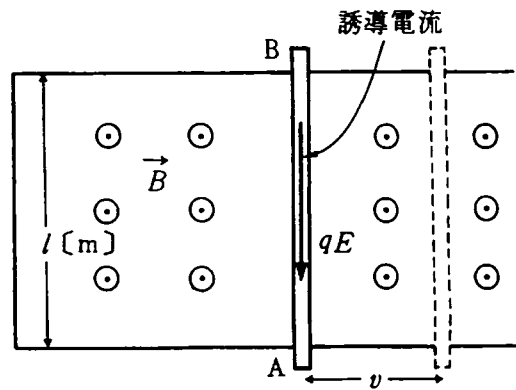


図3

導体棒の中の電荷 $+q$ [C] がローレンツ力 Bqv ($B \rightarrow A$ の向き) を受けるの
 は棒の中に $B \rightarrow A$ の向きに電界 E を生じたためと考えられる。

したがって、 $qE = Bqv \quad \therefore E = Bv$

$$\left(\frac{V}{l} = E = Bv \quad \therefore V = Bvl \right)$$

〔4〕 自己誘導

コイルを流れる電流 i [A] が変化するとき、
 コイルに生じる起電力 v [V] は、

$$v = -L \frac{di}{dt} \quad (\phi \propto i)$$

L はコイルの自己インダクタンスで、単位
 はヘンリー (H)。

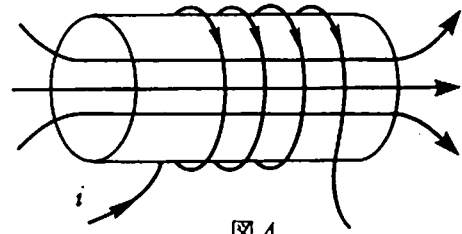


図4

〔5〕 コイルに貯えられた磁界のエネルギー

自己インダクタンスが L [H] のコイルに電流 i [A] が流れているとき、コイ
 ルに貯えられた磁界のエネルギー U [J] は、

$$U = \frac{1}{2} Li^2$$

下の表は電磁気と力学の形式的な対応を示したものである。

| 電 磁 気 | 力 学 |
|---------------------------------|--|
| q (電気量) | x (変位) |
| $i = \frac{dq}{dt}$ (電流) | $v = \frac{dx}{dt}$ (速度) |
| L (自己インダクタンス) | m (質量) |
| $\frac{1}{2} L i^2$ | $\frac{1}{2} m v^2$ |
| $\frac{1}{C}$ (電気容量の逆数) | k (ばね定数) |
| $T = 2\pi\sqrt{LC}$ (T : 周期) | $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ (T : 周期) |

〔6〕 相互誘導

P コイルを流れる電流 i_1 [A] が変化するとき、S コイルに生じる起電力を v_2 [V] とすると、

$$v_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad (\Phi_2 \propto i_1)$$

M は相互インダクタンスで、単位はヘンリー (H)。

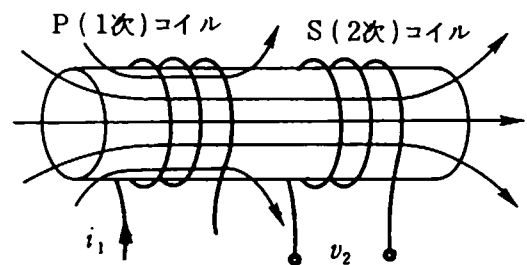


図5

〔7〕 交流の実効値

交流電圧の瞬時値 v は、 $v = V_0 \sin 2\pi f t$ で示されるが、 V_0 は最大値、 f は周波数 (50 Hz, 60 Hz) である。実行値を v_e とすると、

$$v_e = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \text{ で与えられる。}$$

$$v_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_0^2 \sin^2 2\pi f t dt} = \sqrt{\frac{1}{T} V_0^2 \times \frac{T}{2}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

$$\left(\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} \right) \left(\int \cos x dx = \sin x + C \right)$$

電流の実行値を i_e とすると, $i_e = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$

〔8〕 交流回路

(a) 交流と抵抗 (R)

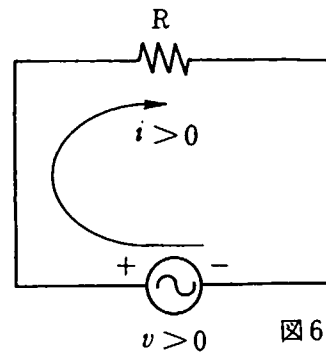
抵抗 R に電圧 $v = V_0 \sin 2\pi f t$ をかけたときの電流 i は,

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V_0}{R} \sin 2\pi f t = I_0 \sin 2\pi f t$$

$$\frac{V_0}{R} = I_0 \rightarrow v_e = R i_e$$

電力の平均値 \bar{W} は,

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 I_0 \sin^2 2\pi f t dt = \frac{V_0 I_0}{2} = v_e i_e$$



(b) 交流とコイル

図7の回路を流れる電流が, $i = I_0 \sin 2\pi f t$ となるとき電圧 v を求めると,

$$v + \left(-L \frac{di}{dt} \right) = R i$$

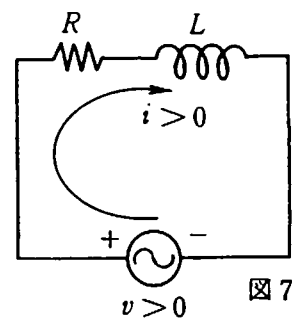
上式で $R = 0$ とおくと $v = L \frac{di}{dt}$

$$\therefore v = L \frac{di}{dt} = L \times I_0 2\pi f \cos 2\pi f t$$

$$= [2\pi f L] I_0 \sin \left(2\pi f t + \frac{\pi}{2} \right) = V_0 \sin \left(2\pi f t + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$V_0 = [2\pi f L] I_0 \rightarrow v_e = [2\pi f L] i_e$$

$[2\pi f L]$ をインピーダンスとよび, そのMKSA単位は Ω である。



$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt = 0$$

(c) 交流とコンデンサ

図8の回路で電流の電圧が、 $v = V_0 \sin 2\pi f t$ であるときの電流 i を求めると、

$$v + \left(-\frac{q}{C}\right) = R i$$

$$R = 0 \text{ のとき, } q = C v$$

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt} = C \times V_0 \times 2\pi f \cos 2\pi f t$$

$$= \frac{V_0}{\left[\frac{1}{2\pi f C}\right]} \sin\left(2\pi f t + \frac{\pi}{2}\right) = I_0 \sin\left(2\pi f t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$= I_0 \sin\left(2\pi f t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$\left[\frac{1}{2\pi f C}\right]$ をインピーダンスとよび、MKSA単位は Ω である。

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt = 0$$

(d) R, L, C の直列回路

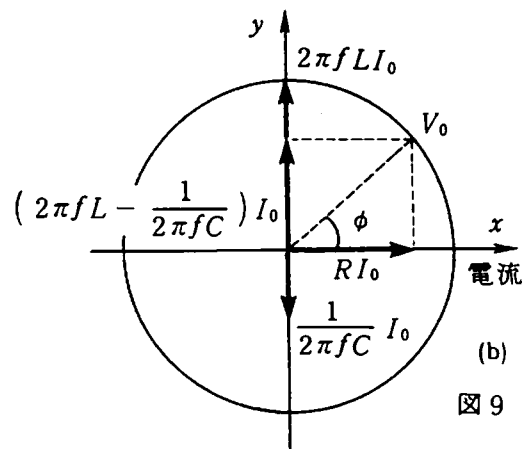
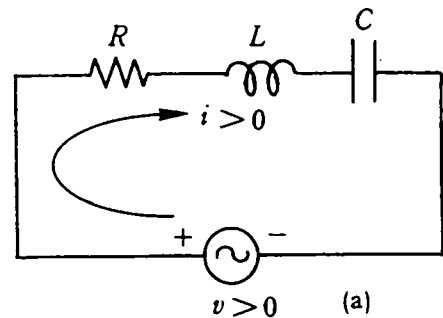
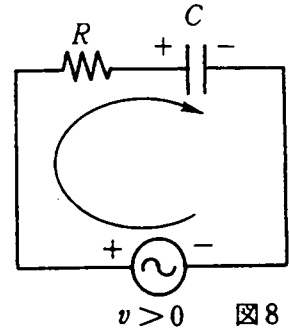
$$V_0 = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2} \cdot I_0$$

$$Z = \frac{V_0}{I_0} = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2}$$

$$\tan \phi = \frac{2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}}{R}$$

$$\bar{\omega} = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt = v_e i_e \cos \phi$$

($\cos \phi$ を力率とよぶ。)



〔9〕 電気振動

容量 C [F] のコンデンサを充電しておき、自己インダクタンス L [H] のコイルを通して放電させる場合を考える。

$$\frac{q}{C} + \left(-L \frac{di}{dt}\right) = Ri$$

$$R = 0 \text{ のとき, } L \frac{di}{dt} = \frac{q}{C} \quad \dots\dots \textcircled{1}$$

コンデンサの放電であるから,

$$i = -\frac{dq}{dt} \quad \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

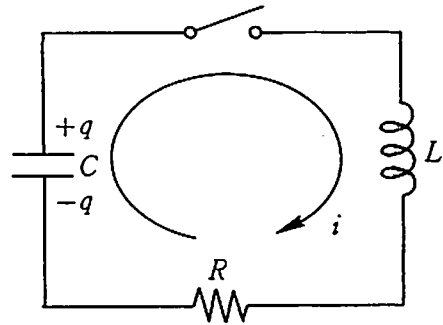
①に②を代入して,

$$L \frac{d^2q}{dt^2} = -\frac{1}{C}q \quad \leftarrow \quad \left(m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx\right)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

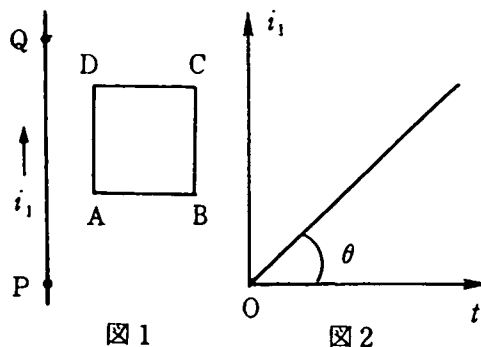
周期 T [s] は, $T = 2\pi\sqrt{LC}$,

周波数 f [Hz] は $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$



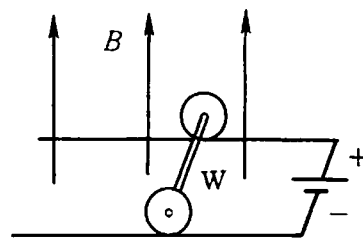
問 題

【1】 長いまっすぐな導線 PQ が紙面内に固定してある。PQ に矢印の向きに電流 i_1 を流すとき (図1), 電気抵抗 R の正方形コイル ABCD に誘導される電流 i_2 について, 次の各問に答えよ。ただし, AD はつねに PQ と平行とする。



- (1) 電流 i_1 が一定のとき,
- (a) コイル ABCD を紙面内で PQ から右方へ遠ざけるときの, コイル ABCD を流れる電流 i_2 の向きはどうなるか。
 - (b) コイル ABCD を紙面内で PQ に平行に P → Q の向きに移動させるときの, コイル ABCD に誘導される電流 i_2 はいくらか。
- (2) コイル ABCD は固定したままで, 電流 i_1 の時間的変化率が図2のように $\tan \theta$ のとき,
- (a) コイル ABCD を流れる電流 i_2 の向きはどうなるか。
 - (b) コイル ABCD を流れる電流 i_2 はいくらか。ただし, 電流 i_1 の作る磁界がコイル ABCD を貫いている磁束を $k i_1$ とする。

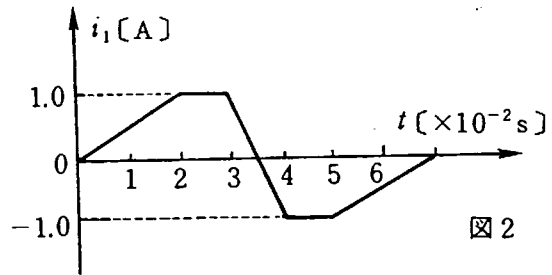
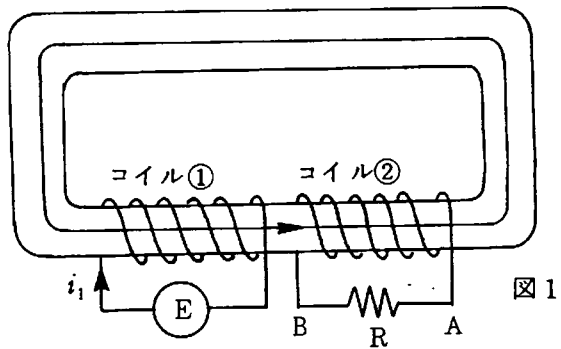
【 2 】 図のように鉛直，上向きの一様な磁界 B の中で，水平面におかれた 2 本のレールの上を電気的接触を保ちながらころがる導体の車 W がある。レールの一端に V ボルトの起電力を加えたとき，次の問いに答えよ。ただし，レールの電気抵抗は 0 とし，車 W の電気抵抗は R オームとする。また， W が動くとき摩擦などの抵抗はなく，レールは車の左右に十分長いものとする。



- (1) W を押えて静止させるとき， W はどの向きに磁界から力を受けるか。
- (2) そのとき電源から流れる電流はいくらか。ただし，電源の内部抵抗は無視する。
- (3) W が動き始めると，どのような電磁現象が加わるか。
- (4) そのとき電流はどうなるか。
- (5) 十分時間がたった後の W の運動はどうなるか。

【3】 図1のように閉じた鉄心の上
 上に絶縁導線で巻いたコイル①とコ
 イル②とがある。

コイル①に図2のような電流 i_1 を
 流すとき、コイル②に流れる誘導電
 流 i_2 をグラフで示せ。ただし、抵抗
 R は $5.0\ \Omega$ 、コイル①とコイル②の
 間の相互インダクタンスを $0.50\ \text{H}$ と
 し、コイル②に生じた誘導電流 i_2 の
 向きは $A \rightarrow R \rightarrow B$ の向きに流れる場
 合を正とする。また、コイル①を流
 れる電流は図1の向きを正とする。



【 4 】 抵抗値が 50Ω の抵抗，自己インダクタンスが 0.10H で内部抵抗の無視できるコイルと，電気容量をえることができるコンデンサーを直列につなぎ，これに周波数 50Hz ，電圧 100V の交流電流をつないだ。 $\pi = 3.14$ として次の各問に答えよ。

- (1) コンデンサーの電気容量が $200\mu\text{F}$ のとき，回路のインピーダンスはいくらになるか。
- (2) (1)のとき，この回路を流れる電流はいくらか。
- (3) コンデンサーの電気容量がいくらするとき，この回路を流れる電流が最大となるか。
- (4) また，このとき，この回路を流れる電流はいくらか。

原子物理

1 電子と光子

(1) 電子と光子

電子の電荷を e ($= 1.60 \times 10^{-19}$ C, 電気素量), 質量を m ($= 9.11 \times 10^{-31}$ kg) とすると, 電子の単位質量あたりの電荷である比電荷 $\frac{e}{m}$ は,

$$\frac{e}{m} = \frac{1.60 \times 10^{-19}}{9.11 \times 10^{-31}} = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

(2) 波と粒子

光や電子などは波動性と粒子性をもっている。波としての波長 λ , 振動数 ν と粒子としてのエネルギー E , 運動量 (大きさ) p との間には次の関係がある。

$$\left. \begin{array}{l} E \propto \nu \quad \therefore E = h\nu \\ p \propto \frac{1}{\lambda} \quad \therefore p = \frac{h}{\lambda} \end{array} \right\} h \text{ はプランク定数で, } h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

電子の質量を m , 速さを v とすれば, $p = mv$ となる。しかし, 光子 (粒子としての光) には質量がないので $p = mc$ (c は光速) とはならない。

$c = \nu\lambda$ を用いると,

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{c/\nu} = \frac{h\nu}{c} = \frac{E}{c} \text{ となる。}$$

電子などの粒子の運動によって生じる波を物質波 (ド・ブローイ波) という。

(3) 光電効果

金属に波長の短い光を当てると電子が飛び出す。金属内の1つの自由電子は光子からエネルギー $h\nu$ をもらい, 金属外に出るのに W (仕事関数) の仕事を必要とし, $h\nu - W$ が飛び出した電子の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ となる。すなわち,

$$h\nu - W = \frac{1}{2}mv^2 \quad \therefore h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2$$

〔4〕 コンプトン効果

波長 λ のX線を物質に当てると、原子内の電子と衝突して、X線は散乱される。散乱されたX線の波長 λ' は λ より長くなる。これはX線の粒子性を示す現象である。

〔5〕 X線の最短波長

電子を電圧 V で加速し、これをターゲットに当てるとX線を生じる。電子のもっていた運動エネルギー eV がすべてX線になるとき最短波長のX線を生じる。このX線の波長を λ 、振動数 ν 、光速を c 、プランク定数を h とすれば、

$$eV = h\nu = \frac{ch}{\lambda} \quad \therefore \lambda = \frac{ch}{eV}$$

$$(h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2 \rightleftharpoons \frac{1}{2}mv^2 = eV)$$

〔6〕 電子ボルト（エネルギーの単位）

静止している電子を1ボルトの電圧で加速したとき、電子のもつ運動エネルギーは 1.60×10^{-19} [J]であるが、この値を1電子ボルト (eV) とよぶ。

〔7〕 ブラッグの反射

結晶の格子面に、波長 λ のX線が、格子面と θ の角度で入射し、反射するとき、各格子面で反射されたX線の波が強め合う条件は、

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

ただし、 d は格子面の間隔である。

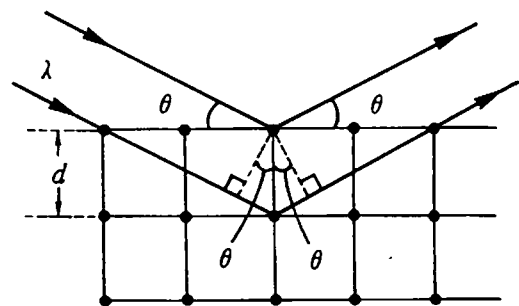
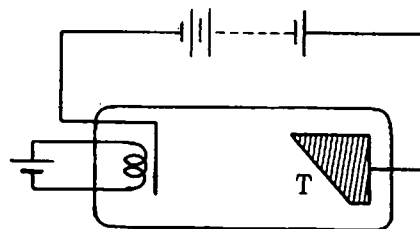


図1

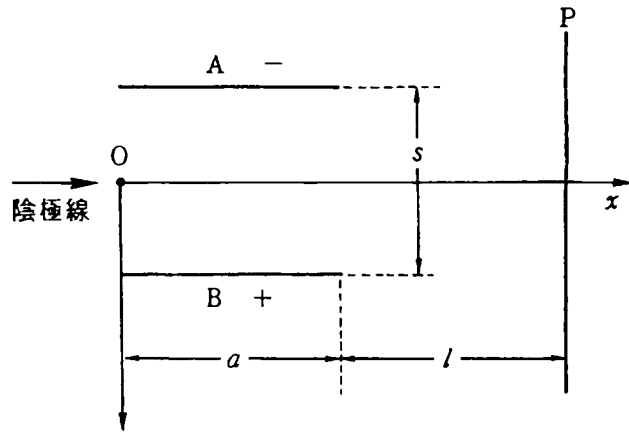
問 題

【1】 電子を 1.24×10^4 ボルトの電圧で加速してターゲット T に当てたとき、制動放射によって連続 X 線を発生させるものとする。電子の電気量を $e = 1.6 \times 10^{-19}$ クーロン、プランクの定数を $h = 6.6 \times 10^{-34}$ J \cdot s、真空中の光速を、 $c = 3.0 \times 10^8$ m/s として、次の各問に答えよ。



- (1) この連続 X 線の最短波長はいくらか。
- (2) この最短波長の X 線の光子の運動量はいくらか。
- (3) この X 線管球を流れる電流が 2.0 mA であったとすると、X 線管球での消費電力はいくらか。(このときヒーターでの消費電力を除くことにする。)

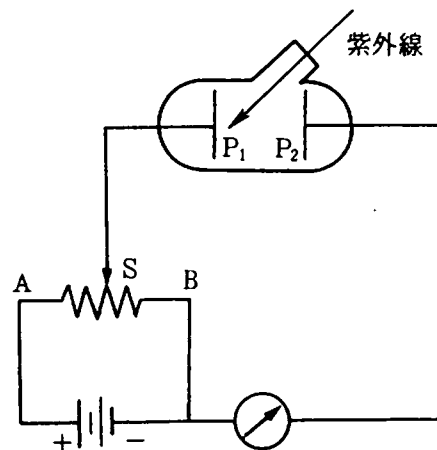
【2】 右図のように、真空内に1辺の長さが a [m] の正方形の極板 A, B があり, A は負, B は正で, これらの間には V [V] の電圧がかかっており, その間隔は s [m] である。極板の端から l [m] の所に極板と垂直に蛍光板 P を置く。極板の1辺に初速 v [m/s] で陰極線を送ると, 蛍光



板に輝点ができる。電子の質量を m [kg], 電気量を e [C] として次の問に答えよ。

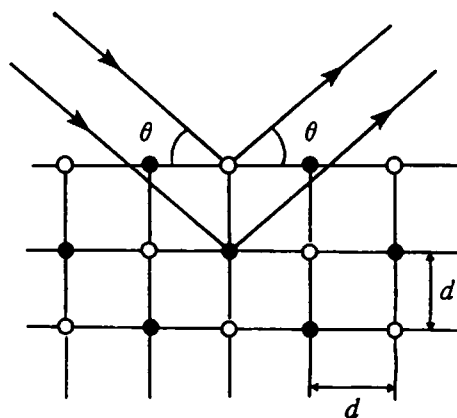
- (1) 電子が電界を出るときの速度の x 成分 v_x , y 成分 v_y を求めよ。
- (2) そのときの電子の位置は, 電子が初め運動していた直線 (x 軸) から, 垂直にどれだけ離れた所であるか。
- (3) 蛍光板上の輝点は, 電子が初め運動していた直線 (x 軸) と蛍光板との交点からどれだけ離れた所であるか。

【3】 真空中に、2枚の同種の金属のできた電極 P_1 、 P_2 を向かい合わせに置き、これに図のような回路をつなぐ。可変抵抗器 AB の接点 S を B 端に置き、 P_1 に波長 $2.5 \times 10^{-7} \text{ m}$ の紫外線を当てたら、回路に光電流が流れた。紫外線を当てたまま S を A 端に近づけると、回路の電流は減少し、ついにあるところで電流が 0 になった。



- (1) この紫外線の光子のエネルギーは何ジュールか。
- (2) 紫外線が当たる前には金属内の電子は静止しているものとし、また、金属内の電子1個を外に引き出すには 4.0×10^{-19} ジュールの仕事があるものとするれば、飛び出す瞬間の光電子の速さはいくらか。
- (3) 回路の電流が 0 になるのは、 P_1 、 P_2 間にかかる電圧が何ボルトになるときか。ただし、電子の電荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ クーロン、電子の質量 $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg、プランク定数 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 、光の速さ $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

【4】 食塩の結晶の表面は、碁盤の目のように Na^+ と Cl^- が間隔 d を隔てて、規則正しく並んだ格子面になっており、この格子面が右図のように何枚も重なって食塩の結晶を形作っている。したがって、食塩の結晶の最小単位は Na^+ と Cl^- が立方体の8つのすみに交互に並んだものと見ることができる。



いま、結晶の表面とのなす角が θ であるような方向に、波長 λ のX線を当てる場合を考える。X線は波長の極めて短い電磁波であるから、結晶表面の格子面で反射したX線と、次の格子面で反射したX線は互いに干渉して強めあうことがある。

- (1) 強い反射X線が得られる場合、 λ 、 θ 、 d 、 $n (= 1, 2, 3, \dots)$ の間にはどのような関係が成り立つか。
- (2) 銅のターゲットから出る $\lambda = 1.54 \times 10^{-10} \text{ m}$ のX線を食塩の結晶に当てると、いろいろの角度 θ で、強い反射X線が観測されるが、その中で最も小さい角度 θ は、 $15^\circ 52'$ であることが実験でわかった。このことから、食塩の結晶では d の値はいくらになるか。

2 原子と原子核

〔1〕 原子

原子番号が Z の原子は、 $+Ze$ (e は電気素量) の電荷をもった原子核と Z 個の電子とからできており、その大きさは約 10^{-10} m である。

〔2〕 原子のエネルギーと光の放出

(a) 原子は特定のエネルギー E_n ($n = 1, 2, 3, \dots$) をもつ定常状態にだけ存在する。

(b) 原子がエネルギー E_n の状態から E_k ($< E_n$) の状態に移るとき、 $E_n - E_k$ のエネルギーをもつ光子、すなわち、

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} \text{ の振動数の光を放出する。}$$

〔3〕 量子条件

質量が m の電子が速さ v で原子核のまわりを半径 r で円運動するとき、物質波の波長 λ が円周に n 個 ($n = 1, 2, 3, \dots$) おさまるとき、原子は定常状態となる。

したがって、

$$2\pi r = \lambda n = \frac{h}{p} n = \frac{h}{mv} n \quad (\because p = \frac{h}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{h}{p})$$

〔4〕 原子核

質量数 A 、原子番号 Z の原子の原子核は、 Z 個の陽子 (水素の原子核と同じで、その電荷は $+e$) と $A - Z$ 個の中性子 (質量はほとんど陽子に等しく、電荷は 0) とからできていて、その大きさは $10^{-14} \sim 10^{-15}$ m。

〔5〕 同位体（アイソトープ）

原子番号が同じであっても、原子核内の中性子の数が異なるため、質量数の異なる原子がある。

これらをまとめて同位体（ ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{1}^1\text{H}$, ${}_{1}^2\text{H}$ ）という。

〔6〕 原子質量単位

${}_{6}^{12}\text{C}$ の質量の 1/12 を原子質量単位（記号 u）とよぶ。

$$1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}\text{ kg}$$

〔7〕 質量とエネルギー

質量 m [kg] が消滅すると mc^2 [J] のエネルギーを生じる。ただし、 c は真空中の光速で 3.0×10^8 m/s。

〔8〕 質量欠損と結合エネルギー

原子番号が Z ，質量数が A の原子核の質量は、 Z 個の陽子と $(A-Z)$ 個の中性子の質量の和よりいくらか少ない。この差を質量欠損という。

質量欠損が Δm [kg] のときには、 Δmc^2 [J] のエネルギーが核子（陽子と中性子）を結合させる結合エネルギーとして外に放出される。

〔9〕 放射線（ e は電気素量）

放射性原子が崩壊するとき、 α 線、 β 線、 γ 線のような放射線を放出する。

| 種類 | α 線 | β 線 | γ 線 |
|------------|------------|-----------|------------|
| 本体 | ヘリウム原子核 | 電子 | 波長の短い電磁波 |
| 帯電量 | $+2e$ | $-e$ | 0 |
| 電界や磁界の作用 | あり | あり | なし |
| 透過力 | 弱 | 中 | 強 |
| 電離・写真・蛍光作用 | 強 | 中 | 弱 |

〔10〕 原子核の崩壊

原子核が α 線や β 線を放出して他の原子核に変わることを『崩壊』という。原子番号が Z 、質量数が A の原子核が崩壊をすると原子番号や質量数は下表のように変わる。

| 崩壊の種類 | Z | A |
|-------------|-------|-------|
| α 崩壊 | 2だけ減る | 4だけ減る |
| β 崩壊 | 1だけ増す | 変わらない |

〔注〕 陽電子を放出するときは、 Z は1だけ減る。

〔11〕 原子核反応の特性

- (a) 原子番号、質量数などの和は保存される。
- (b) 運動量は保存される。このとき、 $p = \frac{h}{\lambda}$ も加える。
- (c) 原子核反応では質量がエネルギーに変換されることがある。このエネルギーや $h\nu$ も加えると、エネルギーは保存される。

〔12〕 放射性原子の半減期

半減期が T の放射性原子 M [kg]があるとき、時間 t の後に残るその原子の質量を m [kg]とすれば、

$$\frac{m}{M} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad \therefore m = M \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \dots \textcircled{1}$$

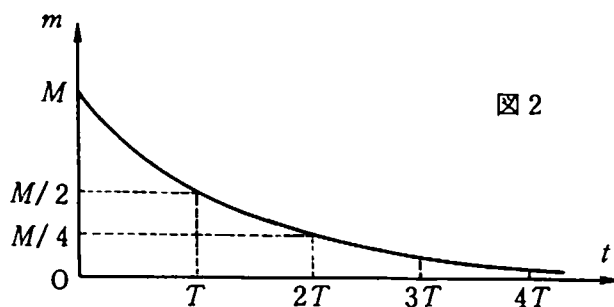
$\frac{m}{M} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$ の対数をとると、

$$\log\left(\frac{m}{M}\right) = -\frac{t}{T} \log 2 = -\frac{\log 2}{T} t = -\alpha t \dots \textcircled{2}$$

ただし、 $\alpha = \frac{\log 2}{T}$ である。なお、 α を崩壊定数とよび、これはガイガーカウンターのカウント数に比例する。

②から、 $\frac{m}{M} = e^{-\alpha t} \quad \therefore m = M e^{-\alpha t}$

m や M に原子数を用いても同様の関係が成り立つ。



問 題

【 1 】 水素原子は質量 M [kg] , 電荷 $+e$ [C] の原子核と質量 m [kg] , 電荷 $-e$ [C] の電子 1 個をもっている。原子核のまわりを電子が半径 a [m] の円軌道面を描いてまわっている。

- (1) 電子の運動エネルギーを求めよ。
- (2) 電子の運動エネルギーと位置エネルギーの和 E を求めよ。ただし、電子の位置エネルギーは、 $-9.0 \times 10^9 \frac{e^2}{a}$ である。
- (3) 原子核のまわりをまわる電子の円軌道は、その円周が電子波の波長の整数 n ($= 1, 2, 3, \dots$) 倍のものだけが許される。これを軌道の量子化という。量子化されたときの半径 a を求めよ。ただし、プランク定数を h [J·s] とする。
- (4) 量子化されたときの E の値 E_n (水素原子のエネルギー) を求めよ。

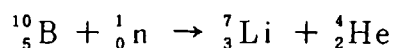
【 2 】 放射性ナトリウム ${}_{11}^{24}\text{Na}$ は、半減期 15 時間で β 崩壊する。電気素量 e を、 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 、アボガドロ数 N_0 を $N_0 = 6.02 \times 10^{23} \text{ 個/mol}$ として次の間に答えよ。

- (1) 1g の放射性ナトリウムは 45 時間後には何 g になるか。
- (2) 放射性ナトリウム 1g を含む線源が、初め帯電していないとき、45 時間後の帯電量は何 C か。電気の正、負も含めて答えよ。ただし、 β 線粒子のもつ電気量はすべて線源から運び去られるものとし、また、それ以外に線源への電気量の移動はないものと仮定する。
- (3) 放射性ナトリウム 1g で毎秒起こる崩壊の数は、半減期 1600 年をもつラジウム ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 1g の場合の何倍か。ただし、線源の中で毎秒起こる崩壊の数は放射性原子の現在数に比例し、その半減期に反比例するものとする。

【 3 】 ラドン (Rn) は原子番号 86, 質量数 222 であって, α 崩壊してラジウム A (RaA) となる。また, この崩壊によって放出された α 粒子の運動エネルギーは $8.8 \times 10^{-13} \text{ J}$ である。

- (1) ラジウム A (RaA) の原子番号と質量数はそれぞれいくらか。
- (2) 初め, Rn の原子核が静止しているものとすれば, 崩壊したとき RaA は, どの方向に飛び出すか。また, 飛び出した RaA の運動エネルギーはいくらか。

【 4 】 次の式で表される原子核反応がある。



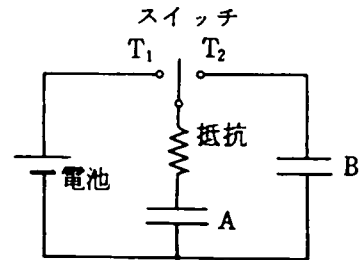
この反応が静止していたホウ素 ${}^{10}_5\text{B}$ に速さがほとんど 0 の中性子 ${}^1_0\text{n}$ が当たって起こったとする。 ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^1_0\text{n}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^4_2\text{He}$ の質量はそれぞれ 10.01677 u , 1.00898 u , 7.01822 u , 4.00388 u であり, 1 u の質量は 931 MeV であるとして, 次の各問に答えよ。

- (1) この反応で放出されるエネルギー (Li と He の運動エネルギーになる) は何 MeV か。
- (2) 反応の前における運動量の和が 0 であったので, Li と He の運動の向きは正反対でなければならない。なぜか。
- (3) Li と He の速さの比を求めよ。
- (4) Li と He の運動エネルギーはそれぞれいくらか。

電磁気の演習問題

【1】 次の(1) ~ (11) に数式を入れよ。

起電力 E [ボルト] の電池，容量 C_A [ファラッド] と C_B [ファラッド] のコンデンサー A と B，抵抗 R [オーム] の抵抗およびスイッチからなる図のような回路を考える。ただし，電池の内部抵抗は無視できるものとし，時刻 $t=0$ ではコンデンサー A と B には電荷は蓄えられていないものとする。



時刻 $t=0$ で，スイッチを T_1 側へ倒す。 t 秒後に，コンデンサー A に蓄えられている電荷を $Q(t)$ [クーロン]，コンデンサー A の極板間の電位差を $V(t)$ [ボルト] とし，抵抗を通して流れる電流を $I(t)$ [アンペア] とする。抵抗の両端の電位差 $I(t)R$ ，コンデンサー A の電位差 $V(t)$ と電池の起電力 E の間には $E = (1) \text{ }$ の関係がある。また， $Q(t)$ と $V(t)$ の間には， $Q(t) = C_A V(t)$ の関係が成り立つ。スイッチを T_1 側に倒した直後には，電荷 $Q(0)$ は 0 であるから $I(0) = (2) \text{ }$ の電流が流れる。電流が流れることによって $Q(t)$ は増加するので， $I(t)$ は時間の経過と共に減少する。十分時間が経過した後では，電流は 0 になり，コンデンサー A の電位差と電荷はそれぞれ一定値 (3) [ボルト]， (4) [クーロン] になる。

先に述べたコンデンサー A への充電過程において，電池は一定の電位差 E [ボルト] で (4) [クーロン] の電荷を移動させたから，電池のなした仕事 W_E は (5) [ジュール] に等しい。 W_E の一部は，コンデンサー A に静電エネルギー U_A [ジュール] として蓄えられ，残りは抵抗においてジュール熱 W_1 [ジュール] として消費される。この静電エネルギー U_A は (6) であり，ジュール熱 W_1 は (7) である。

次にスイッチを T_2 側へ倒す。十分時間が経過した後では，コンデンサー A と B の両端の電位差は等しく (8) [ボルト] である。このとき，両方のコンデンサーには合計 $U = (9) \text{ }$ [ジュール] の静電エネルギーが蓄えられている。したがって，スイッチを T_2 側へ倒した後に抵抗において消費されるジュール熱 W_2 は (10)

[ジュール]である。また, W_E , W_I , U および W_2 の間にはエネルギー保存を表す関係式(1) が成り立っている。

(S・63-北大)

【 2 】 図 1 のような回路がある。L は図 2 のような電圧－電流特性をもつ電球， E_1 は起電力と内部抵抗が未知の電池， E_2 は起電力が 40 V で内部抵抗が 1Ω の電池， R はすべり抵抗器， A は電流計， V は電圧計， S_1 ， S_2 ， S_3 はスイッチである。電流計の内部抵抗と電圧計に流れる電流は無視できるものとして，以下の間に答えよ。

- (1) S_1 を閉じ， S_2 を開き， S_3 を a に接続した。すべり抵抗器の抵抗を変えながら測定すると，電流計と電圧計の読みは図 3 のようになった。電流計の読みが 0.6 A のとき，すべり抵抗器の抵抗はいくらか。
 - (2) 電池 E_1 の起電力と内部抵抗はいくらか。
 - (3) S_1 と S_2 を閉じ， S_3 を a に接続した。すべり抵抗器の抵抗を 40Ω にしたときの電流計の読みはいくらか。
 - (4) S_1 を開き， S_2 を閉じ， S_3 を b に接続した。すべり抵抗器の抵抗が 49Ω のとき，電球で 6 秒間に消費されるエネルギーはいくらか。
 - (5) S_1 と S_2 を閉じ， S_3 を b に接続した。電圧計の読みが 40 V のとき，すべり抵抗器の抵抗はいくらか。
- (S・63-山梨大)

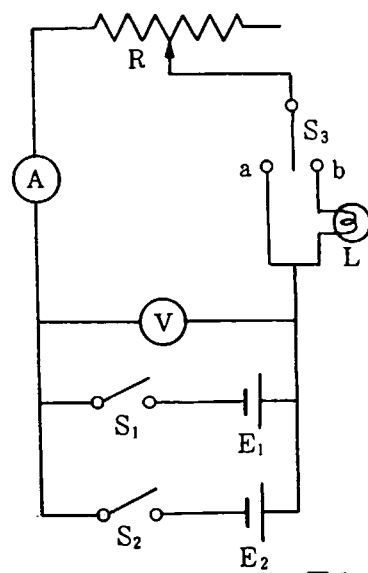


図 1

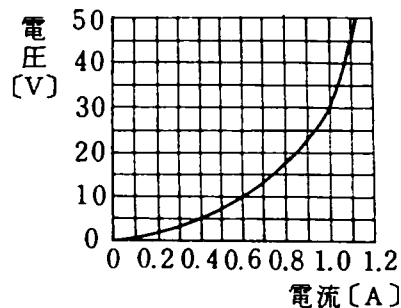


図 2

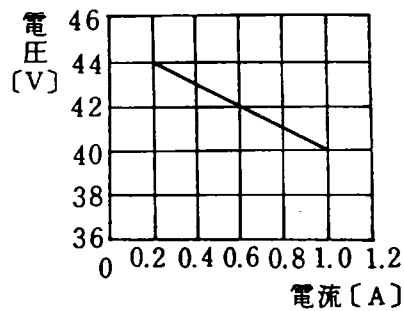
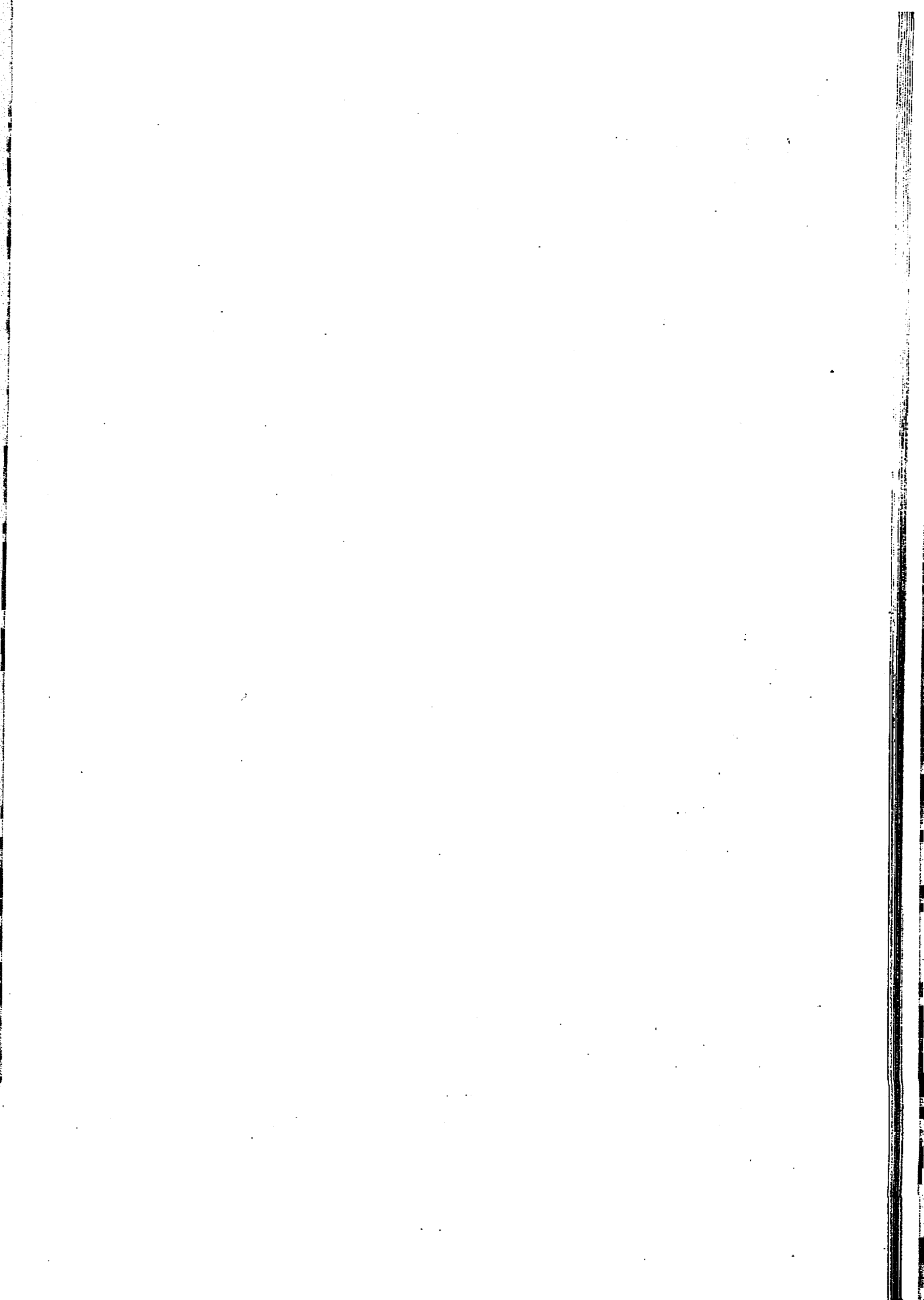


図 3



【3】 つぎの文中の空欄を埋めよ。答えは途中の経過とともに記せ。ただし、以下では電池の内部抵抗や導線の抵抗は無視してよい。

いま、厚さ a [m]、幅 b [m]、長さ c [m] の直方体の金属がある。金属中で電荷は自由電子によって運ばれるが、電界のないときは自由電子は不規則な動きをしており、その平均速度は 0 である。そこで、電界のないときは自由電子は静止しているものとみなし、さらにつぎのように単純化して、質量 m [kg]、電荷 $-e$ [C] の自由電子の運動を考えてみる。

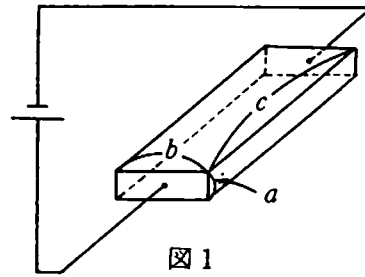


図 1

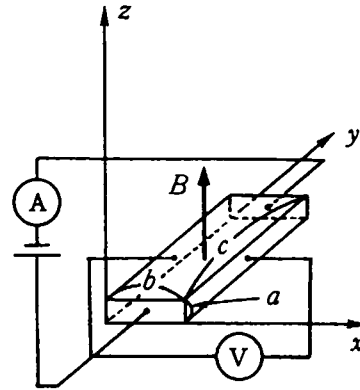


図 2

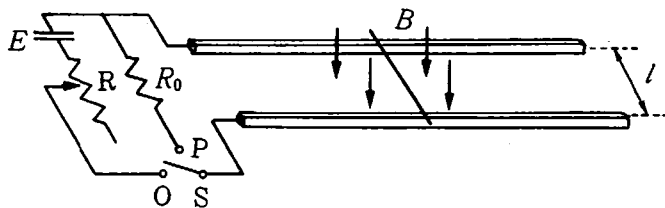
図 1 のように、この金属に起電力 V [V] の電池をつないだとき金属内部に一樣な電界ができ、この電界により加速された自由電子は短い時間 T_0 [s] ごとに 1 回原子と衝突し、加速によって得た運動エネルギーのすべてを失うものとする。そうすると、電界による電子の加速度は① [m/s²] であるから、電子が電界によって動いていく平均の速さは② [m/s] となる。また、自由電子が単位体積当たり n [1/m³] 個あるとすれば、衝突で単位時間に失われた電子の運動エネルギーは、金属全体では③ [J/s] となる。さらに、単位時間に運ばれる電荷の総量は④ [C/s] であり、これが金属を流れる電流であるから、金属の抵抗は⑤ [Ω] と表される。このように、オームの法則やジュール熱発生のおくみを自由電子の運動から理解することができる。

上で用いた T_0 や n を求めるにはつぎのようにすればよい。図 2 に示すように、この金属に起電力 V [V] の電池をつないで y 方向に電流を流すと同時に、さらに z 方向に磁束密度 B [Wb/m² または T] の一樣な磁界を金属全体にかける。金属を動かさないように固定しておき、また電流計④で金属に流した電流 I [A] を測定する。- y 方向に平均の速さ \bar{v} で動く電子は、磁界によって x 方向に大きさ⑥ [N] のローレンツ力を受ける。その結果、電流および磁界の両方に対し垂直な方向に起電力が生じ、その大きさは $V_x =$ ⑦ [V] である。この起電力を電圧

計①で測れば、 \bar{v} 、したがって $T_0 = \textcircled{8} \square [s]$ および $n = \textcircled{9} \square [1/m^3]$ が、
すべてわかっている量 ($a, b, c, m, e, V, B, I, V_z$) で求められたことにな
る。

(S・61-東工大)

【4】 図のように、同一水平面上に固定された間隔 l の平行なレールだけが、鉛直下向きの磁束密度 B の一様な磁界中にある。レールは十分長く、その上には質量 M の導体棒が直角に置かれている。レールの一端



には、起電力 V の電池、可変抵抗 R 、抵抗 R_0 と切換えスイッチ S が接続されている。

導体棒はレールと直交したまますべるものとし、導体棒とレールとの間の最大静止摩擦係数を μ 、すべり摩擦係数を $\frac{\mu}{5}$ 、重力加速度を g とする。切換えスイッチ S を O につないでも導体棒が動かないように、可変抵抗 R の大きさをあらかじめ調節しておく。電池の内部抵抗、導体棒とレールの電気抵抗、および空気抵抗は無視できるものとして、以下の設問に答えよ。答えは解答群の中から選び、その番号を記せ。解答群の番号は、何回用いてもよい。

- (1) 切換えスイッチ S を O につなぎ、可変抵抗 R を調節してその値が R_1 になったとき、導体棒がすべり始めた。したがって、 R_1 は(ア) である。
- (2) (1)の状態からしばらくして、導体棒の速さが一定の値 v になったとすれば、 v は(イ) である。このとき、導体棒を流れている電流の大きさは(ウ) となる。
- (3) (2)の状態で切換えスイッチ S を P へ切換えたところ、導体棒はさらに L だけすべって止まった。スイッチ S を切換えた直後導体棒に働いている力は、導体棒が進んでいる方向を正にとると(エ) である。また、導体棒が L だけすべる間に抵抗 R_0 で発生したジュール熱は(オ) である。

- [解答群]
- | | | | | |
|---|--------------------------|---|-------------------------|---------------------------|
| 10. $\frac{5V}{4Bl}$ | 11. $\frac{5Bl}{4V}$ | 12. $\frac{4V}{5Bl}$ | 13. $\frac{4Bl}{5V}$ | 14. $\frac{5BlV}{4Mg\mu}$ |
| 15. $\frac{4Mg\mu}{5BlV}$ | 16. $\frac{BlV}{Mg\mu}$ | 17. $\frac{Mg\mu}{BlV}$ | 18. $\frac{5Bl}{Mg\mu}$ | 19. $\frac{Mg\mu}{5Bl}$ |
| 20. $\frac{5Bl}{4Mg\mu}$ | 21. $\frac{4Mg\mu}{5Bl}$ | 22. $\frac{25M}{32} \times \left(\frac{V}{Bl}\right)^2 - \frac{Mg\mu L}{5}$ | | |
| 23. $\frac{25M}{32} \times \left(\frac{Bl}{V}\right)^2 - \frac{Mg\mu L}{5}$ | | 24. $\frac{8M}{25} \times \left(\frac{V}{Bl}\right)^2 - \frac{Mg\mu L}{5}$ | | |

$$25. \frac{8M}{25} \times \left(\frac{Bl}{V}\right)^2 - \frac{Mg\mu L}{5}$$

$$26. -\frac{Mg\mu}{5} + \frac{5BlV}{4R_0}$$

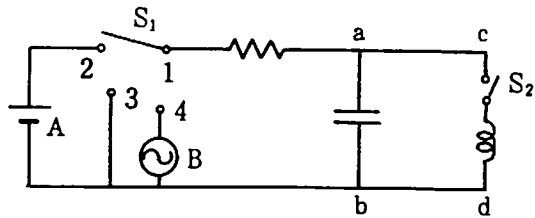
$$27. -\frac{Mg\mu}{5} + \frac{4BlV}{5R_0}$$

$$28. -\frac{Mg\mu}{5} - \frac{5BlV}{4R_0}$$

$$29. -\frac{Mg\mu}{5} - \frac{4BlV}{5R_0}$$

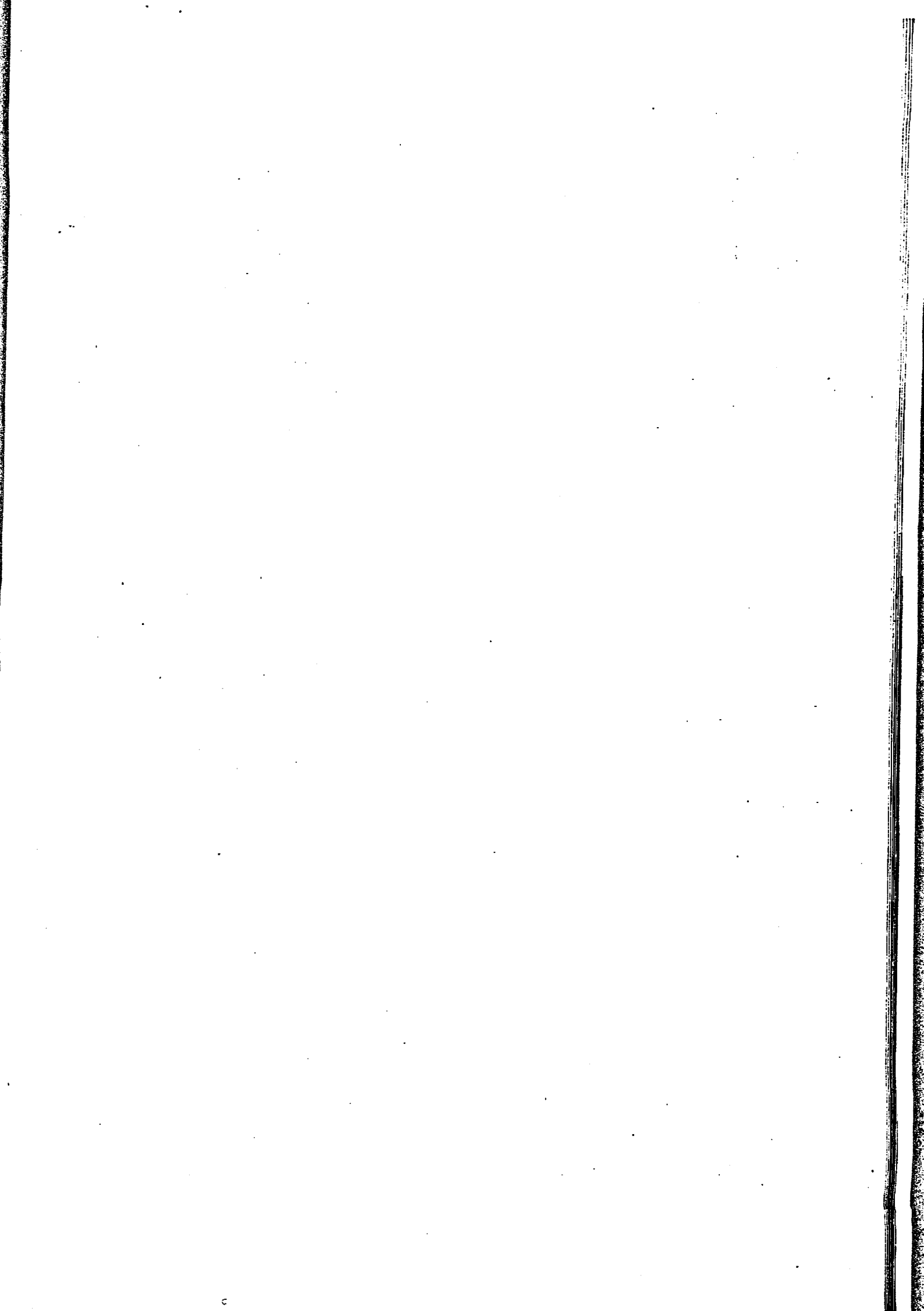
(H・1 - 東京理大)

【5】 起電力 V [V] の電池 A, 角周波数 ω [rad/s] を変化させることのできる交流電源 B, 静電容量 C [F] のコンデンサー, 自己インダクタンス L [H] のコイル, 抵抗値 R [Ω] の



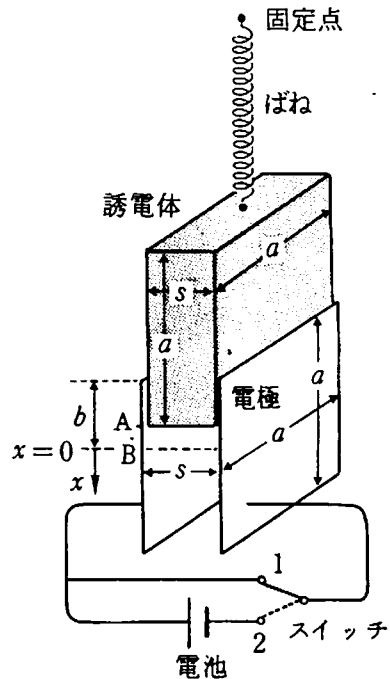
抵抗およびスイッチ S_1 , S_2 を用いて右図のような電気回路を構成した。A および B の内部抵抗は無視できるものとして次の問いに答えよ。解答は問題文に与えられている V , V_0 , ω , C , L , R および数値を用いて表せ。

- (1) 初めに S_2 を開き, S_1 を接点 1 と 2 がつながる状態にして, 電池 A によってコンデンサーを充電した。コンデンサーが充電され終わったとき,
 - (a) コンデンサーに蓄えられた電荷は何クーロン [C] か。
 - (b) 電池 A のなした電気的な仕事は何ジュール [J] か。
- (2) 次に S_1 を開いた後 S_2 を閉じると, 回路に正弦波振動電流が流れる。
 - (a) この振動電流の振動数は何ヘルツ [Hz] か。
 - (b) コンデンサーに蓄えられた電荷が初めて 0 となるのは S_2 を閉じてから何秒後か。
- (3) 次に S_2 を閉じたままで S_1 を接点 1 と 3 がつながる状態にすると抵抗にも振動電流が流れて電力が消費され, 充分時間がたつと回路を流れる振動電流は消滅する。この過程で抵抗によって消費されたエネルギーは何ジュール [J] か。
- (4) 次に S_2 を閉じたままで S_1 を接点 1 と 4 がつながる状態にして, 交流電源 B を回路に接続すると抵抗, コンデンサー, コイルに交流電流が流れる。b 点を基準にして a 点の電位が $V_0 \cos \omega t$ [V] で表されるとすると, a 点からコンデンサーを通過して b 点へ流れる電流および c 点からコイルを通過して d 点へ流れる電流は, それぞれ $I_1 \cos(\omega t + \alpha)$ [A], $I_2 \cos(\omega t + \beta)$ [A] と表される。
 - (a) I_1 はいくらか。
 - (b) I_2 はいくらか。
 - (c) α および β はいくらか。
 - (d) B の角周波数 ω を変化させたところ, 抵抗の両端の電圧の振幅が 0 となった。このときの ω の値を求めよ。
(H・1 - 横浜国大)



【6】 次の文章の空欄を数字と本文中に使用されている記号を用いて埋めよ。

図に示すように、極板が垂直に固定された平行板コンデンサーがある。極板は一边が a の正方形で、2つの極板の間隔は s である。はじめ、スイッチは1の位置にあり、コンデンサーに電荷はたくわえられていない。いま、一边が a の正方形で厚さがほぼ s に等しい質量 m の誘電体があり、この誘電体が電氣的に絶縁されたばね定数 k のばねで固定点からつり下げられて静止している。このときの誘電体の下端の位置を A とする。ただし、ばねの質量は無視できるほど軽い。



次にスイッチを2の位置にして、コンデンサーに起電力 V で内部抵抗の無視できる電池を接続したところ、誘電体は一定の力で引き込まれた。そこで、誘電体をつりあいの状態で静止させると、このときの誘電体の下端の位置 B は極板の上端から b だけ入ったところであった。誘電体を垂直下方に x_0 ($x_0 > 0$) だけ引っ張り、時刻 $t = 0$ で静かに放したところ、横揺れすることなく上下に一定の周期で単振動を始めた。ただし、 x_0 は b に比べて小さく、誘電体の下端はつねに極板間にあるものとする。コンデンサーの極板の間は真空で、真空の誘電率を ϵ_0 、誘電体の誘電率を ϵ とする。誘電体と極板との間のすき間は無視できる程度に狭いが、誘電体は摩擦もなく滑らかに振動し、コンデンサーの電極の電荷や誘電体における分極の変化は速やかに行われるものとする。

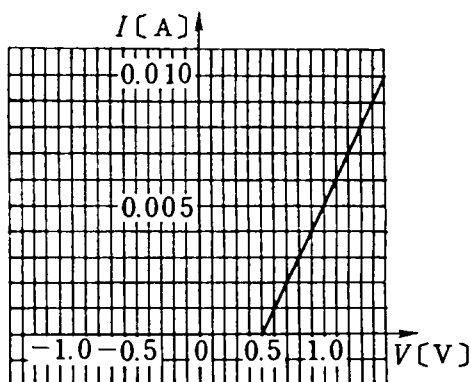
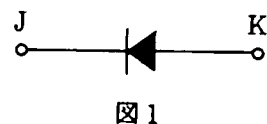
誘電体がつりあいの位置 B から x だけ変位しているとき（垂直下方を変位 x の正方向にとる）、誘電体に働く復元力の大きさはばねの弾性力の大きさ(1) であると考えられるので、誘電体の加速度は(2) と書ける。したがって、振動を開始して、時間 t だけ経過したとき、その変位 x は(3) で与えられる。

誘電体の変位が x であるとき、コンデンサーの電気容量は誘電体の挿入されている部分と真空部分との合成容量と考えられるので(4) で表される。このとき、コンデンサーに蓄えられた電荷（電気量）は時間 t の関数として(5) で

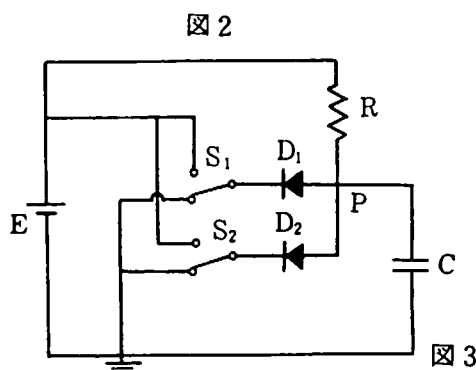
与えられ、コンデンサーに蓄えられる静電エネルギーの最大値は(6) である。
また、電池を接続する前のつりあいの位置Aと電池を接続した後のつりあいの位置Bの間の距離は(7) である。

(H・2 - 大阪大(前))

【7】 図1の記号で表されるダイオードと呼ばれる素子がある。この素子は、図1の点Jに対する点Kの電位を $V[V]$ とすると、 $K \rightarrow J$ の向きに流れる電流 $I[A]$ が図2で表される電流-電圧特性をもつ。



この素子を2個用いて図3に示す回路を作った。ここでEは内部抵抗が無視できる起電力1.5Vの電池、Rは抵抗が 100Ω の抵抗器、Cは容量 $4.0\mu F$ のコンデンサー、 S_1, S_2 は図の上側または下側の接点と切り替えて接続できるスイッチである。したがって、これらのスイッチの接点の位置の組み合わせにより、この回路は下表のような①～④の4つの状態のいずれかとなる。ここで①～④は、スイッチを切り替えてから十分時間が経過した後の状態とする。以下の問いの答えを記せ。なお、解答に必要な考え方や式、計算などを簡単に書き、答えは有効数字2桁で示せ。



| 状態 | S_1 | S_2 |
|----|-------|-------|
| ① | 下側 | 下側 |
| ② | 上側 | 下側 |
| ③ | 下側 | 上側 |
| ④ | 上側 | 上側 |

- (1) ダイオードに流れる電流を $I[A]$ ($I > 0$) として、ダイオードの両端の電位差を式で表せ。
- (2) 図3中の電位E、抵抗器Rおよびダイオード D_2 だけを用いて回路を単純化し、状態②を表すことができる。その単純化した回路を書け。
- (3) 状態②のときに、ダイオード D_2 に流れる電流はいくらか。
- (4) 図3中の点Pの電位は①～④のそれぞれの状態のときいくらか。
- (5) 状態①および状態④のときに、抵抗器Rで1秒間に発生するジュール熱[J]はいくらか。
- (6) 状態②および状態④のときに、コンデンサーに蓄えられる電気量[C]はそれぞれいくらか。
- (7) 状態③から状態④に変わったとき、コンデンサーに蓄えられているエネルギー

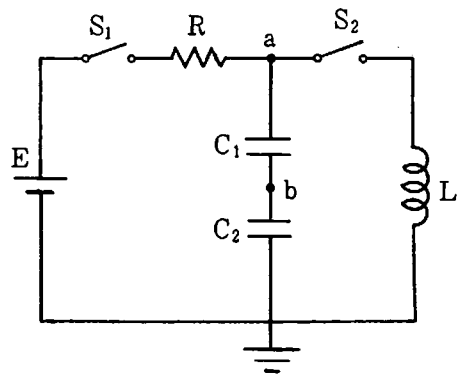
一が W_1 だけ変化したとする。 W_1 はいくらか。また、この間に電池のした仕事を W_2 とすると、 W_1 と W_2 との大小関係はどうなるか。次の①～③から選び記号で答え、その理由を40字程度で記せ。

{ ① $W_1 < W_2$ ② $W_1 = W_2$ ③ $W_1 > W_2$ }

(H・2 - 九州工大)

【 8 】 以下の文中の 内に適当な数値を記入せよ。

図は、電池 E とスイッチ S_1 , S_2 , 抵抗 R, コンデンサー C_1 , C_2 , コイル L よりなる回路である。電池 E の起電力は 10 [V] で内部抵抗は無視する。抵抗 R の抵抗値は 1.0×10^3 [Ω] で、コンデンサー C_1 , C_2 の電気容量はそれぞれ



ぞれ 1.0×10^{-6} [F], 4.0×10^{-6} [F], コイル L の自己インダクタンスは 5.0×10^{-2} [H] である。回路を構成する導線の抵抗は 0 [Ω] である。

はじめに S_1 , S_2 は開いており, C_1 , C_2 には電荷はないものとする。

- (1) S_2 を開いた状態で S_1 を閉じると, コンデンサーに充電が始まる。 S_1 を閉じた直後の a 点の電位は (1) [V] であり, a 点を流れる電流は (2) [A] である。
- (2) 十分時間が経ち充電が完了した時点の a 点の電位は (3) [V] であり, b 点の電位は (4) [V] である。このとき C_1 と C_2 にはそれぞれ (5) [C] と (6) [C] の電気量が蓄えられる。また, このとき C_1 と C_2 に蓄えられるエネルギーはそれぞれ (7) [J] と (8) [J] である。
- (3) この状態で S_1 を開いて S_2 を閉じると, コンデンサーは放電を開始する。放電により, 最初コンデンサーに蓄えられていた全エネルギーはコイルのエネルギーに変わる。しかしコイルの自己誘導により電流は流れ続け, コンデンサーには再びエネルギーが蓄えられる。そしてコンデンサーは最初と逆向きに再び放電を開始する。こうしてコンデンサーとコイルの間でエネルギーのやり取りが繰り返され, 電気振動が生じる。 C_1 と C_2 の合成容量を C [F], コイルの自己インダクタンスを L [H] とすると, 図の回路における電気振動の固有周波数は $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ [Hz] である。したがって, コイルを流れる電流が最初に最大となるのは S_2 を閉じてから (9) [s] 後となる。また, コイルを流れる電流を I [A] とするとコイルの蓄積エネルギーは $\frac{1}{2}LI^2$ [J] と表されることから, コイルを流れる電流の最大値は (10) [A] となることわかる。(H・2-長崎大)

22

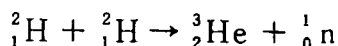
原子物理の演習問題

【1】 原子核Aが α 崩壊によって原子核Bにかわるものとする。核Bは一般に不安定で、多くの場合 γ 崩壊によって、より安定な原子核にかわる。核A, Bおよび α 粒子の質量をそれぞれ M_A, M_B, m とし、また光速度の大きさを c として、以下の問いに答えよ。

- (1) はじめの α 崩壊において核Aは静止していたものとする。このとき核Bと α 粒子がもつ運動エネルギーの和を Q とし、 Q の大きさを求めよ。
- (2) 前問の α 粒子がもつ運動エネルギーの大きさはどれだけか。 Q をもちいて答えよ。
- (3) (1)における核Bが、その進行方向に γ 線光子を放出して別の核にかわり、静止したものとする。このとき放出される γ 線光子のエネルギーはどれだけか。 Q をもちいて答えよ。
- (4) (1)の α 粒子が、近くにある、別の静止した核Bに衝突したとき、この核Bは α 粒子を吸収して核Aに変換されうるかどうか。以下の記述のうちから正しいものを1つえらんで記号で答えよ。
 - ア. エネルギー保存の法則からみて不可能である。
 - イ. α 粒子と核Bは、ともに正電荷をもっていて、互いに反発しあうので、この反応は一般に不可能である。
 - ウ. $A \rightarrow B + \alpha$ という反応が起きたのだから、その逆は常に可能である。
 - エ. 運動量保存の法則が成り立つためには、 α 粒子が核Bに正面衝突する必要がある、その場合には可能である。

(H・2 - 名城大)

【 2 】 原子核融合反応，



について下の各問いに答えよ。ただし，重水素 ${}^2_1\text{H}$ ，ヘリウム ${}^3_2\text{He}$ ，中性子 ${}^1_0\text{n}$ の質量は，それぞれ 2.0136 u，3.0160 u，1.0087 u である。

また， $1\text{u} = 1.66 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，ボルツマン定数 $k = 1.38 \times 10^{-23}[\text{J/K}]$ ，光の速さ $c = 3 \times 10^8[\text{m/s}]$ である。なお電気素量 $e = 1.6 \times 10^{-19}[\text{C}]$ である。

- (1) この反応における質量欠損はいくらか。
- (2) この質量欠損は He と n の運動エネルギーとして解放される。その大きさは 1 反応あたりいくらか。
- (3) 1 kg の重水素から得られるエネルギーはいくらか。
- (4) 二つの重水素核に上記の反応を起こさせるためには，互いに $2 \times 10^{-15}\text{m}$ 程度の距離に近づける必要がある。その距離における，静電気による位置エネルギーを計算せよ。ただし，静電気力法則の定数を $9 \times 10^9[\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2]$ とする。
- (5) 上記の核反応を起こすことのできる重水素核の運動エネルギーを，重水素気体の熱エネルギーとして得ようとすれば，気体の温度をおよそいくらにすればよいか。(H・2 - 弘前大)

【 3 】 次の文中の をうめよ。

- (1) 水素原子の発する光は固有の線スペクトル群からなり、その線スペクトルの波長 λ は次の関係式に従うことが、実験的に明らかにされた。

$$1/\lambda = R \{ (1/m^2) - (1/n^2) \}$$

(但し、 $R = 1.10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$; m, n は正の整数、 $n > m$)

ボーアは、独自の仮説を含む原子模型を提唱し、この実験結果を説明することに成功した。

- (2) ここでは、ボーアの原子模型により理論的に決まる水素原子の線スペクトルの波長を求めてみる。

(i) 水素原子の中の電子(質量 m_e 、電荷 $-e$)は原子核(電荷 $+e$)のまわりを速さ v で半径 r の等速円運動をする。原子核と電子との間に働く力はクーロンの法則より、 k を定数として ke^2/r^2 で与えられ、この力が等速円運動の向心力となるので、 $ke^2/r^2 = \text{ア}$ の関係式が成り立つ。電子は、運動エネルギー $K = \text{イ}$ と静電気力による位置エネルギー $U = -ke^2/r$ (無限遠点を基準点にとる)を持つので、全エネルギー $E (= K + U)$ は、 k, e, r で表して $E = \text{ウ}$ となる。これらの等速円運動をする電子のうち、量子条件 $m_e v \cdot 2\pi r = nh$ (n は正の整数(量子数と呼ぶ)、 h は)を満たすもののみが、電磁波を放出せず安定に存在できる定常状態にある。この量子条件は、ド・ブロイの物質波の考え方からすると、 $\lambda = \text{オ}$ の波長の電子(質量 m_e 、速度 v)の波が半径 r の円軌道上にちょうど定常波として存在する条件 $2\pi r = n\lambda$ と等しいことがわかる。定常状態の軌道半径 r と全エネルギー E は e, m_e, k, h, n で表すと $r = \text{カ}$ 、 $E = \text{キ}$ となり、量子数 n だけで決まるとびとびの値(r_n および E_n と書く)をとる。

(ii) 電子が高いエネルギー(E_n)の定常状態から低いエネルギー(E_m)の定常状態へ移るとき、 $E_n - E_m$ に相当するエネルギーを持った振動数 ν の光子が1個放出される。 $E_n - E_m = \text{ク}$ の関係が成り立つ。従って、真空中の光の速度を c とすると、水素原子の出す光の波長 λ は $1/\lambda = \text{ケ} \{ (1/m^2) - (1/n^2) \}$ となり、実験結果より得られた関係式と等価な式が理論的に導かれたことになる。

- (3) (i) 量子数 $n = 1$ の定常状態(基底状態)の電子軌道の半径 r_1 とエネルギー E_1

を，次に示す各定数の値等を使って求めよ。

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

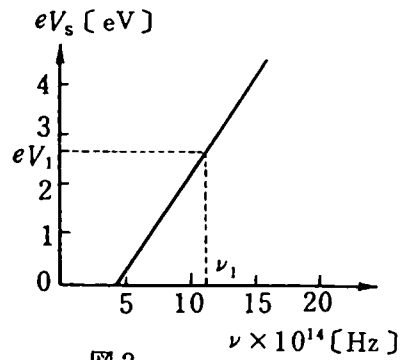
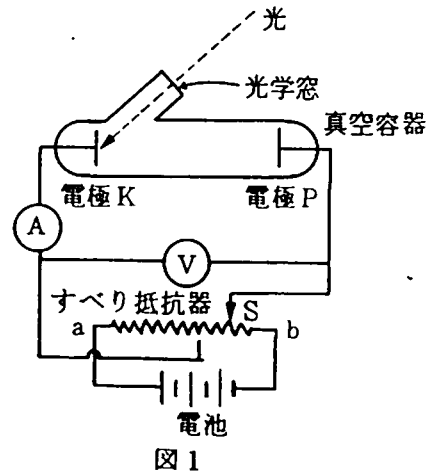
$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$r_1 = \boxed{\text{コ}} \text{ m}$$

$$E_1 = \boxed{\text{サ}} \text{ eV}$$

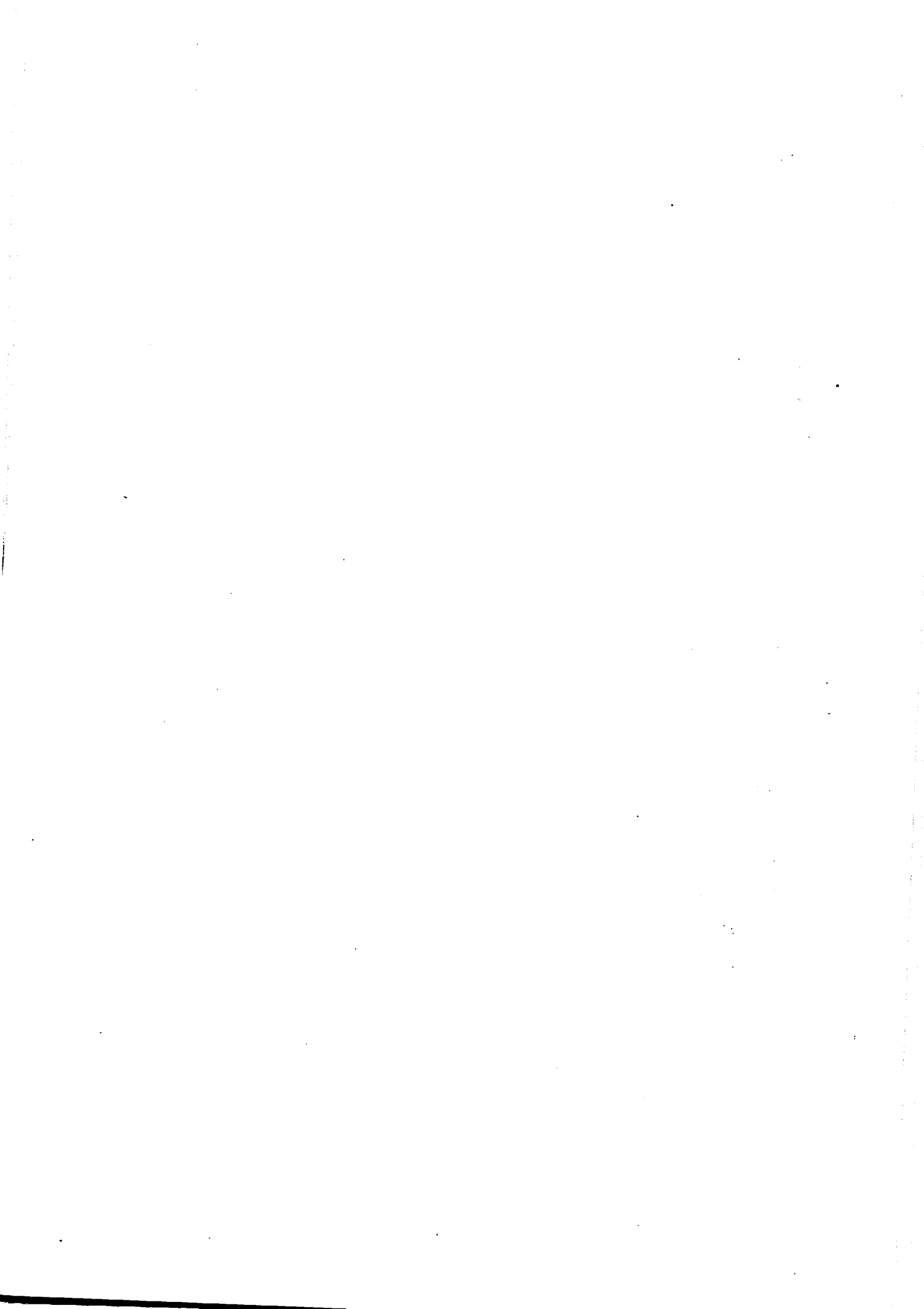
- (ii) 可視域 ($400 \times 10^{-9} \sim 800 \times 10^{-9} \text{ m}$)で観測される水素原子スペクトルの波長をすべて列挙せよ。 $\boxed{\text{シ}}$ m (H・2 - 大分大)

【4】 図1は光電効果の実験回路図を示している。振動数 ν の光を平板電極Kに照射しながら、すべり抵抗器の接点Sを操作し、電圧計Vと電流計Aの読みを記録する。図2は電流がゼロになったときの電圧 V_s [V]をエネルギーに換算して、光の振動数 ν [Hz]に対して描いたものである。平板電極K、Pは同じ金属で作られ、電極KP間の電界は一樣であると考えてよいものとする。プランクの定数を h [J·s]、電子の電荷を $-e$ [C]、質量を m [kg]として次の問いに答えよ。



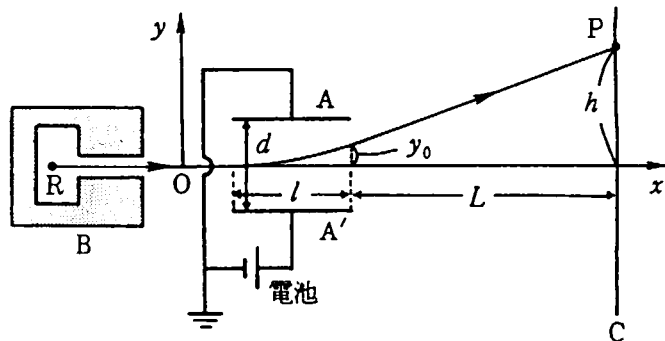
- (1) 振動数 ν_1 [Hz]の光に対する V_s [V]の値が V_1 [V]であった。このとき電極Kからとび出した瞬間の光電子の最大速度 v_1 [m/s]と、この光電子にともなう電子波の波長 λ [m]を求めよ。
- (2) (1)で光電子がKP間の真中に来たとき、光電子の最大速度は(1)の v_1 の何倍になるか。
- (3) KとPの極板を別の金属に取り替えて、同じ実験を行ったところ、図2における横軸との交点が図2の場合より $\Delta\nu$ だけ高振動数側にずれた直線を得た。取り替えた金属の仕事関数を ν_1 、 $\Delta\nu$ 、 V_1 などを用いて表せ。
- (4) 振動数が ν_1 [Hz]で強さが W_1 [J/s]の光を照射しながら、すべり抵抗器の接点Sをao間でaに向かって移動させて、電流の変化を観測した。接点Sがある点に達したとき、電流が飽和し、 I_1 [A]となった。単位時間あたり n_p [s⁻¹]個の光子が入射したとき、単位時間あたり n_e [s⁻¹]個の光電子がとび出すとして、 n_e と n_p の比 $q = n_e/n_p$ を定義すると、 q は光の振動数によって決まる定数と考えてよい。 ν_1 に対する q を q_1 として、 I_1 を W_1 、 q_1 などを用いて表せ。

(S・63-宇都宮大)



【5】 次の(イ) ~ (ロ) には語句を，(1) ~ (7) には数式を入れよ。

図のように真空中に，放射性物質 R が入っている鉛製の容器 B，平行板電極 A および A'，放射線が到達した位置が測定できる検出装置 C が置かれている。座標系を図のように定義する。極板 A，A' は x 軸に平行で， x 軸方向の長さは l [m]，間隔は



d [m] である。極板 A，A' の右端から検出装置 C までの距離は L [m] である。検出装置 C は x 軸に垂直に置かれている。放射性物質 R からは単一種類で一定エネルギーの放射線が出ている。容器 B には，放射線が x 軸に沿って細い線状となって出るように，真っすぐで細長い孔^{あな}があいている。極板 A と A' に電池を接続しないとき，放射線は x 軸上を進む。

いま，図のように一方を接地した V [ボルト] の電池を極板 A' が正極となるように極板 A と A' に接続したところ，放射線の軌道は極板 A の側に曲った。したがって，この放射線は(イ) とよばれ，それは高速で運動している(ロ) である。放射性物質 R から放射されるこの粒子の質量を m [kg]，電荷を q [クーロン]，放射された直後の運動エネルギーを E [ジュール] とする。以下の考察では電界は極板 A，A' の間だけにあるものとし，重力の効果を無視する。

粒子は極板 A，A' の間にあるとき y 軸方向に(1) [= ニュートン] の一定の大きさの力を受けるから，粒子は(イ) 運動を行なう。時刻 $t = 0$ に粒子が極板 A，A' の間に入るものとし，時刻 t [s] における粒子の速度の x 成分， y 成分をそれぞれ v_x [m/s]， v_y [m/s] とする。粒子が極板 A，A' の間にあるとき，

$$v_x = (2) \text{ } , \quad v_y = (3) \text{ }$$

である。粒子が極板 A，A' の間を抜け出る時刻を t_0 [s]，このときの粒子の y 座標を y_0 [m] とすると，

$$t_0 = (4) \text{ } , \quad y_0 = (5) \text{ }$$

である。その後，粒子は等速直線運動を行ない，検出装置 C 上の点 P に到達する。

点Pのy座標を h [m]とする。 l が L に比べて十分小さいとき、 y_0 は h に比べて十分小さいので y_0 を無視してよい。この近似の範囲内で、

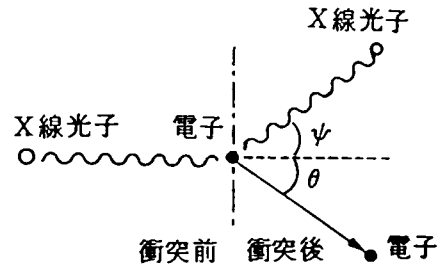
$$h/L = (6) \boxed{}$$

となる。

検出装置Cに到達する粒子数は、測定開始時には毎秒 N 個であったが、 n [日]後には毎秒 $N/8$ 個に減った。放射性物質から単位時間に放射される粒子数は、その時刻における放射性物質の量に比例する。したがって放射性物質Rの半減期は(7) $\boxed{}$ [日]である。 (S・63-北大)

【6】以下の文の□の中に適当な語句，式または数値を記せ。

X線を物質にあてると，散乱X線の中に，入射X線の波長よりも(1)□波長のX線が含まれる場合がある。そしてこの波長の変化は，X線の散乱角によって異なる。この現象は(2)□といわれ，X線が波動性のほかに，粒子性を示すと考えることではじめて説明できる。



X線の速さ，振動数及び波長をそれぞれ c ， ν 及び λ とし，プランク定数を h とすると，X線はエネルギー(3)□で，運動量(4)□の粒子の流れと考えられる。この粒子が物質中で静止している質量 m の電子（粒子とみる）と衝突すると，図のように電子は角度 θ の方向に，X線は角度 ψ の方向に散乱される。この場合，衝突の前と後とでエネルギー及び運動量が保存されると考えてよい。ここで，衝突後のX線の波長 λ' ，振動数を ν' とすると，その運動量は(5)□であり，エネルギーは(6)□である。一方，衝突された後の電子の運動量は，速度を v とすると，(7)□であり，エネルギーは $\frac{1}{2}mv^2$ である。そこでエネルギーが保存されることから(8)□の関係が成立する。また運動量が保存されることから，衝突前のX線の進行方向に対しては(9)□の関係が成立し，垂直方向に対しては(10)□の関係が成立する。

これらの式から， $\lambda' \approx \lambda$ の条件の下で，波長の変化 $\Delta\lambda$ とX線の散乱角 ψ の間の関係を求めると， $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = (h/mc)(1 - \cos\psi)$ になる。 $\cos\psi = 0$ のとき $\psi = 90^\circ$ だから，その場合の $\Delta\lambda$ は垂直方向に散乱するX線の波長の増加分を意味している。ここで， $h = 6.66 \times 10^{-34} [\text{J}\cdot\text{s}]$ ， $m = 9.11 \times 10^{-31} [\text{kg}]$ ， $c = 3.00 \times 10^8 [\text{m/s}]$ とすれば， $\Delta\lambda$ は(11)□と一定の値をとる。いま，入射X線の波長が $1.90 \times 10^{-11} \text{ m}$ であるとすれば，垂直方向の散乱X線の波長は(12)□である。

(H・1 - 岐阜大)

【 7 】 水素原子内で電子が原子核のまわりに半径 r ，速さ v の等速円運動を行っている。電子と原子核の間の静電気力による電子の位置エネルギー $U(r)$ は、無限遠を基準とし、 k を正の定数として $U(r) = -k \frac{e^2}{r}$ となることが知られている。電子の電荷を $-e$ ，質量を m ，水素原子全体の質量を M とする。次の問いに答えよ。

- (1) 原子核から r の距離にある電子を半径方向に距離 s だけ離すのに必要な仕事を求めよ。また、この結果から電子と原子核の間の静電気力の大きさを導け。
- (2) 電子の波動性によれば、円運動の半径と速さの間には、プランク定数 h と自然数 $n (= 1, 2, 3, \dots)$ を含む関係が成り立たなければならない。それはどのような式で表されるか。その理由をもあわせて記せ。
- (3) 電子が上に述べた円運動を行っているとき、その全エネルギーは k ， e ，および r を用いて表すことができる。このことと前問の結果から、電子のエネルギー準位 E_n は、軌道半径や速さによらない定数を L として $E_n = \frac{L}{n^2}$ と表すことができる。定数 L を求めよ。

原子には電子の運動と同時に、原子全体としての運動がある。いま、電子がエネルギー E_1 の準位にあり、全体として静止している水素原子がある。この原子に光をあてたところ、振動数 f の光を吸収して、電子はエネルギー E_2 の準位に移り、原子は光の進行方向に速さ V の運動を始めた。光の粒子説にもとづいて次の問いに答えよ。ただし、光の速さを c とする。

- (4) 原子全体の運動の速さ V と、吸収した光の振動数 f の間に成り立つ関係を書け。
- (5) E_1 ， E_2 および f の間に成り立つ関係を求めよ。 (S・63-金沢大)

【 8 】 次の文章の に適合する語句，数，記号または式を記入せよ。ただし，プランク定数を h [J·s]，光の速さを c [m/s] とする。

- (1) 質量数 A ，原子番号 Z の原子核は① 個の陽子と② 個の中性子から構成されている。原子核のなかには不安定なものがあり， α 線や β 線と呼ばれる放射線を放出して別の原子核に変わる。 α 線はヘリウム ${}^4_2\text{He}$ (α 粒子)の流れであり， β 線は③ の流れである。これらの放射線を放出する現象を，それぞれ， α 崩壊， β 崩壊という。たとえばラジウム ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ は α 崩壊を④ 回， β 崩壊を⑤ 回くりかえして安定な鉛 ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ になる。
- (2) α 崩壊または β 崩壊に引き続いて γ 線が放射されることが多い。 γ 線は電磁波の一種であるから波動の性質をもつが，同時に，粒子としての性質も合わせて持っている。波長 λ [m] の γ 線はエネルギーが⑥ [J]，運動量の大きさが⑦ [kg·m/s] の光子の流れでもある。一方， α 粒子は粒子であるが波動の性質も示し，その物質波(ド・ブローイ波)としての波長は，質量を M [kg]，速さを V [m/s] として，⑧ [m] と表される。
- (3) 非常に質量数の大きい原子核のなかには自発的に核分裂をおこすものがある。質量 M_x [kg] の原子核 x が静止の状態ですべて自発的に核分裂し，質量 M_y [kg] の原子核 y と質量 M_z [kg] の原子核 z に分かれたとしよう。この場合， $M_x > M_y + M_z$ であり， γ 線や他の粒子は放出されなかったとする。アインシュタインの理論によれば⑨ とエネルギーは同等であるから，この核分裂で放出されるエネルギーは⑩ [J] である。また，運動量保存則から原子核 y は原子核 z の⑪ 倍の速さで z と反対方向に運動することになる。したがって，原子核 y の運動エネルギーは⑫ [J] である。 (H・1 - 岩手大)