物　理

Ⅰ　次の文章を読み，$\boxed{\text{い}}$ ～ $\boxed{\text{へ}}$ に適切な数値あるいは数式を解答欄に記入せよ。また，$\boxed{\text{a}}$ ～ $\boxed{\text{d}}$ には選択肢よりもっとも適切なものを選び，解答欄にマークせよ。同じ選択肢をマークしてもよい。なお，重力加速度の大きさを g とし，物体の運動に対する空気抵抗の影響は無視できるものとする。

けん玉の運動について，玉を振り，けん先に入れる場合を考える。図1に示すように，質量 M の玉が長さ L の軽い糸でけんにつながっている。水平方向右向きに x 軸，鉛直方向上向きに y 軸をとる。玉は xy 平面内のみで運動を行い，けん先は図1に示すように y 軸正方向から反時計回りに 45° 傾いて原点Oに固定されている。最初に，糸がたるまないように玉を位置Aまで持ち上げ，静かにはなす。糸がたるまずに玉が円運動し，位置Bまで振れたときに玉に力積を与えた（固定をはずし，けんを一瞬わずかに動かしすぐに元に戻す）。その直後，糸がたるみ，玉が上昇運動を始めた。図1に示すように，このときの初速度の大きさを V，向きを x 軸正方向から θ の角度とする。そして，玉に力積を与えてから時間 T の後に，玉はけん先に入った。

〔1〕　玉の大きさは無視できるとすると，玉の運動は質点の運動と考えてよい。

(i)　玉が位置Aから位置Bに移動したとき，玉の重力による位置エネルギーは $\boxed{\text{い}}$ だけ減少する。したがって，玉に力積を与える直前の玉の速さは $\boxed{\text{ろ}}$ である。

(ii)　玉に力積を与えた後，玉がけん先に入るまでの運動を考える。糸は常にたるんだ状態であり，玉の運動に影響を与えない。玉に力積を与えた瞬間を時刻 $t = 0$ とする。その後，玉は x 軸方向には等速直線運動をするので，時刻 t における玉の位置の x 座標は $\boxed{\text{は}}$ である。玉は y 軸方向には等加速度運動をするので，時刻 t における玉の位置の y 座標は $\boxed{\text{に}}$ である。また，時刻 t における玉の速度の x 成分は $\boxed{\text{ほ}}$ ，y 成分は $\boxed{\text{へ}}$

である。

(iii)　時刻 $t=T$ において玉が図1の傾いたけん先に入るためには，このときの玉の位置の x 座標と y 座標はともに0であり，玉の速度の x 成分と y 成分は大きさが等しく，その符号は逆であることが必要である。これらの条件により，$V=\boxed{\text{a}}\times\sqrt{gL}$, $\tan\theta=\boxed{\text{b}}$，$T=\boxed{\text{c}}\times\sqrt{\dfrac{L}{g}}$

と求まる。

〔2〕 実際には，玉には大きさがあり，図2に示すように，玉がけん先に入るためには玉が回転し，時刻 $t=T$ において玉の穴がけん先の方向に向いている必要がある。玉の穴の中心Qは玉の球面上で玉の中心O′に対して，玉が糸とつながれている点Pとは対称の位置にある。時刻 $t=0$ では，原点O，点P，点O′，点Qはこの順で一直線上に並んでいる。玉が中心O′のまわりに回転して，時刻 $t=T$ において玉がけん先に入るための最小の回転数は $\boxed{\text{d}}$ である。

$\boxed{\text{a}}$ ～ $\boxed{\text{c}}$ に対する選択肢

① $\dfrac{\sqrt{3}}{3}$	② $\dfrac{\sqrt{2}}{2}$	③ $\dfrac{\sqrt{2\sqrt{2}}}{2}$	④ 1	⑤ $\dfrac{\sqrt{3\sqrt{2}}}{2}$	⑥ $\dfrac{\sqrt{5\sqrt{2}}}{2}$
⑦ $\sqrt{2}$	⑧ $\dfrac{\sqrt{6\sqrt{2}}}{2}$	⑨ $\dfrac{\sqrt{7\sqrt{2}}}{2}$	⑩ $\sqrt{2\sqrt{2}}$	⑪ $\sqrt{3}$	⑫ 2
⑬ $\sqrt{3\sqrt{2}}$	⑭ $\sqrt{5}$	⑮ $\sqrt{5\sqrt{2}}$	⑯ $\sqrt{6\sqrt{2}}$	⑰ 3	⑱ $\sqrt{7\sqrt{2}}$

$\boxed{\text{d}}$ に対する選択肢

① $\dfrac{1}{6}$	② $\dfrac{1}{5}$	③ $\dfrac{1}{3}$	④ $\dfrac{1}{2}$	⑤ $\dfrac{2}{3}$	⑥ $\dfrac{3}{4}$
⑦ $\dfrac{5}{6}$	⑧ 1	⑨ $\dfrac{3}{2}$	⑩ 2	⑪ 3	

（このページは空白）

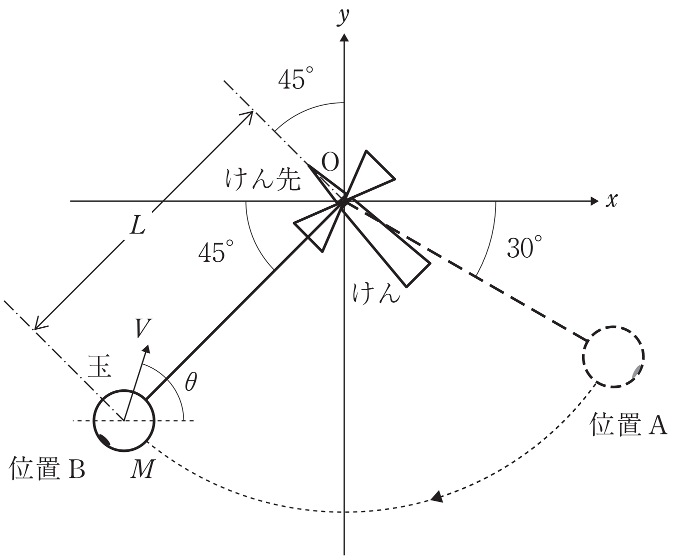

y
45°
O
けん先
x
L
45°
30°
けん
V
玉
θ
位置 A
位置 B
M

図 1

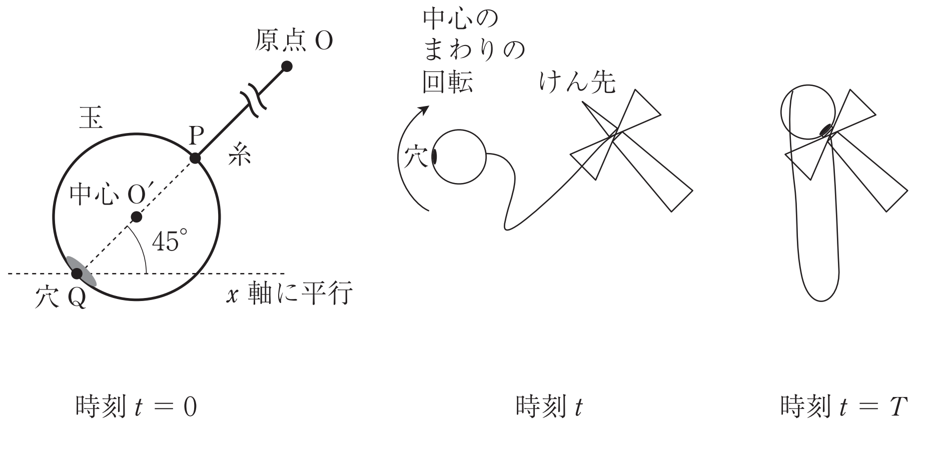

原点 O
玉
P
糸
中心 O′
45°
穴 Q
x 軸に平行
中心の
まわりの
回転
けん先
穴
時刻 t = 0
時刻 t
時刻 t = T

図 2

Ⅱ　次の文章を読み，$\boxed{\text{イ}}$ ～ $\boxed{\text{ル}}$ の解答欄に適切な数式を記入せよ。$\boxed{\text{あ}}$ ～ $\boxed{\text{お}}$ に対しては，指定された選択肢からもっとも適切なものを選び，それぞれの解答欄にマークせよ。なお，$\boxed{\text{あ}}$，$\boxed{\text{い}}$，$\boxed{\text{お}}$ には，同じ選択肢をマークしてもよい。$\boxed{\text{イ}}$ ～ $\boxed{\text{ル}}$ **の解答欄に記入する数式では，数字以外の文字としては** π，k，m，Q，R，r **のみを用いること。**

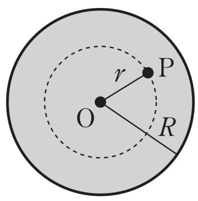
図のように，正の電荷が半径 R の球の内部に一様に分布しており，その電気量の総和は，Q である。この球の中心Oから距離 r の位置に点Pをとる。クーロンの法則の比例定数を k とし，地球の重力や地磁気の影響は無視できるものとする。

〔1〕 半径 R の球における単位体積あたりの電気量は $\boxed{\text{イ}}$ である。電場の強さ E は電場に垂直な面を貫く単位面積あたりの電気力線の本数に等しい。物体が正の電気量 q をもっているとき，この物体から出る電気力線の本数は $4\pi kq$ である。このことは，物体に電荷が連続的に分布している場合にも成り立つ。これらに従い，点Pにおける電場を求めよう。なお，ここでは，点Oを中心とする半径 r の球の外側の部分の電荷は，点Pにおける電場とは無関係であると考えてよい。まず，$0 < r < R$ の場合，点Oを中心とする半径 r の球の内部の電気量は $\boxed{\text{ロ}}$ であり，この半径 r の球の表面を貫く電気力線の本数は $\boxed{\text{ハ}}$ である。この結果，点Pにおける電場の強さは $\boxed{\text{ニ}}$ と表され，その電場の方向は $\boxed{\text{あ}}$ である。次に，$r > R$ の場合，点Oを中心とする半径 r の球の内部の電気量は $\boxed{\text{ホ}}$ であり，この半径 r の球の表面を貫く電気力線の本数は $\boxed{\text{ヘ}}$ である。この結果，点Pにおける電場の強さは $\boxed{\text{ト}}$ と表され，その電場の方向は $\boxed{\text{い}}$ である。距離 r と電場の強さ E との関係を図示すると，$\boxed{\text{う}}$ のようになる（$E-r$ グラフ）。

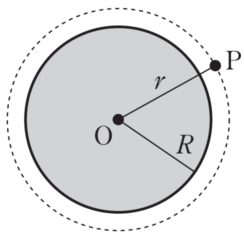
電位の基準点を無限遠の点とすると，点Pにおける電位 V は，$r > R$ では $\boxed{\text{チ}}$ となることが知られている。これは距離 r での電位 V が，＋1Cの電荷を基準点から，距離 r の位置まで，静電気力に逆らって移動させるのに必要な仕事に等しいことにより求められる。この仕事は，$E-r$ グラフにおいて，距離 r と電場の強さ E との関係を与える曲線，r 軸，および，距離 r の位置で

の E 軸に平行な直線で囲まれる領域の面積に等しい。以上から，距離 r と電位 V との関係を図示すると，$\boxed{\text{え}}$ のようになる。

〔２〕 次に，この半径 R の球の内部または外部に負の電気量 $-Q$（$Q>0$）をもつ点電荷がある場合を考える。この点電荷の質量を m とする。ただし，半径 R の球における電荷の分布は，この点電荷によって変化しないとする。この点電荷が点Ｐに存在するとき，この点電荷がもつ，静電気力による位置エネルギーは，$r>R$ では $\boxed{\text{リ}}$ である。距離 r が $0<r<R$ を満たす場合，点Ｐに存在するこの点電荷にはたらく力の大きさは $\boxed{\text{ヌ}}$ であり，その力の方向は $\boxed{\text{お}}$ である。この点電荷に外部から力を加えて，この点電荷を半径 R の球内の点Ｐ（$0<r<R$）で静止させていたとする。外部から加えていた力を静かに取り除くと，この点電荷は復元力を受け，角振動数 $\boxed{\text{ル}}$ で単振動をする。ただし，外部から加えた力によって半径 R の球は移動しないとする。



(a)　$0<r<R$



(b)　$r>R$

図

（このページは空白）

$\boxed{\text{あ}}$, $\boxed{\text{い}}$, $\boxed{\text{お}}$ に対する選択肢

① 球の表面に垂直で，球の中心 O に向かう方向

② 球の表面に垂直で，球の中心 O から外側に向かう方向

③ 球の中心 O と点 P を通る直線に垂直で，この直線に向かう方向

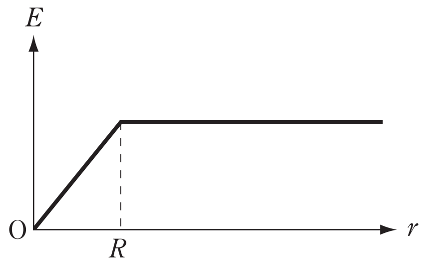
④ 球の中心 O と点 P を通る直線に垂直で，この直線から離れる方向

⑤ 球の中心 O を始点として，らせん状に回転する方向

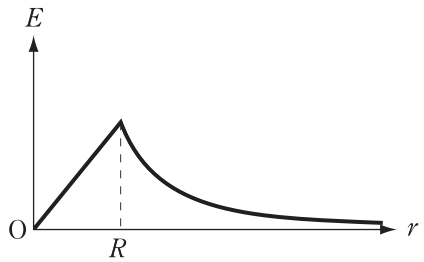
⑥ 球の中心 O を終点として，らせん状に回転する方向

$\boxed{\text{う}}$ に対する選択肢

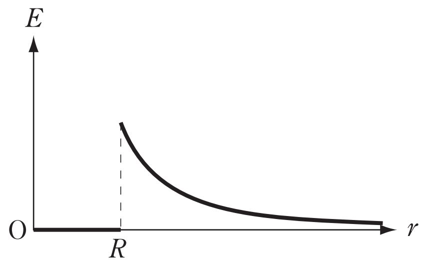
①



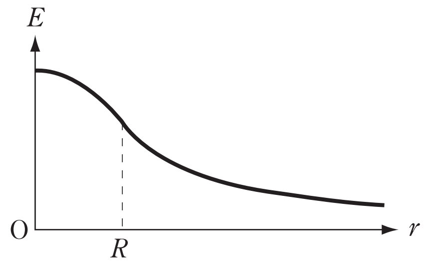
②



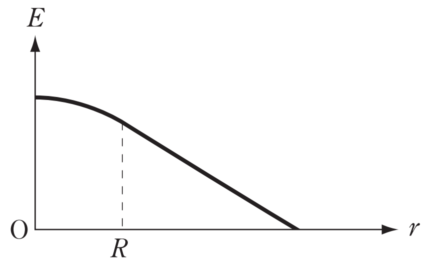
③



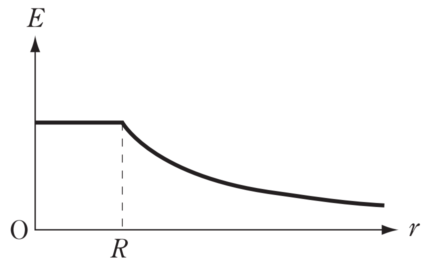
④



⑤

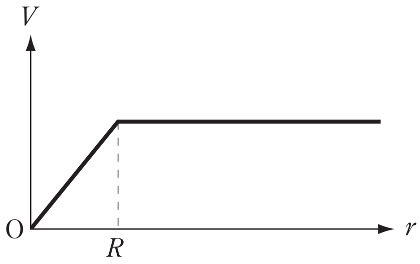


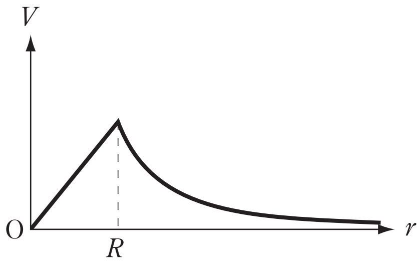
⑥

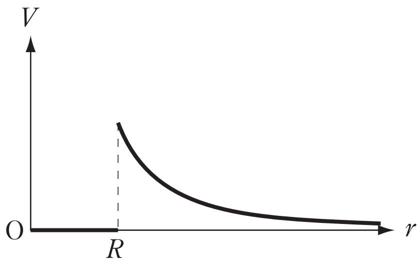


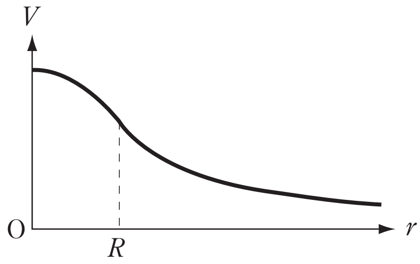
（このページは空白）

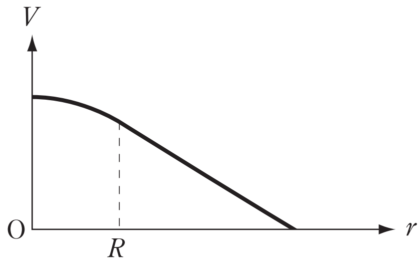
$\boxed{\text{え}}$ に対する選択肢

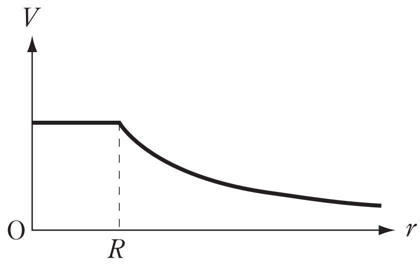
①


②


③


④


⑤


⑥


Ⅲ　次の文章を読み，$\boxed{\text{あ}}$ ～ $\boxed{\text{え}}$ に適切な数式，$\boxed{\text{お}}$ ，$\boxed{\text{か}}$ に適切な数値を解答欄に記入せよ。また，$\boxed{\text{イ}}$ ～ $\boxed{\text{へ}}$ には指定された選択肢からもっとも適切なものを選び解答欄にマークせよ。なお，$\boxed{\text{お}}$ ，$\boxed{\text{か}}$ **の数値はいずれも有効数字２桁とし，** $\boxed{\text{ロ}}$ と $\boxed{\text{ホ}}$ ，$\boxed{\text{ハ}}$ と $\boxed{\text{ニ}}$ には同じ選択肢をマークしてもよい。

金属の表面に波長の十分に短い光を当てると，表面から電子が飛び出す現象が知られており，これを光電効果と呼ぶ。アインシュタインは「振動数 ν の光はエネルギー $h\nu$ をもつ粒子（光子，または光量子）の集団としてふるまう（h はプランク定数）」とする光量子仮説を唱え，従来の光の波動説では説明のつかなかった光電効果を説明した。

〔１〕 図は光電効果を調べる実験の模式図である。極板Aは金属試料であり，接地されていて常に電位は０である。極板Bは極板Aと平行に置かれており，その電位 V は正から負に自由に変えられるものとする。極板Aに十分に短い波長の単色光を当てると，極板Aから様々な速度の電子（光電子）が飛び出し，光電子が極板Bに到達すると回路に光電流 I が流れる。

大きさ v_{A} の初速度で極板Aから垂直に飛び出した光電子を考えよう。電子は電荷 $-e$（e は電気素量）をもつ粒子であるから，極板間の電場から（正または負の）仕事をされる。したがって，この光電子が極板Bに到達できるための条件は，V，v_{A}，e，および電子の質量 m を用いて $\boxed{\text{イ}}$ と表される。この条件が満たされているとき，極板Bの位置での光電子の速さ v_{B} は $\boxed{\text{あ}}$ となる。

さて，単色光を当てながら，V の値を徐々に下げていったところ，負の電位 $V=-V_{\mathrm{c}}$（$V_{\mathrm{c}}>0$）になったときに回路を流れる光電流 I が０となり，$V<-V_{\mathrm{c}}$ では光電流 I は０のままであった。このとき上の考察より，極板Aから飛び出す光電子の速さの $\boxed{\text{ロ}}$ を求めることができる。この値は，e，V_{c}，および電子の質量 m を用いて $\boxed{\text{い}}$ と表される。アインシュタインの光量子仮説によると，１個の光子が吸収されることによって金属中の１個の電

子を「叩き出す」ため，飛び出す瞬間の光電子の速さの $\boxed{\text{ロ}}$ は，入射する単色光の $\boxed{\text{ハ}}$ によって決まり，$\boxed{\text{ニ}}$ には依存しない。一方，光電流 I が流れている状態で任意の十分大きな正の電位 V に対しては，ほぼすべての光電子が極板 B に到達できるため，光電流 I は上限値に近づくが，この値はおもに入射単色光の $\boxed{\text{ニ}}$ によって決まる。

金属表面から電子 1 個を取り出すのに必要なエネルギーは，電子ごとに異なる値をとり得るが，この実験では，飛び出す瞬間の光電子の速さが $\boxed{\text{ロ}}$ となるときに，必要なエネルギーは $\boxed{\text{ホ}}$ をとり，これを仕事関数と呼ぶ。仕事関数は，金属の種類や表面の状態によって決まることが知られている。図の実験において，仕事関数 W は，入射する単色光の波長 λ，真空中の光速 c，および h，e，V_c を用いて，$W=$ $\boxed{\text{う}}$ と表すことができる。また，光電効果の起こる波長 λ の上限値（限界波長）は，h，c，W を用いて，$\boxed{\text{え}}$ と表される。光の波動（電磁波）としての解釈に基づいて光電効果の現象を考察すると「 $\boxed{\text{ヘ}}$ 」という結論が導かれるため，限界波長の存在の説明は困難であった。しかしながら，光量子仮説を用いることにより，その存在は初めて合理的に説明された。

〔2〕 ある金属試料に対し，波長の違う 2 種類の単色光を用いて図の光電効果の実験を行ったところ，V_c として 1.6 V と 7.8 V が得られた。長い方の単色光の波長は短い方の波長の 2.0 倍であった。長い方の単色光の波長は $\boxed{\text{お}}$ m である。また，この金属試料に対する光電効果の限界波長は $\boxed{\text{か}}$ m と求められる。

ここで，電気素量 e，真空中の光速 c，プランク定数 h の値は，それぞれ，

$e \fallingdotseq 1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$,

$c \fallingdotseq 3.00 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s}$,

$h \fallingdotseq 6.63 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s} \fallingdotseq 4.14 \times 10^{-15}\,\mathrm{eV\cdot s}$

である。なお，エネルギーの単位 eV（電子ボルト）は，「電気素量 e の電荷を 1 V の電位差で加速して得られる運動エネルギー」として定義されており，$1\,\mathrm{eV} \fallingdotseq 1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{J}$ である。

（このページは空白）

$\boxed{\text{イ}}$ に対する選択肢

① $mv_A + eV \geqq 0$　② $mv_A + eV < 0$　③ $mv_A - eV \geqq 0$

④ $mv_A - eV < 0$　⑤ $\frac{1}{2}mv_A^2 + eV \geqq 0$　⑥ $\frac{1}{2}mv_A^2 + eV < 0$

⑦ $\frac{1}{2}mv_A^2 - eV \geqq 0$　⑧ $\frac{1}{2}mv_A^2 - eV < 0$

$\boxed{\text{ロ}}$, $\boxed{\text{ホ}}$ に対する選択肢

① 最大値　② 最小値　③ 平均値

④ 二乗平均値　⑤ 中間値　⑥ 中央値

$\boxed{\text{ハ}}$, $\boxed{\text{ニ}}$ に対する選択肢

① 屈折率　② 反射率　③ 位相

④ 波長　⑤ 限界振動数　⑥ コンプトン波長

⑦ 量子数　⑧ 電離エネルギー　⑨ エネルギー準位

⑩ 吸収スペクトル　⑪ 強度　⑫ 絶対温度

$\boxed{\text{ヘ}}$ に対する選択肢

① 光は電子にエネルギーを与えることができない

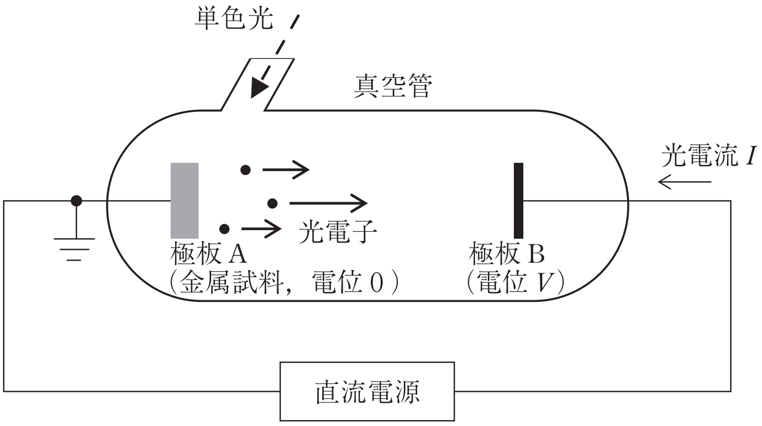
② 光が電子に与えるエネルギーは電磁波としての振動数で決まり，波長には依存しない

③ 光が電子に与えるエネルギーは電磁波としての波長で決まり，振幅には依存しない

④ 光が電子に与えるエネルギーは電磁波としての振幅で決まり，振動数には依存しない

⑤ 光が電子に与えるエネルギーは電子の運動状態のみで決まり，電磁波としての光の性質には依存しない

（このページは空白）



図