

1 09ミリカンの実験［2009 立命館大］

19 世紀末から 20 世紀はじめ，電荷にはもはやそれ以上細かくできない「基本単位」が存在すると考えられるようになってきた。ミリカンは油滴実験とよばれる有名な実験によってこの説を初めて明確に証明し，1923 年のノーベル物理学賞を受賞した。実験の原理は次に述べるように高校物理の知識で理解できる。次の ア ～ カ には適切な数式を記入せよ。 a には選択肢より適切なものを選べ。

［A］ 密度 ρ［kg/m^3］の小さい球にはたらく力を考えよう。球の半径を a［m］，重力加速度の大きさを g［m/s^2］とするならば球に作用する重力の大きさは ア ［N］である。空気中を動く物体が速度の逆向きに抵抗力を受けることは経験からもわかる。小さい球の場合，抵抗力の大きさ F は球の半径 a と速さ w［m/s］に比例することが知られており，ある定数 μ を使って $F=6\pi\mu aw$［N］と表される。μ［N·s/m^2］は空気の流れにくさを表す「粘性係数」とよばれる定数でその値はよく知られている。

空気中を落下する小さい球の場合，加速度は抵抗力によってただちに減少し，最終的に球は「終端の速さ」とよばれる一定の速さ $W=$ イ ［m/s］で落下する。逆にみれば，終端の速さ W を測定すれば，直接に測定できない半径が $a=$ ウ ［m］のように実験データから決定できる。

［B］ ミリカンは弟子のフレッチャーと図 1 に示すような装置を用いて次のような実験を行った。油を噴霧器から霧のように吹き出して空気中に小さい油滴をたくさんつくった。小さい油滴は表面張力のために球になる。油滴には重力と［A］で考えたような抵抗力が作用する。［A］と同じように，油滴半径を a，密度を ρ としよう。このような球状油滴が落下して図 1 の距離 D［m］離れた 2 枚の水平な電極板にはさまれた空間に入ったあと，油滴は X 線で照射され，正または負に帯電した。この電荷を q［C］としよう。2 枚の電極板には電位差 V［V］が加えられ油滴の鉛直方向の運動を顕微鏡で観察する。D が電極板の大きさに比べ十分小さいならば，2 枚の電極板の間につくられる電場が油滴に及ぼす力の大きさは エ ［N］である。決定したいのは q の大きさであり，そのためにさまざまな方法が考えられる。正確さは欠くが，最も簡単な方法は次のようなものである。

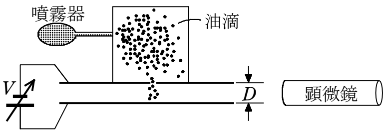


図 1

まず $V=0$ にして，ゆっくり落下してゆく油滴に目をつける。次に電位差 V を与え，油滴が停止するように電位差を調整する。停止した電位差を V_0［V］とすると電荷 q［C］は a，ρ，V_0，D 等を使って $q=$ オ ［C］と表される。一方，油滴の半径は，電位差を $V=0$ にしておいて，［A］で述べたように終端の速さ W を測定すれば決定できる（W は顕微鏡を使って測定できる）。測定できる量によって油滴の電荷を表すと $q=$ カ ［C］となって q が実験データから計算できる。

何度も q を測定する実験をくり返し，電荷 q とそれが観測された回数を棒グラフで表すと図 2 が得られた。もし電荷に「基本単位」があれば，q は基本単位の整数倍の値をもつはずである。このことを考慮するとグラフから電荷の基本単位はおおよそ a $\times 10^{-20}$ C と読みとれる。

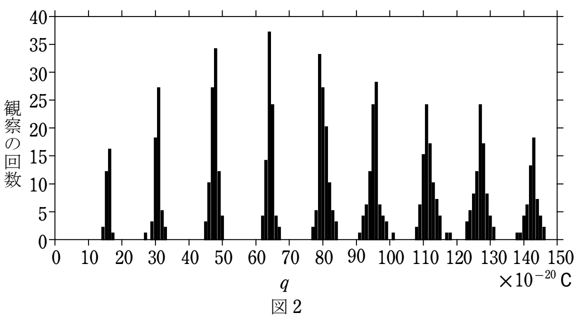


図 2

a の選択肢

① 5　② 15　③ 30　④ 50　⑤ 110　⑥ 140

2 07光電効果［2007 慶応義塾大］

次の文章の（ア）～（エ）に入る適切な語句を解答群の中から 1 つ選び番号で答えよ。さらに，(1)～(5) に答えよ。n W $=10^{-9}$ W，n A $=10^{-9}$ A，G Ω $=10^{9}$ Ω。

光電効果は 19 世紀の末に箔検電器に ア を照射すると イ が失われる現象として観測され，いくつかの特徴が知られている。

(a) 光の振動数が限界振動数よりも ウ 場合のみ，光電子が飛び出す。

(b) 光電子がもつ運動エネルギーの エ は，光の振動数の増加とともに直線的に増加する。

［解答群］
ア ① ラジオ電波　② マイクロ波　③ 赤外線　④ 紫外線
イ ① 熱　② 電荷　③ 光　④ 電流
ウ ① 小さい　② 大きい
エ ① 最小値　② 最大値

(1) 光電効果のもう 1 つの特徴は，光電子放出の時間に関する特徴である。この特徴とはどのようなものか述べよ。

(2) 光電効果から光には波動性とともに粒子性があることに気づき，光量子仮説を提唱した物理学者の名前をあげよ。

(3) 光電管は板状の金属電極 K と線状の金属電極 P が真空容器に封入された構造になっている。電極 K と電極 P は同じ金属である。図 1 に示すように接続し，さまざまな波長の光を照射しながら電源の電圧を 0 から 3 V まで変えて光電流を測定した結果を図 2 に示す。各波長の光について，電極 K からの光電流がなくなる状態を矢印で示した。光の振動数と阻止電圧（電極 K からの光電流がなくなる電圧）との関係を図に示せ。

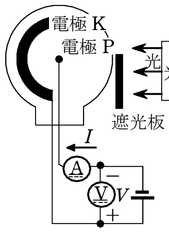


図 1

光電効果を計測するための装置　遮光板は電極 P になるべく光が当たらないようにするためにある。

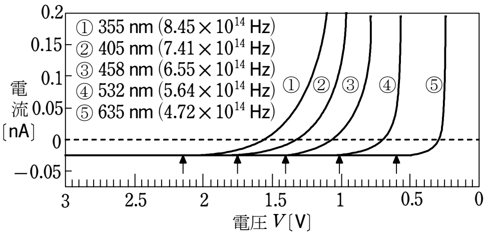


図 2

波長 355 nm から 635 nm の光を用いて測定した光電効果

(4) 電極に用いた金属の仕事関数を eV（エレクトロンボルト）単位で求め，この測定から推定されるプランク定数を eV·s 単位で求めよ。

(5) 図 3 のように接続して，光電管に照射する光の強度を 0 から 7.0 n W まで変え，各光強度について光電管の電圧を 0 から 2.0 V まで変えながら光電流を測定した結果を図 4 に示す。図 5 に示すように光電管を抵抗（10 G Ω）と電源（2.0 V）に接続したとき，光強度と光電管の電圧（電極 K，P 間の電圧）との関係を図に示せ。

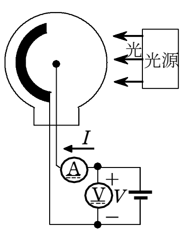


図 3

電源の接続が図 1 とは逆になっている。

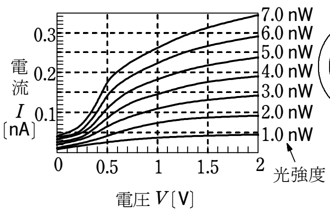


図 4

波長 450 nm の光を用いて計測した光電管の特性

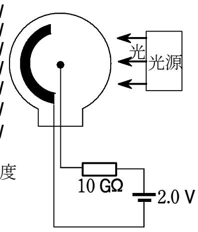
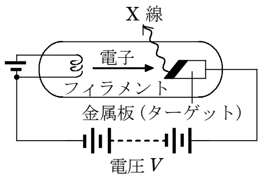


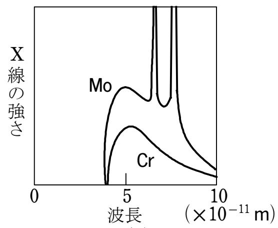
図 5

$\boxed{3}$ 99 X 線の発生とエネルギー準位［1999 千葉大］

1 図のように，真空度の高いガラス管に 2 つの電極を封入し高電圧をかけると，陰極のフィラメントから放出された熱電子が加速されて高速でターゲットの陽極に衝突し，X 線が放出される。加速電圧 V［V］が $V=3.3\times10^4$ V のときに X 線管から放射される X 線のスペクトルを陽極がモリブデン（$_{42}$Mo）とクロム（$_{24}$Cr）の場合について調べてみると 2 図のようになった。以下の文中の空欄 $\boxed{\ 1\ }$，$\boxed{\ 3\ }$，$\boxed{\ 4\ }$ には式を，$\boxed{\ 2\ }$，$\boxed{\ 5\ }$，$\boxed{\ 6\ }$，$\boxed{\ 7\ }$，$\boxed{\ 8\ }$ には数値を，$\boxed{\ 9\ }$，$\boxed{\ 10\ }$ には文を書け。なお，プランク定数を h［J・s］，電子の電荷を $-e$［C］，光速度を c［m/s］，電子の質量を m［kg］，円周率を π とする。また，電荷 q_1［C］，q_2［C］をもつ 2 つの電荷間にはたらくクーロン力は電荷間の距離を r［m］として $\dfrac{kq_1q_2}{r^2}$ と表されるものとする。数値を求める際には $h=6.6\times10^{-34}$ J・s，$e=1.6\times10^{-19}$ C，$c=3.0\times10^8$ m/s とし，有効数字 2 桁で答えよ。ただし，空欄 $\boxed{\ 7\ }$，$\boxed{\ 8\ }$ については既約分数で記入せよ。



1 図



2 図

［A］ グラフ上でなめらかな曲線で表される X 線は連続 X 線である。連続 X 線の最短波長 λ_0［m］を h，V，c，e を用いて式で表すと $\boxed{\ 1\ }$ となる。$V=3.3\times10^4$ V のとき，λ_0 の値は $\boxed{\ 2\ }$［m］である。

［B］ X 線スペクトルには特性 X 線の鋭いピークが現れることがある。この波長をボーアの原子模型にもとづいて求めてみよう。電荷 $+Ze$ をもつ原子核のまわりを 1 個の電子が速さ v［m/s］，半径 r［m］で円運動しているとする。原子内にはこの電子以外の電子はないと仮定する。円軌道の半径 r［m］を m，v，Z，e，k を用いて表すと $\boxed{\ 3\ }$ となる。ボーアの原子模型では n を整数として量子条件 $2\pi mvr=nh$ を満たす円軌道のみが許される。電子が無限遠で静止している場合のエネルギーを 0 として，量子数が n の準位のエネルギー E_n［J］を，π，Z，e，n，h，m，k を用いて表すと $\boxed{\ 4\ }$ である。$Z=1$ の水素原子の $n=1$ の準位のエネルギーが -13.6 eV であることを用いて $Z=42$ のモリブデン原子の $n=1$ の準位のエネルギー E_1 を求めると $E_1=\boxed{\ 5\ }$［eV］である。このモリブデン原子核のまわりを円運動する電子が $n=2$ の準位から $n=1$ の準位に移るとき，1 光子あたり $\boxed{\ 6\ }$［eV］のエネルギーをもつ X 線が放射される。この X 線の波長を λ_{21}［m］とするとき，モリブデン原子の $n=3$ から $n=1$ の準位に電子が移るときに放射される特性 X 線の波長 λ_{31}［m］は λ_{21}［m］の $\boxed{\ 7\ }$ 倍になる。ただし，各準位のエネルギーは原子内に 1 個の電子しかないと仮定して計算した場合の値を用い，既約分数で答えよ。

［C］ ボーアの原子模型にもとづいて，$Z=24$ のクロム原子の $n=2$ の準位にある電子が $n=1$ の準位に移るときに放射される特性 X 線の波長を求めると，モリブデン原子の場合の波長 λ_{21}［m］の $\boxed{\ 8\ }$ 倍になる。この場合も，原子内に 1 個の電子しかないとして計算した各準位の値を用い，既約分数で答えよ。クロム原子から放射される，この特性 X 線が 2 図に現れていない理由は $\boxed{\ 9\ }$ である。

［D］ 加速電圧を 1.5×10^4 V にして実験を行ったところ，モリブデン原子からの波長 λ_{21}［m］の特性 X 線が観測されなくなった。その理由は $\boxed{\ 10\ }$ である。

$\boxed{4}$ 02 ブラッグ反射と金属からの光の発生［2002 東北大］

図 1 は，真空中で金属単結晶試料に 10～100 eV 程度のエネルギーをもつ電子線を照射して，試料から反射される電子または放射される光を測定する実験装置である。装置には，試料に対して一定のエネルギーをもった電子線を照射する電子銃，反射された電子を検出する電子検出器，および放射された光の強さと波長を測定する分光器が取り付けてある。金属単結晶試料は任意の方向に回転できる。次の問いに答えよ。プランク定数を h，真空中の光の速さを c，電子の質量を m，電気素量を e（>0）とする。

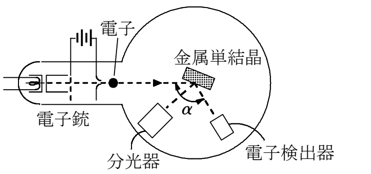


図 1

図 2 に示すように，金属単結晶では原子は規則正しく配列し，その原子面間隔が d であるとする。この原子面に対して，図に示すように角度 θ で入射した電子線の回折を考える。

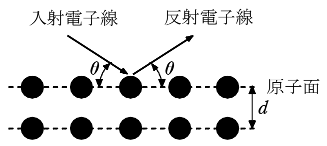


図 2

(1) 入射した電子線を波と考え，その波長を λ とする。エネルギーを失わずに図 2 のように反射した電子線が干渉して強めあう条件を，λ，h，c，m，e，θ，d の中から必要なものを用いて表せ。ただし，電子線が金属単結晶中に入るときに受ける屈折の効果は無視せよ。

(2) 運動エネルギー E をもつ電子の波長 λ を，E，h，c，m，e の中から必要なものを用いて表せ。

(3) 図 1 の実験装置で，電子銃から試料に対して電圧 V_1 で加速した電子線を照射したところ，電子線と電子検出器のなす角度が α のとき，強い電子線の反射が観測された。この電子線の回折に関与している最も小さな原子面間隔を d_α とするとき，d_α を V_1，h，c，m，e，α の中から必要なものを用いて表せ。

(4) (3) で，$\alpha=120°$，$d_\alpha=0.22$ nm の場合の入射電子の運動エネルギー E_e を，eV 単位で具体的に求めよ。ただし，プランク定数 $h=6.6\times10^{-34}$ J・s，光の速さ $c=3.0\times10^8$ m/s，電子の質量 $m=9.1\times10^{-31}$ kg，電気素量 $e=1.6\times10^{-19}$ C として，有効数字 2 桁で答えよ。1 nm $=1\times10^{-9}$ m である。

(5) (3) と同様な回折現象は，電子線のかわりに X 線を用いても観測できる。(4) の回折条件（$\alpha=120°$，$d_\alpha=0.22$ nm）を満たす X 線のエネルギー E_p を，eV 単位で有効数字 2 桁まで求めよ。必要ならば (4) で与えた定数を使うこと。

次に，(3) の実験条件のままで，分光器のスイッチを入れて試料からの発光を調べたところ，図 3 に示すような連続的なスペクトルが観測され，その最短波長は λ_1 であった。図中，縦軸の発光強度は，一定時間当たり検出される光子の数である。この発光現象を光電効果の逆過程と考え，次の問いに答えよ。

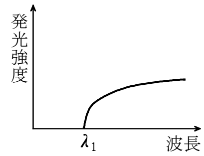


図 3

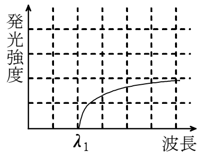


図 4

(6) 同じ加速電圧を保ちながら，一定時間当たり電子銃から照射される電子の数を 2 倍にした。このときの発光の強度と波長の関係を，図 4 に実線（——）で書きこめ。このとき，発光の最短波長 $\lambda_1{}^*$ を図中に示すこと。次に，電子銃からの電子の数をもとにもどし，加速電圧を V_1 より大きな V_2 に変えた場合，検出された発光の最短波長は λ_2 であった。このときの発光の強度と波長の関係を，図 4 に破線（------）で書きこめ。このとき，λ_2 の大まかな位置も示すこと。また，解答にあたって留意したことを図中に書きこむこと。

(7) この金属の仕事関数 W およびプランク定数 h を，V_1，V_2，λ_1，λ_2，c，e の中から必要なものを用いて表せ。

5 07原子核反応と核エネルギー［2007 筑波大］

悪性の脳腫瘍(しゅよう)は最も治癒(ちゆ)が困難ながんの1つである。その理由は，がん病巣がコア(大きながん細胞の塊)の周辺に細胞レベルで浸潤(しんじゅん)していることによる。それを細胞レベルで治療する手段として，ホウ素中性子捕捉療法という治療法が開発された。本問は，これに使われる原子核反応に関するものである。

質量数10のホウ素$({}^{10}_{5}\mathrm{B})$は熱中性子(運動エネルギーの低い中性子n)を捕捉する確率が他の元素に比べて桁違いに高いことが知られている。静止しているホウ素が熱中性子を捕捉すると，

(a) $\mathrm{n} + {}^{10}_{5}\mathrm{B} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{7}_{3}\mathrm{Li}$

(b) $\mathrm{n} + {}^{10}_{5}\mathrm{B} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{7}_{3}\mathrm{Li}^{*} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + \gamma$

${}^{7}_{3}\mathrm{Li}^{*}$：${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$の静止エネルギーが大きい状態，$\gamma$：$\gamma$線

のいずれかの過程を経て，α粒子$({}^{4}_{2}\mathrm{He})$と質量数7のリチウム原子核$({}^{7}_{3}\mathrm{Li})$を放出し大きな核エネルギーが解放される。このとき次の問いに答えよ。ここで，各粒子の静止質量は，原子質量単位で表に示されている。なお1統一原子質量単位は，エネルギーに換算して9.3×10^{2} MeVである。また，熱中性子の運動エネルギーは，核反応のエネルギーに比べて非常に小さいので，それを0として計算せよ。(1)，(4)の答えはMeV単位で有効数字2桁まで求めよ。

表：各粒子の質量(統一原子質量単位で表示)

粒子	質量
中性子	1.00866
質量数10のホウ素原子核	10.01020
α粒子	4.00151
質量数7のリチウム原子核	7.01436

(1) (a)の反応は，発熱反応である。その反応熱Q(反応の結果できた粒子の運動エネルギーの総和)を求めよ。

(2) (a)の反応で，出射するα粒子とリチウム原子核が放出される向きにはどのような関係があるかを述べよ。

(3) (a)の反応で，α粒子$({}^{4}_{2}\mathrm{He})$とリチウム原子核$({}^{7}_{3}\mathrm{Li})$の運動エネルギーの表式を求め，反応熱Q，α粒子の質量m，リチウム原子核の質量Mを用いて記せ。
このとき各粒子の運動エネルギーは，(運動量の2乗)÷(2×質量)と書けるとして計算せよ。

(4) (b)の第2ステップから第3ステップへの過程では，${}^{7}_{3}\mathrm{Li}^{*}$が$\gamma$線を放出して${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$に崩壊する。この$\gamma$線のエネルギーを求めよ。ただし，${}^{7}_{3}\mathrm{Li}^{*}$と${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$の静止エネルギーの差は，0.48 MeVであるとする。ここでは${}^{7}_{3}\mathrm{Li}^{*}$は止まっているとして計算せよ。
このとき，γ線の光子をのぞく各粒子の運動エネルギーは，(運動量の2乗)÷(2×質量)と書けるとして計算せよ。また，εが1に比べて十分小さいとき，$\sqrt{1+2\varepsilon}\fallingdotseq 1+\varepsilon$という近似が使えることを利用せよ。