

光と電子

□ 目的

光電効果の実験を通じて、光子の概念を理解し、プランク (Planck) の定数を決定する。

□ 実験用具

プランク定数測定器、光源、フィルター (赤、橙、緑、青)、電流計 ($100\mu\text{A}$)、電圧計 (3V)、リード線

□ 原理

光を金属の表面にあてると、金属から電子がとび出ることがある。この現象を光電効果という。光の強さ、振動数をいろいろ変えて実験を行うとき、結果はつぎのようにまとめられる。

- (1) ある振動数 ν_0 以下の振動数の光では長い時間光をあてても電子はとび出してこないが、 ν_0 以上の振動数の光では弱い光でもただちに電子がとび出る。
- (2) 一定の振動数の光では、光の強さを増すとそれに比例してとび出る電子の数は増すが、個々の電子の運動エネルギーは一定である。
- (3) とび出した電子の運動エネルギーは、光の振動数だけで定まり、光の振動数の一次式として表される。

この説明として、光は波であるという従来の考え方を受け入れると、光のエネルギーは光の強さに比例することになるので、強い光が金属にあたるととび出る電子のエネルギーは大となり、弱い光では電子がとび出さないことが考えられ、実験に矛盾してしまう。そこで、アインシュタイン (Einstein) は、光は波としての性質のほかに粒子としての性質をもつという考えで光電効果を説明した。すなわち、振動数 ν の光はエネルギー $h\nu$ (h は定数) をもつ光の粒子の集まりであり、光の吸収または放出の現象はこれら光の粒子が吸収または放出されることによっておこるとする。光を粒子とみなすとき、この粒子を光子と呼ぶ。

金属内の電子は金属内に束縛されていて自力では脱出できないが、光子を吸収すると $h\nu$ のエネルギーをもらって外にとび出ることが可能となる。電子が外に脱出するのに要する仕事を W とすると、電子が外にとび出るためには光子のエネルギーは W より大である必要がある。

$$h\nu \geq W \quad (1)$$

電子をとび出させるのに必要な最小の光のエネルギーを $h\nu_0$ とすると

$$h\nu_0 = W \quad (2)$$

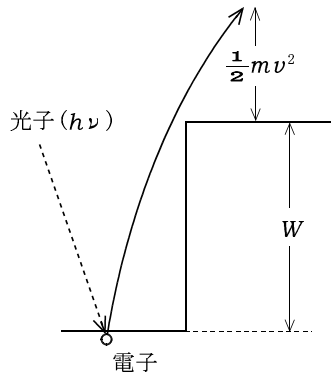


図 1

が成立するから、光子のエネルギーが $h\nu_0$ より大であれば、電子は脱出後、運動エネルギー (m_e : 電子の質量、 v : 電子の脱出後の速度) をもつことができる。エネルギーの保存を式で表わせば、

$$\begin{aligned} h\nu &= W + \frac{1}{2} m_e v^2 \\ &= h\nu_0 + \frac{1}{2} m_e v^2 \end{aligned} \quad (3)$$

と書ける。エネルギーの関係を模型的に 図 1 に示す。ここで W は電子が金属外へとび出す際の障壁の高さを表わしている。

光電管はガラス管内に半円筒状の光電面 (陰極) と、半円の中心部に陽極が封入された構造をもつ (図 2 参照)。この光電面に振動数 ν の光があたると電子は v の速さで光電面からとび出す。このとき、電子の運動のエネルギー $E = \frac{1}{2} m_e v^2$ は、(3) 式より

$$E = h(\nu - \nu_0) \quad (4)$$

で与えられる。

電子はマイナスの電荷をもつことから 図 3 に示されているように陽極にひきつけられ、陽極に達すると回路内を電流が流れる。以後この電流を光電流と呼ぶことにする。この光電流の強さは電流計で測られる。光電管の陽極に直流電源のマイナス極を、また陰極にプラス極を接続し電圧をかけると、電子は陽極に達しにくくなる。このことを陽極に逆電圧をかけて電子を阻止するという言い方をする。逆電圧 V をかけていって光電流がちょうど流れなくなったときには電子のエネルギー E に逆らうだけの仕事 eV をしたことになるから、

$$E = eV (e: \text{電子の電荷}) \quad (5)$$

が成立する。(5) 式で定まる (光電流が流れなくなるときの) 逆電圧を阻止電圧という。図 3 に測定回路を示す。振動数 ν の光を光電子面にあて、電池 E を用いて光電流を妨げ

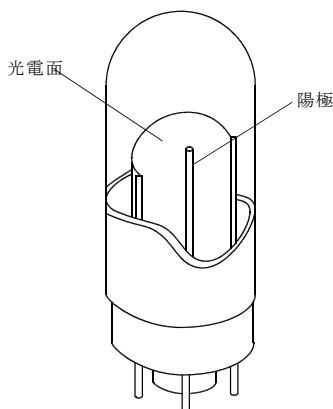


図 2 光電管

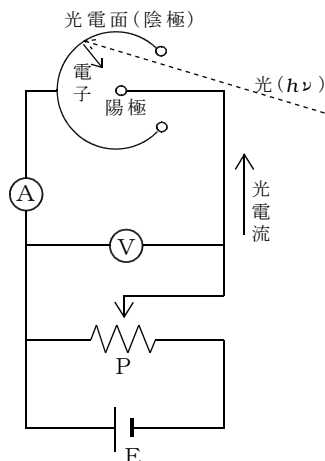


図 3 回路図

る。可変抵抗 P を動かして電流計が 0 を指すときの電圧 V を読むとこれが阻止電圧である。(4) 式と (5) 式を組み合わせることにより

$$eV = h(\nu - \nu_0) \quad (6)$$

を得る。(6) 式の阻止電圧 V は振動数 ν の一次関数である。したがって測定された阻止電圧の値を用い、その ν に対する傾きより h を知ることができる。すなわち適当な 2 点 (ν_1, V_1) 、 (ν_2, V_2) をグラフより求めるとプランク定数 h は

$$h = e \frac{V_2 - V_1}{\nu_2 - \nu_1} \quad (7)$$

と定まる。

このようにして決定されるプランク定数の値は小さいが、ゼロではない。プランク定数を含む項の効果が無視できない現象を説明するには、19 世紀までの物理学（古典物理学）では十分でない。光電効果はその一例である。プランク定数は量子論における基本的定数として重要な意味をもっている。

この実験では、振動数 ν の光（単色光）を得るために白熱電球の光源に赤色、橙色、緑色、青色のフィルターを使っている。例えば、赤色のフィルターを使うと 4.93×10^{14} Hz の振動数の光を得ることができる。他のフィルターと振動数の関係を表 1 に与える。

□ 実験方法

- (1) 図 4 のように測定器本体と光源を配置し、電流計と電圧計を接続する。
- (2) 測定器本体の POWER スイッチ（電源スイッチ）が切れていることを確認して、測定器本体の電源コードを 100V コンセントにつなぐ。

| フィルター | 振動数 [$\times 10^{14}\text{Hz}$] |
|-------|-----------------------------------|
| 赤 | 4.93 |
| 橙 | 5.37 |
| 緑 | 6.21 |
| 青 | 7.02 |

表 1 入射光の振動数

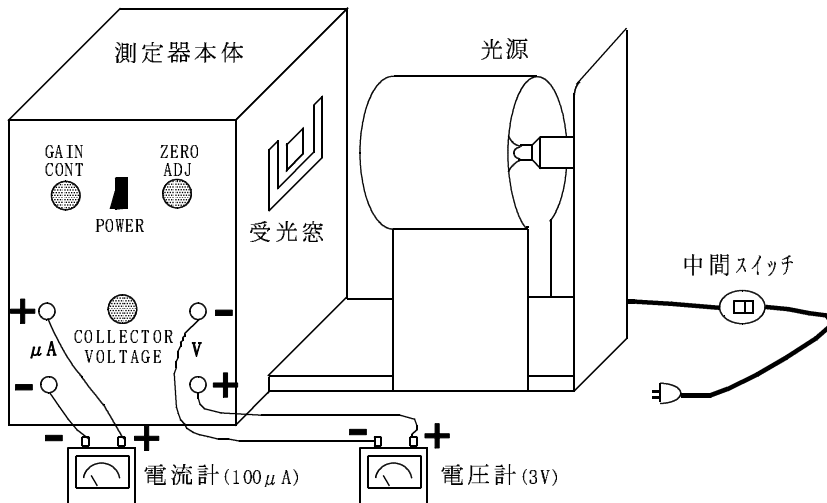


図 4 プランク定数測定器の接続図

- (3) 光源部については中間スイッチが切れているのを確認して、電源コードを 100V コンセントにつなぐ。
- (4) 測定器本体の POWER スイッチを入れる前に GAIN CONT. つまみを左いっぱいにまわす。ZERO ADJ. つまみは中央のゼロの位置に合わせる。光電管に逆電圧をかけるための COLLECTOR VOLTAGE つまみは左いっぱいにまわす。
- (5) 受光窓に 4 枚のフィルターのうちの 1 枚を入れる。
注意 フィルターなしで直接光を光電管にあててはならない。
- (6) 測定器本体の POWER スイッチを入れる。
- (7) ZERO ADJ. つまみを左右にまわし電流計のゼロ点を合わせる。
- (8) 光源のスイッチを入れ白熱電球を点灯する。このとき電流計の針が振れて光電流が流れていることがわかる。
- (9) GAIN CONT. つまみを右にまわし、電流計の針がフルスケール ($100\mu\text{A}$) になるようにする。このとき陽極に逆電圧が少しでもかかっていると正確な測定ができないの

で必ず COLLECTOR VOLTAGE つまみが左いっぱいにまわしてあることを再確認する。(もし GAIN CONT. つまみを右いっぱいにまわしても $100\mu\text{A}$ にならない場合には、 $100\mu\text{A}$ にできるだけ近い値例えば $90\mu\text{A}$ に合わせればよい。)

- (10) 光源の中間スイッチを切ってから電流計のゼロ点を合わせ直す。次に光源を再び点灯して電流計の針がフルスケール ($100\mu\text{A}$) を指すように GAIN CONT. つまみを再調整する。すなわち常に光源を切ったとき電流計の針がゼロを示し、光源を点灯したときには電流計の針がフルスケール ($100\mu\text{A}$) を示すように (7)、(8)、(9) の操作を何度かくり返す。
- (11) 陽極に逆電圧をかけるため COLLECTOR VOLTAGE つまみを右にまわしていき各逆電圧に対する光電流を測定する (表 2)。
- (12) データがとれたら各つまみを元の位置に戻し、光源の電灯を消してからフィルターを 2 枚目のものと取り替える。
- (13) 以上の手順をくり返し 4 枚のフィルターについて逆電圧対光電流の曲線のグラフ (図 5) を描く。

□ 実験例

| 逆電圧 [V] | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | ... |
|---------|-----|------|------|------|------|------|-----------------------|------|------|-----|
| フィルター 赤 | 100 | 68.2 | 40.0 | 18.0 | 4.0 | 0.0 | 光電流 [μA] | | | |
| フィルター 橙 | 100 | 77.6 | 57.0 | 37.1 | 19.2 | 5.8 | 0.0 | | | |
| フィルター 緑 | 100 | 83.8 | 65.8 | 50.3 | 35.8 | 24.0 | 11.5 | 4.2 | 0.2 | ... |
| フィルター 青 | 100 | 88.0 | 74.8 | 63.0 | 50.5 | 40.6 | 29.5 | 20.0 | 12.3 | ... |

表 2 各色の光に対する逆電圧と光電流の測定値

表 2 をグラフに表すと図 5 のようになる。

阻止電圧は、光電流が 0 になるときの電圧の値として求められるが、実験例のグラフからもわかるように光電流の曲線のスノは長く伸びていてどこで 0 になるかははっきりしない。特に振動数が大きい場合ほど曲線はなかなか 0 に近づかない。このことはわれわれの実験による誤差^{*1}のため生じると考えられる。

そこで実験の制約に影響を受けないように阻止電圧を決めることが望ましいので、阻止電圧の値として図 5 のように、ゆるやかに 0 に近づく光電流の曲線で直線に近い部分を延長して横軸との交点を求め、この点を阻止電圧の値として採用することにする。実験例

^{*1} 例えば、フィルターを使っていることにより得られる光は振動数にある幅をもつ。また、光電子の速度は一定でなくいろいろの値をとり得る等の理由が考えられる。

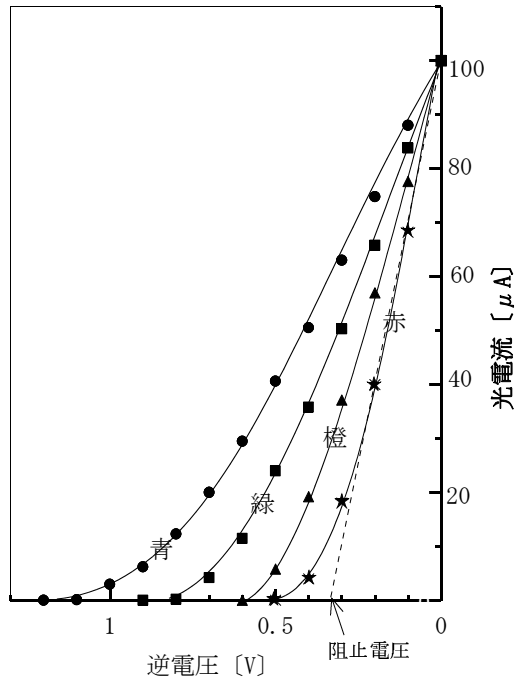


図 5

での阻止電圧の値を 表 3 に示す。

表 3 の結果をグラフに描くとほぼ直線になっている (図 6)

図 6 の直線上の 2 点、例えば

$$(\nu_1, V_1) = (5.0 \times 10^{14} \text{ [Hz]}, 0.37 \text{ [V]})$$

$$(\nu_2, V_2) = (7.0 \times 10^{14} \text{ [Hz]}, 0.83 \text{ [V]})$$

| フィルター | 振動数 ν [$\times 10^{14}$ Hz] | 阻止電圧 V [V] |
|-------|----------------------------------|--------------|
| 赤 | 4.93 | 0.33 |
| 橙 | 5.37 | 0.48 |
| 緑 | 6.21 | 0.63 |
| 青 | 7.02 | 0.84 |

表 3 入射光の振動数と阻止電圧

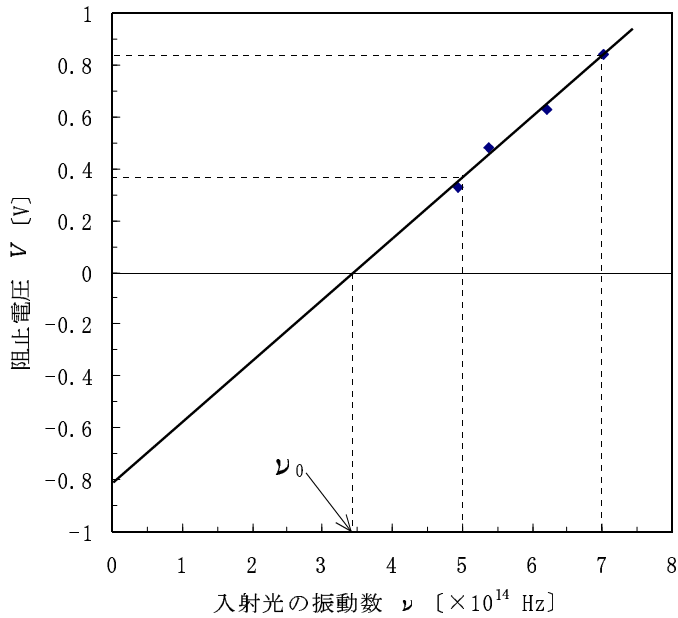


図 6

を使って、 h を (7) 式より計算すると

$$\begin{aligned}
 h &= e \frac{V_2 - V_1}{\nu_2 - \nu_1} && (\text{電子の電荷 } e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]}) \\
 &= 1.6 \times 10^{-19} \times \frac{0.83 - 0.37}{(7.0 - 5.0) \times 10^{14}} \\
 &= 3.7 \times 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}
 \end{aligned}$$

となる。

□ 問

図 6 において、 ν_0 は阻止電圧 $V = 0$ のときの振動数 ν の値 (電子が光電面からとび出るために必要な ν の最小値) である。各自の実験結果より電子がとび出す際の障壁の高さ W を求めよ。

— プランクの定数について —

物体を高温に熱すると光を発するようになるが、プランクはこの出てきた光を調べることにより、光のエネルギーが、 $h\nu$ 、 $2h\nu$ 、 $3h\nu$ 、 \dots のとびとびの値をもつことを見いだした。ここで ν は光の振動数であり、 h は定数でその値は、 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ [J·s] である。光のエネルギーが不連続な値をもつということは、光を電磁波と考える古典物理学では説明できないことであった。プランクは、光は $h\nu$ のエネルギーのかたまりからできているとして上の現象を説明した。

このようにプランクは、現象によっては古典物理学では説明が不可能であり、量子論が導入されなければならないことを初めて示したので、定数 h をわれわれはプランクの定数と呼ぶわけである。(光を粒子(光子)の集まりと考える量子論の立場では1ヶの光子が出たとき $h\nu$ のエネルギーが放出され、2ヶの光子が出たとき $2h\nu$ のエネルギーが放出される等々として上の現象を簡単に理解できる。)プランク定数は値としては非常に小さいが、量子論的效果を議論するとき必ず現われる重要な基本定数なので、現在にいたるまで精密な測定が続けられている。

プランク定数の最近の正確な値 (2006 年 CODATA 推奨値) は

$$h = (6.626\ 068\ 96 \pm 0.000\ 000\ 33) \times 10^{-34} \text{ [J·s]}$$

である。