

# 物理学実験への新実験種目の導入

## －光電効果の実験によるプランク定数の決定－

天本 徳浩\* 上野 賢仁\*\* 町田 光男\*\*\*

### Introduction of New Experimental Theme to Physics Experiment

### －Determination of Planck's Constant by Experiment of Photoelectric Effect－

by

Tokuhiro AMAMOTO\*, Takahito UENO\*\* and Mitsuo MACHIDA\*\*\*

### 要 旨

光は回折や干渉といった波動特有の現象を示すが、波動性では説明できない現象も示す。例えば、光を金属に照射すると、金属内の電子が光を吸収して金属から飛び出すことがある。この現象は光電効果といわれ、光を光子という粒子の集まりと考えると説明できない。光電効果の原理は明快で初等物理学程度の知識で理解できるので、教養課程の物理学実験テーマとして多数の大学で採用されてきた。今回、物理学実験に光電効果の実験を導入するため、検討を行った。

**Key Words:** Planck's constant, photoelectric effect, physics experiment

### 1. はじめに

物理学は自然現象を説明する基礎法則として、力学、電磁気学、熱・統計力学、量子力学などの体系を構築した。多くの場合、これらの体系を確立する過程で、まず実験事実が蓄積され、その後それに基づいて理論的な解釈がなされてきた。従って、物理学は自然科学の中で理論と実験の両側面が相互に補完する関係が特に強く、物理教育では授業と実験の繋がりが重要となる。物理学実験では、問題とする物理現象や法則が関係するように条件設定された実験装置を用い

て、得られた結果から問題を確認するが、物理学実験で取り上げている課題の殆どは、結果が既知である。実験の結果得られた数値が既知の値と良い一致が見られたときの満足感は大いだが、逆の場合は失望感が大い。このため実験では、得られた実験値に対する評価が必要となる。

光電効果によるプランク定数決定の実験は、教養課程の物理学実験テーマとして多数の大学で採用されてきた。理由は測定原理が明快で、初等物理学程度の知識で理解できるからである。しかし、市販の装置を用いて得られるプランク定数の値は、測定誤差として許容範囲を逸脱しており、光電効果の実験は物理学実験のテーマとして不適切であるという報告がなされている。今回、光電効果によるプランク定数決定の実験

\*崇城大学工学部エコデザイン学科准教授

\*\*崇城大学工学部エコデザイン学科教授

\*\*\*崇城大学総合教育センター教授

を物理学実験に導入するため、その問題点の検討を行った。

## 2. 測定の原理

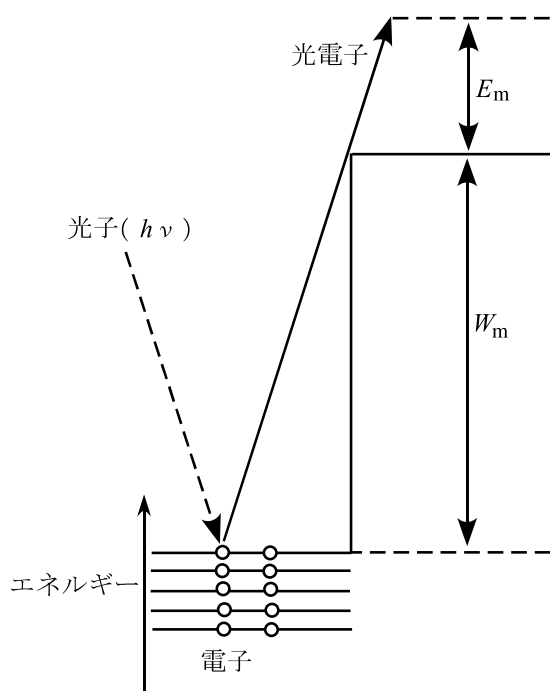


図1 光電効果のエネルギー図

金属に振動数 $\nu$ の光を照射すると、金属内の電子は1つの光子を吸収することによりエネルギー $h\nu$ を得て金属から飛び出す（光電効果）。ただし、金属内の電子は原子核の引力で束縛されているので、電子が外部へ飛び出すためには、電子が吸収したエネルギーが原子核による束縛エネルギー（仕事関数）よりも大きい必要がある。金属中の電子はバンドの中のさまざまな準位を占有しているので、仕事関数の最小値を $W_m$ とすると、光電効果で飛び出す電子の運動エネルギーの最大値 $E_m$ は、

$$E_m = h\nu - W_m \quad (1)$$

となる（図1）。

光電効果を測定するには光電管を用いる。光電管はガラス管内に半円筒状の光電面とその半円筒の中心部に細長いコレクタが封入されたものである（図2）。エネルギー $h\nu$ の光子が光電面に入射して光電効果が起こると、電子は光

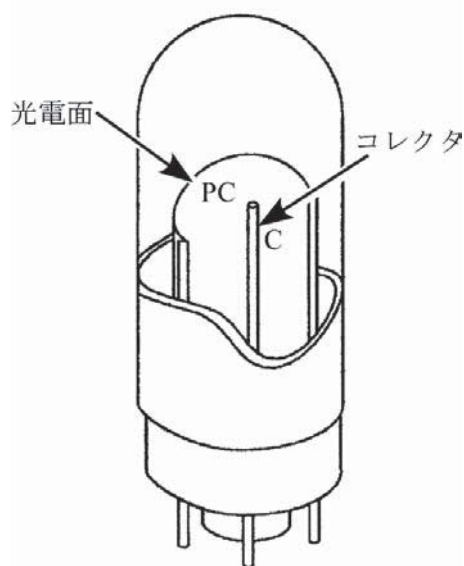


図2 光電管

電面から飛び出す。飛び出した光電子はコレクタに到達して、光電流として検出される。

光電管を使用するときは、図3に示すように、光電面PCとコレクタCにコレクタが低電位になるように電圧を印加する。これを逆電圧という。電子はマイナスの電荷（ $-e$ ）を持つので、光電面に直流電源の陰極を、またコレクタに陽極を接続して逆電圧を印加すると、光電子はコレクタに到達しにくくなる。逆電圧 $V$ が印加された状態での電子の運動エネルギーの最大値 $E$ は、

$$E = E_m - eV \quad (2)$$

である。 $E > 0$ の場合には光電子はコレクタに到達して光電流として検出されるが、 $E > 0$ の場合には光電子はコレクタに到達できずに途中で光電面に引き返す。 $V$ を増加させ、 $V$ が $V_m$ になったとき、光電流が流れなくなったとすると、

$$E_m = eV_m \quad (3)$$

となる。ここで、光電流が流れなくなるときの逆電圧 $V_m$ を阻止電圧という。式(1)、(3)から、

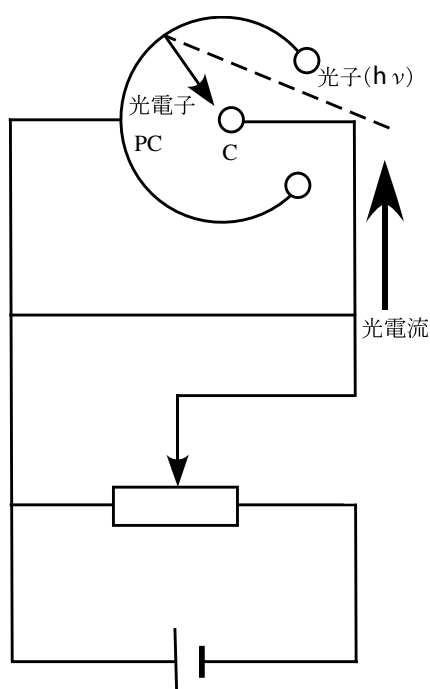


図3 光電効果測定回路図

$$V_m = \left( \frac{h}{e} \right) \nu - \left( \frac{W_m}{e} \right) \quad (4)$$

が得られる。幾つかの振動数の入射光に対して阻止電圧を決定して、縦軸を阻止電圧、横軸を入射光の振動数として阻止電圧－振動数の直線のグラフを描くと、傾きからプランク定数、縦軸との交点から仕事関数  $W_m$  を求めることができる。

### 3. 阻止電圧の測定と測定結果

光電効果の測定には、ケニス社製の光電効果実験装置 (1-121-402 PE) を用いた。阻止電圧の測定は白色光を4種類のフィルターで単色化した光 (中心波長432 nm, 501 nm, 522 nm, 582 nm) を用いて行った。阻止電圧の決定は光電流が0となる逆電圧を探索する方法 (探索法) と逆電圧と光電流の関係の線形部分を外挿して光電流が0となる逆電圧を推測する方法 (外挿法) <sup>1)</sup> で決定し、両者の結果を比較した。

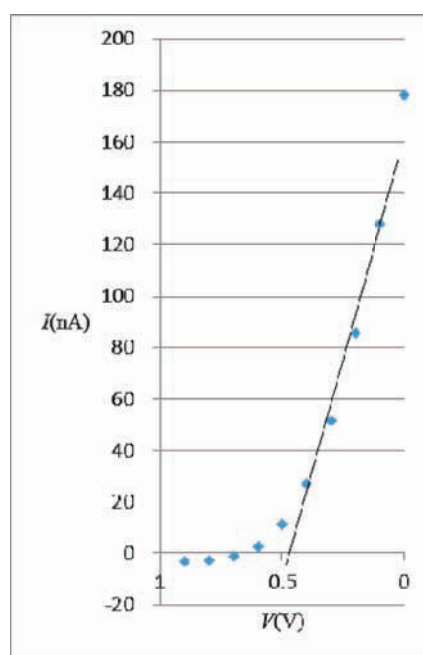
図4  $5.99 \times 10^{14}$  Hzの光に対して測定した光電流  $I$  (A)－逆電圧  $V$  (V) 特性

図4に  $5.99 \times 10^{14}$  Hz の光により測定した光電流 ( $I$ )－逆電圧 ( $V$ ) 特性を示す。探索法における阻止電圧は光電流が0となるときの逆電圧であり、 $V$ － $I$  曲線と光電流がゼロの直線 ( $I = 0$ ) の交点として与えられる。しかし、図から分かるように、 $V$ － $I$  曲線のソコが長く伸びて0となる点が不明確である。また図には示していないが、このような漸近的な振舞は光の振動数が大きくなる程顕著になる。これはフィルターによる光の単色化が不完全であることや金属中での電子のエネルギーに分布が生じていることによると考えられる。このような状況下で阻止電圧を推定する方法として、 $V$ － $I$  曲線の直線部分を延長したものと直線  $I = 0$  との交点を阻止電圧とする外挿法が用いられる。しかし、この方法においてもどこを直線とするか曖昧な点がある。表1に4つの異なる振動数の光を用いて探索法と外挿法で決定した阻止電圧を示す。

表1 探索法と外挿法で決定した阻止電圧

振動数 (Hz)	探索法 (V)	外挿法 (V)
$5.15 \times 10^{14}$	0.348	0.235
$5.75 \times 10^{14}$	0.524	0.352
$5.99 \times 10^{14}$	0.656	0.469
$6.94 \times 10^{14}$	1.028	0.699

#### 4. プランク定数の決定と評価

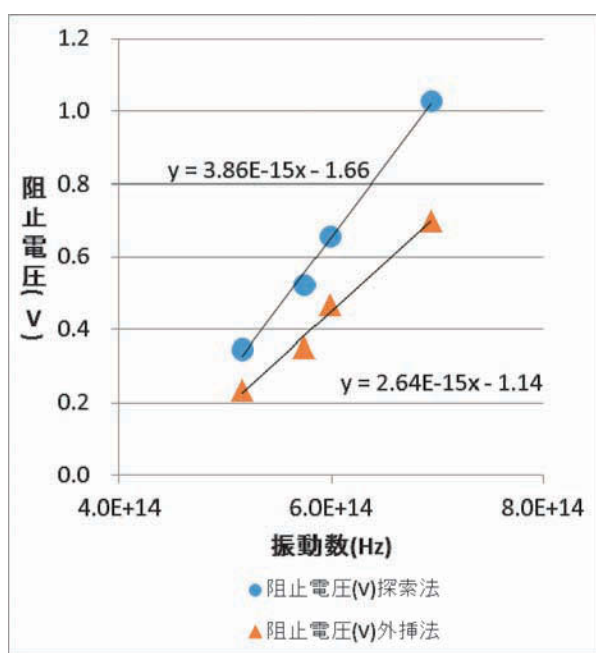
図5 探索法 (○) と外挿法 (△) で決定した阻止電圧  $V_m$  (V) - 振動数  $\nu$  (Hz) 直線

表1のデータをグラフに示したものが図5である。図における直線は最小自乗法で決定したものであり、また得られたプランク定数を表2に示す。

プランク定数の正確な値は

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js} \quad (5)$$

であるので、探索法は良い結果 ( $6.17 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ) を与えている。一方、外挿法から得られた値は正確な値の60%程度 ( $4.23 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ) である。平岡らも外挿法で決定した阻止電圧からプランク定数を求めているが、やはり同様な結果を得ている<sup>1)</sup>。彼らは外挿法では正確な阻止

電圧は決定できないと結論している。

表2 探索法と外挿法により求められたプランク定数

方法	$h/e$ (Vs)	プランク定数 $h$ (Js)
探索法	$3.86 \times 10^{-15}$	$6.17 \times 10^{-34}$
外挿法	$2.64 \times 10^{-15}$	$4.23 \times 10^{-34}$

矢ヶ崎らは単色光を用いて光電効果の測定を行い、光電流と阻止電圧の関係を調べた<sup>2)</sup>。その結果、光電流が初期値（逆電圧が0のとき光電流値）の1/1000程度に減衰したときの逆電圧が阻止電圧に相当することを見出している。彼らは得られた阻止電圧から  $6.81 \times 10^{-34} \text{ Js}$  という値を得ている。探索法から得られる阻止電圧は、光電流－逆電圧特性曲線で光電流が0となるとき逆電圧であるので、矢ヶ崎らの手法から得られる値と大差はなく、そのため探索法は好結果を与えている。一方、図4から分かるように、外挿法から得られる阻止電圧は矢ヶ崎らの手法や探索法から得られる値と大きくかけ離れ、小さくなる。また、光電流－逆電圧特性曲線の漸近的な振舞は振動数が高くなる程顕著さを増す。これは、振動数の増加に伴い、外挿法から得られる逆電圧が探索法から得られる値より小さくなる程度が増大することを表している。その結果、外挿法から得られるプランク定数は真の値から有意に小さくなると推定される。

#### 5. おわりに

物理学実験への新実験種目の導入にあたり、光電効果の実験によるプランク定数を求める予備実験を行った。

外挿法から得られる阻止電圧は真の値から大きくかけ離れている。一方、探索法においては光電流が0になる逆電圧を阻止電圧とするが、これは矢ヶ崎らの主張する狙いとほぼ合致する。また、探索法から得られるプランク定数も真の値と良く一致している。探索法はデータ処理も単純であり、また正確な値を与えるので外挿法より優れている。

## 謝辞

本研究で使用した実験装置は崇城大学教育重点配分研究費により購入したものである。学生にとって工学の基礎となる物理現象理解をより深めるために使わせていただきます。本予算を承認いただいた関係者に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 平野延章, 岩堀純一郎: 高知医科大学一般教育紀要, 1, 43 (1986).
- 2) 矢ヶ崎克馬, 幾島康夫, 照屋全次, 当山忠久: 琉球大学理学部紀要, 36, 15 (1983).

