

光電効果

2511198 肥田幸久

共同実験者

2025 年 10 月 22 日作成

1 実験の目的

光電管を用いて, 基礎物理定数のひとつであるプランク定数 h を測定する.
また, 光電効果の諸特性について得られた測定値をもとに検証を行う.

2 実験の原理

2.1 光電効果

光電効果とは, 金属表面に特定の振動数以上の光が当たると電子 (光電子) が飛び出す現象である. 光電子の運動エネルギー K と光の振動数 ν , 金属表面から光電子が飛び出すのに必要なエネルギー (仕事関数) W には, プランク定数 h を用いて次式の関係が成り立つことが知られている.

$$K = h\nu - W \quad (1)$$

また, 光電効果には次のような性質を持つことが知られている.

- 金属の種類によって決まる限界振動数より小さい振動数の光では, 光の強度を強くしても光電子は放出されず, 光の振動数が限界振動数より大きければ, 光の強度がどんなに弱くても光電子は放出される.
- 光電子の運動エネルギーは光の強度によらず, 光の振動数にのみ依存する.
- 光の振動数を一定にし, その強度を強くしていくと放出される光電子の数が増加するが, 光電子の運動エネルギーは変化しない.

2.2 光電管

光電管はほぼ真空のガラス管内に入れた陽極と陰極からなり、光電効果を利用して光エネルギーを電気エネルギーに変換する電子管である。陰極（光電面）に限界振動数より高い振動数の光を当てると、飛び出した光電子が陽極へ到達し、電流として観測することができる。この電流を光電流と呼び、陰極には仕事関数が小さいアルカリ金属が用いられる。これより、光電管を用いて光電子の運動エネルギーを測定することでプランク定数を求めることができる。また、同様の測定を条件を変えて光電流を測定することで上記の光電効果の諸性質を定量的に検証することができる。

光電管には、光電面から飛び出した光電子を陽極から追いつく向き（逆方向電圧）、あるいは加速する向き（順方向電圧）に電圧を変化させながら印加できるようになっている。光電管に対する印加電圧と陽極より取り出した光電流は各々電圧計と電流計によって測定できる。

3 実験方法

本実験では、以下のような装置を用いて実験を行った。

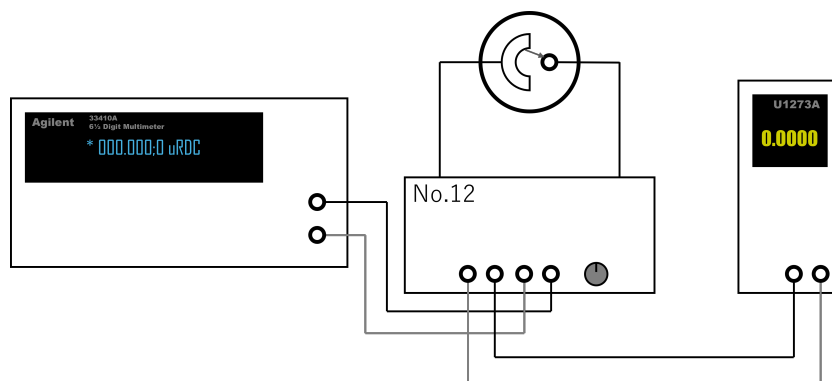


図 1: 光電効果測定の実験図

3.1 電流計のオフセット調整

最初に 7mm の絞り板と青色フィルタをセットした。

十分に大きな逆電圧（約 2V）を印加し、光電流を 10 回測定し記録し、平均値を求めた。上記をもう一度行い、平均値に大きな変化がないことを確認し、表示が平均値近くとなったら 0 補正をした。

3.2 光電流の測定

30nA を超えない切りの良い電圧値から光電流の測定を始めた。その際, 3nA 以上は 5 回, 未満は 10 回測定した。0.05V 毎に電圧を上げてデータを記録し, 光電流が 1nA 未満となったら, さらに 3 電圧点ほどまで測定した。

以上の操作を, フィルタを変えて繰り返した。

4 実験結果

4.1 フィルタの波長と振動数

実験で使用した 4 色のフィルタを通る光の最小の波長 λ と, その振動数 ν を表に示す。ただし, ν の値は光速 $c = 3.0 \times 10^8$ m/s を用いて計算した。

表 1: フィルタの波長と振動数

| フィルタの色 | 波長 λ/nm | 振動数 $\nu/10^{14}\text{Hz}$ |
|--------|------------------------|----------------------------|
| 赤 | 590 | 5.08 |
| 橙 | 530 | 5.66 |
| 黄 | 492 | 6.10 |
| 青 | 428 | 7.01 |

4.2 逆電圧に対する光電流の測定結果

4.2.1 青色フィルタの場合

次の表 2 に, オフセット調整のための, 青色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値を示す。また, これより 2.0 I/nA でオフセット調整を行った。

表 2: 青色フィルタにおける電流計のオフセット調整

| 電圧 V/V | 光電流 I/nA | | | | | | | | | | 平均値 |
|-----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|---------------------|
| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 6 回目 | 7 回目 | 8 回目 | 9 回目 | 10 回目 | \bar{I}/nA |
| 2.0003 | 2.0 | 1.9 | 1.5 | 1.9 | 2.1 | 1.5 | 1.8 | 2.0 | 2.2 | 1.8 | 1.87 |
| | 1.8 | 2.1 | 1.8 | 1.9 | 2.1 | 2.0 | 1.6 | 2.0 | 2.4 | 1.9 | 1.96 |
| | 1.9 | 1.7 | 2.0 | 2.1 | 2.0 | 2.1 | 1.8 | 1.9 | 1.9 | 2.0 | 1.94 |

また, 青色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値を次の表 3 に示す。

表 3: 青色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値

| 電圧 V/V | 光電流 I/nA | | | | | | | | | | 平均値 \bar{I}/nA |
|-----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|----------------------------|
| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 6 回目 | 7 回目 | 8 回目 | 9 回目 | 10 回目 | |
| 0.0000 | 25.7 | 25.6 | 26.0 | 25.7 | 25.6 | - | - | - | - | - | 25.72 |
| 0.0500 | 22.5 | 22.7 | 22.3 | 22.2 | 22.9 | - | - | - | - | - | 22.52 |
| 0.1000 | 20.1 | 20.2 | 20.1 | 20.1 | 20.1 | - | - | - | - | - | 20.12 |
| 0.1500 | 17.1 | 16.7 | 17.6 | 17.3 | 17.2 | - | - | - | - | - | 17.18 |
| 0.2000 | 14.5 | 14.4 | 14.6 | 14.8 | 14.6 | - | - | - | - | - | 14.58 |
| 0.2500 | 12.3 | 12.1 | 12.2 | 12.4 | 12.8 | - | - | - | - | - | 12.36 |
| 0.3000 | 10.5 | 10.7 | 10.4 | 10.3 | 10.5 | - | - | - | - | - | 10.48 |
| 0.3500 | 8.4 | 8.8 | 8.4 | 8.1 | 8.4 | - | - | - | - | - | 8.42 |
| 0.4000 | 6.6 | 6.9 | 6.7 | 6.4 | 6.7 | - | - | - | - | - | 6.66 |
| 0.4500 | 5.3 | 5.6 | 5.6 | 5.2 | 5.4 | - | - | - | - | - | 5.42 |
| 0.5000 | 4.1 | 3.9 | 4.2 | 4.3 | 4.3 | - | - | - | - | - | 4.16 |
| 0.5500 | 3.1 | 3.2 | 3.1 | 3.2 | 3.0 | - | - | - | - | - | 3.12 |
| 0.6000 | 2.4 | 2.4 | 2.8 | 2.4 | 2.6 | 2.7 | 2.5 | 2.5 | 2.2 | 2.8 | 2.53 |
| 0.6500 | 1.4 | 1.6 | 1.7 | 1.5 | 1.2 | 1.8 | 2.3 | 1.6 | 1.9 | 2.1 | 1.71 |
| 0.7000 | 1.4 | 1.7 | 1.2 | 2.0 | 1.5 | 1.4 | 1.7 | 1.4 | 1.7 | 1.1 | 1.51 |
| 0.7500 | 1.0 | 0.9 | 0.7 | 1.4 | 1.3 | 0.9 | 0.9 | 0.6 | 0.9 | 0.8 | 0.94 |
| 0.8000 | 0.6 | 0.4 | 0.5 | 0.9 | 0.7 | 0.9 | 0.8 | 1.2 | 0.3 | 1.1 | 0.74 |
| 0.8500 | 0.6 | 0.5 | -0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.32 |

4.2.2 黄色フィルタの場合

次の表 4 に, オフセット調整のための, 黄色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値を示す. また, これより 1.2 I/nA でオフセット調整を行った.

表 4: 黄色フィルタにおける電流計のオフセット調整

| 電圧 V/V | 光電流 I/nA | | | | | | | | | | 平均値 \bar{I}/nA |
|-----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|----------------------------|
| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 6 回目 | 7 回目 | 8 回目 | 9 回目 | 10 回目 | |
| 2.0000 | 0.8 | 1.2 | 1.0 | 0.7 | 1.3 | 1.1 | 1.0 | 1.3 | 1.2 | 0.9 | 1.05 |
| | 1.2 | 1.3 | 1.1 | 1.0 | 1.3 | 1.4 | 1.6 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.21 |
| | 1.2 | 1.4 | 1.3 | 1.4 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.4 | 1.6 | 1.3 | 1.41 |
| | 1.2 | 0.9 | 1.8 | 1.0 | 1.5 | 0.8 | 1.5 | 1.7 | 1.6 | 0.8 | 1.28 |

また, 黄色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値を次の表 5 に示す.

表 5: 黄色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値

| 電圧 V/V | 光電流 I/nA | | | | | | | | | | 平均値 \bar{I}/nA |
|-----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|-----|------|-------|----------------------------|
| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 6 回目 | 7 回目 | 8 目 | 9 回目 | 10 回目 | |
| 0.1500 | 36.1 | 36.2 | 36.2 | 36.2 | 35.9 | - | - | - | - | - | 36.12 |
| 0.2001 | 29.0 | 28.0 | 28.2 | 28.7 | 28.4 | - | - | - | - | - | 28.46 |
| 0.2500 | 21.1 | 21.5 | 21.6 | 21.5 | 21.5 | - | - | - | - | - | 21.44 |
| 0.3000 | 15.6 | 16.1 | 15.8 | 15.9 | 16.1 | - | - | - | - | - | 15.90 |
| 0.3500 | 11.3 | 11.1 | 10.8 | 11.2 | 10.8 | - | - | - | - | - | 11.04 |
| 0.4000 | 8.0 | 7.9 | 7.6 | 7.9 | 7.3 | - | - | - | - | - | 7.74 |
| 0.4500 | 5.4 | 5.1 | 5.2 | 5.0 | 5.4 | - | - | - | - | - | 5.22 |
| 0.5001 | 3.0 | 3.1 | 2.8 | 2.9 | 3.2 | - | - | - | - | - | 3.00 |
| 0.5500 | 2.3 | 2.2 | 2.1 | 2.4 | 2.7 | 2.6 | 2.1 | 2.6 | 2.6 | 2.3 | 2.39 |
| 0.6000 | 1.2 | 1.0 | 1.6 | 1.3 | 1.1 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.1 | 1.23 |
| 0.6500 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 0.4 | 0.5 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 0.9 | 0.6 | 0.64 |
| 0.7000 | 0.2 | 0.4 | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 0.9 | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 0.9 | 0.70 |
| 0.7500 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.1 | -0.3 | 0.5 | 0.0 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.34 |

4.2.3 橙色フィルタの場合

次の表 6 に, オフセット調整のための, 橙色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値を示す. また, これより $1.2 I/\text{nA}$ でオフセット調整を行った.

表 6: 橙色フィルタにおける電流計のオフセット調整

| 電圧 V/V | 光電流 I/nA | | | | | | | | | | 平均値 \bar{I}/nA |
|-----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|----------------------------|
| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 6 回目 | 7 回目 | 8 回目 | 9 回目 | 10 回目 | |
| 2.0000 | 1.7 | 1.1 | 1.0 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.3 | 0.9 | 1.25 |
| | 1.2 | 1.3 | 0.7 | 1.3 | 1.3 | 1.4 | 1.1 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 1.21 |

また, 橙色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値を次の表 7 に示す.

表 7: 橙色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値

| 電圧 V/V | 光電流 I/nA | | | | | | | | | | 平均値 \bar{I}/nA |
|-----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|----------------------------|
| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 6 回目 | 7 回目 | 8 回目 | 9 回目 | 10 回目 | |
| 0.0000 | 10.7 | 10.6 | 10.4 | 11.1 | 10.8 | - | - | - | - | - | 10.72 |
| 0.0500 | 8.5 | 8.7 | 8.9 | 8.1 | 8.6 | - | - | - | - | - | 8.56 |
| 0.1000 | 6.8 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 7.1 | - | - | - | - | - | 6.64 |
| 0.1500 | 5.0 | 4.9 | 5.3 | 5.5 | 5.1 | - | - | - | - | - | 5.16 |
| 0.2002 | 3.5 | 3.4 | 3.4 | 3.5 | 3.5 | - | - | - | - | - | 3.46 |
| 0.2500 | 1.9 | 2.4 | 2.2 | 2.4 | 2.8 | 2.6 | 2.3 | 2.7 | 2.3 | 2.4 | 2.40 |
| 0.2999 | 2.1 | 1.7 | 1.8 | 2.1 | 2.1 | 2.0 | 2.1 | 1.7 | 1.8 | 1.7 | 1.91 |
| 0.3500 | 1.5 | 1.8 | 1.4 | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1.5 | 1.3 | 0.6 | 1.28 |
| 0.4000 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.2 | 0.4 | 1.4 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 0.94 |
| 0.4500 | 0.8 | 0.6 | 1.1 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.70 |
| 0.5000 | 0.3 | 0.7 | 0.0 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.2 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.47 |

4.2.4 赤色フィルタの場合

次の表 8 に, オフセット調整のための, 赤色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値を示す. また, これより $1.2 I/\text{nA}$ でオフセット調整を行った.

表 8: 赤色フィルタにおける電流計のオフセット調整

| 電圧 V/V | 光電流 I/nA | | | | | | | | | | 平均値 \bar{I}/nA |
|-----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|----------------------------|
| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 6 回目 | 7 回目 | 8 回目 | 9 回目 | 10 回目 | |
| 2.0000 | 1.1 | 1.8 | 1.4 | 1.9 | 1.4 | 1.3 | 1.1 | 1.3 | 1.5 | 1.4 | 1.42 |
| | 1.6 | 1.0 | 1.4 | 1.0 | 1.4 | 0.8 | 1.3 | 1.4 | 1.2 | 1.2 | 1.23 |
| | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.4 | 0.8 | 1.2 | 1.4 | 1.0 | 1.3 | 1.3 | 1.21 |

また, 赤色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値を次の表 9 に示す.

表 9: 赤色フィルタにおける逆電圧と光電流の測定値

| 電圧 V/V | 光電流 I/nA | | | | | | | | | | 平均値 |
|-----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|---------------------|
| | 1 回目 | 2 回目 | 3 回目 | 4 回目 | 5 回目 | 6 回目 | 7 回目 | 8 回目 | 9 回目 | 10 回目 | \bar{I}/nA |
| 0.0000 | 1.9 | 2.1 | 2.2 | 2.2 | 2.0 | 2.6 | 2.2 | 2.3 | 1.8 | 2.1 | 2.14 |
| 0.0500 | 1.7 | 1.7 | 1.4 | 1.7 | 1.9 | 1.7 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.4 | 1.66 |
| 0.1000 | 0.9 | 1.1 | 0.7 | 1.2 | 1.3 | 1.0 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.4 | 1.08 |
| 0.1500 | 0.4 | 0.8 | 0.7 | 0.4 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.8 | 1.0 | 0.3 | 0.55 |
| 0.2000 | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.0 | 0.5 | 0.26 |
| 0.2500 | 0.1 | 0.2 | -0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.5 | 0.2 | 0.2 | 0.0 | 0.14 |

更に, 表 3, 表 5, 表 7, 表 9 の値を, 図 2 (後掲) の片対数グラフにプロットした.

4.3 フィルタごとの振動数 ν と阻止電圧 V_{th} の値

図 2 の数 nA 前後のデータにおおよその直線を引き, 5 nA, 2 nA, 1 nA をよぎる電圧 (阻止電圧とする) を求め, 次の表 10 に示す.

表 10: フィルタごとの振動数 ν と阻止電圧 V_{th} の値

| フィルタの色 | 振動数 $\nu/10^{14}\text{Hz}$ | 阻止電圧 V_{th}/V | | |
|--------|-------------------------------|------------------------|-------|-------|
| | | 5nA | 2nA | 1nA |
| 赤 | 5.08 | - | 0.015 | 0.078 |
| 橙 | 5.66 | 0.151 | 0.286 | 0.391 |
| 黄 | 6.10 | 0.452 | 0.553 | 0.628 |
| 青 | 7.01 | 0.454 | 0.630 | 0.764 |

更に, 表 10 の値をグラフ上にプロットすると, 図 3~5 (後掲) のようになった.

4.4 プランク定数と仕事関数の決定

この図 3~5 から直線の傾き ($\alpha = h/e$) 及び切片 ($\beta = -W/e$) を求め, これをもとにプランク定数 h と仕事関数 W を求め次の表 11 に示す. ただし, 電気素量 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}[1]$ とする.

表 11: プランク定数 h と仕事関数 W の値

| | 傾き $\alpha = h/e$ | 切片 $\beta = -W/e$ | プランク定数 h/Js | 仕事関数 W/eV | 仕事関数 W/J |
|------|-------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| 1 nA | 3.519×10^{-15} | -1.633 | 5.637×10^{-34} | 1.633 | 2.616 |
| 2 nA | 3.214×10^{-15} | -1.546 | 5.149×10^{-34} | 1.546 | 2.477 |
| 5 nA | 2.000×10^{-15} | -0.900 | 3.204×10^{-34} | 0.900 | 1.442 |
| 平均値 | | | 4.663×10^{-15} | 1.360 | 2.178 |

次に, プランク定数と仕事関数のそれぞれの標準不確かさ $\Delta\bar{h}$ と $\Delta\bar{W}$ を求める. なお, 標準不確かさは次式 (2) を用いて求め, 表 12 に示す.

$$\Delta\bar{x} = \frac{\Delta x}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

表 12: プランク定数 h と仕事関数 W の標準不確かさ

| | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| $\bar{h} \pm \Delta\bar{h}$ | $\bar{W} \pm \Delta\bar{W}$ |
| h/Js | W/eV |
| $4.7 \pm 0.8 \times 10^{-15}$ | 1.36 ± 0.23 |

5 考察

5.1 プランク定数の測定値と文献値の比較

本実験におけるプランク定数 h の測定値と文献値を次の表 13 に示す.

表 13: プランク定数 h の測定値と文献値

| | 測定値 | 文献値 [1] |
|---------------|-------------------------------|-------------------------|
| h/Js | $4.7 \pm 0.8 \times 10^{-15}$ | 6.626×10^{-15} |

これより, 文献値が不確かさの範囲外であることが確認できた.

5.2 測定装置の不具合について

本実験で使用した測定装置において, 光電流値が他の装置と比較して著しく低い値を示すという問題が発生した. この影響により, 赤色フィルタにおける光電流 5 nA での阻止電圧 V_{th} を測定することができず, 表 10 の該当箇所が欠損値となった.

また, 実験後にこの不具合に気づき, 実験装置を3回再起動をしたが改善されなかった. しかし, 4度目の再起動後に光電流値は他の装置に近い値を示した. このことから, 本実験中に使用していた装置は, 何らかの理由で一時的な不具合を起こしていた可能性が高いと考えられる.

5.3 測定結果への影響の考察

もし装置が正常に動作し, より大きな光電流値が測定されていれば, 阻止電圧の値は図2および以後の結果が異なっていたと考えられる. 図2において, より大きな光電流値が測定されたと考えると, 黄色フィルタの直線と青色フィルタの直線の角度差から, より阻止電圧の差が広がることがわかる. よって, 図3~5の直線の傾きはより大きくなり, 同時に切片はより小さくなる. これによりプランク定数は大きくなり, より文献値に近づくことが期待できる.

6 まとめ

参考文献

- [1] <https://japanknowledge.com/contents/common/si.html>