

光電効果

電気通信大学 3類
2513176 福島孝太

2025年10月1日作成
2025年10月26日更新

1 目的

光電効果を利用した電子管を用いて、絞り板の穴径を狭めていくことで、光量と光電流の関係を検証する。また、異なる波長の光に対する電流を測定し、最大運動エネルギーを求める。その結果を利用し、最大運動エネルギー E 、プランク定数 h そして仕事関数 W の関係からそれぞれの値を求める。

2 原理

2.1 概要の説明

光電効果は、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）が飛び出す現象のことである。光電子の運動エネルギーを K 、光の振動数、金属表面から光電子が飛び出す際に必要なエネルギー（仕事関数）を W とする。また、 h をプランク定数とする。この時、以下の式(1)が成立つ。

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

光電効果は以下の3つの性質があることが知られている。

1. 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観測されない。逆に、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が確認される。
2. 光電子の運動エネルギーは光の強度によらず、光の振動数のみに依存する。
3. 光の振動数を一定にし、その強度を強くしていくと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。

光電管は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、ほぼ真空のガラス管内に入れた陽極(+)と陰極(-)からなる。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、光電子が飛び出し陽極へ到達し、電流として取り出すことができる。この電流を光電流という。陰極には仕事関数が小さいアルカリ金属が用いられる。

光電効果の原理図を図 1 に示す。

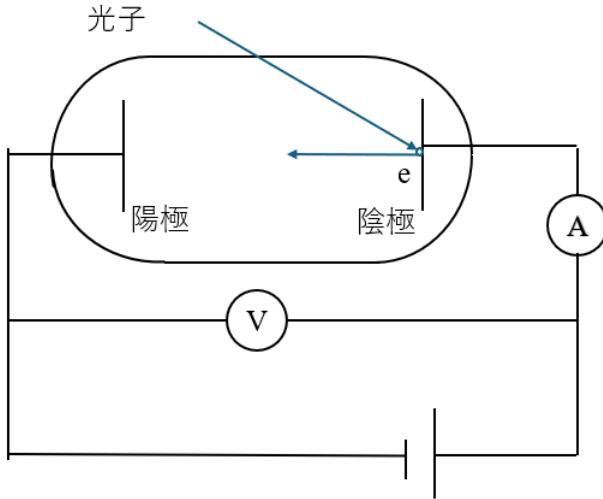


図 1: 光電効果の原理図

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返す向き(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、印加できるよう工夫されている。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り測定できる。

適当な光源を用意して光電管に光を当て、光電面から飛び出した光電子に対して逆方向電圧 V をかけると、光電子はクーロン斥力により、陽極に到達しにくくなる。印加電圧を上げると、ついには光電子はすべて電圧によって追い返され、陽極に到達できなくなる。すなわち、光電流は 0 となる。このときの電圧を V_0 とすると、電圧によって光電子が失うエネルギーと光電子が陰極を飛び出した瞬間に持っていた運動エネルギーが等しいので、 e を素電荷とすると、 $eV_0 = K$ となる。したがって V_0 (阻止電圧)を測定することで、光電子の最大運動エネルギーの大きさを知ることができる(阻止電圧と同じでも、荷電粒子が電圧から受ける力は粒子の電荷の大きさに依存する。つまり、電圧に電荷量 q をかけた qV_0 が荷電粒子の最大運動エネルギーに相当する。電子の場合は $e = q$)。なお、電子など荷電粒子のエネルギーの大きさは電子ボルト(eV)がよく用いられる。1 電子ボルトは式(2)である。

$$1\text{eV} = 1.6022 \times 10^{-19}\text{J} \quad (2)$$

これは 1 つの電子が 1 V の電圧によって加速されるときに得る運動エネルギーの大きさに等しい。

2.2 それぞれの値の求め方

仕事関数 W およびプランク定数 h の求め方について書く。先ほどの式 (1) を仕事関数 W についての式に変形すると、以下の式 (3) となる。

$$W = h\nu - E \quad (3)$$

最大運動エネルギー E および周波数 ν をそれぞれの点から求められる。これを最小二乗法を用いて、近似直線をひく。この時の傾きがプランク定数であり、切片が仕事関数となる。一般に以下の式 (4),(5) で求める。ただし、 $\bar{\nu}, \bar{E}$ はそれぞれ振動数と最大運動エネルギーの平均値を表す

$$h = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\nu_i - \bar{\nu})(E_i - \bar{E})}{\sum_{i=1}^n (\nu_i - \bar{\nu})} \quad (4)$$

$$W = \bar{\nu}h - \bar{E} \quad (5)$$

この時プランク定数は単位が異なり、通常のものに直す必要がある。この時の単位は最大運動エネルギーの単位 eV に合わせられている。そのため式 (2) をかけて、単位を Js に変換する必要がある。

3 方法

3.1 使用した道具

1. Keysight U1273A(電圧計)
2. Agilent 34410A(電流計)
3. 絞り板(穴径が 14 mm, 10 mm, 7 mm, 5.5 mm, 3.5 mm)
4. フィルタ(赤, 橙, 黄, 青)
5. 遮光板

絞り板がない状態での測定も行い、このときの穴径を 20 mm とした。また、それぞれのフィルタの波長は赤 590 nm, 橙 530 nm, 黄 492 nm, 青 428 nm と表面に記載されていた。

3.2 光電流と光量の関係

光量と電流の関係について、実験した。また、フィルタの青と黄色と絞り板を組み合わせて用いた。それぞれのフィルタと、絞り板を組み合せた状態で、それぞれ光電流を 5 回測定した。

3.3 電流と電圧の関係

電流と電圧の関係について、すべての色のフィルタおよび遮光板を用いて調査した。次のような測定の方法で実行した。

1. 電流が 20 nA 以上の時、おおよそ 0.1 V ごとに 5 回電流値を測定した。

2. 電流が 20 nA 未満かつ 10 nA 以上の時, おおよそ 0.05 V ごとに 5 回電流値を測定した.
3. 電流が 10 nA 未満の時, おおよそ 0.05 V ごとに 10 回電流値を測定した. 最大で 1.5 V まで増加させる.
4. 遮光板を挿入した場合のみ 1.0 V まで測定した.

この実験は, ひとつ前の電圧の平均と比較したとき, 差が 1 nA 未満になっていた場合に終了した. 絞り版を挿入しない状態で, 赤フィルタを挿入した. 今回, 遮光板の値は 0.15 V までしか測定しなかった.

4 結果

4.1 実験 1 の結果

光量と光電流の関係は下の表 2 のようになった.

絞り径 R / mm	フィルタ	
	黄 青	
	平均光電流 I / nA	
0	8.1	5.3
3.5	64.3	27.3
5.5	249.3	27.2
7	447.0	161.9
10	798.5	304.3
14	1153.8	486.3
20	1402.3	689.6

絞り径が 0 mm の部分は遮光板を用いているが, 絞り径が 20 mm の部分は絞り板を用いていない. 表を横軸を絞り径 R/mm の二乗 $R^2/(\text{mm})^2$ とし, 縦軸を光電流 I/nA グラフにすると, 図 2 のようになった.

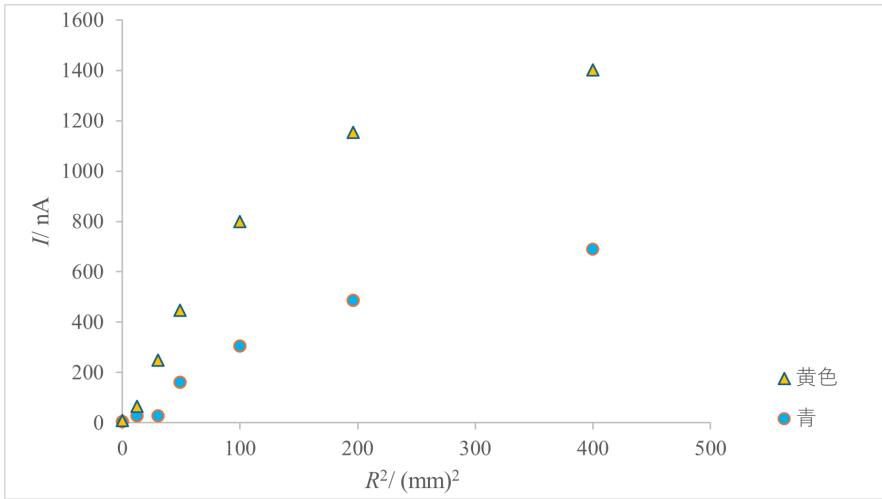


図 2: 光量と光電流の関係

4.2 実験 2

実験 2 では表 2 の結果が得られた。表 2 の結果を用いて、横軸に逆方向電圧 V 、縦軸に光電流 I としたグラフを作成した。それが下の図 3 だ。それぞれの記号について、丸が黄、ひし形が青、バツが橙、十字が赤、三角が遮光板に対応している。

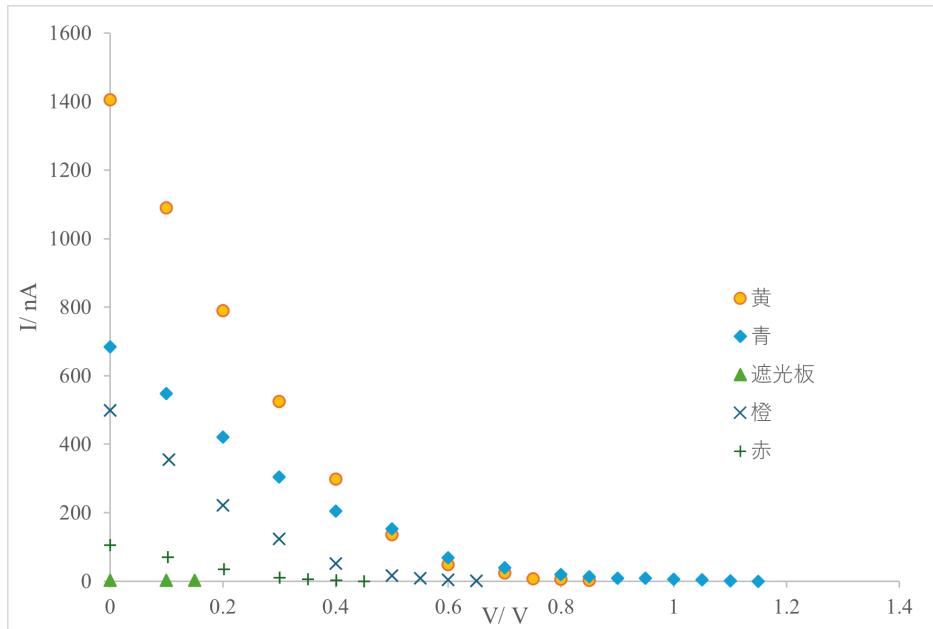


図 3: 逆方向電圧と電流の関係

表 2: 逆方向電圧印加実験結果

赤		橙		黄		青		遮光板	
V/V	I/nA	V/V	I/nA	V/V	I/nA	V/V	I/nA	V/V	I/nA
0.0000	105.2	0.00000	498.9	0.0000	1405.3	0.0000	684.1	0.0000	3.3
0.1025	70.7	0.1024	354.4	0.1000	1089.6	0.1013	548.1	0.1022	2.8
0.2020	35.2	0.2063	222.4	0.2015	788.9	0.2016	421.0	0.1512	2.6
0.3007	11.1	0.3000	123.4	0.3014	524.3	0.3010	305.0	-	-
0.3508	5.6	0.4017	51.8	0.4016	298.9	0.4016	204.1	-	-
0.4016	2.1	0.5006	16.9	0.5016	135.5	0.5003	152.4	-	-
0.4511	0.0	0.5515	8.3	0.6022	49.2	0.6069	68.7	-	-
0.5020	-0.3	0.6012	3.6	0.7001	24.9	0.7010	38.9	-	-
0.5521	-0.6	0.6511	0.6	0.7516	6.6	0.8053	19.3	-	-
0.6015	-0.7	0.7498	-1.3	0.8015	6.5	0.8504	14.0	-	-
0.6534	-0.7	0.8021	-1.5	0.8512	2.8	0.9025	9.3	-	-
0.7005	-0.9	0.8548	-1.8	0.9015	-2.8	0.9513	9.3	-	-
-	-	0.9012	-1.9	0.9551	-3.5	1.0021	5.8	-	-
-	-	0.9534	-1.9	1.0021	-3.8	1.0526	3.5	-	-
-	-	-	-	1.0547	-3.9	1.1008	1.4	-	-
-	-	-	-	1.1006	-4.3	1.1510	0.1	-	-
-	-	-	-	-	-	1.2045	-0.6	-	-
-	-	-	-	-	-	1.2506	-0.9	-	-
-	-	-	-	-	-	1.3032	-1.1	-	-

続いて、最小二乗法で得られた直線の式と光電効果の式の関係から、プランク定数 h と仕事関数を求める。この時単位変換に注意した。プランク定数は Js で与えられ、eV で与えられている。変換は原理の部分で示した、式 (2) を用いて計算すればよい。まとめると、下の図 3 となった。ただし最大運動エネルギーは、平均光電流の測定値と 1 つ前の測定値の差が 1 nA 未満になった値を用いた。

表3: 光電管に照射する光と最大運動エネルギー K の関係

i	フィルタ	波長 λ/nm	周波数 (x_i) $v/10^{14} \text{ s}^{-1}$	最大運動 エネルギー (y_i) K/eV	x_i^2 (10^{28} s^{-2})	$x_i y_i$ (10^{14} eVs^{-1})
1	Red	590	5.08	0.4511	25.8	2.29
2	Orange	530	5.66	0.7039	32.0	3.98
3	Yellow	492	6.09	0.8527	37.2	5.20
4	Blue	428	7.01	1.1008	49.1	7.72
$N = 4$			$\Sigma_{x_i} = 23.85$	$\Sigma_{y_i} = 3.1085$	$\Sigma_{x_i^2} = 568.8$	$\Sigma_{x_i y_i} = 19.19$
$D = N \Sigma_{x_i^2} - (\Sigma_{x_i})^2 = 7.6 \times 10^{28}$					$a = D_1/D = -1.3$	
$D_1 = \Sigma_{y_i} \dot{\Sigma}_{x_i^2} - \Sigma_{x_i} \dot{\Sigma}_{x_i y_i} = -9.75 \times 10^{28}$					$b = D_2/D = 0.34 \times 10^{-14}$	
$D_2 = N \Sigma_{x_i y_i} - \Sigma_{x_i} \dot{\Sigma}_{y_i} = 2.62 \times 10^{14}$						

上の表3より以下の式(6)がなりたつ。

$$y = 3.4 \times 10^{-15} - 1.3 \quad (6)$$

式(6)は式(1)に対応している。

したがって仕事関数 W は式(6)の中で、それ以下の運動エネルギーをもつ電子を放出させない定数の役割を果たしているから、

$$W = 1.3 \text{ eV}$$

であることが分かる同様に式(6)から、プランク定数 h が求められる。プランク定数の単位が Js であるのに対し、最大運動エネルギー K の単位は eV である。単位を変換するために式(2)の電気素量を掛けて求めればよい。

$$h = 3.4 \times 10^{-15} \times 1.602 \times 10^{-19} = 5.4468 \times 10^{-34} \text{ Js} \doteq 5.4 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

上記の式(6)と文献値を比較するため、図4のような図を作成した。

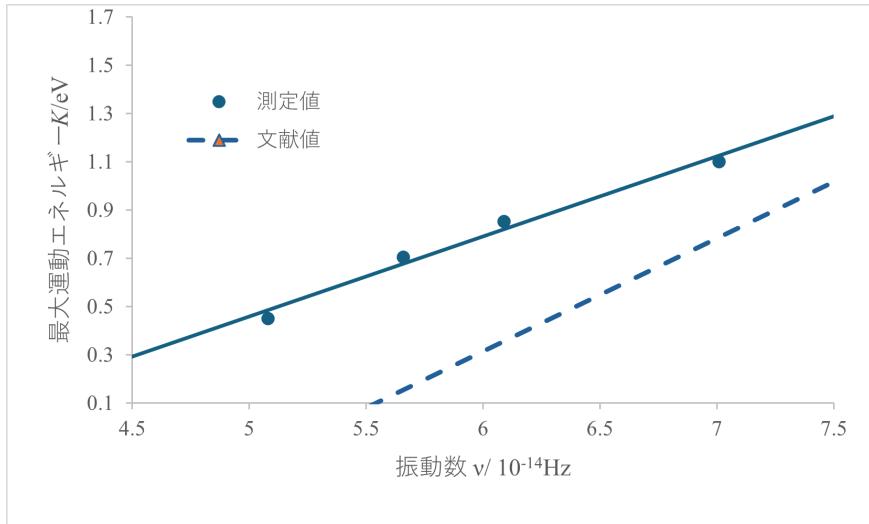


図 4: 運動エネルギーの式の文献値との比較

ただし実線が実験値、点線が文献値である。また、文献値はプランク定数を傾きに、セシウムの仕事関数の値 1.95 eV を桁に合わせた 2.0 eV を用いて作成した [2].

5 考察

5.1 実験 1

実験 1 では光量の変化によって、光电流の増減を調べた。絞り版の絞り径を大きくし、光量を増やすと、光电流の増加が確認された。このことは絞り板の面積が大きくなることで、通ることのできる光子の量が増加することによって起こっていると考えられる。光子の通れる場所が増えることで、光电面に到達する光子の数が増加する。そのため、光电流が大きくなつたと考えられる。

また、実験 1 では青と黄色のフィルタを用いて光电流の測定を行った。基本的に、光子のエネルギー E は原理での電子の運動エネルギーの式とほぼ同じ式 (7) が成り立つ。ただし h はプランク定数, c は光速度, ν は振動数, λ は波長である。

$$E = h \times \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (7)$$

青と黄のフィルタを比較すると、青色は波長が短く、黄色は波長が長い。フィルタは記された長さの波長未満をもつ光を遮断する。そのため、黄色のフィルタの場合、透過する光子のエネルギーは、比較的波長の長い光子のみを透過する。対して、青のフィルタの場合、透過する光子のエネルギーは、黄色のフィルタより短い波長の光も透過する。このことを踏まえると、黄色のフィルタ透過する光より、光电流も青いフィルタの方が大きくなつていたと考えられる。しかし、これは結果に矛盾する。そこで、光子の波長自体に原因があると考え、光源自体が青色フィルタが透過させる光子より、黄色フィルタで透過させる光子をはるかに多く放出していたと考えた。このように考えると青色フィルタより、黄色フィルタの方が、電流が大きい状態にできると考えられる。

5.2 実験 2

原理で示した図 1 にある通り、光電流は光電効果により金属から飛び出した光電子が、反対にある電極に到達することで流れる。最大運動エネルギーが入射した光子のエネルギー $h\nu$ と金属の仕事関数 W によって決まる。光電流に逆方向電圧をかけることで光電子の移動を妨げる。逆方向電圧を大きくすることで、金属から対となる電極方向の電流は流れなくなる。これは、負の電荷を持つ光電子が電気的なポテンシャルエネルギーの上昇に相当する仕事を受け、次第に電子が流れるために必要な最大運動エネルギーが減少するためにおこる。

逆方向電圧をゼロから大きくすると光電流の大きさが黄色と青色のフィルタで逆転する。実験 2 の結果で述べたように、逆方向電圧を上げていったとき、光電流は黄色フィルタより青色の方が大きくなった。つまり、黄色のフィルタは透過する光子の個数が青のフィルタと比較して多かったことになる。そのため逆方向電圧が 0V の時は、光子数の多い黄色のフィルタの方が光電流が大きい。しかし逆方向電圧を上昇させると、電子が反対に到達するために必要な運動エネルギーが増加する。実験 1 の考察でも述べたように、黄色のフィルタは比較的長い波長の光まで吸収するが、青色のフィルタはより波長の短い光を吸収する。青色のフィルタの方が最大運動エネルギーが大きいので、電極に到達可能な光子の数が逆転する。このことによって電流値の逆転が起ったと考えた。

5.3 実験 3

今回得られたプランク定数と仕事関数は以下の表 4 となった。実験値と文献値の差は大きいと

表 4: 実験値と文献値の比較

	実験値	文献値	相対誤差 [%]
プランク定数 $h/10^{-34} \text{ J} \times \text{s}$	5.4	6.62607015	19
仕事関数 W/eV	1.3	1.95	33

考えられる。このような実験結果になった原因として、4点を異なる波長で記録したことが挙げられる。原理で示した最小二乗法により、実験値でのプランク定数および仕事関数を求めている。最小二乗法は平均を用いて計算する場面が多くある。そのため、実際に調べた値が多いほど、真の値に近づくので、4点では正確性を欠き、文献値との誤差が大きかったと考えられる。

参考文献

- [1] 電気通信大学共通教育部自然科学部会(物理), 光電効果, 基礎科学実験 A(物理学実験)2025 年度版, 2025 年, pp.80-83
- [2] 新居浜高等専門学校, セシウム, 元素の周期表, 最終作成日 2008 年 1 月 7 日, <https://www.sci.nihama-nct.ac.jp/PeriodicTable/elements/55.html>, 最終閲覧日 2025 年 10 月 18 日