

1. 目的

プランク定数 h および仕事関数 W を測定する。

2. 原理

光電効果には以下のような特徴がある。

光の振動数がある値より小さいと光の強度をいくら強くしても光電子は観測されない。

光の振動数がある値より大きいと光の強度が弱くても光電子は観測される。

飛び出した光電子の運動エネルギーは光の振動数に依存する。

光の振動数を変えずに光の強度を強くしていくとそれに比例して光電子の数は増えるが光電子の運動エネルギーは変わらない。

これらの性質を利用することによって、光電管と電源装置を用いてプランク定数 h および仕事関数 W を測定する。

3. 実験方法

① 課題 1 光電管の電圧・電流特性

- i 電源装置の電源を入れ電圧を $8V$ に設定し、 $SW1$ をモード 1 に設定した。
- ii 絞り板を入れ、逆方向電圧が $0V$ の状態で光電流を記録した。更に、 $SW3$ により逆方向電圧を印加した時の光電流の変化を記録した。電圧の刻み幅は $0.1V$ とし、光電流がゼロとなるまで測定した。
- iii $SW2$ を High レンジにし、逆方向電圧をゼロに戻した後、 $SW1$ をモード 2 に変えてから外部電源用ケーブルを用いて隣の学生の光源用電源を外部電源として接続した。
- iv 外部電源からの順方向電圧を、 $0V$ から $20V$ まで $1V$ 刻みで上げていき、光電流を測定した。
- v 光電管に印加された電圧を横軸に取り、光電流を縦軸にとってグラフを描いた。
- vi 青いカラーフィルターを挿し込み、i から v の作業を繰り返した。

② 課題 2 プランク定数と仕事関数

- i 赤色のカラーフィルターを挿入し、光源の電圧を $12V$ に設定した。絞り板は取り除いた。
- ii $SW1$ をモード 1 に設定し、光電流をモニターしながら逆方向電圧を $SW3$ で印加していき、光電流がゼロになる電圧(阻止電圧 V_0)を求めた。
- iii 残り全てのカラーフィルターについて i と ii の作業を繰り返した。
- iv 横軸に周波数 ν 、縦軸に阻止電圧 V_0 をとってグラフを描いた。

③ 課題 3 光電子の運動エネルギー分布の観測

- i 光源の電圧を $12V$ に設定した。カラーフィルターおよび絞り板は取り除いた。
- ii $SW1$ をモード 1 に設定し、逆方向電圧を $SW3$ で印加していき、光電流がゼロになるまで光電流を測定した。
- iii 緑色のカラーフィルターを挿入して、i と ii を繰り返した。
- iv 逆方向電圧を横軸に、測定した光電流を縦軸にとってグラフをプロットした。

④ 課題 4 光量と光電流の関係

- i 光源の電圧を $12V$ に設定した。逆方向電圧は印加しないようにした。
- ii $SW1$ をモード 1 にセットし、光電流を測定した。
- iii 絞り板を挿入し、それぞれの径に対して光電流を測定した。
- iv カラーフィルターを挿入して、それぞれに付いて光電流を測定した。
- v 絞り穴の穴の面積を横軸にとり、光電流を縦軸にとってグラフを描いた。

4. 実験結果

表 1 測定結果 課題 1-ii,iv 8.00V 10mm V[V] I[nA]

V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]
-0.925	0.0	-0.500	20.1	0.000	132.0	4.00	860	9.01	990	14.00	1080	19.00	1110
-0.900	0.3	-0.400	34.9	0.000	130.4	5.00	890	10.01	1000	15.00	1090	19.99	1110
-0.800	2.3	-0.300	54.3	1.00	410	6.00	920	11.00	1030	16.00	1090		
-0.700	5.5	-0.200	77.0	2.00	630	7.00	950	12.00	1060	17.00	1100		
-0.600	11.0	-0.100	103.6	3.00	780	8.00	980	13.00	1070	18.00	1100		

表 2 測定結果 課題 1-vi 8.00V 10mm Blue V[V] I[nA]

V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]	V [V]	I [nA]
-0.960	0.0	-0.500	25.5	0.000	120.4	4.00	680	9.00	830	14.00	890	19.00	910
-0.900	1.4	-0.400	38.3	0.000	114.4	4.99	740	10.01	860	15.00	900	19.99	910
-0.800	4.5	-0.300	54.7	1.00	340	6.00	780	11.01	870	16.00	910		
-0.700	9.1	-0.200	74.4	2.01	500	6.99	790	12.00	870	17.00	910		
-0.601	15.9	-0.100	96.1	3.00	620	8.00	820	13.00	880	18.00	910		

表 3 測定結果 課題 2-iv 12.00V V[V]

フィルターの種類	Blue	Green	Yellow	Orange	Red	なし
波長 [nm]	428	460	492	530	590	
波数 [1/m]	7.01×10^{14}	6.52×10^{14}	6.10×10^{14}	5.66×10^{14}	5.08×10^{14}	
阻止電圧 V_0 [V]	1.005	0.781	0.691	0.508	0.303	0.978
	1.004	0.782	0.689	0.508	0.304	0.979
		0.782	0.690		0.306	0.979
					0.306	
					0.307	

表 4 測定結果 課題 3-ii 12.00V

V [V]	I [nA]								
0.000	480	0.441	200	0.719	74.6	0.934	9.8	0.975	0.8
0.000	480	0.447	190	0.740	67.2	0.940	8.4	0.975	0.9
0.109	400	0.508	168.7	0.784	51.4	0.941	8.0	0.978	0.3
0.171	360	0.517	165.4	0.850	31.2	0.945	7.2	0.979	0.0
0.249	320	0.585	131.2	0.878	24.0	0.954	5.4	0.980	0.0
0.335	250	0.621	114.9	0.891	20.5	0.958	4.3	0.971	1.6
0.345	250	0.629	111.8	0.921	13.1	0.963	3.2		

表 5 測定結果 課題 3-iv 12.00V Green

V [V]	I [nA]								
0.000	171.4	0.202	97.6	0.457	30.3	0.626	9.0	0.765	0.7
0.000	170.3	0.245	81.2	0.504	22.8	0.666	5.7	0.766	0.6
0.012	165.6	0.275	74.3	0.528	19.3	0.697	3.8	0.776	0.2
0.031	159.3	0.327	59.5	0.536	18.3	0.705	3.3	0.781	0.1
0.096	134.2	0.368	49.4	0.595	11.6	0.727	2.2	0.781	0.1
0.127	123.6	0.376	47.0	0.598	11.3	0.735	1.9	0.785	0.0

0.174	107.0	0.452	31.3	0.619	9.3	0.751	1.2
-------	-------	-------	------	-------	-----	-------	-----

表 6 測定結果 課題 4-v 12.00V

絞り板の穴の直径 [mm]		なし	7mm	10mm	14mm
穴の面積 [m ²]		0.00	1.54×10^{-4}	3.14×10^{-4}	6.16×10^{-4}
フィルターごとの	なし	0.48	0.20	0.32	0.42
測定結果 [μA]	Blue	0.33	0.09	0.17	0.26
	Green	0.17	0.03	0.07	0.12

5. 考察

① 課題 1

実験によって得られた値を表 1 と表 2 にまとめた。また、3.①v に従って、3.①i~iv の結果を図 1、3.①vi の結果を図 2 としてグラフを作成しレポート末尾に添付した。

観察された光電管の電圧・電流特性について、カラーフィルターの効果と併せて考察する。

グラフの外観を観て概要を述べる。阻止電圧からグラフが始まり、2 次関数のようにゆっくり立ち上がった後、一直線に値が急上昇している。そう思った直後その光電流の強さはその上昇の勢いを急激に弱め、対数関数のような収束を見せている。この様子は素の状態である図 1 に於いても、青のフィルターを挿んだ図 2 においても同様である。異なる点は、立ち上がる阻止電圧の値と最後に収束しているように見える光電流の上限値である。3.①i~iv(グラフでは図 1)におけるこの 2 つの値は -0.925 [V] と 1.11 [μA] である。また、3.①vi(グラフは図 2)におけるこの 2 つの値は、 -0.960 [V] と 0.91 [μA] である。

阻止電圧の値は青色フィルターがある方が高く、光電流の上限値はフィルター無しの方が高い。

この理由を考えていたところ、テキストに阻止電圧の大きさは光電子の最大運動エネルギーに関連している。という趣旨のことが書かれていた。そして、同じくテキストに光電子の運動エネルギーはプランクの式 ($E = h\nu$ h はプランク定数、 ν はその光の波数) によって表される光子のエネルギーから金属によって特有の仕事関数 W を引いた値であることがわかった。よって、フィルターを通して青い光だけとなった方が何も通さずに黄色や赤っぽくみえる状態よりも波長の短い、波数の大きい光を受け取り、それに連れて阻止電圧が高くなっていると考えた。

その一方で、光電流の上限値の値は、フィルターを通して青よりも波長の短い光を遮断しているため、光の総量自体はフィルターを通したほうが何も通さないよりも少なくなっている。よって、光電流の上限値ではフィルター無しのほうが青のフィルターを付けたものより大きくなっているのはそこに理由があると考えた。

② 課題 2

実験によって得られた数値を表 3 にまとめた。また、3.②iv の記述通りに、測定結果を図 3 としてグラフにし、レポート末尾に添付した。

グラフからテキストの手順に従ってプランク定数を求めたところ、 $h = \frac{e\Delta V}{\Delta\nu} = \frac{(92.3-22.5)\times 160 \div 8.0 \times 10^{-4}}{40 \div 100 \times 1.1} =$

6.15×10^{-34} となった。

プランク定数の文献値はテキスト末尾より 6.63×10^{-34} である。求めたプランク定数の実験値と文献値との間にある相対誤差は -7.18% である。他の実験の時に出た誤差などと比べると 7% の誤差は非常に大きく思われた。よって、テキスト p.25 を参考にしながら、プランク定数の相対不確かさ $\frac{\Delta h}{h}$ を求めたところ、 3.30% となった。誤差を補うにはこの相対不確かさは小さすぎる為近似曲線の引き方以外にも誤差生んだ原因があると思われるが、関与したであろう原因が全く思い浮かばないのでこの考察はここまでとする。

次に、仕事関数について考察を行う。グラフの横軸との切片と縦軸との切片から、それぞれ光電管の陰極

に使われている金属(Cs)の仕事関数を求め、文献値と比較せよとのことだが、図 3 では縦軸との切片が読み取れないので、新たに図 7 を作成してから考察を続行した。

近似直線を引き、縦軸との切片を求めたところ、 1.64 eV となった。また、横軸との切片は $4.33 \times 10^{14} \text{ [Hz]}$ となった。そして、横軸との切片の値 ν_0 から、実験によって求めたプランク定数と、 $W = h\nu_0$ という式を使って仕事関数を求めたところ、 $W = 3.84 \times 10^{-15} \times 4.33 \times 10^{14} = 1.66$ となった。ついでに、プランク定数の文献値を使って、仕事関数を求めたところ、 1.79 となった。

ここで、テキスト p.84 より金属(Cs)の仕事関数の値は 1.95 eV である。文献値と実験値との間にある誤差はそれぞれ、 -16% 、 -15% 、 -8% である。3 番目の値はプランク定数に文献値ではない値を使っているため、実験値を用いたそれ以外の数値よりも誤差は少ない。ここでは、実験結果を用いた 1 番目と 2 番目の結果について考察を行う。2 つの実験値の間にある誤差は、 -16% と -15% ということなのでないと言って良い。そこで、文献値との誤差が -15% となった理由を考えたようにしたが、プランク定数の誤差が影響していること以外には思いつかなかった。

次に、仕事関数と第 1 イオン化エネルギーを比較する。手元の理科年表より、Cs の第一イオン化電位は、 3.894 V である。この値は、原子の基底状態から 1 個の電子を無限遠に引き離すのに要する最小のエネルギーを電子の電荷 e で割ったものであるため、この理科年表において、 V と eV は同様と認識した。また、求めた仕事関数は 1.64 eV である。

両者を比較すると、仕事関数の数値は第 1 イオン化電位の値の 42% 程度にとどまっている。文献値を用いても、 46% に過ぎない。そこで、仕事関数が第 1 イオン化電位より小さい理由を考えたところ、イオン化エネルギーが気体状態の原子について定義されていることに思い当たった。つまり、第 1 イオン化エネルギーとは気体状態で 1 つ 1 つ孤立している原子から 1 つの電子を取り去るのに必要なエネルギーということであると考えた。一方、仕事関数は塊としてある金属から電子を 1 つ取り除くのに必要なエネルギーであった。つまり、塊の金属の中で金属結合を構成している数多の電子の中から 1 つを取り除くために必要なエネルギーと考えた。よって、仕事関数が第 1 イオン化エネルギーより小さい理由は、幾つある電子から 1 つの電子を取り出すかの違い、つまり 55 分の 1 か数 mol 分の 1 かの違いであると考えた。より多くある方から 1 つの電子を取り出すほうが状態変化前後での不安定さの変化が少なく必要なエネルギーも小さくなると考え、それをこの必要なエネルギーの違いと考えた。

③ 課題 3

測定を通して得られた測定値を表 4 および表 5 にまとめた。そして、3.③iv の指示通りに、実験結果を図 4 と図 5 としてグラフにまとめ、レポート末尾に添付した。

作図した図 4・図 5 を参照しながら、光電子のエネルギー分布について考察する。

図 4、図 5 共に逆方向電圧を強めるに連れて、光電流の値はまっとうに減少している。

光電流の減少速度について考えることで、光電子のエネルギー分布がエネルギーの高い状態に偏っているのかそれとも低い状態に偏っているのかを考える。

グラフを見ると、はっきりとはないしかなりなだらかなものだが、阻止電圧を頂点にもつ下に凸の 2 次関数のグラフに近いように見える。よって、エネルギーの低い状態の方に光電子のエネルギー分布は偏っていると見える。また、結果のグラフより下の部分を積分したものが、その強さの逆方向電圧で阻止できる大きさのエネルギーしか持たない光電子の量ということになるので、この考えは正しいといえよう。

因みに、光子 1 個が与えることができるエネルギーはプランクの式 $E = h\nu$ から一定の波長の光に対して一対一で対応する一定の値である。また、光電子として飛び出すために衝突される必要のある光子はその波長が限界振動数を上回っているとして最低 1 つである。すると、光電子が持つエネルギーが大きいということは即ち、いくつかの光電子に衝突されてエネルギーを与えられたということか波長のより短い、端数の大きい光子に衝突されたことになるが、いくつかの光子に衝突される確率は 1 つだけの光子が衝突する確率

と比べるとどんどん小さくなっていくことが容易に予想される。また、用いたランプにもよるだろうが、波長のかなり異なる光が多分に含まれていることはそうそうないと考えた。よって、この分布はこの発想が概ね正しいことを示していると思った。

④ 課題 4

測定によって得た値を表 6 にまとめた。また、3.④v にある通りに得られた結果を図 6 としてグラフを描き、レポート末尾に添付した。

図 6 を参照しつつ、絞り板の穴の面積と光電流の関係について考察していく。

フィルター無しの物については前にも検討したように、生じる光電流の値の上限値に達してしまい対数的なグラフを描いている。また、青色のフィルターを取り付けた計測結果のグラフでも 3 番目(14mm)の値ですでに上限値に達しているように見え、7mm と 10mm の時までの直線的な様子を最後までみる事はできない。その性質はグラフ内にプロット出来ていないが、絞り板を取り付けなかったときの光電流の値(フィルター無しが $0.48\mu\text{A}$ 、青色のフィルターが $0.33\mu\text{A}$)に対してグラフを対数関数的に延長して行くと明らかに収束していくことから、光電流が 14mm の絞り板ですでに上限付近に達してしまっていることが分かる。

その一方で、緑色のフィルターを取り付けた結果については 7mm、10mm と 14mm の絞り板を使ったときの光電流の値が綺麗に直線に近似できる。よって、絞り板の穴の面積と光電流は、光電流の値が絞り穴の面積に比例する関係にあると言え、テキストの原理の章にあったとおりの結果であると確認できた。また、蛇足になるが、緑色のフィルターを用いた計測結果の直線近似のグラフをそのまままっすぐ伸ばしていくと穴の面積が $1.0 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 付近で絞り板なしの場合の値である $0.17\mu\text{A}$ に到達する。よって、絞り板なしの状態では $1.0 \times 10^{-3}\text{m}^2$ の大きさの穴が開いているのと同様の結果、即ち測定に用いた機器に開いている穴はこの大きさだろうと予想した。

⑤ 課題 5

フィルターなし、印加電圧 0V のとき、1 秒間に光電管の陽極に到達する電子の個数を推定せよ。

フィルターなし、印加電圧 0V の時に流れる光電流は $0.48\mu\text{A}$ である。よって、1 秒間に流れる電荷は $1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$ より $0.48\mu\text{C}$ である。ここで、電子 1 個当たりの電荷の量である素電荷の値はテキスト末尾を参照して $1.60 \times 10^{-19}\text{C}$ であるから、求める電子の個数は前者を後者で割った、 3.0×10^{12} 個である。

6. 参考文献

- 『理科年表 昭和 59 年』
p.537
昭和 58 年 11 月 30 日発行
編纂者：東京天文台
発行所：丸善株式会社
- 『岩波理化学辞典 第 3 版』
p.69, p.568
1935 年 4 月 15 日 第 1 版第 1 刷発行
1971 年 12 月 5 日 第 3 版第 2 刷発行
発行者：岩波雄二郎
発行所：株式会社 岩波書店

7. 感想

絞り板の有無やカラーフィルターを用いる種類など、説明を受けてもなんどもテキストを読み返しながら実験を行うことになった。このテキストが難解で分かりにくいのは前々から思っていたが、今回の実験の章は特にひどい気がする。TA の説明ももう少し音量をあげて頂けると大変ありがたいと思った。無理なようならばマイクにスピーカー程度は提供して聞き取れないということの無いようにしていただきたいと思った。

実験については些細な部分が分かりにくいことを除けば非常に単調でつまみを回す腕がひきつるようなものだった。初回に行った放射線の計測に勝るとも劣らない単調作業であった。丁寧に操作を行ったつもりではあったが、どうしても誤差と不確かさがかなり出てしまった。手探りで実験を進めないためにも予習をしっかり行いたいと、毎週書いている気がする。頑張りたい。

実験とは全く関係ないが、印字されている数値がかなりおかしかったのでなぜだろうと考えていた。数式の挿入を使って 10^{12} としっかり組んだはずであったのに、提出したレポートが再提出になり返却されたときに1012となっていて茫然とした。Wordのファイルを見直すと正しく 10^{12} となっていたため、おそらく大学でMac版のOfficeを通して印刷したことが悪影響を及ぼしているのではないかと判断した。端末によって个体差があるのは致し方ないと思うが、このような動作をする製品を売り出すMicrosoftにも詰めの甘い点を感じた。よって、再提出のときは大学内のPCに入っているソフトを用いてWindowsを仮想実行しそこから印刷してみようと思う。それで改善されるのであれば、Mac版に問題があるという事なので、それを回避することで問題を回避できる。それでも回避できなければ、自宅のプリンターを使わなければならなくなるだろう。