

2019年度 卒業論文

分光器と光電管を使った
プランク定数の測定

京都教育大学教育学部学校教員養成課程理科領域専攻
基礎物理学研究室 学部4年
161184 川村 陸人

目次

1 序論	4
1.1 概要	4
1.2 プランク定数	5
1.3 定義定数としてのプランク定数	5
1.4 国際単位系 (SI) の再定義 (2019)	5
1.5 光電効果	6
1.6 プランク定数の求め方	6
1.7 光の粒子性と波動性	7
1.8 仕事関数	8
1.9 装置とその他使用器具について	9
1.9.1 分光器	9
1.9.2 光電管	10
1.9.3 光電管支持器	10
1.9.4 3D プリンター	11
1.9.5 電気スタンド	12
1.9.6 光源装置	12
1.9.7 可変抵抗器	13
2 光電管支持器の作成	14
2.1 光電管支持器の作成に至った理由	14
2.2 光電管支持器の作成について	14
2.3 AutoCAD を用いた図面作成について	15
3 プランク定数の測定	17
3.1 回路図	17
3.2 実験方法	18
4 結果	19
4.1 各波長での光電流の変化	19
4.2 0.030nA を引いたときの各波長での光電流の変化	20
4.3 仕事関数を踏まえたうえでのエネルギー	20

5 考察	21
5.1 光電流の流れと実験器具の信頼性	21
5.2 光電流が長い波長で流れなかった原因	21
5.3 教育的現場での注意点として考えられること	21
5.4 誤差	22
5.5 508nm のデータについて	22
5.6 今後の課題	22
6 謝辞	23
7 参考文献	24

1 序論

1.1 概要

光は「粒子でもあり波でもある」ということは高校物理の教科書にも記載されていて馴染みのある言葉である。

例えば、波長の短い光を金属に当てると、金属表面から電子が飛び出す光電効果という現象がある。このとき飛び出す電子を光電子という。この現象は光を波と考えるのでは説明することができず、粒子と考えた場合に説明することができる。

このとき用いられるのがプランク定数 $h=6.63 \times 10^{-34}$ (J・s) である。

プランク定数を導出した Max Karl Ernst Ludwig Planck は量子論の創始者の一人で「量子論の父」とも呼ばれている。Planck は Wien の公式より良い公式を得ようとする過程で Planck の公式を考案した。この公式から Stefan-Boltzmann 定数が求められた。

このようにプランク定数を導出した Planck は量子力学の発展に大きく貢献した。そこで、量子力学の基礎を学ぶ入り口として、Planck の発見したプランク定数の実験を行うこととした。

1.2 プランク定数

プランク定数とは、光子のもつエネルギーと振動数の比例関係をあらわす比例定数のことである。量子力学の創始者の一人である Max Karl Ernst Ludwig Planck にちなんで命名された。国際単位系 (SI) における単位は $\text{J} \cdot \text{s}$ (ジュール・秒) である。ちなみに、プランク定数は本研究を始めた 2019 年 5 月に定義定数となった。

1.3 定義定数としてのプランク定数

従来キログラム (質量の単位) の定義には国際キログラム原器 (IPK) が用いられていたが、2019 年 5 月にプランク定数を用いた新しい定義が施行された。新しい定義においては、プランク定数を実験的にその値が決定される定数ではなく、固定された定義値として扱うこととし、その定義・固定されたプランク定数 ($h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) と、光速と秒を組み合わせることで、キログラムが導かれるという仕組みになっている。

この定義定数への変更に気づいたのは、2019 年 12 月のことであった。このことにより、本実験は定義定数に実験値をできるだけ近づける実験となってしまった。

1.4 国際単位系 (SI) の再定義 (2019)

国際度量衡委員会 (CIPM) の委員会は、SI 基本単位の定義を改訂する決議案を提案していた。

この提案は 2018 年 11 月 16 日に第 26 回国際度量衡総会 (CGPM) で決議・承認された。新しい SI の施行日は 2019 年 5 月 20 日であった。

以下の 4 つの物理定数を定義値とすることになった。

- ・プランク定数 $h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ (J} \cdot \text{s)}$
- ・電気素量 $e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ (C)}$
- ・ボルツマン定数 $k = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ (J} \cdot \text{K}^{-1})$
- ・アボガドロ定数 $N_A = 6.02214076 \times 10^{23} \text{ (mol}^{-1})$

この物理定数の定義値への変更によって基本単位の再現の不確かさに改善がもたらされた。

1.5 光電効果

ドイツの物理学者ヘルツは1887年、電磁波の実験中に亜鉛の板に紫外線を当てると電気を帯びる現象を発見した。

その後、ドイツの物理学者レーナルトの実験によって光電効果は詳細に調べられ、光電効果で飛び出してくるものは電子であるということがわかった。

正と負に帯電した金属板に導線と電球をつないで、プラスに帯電した金属板に紫外線を当てると、何も起こらず、電球は光らない。つまり、電流は流れない。次に、マイナスに帯電した金属板に紫外線を当てると、電球が光る。つまり、電流が流れたということである。

紫外線が当たることによって電子が飛び出して、マイナスの金属からプラスの方の金属に移動する。つまり、光電効果は光によって電子が金属から飛び出す現象である。

なお、1900年の終わりにプランクが学会で、プランク定数 6.6×10^{-34} とボルツマン定数 1.38×10^{-23} という値を発表した。

また、この5年後の1905年にアインシュタインが光量子仮説の論文を発表した。

1.6 プランク定数の求め方

もし光電子の運動エネルギー E_k が、 $eV > E_k$ の場合には光電子は電極にまったく到達することが出来なく光電流は流れない。

そこで、電流がちょうど流れなくなる逆電圧を V_0 (阻止電圧) すると、

$$E_k = eV_0 \quad (1)$$

となる。この式とアインシュタインの光電効果の式から、

$$eV_0 = h\nu - W \quad (2)$$

(2)の両辺を e で割ることにより、縦軸に阻止電圧、横軸に振動数をグラフにとると、傾きが h を e で割ったものとなる。つまり、プランク定数は、

$$h = e \times (\text{グラフの傾き}) \quad (3)$$

で求めることができる。本研究において、阻止電圧と振動数を求められれば、プランク定数は求まるということである。

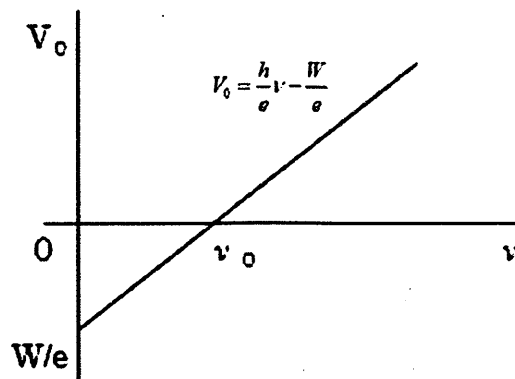


図1 阻止電圧と振動数の関係

1.7 光の粒子性と波動性

光電効果が発見されるまでは、光は波であるというのが主流の考え方だった。その理由としては、光は回折や干渉などの波に特有の現象を起こすことが知られていたからである。

しかし、光電効果では光を波として説明することができなかった。ある波長より短い光では光電効果は起きたが、ある波長より長い光では光電効果は起きなかった。そこで、この長い波長の光の明るさをあげた。波のエネルギーは波の大きさの2乗に比例することが知られていたので、電子が飛び出すはずだった。光が波であるなら、よりたくさんのエネルギーをもらった電子はどんどん金属から飛び出して来るはずだった。しかし、そのようにならなかったのも、光が波であることから光電効果をうまく説明できないことがわかった。

そこで、アインシュタインは、光はエネルギー $h\nu$ を持った粒(光子)の集団であるという考えをした。 h はプランク定数で、 ν は振動数である。光の明るさをあげると粒の数は大きくなるが、結局電子にぶつかって与えることのできるエネルギーは $h\nu$ だけである。結果として、光の明るさ(光子の数)を大きくしても、光電効果によって飛び出す電子の数に変化はない。以上のことから、光を粒子と考えることで、光電効果を説明できるようになった。

1.8 仕事関数

金属表面から1個の電子を外部に取り出すのに必要なエネルギー $W(J)$ は、金属中の電子の状態により、さまざまな値をとる。しかし、その最小値 $W_0(J)$ は金属ごとに定まった値となり、仕事関数と呼ばれる。 J よりも eV で表記されることのほうが多い。金属元素表面での仕事関数の値は、およそ $2eV$ から $6eV$ 程度である。金属単体として最も仕事関数が小さいのはセシウムで、 $1.93 eV$ である。

この $W_0(J)$ を eV 換算するには W_0 を 1.6×10^{-19} で割ればよい。

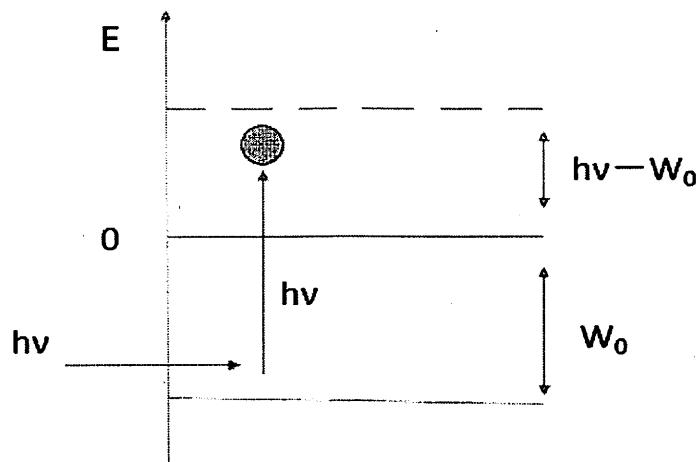


図2 仕事関数のイメージ図

・主な金属の仕事関数の値

	仕事関数(eV)
セシウム	1.93
ナトリウム	2.28
アルミニウム	4.13
銀	4.31
金	4.70
ニッケル	5.20
白金	5.65

1.9 装置とその他使用器具について

1.9.1 分光器

分光器は、一般には光の電磁波スペクトルを測定する光学機器の総称である。分光器によって得られるスペクトルは、横軸に電磁波の波長又は光のエネルギーに比例した物理量（例えば波数、周波数、電子ボルト）を用い、縦軸には光の強度や強度から導かれる物理量(偏光度) が用いられる。例えば、分光学において、原子や分子の線スペクトルを測定し、その波長と強度を測定するのに用いられる。

本実験において用いたのは、HITACHI UV-VIS Spectrophotometer である。



図3 分光器の画像1



図4 分光器の画像2

1.9.2. 光電管

外部光電効果（光電子放出効果）を利用して光強度を電流の大小に変換して測定するための一種の真空管。基本的には光を受けて光電子を放出する光電面と呼ばれる陰極と、光電子を集めて光電流とするための陽極とからできている。光電面には光電子が出やすいナトリウムなどアルカリ金属を主体にした物質が真空蒸着法で薄膜としてつけられている。

ナトリウムの仕事関数は 2.28eV である。

本実験において用いたのは、浜松ホトニクス製の R727 である。

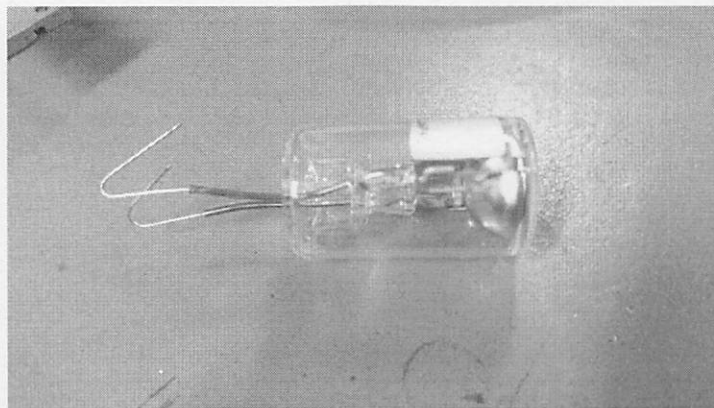


図 5 光電管の画像

1.9.3 光電管支持器

光電管を分光器において支持するために 3D プリンターで作成したものである。図 4 の真ん中の円柱の穴の部分に光電管を入れて支持した。3D プリンターで印刷するのに 8 時間ほど時間を要した。



図 6 光電管支持器の画像

1.9.4 3D プリンター

3DCAD、3DCG データを元に立体を造形する機器のことである。通常のプリンターのように紙に平面（二次元）的に印刷する形式や、鋳型を作って造形材を充填・固形化する形式と異なる。

コンピュータ上で作った 3D データを設計図として、その断面形状を付加加工で積層していくことで立体物を形成する方式が基本となる。液状の樹脂に紫外線などを照射し少しずつ硬化させていく光造形方式、熱で融解した樹脂を少しずつ積み重ねていく FDM 方式（Fused Deposition Modeling, 熱溶解積層法）、粉末の樹脂に接着剤を吹きつけていく粉末固着方式などの方法がある。

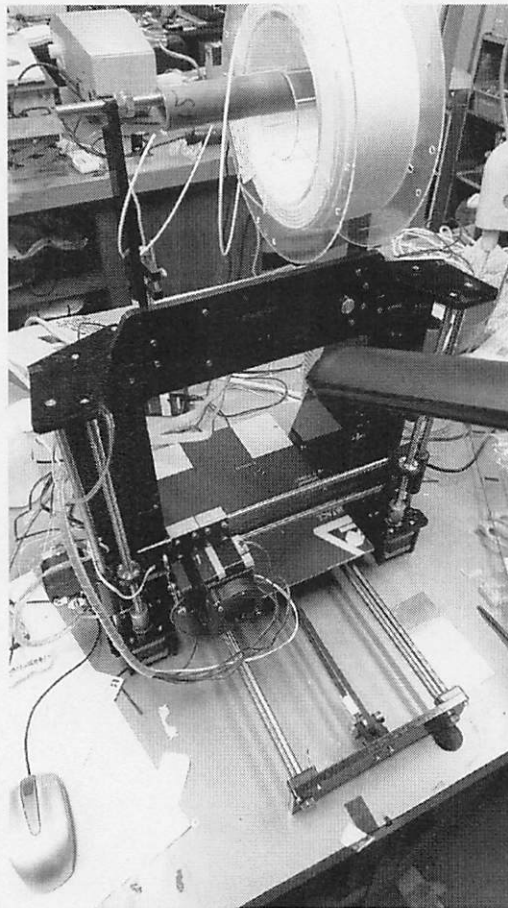


図 7 3D プリンターの画像

1.9.5 電気スタンド

分光器に光を照射するために用いた。この電気スタンドの可動によって、分光器の穴の箇所にも光を照射できるように調節できた。



図 8 電気スタンドの画像

1.9.6 光源装置

電気スタンドの光では光電流がほとんど流れなかったため用いた。直視できないほど光が強く、熱を下げるためにファンが付いていた。

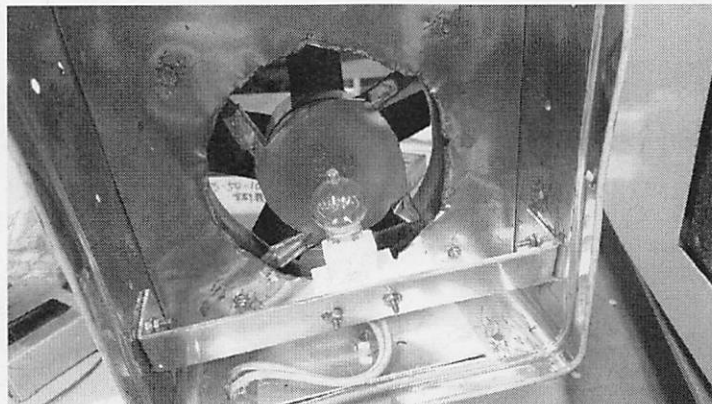


図 9 光源装置の画像

1.9.7 可変抵抗器

抵抗を変化させ、電圧を調節するために用いた。ボール盤やはんだを用いて作成した。つまみを回すことによって、電圧を調節した。本研究において、0.1V 単位で電圧を変化させたため、つまみでの調節に手間取った。

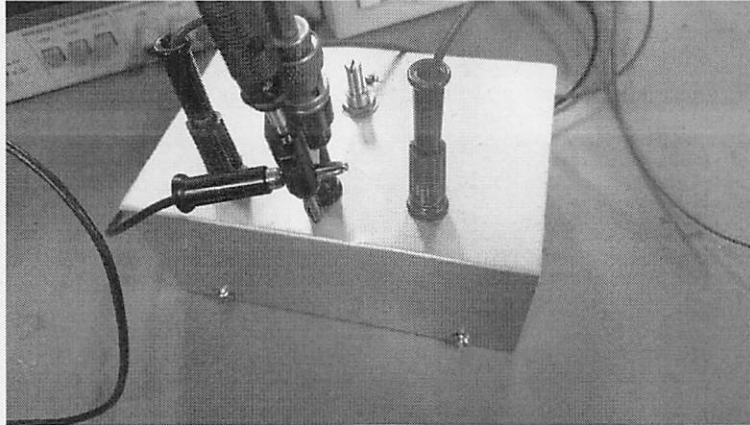


図 10 可変抵抗器の画像

2 光電管支持器の作成

2.1 光電管支持器の作成に至った理由

本研究室の分光器には光電管を差し込む穴はあったが、光電管を支持する箇所が存在しなかった。そこで、光電管を支持して実験を行うために光電管支持器を作成するに至った。

2.2 光電管支持器の作成について

- ①分光器の側面部分をものさしで測り、光電管支持器の幅、ねじ穴の半径、支持する箇所の穴の半径と高さを決めた。
- ②AutoCAD を使用して、図面を作成した。
- ③3D プリンターで印刷した。所要時間は8時間ほどであった。
- ④ねじ穴の位置が1mm ほどずれていたのをやすりで調整した。

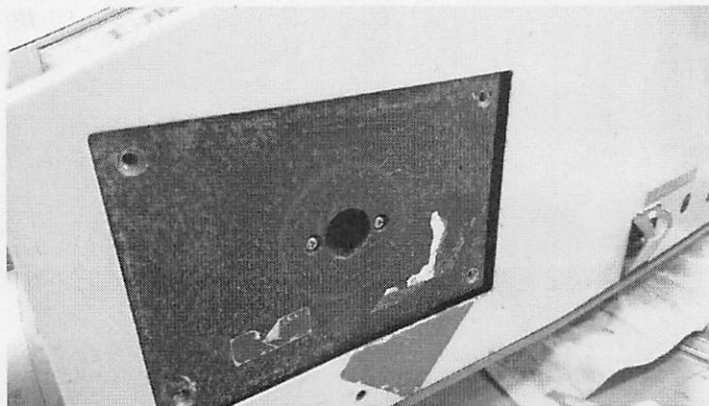


図 11 分光器の側面部分

2.3 AutoCAD を用いた図面作成について

- ①作成する構造物のサイズを決めた。
x 軸 150mm、y 軸 100mm、z 軸 5mm、ねじ穴の半径 3mm、支持する箇所
の穴の半径 11mm、厚さ 29mm、高さ 35mm
- ②AutoCAD を起動した。
- ③上から見た視点に固定した。
- ④図形の作成部分の直方体を選び、基準となる位置を(x,y)=(0.0)とした。
- ⑤(x,y)=(150.100)、z=5 として直方体を作成した。
- ⑥図形の作成部分の円柱を選び、基準となる位置を(x,y)=(9.9)とした。
- ⑦円柱の半径を 3mm、z=10 として円柱を作成した。
- ⑧「差」というツールを使用して(x,y)=(9.9)の位置に半径 3mm の穴を開けた。
このツールを用いて穴を開ける場合、穴を開けたい物体より穴のもと
となる物体の高さを高くしなければならない。
- ⑨上記の⑥～⑧の手順を
(x,y)=(9.91),(141.9),(141.91)の場合でも行った。
これでねじ穴 4 か所が完成した。
- ⑩図形の作成部分の円柱を選び、基準となる位置を(x,y)=(75.50)とした。
これは直方体の中心である。
- ⑪円柱の半径を 11mm、z=40 として円柱を作成した。
半径が 40mm(z=35)の円柱も同様に作成した。
- ⑫「差」のツールを使用して、
(x,y)=(75.50)の位置に半径 11mm の穴を開けた。
これで厚さ 29mm、高さ 35mm の支持部分が完成した。

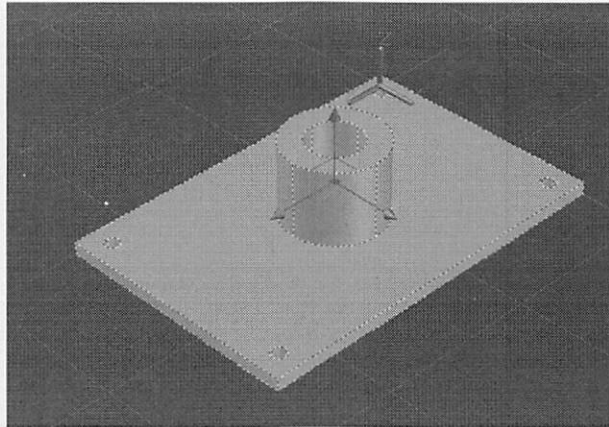


図 12 AutoCAD で作成した光電管支持器の図面

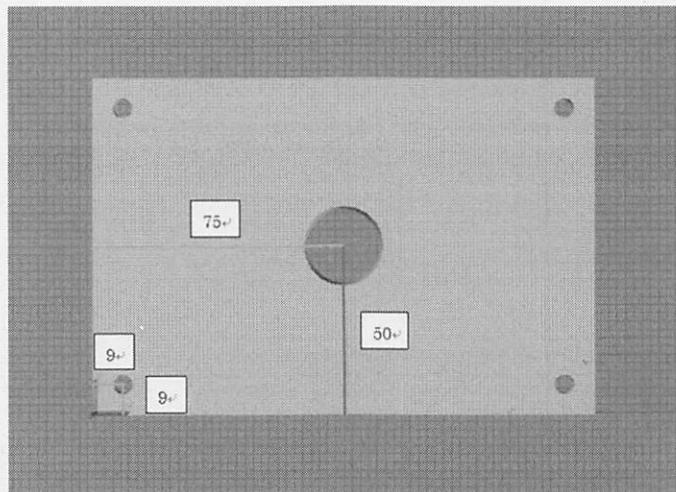
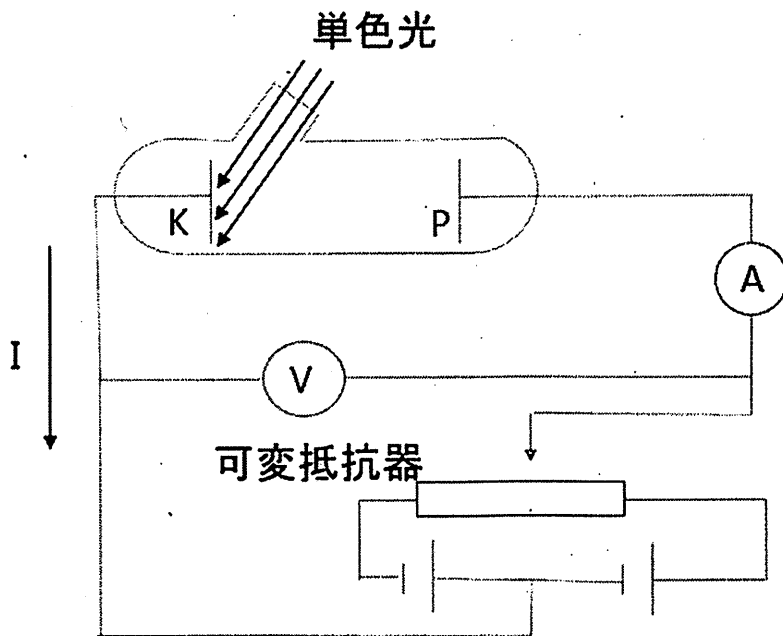


図 13 上から見た (X-Y 座標) 光電管支持器の図面

3 プランク定数の測定

3.1 回路図



上記のような回路図で実験を行った。

3.2 実験方法

- ①回路図を組んだ。このとき、誤った回路を組まないように気をつけた。
- ②波長 455nm の単射光が光電管に入射するように分光器で調節した。
- ③7.0V の電圧がかかるように電源を入れた。
- ④光源をつけて分光器に単射光が入射するようにした。このとき、部屋を暗くして、あまり光が漏れないように分光器に暗幕を被せた。
- ⑤可変抵抗器のつまみを動かして電圧を 0V にした。
- ⑥0V から可変抵抗器のつまみを動かして、逆電圧を 0.1V 単位でかけていき、そのとき流れた光電流の変化を記録した。
- ⑦波長が 508nm、561nm、614nm、667nm のときも同じようにして、光電流の変化を記録した。この波長を用いたのは、島津のカタログで用いられていたからである。
- ⑧508nm の-0.1 から-0.3V のデータが正確でなさそうであったため、もう一度その範囲の逆電圧で光電流の変化を記録した。
- ⑨光電流の値にほぼ変化がなかったため、データは概ね正しいと判断した。
- ⑩表を見ると約 0.030nA がバックグラウンド電流と考えられたので、すべての値において 0.030nA を引いて表にまとめた。
- ⑪光電流が長い波長で流れない理由を考え、各波長におけるエネルギーを eV 換算して求めた。
- ⑫エネルギーから仕事関数を引いた値を算出した。

4 結果

4.1 各波長での光電流の変化

光電流の単位は nA とする。

	-0.1V	-0.2V	-0.3V	-0.4V	-0.5V
455nm	0.059	0.051	0.046	0.042	0.043
508nm	0.071	0.063	0.051	0.042	0.040
561nm	0.047	0.042	0.038	0.035	0.036
614nm	0.036	0.036	0.033	0.033	0.035
667nm	0.034	0.030	0.030	0.032	0.033

	-0.6V	-0.7V	-0.8V	-0.9V	-1.0V
455nm	0.040	0.037	0.035	0.034	0.032
508nm	0.038	0.036	0.034	0.033	0.031
561nm	0.034	0.033	0.033	0.033	0.030
614nm	0.034	0.033	0.033	0.032	0.029
667nm	0.033	0.032	0.032	0.030	0.028

約 0.030nA の電流がバックグラウンドと考えられる。

4.2 0.030nA を引いたときの各波長での光電流の変化

光電流の単位は nA とする。計算して負の値になったものは 0.0 とした。

	-0.1V	-0.2V	-0.3V	-0.4V	-0.5V
455nm	0.029	0.021	0.016	0.012	0.013
508nm	0.041	0.033	0.021	0.012	0.010
561nm	0.017	0.012	0.008	0.015	0.016
614nm	0.006	0.006	0.003	0.013	0.005
667nm	0.004	0.000	0.000	0.002	0.003

	-0.6V	-0.7V	-0.8V	-0.9V	-1.0V
455nm	0.010	0.007	0.005	0.004	0.002
508nm	0.018	0.006	0.004	0.003	0.001
561nm	0.004	0.003	0.003	0.003	0.000
614nm	0.004	0.003	0.003	0.002	0.000
667nm	0.003	0.002	0.002	0.000	0.000

4.3 仕事関数を踏まえた上でのエネルギー

ディラック定数を用いて、eV 換算したエネルギーは下のようになる。

$$E = h\nu = \frac{h}{2\pi} \times 2\pi \times \frac{c}{\lambda} = \frac{1237.8}{\lambda}$$

ここで、各波長を代入した E とナトリウムの仕事関数 2.28eV を引いた値を表にまとめると、

	E(eV)	仕事関数を引いた値(eV)
455nm	2.72	0.44
508nm	2.437	0.157
561nm	2.207	0.0

614nm と 667nm の仕事関数を引いた値は明らかに 0.0eV なので省略した。

5 考察

5.1 光電流の流れと実験器具の信頼性

結果の波長と電圧の関係の表のように、約 0.030nA がバックグラウンド電流となっていることが考えられた。4.2 の 0.030nA を引いたときの表において、455nm などの短い波長では光電流がしっかりと流れていたと考えられる。もともと使っていた電気スタンドを用いた実験では、どの波長でも光電流が全く流れず、別のもっと強い光源を用いた。それでも、短い波長でのみしか光電流が流れず、実験は失敗に終わってしまった。ここにおいて、もっと強い光源を用いるべきであったと思われるが、これ以上強い光源を用いると、熱で電球が焼き切れてしまう恐れがあるため、光源の変更には限界があると判明した。

また、分光器に問題があると考えて、側面部分から光の変化を覗いたが、しっかりと色が青から赤に変化していたため、特に問題は見当たらなかった。

光電管においても、しっかりとした品質（アルカリ金属）のものを扱ったため、問題は特になかった。しかし、どの金属を用いていたかは、企業秘密であるため判明しなかった。予想では、安価で安定しやすいナトリウムと考えた。

5.2 光電流が長い波長で流れなかった原因

4.3 において 561nm～667nm の波長では光電流が流れないことが判明した。おそらく、ナトリウムのみでなく、他の金属も用いて光電管を作っていると考えられるので、561nm でも多少は光電流が流れた。セシウムを用いた光電管を使用すれば、もう少し長い波長でも光電流を測定することができたと考えられる。

5.3 教育的現場での注意点として考えられること

短い波長でのみしか光電流が流れなかったことから、もしこの実験を教育的現場で行うならば、短い波長のみ取り扱わなければならない可能性がある。科学センターなど比較的金銭面に余裕があると思われる施設などでは、ある程度の金額を出して、しっかりとした実験器具などを買うのもよいのかもしれない。

5.4 誤差について

本研究において、最も気になった誤差は、電流計のノイズである。本研究においては、ノイズがある程度安定してきたときのおおよその平均値をデータとして取っていた。安定してきたとはいえども、 0.006nA ほどのブレは常に起こっていた。ここにおいて、測定数値の誤差は確実に生まれている。

また、暗室ではなく実験室で、光電流を測定したことも誤差として考えられる。15時から17時にかけて実験を行っていたので、実験室への日光の入り方も変わっていたと推測される。実験室内の電気は消していたが、このことも誤差を生む原因となったのではないだろうか。

5.5 508nm の波長のデータについて

同じ逆電圧をかけたとき、445nm より 508nm の波長のほうが -0.1 から -0.3V にかけて光電流が多く流れていることがわかった。これは、分光感度が 520nm 付近で高く、短波長側の錯乱光の影響を受けたためと考えられる。

5.6 今後の課題

今回の実験では、短い波長でのみしか光電流が流れなかったことから、プランク定数を求める段階まで到達することができなかった。短い波長の範囲でのみプランク定数を計算しても、意味のないものになってしまう。そこで、長い波長でも光電流が流れるように工夫をするという課題が残った。

実験の失敗の根本的な理由は光電管に用いられた金属の仕事関数が大きかったことと考え、今後実験を行っていく上で、さらに仕事関数の小さな金属を用いた光電管を使用すべきである。

以上を踏まえて、今後はもっと光電流が流れるように工夫をする（光電管を変える）ということが必要となってくる。

6 謝辞

本研究を進めるにあたり、高嶋先生には数多くの助言や知識を授けていただきました。特に、データの信憑性を指摘していただいたことは非常に助かりました。また、同研究室学部生の倉橋君、中井君、藤崎君にはたくさん助けていただきました。同研究室院生の皆様とは一緒に遊んでいたいたり、研究に関するアドバイスをいただいたりして、有意義な時間を過ごさせていただきました。特に、同研究室院生の大川さんには AutoCAD と 3D プリンターの使い方を教えてもらい、本研究だけではなく、将来も使える貴重な知識を身に付けさせていただきました。皆様、ありがとうございました。

7 参考文献

- 1) 「物理」 数研出版 (2014)
- 2) 「量子力学Ⅰ」 みすず書房 朝永 振一郎 (1952)
- 3) 「熱輻射と量子」 東海大学出版会 (1970)
- 4) 「AutoCAD LT 使い方 AutoCAD の基本操作を覚えよう」
http://cad.dee.cc/step1/step1_index.html
- 5) 「物理学実験Ⅰ 手引き」 京都教育大学物理学教室 (1981)
- 6) 「理科機器 総合カタログ」 島津 (2009)
- 7) 「基礎物理学 第5版」 学術図書出版社 原 康夫 (2018)
- 8) 「国際単位系はこう変わる」
<https://www.natureasia.com/ja-jp/ndigest/pdf/90547.pdf>