

学生実験におけるプランク定数測定の正確度向上

奥村紀浩*¹・柳沼晋*²・和田一秀*³・深井郁夫*³・黒岩見法*³・大西浩次*¹

Accuracy Improvement of Planck's Constant Measurement in The Student Experiments

OKUMURA Norihiro, YAGINUMA Shin, WADA Kazuhide, FUKAI Ikuo,
KUROIWA Minori and OHNISHI Koji

Planck's constant is one of the most important physical quantity on modern science. In our college, the third-year students measure it as part of the student experiments. However, the measurements they took have been about 50% smaller than the exact value. Therefore, we examined the origin of error in this measuring technique and improved the accuracy.

キーワード：プランク定数，光電管

1. はじめに

国際単位系 (SI) において、2019 年 5 月からプランク定数 h は、

$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$$

で定義された定数となっている。

長野工業高等専門学校 (長野高専) 3 年次の応用物理学 I では、様々な学生実験を行っている。その中でプランク定数の測定実験は、現代の科学技術において欠かすことのできないプランク定数を、教科書にも載っている方法で測定している。その意味で教育的な実験と言える。

ところがこれまで学生の測定してきたデータを俯瞰してみると、測定値が期待される値の 50% 程度も小さいものが大半であった。さらに測定に用いる機器の安定性も悪いので苦労させられる実験であった。

その結果、プランク定数の測定実験に対しては、学生の成功体験が少なく、学生レポートを読んでも否定的な内容ばかりであった。

そこで、本研究ではこのプランク定数測定実験について考察し、実験の正確度を高める方法を求め、2020 年度の学生実験で実行してみた。

*1 一般科教授

*2 一般科准教授

*3 技術支援部 技術職員

原稿受付 2021 年 5 月 20 日

2. プランク定数の測定

アインシュタインは、振動数 ν の光はエネルギー $h\nu$ を持つ光子であり、それが金属表面 (光電面) に照射されると、金属内の電子が、

$$E_K = h\nu - W$$

という関係を満たす最大 E_K の運動エネルギーで飛び出すとした¹⁾。このときの h をプランク定数と呼び、現代の科学技術において欠かせない物理定数の一つとなっている。また W は金属内部から表面に飛び出すのに必要なエネルギーで、仕事関数と呼ばれている。仕事関数は金属の種類に依存する。

飛び出した電子を収集電極で集めると、電流として検出される。しかし光電面に対して、収集電極の電位を

$$E_K = eV$$

を満たす V だけ下げてやれば最大の運動エネルギーを持つ電子でさえも押し戻すことになるので、電流として検出することができないことになる。ここで e は素電荷と呼ばれる物理定数である。

そこでミリカン²⁾は様々な振動数の光を光電面に当て、光電面と収集電極間の電位差を調整して、電流がゼロとなるときの電圧を求め、プランク定数 h を導いた。彼の報告によると、測定値の変動は 5% 程度に抑えることができていたようである。

3. 長野高専での学生実験

3-1 これまで

長野高専でのプランク定数測定実験は、ミリカンの方法を踏襲している³⁾。

水銀灯からの光をガラスフィルター(表1参照)に通して分別し、光電面に照射した。このフィルターは示された最短波長よりも短い波長の光は通さないことになっている。

表1 各ガラスフィルターが通す最短波長

フィルター	最短波長 [nm]
V-O 54	546.07
V-Y 43	435.83
UV-39	407.78
UV-35	365.48

図1には光電面に照射されるはずの水銀灯からの光のスペクトルを示した(図1中, Hg lamp)。またガラスフィルターの効果を同時に示している(図1中のそれぞれのフィルター名)。紫外光領域のフィルターのキレはあまり良くないように見える。

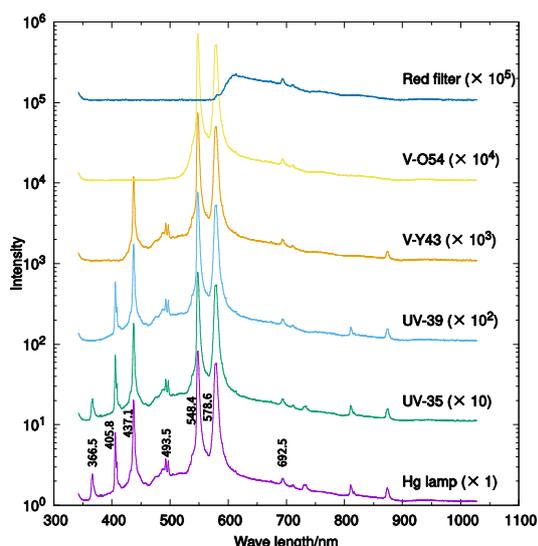


図1 ガラスフィルターの効果。水銀灯からの直接光(Hg lamp)に対して、表1のフィルターを通した場合の光のスペクトルを示す。各スペクトルは水銀灯のデータに対して定数倍して表示している。

使用している光電管は東芝製PV23Aで、光電陰極はSb-CsでSナンバーS-4、最大感度波長は400 nmで、量子効率12%である(図2)。充電式バッテリーの電圧を可変抵抗で分圧したものを光電面(Cathode)と収集電極(Plate)の間に印加した。このときメートルブリッジで加えた印加電圧を正確に読み取った

検流計は横河電機製D-2L DC ガルバノメーターで、微小な電流による可動コイルの振れを鏡の反射光で

拡大している。感度は 5×10^{-8} Aである。ただし振れの周期が定格2.3秒であるので、素早い読み取りが出来ない。

記録の残る2017年度、2018年度の学生実験のデータをまとめてみると(図3参照)、プランク定数 $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J·sに対して、中央値 3.5×10^{-34} J·s程度の値を示していた。この値は定義された値に対して約50%小さく、先に述べた検流計の針の読み取りづらさもあり、苦勞はするが考察しにくい実験であった。

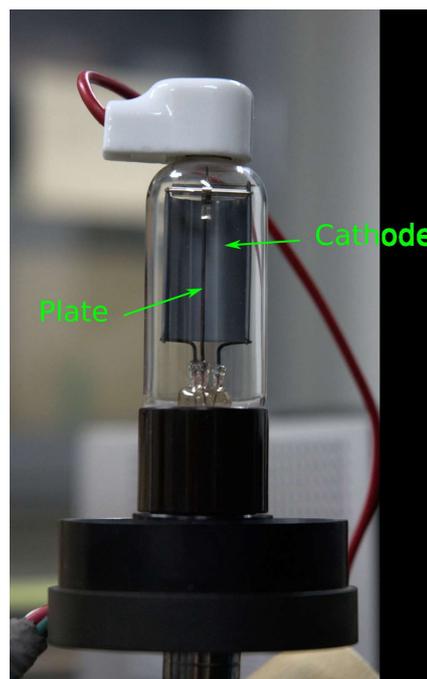


図2 光電管

3-2 光電管に起因する誤差の検討

これまでのプランク定数の測定データの正確度が悪い原因としては、光電管自体の

- (1) 光電面の劣化
- (2) 熱電子放出
- (3) 光電管内の極板間、あるいは光電管外のピン間の漏洩電流
- (4) 光電管の真空度の悪化

などを考えることができ、(1)から(3)までの要因はいずれも光を当てなくても電流が流れてしまう暗電流の増加として現れると考えることができる。特にこの実験は電流0を検出するものであるから、測定には直接の悪影響となる。また要因(4)はそもそも電流が流れない。

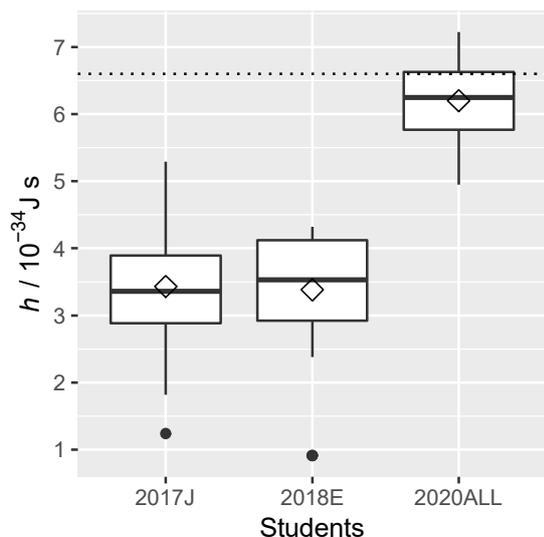


図 3 学生の実験データの箱ひげ図。ひし形は平均値である。2017J は 2017 年度電子情報工学科の学生のデータ、2018E は 2018 年度電気電子工学科の学生のデータを示す。また、2020 年度は全学科の学生のデータをまとめている。なお、水平に引かれた点線はプランク定数の定義値を示す。

(1)の光電面の劣化に関しては、光電面は電圧をかけていなくても明るい光を当てると暗電流が増えると言われている。またそのような場合でも、暗闇で 30 分ほど放置すると回復するとも言われている。ただし特に太陽光を直接当ててしまうと、暗闇で放置しても回復不能となってしまうこともある。

本光電管のこれまでの学生実験での使用で、その取扱いについて強く意識されていたとは思えないが、実験中は常に暗室で行っていたことから、光電面が恒久的に劣化するほどの事象があったとは考えにくいと思えた。

光電面は仕事関数が低い物質でできているので、熱にも敏感である。とは言え仕事関数が 2eV 程度に対して、室温程度では無視して良いとした。

実験に際しては、光電面と収集電極の間に 1~2V 程度の小さな電圧をかける。しかし絶縁抵抗が $10^9 \Omega$ 程度であったとしても、ナノアンペア程度の電流になる。光電管の仕様書によると、暗電流は最大でも 10 nA 程度とされているので、回路全体でもこの程度に抑えたい。埃の影響などを排除するためにも、光電管の外側電極はアルコール等で拭いておく必要がある。

光電管の真空度の悪化については、光電管にヒビが入っていることはなかったもので、問題はないとした。

以上の考察から、現在使用している光電管そのものが h の測定に大きな悪影響を与えているのではない

と考えた。

3-3 光電管以外の誤差の要因

光電管自体を除くと、実験全般で精度のズレを引き起こす原因は

- (a) 入射光の振動数の選択ミス
- (b) 0A 検出の問題
- (c) 阻止電圧の変動

が考えられる。

昨年度までの実験は水銀灯からの光を表 1 に示すガラスフィルターで分別していた。図 1 のフィルターを通った後の光のスペクトルを見ると、ほぼ性能通りの分別ができていようであるが、シャープに切れていてはならないように思える。特に波長 400 nm 付近は光電管の感度の高い領域でもあるので、切れていると思った波長がわずかでも混入していると検出されてしまう可能性がある。

横河電機製 D-2L DC ガルバノメーターは、感度は高いものの、針は周期 2.3 秒で振動している。そのため 0 A の読み取りが難しい。学生実験の際には、端子間を瞬時にショートさせて針を停止させるテクニックを駆使している学生もいた。そうした措置を施しても h の定義値に近い値を得る学生はいなかった。

阻止電圧の変動が起こると、0 A の読み取りミスを引き起こす。これまでの実験ではバッテリーを用いていたが、90 分の授業時間内でのバッテリー電圧の降下はごくわずかだったので、とりあえずは無視することにした。

4. 実験の更新と実験結果

4-1 実験の更新

これまでの考察から、2020 年度の学生実験では光電管の暗電流対策と入射光の振動数を確定させるべきだと考えた。また検流計の安定性を向上させることにした。

東芝製の光電管 PV23A はソケット部だけでなく、頭頂部からも光電面にアクセスできる。そこで、ソケット部からの漏洩電流を防ぐために、そちらを利用することにした。またソケットやコネクタの絶縁物は陶器とした(図 2 の光電管の頭頂部にはすでに陶器の絶縁物が写っている)。

光源を水銀ランプとフィルターの組み合わせから波長のわかっているレーザー光へ交換した。その波長は表 2 に示す。

表 2 レーザー光の波長

色	波長
赤	635 ± 10 nm
緑	532 ± 10 nm
青	450 ± 10 nm

検流計は横河計測製 270710 エレクトリック検流計に変更した。電流感度は 1.1 nA/div で、長周期の針の振動がないものである。

図 4 には使用した回路を示した。メートルブリッジの両端には 1.2 V を印加し、この電圧は実験中に電圧計でモニタしている。

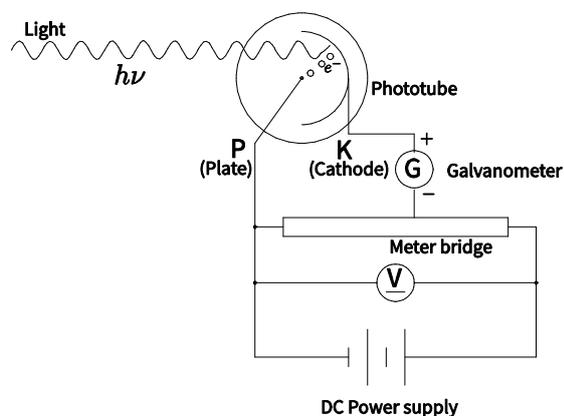


図 4 プランク定数測定回路。光電面（カソード：K）に対して、収集電極（プレート：P）の電位を低くする。

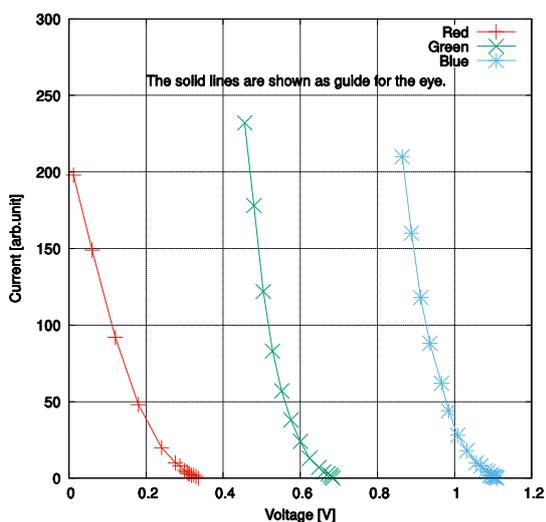


図 5 光電管にかかる電圧に対する検流計の電流値(任意単位)。電流値が 0A の電圧を阻止電圧とする。

4-2 結果

図 5 には光電管の電流値を示したが、0A となる電圧（阻止電圧）は容易にとらえることができた。図 6

では入射光の振動数に対する阻止電圧をプロットしている。直線は最小二乗法でフィットして引いた。この直線の傾きがプランク定数 h であり、

$$h = (6.43 \pm 0.38) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

仕事関数 W は縦軸の切片で

$$W = 1.56 \pm 0.13 \text{ eV}$$

となった。2020 年度の学生による測定でも、図 3 に示したように全ての学生で定義値に近い値が得られた。

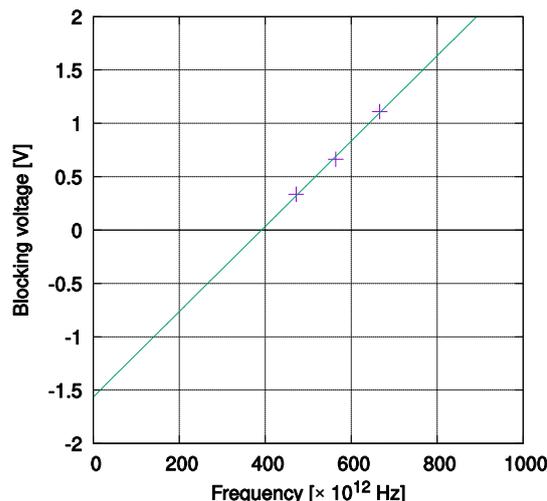


図 6 光電面に当てる光の振動数に対する阻止電圧

5. まとめ

これまでの学生実験では丁寧に実験を行っても、プランク定数の測定値は定義された値の 50 % 程度しかなかった。このずれの原因を光電面に当てる光の振動数のミスと考え、波長の確実にわかっているレーザー光を照射した。また、0A を検出する検流計の安定度を向上させることで、読み取り時のミスを少なくするようにした。

これらの対策の結果、学生らが測定したデータで見ても非常に近い値に収めることができた。

参考文献

- 1) A. Einstein: “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, Ann. d. Phys. **17**, 132(1905)
- 2) R.A.Millikan: “A Direct Photoelectric Determination of Planck’s “ h ”“, Phys. Rev. **7**, 355(1916)
- 3) 物理学実験指導書編集委員会 編: 「新物理学実験-第 3 班-」 pp.170-179(1999)