

琉球大学学術リポジトリ

市販の教育実験用装置によるブランク定数の測定

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学理学部 公開日: 2009-04-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 矢ヶ崎, 克馬, 幾島, 康夫, 照屋, 全次, 当山, 忠久 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/9588

市販の教育実験用装置によるプランク定数の測定

矢ヶ崎 克馬* 幾島 康夫** 照屋 全次***
当山 忠久****

Measurement of the Planck's Constant with an Equipment Manufactured by Shimazu Co., Ltd.

Katsuma YAGASAKI,* Yasuo IKUSHIMA,
Zenji TERUYA, and Tadahisa TOYAMA

Synopsis

The Planck's constant has been measured in the practical training of the special course of physics with an equipment using white light with color filters, but, according to the instruction, the results obtained were very poor. In this investigation, the critical photo-current coincide with the critical wave length of the color filter is determined reasonably by knowing the wave length dependences of the intensity of radiation of the white light source and the sensitivity of electron emission of the phototube and the decreasing of the reaching ratio of photo-electrons with higher energy than that of the inverse field from the photo-electric surface to the anode. The logarithmic method is the most suitable for determination of the critical photo-current. The values obtained with this method are within 3% of error compared with the accurate value. At the same time, the differential method and that using the line spectrum source are performed with a fair accuracy.

1 はじめに

プランク定数の測定は琉球大学理学部物理学科に於いて2年次後期に専門実験として履習す

受付：1983年5月14日

* 琉球大学理学部物理学科
Department of Physics

** 琉球大学理学部物理学科 (学部学生)
現在; 九州大学大学院工学研究科在学

*** 琉球大学理学部物理学科 (学部学生)
現在; 大阪市立大学大学院理学研究科在学

**** 琉球大学理学部物理学科 (学部学生)
現在; 広島大学大学院環境科学研究科在学

る「物理実験II」の中の1テーマとして取り組まれる。装置は市販の島津製作所による「プランク定数測定装置」をそのまま使用しており、その測定原理は以下の通りである。図1に示す

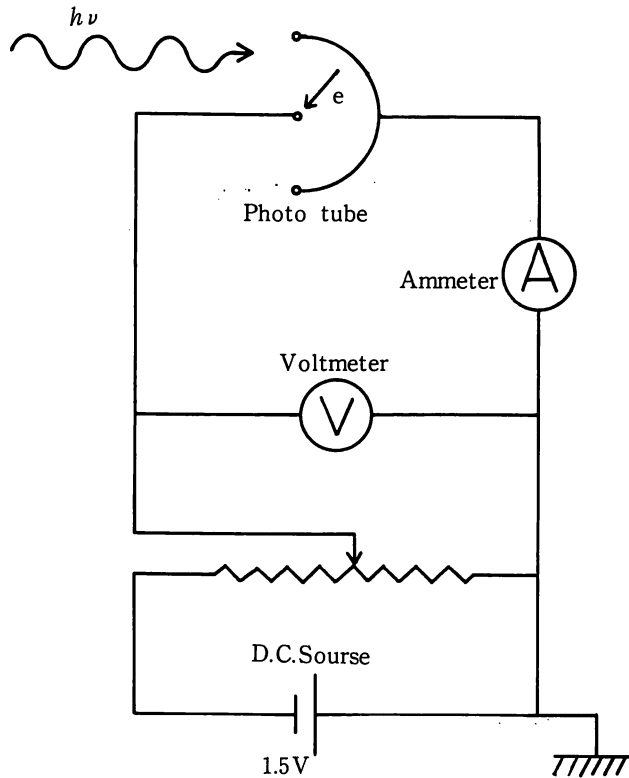


図1 測定の原理図

様に光電管に振動数 ν の光を当て、光電効果によりたたき出された電子の運動エネルギーを E_k とすると、それらは次式の関係にある。

$$h\nu = e\phi + E_k \quad (1)$$

ここで h はプランク定数、 e は電子の電荷、 ϕ は光電面に使用されている金属の仕事函数である。光電子は陽極に到達し光電流となるが、図1の回路により光電管に逆電圧を加え、逆電圧が(2)式の様になり光電子の運動エネルギーに相当する電圧（阻止電圧）になった時、光電子は陽極に到

$$eV = E_k = h\nu - e\phi \quad (2) \quad V = \frac{h}{e}\nu - \phi \quad (2')$$

達できなくなり、光電流はゼロとなる。今、既知の波長を持つ幾つかの光の阻止電圧を求め、(2)'により整理すると、その直線の勾配からプランク定数 h が、縦軸との交点から仕事函数 ϕ が得られる。この原理により、実際に測定する方法は、光源として100Wの白熱球を用い、図2の様子に透過特性と限界波長が与えられている赤、橙、緑、青の4つのフィルターについて各々の阻止電圧を求め、プランク定数 h を決定する。阻止電圧の決め方は、増幅器の増幅率を調節して、逆電圧を加えない時、丁度 $100\mu\text{A}$ の光電流が流れるようにセットし、逆電圧を増加させ、光電流が $1\mu\text{A}$ ないし $2\mu\text{A}$ の時の電圧を阻止電圧として求めさせている。しかし、この方

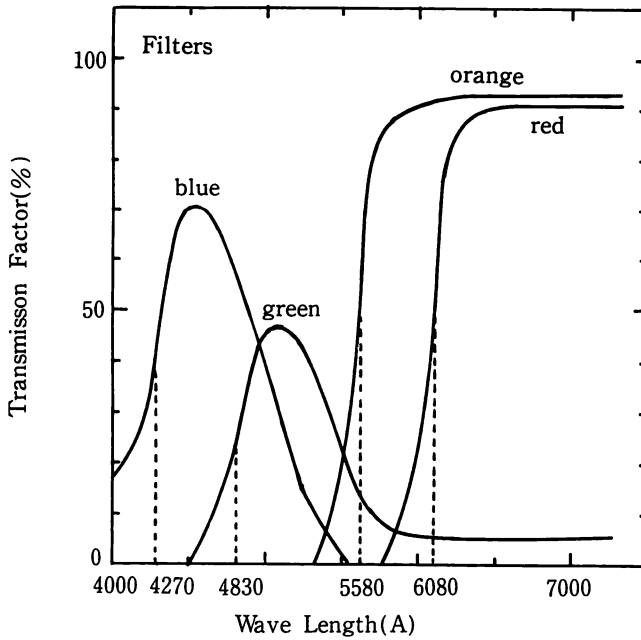


図2 フィルターの特性

法の通りにやると得られる値は真値の30%~60%程度のものであり(島津のカatalogにある測定例では $h = 3.6 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$)、装置の名前にうたわれているプランク定数の決定という立場から言うと、定数を決定することにはほど遠く「プランク定数を決定できる方法を原理的にやってみる」という域を出ない。

このように測定結果の悪い原因として考えられることは、図2で示されているように、各フィルターの限界波長より短波長側に尾を引いて光が漏れており、そのために、阻止電圧を決める臨界光電流値を $1 \mu\text{A}$ ないし $2 \mu\text{A}$ としているが、これらの値には科学的な根拠がないことである。更に、実際の逆電圧-光電流特性は図7に示される様な曲線となるが、低電流となった領域の曲線が横に寝ているため、僅な臨界光電流の違いが大きな阻止電圧の違いをもたらしており、この臨界値の判断が決定的に重要な役割を果すものとなる。測定上の問題として考えられることは、阻止電圧は低電流の領域で決定されるから、低電流の読み取りの精度の良いアンメーターを用意しなければならない。プランク定数の測定については実験教育上の見地から幾つかの論文が見られるが^{1,2,3,4,5)}、ほとんどが光源としてスペクトル線を用いており、白熱光にフィルターを用いて行う実験では良い値は得られていない。本研究に於いては、阻止電圧を決定する臨界光電流値を科学的に判断するために光源の強度の波長依存と光電管の放射感度を調べ、打ち出されている光電子の波長分布を明らかにし、かつ、ナトリウムランプを光源とした測定により阻止電圧以下の逆電圧を加えられた場合でも陽極に到達する光電子数は逆電圧の増加と共に減少することを示し、これから阻止電圧を決定する臨界光電流値を合理的に推定した。更に、線スペクトル光源を用い各線スペクトルの阻止電圧を決定することによりプランク定数を求めた。これらの測定は、装置に附属した計器より感度の良い計器を用い(アンメーターとして岩通製のデジタルアンメーターを用いた)、雑音となる光を完全に遮断し、時間を充分かけて行われた。

なお、この研究は第2著者以下の著者及び測定テーターの一部を提供してくれた2名の諸君がいずれも2年次の時に第1著者の指導のもとに行われたものである。

2 光源及び装置の特性

実験指導書による基礎的な測定方法は、100Wの白熱球を光源として赤、橙、緑及び青の4種類のフィルターを使用して行なわれるものである。各フィルターの特性と限界波長は、図2に示されている。実験指導書には、図2のフィルター特性のみが示されるだけであるが、阻止電圧を決定するための臨界光電流値を決めるためには、実際に打ち出されている光電子の波長分布を具体的に知らなければならない。その為には光源の白熱球の輻射強度の波長分布および光電管の放射感度特性を知らなければならない。100W白熱球の輻射強度の波長分布は物理定数表によって得た⁶⁾。又、用いられている光電管は浜松テレビKK製の「1P39」であり、その放射感度は同社の製品カタログから得た⁷⁾。図3にそれらをまとめて示す。可視光域での白熱球の輻射強度は、波長が長くなるに従って増加し、光電管の放射感度は、波長が長くなるに従って減少している。求める光電子数の波長に対する分布曲線は、

(白熱球の輻射強度) × (フィルターの透過率) × (光電管の放射感度)

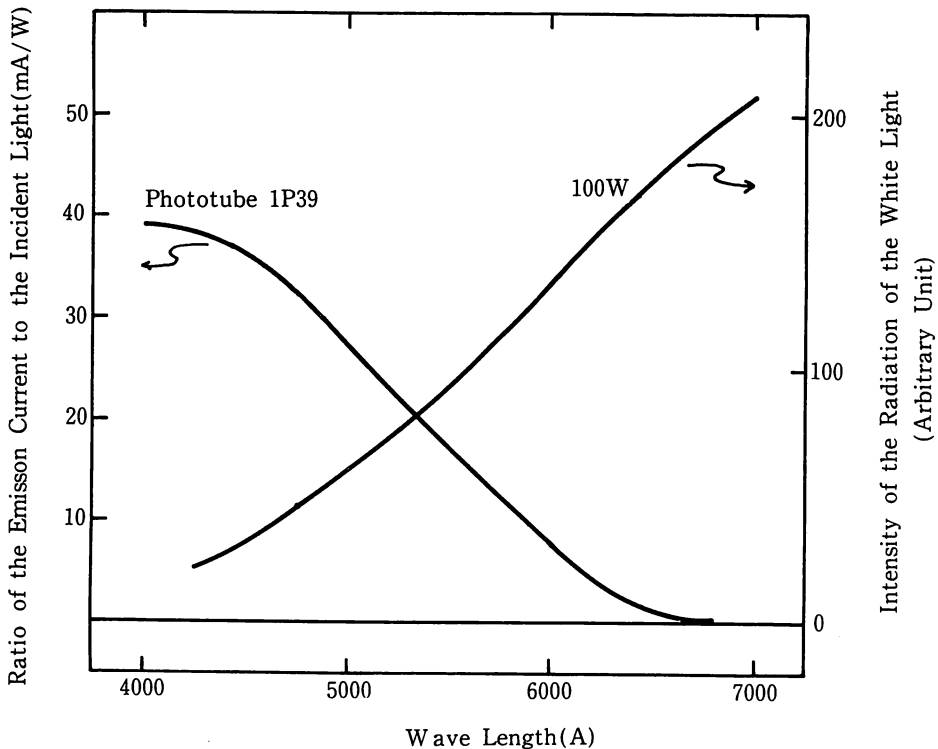


図3 白熱球の輻射強度の波長依存及び光電管1P39の放射感度の波長依存

で与えられ、結果を図4に示す。図2のフィルター特性だけが与えられている時点では、各フィルターでの光電子の強度と波長依存に随分差があるように感じられるが、図4の曲線はいずれも良く類似した形をしており、強度も高々1.5倍程度の差に留まっていることが解る。逆にこの様な結果を導く目的意識によってフィルターの選択がなされていることを窺い知ることが

できる。各フィルターのカーブで囲まれた面積が逆電圧ゼロの状態での全電流に相当しており、これを適当に増幅することにより測定時の初期電流値 $100\mu\text{A}$ としている。

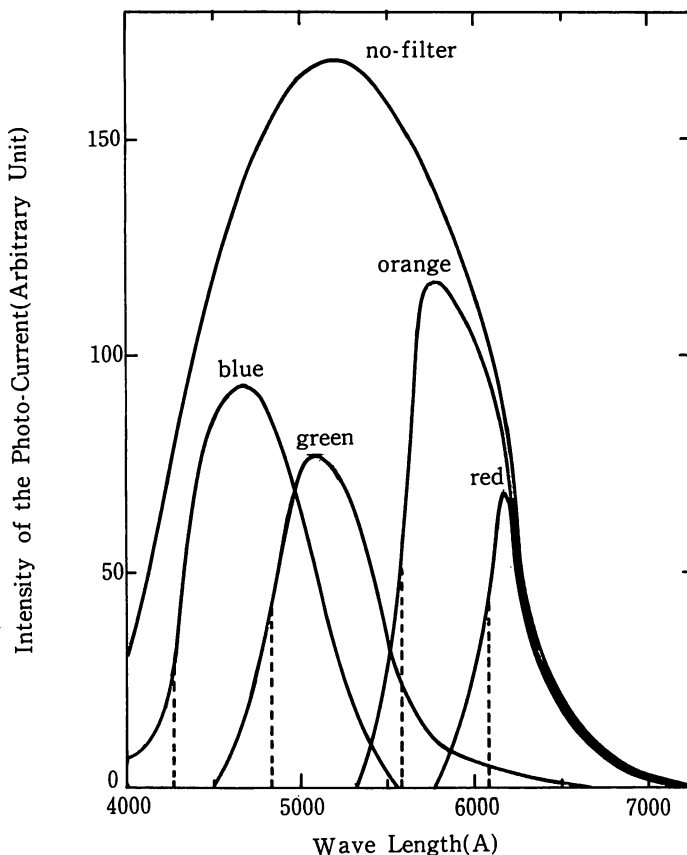


図4 光電子数の波長依存

各フィルターの限界波長は、点線により図中に示されているが、限界波長より短波長側の部分は図2で見える印象よりも実際は随分大きな比率を占めていることが解り、この短波長側の“はみ出し”部分が阻止電圧を決定する時にどれだけの光電流への寄与があるかを評価することが当面の課題である。

その目的にそって我々は、ナトリウムランプを光源として測定を行い図5の曲線を得た。比較のために、光電子はその運動エネルギーが電場ポテンシャルを上回る限りすべて陽極に到達すると仮定し、ナトリウムランプを事実上D線のみとした理想的曲線を図6に示す。D線に対する阻止電圧は $0.6\sim 0.7\text{V}$ 付近とみられるが、理想曲線に対して測定曲線は阻止電圧に至るまでに $0.2\sim 0.4\mu\text{A}$ 程度、すなわち初電流値の $2/1000\sim 4/1000$ 程度までに減衰し急激な電流変化が起こるのではなく連続的にゼロに向っている。このようにエネルギーの大きい光電子も逆電圧を加えられると陽極からそらされてしまい、到達する電子数は逆電圧と共に減少する。図5の結果から推定すると図4に於いて与えられた各フィルターの限界波長より短波長側の光による残存電流は、この限界波長に対する阻止電圧を加えた時、 $1/1000$ 程度に減衰していると判断できる。

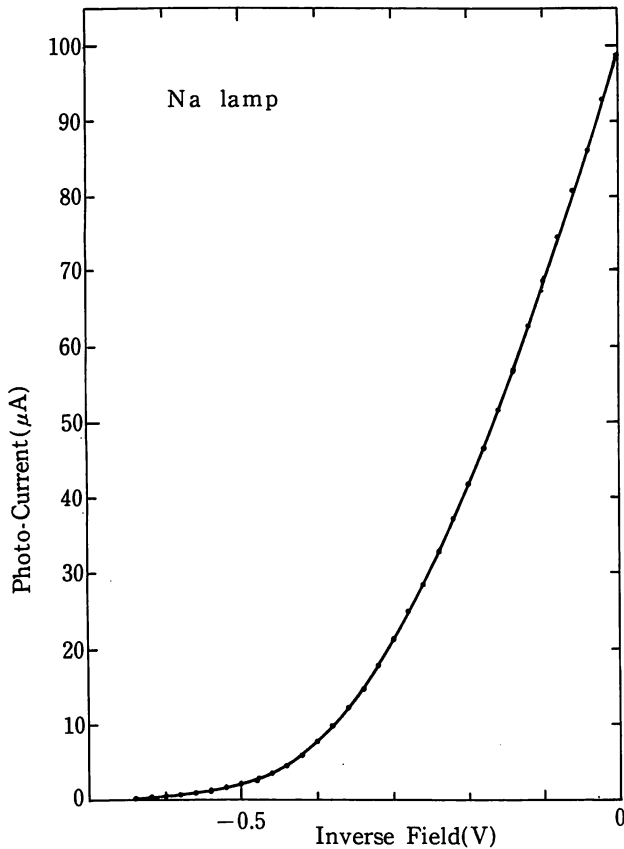


図5 Naランプの光電流—逆電圧特性

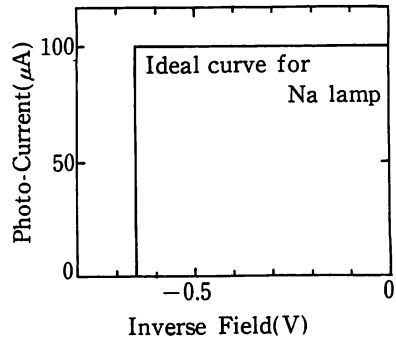


図6 Naランプの理想曲線

3 測定及び結果

① 連続スペクトル光源による測定

図7に各フィルターをつけて測定した場合の逆電圧—光電流特性を示す。測定は、外部光を完全に遮断した状態で、 0.02V ずつ逆電圧を増加させては測定し、3回の測定の平均値をもって測定値とした。この図に於いて、各フィルターに与えられた限界波長に対応する阻止電圧付近では、勾配が小さくなり曲線が横に寝ているため、阻止電圧を決定する際に大きな誤差を生じ易い。従って、以下に詳述する3つの方法、即ち、(i)電流対数法、(ii)図式微分法、(iii)微分対数法により阻止電圧を決定した。

(i)電流対数法——光電流を対数尺により示す方法である。図7の曲線を片対数グラフを用いてプロットしたものが図8である。グラフのスケールを対数尺に取るだけで低電流域の曲線は立ち上って勾配を急にしており、阻止電圧を精度良く決めるには好都合となる。

橙のフィルターは、ナトリウムランプのD線より少し短波長側に限界波長を持つ。従って、この波長に対応する阻止電圧を加えられた時、D線と同じ程度だがそれより少し強い減衰を受けることが推定される。ここでは、減衰率を、 $1/1000 \sim 2/1000$ 程度と判断した。図4に示される橙の限界波長より短波長側のゼロ電圧の時の寄与は、面積比から概算すると10%程度、即

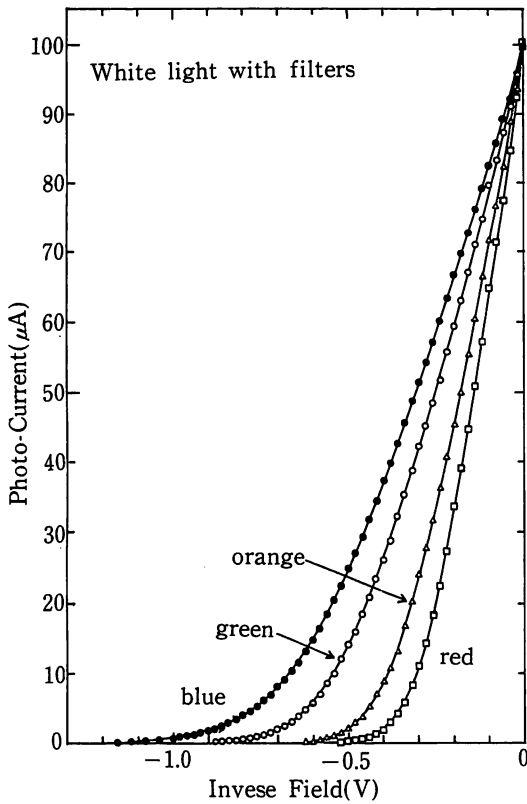


図7 各フィルターの光電流-逆電圧特性

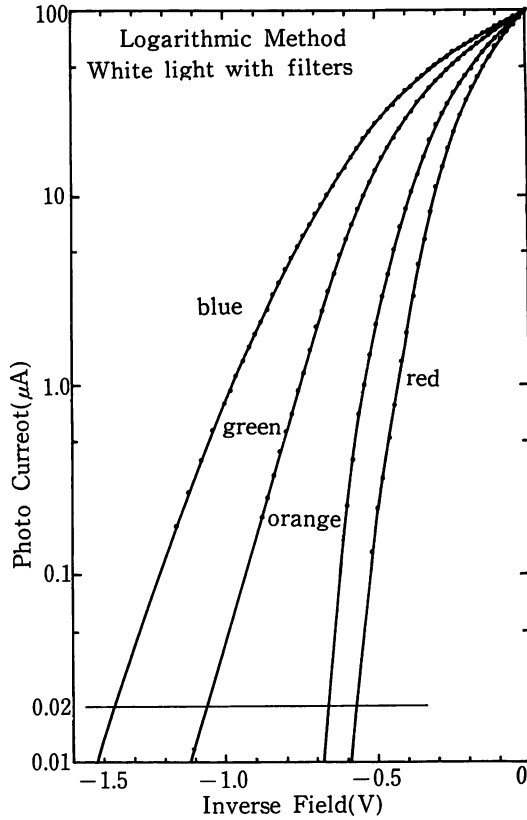


図8 電流対数法による光電流-逆電圧特性

ち、 $10\mu\text{A}$ 程度である。この $10\mu\text{A}$ が $1/1000 \sim 2/1000$ 程度に減衰した時、即ち、 $0.01 \sim 0.02\mu\text{A}$ に達した時が橙の限界波長に対する阻止電圧が加えられた時である。各フィルターの限界波長に対応する阻止電圧を加えた時の減衰率は波長の短い程、著しいので、赤フィルターの阻止電圧はもっと大きな電流値で、緑や青のフィルターの阻止電圧はもっと小さな電流値で決定すべきであるが、実際の電流値を実践的に決定するのは困難であるので、本研究に於いては簡単化して、すべての阻止電圧を $0.01\mu\text{A}$ あるいは $0.02\mu\text{A}$ の時の電圧として決定した。

こうして得られた阻止電圧と振動数の関係を式(2)に従ってプロットしたものを図9に示す。この直線の傾きから得られたプランク定数は、光電流が $0.01\mu\text{A}$ の値を阻止電圧とした時、 $h = 6.81 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 、 $0.02\mu\text{A}$ の値を選んだ時は、 $h = 6.65 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ であった。この様に臨界電流値はあくまで概算による値であるが、Na ランプの実測の結果から減衰効果を推定することにより、真値からの誤差率 $0.3 \sim 2.7\%$ の非常に良い値を得るところとなった。

(ii)図式微分法——今、逆電圧 $-V$ が加えられ電流 I が流れているとする。電流 I は毎秒陽極に到達している全電子数に比例している。逆電圧を $-(V+dV)$ に増加させると、電流は $(I-dI)$ となった。電流 dI は逆電圧を $-V$ から $-(V+dV)$ に増加させた時に陽極に到達できなくなった電子数に比例している。従って dI/dV は逆電圧を単位電圧変化させた時に到達できなくなった電子数を表わす。図10は、図7を図式微分して得た $dI/dV - V$ 曲線である。

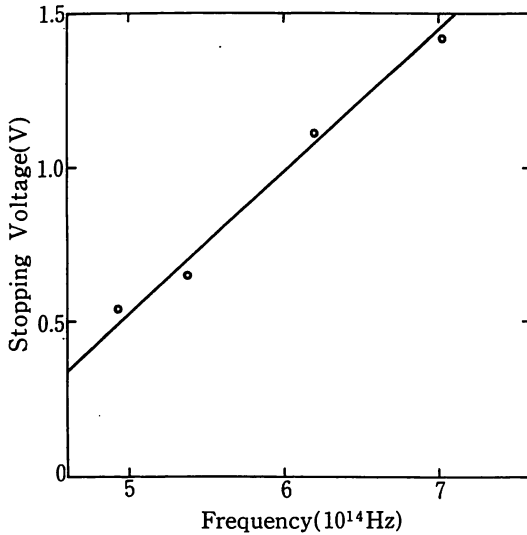
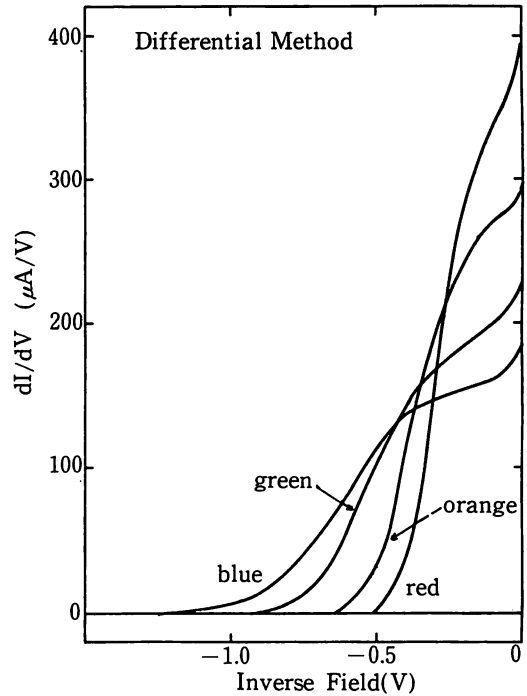
図9 阻止電圧—振動数 (h の決定)

図10 図式微分法

図7に於いて、微小電流がかなり尾を引いていることから、限界波長に対応する阻止電圧は、図10に於いては dI/dV を事実上ゼロに外挿した電圧をとった。こうして得られたプランク定数は、 $h = 5.75 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ であった。

(iii)微分対数法——図10の微分法のグラフに於いては、阻止電圧附近の曲線は図7の $I-V$ 曲線と同様、横に寝ており阻止電圧の決定精度を悪くしている。従って電流対数法と同じ目的で、微分値を対数尺で取り、図11に示す。

電流対数法では、初電流を基準とすれば1/10000に減衰するところをメドに阻止電圧を決定した。これに従って、図11に於いても微分値が1/10000程度に減少する点、 $dI/dV = 0.1 \mu\text{A}/\text{V}$ の値における逆電圧を阻止電圧とし決定した。こうして得られたプランク定数の値は、 $h = 6.33 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ であった。

2 線スペクトル光源による測定

線スペクトル光源を用いて測定した場合の解析と結果は、進上の報告³⁾に詳しく述べられている。図12は、比嘉政勝君及び永田浩君によるCdランプを光源とした場合の測定結果である。ひとつの線スペクトルによってたたき出された光電子は逆電圧が増加すると共に陽極に到達する数がほぼ直線的に減り、 eV がその運動エネルギーに等しくなると完全に到達しなくなる。その過程は、図12に於いてひとつの直線ブランチとして現われる。従って、ひとつの直線ブランチと次の直線ブランチの交点の逆電圧をその線スペクトルの阻止電圧として決定できる。この阻止電圧決定法は屈折法と呼ばれている。又、図12では短い波長の強い線スペクトルの場合には、その阻止電圧に於いて電流が一挙に減少することも見られる。永田君と比嘉君は微分法

により精度良く阻止電圧を決定しているが、ここでは屈折法によって決定した。こうして得た一連の阻止電圧は図12に矢印で示す。この阻止電圧がそれぞれの波長の線スペクトルに対応するかは、図13に示す方法で決定した。一枚のグラフ用紙に各線スペクトルの振動数を縦線として示し、もう一枚のグラフ用紙に大きめにスケールを取って阻止電圧のセットを記入し、両者の角度及び位置を変化させては、全部が一致するところを見い出して、各スペクトル線と阻止電圧を対応させた。こうして得られたプランク定数の値は、 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ であった。

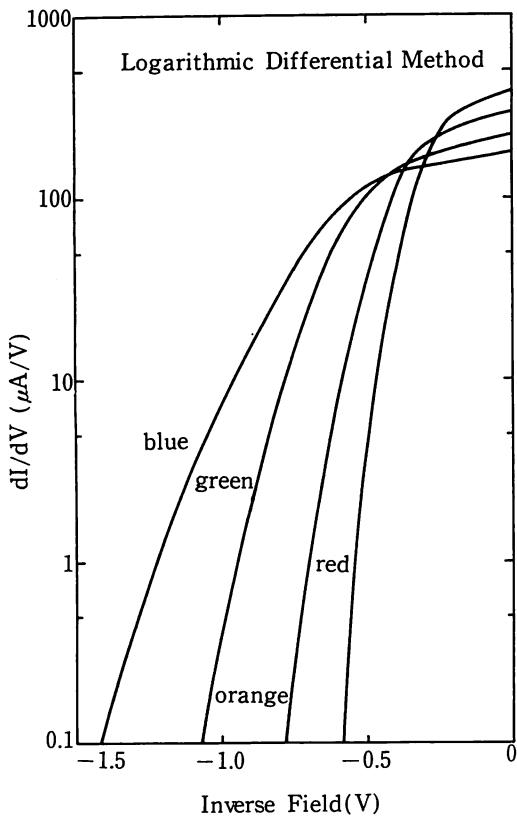


図11 微分対数法

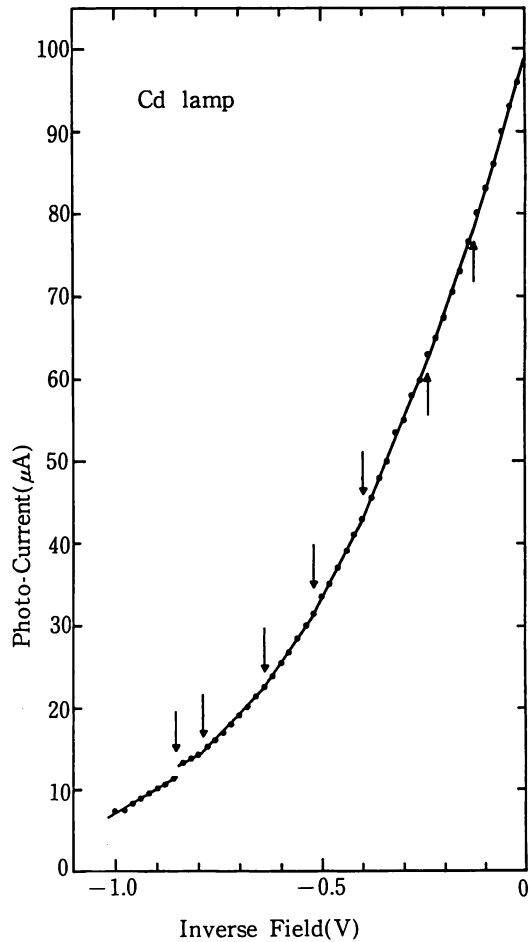


図12 Cdランプの光電流-逆電圧特性

図14は、Hg ランプを光源とした場合の測定結果である。Cd ランプと同様にいくつかの直線ブランチに分割される。Cd ランプと同様な方法でスペクトル線と阻止電圧の対応を定め、 $h = 6.80 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ という値を得た。

4 ま と め

以上の様にして、得られた結果をまとめて表1に示した。値はいずれも真値の数%以内であり、従来得られている値に比較すれば、充分満足のいくものである。本研究に於いて新しく得られた事柄は以下の諸点である。

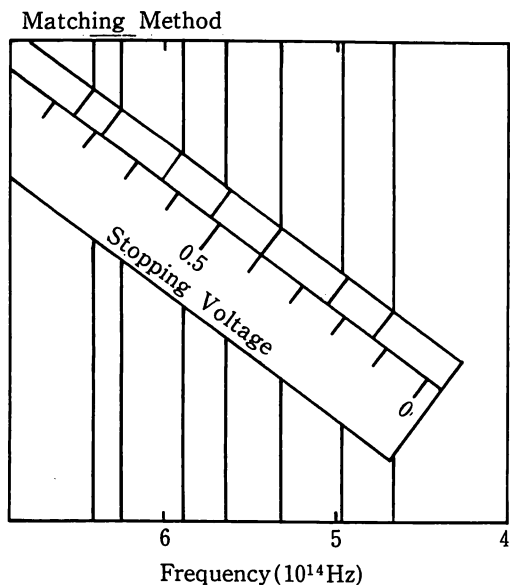


図13 阻止電圧とスペクトル線の対応図

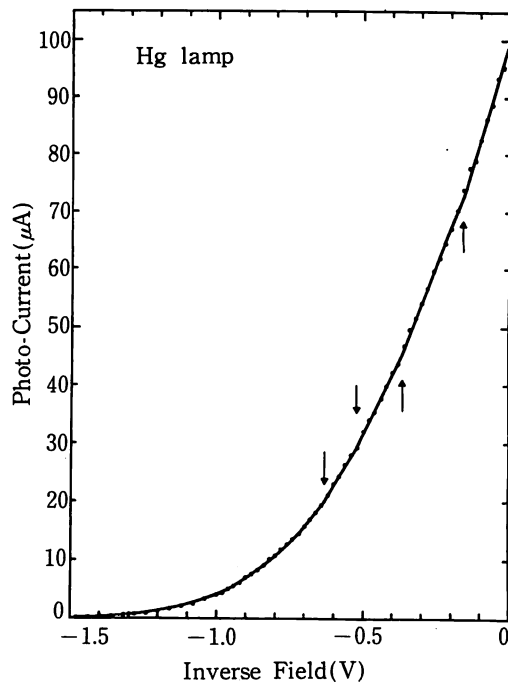


図14 Hgランプの光電流-逆電圧特性

表 1

阻止電圧の決定法	h の値 ($10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$)	誤 差(%)	決定条件
電 流 対 数 法	6.81	2.7	$0.01\mu\text{A}$
	6.65	0.3	$0.02\mu\text{A}$
微 分 外 挿 法	5.75	13.3	0へ外挿
微 分 対 数 法	6.33	4.5	$0.1\mu\text{A}/\text{V}$
屈 接 法 (Hg)	6.80	2.6	直線の交点
屈 接 法 (Cd)	6.63	0	"

標準値 $6.63 \times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$

(1) 光源 (100W白熱球) の強度の波長依存, フィルター特性及び光電管分光特性を考慮して実際に打ち出されている光電子数のエネルギースペクトルを得た。

(2) ナトリウムランプの測定結果から, 逆電圧を加えた場合の光電流の減衰の程度を知り, 各フィルターの臨界光電流値を合理的に推定し阻止電圧を決定した。その際, 減衰の程度が逆電圧の大きさのみに依存し, 光の振動数や, 初期電流の大きさには無関係であると仮定したがこの仮定が現実と一致しているかどうかは今後の研究により検証したい。

(3) 臨界光電流値は, 初電流 ($100\mu\text{A}$) に比し 10000 分の 1 程度と推定される。従って対数法によらないと臨界光電流値に対応する阻止電圧値は正しく求まらない。本研究では, 白熱電

球を光源とする場合としては、最も良い値（誤差率0.3%）を得ている。

(4) 図式微分法により陽極に到達できなくなった光電子の電圧依存特性を得、このカーブからプランク定数を得た。ここでは対数法によらない図式微分法によっても $5.75 \times 10^{-34} \text{Js}$ という値を得たが、この値は対数法によらない報告値としては最良の群に属するものである。

(5) 線スペクトル光源による測定に於いては各スペクトルによる光電流が逆電圧と共に、ほぼ直線的に減衰しているので、減衰曲線を直線で近似し、各阻止電圧を得た。又、波長と阻止電圧の対応を図式的に得て、これから非常に精度の良い結果を得た。

謝 辞

カドミウムランプを光源とする精度の良い測定結果を提供してくれた永田浩君及び比嘉政勝君に深く感謝致します。また、原稿の完成及び論文の発表会に際しましては、具志堅清明君はじめ磁性体研究室の方々に大変な便宜を計っていただき、お世話になりました。ここに深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 中込八郎：物理教育18 (1970) 90.
- 2) 中川保雄：物理教育24 (1976) 22.
- 3) 進上芳雄：物理教育26 (1978) 125.
- 4) 出口孝彦, 北松孝一：物理教育27 (1979) 35.
- 5) 島田昌敏, 岡本哲行：物理教育21 (1973) 176.
- 6) 物理定数表 (飯田修一他編集, 朝倉書店, 1979年) p.184.
- 7) Hamamatsu 光電変換素子 (浜松テレビ株式会社, 1973年) p. 4