

# 大学基礎課程における量子物理学実験

中 島 基 樹\*, 小 倉 昭 弘\*, 関 口 宗 男\*\*, 和 田 浩 明\*\*

## Experiment of quantum physics for a basic course in university

Motoki Nakajima \*, Akihiro Ogura \*, Motoo Sekiguchi \*\*, Hiroaki Wada \*\*

**Abstract:** This article reports an attempt of a new experimental program of the quantum physics for a basic course in university. Our program does not require advanced knowledges and experimental skills for the students. We investigate a simple way for measurements of correct value of Plank's constant. We also hope our experimental program will be used in the advanced physics course in high school.

**Key words:** Plank's constant, quantization, LED, Physics education

### 1. はじめに

大学基礎課程を社会人リテラシー教育と捉えると、先端科学の基盤である量子物理学のエッセンスを教育することは重要であるといえる。量子物理学に関して高等学校の物理教育では、「光の放射・吸収」、「光電効果」、「コンプトン効果」、「対生成・対消滅」が取り入れられているが、入学時における理系の大学生の理解度を調べてみると、それらの内容を十分に習得しているとはいえない。このため大学基礎課程でのフォローが重要である。量子物理学において光の粒子性や物質の波動性を特徴づける定数として「プランク定数」が導入されるが、この定数は量子現象のエネルギーの大きさのオーダーを与える定数であり、量子物理学においてもっとも重要な量である。一般的な教育課程では「プランク定数」の導入に関しては、「光電管を用いた光電効果の実験」が使用されているが、この実験で起きる現象は複雑で、それを理解するためには広範囲な物理の知識が必要となる。そのため、より平易な実験テーマを開発することが望まれている。

「光電管による光電効果の実験」に代わる理解しやすい実験テーマとして、1996年にローレンスは発光ダイオード(LED)を使用したプランク定数測定実験<sup>1)</sup>を提案した。この実験テーマはイギリスの大学進学を前提とする中等教育上級レベル(日本の高等学校3年及び大学1年レベル)のカリキュラムとして2000年に導入された<sup>2)</sup>。また、日本へは1998年4月の「物理・化学教育日英会議」において紹介された<sup>3,4)</sup>。その後、高等学校

の物理実験への導入の動きがあったが<sup>5)</sup>、実際に実験を行うとプランク定数が正確に測定出来ないという報告がなされており<sup>4,6,7)</sup>、現在の段階では高校の実験テーマとして定着していない。先行研究<sup>4,6,7)</sup>では測定回数が少なく、プランク定数を正確に測定できない原因を十分には解明できていない。

プランク定数の値を正確に測定できることも重要であるが、その大きさのオーダーを測定することだけでも量子現象の理解に繋がる。また、LEDという照明器具として身近な装置を使用して、手軽に実験できることと基本的な原理の分かり易さという利点から、「LEDによるプランク定数測定実験」は魅力的な実験テーマである。そこで、我々は大学基礎課程を対象とした量子物理学導入実験として、学生実験用の測定装置を作成し、1回分(180分)の授業としての内容を構成した。そして、実際に大学1年生向け基礎課程物理学実験として日本大学松戸歯学部で実施した。本論文では、3年間分の実験で得られたデータを用いて、プランク定数の測定値にどのような誤差が見られるかを示し、精密に測定できない原因を明らかにする。その上で十分な精度での実験テーマの構成を提案する。

### 2. LEDによるプランク定数測定実験の原理

LEDは、pn型接合の半導体を材料として作成されている。順方向にある値以上の直流電圧をかけることにより発光する半導体素子である。使用する半導体材料や添加物により、半導体内の電子が伝導電子の状態に移移するためには、禁則帯を超えるためのエネルギー(これをバンドギャップ、またはエネルギーギャップと呼ぶ)が必要となるので、特定の電圧(発光開始電圧)以下ではLEDは通電しない性質がある。

\* 日本大学松戸歯学部

\*\* 国士館大学理工学部

半導体順方向にかかる電圧を徐々に増やしていった発光開始電圧に達すると、伝導電子と正孔（ホール）が結合し、同時に伝導電子が失うエネルギーの一部が光となって放出される。量子物理学では、光子のエネルギーは（光子の振動数 $\nu$ ）,

$$E = h\nu \quad (1)$$

で表される。(1) 式は「アインシュタインの関係式」と呼ばれる。(1) 式の中の比例定数 $h$ をプランク定数と呼び、量子物理学でもっとも重要な基本定数である。LEDのバンドギャップ $E_G$ は、発光開始電圧 $V_0$ と素電荷 $e$ を使って、

$$E_G = eV_0 \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、バンドギャップの全てがLEDから放出される光子のエネルギー $E$ となると仮定すると、(1) と (2) 式よりプランク定数 $h$ は、

$$h = \frac{eV_0}{\nu} \quad (3)$$

と求めることができる。以上のような方法で、イギリスで開発されたカリキュラムではプランク定数を求めているが、(3) 式の導出で行ったように、電源がLEDに対して加えているエネルギー（発光開始電圧）がすべて光子に受け継がれるという理想的な仮定をしている。

### 3. プランク定数測定用実験装置の製作

実験を実施するために、図1のような実験装置を製作した。実験装置には、6種類のLEDを使用し、それらのメーカーと型番、ピーク波長を表1にまとめた。それぞれのLEDは、保護抵抗（100 $\Omega$ ）とロータリースイッチで接続されている。また、暗室内での実験中に学生が実験装置を実験台から床に落下させてもLEDが破損しないようにするため、LEDが取り付けられた基板を深めのアルミケース内に設置した。

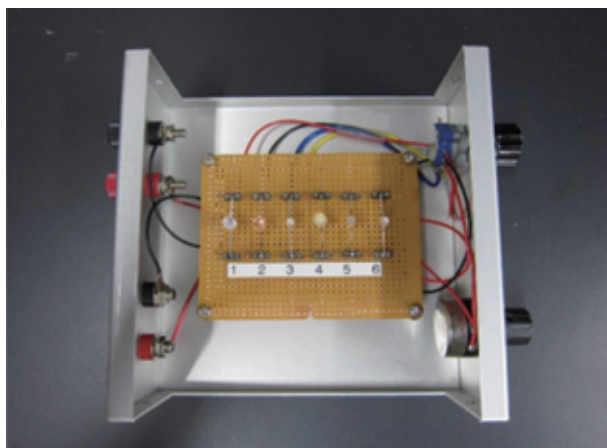


図1 実験装置の全体

表1 実験に使用したLED一覧

色	メーカー	型番	ピーク波長[nm]
赤	Broadcom	HLMP-C1115	645
橙	スタンレー電気	FA5365S	609
黄	Broadcom	HLMP-EL15-SV000	592
黄緑	STANLEY	MPY5373X	570
緑	STANLEY	UC3803X	502
青	スタンレー電気	UB3803X	465

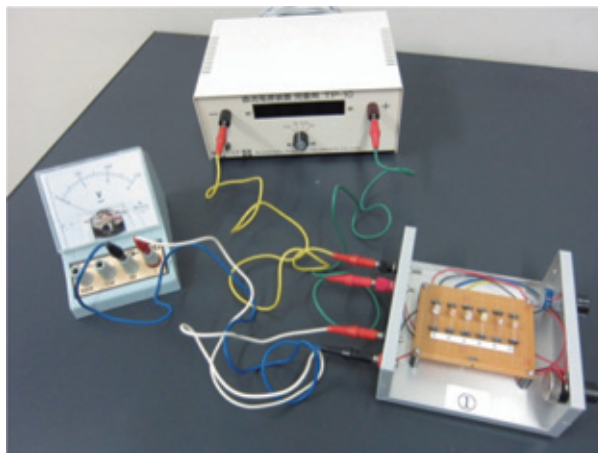


図2 「LEDによるプランク定数測定」の回路

### 4. 実験と解析方法

初めに、明るい実験室で、LEDを実装した基板入りアルミケースに3V直流電源（SHIMADZU：TP-10）と電圧計（SHIMADZU：HQ-300）を用いて図2のような直流回路を学生に組ませた。その後、LEDから発する非常に弱い光を観測したいので、回路を暗室に移して測定を実施した。実際の実験手順は、可変抵抗を調整することによりLEDにかかる電圧を徐々に増加させ、LEDが発光を開始する現象を目視によって確認させる。そして、机上電灯で照らされた電圧計を用いて、そのときの電圧を読みとらせた。なお、実験時間の都合上、装置に取り付けた6種類のLEDを全て測定することは実施せず、3色のLED（青のLEDを参照データとして、残りの2色については任意に選ばせた）を測定させた。実験終了後、測定したLED発光開始電圧と(2)、(3)式から求めた光子のエネルギーと、LEDの光の振動数 $\nu$ の関係をグラフ用紙にプロットさせた。さらに描かせたグラフ上の3つの測定点のデータを線形近似させ、(3)式より直線の傾きをプランク定数として算出させた<sup>1</sup>。

<sup>1</sup> この直線の切片は光電効果における仕事関数と同様な効果を表すが、LEDの場合は材質・製造方法により同じメーカーの同じ型番の製品であっても同じ値にならない。このことも学生実験用の測定装置を作る際には考慮する必要がある。

## 5. 結果と考察

日本大学松戸歯学部において3年間、計380名の学生が行ったLEDによるプランク定数測定の実験結果についてまとめる。測定装置は6台あるためLED一色当り6個のLEDによる測定値になっている。図3は380名の学生が実験から求めたプランク定数の値と、その値を得た実験の度数分布を表す。図3で示された結果では、測定されたプランク定数の中央値が $h = (8.39 \pm 0.02) \times 10^{-34} \text{ Js}$ となり、一般に認められているプランク定数の値 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}^2$ より26%も大きな値に集中した結果となったがオーダーとしては十分であると考えられる。

本実験で得られたプランク定数の測定値が大きくなる原因として考えられるのが、使用したLEDの個体差によ

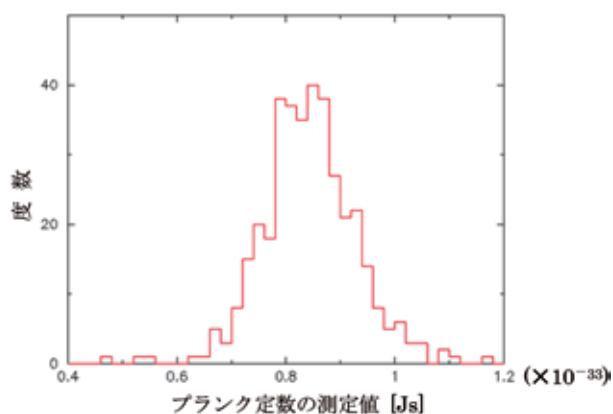


図3 380名の学生が測定したプランク定数の測定値分布

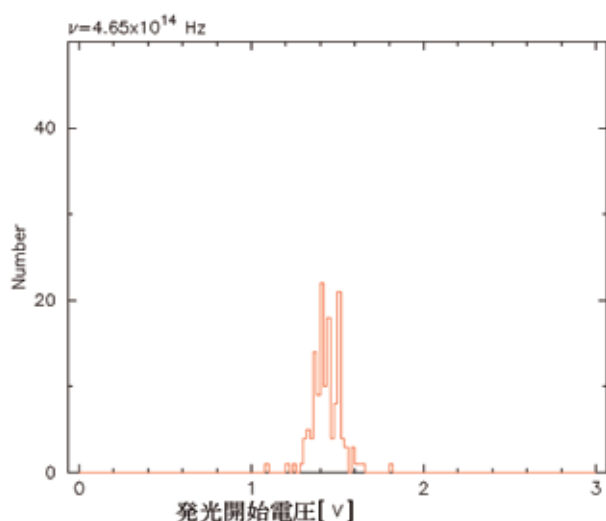


図4a 赤色LED発光開始電圧の度数分布図  
(放出される光子の振動数は $\nu = 4.65 \times 10^{14} \text{ Hz}$ )

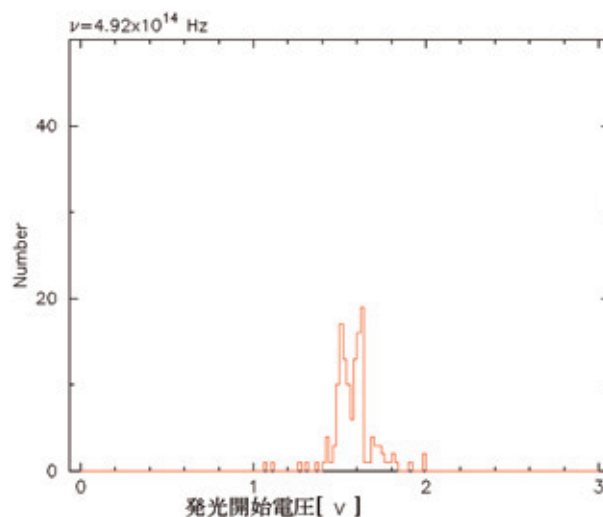


図4b 橙色LED発光開始電圧の度数分布図  
(放出される光子の振動数は $\nu = 4.92 \times 10^{14} \text{ Hz}$ )

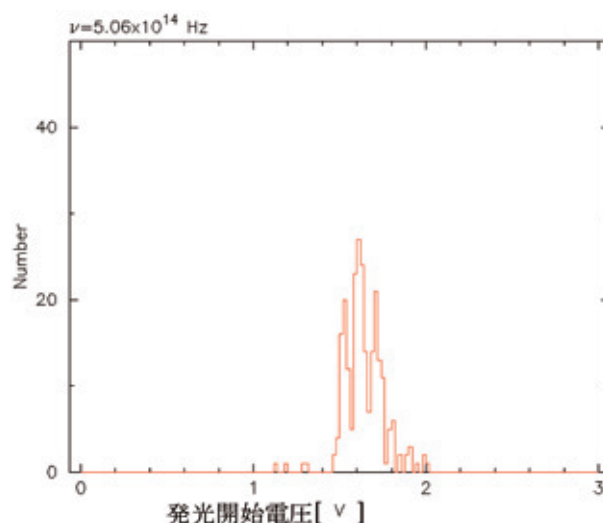


図4c 黄色LED発光開始電圧の度数分布図  
(放出される光子の振動数は $\nu = 5.06 \times 10^{14} \text{ Hz}$ )

る発光開始電圧の値のバラつきが、製作した回路に何かしらの原因があると考えられる。まず回路については、LEDの周辺の接続不良などによる過大な抵抗が存在しないことを確認したので回路が原因である可能性は棄却できた。そこで、本研究ではLEDの発光開始電圧の個体差について調べた。図4a～4fに示すのは、表1の6種類のLED毎に分類した発光開始電圧の度数分布である。これらの結果より、6種類のLEDの度数分布の全てにおいて多峰性が見られることが分かった。特に青色LEDでは顕著である。発光開始電圧の読み取りの際の測定誤差によって、測定された電圧値の度数分布において多峰性が顕著に現れるとは考え難いので、これはLEDの個体差が原因と考えるべきである。参照データとしていた青色のLEDでは、LED個体差が電圧値で約14%もある。以上は、6種類の複数個のLEDの中からそ

<sup>2</sup> プランク定数の実験値は国立天文台編「理科年表平成29年(机上演)」(2016) p.374より $6.626070040(81) \times 10^{-34} \text{ Js}$ であるが、実験の精度を考慮して、有効数字4桁として取り扱った。

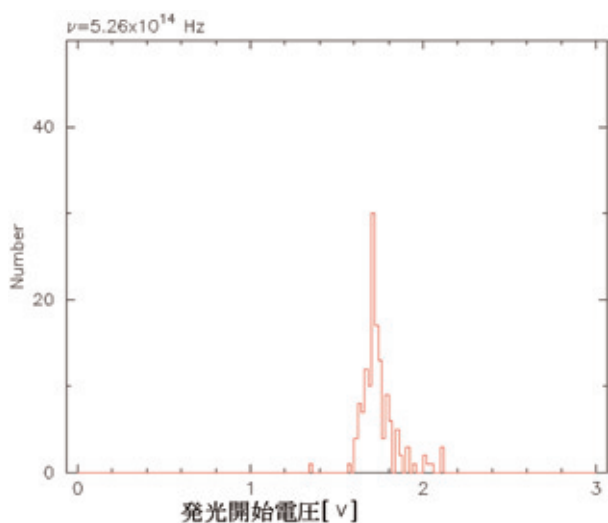


図4d 黄緑色LED発光開始電圧の度数分布図  
(放出される光子の振動数は $\nu = 5.26 \times 10^{14} \text{ Hz}$ )

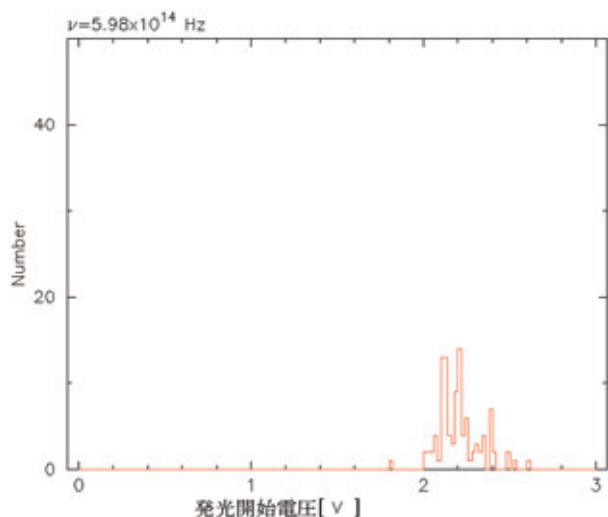


図4e 緑色LED発光開始電圧の度数分布図  
(放出される光子の振動数は $\nu = 5.98 \times 10^{14} \text{ Hz}$ )

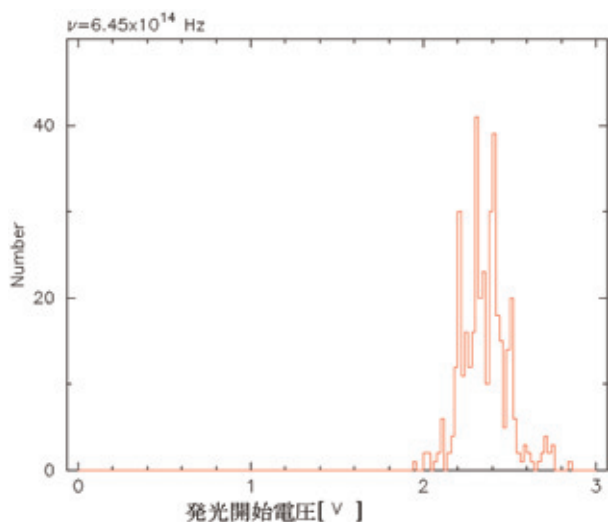


図4f 青色LED発光開始電圧の度数分布図。  
(放出される光子の振動数は $\nu = 6.45 \times 10^{14} \text{ Hz}$ )

それぞれ6個を無選別を選んで作成した装置により実験を行った結果である。

## 6. ま と め

今回、日本大学松戸歯学部で行った学生実験のデータによると、無作為に選んだLEDを使用した装置の場合、プランク定数のオーダーを求めることができたが、プランク定数を正確に求めることまでは難しいことが分かった。今回のプランク定数の測定値で見られたバラつきは、LEDの材質及び製造方法に依存する発光振動数の個体差に起因していると考えられる。

LEDの性能を測定して、選別した上で実験装置を作成することによりプランク定数の測定精度を上げることが可能であると考えられる。例えば、多数のLEDの発光開始電圧を測定し、その平均値を求めて、最も平均的な特性を持ったLEDを実験装置に実装することによりプランク定数の測定値を改善する可能性がある。

日本大学松戸歯学部の実験では3種類のLEDを使用して、180分の実験として実施したが、高等学校の物理の実験においても生徒一人あるいはグループで1種類のLEDの実験を実施(複数回の測定を平均する)させ、教員が全生徒のデータをまとめることにより、50分の授業時間に完結する学習プログラムを作成することも可能である。

今回の実験では、LEDからの光の波長に関してはメーカーが表示しているピーク値を使用している。この値を使って光の振動数を算出しているが、この値に関しても厳密に測定する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) J. Lawrence : Physics Education 31-5 (1996) 278-286.
- 2) J. オグボーン, M. ホワイトハウス : アドバンスンク物理 シュプリンガーフェラーク東京 (2004) p161.
- 3) 笠 耐 : 物理教育 46-4 (1998) pp.218-222.
- 4) 根本和昭 : 物理教育 49-6 (2001) pp.545-547.
- 5) 兵藤中一, 福岡登 編 高等学校 物理Ⅱ 啓林館 (2003) pp.233.
- 6) 三門正吾 : 物理教育 56-2 (2008) pp.117-120.
- 7) 小野寺力, 吉田雅昭 : 物理教育 57-4 (2009) pp.305-306.