

Title	フランク-ヘルツ実験の記録
Sub Title	Notes on the Franck-Hertz experiment
Author	柴崎, 彬(Shibasaki, Akira) 瀬々, 将吏(Zeze, Syoji)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2007
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of natural science). No.41 (2007. 3) ,p.27- 34
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20070331-0027">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20070331-0027</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

## フランク - ヘルツ実験の記録

柴崎彬\*・瀬々将吏\*\*

Notes on the Franck-Hertz experiment

Akira SHIBASAKI and Syoji ZEZE

Summary— The Franck-Hertz experiment is a classical experiment which shows that the energy eigenvalues of an atom is discrete. Nowadays, it is widely introduced as a student experiment in university. We have done this experiment to see whether it is suitable for a program for students of non scientific majors.

Key words: Franck-Hertz experiment

### 1 はじめに

慶應義塾大学日吉物理学教室では、文系学部の学生を対象とした物理学実験の実習を行っている。実験のラインナップは物理学の諸分野を幅広くカバーしており、文系学生にとって有意義なものとなるよう、十分な配慮がなされている。

この実習をさらに魅力的なものにするために、物理学教室では新しい実験の開発・導入に力を入れている。中でも、ミクロスケールの物理学である量子力学に関する実験をいくつか導入してきた。量子力学は応用上重要であるばかりだけでなく、その一見奇妙な、常識に反する性質に触れることで大きな教育効果があると考えている。<sup>1)</sup>

今回は、そのような実験のひとつとして「フランク - ヘルツの実験」の試験を行った。この

---

\* 東京大学大学院工学系理工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1) : Department of Applied Physics, University of Tokyo Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan. Email: shibasaki@looper.t.u-tokyo.ac.jp.

\*\* 慶應義塾大学日吉物理学教室特色 GP 特別研究教員 (〒223-8521 横浜市港北区日吉4-1-1) : Department of Physics, Keio University, Hiyoshi 4-1-1, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8521, Japan. E-mail: zeze@hc.cc.keio.ac.jp. [Received Sept. 29, 2006]

<sup>1)</sup> 特色 GP プロジェクトの WEB サイト : <http://www.sci.keio.ac.jp/gp/> では、実験の紹介、および授業で用いているテキストを公開している。

実験は原子内の電子を励起するエネルギーを直接測定した歴史的実験であり、実験を行った James Franck と Gustav Hertz は1925年にノーベル賞を受賞している。理系学部の学生を対象とした実習では、この実験はすでに標準的であり、目新しいものではない。そこで今回は、この実験が文系の学生に対しても有効であるか、そしてどのように改良すれば導入できるか、といったことを考えるための最初のステップとして、実験を標準的な方法に従って試行してみた。本文書はその記録である。

## 2 実験の原理と方法

### 2.1 原理

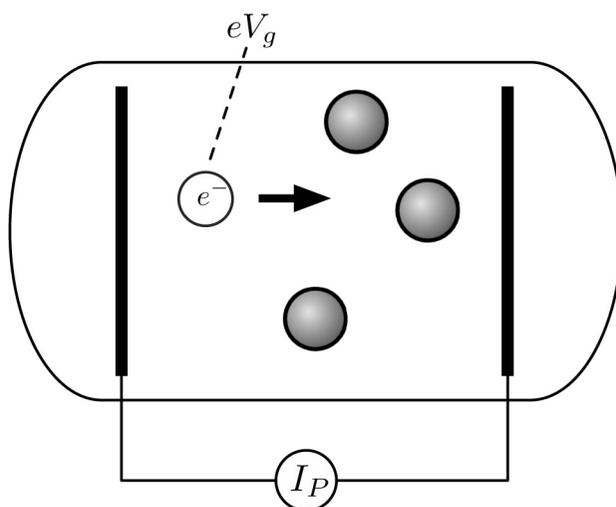


図1 フランク-ヘルツ実験の原理

フランク-ヘルツの実験の原理はさまざまな実験書で紹介されているので[1]、ここでは簡単に説明する。図1は概念図である。気体原子を封入した放電管内で、電子を電圧 $V_g$ で加速する。このとき電子は運動エネルギー $eV_g$ をもつ ( $e$ は電気素量)。加速された電子は気体原子との衝突を経て電極に達し、電流が流れるようになっている。

電子の加速電圧を増加させていき、運動エネルギーが原子の励起エネルギー（基底状態から第1励起状態へ遷移するときのエネルギー） $E_0$ と等しくなったとき、衝突により電子はエネルギーを失う。その結果、終端の電極へ達する電子の数は著しく減少し、電流 $I_P$ は小さくなる（非弾性散乱）。電圧-電流のプロットは図2のようになる。ピークが複数回現れるのは、衝突が複数回起こっているためである。<sup>2)</sup> 図2のピーク間の電位の差、すなわち $V_{g2}-V_{g1}$ 、 $V_{g3}-V_{g2}$ 、

<sup>2)</sup> ピークに関与しているのは第1励起状態だけである。他の準位は関係ないので注意。

……などに単位電荷をかけた量は、すべて励起エネルギー  $E_0$  に等しいはずである。実際にはこれらの測定値はそれぞれわずかに異なるので、適当な方法で平均したものを  $V_{g\min}$  とする。 $eV_{g\min}$  が励起エネルギーである。また、 $V_{g\min}$  を「最小の起電力」と呼び、これ以降は励起エネルギーのかわりにこの量を用いる。<sup>3)</sup>

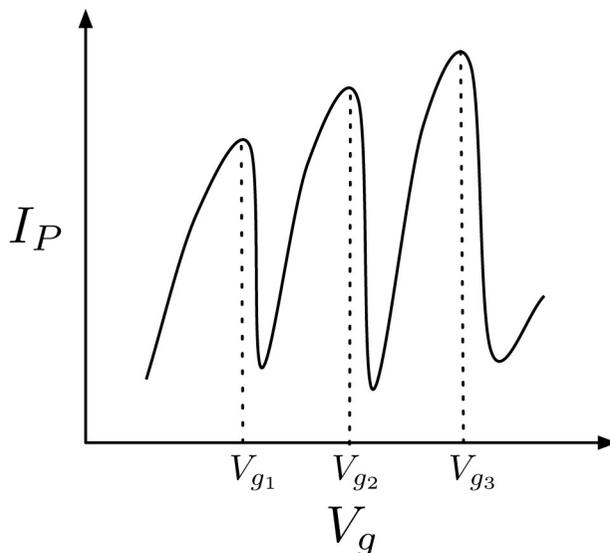


図2 電圧-電流プロット

$V_{g\min}$  の求め方には注意が必要である。ピークが  $n$  個あるとき、算術平均をとることにすると、

$$\begin{aligned} V_{g\min} &= \{(V_{g2} - V_{g1}) + (V_{g3} - V_{g2}) + \dots + (V_{gn} - V_{g_{n-1}})\} / (n - 1) \\ &= (V_{gn} - V_{g1}) / (n - 1) \end{aligned}$$

となり、最初と最後のピーク電圧の情報しか反映されなくなってしまう。そこで、今回は[2]にあるものと同じ式を使うことにした。

$$V_{g\min} = \frac{(n-1)^2 \left( \frac{V_{gn} - V_{g1}}{n-1} \right) + (n-3)^2 \left( \frac{V_{g_{n-1}} - V_{g2}}{n-3} \right) + (n-5)^2 \left( \frac{V_{g_{n-2}} - V_{g3}}{n-5} \right) + \dots}{(n-1)^2 + (n-3)^2 + (n-5)^2 + \dots} \quad (1)$$

## 2.2 方法

実験方法および実験装置は、日吉物理学教室医学部の実習テキスト[2]に従った。放電管を取り付けるソケットを含んだ一体型の測定装置に電流計、電圧計を接続して測定を行うように

<sup>3)</sup> エネルギーの単位に eV を用いるのでこうしておくとう便利である。

なっている。放電管は簡単に交換できるようになっている。アルゴン (Ar), ネオン (Ne), ヘリウム (He) の三種類のガスが封入された放電管を対象に測定した。

### 3 実験結果

#### 3.1 ネオン管 (2006/6/26)

ネオン管に関して、加速電圧 $V_g$ の増加に対応するプレート電流 $I_p$ を読み取ると図3のようになった。これより、3つあるピークに対応する加速電圧は、それぞれ $V_{g1}=19.3V$ ,  $V_{g2}=35.8V$ ,  $V_{g3}=52.9V$ であるから、最小の起電力は式(1)より16.7Vとなる。

これが初回の実験であったため、サンプルとする点はまんべんなく、グラフの全域にわたってとった。

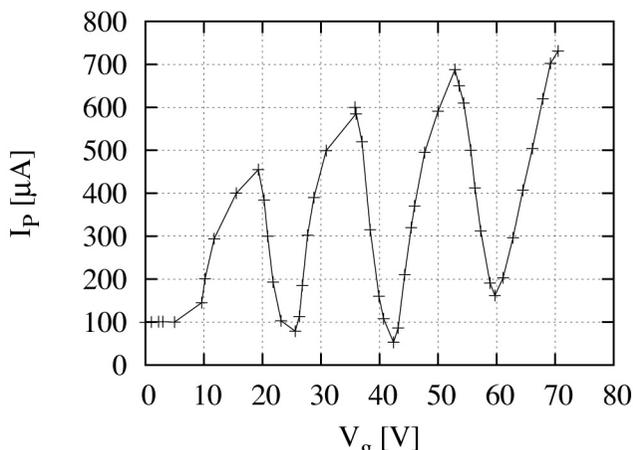


図3 ネオン管の電圧-電流プロット

#### 3.2 アルゴン管 (2006/7/3)

アルゴン管に関して、加速電圧 $V_g$ の増加に対応するプレート電流 $I_p$ を読み取ると図4のようになった。グラフの $10 < V_g < 20$ の範囲には、ネオンの場合とは異なった、独特なパターンがあらわれた。この部分の細かい凹凸はピークとみなさないことにした。

また、右3つのピークにおいて、電流計の針が振り切れてしまった。<sup>4)</sup> そのため、電流計を振り切っていない3つのピークのみを用いて、最小の起電力を見積もった。それぞれの加速電圧は、 $V_{g1}=5.14V$ ,  $V_{g2}=21.1V$ ,  $V_{g3}=33.0V$ であるから、最小の起電力は(1)より14.3Vとなる。

<sup>4)</sup> 本当は、まず測定値を記録する前に全域をスキャンして、電流計が振り切れる場合には電子ビームのパワーを弱くする、という作業が必要であった。後日再実験を行った。

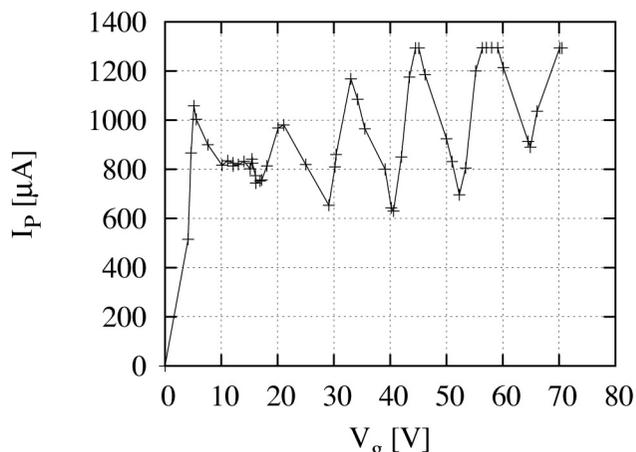


図4 アルゴン管の電圧-電流プロット

### 3.3 ネオン管の蛍光 (2006/7/3)

前回 (3.1節) のネオン管の測定では、電子と衝突した原子が発する蛍光を観測していなかったため、その観測を行った。

まず実験室を暗くして観測を行った。すると、加速電圧を上げるとともに、放電管内に環状の蛍光が見られた。蛍光が見られない状態から加速電圧を上げると、まず図5の左側のようなオレンジ色のリングが1つ現れる。さらに加速電圧を上げると、最初のリングが大きくなっていき、内側に新しいリングが現れて図5右のようになる。さらに電圧を上げると複数のリングが見える。このことから、管の中の電子が平均的にもっともガスと衝突しやすい距離 (平均自由行程) が定まっており、リングが光る半径が平均自由行程に相当すると思われる。また、同じ色のリングが複数個できることから、衝突が複数回起こっていることがわかる。また、実験室の照明をつけた状態では、蛍光の観測は困難であった。

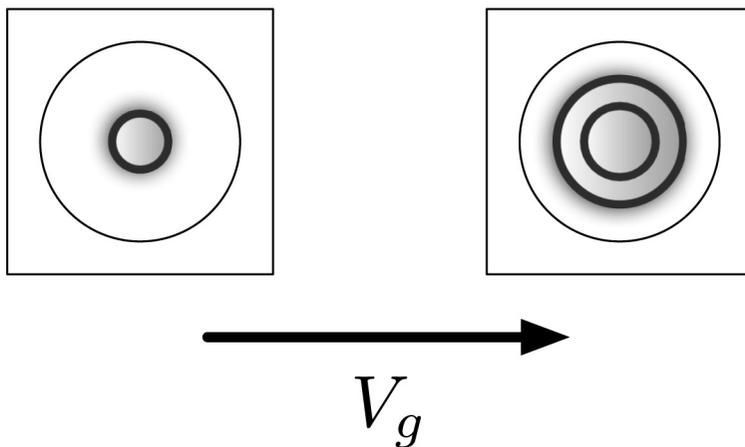


図5 ネオン管の蛍光の様子

### 3.4 ヘリウム管 (2006/7/10)

ヘリウム管に関して、加速電圧 $V_g$ の増加に対応するプレート電流 $I_p$ を読み取ると図6のグラフのようになった。実験時間を短縮するために、グラフの極大および極小から離れた場所ではデータを記録しなかった。

それぞれのピークに対応した加速電圧は、 $V_{g1} = 23.8\text{V}$ 、 $V_{g2} = 45.2\text{V}$ 、 $V_{g3} = 70.3\text{V}$ であるから、最小の起電力は式(1)より $22.9\text{V}$ となる。

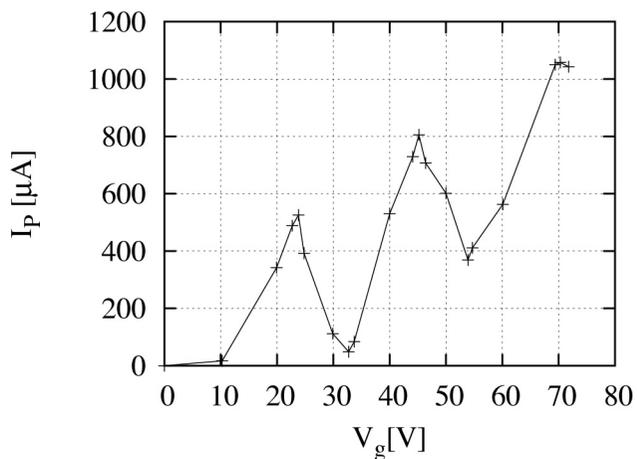


図6 ヘリウム管の電圧-電流プロット

### 3.5 アルゴン管 2 (2006/7/10)

前回行ったアルゴン管の測定では、ヒーターの出力が大きすぎたため、電流計の針が振り切れてしまった。今回はヒーター電圧を少し小さくして実験を行った。その結果得られたのが図7である。前回と同じように、グラフ左側の部分に細かいパターンが出現した。それぞれのピークに対応する加速電圧は、 $V_{g1} = 5.84\text{V}$ ,  $V_{g2} = 21.3\text{V}$ ,  $V_{g3} = 33.3\text{V}$ ,  $V_{g4} = 44.8\text{V}$ ,  $V_{g5} = 57.5\text{V}$ であるから、最小の起電力は式(1)より12.7Vとなる。

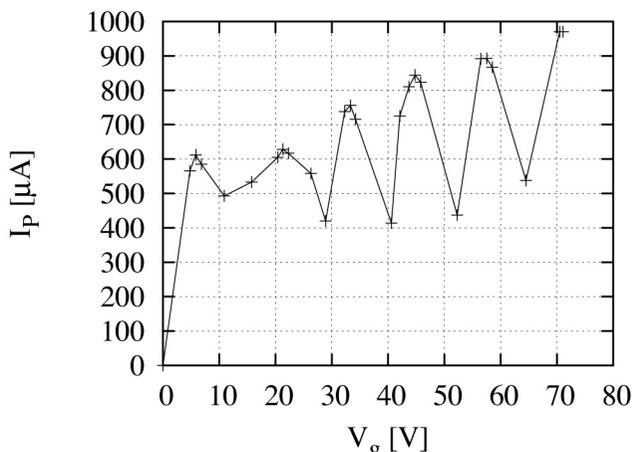


図7 アルゴン管の電圧-電流プロット (その 2)

### 3.6 測定値の評価

3.1節～3.5節の実験で得られた最小励起電圧を表1にまとめた。「文献値」として[2]を引用した。起電力の文献値とのずれは10%程度であることがわかる。

原子の種類	Ne	Ar	He	Ar (2)
測定値[V]	16.7	14.3	22.9	12.7
文献値[V]	16.7	11.6	21.2	11.6

表1 最小起電力の測定値

## 4 最後に

実験を終えて感じたことを列挙する。

- ・実験にかかる時間は、試料1つにつき1時間程度であった。当然、細かくスキャンすればするほど時間がかかる。複数の試料を観測することは実習の時間内では難しい。
- ・マニュアルをよく読んでから行えば、決して難しい実験ではない。実験器具の設置および

操作は容易である。

- ・本実験で使用した測定器はデジタルのもので、電流の上下する様子がかみづらかった。アナログ電流計を用いたほうが測定しやすいと思われる。
- ・受講者に人気のある実験は、物理現象がダイレクトに見える実験であることが多い。その意味では、フランク-ヘルツの実験は「地味な」実験である。電子が気体と衝突する際の蛍光は、部屋を暗くしないとはっきり見えない。したがって、実験実施時に学生が見るのは電圧計、電流計の針だけである。
- ・上述のとおり、この実験は大学初年度の題材としてはやや面白みに欠けるかもしれないが、少し物理の知識がある受講者にとっては、非常に面白い実験だと思われる。測定で得られたグラフは量子力学のエネルギー固有値の離散性を強烈に印象づける。<sup>5)</sup> 物理の知識がないと楽しめないという意味で、やや高度な実験である。
- ・放電管の内部にできる蛍光の様子は、観察していて大変面白い。工夫して照明下でも綺麗に見られるようにすれば面白いと思う。

## 5 謝辞

この実験に関する様々な助言と議論をしてくださった青木健一郎氏に感謝します。また医学部の浜野明子氏、三井隆久氏、古野泰二氏には実験機材の提供をしてくださったことに感謝します。この研究は文部科学省特色GPプロジェクトならびに慶應義塾大学部門内調整費の補助を受けて行われました。

## 参考文献

- [1] Adrian C. Melissinos and Jim Napolitano, “Experiments in Modern Physics”, Academic Press (2003)
- [2] 慶應義塾大学医学部物理学教室編, 『物理学実験』 (2001)

5) すでに日吉物理学教室において導入された「原子のスペクトル」もエネルギー固有値の離散性に関する実験であるが、この実験で測定するのは光の色であり、どちらかという複雑なスペクトルから量子力学の性質を導きだす、という実験である。