

目 的

フランク・ヘルツの実験は、原子物理学において、ボーアの原子モデルを検証したという点で重要な意味をもつ。したがって、この実験を、とかくお話授業になりやすい高校の原子物理に取り入れることは、必要不可欠のことと思われる。

概要で述べる二種の実験装置について試作をくりかえし、教師演示用、あるいは生徒実験用として、高校で取り扱える程度の装置とすることに成功した。

概 要

1. 水銀封入管の開発

この実験は、フランク・ヘルツがやったように、水銀封入の電子管が用いられるが、わが国では、この実験専用の電子管は製造されていなかった。既製の水銀封入管（例えば、サイラトロン）を利用する方法もあるが、電極の構造が不適当などのため、実験が極めて不安定であり、教育用としては不向きである。

そこで、いろいろな構造の電子管を設計、試作してその性能をしらべ、失敗を重ねた後、実験に適した電極の構造、管の温度等を明らかにし、また、陰極の最適温度の決定法を見出した。この間に、回路の新しい接続法も発見した。

2. ネオン封入管の開発

水銀封入管では、電子管を 150°C 前後の高温にしなければならない。このため、加熱装置を必要とし、加熱や温度調節のために、かなり長時間を要するばかりでなく、温度変動によって、実験上、種々のトラブルを生じる。これらの難点は、水銀の代りにガスを封入すれば除去できると考えた。

この考えに従ってネオン封入管を試作し、実験に適した管の構造、ガスの圧力等を決定すること

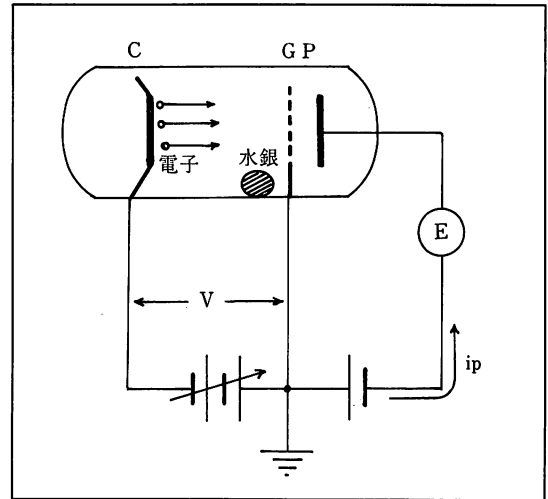


図1. フランク・ヘルツの実験

に成功し、所期の目的を達した。

フランク・ヘルツの実験は、約50年前、J・フランクとG・ヘルツによって初めて行なわれた。

実験には、図1のような電極をもち、水銀を封入した電子管を用いた。陰極Cと、グリッドGの間に電圧Vをかけて、Cから出た熱電子を加速する。この時、Gの網目を通りぬけてプレートPに達する電子の量は、プレート電流として検流計Eで測定できるようにしてある。電子は、もし運動エネルギーが小さければGに引きつけられてしまうが、運動エネルギーが大きくなるに従ってGの網目を通りぬける率が増し、プレート電流が増加するはずである。

さて、この装置で、加速電圧Vを0から徐々に上げると、初めは予想通りプレート電流 i_p は増加するのであるが、やがて4.9Vあたりで極大となり、その後急激な減少がおこる。さらにVを上げると、 i_p は再び増加し、9.8Vあたりで再び極大になった後急減する。(図2)

この現象は、水銀原子のもつエネルギーが不連

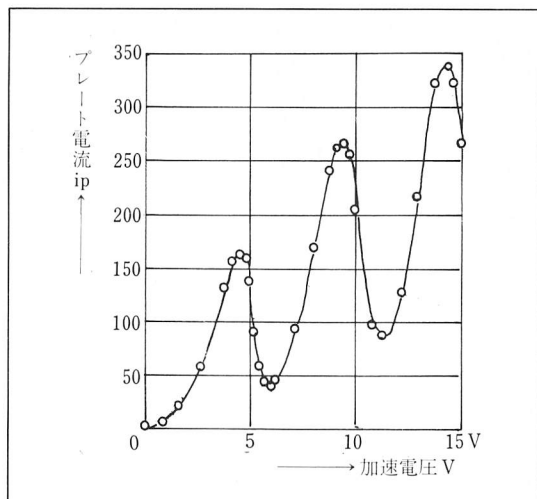


図2. フランク・ヘルツの得たグラフ

続なため、 4.9eV 未満の運動エネルギーを持つ電子は、水銀原子と単なる弾性衝突をくりかえすのみで、ほとんどエネルギーを失わないが、 4.9eV の電子は非弾性衝突をおこして、一挙に全運動エネルギーを水銀原子に与える、と考えて説明されるのである。 4.9eV は、水銀原子を、基底状態から最低の励起状態にするのに要するエネルギーに等しい。

加速電圧 V が、 4.9V よりさらに大きくなると、電子は加速される途中で 4.9eV の運動エネルギーを持ち、一たん非弾性衝突によって全エネルギーを失うが、残る区間で再び加速されるから、 i_p も再び増加する。そして、運動エネルギーが再度 4.9eV になった時に、また非弾性衝突をおこす。このようにして、 i_p の極大が、 4.9eV 間隔でくりかえし現われるのである。

教具の製作方法

1. 水銀封入管の製法

図3は電極の構造を示す。Cは傍熱型陰極であ

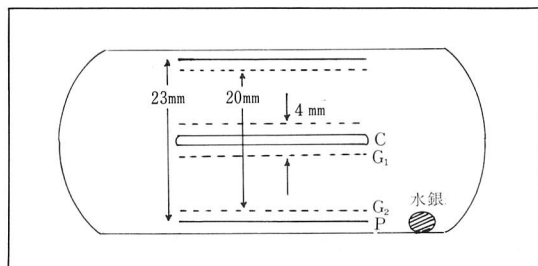


図3. 水銀封入管の構造

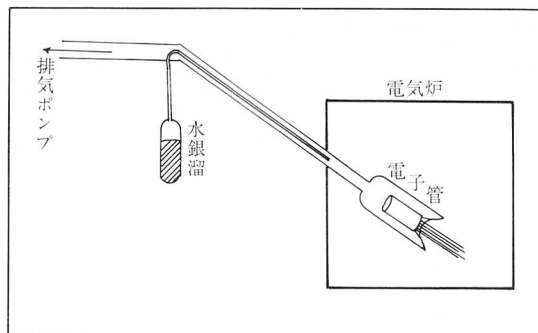


図4. 水銀封入管の排気

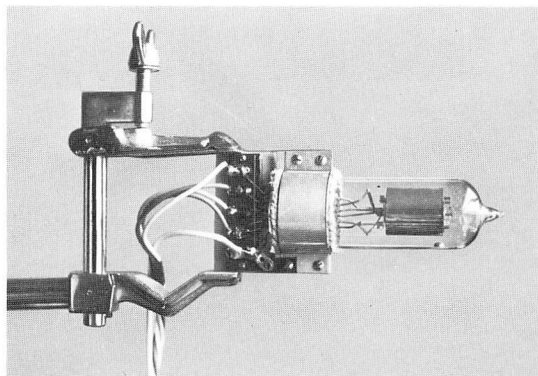


写真1. 水銀封入四極管
右の方に水銀が球状になって見える。

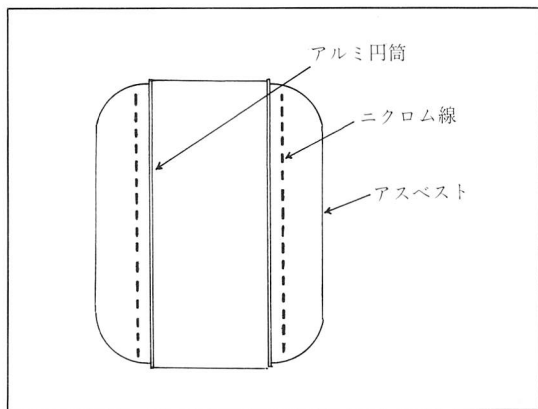


図5. 加熱装置
上、下の蓋にはアスベスト板を使う。

り、グリッド G_1 、 G_2 、プレート P は円筒状である。電子管の形をつくった後、図4のように電気炉に入れ、排気をずっと続けながら、炉の温度を 350°C まで上げ、 10^{-6}mmHg 程度になったら室温にもどし、陰極を活性化する。活性化の際、陰極からガスが発生するので、さらに充分排気した後、突沸を利用して水銀を注入し、電子管を封ずる。(写真1)

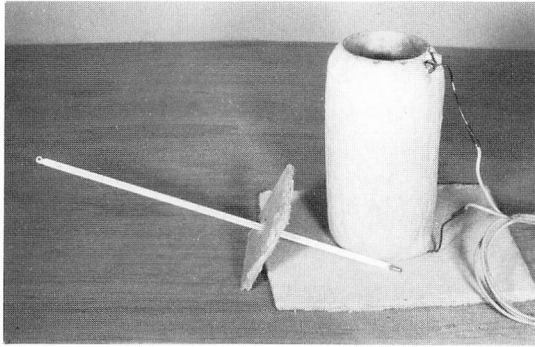


写真 2. 加熱装置
電子管をこの中に立て、上蓋には温度計をさす。

2. 加熱装置の製法

アルミ板で、電子管が充分はいる大きさの円筒を作る。別に、板状アスベストに水を加えて粘土状にねり、図 5 のように円筒に塗りつけ、その上にニクロム線を巻く。さらにアスベストを塗りつけて乾燥するのである。上下の蓋は、アスベスト板を適当な大きさに切って用いる。(写真 2) 加熱

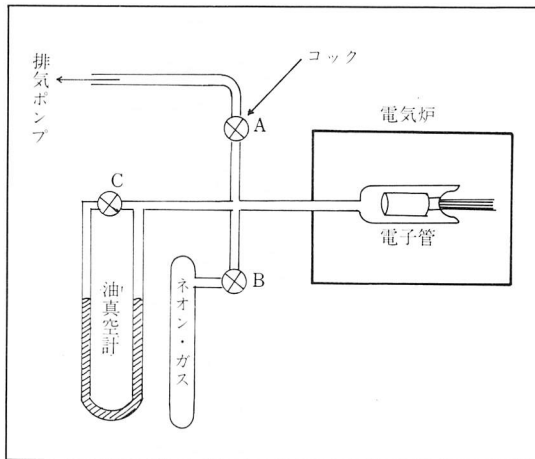


図 6. ネオン封入管の製法

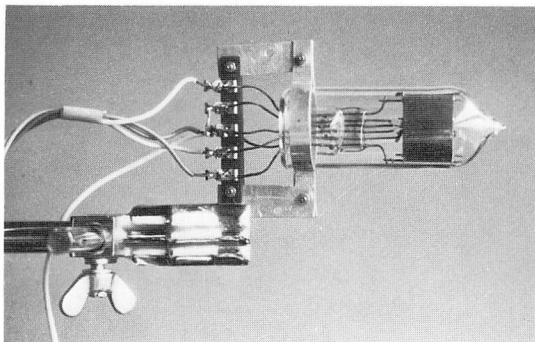


写真 3. ネオン封入四極管

電流は、内部が 150°C 前後になるように変圧器で加減する。

3. ネオン封入管の製法

電極等の構造は水銀管と同じでよい。図 6 は排気時における配管、図中の⊗はコックを示す。はじめ、コック A、C を開いて排気を続けながら、炉の温度を 250°C に上げ、 10^{-6}mmHg 程度とした後、室温に下げる。陰極を活性化し、なお充分排気した後、A、C を閉じ、B を少し開いてネオン・ガスを入れ、電子管を封ずる。(写真 2) ネオンの最

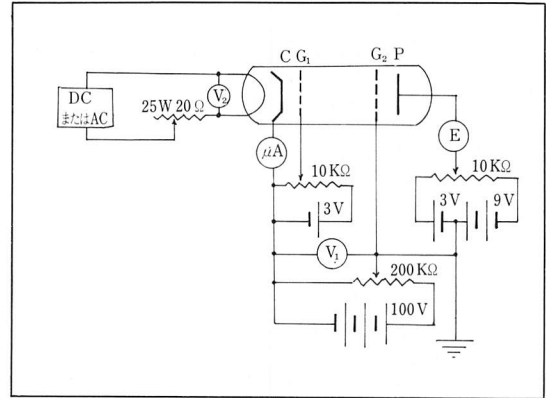


図 7. 電源

適の圧力は管の構造によって差があるが、 20mmHg 程度でよい。

4. 電源と測定器

電源は図 7 の通りで、水銀管、ネオン管共用である。 V_1 は加速電圧用電圧計、 E はプレート電流用 (直流増幅器付) 電流計、 μA は陰極電流測定用電流計である。

プレート電流は極めて微弱なので、図の P ~ E

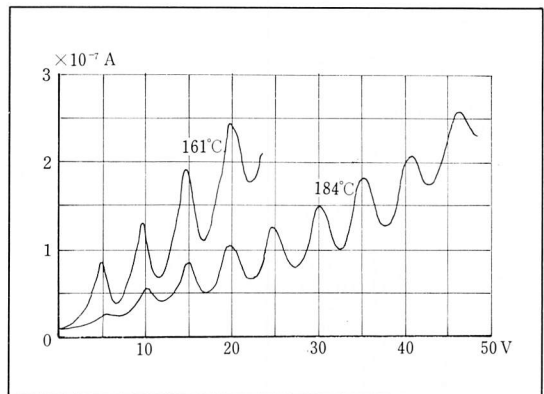


図 8. 水銀管のデータ
温度だけを違えた場合

間の絶縁には特に留意する必要がある。

実験方法

基本的には、真空管の特性曲線を調べる実験と差はないのであるが、特に留意すべき点は次の通りである。

1. 電気炉の温度

水銀管では、炉内の温度は 150°C 前後がよい。比較的低温の時は、プレート電流が大きくて測定しやすいが、加速電圧を高くすると放電しやすい欠点がある。高温にすると放電しにくく、周期性をよく出せるが、プレート電流が減ずる。図8は、そのような関係を示すデータの一例である。

2. 陰極温度の選定

陰極温度の選定を誤ると望む結果は全く得られない。適正な陰極温度は、次のようにするとよいことがわかった。

図7で、 G_1 の電位をCより1V程度高くし、加速電圧Vを0Vにした時、 (μA) の示す陰極電流が1 μA 程度となり、Vを必要な最大値にした時、 (μA)

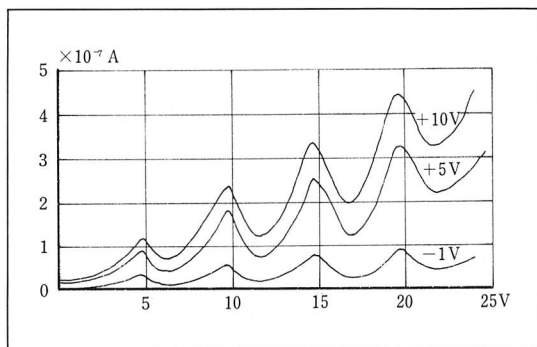


図9. 水銀管のデータ
 G_2 に対する P の電位だけ変えた場合

が5 μA 程度を示すように、フィラメント電圧をえらばよい。

3. プレートの電位

プレートPの電位は、文献によると、グリッド G_2 より0.5~1V低くしなければならないとしているが、実験の結果、水銀管では同電位か、Pを高くした方が、かえってプレート電流も増し、ずっとよいことを発見した。(図9) ただし、ネオン管では、Pを低くした方がよいようである。

学習指導方法

1. 教師実験

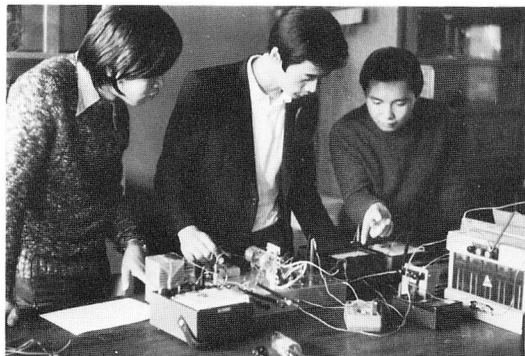


写真4. クラブ活動での生徒実験

教師が実験して生徒に見せる時は、器具の大きさから、1回に10人ぐらいつつになるが、どの方向から見てもわかるので、教師を取り囲むようにさせるとよい。

2. 生徒実験

クラブ活動の中で実験させるのに適している。(写真4) 授業の中でも、真空管の実験等の経験が生徒にあれば、グループ実験が可能であろう。いずれにしても、慎重な指導が肝要である。

効果

フランク・ヘルツが用いたような三極管やサイラトロンを利用する方法などにくらべて、次のような効果が得られた。

1. 四極管の性能

四極管にしたことによって、極めて安定した性

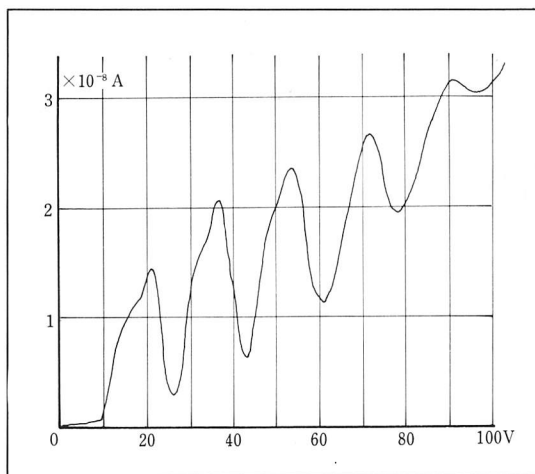


図10. ネオン管のデータ
ネオンの最小励起電圧は約16.5Vなので
グラフの極大はほぼ16.5V間隔となる。

能が得られた。

2. ネオン管の性能

- (1) 加熱装置が不要になり、加熱に要する時間が全く不要になった。
- (2) 温度変動によるトラブルが皆無になり、安定した実験を可能にした。
- (3) 管が露出しているので、実験中も管を見ることが出来る。図10は、そのデータである。

その他補遺事項

この研究は昭和42年度東京都教員研究生として、東京教育大学理学部小島研究室で行ない、その後引続き改良を加えたものである。

初めは、具体的な実験の手掛りを、何も入手できず、電極の概念図と原理の説明だけが頼りであった。しかし、「盲、蛇におじず」で、概念図に似せて、円板状電極を平行にとりつけた試作管（写真5）ができた時は、これで電源をつなげば実験は終りだ、と思っていた。肝心なことは、何一つ知らなかったと言ってよい。

〔注〕写真6～10は53頁に掲載

試行錯誤をくりかえし、やがて、直熱三極管による実験に成功して、多くのデータを得た。さて、プレートグリッドに対して、 $-0.5V$ にしておくと、加速電圧が $4.9V$ を越えたところで、電子はプレートに達しなくなるはずなのに、実際はプレート電流はいつもゆるやかに減少するのであった。直熱管では、陰極内に電位差を生じ、電子のエネルギーが不揃いになるのでこんな事が起ると推論した。

この推論を裏付けるべく、いろいろな構造の電子管を作ったが、どのように改良しても、プレート電流は予想されるような急減を起さなかった。この矛盾を追求する過程で、「プレートの電位をグ

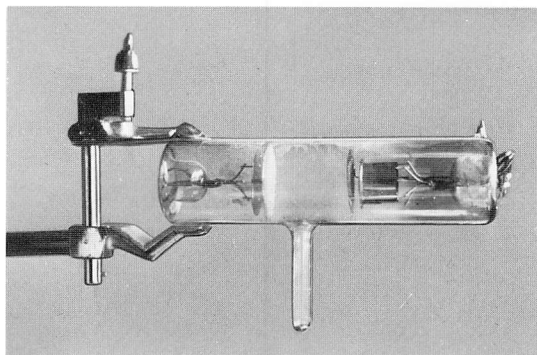


写真5. 試作第一号水銀管
極は円板状、下部の突起は水銀蒸気圧を下げるのに用いた冷却部、むろん不要。

リッドより低くする必要はないこと、プレートに向う電子を阻止する働きは、プレートのマイナス電位だけであるとする理論は不適當であること」を発見したのである。（フランク・ヘルツの実験とその解釈 日本物理教育学会誌 Vol. 16. No. 1. 1968参照）

それにしても、あの小さい電子管の排気に丸2日ずつを要したので、作るたびにポンプ室に泊り込み、徹夜で排気ポンプを運転したのは、今になれば楽しい思い出である。

この研究については、小島研究室の小島先生、荻原先生、都立教育研究所物理研究室の栗田先生、尾科先生、その他多くの方々のご指導、ご助力をいただき、電子管は、教育大硝子工作室の岡本先生に作っていただいた。ここに厚く感謝する次第である。

付 記

ネオン封入管ならびに関係器具の入手先

有限会社 三協製作所

東京都豊島区高松3-9 電話03-956-3979



写真6. 実験用電子管
左からネオン管、水銀管、試作管



写真7. 実験装置
ネオン管をとりつけたところ

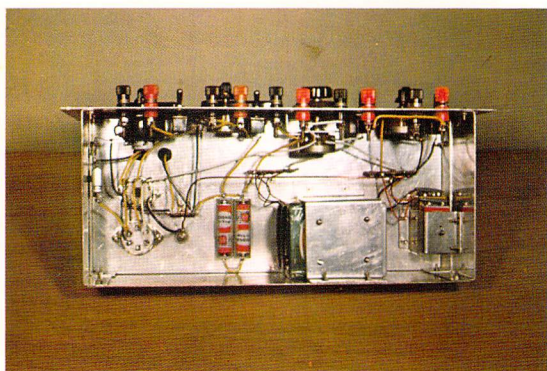


写真9. 装置の裏側

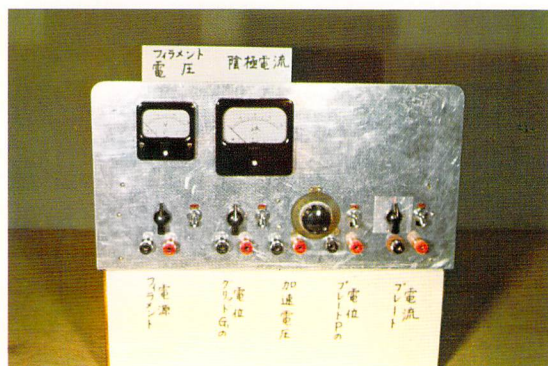


写真8. 装置前面パネル

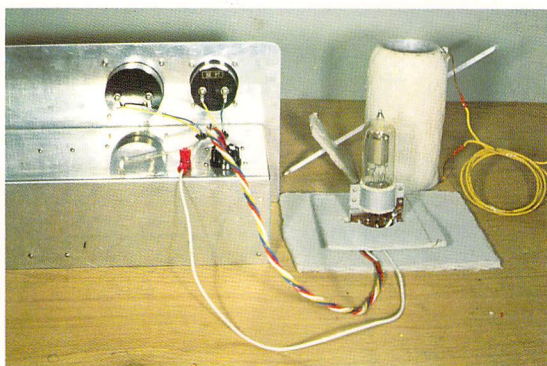


写真10. 水銀管のとりつけ方
プレート回路は独立線（白ビニル線）にして
絶縁をよくした。
装置のうしろ側から見たところ。