

11 原子の離散的励起準位

フランク (Franck) ・ヘルツ (Hertz) の実験は、原子のとりうるエネルギーの値が離散的であるという Bohr の量子論を実験的に検証した著名な実験である。1913 年当時、Bohr は原子の安定性と発光スペクトルに関して量子論に基づく離散的なエネルギー状態を提唱したが、Franck と Hertz は光の場合だけに限らず、加速された電子と原子とのエネルギー交換に際しても量子論的な取扱いが必要であることを実験により示した。離散的エネルギーを持つ原子の電子状態はエネルギー準位と呼ばれる。通常原子は最低のエネルギー状態である基底状態にあるが、より高いエネルギー状態である励起状態への遷移に際し、離散的なエネルギー差 ΔE だけの励起エネルギーが必要となる。励起状態は数多く存在するが、この実験では最低の励起状態への遷移に着目する。

1 理論

1.1 原子の励起状態

原子は原子核と電子とからできている。原子核の周りの電子は、量子力学による制限があるために勝手な位置やエネルギーをとることができず、ある決まった軌道 (orbit) を運動している。それぞれの軌道にある電子のエネルギーはクーロンエネルギーと運動エネルギーの和となり、飛び飛びの値をとる。各軌道にはエネルギーや角運動量に関連する量子数 (quantum number) によって名前がつけられていて、エネルギーの低いものから $1s$ (2), $2s$ (2), $2p$ (6), $3s$ (2), $3p$ (6), $3d$ (8), $4s$ (2) ... のようになっている。() の中の数字は、その軌道に入ることのできる電子の個数を示している。

さらに、エネルギーの接近した軌道をいくつかまとめて殻 (shell) と呼ぶことがある。例えば K 殻 ($1s$)、 L 殻 ($2s, 2p$)、 M 殻 ($3s, 3p, 3d$) などがある。Ne 原子の場合を考えよう (図 1.1)。Ne の価数は 10 だから、エネルギーの低い軌道から順に電子を詰めていくと、 $2p$ 軌道まで、すなわち L 殻までが電子で詰まることになる。この状態は電子のエネルギーの総和が最低の状態であり、基底状態 (ground state) と呼ばれる。

今、このような原子が外部とエネルギーの受け渡しをする場合を考える。原子のエネルギーは (原子核内部の陽子や中性子のエネルギー + 各電子のエネルギー) であるが、原子核内部のエネルギーは電子のエネルギーに比べてはるかに大きいので、通常の化学・物理反応を支配するのは原子内の電子の振る舞いである。

Ne 原子の場合なら、基底状態より一段階エネルギーを高くするには、 $2p$ 軌道の電子が一つ $3s$ 軌道に移動すればよい。このように、基底状態よりエネルギーの高い原子の状態を励起状態 (excited state) と呼ぶ。今のように基底状態とのエネルギー差が一番小さいものは、特に「第一励起状態」とか「最低励起状態」などと呼ばれる。基底状態と励起状態とのエネルギー差は励起エネルギー

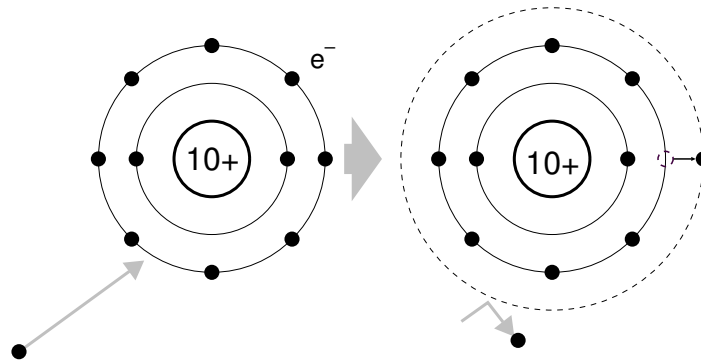


図 11.1: Ne 原子の基底状態と励起状態

ギーと呼ばれる。上の場合は $2p$ 軌道と $3s$ 軌道の電子のエネルギー差であるとみなしてよい。各軌道のエネルギーは先に述べたようにある飛び飛びの値に決まっているから、このエネルギー差も原子によって決まる定数となる。

ここで重要なのは「原子が励起するためには、励起エネルギーを一度に受け取る必要がある」ということである。例えば、高速の電子が原子に衝突することを考える。衝突する電子の運動エネルギーが励起エネルギーよりも小さい場合には、その電子は原子を励起することができないので、そのまま跳ね返され、(質量がはるかに違うから) 衝突前と同じの運動エネルギーを持ち続けることになる。逆に電子の運動エネルギーが励起エネルギーよりも大きければ、電子は自分のエネルギーを原子に受け渡すことができ、その結果衝突後の自分自身のエネルギーは小さくなる。

1.2 フランク・ヘルツ管

実験に用いる フランク・ヘルツ (Franck · Hertz) 管とは、図 11.2 のようにカソード (陰極) (K)、グリッド (G)、プレート (陽極) (P) から構成される 3 極真空管で、この中には少量の気体が充填されている。カソード K はヒーターによって加熱できるようになっており、熱電子放出現象によってここから電子を取り出す。グリッド G は金属の網でできていて、ここには K よりも高い電位にする。プレート P は金属板の電極であり、ここは G よりも低い、K よりも高い電位になるようにする。電子のポテンシャルエネルギーは電位をマイナスしたものであるから、結局電極間での電子のポテンシャル ϕ は、図の下部に示したようになる。

電子の動きを考えよう。K から放出された電子は、G に向かって加速されていき、その大部分は網であるグリッドを通過する。その後電子は P に向かって減速されるが、グリッドを通過した時点で十分大きな運動エネルギーを持っているために、P に到達してプレート電流 I_P となる。

フランクヘルツ管では、この電子の通過する領域に低圧の気体が封入されており、電子は陽極に到達するまでに気体原子と衝突する。その衝突の際に、電

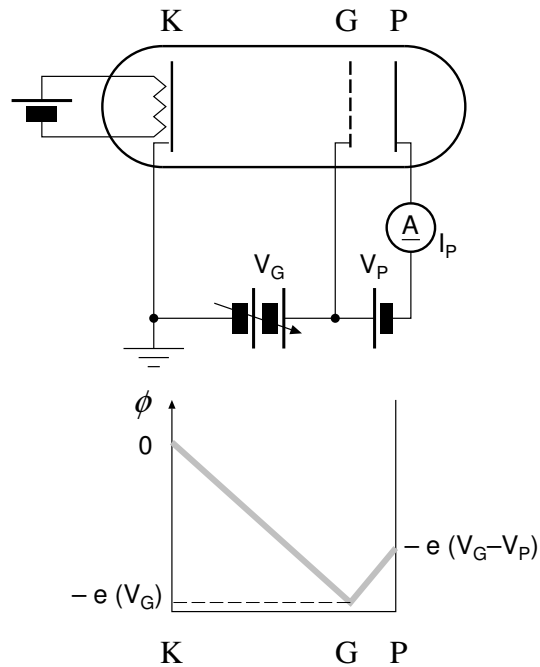


図 11.2: フランク・ヘルツ管

子の運動エネルギーが原子の最低励起エネルギー E_{ex1} よりも高い場合には、電子は原子を励起することが可能となる。そしてその結果、電子は原子の励起エネルギーに等しいエネルギーを失う。

いま V_G をだんだん増加させていくとどうなるかを考えよう。電子の電荷の絶対値を e とする。

- $eV_G < E_{ex1}$ の範囲では、電子は原子と衝突しても励起を起こさないの
で、 $V_G > V_P$ の関係が成立していれば電子はプレートに到達して電流 I_P
となる。
- $E_{ex1} < eV_G < E_{ex1} + eV_P$ となると電子は気体原子との衝突でエネルギー
を失うので、グリッドを通過する時の電子の運動エネルギーは $eV_G - E_{ex1}$
となる。今これがグリッドとプレート間のポテンシャルエネルギーの差
 eV_P よりも小さいから、電子はプレートに到達できなくなり、その分プ
レート電流 I_P が減少する。
- $E_{ex1} + eV_P < eV_G$ となるようにさらに V_G を増加させると、今度は
 $eV_G - E_{ex1} > eV_P$ となる。すると励起分のエネルギーを失った電子は再
びプレートに到達できるようになり、 I_P は復活する。
- $2E_{ex1} < eV_G$ になると、電子は原子を 2 回励起し、その分エネルギーを
失うため、再びプレートへの到達ができなくなって I_P が減少する。し
かしさらに V_G が上昇すればまた I_P は復活する。

以上をまとめると、結局プレート電流 I_P が減少する条件は

$$nE_{ex1} < eV_G < nE_{ex1} + eV_P \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (11.1)$$

となる。したがって、プレート電流 I_P の V_G に対するグラフをとれば、周期的にディップ (くぼみ) が現れる。このディップの間隔を測定すれば E_{ex1} を知ることができる。

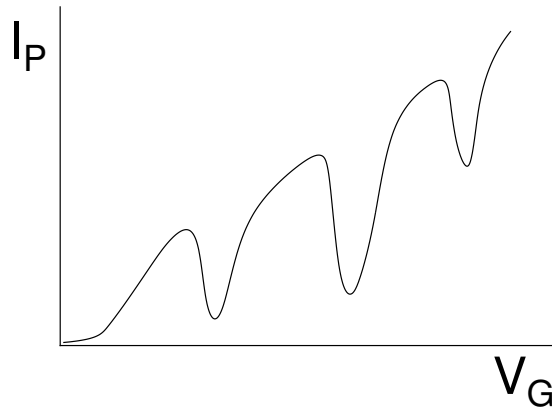


図 11.3: グリッド電圧 - 陽極電流特性の一例

なお以上の説明では、カソードから電子が初速度 0 で放出され、等しく V_G によって加速されて、エネルギーが揃った電子流が得られているように記述したが、実際には電子の初速度は分布をもっているため、グラフの山や谷はなだらかなものとなる。

この実験では、電子のエネルギーの単位として電子ボルト [eV] を用いるのが都合が良い。電子ボルトは「電子が 1 V の電位差から受け取るエネルギー」と定義されるので、カソード/グリッド間の電位差を V_G [V] とした場合、電子が受け取るエネルギーをそのまま V_G [eV] と表せるからである。

Q. 図 11.3 中で、 E_{ex}/e や V_P に対応する部分を示してみよ。

Q. 1 [eV] は何 [J] か？ また、このエネルギーを持つ光子の波長は何 [nm] であるか。

2 実験

2.1 実験装置

フランク・ヘルツ管 (Ar 管、 Ne 管、 He 管、 Hg 管 : 島津製)
DC 電源 × 4 (陽極用、第 1 グリッド用、第 2 グリッド用、カソード加熱用)
フランク・ヘルツ管差し込み用ソケットボックス、陽極電流測定用微小電流計

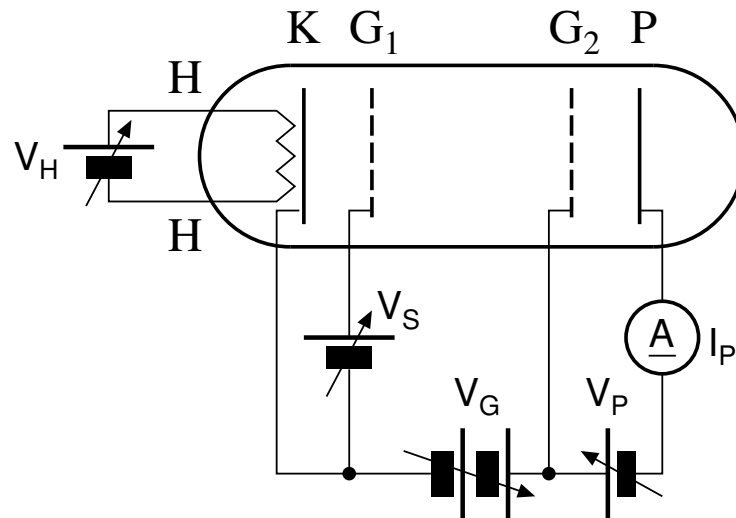


図 11.4: 4 極型フランク・ヘルツ管配線図

フランク・ヘルツの実験を行なう方法としては、I. 市販の気体封入型フランク・ヘルツ管を用いる方法 と II. 電離真空計用管球と真空排気装置とを用いて、実験者が種々のガスを充填して行なう方法 とがある。後者の場合はガスの種類や圧力を自分で選択することができるが、装置がやや大がかりとなり、実験に時間もかかるので、ここでは市販の封じ切り型のフランク・ヘルツ管を用いる。

前述の説明ではフランク・ヘルツ管は3極構造であると述べたが、市販のフランク・ヘルツ管は加速用グリッド (G_2) の他に、空間電荷制御用グリッドと呼ばれる付加的なグリッド (G_1) が別に設けられている。これはカソードからの電子流を制御するためのもので、フランク・ヘルツ管の動作に本質的に関係するものではない。実際の管では各電極が円筒対称的に配置されている。実験前に図 11.4 に表した各電極との対応をつけてみると良い。一番外側にある金属円筒がプレートである。

フランク・ヘルツ管として、アルゴンを封入したもの、ネオンを封入したもの、ヘリウムを封入したものおよび水銀蒸気を封入したものが用意されている。本実験ではまずネオン管、アルゴン管について測定を行った後、余裕があればヘリウム管、水銀管についても実験を行う。ただし水銀を封入したものについては、加熱して水銀の蒸気圧を上げた状態で測定を行なう必要があるため、実験には注意を要する。

- Q. 実際のフランク・ヘルツ管で、電極が円筒対称的に配置されているのはなぜだろう？ 平行に平板な電極を配置する場合に対するメリットはなんだろうか（ヒント：励起を起こさない衝突でも、電子の方向は変化する）。

2.2 実験手順

注意 手順 6 において、フィラメントから放出される電流 (V_H とともに増加する) と V_G へ印加する電圧とが大きくなり過ぎると、管内に放電が起こって I_P が通常の数 100 倍以上の値となる。この状態が続くと管が破壊されるので、放電が起きた場合にはただちに V_G を下げて放電を停止する。このとき、もし充分広い範囲の V_G にわたった測定が行なえていない場合は、 V_H を下げて測定をやりなおす必要がある。

1. まずネオン封入のフランク・ヘルツ管について、図 11.4 のような配線をする。

管を差し込み用ソケットボックスにノッチをあわせて差し込むと、ボックスの各端子が内部の電極と正しく接続するようになっている。

配線を行うときは、ボックスの各端子から電源へケーブルを配線するように考えるとよい(ケーブルが二本出る端子があることに注意)。

微小電流計の接続には、赤、青、黒の三本のクリップが出ている専用ケーブルを用いる。実際の配線には赤と黒のクリップを用いる。片方をボックスの P 端子に、もう一方を V_P のマイナス側に接続することになる。

2. 各電源を ON にする前に、担当教官の確認を得ること。配線を間違えると致命的な感電を起こす可能性もある。
3. カソード傍熱用の電源 V_H に電圧をゆっくりと印加し、その時の電圧 / 電流を指定の値になるように調節する(机上に配布してある)。この時過大な電圧がかかると管球のフィラメントを切断してしまうので、電源の設定には最大限の注意を払う。
4. カソードと空間電荷制御用グリッド G_1 の間に 2~3 V 程度の電圧を印加しておく (V_S)。
5. 加速用グリッド G_2 と陽極の間に 1~5 V 程度の電圧を印加する (V_P)。
6. 加速用グリッド (G_2) への印加電圧 (V_G) を変えながら、陽極電流 I_P の値を微小電流計により測定する。この実験における I_P の値は、~ 0.1 [μA] 程度である。

初めは V_G を 3~5 V おきに変えておおよその傾向をつかみ、山、谷のピーク付近を中心にだんだん細かく (0.5 ~ 1 V) 見ていくと良い。

I_P が小さく、山や谷の位置がはっきり見えない場合には、傍熱用フィラメントに加える電力をわずかに増やす。

このとき管内に発光が見られたら、発光が始まった時の電圧も記録しておく。電圧の上限は、第 3 の極大、極小がでるまでを目安とする。

7. 次に V_P の設定値を変えてもう一度同様の実験を行なう。

8. 同様の実験をアルゴン封入のフランク・ヘルツ管について行なう。時間に余裕があれば、ヘリウム封入のフランク・ヘルツ管についても行なう。
9. さらに実験者が望む場合には、水銀封入のフランク・ヘルツ管について実験を行っても良い。この場合は、担当教官より別途指示を受けること。

3 解析

各フランク・ヘルツ管の場合について、陽極電圧 V_P をパラメータとし、第2グリッド電圧 V_G に対する陽極電流 I_P をグラフとして表示し、極大値間、極小値間の幅から励起エネルギーの値を算出する。

なお、陰極およびグリッド材料の仕事関数の違いによる接触電位差 W のために、最初の谷の位置はこの分だけずれている可能性があるため、励起エネルギーの算出には山と山、谷と谷との間隔を用いること。

- Q. 本実験において、励起エネルギーを決定する際に最も大きな誤差となるものは何であるか考えよ。また、より精度良い値を得るにはどうすればよいか、あるいはよかったかについて述べよ。
- Q. V_P の違いによってグラフの形に変化がであることを確認し、その理由を考察せよ。また、ガス相互のグラフの間に、励起エネルギーの違い以外に理由があると思われるような差異があれば、その特徴と理由について考察してみよ。
- Q. ガスの種類 (原子量) と最低励起エネルギーとの間には、何らかの傾向が見られるだろうか? もし理由が考えられるようであれば述べよ。

参考文献

- [1] 渡辺正雄、笠 耐:「プロジェクト物理5 原子のモデル」 コロナ社.
- [2] 大石二郎、大場勇治郎、兵頭申一 監修:「工学基礎物理実験」 東大出版会.