

# 基礎電子工学Ⅱ

伊藤 糾 次 著

# 基礎電子工学Ⅱ

早稲田大学教授

工学博士

伊藤 紉次 著

昭晃堂  
株式  
会社

著者紹介

伊藤 糾 次

昭和 20 年 早稲田大学理工学部  
電気通信学科卒

昭和 35 年 工学博士の学位を授与さる  
現 在 早稲田大学教授

昭和 43 年 4 月 10 日 印刷  
昭和 43 年 4 月 20 日 発行  
昭和 44 年 6 月 25 日 2 版 (補遺)  
昭和 46 年 4 月 15 日 3 版 (第 2 回修正)  
昭和 47 年 6 月 20 日 4 版 (第 3 回修正)  
昭和 48 年 6 月 15 日 5 版  
昭和 49 年 6 月 10 日 6 版  
昭和 50 年 4 月 10 日 7 版

基礎電子工学 [I]

◎ 著 者 伊 藤 糾 次

発 行 者 阿 井 国 蔵  
東京都新宿区矢来町 48

印 刷 所 新日本印刷株式会社  
東京都新宿区市ヶ谷本村町 27

発 行 所 株式会社 昭 晃 堂

郵便番号 162 東京都新宿区矢来町 48  
振替口座東京 199320 番  
3449 番  
電話 東京 (269) 1374 番  
8495 番

定価 2,300 円

Printed in Japan



日本書籍出版協会会員  
自然科学書協会会員  
工学書協会会員

三和製本

3055-220007-3080

## は し が き

トランジスタが実用化されてからすでに 20 年、三極管の出現以来、実に 50 年の年月が流れ、これらの、いわゆる電子装置を中心として発達してきたエレクトロニクスは、世人の日常生活の中に、深く根をおろしている。

電子装置に应用されている、基礎的な諸現象ならびに“物の考え方”は、関連技術者でなくとも必要な知識の一つであろう。

本書は、学部で行なった電子工学の講義に、多少の修正をほどこすと共に、説明を補足し、電子技術者を志す人々や他の工業部門の技術者の基礎的知識として役立つように書きあらためたものである。

本来、トランジスタで代表される半導体装置に取り入れられている固体電子工学の知識は、“真空中の電子運動”と“気体中の電子運動”に関連して観測される諸現象の中に、大部分含まれていると同時に、現在でも、真空管および放電管はエレクトロニクスの分野で大きな役割を果たしている。このような理由から、本書は、[I]・[II] 巻に分け、[I] 巻においては、真空中の電子運動、真空中の電気伝導、これらの応用装置を前半において述べ、気体中の電子運動、気体中の電気伝導、これらの応用装置を後半において述べている。

本書を執筆するに当たり、できるだけ自然に、しかも余り多くの参考書を用意しなくとも、内容を理解できるように心がけたつもりであるが、充分にこのような特色を発揮できなかったかも知れない。また、このような考えが余り念頭にあったため、かえって、独りよがりになり落ち入ったところもあると思われる。読者諸兄の意見、叱正をえられれば幸である。

昭和 43 年 3 月

著 者

# 目 次

## 1. 電 子 と 光 子

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1.1 陰 極 線 .....               | 2  |
| 1.1.1 陰極線と電子 .....            | 2  |
| 1.1.2 電子の電荷と質量 .....          | 5  |
| 1.2 熱輻射とエネルギー量子 .....         | 7  |
| 1.2.1 キルヒホッフの定理 .....         | 8  |
| 1.2.2 ステファンの法則とウィーンの変位則 ..... | 9  |
| 1.2.3 レイリー-ジーンズの輻射法則 .....    | 9  |
| 1.2.4 プランクの輻射法則 .....         | 11 |
| 1.3 光電効果とコンプトン効果 .....        | 13 |
| 1.4 ボーアの水素原子理論 .....          | 17 |
| 1.4.1 原子の構造 .....             | 17 |
| 1.4.2 水素原子スペクトルとボーアの理論 .....  | 20 |
| 1.5 励起現象とイオン化現象 .....         | 25 |
| 1.5.1 励起電圧とイオン化電圧 .....       | 25 |
| 1.5.2 エネルギー準位 .....           | 28 |
| 1.6 副量子数とパウリの排他原理 .....       | 31 |
| 1.6.1 副量子数 .....              | 31 |
| 1.6.2 パウリの排他原理 .....          | 33 |
| 1.7 電子および光の二重性 .....          | 36 |
| 1.8 電子の運動と波動力学 .....          | 40 |
| 1.8.1 波動方程式 .....             | 40 |
| 1.8.2 不確定性原理 .....            | 41 |

## 2. 電 子 の 放 射

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 2.1 固体の中での電子のふるまい ..... | 46 |
|-------------------------|----|

|       |                      |     |
|-------|----------------------|-----|
| 2.1.1 | 金属内の電子 (1).....      | 47  |
| 2.1.2 | シュレディンガーの波動方程式 ..... | 48  |
| 2.1.3 | 金属内の電子 (2).....      | 50  |
| 2.1.4 | フェルミ-ディラックの分布則.....  | 53  |
| 2.1.5 | 帯理論のあらまし .....       | 57  |
| 2.2   | 熱電子放出 .....          | 63  |
| 2.2.1 | 概 論 .....            | 63  |
| 2.2.2 | 金属の熱電子放出 .....       | 67  |
| 2.2.3 | 熱電子のエネルギー分布 .....    | 74  |
| 2.2.4 | ショットキー効果 .....       | 79  |
| 2.2.5 | 熱陰極の種類 .....         | 82  |
| 2.2.6 | 酸化物陰極 .....          | 88  |
| 2.2.7 | 電界放射 .....           | 94  |
| 2.3   | 光電子放出 .....          | 96  |
| 2.3.1 | 光電効果の概要 .....        | 96  |
| 2.3.2 | 表面光電効果と体積光電効果.....   | 100 |
| 2.3.3 | 選択光電効果.....          | 102 |
| 2.3.4 | ファウラーの式.....         | 105 |
| 2.3.5 | 高感度光電面.....          | 112 |
| 2.4   | 電子による二次電子放出.....     | 114 |
| 2.4.1 | 二次電子のエネルギー分布.....    | 114 |
| 2.4.2 | 二次電子利得.....          | 115 |
| 2.4.3 | 二次電子放出の理論.....       | 118 |
| 2.4.4 | 高感度二次電子放出面.....      | 123 |
| 2.5   | イオン衝撃による二次電子放出.....  | 124 |
| 2.5.1 | オージェ型中和.....         | 124 |
| 2.5.2 | オージェ型反励起.....        | 127 |
| 2.5.3 | 運動エネルギーの効果.....      | 127 |

### 3. 真 空 中 の 電 子 運 動

|     |               |     |
|-----|---------------|-----|
| 3.1 | 電界中の電子運動..... | 131 |
|-----|---------------|-----|

## 目 次

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 3.1.1 均一電界中の電子運動         | 132 |
| 3.1.2 電子の静電偏向            | 133 |
| 3.1.3 二次元的電界中の電子運動       | 136 |
| 3.2 磁界中の電子運動             | 139 |
| 3.2.1 均一磁界中の電子運動         | 139 |
| 3.2.2 磁気偏向               | 141 |
| 3.2.3 磁気集束               | 142 |
| 3.3 電界・磁界中の電子運動          | 144 |
| 3.3.1 直交する電界と磁界中の電子運動    | 144 |
| 3.3.2 平行におかれた電界と磁界中の電子運動 | 146 |
| 3.4 電子レンズ                | 149 |
| 3.4.1 電子レンズに関する基礎方程式     | 149 |
| 3.4.2 静電レンズ              | 154 |
| 3.4.3 磁気レンズ              | 157 |

## 4. 真空中の電気伝導の応用

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 4.1 エネルギー方程式        | 161 |
| 4.1.1 定常または準定常電界の場合 | 165 |
| 4.1.2 周期的電界の場合      | 165 |
| 4.1.3 電子流からの輻射がある場合 | 166 |
| 4.2 二極真空管           | 166 |
| 4.2.1 二極管の特性曲線      | 166 |
| 4.2.2 空間電荷          | 167 |
| 4.3 空間電荷で制限された二極管電流 | 168 |
| 4.3.1 平板系二極管        | 171 |
| 4.3.2 円筒系二極管        | 172 |
| 4.3.3 仮想陰極          | 174 |
| 4.3.4 陽極損失          | 175 |
| 4.3.5 二極管の整流作用      | 176 |
| 4.4 三極真空管           | 177 |

# 目 次

|        |                |     |
|--------|----------------|-----|
| 4.4.1  | 三極管の特性         | 177 |
| 4.4.2  | 等価二極管          | 179 |
| 4.4.3  | 格子電流           | 180 |
| 4.4.4  | 三極管の三定数        | 184 |
| 4.5    | 四極真空管          | 186 |
| 4.5.1  | 四極管の構造         | 186 |
| 4.5.2  | 空間電荷格子四極管      | 187 |
| 4.5.3  | 電気計用真空管        | 189 |
| 4.5.4  | 遮蔽格子四極管        | 190 |
| 4.5.5  | 三極管の小振幅動作と等価回路 | 192 |
| 4.5.6  | 三極管の入力アドミタンス   | 196 |
| 4.5.7  | 四極管の静特性        | 198 |
| 4.6    | 五極真空管          | 199 |
| 4.7    | 臨界距離管およびビーム四極管 | 202 |
| 4.8    | 超高周波用電子管       | 205 |
| 4.8.1  | 周波数の増加に伴う諸問題   | 205 |
| 4.8.2  | 超高周波用三極管       | 210 |
| 4.9    | 速度変調管とクライストロン  | 212 |
| 4.9.1  | 集群作用           | 214 |
| 4.9.2  | 電子に与える間隙の影響    | 218 |
| 4.9.3  | 誘導出力           | 219 |
| 4.9.4  | 出力に含まれる高調波     | 220 |
| 4.9.5  | クライストロン        | 222 |
| 4.9.6  | 反射形クライストロン     | 224 |
| 4.10   | 進行波管           | 230 |
| 4.10.1 | 進行波管の構造        | 231 |
| 4.10.2 | 増幅の原理          | 232 |
| 4.11   | マグネトロン         | 241 |
| 4.11.1 | マグネトロンの構造      | 242 |
| 4.11.2 | 動作原理           | 243 |

## 5. 気体中の電子運動

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 5.1 マクスウェル-ボルツマン分布 .....           | 253 |
| 5.1.1 マクスウェル分布則の誘導 .....           | 253 |
| 5.1.2 マクスウェルの総速度分布曲線 .....         | 261 |
| 5.1.3 $x$ 方向のマクスウェル速度分布 .....      | 266 |
| 5.1.4 単位面積を通過するマクスウェル粒子 .....      | 269 |
| 5.1.5 平均自由行程 .....                 | 271 |
| 5.2 荷電粒子への気体運動論の応用 .....           | 273 |
| 5.2.1 乱電流 .....                    | 274 |
| 5.2.2 ドリフト電流 .....                 | 275 |
| 5.2.3 拡散電流 .....                   | 277 |
| 5.3 気体中の電気伝導 .....                 | 279 |
| 5.3.1 $\alpha$ 作用と第1タウンゼント係数 ..... | 279 |
| 5.3.2 ペニング効果 .....                 | 284 |
| 5.3.3 $\beta$ 作用と第2タウンゼント係数 .....  | 285 |
| 5.3.4 $\gamma$ 作用 .....            | 288 |
| 5.3.5 陰極における光電効果 .....             | 291 |
| 5.3.6 相似則とパッシュェンの法則 .....          | 293 |
| 5.3.7 放電破壊の時間遅れ .....              | 297 |
| 5.4 定常放電 .....                     | 298 |
| 5.4.1 グロー放電 .....                  | 301 |
| 5.4.2 アーク放電 .....                  | 315 |
| 5.4.3 正コロナ放電 .....                 | 321 |
| 5.5 プラズマ中の電子のエネルギー分布 .....         | 322 |
| 5.6 電子およびイオンの消失 .....              | 325 |
| 5.6.1 拡散による荷電粒子の消失 .....           | 325 |
| 5.6.2 再結合による荷電粒子の消失 .....          | 327 |

## 6. 気体中の電気伝導の応用

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 6.1 定電圧放電管          | 331 |
| 6.2 リレー放電管          | 334 |
| 6.3 計数放電管           | 337 |
| 6.4 切換放電管           | 340 |
| 6.4.1 高周波電界による電子運動  | 342 |
| 6.4.2 漏れ電力および残留損失   | 343 |
| 6.5 コロナ定電圧放電管       | 346 |
| 6.6 放射線計数管          | 347 |
| 6.6.1 G-M 計数管の特性    | 348 |
| 6.6.2 放電消去機構        | 349 |
| 6.7 熱陰極格子制御放電管      | 350 |
| 6.7.1 サイラトロン        | 351 |
| 6.7.2 イオン化時間と消イオン時間 | 352 |
| 6.7.3 陽イオン鞘         | 354 |
| 6.8 MHD 発電          | 355 |
| 6.8.1 発電器の形式とホール効果  | 355 |
| 6.8.2 プラズマの導電率      | 358 |
| 主な参考文献              | 360 |
| 索引                  | 361 |

# 1. 電子と光子

電子工学の立場から取り扱われるいろいろな現象は、電子がある媒質中を電界、磁界の作用を受けながら運動することによって起こると考えて解析されている。そして、ここに対象となる媒質には、真空、気体および固体がある。これらのうち、真空中の電子の運動は、比較的純粋な形で電界および磁界との相互作用を考えることによって現象を解析することができる。しかし、気体中の電子の運動は、気体分子の熱運動と、電離や再結合によるイオンの発生や消滅に基づく作用等が加わるため、そこにみられる現象も複雑なものとなる。この他、気体分子は、その電離や再結合の過程における励起状態で、光子 (photon) の吸収や放出を行なう。すなわち、気体中の電気伝導に関する諸特性は、終局的には電子の運動で規制されるが、光子の役割が主としてその特性を左右することもある。

また、固体の電気伝導を特徴づける電子の運動に対しては、その固体すなわち結晶を形成している原子のイオンに基づく電位の周期的分布によって決まる電子の密度と、電子のエネルギーによって決まる分布関数とが問題となる。固体内の電子は、真空中および気体中の電子の場合と異なり、粒子性よりはむしろその波動性に着目して、運動を解析した方が適切である。そのおもな理由は、真空中あるいは気体中での電子の運動に対して、作用させる電界はいわゆる電極によってつくられ、また磁界はたとえば電流を通した導体によってつくられるものである。したがって、これらのフィールドの広がりとは、運動電子のもつド・ブロイ波の波長に対して、けた違いに大きいため、電子は負の電荷とある質量を有する粒子と考えると、その運動を解析した方が適切となる。これとは反対に、固体内の原子のイオンによる電位の分布は、結晶の格子間隔に相当する広がりとなり、同時に周期性をもち、これらのフィールドの周期性は、運動電子のもつド・ブロイ波の波長にほぼ等しい値をもっている。このため、固体中の電子に対しては、その波動性が重要な意味をもつことになる。

以上は、均一な媒質中の電子の動きについて考えた場合であるが、この他に2種の媒質の界面、特に固体と真空、あるいは気体の界面、すなわち固体の表面、および固体と固体の界面、たとえば金属と半導体の接触、異種の半導体の接合等では、また特有の電子現

象が起こる。このような媒質の界面では、特に、電子と光子との関連が強く現われる。

電子工学の分野では、まず電子と光子の性質、ならびに相互の関連について知る必要がある。

## 1.1 陰極線（カソード・レイ）

### 1.1.1 陰極線と電子

陰極線（cathode ray）の発見は、1870 年頃にヒットルフ（J. W. Hittorf）により行なわれた低圧気体放電の研究中に発見された一つの現象が、その端緒となっている。すなわち、図 1-1 のように、ガラス管の両端に円板状の電極を封入し、管を真空ポンプに接続して管内の空気を排気しながら、電極間に数十 [kV] の高電圧を加える。管内には、圧力の低下とともに複雑な発光現象が見られるが、気圧が  $10^{-3}$  [Torr : mmHg] 程度となると、気体の発光は消失し、かわりにアノード（anode : 陽極）の付近のガラス壁に緑色の発光（蛍光 : fluorescence）が現われる。この発光の様子をよく見ると、アノードの後方には蛍光が現われず、電極の形のかげができる。これは、あたかもカソードから何らかの粒子がアノードへ向かって流れ

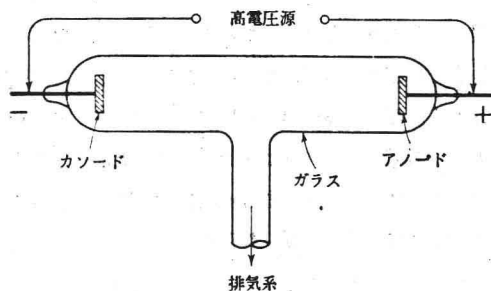


図 1-1 気体放電を観測するための放電管  
(ガイスラー管 : H. Geissler tube)

れとなって直進していくように考えられる現象であったため、想像されるこの粒子の流れをカソード・レイ（陰極線）と名付けた。陰極線は、はじめ“negative ray”とか“molecular stream”と呼ばれたことがあり、この正体が何であるかという疑問に対しては、ヒットルフらのドイツの学者は電磁波を予想していたが、クルックスらのイギリスの学者は陰極線が軽いものを動かすという力学的な効果や、電界や磁界中を通過すると線の通路が曲がるという、光にはない特殊な性質をみて、陰極線は帯電した粒子の流れであるという考えを固めていった。

陰極線の実在を確かめるため、図 1-2 のような装置もつくられた。すなわち、カソードとアノード間にマイカやアルミニウムで作った軽い羽根車を置き、さきのように管内の

圧力を  $10^{-8}$  [Torr] 程度の真空中に保って、両電極間に図のように高電圧を加えると、アノード周辺のガラス管壁上に蛍光が現われるとともに、羽根車は回転しはじめ、高電圧を加えている間は回転を続けることが示された。このような現象は、管内の気圧が  $10^{-4}$  [Torr] 程度となるまでみられ、残留気体の運動による現象とは考えられず、カソードからアノードに向かって流れる気体以外の、ある質量をもった粒子が想定された。

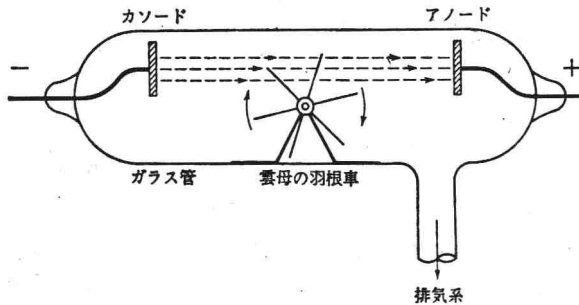
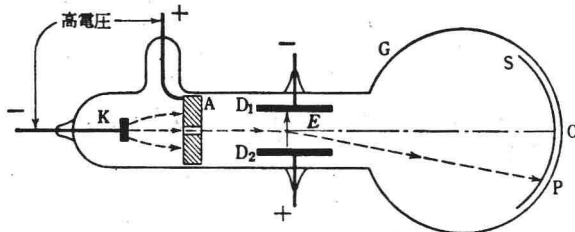


図 1-2 陰極線の力学的効果の実験



K : 陰極, A : 陽極, S : 蛍光板, G : ガラス容器

図 1-3 電極  $D_1$ - $D_2$  間の電界  $E$  による陰極線の偏向

やがて、20 世紀にはいろいろとする 1897 年、トムソン (J.J. Thomson) は図 1-3 のような装置をつくり、陰極線に関するより詳細な研究を行ない、陰極線が負の電荷とある大きさの質量をもつ粒子の流れであることを確認した。

すなわち、管内圧力を  $10^{-8} \sim 10^{-4}$  [Torr] に排気したガラス容器中に、カソードと対向して中央に小孔を設けたアノードを設け、両電極間に図のような直流高電圧を加えると、陰極線の一部はアノードの小孔を通して蛍光膜上に達し、O 点に輝点を生ずる。そこで、2 枚の平行平板状の電極を用いて、図のように、陰極線の進行方向に直角に電界を加えると、陰極線はその進路が変化する。このことは、蛍光膜上の輝点の位置が O 点から P 点に移動するので知ることができる。そして、この輝点の移動方向と電界の向きから、陰極線

# 1. 電子と光子

が負の電荷をもっていることを判定することができる。

さらに、トムソンは図 1.4 のように陰極線の進行方向に直角に磁界を作用させても、その進路が変化することを確かめ、その偏向の方向と磁界の向きから、電荷は負であるこ

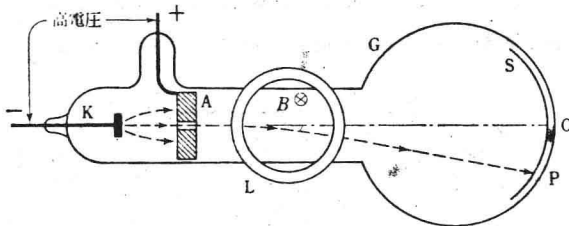


図 1.4 巻線 L のつくる磁界 B による陰極線の偏向

とを確認した。このようにして、陰極線は負の電荷とある大きさの質量とを有する粒子の流れから成っていることが確認され、この粒子を電子 (electron) と名付けた。

電子は、負の電荷とある大きさの質量をもっていることがわかったが、これらの値はどのくらいのものであるうか。いま、電子の電荷を  $e$ 、その質量を  $m$  で表わすものとすれば、 $e$  および  $m$  の値を個々別々に測定することはできなかったが、電子の比電荷 (specific charge:  $e/m$ ) は巧みな方法で測定された。これは、トムソンによって前記の二つの実験をうまく組み合わせることによってなしとげられた。

すなわち、電荷が  $v$  [m/s] なる速度で、電界・磁界中を運動すると、いわゆるローレンツ力 (Lorentz force) を受ける。この関係は、

$$F_e (\text{電気的力}) = eE \quad (1.1.1)$$

$$F_m (\text{磁氣的力}) = evB \quad (1.1.2)$$

で与えられる。そこで、電界  $E$  と磁界  $B$  を陰極線に対して、図 1.5 に示すように同時に作用させ、しかも、その値を陰極線が上へも下へも偏向されることがなく、図の点線のように蛍光板上の O 点に達するものとするば

$$F_e = F_m$$

なる関係が成立するはずであるから、式

(1.1.1) と式 (1.1.2) から、

$$v = \frac{E}{B}$$

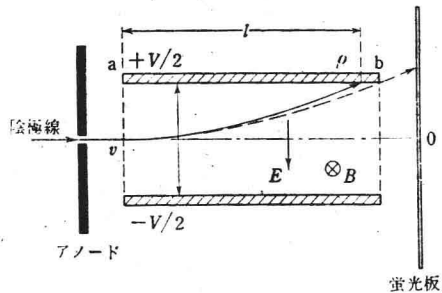


図 1.5 比電荷 ( $e/m$ ) 測定の原理図

$$(1.1.3)$$

が得られる。ただし、電界と磁界が作用している領域は、ともに図中の a から b の範囲にあるものとし、ともに均一に分布しているものとする。次に、電界  $E$  だけが加えられた場合には、陰極線は図中の実線で示すような偏向を受け、a 点から  $l$  [m] の距離で  $d/2$  の変位を生ずる。陰極線の速度を  $v$  [m/s]、偏向電極は間隔  $d$  [m] の平行平板より成るものとして、両極にはそれぞれ  $+V/2$  および  $-V/2$  [V] の電圧が加えられているとすれば、

$$d = \frac{e}{m} \left( \frac{l}{v} \right)^2 \cdot E \quad (1.1.4)$$

なる関係が近似的に成立する。そこで、式 (1.1.4) の  $v$  を、式 (1.1.3) の関係を用いて消去して、 $e/m$  を与える式を求めてみると、

$$\frac{e}{m} = \frac{d}{l^2} \cdot \frac{E}{B^2} \quad [\text{C/kg}] \quad (1.1.5)$$

が得られる。

この関係は、磁界だけによって陰極線が偏向を受けた場合の式

$$d = \frac{e}{m} \cdot \frac{l^2}{v} \cdot B \quad [\text{m}] \quad (1.1.6)$$

を用いても同じように求めることができる。

このような実験から求めた値を用いて計算してみると、陰極線を構成している電子の比電荷として、

$$e/m = 1.76 \times 10^{11} \quad [\text{C/kg}] \quad (1.1.7)$$

が得られた。

### 1.1.2 電子の電荷と質量

電気分解に関するファラデー (M. Faraday) の法則は、電気量に一つの素量があることを示唆している。また、陰極線の研究が進むにつれて、電子の特性がしだいに明らかになり、電子の電荷がこのような電気素量であると考えられるようになった。

そして、実験によって、この電気素量を測定することが、トムソン、タウンゼント (J. S. Townsend)、ウイルソン (R. R. Wilson) およびミリカン (R. A. Millikan) らによって試みられた。特に、1909 年、ミリカンによって行なわれた油滴の実験は、水滴を用いたウイルソンの実験方法をさらに改良して精度を上げたもので、電子の電荷  $e$  の絶対値として、

$$e = 1.59 \times 10^{-19} \quad [\text{C}]$$

を得た。

図 1-6 にミリカンの実験装置の原理を示す。すなわち、2枚の金属平板電極 A, B を水平に保持し、この間に電圧を加えて均一電界をつくることができるようにしておく。この空間に油を噴出させてつくった油滴を、電極 A にあけた小孔から

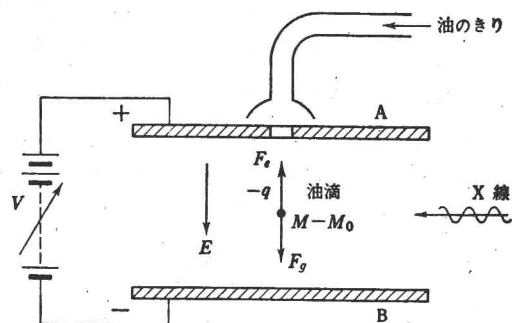


図 1-6 ミリカンの油滴の実験

することにより、次に述べる方法で、その電荷を測定する。そして大きさの異なった多数の油滴の電荷を測定し、これらの電荷の最大公約数を求めて、電気素量を決定する。実験に油滴を用いた理由は、測定中に蒸発によって質量や電荷が変化しない球形の粒子が簡単に得られるためである。

まず電極間に電圧を加えない場合を考える。電界の作用を受けないので、油滴は重力によって自由落下し、しだいに速度が増加するが、空気による粘性抵抗のため、ある時間の後には一定の終速度となる（ストークスの法則）。この速度を  $v_0$  とすれば、

$$v_0 = F_g / K \quad (1.1.8)$$

なる関係が成立する。ここに、 $F_g$  は油滴に作用する重力、 $K$  はストークスの法則に含まれる係数であり、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} F_g &= g(M - M_0) \\ &= g \cdot \frac{4\pi}{3} r^3 (\rho - \sigma) \end{aligned} \quad (1.1.9)$$

$$K = 6\pi\eta r \quad (1.1.10)$$

ただし、 $g$  は重力の加速度、 $gM_0$  は空気による浮力、 $\rho$  は油の密度、 $\sigma$  は空気の密度であり、また、 $\eta$  は空気の粘性係数、 $r$  は油滴の半径である。

式 (1.1.8), (1.1.9), (1.1.10) より明らかなように、 $v_0$  の値を測定することにより  $r$  の値を求めることができる。

次に、図のように A, B 電極間に電圧を加えると同時に、この空間を X 線で照射すると、空気の分子はイオン化され、電子と正イオンに電離し、これが油滴に附着して、油滴は負あるいは正に帯電することになる。

さて、油滴が  $q$  なる負電荷をもっているとすれば、電界  $E$  によって  $F_e$  なる力が重力  $F_g$  とは逆向きに作用する。したがって、 $E$  の値をある値より大きくすれば、 $F_e$  は  $F_g$  より大きくなり、油滴は上昇することになる。このときの速度を  $v$  とすれば、式 (1.1.8) に対応する式として、

$$\begin{aligned} v &= \frac{F_e - F_g}{K} \\ &= \frac{qE - F_g}{K} \end{aligned} \quad (1.1.11)$$

が与えられる。式 (1.1.8) と式 (1.1.11) より

$$q = \frac{K}{E}(v_0 + v) \quad (1.1.12)$$

として、電荷  $q$  を決定することができる。

ミリカンは、このような実験を繰り返し行なって、 $q$  の値は常に  $1.59 \times 10^{-19}$  [C] の整数倍になっていることを発見した。イオン化現象の過程を考えると、この電気素量は電子1個がもっている電荷に他ならぬことがわかる。ミリカンの実験の後、より精密な測定が繰り返された結果、現在では、

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ [C]} \quad (1.1.13)$$

が、電子の電荷の絶対値として採用されている。したがって、電子の質量  $m$  は、 $e$  の値がわかると、比電荷  $e/m$  の値を用いて求めることができ、

$$m = 9.107 \times 10^{-31} \text{ [kg]} \quad (1.1.14)$$

となる。

## 1.2 熱輻射とエネルギー量子

低圧の気体に電圧をかけて放電を起こさせると、原子からは線スペクトルを示す光が、また分子からは帯スペクトルを示す光が放射される。これに対して、原子あるいは分子がきわめて数多く集まってできている固体を熱すると、それぞれの温度に対応して、連続スペクトルを示す光が放射される。

まず熱平衡状態にある輻射の性質を考察するために、図 1.7 のような温度  $T$  [K] に保たれた中空の箱を考える。すると、この内壁で囲まれた空洞へは、内壁からその温度に応じた熱輻射が放射され、同時に空洞から内壁に入射する熱輻射が存在する。内壁上に入射する熱輻射は、一部は吸収され、一部は反射されて、内壁の各部分は熱輻射の放射・反