

Halliday · Resnick

# Physics

# 物理学

第四册

譯者

王唯農

王明建 蔡正治

東華書局印行

# 物理學

第 四 冊

著 者

雷 士 勒 霍 立 德

譯 者

王 唯 農

王 明 建 蔡 正 治

東 華 書 局 印 行



---

**版權所有·翻印必究**

中華民國五十七年五月初版  
中華民國六十八年三月七版

**大學 物理學**  
用書

**第四冊 定價新台幣六十元整**

(外埠酌加運費滙費)

原著者	雷士勒 霍立德
譯者	王唯農 王明建 蔡正治
發行人	卓 鑫 淼
出版者	臺灣東華書局股份有限公司 臺北市博愛路一〇五號 電話：3819470 郵撥：6481
印刷者	中 臺 印 刷 廠 臺中市公園路三十七號

---

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號  
(57001)

## 物 理 常 數

(參閱附錄A之附表, 該表較完整)

光速	$c$	$3.00 \times 10^8$ 米/秒 = $1.86 \times 10^8$ 哩/秒
質量能量關係	$c^2 (=E/m)$	931Mev/amu = $8.99 \times 10^{16}$ 焦耳/仟克
重力常數	$G$	$6.67 \times 10^{-11}$ 牛頓米 <sup>2</sup> /仟克 <sup>2</sup>
普遍氣體常數	$R$	8.31 焦耳/摩爾 °K = 1.99 卡/摩爾 °K = 0.0823 升 atm/摩爾 °K
水的三相點	$T_{tr}$	273.16 °K
導磁常數	$\mu_0$	$1.26 \times 10^{-6}$ 亨利/米
容電常數	$\epsilon_0$	$8.85 \times 10^{-12}$ 法拉/米
亞佛加德羅常數	$N_0$	$6.02 \times 10^{23}$ 分子/摩爾
波爾茲曼常數	$k$	$1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/分子 °K
蒲朗克常數	$h$	$6.63 \times 10^{-34}$ 焦耳秒
基本電荷	$e$	$1.60 \times 10^{-19}$ 庫侖
電子靜止質量	$m_e$	$9.11 \times 10^{-31}$ 仟克
電子荷質比	$e/m_e$	$1.76 \times 10^{11}$ 庫侖/仟克
質子靜止質量	$m_p$	$1.67 \times 10^{-27}$ 仟克
電子磁矩	$\mu_s$	$9.27 \times 10^{-24}$ 焦耳/tesla

## 物 理 性 質

空氣密度(STP)	1.29 仟克/米 <sup>3</sup>
水密度(20°C)	$1.00 \times 10^3$ 仟克/米 <sup>3</sup>
水銀密度(20°C)	$13.6 \times 10^3$ 仟克/米 <sup>3</sup>
乾燥空氣(STP)中之聲速	331 米/秒 = 1090 呎/秒
重力加速度(標準)	$9.81 \text{ 米/秒}^2 = 32.2 \text{ 呎/秒}^2$
標準大氣壓力	$1.01 \times 10^5$ 牛頓/米 <sup>2</sup> = 14.7 磅/吋 <sup>2</sup> = 760 毫米水銀柱
地球平均半徑	$6.37 \times 10^6$ 米 = 3960 哩
地球-太陽平均距離	$1.49 \times 10^8$ 仟米 = $92.9 \times 10^6$ 哩
地球-月球平均距離	$3.80 \times 10^5$ 仟米 = $2.39 \times 10^5$ 哩
地球質量	$5.98 \times 10^{24}$ 仟克
水的熔解熱(0°C, 1atm)	79.7 卡/克
水的汽化熱(100°C, 1atm)	539 卡/克
冰的熔點	$0.00^\circ\text{C} = 273.15^\circ\text{K}$
空氣(20°C)之比熱比( $\gamma$ )	1.40
鈉光黃色雙線的波長	5892Å
水的折射率(@5892Å)	1.33
冕牌玻璃的折射率(@5892Å)	1.52

## 原書下冊序

物理學下冊爲 *Physics for Students of Science and Engineering* 一書第二版之修訂本。在這本下冊之(1966)新版中,有下列之修正:

1. 提供 142 則補充習題。此等習題經慎密安排,與原有之大量習題配合,興趣範圍和艱難程度較前有更廣泛之選擇。

2. 馬克士威方程式的微分形式和電磁波方程式已新編爲補充題材,供討論此較深材料參考之用。

3. 原有附錄已予擴大及現代化,并添加若干新材料,以增加此等參考材料的效用和準確。本書首尾之襯頁已隨之改變。

4. 頁數標記參考數字,符號和單位必要者均已更改,以使新上冊和修訂之下冊一致。

## 譯 本 序

在 1960 年霍立德與雷士勒合著之 *Physics for Students of Science and Engineering* 問世，1962 年將下冊予以修正，發行以來，已被普遍採用。本年又將上冊大量修改，並更名爲 *Physics*；全書對物理學之基本觀念，古典力學的適用範圍，及近代物理學的基本概念，均予深入闡釋及討論。數學方面全部用向量和微積分，程度大爲提高。最近二十年來，物理學發展之範圍甚廣，進步亦大，本書取材新穎，立論精闢，頗能適合近年教學之需。國外著名大學如哈佛，麻省理工等校均採用此書。爲便利國內學生易於閱讀並能徹底了解起見，故予譯述。

全書譯文，盡量接近原文字義，流暢通順爲原則；但在艱澀之處，則以淺近之中文句法表達，而不失物理意義爲主。所有名詞翻譯，以教育部公布之物理學名詞爲準，其原文字義變更，及新生名詞未及列入者，均按其物理意義，予以訂定，務使文意相符，簡明劃一爲原則。書內對甚多高深論題，歷史敘述及哲理解說，均以小字排印，屬於選用教材，可酌情決定取捨。

本書譯校，以時間短促，疏漏之處難免，尚祈教師及讀者諸君隨時指正，俾於再版時修訂，至深感荷。

王唯農 王明建 蔡正治 謹識

五十七年五月於國立清華大學

# 物 理 學

## 第 四 冊 目 次

### 第四十章 光之本性與傳播 ..... 1~18

- |              |                |
|--------------|----------------|
| 40-1 光譜和電磁波譜 | 40-2 能量與動量     |
| 40-3 光速      | 40-4 運動之光源和觀察者 |
| 40-5 都卜勒效應   |                |

### 第四十一章 反射與折射——平面波與平面 ..... 19~38

- |                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| 41-1 反射與折射      | 41-2 惠金斯原理      |
| 41-3 惠金斯原理和反射定律 | 41-4 惠金斯原理和折射定律 |
| 41-5 內部全反射      | 41-6 費爾瑪原理      |

### 第四十二章 反射與折射——球面波與球面 ..... 39~68

- |                |               |
|----------------|---------------|
| 42-1 幾何光學與波動光學 | 42-2 球面波——平面鏡 |
| 42-3 球面波——球面鏡  | 42-4 球形折射面    |
| 42-5 薄透鏡       |               |

### 第四十三章 干涉 ..... 69~96

- |               |                   |
|---------------|-------------------|
| 43-1 楊氏實驗     | 43-2 相參性          |
| 43-3 楊氏實驗中之強度 | 43-4 波擾動之相加       |
| 43-5 薄膜之干涉    | 43-6 反射之相改變       |
| 43-7 邁克爾孫干涉儀  | 43-8 邁克爾孫干涉儀的光的傳播 |



## 第四十四章 繞射 .....97~116

- |               |               |
|---------------|---------------|
| 44-1 導論       | 44-2 單縫       |
| 44-3 單縫——性質方面 | 44-4 單縫——數量方面 |
| 44-5 圓形孔徑繞射   | 44-6 雙縫       |

## 第四十五章 光柵和光譜 .....119~140

- |             |                    |
|-------------|--------------------|
| 45-1 導論     | 45-2 複縫            |
| 45-3 繞射光柵   | 45-4 光柵的鑑別率        |
| 45-5 X射線的繞射 | 45-6 <u>布拉格</u> 定律 |

## 第四十六章 偏振 .....141~164

- |            |            |
|------------|------------|
| 46-1 偏振    | 46-2 偏振片   |
| 46-3 反射之偏振 | 46-4 雙折射   |
| 46-5 圓偏振   | 46-6 光的角動量 |
| 46-7 光的散射  | 46-8 雙散射   |

## 第四十七章 光和量子物理學 .....165~188

- |                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| 47-1 光源                | 47-2 空腔輻射體         |
| 47-3 <u>蒲朗克</u> 輻射公式   | 47-4 光電效應          |
| 47-5 <u>愛因斯坦</u> 的光子理論 | 47-6 <u>康普頓</u> 效應 |
| 47-7 明線光譜              | 47-8 氫原子           |
| 47-9 相當原理              |                    |

## 第四十八章 波動和粒子 .....189~202

- |            |                 |
|------------|-----------------|
| 48-1 物質波   | 48-2 原子構造和駐波    |
| 48-3 波動力學  | 48-4 $\psi$ 之意義 |
| 48-5 測不準原理 |                 |

## 補充題材

- I 在平面上運動的質點其線運動與角運動間之關係..... 1
- II 極向量和軸向量..... 4
- III 張緊之絃的波動方程式..... 6
- IV 馬克士威速率分佈定律的推導法..... 8
- V 馬克士威方程式的微分形式和電磁波方程式..... 11

補充習題 ..... 19

## 附錄

- A 標準的定義和基本與導出物理常數..... 39
- B 各項地球數據..... 42
- C 太陽系..... 43
- D 元素週期表..... 45
- E 物理學的粒子..... 46
- F 物理量之符號、因次和單位..... 48
- G 換算因數..... 50
- H 數學符號和希臘字母..... 60
- I 數學公式..... 61
- J 三角函數值..... 64
- K 諾貝爾物理學獎得主..... 66
- L 高斯單位制..... 70

單號習題答案 ..... 72

雙號習題答案 ..... 75

補充習題答案 ..... 91

索引 ..... 96

## 第四十章

# 光之本性與傳播

### 40-1 光譜和電磁波譜

馬克士威證明光是圖 40-1 之電磁波譜的一部分。所有這些波本質上均屬電磁波，且在自由空間中均有相同之速率  $c$ 。彼等只是波長（因而頻率）不同，意即生波之波源和用以量度之儀器有所不同\*。電磁波譜並無一定之上下限。圖 40-1 中標示之區域代表在此頻率區間中，有通用之實驗器具，諸如通用之振源和探測器等。所有此等區域均重疊，例如，以微波技術（微波振盪器）或以紅外線技術（白熱光源）均能產生波長為  $10^{-3}$  米之輻射。

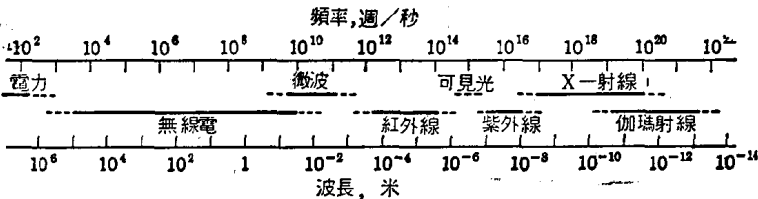


圖 40-1 電磁波譜。注意波長和頻率均為對數標度。

此處定義“光”為能影響眼睛之輻射。圖 40-2 陳示一假設之標準觀察者對不同波長之輻射的相對視力靈敏度，顯示可見區域的中心約為  $5.55 \times 10^{-7}$  米，這種波長之光產生的感覺為黃綠色\*\*。

\* 對於電磁波波長至  $1.9 \times 10^7$  哩之報告，讀者可參閱 James Heirtzler 所著論文，刊於 *Scientific American* 1962 年三月號。

\*\* 參閱 Edwin H. Land 著 “Experiments in Color Vision”，*Scientific American*, 1959 年五月號，及 M. H. Wilson 和 R. W. Brocklebank 著 “Color and Perception: the Work of Edwin Land in the Light of Current Concepts”，*Contemporary Physics*, 1961 年十二月號，對知覺問題，和色彩為光的特性與色彩為察覺物體的性質之間的區別，有精彩的討論。

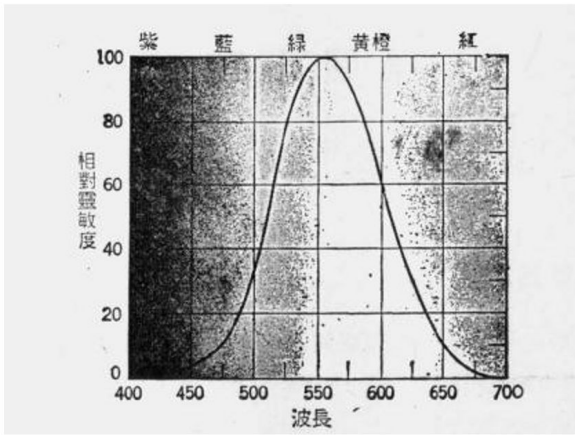


圖 40-2 在平常照明程度，一假設之標準觀察者對不同波長之光的相對視力靈敏度。陰影區域代表正常視覺對(連續變化之)色彩的感覺。

在光學中常用微米(micron 簡寫為  $\mu$ )、毫微米(millimicron 簡寫為  $m\mu$ )、和埃(Angstrom 簡寫為 A)為波長單位，分別定義為

$$\begin{aligned} 1 \mu &= 10^{-6} \text{ 米} \\ 1 m\mu &= 10^{-9} \text{ 米} \\ 1 \text{ A} &= 10^{-10} \text{ 米。} \end{aligned}$$

故可見區域的中心可表之為  $0.555 \mu$ 、 $555 m\mu$  或  $5550 \text{ A}$ 。

因視力靈敏曲線在長波及短波長處漸趨近於軸，故可見光譜並無確定之極限。若隨意定視力靈敏度降至其最大值的 1% 處之波長為極限，則此極限約為  $4300 \text{ A}$  和  $6900 \text{ A}$ ，兩極限之波長相比不到兩倍。若在此限度外之輻射甚強，眼睛仍能探測到。在物理學之許多實驗中，可用照像底片或感光靈敏之電子探測器代替人眼。

## 40-2 能量與動量

電磁波將能量自太陽載至地球，或自火光載至在附近之手上。在自由空間中電磁波傳送之能量，已在第 39-6 節中以坡印亭向量  $\mathbf{S}$  描述之，即

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}, \quad (40-1)$$

$\mathbf{E}$  和  $\mathbf{B}$  為電場和磁場向量的瞬時值。

電磁波亦可傳送線動量則少為人知，換言之，照射於物體上之光能對物體施以

壓力(輻射壓力\*)。因為我們平常未察覺到這種力,故這種壓力必比我們日常承受之力小。首先量度輻射壓力者為1901-1903年在美國之Nichols和Hull及在蘇俄之Lebedev,時在馬克士威理論上預言有此效應之後三十餘年。

使平行光束照射於物體經時間 $t$ ,入射光全部被物體吸收。若在此期間吸收之能量為 $U$ ,依據馬克士威的預測,則傳予物體之動量 $p$ 為

$$p = \frac{U}{c} \quad (\text{完全吸收}), \quad (40-2a)$$

$c$ 為光速, $p$ 的方向為入射光束的方向。若光能 $U$ 全部被反射,則傳予之動量為上式之兩倍,即

$$p = \frac{2U}{c} \quad (\text{完全反射}). \quad (40-2b)$$

同理,當完全彈性之網球自物體彈回時傳予物體之動量,為此球與質量速率均同之完全非彈性球相撞時所傳動量之兩倍。若光能 $U$ 部份反射部份吸收,則傳予之動量介乎 $U/c$ 與 $2U/c$ 之間。

► 例1. 能量通量 $S$ 為10瓦特/厘米<sup>2</sup>之平行光束照射於面積為1.0厘米<sup>2</sup>之完全反射平面上達1小時。(a)在此期內傳予鏡面之動量若干?(b)作用於鏡之力為何?

(a) 自鏡面反射之能量為

$$U = (10 \text{ 瓦特/厘米}^2)(1.0 \text{ 厘米}^2)(3600 \text{ 秒}) = 3.6 \times 10^4 \text{ 焦耳}.$$

經一小時之照射後,傳予之動量為

$$p = \frac{2U}{c} = \frac{(2)(3.6 \times 10^4 \text{ 焦耳})}{3 \times 10^8 \text{ 米/秒}} = 2.4 \times 10^{-4} \text{ 仟克米/秒}.$$

(b) 由牛頓第二定律,鏡上之平均力等於傳予鏡面之動量的平均率,即

$$F = \frac{p}{t} = \frac{2.4 \times 10^{-4} \text{ 仟克米/秒}}{3600 \text{ 秒}} = 6.7 \times 10^{-8} \text{ 牛頓}.$$

這是甚小之力。

在1903年,Nichols和Hull氏用扭秤法測定輻射壓力並證實式40-2,彼等使光射至圖40-3中之鏡 $M$ 上;輻射壓力促使秤臂轉動至量得之角 $\theta$ ,而扭絞懸線 $F$ ,設懸線經適當校準,則實驗者能獲得輻射壓力之數值。Nichols和Hull使光束照於已知吸收率之塗黑金屬盤上,並量此盤的溫度上升,而測定光束強度。在特定之運轉後二實驗者測得輻射壓力為 $7.01 \times 10^{-6}$ 牛頓/米<sup>2</sup>;就此光束用式40-2計算,預期之值為 $7.05 \times 10^{-6}$ 牛頓/米<sup>2</sup>,故二者極相符合。設鏡面積為1厘米<sup>2</sup>,這表

\* 參閱 G. E. Henry 著 "Radiation Pressure", *Scientific American*, 1957 年六月號第 99 頁。

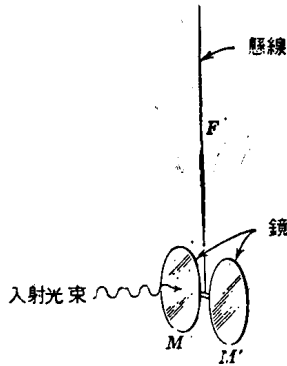


圖 40-3

示鏡上之力為  $7 \times 10^{-10}$  牛頓，比例 1 中算得之力約小 100 倍。

Nichols 和 Hull 實驗之能成功，大部份由於二人對鏡面周圍氣體分子的速率分佈改變所生之假偏轉效應，仔細予以消除之故。鏡面由入射光束中吸收光能時溫度少量升高，而引起此等改變。這種“輻射計效應”(radiometer effect)可說明常見之玩具式輻射計置於太陽光束中能自旋之情形。在完全真空中不發生此等效應，但在 1903 年之際能作到之最佳真空亦會有輻射計效應，故在實驗設計時應對此效應特別予以考慮。

為就特別情況證明由馬氏方程式而得之動量的傳送，茲設電磁平面波在  $x$  方向行進，射至高電阻率之大型薄板上，如圖 40-4。入射能量之小部份為板所吸收，但若板甚薄，則大部份能量透過薄板\*。

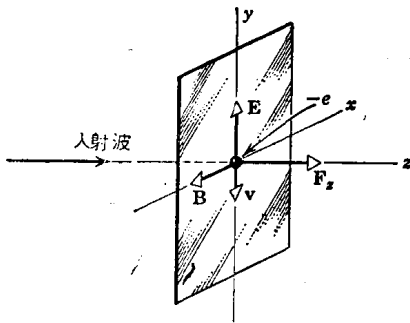


圖 40-4 入射平面光波照射在有電阻薄板中之電子上。E, B 的瞬時值，電子速度  $v$ ，及輻射力  $F_x$  均示於圖。

\* 若干入射能量亦會反射，但反射波強度太低，在下文之推導中可予忽略；參閱 B. Rossi 著之 *Optics*, Addison-Wesley Publishing Company 1957 年版第 411 頁，本書導法即採自該處。

入射波之  $E$  和  $B$  在板上隨時間之變化為

$$E = E_n \sin \omega t \quad (40-3)$$

及

$$B = B_m \sin \omega t, \quad (40-4)$$

$E$  與  $\pm y$  軸平行,  $B$  與  $\pm x$  軸平行。

在第 31-4 節已知(不變之)電力  $(-eE)$  對金屬中傳導電子的作用係使電子以(不變之)遊動速率  $v_d$  移動。電子之行徑似其沉於粘滯流體中, 作用於電子之電力則為“粘滯”力所抵消, 粘滯力可視為與電子速率成正比。故當電場  $E$  為不變值而達到平衡後,

$$eE = bv_d, \quad (40-5)$$

$b$  為阻力之阻尼係數。故電子的平衡速率為

$$v = \frac{eE}{b}, \quad (40-6)$$

已將下誌  $d$  去掉。

若外加電場隨時間而變化, 且其變化甚慢, 則電子速率可隨改變之  $E$  值而不斷自行調整, 故在任何時間電子速率實以其平衡值(式 40-6)表之。介質愈粘滯則這些調整行之愈快, 恰似空中落下之石塊甚慢到達不變之平衡下降率, 但在粘滯油液中則甚快到達平衡下降率。設置 40-4 之薄板頗為粘滯, 即其電阻率太高, 即使在入射光束中  $E$  振盪甚快, 而式 40-6 仍屬有效。

當電子振動時平行於  $y$  軸, 由於波的磁分量電子尚承受第二種力, 此力  $F_z (-ev \times B)$  在  $z$  方向, 與  $v$  和  $B$  所形成之面, 即  $xy$  面垂直。  $F_z$  的瞬時值為

$$F_z = evB = \frac{e^2 EB}{b}. \quad (40-7)$$

因  $v$  和  $B$  同時反轉其方向, 故  $F_z$  恒向正  $z$  方向; 實際上此力就是作用於圖 40-4 中薄板之輻射壓力的緣由。

由牛頓第二定律,  $F_z$  是入射波將動量傳予板中每電子之時率  $d p_e / dt$ , 即

$$\frac{d p_e}{dt} = \frac{e^2 EB}{b}. \quad (40-8)$$

動量以此率傳予板中各電子, 亦即傳予板之本身, 尚待決定轉移至板之動量與板中吸收之能量間的關係。

入射波的電場分量對每一振盪之電子作功, 其瞬時率(詳式 40-6)為

$$\frac{dU_e}{dt} = F_z v = (eE) \left( \frac{eE}{b} \right) = \frac{e^2 E^2}{b}.$$

留意磁力  $F_z$  恒與速度  $v$  成直角, 故對振盪之電子不作功。式 39-11b 表示自由空間中之平面波,  $B$  與  $E$  之關係為

$$E = Bc.$$

代入上式中之一  $E$  得

$$\frac{dU_e}{dt} = \frac{e^2 EBc}{b}. \quad (40-9)$$

此式代表每電子自入射波中吸收能量之時率。

比較式 40-8 和 40-9 顯示

$$\frac{d p_e}{d t} = \frac{1}{c} \frac{d U_e}{d t}.$$

積分得

$$\int_0^t \frac{d p_e}{d t} dt = \frac{1}{c} \int_0^t \frac{d U_e}{d t} dt,$$

即

$$p_e = \frac{U_e}{c}, \quad (40-10)$$

$p_e$  是在任何一定時間  $t$  內傳予單個電子之動量,  $U_e$  是在相同時間內電子吸收之能量。式之兩邊各乘以板中之自由電子數即得式 40-2a。

雖然以特種吸收體推導此關係式(式 40-10), 但在最後所得之表示式中未含有吸收體的特性, 例如阻力之阻尼係數  $b$ 。因式 40-10 是任何材料吸收輻射的一般性質, 故這是理所當然者。

### 40-3 光 速\*

光進行太快, 故在日常經驗中無法想到光速並非無限。即使要問“光進行多快?” 也須相當的見識。伽利略曾自問此問題, 並試圖以實驗解答之。他的主要著作 *Two New Sciences* 一書, 於 1638 年在荷蘭出版, 該書以三位虛構人物 Salviati, Sagredo 和 Simplicio 問之談話方式寫成。下段為三人談論有關光速之部份。

*Simplicio*: 日常經驗顯示光的傳播乃即時而至者; 因當遠處發射砲彈時, 閃光毫不耗時而達人眼; 但聲音則在顯著之時間後到達人耳。

*Sagredo*: 可是 *Simplicio*, 對此熟悉之經驗我所能推論者, 乃是聲音到達人耳時, 其行進遠比光慢; 這並未告知光是否即時而至, 或光雖進行極快, 是否仍需耗時…。

*Sagredo* 無疑是伽利略本人, 之後他敘述測定光速之可能方法。在夜晚他和一助手彼此遠隔對面而立, 各携一可隨意啓閉之燈號。開始實驗時伽利略開啓其燈號, 當助手看到燈光時即開啓燈號, 然後伽氏得見此燈光。伽利略試圖測定他開啓燈號, 與自助手燈號之光到達之時間。現在已知間隔一哩光來回一週之時間僅為  $11 \times 10^{-6}$  秒, 遠遠比人的反應時間小, 故此法不成。

欲直接測大速度, 應測甚小之時間區間, 或用甚長之基線。這種情形顯示處理大距離之天文學或能提供光速之實驗值; 此構想證明屬實。雖然希望測定光自太陽行至地球所需之時間,

\* 參閱 J. H. Rush 著 “The Speed of Light”, *Scientific American*, 1955 年八月號第 67 頁。



但無法知道在任何時刻到達地球之光係在何時離開太陽；故仍應使用較巧妙的天文方法。

注意微波脈波自月球反射而同時極有規律，因而得  $7.68 \times 10^8$  米之基線（往復）供計時之用。現由其它實驗已甚確知光速（及微波速率），故用此等量度法以精確測定月球距離。微波信號亦會自金星反射回來。

1675 年在巴黎工作之丹麥天文學家 Ole Roemer 觀測木星的月球（見習題 9），由此可求得光速為  $2 \times 10^8$  米/秒。約五十年之後英國天文學家 James Bradley 曾作完全不同之若干天文觀測，因而求得光速之值為  $3.0 \times 10^8$  米/秒。

在 1849 年法國物理學家菲左 (Hippolyte Louis Fizeau 1819-1896) 首次用非天文學之方法以測光速，而得  $3.13 \times 10^8$  米/秒之值。圖 40-5 陳示菲左的儀器。設先不計齒輪，自光源  $S$  發出之光經透鏡  $L_1$  會聚後由鏡  $M_1$  反射，在空間  $F$  處生成光源的像。鏡  $M_1$  即所謂“半鍍銀鏡” (half-silvered mirror)；其反射層甚薄，故照於鏡面之光僅一半反射，另一半則透射。

自  $F$  處成像之光進入透鏡  $L_2$  後成平行光束發出；經過透鏡  $L_3$  後此光由鏡  $M_2$  反射沿其原方向而回。在菲左的實驗中， $M_2$  與  $F$  間之距離  $l$  為 8630 米，即 5.36 哩。當反射光再觸及鏡  $M_1$  時，部份光透過鏡面，經透鏡  $L_4$  進入觀察者的眼中。

觀察者得見光源之像，係由在齒輪與鏡  $M_2$  之間來回行經  $2l$  距離之光所形成。欲計光束時間，應在光束上置有某種記號，以快速轉動之齒輪“切斷” (chopping) 光束可達成之。設在來同一週之  $2l/c$  時期中，齒輪轉動恰使自某一“爆叢” (burst) 之光返回齒輪時， $F$  點為齒所掩蓋，光則照在朝向  $M_2$  之齒面，故光無法到達觀察者眼中。

若齒輪速率恰好適當，因各爆叢為齒所遮，觀察者看不到任何光爆叢，將輪的角速率  $\omega$  自零增加至光源  $S$  之像消失，觀察者即可測  $c$ 。設間隙中心與齒面中心

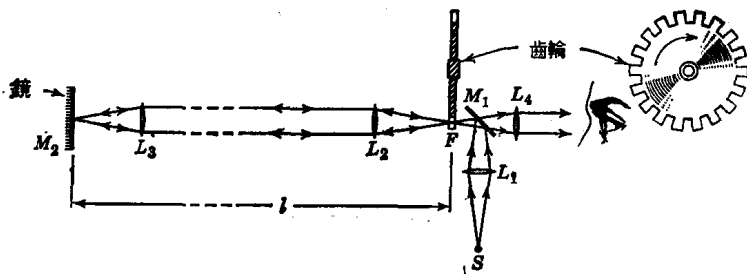


圖 40-5 菲左測定光速的儀器。