

Fundamentals of Physics

物理學基本原理解

譯者

王唯農
王唯明 建

第 冊

東華書局印行

物理學基本原理解

July 26/05 第三册

著者

雷士勒 霍立德
(R. Resnick) (D. Halliday)

譯者

王唯農 王明建

東華書局印行



版權所有·翻印必究

中華民國六十六年五月初版
中華民國六十八年三月二版

大學
大用書 物理學基本原理

第三册 定價新臺幣五十元整
(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
發行人	卓 鑫 森
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
(66023)

物理常數

(參閱附錄A之附表, 該表較完整)

光速	c	3.00×10^8 米/秒 = 1.86×10^5 哩/秒
質量能量關係	$c^2 (=E/m)$	931 Mev/amu = 8.99×10^{16} 焦耳/仟克
重力常數	G	6.67×10^{-11} 牛頓米 ² /仟克 ²
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	μ_0	1.26×10^{-6} 亨利/米
容電常數	ϵ_0	8.85×10^{-12} 法拉/米
亞佛加德羅常數	N_0	6.02×10^{23} 分子/摩爾
波爾茲曼常數	k	1.38×10^{-23} 焦耳/分子 °K
蒲朗克常數	h	6.63×10^{-34} 焦耳秒
基本電荷	e	1.60×10^{-19} 庫倫
電子靜止質量	m_e	9.11×10^{-31} 仟克
電子荷質比	e/m_e	1.76×10^{11} 庫倫/仟克
質子靜止質量	m_p	1.67×10^{-27} 仟克
電子磁矩	μ_e	9.27×10^{-24} 焦耳/tesla

物 理 性 質

空氣密度(STP)	1.29 仟克/米 ³
水密度(20°C)	1.00 × 10 ³ 仟克/米 ³
水銀密度(20°C)	13.6 × 10 ³ 仟克/米 ³
乾燥空氣(STP)中之聲速	331 米/秒 = 1090 呎/秒
重力加速度(標準)	9.81 米/秒 ² = 32.2 呎/秒 ²
標準大氣壓力	1.01 × 10 ⁵ 牛頓/米 ² = 14.7 磅/吋 ² = 760 毫米水銀柱
地球平均半徑	6.37 × 10 ⁶ 米 = 3960 哩
地球太陽平均距離	1.49 × 10 ⁸ 仟米 = 92.9 × 10 ⁶ 哩
地球月球平均距離	3.80 × 10 ⁵ 仟米 = 2.39 × 10 ⁵ 哩
地球質量	5.98 × 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°C = 273.15°K
空氣(20°C)之比熱比(γ)	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

物理學基本原理

第三冊 目次

第二十二章 電荷與物質1~15

- | | |
|-------------|------------|
| 22-1 電磁學 | 22-5 電荷量子化 |
| 22-2 電荷 | 22-6 電荷和物質 |
| 22-3 導體和絕緣體 | 22-7 電荷守恒 |
| 22-4 庫侖定律 | |

第二十三章 電場16~35

- | | |
|-------------|--------------|
| 23-1 電場 | 23-4 E 之計算 |
| 23-2 電場 E | 23-5 電場中之點電荷 |
| 23-3 力線 | 23-6 電場中之雙極 |

第二十四章 高斯定律36~55

- | | |
|----------------|-------------------------|
| 24-1 電場通量 | 24-5 高斯定律和庫侖定律
的實驗證明 |
| 24-2 高斯定律 | |
| 24-3 高斯定律和庫侖定律 | 24-6 高斯定律——應用 |
| 24-4 絕緣之導體 | |

第二十五章 電位56~84

- | | |
|-------------|-------------------|
| 25-1 電位 | 25-6 電位能 |
| 25-2 電位和電場 | 25-7 用 V 計算 E |
| 25-3 點電荷之電位 | 25-8 絕緣之導體 |
| 25-4 點電荷羣 | 25-9 靜電發電機 |
| 25-5 電雙極之電位 | |

第二十六章 電容器和介電質..... 85~106

- | | |
|------------------|----------------|
| 26-1 電容 | 26-4 介電質——原子觀點 |
| 26-2 計算電容 | 26-5 介電質與高斯定律 |
| 26-3 有介電質之平行板電容器 | 26-6 儲於電場中之能量 |

第二十七章 電流與電阻107~123

- | | |
|-----------------|----------------|
| 27-1 電流和電流密度 | 27-4 電阻率——原子觀點 |
| 27-2 電阻、電阻率和導電率 | 27-5 電路中之能量轉換 |
| 27-3 歐姆定律 | |

第二十八章 電動勢與電路124~145

- | | |
|-------------|-----------|
| 28-1 電動勢 | 28-4 電位差 |
| 28-2 計算電流 | 28-5 多迴電路 |
| 28-3 其他單迴電路 | 28-6 RC電路 |

第二十九章 磁場146~171

- | | |
|---------------|------------|
| 29-1 磁場 | 29-5 霍爾效應 |
| 29-2 B 之定義 | 29-6 環行之電荷 |
| 29-3 電流上之磁力 | 29-7 迴轉加速器 |
| 29-4 電流迴路上之力矩 | 29-8 湯姆孫實驗 |

第三十章 安培定律172~196

- | | |
|---------------|--------------|
| 30-1 安培定律 | 30-4 兩平行導體 |
| 30-2 長導線附近之 B | 30-5 螺線管之 B |
| 30-3 B 線 | 30-6 畢奧—沙瓦定律 |

第三十一章 法拉第定律197~219

- | | |
|------------|--------------|
| 31-1 法拉第實驗 | 31-2 法拉第感應定律 |
|------------|--------------|

- | | |
|---------------|------------|
| 31-3 楞次定律 | 31-5 時變磁場 |
| 31-4 感應——量的研究 | 31-6 貝他加速器 |

第三十二章 電感 220~237

- | | |
|--------------|--------------|
| 32-1 電感 | 32-4 能量與磁場 |
| 32-2 電感的計算 | 32-5 能量密度與磁場 |
| 32-3 LR 電路 | |

第三十三章 物質的磁性 238~254

- | | |
|--------------|----------|
| 33-1 磁極與磁雙極 | 33-4 抗磁性 |
| 33-2 磁學的高斯定律 | 33-5 鐵磁性 |
| 33-3 順磁性 | |

第二十二章

電荷與物質

(Charge and Matter)

22-1 電磁學 (Electromagnetism)

電學的知識以觀察爲其根源，公元前 600 年即已知摩擦過的琥珀會吸引稻草屑。磁學的研究可溯自對天然“石塊”（即磁鐵礦）會吸鐵的觀察。這兩門科學各自發展，直到 1820 年奧斯特 (Hans Christian Oersted) 才觀測到二者之間的關聯，即導線中的電流能影響羅盤的磁針（第 29-1 節）。

電磁學係新的科學，由許多研究者予以發展，法拉第 (Michael Faraday, 1791-1867) 是其中最重要者之一。馬克士威 (James Clerk Maxwell, 1831-1879) 將電磁學的定律寫成今日我們所知道的形式，這些定律常稱之爲馬克士威方程式 (Maxwell's equations)，列於表 34-2 中，以供參考。這些定律在電磁學中的重要性，就與牛頓的運動定律和重力定律在力學中的地位相同。

雖然馬氏的電磁綜合理論深賴前輩的研究結果，但他自己的貢獻仍然非常重要。馬氏推論光是電磁的性質，純粹由電和磁的量度就能求得光速，故光學的知識與電學和磁學的知識有密切關係。馬克士威方程式的應用範圍實屬非凡，它包括所有大件電磁和光學器具的基本原理。諸如電動機、迴轉加速器、電子計算機、無線電、電視、雷達、顯微鏡和望遠鏡等。

英國物理學家赫維賽 (Oliver Heaviside 1850-1925)，特別是荷蘭物理學家羅倫茲 (H. A. Lorentz 1853-1928) 對闡明電磁理論均有重要貢獻。在馬氏創立其理論之後二十餘年，赫茲 (Heinrich Hertz 1857-

1894)* 在實驗室中造出電磁的“馬氏波”，就是現在所稱之無線電短波，使電磁學前進一大步。其後馬可尼 (Marconi) 和其他學者將馬氏和赫茲的電磁波作實際的應用。

在工程應用方面，經常用馬氏方程式以解決實用問題。

以馬克士威方程式為根據的電磁學稱為**古典電磁學**，對於在約 10^{-10} 厘米之微的所有電場和磁場問題都能給予正確解答。這種尺度比原子還小得多，正是該用量子力學取代牛頓力學的範圍。古典電磁學、量子力學和相對論的混合物稱為**量子電動力學**，能對更極微小尺度的問題予以正確解答。戴生 (F.J. Dyson) 曾說：“只有在量子電動力學中，我們能做假想的實驗而預測其結果準確至五位小數，相信其理論已考慮所有涉及的因素。” 本書僅討論古典電磁學。

22-2 電荷 (Electric Charge)

本章以下討論電荷及其與物質的關係。電荷有兩種，以絲絹摩擦玻璃棒，再以長絲線懸棒，如圖 22-1。若第二玻璃棒以絲絹擦後，持近第一棒經摩擦之端，則二棒互相推斥。另一方面，用毛皮摩擦過的合成樹脂棒會吸引玻璃棒，但用毛皮摩擦的二合成樹脂棒會相互推斥。解釋這些現象，可說摩擦一棒就給棒以電荷，二棒上之電荷乃相互施力。顯然在玻璃棒上之電荷與樹脂棒上之電荷必定不同。

第一位美國的物理學家富蘭克林 (Benjamin Franklin 1706-1790) 有多方面的成就，他將玻璃棒上之電荷稱為**正電**，樹脂(當時叫硬橡膠)棒上之電荷稱為**負電**；此二名稱沿用迄今。綜結這些實驗，結論為**同電荷相推斥，不同電荷相吸引**。

電的效應並不限於以絲絹摩擦的玻璃，或以毛皮摩擦的合成樹脂。在適當情況下，任何物質以任何其他物質摩擦後，多少會變成帶電；將不知正負的電荷與帶電的玻棒或樹脂棒比較，就能定其為正電或負電。

* 參閱 P. Morrison 和 E. Morrison 合著之 “Heinrich Hertz”，刊於 Scientific American, 1957 年十二月號。

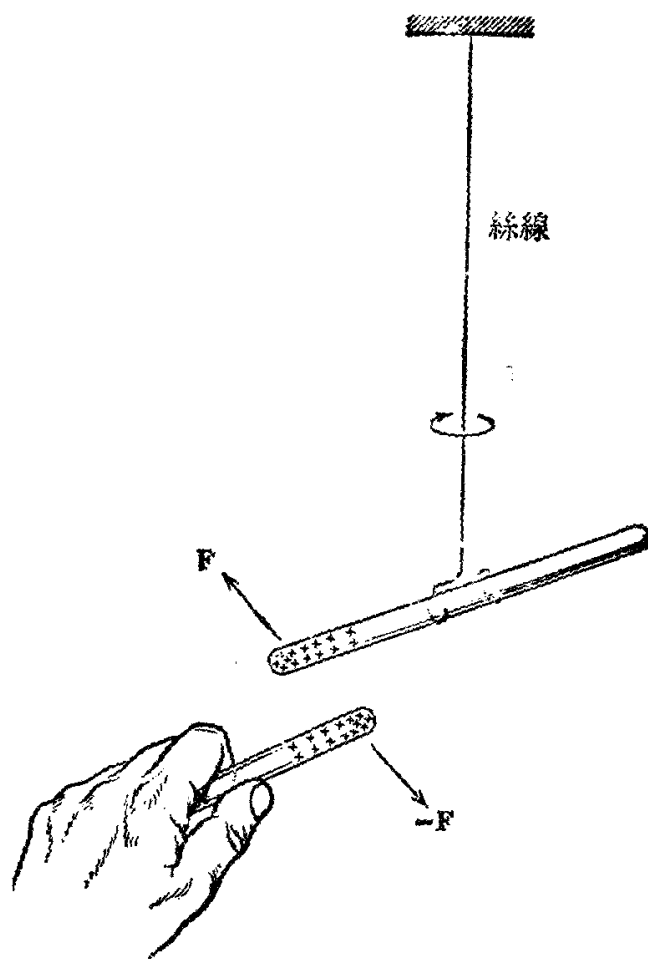


圖 22-1 帶正電荷的二玻璃棒互相推斥。

大形物質在其正常或中性狀態時，近代觀點是該物質含有等量的正電和負電。若像玻璃和絲絹之二物體相互摩擦，則少量電荷自一物體轉移至另一物體，因而打破各物體的電中性 (electric neutrality)，此時玻璃變為正電性，絲絹為負電性。

22-3 導體和絕緣體 (Conductors and Insulators)

手握金屬棒並以毛皮摩擦，似乎不會產生電荷，但若加以玻璃柄，摩擦時金屬不與手接觸，則金屬棒能帶電荷。解釋如下：金屬、人體和地

球是電的導體 (conductor), 玻璃、塑膠等是絕緣體 (insulator), 亦稱介電質 (dielectrics)。

在導體中電荷能經物質而自由移動, 然在絕緣體中則否。世上雖無完全的絕緣體, 但熔融石英的絕緣性約為銅的 10^{25} 倍, 故就許多種實用目的言, 若干材料可視為完全絕緣體。

對金屬之一種相當巧妙的實驗叫做霍爾效應 (詳第 29-5 節), 該實驗顯示只有負電荷自由移動, 而正電荷不易移動, 如同在玻璃或在任何其他介電質中一樣。在金屬中實際的電荷載體 (charge carrier) 是自由電子, 當諸孤立原子結合成為金屬固體, 原子的外層電子不再與個別原子相連, 而在整個固體中自由運動。至於有些導體, 如電解質 (electrolytes), 正電荷和負電荷均能移動。

半導體 (semiconductor) 的導電性能介於導體與絕緣體之間, 元素中矽和鍺是熟知之例。在半導體中加入極少量的其他元素, 其導電性常能大量增加, 因此之故, 矽中常加入微量的砷或硼。半導體應用極多, 如用於電晶體的製作。欲充分敘述半導體作用的方法, 應對量子物理學的基本原理相當了解。

22-4 庫侖定律 (Coulomb's Law)

在 1785 年, 庫侖 (Charles Augustin de Coulomb) 首先就數量方面測量電的吸引和推斥, 並推導決定其間關係之定律。所用儀器示如圖 22-2, 與圖 22-1 的懸棒類似, 只是在圖 22-2 中的電荷集於小球 a 和 b 上。

若 a 和 b 帶有電荷, 則 a 球上的電力將使懸線纖維扭轉。庫侖 將懸頭轉動角度 θ 以消除此電力扭轉作用, 而保持兩電荷在特定之相隔距離, 則角度 θ 為測量作用於電荷 a 之電力的相對標準。圖 22-2 的儀器稱為扭秤, 與以後卡文狄西用以測量重力吸引的裝置相像 (第 14-2 節)。

最初庫侖的實驗結果可表之為:

$$F \propto \frac{1}{r^2}.$$

F 是作用於電荷 a 和 b 上各力的大小， r 是其間之距離。如牛頓第三定律所要求，此二力沿電荷的連線而作用，但朝相反方向。注意即使電荷或許不同，各電荷受力的大小仍相同。

庫倫又研究當球上電荷的相對大小改變時，電力如何變化。例如若將帶電荷之導體球與完全相似但不帶電荷之導體球接觸，原有電荷應由二球平分。以此方法，庫倫將平方反比關係推展為

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (22-1)$$

q_1 和 q_2 是球 a 和 b 上電荷的相對大小。式 22-1 稱為庫倫定律；僅當帶電物體的大小遠小於其相互間的距離時方成立，我們常謂僅對點電荷成立。

庫倫定律與重力的平方反比定律類似，重力定律比庫倫實驗之時早百餘年； q 即相當於重力定律中之 m ，然而重力總是吸引力；這相當於電有兩種而（顯然）質量只有一種。

對庫倫定律的信賴並不在數量上依靠庫倫的實驗。用扭秤的量度難使精密度達到百分之幾以內，這種量度不能使人信服如式 22-1 中的指數恰為 2.00，而不是 2.01。在 24-5 節將說明由間接的實驗推得庫倫定律，該實驗顯示 22-1 式中的指數約在 2.000000002 與 1.999999998 的限度內，此限度區間太小，故常定指數恰為 2。

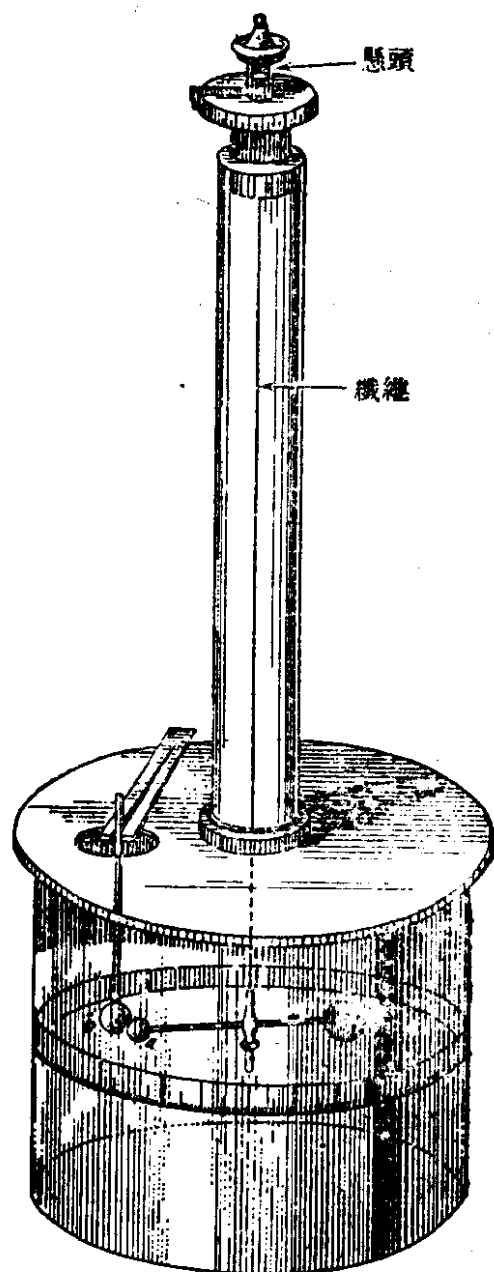


圖 22-2 庫倫的扭秤，採自 1785 年他送呈法國科學院的論文。

6 物理學基本原理

前已建立電荷的物理概念，但尚未定義測量電荷的單位。欲定其單位，可將相等之電荷 q 置於扭秤的二球上，當二電荷相距 r 時，測量作用於各球之力的大小 F 。當二電荷相隔為單位距離時，若單位之力作用於各球，即可定義 q 為單位之值，並對如此定義的電荷單位定一名稱。依照這種辦法而定義的電荷單位稱為靜庫侖 (statcoulomb)，但本書並不使用這個單位或含有這個單位的單位制。

爲了量度精確的緣故，mks 制的電荷單位由電流的單位而定義，若一長導線兩端連於電池的兩極，可知導線中產生電流 i ，此電流視爲電荷的流動。電流的 mks 單位是安培 (ampere, 縮寫爲 amp)，在第 30-4 節將敘述定義安培的操作步驟。

電荷的 mks 單位是庫侖 (縮寫爲 coul)，若在導線中有一安培的穩定電流，則在一秒鐘內流過導線某截面之電荷的量，定爲一庫侖。以符號表之爲

$$q = it, \quad (22-2)$$

若 i 以安培和 t 以秒爲單位，則 q 的單位爲庫侖。故若導線連一絕緣之金屬球，在 10^{-6} 秒內導線的電流爲 1.0 安培，則可置於球上的電荷爲 10^{-6} 庫侖。

【例 1】 銅幣質量爲 3.1 克，含有等量的正電和負電，故呈電中性。其電荷的大小 q 爲若干？一個銅原子有原子核正電荷 $\times 4.6 \times 10^{-18}$ 庫侖，和大小相等的電子負電荷。

銅幣中銅原子的數目 N 爲

$$\frac{N}{N_0} = \frac{m}{M},$$

N_0 是亞佛加德羅常數， m 是銅的質量， M 是銅的原子量。解 N 得

$$N = \frac{(6.0 \times 10^{23} \text{ 原子/摩爾})(3.1 \text{ 克})}{64 \text{ 克/摩爾}} = 2.9 \times 10^{22} \text{ 原子}。$$

電荷 q 爲

$$q = (4.6 \times 10^{-18} \text{ 庫侖/原子})(2.9 \times 10^{22} \text{ 原子}) = 1.3 \times 10^5 \text{ 庫侖}。$$

在 100 瓦特 110 伏特的電燈泡中電流為 0.91 安培，讀者應證明上式電荷之量流經此燈泡需時 40 小時。

式 22-1 插入比例常數即可寫成等式，該比例常數不寫為 k ，通常寫成 $1/4\pi\epsilon_0$ 之較複雜形式，即

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (22-3)$$

有些方程式由式 22-3 導得，但較上式更常使用；若寫成上式的形式，則導得之式其形式反較簡單。

在 mks 制中，可測量式 22-3 中的 q_1 、 q_2 、 r 和 F ，而其方法並不依靠庫侖定律，可將這些量定以數字及單位。 ϵ_0 稱為容電常數 (permittivity constant)，此常數並無選擇餘地；其值應使 22-3 式的右邊等於左邊。此常數之 (測得) 值為

$$\epsilon_0 = 8.85418 \times 10^{-12} \text{ 庫侖}^2/\text{牛頓米}^2。$$

在本書中取其值為 8.9×10^{-12} 庫侖²/牛頓米²，對所有問題言已够精確。至於庫侖定律的直接應用，或在有量 $1/4\pi\epsilon_0$ 出現的任何問題中，可用

$$1/4\pi\epsilon_0 = 9.0 \times 10^9 \text{ 牛頓米}^2/\text{庫侖}^2，$$

在本書中用此值够稱精確。由於實際量度方便之故，此值並非直接應用 22-3 式而量得，乃依相等但較迂迴的辦法，將在第 26-2 節敘述。

若有兩個以上之電荷，式 22-3 對每對電荷仍成立。設電荷為 q_1 、 q_2 和 q_3 等；由向量方程式計算所有其他電荷施於任一電荷 (設為 q_1) 之力，即

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14} + \dots, \quad (22-4)$$

\mathbf{F}_{12} 為 q_2 施於 q_1 之力，餘均類似。

【例 2】圖 22-3 顯示三電荷 q_1 、 q_2 和 q_3 。作用於 q_1 之力為若干？設 $q_1 = -1.0 \times 10^{-6}$ 庫侖， $q_2 = +3.0 \times 10^{-6}$ 庫侖， $q_3 = -2.0 \times 10^{-6}$ 庫侖， $r_{12} = 15$ 厘米， $r_{13} = 10$ 厘米， $\theta = 30^\circ$ 。

因只注重諸力的大小，可不計較電荷的符號，由式 22-3 得

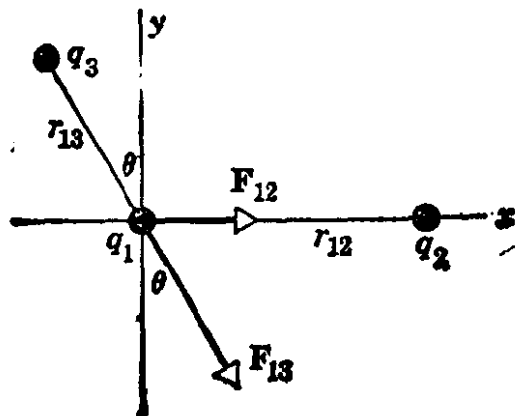


圖 22-3 例 2，圖示 q_2 和 q_3 施於 q_1 之力。

$$\begin{aligned}
 F_{12} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \\
 &= \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ 牛頓米}^2/\text{庫倫}^2)(1.0 \times 10^{-6} \text{ 庫倫})(3.0 \times 10^{-6} \text{ 庫倫})}{(1.5 \times 10^{-1} \text{ 米})^2} \\
 &= 1.2 \text{ 牛頓}
 \end{aligned}$$

及

$$\begin{aligned}
 F_{13} &= \frac{(9.0 \times 10^9 \text{ 牛頓米}^2/\text{庫倫}^2)(1.0 \times 10^{-6} \text{ 庫倫})(2.0 \times 10^{-6} \text{ 庫倫})}{(1.0 \times 10^{-1} \text{ 米})^2} \\
 &= 1.8 \text{ 牛頓。}
 \end{aligned}$$

力 F_{12} 和 F_{13} 的方向如圖所示，作用於 q_1 之合力 F_1 的二分量(見式 22-4) 爲

$$\begin{aligned}
 F_{1x} &= F_{12x} + F_{13x} = F_{12} + F_{13} \sin \theta \\
 &= 1.2 \text{ 牛頓} + (1.8 \text{ 牛頓})(\sin 30^\circ) = 2.1 \text{ 牛頓,}
 \end{aligned}$$

及

$$\begin{aligned}
 F_{1y} &= F_{12y} + F_{13y} = 0 - F_{13} \cos \theta \\
 &= -(1.8 \text{ 牛頓})(\cos 30^\circ) = -1.6 \text{ 牛頓。}
 \end{aligned}$$

試求 F_1 的大小和與 x 軸所成的角度。

22-5 電荷量子化 (Charge Is Quantized)

在富蘭克林之時，認爲電荷爲連續流體，對許多情形此觀念甚屬有用。但物質的原子學說顯示流體本身並非連續，例如水和空氣由原子組成。實驗證明“電流體”(electric fluid)也不連續，而由某種最小電荷的整倍數所組成，這種基本電荷以符號 e 代表，其大小爲

$1.6021917 \times 10^{-19}$ 庫侖。

任何出現的電荷 q ，不論其來源為何，均可寫成 ne ， n 是正整數或負整數。

像電荷之類的物理性質以間斷之“包”(packets)的形態出現，而非連續量的形態，這種性質稱為量子化。現有的原子和電子及質子之類的粒子顯示質量也是量子化的。以後將會知道幾種其他性質，當宜在原子尺度研究時，均屬量子化；能量和角動量即是其例。

電荷 e 的量子太小，故在大尺度之實驗中並不顯出電的“顆粒狀”(graininess)，正如我們不覺得呼吸的空氣為原子組成。例如在通常 110 伏特 100 瓦特燈泡中，每秒鐘進入或離開燈絲的基本電荷為 6×10^{18} 個。

現在尚無理論解釋電荷的量子化（或質量的量子化，即如質子、電子、 π 介子等基本粒子的情形）。

22-6 電荷和物質 (Charge and Matter)

就日常經驗，認為物質由三種基本粒子構成，即質子、中子和電子。表 22-1 列示其質量和電荷，注意中子和質子的質量大約相等，但電子則約輕 1836 倍。

表 22-1 質子、中子和電子的性質

粒 子	符 號	電 荷	質 量
質 子	p	$+e$	1.67261×10^{-27} 仟克
中 子	n	0	1.67492×10^{-27} 仟克
電 子	e^-	$-e$	9.10956×10^{-31} 仟克

原子由密緻帶正電荷的原子核組成，電子雲環繞於外；參閱圖 22-4。原子核的直徑自氫核之 1×10^{-15} 米變至最重原子核之 7×10^{-15} 米，電子雲的外直徑即原子的直徑，在 $1 \sim 3 \times 10^{-10}$ 米範圍內，比原子核直徑約大 10^5 倍。