

553206

3345  
7/216

科學圖書大庫

# 電漿物理學

譯者 孟憲鈺

校閱者 楊覺民

南京大學圖書館

基本館藏

徐氏基金會出版

徐氏基金會

科學圖書大庫

引介世界科技新知  
協助國家科學發展

發行編號 0070

180

3345

553296

7/2161

科學圖書大庫

# 電漿物理學

譯者 孟憲鈺

校閱者 楊覺民

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會  
監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

# 科學圖書大庫

版權所有



不許翻印

中華民國六十八年三月七日再版

## 電漿物理學

基本定價 1.00

譯者 孟憲鈺 清華大學物理研究所肄業

校閱者 楊覺民 清華大學核子工程組副教授

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

出版者 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686 號

發行者 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第 15795 號

承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話 9719739

# 前 言

這本書是為那些並不準備專門去做關於電漿的研究，但是想比從一般報章雜誌上能得到更多關於電漿知識的人所寫的。

本書是按下列程序安排的。第一章是對電漿物理學的源由作一概括敘述。第二章至第七章是以最基本的數學來述說一般的理論。第八章到第十一章是處理工程問題及應用。

一些材料是摘自作者的前輩研究的結果和出版刊物，或是在西北大學氣體動力學實驗室所做的研究工作。必須注意的是氣體力學實驗室是獲得美國空軍，國家科學基金會和國家航空及太空總署以及一大群工業公司財政上的支持。另外的資料是從目前有關的刊物或同類的參考書上蒐集來的。

有許多人曾對作者提供幫助。羅勃，安斯鮑夫先生 (Mr. Robert Anspaugh) 是伊瓦斯通 (Evanston) 區高等學校的物理老師，曾予本書校正，並將第一次草稿送給最高級生試談。雷哈，勞維爾先生 (Mr. Richard Lowell Hall) 是伊瓦斯通區高等學校的化學老師，讀了部份原稿並提出更深入的問題。其他讀了這本書稿並且提出建議的有密西根州立大學的湯瑪士，法瑞爾教授，西北大學的大衛，米尼茲教授 (Davide, Mintz) 以及加洲大學的安東尼，歐本海默教授 (Antoni, K. Oppenheim)。一部份的圖片是由通用公司的福爾德瑞克，考夫曼 (Frederic de Hoffman) 博士所提供。特別向麥克瑞圖書公司 (Mc Graw-Hill Co.) 及西屋電器公司的斯提威特博士 (Dr. Stewart Way) 致謝。不同次數的稿件的打字由伊斯，路易 (Ethel Roy)，美爾姬，白萊特 (Marge, Bright)，巴爾巴瑞，馬克考溫 (Barbara McCowan) 和威理瑞，尼爾遜 (Valerie Nelson) 所分擔。

在整理原稿時，編者路易士先生 (Mr. Louis F. Vogel) 曾提供不少極有價值的建議。

最後，作者對他的四個孩子表示謝意，他們停止慣常的喧鬧而使屋子保持清靜。必要時他們並且幫助做零星工作。而且他們和他們的朋友一直讀從打字機打出的新稿。他們的批評是所有批評裏最殘忍的。

阿里，鮑蘭特，卡貝爾

瑪麗，卡貝爾·

# 目 錄

第一章：宇宙間的電漿 .....	1
第二章：從氣體到電漿 .....	7
第三章：運動和數學 .....	17
第四章：磁流動力學 .....	27
第五章：碰撞及遞傳質 .....	33
第六章：電漿在熱力學上的性質 .....	39
第七章：電漿波 .....	43
第八章：有用的電漿 .....	53
第九章：電漿的產生 .....	61
第十章：電漿診斷學 .....	75
第十一章：受控核子融合 .....	83
附 錄 .....	99
索 引 .....	101

# 第一章 宇宙間的電漿

在人類開始使其周圍環境能配合人們的需要以前，電漿 (plasma) 早已存在於宇宙中。很早人類就已經熟悉兩種形式的電漿——閃電及極光，雖然那時還認為這些是一種預兆或者是神的作為。科學使閃電及極光從人類以往迷信中揭露出來，並且知道那是大自然的一種現象。現在，我們相信宇宙差不多有百分之九十以上是由電漿所組成的。正像人類為要謀求本身的幸福而一個接着一個的利用自然現象一樣，人類正在尋求利用自然狀態的電漿，並且正試圖以人工方法來產生它。

在地球上，人工製造的電漿是愈來愈普遍。我們可以從電銲弧光的光炬之中，在燦爛的螢光燈青白色的光中，在電視機的電子管中發現電漿。電漿可被用來切斷或包鍍金屬，而目前正在十分小心地去檢視其性質以期在未來能擔當能量產生及太空引擎的任務。

不論由人工方式製成或由自然界所形成，電漿是由電子，離子及中性的質點所構成的氣體。由這些質點所組成的氣體已經從它們的最初狀態改變了許多。所有的這些改變可由物理定律加以診斷。因此，探查電漿的複雜性質的學科稱為電漿物理學 (plasma physics)。在所有的物理學各部門之中與此種學科最有關係的是：電學和磁學，正如近代建築結構上的鋼筋水泥一樣。

通往電漿物理學的道路遠在西元前六百年左右已經開始了。亦是當希臘哲學家 (Thales of Miletus 西元前624—547年——譯者註。) 描述磁石的磁性質的時候。在以後幾百年，磁石因為它具有巫術上的性質而被尊奉。漸漸地，磁石被應用於航海用的羅盤。而其促成地理上發現的結果，不僅是地圖的更改而且造成知識的交換，變成一種科學上探究的原動力。

當威廉·吉伯特 (William Gilbert) 是英格蘭伊利莎白女皇一



世的宮庭醫師的時候，仍然存在着許多關於磁石能力的神話。吉伯特否認一般的信仰而開始對磁石互相吸引做了一些有系統的實驗。他實驗的結果，當作電學的一部份，而於西元一六〇〇年出版。雖然它弄亂了形而上學；但它仍然是一株強壯的小樹苗，而使得以後兩百年的電學與磁學平行發展。

許多人想要建立磁學與電學的關係，而每一次的努力都獲致少許進展。終究以戲劇性而意外的發現了它，在一八二〇年春天，奧斯特 (Hans Christian Oersted) 用一個剛由伏特 (Volta) 在不久前所發展成的化學電池來加熱於一條線。而一個羅盤放在他實驗儀器的附近。當電池與導線相連，羅盤針竟劇烈的搖擺而離開這條線。從這一刻開始，研究變成非常刺激的冒險。當這條線與羅盤針成直角的時候，針頭只稍微移動，但是當綫與針平行時，針擺動幾乎九十度。如果綫放在針上方，針頭就向西擺動；如果在下方的話，則向東擺動。羅盤針的這些行為並非奧斯特所期望的。不論如何，他很快的了解這實驗所顯示的：電流創造一個磁場。

在幾個月之內，奧斯特實驗的消息傳到了巴黎的安培 (André-Marie Ampère) 那裏。安培也是利用以往物理上的發現以及跟隨着與日俱增的知識洪流來研究電與磁的關係的。也許，他對奧斯特的觀察覺得不耐煩，因為奧斯特他們無法充分地解釋這實驗，不過他仍然十分欣賞奧斯特的重要發現。他立刻弄明白這位丹麥教授的實驗，並且極用心的想出一種數學方式來處理電流性質。

安培推斷，假如一個電流影響磁鐵，則一個磁鐵亦必影響電流。假如二個電流影響同一磁鐵，則他們會相互產生影響。從這些簡單前提之下，安培建立了可由電生磁效應的事實。

正當安培將導綫放在另一導綫之上，並且將電流方向變換以完成他的數學描述「如何由電產生磁場」的時候；在英格蘭的法拉第 (Michael Faraday) 也正在研讀每一件他所能夠挖掘到關於電學與磁學的事。他時常十分謹慎地做一些人家做過的實驗，希望能找出由磁產生電的綫索。在一八二二年，他在筆記簿上摘記下「將磁轉變成電」這句話。再向後看，或者一個人會懷疑為什麼在最初幾年突然闖

明了電磁之間的關係，而以後的發展並不十分輝煌。的確，所有片斷的了解都加以利用，甚至在一八二二年法拉第仍然無法同時去調和電磁關係。不過在十年之間，他的工作使得他在一八三一年完成了許多關於電磁感應有意義的實驗。而且寫下了定律，建立了電動機的模型，他的三個實驗在圖 1.1。

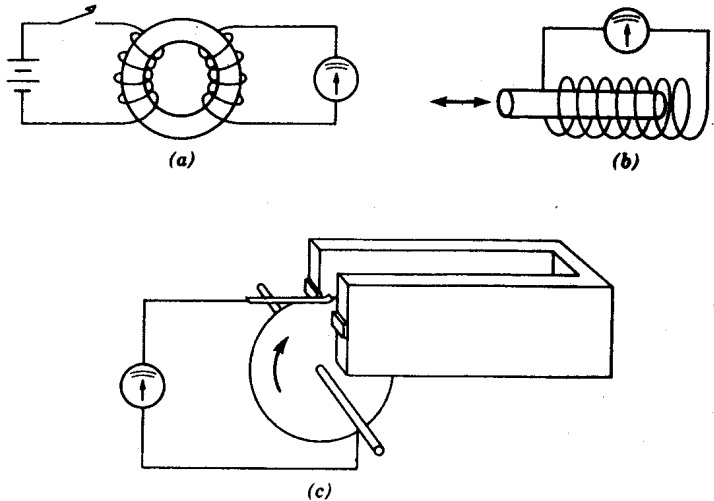


圖 1.1 法拉第的實驗。(a) 當一邊含有電池的線圈的線路中，而開關啟或關閉之瞬間，電流在鐵環的另一端的線圈中流動。(b) 當鐵磁插入或抽出線圈，會產生電流。(c) 當一個銅片在馬蹄形磁鐵的二極之間轉動時，橫過銅片而產生感應電流。

他實驗的結論，震驚了那個時期的理論家，他提出了磁力線 (magnetic lines of forces) 的觀念。他支持當鐵屑撒在磁鐵附近所形成的圖案曲線與地球磁場所形成的曲線圖形一樣。感應電流，必須使用導體去切斷磁力綫。圖 1.2. 是一位藝術家繪出法拉第企圖描述他的觀念時的情形。法拉第在一個橫跨湯姆士河的滑鐵盧橋上。二個電極懸掛在河裏，法拉第聲稱，假定他的假定是對的，電的導體——湯姆士河，將切斷由於地球磁場所產生的垂直方向的磁力綫。因此，他正確地預料他的電流計會記錄由他的電極所集成的感應電壓。實際上，

#### 4 電漿物理學

法拉第得到了讀數雖然是微弱與不規則的數據。差不多二十年之後，烏拉斯通 (Wallaston) 重複他的實驗而得到滿意的結果。

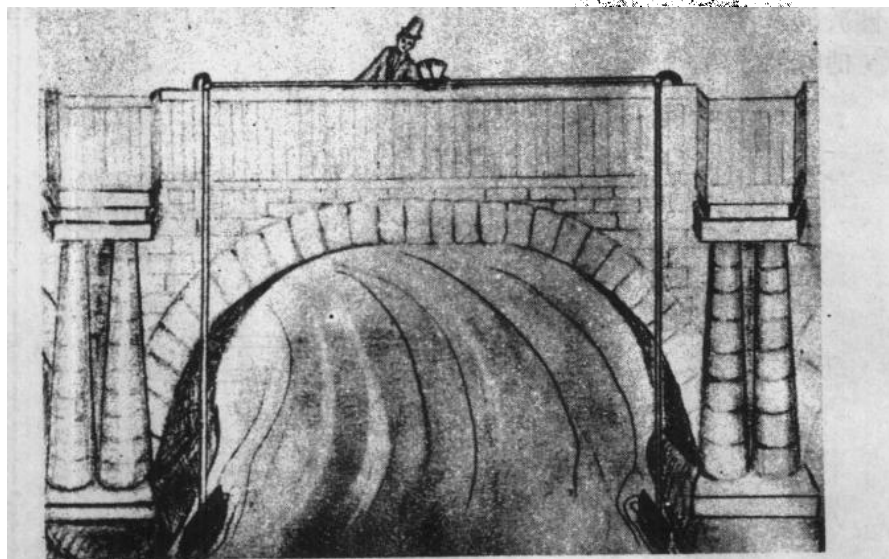


圖 1.2. 藝術家繪出法拉第正在滑鐵盧橋準備作產生電的實驗。

「因此我在滑鐵盧橋做實驗，用一條長 960 英尺的銅線掛在橋欄杆上，從其二端緊繫欄杆而垂直於水面，在線二頭，各懸以金屬板並且充分與水接觸。因此，銅線與水構成一導電線路；當水退走時，我希望得到電流……」。

「我經常在電流計裏得到偏折的現象，但是它們非常不規則……」。

在一八三二年一月一二日，巴克林 (Bakerian) 演講稿，第二卷。（本圖由西屋公司提供，卡貝爾 (M. Cambel) 所繪）。

同一年（一八三一年），當法拉第在電磁感應方面做實驗的時候，馬克士威爾 (James Clerk Maxwell) 在蘇格蘭誕生了。二十四年後，馬克士威爾用數學式子給予法拉第的實驗的理論形式。用他的式子，馬克士威爾了解並且對電磁關係觀察結果公式化。法拉第極悅於此項嚴格的數學處理，雖然尚有許多同時代的研究者仍然懷疑它。

馬克士威爾不理會他的毀謗者，繼續他對電磁學的探索。因為他發現電磁學要求不通常的數學，因而他發展出數學的一支，也就是一般所稱的「向量分析」。「向量分析」不僅節省了大量的時間，同時它更能明白地表示出許多不通常的現象。一般繁雜的計算使用「向量分析」，可說是「數學速記法」，甚至到目前，由馬克士威爾所寫出的場方程式，仍然是電磁場論的語言。

場方程式 (field equation) 使馬克士威爾能夠比較那些在外表上看來是獨立的研究成果。僅在很短時間以前，才發現電擾動沿着一完全導綫傳播速度為  $3 \times 10^{10}$  厘米/秒。光速也不過是在更早幾年才計算出來，其結果也差不多。這二種數據看來非常相近，能符合馬克士威爾的結果。他比較實驗結果，並加以分析，結論是說：在一條綫上的電流與光在空間具有同樣的速度。這證明了電磁擾動以光速傳播，也是馬克士威爾場方程式極重要的結果。

由奧斯特、安培、法拉第、馬克士威爾及許多其他的貢獻者，促使電磁學獲致極大的進展，而把其它的研究者，在通往電漿物理學的路上，帶進了一大段。

宇宙中的電漿已經產生了許多年代，而任何想在地球上模倣產生出電漿來的努力能實現之前，對在原子結構和質點行爲方面廣濶的知識，仍然是不可缺少的。

## 6 電漿物理學

## 第二章 從氣體到電漿

### 電漿的定義

「電漿」這兩個字是一位偉大的美國化學家朗格莫爾 (Irving Langmuir) 在一九二〇年時做氣體放電實驗時所採用，他注意到在電子管中的振盪，與在活的細胞中的激烈翻動有令人驚異的相似之處。電漿振盪能與在一個搖動的碗中的膠質顫動情形一樣。在活的細胞裏有一種類似包含許多質點的膠質。朗格莫爾撤消這種細胞的膠質最原始的名字「原生質」(Proto Plasma)而非常簡單地只借用這個字的一部份作為他所觀察的東西標記——電漿 (Plasma)。

自一九二三年「電漿」被引介到科學術語內之後，它曾被用來描述與電離氣體有關的許多現象而混亂了它本來的真正意義。一個定義是說任何一種導電的氣體稱為電漿，而不管它電離量如何，也不管是否是呈帶電的中性。這種混淆導致許多物理學家，為了正確定義而添加了限制的字句，例如：電漿可以被描述為一些部份電離的電漿或全電離電漿。

部份電離的電漿，是由許多帶正電及負電以及中性狀態的質點所組成的。換句話說，在一個全部或者完全電離的電漿，每一個氣體質點至少都失去了一個電子。因此，在全部電離的電漿裏，沒有中性質點。雖然整個氣體也許呈中性，這是因為當正電荷與負電荷相等而互相抵銷時所成的結果。氣體如果不呈帶電的中性，必定會有一些空間電荷存在，通常以  $\rho$  代表。空間電荷或電荷密度定義如下：

$$\rho = -e(n_e - n_i)$$

這裏， $e$  代表電子電荷， $n_e$  是單位體積內的負電荷數， $n_i$  是單位體積內的正電荷數。

我們曾發現環繞一個物體四周的氣體的套子 (gaseous sheath) 並不一定是中性，這件事實被認為電漿有另外的定義，一些科學家對中性的電離氣體叫做電漿，當他們稱呼一個非中性的電離氣體時叫電漿套子 (plasma sheath)，說得更簡單一點，叫套子 (sheath)。舉一個非中性電漿的例子，例如：在太空艙前面所形成的一種電漿，可由圖 2.1 看出，這種電漿套子的存在及其帶有過多的電荷密度，使一個超音速的太空艙重返地球時，經過大氣層變得非常困難與危險。

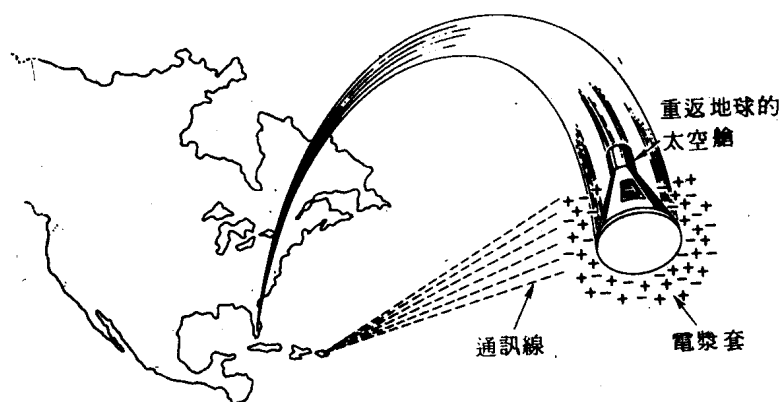


圖 2.1 由藝術家所繪在重返地球的太空艙前面的電漿套。

不論電漿是否為中性或非中性，或者部份或全部電離，對所有不同種類的電漿必有一共同的改變。甚至當我們呼吸空氣的時候，能夠照前述的定義變成電漿。

## 電離

空氣由氮、氧與少量的二氧化碳，氫及其他元素混合成的，雖然空氣是一種複雜的混合物，但是，我們大致可說由氮及氧混合而成。實際上，在實驗室的工作上，其他存在於空氣中的混合物能被忽略而只須考慮二種最主要的混合元素。

忽略存在於空氣中較少部份的其他元素，剩下的則是由氧分子與氮分子所組成的雙原子氣體。雙原子分子可用一個剛體的轉動子或啞鈴所代表 (看圖 2-2a)，也可以用一根二端繫有硬球的橡皮棒來代表

在絕對零度 (攝氏零下-273度或用凱氏0度代表), 分子幾乎不再運動, 其原因如下, 照理想情況來說, 任何物體所具有的能量不能少於其在絕對零度時所具有者, 在溫度高於絕對零度時方能交換能量。

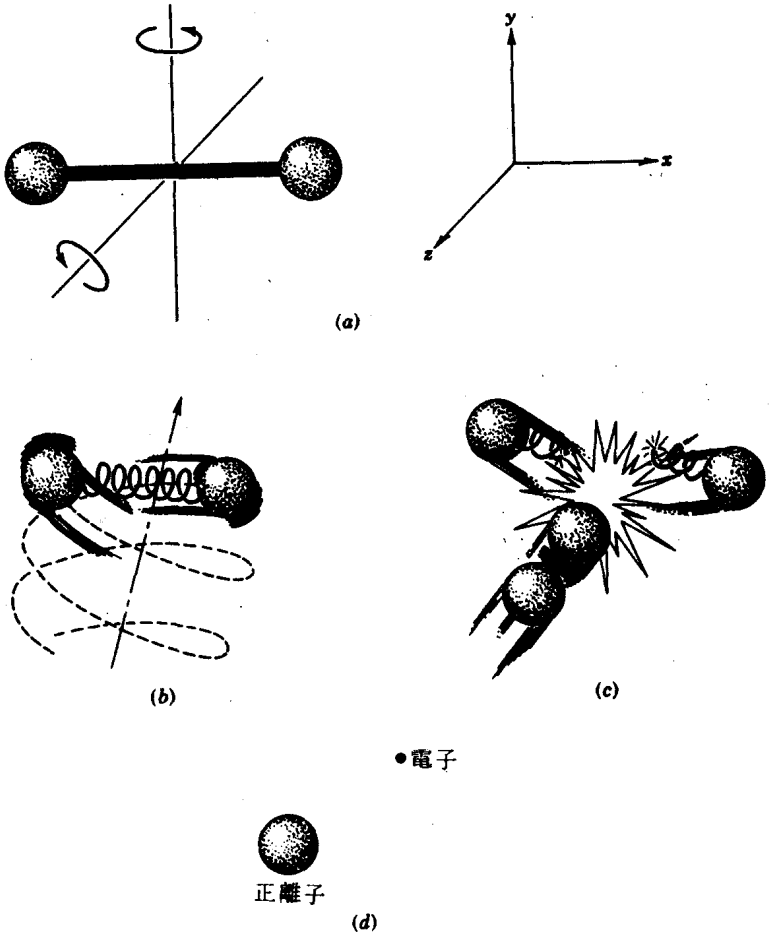


圖 2.2. (a) 剛體轉動子具有移動及轉動的自由度。 (b) 振動的自由度。  
 (c) 分子游離成中性。 (d) 原子的電離作用。



在溫度趨近於絕對零度時，分子能向前方，旁邊或上方運動。更科學化來說，分子能在 $X$ ， $Y$ 和 $Z$ 方向移動（看圖 2.2a），我們說，分子具有三個移動的自由度（degree of freedom），每一個自由度都具有一特殊的能量。

當氣體溫度達到大約10度時（凱氏）或者攝氏  $-263^{\circ}\text{C}$  時，分子得到兩個轉動的自由度，其方向可由圖 2.2b 看出，在這種溫度，原子之間的橡皮棒子仍然非常堅固，但是當溫度漸漸升高時，這根棒子好像是彈簧，開始具有振動的自由度。這種情形大概發生在  $1000^{\circ}\text{K}$  或  $727^{\circ}\text{C}$  的時候。由於氣體分子之間的碰撞而造成了原子轉動以及在這二個原子之間的棒子像彈簧一樣的作用。當二個分子互撞的時候，每一個分子的原子都從它們緊束的母體拉遠，他們動能轉變成位能，下一步，橡皮棒又像彈簧一樣把它們拉近，而使位能又轉變成了動能。在一個振動的週期中，一半時期是位能，一半時期是動能。

溫度愈增高，分子之間的衝擊亦愈強，直等到連接原子之間的棒子不再能忍受這種張力，最後，棒子斷了，每一個原子在不同的方向飛開。棒子——（或稱之謂分子鍵）斷了，此種現象稱為游離。氧大約  $3000^{\circ}\text{K}$  時開始游離。而氮要在  $4500^{\circ}\text{K}$  左右才開始游離。

溫度一直增加到超過游離溫度的時候，環繞在原子核外軌道上的電子成受激狀態\*。這種受激作用增加了整個氣體的總能量，但並沒有顯着的效果顯現出來，一直等到約  $5000^{\circ}\text{K}$  的時候，更高的溫度，使電子脫離它們的軌道。當電子離開原子最外層的軌道時，原子不再呈中性，而是多了一個正電荷。一個原子帶有一個額外的正電荷謂之正離子（positive ion）。

當許多原子失去了電子，在氣體中離子的數目增加了，這種氣體如果充分電離，則可在工程應用上加以考慮。這種情形通常發生在一氣壓，溫度  $10,000^{\circ}\text{K}$  或更高的溫度時候。

對於一位希望設計電漿產生裝置的工程師來說，他非常幸運地知道游離作用及電離作用決定在壓力及溫度，但又被材料所限制住，因為很少材料能忍受這麼高的溫度。像一般情形一樣，高溫有助於電離作用。假定壓力一定，溫度增加，也增加了電離量。「反之，溫度一定，壓力減小，電離度也會增加」。例如：這句話：

\*請看附錄：原子。