

萬有文庫

第一集簡編五種

王雲五主編

實驗物理小學史

(上)

著 斯 徹

譯 樂 楊

省立新竹高中圖書館



00010987

借書登記表

借閱者	借出日期	歸還日期
陳照際	45. 11. 22	45. 11. 24
張齊光	45. 11. 21	45. 11. 24



實 驗 物 理 學 小 史

(上)

著 斯 微

譯 楊 偉 嬋



自 然 科 學 小 叢 書

010987

題辭

美國學物理的學生所受的訓練有些嚴重的弱點，其中之一無疑的就是他對於物理學在歷史上的發展殊少得着親切的了解。

我自己認為倘對於物理學中各原則的本身要得着透澈的把握，就不可缺少這種歷史上的展望。

倘使徹司博士這一本書，在這樣狀況的糾正上，能稍發生影響，他對於美國的科學就已經有了很有價值的貢獻。目前對於這種注重物理學的發展的專書漸感需要，至少可以說是健全的表徵。

Robert A. Millikan (密立根)

原序

倘使把物理學視為實驗科學而鑽研其發展的歷史，則早期的格致家工作時所受的困苦，使人不得不起深刻的印象。就大多數而論，他們的努力都是單人獨馬，無所依傍，前人觀察所得的結果，經刊布而可以資為依據者，既幾於全然沒有，而隨着他們潛心致力而來的障礙惟有公衆的絕情漠視，甚至於還要遭仇意的反對。

然而到了較為晚近的時期，物理學中的實驗，由於人們持着真正的科學態度去接近牠，遂受着推動的力量。這門科學發皇滋盛，於是往往有一個意思的種子是一人所播下的，而實證的研究乃由多人所舉行。這就是為本書所採的編制方法的說明。本書前一部份是早期諸物理學家的工作的敘述，必然的不甚連貫，而後一部份則把經過許多階段的發展，修正的學說，加以整理排比，以形成最後的結晶。

本書意在把物理學上大發現的勝利進行，試陳於讀者之前，使得一廣闊的展望，其有自成歷史和足為進展路線上的特殊標識的研究，則不惜留連考察。許多祇有暫時或疑似的趣味的實驗都未曾述及；有若干實驗，縱然富於趣味，而其位置並不在進展的幹線上，亦祇得割棄。與重要實驗有關的理論探討，以及由這類實驗引起的理論，都加以簡括的討論，以說明實驗之所以確有關係純粹屬於數學上的考察固未列入，而除了有限幾點與物理學不可分離的地方，天文學在本書中也沒有可估的餘地。至於哲學上和神學上的含義更非本書所當涉及，不得不留待他種書籍為之敷陳。

作者的希望是，本書的範圍有了這樣的限制，實驗物理學發展到現在的崇高地位，其中較為重要的各步驟方可以得著其分所應得的適當闡明，而同時讀者不致因眩於包舉太廣，反而對於歷史上發展的大趨向和每一階段有賴於以前各階段的緊要連繫，倒茫然不會領會得。

C. T. C. 一九三一年一月，於紐約。

目錄

第一章	物理學之肇始	一
第二章	開創人伽利略	一四
第三章	光之波動說	二五
第四章	熱之動力說	五一
第五章	原子與分子	六七
第六章	法拉第邁克爾	八七
第七章	赫芝與馬克思威爾	一一一
第八章	陰極射線與X射線	一二二
第九章	放射性之發現	一三四

第十章	放射性與惹瑟福原子	一四七
第十一章	量子論之誕生	一六〇
第十二章	光譜學與波耳原子	一七〇
第十三章	相對論之實驗基礎	一八四
第十四章	邁克爾孫與光之速度	二〇〇
第十五章	電子	二一〇
第十六章	輻射之微粒性	二二〇
第十七章	電子之波動性	二二八
第十八章	波動力學與原子	二三四
	著名物理學家紀年簡表	二四〇

實驗物理學小史

第一章 物理學之肇始

物理學之成爲實驗的科學，幾乎還不滿三百年之久。其歷史實發端於伽利略（Galileo）的時代；因爲第一個物理實驗雖然非他所作，而實驗科學的近世時期實以他的工作劃時代之始。

假如我們認希臘的泰爾斯（Thales）爲物理學的鼻祖，則物理學之成爲實驗的科學祇居其全期的八分之一。科學的年歲比起來老得多；因爲在泰爾斯以前許多世紀，人們對於自然已起了深厚的興趣，足使他們注意到自然現象，更進而推測其原因。但最近三百年內所達的奇速的進步在早期中實無倫比。現代文明組織的本身就是實驗科學的結果。亞里士多德（Aristotle）雖然是哲學的大師，他全部的學問卻不會給他製成一架電話機的本領。



泰爾斯是希臘的買里他斯 (Miletus) 地方的人，他在世的時期約在耶穌紀元前六百年。買里他斯就是現在小亞細亞的一部分，在當時卻是希臘文明的外徼。泰爾斯傳受着那時代的初步幾何學和天文學；這兩門學問，應實用上的需要，彼時已有發展，主要的地方要算埃及 (Egypt) 和巴比倫 (Babylonia) 和亞西利亞 (Assyria)，而腓尼士亞 (Phoenicia) 人中也有所貢獻。古代的人需要一點幾何學的知識，好來計劃他們的房屋，測量他們的田地，特別是在埃及，尼羅河 (Nile) 按着週期氾濫為災，往往把毗連的地產的界址沖毀湮滅，幾何的用途更是切要，而腓尼士亞人則利用他們的星象知識，幫助他們貿易上所用的船舶的航行。這些古代人，由日月的運行，覺察了時光的流駛，並且知道行星有與其他天體不同之處。這些天體的運動有若干一定的規則，也為他們所見到，泰爾斯竟能預測出太陽的一次全食。他因這次預測之實現而享盛名。然而他之所以列為物理學家，並非由於他在天文上的研究，而是由於有記載可考的第一次電象觀察乃他所作。泰爾斯覺察到一塊琥珀，倘使用織造品去摩擦牠，便獲得為牠以前所無的新性質。這塊被擦過的琥珀得了吸引輕微物件，並且持着不放的本領。我們現在說珀球乃因摩擦而帶電，而其吸着紙片或木髓，

乃由於電的吸力。其實英文中 Electricity 一字（意爲「電」）即從希臘文中意爲琥珀的字
變而來。泰爾斯對於隱伏在他的觀察之下的原因，當然毫無所知。他並不會悟到：那許多人無不
怵目驚心，避匿不遑的現象（就是那天空中迅烈的電閃）和他那擦過的琥珀之間，竟有極端的
肖似。

所以我們並不能說泰爾斯是一位真正的實驗科學家。他不過是視之而見，加以注意而已。照
我們現在的觀念，一個真正的實驗家就會提出明確的問題，訴之於自然而待其答覆。他會理會到：
琥珀倘使受了摩擦，許就可望其獲得新異的性質。他於是就會去作試驗而觀察其結果。倘使他所
料的實現了，他第二步就會去試旁的物質，去考見用同樣的處理是否發生同樣的結果，並且爲窺
全豹，他就會用旁的方法去試驗琥珀，追究他所觀察到的這個新現象，是否也能由別樣方法產生。
在他那時代，泰爾斯還是一位能幹的工程師，地方上市政工程的工事正用着他。他對於一切
事物，都要尋究其潛在的緣故和一貫的原理，這在現在也還是物理學家的主要目的之一；不過泰
爾斯認爲水是自然中最基本之物，是生命的首先需要之一，這個看法在現在自無甚可取了。

皮達果拉斯 (Pythagoras) 在世的時期大約是從耶穌紀元前五百八十二年起到紀元前五百年止。他創立一種集會，即所謂皮達果拉斯學校，在這學校裏，有一特點，無論師徒，共作共習。皮氏學派中人首要的旨趣所在，是數的抽象理論，要求出自然中的數學關係，來證實他們認為數之重要為無上的觀點。他們在幾何學上的研究，已為二百年後的歐克立德 (Euclid) 開其先河。歐氏幾何中許多命題都先經過皮氏的研考。然而把他看作一個物理學家，則皮氏之所以為人紀念者，主要的原因是他在聲學上的研究。他用所謂單弦來作的實驗，是向自然發問的最早嘗試之一。他製作單絃的思想無論是由亞波羅的七絃琴而起意，或是從鐵匠鋪裏發出的鐘鍛的樂音而悟到，不去細考，總之，單絃是他所造成，而且還做了實驗來測定樂音的音調如何依着振動絃的長度等等而變異。單絃就是單根的絃，緊張於適當的支柱之間，裝在共振板上，以放大其發音的強度。另有一可以移動的絃柱，讓人將絃的振動部份的長度加以改變。就小提琴而論，振動的絃的長度是由琴師的手指去改變，而提琴的正身就是共振板。皮氏發現絃在振動時發出的音調與絃長成反比。不特此也，他又發現：依單簡整數（如一、二、三等）成比例的絃長所發的音最為諧和。在他所珍

愛的數學和音樂之間，居然尋出這樣密切的關係，皮氏喜慰之情自可想見。但是皮氏又把這個實驗的結果推到他無法實驗的境界裏去。他竟從事於「球體音樂」(“music of the spheres”)的研究，把地球到各行星間的距離，斷為必成樂音級數，其相互的關係必與他的單絃在振動時發出諧音的絃長的關係相同。

皮氏不會辨識空氣和虛無的空間的分別，這個分別，直到安納克薩拉士 (Anaxagoras) (約在耶穌紀元前五百年至四百二十八年) 和與之同時的愛姆皮多克利斯 (Empedocles) 方纔指證出來，並且證明空氣為實質之一。在這個證明裏，他們是用水漏 (water clock) 來作觀察。水漏者乃一盛水之壺，上面有一小孔，近底之處，另有一孔，水可由之或流或滴。時間就以流出的水量來量。他們觀察到的事實是這樣的：把漏壺的下部沒入水中，同時如用拇指將上面的小孔蓋嚴，水就不會進入壺中；換句話說，倘空氣不能出壺，即無水能入壺。還有一點，倘空氣不能由上孔入壺，已在壺中的水也不能出。這裏就看得出：空氣和虛無的空間有很明晰的分辨。安氏對於動物的呼吸，也曾研究，他觀察到魚是用鰓來呼吸。

安氏是所謂原子論家 (atomists) 的第一人。他相信一切的物質，分析到最後一步，都是人所看不見的微層所成，這些微層之所以聯合而成實物，乃由於受了某種主因的影響，至於何為主因，他設想微層間亦如人類，有愛憎的情感，以愛憎之度不同，會合之態即由之而異。他對於自然和造物的觀點既取物質主義，所以極為正統派所厭惡。這樣的原子觀自屬含混，盧西泊斯 (Leucippus) 加以整理，乃略見澄清。盧氏講到實物的由來，乃因原子在虛無的空間中有偶然的遇合。在這時期中，抱原子觀的有三人，安氏、盧氏而外，最後一個而最有名的就是德謨克利他斯 (Democritus)。(約從耶穌紀元前四百六十年到三百七十年)。他們三位都是希臘文化的所謂黃金時代中的人物。

我們必須記牢，在這些人的意念中的原子絕不是現代物理學和化學裏的確定的觀念，儘管現代所謂原子的名稱是由他們所取的。所以有最後不可再分的質點的觀念，實由於人們探究物質（譬如一滴水）的可分性的原故。問題是：一滴水是否永能分了再分，使成更小的部份，或者有一個限度？德氏知道，用簡單的辦法會把冰變為水，水變為蒸汽，但不能將冰變為石頭。所以他就

猜到必定有各種的原子。石頭的原子和石頭的原子聯合而成石頭；但是石頭的原子和旁的物質的原子聯合起來，就做成與原有兩種都不相同的物質。冰、水和蒸汽之間的分別本為不解的事，德氏卻從原子觀得着他可承認的說明。

德氏對於新理，熱心講授傳播，不遺餘力，所以在他那時代的原子論家中，他最為知名，直到現代，仍然著稱。他具有三項現代的科學態度：第一、不倦的研詢；第二、合理的懷疑；第三、對他的理論作須由實驗證實的要求。但是他沒有甚麼方術來對原子作實驗。然而我們知道他確然見到實驗證明的切要，並且他並不會教人說自然的原子性論是絕對的真確。與他同時代的人大多數都不能說有他這樣的謹嚴。

亞里士多德乃古今來最偉大的哲學家之一，他在世的時期約在耶穌紀元前第四世紀，一向居住在希臘。他是那柏拉圖的著名學院裏的生徒，但我們卻無從稱他為物理學家。在物理學上，柏拉圖絕少貢獻，我們把他略去不譯，並不為過，但是他這位赫赫有名的高足，倒不得不破費一些工夫來表敘一番。在實驗物理學上，亞里士多德之所以關係重大，就在他對於科學思想的羈絆，歷年

很久，仍牢不可破，直到二千年後，實驗方法苦苦自求樹立，科學還得努力奮鬥，以求解脫亞氏遺著的纏鎖。

亞氏寫了許多涉及科學的書。他視察自然現象，並且自問自思，求其理解。祇有從這一點看去，可以說他曾作觀察。但是他的觀察告訴他，凡他所業已前知的必為真實；倘若他作實驗的話，這些實驗的目的不在於察出自然如何作為，而在證明自然所作所為一如他所預知。他顯然具有成見，這是沒有一個科學家所應有的一種品性。若向自然發問，必須讓自然自行申答，這纔是現代科學的態度。亞氏則不然，倘使問題是他提出的，而自然的答案似乎和他預存的意見相違，他就認為這不是事實的問題，而是詮釋的問題。無論什麼問題，他總提得出合於他意的詮釋。窺他的意見，這種觀點，即使是除了形上學外毫無所據，也必然不會錯的。這句話固然是我們的講議，但是亞氏陷入這樣的偏見，他並不自覺，還要認我們的揣測是無端的誣蔑，這樣武斷的觀點在他是要排斥的，猶之乎認力學為應根據於形上學的觀點，在現代的工程師看來，是絕對不能容納的。

亞里士多德有偉大無比的論理本領。他的遺著裏堆積曲喻，妙緒泉涌，足令懷疑者藉口結舌，

所以在他身後二千年他的書，在一切與科學有關的事物上，還是不祧之祖。這在天文學上，尤其顯著，不過在本書裏沒有多餘的篇幅來詳敘了。總之，他說行星怎樣運動，大家就奉爲金科玉律，以爲行星必然照他所說的作運動。縱然後來有了長時期的經歷，實驗開始告人以關於天體的新事實，碩儒大師還是惟有頹搖其首，歎爲無當於亞里士多德！

這個論理學興盛的時代，確是歐克立德的幾何學滋生的沃土。歐氏幾何的特點就是從已知的推理到未知的，或者照我們現代的說法，從假設的推理到未知的。這個方法實在足以代表亞里士多德的態度。不過就亞氏而論，他所謂已知的並不會有實驗的根據。我們在今日仍然看見理論物理學家由已知的推理到未知的，但他的已知的是實驗的事實；而且他精思熟考的結果，不到完全全爲實驗所證實的時候，除了他自己而外，旁的人不會認爲真實的；他的理論獲得實驗上的證據愈多愈妙。現代的理論家全靠業經證爲無懈可擊的數學方法，難得乞靈於純粹的假設或內心的神悟。亞里士多德則多賴神悟。歐克立德之所以巍然不拔，除了他的準確的論理而外，還靠着他用實驗的事實爲起點。他本人倘使要把他所有的公理和基本假設用實驗去證實也不致有什

麼困難。他會否立意為他的講說求實驗的佐證，現在固是疑問，然而這樣的真憑實據卻天天在他面前呈現。譬如說，由他的住宅到十字街頭的最短距離，他當然看得出，就在兩處之間的那條直線上。

歐克立德之後，在耶穌紀元前第三世紀，接踵而起的是亞基米德 (Archimedes)。他們兩人都與亞力山枝亞 (Alexandria) 學院有關係。亞里士多德曾做過亞力山大大帝 (Alexander the Great) 的師傅，而自從亞力山大征服希臘之後，學問和文化的中心便移到埃及的新城市亞力山枝亞，在這裏，知識的尋求仍得持續不斷。在我們所講的時期裏，領導的人物要算亞基米德。比起在他以前的人，他的心思較為注重實用方面，因而他的興趣範圍頗廣。在幾何學的發展上，他有繼往開來之功，而理論力學和微積分學的基礎也是由他奠定。對於所謂應用科學，他的興趣較之歐克立德為高，所以槓杆以及旁的簡單機械都經過他的研究，而且為這些機械的用途作數理的說明，他之出名，以其為一工程師，在他所製成的器物中，有軍用的引擎和由管中提水的螺旋。他又曾用滑輪組在陸地上拉船下水。在物理學的編年史裏，他之所以馳名至今，初非因他有上述的種

種成功，而是由於他在靜水力學上的研究，求出了關於浮在液面或沉入液中的物體的性質和定律。特別是有一個著名的實驗使他爲人所豔稱。他的君王海衣羅（Hiero）取出黃金，命金匠做王冕，做成之後，疑心金匠盜去一部份黃金，以銀爲代，就由亞基米德設法作實驗來斷定。物理學上與這件故事有關的定律，在所有初步物理學課本裏，都找得到。就叫作亞基米德的原理。

我們並沒有直接的證據說亞基米德是一個實驗的科學家，但他必曾作了許多實驗，特別是關於槓杆的實驗，方好設計和製造向敵人拋擲巨石的軍用引擎。沒有實驗而他能造成提水的螺旋，更是不可想像的事情。上面所說的王冕實驗簡直是一個實在數量的確定的量度，是科學實驗的最好例子。這些事件在他那時代都認爲工程上的偉績，他因之享有盛名。

在離卻亞基米德之前，我們對於他之所以得傳於不朽，還可以作稍爲詳盡些的討論。依照他的原理，一個物體沉入於一液體表面之下，稱起來比在未沉入前要輕些，而此因浮力而減少重量，恰等於被這物體排去的液體的重量。飄浮的物體已全失其重量，否則就會下沉。倘使有一玻璃杯，滿盛着水，恰齊杯沿，然後取一木塊，放入杯中，則翻沿溢出的水重等於木塊本身的重量。倘放入

這滿盛着水的杯裏的，不是木塊而是金屬塊，就立刻下沉。倘使把這金屬塊用繩懸掛在天平的鉤上，垂入水面之下，然後去稱，所得的重量小於這塊金屬在空氣中的重量，而牠這失去的重量恰等於溢出的水的重量。就王冕一事而論，黃金的密度既然高於銀的，一頂在空氣裏重一千克的純金王冕，沉入水中，所排的水，比起一頂在空氣裏也重一千克而是金銀鑄和所製的王冕所排的水，要少些，因之所失的重量也要少些。純金冕的體積，因其密度較大，比起金銀鑄和的冕的體積，當然要小些。

自亞基米德而後，物理學有十幾個世紀靜止不前。我們不妨提及耶穌紀元後十三世紀中英國的培根羅傑 (Roger Bacon)。除了是變金術家而外，他曾作有物理學意味的實驗，特別可述的是他曾研究幾何光學中的定律。雖然他領悟到實驗方法在物理學中的必要，他並不會把知識促進到甚麼樣的程度，結局他竟因被指為具有妖術的本領而遇害。如果他生在幾百年後，他會成一個合於現代精神的真正物理學家。

耶穌紀元後第十五世紀可資紀念的事情中，有美洲的發現和印刷的發明。這時在意大利有

一位有名人物，即雷阿拿多達文器 (Leonardo da Vinci) (1452至1519年) 在他的著作中，我們漸見科學時代破曉的曙光，其後遂益加清明。雷氏多才好學，一身兼為藝術家、工程師和科學家，亞里士多德的遺著固然攻讀不倦，工程學和物理學中的實驗也作了不少。他看出了永久運動之不可能，並認為物理科學實數學真理在實際上的應用。他曾研究槓杆一類的簡單機械的作用，並考察過墜落物體的定律。流體靜力學和流體動力學定律也經過他的研究。他辨識出慣性的原理，後來就併入牛頓 (Newton) 的運動定律之中，又作過聲學和光學中的實驗，注意到回聲和反射之間的密切關係。

科學時代的破曉並非由雷氏的時代算起；一則因為時期尚未成熟，二則因他不曾印布他的著作，而僅留下了記錄簿。自從亞里士多德以後，科學陷入於迷誤的時代，在這科學謬信的沙漠中，雷氏要算一片水滋草榮的沃土。在這整個時代中，所有真實的信徒都奉亞氏的著作為指迷的明燈，而這些信徒，托庇於有組織的教會的權威，幾於全體一致的不容異議。一個人倘要知道關於自然的任何事件，他必須在亞里士多德的著作裏去尋求。

第二章 開創人伽利略

(Galileo)

前章之末已達科學舞臺最沉寂的時期，甦醒虛設，闕其無人，靜待新時代的先知伽利略之降臨。科學之靜止不前已歷十餘世紀。那時所謂的真理，人們以為知之甚確，已告成立。科學的信仰，以及宗教的信仰，都在教會的掌握之中，把亞里士多德奉為一切科學真理的神聖不可侵犯的先知。科學上的反信與宗教上的反信同其嚴重，在



伽利略

這時候，叛道的人就不得盡其天年。就一種意義看去，這時的宗教是建立在該時代的科學信仰之上。舉例來說，除了地球為萬物之中心的說法，教會絕不能容許任何其他的意見。哥白尼（Copernicus）的思想一經為人接受，就是頑固宗教末日的開端。

伽利略是在一五六四年生於皮薩（Pisa）城，與大詩人莎士比亞（Shakespeare）同年，他的祖居在菲洛倫撒（Florence），到了十三歲就把他帶到菲城，並送入附近的學校。在校裏住了兩年。在十八歲時，他回到皮薩進大學。在皮薩四年，隨後又到菲城四年，他求知頗為勤勉。那時的科學知識，他大都無所師承，獨自研考，從亞里士多德、歐克立德、亞基米德，說不定還有雷阿拿多，這些人的著作裏，他旁收博採，取精集萃，融會貫通，遂成碩學，以二十五歲的青年，被聘加入皮薩大學的教務會，在那兒講授數學。

伽利略的時代是人才輩出的時代，與他同時的有台珂布拉喜（Tycho Brahe）、刻卜勒（Kepler）和吉柏（Gilbert）。這時的天文家，有一位把許多許多的星和行星的位置編成目錄，其準確的程度，依他所用的儀器的粗陋而論，至可令人驚詫，其人便是台珂。刻卜勒就是他的學生和信徒，

以先生的觀察為根據，便推出了著名的行星運動定律，這一件大事，再加以馬傑倫 (Magellan) 的周航地球和伽利略自己在天文上的觀察，已開出一條路來，使人完全接受哥白尼創見太陽系的思想。吉柏是英國的一個名醫，他發表了一部講磁學的書，至今仍令人景慕。琥珀受擦後所具的性質現在叫作「帶電」，選定這個名詞來用的便是吉柏。他現發玻璃棒也能由摩擦而帶電。他研究過天然磁鐵或磁石的性質，並且知道磁塊能用磁石來磁化。他作了許多試驗，以察一切物體是否能同樣磁化，而考見其不能。他在實驗上最偉大的成就或許就是證明地球乃一磁體，他所用的方法是把一塊磁石磨治成一球形，然後說明環布於這個小球的磁場與環布於地球的磁場同其形態。電磁學中單位之一的名稱就取他的姓，但是用處不多，他的姓氏現在少有聽見了。

讀者也許要問，既然台珂、吉柏，以及亞基米德、雷阿拿多這些人都用過向自然直接發問的方法，何以我們單取伽利略認為現代實驗科學的先知呢？我們的答案在於他所研考的問題具有基本重要性，在當時又有劇烈的爭執，而且他是抱着求真的勇氣，憑着明察的眼光，來研考這些問題。台珂不過記其所見，至於他的觀察是否確當，那時就沒有人有同他爭辯的地位。吉柏也是把他所

觀察到的記了下來；他的發現雖然新異，但與一般人所信的並不衝突，除了大家相信金剛石能受磁化這一點是被他很輕易的證為不確。這些問題無關宏旨，而且並不牽涉到把歷時千年，一致崇信的亞里士多德和教會的主義加以否認的意味，所以不會引起糾紛。

在皮薩大學任職的時候，伽利略以一青年的教授，對於動力學就有著述，很可以看得出他思想極為清晰。他對動力學上的數量，諸如速度，加速度等等，觀念之正確，就在今日，也可使人接受。他的學養，特別是在高深學問的境界裏，大部份都是自修而得，所以這時他已蔚為一個獨立無畏的思想家。凡他的同事閉目無視的，他卻眼光四射，看得周詳。看見一塊拋在空中的石頭，他就注意其所取的路線，而加以思索。倘使那時的動力學的舊觀念是不錯的，那塊石頭就絕不能取他所察見的方式墜落。他所目觀的和他所學之於書的不符之處甚多，使他大惑不解。問問年事較高的同事，他們叫他去查查書，在書裏頭一定會尋到他的答案。書是查了，但是找不着答案。其餘的人本來就「不管帳」一切事情，在他們看來，都是簡單的。如果石頭顯見不會照着書上規定的方式墜落，那嗎必定是他的眼睛花了。人眼以前受過迷障，許就會再受迷障。他們要謝謝他，還是去讀讀書，求

教自己，莫再打擾他們了。

攻擊公認的權威，儘管攻擊得有理，還是一件危險的事。但是伽利略有篤信的毅力。他很知道書裏有些什麼說的，而他覺得這些書錯了。對於恐嚇他的道貌儼然的先生們，他毫不畏懼。單憑意見，他是以一敵衆，自不能使他們心服。但是另有取勝之道。自然業已憑着墜落的石塊把真相告訴了他。難道他不能請求自然，說得明明白白，確確實實，庶幾乎別的人也得聽見，也得了解嗎？這個決心既下，方纔標明了現代實驗物理學真正的誕生。

以前總相信從高處掉下的物體快慢各有不同，較重的降落較快。因為多數墜落之物並非從很高的地方落下，所以這種信仰的謬誤顯不出來。即使有石頭從正在建築中的房子上掉下來，或者是每次只掉下一塊，無從比較下落的快慢，不然就是毫無把握來談到各塊石頭的速度。倘使兩塊大小不同的石頭偶然一齊下落，而且假設當時就有一位有學問的人恰在那裏，親眼看見兩塊下落，又看見這兩塊同時着地，他就要說，既然重的必定比輕的要落得快些，而兩塊竟同時着地，那塊輕的一定是首先掉下。倘使兩塊石頭是由手中落到地上，以下落距離之短，兩種理論的任一種

都會與觀察相合。

伽利略看到了拋擲在空中的石頭的行徑並不像較重的落得快些。他相信兩件輕重不同的東西，假使同時同地開始下落，應該同時着地，爲要證實這個意見，他決意從很高的地方讓這兩件東西同時墜下，看個究竟。他於是就邀約皮薩的老師宿儒，請他們聚齊在那斜塔的地基上，看這兩件輕重不同的東西的降落。他們覺得有點躊躇，以爲這樣白費時間，真是傻氣。凡是人所當學的都已經知道了，凡是沒有知道的有什麼能值得去學呢？不過末了竟有幾位被勸動了屈駕去看他的把戲，大概還是滿心料定伽利略要大坍其臺，準備著去發冷笑的。伽利略扒上塔去，把一輕一重的兩件東西同時釋放。兩件東西墜了下來，恰在同一時刻到著地面。他當時把這實驗重作一次，這兩件東西復又同時著地。

但是那幾位來看把戲的先生心服了嗎？他們皺着眉，搖着頭，趕回家去查亞里士多德關於這個問題有什麼說的。也許書上會告訴他們適纔親眼所見的事態的道理。翻來翻去，找不出什麼解釋，他們還是翻出「重物體比輕物體要落得快些」那句老話。他們讀了多少遍數，書上還是這句

話。聖經賢傳焉能不信？祇有說伽利略是聖教的叛徒，是揚竿發難，膽敢致疑於亞里士多德的訓誡的罪魁；這樣的人應當驅除掉。幾乎全體的教授反對他一個人，伽利略不得不在他業經受聘的學期之中，從皮薩大學退職出來。

關於這個斜塔實驗實在進行的詳情，不甚知道。伽利略在他的著作裏很少提到這件事。幾點有關係的事並無記載。譬如說，那般參與的教授們曾取如何嚴密的方法去防止他作偽，我們並不知道。實驗中所用的兩個物體雖然重量不同，是否有相同的大小，譬如說，一為木球，一為金屬球，而直徑相同，方纔好把空氣阻力的效應消得掉，我們也不知道。然而我們確然知道，這個實驗施行的情狀可使任何人都得信服，祇要他不故意的自掩其目。

這個著名的實驗後來是包括在牛頓的第二運動定律之中。倘使有一力作用於一物體而使之加速，這力就等於該物體的質量乘其所發生的加速度。在伽利略的實驗中，兩件物體的質量不同。但是因為加速度等於質量除力，而作用於較重物體的力（按即其重量）比作用於較輕的要大些，兩力之比與兩物體質量之比相同，那嗎，兩物體所受的加速度（即力與其所作用的質量的

比例)是恆定的。所以，在地球面上某一部位，一切物體，無論輕重，所受的重力加速度都是一樣的，而從該部位下落的快慢亦復相同。於此我們必須注意，倘使物體輕到要受着墜落所經空氣的阻力的影響，伽氏的實驗祇有在真空中纔能成功。

誠然，這個實驗的結果並非立刻爲人所承認，但這並不損及伽利略的偉大。以實驗方法應用在研究上的需要，他比他以前任何人看得更爲清楚，而尤爲重要的是在他把科學之必須成爲實驗的，廣爲宣示，而且他自己又現身說法，指出途徑。無論何事，總得有一個人起頭。即使伽利略不曾顯出他所顯的深識和勇氣，說不定就會有另一人出來指示途徑。進步一定會實現的，總歸要在世界上崢嶸展露的，不過也許是突如其來，也許是緩緩漸進。伽利略的工作感動了若干信徒來繼續推進，而因爲有了他，他們後來的工作就較爲容易。

他既被逼而離開皮薩，就轉到帕杜亞(Padua)做數學教員。在這裏他遇着一班人，比在皮薩的心量要闊大些。他所給的演講範圍頗廣，包括有數學、物理和天文的題目。在這裏他發明了空氣溫度計，在初步的物理學課本裏，都描寫作創首的測溫的準確器具。在好幾年前，他還在皮薩，以一

個青年，就發見了擺的定律。他在禮拜堂裏，看見掛燈的來回擺動，加以觀察，就注意到每次擺動的
時間祇與那擺動物體的長度有關，而且無論擺動的距離之爲大爲小，這時間都是相同的。

在帕杜亞，他製成了他在歷史上有名的望遠鏡。雖然有人說他關於望遠鏡的思想是從荷蘭
得來的，然而能合於天文上的用途的第一架望遠鏡確乎是他所做的。他之發見木星的衛星，太出
名了，只消在這兒提到一句。他也看見太陽表面上的黑斑，並且量出太陽自轉的週期，在知識的進
展上較爲重要的一件事，也許就是他發見了金星也顯盈虧之象，與月亮的盈虧相仿。在這以前，因
爲總不會見着金星的盈虧，哥白尼一派的理論受了很窘迫的阻礙。有人和他們辯論道：如果行星
都是繞日而行，那嗎金星就應該經歷盈虧的變遷，有時顯出全象，而他時則顯變形。哥白尼派只好
回答道：這樣的變遷，儘管不是能力薄弱的人類所得見，但是以造物之仁，總有一個時候，人會見着
這確然存在，等候人去看的現象。果然這個時候到了。

到了這時，伽利略的聲譽洋溢遠近。在脫斯根尼大公 (Duke of Tuscany) 的旨意之下，有
書聘他遷到菲洛倫撒去。他就貿然應聘。其實爲他着想，在帕杜亞，思想自由，心意毫無拘束，還是留

住的好。他所移入的新環境誠然是講學崇道的環境，其中有不少大智慧的人。但是以伽利略這樣才智超軼的人，這個地方不特無從涵蓋，反而不啻牢獄，因為弗洛倫斯是在教會和其信徒的統治之下，在那時候，這般人堅信科學僅為宗教而存在，科學家的思想行為自必守此繩墨。哥白尼的理論已在禁例，伽利略就受制不得加以講授或著述，除非是遵照教會所頒的限制，然而有了這些限制，他的議論就失了大部的力量。後來限制越來越厲害，直到最後，竟發生了思想史上有名的審訊和伽利略否認哥白尼學說的悔過書，這件公案已經有了不少的記載，在此不多述了。

許多人責備這位七十老翁不該具這悔過書。許多人以為他應當以身殉真理。但是犧牲了他會得着什麼好處呢？他一死絕不會使那班處治他的人有絲毫的感悟。至於由他取此絕路而可望其起信的人們，多數因他所舉出的鐵證已經起信了。少數心胸闊大的人受了他的感化，還等着把知識的火炬揚起來前進到伽利略所未能達的地方去。他看定了科學原理終必昌盛，闡發推進的工作他比在他之前的任何人盡力得多。他深知他的時代還沒有成熟到更往前進的地步。個人的污辱在他的生活中本是平淡無奇的事，又有什麼受不了？他從皮薩的斜塔放下的兩個物體

墜落的速率相同，是鐵般事實，不管他或任何他人能說什麼，不會變更一點。以後自有旁的人出來會製更大更好的望遠鏡，會想見他那豐富的想境所不會想像到的事物。真理永是真理，終必昌明，儘管那般頑固的人就假借這句話來自便其私。伽利略的全生無非為真理犧牲的生活。他如能保其天年，他許還探得更多的造物之妙。他可以回頭去研究力學，而他在天文上的發現，當時不必加以鼓吹，只消聽其自然在人們的心中潛移默化，誰能說伽利略應該自毀其生呢？

第三章 光之波動說

光是一切自然現象中的最普通的；就是下等動物都顯然知道光的存在。以其照臨的普遍，有人不免要把光認爲造物的一種神奇，是上帝給與人類的恩賜，使人對於自然之美有更深更廣的欣賞。人要得光，用不着跋山涉水去尋，也不用探訪，也不用發掘。處處都是光，人人取之不盡，用之不竭。但是人性好尋根究底，總要求知道光究竟是什麼構成的。如果人情願聽天安命，但去欣賞，不去頭頭求知，未始不是藏拙之道。何以言之呢？因爲儘管從人類認識光起，經過了許多的世代，後來加以研究，也費了悠久的歲月，到了現在，這自然的恩賜還是大部份不可捉摸！

光依直線而行，就在最初的觀察人看去，已是顯然的事情，實在顯然得很，這事實的意義似乎反而不會給他什麼印象。他覺得要去推敲這個觀察的意義，猶之乎看見一個人朝前走的時候，要去納罕他爲什麼前進一樣。動物亦復如此，當他們想到一個地方去，而其間要是沒有阻隔的話，就

會依着直線行動。

許多古代的作家都曾談到光。有人相信歐克立德對此曾略加研究。在大家認為是他所寫的光學書上，就有光依直線而行的話，並且還表示一種信念，以為視覺乃由於人目發出一種傳信通問的東西。皮達果拉斯和旁的人，連德謨克利他斯在內，卻傾向於相反的觀點，他們以為視覺的原因，在被見之物發送出微粒來撞擊人目。歐氏研究過平面鏡和曲面鏡中的物體的反射，並在看出來入射角等於反射角。他又認明了凹鏡必有焦點的存在，能把太陽的光線聚集起來，甚且於使物體着火。在他的書裏又提到一件事，就是把錢放在一件器皿的底上，然後傾水入器，錢就彷彿升高了。埃及的托勒米 (Ptolemy) 在耶穌紀元後第二世紀裏就研究大氣裏和液體裏光的折射現象，並且有記錄說，當光經過一種介質而達另一密度不同的介質裏，入射角和折射角是成比例的。托氏略早的時期，希羅 (Heron) 的筆記說，由鏡面反射的光線所取的路線是最短而可能的路線。從這些記載裏我們可以看出現代幾何光學的端倪。

1030年，在亞拉伯 (Arabia) 已有亞爾哈士 (Al Hazen) 在做反射鏡和透鏡的實驗。

他研究過曲面鏡和透鏡的放大率，並且認出球面像差的存在，所謂球面像差，乃是某種鏡或透鏡所具的性質，使其無從把物像引到確切的焦點。在他的著作裏，我們看得見想去發現人眼的構造和光學性質的最早企圖。培根也研究反射鏡和透鏡，而且宣說出虹霓的理論。管他也許從不曾製成一架。培根也研究反射鏡和透鏡，而且宣說出虹霓的理論。

在前面我們已經提及勒阿拿多的實驗工作。人眼的構造也經過他的考究。從回聲和光的反射有類似之處，他就從而以聲與光相比較，並猜疑到是否光也會是一種波動。他也許想像着這是與聲同例的波動，即振動的方向與聲進行的方向相平行。彈性以太裏的橫振動的觀念要到較為很後的時候纔得出現。勒阿拿多量過由鏡面反射的光線的入射角和反射角，並求出其相等。

施奈爾 (Snell) 曾在萊頓大學 (University of Leyden) 任職。他研究過由空氣到水和由水到空氣的光線所取的路線，在一六二一年，他就能把光的折射定律第一次規定得正確無誤。這條定律現在叫作施奈爾定律，不過我們現在所用的形式（按即：折射角的正弦除入射角的正弦等於一常數，叫作折射率）是取之於數學家笛卡兒 (Descartes)，然而笛氏卻相信光在較密

的介質裏，譬如水裏，傳行起來，比在較稀的介質裏，譬如空氣裏，要快些。與施奈爾同時的浮馬（Fermat）卻假設在較密的介質裏光的速度較快，並用了現在大家知道的浮馬原理來推出施氏定律；浮馬原理說，光由一處傳行到另一處，無論是否受了反射，無論是在同一介質中或由一種介質中到另一介質中，由起點到終點所需的時間或為最短，或為最長。用了這條原理，要推出所有的反射和折射定律就容易了。第二步的進步是在這世紀之末由荷蘭物理學家惠更斯（Huygens）所求得，他看出了光速的變更必在那劃分兩種介質的面上發生，並且假設折射率（按即入射角的正弦與折射角的正弦的恆定比數）乃光在二介質中的比較速度的量度。

在此我們須要注意的一點，就是除了巴塞理納斯（Bartholinus）在一六七〇年發現光經晶體而起略未了解的偏極現象而外，此時可供應用的僅有的實驗證據即施奈爾和旁的人研究反射及折射的工作。一種理論，倘使推得出施奈爾定律，便算滿意。舉個例說，在一六八七年，牛頓根據他的光的微粒說來說明折射的事實。他假設光是微粒所成，這些微粒依着直線進行，最後撞擊人眼而生視覺。他還得假設微粒在水裏行動的速率比在空氣裏要大些，這個假設在那時任何可

供應用的實驗證據都不能否認。

然而牛頓的稜鏡實驗卻建立了很大的進步。以前總相信白光經過稜鏡，連本性都變了。在早的作家也曾設法把虹霓的顏色和折射聯屬起來，但直到牛頓實驗之前，沒有什麼是確實知道的。他在他實驗室的窗板上開一小孔，讓陽光進去。這一狹條的光線經過一個玻璃稜鏡射在帷幕上。幕上的像不復為白色，而展開成爲一帶彩色，排列的次序與虹彩



牛頓愛賽克爵士

羅克新天文臺

的次序相同。這些彩色是由稜鏡而來呢，還是本來含在光的本體裏呢？牛頓以天賦他的在科學上的超絕神悟（這宗神悟現代的科學家大多數願傾其今生所有去抵換）就覺得白光是許多顏色的光混合而成，一經過稜鏡，便分開了，一個簡單的實驗就可為證。他在幕上恰是色帶中紅色射到的地方，開一小孔，以使一條紅光線穿過幕去。然後走到幕後，他把第二個稜鏡放在紅光線所經的路上。光線穿過這個稜鏡射到第二帷幕上，顯出一片紅色。光線的方向是變了，不過稜鏡並不會更換紅光的顏色。為完成證明起見，牛頓又把第二稜鏡放在第一稜鏡和第一帷幕之間，要有色的光線先得經過第二稜鏡射到幕上。放在恰當的位置，第二稜鏡反把第一稜鏡的功用廢掉；第一稜鏡所分開的光線被第二稜鏡復合起來，而射在幕上的又是白光。他證明了白光是許多顏色的混合，而各色的光線，若取斜向經由一種介質到另一密度不同的介質裏，所受撓折的程度各異；每一顏色有一不同的折射率。第二步他把虹霓的色和他的光譜的色塗在一塊紙板做的圓盤上，然後將這圓盤很快的轉動起來。在轉動的時候，人眼無法隨着轉，就同時看到所有的顏色，而圓盤顯得並非有色而成淡灰。圓盤不顯全白的理由每每有人覺得難懂，因為他們忘記了雖然分佈在盤上

的各種顏色合起來就成白光，然而這樣合成的白光的量祇抵得過全盤塗白了之後一小部份發出的白光。倘使把圓盤勻分爲六片，每片各塗一色，這些色合起來所成的白光祇有全盤淨白的六分之一所發的白光量。用上面所說的方法察見的灰色，可以用另一法複製，只須取一圓盤塗成黑白相間，再把盤轉動即得。（註）

（註）此處必須注意，用色盤來混合各種顏色和顏料的混合很有區別；兩種方法根本不同，自不應得相同的結果。

這些事實，因爲我們現代的人童而習之，就容易認爲當然的，但必須記得，有了這些科學界中開創人物的功勞，方纔能够毫不費事的在書本上讀到科學上證實的奇蹟。我們敬佩牛頓應當像我們敬佩現代的科學研究家一樣，他們都是熱烈的竭其所能來自助助人，求更進一步，從茫昧的黑暗中達到開悟的光明。將來會有一天連小學生也許要笑他們的祖先竟至對於愛因斯坦（Einstein）都不能了解。

牛頓關於光色和折射的發現後來在光的波動說上有重要的關係，但是他的這些實驗，在當時任何人看去，毫不含有光是波動的指示。我們現在說光色是由光的波長所定，紅光的波長比藍

光的要長些。牛頓爲了要合於光必依直線而行的條件的要求，纔創立他的微粒說，於是對於一切事務都根據微粒說去考量。後來根據光的波動說證明了同一的事實，實爲新說的大勝利之一。

牛頓有一椿錯處卻產生了有趣的結果。當他研究稜鏡所致光的偏向（即撓折）和光的色散（即散爲光譜）他以爲這兩宗恰成比例；在有些物質，這句話是對的，他所用的物質剛剛合於此說，也是可能的，但一般而論，就不然了。他正要試試爲一架望遠鏡做一塊消去色差的物鏡，換句話說，這塊物鏡要把所有的光色聚焦於一點，成一無色之像。要做這樣的透鏡，須把折射本領不同的兩塊透鏡，拼在一起，要第一塊所起的色散被第二塊所起反向的色散抵消掉，情形和牛頓用兩塊稜鏡所做的實驗相仿，然而這拼合的稜鏡所起的偏向必不得消滅，不然就絕不會有聚焦作用。牛頓以爲只要色散消盡了，偏向就隨之消失。所以他轉而製反射望遠鏡，這宗望遠鏡沒有色像差的麻煩，和全用透鏡做的望遠鏡不一樣。他的反射望遠鏡成了歷史的儀器。以反射望遠鏡和折射望遠鏡兩兩對較，他這樣側重反射式，在天文學上也許沒有多少損失，因爲二者各有功用，還有一點，也許是牛頓認爲磨鏡子比磨透鏡要容易些。

直到這時並沒有實驗的證據。明明白白的要求有光的波動說。所有觀察到的反射和折射的事實都能將就微粒說來勉強附會的解釋。此時卻有一件新現象出現。在波羅格拿 (Bologna) 有一位格利馬耳底 (Grimaldi) 是個耶穌會徒，在一六六三年去世，他的著作在死後纔刊布出來。他注意到，當一盞燈遠遠的照在一條直邊上，直邊射在前面幕上的影並非黑白分明。在影的邊際顯出明暗相間的帶紋，直到影中，方減為全暗。這卻是一件新奇的事；光之經過直邊實實在在轉了一個角，而且還折入影中。這是光並不依直線進行的一個確定例子。這個現象，格利馬耳底偶然觀察到，並特為之取名「繞射」，在現在是坐實波動說最有力的一種佐證。但波動說並非因這新現象就立刻出現。大家以為，就是牛頓也這樣想，光線之受撓乃由光的微粒經過直邊時受了邊的吸引所致。真正的困難不在說明光之受撓，而在解釋影的邊際有若干釐然清晰的帶紋。這個事實逼出了一種苦心的假設，說那投影的直邊所施的吸引是有週期的。微粒說的困難，日積月累，畢竟不得不把所據的地位完全讓給波動說。

研究繞射的第二人是英國的虎克 (Hooke)。他與格利馬耳底同時，但在格氏死後還活了四

十來年。他觀察到，遠處的光源照在輪廓顯晰的物件上，所投的影中有帶紋，不特此也，肥皂泡中和浮在水上的油膜中所顯的顏色，他都好去考究，並注意到每每有循環的帶紋，與他在影中所看見的大路相像。單就與光的理論有關的來說，我所能歸功於虎克的僅此而已。他的見解不夠透闢來觀察他的觀察所含的意義，也不够來計劃出僅僅破除部份疑團的實驗。

以這樣未經探討的新奇境界，對於科學上不出世的偉傑如牛頓，自會引得他尋幽窮勝，欲罷不能。關於波動說的肇始，我們得深深記牢牛頓的大名，其故有二。第一、現在認為光具波動性的無上證據中，有的事實是他所發現研究過的。第二、他深信他的光的微粒說，申說傳授，堅守不渝，成就較小的人們，在一百多年當中，儘管看見須有波動說來說明實驗的必要，簡直不能絲毫撼動他在科學界中巍然屹立的地位。我們以後會明白，即此一端或已可窺測牛頓之偉大，且他之察驗自然的行迹，深入玄奧，獨具隻眼，雖不免差舛，或不如一般所信之甚。倘使我們承認牛頓的光說的主要部份就是光之進行若微粒，那嗎他的理論就在今日科學的最高思想界中也是接受的。當然，要說明折射，他不得不把他的理論引申廣衍，這些枝節的說法，諸如光由空氣入水便增加速率，現在業

經放棄了。我們所要辯明的就是牛頓確曾以深遠廣大的目光看出事物之必當如何；他不幸而出世太早，沒有我們現在所有的大量實驗的事實，他只好憑着貧乏的佐證，潛心冥索，而下臆斷，然而這些臆斷，後來越經研究，就越發成立。他的萬有引力論由晚近相對論的發達而略有修正，有什麼關係呢？他的光說的某幾方面經不住時間的試驗，於他有什麼恥辱呢？最後一句話，倘使就在他的微粒說最盛的時期，別的事實已顯然指點到量子論，那嗎對於他的微粒說會有什麼樣的議論呢？我們忍不住要問，波動論，照其存在的這許多年中所取的純一形式，是否會有出世的機會。不過在這兒我們須提到一點，牛頓是拿聲波一類的縱波來和他的光粒相比擬。後來所謂彈性以太中的橫波的觀念在那時還未曾出現。我們以後會明白偏極一類的事實不能根據縱波論來解釋，牛頓之選用微粒論而認為不錯，或許受了這樣看法的影響。

在透明物質薄膜中現出顏色的研究上，牛頓做了很多的實驗工作。下面所講的就是他成典的實驗之一。取一塊曲率半徑很大的玻璃透鏡，放在一塊面很光平的玻璃板上。這兩塊玻璃祇有一點接觸，在所有其餘的地方是被一層空氣薄膜所分開，離開透鏡的中心愈遠，膜愈加厚。倘使用

祇有一色的光，譬如鈉的黃光，射在這樣的組合上，就看得見繞着兩塊玻璃的接觸點有許多的圓圈。這些同心圓叫作牛頓圈。倘使不用單色光而用白光，這些圈就是有色的，而每圈就含有許多顏色。不特此也，各圈所含諸色的排列都是相同的。倘使把兩塊玻璃用力按之使緊，圓圈就向外展開，設若加壓之點不在接觸點，近於加壓處的圈或圈的部份就向外推擠離開該處。

牛頓認清了這些層見叠出的圓圈，對於兩塊玻璃間的空氣膜離心愈遠愈增的厚度，總有關連之處；他的認識還不止此，他又審出這宗關係總帶有循環性，猶之在直邊影中觀察到的繞射帶紋，雖然具有循環性。不過牛頓仍是用他的微粒說來詮解這些事實，以為光粒能通過他的裝置中的光程各部份難易不同。所得的效應即繫於光粒通行難易的程度。雖然他的思想裏不曾明用波長的詞意，他卻把各圈所在處的空氣膜的厚度換次量過，並且發見倚着空氣膜向外增加的厚度，有一循環重出的量，這個量，我們知道，是與光的波長有關的。他量出這循環量的大小，而且所得的數目，較之現代求出的光波波長的數值，相差不出百分之幾分。這樣看去，對於這些新效應作精密量度的，以牛頓為第一人，他並且首先證明光內含着具循環性的東西。我們講到這兒要注意，牛頓

固然把這個實驗當作他的微粒說的主要證明，而我們現在卻把牛頓圈和相關現象的表顯用爲波動說的憑藉。這一點不久還要詳加討論。此刻我們祇要察見在這個特殊的例子裏，這位大科學家，是錯了。

證據越積越多。呂謀 (Romer) 這時剛已宣布他的發現，從觀察木星各衛星被蝕的時候，他斷定光速並非無限大，而是有定量，並且是可以量度的；上面已經說過，牛頓察見光含有一種循環性。於是惠更斯乃以坦白顯明的方式，把波動說引入申論。假設空間中充滿了一種具有彈性，名曰以太的介質，他進而討論，倘認光爲在以太中由一處傳行至另一處的波動，是否有說明觀察到的事實的可能。有了這個假設，得由之說明折射以及反射的事實，並得由之求出光速爲有定量的理由，因爲在實物介質中的彈性波的速度是恆爲有定的。當時的科學界何以不立刻抓著這個嶄新的主義，有兩個理由。第一，牛頓的微粒論仍然籠罩着那時的思想。第二，那時有許多人懷疑呂謀的發現是否真確。科學思想的潮流並不變於須臾，微粒論卽其一例。謹守牛頓的遺訓，相信光依直線而行，是因爲光爲微粒所成，微粒天然的要依直線而行，那時以爲是再簡易沒有了。誰還肯避易就

難，去採取一種新假設，僅僅乎因其能說明顯而易見的事，何況還要費一點事纔說得明呢？

惠更斯不僅止於發抒意見，他還宣布了一條原理，現在叫作惠更斯原理，由之即可確然證明光波是依直線而行。要能說明這條原理，最好是舉例。倘使一池子的水面有一小部受了擾動，譬如一滴水落在水面，就有一列的水波，形成許多不斷向外展開的同心圓，傳了出去。我們就說擾動是水波的起源。倘使再取一塊板，上面鑽一小孔，壁直放在池中，使小孔恰與水面相齊，則唯一的自由路徑就是通過小孔。當水波行抵這塊攔着去路的木板時，我們就看得見一系列微波從小孔而出，成爲許多以孔爲中心的半圓形。向各方傳布出去。向着木板進行的波擾動了孔中的水，而孔中的水祇要一受擾動，無論是用棍去點，或由前進的水波傳動，就重新發出波動來。

現在假設另取板一塊，在上節所述水池中推水使前，發生一平面波，並假設那塊攔波的板有一個很大的孔。當另一板所發的平面波行抵攔板時，越攔板而前進的仍是一平面波，至少一大部份，居中的部份，是平面的。其運動的方向是與波前成直角的。惠更斯原理，應用在這個水池的例裏，告訴我們說，攔板孔中每一水質點都成了新的波源，這在前面所講板孔很小的例裏已經很顯然。

惠更斯原理之說明：水波之波。(此圖係由 Henry Holt 公司出版 Saunders 所著 A Survey of Physics 書中繪印)



了。這樣看來，在這很大的孔中，沿着與欄板橫邊平行的線上，各水質點受了前進波的影響以起振動，而每一質點又轉而發出微小的第二次波。這些第二次波的包跡就成爲新的波前。講到最後的一步，我們可以把欄板完全取銷，而說在某任一時刻，平面的波前就是剛在後面的水質點所發小波的包跡，這些在後的質點是在前一時刻被原來的波迫起振動的。以光而論，就假設以太的微粒起了振動而發出第二次的波。

惠更斯原理就這樣爲光依直線而行的事實下了註腳。現代的波動說，我的意思是指在量子論出世以前所傳的純粹波動說，並非完全合於惠更斯的概念。然而饒有趣味的事是以後會要看見，非但在繞射光柵的理論中，以及在一切牽涉到光的干涉的現象中（其中的大部惠更斯並不諳悉），有方法和惠更斯原理相融合，而且就是在一兩年前的嶄新學說中，這些學說絕非惠更斯所能想像萬一，也有法與他的原理一貫。

此時已播下了改革的種子。這株植物，在楊湯麥司 (Thomas Young) 的殷勤培養之下，會要蓬勃發苗，而到了法國學者夫累涅爾 (Fresnel) 的手裏，便要英華怒放，燦若雲錦了。

楊氏是一個英國醫生，由研究人的眼睛，因而對於牛頓在光性上的工作起了興趣。他也知道有惠更斯的工作。相傳他自幼就極其聰穎，小小年紀，便無書不讀。在一八〇一年，他纔二十八歲，就悟到一種卓越的意見，因這意見，他的高名遠播，而波動論獲得全勝。這個意思最好是再回到水池的例子纔能解釋。

設若我們在池子一邊的水面上發送一種波動出去。這波就會傳行到池子的對岸，一路保持

原有的圓形。現在再假設在池子的兩對岸將兩個小物件放落水中，注意要兩物大致同時點着水面，於是每邊發出一組波動，池中就有兩組波動。這兩組各從一點取向外展開的圓形往前進行，在未相碰接以前，各行其是，了不相干，就像並沒有另一組波的存在。一到兩組碰接，就發生很有趣味的東西。無論何時，由甲源來的波峯祇要遇着由乙源來的波谷，兩波相遇處的水面同時被甲波拉着向上，被乙波拉着向下，無所適從，祇得兩俱不從。在這一點，儘管有兩波的波前經過，並沒有運動。在鄰近的另一點，由甲源來的波峯遇着由乙源來的波峯，兩波相遇處的水質點倍受向上的推動，祇得順從。結果水面的位移兩倍於任一波單獨所能發生的位移。剛纔所敘的事情叫作波的干涉現象。有一個很簡便的方法可以表演出來。取一音叉，在兩條叉股上各裝一針，讓兩針的尖端與一盤水銀的面接觸。再使音叉振動，就發出波來，顯出干涉現象，如上所述，結果水銀面上現出井井成章，常駐不變的花樣。兩組之波依然各自進行，而在這一片常駐的花樣中，有一組地點保持寧靜，不起擾動，另一組地點則恆作上下振動，振幅較任一波的振幅為大。在此我們必須明白，干涉花樣中擾動之點各有定處，並不在液面上移動無常。這宗波動名曰定波。要得任何有規則的干涉花樣，兩

源之間須有確定的關係。我們不能把水來亂七八糟的擾動，而希望得着任何有規則的干涉現象。

楊氏就把這個意思應用到光上去。如果惠更斯關於光的性質的意見是對的，而光確為波動，則使兩列光波互起干涉應當是辦得到的事。倘使我們隨便說用兩枝燭為光源，那是不行的，因為由兩枝分立的蠟燭而來的光，波相（或者可以說振動的情形）沒有確定的關係，這就與上面所說的不規則的擾動相似。然而他能有方法得着合於需要的兩個光源：他可以取一塊紙板，在上面鑿兩個針孔，很小而又很相近，然後讓從放在遠處的單個光源發來的光照在兩針孔上。由遠源發來的光既射在兩孔上，依據惠更斯原理，就輪着兩孔發出波去，這兩組波，因為發源於同一盞燈，現在就有確定的波相關係了。在實際上，裝置略有不同，大致如下。燈源所發的光先射到第一光屏，這屏上祇有一個針孔。光穿過這個針孔，再射到第二光屏上兩個相近的針孔。要看見干涉花樣，可以用一第三光屏，放在第二光屏的前面（譯者按：此處前後有兩種可能，我們認定第一屏在第二屏之後，第三屏在第二屏之前。）否則更好的辦法，不用第三光屏，而讓光線射入放大的目鏡中，再從目鏡直達人目。我們就看得見明暗相間的帶紋，一如我們容許了光為波動的假設後所預料。

往往承認一個新學說，並非因為舊學說不能解釋觀察到的現象，而是因為新學說能以較簡的方式和較少的假說來說明這些事實。所以，哥白尼的太陽系的見解並非唯一能說明星與行星的運動的見解，但是舊的天文系統，以其複雜的擺線系，已經不勝其煩，而知識每進一步，就愈加複雜；哥白尼的系統簡單得多，又適合個個觀察，於是乎就取舊系統而代之。同樣的，關於光的知識一天一天增多，要用微粒說來說明一切，便一天天更為困難。以楊氏這宗人物出來表章波動說能以簡捷動人的優點說明觀察到的事實，微粒說的告終已可望見了。

然而楊氏的理論並不會立刻為人所承認。要那個時代接受這樣的創見，或者未免期待過甚了。楊氏對於薄膜顯色的現象和所謂牛頓圈都曾研究，並且竭力向那時的科學界申說這些事實的真解得在波動論中去尋索。楊氏的理論有一點缺憾，他對於光穿過單縫所生繞射效應，曾求加以解釋，他自己就在此陷入錯誤。他的錯誤，現在的大學一二年級的學生還無人能免，就是把單縫的繞射認為與雙針孔實驗的情事大要相同，然而這兩種現象，縱然都是靠波動論來說明，卻需要不同的解釋。後來發現了楊氏對於單縫實驗應得結果的預言並不合於實地實驗的結果，許多與

他同時的人以爲他的理論不值得考慮，就擱開了。

這樣看來，我們有兩類不同的現象，一是繞射，一是干涉，沒有一類不求助於波動說而能滿意的解釋的。當光從遠源射來，或掠過銳邊，或穿過單個小孔，或行經針的兩邊，我們就觀察到繞射現象。光被撓折入於幾何影中，影邊並非截然清晰，而以明暗相間的帶紋，由光明逐漸趨於黑暗。這些效應是由於本問題中的障礙物把入射的波前截去了一部份，廢餘的部份則依波動干涉的法則來聯合，而產生影邊的繞射帶紋。在另一方面說，當光由遠源而來，穿過兩個或兩個以上的小孔，就像在楊氏實驗裏的情形，或者是當光射在夾在兩個反射面之間很薄的薄膜上，就像在表顯牛頓圈的實驗裏的情形，我們就說這些效應是由於光的干涉。就薄膜中的干涉而論，其效應可以說明如下。假設在兩玻璃面之間有一層很薄的空氣膜，而光從上面射在這個裝置上，有的光被恰在空氣層之上的玻面所反射，有的被恰在空氣層之下的玻面反射向上。還有別的反射，不過不必在此考慮。那嗎，我們有兩列同出一源向上行動的波。這兩列光波起干涉作用，情形和楊氏實驗中由第二屏上兩個小孔而來的波列恰恰相同。當一波的波峯行到一指定之點，同時由另一面反射而來

的波峯也恰到此點，則合併的效應倍於單獨的效應，而在波相相反的情形下，兩波互相消滅，在那一點就沒有振動。如果我們俯察這個裝置，在某幾處就要看見明亮的帶紋，而明帶之間就是暗帶。在上面我們業已假設所用的光裏只有一色；如果用的是白光，白光每色成份的明亮帶紋所取位置各各不同，因為各種波長對於在任一定點空氣層的恆定厚度的關係不同。所以，我們向空氣膜看去，在某一方向看見繞射帶紋的藍邊，若要看見紅邊，就必須取另一方向。肥皂泡的顏色，以及油潑在水上所顯的顏色，都是由於干涉作用。楊氏能把所有這些事實歸納到波動論之下，誠然是他的大成功。

到了此時，機會已經成熟，只待美才上智去抓著惠更斯和楊氏的成就，把波動說發皇光大到一個地步，人人除了全盤接受以外，絕不會有其他的可資選擇的說法。在這段故事裏出現的英雄是夫累涅爾。他是法國的一位科學家，在十九世紀的早期裏就致力於波動說，其收穫之多，成功之大，就在今日，波動說仍然是照他所考訂，幾乎一無變異。我們應當說直到本世紀中量子論出世之前沒有變異，縱然僅以夫累涅爾所研究的諸問題而論，他的觀念和解釋現在依舊是認為正統的。

不幸的是現在的光性觀念乃波動說和微粒說的混合。關於這點困難的討論必須留到後面的一章裏去。然而我們在此可以說，如涉論不出於光的干涉和繞射，一切有待解釋之點，夫累涅爾的波動說就解釋得了。

夫累涅爾的第一件勝事就是掃除楊氏失足的障礙，把光受單縫繞射的現象很順利的說明。楊氏以爲光經過單縫，在縫的兩邊受了反射，這兩股反射處於他所作干涉實驗中兩個第二次光源的位置。這個看法的困難就是，如果出現的效應是由於從兩個第二次光源而來的干涉光柱，譬如如是兩個針孔，或者從單縫兩邊來的反射，那麼在繞射實驗中察見暗帶所在之處應當現爲明帶。夫累涅爾首先由實驗把這困難除掉，其法在表明無論縫邊是否有反光的能耐，所得的效應是一樣的。然後以美妙的解辯，說明人由推理所預料的必恰合於其所觀察到的事實。倘能復起夫氏於地下，讓他看見國中個個大學生在光學課程中所傳習的事實，依然是他在百年以前所貢獻給世界的，了未經有更改，他也會欣然得意的。

波動說便是這樣很穩固的成立了。在其完全能爲人人所接受以前，還有一件尚待考定的事，

就是要知道光之傳播究竟是何種波動所任。此時正有一串燦爛光明的發現以供這個問題的答。光由反射而起偏極，剛由馬勒斯 (Malin) 偶然發現：他用一塊晶體去看由遠處窗中反射來的太陽像，他考見當他把晶體轉動之時，反射來的太陽像的亮度並不常同。冰蘭石中的雙折射已經爲人所知有若干時了；隔着冰蘭石觀物，一物會成二像的事實並曾由惠更斯研究過。馬勒斯把他的晶體轉動之時，一像的亮度漸增，而另一像的漸減，直到轉到一定的地方，剛纔所說的情形便反了，原來亮度增的反減了，原來減的反增了。他自己不放心，恐怕這個效應是由於在他的房子和那遠窗之間的空氣所起的某種作用，他又把他的實驗用室中鏡子或水面所反射的蠟燭光來試，仍舊觀察到相同的效應。以馬勒斯這樣提倡微粒說的人而有這宗新觀察，楊氏頗感惶惑。楊氏本來以爲光的振動是縱向的，這就是說，振動是沿着光線運動的方向，若然，在前進光線的周圍光波是對稱的，那嗎，光受反射而起偏極倒真成了困難了。但是猜到正確的解釋的也是楊氏。他看到倘若假設橫向的振動，一切的觀察便都能說明。一條光線的振動也許與射線的方向成直角，換句話說，是在波前的平面上，而不與波前垂直。這個顯然的解釋，夫累涅爾也獨立的猜到，與楊氏不謀而合。

以太本來是假定爲傳光的介質，光的振動既已改爲橫向性，則對於以太的性質自有新的要求；以前擬定以太爲流體，此時必須放棄而改爲彈性的固體。夫累涅爾很願接受這樣的修正。

光之能由反射而起偏極的情形，我們可以舉一粗疎的譬喻來說。設有一人，閒悶得慌，划船消遣，戲以棍子擲入水中。不久他就發覺棍子碰着水後的行爲是與牠如何碰着水面有關。倘使他拿着棍子的中間，並且擱平了纜放手，使棍子着水時與水面平行，這樣，棍子朝上彈回來的機會，比起把棍子豎直了扔（一頭先着水，）要多得多。同樣，光線射到玻璃面上，反射的光線所含的光以振動向和玻璃面平行的爲多，所以這反射線就起了部份的偏極；那透射過玻璃的光線所含的光，振動不與玻璃面平行的爲多，所以也起了偏極。反射和透射兩部光線之起偏極是在互相垂直的平面裏。

夫累涅爾既有了新的認識，立即轉而注意偏極光的研究。他發見由冰蘭石的雙折射晶體裏出來兩條光線，是在互相垂直的平面裏起偏極。他又研究過偏極光的干涉現象，替光爲橫波的看法加了一些證據。在這兒我們祇講到他所做的一個實驗，由這實驗他斷定了兩條偏極的光線，除

非是在同一平面內偏極，不能生干涉現象。他對於光在晶體中的透射，尋常並不遵從施奈爾的正規折射定律，頗費研究，而且對他所觀察到的現象所下的解釋，大有成功。夫氏而外，還有別的人研究這些現象，或類似的現象，在此可以任便說幾位的姓，像亞拉哥 (ARAGO)，布魯斯特兒 (Brewster)，畢阿 (Biot) 都是的。

波動說到了這時自衛的壕塹益加堅固，不過還賸下一個實驗來作最後的證明。牛頓式的微粒論須要光在水中比在空氣中傳行的速率大些，而波動論卻作恰恰相反的要求。從來沒有人量過光在水中的速度和在空氣中的速度相比，就是在空氣中的速度也不會準確到合適的程度。這件事業落到法國的一位學醫的，後來轉而注意物理學的人，就是佛科 (FOUCAULT)。

佛科所用方法的原理如下。讓光射到旋轉很快的鏡子上，由鏡子反射到一根管子裏，管內或為空氣，或為水，看是要定光在那一種物質裏的速度。在管子的另一端有一固定的鏡子，把來的光線由反射送回旋轉鏡。這條光線又被旋轉鏡反射，不過所取的方向與由光源到旋轉鏡的方向不同了，因為光經過管子的全長來回各一次，在這時間裏，旋轉鏡已微微轉移。知道旋轉鏡的旋速和管子的

長度，要算光的速度，那是簡單的事情。佛科求出光在水裏比在空氣裏的速度小，於是波動說又一度證實了。所以波動說的完全成立是在佛科實驗做了一年，即一八五〇年。

第四章 熱之動力說

我們現在認熱爲能之一式，可以變爲他式的能，無論是電能，機械能，或發光能都可由熱變成。我們也知道無論那一式的能可以復變爲熱。我們隨後就要明白，這些現代的觀念之傳給我們，乃由於許多人經過悠久的探討，下了忍苦的工夫，所得的結果，而熱的理論進化到能爲現代物理學家所接受的形式，爲時並不早於光的波動說。在熱和別的形式之間有密切的關係，從熱力學一名詞看，就已顯然，這個名詞是我們用來專指一門熱的性質的研究的。

現在所講授的熱力學是從兩條定律或原理發展出來的，每條各有充盈卷帙的實驗證據爲基礎。現代熱學說發展的歷史，提綱挈領的說，就是熱力學這兩條定律的成立史。

熱力學的第一定律非他，即能量不滅的原理。能可以由一式變爲任何另一式，但絕不可增生或減滅。通常把第一定律和能量不滅分開來說，是有理由的，這個理由是歷史的：在把熱歸到能的

範疇之前許多年，能量不滅的觀念已經爲人所承認。機械能量不滅的觀念是要從萊勃尼茲 (Leibnitz) 起，他在十七世紀之末就看到一個機械系統中一切能量，無論其爲動能或位能，總和必須經常恆定。熱的學說是另自發展的，爲表出熱能之不背能量不滅的大原理，所以特爲規定第一定律。

溫度的第一次測量是伽利略所作，在一六〇〇年後短期內，他製成他在歷史上有名的空氣溫度計。他做了一個玻璃泡，泡上接有一根長玻璃管。一面把玻璃泡握在兩手中使暖，一面把玻璃管開口的一端插入盆中水面之下。一把手放開了，泡中空氣變冷而縮，就有水抽入管中。管中水面的高度成了泡中溫度的指標；泡愈冷水愈升高，泡愈熱水愈降下。關於這個溫度計，我們要說一句話，其中絲毫沒有意思要減低伽利略因他的發現所應得的敬信，不過必須記得，他的溫度計的準確度要靠大氣壓力的恆定，因爲大氣壓力的變更，就和溫度的變更一樣，會逼着他的溫度計上玻璃管中的液體上升或下降。

幾年之後，一位姓瑞 (Rey) 的法國醫生造成一具較爲可靠的儀器，他用水代空氣，作爲利用

其膨脹以量溫度升高的質料。他的溫度計的缺點在他不會把水在其中膨脹的管子上端封沒於
是乎因水在那裏蒸發，他的溫度讀數便一天一天減低下去。第一具較好的溫度計，其中裝一液體，
溫度升高了，便膨脹到一根管子裏，管子的遠端是封沒了，並且還是部份抽空的，是留到伽利略在
菲洛倫澈的學生手裏纔做成的。然而我們要明白，這些早期溫度計並不會有和我們現在所用略
相彷彿的溫度標。現在校準溫度計的方法，是任意取兩個定點，並且任意規定這兩點的溫度，把溫
度計在這兩點的位置或讀數記了下來，然後把居間的距離分成度數。伽利略的學生所用早期溫
度標是用這樣的兩個溫度為根據，一是寒冬的雪溫，一是動物的體溫。後來把上面的一點改為乳
酪熔解的溫度。

我們現在所用的兩個標準溫度，即水的凝固點和沸點，是還在後纔採用的。在前一章裏講到
的虎克氏，似乎是第一個人確認水的熔解溫度是固定不變的溫度，而且易於複見，適於作為標準，
而惠更斯則對於水的沸騰溫度作同樣的確認。我們現在所用的式子的溫度計是華倫海（Reaumur）
在十八世紀的初年首先製成。他的溫度計是把水銀裝在玻璃管中，然後將在水銀面之

上的一頭封了起來。他的溫標所根據的定點是水的沸點和水同食鹽的混合物的溫度，前者定為二百十二度，後者定為零度，兩點之間的距離勻分為二百十二分度。他之所以選定二百十二度這樣怪的數目作為上一定點，或許是由於要拿一百度來代表人的體溫的原故；這一溫度，用現代較準的溫度計來量，知道是華氏溫標九八·六度。現代的華氏溫度計是在兩個溫度校準，一是三十二度，即毫不含鹽的水的熔解點，一是二百十二度，即水在大氣壓下的沸點。現在科學工作中一致使用的百度溫度計也是根據這兩個定點，不過不同的是叫冰點為零度，沸點為一百度罷了；這個溫標，攝爾休士 (Celsius) 在十八世紀的中期就採用了。

現代最準確的溫度計是以氣體溫度計為根據，其中含有氫或氦一類的氣體。所以如此的理由，是因為水銀在一切溫度下膨脹不等，（譯者按：意謂水銀溫度每升高一度，膨脹的程度視其原有的溫度而不同。）實在說來，沒有一樣質料在一切溫度下膨脹是等的，除了理想氣體，我們硬假設其如此。因為這個理由，兩枝溫度計，倘使所用計溫質不同，儘管在兩個定點的讀數可以相合，而在溫標中其他部份仍有差異。要規定出一個永久不變的溫度標，我們可以想像一個理想氣體溫

度計，單就其構造而論，與伽利略的空氣溫度計並無主要的差別，並規定其溫標。然後再實地做一具氫氣溫度計，因為氫氣的性質和理想氣體的性質相差不過。要把氫氣溫度計的讀數改正到理想氣體溫度計的讀數，並非難事。最後我們再用氫氣溫度計來校準水銀溫度計，不單是校兩個定點，而是沿全部溫標一點一點的校。

在這兒祇要提及絕對溫度標這個名詞，較為詳盡的討論，要留到本章的後面，等讀者明白了絕對溫標之所以採用及何以重要的理由，方好着手。

到了此時，科學既得着了量溫度的器具，熱的理論便有發展的可能。以前認熱是不可毀滅的流質，名之曰熱質，能從一個物體流到另一物體。熱的物體所含的熱質多於冷的物體。是在十八世紀的末後幾年，格拉斯哥 (Glasgow) 的勃拉克 (Black) 纔首先分清了溫度和熱量的區別，而他的方法是實驗的。他察見要熔解一塊冰，雖然冰和水的混合物的溫度，不到冰化盡了，不會上升，而必須加大量的熱，他就認為熱質是依一種方式與冰相合，並潛伏在水中。潛熱這名詞至今存在，不過現在用起來，所給的印象與勃拉克所要給的不同。他觀察到用定量的熱加於一塊金屬，所增的

溫度，比之加於等重的水中要高些，他的心目中似乎從這個事實清清楚楚的有了熱容量或比熱的觀念。他採用將水由某一溫度變為另一溫度的量，來規定熱量的定義，這個定義和現代的熱單位卡路里關聯很為切近，卡路里就是把一克的水升高攝氏一度所需的熱量。勃拉克也用過應用在水的蒸發上的潛熱觀念，在蒸發的過程裏，雖然直到水蒸發淨盡為止，溫度總是保持在攝氏一百度，仍要用熱纜行。這些進步已為現代的量熱學開闢出一條道路。

講到此地，已是後來進步的程序的開端，這一段程序的結果就是把熱質說完全推翻，把現代的熱之動力說和熱力學成立起來代替牠。第一步明確的進步，一如常規，是由於實驗。固然已有幾位作家提到了熱或者是運動的一式的意思，但是他們的擬議只好比於德謨克利他斯的原子說，德氏雖曾說起原子，並沒有創建現代的化學或動力說。倫福德伯爵 (Count Rumford) 生在美洲，後來住在英國，熱學上第一次實在的進步是由他在慕尼克 (Munich) 做了一串觀察和實驗所得。在一七九七年，他守着看鑽穿砲筒的孔隙，就察見有大量的熱發生出來。這使他覺得奇特，因為明明沒有熱質的供給來使砲金熱了起來。他性好查究，就着手策劃解除這樁疑難的實驗，他首

先考定了熱沒有從鑽的周圍來；這就把熱是從周圍的物件取得，而不知如何因鑽孔的手續就傳入鑽中的可能撇開了。於是他又去量製鑽材料的熱容量和鑽出的廢屑的熱容量，求出來二者相同；那嗎，熱不能因鑽孔前後金屬的比熱有變而發生。他又用鈍的工具，儘管在那裏鑽，而祇能從大塊的金屬去掉很少的材料，但是仍然有熱發生。雖然他所作量度的準確有許多處使人歎然，他自己卻心滿意足以為證明了熱和功是等效的，而功能轉變為熱。熱功當量之測量以他為第一人，他求出發生一卡路里熱量的功約等於將七百千克提高一米所需之功。

倫福德自己雖然信服熱和功的等效，但是被他說服的沒有幾個人。人們浸淫於熱質說之中，為時已久，積習難改，總要在他的實驗和理解裏去尋求瑕疵，與他同時的人以為熱質的觀念是熱的「常識」觀，而倫氏的推論與「常識」相反。這就是我們的一個教訓，倘使有一件新的發現，而我們忍不住要說牠是反於一切的常理時，就應當記著這個教訓，誠然，我們可以說牠是與我們所認為有理的相反，我們又願意不願意這樣的自縛呢？

有幾個人對於倫福德宣說的真確性，半信半疑，其中之一就是戴維赫姆萊勒爵士（Sir

Humphrey Davy) 他在一七九七之後一兩年中，做了些實驗來測定摩擦所生的熱的來源。他以爲倫福德實驗中的熱或許是由傳導而到了鐵金之中，他就安排了一套儀器，使兩塊冰能够在真空裏互相摩擦。他又推論道：倘若設法使儀器的周圍比水的熔解點還冷，熱就不能由傳導而入水中，因爲熱總是由溫度較高的物體傳到溫度較低的物體。況且真空是對於傳導進熱更進一步的提防，說不定他還設法預防熱由輻射而達於冰。有了這種種的預防，雖然無路可以進熱，而當兩塊冰互相摩擦之時，冰竟熔了。唯一可能的結論就是熱由摩擦而生。

戴維的實驗比起倫福德所做的要有結果些。戴維和楊氏（就是那對於光的波動說貢獻很多的楊氏）都同情於倫福德，相信熱是運動的一式，儘管倫氏的說法不免惆恍；他的推論說：由摩擦所能發生的熱量既然似乎是無限的，熱絕不能爲物質之一式，因爲那時以爲熱質是一種物質的流體。問題就是從甚麼地方能有無限量的物質的流體出來。

首先把能量不滅原理應用在熱上而作明確的申說的，是德國的物理學家麥亞（Mayer）在一八四二年所爲。他從沒有一個很正確的若干實驗之中，察見了倘使讓一塊涼涼的金屬從很高

處落入一個盛水的器皿裏，水的溫度就會上升，比水的本身或落下的那塊金屬原有的溫度還高。他又發見將水用勁的搖動也能升高其溫度。他曾對於熱的功當量和空氣的比熱加以量度，但他的結果並不準確。雖然戴維所指出的，不過是熱與能之間有確定的關係，麥氏卻以為戴氏的工作已經必須能量的不滅。常常有人說起麥氏是發現熱為能之一式的原理的人，但是倫氏也把這定律說得差不多同樣的清楚。法國一位姓石干 (Seebin) 的工程師在麥氏發表意見的前幾年，就提及功能變為熱，而且二者總是等效的。熱也能變為功，想來也必是石氏所顯然見到的。

就在事情這樣游移不決的狀態中，英國的焦耳看出了實驗上的問題。他是生於一八一八年，後來對於實驗的科學發生了興趣。在他所做的實驗中有關於電學和化學的。也許他由這兩門學問裏的實驗得着熱學上所應用的能量不滅的觀念。把金屬浸沒在酸裏，就有熱和電發生出來。這就是熱和電之間一個顯見的關係；他知道電能作功，而熱亦復能作。那嗎，有沒有辦法把所有這些事情歸束到一條原理之下呢？

就在一八五〇年前幾年之中，焦耳用了許多不同的方法，量出熱功當量。因為這樣，我們現在

用J字來表示發生一卡的熱所需的功，這個符號就是他的姓的第一個字母。我們還有一個叫作焦耳的物理單位。他把一圈線浸入水中，然後在線裏通過電流。水就熱了起來，焦氏竟能算出要發生一卡的熱用了若干電能。他又將水攪動，觀察其溫度的升高，就直接量出了熱功當量，其儀器頗像現在的水酪冷凝器。水是裝在一個封固的器皿裏，用許多槳葉去攪動。槳葉是安在一根軸上，軸的一頭繞有一繩，再在繩的一端繫以重物，重物向下墜落時，槳葉便旋轉起來。將重物舉起和墜下的次數，看要水溫度上升若干而定。這個方法的便利，就在祇要知道下墜重物每個的重量和每個墜下的距離，就能直接算出下墜重物所作的功。在現在，幾乎每個報名學物理的大學生都要指定去作和焦耳這個實驗相似的實驗。

焦耳所得的熱功當量是四百二十七千克的功，就是需要這麼多的功來發生一卡之熱。他又做過些實驗，由兩個固體的摩擦來生熱，所取的方式現在還每每用到。他所得的數值比較前人所作任何相類的實驗的結果，準確度高出多多，所以我們可以說他纔是那把熱力學第一定律建立在穩固的實驗基礎之上的人，他纔是那把熱歸到能的範疇的人，能的範疇現在已經推廣到包

括一切爲人所知的事物，無論其爲熱，爲光，爲運動，爲質量等等，都可以歸納於其中。

熱力學第一定律的發展就是如此。這就是那禁絕永久運動之一種的定律。這一種可以叫作第一種的永久運動，凡想從無中生能的方策都包在這個名目之內。要發生能量，而不用另一式至少相等的能量，是不可能的事。如果能把摩擦完全免去，就可以造得成一部機器，一經開動，就會繼續不斷的運行。地球和太陽，在牠們的運動狀態之下，就是這宗系統的一個例子。但是即使摩擦通通去掉了，也沒有機器會能夠供給任何功率而不衰竭停止的。我們以後將見這個定律並不禁絕第二種的永久運動，因其毫不違背能量不滅的原理。我們就進而考察熱力學的第二原理。

對於第二定律要作任何討論，必先從在法國研究熱機的卡爾諾沙第 (Sadi Carnot) 的工作開始。他認爲熱在熱機中的流動與水在瀑布中的流動相類似。要讓水墜落，水纔能作工。必須有水位的不同，有位能的較差，以變換爲他式的能。山中湖澤所蘊藏的水並無發電的能力，而利用奈阿加拉瀑布 (Niagara Falls) 所發的電力，就發展了很多偉大的工業。推原論功，實由於水之就下。就熱機說，熱須流入機中，復又流出。在蒸汽機中，熱的蒸汽將其位能給與活塞，放出之時含能就

減少了，有時甚至凝為冷水。倘使放出的蒸汽溫度和進機時相同，活塞兩面的壓力就得相同，即不能有任何工作。卡爾諾認清了倘不是受了溫度差的驅策，熱從一處流到另一處是不可能的，猶之乎水，若非能流到水位較低的地方去，而聽其自然，是不會動的。熱力學第二定律是卡爾諾所首先規定，常時稱為卡爾諾原理。雖然他是在熱的動力說成熟以前工作，抱着熱質的位能的觀念，我們仍然還保存他的定律。他的著作是在一八二四年發表的。卡氏抱着錯誤的觀念而有這樣的成就，也許和人類對於電之究為何物無絲毫的概念而在許多年中用電所得的成就，不無互相類似之處。

所謂卡爾諾循環即卡氏所發明，乃用一理想的熱機所演的理想過程。這過程的設備含有一個機筒，一個活塞，一個高溫熱能的蘊蓄器（又名熱器），一個低溫熱能的蘊蓄器（又名冷器或冷凝器）和機筒所用的不導熱的底座。機筒內容氣體，其體積和壓力依活塞的位置而定。機筒的圓壁和活塞是用熱能流不過去的材料所作，但筒底是導熱的。

在卡爾諾循環中，機筒所容氣體經過的全部循環如下。假設起初氣體的溫度為冷器的溫度。

將機筒放在不導熱的底座上，再在活塞上加重量，將氣體壓縮而升高其溫度。在這段過程裏，沒有熱能流入氣體或從氣體流出。這個過程這樣繼續下去，直到氣體的溫度等於熱器的溫度。然後將機筒放在熱器上，而取去加在活塞上的重量的一部份。氣體就膨脹起來把活塞往上推。隨膨脹而起的冷卻被由熱器流入的熱所抵消。於是再將機筒放在不導熱的底座上，並將活塞上的重量全行取去。此時膨脹作用就將氣體冷卻下來，因為沒有熱能進去。等到氣體溫度降到冷器的溫度，就把機筒移到冷器上，並將重量加在活塞上。氣體受壓而縮，但壓縮所生的熱，因筒底的傳導，離了氣體而入於冷器中。這個過程繼續下去，直到氣體回復原來的狀態，即其溫度、體積和壓力與其在循環開始之前所有的相同。熱能這樣的流過熱機，而工作就這樣的得着了。

卡爾諾用了這個循環證明一部熱機的效率絕不能大於某一數量，而這數量自是小於百分之一百；他並且證明沒有一部實在的熱機能夠達到他所假設為可迴溯的理想熱機那麼高的效率。倘使把定量的熱從熱器取出，經過熱機，而給與冷凝器，因而得着若干的功，那嗎，倘使費同量的功，故意將熱機逆行，就會從冷凝器取得同量的熱，而還給熱器。在第一步裏，是由熱得功，而在第二

步裏，是由功生熱。熱機的效率完全是由熱器和冷器的溫度決定的。

卡爾諾的宣說實在等於假定第二種永久運動之不可能，而這一個假定本是含在熱力學第二定律之中的。在一八五零年，克勞休士 (Clausius) 以坦直的形式，說此定律，他說：熱不會由一個冷的物體無所憑藉的就過到較其本身為熱的物體。這個定律的另一說法就是在若干物體所成的任何封閉系統之中，不會自行發生一種變化，以致一個物體失去熱量，而另一同溫度或溫度較高的物體倒增加位能的。舉一個例來說。在大洋裏，隱藏着巨量的熱位能，因為洋水的溫度尋常比冰點高了不少，是一個大蓄熱池。但是我們不能利用這些熱能，因為這些熱能得流到更冷的水裏去，而我們沒有那麼大的池子來蓄這麼多的冷水。北冰洋離得太遠了，自不合實際的用途，而洋底的水雖然較冷，除非花很大的經費抽了上來，也無從供商業上的企圖。要想用這種熱能即是要發生第二種永久運動，這種運動並不違犯熱力學第一定律，因為並不是要從無中生能。在大洋裏，有足夠用的能量，還有多；唯一的困難就是這種能量不能取得。第二定律，照此說來，就是能量可否取得的定律。要證明宇宙衰歇，要證明熱的物體在冷下去，而冷的物體在熱起來，直到宇宙的一切

星哪，地球哪，星際的空間哪，都達到同一溫度，而生命遂不復可能，要證明這些事，都會乞靈於這條定律。倘使這便是我們的定命，也用不着杞憂，大限的來臨，至少是在很遠很遠的將來哩。

卡爾諾的工作有青年時代的湯姆孫威廉 (William Thomson) (後爲愷爾文勳爵 Lord Kelvin) 爲之扶助，得了很大的裨益。湯氏是最初認出卡氏工作重要之一人，並且把卡爾諾循環和其中的含義歸到熱爲能之一式的新理論籠照之下。絕對的溫度標也是由湯氏而出。他知道廠在容積恆定的封閉器中的氣體，一經受冷，便要收縮，壓強便要減少，氣體溫度每降低百度標一度，壓強減少的量爲其在百度標零度時的壓強的二百七十三分之一。在下一章裏我們會看見氣體壓力是由氣體分子的運動，而其動能又復依氣體溫度的高下而異。推其結果，在百度標零度下二百七十三度的溫度下，氣體就不會發施壓力，不會有一點熱能了。同樣的，從一部履行卡爾諾循環的熱機所能得的功，要依熱器的溫度和冷熱二器的溫差而定。湯姆孫察見了這宗依倚的關係，就用作他的絕對溫度標的基礎，他這溫度標比起用氣體壓力來規定的絕對標度來，很爲相近，但還有一個優點，就是他的溫度標與卡爾諾循環所用的物質的性格完全無關。依此說法，在絕對溫度標上，水的

凝固點就是二百七十三度。

卡爾諾的可迴溯熱機的效率是從任何熱機所能得的最大效率，等於熱器溫度除冷熱二器的溫度差，一切溫度都是在愷爾文動爵的絕對溫標上去量。

關於蒸汽機的發展，我們在這裏祇消提到幾個名字，像巴班 (Papin)，牛柯門 (Newcomen)，和其他的人，特別是瓦特 (Watt)，都是的。卡爾諾和愷爾文的理論在這些發展中屢屢的證實了。爲本章的結束，我們許給讀者，以後對於熱力學第二定律，還要從動力論和統計力學現代形式的見地，作更進一步的解釋。

第五章 原子與分子

往往有科學家奠定了知識上大進步的基礎，而他們自己並沒有認識他們的發見的重要，這在歷史上有許多的例子，而在實驗科學的領域中尤其如此；考其原因，每每由於實驗家堅決的要依據當時視為業已成立的理論，去尋求他們所得結果的解釋。倘使結果與理論相反，就常常把結果棄去。後來的觀察人重尋前人留有標誌的舊路，並假設原來的理論有誤，方纔走上正確的途徑。然而一般的說，不能責備這些實驗家具有成見，而祇好歸咎於接受新思想的時期還沒有成熟。

因其如此，關於氣體的性質和行為的初期實驗，並不曾立即引達氣體的現代觀念。現代的觀念認為氣體乃微小的原子和分子所成，這些微粒時彼時此的奔馳，從這觀念就開闢出現代氣體動力論收穫豐富的沃壤。在這一門裏的初期實驗，其略有準確度的乃牛津（Oxford）的物理學家波義耳（Robert Boyle）所作，他約在一六六〇年發表關於空氣彈性的實驗結果。現

在學初步物理的學生，人人都要作一個波義耳定律的實驗，實驗的布置和波義耳本人所用的很相像。他把一根玻璃管彎成U字形，將長的兩股豎直，並將一股的上端封閉。然後他將水銀注入開口的一股，這樣就把若干空氣關在封口的一股裏。水銀的重量將封閉股裏所藏的空氣壓縮，注入的水銀愈多，空氣受壓愈甚，依壓力的增加，空氣的體積便逐漸減少。這樣普通的事實也許從前就已經知道，其實伽利略從他在空氣溫度計上的工作，或者業已知道這一回事。至少，彈性物體一受壓力便要收縮，是一般所知道的。波義耳的成就在於把壓力變更時空氣膨脹或收縮的程度作精細的測定。他求出他管裏的空氣的體積，依很確定的法則，隨着壓力而變更；若壓力加倍而溫度保持恆定時，空氣的體積減小，很接近於原來體積的一半。一般的說，就一定質量的空氣而論，體積和壓力互成反比例。壓力和體積的乘積，（仍然就一定質量的空氣而論，並且在恆定溫度之下）隨時保持得差不多恆定不變。這就是大家所知道的波義耳定律，每本初步物理學課本都載有這條定律。雖然在事實上，這條定律祇有用在所謂理想的氣體（氣和氮就與這宗氣體的行爲相近）方為嚴格的正確，但無害其為有用。這條定律也經馬利歐脫（Marriott）研究過，但要以波義耳為

創始人。

在本章裏，我們把伽利略在氣體膨脹上的工作略過，因其不過是表性的。他知道空氣受熱而脹，但他所作量度的準確太差，不許他頒布所謂查理 (Charles) 定律，或給呂薩克 (Gay-Lussac) 定律，將氣體隨着溫度上升而膨脹的量規定出來。這條定律似乎在一千七百年，當法國的物理學家亞蒙通斯 (Amontons) 作氣體溫度計的實驗時，已爲他所了解。後來查理也在法國研究氣體依着溫度膨脹的定律，而給呂薩克在一八零二年發表了尤爲準確的實驗結果。這一班人領悟到由溫度增加而得的膨脹，凡屬氣體都差不多相同的；絕對溫度的概念已蘊含在他們的工作之中，不過用確定的形式來宣述絕對溫度的觀念，要稍遲一點罷了。我們現在說，在恆定體積之下，氣體的壓力是與絕對溫度成比例；而且，在恆定壓力之下，氣體的體積是與絕對溫度成比例。

雖然這些人的工作到後來有助於分子動力論的建立，但一般並不承認他們是分子動力論的開山祖師。然而他們卻具有真正物理學家的典型，覺得對於一切可能的事物都要竭其所能去探討，不問是否察見了他的結果之終爲重要。真正的物理學家，猶之天文學界的台珂布拉喜，把事

實記載下來，讓後來的人能使用。

實驗的基礎已經奠定，已知的事實都有記載供給科學界作闡明的工作。這些事實後來就有柏努利 (Bernoulli) 來使用，他在一七三〇年之後不久就為分子動力論開出前進之路。他假設空氣乃無數的微粒所合成，這些微粒常動不息，時彼時此的奔馳，互相撞擊，並撞擊容器的界壁，他更指示以他的假設為根據，由數學的推理，便引達波義耳定律和後來以查理為名的定律，這兩條定律都是從直接實驗得來的。每每有人把柏努利叫作分子動力論的開基人。無論如何，假設為作成氣體的微粒之確然存在，以及這些微粒之運動不息，都有待於辯證，而舉出真正合於科學的辯證，要以柏氏為第一人。這些微粒究竟是什麼，他並沒有確定的意思，當然，他並沒有原子和分子兩種不同的微粒的觀念，他也不知道化學化合的定律。然而他的工作，拿來和德謨克利他的原子的說相對照，就顯得處處都合於科學。德氏不過是懸揣有極限微粒的存在而已。況且柏努利還有絕大的便利，就是有實驗的結果為根據來建立他的理論。要說他是受了德氏著作的暗示，也或許是對的，我們也很可以相信他的理論之所以較為易於接受，乃由於德氏的思想在希臘的文學中以

及後來都懸延不衰之故，就是偉大的牛頓也接受德氏的思想。

我們所取的途徑把我們引到化學的領域中，作短時的盤桓，在化學的領域中，原子和分子此時方始成爲確定的概念。在這以前，已經感覺到對於假設爲作成空氣的微粒，知識有限，還須多加探討。在緊接柏努利之後的時期裏，要直接研究這些微粒的行爲，唯一可供使用的方法就是去研究可以假定爲微粒所成的各種物質的化學化合。在這個時候，化學一門，以及物理學，正在從事於變爲正確科學的程序之中，用天平來作準確的稱量越來越認爲在化學工作中很爲緊要，並且確認了一樁向來不知道的事實，就是化合物與混合物不同。在混合物中，可以取任意的比例把各項成分混合起來，而在化合物中，各項成分原素的比較數量是永遠不變的。比方說，如將一塊鈉放在氯氣裏，由化學作用就會作成氯化鈉；但是倘使我們不曾極端留意把恰好足量的鈉放在氯氣裏，兩元素中就有一元素不會完全加入化合物的合成。在另一方面，我們卻能取隨心所欲的比例把鹽和沙混合起來。由此再進一步，主要的是由於拉伐西埃 (Lavoisier) 的工作，漸次認清了在化學變化中物質不生不滅。參加一種化學反應的物質的重量總是與反應產品所含物質的重量相

等。這就是道爾頓 (Dalton) 所得依據以建立他的原子論的基礎。

道爾頓約翰 (John Dalton) 在世的時期是從一七六六到一八四四年。化學家總認他是他們的宗師，但他也是一位物理學家。他的工作之一就是關於各樣氣體在水中的可溶性，換句話，每種氣體有若干會溶在定量的水裏，這個問題撥轉他的念頭去猜到一種可能；既然假設空氣和其他氣體是微粒所成，各樣微粒的大小就許不同，輕重就許各異，而各樣氣體重量相等時所含微粒的數目也許不同。要試驗這幾點，他祇有轉而注意於化學變化的事實。在一種化合物中，各項成分的比較重量永遠不變。這就是明白的表示說：各項化合成分的本身是由判然分立的單位所作成，而這些單位又依簡單比例以相化合。這樣假設的簡單與合理至少不遜於任何別的假設，頗合於作進一步研究的基礎。他進而作化合物的分析，不久竟能宣布他的整倍比例定律，在化學裏講到這條定律，就常提起他的大名。雖然他起初不會辨認出原子和分子的區別，也不知道有兩式蓋然各別的微粒須加考量，他卻會說了這樣幾句話：「倘使碳和別的原素聯合，我們任便說，和氧聯合，和硫聯合，那嗎，與一定重量的碳分別聯合的氧和硫的重量，其間的關係和兩個簡單整數的關係

相同。」這個宣言是在一八〇八年裏出來的。

我們曾經說及與道爾頓同時的法國物理學家給呂薩克。以他所具波義耳的和查理的定律的知識，再用他自己的量度，他對於氣體作了一番的研究，格外注意到互起作用的氣體的體積和作用後所生氣體產物的體積。他以同溫同壓的條件來考察所有的氣體，他求得的結果可以任舉一例來說，譬如兩立特的氫氣和一立特的氧氣相化合，便產生兩立特的水蒸汽。換了別的氣體，比例許有不同，但無論如何，各項氣體的體積互相的關係和簡單整數間的關係相同。

這些事實對給呂薩克所作的指示就是一切氣體，在相同的情狀下，所含微粒或原子的數目應當同。這個看法，儘管沒有主要不妥之處，卻是漏了一件重要的細節：沒有把原子和分子分辨清楚。這點罅漏影響到道爾頓對於氣體如何互相化合所作的解釋，竟引出矛盾之處。其困難所在，在我們現在的人，是很顯然的，祇要我們想到倘使沒有分清原子和分子而去測定原子量，則將發生何等的糾紛。在這樣狀況之下，要推闡出毫無矛盾的原子量方案，勢有不能，因為分子能含有一個，甚至更多的原子。主要的困難，照道爾頓所見，就是倘使要假設各種體積相等的氣體在同溫

同壓條件之下含有同數的微粒或「原子」，那就絕不能了解爲甚麼，照實驗所示，一立特的氧和一立特的氮化合起來生出兩立特的氧化氮。同數的假設明明告訴他祇應當有一立特的氧化氮出來，因爲一個氧「原子」（他所叫的「原子」）應當和一個氮「原子」化合起來生出一個氧化氮的「原子」。原子和分子的區別還是等到亞佛加德羅 (Avogadro) 來分辨。他在一八一一年說明只要假設原子爲化學上極限的微粒，而原子能聯合以成分子，則一切的反駁都可以解除。一切氣體在同溫同壓的條件下而佔有相等的體積，在各該體積內應當相等的乃分子之數而非原子之數。這個說法就叫作亞佛加德羅定律，乃最有用而最基本的科學通則之一。有了亞氏這一番工作，道爾頓的工作就完全可以應用到化學化合的許多事實上去，他並可進而從事於原子量的測定，所謂原子量即各種化學元素的原子互相比較的重量，這宗測定以前受了阻礙，乃由於他把原子和分子混統不分之故。原子量的量度後來由柏齊利瓦斯 (Berzelius) 以及其他的人繼續努力，成效頗大。

就是以此，我們認道爾頓爲原子之父，認亞佛加德羅爲分子之父。後來對於原子及其重量的

知識積漸增多，就可以看得出，倘使把各元素依着原子量往上增的次序排列起來，開爲清單，間或就會遇着一個元素，其性質與見於單上前而諸元素之一的相同。這樣的情形數見不鮮，經過好些人的工作，成例愈多，在一八七〇年的光景，引出了孟德勒也夫 (Mendel'eff) 的週期表。在這表裏，把化學元素排成一個長方形的方陣，在各橫列裏，原子量是由左至右而增，在各直行裏是由上至下面增。每一直行中的元素在化學上很爲切近，有相類的性質。這張表裏缺空之處引起人去尋求新的元素，因而竟至發現，這張表實在是化學家最有用的利器之一。後來新元素多有發現，而別的元素原子量有高度準確的測定，就很看得出這樣形式的表不是最後的定式；有些元素不會與這方案相吻合。在後面一章裏討論現代原子說的時候，就會看見這些差異祇是見於表面的，現代學說的優勝處之一，就是把這些差異除掉。

以上所說的是原子和分子確然存在的化學證據，無須再多講了，我們可以提及，正當道爾頓和亞佛加德羅把他們的結果公之於世的時候，勃勞特 (Prout) 也擬出一個假說，他說，所有的元素都是從一個元素，很可能的是從氫素，造出來的。他之所以作此擬議，乃因有見於那時所承認

各原子量的數值，常有是近於氫原子量的整倍數的。雖然更精確的原子量測定對於這個看法頗為不利，使之多年得不着承認，在後面一章裏（就是上節所說的一章），我們就要看見近來如何又回轉去承受勃勞特的假說，不過這次卻有充分適當的實驗證據為後盾，以證明其正確。我們現在可以終止在化學領域內的盤桓，而回到物理學和分子動力論發展的大道上去。

原子和分子的存在既然成立了，分子動力論就很有發展的可能。在道爾頓和亞佛加德羅成功之後不久，就出了一樁重要的發現，本該對於動力論加以有力的催動，而事實上竟非如此。我們既然講的是實驗物理學史，祇好依着年代的次序來敘述這樁發現，不便等到後來好久了，動力論由旁的方面發展，因而恍然悟到這樁發現的重要的時候，再回頭去講。這個情況足供我們借鏡，因其指示我們，科學家怎樣的由於不能領略新實驗結果的意義，每每讓可以把他們引入有成就的新境界裏去的重要事實，失之交臂，擱置了許多年。

英國的布郎勞勃特 (Robert Brown) 在一八二七年裏，當其作植物學的實驗，從事於用顯微鏡觀察植物的微生物時，他察見了一些微細的形體，似乎在作繼續不斷的運動，運動的形式不

甚像有規則的由一處到另一處，而像是受了劇烈的激擾，很為凌亂的樣子。他並且確實的考定了這些亂動的微物並無生命，而是灰塵或者菜質的粒屑。正確的解釋非他所及得到，他祇能把他所觀察的記載下來。這就是所謂布朗運動，經過了好多年之後，方纔得着解釋，但因其在分子動力論中後來的表現很為動人，我們為首尾的貫串起見，就在這裏把牠說明。

設想有一個人，站在湖邊閒眺，賞玩天然的景色。湖面一平如鏡，幾無波紋。後來他舉目看見離岸好遠有一件東西，似乎在那裏動蕩。他就很留意的注視這件東西，看見牠儘管動來動去，卻是總離開他最初看見的地位不遠。想起來這一定是受了厄難的小動物。一面從身邊去摸望遠鏡，他滿以為會看見那動物奮力的游泳，掙扎着希圖不沉了下去。然而不然，他從望遠鏡裏看見的乃是一塊浮在湖面上的麪包。那嗎為甚麼在那裏動呢？湖中平靜無浪，幾乎連波紋都看不見，他祇好搖搖頭，沿着湖岸向前走去。其實不知不覺的他已經做了布朗，他的發現和布朗的發現很相彷彿。他把這塊浮在湖面的麪包奇怪的動作告訴一個朋友，請其加以思考。這位朋友也覺懷疑不解，經過了一番思索，猜想倘使有一羣小魚在那裏咬那塊麪包，會發生甚麼情形。這些魚要從各方向來吃這

塊麪包，各各想搶着最大的塊子。有的時候，一面的魚碰巧比另一面的多些，麪包就會被擠向魚少的一面動一點，不一會又被擠着向另一方向動。這位朋友就好比那班後來說明布朗運動的人們。布朗所見那些微粒之不住的運動，他們解釋起來，認為是由於灰塵的粒屑受了液體分子不停的亂碰亂撞。不過這位朋友比起他們還有一樁很大的便宜，他能够搖着船去看究竟在麪包的附近是否有魚。然而沒有人能看見分子。

隨便什麼人，有了一架高倍顯微鏡，就能看得見布朗所看見的，或者是照着一種液體裏所含的縐微質點看，或者是向着懸蕩在空氣裏的煙塵看，都行。無論看的是那一樣，強亮的照度是緊要的。我們在現在看起來，要覺得奇怪，這樣顯然的解釋怎樣會經了五十年之久，還不會被科學界抓着。柏努利曾經說明過，假設氣體是由長作迅急運動的微粒所合成並不是荒謬的事情，而道爾頓和亞佛加德羅也開闢出一條途徑，使後來的人承認原子和分子存在的觀念乃是顛撲不破的事實。布朗運動實是現在分子動力論的主梁，並且是氣體和液體中分子運動最直接可見的證據。

倘使布朗運動的完整意義早經了解，分子動力論的發展許可以快的多，但是事實上並非如

此爲敘述的便利，我們在前一節裏，沒有依歷史的次第，就把布朗運動的解釋提前說明，此刻要重尋歷史的線索來作敘述。分子運動的觀念在那時已經在許多方面逐漸得着承認。這有一部份或者是由於熱的動力說同時在那裏發展。我們在前面一章裏已經說明，熱能和其他形式的能的關係，已由倫福德、焦耳、克勞休士以及其他的人堅決的樹立了。那嗎，天然的結論似乎就是說，氣體的熱能非他，即氣體分子實有的動能而已。採取這個看法還有更進一步的促動，是在柏努利以前的著作裏看得見的。焦耳之爲人所紀念，主要的原因是由於他樹立了熱功當量的原理，至於在分子動力論的發展上，並不常提到他。然而第二步的進步實是他所作成。他所取的觀點和柏努利以前所取的相同，就是認定氣體乃由長作迅急運動的分子所合成，而容盛氣體的器物圍壁所受的氣壓乃由於這些分子在圍壁上所施的碰撞，從這兩點出發，他就能用動力學的推理，算出分子的平均速度必須爲何，分子的碰撞機會發生觀察到的壓力。他求出來氣氣分子在大氣壓力和室內溫度的條件下，所有的平均速率之值略略超出每秒六千英尺——這和現在承認的值比起來，數量級是相同的——以創始的工作而有這樣的結果，其準確已足令人驚異了。我們要知道這是在一

八四八年的事呢。

約在十年之後，克勞休士也對於熱的理論感有深厚的興趣，因而把焦耳在分子動力論上的工作繼續作下去。他把焦耳的解說加以推廣，並且討論到一個例子，其中假設分子是有彈性的球體，此時彼此的移動，互相碰撞，並且和容器的圍壁碰撞。他依着這個假設來推導氣體定律，得着很大的成功，這些定律本有實驗的根據，並且曾由柏努利取相類的假設推導出來過。分子動力論如何會引到這些定律，並不難看出。倘使氣體壓力是分子碰撞的結果，則撞在某面上的分子愈多時，在該面上量得的壓力即愈大。這是與波義耳定律相合的，因為假如體積減小，密度就增加，而每一秒鐘內就有更多的分子撞在圍壁上作壓力測定的那一部份，以致氣壓增加。當然分子也互相撞擊，就和牠們撞容器一樣，而當容器容積減小，牠們擁擠起來，互相撞擊就更加頻數。而且，既然溫度是氣體熱能的量度，倘使熱能根本就是分子的動能，則溫度愈高，分子行動的速率就愈大。此已增的速率又轉而增加分子在壁上撞擊的力，而壓力就更大，這是與給呂薩克的定律相合的。克勞休士又把其他觀察到與氣體擴散有關的事實加以解釋，也有成功，但我們不爲此逗留了。

緊接着克勞休士這部工作之後幾年內，馬克思威耳 (Maxwell) 把他卓絕的天才施展到這個問題上。在後一章裏講到光的電磁說那一部份，我們還要遇着他。在這裏我們祇說他注意到分子動力論，並且察見此論有些錯誤，需要改正。舉一個例來說，克勞休士認為一切的分子都有同一的速度，他名之為平均速度。其實這就不能如此，馬克思威耳纔出來作適當的改正。

假設我們想要察出我們能把一塊石頭擲出多遠。我們擲了一次，結果並不滿足。我們從同一的地點，依同一的方向，並且留心用恰與第一次所用相同的勁，又擲第二次。這一次並不及以前那麼遠。我們又擲，而石頭竟出去到從來沒有的那麼遠。我們說這不行，石頭出去的距離這樣的次數不同，我們如何能知道我們能把石頭擲多遠呢？發起火來，我們擲了再擲，擲個不停，過了若干次之後，方始看出有一個平均的距離，在這個距離石頭落下的次數最多。有幾次我們擲得比這遠，有幾次沒有這樣遠。有一兩次我們擲得遠得多，有一兩次石頭落下的距離比平均短了好些。於是乎我們說我們尋到了一個範圍；我們知道平均起來我們能把這塊石頭擲得多麼遠。說不定到了這個階段，我們便丟下這個工作，回家去午飯了。但是倘使我們的興趣够高，將這塊石頭擲了很多很多

的次數，我們就會發現有甚麼機會恰恰把石頭擲到平均的距離，當然，每次擲石所用的勁都要相同。倘使我們還要好奇，作更進一步的探討，我們就應爽然自失的覺察到，數學家已經在幾率論裏，把這問題通通解了出來。我們把石頭擲了成千成萬的次數，實在是白費氣力，因為我們祇消擲九次或十次，求出平的擲程，然後應用幾率論來求，在一定的次數裏，有甚麼機會恰恰擲到這個距離，並且和這平均距離比較的偏差數是甚麼。

馬克思威耳把幾率論應用到分子動力論上。他覺得說到氣體分子的平均速度，已經够正當了，但是他還要探求，倘使用一種更正當的假設，說分子的速度是照着幾率論的程式分佈於平均速度的左右，再來推出氣體定律，則這些定律會受什麼影響。他推算出所謂馬克思威耳的速度分佈，可以應用到氣體分子以及其他的問題，很顯著的是電燈或真空管內熱燈絲所發的電子的速度分佈。他的速度分佈定律，以分子及電子而論，都已由實驗證實了。

馬克思威耳又把分子動力論依着旁的途徑推廣，並且作有關於氣體粘滯性的預測。在這問題上，他引進了分子間的排斥力的觀念，後來又和波爾茲曼 (Boltzmann) 建立了能的平均分配

定律。這條定律宣示我們說：與每一度所謂自由度（實言之，即一物體或質點的許多可能運動方式之一）相結合的有一定量的動能，而此動能祇與溫度有關。倘使有許多許多的質點，像在氣體裏那麼多，其自由度的總數，或者說運動方式的總數也是一樣，等於每一質點的自由度數乘質點的總數；動能的總量也比例的加大，而氣體的熱能隨之有相當的增加。能量與氣體分子的種類無干，祇是依自由度數和溫度的高低而定。

直到這裏，我們是在討論理想氣體。理想氣體的分子不佔空間，又不能互相施力。誠然，馬克思威耳研究過分子間一種的力。他的理想氣體分子是具有完全彈性的小球體，並且能互相彈碰而不失去絲毫的能量。這些理想物體唯一的毛病在根據牠們作出來理論，遠不到對於實驗室中所用實在的氣體的行為作準確說明的目的。於是凡得瓦爾（Van Der Waals）在一八七三年促成一次大進步，他把分子的大小以及分子間互施的引力都包括在理論之中。分子有了限定的大小，每一分子所得支配的空間即為之減少，而有了分子間互施的力，氣體壓力亦有變更。他得着一個方程式，把實在氣體的行為，說明得最近真相，比起理想氣體說來，與實驗所得的事實相符得多。

他的方程式叫作實在氣體的狀態方程式，而含有波義耳定律和給呂薩克定律的幾條舊方程式，就合而為理想氣體的狀態方程式。所謂氣體的「狀態」即其溫度、壓力等等的狀況，而狀態方程式就是表示這些量的關係的。

布朗運動久虛的解釋是由藍姆賽 (Ramsay) 在一八七九年方始推究出來。他將布朗所察見的微粒運動詳加思考，就像那位湖濱閒眺的先生對於浮在湖面的那塊麪包所作的思考，他所達到的結論，前面已經提過，就是人眼看得見的微粒所作的運動乃由於液體或氣體分子對這些微粒加以撞擊之故。後來還有許多人攻治這個問題，其中以愛因斯坦 (Einstein) 所創的理論最為滿意。

分子動力論的造就，這樣看來，可算完全的成功。後來還有更多的憑證加強人們對牠的信仰。凡特荷甫 (Van t'Hoff) 在一八八七年，從他在所謂滲透壓力的研究上，說明氣體分子的理論怎樣能够直接應用到液體中的分子上去，並且證明溶解在水裏的物質的分子，當溶液的濃度很低的時候，其行為和氣體中分子的行為相仿。再後一點，白蘭 (Perin) 在本世紀之初做了一些實

驗，研究懸蕩在液體裏的微粒的行爲，他竟舉出強有力的實驗證據來證明分子動力論之正確。他把微粒在液體裏分佈的情形加以研究。這個情形和地球上的大氣層相仿。倘使沒有分子的運動，空氣受了重力向下的拉引，就會通通集在地球面上。把萬有引力的定律和分子動力論聯合起來，就能計算出兩種作用怎樣會互相抵消。白蘭所採的方法是用顯微鏡去量微粒在液體中的分佈，比起攀登高山去作大氣層的實驗來，要便當得多，要易於控制得多。在此地我們祇消說他的結果是與分子動力論完全相合的。

在結束本章之前，對於由分子動力論發展出來的統計力學及其與熱力學第二定律的關係，我們不能不略略提到。要討論這宗關係，最好是舉例來講。第二定律告訴我們說，在大洋中的鹽總是平均分佈的。無論最初鹽是怎樣到大洋裏來的，現在已經達到，或者不久就會達到一種平衡的狀態，在這宗狀態之中，鹽是平均分佈的。然而就統計力學來說，要依着分子動力論的提示，去分別研考鹽的每個分子的運動，而求出鹽之將爲某某事實竟有怎樣的機會。譬如說，讓鹽在洋裏，不加以絲毫的干擾，我們就能算得出有怎樣的機會，鹽有時會通通集在一點，聚成一個整堆。第二定律

說這是絕不能發生的事情。統計力學說，這樣的事能夠發生，但不能時常發生。倘使我們把大洋的水時時分析，譬如說，每秒鐘分析一次，也許在許多億萬世紀之中有那麼一次，會遇着大洋裏的鹽通通推在一處，而洋竟成了淡水洋。用同樣的方法，我們也能求得出一副紙牌要抄和若干次方纔會恢復原來的順序，這是熱力學第二定律所絕對不許的事。

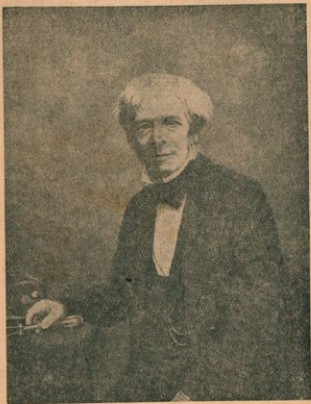
第六章 法拉第邁克爾

心理學家往往表示一種意見，說平常的人利用他自己潛在的智能祇是小小的一部份。有人就要問，倘使一個人使用他的才能至乎其極，其結果又將何如。其實用不着在這一點上白費揣測。法拉第的一生就是這個問題的答案。他的生活是很有條理的生活，其中有信仰，有對自然的愛慕，有美感，有真樂的哲理，各爲他生活的一部。在這樣的環境裏，他顯出在智識上絕頂異常的活力；他耗盡心血，到了晚年，記憶力大衰，竟到了一個地步，方纔告了結束的實驗，他一會兒又去勤勤懇懇的做。他給了我們一宗使人發憤的榜樣，指示我們，一個人的一生，倘使有什麼樣的願力，就能有何等樣的成就。當我們舉行法拉第電磁感應大發現的百年紀念慶賀會，作科學史的回顧，真恨不得多有幾個和他相類的人物。

關於法拉第的一生和他的工作，有好些人寫成了不少的卷帙。這些書都注重在他的工作怎

樣引起了許多貢獻，增進現代的文明生活。電動機、發電機、變壓器，以及這些機器無窮的用途，推本溯源，都推得到他的實驗室裏去。但是這些並非我們崇敬他僅有的理由。即使他沒有這些發現，旁的人總會尋究得出的；也許是一個人，也許是許多人，無論怎樣，事實總會大白的。這並非信口說說而已，實際上祇要提到法拉第關於電磁感應的發現，我們就要說起美國的亨利約瑟夫 (Joseph Henry) 曾獨立的作有相似的發現，有的發現還在法拉第的發現之前，不過法拉第把他的結果宣布出來，是在亨利之前，所以應把這些發現歸功於法氏。我們所深以為幸的，法拉第這樣的人的盛名並非僅僅乎繫於發現先後的小問題上。我們對他的欣慕敬愛，乃由於他為人慈藹，心思敏銳，確是一位聰慧絕倫的實驗家，思路宏闊，不沾沾於小節而忘卻大處，他所擬的理論總要無限的小心在意從他的實驗裏去體驗，又隨時奉着自然本為簡單一致的信條作為圭臬。

要想能够了解這位大科學家的成就，我們得設身處地想像我們是在他剛出現之前的那個科學世界裏。那時靜電學剛剛發軔，然而對於電究竟是什麼一問題，並沒有確定的觀念。格理克 (Von Guericke) 造了一部靜電機，是利用手在硫磺球上的摩擦來發電，和泰爾斯使琥珀帶電



法拉第邁克爾 (1791-1867)

的情形相仿；格雷 (Gray) 又發見這樣產生的電可以從一處傳到另一處。既有了帶電體，進而研究幾個帶電體的互相吸引，因而看出有兩種電，於是武斷的取名爲「陽電」和「陰電」。這時已經知道兩個帶電體會互相排斥或互相吸引，看牠們所帶的電是同種或異種而定。靜電感應的事實一經知道，就引起究竟有兩種「電流體」或祇有一種的討論。所謂單流體說，就是說，一個物體有了這種流體，就顯着帶某種記號的電，而缺少這種流體時，就顯着帶反號的電。靜電感應的許多事實對於人是很有教益的，所以在下面我們要插入一段簡略的敘述來說明緊要的實驗。

設想有一個金屬圓球，裝在一根玻璃座上，所以用玻璃的原故，是要使圓球帶電時，電荷留在球上不去。我們要使圓球帶電，可以摩擦牠，或者更好的方法是用絨布或貓皮摩擦蠟做的棒，或者玻璃做的，或者其他相類之物所做的棒，然後再將棒與圓球接觸。再設想另有一金屬體，也裝在玻璃座上；爲便利起見，這個金屬體不要圓球形，而要像雞蛋形，長軸的方向是水平的。倘使我們把蛋形導體和帶電的圓球相接觸，原來的電荷就會分佈在兩個導體上。但是倘使不這樣辦，讓我們把兩個導體搬得很相近，但不要太近到其間會發生火花的程度，蛋形導體的一端朝着圓球。這樣，倘使

圓球上的電荷是陽電，就會吸引陰電，推斥陽電，那蛋形球體，本來沒有電荷，離圓球近的一端就有陰電荷，離圓球遠的一端就有陽電荷。倘使再把圓球搬開，蛋形體上的兩種電就會重行聯合起來，不顯電荷。然而倘使在搬開圓球之前，我們拿一個裝有玻璃柄的小金屬球，使牠與蛋形體帶陰電的一端接觸，拾取一些陰電，然後再把大圓球搬開，蛋形體就會顯陽電，其業已失去的陰電荷恰會中和這過剩的陽電荷。再換一種辦法，倘使我們把圓球如前安置好了，就把蛋形體用金屬線與地相連，球上的陽電就會從地上吸引陰電，於是先將連地的金屬線撤去，再把圓球搬開，蛋形體上就顯有陰電。根據這些事實，就發生前面所提起的「單流體說」和「雙流體說」。我們可以看出兩說中的任一說都能解釋觀察到的事實。我們現代的觀點，認為電子在導體裏游行，而陽電是和金屬的原子有很密切的結合，和這原子在一起靜止不動，這個看法所根據的證據出現要晚得多。

靜磁吸引和靜電吸引的定律，由庫侖(Coulomb)用他的扭力天平量度出來，證明是平方反比律；後來凱文迪喜(Cavendish)用了改良的實驗方法，指明這個定律在靜電學上適用的準確度，比起庫侖在他的實驗裏所能達的準確度，要大出遠甚。還有，靜電理論的數學方面正在那裏發

展，而動電學的研究也在這時着手。

在一七九〇年，加爾伐尼（Galvani）正在從事於青蛙的剖解，他的剖解刀偶爾觸着一片和蛙體接觸的金屬，同時又觸着蛙腿，蛙腿的肌肉就因而抽縮。這個發現雖然是偶然的，但孕含的後果很多，竟開出一個新境界。由於在這個效應上的研究，就引起伏打（Volta）做成第一個電池；起初所取的形式是多層金屬板疊成的電堆，用兩種不同的金屬相間疊了起來，兩者之間用濕紙來隔開；後來就取液體電池的形式，用兩種不同的金屬浸在酸的溶液裏。用了這個電池，於是發現由牠發出的電流會把水分解為氫氣和氧氣，而且有的鹽也能同樣的分解開來。這些新效應很引起了一位科學家的深厚的興趣，其人便是青年時代的法拉第的科學師戴維。

直到這時，磁學的研究和電學的研究（包括靜電同動電）分別各有發展。當然可以設想已經有人感覺到，二者之間應當有密切的關係。磁和電的力都服從平方及比律，這個事實就許是引起這宗感覺的暗示。人們對於許多事物都可以加以揣測，都可以依着許多方法去作揣測，但是在物理學裏，這些揣測，倘使不經實驗的證實，無論如何不久就會陰消的。倘使有人創立一種假說，而

後來竟證實了，我們對於創作人自是欽佩他的遠大的眼光；倘使這個假說不為事實所徵實，我們往往就說他思路有誤。這個說法又引起另一問題，就是：「科學上的大發明有若干是由於實驗上偶然的際遇？」這個話往往無從作答。不過在這裏我們可以說，一個人預料到電和磁之間有一種關係，就會被尊為先知，然而倘使他預料磁和萬有引力之間有類似的關係，這在我們所討論的時期中他儘管有同等的理由，我們就得說他的思路有誤。

不管怎樣，是有意也好，是無意也好，這時竟發現了電和磁之間的一種關係。在一八一九年，奧斯特（Oersted）注意到磁針會受電流的影響。他的實驗室棹子上有一個指南針，當電流從一個電池流過一根與針相近的金屬線時，指南針就起了偏轉。這個實驗實在是科學史上的大關節，從此就引到了許多成就的新境地。往往一經有了劃時代的發現，全部的科學界就爭先恐後的抓着牠，把原來的觀察加以覆驗，並且想法推廣其區域。而且往往的在全班的實驗家中總有一兩位傑出之人，嶄露頭角，高出儕輩。這一次這宗命世的光榮輪到法拉第來承受。

但是在專寫法拉第之前，還要把安培（Ampere）的工作敘述一番。磁力是與載流金屬線相

聯屬已經有奧斯特證明了。在一八二〇年，安培又獲由實驗證明，這宗由電流生出的磁力能够影響到另一載有電流的金屬線。非但在載流金屬線和磁針之間實在有一機械力，就在兩根載流金屬線之間也同樣的有一機械力。與他同時的人就起而駁難他，大意說兩金屬線間的力不過是由於線中電荷的互相吸引或推斥，已經有了著名的靜電吸引和推斥的定律為依據，用不着另創新說。安培就指出兩根載着同向電流的平行金屬線事實上互相吸引，然而有同號電荷的兩根線卻應互相推斥，他們的駁難反被他駁倒了。一個磁體所受鄰近載流金屬線發生的力，有一定的方向，安培把磁體本身磁力的方向，電流的方向和二者之間的機械力的方向，加以研究，找出相互的關係，造出一條定則來，這條安培定則在現代的課本上總是講到的。他對於這些新效應，既從數學方面推究，又從實驗方面考證，定出一條定律，這條定律，再有了法拉第的許多發現，後來不久就成了馬克思威爾的偉大理論的基礎。安培想像一個磁體本身就是許多的微小磁粒所合成，而所顯的作用乃這些磁粒各別作用的結果；還有一點是他同事中有許多人以為然的，就是他假設各個磁粒都是微小的連通了的電路。倘使把這個早期的觀念和近代的觀念作對照，確是很有趣味的。

事。一個近代的觀念就是電子是在原子裏週迴流轉，還有一個更晚近的觀念就是電子本身是在那裏旋轉，原子和電子二者所具的元始磁體的性質，都是旋轉電子所賦予的。安培的觀念在原則上和近代的觀念是一致的。安培的定律推測出在通路裏的電流所當生的磁效應的數量，並且說明一組永久磁體如何纔會發生相同的效應，這是電磁學上的重要規定。

法拉第邁克爾(Michael Faraday)是在一七九一年生於英格蘭。他一生的故事時常都有記述。我們祇消重述幾點。迫於家境，他須自食其力，不得不放棄大學教育的權利，起初受傭為差喚的僮子，後來在一家釘書鋪裏做學徒。在這書鋪裏，有些書經過他的手，他因而對於科學發生興趣，最後竟得着機會，去聽皇家學院的戴維赫姆弗雷爵士所作的一套講演，戴維是那時科學界的領袖人物之一，化學是他的本門。在講熱學理論的那一章裏，我們提到過戴維的名字，他又是礦工所用的安全燈的發明人。法拉第這孩子大受戴維講演的感動，這些講演展開了一片簇新的境界在他眼前。他靜氣寧神的聽講，小心在意的寫筆記，更抽出閒空，很勤苦的把筆記稿編輯起來。他把編定了的筆記送給戴維，以表他的誠懇，並且請求收用他，無論什麼樣的事都行，祇要是與科學有關

的事，因為科學實在使他心醉。他這樣的虔誠，戴維也不能不為之感動。幾個月之後，法拉第便進了皇家學院做實驗室的助理。這是在一八一三年，法拉第纔二十二歲呢。就在這年，他又隨着戴維到歐洲去旅行，當他的助理和書記。在這一趟旅行中，他們到過各國的大實驗室去考察，接觸了許多當時科學界的領袖。以好學的青年如法拉第，這趟旅行所給的機會自必有極大的影響。以他對於實驗和在實驗技術上的興趣，當然不會輕易放過這樣給他可以學到許多事物的機會，這些事物都是在他自己後來的工作可以作用的，他之所以成為有大技巧的實驗手術名家，種因就在這趟旅行。

我們不能把這一章作為法拉第的行傳。我們祇好略略敘一敘他的事蹟，而注重到他在科學上的貢獻和關係，便滿意了。他從歐遊回國之後，就奮力工作，推進得很快，而他受同輩的欽敬也隨着繼長增高，在一八二三年便被選為皇家學會的會員。第二年便見他被派為皇家學院的講師，再第二年便被任為學院實驗室的主任。在我們結束這簡短的事略以前，還得提到一點，就是他爲了要留下精力來做他所願做的純粹科學上的工作，祇得拋棄講演的職務，並且謝絕商業上和工業

上的研究，儘管這兩項研究的酬金很豐厚，他也明知道在純粹科學上的工作，除了得着完成優美工作的安慰，更透澈的認識科學的神秘，和證實他所抱自然具有一致性的信仰，除了這幾點而外，不會再給他任何報酬。倘使他能預先見到他的工作在科學本身上所引起的一切成就，他自己都會愕然驚詫起來，還一點不用說起現代電工業在純粹經濟方面的重要性，以及現代的電工業在本世紀的文明上佔有若何重要的地位，而究其大要，無一不是從法拉第的工作蛻化而來。當他的家屬悄然退出，讓他獨自在花園裏極目眺賞落日的殘暉，默默的沉思他所不會宣之於口，筆之於書的念頭，他究竟可曾涉想到竟會有這樣的將來呢？

到了這時，法拉第年方四十，正在精力瀟灑，才華鼎盛的時期，人盡知名而他確惟恐邀譽，那時所有的科學上的資料都可供他使用，他懷着滿腹的經綸，祇想求出那些使他徬徨莫決的問題的答案，證實他一向所抱的信仰。他計劃已畢，便立即開始去做整部的實驗，這部實驗就是他所稱爲「電學上的實驗研究」。我們曾經說起他相信自然具有一致性和簡單性。我們對於自然的了解愈充分，則自然應當愈見簡單，其各部份應愈有關聯，而所遵循的定律條數應愈少，含義應愈基本。

就是今日的科學家也仍然在那裏尋求他們所覺得必然存在的一統原理；無論何時，我們碰上一條自然的原理或定律，祇要把以前認為分立的事實歸納到一個總項之下，我們便說是進了一步。在這條思想的大道上，法拉第覺得電和磁之間總有些潛在的關係。奧斯特和安培證明過磁是與電流電有關係，此時法拉第卻要想證明可以從二者中任一項得着另一項。他還抱有一種見解，我們直到這裏還不曾提起過，就是他認為當時通行的超距作用的觀念是錯誤的。他看見一塊鐵受了磁體的吸引，他絕不像與他同時的人，硬說鐵與磁體之間既沒有顯然的連繫，也許就毫無連繫，於是就認為如此，不再追問。他絕不能想像出一種過程，倘使甲乙兩處之間沒有什麼連繫，而甲處發生的事就能由這過程在乙處產生一種作用。這些逼攝的意念便是導引他的明燈。他如何的運用，我們在下面就會看見。

倘使我們相信他記錄簿中早期的記載就記有他在這方面所作的初步實驗，則他由磁生電的成功幾乎就在俄頃。在初期幾年裏，除了旁的工作，他偶然在這方面所作的工作究竟有多少，現在並不確知。第一個變壓器就是他所作，乃一個簡單的磁環，取一根金屬線，在鐵環的一段上繞上

幾轉，又另取一根金屬線，在對過的一段上也繞上幾轉。他把一個線圈接到一個電流計，另一線圈接到一組電池，他就察見有電池的電路剛一接通，電流計便起偏轉，由此可見有一電流流過與電流計相連的線圈。流過電流計的電流為時很暫，祇是正在接通電池電路那一忽兒纔有，幾乎立刻又歸消滅，而當電池電流在相連的線圈裏繞着鐵環的一段流得很穩定時，電流計所示的電流總是零。但是電池電路一斷，電流計又起偏轉，然而這次卻取相反的方向。

到了這裏，我們要暫時放下法拉第，轉到美國，說一說亨利約瑟夫在奧爾本尼 (Albany) 獨立的作有相似的實驗。在施透就 (Sturgeon) 在一八二五年造成第一部有實用的電磁鐵之後，亨利就從這條新路上做實驗，在一八二九年他竟能造成前所未有的強磁鐵。在一八三〇年他就觀察到電磁感應的效應，而法拉第是在一年以後纔察見，不過亨利以為撞見這個新境界的祇是他獨自一人，在未會多做幾個實驗之前，就宣布他的結果，他很覺躊躇。那知道法拉第後得的結果倒先宣布了，他纔趕着在一八三二年宣布他自己工作的結果。這樣他竟失卻首先作成電磁感應的實驗的地位，其實這些實驗的創始人也許還要算他呢。不久以後我們還要再說到亨利。

這宗發現就是法拉第的見解的明徵，但是還要更多的佐證。他意在求出這效應確切不移的是怎樣發生的。於是乎他第二步就用兩個線圈，都繞在一根條形鐵棒上（不用鐵環）所得的效應仍舊一樣。但是他還不滿意。他以為進到實驗裏的因子不會了解的太多。看見的效應可以由於兩個線圈互起的作用，而也可以是由於磁化鐵心對於電流計線圈所起的作用。很顯然的步驟就是把這兩樁效應分開，他所取的辦法是不用與電池相連的線圈，而用另一磁鐵，去使鐵心磁化。天然的從這再進一步，便發現了將磁鐵插進一圈金屬線會在線圈裏發生電流，祇要磁鐵相對線圈在作運動，便有電流，至於電流之取一向或反向，要看磁鐵是進入線圈或離開線圈。

這樣便發現了發電機的主要原理，發電機的作用就是在使得導體在磁場裏運動，因而把機械能變為電能。但是到了這一步，所發生的仍祇是間歇的電流。倘若能使導體繼續不停的在磁場裏運動，就會產生繼續不斷的電流。於是乎法拉第又安排了一個圓銅盤，盤上裝有搖柄，能够使盤旋轉，而旋轉的時候，銅盤總有一部份常在磁場裏。然後在盤的中心和在磁場裏（即在磁鐵兩極之間）的那部份外沿，接出線來連到電流計上。圓盤一轉動起來，便有電流流入電流計中，而且不

停的流，其數值依圓盤旋轉的快慢和磁鐵的強弱而定。還有一點，就是電流方向是依着圓盤轉動的方向而變。現代的發電機之不同於這初期的發電機，祇是在機械的細節而已。

奧斯特同安培，我們已經寫過，證明了在一根載有電流的金屬線的周圍，有一磁力場，而且證明在磁場裏的電流受有機械力。法拉第又繼續做這方面的工作，應用磁場裏金屬線上通過的電流來發生繼續不停的機械運動無疑的要算法拉第為第一人。這是在一八二一年。他的機器並非可與今日的電動機恰相比擬。兩年之後，巴洛 (Barlow) 用了法拉第的思想和結果，造成了現在所稱的巴洛輪，其構造和法拉第的圓盤發電機相似，不過在巴洛輪裏，電流是從盤心流到在磁場裏的盤沿，因而發生圓盤的轉動，而法拉第的圓盤電動機是用圓盤的機械運動來發電。如此說來，兩機的構造相似而功用相反。然而探本究源，兩樣都是法拉第工作的結果。

法拉第既在線圈所載的電流上做過工作，亨利亦復做過，他們兩人自不免要遇着自感應的現象。關於這一點，在以後討論力線的時候，還要解說得更詳盡一點。他們觀察到的事實不過是當流過鐵心線圈的電流忽然被斷時，在那斷觸的一刹那，有一電花發出。發出的電花比電池組單獨

所能產生的強烈得多。因為亨利較有意於電磁鐵的製造，也許他所造的電磁鐵要大些，繞在鐵心上的金屬線匝數要多些，所以有人猜想自感應的作用在亨利的實驗裏更要見得確定些，我們認為是合理的。這一次卻是亨利佔了先，在一八三二年就把他的結果發表了，而法拉第的發現是在一八三四年作成，一八三五年纔發表的。我們應當聲明他們兩位的發明都是獨立的工作，無所假借的。法拉第更把這個效應的含意面面俱到的考究出來，把力線的明確觀念傳之於世，這個觀念我們在後面就會看見，在物理學的發展上，有極大的用途。

法拉第之發現兩圈載流金屬線有相互作用（即互感應現象），不能說是偶然的事情。在前面我們已說過他做過實驗，用了兩個線圈，就能由磁生電，然而他對於這些實驗還是不滿意。我們還記得他原來的觀察是把兩個線圈繞在一個鐵心上，後來祇用一個線圈和一根磁鐵，也生出相同的效應。他知道電流的周圍佈有磁場，所以若祇用兩個線圈而不用任何鐵心，原來的觀察就應當重見。如此辦法，則第一個實驗用了兩個線圈是否和應流之發生有任何關係的問題，即一個線圈對於另一線圈有無直接影響的問題，就會有了解決。他於是乎把線圈都繞在木架上，將電池電

流通過一個線圈，而將電流計接到另一線圈。這個實驗起初毫無結果，在一個較小的天才，認為本來沒有什麼尋究得出的，也就肯死心了。然而法拉第卻不是孟然許可任何事的人，便試了又試，用了各式各樣的安排，換了各種長短的線去試。最後，他取了很長的線，密密的纏在木架上，便成功了。他一把電池電路接通，電流計便起偏轉；他一把電池電路拆斷，偏轉便反方向。從繼續的實驗，他知道了雖然這個效應能由無鐵心的線圈發生出來，但是用了鐵心，應流的強度，以及由應流所生的電流計偏轉，要大得多。

繼續的實驗下去，便明白了載流的線圈怎樣和磁體相像。倘使把一個磁體驟然插進一個接到電流計的線圈裏，電流計就有偏轉。同樣的，倘使把另一載有穩定電流的線圈驟然插進頭一個線圈裏，也得着偏轉，祇要兩個線圈在作相對的運動，總有偏轉。凡是把接電池的線圈在另一線圈裏插進退出，或者是讓電池線圈放在那線圈裏，而把電池電流時而接通，時而拆斷，都會有一應流通過電流計電路裏的線圈。要把這件故事澈首澈尾的貫串起來，他又確定出感應的電是和電池的電同類，也和靜電同類，他的方法是把各樣電流挨次通過藏有鐵針的線圈；每次鐵針都受了磁

化。後來他還做過相類的試驗，用各樣的電流來分解電解質，因而知道無論電流是如何發生的，結果總是一樣。

爲感應現象這段故事作一結束，我們須講到楞次 (Lenz) 定律，這是在一八三三年宣布的，是把能量不滅的原理應用到法拉第的實驗上。這條定律說，倘使由導體和磁場的相對運動而感生電流，這應流所生的磁場所取的方向就要阻止導體在原來磁場中的繼續運動。這條定律不過是說永久運動之不可能而已，因爲倘使應流所生磁場的方向要幫助導體的運動，則已增的運動就要更增應流的磁場，那嗎，我們的機器就會產出無窮的能量了。一部發電機，當其兩端加有捷路，就更難使之轉動，就是由於這個道理；一面取用電能，一面就須供給機械能來驅動發電機，這實在是合於能量不滅原理的一般說法。

法拉第這時又轉到一個新場面。戴維和別的人已經知道電流能把水和各樣的鹽分解爲所含的各元素，但是不會追究這件事。法拉第求知不已，認爲這些觀察到的事實還沒有解釋，便以提出解釋自任，他要提出的解釋照例是要實驗的，因爲這在他是比任何人的意見還要重視。法拉第

探求實驗的事實，多多益善，心專情急，甚於飢之求食，而無論何事，倘沒有實驗的事實作後盾，便不肯貿然置信，他這些長處，還沒有科學家趕得過他。他此時就轉而對於用電來分解物質，即他所名為電解的現象，作專精的研究。

法拉第的工作總具有一種特性，就是對於什麼是會得結果的實驗，他每有驚人的神感，而對於每一問題要從種種可能的實驗方式去考察，他又立有百折不回的志願。任何理論，一有試驗的可能，他絕不肯甘心聽其不經試驗。他在電解上的工作，首先是去考察這效應怎樣和所要分解的物質的情形有關係，不久就知道所要分解的物質應取液態，最好是水溶液。這就提醒了他，和這現象發生關係的是能夠游動的東西，因為由一處到另一處的運動在液體裏比在固體裏容易些。於是又引起一個問題，就是由分解所得的元素如何會從他開頭所用的化合物分解出來。換句話說，氫和氧怎樣會從水分出來，銅怎樣會從銅鹽溶液分出來？那時最高明的意見，把物質的分解歸之於加在浸入溶液裏的極板的電場直接所起的作用。要試驗這一點，法拉第對於電流和電極都作有量的測定。先讓一定的電量流過溶液，然後稱出澱積在一塊極板上的金屬的質量（譬如

說，銀的質量，爲了要改變所加電場的強度，兩塊極板相隔的距離，近的都試過，各種形狀的極板也用過。他竟求出濃積的銀的質量（即從溶液裏分解出來的銀量）與一向認爲分解原因的力量（即電場的強度）絕不相干，而祇與通過溶液的電量有關。照這樣看去，以分解爲由於電場的說法是不可能的；在加上電場之前，溶液裏必已有分解，電場之用祇是驅動銀質點移到極板上而已。這些游行的微小物體，他叫作「游子」，因爲牠們是在溶液裏游行。每一游子是認爲有

* 這名詞的英文是 *ion*，是從希臘文中意爲「我行」一動字的方事兩用式 *ion* 而出。*ion* 即是「行者」的意思。

一確定的電荷，一到了那承受濃積的極板上，便把電荷失去。這些實驗的結果便是法拉第兩條電解定律的成立。第一條說，把電通過溶液，從溶液裏濃積的物質的多寡祇和通過電量的多寡有關。第二條說，一定的電量從兩種溶液裏濃積出來兩種元素（假設爲銀和銅），其質量之比等於兩元素的化合當量之比，兩元素依這比例化合起來，便恰好各無餘賸；倘使這兩元素不起化學作用，這個比例，便是分別用這兩種元素，從一種化合物換去同量的氫素，所需的質量的比例。所謂游子就是帶電的原子或原子羣。游子的觀念，我們在後面要看見，後來還應用到電在氣體中的傳導現

象；無論是在電解裏或氣體傳導裏，游子的電荷總至少是與元電荷（即電子的電荷）相等，或爲其二倍，三倍等的整倍數。在電解裏，游子的電荷數目是由相涉的物質的化合性質所定，這宗性質就是我們所謂的化學價。

這些研究又引出兩樣結果。第一，自有了這些研究，我們纔得着量度電流強度的準確方法，祇要量出那電流在一定時間內所澱積的銀或其他物質的質量即得。第二，從這些研究，法拉第便得着了伏打電池的作用的解釋，他研究出伏打電池作用就是他的分解電池（即所謂電量計）的作用的反面。在伏打電池裏，驅使游子游行的就是化學能，游子行到極板，便把電荷卸給極板，這電荷即可供電流之發生，而在電量計裏，驅動游子通過溶液的乃是電能。

就是到了這時，法拉第的工作還是沒有完畢。他仍在那裏反覆思考他在感應上所作的實驗，一面覺得奇怪，所得的結果是怎樣發生的，一面還是想打破超距作用的觀念。在這時候他工作的結果就是力線的觀念，這一觀念也許他一直就藏之於心，非等到得着充分的實驗證據來證爲正確，不肯發表。他知道，倘使在甲處有一磁體，而在乙處量磁力，量得的磁力方向並不常是由甲到

乙那條直線的方向。這時他又求出電力也確有相同的情形，因為儘管在兩個帶電體之間，放一傳導的屏障（當然不得把任一帶電體完全包沒），兩體的吸引依然存在。這在他的心目中已經把超距作用排去了，因為絕不能擬設超距作用會得遵循曲線的。這樣看來，似乎我們要是擬設超距作用的話，我們就擬設無論什麼樣的作用，也是一樣，但是事實引得法拉第相信力線的實在，作成力場的就是力線。他甚至於想像實在有力線把磁體和被吸引的物體連接起來，這些力線有收縮的性質，因而把物體向着磁體拉。我們在前面所敘他在電磁感應上所作的實驗，愈使他加強對於力線的實在的信心；在這些實驗裏，他看出無論是金屬線在磁場裏行動，或是磁場行過金屬線，所生的電量與磁場強度無關，而祇依金屬線所交之力線實數而定。在自感應的現象裏，因斷路而起的額外電流，乃由於線圈中電流所生的磁場力線，當磁場消滅時，割切線圈的繞組，就感生出來。

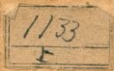
就是這樣的天才，已經有了這許多震古爍今的成就，人以為總要燈盡油乾，智衰才竭了；然而不然，事實上他又在那裏作光學上的實驗。他覺得依照自然的簡單性的需要，光和電磁不應當有主要的不同，他就開始去求出他所猜想的關係的證明。因為他缺少够精巧，够有能力的儀器，許多

實驗都失敗了。不過他確曾證明偏極的光線在很強的磁鐵兩極間的電介質裏經過，就受磁鐵的影響，光的偏極面就被旋轉。他在物理學這一部份所作的其他實驗，後來是由刻耳 (Ker) 完成的，刻耳讓偏極光線射過強電場中的物質，也得着類似的效應。後來柴曼 (Zeeman) 在磁對於光的影響上所得的發現，法拉第沒有能夠求出，因為必須的儀器還沒有做出。除了在光學上作實驗，他又證明不但是鐵，就是一切的物體都多少帶有磁性。取鐵一條，放在磁體兩極之間，鐵條就會旋轉到和力線平行的地位。法拉第卻又發見一切的物體，在相似情形之下，都要旋轉，不過有些物體轉到的地位，並非和磁場平行，而是和磁場垂直。這個效應自然是以鐵為最強；和鐵的行爲相似之物體，他叫作順磁的，其餘的叫作反磁的。

在下一章裏，我們要看見馬克思威爾在他的電學和磁學的數學理論裏，在他的光的電磁論裏，怎樣把法拉第的意思發揚光大，有彪炳古今的成就。科學界為對法拉第致其景仰之思，把電學裏兩個單位都用他的姓作名字，以作紀念。「法拉」是電容的單位，即一物體或容電器儲電的本領。「法拉第」是電解現象裏要遇着的單位。

這位偉人的成就，任何人最如意的夢想都及不到，最後迫於衰老，祇得休息。在一八六七年，拉第與世長辭，我們這個世界就失卻了科學家和哲學家中最偉大的人物，失卻了人類中最慈祥愷悌的君子。

14455



14

42-1
0987