

十八、十九世紀

力學與熱力學之發展

范崇湖

牛頓 (Newton) 之力學理論，奠定了近代自然科學的基礎。他一方面闡明了物質的運動與力的觀念，並且根據理論建設的實際需要，和當代大陸哲學家萊布尼茲 (Leibnitz) 共同創建了微積分學，而開拓了分析研究的新境界。他在科學世界裏造下的影響是空前的。本文中我們將介紹在他身後近兩百年間的歐洲科學界，如何在他的思想籠罩下宣揚他留下的寶貴遺產，並且發展出新的科學。

牛頓的忠實信徒：百科全書派與機械宇宙論

直到一七二七年他去世前，牛頓當了二十四年的英國皇家學會主席，此時歐洲學術研究的舞台也從意大利半島漸漸遷到了英吉利海峽的兩岸。在他逝世之後的英國正是浪漫文學的盛世，科學界後繼無人，遺下的力學著作倒受到法國科學院的一群學者無比的重視。一代文豪伏爾泰 (Voltaire 1694-1778) 對他更是推崇備至，以犀利生動的文筆，鼓吹知識的至高權威，建立起他的理性王國，向桎梏人類心靈的宗教迷信挑戰，並且更推廣到反對貴族政治，大大地影響到法國大革命前後的思想界。

圍繞在伏爾泰四週的是一群數理大師，包括達朗貝爾 (d'Alembert)、拉格蘭基 (Lagrange 1736-1813)、拉普拉斯 (Laplace 1749-1827) 等人。他們在狄德羅 (Diderot 1713-1784) 的苦心籌劃下，從一七五一年起花了三十多年的時間合力撰寫了一本百科全書，努力發揚他們基於牛頓力學而構建起的機械宇宙觀，強調理智是真與善的最後評判標準，大肆攻擊法國傳統的宗教思想，這一群著名學者在科學史上被合稱為百科全書派。

事實上牛頓本人是十分虔誠謙卑的教徒。他並沒有野心將他那描述客觀世界的力學法則應用到整個宇宙本體上，而侵奪了上帝的威權。但是他那群熱心的法國門徒數學家們，却把他創建的

微分方程學 (Differential Equations) 的研究，並由此發揮運用於力學的解釋上。在共同努力之下，導出了許多帶有哲學意味的力學方程式來。

根據牛頓理論，一個系統的運動狀態完全取決於它瞬時的位置與速度，只要這些一經確定，便可以由運動方程求出加速度，而接著導出下一瞬間的位置與速度。換言之，這是遵循著一個嚴密的因果關係的，我們只須把握這一瞬間，以後的一切就瞭若指掌了。另一方面，牛頓的萬有引力，剷除了天體的神秘，它指出掌握著天體運動的力量，與控制地球上物體運行的力並沒有什麼不同，而拉普拉斯更進一步地研究出來，行星在太陽系中的運動之所以能保持穩定，是用數學方程式來證實的。因此物理定律不僅可以解釋一系統之運動，更可以說明它的穩定性。根據這點，拉普拉斯曾聲言『只要知道了宇宙間各物質的質量與其速度，則可以預言出整個大自然的發展狀況』，這種將客觀世界的法則推展到整個宇宙，而視之為一個因果密切相貫的大機器的看法，在當時的法國是非常盛行的。

在同一段時期中，拉格蘭基推演到了位能與運動中能量不變的原理，更以變分學 (Calculus of Variation) 導出一項著名的最小作用量原理，即 (Principle of Least Action)。它說明當我們考慮一個物理系統的運動歷史時，可以從它的整個歷史過程來計算一個物理量，即位能與動能的差對時間的積分，而這積分的值在實際的歷史過程中必定要達到最小值。這種表示方法充滿了所謂目的論的語氣，它指明一系統的歷史並不是由瞬間的狀態決定的，而是由跨越整個歷史過程的一個積分量的最小原則決定的。事實上這種說法早在公元第一世紀前後亞歷山大利亞的希羅 (Hero of Alexandria) 便已經用在光線的傳播上，就是說光線前進一定是使其在兩定點之間所經的時間總和最小，而後來在十九世紀漢彌爾頓 (Hamilton) 又大大發揮於力學與光學上，赫爾模茨 (Helmholtz) 則用於電力學，最後二十世紀初蒲朗克 (Planck) 與希伯特 (Hilbert) 也先後將這原則應用於量子學與相對論上。

總之，在十八世紀前葉，法國的科學家們盡了他們最大的努力，建造起一個偉大的機械宇宙觀，而認為有關宇宙本體的主要問題都可在牛頓的力學結構裏得到解答。他們對數理法則的信心是固然令人興奮的，但是矯枉過正之極，却觸發了哲學界的反抗逆流。不久英倫三島上，便有伯克萊 (Berkeley) 與休姆 (Hume) 揭起了懷疑主義的大旗，對於科學界中主客分離及因果律兩條基本假設都發生動搖。從此科學界之間歧見一天一天加深，而開始分道揚鑣，各奔前程了。

牛頓的叛徒 湯瑪士·楊

牛頓力學帶來了新的科學觀念，粉碎了以往中古時期的神學教條，但是由於他貢獻之偉大精博，使得連拉格蘭基之類的大學問家却感數千百年間難得會有人能望其項背，因此我們不難想像

十八世紀末，英國的湯瑪士·楊（Thomas Young 1773-1829）胆敢冒大不韙地向牛頓的光顆粒說提出挑戰，曾遭受到多大的耻笑與反對。在牛頓的理論中，光線是一串不連續的微粒，從光源發射出來。光的反射，折射均在此學說內得到解釋，但是早在同一時代裏，赫更斯（Huygens 1629-1695）便提出了光的波動說，相同地可以圓滿說明各種現象，但並沒有受到應得的重視。一直到一七九九年前後，楊氏以光的雙縫干涉實驗，重新證實了光波動理論，而大大搖撼了牛頓顆粒說的威信。在這實驗中，光線通過兩道窄縫，進行路線一分爲二，當照射在窄縫後的幕上時，由於兩支線的路程長短不同，於是在相位上便有建設性或破壞性的干涉，而造成明暗交替的圖紋，這種現象是決非顆粒說所能解釋的。

楊氏生於牛頓死後大約半個世紀的英國，十四歲時便通曉拉丁、希臘、法、義大利、希伯來、阿拉伯及波斯七種外國語文。曾相繼在倫敦、愛丁堡及哥丁根學醫。一七九七年進入劍橋大學。兩年後便執業行醫。一八〇一年在皇家學院（Royal Institution）受聘爲物理教授。一八〇二年出任皇家學會（Royal Society）的對外秘書（Foreign Secretary），在不到兩年之間，他就光的雙縫干涉實驗結果，連續發表了九十一大演講，但是遭到許多無理的反對。譬如當時的愛丁堡評論（The Edinburgh Review）便曾出現如下的謾罵文章：

『……皇家學會是否應當願意爲了迎合皇家學院裏貴婦的心理，減低學會刊物的聲價，作爲新奇時髦理論的廣告牌。請「教授」儘管繼續在沒有惡意的小玩意上玩無窮的花樣，讓觀眾開心。但是奉科學之名，不准他進入保存牛頓、波義爾、加文迪許、侯克爾、馬斯開林名著的場所……』。一八〇三年他終於被迫辭去皇家學院的教職。

楊氏在科學界的貢獻是很值得我們作爲後輩的大大注意的。他除了在物理光學上有著扭轉乾坤的壯舉，爲後日之量子力學、X光繞射，全相術（Holography）作鋪路工作，他更糾正了以前力學中力與能量觀念混淆不清的錯誤。一七九三年他提出眼睛的散光理論，一八〇一年他指出眼睛有三種視覺感受子，分別對紅、綠和紫有敏銳反應。一八〇三年他發展出動脈血液流力學。同時彈性力學中的楊氏係數便是以他爲名的。

一直到一八一六年，楊氏才被邀出任中央註冊局，負責計算秒針鐘擺的標準長度。一八一八年又負責經緯之測量及國家曆法。湯瑪士·楊在公元一八二九年離開人間，他的遭遇是頗值得人們同情的。

代表十九世紀時代精神的熱力學

自從人類一開始與『火』結了緣後，『熱』的感覺及其本質性一直是令人困惑的問題。在牛頓、波義爾的時代，熱是被看作一種物質驅動性的振盪運動，但是對於熱與溫度兩個物理量並

沒有明晰的分劃。在十八世紀後半葉布雷克 (Black 1728-1799) 發現在物相變化時有潛熱 (latent heat) 的吸收與舒放，但溫度却並沒有變化，於是知道熱與溫度並不相同，他並且跟着帶來了比熱的觀念。但當代對熱最普遍的觀念乃是認為，熱是一種無色、無臭、無重量而自由來去物體間的流體。

到了十九世紀中葉 (一八四二年) 梅葉 (J.R. Mayer) 指出熱可與機械功相互交換。假設氣體受壓後，則功可以轉換成爲熱。一八四六年英國葛羅甫 (Sir Grove) 發表了一本名叫『各種物理力的相互關係』 (The Correlation of Physical Forces) 的書，次年，日耳曼科學家赫爾模茨 (Helmholtz) 也以『力的守恒原理』 (Über die Erhaltung der Kraft) 一文先後談及各種變換中能量守恒的原理。顯然地，一直到這時湯瑪士·楊慧眼別具對能與力的分劃仍然沒有被科學界領會到。焦耳 (Joule 1818-1889) 這時正以實驗測量出機械功與熱的轉換公式，它證實了一個孤立的物理系統的能量總和是不變的，功消逝後必較爲熱。而這條著名的能量守恒原理經過開爾文 (Lord Kelvin) 及赫爾模茨等人的潛心研究推廣終於成爲公認的熱力學第一定律。它可說是最具普遍性的物理法則，完全超越物理體系的特殊性質，其適用範圍甚而可以包括有生命、無生命的一切物質變換。它的基本性質可說是比牛頓的運動方程式有過之而無不及的。它說明能量本身不可以無中生有，人在所觀察到的現象中只能看到能量在機械、光、電、熱、聲、化學等不同的形態間轉換來，轉換去。

另一條著名的物理法則也正在此一時期醞釀成形，那便是熱力學的第二定律。它緊隨著第一定律，爲人們帶來一個對於能量轉換過程中所受嚴格限制的觀念。一八二四年，卡諾 (Carnot) 便提供了熱機 (Heat Engine) 工作的原理，他認為熱機的操作必須要經過一種循環的過程，使工作的物質能在循環中，週而復始地回到起初的物理狀態，否則這機器便消耗掉物質本身的內能以轉爲機械功，而流經熱機的熱反不能發揮功能。後來克勞塞斯 (Clausius) 與開爾文都在問題上的理論建設上有很大的貢獻。他們發現在熱機操作中，有一項無可避免的事實，即是只有一部分熱可以轉爲機械功，其餘的部分從溫度高度傳導至溫度低處而無法爲人所利用。克勞塞斯於是提出一個新物理量熱熵 (熵 Entropy) 的觀念，它的定義是其變化量等於某一過程中熱之變量除以該過程所處之溫度。他確切指出在一個封閉的物理系統中，熱熵不能減少，只有在可逆的卡諾循環過程 (Carnot Cycle) 中方能保持不變。根據這觀念，我們知道，在固定的兩個溫度之間操作的卡諾熱機，必定會有某一定量的熱無法化爲機械力。開爾文後來便以卡諾熱機的工作效率爲基準，設計出了一個絕對溫度的尺度，這項發展後來間接地激發了低溫以及氣體液化工業技術上的進步。

第一、第二條定律既然確立以後，熱力學漸漸脫穎而出，在當代的思想世界中扮演起重大的

角色。正如牛頓力學在百科全書派的渲染下，引起了一兩百年哲學界的騷動。這時的熱力學也似乎代表著時代的精神，經過類似的錯誤，這兩條基本物理法則也被扭曲放大地應用在整個宇宙人生的問題上。能量之守恒暗示著一股超越世界的力量充斥流動於宇宙間，多年來萊布尼茲的生命哲學不久後再度又在叔本華（Schopenhauer）、尼采（Nietzsche）和伯格森（Bergson）的身上重新出現。而第二定律熱商恒增的原則也被認為宇宙間可利用之熱能必隨溫度均勻化而減少，而終於會達死亡（Thermal Death）的最後階段。這正如美人遲暮，又如華格納歌劇『諸神之黃昏』中的悽愴景象。十七、十八世紀，力學之下的機械宇宙多少仍是樂觀的，人們仍相信有第一因之存在，但是十九世紀的熱力學却給了人們一片昏暗的未來。

這時候的哲學，早已與科學背道而馳，最後一位能欣賞科學的集大成哲學家康德（Kant）倒下後，他的不肖門徒紛紛走向玄學詭辯。面對這一股狂風逆潮而能挺立起來為實證科學仗義執言的是日耳曼的赫爾模茨，他曾說『我確認我們這時代，從物理科學上領取了許多教訓，如同，對於事實絕對而無條件的尊重，在收集事實時所具的忠實態度，在每一事件上求得因果關係的努力，和一種肯定因果關係之存在而使本世紀大大有別於他世紀的趨向，這一切都明顯地為我指出它所具的深遠影響』，他的這一番話若是和黑格爾（Hegel）無情抨擊牛頓等自然哲學家的言論相對照之後，便可以看出當時科學與玄學之鬥爭是如何的劇烈了。

十九世紀的科學偉人

若說赫爾模茨是十九世紀科學界具有代表性的偉人，他是當之無愧的。生於一八二一年，逝於一八九四年，他本是一位懸壺濟世的醫生，曾先後在日耳曼的康尼斯堡（Konigsberg）、波昂（Bonn）以及海德堡（Heidelberg）担任三十多年生理學的教授。一八七一年，普法戰爭，普魯士勝利，完成了日耳曼的統一，建都柏林，他在皇室的禮聘下，出任柏林大學最高物理教席。他一生不論在生理、物理、數學、哲學以及教育各方面的貢獻都是卓越驚人的。除了上面提及，他與莫逆之交開爾文一同在能量守恒原理上有著永恒的建樹，其他著名的成就尚有，耳與聽覺的研究、樂音分析、流體力學旋渦運動、氣象學，尤其是雲層、雷雨及冰河之生成等，他更曾先後量度過神經信息及光的傳播速度。赫氏可說真正體認到了物理方法之可貴而充分活用。在生理光學方面的研究，他發明了驗光儀（Ophthalmoscope），測量出眼球的光學常數以及晶體的曲率與遠近視的關係。他以力學推算眼球的運動，更證實了湯瑪士·楊的有關色光感覺的理論，並解釋色盲的基本原因。

在數學方面，繼李曼（Riemann）之後，赫氏對非歐幾何（Non-Euclidean Geometry）對哲學知識的影響詳加解釋，並對最小作用量原理的歷史意義亦有極深的刻劃批評。他了解

到將熱力學第二定律濫用於宇宙時所具的危險性而提出警惕。

他曾大力提拔一位學生——赫茨（Hertz）完成了著名的電磁波傳播實驗，為馬克斯威電磁學（Maxwellian Theory of Electromagnetism）提供了最有力的證據。

在科學思想上，他是不折不扣的實證主義者，一生不遺餘力地從事實驗，創造理論。他竭力反對當代盛行一時的生機論（Vitalism）與靈魂詭說（Spiritualism）。

到了十九世紀末葉，緊跟在赫爾模茨、開爾文之後，而能高瞻遠矚地將熱力學的研究引進新的境界的，當然要推馬克斯威（Maxwell）、波茨曼（Boltzmann）與吉普士（Gibbs 1839-1903）了。他們合力將牛頓的機械熱學，早期的氣體動力學（Kinetic Theory of Gases）和由拉普拉斯倡導的機率論綜合而建立起一個完整的統計力學結構。馬克斯威和波茨曼推出氣體分子最可能的速度分佈是依著高士（Gauss）的正常函數（Normal Distribution）的。而且分子的平均速度是與溫度及其自由度有直接的關聯。波茨曼更從氣體分子分佈函數（Molecular Distribution）的演化方程式演繹出著名的 H-定理（H-Theorem），在分子運動層面上解釋熱力學的第二定律，他指出，一系統的熱商是與其可能存在的狀態數目之對數成正比的（ $S = k \ln W$ ）。因此熱商之恒增事實上即意味著或然率漸趨最大值，亦即此系統最可能趨向的狀態。所以有關它的邏輯推論是或然的，而不是必然的。後人紀念他這一項永恆的貢獻，將這著名的公式刻在他的墓碑上。半個世紀之後，這條公式被宣農（Shannon）推展利用在消息理論（Information Theory），而在通訊研究上引起了很大的革命。

吉普士（Gibbs 1839-1903）可說是美國士生士長第一位插足國際學壇的著名科學家，他從另一角度出發研究統計力學。獨力創建了系集理論（Ensemble Theory），在這理論裏，他認為一個熱力系統，受到了少數巨觀熱力變數（Macroscopic Thermodynamic Variables）的限制，可以被看為是一個未被完全確切描述的微觀系統，於是我們可以利用一系列同類的代表系統取代之，容許他們以適當的機率分佈在某一範圍的確切狀態上而平等處理之。根據這方法求得到了各變數的系集平均值間的關係，就是求得了此系統的熱力性質了。他更延伸到物相平衡（Phase Equilibrium）的研究而導出著名的物相公式（Phase Rule），這公式後來被荷蘭的盧斯布（Kocceboom）應用在鋼鐵的合金問題上而引發了冶金工業上的鉅大進步。而且也間接影響到德國的哈伯（Fritz Haber）促成了人造尿素與石油的合成，這些實用技術上深處的貢獻是遠非終生埋首於耶魯大學的長春藤蔭裏的吉普士所可能想像得及的。

波茨曼與吉普士相繼在一九〇一年及一九〇三年去世，但他們無疑地已經替十九世紀的熱力學尋得一個充滿希望與意義的出路，而為下一世紀更上一層樓的統計物理揭開了新的序幕。

（本文為科技發展史第三次座談會記錄之一部分）