

## 科學巨匠亥姆霍茲

陳關榮

(香港城市大學, 2020. 7. 23)

德國物理學家赫爾曼·馮·亥姆霍茲 (Hermann von Helmholtz, 1821.8.31–1894.9.8) 是十九世紀科學界燦爛群星中特別光彩奪目的一顆。

亥姆霍茲知識淵博，一生中涉獵過許多不同領域並作出了重要貢獻，其中包括醫學、生理學、化學、數學、哲學，特別是物理學。事實上，他還被譽為是「最後一位博學家」(The last polymath, *Nature*, 13 Sept., 2018)。

在物理學領域裡，大家耳熟能詳的有亥姆霍茲電磁場定理、亥姆霍茲波動方程、亥姆霍茲渦量方程、吉布斯-亥姆霍茲方程、亥姆霍茲-克希霍夫方程、亥姆霍茲函數、亥姆霍茲自由能、亥姆霍茲線圈、亥姆霍茲共鳴器、亥姆霍茲雙電層、楊-亥姆霍茲三色學說、亥姆霍茲-克特勒公式、亥姆霍茲分解。以亥姆霍茲為主要創始人和領導者的柏林熱物理學派對量子力學的誕生功不可沒。他自己無緣諾貝爾獎，但門下的學生卻出了好幾位得主，包括發明彩色照相術的李普曼 (Gabriel Lippmann)、以測量光速而著名的邁克爾遜 (Albert Michelson)、將電磁波帶給世界的赫茲 (Heinrich Hertz)、建立能量量子化理論的普朗克 (Max Planck) 以及發現熱輻射和位移定律的維恩 (Wilhelm Wien)。他在物理學界的知名學生還有羅蘭 (Henry Rowland)、哥德斯坦 (Eugen Goldstein)、凱澤爾 (Heinrich Kayser)。



Hermann von Helmholtz (1821.8.31–1894.9.8)

1821 年，亥姆霍茲出生於德國波茨坦(Potsdam)。他父親是中學教師，母親是軍人的女兒。在家裡亥姆霍茲是老大，另有兩個妹妹和一個弟弟。他從小體弱多病，因而常常被關在屋裡接受家庭教育。在小學和初中讀書時，亥姆霍茲的記憶力表現甚差，文史課程的內容聽後即忘，但是他對數學和物理特別是光學尤有興趣。他的智力是在中學後期才發展起來的。到 1838 年中學畢業時，他的各科成績都很優秀。

亥姆霍茲隨後進入 Friedrich-Wilhelms 醫學院學習。他得到了政府資助，條件是畢業後要為軍隊醫院服務八年。在醫學院專業學習之餘，他喜好音樂，常常參加演奏莫札特和貝多芬等人的名曲。他思考哲學，研究休謨、康得、歌德、拜倫等人的著作。他也愛好文學，閱讀了很多希臘文學作品。數學方面，他自學了歐拉(Euler)、伯努利(D. Bernoulli)、達蘭貝爾(d'Alembert)、拉格朗日(Lagrange)等名家的數學力學著作。

1842 年 11 月，亥姆霍茲以題為「無脊椎動物神經系統的結構」的論文獲得了博士學位。他論文中關於神經細胞的中樞特性的分析以及神經纖維發源於神經節細胞的發現，成為後來生理學、病理學和神經組織學的理论基礎，是對微觀解剖學的重要貢獻。讀書期間，導師繆勒(Johannes Müller)的科學哲學觀念對亥姆霍茲後來擺脫關於科學的形而上學觀點而注重於科學的經驗主義有很大的影響。

1843 年亥姆霍茲從醫學院畢業後，遵約在波茨坦部隊服役，擔任助理軍醫。同年，他發表了題為「論發酵和腐爛的本質」的論文，報告了他在繆勒實驗室取得的詳盡實驗結果，批判了時下流行的生物「活力」論，對發酵和腐爛給予了科學解釋。1845 年，他又發表論文用實驗結果駁斥了流行的「熱質」說。

亥姆霍茲在這幾年間做了非常重要的能量守恆理論研究工作，同時進行了大量科學實驗，證實了他的一些基本思想並通過公式化形成嚴謹的理論。能量守恆的第一篇科學論文是由馮·邁爾(Julius von Mayer)在 1842 年發表的，當時並沒有引起任何注意。次年，焦耳在一個學術會議上報告並展示了位能與熱能的轉換實驗，可惜也沒有聽到任何反響。1847 年 7 月 23 日，亥姆霍茲在柏林物理學會上作了題為「論力之守恆」的演講，對能量守恆定律的普適性做了第一次最充分明確的闡述。會議之後，亥姆霍茲把論文寄給了當時以流體動力學中的「馬格努斯效應」出名的實驗科學家馬格努斯(Heinrich Magnus)，希望能在德國頂刊《物理年鑒》上發表。但馬格努斯認為該論文過多地使用數學方法把理論與實驗物理結合起來，不算上乘之作。於是，作為編委他在寫給主編波根道夫(Johann Poggendorff)的介紹信上並沒有表示特別的推薦。波根道夫也認為，儘管論文結論看來重要，但實驗結果不夠充分，決定拒稿，建議作者可以考慮將論文以單行本印刷方式出版。年輕人亥姆霍茲當時很洩氣。後來，在他的師兄、生理學家杜布瓦-雷蒙(Emil du Bois-Reymond)的支持和鼓勵下，亥姆霍茲的第一本小冊子《論力之守恆》在當年正式出版。他的理論在科學界引起了迴響，讓能量守恆原理得到了公認。今天，該書已經成為經典，其中文譯本名為《能之不滅》，由商務(萬有文庫本)印刷，書後還附有作者 1881 年寫的補遺。

他在論文和著作中解釋了當年大家熱衷的「永動機」並不可能實現。他寫道：「鑒於前人所有試驗的失敗，人們不會再詢問『我如何能夠利用各種自然力之間已知和未知的關係來創造一種永恆的運動』，而將會試問『既然永恆的運動是不可能的，在各種自然力之間應該存在著什麼樣的聯繫？』」

那次成功的演講和書的正式出版讓 26 歲的亥姆霍茲聲名鵲起。他也因此得以提前退役，於 1849 年初到了哥尼斯堡 (Königsberg) 大學任職生理學副教授。同年 8 月，他與一位物理學家的女兒奧爾加 (Olga von Velten) 結了婚。

在柯尼斯堡大學任教期間，亥姆霍茲測量了神經刺激的傳播速度，成為第一位把物理方法運用到神經傳導速度測量的人。1851 年，他發明了今天還在使用的眼底鏡，並解釋了其中的光學和數學原理。其間，他還發表了生理力學和生理光學方面的重要研究成果。

1855 年，他轉到波恩 (Bonn) 大學任解剖學和生理學教授。在那裡，他出版了《生理學手冊》第一卷，並開始了流體力學中渦流的研究。

1857 年，他又轉到了海德堡 (Heidelberg) 大學，任生理學教授。他利用後來稱為亥姆霍茲共鳴器的儀器分離並加強聲音的諧波。1863 年，他出版了影響深遠的巨著《音調的生理基礎》。

1871 年，他到了柏林大學任職物理學教授。從此，他的研究方向完全轉向了物理學。



亥姆霍茲在物理學的多個方面成果累累。

在電磁學研究方面，亥姆霍茲用實驗測量出電磁感應的傳播速度為  $314000\text{km/s}$ 。他由法拉第電解定律推導出電是粒子的結論。1847 年，他發現了萊頓瓶的放電特性，並指出楞次定律是電磁現象符合能量守恆與轉換定律的極好例子。1849 年 3 月，他在柏林物理學會上作了「正切電流計構造原理」的報告。之後，他在神經脈衝傳速實驗中研究了感生電流的本質及其持續時間。1853 年，他在「論電流在物質導體中的分佈定律及其在生物電實驗中的應用」一文中綜述了自己在數學物理和心理學交叉領域的研究成果。他的師兄杜布瓦-雷蒙認為這篇論文科學思想之豐富前所未見。1870 年，他又發表了題為「電動力學理論」的論文，開始了電動力學的研究。當年創建電磁理論的主要競爭者是韋伯 (Wilhelm Weber)、馮·諾伊曼 (John von Neumann) 和麥克斯韋 (James Clerk Maxwell)。亥姆霍茲通過實驗檢驗了這些電磁理論，結論傾向於麥克斯韋。他也得出了自己的一個基本波動方程，即亥姆霍茲方程。1870 年，在馮·諾伊曼理論的基礎上，亥姆霍茲得到了兩個電流元相互作用勢的一般表達式。在不同情況下，這個勢分別與韋伯理論、亥姆霍茲-諾伊曼理論和麥克斯韋理論相符合。電磁波的存在最終由赫茲通過實驗得到了證實。這一切為麥克斯韋的電磁理論

在歐洲以至世界的傳播鋪築了平坦的道路。1893年，亥姆霍茲在芝加哥召開的第四屆國際電氣工程師大會上主持制定了歐姆、安培和伏特這三個基本電磁學單位。

在熱力學和流體動力學研究方面，亥姆霍茲在1857年發表了論文「論描述渦旋運動的流體動力學方程之積分」，為後來研究流體無旋運動和有旋運動而建立的亥姆霍茲第一、第二和第三定理奠定了理論基礎。1858年，他從理論上研究了流體間斷面問題，討論了無重力影響下板縫噴射流的形狀。他隨後進行了一系列關於流體內摩擦的理論和實驗研究，得出的公式與電磁學中描述兩電流元相互作用的Biot-Savart定律完全一致。他在1882年發表的論文「化學過程的熱力學」中，把化學反應裡的束縛能和自由能區別開來，指出前者祇能轉化為熱，而後者卻可轉化為其他形式，從而有了亥姆霍茲自由能的概念。他從Clausius-Clapeyron方程出發，導出了後來著名的吉布斯-亥姆霍茲方程。他還研究過大海渦流和海浪形成的機理，也發表過冰物理和大氣物理方面的科學論文。

作為能量守恆與轉化定律的延伸，亥姆霍茲對力學中關於最小作用量原理的研究尤為深入。他在1886年發表了題為「論最小作用量原理的物理意義」的論文，1887年發表了「最小作用量原理發展史」的論文，1892年發表了「電動力學中的最小作用量原理」的論文，先後論證了韋伯、馮·諾伊曼、麥克斯韋等人提出的帶電體間的相互作用的假設在計算形式上都與最小作用量原理相對應。亥姆霍茲在餘生中為探尋以最小作用量作為統一原理的研究作了不懈的努力。雖然他的結局與愛因斯坦的統一場論別無二致，他們的思想都深刻地影響了現代物理學的發展。

在生理光學方面，感覺實驗心理學是亥姆霍茲作出了重大貢獻的一個領域。他的實驗結果表明：心理過程可以通過實驗來研究，作為心靈代表的神經系統可以成為實驗控制的對象。亥姆霍茲在1856-1866年編輯出版了《生理光學手冊》，把當時的物理學、生理學以及哲學的研究成果和一般原理彙集一體，加上自己的發現和闡釋，對視知覺作了系統的論述。該手冊至今仍是生理光學和心理生理學的重要參考書。在大量生理光學實驗的基礎上，亥姆霍茲進一步發展了湯姆斯·楊(Thomas Young)於1807年提出的色視覺見解，認為紅、綠、藍這三種基本色可以通過各種比例互相混合從而生成各種不同的色。這些研究成果後來成為著名的楊—亥姆霍茲三色理論。

在生理聲學方面，他在編寫《生理光學手冊》的同時，也開始了生理聲學的研究，其成果彙集於1863年出版的《聲學》一書中。該書至今仍是聽覺實驗心理學的經典。他還以實驗確定了人耳可以聽到的最高音和最低音以及介乎兩者之間的可辨音調級數。他最重要的實驗成果之一是關於構成音色的特殊差異因素的發現，即每種樂器發出的不僅是一定的基音，而且還有比基音頻率更高的泛音，基音與泛音之間的拍子及泛音與泛音之間的拍子都會影響混音的和諧程度。這一發現使他成為給出諧音以物理解釋的第一人。他還用後來以他命名的共鳴器證實，可以通過變換泛音強度的辦法人為地產生各種樂器的聲音。他還被認為是提琴聲學研究的創始人之一。他的《論音調的感覺》一書以及關於音調實驗的設備對後來貝爾(Alexander Bell)發明電話起過啟迪作用。

在數學方面，他研究了黎曼幾何、黎曼度量和數學物理中的退化波動方程等問題。他提出的有關黎曼度量的理論和偏微分方程在許多科學領域中都有重要的應用。1859年，亥姆霍茲在提交給德國最具權威的巴伐利亞(Bavaria)科學院的論文「空氣在開孔管中的運動理論」中，首次給出了波動方程(即亥姆霍茲方程)的一般解。此後，數學物理學家基爾霍夫

(Gustav Kirchhoff) 在亥姆霍茲解的基礎上，得出了波動方程初值問題的解，由此闡明了聲學的惠更斯(Christiaan Huygens)原理。這一研究和他關於流體的渦旋運動的研究代表了亥姆霍茲最出色的數學成就。他常常以自己能解決「這些令歐拉以來的大數學家們感到困惑的數學問題」而感到自豪。

亥姆霍茲關於幾何學的研究由生理光學中的空間直觀形式驅動，讓他對人們關於空間普通直覺的起源及原理進行了探討。他認為歐氏幾何的公理系統並不是先驗的，而是經驗的產物。1868年起，他先後發表了多篇論文，力證數學的經驗性。其論文「論幾何的一些事實基礎」最為著名，令當時的科學界和數學界歎為觀止。這篇論文和黎曼(Bernhard Riemann)1854年發表的論文「論作為幾何學基礎的假設」一起，被稱為19世紀下半葉數學哲學概念發展中的劃時代作品。特別是，亥姆霍茲在他這篇論文中引出了半個世紀之後由女數學家諾特(Emmy Noether)證明的一條著名定理，確立了物理守恆定律和動力學定律之間的對稱性，其結果對現代物理學有著極為重要的意義。他長期潛心數學研究，曾獨立地得到黎曼幾何學中的一些結論。數學家克羅內克(Leopold Kronecker)在給亥姆霍茲的一封信中寫道：「您合情合理的實際經驗以及對有趣問題所形成的結論將給予數學以新的方向和激勵。...而那些片面和自我的數學思維只會把人們引向荒蕪之地。」

亥姆霍茲非凡的科學才能和巨大的學術貢獻讓他矗立在近代科學家的殿堂里，熠熠生輝。



(亥姆霍茲塑像，柏林洪堡大學主樓前)

由於工作在醫學、生理學和物理學的交叉領域和深受導師繆勒的影響，特別是他對德國古典哲學的畢生關注，亥姆霍茲的哲學思想非常豐富。但這位哲人在生活裡，又是一個謙虛誠實、正直善良的凡人。他的學生普朗克說過：「我知道亥姆霍茲也是一個普通人。我敬佩他的為人並不亞於敬佩他是一位科學家。由於他具有誠實的信念和謙虛的人品，他成了科學高尚和正直的化身。他的這些品格深深地感動著我。每當我們談話時，他總是用平靜、銳利、打動人心和慈祥的目光看著我。我可以完全信賴他。事實告訴我，他是一位公正而

又寬容的裁判。他的一句稱許，更不用說是讚揚，都會使我象贏得了世界賽勝利那樣的快樂。」

亥姆霍茲以其傑出才能和高貴品格獲得學生、同事和朋友的愛戴，成為大眾的良師益友，也贏得政府的尊敬和重用。他在 1862 年被任命為海德堡大學副校長，1877 年被任命為柏林大學校長，1887 被任命為國家科學技術局主席，1888 年被委任為帝國物理技術研究所的第一任所長。榮譽方面，他在 1860 年被遴選為英國倫敦皇家學會院士，並榮獲該學會 1873 年度科普利 (Copley) 獎章。此外，他在 1870 年被選為普魯士科學學會會士。

說起來沒有一個人可以全無挫折地度過一生，亥姆霍茲也一樣。1859 年，38 歲的亥姆霍茲受到了雙重打擊：父親辭世，愛妻病亡。兩年後，他再婚作家安娜 (Anna von Mohl, 1834.9.19–1899.12.1)。1893 年 8 月，他主持了在芝加哥舉行的第四屆國際電氣工程師大會。在返回歐洲船上，他不小心從甲板上跌倒，頭部受了重傷。接下來他一直受著傷痛的折磨，到次年 9 月 8 日終因腦溢血在 Charlottenburg 逝世，享年 73 歲。

12 月 14 日，亥姆霍茲追悼大會在柏林隆重舉行。德意志國王與王后、亥姆霍茲家人及各界名人參加了葬禮。隨後，國王撥款一萬馬克並親自選定在柏林大學主樓前側建造了亥姆霍茲紀念館。1899 年 6 月 6 日紀念館揭幕那天，王后、王儲及王子，以及亥姆霍茲家人和柏林科學藝術界名流一起參加了揭幕儀式。

並非所有的名人都有逸事留給後人閒聊。如果說我還有關於亥姆霍茲後來的故事，那就是 2019 年 9 月 23-26 日我在德國柏林洪堡大學參加了第 16 屆國際複雜系統與網路學術會議 (International Workshop on Complex Systems and Networks)，會後和矗立在柏林大學主樓前的亥姆霍茲塑像拍了一幅合照，心滿意足地當了一回科學家追星族。



(柏林洪堡大學，2019 年 9 月 27 日)

## 附錄：《德國亥姆霍茲國家研究中心聯合會》簡介

德國亥姆霍茲國家研究中心聯合會 (Helmholtz Association of German Research Centers) 是德國乃至歐洲最大的科學研究機構, 有 19 個獨立的自然科學、工程學、生物學和醫學研究中心, 3 萬多雇員, 年度經費總額 34 億歐元。亥姆霍茲聯合會著眼於德國中長期科技發展目標, 集中在六個研究領域 (能源、地球與環境、生命科學、物質結構、航空航天和交通、關鍵技術), 依託重大基礎研究設施, 開展前瞻性的跨學科綜合研究, 旨在解決社會持續發展中的重大問題。

亥姆霍茲聯合會共建立有 100 多個非實體科學研究所, 其中包括來自德國的 60 多所大學的 300 多個合作單位, 每年資助近百個青年科學家小組和大批的博士學位研究項目 (達 4 千多項), 以及各種水平和層次的訪問科學家 (達 5 千多人次)。

亥姆霍茲聯合會正在建立全球最大的訊息技術安全研究中心「德國訊息技術安全、隱私及責任中心」 (Helmholtz Center for Information Security, 簡稱 CISPA)。按計劃, 到 2026 年該中心將有來自全球約八百名專家從事網絡安全研究工作, 屆時該中心每年的科研經費預算可達五千萬歐元。

德國亥姆霍茲聯合會——中國全國博士後管委會在 2018 簽署了「中德博士後交流項目」協定, 每年共同遴選和資助 50 名以內的中國優秀青年學者到亥姆霍茲聯合會屬下的研究中心從事為期兩年的博士後研究。對於入選的每位博士後, 全國博士後管委會提供 30 萬元人民幣的一次性資助, 同時亥姆霍茲聯合會提供每月 1500 歐元的免稅獎學金, 用來支付日常生活、健康保險及學術交流的費用。