

真空歷史介紹

早期的真空發展與應用—從亞里斯多德到藍米爾—

譯述自美國真空學會創立三十週年紀念論文

Theodore E. Madey, J. Vac. Sci. Technol. A2(2), 110(1984)

一、前言

古云："自然憎惡真空(nature abhors a vacuum)"。任何一位研究真空的科學家聽了這句話一定覺得好笑，然而它卻說明了古代人對於"真空"的概念是起源於亞里斯多德(Aristote)以及他的隨從們皆認為"真空"在邏輯上是不可能有的。亞里斯多德從"物體所佔據的範圍"來定義"空間(space)"，而"真空(vacuum)"意謂著"不含任何物體的空間"，因此從邏輯的觀點，既然"空間"必含有物，所以無所謂的"真空"。這個觀念持續了將近 1800 年之久，直到 16 世紀末才略有改觀。即使在 17 世紀，著名的法國哲學家笛卡爾(Descartes)仍強烈地否認 "真空"存在的可能性。對於以幫浦抽水只能達到某一高度極限以及越過某一高度以上的虹吸管即不發生作用等現象當時的解釋為由於幫浦作用不完全或者在虹吸管中有一股神祕未知的力所致；而空氣具有重量以及承受壓力的觀念也是後來逐漸地為人所理解與接受。自古以來，科學的觀念大多基於哲學家的沈思而很少是根據實驗證據的解釋，這種觀念歷經了多個世紀人們早已習以為常。但從第十七世紀開始，由於一些偉大科學實驗家的努力，才使得真空科學打破傳統邁出革命性的一大步。

本文將簡述自早期到二十世紀初之間有關真空科學與技術的歷史淵源，包括真空的形成及其在科學與工程上的應用等相關觀念之發

展、幫浦與真空計的歷史以及歷代以來對於真空度的需求、產生與特性之演變等內容。

二、第一個真空實驗——十七世紀

一般人都認為托里切利(Torricelli)首先發明氣壓計(barometer)，然而經過密得頓(Middleton)審慎地考察發現產生真空的第一個實驗應是在 1640 年由一位名叫伯提(Gasparo Berti)的年輕義大利人所做的。當時他基於虹吸管問題的動機而設計一個產生真空的實驗，實驗系統基本上是一個"水壓力計(Water barometer)"，如圖一所示，將一支長鉛管(AB)插入水中，並將下端浸在水中之活栓(R)關緊，然後經由鉛管上端之活栓(G)把水注滿整個鉛管系統內部，再關緊上方 G 處與 D 處之活栓。此時，將活栓 R 打開，系統內部的水位再降低至 L 處，則在水面上方的空間即為真空狀態。很不幸!在上端球形容器中 M 處掛著一只小鈴噐的聲音卻仍讓四週半信半疑的人們清楚地聽見(基本上，假設聲音是要靠介質傳遞的。)，以致舉世首削的這個真空實驗未被採信。

托里切利由於伯提實驗的影響，使他對空氣壓力的觀念更明朗，因而在 1644 年設計了另一個實驗不但能產生真空，並且研製了一套可以顯示氣壓變化的儀器(實際的實驗可能由托里切利描述其構想，而由另一位維偉安尼(Vivian)來進行)。托里切利使用充滿汞的玻璃管即第一個汞壓力計，如圖二所示，此實驗提出頗令人信服的論證，即將裝滿汞的玻璃管倒插入充滿汞的容器中，此時管內汞上方所留下的空間使為"真空"；同時，汞的高度與容器的體積大小無關，若以水由下方灌入，便會充滿整個管子。這便是你我都熟知的托里切利實驗。儘管如此，當時亞里斯多德仍不認為所產生的是"真空"，而以為管上方的空間中充滿著一種稀薄物質，或可說是由汞所釋出(breathed out)的靈氣(spirit)，並藉著這種物質與汞之間的吸引力來支持管中汞液維持一定的高度。

在 1648 年的另一個實驗由帕斯卡(Pascal)的堂兄弟斐瑞爾(Perier)所做的，後來密得頓稱當時是理念史上偉大的一刻。斐瑞爾帶著一個前述之壓力計及約四公斤重的汞登上一座高約 1000 米的高山(稱作 Puy de Dome)，並僱了一位僧侶在登山的途中一路上盯著汞壓力計的變化，結果發現在山頂上所量得汞柱的高度比在山腳下低了 7.5 公分。這個實驗與一連串“真空中的真空”實驗(即在一個真空系統中裝一個壓力計)已改變了以往的舊觀念，也就是“真空可以被產生”與“空氣壓力是實在的”。

到了十七世紀的中葉，已有許多關於真空性質的論述，如充了氣的氣囊在真空中會膨脹、在真空中不能助燃與生存以及聲音不能在真空中傳遞等。然而對於光何以能在真空中行進的疑惑，直到十九世紀時由馬克斯威爾(Maxwell)解釋才得以澄清。

三、抽氣幫浦的發明—葛里克(OTTO VON GUERICKE)

在十七世紀的科學發展中，葛里克發明了抽氣的幫浦(真空幫浦)具有相當大的實質貢獻，與當時其他發明的望遠鏡、顯微鏡及擺鐘等並稱為該世紀四件最偉大的技術發明。早在 1640 年左右，葛里克曾做一個實驗，想將一個裝滿水的木桶(抽水幫浦)把水抽掉，看是否能在桶中產生真空。如圖三所示，由幾位壯漢合力抽水時，可聽見空氣由木桶孔隙衝進的聲音，實驗結果甬說，也失敗了。在稍晚的另一個實驗中，他製造了一個大銅球，並裝上幫浦，這回不抽水而直接抽氣，當球內的空氣快被抽掉時，球突然爆破掉而且聲音震耳欲聾，葛里克認定大氣壓力是使球體碎裂的主因，後來這個問題在建立一個比一個堅固完美的球體後終於解決了。

之後，葛里克更進一步設計製造了一個產生真空的特製活塞式抽氣幫浦，也是第一個空氣幫浦。而且經歷了一連串的變革，後來的幫浦已改進了系統密封方式與閥門，使此種活塞式幫浦中的死角減到最小。然後他進行了一段長時間的實驗研究許多真空的性質；此外，他觀察到能量對應於氣壓的關係且造成“飛沙走石”的現象，推論風暴是起源於大氣的壓力差異所致。

葛里克最有名的實驗，也就是膾炙人口的“馬德堡半球(Magdeburg emispheres)”實驗。如圖四所示，將一對直徑約 33.6cm 的厚銅製中空半球密合後抽真空，然後在二邊各以八匹馬同時向二方拉，結果無法拉開，最後費了九牛二虎之力才將這二個半球分離，而且發生如砲轟聲般的巨響，估計馬匹所施的力共約 887 公斤；當時震驚了現場參觀包括國王、諸侯、眾臣民，而且在座人員皆讚嘆不已。此後，他又做了一個較大的銅球，直徑約 49cm，這次使用了共 24 匹馬來拉，始終都拉不開，當然只要把活栓打開充入空氣後，這二個半

球便自己分開了。據葛里克之計算，要將這二個大半球分開，需要36匹馬的力量才能達成。起初葛里克的實驗於1654年時在德國之雷根斯堡(Regenshurg)進行，後來應皇室之邀請表演。

由於葛里克的實驗很快地傳遍了整個歐洲，許多人也陸續跟進在各地重做這個實驗。一位熱衷的實驗家也是英國皇家科學院創立人之一的波義耳(Robert Boyle)將葛里克所使用的抽氣幫浦加以改進，並發展出一套在定溫下氣體壓力與體積之間關係的定律——即"波義耳定律(Boyle's Law)"。密得頓將第一次使用"barometer"(壓力計)字的人歸於波義耳。

四、十八世紀到十九世紀初期之間的發展

有關氣體放電與真空科學相連結之研究發展經歷了三個世紀，其起源於 1676 年初，一位法國大文學家皮卡得(Jean Picard)將汞壓力計帶進一間暗室裡，並將其上下搖動，結果發現其發光。另有一位學者在 1705 年到 1711 年期間也做了一些最早的分類實驗，就是今天我們所稱的放電發光(electroluminescence)及增擦發光(triboluminecence)等實驗。他認為發光的效應是由於磨擦產生的，並且與帶電作用相連結。至於磨擦發光之解釋直到本世紀才較為明瞭，然而較為深入的研究結果仍不完整。1740 年時，在巴黎一位學者諾雷(Nollet)在一個蛋形的真空容器中產生了輝光放電的現象，該真空容器因而被稱為"電蛋(electric egg)"。後來在英國，戴維(Davy)與稍晚的法拉第(Faraday ~1838 年)也做了不少放電管的研究，後來放電實驗中靠近陰極有一個"暗區(dark space)"便是以"電學之父"——法拉第來命名。而有關放電的現象直到十九世紀末時克魯克斯(Crookes)、湯姆生(Thomson)與其他學者接續的實驗才逐漸了解。

自托里切利以後的幾個世紀中，都是以壓力計(barometer)來量測氣壓，為了提高最測的靈敏度，上述的壓力計也經過多次的修正與改進基本設計，此外也致力於多液體壓力計(multiple liquid barometers)的研究。在十七世紀時，即有不少研究者發表有關壓力計中真空的改進與維護之演說，到了 1740 年左右，使用這種壓力計通常要將管中的汞煮沸；在 1772 年，狄盧克(de Luc)發表說明其原因主要是要將管中汞本身內含的空氣除去，這似乎是"真空烘烤(vacuum bakeout)"的第一個例子。

抽氣幫浦的改進起源於十八世紀時的豪克斯比(Hauksbee)與諾雷，但基本的設計仍是葛里克型式。當時這種機械幫浦最好的要算英

國的紐曼(Newman)所建造，而於 1851 年倫敦大展示會中推出，勝過來自法國、丹麥等國家的其他幫浦。實驗測試結果，當壓力計的讀數為 30.08 英吋汞柱高時，這種抽氣幫浦的壓力計可達 30.06 英吋汞柱高。居於十九世紀中葉所發展蓋斯勒(Geissler)、特普勒(Tople)與史普仁格(Sprengle)等汞幫浦之先。當時產生高真空的方法皆採用托里切利法，而實驗的"真空容器"就是汞壓力計頂端的那一部份空間。當然，早期的學者並不瞭解"汞蒸氣"的存在，而始終認為這種真空就是"完美"的真空。

五、十八、十九世紀期間的大型真空技術

正當科學家不斷發現真空科學的基本原理及哲學家們為真空的存在性而爭論不休之時，精明的工程師——實踐者已著手推廣應用新發現的原理。若要說工業革命是起於一位天才——紐康門(Thomas Newcomen)設計了第一個實用的"大氣抽氣引擎(atmospheric pumping engines)"，一點也不誇張，他的設計基礎在 1712 年首次被應用。在一個有滑動活塞之圓柱管中充滿了蒸氣，當其凝結後便形成了真空，而在活塞另一邊的大氣則以相當大的壓力將活塞推至底部。就是利用這種原理，紐康門將活塞連接大的樑桿，使設計出一連串的橫樑推動引擎(beam engines)，在英國被廣泛地用於深井抽水，家庭供水與乾旱時工業水車之供水等。這些引擎比旋轉蒸氣引擎(rotary steam engines)早了七十年，而引進了工業革命。

在真空技術史上有一則有趣且鮮為人知的插曲，就是在十九世紀中葉時於愛爾爾、英國及歐洲大陸等地所建造的"大氣軌(atmospheric railway)"。在 1830 年代，正當蒸氣機車被認為相當不可靠、骯髒、嘈雜、笨重且功率負荷大與不能爬陡坡時，一些充滿幻想力的工程師便構思一個建造乾淨、安寧、輕而且便宜低功率列車的計畫，藉著大氣壓力的力量推動置於鐵軌兩軌中央的列車傳動活塞。

1846 年在英國的南帝汶(South Devon)海岸，由布魯涅耳(Brunel)建了如上述之系統(9)，其原理可由圖五中瞭解。沿著二鐵軌中間固定一長而堅固的鑄鐵管，其管徑由平地之 15 英吋可變化至陡坡地區之 22 英吋(因為列車在陡坡區行駛時需要較大的推力，而 22 英吋管徑的表面積可使活塞由大氣壓力獲得較平地區更大的推力)。沿著這長鑄鐵管的上方是一條寬約數英吋的長狹縫，並以一長條所謂的"縱向閥門(longitudinal valve)"封住，這種閥門的結構示意圖如圖六所

示。主要是一長條皮帶，其一方邊緣封閉固定在長狹縫邊緣，而另一方邊緣則由一鐵架撐緊並罩一種合成物質(soap + cod oil)墊於皮帶與狹縫緣之間而密封住。圖五中，在長鑄鐵管中為一活塞(a)，列車之前輪軸藉著特殊設計的結構(b)使固定在活塞(a)上。當列車準備啟動時，在活塞"前方"約三英哩遠處以一大型的抽氣幫浦(以約 80 馬力的蒸氣引擎推動其作用)將活塞前三英哩之管內空氣抽除，此時在活塞後面一專用於開啟"縱向閥門"(d)的滑輪(c)設計由皮帶(d)下方將皮帶頂起，使空氣進入管內活塞的"後方"，就靠此大氣壓力將活塞帶列車一路推進到三英哩遠的下一站；當然沿途在滑輪(c)之後方有另一個滑輪(e)由皮帶上方將皮帶壓回原密封之位置，以便於下次系統抽氣。根據記載在活寒前方的真空度約為 16 英吋汞柱，且其最高速率可以平均時速 64 英哩行進 4 英哩遠(極速可達 68mph)。

這種大氣軌的設計的確相當迷人，可惜它的生命正如曇花一現般地絢爛而短暫。種種不利的因素，例如列車啟動時的意外、活塞損壞以及抽氣站故障等使其提前結束。其實最重要的缺點在於上述縱向閥門的長皮帶經不起或氣候變化及化學反應的腐蝕作用而減低了其使用效率，加上用於密封用的合成物質常讓好奇的老鼠啃得殘缺不全，使密封的功能大不如前。早在 1844 年史蒂芬生(Stephenson)便曾說過："以如此利用大氣的系統，必須靠整個機關每一個細節部份完全正常運作始能整體有效地操作來講，要滿足大型交通運輸的需求實在是一項艱鉅而不易達成的任務"。最後一個大氣軌系統位於巴黎附近的一條長約 5.5 英哩列車線終於在 1860 年停駛了。

至今尚有一件將真空技術應用於生活中的例子是藉充氣管傳送郵件、音信。1886 年英國不列顛郵局便在倫敦設置一長 34 1/2 英哩之管，並充以 12psi 的壓縮空氣或 6 1/2 psi 之大氣來推進傳送裝置。

1897 年在美國紐約、波士頓與費城等地亦有類似的系統，十年前在美國許多百貨公司還利用這種充氣管來控制鈔票兌現傳送呢！

六、真空科學與近代物理、化學的誕生——十九世紀末期

真空科學與技術在近代物理及化學許多實驗之基礎準備上扮演著關鍵的角色。各種難解的問題諸如電子與 X-射線的發現、稀有氣體的分離與確認、氣體放電的闡釋及冷凍的改進等皆由於真空方法的運用而得以迎刃而解。真空技術對於近代科學誕生的衝擊可由下列的例子得到顯著的答案。自 1901 年至 1906 年間 24 位物理與化學諾貝爾獎得主中便有五位是基於 1800 年代期的真空量測。包括倫琴「Rontgen」發現 X-射線、瑞里(Rayleigh)發現氫氣、蘭姆塞(Ramsay)發現稀有氣體、雷納德(Lenard)研究陰極射線以及湯姆生(Thomson)研究氣體的電導性等。

在十九世紀稍晚時期，新發明的特普勒幫浦(1862)、史普仁格幫浦(1865)與麥可雷歐得真空計(McLeod gauge, 1874)等使一般真空系統的真空度提高達 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Torr(約 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Pa)的層次。當時大多數的實驗皆採用玻璃容器，而電導引(electrical feedthrough)的安裝則使用白金(Pt)密封。

對於十九世紀末期有關真空科學與技術之進展，分別簡述於后：

A．氣體放電(Gaseous discharge)的改進

當時許多科學家相當熱衷於氣體放電的研究，並且希望得到漂亮的結果，因此促使他們對實驗所需之真空系統不斷地改良。

在 1879 年左右克魯克開始進行一連串的放電實驗，他主要觀察陰極附近的暗區(該暗區後來以他來命名)，並且指出一種"陰極射線(cathode rays)"的束流帶有足以引起加熱弘效應的能量。當他移動輻射計時，便發現陰極射線照射玻璃所產生的螢光，此外由陰極射線在磁場中運行的軌跡被偏轉而證明這種束流是一群帶負電荷的粒子。艾爾斯特(Elster)與蓋特(Geitel)在 1880 年所做的實驗發現真空中或氣體中

的熱燈絲會放出負電荷之粒子，且其放射率隨著燈絲溫度的上升而迅速增加。不久之後維尼爾特(Wehnelt)也發現一些金屬氧化物如鈣與鋇等比一般金屬更容易放射出大量的負電粒子，這也是第一個氧化的陰極。此後，採用此種維尼爾特陰極與蓄電池可增加氣體放電的穩定性有助於對各種暗區以及條紋放電之研究。

B.光電效應(Photoelectric effect)的研究

1887 年赫茲(Hertz)發現將紫外光照射在一種充了電的火花放電狹縫(spark gap)材料上能夠促使此裝置產生火花放電的效應，導致一系列用紫外光及其他光源照射在充了電的物體上使產生放電效應之研究。艾爾斯特與蓋特曾將各種金屬材料依“充負電而藉光以觸發放電”之難易度來排列，發現以銣(Rb)與鉀(K)之效果最好，以碳(C)及汞(Hg)之效果最差。雷納德發現儘管電荷放射率隨光強度增加，然而所放射出的負電荷粒子之能量與入射光之強度大小無關。但對於這些現象仍存在不少疑點，直到 1905 年愛因斯坦(Einstein)提出了光電效應理論時才得到較合理的解釋，說明了光子能量與材料表面功函數(Work function)及所放出之電子能量間的關係。

C.電子的發現

在 1898 年，H 姆生 (J.J.Thomson)綜合了各種實驗的結果，並說明無論在任何的放電來源，包括藉感應線圈放電而由材料表面放射出負粒子及利用熱燈絲放射出之熱負粒子，其荷質比(e/m)值皆相同，證明這些負粒子是同一種粒子，就是“電子(electron)”，而且他更進一步認定電子的質量要比氫原子小約 1000 倍。由於他的發現與結論平息了風行數年期間對陰極射線本質的激烈爭論。

D.X-射線的發現

倫琴(W.K. Rontgen)在 1895 年發現當放電真空管內真空度較高時($\leq 10^{-2}$ Torr)，在玻璃管壁上可看到螢光，這種輻射光具有高穿透性，除了能穿過空氣、肉體之外，也可以透過薄金屬片。有關這種“X-射線”(當時實在不明瞭這是何種射線，只好暫名為 X-ray)的特性，倫琴也做了相當多的實驗。

E. 濺射(Sputtering)現象的研究

1852 年時，葛洛夫(W.R.Grove)首次發現在氣體放電時陰極附近產生濺射的作用，把陰極材料表面變成光滑的平面，其實驗系統如圖七所示。直到 50 年之後才瞭解這種濺射現象的原因是由於“正輻射線—離子”撞擊陰極表面而造成。第一個證明這種正離子撞擊陰極同時也產生二次電子的是湯姆生(J.J. Thomson)。

F. 化學(Chemistry)領域的拓展

在 1890 年代期間，蘭姆塞(Wiiliam Ramsay)與瑞里(Lord Rayleigh)等人便是藉了特普勒幫浦抽真空之力而發現稀有氣體並將之分離出來，同時也將這些元素編列到元素週期表之中。

G. 低溫冷凝(Cryogenics)作用的提升與冷凝幫浦(Cryo-pumping)的發明

雖然在 1885 年首次把空氣凝結成液體，但是對於如何儲存這種冷凝液體的方法要到 1892 年狄瓦(Dewar)設計了一個真空容器來儲存冷凝的液態空氣才解決。他發現以一個抽了高真空的容器加上容器壁(玻璃)上鍍一層銀，可以減少由容器外界流入之熱量達 1/30 倍:大約同時，他也認為以冷凍的活性炭(charcoal)可以吸附大量的氣體，所以可以應用到真空抽氣幫浦上，便是“冷凝幫浦”，當時利用這種冷凍活性炭來抽真空可以達到 10^{-5} Torr 以下氣壓之高真空，以致麥氏真空計(Mcleod gauge)無法量得其真空度。

H.度量衡(Metrology)技術的提升

想要利用一般的分析天平精確地量測質量，卻由於待測物體的密度不一，以致受到了不同的浮力效應(buoyancy effects)，使所量到的物體重量與實際值有差異；此外，物體的表面積也不同，以致因吸收了大氣中的水氣而使量測值改變。為了解決這二個問題必須在真空中來量測物體的重量，而且儘管操作上較不容易，但至少裝天平的容器要密封抽氣且要耐得住相當可觀的大氣壓力，由密勒(W.H. Miller)所設計製造的一個真空天平容器其前後門是用厚 1 3/4 英吋的玻璃板做的，在 1872 年到 1892 年期間在英國演被用來做完全相同物體重量精確量測與比較之標準。

I.白熱光照明的發明

在 1879 年，愛迪生(Edison)由美國普林斯頓大學 借了一個美國第一個史普仁格幫浦使用，結果成功地研究發明碳絲燈，在他的專利證書上說："我發現將一根棉線經過適當的碳化處理後，裝進一個密封的玻璃燈炮中，並抽真空達百萬分之一的大氣壓後，其電阻約 100 到 500 Ω 之間，然後通以電流，則其即使在相當高的溫度時 仍絕對穩定。"這也是第一個經濟、實惠的家用電燈。

七、邁入二十世紀的真空—藍米爾(Langmuir)

在二十世紀初期，真空科學與技術的進展相當大，在極短的時間內，由氣體動力論的發展，迴轉機械幫浦與水跟擴散幫浦的發明，熱傳導真空計與離子真空計到冷凝阱與烘烤等處理步驟的發展，顯出突飛猛進的神速進步。到了 1922 年，達胥曼(Dushman)已有了詳盡完整的描述。在當時主要的研究在於瞭解氣體放電，X-射線、熱游離放射(thermionic emission)、光電子放射、固體蒸發與表面化學等方面。儘管當時許多科學家與工程師對於這些發展皆有貢獻，但對於真空科學、技術與應用方面貢獻最大的要算是藍米爾(Irving Langmuir)了。

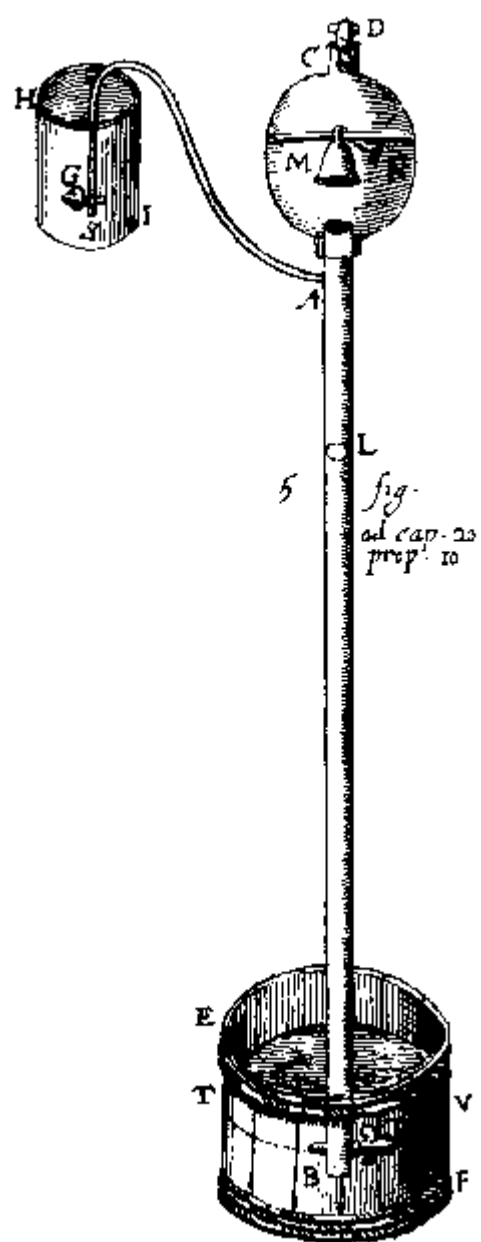
藍米爾自 1909 年起，便窮其畢生專職於紐約奇異研究實驗室(General Electric Research Lab.)工作。他的工作起源於最初的求知慾想瞭解真空對生命的影響、燈炮的效率以及為何其在使用時會變黑等。在 1920 年，他便進行了量測蒸氣壓力、低氣壓的化學反應、氣體的分解、氣體的表面吸附作用、鎢絲燈變黑、熱游離放射與原子的結構等相當前衛的實驗。同時他也發展了玻璃與金屬製之擴散幫浦(diffusion pump)當時他稱為凝結幫浦(condensation pump)以及二個靈敏的分子黏滯真空計(molecular viscosity gauge)。

他一些影響最深遠的研究則在於表面化學與觸媒作用等領域，而且大肆改革在這些範疇之內的舊思想，即提出這種異質成分的觸媒反應過程不只發生於凝結在表面之分子“厚膜”中，而且在一固體表面的單層氣體分子也一樣為受到相同的力將原子固著於物體之上。在 1915 年，他研究了鉑(Pt)表面之 CO 觸媒氧化作用，並結論說明氧與 CO 之單層厚度不超過一個分子大小，同時由於碳原子的不飽合特點而導致 CO 在鉑表面上的化學交互作用，即“化學吸附作用(chemisorption)”。藍米爾當時還提出許多富有科學性的問題，至今的

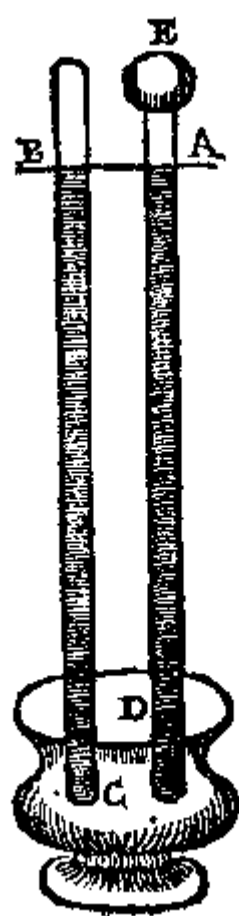
許多科學家仍在研究當中，可能在這整個二十世紀當中再也沒有一個真空科學家能和他相提並論的了。

八、結語

真空工程的技術與知識已和物理、化學及工程等學問平行發展且影響深遠超過了 300 年的光陰。在十八世紀時真空技術奠定了大型機械引擎的技術基礎而且引發了工業革命；而在當今二十世紀末期之高度複雜性真空科學與技術已開始為另一個嶄新的革命—微電子革命 (Microelectronics Revolution) 以及其在生活上所造成遠大的衝擊性而催生。期盼讀者們能從本文中所提到的真空觀念及其變革瞭解真空的發展以及對這些革命的衝擊性。



圖一



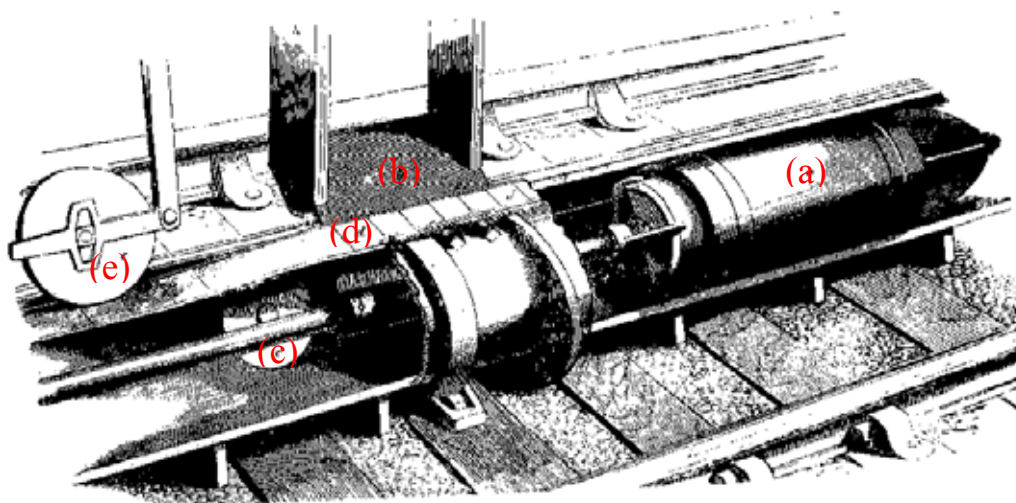
圖二



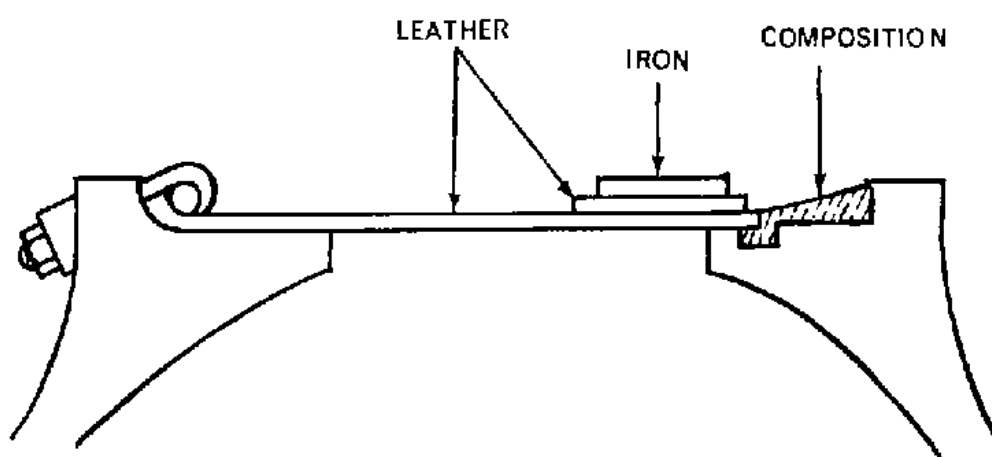
圖三



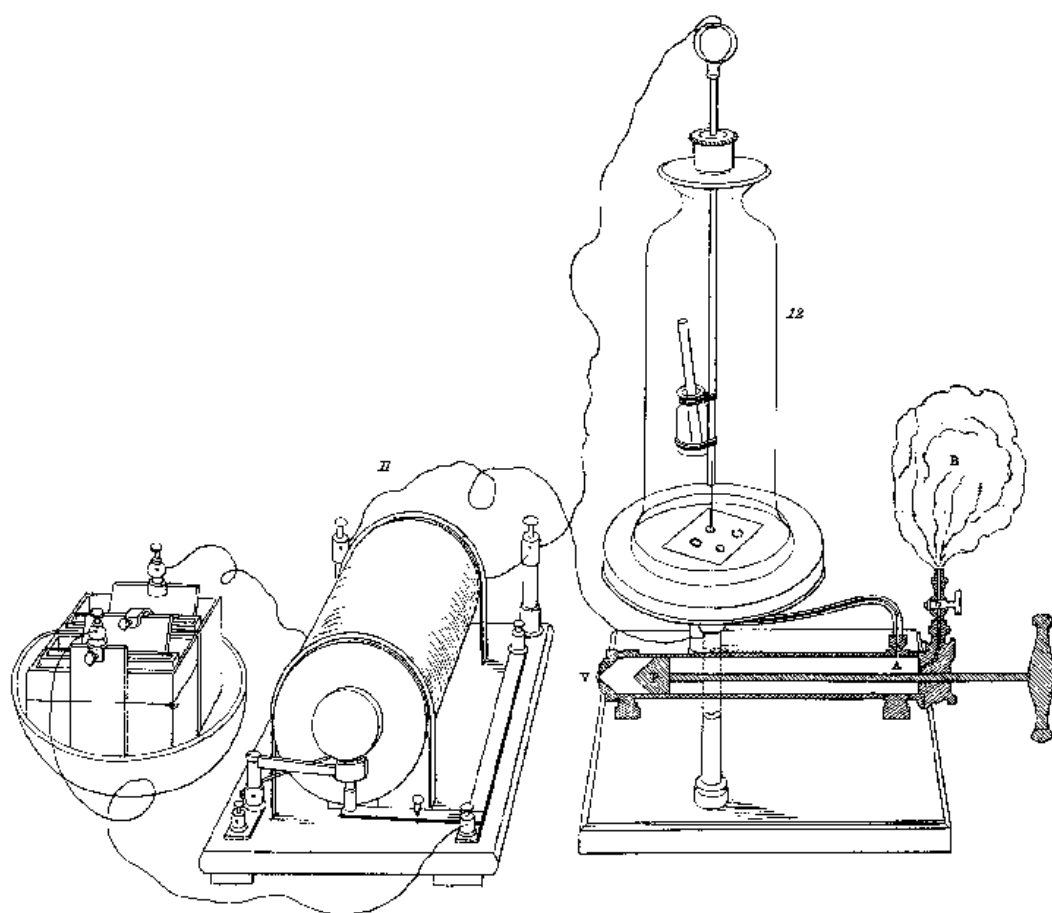
圖四



圖五



圖六



圖七