

科學實驗的輻射發展： 重構早期電學實驗的歷史*

陳瑞麟

國立中正大學哲學系
E-mail: pyrhc@ccu.edu.tw

摘要

本文的目的在於提出一個「科學實驗的輻射發展模式」，並以十八世紀的近代電學實驗的歷史來例證。本文首先簡短回顧研究科學實驗的文獻，然後提出實驗的結構，包括背景理念、實驗模型和物質落實。接著我們界定原型實驗與衍生實驗的概念，再根據實驗的結構來考察兩者間的傳衍關係，繼而辨識八種傳衍關係。原型實驗與衍生實驗間不同的傳衍關係，使得科學實驗的發展呈現出輻射狀。最後我們將顯示近代電學實驗的歷史能緊密地配合此模式。

關鍵詞：科學實驗、實驗的結構、科學史、電學、科學哲學

投稿日期：95.8.1；接受刊登日期：96.9.20；最後修訂日期：96.10.13

責任校對：蔡旻芳、范馨文、李珮華

* 本文寫作期間受到國科會計畫補助 (NSC94-2411-H-031-002)，謹此致謝。筆者也十分感謝三位匿名評審的寶貴評論與建議，使得筆者能夠精煉本文。還有感謝《歐美研究》在校對上的精細嚴謹，訂正了筆者在文獻部分的許多疏漏，唯文中若仍有錯誤，自當由筆者負起全責。

壹、前言

哈金 (Ian Hacking) 於一九八三年說出「實驗自有其生命」(Experimentation has a life of its own) 這句名言，扭轉了長久以來科學史家與科學哲學家只關注於理論的傾向。哈金重新活化實驗的生命，不僅產生許多有關科學實驗的新議題 (如觀察技能、實驗建構現象 [Gooding, 1990]、複製實驗 [Collins, 1985]、實驗不是理論附庸 [Galison, 1987, 1998]、科學不統一 [Galison & Stump, 1996] 等等)，也促使「科技研究」(Science Studies; SS) 和「科技與社會」(Science, Technology and Society; STS) 學者標舉「科學實踐 (作)」(scientific practice) 的觀念，不僅把焦點放在科學家的實踐活動上，進一步標榜「科學做為實踐」(Pickering, 1992, 1995)，甚至認為理論認知也不過是論述實踐 (Rouse, 1996)。這個觀點把科學看成主要是「做」(doing)，而非「認知」(knowing)；是「干預世界」(intervening the world) (操弄、改造和建構世界) 而非「表徵世界」(representing the world)。讓我們把此一觀點家族統稱為「實踐主義」。¹ 科學的實踐主義者多半以案例研究的方式來切入科學的實驗活動，考察科學家如何執行、如何結束同一個或同一類的科學實驗，在整個過程中，有哪些社會因素與力量的介入，又有哪些理論、社會和資源上的限制。

約莫同時，卡特萊特 (Nancy Cartwright) (1983)、納西婁 (Nancy J. Nersessian) (1984)、吉爾瑞 (Ronald Giere) (1988, 1999a, 1999b) 等人繼承海絲 (Mary Hesse) (1966) 的觀點，強調模型在科

¹ 由「實踐」字根衍生的「主義」英文字原本應是pragmatism，可是這個字已慣於指稱「實效主義」或「實用主義」。本文想表達的「實踐 (作) 主義」英文沒有對應的字，或許勉強可以根據構詞原則而寫作practicalism，這並不是通用的英文字，但可以恰當地配合此處需求。

學理論與認知中的關鍵角色，形成科學哲學的認知進路 (cognitive approach)，經過近二十年的發展，逐漸把模型的概念應用到科學實驗上 (Morgan & Morrison, 1999; Magnani, Nersessian & Thagard, 1999; Magnani & Nersessian, 2002)。認知學派仍然強調模型做為「表徵世界」的工具 (Giere, 1999a)，他們的焦點著重在分析實驗的結構 (Morgan, 2002) 與模型在實驗中的模擬、認知與推理功能 (Guala, 2002; Boumans, 2002)。²

然而，不管是實踐主義或認知進路，兩派都還沒有人涉入科學實驗發展的議題，也就是說，如同歷史進路 (孔恩 [Thomas S. Kuhn]、拉卡托斯 [Imre Lakatos] 和勞丹 [Larry Laudan]) 考察科學理論演變的發展邏輯 (developmental logic)、規律 (regularity) 或模式 (pattern) 般地考察科學實驗演變的發展邏輯、規律或模式。當然，在某種程度上，蓋利森 (Peter Galison) 已做了近似的工作。蓋利森在其《形象與邏輯》(*Image and Logic*) 中提出了理論、實驗和工具形成三個獨立的傳統，它們各有各的周期循環，交錯地 (intercalatedly) 發生在歷史演變中。可是，一來他那傳記性的案例研究無法鮮明地顯現出他的理論模型與歷史材料間的配合；二來他也沒有分析實驗科學的「常態科學」、「典範」、「科學革命」來說

² Morgan, Guala和Boumans三人都是經濟學哲學家，他們對模型的討論，不免地環繞著經濟現象而出發。在經濟學領域中，不容易執行像物理化學或生物學一般的控制實驗，所以他們大致區分了model experiment (大致相當於simulation) 與 laboratory experiment 兩大類型。前者指經濟學家應用「模型」來模擬 (simulate) 經濟現象的演變，所以又稱作「模擬」，它是把預擬的參數輸入電腦程式，經過運算而得出結果，除了運算的電腦外，它不需要實驗器材，因此也不需要傳統的實驗室。後者則指發生在實驗室中可控制的實驗。清華大學經濟所趙相科教授告訴筆者，其實也有一門「實驗經濟學」(experimental economics)，經濟學家設計實驗，一般以學生來代表經濟行為人，處在一個設定的經濟環境下來做決策。這是一種經濟學內部的 laboratory experiment，也對比於「模擬」。

明實驗的周期循環性。³ 我們可以說，迄今尚未有任何一個可能的科學實驗的發展邏輯、規律或模式被揭示出來。本文的工作，就是企圖尋找科學實驗在歷史中的發展邏輯、秩序和模式，以及探討是否有個理論模型能揭示它們？換句話說，我們試圖尋求科學實驗發展的理論模型。

貳、實驗的發展模型

實踐主義者之所以難以針對科學實驗提出一個發展邏輯的考察，或許是因為他們沒有分析實驗的基本結構。他們認為科學實驗是一種行爲、一種實踐，行爲和實踐不斷地在變動。可是即使行爲和實踐也有其內在的結構，它不是物質儀器裝備的結構，而是一個由異質的事物所結合的一定程序或關係網絡，要經歷一段時間才能完成，物質裝備乃是這個結構中的一部分。只有在建立實驗的結構之後，我們才可以透過分析和比較歷史上相繼的兩個實驗之間的內在結構，來揭示實驗的變動，從而追蹤實驗的發展與其發展路徑。

一、實驗的典型結構與實驗模型

已知實驗是一種行爲，因此行爲的一般模型——也就是「目的—手段—結果」的模型——可以很恰當地應用在實驗結構的分析上。典型的科學實驗擁有一個三元結構，也就是由三個異質局部 (heterogeneous parts) 組成一個實驗行爲的整體：即實驗的背景觀念、實驗模型和實驗模型的物質落實 (Chen, 2007)。實驗家從事實驗的目的莫不在於「落實」他的背景觀念。由目的出發，根據其背

³ 當然，我們注意到蓋利森討論了「侷限」(constraint) 在科學實驗中扮演的角色，以及實驗和理論的「交易區」(trading zone) 之概念，但是，這些概念比較像是「空間性的概念」而不是「時間性的概念」，似乎不易和他的交錯周期循環發展配合起來。

景觀念而設計一個實驗模型，做為具體執行實驗的手段，然後製作與操作物質系統，使實驗模型得以落實。加上「典型」這個形容詞是因為我們不想排除某些特別、周邊或邊緣的實驗，它們也許缺乏這三元結構的某一部分；例如介於實驗和理論之間的邊緣活動「思想實驗」(thought experiment)，完全談不上「實驗模型的物質落實」；或者只有純粹的書面構想，卻從未被落實過的實驗模型。或者它們的實驗模型的構成並不完整，例如也許缺少資料蒐集的部分，也許沒有明確的預測結論，或者沒有控制變因、實驗系統沒有封閉性等。

一個典型的實驗，首先在於根據某種背景觀念而設計實驗模型。然後，背景觀念也可以用來解釋實驗的具體結果。背景觀念可以是某個理論、某個假設、某個想法，甚至某個未成熟的信念等等，不管科學家的背景觀念是否明確，只要能導出一個「可落實模型」，科學家就能據以設計實驗模型。換言之，科學家透過思想中的「可落實模型」來設計一個更具體的、可操作的實驗模型。一個實驗模型也有一個典型的內在結構，它也可以應用「目的—手段—結果」這個一般模式來分析。一個實驗模型包括 (a) 實驗目標：又分成 (a1) 目的、(a2) 對象；(b) 實驗手段 (工具)：又分成 (b3) 裝備、(b4) 控制、(b5) 操作；(c) 預期結果：又分成 (c6) 蒐集、(c7) 預測。也就是說，一個實驗模型包含了某個實驗目的 (或檢驗理論、或產生穩定現象、或探測工具潛能等等)；有待實驗的對象，它將和裝備互動；用來容納和操作實驗對象的實驗裝備；實驗操作的步驟和方式；控制實驗裝備和實驗對象互動的設計；蒐集實驗操作產生的資料；預測實驗將產生的結果 (Chen, 2007)。如此一來，根據實驗的背景觀念，科學家首先決定實驗目的與實驗對象，繼而選擇或建造實驗裝備，構思實驗的操作步驟，以及控制裝備與對象互動的方式和預測實驗結果，並設計蒐集實驗資料的方式——這一切考慮

就是「設計一個實驗模型」。最後具體執行實驗——把實驗模型加以落實。落實產生一個實際的結果，如果它一致於預測的結論，則它一致於背景觀念；如果它不一致於預測的結論，則它不一致於背景觀念。一旦與背景觀念不一致時，自然會導致科學家懷疑背景觀念或實驗本身，產生了重新實驗的契機。

一個實驗的典型結構，可以被圖示如下，它是一種「整體—局部結構」：

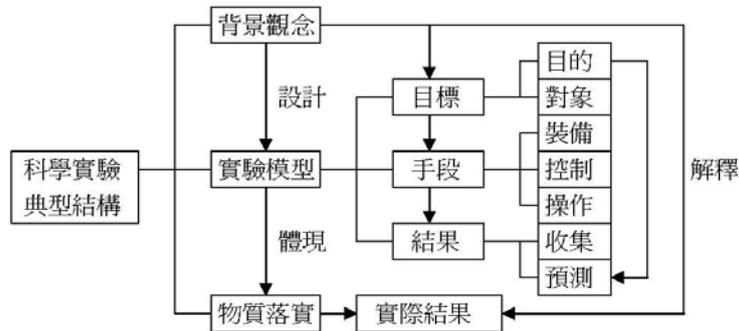


圖 1 實驗的典型結構圖示

二、原型實驗、衍生實驗及其傳衍關係

考察實驗發展的目標，在於揭示從一個實驗到另一個後繼實驗之間，是否存在某種秩序、規律或模式？如同哈金所言，理論主流的科學哲學（從邏輯經驗論一直到歷史學派）傾向考察理論的發展演變，實驗則是在理論的演變過程中被提及。但是，「實驗自有其生命」指示了另一種看待實驗科學的觀點：也許可以以實驗為核心來看實驗科學的發展。當然，大家都同意實驗與理論有糾纏難解的關係，在歷史上，相同的實驗可能被不同的理論所使用，實驗也可能先於理論而創造出有待進一步說明的新現象。一個出於檢驗理論

而設計出來的裝備（蓋利森慣於稱為「工具」[instrument]），也有可能被用為完全不同的實驗目的。可是，問題在於：是否存在某種領域是以實驗為主來發展？實驗的變遷是否也在某些領域中成為引導科學發展的主要動力？當然，這樣以實驗為主的發展史，仍然少不了理論的角色，重點在於，我們如何提出一個發展模型，能夠揭示以實驗為主的學科之發展史，並同時妥當安排理論與實驗間的相互關係？

既然我們已經知道實驗的典型結構，那麼我們就可以根據抽象結構來加以分析，透過實驗結構的局部同異之比較，從而獲得實驗發展的可能路徑。例如，最初某個科學家可能基於某個理念，設計出某個實驗模型，並加以落實。如果由於這個實驗的新奇性，導致其後有一大堆後繼的實驗受到啓發而產生，這個實驗就成為一個「原型實驗」(prototypical experiment)。受它啓發所產生的實驗就稱作「衍生實驗」(descended experiment)。原型實驗有歷史上的「原創的」、「最初的」(original) 的意義。

讓我們先設想幾種可能的衍生實驗。科學家可能受到某一原型實驗的啓發，接受其背景觀念；他也可能採納實驗工具，並做細部調整以便配合他的不同理念，執行一個不同的落實，並觀察其實驗結果；或者他可能改良工具以探測其新奇性和潛能，產生各種結果，以檢驗或形成不同的背景觀念。簡言之，一個實驗啓發或傳衍另一個實驗的途徑有三：背景觀念、實驗結果、實驗工具。進一步，如果衍生實驗的落實後之實際結果與預測結論不一致，也就表示與理念不一致，如此再度引發調整實驗模型、改良實驗工具或調整背景觀念的動機，導致重做一個新實驗的需求，這個新實驗是由於「衍生實驗」所引發的，它就做為「第二序或第二代的衍生實驗」。

瑣碎複製與衍生實驗：如果一個實驗，除了執行的時空和某一

原初實驗不同之外，它的背景觀念、實驗模型（含實驗工具）和物質落實均與原初實驗一模一樣，則我們說這是一種「瑣碎的複製」（trivial replication），它既無檢驗力，也不算是一個「衍生實驗」。例如在各級學校中的實驗課程中，學生所執行的實驗，姑不論執行結果的好壞，都是一種瑣碎的複製。因為就一個實驗的「背景觀念」、「實驗模型」與「物質落實」這三個相互關聯的構成成分而言，一個細節差異，就足以產生三種成分相似但不同的實驗。當然，衍生實驗的背景觀念、實驗模型和物質落實，也有可能完全不相似於原型實驗。重點在於，一個衍生實驗不能是原型實驗的「瑣碎複製」。一模一樣的實驗，談不上「發展」。

複製關係與傳衍關係：接下來，我們有必要澄清與區分「複製關係」與「傳衍關係」。粗略地說，傳衍關係著眼在後繼實驗是否被原初實驗所啟發而執行，正如生物上的後代與親代間的關係；複製關係考慮的則是兩個實驗（模型）之間的結構相似性。「複製關係」有複製程度大小，由實驗模型的相似程度來判斷。很多複製性的實驗同時也是一個衍生實驗，它和被複製者之間有傳衍關係。例如培林（Jean Perrin）和湯姆森（Joseph. J. Thomson）對於赫茲（Heinrich Hertz）的陰極射線之複製。可是，也有很多衍生實驗和它的啟發實驗之間，完全談不上複製關係。例如法拉第（Michael Faraday）重做其老師戴維（Humphrey Davy）的針塔實驗（由此形成磁力運轉的構想，因而導致磁力推動導線的實驗構想）（Gooding, 1990: 53），雖然衍生自戴維，但它本身也進一步衍生了其它實驗，如使載流導線在磁場中旋轉的實驗，試圖印證「磁力運轉」的想法。這是兩個非複製的實驗，它們分別有兩個截然不同的實驗工具，但都是出於法拉第的電磁統一和磁力線理念下的產物（Gooding, 1990: 115-130）。傳衍關係重視的是原初實驗的背景觀念（用來設

計實驗模型)、所用的實驗裝置或工具以及新奇的實驗結果(物質落實)之啓發,實驗模型之間的相似性,在傳衍關係的考察中幾乎不扮演任何角色。

傳衍關係的類型:既然傳衍關係的考察重點在於原型實驗的背景觀念、實驗工具與落實結果,這三個變項可產生八種組合。也就是說,傳衍關係可以初步分成下列八種組合(次類型):⁴

1. 背景觀念一致,同類實驗工具,落實結果一致(BIC)。
2. 背景觀念一致,同類實驗工具,落實結果不一致(BI)。
3. 背景觀念一致,實驗工具不同類,落實結果一致(BC)。
4. 背景觀念一致,實驗工具不同類,落實結果不一致(B)。
5. 背景觀念不一致,同類實驗工具,落實結果一致(IC)。
6. 背景觀念不一致,同類實驗工具,落實結果不一致(I)。
7. 背景觀念不一致,實驗工具不同類,落實結果一致(C)。
8. 背景觀念不一致,實驗工具不同類,落實結果不一致(X)。

首先,原型實驗和衍生實驗的背景觀念,就是實驗設計者的背景觀念,如同我們之前論述,背景觀念有兩個功能:設計實驗模型(決定使用什麼實驗工具或加以改良是其中一部分)與說明(或解釋)實驗結果。如此一來,我們有兩種結果:「實驗落實後的結果」(未經解釋的結果)與「經(背景觀念)解釋後的結果」。如何理解這兩種結果?根據陳瑞麟(2005),背景觀念不一致的科學家,也有可能觀察到一致的實驗結果(上述的類型5與7),因為他們有相同或極相似的可落實模型,但當他們逆推其背後的原因時,可能會產生不一致的高層理論模型——換言之,他們的背景觀念不一致。反

⁴ 其中的編號,B表示「背景觀念」,I表示實驗工具,C表示落實結果。BIC表示背景觀念一致、同類實驗工具、落實結果一致。以此類推。最後三者全不一致者以編號X表示。

過來說，背景觀念一致的科學家，也有可能觀察到不一致的落實結果（上述的類型 2 與 4）。在類型 4 的情況，因為他們採用不同類的實驗工具，可以把不一致歸給實驗工具，換言之，實驗工具造成觀察結果的不一致，但並不妨礙「經解釋後的結果」是一致的；但是在類型 2 的情況，他們採用同類的實驗工具，卻得到不一致的結果，此時他們有三種可能：一是將不一致的觀察結果，解釋為一致的，將問題歸諸於某個外來的、未經控制的因素；另一種可能是暫時擱置理論上的疑惑，從事進一步實驗來確認；第三種可能性是調整或改變背景觀念，換言之，在此種情況中，實驗前與實驗後的背景觀念不一樣——亦即類型 2 被轉變成類型 6。

啓發與傳衍：由於實驗的傳布，衍生實驗與原型實驗的傳衍關係也可根據傳衍的直接性而初分成「直接傳衍」(direct descent; DD) 與「間接傳衍」(indirect descent; ID)。如果 A 實驗啓發 B 實驗，則 B 實驗是 A 實驗的「直接傳衍」；如果 B 實驗進一步啓發 C 實驗，則我們說 C 實驗是 A 實驗的「間接傳衍」。當然 C 實驗是 B 實驗的直接傳衍。換言之，兩個具有「直接傳衍關係」的實驗，同時也具有「啓發關係」。「直接傳衍」可以指認「啓發」；「啓發」定義了「直接傳衍」。然而，我們可能想進一步問：在什麼歷史條件下或者在什麼歷史情境或脈絡下，一個實驗啓發了另一個實驗？在什麼意義下，我們可以說一個實驗是被另一個實驗所啓發？如果 A 實驗啓發了 B 實驗，則第一個條件是：(C1) 執行 B 實驗的科學家曾經吸收 A 實驗報告之後執行了 B 實驗；要不是有親身的接觸和溝通（或為師徒、或聽公開演講、或者曾在學術場合交換意見），就是透過公開學術的發表管道（期刊、書籍等等）。(C2) 滿足了 C1 條件之後，我們應該考察 B 實驗的背景觀念、實驗工具與落實結果，是否有任一項目與 A 實驗一致或相似？只要任一項目一致或相似，則

可判斷 B 實驗確實受到 A 實驗的啓發；(C3) 滿足了 C1 條件但是不滿足 C2 條件時（也就是上述第八種次類型），我們說 B 實驗受到 A 實驗啓發是因為它們企圖解決相同的問題，或者 B 實驗（背景觀念、實驗工具和落實結果均與 A 實驗不一致）企圖解決 A 實驗產生的新問題。

一般而言，歷史學家在討論實驗間的啓發關係時，著重於揭示 C1 條件；而科學哲學家著重於 C2 和 C3 條件。可是，不管是歷史學家或科學哲學家，在指認兩個實驗是啓發或直接傳衍關係時，他們都必須同時考慮這三項條件。歷史學家的工作較重視 C1 條件可以幫助科學哲學家辨識兩個實驗究竟是直接傳衍或間接傳衍？而科學哲學家對於 C2 和 C3 條件的考察，可以幫助歷史學家確認兩位歷史上曾互相接觸的實驗家，他們執行的相繼實驗是否確實有啓發關係。因為 B 實驗家曾經吸收 A 實驗報告，不必然表示 B 實驗就一定被 A 實驗所啓發。

實驗工具的分類：實驗是否使用同類工具，在傳衍關係的考察中，扮演重要工作。如此一來，「如何分類實驗工具」就變成必須面對的問題。我們得回答：由什麼標準，我們可以判斷實驗工具是同類的？在科學歷史上，實驗工具不斷地在改變演化，我們不太可能為實驗工具找到一個本質性的分類標準，我們只能採取家族相似的演化觀念。亦即同類的實驗工具是家族相似的，有其「原型」、「典型」的成員，它們做為決定「一類」的參考範例，但是同類成員與它們的相似有程度性的差異，因此有非典型成員，也有周邊的成員，但都屬於同一家族（同類）的成員。在這兒，我們要進一步採取歷史發展的觀點，來看待這個家族相似的結構，亦即「原型」、「典型」往往也是在歷史上較早出現、被視為「典範」、被模仿的成員。可是，還是有比「原型」更早誕生、啓發原型、但並不被視

為「典範」的成員，我們稱作「雛型」(embryonic form)，它是尚未成熟的成員。這意謂著，「原型」是最早的成熟型的成員。本於原型，實驗科學家和工具科學家會不斷地改良工具，新的工具改變了舊工具的某一部分，慢慢地，差異累積越多，越晚產生的工具與原型的差異越大，成為周邊的成員，最後有可能演變成全新類型的工具。總而言之，我們對實驗工具的分類，乃是基於如下理論：結合歷史發展、家族相似與原型等概念而構成的分類理論。

例示傳衍關係的類型：是否有科學史的實例，可以例示傳衍關係的八種類型？在下一節，我們將以早期電學實驗的歷史來進行更詳細的分析。在此，我們先簡短地為各種次類型舉例佐證。

1. BIC 型：如早期電學實驗有相當多的例子。

2. BI型：此類型的事例，往往會產生意外的發現。例如業餘科學愛好者康紐烏斯 (Andreas Cunaeus) 從穆金布洛克 (Pieter van Musschenbroek) 那兒學到電化水瓶的想法和工具，卻因不諳操作而產生可怕的結果，導致萊頓瓶 (Leyden phial) 的發明。又如十九世紀末荷蘭科學家倫琴 (Wilhelm K. Röntgen) 使用陰極射線管來做實驗，⁵ 卻意外發現X射線 (因為一片靠近射線管的感光片發出螢光)，從此他把陰極射線管包上黑紙來進行X射線的實驗 (Röntgen, 1969: 600-610)。

3. BC 型：在相同背景觀念下工作的不同科學家，使用不同的工具試圖印證相同的現象多屬此類。如杜費 (Charles Francois de Cisternay Dufay) 使用摩擦玻璃管進行導電實驗；而豪森 (Christian

⁵ 倫琴稱為「希托夫真空管」(Hittorf's vacuum-tube) 或「雷納德管」(Lenard's tube) 或「克魯克斯管」(Crooke's tube) (Röntgen, 1969: 600)。因為倫琴當時在德國跟隨昆特 (Kundt) 做實驗。其時陰極射線管並未被定名，因此倫琴冠上的人名都是一八六〇到一八八〇年之間，使用各種不同形狀的陰極射線管來進行實驗的科學家。

A. Hausen) 則繼承杜費的背景理念卻使用起電機來從事導電實驗，但實驗結果是一致的。

4. B 型：同一位科學家，使用不同的工具，來從事相同或相關現象的實驗，就屬於這類型。例如諾雷 (Abbé Nollet) 使用起電機來從事引燃火花的實驗，也使用萊頓瓶來從事引燃火花的實驗，後者卻會感受到強大的電擊。

5. IC 型：例如波以爾 (Robert Boyle) 在不同的背景觀念下，複製給呂克 (Otto van Guericke) 的硫磺球，從事摩擦起電實驗，並得到一致的結果。

6. I 型：對立的理論被提出來說明某一現象時，往往會產生這類型的關係。例如十九世紀末湯姆森在不同的背景觀念下，使用陰極射線管複製赫茲的偵測陰極射線電荷的實驗，得到和赫茲不一致的結果 (Chen, 2007)。

7. C 型：例如諾雷使用起電機進行電排斥實驗，而杜費摩擦玻璃管；他們都觀察到電排斥現象，但是背景觀念不同，工具也不同。

8. X 型：例如杜費的金箔實驗與豪斯比 (Francis Hauksbee) 的絲線實驗，就是從背景觀念、實驗工具到結果都不一致。可是，杜費企圖解決豪斯比的實驗留下的問題。

三、實驗的輻射發展模型

現在，我們可以提出一個實驗發展的基本模式，讓我把它稱為「輻射發展模型」或「發展的輻射模型」(a radial model of the development)。它是建立在「原型實驗」和「衍生實驗」的基本傳衍關係上。

一個實驗之所以能成為原型實驗，意謂有新的實驗被它所啓發，或者由它而衍生新的實驗。但是，這個新的實驗並不是循著一

個固定的關係或者一條固定的路徑而被產生，相反地，正因實驗有一個典型的結構，有背景觀念、實驗模型（以實驗工具為主）和物質落實三個主要的傳衍項目，每個項目都可能成為構思與設計新實驗的契機，成為新實驗發展的途徑或管道。各種途徑和管道形成衍生實驗和原型實驗間的不同傳衍關係。我們已在上節分析得到：原型實驗與衍生實驗可以有八種基本關係。如此一來，一個原型理論，可以沿著各種管道或關係而發展出一個新實驗，以做為原型實驗的衍生實驗；進一步，該衍生實驗也可以進一步沿著各種管道或關係而發展或衍生出第三代的實驗。如此不斷地延續下去。這樣的發展將呈現出輻射狀，其抽象圖示如下圖 2。

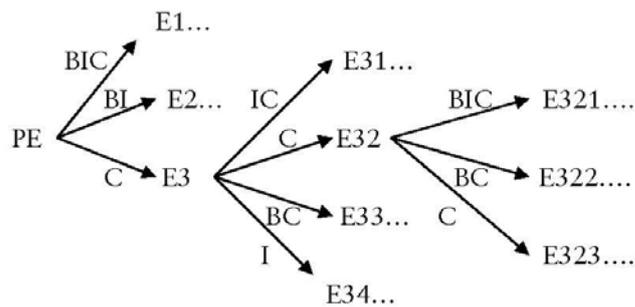


圖 2 實驗的輻射發展模型圖

其中，PE 是第一個原型實驗，E1, E2, E3 代表由 PE 沿著 BIC, BI, C 三種關係衍生出來的實驗；E1, E2, E3 都可以繼續衍生新實驗，上圖中所示為 E3 沿著另幾種關係而衍生 E31, E32, E33, E34 等。每個第三代的實驗都有可能再衍生第四代的實驗。如從 E32 衍生 E321, E322, E323 等。有幾點值得注意的是，首先，這個圖只是一個簡化抽象的示意圖，歷史上一個具體的原型實驗，其沿著哪幾種關係而衍生出哪幾種新實驗乃是變動不定的，但是一切都可以由我

們所建立的八種基本關係來分析。其次，建立一個實驗的輻射發展，要同時考察「直接傳衍」與「間接傳衍」，以建構一個實驗歷史的傳衍系譜。換言之，一個實驗的輻射發展系譜不只是一個根據分類原則而來的分類系統而已。事實上，當我們納入實驗的「世代傳衍」時，我們考察的就已不是單純的實驗分類系統。第三，一個實驗不一定「傳衍」(不管直接或間接)自單一個實驗，它有可能傳衍自兩個以上的實驗。它也可能「直接傳衍」自一個實驗，而「間接傳衍」自另一個實驗。

根據這個模型，我們就可以將歷史上的實際科學實驗，重建成一個有秩序的輻射發展圖像。每個階段或每個主題的實驗發展輻射圖像，同時也表徵了實驗在歷史上的發展系譜。因此，一個「輻射發展模型」的研究，也在於把歷史上的各種實驗重建成一幅實驗發展的輻射圖像。進而，我們在建構各種實驗發展的輻射圖像時，我們應該同時交代實驗間的發展路徑(是沿著背景觀念、實驗工具或實驗結果在發展的?)換言之，我們要使用 BIC, BI, I... 等類型標記來清楚地標示實驗發展的路徑，進而我們也要使用 DD (直接傳衍) 和 ID (間接傳衍) 的標記來標示實驗間的啓發和傳衍關係。

四、輻射發展模型的歷史意義

現在，有人可能想問，這樣一個輻射發展模型，除了把各種實驗加以分類之外，還有什麼歷史意義？首先，這個模型不是一個單純地根據實驗間的相似和差異來分類的階層分類系統，它考慮的是歷史上的實際啓發與傳衍關係，換言之，它結合了實驗的分類、演化與系譜的觀念。⁶ 其次，它建立一個實驗的結構，揭示演化發展

⁶ 再次使用達爾文的演化論來類比，本文所揭示的輻射發展模型，類似於建立在達爾文演化模型上的分類理論：演化分支分類學 (the cladist taxonomy)。它是一種考察

的基本路徑是「背景觀念」、「實驗模型」與「落實結果」的一致或不一致，這些基本路徑為實驗發展提供了某種可理解的、秩序化的規律或模式。第三，這樣的輻射發展模型蘊涵了一個實驗演化與發展的動力學 (dynamics)——一個同時涉及背景環境、個人思想與行為結果的動力學。打個比方，正如天擇是生物物種演化的動力，「輻射模型」主張科學家落實背景觀念的動機，以及落實過程中產生背景、個人思想與行為結果間的不配合或不諧調，乃是實驗發展與演化的動力——這個動力潛藏在實驗行為的結構中。

科學哲學家大多同意「異例」(anomaly)、「異常現象」(anomalous phenomena) 或「異常問題」(anomalous problem) 的出現，乃是科學理論發展的契機，科學家解決異例的動機乃是促成科學理論發展的動力之一。通常理論與檢驗理論的實驗之間不一致或不能配合，是異例的主要來源。勞丹 (Laudan, 1977) 則把一理論尚未解決但競爭對手已經解決的問題視為該理論的異常問題。不管理論發展的異例如何界定，異例也是推動實驗發展演變的重要動力。就實驗的結構來分析，實驗異例有六種來源：(1) 某個實驗結果與實驗者的背景觀念不一致，所以他企圖再做實驗，同時檢查實驗過程和背景觀念；(2) 一個實驗者的實驗模型與其他科學家的背景觀念不一致，所以企圖落實實驗來檢驗他們的背景觀念；(3) 一位實驗者的實驗結果與實驗模型的預測不一致，所以企圖再做實驗來找出問題。(4) 兩個實驗者的背景觀念不一致，所以企圖做實驗來裁決；(5) 兩個實驗者針對相同問題建立不一致的實驗模型 (含實驗

某一物種來自另一物種，以建立演化樹的分類理論；它重視一物種的來源或祖源，而不是根據一物種是否與另一物種在特徵上的相似和差異來分類。可是，多數物種與它的直接祖源的確會有特徵上的相似性。「輻射發展模型」結合了實驗來源與實驗間的相似性之考察。

工具)，所以企圖落實實驗來裁決；(6) 兩個針對相同問題的實驗結果不一致，所以企圖再做新實驗來裁決。

可是，異例並不是推動實驗的原始動力，事實上，如同實驗結構所示，「落實背景觀念」的動機或目的才是推動實驗發展的主要或原始動力。換言之，行為者（實驗者）透過行為（實驗）企圖落實（實現）自己的觀念或想法，證實自己的信念，因此他可以在執行一個與背景觀念一致的實驗之後，繼續設計另一個實驗模型，並加以落實，以便證實新的實驗結果也與自己的信念一致。如此可以強化（即印證）自己的信念。當然，實驗者極可能在落實自己想法的過程中遇到困難、產生異例（如上所述）。此時，解決異例的動機，推動了新實驗的設計與執行。然而解決異例的目的仍在於落實自己的觀念。當然，實驗者極有可能在整個過程中改變了自己的原初信念，但是他仍會想落實自己的新信念，以便證實他的選擇是對的。如果我們進一步問：為什麼實驗者要汲汲於落實自己的信念？答案可能是：如此做可以帶給他利益、或是可以伸張他的權力、或是迎合他的某種意識型態、或是滿足他的某種更宏觀的信仰等等。現在，讓我們把直接推動實驗執行與發展的目的稱作「直接目的」（direct end），而可能想透過「直接目的」來達成的進一步目的稱作「間接目的」（indirect end）。所以，「落實背景觀念」和「解決異例」可以是立即推動實驗執行的直接目的；而科學家達成這直接目的之後，或許想要進一步達成某個間接目的。

「背景觀念」乃是實驗結構中連結實驗者個人和他的科學、生活和文化背景的關鍵項目。我們也是透過「背景觀念」來連結「間接目的」。為什麼？因為實驗者的背景觀念主要來自他隸屬的科學社群、典範、研究傳統、理論家族等等，而這些社群、典範、研究傳統、理論家族等等科學背景，又可以連結到更宏觀的生活、政治、

社會和文化背景，它們提供了間接目的，引導直接目的。所以，「背景觀念」在本質上具有「群體」或「社會」的屬性；對照之下，「實驗模型」則是實驗結構中屬於實驗者的個人思想成分，「實驗模型」代表實驗家如何從群體性的背景觀念中建立自己的「實踐藍圖」，以便引導他去落實藍圖、具體實踐、執行實驗。經由上述分析，我們可以總結地說：一個「輻射發展模型的動力學」將會揭示實驗演化與發展的動力在於「群體」與「群體」（不同的背景觀念）、「群體」（背景觀念）與「個人」（實驗模型）、「個人思想」（實驗模型）與「行爲」（物質落實）、「行爲」與「群體」等兩兩項目之間的張力。

由於建立一個完整的「實驗發展的動力學」需要更多篇幅，以及更多歷史案例的佐證，讓我們把這個目標放到另一篇文章來完成。

參、近代電學實驗的發展歷史

孔恩認為近代科學似乎沿著兩條截然不同的路線而開展出兩個不同的傳統：一個是數學的傳統；另一個則是實驗的傳統。⁷ 第一個傳統往往又稱作「古典科學」(classical sciences)，其代表性的典型學科是天文學和力學；⁸ 第二個傳統則因為培根 (Francis Ba-

⁷ 孔恩 (Kuhn, 1977) 的〈數學傳統對抗實驗傳統〉(“Mathematical versus Experimental Traditions”) 這篇經典文章中，宏觀性地描繪了近代科學的兩個傳統的發展與對抗，並討論十七到十九世紀的大科學家和種種物理和化學學科，要被歸屬到哪個傳統中，以及兩個傳統的起源。大致而言，天文學、力學、和（幾何）光學是典型的古典數學科學中的學科；而氣體力學 (pneumatics)、熱學、磁學、電學和化學則是培根科學的學科。這兩個傳統當然有彼此相互借用或滲透之處，可是，一直到今天仍然有「理論的」和「實驗的」物理、化學、生物學的區分。孔恩的結論是，或許這個區分是根植在人性中。

⁸ 從古希臘以來一直到十九世紀初，今日所謂的物理、化學和生物科學等等，仍然被稱作「自然哲學」。天文學則屬於「數學」(mathematics) 的傳統，不同於自然哲學。

con) 的《新工具論》(*Novum Organum*) 的象徵意義而又稱作「培根科學」(Baconian sciences)，其代表性的學科則是磁學和電學。這兩個傳統沒有截然分明的界線，彼此也常互相滲透合作，但它們仍然可以被分辨出來。雖然數學傳統並不是沒有或很少使用實驗，像其代表人物如伽利略或牛頓都做了許多實驗，可是數學傳統的實驗往往在理論的引導下，或者是為了檢驗理論這目的而進行。相反地，培根科學傳統的實驗，大部分是在從事哈金所謂「創造現象」的活動。⁹ 尤其是熱、磁與電的實驗，創造了全新的科學領域，成為十八和十九世紀科學主要研究的對象。¹⁰

孔恩的圖像是否恰當？是另一個問題。現在，我們的問題是：電的實驗如何創造一個全新的科學領域？回答這個問題得立基在電的實驗如何發展、傳衍和擴張的回答之上。

沿用天文學—數學的方法到自然哲學處理的對象和領域上，大致出現在十六世紀末十七世紀初，伽利略乃是一位關鍵的、象徵性的科學家，所以有人把他稱為「近代科學之父」。數學化的自然哲學，最鮮明的標記應該是牛頓的鉅著《自然哲學的數學原理》(*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*)。至於「實驗的傳統」，在十七世紀時，則有「實驗哲學」(experimental philosophy) 一詞，為培根本人所用，而波以爾和牛頓也使用過這個詞。

⁹ 有一些實驗的主要目的是為了裁決長久爭議的理論，如望遠鏡之於托勒密和哥白尼的理論、空氣幫浦之於真空的存在與否；可是大多數實驗在先於可接受的理論說明之下而進行（當然，這並不意味完全沒有任何「背景觀念」），同時累積大量的觀察記錄，如吉伯特 (William Gilbert) 的磁石實驗和物質生電實驗、波以爾的熱學與化學實驗、虎克 (Robert Hooke) 的顯微鏡觀察、豪斯比 (Francis Hauksbee) 的種種生電、導電實驗等等。

¹⁰ 由於培根科學在十七世紀科學革命中的概念轉變中並沒有扮演什麼角色，所以一些重視理論和概念變遷的科學史家如奎黑 (Alexander Koyré, 1978) 和巴特斐 (Herbert Butterfield, 1958) 認為培根科學運動乃是個假象。不過，孔恩認為即使培根科學對於古典科學沒什麼貢獻，它卻產生了很多新的科學領域。

一、電學與電學實驗的起源

希臘人已經觀察到在乾燥的天候下，以羊毛織物摩擦琥珀之後，琥珀會吸引秣料、木屑一類輕微的小事物 (Electro- 這個字根即是來自希臘文的琥珀)。這種現象和磁石吸引鐵、重物掉落同被視為「超距作用」(action in a distance)，毋需接觸即可產生運動。在十七世紀之前，磁吸引和電吸引不僅被相提並論，而且往往被看成是同一種現象。一些中世紀經院哲學家把它們看成是不可說明的「玄奧性質」(occult qualities)，一些赫密斯主義哲學家 (Hermetic philosophers) 則乾脆以最廣泛的「同感」(sympathy) 和「反感」(antipathy) 來說明磁石對鐵的吸引和磁石彼此間的排斥 (Heilbron, 1979: 19-30)。在這樣的思想氣氛下，如果一個人問：「為什麼磁石能吸引鐵」？答案就是「因為磁石具有磁性」。如果要進一步問：「磁性又是什麼？」答案只能是「磁石的天性 (nature)」或「磁石之間的同感作用」。對於十七世紀的新哲學家來說，這樣的答案當然不能令人滿意。

十六、十七世紀之交，第一位對**磁與電**的實驗研究作出具體貢獻的人乃是科學家兼醫生的吉伯特 (William Gilbert, 1540-1603)，他往往也被視為培根科學的實踐者 (事實上，他的工作比培根的實驗哲學宣言要早二、三十年)。吉伯特於一六〇〇年出版《論磁石、磁體與地球這大磁體：一個新生理學》(*De Magnete Magnetisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure Physiologia Nova*)，¹¹ 一般

¹¹ 本文引證使用芝加哥大學出版社的英譯本，由Mottelay譯自拉丁文 (Gilbert, 1990)。關於physiology這個字，現代通譯或理解成「生理學」，即探討生物體生理作用之學問，其字根來自希臘文physis，即nature之意。physio-logy就其構字本義，乃指探討「物性 (包括無生物和生物) 的邏輯」。physics或physician都來自相同的字根。physics有它特別的歷史根源與流變，後被用於傾向研究「無生物的天性」的學問；而physiology傾向於研究生物的天性。physician則是精通physiology的專家。吉伯特

被科學史家認為是現代磁學與電學的開山之作。《論磁石》主要討論磁，然而吉伯特在第二冊第二章中花了不少篇幅來分辨磁與電的差異，並報告他對電的一些實驗結果——這也是近代電學研究的開端。正是因吉伯特區分與澄清磁與電的差異，磁學和電學的深入研究才能展開。

在某些方面，吉伯特仍然保有亞氏的思想的餘緒，他認為電吸作用來自質料 (matter)，而磁作用來自形式 (forma) (Gilbert, 1990: 30)。¹² 又因為磁具有指向性，所以吉伯特認為磁是一種生命力 (animate)，地磁則是地球的一種精神力或「磁魂」(Gilbert, 1990: 104-105; Westfall, 1977: 25-28)。¹³ 至於電則是純物質的，乃是電物體 (electrics) 在其表面散發出一種「水樣電素」(watery effluvium)，類似濕氣黏住輕物體般地吸引輕物體。¹⁴ 可是電吸引作用當然不同於濕氣的吸引作用，因為濕氣會破壞電吸引——濕琥珀無法吸引輕物體。進一步，吉伯特實驗發現不只是琥珀或硬臘等少數幾種物質才有電作用，事實上，石塊、玻璃、鑽石、翡翠、寶石等許多東西都是電物體。總而言之，區分電和磁、以「水樣電素」來說明電作用的原因、辨識出許多物體都是電物體這三點乃是吉伯特對電研究的重要貢獻。

吉伯特之後，電學進展緩慢，整個十七世紀一百年間，只有少

選用這個字，自然是因為他把「磁」理解成一種「生命力」。

¹² 嚴格說來，吉伯特認為磁不是一種吸引作用 (attraction)，吸引作用是物質性的，電吸作用為其典型 (當時尚未發現電斥力)。磁有吸引也有排斥，吉伯特以 *coition* (今天的字義是「性交」，吉伯特取其「交互作用」的意義) 來稱呼磁作用。可是，當時人們慣於以 *attraction* 來稱呼磁吸引。

¹³ 科學史家沃爾夫 (Wolf, 1999) 則幾乎完全沒有提到吉伯特對於磁本性的觀點。

¹⁴ 吉伯特將電物質的「水樣電素」和地球的大氣作類比。水樣電素吸引輕物，猶如地球大氣吸引重物。地球周遭的大氣 (air) 就是地球所散發的「氤氳」(effluvium)，此種氤氳作用「把重物體帶回」地表 (Gilbert, 1990: 32)。

量的電學研究與實驗。十八世紀上半葉雖有較多電作用的實驗，但一直到十八世紀上半葉為止，整整一百五十年間，電學一直不是科學家的焦點。按孔恩在《科學革命的結構》(Kuhn, 1970) 中的觀點，十八世紀中葉的富蘭克林 (Benjamin Franklin, 1706-1790) 的電流體理論成為電學典範之後，「電科學」才算是真正誕生。我們雖然不接受這個觀點，但是，電學研究從此突飛猛進也是史實。一直到十九世紀中葉之前，電與磁統一，進而與光統一。這不到一百年的時間，培根科學發光發亮。再過不到五十年，二十世紀來臨之前，電力已成為最廣泛使用、最強大的文明力量。

從吉伯特的《論磁石》經歐斯特 (Hans Oersted)、拜歐特 (Jean-Baptiste Biot)、法拉第等人的電磁現象建構，再到馬克斯威爾 (James C. Maxwell) 的電磁統一理論，共約二百七十年，電學和電磁學研究大致是實驗先於理論，是實驗在推動學科的進展。這段期間又可分成兩期，首先是一六〇〇年到一八二〇年歐斯特看到電流的磁作用為止，為電學時期；一八二〇年之後為電磁學時期。電學時期又可分成早期的靜電時期 (約一六〇〇到一七四〇年間) 與晚期的電流時期 (一七四〇到一八二〇年間)。靜電時期的實驗發展又可分成四階段：從摩擦生電到起電機 (electrical machine)、起電機與導電現象實驗 (experiments on conductive phenomenon) 的發展、靜電的吸引與排斥、萊頓瓶的發明與電的儲存。萊頓瓶的發明乃是電學從靜電時期過渡到電流時期的一個標誌。下文將以「實驗的輻射發展模型」來模釋靜電時期的實驗發展。

二、從摩擦生電到起電機

十八世紀之前關於電最主要的實驗，除了吉伯特摩擦各種物體，證實電物質的多樣性之外，就是真空中的摩擦生電之實驗。可

是，後一個實驗的主要目的是為了檢驗電本性的競爭理論，即吉伯特的「水樣電素」理論和卡畢歐 (Niccolo Cabeo) 的「稀化空氣吸引」理論。

一六二九年耶穌會士卡畢歐出版《磁哲學》(*Magnetic Philosophy*)，提出了電作用乃是稀化空氣而產生吸引作用的觀點與吉伯特的觀點競爭。卡畢歐區分四種「吸引作用」：第一種是標準的同感作用，如磁作用；第二種是由於重性 (gravity) 和輕性 (levity) (物體回歸其位置的天性) 之作用；第三種則是物體為了填補空氣被抽走時留下的空間而產生的作用，如電吸引；第四種則要透過媒介物，如以繩拉船。因此，摩擦琥珀之所以能吸引輕物體，乃是因為摩擦稀化空氣，使其附近的輕物體要填補空氣留下的空間而發生運動 (Heilbron, 1979: 180-183)。

從一六三〇年到一六七〇年代間，歐洲實驗科學家對於空氣的性質產生很大的興趣，一方面不僅促成許多工具如氣壓計 (barometer) 和空氣幫浦 (air pump) 的發明，二來也導致「氣體力學」(pneumatics) 這門新學科的誕生。¹⁵ 這些實驗與理論活動自然和當時「真空論」(vacuumism) 與「密實論」(plentism) 的爭議有關。¹⁶ 然而，不管是氣壓計或空氣幫浦，都可以創造出空氣被移除的空間，使得電學實驗家發現他們開始有可能來檢驗以裁決吉伯特和卡畢歐的觀點。根據卡畢歐的觀點，如果在移除空氣的環境下，不管

¹⁵ 後來的科學通史學家則把氣體力學視為力學 (mechanics) 的一個次學科。

¹⁶ 亞里斯多德與中世紀的漫步學派都主張密實論——自然界不存在「真空」，因為「自然厭惡真空」。十七世紀的微粒子哲學興起之後，哲學家雖然不同意亞氏與漫步學派的許多論點，但對真空論與密實論也沒有共識。原子論者堅持真空存在，因為原子與原子間的空隙就是真空；密實論者如笛卡兒堅持真空不可能存在，因為說真空存在等於說虛無存在，乃是個矛盾。微粒子與微粒子間的間隙，總是會有其它更小的微粒子來填滿。

再怎麼摩擦琥珀，電作用現象絕不可能發生。如果是吉伯特的觀點，就不會受影響。一六六〇年代左右，在不知波以爾的空氣幫浦的情況下，義大利的「西蒙圖學院」(accademie del Cimento) 以托里切利氣壓管 (Torricelli tube) 創造出一個空氣被移走的空間，在該空間內摩擦琥珀，結果沒有電作用發生。後來波以爾則使用空氣幫浦來創造「真空」，他卻觀察到電吸引作用了！卡畢歐的追隨者自然沒有同意波以爾，他們相信西蒙圖學院的「托里切利空間」比波以爾的幫浦抽掉空氣的空間更近於真空 (Heilbron, 1979: 193-208)。

總觀十七世紀的電學實驗，一直停留在摩擦起電的狀態中原地踏步，直到一六七二年給呂克的硫磺球起電裝置 (見下文) 的誕生。雖然一六六〇年代產生「真空中摩擦起電」的實驗，卻沒有明顯結論。事實上，這個實驗也可以說是十七世紀中葉主要的科學實驗——「氣壓與真空實驗」——的衍生實驗，其目的在於檢驗理論。起電機的誕生與導電現象的創造，才是標誌了電實驗超前於理論的開端。不管如何，從希臘人最初的摩擦生電實驗到西蒙圖學院和波以爾的真空摩擦起電實驗，我們仍可以建構一個發展關係如下圖 3：

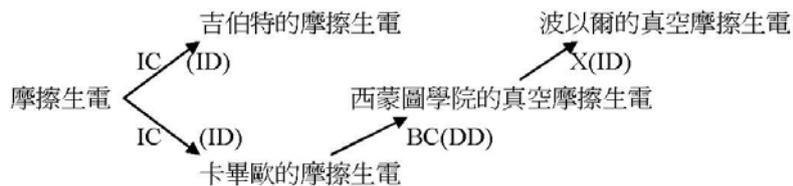


圖 3 摩擦生電實驗的輻射發展：從希臘人的摩擦生電到卡畢歐的摩擦生電，大致使用同類的工具，產生電吸引的現象。西蒙圖學院繼承卡畢歐的觀念，但嘗試在使用水銀氣壓管創造真空以摩擦生電。波以爾的觀念、工具和實驗結果與西蒙圖學院的實驗完全不一致，他的實驗也非直接傳衍自西蒙圖學院。

三、起電機、導電現象、與電排斥實驗的發展

繼摩擦生電之後，電學實驗的焦點無疑是導電現象與排斥現象的發現，與此兩發現同步進展的是起電機的發明與改良。起電機能產生比摩擦生電更強大的電力，有助於電學家們執行種種實驗與探測，於是我們很快地看到起電機被用來執行導電與排斥實驗。萊頓瓶發明之後，這個裝置也被納入起電機的構造中。但是，不管是導電與排斥實驗或起電機，都必須追溯到十七世紀的給呂克。

給呂克不僅是氣壓學上著名的馬德堡球 (Magdeburg sphere) 的發明人，也建構了最早的、雛形的起電工具——一個具有中軸的硫磺球 (見附圖 1)。可是，給呂克的背景觀念有著濃厚的生機論色彩，他建造硫磺球的目的，主要不是為了產生電，而是想模擬地球的種種「德性」(virtues)。因為給呂克相信地球擁有「行星魂或行星能力」(planetary souls or powers)，它們是一種「地球德性」(terrestrial virtues)，能對物體產生超距作用。這些德性是「保守性」(conservative，即重性)、「排斥性」(expulsive，使火和月球保持在一定的距離上)、「指向性」(directive，引導地球公轉)、「自旋性」(gyrational，使地球自轉)、「衝力性」(impulsive，即慣性)、「發光性、發聲性、發熱性」(virtues luciens, soni, and calefaciens，以上的光、聲和熱均為拉丁文) (Heilbron, 1979: 215)。在這種背景觀念下，給呂克使用一個球形玻璃瓶，注滿熱硫磺，冷卻後打破玻璃而得到一個硫磺球。給呂克相信它是一個具體而微的「小地球」，只要摩擦它，一些「德性」就會出現。最明顯的證據是它會吸引一些輕物體附著在其表面上，給呂克相信這是地球的「保守性」(換言之，給呂克把地球吸引地面物體的能力隱然地等同於靜電力)。其它種種德性，給呂克也一一展示。其中之一包括受激的硫磺球可以使一根羽毛懸浮在其上方，隨著硫磺球的移動而移動 (見附圖 2)，這一操作

導致日後發現了「排斥電性」。給呂克還拿了一根亞麻線，使其一端接觸硫磺球，結果發現另一端可以吸引秣料，這是最原始的「導電」實驗 (Heilbron, 1979: 216-218; Wolf, 1999: 304)。¹⁷ 可是，基於給呂克的背景觀念，我們不能說給呂克已經執行了貨真價實的電實驗。

英國的波以爾在得知給呂克的實驗後，也製作一個硫磺球，並做了幾個類似的實驗。但是波以爾是微粒子哲學的支持者，他背景觀念與給呂克相當不同，他並不認為硫磺球實驗的目的是在模擬地球的「德性」，他相信硫磺球像一種「電物體」(electrical body)。摩擦硫磺球能吸引輕物，是因為硫磺球表面會產生一種膠狀電素 (glutinous effluvium) (Priestley, 1966: 9; Wolf, 1999: 305)。如此看來，波以爾是在不同的背景觀念下，複製了給呂克的實驗。在歐洲大陸，深受笛卡兒影響的惠更斯 (Christiaan Huygens)，也製作了硫磺球，卻沒有成功，後來他改用琥珀球做實驗。惠更斯相信琥珀球吸引輕物，是因為看不見的電渦漩把物體帶到琥珀；琥珀球排斥羽毛，是因為兩股渦漩互相排斥。顯然惠更斯也是在不同的背景觀念下複製給呂克的實驗，但他的實驗模型與給呂克的實驗模型之差距就更大了。

繼給呂克和波以爾的硫磺球之後，英國皇家學會的豪斯比在十

¹⁷ 其中還有一個重要的現象是「電光現象」，也就是給呂克以手指接近受激的硫磺球，則在暗室中會發出光點，也會有噼啪聲。波以爾和豪斯比也曾在低壓狀態下摩擦生電，看到輝光現象。豪斯比在其起電機 (見附圖 3) 的中軸裝置兩個玻璃球，一個在另一個內部，利用空氣幫浦降低內部玻璃球的氣壓，摩擦外球外殼之後，會看到內球發出輝光。電與光的關係為何？後來電學家一直想努力實驗和說明這種電光現象，可是要到十九世紀下半葉才有理論上的統一，並導致陰極射線的研究與實驗。限於篇幅與重點，本文不將討論「電光現象」。

七〇六年發明第一台正式的原型起電機。他以玻璃球代替給呂克的硫磺球，而且使用皮帶、轉輪和曲柄來帶動玻璃球的旋轉，再手持織物接觸摩擦轉動的玻璃球，如此可產生更大的電力效應（見附圖 3）。後來歐洲大陸的電學家持續改良豪斯比的起電機，製造多樣外型，但其基本結構都是相近的。根據普里斯利（Joseph Priestley, 1966）的記載，我們可以把起電機的演變分成三個階段：(1) 原型階段：必須手持摩擦的織物，包括豪斯比和德國的豪森（見附圖 4）與法國電學家諾雷用來執行導電實驗的起電機（見附圖 5）；(2) 固定摩擦片的改良階段：把摩擦玻璃球的摩擦布片固定在機器座台上，實驗家不再需要手持摩擦布；如威爾森博士（Dr. Benjamin Wilson）的起電機。華生博士（Dr. William Watson）製造的起電機甚至可同時驅動四個玻璃球來發電（見附圖 6）。(3) 整合萊頓瓶的起電機：起電機被進一步地小型化、桌上化，使實驗家可以獨立執行實驗。此時為一七六〇年代之後，萊頓瓶早已發明，而且普遍為人所用。所以，起電機的設計者在第二階段的改良之基礎上，進一步地整合了兩個裝置，把摩擦玻璃球或玻璃瓶所產生的電，透過導體而引入萊頓瓶。如瑞德博士（Dr. John Read）和普里斯利的起電機（見附圖 7 和附圖 8）（Priestley, 1966: 106-118）。¹⁸ 讓我們把起電裝置的演變與傳衍關係整理成下圖 4。

¹⁸ 普里斯利是十八世紀法國有名的實驗科學家。他加熱硃砂而得到氧氣，但他相信燃素理論。他也做了許多電學實驗，對靜電吸引的量測也有貢獻。他寫了一本電學的歷史史著，幾乎可以說是第一本第一手的電學實驗科學史著。普里斯利所描述的起電機和蒐集的圖片，主要展示的是實驗裝置（工具）的演變。但實驗裝置是實驗模型的結構、也是實驗行為結構的一部分，裝置的演變同時也意味了實驗的演變。

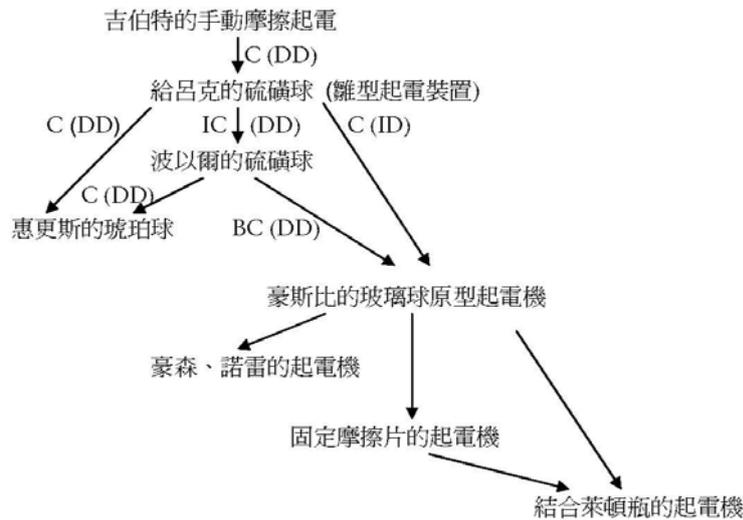


圖 4 起電機的傳衍關係圖：從吉伯特的摩擦起電到豪斯比的原型起電機，主要是實驗摩擦生電以產生吸引現象的實驗，所以實驗結果都是一致的。但是工具與關於此現象的背景觀念一直在改變。豪斯比的原型起電機發明之後，圖中所示為起電機的演變與改良。

從給呂克的硫磺球到普里斯利的起電機，約有一百年的時間。依孔恩的觀點看來，這是電學的「前典範時期」，科學家們對於電的本質眾說紛云，幾乎每個人都有自己的一套解釋。依蓋利森的觀點來看，他們共享相同的工具，而且持續到第一個電學典範（富蘭克林的電流體理論）建立之後。換言之，工具的持續可以跨越典範的變遷。不過我們想指出，這並不意味工具不會演變和改良。上文與圖 4 明顯地展示，以「家族相似的輻射模式」來理解工具的改良和演變是一個更好的方式。在本文的觀點中，工具只是實驗結構的一部分，我們必須繼續看起電機這工具被用來執行什麼樣的實驗。

豪斯比在英國皇家學會的支持下，能夠建造昂貴的設備來從事實驗，相比之下，一位職業染匠兼業餘科學家葛雷 (Stephen Gray)

只使用廉價的設備，就能為電學實驗帶來相當的貢獻——尤其是確認電的傳導現象。一七二九年，葛雷使用一根玻璃管，一端塞了軟木塞，摩擦玻璃管後，發現軟木塞可以吸引羽毛。葛雷因此猜測電是可以傳導的。他拿一根木棒，一端插入玻璃管端的軟木塞，一端則插著一個象牙球（做為電性的接收者），實驗後發現象牙球也可以吸引小物體。葛雷想知道究竟那些物質可以傳導電，所以他使用鐵線、銅線和麻繩來代替木棍，發現它們都可以傳導電。為了試驗電傳導的範圍，葛雷以麻繩來懸吊導電的麻繩，發現接收端不能吸引小物體了！後來改以絲線來懸吊，又可以傳導成功。葛雷原以為絲線較細、截面積較小，所以避免「電素」漏失。可是，當他用細銅線來懸吊導線時，卻發現傳導失敗。葛雷的實驗導致後來的電學家確認了「電物體」（非導體）和「非電物體」（導體）的區分。葛雷又使用圓環狀的導體做了幾個導電實驗（見附圖 9），其中一個隱然地預示了「電感應」（induction）現象（見附圖 9，導管末端位於圓環的圓心，圓環則能吸引小物體），但葛雷當然還沒有「感應」的觀念，他對此現象的說明是受激的「電素」可以躍過空氣，進入另一個導體中——讓我們把這實驗稱作「不接觸的導電實驗」。

法國電學家杜費是正式確認「電物體」和「非電物體」區分的科學家之一，他繼承了葛雷的觀念，也做了許多延續葛雷貢獻的實驗。他發現再怎麼摩擦金屬都無法使金屬（或非電物體）帶電，但金屬（非電物體）卻可以在接觸帶電物質後擁有強大的電性；可是要使金屬擁有強大電性，必須要使用沒有被激發電性的電物體來隔離才成。這樣的經驗被視為一條「規則」，又稱作「杜費規則」。許多電學家都確認此規則，直到萊頓瓶的發明，偶然地打破了這條規則。儘管如此，杜費規則與印證的實驗導致了後來的「絕緣體」（insulator）概念。杜費進一步發現很多物體，只是單純地靠近（而非接觸）帶電物體，也會產生電性，但是他並未區分「傳導」和「感

應」這兩者，因為他繼承葛雷的觀念，相信不管是接觸或靠近都是由於「電素」受激而進入物體中。必須一提的是，從葛雷確認傳導現象以來，電學家們想像的「電素」——負荷電性的細微物質，有時又稱為電流體——已經被想像成為可以流動的「電材質」(electrical matter)。

德國第一代電學家伯斯 (Georg M. Bose) 約在一七三七年時得知杜費的論文，他重做各種實驗，發現結果十分正確。他又偶然地發現豪斯比的機器可用來從事杜費的導電實驗，傳導棒與豪斯比起電機的結合，成為之後三、四十年間電學實驗的標準配備。伯斯在電學實驗上的另一個貢獻是，他曾經嘗試電化一個瓶中的水，再以手指或劍尖靠近而引出火花。這個實驗可能啟發了萊頓瓶的發明。另一位同時期的德國電學家豪森也約莫在一七四三年時使用豪斯比起電機來執行葛雷和杜費的實驗。¹⁹ 除了使用人體當導體同時摩擦起電外，他並沒有什麼新的發現。不過，他以渦漩理論對於電現象的機制做了相當的思辨：當電物質受激時，電素會從孔隙中發散出，但受到空氣的阻抗而呈現渦漩運動。如果兩個物體有強度不等的電素渦漩，就會互相吸引；如果渦漩強度同等時，就會彼此排斥。顯然，豪森繼承了惠更斯的渦漩理論 (Heilbron, 1979: 271-272)。

諾雷曾是杜費的助手，在杜費去世之後，成為法國的首席電學實驗家。杜費不曾使用過豪斯比式的起電機，諾雷起初也沿用杜費的玻璃管來從事實驗，一七四五年時他從德國的豪森和伯斯那兒知

¹⁹ 伯斯與豪森兩人，誰先使用豪斯比起電機來執行葛雷和杜費的實驗？誰影響了誰？或者各自獨立的發明？海布隆 (John L. Heilbron) 做了一點小討論。豪森比伯斯年長一點，從一七二六年起在萊比錫大學教書，而伯斯在一七二〇年間在萊比錫大學讀書，然後一直在那裏教書，直到一七三八年，似乎可能當過豪森的助手。可是，伯斯在一七三七年就使用豪斯比的起電機，而且宣稱他首度把它拿來做葛雷和杜費的實驗。豪森卻從未做過這種宣稱 (Heilbron, 1979: 270-271)。

道了豪斯比式的起電機，於是不休不眠地建構了一大台型的起電機(如附圖 5)，並重覆許多葛雷、杜費所做過的實驗。可是，諾雷對電學的重要貢獻在於他企圖為迷惑之前電學家的許多現象提出一個統一的理論說明，並以實驗來展示他的理論是可行的。諾雷肯定一種環繞在帶電物體周遭的「電氣」(electrical atmosphere) 之存在，正如地球的大氣一般。他進一步假設這種「大氣」是在電微粒受摩擦後，從表面的孔隙中噴出，形成圓錐狀的「噴出流」(effluent flux)。諾雷安排了一個實驗來證明。他把細粉末灑在一根傳導棒的週遭，當摩擦起電之後，電傳至導棒，細粉末在導棒表面上跳躍。諾雷認為粉末的跳躍指示了圓錐狀的電氣「噴出流」，他將這實驗畫成一幅示意圖(見附圖 10) (Heilbron, 1979: 282-283)。

從給呂克的原始導電實驗，到諾雷的初步理論說明，導電實驗的發展可以被圖示如下：

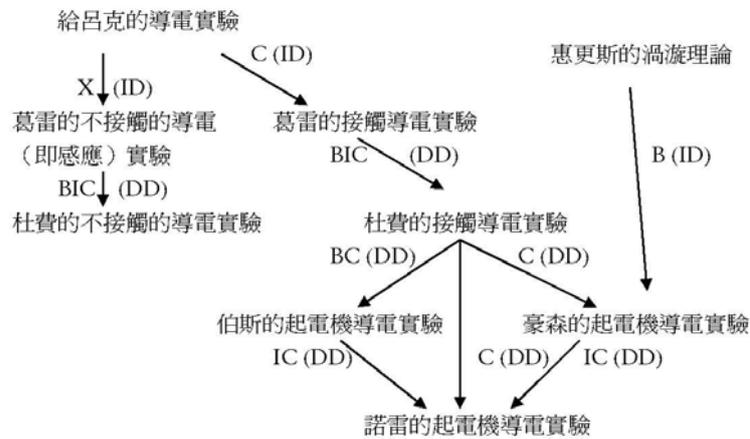


圖 5 導電實驗的傳衍圖：給呂克並未直接啟發葛雷的接觸導電與不接觸(感應)導電實驗。接著從葛雷、杜費到伯斯，繼承的是波以爾的膠狀電素觀念，豪森則從惠更斯那兒繼承了渦漩的觀念，諾雷進一步提出自己的「噴出流」與「吸入流」的理論假設。

已經展示了導電實驗的發展傳衍之後，讓我們考察電排斥實驗。

豪斯比曾觀察到小銅片起先被摩擦後的玻璃球或玻璃管所吸引，旋即被排斥，而後再度被吸引，如此反覆發生，彷彿在舞蹈一般。他做了一個木環箍，懸掛一些絲線（如附圖 3 的 Fig. 1），使其環繞一個自旋的玻璃管。豪斯比原本預期玻璃管產生的電素會將絲線吹開（如附圖 3 中的 Fig. 2），結果沒料到絲線卻直挺挺地指向玻璃管或玻璃球的軸心（如附圖 3 中的 Fig. 3, 4, 7）。豪斯比又嘗試以手指碰觸絲線末端，觀察到它們立即萎縮。後來豪斯比把絲線安排在玻璃球的內部，旋轉摩擦玻璃之後，發現絲線直立如像輪胎輻輳一般（如附圖 3 中的 Fig. 5, 6）。這些現象在在都令豪斯比迷惑，因為他繼承的主要是波以爾的「膠狀電素」的觀念。膠狀電素用來產生電吸力。但是，如何說明絲線在自旋的玻璃球外部與內部的行為呢？又要如何說明排斥的現象呢？豪斯比一直難以形成一個完整的理論，但是他相信「排斥」只是電素和空氣相互作用所產生的偶然結果，這有時也被視為一種「雙流體」（double flux）的理論版本（Hankins, 1985: 59; Heilbron, 1979: 231-234, 237-238）。

杜費從一七三三年起著手想解決豪斯比留下的謎團。他首先以小金箔來實驗，發現金箔未帶電時，會被摩擦後的玻璃管吸引；但一旦金箔帶電之後，就會被排斥。後來杜費又發現此接觸玻璃的帶電金箔，會被摩擦後帶電的樹脂吸引。反過來，金箔接觸摩擦的樹脂後，會被排斥，但卻被帶電的玻璃吸引。這種實驗引導他確認了兩種電性的存在：「玻璃電」（vitreous electricity）和「樹脂電」（resinous electricity）。杜費一度認為這兩種電性乃是電物質（electrics）的內在特徵，與用什麼東西來摩擦無關（Heilbron, 1979:

255-258)。後來卡頓 (J. Carton) 與威克 (J. C. Wilcke) 的實驗也顯示這兩個名稱有些誤導。以適當的材料來摩擦玻璃，可使它帶有「樹脂電」；反之，用不同的材料摩擦樹脂，也可使它帶有玻璃電 (Wolf, 1999: 218)。從此科學家確認存在兩種不同類型的電性，杜費的繼承者諾雷則嘗試提出一個流體理論來加以說明。

諾雷所面對的問題是：為什麼金屬薄片 (非電物質) 首先會被帶電物體所吸引，繼而接觸後被排斥呢？之前在說明導電實驗時，諾雷已經假定有電微粒會噴出，但電微粒瀰漫在環境中，為了補充電物體內的損失，必須從環境中吸入電微粒，從而形成「注入流」(affluent flux)，其方向與「噴出流」相反，它是由外朝向電物體表面的孔隙快速直線注入。「噴出流」呈圓錐狀發散而出，「注入流」卻是平行注入。因此，一開始金屬薄片受到注入流的引導，被吸向帶電物體。當接觸之後，金屬帶電，也開始發散「噴出流」，將它自己推開帶電物體 (見附圖 11)。可是，這樣的理論要如何說明杜費所確認的兩種「電物體」——「玻璃電物體」與「樹脂電物體」呢？諾雷以噴出流和注入流的強弱來說明。樹脂電物體受激時，注入流較強；而玻璃電物體受激時，噴出流較強。所以金屬與帶電樹脂接觸後，注入流較強，會受帶電玻璃吸引 (帶電玻璃的噴出流恰好注入金屬)，反之亦然。此外，在電中性的物體中，噴出流和吸入流較好保持平衡。這個觀念後來發展成「電荷守恆」的原則。諾雷之後，電學開始進入富蘭克林的時代。

富蘭克林假設帶電物體內有一定的電量，當受激時，其電量會改變。杜費所謂的玻璃電物體的電量會過多 (所以用「加電」(plus, + e) 表示)，樹脂物體的電量則會減少 (用「減電」(minus, - e) 表示) (Whittaker, 1989: 47)。換言之，富蘭克林提出了一個電的全新理論。可是從諾雷理論 (早期電學理論的終點) 到富蘭克林的理論

(新的電學理論之開端)，中間還有英國華生的電乙太增減的假設以及萊頓瓶這種工具的發明與實驗（包括諾雷、華生還有富蘭克林，都對萊頓瓶做了許多實驗）——更詳細的說明是下一小節的主題。

在整理給呂克到諾雷的電排斥實驗之傳衍圖時，我們也要稍提德國的豪森。如同先前討論導電實驗中所述，豪森在不同的背景觀念下，以起電機重做了杜費的實驗——包括排斥實驗，但他並未做出什麼新奇的結果。

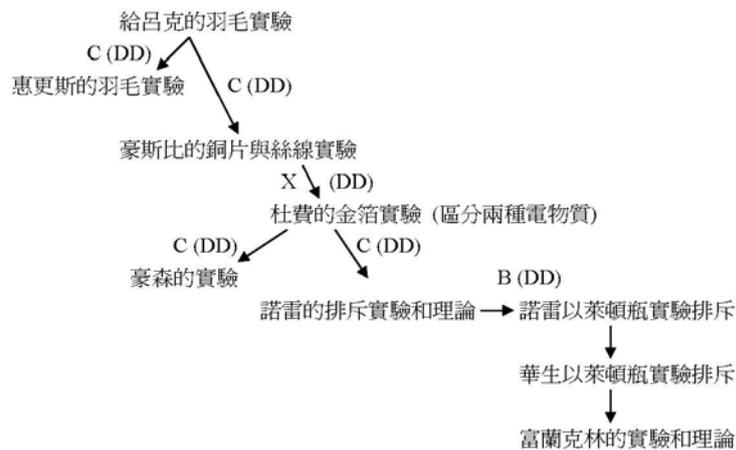


圖 6 電排斥實驗的發展：豪斯比的銅片與絲線實驗到杜費的金箔實驗，乃是一個較大的「斷裂」，即觀念、工具和結果均不一致。諾雷則在自己的理論假設下，使用起電機來從事排斥現象的實驗，進一步使用萊頓瓶來實驗。更詳細的萊頓瓶實驗傳衍圖見下文。

四、萊頓瓶的實驗與電的儲存

萊頓瓶不是一人一時一地的發明。大約在一七四五到一七四六年間，由荷蘭萊頓大學出身的幾位學者，各自獨立地發明了它。最

早一位是曾經在萊頓大學讀書的普魯士人克萊斯特 (Ewald Juergen von Kleist)。克萊斯特認為帶電物體引發的火花強度，應與受電化的物質量成正比，所以他把一根連結導體的導線插入一個絕緣的、充滿水的玻璃瓶中，對他而言，這只是增加導體質量的方便方法。只要他把玻璃瓶接地，他就能產生一個「萊頓瓶」，但他的目的在於增強火花，所以他認為必須遵守「杜費規則」。

克萊斯特稍微改變一下裝置，他把一根釘子插在裝水的窄瓶上，想引起火花來點燃酒精。他在瓶中加入一點酒精，把電引入釘子之後，移除起電機後，發現釘子上會產生火焰。克萊斯特想到他可以因此製造一個手提的點火器，所以嘗試手持瓶子到另一房間，再以手指接觸鐵釘來引發火花。令他驚訝的是，一旦把瓶子放在桌上，就無法產生火花，只有拿在手中，才可以產生火花。後來克萊斯特更試著手握瓶子，在電化的同時用手指接觸鐵釘，卻感受到強烈的「電擊」。可是，克萊斯特並未認知他的發現之重要性，也不能掌握他的實驗的正確方向——他的焦點都放在如何使「點火器」運作之上 (Heilbron, 1979: 309-312)。

克萊斯特把他的實驗告訴一些朋友，傳到葛拉特 (Daniel Gralath) 和溫克勒 (Johann H. Winkler) 耳中，他們改良了克萊斯特的實驗。葛拉特安排二十人手牽手，每個人都同時感受到電擊。其中一個實驗是要一些朋友，每人都拿一個克萊斯特瓶，同時手持一根短線，另一手摸著起電機導體；另一人則同時伸手握住每根短線，再用另一手接觸導體，結果感受到更強大的電擊。溫克勒則把一根鏈纏繞在一些克萊斯特瓶外，通到一張可導電的桌上，再從桌上伸出一根金屬棍，與起電機的導體形成一個小間隙，稱作「火花溝」(sparks gap)。當轉動起電機時，同時產生火花與巨響 (Wolf, 1999: 222)。

約從一七四二年，萊頓大學的穆金布洛克 (Pieter van Musschenbroek) 開始著手實驗伯斯的觀念：從帶電的水中引發火花。穆金布洛克是專業的電學家，自然不會忘掉玻璃瓶下的絕緣體。他重複著克萊斯特所研究的東西：火花的強度。偶然地，一位喜好新奇玩意的律師，康紐烏斯，在一七四六年時拜訪穆金布洛克的實驗室之後，著迷於伯斯的點子。他在家中重做此實驗，但是由於不是專業的電學家，也不知道什麼「杜費規則」，他很自然地手持瓶子，在充電時，用另一手接觸鐵釘——從此就把伯斯溫和的火花產生器轉變成可怕的萊頓瓶。

穆金布洛克在知道康紐烏斯的報告之後，很快地重做實驗，心有餘悸地在寫給巴黎學院 (Paris Academy) 的黎穆爾 (René Réaumur) 的信中，記下他的可怕經驗。他的描述十分專業精確，正式標誌了萊頓瓶的誕生 (見附圖 12)。諾雷從黎穆爾處得知穆金布洛克的實驗，立即印證該實驗的效應，也正是諾雷，把產生這種效應的瓶子稱作「萊頓瓶」。萊頓瓶對當時流行的各種「電本質」的理論構成了挑戰。因為如果萊頓瓶只是普通的導體，為何會產生前所未見的電擊震撼？比起電機所產生的觸電感受更強得多。電學家也很快地觀察到充電之後的萊頓瓶，經過一段時日，仍然可以產生觸電的效應。為何萊頓瓶未經摩擦和導電，就能發出電力的效果？如果電是「流動的電素」，它究竟如何被保存在萊頓瓶內？不會流失散逸？萊頓瓶為什麼又違反當時大家公認的「杜費規則」呢？即不以絕緣體隔離瓶身，反而使瓶底接通地面，卻能產生強大的電力？

萊頓瓶也對諾雷的「噴出流」和「吸入流」理論構成挑戰：要如何使用這個理論來說明萊頓瓶的強大電力呢？諾雷假設當實驗者手持萊頓瓶時，萊頓瓶表面有一股「噴出流」，從地面通過手持者的身體而噴入地面，反過來，有一股注入流從身體注入萊頓瓶。

另一方面，手指接觸導體時，導體的噴出流注入身體，而身體有注入流注入導體。身體兩端同時有電素的噴出和注入，以致產生強大的震撼感覺。但是，為何萊頓瓶能保存電性？此時電性只是注入而不噴出嗎？裝水的玻璃瓶究竟有何特殊之處，能產生保存電性的效果？如果以絕緣體來隔離萊頓瓶時，以手指碰觸萊頓瓶口的鐵釘能產生火花、卻不會觸電？凡此種種，都有諾雷的理論難以交代之處。所以，諾雷傾向於把萊頓瓶的現象看成是個例外，是「自成一種」的現象 (Heilbron, 1979: 312-316)。

儘管理論上有所困難，實驗上有受到電擊的恐懼感，電學家包括葛拉特、溫克勒、華生、威爾森、勒蒙內爾 (Louis-Guillaume Le Monnier) 等人仍然努力地從事種種實驗以探索萊頓瓶的奧秘。這些實驗可以大致分為四類：瓶的性質、能產生電擊的迴路有多大、電擊的傳播和傳播速度、如何弱化萊頓瓶的電擊效應。關於第一點，葛拉特、威爾森和華生最後確認了玻璃瓶壁越薄，電擊的效果越大。關於第二點，諾雷、葛拉特、勒蒙內爾、華生等人，都曾使上百人感受到電擊；葛拉特已試驗並聯和串連萊頓瓶的效果。關於第三點，勒蒙內爾和華生想以碰觸導體產生火花和感受電擊的時間差來判斷傳播的速度 (見附圖 13)，發現根本沒有時間差，他們只能結論電性傳播的速度太快了。最後一點，後來的電學家試著使用金屬導線接地的方式，使萊頓瓶的電力一點一點地減弱 (Heilbron, 1979: 317-323)。

種種關於萊頓瓶的實驗，在富蘭克林的手中改良，並導出一個恰當的理論說明。在討論富蘭克林之前，我們也有必要先瞭解華生的假設。華生主張有一種微妙、精細的電流體，充滿地球上的每個物體，在自然狀態中，每個物體含有的電流體密度是相同的 (電流體守恆原則)。由於某些外力，會使得一些電物體擁有較高的密度，

一些則較低。高密度的為「正電」、低密度為「負電」²⁰ (Whittaker, 1989: 46)。爲了說明萊頓瓶的神奇現象，富蘭克林也提議正負電、電流體守恒以及「萊頓瓶像空氣幫浦」等觀念，並加上「電火（電流體）不能穿透玻璃」的假設。正因爲電不能穿透玻璃，當爲萊頓瓶充電時，電就累積在萊頓瓶口的金屬棒內，不會由玻璃瓶流失。可是，又因爲萊頓瓶像空氣幫浦，當它的瓶口的金屬棒被充電時，反而會同時把瓶身的電流體抽取到金屬棒處（帶「正電」）。一旦起電機不斷地從導線中輸入電時，瓶底就依比例地損失電量，所以帶「負電」。整個運作過程如下：假設一開始不帶電時，共同電量是 20，當瓶口金屬棒的電量變成 21 時，瓶底的電量就變成 19，直到最後金屬棒的電量 40，而瓶底電量爲 0 (Wolf, 1999: 229)。在充電完成的狀態下，萊頓瓶的電量差距，無法由其內部來回復平衡，因爲玻璃是電流不透的。可是，如果以一個非電物體（即導體）同時接觸瓶口金屬與瓶底兩端，瓶口金屬就透過導體流到瓶底，恢復原來的平衡不帶電狀態。所以，一旦以手接觸瓶身、腳踏地面，一方面萊頓瓶底的電流體會透過身體流入地底；另一方面，一手接觸瓶口，也會使得金屬棒的電量流入身體，補償瓶底的損失，使得人體感受到強大的電擊。

富蘭克林也設計了幾個實驗來印證他的理論。他首先在萊頓瓶底部裝置一根像老鼠尾巴的導線，末端有一金屬球（見附圖 14 Fig. I）接著把萊頓瓶放在一塊蠟上絕緣隔離，再用一根絲線懸吊一小塊軟木塞，來回地碰觸「鼠尾」與萊頓瓶口的釘頭，軟木塞可以一點一滴地從釘頭引出「電火」，傳送到「鼠尾」，最終使得萊頓瓶回復未充電前的平衡狀態（因此不再擁有電性）。富蘭克林使用不同的

²⁰ 富蘭克林是透過另一位史賓塞博士 (Dr. Archibald Spencer) 而間接得知華生的實驗。

方式來做類似的實驗，例如以一根絕緣體夾住金屬線，同時碰觸萊頓瓶口金屬端和瓶底，最終使萊頓瓶不再帶電（見附圖 14 Fig. III）；又如用一根導線連接瓶底和瓶口金屬端，在一段時間後，萊頓瓶不再帶電（見附圖 14 Fig. IV）(Heilbron, 1979: 330-334)。

一個萊頓瓶的發展系譜圖可以重建如下：

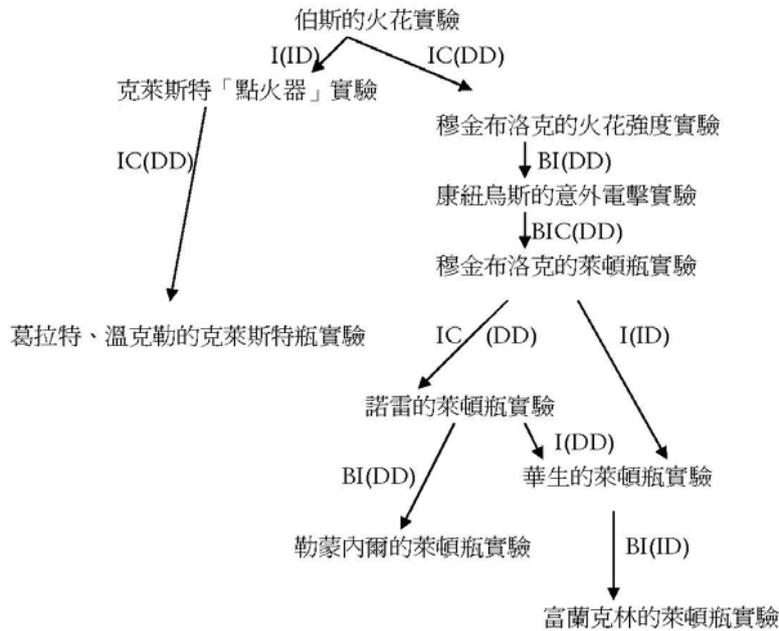


圖 7 萊頓瓶實驗的發展傳衍圖：本圖所展示的是同類工具的實驗傳衍，可以看到在克萊斯特和康紐烏斯時，發生了實驗結果的不一致。其後，電學家都以萊頓瓶從事新型實驗，以產生新的結果，而且對萊頓瓶工作之理論說明，也不斷地在變動。富蘭克林雖然繼承了華生的一些背景觀念，但是他其實發展了一個全面完整的電流體理論。

富蘭克林的實驗和理論，將電學導向一個全新的階段。在說明萊頓瓶的工作原理之理論模型之下，富蘭克林建立一個「單流體理

論」(one-fluid theory)，主張所有物體內部的電流量，在正常狀態下是固定的，呈現電中性。一旦電流量超出此固定量，就呈現正電性；少此於量，就呈現負電性。正如水流總是趨於水平面的平衡一般，大自然所有物體內的電流量也總是趨於固定平衡的狀態。如此一來，一旦兩物體同時帶正電性或負電性時，自然會互相排斥；電吸引也不是物體發出電素產生的作用，而是電流量趨向平衡的本性所產生的效應。

肆、結論：反省電學實驗歷史的書寫

本文已經花了相當的篇幅重建了早期電學實驗的歷史。我們的重建的歷史材料來自於普里斯利、吳爾夫 (Abraham Wolf)、惠塔克 (Sir Edmund Whittaker)、海布隆 (John L. Heilbron) 等科學史家的史著。我們所展示的事件，都已經在這些著作中有詳細的交代，既然如此，還有什麼重建這些歷史插曲的必要性？我們重建之後的電學實驗歷史，又和上述的科學史著，有什麼重要的差別？

最重要的差別當然是本文建立了「實驗的輻射發展模式」，透過實驗結構 (背景觀念、實驗模型與工具和落實結果) 的不同項目來分析實驗的傳衍，這也是一種科學實驗的系譜學 (genealogy) 或演化論 (theory of evolution)。它的獨特性只有在我們進一步比較上述諸本科學史著的寫作模式時，才能被彰顯出來。

大致說來，上述史著都是採取傳統的編史學寫作，根據「科學發現、實驗、理論」發生的年代先後順序，一一記載描述。這樣的寫作風格，反映出科學史家背後的「發現進步史觀」。而科學史家的寫作風格又體現在史著的章節編排結構之上。所以，讓我們針對上述幾本史著的編排結構，做更進一步的分析。

十八世紀科學家普里斯利寫作的《電的歷史與現前狀態》(*The*

History and Present State of Electricity) 乃是一本珍貴的、第一手的科學史著。共有兩冊，第一冊從吉伯特開始直到普里斯利之前的電學歷史，第二冊則是普里斯利自己對於電學的理論和實驗研究。以下的分析自然是對準第一冊。普里斯利的焦點在於「電現象的新發現」，他把吉伯特以來的電學實驗與發現，畫分成十「期」(period)，第一期為「豪斯比先生之前的電性實驗與發現」，此後從第二期到第七期，都是重要電學家的「電性實驗與發現」，依序為豪斯比、葛雷、杜費、葛雷的延續與結論、迪沙古里爾 (Jean T. Desaguliers)、德國人華生博士的實驗。第八期開始討論萊頓瓶的發現、第九期是富蘭克林的實驗和發現、第十期是富蘭克林之後到一七六六年的諸多電學家的實驗。由此可見，普里斯利所書寫的是「科學發現的編年史」，以每個科學家的發現為中心 (唯一的特例是第八期以重要的工具——萊頓瓶——的發現為核心主題)，呈現出一幅線性的、不斷累積進步的科學發現圖像。普里斯利的寫作格式，相當程度地被後來的電學史家所繼承。

吳爾夫的《十八世紀的科學、技術和哲學史》(*A History of Science, Technology and Philosophy in the 18th Century*) 是一套科學通史鉅著中的第二冊，第一冊是《十六、十七世紀的科學、技術和哲學史》。他採取二十世紀的學科分類方式，將十八世紀科學分成「數學」、「力學」、「天文學」、「天文工具」、「海洋工具」、「物理學：光與聲」、「物理學：熱」、「物理學：電和磁 (I), (II)」、「氣象學」、「氣象工具」、「化學 (I), (II)」、「地質學」、「地理學」、「植物學」、「動物學」、「醫學」，每門科學、即每個標題一章，共佔十九章。接下來是技術的部分，共有八章；最後五章是「心理學」、「社會科學」和「哲學」。本書實在是一套驚人的人類思想、知識與技術活動歷史的百科全書。在此當然不可能全

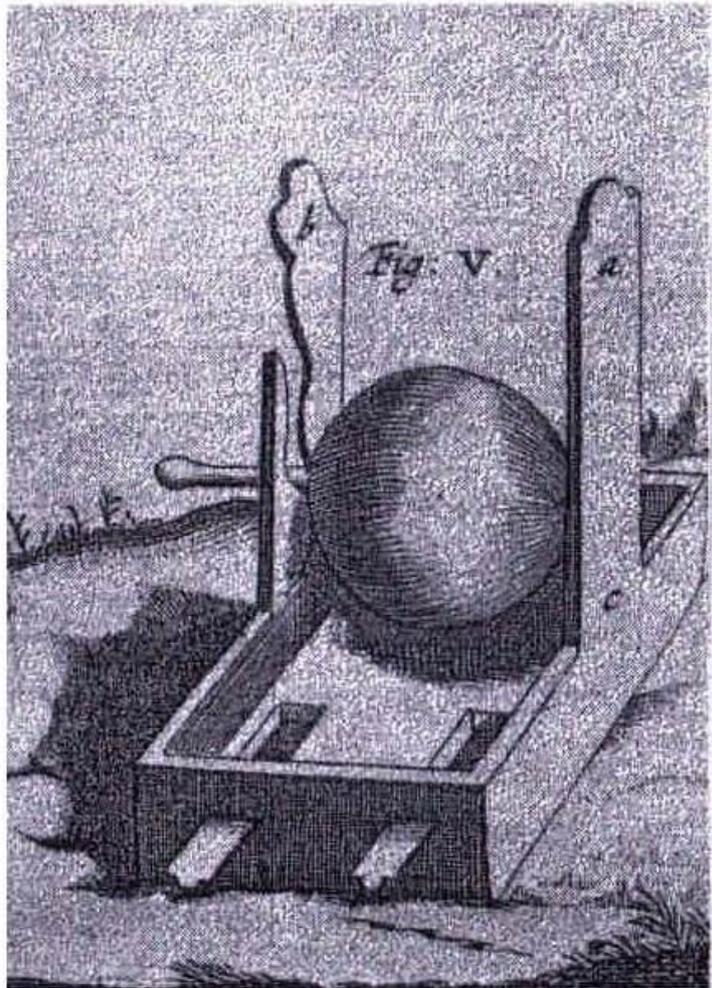
面評述吳爾夫的鉅著，與本文相關的是第九章「物理學：電和磁 (I)」。吳爾夫將此章分成「A. 摩擦電性：豪斯比、葛雷、迪沙古里爾、杜費、起電機、萊頓瓶、電的本質、富蘭克林」、「B. 感應與火電性 (pyro-electricity)：阿匹紐斯 (Aepinus)」。第十章則是「C. 靜電力學」。吳爾夫的寫作也可以說是一種「主題史」，以「科學家」和「工具」為主題分類的單元，重要的科學家與重要的工具都可成爲一個獨立的單元。值得注意的是，吳爾夫在討論「起電機」和「萊頓瓶」時，已經運用了演化的觀念，而且在討論十八世紀重要的電學家時，吳爾夫是以他們的實驗和重要的觀念爲描述重心。吳爾夫的寫作隱然地預設了一個發展的秩序，爲本文的重建提供了相當重要的資源，儘管如此，他的鉅著仍然缺乏一個明確的「發展模型」。

相較之下，惠塔克的《乙太與電理論的歷史》(*A History of the Theories of Aether and Electricity*) 是一冊描述「光」、「乙太」(被視爲光的傳播工具)與「電」這三個重要的科學觀念之「觀念史」，其寫作模式也是傳統的編史學。可是，惠塔克以介紹觀念和理論假設爲主，幾乎完全沒有討論實驗，就十八世紀電學發展的歷史而言，其實是相當偏頗的。因此，在以「電學實驗的發展」爲主題的本文中，惠塔克提供的重建資源很少。

最後一本史著是海布隆《十七與十八世紀的電》(*Electricity in the 17th and 18th Centuries*)，它鉅細靡遺地交代了十七和十八世紀電學實驗與理論的歷史，乃是本文重建最倚重的材料。但是，海布隆的寫作模式是「混雜型」的。海布隆引證了驚人數量的原始科學文獻，使得此書可以說是第一手科學文獻的原始重建。與本文最爲相關的是第三部分「大發現」和第四部分「富蘭克林的時代」，從第八章到第十四章，章名分別爲「豪斯比與葛雷」、「杜費」、「萊

茵河彼岸的電」(討論德國的電學實驗)、「杜費之後，在法國的電」、「葛雷之後，在英格蘭的電」、「電容器的發明」(即萊頓瓶)、「富蘭克林」。很明顯地，我們說海布隆的「混雜型書寫」乃是指他以主題——「科學家」和「實驗」(電容器的發明)——為主，卻又揉入了地理區域的區分。而且海布隆在寫作每位主題科學家時，都會介紹他們的生平。我們可以理解海布隆想納入一點傳記、一點思想背景的影響、一點主題內容、一點科學思想與實驗的地理傳播，從而構成本書的面貌。可是，這樣的揉和或混雜，也使得本書的可讀性大為下降，它會給人一種煩悶、跳躍、斷裂、瑣碎、失焦的閱讀感。

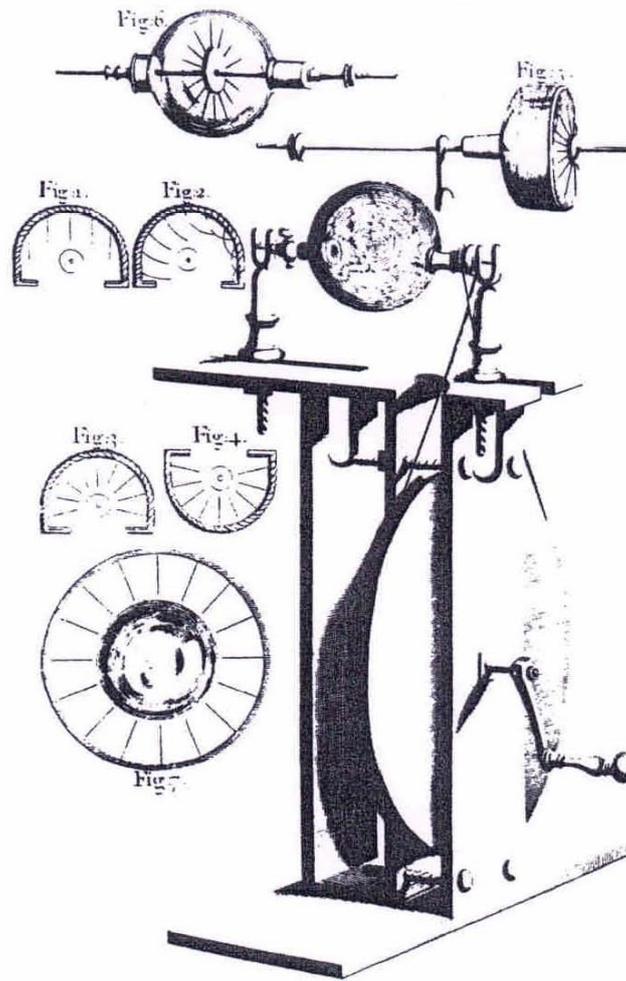
本文不以「發現」為主線，而是以實驗的結構之演變為主線，根據家族相似的發展模型來呈現實驗的發展圖像，這是一種模型化的重建——從實驗的傳衍、演化、系譜的觀點和模型來重建的電學實驗史。當然，我們並未宣稱它是唯一的或最好的科學史寫作模型，也不試圖宣稱此模型足以代替上述的傳統寫作，但是我們想宣稱它其實是上述科學實驗史著背後隱然未明的預設，而本文的貢獻就在於揭示這個預設，並提供了另一扇視窗、另一種互補的模型，使我們更能從演化與發展的面向來理解科學實驗與科學思想的歷史。如此一來，使用傳統寫作模式的科學史家的工作，就可定位在描述每個重要的實驗傳衍的種種歷史細節，可說是一種科學實驗的「材料歷史」；而使用「輻射發展模型」來寫作實驗史的科學史家或歷史導向的科學哲學家，則是呈現出實驗規律、有序發展與演化的「理論歷史」。兩者形成互補。



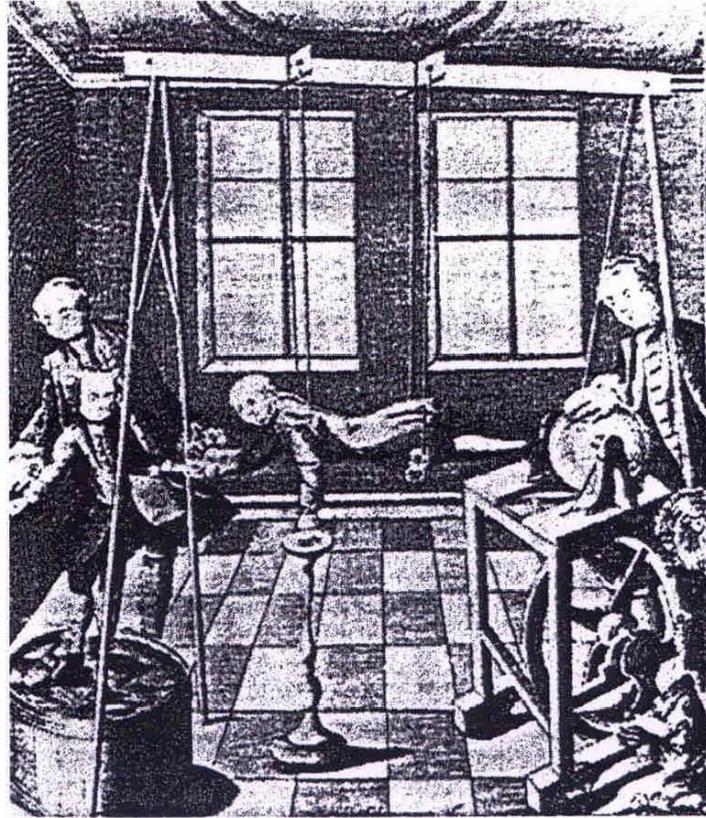
附圖 1 給呂克的硫磺球離形起電機 (Heilbron, 1979: 216)。



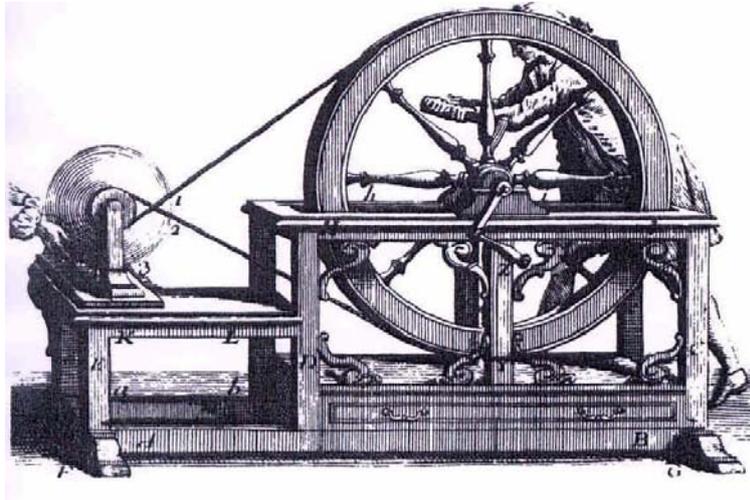
附圖 2 給呂克的羽毛實驗 (Heilbron, 1979: 216)。



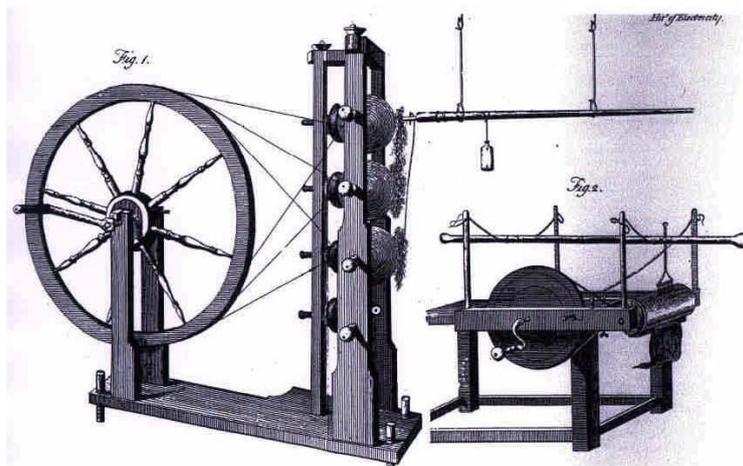
附圖 3 豪斯比的原型起電機，與電排斥的絲線實驗 (Heilbron, 1979: 232)。



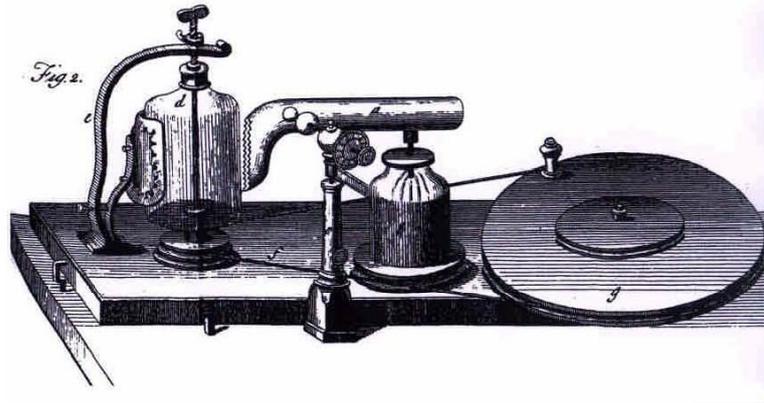
附圖 4 德國豪森的起電機，以鞋底為摩擦片，並以人體為導電棒 (Wolf, 1999: Illustr. 96)。



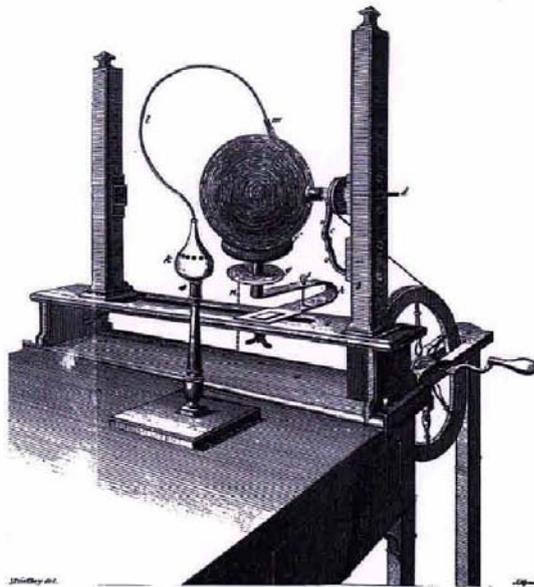
附圖 5 諾雷的大型起電機 (Heilbron, 1979: 266)。



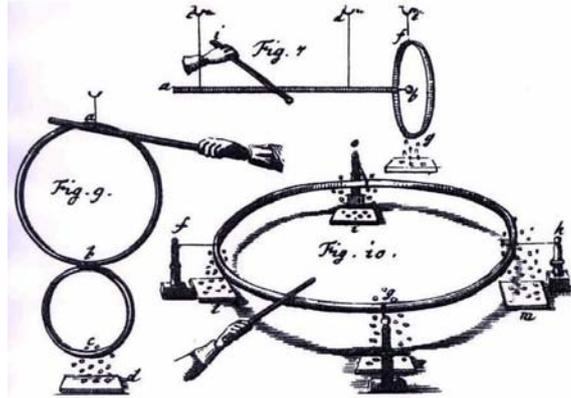
附圖 6 左為華生博士的四玻璃球起電機 (Priestley, 1966: Plate V.) ;
右為威爾森博士的起電機 (Priestley, 1966: Plate V.)。



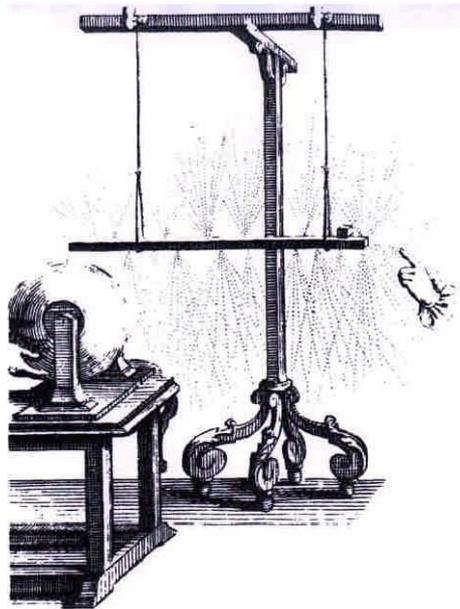
附圖 7 瑞德博士的起電機 (Priestley, 1966: 304-305)。



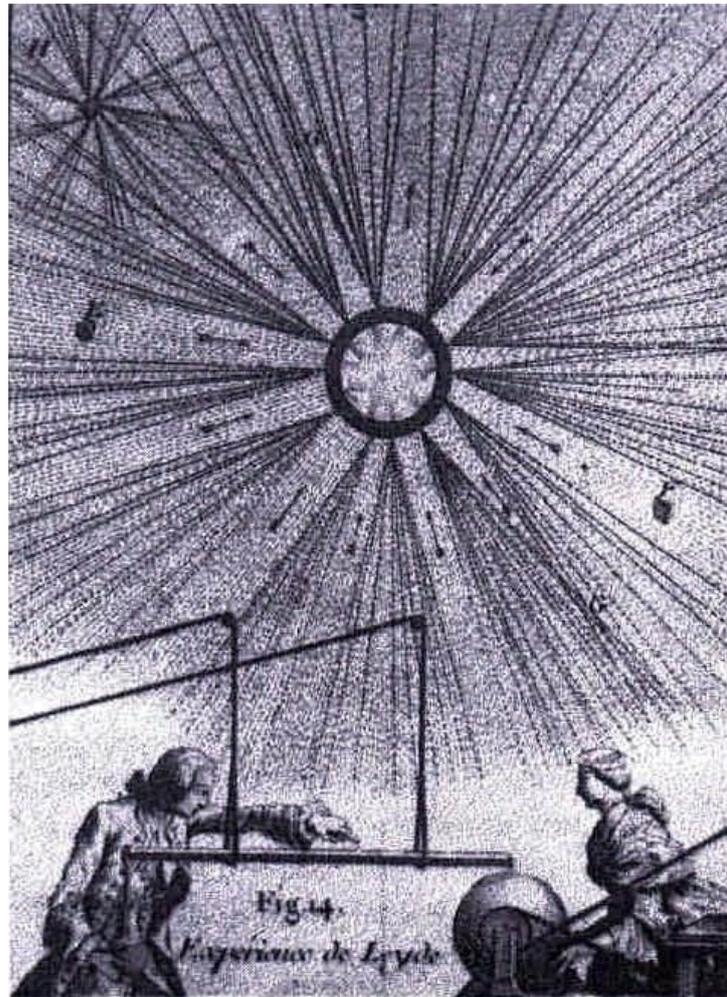
附圖 8 普里斯利的起電機 (Priestley, 1966: 336-337)。



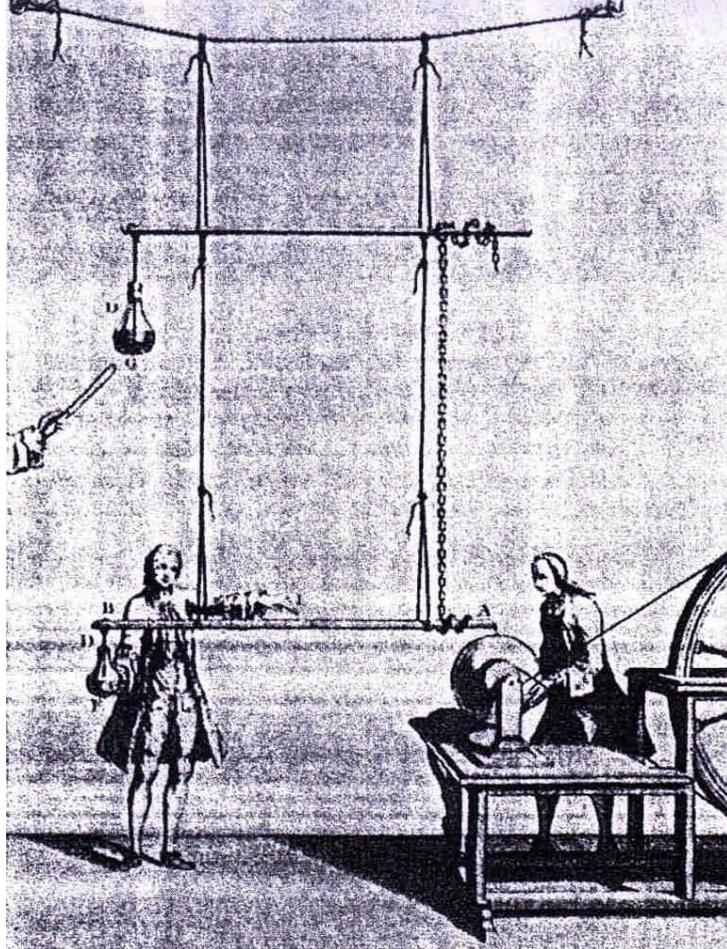
附圖 9 葛雷的接觸導電和不接觸（感應）導電實驗 (Heilbron, 1979: 249)。



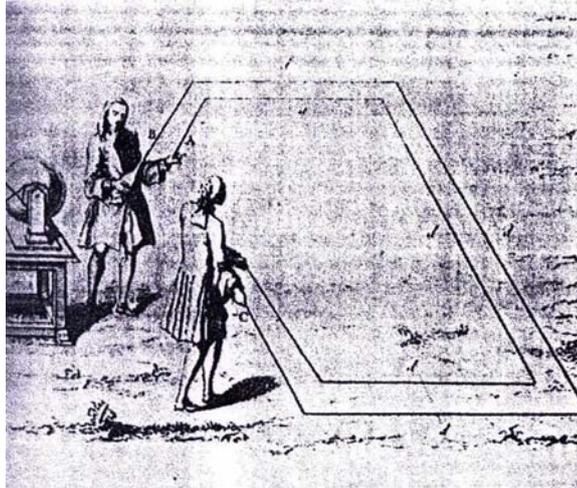
附圖 10 杜費的「噴出流」假設示意圖 (Heilbron, 1979: 283)。



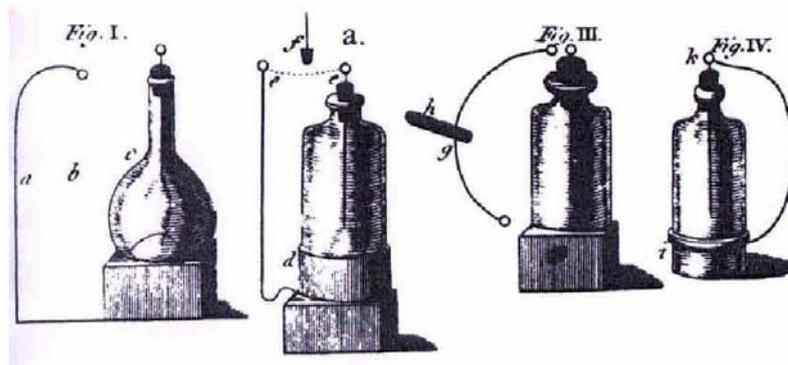
附圖 11 杜費的理論假說，說明排斥現象的示意圖 (Heilbron, 1979: 285)。



附圖 12 穆金布洛克的萊頓瓶實驗 (Wolf, 1999: Illustr. 105)。



附圖 13 勒蒙內爾的電傳導速度實驗 (Wolf, 1999: Illustr. 104)。



附圖 14 富蘭克林的菜頓瓶實驗 (Heilbron, 1979: 332)。

參考文獻

- 陳瑞麟 (2005)。〈科學現象的觀察與建構〉，《東吳哲學學報》，11: 57-98。
- Boumans, M. (2002). Calibration of models in experiments. In L. Magnani & N. Nersessian (Eds.), *Model-based reasoning: Science, technology, values* (pp. 75-93). New York, NY: Kluwer Academic/Plenum.
- Butterfield, H. (1958). *The origin of modern science: 1300-1800*. London, UK: G. Bell and Sons.
- Cartwright, N. (1983). *How the laws of physics lie?* Oxford, UK: Oxford University Press.
- Chen, R.-L. (2007). The structure of experimentation and the replication degree: Reconsidering the replication of Hertz's cathode ray experiment. In C. M. Mi & R.-L. Chen (Eds.), *Naturalizing epistemology and philosophy of science* (pp. 129-149). Amsterdam, the Netherlands: Rodopi.
- Collins, H. (1985). *Changing order*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Galison, P. (1987). *How experiments end*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Galison, P. (1998). *Image and logic*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Galison, P., & Stump, D. J. (Eds.). (1996). *The disunity of science*. Stanford, CA: Stanford University Press.
- Giere, R. N. (1988). *Explaining science: A cognitive approach*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Giere, R. N. (1999a). *Science without laws*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Giere, R. N. (1999b). Using models to represent reality. In L. Magnani, N. Nersessian, & P. Thagard (Eds.), *Model-based reasoning in scientific discovery* (pp. 41-58). New York, NY: Kluwer Academic/Plenum.
- Gilbert, W. (1990). *On the loadstone and magnetic bodies and on the great magnet the earth* (P. F. Mottelay, Trans.). Chicago, IL: The University of Chicago. (Original work published 1600)

- Gooding, D. (1990). *Experiment and the making of meaning*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic.
- Guala, F. (2002). Models, simulations, and experiments. In L. Magnani & N. Nersessian (Eds.), *Model-based reasoning: Science, technology, values* (pp. 59-74). New York, NY: Kluwer Academic/Plenum.
- Hacking, I. (1983). *Representing and intervening*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hankins, T. (1985). *Science and the enlightenment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Heilbron, J. L. (1979). *Electricity in the 17th and 18th centuries: A study of early modern physics*. New York, NY: Dover.
- Hesse, M. (1966). *Models and analogies in science*. Notre Dame, IN: University of Notre Dame Press.
- Koyré, A. (1978). *Galileo studies* (J. Mephan, Trans.). Sussex, UK: The Harvester Press. (Original work published 1939)
- Kuhn, T. S. (1970). *The structure of scientific revolutions*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Kuhn, T. S. (1977). *The essential tension*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Laudan, L. (1977). *Progress and its problems: Toward a theory of scientific growth*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Magnani, L., & Nersessian, J. N. (Eds.). (2002). *Model-based reasoning: Science, technology, values*. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum.
- Magnani, L., Nersessian, N. J., & Thagard, P. (Eds.). (1999). *Model-based reasoning in scientific discovery*. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum.
- Morgan, M. S. (2002). Model experiments and models in experiments. In L. Magnani & N. J. Nersessian (Eds.), *Model-based reasoning: Science, technology, values* (pp. 41-58). New York, NY: Kluwer Academic/Plenum.
- Morgan, M. S. & Morrison, M. (Eds.). (1999). *Models as mediators: Perspectives on natural and social science*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Nersessian, N. J. (1984). *Faraday to Einstein: Constructing meaning in scientific theories*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic.
- Pickering, A. (1992). From science as knowledge to science as practice. In A. Pickering (Ed.), *Science as practice and culture* (pp. 1-26). Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Pickering, A. (1995). *The mangle of practice: Time, agency and science*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Priestley, J. (1966). *The history and present state of electricity* (Vol. 2). New York, NY: Johnson Reprint Corporation.
- Röntgen, W. K. (1969). The Röntgen ray. In E. Madden (Ed.), *Source books in the history of science* (pp. 600-610). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Rouse, J. (1996). *Engaging science: How to understand its practices philosophically*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Westfall, R. S. (1977). *The construction of modern science: Mechanism and mechanics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Whittaker, Sir E. (1989). *A history of the theories of aether and electricity*. New York, NY: Dover.
- Wolf, A. (1999). *A history of science, technology and philosophy in the 18th century*. Bristol, UK: Thoemmes.

A Radial Model of Experimental Development— Reconstructing the History of Early Electrical Experiments

Ruey-Lin Chen

Abstract

This paper proposes a radial model of scientific experimental development. I shall support the model with reference to the history of modern electrical experiments in the 18th century. After a brief review of the literature on experimentation, I first analyze the typical structure of experimentation, which consists of the background ideas of experiment, the experimental model and the material realization of the model. Next, I specify “the prototypical experiment” and “the descended experiment” and explore the descendent phenomena by juxtapositioning the structure of the prototypical experiment against that of the descended one. Then, I discern eight types of descendent relations. Different relations between a prototypical experiment and different descended experiments cause the developmental pattern of experiments to appear radial. Finally, I show that the history of modern electrical experiments fits very well the radial model.

Key Words: Scientific Experiment, Structure of Experimentation, History of Science, Electrics, Philosophy of Science