

科學理論版本的
結構與發展

陳瑞麟 著

科學理論版本的結構與發展

陳瑞麟 著

科學理論版本的結構與發展

目 次

序.....	ii
導 論 科學理論的結構與發展.....	1
壹、科學理論的結構與發展.....	1
貳、科學理論的恰當說明之要求.....	3
參、理論版本與理論版本家族.....	5
肆、方法與架構.....	10
第一章 模型和理論的歷史縱覽.....	13
壹、從邏輯實證論到理論的模型觀點.....	13
貳、早期的模型與理論之分.....	15
參、類比與模型.....	18
肆、模型觀點的興起.....	20
伍、薩普論科學理論的語意概念.....	25
陸、語言句式和理論結構.....	31
柒、范弗拉森的語意模型進路.....	33
捌、薩普與范弗拉森學說的評論.....	36
玖、從模型到分類.....	40
第二章 科學區分：分疇和樹狀區分.....	41
壹、孔恩對詞彙結構的分析.....	43
貳、哈金的科學種類和分類樹.....	47
參、概念的連結.....	50
肆、分疇和樹狀區分.....	53
伍、範疇、種類和意義的結構.....	58
陸、種類間的不重疊.....	62
第三章 認知模型及其分類.....	65
壹、分類的基礎：原型理論.....	67
貳、吉爾的認知模型.....	72
參、理論模型的認知結構.....	75
肆、評論吉爾的學說.....	78
伍、主題分類蘊涵模型分類.....	79
陸、模型家族的原型結構.....	82
柒、模型的類型.....	83

捌、模型與現象：可落實模型.....	88
玖、簡單可落實模型與複合可落實模型.....	91
拾、從理論的組織到理論版本.....	94
第四章 理論版本取代典範的精煉.....	97
壹、為什麼要提出「理論版本」？.....	98
貳、什麼是理論版本？.....	101
參、理論版本的論域.....	102
肆、相對的局部理論版本.....	107
伍、理論版本的表達系統.....	108
陸、「原理」做為最高階層的表達和古典力學的兩種原理.....	110
柒、定理做為模型家族的描述.....	113
捌、理論說明預測和表達系統的樹狀結構.....	114
玖、古典力學的理論版本家族.....	118
第五章 牛頓《原理》的理論版本.....	121
壹、牛頓「風格」.....	122
貳、牛頓的認知跳躍和平方反比定律模型的建構.....	125
參、《自然哲學的數學原理》之結構.....	131
肆、定義和公理.....	132
伍、一般物體的運動：《原理》的第一冊.....	134
陸、阻抗媒介中的運動：《原理》的第二冊.....	137
柒、《原理》的「世界系統」.....	139
捌、牛頓理論版本的分疇分類和主題分類.....	143
第六章 赫茲的力學理論版本.....	147
壹、牛頓之後的古典力學.....	147
貳、赫茲力學的方法論和基本架構.....	150
參、《力學原理》的表達和內容之分析.....	153
肆、赫茲版本和牛頓版本的比較.....	157
第七章 理論版本家族的發展.....	163
壹、理論版本家族結構的發展歷程.....	163
貳、原型版本、研究方案與拉卡托斯.....	166
參、研究方案的啟發功能與後裔版本的生成路徑.....	170
肆、勞丹的「解題」與「競爭」.....	176
伍、傅大為的科學方略的競爭理論.....	179
陸、理論版本家族的競爭與發展.....	183
柒、家族的發展路徑圖.....	186
第八章 牛頓家族對抗渦漩家族.....	189
壹、「笛卡兒－牛頓的競爭」和科學哲學的傳統觀點.....	191

貳、笛卡兒《哲學原理》中的力學理論.....	193
參、《哲學原理》中的渦漩理論.....	197
肆、笛卡兒的研究方案.....	202
伍、渦漩家族的發展.....	205
陸、「萬有引力」的戰爭.....	210
柒、牛頓學派的反擊與牛頓研究方案的發展.....	213
捌、渦漩家族對抗牛頓家族.....	216
結 論.....	219
附 錄 科學理論的兩種公理化進路.....	221
壹、科學理論的述句觀點.....	222
貳、模型觀點之公理化理論.....	230
參、兩個公理化系統的比較.....	240
參考文獻.....	245
索 引.....	259

誌謝

從博士論文的寫作至今，已逾六年，一個不算短的時間。自覺六年來，除了各種知識的累增外，在思考、表達和寫作上，也更加成熟，過去所不擅長的口頭表達與人際接觸，也在五年來教學的磨練下而有所成長。大學的教學與研究生涯，乃是最想過的生活方式，如今不但如願以償，更能居住在東吳優雅的山林校園內，實在該感謝東吳大學哲學系所提供的教職工作。一路行來，所居所處的場所、所過所歷的歲月、所接觸所往來的人事，都是一段一段鮮明的回憶，心中不可磨滅的痕跡。中正大學廣袤寂寥的校園與博士後研究生活，靜宜大學一年的兼課與同事們的午餐，東吳大學哲學系五年來的教學生涯與同事情誼，在在都使我感念不已。我是個溝通困難的人，不易與人建立自然深厚的友誼，然而，在我生命的某些時段中仍有許多朋友張開雙手，給我溫暖的友誼而不求回報，這份施予，我永遠銘感在心。其他自博士研究以來，一直陪著我成長的朋友們，感謝之情更是溢於言表。

走出哲學學徒生涯，步入學術叢林，相較於其他同學朋友，自覺多了一分幸運。然而，「幸運」並不是神秘力量的降臨或介入，而是許多師長貴人和朋友的照顧與提攜：林正弘教授一直是我在各種難題上的「顧問」，他那亦師亦友、始終不斷的鼓勵與支持，令人如沐春風。傅大為教授則在各種學術場合不斷啟發、砥礪與督促我，他所領導的 STS 社群和許多 STS 研究的朋友們，一直是我在學術對話上的好夥伴；徐光台教授則透過不同的管道，在科哲與科史的思考給我許多建議；苑舉正教授不僅是我的學術同志與好友，也數度在學術會議上協助我；東吳大學哲學系的諸教授們在五年共事歲月中，幫助我怎麼扮演好老師的角色。台大哲研所時代許多學長、同學、學弟妹更是一直伴著我的好朋友們：楊植勝、賀瑞麟、龔卓軍三人分別進入各大學，在種種場合中我們會互相吐槽打氣；黃偉雄則是我多年的好朋友，彷彿始終在某處，等著我去找他幫忙；蕭進銘、鄭光明是我的碩士同學，有時一段時間沒有往來，一旦我需要他們協助時，他們就立刻現身，這份情誼實在令人難忘；蔡偉鼎、王尚文、李志成、沈享民是吃喝玩樂的哥兒們，陪著我渡過許多時光；薛清江、蔡政宏、古秀鈴則是我的「翻譯戰友」。東吳哲學系的一些同學們，不管他們懂不懂，一直熱情地支持我的課程，提供了教學相長的機會。還有網路上的好朋友們：潘成衍劉瑞琪伉儷、郭文華、祝平次、蔡坤憲常雲惠伉儷、陳鈺銘、林敏聰、蔡麗玲、許麗香等等，他／她們在網路上與我或正式討論或閒聊鬥口，都對我的思想精煉有所助益。還要感謝我的家人，尤其是妻子林柔瑀，在新婚一年來學術生活仍然忙碌之際，默默地陪伴與支持我；最後是我那偉大、勞苦、在書寫本書初稿之時（2002 年初）與病魔搏鬥的母親 張美惠 女士，令人遺憾與傷心的是，她無法見及本書出版，謹再將此書獻給她，以告慰她天之靈。

陳瑞麟

序

「科學理論版本的結構與發展」是一本探討「科學理論的結構與發展」的專題論著。針對「結構」，筆者使用「分疇、分類與模型」的觀念來分析；針對「發展」，筆者提出「理論版本」和「理論版本家族」這一對觀念，用來說明科學理論及其發展的諸般現象，包括繼承、更新與競爭等。

一個科學理論版本總是擁有許多相互關聯的概念，它們透過分疇與樹狀區分兩種組織模式而構成一個概念網絡。為了說明一大群複雜現象的結構、行為與變化，理論版本了建構一群模型，它們構成一個分類的階層系統，包含最高層的抽象模型和最低層的可落實模型。一個有力的理論版本可能被後來的科學家所繼承與追隨，但重新組織概念網絡與模型階層體系，就產生了新的理論版本。一群理論版本可能形成一個理論版本家族；家族間的成員並未共享相同的概念結構，彼此間只是家族相似的。一個異質性極大的理論版本可能發展出一個全新的家族。開創出一個家族的理論版本變成為該家族的始祖、原型或典範版本。如果兩個家族的研究領域有所交集，發展時間也有所重疊，它們便會展開競爭。理論版本家族的競爭乃是批判對手、啟發與生成後裔版本、擴張科學版圖的競爭。上述便是本書企圖描繪的科學理論版本的結構與理論版本家族發展的圖像。

正如科學理論版本總是有所繼承、有所更新地發展自先前的理論版本，本書所提出的科哲理論版本，也是改良、更新與整合先前的種種科哲理論和觀念，包括孔恩的「分類」概念、吉爾的認知模型、分類的原型理論、很多哲學家慣用的「版本」觀念、維根斯坦的「家族相似」等等。我們從「分類」中區分出「分疇」，成為組織概念的兩種基本模式。我們指出理論中包含了一個認知模型的分類階層，它與概念網絡構成一個「理論版本」。概念網絡與模型分類階層的拓模型態乃是分辨理論版本相似與差異的標準。而科學理論的發展過程，要透過理論版本家族的形成、發展與競爭來理解。

這幅科學理論的發展圖像，以及本書的科哲理論之形成圖像，決定了本書的結構。它由導論、結論、第一章到第八章構成的，最後再加上一篇附錄論文。「導論」勾勒出一個針對「科學理論的結構和發展」的科哲理論之輪廓：首先是議題的重要性與傳統觀點對它們的處理；其次我們提出對於「科學理論之理論」的後設要求，包括科學文獻、認知結構與發展歷程的必要性，它們做為評價與選擇科哲理論的標準；再來，我們以具體的科學實例，詳細地描繪本書所將發展的科哲理論，也就是一個「理論版本的結構」與「理論版本家族的發展」之圖像。最後，我們對本書的方法和結構作個綱要性的介紹。

一個概念網絡總是繼承、發展、改良、更新和整合自先前的理論，這個觀點也決定了每章的論述結構。第一章回顧科哲史上，哲學家對於

模型與理論關係的觀點演變，從早期的模型與理論之分，經類比模型的中繼，再到科學理論的語意模型觀點。第二章我們從孔恩和哈金的「分類」觀念開始討論，繼而建構科學理論的概念結構之一般模型，其核心在於科學理論的兩種基本區分：網狀分疇與樹狀區分。第三章以分類的原型理論與吉爾的認知模型理論為起點，我們透過原型理論來分析每個模型種類的內在結構，以及科學理論整體內含的認知模型之樹狀分類階層，包括高層的抽象模型與連結現象的可落實模型。第四章我們由孔恩的科學發展三部曲模式、以及夏佩爾對「精煉典範」的質疑而出發，我們面對了夏佩爾的挑戰，提出「理論版本」與「理論版本家族」的觀念來回應。接著發展理論版本所需的「論域」和「表達」的結構。第五章和第六章的內容是第二到第四章所建構的理論版本之結構模式的應用。我們扣緊古典力學家牛頓和赫茲的著作，分析其理論版本中的概念網絡與模型分類階層體系，顯示兩者間的家族相似。第七章針對的是科學發展與競爭的議題，拉卡托斯、勞丹和傅大為的理論模式是我們的探討起點。我們提議一個建立在理論版本家族觀念上的發展與競爭模式，它所處理與描述的是理論版本家族的生成、更新與家族間的競爭之歷史現象。第八章我們實際地分析笛卡兒的渦漩理論家族和牛頓的力學理論家族之競爭與演變。最後，在附錄〈科學理論的兩種公理化進路〉中，我們回顧早期處理科學理論的兩種公理化方法，包括邏輯經驗論的一階邏輯公理化，以及語意模型觀點的集合論公理化。就科學哲學而言，這是一個相當不同於本書理論的科哲理論家族。

做為一本專題論著，本書的內容具有高度的整合性和有機性，但並不妨礙讀者就感興趣的章節分開閱讀。本書的章節順序從「結構」朝向「發展」而發展，但如果讀者只對科學發展的議題感興趣，不妨可先從第四章開始讀起，再看第七章與第八章。對於科學理論的語意觀點和公理化感興趣的讀者，當然先讀第一章和附錄。對於牛頓力學和力學歷史感興趣的讀者，可以在第五章和第六章中發現牛頓理論和赫茲理論的「原貌」，以及它們的「版本性」和兩者間的相似關係。當然，筆者衷心希望讀者能看完全書，並提出批判與指教。

本書的觀念大多在筆者的博士論文中已然萌芽〔《科學理論的分疇、分類和模型——以牛頓力學為範例》（台灣大學哲學研究所，1998年）〕。然而，當時筆只處理了「結構」的議題，雖已提出了「理論版本」的概念，並未詳盡發展。經過多年的思考，筆者的想法已更為完整成熟，因此以博士論文對「理論結構」的處理為基礎，重新寫作本書，並真正面對了「發展」的議題，充實「理論版本」和「理論版本家族」觀念的血肉，正式提出一個具完整意義的「科學理論之理論」。當然，必須一提的是，本書章節的部分內容，和筆者的博士論文、已發表的一些論文有重疊之處，如第二章和第三章部分，與〈組織科學理論：分疇、分類和模型〉（《東吳哲學學報》第四期）大致相同；第四、五、六章的內容，則是“Theory Version Instead of Articulations of a Paradigm” (Studies in History and Philosophy of Science, vol. 31, No. 3) 的擴充；第三

章第七八九節則是“Testing through Realizable Models”一文部分內容之中文版。

本書初稿成於 2002 年初，其內容與結構截然不同於目前的規模，對於「發展」的議題仍是點到為止。投稿台大出版中心送審，由於兩位匿名評審的嚴格審查，在評審意見中表達對初稿的不滿之意，並要求筆者補入許多課題。筆者因此痛下決心，全面進入「理論發展」的議題，並將初稿的結構大幅更動，由原來的十章整併成六章，並加寫第七和第八章，完成「理論版本家族」的觀念，並以渦漩理論和牛頓天體力學兩大家族的競爭來展示「理論版本家族的競爭與發展」。二稿完成時間已是 2003 年尾。雖然經過一番波折與時間的延遲，筆者一點也不以為意，反而相當感謝兩位匿名評審的嚴格要求，因為二稿確實比初稿要緊緻、完整與精彩許多。如果沒有他們的把關，就不會有本書目前的面目了。

筆者原計畫將本書做為個人的第一本正式出版的著作，由於經過大幅改稿增補的過程，筆者已於 2003 年九月先行出版一本論文集《科學與世界之間——科學哲學論文集》（台北：學富）。然而，不管是就筆者個人的思想的發展順序、或是就內容的專題性與完整性來看待，本書都是筆者個人學術生涯第一本真正的「代表作」，總結了三十七年歲月的主要學習與思考。然而，希望本書不僅對筆者個人有紀念意義，也能對台灣的科學哲學研究，產生些許具有意義的貢獻。

導論 科學理論的結構與發展

科學知識往往被認為是歸納了規律性的現象之後而得到的敘述。很多人相信科學知識的核心是「定律」(law)，它是一種由歸納推論而獲得的全稱敘述，例如：「所有物體，如果在空中失去支撐，就會掉下來。」然而有無數類似的敘述，例如：「凡人會死」、「所有正常的狗都有四條腿」、「太陽每天都從東方升起」等等卻不會被視為科學敘述。對規律現象的歸納必須從事觀察，然而每天觀察到哲學家康德在下午三點準時、風雨無阻地出門散步，並記錄下來，也不會被視為科學發現。

似乎單純的現象歸納和觀察敘述並不能形成科學史上豐富生動多采多姿的科學知識。科學家和哲學家們通常同意：有趣有價值的科學知識泰半來自科學理論(scientific theories)。科學家頻繁地把許多科學知識稱呼為「某某理論」。提出一個科學理論來說明自然現象更是許多科學家畢生追求奮鬥的目標。然而，什麼是科學理論？

一般認為「理論」是一種有系統有組織的「東西」，它帶給我們成組成套而非瑣碎散漫的知識。歷史上的科學理論家使用各式各樣的方法來研究自然，他們觀察、閱讀、思考、想像、計算而有了某些心得和知識，再將它們組織成系統並且表達出來。但是，這些心得知識如何被組織以致能被稱作「科學理論」？科學家也親自去觀察自然現象、動手測量、實地做實驗以便確認他們的推想或預測，他們也將觀察、測量和實驗記錄下來並加以表達，作成報告——但這類報告卻不會被我們稱為科學理論。究竟科學理論有什麼特殊之處？

直觀地看來，「理論」往往對比於「實行或實踐」(practice)。我們說某物是「理論的」就意味著它不是「實踐的」、不是去「動手實際地行為或做出來」，而只是停留在思考或言論的層次中¹。但這種「紙上談兵」的思考和言論卻能對自然和實在界產生奧妙強大的說明和干預力量，科學理論到底是什麼東西？

壹、科學理論的結構與發展

本書的目的在於探討科學理論的結構與發展。科學理論是什麼？有什麼樣的結構？有哪些基本特徵？它是怎麼生成的？又如何發展與變遷？此類問題傳統上被科學哲學家們歸諸於「理論的本性和結構」(the nature and structure of theories)與「理論的發展和變遷」(development and change of theories)這兩個主題下，從十九世紀末以來，一直是科學哲學的基本主題和關懷重心。各式各樣的觀點紛呈。

¹ 坎貝爾(Campbell, N. 1957, pp. 120-121)也討論了「理論」和「實踐」的對比。

在「理論的本性和結構」這一主題上，我們大致可以標定出三種不同的主要觀點：述句觀點(statement view)²、模型觀點(model view)、認知觀點(cognitive view)³。述句觀點指的是邏輯經驗論(logical empiricism)所提出的分析架構：理論作為「局部解釋的公理系統」(partially interpreted system of axioms)，包括公理和對應規則(correspondence rules)。亦即，科學定律應被表達為包含理論詞(theoretical terms)的公理，再由對應規則聯結理論詞和觀察詞(observational terms)而提供經驗意義給理論。這個觀點已經有許多批評和討論⁴，它不再做為科學理論的恰當分析似乎已是「公認的」事實。模型觀點應用集合論(set theory)和模型論(model theory)來嘗試重建科學理論。簡單地說，理論包含了一群具有共通結構的模型(models)，它們可以用一個有序結構 $\langle D; r_1, r_2, \dots, r_n; f_1, f_2, \dots, f_m \rangle$ 來代表，其中 D 是所有能滿足此結構的對象之集合， $r_1, r_2, \dots, r_n; f_1, f_2, \dots, f_m$ 則分別是這些對象之間的關係和函項，它們由一組科學定律關聯起來，科學定律則用以說明對象的行為或狀態變化。認知觀點起於認知科學的興起，試圖從科學家的認知結構與功能來探討科學理論，它將科學理論定義為科學家心智中的表徵(cognitive representations)，依據心智表徵的運作歷程去分析科學家如何從事推理、如何建構理論的意義、理論的認知結構為何等等項目。後兩個觀點方興未艾，討論其代表性學者之論述是必要的。然而，這三種觀點的代表性學說都無法令人滿意。

「科學的發展與變遷」這一主題則是六十年代後歷史進路的重心。孔恩(Thomas Kuhn)、拉卡托斯(Imre Lakatos)、夏佩爾(Dudley Shapere)、勞丹(Larry Laudan)等人都有各擅勝場的學說。可是，要討論科學的發展與變遷，一定要有一個基本單元，做為變動的基準。歷史進路的科哲家們，都提議一種比理論更大的單元如典範(paradigm)、研究方案(research programme)、論域(domain)、研究傳統(research tradition)等等，然而被他們列為單元的科學實例也常常被稱作「理論」，一種「大」理論。他們所提議的單元，要不是失之歧義含糊，就是無法精確地呈現其內部結

² 這個名號來自 Stegmüller(1976)；就是邏輯實證論所發展出來的科學理論分析。卡納普(R. Carnap)和韓培爾(C. G. Hempel)形構了代表性的版本。在六十年代以前普遍受到認可，因而被稱作公認觀點(received view) (語出帕特南(Putnam 1962))，或是標準說明(standard account) (語出娜西姆(Nersessian 1984))、正統說明等等。另范弗拉森(Bas Van Fraassen 1980)則稱為「句法進路」(syntactic approach)。

³ 根據吉爾(Giere 1992)，認知觀點就是應用認知科學來進行科學本質的研究。認知科學是一門跨學科的學門，包括認知心理學、語言學、神經科學、人工智能和(心靈)哲學等等，為了方便之故，吉爾在所編輯的書(Giere 1992)中將應用認知科學來研究科學粗分成三個學科群：(1) 認知心理學；(2) 人工智能；(3) 認知的神經科學。當然，內文中只將焦點放在「科學理論」上，只是「科學理論的認知觀點」。

⁴ 可參看薩普(Frederick Suppe)的長文“The Search for Philosophic Understanding of Scientific Theories”(Suppe 1977, pp. 6-118)。

構，或是難以說明科學文獻的概念架構，或者沒有交代「大理論」（典範、方案、傳統等等）與小理論（定律、公式）之間的結構性關係。因此，在發展「科學發展與變遷」的恰當理論時，一個更細緻、更完整的「理論結構」之理論有必要先被發展出來。

我們認為，上述傳統的科哲學說，不管是針對理論的結構或者針對科學的變遷與發展，都無法令人完全滿意。因為一個恰當的理論結構之揭示，必定要考慮理論間的競爭與發展；反過來說，一個恰當的科學發展之說明，也要有變遷單元的完整「結構」之揭示。理論的「結構面」與「發展面」兩者有密不可分的關係。這個關係是什麼？只有在我們提出完整說明之後，才能全面被揭示。然而，我們怎麼知道本書的說明會比先前的諸科哲學說更好、更能恰當地揭示理論結構與發展？這又必須依賴於「後設科哲」的標準之建立，在此我們將預先提出幾項「科學理論的恰當說明」(an adequate explanation of scientific theories)之後設要求(requirements)。

貳、科學理論的恰當說明之要求

讓我們先從「有科學理論嗎」這個最根本的問題談起。當然必定存在科學理論，否則我們的整個研究將變得毫無意義。但是我們如何知道科學理論是存在的呢？明顯的事實是：透過科學文獻。

我們之所以能知道和學習科學理論都是透過科學文獻的傳遞。科學家將他研究自然的成果表達出來，寫成期刊論文、書籍以及教授學生的教科書，這些都是科學文獻。早期的科學家努力將自己的整個系統知識寫成完整著作，當代科學家則多半以短篇論文發表在期刊上。不管文獻形式如何演變，只要這些文獻表達了某個科學理論，表達形式本身將會透露出科學理論的有用訊息。

分析傳統的科哲對科學理論之研究，總是強調其邏輯結構，預設了科學家的表達多是在不理想、不標準的形式下。哲學家的任務就在於將科學家的理論重建為標準的邏輯格式——所謂科學理論的「邏輯重建」(logical reconstruction)。要達到標準，就必須求助於邏輯家或數學家所發展的邏輯系統和嚴密方法。例如邏輯經驗論的述句觀點訴諸於一階述詞邏輯和公理方法，模型觀點則應用集合論和模型論的語意建構，結果是科學文獻被遺忘了。

傳統科學史家的寫作方式，雖然依賴大量的科學文獻，然而他們隱然的「科學史觀或科學發展觀」卻左右他們的史料呈現。在「統一」、「進步」、「累積」、「化約」等科學史觀的籠罩下，他們對科學理論的呈現往往破壞其系統性、個體性與整體性。也就是說，他們認為整個科學是統一的、持續進步的、累積性的、化約性的（生物可以化約到化學、化學可以化約到物理學如此等等），他們所寫作的科學史，往往先根據史家所處時代的科學分科標準，如物理學被分成「天文學」、「力學」、「光學」、「熱學」、「電磁學」等等；「力學」又被分成「靜

力學」、「動力學」、「流體力學」、「固體力學」、「彈性體力學」等等，進一步每個子學科又被分成某些重要的議題、概念或公式，然後依如此架構呈現一群科學家對某一重要「議題」或「概念」的集體貢獻⁵。在這種呈現方式下，一位科學家在某一特定脈絡（有繼承、競爭與創新三面向）下發展出的理論，往往就被割裂得支離破碎。這種科學知識發展史觀，在六十年代科哲歷史進路的衝擊之下，顯出很大的缺陷。

我們認為：理論性的科學文獻不僅傳達科學知識的內容，也是科學理論的「寓居場所」。它能反映科學理論的本性和結構，也能夠透露科學家組織理論的特別認知方式。因為科學理論實在是科學家的認知產品，他們以理性的、非常識、非神話、非冥想的認知和推論來系統性地組織科學知識，再將這特別的組織系統表達成科學文獻呈現給公眾。正因他的表達具有完整的結構，他們所提出的科學知識才得以被稱作「科學理論」。因此，要分析科學理論的結構，應該從科學文獻出發。雖然科學文獻有許多種類、有不同的目的、也有種種不同的表達方式或風格，但是理論的組織方式總會或隱或顯地涵蘊在科學文獻的組織中⁶。總之，一個恰當的理論結構之研究必須要考量科學文獻的基本特徵—認知、表達和編排的結構。反過來說，科學理論結構也可以從科學論著中加以「內在地」重建，而不必訴諸外在的邏輯系統。據此，我們可以設定第一項要件：

(R1) 對科學理論的研究、分析或重建，必須參考理論性的科學文獻之基本特徵—認知、表達和編排的結構。

⁵ 這種科學史寫作的典型例子有休艾爾(William Whewell)的《歸納科學的歷史》(*The History of Inductive Science*)、馬赫(Ernst Mach)的《力學科學》(*The Science of Mechanics*)、屋爾夫(Abraham Wolf)的《十六、十七、十八世紀的科學、技術與哲學史》(*A History of Science, Technology, and Philosophy in the 16th, 17th, 18th Centuries*)、竇加士(Rene Dugàs)的《力學史》(*A History of Mechanics*)。儘管本書不贊同他們的史觀，這些科學史著作仍然擁有大量寶貴資料可供我們參考。

⁶ 有趣的是，薩普在1998年發表了一篇〈科學報告的結構〉(*The Structure of a Scientific Paper*)，強調了實驗科學報告在「檢驗(或驗證)理論」(*theory of testing(confirmation)*)上的重要性。他認為，一個恰當的驗證理論，必須能夠說明知名科學期刊上典型的科學實驗報告之結構——說明為什麼期刊只容許報告以這樣的標準格式來發表？薩普討論了科哲傳統的三個驗證理論：假設—演繹法、貝耶斯歸納法(*Bayesian inductive method*)和「最佳說明推論」(*inference to best explanation*)三者，論證它們均無法滿足上述的目的。Hardcastle, V. G.(1999)雖然不贊同薩普的論點（其主張科學報告有種種結構），但仍盛讚薩普這篇論文的原創呈現(*seminal presentation*)。另外，Lipton, P.(1998)也寫回應文為「最佳說明推論」辯護；Franklin, A. & Howson, C. (1998)則為「貝耶斯歸納法」辯護。筆者在1998年博士論文中提出從科學文獻中分析理論結構的想法時，薩普此篇論文尚未發表。

雖然我們有了科學文獻，但是我們又要如何辨認出「隱藏」在文獻中的「理論」呢？有什麼樣的鑒定特徵能夠讓我們達到目標呢？先前已經指出：特別組織方式才讓科學文獻的表達被「指認」(identified)為科學理論。一旦我們論及理論的組織方式，我們詢問的就是理論的局部和整體的關係：科學理論的局部如何組織成一整體？有什麼根本且特別的組織模式，使其局部和局部之間有系統性的關聯？這兩個問題又暗示了科學理論必須要有兩個基本特徵：「整全性」(integrity)和「系統性」(systematicity)，沒有這兩個特性，就算不上是「理論」。據此我們可以提出第二項要件，一個「科學理論的恰當說明」要滿足：

(R2) 必須展示科學理論如何由局部而組織成整體、以及如何體現於科學文獻的表達上，並刻劃其整全性和系統性。

科學是人類活動的產物，它也有一段長遠的歷史，迄今科學和科學理論都還在發展演變當中。要瞭解「科學理論是什麼」，當然也必須知道「歷史上的科學理論是如何發展與演變的」。因此，一個恰當的科學理論之說明，必須把科學和科學理論的發展歷史納入考察之中。換言之，思考「科學理論是什麼」（同時包含「科學理論的本性和結構」以及「理論的發展和演變」）不能脫離歷史的脈絡——也就是要能說明重要的理論發展之歷史現象。哪些歷史現象呢？首先是既存在「理論更新」(theory renovation)又存在「理論繼承」(theory inheritance)；其次是新理論如何從其所繼承的老理論而產生出來？其生成(generating)的經過又如何？第三是大理論的相互競爭(competing)。從歷史發展的強調，我們可以提出第三個要件。

(R3) 要能說明科學理論發展的種種歷史現象：理論的繼承、更新、生成與競爭的過程。

上述三者乃是科學理論的恰當說明之要求，它們的角色類似拉卡托斯的後設方法論評價，既是科哲理論的「要求（需求）」也是評價的「判準」，又做為恰當說明所應達到的「目標」。既然目前關於科學理論的種種觀點都無法滿足這三項要求（見第一章）。那麼，究竟能滿足它們的恰當說明是什麼樣子？

參、理論版本與理論版本家族

我們提議的恰當說明，要把科學理論看成「理論版本」(theory version)意義下的科學理論。所謂「理論版本」是指單個科學家所提出或擁有的理論，針對某一個特別的主題(subject)或領域(field)——如運動、光、電、磁、生物物種等等——而建構，並呈現在他的著作當中，有其獨特的表達、認知和內涵。例如牛頓(Isaac Newton)在《自然哲學的數學原理》(*Mathematical Principles of Natural Philosophy*)和《光學》(*Opticks*)、笛卡

兒(René Descartes)在《哲學原理》(*Principle of Philosophy*)、拉普拉斯(Pierre Simon de Laplace)在《天體力學》(*Celestial Mechanics*)、赫茲(Heinrich Hertz)在《力學原理》(*Principles of Mechanics*)、法拉第(Michael Faraday)在《電的實驗研究》(*Experimental Researches in Electricity*)和其它論著、馬克士威爾(James Clerk Maxwell)在《電和磁的論理》(*A Treatise on Electricity and Magnetism*)和多篇論文、愛因斯坦(Albert Einstein)在《論運動物體的電動力學》(*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*)和多篇論文、達爾文(Charles Darwin)在《物種起源》(*The Origin of Species*)等等著作中呈現出來的「理論」。也就是，我們所舉出的科學家，每人都提出了不同的理論版本⁷。當然，還有其他許許多多的科學家和科學著作都已呈現了各種科學主題或領域的種種理論版本。

傳統上，牛頓、拉普拉斯、赫茲的著作所呈現的都被歸為古典力學；法拉第和馬克士威爾的論著則同屬古典電磁學；愛因斯坦是相對論的創始者，但也有其它的科學家提出不同表達形式的「相對論」；達爾文開創了天擇說的演化論，後繼生物學家雖略有不同於達爾文的表達（如新達爾文主義），仍然屬於天擇說。在強烈的科學統一觀點下，大部分科學家、科學教育家、科學史家或科學哲學家都不會將牛頓等人不同的理論版本看成是不同內容的「理論」，反而設想有一跨越不同版本的「相同或共同內容的理論」，或是主張應該用標準的格式或語言來形構它，或者主張它是一種共同的語意結構（模型論意義下）但可容許不同的表達形式。傳統上，哲學家對理論結構的探討就一直在這種預設下進行，在細究之下卻令人感到很大的疑惑：牛頓的理論和赫茲的版本真的是「同一個理論」嗎？法拉第和馬克士威爾的電磁學理論，也可以說是共同的嗎？如果是「共同的理論」，究竟在什麼判準下，被稱為共同的？一個最有力的候選者，或許是同一理論是由相同的數學公式所表達的定律或通則來判定的。然而，考察科學家的著作本身，我們會發現即使定律或通則，也會在版本到版本之間而變動。以古典力學第二運動定律為例，今天我們所熟知的 $F=ma$ 數學式，並沒有出現在 1687 年出版的《自然哲學的數學原理》中，而是一直到了 1750 年才首度由歐拉(Leonard Euler)所形構（參看 Truesdell 1968, p. 105-107）。如果連這個科學史上最著名的定律，都有足以令人推敲之處，不免令人疑惑：真的存在共同的理論嗎？如果我們進一步考察科學家的概念網絡，他們對具體現象的實際說明方式，以及他們的整個自然觀、世界觀，想要找到「共同的理論」，那更是難之又難。我們認為，現有超出科學家個人版本之外的共同理論之判準，都無法令人滿意。我們主張：並不存在任何跨越科學家個人版

⁷ 這個概念對科學史家來說可能並不陌生，其實科學史家早已頻繁地使用像「笛卡兒力學」、「牛頓力學」、「拉普拉斯力學」、「拉格朗日動力學」、「法拉第電磁學」、「愛因斯坦相對論」、「達爾文演化論」等等名目在他們的著作中。然而，問題在於科學史家通常不能（或覺得不必要？）給予它們一個完整結構的刻劃。相反地，科學哲學家雖然能運用邏輯工具刻劃出理論的完整結構，卻沒有（或疏於）區分理論版本之間的不同。

本之外的「共同的某某理論」，實際存在的只是眾多個別的理论版本，以及一些個別理論版本組合而成的「某某理論版本家族」。換言之，古典力學、古典電磁學、相對論、天擇說演化論等等分別是理論版本家族，這些家族各有它們的內在結構。但並沒有任何共同內容的、超出個別理論版本之外的「某某理論」之存在。通常科學家和哲學家所稱為「某某理論」或「某某學」的大型系統指的多是「理論版本家族」。至於，「科學理論」這一詞語，我們在集合用法下來使用它，指稱所有「科學理論版本」和「科學理論版本家族」。

理論版本總是聯結著科學家個人，意謂著我們想要強調理論版本之個人化的表達、認知和意涵，以及版本和版本之間的差異，而非理論版本間的「共同內容」。這進一步意味了科學家個人的認知、表達和理解都「參與」了理論版本的構成，才會造成版本和版本之間的差異。然而，究竟什麼是理論版本呢？只有在實際詳盡地分析科學文獻之後，才能呈現出一幅清晰具體的圖像。但是我們也無法無所傍依地憑空進行，也不能依照傳統科學史家的寫作方法，我們有必要先發展一個分析的參考架構。

理論的局部如何組織成整體？反過來說，一個整體的理論如何有秩序地區分它的局部？這一點也反映了科學家如何對現象進行有秩序的認知？「區分」(classification)因而邏輯地成為研究科學理論的組織之起點。每個理論版本首先會對其主題進行「科學區分」(scientific classification)，被區分後的主題形成一個「論域」。這個區分在定律、通則和模型的建構之前，就潛在地、「先驗地」進行著。「科學區分」有兩種模式：「分疇」(categorization)和「樹狀區分」(tree classification)（又可分成「分類」(taxonomy)與「分部」(partition)）。所謂「分疇」指的是科學定律或科學原理蘊涵了將論域區分成截然分明的「範疇」(categories)，例如牛頓第二運動定律「物體所受的力量是其質量和加速度的乘積」，在這個定律中，它至少區分了「物體」(body)、「力量」(force)、「質量」(mass)、「時間」(time)、「位置」(place)（由「加速度」(acceleration)區分而成）這幾個基本範疇——這也是科學哲學家所謂理論背後預設的「存有論範疇架構」(ontological scheme of categories)。所謂「分類」指的是每個範疇可以再進行次種類的區分，如「力」可以再區分成「慣性力」、「向心力」、「碰撞力」等等種類。所謂「分部」指一個範疇或種類也可以進行局部的區分，如「空間」可以「分部」成「長」、「寬」、「高」等等。「科學區分」是本書第二章的主題。

分類往往形成一個階層系統(hierarchy)，特別是主題範疇的分類——我們又稱為「主題分類」(taxonomy in subject)，意指從最高階層的主題種類像樹枝般分叉成較低階層的許多種類，每一種類也可再分叉。例如，牛頓力學的主題是「運動」，它通常被分類成直線運動、拋射運動、圓周運動、往復運動等等。它們是由科學家的經驗研究組織而來的。主題與它的次類就由科學定律和它所導演的定理來描述，定律和定理都是通則，一方面由語言符號來表達，另一方面也蘊涵了一個「模型」——兩者

都是科學所要追求的知識。因此，主題分類也對應了一個「定理的分類」和「模型的分類樹」，從而有高層(higher-level)和低層(lower-level)定理與模型之分，但是能直接和現象聯結的是「可落實模型」(realizable model)。也就是說，低層的定理對現象所作的說明和預測，最終要透過模型的中介，才能「觸及」現象。反過來說，一個能夠被「可落實模型」所「模映」(modeling)的現象便是該模型的「被落實個例」(realized instances)。我們也透過尋找或建造被落實的個例來驗證(confirm)模型樹的恰當性和理論的真實性。第三章將展示一個理論版本如何包含一群具有分類秩序的「認知模型」，至於模型如何被落實？可參看陳瑞麟(2003c)〈科學模型的投射與落實〉。

我們試圖使用具有上述結構的「理論版本」，以及具有繼承性的諸理論版本共組成「理論版本家族」，來說明一個原創的理論，產生了許多後繼理論的現象，以及後繼理論和原創理論之間的關係。孔恩使用「典範」以及「在典範下精煉原創理論」來說明兩者的關係；拉卡托斯主張具有一共同結構（硬核、保護帶和啟發術）的一系列理論，合組成一個研究方案；勞丹則以「研究傳統」（研究領域內的存有論假設與解決問題的方法）和研究傳統之下的「特殊理論」來說明。對本書而言，這類「一般理論」（典範、研究方案、研究傳統）和「特殊理論」的「垂直」二分法，似乎都破壞了科學家建構理論的整全性。大科學家會建構他自己的理論版本，包含一套整全的存有論、方法、論域、模型和通則，儘管他們可能繼承另一位大科學家的理論版本，但是並不是在哪些固定的項目上承襲之，而是他們分別在不同的項目上有不同的繼承、改良、與更新。也就是說，後繼理論與原創理論間是一種家族關係；家族內的每個成員彼此間，乃是一種在歷史之流中前後相繼的「平行」關係，而不是「上下垂直式的從屬」關係。

「理論版本家族」乃是把具有繼承關係的許多理論版本聚集起來看待，合稱為「一個家族」。理論版本如同家族中的個人一般，具有獨立的「人格」，是家族建立的基本單元。然而，要如何指認(identify)同一個理論版本？這一點包括三個不同的層次：(1) 在整個科學史中指認出一個理論版本；(2) 在一位科學家的廣泛研究中，指認出一個理論版本；(3) 在一個理論版本家族中，指認出一個理論版本，並與其它理論版本區分開來。

首先，科學家個人建構的理論，有其個人的認知、表達與風格，乃是理論版本的第一個指認特徵。如此產生一個問題是：一位大科學家，可能針對不同的主題建立不同的理論版本，例如牛頓同時在「運動」和「光」兩個主題上，分別建立了他的力學理論版本和光學理論版本，顯然，區分這兩個理論版本的判準是它們的「主題」—分別是「運動」和「光」；但是，我們注意到兩個理論版本又可統合在一個更大的「自然哲學」的理論版本之下，這表示，牛頓亦針對整個自然試圖建構一個完整的自然哲學（也就是自然科學）理論版本，力學和光學不過是其下的二個局部理論版本；笛卡兒同樣企圖發展一整個（自然）哲學科學的理

論版本，但是笛卡兒主張光學和天文學／宇宙論的基礎是力學；進一步，力學又得奠基在形上學之上。於是，這引發了如下問題：大科學家會針對研究主題進行什麼樣的「學科分類」？他又會如何認知「學科間秩序」？這個問題我們將在第七和八章的討論。第三，同一家族內的理論版本，又該如何指認和分辨？一個主要的方式是透過「科學區分」的組織模式而建立一個分疇分類的「概念架構」，以及透過主題分類而建立「模型階層體系」，兩者皆被體現在理論版本的表達系統中，我們則透過分析科學文獻中的表達來重建每一理論版本的概念架構和模型階層體系——這兩者的差異，區分了同一家族內的不同版本。以下第四章將理論性地探討第一和第三個指認問題，並在第五、六章將以牛頓的《自然哲學的數學原理》和赫茲的《力學原理》來具體地例證古典力學家族內的理論版本之間，只是個家族關係，而不是傳統科哲的任何其它垂直式的隸屬關係。我們將分析兩書中的「分疇分類架構」以及「模型階層體系」，展示兩者的網絡與結構雖有局部繼承，但也有局部更新之處。

既然我們以「家族」的概念來說明具有繼承性的理論版本間的關係，我們自然也是以「家族結構」（即「家族成員間的關係網絡」）來理解理論版本家族。也就是說，每個理論版本都有其來源上的親代，也有其同親代的兄弟姊妹版本；以及關係更遠的遠親版本。一個理論版本的親代不見得只有一個，可能是兩個以上的版本「聯姻」或「融合」而生成的「子嗣」。但是，要記住，這樣的家族結構，總是在歷史中發展出來的。就像一個人類大家族通常會有一個或二個始祖，由他或她生成許多後代子嗣；一個顯赫的理論家族，也會有一個或幾個理論始祖，其子代的版本分別繼承（遺傳）了不同的面向或特徵，從而形成家族式的結構。問題是：究竟一個子代版本繼承了親代的哪些面向或特徵呢？反過來說，親代版本是從哪些面向或特徵開展出子代版本？子代的理論版本又是從哪些面向或特徵進一步開展後裔版本？這些特徵或面向也就是從親代理論發展到後裔版本的「路徑」(pathway)。後裔版本總是沿著不同的路徑從親代版本中發展出來，沒有一個子代版本會完全繼承其親代版本的每個重要特徵，也因此才會使科學理論版本呈現出家族式的結構。

一個理論版本家族的始祖版本，扮演著「典範」的角色——換言之，它是一個「典範版本」(paradigmatic version)，我們又稱作「原型版本」(prototypical version)。在使用「典範版本」一類的術語時，我們試圖將「典範」這概念再理解為一個始祖版本在理論版本家族中扮演的「角色」或「功能」，而不是孔恩式的「有序的訓練要素」(disciplinary matrix)。同樣地，一個原型版本能夠生成子代和後裔版本，也意謂它具有相當的「啟發力」，能夠打開一片研究的新領域，就在這個意義上，我們將說一個原型版本同時也做為一個研究方案(as a research programme)。因此，這個拉卡托斯式的術語，也將被我們重新詮釋成一個原型版本扮演的「啟發角色」或擁有的「啟發功能」。本書主張，具有啟發力的特徵有五：原理定律等通則、模型、論域中的存有論範疇架構、自然哲學的

學科分類與學科秩序、目標價值與方法論——我們稱之為「形式要項」。換言之，它們也是理論版本家族的不同發展路徑。不同的原型版本在不同要項上的啟發力有所不同，因此它們的發展路徑也不盡相同（參看第七章）。例如，牛頓版本的通則與模型具有強大的啟發力，因此其後裔版本往往沿著兩路徑而發展；相反地，笛卡兒版本的目標價值與方法論和存有論範疇架構，具有強大的啟發力，甚至連牛頓家族也難以避免受其影響（參看第八章）。

理論版本家族的發展，總是處在與其它家族競爭的環境下，競爭也是理論發展的四個核心現象之一。兩個理論家族的競爭，也就是兩個家族成員互相批判，以及成員生成後裔版本的能力的競爭。一個能啟發更多科學家，吸引更多科學家投入其「研究方案」下工作，生成更多理論版本，就具有更強的競爭力和啟發力。當然，兩個理論家族要互相競爭，至少其成員的部分主題必須有交集。因此，「主題」、「批判」與「生成與繼承」乃是「競爭」現象發生的三個條件。從這兒我們也可以看到，「繼承」、「生成」、「競爭」與「啟發」這些概念與其所代表的現象之間的關係。本書第七章，我們將發展一個全面的理論版本家族之發展與競爭的理論，第八章我們將以渦漩理論家族與牛頓的天體力學家族競爭的實際歷史，來佐證第七章的觀點。

最後，必須一提的是，本文並不考察理論發展、變遷與選擇的因素，我們並不打算探討「為什麼一個家族最終獲得成功，其對手卻失敗了？為什麼一個家族會取代另一個家族在科學版圖中的勢力，其內部與外部因素是什麼？」並不是我們認為這不重要。相反地，它們相當重要，但是在發展出一個完整的得失之評價理論之前，我們有必要先建構一個家族發展與競爭的路徑圖。套用力學中的「靜力學」(statics)（研究機械結構與結構中的靜力作用）、「運動學」(kinematics)（描述運動物體的軌跡）和「動力學」(dynamics)（研究力量與運動軌跡的關係）的區分，本書的第二三四五六章建構的是「理論的靜力學」——在「理論運動學」的背景和架構下；第七八章考察的是「理論的運動學」——在一個「理論靜力學」的充分發展之基礎上。讓我們把「理論動力學」留待日後。

肆、方法與架構

一般科學哲學對科學（科學活動、科學理論等等）的研究有下列幾種主要的方法：(1) 邏輯分析和重建(logical analysis and reconstruction)：應用邏輯工具來「分析重建」科學理論，往往包含了重新表達和重新呈現。例如邏輯經驗論的述句觀點要求將科學家的原始表達以一階邏輯的標準形式重新呈現出來；而模型觀點則應用邏輯模型來重建種種特別理論之間共同語意結構。然而，這種方法彷彿暗示了科學家本人的呈現

或表達，在邏輯上都不夠恰當完整——這是否是哲學家的偏見⁸？(2) 歷史解釋(historical interpretation)：根據科學史（包括科學史家的史著和原始科學文獻）所提供的材料來解釋科學活動的興衰起落或科學概念的傳承變遷。然而，目前歷史學派所涉及的主要是科學活動：包括觀察、理論、實驗、科學家社群、社會文化條件等等被揉合成一巨大塊體(macro-block)而進行一種巨觀性質的探測，儘管他們常常要用到理論這個概念，但一個完整的理論分析或說明卻付之厥如⁹。(3) 「認知—歷史的分析」(cognitive-historical analysis)或「歷史—認知的分析」(historical-cognitive analysis)：結合認知科學對人類認知的研究和科學歷史以發掘科學家的種種認知能力對理論建構的參與，或者科學家從事各種科學活動背後的認知基礎。「認知—歷史」意味先運用認知科學中的既成理論，再用來分析解釋科學史現象；「歷史—認知」是檢查科學史的發展來考察科學家特別的認知能力¹⁰。這兩個「二合一」的方法比較不會受到限制：也就是說它們可應用到較巨觀性的整體科學活動，也可應用到較微觀性的個別項目如理論、實驗、觀察、思考、推理等等主題，所以具有相當大的發展潛力。

正如孔恩、拉卡托斯都「後設性」地應用其理論到科哲本身的發展上，我們也將自我應用本書所發展的理論版本概念。一個理論版本絕不是無所傍依，憑空而生，總是發展自其親代的理論版本：或者大部分繼承某個單一親代理論，或者融合或整合幾個親代版本。但是，一個理論版本也總是會有所更新、有所調整。尤其是整合幾個親代版本的理論版本，自然相對於每一個親代會顯現出相當大的異質性。本書試圖發展一

⁸ 吉爾(Giere 1988, p. 63)也提出類似的批評。雖然史尼德(Sneed, J. D. 1979, pp.2-3)曾指出哲學家對科學理論的邏輯結構之重建有兩種目標，第一種目標是尋求所有理論所共有的邏輯結構，並以此為區分一個理論是否為科學理論的判準，這是一種規範性的理論研究；第二種目標只是尋求特定理論實際的邏輯結構，再將這個邏輯結構推廣到各種科學理論上，這是一自然化的研究態度。但是，史尼德的重建法仍然相當難以符合科學文獻，因為它幾乎完全忽略文獻中的實際表達。

⁹ 沙普斯(Patrick Suppes)強烈地懷疑科學史家和科學史進路的科哲家對「科學革命」的研究之合法性。他認為目前的對科學革命研究的科學史料都太原始，不足以支撐嚴格的科學變遷之研究。他推薦普萊斯(Price)式的量化研究，並且主張只有在我們先將理論的結構勾勒出來時，我們才能進一步跨向理論動力學的研究(Suppes 1993, pp. 15-23)。筆者相當認同「先勾勒出理論的結構，再進行理論動力學的研究」之觀點，但普萊斯式的研究並不足夠。。

¹⁰ 「認知—歷史」和「歷史—認知」之區分並不容易辨識，然而我們仍能根據優先順序和著重的程度做一個區分。前者的做法如吉爾(Giere 1988, 1999)、Thagard, P. (1988, 1992)、Gooding, D. (1990)等人；後者如 Nersessian, N. (1984)、Miller, G. (1987)。有趣的是「認知—歷史的分析」是 Nersessian 提出的概念(1987, 1992)，但 Nersessian 本人在 1984 年的著作中卻是先進行歷史分析，再引用認知的理論，她 1992 年的論文則先引用認知的理論，再從事歷史分析。筆者關於這兩者的區分，乃是出於徐光台教授的啟發。

個科哲的理論版本，一個「科學理論版本與理論版本家族的結構與發展」之科哲理論——它不是波柏(Karl Popper)、拉卡托斯、勞丹等認知下、具規範性評價性的科學方法論，而是較接近孔恩一只作理論式、模型式的「模釋」理論發展的「運動」現象，但並不作任何「動力」的探討。換言之，我們的「科哲理論」，也將後設地應用「理論蘊涵模型」的論點，亦即，它蘊涵了一個模釋「理論結構」和「理論變遷」的模型，一個以「網狀分疇」、「樹狀區分」、「家族結構」、「家族發展路徑」等形象式概念所組成的「概念架構」或「概念模型」。

基於上述的目標、方法和架構，本書主要內容分成八章：第一章回顧科哲史上對理論、類比和模型的探討，尤其是討論與評估理論的語意觀點之得失。理論的語意觀點主張邏輯性的抽象模型乃是科學理論的核心、它固然是理論的模型觀點之前導，卻有其缺陷。第二章「科學區分」從孔恩後期的「分類」和「詞彙結構」的觀點出發，區分「分疇」和「樹狀區分」的概念，主張此兩者為組織科學理論的概念架構之基本方式。第三章「認知模型及其分類」討論認知進路的科哲家吉爾(Ronald Giere)之觀點，並部分繼承、部分更新地提出一個科學理論的模型階層體系之結構；第四章「理論版本取代典範的精煉」，顧名思義，試圖發展「理論版本」的概念來取代孔恩「在常態科學下精煉典範」的概念；同時以「理論版本家族」的概念來取代「典範」。第五章則應用第二三章的成果，詳盡分析牛頓《自然哲學的數學原理》中的力學理論版本之結構；第六章則以赫茲的《力學原理》為標的，四五六章聯合展示了「理論版本家族」成員間的家族相似關係。第七章全力發展「理論版本家族」的概念，包括家族結構、家族的一般發展歷程、家族發展的路徑，以及家族間的競爭，我們也評估了拉卡托斯、勞丹和傅大為等所提出的發展與競爭理論；第八章以渦漩理論家族和牛頓力學家族為例，詳盡地展示與佐證第七章中的理論。

現在，這個「理論」、這個模型（或模釋）或者這整個說明，將以先前所設立的三項恰當說明的標準來加以評價。我們是否滿足了該三項要求？在第二章和第三章，我們探討科學理論的組織結構，分析它如何透過「分疇」、「分類」和「認知模型體系」而組織成整體，並展示其整全性與系統性，如此滿足了(R2)的要求。在發展理論版本內在結構的過程中，我們在第四、五、六諸章所分析的例子都是來自科學文獻：包括古典力學教科書、牛頓的《自然哲學的數學原理》、赫茲的《力學原理》、笛卡兒的《哲學原理》等書，同時根據它們的認知、表達與編排來建立理論版本的組織結構，我們的理論內容分析，也完全滿足(R1)的要求。最後，在第四章的探討中，我們論證理論版本與理論版本家族的概念，最能恰當地說明理論繼承與理論更新的歷史現象；在第七和第八章中，我們考察理論版本家族的發展，是建立在子代理論版本的生成之上；同時家族間的競爭，也建立在後裔版本的繼承與生成之上，如此地說明了科學理論發展的繼承、更新、生成與競爭的歷史現象，從而滿足了(R3)的要求。

第一章 模型和理論的歷史縱覽

科學理論是科學知識的主要載體。直觀的說，科學理論是關於自然世界的系統性知識(systematic knowledge)或知識系統(systems of knowledge)；科學理論裡的每一局部都必須與該理論裡的其他部分互相關連。以研究科學知識本質為主要目標的科學哲學，其核心往往就是科學理論的本質之研究。科學哲學家常常會問：「什麼是科學理論」、「科學理論是怎麼組織的、怎麼構成的」、「什麼是科學理論的結構」以及「什麼是所有科學理論不可或缺的成份」等，這些問題也是所有科學理論的哲學研究者所面臨的共同問題。

從歷史發展的事實來看，述句觀點、模型觀點和認知觀點的諸學說彼此之間也有類似科學發展般的既更新又繼承的動態關係。本章就讓我們先進行歷史回顧的工作，以便對這些觀點的動態關係與發展有一初步瞭解。我們將詳細討論上述三種觀點的代表性學說，並展示為何它們都無法滿足導論中所提出的要件。因此，我們要提出一個新的說明模式。

壹、從邏輯實證論到理論的模型觀點

第一個科學理論的優勢觀點和進路起於本世紀二三十年代的邏輯實證論(logical positivism)。邏輯實證論的哲學家們系統性地整合了彌爾(John S. Mill)的歸納主義(inductivism)、馬赫(Ernst Mach)的實證論(positivism)、弗列格(Gottlob Frege)和羅素(Bertrand Russell)的邏輯理論，提出了看待科學理論的完整觀點。後來，邏輯實證論擴展成邏輯經驗論，兩位代表性人物卡納普(Rudolf Carnap)和韓培爾(Carl G. Hempel)各自形構了科學理論的有力詮釋，在六十年代之前，得到普遍地支持與接受，而被稱作「公認觀點」(received view)或「標準說明」(standard account)。

科學理論的公認觀點可以簡述如下：一個科學理論由一形式公理系統和一組對應規則所組成的。公理系統乃是應用一階邏輯語言所表達的理論定律，所謂理論定律是指含有理論詞的普遍敘述，它們扮演公理系統中的基本公理之角色。對應規則是一種解釋規則，它連結理論詞和觀察詞，透過觀察詞而提供經驗意義

給形式公理，這被稱作「局部解釋」。這個理論的詮釋中包含了下列著名的特點：「觀察語言—理論語言」二分法、「局部解釋」、「形式化的公理系統」、「對應規則」。

公認觀點自六十年代起開始受到嚴格批評，「觀察詞—理論詞」的二分法是首要標靶¹，局部解釋、對應規則也難以倖免(Suppe 1977)。公

¹ 譬如帕特南(Putnam 1962)、費耶阿班(Feyerabend 1962)、孔恩(Kuhn 1962)、阿欽斯騰(Achinstein 1968)。另帕特南也批評了「局部解釋」的概念。

認觀點不再受到公認（反而「公認」為不恰當）。由於公認觀點將理論詮釋為「局部解釋的形式化公理系統」，亦即述句或語句集合，相當於在存有論上將理論界定為語言存目(linguistic entities)。所以公認觀點又被稱作述句觀點或句法進路（相對於後來的語意進路而言）。然而，公認觀點所呈現的一階邏輯的理論結構，很難說明科學文獻的理論結構，因此很難滿足要件(R1)。

說科學理論是述句集合也即是語言存目，意謂著不同的敘述將產生不同的理論（這裏考察的語言存目指的是述句而不是語句，相同的述句可以有不同的語句，好比「下雨」和「It's raining」是兩個不同語句，卻是相同的述句）。但是有些不同的理論之間是繼承關係，有些則是革命關係，述句觀點無法分辨這兩者，因為同樣都只是敘述上的不同。例如牛頓的力學敘述（三大運動定律）和拉格朗日(Luis de Lagrange)－漢彌爾頓(William R. Hamilton)的力學敘述（拉格朗日等式加漢彌爾頓原理）被視為前後相繼的理論；而愛因斯坦的相對論(the theory of relativity)敘述則是對牛頓、漢彌爾頓等人的理論革命，為什麼？述句觀點沒辦法恰當地回答這些問題。一個傳統的答覆是，我們可以設定前後相繼理論的不同敘述之間的「等值條件」(equivalent condition)，好比牛頓理論和漢彌爾頓理論擁有等值條件，所以它們只是相繼的不同句式系統。換言之，以「等值條件」來做為「同一理論」的判準。然而，所謂的等值條件，是指因漢彌爾頓的公式可以引導出牛頓的公式，才說它們是等值的，也就是說「等值」意味著設定條件下的「可導衍性」²。但相對論也可以在設定條件下導出牛頓理論！我們可以因此說相對論等值於牛頓理論嗎？相對論因此也是牛頓理論的繼承理論而已嗎？顯然不行。

當然，述句觀點可以不承認科學歷史的發展有「既更新又繼承」的現象，主張科學發展只是單純累積。但這種累積觀並不能融貫地說明種種科學史料，也受到歷史學派以豐富的史料來反駁。如果累積觀不恰當，述句觀點的理論結構之主張就無法說明科學史的現象，所以述句觀點不僅在科學發展的議題上完全失敗，在科學理論的結構上，其主張也無法成立。哲學家們開始思考替代它的新進路。

七十年代起，有一些哲學家開始標舉科學理論的「模型觀點」來進行理論結構的研究（當然，這個觀點的萌芽可以上溯到五十年代的邏輯家，甚至三十年代末的科學家馮紐曼(John von Neumann)和勃克霍夫(George Birkhoff)。什麼是科學理論的模型觀點？簡單的答案就是應用集合論和模型論的「邏輯模型」概念來定徵(characterize)科學理論。然而在邏輯模型的概念興起之前，科學哲學家一般提及模型時，總是指類比的模型，和科哲家口中「理論」（特別是述句觀點的理論概念）完全是兩回事。換言之，「模型」的概念本身以及它和理論的關係在科學哲

² 就漢彌爾頓理論和牛頓理論之間的導衍而言，其等值條件自然是「能量」的公式，譬如透過動能的定義($E=1/2 mv^2$ ；E 表示能量)，即可連結動量和動能（即 $E=1/2 Pv$ ；P 表示動量）。

學中有一個演進的歷史，我們希望能簡短地回顧這段歷史，並檢討其得失。

貳、早期的模型和理論之分

在十九世紀末到二十世紀初的科學哲學中，模型和理論被認為是不同的東西。模型是一種透過類比來說明對象的工具，而理論則是以符號句式（或數學等式）來描述對象的定律通則。然而科學家卻往往混用兩者，譬如用來說明波以耳－查理定律的「氣體分子動力論」(the dynamical theory of gas)是一種假想大量氣體分子碰撞以維持密閉空間的氣體壓力之模型（類比於球體的碰撞），但如其名所示，科學家卻習慣稱之為「理論」。事實上，不管模型是哪一種，模型和理論對科學家來說一向就不易分辨，或者科學家覺得沒有必要去分辨。然而，六十年代前的哲學家卻總是試圖去區分它們。

對理論和模型以及兩者間的關係之探討，在本世紀初已有對立觀點出現。哲學家們問著：模型是理論的一部分嗎？或者只是誘發建立理論的心理性、實用性的工具？法國科學家兼科學哲學家杜恩(Pierre Duhem)在其影響力極大的名著《物理理論的目標與結構》³(*The Aim and Structure of Physical Theory*)中，把理論定義為「從小量原則中演繹出來的數學命題系統」⁴，目標是「儘可能簡單地、完備地、正確地表象一組實驗定律」(1991, p. 19)，並且指向一個「自然分類」(natural classification)。模型在杜恩看來是說明性的角色，只為了讓一般人能容易理解科學家的工作；但杜恩強調「理論並不是說明」⁵，從而否定模型是理論的一部分，也拒絕模型有助於理論的形成並且排除它對理論和理論發展的必要性⁶。後

³ 本書法文第一版於 1906 年出版，1914 年出第二版。普林斯頓大學於 1954 年出英譯本並有法國著名物理學家德布洛依(Louis de Broglie)作序。我們使用的是 1991 年再印製的平裝本。

⁴ 杜恩進一步刻劃了物理理論的四項後繼運作(successive operation)為：(1)物理量的定義和測量；(2)假設的擇定；(3)理論的數學發展；(4)理論和實驗的比較(ch. 2, pp. 19-30)。我們可以看到杜恩對科學理論的定義，已經奠定了後世對科學理論進行分析的基本規模。

⁵ 杜恩所用的「說明」之意思，和後來科哲家普遍關切的「科學說明」並不相同。杜恩的「說明」概念其實相當後來科哲家所謂的「解釋」(interpretation)或是「模釋」(modeling)（提出模型來解釋），很自然地，模型的功能乃是說明。說明恰對比於理論，而理論的功能和角色是再現性的(representative)或描述性的(descriptive)（見 ch. 3, ch. 4）。

⁶ 杜恩十分推崇思維經濟原則(economy of thought)，這幾乎是他的先驗原則。他對理論的種種考察和評判，大抵是以此原則為標準——正是在思維經濟原則的考量下，他相當貶抑模型在科學中的地位和功用。雖然他承認某些科學天才在發展科學理論同時，也提出了說明性模型，但他不認為模型對理論的提

來，英國科學家兼科哲家坎貝爾(Norman R. Compbell)在 1920 年出版了《物理學：基本要素》(*Physics: The Elements*)⁷提出了和杜恩針鋒相對的論點。坎貝爾認為理論的目的在於說明實驗定律(experimental law)⁸，包括兩群命題：一群是「假說」(hypotheses)，它們敘述了說明定律的觀念；另一群則稱為「辭典」(dictionary)，使用實驗詞項來解釋假說中的觀念，這個辭典總是由假說和某些已知定律間的類比而建立起來。可以看出坎貝爾所謂的辭典正描述了一個模型⁹。在這樣的立場上，坎貝爾強烈地反對杜恩有關模型的各種論點，堅持模型正是理論必要的部分¹⁰。

出和發展有什麼必然關係。杜恩從科學史中發現那些提出說明模型、並強烈主張模型重要性的科學家多數是英國人（如凱爾文爵士(Lord Kelvin)、法拉第、馬克斯威爾等等），他就開始分析英國科學家和歐陸科學家的思想和心智差異。杜恩認為提出說明模型的心智是一種「廣而弱」(ample and weak)的心智，英國科學家大抵屬之；而歐陸科學家的心智普遍是「窄而強」(narrow and strong)，他們慣於從少量定義和原理推演出數學系統(ch. 4)。杜恩這種「心智」區分其實相當站不住腳，但顯然受到法國背景的影響（十八、九世紀間法國一群用大量高等數學將牛頓力學發展成「理性力學」的科學家）。後來如夸黑(Koyré)、孔恩等科學史家指出在十八、九世紀時，牛頓力學有歐陸數學學派和英國的經驗學派之分。這種科學學派的分流可能只是歷史偶然，很難說是英國人和歐陸人的心智差異。

⁷ 我所用的是美國紐約 Dover 公司於 1957 年出版的版本，改名為《科學的基礎：理論和實驗的哲學》(*Foundation of Science: The Philosophy of Theory and Experiment*) 內容完全沒有任何縮節和變動。

⁸ 在坎貝爾的論述中，凡是使用「定律」的地方，都是指實驗定律。「定律」意謂「命題—它們斷說了能由實驗和觀察建立起來的關係。在這個關係中被斷說的詞項大致或整個地構成了物質世界的判斷」(Compbell 1957, pp.38-39) 但這些詞項並不是感覺的直接判斷，而是這類判斷的複雜集合。坎貝爾反對定律所斷說的關係是因果的（亦即，定律基本上不是因果律）；定律的兩個特徵是「聯結的齊一性」(uniformity of association)和「函應性」(functionality)。坎貝爾並沒有理論定律(theoretical law)的想法；理論定律的概念是後來邏輯實證論的產物，但對坎貝爾來說，理論只能假說或假說性的敘述。

⁹ 當然，坎貝爾並沒有使用「模型」這個字眼和概念。在他的理論中，說明或解釋乃是以熟悉觀念代替不熟悉的、簡易代替複雜的。因此辭典正是透過一個熟悉且簡易的類比來解釋比較不熟悉的假說觀念。

¹⁰ 在坎貝爾看來，杜恩定義下的理論是另一類型的理論。坎貝爾作了「數學理論」和「力學理論」(mechanical theory)的區分：前者是杜恩所謂的「數學命題系統」，典型的例子是傅利葉(Fourier)熱傳導理論(theory of heat conduction)；後者的典型例子是說明波以爾定律的氣體分子動力論(the dynamical theory of gases)。乍看之下，這是兩種不同的理論，後者是坎貝爾心目中需要模型解釋的標準理論，前者似乎不需任何類比和模型。然而，坎

坎貝爾對理論的分析，奠定了邏輯實證論對理論結構的基本分析，並發展成三十年代到五十年代間的「公認觀點」。最初物理學家布里基曼(Percy W. Bridgman)提出了「操作型定義」(operational definition)而將「辭典」觀念明確化，並且回到杜恩的立場而反對「模型」和「類比」對理論的必要性¹¹；接著，卡納普進一步提出對應規則和化約句(reduction sentence)來精煉且代替操作定義¹²。三十年代到五十年代是科學理論的述句觀點之黃金時期，接受述句觀點的哲學家也常探討「模型」在科學裏的功用和價值，但多半反對「模型」是理論的一部分。例如，韓培爾剖析了類比模型在科學說明裏的使用，也討論了杜恩和坎貝爾的立場，最後仍認為類比模型只是實用心理層面(pragmatic-psychological aspects)上的工具(Hempel 1965, pp. 433-445)。韓培爾也提及另種科學說明上常用的「理論或數學模型」(mathematical model)，指出它有一種限制應用範圍的理論性格，它的基本假定常常過於理想化或過於簡化¹³，因此在說明和預測價值上也有其侷限(pp. 445-447)。

從六十年代起，「模型」是理論要素的主張似乎又慢慢興起。納格爾(Ernest Nagel)雖也是述句觀點的支持者，但他主張公理系統、對應規則和模型是理論的三種成分¹⁴，他的立論約莫是坎貝爾和卡納普之間的調和。納格爾所謂的「模型」隱涵兩種含意：既是對理論設準(postulates)的語意解釋，又總是可以形成局部的視覺形像(Nagel 1961, pp. 91-97)；

貝爾論證兩者的差異並沒有乍看之下那麼大，前者仍需要類比和模型(Compbell 1957, pp. 122-158)——只因傅利葉等式的類比和氣體動力論的類比也不太相同，所以坎貝爾視它們為兩種不同類型的理論。

¹¹ 布里奇曼(Bridgman 1951, pp. 52-60)另提出了「心智建構」(mental constructs)的觀念和「模型」的觀念相提並論，說它們是心智的而對比於物理實在(physical reality)——可由操作定義來保證。布里奇曼承認模型和建構是有用的思想工具，但它們的使用也有危險性，心智模型和心智建構如果不能建立操作定義，則不足以被承認為物理實在。

¹² 本書「附錄」一文，對述句觀點有比較詳細的介紹，並且比較它和模型觀點的兩種公理化系統。

¹³ 譬如經濟行為的理論模型乃是建立在嚴格的行為人的經濟合理性之假定上；又如危機決策的理論模型可能受限於人為化的控制條件，這些條件往往只考慮瑣碎的少數選項。

¹⁴ 納格爾(Nagel 1961)認為理論有三種成分(components)：(1)抽象演算(abstract calculus)，它是說明系統的邏輯骨架；(2)對應規則；把抽象演算關聯到觀察和實驗資料上，以指派給它們經驗內容；(3)抽象演算的解釋或模型，它是一種多少較熟悉的概念或視覺材料，從而把理論的血肉賦予作為理論骨架的抽象演算(p. 91)。

前者其實相當於語意模型之雛形，但納格爾認為這種模型必定也可用某種圖像的形式表現出來¹⁵。

海絲(Mary B. Hesse)繼承坎貝爾的立場，在1962年的著作中，提出類似納格爾的理論，明白地反對述句觀點中觀察語言獨立於理論語言的論點，她主張對理論（形式演算）的解釋同樣也會涉及理論的概念，也就是，我們需要使用「類比模型」（借用另個理論，透過類比推論來說明新的現象）來解釋形式公式裏的概念，因為類比模型也正是一種理論性的建構。這使她比坎貝爾和納格爾更遠離邏輯經驗論。對納格爾來說，模型解釋並不能代替對應規則，因為它不足以演繹出實驗定律。對海絲來說，理論並不需要對應規則，它只包括形式敘述和解釋的類比模型。雖然海絲的模型並不是模型進路下的抽象關係模型，而且也沒有脫離理論是語言敘述的觀點，但她的理論已經預示了模型觀點——後者先是把模型看成理論的核心、進而把模型當成理論本身而推翻了語言述句的地位。

參、類比和模型

早期科哲家的詞典中，模型和類比總是孿生並存，也常常被混用著。然而，必須強調兩者畢竟仍是不同的概念。模型是「非原件的存目」(non-original entities)，類比則是一種思考推論方式，它展示了模型和原物件之間的關係——重現、模倣、模擬、類比等等其實都包含了類比推論的因素。據此，我們可以將大部分科學家和哲學家說及的模型都歸類為「類比模型」。然而，類比模型有沒有一般結構呢？

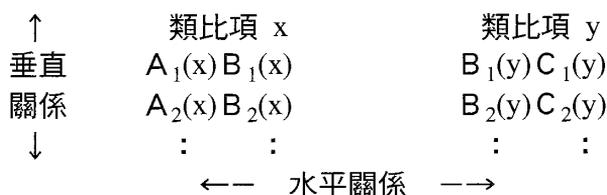
納格爾區分兩種類比：實質類比(substantive analogy)和形式類比(formal analogy)。所謂實質類比是指科學家在建構理論來說明現象時，往往藉助於心中比較熟悉的經驗或事物系統，它們可以被圖像或形像地表示出來，以便用來類比和解釋所面對的新現象；而形式類比則是指透過某種抽象關係的熟悉結構之模型來建構理論，科學史上的著名例子是重力定律(law of gravity)的數學等式和庫倫定律(Coulomb's law)的數學等式之結構相似性(Nagel 1961, pp. 110-117)¹⁶。納格爾和韓培爾對理論雖有

¹⁵其實，對納格爾來說，模型的含意就是既能滿足理論設準的語意解釋又能加以圖像化。我們說它隱涵了兩種含意，乃是來自薩普(Suppe 1977)的詮釋和區分。薩普以「數學模型」和「圖記模型」(iconic model)的概念來區分納格爾的兩種模型含意。因為薩普認為並非所有的科學理論之模型都是視覺性又令人熟悉的圖記模型，好比量子理論並沒有這種模型，但可以為它建立一個滿足設準的語意解釋(pp.97-98)。

¹⁶重力定律是 $U=Gmn/r^2$ ，其中 U 是兩物間的重力， G 是重力常數， m, n 分別兩物體的質量， r 是兩物的質心距離。庫倫定律則是 $F=k|Qq|/r^2$ ，其中， F 是兩物體間的靜電力， k 是比例常數， Q, q 個別是兩物體間的電荷量， r 是兩物間距離。這是筆者自行提出的例子。

相近的觀點，然而兩人對模型的說明以及賦予模型的功能和地位卻大不相同。

1966年海絲出版了《科學中的模型和類比》(*Model and Analogy in Science*)再度強調類比模型在理論中的必要性，甚至賦予它更重要的角色和地位。她模擬了杜恩主義者(Duhemist)和坎貝爾主義者(Compbellist)之間的對辯(dialog)，並且試圖為模型提出一個類比邏輯的基礎，她可以說是當代第一位深入分析類比模型的邏輯結構之哲學家。海絲分析了模型類比的內在結構，而提出了一個模型的一般形式架構：



在這個架構中， $A_1(x), A_2(x), B_1(x), \dots$ 代表出現在系統 x (模型 x) 中的特徵； $B_1(y), C_1(y), \dots$ 代表出現在系統 y 的特徵。 $B_1(x), B_1(y)$ 代表系統 x 和系統 y 的共同特徵。垂直關係是指每一列如 $A_1(x), A_2(x), \dots$ 或 $B_1(y), B_2(y), \dots$ 之間是因果關係，而水平關係主要指 $A_1(x) B_1(x), B_1(y) C_1(y)$ 之間的相似關係，可以被化約為同一 ($B_1(x)$ 和 $B_1(y), \dots$) 和差異 ($A_1(x)$ 和 $C_1(y), \dots$)。譬如，在聲波和光波之間的類比可以表示為¹⁷：



其中括號內表相同的性質 (在聲音和光的類比中，正是應用波理論的共同特徵)。

在這個一般架構下，類比仍可再區分為三類：

一、形式類比(formal analogy)：這是指對相同的形式理論之不同解釋中存在著一一對應，它的類比項只擁有上述形式架構中的 $B_1(x), B_2(x), \dots$ 這一系列的性質以及 $B_1(y), B_2(y), \dots$ 這一系列的性質¹⁸。

¹⁷這個例子是海絲自己的例子，但括號中的項目是筆者自行添加。

¹⁸譬如，我們把彈子球的碰撞之力和路徑的幾何理論拿來當作氣體分子碰撞的模型，顯然只要把彈子球替換成氣體分子，就可以恰當地說明氣體分子間的

二、實質類比(material analogy)乃是海絲的重心，也即是上述一般形式所主要表達的類比模型。實質類比有兩項條件：(B1)詞項間的水平二元關係是相似性關係，而它可以化約為組成這詞項的特徵集之同一和差異關係；(B2)模型中的垂直關係是某個科學意義上的因果關係。

三、概念類比(conceptual analogy)：它是一個能滿足(A)，但卻是完全想像性，不可能落實為物理系統的模型，只能在理想化情況下，從存在的因果理論中演繹出來¹⁹。

以上是海絲關於模型的類比結構之分析和分類。類比既然是「類比模型」中模型和被模映物件之間的推論關係，不同形式的類比理所當然地衍生不同類型的「類比模型」，如此，我們將會得到一個類比模型的分類。

肆、模型觀點的興起

自五十年代起，科學哲學開始出現零星的聲音，提出看待理論的新觀點，反對邏輯實證論把理論視為一組述句(a set of statements)，而主張理論應該透過模型來定徵—模型不僅是理論的一部分，而且理論的核心就在於模型—讓我們把這樣基本立場稱作「模型觀點」或「模型進路」。只不過這模型並不僅是科學家和科哲家一向談及的類比模型，而是數理邏輯意義下的模型—為了分辨之故，我們將稱之為「邏輯模型」(logical model)。

從邏輯實證論或述句觀點以一階邏輯公理系統來定義理論，到模型觀點以邏輯模型來定徵科學理論，隱隱然地反映了現代邏輯的發展軌跡。因為，邏輯模型的概念正是在三十、四十年代左右開始進入數理邏輯家的視界裏，並且在五十年代發展成數理邏輯的一分支—「模型論」(model theory)。它的誕生源自邏輯家對形式語言的解釋之關切，以及從純粹演算的句法學(syntax)發展出形式語意學(formal semantics)之企圖。

碰撞途徑，這是海絲所言的形式類比。注意這種形式類比和納格爾所言的形式類比並不太相同。對海絲來說，形式類比共享有相同的形式理論，只是解釋不同。我們可以看到在海絲的類比架構中，形式類比缺乏垂直關係的項目，也就是意味了缺乏因果關係的預測。正因如此，海絲認為形式類比的預測力微弱(Hesse 1966, pp. 68, 129)。

¹⁹海絲舉道爾頓自己的說詞「在紙上組合我的原子」為例證。因為它的理想性和想像性使概念模型難以進一步以實驗來驗證，就這一點而言，概念模型無需受到實驗物質和器材的侷限，使它具有某種任意性。但同時它也有很強大的預測力，因為它們賦予理論詞新的解釋，使理論詞聯結到可觀察事物上，而這可觀察的事物必須根據模型的指引或者由模型來決定它的範圍，就「可觀察事物由模型來決定」的意義而言，概念模型並不是任意的(Hesse 1966, pp. 87-89)。

在我們進入科學理論的模型觀點之前，讓我們先看看數理邏輯中的模型論、以及它究竟如何定義「模型」的概念。

模型論，簡單地說，即是處理形式語言和它的解釋兩者間的關聯²⁰。在面對形式語言所組合成的一組語句時，我們可能想去解釋（解釋的主要目標在賦予真假值）這些語句。我們可以在一定的對象集合內，對每個語言成分指派某個對象或對象間的關係和函應，這種解釋便是一個模型（或稱「結構」，因為它反映了語句的諸語言成分間的種種關係，就如建築物的內在結構一般），又稱為「關係結構」。一個關係結構是由一個對象集合(a set of objects) D （又稱為論域或定義域(domain)）和對象間的關係集合 R 所構成的有序對(ordered pair)²¹：

$$\langle D, R \rangle$$

其中 $R = \{R_0, R_1, \dots, R_n\}$ 。 R_0, R_1, \dots, R_n 表達了 D 中對象間的所有關係。而每個關係 R_i 都可再用對象間的有序組(ordered tuples)的集合來表示，例如，若 R_0 是個三元關係， R_1 是個二元關係， R_j 是個 m 元關係，則分別表示為：

$$\begin{aligned} R_0 &= \{ \langle a, b, c \rangle, \langle d, e, f \rangle, \dots \} \\ R_1 &= \{ \langle a, d \rangle, \langle a, c \rangle, \langle c, d \rangle, \dots \} \\ R_n &= \{ \langle a_1, a_2, \dots, a_m \rangle, \langle b_1, b_2, \dots, b_m \rangle, \dots \} \end{aligned}$$

其中 $a, b, c, d, e, f, \dots, a_1, a_2, \dots, a_m, b_1, b_2, \dots, b_m$ 均是對象集合 D 的成員。顯然，任何成員間彼此互有關係的對象集合，都可以用 $\langle D, R \rangle$ 這個有序對來表示，所以它是「模型」的一個最簡單的一般形式（這個形式還可以擴張成包含函項(function)和區辨元素(distinguished elements)²²）。

²⁰本論關於模型和模型論的討論，參考 C. C. Chang & H. J. Keisler 合著的 *Model Theory*。楊金穆教授在台大哲研所的“Element Model Theory”課程，給我很大幫助，特此誌謝。

²¹邏輯模型的第一個形式定義是在 1939 年由 N. Bourbaki 所提出的。Bourbaki 是一群法國結構主義數學家共用的筆名，他們雄心勃勃地想推動「數學的結構主義」計畫，試圖把數學奠定在抽象結構的基礎上。

²²包括函項和區辨元素的模型之粗略形式為： $\langle D, R, F, E \rangle$ ，其中 F 是諸函項的集合， E 是區辨元素的集合。 $F = \{F_0, F_1, \dots, F_m\}$ ； $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ， R, F, E 都是集合，可用集合的標準形式來表達，那麼模型的一般形式便是 $\langle D, \{R_i \mid i \in I\}, \{F_j \mid j \in J\}, \{e_k \mid k \in K\} \rangle$ 。 I, J, K 是「索引集合」(index set)，它們是關係、函項等符號的下標之集合，用來標記出不同的關係或函項等等（換言之，索引標誌不同，代表兩者不同）。這些索引集合可以透過聯結函應(connective function) p 和 f 而對應到自然數集合(N^+)上。即 $p: I \rightarrow N^+$ ； $f:$

模型論的主題是對對象的關係結構——也就是模型，但它關注的是所有模型的共同結構，亦即我們並不考慮任何特定的、具體的對象，而是抽取對象集合（其成員是語句集所論及的對象）以及對象和對象之間的關係。在面對任何擁有關係的對象集合時，我們可以使用某種語言來表達它們，這些表達構成一個語句集合。如果有語句集合的所有語句，其所有語言成分均已解釋，而且相對於此結構均為真（通常會有某種系統性，即成員間彼此相關形成一整體，如形式語言系統、一階邏輯系統、代數系統等等），我們便稱它為一個「理論」。換言之，在模型論看來，一個理論基本上仍包含一個語句集合，但是語句集合本身只是一些語言符號的組合，需要我們給它一個模型M來解釋它，才能知道它表達了什麼對象以及對象間的關係和函應。這個模型M通常就被稱作「理論的模型」(a model for a theory)。

我們可以用各種不同的語言來形構理論的語句集，但模型論也不考慮任何具體的、特別的語言，而是使用足以代表各種特別語言的抽象符號。這種一般性的抽象符號集合就被稱作「形式語言」。形式語言可以組合成各種語句集合，一個未經解釋卻具有系統性（換言之，只有句法上的組合性而沒有語意性質）的語句集合就稱作「形式系統」(formal system)。一個形式系統接受模型解釋而且為真，就是一個理論。既然形式系統只是一個形式的「框架」，所以它能夠接受各種模型的解釋，而且可能有多個模型均讓此形式系統為真。因此，一個形式系統可能對應多個理論。

如果我們從模型出發，由於模型論下的一般模型也是由一些形式符號來表達，單一模型也可能滿足許多不同的形式系統（亦即不同的語句集合），那麼我們可以說這些語句集合擁有一個共同的模型，也就是共同的結構。這種情況是一個模型可以滿足許多不同的語句集合²³。也就是說，我們可以對一個形式語句集合作許多不同的解釋（賦予其種種不同的模型）。

原則上，模型與形式系統間的「一對多」和「多對一」兩種情況均可以應用到科學上。現在問題是：哲學家如何應用模型論或邏輯模型到科學理論的結構上呢？

從科學史上，模型論者發現科學家認為「相同」理論者，往往有不同的句式系統(formulation)，譬如古典力學中牛頓的幾何分析和十八世紀法國理性力學(rational mechanics)的代數分析，就是相當不同的兩種句式系統，卻仍表達「相同的」東西和內容——亦即都是表達物體間的位置、

$J \rightarrow N^+$ 。

²³譬如我們可以有一個模型M的理論 $Th(M)$ 這種表示法，意謂在一語言集L下，以L組成的所有在M之中均為真的語句集合 Th 乃是M的理論。我們也可以有一理論 Th 的所有模型，表為 $Mod(Th)$ ， $Mod(Th) = \{M \mid \text{所有在L語言下可以解釋 } Th \text{ 的模型 } M\}$ 。

力量和質量三種函項關係。那麼，我們可以運用「模型」的概念來給予這些不同的句式一個共同的結構，這個共同的結構便能顯示出不同的句式仍然表達著同一個理論。但這樣一來，理論的本質就不能定位在「述句集合」上了，因為如果理論是述句集合，那麼不同的述句集合理當代表不同的理論，我們若說「不同的句式系統（述句集）表達了同一個理論」將是相當矛盾的說法。

在抽象化、形式化的模型論中，我們可以根據需要將理論規定為已解釋的述句集，還必須再考慮組成這些述句集的語言集合（哪些語言集合內的元素組構了該述句集？）語言集合、述句集、模型互相配合的每一種情況都可以用很精確的符號來表示，追究不同的述句集是否表達相同理論並不是模型論的議題。但在具體的、實際的科學理論中，解決不同的述句集是否描述相同的理論是理論分析必須面對的問題，而且科學理論總無法被形式地解釋為真。因此，我們不能完全挪用模型論的整個系統。為了解答不同的述句集可以表達相同的理論，我們需對理論的本質和構成做一番界定。我們可以將理論的本質和構成定質為一個結構和它所滿足的諸述句集；也可以將理論的本質定位在只是(only as)這個共同的結構（模型）上。這兩種定義都可以很適切地說明「不同的句式表達了同一個理論」，因為「相同理論」的判準並不是「述句集」也不是「已解釋的述句集」，而是各述句集表達或指稱的「共同結構」。而這共同結構也就是模型，我們便有了科學理論的模型觀點。

模型觀點的早期發展仍然受到述句觀點的公理化思路之影響，試圖將科學理論重建為一個公理系統。既然不採述句觀點，當然不能也不可能沿用述句觀點那種句法式的公理化方法，模型觀點的主要提議人沙普斯(Patrick Suppes)就發展了「集合論述詞的公理化方法」(Axiomatization method of set-theoretical predicate)。不過，為什麼用「集合論」這個詞而不是「模型論」呢？事實上，模型的元素都是集合論探討的事物，一個模型是由對象集合、關係、函項排列而成的有序對，它是理論的本質或核心。在存有狀態(ontological status)上，對象集合、關係、函項、有序對這些事物都是集合論存目(set-theoretic entities)，因而模型和理論都將被定質為集合論存目。但在述句觀點下，做為語句集的理論則是被定質為語言存目，它的成分元素是符號、詞項、語句等等。沙普斯曾列出兩種存目的成員(Suppes 1957, p. 232)：

語言存目

句式(formula)
語句(sentence)
語句連詞(connectives)
變詞(variables)
詞項(terms)
量化詞(quantifiers)

集合論存目

個體(individuals)
有序對(ordered couples)
集合(sets)
空集合(empty sets)
關係(relations)
函項(functions)

在理論的模型觀點看來，理論模型（集合論存目）乃是語句集（語言存目）所指稱的東西。也就是，科學理論的本質在於被指稱物(the referred, the referent)，而不是指稱符號(the referring)。

總之，邏輯模型是一種抽象的集合論存目，它試圖以抽象的方式（集合論的符示方法）來顯示對象間存在著關係和函應。「邏輯模型」因而可以表達為「某種抽象的集合論存目，用來『符示』(signify)一些對象之間的種種抽象關係」。注意，它現在既不是重現、也不模倣和類比某物，而只是「符示」出結構—集合論結構，顯現在個體集合、關係、函項等集合論存目的有序排列之間—的存在。讓我們稱它為「有序符示」(ordered signifying)。

現在「邏輯模型」的概念被用來定徵科學理論，但有直接與間接的兩種應用方式。直接方式乃是應用邏輯模型來重構和公理化科學理論，為「公理化的模型進路」所採納；間接應用則只利用邏輯模型中的語意結構觀念，並不主張將科學理論公理化，而著重分析理論的語意結構，是為「語意模型進路」。二十世紀八十年代後的認知進路的科學哲學家，則進一步捨棄語意模型的抽象特性，主張科學理論的語意結構也是心靈中的認知模型，因而建立了第三條進路，即科學理論的模型觀點之認知進路。

模型觀點的公理化進路的缺陷在於重蹈了一階邏輯公理化的覆轍：它所揭示的只是科學理論的抽象邏輯結構，而沒有納入科學理論的其它面向：如階層性的分類、圖像性的思考、類比的可能性、概念模型的建構等等。換言之，公理化進路過於形式化，以致排除了科學理論的非形式部分。再者，形式化的公理進路幾乎已在史尼德(Joseph Sneed)的手上燦然大備，只留下很少的發展空間。如果我們想進一步前進的話，沿著公理化的進路恐怕無法再做些什麼。因此，非公理化的語意進路就成了一條新出路。

伍、薩普論科學理論的語意概念

或許是怕和類比模型的概念混淆，薩普並不使用「模型觀點」而較喜歡使用「理論的語意概念」來稱呼他自己對科學理論的「理論」²⁴。同時他慣用「理論結構」(theory structure)來指稱理論—「理論結構」不是「理論的結構」，而是科學理論本身就是一個結構，一個在模型論意義上的抽象結構，而且表達它的諸語言句式(linguistic formulations)共同指稱了它。因為它是一種關係性的結構而且容許各種不同的語言句式，所以是非語言存目(extralinguistic entities)。薩普也稱它為集合論存目。

薩普的整個「語意概念」的學說可以整理成下列論旨：

1. 科學理論是集合論意義下的理論結構，是一種集合論存目。
2. 理論結構透過物理系統(physical system)的中介而模釋了現象系統的行為(behavior of phenomenal systems)。
3. 物理系統是現象系統的「摹本」(replica)，是只考慮了一些參項的系統。這些參項是現象系統屬性的抽象或理想化；考慮的所有參項在某一時刻構成了物理系統的狀態，狀態是現象系統的殊象之抽象或理想化；整個物理系統則是現象系統的抽象或理想化。
4. 理論結構由一個或幾個理論定律組成，每個理論定律反映了物理系統在時間中的狀態變化。
5. 計算某一時刻所有參項的數值可以得到「理論引導的物理系統類」(class of theory-induced physical system)，如果「理論引導的物理系統類」和「物理系統類」是同一的，則理論為真。
6. 語言敘述表達理論結構，但本身不是理論的一部分。表達理論結構的命題集或句式和理論結構、物理系統、現象系統之間有著錯綜複雜的關係。

從第一個論旨，我們就可以看到薩普對理論的定質跟模型論已有所差別。現在這個結構不是某理論的結構，反而它就是理論本身。但如果理論就是一種結構的話，它又將以什麼樣的方式相關到現象上？薩普說：

當吾人提出一理論時，吾人刻劃了理論結構而且斷言了一理論性的假說—它宣稱真實世界的諸現象(或一個特殊的真實世界現象)和

²⁴以下討論均出自薩普 1989 年的著作第一章到第五章，由於薩普的論述相當複雜，使用的術語相當繁複，而且他的論述方式是由簡而繁，逐層展開深入，往往先在前一章提出了較簡單的概念，在後一章進行相同概念但更細密的描繪和稱呼。為了簡潔地勾勒出薩普的理論輪廓，我們無法依照諸概念在薩普原書中的出場順序，而必須統整性地整理，因此，我們也不易指明各觀念的詳細出處。一般說來，他的所有重要觀念均出現在各章之中（特別是第二到五章）。

該理論結構處在某種投影關係(mapping relationship)，藉著這個關係，該結構模釋了現象的動態行為(dynamic behavior)。(Suppe 1989, p. 4)

這段論述意味著，在現象的行為中存在某種變動的秩序，它投影成理論結構。結構反映了秩序。我們也可以說這抽象結構就是現象行為的抽象模型，用「抽象」來定徵是因為它和現象間並不是類比關係，而是集合論式的關係。但是理論結構對現象行為的反映並不是如鏡子般巨細靡遺、毫無遺漏地鏡映(mirroring)出來，理論結構真正反映的不是世界的實際現象，而是一類特別的現象：從實際現象中進行某種程度的抽象、理想化、可控制之物理系統。

我們常說科學理論的目的在於描述、預測和說明現象。但在理論的語意概念看來，理論從來不會考慮實際現象一切特徵，而只是抽取(abstract)少數「參項」或「參數」(parameters)，並在特別的條件下來進行考察。這兒所謂的「參項」是指在一理論中被我們視為相關的變項(variable)或數值²⁵，它們是理論所需而且只需的函應或關係。譬如，古典動力學只考慮的物體位置、質量和受力三個參項；而不會去考慮物體形狀、顏色等等其它特徵。因此，物理系統只是實際現象的「摹本」——透過參項和理想化環境來定徵的抽象關係系統。

進一步，薩普認為，理論所描述、預測和說明的總是要包括過去、現在、未來一切所可能遭遇的物理系統，也就是，「因果上可能的物理系統」(causally possible physical system)。因果上可能的物理系統對應著因果上可能的現象（也就是一切可能發生的現象），理論試圖去定徵的所有因果上可能現象共組成「意圖用理論來說明的範圍」(intended scope of the theory)。因果上可能的現象、因果上可能的物理系統和理論三者形成一個傳遞鏈，即：

²⁵parameter，在科學裏應用得相當廣泛，一般通譯成「參數」或「參量」，因為它一向以數值或數量的形態出現。而且它在各不同學科中，往往具備特別的意義。如果從薩普的用法看來，他是把一切理論相關的關係和函項都稱作parameter，所以我們譯成「參項」，當它擁有數值時，就成為「參數」了。同樣的道理，function也是如此，就它做為一般變項上，我們稱為函項，但如果它擁有數值（被指派數值時）。我們就可改稱「函數」。

理論———→因果上可能的物理系統——→因果上可能的現象
 描述、預測、說明 摹本

理論就是透過這種傳遞而相關到現象上。

理論被定徵為結構化的存目，而且反映了現象的行為的秩序。所謂現象的行為是指組成一現象的諸元素，彼此間的關係在時間中的變化，從一個狀態到另一個狀態，形成一秩序序列(sequence)。這意味著一個現象也是系統性的事物，它有一個關係結構；物理系統既然是現象系統的摹本，理所當然也摹狀(replicate)了其關係結構。

現象系統的關係結構，其實我們已在集合論關係中看到，它擁有一些殊象(particulars)以及定義這些殊象的屬性(attributes)。相應於某一現象系統的物理系統則擁有可能狀態(possible states)——它們相應於現象系統中的殊象（薩普把所謂的理论存目(theoretic entities)定質為狀態）；以及參項——它們相應於現象系統中的屬性。薩普這兒所謂的殊象並不能用「對象、物件」(object)的概念來瞭解，而應該用「在某一時間連續體的截面上之『事件切片』(event slice)」來理解。也就是現象系統行為相當於一事件，它反映在物理系統上就是一序列的狀態，故物理系統的每個狀態相當於現象系統的每個「事件切片」²⁶（參看後文圖解）。狀態由一個物理系統的所有參項在同一時間內的量值(values)集合來定義，這些量值又被稱作物理量(physical quantities)，它們可以是決定論式(deterministic)或統計式的(statistic)。

從現象系統中抽取、抽象出物理系統有兩種方式：純抽取(pure abstraction)和理想化(idealization)。純抽取是忽略實際現象中的某些屬性，只將那些重要的屬性抽取成相關參項，所以它在因果範圍內可能落實(realize)成現象系統；而理想化則在參項上附加一些特別條件，這些條件使得物理系統在因果上完全不可能落實²⁷。

理論結構反映出物理系統和現象系統的關係結構，它們可以用下表來展示：

²⁶這兒「時間連續體的截面」、「事件切片」等用詞是我自己用來解釋薩普的「殊象」概念之用語。可以看到，薩普這兒延續了羅素、懷德海(A. Whitehead)把「事件」看作為世界的基本成分之觀點，當然也接近早期維根斯坦的《論說》(Tractatus)的「事態」(state of affairs)

²⁷薩普舉出純抽取例子如帶電球體現象是可能透過實驗控制而出現在完全隔離其它因素影響的環境中；理想化則如古典質點力學中，需要物體變成一種在空間定位上是無擴延、無向度的質點，這是一種理想化，在實際上完全不可能落實。

一般層次	理論	因果可能的物理系統(類)	純抽象	因果可能的現象系統(類)
元素層次	一組量值函項	狀態參項	理想化	殊象屬性

我們已經知道了語意概念認知下的科學理論本質、結構以及透過物理系統和現象間的對應關係。接著，我們當然會想問：理論如何刻劃物理系統的行為？讓我們應用薩普對理論定律的集合論刻劃來說明（以下參看 Suppe 1989, ch. 5, pp. 153-167）。理論定律不同於經驗通則 (empirical generalizations)，理論定律是一個物理系統的狀態變化之關係。物理系統在每個時刻都處在某一狀態下，系統的行為就是它在時間中的狀態變化。一個理論可以只擁有單一定律或幾條定律。單一理論定律可以表示為兩個任意時刻間的關係 $R(s(t), s'(t'))$ ， R 是個一個關係集合，亦即所有任兩個時刻的狀態之間的關係如 $\langle s(t_1), s'(t_2) \rangle$ ， $\langle s(t_1), s'(t_3) \rangle$ ， $\langle s(t_2), s'(t_4) \rangle$ ，……等等都屬於 R ，其中 $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots$ 形成一個時間序列 α ， t, t' 是代表 α 中任意元素的變詞。 $s(t), s'(t')$ 也可以用關係符號來表示，即是許多參項（數值）在同一時刻 t 或 t' 之下的關係，讓 p_1, p_2, \dots, p_n 代表同一時刻下的參項，則可以表示為 $s(t) = \langle p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t) \rangle$ ； $s'(t') = \langle p_1(t'), p_2(t'), \dots, p_n(t') \rangle$ 。以這種符號表示方法，後繼型的古典決定律(classical deterministic law of succession)可以定義如下：

定義：讓 t, t' 是在 α 時間序列上變動(ranging over α)的變詞。則一個後繼型的古典決定律是一個關係集合 $R(s(t), s'(t'))$ ，對每一個 t 和 t' 以致 $t < t'$ 而言，符合下列條件：

若 $\langle s(t), s'(t') \rangle \in R$ 而且 $\langle s(t), s''(t') \rangle \in R$ ，則 $s' = s''$ 。

也就是說，如果系統在 t 時刻是狀態 $s(t)$ ，決定律將決定系統在 t' 時刻時必將只處在同一狀態 $s'(t')$ 之下，所以在 t' 時刻可能出現的任何狀態 $s''(t')$ 必然等於 $s'(t')$ 亦即 $s'' = s'$ 。傳統上有三種類型的定律：後繼律(laws of succession)、共存律(laws of coexistence)、互動律(laws of interaction)，加上薩普自己提出的準後繼律(laws of quasi-succession)和目的律(teleological laws)；上述每一類型都可再區分出「古典決定律」和「古典統計律」兩種類型，一共有十種類型的定律之定義。這些定義不僅定義了諸類型的定律，而且展示了理論定律如何描述物理系統的行為。在實際的運算上，諸參項將被計算成具體的量值，這一組量值就是理論結構所反映的物理系統之狀態。

然而，上文所展示的只是單一定律，如果一個理論擁有超過一條以上的理論定律時又該如何表示？薩普並沒有闡述這一點，不過我們可以根據集合論和薩普的「理論邏輯」來提出一個理論結構的一般符號表示： T 代表理論， $T = \langle R_1, R_2, \dots, R_n \rangle$ 其中 $R_1 = R_1(s_1(t), s_1'(t'))$ ， $R_2 = R_2(s_2(t), s_2'(t'))$ ，……， $R_n = R_n(s_n(t), s_n'(t'))$ 。 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)$ 代表在 t 時刻各定律所共同描述的物理系統之各種不同層面的狀態（由不同的定律

來刻劃)， $s_1'(t')$, $s_2'(t')$, ..., $s_n'(t')$ 代表在 t' 時刻該物理系統的各不同層面之狀態。舉例來說，古典質點力學基本上擁有兩個定律：牛頓第二和第三運動定律（第一運動定律是第二定律的特例），所以它可以表示為： $CPT = \langle L_2, L_3 \rangle$ ，其中 $L_2 = R_2(s_2(t), s_2'(t'))$ ， $L_3 = R_3(s_3(t), s_3'(t'))$ ，又 $s_2(t) = \langle p(t), m(t), f(t) \rangle$ ， p 表位置（向量）， m 表質量， f 表力量（向量）。 $s_3(t) = \langle p(t), f(t) \rangle$ 。亦即第二定律考慮了三個參項，第三定律考慮二個參項（其中位置函數指示了力的方向關係）。

由上可知，在理論的語意概念看來，理論所描述的是物理系統一序列的狀態，而狀態是某一同時間的一組參項數值。因此，給定一時間點，以及所有參項數值，再透過理論定律，我們就可以描述或說明物理系統的可能狀態是由哪個狀態產生，並且預測它將演變成什麼樣的狀態——換言之，我們可以透過理論來推算出在那些狀態下的各個參項數值——這就是理論對物理系統的行為之「描述、預測和說明」。

但這兒描繪的是一個成功的理論，問題是：我們如何判定一個理論是否成功了？在薩普的論點下，這也是一個如何斷定理論真假的問題。

主張類比模型是理論一部分的觀點，或者主張邏輯模型或抽象模型就是理論的模型觀點，通常會被視為「工具論」，亦即我們只能談及模型（也就是理論）的有效性(validity)或合用性(utility)（有無有效或合不合用？）²⁸，而不可能判斷模型或理論是否為真或為假。但把真假量度應用到模型上就讓人感到格格不入，我們頂多只能談及一個模型是不是合用的？或者是不是成功的？若要談論模型的真假將是相當奇怪的說法。但薩普卻提出科學理論的「準實在論」(quasi-realism)之立場²⁹，在這個立場上，他因而理直氣壯地問及：一個理論結構是否為真或假？

初步地說，要判斷理論是否為真，我們必須從理論所包含的定律去推算一系列時間的參項數值，這些參項數值決定了一個「理論引導的物理系統類」，如果「理論引導的物理系統類」和「因果上可能的物理系統類」是同一的，這個理論即是經驗地真³⁰。反之，則為假。注意，現在我們區分了普遍性的「物理系統類」和個別性的「物理系統」。以「理

²⁸或者對范弗拉森來說是「適當性」(adequacy)的問題——「適不適當」(adequate or inadequate)？范弗拉森是模型觀點的主要發展者，他也反對我們去問及理論和模型的真假，不過他的立場卻不是工具論，而只能算是「反實在論」，用他自己的術語來說，是建構經驗論(constructive empiricism)。

²⁹如我們一開始就談及：本論並不想涉入實在論、工具論的爭議。故我們只要知道薩普的「準實在論」立場，以致讓他問及理論結構或理論模型的真假是有意義的，暫時就夠了。

³⁰薩普在這兒的論述還提及「後繼律」、「共存律」、「互動律」三種不同類型定律的不同差異(Suppe 1989, pp. 84-86)。我們已經討論了後繼型的古典決定律，其它定律類型我們不擬繼續討論。此外，理論的驗證更涉及實驗問題，薩普也用第四章來討論，但我們也不擬在本章中討論實驗檢驗的問題。

論引導的物理系統」來說，每個時間點上的參項數值構成了單個「理論引導的物理系統」，而所有時間點的參項數值之集合即是「理論引導的物理系統類」，它對應了「因果可能的物理系統類」，後者再對應「因果可能的現象類」。讓我們用下面的圖 1-1 來顯示：

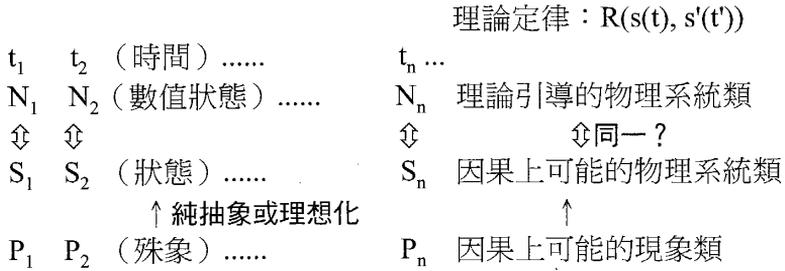


圖 1-1

其中因果可能的物理系統之參項數值，乃是由實驗所測量出來的（這被稱作「硬」資料(“hard” data)，它並不是單純直接的觀察敘述³¹）。

薩普更深入地提出了斷說理論真假的條件。在提出一理論時，吾人許諾了某個自然種類的現象系統存在於理論所意圖說明的範圍內；繼而吾人呈現了理論結構而且斷說理論引導的物理系統類同一於因果可能的物理系統類，這一斷說也讓吾人許諾了因果可能的物理系統類乃是現象系統類的純抽取或理想化的摹本。若理論為真，則勢必要滿足這些許諾，薩普將它們整理成較形式化的條件(Suppe 1989, pp. 97-98)：

讓 T 是一個擁有意向範圍 I 的理論，T 的確定參項為 p_1, \dots, p_n 。則 T 是經驗地真，若且唯若

- (a) I 是因果可能的現象系統之自然類集，它的論域擁有殊象，而 p_1, \dots, p_n 是這些殊像的屬性。
- (b) T 所容許的參項 p_1, \dots, p_n 的可能值，要不是 I 中的現象系統之殊象屬性，就是這類屬性的理想化。
- (c) 理論引導的物理系統之集合，同一於因果可能的物理系統類。

如果 T 無法滿足這三條件中任一個，則 T 是經驗地假。

³¹「硬資料」的概念是薩普提出來對應於「敘述觀點」所謂的「觀察敘述」。薩普認為在實際的科學實踐中，我們所搜集的現象資料必定訴諸於相當複雜的理論體，它們通常包括實驗設計、控制和實驗工具，以及可靠性的檢查和實驗過程的校準等等因素，這些事物不能簡單地把它們歸為直接的觀察資料(Suppe 1989, pp. 63-65)。

讓我們再把整個關係重製成如下圖 1-2：

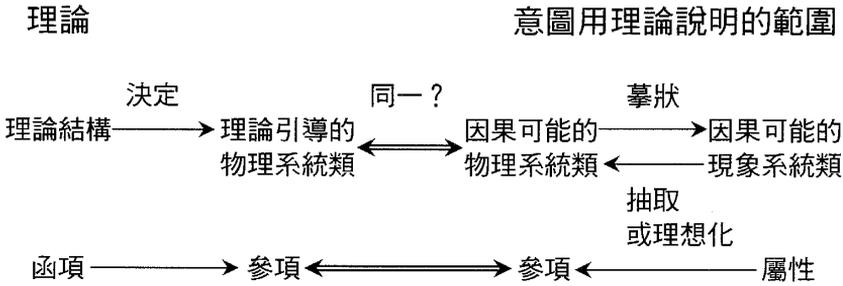


圖 1-2

現在，可能會有一個疑問：傳統上一向把理論視為語言敘述，在語意概念的觀點下，將如何定位？

陸、語言句式和理論結構

既然在「語意概念」的定徵下，理論並不是那些作為語言存目的命題集；命題集乃是那指涉理論的表達，但理論又是用來描述、預測和說明物理系統，物理系統又是現象的摹本，它們都是和理論不同的東西，它們也都需要用語言來表達。如此一來，表達和理論、物理系統、現象三者間的關係就變成語意概念所不得不處理的問題。

在後設邏輯、集合論和模型論的理論系統之建構當中，一個一般性的、標準的方法是：列舉所使用的語言元素，它們組成一集合 L_k ，繼而讓語言元素根據形構規則(formation rules)而組成公式(formula)（即是命題或語句）。我們解釋一語句集，讓其每一構式均為真，這時我們可視該語句集為理論 T ，並給了它一個模型 M 。有時我們的語言不足以處理我們意向的所有對象，這時我們需要擴張我們的語言元素之數目，於是我們有了擴張語言集 L'_k 。

薩普對表達和理論的處理大致根據這個標準方法。當然，因為他面對的不是抽象理論而是科學理論，而且也因他把理論定徵在模型上，以致他的成果和數理邏輯的一般理論建構有不少差異。薩普提出了「理論句式語言」(theory formulation language)和「擴張的理論句式語言」(expanded theory formulation language)兩個語言集³²，前者是後者的次語言。顧名思義，它們是用來形構理論的語言元素之集合。

³²以下我們提及理論句式語言或擴張後的理論句式語言時，我們指的是所有語言元素的集合，而不是指任何個別的語言元素。

首先，透過理論句式語言的元素，我們就可以組合成一個命題集來表達一個理論，這命題集稱作理論句式³³。不管局部或完全的理論句式，它都會有下列三項特徵：(1) 既然理論其實是許多參項的關係結構，我們賦予參項數值以便描述、預測和說明物理系統的行為，如此我們也需要一種基本命題(*elementary proposition*)—它存在於理論句式語言之中，它表達系統狀態 *s* 的某個參項 *p* 在某時間 *t* 中的數值 *q*。(2) 存在一種理論的邏輯(*logic of theory*)³⁴，基本命題根據這種邏輯而被結合起來。這種理論的邏輯是由理論所決定的，不同的理論可能擁有不同的邏輯。(3) 理論句式的命題集內的每個命題對理論而言，必定為真(Suppe 1989, pp. 89-90)³⁵。現在這些命題可以同時表達理論、物理系統和現象系統。但是這些表達上的能力顯然出現在理論被驗證成立的情況下。

但如果理論被否證了，也就是存在著因果可能的物理系統，擁有那理論視為不可能的狀態，那麼描述這種因果可能的物理系統之命題就不是屬於理論句式語言的命題了，這顯然指示了我們需要擴張我們的理論句式語言成為「擴張的理論句式語言」，這樣才能產生表達那些用來否證理論的因果可能的物理系統之命題。

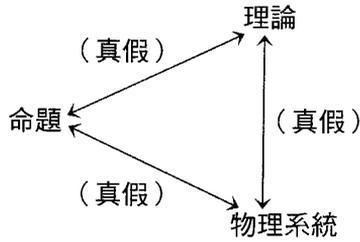
上文我們已經討論了理論真假的條件。然而傳統上我們談及真假總是針對著語言性的命題，但在語意概念下，理論並不是命題，卻仍需用命題來表達，而理論和命題又都有真假可言，這便形成頗為複雜的語意關係：也就是描述理論的命題有真假可言，而描述理論所試圖去預測和說明的物理系統之命題也有真假判斷，理論對於物理系統也必須訴諸真假值，三者形成如下關係：

³³薩普區分了命題的兩種用法：「嚴格用法」和「擴大用法」(*amplified usage*)。

在理論形構語言中的命題，其嚴格用法只是指示理論的某個特徵、一個特別的物理系統以及一個特別的現象；但在命題的放大用法上，則命題可以同時指稱理論、許多物理系統和現象系統。如此，命題的擴大用法總是可以用來進行預測(Suppe 1989, p. 88-89)。

³⁴薩普所謂理論的邏輯，相當於後設邏輯系統的理論建構之「形構規則」。在科學理論中指的是推論規則或演算規則的意思。譬如牛頓力學除了一般代數外可以再應用微分方程；而量子力學理論也可以應用希爾伯特空間(*Hilbert space*)或矩陣代數(*matrix algebra*)(Suppe 1989, pp. 89-90)。很明顯地，薩普的這些例子指的正是某種數學理論，而把它們的演算規則可以稱作理論的邏輯。

³⁵這一點可以語句邏輯(*sentential logic*)的模型論做個比較。一個語句邏輯的模型容許很多不同的語句表達(序列) S_i ，但所有不同的語句集指向一個共有的真語句集 *A*，這個真語句集 *A* 即是這些表達 S_i 的模型，也是它們的次集合。換言之，在語句邏輯的模型中，模型也是個語句集，但它的每個成員語句都必定為真。



命題由理論句式語言組構而成的，理論句式語言又可加以擴張，於是形成相當複雜的真假判斷網絡。譬如，當理論為真時，也就意味「理論引導的物理系統類」和「因果可能的物理系統類」是同一的，那麼在句式語言中的每個對「理論引導的物理系統」為真的命題，對理論也將為真。可是如果理論在經驗上為假時，這意味了「因果可能的物理系統類」並不同一於「理論引導的物理系統類」，換言之，至少有某一個「因果可能的物理系統」和相對應的「理論引導的物理系統」並不相同；則對任一「因果可能的物理系統」為真的命題，並不一定對理論為真（用「不一定」是因為可能剛好該命題對理論也為真，但那只是巧合）。但如果命題被擴大使用去描述整個因果可能的物理系統類時，這命題為真，那麼它對理論則必然為假。除此之外，還有許多複雜煩瑣的可能性，但薩普並沒有舉例來加以說明。基本上，我們認為這種判斷的煩瑣性是薩普的整套理論之一大缺陷。

柒、范弗拉森的語意模型進路

范弗拉森和薩普是發展語意模型進路的兩位代表性哲學家。除了所用的術語和論述風格不盡相同外，范弗拉森的學說和薩普的語意概念沒有根本差別。但是前者的理論比較簡潔明快，後者則顯得冗長繁複。范弗拉森的論述方式比薩普更為形式化和抽象化，並直接使用了不少集合論和模型論的術語；薩普則應用了許多他自己的術語來闡述集合論和模型論應用到科學理論上的結果。以下讓我們簡介范弗拉森的理論。

對范弗拉森來說，科學理論可以如下的方式來定徵(Van Fraassen 1980, pp. 64-65)：

呈現一個科學理論包括了

(a)是刻劃(to specify)一個結構家族(a family of structures)，亦即理論的諸模型³⁶——它們都滿足(satisfy)某一組公理；

³⁶范弗拉森所謂理論的「諸模型」（結構家族）相當於薩普所謂的「理論引導的物理系統類」，薩普又建立一個共同的「理論結構」來統攝它們。對范弗拉森來說，所有的理論諸結構或模型都能滿足一組公理；對薩普來說，共同

(b) 刻劃這些模型（結構）的諸經驗次結構(empirical substructures)，使它們作為可觀察現象的直接再現(direct representation)；

(c) 理論和現象的關係不是真假，而是經驗適當性(empirical adequacy)。一個經驗適當的科學理論是它擁有某個模型，以致所有的表象(appearances)同構於(isomorphic to)該模型的經驗次結構。其中所謂的表象是在實驗和測量報告中所描述的結構。

這個定徵需進一步說明：(1) 所謂「結構」、「次結構」、「同構」都在模型論中都有標準定義，在這兒范弗拉森賦予這些詞彙的正是這些標準定義中的意義³⁷。(2) 所謂「一個結構家族」當中的「家族」只是「集合」的意思，並沒有任何原型理論中的「家族」含意。(3) 「經驗次結構」乃是理論結構（模型）的一部分，也就是理論中一對應了實際現象的部分。(4) 在「實驗和測量報告中所描述的結構」並不是「理論的結構（模型）」，而是可觀察現象的結構，也就是「表象」。為了方便，讓我們把前者稱為「理論結構」——是使用理論語言所建立的結構；後者稱為「表象結構」——則是使用實驗和測量語言所建立的結構。

的理論結構有理論上的優先性，語言句式（基本命題和理論邏輯）則居於附屬地位。這裏隱涵著兩種不同的思路。

³⁷根據模型論，結構的一般形式為： $M = \langle D, \{R_i | i \in I\}, \{f_j | j \in J\}, \{c_k | k \in K\} \rangle$ 。現在有另一結構 $M' = \langle D', \{R'_i | i \in I\}, \{f'_j | j \in J\}, \{c'_k | k \in K\} \rangle$ 。則「次結構」、「嵌入」、「同構」等函應關係可以定義如下：

(def.1) M 是 M' 的次結構，寫為 $M \subseteq M'$ ，若且唯若 (1a) $D \subseteq D'$ ；(1b) $\forall i \in I, R_i = R'_i \cap D^{p(i)}$ （也就是出現在 M 中的每一個關係都必須等於 M' 限制在 D （不是 D' ，本來 M' 的論域是 D' ，但現在只考慮 D 的次集合 D ）中某一個關係），則 R_i 稱作 R'_i 到 D 的限制(restriction)；(1c) $\forall j \in J, f_j = f'_j \upharpoonright D^{F(j)}$ ，也就是，如果 f_j 是 m 元函項，則所有的 $a_1, \dots, a_m \in D$ ， $f_j(a_1, \dots, a_m) \in D$ ， $f_j(a_1, \dots, a_m) = f'_j(a_1, \dots, a_m)$ （同理，這代表 M 中的每一個函項必須等於 M' 限制在 D 中的某一函項，換言之， f_j 所涵蓋的元素必定都在 D 之內）；(1d) $\forall k \in K, c_k = c'_k$ 。

(def.2) $h: M \rightarrow M'$ 是嵌入(embedding)（或者 $h: D \rightarrow D'$ ； h 稱作滿足函應(satisfying function)），若且唯若 (2a) h 是內射(injection)；(2b) $\forall i \in I, p(i) = n$, for $\forall a_1, \dots, a_n \in D, \langle a_1, \dots, a_n \rangle \in R_i$ iff $\langle h(a_1), \dots, h(a_n) \rangle \in R'_i$ （亦即 M 中的每個關係必定在 M' 中找到某個對應關係——透過 D 和 D' 之間的滿足函應）；(2c) $\forall j \in J, F(j) = m$, for $\forall a_1, \dots, a_m \in D, h(f_j(a_1, \dots, a_m)) = f'_j(h(a_1), \dots, h(a_m))$ （理由同(2b)）；(2d) $\forall k \in K, h(c_k) = c'_k$ 。

(def.3) $h: M \rightarrow M'$ 是同構的，若且唯若， h 既是嵌入函射又是跨射函射(surjection)（亦即 $h: D \rightarrow D'$ 是雙射函射(bijection)； M 中的每一個關係和函項都一對應於 M' 中的每個關係和函項）。

據此，當科學家提出理論時，他刻劃了許多可能的結構或模型——它們都滿足某一組公理，我們也可說這些模型是由該組公理來定義的。舉例來說，古典質點力學之公理化模型，所有抽象的、占有位置、有質量的受力質點或質點系統都滿足公理，它們都是古典質點力學的理论結構（見附錄）。現在這些結構中的局部（論域元素、關係或函項等等）是可觀察或測量的（好比古典力學結構中的質點、位置、質量等），也就是經驗次結構。它和實際的實驗和測量現象之結構（表象結構）間有一個同構關係。我們可以用一個簡單的圖形（圖 1-3）來表示「理論結構」（ M_T ）、「經驗次結構」（ M_S ）和「表象結構」（ M_A ）之間的關係：

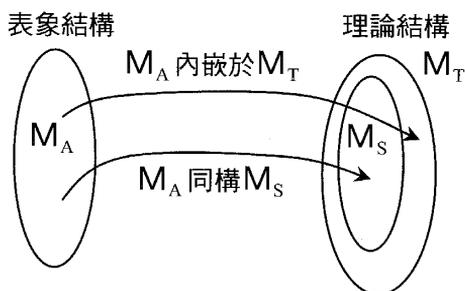


圖 1-3

有時范弗拉森也會說表象結構內嵌於 (be embedded in) 理論結構內，因為 M 內嵌於 M' 的定義正是 M 同構於 M' 的某一次結構。

如果經驗次結構再現了表象結構，那理論結構呢？理論結構又是什麼？和現象有何關聯？范弗拉森認為理論結構再現了某種物理系統的行為。物理系統可進一步「理解為某一定的狀態集合，這些狀態都被一確定的數學空間——即狀態空間 (state space)——的元素所代表。」 (Van Fraassen 1970, p. 328)。譬如，在古典質點力學中主要有位置和動量兩個函項，而這兩個函項必定相對於某一參考座標系統（應用歐幾里德幾何）來計算，則位置 $q = \langle q_x, q_y, q_z \rangle$ ，動量 $p = \langle p_x, p_y, p_z \rangle$ ，那麼這個物理系統的狀態空間之元素便是一個實數的 6-tuples，即 $\langle q_x, q_y, q_z, p_x, p_y, p_z \rangle$ 。顯然，所謂狀態空間就是理論結構，是抽象結構的另一種形式（數學形式）³⁸。

³⁸這種狀態空間的思考方式在早期的科哲中常被用來討論因果性 (causality) 和決定論 (determinism) 的議題，一般稱作「狀態描述」 (state description)。譬如在古典力學中，我們可用三個位置分量和三個速度（或動量）分量來定義質點在每一時間點（瞬間 (instant)）的「機械狀態」 (mechanical state)（而決定一質點在某一瞬間的狀態，如位置和速度，就叫做狀態變項）。如果一個系統在任一瞬間的狀態邏輯地決定了該系統在每一瞬間的其它狀態，這種狀態描述就是決定論的。當然，我們還有其它種狀態描述方式，其典範為電磁場論，

除了狀態空間外，范弗拉森認為理論也用某一組可測量的物理量來刻劃物理系統，因而產生了有關此系統的基本敘述(*elementary statement*)，每一基本敘述 U 敘述了一物理量 m 在一定時間 t 有量值 r (可以寫為 $U=U(m, r, t)$ 或省去 t 而作 $U=U(m, r)$)。現在 U 顯然代表理論敘述，我們可以在 U 和狀態空間 H 之間建立一個函應 h ，這個函應也就是滿足函應，則 $h(U)$ 表示 U 在 H 的範域(*range*)，因此，如果一個基本敘述 U 為真，則它的充分必要條件是：物理系統的實際狀態被 $h(U)$ 的一個元素所再現(Van Fraassen 1970, pp. 328-329)。我們可以用下圖 1-4 來表示：

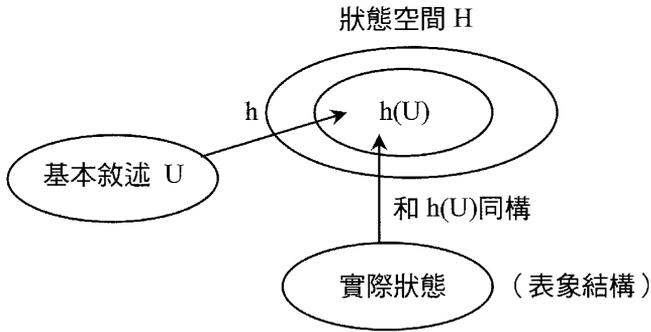


圖 1-4

這個圖表呈現的結構和薩普的命題—理論—現象關係結構十分相似。所不同的是薩普應用抽象理想化的「物理系統」來作為理論和實際現象間的中介項目，而且宣稱物理系統是真實系統的摹本來保證理論說明了「實在」。然而，物理系統和實際現象之間的摹本關係並不能代表它們是同構的(參看下節)。對范弗拉森來說，我們無法證成真實世界的實際秩序以及它和理論間的真實關係，我們只能談及「經驗表象」和理論的「經驗適當性」，表象和理論之間則是同構關係。

捌、薩普和范弗拉森學說的評論

語意觀點在敘述觀點外另闢蹊徑，解決了敘述觀點所產生的不少難題，為科學理論的哲學研究上打開新的研究向度，的確讓我們更加深入地瞭解科學理論的一般性質和一般結構。然而，語意觀點受限於述句觀點的邏輯思路，雖然發展於歷史學派的衝擊之後，卻未能吸收歷史學派帶來的啟示，以致語意概念所呈現的科學理論之分析仍然不能令人滿意。

像金屬的彈性疲乏理論、遺傳學等等均屬此型態；再來還有第三類型的統計狀態描述等等。以上均參見納格爾(Nagel 1961, pp. 278-293)。

如同我們已提及公理化進路試圖把理論定質為邏輯模型的論點，忽略了科學理論中的非形式成分，並不吻合科學文獻的實際表達，也不完全一致於科學家的實際認知方式，所以它不能滿足要件(R1)。理論的語意概念固然不採取公理化路線，但它對理論的定質同樣借用集合論式的邏輯模型，因此仍然擺脫不了公理化進路的困境。下文我們將根據上述條件逐一進行詳盡評論。讓我們從薩普的學說開始。

對理論的語意概念來說，科學理論是由集合論意義的諸關係和諸函項（也可總稱為參項）組成的更高層的關係系統（定律系統），它反映了物理系統的行為，也就是物理系統在時間中的狀態變化，物理系統又被刻劃為現象系統的摹本。這一整個複雜的闡述，呈現科學理論的系統性。我們可以說代表參項的函項和代表狀態的諸函項關係 $(s(t) = \langle p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t) \rangle)$ 由高階關係 $(R(s(t), s'(t)))$ 組織起來，所以科學理論是由這類集合論存目所構成。它提供了科學理論形式結構與內容意義的完整描繪，所以它能夠初步滿足條件(R2)。

然而，語意模型觀點最大的困難在於無法符合科學理論發展的繼承、生成與競爭的歷史現象。理論的模型觀點起於不同的敘述集合如何能視為同一理論的問題，當理論被定質為語言敘述或表達方式所指涉的「對象」—即抽象的關係結構時，如果有不同的表達或敘述指涉了共同的關係結構—即同一個理論—那麼，這些表達或敘述就可以被視為相同理論的不同句式。但是，儘管回答了相同理論能有不同句式，卻產生了另一個困難：亦即，不同的理論可能擁有相同的形式結構。理論結構的成分是「參項量值集合」和「函項」，也就是 $R(s(t), s'(t))$ ，相當於 $R(p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t); p_1(t'), p_2(t'), \dots, p_n(t'))$ 。因此，根據模型觀點，量值集合相同，而且每個關係和函項也都相同的兩個理論敘述的結構，當然應該是相同的理論。假定現在有二個不同的句式，其理論分別為 $R(p(t), q(t); p'(t), q'(t))$ 和 $R'(p'(t), q'(t); p'(t), q'(t))$ ，其中， $p \neq p', q \neq q'$ ，但是在實際計算後的量值 $p(t) = p'(t), q(t) = q'(t), p'(t) = p'(t), q'(t) = q'(t)$ ，則在語意概念看來，這兩個句式和理論是相同的理論。但是，古典運動學(classical kinematics)和特殊相對論(special relativity)的「參項量值集合」可能都是「同一條空間軌跡」（在小尺度的速度下）；函項都是「位置」、「速度」、「加速度」等函數，結構完全相容甚至相同，換言之，完全符合上述情況，但卻是不同且不相容的理論—因為在位置、速度所涉及的空間和時間的概念或物理意義上，兩種理論有了截然的差異。換言之，我們可能會有某些結構相同，卻被科學家視為不同的理論；也可能會有某些結構不同，卻被視為相同理論。理論的語意概念碰到這種情況就失去它的說明力了，因為它只考量抽象的形式結構，忽略了結構成分的實質內容，也就是構成理論的種種詞項內涵的物理意義—而這卻是科學家相當重視的一環。理論的語意概念無法解決這樣的困難！因為理論的語意概念只考慮參項（函項、物理量）在某時刻 t 時計算出來的量值（相當於函項或物理量的外延—指派一定的量值給予一函項，當量值符合經驗時，等於指派真值給予理論，這整個架構都只考慮外延層面），而沒有

考慮它們的內涵意義。忽略內涵意義的結果讓模型觀點無法滿足(R3)要件。

在語意模型觀點中，「古典力學的繼承」是由於諸古典力學家提出同一理論的不同句式：牛頓、漢彌爾頓、赫茲等人的句式都有共同的結構，計算上也是等值的，只是表達和句式不同。顯然，這個觀點正是沒有考慮我們前述之理論的「內涵意義」。如果我們把理論的內涵意義（物理學家口中的「物理意義」）視為理論的必要元素（理論的語意不只是外延的數學結構），我們就不能簡單地把牛頓、漢彌爾頓、赫茲等人的版本視為只是「相同理論的不同表達或句式」。就此而言，語意模型進路預設了相當不同的理論發展觀點，這種理論發展的觀點卻無法被我們接受。

誠然理論的語意觀點借用集合論和模型論的邏輯架構來揭示了科學理論的語意結構；理論家如薩普在論述他的理論時，舉了許多各種科學的實例來佐證他的論點，但理論的語意概念仍無法滿足條件(R1)。理由很簡單：它無法把科學史上的種種建構理論的非形式成分納入考量，也不是科學家慣用的思考和認知方式³⁹。當然，語意觀點可以很容易地辯稱他們所揭開的「集合論式的理論結構」是「理論的本質」，是所有理論所共有的基本特徵；而且理論結構容許各種不同的語言句式—這些語言句式才是那科學史上實際呈現的「理論」。如此辯護反而佐證了科學家是把「語言句式」看成理論，而不是句式所預設的「語意結構」—這一個事實必須被一個「關於科學理論的理論」所說明，而非視之不見。

歷史上的科學家對理論的觀點和呈現的型態表面上是繁複多樣，沒有一致的看法或共同的見解⁴⁰。然而，科學家也是人，是人就受到人類認知條件的限制。科學理論是科學家應用他們的認知能力對自然進行研究的成果，這成果又透過語言或符號系統來表達，最終呈现在科學文獻上。所以，一個科學理論的「本質」和一般結構之理論⁴¹，不能忽略或

³⁹Thagard(1988)提出和筆者相似的質疑。他質問：語意模型論者提出的模型理論結構和科學家應用的認知結構之間的關係是什麼？他以為模型理論結構呈現的是高度理想化的理論描述，但它很難定徵科學家所使用的理論(pp.37-38)。

⁴⁰阿欽斯騰對科學理論是否有共同的結構或本質感到懷疑。見其著作第四章。理論結構問題對阿欽斯騰來說是「理論呈現」(presentation of theories)的問題。阿欽斯騰說：「我想驅逐理論總是在某一方式或者總有一種理想的呈現方式之觀念。這個討論應該產生科學哲學家所謂的理論之結構的洞察....」(Achinstein 1968, p. 138)也就是指說，科學理論顯然有很多不同的呈現方式，因此它不可能有共同的結構。

⁴¹在原型理論的理念下，本書原則上拒絕「共同的本質」或「共同的特徵」這樣的概念，不過，為了和傳統觀點進行比較，我們有時仍然會說及這樣的概念。重要的是，這裏所謂的「一般結構」乃是指我們分析了某些做為範例的

無視於科學家對理論的實際呈現和認知方式。事實上我們的確能發展一個從科學文獻中分析出科學理論結構的方法（見第五、六章）。再者，科學家的確頻繁地運用「模型」這個概念，模型也被部分科學家視為理論的核心。但他們運用的是「各式各樣」的模型，這種「多樣化」的事實是否也能被抽象的邏輯模型中所顯示呢？答案恐怕是否定的。

就美學感受來看，薩普的理論本身固然思慮周到，卻也呈現出一種繁瑣、拖沓的理論風格。將語言敘述排除在理論的成分之外，卻又主張準實在論的立場，讓薩普必須回答理論（也就是模型）真假的問題。理論現在是「語意結構」，在數理邏輯的共識中，模型或結構本身、亦即語意本身，是由真假值的指派來定義的。而且被指派真假值的對象，一向是語句—語言存目。薩普的理論截然區分理論和語言敘述，因而必須同時考慮理論真假和理論的語言句式之真假問題，這讓他的理論變得相當繁複而造作。

現在，模型成為理論，我們必須再對這樣的模型進行真假值指派—從模型論的觀點來看，也就是我們必須談及模型的模型—這在抽象思考和抽象理論的建構上實在是一種負擔。當然，薩普並不是在討論抽象理論，而是具體的科學理論，而且他的理論也能健全地解決模型真假的判定問題，但代價是犧牲了簡潔優雅的美學感受。雖然立場各異，同樣是語意概念的發展者，范弗拉森的理論版本卻受到較多注目，美學因素可能是原因之一。當然美學感受並不足以成為我們拒絕薩普理論的唯一要素，事實很明顯，薩普的理論無法滿足我們的條件。

在范弗拉森的版本中，理論敘述和語言公理仍然扮演了定義模型的重要角色。因此，他並不強調「理論就是理論結構或理論模型」，他只是用模型論的一貫說法：「理論的諸結構或理論的諸模型」。這樣看來，語言敘述仍被納入理論內，只不過，結構是理論的核心。當然，范弗拉森幾乎沒有談及「理論的本質」或「理論的存有論」等等相關問題（或許和他的反實在論、反形上學立場有關），在這些問題上，他並沒有給我們明確的答案。

范弗拉森的論述觀點和風格更接近於模型論的理論建構，甚至我們可以說范弗拉森把模型論的理論建構直接應用到科學理論的結構上。他的論述雖然比薩普簡潔，也抽象簡略得多。在於現象和理論的關係上，范弗拉森忽略了理論對現象的理想化和抽象運作，而允許現象和理論的次結構間有著可疑的同構關係（參看薩普(1989, p. 102)的批評）。此外，兩人在理論和結構、模型以及語言敘述的關係上也有思考路線的不同。雖然如此，他們的理論並沒有根本性的差異，薩普的語意概念所產生的「忽略理論詞項的內涵或物理意義」同樣也發生在范弗拉森的理論上。

科學理論之組織方式、構成成分、構成方式和種種特徵，這些組織、成分、方式和特徵形成了所有可能理論的內在結構之範例。因為我們是以第一個高度發展和充分成熟的牛頓力學為藍本來揭開這個理論的一般結構。

似乎有些諷刺地，標榜理論的「語意概念」或「語意模型」的觀點，卻仍然忽略理論詞項的「內涵意義」。何以故？原因在於語意模型的哲學家們只考慮敘述的外延性的關係結構，對理論的語意概念來說，當他們談及「解釋」、「語意」等等概念時，他們所想的只是指派外延對象來滿足公理和敘述中的詞項；進而外延對象彼此間形成一個關係結構，也就是模型，整個地指派給公理和公理系統；如此提出結構和模型也就是給予敘述一個解釋，也就算是語意的解答。顯然，這種「外延進路」是他們的忽略內涵意義的關鍵原因⁴²。當然，范弗拉森的理论也無法滿足我們的條件(R3)。

我們可以同意范弗拉森揭開了「理論的形式語意結構」，反映的是理論結構的抽象的、形式的語意層面。但是，這樣的抽象和形式化的進路再次忽略了實際的科學理論的非形式成分，也沒有顧及科學家的認知與科學史的實況。總而言之，薩普和范弗拉森的語意觀點，乃是「化約主義」與「外延主義」下的產物，無法通達我們的目的地。

玖、從模型到分類

上述的歷史回顧，相信已經為「模型和理論的關係史」提供了一幅發展圖象。模型觀點至少提出科學理論結構的完整理解。只是我們仍然不滿意模型觀點的代表性學說，因為它無法滿足科學理論的「恰當說明之要件」。理由已見上述論證。這引導我們必須追求新的進路，雖然我們仍保留模型做為理論核心的觀點，但是，主張模型乃是認知性的，而非邏輯性的，而且理論蘊涵許多模型，構成一個分類階層系統——也就是說，我們將整合後期孔恩的分類進路，與吉爾的認知模型理論，試圖建構一個「科學理論版本的結構」之理論。因此，在以下第二章中，我們將精煉孔恩的分類觀念成為「科學區分」，包含「分疇」與「樹狀區分」兩種模式。第三章「認知模型及其分類」則考察吉爾的認知模型，並整合科學區分中的分疇和分類，最終建立一個科學理論版本的認知模型分類系統。

⁴²雖然吉爾(Giere 1985, p. 77, pp. 82-85)認為范弗拉森拒絕集合論架構從外延進路來定徵科學理論，但他無法指出范弗拉森的論述解決了我們提及的「理論詞項的內涵意義」。他提及了范弗拉森顧及模型的「模態性」(modality)，但「模態性」是另一個脈絡的問題，它同樣不能解決「內涵性」。在我看來，模態性的相對概念是「實際性」(actuality)，而不是外延性。

第二章 科學區分： 分疇和樹狀區分

湯姆(Tom, 指 Thomas Kuhn)的觀念已經在種種方式上影響了我，而且的確促成了我從反自然論的立場轉向自然論。在湯姆最近分類轉向(taxonomic turn)的遠景中，我的轉變即使十分正確，卻可能不是件值得一提的大事，但在目前的場合中毋需懷疑。

不管你的同事採取什麼立場，湯姆，他們都將因為你誘人且明智的觀念而感到受益匪淺，在這個「孔恩節日」(Kuhnfest)的會議中，我們所有聽眾，懷著敏銳的興趣等待你的思想。(Horwich 1993(ed.), *World Change*, p. 8)

韓培爾這段讚譽宣讀於 1990 年美國麻省理工學院(MIT)所舉辦的會議中，主角是孔恩的思想。我們引用的重點不在於大哲學家對另一位大哲學家毫無保留的盛讚，而在於文中指出的「分類轉向」。在該會議中，哈金(Ian Hacking)提出了他詮釋孔恩後期思想的論文〈在一個新世界中工作：樹狀分類的解決〉(Working in a New World: The Taxonomic Solution)，顯著地標誌了韓培爾所謂的「分類轉向」。

分類和種類的問題似乎又成為九十年代科學史和科學哲學的議題¹。雖說分類議題在生物史和生物哲學中是個持續不斷的關注焦點，但是從現代科學和科學哲學誕生以來，幾乎沒有科學家或科學哲學家認為

¹ 譬如，除了孔恩本人八十年代末起的幾篇談分類系統的論文(Kuhn 1987, 1989)和演講外，1992 年出版了一本探討古德曼(Nelson Goodman)的社會哲學之論文集 *How Classification Work*，以分類為主題（古德曼是一位在「種類」(kind)概念上奉獻長期心力卻頗受忽視的哲學家）。1993 年則有討論孔恩的「世界變遷」哲學的論文集，收錄了哈金(Ian Hacking)在 1990 年發表的有關分類的重要論文以及孔恩對哈金的回答。然後，一些科學史家和科學哲學家開始應用哈金發展的分類樹概念，並以物理史的材料來探討科學變遷和不可共量性等議題；如 Buchwald, Jed Z.(1992)探討十九世紀光學的分類佐證了哈金所提議的分類樹方案，Chen, Xiang(1995)亦以同樣的光學史為材料，討論波理論和質點理論之爭論，以及爭論當中的分類變遷對科學家評價理論說明力的影響，Fu, Daiwie(傅大為 1995)則討論更高層次的學科分類所造成的不可共量性，他稱為「較高層次的不可共量性」(higher incommensurability)。（後兩篇被 *Studies in History and Philosophy of Science* 1995 年夏季號(No.2)並列為「科學中的分類系統」(Taxonomy in Science)專題）。此外，Thagard(1992) 從認知和人工智能(AI)的進路來討論「概念變遷」(conceptual change)和科學革命，主要也是應用種類和分類樹的概念（他稱之為「種類階層」(kind-hierarchy)），只不過 Thagard 把主題置放在種類的心智層面一概念。

「分類」也是精密科學(precise science)——特別是天文和物理學，通常運用大量數學的學科——的重心，分類被視為是初級和相對原始的科學活動，高級且精密的科學早已脫離了分類這種幼稚階段。然而，九十年代的分類風潮的特色是：分類不僅重返科學哲學舞台，成為聚光燈下的主角，而且主要被用來分析物理學！這個風潮又是源於孔恩後期工作的啟發²。

孔恩有關分類的新想法導源於他對不可共量性(incommensurability)議題的持續辯護和發展。這個議題可以說是近四十年來，科學哲學界最大思想震央和爭議根源³。《科學革命的結構》之後的孔恩，幾十年來所有的思想工作幾乎完全聚集在「不可共量性」的澄清、辯護和精煉之上(Kuhn 1970a, 1970b, 1979, 1983, 1987, 1987a, 1989, 1990, 2001)⁴。八十年代後，孔恩把不可共量性定義為不可翻譯性(untranslatability)，並且提出了詞彙結構或分類結構的概念來說明之。孔恩以為，革命前後的科學系統之所以是不可共量的，乃因它們各自擁有的詞彙集(lexicon)，由於語意結構和分類結構的差異，導致彼此間的不可互譯（從 1983 年的論文起，幾乎孔恩的每篇論文的主題和方法莫不環繞在這些概念上）。

哈金以科學種類(scientific kinds)代替孔恩所用的詞彙，將分類結構具體化為分類樹，根據這兩個概念來鋪陳「種類的邏輯」，並重新詮釋孔恩的後期思想。儘管孔恩認為哈金的詮釋並不符合他的真正想法(Kuhn 1993, pp. 315-319)；仍然有不少科學史家和科學哲學家接受了哈金的分類樹方案，並用它來分析物理科學史的材料。

² 參看上註。另外，雖然 Thagard 並不是直接應用孔恩和哈金的理論資源，但他也提及並引證孔恩的分類範疇概念。筆者乃是透過傅大為教授的論文〈H₂O 的一個不可共量史〉(1995)而接觸孔恩的後期論文和哈金的論文，本書的理論也可以說是這個啟發鏈的一環。

³ 《科學革命的結構》中引起最多批評的兩個概念是「典範」和「不可共量性」。對典範的批評在七十年代後已經很少見，因為一方面，孔恩有所退讓，以範例(exemplar)來代替典範；另一方面，典範的概念廣泛地擴散到其它各種學科去，使得反對者也無可奈何。反而「不可共量性」的議題四十多年來，爭議未曾稍減，批評始終不息。而孔恩也始終不退讓地一再為之奮鬥。光看 Hoyningen-Heune (1993, p. 207) 在一個註解中列出了九十九個討論過它的哲學家，其中多數人還不止討論一次而已，即可知道這個議題熱烈得多可怕。八十年代最兇猛的批評火力來自語言哲學，哲學家們應用帕特南提出的指稱的因果理論(the causal theory of reference)來批評科學詞項彼此間的意義不可共量是站不住腳的。孔恩在八十年代的主要論文，莫不是在回應且反批指稱的因果理論。

⁴ 孔恩在七十年代到九十年代間的一些科哲論文，已在他去世後被集結成《結構以來的道路》(The Road Since Structure, 2001)出版。

本章關切的並不在於不可共量性，但是認為詞彙結構、分類樹、種類等概念密切相關於科學理論的結構和核心特徵。但不管哈金的改造或孔恩的原初提法，都無法完全說明科學理論的整個結構，也無法恰當配合我們的需求。因此，我們有必要重鑄且精煉這些概念，重新整合出適切的理論架構和系統。在進行之前，詳細地討論孔恩和哈金的說法也是必要的工作。

壹、孔恩對詞彙結構的分析

在將不可共量性定義為不可翻譯性之後，孔恩(1983)指出科學哲學上有一個長久的混淆：以為翻譯等同於解釋(interpretation)⁵。事實上，不可共量理論的支持者彼此間也能瞭解對方的理論，那是因為他們能用自己的科學語言來「解釋」敵對理論，他們能「學習」對方的科學語言，但不可能去翻譯它。因為翻譯是兩個語言彼此間的等值替代，翻譯者以自己熟悉語言中的字詞和語句來系統性地代替被翻譯的文本(text)，並藉此產生一個和原初語言不同的等值文本，如同英文和中文、法文和德文等等不同語言彼此間的互譯。在這種情況下，翻譯不可能只根據字詞的指稱(reference)和外延(extension)⁶，因為在可以互譯的語言當中，顯然存

⁵ 早期對不可共量性的批評中，也包括對不可翻譯性的攻擊。換言之，不可共量性在一般理解上已涵蘊了不可翻譯和不可溝通。批評者（如 Popper 1970, Toulmin 1970, Kitcher 1978, Putnam 1981 等等）則以科學理論可以互譯並且科學社群總是能溝通良好的史實來拒絕不可共量性論題。他們也提出孔恩的不可翻譯性議題是自我擊敗的(self-defeated)，因為如果過去的科學語言不可翻譯成現代的科學語言，那麼像孔恩這樣的科學史家，又如何能說過去的科學語言和現代的科學語言意義不同，因而不可共量呢？孔恩指出類似的批評和看法混淆了翻譯和解釋。哲學家們批評的不可翻譯是以奎因(Quine 1960)所描繪的「徹底翻譯」(radical translation)場景中的「翻譯」為標準，但孔恩以為奎因所描繪的場景並不是一種翻譯，而是一種解釋。在奎因描繪的場景下，去理解土著民族語言的人類學家並不是在進行翻譯工作，而是以自己的母語來解釋土語的每個單字。只有在人類學家學會了土語後，他才有能力去從事翻譯工作，往往他也會碰到不可翻譯的情況。換言之，翻譯是懂得兩種語言的人（雙語人）才有能力執行的。科學史學家就像是研究陌生土語的人類學家，他可以去解釋過去科學的語言，但限於詞彙結構和分類系統，他們無法以現代科學語言來翻譯它們。

⁶ 許多哲學家特別是因果理論的支持者認為翻譯只需要訴諸於指稱。孔恩(Kuhn 1983)以為這個錯誤的見解也是來自奎因，因為奎因不但把解釋等同於翻譯，進一步在描繪「徹底翻譯」的場景中，只以指稱為翻譯的唯一根據。意義和內涵的概念在奎因的語言哲學中被化約為刺激意義(stimulus meaning)，而刺激意義不過是指稱物對感官所產生的刺激。也就是，語言根本就沒有意義和

在許多沒有指稱的字詞。科學語言的情況亦然。例如，孔恩質疑指稱的因果理論家：既然「燃素」(phlogiston)指稱了不存在的東西，也就是沒有指稱的對象(referent)，那麼「燃素」和「去除燃素的空氣」(dephlogisticated air)這類詞彙，該如何翻譯成現代化學的語言？(Kuhn 1983, p. 679) 翻譯免不了要涉及意義(meaning)和內涵(intension)，而這又相關了語言的詞彙結構和分類系統或分類結構⁷。

詞彙集的概念來自語言學中的詞彙語意學(lexical semantics)⁸，它意指某種特別語言或某領域使用的全部詞彙，好比已經不再流行的古希臘文、拉丁文、或者某一作家的作品全集內的所有詞彙。科學、以及科學中的某個學科或某個理論當然也有它的詞彙集。孔恩提出科學或科學理論的詞彙結構強調了關鍵詞彙（或核心詞項(kernal terms)）彼此間形成一環環相扣(interrelated)的意義網絡(semantic network)。如果改變其中任

內涵層面。奎因的觀點不見得受到大部分語言哲學家的認同，但在有關翻譯的議題上，卻普遍地影響了大部分的哲學家。

⁷ 在 1983 年的論文中，孔恩似乎把「詞彙結構」和「分類系統」或「分類結構」這兩個概念用為同義詞。後來，孔恩較強調詞彙結構而較不重視分類，這大概是因為他認為「分類」必須由詞彙結構來具體化，以及他的新觀點關乎語言更多而關切種類的成分較少。他在對哈金的評論中也反映了這一點。為什麼孔恩如此重視科學中的語言因素呢？部分原因或許是由於孔恩的新觀點乃是在對抗語言哲學的批評中發展出來。當然，這並不表示說「分類」在孔恩的新觀點不占任何重要性，事實上，孔恩也提出了以「特徵空間」(feature space)來做為分類的依據，他也用了「重新洗牌」(re-shuffling)這個詞來表示科學的分類系統之變遷。然而，他指出「詞彙集將語言社群（這社群的成員使用該詞彙集）的分類系統具體地表現出來。...當合併語言考慮時，我在這兒關切的是分類採取的形式。」(Kuhn 1987a, Shearman Lecture, p. 42) 也就是說，畢竟分類是體現在詞彙集和詞彙結構之中的。孔恩在這個演說中花了不少篇幅來分析詞彙結構和分類結構的關係。

⁸ 詞彙集和字典(dictionary)的概念並不太一樣。哈金(Hacking 1993, p. 292-293)指出孔恩是以流行在語言學中的某種特別意義來使用「詞彙集」。不過，不管是孔恩或哈金都沒有簡單地介紹他們用了「詞彙集」的哪個語言學含意。事實上，這個概念並不常見，在詞彙語義學中的確有它的特別用法。好比，詞彙集內的基本單元不是「單字」(word)，而是詞彙單元(lexical unit)。簡單地分辨是，一個詞彙單元是一個字形連結單一的含意(sense)，而一個單字則可能有好幾個含意。翻開任一本英文字典，我們可以看到其中任一個字，例如 book，它有下列幾個解釋(含意): [sense 1] a printed work on sheet of paper bound together; [sense 2] a main division of a literary work; [sense 3] a record or account; etc. 則 book 這個字形連結 sense 1 or 2 or 3 中任一個就構成一個 lexical unit; 而 book 連結所有的 senses 則構成一個 word。參看 Cruse, D. A. (1986), *Lexical Semantics*.

一詞彙的意義，就會牽動整個詞彙集的意義結構之改變，以致我們無法產生舊理論和新理論之間的等值文本，換言之，它們是不可翻譯的。在這種情況下，不同理論的科學詞彙即使有共同的指稱，也無法改變不可翻譯的事實。

為了論證詞彙結構如何導致不可翻譯性，孔恩以幾個具體的科學理論為例⁹，從一個科學理論的學習歷程出發，試圖說明內建在詞彙結構內意義網絡之整體性。現在，讓我們來看看孔恩對牛頓力學的詞彙結構之展示(Kuhn 1989, pp.14-23)。

孔恩以為牛頓力學有三個核心詞項：「力」、「質量」、「重量」。當一個科學學生要瞭解牛頓力學時，他必須掌握這三個詞項的意義一相當不同於直觀或亞里斯多德式的觀念。對小孩子或亞里斯多德學派的信奉者而言，受力運動(forced motion)必定發生在物體被一個施力體所觸及或拋射出去的時候，典型的範例是拋物運動。空中自由落下的石頭則是一個不受力(force-free)運動的好例子。但是，對牛頓學派而言，兩者都是受力運動的案例。牛頓力學中唯一不受力運動的例子是由第一運動定律所描述的情況：「缺乏外力的情況下，物體以等速在一直線上持續地移動。」甚至，「運動」這個概念本身，亞里斯多德理論和牛頓力學也有很大的不同，牛頓力學的運動只是位置的改變；而亞里斯多德的「運動」約相當於「改變」，位置改變只是「運動」的次範疇(Kuhn 1989, pp.8-12)。

在性質的特徵上，牛頓力學的「力」不同於前牛頓的用法；至於「質量」和「重量」則大致同一於前牛頓的用法。但是，在牛頓力學上，這三個詞項都是在量的意義上被使用¹⁰。進一步，牛頓這種量化的形式，「既改變了它們個別上的使用，也改變了它們之間的內在關係。」(p.17)要掌握這三個詞項的量化用法和量化關係，首先必須掌握「力(量)」。

⁹ 在1987年的論文“*What is Scientific Revolution?*”中，孔恩說明了三個實例：亞里斯多德(Aristotle)的物性學(physics)、伏打電池(Volta's electric battery)、和黑體問題(black-body problem)；在1989年的論文中則以牛頓力學為例。此外，1987年的 *Shearman Memorial Lectures: The Presence of Past Science* 的主要題材和上述兩文大同小異。但這篇演說呈現的論點相當完整，幾乎可說是孔恩後期「分類轉向」的代表性著作，和早期的《結構》應有相似的地位。筆者於另一篇論文中討論了「黑體問題」的例子（參見陳瑞麟(2001)）。

¹⁰ 在中文翻譯上，明顯可看出它們的「量化意義」。因為中文已經是根據現代物理的觀念來翻譯 force, mass, weight 等詞項—「力量」、「質量」、「重量」。但中文翻譯也比較看不出「相同字形的意義變化」之情況。面對前牛頓時期的使用，我們得把「力量」、「重量」中的「量」字去掉而作「力」、「重」來翻譯它們，並只強調它們「性質」上的特徵。然而，「質量」去掉「量」而單單只作「質」相當不恰當，而且，「力」和「力量」也是不同的詞形。

「力量」可以使用彈簧秤來測量，測量的原理則依據兩條定律：第三運動定律和虎克定律(Hooke's law)。前者斷言「反作用力等於作用力」；後者則斷言「施力在彈簧上的力量，和彈簧的形變量（伸長量或壓縮量）成正比」。掌握了「力量」之後，「質量」則可以由第二運動定律—「施加在物體上的力量等於物體質量乘上物體加速度($F=ma$)」—引入，亦即「質量」可以透過這個等式的計算而得到（既然力量已可測量，而加速度也是一個可從位置和時間的測量中導出的量）。這個等式所得到的質量在今天被稱作「慣性質量」(inertial mass)：在固定加速度下，物體質量和受力成正比。現在，「力量」、「質量」由牛頓三大運動定律和虎克定律所定義了。重力定律則定義「重量」的意義，並作為經驗律則(empirical regularity)而被引入。「重量」被視為一種關係性質，必須要有兩個到三個物體的出現才能決定，換言之，一物體的重量實在是另一個物體對它的重力引力(gravitational attraction)。就此而言，物體的重量隨著它和不同的物體所形成的位置關係而變動。

以上所述是學習牛頓力學詞彙結構的一種進路，此外，孔恩也展示另一種進路¹¹。然而，不管是哪一種進路，我們都會發現，它們的意義彼此交織成一個整體網絡¹²。改變其中一個，勢必牽動全體。孔恩因而質問：我們能夠改變任一個詞彙的意義而不改變這整個結構嗎？或者我們能夠調整牛頓三大運動定律、虎克定律之任一任二或任三而不同時改動其它定律嗎？顯然不可能。在這種情況下，除了重力定律外，其它定律都不是扮演經驗法則的角色。也就是說，除了重力定律可以接受經驗驗證外，其它定律都不可能因為和經驗事實牴觸而被修正。就算我們只做小小的局部調整，若不是在無形中改變了整個意義網絡，就是這個調整將不融貫於原來的意義結構。在這種情況下，不可共量性或不可翻譯性就是科學革命的必然結果了。

¹¹另一個進路是從今天所謂的「重力質量」(gravitational mass)出發。孔恩說：

「從同樣的起點開始，在彈簧秤的協助下量化了力的觀念。下一步，『質量』則從今天標誌為『重力質量』的概念引入。在這種方法下，學生學到重力做為一對物質體之間萬有引力的觀念，每個物體所受的引力量 and 每個物體質量成正比。由於補足了質量的失去層面，重量可以被說明為關係性質，而力量則由重力引力所造成。」(Kuhn 1989, p. 19)在這條進路下，牛頓第二運動定律成為經驗定律。相反地，重力定律則變成非經驗定律。

¹²孔恩所論述的這種詞彙和定律的整體化結構，也可以用邏輯經驗論的一階邏輯之公理化方法來加以形式化的表達。參看本書附錄〈科學理論的兩種公理化進路〉。

貳、哈金的科學種類和分類樹

哈金(1993)以科學種類來詮釋孔恩的科學詞項，以分類樹來詮釋孔恩的詞彙結構，得到不少認同。分類樹的概念並不是什麼全新事物，它在生物學、語言學甚至邏輯中都有長遠的歷史，但是分類樹結合科學種類的概念，並且將它應用到物理理論上，則是一項新穎的嘗試。哈金以及應用分類樹概念的科學史家讓我們看到：物種的樹狀分類也存在於物理學理論上，並深深地影響了理論的變遷和評價。

長久以來，哲學家慣常討論自然種類(natural kinds)。特別是實在論者不僅相信自然種類存在於大自然當中，是自然的接合點(joint)，也相信科學的終極目標是在發現一切自然種類¹³。但是哈金指出，談論自然種類，則有區分其適用範圍的麻煩。哲學家們對於自然種類的涵蓋範圍有所爭議，一些哲學家深信自然種類是「宇宙範圍的」(cosmic)；其它哲學家如奎因，認為我們天生只擁有區分「地球範圍的」(mundane)種類之能力，這是由於我們受限於演化之故¹⁴。後來的哲學家則以「自然類詞」(natural-kind terms)來避開區分種類適用範圍的麻煩，讓一些命名「地球範圍種類」的名稱如「水」、「虎」、「熱」指稱了「宇宙範圍種類」(如 H₂O、虎的染色體、分子運動)(Hacking 1993, pp. 290-291)。但這些名稱很少是源自科學—換言之，自然類詞很少是相關於科學研究的。

哈金指出，很多科學家研究的對象並不是自然的，而是科學家在實驗室中創造出來的效應或現象—譬如康普頓效應(Compton effect)和齊曼效應(Zeeman effect)。將這些現象或種類歸於自然種類並不恰當，更不能說它們不是科學家研究的種類，所以哈金以為，孔恩所主張的實在是「科學種類」，而不是他和其他哲學家口中所謂的自然種類，「大部分的科學種類是裝置(apparatus)和工具(instruments)的種類。」(Hacking 1993, p.284) 科學家「希望」他們研究的種類是「推定的宇宙範圍」(putatively cosmic) (亦即推定或設定它們的範圍遍及整個宇宙)，「希望」意謂科學家的主觀要求或興趣，因此某事屬於「科學的」其實不是因為它揭露自然，而是因為它是人類的要求或興趣，即「它在我們有關宇宙上顯得是正確的時候滿足了我們。」(Hacking 1993, p. 292) 就此而言，我們甚至可以說，大部分的科學種類都是「人造種類」。在科學種類的表達上，

¹³好比，以八十年代前的帕特南為首，主張指稱的因果理論的實在論哲學家。

¹⁴cosmic 和 mundane 在哈金的用法中是一組對立的概念，它們很難翻譯。字典對前者的解釋是「宇宙的」；對後者的解釋是「俗世的」、「塵世的」。我們以存在範圍來解釋這兩個概念，主張它們表達了某種「時空範圍」的認知：前者指的是時空無限的、永恆的、和宇宙同尺度的；後者則是時空有限的、僅限於地球範圍。但它們也不光限於「存在範圍」，還包括認知上的「地位」或「純粹性」：好比，數字和柏拉圖的理型是 cosmic，我們一般常識中的「水」、「虎」、「檸檬」、「熱」等等概念則只是 mundane。

我們也得用「科學語詞」來代替自然類詞，它指稱了科學種類。科學語詞主要被用於各種科學分支當中，它們通常也不是一種自然類詞。

緊接著，哈金著手討論種類的邏輯，主張適用於科學種類的邏輯是樹狀分類邏輯，它在結構上呈現出一種樹枝分叉的形態。這種樹狀分類結構，我們可以圖示如下¹⁵：

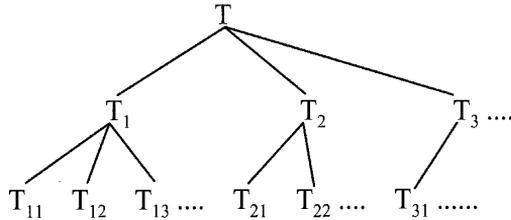


圖 2-1

其中， T , T_1 , T_2 , T_3, \dots , T_{11} , T_{12} , T_{13}, \dots , T_{21} , T_{22}, \dots 等等都是種類（或稱範疇），但是它們排列成不同的階層。 T_1, T_2, T_3, \dots 和 T 之間、以及 $T_{11}, T_{12}, T_{13}, \dots$ 和 T_1 之間等等都是「種關係（K-關係）」（a kind of...），K-關係的判準就是「 T_1 是一種 T 」（ T_1 is a kind of T ）。而且，和 T 有 K-關係的 T_1, T_2, T_3, \dots 等等必須完全被包納（properly contained）在 T 之內。用集合論的術語來說， T_1, T_2, T_3, \dots 等等都是 T 的真子集（proper subset）。至於 T_1, T_2, T_3, \dots 等處在同層次上的種類，彼此之間絕不可重疊（non-overlapping），也就是說，相同層次的不同種類不可以共有相同的成員。用范恩圖示法來表達就成了下圖（略去了更低階層的 T_{11}, T_{12}, \dots 等等）：

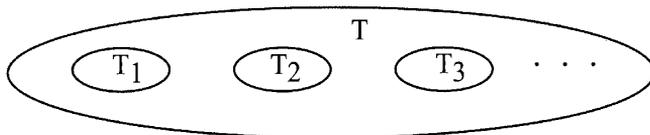


圖 2-2

這樣一個樹狀分類系統的最底層種類，也就是不可再對它進行分類的種類，叫做「基層種」（*infima species*）。

現在，哈金建立了一個科學種類的樹狀分類系統。他以這套理論系統來詮釋孔恩的後期思想。孔恩的詞彙結構被轉化為這套樹狀分類結構，包含了下列三項論題：

¹⁵哈金的討論比較形式化，他用 $\{C, K\}$ （標準的邏輯記號法應作 $\langle C, K \rangle$ ，亦即一個有序對）的抽象符號來代表樹狀分類，其中 C 代表種類， K 代表「種關係」（Kind of）。我們用較圖像的方式來解釋哈金的論述。

(1) 科學種類是樹狀分類的：孔恩所談的詞彙結構當中的理論詞彙都是指稱科學種類，在垂直向上，詞彙與詞彙間乃是「種關係 (K-關係)」；在水平向上，詞彙與詞彙間則是「非重疊」。

(2) 科學種類的樹狀分類系統有基層種：任一個科學分支所使用的詞項和描述都是有限的，樹狀分類必然會到盡頭，最底層的就是基層種。

(3) 科學種類是可投射的(projectible)：所謂可投射的¹⁶，意謂指稱科學種類的科學詞項，可以在通則(generalization)當中使用（或者被科學社群表達為定律式(lawlike)的敘述），形成對未來的預測或預期。

在科學發展當中，老科學和新科學對相同的研究領域往往有截然不同的樹狀分類，以致兩者無法互相轉稼；就算它們都應用了一部分相同的種類名稱，也因為種類在樹狀分類中的位置並不相同或者整個樹狀分類的拓樸結構並不等值，造成了兩個分類之間的無法嚙合(meshing)，如此證成了不可共量性的論題。的確，科學種類、樹狀分類結構以及上述三項論題，描繪了一個說明科學革命的不可共量性之明確圖像。

一些科學史家已經運用實際的歷史案例來佐證哈金的樹狀分類方案之優越性。比起孔恩之強調語言，哈金的方案則無需訴諸語言；而且正如哈金之強調裝置和工具，科學史家們也重視實驗工具和技能對他們的分類造成的關鍵影響¹⁷。我們或可這麼說：孔恩的分析和焦點仍然著重在「理論」的內部（雖然他並不限制在此），而哈金等人則有意突顯「理論之外」（如實驗、工具、學科等等）的影響因素。

在很多方面，孔恩並不同意哈金對他後期思想的詮釋。譬如，哈金(Hacking 1983)曾以唯名論一實在界中只有個體存在，是我們根據意志來將它們劃分為種類—詮釋孔恩的立場，孔恩(Kuhn 1993, p. 315)則反問：「力」和「波前」(wave front)這些詞項指稱的對象能被詮釋為個體嗎？雖然哈金把他的方案視為孔恩的立場，但兩者之間其實存在著很大的差異。孔恩同意自然類並不能完全涵蓋他所需求的種類，但是科學種類也不成：

¹⁶這個概念的意義基本上承襲自古德曼（參看 Goodman, N. (1983), *Fact, Fiction, and Forecast*, ch. 4 “Prospects for Theory of Projection”）。對某些涉及「存在」的科學詞項而言，「可投射的」這個概念可以代替「指稱」的概念。也就是說，這些科學詞項是可投射的，而不是指稱性的。它們被用在通則敘述中，「預測」了某些事物的存在，但是否真實存在，則可以用實驗來檢驗。進一步發展「投射」概念，並將它應用到存在語言（語句）上的哲學家有 Blackburn Simon(1984)。中文方面，參看楊金穆教授(1997)，〈一個投射論者的存在概念〉。筆者近來已發展了一個「科學概念的投射理論」（參看陳瑞麟(2003a)〈科學概念的指稱與投射〉）。

¹⁷參看註 1。

所需的是一般種類和種類詞的特徵... (這特徵) 是一心靈模組 (mental module), 容許我們學習指認各種類: 不只物理對象, 也要包括傢俱、政府、人格等等的種類。以下我頻繁地把它稱為詞彙集—說話社群的成員將社群的種類詞儲存在其中的模組。(Kuhn 1993, p. 315)

簡單地說, 孔恩不認為我們可以單只訴諸分類而不涉及語言。在哈金所談的範圍內, 他寧願討論一般性的「種類詞」和這些種類詞的學習。孔恩再論述了種類詞的三項共享性質。首先, 它們都是在使用中被學得的: 某人已經使用了某種類詞, 因而提供了學習者如何恰當使用它們的範例; 在學習的過程中, 學習者得到的不僅是概念的知識, 也包括了世界的性質。其次, 種類詞是可投射的: 徹底瞭解一種類詞乃是知道了某種通則化, 可以被種類詞的指稱物所滿足。第三, 在學習種類詞當中, 個人不僅得到它們的意義, 也得到了對指稱的期望(expectations) (它們可能因人而異); 種類詞的指稱物之期望的改變, 也是意義的改變, 以致只能有一些期望存在於單一的語言社群中(Kuhn 1993, pp. 316-317)。(這暗示了最終只有少數意義結構能得到科學社群的接受) 這些對種類詞的論述, 的確以不同於《結構》的說法而暗示了孔恩自己長久以來堅持的「範例」、「學習」和「理論競爭」等等立場。

總之, 孔恩和哈金的最大差異表現在(孔恩自己看得很清楚): 「他(哈金)希望消除我的立場中所有意義理論的殘餘, 我(孔恩)則不相信這可以做到。...有關種類詞, 意義理論的層面一直保持在我的立場的核心地帶。」(Kuhn 1993, p. 316) 當然, 值得注意的是孔恩意義理論的主調是「認知」取向的, 他訴諸於科學詞彙的「學習」來揭開種類詞的諸般特徵, 以及科學理論中的詞彙結構。

參、概念的連結

如我們所見, 孔恩與「分類的孔恩主義者」在論及詞彙結構時, 似乎只強調唯一的一種「分類」樣型。亦即在一科學種類與另一種類之間, 要不是不相隸屬; 就是一種隸屬於另一種, 也就是「種—類」或「種—屬」(specie-genre)連結或「種」(kind of)連結。娜西婁(Nancy Nersessian)與塔加德(Paul Thagard)則辨認出理論的概念與概念之間, 總共有五種連結方式¹⁸: 「種連結」(kind links)、「局部—整體連結」(part-whole links)、「性質連結」(property links)、「規則連結」(rule links)、「個例連結」(instance links)。因此, 一個科學理論的概念結構, 就可以重建成如下列

¹⁸娜西婁最初在 1989 年的論文中提出了「種連結」(kind links)、「性質連結」(property links)、「關係連結」(relation links); 而塔加德於 1990 年的論文則進一步地提出了「種連結」、「局部—整體連結」(part-whole links)、「性質連結」、「規則連結」(rule links)、「個例連結」(instance links)。其中「關係連結」約相當於「規則連結」。

圖 2-3(以亞里斯多德的物理學系統為例,本圖取自塔加德(Thagard 1992, p. 193, Fig. 8.1))。如其所示,「物體」這個範疇被分成「天體」與「地面物體」兩種,但地面物體大都都是由「土、水、氣、火」四大基本元素混合構成的,所以地面物體和「土、水、氣、火」的連結是「部分—整體連結」。而「天體」的運行「規則」是「自然的圓周運動」,所以「天體」和「自然運動」與「圓周運動」之間就是以曲線代表的「規則連結」;而「地面物體」中,包含較多「土」和「水」成份者,會產生「自然的向下運動」,包含較多「氣」與「火」者則產生「自然的向上運動」。因此這個圖表可以顯示亞里斯多德理論的概念網絡中,諸概念間的連結關係。

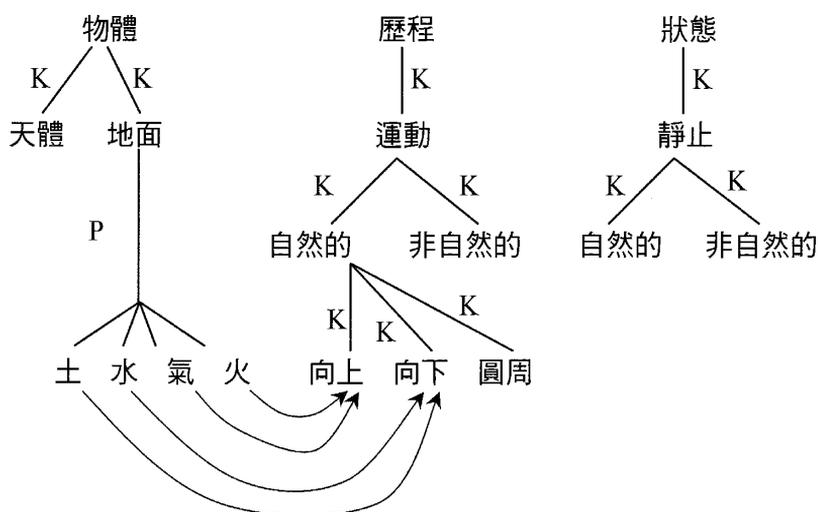


圖 2-3 說明：其中，直線指示「種連結」並以 K 字母標示，或者指示「局部整體連結」以 P 字母標示；曲線則指示「規則連結」。

還有兩種連結呢？我們再舉牛頓的概念系統(Thagard 1992, p. 202)為例(見下圖 2-4)，一來其中包含了「個例連結」，二來可和亞氏的概念系統作比較¹⁹。

¹⁹塔加德進一步討論了從亞氏概念架構到牛頓的概念架構的變遷，是否蘊涵了科學革命？詳細討論見陳瑞麟(2001)。

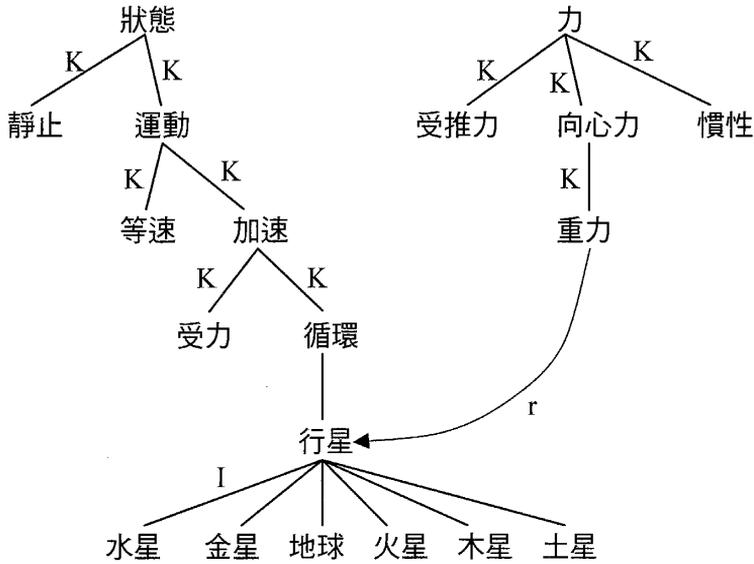


圖 2-4

在牛頓的概念系統中，六大行星和「行星」之間，就是「個例連結」（以 I 表示），因為六大行星都是個體，而不是種類。牛頓的「重力定律」則是重力和行星之間的「規則連結」。

仔細考察圖 2-3，我們可能會有疑問：大部分的概念都有其連結，但「物體」、「歷程」、「狀態」三個概念之間沒有連結，如此，它們為何會被放在一塊兒，而且構成理論的概念系統之基石？我們將在下文以「分疇」的觀念來解答這個問題。亦即，這三個概念是整個概念系統的基本範疇，是基本分疇的產物，標誌著科學理論在處理對象時，必對它的論域有一個最基本的區分。

事實上，我們主張，「分疇」和「樹狀分類」是兩種更基本的劃分樣型。在娜西婁—塔加德的系統中，「規則連結」和「性質連結」都屬於「分疇」，因為在很多情況下，兩者很難區分。譬如，「自然向下運動」雖是包含多量「土元素」的某些物體之運動「規則」，但說它是那些物體的「性質」也未嘗不可。正如上文亞氏和牛頓的運動系統中，都缺少「性質連結」的實例。因此，我們可以不需要區分「規則連結」與「性質連結」，進而將兩者併入「分疇」的概念內（下文將對「分疇」的概念作更詳細的論述）。此外，「種類連結」、「局部—整體連結」和「個例連結」則屬於「樹狀分類」的樣型。一方面，在表達成圖式時，三種連結都會呈現「樹枝分叉狀」。事實上，「個例連結」可以進一步併入「種類連結」中，雖然「個體」並不是「種類」，但是它其實只是「樹狀分類」的最基層而已。我們會說「Y 個體是一種 X」，正如「水星是一種行星」。「分疇」和「分類」，就是將一些科學概念組織成科學理論的兩種基本樣型。

肆、分疇與樹狀區分

雖然孔恩和哈金發展詞彙結構和分類樹諸概念是為了澄清和證成理論發展和不可共量性的論題，這些概念卻對理論結構的議題有了重大的啟發。的確，詞彙結構、樹狀分類不也很清楚地在概念組織上表現出理論的結構嗎？然而，不管是孔恩的論述或哈金的方案，都沒有揭開理論結構的所有重要特徵，也沒有分辨出一些分類上難以察覺的差異——我指的是「範疇」和「種類」的不同。此外，我們也必須考察娜西婁與塔加德對「整體—局部」區分的洞見。

我們同意，科學活動中的確存在著廣泛的「分類」現象，而且「分類」也的確是科學理論的基本特徵。但是，理論卻有著兩種不同的「分類」型態——「分疇」和「樹狀區分」。讓我們用更廣義的「區分、劃分」(classification)來表示這個包含分疇和樹狀區分的「分類」概念。在主題是考察理論結構的目標下，我們將更細密地檢視科學理論對研究對象的「區分」。

科學理論是一種「分疇與樹狀區分的系統」(system of classification and categorization)，這個複合概念給予理論整體性的特徵，它表明了科學理論做為一種獨特的、量化的「範疇、種類、整體—局部的複合階層系統」。

所謂「分疇」，即是區分範疇，現在的認知心理學把它用為同義於 classification，而「範疇」則同義於類別或種類。一個「分類」的典型例子是生物分類，亦即我們面對一群個體對象，根據它們的相同和不同性質進行區分歸屬，我們便得到一個一個「物種」(species)；繼而尋求諸多「種」的共同特徵並進行歸屬，就會得到更高階層的類別，好比稱它為「屬」(genus)，對一個個「屬」再加以歸屬劃分，如此等等，最終得到一個樹狀分類階層。但是，這裏所謂的「分疇」並不是上述的一般分類，我們希望回溯到「範疇」在希臘思想中的原始涵意。

「範疇」(category)這個字源自希臘文 *kathgoria*，原意是「述詞形式」(form of predicate)，所以「分疇」意謂著區分各種述詞形式。亞里斯多德曾把世界的所有可想到的東西（存有）區分為十種範疇，用十個述詞形式來表達：實體(substance)、量(quantity)、質(quality)、關係(relation)、地點(place)、時間(time)、位置(position)、狀態(state)、主動(動作)(action)、被動(reaction)²⁰。其中個體實體一般在語句中被主詞(subject)所指涉，其它的範疇則是各種不同的述詞形式，它們是述詞指涉的屬性，用來稱述

²⁰這是一般哲學史的翻譯用詞。亞里斯多德全集(*The Complete Works of Aristotle*)中《範疇》一書譯者 J. L. Ackrill 則譯成較抽象的 substance, quantity, qualification, relative, where, when, being-in-a-position, having, doing, or being-affected. (Vol. 1, p. 4)

實體²¹。這種範疇系統是對世界一切存在事物的區分。如此，世界可被理解為許多個實體擁有量、性質，和其它實體有所關係，並存在於某一地點、某一時間、處於某種位置上、發生著某種狀態、並進行某種行動或被行動。

科學理論的基本特徵是亞氏的範疇區分涵意下的分疇。亦即科學理論總是最先對「它指向的對象整體」進行「範疇」的區分：譬如把「對象」區分成個體、某些性質、個體和個體間的關係、個體存在的空間、時間、以及個體產生的行為等等的劃分，繼而尋求規則或定律來界定各「範疇」彼此間的相互關係(correlation)（也就是傳統上所說的「定義」，但是我們並不是在語言定義的意思上來使用這個詞）——「區分」和「定義」是分疇的兩個基本面向。好比，古典力學的運動定律，將世界區分成物體、質量、力、位置、速度、運動等等範疇，並且規定了這些範疇的相互關係，形成一個「相互關係網絡」(correlative network)。這是蘊涵在科學理論中對「世界」最基本的區分。基本區分的範疇彼此間的界線截然分明，也就是說，不可能有某個存在(being)既屬於物體，又同時屬於質量。而且，範疇與範疇之間，有清楚鮮明的「異質性」(heterogeneity)，也就是，彼此之間沒任何可以說是相同的地方，因此在某一限定論域內也不能用更高的範疇來含括兩個異質的範疇。

在分疇之後，科學理論往往再對每個範疇進行範疇內部的區分。好比，古典力學中的「物體」可以被區分成「質點」(particles)、「剛體」(rigid body)、「流體」(fluid)等等；「力量」可以區分成「向心力」(central force)、「拘束力」(constraint force)、「碰撞力」(collision force)等等；速度可以被區分成「平均速度」(mean velocity)、「瞬間速度」(instantaneous velocity)等等；「運動」更是可以被區分成種種類型如「質點平衡」(equilibrium of a particle)、「直線運動」(motion on a straight)、「平面運動」(motion in a plane)、「旋轉」(rotation)、「周期運動」(periodic motion)

²¹亞里斯多德又將實體區分成「初級實體」(primary substance)和次級實體(secondary substance)，初級實體是個別的人、個別的馬等等，是最基本的實體；而次級實體則有「人種」、「馬種」等等「物種」，甚至更高階層的「動物」、「植物」一類的「屬」也是次級實體。初級實體通常被主詞指涉，次級實體則既可被主詞指涉，也可被述詞所指涉，所以「實體」仍然算是一種述詞形式。譬如「人是理性的動物」這句話中，「人」指稱次級實體，但也作為主詞；而「蘇格拉底是人」這句話中，「蘇格拉底」是個別人——即初級實體——的名稱，而「人」在這兒作為述詞的一部分，但它指稱次級實體。邏輯上，我們把某個初級實體命名，這類名稱就叫「專名」(proper name)；而次級實體的名稱，一般就叫通名(general name)。

等等²²。現在這種區分都是在某一相同範疇下進行，範疇的成員都是同質的或均質的(homogeneous)，它們擁有一些共同的性質(qualities)，但是也有一些特徵(characteristics)有所不同，以致可以再被區分。這樣的區分很容易形成階層性，像樹枝一樣從根幹處分叉出去，正是孔恩先前所談的「樹狀分類」。被區分的「子範疇」(sub-category)是「種類」，而從「種類」可以繼續樹狀地區分出「次種類」。上層母群和下層成員之間是「種關係」或「屬—種關係」(“genus-specie” relation)。

然而，娜西姍和塔加德提醒我們還有另一種樹狀的區分，可稱作「分部」(partition)。被區分出的「子範疇」乃是原範疇的「局部」，原範疇為「整體」，換言之，範疇和它的子範疇之間是「整體—局部」關係。然而，兩種區分在圖式(scheme)上都呈現出「樹狀」；而且「局部」既然是整體的「一部分」，它仍然具備整體的許多性質，但由於各自獨特的「局部特徵」而自然地有所區分。所以，「整體—局部」的區分也是「同質的」或「均質的」區分。因此我們可以合併「分類」和「分部」的關係，而稱作「樹狀區分」。由此可見，分疇和樹狀區分是劃分世界的兩種相當不同的方式，也有相當不同的「視覺圖式」：一個是「樹狀」，另一個「網狀」。

現在，考慮任何科學理論。首先，我們都會發現它們包含幾個具有相互關係的基本概念，這些概念就是代表我們所謂的「範疇」。其次，一些範疇往往有進一步的樹狀區分：樹狀分類或「整體—局部」區分，從而長出一棵一棵的「區分樹」，該範疇就是區分樹的根部（或頭部）。讓我們以古典力學來作個示範。

²²這是一本大學物理的運動分類。Sears, et. al., *University Physics* (1985), 分別是第二、三、五、九、十一章。它是大一學生學習的普通物理，所以只考慮最簡單的單質點系統。

古典力學的分疇和樹狀區分可以根據上述說明而圖示如下圖 2-5²³：

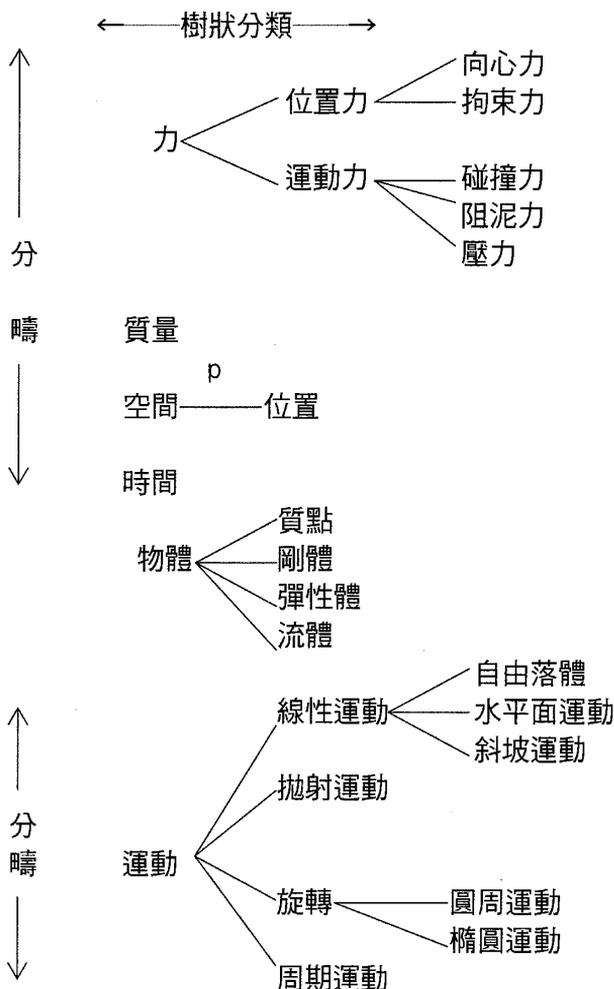


圖 2-5 說明：在這個圖表中，水平方向表示樹狀區分；垂直方向表示基本分疇，但只限於左邊第一排的项目才是基本分疇下的範疇。第一排的项目相對分疇關係乃是做為全然異質的範疇；但相對於樹狀分類則做為最高層的種類（以實線連結）。注意，其中「位置」與「空間」的關係乃是「局部—整體」的關係。

²³本樹狀分類中「力」的部分參考納格爾(Nagel 1961, pp. 167-168)。他把「力」分成「位置力」(positional force)：它相關於質點的質量和位置；「運動力」(motional forces)：不僅相關了相對位置和質量，也相關了相對速度。「位置力」又可分成兩群：「向心力」(central force)，力量總指向一定點；和「拘束力」(constraining force)，拘束質點在一限制區域或曲線上運動，譬如單擺的受力。「運動力」則包括了種種型態的力函數，如碰撞力、阻泥力、壓力等等。當然，力的區分不是只這一種。

讓我們將樹狀區分和網狀分疇的差別整理如下：首先，如果我們將這些被區分的範疇、種類、局部等等以圖表顯示出來，就可以在上圖和下文的幾個圖表中看到樹狀區分和分疇的「圖式」並不相同：樹狀區分呈現「樹狀的」；分疇則呈現「網狀的」（看下文的圖表）。其次，前者為「同質區分」，被區分出來的成員是一個個同質性的個體、類別或局部。在分疇中，區分出來的是個體、量、關係、行為等等毫無共同點的異質範疇，它們不可能有邊界案例的產生，也沒有明顯的層次之分。彼此間形成一個相互關聯(interlocked)的網絡，「套在」世界之上，從而影響了科學家對世界資訊的接收、篩取和解釋。

第三，樹狀區分和分疇的區分準則(guidelines for classification)之類型不同。樹狀區分的準則通常由成員間的一些不同特徵（獨特的種類特徵或獨特的局部特徵）構成的，這些特徵是被區分對象的形狀、作用、表現結果、組織結構、行為型態、或生命史等等。很多科學家努力進行一個理想的樹狀分類：亦即沒有成員會同時屬於同階層的兩個不同類別，而且該樹狀分類必是唯一的。但這樣的理想分類並不見得總是能夠達成。分疇則沒有根據特徵而形成的準則。科學理論的分疇通常出於「直觀」，因為不同範疇間的「異質性」具有直觀上的明確性。一般的「分疇系統」大抵繼承先前的理論一些範疇，再因為新的研究而添加新範疇。科學家根據這些繼承或添加的範疇來思考研究，尋求彼此間的相互關係，最終試圖建立科學定律或數學等式。一旦建立起科學定律，則其中每個「參項」（或稱「相關項」）就代表了理論對於「對象世界」（或「論域」）的分疇。換言之，一個分疇系統，正是科學理論中的諸科學定律，組成定律的參項就是種種範疇。

除了分疇外，一個科學理論必然包含對一些範疇的再分類，其中最重要的是主題分類(taxonomy of subject)。譬如，古典力學根據運動定律來研究種種運動型態的同時，也就根據一個分疇系統來進行著「運動」的分類。因為「運動」是「力學」的研究主題，但也是力學的分疇系統下被劃分出來的主題範疇。這主題範疇被「再分類」的方式是：從基本運動定律演繹出的不同運動定理(theorem)或數學等式，分別描述了不同的運動型態。但科學家如何從運動定律中演繹出不同的運動定理呢？例如，當科學家從牛頓第二運動定律 $F=ma$ 演繹出描述「周期運動」的定理 $F=-kx$ 時，他是根據物體的受力方向與其移動的瞬間方向相反、而且力是位置的函數（亦即力量大小會隨位置而變動）等特徵來進行數學推演。換言之，周期運動的受力是「一種」特別的力，和受力物的移動方向有特別的關係。這也意味著，「運動」的分類準則可能來自不同的受力型態、不同的物體種類、不同的速度種類等等——換言之，來自其它範疇的分類。

總而言之，科學理論是一個既有分疇也有樹狀區分的階層系統。而且即使在表面上看起來只需考察分類的學科理論，好比生物分類學，也必存在著分疇的現象。

伍、範疇、種類和意義的結構

既然區分有兩種不同型態和結構，它們的產品—範疇和種類（暫不管「局部」的區分，因為「種類」的區分較為常見），除了上節已提及的差異特徵外，還各有其特性。第一，科學範疇主要出現在原理—通常是科學定律當中。定律是一種用以預測和預期未來的通則，所以範疇擁有「可投射性」；第二，範疇和範疇之間的界線分明，絲毫不可能有邊界案例存在，所以範疇間是「不可重疊的」；第三，範疇語詞(category-term)要應用「意義整體論」來加以說明²⁴。因為分疇表現於科學定律，科學定律規定了範疇間的相互關係，每個範疇語詞的意義都是由科學定律所定義，一個科學理論的所有範疇語詞形成一整體性的詞彙網絡(lexical network)，環環相扣，牽一髮而動全身。

然而，科學理論內部的諸範疇又因其在理論中的地位與角色而分成兩種：「基本範疇」(elementary categories)和「次要範疇」(secondary categories)。科學家通常會把一些範疇視為最基本與最核心的，而且是理論成立所必要的範疇，這些範疇就是我們所謂的「基本範疇」²⁵。區分基本範疇就稱作「基本分疇」，它在理論內往往表現在最根本的「原理」或最初始的定義之中。譬如「物體」、「質量」、「力」、「時間」、「空間」乃是牛頓力學的基本範疇。另外一些範疇則雖在理論中亦扮演

²⁴我理解「意義整體論」為強調單一詞項的意義將由脈絡整體來決定，並隨脈絡不同而改變；改變其中一詞項的意義，其它所有相關詞項的意義也會隨之變動。通常哲學家認為它對立於「意義原子論」(semantic atomism)—後者主張表達或語句的「意義」是由其成分字詞的意義組構而來的（這被稱為意義的組構性(compositionality)），而字詞的意義又決定於被指對象。它們是不可再分割的單元—意義原子；所以這整套觀念被稱為「意義原子論」。近來有所謂「意義分子論」(semantic molecularism)的提法（參看洪裕宏(1997)）。我想它和意義整體論的差別在於部分哲學家將後者詮釋為全體性的(global)，而分子論則只是局部性的(local)。如果我們只在「詞項的意義隨脈絡而變動，變動的結果將改變整體以及整體的其它部分之意義」這個意思下來理解「整體論」，那麼這整體論究竟是全體性的或局部性的？我們暫時不在這兒討論這個問題。

²⁵我們所謂的「基本範疇」，也可以說是一種「存有論範疇」。它是建立在亞里斯多德的「存有論架構」下的一種分類的存有論。孔恩在《結構》一書中已經提及了「物質的量」(quantity-of-matter)是一基本的存有論範疇(fundamental ontological category) (Kuhn 1970, p. 40)在回答對不可共量性的批評中，也曾應用了同樣的詞彙(Kuhn 1970a, p. 270)。然而，孔恩似乎沒有清楚說明他所謂的「存有論」是什麼？「範疇」又是什麼？如果我們用亞里斯多德的存有論架構來理解孔恩，顯然他所說的存有論範疇就是指我們的「基本範疇」。

某一角色（通常也是重要的角色），也有其重要的物理意義。但在科學家眼中並不是最基本或最核心的，而是居於較次要的位置，通常為了輔助理解或計算方便而設立，這種範疇就是我們所謂的「次要範疇」。例如古典力學中的「速度」、「加速度」、「動量」屬於次要範疇。對不同的科學家來說，同一組範疇中的哪些是「基本範疇」，哪些是「次要範疇」可能會有不同的認知（如此可能產生不同的理論版本）：譬如在赫茲的力學版本中，基本範疇只有「物質」、「質量」、「時間」和「空間」四者，「力」、「動量」、「能量」在赫茲力學中都只是「次要範疇」（參看第六章）。基本範疇和次要範疇的區分反映的是科學家對概念層次的不同認知，有時也會表現出科學家對理論的美學感受（通常基本範疇越少的版本被認為是越優美的理論）。

種類是對各範疇的再區分，被區分的種類則形成一個樹狀階層。因此，種類主要考慮的是上下階層間的關係。在垂直方向上，種類和種類是隸屬關係，如果X在Y的上一階層之中，我們就可以說「Y是一種X」；如果X和Y是在同階層中，而Z在X和Y之上，我們就說「X和Y都是一種Z」²⁶。如此，種類名稱的意義就「嵌在」於這個樹狀的意義結構上。當分類樹的拓樸形狀改變時，種類名稱的意義也會隨之變動²⁷。此外，種類也可用來預測或預期某種存在的新事物，所以種類也具有「可投射性」。部分種類除了可投射性外，還能「指稱」世界的真實種類。必須注意的是，一個科學語詞，好比說「力」，究竟代表了範疇或種類並不是絕對的，而是必須視它和其它語詞的相對關係才能決定：「力」如果出現在基本分疇關係間，它代表範疇；「力」如果出現在「位置力」、「運動力」等詞項之間與樹狀分類關係之中，它則代表種類。

但分類既然以範疇為「根」而長出分類樹，則不同的範疇類型會也產生不同類型的分類。亦即，我們有兩種分類²⁸：「參項分類」和「主

²⁶自然，如果X和Y是「整體—局部」關係時，則我們要說「X是Y的一部分」。

同樣地，X和Y的意義也被「嵌在」這種「整體—局部」的樹狀區分之中。

作為而代表局部的局部詞(part term)也有可投射性。

²⁷「拓樸形狀」(topological shape)這個詞意指在種類階層中，種類和種類的整體連結結構，也即是樹枝分叉的整個形狀。上文塔加德對亞氏力學和牛頓力學的概念網絡之展示，可以明顯看到兩種系統的拓樸形狀之改變。

²⁸原型理論是否能應用到「力」、「質量」這些所謂物理概念的參項範疇上？洪裕宏教授認為原型理論並不適用於現代物理學，因為現代物理學的概念是精確定義的。他質疑筆者：「時間的原型是什麼？」筆者原本認為像這類參項範疇其實可以將其「量、定義」層面和「質(quality)、概念」層面分開來討論。如果我們可以獨立考察這些物理範疇中「質」和「概念」的層面，那麼原型理論應該也可以應用來說明現代物理範疇。再者，如果進一步考慮「理論版本家族」，那麼不同版本的科學家，可能會對相同的概念產生原型效應式的理解（Nersessian (1984)已經以「電磁場」(electrical field)為例展示這一

題分類」。我們將指出主題分類是對一群模型的區分（見下節），科學模型則是一種抽象或具體的物件（或物件系統），而人類對物件的分類必然受原型理論(prototype theory)揭露的認知結構所限定（關於原型理論，參看第三章）。換言之，物件種類的區分總是根據我們的分類認知能力和物件的基本特性，由分類的原型理論來說明。分類的原型理論告訴我們，分類的產品有其內在結構—原型和週邊的等級、模糊邊界等等，故同層次的種類間往往產生難以歸類的邊界案例。譬如，古典力學的主題是運動，科學家建立了許多模型來說明各類運動，但這些模型當中有些是典型的、做為範例的，有些則是周邊的，顯現了原型理論所揭露的等級性。吉爾已經對這一點作了卓越的展示（參看第三章）。

然而，我們另有針對「力」、「質量」、「空間」這些作為參項的範疇所進行的分類，這些參項範疇的分類往往由於數學等式或精確的定義來作為區分的標準或規則。透過和其它物理量以及物理量的次範疇的相互關係，參項範疇可以被精確定義，而這些定義可以在兩個不同的次範疇之間劃出截然分明的界線來（至少科學家普遍希望且認知為如此），特別在數學物理之中，它們往往是「量化的定義」或者「以量來作分類」。但是這樣的區分也可能產生樹狀結構，也就是說：它們也是樹狀分類而不是分疇，但它並不像主題分類一般會產生內在的原型效應，這些分類後的次種類內部是均勻的，彼此間也是界線分明的。

現在，我們已經知道科學理論中存在著分疇和分類的差別。如此，我們可以再將「基本範疇」、「次要範疇」、整體性的「意義網絡」整合到前一節的分疇分類的模型圖中，可以得到下圖 2-6：（在這兒我們省略了主題分類的部分）

點）。然而，經過詳細考慮後，筆者決定採納洪教授的部分見解，不以原型理論來說明這些物理範疇。理由是：現代物理學家大多相信物理範疇是精確定義的，而且多在量化的層面上應用物理概念，並以量化定義的方式來認知物理範疇，因此他們大概很難接受物理範疇可能具有原型結構。既然我們考慮的主要是「理論版本」，亦即單個科學家的分疇和分類，我們也強調了要符合科學家的認知。因此，在只考慮「理論版本」的情況下，單一理論版本的物理範疇可能並沒有內在的原型結構。然而，筆者還是認為原型理論可以很適切地說明「主題分類」，參看下節討論。

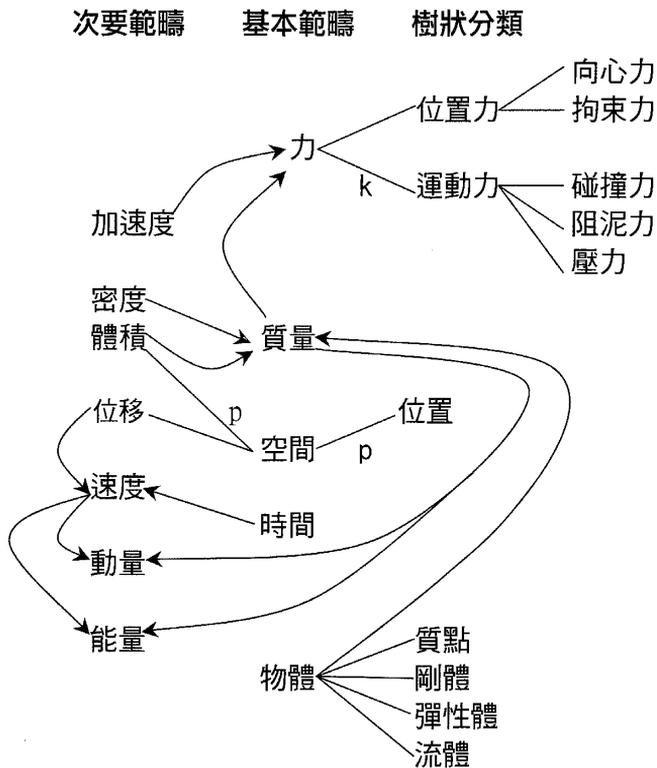


圖 2-6 說明：在基本範疇和次要範疇之間，箭頭的方向表示定義的方向。譬如：牛頓第二運動定律是「力等於質量乘以加速度」，則可以說「加速度」和「質量」共同定義了「力」，所以從「加速度」和「質量」發出箭號，其箭頭指向「力」。同理，「體積」和「密度」定義了「質量」；「空間」定義了「體積」；「質量」和「速度」定義了「動量」；而「速度」又由「位移」或「空間」和「時間」來加以定義。

比較「分疇分類系統」和哈金的方案，可以看到我們所謂的範疇，很像哈金所提出的「科學種類」，因為它是截然分明、不可重疊的。但範疇彼此間並不是樹狀的「屬一種」關係，而是由科學定律關聯起來的「相互關係」(correlation, interrelation or interlocked relation)。當然一個科學理論的所有概念或詞項代表的並不都是範疇，科學理論中還存在許多範疇之下的種類，種類和種類之間才是「種—屬」關係。哈金將所有科學概念的劃分單元同歸為「樹狀分類的科學種類」，使他遺忘了某些科學概念之間明顯不是。簡單的例子，牛頓力學的「力」、「質量」、「位置」等等概念之間，能夠說是「屬一種」關係嗎？當然，哈金可以辯說，科學理論中有好幾個分類樹，每個分類樹的樹首(head)和樹首之間當然不會是「屬一種」關係。若不是，那又是什麼關係呢？哈金恐怕無法在他的理論架構內交待。樹首和樹首彼此間是不重疊的，但我們無法說它們都是於某一更大分類樹的分枝，因為它們已經是論域內最基本的區分了（當然，如果該論域乃是一個更大論域的子論域，則它們有可能是更大論域中某範疇的分枝，但這個更大的論域仍然有它自己最基本

的分疇。「論域」(domain)的概念見第四章。)它們之間當然有某種關係，是一種由定律連結起來的相互關係。或許哈金可以再辯稱：定律位在分類樹的最高層次，是一巨大的理論分類樹之樹首。好比， $F=ma$ 做為樹首，而分類出「力」、「質量」、「位置」、「時間」等種類。然而這個辯護成立嗎？我們必須注意分類樹中的枝和幹的關係是「種—屬關係」。讓我們試問：可以說「力是一種第二運動定律」嗎？明顯不能。樹狀分類方法只能應用在同質事物上。好比運動型態的分類、光學現象的分類、化學元素的分類、生物分類等等；但是它無法應用在異質事物（也就是述詞所代表的性質）如「力」、「質量」、「位置」的區分上。所以，筆者認為哈金的「科學種類」和「分類樹」概念是不完全的。

孔恩以牛頓力學中的「力」、「質量」、「重量」三個核心概念來展示理論的詞彙結構，顯然正是我們所謂的基本分疇。所不同的是，孔恩從語言學習的面向來揭示科學理論對世界的分割；我們則跟從哈金直接自分類、區分的認知活動本身來看這個問題。然而，我們並不像哈金一般，試圖排除有關語言和意義理論的東西，相反地，我們的立場如同孔恩，認為語言表達是科學理論的必要面向。有關語言的問題，讓我們留到第四章。現在，孔恩的問題是他只談論了泛泛的「詞彙結構」，雖然他也提及了「分類樹」，但所謂的「分類樹」是什麼意思？它的結構為何？孔恩似乎沒有清楚地展示過。或許孔恩並沒有分清在科學理論中存在著兩種相當不同的區分方式²⁹，或許他混用了分疇和分類，也可能孔恩不認為有必要去區分我們所謂的「分疇」和「樹狀分類」，詞彙結構已足以涵蓋這兩者。固然，「詞彙結構」可以被擴大理解而容納整個「分疇分類系統」，但是不揭開這「結構」裏包含了兩種相當不同的「組織」方式，我們終究無法透徹理解科學理論的基本特徵。

陸、種類間的不重疊

最後，我們想大略談談種類間的不重疊。孔恩和哈金認為在樹狀分類結構當中，相同層次的種類之間必定是不可重疊的。然而，我們卻主張至少在主題分類的樹狀系統中，相鄰的種類之間可能有邊界案例，以致造成難以歸類的重疊情況。我們所根據的理論基礎是分類的原型理論：它告訴我們每個種類的內部存在等級結構，而這是源於人類分類認知能力的限制。如此一來，我們觀點和哈金概念之間的產生重大衝突了嗎？

事實上，哈金所謂的不重疊主要指的是「反樹狀分類」(anti-taxonomy)的情況(1993, pp. 286-287)：譬如，「毒藥」、「植物」和「礦物」這三個種類之間，有部分植物成員是「毒藥」，有部分礦物成員也是「毒藥」，

²⁹譬如在 Shearman Lecture 中，孔恩使用了像 taxonomic categories 這樣的複合用詞(Kuhn 1987a, p. 40)。當然，我們知道在英語的一般用法中，category 已經失去了它的希臘字源涵義。

如此，這三個種類的關係，並不是樹狀分類，因為它們的「毒藥類」和「植物類」、「礦物類」有相當的重疊。這種反樹狀分類情況的重疊和我們所說的因邊界案例而產生的重疊，似乎有很大的差異。在我們主張的樹狀分類系統中，當然也不容許哈金所提出的這種反樹狀分類情況，但由於人類認知能力的限制，我們容許主題分類存在著邊界案例的重疊。接近基本層次的，重疊程度可能極小，在上位或下位層次的種類，重疊的程度可能較大。不管如何，絕無重疊的情況並不存在於「主題分類」的系統中。

現在問題是，真正科學理論的主題分類是否能容許邊界案例的重疊³⁰？我們可以這麼說：不容許邊界案例重疊的樹狀分類只是科學家的理想，每個科學家都試圖去提出或發現一個絕無邊界案例的樹狀分類系統；然而受限於人類的分類認知條件和世界結構（分類的原型理論所揭櫫的），這樣理想的樹狀分類系統從來未曾實現。也就是說，科學家在提出科學理論的同時也隨附著一個分類系統，科學家相信他已經達到理想的分類系統，但這只是科學家自己的「想像」。其他科學家根據他們的認知能力去考察這個分類時，總是會發現許多不理想的邊界情況——特別是如果這個種類層次是位於下位層次的話。換言之，分類認知的限制告訴我們沒有一個分類系統能得到所有人類的一致公認。甚至他自己也可能發現存在著某些邊界案例。從理論版本的角度，也即是個別科學家的觀點來看，單個理論版本是否存在著模型區分間的重疊？個別科學家是否能容忍他的主題分類中存在著難以歸類的邊界案例？我們認為科學家對分類中的邊界案例有相當的容忍度。科學史上已經顯示科學家往往長期地容忍「異例」(anomaly)的存在，而異例可以是完全在分類樹之外的異常物件（無法以現有模型來說明），也可以是難以歸類的邊界物件（在現有的兩種模型之邊界地帶）³¹。

³⁰孔恩、哈金、Buchwald(1992) 都相當重視且強調這不重疊原則。他們似乎也不容許邊界案例情況的重疊。當然，他們指的是科學家對樹狀分類系統的要求，正因為理想上不能有邊界案例，所以，科學家有時會嘗試提出新的樹狀分類架構。當然，這裏也牽涉到科學家主觀上對邊界案例的容忍程度，以及客觀情勢上是否解決異例的時機已然成熟。換言之，理想分類的無法達成與邊界案例的存在並不必然總是理論的缺陷。

³¹舉例來說，天文學家赫歇爾(William Herschel)在觀察到天王星時，曾一度視它為彗星。在赫歇爾確認天王星是另一顆行星之前，天王星可以說是彗星類和行星類之間的邊界案例。因為天王星被觀察到軌道相當怪異，這方面類似彗星；但天王星並沒有彗星的尾巴，這又讓天王星像一顆行星。因此，天王星在尚未確認之時，乃是一個彗星和行星之間的邊界案例。同樣地，就算天王星在被確認為行星之後，它的軌道也是牛頓的向心力模型（或行星軌道模型）之邊界案例——因為它是行星，理論上應該受行星軌道模型所說明，但它沒有。在十九世紀初有一個假說主張重力定律在天王星如此遠的距離下將失

但是，正因實際分類和理想分類的落差，推動科學家不斷嘗試去改革舊理論，提出新分類。這恰是科學革命、分類變遷、理論改變的推動因素之一。形式地說來，A 科學家提出了一個分疇分類系統，相信它的分類之間絕無任何重疊情況；但 B 科學家認為他的分類並不完善，存在著邊界案例；或者 B 科學家發現了一種新現象，無法毫不重疊地納入 A 科學家的分類系統中；所以 B 科學家不得不提出新的分類。這個新分類如果能重新將邊界案例納入分類系統內，也就解決了理論的異例。進一步可能形成分類變遷，促成理論修改或革命。當然，我們要強調：樹狀分類的改變並不一定造成理論革命，也不一定是理論革命的唯一因素³²。

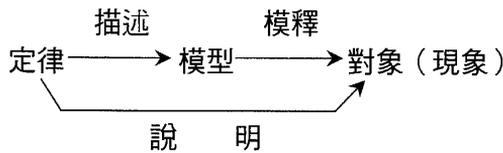
去效力，可能會有新的重力定律來說明天王星的軌道。這個假說當然沒有證實。但如果這個假說後來被證實的話，或許科學家會進行「兩種行星」的分類，一種是六大行星，遵循牛頓重力定律；另一種天王星或更遠的未知行星，遵循新的重力定律（參看 Chen, R.-L. (2003), “Testing through realizable models”）。然而，在找到解決辦法之前，科學家仍然容忍天王星做為行星或行星軌道的邊界案例。

³²孔恩在 Shearman Lecture 中對「詞彙結構」或「分類結構」如何導致科學理論的變遷之描述很類似我在這兒的描繪，孔恩提及分類系統中的邊界案例正是相對這個科學分類系統的異例：「一個異常對象—同等地類似兩個不同種類的成員—將威脅到它所類似的自然類之地位。」(Kuhn 1987a, p. 47) 傅大為教授(1995)也討論了分類之間的重疊造成分類樹中的迴路(loop)之情況，以及這迴路如何產生重新分類的壓力。當然在這個問題上我們暫時不打算深入。

第三章 認知模型及其分類

分疇和樹狀區分是科學理論的基本特徵，範疇和種類則傳遞著世界事物的相似和差異的資訊，在我們心智中形成科學概念。掌握這些概念，我們也就擁有科學知識的一部分。但是，這並不是科學知識的全部，除了少數學科之外，科學家所追求的目標，很少只是一個完善的範疇和種類系統。科學家真正重視的是範疇與範疇之間的規則性、量化的關係（也就是科學定律），以及這些規則和關係（定律）對現象或事物變化的說明。範疇與種類不過是這個目標下的副產品。

事實上，科學定律的建立總已蘊涵了分疇，因為分疇並不只是區分範疇，還包括範疇的定義一也就是範疇與其它範疇之間的關係之界定。分疇形成整體性的關係和意義網絡。尋求研究對象的分疇也就在於發現科學定律，因此符合科學的基本目標。然而，科學家除了發現定律外，還必須考慮定律對現象的說明，也就是必須考慮定律和它所說明對象間的關係，這個關係必須能被我們所理解，能指引我們去發現世界的結構。讓我們提議這個關係是「模釋」或「模映」(modeling)，而定律所描述的是被說明對象的「模型」。換言之，定律是藉描述能夠模釋現象的「模型」來說明現象。定律、模型、被說明對象（現象）之間的關係可以表示如下：



如果說，科學理論的語意觀點，由於過於抽象與形式化的特徵，無法完整地「模釋」科學理論的各種面向—尤其是科學家對理論的認知。那麼，把「模型」定質成為實際的、出現在科學家心中的「認知模型」，是否就能解決這個麻煩？然而，這樣的重新定質，也免不了要涉及科學家的心智認知結構之研究。這就是科學理論的認知模型進路—它主張理論的核心是科學家心智中的認知模型，是一種認知科學意義上的心智表徵(mental representation)，是心智到世界的中介項目。認知模型進路一方面援引認知科學的成果來探討和理解科學理論（因而可以被稱為「科學的科學」）；另一方面也接受模型是理論的必要和核心成分，並且給予科學模型一個認知科學上的定義。

認知模型進路其實包含在更廣泛的科學哲學之認知觀點或科學的認知研究內¹。隨著認知科學的擴展，不僅哲學家援引認知科學的成果或

¹ 據筆者目前所知，科學的認知觀點之研究成果有如下著作（儘列出作者和出版年份，不列出書名）：論文集有兩本，Nersessian(1987)(ed.); Giere(1992)(ed.);

者直接應用認知科學的方法來探查科學，而且也開始有許多認知心理學家、認知科學家直接投入科學知覺、推理、思考、理解、判斷、選擇、解決問題等等心智歷程一也就是科學認知歷程—的研究，造成了「自然論」(naturalism)的哲學觀點和「科學哲學」自然化研究之興盛²。科學理論的認知模型觀點，可說是採取自然化的研究取向。

涉及科學理論的本質議題且抱持認知模型觀點的主要哲學家有吉爾和娜西姆等人，本文從吉爾的作品出發。吉爾應用認知心理學中的「分類的原型理論」(prototype theory of categorization)，做為揭開理論的模型家族之階層結構的理論工具。什麼是分類的原型理論？

專書則有 Giere(1979) (本書的主題在於科學推理)、Giere(1988) (本書即是本節討論重心)、Giere(1999) (吉爾在九十年代的多篇論文合集)；Nersessian(1984) (本書研究科學理論的意義建構問題，作者後續的研究論文進一步聚焦於意義改變上)；Paul Churchland(1989) (此書上半部為心智哲學，下半部則為科學哲學)；Thagard(1988, 1992) (作者是從計算觀點來進行考察，前一本關於科學知識和理論的結構；後一本也關切概念和意義變遷的問題)；Gooding(1990) (本書是一本實驗的意義建構和認知歷程之研究)。

² 自然論的觀點目前在認識論和心智哲學中相當流行，而且也逐漸伸展向科學哲學，產生英美哲學間所謂「自然論回轉」(naturalist return)的風潮 (參看基契爾(Kitcher 1992))。「自然論」是一種哲學觀點，主張把研究對象當成是「自然」的一分子，並使用「自然化」也就是「科學化」的方式去考察對象在時間中的演變歷程，因此，自然論一般強調「歷程」和「實然」而不是「基礎」和「規範」的研究。就此而言，自然論並不單只是指應用認知科學來進行心智或科學研究的觀點；事實上，孔恩之歷史進路的科學哲學也是自然論的一種形式，他們使用歷史材料，並且把焦點聚集在科學的演變發展歷程。然而，並非一切研究科學歷程或應用歷史為材料的科學哲學都是自然論，譬如拉卡托斯(Lakatos 1978)和夏佩爾(Shapere 1984)同樣都屬歷史學派，但他們將科學哲學定位為一種「後設方法學」(metamethodology)，試圖「重建科學的合理性」並且追求一個「合理性的規範理論」，但如果「合理性」定義在歷史進程之外，那麼他們的並不是自然論；但是，勞丹(Laudan, Larry 1977, 1984)雖然主張科學發展有其合理性(rationality)，但他用歷程的「進步」來定義「合理性」，而且喜歡稱自己的理論為「規範的自然論」(normative naturalism)，這是一個有點自相矛盾的講法 (所以吉爾並不把勞丹納入自然論的版圖內，他認為勞丹和拉卡托斯是同類的觀點)。關於科學哲學的自然論可參看吉爾(Giere 1985a)、羅森伯格(Rosenberg, Alex 1996)的專論文章。亦見陳瑞麟(2003b)，〈規範的或演化的？——科學哲學自然論的兩張面孔〉，《科學與世界之間》(台北：學富)。

壹、分類的基礎：原型理論

目前的心理學通常混用「分類」和「分疇」這兩個概念³，然而，我們已在前文區分「分疇」和「分類」。因此心理學家所用的 *categorization* 和 *category* 並沒有我們所談的範疇含意，而相當一般的「種類」。為了分辨，以下我們將「*category*」譯成「類別」。心理學家認為對分類的研究從亞里斯多德以來一直受傳統觀點主宰。分類的傳統觀點主張「類別劃分」是對事物的進行客觀的區分，和人類主體的心智能力無關⁴；類別是一個事物的集合，它用一組共同性質或某一本質來定義，集合內的每個成員都分享該組性質或該本質⁵。維根斯坦(Ludwig Wittgenstein)在 1953 年對傳統觀點中共同性質的質疑⁶，結合認知心理學的成長，開啟了對「分類」的嶄新進路和研究—成果就是分類的原型理論。

1970 年代間，認知心理學家羅施(Eleanor H. Rosch)和她的同事們正式提出了分類的原型理論，系統性地綜合且整合了許多心理學家、人類學家、語言學家先驅性的研究成果，正式將類別和概念的認知研究推入科學的舞台，已形成具備前瞻性和豐富性的新學說，不斷有許多後繼研

³ 認知心理學家 W. Estes(1994) 注意到 *classification* 和 *categorization* 這兩個英文概念有些差異，他說：「*classification* 意味只是劃分成群體的對象之收集；而 *categorization* 則涵蘊了範疇知識，屬於它的對象將告訴我們關於它的性質。」(p. 4) 這和本書對 *taxonomy* 與 *categorization* 的區分有相近之處（述詞形式也代表一種性質）。

⁴ 所謂古典觀點(classical view)的論述，哲學文獻裏當然很熟悉，但心理學家如何描述古典觀點呢？許多心理學文獻引証了 Smith & Medin(1981), *Categories and Concepts*，他們標出了「古典觀點」，並主張用原型理論來取代它。除了上書外，可以再參看 Sutcliffe(1993), "Concept, Class, and Category in the Tradition of Aristotle"一文。

⁵ 可以說，在分析哲學內，主張描述詞論者(descriptive theory)者是用「一組共同性質」（一組充分必要條件或特徵）來選出一個類別的成員或定義一個類別；而主張固定指稱論者則以「本質」來定義一個類別，名稱和類別成員是直接且固定的聯繫。有些作者只把描述詞論的觀點視為傳統觀點，而認為固定指稱論者也是對傳統觀點的批判（見 Keil 1989, ch. 3）

⁶ 維根斯坦問：「共通於所有遊戲的是什麼？...你將不會看到共通於所有遊戲的東西」(§66) 萊卡夫(George Lakoff)稱此為「傳統理論中的第一個主要破綻」(Lakoff 1987, p. 16)。奧斯丁(J. L. Austin)在 1940 年發表一篇論文〈一個字的意義〉(The Meaning of a Word)中，對字詞的分析已有類似觀點，只不過奧斯丁集中在字詞和意義上，並未如維根斯坦般把它推到事物上。萊卡夫也提到奧斯丁，並且顯示出奧斯丁在意義上的分析預示了他自己很多後來的研究 (Lakoff 1987, p. 17-21)。

究被推出。羅施在多篇研究論文(Rosch 1973, 1975, 1976)中，進行了一系列有關「原型」、「原型度」(prototypicality)、「家族相似」、「基本層次類別」(basic-level categories)等原型理論的核心概念之說明、操作定義和實驗，並將完整理論總結描繪在 1978 年的論文〈分類的原理〉(Principles of Categorization)中。

分類的原型理論主張類別和分類有下列基本特性：(1) 認知性：類別是人類認知能力的產品；(2) 原型性：類別有其內在結構，部分成員易於被認知為較典型的成員；(3) 等級結構(gradience structure)：類別的成員並不是均等地相似或相異於原型成員，而是呈現出一種中心到周邊的等級性；(4) 家族相似性：所有類別成員並不共享一組共同的諸特徵；(5) 模糊邊界(vague borderline)：類別與類別之間的界限總是有邊界成員的存在。(6) 類別三層階層性：人類對事物的分類將形成一個類別階層系統，主要有三個層次：上位類別—基本層次—下位類別；(7) 基本層次類別對世界做了最清楚截然的劃分。

在原型理論看來，類別並不是由無關於主體能力的客觀事物，透過充分必要條件的判準而形成的單純集合；類別和人類主體相關，「分類」就是人類的基本認知能力。分類的產品是類別，有其獨特的內在結構：它有部分成員總是會被人類主體認知為該類別的較好範例(better example)或典型(exemplar)—它們被稱作「原型」，其它成員則可能接近原型（和原型共享較多的特徵，擁有較大的「原型度」）或者更偏離原型（共享較少的特徵）；譬如，人們通常會把「椅子」、「桌子」看成典型地屬於「傢俱」，而「酒櫃」、「吧台」等則屬於較偏遠的傢俱（認同它們為傢俱典型的人較少或者反應較遲疑）；因此類別的內部並不是傳統觀點定義下的均勻齊一，也不是其它成員均勻地相似於原型成員，而是呈現中心—周邊的等級性。再者，不少人對是否「收音機」屬於傢俱會感到更猶豫，這顯示了模糊邊界的特性（收音機屬於傢俱和非傢俱的邊界情況）。此外，類別內的A成員和B成員之間共同擁有的特徵不完全相同於C成員和D成員之間共有的特徵，也就是類別內的成員彼此間只能是「家族相似」的，正如「桌子」和「椅子」一般共享較多的傢俱屬性，「收音機」和「椅子」則分享較少的傢俱特徵，而「收音機」和「花瓶」之間甚至可能完全沒有共同的傢俱特徵；「椅子」、「沙發」、「桌子」、「鋼琴」等等均屬於傢俱的成員，卻無法找到所有成員均共享的特徵，我們只能以「家族相似」來形容它們之隸屬於同一個類別內(Rosch 1975)。

類別內在結構之揭露屬於分類研究的水平向度(horizontal dimension)，除此之外，羅施還進行垂直向度(vertical dimension)的基本層次對象（或基本層次類別）之研究(1976)。人類對事物的分類總是形成一個類別系統，是一種階層體系(hierarchy)，它擁有一個三層次的基本結構：即上位類別(superordinate categories)、基本層次類別和下位類別(subordinate categories)。許多不同的下位類別合組成一個基本層次類別；而許多不同的基本層次類別又合組成一個上位類別。好比「書桌」、

「餐桌」、「電腦桌」等等下位類別合組成「桌子」這個基本層次類別；「搖椅」、「躺椅」、「旋轉椅」等等合組成「椅子」；「桌子」、「椅子」、「櫥櫃」等等基本層次類別又合組成「傢俱」這個上位類別⁷。羅施的研究顯示基本層次類別是世界的「切斷點」(cut)，傳統上所言的「自然類」⁸在一個類別階層中通常位於基本層次上。因為基本層次類別對世界做了最截然的分割，所以往往被認為「鏡映」(mirror)了世界本身的相關結構。

羅施以「提示有效度」(cue validity)的變量來檢驗和測量類別內的原型結構，它讓「原型度」和「家族相似」成為可操作的概念。所謂「提示有效度」是：

.....一個機率的概念；給定一個提示 x 做為一已知類別 y 的預報項 (predictor)，則 x 的有效度隨著提示 x 聯想到類別 y 的頻率 (‘ y/x ’ 的條件機率) 之增加而增加，以及隨著提示 x 聯想到非 y 的類別之頻率的增加而減少。(Rosch 1978, p. 30)

其中的提示 x 可以是具體的成員或者是抽象的屬性。那麼家族相似關係的原理可以透過提示有效度而加以定義：若一類別內的各成員有各種不同的聯想頻率；或者不同屬性有各種不同的分佈程度（比較多成員擁有該屬性或者比較少的成員擁有該屬性），亦即它們在實驗上產生不同的提示有效度時，也就意謂了這個類別的成員間是家族相似的。而「原型度」也就是類別成員所具備的提示有效度之程度—提示有效度越大，原型度越大。提示有效度因而成了檢驗原型理論的可控制和可操作變項⁹。

⁷ 文中的例子是羅施原來例子的中譯，為了配合中文文化而作小幅度的更動，由這兒可以看到這個「上位—基本層次—下位」的階層結構乃是一個浮動的結構—例如，「米飯」(rice)在東方文化中可能是上位類別，其下包括了「乾飯」、「粥」、「糯米」、「炒飯」等等。而在西方卻可能位於基本層次上，和其它的「麵包」(bread)、「牛排」(beefsteak)、「熱狗」(hot dog)是同層次的類別。

⁸ 當然，我們在這兒所舉的「桌子」、「椅子」並不是自然類，而是人造種類 (artificial categories)；像「麻雀」、「水」、「榕樹」、「老虎」等等則是自然類。認知心理學家發現民間的自然類，很多種類和林奈氏(Linnaeus)的動植物分類系統中的「屬」層次相吻合，但並不必然如此。譬如，有些科學實在論的哲學家可能會把自然類詞等同於科學類詞，自然科學所揭露的代表某一事物的名詞都是「自然類詞」。事實上，「自然類詞」本身是一個相當含混的語詞類別。

⁹ 提示有效度除了用在檢驗類別的內在結構外，也可以用來測量同層次的類別和類別之間的差異程度。這時我們必須運用「整個類別的提示有效度」，又稱「總和提示有效度」(total cue validity)(Rosch 1978, p. 30-31)，它可以定義為「類別內的每個屬性對該類別之提示有效度之總和」。如此，一個類別有越

吉爾並沒有討論原型理論應用到科學理論上的有效性，然而原型理論不能原封不動地應用到科學分類上，為什麼？

首先，基本層次類別的認知明顯和文化相關。我們在解釋羅施的觀點時，是以中文為例子，將它們和羅施原來的例子作比較，可以揭示所謂「上位－基本層次－下位」的階層結構乃是一個浮動的結構—換言之，什麼類別在上位層次、什麼類別在基本層次或下位層次並不是放諸四海皆準的固定階層，而是會隨人們先行決定「基本層次類別」再決定其上位類別和下位類別，文化在決定什麼是基本層次類別上扮演著關鍵角色。換言之，不同的文化對什麼類別位在基本層次，可能會有不同的認知。進一步在類別的內在結構上，我們也會發現「原型的範例」和文化相關，亦即對相近的類別而言，什麼樣的例子是該類別的原型成員，不同的文化也可能會有不同的挑選。

再者，原型理論主要在闡述常民的分類(folk taxonomy)，常民分類和科學分類往往有相當不同的階層。學習少量科學或完全外行的常民可能在科學探討的主題上不自覺地形成和科學理論相當不同的分類階層和基本層次¹⁰。至於創作或精通科學理論的不同科學家，則可能各有不同的「基本層次」認知，科學家也可能對分類的每一階層總是要求達到「截然分明」的程度。不管科學家的目標是否可行，在考慮單個科學家的科學理論時，「基本層次」變成一個不具重要性(significance)的概念，因為「基本層次」是一種「群體的分類認知」的衡量（也就是說，在一個群體中，其成員一般認知為最清楚截然分類的那一層次就是基本層次，這是一種認知上常態的、實際的現象），而歷史上科學家往往有自己的一套分類，也總是企圖去做出一個最清楚截然的分類系統，所以對他們而言，可能每個層次都是「基本層次」。既然我們的目標指向單個科學家的理論版本，因此，在討論科學分類時就不必涉及任何基本層次的分析。當然，心理學家還是可以去調查具備某一定程度的科學能力之

高的提示有效度表示它和其它類別有更大的差異性。此外，羅施再引用特維斯基(Tversky)提供的「類別相似度」(category resemblance)用來測量一個類別內部的成員間之相似程度，它可以定義為「所有共同特徵的量測之權重和(weighted sum)減去所有不同特徵的量測之權重和」(1978, p. 31)。而基本層次類別會同時將「總和提示有效度」和「類別相似度」予以最大化—它和同層次的其它類別有最大的差異度，內在成員間則有最大的相似度。上位類別在提示有效度和類別相似度上皆低於基本類別；下位類別則在總和提示有效度上也低於基本類別，因為它們和對立類別分享了最多的屬性；並且因而類別內部的成員相似度也較低（因為它們的共同特徵雖然更多，但跨類別的不同特徵也更多）—換言之，它們彼此間的界限最模糊。

¹⁰可參看 Gentner 編輯的《心智模型》(Mental Models)這本書。本書共收集十四篇心理學家研究一般人對一些科學概念如「力」、「空間」、「電流」等等的認知，並和科學的「正確」觀點進行比較。

科學研究生或從業科學家群體，對一個科學理論的分類階層之認知，是否將產生共同的基本層次認知？而羅施的理論提供了一個調查研究的有效方法。

儘管如此，分類的原型理論所揭櫫的是人類普遍的分類認知能力，科學家也是人，雖然他的分類能力可能比常民更敏銳，但並沒有根本性的不同。他所劃分的種類同樣也會產生家族相似和模糊邊界的特徵——儘管他可能以為自己的分類是截然分明、毫不模糊的。我們認為，問題的根源不僅在於人類的一般分類認知能力，也在於世界的結構本身。

原型理論將「分類」從做為客觀世界的事物類別之分割轉化成人類的心智認知能力，「類別」從而也被認為是心智的產品。這可能會引起某種錯覺：以為我們心智的分類能力所劃分的類別擁有原型理論所揭露的結構，但世界本身也有它自己的類別（或許正是傳統觀點理解下的那種類別或者擁有不為人知的結構）。換言之，我們有一種「心智類別」(categories of mind)和一種「世界類別」(categories of world)¹¹，前者由認知心理學來揭示，後者則由自然科學來發現。然而這是一種錯覺或錯解，本文的討論將可看成是對這一種錯覺的反駁。

在這裏我們先做個簡單說明。心智能力對分類的影響在垂直和水平向度中有些不同。在水平向度上，我們的心智能力並不扮演類別的內在結構之決定角色；所謂的分類做為人類的心智能力，只不過意謂人類能認知世界的事物有其差異和相似，若不是事物的特徵給我們的感覺刺激本身具有等級性，類別也無法呈現出等級結構。換言之，讓類別呈現出等級結構的並不單單是我們的能力特性，還有世界的事物本身的特性。在垂直向度上，我們的心智對類別系統的建立有更重大的影響，但也不是完全由心智主宰。決定基本層次類別涉及了更多分類外的心智能力，如格式塔知覺(Gestalt perception)、心智意象(mental imagery)、記憶力(memory)等心智功能，此外，原動性活動(motor activity)¹²、社會和文化因素也扮演重要角色；再如共同屬性(common attributes)、形狀上的相似

¹¹萊卡夫對柏林(Berlin)的討論中便提到了「心智類別配合世界類別」這樣的說法。當然他是在論述柏林對澤塔語(Tzeltal)動植物分類研究的脈絡中，指常民分類在基本層次和科學分類(林奈氏的分類系統中的「屬」層次)往往一致。其實這應該是指不同的分類階層系統。而不是「心智類別」和「世界類別」之區分。在常民和科學家的分類系統中，類別均既是心智類別又是世界類別。

¹²所謂的「原動性活動」或「原動性運動」(motor movement)乃是指我們對象屬性(用來決定分類)的知覺，總是和人類與物件互動(interaction)以及人類對物件的使用(賦予物件的功用)等不可分離。好比，我們可以說「椅子」的基本屬性是「可坐性」，這「可坐性」本身就是人類對椅子的使用，而在執行「坐下」的行動中，身體的屈身、肌肉運動、內心感受整個系列活動都和椅子的諸屬性——椅腳、椅座、椅背不可分離。很多心理學家均已指出人類和世界的原動性互動促成了思想的發展。(Rosch 1978, p. 33)

性(similarity in shapes)、平均形態的可指認性(identifiability of averaged shapes)¹³這些強調事物一面的因素，都會影響基本類別的認知，從而建立起一個類別的階層體系¹⁴。顯然，不同的認知主體和社會文化體將可能產生不同的看待世界的類別階層系統，但沒有一個類別階層會是「世界自身(world in itself)的類別階層體系」。總之，類別的內在結構既是心智的認知結構也是世界的結構；而類別階層系統的建立更進一步關涉了心智的種種能力，但它們也是描述世界的階層體系，我們可以有多元的世界類別系統。這個立場容許並存著許多不同分類系統的科學理論。

從上述的討論可以看到，分類原型理論的應用，主要在於「原型或範例」、「等級結構」、「家族相似」、「分類階層」（相當於分類樹）和「模糊邊界」這些概念上，它們共同說明了模型種類的內在結構和分類系統的整體特徵。

貳、吉爾的認知模型

不像其它認知進路的哲學家或認知科學家般，較著重在科學活動中種種特別的認知行為和認知歷程；吉爾(1988)認真地面對了科學理論的「本質」—亦即回答「科學理論是什麼」這樣的問題—他對科學的研究也是以理論為核心而展開¹⁵。吉爾從科學教科書中找到了刻劃理論的完整線索，因為科學知識的傳遞主要是依賴教科書，而且大部分的科學家也都是從教科書中學到他們所知的理論，因此教科書為哲學家提供了分析科學理論的完整材料。當然，科學教科書何其之多，勢必不可能一一分析，所以吉爾把他的研究對象侷限在古典力學教科書¹⁶。

¹³形狀相似性指的是對象外形輪廓上的相似，它可以用將兩個輪廓（主要是大小和方向）並置後，輪廓的重疊量來衡量；而平均形態的可指認性是說在基本類別層次，其成員的平均形狀能和其它類別明顯區分，讓它可以輕易被指認出來。(Rosch 1978, pp. 33-34)

¹⁴在基本層次對象（類別）的決定因素上，萊卡夫提出了格式塔知覺、原動性活動、心智意像、記憶力、社會功能；筆者則加上了文化因素；而羅施也提出了共同屬性、原動性運動、形狀上的相似性和平均形狀的可指認性。可以看到萊卡夫著重在心智功能；而羅施著重在對象特徵上，其實形狀相似性、可指認性均相關了格式塔知覺、心像、記憶力等等心智功能。其實兩者都像原動性活動和對象特徵一般是一個不可分離的整體。

¹⁵以下討論主要均來自《說明科學》的第三章〈模型和理論〉，也參看吉爾(Giere 1985)。

¹⁶吉爾提出了三個理由來說明為什麼選擇古典力學教科書：首先，幾乎每個討論科學理論本質的哲學家都討論了古典力學理論，因此如果要和他們爭論，當然也得分析古典力學；其次，古典力學是一個典型的廣範圍的科學理論，

根據吉爾的分析，典型的古典力學教科書大抵說明一些線性加速運動系統（包括自由落體、拋射體等等）、線性振盪系統(the linear oscillator)（包括單擺(simple pendulum)、簡諧振盪器(simple harmonic oscillator)、阻泥振盪器(damped oscillator)等等）、向心力（圓周）運動系統（central-force motion system）等等；它們是被一些數學等式所描述，但這些等式都是引導自牛頓第二運動定律的基本樣型 $F = ma = md^2x/dt^2$ ，因為系統組織不同，而且受力型態也不同，故會有等式上的變形¹⁷。

這些被數學等式定義的物理系統都不是真實世界的系統，而是一種抽象、理想化的系統，換言之，它們就是真實世界的系統之「模型」，吉爾稱之為「理論模型」。這種模型也不是我們一般談論的類比模型，而是接近語意概念所徵定的抽象模型¹⁸，但「抽象」並不是集合論式的抽象，而是科學家的心智對真實世界的抽取和理想化的思考。它通常可以用圖形來表現，也是科學家用來表徵世界的工具，它存在於科學家的心智中，作為一種心智表徵。也就是，在存有論狀態上，它應被定性為心智存目¹⁹。科學家和科學教科書通常用科學定律來代表理論模型，並且進一步把科學定律視為「定義」。好比，以力量定律 $F = -kx$ 來代表簡諧振盪模型，它也是簡諧振盪模型的定義。所以，科學定律可以被視為一種語言定義，它定義了理論模型(Giere 1988, pp.76-78)。

除了理論模型之外，吉爾還提出了「理論假說」(theoretical hypotheses)的概念，明白地指出它是一種語言存有物，亦即「斷說模型和被指稱的真實系統（或真實系統類）之間的某種關係之敘述。因此理論假說將根據被斷說的關係成立與否而為真或為假。可是，這個模型和真實系統都

而且是科學史上的原型(prototype)；第三，很多科學家的教育是從古典力學開始，而且嚴格的科學研究也是從古典力學開始(Giere 1988, pp. 63-64)。

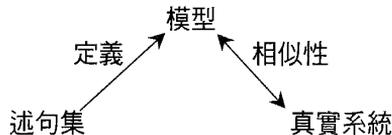
¹⁷譬如一般簡諧公式是： $f(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$ ；其中 \sin, \cos 意指三角函數。單擺的公式則變形為 $m(d^2x/dt^2) = -(mg/l)x$ ， mg 是擺錘重量， l 是擺長。受摩擦力的單擺是阻泥振盪的一種形式，其公式則為 $m(d^2x/dt^2) = -(mg/l)x + bv$ ， bv 是摩擦力。

¹⁸吉爾認為這個術語不僅是科學家自己使用，而且也與語意概念——特別是范弗拉森的模型概念——相重疊，它們完全滿足描述它們的運動等式(Giere 1988, p.79)。

¹⁹其實，吉爾並沒有明白談論模型的存有論狀態問題。他當然宣稱理論模型運作為認知科學意義中的「表徵」，不過這表徵是不是一種心智存目？只存在於科學家的心智中？他並沒有在 1988 年的書中明白談到。但是在 1994 年的論文他開始引用認知語言學家萊卡夫的「理想化的認知模型」(idealized cognitive model)。娜西婁(Nersessian 1992)則明白主張所謂的理論模型是一種心智模型，而且是強森賴爾德(Johnson-Laird)所定性的的心智模型，心智模型也是一種心智表徵。當然依認知科學和心智哲學的思路，如果一個東西是心智表徵，它在存有狀態上，理所當然地是心智存目。

不是語言存目，所以兩者之間的關係不能是真假其中之一。」(1988, p. 80) 那是什麼樣的關係？吉爾提出了「相似性」(similarity)，包括特點(respect)上的相似和程度(degree)上的相似²⁰。舉例來說：「地球—月球系統中的地球和月球之位置和速度非常接近於帶有和距離平方成反比的向心力之二質點的牛頓模型。」(1988, p. 81)²¹ 這個敘述即是「理論假說」。「位置」和「速度」是「特點」；「程度」則被宣稱為「非常接近」。如此，所謂理論假說為真不過意謂著模型和真實系統間存在著特點上和程度上的相似性。

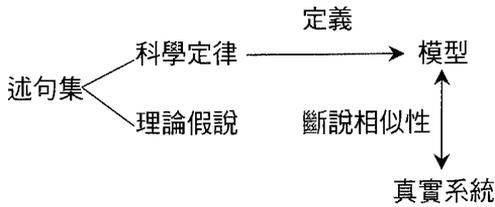
吉爾認為理論就是「理論模型」和「理論假說」的組合。這個組合在教科書上通常表達為一組述句，包括定義模型的科學定律和斷說模型和真實世界之相似性的理論假說。吉爾想要強調模型在理論中的關鍵角色，因此他以如下圖表來表示述句集、模型和真實世界的關係(1988, p.83)：



²⁰吉爾這裏所謂的「特點」相當於薩普論述中物理系統的「參項」和現象系統的「屬性」。吉爾主張，模型並不是在所有的特點上都相似於真實系統；薩普也說，物理系統只是抽取現象系統中殊象的部分屬性而成為參項，並不是所有的屬性都會被考慮。

²¹筆者認為這種理論假說的觀念有些兒笨拙。顯然科學家並不是使用這樣或類似的宣稱方式。科學家並不是宣稱地球和月球的「速度」和「位置」非常相似於牛頓的二質點模型。而是科學家將地球當成質量較大的質點，而月球當成質量較小的質點；然後根據重力定律，科學家計算出月球受地球重力吸引，使月球維持在繞地球公轉的軌道上，將在某時某刻出現在某位置上，具有某一特定的速度。科學家明確地算出月球的位置和速度，將數據和觀測數據比較。這是一種假設方式。另一種理論假設的方式是，設想出新的模型，以便解決異常的對象。譬如，天王星的軌道。牛頓理論中原來針對七大行星軌道而推出的「向心力模型」並不符合觀察結果。換言之，計算下的「沒有干擾因素的天王星軌道模型」，並不能恰當地應用到天王星的實際軌道上；反過來說，天王星的觀測數據，並不支持「沒有干擾因素的天王星軌道模型」。現在，科學家可以設想在天王星軌道外，另有一顆未知行星在干擾天王星的軌道，以致造成觀測和理論不符的情況。如此，科學家提出一個新的模型，包含了一個新的理論假設，這模型不同於原來「沒有干擾因素的天王星軌道模型」，而是「有另顆大行星干擾的天王星軌道模型」，這個模型包含的理論假說擁有一顆猜測或預測中的新行星。

如果我們進一步分開述句集內的科學定律和理論假說，可以把吉爾的圖表再重新安排為：



但是必須注意的是，理論所包含的並不是單一模型，也不僅是一個模型家族，而是模型家族的家族。舉例來說，線性加速系統是一個模型家族，而線性振盪系統、圓周運動系統分別都是模型家族，所有這些模型家族合起來才是古典力學所涵蓋的理論模型，因此是一「家族的家族」。吉爾最終把理論定徵為兩項元素的組合：(1) 一個模型的家族群 (a population of models)；(2) 連結那些模型和真實世界系統的種種假說。

所謂模型家族，也意謂其成員彼此間是「家族相似」關係；進而各家族之間也是「家族相似」關係，所以吉爾認為理論不是一個完善定義的存目(well-defined entities)，也就是沒有任何充分必要條件能定義出一個理論。如果說理論模型包含的是「模型家族的家族」，則顯然將會呈現一個等級結構(graded structure)，它其實是科學家的認知結構所造成的產物。吉爾在 1994 年的論文〈科學理論的認知結構〉(The Cognitive Structure of Scientific Theories)中開始引用分類的原型理論來摹繪這個等級結構。

參、理論模型的認知結構

什麼是模型家族的等級結構呢？也就是說，一個理論所包含的種種模型，並不是同等地處在科學家的心智中，而是呈現出「中心—周邊」的等級結構—有些模型會處在中心的位置，有些則出現於周邊。這是由於「原型性」和「家族相似」的效應，一種類將有部分成員居於類別間的中心地位—即認知主體將它們歸屬於該種類的頻率較高；而部分成員則居於周邊地位—認知主體將它們歸屬該種類的頻率較低。這是人類類別認知的的基本結構，科學家對研究對象的認知亦然。

考慮下列不同的單擺系統，如圖 3-1 (取自吉爾(Giere 1994, p. 285)) 的各種構形。在直觀上，我們將會贊同(a)和(b)是中心成員；而(e)和(f)則是周邊成員。

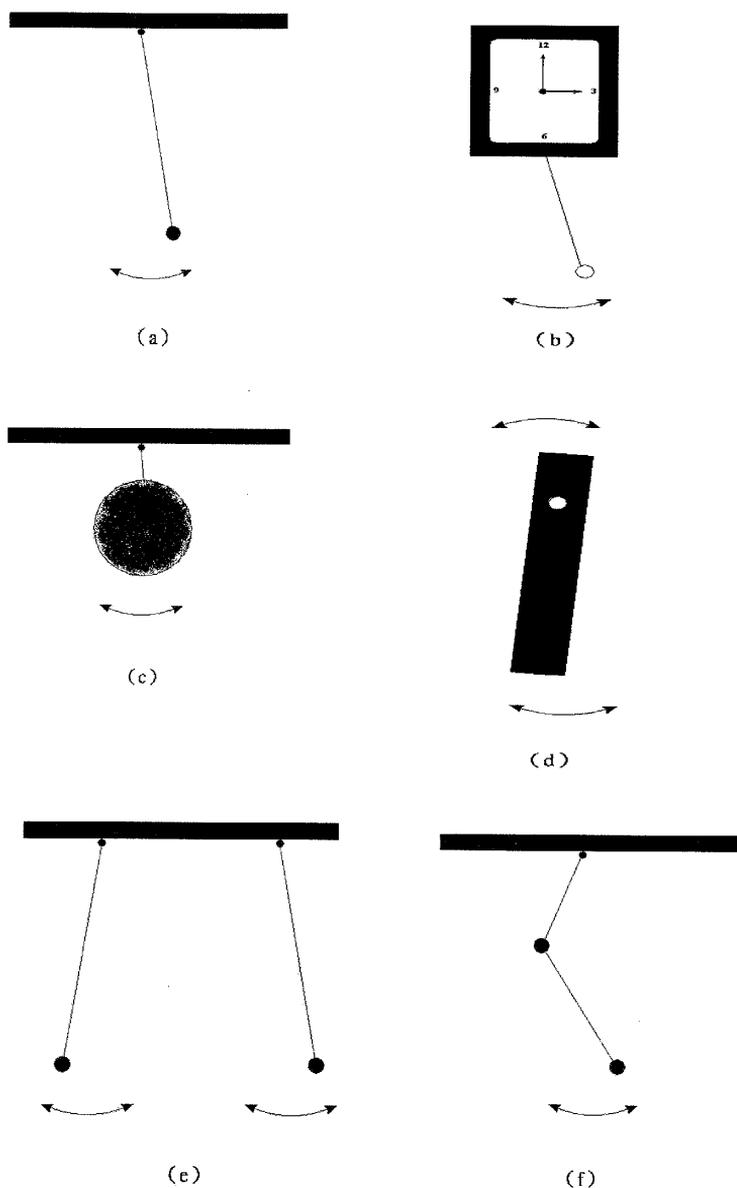


圖 3-1

「中心—周邊」本身是一個空間性的隱喻，因此，中心成員和周邊成員在「心智空間」中的位置關係，會構成某種幾何型態，這個幾何型態是什麼？是呈現出一個直線性的排列序列嗎？還是另有其它特殊的位置型態？例如，呈現出一個輻射性(radial)的分散結構？進一步，人們又如何判斷(a)和(b)是中心成員，而(e)和(f)則是周邊成員？

吉爾以為萊卡夫所提供的人類認知之輻射結構模型能提供解答²²，亦即單擺模型家族也呈現一個輻射結構；而模型本身的複雜度提供我們判斷的指引。例如，帶有水平恢復力(horizontal restoring force)（即擺錘重量引發在水平方向的分力）的單擺模型是這個輻射結構的焦點模型（見圖 3-2(Giere 1994, p. 287)²³）：

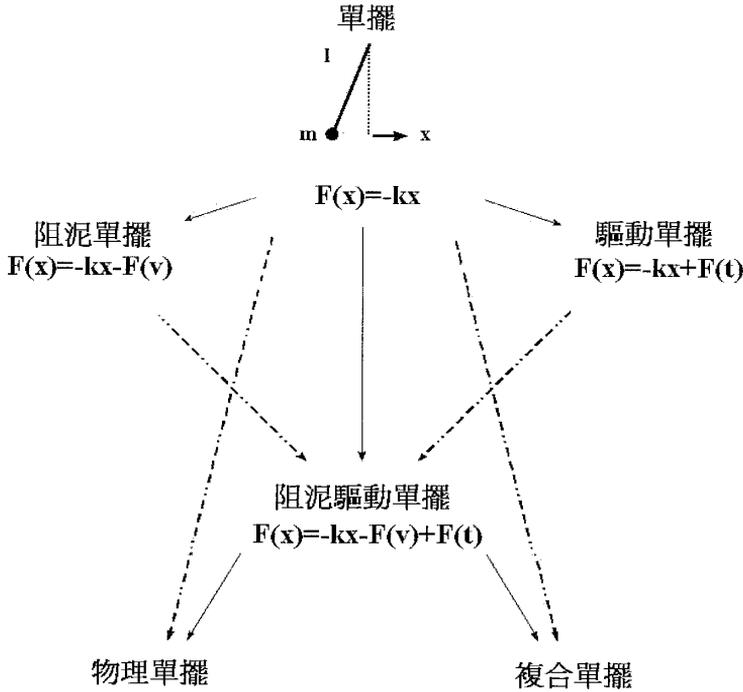


圖 3-2

阻泥單擺(damped pendulum)和驅動單擺(driven pendulum)則需增加不同方向的力量；複合單擺(coupled pendulum)（即圖 3-1 中的(f)）是驅動單擺的一種，但其驅動力則來自另一單擺；物理單擺(physical pendulum)則能被分析為矩形單擺(regular pendulum)（圖 3-1 中的(d)），吾人必須先計算其軸點的慣性動量，再決定一個等值單擺的長度。這些都是在原來的單擺系統上增加新的影響因素，讓其複雜度增加，進而讓模型本身居於周邊地位。

²²見 Lakoff(1987), pp. 74-76；也就是一個範疇中擁有一個焦點模型(focal model)，它刻劃了這範疇的中心特徵，而其它成員則各自相似於各種不同的特徵，形成一個輻射狀的結構；萊卡夫把這稱作「模型叢集」(model cluster)；他認為這是等級結構的來源之一。

²³其中的帶箭頭的實線和虛線乃是筆者自行添加，以表明其輻射方向。

等級結構是羅施所謂的水平向度之研究；而原型理論的另一重要成果是垂直向度的類別階層和基本層次類別之揭露。同樣地，力學模型也呈現了認知上的類別階層，吉爾以如下圖 3-3(1994, p. 288)來展示：

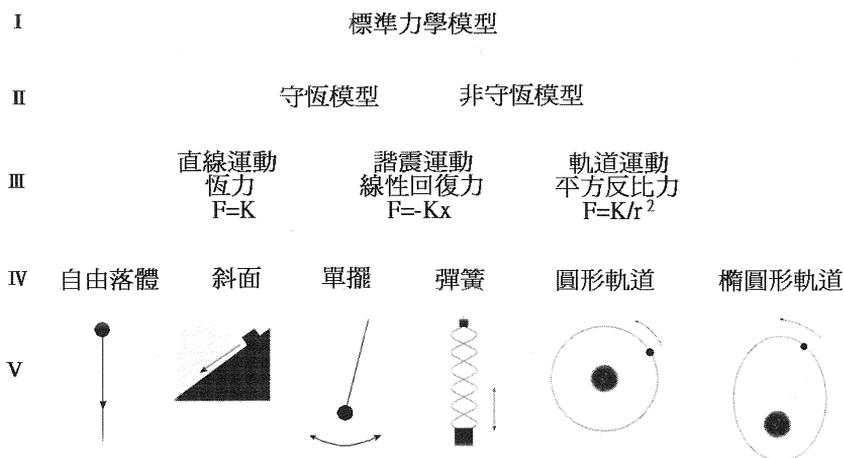


圖 3-3

在圖 3-3 中的第四階層乃是力學模型的基本層次模型，第五層是對應的視覺模型。在這層次上的類別一般是先被學習的對象，吉爾引用了認知心理學家齊(M. T. H. Chi)的實驗來支持。這個實驗的內容是新手（剛學過古典力學的學生）和專家（教師）對教科書中選出的習題之分類。結果新手傾向從問題的表面結構來分類（十分接近於圖 3-3 的第四層次）；而專家則傾向以物理原理（接近圖 3-3 的第三和二層次）來進行分類。吉爾因而結論說：要變成古典力學專家的部分條件是學會基本層次以上的抽象層次類別(1994, pp. 290-292)。

肆、評論吉爾的學說

吉爾的研究已經奠定了下文的基礎，特別是在理論（版本）的模型組織結構上。而且吉爾對科學理論的定徵也能初步滿足我們設立的恰當說明之(R1)和(R2)要件：首先，在吉爾的觀點下，理論包含了理論模型和理論假說，可以免除薩普不將科學敘述納入理論內所帶來的困擾。再者，回顧模型觀點的發展，薩普把理論定徵為較具統一性的「理論結構」—「理論引導的物理系統類」每個成員之「共同的語意結構」；而范弗拉森則定徵理論為「許多」模型或結構組成的模型集合（家族），這就留下了考量各模型間細微差異之可能性。吉爾繼承了范弗拉森的思路，擴大模型家族為「模型家族的家族」，進而展示這「家族群」的階層性，更為貼近科學家實際使用的理論。第三，對理論模型的定徵和刻劃主要引自教科書一般使用的案例，因而也能反映科學家實際呈現的理論型態；理論假說提供了理論模型和真實世界的連結，同時也提供了理論模

型的物理意義，因而不會產生只考慮形式結構的麻煩。不過，理論假說所提供的物理意義是整個模型的應用結果，基本上仍是外延性的，還是沒有顧及刻劃模型的理論詞項之內涵意義，換言之，它沒有考慮原理、定理的分疇和分類效應。忽略了內涵意義，就會讓吉爾的學說陷入和語意模型進路一樣的麻煩之中：在面對古典力學的諸版本之間，吉爾的學說究竟會如何處理牛頓、漢彌爾頓、赫茲等等版本之間的關係？是他們都擁有共同的理論表徵嗎？或者他們的版本都可以化約成一個共同的模型分類階層？似乎吉爾對這些問題的答案和語意模型並沒有很大的不同，那麼他的學說就無法滿足我們的(R3)要件。

另外一個需再精煉的地方是吉爾對科學文獻的運用。吉爾以教科書來擷取科學理論的分析材料的確是可行的作法，教科書提供了學習的管道和理論的完整表述，而且顯示科學家們對哪些東西同屬於同一理論的認定。教科書本身也算是一種科學文獻，它所表達的是一般科學研究者的理解（也算是一種「理論版本」或其個例），但是它是精煉萃取後的產物，無法傳達那些創發理論的科學家之真正觀點。因此，教科書的分析只能當作一部分，而不能視為理論分析的全部。若要研究那第一線的科學家之理論，我們勢必回到科學家本人的文獻，也只有這樣，我們才能更加瞭解「理論版本」的內在結構以及它在歷史中的形成演變。當然，吉爾曾明白表示教科書只是一種途徑，而不是唯一途徑(Giere 1988, pp.63)，因此這並不是他的咎責。

伍、主題分類蘊涵模型分類

現在問題是，科學理論往往用少數甚至單一定律來說明一龐大數量的種種現象，也就是說，科學定律被要求說明的，不是單一個對象，也不僅是單一種類的對象，而是一大群各種各樣的對象。如牛頓第二運動定律能夠說明天體運行、自由落體、拋射體、單擺、汽車的跑動...等等幾乎一切運動現象。這如何可能呢？這類定律將會建立一個模型的分類系統，或用吉爾的術語而稱作「模型家族的家族」(a family of model families)、或一個「模型族群」(model population)。透過這樣的模型族群，對應地模釋了無數種類的現象，科學定律就能達到它的任務。以具體的例子來說，牛頓力學下的各種運動（模型）可以被劃分成如下的樹狀分類結構（見圖 3-4）：

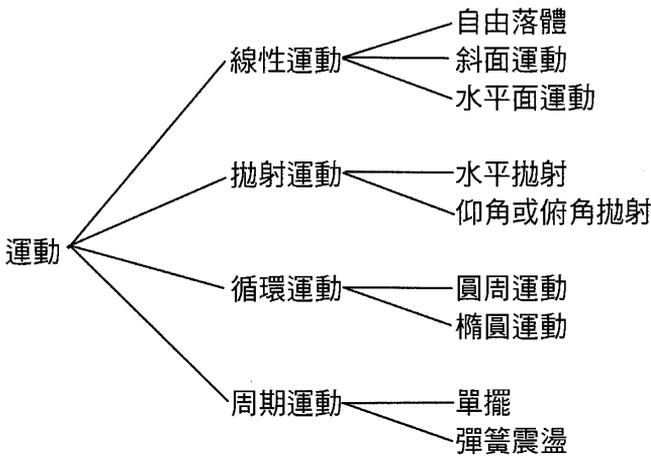


圖 3-4

然而，科學定律又如何能建立一個鉅大的模型家族的家族呢？科學家根據定律中任一範疇的分類，而導引出不同種類的「定理」(theorem)，定理可以再根據某些變項的分類，導引出更低層次的定理。如此，科學定律就可能建立一個「定理分類樹」。居於最高層次的樹根位置的定律，一般就被稱作「理論原理」(theoretical principle) (或簡稱「原理」)。在現代科學（特別是物理學）中，定律和定理往往由數學公式來表達，所以一個定理分類樹也包含一個數學公式的分類樹，而且作為定理的數學公式，必定可以從定律的數學公式中演繹出來。以牛頓力學為例，一個定理的分類樹將如下圖 3-5 所示：

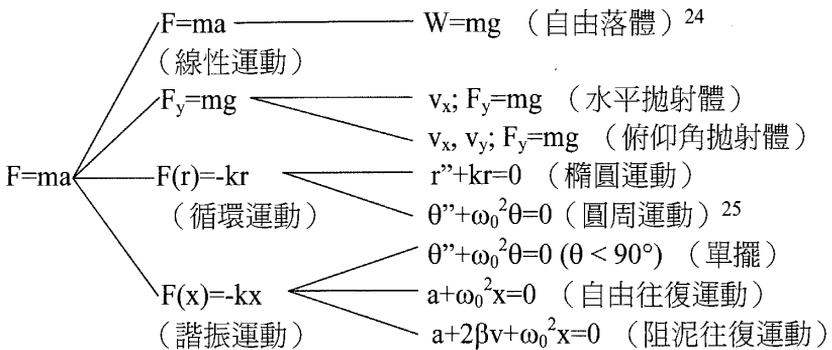


圖 3-5

每一個說明某類現象的定理描述的是該種現象的「對應模型」(correspondent model)；中間層次的定理則描述了階層系統中的「模型家族」，它說明更大種類的現象，我們也說它是該類對應現象的模型。而

²⁴W 代表自由落體在某位置上的重量，g 代表相同位置的重力加速度之測量。

²⁵Where $\omega_0 = 2\pi\nu_0 = \sqrt{k/m}$; ν_0 代表頻率， ω_0 代表角頻率。

可以被落實(realized)或具體化的模型，換言之，我們能夠找到或建造實際的物理系統，其內在結構與功能行為近乎同構於(near-isomorphic to)模型者，我們將稱作「可落實模型」(realized model) (見下文)。建立模型與研究模型(構思理論模型並加以計算或設計實驗模型並加以檢驗和測量)是科學理論的主題，對模型的分類，也就是對主題的分類。總而言之，科學定律的建立蘊涵著基本分疇，以定律來說明廣大現象也必同時進行主題分類，兩者乃是科學理論的基本條件。

現在，這個模型樹狀階層裏的每個模型種類都有其內在結構，它可以應用原型理論來說明。乍看之下，在物理學中的模型是以定律或定理來描述，而定律或定理通常是數學等式，由幾個嚴格精確定義的範疇組成的量化通則(generalization)。或許有人會據此認為模型的分類也應該是嚴格定義的、量化的、邊界截然分明的，加上個別科學家總是希望達成一個理想分類。據此而主張主題分類也不能用原型理論來說明。這種觀點正確嗎？

首先，模型是心智模型，是一種被心智投射的抽象物件與物件的行為，有其形狀、結構、歷程和視覺特性，這些特徵都可能在分類上造成原型效應。模型並不就是那單純的數學等式，因此它的分類和認知不能單由純粹符號或概念的數學等式來決定。再者，模型的主要目的是用來說明或解決實際的問題，用來「模釋」具體的現象，因此不盡相同卻同類的問題情境(problematic situation)與具體現象，會讓同類模型也產生略有差異的成員。例如，在教科書的習題中，我們常常會看到滑輪的問題，單個滑輪可以說是典型的滑輪模型，兩個以上的滑輪組則是較不典型的成員，滑輪組合槓桿更是周邊甚至邊界的情況了。如此顯現了原型理論所說明的種類之內在結構。三來，科學家在建立他的理論版本之前，他總會先有一個學習過程，在這過程他首先會學習那些「範例」問題，以這範例為基礎，通過類比將它應用到不同的問題情境，再進行理想化或提出精確的數學等式，最後提出一個模型分類。如此，範例問題在他的模型分類中，扮演著種類的「原型」之角色，而不同的問題情境也讓模型種類變成一個內部不均勻的等級結構²⁶。基於上述理由，原型理論可以恰當地應用到主題分類上。換言之，一個模型種類擁有典型成員，而成員彼此之間是家族相似的，諸成員和典型成員間的相似也有等級性。

²⁶以原型理論來說明模型分類，其實是孔恩的「範例」觀點之合理發展。特別看孔恩(1974)年的論文“Second Thought on Paradigm”。孔恩在此文中討論「範例」和「符號通式」(symbol generalization)的關係。他提及了 $F=ma$ 有許多變形，它們分別被應用到不同的問題中，但「不管他在這麼做當中應用的程序是什麼，這程序不能是純句法的。經驗內容必定從頭到尾進入這形式化的理論中。」(Kuhn 1974, p. 466) 孔恩在這裏從問題的角度來強調「解決問題」，在我們的架構下，解決問題總是先或同時發展出一個模型。既然有些問題會成為科學家學習的範例；相應地，有些模型也會成為科學家分類中的原型。

陸、模型家族的原型結構

模型家族的內部不僅呈現「種關係」的樹狀分類；也呈現出分類的原型理論所描繪的原型結構。亦即，家族成員之間呈現出中心—周邊的等級性，有某些家族成員是相對中心的成員，而家族成員彼此間承受家族相似性，並且諸周邊成員相對於原型成員而排列成一個幅射狀的結構。譬如，震盪模型家族以自由震盪（其數學等式為 $F(x)=-kx$ ）為中心，它除了恢復力外，沒有其它外力。如果增加其它外力，就會衍生新的成員。例如，增加和恢復力反向的阻泥力，我們就得到阻泥震盪（ $F(x)=-kx-F(v)$ ）；增加和恢復力同向的驅動力，就得到驅動震盪（ $F(x)=-kx+F(t)$ ）；當然，我們可很輕易地再形成一個既有阻泥力又有驅動力的震盪系統。再者，震盪物體質心的震盪路徑不一定是一直線，有時可能是小角度的曲線，這種情況就是單擺。因為曲線路徑，描述單擺的公式（定理）必須以擺動角度 θ 來代替震盪位移，但是單擺的公式（ $d^2\theta/dt^2+\omega_0^2\theta=0, \theta<90^\circ$ ）和自由震盪的公式（ $a+\omega_0^2x=0$ ）形式完全相同²⁷，所以單擺也是震盪家族中一員，但它是周邊成員，接近圓周運動（圓周運動的公式和單擺完全一樣，不同的是 θ 大小沒有限制）。然而，單擺本身也可以再形成一個模型家族，它也可以在恢復力（擺錘重量在切線方向上的分力在水平方向上的分力）增加驅動力或阻泥力而各自形成驅動單擺或阻泥單擺，顯然，驅動單擺、阻泥單擺也屬於驅動震盪、阻泥震盪的周邊成員，這樣形成的結構，讓我們下圖 3-6 表示（以數學等式來代表）：

²⁷ θ 是物體在圓周上的位置與圓心之連線（其實也就是物體的位置，只不過用角度來表達）和垂直或水平軸所夾的角度， a 是在笛卡兒座標上的加速度。

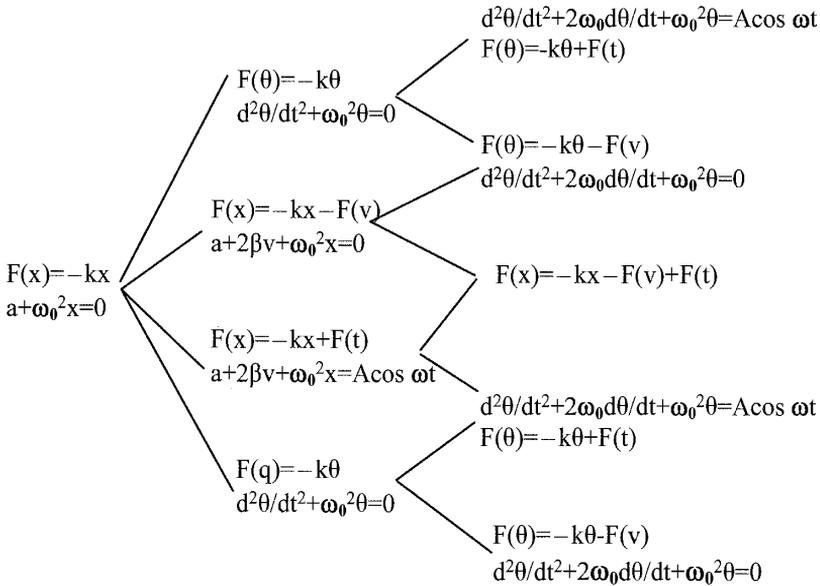


圖 3-6 說明：現在這個結構不是單純的樹狀分類，而是具等級性和輻射狀的原型結構。和焦點模型連線的長短和排列位置代表它們距中心的等級程度。本圖試圖安排出一個能顯示各模型關聯的架構，所以讓單擺重複了一次。它的輻射結構表現在：驅動、阻泥震盪和單擺由自由震盪輻射出去；就單擺家族而言，阻泥單擺和驅動單擺由單擺輻射出去；就阻泥震盪而言，阻泥單擺和阻泥驅動震盪則由震盪輻射出去。

從上圖中可以看到，自由震盪是震盪家族中的核心成員，讓我們把自由震盪稱作震盪家族的「焦點模型」(focus model)。從發展的觀點來看，周邊成員乃是根據焦點模型的各不同的局部或範疇而生成。比起家族的周邊成員，居於模型家族中心位置的焦點模型通常更具理想性（所考慮的參項或變項較少），所以焦點模型就成為此模型家族的代表，扮演著孔恩所謂「範例」(exemplar)的角色。因此，我們往往也用自由震盪來代表震盪家族。

柒、模型的類型

我們已經用模型來解釋定律所描述的東西，然而，模型是什麼？「模型」這個詞的意義又是什麼？模型似乎有許多類型，我們又是指哪一種？

「模型」這個觀念在今天已經用得很廣泛，不僅在科學學術上，也在日常生活中。當我們（一般人）談到「模型」這個詞時，我們聯想到的可能是縮小比例尺的汽車、飛機、船艦、建築等等玩具，或者是在商場上看到的塑膠假人「模特兒」(model 的音譯)，這種「實物模型」(substantive model)的意義可能就是「模型」這個概念在我們日常生活認

知上的「原核意含」(primary nuclear sense)²⁸，也可能是科學技術上的原核意含，譬如在科學或工程(engineering)上可以看到水分子、太陽系、水壩、橋樑、發動機等等使用各式各樣材料所製作的模型。由實物模型的理解，我們可以將「模型」的原核意含表達為「某種具體的但縮小或簡化、或以其它特別方式呈現的實質物件，被用來在某個不同的空間中重現(re-present)、模倣(imitate)、或類比(analogize)原物件」。透過實物模型，我們可以在不同的空間中認識無法親自接觸或觀察到的原物件。

科學界對「模型」的使用並不僅限於實物性的模型，科學家常常把某些想像(imagination)、圖像(picture or icon)、概念描述(conceptual description)等非具體事物稱作「模型」(想像模型、圖像模型、概念模型等等)，正是因為他們也運用這些非實物性的存目(entity)來重現、模倣、模擬或類比某些對象或現象的結構和行為，一方面讓他們能夠透過對模型的深入解析而發現對象的新線索，另一方面也讓我們能夠恰當、妥善甚至輕易地理解那些複雜對象。就此而言，「模型」往往具備強大的預測力和說明力(predictive and explanatory power)。也因此，科學哲學家也對模型的概念和功能、以及模型和理論的關係做了不少探討。

然而，探討模型的不同哲學家往往有不同的類型區分，模型的探討歷史也隱然地暗示了「模型」這個概念的分歧意義以及模型的分類和類型間的演變。即使類比模型也可再根據其存在特徵或功能而區分成不同的種類，許多哲學家已經努力提出一個模型的類型區分²⁹。但是，隨著

²⁸「原核意含」出自奧斯丁的論文〈一個字的意義〉(The Meaning of a Word)，也就是「原型意含」(prototype sense)的意思。換言之，它居於一個字的核心地位，其它有關該字的意含將由此意含透過相似、類比、隱喻等規則而衍生出來。奧斯丁是這麼闡述「原核意義」的：「當我們談及健康的身體(healthy body)以及健康的膚色、健康的運動時，這個字並不是模稜歧義地被使用...在這種情況中，有著我們可以稱作『健康的』原核意含：在這個意含中，『健康的』被用於健康的身體上：我稱『健康的身體中的「健康的」這個字的意含』為原核的是因為它『作為另兩個片語中「健康的」意含之一部分』，該另兩個意含可以被解釋為『由健康的身體而產生』以及『造成一個健康的身體』。」(Austin 1961, p. 39)

²⁹阿欽斯騰提出了一個頗完整的模型分類系統：(1)再現模型(representational model)，一種三度空間的物理再現物，其下又包括：a. 真模型(true models)；所模塑物件的一切特徵均以齊一的尺度而再現於模型上；b. 適當模型(adequate models)：只有原物件的一些特徵；c. 扭曲模型：以不齊一的尺度而再現原物件的所有特徵；d. 類比模型：模型類比原物但被視為再現了原物件。(2) 理論模型：當科學家說Y是X的模型，而Y是指一組有關X的假定时，Y即是一類理論模型；(3) 想像模型：這是第三類型的模型，它在某些層面上類似於理論模型也類似再現模型，它也是一組假定，但假定本身無法保証自

模型的膨脹和發展，早期的模型區分總是無法涵蓋晚期的新產品。每到一階段，我們總是有必要重新提出一個新的類型架構。

模型，它的最一般性的意義是一物對另一物的模倣、類比、模擬，因此它總蘊涵了兩個事物之間的關係，讓我們把這兩個事物間的關係總稱為「模映」(modeling)。模映對方的事物是「模型」，另一物就稱為「被模映事物」(the modeled)。在歷史的演變中，人們嘗試去發展模型，他們應用新的材料製作事物來模映它物，並把這新事物也稱作「模型」，這種作為讓「模型」產生新的意義，進而新型態的模型再循環地發展出新型態的模映關係，於是我們有許多類型的模型和模映。讓我們先在此嘗試整理出一個比前人的區分更完整的模型類型表：(1)實物模型：以各種材料製作成的三度空間實質物體，能夠「再現」、「模倣」原物；(2)圖像模型：呈現在紙上的圖案或圖像或者腦海裏心像或形像，以二度空間的方式來「再現」原物；(3)概念模型：根據概念的內含或意義，而理想化地「解釋」（又可稱為「模釋」）或「類比」某個具體事物或事物的行為，它發生在心智中，而且可能伴隨著形像的產生；(4)理論或數學模型：透過量化符號或數學等式而建立的模型，它量化模擬(quantitatively simulate)了某種抽象或具體的對象系統之間的內在關係；(5)邏輯模型：運用集合論而建構出的關係結構以「函射」對象間的抽象關係或抽象結構，我們也說這組相關對象「滿足」了這個關係結構，並且被建構的抽象關係結構和對象間的關係結構是同構函射(isomorphism)³⁰；(6)電腦模型(computer model)。

這六種類型的模型，可以根據類型、實例、存有狀態、模映關係和被模映事物這五個項目而繪成如下的表 3-7：

己的真實性，只是科學家想用它來接近實際的情況(Achinstein 1968, pp.203-225)。

³⁰參看第一章的討論。在此我們可以應用集合論中的元素排序(ordering)概念來給它一個初步定義：兩個集合 A 和 B，讓 $<_1$ 是 A 集合的總序(total ordering)， $<_2$ 是 B 集合的總序。則當一涵應 $f: A \rightarrow B$ 是嵌入的(embedding)（保留排序(ordering-preserving)），亦即 $\forall x, y \in A, \text{ if } x <_1 y, \text{ then } f(x) <_2 f(y)$ ，而且 f 是雙射的（即 A 和 B 的元素一一對應），則我們說 f 是結構 $\langle A, <_1 \rangle$ 和 $\langle B, <_2 \rangle$ 之間的同構函射。這個定義可以推廣到一般的邏輯結構 $\langle D, p, q, r, \dots, f, g, h, \dots \rangle$ 上。

表 3-7

模型類型	實例	存有狀態	特別的模映關係	被模映事物實例
實物模型	模型玩具、縮小橋樑、建築等等	三度空間的實體物	再現或模倣、類比	橋樑、建築、汽車等等
圖像模型	原子結構圖、DNA 的心中形像	二度空間圖案或心像	再現、類比	原子、DNA、各種人造物體等等
概念模型	概念系統、動物行為、社會學理論	概念	解釋、類比	人類或生物的行為、社會等等
理論或數學模型	運動定律、供需定律等等	數學存目	量化模擬	物體運動、自然現象、經濟現象
邏輯模型	兩集合間一般性的關係結構	集合論存目	函應或函射	各種關係性的對象系統
電腦模型	螢幕模擬駕駛、飛行	程式	模擬	飛行、駕駛、天氣種種動態事物

顯然，存有狀態是這個類型區分的主要依據（每一類型的模型都是不同的存目）。但是如同我們已提及，模型和被模映事物之間的關係也有各種類型，而不同的存有狀態之模型也可能有同種的模映關係（譬如類比），每一類型的模映關係又可能有次型態，這些都意味著，我們可以再根據「模映關係」來進行另一種區分。如此，我們將可得到另一個「模型」的樹狀區分（如圖 3-8）：

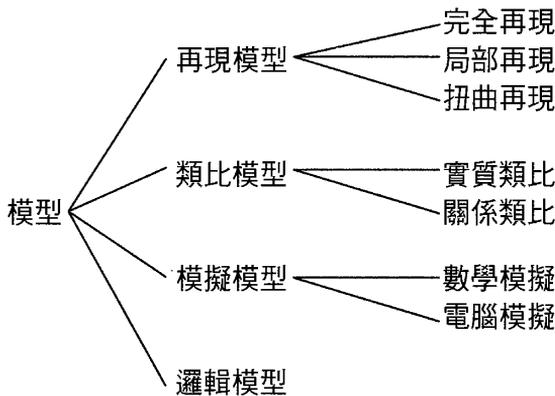


圖 3-8

在早期模型被視為只限於類比角色或功用的時候，科學家和哲學家最常區分：實質類比和關係類比（或形式類比）³¹。現在我們知道這兩者只是「模映關係」中的類比關係之次類型。

³¹其中，實質類比與關係類比的區分，參看 Hempel(1965, pp. 433-447)、Nagel(1961, p. 110)、Hesse(1965, pp. 77-87)。

在沙普斯(Suppes, 1961)看來，過去科學家和哲學家所談的各種類型的模型都可以拿邏輯模型的概念為基礎；或者各種模型都可以被化約到邏輯模型上³²。因為他可以將「再現」、「模倣」、「類比」都看成是種種功能，它們都會顯現出所論及的對象間之結構、關係、行為和函項；譬如，「再現」蘊涵了一個物件（可視為一對象系統）內部的組織結構；「實質類比」蘊涵對象的一元關係（性質），「關係類比」涵蘊對象間的二元及以上的關係或函項；如此，對象可以被聚集成一集合，相當集合論中的論域；而組織結構、性質和關係、函項都可以用集合論符號而表示成一個有序序列；論域和有序序列的有序排列就是一個邏輯模型了³³。則很顯然地，各種模型都可以被符號化地表示為邏輯模型。

我們可以依循沙普斯的思路來理解邏輯模型做為邏輯家思考各類型的模型之邏輯基礎，但卻不能同意科學模型（或理論）可以化約到這種集合論式的邏輯模型上，因為它預設了集合論的概念，已經不再是原來的模型本身（參看第一章討論）；再者，邏輯模型的化約計劃將喪失科學家實際理解的科學意義，而且歷史上的科學家也從來不是使用這種抽象化、形式化的思考方式。如果我們接受這樣的邏輯模型計劃，那麼多采多姿的科學模型和理論發展將變成單一性的數理邏輯構述，這可能也是科學家所不願意甚至不樂見的³⁴。因此我們不能完全依循沙普斯一類模型論者的進路，反而應將各類型的模型看成是一個「模型類型家族」，彼此間分享「家族相似」關係，這個模型類型家族裏的成員乃是根據其「原核意含」所的描述的種種特徵而各別地衍生出來。因此，所有模型類型都不是截然分明的類型，許多具體、實際的科學模型可能同時歸類於任二個類型以上，或者恰介於各模型類型之間。這樣的視點可以讓我們更恰當地說明模型在科學史上的實際應用和發展狀況。

³²沙普斯首先引了許多段落中提到「模型」字眼的科學文獻，然後，他主張塔斯基(A. Tarski)定義的「模型」可以做為一切模型概念的基礎(Suppes 1961, pp. 163-164)。以喀爾文(Kelvin)和馬克士威爾(Maxwell)努力去發現電磁現象的機械模型(mechanic model)為例，沙普斯評論說：「無疑地他們都在字面上的物理意義來思考可能的模型，但是重鑄他們在這標題上的研究論集而成為『說明已觀察的電磁現象之連體力學(continuum mechanics)理論』的集合論模型並不困難。」(pp. 167-168)

³³Da Costa, Newton C. & French, Steven (1990, pp. 258-260) 也著手從事這種化約的工作。他們根據薩普(1977, p. 97-98)對模型的基本分類—數學模型和圖記模型(iconic model)，而著力展示兩種模型，特別是後者，可以被表示形式結構性的邏輯模型。

³⁴事實上，沙普斯本人在五十年代末因為其公理化的工作並不能得到科學家和大部分哲學家的興趣和認同，所以他本人也轉變了研究方向。根據薩普的說法，沙普斯在六十年代時已經認可了語意概念的合法性，而不再強調公理化方法。當然，直到現在，沙普斯的公理化興趣並不曾消失，參看 Suppe(1989, pp. 7-10), Suppes(1993)。

現在讓我們來看看存有論分類中的第六型模型：「電腦模型」。在資訊電腦科學誕生之後，很多科學家（未必是資訊科學家）也頻繁地提到「電腦模型」並使用它來做為研究工具。電腦模型既不是實體物件、也不是圖像或心像、當然它也不是數學關係或公式、更不是邏輯模型，因此它並不能被化約到上述各類模型上，但它和各類模型卻可能有著相似關係。電腦模型是一組軟體程式，可以驅動計算機硬體而在螢光幕上顯示某種圖像或關係，用來再現或類比自然現象、事物的動態行為或事物間的具體關係等等；通常電腦模型所再現的對象都具有動態性質，所以我們慣於把這種「再現」稱作「模擬」(simulation)，可以說，電腦模型的功用就在於進行電腦模擬。電腦模擬在今天的科學活動中已運用得相當廣泛，它已經慢慢擺脫只是輔助研究工具的角色，而成為科學活動的核心環節。一個研究即使尚不能提出可行的數學公式，但如果能為它建立一個電腦模型，它的科學合法性即可得到認可。我們可以看到，電腦模型和模擬的出現已經改變了科學研究的生態，而且強化了模型在科學活動的重要地位。

以前瞻性的眼光來看，我們必須保留「模型類型」家族繼續產生新成員的可能性，即使上述兩種分類系統，以及「再現」、「模倣」、「類比」、「模擬」等等特徵和功能仍不足以窮盡「模型」的所有特徵和可能發展。我們主張：科學理論中的模型，包含了所有模型類型，也可能包含了可能介於兩類型之間的模型，以及它們未來的可能發展。

捌、模型和現象：可落實模型

在一個像古典力學這種完整的科學理論中，理論說明現象的方式是建構一個模型家族的家族或模型族群。所有科學理論都有它的主題—某種現象—例如「運動」是古典力學的主題。因此，運動現象的說明，就是透過模型族群對運動現象的模釋(modeling)。在這兒，模型族群相對於現象而言具有某種優先性，亦即，我們是將模型的分類套用在現象的分類上³⁵。當我們談論真實現象領域中的運動時，我們必定意指某種物體或物體系統的運動。然而，運動中的物體之種類是無限的，運動的類型也是無限的。吾人不可能說明每一個物體所產生的每一個運動。科學家總是企圖去找出隱藏在多元且複雜的現象背後之秩序，他們由設計單一模型或者發明一個包括模型族群的理論來達成這個目標。這個模型族群必蘊涵了一個樹狀的分類層級秩序；進一步，這秩序可以被視為模釋了科學家想追求的實際現象之秩序。透過此一層級秩序，我們就可以知道究竟在現象王國中，有多少種類的運動。我們也能由此而指認或確認某一定種類的運動。通常我們以為一個實際運動種類的名稱，其實是某

³⁵韓森(Hanson 1965)有類似的評論：「...但有時物理學家所關切動力學系統，其內部沒有任何東西能否證定律，因為定律決定了系統所能應用的現象之類型。」(p. 103)差異只在於韓森不是從模型觀點來作出他的評論。

個理論內的某個模型種類之名稱，譬如我們有時會說這個彈簧正在進行諧振運動(harmonic motion)、地球正在進行繞太陽的循環運動等等，其中的「諧振運動」、「循環運動」都是模型種類而非實際的運動種類之名稱。或者換句話說，一個實際現象的樹狀分類，是參考模釋它的模型之樹狀分類，才能被建立起來。如下圖 3-9 所示。



圖 3-9

就此來看，古典力學理論如何說明像月球環繞地球轉動或小孩手上綁住繩子而迴旋的石頭這類實際現象呢？正是透過循環運動對它們的模釋：橢圓循環運動模型被應用來模釋月球繞地球轉動，圓周運動模型被應用來模釋石頭的迴旋。反過來，我們也可以說月球繞地球轉動是橢圓循環運動模型的一個「落實例」(realized instance)，而迴轉的石頭則是圓周運動模型的一個落實例。一個擁有「落實例」的模型種類則被稱作「可落實模型」(realizable model)。

一個模型種類如何模釋一個實際現象呢？譬如圓周運動如何模釋綁住繩子迴旋的石頭呢？首先，石頭必須被視為一個單純的質量點(mass-point)，也就是說，它的種種其它特徵如形狀、大小、硬度都必須被忽略。其次，連結石頭和固定點的繩子必須被視為一個非具體的聯結，沿著緊繃的繩子方向，有一個向心力指向作為圓心的固定點；第三，從固定點到石頭的繩長，必須被處理為質點所運轉的圓周軌道之半徑。如此，一個綁在繩上迴旋的石頭之模型，就是一個想像的質點，以一定速度繞著一個有一定半徑的幾何圓形。因為這模型的成分是想像或抽象的，所以，我們可以很恰當地說模型是一個物件的抽象系統或者稱作抽象物件的系統。而在抽象物件系統和實際的運動現象之間存在一個模釋關係。

一個實際物件的系統又如何被刻劃為一個模型的落實例呢？一個實際的系統應該在理想情境下「同構於」(be isomorphic to)、或者在實際情境下「近乎同構於」(near-isomorphic; quasi-isomorphic)一個給定模型³⁶。也就是在模型和它的落實例子之間，存在一個「近乎同構關係」。例如，在圓周運動的抽象系統中，多數相關參數像質點的質量、迴旋圓

³⁶此處「同構」的意義和模型論的意義是相同的。但是我並未主張在模型和它的落實例證間必定有一個嚴格的、邏輯上的同構關係。所以，我使用了「近乎」這個形容詞來修飾「同構於」，以便形成一個新觀念來配合我的觀點。

的半徑、質點繞行軌道的速度、向心力對應著石頭迴轉中的多數「可測量」(measurable quantities)，如石頭質量、石頭到固定點的繩長、石頭的速度和繩子所受的張力。在此「對應」的意義包含在「量」(quantity)的面向上的數值(量)相等(容許誤差存在)，與質(quality)或概念面向上的參數和可測量(影響物件系統的變因)上的相互關聯：通常是彼此間的函數關係。所以，後者是前者的落實例子。至於模型和它的落實例子之間的對應，要對應到什麼程度，才能被說是「近乎同構」？這是一個留給科學家的專業判斷之問題。實際工作的科學家會針對主題、實驗技術的發展狀況、理論工具等等來判斷模型的參數與實際現象的可測量之間，在概念上有多少組對應？在數值上又可以容許多大誤差？然而，我們仍嘗試在此提議一個「近乎同構性」的判準，它由下列三項條件來「落實」。(a) 理論性的方向：科學家發現再也不能把任何新參項、或參項間的新關係或新函項加入該模型和描述它的定理之內時；以及(b) 技術性的方向：科學家發現在現有的技術中，再也不能把任何會影響物件系統的變因排除出去時；再加上(c) 定理的計算數值與物件系統的實際測量數值間的誤差是可容忍的。因此，一組能滿足(a)、(b)、(c)三條件的模型和物件系統，兩者間即有「近乎同構關係」。顯然，這是個具「歷史性」和「情境性」的判準，也就是它會隨著科學的歷史和環境背景而變動。我們應該說，科學家不是「根據」這三項條件建構可落實模型以檢驗理論，而是科學家「努力落實」這三項近乎同構的條件。當然，我們之所以使用「近乎同構」這個概念，也是因為「完全同構」畢竟是件幾乎不可能之事。

已經建議「近乎同構性」的判準之後，我們可以來問：一個模型在什麼條件下才被視為「可落實模型」？綜合上述討論，我們可以提出如下的「可落實模型」之條件：(r1) 它是從一個更高層模型被引導出來，這是一個充分條件。(r2) 它必可被表徵為圖像，這是一個必要條件。(r3) 它至少和一個物件系統是「近乎同構的」。

透過模型來說明現象與檢驗理論，可以用如下方式來描述。首先，必先決定一個實際現象是否可做為可落實模型的「落實例之候選者」(candidate for a realized instance)？針對此點，科學家要從「質」的面向上評估，亦即考察可落實模型的參數，是否能一一對應於此候選者的所有重要的、可以測量的相關變因？如果是，則此現象乃是可落實模型的落實例子之候選者。其次，必須進行「量」上的計算。一方面，不同組的數值或量可以被指派給質點的質量、半徑、向心力和周期，然後它們之間的數學關係由描述圓周運動的定理來計算與決定。另一方面，在石頭的實際運動中的數值資料，包括石頭的質量、從石頭到固定點的長度、周期等等，可以被測量以便印證或否證描述圓周運動的定理。現在，我們有一個可落實的模型、一個描述模型的定理、一個實際現象(做為可落實模型的落實例之候選者)。如果定理的計算或計量一致於可落實模型的候選者之測量數據與描述，則定理被印證。但如果兩者之間不一致，定理被否證。唯有當定理的模型被印證了，模型被直接地落實，候

選者也變成一個落實例。定理的印證或否證乃是模型本身的檢驗。如果模型的定理被印證，模型也被印證；如果定理被否證，則模型並未被落實；定理或模型應該被校正或修改。讓我們用下列圖 3-10 來表達模型、定理和落實例的候選者三者之間的關係。

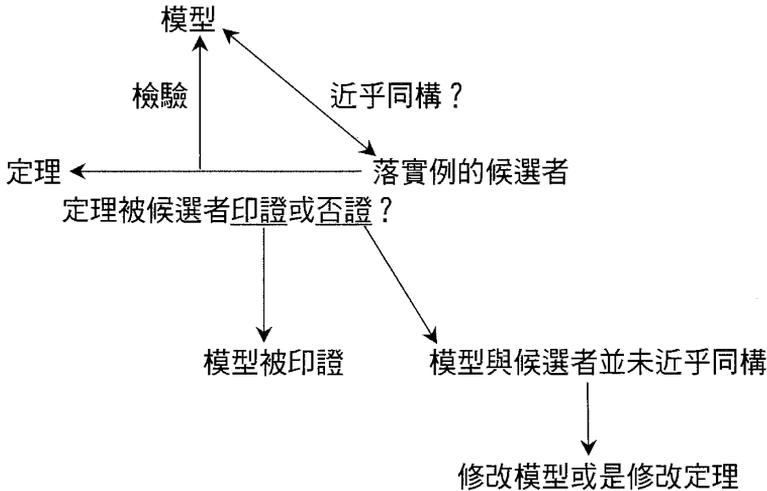


圖 3-10

玖、簡單可落實模型和複合可落實模型

既然一個理論或理論版本有一個分類的模型族群以及一個相應的分類定理系統，自然會區分出高層與低層的模型與定理。描述高層模型家族的高層定理乃是透過描述低層模型種類的低層定理才能「觸及」實際世界。低層定理則藉由其對應的模型種類模釋現象之中介，才能說明實際現象。舉例而言，屬於高層模型家族的線性運動，必須被再分類成低層模型種類，諸如沿直線的慣性運動，自由落體運動，拋物線運動等等，藉此線性運動才能「觸及」實際現象。這些低層模型種類擁有落實例，因為它們與落實例近乎同構。但是我們卻沒有一個實際的物件系統可以作為高層模型家族—像是線性運動—的落實例。除非線性運動的軌道和受力情況已經被決定，比如說像不受力質點的水平移動、自由落體的垂直掉落、投擲物體的拋物線等等，否則我們無法找到任何近乎同構於這模型家族的實際物件系統。然而一旦這些條件被滿足了，也就等於是將這模型家族再分類成幾個次種類。具有落實例的是那些次種類而不是模型家族本身。可以說，根據分類秩序，一個高層模型家族可以對它次種類中的落實例給出一個更為抽象的模釋，但它本身沒有任何相對應的落實例³⁷。

³⁷以模型論的術語來說，我們可以說次種類的那些落實例，被鑲嵌在(embedded in)高層的模型家族中。

一般而言，較低層的模型種類，或是較高層模型家族中的次種類，都是可落實的模型。然而，許多自然現象極為複雜，無法以簡單的低層模型來說明。為了模釋它們，我們必須將兩個以上的低層模型加以組合。如此而得的結果並不是某個高層模型家族的次種類，不過它仍然是可落實的。我們稱之為複合模型(complex model)。科學史上複合模型的最好例子是十八世紀英國人阿特武德(George Atwood)所設計的阿特武德機(Atwood's machine)³⁸。一個簡單的阿特武德機本身是一個實體模型，由兩個不同質量的物體 m 和 M ，分別懸吊在一條理想繩子兩端，繩子繞過一個無摩擦的滑輪(阿特武德機模型，見圖 3-10，其原型參看附圖 3-11)。當兩個物體的支撐被移除時，由於所受重力之差距，較大量的物體將會落下，同時把另一物體向上拉。阿特武德機的理論模型則是由一個旋轉運動(滑輪)、一個受到繩子向上拉力的下降運動(較大質量的物體 M ，這不是自由落體運動)，以及沿直線的上昇運動(較小質量的物體 m)³⁹。它是個可落實的複合模型。描述此模型的定理或公式為 $a_s = g(M-m)/(M+m)$ ，其中 a_s 是整個系統的加速度， g 是重力加速度。

阿特武德(George Atwood)在 1784 年設計了「阿特武德機」這種實驗裝置，試圖驗證牛頓第二運動定律。設 $M = 50$ 公克， $m = 48$ 公克，則 $a_s = 980(50-48)/(50+48) = 20 \text{ cm/sec}^2$ 。阿特武德認為這個結果為牛頓第二運動定律所預測，故它印證了牛頓第二運動定律。阿特武德說：

這三個已被假定為運動原理的物理命題(physical propositions)，將力學還原到數學確定性上。它們可以先驗地(a priori)演繹出無數運動的性質而且彼此之間嚴格融貫，但它們不只是因為這樣就能成立，還要因為它們和事實的一致才成立。(轉引自 Hanson 1965, p.102)

阿特武德機能否驗證第二運動定律？它的真正地位究竟如何？阿特武德的評論本身是對的，但是他沒有考慮到事實和原理之間的巨大距離。牛頓第二定律無法被阿特武德機和它的實驗結果直接地印證，因為它是最高層次的原理，從此原理中，一個龐大的模型族群被演繹或建構出來。如以上文分析的角度觀之，被印證的只是複合模型和描述它的定理，而非第二定律本身。

³⁸Atwood 將他的構想發表在 *A Treatise on the Rectilinear Motion and Rotation of Bodies, with a Description of Original Experiments Relative to the Subject*。參看 Greenslade, Thomas B. (1985), "Atwood's machine"。此文附有阿特武德機的照片，參看本文附圖。Hanson (1965, pp. 99-104)對阿特武德機是否印證了牛頓第二運動定律，做了頗詳盡的討論。

³⁹當然，無摩擦滑輪的旋轉運動，並沒有在數學分析中被考察。

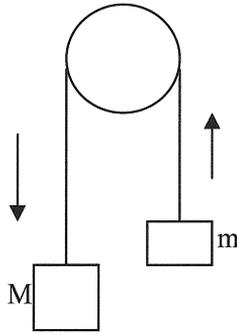


圖 3-11

卡文迪士(Henry Cavendish)的轉矩天平(torsion balance)(或譯轉矩平衡儀)是另一類型的複合模型。它被設想為要檢驗牛頓重力定律。轉矩天平的構造是：一根幾近無重的細桿，兩端是質量同為 m 的金屬球體，細桿中段由一條石英纖維懸垂起來，桿上附有一面反射鏡。置放兩個質量 M 的大金屬球體在質量 m 的小金屬球附近的固定位置上。如果萬有引力存在，則大金屬球將吸引小金屬球，造成細桿的轉動。然後置一個固定光源放射光線照射反射鏡，當細桿小幅轉動時，將帶動反射鏡轉動造成光線反射角度的變動。透過望遠鏡觀察反射光線的角度變動，就可以顯示小金屬球是否受到大金屬球的吸引。轉矩天平的示意圖見圖 3-12，其原型見圖 3-13⁴⁰。

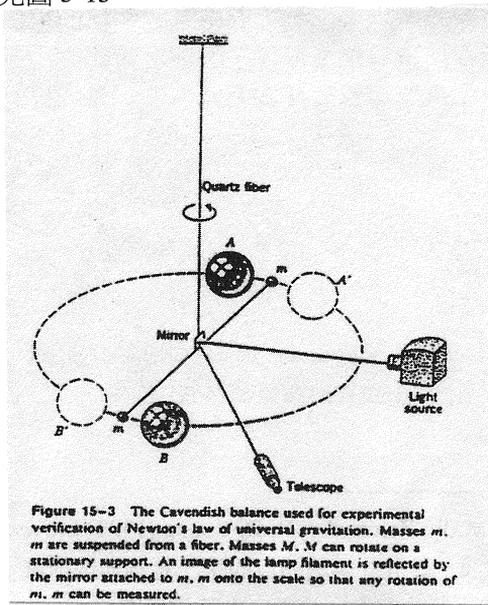


圖 3-12

⁴⁰圖 3-12 取自一本大學物理教科書 *Fundamentals of Physics*, p. 270。轉矩天平的構造也是根據此圖和教科書的解說而描述。這樣的轉矩天平是改良後的精密儀器，而不是當初卡文迪士的原始設計，不過設計的基本原則是一樣的。卡文迪士的原始設計平面圖見 3-14。

分析轉矩天平的實體，我們會發現它的模型是由一個非常小距離的線性運動、非常小角度的旋轉運動和一個來自幾何光學的光反射模型。重點在於是否兩個小球的移動造成了被觀察到的旋轉？反射光線的角度偏移只是一個輔助模型，幫助我們觀察到鏡子的旋轉以及透過偏轉角度大小來計算重力的量。現在，卡文迪士的轉矩天平印證重力定律了嗎？仍然沒有。

轉矩天平落實的是重力造成小球在小距離的線性運動，但它並未落實其它由重力導致的運動，譬如圓周運動或長距離的作用。也就是說，它不是一個相對高層的重力模型之落實例。它只是如上所描述的複合模型之落實例。如果我們想要透過轉矩天平的實驗來印證重力定律 $G=gMm/R^2$ （其中 g 是重力常數），則我們必先知道重力常數的數值。但轉矩天平事實上被很多大學物理教科書看成求出重力常數的工具⁴¹。在這種情況下，牛頓重力定律是推論的先驗規則，而不是被檢驗的經驗定律。在可落實模型的概念下，科學家如何透過它們來檢驗理論？這又是另一個問題⁴²。

拾、從理論的組織到理論版本

在第二和第三章中，我們已經展示了科學理論的組織結構：透過分疇和樹狀區分的運作，將範疇、種類和模型組織成一個結構性的知識系統。然而，這個組織結構的展示並不是超乎歷史脈絡的「邏輯重建」，而是從實際的科學理論中抽取出的「歷史－認知性的重建」。我們所展示的結構總是發生在個別科學家所提出的理論版本之中。理論版本是分析科學理論在歷史中發展演變的基本單元，下一章，我們主題就轉向理論版本。

⁴¹參看 F. W. Sears, M. W. Zemansky, H. D. Young (1982) *University Physics*, p.65。而當初卡文迪士設計此儀器的目的是「要為地球稱重」，即求地球的重量。其實也是把牛頓的重力定律當成先驗的規則。

⁴²參看 Chen, Ruey-Lin (2003)，修訂稿已發表於陳瑞麟(2004)，“Testing through Realizable Models”，《台大哲學論評》第二十七期(pp. 67-117)。本文從「可落實模型」的觀點討論了檢驗理論的模式和牛頓力學的檢驗歷史，並得到一個近似杜恩「理論無法被完全決定」(underdetermination of theory)的論旨。

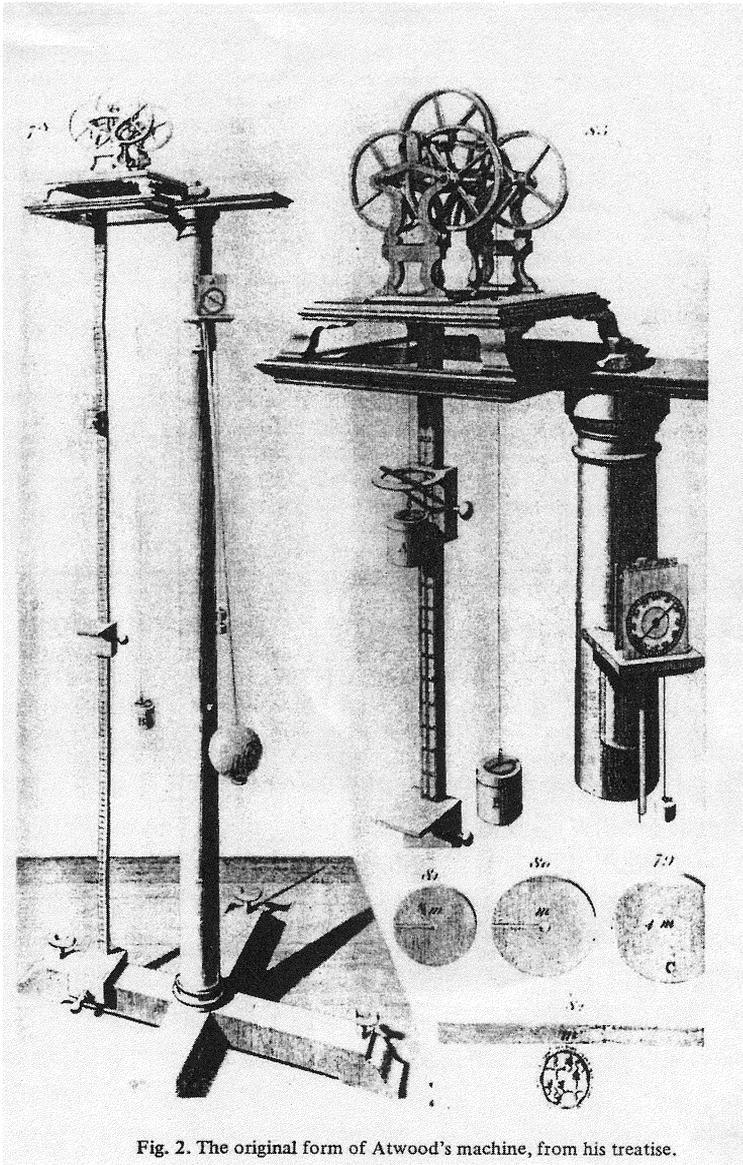


Fig. 2. The original form of Atwood's machine, from his treatise.

圖 3-13 阿特武德機原型圖

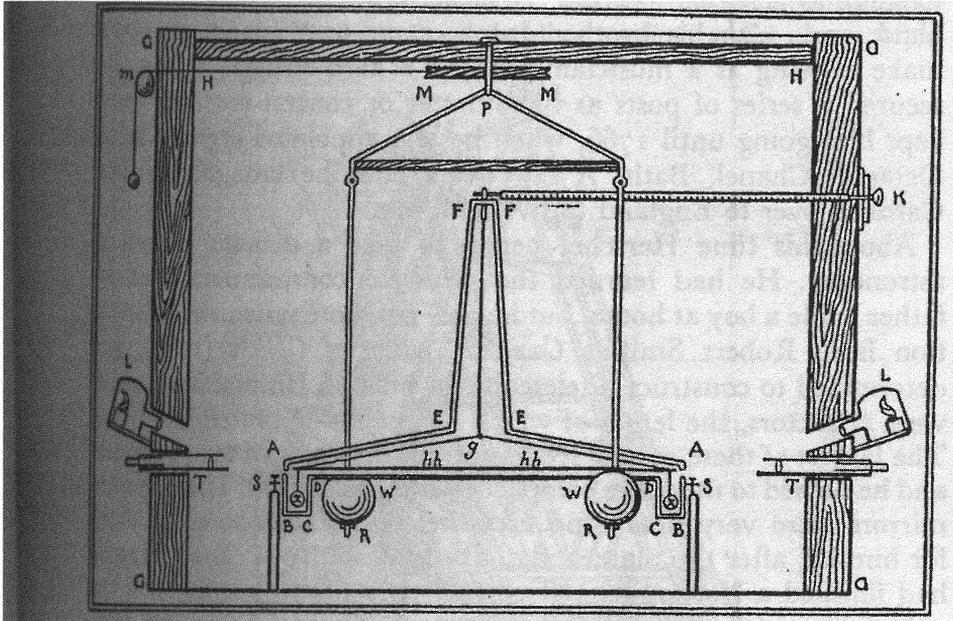


圖 3-14 卡文迪士轉矩天平原型平面結構圖
(取自 Wolf, A. (1999), p. 113)

第四章 理論版本取代典範的精煉

長久以來，科學家、科學史家和哲學家已經不斷地在討論理論的轉換、更迭和革命。我們有哥白尼革命(Copernican Revolution)，以太陽中心說來取代托勒密(Ptolemy)的地球中心說；伽利略和牛頓的力學革命連同道爾頓(John Dalton)的原子說，推翻了亞里斯多德和教會的舊世界觀；拉瓦錫(Antoine Lavoisier)發現氧氣，取代了燃素化學(phlogiston chemistry)；愛因斯坦的相對論加上玻爾(Niels Bohr)、海森堡(Werner Heisenberg)、薛丁格(Erwin Schrödinger)等人的量子力學(quantum mechanics)再次更新牛頓力學和馬克斯威爾的電磁學(electromagnetics)。在這種種「革命」當中，有人認為舊理論添加了新材料而成為新理論，有人主張新理論推翻了舊理論，也有人相信新理論並沒有決定性的證據來否認舊理論，只是新世代的科學社群不再接受舊世代的科學社群所信奉為真的東西。不管對「革命」的解釋是什麼，至少新理論和舊理論之間總是有足夠的差距，以致讓科學家、科學史家和哲學家一致公認兩者間存在著某種「更新」(renovation)（當然「更新」容許各種不同的解釋，包括只是「增添擴張」、或者「推翻」和「更替」、或是「斷裂」(rupture or break)等等）。

然而，科學史上也有另一種常見的現象：許多傑出的科學家像歐拉、拉格朗日(Joseph Lagrange)、拉普拉斯、漢彌爾頓(William Hamilton)、赫茲等等每一個人都提出了和牛頓的原始表述相當不同的『力學理論』，而與牛頓的原始理論共同組成科學家必定學習的「古典力學」(classical mechanics)；法拉第、馬克士威爾和洛倫茲(Hendrik Lorentz)也各自形構了相關卻不盡相同的古典電磁學理論。相對論和量子力學也各有許多不同的表達和論述。這些情況都可以被稱作理論的「繼承」(inheritance)現象。究竟，這種「繼承」現象和上述的「更新」現象有何實質上的差異？

本章並不打算去全面回答這個問題。然而，這些現象卻是我們在說明理論結構時所不得不考慮的相關條件。我們主張「理論版本」以及「理論版本家族」這一對概念可以恰當說明上述現象，並用這兩個概念來代替「理論」。因而理論結構的問題就變成理論版本和其家族的結構問題。

理論的繼承和更新的雙重現象不僅在理論發展層面上是一個必要處理的核心問題，即使在理論結構的層面上，也扮演關鍵角色，因為理論結構乃是理論發展的分析基礎。如果我們有恰當的理論結構之「理論」，我們便能用它來更精緻地說明理論繼承和更新的問題。換言之，要說明「革命前後的兩個理論之間與非革命的兩個理論之間究竟有什麼不同？或者根本沒有任何不同？所謂理論革命只是一種虛構？或者每一個不同的『理論』都得視為一場革命？」諸如此類的問題，都必須先

有一完整的理論結構之理論。然而，在當前傳統科哲理論都無法達到此需求的背景下，我們提出「理論版本」的觀念。

壹、為什麼要提出「理論版本」？

我們的基本要求是：能夠說明「繼承」和「更新」的科學史現象，同時也提出了理論結構的完整分析。

邏輯實證論的敘述觀點固然分析了理論結構，卻無法清楚合理地分辨：為什麼這些古典力學「理論」和牛頓的原始表述被歸屬為同類理論？而相對論卻是對古典力學一場理論「革命」？累積和化約科學觀甚至也使他們只認同理論繼承，而不認為相對論乃是古典力學的革命替代理論，在他們看來，相對論不過是擴展牛頓力學到大尺度的速度上¹——一切只是科學知識的累積成長。然而，邏輯實證論已經不斷受到嚴重攻擊，一些科學史家和哲學家以有力的史料否定了這種觀點。

為了代替累積成長觀，歷史學派用一些整體而鉅大的「典範」、「研究方案」或「研究傳統」等概念來說明這些科學史現象。如此一來，諸力學理論家只是在牛頓典範下從事著解謎(puzzle-solving)的活動或在牛頓研究方案下檢查保護帶(protective belt)，而相對論是另一個典範、研究方案或傳統。歷史學派值得付出稍多的關注，因此讓我們來檢討具代表性的孔恩學說。

孔恩在《科學革命的結構》對上述現象做出了較完整的解答。他提出了「常態科學」(normal science)和「科學革命」(scientific revolution)兩個重要的觀念。常態科學中主要的科學活動是在典範指導下進行「解謎」；解謎的目標有三：決定重要的事實、使理論與事實吻合、精煉理論或典範(paradigm-articulation)。關於精煉理論，孔恩特別舉出十八九世紀的古典力學家歐拉、拉格朗日、漢彌爾頓、赫茲等人一再地嘗試重新形構(reformulated)力學理論，以便得到一功效相同但邏輯與美學上更令人滿意的形式(Kuhn 1970, p. 33)。科學革命則意味了新理論徹底地不同於舊理論，特別是在意義、標準、概念系統和世界觀之上。孔恩指出牛頓力學並不是相對論的特例，就算相對論可以導演出牛頓力學，但導出過程中所出現的概念如空間、時間、質量卻截然不同(1970, p. 101-102)。因此，相對論是對牛頓力學的科學革命。

然而，夏佩爾(Dudley Shapere)在1964年寫了一篇書評〈科學革命的結構〉，評論孔恩《結構》一書，卻嚴重地打擊了上述觀念。在這篇書評中，夏佩爾對書中的核心概念「典範」提出了一個尖銳的質疑：如何辨認(identify)典範？這個困難特別表現在：「不同的典範和典範的不

¹ 在限制條件下，相對論公式就可導演出牛頓公式。亦即限制 $v \ll c$ (v 遠小於 c)， v 是質點速度， c 是光速，其引導過程可參看任一本大學物理或者介紹相對論的書籍。

同精煉(different articulations)之間的界線要劃在哪兒？」² (Shapere 1980, p. 32)夏佩爾隨即指出：

說牛頓、達蘭伯特(Jean d'Alembert)、拉格朗日、赫茲、漢彌爾頓、馬赫(Mach)和其它人形構了古典力學的不同版本是很自然也很尋常的；然而，這些公式系統(formulations)的某些包含了不同的「許諾」(commitments)—譬如，一些人許諾了力(forces)、其它人則許諾了能量(energy)，一些人許諾了向量原則(vectorial principles)、其它人則許諾了變量原則(variational principles)。(Shapere 1980, p. 32)

果真如此，我們如何能說達蘭伯特、拉格朗日等人的古典力學公式系統是「牛頓典範」的不同精煉呢？漢彌爾頓以能量概念為核心，提出「動力系統的移動路徑是能差最小化的路徑」之漢彌爾頓原理，從而發展了漢彌爾頓力學；赫茲以再定義時間、空間和質量三者的基本概念，建構了整個赫茲版本的力學；它們都只是牛頓典範的精煉嗎？誠如夏佩爾繼續指出：

牛頓和赫茲的古典力學公式系統彼此相似(similar to one another)，正如同愛因斯坦、懷海德(Whitehead)、勃克霍夫、彌恩(Milne)的相對論版本間的相似；波動力學和矩陣力學之間的相似。但是在這些理論是『相似』的方式和程度上，存在著重大的差異—如果只把它們都視同為相同典範的不同精煉，差異將被掩蓋。(1980, p. 33)

夏佩爾對孔恩的質疑已經帶來鉅大的難題，迄今似乎不曾看見任何哲學家或科學史家注意到它的重要性。如果漢彌爾頓和赫茲等人也在概念上相當地不同於牛頓，有什麼理由說它們只是牛頓版本的精煉？只是邏輯和美學上更令人滿意而已？如果相對論是對牛頓力學的革命，那麼愛因斯坦和牛頓之間的概念差異與漢彌爾頓和牛頓之間的概念差異又有什麼樣的不同？

「典範的不同精煉」之觀念無法精確地顯示出這些古典力學版本彼此間的真實關係。在此我們應該拋棄「達蘭伯特、拉格朗日等人的古典力學公式系統是一個典範（牛頓典範？）的不同精煉」這樣的想法。然而，拋棄了之後，又該如何？有部分歷史取向的哲學家提出了「理論系列」(series of theories)的觀念³。亦即一系列相繼發生的理論。但是，它

² 文中所附頁數來自 1980 年 Gary Gutting 編輯的 *Paradigms and Revolutions*, 書評所佔頁數為 pp. 27-38。這篇書評於 1964 年首度發表在 *The Philosophical Review*, Vol. 73, No.4, pp. 383-394。後來亦收入夏佩爾在 1984 年出版的論文集(pp. 37-48)。

³ 譬如波柏(Karl Popper 1959, pp. 108-109)。雖然他只談及從許多競爭理論中選出最好的理論，不過拉卡托斯(Lakatos 1978, pp. 34-36)以理論系列的概念來闡述精緻否證論(sophisticated falsificationism)，並將這立場歸諸給波柏的立場。

似乎和典範一樣模糊。因為，除了發生的相繼性外，他們並沒有去分析該理論系列中的每個理論究竟是什麼東西？理論之間究竟有什麼樣的關係？是否能看成一個整體？或者每個都是獨立的個體？相對論是不是就接續在古典力學理論系列之後？如何的接續法？簡單地說，他們從未能提供一個完整的理論結構之分析⁴。

語意模型觀點不滿意歷史學派無法提出清楚完整的理論結構，他們引用了集合論和模型論的理論建構方法，主張這些古典力學諸『理論』和牛頓的原始理論只是「公式系統」或「公式」的不同，也就是使用語言或表達方式上的差異，但其實它們都共享相同的語意結構，這個語意結構才是核心的古典力學理論。但是語意觀點的「語意」總是限制在外延層面上，嚴重地忽略了科學語詞的內涵意義（參看第一章）。夏佩爾對孔恩的質疑也顯示，諸古典力學家的『理論』不僅在公式或語言句法上有所不同；在語意結構上也有所差別。而且也不僅在語意的形式結構或外延層面上有所不同，在內涵層面，亦即在某些重要的科學概念或物理意義上，他們也顯示了不同於牛頓的理解。換言之，其他古典力學家的「理論」和牛頓的「理論」未必擁有相同的語意結構。這一切，似乎指示了現有的各種觀點均無法恰當清楚地說明種種科學史的現象。果真我們無法找到既能清楚辨認理論又能符合歷史現象的說明方式？

「理論版本」的觀念可以解決這個難題。只要我們將歐拉、拉格朗日、拉普拉斯等人的『理論』，包括牛頓的原始表述，都視為在古典力學下的一個個「理論版本」，彼此間具有家族相似的關係⁵，而牛頓的『理

- 拉卡托斯本人則明顯繼承「理論系列」的概念，而且宣稱「研究方案」就是由一個連續的理論系列融鑄而成的（或說理論系列的共同結構）(p. 47)。拉卡托斯也曾使用「研究方案版本」(the version of research programme)這樣的片語(p. 52)，但並沒有詳細分析其內在的結構。另外他們以及費耶阿本(Feyerabend 1975)都主張科學的目標在於「理論的增殖」(proliferation of theories)。不同的是：前二人相信理論增殖代表科學的進步和成長，後者則反對成長的概念，但仍相信理論增殖對科學有益。拉卡托斯見第七章的討論。
- ⁴ 雖然波柏(Karl Popper 1959)有分析理論的結構，但是他的「科學發現的邏輯」——「推測—推翻」理論或者「精緻的否證論」（借用 Lakatos 的用語）並不能精確地說明「理論繼承」的現象。
- ⁵ Nersessian 已經探討了法拉第、馬克士威爾、洛倫茲到愛因斯坦四人如何建構起電磁學的意義，不過她聚焦在「電磁場」(electromagnetic field)這個概念上。Nersessian 採納了原型理論的立場，主張將上述四人對「電磁場」的意義或概念認知理解為家族相似的。她也發展了「意義框架」(meaning schema)的理論，主張一個意義框架應從「材料、功能、結構、因果力」(stuff, function, structure, causal power)四項因素上去刻劃(1984, pp. 153-159)，從意義框架中我們就能看到家族相似的發展。Nersessian 的理論已經預示本論進一步的發展

論』就是諸理論間的「典範版本」。而且，古典力學是許多理論版本組合而成版本家族，相對論則不在這個家族之內，它自己產生了另一個家族。藉著這樣的觀念，我們就可以恰當地說明這種科學史現象。換言之，家族內的成員之間顯然是「繼承」；而不同家族的理論版本之間則是一種「更新」。實際上，我們將更進一步地主張：科學歷史上真正具體存在的只是理論版本，以及許多理論版本所共組的理論家族，而沒有過去科學哲學想像中的跨越個別表達系統的單一共同的「理論」。因為，所謂的「理論發展或變遷」其實正是後來的科學家對先前的科學家所提出的科學理論（甚至學科分類）有了不同的組織、理解和表達。理論版本的定義是單個科學家所建構的「理論」，許多科學家擁有相似的「理論」則組成一個理論版本家族。透過這種「理論版本」的概念，我們可以將理論發展的考察置放到「微觀的」大科學家個人的「輸入和輸出」(input and output)的脈絡下，從而更明確地描繪出一幅科學知識發展、競爭與變遷的精緻圖像。

貳、什麼是理論版本？

理論版本指的是單一個別的科學家所提出或表達的科學理論——並不一定是原創的。形式地說來：某個科學家提出了「某個理論」來說明某些現象，這個理論受到其它科學家的認可並接受，但他們不滿意某些細節，於是著手修飾它或者重新建立公式來表述它，以致產生了一個和原來的「理論」有所不同的「新理論」。這個「理論」可能有兩種後果：一是它和「原理論」有重大的差異，它推翻了「原理論」的某些預測，或者開闢了一個嶄新的研究領域。如此科學家們可能認為它造成了理論革命，雖然他們並不一定全部放棄「舊理論」，但可能進一步根據它去發展更新的「理論」。第二種後果是改動理論的科學家本人以及大部分科學家並不認為它是「完全不同的理論」，所謂的「新理論」在許多層面仍然立基在「原理論」之上，並沒有推翻、也沒有革新「原理論」，而只是修飾、擴充或強化；它在說明現象上的效果和「原理論」差別不大，通常和「原理論」可以互相導衍，在說明力、真值或計算上等值於「原理論」，也沒有開闢全新的領域或只開闢了少許的新領域。科學家們包括他們自己並不認為這些「理論」是在替代「原理論」。但是這些修飾、補充或強化也不僅僅只有邏輯或美學上的精煉效果，在概念上也可能產生重大的差異。

然而，不管「新理論」造成了哪一種結果，原科學家的「原理論」和後繼科學家的「新理論」都同樣只是一個個「理論版本」。在第一種情況中，這個新理論版本具有發展成另一「理論版本家族」的潛能；在第二種情況中，它則仍只是原來的「版本家族」裏的一成員。例如，漢

方向，只是她對原型理論的應用和她所提出的意義框架太過簡單，無法提供理論變遷的完整圖像。

彌爾頓版本和牛頓版本的基本概念相當不同，赫茲版本和牛頓版本的基本概念也不相當不同，而漢彌爾頓和赫茲版本兩者間也不同；只不過漢彌爾頓版本和赫茲版本都屬於古典力學家族。為什麼呢？這一點只有在我們詳細發展了理論版本的結構之後，我們才能回答這樣的問題。

理論版本有什麼樣的結構？其實就是透過「分疇」、「樹狀分類」與「模型」所組織起來的科學理論之結構。換言之，在普遍性、抽象性的語言呈現下所謂的「科學理論的結構」，其實是「理論版本的結構」。也就是，諸科學理論必定總是連結著某些個獨特的科學家，而以「理論版本」的面貌呈現。科學家在針對一個共同主題或對象提出的理論說明時，如果能夠使用不同的數學工具和符號系統、發展出不同的表達、特別的概念與解釋、獨家的分疇分類系統，就可能發展出一個獨特的理論版本。簡單地說，理論版本就是個別科學家，針對某一「論域」所提出的一個獨特的「分疇分類與模型系統」，加上用來呈現它的表達系統。

總而言之，理論版本有如下的指認特徵：(1) 理論版本繫屬於單個科學家的著作，是具有個人風格的概念架構，有其特別的模型階層系統。(2) 理論版本具有特別的論域，由其分疇分類系統來定義。科學家個人可能針對不同的主題，發展出不同範圍的理論版本，蘊涵了不同的論域，但是，這些不同範圍的理論版本，可能被整合成一個更大的理論版本，蘊涵一個最大的論域—其範圍含蓋整個「自然」甚至「世界」。(3) 理論版本被體現在科學家所發表的文獻上，亦即它具有一個「表達系統」，表達系統即理論版本的語言成分，亦有其內在結構，與模型系統之間具有同構性（即共同的結構）。我們總是從表達系統中重建科學家的理論版本。其中第一點已見上述討論；第二點和第三點見下文展示。

除了上述三點「指認特徵」之外，理論版本還具有幾個發展特徵或歷史特徵(*developmental or historical characteristics*): (1) 每個理論版本都是由先前的一個或幾個理論版本修改或組合而來的；(2) 每個理論版本都具有成為一個「研究方案」或「研究計劃」(*research program*)的潛能，從而具備「啟發功能」(*heuristic function*)與「競爭功能」(*competitive function*)；因此，(3) 每個理論版本都可能成為一個「原型版本」或「典範版本」，從而開展出一個理論版本家族。關於這些發展特徵，讓我們留待第七章。

參、理論版本的論域

除了個別的科學家之外，傳統上定義或指認同一理論（理論版本）的指標在於它所研究的對象（一組相關的現象），不同的研究對象很自然地區分了不同的理論。例如，研究運動現象與成因的是力學理論(*mechanical theories*)、研究光現象的是光學理論(*optical theories*)、研究磁現象的是磁學理論(*magnetic theories*)，如此等等。然而，理論並不是完全被其研究對象所界定，理論版本也可能反過來界定其研究對象，好比說，馬克斯威爾的電磁理論就把電、磁和光三種現象統合成單一現象—

電磁波。不管是理論決定對象或對象決定理論，一個理論版本必定蘊涵其自己的「論域」。

論域是科學理論版本的核心。論域並不只是科學理論所意圖說明的經驗現象之範圍，還是科學理論和經驗世界連結的「介面」，是科學理論自己規劃的分疇分類系統，科學理論透過論域才「接觸」實際世界。甚至，我們可以說，論域是科學理論內部的「世界」，是我們透過科學理論所瞭解的「世界」。透過科學理論學習世界的知識，其實是在學習它的論域之知識。

我們使用「論域」這個概念的有二：首先，它表達科學理論探討的整體取向，亦即科學理論總是試圖揭開某個整體—譬如，整個世界—的奧秘，使該整體成為可理解的。科學理論總是或隱或顯地針對其主題的整體進行分疇分類，形成它自己的論域。其次，「論域」這個概念並不是什麼全新名詞，它是邏輯和集合論裏的重要概念。「論域」在相當大的程度上承襲這個概念的意義，這讓我們得以進行邏輯和集合論的形式化。在集合論中，論域相關了關係和函應的概念，它可以嚴格的定義如下：

若 ρ 是一關係，則 ρ 的論域（又稱定義域） D_ρ 是

$$\{x \mid \text{對某些 } y, \langle x, y \rangle \in \rho\}$$

而 ρ 的範域 (range) (又稱「值域」) R_ρ 是

$$\{y \mid \text{對某些 } x, \langle x, y \rangle \in \rho\}$$

論域和範域是成對出現的概念，特別頻繁地出現在應用函應(function)的場合上（函應也是一種關係）。在數學上我們習慣將函應稱為函數，標記為 $y=f(x)$ ， x 和 y 都是變數。如果所有的整數都可以在這個函數 f 上代入 x ，則 f 的論域就是「整數集合」，而整數集合的所有元素代入 x 後進行函數 f 的運算所得到的數值的集合就是 f 的值域。

論域是關係或函應所考慮（論及）的全部對象之集合，這些對象將透過關係或函應而對應(correspond)或投影(mapping)到另一群對象；該群對象的集合便叫做範域。集合論上慣常記為 $f: D_\rho \rightarrow R_\rho$ 。通常我們以圖像 4-1 來幫助理解論域和範域之間的函應⁶：

⁶ 我們有幾種特殊的函應型態，如(a)內射(injection)：指論域裏的每個元素都能在範域裏找到相對應的元素；(b)跨射(surjection)：範域裏的每個元素都能在論域裏找到相對應的元素，但論域裏可能有一些元素在範域裏沒有對應；(c)雙射(bijection)（或一一對應(1-1 correspondence)）：論域的每個元素恰好一一對應於範域裏的每個元素，不多不少。這些型態都可以在集合論裏用符號嚴格的定義，不過在此我們只需要知道其概念就夠了。此外還有一些型態如同(identity)、函應組合(composition of function)等等。

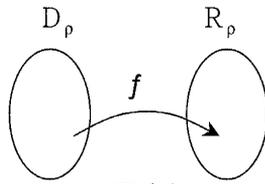


圖 4-1

直觀地看來，科學理論的「論域」意味著理論所研究的對象之集合。夏佩爾試圖用它來取代邏輯經驗論的觀察和理論之區分，以便顯示科學理論的本質。他直截了當地指出：「理解科學的重要部分，特別是理論的本質，必定檢查建立論域的基礎之特徵。」(Shapere 1977, p. 521)夏佩爾定義的論域，指的是科學研究的主題(subject-matter)，像「電」、「磁」、「光」等等，亦即被視為研究對象之一定的資訊體(certain body of information)(1977, p. 518-521)。這個資訊體是由許多相關項目(related items)如物件、歷程、行為、事實等共同組成的統一整體(Shapere 1984, p.320)⁷，甚至其它的理論也可能被視為「事實」而納入論域內⁸。但是，夏佩爾認為論域並不是雜亂、散漫的項目，也不只是所有相關資訊體而已，它還需更多限制條件。比如，這資訊體能夠引起問題，而且是在合理的基礎下產生它（不是在「主觀的價值判斷」之基礎上），以致值得科學家付出心力去解決它們。就此而言，論域包括了四項特徵：(1) 建立在項目之間的某種關係之聯結；(2) 相關的資訊體中存在某問題；(3) 問題是重要的；(4) 科學準備去(ready to)處理這問題(Shapere 1977, p.525)。

由於這些特徵，尼可拉斯(Thomas Nickles)以為夏佩爾意義上的「論域」是：任何適當理論「應該」相關且交代的一切東西。他自己則提出另一個修正的意義：一個特別、可行的理論的確(does)成功地說明（由當時的標準來看）的一切東西。這個意義特別強調理論決定的特徵(Nickles 1977, p. 583)。換言之，夏佩爾的論域是在「理論之先」，透過上述(1)到(4)的特徵來決定；而尼可拉斯則提出了一個「理論之後」的論域概念。當然，尼可拉斯強調：「我們仍然可以區分理論確實成功地說明的論域，和理論應該說明的論域，因而容許我們可以宣稱一理論是不完備的。」(1977, p. 584) 總結上述討論，集合論帶給我們「論域—範域」的成對概念；夏佩爾提供了論域的主題、資訊體、問題性和整體性等等

⁷ 夏佩爾也在此談及了科學「場域」(field)的概念。論域涉及的是科學探討(inquiry)的項目，而場域則既包括了論域的所有項目，也包括了相關於論域的問題，以及從事探討和解答問題的技術(Shapere 1984, p. 320)。

⁸ 夏佩爾以馬克士威爾理論為例，它統一了先前的「電」、「磁」和「光」等論域，因而形成一個更大的論域，則先前的關於各論域的理论現在變成「事實」而被納入新的論域內(Shapere 1977, p. 529)。正因如此，尼可拉斯在他的評論中認為夏佩爾的論域是一個駁雜集體(motley collection)，包括了可觀察的現象、有序的現象、理論、甚至物理對象(物件)等等(Nickles 1977, p. 573)。

的重要特徵；尼可拉斯則強調論域的「理論決定」性質。這些概念為我們發展一個「論域」完整概念，奠下了基礎。

論域就是科學研究的「主題」—物件、歷程、行為、事實等等「對象」（項目）的整體。但論域並不是在理論之外的東西，相反地，它屬於理論，它就是構成理論的分疇分類系統，理論包含的論域，決定了它的大小、範圍和種種性質。科學家建立一個理論必然蘊涵建立一個論域；我們學習科學理論，也只有在學會論域的諸範疇特徵和概念意義之後，我們才算是學會了理論。因此論域提供了我們關於理論的重要資訊，以及有待解決的疑難與問題。

在建立理論之前，科學家總會先面對一個「前理論的田野（場域）」(pre-theoretical field)，這個場域對世界有一個原初的分疇分類（它可能是前一個科學理論或還沒有科學之前的哲學或神學理論所產生的）。科學家對該場域進行研究以及重新分疇和分類，產生了理論的論域，繼而將這分疇分類的論域應用到世界上。這時，世界已不再是原先的世界了，科學家現在對世界有一個和原初世界不同的分疇分類，換言之，他透過理論來看待世界了。現在，理論的真正指向是在於描述、說明和預測這個分疇分類後的新世界和新領域。如果科學家想證明理論為真，就必須在新領域中找到和論域裏的範疇和模型相對應的事物。讓我們把「範域」這個概念引進，論域屬於科學理論，範域則表示科學理論試圖說明的領域。範域在理論之外，它屬於世界。顯然在論域和範域之間預設了某種投射或投影關係（理論的應用、預測、模型落實或具體化等等）。讓我們再用下圖 4-2 來表示前理論場域、論域、範域三者間的關係：

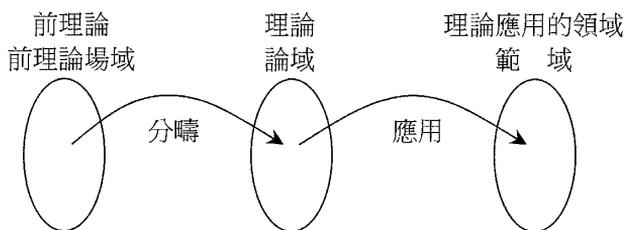


圖 4-2

顯然，我們的「論域」之涵意和夏佩爾及尼可拉斯的「論域」概念並不相同。最大的差異在於我們把論域視為理論的部分，屬於理論而不是在理論之外，在理論之外為理論意圖說明（不管是「應該說明」或「實際說明」）的世界範圍是「範域」。換言之，夏佩爾和尼可拉斯所說的「論域」相當於我們架構裏的「範域」。而他們兩人不同的論域概念可以用我們的架構中論域和範域之間的內射函應來明示：亦即夏佩爾的論域大小相當於我們架構中的整個範域，尼可拉斯的論域大小則相當於我們架

構中的範域之子集合，這子集合恰和我們的論域有一一對應函應⁹。讓我們再用下圖 4-3 來表示：

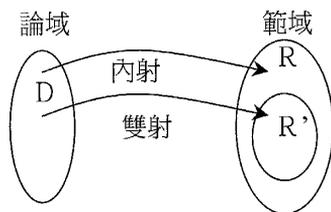


圖 4-3：其中， D 是論域， R 是範域（相當於夏佩爾的論域）， R' 是範域的子集合（相當於尼可拉斯的論域）， $R' \subseteq R$ 。 $D \rightarrow R$ 是內射函應； $D \rightarrow R'$ 則是雙射（一一對應）。

論域的最大特徵在於它是對前理論場域的分疇，再將這分疇投射到世界上，將前理論世界（前理論的分疇分類系統）改變成為理論意圖應用的世界（改變分疇分類）。理論事實上總是和「兩個世界」相關。而其它的科學理論觀點，例如邏輯經驗論、模型觀點以及上節討論的夏佩爾等等，都不能看到理論的分疇分類特徵，他們的理論和世界的關係只是單純的歸納或應用，他們的「世界」也只是單一可觀察世界或實際的現象世界。我們可以用下圖 4-4 來表達邏輯經驗論和模型觀點的理論和世界之關係：

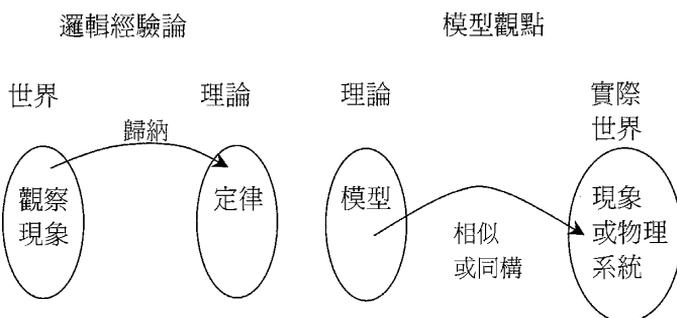


圖 4-4

總而言之，論域不是外在世界，而是被理論所預設的核心成分，是理論所投射出來的「世界」，也是指認某一理論版本的重要特徵。

⁹ 正因為夏佩爾所謂的論域其實乃是理論投射的範域，所以它可容許不同的理論投射到這個範域來，換言之，同一範域可以有不同的理論來說明，因而薩普宜稱夏佩爾的論域乃是一個比理論更大的存目，正像孔恩的典範、拉卡托斯的研究方案或勞丹的研究傳統。

肆、相對的局部理論版本

一位科學家可能針對不同的主題而提出不同的理論版本，但是，這些不同主題的理論版本，有可能被整合在一個更大的理論版本之下。最大的理論版本，就是針對「整個自然」所提出的理論。好比牛頓針對運動（包括傳統上的天體運動和地面運動）這個主題提出一個天文學／力學的理論版本，被表達在《自然哲學的數學原理》之中，又針對光這個主題提出一個光學的理論版本，被表達在他的《光學：論光的反射、折射、偏屈與色彩》(*Opticks: A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*)和其它相關的光學論文之中¹⁰，而且因為牛頓主張光的微粒子學說(*corpuscular doctrine*)，並試圖說明光的微粒子和物質微粒子的互動，使得他的《光學》也包含了針對「物質」的理論版本。進一步，牛頓在其著作的再版中，努力把兩者連結起來，以便建立一個以「整個自然」為主題的理論版本。所謂的「整個自然」涵蓋了十七世紀大部分科學家感興趣的所有現象：包括物質的微小基本成分、光與色彩現象、物體運動的方式與原因、天體的運動與原因、宇宙的時空結構與宇宙秩序的原因。我們可以說，牛頓建立了一個「自然哲學」的理論版本：包括「力學／天文學」、「光學」和「物質理論」三個「局部理論版本」(*partial theory versions*)。同樣地，笛卡兒也在其《哲學原理》(*Principles of Philosophy*)中提出一整個「自然哲學」的理論版本，而其天文學／宇宙論中的「渦漩理論」則是其整個自然哲學理論版的一個局部理論版本。必須強調的是，「局部理論版本」的「局部性」乃是相對的，也就是相對於其上層、包含它的更大理論版本才為局部的，但這並不意味它們本身不具獨立性。

每個理論版本既然都蘊涵了它自己的論域，如果這個理論版本是一個更大範圍的理論版本之局部理論版本，它的論域就成為一個更大的論域之局部論域。既然論域是針對主題的一個分疇分類系統，表示局部論域的分疇分類系統，乃是更大的論域之分疇分類系統一部分。這是理論版本的階層體系性。「最大的」理論版本，無疑是針對整個自然，也就是說，一個自然哲學／科學的理論版本。當然，它也有一個以整個自然為範圍（範域）的論域。

大部分科學理論的論域有其範圍限制，專注於某個特別種類的現象，換言之，它們只針對局部世界或世界的局部。好比光學理論之於光現象、電磁學理論之於電磁現象、生物學理論之於生命現象、動物學理論之於動物界等等。但是這種世界的局部有多大，往往是依據理論本身的設定，也就是說，究竟哪些現象會被視為光現象、生命現象、動物現象？是由理論來部分地決定，另一部分則來自理論對其先前研究或前理

¹⁰見 Shapiro, Alan E. (1984)(ed.) *The Optical Papers of Isaac Newton* (Cambridge: Cambridge University Press)。

論的繼承。每個科學理論（版本）都會對它們的前理論領域進行分疇分類，並部分地承襲部分地修正先前理論的成果，而或明或隱地呈現出自己的論域並投射到其理論範域上。反過來看，我們也可從一個理論的論域來看出它所試圖說明的理論範域——它把一個特別的存有論設定在世界中。論域決定了理論對世界或某局部世界的存有論分割。但是，許多大科學家往往不願侷限在某個局部世界之中，他們總是試圖針對整個自然世界（甚至整個「世界」）來提出一個完整的理論——也就是科學家個人所能創建的「最大」理論版本。

然而，所謂的「整個自然」究竟包含哪些東西和現象？以「自然」為主題的理論版本，當然會針對前理論的自然場域，進行重新分疇和分類，提出不同的存有論範疇架構。好比，十七世紀的自然哲學理論版本，都針對其前理論場域——亞里斯多德和中世紀亞里斯多德主義的自然哲學所建立的「自然」，一個由「形式」(forms)、「質料」(matter)、「潛能」(potentiality)、「實現」(actuality)、「實體」(substance)、「屬性」(attributes)、「變化」(change)（性質改變、濃縮和稀化、生成與消滅、空間運動）、「超月區域」(superlunar area)（日、月、水星、金星、火星、木星、土星七大行星、恆星、天球和乙太）和「月下區域」(sublunar area)（土、水、氣、火）等範疇所構成的世界——作新的分疇和分類，因而產生一個新的論域，它甚至可能重新定義「自然」的概念。如笛卡兒的自然哲學的論域，它不僅只剩下「物質」（球體微粒彈性球、精細的以太微粒子、行星（微粒子集合體））、「空間運動」(local motion)、「碰撞作用」等少數範疇，更把「自然」重新定義成「機械的」(mechanical)——截然不同於亞氏的「目的論自然」(teleological nature)。讓我們把更詳細的討論留待後文。

伍、理論版本的表達系統

表達系統是指科學家將他的理論版本用語言表達出來的成品，包含了原理、定理（模型描述）和理論說明或預測。所謂「原理」(principle)是指對「基本分疇」的語言表達；「定理」(theorem)則指對「模型」的數學表式或語言表達。「理論說明或預測」(theoretical explanation or prediction)則用來表達模型和實際現象的關係。此外，科學家在建立理論版本、也即是分疇的過程當中，一方面使用一群術語來表達每一範疇，另一方面也將這些術語組合成原理和定理，這些術語也就是一般所謂的科學語詞。理論版本的分疇、分類和模型的系統性讓這些語詞意義彼此相關，構成了一個意義網絡，單一語詞的意義只有在這意義網絡中才能得到界定，讓我們沿用孔恩的用法把這交織的意義網絡稱作理論版本的詞彙結構。

如果以牛頓運動定律為基本原理，對世界進行基本分疇，我們有了像「力量」、「質量」、「位置」、「動量」等等語詞，讓我們稱它們

為「範疇語詞」(categorical terms) (教科書有時稱為基本概念)¹¹，它們的內涵必須由原理來加以定義，然而原理卻又是這些語詞的組合。譬如質量只能從 $m=F/a$ 來定義， F 雖然可以根據虎克定律(Hooke's law)來定義，虎克定律本身的成立卻必須由牛頓第三運動定律來說明，但牛頓第三定律又預設了「力」的範疇或概念。因此，這些語詞的意義形成一個環環相扣的意義網絡—從本書的觀點看，就是一個「分疇系統」(位置雖可直接測量，但測量必應用參考架構和座標變換，因此必須涉及時間和空間的概念，這兩個概念也正是分疇系統下的兩個範疇)一直接對世界進行範疇的區分和定義，而不是從任何更基礎的感官經驗上歸納而得到。這意謂著科學理論中的詞項意義，並不是來自觀察，而是依賴著分疇；反過來看，分疇的事實，也只能由科學理論的詞彙集中傳達出來。

翻開任一本古典力學教科書的目錄，我們將會頻繁地遭遇許多基本的和次要的範疇語詞。除了這類語詞外，目錄中也有許多像「自由落體」、「拋射運動」、「圓周運動」、「震盪」一類的詞項，都不能用一般意義去掌握，必須在學會原理和諸定理後才能理解，這類詞項是主題分類下的產物，和各基本範疇形成樹狀結構的種類關係。根據分疇分類特徵，相關語詞將集成古典力學理論的詞彙集。就它們的彼此相關、互相定義的特徵來看，我們又稱之為「詞彙結構」。明顯地，詞彙結構是分疇分類在語言層面的反映，其中的語詞都是各種範疇語詞或種類名稱。

原理、定理、理論說明與預測和詞彙結構都是表達系統的一部分。讓我們先以古典力學教科書的內容為實例。我們將會看到這些古典力學教科書裏所介紹的力學理論，不僅其編排的結構吻合概念的分疇與分類以及模型的分類結構，同時也包含不同的古典力學「理論版本」。教科書通常不只介紹牛頓力學的理論版本，也介紹了漢彌爾頓的古典力學版本，只是沒有以「理論版本」的概念來區分它們。

¹¹教科書一開始也對這些概念進行解釋，但是，教科書作者未必會認同我們所指出的「詞彙結構」之觀點，這是因為教科書的內容並不在探討哲學，而是介紹科學；作者的目的也不在於分析理論結構，而是在教導理論內容。儘管如此，一本教科書(Marion, 1988)仍然寫說：「距離從幾何觀點中可以直觀地理解；時間則被視為絕對量，能被任意觀察者所精確定義。可是，在相對論中，我們必須修正這些牛頓觀念。距離和時間概念的組合允許我們定義質點的速度和加速度。第三個基本量，質量，需要再加以精心定義，我們將在討論牛頓定律時給出。」(p. 43)顯然這個作者抱持類似詞典結構和意義網絡的觀點。

陸、「原理」做為最高階層的表達和古典力學的兩種原理

以三本不同年代的古典力學教科書為例：(A) 馬利翁(J. B. Marion),《質點和系統的古典動力學》(*Classical Dynamics of Particles and System*, 1988)；(B) 諾伍德(J. Norwood),《中級古典力學》(*Intermediate Classical Mechanics*, 1979)；(C)高德斯坦(H. Goldstein),《古典力學》(*Classical Mechanics*, 1950)。B和C教科書中，第一章都是以「原理」為名而介紹向量、張量等數學工具，並且把牛頓定律、質點力學納入這一章中；A教科書雖沒有在章名中使用「原理」一詞，但第一章同樣是介紹數學工具，第二章則以「牛頓力學」為名，討論單質點的運動等式，顯然，它也是「原理」的介紹章節。除此之外，三本教科書均在不同順序的章節裏討論了漢彌爾頓原理和拉格朗日等式，同樣也視它們為基本原理，能夠產生和牛頓力學不同但等值的力學等式。在介紹了這些原理之後，才開始討論應用這些原理的種種「運動」：震盪、重力現象、向心力運動、質點系統運動、剛體運動等等。如此，我們有必要看看：這些教科書所謂的「原理」之實際內容是什麼？

《質點和系統的古典動力學》一書的第二章第二節介紹「牛頓定律」，作者列出牛頓定律的傳統形式(p. 44)¹²：

1. 除非受力作用，否則物體保持靜止或等速運動。
2. 受力物體，以動量變化和時間的比率等於力量的方式而移動。
3. 如果兩物體彼此施力，力量的大小相等、方向相反。

作者接著從第二定律的敘述中導出第二定律的數學等式：

$$\mathbf{F} = \left(\frac{d\mathbf{p}}{dt} \right) = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \frac{m d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (\mathbf{p} = m\mathbf{v})$$

其中， \mathbf{p} 表動量（是一種向量），等於 $m\mathbf{v}$ ； m 是物體質量， \mathbf{v} 是物體速度向量， \mathbf{r} 是從參考架構原點到物體位置的位置向量¹³。

¹²讓我們也引出作者的英文原文(可和第五章牛頓原文英譯作比較):「1. A body remains at rest or in uniform motion unless acted upon by a force; 2. A body acted upon by a force moves in such a manner that the time rate of change momentum equals the force; 3. If two bodies exert forces on each other, these forces are equal in magnitude and opposite in direction.」

¹³ $\mathbf{r} = x_1\mathbf{e}_1 + x_2\mathbf{e}_2 + x_3\mathbf{e}_3$ ； $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ 分別是參考架構 x_1, x_2, x_3 軸的單位向量。

作者接著也討論第三運動定律的數學形式，它可以建立在動量的概念上，即：

$$p_1 + p_2 = \text{常數}；\text{或者} \left[\frac{d(p_1 + p_2)}{dt} \right] = 0$$

這個等式比牛頓第三運動定律更為普遍，因為後者只斷說隔離外界的兩個質點彼此互動的動量守恆，而這個等式則斷言一切互相作用物體的動量守恆。現在，牛頓第三定律只是這更普遍性的線性動量守恆 (conservation of linear momentum) 之特例。

第三節作者介紹「參考架構」，第四節運用很多例題來闡明質點的運動等式 (即第二定律的應用)，第五節則從牛頓定律中引導出線動量、角動量和能量三者的守恆定理。這些乃是「原理」的相關項目¹⁴。

第六節討論「能量」的概念，在此作者說：「能量概念在牛頓時代不如今天般流行。稍後我們將研究兩個不同於牛頓的動力學新公式，建立在能量上一拉格朗日和漢彌爾頓方法。」這裏有兩項暗示：首先，先前所介紹的牛頓力學是以「力量」或「動量」為基本概念而建立起來，能量則是衍生的概念；其次，我們可以拿「能量」為基本概念來重新表述牛頓力學，這正是拉格朗日和漢彌爾頓運用的方法。第六章的主題即是漢彌爾頓原理¹⁵，它可以敘述如下(p.192)：

在動力系統可以在一個特別的時間間隔 (一致於任何條件) 內從一點移動到另一點的所有可能路徑中，它所遵循的實際路徑是那一條能夠使動能和位能之間的時間間隔積分最小化的路徑。

¹⁴當然，作者還介紹了其它一些「原理」。如在敘述「慣性質量」(inertial mass) 和「重力質量」(gravitational mass) 兩個概念後，引入了慣性質量和重力質量精確相等的「等價原理」(principle of equivalence)(p. 47)；以及在介紹參考架構後，引入了「牛頓相對性原理」(principle of Newtonian relativity)：它是說牛頓定律在一個參考架構有效的話，則對另一個相對於第一個參考架構而等速運動的參考架構也同樣有效(p. 48)。

¹⁵漢彌爾頓原理即「最小作用量原理」(the principle of least action)的精確公式，是建立在「能量」和「路徑」的概念上。最小作用量原理是十八世紀時，在形上學和目的論的觀點下所產生的一個觀念，因為科學家們認為上帝創造世界，應該以最節省、最簡單的作用來推動世界。教科書作者將漢彌爾頓原理安排在第六章，乃是因第七章後的「向心力運動」、「質點系統的動力學」、「非慣性參考架構的運動」、「剛體動力學」、「雙重震盪」等等主題，作者都運用了拉格朗日與漢彌爾頓的方法和概念。而第三章的「震盪」、第四章「重力」則是在牛頓構述的架構下來討論。第五章〈變分法〉則是拉格朗日方法所需的數學工具。

透過變分演算，漢彌爾頓原理可以表為如下的數學形式：

$$\delta = \int_{t_2}^{t_1} (T - U) dt = 0$$

其中 T 表動能 ($T=(1/2)mv^2$)，U 表位 ($U=(1/2)kx^2$)，而 δ 是變分演算的縮寫記號¹⁶。從漢彌爾頓原理的數學形式可以引導出拉格朗日運動等式如下：

$$\left(\frac{\partial L}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{d}{dt} \right) \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) = 0 \quad i = 1, 2, 3 \dots$$

其中， L 稱作拉格朗日函數¹⁷。從拉格朗日等式我們可以再得到如下結果，它同一於使用牛頓力學所得到的結果：

$$m(d^2x/dt^2) + kx = 0$$

如此，教科書證明了使用能量為基本概念以及漢彌爾頓原理為基本原理所得到的力學理論，等值於使用力量為基本概念以及牛頓三大定律為基本原理所得到的力學理論。作者認為，漢彌爾頓原理甚至比牛頓等式更基本，因為它能「被應用到廣大範圍的物理現象（特別是包括場(fields)的物理現象）—那些現象通常不能和牛頓等式聯結在一起。」(p.190)但作者也強調：「漢彌爾頓原理沒有提供我們新的物理理論，但它容許很多個別理論被單一的基本設準(basic postulate)所完滿地統合起來。....的確，漢彌爾頓原理是物理理論中最優雅且廣泛的原理之一。」(p.190)上述介紹暗示了一個理論是由一些基本原理所建構起來的，而總是存在著從不同的基本原理中建構出等值理論的可能性。

根據教科書，一個簡單的漢彌爾頓古典力學版本，即建立在能量概念上的基本分疇，可以圖示如下圖 4-5：

¹⁶亦即： $\delta J \equiv \left(\frac{\partial L}{\partial a} \right) da$ 。

¹⁷拉格朗日函數 $L \equiv T - U = L(x_i, dx_i/dt)$ 。

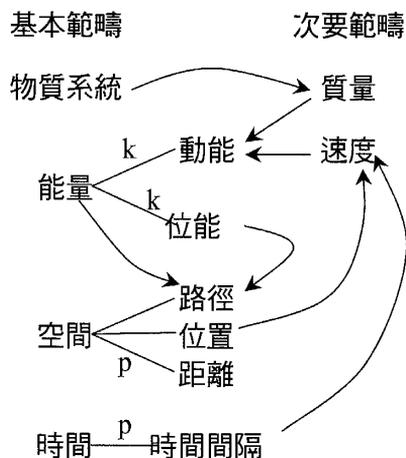


圖 4-5 說明：其中，動能和位能都是能量的一種，但它們也都屬於基本範疇。位置、路徑和距離都是空間的一部分，因此它是「樹狀區分」中的「整體一部分」區分；而時間間隔的概念也是時間的一部分。

比較起來，《中級古典力學》主要是用牛頓定律為基本原理來形構整個牛頓力學的理论版本，它只在第十一章介紹了漢彌爾頓原理。相反地，高德斯坦的《古典力學》則一開始即應用拉格朗日等式與漢彌爾頓原理來形構他的整個理论版本。這隱然和古典力學的難易程度有關，並涉及學習認知的問題，但在此我們不打算進入這個問題。

柒、定理做為模型家族的描述

教科書在敘述基本原理之後，緊接著開始討論像「震盪」、「重力」、「向心力運動」等等主題。以《質點和系統的古典動力學》第三章〈震盪〉為例，它考察的是「受限於單向度移動的單質點之震盪運動。我們假定一質點存在於穩態平衡的位置上，我們稱此位置為原點(origin)，如果質點從原點位置移開（只在兩種方向上），則有一定力量傾向於使質點恢復到它的原點位置。」(p. 98)這段敘述向我們描述了「震盪運動」，而使質點恢復原點的力量叫恢復力(restoring force)，它可用一個數學公式來定義：

$$F(x) = -kx$$

其中， F 是恢復力，因為恢復力指向原點（和質點運動方向相反），所以 k 是一個正常數。根據牛頓運動等式 $F=ma$ 我們可以得到：

$$m(d^2x/dt^2) = -kx$$

這個等式所代表的就是簡諧震盪器的運動等式，或說它定義了「簡諧運動」。因為簡諧震盪也是一種周期性的往返運動，它有周期(period)也就

有震盪頻率(frequency)，我們想要瞭解它的周期、頻率和位置的關係，則我們可以導出下列公式：

$$(d^2x/dt^2) + \omega_0^2x = 0$$

$$\omega_0 = 2\pi\nu_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \nu_0 \text{ 是頻率, } \omega_0 \text{ 則稱為「角頻率」(angular frequency)。$$

在討論簡諧震盪後，教科書繼續描述阻泥震盪、驅動震盪、電震盪(electrical oscillations)¹⁸、非線性震盪、平面單擺等等運動型態，一一用文字和數學等式來加以定義和解釋。好比，在阻泥力震盪一節，教科書一開始即說明：「由簡諧震盪器所代表的運動叫作自由震盪(free oscillation)；一但開始震盪，運動永不止息。這過度簡化了實際的物理情況，實際上，耗散或摩擦力最終將阻泥運動，使震盪不再發生。我們可以把代表阻泥力的項目併入微分方程中來分析這種情形的運動。」(p.106)結果我們就得到了¹⁹：

$$m(d^2x/dt^2) + \beta(dx/dt) + kx = 0 ;$$

$$(d^2x/dt^2) + 2\beta(dx/dt) + \omega_0^2x = 0$$

現在我們將這些數學等式所描述的「自由震盪」、「阻泥震盪」、「驅動震盪」等等所代表的物理系統和它們的「行為」看成是一個個模型；如此，定義這些概念的數學等式和解釋也就是「定理」，是一種「描述模型的命題」，也就是「模型的描述」(description of model)。顯然，一個模型的描述和定義並不是只能有一個單獨的數學公式，而是容許一群等值的數學公式或語言表達。現在，上述諸模型被歸屬在「震盪運動」這個類別下，因此震盪本身就代表著一個模型家族。繼而，直線和平面運動、震盪、向心力運動、質點系統運動、剛體運動等等一起組成整個古典力學理論的「模型族群」。

捌、理論說明預測和表達系統的樹狀結構

模型與實際現象之間的關係的表達什麼？吉爾主張把它稱作「理論假說」(theoretical hypotheses)。亦即理論假說是一種敘述，斷說了模型

¹⁸有趣的是，電震盪並不是一種質點系統，但是震盪的數學等式卻可應用到電震盪之上，只不過原來的變項都必須改成電阻、電容等等概念或函項。這是一種關係類比之具體實例。

¹⁹同理，第二個公式從第一個公式導出，顯示了位置、速度和角頻率的關係；第一個公式中的 b 是阻抗參數，必定為正數；第二個公式中的 $\beta=b/2m$ 稱作「阻泥參數」(damping parameter)。

和真實現象間的相似性。好比，「地球—月球系統中的地球和月球之位置和非常接近帶有和距離平方成反比的向心力之二質點模型。」(Giere 1988, p. 81) 我們認為用「假說」這個概念來表達模型和實際現象間的關係並不恰當。一來因為「假說」這個概念的複雜與含混，二來因為我們堅持模型並不是一種「假說」，不是「推測」，而是有經驗基礎（但又非歸納）的認知建構物(cognitive construct)。

「假說」或「假設」(hypothesis)的概念在傳統上有許多爭論，這些爭論包括科學究竟能不能包括假說？或者假說在科學裏是合法的知識嗎？甚至科學理論或整個科學是否都是假說性的？一般而言，有兩派立場。一派主張科學並不容許假說，即使包含假說也是暫時性的，科學知識必定是可充分檢證的命題，如牛頓著名格言：「我不妄作假設」(Hypotheses non fingo)²⁰。另一派當然容許假說的合法性，甚至認為整個科學都不過種是假說性質的命題。我們不擬介入這類爭論當中。因為，我們主張：一旦用模型來理解科學理論時，再使用假說的觀念就不恰當。根據科哲家對「假說」一詞的用法，特別是約定論者龐卡黑(Henri Poincaré)和否認論者波柏²¹，「假說」總是蘊涵了強烈的「約定」或「猜測」之意（「約定」之前要先「猜測」，「猜測」之後要有「約定」，因此，「約定」和「猜測」實為一體兩面），而且蘊涵了與「真實」的對立，至少是預設其在「真實」之外。然而，一旦我們把理論理解為透過「模型」來接觸實際現象，科學家對模型的建構，就不得不根據實際

²⁰內文中所附為拉丁原文，英譯為“I frame no hypotheses”，出自牛頓《原理》(*Mathematical Principles of Natural Philosophy*)第三冊最後的一般評註(general scholium)。牛頓對 hypothese 的用法和看法為何？可參看 Cohen, I. B.(1992), “Hypothese in Newton's Philosophy”。

²¹龐卡黑主張所有的科學通則(generalization)都是假說，所謂通則就是表為全稱敘述的普遍定律(Poincaré 1952, p. 150-153)，相當我們所謂的理論原理。可以說，龐卡黑主張科學原理都是一種假說而已。至於波柏，我們都已熟知他的「假設—演繹」法的否證論，從普遍定律中演繹出單稱敘述作為檢驗否證的對象。更精確地說，波柏認為科學理論雖無法完全被公理化，但可以用公理系統的觀念來理解。但對公理系統我們有兩種解釋方向：解釋公理為觀念的隱定義(implicit definitions)——也就是一種約定(conventions)；或者解釋公理中觀念（或原初語詞(primitive terms)）為「在邏輯外的常詞」(extra-logical constant)，具有經驗的意義，也就是「假說」。但如果觀念是經驗的，它的經驗意義來自哪兒？波柏指出，除了個體名稱可以「指物指稱」(ostensively referring)真實對象外，普遍名稱(universal names)顯然不能，它們只能借助其它普遍名稱來定義，換言之，利用「約定」。但科學理論如何因此不陷入約定論的困難呢？波柏應用他的方法學判定來解決——也就是使用否證的觀念。如此，科學理論的公理系統應該被解釋為假說，能夠演繹出單稱敘述，和否證一起構成科學的方法學規則(Popper 1959, pp. 72-75)。

現象的經驗，雖然包含了想像與投射成份，但並不是一種「猜測」或「約定」。

模型和實際現象間的關係，除了不是一種「假說」之外，其實際呈現也不是如吉爾所舉例般地笨拙。事實上，歷史上大部分科學家不會主張理論和真實現象之間只是一種相似性，他們可能相信定律和模型直接地斷說了真實現象的行為。因此，在表達上，他們會說：「根據向心力的計算，月球將會在某時某刻出現在某某位置上」、或者「該跑車輪胎的抓地力通過 180°的彎道時，可以保持最大時速 120 公里而不致於衝出彎道」、「或者根據燃素理論，木材燃燒剩下灰渣，而且重量比燃燒前更輕，乃是因為木材中的燃素散逸入大氣中。」等等諸如此類的判斷。這些判斷與其稱為假說，不如說是「理論說明或預測」。根據這類例子，理論說明和預測有兩項條件：(1) 必定說及實際現象的某物件；(2) 必定包含了有關該物件的狀態之陳述和判斷（通常包括數據的呈現）。如此，理論說明和預測乃是聯結抽象、理想性的原理和具體、真實的現象之間的橋樑。從抽象原理到理論說明與預測，科學理論的表述系統也同樣呈現出一個樹狀分類的階層結構。

從牛頓運動定律，我們可以導出震盪、向心力運動、剛體運動等等「行為」或「模型類別」的數學等式；而這些模型類別又可以導出了許多不同種模型，如震盪可以包含自由震盪、阻尼震盪、單擺等等，對這些原理或模型的敘述，便構成了一個樹狀階層（以名稱來代表它們）²²：

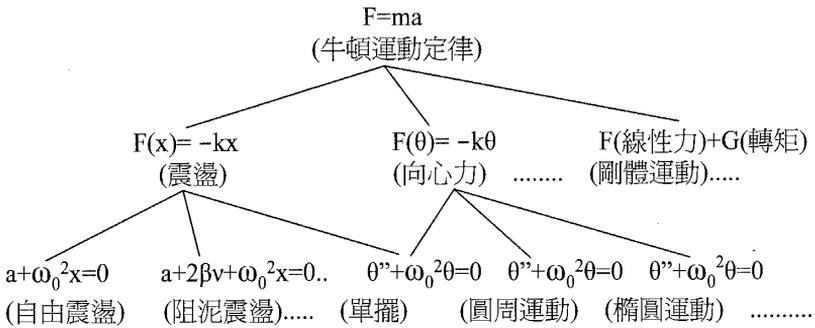


圖 4-6

將圖 4-6 一般化，納入理論假說和真實現象，我們可以描繪出表達系統之階層系統的形式架構（當然，這個形式架構也是一個理想化的模型）：

²²單擺是震盪運動和圓周運動之間的運動型態，可說其運行軌道是圓周性的往復震盪。所以在單擺的等式中， θ 必須限定在小角度的範圍內，理論上， $\theta < 90^\circ$ 都算單擺運動。單擺運動介於線性震盪和圓周運動之間也例證了類別的家族相似性。

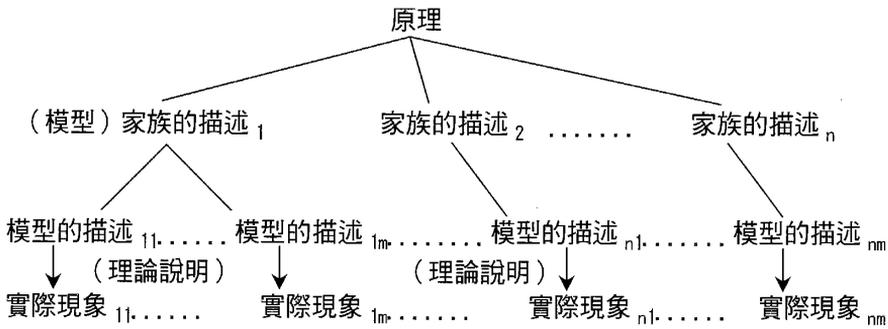


圖 4-7

同理，詞彙結構裏的單一語詞，譬如「力」，當它出現在原理中時，我們可以透過原理的等式來定義它；當它出現在模型描述中時，我們就會有不同的等式和相關量值來定義它；或者透過這些等式而可以進行實體化的定義或解釋，也就是程序性或操作性的定義（譬如透過震盪等式，設計一種儀器，可以藉由量測震盪頻率來計算出受力的量值，並在儀表上直接讀出）如此等等，顯然我們會有一個「力」的意含（內涵）家族。這個意含家族可能隨著表述系統的階層性而呈現出階層性。單一語詞的形式階層架構可以描繪如下圖 4-8：

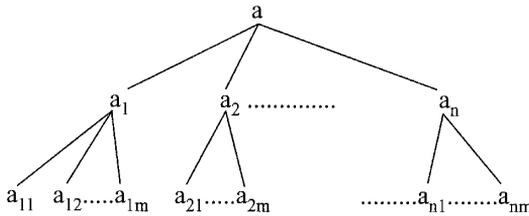


圖 4-8

事實上，單一語詞的意義總是整個詞彙結構的一部分，而且單一語詞總也是出現在原理、模型家族和模型的描述當中，因此詞彙結構正是展現在原理、模型描述的階層系統中。我們可以再用下圖的形式架構來表現整個詞彙結構。讓 $P[a, b, \dots, f]$ 表示一原理，有 a, b, \dots, f 等等語詞出現於其中； $M_i[a_i, b_i, \dots, f_i]$ 表一模型家族描述， a_i, b_i, \dots, f_i 分別是 a, b, \dots, f 等語詞的家族成員； $M_{ij}[a_{ij}, b_{ij}, \dots, f_{ij}]$ 表隸屬於 M_i 模型家族的模型描述； A_{ij} 表示對應於 M_{ij} 的真實現象； E_{ij} 表示說明 A_{ij} 和 M_{ij} 關係。如圖 4-9：

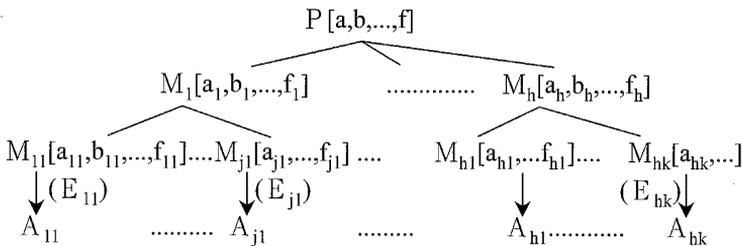


圖 4-9

表達系統是理論的語言面向，它的主要目的在傳達理論的意義。理論只有透過表達系統才得以彰顯，以致在傳統觀點中，表達系統就等於理論本身。但是，從模型的觀點來看，表達系統並不是理論的一切，然而，沒有表達系統，理論也無法形成。整個表達系統由不同層級的句式（分別稱作原理、定理和說明）構成的，各句式又由科學詞彙組成的（詞彙也因所在的句式之層級而顯現出層級性）。句式的階層系統恰對應著模型的階層系統，詞彙的層級性恰對應著分疇分類系統的層級性。換言之，在科學理論的語言面向和模型面向上，彼此間有內在結構上的同構關係(isomorphic relationship)。

玖、古典力學的理論版本家族

我們已經提出了「理論版本」與「理論版本家族」的概念，試圖以前者來取代孔恩所謂「典範的精煉」之理論面向，以後者來取代典範本身的理論面向。我們的企圖是否能成功？必須看我們對實際的理論版本之「重建」。本章已經從教科書的分析中，簡單地重建了古典力學的兩種版本。

在第二章闡述科學理論的分疇、分類和模型結構時，我們已經使用了一般物理教科書中的牛頓力學理論版本，我們可以說這是一個「牛頓式的版本」(Newtonian Version)。此外，在本章對理論版本的「表達系統」之展示中，我們也從教科書的介紹中，勾勒了一個漢彌爾頓的古典力學理論版本之分疇結構，我們可以說這是一個「漢彌爾頓式的版本」(Hamiltonian Version)。在漢彌爾頓式版本的分疇結構中，只包含「能量」（「動能」和「位能」）、「路徑」（屬「空間」範疇的一部分）和「時間」等幾個基本範疇，並不需要「力」和「動量」。漢彌爾頓原理在說明物件系統的運動狀態之變化過程時，並不是訴諸於不同方向的「力」所造成的速度變化和位置變化，而是考察初始狀態和最終狀態兩點之間，物件系統的所有可能移動路徑中，實際移動的路徑，具有動能和位能上的數學關係。「路徑」的範疇變成最基本的概念之一。顯然，這和牛頓式版本是相當不同的概念系統與世界觀。當然，我們也看到漢彌爾頓式版本的數學公式可以導衍牛頓式版本的定律，在計算上完全等值。而且，牛頓式版本也可以包納「能量」（包括「動能」和「位能」的概念），換言之，漢彌爾頓式版本和牛頓式版本仍是「相似的」。但是，這種計算等值式、可導衍性和概念相似性無法抹消其理解世界（物體的運動變化）的不同方式。沒錯，漢彌爾頓版本不是牛頓版本的革命，因為它並沒有預測出什麼樣的新奇現象是牛頓力學所無法預測或者預測值不相容；但它也不是牛頓版本的公式精煉而已，因為它提出相當不同的分疇系統、概念架構和理解方式，這些「內涵」上的差異，使得漢彌爾頓式版本不是牛頓理論的「另一種句式系統」或「另一種表達」，而是同一個家族的不同理論版本。

在第五和第六章中，我們將以牛頓和赫茲的力學原著本身來進行文獻分析，它們將更完整地從「原始科學文獻」中顯現出一個理論版本的整全結構。進而，從我們對這些具體的力學理論版本之分析中，一個古典力學「理論版本家族」的大致面貌也就能隱然地浮現出來。總之，我們至少有牛頓式版本、漢彌爾頓式版本、牛頓原版本、赫茲原版本，四種版本之間只具家族相似的關係，並沒有「共同的語意結構」——也就是，沒有共同的分疇分類架構和模型階層系統。

第五章 牛頓《原理》的理論版本

1680年代初，英國倫敦皇家協會(Royal Society of London)的維恩爵士(Sir C. Wren)、胡克(R. Hooke)和哈雷(Halley)三人討論著是否行星運行的軌道，可以從某種力量定律演繹出來。他們猜測這種作用於行星上的力量與行星和太陽之間的距離平方成反比¹。但，是否真有這種力量？它是吸引力或排斥力？是否真與距離平方成反比？都只是很初步的猜測，沒有人知道它是什麼，也沒人知道它和距離的關係能否被證明。

1684年8月哈雷到劍橋拜訪牛頓，哈雷向牛頓提出他們的問題。他問牛頓：假設行星指向太陽的吸引力和距離平方成反比，則行星軌道所描述的曲線會是什麼？牛頓直接地回答：橢圓。哈雷問牛頓如何知道？牛頓說：我已經計算出來了²。牛頓想找以前的論文給哈雷看，但沒有發現，他答應重寫一分並且寄給哈雷。1684年11月哈雷收到一份論文，標題為〈論物體在軌道上的運動〉(De motu corporum in gyrum)——這篇短文便是《原理》的前身，主要包含了克普勒面積定律的證明和曲線軌道的向心力和距離平方成反比的推算³。這篇短文讓哈雷大為震撼，他預見一個革命性的理論即將降臨，於是迫不及待地再度造訪劍橋，勸服牛頓將他的所有理論寫下，並承諾皇家協會將負責出版事宜。牛頓於是開始著手《原理》的寫作，經過三年廢寢忘食、全心全意地埋首研究，其間雖曾發生一些波折⁴，《原理》全書共三冊總算順利出版。一部現代科學史的「經典」和「革命性」巨著就此誕生了。在當時，能夠瞭解《原

¹ 當時在英國的知識環境普遍傾向「吸引力」的觀念，更早以前就被稱作「磁力哲學」(Magnetic Philosophy)。力量大小和距離平方成反比的想法則出於光學上的類比：當一光束從光源向某一方向發散時，它的光亮強度和距離平方成反比。以上參看 De Gandt(1995, pp. 3-6)。

² 簡介可以參看 John Roche(1988)；另看 Westfall(1980, ch. 10)、De Gandt(1995, pp. 7-8)均有此事的詳細報導。以下有關牛頓《原理》一書的誕生歷史，在大部分討論牛頓的科學史著中都有記載。當然 Westfall(1980)的《永不休息》(Never at Rest)的牛頓傳記是最豐富詳實的。此書另有縮節本，標題為《牛頓的一生》(The Life of Isaac Newton)大約減少了三分之二篇幅。

³ 〈論物體在軌道上的運動〉一文共有三個定義，四個假說和九條命題（四個定理和五個問題）。De Gandt(1995) 特闢一章來詳盡討論此文。

⁴ 主要是在牛頓完成第一二冊之後，胡克認為他比牛頓先行考察和距離平方反比定律為真，因此牛頓至少應該在序文上提及他的貢獻。哈雷用書信告訴牛頓有關胡克的要求，但牛頓大為憤慨，他不認為胡克在這方面有什麼貢獻，所有的計算都是他自己發展出來的。牛頓向哈雷威脅要撤消第三冊的出版。哈雷很快地安撫牛頓，終於第三冊在1687年順利出版。

理》的人並不多，但牛頓的聲譽和名望卻快速暴漲，牛頓理論也很快傳遍全歐⁵。

從這段《原理》誕生的歷史來看，太陽對行星有吸引力以及「和距離平方成反比」的觀念並不是牛頓首度獨創的，相反地，在當時的知識環境下，早已經成了氣候。許多科學家都曾投入研究，但為何榮耀桂冠歸於牛頓的頭上？是否牛頓的處理和思考有什麼獨特的地方呢？牛頓的理論證明了「和距離平方成反比定律」嗎？《原理》又如何獲致其巨大成功，而支配了其後三百年的科學？關於這些問題，我們的答案有三點：(1) 牛頓擁有建構「模型」與「模型階層系統」以及整合模型與數學計算的超凡能力，讓他超越同儕而證明了「平方反比定律」；(2) 牛頓在《原理》中理論版本不僅以精確的數學方法說明了經驗定律（克普勒定律），並建構一個龐大完整的模型分類樹來說明整個世界系統；(3) 牛頓的「模型分類樹」中可導出許多「可落實的模型」，在科學家的實驗中，都能一一落實並獲得印證，日後更克服不少異例。本章將論證第一和第二點，第三點見筆者另篇論文(Chen, Ruey-Lin(2003))。

壹、牛頓「風格」

我們對牛頓力學的印象，通常是教科書上所學到的 $F=ma$ （第二運動定律）或 $U=GMm/R^2$ （重力定律）這兩數學公式。當我們在解答習題時，只要將數據代入公式中，使用很簡單的代數（頂多是複雜一點的微積分）就可以求得。我們在解答時大腦中所意識到的大概是一系列代數符號和規則的變換。但這一套教科書的牛頓力學形象，與歷史上的牛頓和他的經典鉅著《原理》所呈現的東西一點也不像。《原理》呈現的是一系列的幾何圖形，所有的推算幾乎很少用到第二運動定律，百分之九十以上的篇幅在展示各種不同的軌道形狀都是遵從「重力和距離平方成反比定律」。牛頓顯示這套系統可以用來說明、溯測和預測種種天體和地球的現象：行星繞太陽公轉、月球繞地球公轉、彗星的軌道、海洋潮汐成因等等。換言之，牛頓演示了一整套十七世紀人們所念茲在茲、不斷想嘗試建構的「世界系統」。毫無疑問地，牛頓的「世界系統」相對於以前的所有世界系統，都是革命性的突破。

將天體和地球的現象用統一的原理來說明；斷言「萬有引力」存在，展示它具有種種十七世紀的人們匪夷所思的性質：無需接觸就能夠產生「力」的作用、可以跨越幾百萬公里距離、並普遍存在於所有物體之中、是所有物體的本有性質；以及提供了一個擁有完整數學演示的說明系統。這些特徵都是牛頓《原理》超越十七世紀所有科學家和科學著作的地方。為什麼？經過十六世紀的文藝復興，哥白尼革命和伽利略革命的衝擊，啟蒙思想大行其道，思想家、科學家莫不熱切試圖掃除中世紀傳承下來的一切「玄奧的」(occult)概念，機械世界觀應時而興，成為十七

⁵ 關於牛頓的成功和聲譽的傳揚，可參看 Gjertsen(1988)的簡介。

世紀的自然哲學／形上學／宇宙論的思想主流，人們相信自然事物通通可以應用「物質」和「運動」與運動產生的作用(action)來說明—微粒子的互相碰撞產生了世界的一切動態變化⁶。笛卡兒從他的沈思中提出了一個完整的機械理論，並試圖說明世界的一切事物。笛卡兒把「知識」定義為清晰分明的概念，以「我思考，故我存在」的經典反思，建立了知識大廈的基石。由於笛卡兒的成功，使他的知識論和方法論，成為十七世紀下半葉的標準（見第八章）。在這種思想氛圍下，牛頓的「萬有引力」概念實在是個相當大膽冒險的提議，天體和地面現象的統一對當時人們而言也是一個飛躍性的思考。一方面，「和距離平方成反比定律」在《原理》出版之前已有許多科學家投入研究，何以牛頓能後來居上？另一方面，「萬有引力」違反當時的思想潮流（譬如在《原理》出版之後，許多當時的大思想家和大科學家如惠更斯(Christiaan Huygens)和萊布尼茲都反對牛頓的「萬有引力」概念⁷，他們的觀點當然是「萬有引力」的概念違反了機械觀的思想。）為什麼牛頓仍然甘冒不諱？（事實上，牛頓的確也為這點而付出相當的心力和代價與笛卡兒學派周旋。）除了宗教上的理由之外，究竟他有什麼樣的知識或方法上的憑藉？這些問題都讓人想知道：何以牛頓竟能超出同輩的識見，跳出潮流的氣氛和十七世紀機械觀的藩籬，而提出這大膽、革命性的概念和科學系統呢？當然，我們可以很輕易地把答案歸諸於牛頓的天才，但是就算如此，我們也想知道這是一種什麼樣的天才？精研牛頓的科學史家柯亨(I. Bernard Cohen)的答案是：「牛頓風格」(Newtonian Style)⁸。

⁶ 關於十七世紀機械世界觀，參看 Westfall(1977), *The Construction of Modern Science: Mechanism and Mechanics*.

⁷ 參看第八章討論。另看 Hesse(1962, pp. 157-163)討論萊布尼茲的批評；Cohen(1980, pp. 79-83)討論惠更斯的反應。

⁸ 另一些科學史家如 Westfall(1971, 1984)、Dobbs(1975)則主張十七世紀思潮所亟欲排除的煉金術思想給了牛頓「萬有引力」概念的啟發，甚至煉金術思想就是「萬有引力」概念的根源；Dobbs(1988, 1991)後來更進一步主張牛頓的「神學」或「宗教」思想影響了他提出萬有引力的觀念，甚至「萬有引力」就是某種「神性」的「精神力量」(spirit power)，因為它能夠無摩擦地「穿透」(penetrate)所有物體，而且跨越幾百萬里（甚至無限）的距離而作用在宇宙的每一個地方和物體上，只有「神性精神力」才能辦得到。柯亨(1980, 1982, 1988)基本上是反對這樣解釋，他另從《原理》本身的深入閱讀中提出了所謂的「牛頓風格」觀點。柯亨並不是拒絕煉金術和神學在牛頓思想和生涯中的影響，但他反對「萬有引力」概念是源自煉金術思想、或者以煉金術思想來「合法化」萬有引力概念的觀點。在本文中我們並不打算去評量哪一種講法更正確，那是史學考證的事務。不過，因為柯亨的觀點和本書的觀點有相當類似之處，所以我們打算簡單地討論一下柯亨的研究。

什麼是「牛頓風格」？就是牛頓在《原理》呈現的作科學的方式和特色。柯亨以為，牛頓風格是「區分數學領域和物理實在(physical reality)領域...數學和物理思考的混合...」(Cohen 1982, p. 22)所謂「數學論域」是指牛頓在《原理》第一二冊所展現的諸命題；物理實在的領域是指將第一二冊的數學命題應用到第三冊的世界系統一具體的物理現象上。依柯亨的說法，「牛頓風格」共分成三個階段：第一階段是不涉及實際物理現象的數學建構(mathematical construct)，因為它的條件完全是由心智所規定或賦予的，所以是一種「心智建構」。譬如牛頓在一開始所考慮「單體問題」，是一種「質點受到指向不動定點的向心力作用」之系統。這種指向不動定點的向心力單質點系統在自然界幾乎是不存在的，「向心力」是這一階段的主要用詞。第二階段則將數學系統和物理宇宙進行比較，把「心智建構的元素翻譯成它們的物理等價項。如此幾何空間、數學時間和質點被轉換成物理空間、現象時間和具有質量的天體。」(1982, p. 50)。因為牛頓「不只是將自然中發現的系統簡化或理想化，而是他想像地認知一個數學上的系統是自然系統的平行或類比(parallel or analogue)」(1980, p. 63)這個階段的主要例子是「雙體和多體問題」：在雙體情況中，物體並不是由於向心力指向一不動定點進行移動，而是彼此互相「吸引」(attraction)環繞重力中心運轉。在此階段引入了第三運動定律，因為在真實的物理世界中，受到力量作用的物體總是會對作用者產生一反作用力。換言之，在第二階段中，牛頓將第一階段發展的數學技術應用到更接近真實世界的雙體、多體、甚至有尺寸和有形狀的物體上，而且牛頓也不再使用「向心力」這個詞，此時他主要用的是「吸引力」(attraction)。最後的第三階段不再是純數學的考察，而是應用到由實驗和觀察揭露的真實世界上，正如《原理》的第三冊所呈現的諸命題。用柯亨的話來說是「由使用『自然哲學的數學原理』來發展『世界系統』」(1982, p. 51)。在第三階段，牛頓將吸引力擴展成「萬有引力」(universal gravity)，但是他並沒有進行任何存有論的研究，何以能推出這個概念呢？正是因為這種「牛頓風格」。牛頓風格讓牛頓從純數學的「向心力」來逼近混合數學和物理的「互相指向的向心力」之「吸引力」，進而由於這「吸引力」能說明世界一切現象，所以它可以根據第三冊的「規則2」而合法地擴展為「萬有引力」。如此，牛頓無需追究萬有引力的成因，就可斷言「萬有引力真實存在」，因為在第二和第三階段已經說明、溯測和預測了世界的種種現象，這「就夠了」。

柯亨所謂的「牛頓風格」，其實就是構思「模型」與整合模型和數學計算的模式。從我們的觀點看，柯亨所謂「階段一和階段二」的工作相當於「建構高層次的模型」（基本分疇、原理、定理等等）部分；「階段三」相當於「將模型應用到真實現象」上，也即是提出「可落實模型」來說明具體現象。所不同的是柯亨區分了「階段一」和「階段二」，「階段一」是純數學建構，「階段二」則混合了物理思考。從本書的觀點看，階段一和階段二並沒有什麼清楚的界線，即便雙體、三體或多體系統相對於複雜的真實現象而言都只是一種「模型」。柯亨強調「階段一」是

純粹的心智和數學的建構，在自然世界中不存在這樣的系統，物理意義在階段二才引入。其實，就階段一的「向心力之單體系統」而言，也不是自然完全不存在相似於這種模型的現象。想像一根繩子綁著一塊石頭，繩子另端固定在一定點上，石頭進行圓周運動的情況；或者兩物體質質量相差太大時，重力中心和大物體的質心位置沒有多少差別的情況。換言之，只要是可落實的模型，不管階段一或階段二，就可以應用到實際的自然現象上。總之，我們要說的是：柯亨所謂的「階段一」和「階段二」並沒有實質上的差異，頂多只是不同的模型種類。

貳、牛頓的認知跳躍和平方反比定律模型的建構

事實上，柯亨的「牛頓風格」也是一種對《原理》所呈現結果的「模式化」。柯亨的模式和本文所提出的模式都顯示了《原理》乃是牛頓建構「模型階層系統」之卓越能力下的產品。因此讓牛頓超越時代限制的根本原因或者方法上的憑藉在於牛頓的獨特能力上，也就是「理想化的認知模型」之構思能力，它的典型產品乃是透過幾何微積分方法從曲線軌道來引導出「和距離平方成反比」定律：包括以無限小的長方形來逼近曲線軌道、應用力的平行四邊形來證明克普勒面積定律以及建立任意曲線的向心力運動模型。因為只有在牛頓建立了這套基本的數學架構之後，他才能將之擴展到各種不同類型的曲線上，進而建立各種不同種類的運動模型，再應用到真實的物理現象上。當這些目標都能達成時，牛頓也才敢大膽地宣稱「萬有引力存在」，畢竟支持它存在的堅實基礎在於牛頓的整個數學模型系統可以有力恰當地說明整個世界。這意味著牛頓系統突破的關鍵點在於上述三個「數學（幾何）模型」的建立。因此，讓我們重新來看看牛頓如何逐步地建構這些「模型」。

第一書的第一節牛頓討論「量的全體比率方法」，也就是微積分方法。在一條曲線內外劃分互相平行的矩形是人人都能想到的幾何圖形，如圖 5-1：

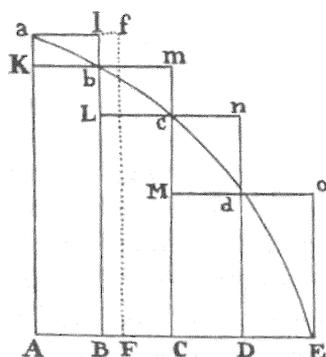


圖 5-1

但牛頓進一步思考了這些矩形的寬度遞減到無限小的程度，想像曲線外的所有平行矩形形狀（面積）和曲線內的所有平行矩形的形狀（面積）趨近相等，兩者的互相逼近也就相當於曲線所描出的形狀（面積）。這是牛頓的「數學模型」的第一次跳出常人的認知限制。

緊接著，力的平行四邊形之分析已是當時流行的作法：力是向量，其量由箭頭長度來代表，方向由指向來代表。當兩個力作用在同一物體上時，作用結果可以用平行四邊形來分析，也就是其斜邊之長度和方向等於兩力合力的總作用。牛頓看到了這個力的平行四邊形分析法可以用來證明克普勒面積定律恰在「向心力」作用的情況下才能成立。也就是當一物體因其慣性而進行直線運動時，在一點上突然受到一指向某定點的力量之作用，根據力的平行四邊形，這力量將改變物體的運動方向。假想物體每進行一段等長的距離（速度相等、時間間隔相等）即受到向心力之作用，如此物體軌道將形成一多邊形，此多邊形由許多三角形合成，每個三角形的面積都相等。進一步想像這多邊形的每一段趨近於無限小，以致讓多邊形趨近一圓滑曲線，如此圓滑曲線上的物體在任何相等的時間間隔內所掃過的面積必然相等。這是牛頓的第二度在建構模型上的認知跳躍。

跟從面積定律和向心力運動的分析，牛頓很自然地再跨出「巨人般的跳躍步伐」，以力的平行四邊形來分析在任意曲線軌道上運動的物體，其所受的向心力和它距中心的距離之比例關係——也就是證明「和距離平方成反比定律」是成立的⁹。這二個「跳躍」被呈現在牛頓《原理》的第一冊第二節中，以下我們將作詳細的展示。

在第二節中，命題 1、2、3、6 共同建構了一個向心力運動的數學（幾何）模型。這裏的幾何模型並不是作為物體運動的視覺圖形，而是作為一種演算的數學建構（或者幾何表徵）：亦即將時間、力、距離等等物理量都以幾何圖形上的線條、面積和比例來代表。

命題 1 [定理 1]：旋轉物體由指向不可動的中心，在一不可動的平面上所劃過(describe)的區域，和它們的經過時間成比例。

⁹ 必須一提的是，使用力的平行四邊形—慣性力和指向中心的向心力之合成—來分析「向心力和距離平方成反比」的靈感最初是得自胡克的建議。當然胡克的建議並不是在抽象層次上的向心力和任意曲線，而是具體的天體，行星在軌道上運行的慣性力（切線方向）和指向太陽的吸引力。胡克在 1679 年給牛頓的信中寫道：「現在所剩的是去知悉曲線（非圓形也非同中心）的性質，該曲線由一指向中心的吸引力從切線上造成下降的速度……」（轉引自 Cohen 1988, p. 36; De Gandt 1995, p. 159）。或許這也是日後胡克指責牛頓「剽竊了他的構想」的原因之一。當然，必須承認牛頓的確從胡克的信中得到靈感，但這模型本身的複雜分析也不是胡克的能力所能達到的，而且胡克的建議並不是在抽象層面上的任意曲線。

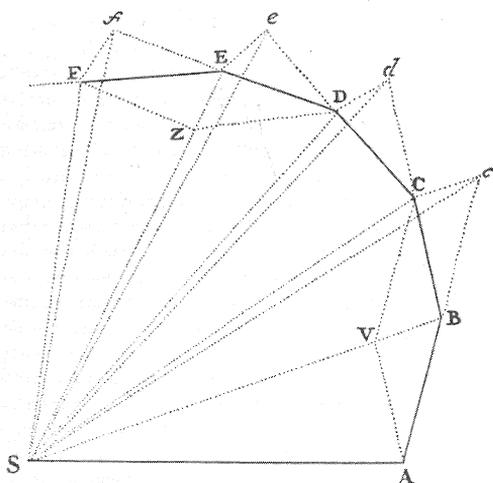


圖 5-2

由這個圖形，牛頓證明克普勒的「面積定律」(law of area)：在任何相等的時間間隔內，半徑掃過的面積必然相等。其中 AB 、 BC 、 CD 、 DE 、 EF 代表時間間隔相等的區間，各自線段長短則代表速度大小。如此各三角形的面積均相等。舉例來說，有一物體時間區間 T 之間由 A 等速抵達 B ，如果維持不變，它將在下一時間間隔時行經 Bc 線段，而且 $Bc = AB$ 。假設它在 B 點突受一指向 S 的力量作用，使它在 BS 方向移動 cC 的距離，換言之，物體現在在 C 點。連接 BC ，因為 cC 和 SB 平行，所以 $\triangle SBC$ 和 $\triangle SBc$ 面積相等，又 Bc 等於 AB 而且在同一直線上，所以 $\triangle SBc$ 等於 $\triangle SAB$ ，故 $\triangle SBC = \triangle SAB$ 。同理，所有三角形面積均相等，當 AB 、 BC 、 CD 諸線段趨近無限小時，多邊形將變成曲線，克普勒定律仍然成立¹⁰。

命題 2 [定理 2]：每個在某一平面的曲線上移動的物體，有一半徑指向一中心，此中心要不是不可動，就是向前進行直線等速運動，若物體環繞該點所劃出的區域和時間成比例的話，則它被一向心力所驅動。

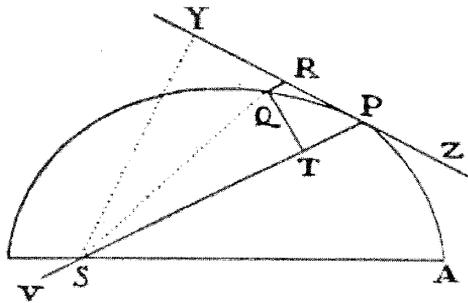
命題 2 則斷說如果命題 1 成立的話，則必然存在一向心力在作用。換言之，上述指向 S 的力是一向心力。

命題 3 [定理 3]：每一物體，其環繞另一物體中心運動，其半徑所劃過的區域和時間成比例，而且由指向另一物的向心力所驅動，則其加速力是由另一物所推進的。

¹⁰牛頓在這一命題上的解說已經相當清楚了。柯亨從一條直線上的諸等長間隔和線外一點的三角形面積均相等開始，逐步地擴展到多邊形，做了更詳細更易理解的展示(Cohen 1988, pp. 29-32)，相當值得參考。柯亨在這篇文章中主要考察牛頓第三定律和萬有引力的概念。

命題 3 斷說向心力由另一（不動）物體所提供。這個命題埋下了將物體所受的向心力和重力視為同一的伏筆。

命題 6〔定理 5〕：在一無阻抗的空間中，一物體環繞一不可動的中心 S 的任何軌道 APQ 運行，在無限小的時間內劃過一弧 PQ ，直線 QR 平行於直線 SP ，代表由 P 指向 S 的向心力所造成的加速運動，則 QR 和物體劃過 PQ 的時間平方成反比¹¹。見下圖 5-3。



在這個命題和幾何圖中，牛頓發展了幾何計算模型可以證明向心力和距離的平方成反比。牛頓的思路大致如下：(1) 物體沿著軌道 APQ 運行，在非常小的時間內，經過弧 PQ ，可以看成等值於：物體以等速經過直線 PR ，再以加速運動經過直線 RQ ，這加速運動是由於向心力而產生的；(2) 根據伽利略的自由落體公式， RQ 和時間的平方成比例，也就是與向心力和時間平方的乘積成比例；(3) 一物體穿過軌道的時間，根據面積定律，和半徑掃過面積成比例，換言之，和 $QT \cdot SP$ 成比例；(4) 所以，向心力與 $(QT \cdot SP)^2$ 的乘積與 RQ 成比例，相當於

$$F \propto RQ / (QT \cdot SP)^2$$

當時間趨近無限小時， PQ 也趨近無限小， RQ 、 QT 同樣趨近無限小，所以

$$F \propto 1/SP^2$$

如此，牛頓證明了向心力和距離平方成反比如何應用幾何方法推算出來。把這幾個命題的成果加推廣，就得到：在任意曲線上運動的物體，依其慣性所產生的速度沿著曲線的切線方向前進，但因為不斷受到向心力的作用，物體在軌道上運動的每一瞬間點都由於向心力所產生的加速度而改變物體運動方向，以致它保持在一圓滑曲線上運動。根據力的平

¹¹牛頓原文相當不易瞭解。我參考 De Gandt (1995), pp. 10-13 的解說而改寫。

行四邊形分析，我們可以計算慣性速度大小和向心速度的大小而決定物體的下個位置。進一步，此向心力和距離平方成反比。

由上述分析，我們可以看到這四個命題以幾何方法演證了「和距離平方成反比」定律，而且共同描述了一個向心力運動模型¹²。但這個運動模型其實是個「模型家族」，在這個模型家族下，牛頓繼續演繹出其家族成員：包括「命題 5〔問題 1〕：已知一物體在任何位置上的速度，該物體行經一個已知圓形，而且由指向同一中心的向心力所驅動，求此中心點。」「命題 7〔問題 2〕：一物體繞一圓周運行，求其指向任何一點的向心力定律。」「命題 8〔問題 3〕：如果一物體在一半圓上移動，求指向一遠距離定點 S 的向心力定律。」「命題 9〔問題 4〕：如果一物體繞一螺旋軌道運行，求其指向螺旋中心的向心力。」「命題 10〔問題 5〕：如果一物體在一橢圓軌道上運行，求指向橢圓中心的向心力定律。」可以看到這五個「問題性的命題」雖然求解目標不同，但每個都展現了不同的曲線運動軌道，也因此是不同的運動模型，也都可以由先前的「曲線軌道的向心力模型」引導出來，所以它們都是「向心力模型家族」的成員。此外，第三節所討論的「偏心圓錐曲線運動」也是向心力運動的家族成員。在這一節中，牛頓討論的是非指向中心(centre)的向心力一如指向橢圓曲線的其中一焦點(focus) (命題 11)、指向雙曲線軌道的焦點運動 (命題 12)、指向拋物線軌道的焦點之運動 (命題 13)。

邱崎南(Paul Churchland)以月球繞地球的力量分析為範例，畫出了一個月球以橢圓軌道繞地球運動之「認知模型」圖(參看下圖 5-4)，清楚地標示出向心的下落運動向量和慣性力的切線運動向量如何造成月球的橢圓軌道(Churchland 1995, p. 119)：

¹²「命題 4」所談的是一個多物體系統，它的內容是「以同等運動環繞不同的圓周而運行的諸物體(bodies)，它們的向心力都指向這些同心圓的中心，則在相同時間內，每一個的向心力和半徑所劃過的弧的平方成比例。」這是太陽系的模型，牛頓想用這個命題來說明太陽系統。然而它出現在這兒有點突兀，因為它是一個多物體系統，尚不能得到良好的證明。

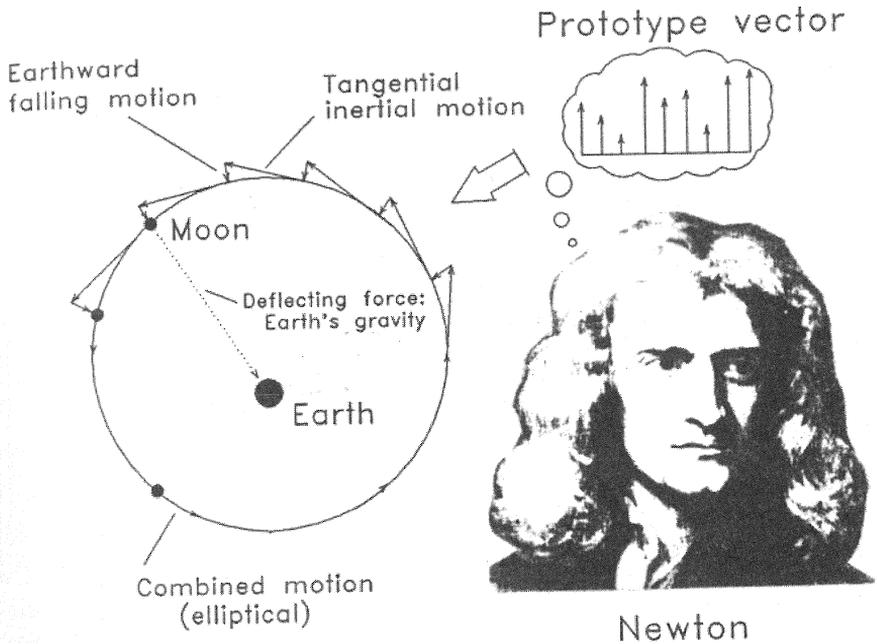


圖 5-4 說明：這個圖代表了牛頓腦中的「認知模型圖」，右側的「原型向量」(prototype vectors)中九個向量箭頭代表這個認知模型的複雜度（相較於笛卡兒的渦漩模型只有七個原型向量）。因為原型向量是邱崎南應用「認知空間」理論來建構認知系統的基本概念，它屬於不能意識的「心智密碼」層次的表徵理論，在此不予討論。

邱崎南解釋說：「牛頓看月球更像是一個迴旋的石頭，位於一條弦線的末端，在那兒，地球的重力扮演無終止地拉著弦線的角色。」(1995, p. 118) 邱崎南圖形是更清楚簡潔的模型重構，他的解說類比於綁著繩線的石頭旋轉，也有助於我們理解橢圓向心力模型。不過，邱崎南的圖形和解說只能看成一種輔助，而不是牛頓心中真正浮現的認知模型。筆者並不確定牛頓是否曾在向心力問題上透過具體事物的類比來構思他的模型，不過從既有文獻看，牛頓心中雖然有一個橢圓向心力運動的認知模型，但他的認知模型相當抽象和幾何化。這是他的獨特風格，也是使他超越時代的奧秘—因為在十七世紀當時，主導的機械觀正是一種類比的世界模型，彈子球碰撞和笛卡兒的渦漩模型都是應用類比的高度理知產品。我們懷疑牛頓如果只單純地在行星系統上應用類比思考，他是否能超出那個時代的限制？

牛頓心中的認知模型不是類比性質的，而是強生賴爾德 (Johnson-Laird) 所謂「空間規劃模型」(model of space layouts) 之高度精緻化和理想化的表現 (Johnson-Laird 1983, p. 156)。也就是從幾何化的微積分和力的平行四邊形、經克普勒面積定律到任意曲線運動上的「向心力和距離平方成反比定律」，逐步地建構出來的「幾何空間的認知模型」。以這個認知模型為基礎擴展成一個巨大的數學物理系統，融貫地說明了

天體和地面的種種現象，配合牛頓設立的「規則 2：對相同的自然效果，盡最大可能地指派相同的原因」，使得牛頓不惜違逆當時權威的機械世界觀而大膽地提出「萬有引力」的概念，並斷言「萬有引力」「真實存在」。總而言之，理想化模型的建構正是牛頓理論超越時代的方法和認知要素。

參、《自然哲學的數學原理》之結構

《原理》除了包含許多超凡的理想認知模型外，還提出了一個劃時代的革命性理論，也示範了「做」科學的經典方式，並呈現了現代形式的科學理論。換言之，從理論內容到方法和形式，牛頓的《原理》都扮演著「典範」的角色。我們可以說，《原理》一書呈現了完整的牛頓力學理論版本，相當完美地例證了本書所提出的理論結構之模式。換言之，本書的理論結構之模式將會反映在《原理》這本鉅著當中。這意味著我們可以使用本書發展的理論結構模式來「模釋」牛頓的力學理論版本，以佐證它的說明力。這也等於說，牛頓的力學理論版本將可以透過《原理》一書而被分析出來。

《原理》¹³一書分成四大部分：「定義和公理（或運動定律）」(Definitions and Axioms, or Laws of Motion)、「第一冊：物體的運動」(Book 1: The Motion of Bodies)、「第二冊：（在阻抗媒介中的）物體運動」(Book 2: The Motion of Bodies (In Resisting Mediums))、「第三冊：世界系統」(Book 3: System of the World)。「定義和公理」部分包括基本詞項的定義和「評註」(Scholium)以及三大運動定律（公理）、六個推論(corollary)和「評註」；其它三冊則均由下列項目一起組成：中介定理(lemmas)，命題(propositions)，命題的演算、證明、闡述和推論，以及每隔幾條命題後附加的「評註」。

從分疇分類的角度粗略地看來，很明顯地，「定義和公理」部分呈現出牛頓版本的基本分疇，第一、二冊所討論的內容是牛頓版本的主題分類或模型分類。在基本分疇之後，牛頓將運動分成兩大種類：無阻抗媒介的運動和在阻抗媒介中的運動¹⁴。在這兩大運動種類之下，牛頓建

¹³以下所分析的是 Florian Cajori 翻譯，它是 Motte 譯本的修訂版，美國加州大學 1962 年版本，紐約綠木出版商(Greenwood Press, Publishers) 1969 年出版的平裝本。文中頁數均是此版本的頁數。

¹⁴這個區分的歷史背景是為了駁斥當時佔優勢的渦漩理論(the theory of vortice)一笛卡兒用來說明世界系統的假說。在這個假說中，世界（太陽系）的諸行星、衛星和彗星被假想存在一個充滿「流體」(fluid)的空間（或天空(heavens)）中運行，諸星體本身並無任何動力，而是由這些流體來帶動（因此說星體的「運動」並不恰當，更恰當地說法是，它們被移動(are moved)），這些流體的運動正如一般的流體渦漩。參看笛卡兒(Descartes 1983), *Principles of Philosophy*, pp. 93-98。牛頓把「流體」看成媒介，探討了媒介中的運動定律，

立了許許多多運動模型。「定義和公理」以及第一二冊合組成牛頓版本的整個模型系統。第三冊呈現的則是此模型系統應用到實際現象（太陽系、世界系統）的成果，亦即應用第一二冊發展的運動模型來說明和預測太陽系的天文觀察資料。從表述系統的面向來看，「定義和公理」顯然扮演「原理」的角色；而第一二冊的諸多「命題」則是描述了運動模型；第三冊的「世界系統」中的「命題」就是「理論說明」，其斷定模型和真實世界的模映關係。上述粗略觀察必須補以更細密的分析才能恰當地模釋牛頓版本。

肆、定義和公理

《原理》由「定義和公理」展開。在「定義」部分，牛頓提出了八個核心詞項的定義。前五個是：

- D1. 「物質的量（即質量）」(the quantity of matter)是體積(bulk)乘密度(density)的量測。
- D2. 「運動的量（即動量）」(the quantity of motion)是質量乘上速度(velocity)的量測。
- D3. 「物質的慣性力」(inertial force of matter)是內在每一物體內本有的阻抗能力，維持物體在目前的狀態—或者靜止，或者在一直線上等速移動。
- D4. 「作用力」(impressed force)是施加上物體上的作用(action)，為了改變它的靜止或等速狀態
- D5. 「向心力」(centripetal force)使物體被拉向或驅向或傾向作為中心(centre)的某一點¹⁵。

接下來的三個定義是向心力的分類：「向心力的絕對量」(the absolute quantity of a centripetal force)和、「向心力的加速量」(the accelerative quantity of a centripetal force)、「向心力的起動量」(the motive quantity of a centripetal force)，我們就不再一一引證。可看到所有詞項均屬於一種測量（或比例上的）的定義。「慣性力」、「作用力」、「向心力」三者的定義沒有直接提到量測，但在解說中提供比例測量的方式。另外，在「評註」當中，牛頓提出了著名的絕對空間和絕對時間的主張。

結果完全否定了渦漩理論成立的可能性。簡單介紹可參看 Roche, John (1988), pp. 56-57；Henry, John (1988), pp. 133-136。

¹⁵向心力(centripetal force)的定義早已出現在《原理》的前身〈論物體在軌道上的運動〉(De motu corporum in gyrum)之中，是該論文的兩個定義之一。centripetal 這個字是牛頓所造的，他有意對比於惠更斯的「離心力」(centrifugal force)，因而被視為最能代表《原理》一書的一個單字，參看 Westfall (1980), p. 411。

接著，牛頓提出了三條「公理」或「運動定律」，就是著名的三大運動定律(p.13)：

- L1：除非受到外力作用，否則每個物體保持靜止，或者保持等速直線的運動。
- L2：運動（量）的改變和作用力成正比；而且改變發生在力量作用的直線方向上¹⁶。
- L3：對每個作用(action)而言，總有相反方向上相等的反作用(reaction)；或者兩個物體彼此互相作用，總是相等而且方向相反。

跟在這三大運動定律之後是六條推論，包括「力的平行四邊形」、「動量加減」、和「共同的重心」等等從定義和定律中直接推出的結果；隨後是一個「評註」，牛頓在這兒試圖顯示三大運動定律都得到建全（也就是經驗證據）的支持¹⁷。

「定義和公理」包含了牛頓版本的詞彙結構和原理。它有幾個特色：首先，在牛頓這些原始敘述中，並沒有我們在教科書中讀到的那種簡單明確的等式，也沒有呈現很嚴密的意義網絡。儘管如此，核心詞項的意義仍然彼此相關，也擁有特別的「比例」(proportion)意義，截然不同於亞里斯多德學派的傳統用法。例如第三運動定律中的「作用」和「反作用」似乎沒有明確的定義，然而我們卻可以在定義 4 中看到它和「作用力」的相互關係。再者，這組概念網絡所呈現的不只是單純的分疇，還包括了力的分類：「慣性力」、「作用力」、「向心力」。尤其是向心力，牛頓更是一口氣定義三種不同的量測，這裏指示了「向心力」在牛頓的整個理論版本中的關鍵地位—因為牛頓所探索的標的是天體現象，均屬於向心力作用的旋轉運動。第三，我們回憶孔恩分析牛頓力學核心詞項意義的兩條進路，牛頓的理論版本所顯示的顯然是以三大運動定律為提供詞彙意義的基本原理，重力定律(law of gravity)—在牛頓時代的語言中是「和距離平方成反比定律」(inverse-square law)—則是有待經驗驗證的假設性定律。牛頓的整個版本的成就就在於驗證了它，並且將這假設和重力巧妙關聯起來，推廣成「萬有引力」(universal attraction)，從而「發現」了重力定律。

¹⁶這是牛頓的原始表述，似乎和傳統理解不太相同，它也沒提到質量。不過我們要記得在定義二中牛頓定義了「運動量」等於質量乘以速度，亦即 $P = mv$ 。所以，這兒的第二定律可以表為 $(P_1/P_2) = (F_1/F_2)$ 。

¹⁷牛頓的論證參看 Chen, Rucy-Lin(2003)（修訂版已於 2004 年發表於《台大哲學論評》第二十七期 (pp. 67-117) 的簡單討論。

伍、一般物體的運動：《原理》的第一冊

《原理》的第一、二冊的主要內容是透過數學來發展各種各樣的運動模型，由「命題」和「中介定理」來表達。命題分成兩種：「定理」(theorem)和「問題」(problem)。基本上，「問題」是一種求解形態的命題，它有一明確的求解目標，單個問題或幾個問題指向一個模型的建立；「定理」則是斷說形態的命題，單個定理或幾個定理共同斷說了一個模型。「中介定理」則連結命題和數學方法，說明如何透過數學方法來推證命題或解決問題。由於牛頓發明了一種全新的數學工具（就是微積分(calculus)，但在《原理》中以幾何和比例的形態呈現），這種工具讓他能解決「和距離平方成反比」的懸疑。對當時的人們來說，這是新穎困難的數學，所以牛頓必須花費篇幅來說明這數學工具如何形成解決問題和推證的方法，並且演示這數學方法如何被用來達成目標——「中介定理」就是扮演這樣的中介角色。

第一冊的主題是「物體的運動」，討論無阻抗媒介中的物體之運動。全冊分成十四節，共九十八條命題，其中五十條定理，四十八條問題。這十四節當中，部分章節是數學方法的演示，部分章節則描述了種種不同階層模型家族。以下讓我們逐節做個簡略說明。

第一節是「量的全體比率方法」(the method of first and last ratios of quantities)，也就是微積分方法，共有十一條「中介定理」和兩個「評註」。第五節是「不知焦點時，如何求得軌道」是一種數學方法。亦即求取軌道的幾何方法。例如「命題 22」：如何畫出通過五個給定點的圓錐曲線。第四節「從已知焦點來發現橢圓、拋物線和雙曲線的軌道」和第八節「物體由任一向心力作用時，軌道的決定」，也是一種數學方法，亦即畫出軌道的幾何作圖法。

第二節「向心力的決定」描述了一個曲線向心力運動的模型，它是一個高階層的模型家族（見前文）。第三節「偏心圓錐截面的物體運動」則是從向心力運動模型中演繹出來的子模型；第六節「如何求得已知軌道上的物體運動」則是向心力模型的應用方法——求出物體在軌道上的位置。接著第七節「物體的垂直上昇和下降」描述了一個高階層的直線昇降的模型家族；第九節「物體在可動軌道上運動，以及遠近點(apsides)的運動」，本節討論圓錐曲線軌道會在空間中產生偏移情況下的物體運動；第十節「在已知表面上的物體運動，以及物體的往復擺動(oscillating pendulous motion)」，這是討論單擺的問題。

以上二、七、九、十節各自描述了一個高階層的模型家族，但它們可以再被歸屬於一個「物體向心力指向不可動中心的單物體運動」之模型家族。第十一節，牛頓開始討論著名的「雙體和多體運動」——「彼此有向心力互相指向的多物體之運動」，這一節是解決天體運行現象的相關模型，後文我們將更詳盡地討論它。「雙體和多體運動」有一個特殊次種——即兩物體質量差距巨大時，以致較小物體的慣性無法維繫它的運

行而被吸向較大物體——這是第十二節「球體吸引力」、第十三節「非球體吸引力」、第十四節「由向心力引動的微小物體指向超巨大物體的一些局部之運動」所處理的問題。在十二節中，牛頓建立了球體和非球體表面或內部的相對微小質點受到球心的吸引力，也是遵守「和距離平方成反比」定律。顯然，十二、十三和十四節將「平方反比定律」推廣到地球上(terrestrial)，包括地球對所有物體甚至所有物體彼此間的相關模型。

牛頓在第二節建構了向心力運動模型，並證明了平方反比定律（見上文），但它們只涉及抽象質點。從第十一節，牛頓才開始討論多體運動。牛頓先做了一段解說：

迄今我已處理了指向一不可動的中心點的物體吸引力(attractive forces of bodies); 雖然在大自然中很可能並不存在這樣的東西。至於兩個物體之間的吸引力，由第三運動定律，吸引和被吸引的作用是相互且相等的；所以兩個物體，被吸引的物體和吸引對方的物體都不是靜止的，但兩者由於互相吸引，所以繞著一個共同的重力中心(a common centre of gravity)旋轉。(p.164)

這段話包含兩個有趣的旨意：(1) 它做了一個運動（模型）的分類，而且明言「大自然很可能並不存在這樣的東西」指示了這種模型的「理想性」；(2) 指出雙體旋轉運動的特徵。然而，牛頓並不僅僅處理雙體的問題。

在這一節中，牛頓提出了 (A)「雙體環繞一共同的重力中心相互旋轉運動模型」由命題 57、58、59、60、62、63 共同描述；(B)「雙體環繞一不動的第三物體（位於共同的重力中心）而相互旋轉的模型」由命題 61 描述；(C)「多體運動模型」（命題 64、69）；(D)「二物體以同心軌道環繞第三個最大的物體而運行的運動模型」（命題 66、67、68）：這是一個可以應用到太陽系的標準模型，牛頓花了很長的篇幅來討論它（共 15 頁），讓我們做個簡短的討論：

命題 66 [定理 26]：如果三個物體，它們的力量隨著距離平方而減小；任兩個物體指向它們之間的第三個物體的加速吸引力和距離的平方成反比；而二個較小的環繞第三個較大的運行；我斷定，兩個旋轉物體較內圈的物體——其半徑指向外圈和最大物體——將劃出比時間更大比例的面積，而且劃出一個接近橢圓的圖形，其焦點在半徑的交點上。如果最大物體被吸引力所擾動(perturbation)，則它將顯得好像一點也沒有受較小物體吸引的樣子，而保持靜止；或者它將顯得好像最大物體只受到非常非常小的吸引力或擾動。

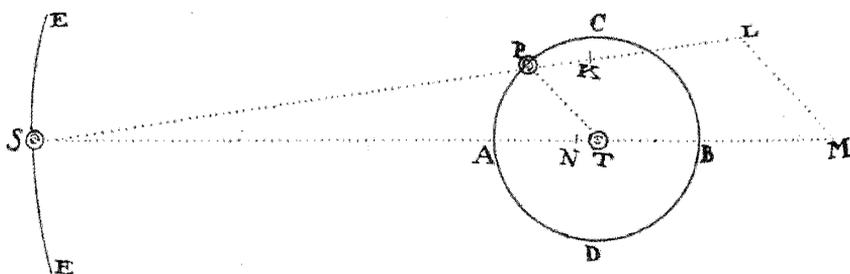


圖 5-5

這個模型模映的正像太陽系的情況¹⁸，太陽固然吸引行星，但行星也吸引太陽，為何太陽顯得像是靜止的樣子？牛頓試圖回答這種現象，因此他建構了這個三體模型（比起十七世紀已知有六大行星繞太陽旋轉，它要簡單太多了；然而比起環繞不動定點和雙體的運行，它又相當地困難）來進行逼近。牛頓如何解決三體模型中，整個系統保持穩定的情況呢？

T 是最大的物體，P 是內環運行的物體，S 在外圈。讓 LS 代表 S 對 P 的吸引力，讓 KS 代表 P 在 ABC 之間運行時距 S 的平均距離。當 P 和 S 的距離大於 KS 時，讓 KS 代表此時 S 對 P 的吸引力。如此，當 P 和 S 距離比 KS 小時，LS 大於 KS，要符合和距離平方成反比，必須 $LS/KS = KS^2/PS^2$ 。再根據力的平行四邊形分解，LS 必須被分解成 LM、MS 兩個分力，LM 朝向 T，而 MS 和 ST 的方向平行。LM 將再加入 S 對 P 的吸引力中，致使半徑 PT 的掃過面積仍然和時間成比例。和但 MS 呢？它既不是向心力，也沒有和距離平方成反比，它會拉開軌道使 P 不能穩定，造成了系統的擾動。但是這個擾動可以被 S 和 T 的互相吸引來消除，如此保障了整個系統維持在穩定的狀態上¹⁹。

¹⁸乍看之下，「命題 66」有一些怪異，而且史家對「命題 66」的詮釋也有歧異。譬如 Westfall 將它重建為「太陽和其它某兩個行星的關係」；而柯亨則將它視為在處理「太陽、地球和月球」的關係(Cohen 1988, p. 36)。在牛頓的原圖案中，T 似乎代表地球(Terra)，而 S 似乎代表太陽 P 代表月球。如此這個問題也可以表示為月球繞地球旋轉時太陽對月球的引力造成月球擾動的問題，因為太陽距離月球比地球距離月球相對遙遠，它對月球的吸引力比起地球要相對地小，此時，地球可以合理地視為「最大物體」。然而，問題是太陽並不繞地球旋轉，牛頓圖案中的 S 卻繞地球旋轉。因此，一個合理、公平且有用的看待是：命題 66 乃是一個普遍的「三體模型」，它可以應用到「地球—太陽—月球」之間的關係，也可以應用到「太陽—其它任兩個行星」之間的關係。

¹⁹內文中的解說參考了 Westfall (1980), pp. 430-431，相對於牛頓原來的解釋而言，已經大幅地簡化了。牛頓將這一命題（三體模型）分成二種情況(case)：

上述討論顯示幾點特色：牛頓在此已經無法使用精確的幾何證明，而只能應用推論和論證的方式，如同威斯特佛(R. Westfall)所言：「牛頓發現這個問題的證明解決(demonstrative solution)超出他的能力（事實上，今天已顯示它不可能證明）」(1980, p.430)。第二，儘管牛頓或科學家們可能認為或希望自己所處理的真正是自然世界的實際現象。然而，這兒很清楚地展示，牛頓所建立的其實只是抽象的模型，相較於實際現象（如太陽系），這些模型已是相當地簡化、理想化，但這種簡化理想化的模型卻能獲得高度的成功。第三，牛頓分析這些模型的方式，主要是應用先前已得成果來進行推論，並且運用了「類比」方法。在雙體問題中，牛頓頻繁地將雙體運行「類比」於物體環繞不動定點的模型來逐步論證諸命題。舉命題 63 為例：「命題 63 [定理 21]：如果兩物體以任意種力量互相吸引，而且繞著它們共同的重力中心運行；我說，由相同的力，物體繞著不動定點所劃出的圓形相似且等於物體彼此移動所劃出的圓形。」

陸、阻抗媒介中的運動：《原理》的第二冊

第二冊的主題是「物體在阻抗媒介中的運動」。共有九節，五十三個命題，其中四十一條定理，十二個問題。這九節可以分成三個階段：單一物體在抵抗力下的一般運動（第一到四節和第六節）、流體靜力學（第五節）、流體動力學（第七到九節）。

第一到三節分別是「物體運動受到和速率(the ration of velocity)²⁰成正比的阻抗」、「物體運動受到和速率平方成正比的阻抗」、「物體運動受到部分和速率成正比、部分和速率平方成正比的阻抗」。這三節根據阻抗和速率的比例關係來建立不同的阻抗運動模型。這時尚不考慮抵抗力是來自哪兒，純粹設定抵抗力存在，而且和速率有各種不同的比例，如此所建立模型是抽象層次極高的模型。可以說，它扮演著「一般性的在阻抗中運動」的「原理」之角色—可說是由基本分疇的原理加上抵抗力所導引出來的「次原理」，當然，它們也是高階層的模型。第四節則考察「在阻抗媒介中的旋轉運動」，旋轉運動受到抵抗力，其旋轉半徑必然逐漸縮小，而使軌道呈現出指向一中心的螺旋狀的進動

在相同平面上；以及在不同平面上。並包括了二十二個推論，這些推論將雙體環繞較大物體旋轉的情況推擴到更多物體共同環繞一較大物體旋轉的情況。牛頓的解說雖然長，卻相對簡略也不甚清楚，事實上，這個問題到今天仍然是力學上的超級難題。正是牛頓在雙體和三體的分析，使他的《原理》超越他先前的所有作品，也遠遠超越和同時代的科學家。柯亨形容他在擾動的問題上「以巨人的步伐向前飛躍」(Cohen 1988, p. 36)。

²⁰在牛頓力學中，速度是個向量，具有方向性。而現在抵抗力只是和「速度的純量」—也就是「速率」—成比例而已，換言之，速度量越大，阻抗越大。此外，阻抗力的方向當然和速度的方向相反。

(progression)，這一模型顯示了在渦漩運動中的物體最終將掉入渦漩中心。第六節則展示單擺在媒介中受到阻抗的運動（它應用了第五節所發展的一些描述幾何工具，所以被牛頓放到第六節）。

第五節討論流體的密度和壓縮(compression)，正屬於今天所謂的流體靜力學(hydrostatics)，牛頓自己也明確標出這個詞。在這節中，牛頓首度引入了「流體」一詞並進行定義：「流體乃是其局部會對自己產生壓力的任何物體，由於壓力，其局部很容易在彼此間移動。」接著，命題 19 到 23 皆是在描述靜止流體的特殊現象，可以說是「流體靜力學」的「原理」或「基本分疇」。譬如命題 19 描述靜壓現象：「一不動容器中均質且不動的流體，其所有局部，每一面受到壓縮時，將在每一面受到同樣的壓力，於是停留在原來位置，沒有任何因壓力而生的運動。」當然，這兒的原理或基本分疇並不是獨立於牛頓版本的原理和基本分疇之外的，它只是在原來的「物體範疇」中引入了一種「新物體」，故必須針對這種「新物體」的特性來加以定義。流體既然也是物體，當然要服從物體遵守的原理，所流體也會受到重力作用，命題 21 便描述了流體受到重力作用時，密度和距離的關係：

讓任何流體的密度和壓縮度成比例，而且它的局部都受到和中心距離平方成反比的向心力之吸引：我說，如果距離被視為連續比例的(continually proportional)，則在相同距離上的流體密度也是連續比例的。

也就是說，距離重力中心越近，流體的密度越大，而且在比例上呈現一種連續性的特徵。命題 23 則斷說流體由粒子(particles)所聚集而成的。

在說明流體的基本性質（靜態性質）之後，牛頓開始研究流體的運動，亦即今天所謂的流體動力學(hydrodynamics)。第七節討論一般的流體運動和流體從狹窄噴口噴射而出的模型；第八節則討論「透過流體傳播的運動」一涉及了「波」(wave)的問題；第九節則分析流體的旋轉運動—包括繞圓柱體和球體的旋轉兩個模型。透過流體旋轉運動的分析，牛頓駁斥了笛卡兒的渦漩理論。

笛卡兒以渦漩來解釋天體的運行，認為諸天體（恆星、行星、彗星等等）存在於一充滿流體的天空中，其運行是由於天空流體的旋轉（也就是渦漩）來帶動，整個天空充滿大大小小的渦漩，諸星體本身並不能有任何主動力量，純粹是被渦漩帶動而運行。牛頓的駁斥渦漩說的主要論點是：假設存在渦漩，那麼「為了保持渦漩在相同的運動狀態，必須要有某種主動原則(active principle)，讓球體可以接收連續相同的運動量，它總是能傳達給渦漩的物質。沒有如此能通過球體和渦漩內層而將運動傳播到外層的原則，就不能接收新的運動量，將逐漸變慢，最後不再旋轉（命題 52，推論 4）」(p. 390)

所謂的主動原則便是「重力」—跨越空間的吸引力，然而牛頓並不瞭解它的成因。在十七世紀的機械觀氣候下，重力被視為具有「玄奧」

性質，牛頓引入這神秘的「主動原則」反而被認為開倒車，回到亞里斯多德，因而受到激烈的反對²¹。然而，必須注意，牛頓並不是主張重力穿透渦漩而致使星體持續運動，而是天空根本沒有渦漩。因為天體觀察的經驗定律克普勒第三定律「周期的平方和半徑的立方成正比」無法被渦漩理論所說明²²。在第二冊最後的評註中牛頓再以天體現象的觀察資料來論證渦漩理論將會導致克普勒第二定律和第三定律在速度關係上的不相容。因此，他結論說：天體運動，「發生在沒有渦漩的自由空間 (free space) 中，可以由第一冊來理解。」 (p. 396)

牛頓對笛卡兒的渦漩理論之批判，也拉開了牛頓學派與笛卡兒學派的競爭序幕（見第八章）。

柒、《原理》的「世界系統」

《原理》的第三冊《世界系統：以數學處理》(System of the World: In Mathematical Treatment)²³由三個部分組成。「哲學推理的規則」(rules of reasoning in philosophy)包含四條規則，「現象」(phenomena)部分則包含六個現象敘述，「命題」(Propositions)部分共有四十二個命題，其中二十條是定理而其餘二十二個命題是問題，加上雜於其間的「中介定理」和「評註」。不像前二冊，「命題」這一部分並沒有再分節。

²¹特別是萊布尼茲(Leibniz) (參看 Hesse(1962, pp. 157-163)和第八章)。而牛頓堅持引入這種無法瞭解成因的「神秘力量」，被史家認為源自中世紀的「魔術」(magic)和鍊金術傳統(alchemical or hermetical tradition)，可參看 Henry(1988)、Golinsky(1988)的簡介。詳細討論見 Westfall(1971, 1984)、Dobbs(1975, esp., pp. 204-213, 1988)。牛頓是否受到「鍊金術」甚至「神學」的啟發，也有一些爭議 (Dobbs(1988)持此看法，柯亨(Cohen 1982)則反對)。不管如何，牛頓的論敵普遍以「重力」有神秘性來批評他。正因「重力」的神秘性質，其它接受牛頓理論又接受機械觀的十八世紀科學家，莫不努力去為「萬有引力」的觀念尋找合理的解釋。然而始終得不到解決，所以科學家只好接受萬有引力是物質本有的內在性質之觀點。因為若不如此，就無法應用牛頓理論來進行研究 (參看孔恩(1970, p.105))。

²²牛頓否認渦漩說的簡單說明，可再參看 Westfall(1980), pp.456-457。Westfall提及牛頓的反駁依賴於摩擦和流體的相對速度成正比，但如果吾人假定流體產生的摩擦和速度成 $4/3$ 次方，便能得到克普勒第三定律。然而牛頓的假定一點也不是任意的，而是有經驗基礎。它從摩擦力是質點衝力的總合的力學直觀中引導出來的(p. 457)。

²³牛頓另有一篇標題也是〈世界系統〉的長篇論文，共有七十八個命題和三個問題，是比較簡單的敘述文章，也沒有《原理》內那麼多困難的數學。史家判斷這篇論文大約在 1680 年代間寫就，但一直到牛頓死後都沒有出版。這篇論文附錄在 Cajori 修訂的版本之後。

「哲學推理的規則」部分有四條規則，扮演今天所謂「方法論規則」(methodological rules)的角色²⁴：

- 規則 1：除了那些既能真實地又能充分地(both true and sufficient)說明現象的自然原因之外，我們將不準備容許更多。
- 規則 2：因此，對相同的自然效果而言，盡最大可能地指派相同的原因。
- 規則 3：物體的性質，在程度上的擴張或省減都不可容許；在我們的實驗研究中被發現屬於所有物體的性質，必須被視為所有不管什麼物體的普遍性質。
- 規則 4：在實驗哲學中，就算準確地或非常接近真實的、無法抗拒的(notwithstanding)任何假說可能被想像時，我們也將考察(look upon)那些命題——由對現象一般歸納而推論得到命題——直到其它現象出現時，命題要不是可以更準確，就是易於成為例外。我們必須遵守這條規則：歸納論證不能被假說規避。

這四個「方法論規則」讓牛頓得以固守看似具有神秘性質的「重力」就是星球運行的向心力(根據規則 2)，而不必去追究它的原因(規則 1)，並且推廣成「萬有引力」(規則 3)。這一點很明確地表達在「命題」部分的第一個「評註」：「因此，既然這些力量兩者，也就是天體的重力，以及行星之間的向心力，都指向其所環繞的星球之中心，彼此之間既類似又相等，它們將有同一個原因(規則 1 & 2)。因此將月球維繫在它軌道上的力量就是我們通常所謂的重力...」(p. 409) 規則 4 可以說是一個「否認論式」的方法論規則，它的功用在於對抗笛卡兒的機械假說之批評，實際上它和牛頓自己的方法相違背。

「現象」部分則有六個「現象」，它們是天體的觀察資料的敘述，主要對象是六大行星和它們的衛星。這六個現象描述這些星體都服從克普勒第二和第三定律。例如「現象 1：繞木星運行的『行星』²⁵，由指向木星中心的半徑，劃出的面積和運行時間成比例；而且它們的周期時間，和距它中心距離的 $3/2$ 幕次方成比例。」牛頓在解說中強調「我們由天文學觀察而知道這些。」(p. 401)然後附上數據。接著，「現象 2」描述土星的衛星遵從克普勒定律，「現象 3 & 4」描述地球外的五大行星(primary planets)都環繞太陽，而且服從克普勒定律，「現象 5」描述地球，「現象 6」描述月球。

²⁴這四條規則是牛頓在和笛卡兒學派長期纏鬥後，無法解決「萬有引力」的機制之問題，而由修改方法論規則來防衛笛卡兒學派的攻擊。參看 Lakatos (1978), "Newton's Effect on Scientific Standards"。

²⁵今天我們稱作衛星。不過在牛頓時代，是以 planet 來稱呼它們。planet 這個字眼來自希臘文，原義是「漫遊者」(wanderer)。

在「命題」的部分，牛頓開始應用第一二冊的命題和上述的推論規則及現象資料來展示太陽系統的諸星體都可以應用「和距離平方成反比定律」來加以說明。牛頓認為他的命題都不是假說²⁶，他所謂的「假說」自然是像笛卡兒的機械理論和渦漩理論一類的說法。在我們的「科學理論的結構之模式」的架構內，這些命題明顯是一種「說明」——把第一二冊發展出來的模型應用到實際現象上。

第三冊的命題也分成二種：定理和問題。定理根據先前的命題之推論來進行效應的斷說或預測。例如，前四條命題斷言各大行星的向心力和「距離平方成反比」，例如「命題 2：六大行星從直線運動中被拉向維持在它的軌道上，而且指向太陽中心的力量，和行星距太陽中心的距離平方成反比。」牛頓解說：「這個命題的前一部分明顯來自現象 5 和第一冊的命題 2；後一部分來自現象 4 和第一冊的命題 4 的推論六。」解說中的前一部分指那些力量是「向心力」；後一部分指「向心力」和「距離平方成反比」。從我們的觀點看，正是把「向心力運動」模型應用在六大行星上。

接下來的幾個命題是重力效應的預測。例如，「命題 6：所有物體受到指向每個行星的重力；指向任一個行星的物體重量，在距行星中心相等的距離上，和它們各自擁有的質量成比例。」這一命題首度引入了重量的概念，它是第二運動定律的推廣，牛頓以單擺來實驗，指出用金、銀、鉛、玻璃、沙、木頭、水、麥粒來做為擺錘，結果都可以驗證這個命題。「命題 7：存在屬於所有物體產生的重力，和它們所擁有的質量成比例」這個命題是對上個命題的再推廣，指出所有物體均能產生重力，已經隱然地預示（預測）了「萬有引力」的存在。「命題 9：考慮行星表面以下的重力，和距行星中心的距離成比例地遞減。」這個命題應用了第一冊命題 73 的球體內部重力遞減效應模型，它也指示了重力和物體質量的關係。

²⁶「假說」(hypotheses)在牛頓科學中扮演的角色為何？儘管牛頓在作為結論的「一般評註」中宣稱「我不妄作假說」，它的脈絡如下：「但迄今我不能從現象中發現重力性質的原因，而且我不妄作假說；因為任何不能從現象中演繹出來都被稱作假說；而且假說，不管是形上學的或物理學的，也不管是神秘性或機械性的，在實驗哲學中沒有地位。」(p. 547)這裏可以看出牛頓對「假說」的認知是服從他的「推理規則」。「重力」既然能充分且真實地說明所有現象，那就夠了，不必去「猜測」它的原因，猜測它的原因便是作了假說。然而科學史家卻指出牛頓對「假說」這一詞的用法曾有所轉變。因為在《原理》的第一版中，所謂的「哲學推理的規則」和「現象」都是以「假說」為名的（參看 Cohen 1992, pp. 205-226）。這裏顯現出牛頓對「假說」這個詞的意義之理解，有過一番轉變，這轉變可說出於牛頓以「哲學」來防衛他的科學主張（參看下註）。其實《原理》一書中仍然保留了三個假說。例如，在命題 10 和命題 11 之間有「假說 1：世界系統的中心是不動的」(p. 419)。

至於問題的部分，例如「命題 15〔問題 1〕：求行星軌道的基本直徑」、「命題 20〔問題 4〕：求物體在地球不同區域的重量並加以比較。」顯然，它們的命題性質是求取各種數據並進行數量的預測，如果我們要驗證此類命題的話，可以應用各種方式來進行測量，比較數據即可驗證預測是否準確。正是這種數據和量化的預測讓牛頓的理論版本超越同時代的其它自然哲學家，而成為「作科學」的新典範。然而，我們也要記得，牛頓的數據推算都是透過第一二冊發展的模型，代入觀察資料然後求得數值，應用「雙體模型」的「命題 25〔問題 6〕：求太陽干擾月球運動的力量」很明白地佐證了這一點。

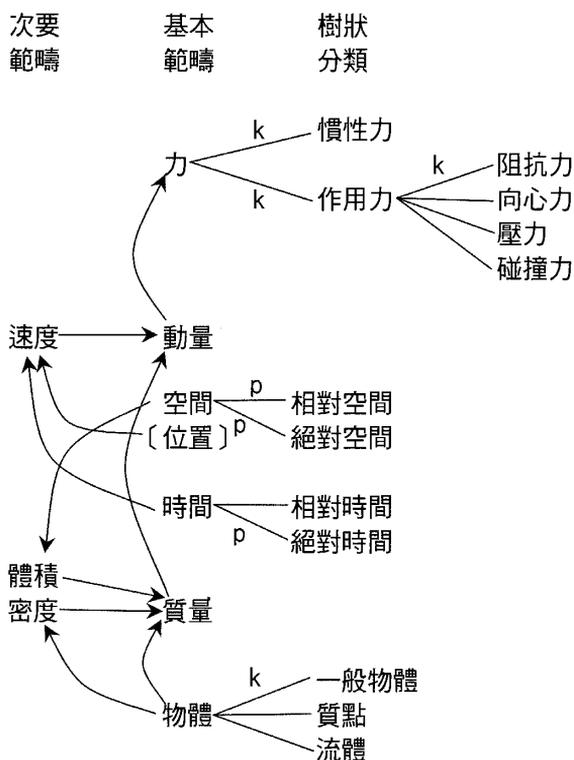
迄今，牛頓雖然證明了天體遵守「平方反比定律」，而且物體所受重力也遵守「平方反比定律」，並且預測重力做為萬有引力的真實性。然而，如果天體運行的重力和地球吸引物體的重力是同一種東西，天體對地球的吸引力也應當影響地球才對。什麼東西可以顯示出這種影響呢？什麼現象可以扮演完美地統一天體和地球的動力學之關鍵證據呢？海洋的潮汐！在「命題 24：海洋的漲潮和落潮來自太陽和月球的作用」中，牛頓首度以天體的吸引力作用來說明海洋潮汐的成因。「命題 36〔問題 17〕：求太陽移動海洋的力量」和「命題 37〔問題 18〕：求月球移動海洋的力量」則計算出具體的數值，如此完美地達成了統一天體和地球動力學的目標——雖然牛頓並沒有提出萬物產生重力的原因。在這一方面，牛頓違反了當時機械觀的一般看法，但是這個結果遵守「哲學推論的規則」。所以，最後牛頓結論說：

迄今，我們已說明天體和我們海洋由重力造成的現象，但是我們並未發現這種能力的成因。必須從一個原因向前進是確定的，這個原因能夠穿透太陽和行星的中心而沒有造成力量的減弱；它不是根據它所作用的質點表面量而運作（如同機械因(mechanical cause)的作用），而是根據它們所擁有的固體物質的量，而且從它的每一面傳播到極遠處，總是和距離平方成反比。....對我們而言，已足以證明重力真實存在，而且根據我們已說明的定律而作用，普遍地存在於天體和我們海洋的所有運動之中。(pp. 546-547)²⁷

²⁷這段話出自「一般評註」，也就是整部《原理》的總結論。這部分以及「我不妄作假說」乃是在 1713 年《原理》第二版才加入。《原理》在 1687 年出第一版後，牛頓一直努力試圖為「萬有引力」找出一個機械因的說明。十多年後，他終於放棄了，改以拒絕「假說」的哲學或方法觀點來防衛他的科學理論。結果就是第一版中的「假說」通通被改成「哲學推論的規則」和「現象」。柯亨認為這是牛頓「失敗的告白，牛頓遺憾於他無能力發現重力的機械說明之表現」(Cohen 1988, p. 44)我則同意 Lakatos 的觀點：這是牛頓訴諸於「哲學」武器來對抗出自「機械哲學」的攻擊。

捌、牛頓理論版本的分疇分類和主題分類

由前二節的分析，我們已經看到「定義和公理」呈現了牛頓版本的基本分疇：包括「質量」（由「體積」乘「密度」來定義）、「動量」（由「質量」乘「速度」來定義）、「運動」、「力」、「時間」、「空間」、「物體」、「作用」²⁸ 等等範疇的區分和定義。這些範疇在牛頓的系統內都是可量測的量化範疇，而且彼此間以「比例」的方式互相定義，環環相扣。在第一二冊的命題證明當中，我們也看到了諸範疇不斷地被「分類」成次範疇—如「力」被區分為「慣性力」、「向心力」、「抵抗力」、「壓力」等等；「運動」被區分為「無阻抗運動」和「在阻抗媒介中運動」，以下更細分成各樣不同層次的類別；「物體」至少分成「質點物體」、「一般物體」和「流體」（任何局部將在它自身上產生壓力的「物體」）等種類的區分。如此，根據上文的分析，我們可以將牛頓的分疇和分類系統表達為下圖 5-6。



²⁸關於「作用」(action)這個概念，它介於「力」和「運動」(動量)之間，因為「力」所造成的「作用」總是會導致「運動(量)」。牛頓使用這個詞的原因在於強調物體能產生「主動性」(active)的力而和單純的「被推動」區分開來，這個用詞也殘留了亞里斯多德的十個範疇區分(「主動」、「被動」)之痕跡。

圖 5-6 說明：「動量」和「力」在牛頓版本都是個基本範疇，第二運動定律敘述的正是動量和力成正比。換言之，「動量」和「力」的意義互相關聯。牛頓又定義動量為質量和速度的乘積，透過動量，力和質量、速度、時間關聯起來。因為在牛頓版本中並沒有「加速度」的範疇出現。

基本原理與最高層模型，也可再根據其它範疇的次種類來進行區分，產生許許多多的次模型。例如，根據阻抗力的有無可將運動區分為兩大型態。分疇和種類區分合成的結果就是牛頓版本的模型分類階層系統。由原理（三大運動定律和「距離平方反比」定律）展開，牛頓版本首先分成兩大運動類：A. 無阻抗的運動；B. 在阻抗媒介中的運動。在這兩大類之下，全版本的模型分類階層可以展示如下：

A. 無阻抗運動（第一冊）

A1. 指向不可動定點的向心力運動（第二、三、七、九、十節）

A11. 曲線向心力運動（第二、三節）

A111. 指向任何定點的圓周軌道運動

A112. 指向遠距定點的半圓周軌道運動

A113. 指向螺旋中心的螺旋軌道運動

A114. 指向橢圓中心的橢圓軌道運動

A115. 指向橢圓焦點的橢圓軌道運動（以下第三節）

A116. 指向雙曲線焦點的雙曲線軌道運動

A117. 指向拋物線焦點的拋物線軌道運動

A12. 垂直上昇和下降的向心力運動（第七節）

A13. 可動軌道的物體運動（第九節）

A14. 已知平面上的運動和往復擺動運動（第十節）

A141. 向心力指向圓錐中心的橢圓旋轉

A142. 圓輪上一點沿著圓周外緣滾動

A143. 圓輪上一點沿著圓周內緣滾動

A144. 在旋輪線(cycloid)²⁹上往復的物體擺動

A145. 在曲面(curved surface)移動的物體運動，其向心力指向曲面中軸上的一定點

A2. 雙體和多體相互吸引的旋轉運動（第十一節）

A21. 環繞一共同重力中心旋轉的雙體運動

A22. 雙體環繞一不動的第三物體（位於重力中心）的旋轉運動

A23. 簡單多體運動

A24. 二物體以同心軌道環繞第三個最大物體而運行的運動

A241. 二物體在同一平面上

A242. 二物體在不同平面上

（上述為兩物慣性可以抗拒吸引力而維持「均勢」的情況；下列則是其中一物的慣性無法抗拒吸引力被吸向較大物體的情況。）

²⁹也就是擺錘質心或重心經過的軌道。

- A25.球體吸引力（第十二節，證明吸引力大小均服從「距離平方成反比」定律）
 - A.251.球體表面吸引力大小
 - A.252.球體外吸引力大小
 - A.253.球體內部吸引力大小
 - A.254.球體密度或吸引力不均勻
- A26.非球體吸引力（第十三節，證明吸引力大小也服從「距離平方反比」定律）
- A27.由向心力引動的微小物體指向超巨大物體的局部之運動（第十四節）

B.在阻抗媒介中運動（第二冊）

- B1.單一物體在阻力下的一般運動（第一到四節、第六節）
 - B11.物體運動受到和速率成正比的阻抗（第一節）
 - B111.憑藉慣性且穿過均質媒介而移動
 - B112.受到齊一重力且穿過均質媒介而直線上昇或下降的物體運動
 - B113.拋物運動，受到垂直於水平面的重力，它在任何均質媒介都是齊一的
 - B12.物體運動受到和速率平方成正比的阻抗（第二節）
 - B121.憑藉慣性且穿過均質媒介而移動
 - B122.在均質媒介中，受到齊一重力而直線上昇或下降的物體運動
 - B123.雙曲線和半圓形的混成軌道
 - B13.物體運動受到部分和速率成正比、部分和速率平方成正比的阻抗第三節）
 - B131.憑藉慣性且穿過均質媒介而移動
 - B132.受重力吸引而直線上昇或下降的運動
 - B14.在阻抗媒介中的旋轉運動，必將成為螺旋狀進動（第四節）
 - B15.在阻抗媒介中的單擺運動（第六節）
 - B151.阻抗和時刻成比率
 - B152.阻抗和速率成比例
 - B153.阻抗和速率平方成比例
- B2.流體的靜力原理（第五節）³⁰

³⁰其實，牛頓在流體靜力學和動力學部分的討論相當簡略。牛頓的主要目標只是為了驗證是否天空存在著「流體」？為了否證渦漩說而涉入流體的研究，一方面讓他再度證明重力吸引力這種「主動原則」的必要性，另一方面也統一了天體和地球的運動。然而這種簡略性卻留給後來力學家發展的空間。日後的力學家們也將牛頓的研究擴大為流體力學，同時在物體的分類上，進一步

B3.流體的運動（第七節）

B31.流體的一般運動

B311.圓柱體中的水流通過噴口噴出的運動

B312.圓柱體移向水面，其橫截面遭到的阻抗

B32.通過流體傳播的運動（第八節）

B33.流體的旋轉運動（第九節）

B331.環繞圓柱體旋轉

B332.環繞球體旋轉

除了少數階層上的更動之外，這個分類階層大致上是根據《原理》本身的冊、節、命題的安排方式和排列順序而提出的。從這兒我們可以看到，科學家在表達理論時，一個隱而未顯的分類早已在運作當中。本節所揭示這個模型（主題）分類系統結合先前的「基本分疇」組成牛頓版本的分疇分類系統，再加上聯結模型和真實現象的「可落實模型」，構成了一個說明運動現象的完整版本。

劃分「質點」、「剛體」、「流體」和「彈性體」，分別發展出質點力學、剛體力學、流體力學、材料力學等等力學的次學科。

第六章 赫茲的力學理論版本

讓我們回憶第四章中夏佩爾對孔恩的典範觀念之質疑。夏佩爾的質疑引起我們對科學理論發展歷史的重新思考：究竟該如何理解科學史上那些繼承理論之間的關係？什麼樣的理論概念能恰當地回答這種科學史現象？以古典力學為例，究竟牛頓「理論」與拉格朗日、漢彌爾頓、赫茲等人的「理論」之間，有著什麼樣的關係？

我們已經提議了「理論版本」和「理論版本家族」這一組觀念，可以恰當說明這種科學史現象。換言之，牛頓的「理論」和拉格朗日、漢彌爾頓、赫茲等人的「理論」形成一個「理論版本家族」，彼此之間是一種「家族相似」的關係。說它們是家族相似的關係，意謂著它們的「論域的分疇分類」、「模型的分類結構」和「表達系統」上都只是相似的，都有部分相同、部分差異的地方——而且在兩兩之間，相同和差異的地方也都各不相同。

本章的目的在於分析一個具體的古典力學理論版本，從而佐證上述的提議。被分析的對象是赫茲的《力學原理》一書，透過揭示其「分疇分類的概念網絡」與「模型階層」來呈現赫茲的力學理論版本，並將它和牛頓的版本作一比較，展示它和牛頓版本之間的相似關係。更具體一點地說，赫茲版本不只是以不同的數學或語言來重新形構牛頓版本，在部分基本概念上，赫茲的版本也不同于牛頓的版本。

基於上述目標，本章將分成四節：第一節「牛頓之後的古典力學」試圖針對十八世紀之後古典力學的發展做個相當綱要性的流覽，以便明瞭赫茲版本誕生的歷史沿革。第二節「赫茲力學的方法論和基本架構」主要討論赫茲在《力學原理》的導論部分所闡述的方法論原則，它們是赫茲形構他的力學版本之「指導原則」也是判斷其它力學版本的「判準」或「要件」。這個方法論原則明白地透顯出赫茲力學的「笛卡兒精神」。除此此外，我們還要提出赫茲整個版本的基本架構。第三節「《力學原理》的表達和內容之分析」則選擇性地分析了《力學原理》的一些重要定義，從而展示赫茲表達其版本的獨特方式。第四節「赫茲版本和牛頓版本的比較」將前二節分析的內容整理成「分疇分類」和「主題分類」的模式，並和第五章中牛頓的「分疇分類」和「主題分類」進行比較，以便顯示兩者之間的相似和相異。

壹、牛頓之後的古典力學

牛頓以三大定律和重力原理統一了天體和地面的運動的成就是空前的，而且《原理》一書的內容和結構也是劃時代的新穎。自兩球宇宙模型以來，牛頓再度帶給西方人一個真正革命性的宇宙圖像。從十七世紀末起，天體在沒有以太殼層和渦漩的空間中互相吸引，跨越空間的吸引力是維持它們在橢圓軌道上運行的原因。牛頓理論指引了這個可能

性：任何物體受力後的運動路徑，不管是圓形、橢圓、拋物線、雙曲線，通通可以運用數學模型推算出來，也因而可以明確預測物體的運動位置。然而，不只在科學內容上，在作科學或者發展科學理論的方式上，牛頓也提供了一個典範：建構抽象的數學原理或數學模型，再應用到真實現象上。

牛頓之後，建構數學原理的方法大幅進展。雖然牛頓是英國人，但力學（包括天體力學、重力天文學、動力學等等）發展的主力卻轉移到歐洲大陸—特別是法國¹。法國的力學家兼數學家們一方面研究力學、一方面發展適合描述力學的數學，結果力學和代數型態的微積分都在十八世紀達到頂峰。法國力學家傾向認為力學原理是一種「必然真理」，出於人類的理性推論，於是力學變成一門純粹的「理性科學」，而產生所謂「理性力學」(rational mechanics)、「分析力學」(analytic mechanics)、「理論力學」(theoretical mechanics)等等稱呼²。力學家們普遍以更抽象的「質點」、「質點系統」、「剛體」等概念來思考，而且往往沒有參照任何自然現象。他們應用代數型態的數學公式來描述種種抽象概念之間的關係，好像完全從理性或符號定義演繹出來一般。比起牛頓在《原理》中已經相當抽象的幾何圖形，這些數學等式和它所描述的對象或事件之間更是沒有任何相似或類比的可能性。儘管如此，質點、剛體等等是一種抽象物件，數學公式描述的是這些抽象物件的行為，所以它們都是可認知的，仍然做為一種抽象的「認知模型」。

-
- ¹ 為什麼牛頓所展現的數學（幾何）方法沒有在英國繼續發展呢？天文史家 Berry 以為部分是因為當時的英國缺乏真正有才能的人，部分原因則是因為牛頓的數學形式的特異性。牛頓的幾何方法固然較清楚、優雅，但每一個特別的問題都必須分別考慮，因而難度更高。雖然牛頓已經發展了微積分的代數形式，但顧慮到它的新奇性和不熟悉，而改用幾何方法在《原理》中。英國人由於尊敬他們的大師，不像歐陸數學家一樣，敢於應用萊布尼茲的系統。因此，牛頓之後的力學遂由歐陸數學家獨領風騷(Berry 1961, pp. 247-248)。其實，這一點可以有很多解釋，一種是從民族性上來解釋，即英國作科學和思想傳統一向不同於歐陸的風格（參看下註），牛頓反而比較像是當時英國人的異數。另一種是從「理論競爭」的架構上來解釋，亦即英國的牛頓學派，始終將笛卡兒和萊布尼茲視為對手，在競爭狀態下，法國力學家的「整合」作為，可能會被視為牛頓家族挫敗的象徵。見第七章對於「競爭」的討論。
- ² 孔恩已經描繪了「兩種科學」間的對抗：「數學對抗實驗傳統」。前者由古典物理科學所代表，後者則被稱為「培根科學」(Baconian science)（注意培根正是英國著名的啟蒙思想家）。孔恩分別描繪這兩種科學的希臘根源和它們各自的傳承和發展(Kuhn 1976)。我們可以看到英國的科學傳統和歐陸的確有某種風格上的差異，這一點以乎平行於哲學上的英國經驗論和大陸理性論。法國科哲家杜恩也看到英國人長於實驗和模型的想像，法國科學家則長於數學分析和演繹(Duhem 1991, ch. 4)。

雖然牛頓的成就非凡，但並非毫無瑕疵。牛頓的力學理論版本在流體方面並不完善，有很大的餘裕和發展空間。事實上，不僅在流體這一主題上，牛頓帶有神秘色彩的「萬有引力」概念，他的幾何方法以及他的基本概念和定義等等，都是力學重構和再發展的契機。牛頓之後的古典力學家們，大致上也是循著這幾個缺失去發展和形構他們自己的理論版本。歐拉將萊布尼茲的微積分系統和符示方法引入力學研究中，他也探索了固體(solid bodies)（也就是剛體）和流體力學³。達蘭伯特則認為力學是純粹的理性科學，並提出質點系統的達蘭伯特原理，他也探討流體力學⁴。卡諾(Lazare Carnot)的力學則首度顯現了「能量」(energy)概念優先於「力」概念的觀點⁵。進入十八世紀末，能量概念開始成為重要概念，並在十九世紀成為科學的主導觀念⁶。拉格朗日以動能和位能的概念首度提出和牛頓第二運動定律等值的拉格朗日等式，隨後愛爾蘭的漢彌爾頓應用拉格朗日等式提出漢彌爾頓原理，成為科學家眼中比牛頓運動定律應用更廣、更優雅的基本原理（參看第四章）。雖然在許多方面，這些古典力學家發展了和牛頓不盡相同的概念和分疇，但是在大部分基本概念上，他們也沒有表現出對牛頓版本的革命或斷裂。在某些面向上，他們可能不會被視為「牛頓主義者」，然而，它們和牛頓版本仍屬於同一家族的一即「古典力學」，也就是一個「古典力學的理論版本大家族」。這些古典力學家與牛頓之間的相似、差異和繼承關係當然不能這樣三言兩語地打發，對諸版本進行分析比較將是發展「理論版本家族」模式的必要工作。

十九世紀末的古典力學發展，可以說已經燦然大備。科學家似乎再也找不到新發展的空間，特別是海王星的發現給予牛頓力學最強有力的支持，科學家們似乎感到「力學的終結」，雖然還有水星近日點的問題⁷，然而有了天王星和海王星的成功案例，科學家對水星問題是樂觀的，他們大多相信解決只是時間長短而已。另一方面，一部分科學家開始將注意力轉向力學內部的邏輯或概念一類的哲學問題上。更具體地說是隱然

³ 參看 Dugàs(1988), *A History of Mechanics*, Part 3, ch. 3, 6, 8。以下談及的諸古典力學家，本書均有論及。

⁴ 達蘭伯特原理，簡單地說，指一物體如果在運動的過程中裂開，則其裂開後的諸部分，會朝向不同方向運動，但總質心仍然保持在原來的路徑上。其解說可參看 Mach(1960), *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*, pp. 425-426。

⁵ 能量概念來自萊布尼茲的「生命力」(vis viva)，萊布尼茲認為它是質量與速度平方之積。

⁶ 能量概念在十九世紀成為不僅力學、而且也橫跨許多學科的統一概念，並發展出熱力學(thermodynamics)。關於它的興起和演變可參看 Crosbie, Smith (1990), “Energy” 的簡介。在牛頓的理論版本中明顯沒有任何能量概念的痕跡。

⁷ 關於解決水星近日點的歷史，參看 Roseveare, N. T. (1982)。

地以不同的哲學立場來重新安排動力學裏的關鍵概念，試圖尋求一個邏輯上更融貫、完美、更簡潔的表述。馬赫站在實證論和現象論(phenomenalism)⁸的立場上，針對牛頓的「絕對空間和絕對時間」、第三運動定律和「質量」概念進行批判即是一個顯著的例子⁹。赫茲的力學理論版本就在這種科學發展的思想氛圍下誕生。當然，這種出於哲學和邏輯上的動機，所帶來的不僅僅是邏輯或美學上的效果，在概念網絡與意義整體論的觀點下，對科學概念或科學意義也會帶來截然不同的變化。

貳、赫茲力學的方法論和基本架構

赫茲肯定是個能令哲學家興奮的科學家，他的科學思想和作品中蘊涵了許多哲學考察的材料，事實上，他本人也是個相當「哲學化的科學家」。赫茲是個新康德主義者(neo-Kantian)，但是也有濃厚的實證論成分。他相信先驗(a priori)知識的存在，但也主張檢驗真理終究是一件經驗事務¹⁰。赫茲力學理論版本的最大特色在於他試圖從「質量」、「時間」和「空間」三個原始詞項(primitive terms)出發來重構整個力學系統¹¹。赫茲不滿意使用「力」概念為核心的牛頓版本，也不滿意以「能量」為核心的漢彌爾頓版本，他認為這兩個概念都太模糊，既無法以經驗直接證實，又沒有嚴格的定義，於是著手發展他自己的版本，將「動力學」

⁸ 實證論，也就是主張只有那可以經由感官經驗證實的對象才是科學知識的對象；現象論則是指認識論上的現象論，主張知識的基礎必定建立在直接的感覺內容—哲學家所謂的感覺與料(sense-data)上。

⁹ 參看 Mach(1960), ch. 2: IV, V, VI, pp. 247-297.

¹⁰ 關於赫茲的認識論和科學哲學思想種種，參看 Cohen, R. S. (1955), "Hertz's Philosophy of Science: An Introductory Essay" 的介紹。此文附於赫茲的《力學原理》英譯本之前（未標出頁數）。另外，赫茲自己為了《力學原理》寫了長達四十頁的介紹，提供了許多他的科學哲學思想的材料。有許多哲學家如 Cassirer, Duhem, Voss, Dugàs, Mach 都相當贊美赫茲，參看 Cohen, R. S. (1955) 之文。Mach(1960)和 Duhem(1980)也在赫茲的力學和哲學上作了簡短評論。最近討論赫茲的科學和哲學論文集是 Baird, Hughes, & Nordmann(1998) (eds.) *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher* 一書，收集了很多討論赫茲思想的論文。

¹¹ 當然這並不表示「力」和「能量」的詞項和概念在赫茲的理論和著作中消失了，而是它們的意義現在只是用「質量」、「空間」和「時間」來加以定義的「名目定義」(nominal definition)，沒有任何指涉性的涵意(referential meaning)。換言之，把它們詮釋為只是物體運動（空間和時間的變化）的效應，而不是造成物體運動的原因。

化約到「運動學」和「幾何學」之上。這種化約方式也讓他的理論有笛卡兒的色彩¹²。

《力學原理：以一個新形式呈現》(*Principles of Mechanics: Presented in a New Form*)，顧名思義，赫茲試圖提出一個新形式的力學。什麼樣的「新形式」？也就是重新安排過去流行的力學理論之各關鍵概念，以便呈現一個新的力學架構。為什麼要這樣呢？赫茲以為：

...力學的基本觀念，以及聯結它們的原理，代表了物理學對可感世界的事物、以及發生在這些事物上的歷程，所能產生的最簡單形象(image)。選擇不同的基本命題，我們就能夠再呈現出力學原理的種種形式。因此，我們能得到事物的種種形象；而我們能夠在有關邏輯的可容許性(logical permissibility)、正確性(correctness)、和適切性(appropriateness)¹³方面來檢驗和互相比較這些形象。(Hertz 1956, p. 4)

這兒所謂的「事物的形象」指的是「事物的諸概念」(conceptions of things)——從本文的觀點看，是指「概念框架」。如此上段的引言即可簡單地重述為：以不同的基本原理來說明或模釋力學對象，將會產生不同的力學「概念框架」。如果從科學家用語言符號來表達這形象的角度來看，又可稱為「再呈現模式」(mode of representation) (赫茲在後文中常常使用這個詞)。而最好的力學形象必須滿足「邏輯可容許性」、「正確性」和「適切性」這三項價值或要求。對赫茲來說，「邏輯可容許性」意指我們的諸形象不能和思想法則相矛盾；但是，邏輯可容許的形象卻可能是不正確的，因為它們的基本關係和外在事物的關係相矛盾；再者，在既可容許又正確的不同形象之間，較適切的那個形象圖繪(picture) (也就是模釋)了更基本的對象關係，而最適切的形象則是擁有最少多餘或空洞關係的那一個(Hertz 1956, p. 2)。我們可以說這三個要求是赫茲建構力學理論的「基本價值」與「方法論原則」，他試圖建立一個「邏輯可容許的」、「正確的」且「最適切」——也就是「最好的」力學框架¹⁴ (至少相較於當時已有的其它形象)。

¹²馬赫指出赫茲的力學實現了笛卡兒的理想(Mach 1960, p. 323)。Saunders(1998)比較了赫茲力學和笛卡兒力學。至於赫茲將力學與幾何學聯結的詳細討論，參看 Lützen (1998)。

¹³這三項要求的德文原文是 "Zulässigkeit"、"Richtigkeit"、"Zweckmässigkeit" (轉引自 Dugàs (1988), p. 445。Dugàs 譯作 *the absence of logical contradiction, agreement of experiment, convenience*) 直接根據德文原文，亦可譯作「可行性」、「正確性」、「合目的性」。

¹⁴雖然赫茲自謙地說：「我已尋求的不是唯一的力學形象，也還不是最好的形象；我只尋求去發現一個可理解的形象，而且由一個例子顯示出這個可理解的形象是可能的而且看起來是什麼樣子的。」(Hertz 1956, p. 33)

基於上述目的與價值，赫茲在〈導論〉中首先介紹了過去已發展的兩種力學形象（分別佔用了〈導論〉第一和第二節的篇幅）：一是伽利略—牛頓一脈，以「空間」、「時間」、「質量」和「力」四者為基本概念和以牛頓三大運動定律為基本原理所形構的力學形象；另一是漢彌爾頓一脈，以「空間」、「時間」、「質量」和「能量」為基本概念並以漢彌爾頓原理為根本的力學形象。赫茲以觀念論述的方式（沒有討論任何數學等式或定律公式），分別展示這兩種形象的基本論點，並批評它們均不能完全滿足所提的價值標準（主要為「邏輯可容許性」）（Hertz 1956, pp. 4-24）。於是赫茲試圖提出第三種概念安排或者再呈現模式：只以「空間」、「時間」、「質量」三者為基本概念，再加上一條類似牛頓的慣性定律或高斯(Gauss)的最小拘束原理(Principle of Least Constraint)的基本定律，藉此來形構一個新的力學大廈。在〈導論〉第三節，赫茲以論述的方式描繪這個提案的藍圖，隨後評估這個提案是否能滿足先前所提出的三項價值要求。在「正確性」方面，必須由實驗來驗證——顯然赫茲所處理的已經由過去的許多經驗所證實；在「適切性」方面，則由整本書的內容來顯示（赫茲特別強調這適切性和人類的實用或需求無關）；提出能滿足「邏輯可容許性」的新形式，則是赫茲發展這新模式的主要原因。

為了達成預設的目標，赫茲不惜採取單調、繁複的精確定義方式，在引入新的詞彙之前，必先透過先前已定義過的詞項來定義，如此可以保證後來出現的概念都建立在已證明的概念上。既然力學要使用數學語言來描述，最根本的定義也可以追溯到數學上，也就是「先討論那些單純且必然從已被接受的定義和數學中引導出來的關係。」(p. 35) 這些最根本的定義或數學，可以被視為無關於任何經驗的「先驗」判斷，所以赫茲採取如下的架構來「發展」或「再呈現」他的《力學原理》：第一冊定義各種詞項，赫茲宣稱它完全是康德意義下的先驗判斷，我們可稱之為「先驗運動學」；第二冊才進入動力學和經驗領域，讓我們稱之為「經驗動力學」。從本文的「分類—模型」的架構來看，赫茲的《力學原理》的基本架構可以圖示如下圖 6-1。

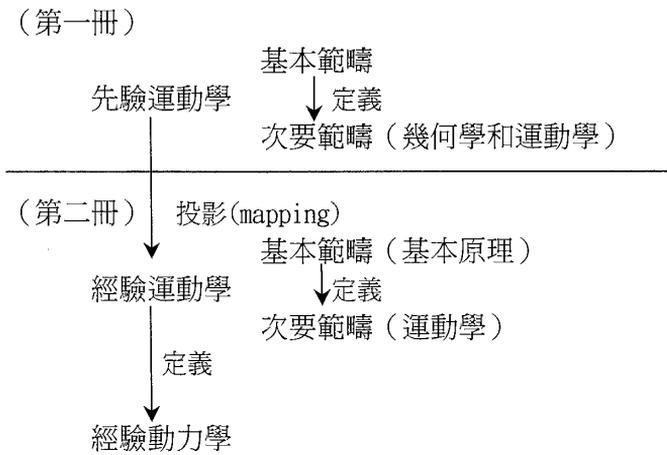


圖 6-1 說明：先驗運動學的部分，在概念上（直觀性地）定義了所有的相關詞項：包括基本範疇、次要範疇和範疇的分類，這些定義被應用到經驗上，與操作程序聯結起來，從而有了經驗意義（因為它們本身的先驗意義並沒有消失，而是對應了操作程序，故我們稱之為投影）。從經驗運動學再進一步定義經驗動力學裏的概念與模型，如此形成赫茲整個力學架構。

《力學原理》分成兩冊，第一冊全冊為「先驗運動學」部分，定義了所有的詞項；第二冊的第一、二、三章則是「經驗運動學」的原理部分，也就是「經驗動力學」的原理；第四章討論「不自由系統的運動」，才正式進入「動力學」。

參、《力學原理》的表達和內容之分析

第一冊《物質系統的幾何和運動學》(Geometry and Kinematics of Material Systems)共有七章。其中一到六章都是各重要詞項的定義，對赫茲來說，屬於幾何學領域的；第七章才是運動學部分。赫茲開宗明義地宣告：「第一冊的主題完全獨立於經驗。所有斷言是康德意義下的先驗判斷。它們建立在下斷言的那個人的直觀上，以及由這直觀引導出來的邏輯形式....」(1956, p. 45)所以，赫茲在進行每一章的討論之前總是先針對詞彙進行直觀性的定義。正如標題所示，這一冊處理的是幾何學和運動學的問題，其問題著重在物質點(material point)和物質點系統(system of material point)（往往簡稱為「系統」）的空間關係，也就是說它的主题主要是建構物質點和空間的關係模型。

首先，赫茲在第一章「時間、空間和質量」中提出了四個定義：「物質質點」(material particle)、「質量」、「物質點」、「物質點系統」。從這兒我們可以看到幾項特色：(1) 從一開始即應用了「時間」和「空間」在定義項中，譬如「定義 1：一物質質點是一個特徵(characteristic)，我們毫不歧義地在一已知時間上將一已知點和（任何其它時間上）空間

中已知點聯結起來」¹⁵(pp. 45-46)；(2) 赫茲很小心地使用「關係性」或「相對性」的定義方式，「質量」並不是絕對量，而是比較得到的。例如「定義 2：在任何空間中的物質質點數量，和在一個固定時間內某個選出的空間中物質質點數量相比較，被稱作第一個空間中所擁有的質量。」(p. 46)；(3) 「物質質點」和「物質點」的概念不同，前者是用來計算質量的單元(units)，後者則是進行運動的主體。

接著第二章〈點和系統的位置和位移〉(Positions and displacements of points and systems)、第三章〈一個物質點系統的無限小位移和路徑〉(Infinitely small displacements and paths of a system of material points)兩章定義和討論了三個屬於空間的概念(或說由空間來定義的概念)：位置、位移、路徑。「(物質點)位置」的定義是「由一個質點在一已知時間上所指示的空間點，被稱為該質點在該時間的位置。一物質點的位置是它的質點之共同位置。」這個定義只是單個物質點，緊接著赫茲定義「系統的位置」：「一個系統的所有物質點同時占據的位置之總累積(aggregate)，稱作這個系統的位置。」(p. 48)，隨後赫茲繼續定義「位移(點的有限位移)」¹⁶，並首度出現數學等式：

$$s'^2 = \sum_1^3 v (x'_v - x_v)^2$$

這個數學等式在表達三度空間座標軸 v 上的位移， x'_v 代表末位置， x_v 代表初位置；總和符號 Σ 上的 3 表示三個向度，位移的量(magnitude) s' 是這等式中的正方根。對赫茲來說，數學等式的目的是為了「表達」(express)物理量(當然，它們也必須被視為該物理量的理論脈絡定義)，赫茲將這數學表達系統發展得相當繁複。

隨後，赫茲繼續定義和表達各種不同類型的位移：「系統位移」、「位移組合」、「無限小位移」，其中「無限小位移」首度引入微積分(也就是引入了「時間」的概念或因素)，系統的無限小位移之數學表達式如下(以 dx_v 來代替 $x'_v - x_v$) (p. 61)：

$$m ds^2 = \sum_1^{3n} v m_v dx_v^2$$

在第三章末尾，赫茲引入了「路徑」的概念。「路徑」在漢彌爾頓版本中即扮演重要的角色(記住在牛頓的《原理》中不曾出現過這個概念)，

¹⁵英譯為「A material particle is a characteristic by which we associate without ambiguity a given point in space at a given time with a given point in space at any other time.」

¹⁶這個定義是「物質點從初位置到末位置的經過(passage)，無關於時間或經過的方式，被稱作該點從初位置到末位置的位移。」(Hertz 1956, p. 52)

在赫茲版本中也是相當重要的概念。赫茲在定義路徑時，一開始即從系統的路徑著手：「一系統從一位置到另一位置的過程中，所占據的位置之總累積，稱為此系統的路徑。」

第四章討論模態性的空間，亦即「可能和不可能的位移、路徑、位置」等等；第五章「物質系統的特殊路徑」開始定義且和表達一些特別種類的路徑：諸如「最直路徑」(straightest paths)、「最短路徑」(shortest path)、「測地線路徑」(geodestic path)；第六章則論「單一系統的最直距離」(the straightest distance in holonomous system)。縱觀這五章的主題，的確屬於空間幾何學的範圍（當然不是歐幾里德式的純粹幾何），換言之，針對空間範疇進行分類，再組合第一章的「物質」範疇之各種類，而形成了種種不同的概念，赫茲就針對這些概念逐步地一一明確定義，並發展它們的數學表達系統。直到第七章，赫茲才進入了運動學的部分。

第七章的標題即是「運動學」(Kinematics)，分成兩部分。第一部分引入向量(vector quantities)；第二部分標題為「系統的運動」(Motion of System)，並且定義了運動的四個參項：「速度」、「動量」、「加速度」、「能量」。在數學表達上，它們都只是用「質量」、「空間」（「位置」）和「時間」三者的代表符號來組合等式。讓我們列舉如下（注意這四個表達式代表的都是「系統」）：

$$\text{速度 } v \quad mv^2 = m \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 = \sum_1^{3n} v m_v \dot{x}_v^2$$

$$\text{動量 } q \quad q_\rho = m \sum_1^r \sigma a_{\rho\sigma} \dot{p}_\sigma$$

$$\text{加速度 } f \quad mf^2 = \sum_1^{3n} v m_v \ddot{x}_v^2$$

$$\text{能量 } E \quad E = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \sum_1^{3n} v m_v \dot{x}_v^2$$

第二冊「物質系統的力學」(Mechanics of Material Systems)赫茲才真正是進入「動力學」以及經驗的領域。當然，赫茲並不是一開始就討論了系統的「動力現象」，他仍然先進行基本概念的定義。譬如第一章也是〈時間、空間和質量〉、第二章為〈基本定律〉、第三章〈自由系統的運動〉都還是在傳統上認為「運動學」部分。在第一章中，赫茲開始為第一冊的直觀概念賦予操作定義（赫茲自己改稱「規則」）：譬如「時間」的定義是「我們透過單擺擺動次數的計時器來決定時間的持續

長度(duration)；持續的單位是任意約定的。」；「空間」則是「我們根據實踐幾何學的方法，透過尺規(scale)來決定空間關係；長度的單位是任意約定的。」；「質量」則是「由稱重(weighing)來決定物體的質量。質量單位則是任意約定的某物體之質量。」(p. 140)。最後「物質系統」則是「具體質量的系統，其性質與理想定義的物質系統一致。」(p. 142)

第二章，赫茲提出了運動學和動力學的「基本定律」(the fundamental law)：「每個物質系統或者保持在靜止狀態，或者在一最直路徑上等速運動。」(p. 144) 赫茲隨即指出：

一個自由物質系統或者它的局部之每一個運動，一致於基本定律者，我們稱為該系統的自然運動；相對於它可想像和可能的運動。如此力學處理的是自由物質系統和它們的局部之自然運動。(1956, p. 144-145)

顯然對赫茲來說，自然界中的所有運動，都是自由系統或者它們局部的運動。第三章因此處理自由系統運動的一般性質，包括「能量保守」、「最小加速度」、「最短路徑」、「最短時間」等等主題。

第四章則正式進入動力現象（受力運動）的討論。在赫茲的版本架構下，傳統上所謂「受力運動」其實是一種「不自由系統的運動」。所謂「不自由的系統」是指「一個更廣泛的自由系統之局部」，所以不自由系統也是「局部系統」(partial system)，而自由系統則是「完全系統」(complete system)。不自由系統又分成兩種：「受支配系統」(guided system)和「合併系統」(coupled system)。後者即是傳統上所謂的「受力作用之系統」(systems acted on by forces)，赫茲再詳細地定義為：「當一個物質系統的一個或更多的座標等於另一個物質系統的一個或更多的座標，則稱這兩個物質系統直接合併(directly coupled)。」那麼「力量」就被定義為「兩個合併的系統（做為基本定律的結果）其中一個系統施加在另一個系統的運動上之獨立想像的效應(independently conceived effect)。」(p. 185) 可以看到，「力量」現在變成只是「想像的」，而沒有實在性；赫茲用「合併系統」的概念來消除傳統上的「受力作用」之概念。但為了方便，赫茲仍然使用「力」、「受力作用」這樣的詞項。受力運動的數學等式則表達為：

$$m_v \ddot{x}_v + \sum_i^i x_{iv} X_i = X_v$$

其中各 X_v 乃是沿著 x_v 上的分力；這個等式就相當於牛頓第二運動定律。

在第四章所討論的主要是在直角座標下的「合併系統的運動」，赫茲討論了如「作用與反作用」、「力的組合」、「加速度」、「能和功」等等主題。第五章討論「圓周運動」(cyclical motion)也就是牛頓版本下

的「向心力運動」¹⁷，但是赫茲既然取消力的概念，所以他把「圓周運動」定義為「當一系統無限小的位移長度不依賴座標值，而只依賴於它的變化(change)時，這系統的自由座標被說是圓周的。」(p. 209)；第六章討論「不連續運動」，相當於傳統上衝力(impulse)作用的運動。然後，赫茲也分別討論了相對於這兩種特殊運動的主題如「往復的特徵」、「能和功」、「守恆系統」等等主題。

從上文的討論中，我們可以展示赫茲版本的主題分類。其中，基本定律描述自由系統的運動，而「受力運動」現在只是一種「局部自由系統的運動」，受力系統總是一個更廣的完全系統之局部。如果我們考慮整個完全系統的運動，那麼它是一種自由運動；如果我們只考慮完全系統的局部部分之運動，那麼它就是不自由的運動。因此，「完全系統的運動」和「局部系統的運動」是「自由系統運動」的兩個次類。而「局部系統運動」又可分成「受支配系統運動」和「合併系統運動」，後者即是傳統上所謂的「受力運動」，其下又可分成「直線連續運動」、「圓周運動」和「不連續運動」。如此我們得到一個赫茲版本的主題分類樹，如圖 6-2：

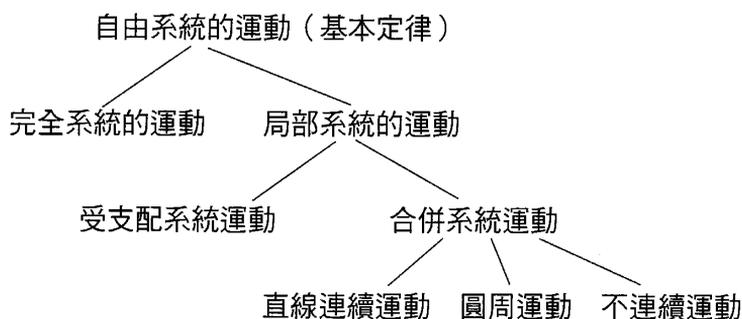


圖 6-2

肆、赫茲版本和牛頓版本的比較

要比較赫茲的理論版本和牛頓的理論版本，當然必須先以「分類—模型的模式」來分析《力學原理》一書的內容。當赫茲不斷在定義各種詞項時，他同時也在進行分疇和分類；當他再以數學等式來表達所定義的詞項時，他也同時在建構模型。

從上一節的討論中，我們可以看到赫茲試圖以「時間」、「空間」和「質量」這三個未定義的原始詞項來定義出所有的力學概念。在數學

¹⁷赫茲在第五章的標題是「隱藏質量的運動」，包含了兩部分「圓周運動」和「隱藏圓周運動」。後者是指系統擁有隱藏未知的質量存在。赫茲指出連續的圓周運動通常有隱藏質量存在；相反地，隱藏質量的運動幾乎總是圓周運動(p. 224-225)。

表達上，我們也可看到所有的概念或模型的數學等式，最後都可以化約到 m, s, t 這三個函項的組合。所以人們有時稱赫茲在進行古典力學的「公理化」。從分疇的觀點來看，顯然「時間」、「空間」和「質量」三者在赫茲的版本中就是建構理論所必要的「基本範疇」，而赫茲試圖應用這三個基本範疇來定義其它次要範疇、次範疇和次種類等等。然而，基本範疇並不是只有這三者，「物質」（包括「物質點」、「物質點系統」、「物質系統」）和「運動」（力學的主題）也是基本範疇。餘者如「位置」、「位移」、「路徑」則是空間的劃分，屬於空間的次範疇；而「速度」、「加速度」、「動量」、「能量」則由「時間」、「空間」和「質量」三者來聯合定義，因此它們是「次要範疇」；此外「聯結」(connection)則是物質點系統的重要性質，「約束」(constraint)是加速度的重要性質（相當於牛頓版本中的「力」之範疇）¹⁸。如此，我們可以將赫茲版本的內容表示為如下的分疇分類架構（圖 6-3）：

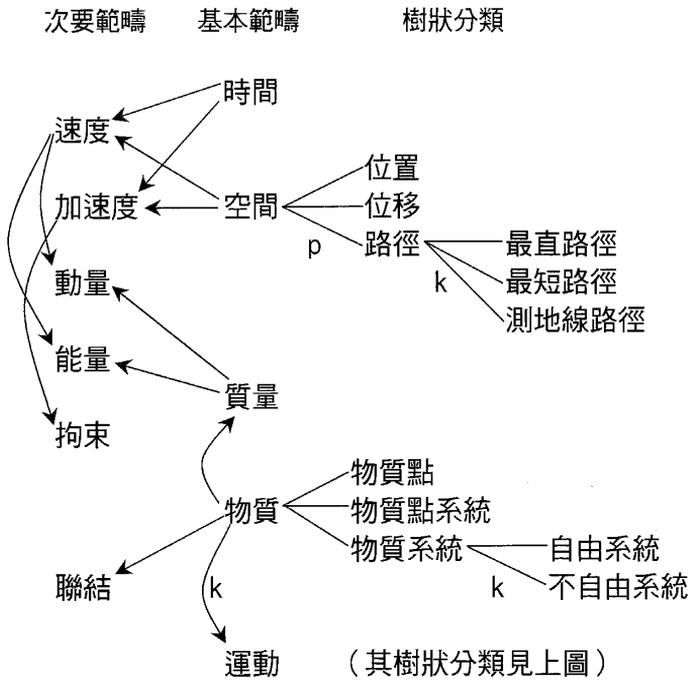


圖 6-3

¹⁸「聯結」和「約束」在赫茲版本中相當重要，其中「聯結」是物質點系統的重要性質，換言之，物質點系統是由於物質點聯結而成的。如果物質點受到「連續聯結」則它形成「物質系統」，非連續性的聯結則形成物質點系統(Hertz 1956, p. 80)。再者，由於物質系統內的所有聯結造成的加速度之改變，即稱作該系統的「約束」(1956, p. 164)。「約束」是牛頓系統中「力」的替代範疇。然而，赫茲並未將這兩個概念表成數學符號，換言之，未使它們扮演「函數」的角色。

必須討論的是，在赫茲的版本中，同樣的科學詞項分別在第一冊「先驗運動學」和第二冊「經驗運動學和動力學」重複出現，並分別有所謂「先驗」與「經驗」兩種意義，這種情況該如何處理？從「分疇」的觀點看，同一詞項雖然有「先驗」和「經驗」兩種定義，但都是同一範疇，因為「分疇」本來就是「先」對世界進行劃分，再投射到世界之中，所以赫茲這種特殊的「哲學立場」對我們的範疇架構並沒有什麼樣的影響。在第一冊中定義的「質量」和第二冊中定義的「質量」都是同一個範疇。

這個分疇分類框架和先前的主題分類樹表達了赫茲版本的「分疇分類與模型」系統。這樣的版本和牛頓版本有什麼可以比較之處？我們將分成下列數點來進行比較。

首先，赫茲和牛頓版本最大的差異就在於「力」的實在性和必要性之上。如我們所見，赫茲的力學根本地扭轉了「力」作為運動原因的觀點，「力」變成只是運動效應的一種想像。在牛頓的「分疇分類」框架中，「力」是一基本範疇，並且有許多不同種類的力量形態，牛頓許諾(commit)了「力」的存在和實在。但在赫茲的「分疇分類」框架中，完全沒有「力」的範疇，並且在運動模型中，以「合併系統的運動」來定義「受力運動」的現象，赫茲並不許諾「力」的實在性。為什麼在「力」的概念上，牛頓和赫茲會有如此大的差異呢？我們記得，在牛頓以重力來說明天體現象和世界系統時，他根據「哲學推論的規則」而反對進一步去追溯重力的成因。牛頓的理由已被史家認為具有實證論的色彩。現在，赫茲則走得更遠，將實證論落實得更徹底。換言之，「力做為運動的原因」這種判斷，無法在感覺經驗中來加以證實，我們只經驗到運動的發生，然後我們想像有某種隱藏的原因在作用，故稱此隱藏原因為「力」，但這只是「想像」。除了實證論外，公理化的傾向、對邏輯可容許性的要求、十九世紀力學發展的氣候，都促使赫茲精簡他的版本，從而消除「力」的實在性和必要性。

第二個必須比較的重點是兩個版本中「分疇分類」的「拓樸形態」(topological shape)，也就是各範疇和各種類之間聯結的結構（同樣地，可進一步和第四章中古典力學的漢彌爾頓版本進行比較¹⁹）。表現在我們的圖示框架中，是定義箭頭和直線連結的形狀和路線之差異。如我們所見，在牛頓版本中，「動量」和「力」都是基本範疇，動量由質量和速度的乘積來加以定義，進而透過第二運動定律「動量和力成比例」的關係來定義「力」。然後，速度以位置和時間來定義，質量則由體積和密度來定義，密度又是由空間來定義，整個範疇系統呈現出一種互相定義的網絡形態。我們明顯可看到，在「基本範疇」和「次要範疇」之間，定義箭頭互相指向，顯出某種「紊亂」的模樣（特別是比起赫茲的版本）。赫茲的版本看起來要「整齊」得多。在赫茲的分疇分類中，各範疇明顯受到有意的重新安排，亦即透過公理化方法的思路，以最少的原始詞項

¹⁹教科書介紹的漢彌爾頓版本也相當簡潔，當然，本書所呈現的並不完全。

來定義其它所有詞項。因此所有定義箭頭都是由「基本範疇」指向「次要範疇」，「基本範疇」本身則維持未定義的狀態。

緊接著，各範疇的樹狀分類部分，我們也可看到相當有趣的差異。由於牛頓重視「力」並許諾它的實在性，因此「力」被劃分為許多次範疇（或次類）代表造成種種不同運動形態的種種不同類型的力。相反地，赫茲試圖把「動力學」化約到「運動學」和「幾何學」之上，所以赫茲重視空間（幾何學的主題）的分類，位置、位移、路徑等等牛頓版本中少見或不曾出現的空間次範疇，在赫茲版本中成為重要的主題，並進行了詳盡的分類。對牛頓來說，空間的概念主要是位置²⁰，當然他還做了絕對空間與相對空間的區分。對赫茲來說，空間的概念則包含了較複雜的樹狀結構（位置、位移、路徑以及種種特殊路徑）。然而，這並不代表赫茲和牛頓的空間概念產生了什麼樣重大的差異，只不過是赫茲對空間進行了更細密的劃分。從意義整體論的觀點來看，「力」和「空間」這兩個範疇內涵的差別，將會影響了整個範疇框架的意義。當然，這樣的影響所造成的變動並不是很大，在「質量」、「動量」、「速度」、「時間」等等範疇上，兩個版本的定義線路仍然是一樣的。

最後，我們要考察的是「主題分類」，也就是兩者各自建立的運動模型族群之比較。牛頓在《原理》中建立的模型階層系統，主要集中在「向心力」運動的部分，因為牛頓特別關注「世界系統」（特別是天體現象）的說明。但這並不表示牛頓版本只侷限在向心力運動模型內，從牛頓對「力」的分類和認知中，我們可以瞭解不同形態的力將會造成不同的運動種類。因此讓我們重新建立一個簡單的牛頓版本的模型階層：

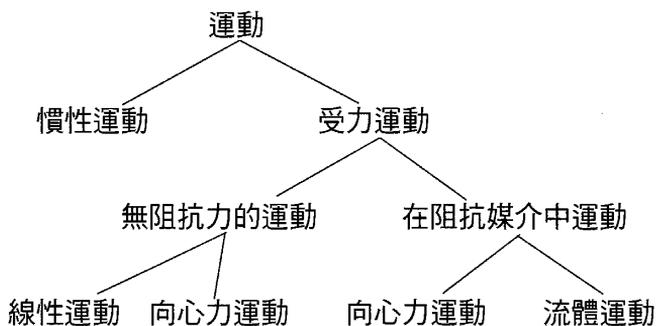


圖 6-4

比較這個分類樹和先前赫茲版本的分類樹，可以看到最大的差異在慣性運動和受力運動兩者關係的調整。對牛頓來說，「慣性運動」（由第一運動定律來說明，指完全不受外力作用或處在力平衡或抵消的狀態下之

²⁰在牛頓《原理》討論絕對空間與絕對時間的部分，牛頓也使用了一個亞里斯多德式的傳統概念：「地點（或場所）」(place)。不過這個概念在精確的數學座標系統之下，將可被化約為「位置」的概念。

運動)和「受力運動」是運動之下的兩大互不相隸屬的種類；但在赫茲的版本中，所有的運動都是「自由系統的運動」(相當於牛頓版本中的慣性運動)，因為所有的運動都必須用「基本定律」來說明。自由系統的運動又分成完全系統運動和局部系統的運動(局部自由系統的運動)，受力運動被化約為合併系統運動而歸屬於不自由系統的運動之下，也就是說，受力運動是某個更大的自由系統之下的兩個局部系統之合併。換言之，在赫茲看來，牛頓版本下的受力運動只是慣性運動的一個次種類。

赫茲的理論版本和牛頓的理論版本，兩者間的關係究竟應該如何看待？上述幾點考察固然顯現了赫茲版本和牛頓版本之間的差異，但並不能顯示赫茲提出了一個全新的理論。理由很清楚，一來赫茲並沒有這種意向，他的目的和出發點本來就只是重新安排傳統力學裏的概念，以便提出一個滿足「邏輯可容許性」、「正確性」和「適切性」的「形象」或「呈現模式」；二來雖然赫茲版本的概念架構和詞彙結構不同於牛頓的版本，但其理論和計算結果在形式上是等值的(formal equivalent)²¹。在兩個版本的分疇分類和模型階層的架構上，都顯現了部分變動、部分不變的情況，我們當然不能說赫茲的版本只是牛頓版本的重新表達，但也不能說赫茲提出全異於牛頓的嶄新理論。我們看到，在邏輯秩序上，赫茲版本的確是牛頓版本的精煉和提昇；從某些美學觀點來看，赫茲的概念架構的確也比牛頓的架構更美；但赫茲版本並不是只有邏輯和美學上的效果。我們已主張科學範疇架構的意義必須用意義整體論的觀點來看待，因此，赫茲的範疇架構有別於牛頓的範疇架構，顯示了赫茲版本的「整體意義」和牛頓版本的「整體意義」之差異，但這整體意義之差異並不代表它們是兩個截然不同的理論，如同相對論和牛頓力學之間的那種不同。因為在整體意義的比較上，赫茲版本和牛頓版本仍然有很大的重疊或相同之處。再者，赫茲所提出的模型階層中，只是對牛頓的模型階層之重新安排²²，並且給予不同的名稱，但赫茲並沒有提出任何新的可落實模型，也沒有開發出任何新的論域，所以赫茲版本只是古典力學家族裏的一個版本，而不是對牛頓力學或古典力學的革命。

²¹關於赫茲的理論版本和牛頓的理論版本是否「等值」，有一些爭議。如何解決爭議要看我們如何定義「等值」的意義和概念。Saunders(1998)已討論了是否赫茲的系統等值於牛頓的系統，並提供哲學和方法論的答案。他引用奎因對卡納普的《世界的邏輯結構》之批評，而主張赫茲的進路「不容許事實宣稱的可修正性」，所以很難把赫茲的系統應用到實際現象上。

²²不過，我們要注意，赫茲的「運動種類」之意義和牛頓的「運動種類」之意義頗有不同。譬如赫茲的「圓周運動」依賴於一個圓座標，但牛頓的「向心力運動」則不是。



第七章 理論版本家族的發展

諸古典力學家們的理論版本，構成了一個古典力學的理論版本家族，每個版本的「分疇分類」與「模型分類樹」都有相似與差異之處、兩兩之間的相似與差異亦不完全相同，這樣的家族相似關係，前文已有充分的例示。現在問題是，理論版本家族是怎麼形成的？它是怎麼發展出來的？理論版本家族在發展的過程中，總是會面對其它版本與家族的競爭。換言之，每個理論版本家族，總是在一個競爭環境下形成、擴張或萎縮。因此，探討理論版本家族的發展，也免不了考察理論版本之間的競爭。

在科學方法學的傳統中，對科學理論的競爭、發展與變遷的考察，總是涉及評價與選擇，亦即探討科學家在面對競爭理論時，究竟是如何、以及應該如何選擇，以致造成科學理論的變遷。然而，本文並不算進入選擇與評價的問題中。我們考察的只是理論版本與理論版本之間，家族與家族之間，究竟是如何競爭與發展？一個理論版本究竟如何與另一個理論版本「競相」吸引新生代科學家的投入？如何產生更多子代理論版本？它們分別是沿著什麼樣的「路徑」(pathway)通抵（或發展到）其子代的理論版本？最終發展成不同的家族？每個家族發展的主要路徑又是什麼？這些是本章要考察的問題。至於一個家族為什麼會繁榮成功？為什麼在科學版圖中取代另一個家族的勢力？究竟是什麼內部因素與外部因素，造成一個家族的成功與另一家族的失敗？這類家族發展的原因，涉及科學家的選擇與評價，我們暫不涉及。並不是它們不重要，而是我們認為，要進行理論取捨、家族成功或失敗的評價，有必要先瞭解更細緻的理論發展路徑圖——而這正是傳統科學方法論最忽略的地方。

套用力學中的「靜力學」(statics)（研究機械結構與結構中的靜力作用）、「運動學」(kinematics)（描述運動物體的軌跡）和「動力學」(dynamics)（研究力量與運動軌跡的關係）的區分，我們可以說，第七八章考察的是「理論的運動學」，先前諸章考察的是「理論靜力學」，但是本書尚未全面涉入「理論動力學」。因為在我們看來，「理論動力學」必須奠基在「理論運動學」的充分展示之上。「理論運動學」其實是科哲中的「理論靜力學」（理論的結構）與「理論的動力學」（理論的發展與變遷的原因之發現與評價）之間的必要聯結。

壹、理論版本家族結構的發展歷程

牛頓原版本、牛頓式的版本、漢彌爾頓版本、赫茲版本等等，構成了一個牛頓力學的理論版本家族。它們顯然不是一開始就同時俱在，也不是直線性地發展，更不是在整個大家族內都具有同等的位置；相反

地，這個家族的形成本有一段漫長的歷史發展過程，使得成員間具有錯綜複雜的關係，也讓牛頓力學具有一個家族性的結構。然而，這樣一種家族性的結構究竟是怎麼發展出來的？

既然我們使用了「家族」這個人類社會單元的語詞，就表示理論版本的家族結構和人類家族結構有相當的類似性。正如一個人類家族的每個個人，有其血緣上的父母、有其兄弟姐妹，也有兩代之上的遠親與透過婚姻關係而帶來的姻親。理論版本家族成員之間，則有其植基在原理、概念、方法上的種種不同的繼承，產生一個類似人類家族的關係結構：也就是說，一個理論版本有其理論上的父母、有其兄弟姐妹版本、有其偏遠的遠親。而且正如家族會形成一個傳衍的譜系，使每個個人在族譜中有一個特定的位置；每個理論版本在理論版本家族譜系中，也會有其特定位置，使個人和其他家族成員間的關係，可以一目瞭然。同樣地，一個理論版本家族結構的揭示與研究，也在於揭示和建構這個理論版本家族的譜系圖，使得每個版本在家族中的位置與關係，可以鮮明地被呈現出來。當然，理論版本之間的傳衍與繼承關係，比較人類家族間的血緣遺傳，更為複雜許多。

正如每個個人都必須有生物上的根源；每個理論版本要不是在先前的某個理論版本的啟發下被發展出來，就是綜合先前更多理論版本而建構一個全新版本。它可能繼承其前輩的某些基本概念、原理和方法，卻拋棄或改善一部分的概念、定理和觀點。換言之，一個理論版本對其「理論父母」（或「直系親代」）的繼承，絕不是全盤地複製，而必定有概念、原理或方法上的差異（否則就不能算是一個「版本」）。如同十八世紀古典力學版本大抵繼承了牛頓的力量概念和三大運動定律，但是卻拋棄他的神學式的萬有引力觀念。

如果有另一個理論版本，也繼承了直系親代的理論核心，卻著重在處理其它不同的問題和現象，它和「同親代」的理論版本，就成了「兄弟姐妹關係」。版本間的兄弟姐妹關係之所以會形成，是因為「親代版本」的內容有許多尚未解決的問題或處理不完善的地方，使得後繼版本有施展的空間。譬如牛頓《原理》中的版本，至少有下列主要缺憾之處：(1) 《原理》第二冊處理的流體的部分，雖然具有前所未見的原創性，但大部分都是錯誤的；(2) 三體（如太陽—地球—月球）問題無法提出精確計算上的解答；(3) 一些力學基本概念如「力」、「質量」、「重量」、「動量」、「物體」的定義、彼此間關係和測量方式並不清楚；(4) 原書中的幾何表現方式，在應用上十分晦澀困難¹。這些缺點，都留下了新理論版本發展空間。有的數學家對準流體問題而發展流體力學；有的則試圖以代數語言來重新形構牛頓的原始表達；有的人則發展剛體、多體和動力系統理論。在解決問題的過程中，他們不僅作了更精確

¹ 參看第六章與 Truesdell 1968, ch. 2。

的數學表達、也發現了更多力學原理、引入不同的概念、分疇和分類²，他們的努力共同建構了牛頓力學家族。然而，由於他們之間的不同信念、許諾與概念，使他們的理論版本成為「兄弟姊妹」。甚至有些力學家在牛頓論敵笛卡兒的影響下應用牛頓的理論來進行研究，使他們的版本成為牛頓家族中的旁系或遠親³。

一個理論版本家族至少有一個「始祖」，它啟發了後續的研究，引導一個家族的建立，讓我們把做為「始祖」的理論版本稱作「原型版本」或「典範版本」——亦即它是一個理論版本家族中，被後繼版本視為參考、模倣和改良依據的版本，扮演著工業上的原型產品（如原型機、原型車等）以及「分類的原型理論」中的「原型」之角色。一個做為始祖的原型版本通常是家族中的第一個誕生的版本，但是並不是唯一一個，也不是憑空而生，原型版本仍然有它的直系親代與祖先，而且它的直系親代通常有好多個，正是綜合了好幾個親代的特長，加上新增與改良的內容，使它得以成為一個新家族的始祖。譬如，牛頓《原理》的理論版本自然是牛頓力學家族的始祖，但是，它也有許多直系的親代源頭——如伽利略、克普勒、波以爾、甚至笛卡兒。

儘管牛頓原版本是牛頓力學家族的單一始祖，但是正如一個理論版本的親代可以不是單一的；一個理論版本家族的祖源也未必是單一的，而是有多祖源的可能。一個家族有好幾個理論源頭。譬如古典力學這個大家族——它太龐大了，甚至可以被稱作王國。古典力學王國不能和牛頓力學家族劃等號，雖然兩者有很大的重疊。牛頓力學家族可以有一個原型版本，即牛頓原版本。但是，古典力學王國的祖先，至少要包括伽利略、克普勒、笛卡兒、惠更斯和牛頓、萊布尼茲等人⁴。牛頓力學家族是

² 最好的例子是歐拉(Leonard Euler)，如同 Truesdell 說：「歐拉生平作品的大部分，都是為了澄清且發展牛頓式的概念，並以同樣重要的新觀念來補充它們，證明了真正的問題如何能被解決。」(Truesdell 1968, p. 106)。現代形式的力學其實是在歐拉手中完成的。他的功績有精確地定義和表達「加速度」的微積分公式、以及第二運動定律的現代形式，即 $F=ma$ ，把牛頓含糊的「物體」概念精確地定義成「質點」(mass-point)。歐拉也處理了許多流體、彈性體、往復運動等力學問題。（同上，見 pp. 105-107, 114-117）

³ 恰當的例子有 Daniel Bernoulli 和 D'Alembert 兩人。至於 Daniel 的父親 Johann Bernoulli 則可被歸為笛卡兒主義的古典力學家。見第八章。

⁴ Dugès 的《力學史》第二部分「古典力學的形成」共有八章，除了文中所提諸科學家外，還包括了靜力學部分的史帝文(Stevin)；托里切利(Torricelli)、羅伯瓦(Roberval)、帕斯卡(Pascal)的流體靜力學、萊布尼茲等人。Truesdell 則強調與萊布尼茲同時期的 James (Jacques, Jacob) Bernoulli 亦是「理性力學」的創始人之一。Jacob Bernoulli 是 Johann Bernoulli 的哥哥，二人與 Daniel Bernoulli 形成古典力學家中有名的伯努利家族（甚至也可以說是理論版本家

古典力學王國中的一個家族；笛卡兒家族是另一個家族；兩大家族曾經競爭這個王國的統治權，在一段期間內各有其版圖，後來笛卡兒家族的版圖逐漸被牛頓家族所侵吞，牛頓力學家族統領了古典力學王國的絕大領地。儘管如此，許多牛頓力學家族中的理論版本，仍然強烈地透顯笛卡兒家族的精神⁵。這一場理論家族的競爭與王國統治權的逐鹿之戰，見第八章的展示。

貳、原型版本、研究方案與拉卡托斯

當一個理論版本做為發展成一個家族的原型版本時，也意味它啟發了後繼版本的建立，同時在開展了一連串更深入研究的意義上，它將做為一「研究方案」或「研究計劃」(research program)。一個有力的研究方案，通常能打開了一片嶄新的研究領域，揭示一片有待攻克的新版圖，並提供一組從事新研究的有效方法。正如同牛頓與笛卡兒的理論版本，都能啟發、開展且建立各自的大家族，因此都具有「研究方案」的角色和功能。其他追隨牛頓或笛卡兒的科學家，則在這兩個原型的啟發下，建立自己的理論版本。「研究方案」是一個科學理論版本所扮演的角色或具備的功能，這個意義和拉卡托斯(Imre Lakatos)具有啟發術、能指導科學家從事進一步研究的「科學研究方案」(scientific research programme)相近似；但是在構成成分和基本結構上，「原型版本做為研究方案」(prototypical version as research programme)拒絕拉氏研究方案的硬核／保護帶之區分。

拉卡托斯所謂的「研究方案」，約莫相當於孔恩的典範。事實上，拉卡托斯的確提過：如果你喜歡，也可以稱作典範(Lakatos 1978, p. 69)。一個研究方案意味一系列理論(a series of theories)的共同結構：包括一個共同的硬核(hard core)、一個隨著後繼理論而變動的保護帶(protective belt)、以及指導後續研究進行的「啟發術」或「開展術」(heuristics)。首先，硬核意指這一系列理論總是保持固定不變的核心部分。硬核定義了研究方案，如牛頓的方案由三大運動定律和重力定律來定義。在實際的研究上，應用該方案的科學家，不會去質疑硬核。同時，設計實驗來檢驗方案時，也不會把目標對準硬核——它是「不可駁斥的」(irrefutable)或「不可否認的」。其次，保護帶由是許多「輔助假說」(auxiliary hypotheses)、觀察假說、初始條件等等構成的，用來防衛硬核。也就是說，當經驗證據並不吻合理論預測時，科學家會將矛頭對準輔助假說，而不是理論硬核本身。這個經驗證據也不被看成是個反例

族，因為他們三人明顯有理論上的繼承性，他們都看重連續性的作用，而反對牛頓式的超距作用概念)。

⁵ 最主要的當然是法國的牛頓學派者，如達蘭伯特、拉格朗日的「理性力學」和「分析力學」都受到笛卡兒的「理性主義」之影響。更不必提可歸屬於笛卡兒派的 Bernoulli 父子。

(counter-instance)，而只是異例(anomaly)。進一步，當方案面對許多異例時（多到猶如「異例海洋」），科學家可以不斷地調整保護帶：舊的輔助假說被駁斥了，換一個新的假說，以保護硬核穩如泰山。例如，哥白尼為了保護他的天體完美之硬核，而建立了地球運動的假說，然而面對自由落體的異例時，哥白尼就再使用特置假設(ad hoc hypothesis)來解決這個異例。他主張地球的運動會帶動空氣⁶，而空氣會推著落體向東運動，如此，落體掉到地面時不會落在後方。但此假說又會引來一堆異例而不具說服力，譬如逆著地球自轉方向輕物體（如木頭），該物體為何不會被空氣推動而倒退？因為如果隨著地球運動的空氣可以推著重落體和地球同步，那麼為何不能推著輕物體而使其倒退？後來伽利略方案把地球運動視為硬核，加上了「慣性」的輔助假說—落體的慣性使它保持向東，如此保護了地動的硬核，進一步開啟地動說的天文學發展。第三，啟發術意指每個方案所具有的、啟發科學家從事進一步研究和解決問題的技術。包括消極啟發術(negative heuristic)禁止科學家把「否定後件式」(modus tollens)應用到硬核之上，換言之，即使有很多異例，也不能宣稱硬核被駁斥了，否則研究將無法進行。積極啟發術(positive heuristic)一方面意指科學家使用方案去調整、修正或精鍊保護帶的方法；另一方面則指導科學家忽略反例，使用理想狀況或模型來模擬實在。例如，牛頓不管實際的數據，而把太陽和行星設想成質量集中在一點上的質點，而且也不管行星與行星之間的吸引力，只考慮太陽和行星之間的吸引力來計算軌道。

在這種研究方案的界定之下，拉卡托斯提出所謂的研究方案方法論，亦即一套對各種競爭的研究方案進行評價的方法論。啟發術指導科學家進行研究，解決問題，為研究方案爭取「解題成績」，然而，研究的開展無法避免異例的產生，故由保護帶做為後衛防護理論硬核，等待解決異例的方法被發展出來。如果在保護帶的後衛戰之中，調整輔助假說過程中達成了進步的問題轉移(progressive problem-shift)時—發現新奇事實且驗證其一，這個方案反而取得更大的成功；相反地，如果理論落後於經驗證據，必須不斷使用特置假設來補救方案本身，就會產生了退化的問題轉移(degenerating problem-shift)—科學問題轉向如何修補理論，而非作新奇預測，就變成一個失敗的方案。這樣一整個研究方案方法論的「歷史圖像」(historiography)之運作流程，可以表達成下列的概念架構（圖 7-1）：

⁶ 地動說，在哥白尼的方案內並不是硬核。「特置假說」的概念、爭議和功能的討論，可參看傅大為(1992)的〈Ad Hoc 假設和「局部理性」〉。

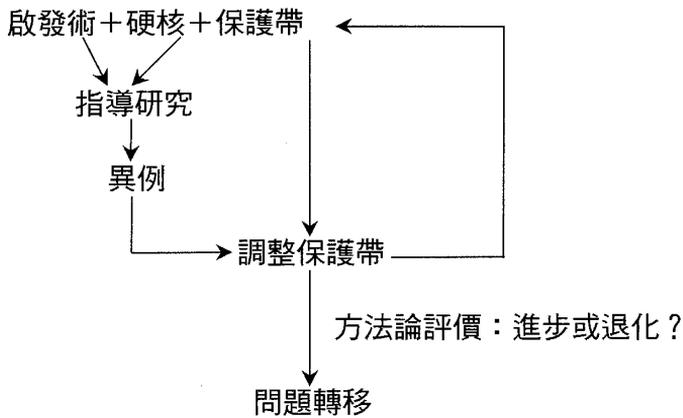


圖 7-1

硬核和一連串的輔助假說之調整，構成了一系列理論（或一理論系列） T_1, T_2, T_3, \dots 。每個後繼的理論乃是為了消化某些異例，而在先前的理論加上或調整輔助假說。我們以 AH 來表達構成保護帶的一組保護假說，則一系列理論可表為 T_1 (硬核 + AH_1)、 T_2 (硬核 + AH_2)、 T_3 (硬核 + AH_3)... (其中， AH_2 是 AH_1 的調整， AH_3 是 AH_2 的調整)。在研究方案內的理論系列之調整，其實是「印證」(confirm) (拉卡托斯用 verify) 了方案的硬核，而不是否證先前的理論，頂多只是「否證」先前的輔助假說。至於進步和退化的問題轉移指如果每個後繼理論比其先前理論有更多的經驗內容（即它預測了某個新奇的事實 (novel fact)），則它構成一個理論進步的問題轉移 (theoretically progressive problem-shift)；如果後繼理論預測的新事實被認可 (corroborated)，或者引導我們發現新事實，則這構成了經驗進步的問題轉移 (empirically progressive problem-shift)。如果研究方案達成了理論和經驗進步的問題轉移，即是進步的問題轉移。如果沒有這樣，就是退化 (degenerating)。更精確地說，退化的研究方案是增加輔助假說來消化已知的異例，卻沒有導致新事實的發現或認

⁷ 注意，精緻的方法學否證論（蘊涵在波柏的理論，但波柏並沒有清楚地表達出來，而是由拉卡托斯發展的）中，理論系列並沒有上述的「研究方案」結構。依據拉卡托斯，精緻否證論也是由「理論進步的問題轉移」來判定科學和偽科學。而且，如果在這理論系列中的某個理論，被另一個帶有高度認可的內容理論所代替了，就表示該理論被「否證」了。譬如，一理論系列 T_1, T_2, T_3, \dots 之中， T_2 代替了 T_1 ，因此 T_1 被否證了； T_3 代替 T_2 ， T_2 又被否證了。換言之，在精緻否證論中，整個科學呈現出一理論系列。但在研究方案中，一個研究方案就包含了一個理論系列，造成進步的問題轉移的研究方案代替了退化的研究方案。但這種代替並不叫否證。形式地說，一個造成進步的問題轉移的研究方案 $RP_1(T_{11}, T_{12}, T_{13}, \dots)$ 代替了退化的研究方案 $RP_2(T_{21}, T_{22}, T_{23}, \dots)$ 。

可。有時甚至產生更多異例，導致必須再增加更多輔助假說——這時輔助假說就變成「特置假設」。特置假設的不斷繁殖造成方案退化。

拉卡托斯的研究方案方法論提供了一個非常有趣的歷史圖像，其歷史發展的單元是「研究方案」，指一個理論系列的共同結構或核心。然而，正是這個「共同結構或核心」的概念為我們所拒絕。我們主張一個「研究方案」是一個理論版本的角色，當一個理論版本在面對其它理論版本的競爭之下，仍然可以吸引優秀的科學人才投入，啟發、引導他們應用理論版本進行研究，甚至建構子代的理論版本時，它就做為一個研究方案。因此，「研究方案」並不是指一個理論系列的共同結構；而是指開拓一片科學版圖的理論始祖，一個具備強大的競爭力(competitive power)、生成力(generative power)和啟發力(heuristic power)的原型版本，足以面對競爭，並「生成」許多「理論後裔」或「後裔理論版本」(descent version)，但是，其理論後裔未必和它共享相同的「硬核」⁸。簡言之，「競爭功能」與「生成或啟發功能」才是研究方案的核心。把競爭與生成結合考量，就形成如下圖像：不同的原型版本做為不同的研究方案，「競相」吸引下一代科學家投入自己的陣營，發展並生成各人的理論版本，以建立並壯大自己的家族，盡力佔領更廣大的科學版圖。在吸引新生代的科學家投入，並啟發他們形構自己的理論版本，以做為家族一份子上，乃是研究方案的生成與啟發功能；就理論版本內容，它所設定的

⁸ 科學歷史上，是否有一系列相繼的理論中，始終保有一個共同的「硬核」？這一點恐怕是有疑問的。最大的困難在於，如何指認這一系列理論的硬核？僅以拉卡托斯的〈為什哥白尼的方案替代了托勒密的方案〉一文為例，拉卡托斯自己詮釋哥白尼理論的靈感和啟發，是畢達哥拉斯和柏拉圖的「原型方案」(proto-programme) (以下簡稱「畢柏原方案」)，以天體為完美，故必須用等速圓周運動來保全天文現象——即畢柏兩人方案的硬核。哥白尼受「天體完美」啟發，而提出必須以不動的恆星球殼來做為天體運動的參考架構——這成為哥白尼方案的硬核。因為恆星天球球殼保持不動，為了說明天體的運動現象，必須讓地球移動，就此在理論上導出地球必須具有周日運動(diurnal motion)與周年運動(annual motion)。此時，地球運動違反了亞里斯多德—托勒密的地球中心說研究方案（它和哥白尼方案共用畢柏的「天體完美」之啟發，但硬核是地球不動，位於宇宙中心。）但地動說並不是哥白尼方案的硬核。後來伽利略進一步發展哥白尼的方案，哥白尼的方案被併入伽利略的方案內，地動說成為伽利略方案的硬核，而且伽利略拋棄了畢柏的「天體完美」這個硬核的啟發。這裏明顯可看出，從「畢柏原方案」經哥白尼到伽利略，硬核一直在變動，那麼究竟從哥白尼到伽利略、克普勒、甚至牛頓，這「一系列的地球天文理論」，有其共同的硬核嗎？它們都能視為哥白尼研究方案之下的一系列理論嗎？還是每位科學家都有自己的研究方案？就本文的「理論版本家族」的角度來看，與其說，每人都只是一系列理論，不如說每人都建構了自己的理論版本，都可做為研究方案，而開展出新的理論版本。

對象論域與它的處理方式，是否能吸引足夠有才能的科學家投入、能開展出多大的家族、佔領多大的科學版圖而言，這是研究方案的競爭功能。

然而，當一個原型版本做為研究方案時，它將會包含哪些成分，以致能與其它版本競爭，並啟發和指導新研究的展開？進一步，它又如何生成其後裔的理論版本？一個理論版本家族的後裔理論版本，是受到研究方案的哪一部分之啟發？又是哪一部分具有競爭性？

參、研究方案的啟發功能與後裔版本的生成路徑

「原型版本做為研究方案」乃是從一個生成後代子嗣的發展角度來看待一個理論版本。如前文所示，一個理論版本的靜態結構是由一個「論域」（包含一個存有論的分疇分類架構）、一個「模型的分類體系」和一組「表達系統」（即一組原理和定律的通則）所組成的。然而，在實際歷史的發展中，科學家提議的原型理論版本，其論域往往含蓋整個自然。要處理這麼龐大的論域，科學家勢必要把整個自然論域樹狀地分類成許多子論域系統，每個子論域構成一個學科的主題，從而構成一個「學科分類系統」，而且這些學科間會有一定的秩序，以反映自然論域內在的秩序。同時，科學家總是基於某些目標而提出其理論，或者保全現象、或者解讀上帝心靈、或者理解自然真實、或者解決問題、或者貢獻社會等等，為了實現這些目標以及判斷自己和其他科學家的成果是否優越地實現它們，科學家自然要設定一定的基本判準（也就是某種價值），並從其中導出從事研究的方法論規則（要能優越地實現目標，必須遵照某一定的方法來執行或操作）⁹。

⁹ 目標、基本價值和方法論規則的關係，可以簡單分析如下：首先，如果我們有一個目標，譬如說「每天準時到公司上班」，那麼我們有很多不同的方法（或工具）可以來達成這個目標，譬如說，我們可以把房子買在公司附近（但因公司在鬧區，鬧區房價高昂，我們買不起）；或者我們可以買在市郊，然後開車上班（然而市郊到鬧區的交通經常阻塞）；或者我們也可以選擇住在捷運沿線，然後搭捷運上班（然而捷運附近的居住品質可能吵雜）。雖然這些方法都可以達成目標，但達成的效果並不完全一樣。每個方法都會滿足一部分要求，卻犧牲另一部分要求。換言之，為了達成我們的目標，我們必須選擇一個好方法，然而什麼是好方法？牽涉到我們如何在各種要求之間作取捨，這些要求就是「價值」或「價值標準」。如果我們特別重視節省通勤時間，我們就可以定出一條方法學規則為：「選擇儘量節省通勤時間的方法」。回到科學，如果一位科學家的理論目標是「準確預測」，那麼「準確性」和「精確性」和「可預測性」就是他實現目標的基本價值，而且他可以導出的方法學規則大致是：「要精確地測量數據，以便判斷預測準確與否？」、「科學理論要能提供預測未來的方式」、「要選擇那能夠精確地測量數據的方法」、「要選擇那擁有預測力和較高預測準確率的理論」等等。

據此，做為研究方案的原型版本將包括下列五個形式要項：一組原理或定律式的通則（即「表達系統」）、模型分類體系(a hierarchy of models)、論域的存有分疇分類架構(a ontologically categorized-and-taxonomic framework in domain)、自然哲學或全體知識的學科分類與學科秩序(disciplinary taxonomy and order)、理論目標和基本價值與方法論(theoretical goal, elementary value and methodology)。說它們是「形式要項」指的是每個研究方案或理論版本固然都有這五個要項，但是其具體內容卻可能大不相同，頂多只是局部相似。譬如，哥白尼的理論版本在模型階層體系上仍保有托勒密的本輪—均輪模型；在存有範疇架構中保有亞里斯多德式的宇宙結構、其自然哲學在許多方面仍保有中世紀的分類法，其價值目標主要在於解決歲差問題（托勒密理論與實際情況的不一致）¹⁰；然而，受到哥白尼的研究方案啟發的伽利略理論版本卻拋棄托勒密的本輪—均輪模型、亞里斯多德的同心晶球的宇宙結構（代之以不受限定的虛空）¹¹、一個新的自然哲學的學科秩序（處理「空間運動」的幾何學—力學成為基礎學科，取代了亞氏以目的論為基礎來處理廣義「變化」的「物性學」(physica))、其科學目標以說明世界真實為依歸（「實在論」導向的價值目標）、其方法論則標舉假設演繹法¹²。因此，伽利略的理論版本和啟發它的哥白尼方案其實大異其趣。現在，一個研究方案具有這五個基本要項，但是，哪個要項具有生成、競爭功能和啟發功能呢？我們的答案是：五者皆是。

首先，原理或定律式的通則，傳統上被指認為「理論」至少是「特殊理論」(specific theories)，由數學公式或語言表達呈現出來。往往也被視為科學的核心部分或是研究方案的硬核，是理論繼承甚至是科學知識累積的主要成分¹³。譬如伽利略的落體定律、牛頓的三大運動定律和重力定律、馬克士威爾的電磁場方程式等等。許多後裔的理論版本，主要都是繼承了一組通則而被視為隸屬於該理論家族。但並不是唯一也不是必然。在十八世紀初笛卡兒學派與牛頓學派的競爭過程中，出現一些試圖在渦漩世界觀的基礎上，納入牛頓的公式與計算（見第八章），這類科學家應該被稱作牛頓主義者嗎？不！相反地，他們仍然被視為屬於笛卡兒家族。更精確地說，他們是笛卡兒家族與牛頓家族「聯姻」的後裔。

¹⁰參看孔恩的《哥白尼革命》。

¹¹參看夸黑(Alexander Koyré)的《從封閉世界到無限宇宙》中第四章。

¹²參看林正弘(1988)，《伽利略·波柏·科學說明》，〈第一章，伽利略為什麼不接受貝拉明的建議？〉。

¹³有一些科學家明白地表達這樣的看法，認為物理學的核心是數學公式，而不是概念系統或世界觀，他們承認概念或世界觀可以不斷變動，但是數學公式一旦被確立，就成為科學知識寶庫的一部分，如馬克士威爾的電磁場理論中，其以太世界觀已被捨棄，但是電磁場方程式仍然延續下來，成為計算與預測的主要工具。他們甚至同意，對相同的數學公式而言，存在好幾種不同的「世界觀」，但是不會改變公式本身的「堅固性」。參看高涌泉(2001)。

其次，模型或模型階層體系是理論版本用來說明現象的主要媒介工具，它被蘊涵在基本定律、理論原理或符號通則中。也就是說，抽象的數學公式、符號表達，勢必要有認知模型的中介才能用來說明具體的現象¹⁴。一個模型分類體系包括最高層、最抽象的模型、中間的模型以及最低層、與現象直接觸的「可落實模型」。認知模型有不同層次的抽象程度，以及不同種類的模型分類。這些不同層次和不同種類的模型，都具有引導進一步研究的功能。一方面，這個模型階層體系可被加以擴充，以建立更多具體的可落實模型。譬如，牛頓的原型理論從質點(*particle*)被擴充到流體、剛體、形變體等等不同類型的物體上。另一方面，模型可以被借用到另一個主題、另一個對象和另一個脈絡中，以便引導出新的研究。譬如十七世紀時，研究一般波現象（水波、繩波）的波動模型，被借用到光現象上，成為光的波動理論；同時，研究微粒子碰撞的一般模型，也被借用到光現象上，成為光的微粒子理論。十八世紀對流體理論的研究，被借用到熱、電等現象上，而開展出熱質理論(*calorie theory*)與電流體理論(*the theory of electric fluid*)等等。就競爭意義而言，如果兩個理論版本，在一段相近的時間內，針對同一主題（或現象）提出兩個完全不同的模型分類體系（即從基本原理、中間定理到可落實模型都截然不同），因而有不同的說明和預測時，則這兩個模型分類體系就處在互相競爭的狀態。

再者，每個理論版本都有其論域，蘊涵一個存有論的分疇分類架構。通常一個後繼的理論版本，會局部地繼承其論域和存有論的基本範疇。然而，如果一個理論版本做為嶄新的研究方案，擁有一個和「前理論場域」幾乎截然不同的論域，也就是擁有一個全新的存有論範疇架構時，它所建立的新的範疇，通常會設定某些新的存有物。如果這新架構、新的存有物設定能引發許多新問題，使科學家必須去面對它們，「證實」它們真地存在，探測這它們的性質，深入瞭解它們，就很自然地啟發且引導新研究的展開。當笛卡兒的理論版本主張天空不是透明的、固體球殼狀的結晶天球，而是流體狀的微粒子渦漩時，引來牛頓對流體如何運動、如何產生阻抗、如何推動流體中的物體之研究，除了導致渦漩理論本身受到嚴重批判的負面結果之外，也正面地推動了十八世紀流體力學的研究與發展（分別由笛卡兒學派的伯努利家族和牛頓與牛頓學派的科學家如歐拉等人擔負起來）。相對地，牛頓主張天空是個虛空的空間(*void*)，沒有固體的結晶天球，也沒有流體的微粒子渦漩，諸行星和恆星的相互運動是由能夠產生超距作用(*action at a distance*)的萬有引力造成的。笛卡兒學派的對象論域之設定和許諾(*posit and commitment*)對立於牛頓學派的對象論域之設定和許諾，兩者就處在競爭狀態。

第四，一個理論版本有可能隸屬於一個更大的理論版本，它的對象論域就是更大的對象論域之一部分，其存有論的範疇架構也是如此。最大的理論版本是以整個自然或世界為對象，其對象論域界定了各種不同

¹⁴參看陳瑞麟(2003)，《科學與世界之間》，〈第四章，科學模型的投射與落實〉。

的主題。大科學家一方面可能針對每個主題都發展出一套理論版本，另一方面也為每個主題界定了一門「學科」(discipline)，因而構成一個「學科分類」。進一步，不同主題的理論版本之間，擁有某種關係或秩序性，使它們可以融貫有序地構成整個自然哲學的理論版本，這樣的關係或秩序性，也就投射到學科分類上，而建立一個「學科秩序」。譬如，對笛卡兒的自然哲學的理論版本來說，自然大致可區分為天體和地球兩大主題或領域，因而相應地有「天文學／宇宙論」和「地球科學」兩大學科。然而，這兩大學科並不像亞里斯多德的系統一樣，有其不同的原理和構成，相反地，它們共用同一套原理和構成，針對相同的對象——也就是物質的結構和運動的原因——由「物質科學／力學」來揭示，因此，「物質科學／力學」就做為天文學／宇宙論和地球科學這兩大學科的基礎學科。只有在建立物質科學／力學之後，天文學／宇宙論和地球科學，才能立基在穩固的基礎上。進一步，笛卡兒又認為「物質科學／力學」預設了形上學（第一哲學），他針對形上學提出了一個「心物二元論、實體論、機械論」的理論版本。最後，笛卡兒又使用知識論和方法論來保證他的形上學是清晰確定的知識（詳細展示見第八章）。由此可見，笛卡兒不僅建立一個知識全體的學科分類，也提供了明確的「方法論→形上學→物質科學（物理學）→天文學／宇宙論和地球科學」的學科秩序。這個知識全體的學科分類和學科秩序大致上為萊布尼茲所繼承（雖仍有一點小差異，見第八章），但萊布尼茲用這套學科分類和秩序來發展自己的理論版本。相反地，牛頓的學科分類與學科秩序，和笛卡兒截然不同。牛頓反對笛卡兒學派的機械主義形上學，因而乾脆在方法論上標舉歸納與實驗¹⁵，並以此來拒絕和取消形上學的位置。因此，牛頓的自然哲學三大學科天文學／宇宙論（萬有引力理論）、光學（微粒子發射學說）和物質科學（微粒子學說）¹⁶，彼此間是互相平行的，如果說它們之上還有什麼基礎學科的話，這個學科是神學，而不是形上學。上述簡單討論，相信已明白地顯示自然哲學或知識全體的學科分類和學科秩序之啟發與競爭功能。

最後一點，目標、價值和方法論不屬於模型階層和對象論域的一部分，卻十分重要，往往左右了一個研究方案的發展。一個原型版本要做為研究方案，指導科學研究的進行，原則上應該要提供其理論目標、基本價值和深入研究的方法與方法論規則，才能吸引後繼科學家追隨與跟從，從而發展個人的理論版本。然而，這並不意味共同的目標、共享的

¹⁵牛頓的方法論和他的實際方法有很大的落差，甚至是不相容。他的方法論是為了對抗笛卡兒學派的批判而發展出來的，乃是一種「後衛保護戰」的最佳武器。在這方面，拉卡托斯(1978)的〈牛頓對科學標準的影響〉(Newton's effect on scientific standard)一文有非常精彩的分析。

¹⁶參看 Dobbs, B. J. T. (1992), "Newton's Alchemy and His Theory of Matter," in Chappell, Vere (ed.), *Seventeenth-Century Natural Scientists* (Early Modern Philosophers, Vol. 7)。

價值、方法與方法論，是理論版本家族的鑑別特徵。即使一個原型版本明顯地提供了這三者，其後裔的理論版本，卻未必完全遵從，它們可能在截然不同的目標、價值和方法論上來建立新的理論版本。事實上，每個理論版本背後，都有科學家個人作科學的目標、基本價值判斷、以及由之而引伸出來的方法論規則。一個鮮明的例子是十八世紀的法國牛頓主義的數學／力學理論家，雖然在牛頓的模型階層體系和對象論域下作研究，卻強烈地受到笛卡兒學派的目標、價值和方法論的影響，如達蘭伯特貶抑經驗和實驗性的研究。他認為，如果只是滿足於收集和組織知識，將會「破壞力學的信譽，使它降格為單純的實驗科學。」(Truesdell 1968: 95)，他認為科學的目標在於發展一個純公理的系統，笛卡兒式的「清晰、自明與確定」成為他的價值，因此，他由目標和價值設定下列方法論規則：(1) 理性力學像幾何學一樣，必須建立在明顯為真的公理上。(2) 力學中的進一步真理，由數學證明導出(Truesdell 1968: 94)。可是，達蘭伯特仍然是一位牛頓主義者，因為他明白地支持牛頓的公式和計算，認為它比笛卡兒的純質性的渦漩理論更好。當然，我們也看到牛頓學派的人謹守牛頓研究方案的目標、價值和方法論，尤其是英國的科學家（柯特斯、克拉克等等）。目標、價值和方法論的競爭功能，在牛頓反抗笛卡兒學派對他的萬有引力概念的批評中，尤其發揮得淋漓至盡。事實上，牛頓所明白發展出來的目標、價值和方法論（規則），都是由於在對抗笛卡兒學派的後衛保護戰中發展出來的，甚至改變了「科學標準」(Lakatos 1978, ch. 5)。

必須一提的是，這五個形式要項在同一個理論版本內部有密不可分的關係，也就是說，一個理論版本的通則系統蘊涵了一個模型階層體系；後者預設了其主題的分疇分類系統，即其論域；而此論域又是其所預設的更大論域（即自然哲學的存有論範疇，由學科分類與學科秩序來展示）的一部分；論域與自然哲學的存有論範疇則提供或限定了目標與方法論規則（正如笛卡兒的機械世界觀限定了其理論版本必定要尋求自然現象的機械說明、公理化的真理系統，而貶抑甚至排斥經驗或實驗研究），目標與方法論規則反過指導通則的尋求與模型的建構，並以此來說明自然現象。然而，如果從整個理論版本家族的角度來看，這五個形式要項又成為可分離的項目，也就是說，一個後裔版本可能和親代版本共享相同的通則系統，卻有不同的模型、不同的論域和分疇分類系統、不同的方法論等等。同樣地，它們也可能共享相同的模型和論域，卻有不同的公式系統、不同的方法論等。在這種情況下，我們如何指認某些理論版本是同一理論版本家族呢？就歷史的演變而言，並不存在任何固定的判準，科學家的個人認同、師承關係、社群連繫，都可能是關鍵。不過，原則上，多數版本的歸屬在於「通則表達系統」、「模型」與「論域（分疇分類系統）」三者任一的繼承性，因為這三者是「理論版本」的基本結構成分。但是，後兩個項目「自然哲學的學科分類與學科秩序」和「目標、價值和方法論」也可能構成家族的牽繫紐帶—只要一個家族始祖特別重視這兩個要項。

現在，後裔版本可以從其原型方案中的每一個形式要項發展出來，繼承這些要項的某些部分，更新另一些部分。也就是說，後裔版本總是透過「局部繼承」與「局部更新」的方式而生成的。這就表示每個後裔版本—理論家族中的所有成員—和它們的始祖版本，都沒有共享某種共同的結構或核心；而是後裔版本有繼承其親代版本之處，也有更新之處。然而，繼承與更新的部分或比例多寡，並沒有任何標準或界線可言。只有在進行理論版本具體內容的重建與分析之後，我們才能瞭解一個後裔版本，究竟對其親代版本繼承多少、又更新了多少。如果我們以 A 來表示「通則表達系統」、B 表示「模型分類體系」、C 表示「論域的分疇分類架構」、D 表示「自然哲學的學科分類與學科秩序」、E 表示「目標、價值和方法論」、P 表示原型版本、Q 表示後裔版本。A, B, C, D, E, P, Q 都可被視為集合，其中，A 有其元素，可以表達為 $A\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 、B, C, D, E 亦然。那麼，形式地分析，P 可表為 $P\{A, B, C, D, E\}$ ，Q 可能繼承了 P 中的 A, B, C 大部分，但是完全不繼承 D 和 E，或者只繼承了一小部，也就是 Q 表為 $Q\{A', B', C', D', E'\}$ ，其中，A' 和 A、B' 和 B、C' 和 C 的交集都是非空集合；而 D' 和 D 與 E' 和 E 的交集則可能是空集合。儘管如此，Q 與 P 的關係仍十分親近。同樣地，可能有另一後裔版本 R 繼承了 P 中的 A, D 之大部分，卻在 B, C, E 之上和 P 有較大差異。若 R 為 $\{A'', B'', C'', D'', E''\}$ ，可能 B''、C'' 和 E'' 的成分甚至來自別的家族，如此 R 與 Q 比較起來，距 P 就較為疏遠。如此等等。所以，一個理論版本之所以隸屬於某一家族，不在於所有的家族成員都只享有某一個項目，而在於正面地啟發與生成它的研究方案是哪一個？它對於該方案的具體內容又繼承了多少？

後裔版本對親代版本的繼承成份，也即是親代版本對後裔版本的啟發。因此，如果後裔版本主要繼承了親代版本的「通則系統」、「模型」，就表示親代版本在這二個項目上啟發了後裔版本。我們也說，這二個項目乃是親代版本到後裔版本的「發展路徑」(developmental pathway)，也就是後裔版本的「生成路徑」(generative pathway)。如果一個原型版本所開展出的理論版本家族，其大多數的後繼版本都是繼承某一項目，我們就可以說該原型版本的該項目具有強大的啟發力與競爭力。該項目也是該理論家族的主要發展路徑。譬如說，牛頓版本的「通則系統」就是這樣一個典型，牛頓理論家族，大多繼承的是他的通則系統。相反地，笛卡兒版本中最具啟發力與競爭力的項目乃是其機械世界觀的論域和它的方法論，這兩個項目聯合構成牛頓版本的重大挑戰。

至於互相競爭的原型版本或研究方案，以及互相競爭的理論版本家族，也是透過五個形式要項的局部對立而互相競爭。然而，競爭究竟是什麼呢？如何才能說是兩個版本或兩個家族在競爭呢？先前我們只作了簡單的討論，下文將進一步深入探討「競爭」、「競爭力」與「競爭條件」。

肆、勞丹的「解題」與「競爭」

波柏、孔恩、拉卡托斯、勞丹、費耶阿本等科哲家，在探討科學的發展與變遷時，都論及了理論競爭所扮演的角色。正是因為有競爭、有勝負，才有科學變遷可言。然而，他們都只談到「競爭」這現象的發生，以及造成變遷的關鍵地位，卻都沒有深入考察：究竟理論、典範或研究方案彼此間如何競爭的？在什麼樣的情況或條件下，理論之間才算是互相競爭？競爭似乎被視為理所當然、不言自明的現象一亦即作了相反的判斷即是互相競爭¹⁷。可是，情況可能沒那麼簡單，問題在於：我們如何去界定「相反判斷」？當兩個相反的判斷共存時就一定就互相競爭嗎？譬如，吉伯特(William Gilbert)在其《論磁石、磁體與地球這個大磁體》(On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth)一書中，試圖透過「磁」(magnetism)來揭露整個自然，進而把「地磁」理解為某種「地球的心靈」¹⁸；笛卡兒則純粹把地球看成只是一大塊物質體，不可能有心靈存在，磁也被理解為微粒子的機械作用，顯然兩人對「地球」與「地磁」的判斷完全相反，那麼吉伯特的理論是否和笛卡兒的理論互相競爭了¹⁹？或許年代是一個問題，但如果我們把他與年代更近一些的伽利略互相比較，他們兩人都探討了天體與地球的自然現象，吉伯特固然局部地接受了哥白尼的系統²⁰，但是他的生機論式的地球理論，與伽利略的地面運動學不盡相同，他們兩人的理論是否處在互相競爭的狀態呢？如果不是，為什麼不是？

傅大為(1986)在其博士論文《問題領域和發展策略—科學方略的競爭與發展邏輯之研究》(Problem Domain and Developmental Strategies—A Study on the Logic of Competition and Development of Scientific Programs)

¹⁷用一個最簡單的例子來說，A 命題「這張紙是白色的」和 B 命題「這張紙是紅色的」，兩個命題即是做了相反的判斷，它們不能同時為真，但可以同時為假。

¹⁸參看 Westfall(1971)：「吉伯特不是把磁看成自然所顯示的許多現象之一，而是看成理解整體的關鍵」(p. 26) 他又提到吉伯特的著作有一副標題是「由很多論證和實驗所證明的新生理學」(A New Physiology Demonstrated both by Many Arguments and by Many Experiments)（然而在吉伯特的著作英譯本中（芝加哥大學所出版的 Great Books of the Western World 系列之一），其副標題被拿掉。「生理學」一詞透露吉伯特乃是位「生機自然論者」(vital naturalist)（Westfall 稱為「文藝復興自然論」）。

¹⁹我們的答案是「沒有」。因為吉伯特所代表的生機自然論，在十七世紀初即後繼無人，幾乎沒有科學家站在類似立場上出面反抗笛卡兒的機械世界觀。因此，吉伯特對自然雖然作了和笛卡兒相反的判斷，但是他們沒有互相競爭過。這意味了「家族的形成與發展」在競爭上的重要性。

²⁰ 參看 Debus(1978), *Man and Nature in the Renaissance*, p. 89-90。

中，建構了一個科學理論或科學方略間的「競爭理論」，並探討科學方案的「發展策略」。就科學「競爭」而言，我們有必要討論傅大為的理論。然而，傅大為以勞丹和拉卡托斯對競爭的討論為起點，所以，本節我們也從勞丹開始。

不像經驗論的傳統總是在說明、預測現象的基本架構上討論科學，勞丹在其《進步及其問題》中，把科學視為本質上是「解決問題」(problem-solving)的活動（以下簡稱「解題」），科學家發展理論來滿足這個基本目標。理論在盡可能地「極大化自己的解題能力」上互相競爭，並導致科學的變遷與進步。但是，「理論」一般有兩種用法，一種是狹義的、特殊的理論；另一種則是較普遍、廣泛的理論群，勞丹又把後者稱作「研究傳統」(research traditions)（相當於孔恩的「典範」與拉卡托斯的「研究方案」），乃是科學競爭、演化、變遷與進步的基本單元。勞丹就是在評價「研究傳統」的解題能力之基礎上，提出一個「科學理性」或「科學進步」的方法論。

勞丹首先開宗明義地宣示兩個論旨(Laudan 1977, pp. 13-14)：

論旨一：任何理論之首要且基本的嚴苛檢驗是否它對有趣的疑問(questions)提供了可接受的答案。換言之，是否它對重要問題(important problems)提供了令人滿意的解決(solutions)。

論旨二：在評鑑理論的優點時，更重要的是問是否它們構成了重大問題的適當解決，而不是問是否它們是「真的」、「被認可的」、「被堅實地印證了」或其它「可證成的」（在當代知識論的架構內）。

這兩個論旨鮮明地為科學方法論提供了非傳統的另類進路（雖然它的祖源可以追溯到孔恩的常態科學的「解謎」(puzzle-solving)）。如果科學的本質與評價的標準在於「解題」和「解題能力」，那麼科學究竟在解決什麼樣的問題，就成為研究的起點。勞丹首先澄清，解題並不是傳統科哲上所謂的「事實說明」(the explanation of fact)，主因在於問題通常是「非現實的」(counterfactual)²¹。隨後勞丹把科學問題區分成「經驗問題」(empirical problems)和「概念問題」(conceptual problems)兩大種類。進一步，經驗問題又被區分成 (1) 待解決的問題：尚未被任何理論所適當解決的經驗問題；(2) 已解決的問題：至少被一個理論所恰當解決的問題；(3) 異常問題(anomalous problems)：一個特別的理論尚未解決、卻被超過一個以上的競爭理論所解決的問題，就構成了該特別理論的異常問題(Laudan 1977, p. 17)。至於所謂的概念問題，又分成(4) 內部概念問題：一理論顯示出內部的不一致性，或者其分析的基本範疇含混

²¹這裏當然也有把傳統科哲所討論的科學說明簡化的地方，因為傳統科學說明主要在研究「現象的說明」(explanation of phenomena)，「現象」在很多意義上也是「非現實的」。

不清；(5) 外部概念問題：一理論 T 與另一理論或學說 T' 產生衝突，而 T' 的支持者認為 T' 已堅實地被建立起來。

對勞丹來說，並非所有的問題都在重要性的等級上相同，有的問題在選擇與評價理論時會比其它問題更重要，而且問題的重要性程度也會隨著不同的處理而變動。因此在評價理論時，我們需要權衡問題的輕重。大致來說，經驗問題可能在如下的方式上被合理地權衡：(1) 由於解決、異常的解決、原創建構、更具一般性而變得更重要；(2) 由於被解消、被領域的改變、被基本型的改變而降低其重要性。其次，異常問題的認定與評估，尤其要在競爭理論的脈絡下，這一點已反映在勞丹對異常問題的定義上。異常問題的重要性之權衡有兩個主要方式：理論預測與實驗結果之間的懸殊性、異常問題的年紀與它對某一特別理論解決的抗拒性(Laudan 1977, pp. 31-40)。至於概念問題的重要性權衡也有下列四種狀況（主要是「外部概念問題」）：(1) 理論間的不一致越大，問題越重要；(2) 對手理論是越好的問題解決者時，問題就越重要；(3) 如果兩個競爭的理論，其中之一產生了概念問題；另一個沒有，則問題就變得相對重要；(4) 概念問題的年紀越大越重要(Laudan 1977, pp. 65-66)。

理論是發展來作為解題的工具，要評價理論與決定理論的取捨，基本判準就在於理論的「解題效力」(problem-solving effectiveness)。解題效力由「把已解決的經驗問題之涵蓋範圍極大化，把異常問題與概念問題的涵蓋範圍極小化」，「科學進步」(progress)就由其解題效力來定義，亦即解題效力越強的表示越進步。同理，理論的選擇與評價也是以解題效力為方法論判準，科學社群「應該」選擇解題效力更強的理論；而且如果科學社群作了這種選擇，就是進步的。

現在，勞丹已經提出評價科學進步的判準，然而，科學進步的基本描述單位並不是單一、小範圍、特別的理論，而是一群相繼理論所構成的「研究傳統」，也就是說，先前所謂具「解題效力」的「理論」指的是做為一個「研究傳統」的一般性大理論。勞丹把研究傳統定義為：「一組關於研究領域的存有物與歷程的基本假定；以及在此領域內建構理論與解決問題的恰當方法」。更詳盡地說，一個研究傳統包括一群特別的理論、一組形上學與方法論的許諾、擁有一個長遠的歷史；以及在科學的解題活動中扮演下列四種角色：研究傳統決定了問題、研究傳統限制了被發展出來解題的理論型態、研究傳統可以啟發特別理論的建構、研究傳統賦予理論正當性和合理性。然而，對勞丹來說，研究傳統並不是孔恩式的典範、也不是拉卡托斯式的研究方案，因為它沒有共同的核心或不會變動的硬核。勞丹同意，一個研究傳統下的諸個別理論，確實有其自己不可駁斥的核心，但這核心並不是共通於所有理論。研究傳統會隨時間流逝而慢慢演化，它的構成元素也會慢慢改變，兩個不同的研究傳統也可能被整合。至於研究傳統的選擇與評價，勞丹又區分成「接受的脈絡」與「追求的脈絡」，在接受的脈絡下，科學家選擇更好的解題傳統乃是個進步的選擇；在追求的脈絡下，科學家選擇進步率較大的傳統是合理的(Laudan 1977, ch. 4)。

比較拉卡托斯與勞丹的科學哲學，可以看到他們都在尋求「合理的、規範的、評價的方法論」與「進步性」的判準，都討論了「系列理論」和「解決問題」以及系列理論構成的研究方案或研究傳統的競爭。不同之處在於拉卡托斯以「新奇預測」與其印證為進步性的判準，勞丹則精煉「解題效力」；拉卡托斯以共同的「硬核」來定義研究方案，勞丹則主張研究傳統會改變與演化。拉卡托斯強調長期的合理性導致他的科學競爭圖像是一場運動競賽（足球賽或籃球賽）：著重在描述啟發與開展的前鋒戰與容許特置修正的後衛戰，由優先「達陣得分」的一方獲勝。勞丹的科學競爭圖像則像是一場團隊考試的競爭，試卷擁有占分比重不同的題目，解題與答案的品質有客觀的衡量標準，而且有科學哲學家擔任閱卷與批改成績的老師。雖然他們都為我們提供了競賽的方式、球隊的構成與裁決勝負的標準，但是，兩人都沒有（1）深入地分析參賽球隊的個別成員或受試團隊中的個別受試者（即諸系列理論）的結構，也沒有考慮到（2）在什麼情況下，參賽者或受試者才算是進入競賽（競爭狀態）？以及（3）對整個競爭過程作一個詳細的分析（因為他們看重的是競賽的結果，以及如何決定競賽的勝負）。然而，這三點卻都是重要的，因為（a）在一個「團隊」中，個別成員的能力、技巧可能大不相同，會影響到整個團隊的成績；（b）在沒有一個具體實際的科學競技場以及同時有許多科學團隊共存的情況下，兩個團隊要如何才算是開始競賽呢？最後，（c）也正因沒有具體實際的科學競技場，以致如果沒有把整個競賽的過程做一個詳細的分析，即使身為裁判的科學哲學家恐怕也很難決定科學競賽究竟誰勝誰負²²？傅大為的「科學方略的競爭理論」回答了第二與第三個問題。

伍、傅大為的科學方略的競爭理論

傅大為博士論文的一個焦點問題是：在科學理論或方案之間，究竟怎麼才算是競爭的？在哪些場域上互相競爭？有什麼樣的競爭結構？為了回答這些問題，他提出了四項條件：(f1) 互相競爭的理論是針對某個主題(subject matter)的理論、(f2) 互競的理論不必有相同的「問題領域」(problem domain)（此概念見其論文第三章的討論），但通常會「共同的問題」，但它們之間也不只在共同問題上競爭，還會在不同的「問題性」

²²這裏的隱喻性修辭，點出「科學哲學」在科學競賽中的角色問題。究竟科學哲學（後設科學）是裁判、觀眾、播報記者、團隊領隊、經紀人或是如球評家一般的評論者？筆者雖然分別以「裁判」和「評分老師」來隱喻拉卡托斯和勞丹的規範方法論，但是必須坦言的是，這樣的比喻是稍嫌誇張了一些，因為拉卡托斯和勞丹可以把他們自己所發展的「評價方法論」看成居於「球評家一般的評論者」角色，乃是對科學競賽的過程和結果，作一番得失的評論。筆者當然也不放棄科學哲學做為「球評家一般的評論者」角色，但是本書所發展的理論，比較接近於「播報記者」的地位。

(problematic) (即「這個問題是重要的、中心的或是邊緣的、附帶的」等等「問題的特性」)和發展路徑上競爭;(f3) 如果理論 A 把理論 B 視為對手,表示理論 A 的支持者承認理論 B 所解決的問題是有趣的、或值得尊重的;(f4) 理論 A 的支持者其對手 B 所解決的問題感到有趣,可能試著去學習 B 的發展過程,進而跨過它,但他們不會有「改投明主」的想法。更甚者,他們可能感到「競爭壓力」,因而認真地考慮在 A 和 B 之間作選擇。

一開始,傅大為仍然使用傳統上的「理論競爭」之語言,但他其實真正想論述的是「科學方略的競爭」,先前所謂的「理論」以及科學家一般所說的「理論」,在傅大為的架構下,其實是一個「科學方略」(scientific program)——這個概念很像拉卡托斯的「研究方案」,但並不一樣。一個科學方略由下列四項元素所構成:(1) 一組(a set of)推理規則、模型和開展術;(2) 一組發展策略;(3) 背景資源或知識;(4) 解決某一定領域問題的一組潛在答案。傅大為作了進一步的刻劃:第一和第二項元素是幾組命令或建議性語句;第三和第四項則是幾組指示性或描述性的語句,它們分別有不同的「認知評價」(cognitive evaluation)(Fu 1986, p. 70)。首先,一個方略的一般評價是其最低限內核(minimal core):解決問題的能力—被一個方略解決的「領域問題」(domain problems)越多,表示其解題能力越高²³。但是,除了這一般性的解題能力之評價外,還有三個更精細的評價項目:(a) 豐富性評價:應用於方略的第一和第二項元素,評價判準在於和對手相比的解題能力如何。(b) 知識評價(epistemic evaluation):應用於方略的第四項元素和第三項元素,即方略的背景知識有多可靠?每個潛在的答案相對於背景資源又有多一致?其目的在於消除誤差的可能性。(c) 資訊量評價(informational evaluation):應用於第四項元素和第一二項元素,亦即每個潛在答案,對解決其它有價值的問題而言,能帶來多少幫助?其中(b)和(c)都牽涉到元素 4,因此兩種評價間常需要取得平衡或進行交易。在以具體的實例詳細討論科學方略及其元素和相關的認知評價之後,傅大為展示「方略元素如何變遷?」在持續競爭之中,很重要的作法是方略的自我修改(modification),包括第一二三種元素。特別在背景資源的修改上,方略的支持者往往會面對「知識評價」與「資訊量評價」的取舍。反過來說,每一個元素也可能抗拒修改。最後,傅大為本於他的「科學方略」之提法,而對拉卡托斯的「研究方案」作了一些批判:(1) 因為被設定為純粹的「方法學規則」,故而缺乏「問題領域」的設置與刻劃;(2) 對「開展術」的說明無法讓人

²³即「問題領域」內的「經驗問題」(empirical problem),至於「理論問題」(theoretical problem)因其內在於一方略內部,並不屬於領域問題。進一步,傅大為討論了兩種「解決問題」的方式:(1) 直接解決:即方略的元素 1, 2, 3 以非特置假設的方式建構了一問題的潛在解答。(2) 透過說明的解題(Problem-solving through explanation):從對手那邊借來的,但可由方略的元素 4 來加以說明;或者方略的背景資源(元素 3)可以修正自己以便能說明該解答。

滿意。「開展術」不能只是方法論的，還要包括「目的論式」的研究目標和背景知識。由這二個批判，傅大為正式導向「問題領域」的細節探討。

在其博士論文第三章〈科學方略變遷的發展面向〉，傅大為首先描繪了一個「科學方略競爭的隱喻圖像」：尋寶。有幾組不同的尋寶團隊，在一個開放而沒有確定疆界的場域上，競相挖掘寶藏。在這片藏寶的場域中，有許多「公告」(explicit post)也有許多「密函」(implicit post)，裏面含有一個尋寶團隊所必須解決的技術問題與進一步的線索，可供他們尋獲其他的「函件」或「小寶藏」。這些和函件和小寶藏之間都有其「內在關聯」。在這種條件下，每個尋寶團隊必須發展自己的技術與專業，選擇一個特別的入口，設想自己的策略等等，最終的目的在於獲取自己能力所及的最大的寶藏。顯然，此藏寶的場域就是「問題領域」，各種公告或密函就是「待解決的問題」。對傅大為來說，競爭方略的「問題領域」是變動的，而不是科哲傳統的那種固定不動的「素樸領域」。然而，如果問題領域是變動的，如何說兩個方略在競爭、是互為對手(rival)呢？判準在於它們針對一個相同的主題而有「相似」的問題領域，其中含有一些不同的問題，但也必須在他們的「問題性」中有相同的問題。更詳細地說，互相視為競爭對手的方略，都同意某些「重要的問題」(important problems)是他們的主題所必須解決的，也都著手試著去解決它們。傅大為把這些重要問題稱作「領域問題」(domain problems)²⁴。所謂的「重要的問題」包括兩種：共同的問題（作為共同性的重要性(importance as commonality))、具生產力的問題（作為生產性的重要性(importance as productivity))。前者是一個學科(discipline)中共同的或知名的(well known)問題，例如在十七世紀時，如何說明色彩現象就是一個光學的共同問題；後者是解決該問題可以進一步地導致(lead to)解決不同的問題，能夠導致解決更多問題者，自然是更具生產力的問題²⁵，例如牛頓對克普勒三大行星定律的說明。現在，不同的研究方略針對相同的領域問題提出不同的解決，並以此尋求解決更多更多問題，競相吸引下一代研究者來歸附，這就是科學方略的競爭。然而，不同的方略如何強化自己的競爭力呢？也就是如何擬訂增強自己競爭力的策略呢？這和他們對「重要問題」的選擇、對「具生產力的重要問題」之解決與解題的「順序」(orderings)有密切關係。傅大為進一步分析了不同選擇和順

²⁴「領域問題」也面對至少三種不同的情境：一般而言，它是所有互競的方略都視為重要的，然而，並不必然如此。有時，少數方略視為非常重要的領域問題，多數方略卻不以為然；有時，多數競爭方略都視為重要的領域問題，少數方略卻又與眾不同。

²⁵傅大為也提到了第三種「重要問題」，其實是「假設為具生產力的重要問題」(hypothetically productive problems)，也就是說：如果一個方案證明了如下的條件：「解決了 X 問題，則許多或老或新的問題都可以被解決了。」那麼，X 問題就是這類的「重要問題」。當然，它可以併入「具生產力的重要問題」。

序所產生的種種不同的發展路徑(developmental path)與競爭情況²⁶：簡單地說，如果一個方略能優先解決它與敵對理論之間的問題，那麼它可以先馳得點；反過來說，如果一方案遲遲難以解決共同問題，則它可以先解決一個具生產力的問題，如此可以帶來更多問題的解決，那麼它也可以依靠「大量得分」來扳平劣勢。但是，如果它苦苦著眼於未能解決的共同問題，導致蹉跎時間，支持者流失，它就錯擬了一個解題排序的策略。

「競爭」在拉卡托斯經勞丹的方法論中，只是科學評價的背景，到了傅大為的手中，成為主要的焦點問題。傅大為的科哲方法論版本，不僅考察了科學競賽的條件，也分析了互競的科學團隊（科學方略）在競爭過程中，為了求贏所採用的戰術與策略。比較三人的方法論，展現了如下的發展路徑（也就是說，有如下的同異、或者繼承與更新之處）：(1) 與勞丹一樣，傅大為以「解題」的進路來切入科學方法論中，也如勞丹重視「問題權衡」般地強調「問題性」的概念；(2) 與勞丹相似，傅大為主張研究方案會隨時間而變動；(3) 如同拉卡托斯一般，傅大為相當著墨於研究方案的啟發功能（開展術），從而指導解題活動的進行，在這方面，勞丹只是點到為止；(4) 回歸拉卡托斯而與勞丹不同的另一點在於，傅大為的競爭圖像近於拉卡托斯的運動競賽，而不像勞丹的團隊競試，他並不試圖提出一個客觀的解題能力之判準。(5) 由第四點，我們可以看到傅大為的一個更新的面向在於，他完全不想尋求「科學進步」的理性判準，他所建構的是一個「策略理性」（或「局部理性」、「工具理性」）的方法論，雖然他還是保留了一些評價的判準。(6) 傅大為設置了一個變動的「問題領域」之概念，做為科學方略競爭的場所，也就是說，「科學解題競賽」的場域、方式、目標甚至規則，會在歷史發展中不斷地改變。(7) 傅大為版本最後一點更新的地方是，我們一開始就提出來了，他把「競爭」與「競爭策略」當成是主要的問題。因此，從拉卡托斯經勞丹到傅大為，我們也可以看到一種「問題轉移」。

本章將理論版本、理論版本做為研究方案與理論版本家族的基礎上，提出一個科學競爭的新學說，它將在在下列幾點上不同於拉一勞一傅的進路（方案）：(a) 首先，本學說將完全不包含方法論式、規範性、評價性的意味，也不包含傅大為式的「發展策略」之揭示。套用本章開頭的聲明，本學說屬於「理論運動學」而不涉及「理論動力學」。(b) 正因此，在理論的選擇與評價中佔有關鍵地位的「異例」(anomaly)與「特置修正」(ad hoc revision)的問題，我們也沒有作任何討論。當然，再次重申，並不是我們認為它們不重要，而是處理它們會涉入我們暫不考慮的理論動力學。(c) 我們不採取「解題」活動的進路，有下列幾個理由：(c1) 解題是科學研究活動的必要條件，但並不是充分條件。也就是說，

²⁶傅大為這裏所談的是依據「解決問題」的排序而來的發展路徑，與我們先前所談的「理論版本」和理論版本家族的透過某些特定的項目和方向而發展的發展路徑(pathway)並不相同。

固然科學研究總是蘊涵了解題，但是，解題卻未必一定是科學研究。人類各種不同的領域，如商業、政治、軍事、倫理、日常生活，處處都有解題活動的痕跡。(c2) 科學的本質與特殊性在於它回答或解決問題的方式（我們認為是「模型的投射與落實」），而不是回答或解決問題這活動本身。(c3) 「科學問題」的類型在解題進路中扮演很重要的角色，然而，建立一個明確的「問題分類」卻是個難題。具體地說，我們很難明確地區分勞丹所謂的經驗問題和概念問題。例如，笛卡兒學派指控牛頓的萬有引力概念，似乎是個概念問題，然而，它不涉及經驗嗎？牛頓不是應用萬有引力來詮釋自由落體的經驗？(c4) 更麻煩的是，做為兩個競爭理論所面對的共同問題本身，很難被清楚地指認、刻劃與表達出來。因為，不同的科學傳統或方案都會使用自己的語言來表達問題，使得究竟在競爭理論間有沒有共同的問題，變成一件很難在科學史上確認的事；以地球和太陽的關係為例，笛卡兒學派處理的可能：「地球懸浮在太空中，並繞行太陽運轉的原因是什麼？」牛頓學派也許針對的是：「地球繞太陽的軌道是什麼？如何用數學推導出來？」那麼，這是共同的問題嗎？當然，我們還是可以說他們針對的是「地球和太陽的運動現象」這一個「共同問題」，然而這是出於科學史家的重建，而非原本科學家所真正面對的問題。公平地說，「共同問題」並不是競爭的唯一衡量；(c5) 我們採取傳統進路—以結構化的理論，即理論版本—為主角，在說明理論的競爭、發展與變遷的議題上顯然更自然、更具適當性。而且它已經蘊涵了「問題」的存在，也就是說，每一個實際的科學理論都指向或預設了它所面對的問題—當我們探討理論被用來說明現象的行為和成因時，「說明」總是預設了一個為什麼的問題。當我們探討理論預測與經驗證據不吻合時，我們就預設了科學家要面對這樣「不吻合」的問題。當理論版本的概念架構被建立起來時，一科學理論與其它科學理論的概念不一致，也立刻變成一個鮮明可見的「問題」。換言之，我們同意「解題」做為科學研究的充分和重要特徵，但是既然「理論」是針對解題而被建構，針對「理論」必然蘊涵了解題，我們不如直接討論「理論」即可。

陸、理論版本家族的競爭與發展

已經說明不採取解題進路的原因之後，我們要如何建構一個立基於理論版本與理論版本家族上的競爭理論呢？簡單地說，在解題的進路下，「競爭」是解決問題的比賽；然而在理論版本與其家族的架構下，「競爭」是一版本對另一版本發出批判的競爭與啟發理論版本生成的競爭（亦即，吸引繼承人的競爭）。在發展一個全面性的競爭理論之前，我們想再回頭來檢討傅大為對「競爭」的四項條件設定。

在我們看來，傅大為在「解題」進路下所定義的四項競爭條件，(f1)的條件為本文所繼承；但是，上文的(c4)點批判了(f2)條件；(f3)條件似乎過於主觀而難以判定，我們想提出的質疑是：理論 A 的支持者把理論

B 視為對手，一定是認為理論 B 所解決的問題有趣或值得尊重嗎？如果理論 A 的支持者把理論 B 視為對手，卻認為理論 B 所解決的問題是荒謬的呢？（如萊布尼茲認為牛頓學派以上帝來解決萬有引力來源的問題是荒謬的。）(f4)條件似乎不能算是競爭的條件，而是競爭發生後的一種從事競爭情況，因為會產生向對手學習的情況，已經預設了競爭狀態的出現了。因此，我們認為，傅大為的競爭四條件，並沒有完全掌握「競爭」的全貌。

當然，出於傅大為對競爭條件的設定之啟發，我們重新提出三項競爭條件—尤其強調「批判」行為在競爭上的關鍵性。「批判」可以定義成：公開指出一理論或其某些判斷或某些部分是錯誤的、可質疑的、含混歧義的、不一致的、該修改的等等，即是批判。那麼，競爭的新條件可以設定如下：

(a) 「主題」(subject matter)條件：互相競爭的理論版本或家族所處理的主題必定要有交集，最大的交集甚至是整個自然；而且它們必須對該主題提出不相容的判斷（也就是兩個判斷不能同時成立）—這是一個必要條件。(b) 「批判」條件：如果理論家族 A 的成員批判理論家族 B 的觀點、說明或預測，家族 A 和家族 B 即互相競爭—這是一個充分條件，它又有如下的子條件：(b1) 如果方案 A 或其任一後裔理論 A' 批判了方案 B 或其任一後裔理論 B'，則 A 所隸屬的家族與 B 所隸屬的家族即互相競爭；(b2) 如果有家族 A 的成員，試圖用另一家族 B 的任何資源（包括「通則」、「模型」、「論域」、「自然哲學」、「方法論」）來修改或建構其理論版本時，引發家族 A 其他成員的不贊同與反彈時，則家族 A 和家族 B 也進入競爭狀態。(c) 「生成與繼承」條件：兩個原型理論或研究方案，如果在有交集的一定時間範圍內，在任何一個形式要項上提出相反的判斷，而且各自吸引新生代來投入己方，發展自己的家族，兩個理論即進入競爭狀態；它們可能在形式要項上的任一部分或全部提出相反判斷而互相競爭—這是一個充分條件。以下讓我們進一步舉例作個較詳細的闡明。至於科學競爭史的全面解析，如笛卡兒家族與牛頓家族的大競爭這個典型案例，則見下一章。

就「主題條件」而言，每個理論版本都是針對某一主題而提議，進一步它們會建立自己的論域。然而，如果兩個理論版本要成為互相競爭的對手，它們的主題和論域必定要有所交集，而且必定要針對交集的部分提出不相容的判斷。譬如牛頓的光學版本處理光現象，並建立一個包括反射、折射、偏折(inflexion)、色彩都納入了論域內；惠更斯的光學版本也處理光現象，只考慮反射、折射和冰島晶石的奇怪折射（雙重折射），惠更斯沒有處理色彩（即菱鏡的色散或分光現象），然而，牛頓和惠更斯的光學當然有交集，而且他們分別提出「波動說」和「微粒子發射說」的不相容判斷。有另一種「潛在競爭」情況是，兩個版本各自所針對的主題原本沒有交集，但是兩個主題都屬於另一個更大主題的一部分，而兩個版本都具有擴充其主題的潛力，則兩個版本成為潛在的競爭者。如同十九世紀的古生物學的主題侷限於古生物化石，處理的是化

石的解剖特徵與它們在地層間的分佈狀態；對比之，達爾文的研究屬於自然史的傳統，最初處理的是現存生物物種的來源、形成、以及是否會演變的問題。達爾文提出演化論，勢必要擴及過去、現在與未來的所有生物物種演變的趨勢，而古生物學則必須回答古代生物物種滅絕與現代生物物種的誕生，當兩者的判斷不同（達爾文的逐漸演變說與古生物學的災難說），就成為潛在的競爭者，事實上後來的確也進入實際的競爭狀態²⁷。

就「批判」條件而言，這似乎是勞丹和傅大為沒有明確提示的條件。當一個理論的支持者批判另一理論時，不管其對手有沒有回應，兩個理論就會進入競爭狀態。牛頓批判波動說，而且認為自己的菱鏡實驗已經決定性地否證了波動說，此時牛頓支持的微粒子發射說自然和波動理論進入競爭狀態。雖然，在科學史上，支持強勢主流理論的科學家，往往漠視來自弱勢理論支持者的批判，不願加以回應；然而，這種「高掛免戰牌」的態度並不足以否定競爭的批判條件，理由是一旦有「單方面的批判」，被批判者就不得不進入競爭狀態。因為，批判者利用批判的動作來提高自己的能見度，使其理論進入其他科學家的審視評估名單內；二來批判讓被批判的理論受到其他科學家重新評估審視。換言之，其他科學家總是會把批判和被批判的兩方一併納入考量，從而進入競爭狀態。

面對批判，只有回應和不回應兩種態度，如果選擇回應，兩者自然進入競爭狀態。如果選擇不回應，則可能有下列幾種不同的情況：(1) 如果批判無關痛癢，產生不了什麼作用，強勢家族仍占競爭的上風。(2) 如果對手的批判切中要害，強勢家族當然可以選擇不予回應而「避開其銳」，這又有兩種可能性。一是始終保持沈默對於吸引新生代的科學家而言，是一個不利的態度，也就是說，不回應而阻礙了理論子代的發展和繁衍。另一放任該要害不管，轉而努力去擴張領域，「繁衍」子代以彌補該弱點，並靜待對手的發展結果。一個很特別也很有趣的實例是：十九世紀達爾文的演化論受到來自熱物理學理論家克爾文爵士(Lord Kelvin)的批判：他從熱物理學的理論計算結果，認為地球壽命不像達爾文的演化論所預設的那麼長。克爾文爵士的批判甚至把兩個截然不同的主題之理論（演化論和熱物理學，當然它們還是有交集—在地球壽命這一部分）帶入（潛在）競爭的狀態。然而達爾文則採取不回應的態度，持續發展自己的理論，結果日後新的物理理論證明了克爾文爵士的錯誤。

就批判的兩個子條件而言，(b1) 這子條件的例子在科學史上屢見不鮮，我們不再多說。(b2) 這子條件著眼的是在歷史上，理論家族總是不斷地在「混血」，這種混血究竟是合作還是競爭呢？如果借用者所隸屬的家族其他成員並不贊同這種「混血」的作法，表示借用家族和被借用

²⁷參看傅大為(1992b)的〈Ad Hoc 假設與局部理性〉中關於古生物學與達爾文演化論的競爭史之描繪。

家族基本上是競爭的格局。最有名的例子是英國的牛頓主義者始終不贊同法國的理性力學家借用牛頓論敵萊布尼茲的微積分符號來發展牛頓力學，他們也厭惡理性力學中濃烈的笛卡兒精神，因此十八世紀的英國，在微積分代數化與理性力學的發展方面，幾乎一片空白。

就「生成與繼承」條件而言，即使兩個方案甚至家族都沒有互相批判的情況發生，然而，只要它們各自在某一段時間內，吸引新生代的科學家投入己方陣營，形成兩個不同的學派，它們就處在競爭狀態中。可以說這是一種「家族繁衍」的競爭。從歷史的結果觀之，牛頓版本能吸引許多大科學家（尤其是其論敵笛卡兒出身的法國）獻身投入其家族，並且被列入牛頓主義者，因此，牛頓的家族繁衍取得很大的成功；然而笛卡兒版本固然也有很大的穿透力，卻不能讓惠更斯和萊布尼茲這樣的大科學家甘心情願地自稱是笛卡兒主義者。在這方面，笛卡兒版本顯現其「繁衍力」虛弱的一面。當然，這並不表示笛卡兒版本完全沒有競爭力強大的一面。因為家族繁衍的競爭，是在五個形式要項上全面展開，我們已在第三節作了探討。

柒、家族的發展路徑圖

本章所建構的「理論版本家族的競爭與發展」之模型，其焦點在於揭示理論版本家族的發展路徑圖譜。它除了能讓我們瞭解科學理論在歷史中發展的樣貌之外，還為科學史家提供了寫作科學史的方法、架構或模型。所謂「發展路徑圖譜」不僅涵蓋了傳統「系譜學」(genealogy)的研究：即揭示科學家的思想和理論（即理論版本）的「血緣」和「族譜」；還引入了「理論版本」之結構成分為傳衍的相關項目，並且進一步考察理論版本間的發展路徑，以及一個家族的主要發展路徑。就好像在建構一個家族譜系時，不僅列出家族成員的名稱和輩份關係，還把每個子代成員究竟繼承了親代成員的哪些特徵，在哪些特徵上則有根本差異，均一一加以列出明示。也就是說，我們要考察的是：每一個子代版本，在「通則和表達系統」、「模型分類體系」、「論域的分疇分類架構」、「自然哲學的學科分類」、「目標、價值和方法論」這五個形式要項上，繼承其親代版本的哪些實質內容？當一整個理論版本家族中的每個成員的理論內容和內在結構都被描繪之後，我們就可以看出這個家族是沿著哪個要項在發展的？這整個圖像就是所謂的家族發展路徑圖譜。一個抽象的發展路徑圖譜可以展示如下圖 7-2：

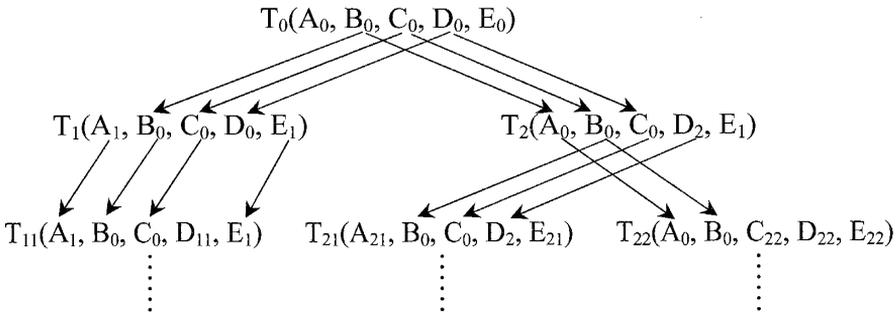


圖 7-2 說明： T_0 發展出兩個子代版本 T_1 和 T_2 ； T_1 在 B, C, D 三項目上繼承 T_0 ，故均表為 B_0, C_0, D_0 ；但在 A 和 E 兩項目上不繼承 T_0 ，故表為 A_1 和 E_1 。同理， T_2 在 A, B, C 三項目上繼承 T_0 ，但在 D, E 項目上不繼承。又 T_2 和 T_1 的 E 項目是相似的，故同表為 E_1 ，即 T_2 可能從 T_1 繼承了 E 項目。第三代理論版本的表達方式，以此類推。

根據同樣的道理，我們可以把單個家族的發展模型，擴張到兩個（或以上）的競爭家族之發展模型。如果我們能把一段時間內，兩個競爭家族的發展路徑圖譜加以重建，除了可以看出不同的發展路徑外，還可以看出「混血」的可能性或實際情況。

回顧本章所發展的科學「競爭理論」與所採取的理論結構之進路，以及所立基的理論版本與版本家族的概念，相較於拉－勞－傅一系列的理論，我相信，我們的進路和理論，除了缺少評價面向之外，在「競爭」與「競爭歷程」和「發展狀況」上，一方面足以涵蓋拉－勞－傅系列理論的優點（繼承性）；另一方面也打開了一片新的探索領域（更新性）：即理論版本家族的發展路徑圖譜之揭示。

1. 就「涵蓋面」而言，我們提出研究方案具有五個形式要項，以及五個形式要項都具有啟發功能與競爭功能的觀點，比起拉卡托斯和勞丹的觀點，都更能精確地定義「啟發」這個概念與說明歷史上啟發的複雜實況，而且我們的理論足以涵蓋他們的概念架構。以勞丹為比較重心，「論域」與「自然哲學的學科分類與學科秩序」約莫相當勞丹的「研究傳統」中的形上學假定；然而，包括孔恩、拉卡托斯、勞丹等科哲家論及科學理論背後的形上學時，都沒有辨識到它包括理論內部的「論域」與理論外部的「學科秩序」²⁸。再者，勞丹所謂隸屬於研究傳統的「諸理論」(theories)約莫相當於本文的「通則系統」與「模型分類體系」，我們已經針對它們的內部結構作了許多詳盡深入的研究，提供了更細緻處理的理論資源，勞丹的理論在這方面是付諸缺如。此外，當科學家把公式系統與模型應用到現象上時，就引發了勞丹所謂的經驗問題；當科

²⁸ 必須一提的是，學科分類與學科秩序的概念，傅大為雖然沒有在其博士論文中論及，但日後他已在其他論文中論及（見 Fu (1995)），雖然和本文所言不盡相同。但本文的學科分類與學科秩序的概念也是得之於他的啟發。

學家處理理論域與學科分類的融貫性，或者它們和其它理論的關係時，就引發了勞丹的概念問題。

2. 就「更新面」而言，本章發展的「理論運動學」將「啟發」、「競爭」、「生成」、「繼承」等概念，結合理論版本、研究方案和理論版本家族，而做了理論上的整合與聯結。我們明確地從「生成新理論版本」和「繼承某一形式要項的部分」來定義「啟發」的概念；也明確地從「生成理論版本」與「家族版本繁衍」的能力而定義了「競爭」概念的一部分。「五個形式要項都具有啟發與競爭功能」的觀點，使我們不能再光從「研究方案」或「研究傳統」整體的結果或成績來考量一個理論家族的得失。開展出一個理論家族的研究方案，有些項目的具有較強的啟發力與競爭力，有些項目較弱，這可以考察理論版本的發展路徑看出。如果我們根據拉一勞一傅的方案，則很難看出這一個歷史實情。

3. 最後，本文所打開的一個新場域乃是「理論家族的發展路徑圖譜」之繪製。這意味著，舉例言之，我們不僅要知道惠更斯是個笛卡兒主義者，隸屬於笛卡兒家族；我們也要知道惠更斯有自己的理論版本，以及從笛卡兒版本到惠更斯版本的發展路徑是什麼？換言之，惠更斯在哪些項目上繼承了笛卡兒，又在哪些項目上不同於笛卡兒？進一步，日後的笛卡兒主義者，主要是在哪一條發展路徑上繼承了笛卡兒？追蹤一個家族的發展路徑，不僅能讓我們理解一個家族的繁衍方向，也能看出競爭家族的競爭焦點與各自的強項和弱項，更能看到「家族混血」，從而繪製出一幅更全面、更完整的科學發展圖像。

第八章 牛頓家族對抗渦漩家族

渦漩理論(vortex theory)這個名稱，在今天除了科學史家之外，可能大多數科學家都會對它感到陌生。然而，它卻是十七世紀後半葉到十八世紀初歐洲天文學／宇宙論的一個顯赫的理論。早在牛頓力學興起之前，十七世紀初誕生的笛卡兒力學和天體渦漩理論，已起而對抗亞里斯多德物理學和托勒密天文學這個古老王朝，吸引新生代科學家投入，並發展了一個龐大的渦漩理論版本家族，從而取代亞、托家族並統領了歐洲的科學舞台一直到牛頓天體力學崛起。十七世紀末起，兩者開始競逐科學王國的統治權，直到十八世紀三、四十年代才分出了勝負。

牛頓的天體力學理論，在相當的程度上是由於駁斥渦漩理論而建立的，在其擴展之初，也一直受到渦漩理論家的強力反擊，兩者之間有過一段激烈的競爭。雖然結果今天很清楚，牛頓力學取得了勝利，卻也無法將渦漩理論背後的笛卡兒精神，全然排除在力學研究之外。笛卡兒與牛頓，以及兩個理論家族間的競爭與對抗，無疑是近代科學史中最激烈、也是最壯觀的一頁。

渦漩理論首度在笛卡兒的手中被形構成一個完整的版本，因而幾乎成為笛卡兒的天文學／宇宙論專利。然而，笛卡兒並不是渦漩理論的唯一支持者，甚至不是最初的創始人。十七世紀的其他大科學家，如在笛卡兒之前的克普勒，與笛卡兒同時的惠更斯(Christiann Huygens)和稍後的萊布尼茲(G. W. Leibniz)，都提出了不同的渦漩理論版本。克普勒的磁性渦漩理論乃是微粒子渦漩理論的雛形¹，惠更斯和萊布尼茲，不僅繼承了笛卡兒的宇宙渦漩理論，在許多方面，甚至可算是某種程度上的「笛卡兒主義者」，但是他們分別為渦漩理論添加了不同的理論元素。他們站在機械主義和渦漩理論的觀點上，批判牛頓的萬有引力、絕對時空和絕對運動等觀念，不但涉及形上學與世界的存有結構，更使得雙方不得不爭辯上帝與世界的關係。天文學／宇宙論中的衝突，演變成兩大知識系統的全面對抗。換言之，這場波瀾壯闊的知識戰爭，並不僅限於天文學／宇宙論內部，而是擴張到物理學、形上學、知識論、方法論甚至神學（上帝的觀念）等領域，也可說是「笛卡兒主義」(Cartesianism)對抗「牛頓主義」(Newtonianism)（如何理解這兩個標籤？見後文討論）。

笛卡兒與牛頓兩家族的研究方案與知識系統，在科學史、思想史和哲學史上已經有卷帙浩繁的研究文獻²，卻仍少有對準兩大系統間的競

¹ 參看 Aiton, E. J. (1972), *The Vortex Theory of Planetary Motions* (London: MacDonald Press), 第二章〈克普勒和伽利略的理論〉。

² 個別研究笛卡兒的科學／自然哲學和牛頓的科學／自然哲學都有非常多文獻和論文集，牛頓部分已見第五章內文和腳註的參考文獻；笛卡兒部分最近的二手研究專書有 Garber, Daniel (2001), *Descartes Embodied: Reading*

爭，做個全面性探討的成果³。當然，我們不能不提科學史家夸黑(Alexander Koyré)的顯著成就，他在《牛頓研究》(*Newtonian Studies*)第三章「牛頓和笛卡兒」中，做了長達六十一頁第一手科學文獻的精細研究，展示了笛卡兒和牛頓兩人思想之間錯綜複雜的關係。夸黑首先指出，儘管牛頓在其著作中呈現出厭惡與全面批判笛卡兒思想的姿態，卻無法免除他也曾受益於笛卡兒的史實：例如「運動量」(quantity of motion)的概念和特別是慣性定律的公式(formulation)(包括「運動」做為一種「狀態」(status, state)的肯定)⁴。隨後，夸黑引證了牛頓《未出版的科學論文》(*Unpublished Scientific Papers*)對笛卡兒的批判，包括相對主義式的運動定義(relativistic definition of motion)、空間與物質同一的觀念(從而主張物質充滿世界，並拒絕虛空(void)的存在，即所謂的「物質遍在論」(plentism))、上帝的角色與祂和世界的關係；至於笛卡兒的天體渦流理論，牛頓在《自然哲學的數學原理》第二冊中，乃是以處理「物體在抵抗流體中的運動」這個一般議題的方式來駁斥；最後在《光學》(*Opticks*)一書的質問中，牛頓闡述了他的方法學和神學觀點，以回應笛卡兒學派對他的攻擊。除了正文之外，夸黑更補充了八十五頁的附錄，包括惠更斯、萊布尼茲、笛卡兒主義者如羅浩(Rohault)、牛頓主義者如柯特斯(Cotes)和克拉克(Clarke)對於「萬有引力」、「重力」、「物質」、「展延」等概念的爭論。夸黑的另一本科學史經典名著《從封閉世界到無限宇宙》(*From Closed World to Infinite Universe*)則以更宏觀的角度，呈現了十七世紀的歐洲人世界觀的鉅變，其中自然要包括笛卡兒、牛頓和萊布尼茲等要角。此書內容著重在宇宙結構以及上帝的概念和角色，強化了「牛頓和笛卡兒」的科學思想關係史的複雜面向。夸黑的著作有兩個意義：一方面，他展示了笛卡兒科學和牛頓科學競爭的複雜性和多面性，絕不能僅限於傳統上所認知的科學理論(如渦流理論對抗萬有引力理論)，而必定要涉及形上學甚至神學等面向，也就是我們所謂的「兩

Cartesian Philosophy through Cartesian Science (Cambridge: Cambridge University Press)；論文集方面則有 Moyal, G. J. D. (1991), *René Descartes:*

Critical Assessments, Vol. 4 The Sciences; From Physics to Ethics (London: Routledge Press)，此書收錄了二十世紀在各相關期刊中研究笛卡兒科學的重要論文。最新的研究論文集有 Gaukroger, S., Schuster, John, & Sutton, John (2000), *Descartes' Natural Philosophy* (London: Routledge Press)。

³ 如 Aiton, E. J. (1972), *The Vortex Theory of Planetary Motions*，以及內文中提及的夸黑的著作。Aiton 的著作集中在天文學／宇宙論中的渦流理論之興起與衰落的歷史。夸黑的著作較著重在時間、空間、運動和上帝等等觀念上。

⁴ 夸黑指出，雖然牛頓拒絕笛卡兒的整個世界「動量守恒」的觀念，但他沒有提及「運動量」的概念源頭是笛卡兒；也沒有提到笛卡兒對慣性定律的格述，反而把它歸功於伽利略。然而伽利略實際上認為只有圓周運動才是慣性運動，而非直線運動。笛卡兒把運動視為狀態，包括「狀態」這個術語，直接被牛頓應用到他對慣性定律的格述之上。

大知識系統（理論家族）」的全面對抗；另一方面，夸黑的歷史圖像學研究，為任何試圖去說明「科學史的競爭現象」的科哲理論，提供了分析與檢驗的素材。

因此，一個科學哲學理論，究竟該如何說明近代科學創建之初，兩大知識系統之間的競爭現象？以及其間錯綜複雜的關係？或者反過來說，笛卡兒式和牛頓式的思想系統和學派的競爭，具有什麼科哲上的多重意義？在回答這些問題之前，我們也有必要先問：現有的科哲理論（科學方法論或科學知識成長、發展與變遷的理論）又要如何說明這段兩大科學理論和學派的競爭史？它們是否能全面揭開其間蘊涵的豐富意義？

壹、「笛卡兒—牛頓的競爭」和科學哲學的傳統觀點

以波柏的否證論來看，我們勢必要問：擊敗笛卡兒的渦漩理論而認可了牛頓的萬有引力理論的關鍵實驗是什麼？為什麼牛頓派的科學家與笛卡兒派的科學家（如萊布尼茲）不斷地在論辯那些不可否證的神學（「上帝」的觀念與上帝和世界的關係等等）議題？以及「空間」、「展延」、「運動」等等根本無法設計實驗來檢驗的概念議題？顯然，不管是笛卡兒學派的微粒子渦漩或者牛頓學派的萬有引力，在當時都無法得到實驗證據的支持與否定（萬有引力的檢驗要到 1774 年的 Maskelyne 的重錘偏斜實驗和 1798 年卡文迪士的轉矩天平實驗，才算被設計與實行⁵）；進一步，牛頓和牛頓學派的人，把上述種種不可檢驗的概念看成是嚴肅的科學議題來論辯，而不是舉出經驗證據來否定笛卡兒派的理論，也不符合波柏心目中的「理性科學家」之行為。因此，如果想以否證論來說明這段科學競爭史，恐怕會有很多困難。

在孔恩的典範理論之下，笛卡兒和牛頓兩人，分別提出了兩個互不相容、不可共量的物理學典範，指導兩個學派的研究，競相試圖取代亞里斯多德的物理學典範，十八世紀後半葉多數科學家接受牛頓典範，抱持亞氏典範與笛卡兒典範的科學家逐漸凋零，物理學終於進入牛頓典範全面支配主導的常態科學時期。乍看之下，典範變遷理論能夠很貼切地說明這場競爭史。然而，深入追究理論與歷史的細節，我們就會發覺典範

⁵ 所謂「重錘偏斜實驗」是指拿一個細繩懸吊的重錘置放在大山脈的山邊，測量重錘偏斜的角度。因為，理論上，重錘應該垂直於地面，然而根據萬有引力理論，它會受到大山脈的質量吸引，於是產生非常微小角度的偏斜。卡文迪士的實驗，則是設計一個轉矩天平，利用固定不動的大鉛球來吸引小鉛球，並觀察小鉛球的天平桿是否有偏斜？兩個實驗均可見 Wolf, A. (1999), *A History of Science, Technology and Philosophy in the 16th, 17th and 18th Centuries*, Vol. 2, pp. 111-113。然而，值得注意的是，不管是 Maskelyne 或卡文迪士，其實驗目的都在於求取地球的密度或重量。換言之，他們已經接受牛頓的萬有引力理論，而且預設其為真，並利用此理論來計算地球的重量和密度。

變遷理論，提供的只是一個過於粗略的模式。因為，一個最主要的困難就是我們已經提出的：如何定義典範？如何指認同一個典範？

就歷史先後順序來看，笛卡兒乃是牛頓批判的目標，然而笛卡兒本人死於 1650 年，不可能回應牛頓的批判。代表笛卡兒典範來反擊牛頓和牛頓典範的主要科學家是惠更斯和萊布尼茲。他們兩人只是笛卡兒主義者嗎？只是在笛卡兒典範指導下從事研究的科學家？沒錯，惠更斯和萊布尼茲都接受了笛卡兒的機械主義和天體渦漩原理，然而，惠更斯和萊布尼茲也都否認自己是笛卡兒主義者，萊布尼茲甚且自認是反笛卡兒主義者⁶。那麼，惠更斯和萊布尼茲對牛頓的批判，算不算是笛卡兒典範對抗牛頓典範的一環？

孔恩後來對典範的精確定義是由範例、基本原理或符號通式、形上學信念、共享價值和方法論所組成的「有序訓練元素」(disciplinary matrix)。根據這個定義，我們必須說惠更斯和萊布尼茲的典範，和笛卡兒的典範並不是同一個。因為惠更斯的方法論相當不同於笛卡兒，其範例和基本原理也不完全同於笛卡兒（見下文分析）；萊布尼茲的形上學信念，則徹底不同於笛卡兒（除了物質碰撞的機械原理之外），也因此使得他的物理學基本原理（如「物體」(body)、「力」、「運動」等概念的定義與理解），對「上帝」的角色與地位、科學知識的價值（「預定和諧」(pre-established harmony)價值的揭露）等方面，也相當有別於笛卡兒（見下文分析）。換言之，惠更斯和萊布尼茲的整體科學知識或思想系統，只是在一小部分上繼承了笛卡兒，在很多方面，保有他們自家的理論特色。因此，說惠更斯和萊布尼茲與牛頓及其門徒的對抗，是笛卡兒典範與牛頓典範之間的對抗，不僅不精確，也會掩蓋掉惠更斯和萊布尼茲的知識系統之自主性。另一方面，這也揭示出孔恩將典範定義成一組固定的「有序訓練元素」並不能妥當配合笛卡兒和惠更斯與萊布尼茲理論的關係。因為機械世界觀、微粒子渦漩、世界的時空結構、實體、力和運動，都既有屬於物理學／天文學／宇宙論的部分，也有屬於形上學信念的部分，甚至價值和方法論的部分。惠更斯和萊布尼茲接受了一部分，卻也拒絕其它的部分。

其次，孔恩的典範變遷理論，無法、至少是沒有處理夸黑所揭示的：牛頓其實也正面地受益於笛卡兒的史實。在某個意義上，牛頓「繼承」了笛卡兒的動量概念和慣性定律，而且堅持「動量」是力的本質，拒絕惠更斯和萊布尼茲雛形的「能量」(vis viva)概念。我們當然不可能因此

⁶ 惠更斯和萊布尼茲在以什麼量度來定義「力」的概念上，對立於笛卡兒。即他們主張「力」的量度是 mv^2 （今天的能量單位），而笛卡兒主張是 mv （今天的動量單位）。萊布尼茲甚至寫長文批判笛卡兒的 mv 概念，並和笛卡兒主義者有過一場爭論。見 Garber, Daniel (1995), "Leibniz: Physics and Philosophy," in Jolley, Nicholas (ed.) *The Cambridge Companion to Leibniz* (Cambridge: Cambridge University), pp. 284-293 部分。

說，牛頓也是個笛卡兒主義者，但是這一點卻是說明「科學競爭」時，所必須要處理的課題。

拉卡托斯的科學研究方案方法論、勞丹的研究傳統方法論和傅大為的科學方略的競爭與策略理論，比起孔恩的典範理論，更加重視兩大理論之間的競爭與攻防之歷史評價，他們的理論得失，我們已在上一章討論。當然，拉卡托斯實際地探討了牛頓為了與笛卡兒競爭，發展出他的方法論，甚至改變了科學標準的有趣歷史，我們在前文已數度於腳註中提及。

在歷史圖像學的描述上，科學史家和科學哲學家都常使用像「笛卡兒主義」和「牛頓主義」這樣的用詞來標示兩大知識系統，雖是方便的用詞，卻不夠精確。重點在於我們必須瞭解，「笛卡兒主義」或「笛卡兒學派」和「牛頓主義」或「牛頓學派」等詞，其實意味著兩大理論版本家族，包括笛卡兒家族中的笛卡兒版本、羅浩版本、惠更斯版本、萊布尼茲版本；以及牛頓家族中的牛頓版本、牛頓學派（柯特斯、克拉克、歐拉等人的版本）以及其後的一系列古典力學家的理論版本。事實上，我們更應該說，古典力學乃是綜合了伽利略、笛卡兒、惠更斯和牛頓等人所發展出來的一個龐大的古典力學家族，然而此時我們將暫不涉及此更困難的問題。笛卡兒的版本在家族中做為典範版本，並不意味它是孔恩意義下具支配性地位的「典範」，而是由它開展出一個理論版本家族，換言之，一個典範版本只是一個「原型版本」。同樣地，笛卡兒版本做為研究方案，乃是意味著從它而啟發許多新的理論版本，但是，「笛卡兒主義」並不單只意謂一套研究方案，而是在原型版本的啟發之下所發展出來的一整個理論版本家族。

我們提出的理論版本家族的發展理論，不僅要揭示理論家族間的競爭關係，也要揭露其交互影響與傳承關係，究竟一個先行的理論版本，沿著什麼樣的概念或原理而啟發影響了後繼的理論版本？是順向的繼承還是逆向的對抗？究竟理論版本的哪一部分做為啟發因子，促成了新理論版本的誕生？究竟哪一部分，直接地被其後繼者所接受與吸收？這些啟發、促成、影響和傳承構成了科學知識的「發展路徑」（有時簡稱「路徑」），本章的工作試圖追蹤知識的發展路徑，並試圖建構一個競爭、影響與傳承的路徑地圖。

貳、笛卡兒《哲學原理》中的力學理論

笛卡兒在其 1644 年出版的《哲學原理》(*Principles of Philosophy*)中，試圖建構一個關於整個世界的一切事物之知識系統。這龐大的知識大廈，需要一個起點、方法和基石，就是他先前已在《方法論述》(*Discourse on Method*)、《沈思錄》(*Mediations on the First Philosophy*)、《指導心靈的規則》(*Rules for the Direction of Mind*)等書中揭櫫的「懷疑方法」和「自我的存在」；前者指一套系統性的方法：透過清晰自明的觀念(clear and distinct ideas)以尋求確定無疑的(certain and indubitable)知識與真

理；後者指一旦我們把過去的一切信念都放入懷疑的檢視之下，還是能得到一個確鑿無疑的真理：「我思（懷疑），故我存在」。

從「我（自我、心靈）存在」的穩固基石上，笛卡兒推出了「心」與「物」的截然區分。因為我不能懷疑我的心靈存在，但是我可以懷疑一切我心靈之外的事物，也就是「物質世界」的存在。進一步，從我們不能創造自己、能夠知覺我心靈之外的事物、知覺到它們的穩定呈現、以及實際擁有清晰分明的「上帝」觀念，可以推出我自己與知覺的創造與維繫需要上帝，上帝必然存在⁷，而且上帝不會欺騙我，故我所知覺的外在物質世界也必定存在，而且呈現出穩固的秩序性。也因此，探討外在物質世界的知識才有意義。由上述思考，笛卡兒展開他的世界知識體系之建構，具體地表達在《哲學原理》一書之中。

《哲學原理》有一個簡潔明確、層次井然的編排結構，完全反映出笛卡兒心目中的知識結構與世界秩序。全書共分成四部分，其標題分別是：一、人類知識的原理、二、物質對象的原理、三、論可見宇宙、四、論地球。每一部分都有數十條到一百多條命題，每條命題做了一個斷言或敘述一個主題，其下都有針對此主題的進一步說明、解釋與論證。在第二部分的命題是關於整個物質世界的抽象高層原理、也是最基礎的原理性知識，在它們的基礎上，第三和第四部分的世界現象之知識才能被建立起來。反過來說，第三和第四部分的一二百條命題，是基於第二部分的原理，而去試圖說明去人類知覺現象所表徵的物質世界背後的成因。同樣地，第二部分的原理乃是物質對象在時空中產生運動的基本知識，必須建立在更基本的、人類如何建構知識的方法和原理之上，即第一部分的主題。

第二部分「物質對象的原理」可以說就是笛卡兒的力學理論，針對的主題是物體的運動，運動指空間位置的改變，所以，笛卡兒在第二部分共 64 個命題中企圖說明「物體」、「運動或移動」、「空間」(space) 這幾個基本概念。首先，頭二十二個命題討論的是物質和物質世界的本質。命題一斷定物質對象存在的確定性—這命題其實已在第一部分被建立起來。命題四說明物體的本質不在於重性、硬性、色彩或其它類似的可感質性，而唯獨是「展延」(extension)—在長(length)、寬(breadth)、深(depth)（「高」）三個向度上。展延也是空間的定義，所以，笛卡兒很快地推出一個著名的論旨：「物質與空間的同一」，被表達在命題十一中（笛卡兒的精確講法是：「物質實體與空間事實上沒有差異」）。由此邏輯地否定「真空」(vacuum)的實在性，因為「真空」由定義是「不

⁷ 從我們擁有清晰分明的「上帝」觀念，推論出上帝必然存在的論證，傳統上被稱作「上帝存在的存有論論證」。它的推論過程是這樣的：上帝，由定義是全真、全善、全美的無限實體，而我，做為一個有限的實體，卻能擁有一個無限實體的清晰概念，這個概念必定不是我自己能產生的。除非無限實體本身存在，而且把祂的概念「印在」我的心靈上，使我生而即有，否則我不可能擁有無限實體的概念，因此，無限實體，也就是上帝，必然存在。

存在任何物質的空間」，但從命題十一來看，這定義是自相矛盾的，「真空等於是空無(nothing)」。這也邏輯地否定「原子」的存在(命題二十)，換言之，笛卡兒拒絕了古希臘以來的「原子論」，他的物質無限可分(命題三四)、瀰漫空間各處且同一於空間的觀點，被當時的科學家稱作「物質遍在論」(plentism)，恰對立於「原子論」(蘊涵「真空存在論」)。最後，命題二一斷言世界「不受限定地展延」(indefinitely extended)，命題二二斷言構成「天與地的物質是相同的」，因而拒絕了亞氏學派的天(超月區域，由固體晶體構成的天球)／地(月下區域，由土、水、氣、火四元素構成的)二分。

從第二十三命題起，笛卡兒開始進入「運動」的討論，他斷言，物質的變動與形式上的差異之唯一原因是「運動」(motion)——也即是空間上的「移動」(local movement)(命題二五)。運動和靜止是物體僅有的兩種不同模式，在笛卡兒的獨特空間理解下，運動乃是一物體的位置轉移(transference)給另一個物體⁸，靜止則是這種轉移沒有發生(命題二七、二八、二九)。命題三四斷定一切運動的第一因是上帝，而且祂總是維繫整個宇宙的總運動量相等——去除有關神學因素(「上帝」)的部分，即為著名的「運動量守恆原理」。然而，必須注意的是笛卡兒所謂的運動量(quantity of motion)並不等於後來的「動量」(momentum)(即物體的質量和速度(velocity)(有方向性)的乘積)，而是物體的大小(size)(體積)和速率(speed)的乘積⁹。從這條原理，笛卡兒認為他可以導出下列的自然定律(law of nature)(命題三七、三八、三九，括號內為我們給它的名稱)：

第一自然律(慣性定律)：每個事物，就其被關切的範圍內，總是保持在相同的狀態上；因此，一旦被移動，總是保持移動。

第二自然律(直線運動定律)：所有移動總是沿著直線；因此在圓周上移動的物體，總是傾向移離圓心。

第三自然律(碰撞定律)：一物體與更強的物體接觸，不會損失運動量；但是，如與較弱的物體接觸，它會損失運動量，和它傳送給較弱物體的量一樣多。

第一自然律加第二自然律的前半部分，相當於牛頓三大運動定律中的慣性定律，第二自然律的下半部陳述「離心定律」，第三定律則是表達碰撞的原理。這三者是笛卡兒的力學版本中隸屬於「運動量守恆原理」之下的高層抽象模型。針對碰撞定律，笛卡兒再提出七條碰撞規則(其實就是低層、甚至是可落實的模型)，描述了各種條件(速率、大小和

⁸ 在笛卡兒看來，「位置」和「空間」都是「物體」的不同名稱，然而有不同的認知和用法。物體占據的「空間」乃是「內部位置」(internal place)(命題十)；而「外部位置」則是心靈參考其它物體而設定的關係性位置(命題十三)。一般所謂的「位置」指的是外部位置(命題十四)。

⁹ 見《哲學原理》英譯本譯者的譯註 31(頁 58)。

碰撞方向)的兩物碰撞之結果:(1) 速率和大小都相等的兩物對撞、(2) 速率相等、一大一小的兩物對撞、(3) 大小相等、速率不等的兩物對撞、(4) 有速率的小物體撞靜止的大物體、(5) 有速率的大物體撞靜止的小物體、(6) 有速率的物體撞靜止的同大物體、(7) 較大速率的較大物體撞擊同方向的較小速率的較小物體(命題四六到五二)¹⁰。

建構了上述碰撞運動原理和模型後，笛卡兒接著考察「物體」，作了「固體」(solid bodies)和「流體」(fluid bodies)的區分，兩者差別僅在於流體的局部比固體更易於改變位置；另一方面，固體的各局部凝著在一起，不易分離(命題五四到五六)。當固體受到另一固體的碰撞而移動時，也會從其周遭的流體獲得運動，可是它無法從流體中獲得更大速度(命題五九和六十)。如果有整個流體同時朝向同一方向移動，總是會帶動浸於其中的固體而行，嚴格說來，這並不是「移動」，而是「被帶動」(carried)(命題六一和六二)。明顯地，這些命題乃是為第三部分的主題「鋪路」。最後笛卡兒宣稱：「在物理學中，我不接受任何非幾何或非抽象數學的原理；因為一切自然現象都要藉此而被說明，而且可以提供關於它們的證明。」(命題六四)

在進入第三部分之前，讓我們先建構笛卡兒力學(物理學)理論版本的概念架構(分疇分類系統)如下圖 8-1，同時說明如下：首先，「物體」範疇可以作兩種分類，從「可動性」的準則而分類成「固體」和「流體」，從「所在位置」分類成「天體」和「地面物體」(分別是第三和第四部分的主題)。其次，物體與空間和內部位置是同一的(以雙箭頭表示)，「內部位置」和「外部位置」是「位置」的局部區分。「展延」和「大小」都是空間的一部分，「展延」又是物體的本質，大小是物體的性質(故以單箭頭表示)。大小與速率的乘積是運動量，運動量是運動的一個性質，「運動」則可區分成「慣性運動」、「碰撞運動」與「被帶動」。當然，在笛卡兒的渦漩世界中，慣性運動幾乎不太可能出現。

¹⁰可參看 Aiton (1972), p. 36 的圖示。

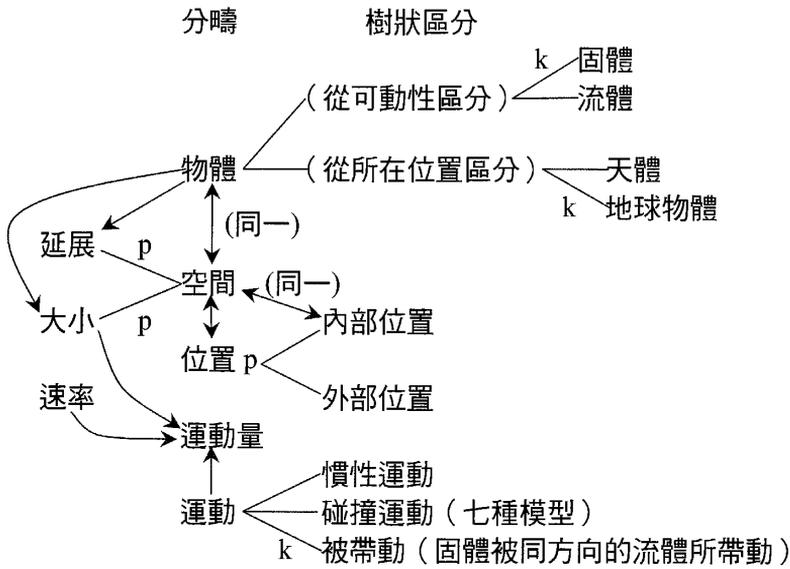


圖 8-1

參、《哲學原理》中的渦漩理論

「渦漩理論」是科學史家用來稱呼笛卡兒在《哲學原理》第三部分，所發展的一套說明天體現象成因的學說。天體現象一尤其是星體的運動一正是應用了第二部分的物理學（力學）原理：「物質與空間同一」、「宇宙不受限定地展延」、「天與地的物質是相同的」、「固體與流體的區分」、「碰撞運動與被帶動的區分」、「往同方向流動的流體會帶著其中的固體行進」。笛卡兒的思路大致如下：因為物質與空間同一，所以宇宙各處必充滿物質，不受限定地向四面八方展延，構成天與地的物質不外乎固體和流體，既然天體顯現出運動的現象，故充滿天界的物質必是流體，它們構成巨大的渦漩，帶動固體天體（星球）進行圓周運動。

「論可見宇宙」前二十個命題討論宇宙的驚人尺度，包括各行星之間的距離（命題五到七、命題二十斷定恆星在土星之外很遠處）、恆星自行發光、行星反射陽光而發光、地球與其他行星沒有不同。命題十五到十九討論托勒密、哥白尼、第谷(Tycho Brahe)等人的宇宙論假設，笛卡兒皆表不贊同之意¹¹。他做了乍看之下相當驚人的宣稱：我拒絕地球的運動。在此，笛卡兒要講的其實是：就「運動」一詞的一般意義而言（慣性運動或被碰撞而運動），地球並沒有這兩種運動，然而，地球卻被天體渦漩所帶動而繞太陽運轉。命題二四宣稱「諸天寰是流體」(the

¹¹笛卡兒支持地球環繞太陽，但他並不同意哥白尼「太陽是宇宙中心」的觀點。一位審查人指出，由於 1633 年伽利略受教會審判，使笛卡兒在寫作措辭上格外小心，避免步上伽利略後塵。

heavens are fluid)¹²，他並說明：「這是一個當前被所有天文學家持有的意見，因為若不如此，幾乎不可能為行星現象提供令人滿意的說明。」(p. 93)「諸天寰攜帶它們所含容的一切物體」(命題二五)·「地球靜止在它所在的天寰之中，儘管天寰帶著它而行(carries it along)」(命題二六)，「所有行星據信都是相同的」(命題二七)，「恰當地說，地球沒有移動，諸行星也沒有；雖然它們被天寰所攜帶而行」(命題二八)。很明顯地，笛卡兒在這裏巧妙地整合了哥白尼的「太陽中心說」(heliocentric theory)和第谷的「地球靜止」觀點(從而也就是亞氏傳統的地球靜止論)。既然地球是被以太陽為中心的天寰渦流所帶動，笛卡兒當然就得接受天體現象的一些哥白尼式的說明，如「地球繞太陽作週年運動(annual movement)」(命題三九)、觀察不到恆星視差(parallax)是因為恆星極端遙遠(命題四十)。已經決定了宇宙的基本結構之後，笛卡兒所面對的問題是：如何去說明諸種可見的宇宙現象？包括天體構成元素、天體的形狀、天體的規律移動現象、如何能看到星光(光如何穿透宇宙抵達人眼)、星體如何形成等等。

笛卡兒認為整個可見宇宙是由三種元素構成的：第一種是由於物體不斷碰撞而剝落的小部分，被分解成不受限定地小的微粒子，它們構成太陽和恆星，能產生光現象，也能填滿所有較大物體間的空隙；第二種元素是球體狀的粒子，它們與肉眼可見的物體相較，仍然非常小，它們構成天寰流體；第三種元素是由局部組成較大體積的可見物體，包括地球、地球上的事物、行星、彗星等等(命題五二)。太陽與恆星的形成是因為第二種元素由於不斷地碰撞，其周邊會彼此磨損，使得第一種元素漸漸增加，第二種元素變圓，佔據空間也變小，開始被擠開，並嘗試移離(recede from)中心，以致留下一個充滿第一種元素的球狀空間，即太陽與類似的恆星(命題五四)。「光」就是由這種離開中心的力量所構成的(命題五五和命題六四)。接下來的命題五六到六三都在於說明了第二種元素的運動是「努力離開中心」，因而構成巨大的渦流，越靠近外層的離心傾向越大但速率越小。這也意謂著天寰渦流是「離開中心」的渦流，而不是朝向中心的渦流。

既然已經斷定了宇宙存在不同的天寰—也就是不同的巨大渦流，笛卡兒必須要說明這些(尤其是彼此鄰接的)渦流如何分佈共存於宇宙之中，而不致於互相干擾。他以下圖 8-2(出於《原理》的 Plate VI)來展示渦流方向與邊界相容性。笛卡兒在命題六五的說明中指出，如果有一以 S 為中心，其旋轉方向為由 A 到 E 到 I，如果其旁邊有另一渦流以 F 為中心，則其旋轉方向必定要由 A 到 E 到 V；再者，如果有第三個渦流不在 S 和 F 的平面上，而是在它們之上，其中心與 S 和 F 構成一個三角

¹²笛卡兒在此所用的字，英譯為 heaven，我們譯成「天寰」，其範圍指的約莫相當於今日天文學所謂的「太陽系」或「恆星系」，在笛卡兒的理論中，它是由一個巨大的流體渦流構成的，以太陽為中心。其它恆星也有以它自己為中心的「天寰」。

形，則其渦漩必定要由 A 到 E 再朝向上方(p. 118)。宇宙中的諸天寰大抵以類似的方向分佈、鄰接與旋轉，因此總是保持和諧，不會互相破壞。要注意的是，單個渦漩也不是二度空間的平面分佈，而是一構成三度空間的立體橢球狀，因此，笛卡兒再以如下圖 8-3 (Plate X) 來說明渦漩的結構與流體的運動。

在圖 8-3 中，假定 AYBM 是環繞中心 S (太陽) 的渦漩，A 和 B 是兩極，穿過兩極 AB 的直線構成了此渦漩天寰的中軸，AYBM 渦漩就繞著此中軸旋轉。既然渦漩微粒子總是有逃離中心的傾向，所以它們會從中心逐漸往外圍流動，當它們流動到最外圈的大圓 YM 時 (也就是橢球體的赤道(equator))，將進入另一個渦漩 MCM 或 YOY 的中軸地帶，再次沿著 MCM 或 YOY 渦漩而往外圍逃逸，直到進入 ZLZ 渦漩的 ZZ 中軸地帶，進行下一個渦漩循環，再次流動到 ZLZ 的最外層，重新進入 AYBM 渦漩。笛卡兒在圖 8-2 中所提供的宇宙渦漩分佈結構的上視 (與中軸垂直的截面) 與側視 (與中軸平行的截面) 的混合圖像；在圖 8-3 所提供的全部都是側視圖像。

上文討論的是渦漩與渦漩之間的微粒球(globules)交換，至於一個微粒球在渦漩內部的運動路徑又是如何？假定有一微粒球從 A 點進入 AYBM 渦漩，它會沿著直線直達太陽週圍的 d 點，同樣地，從 B 點進入 AYBM 渦漩的微粒球，沿著直線抵達 f 點，兩端的微粒球沿著太陽表面接觸，只能被擠開往兩旁運動，亦即沿著太陽的赤道圓周而抵達 eg 點，開始向外圍逃逸，它們把內圈的微粒球擠向外圍，自己也被後繼的微粒球不斷地推動，最終達到外圍的赤道上 (命題七二)。同樣地，AB 中軸外的微粒球都以類似的方式而進行運動，它們的路徑都是一種螺旋狀的路徑。

現在，這樣的天寰渦漩如何說明行星和彗星的運動？首先，笛卡兒認為行星和彗星是由於恆星轉形而成的¹³。一個「勢力較小」的渦漩 (例如圖 8-2 的 N)，很可能會因為中心恆星的固體黑斑擴張，阻礙它的流動，使它被鄰近的大渦漩 (如圖 8-2 中的 S) 所侵吞，其殘留下來的固體球體，要不是被大渦漩帶動而繞著其中心運轉，變成其行星；就是在各渦漩中移動，變成彗星。如果這個固體球體是沿著大渦漩的中軸極點處掉入渦漩，那麼它將直線下降，直到某處的渦漩微粒球的固體性與它相等，此時，它將不再掉落，但也不上昇，而是開始沿著渦漩方向移，繞中心運轉 (命題 140)。但是，渦漩流體不是有移離中心的傾向？為什麼行星能保持在固定的軌道上？對此，笛卡兒的說明是，如果行星比

¹³因為渦漩本身也可能被破壞，但是破壞它的因素，不是因為其鄰近的渦漩，而是來自其中的恆星。恆星中會有一些較大的固體凝成黑斑 (例如太陽黑子)，而且這些黑斑可能越來越多，阻礙渦漩微粒的流動，從而破壞整個渦漩結構。這個渦漩就會被其週遭的渦漩所侵佔，原來的中心恆星因為聚集了很多黑斑而不再流動發光，變成行星或彗星，而且被入侵的渦漩所帶動，繞著它的中心移動。(命題 118-120)

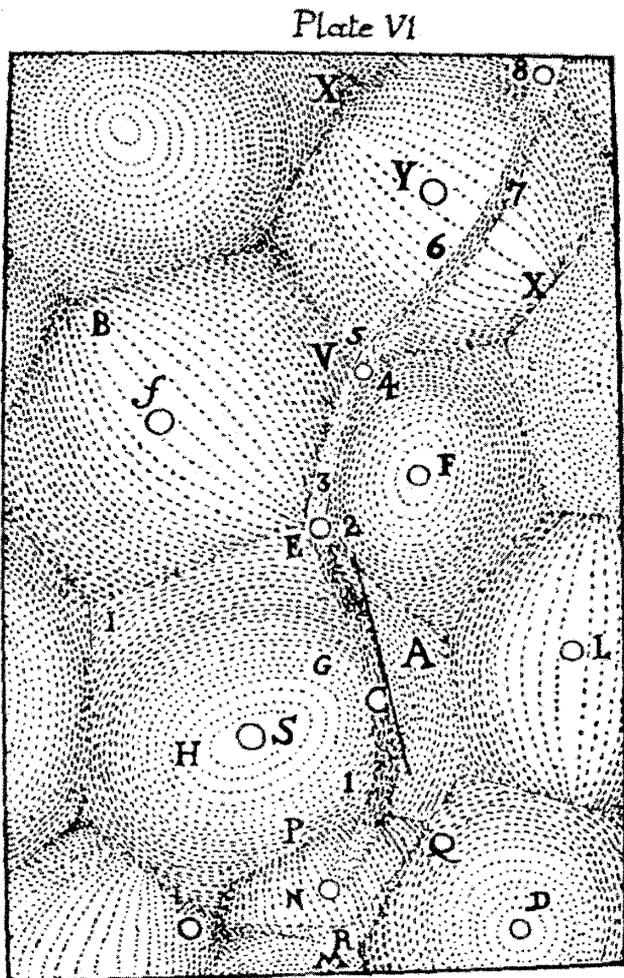


圖 8-2

起軌道更靠近太陽時，它就被會附近較快速的流體帶動而移離太陽，如果它稍微遠離太陽時，其週遭流體的移動速度較慢，就會降低行星的震動，使它回向太陽，因此，行星就保持在其固體性和微粒球相等的位置上¹⁴（命題 140-145）。在提出這行星的一般模型之後，笛卡兒說明太陽系諸行星的情況，尤其是為什麼月球會繞地球運動的現象¹⁵（命題

¹⁴這兒所謂的「固體性」被後來的笛卡兒派天文學家改成「密度」的概念。當然，笛卡兒已在命題 122 中說明了固體性，要依賴物體的大小和形狀來決定。笛卡兒認為微粒球有可能比整個星球更固著化。

¹⁵笛卡兒對月亮繞地球的說明是，因為月亮比較地球小得多，較易受到震動。月亮不僅繞地球轉動，也同時繞太陽。當它在地球外側時，就產生較大震動力量把它推向地球內側，但是當它抵達地球內側最近太陽處時，該處渦漩的

146-157)。至於彗星，笛卡兒說明如下：如果恆星轉形的固化球體（假設是圖 8-2 的 N），其固體性比渦漩微粒球更大，而且距中心的極點有相當的距離，雖然它會被流體帶動，但是卻未必會接近渦漩中心，其移動可能有種種方向，甚至穿越各不同的渦漩（見圖 8-2 的 1234567 數字所指示的路徑）（命題 126-128）。

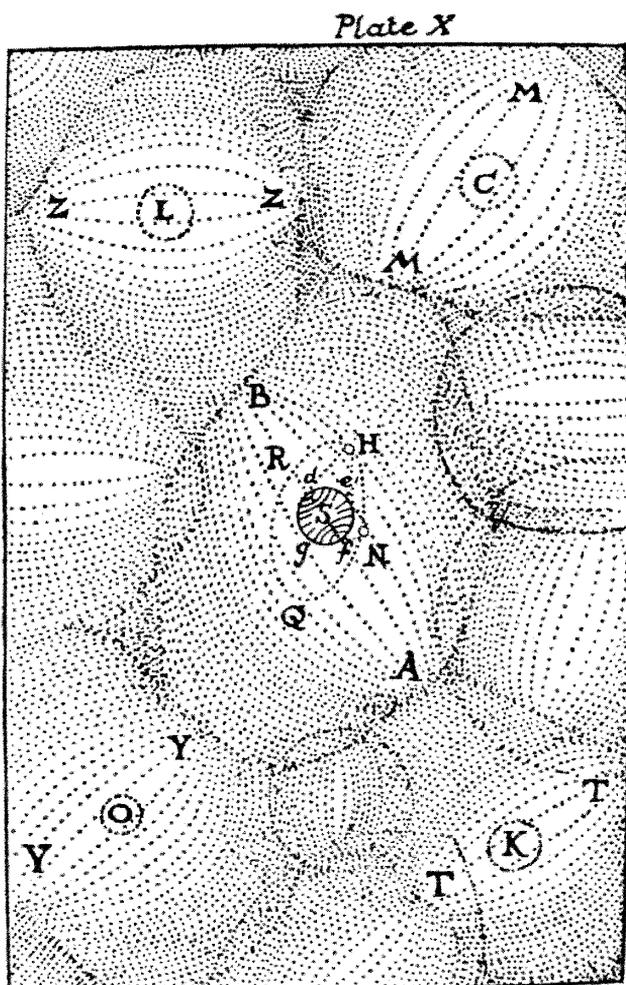
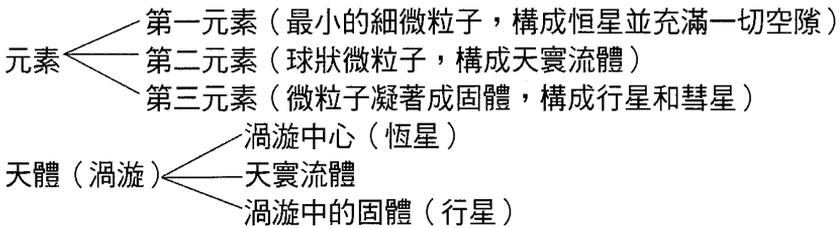


圖 8-3

最後除了上述天體成分、結構、形成與運動的說明之外，笛卡兒也試圖以三元素的基本架構來說明各種可見的宇宙現象如：星光、太陽黑

速度又大到把它推回來。因此，月亮因為體積小的關係在地球兩側被推來推去。當然，因為渦漩流體的關係，月球的來回就會呈現一個橢圓形的繞地球軌道。

子、新星誕生、恆星消失、彗星的尾巴等等。現在，讓我們將笛卡兒的渦漩理論之分疇分類架構和它的模型系統，重建如下圖 8-4。



宇宙的渦漩分佈結構

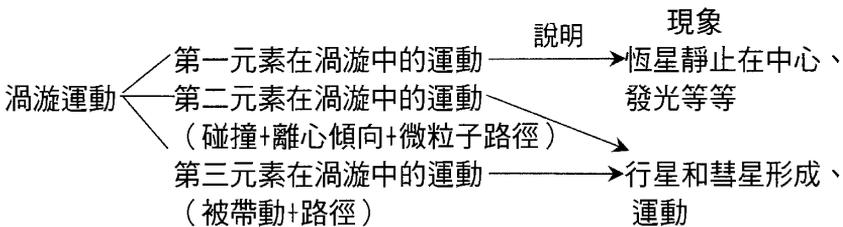


圖 8-4 說明：「元素」和「天體渦漩」乃是渦漩理論的兩個基本範疇，而宇宙中的渦漩分佈結構乃是一種模型（結構模型）；渦漩運動也是一種模型（運動模型）。「渦漩運動」模型又可分成三種，分別說明恆星的形成、運動和發光等等（第一元素的運動）與行星和彗星的形成和運動（第二元素與第三元素的渦漩運動，再加上離心傾向與微粒子路徑來說明）。

肆、笛卡兒的研究方案

《哲學原理》的最後一部分「論地球」，試圖說明地球上所發生的一切自然現象，包括地球本身的形成由來、海洋的形成、物體的重、熱的本質和作用、地質表面、空氣的本質、水的本質、海洋潮汐的原因、空氣與水的流向、地球內部、酸、油性物質、硫磺、金屬和礦物、噴泉、海鹽、金屬的遍在性、地震、火、煙、酒精、火藥、硝石、石火、玻璃、磁石、硬性、磁力、地磁、靜電吸引力、感官和感覺等等。讓我們根據標題，姑且把這一部分稱作「地球理論」。從二三四部分明顯可以看到，笛卡兒在《哲學原理》中，試圖提出一切自然現象的說明和理論，也就是以「所有自然對象」為論域的一整個「自然科學」的理論版本。我們在上兩節所揭示的「力學理論」和「渦漩理論」其實只是這個「自然科學理論版本」的局部理論版本。現在問題在於，《哲學原理》四大部分的關係並不是平行獨立的。

嚴格說來，把笛卡兒在《哲學原理》的第二和第三部分所發展的理論，稱作「力學理論」和「渦漩理論」，也不是非常精確。因為「力學」和「渦漩」的主題似乎都在於「運動」。然而，如我們所見，「運動」固然是這兩部分的主題，卻非全部，笛卡兒試圖說明的還包括種種可見

的現象（如物體的構成元素、天體的結構和形成，雖然現象的原因最後都要歸諸於物質的運動），而且第二部分相較於第三和第四部分，乃是處在更基礎的地位上。也就是說，《哲學原理》的四部分，蘊涵了一個階層秩序。其第二部分，試圖發現能說明所有物質對象的原理，也就是一個「物質理論」（或「物理學」，笛卡兒明白地用這個詞）。渦漩理論和「地球理論」其實是他的「物質理論」的二個局部理論版本，因為渦漩理論和地球理論的論域都是物質理論論域的子集合。物質理論中的原理和概念（物質與空間同一、物質遍在於空間中、固體與流體的區分、碰撞運動與被流體帶動的模型等等），都被用來說明宇宙和地球上的種種自然現象。

就歷史來看，笛卡兒的物質（力學）理論和渦漩理論深具啟發力，吸引當時科學家的目光，也使它自己成為一個家族的「原型版本」，蘊涵了一個引導後繼研究的方案。事實上，這個研究方案具體地體現在《哲學原理》中，完整地包含了五個形式要項：公式或表達系統、理論內部的分疇分類論域、模型或整個模型階層體系（機械碰撞模型與渦漩模型）、自然哲學或知識全體的存有論論域（學科分類）和學科秩序（體現在《哲學原理》一書中的整個自然論域的分疇分類，以及各理論之間的階層秩序）、價值目標與方法論（表現在第一部分）。讓我們作個更詳盡的說明。

首先，上兩節已經展示了笛卡兒的「自然科學理論版本」的「公式（定律）與表達系統」、「模型階層系統」和「分疇分類的論域」。笛卡兒的整個自然哲學的存有論範疇架構（分疇分類的論域）可以整理如下圖 8-5：在笛卡兒的存有論系統中，神創造了心靈與物質，並把天生觀念印在心靈上。天生觀念、理性反省的觀念與知識都是心靈的一部分。

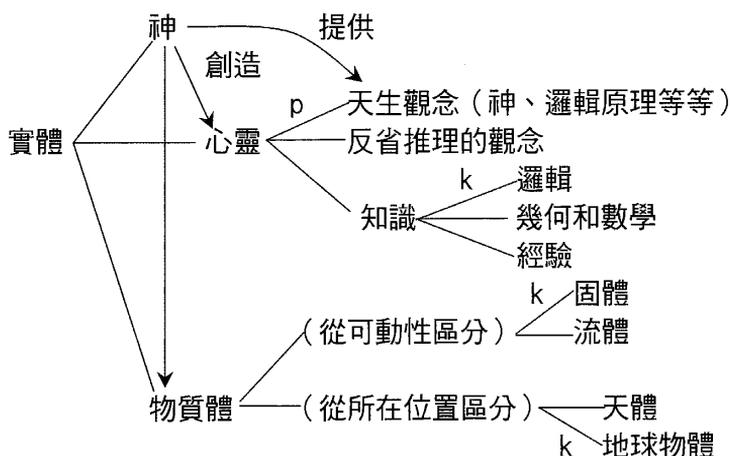


圖 8-5

這個存有論的論域，反映了一整個哲（科）學（或整體知識）的學科分類和學科秩序如圖 8-6。圖中的箭頭表明秩序關係，亦即若箭頭從

A 學科指向 B 學科，表示 A 學科是 B 學科的基礎。方法論和知識論是獲得整個知識大廈的工具，它們規定了「知識」的本質與條件（如清晰分明的觀念等等）以及獲取知識的方法，從而引導研究者建立整個知識大廈。至於整個知識體系的根基是第一哲學，即形上學，乃是物質科學的基礎。笛卡兒的形上學大致包含實體論、心物二元論和機械論，三者聯合決定了笛卡兒的「科學（哲學）」之視野、範圍與內容。相應於二元論，有「心靈科學」與「自然科學」之區分；機械論則支配了「自然科學」，它包含了「物質科學」（物理學，討論一般物質的運動），以及討論「特別物質的運動」之「宇宙論／天文學」和「地球科學」。心靈所發展出來的幾何和數學又特別是物質科學的方法論基礎，物質科學又做為宇宙科學和地球科學的基礎。至於，笛卡兒所訴諸於「上帝」的地方，可以被視為「神學」，但神學在笛卡兒的整個知識體系上，其實聊備一格。

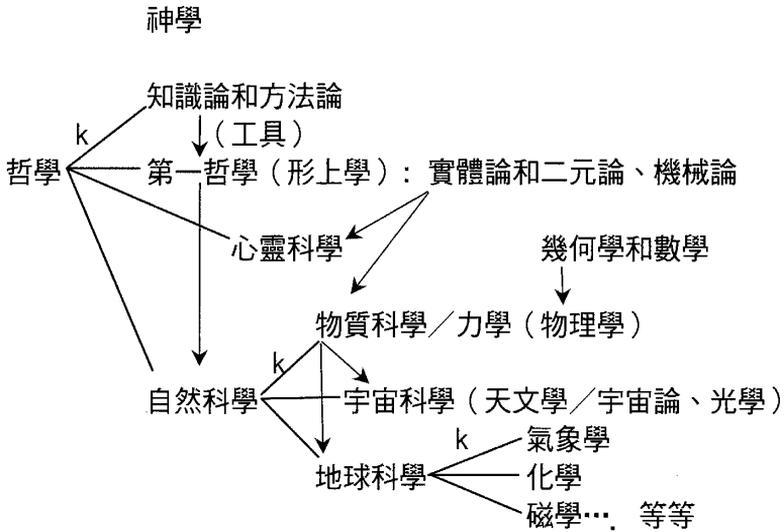


圖 8-6

笛卡兒研究方案的「基本目標」是「說明一切自然現象的成因—機械因，並拒絕一切訴諸於玄奧觀念的說明」，可以說是他對士林學派與文藝復興神秘學派的反彈。他的方法論規則乃是由此基本目標中導出。《哲學原理》一書中雖然沒有明載方法論規則，但是笛卡兒已在先前出版的著作如《方法論述》、《指導心靈的規則》中明白條列陳述，當然，這些規則誠如其書名，並不只限於現代所謂的「科學方法論」，然而對笛卡兒而言實與之無異。讓我們將這些規則整理成三條最基本的原則：

(1) 基礎原則：知識必須建立在確定且不容置疑的基礎上，這個基礎最終必定落在清晰分明的天生觀念或演繹得到的觀念，如自我、上帝、幾

何和數學等之上¹⁶；(2) 分析原則：把複雜難解的命題分析成較簡單的命題，並試圖從最簡單的直觀中獲得餘者的知識；(3) 機械論的說明原則：只使用「幾何和數學」來說明自然現象。在這兒，所謂的「幾何和數學」，其實真正指的是笛卡兒形上學中的機械論，亦即只考察物體的大小與運動軌跡—這些都屬於「空間」範疇，即「幾何學」的主題。笛卡兒其實從沒有真正應用他所發展的「解析幾何」去描述物體的軌跡。然而，包含「機械論」與應用「幾何與數學」的方法論規定在日後的發展與競爭中，具有強大的啟發力，並扮演了十分重要的角色。

伍、渦漩家族的發展

不以成敗論英雄，我們必須承認，笛卡兒的確提出了相當吸引人的知識體系與研究方案，才能吸引當時第一流的科學與哲學頭腦，繼承笛卡兒方案中的部分項目，持續發展下去—這些頭腦包括惠更斯、萊布尼茲和伯努利一家¹⁷。事實上，笛卡兒方法論的影響也不儘限於歐洲大陸的荷蘭和法國，還穿透到其論敵牛頓的國家¹⁸。不過，我們對笛卡兒家族（渦漩家族）的發展之探討，將以惠更斯、萊布尼茲和伯努利一家為主軸¹⁹。而且我們也不再詳細地展示這些科學家的理論版本的每個細節，以下只著重他們對笛卡兒的繼承與更新之處。

¹⁶「基礎原則」即是當代知識論所謂的「基礎論」(foundationalism)，主張知識最終必定可建立在非推論性的基礎上。經驗論的基礎論主張知識最終建立在直接的經驗命題上；理性論的基礎論則如笛卡兒。當然，笛卡兒本人並沒有使用這樣的術語，包括第二個「分析原則」。

¹⁷這是兄、弟和弟弟的兒子三人所組成的科學家家族。見下文。

¹⁸笛卡兒是法國人，但因不見容於教會，而長期居於荷蘭。因此，笛卡兒科學在這兩個歐陸國家的影響力最大，但他也影響了英國，見 Rogers, G. A. (1992), "Descartes and the Method of English Science," in Chappell, Vere(ed.), *Seventeenth-Century Natural Scientists* (Essay on Early Modern Philosophers Series, Vol. 7)。

¹⁹由於缺乏這些科學家的第一手文獻，包括英譯本，不過，萊布尼茲部分有一本英譯論文與書信集，有不少重要文獻。以下的討論將依賴於科學史家的詮釋。主要的科學史文獻來源有 Koyré (1965), *Newtonian Studies*; Chappell, Vere(1992) (ed.), *Seventeenth-Century Natural Scientists : Early Modern Philosophers*; 荷蘭科學家史家 Dijksterhuis, E. J. (1986), tr. by Dikshoorn, C., *The Mechanization of the World Picture*; Loemker, Leroy E. (1976)(ed.), *Leibniz's Philosophical Papers and Letters*; Jolley, Nicholas (1995), *The Cambridge Companion to Leibniz*; Woolhouse, R. S. (1994), *Leibniz: Critical Assessments*; Hall, A. Rupert (1980), *Philosopher at War*; 以及我們先前不斷引證的 Truesdell, C.(1968)和 Aiton, E. J. (1972)等著作。

惠更斯被視為十七世紀四大天才科學家之一²⁰，他也常常被視為「徹頭徹尾的笛卡兒主義者」(Dijksterhuis 1986, p. 414)。然而，惠更斯的科學成就在日後的科學界而言無疑比笛卡兒的成就更具知名度。事實上，惠更斯的笛卡兒主義當然不是遍及在每一方面，他發展了自己的理論版本，在很多論點上不同、甚至改良了笛卡兒的理論版本。惠更斯繼承笛卡兒的地方主要在於形上學（尤其是機械論）、物質理論／力學理論和天體渦漩理論²¹，但是在「重」的主題上，惠更斯改良了笛卡兒的論述（見下文），並在「光」的主題上發展了一個精緻的波動理論，成為在「光學」領域中與牛頓光學理論競爭的主要對手。最重要的是，惠更斯在方法論上，一點都不是個笛卡兒主義者。

根據艾辛加(Aant Elzinga)，惠更斯的方法論包含了下列四項特色：(1) 「阿基米德式的科學理想」(Archimedean ideal of science)：惠更斯偏愛阿基米德式的幾何證明法；(2) 效益觀(utilitarianism)：科學應該要具有實踐上的效益。(1) 和(2) 兩點可以說是惠更斯的科學目標。(3) 機率主義(probabilism)：知識的本質不在於確定性上，而是有其推測性，只要具備高度可能性即可；(4) 經驗組合理性：獲得知識的工具，除了理論推論外，還必須參考經驗，如基本的機械原理必須要參考經驗來檢驗(Elzinga 1992, pp. 147-166)。很明顯地，惠更斯的第一項目標，和笛卡兒並沒有什麼不同（雖然具體成果差距頗大），其餘三個項目則與笛卡兒的目標和方法論大異其趣。惠更斯拒絕笛卡兒的純粹分析理性與確定知識的嚴格要求。

就笛卡兒的研究方案之五個形式要項而言：(1) 在公式表達系統與模型體系上：惠更斯在力學理論的「慣性定律」、「碰撞定律」、「動量」等方面繼承了笛卡兒；在「天文學／宇宙論」上繼承笛卡兒的「渦漩理論」；在「光學」上提出一個笛卡兒所沒有的「波動理論」；(2) 在理論領域、自然哲學的存有論範疇與學科秩序上，惠更斯也繼承了笛卡兒的機械論、學科分類與學科秩序，以及一部分的物質觀點，但在物質與空間的關係上不同意笛卡兒，反而傾向加森迪(Pierre Gassendi)的原子論。(3) 科學目標與方法論與笛卡兒截然不同。笛卡兒的研究方案到惠更斯的理論版本之發展路徑可表達如下圖 8-7。

²⁰懷海德(Alfred Whitehead)在其《科學與現代世界》(*Science and Modern World*)中把十七世紀稱為「天才的世紀」，並列出四位科學巨人，即伽利略、笛卡兒、惠更斯、牛頓。懷海德認為他們四人聯手更新了歐洲人的世界圖像。

²¹參看 Dijksterhuis (1986), pp. 368-385 惠更斯力學的部分，Hall, A. Rupert(1992), "Huygens and Newton," in Chappell(ed.), pp. 167-181。惠更斯建立了「等速圓周運動」、「彈性碰撞定律」、「運動相對性」等模型，並將笛卡兒的動量概念改變成質量和速度的乘積。「光」與「重力」部分，參看 Dijksterhuis (1986), pp. 458-460 和 Snelders, H. A. M. (1992), in Chappell(ed.), pp. 182-203。

形式要項	笛卡兒的研究方案	惠更斯的理論版本
通則與模型	力學 天文學／宇宙論 光學（壓力模型）	力學 天文學／宇宙論 光學（波動模型）
論域與存有論	物質與空間 運動（機械論） 天體（大渦漩） 光的介質	物質與空間（傾向原子論） 運動（機械論） 天體（小渦漩） 光的介質
目標與方法論	理性論	×（不繼承）傾經驗主義

圖 8-7 說明：其中箭頭表示繼承；× 表示不繼承。公式、表達與模型那一欄的學科排列方式，則明顯地透露出兩人的學科分類與學科秩序的繼承關係。

萊布尼茲是十七世紀末到十八世紀初的大科學家與大哲學家，是牛頓的同輩人，也是渦流理論家族中，與牛頓家族產生激烈爭辯的人物。在哲學史上，萊布尼茲與笛卡兒同列為理性主義(rationalism)。因此不像惠更斯，萊布尼茲在知識論和方法論上，與笛卡兒的步調一致，相信確定性的知識、天生觀念的存在與演繹推論方法（當然萊布尼茲發展自己的版本，他對邏輯原理的貢獻也遠遠超過笛卡兒，但其方法學上的精神是一致的²²）。他繼承笛卡兒的天體渦流原理，並發展一個自己的和諧渦流理論版本(Aikon 1972, pp. 125-151)。很多哲學史家與科學史家並不把萊布尼茲視為笛卡兒主義者，把他看成開創新學派的首領人物，故有「萊布尼茲主義」(Leibnizianism)的用詞。

究竟萊布尼茲算不算笛卡兒主義者？我們已經指出所謂「某某主義」這類術語的含糊與浮濫，我們也指出一個理論版本家族的成員，都具有自家特色，幾乎不會在每一點上都完全一致。因此，重要之處在於，我們必須要分析一個理論版本和研究方案之間的結構要項，究竟被其後裔版本繼承了哪些？又繼承了多少？同時更新了哪些？

²²一些研究萊布尼茲哲學的專家，會著眼於萊布尼茲在知識論、形上學和方法論方面都批判笛卡兒的部分論點，因此主張萊布尼茲是反笛卡兒主義者。不過，究竟什麼是「笛卡兒主義」？如何界定笛卡兒主義的硬核？哲學學者通常很少作出清楚的定義。我們認為，在方法論上，萊布尼茲當然繼承了笛卡兒的方法論精神。

萊布尼茲與笛卡兒的理論版本最大的差異在於形上學。他拒絕笛卡兒的實體論和二元論，轉而發展他自己的「單子論」(monadology)²³。單子論是一套頗為晦澀難解的形上學系統，大意指構成整個世界的最基本元素是「單子」(monad)，它是不可再分割的最小單位。「單子」並不是物質性的原子，而是精神性的東西，可說是一種「精神原子」，具有主動能力，並聯合組成了有機體、物質和世界。這種「單子」才是真正的實體。精神單子與物質之間的關係如下圖 8-8²⁴。



圖 8-8 說明：一群單子能聚集成活的有機體(living organism)，其中有一具支配性的單子統一成整體。此活的有機體組成根據機械律運作的物質。這意味著物質必須莫基於單子之上，而精神單子則能知覺物質。

萊布尼茲認為這個世界的運動現象，必定是來自事物內在的主動能力，然而傳統上的物質(matter)都是被動的，無法主動造成運動現象，因此，這世界最基本的元素必定不是被動的物質，而只能是精神性的單子。很明顯地，在這樣的形上學系統下，萊布尼茲自然不會同意笛卡兒的物質科學與力學理論，他雖然同意物體只有在碰撞時才能將「力」傳遞給另一物體，但這力(vis motrix) (即「物體在運動中的力」(the force of bodies in motion))並不是笛卡兒所謂的「運動量」，而是一種活力(vis viva, living force)，其量為質量與速率平方的乘積，它蘊涵在運動物體內部，這個觀念後來發展成現代力學中的「動能」。

除此之外，萊布尼茲的形上學中還有「預定和諧」(pre-established harmony)以及「實際世界是一切可能世界中最完美的世界」之概念，這些都和上帝有關，「上帝」在他的形上學中也扮演相當重要的角色。萊布尼茲反對笛卡兒哲學系統中那種「上帝」和神學聊備一格的位置。所

²³關於萊布尼茲的形上學，有一些專著值得參考，如 Rutherford, Donald (1995), *Leibniz and the Rational Order of Nature* (Cambridge: Cambridge University); Savile, Anthony(2000), *Leibniz and Monadology* (London: Routledge Press)

²⁴此圖引自 Rutherford (1995), p. 258。

以，他也拒絕笛卡兒式的知識體系和學科分類，雖然他沒有一本像《哲學原理》那樣的整體性著作來闡明他的整個知識體系和自然哲學，我們仍然可以將萊布尼茲的學科分類與學科秩序重建成如下圖 8-9。

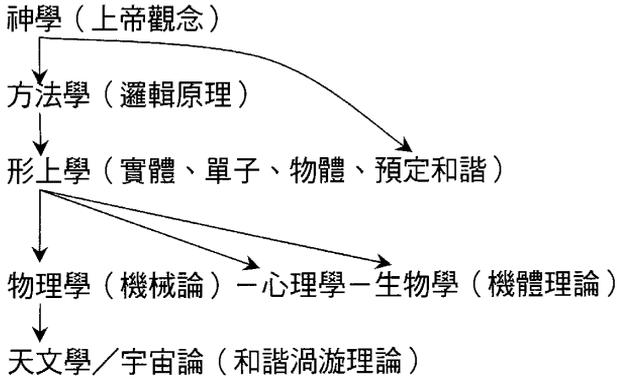


圖 8-9 說明：在物質與精神統一的形上觀點之下，萊布尼茲的物理學、心理學和生物學（機體理論，有生機論的色彩）乃是互相平行的學科。

單就天文學／宇宙論、甚至物理學而言，萊布尼茲基本上仍繼承了笛卡兒理論版本的定律系統、機械碰撞模型和渦漩模型，但拒絕笛卡兒的「力是運動量」的觀念；就物理學背後的論域與存有論範疇架構（形上學）而言，萊布尼茲和笛卡兒截然不同，因而也蘊涵了一個不同的學科分類，然而就體系的說明秩序而言，萊布尼茲基本上仍繼承了笛卡兒。因此，從笛卡兒的研究方案到萊布尼茲的理論版本之發展路徑可以圖示如下圖 8-10。

形式要項	笛卡兒的研究方案	萊布尼茲的科學理論版本
通則與模型	力學（機械模型） （運動量） 天文學／宇宙論 光學	力學（機械模型） （活力） 天文學／宇宙論 （不重視）
論域與存有論	實體（二元） 心靈 物質（機器） 生物（屬物質） 天體（渦漩）	實體（單子） 單子（精神） 物質（由單子組合） 有機體（由單子支配） 天體（渦漩）
學科秩序	笛氏版本	萊氏版本
目標與方法論	理性論	理性論

圖 8-10

十八世紀後，在面對牛頓力學的強力競爭之下，繼承笛卡兒方案並進行「救亡圖存」的有名科學家是伯努利一家人。讓我們留待下文。

陸、「萬有引力」的戰爭

為什麼物體在空中失去支撐就會掉到地面？這是自希臘時代以來，就為科學家所感興趣的問題。一個可行的答案是：物體因「重」(gravity)而降落。可是，這個答案並未真正回答問題，因為人們總是可以追問：那什麼又是「重」，該如何說明它？它的機制又是什麼？十七世紀還有一個普遍的科學問題是：在拋棄了亞里斯多德與中世紀的同心圓晶球的固體天球宇宙觀，並接受哥白尼的地球繞太陽公轉的主張之後，究竟是什麼因素讓地球和其它行星能「懸浮」在太空中，並繞行太陽運轉？

這兩個問題對笛卡兒而言，分屬不同的領域，後者屬宇宙科學，笛卡兒的答案是地球被天寰渦漩所攜載而懸浮空中，並被以太陽為中心而作同方向轉動的渦漩所帶動。前一個問題則屬於地球科學，笛卡兒的答案是：因為地球周遭同時擁有地面物質（第三元素）與天寰物質（第二元素），如果有一固體物體擁有較多第三元素，當它在空中失去支撐時，其下方的空氣較稀薄，因此擁有較多的天寰物質，而天寰物質的傾向是逃離地球，所以，它們會往上取代固體物體所佔據的位置，因此就把固體物體擠下來。天寰物質逃逸地球在固體物體上所施加的作用便是「重」（《哲學原理》命題 24-27）。

牛頓對兩個問題提出同一套模型來說明：兩種現象都是萬有引力的作用。在空中失去支撐的物體會掉落是因為地球對它施加一個吸引力(attraction)，此力從物體（假想它變成一點）指向地球的球心。地球（和其它行星、月球等）能懸浮在太空中並繞行太陽運轉的原因是：太陽在地球（和其他行星）施加一個指向太陽球心的吸引力，加上地球本身在切線方向的慣性速度，兩者之間的平衡，使得地球得保持在橢圓軌道上繞行太陽運轉（見第五章）。顯然，牛頓的說明比起笛卡兒更為簡潔，不僅能作量上的計算，也能導出（說明）伽利略的落體定律和克普勒的行星定律。但是，牛頓所謂「指向球心的吸引力」是一種「超距作用」(action at a distance)，不需兩物體互相接觸，就能使運動發生。究竟它是什麼？它背後的機制何在？牛頓進一步宣稱這種力量是任何物質（必定具有質量(mass)）都擁有的，因而稱之為「萬有引力」(universal attraction)。這些主張引起了浸沐在笛卡兒機械世界觀下的科學家之疑慮：無需接觸即能作用，使他們聯想到巫術中的「玄奧」性質或是亞里斯多德式的目的因——這是一個理性科學計畫（方案）所亟待掃除的舊世界觀殘餘，牛頓居然又把它們召回科學中。因此，儘管牛頓的萬有引力理論有強大的計算力和說明力，他們仍然無法忍受這樣一種能在距離間作用的玄奧原因²⁵。另一方面，牛頓又在他的《自然哲學的數學原理》

²⁵事實上，除了「萬有引力」這個類似玄奧性質的概念之外，太陽為何會懸浮

第二冊中全面公然地向笛卡兒的渦漩理論開砲，他深入發展笛卡兒渦漩理論所必須要依賴的流體運動原理，從而論證渦漩理論並不能說明克普勒定律，也不能說明整個太陽系的穩定性，甚至會導致整個系統崩潰（笛卡兒當然不承認這一點）。換言之，牛頓對笛卡兒的強烈批判與引入「超距作用」的概念，使他的理論和渦漩理論進入全面競爭的情勢中。

牛頓的挑戰來勢洶洶，深受笛卡兒影響的科學家當然不能漠視，就算他們自己對笛卡兒的科學和哲學頗為微辭、甚至不以為然，他們更不能忍受牛頓神秘的「萬有引力」——「他們」至少有惠更斯和萊布尼茲。

惠更斯在 1690 年一封寫給萊布尼茲的信中說：

關於牛頓先生所提供的流數(flux)原因，我一點也不滿意；他建立在吸引力原理上的其他理論，我同樣也不滿意。吸引力原理，如我已在《重性論》(Discourse on Gravity)的附錄中提及，對我而言似乎是荒謬的(absurd)。我常想知道，除了這條原理，卻沒有其它基礎的情況下，他如何能費力地作這麼多研究和困難的計算。(轉引自 Koyré 1965, pp. 117-118)

惠更斯其實沒有明白地在 1690 年出版的《論重的原因》(Discourse on the Cause of Gravity)中說「吸引力原理」是「荒謬的」，他只說(1) 他不接受它，因為無法由機械原理來說明；(2) 以吸引力來說明重性似乎是浮濫的；(3) 如果牛頓可以說明「向心力」(vis centripeta)，他就沒什麼好反對的。可是他並不承認「重」是物體的固有性質，而且牛頓自己也不承認（參看 Koyré 1965, p. 118）。那麼，惠更斯自己如何說明「重」呢？這方面，他是個不折不扣的笛卡兒主義者，因為他仍然借用地面附近的渦漩有離心傾向（離心力(vis centrifuga)），因而往上流動佔據物體在空中原有的位置，從而將物體下擠。當然，對行星繞行太陽的現象，惠更斯也是訴諸於渦漩。然而，他並不同意笛卡兒那種巨大的、朝同方向流動的「天寰渦漩」，他同意牛頓已經「摧毀」了笛卡兒式的天寰渦漩。可是，既然無法接受萬有引力的觀念，惠更斯仍然只有從改良渦漩理論著手。事實上，他早在 1669 年即試圖以在球體表面朝各種方向運動的小渦漩，組合成循環運動來代替笛卡兒式的巨大天寰渦漩，其後在《論重的原因》中，並企圖以這個構想來說明「重」的現象（參看 Koyré 1965, pp. 115-124）。惠更斯的做法如下。

笛卡兒的渦漩理論固然能成功說明許多天體現象，然而地球上空的物體為何會直線掉落？沒有被渦漩所帶動？也就是「重」的現象，就成了渦漩理論中有待克服的困難。惠更斯構思了一個可以實驗的模型（如圖 8-11，引自 Aiton 1972, p. 77）：

靜止在太空中？這也是牛頓的系統內沒有說明的地方。但是笛卡兒的渦漩理論卻作了卓越的說明。

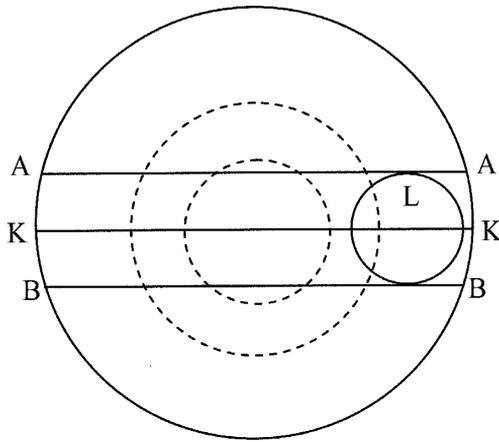


圖 8-11

一個小球 L 被置放在一個圓柱筒中，小球左右是兩根弦線 AA 和 BB，上方則是第三根弦線 KK，其通過圓柱筒的中軸，三條弦線完全平行。現在讓圓柱筒注滿水，並使其繞中軸旋轉到一定速率時，突然停止圓柱筒，此時，筒中之水仍持續旋轉，但可以看到小球 L 朝向中軸移動。換言之，這個實驗模型可以證明在流體速度很快的情況下，小球會向中軸移動（由正上方看來，小球向圓心移動）。然而，要把這實驗應用到地球上空的自由落體現象仍有困難，一來因為實驗中的小球受到弦線的約束；二來地球周遭的渦流是繞地軸旋轉，那麼物體的移動路徑應該垂直於地軸，而不是地面。為了解決這個困難，惠更斯假設地球表面上空一定範圍內、包含地球在內的球狀空間中，有許多朝向各個方向的小渦流，正如沸騰的水一般。由於物體受到渦流衝擊的時間很短，不足以使它們產生水平方向的移動，既然物體無法擁有足夠的離心力，它們的位置又很快地被渦流物質所取代，它們只好朝向地心移動——也就產生了「重」或自由落體的現象（參看 Aiton 1972, pp. 77-78）。這個說明有濃厚的「假說、猜測」性質，但它的確在不違背機械原理的教義下對「重」做了相當卓越的說明。對照之下，牛頓的「萬有引力」概念反而顯得「玄奧」了。

指控牛頓的「萬有引力」概念是「玄奧性質」，並將它與「奇蹟」(miracle)作類比的是萊布尼茲。事實上，他早在十八世紀初，於《人類理解力新論》(*New Essays on Human Understanding*)中已作出了類似的指控，然而由於種種波折，該書在萊布尼茲死後（於 1716 年死亡）才出版（1765 年）²⁶。從 1706 年起，萊布尼茲與哈特索克(Hartsoeker)通信

²⁶ 《人類理解力新論》乃是一本針對英國哲學家洛克(John Locke)在 1690 年出版的《人類理解力論議》(*An Essay on Human Understanding*)而寫作的知識論著作，被視為「理性主義」知識論的經典之一。其編排結構幾乎完全複製《人

討論物理問題，後者將兩人的通信匯集成書於 1712 年出版²⁷，萊布尼茲在這些書信中將「萬有引力」與玄奧性質或奇蹟劃上等號，這個指控就此公開，也引來牛頓門徒的強烈反擊（見下節）。萊布尼茲是這麼說的：

在物質固有重性這種觀點中，重性是個玄奧性質。擁有這種觀點的古代人或現代人，如果他們由「重性」這個詞所意指的是某種他們所不知的機械作用(mechanism)，藉此物體朝向地球中心，他們就是對的。可是，如果他們意指的是事物沒有任何機械作用，而由單純的原初性質、或由上帝的法則，就能行使「重」，則他們產生的效果就無法使用任何可理解的工具來說明，它是一個不合理的玄奧性質，玄奧到連天使、甚至上帝自己都不可能把它說明得一清二楚。（轉引自轉引自 Koyré 1965, pp. 141）

除了指控「萬有引力」的玄奧性之外，萊布尼茲也試圖說明「重」與天體運行的原因，他的觀點仍不脫笛卡兒和惠更斯的渦漩理論色彩，只是更加重視克普勒的行星定律，並站在其形上學基礎上，強調天體運動的「和諧」(harmonic)，以及上帝在「和諧」體系中的「預定」角色²⁸。

柒、牛頓學派的反擊與牛頓研究方案的發展

面對「玄奧性質」、「不可理解」這樣強烈的指控，牛頓學派當然不能視若無睹。然而，從《自然哲學的數學原理》發表至今，二十多年來，牛頓已建立了相當尊崇的地位，他不願親自出面來回應這樣的批判，因此，任務就落在他的學生柯特斯(Roger Cotes)的身上。柯特斯在 1713 年為《自然哲學的數學原理》第二版作序，他以針鋒相對的譏刺口吻說：

伽利略已經證明了一塊以拋物線移動的石頭，從直線路徑偏轉成曲線時，是由於石頭朝向地球的重力——也就是一種玄奧的性質——所造成的。現在，某個人比伽利略更天才，他可以用下列的方式來說明這個原因。他假設某種我們的視覺、觸覺或任何其它感官都無法辨識的微妙物質，充滿著地球周遭一直到地表的空間中，這種物質有

類理解力論議》，但主張和內容則大不相同。原本萊布尼茲想在 1703 年出版，但是因為恰逢洛克死亡，萊布尼茲不想攻擊死者，因此壓下沒有出版。

²⁷書名作 *Memoir of Literature*，包含三封書信，它們只是一系列通信中的一部分。見 Koyré 1965, p. 140。

²⁸參看 Koyré 1965, pp. 124-138。由於萊布尼茲在形上學方面深深不同意笛卡兒，所以儘管他對「重」和天體運行原因的說明，基本上都是建立在渦漩理論上，除了用詞不同之外（萊布尼茲用了層軌渦漩(orb vortices)）。然而，萊布尼茲卻極力想掩蓋他自己受笛卡兒的影響，也努力想除去自己理論上的笛卡兒主義色彩。

不同的方向、通常是相反的運動，卻整個形成拋物曲線。然後，看他多麼容易地就說明了石頭的偏向啊！他說，石頭浮在這微妙的流體中，循著它的運動，除了形成相同軌跡外沒有其它選擇。因為流體以拋物曲線運動，因此石頭當然必定以拋物線運動。這位哲學家可以從機械因中演繹出自然的表像，清楚到連最卑微的人都能理解，他的聰明豈不是太非比尋常了？難道說，伽利略花這麼多數學上的辛勞，只為了把哲學已經快樂地排除的玄奧性質重新引入？啊，如此詳述這些瑣事，我真感到羞恥。（《原理》，柯特斯序，p. xxix）

雖然沒有指名道姓，明眼人都知道「某個人」是指萊布尼茲²⁹。除了一再地重申物體間存在互相作用的「重力」(the force of gravity)已被證明之外，柯特斯還抓住「玄奧性質」大做文章，反擊笛卡兒學派的「機械假說」才是不折不扣的玄奧：

其他人由拒絕〔士林學派自然哲學〕的語詞夾纏而盡力獲得更大的好處。他們假定所有的物質都是同質的，物體上所見的種種形式乃是由成分粒子的簡明關係所引發的。如果除了自然給定的關係之外，他們再也沒有把其他關係歸屬給那些原初的關係；則他們從單純的事物走向更複雜的事物，這一點是對的。但是，當他們自由任性地想像那些成分的形狀、量度、不確定的情境與運動時，更進而假設「玄奧」的流體〔筆者按：指渦漩〕，自由地彌漫在物體的孔隙中、被賦予無所不為的微妙特性，並且被玄奧運動所激發時，他們闖入了夢鄉和幻像中，忽略了事物的真實構成—這確定不是由虛假的猜測中導出，我們幾乎無法由大多數確定的觀察中獲得它們。那些設定假說是他們思索第一原理的人，所形成的其實是一個精巧的羅曼史，雖然有可能因那些原理而進展到最大的準確性，但是它終究仍會是個羅曼史。（《原理》，柯特斯序，p. xx）

在多年來受困於笛卡兒主義者的嚴苛批判（拉卡托斯稱這「能造成恐怖損害」(Lakatos 1978, p. 203)）之後，柯特斯開啟了牛頓學派大反擊的序幕。牛頓學派包括牛頓本人，從《原理》出版和惠更斯的反應以來，就一直感受到「重力的機械因說明」之要求的強大壓力。一開始，牛頓仍不能免於笛卡兒的影響，努力嘗試為萬有引力尋求一個機械因的說明

²⁹這種譏刺，萊布尼茲自然也難以嚥下，尤其牛頓學派又為了微積分的發明優先性而不斷攻詰他。萊布尼茲在 1715 年藉著寫信給威爾斯公主，公開答覆了柯特斯的批評，並反批牛頓學派的上帝觀念，這一次，牛頓又推出他的代理人克拉克(Samuel Clarke)，亦回信回應萊布尼茲的批評，一來一往，火氣十足，一直到 1716 年萊布尼茲死亡才告終。參看夸黑的《從封閉世界到無限宇宙》第十一章。

30。在多年辛勞而一無所獲之後，牛頓終於瞭解到笛卡兒學派的競爭優勢在於他們的方法論和形上學基礎，要妥當地應付笛卡兒主義的攻擊，最好的策略是：發展不同的方法論和形上學。因此，牛頓開始公開提議一個「非笛卡兒主義」的方法論：標榜經驗和實驗哲學，並強調「從現象中歸納」的推論方法之優先性（具體地表達在「規則 4」上），由此隱然地貶抑笛卡兒式的沈思（然而，牛頓自己的《原理》卻一點也不是由歸納的方法所能發展出來的）。至於形上學部分，則有攻擊和防禦兩面，攻擊的一面與方法論結合，將形上學和「假說」畫等號，進一步全面否定「假說」在科學研究中的正當性。所以，首先由柯特斯出面暗示機械假說才是真正玄奧的、沒有理性根據的猜想。隨後牛頓著手修改他在《原理》第一版中的「假說」條目，分別改成「現象」和「規則」，並宣稱「我不妄作假說」（參看第五章腳註 27 與 28）。防禦的一面則是以「神學」來取代機械論形上學的角色。換言之，把「萬有引力」的原因隱然地歸諸於上帝。牛頓如是說：

現在，我們可以在彌漫且隱藏在一切物體背後之最細微的精神上多說幾句：由於此精神的力量和作用，物體微粒子彼此在近距離互相吸引，如果相鄰的話，就會凝聚在一起；帶電物體則運作在更大的距離上，既包括鄰近微粒子的吸引也包括排斥；光被發射、反射、折射、偏向、而且能加熱物體；所有感覺被激起，動物身體的器官在意志的指令—亦即精神的震動—下移動，沿著神經纖維互相傳播，從外部器官到大腦，從大腦到肌肉。但這些事物都不能用少數幾句話來說明，也不能用充分的實驗來完成，這樣的實驗亦需要定律的決定和證明，這個具彈性且如電般的精神〔筆者按：即上帝〕乃是由定律來操作〔世界，此為筆者添加〕的。（《原理》，p. 547）

也就是說，牛頓在其《自然哲學的數學原理》一書中，一開始並沒有提供一個完整的「研究方案」：缺少了明確的方法論與形上學基礎。日後在於笛卡兒學派的競爭當中，牛頓才逐步建立他的科學目標、方法論規則與神學³¹（用以代替形上學基礎）。最後，牛頓的也隱然地完成了一個他自己的知識體系之學科分類和學科秩序，即圖 8-12。

³⁰在 1693 年時，牛頓自己在信中還警告他的追隨者關於此問題的嚴重性，他在寫給賓利(Bentley)的信中說：「重力應該是物質天生的、固有的、本質性的性質，以致一個物體可以跨越真空距離而彼此作用，毋需其它事物的媒介，透過它們的作用，力量可以彼此傳送—這整個對我來說是個大荒謬。我相信，在哲學事務上有思考能力的人，沒有人會支持它。」（轉引自 Lakatos 1978, p.204）

³¹關於牛頓的神學，或者神性（上帝）在牛頓的思想與科學體系中扮演的角色，可參看 Koyré (1957)，《從封閉世界到無限宇宙》中第九章。另可參看 Dobbs (1991), *The Janus faces of genius* (Cambridge: Cambridge University)。

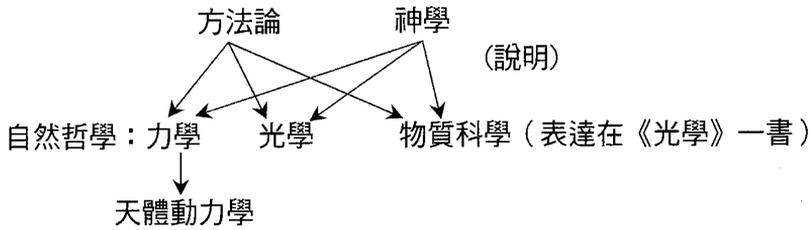


圖 8-12

捌、渦漩家族對抗牛頓家族

隨著方法論的建立與神學基礎的補強，牛頓學派終於有了一個完整的研究方案，足以抵禦各方面的攻擊。加上其理論版本強大的計算、預測、統合與說明力，牛頓主義開始跨出英國本土，向歐洲大陸擴張，原先笛卡兒勢力所盤據的法國在 1720-1730 年左右開始有公開的牛頓主義者。由於歐陸數學家沒有英國科學家的包袱（受限於牛頓的權威和方法），他們自由地應用笛卡兒的解析幾何與萊布尼茲的微積分記號，使得力學和代數同時突飛猛進。這些新研究議題的誕生，也使科學家不再把焦點放在機械因的尋求與物理說明之上，努力鑽研新議題與發現新數學解答。即使仍不放棄渦漩理論的科學家，也不再以機械因來攻擊牛頓的萬有引力，相反地，現在他們必須面對牛頓理論的卓越數學能力之挑戰，他們必須努力嘗試為渦漩理論提供量上的、數學性的解決。

其間，最有名的努力是伯努利家族。包括哥哥賈可布·伯努利、弟弟約翰·伯努利和其子丹尼爾·伯努利。賈可布·伯努利在力學史家崔斯戴(C. Truesdell)的筆下是現代力學的兩位創建者之一，他的重心在於彈性體、剛體等動力學與靜力學，然而，他的方法和進路與牛頓相當不同，他「發展連續作用以及動力學和靜力學的關係」(Truesdell 1968, p.101)，在這方面，他的「力學精神」無疑是笛卡兒主義的。

約翰·伯努利父子則實質地為笛卡兒的天體渦漩理論作出數學貢獻。在他們看來，一方面，把超距作用的「引力」理解為物質的固有性質仍然無法讓人接受；另一方面，引力理論也不能恰當地說明為什麼太陽系的行星之軌道，大抵都在同一平面上？笛卡兒的渦漩理論則可以輕易地解決這些問題。問題是，渦漩理論必須要改良，使它能用真正的數學和幾何來作量化的說明。第一個挑戰是克普勒的行星定律，約翰·伯努利著手處理它。在 1730 年一篇得獎論文中，他首先回答牛頓對渦漩理論與克普勒第三定律不一致的批判，他描述牛頓的推理是「明顯的詭辯，建立同樣假的兩個命題上」。約翰·伯努利認為流體層流(layer)之間的摩擦力與接觸面積無關，只和作用力有關。牛頓的第二個錯誤是在計算摩擦力在「動量」或「效能」時，忽略了其距中心的距離。當然，此論文最大的成就是推論渦漩理論與克普勒的行星定律，包括行星的橢圓軌道與周期定律，並沒有不一致。然而，他並沒有如指出牛頓錯誤般地作出數學證明(Aiton 1972, pp. 214-219)。

在 1732 年間，法國皇家學會提出一個問題：如何說明行星的軌道集中在太陽的赤道面附近？在這個議題上，牛頓自己只能訴諸於超自然的上帝力量，但是笛卡兒的渦漩理論中的渦漩會指引行星運行的軌道，所剩的問題只是：為何行星軌道集中在此平面附近？然而，所有投稿的論文都沒能得獎。1734 年法國皇家學會將獎額提高一倍，約翰和他兒子丹尼爾兩人，都參與競賽。這次競賽的論文也顯示出丹尼爾比約翰更偏離笛卡兒（見 Aiton 1972, pp. 219-221）。

約翰假設天體物質「以太」(aether)有兩種，其性質類似於笛卡兒的第一和第二元素，所不同的是，第一元素不是第二元素的剝離，反之，第二元素由第一元素構成的。第一元素構成恆星，而且偏佈宇宙空間，但其性質與牛頓的「虛空」幾無差異，使得天體在其間穿行而幾近毫無摩擦。第二元素也十分稀薄，它們構成渦漩，卻不會造成很大的摩擦力以致阻礙行星運動。現在，對約翰而言，渦漩是太陽自轉所造成的現象，它們引導行星位在同一平面上，其層流現象則把行星保持在固定的軌道上。但並非渦漩帶動行星繞行太陽，行星繞行太陽的力量來自行星形成之初的慣性速度（這一點與牛頓相同）（Aiton 1972, pp. 228-232）。

丹尼爾是「把動量原理正確地應用到連續媒介上的第一人」（Truesdell 1968, p. 111）。他的主要成就在於「流體動力學」，正好是牛頓《原理》中最薄弱的地方。在天文學方面，丹尼爾「雖然沒有明確地說他不相信渦漩，但是無疑同情牛頓的系統。」（Aiton 1972, p. 235），但是他仍如他父親一般，試圖調和渦漩理論和牛頓的重力理論，他的解答與其父相近，但他進一步說明行星自轉的現象。儘管同情牛頓理論，對丹尼爾而言：行星的軌道面為何如此集中在一小範圍的區域內？重力理論實在很難說明。他仍得訴求於更稀薄的氣體渦漩，他假設太陽赤道面周遭有一股「大氣」，延伸到比土星還遠之處，這股大氣使得行星被約束在相同平面的太空區域中。現在難題在於如何說明行星的自轉？他的解決在於計算這大氣的密度分佈（Aiton 1972; pp. 235-237）。

關於「行星軌道何以在同一平面上」這個現象的說明，可說是十八世紀的天文學家和數學家的主要問題，然而要到 1796 年才由拉普拉斯 (Pierre Laplace) 提出令人滿意的解決。他進一步回溯思辨太陽形成之初，提出星雲假說 (nebular hypothesis)，說明恆星與行星的構成，是由於太初的巨大星雲渦漩，其末端氣體凝聚、固化成行星。太陽和行星間的重力，與行星形成之初的慣性速度，使得太陽系保持穩定。雖然拉普拉斯說明行星運轉的主要原因是牛頓的重力理論，但是畢竟仍有渦漩理論的遙遠身影——只是渦漩存在於在恆星誕生之初。當然，不必等到 1796 年，早在 1740 年代之後，渦漩理論的支持者日漸稀微，在法國這個笛卡兒主義的大本營，又出了伏爾泰這個傑出的作家，宣傳推廣牛頓的世界體系，加以牛頓理論版本的強大計算力，自認為牛頓主義者越來越多，運用代數微積分的新一代法國數學家與古典力學家閃耀在歐洲科學舞台中心，達蘭伯特是其中一顆耀眼的明星，他乃是牛頓家族和笛卡兒家族「混血」的最佳代表。

達蘭伯特一般被列為法國的「牛頓學派」數學家兼力學家，他又是啟蒙時代與狄德羅(Diderot)合作的著名百科全書派核心人士之一，他比丹尼爾·伯努利更偏向於牛頓，他明確地敘述牛頓量化的重力理論優於笛卡兒質性的渦漩理論（見 Hanks, Thomas 1985, p. 37）。但是，他所發展的力學和運動學，主要建立在牛頓的第二運動定律的基礎（以「動量」為核心），他在「加速度」概念的建立上作出貢獻（他稱作「加速力」(accelerating force)），也提議了達蘭伯特原理。然而，他的形上學與方法論上保有許多笛卡兒的精神，譬如他最明確地表達出「理性力學」、「先驗力學」的精神，也拒絕「力」的實在性，他認為「內在於運動中的力」只是一種晦澀的形上學存在物，它只會為科學帶來黑暗（見 Truesdell 1968, p. 113）。就這一點而言，達蘭伯特可說是赫茲的先驅。後來，即使拉格朗日、拉普拉斯、漢彌爾頓、赫茲等人，都繼承這種「笛卡兒精神」。

回顧這一段渦漩理論與牛頓力學的競爭史，我們可以發現，由於牛頓理論版本的「通則系統」與「模型」的強大計算力、說明力與啟發力，使得科學家不得不利用牛頓力學來維繫自己的科學事業。反過來說，笛卡兒的研究方案，其方法論和機械觀的形上學，在指導人們理性思考方面，具有相當強大的支配力，儘管其理論版本內容遭到全面拋棄的命運，其方法論與形上學的精神，仍牢牢盤據在科學家的心靈中。我們可以說，十八世紀下半葉到十九世紀的古典力學，擁有一副牛頓理論版本的身軀，卻有笛卡兒的精神與萊布尼茲的衣著。

結 論

孔恩在 1968 年的一個演說中論述：

絕大部分的歷史作品所關切的是歷程和穿越時間的發展。原則上，發展和變遷不需在哲學中扮演一個類似的角色；但實際（踐）上，我現在想迫切地說，如果發展和變遷被研究了，哲學家對靜態科學（static science）的觀點，像是理論結構和理論驗證的問題，也將會有豐饒的變化。（1968, p. 18）

孔恩說得不錯。科學發展和變遷的探討的確衝擊了靜態的理論結構和理論檢驗之研究，本書正是這個衝擊下的產物。我們不僅強調理論結構的研究要顧慮到歷史發展現象的說明，更展現了直接應用歷史資料來進行理論結構之分析的可能性。這些原則或目標在一開始就被我們設定為「恰當說明的要求」，而提出一個滿足這些要求的說明，也是本書的目的。然而，孔恩只說了一半。另一半是動態的科學發展與變遷的議題，也要建立在一個細緻的理論結構之基礎上。如果把發展與變遷理解成科學史的傳統主題；而科學哲學的傳統主題被理解為靜態結構的研究，那麼拉卡托斯的格言也可以被挪用在這兒：科學史（動態發展）沒有科學哲學（靜態結構）是缺乏根基的；科學哲學（靜態結構）沒有科學史（動態發展）是脫離現實的。

這則仿拉氏的格言，已被我們重鑄成三項後設要求：(R1) 對科學理論的研究、分析或重建，必須參考理論性的科學文獻之基本特徵—認知、表達和編排的結構。(R2) 必須展示科學理論如何由局部而組織成整體、以及如何體現於科學文獻的表達上。並刻劃其整全性和系統性。(R3) 要能說明科學理論發展的種種歷史現象：理論的繼承、更新、生成與競爭的過程。我相信本書的內容已達到這三項目標，並滿足它們的要求。不過，或許仍留下一個疑點。

傳統上，「理論變遷」的議題總是和「科學革命」(scientific revolution) 相提並論。「科學革命」固然也有很多涵意，至少一個普遍的認知是：科學革命是指「一個在某一時期統領大部分研究的科學理論，遭到全面拋棄的命運（如亞里斯多德的理論），科學版圖被一個全新的科學理論所佔領（如牛頓的理論）」。由此才產生一個大規模的「理論變遷」。至於在非革命的情況下，科學理論固然有細節性的調整和修正，但都不足以被稱作「變遷」。顯然，本書的確沒有涉及「科學革命」的議題。但是，在「理論版本」與「理論版本家族」的重新理解之下，我們要說，本書已經改變了「理論變遷」的傳統意義。現在「理論變遷」有兩個基本涵意：一是理論版本家族內部的理論版本之變遷；另一是從一理論家族變遷到另一理論家族。

當一個原型理論版本生成其子代版本時，「變遷」就發生了。或許其變動的幅度不大，但是，在一個理論版本家族發展的過程中，從始祖

版本到後裔版本所累積的變遷，可能非常巨大（猶如十七世紀的牛頓力學版本發展到十九世紀的漢彌爾頓力學版本）！重點在於，串連這一系列變遷的「路徑」是什麼？這種「運動學式」的發問，才是本書的核心課題。現在，運動的對象不是一個有形具體的物體，在空間中改變其位置；而是一個有組織的複合抽象事物，在歷史之流中，改變它的組織成分、方式與結構。因此，在考察所謂的「運動路徑」時，揭示這個複合抽象事物（科學理論版本）的內在結構，是優先必要的工作。描繪理論家族內的理論版本之運動路徑，不僅是回答了「理論的發展」也同時回答了「理論的變遷」：發展需要變遷，變遷也意味著發展。

至於從理論家族變遷到另一理論家族，在歷史記錄，它們通常會先進入競爭情勢中。因此我們必須先考察兩個家族的競爭。科學理論家族的競爭是一種開拓科學版圖與繁衍子代後裔的競爭；因此，所謂從一理論家族變遷到另一理論家族，其實意指的是，一個家族所統領的科學版圖逐漸萎縮，它越來越無法吸引新生代的科學家投入，發展新的理論版本來延續其生命；原來它所統領的科學版圖被另一理論家族所取代，該家族不斷繁衍子代版本，擴張家族勢力，在科學界（科學版圖、科學文獻的出版與能見度）取代了原先的理論家族。這種取代何以會發生？牽涉到該家族的原型版本的啟發力與競爭力。進一步，一個理論版本的啟發力與競爭力，可以從它生成後裔版本的路徑而看出來。總而言之，本書所發展的理論，可以說很恰當地、統一地回答了本書所設定的兩大主題：「理論的本性和結構」與「理論的發展和變遷」。

本書沒有論及「科學革命」，並不是我們否認科學革命的存在，相反地，我們想指出科學革命所牽涉的相關項目，遠遠超出「理論變遷」所涵蓋的議題，還要包括科學版圖(*scientific territory*)中的學科分類或知識分類的變遷，實驗與工具的變革、甚至時代的文化氣候和社會背景等等。換言之，我們不能把「科學革命」理解成僅僅是理論、典範、世界觀或概念架構的變遷，正因為這類變遷太頻繁了，在科學史上根本無時無刻在發生當中——我們指的是從理論版本到理論版本的變遷。即使一個廣義的理論變遷也無法刻劃一個科學革命。對於這些相關問題，以及結論提及卻未在本書發展的「科學版圖」的概念，我們希望日後有機會讓它們「落實」。

附錄 科學理論的兩種公理化進路

二十世紀上半頁，關於科學理論的結構之探詢達致最高潮。十九世紀末到二十世紀初的邏輯學家如弗列格(Frege)、希爾伯特(Hilbert)、羅素(Russell)、維根斯坦(Wittgenstein)、哥德爾(Gödel)、塔斯基(Tarski)等人，已為哲學提供了強而有力的邏輯工具。受到啟迪的哲學家與科學家，乃藉由這些邏輯工具，致力於找尋科學理論的邏輯結構。由於分享共同的觀點與方法，他們形成了一個學派，即著名的「邏輯實證論」，後來更發展成所謂的「邏輯經驗論」。這個學派主張，一個科學理論就是一組語言述句，科學理論的結構正是這些述句之間的邏輯結構，尤其是觀察語言(observational language)與理論語言(theoretical language)間的邏輯關係。這個觀點在六十年代之前，主宰了整個科學哲學的發展，因而被稱之為「公認觀點」¹。

六十年代起，孔恩、費耶阿本、拉卡托斯等人共同改變了科學哲學探討的方向、領域、方法及進路。這些改變可以用孔恩的典範(paradigm)概念來理解²：科學哲學研究的典範從靜態的科學結構（亦即，科學理論邏輯結構的分析）轉移到動態的科學發展過程（亦即，科學活動在歷史裡的演變及發展）。儘管這些歷史化的哲學家見解各異，由於他們的研究皆以科學史為題材而進行，因此被稱為科學哲學的歷史學派。歷史學派確實在科哲領域產生了強大的衝擊，並且在許多層面上駁斥了邏輯經驗論者的許多論點（尤其是關於科學知識的發展這一議題上）。但嚴格說來，歷史學派與邏輯經驗論因為源自於不同的「典範」，兩者的學說其實是「不可共量的」。

儘管最近幾十年來歷史學派主導了科學哲學的研究，關於科學理論結構的研究並未停止。具有邏輯傾向且對歷史進路不滿意的哲學家們，不斷嘗試尋找一個新的進路與論點來取代歷史學派的研究及邏輯經驗論者的「公認觀點」。他們認為，歷史學派與公認觀點，兩者皆不能提供關於科學理論的結構及科學理論的本質的恰當說明，他們在集合論中找到了出路，此即科學理論的模型觀點（或稱「語意觀點」）。

本文的目的，即在於介紹並比較兩種關於科學理論的公理化進路。首先，讓我們從述句觀點（即，公認觀點）開始。

¹ 根據薩普(Suppe 1977, p. 3, fn. 1)的說法，「公認觀點」這個標籤，是帕特南(Putnam)的論文〈理論不是什麼〉(1962)所貼上的。薩普對此做了一番精彩的討論與批評。

² 無疑我們可更精確地使用「科哲理論版本家族」的概念來理解。

壹、科學理論的述句觀點

科學理論被述句觀點理解為由述句所構成的形式化公理系統以及對它們的局部解釋³。更精確地說，一個理論裏的理論定律必須透過包含等號的一階邏輯語詞而表達成公理或設準(postulates)，理論定律所包含的理論概念必須透過觀察語言來解釋，使其具有經驗意義。這個解釋所使用的語意規則就被稱作「對應規則」⁴。一個科學理論便是由理論公理與對應規則所組成⁵，它也可以被表達成所有公理化語句與所有對應規則語句的連言句(conjunction)。此連言句，有時又被稱為理論句式(theory formula)。

上文對於科學理論的簡要描述，已經意味著某種組織方式——即科學理論的內在結構——的理解⁶，並且產生了一連串衍生問題，諸如：「什

³ 對於科學理論，有許多不同的概述。簡單地說，就有「局部解釋的演算」(partially interpreted calculi)(Putnam 1962, p. 240)、「任何物理理論...只要由一個解釋系統的形式所呈現出來即是，其包含特定運算（公理系統）與一個解釋這些公理的語意規則系統」(Carnap 1939, 引自 Brody 1989(eds.), p. 7)、「一個被理解成使用特定語言架構（此一語言具有清晰之邏輯結構，以及決定演繹推論的規則）所形構的理論」(Hempel 1965, p. 183)等等。

⁴ 卡納普(Carnap 1966, p. 233, fn. 1)及薩普(Suppe 1974, p. 17, fn. 33)都提到過「對應規則」。「對應規則」也被不同的學者稱之為「操作規則」(operational rules)、「字典」(dictionary)、「橋律」(bridge laws)、「解釋系統」(interpretative system) 等等。

⁵ 薩普(Suppe 1977, p. 50-52)提供了一個更為形式化的描述，總結如下：(一) 存在一個一階語言 L，科學理論用此語言來形成句式，並定義邏輯運算 K。(二) L 所包含的語詞可二分為兩種集合：VO 為包含觀察語詞的集合；VT 則為包含非觀察語詞或理論語詞的集合。(三) 對於理論語詞及包含理論語詞之語句的局部詮釋，是由兩種假說所提供：只包含非觀察語詞 VT 之理論假說 T(即，該理論之公理)，以及包含觀察語詞及非觀察語詞之假說 C(即，對應規則)。(四) T 是由所有理論假說連結而成的連言句，而 C 是由所有對應規則連結而成的連言句。從而立基於 L, T, C 的科學理論，是經由 T 與 C 的連言而成，可表示為「TC」。這個最初且未加簡化的描述，是關於公認觀點的最終且最完整的版本。這個句式系統也出現在卡納普(Carnap 1966, p. 270)。

⁶ 韓培爾(Hempel 1952)提供了關於科學結構的生動描繪：「一個科學理論因此或許可以排列成一個複雜的空間網絡：此理論的各種語詞可以用網絡中一個個的節結(knots)來表示，而連結各個節結的網路則對應於此理論中的各種定義、基本假說或推導而得之理論。這整個網絡漂浮在觀察的平原之上，並經由解釋規則而下錨固定。這些解釋規則可以被看作不屬於整個網絡，卻以某種方式將整個網絡的某些部份與觀察平原上的某些地方鏈結起來。透過這種解釋性的鏈結，整個網絡便以一個科學理論的方式運作：從某些觀察資料，我們可透過一個解釋鏈結，攀升到理論網絡的某一點上，再透過定義及其他假說，通往網絡中的其他可容許經由解釋鏈結下降到觀察平原上的其他點

麼是理論定律？」、「什麼是觀察語言？」、「理論定律如何經由對應規則與觀察現象關連起來？」。要回答這些問題，就必須先解釋此一科學理論的內在結構，筆者將分三個步驟，逐步說明：(1) 觀察與理論的區分；(2) 對應規則暨局部解釋；(3) 示範：從述句觀點重建牛頓力學。

一、觀察與理論的區分

邏輯經驗論者相信，科學知識必須立基於可觀察的現象之上。所有解釋現象的語言（包括字彙、語詞、語句等等），都必須包含經驗意義。但實際從事科學研究的科學家們，常常使用一些如「電」、「磁」、「重力場」、「分子」等語詞，來解釋他們所研究的自然界。然而，這些語詞所指涉的事物，並無法以直接且簡單的方法來觀察；甚至，這些事物可能並不一定真實存在。相對的，有一群性質及對象，譬如紅色、溫度及老虎等，是可以透過感官或簡單的儀器直接觀測。因此，科學家所使用的語詞，顯然必須區分為兩類，一類是可觀察詞(observable term)，另一類則不可觀察詞(unobservable term)、即所謂的理论語詞。

同樣地，科學述句或科學語句也必須區分為兩類⁷：(a) 只包含觀察詞之觀察語句（若以邏輯語言來陳述該觀察語句，還必需包含邏輯常詞(logical constants)）；(b) 包含理論語詞之理論語句（此理論語句可能含有觀察語詞及邏輯常詞）。

必須注意的是，觀察與理論的區分之間，並沒有清楚明白的界線。從最簡單的感官知覺，到透過儀器及間接方法進行之極端複雜的觀測，觀察活動本身形成一個連續性光譜。卡納普曾描述如下：

一個物理學家當然會說，當他透過一個普通的顯微鏡進行觀察，他所做的是一個直接觀察。問題是，當他使用電子顯微鏡時，他所做的仍然是直接觀察嗎？當他看到雲霧室內的軌跡時，他真的看到了粒子運行的路徑了嗎？一般說來，物理學家比哲學家在更廣泛的意義下認定什麼是可觀測的對象。但是，在上述兩個例子裡，可觀察與不可觀察者之間的區別其實是相當任意的。(1966, p. 226)

這個區分的任意性，引起了一些麻煩而嚴重的問題⁸。關於理論詞及理論存目(theoretic entities)〔或譯：理論存有物〕的懷疑論，是其中之一：科

上。」(International Encyclopedia of Unified Science, Vol. Two(1970), p. 688) 此段描述也被卡納普引用到他的書上(Carnap 1966, p. 266)。費格爾(Feigl, H)在1970年的論文中，曾提供一個邏輯經驗論者的科學理論圖像（重印於吉爾(Giere 1988, p. 25)韓培爾的描繪及費格爾的圖像給了我們一個非常清楚的科學理論的形像，此一形像同時蘊涵某種意義整體論(semantic holism)的精神。

⁷ 科學定律亦可分為經驗定律與理論定律，說法稍有不同，但其意義相同。參見卡納普(Carnap 1966, ch. 23)簡單流暢的說明。

⁸ 例如，有人也許會懷疑，如果可觀察與不可觀察者間的區別是任意的，那麼

學家有必要使用理論詞嗎？理論存目真的存在嗎？有沒有什麼方法可以消除一個理論中的某些理論詞，從而決定這些理論詞所指涉的理論事物其實並不存在？

1931年，瑞姆濟(Ramsey)提供了一個消除理論中所有理論詞的辦法。他的想法很簡單：讓每一個理論詞都由一個與之對應但被存在量號量限的變項所取代，並且將這些變項加入到理論句式。譬如，讓S代表整個理論句式（一個由所有公理與解釋語句所構成的連言句），而 T_1, T_2, \dots, T_n 代表每一個包含在S裡的理論語詞， $0_1, 0_2, \dots, 0_m$ 代表每一個包含在S裡的觀察語詞。那麼「S中的 $T_1, T_2, \dots, T_n; 0_1, 0_2, \dots, 0_m$ 」就可以表示為：

$$(TS) S[T_1, T_2, \dots, T_n; 0_1, 0_2, \dots, 0_m]$$

如此，瑞姆濟的消除法可以下列方式表示：

$$(RS) (\exists \tau_1)(\exists \tau_2)\dots(\exists \tau_n)S[(\tau_1/T_1), (\tau_2/T_2), \dots, (\tau_n/T_n); 0_1, 0_2, \dots, 0_m]$$

其中 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ 為變項； $\tau_1/T_1, \tau_2/T_2, \dots, \tau_n/T_n$ 表示 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ 取代 T_1, T_2, \dots, T_n 。(RS)被稱為瑞姆濟語句，學者已證明其與原來的理論句式(TS)等值⁹。換言之，瑞姆濟語句可以消除理論語詞，而不會失去一個理論中的經驗資訊。

瑞姆濟語句可以做為「奧坎剃刀」(Ockham razor)以刮去「柏拉圖的鬍子」(Plato's beard)——那些理論存目——嗎？一些哲學家（如韓培爾(1958)與林正弘(1985)）認為不能。相反地，他們認為不管這些理論存有物是什麼，(RS)使用的存在量號已經確保它們的存在。儘管如此，瑞姆濟語句已被公認為理論的一種徹底經驗表達方式。

理論語詞就沒有存在的必要了。這種懷疑，足以強化所謂的「理論家的兩難」(theoretician's dilemma, 參見 Hempel 1958, p.186)。其次，這種任意性也引起了對於這個區分的攻擊（此為帕特南(Putnam 1962)的批評）。理論語詞的存在真的沒有必要嗎？這個論題涉及許多論辯，包括實在論與工具論觀點之爭，以及如何消除理論語詞等問題。

⁹ 參見林正弘(1985)，〈瑞姆濟的理論性概念消除法〉，收錄於《知識、邏輯與科學哲學》。

二、對應規則與局部解釋

一方面，如韓培爾所說：「科學系統化之最終目標，在於從雜亂無章且可被直接觀察的現象及經驗資料裡建立一個說明及預測的秩序」(1958, p. 177)，因此我們需要各種理論及理論詞。但問題是，理論要如何與可觀察資料連結起來，才能解釋經驗現象？另一方面，經驗論者的基本主張是，所有有意義的語詞必須是能夠以經驗來檢驗的 (Carnap 1936/1937; Hempel 1950)。如果理論詞是有意義的，它們必須有可觀察的證據來支持。我們如何能在不違反此一經驗論的基本主張下，使用理論詞？對應規則正是連接理論與可觀察者之間的橋梁：理論詞可透過對應規則，以觀察詞來定義或解釋。讓我們引用卡納普的例子來說明這點：

「氣體的溫度(由一可觀察的溫度計測量所得)與該氣體分子之平均動能成正比」。這一原理，將分子理論中的不可觀察者—分子動能—與可觀察之現象—氣體的溫度—連接起來。(Carnap 1966, p.233)

然而，對應規則的邏輯地位與句式是什麼，使得我們能用一階邏輯語言來描述，並配合理論的公理化句式呢？這問題可以再分析成下列：理論詞要如何解釋？對應規則賦予理論詞的是完整的意義抑或只是局部意義？什麼又是對應規則的邏輯句式？

在述句觀點發展的早期，操作論者(operationalist)布里基曼(Bridgman 1951, pp. 3-32)倡議，所有科學概念都必須是操作的概念或可由其他操作概念所定義的概念來加以定義。以語言使用的角度來說，操作論者主張，理論詞理所當然必須包含操作型定義，而此一定義賦予了理論語詞所具有的全部意義。例如，一個傾向詞(dispositional property term)「易碎的」(一種理論詞)的操作型定義，可以表達如下：

(B.1) 一個物體 x 是易碎的，若且唯若 x 滿足以下條件：在任何一個時刻 t ，如果 x 在 t 時被敲擊，則 x 將在 t 時破碎。(取自 Suppe 1974, p. 18)

以一階邏輯語言來表達，讓 F 代表「易碎的」， S 代表可觀察語詞「在某一時間被敲中」， B 代表可觀察語詞「在某一時間破碎」。上述定義可以一階述詞重新表述如下：

$$(x)[Fx \equiv (t)(Sxt \supset Bxt)]$$

這是一個雙條件句，其前件(antecedent) (含有理論詞) 與其後件(consequent) (含有觀察詞) 等值。這意謂著，此一操作型定義完全規定了理論語詞「易碎性」的意義。因此，當一個語詞可以經由許多不同的

操作來定義時，此一語詞相應地有許多不同的概念及意義。並且，嚴格說來，對應此一語詞各種意義，我們應當給予其不同的名稱或語詞。

然而，操作論在為如「易碎性」等傾向語詞下操作型定義時，卻產生了一些邏輯上的困難。假設有一物體 b 一直（相當於在任何時刻）都沒有破碎，那麼它可能有兩種情況 (1) 被敲了也不會破碎；(2) 沒有被敲過。如果是(1)則表示此物體 b 沒有易碎性（或具不易碎性）；但如果是 (2) 的情況，則依照操作型定義，物體 b 會有「易破碎性」，因為 $(t)(\neg Bbt \supset \neg Sbt)$ 為真，而且等值於 $(t)(Sbt \supset Bbt)$ ，即 $(t)(\neg Bbt \supset \neg Sbt) \equiv (t)(Sbt \supset Bbt) \equiv Fb$ 。然而，這是一個荒謬的結果，因為物體 b 可能很堅硬，一點都不易碎。而且不管物體 b 堅硬與否，它從來沒有被檢驗過，結果自然不會碎，卻能滿足操作定義，從而被賦予「易碎性」的傾向性質。換言之，只要一物體沒有破碎過，依據操作定義，它就有「易碎性」——這當然是荒謬的。

卡納普(1936/37)提出另外一種解答：他建議將對應規則視為對於理論詞的局部解釋，以代替操作型定義。如此，對應規則的目的在於將理論語句化約到觀察語句，因而對應規則的邏輯句式被稱為「化約句」(reduction sentence)。如此，上述關於易碎性的例子，可以邏輯符號表達為：

$$(x)(t)[Sxt \supset (Bxt \equiv Fx)]$$

此一表達式的語意為：

(B.2) 如果一個物體 x 在 t 時被敲擊，那麼 x 會在 t 時破碎，若且唯若 x 是易碎的。

由此可知，化約語句並不定義理論詞，而只是規定理論詞的測試條件（如，在 t 時受到敲擊）。只有當一個真實存在的物體具有某種性質（易碎性），又可以在某種條件下進行檢測時，它才會產生某些特定的結果（在 t 時破碎）。

我們可以為同一個理論詞規定不同的測試條件。譬如，「一個易碎的物體受到嚴重的扭曲時會破裂」，若以 T 代表「嚴重扭曲」，則我們可以得到另一個化約句：

$$(x)(t)[Txt \supset (Bxt \equiv Fx)]$$

當然，我們還可以為易碎性找到更多的測試條件以及因之而來的化約句。每一個化約句都是一個對應規則，它僅僅賦予局部意義給某個理論詞。原則上，一個理論語詞的測試條件可以有無限多，因此，所有已被

紀錄下來的關於該語詞的對應規則及化約句，只是對於該語詞的局部解釋¹⁰。

三、從述句觀點重構牛頓力學

我們已經討論了觀察和理論的區分、對應規則作為理論語詞的局部解釋、以及兩者如何構成科學理論的「骨架」。我們也已經了解一個科學理論如何透過一階述詞邏輯來陳述。為了做一比較，讓我們利用這些知識，而從述句的觀點來重構牛頓力學理論(Newtonian mechanic theory)¹¹。

一般而言，牛頓力學包括三個運動定律及一個萬有引力定律。從述句觀點來看，這些定律可以用一階邏輯語言而形構一個公理系統如下：

1. 語言：包含等號之一階述詞邏輯、向量函數與導數微積分

2. 理論設準（公理）：

$$(A1) (x) \{ \sim Fx \supset [(Rx \supset Rx) \vee (Vx \supset Vx)] \}$$

$$(A2) (x)[(Mx \supset (Fx \supset Ax)) \cdot f(x) = m(x)a(x)]$$

$$(A3) (y)(x)[(Fxy \supset Fyx) \cdot (f(x, y) = -f(y, x))]$$

$$(A4) (x)(y)[(Mx \cdot My \supset (Dxy \supset Uxy)) \cdot u(x, y) = Gm(x)m(y)/d(x, y)^2]$$

3. 解釋：

(i) 符號（述詞和函項）：

(i1) $Fx = x$ 受到力量 $f(x)$ 的作用； $f(x)$ 是一個向量函數。

(i2) Mx , or $My = x$, or y 擁有質量 $m(x)$, or $m(y)$ ； $m(x)$, $m(y)$ 是數值函數。

(i3) $Rx = x$ 是靜止的。

(i4) $Vx = x$ 以等速直線 $v(x) = ds(x)/dt$ 而運動； $s(x)$ 表示 x 的位移向量函數； t 表示所花時間。

(i5) $Ax = x$ 產生加速度 $a(x) = d^2s(x)/dt^2$ 。

(i6) $Fxy = x$ 施加一力量 $f(x, y)$ 在 y 之上； $f(x, y)$ 是一向量函數。

(i7) $Fyx = y$ 施加一力量 $f(y, x)$ 在 x 之上； $f(y, x)$ 是一向量函數。

(i8) Dxy , or $Dyx = x$ 與 y 有一距離 $d(x, y)$ ； $d(x, y)$ 是一數值函數。

(i9) Uxy , or $Uyx = x$ 和 y 之間有萬有引力 $u(x, y)$ ； $u(x, y)$ 是一數值函數。

(i10) G 是一個實常數，表示萬有引力常數。 $G = 6.670 \cdot 10^{-11} (N \cdot m \cdot kg^{-2})$ ，其中 N (牛頓)， m (公尺)及 kg (公斤)分別是力、距離及質量的單位。

¹⁰卡納普(Carnap 1966)最後接受了某種意義整體論的觀點，並容許理論只能局部地解釋理論語詞。他的提案透過分析一綜合的區分及瑞姆濟語句而構成且實現。

¹¹萊興巴哈(Reichenbach 1969)曾從述句的觀點將相對論公理化。

(i11) 「質量」、「力」、「萬有引力」是理論詞，需要對應規則的解釋。

(s) 公理的語言解釋：

(A1) 如果一物體 x 沒有受到力的作用，則如果 x 是靜止則 x 靜止；或者如果 x 以等速直線 $v(x)$ 運動，則 x 以等速直線 $v(x)$ 運動。

(A2) 一物體 x 擁有質量 $m(x)$ ，如果 x 受到力 $f(x)$ 的作用，則 x 產生加速度 $a(x)$ ；而且 $f(x)=m(x)a(x)$ 。

(A3) 如果一物體 x 施加一作用力 $f(x, y)$ 在 y 之上，則 y 亦施加一反作用力 $f(y, x)$ 在 x 之上，而且 $f(x, y)=-f(y, x)$ (大小相等，方向相反)

(A4) 一擁有質量 $m(x)$ 的物體 x 和一擁有質量 $m(y)$ 的物體 y ，如果 x 和 y 相距 $d(x, y)$ 的距離，則 x 和 y 之間有萬有引力 $u(x, y) (=u(y, x))$ ，而且 $u(x, y)=Gm(x)m(y)/d(x, y)^2$ 。

(c) 對應規則：

(c1) 力之度量 (對「力」之解釋)

(C1) $(x)\{Sx \supset (Fx \supset Dx) \cdot [f(x)=f_0 \cdot d(x)=d_0 \supset (f(x)=nf_0 \supset d(x)=nd_0)]\}$

(c1.1) $Sx = x$ 是標準彈簧； $Fx = x$ 受力 $f(x)$ 的作用； $Dx = x$ 產生 $d(x)$ 的形變。 $f(x)=f_0$ 表示 $f(x)$ 的數值量是 f_0 。

(c1.2) x 是標準彈簧，如果 x 受到一力 $f(x)$ 的作用，則 x 產生一 $d(x)$ 的形變；而且，如果 $f(x)=f_0$ 且 $d(x)=d_0$ ，則 $f(x)$ 等於 n 倍的 f_0 時，則彈簧形變函數 $d(x)$ 亦等於 n 倍的 d_0 。

(c2) 質量之度量：(對「質量」之解釋，據牛頓第二運動定律)

(C2) $(x)\{[Fx \supset (Ax \supset Mx)] \cdot m(x)=f(x)/a(x)\}$

(c2.1) (C2) 的解釋為， x 受力 $f(x)$ 的作用，如果 x 產生加速度 $a(x)$ 則 x 具有質量 $m(x)$ ；而且 $m(x)=f(x)/a(x)$ 。(已知， $f(x)$ 可由(C1) 的對應規則和測量方法測量出來。 $a(x)=d^2s(x)/dt^2$ 計算出來，其中 $s(x)$ 和 t 均可直接測量。)

(c3) 萬有引力之測量：(依據萬有引力定律)

(C3) $(x)(y)\{[Mx \cdot My \cdot (Dxy \supset Uxy)] \cdot u(x, y)=Gm(x)m(y)/d(x, y)^2\}$

(c3.1) 解釋：和萬有引力公理相同。因為 $m(x)$ ， $m(y)$ 可由 (C2) 測量出來， $d(x, y)$ 可用其它方式測量出來。萬有引力常數 G 則由轉矩天平(torsion balance)實驗測量出來。

(c4) 萬有引力之測量：(依據牛頓第二運動定律)

(C4) $(x)[Mx \supset (\sim Fx \cdot Ax \supset (\exists y)My \cdot Uxy)] \cdot u(x, y)=m(x)a(x)$

(c4.1) 解釋，如果一質量 $m(x)$ 的物體 x 沒有受到外力 $f(x)$ 的作用，卻產生加速度 $a(x)$ ，則存在一個物體 y ，有質量 $m(y)$ 而且產生一萬有引力 $u(x, y)$ ；而且 $u(x, y)=m(x)a(x)$ 。

(c4.2) 如果 $a(x)=Gm(y)/d(x, y)^2$ ，則(C4)與(C3)等值。

如此，整個牛頓力學理論，可以一個連言句的表示如下：

$$\text{牛頓力學理論} = [(A1) \wedge (A2) \wedge (A3) \wedge (A4) \wedge (C1) \wedge (C2) \wedge ((C3) \vee (C4))]$$

我們也可以將上述的一階述詞邏輯語言，改用向量函數語言，則得到如下的公理系統、解釋和對應規則。即：

1. 語言：包含不等號的向量函數語言和導數微積分

2. 理論設準（公理）：

$$(A'1) (x) \{f(x) \neq 0 \supset [(ds(x)/dt) = 0 \vee (ds(x)/dt) = c]\}$$

$$(A'2) (x) (f(x) \neq 0 \supset f(x) = m(x)(d^2s(x)/dt^2))$$

$$(A'3) (y)(x) [f(x, y) \neq 0 \supset f(x, y) = -f(y, x)]$$

$$(A'4) (x)(y) [u(x, y) = G((m(x)m(y))/r^2(x, y))]$$

3. 解釋：

(I') 符號（函項）：

(I'1) $f(x)$ 是一個一元向量函數，表示施於物體 x 上的合力。

(I'2) $s(x)$ 是一個一元向量函數，表示物體 x 於一個時間間隔內的位移量。 $s(x)$ 是 t 的二階可微函數。 $(ds(x)/dt)$ 是一個一階導數，表示速度；而 $(d^2s(x)/dt^2)$ 是一個二階導數，表示加速度。

(I'3) $m(x)$ 是一個一元數值函數，表示物體 x 的質量。

(I'4) $f(x, y)$ 是一個二元向量函數，表示物體 y 施力於物體 x 。

(I'5) $u(x, y)$ 是一個二元數值函數，表示物體 x 與物體 y 之間的萬有引力。

(I'6) $r(x, y)$ 是一個二元數值函數，表示物體 x 與物體 y 之間的距離。

(I'7) t 是一個實變數，表示時間間隔。

(I'8) c 是一個向量變數，表示定常速度。

(I'9) G 是一個實常數，表示萬有引力常數。 $G = 6.670 \cdot 10^{-11} (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-2})$ ，其中 N (牛頓)， m (公尺) 及 kg (公斤) 分別是力、距離及質量的單位。

(I'10) 「力」、「質量」及「引力」是理論詞，需要對應規則的解釋。

(c) 對應規則：

(c'1) 力之度量（對於力之解釋）：

$$(C'1) (f) \{d(f|_{f=f_0}) = d_0 \supset [(f_1 = nf_0) \equiv d(f|_{f=f_1}) = nd_0]\}$$

（此為虎克定律，一個觀察或經驗定律）

(c'1.1) f 是一個變數； $d(f)$ 表示受到外力的彈簧形變； $d(f|_{f=f_0}) = d_0$ 表示施加一個單位力 f_0 於彈簧上時，彈簧所產生的伸長或壓縮量為 d_0 。

(c'1.2) n 是一個實變數，其大小等於外力 f_1 與一個單位力 f_0 的比值。

(c'1.3) (c1) 可以解釋為：若彈簧受到一個單位的外力 f_0 作用時其形變為 d_0 ，則該彈簧受到 n 倍於 f_0 的外力 f_1 作用時，其形變為 nd_0 。

(c'2) 質量之度量（「質量」概念由牛頓第二運動定律所解釋）：

$$(C'2) (x)\{f_i(x) \wedge s_i(x) \supset [f_i(x)/(d^2s_i(x)/dt_i^2) = m(x)]\}$$

(c'2.1) $f_i(x)$, $s_i(x)$, t_i 表示以第 i 種方法測量所得之力 $f(x)$ 、位移 $s(x)$ 及時間間隔 t 。物體 x 的質量，可透過牛頓第二運動定律計算而得之。

(c'2.2) (C'2) 的語言解釋為：若物體 x 受到外力 $f_i(x)$ 作用，在 t 時距內產生 $s_i(x)$ 位移，則該物體的質量等於外力 $f_i(x)$ 除以加速度 $(d^2s_i(x)/dt_i^2)$ 。

(c'3) 萬有引力之測量（依據萬有引力定律）：

$$(C'3) (y)(x)\{m_i(x) \wedge m_i(y) \wedge r_i(x, y) \wedge G \supset u(x, y) = Gm_i(x)m_i(y)/r_i^2(x, y)\}$$

(c'3.1) (C'3) 的語言解釋為：若任何兩個物體 x 與 y 相距 $r_i(x, y)$ ，且其質量以第 i 種方法測量分別為 $m_i(x)$ 及 $m_i(y)$ ，那麼 x 與 y 之間的萬有引力等於 $Gm_i(x)m_i(y)/r_i^2(x, y)$ 。

(c'4) 萬有引力之測量（依據牛頓第二運動定律）：

$$(C'4) (y)(x)[m_i(x) \wedge s_i(x) \supset u(x, y) = m_i(x)(d^2s_i(x)/dt_i^2)]$$

(c'4.1) (C'4) 的語言解釋為：若物體 x 的質量為 $m_i(x)$ ，且只受來自於物體 y 之重力吸引，則 x 與 y 間的萬有引力大小 $u(x, y)$ 等於 x 的質量 $m_i(x)$ 乘於 x 的加速度 $(d^2s_i(x)/dt_i^2)$ 。

(c'4.2) (C'4) 等同於 (C'3)，若且唯若， $(d^2s_i(x)/dt_i^2) = Gm(y)/r_i^2(x, y)$ 。

(c'4.3) 「萬有引力」可以使用 (C'3) 萬有引力定律或 (C'4) 牛頓第二運動定律解釋。

最後，整個牛頓力學理論，可以一個連言句的表示如下：

$$\text{牛頓力學理論} = [(A'1) \wedge (A'2) \wedge (A'3) \wedge (A'4) \wedge (C'1) \wedge (C'2) \wedge ((C'3) \vee (C'4))]$$

如此我們分別從「一階述詞邏輯語言和向量函量語言」和簡化版的「向量函數語言」完成了從述句觀點對牛頓力學所作的公理化重構。

貳、模型觀點之公理化理論

除了上述述句觀點之外，另一重要的關於科學理論之理解的進路是所謂的模型觀點。此一觀點源於四十年代末期貝斯(Beth)的作品，並可追溯到三十年代的馮紐曼及柏克霍夫兩人¹²。此一觀點早期仍依循述句

¹²參見薩普(Suppe 1989)。薩普於該書介紹了模型觀點的發展史，並扼要的分析了幾位主要提倡者間的差異，包括沙普斯、史尼德(Sneed)、范弗拉森(Van Frassen) 及薩普本人。薩普稱模型觀點為「理論的語意概念」(the semantic conception of theories)。

觀點的形式化公理系統進路，但後來卻發展出非形式的語意路線。沙普斯可說是最早的系統化發展者，史尼德則綜合沙普斯的方法與理論—觀察的二元區分，建構了一個非常精緻的科學理論的公理化系統。范弗拉森及薩普則致力於發展有別於邏輯公理化系統、但卻立基於邏輯公理化系統上的非形式概念。

儘管科學哲學仍在歷史學派的主導下，模型理論近年來獲得不少學者的支持。沙普斯以及其他學者的學生，已將模型理論延伸應用到更多的科學領域裡去，尤其是生物學及達爾文的演化論。薩普已寫了一篇清晰的導論，說明模型觀點的發展史及系譜¹³。在本章中，筆者將集中討論公理化進路，亦即沙普斯、史尼德及史泰格穆勒的思想路線。以下將分四個部份：(1) 從模型觀點論科學理論的本質；(2) 透過集合論述詞將科學理論公理化；(3) 理論性的新判準；(4) 關於消除理論詞的問題。

一、從模型觀點論科學理論的本質

科學理論的模型觀點之兩種進路，有一共同主張：科學理論的本性必須透過模型來理解¹⁴—不論科學家、經濟學家、數學家或邏輯學家如何使用「模型」這一語詞¹⁵。但正如沙普斯所說：「...塔斯基的模型概念，可以毫不扭曲地作為所有模型意義的基本概念。」(Suppes 1961, p.165) 塔斯基(1953)將模型定義為「一個可能的落實(realization)，其中一個理論 T 之所有有效語句都可以被滿足。」(Suppes 1961, p. 163) 這正是邏輯語意學或模型論中，「模型」的標準意義。大多數接受科學理論之模

¹³史尼德是沙普斯的學生，畢亞堤(John Beatty)師事吉爾(R. Giere)，而洛伊德(E. A. Lloyd)及湯普生(P. Thompson)則是范弗拉森的學生。畢亞堤(Beatty 1980)、湯普生(Thompson 1982, 1986)及洛伊德(Lloyd 1983, 1984, 1989)曾將模型觀點應用到生物學上。除了薩普的歷史性導論外，柯斯塔與法蘭西(N.C. Da Costa & Steven French, 1990)也曾發表一篇資訊豐富且詳盡的通論，介紹模型觀的發展及基本論點。

¹⁴不同的哲學家，對於模型與科學理論之間的關係有不同的理解。譬如，沙普斯(1957)喜歡說理論的公理化及理論模型，認為模型是一個滿足公理化定義的理論；而吉爾(1988)則認為一個理論包含兩種元素：(1)各種不同的模型，及(2)各種將模型與真實世界的系統連結起來的假說。(p. 85)

¹⁵沙普斯(Suppes 1957, 1961)曾討論「模型」的各種不同意義。在他的《邏輯導論》(Introduction to Logic)中，他區分了邏輯學家、量化經濟學家及經驗科學家的「模型」意義：對量化經濟學家來說，模型是一個邏輯意義的理論之模型(models for the theory in logician sense)的集合；而對經驗科學家來說，一個模型就是一個經驗科學理論，也就是說，描述一個數學模型，就是描述一個數學理論(見 pp. 253-254)。在 1961 年的論文裡，他廣泛引用了各種科學文獻，嘗試證明所有關於「模型」概念的用法，都源自於塔斯基的觀念。

型觀點的哲學家都同意，模型之邏輯意義可以做為重建科學理論的基礎。

但模型要如何揭露科學理論的本質呢？模型與科學理論的關係又是什麼呢？進一步言之，從模型觀點來看，究竟什麼是一個科學理論？薩普明白指出：

....科學理論不是語言存目(linguistic entities)，而是集合論存目(set-theoretic entities)。這與許多關於科學理論之公認觀點的實證論版本，呈現尖銳的對比：這些實證論觀點將理論理解為被局部解釋的公理系統，因而視理論為語言存目。說某些事物是語言存目，意謂著該事物的語言特徵（包括對於公理系統的描述）若有所變化時，則新的存有物便因應而生。(Suppe 1989, p. 3)

此一關於科學理論的存有論定性，回答了「什麼是科學理論？」這一問題。但，什麼是「集合論存目」呢？我們又如何能區別集合論存目與語言存目呢？一個語言存目，可以是符號、語詞、語句等等，可被解釋或指派經驗意義，以接觸經驗世界之事物。相對的，集合論存目則是一些個體的集合(sets of individuals)、集合的次序(orders of sets)、個體間的關係、函應等等，可被理解為各種存在於真實世界事物間的關聯（集合、次序、關係、函應）。集合論存目是抽象的，它 M 是一組語言存目指涉的對象；反過來說，該組語言存目就是集合論存目的語言表述。做為科學理論的集合論存目是個非語言的存有物，可以被表為一個有序對： $\langle D, R \rangle$ 。這個有序對通常容許不同系統的語言表達。

不過，模型理論家並不斷然地主張，一個科學理論即等同於其語言表述之共同邏輯模型¹⁶。他們只說，一個科學理論之諸語言表述的共同

¹⁶哲學家們常常不把科學理論的存有論地位說清楚。他們都把科學理論與模型視為集合論存有物，但一個科學理論就是一個模型嗎？他們並未給予一個肯定而明確的答案。沙普斯(Suppes 1957) 習慣性地使用「理論之模型」這一術語（模型是理論的一部分嗎？）；史尼德(Sneed 1979)說：「如此，據說如果某個述句集合是一個科學理論，那麼在這述句集合裡的元素間的某些邏輯關係必須成立...一個假設是，包含於所有科學理論的述句集合裡的共同元素間，存在有某些邏輯關係。」(p. 2)是否科學理論是述句集合，或者是述句集合共同的邏輯結構？換句話說，儘管模型論者強調模型在科學理論中的核心地位，他們並沒有明確回答「述句集合或語言表述是否為科學理論的一部份」這一問題。從哲學家們的各種說法，我們也許可以說，沙普斯及史尼德的答案為「是」；而薩普及范弗拉森的答案為「否」。要對「什麼是科學理論？」給予一個完整而確定的答案，的確是一件困難的事，因為「什麼是...？」這種問題涉及許多層面。沙普斯在其論文〈科學理論是什麼〉(What is a scientific theory)裡並沒有對科學理論下一個精確的定義，相反地，他說：「對我而言，一個簡單的回答似乎並不存在...對我來說，給予一個具有『X 是一個科學理

邏輯模型，是科學理論的核心：它是一個共同邏輯結構（史尼德用語）或在語言之外的理論結構（薩普用語）。

現在，這一共同的邏輯模型（邏輯結構、或理論結構）可以「被描述為集合論述詞（沙普斯和史尼德）、狀態空間（貝斯及范弗拉森）或關係系統（薩普）」(Suppe 1989, p. 4)，正反映了本節一開始所提及的兩種進路。由於沙普斯及史尼德以集合論語言來描述科學理論之模型，讓我們在此更深入的討論他們的學說。

二、透過集合論述詞公理化科學理論

遵循形式化與公理化路線的哲學家們，以集合論述詞的公理化方法來考察科學理論¹⁷。簡單地說，透過定義集合論述詞的方式來為一個科學理論進行公理化，而且該理論之模型，正是一個滿足其集合論述詞的存有物。即，

X 是一個 S

在其中， $X = \langle D, R \rangle$ 是一個模型； S 代表任何一個科學理論（如古典質點力學理論等），而「是一個 S 」則是集合論述詞。問題是： X 要如何滿足「是一個 S 」這一集合論述詞呢？有序對 $\langle D, R \rangle$ 必須由幾個對 D 與 R 的特定條件來界定它的內容，一些特定條件包括將科學理論的定律加以公理化。透過對 D 和 R 的界定從而定義 S 。換句話說，一個被公理化的科學理論的所有公理，是用來描述此一模型中的每一個元素以及各元素間的關係。讓我們用一個簡單具體的例子來說明這點。

論，若且唯若，如此如此』之類形式的準確的定義，似乎不是一件重要的事。真正重要的事，是去確認是否因著檢驗基本理論的不同實驗方法而產生的理論層級，是任何精緻的科學學科的一個基本必要的成分。」(Suppes 1967, pp.63-64)在這篇論文裡，沙普斯探討了科學理論的述句觀點，並討論了理論模型與實驗或數據模型之間的關係，以及它們彼此之間的配合。

¹⁷史泰格穆勒(Stegmüller 1976, pp. 30-36)曾考慮五種關於科學理論的公理化系統，分別是歐幾里得公理化系統、非形式化希爾伯特公理系統、形式化希爾伯特公理系統（也稱作「運算」(calculi)）、非形式化集合理論公理系統及形式化集合理論公理系統。沙普斯(Suppe 1993, pp. 5-8)也曾提及四種形式方法，分別為一階或二階邏輯句式形構、集合理論句式形構、計算機科學程序性特徵(the procedural characteristic of computer science)及在許多場合為喬治·克雷索(George Kreisel)明白支持的非形式的嚴密化之進路(the approach of informal rigor)。此處所言之「形式」與「非形式」的意義，是相對性的概念。譬如，集合理論述詞之非形式化公理系統，相較於集合理論述詞之形式化公理系統，是非形式化；但若相較於沙普斯對關係系統之描述，則為形式化系統。

「定義 G」X 是一個群（群論的對象），若且唯若，存在一個 B 及一個「#」，滿足以下各點¹⁸（此為史尼德的版本，見 Sneed 1979, pp.9-10）：

- G1. $X = \langle B, \# \rangle$
- G2. B 是一個非空集合；
- G3. # 是一個函數，其定義域為 $B \times B$ ，其值域為一個 B 的子集合；
- G4. 對所有 $a, b, c \in B$ ， $a \# (b \# c) = (a \# b) \# c$ ；
- G5. 對所有 $a, b \in B$ ，有一個 e ，使得 $a = b \# e$ ；
- G6. 對所有 $a, b \in B$ ，有一個 e ，使得 $a = e \# b$ 。

G1, G2, ..., G6 是群論的公理，他們既定義了 X，又表現了「#」這一函數。這種公理化方法，使用集合論的理論架構和符號系統，明顯與傳統使用一階邏輯的公理化方法不同。以傳統方式來建構公理系統，如群論可以三個公理來表示：（見 Sneed 1979, p. 10）

- G1'. $(x)(y)(z)(x \# (y \# z) = (x \# y) \# z)$
- G2'. $(x)(y)(\exists z)(x = y \# z)$
- G3'. $(x)(y)(\exists z)(x = z \# y)$

G1', G2', G3' 分別對應於 G4, G5, G6，用以表達群論的基本設準與內容。但集合論述詞的公理化方法，不但表現了群論的內在結構，還為我們提供了更完整的圖像及資訊——也就是說，只要有任何一集合和函項能滿足 G1 到 G6 的公理，它就是一個「群」。這是集合論述詞公理化系統的好處及優越性。

¹⁸群論是一個數學理論。另一種常見的定義是（承蒙我的朋友，成功大學數學系潘成衍教授告知，謹此致謝）：

- (1) $X = \langle B, \#, i \rangle$
- (2) B 是一個非空集合；
- (3) # 是一個函數，其定義域為 $B \times B$ ，而其值域為一個 B 的子集合；
- (4) 對所有 $a, b, c \in B$ ， $a \# (b \# c) = (a \# b) \# c$ ；（這稱之為聯結律(association law)）。
- (5) 對所有 $a \in B$ ， $a \# i = i \# a = a$ ；（i 稱之為單位元素）
- (6) 對所有 $a \in B$ ，存在有一個元素 a' ，使得 $a \# a' = a' \# a = i$ （ a' 稱之為反元素(contrary element)）

例如， $\langle Z, +, 0 \rangle$ 是一個群（其中，Z 是一個由整數所構成的集合，+ 是加號函數，而 0 表示零），可證明如下：

- $\langle Z, +, 0 \rangle$ 顯然滿足(1)與(2)。
- (3) 對所有 $z, y \in Z$ ， $z+y=x$ ，且 $x \in Z$ ；
- (4) 對所有 $x, y, z \in Z$ ， $(x+y)+z=x+(y+z)$ ；
- (5) 對所有 $z \in Z$ ， $z+0=0+z=z$ ；
- (6) 對所有 $z \in Z$ ，讓 a' (反元素) = $-z$ ，則 $z+(-z)=(-z)+z=0$ 。

我們已經知道如何透過集合論述詞來公理化一個理論，現在讓我們進一步看看如何以沙普斯式的方法來公理化古典質點力學理論(classical particle mechanics) (代號為 M)¹⁹：

「定義 M 」 M 是一個 M (古典質點力學)，若且唯若，存在 P, T, S, m, f, g ，使得以下公理成立：

[結構公理]

M1. $M = \langle P, T, S, m, f, g \rangle$ ；

[運動學公理]

M2. P 是一個有限的非空集合；

M3. T 是一個實數區間；

M4. 對 $p \in P$ ， $s(p)$ 是 T 的二階可微函數；

[動力學公理]

M5. 對 $p \in P$ ， $m(p)$ 是一個正實數；

M6. 對 $p, q \in P$ 及 $t \in T$ ， $f(p, q, t) = -f(q, p, t)$ ；

M7. 對 $p, q \in P$ 及 $t \in T$ ， $s(p, t) \times f(p, q, t) = -s(q, t) \times f(q, p, t)$ ；

M8. 對 $p, q \in P$ 及 $t \in T$ ， $m(p)d^2s(p, t) = \sum f(p, q, t) + g(p, t)$ ；

為了理解這些公理及函數的物理意義，我們仍然需要語言來解釋這些集合論符號：（注意，這些解釋並不被包括在模型及公理化定義裡）

(j1) T 表示時間間隔之集合。

(j2) $s(p)$ 是一個位置函數，表示質點 p 的位置。 $m(p)$ 是一個質量函數，表示質點 p 的質量。 $f(p, q, t)$ 是一個力函數，表示 q 於 t 時施加外力 f 於 p 上。 $g(p, t)$ 表示於 t 內施於 p 的外力之合力。

(j3) $M6$ 及 $M7$ 為牛頓第三運動定律。 $M6$ 表示作用力與反作用力的大小相同、方向相反； $M7$ 表示 p 所受來自於 q 的外力，與 q 所受來自於 p 的外力，使它們分別抵達 $s(p, t)$ 與 $s(q, t)$ 的位置上，兩者方向相反，且剛好在同一直線的反方向上²⁰。

¹⁹以下之公理化描述，雖然筆者基本上從沙普斯的理論出發，但因融合史尼德的理論之故，稍有別於沙普斯的說法。沙普斯一般以「定義：一個系統 $x = \langle P, T, s, m, f, g \rangle$ 是一個質點力學理論系統，若且唯若， x 滿足以下七個公理...」來定義古典力學理論。

²⁰本公理 $s(p, t) \times f(p, q, t)$ 中的 \times 號是集合論中的笛卡兒積(Cartesian Products)，其定義為 $A \times B$ 是 A 和 B 兩集合的笛卡兒積，定義為 $\{ \langle a, b \rangle \mid a \in A \text{ 且 } b \in B \}$ 。如此，力函數 $f(p, q, t)$ 和位置函數 $s(p, t)$ (亦是兩集合) 的笛卡兒積為 $\{ \langle s'(p, t), f'(p, q, t) \mid s'(p, t) \in s(p, t) \text{ 且 } f'(p, q, t) \in f(p, q, t) \}$ ，其物理意義是「 p 受到 q 施加力 f' 將使 p 在 t 處在 s' 的位置上。」這個定

(j4) M8 表示牛頓第二運動定律。 $d^2s(p, t)$ 表示 p 於 t 時內受外力所產生的加速度。

將此一集合論對古典力學的公理化與前一節的一階量化邏輯對牛頓力學的公理化加以比較，我們可以看到很大的差異。一階邏輯的公理化系統，無法直接顯現出牛頓理論本身的結構性。

三、理論性的新判準

史尼德曾提出一個關於科學理論（尤其是史尼德的主題—數學物理 (mathematical physics)）公理化的精緻方案，並藉由沙普斯所發展的集合論述詞，建構了一個典雅優美、但頗為複雜難懂的公理化系統。史泰格穆勒受到史尼德方案的吸引，嘗試以之重建孔恩的科學發展理論。他因此寫了一個史尼德系統的精簡版，並將之應用到科學革命上²¹。以下我對史尼德理論的闡釋，也參考了史泰格穆勒的精簡版。

史尼德的理論揭露了數學物理的邏輯結構，但仍留下了諸如「一個科學理論是如何構成的」或「一個科學理論如何與現象關連起來」等問題。史尼德延續邏輯經驗論者關於理論與觀察二分法的區分，探討科學理論的構成結構。他的工作可以被看成如下的程序：如何在集合論公理化系統內，將科學理論立基在經驗基礎上。第一個關鍵，乃是如何決定一個函數是否是理論的 (theoretical)，為此他提出一個理論性的判準 (criterion of theoreticity)。

大致說來，史尼德的觀點是，理論與非理論的區別總是相對於某一已知理論的：沒有任何函數總是理論性、或總是非理論性的；對某個已知理論而言可能是理論性的函數，但對另一個理論則可能為非理論性的。這意謂著：一個擁有某些條件的函數，只會相對於某個既知理論而為理論性的。這些條件就構成決定這個函數是否具有理論性的判準。讓我們以一個顯式定義來表出這一判準²²：

理也可以導出「功」的概念，即函數 f 與函數 s 的數值相乘將得到「功」。如此，表示 p 受 q 施加的 $f(p, q, t)$ 之力，將同時施加一反作用力 $f(q, p, t)$ 於 q ， q 使 p 在 t 時位於 $s(p, t)$ 之位置， p 使 q 在 t 時位於 $s(q, t)$ 的位置，兩個質點互相對對方所作的「功」(work)大小相等、方向相反。

²¹史尼德於 1971 年發表《數學物理的邏輯結構》(The Logical Structure of Mathematical Physics)第一版，收錄他在密西根大學授課及 1966 到 1968 年在史丹佛大學教授研討課的內容。不久，史泰格穆勒於 1973 年以德文出版《理論結構與理論動力學》(Theorienstrukturen and Theoriendynamik)，並於 1976 年譯為英文。史尼德後來重新考慮史泰格穆勒對於他的理論的應用，於 1979 年出版該書第二版的擴充版。

²²史尼德與史泰格穆勒對於此一判準的討論相當複雜又充滿技術性。筆者將簡化並重述他們的論述，以避免過多技術性的句式。

(DT) 函數 g 在（或相對於）一個理論 T 是理論性的，若且唯若所有應用 T 對 g 所進行的測量，皆依賴於(dependent of) T 。 g 在（或相對於） T 是非理論性的，若且唯若至少存在一個 T 的應用 i ，使得在 i 中對於 g 的測量獨立於 T 。

「對於 g 的測量獨立於 T 」這句話，意謂至少有一個不預設理論 T 而能測量 g 的方法。在這個測量方法中，用來測量 g 的儀器，也不必依照理論 T 的原理來設計。譬如，在古典質點力學理論中，位置函數可以透過光學方法來決定。因為光學並不預設古典力學理論的原理，所以位置函數對於古典力學理論而言，是獨立且是非理論性的。反之，由於對力與質量的測量總是得依賴於古典力學理論，因此力與質量兩函數相關於古典力學裡而言是理論性的。接下來的問題是：什麼是一個理論的應用？直覺上，古典質點力學理論可以用來說明太陽系的天體運動，也可用來說明拋射或自由落體等運動。這些說明，就是古典質點力學理論的應用。太陽系裡的天體、被拋射或自由掉落的物體，可以被視為個別的物理系統，分別隸屬於 D 的子集合 E_i, E_j, E_k 。若此，古典力學理論的每一個應用 i ，都可以透過集合理論述詞來定義：

M_i 是一個 AM（理論 M 的應用(application of M))。

其中， $M_i = \langle E_i, R_i \rangle$ ； $E_i \subseteq D, R_i \subseteq R$ 且 $R_i = \{r_j \mid j \leq n, j, n \in N, n \text{ 是一個有限的自然數}\}$ ； r_j 則是一個應用於 E_i 的函數。如此， M_i 被（特別）稱為 M 的可能模型。普遍說來，理論 T 的第 i 個應用，就是 T 的第 i 個可能模型。

我們已經知道，古典力學理論裡的位置函數，相對於該力學理論而言是非理論性函數，而力與質量則是理論性函數。因此，古典力學理論的一個可能應用可以定義如下：

「定義 AM」 M_k 是古典質點力學理論的第 k 個應用，若且唯若，存在 P_k, T_k, s, m, f, g 使得：

- AM1. $M_k = \langle P_k, T_k, s, m, f, g \rangle$
- AM2. P_k 是一個有限的非空集合；($P_k \subseteq P$)
- AM3. T_k 是一個實數區間；($T_k \subseteq T$)
- AM4. 對所有 $p \in P_k, s(p)$ 可對 T_k 做二階微分；
- AM5. m 是個從 P_k 對應到 Z^+ 的函數；
- AM6. f, g 是從 $P_k \times T_k$ 對應到 R 的函數。

（解釋：在 AM5 中， P_k 表示函數 m 的定義域， Z^+ 表示其值域，為正數所構成的集合。在 AM6 中， $P_k \times T_k$ 表示函數 f 與 g 的定義域，而 R 表示其值域，為實數所構成的集合。）

對於一個科學理論的成功應用，蘊涵著：此一理論中，由集合論公理化系統所表達的定律，成功地解釋了在 E_i 中的物理系統的表現行為。以一個實際的例子來說明的話，就是在古典力學理論的可能模型中，函數 m, f, g 都被指派了一些確定的值，使得它們不再受原先定律的限制。反映在定義的改變上，就是從「M 定義」中的 M5 到 M8 被「AM 定義」中的 AM5 和 AM6 所取代。因為 AM5 和 AM6 描述了這些函數的定義域和值域，意味著這些函數已被指派了實際的值，以代替原先函數所依賴的定律。

四、關於理論詞的消除之問題

現在我們的確已經有了對於理論語詞的新判準，但此一判準也帶來了一個新的麻煩。假設 M_i 是一個古典質點力學理論 M 的可能模型，「 M_i 是一個 M 」這一定義，表達了該力學理論的第 i 個應用。當我們想要知道 M_i 是否為一個 M 時，我們必須檢查函數 m, f, g 的值是否滿足牛頓運動定律；也就是說，「AM 定義」中的 (AM5) 及 (AM6) 必須與「M 定義」中的 (M5) 到 (M8) 一致。但因為 m, f, g 相關於 M 而具有理論性，所以對於它們的測量必須預設 M 。這造成一個後果：我們只能透過 M 的第 j 個應用（亦即， M_j 是一個 M ），得到 m, f, g 在第 i 個應用中的值。但 M_j 是一個 M 嗎？這個問題的答案，如上所述，將取決於另一個 M 的應用 M_k 。如此，我們將陷入一個無限後退的窘境。要如何逃離此一泥淖呢？史尼德提供了一個消去理論函數的方法。

考慮「M 定義」中的運動公理，他們構成了質點運動理論 K 的一個模型 K 。 K 可以用集合論述句「 K 是一個 K 」來定義，亦即：

「定義 K 」 K 是一個質點運動學 K ，若且唯若，存在 P 與 T ，使得：

- K1. $K = \langle P, T, s \rangle$ ；
- K2. P 是一個有限的非空集合；
- K3. T 是二個實數間大小的差距；
- K4. 對 $p \in P$ ， $s(p)$ 可以對 T 做二階微分；

如果我們加上引入函數 m, f, g 的兩個公理以及這些函數的定義域與值域到「定義 K 」，我們可以得到一個古典質點力學理論的可能模型：

「定義 PM 」 M_p 是一個可能的古典質點力學理論，若且唯若，存在 P, T, s, m, f, g 使得：

- PM1. $M_p = \langle P, T, s, m, f, g \rangle$ ；
- PM2 ~ PM4. 與「定義 K 」中的 K2~K4 相同。
- PM5. m 是一個從 P 對應到到 Z^+ 的函數；
- PM6. f, g 是個從 $P \times T$ 對應到 R 的函數；

「定義 PM」是古典質點力學理論 M 裡一個普遍的可能模型(generally possible model) (相較於「定義 AM」, 「定義 PM」代表 M 的所有可能應用; 而「定義 AM」則僅代表 M 的一個可能應用。) 這意味著, 如果我們把數值賦予「定義 PM」裡的一些函數, 質點運動學可以被擴充到古典質點力學的應用上。既然「定義 K」是「定義 PM」的一部份, K 可以被稱為 M 的可能的局部模型(possible partial model)。在 K 中, 只有一個非理論函數 s, 而無其他任何理論函數存在。這表示, 一個理論 T 的一個局部可能的模型並不包含任何理論函數。

如果我們再加上一些函數以及對於這些函數的限制, 我們將可得到古典質點力學理論:

「定義 M」 M 是古典力學理論, 若且唯若, 存在 P, T, s, m, f, g 使得:

- M1. $M = \langle P, T, s, m, f, g \rangle$;
- M2. ~ M4. 與「定義 K」中的 K2~K4 相同;
- M5. 對 $p \in P$, $m(p)$ 是一個正實數;
- M6. 對 $p, q \in P$ 及 $t \in T$, $f(p, q, t) = -f(q, p, t)$
- M7. 對 $p, q \in P$ 及 $t \in T$, $s(p, t) \times f(p, q, t) = -s(q, t) \times f(q, p, t)$;
- M8. 對 $p, q \in P$ 及 $t \in T$, $m(p)d^2s(p, t) = \sum f(p, q, t) + g(p, t)$

這些添加的公理表示: 運動學模型 K 有可能被擴充為 M。讓我們假設 E_k 是 K 的一個擴充, 並藉由述詞「是一個 E_k 」定義 E_k 如下:

「定義 E_k 」若 $K = \langle P, T, s \rangle$ 是一個質點運動理論, 則 M 是一個 E_k , 若且唯若, 存在 m, f, g 使得:

- E1. $M = \langle P, T, s, m, f, g \rangle$
- E2. 對 $p \in P$, $m(p)$ 是一個正實數;
- E3. 對 $p, q \in P$ 及 $t \in T$, $f(p, q, t) = -f(q, p, t)$
- E4. 對 $p, q \in P$ 及 $t \in T$, $s(p, t) \times f(p, q, t) = -s(q, t) \times f(q, p, t)$;
- E5. 對 $p, q \in P$ 及 $t \in T$, $m(p)d^2s(p, t) = \sum f(p, q, t) + g(p, t)$

在「定義 E_k 」中, E2~E5 顯然與「定義 M」中的 M5~M8 等同。也就是說, 古典質點力學理論是質點運動理論的一個「擴充」(extension)。反過來說, 模型 K 做為一個質點運動學, 則是古典質點力學理論的一個可能局部模型。讓我們用一個形式語句來表達此一「可能局部模型 v.s. 擴充」的關係:

(DE) $(\exists x)(K \text{ 是一個 } M \text{ 的可能的局部模型} \wedge x \text{ 是一個 } E_k \wedge x \text{ 是 } M)$

(DE)表示，存在有一個同於古典質點力學理論的模型M，可從質點運動學模型K擴充而得。(DE)、「定義 E_k 」及「定義 M」在經驗意涵上，其實是相同的，即：

$$(DE) \equiv \text{「定義 } E_k \text{」} \equiv \text{「定義 M」}$$

我們必須注意，模型K只擁有一個非理論函數 s ，且K的擴充，只須在 s 之外加上一些理論函數。因此，K可以被理解為消除 M 中的理論函數之後所剩下來的東西。因為此一消除法與瑞姆濟消除理論語詞的方法可以獲致相同的效果，史尼德乃稱此一消除法為「瑞姆濟觀點」。如且讓我們稱(DE)為集合理論的瑞姆濟語句。但它真的是瑞姆濟語句嗎？如史泰格穆勒所說：「可是，史尼德理解的東西和瑞姆濟的概念消除法是完全不同的。」(Stegmüller 1976, p. 64)史尼德的瑞姆濟觀點不涉及任何關於理論存有物是否存在的爭論。

為什麼集合理論的瑞姆濟語句可以被視為一個理論函數的消除法呢？直覺上，該語句告訴我們，我們可以透過粒子運動學，來描述及測量一個粒子系統的行為及運作，而無需假設任何古典質點力學；而且，因為質點運動學可以被擴充成古典質點力學，此一描述與測量在經驗意涵上，與假設了理論函數之存在的古典質點力學理論並無二致。我們因此不須直接測量諸如質量及力等理論函數，即可透過對於非理論函數的測量與計算，獲得同樣的經驗結果。理論函數是否指稱真實存在的存有物，並不是史尼德所處理的問題，也不是他提出的理論語詞消除法的目的。這一消除法的基本意涵，在於其揭示了科學理論的內在複雜結構，並使得此一結構可以集合理論述詞來進行公理化。

我們已經介紹了史尼德的理論函數消除法的基本觀念，關於這個消除法的其他所許多問題（諸如史泰格穆勒所提的「瑞姆濟方法的三重改良」），多數是一些技術上的問題，討論諸如「如何用集合理論語言展現科學理論的完整結構？」或「如何透過集合論方法建構一個完全的公理系統？」等問題。本文有限的篇幅將無法、也不需討論這些不但複雜、專技且冗長單調的細節。

參、兩個公理化系統的比較

本文的目的之一，是要比較上述兩種不同的公理化觀點。事實上，述句觀點（尤其是卡納普與韓培爾的版本）與公理化模型觀點（尤其是史尼德的版本）兩者之間有許多的類似點。首先，儘管進路不同，他們皆認同公理化此一大方向。其次，兩者用以表達科學理論的語言（即，一階邏輯語言與集合理論語言），皆可歸類為形式化後設邏輯語言 (formalized meta-logical language)。我們甚至可以說，公理化模型觀點是傳統述句觀點的一個合理發展。因為，它們的傳承關係反映了邏輯的發展軌跡，亦即，從希爾伯特的句法公理化系統到塔斯基的邏輯語意學。

從更寬廣的角度來看，兩種公理化進路有一個互補性的結果²³。當然，這需要進一步的說明。

我們的比較，將沿以下項目進行：(1) 科學理論的本性；(2) 科學理論的公理化；(3) 理論—非理論之區分；(4) 理論概念的消除。

一、科學理論的本性

這個主題也關係到科學理論的存有論地位。我們已經在前文中，展示了述句觀點和模型觀點在這個問題上所持的不同立場。模型觀點理論家一般認為，述句觀點學者眼中的科學理論是語言存目。說某個理論是語言存目，意謂如果我們有不同於該理論的公理化句式，則我們有另一個不同的理論。但一個明顯的事實是，許多科學理論（譬如牛頓力學）可以有不同的描述。我們該把這些不同的描述，視作不同的理論嗎？事實上，即使述句觀點論者也不會接受這個提議；他們會將這些不同的描述視作同一理論的不同表述。問題是，他們的進路無法提供一個明確的、關於理論同一性的判準。如果我們視這些不同的描述為同一理論，這意味著在這些描述間，必然有一個共同的地方，使得這些不同的描述可以被視為同一個理論；而這個共同的地方，就是該理論最重要的核心。一個問題自然就產生了：什麼是這些不同的描述的共同之處呢？模型觀點論者回答了這個問題。

現在，模型觀點論者主張，「模型」就是那個「共同之處」，它可由集合理論定義來描述。模型是一個被稱為集合論存目的抽象事物，展示了一個理論的內在結構。但模型在一個理論中扮演了什麼角色呢？一個模型是否就同一於一個理論？或是它只是理論的結構？一個理論的種種不同描述，是否為該理論的不同構成成分？模型理論學家並未給予我們一個確定的答案。我們也許可以接受這個觀點：模型是一個理論的不同描述間的共同核心，但模型並不同於整個理論。一個科學理論應當被定性為至少有一種語言句式系統的一個模型。也就是說，科學理論並不僅僅是集合理論存有物，它還應包含語言存有物。既然不同的語言表述指涉共同的模型，保證了它們仍然是「同一個理論」。就此看來，集合論述詞的公理化方法只是述句觀點的補充面向，而非一個成功的取代性觀點。

²³譬如納格爾(Nagel, 1961)便標舉了科學理論的三個主要成份，即：(一)一個可做為科學解釋系統骨架、且「隱然地(implicitly)」定義該系統基本概念的抽象運算；(二)一套可以連結該抽象運算與具體觀察與實驗材料、從而賦予該抽象運算經驗內容的規則；(三)一個多多少少可以透過熟知的概念或視覺化材料賦予該解釋系統血肉的、關於該抽象運算的解釋或模型(p. 90)。納格爾的此一說明，自然是建立在述句觀點上。他在此處所提到的「模型」，只是一個「圖像模型」。然而，我們已經看到，圖像模型可以被表示為邏輯模型。因此，納格爾的說明提供了一個很好的、整體的起點。

二、科學理論的公理化

筆者已依據述句觀點的形式化規則，公理化了牛頓力學理論。以下筆者將比較集合理論對於古典質點力學理論的公理化，以及一階邏輯語言對於牛頓力學的公理化²⁴。我們已經看到，筆者的公理化系統中，包括了沙普斯式的公理系統中所缺乏的牛頓第一運動定律(A1)、萬有引力定律(A4)及虎克定律(C1)等公理。這並不意謂沙普斯式的公理系統不容許加入這些定律，史尼德(1979, ch. 6)已作過這樣的嘗試²⁵。但本文將不將討論。

讓我們更仔細地思考集合理論公理系統。一個集合論公理系統，包括了一個模型 $X = \langle D, R \rangle$ ，以及其他公理。幾條公理描述了該模型的元素；其它公理則利用集合論語言，重新表述了這些元素間的函數關係。而且，這些用來重新表述的公理，與那些使用一階邏輯語言來表述的同一個理論之公理，互相對應。但是，這些似定律的公理(lawlike axioms)，因為缺乏科學家所理解的物理意義（我們需對那些集合理論符號加以解釋），不能算是科學定律本身。我們不能說這些定義了函數關係的公理就是科學定律；相反地，我們必須說：包含這些公理的整個模型，解釋了抽象的科學定律的運算，以及解釋了科學定律如何被應用到物件系統上。讓我們宣稱：在敘句觀點中，對於公理的解釋乃是對應規則詮釋，而在模型觀點中，對公理（科學定律）的解釋，就是這種模型的解釋。而這正是述句觀點與模型觀點兩者之間，最重要的差別。

此一模型解釋，系統化地將待解釋的對象描繪為一個理想的物理系統，因而輕易地揭示了科學理論的內在結構。我們可以透過此一共同的模型結構，輕鬆地辨識出一個理論的不同表述。譬如，漢彌爾頓原理也

²⁴牛頓力學理論並非古典質點力學理論之外的另一理論；事實上，他們是同一個理論（從模型觀點來看），但具有不同的名字。筆者此處稱之為牛頓力學理論，而不稱之為古典質點力學理論，乃因筆者對於該理論的描述，並不涉及「質點」這一概念。

²⁵對史尼德而言，古典質點力學理論僅包括質點運動學及牛頓第二運動定律（質點動力學）。牛頓第一運動定律事實上是牛頓第二運動定律的一個特例。加上牛頓第三運動定律的古典質點力學理論(CPM)，可稱為牛頓式古典質點力學理論(NCPM)。虎克定律被看成一個新的結構元素而加到 NCPM 之中，由此所獲得的理論結構可以 HNCPM 表示。萬有引力定律對 NCPM 而言也是一個新的元素，加入此一定律後，NCPM 可以 GNCPM 來表示。虎克定律可以定義如下：（依史泰格穆勒(1976, p. 101)重述）

(DH) 存在有從 $P \times P$ 對應到 R (實數) 的函數 K 與 d ，使得：

(M9) 對所有 $p, q \in P$ 及所有 $z \in R$ ， $h(p, q, z) = K(p, q)(z - d(p, q))$

其中， h 是虎克力； K 是質點 p 與 q 間的彈性常數； z 是原始距離； $d(p, q)$ 是 q 施力 h 於 p 後所造成的位移。

能滿足 $\langle P, T, s, m, f, g \rangle$ 這一模型，因為它只是用不同的句式來描述 P 集合內的質點系統之狀態²⁶。相反的，對應規則的解釋卻很難展現出科學理論的內在結構。因為，在述句理論中，並沒有一個清楚的判準，用來判斷哪些元素同屬於某個科學理論，譬如，應用能量概念的漢彌爾頓原理屬於牛頓力學理論嗎？（這當然並不意謂我們不能依直覺將某些元素視為屬於同一個科學理論；問題是，我們沒有清楚的判準來做這件事。）科學理論於是變成一個累積性的觀察活動，而失去其系統性（或理論性）。這樣一個結果，並不符合科學發展的歷史，也無法恰當地解釋科學理論的本性。相反地，模型理論則補足了這個缺失。因此，集合理論公理系統的發展，無疑是一階邏輯公理系統的改良。

三、理論—非理論之區分

邏輯經驗論者所持的觀察與理論的區分，的確是一個明顯的缺點。觀察詞與理論詞間既無明顯的界線，又無明確的判準足供決定一個語詞是否為理論詞。事實上，理論詞被等同於非觀察詞，而可觀察性則變成此一區分的絕對判準。然而，由於沒有事物在原則上是不可觀察的，因此，理論詞就變成不必要的贅詞。

史尼德關於理論性的判準，顯然解決了這個「理論家的兩難」(theoretician dilemma)。此一判準，將可觀察性優先於理論性的情形倒轉過來，提供一個判斷某個函數是否相對於某個理論而具有理論性的標準。如此，我們對科學語詞或科學概念的區分是「理論語詞／概念／函項」和「非理論語詞／概念／函項」之區分，而不是「可觀察詞」與「不可觀察詞」之區分。而且，同一語詞相對於某一理論可能代表「理論概念」；相對於另一理論，卻代表「非理論概念」。因此，對史尼德的系統來說，理論函數乃是必然的也是必要的，因為對它們的測量總是依賴於包含它們的理論。至於一個非理論的函數，可以是可觀察的或者不可觀察的²⁷，換言之，非理論性並不就等於可觀察性。

在述句觀點中，扮演關鍵角色的「可觀察性」在史尼德的系統裏，幾乎不再有任何地位。反而是一個函項的「理論性」相對於理論而定的這種主張，很類似於孔恩的「科學詞彙」的意義必須依賴典範來決定的觀點。這也是為什麼史泰格穆勒認為史尼德的系統，為孔恩的典範之結構和變遷，提供了一個形式化的形構。

四、理論概念的消除

瑞姆濟消除法無疑可以消除局部解釋運算中的理論語詞，但它引起了理論存有物的存在及真實性的問題。事實上，在與一階邏輯的配合

²⁶漢彌爾頓原理，簡單地說是：「動力系統的實際移動路徑，乃是其動能和位能差的時間間隔積分之最小化的路徑。」詳見第四章。

²⁷所有的非理論性函數皆不可觀察的，只有局部非理論性函數是可觀察的。

上，此一消除法有更嚴重的問題。我們知道，在一階邏輯中，量限變項(quantified variables)所指涉的對象是一個個的個體。但是，科學理論中的許多理論詞代表的乃是關係或函數；如果我們想要消除此類理論詞，要不是我們得把這些理論詞所指稱的視為一階邏輯中的個體對象，就是得應用高階邏輯(higher-order logic)而將這些函項或關係量化。然而，前者將混淆了個體和關係與函項之間的分界，後者則複雜化了所需的邏輯語言。

史尼德的消除法主要聚焦於理論函項，是否電子與質子等理論存有物是否真的存在，並不是他的問題。雖然我們可以輕易地將他的理論性判準應用到物體的領域中，但他的消除法並不是用來消除理論存有物的。經驗上，理論對象通常是透過理論函數而發現，或許我們在消除理論函數時，免不了也消除了理論對象。然而，我們必須注意，史尼德的消除法是發展來解決理論性判準陷於無限後退之困境，儘管可以有類似的效果，史尼德的方法仍相當不同於瑞姆濟的方法。

參 考 文 獻

- 林正弘(1985),《知識·邏輯·科學哲學》(台北:東大圖書公司)
- (1989),《伽利略·波柏·科學說明》(台北:東大圖書公司)
- 洪裕宏(1997),〈概念與整體論(holism)的問題〉,發表於台灣哲學學會、中正大學哲研所主辦「南台灣哲學研究 1997」,民國八十六年九月。
- 高涌泉(2001),〈孔恩 vs. 費曼〉,《孔恩:評論集》(台北:巨流出版社),頁 257-277。
- 陳瑞麟(1999),〈組織科學理論:分疇、分類和模型〉,《東吳哲學學報》第四期,頁 1-36。
- (2003a),〈科學概念的指稱和投射〉,《歐美研究》第三十三卷第一期,頁 125-192。(修改自國科會研究計畫成果報告, NSC-89-2411-H-031-012)。
- (2003b),《科學與世界之間:科學哲學論文集》(台北:學富出版社)
- (2003c),〈科學模型的投射與落實〉,《科學與世界之間:科學哲學論文集》第四章。
- 傅大為(1992a),《異時空裏的知識追逐》(台北:東大圖書公司)
- (1992b),〈Ad hoc 假設與局部理性〉,《異時空裏的知識追逐》(台北:東大圖書公司)
- (1995),〈H₂O 的一個不可共量史—重論「不可共量性」及其與意義理論之爭〉,《第四屆美國文學與思想研討論論文集》(中研院歐美所)。
- Abetti, Giorgio (1952) *The History of Astronomy*, tr. from Italian by Betty Burr Abetti. London: Abelard-Schuman.
- Aiton, E. J. (1972) *The Vortex Theory of Planetary Motions*. London: MacDonald Press.
- Andersen, Hanne (1996) "Categorization, Anomalies and the Discovery of Nuclear Fission," *Studies in History and Philosophical of Science*, Vol. 27, No. 4: 463-492.
- Achinstein, Peter (1968) *Concepts of Science: The Philosophical Analysis*. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins Press.
- Aristotle (1984) *Categories*, tr. by J. L. Ackrill, *The Complete Works of Aristotle*. Ed. by Jonathan Barnes. Princeton: Princeton University Press, pp. 3-24.
- (1984a) *On the Heavens*, tr. by J. L. Stocks, in *The Complete Works of Aristotle*.
- (1984b) *On the Universe*, tr. by E. S. Forster, in *The Complete Works of Aristotle*.
- Austin, J. L. (1961) "The Meaning of a Word," in *Philosophical Papers*, 1st ed. Oxford: Clarendon Press, pp. 23-43. First Published 1940.
- Baird, D., Hughes R. I. G., & Nordmann A. (1998)(eds.) *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers).

- Barbour, Julian B. (1989) *Absolute or Relative Motion? Vol. 1 The Discovery of Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Baruch & Grandy, Richard E. (1989)(eds.) *Readings in Philosophy of Science*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Beatty, John (1980) "Optimal-design models and the strategy of model building in evolutionary biology," *Philosophy of Science*, Vol. 47: 532-561.
- Berry, Arthur (1961) *A Short History of Astronomy*. New York: Dover Publications, Inc., 1961. First Published 1898.
- Blackburn, Simon (1984) *Spreading the Word*. Oxford: Clarendon Press.
- Brenann, R. (1996) *Heisenberg Probably Slept Here* (New York: John Wiley & Sons, Inc.)
- Bridgman, Percy W. (1951) *The Logic of Modern Physics*. New York: The MacMillan Company. First published, 1927.
- Brody, Baruch A. & Grandy, Richard E. (1989)(eds.) *Readings in the Philosophy of Science*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Buchwald, Jed Z. (1992) "Kinds and the Wave Theory of Light," *Studies in the History and Philosophy of Science*, Vol. 23, No. 1: 39-74.
- Burge, Tyler (1992) "Philosophy of Language and Mind: 1950-1990," *Philosophical Review*, Vol. 101, No. 1: 3-51
- Campbell, Norman R. (1957) *Foundations of Science: The philosophy of Theory and Experiments*. (Formerly Titled: *Physics: The Elements*.) New York: Dover Publications, Inc., First published 1920.
- Carnap, Rudolf (1936/37) *Testability and Meaning*, *Philosophy of Science*, Vol.3:420-471; Vol 4: 2-40.
- (1939) "Foundations of Logic and Mathematics, ch.23-ch.25," in Brody, Baruch & Grandy, Richard E. (1989)(ed.) re-titled as "Theories as Partially Interpreted Formal Systems," pp. 5-12.
- (1966) *Philosophy Foundation of Physics*. New York: Basic Books, Inc.
- Chappell, Vere (1992)(ed.) *Seventeenth-Century Natural Scientists*. (Essays on Early Modern Philosophy Series, Vol. 7) New York: Garland Publishing, Inc.
- Chang, C. C. (1990) *Model Theory*, 3rd ed. Amsterdam: North-Holland.
- Chen, Rueylin (2000) "Theory Versions Instead of Articulations of a Paradigm," *Studies in History and Philosophy of Science*, 31A, No. 3: 449-471.
- (2004) "Testing through Realizable Models," *NTU Philosophical Review*, No. 27: 61-117. The script was presented at the Conference on *Logic, Methodology, and Philosophy of Science* in Taiwan, The Institute of Mathematics, Academie Sinica, in June.
- Chen, Xiang (1995) "Taxonomic Changes and The Particle-Wave Debate in Early Nineteenth-century Britain," *Studies in History and Philosophy of Science*, Vol. 26, No. 2: 251-271.
- Churchland, Paul (1984) *Matter and Consciousness*. Massachusetts: The MIT Press.
- (1989) *A Neurocomputational Perspective: The Nature of Mind and the Structure of Science*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

- (1995) *The Engine of Reason, the Seat of the Soul*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Churchland, Paul M. & Hooker, Clifford A. (1985)(eds.) *Images of Science*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Cohen, I. Bernard (1980) *The Newtonian Revolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- (1982) “The *Principia*, Universal Gravitation, and the ‘Newtonian Style’, in Relation to the Newtonian Revolution in Science,” in Zev Bechler (1982)(ed.) *Contemporary Newtonian Research*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, pp. 21-108.
- (1988) “Newton's Third Law and Universal Gravity,” in Scheurer, P. B. & Debrock, G. (1988)(eds.), pp. 25-53.
- (1992) “Hypotheses in Newton's Philosophy,” in Chappell, Vere(1992)(ed.) *Early Modern Philosophy, Vol 7. Seventeenth-Century Natural Scientists*. New York: Garland Publishing, Inc., pp. 205-226.
- Cohen, R. S. (1955) “Hertz's Philosophy of Science: An Introductory Essay,” in *Principles of Mechanics*.
- Crosbie, Smith (1990) “Energy,” in *Companion to the History of Modern Science*, eds. by R. C. Olby, et. al.(1990), pp. 326-341.
- Cruse, D. A. (1986) *Lexical Semantics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Da Costa, Newton C. & French, Steven (1990) “The Model-Theoretic Approach in the Philosophy of Science,” *Philosophy of Science*, 57 (1990), pp. 248-265.
- D'Agostino, Salvo (1998) “Hertz's View on the Methods of Physics: Experiment and Theory Reconciled?” in *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*, pp. 89-102.
- Debus, Allen G. (1978) *Man and Nature in the Renaissance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- De Gandt, François (1995) tr. by Curtis Wilson, *Force and Geometry in Newton's Principia*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Descartes, René (1983) tr. by Valentine R. Miller & Reese P. Miller, *Principles of Philosophy*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- (1954) *Philosophical Writings: A Selection*. Tr. and ed. by Anscombe, Elizabeth and Geach, Peter. London: Macmillan Press.
- Dijksterhuis, E. J. (1986) tr. by Dikshoorn, C., *The Mechanization of the World Picture*. Princeton: Princeton University Press.
- Dobbs, B. J. T. (1975) *The Foundations of Newton's Alchemy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- (1982) “Newton's Alchemy and his ‘Active Principle’ of Gravitation,” in Scheurer, P. B. & Debrock, G. (1988)(eds.) *Newton's Scientific and Philosophical Legacy*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, pp.55-80.
- (1991) *The Janus Faces of Genius*. Cambridge: Cambridge University Press.

- (1992) “Newton’s Alchemy and His Theory of Matter,” in Chappell, Vere (ed.) *Seventeenth-Century Natural Scientists* (Essays on Early Modern Philosophers, Vol. 7). New York: Garland Publishing.
- Douglas, Mary & Hull, David (1992)(eds.) *How Classification Works-Nelson Goodman among the Social Science*. Edinburgh: Edinburgh University Press.
- Dugás, Rene (1988) *A History of Mechanics*, tr. by J. R. Maddox. New York: Dover Publications, Inc. First Published 1955.
- Duhem, Pierre (1991) *The Aim and Structure of Physical Theory*, tr. by Philip P. Wiener in 1954. Princeton: Princeton University press, 1991. First Published 1906 in French.
- (1980) *The Evolution of Mechanics*, tr. by Michael Cole. Maryland: Sijoff & Noordhoff.
- Eisberg, R. & Resnick R. (1985) *Quantum Physics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Estes, W. K. (1994) *Classification and Cognition*. Oxford: Oxford University Press.
- Faraday, M. (1859) *Experimental Researches in Electricity*. New York: Dover Publications, Inc.
- Fauvel, J., et. al. (1988)(eds.) *Let Newton Be!*. New York: Oxford University Press.
- Feyerabend, Paul (1962) “Explanation, Reduction and Empiricism,” in *Realism, Rationalism and Scientific Method: Philosophical Papers*, Vol.1. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.
- (1975) *Against Method*. Revised Edition. London: Verso, 1988.
- Forbes, Eric G. (1990) “The Comet of 1680-1681,” in Thrower, Norman J. W. (1990)(ed.) *Standing on the Shoulder of Giants*. Berkeley: University of California Press, pp. 312-323.
- Franklin, Allan & Howson, Colin (1998) “Comment on ‘The structure of a scientific paper’ by Frederick Suppe,” *Philosophy of Science* 65 (September): 411-416.
- Freudenthal, Hans (1961)(ed.) *The Concept and the Role of Model in Mathematics and Natural and Social Science*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Fu Daiwie (1986) *Problem Domain and Developmental Strategies –A Study on the Logic of Competition and Development of Scientific Programs*. Columbia University Dissertation.
- (1995) “Higher Taxonomy and Higher Incommensurability,” *Studies in History and Philosophy of Science*, Vol. 26, No. 2: 273-294.
- Garber, Daniel (1995) “Leibniz: Physics and Philosophy,” in Jolley, Nicholas (ed.) *The Cambridge Companion to Leibniz* (Cambridge: Cambridge University), pp. 284-293.
- (2001) *Descartes Embodied: Reading Cartesian Philosophy through Cartesian Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gaukroger, S. Schuster, John, & Sutton, John (2000) *Descartes’ Natural Philosophy*. London: Routledge Press.

- Gentner, Dedre & Stevens, Albert L. (1983) *Mental Models*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Giere, Ronald N. (1979) *Understanding Scientific Reasoning*. Chicago: Holt, Rinehart and Winston, Inc.
- (1985) “Constructive Realism,” in P. Churchland & C. Hooker (1985)(eds.) *Images of Science*. Chicago: The University of Chicago Press, pp. 75-98.
- (1985a) “Philosophy of Science Naturalized,” *Philosophy of Science* 52: 331-356. Reprinted in B. Brody & R. Grandy (1989)(eds.) *Readings in the Philosophy of Science*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, pp. 279-397.
- (1988) *Explaining Science: A Cognitive Approach*. Chicago: The University of Chicago Press.
- (1992)(ed.) *Cognitive Models of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- (1994) “The Cognitive Structure of Scientific Theories,” *Philosophy of Science* 61: 276-296.
- (1999) *Science without Laws*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Gillett, Grant (1992) *Representation, Meaning and Thought*. Oxford: Clarendon Press.
- Gjertsen, Derek (1988) “Newton's Success,” in Fauvel, J., et. al. (1988)(eds.) *Let Newton Be!*. New York: Oxford University Press, pp. 23-41.
- Goldstein, Herbert (1980) *Classical Mechanics, 2nd ed.* New York: Addison-Wesley.
- Golinsky, Jan (1988) “The secret life of an alchemist,” in Fauvel, J., et. al. (1988)(eds.) *Let Newton Be!*. New York: Oxford University Press, pp.147-167.
- Gooding, David (1990) *Experiment and the Making of Meaning*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- (1992) “The Procedural Turn; or, Why do Thought Experiments Work?” in Giere (1992)(ed.) *Cognitive Models of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, pp. 45-76.
- Gooding, D. & Pinch, T. & Schaffer, S. (1989)(eds.) *The Use of Experiment: Studies in the Natural Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Goodman Nelson (1983) *Fact, Fiction, and Forecast*. 4th ed. published in Cambridge, Mass.: Harvard University Press. First published 1955.
- Greenslade, Jr., Thomas B. (1985) “Atwood's Machine,” *The Physics Teacher*, January, 1985: 24-28.
- Greenwood, D. T. (1967) *Principles of Dynamics*. Englewood Cliff, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Grosser, Morton (1979) *The Discovery of Neptune*. New York: Dover Publications, Inc., 1979. First published 1962.
- Gutting, Gary (1980) *Paradigm and Revolution*. London: University of Notre Dame Press.

- Hacking, Ian (1983) *Representing and Intervening*. Cambridge: Cambridge University Press.
- (1993) “Working in a New World: The Taxonomic Solution,” in Paul Horwich (1993)(ed.) *World Changes*. Massachusetts: The MIT Press, pp.275-310.
- Hackmann, W. D. (1989) “Scientific instruments: Models of Brass and Aids to Discovery,” in Gooding et. al. (1989)(eds.) *The Use of Experiment: Studies in the Natural Science*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 31-65.
- Hankins, Thomas, L. (1985) *Science and Enlightenment*. Cambridge: Cambridge University.
- Halliday, D. & Resnick, R. (1986) *Fundamentals of Physics*, 2nd extended version. New York: John Wiley & Sons Press.
- Hanson, N. R. (1965) *Patterns of Discovery*. Cambridge: Cambridge at the University Press, 1965. First Published 1958.
- Hardcastle, Valerie G. (1999) “Scientific Papers Have Various Structures,” *Philosophy of Science* 66 (September): 415-439.
- Harrison, Edward (1987) *Darkness at Night: A Riddle of the Universe*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Hempel, Carl G. (1950) “Problems and Changes in the Empiricist Criterion of Meaning,” *Revue Internationale de Philosophie* 11: 41-63. Reprinted in Hempel (1965) *Aspects of Scientific Explanation and Other Essay in the Philosophy of Science*. New York: Free Press, pp. 101-119, re-titled as “Empiricist Criteria of Cognitive Significance: Problems and Changes.”
- (1952) “Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science,” in *Foundation of the Unity of Science*, Vol. 2. Chicago: The University of Chicago, 1970.
- (1958) “Theoretician's Dilemma,” reprinted in Hempel(1965) *Aspects of Scientific Explanation and Other Essay in the Philosophy of Science*. New York: Free Press, pp. 173-226.
- (1965) *Aspects of Scientific Explanation and Other Essay in the Philosophy of Science*. New York: Free Press.
- Henry, John (1988) “Newton, matter, and magic,” in Fauvel, J., et. al. (1988)(eds.) *Let Newton Be!*, pp. 127-145.
- Hertz, Heinrich (1956) *The Principles of Mechanics: Presented in a new form*. New York: Dover Publications, Inc.
- Hesse, Mary (1962) *Forces and Fields: The concept of Action at a Distance in the history of physics*. Westport, Connecticut: Greenwood Press, publishers.
- (1966) *Models and Analogies in Science*. Notre Dame: University of Notre Dame Press.
- Horwich, Paul (1993)(ed.) *World Changes*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Hoynigen-Heune, P. (1993) *Reconstructing Scientific Revolutions*. Chicago: The University of Chicago Press.

- Huges, David W. (1990) "Edmund Halley: His Interest in Comet," in Thrower, Norman J. W. (1990)(ed.) *Standing on the Shoulder of Giants*. Berkeley: University of California Press, pp. 324-372.
- Hall, A. Rupert (1980) *Philosopher at War*. Cambridge: Cambridge University Press.
- (1992) "Huygens and Newton," in Chappell, Vere(ed.) *Seventeenth-Century Natural Scientists*. (Essays on Early Modern Philosophy, Vol. 7.) New York: Garland Publishing, pp. 167-181.
- Johnson-Laird, P. N. (1983) *Mental Models*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Jolley, Nicholas (1995)(ed.) *The Cambridge Companion to Leibniz*. Cambridge: Cambridge University.
- Keil, Frank C. (1989) *Concepts, Kinds, and Cognitive Development*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Kitcher, Philip (1978) "Theories, Theorists, and Theoretical Change," *The Philosophical Review* 87, No.4. (October 1978): 519-547.
- (1992) "The Naturalists Return," *The Philosophical Review*, Vol. 101, No.1: 53-114.
- Koyré, Alexandre (1957) *From the Closed World to Infinite Universe*. Baltimore: The Johns Hopkins University.
- (1965) *Newtonian Studies*. Chicago: The University of Chicago. First Phoenix Edition 1968.
- Kuhn, T. (1957) *The Copernican Revolution*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- (1961) "The Function of Measurement in Modern Physics," in Kuhn (1977) *The Essential Tension*. Chicago: The University of Chicago Press, pp. 240-265.
- (1962) *The Structure of Scientific Revolution (SSR)*. Chicago: The University of Chicago Press. 2nd ed. is published in 1970.
- (1964) "A Function for Thought Experiments," in Kuhn(1977), pp.240-265.
- (1968) "The Relations between the History and the Philosophy of Science," revised 1976, in Kuhn(1977), pp. 3-20.
- (1970a) "Reflection on My Critics," in *Criticism and the Growth of Knowledge*, ed. by I. Lakatos and A. Musgrave. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 231-278
- (1970b) "Postscript—1969," in *The Structure of scientific revolution*. 2nd ed.
- (1976) "Mathematical versus Experimental Traditions in Development of Physical Science," in Kuhn(1977), pp. 31-65.
- (1977) *The Essential Tension*. Chicago: The University of Chicago Press.
- (1979) "Metaphor in Science," in *Metaphor in Thought*, ed. by A. Ottony. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 409-419.
- (1983) "Commensurability, Comparability, Communicability," in *PSA 1982 Proceedings of the 1982 Biennial Meeting of the Philosophy of*

- Science Association*, ed. by P. D. Asquith and T. Nickles. East Lansing: Philosophy of Science Association, pp. 669-688.
- (1987) “What is Scientific Revolution?” in Lorenz Krüger, Loraine J. Daston, and Michael Heidelberger (1987)(eds.) *The Probabilistic Revolution, Vol: Ideas in History*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- (1987a) *The Presence of Past Science*. The Shearman Memorial Lecture. London: University College, London.
- (1989) “Possible Worlds in History of Science,” in *Possible Worlds in Humanities, Arts, and Sciences*, ed. by S. Allen. Berlin: de Gruyter Press, pp. 9-32.
- (1990) “Dubbing and Redubbing: the Vulnerability of Rigid Designation,” in *Scientific Theories*, ed. by C. W. Savage. Minneapolis: University of Minnesota Press, pp. 298-318.
- (1993) “Afterwords,” in Horwich, Paul (1993)(ed.) *World Changes*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, pp. 311-341.
- (2001) *The Road since Structure*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Lakoff, George (1987) *Women, Fire, and Dangerous Things*. Chicago: The University of Chicago Press.
- (1987a) “Cognitive models and Prototype theory,” in Neisser, U. (1987)(ed.) *Concepts and Conceptual Development: Ecological and Intellectual Factors in Categorization*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 64-100.
- Lakatos, Imre & Musgrave (1970)(eds.) *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lakatos, Imre (1978) *The Methodology of Scientific Research Programmes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Laudan, Larry (1977) *Process and Its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. Berkeley: University of California Press.
- Lea, Susan M. & Burke, John R. (1997) *Physics: The Nature of Things*. New York: Brooke/Cole Publishing Company & West Publishing company.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm (1976) ed. by Leroy E. Loemker, *Leibniz: Philosophical Papers and Letters*. Texts and Studies in the History of Logic and Philosophy Series. Dordrecht: D. Reidel Publishing.
- Liu, Chung (1997) “Models and theories I : the semantic view revisited,” *International Studies in the Philosophy of Science* 11(2): 147-164.
- (1998) “Models and theories II : issues and applications,” *International Studies in the Philosophy of Science* 12(2): 111-127.
- Lloyd, Elisabeth A. (1983) “The Nature of Darwin's Support for the Theory of Natural Selection,” *Philosophy of Science*, Vol. 50: 112-129.
- (1984) “A semantic Approach to the Structure of Population Genetics,” *Philosophy of Science*, Vol. 51: 242-264.
- (1989) “A Structural Approach to Defining Units of Selection,” *Philosophy of Science*, Vol. 56: 395-418.
- Lützen, Jesper (1998) “Hertz and the Geometrization of Mechanics,” in *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*, pp. 103-121.

- Mach, Ernst (1960) *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*. 6th ed., tr. by Thomas J. McCormack. Illinois: The Open Court Publishing Co.
- Marion, Jerry B. & Thornton, Stephen T. (1988) *Classical Dynamics of Particles and Systems, 3rd ed.* San Diego: Harcourt Brace Jovanovich, Publishers.
- Markman, Ellen M. (1989) *Categorization and Naming in Children*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Maxwell, J. C. (1954) *A Treatise on Electricity and Magnetism*. 3rd. edn. New York; Dover publications, Inc., 1954. First published 1891.
- Mechelen, Iven Van & Hampton, James & Michalski Ryszard S. & Theuns, Peter (1993) *Categories and Concepts: Theoretical Views and Inductive Data Analysis*. London: Academic Press.
- Miller, A. (1987) *Imagery in Scientific Thought*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Morgenbesser, Sidney (1961)(ed.) *Philosophy of Science*. New York: Basic Books, Inc., Publishers.
- Moyal, G. J. D. (1991)(ed.) *René Descartes: Critical Assessments, Vol. 4 The Sciences; From Physics to Ethics*. London: Routledge Press.
- Nagel, Ernst (1961) *The Structure of Science*. New York: Harcourt, Brace.
- Nagel, Ernst & Suppes, Patrick & Tarski, Alfred (1962)(eds.) *Logic, Methodology and Philosophy of Science*. Standford: Standford University Press.
- Neisser, Ulric (1987) *Concepts and Conceptual Development: Ecological and Intellectual Factors in Categorization*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nersessian, Nancy J. (1984) *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- (1987)(ed.) *The Process of Science: Contemporary Philosophical Approaches to Understanding Scientific Practice*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- (1992) “How Do Scientists Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science,” in Giere (1992)(ed.) *Cognitive Models of Science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, pp. 3-44.
- Neurath, Otto & Carnap, R. & Morris, Charles (1938)(eds) *Foundations of the Unity of Science: Toward an International Encyclopedia of Unified Science*, Volume 1. Chicago: The University of Chicago, 1969.
- (1939) *Foundations of the Unity of Science: Toward an International Encyclopedia of Unified Science*, Volume 2. Chicago: The University of Chicago, 1970.
- Newton, Issac (1962) *Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of The World*. Tr. by Florian Cajori. New York: Greenwood Press, 1962.
- (1953) *Newton's Philosophy of Nature: Selections from his writings*, ed. by H. S. Thayer. New York: Hafner Publishings Co.
- Nickles, Thomas (1977) “Heuristics and Justification in Scientific Research: Comments on Shapere,” in Suppe(1977), pp. 571-589.

- Nordmann, Alfred (1998) “ ‘Everything could be different’ :The Principles of Mechanics and the Limit of Physics,” in *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*, pp. 155-171.
- Norwood, Joseph Jr. (1979) *Intermediate Classical Mechanics*. Englewood cliffs, N. J.: Prentice-Hall, Inc.
- Poincaré, Henri (1952) *Science and Hypothesis*. New York: Dover Publications, Inc.
- Popper, Karl (1959) *The Logic of Scientific Discovery*. New York: Harper & Row, Publishers. 2nd., 1968.
- (1970) “Normal Science and its Dangers,” in Lakatos & Masgrave (1970)(eds.) *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 51-58.
- Putnam, Hilary (1962) “What Theories Are Not,” in Nagel, Ernst & Suppes, Patrick & Tarski, Alfred (1962)(eds.) *Logic, Methodology and Philosophy of Science*. Stanford: Stanford University Press, pp.240-251.
- Quine, W. V. (1960) *Words and Objects*. Published jointly by The MIT & John Wiley & Sons, Inc.
- (1974) *The Root of Reference*. La Salle, Illinois: Open Court Publishing Company.
- Reichenbach, Hans (1969) *Axiomatization of the Theory of Relativity*, tr. by Maria Reichenbach. Berkeley & Los Angeles: University of California Press.
- Roche John (1988) “Newton's *Principia*,” in Fauvel, J., et. al. (1988)(eds.) *Let Newton Be!*. New York: Oxford University Press, pp. 43-61.
- Rogers, G. A. (1992) “Descartes and the Method of English Science,” in Chappell Vere(ed.) *Seventeenth-Century Natural Scientists*. (Essays on Early Modern Philosophy Series, Vol 7.) New York: Garland Publishing, Inc., pp. 65-83.
- Rosch, Eleanor H. (1973) “Natural Categories,” *Cognitive Psychology* 4: 328-350.
- (1975) & Mervis, Carolyn. B. “Family Resemblances: Studies in the Internal Structure of Categories,” in *Cognitive Psychology* 7: 573-605.
- (1976) et. al., “Basic Objects in Natural Categories,” *Cognitive Psychology* 8: 382-439.
- (1978) “Principle of Categorization,” in Rosch, E. & Lloyd, B.(eds.) *Cognition and Categorization*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, pp. 27-48.
- Rosenberg, Alex (1996) “A Field Guide to Recent Species of Naturalism,” in *Britian Journal for Philosophy of Science* 47: 1-29.
- Roseveare, N. T. (1982) *Mercury's Perihelion: From Le Verrier to Einstein*. Oxford: Clarendon Press.
- Rutherford, Donald (1995) *Leibniz and the Rational Order of Nature*. Cambridge: Cambridge University.
- Saunders, Simon (1998) “Hertz's Principles,” in *Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosopher*, pp. 123-154.
- Savile, Anthony (2000) *Leibniz and Monadology*. London: Routledge Press.

- Schaffer, Simon (1990) "Halley, Delisle, and the Making of the Comet," in Thrower, Norman J. W. (1990)(ed.) *Standing on the Shoulder of Giants*. Berkeley: University of California Press, pp. 254-298.
- Scheurer, P. B. & Debrock, G. (1988)(eds.) *Newton's Scientific and Philosophical Legacy*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Sears, F., Zemansky, M., & Young, H. (1982) *University Physics*. Addison-Wesley Publishing Co., Inc.
- Shapere, Dudley (1964) "The Structure of Scientific revolution," reprinted in Gutting, G. (1980)(ed.), pp. 27-38.
- (1977) "Scientific Theories and Their Domains," in Suppe(1977), *The Structure of Scientific Theories*, 2nd ed. Urbana: University of Illinois Press, pp. 518-565.
- (1984) *Reason and The Search for Knowledge: Investigation in the Philosophy of Science*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- (1984a) "Remark on The Concepts of Domain and Field," in Shapere(1984), *Reason and The Search for Knowledge: Investigation in the Philosophy of Science*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, pp. 320-324.
- (1987) "External and Internal Factors in the Development of Science," *Science and Technology Studies* 4, pp. 1-9.
- (1988) "Discussion: Doppelt Crossed," *Philosophy of Science* 55, pp.134-140.
- (1989) "Evolution and Continuity in Scientific Change," *Philosophy of Science* 56, pp. 419-437.
- Smith, Edward E. & Medin, Douglas L. (1981) *Categories and Concepts*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Sneed, Joseph D. (1979) *The Logic Structure of Mathematical Physics*, 2nd ed. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company. First Published 1971.
- Snelders, H. A. M. (1992) "Christiaan Huygens and the Concept of Matter," in Chappell, Vere(ed.) *Essay on Early Modern Philosophers*. New York: Garland Publishing, pp. 182-203.
- Spiegel, M. R. (1967) *Theoretical Mechanics*. Rensselaer Polytechnic Institute.
- Stegmüller, Wolfgang (1976) *The Structure and Dynamics of Theories*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- (1979) *The Structuralist View of Theories: A Possible Analogue of Bourbaki Programme in Physical Science*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Suppe, Frederick (1977)(ed.) *The Structure of Scientific Theories*, 2nd ed. Urbana: University of Illinois Press. First published 1974.
- (1989) *The Semantic Concept of Theories and Scientific Realism*. Urbana: University of Illinois Press.
- (1998) "The Structure of a Scientific Paper," *Philosophy of Science* 65: 381-405.
- Suppes, Patrick (1957) *Introduction to Logic*. Princeton: D. Van Nostrand Company, Inc.
- (1961) "A Comparison of the Meaning and Uses of Models in Mathematics and the Empirical Science," in Freudenthal, Hans

- (1961)(ed.) *The Concept and Role of the Mathematics and Natural Science*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- (1967) “What Is a Scientific Theory?” in Morgenbesser, Sidney (1967)(ed.) *Philosophy of Science*. New York: Basic Books, Inc., Publishers, pp. 55-67.
- (1977) “The Structure of Theories and the Analysis of Data,” in Suppe(1977) (ed.), pp. 3-241.
- (1993) *Models and Methods in the Philosophy of Science: Selected Essays*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Sutcliffe, John P. (1993) “Concept, Class, and Category in the Tradition of Aristotle,” in Mechelen, Iven Van, et. al. (1993)(eds.) *Categories and Concepts: Theoretical Views and Inductive Data Analysis*. London: Academic Press, pp. 35-66.
- Thagard, Paul (1988) *Computational Philosophy of Science*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- (1992) *Conceptual Revolutions*. Princeton: Princeton University Press.
- Thompson, Paul (1983) “Tempo and Mode in Evolution; Punctuated Equilibria and The Modern Synthetic Theory,” *Philosophy of Science*. Vol. 50: 432-452.
- (1988) “Some Punctuationists are wrong about Synthesis,” *Philosophy of Science*. Vol. 55: 74-86.
- Thrower, Norman J. W. (1990)(ed.) *Standing on the Shoulder of Giants*. Berkeley: University of California Press.
- Timoshenko, S. & Young, D. H. (1948) *Advanced Dynamics*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Toulmin, S. (1970) “Does the Distinction between Normal and Revolutionary Science Hold Water?” in Lakatos & Masgrave (1970)(eds.) *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 39-47.
- Truesdell, C. (1968) “A Program toward Rediscovery the Rational Mechanics of the Age of Reason,” in Truesdell, C. (1968) *Essays in the History of Mechanics*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- (1968) *Essays in the History of Mechanics*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- (1982) *An Idiot's Fugitive Essays on Science: Methods, Criticism, Training, Circumstances*. New York: Springer-Verlag.
- Van Fraassen, Bas C. (1970) “On the Extension of Beth's Semantics of Physical Theories,” *Philosophy of Science*, September, 1970: 325-339.
- (1980) *The Scientific Image*. Oxford: Clarendon Press.
- (1987) “The Semantic Approach to Scientific Theories,” in Nersessian(1987)(ed.) *The Process of Science: Contemporary Philosophical Approaches to Understanding Scientific Practice*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, pp. 101-124.
- (1989) *Laws and Symmetry*. Oxford: Clarendon Press.
- Waff, Craig B. (1990) “The First International Halley Watch: Guiding the Worldwide Search for Comet Halley, 1755-1759,” in Thrower, Norman J. W. (1990)(ed.), pp. 373-411.

- Westfall, Richard (1971) *Force in Newton's Physics: The Science of Dynamics in the Seventeenth Century*. New York: American Elsevier Press.
- (1977) *The Construction of Modern Science: Mechanism and Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- (1980) *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- (1984) “Newton and Alchemy,” in Brian Vicker (1984)(ed.) *Occult and Scientific Mentalities in the Renaissance*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 315-335.
- Wittgenstein, Ludwig (1968) *Philosophical Investigation*. Oxford: Basil Blackwell. First published 1955.
- Wolf, Abraham (1999) *A History of Science, Technology and Philosophy in the 16th, 17th and 18th Centuries*, Vol. 1 & 2. Bristol: Thoemmes Press.
- Woolhouse, R. S. (1994) *Leibniz: Critical Assessments*, Vol. 1. London: Routledge Press.
- Yang, C. M. (1997) “Element Model Theory,” The Lectures in Department of Philosophy, Taiwan University.

索引

二劃

- 力學(mechanics) · ii, iv, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 16, 23, 26, 27, 29, 32, 35, 38, 39, 45, 46, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 72, 73, 75, 78, 79, 80, 87, 88, 89, 92, 94, 97, 98, 99, 100, 102, 107, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 118, 119, 122, 131, 133, 137, 138, 139, 142, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 155, 156, 157, 159, 160, 161, 163, 164, 165, 166, 171, 172, 173, 174, 182, 186, 189, 193, 194, 195, 196, 197, 202, 203, 204, 206, 207, 208, 209, 210, 216, 217, 218, 220, 223, 227, 229, 230, 233, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243
- 力學原理(the principles of mechanics) · ii, 6, 9, 12, 147, 148, 150, 151, 152, 153, 157, 165

三劃

- 三大運動定律(the three laws of motion) · 14, 46, 131, 133, 144, 152, 164, 166, 171, 195

四劃

- 不可共量性(incommensurability) · 41, 42, 43, 46, 49, 53, 58, 245
- 不可翻譯性(untranslatability) · 42, 43, 45, 46
- 公認觀點(received view) · 2, 13, 17, 221, 222, 232
- 分析力學(analytic mechanics) · 148, 166
- 分疇(categorization) · i, ii, iv, 7, 9, 12, 40, 41, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 67, 79, 81, 94, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 109, 112, 118, 119, 124, 131, 133, 137, 138, 143, 144, 146, 147, 149, 157, 158, 159, 161, 163, 165, 170, 171, 172, 174, 175, 186, 196, 197, 202,

- 203, 245
- 分類(taxonomy) · i, ii, iv, 7, 9, 10, 12, 15, 20, 24, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 75, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 87, 88, 91, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 109, 116, 118, 119, 122, 131, 132, 133, 135, 143, 144, 145, 146, 147, 152, 153, 155, 157, 158, 159, 160, 161, 163, 165, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 183, 186, 187, 196, 202, 203, 206, 207, 209, 215, 220, 245
- 分類樹(taxonomic tree) · 8, 41, 42, 47, 59, 61, 62, 63, 64, 72, 80, 122, 157, 159, 160, 163
- 分類轉向(taxonomic turn) · 41
- 化約主義(reductionism) · 40
- 化約句(reduction sentence) · 17, 226
- 反樹狀分類(anti-taxonomy) · 63
- 天寰(heaven) · 197, 198, 199, 202, 210, 211
- 太陽中心說(the heliocentric theory) · 97, 198
- 孔恩(Thomas Kuhn) · i, 2, 8, 9, 11, 12, 13, 16, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 53, 55, 58, 62, 63, 64, 66, 81, 83, 98, 99, 100, 106, 108, 118, 133, 139, 147, 148, 166, 171, 176, 177, 178, 187, 191, 192, 193, 219, 221, 236, 243, 245
- 心物二元論(dualism) · 173, 204
- 心智表徵(mental representation) · 2, 65, 73
- 心智建構(mental constructs) · 17, 124
- 心智密碼(mental code) · 130
- 文藝復興(Renaissance) · 122, 176, 204
- 方法論(methodology) · ii, 5, 10, 12, 123, 140, 147, 150, 151, 161, 167, 168, 169, 170, 171, 173, 174, 175, 177, 178, 179, 181, 182, 184, 186, 189, 191, 192, 193, 203, 204, 205, 206, 207, 209, 215, 216, 218
- 牛頓(Isaac Newton) · ii, iii, iv, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 23, 29, 32, 38, 39, 45, 46, 51, 52, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 73, 74, 79, 80, 92, 93, 94, 97, 98, 99, 100, 102, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 115, 116, 118, 119, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128,

129, 130, 131, 132, 133, 134, 135,
136, 137, 138, 139, 140, 141, 142,
143, 144, 145, 146, 147, 148, 149,
150, 152, 154, 156, 157, 158, 159,
160, 161, 163, 164, 165, 166, 169,
171, 172, 173, 174, 175, 181, 183,
184, 185, 186, 189, 190, 191, 192,
193, 195, 205, 206, 207, 210, 211,
212, 213, 214, 215, 216, 217, 218,
219, 220, 223, 227, 228, 229, 230,
230, 235, 236, 238, 241, 242, 243

牛頓力學(Newtonian mechanics) · 6,
12, 16, 45, 59, 97, 98, 109, 110, 111,
113, 118, 122, 149, 161, 164, 165,
186, 189, 210, 218, 220, 223, 227,
229, 230, 236, 241, 242, 243

牛頓主義(Newtonianism) · 149, 171,
174, 186, 189, 190, 193, 216, 217

牛頓風格(Newtonian Style) · 123, 124

五劃

主題分類(taxonomy in subject) · ii, 7,
9, 57, 60, 62, 63, 81, 131, 143, 147,
157, 159

以太(aether) · 19, 97, 108, 147, 171,
198, 210, 217

卡文迪士(Henry Cavendish) · 93, 94,
96, 191

卡納普(Rudolf Carnap) · 2, 13, 17, 161,
222, 223, 225, 226, 227, 240

可落實模型(realizable model) · i, 8, 81,
88, 89, 90, 91, 94, 124, 146, 161,
172

古典力學(classical mechanics) · 6, 9,
35, 38, 59, 72, 78, 88, 97, 98, 99,
100, 101, 109, 110, 113, 118, 119,
147, 149, 158, 161, 163, 165, 193,
218, 235, 236, 237, 238, 239

史尼德(Joseph Sneed) · 11, 24, 231,
233, 234, 236, 238, 240, 242, 243,
244

句法進路(syntactic approach) · 2, 14

句法學(syntax) · 21

外延主義(extendionalism) · 40

尼可拉斯(Thomas Nickles) · 104, 105,
106

布里奇曼(Percy W. Bridgman) · 17,
225

生成力(generative power) · 169

生成路徑(generative pathway) · ii, 170,
175

目的論(teleology) · 108, 111, 171, 181

目標(goal) · 1, 5, 10, 11, 12, 13, 15, 21,
47, 53, 65, 70, 88, 98, 100, 125, 129,
134, 142, 145, 147, 152, 166, 170,
171, 173, 174, 175, 177, 181, 182,
186, 192, 203, 204, 206, 207, 209,
215, 219, 225

六劃

再呈現模式(mode of representation) ·
151, 152

吉伯特(William Gilbert) · 176

吉爾(Ronald Giere) · i, 2, 11, 12, 40,
60, 66, 70, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 79,
114, 116, 223, 231

同構關係(isomorphic relationship) · 35,
36, 39, 89, 118

向心力(central force) · 7, 52, 54, 56, 61,
63, 73, 74, 89, 90, 110, 111, 113,
114, 115, 116, 121, 124, 125, 126,
127, 128, 129, 130, 132, 133, 134,
135, 136, 138, 140, 141, 143, 144,
145, 157, 160, 161, 211

向度(dimension) · 27, 36, 68, 71, 78,
113, 154, 194

地球中心說(the geocentric theory) · 97,
169

夸黑(Alexander Koyré) · 16, 171, 190,
192, 214

有序訓練元素(disciplinary matrix) ·
192

有效性(validity) · 29, 70

次要範疇(secondary categories) · 58,
60, 61, 113, 153, 158, 159

自由落體(free body) · 56, 73, 79, 80,
89, 91, 92, 109, 128, 167, 183, 212,
237

自然分類(natural classification) · 15

自然哲學(natural philosophy) · ii, 5, 6,
8, 9, 12, 30, 107, 108, 123, 124, 131,
142, 171, 173, 174, 175, 184, 186,
187, 189, 190, 203, 206, 209, 210,
213, 214, 215, 216

自然哲學的數學原理(Mathematical
Principles of Natural Philosophy) ·
9, 213

自然種類(natural kinds) · 30, 47

七劃

伽利略(Galileo Galilei) · 97, 122, 128,
152, 165, 167, 169, 171, 176, 189,

190, 193, 197, 206, 210, 213, 245
 作用力(impressed force) · 46, 124, 132, 133, 143, 216, 228, 235
 伯努利家族(Bernoulli family) · 165, 172, 216
 克拉克(Samuel Clarke) · 174, 190, 193, 214
 克普勒(Johannes Kepler) · 121, 122, 125, 126, 127, 130, 139, 140, 165, 169, 181, 189, 210, 213, 216
 克普勒定律(Kepler's laws) · 122, 127, 140, 211
 否定後件式(modus tollens) · 167
 坎貝爾(Norman R. Campbell) · 1, 16, 17, 18, 19
 局部—整體連結(part-whole links) · 50
 形上學(metaphysics) · 9, 39, 111, 123, 141, 173, 178, 187, 189, 190, 192, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 213, 215, 218
 形式系統(formal system) · 22, 23
 形式語意學(formal semantics) · 21
 形式類比(formal analogy) · 18, 20, 86
 更新(renovation) · iv, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 97, 98, 101, 175, 182, 187, 188, 205, 206, 207, 219
 杜恩(Pierre Duhem) · 15, 16, 17, 19, 94, 148
 沙普斯(Patrick Suppes) · 11, 23, 87, 231, 233, 235, 236, 242
 系統性(systematicity) · 3, 4, 5, 12, 13, 22, 27, 37, 43, 67, 108, 193, 219, 243
 系譜學(genealogy) · 186

八劃

亞里斯多德(Aristotle) · 45, 51, 53, 54, 58, 67, 97, 108, 133, 139, 143, 160, 169, 171, 173, 191, 210, 219
 典範(paradigm) · ii, 8, 9, 12, 35, 42, 97, 98, 99, 101, 102, 106, 118, 131, 142, 147, 148, 165, 166, 176, 177, 178, 191, 192, 193, 220, 221, 243
 典範版本(paradigmatic version) · 9, 101, 102, 165, 193
 函項關係 · 23, 37
 受力運動(forced motion) · 45, 156, 157, 159, 160
 帕特南(Hilary Putnam) · 2, 13, 42, 47, 221, 224
 性質連結(property links) · 50, 52
 拉卡托斯(Imre Lakatos) · ii, 5, 8, 9, 11,

12, 66, 99, 106, 166, 167, 168, 169, 173, 176, 177, 178, 179, 180, 182, 187, 193, 214, 219, 221
 拉格朗日(Luis de Lagrange) · 6, 14, 97, 98, 99, 100, 110, 111, 112, 113, 147, 149, 166, 218
 拉普拉斯(Pierre Simon de Laplace) · 6, 97, 100, 217, 218
 拓樸形態(topological shape) · 159
 波以爾(Robert Boyle) · 16, 165
 波柏(Karl Popper) · 12, 99, 100, 115, 168, 171, 176, 191, 245
 法拉第(Michael Faraday) · 6, 16, 97, 100
 物質的量(the quantity of matter) · 58, 132, 142
 物質的慣性力(inertial force of matter) · 132
 物質遍在論(plentism) · 190, 195
 物質質點(material particle) · 153
 物質點(material point) · 153, 154, 158
 知識系統(systems of knowledge) · 13, 94, 189, 191, 192, 193
 空間規劃模型(model of space layouts) · 130
 空間幾何學(space geometry) · 155
 表象結構(representative structure) · 34, 35, 36
 阿特武德機(Atwood's machine) · 92, 95

九劃

保護帶(protective belt) · 8, 98, 166, 167, 168
 哈金(Ian Hacking) · i, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 50, 53, 61, 62, 63
 哈雷(Edmond Halley) · 121
 後裔理論版本(descendant version) · 169, 170
 柯亨(I. Bernard Cohen) · 123, 124, 125, 127, 136, 137, 139, 142
 柯特斯(Roger Cotes) · 174, 190, 193, 213, 214
 相互關係(correlation) · 54, 55, 57, 58, 60, 61, 133
 相對論(the theory of relativity) · 6, 14, 37, 97, 98, 99, 100, 101, 109, 161, 227
 研究方案(research programme) · ii, iii, 2, 8, 9, 10, 98, 100, 102, 106, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 182,

184, 187, 188, 189, 193, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 209, 213, 215, 216, 218

研究傳統(research tradition) · 2, 8, 98, 106, 177, 178, 179, 187, 188, 193

科學方略(scientific program) · ii, 176, 179, 180, 181, 182, 193

科學史(history of science) · 1, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 14, 16, 18, 23, 38, 40, 41, 42, 43, 47, 49, 63, 73, 87, 92, 97, 98, 99, 100, 101, 121, 123, 141, 147, 183, 185, 186, 189, 193, 197, 205, 207, 219, 220, 221

科學版圖(scientific territory) · 10, 163, 169, 219, 220

科學革命(scientific revolution) · 11, 41, 42, 46, 49, 51, 64, 98, 219, 220, 237

科學哲學(philosophy of science) · ii, iv, 1, 6, 7, 10, 13, 14, 15, 20, 24, 38, 41, 42, 43, 65, 66, 84, 101, 150, 179, 191, 193, 219, 221, 224, 231, 245

科學區分(scientific classification) · i, 7, 9, 12, 40, 41

科學理論(scientific theories) · i, iii, iv, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 43, 44, 45, 46, 50, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 70, 72, 75, 78, 79, 81, 88, 94, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 109, 115, 116, 118, 131, 141, 142, 147, 148, 163, 166, 170, 177, 179, 183, 186, 187, 190, 191, 202, 203, 209, 219, 220, 221, 222, 227, 231, 232, 233, 236, 238, 240, 241, 242, 243, 244, 245

科學種類(scientific kinds) · i, 42, 47, 48, 49, 50, 61

胡克(Robert Hooke) · 121, 126

范弗拉森(Bas C. van Fraassen) · i, 2, 29, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 73, 78, 231, 232, 233

英國倫敦皇家協會(Royal Society of London) · 121

述句(statement) · iii, 2, 3, 10, 13, 14, 17, 18, 20, 21, 23, 36, 74, 75, 221, 222, 223, 225, 227, 230, 232, 238, 240, 241, 242, 243

述句觀點(statement view) · iii, 2, 3, 10, 13, 14, 17, 18, 21, 23, 36, 221, 222, 223, 225, 227, 231, 233, 240, 241, 242, 243, 244

重力中心(centre of gravity) · 124, 125, 135, 137, 138, 144

重力定律(law of gravity) · 18, 46, 52, 63, 74, 93, 94, 122, 133, 166, 171

面積定律(law of area) · 121, 125, 126, 127, 128, 130

十劃

個例連結(instance links) · 50, 51, 52

原型(prototype) · i, ii, 9, 34, 38, 59, 60, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 78, 81, 82, 83, 84, 92, 93, 95, 96, 100, 102, 130, 165, 166, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 184, 193, 203, 219, 220

原型版本(prototypical version) · 9, 165, 166, 169, 174, 175, 193

原型度(prototypicality) · 68, 69

原核意含(primary nuclear sense) · 84, 87

哥白尼(Nicolaus Copernicus) · 97, 122, 167, 169, 171, 176, 197, 210

哲學原理(Principle of Philosophy) · ii, 6, 12, 107, 193, 194, 195, 197, 202, 203, 204, 209, 210

夏佩爾(Dudley Shapere) · 2, 66, 98, 99, 100, 104, 105, 106, 147

家族相似(family resemblance) · 12, 68, 69, 71, 72, 75, 81, 82, 87, 100, 116, 119, 147, 163

庫倫定律(Coulomb's law) · 18

效益觀(utilitarianism) · 206

海絲(Mary B. Hesse) · 18, 19, 20

特置修正(ad hoc revision) · 179, 182

特置假設(ad hoc hypothesis) · 167, 169, 180

真空(vacuum) · 194, 215

納格爾(Ernest Nagel) · 17, 18, 20, 36, 56, 242

訓練要素(disciplinary matrix) · 9

馬克士威爾(James Clerk Maxwell) · 6, 87, 97, 100, 104, 171

馬利翁(J. B. Marion) · 110

高德斯坦(H. Goldstein) · 110, 113

十一劃

假說(hypotheses) · 16, 25, 63, 73, 74, 75, 78, 114, 115, 116, 121, 131, 140, 141, 142, 166, 167, 168, 212, 214, 215, 217, 222, 231

動力學(dynamics) · 4, 6, 10, 11, 99, 110, 111, 137, 142, 145, 148, 150, 152, 153, 155, 163, 182, 216, 217,

- 235, 236, 242
- 區分(classification) · i, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 28, 29, 32, 39, 40, 41, 47, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 67, 71, 72, 84, 85, 86, 91, 94, 102, 104, 109, 113, 124, 131, 143, 144, 160, 163, 166, 173, 177, 178, 183, 194, 196, 197, 203, 204, 223, 224, 226, 227, 231, 236, 241, 243
- 問題領域(Problem Domain) · 176, 179, 180, 181, 182
- 問題轉移(problem-shift) · 167, 168, 182
- 基本層次類別(basic-level categories) · 68, 70, 71, 78
- 基本範疇(elementary categories) · 7, 52, 58, 60, 61, 109, 113, 118, 144, 153, 158, 159, 172, 177, 202
- 基層種(infima species) · 48, 49
- 崔斯戴(C. Truesdell) · 216
- 常態科學(normal science) · 12, 98, 177, 191
- 康德(Immanuel Kant) · 1, 150, 152, 153
- 啟發力(heuristic power) · 9, 10, 169, 175, 188, 203, 205, 218, 220
- 啟發功能(heuristic function) · ii, 9, 102, 169, 170, 171, 182, 187
- 啟發術(heuristics) · 8, 166, 167, 168
- 理性力學(rational mechanics) · 16, 23, 148, 165, 174, 186, 218
- 理性科學(rational science) · 148, 149, 191, 210
- 理論更新(theory renovation) · 5, 12
- 理論版本(theory version) · i, ii, iv, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 39, 40, 59, 63, 70, 79, 81, 91, 94, 97, 98, 100, 101, 102, 106, 107, 108, 109, 113, 118, 119, 121, 122, 131, 133, 142, 143, 147, 149, 150, 157, 161, 163, 164, 165, 166, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 182, 183, 184, 186, 187, 188, 189, 193, 196, 202, 203, 205, 206, 207, 208, 209, 216, 217, 218, 219, 220, 221
- 理論版本家族(theory version family) · i, ii, iv, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 59, 97, 101, 102, 118, 119, 147, 149, 163, 164, 165, 166, 169, 170, 174, 175, 182, 183, 186, 187, 188, 189, 193, 207, 219, 221
- 理論原理(theoretical principle) · 80, 115, 172
- 理論假說(theoretical hypotheses) · 73, 74, 78, 114, 222
- 理論結構(theory structure) · i, iv, 3, 4, 6, 12, 14, 17, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 53, 78, 97, 98, 100, 109, 131, 187, 219, 233, 236, 242
- 理論詞(theoretical term) · 2, 13, 20, 39, 40, 49, 79, 224, 225, 226, 228, 229, 231, 238, 243, 244
- 異例(anomaly) · 63, 64, 122, 167, 168, 182
- 異質性(heterogeneity) · 11, 54, 57
- 笛卡兒(René Descartes) · ii, iii, 6, 8, 10, 12, 82, 107, 108, 123, 130, 131, 138, 139, 140, 141, 147, 148, 151, 165, 166, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 183, 184, 186, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 235
- 笛卡兒主義(Cartesianism) · 186, 188, 189, 190, 192, 193, 206, 207, 213, 215
- 第谷(Tycho Brahe) · 197
- 符示(signify) · 24, 149
- 規則連結(rule links) · 50, 51, 52, 222
- 娜西婁(Nancy Nersessian) · 2, 50, 53, 55, 66, 73

十二劃

- 傅大為(Fu, Daiwie) · ii, v, 12, 41, 42, 64, 167, 176, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 187, 193, 245
- 最小拘束原理(Principle of Least Constraint) · 152
- 勞丹(Larry Laudan) · ii, 8, 12, 66, 106, 176, 177, 178, 179, 182, 183, 185, 187, 193
- 單子論(monadology) · 208
- 惠更斯(Christiaan Huygens) · 123, 132, 165, 184, 186, 188, 189, 190, 192, 193, 205, 206, 207, 211, 212, 213, 214
- 渦漩理論(vortex theory) · ii, iv, 10, 12, 107, 131, 138, 139, 141, 172, 174, 189, 190, 191, 197, 202, 203, 206, 207, 209, 211, 213, 216, 217, 218
- 發展路徑(developmental pathway) · ii, 10, 12, 163, 175, 180, 182, 186, 187, 188, 193, 206, 209
- 硬核(hard core) · 8, 166, 167, 168, 169, 171, 178, 179, 207

等值條件(equivalent condition) · 14
 等級結構(gradience structure) · 62, 68,
 71, 72, 75, 77, 78, 81
 萊布尼茲(G. W. Leibniz) · 123, 139,
 148, 149, 165, 173, 184, 186, 189,
 190, 191, 192, 193, 205, 207, 208,
 209, 211, 212, 213, 214, 216, 218
 萊布尼茲主義(Leibnizianism) · 207
 虛空(void) · 171, 172, 190, 217
 詞彙結構(lexical structure) · i, 12, 42,
 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 53, 62,
 64, 108, 109, 117, 133, 161
 費耶阿班(Paul Feyerabend) · 13, 100
 超距作用(action at a distance) · 166,
 172, 210, 216
 量化通則(generalization) · 81
 量的全體比率方法(the method of first
 and last ratios of quantities) · 125,
 134
 階層系統(hierarchy) · 7, 40, 53, 57, 68,
 71, 72, 80, 102, 116, 117, 118, 119,
 122, 125, 144, 160, 203
 集合論存目(set-theoretic entities) · 23,
 24, 25, 37, 86, 232, 241
 集合論述詞(set-theoretical predicate) ·
 23, 231, 233, 234, 235, 236, 241

十三劃

塔加德(Paul Thagard) · 50, 51, 52, 53,
 55, 59
 微積分(calculus) · 122, 125, 130, 134,
 148, 149, 154, 165, 186, 214, 216,
 217, 227, 229
 意義網絡(semantic network) · 44, 45,
 46, 60, 65, 108, 109, 133
 愛因斯坦(Albert Einstein) · 6, 14, 97,
 99, 100
 概念問題(conceptual problems) · 177,
 178, 183, 188
 概念模型(conceptual model) · 12, 20,
 24, 84, 85, 86
 概念類比(conceptual analogy) · 20
 準實在論(quasi-realism) · 29, 39
 萬有引力(universal gravity) · iii, 46,
 93, 122, 123, 124, 125, 127, 131,
 133, 139, 140, 141, 142, 149, 164,
 172, 173, 174, 183, 184, 189, 190,
 191, 210, 211, 212, 213, 214, 216,
 227, 228, 229, 230, 242
 經驗次結構(empirical substructures) ·
 34, 35
 經驗問題(empirical problems) · 177,

178, 180, 183, 187
 落實例(realized instance) · 89, 90, 91,
 94
 解謎(puzzle-solving) · 98, 177
 解題(problem-solving) · ii, 167, 176,
 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183
 路徑(pathway) · 9, 10, 12, 20, 82, 99,
 111, 113, 118, 148, 149, 154, 155,
 156, 158, 160, 163, 175, 182, 186,
 187, 188, 193, 199, 201, 202, 212,
 213, 220, 223, 243
 運動學(kinematics) · 10, 37, 151, 152,
 153, 155, 156, 159, 160, 163, 176,
 182, 188, 218, 220, 235, 238, 239,
 240, 242
 達爾文(Charles Darwin) · 6, 185, 231
 達蘭伯特(Jean d'Alembert) · 99, 149,
 166, 174, 217, 218
 電腦模型(computer model) · 85, 86, 88
 電磁學(electromagnetics) · 3, 6, 97,
 100, 107

十四劃

圖像模型(pictorial model) · 84, 85, 86,
 241
 實物模型(substantive model) · 83, 85,
 86
 實質類比(substantive analogy) · 18, 20,
 86, 87
 對應規則(correspondence rules) · 2, 13,
 17, 18, 222, 223, 224, 225, 226, 227,
 228, 229, 242
 慣性力(inertial force) · 7, 126, 129,
 132, 133, 143
 慣性運動(inertial motion) · 89, 91, 160,
 190, 196, 197
 漢彌爾頓(William R. Hamilton) · 14,
 38, 79, 97, 98, 99, 102, 109, 110,
 111, 112, 113, 118, 119, 147, 149,
 150, 152, 154, 159, 163, 218, 220,
 242, 243
 磁力哲學(Magnetic Philosophy) · 121
 種連結(kind links) · 50, 51
 種關係(kind of) · 48, 49, 55, 82
 維恩爵士(Sir C. Wren) · 121
 語言存目(linguistic entities) · 14, 23,
 24, 25, 31, 39, 74, 232, 241
 語意概念(semantic conception) · i, 25,
 26, 28, 29, 31, 32, 33, 36, 37, 38, 39,
 73, 87, 230
 認知空間(cognitive space) · 130
 認知模型(cognitive model) · i, 8, 12,

24, 40, 65, 66, 72, 73, 125, 129, 130, 131, 148, 172

認知觀點(cognitive view) · 2, 13, 65
 赫茲(Heinrich Hertz) · ii, 6, 9, 12, 38, 59, 79, 97, 98, 99, 102, 119, 147, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 163, 218
 輔助假說(auxiliary hypotheses) · 166, 168
 領域問題(domain problem) · 180, 181

十五劃

價值(value) · 1, 10, 17, 104, 151, 152, 170, 171, 173, 174, 175, 180, 186, 192, 203
 標準說明(standard account) · 2, 13
 模型的描述(description of model) · 114, 117
 模型家族(model family) · i, ii, 66, 75, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 88, 91, 92, 113, 114, 117, 129, 134
 模型觀點(model view) · i, iii, 2, 3, 10, 12, 13, 14, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 25, 29, 37, 38, 40, 66, 78, 88, 100, 106, 221, 230, 231, 232, 240, 241, 242
 模映(modeling) · 8, 20, 65, 85, 86, 132, 136
 模釋(modeling) · 12, 15, 25, 26, 65, 79, 81, 85, 88, 89, 91, 92, 131, 132, 151
 歐拉(Leonard Euler) · 6, 97, 98, 100, 149, 165, 172, 193
 範例(exemplar) · iv, 38, 42, 45, 50, 60, 68, 70, 72, 81, 83, 129, 192
 範域(range) · 36, 103, 104, 105, 106, 107, 108
 範疇(category) · i, 7, 9, 42, 45, 48, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 65, 67, 77, 80, 81, 83, 94, 105, 108, 109, 118, 138, 143, 144, 153, 155, 158, 159, 160, 161, 171, 172, 174, 196, 203, 205, 206, 209
 範疇語詞(categorical term) · 58, 109
 複合模型(complex model) · 92, 93, 94
 論域(domain) · ii, 7, 8, 9, 21, 30, 34, 35, 52, 54, 57, 61, 87, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 124, 147, 161, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 184, 186, 187, 202, 203, 206, 207, 209

十六劃

學科分類(disiplinary taxonomy) · 41, 170, 171, 173, 174, 175, 186, 187, 188, 203, 209
 學科秩序(disiplinary order) · 10, 171, 173, 174, 175, 187, 203, 206, 207, 209, 215
 操作型定義(operational definition) · 17, 225, 226
 整全性(integrity) · 5, 8, 12, 219
 樹狀分類(tree taxonomy) · 41, 47, 48, 49, 52, 53, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 79, 89
 機械論(mechanism) · 173, 204, 205, 206, 207, 209, 215
 機率主義(probabilism) · 206
 諾伍德(J. Norwood) · 110
 遺傳(inheritance) · 9, 36, 164
 靜力學(statics) · 4, 10, 138, 163, 165, 216

十七劃

韓培爾(Carl G. Hempel) · 2, 13, 17, 18, 41, 222, 224, 225, 240

十八劃

歸納主義(inductivism) · 13
 薩普(Frederick Suppe) · i, 2, 4, 18, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 36, 37, 38, 39, 40, 74, 78, 87, 106, 221, 222, 230, 231, 233
 轉矩天平(torsion balance) · 93, 94, 96, 191, 229
 雙體模型(two-body model) · 142

十九劃

龐卡黑(Henri Poincaré) · 115
 羅施(Eleanor H. Rosch) · 67, 68, 69, 70, 71, 72, 78
 辭典(dictionary) · 16, 17
 鏡映(mirroring) · 26, 69
 關係結構(retional structure) · 21, 22, 27, 32, 36, 37, 40, 85, 86, 164
 類比(analogy) · i, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 24, 25, 26, 29, 73, 81, 84, 85,

86, 87, 88, 114, 121, 124, 130, 137,
148, 212
類比模型(analogous model) · 17, 18,
19, 20

二十劃

競爭力(competitive power) · 10, 169,
175, 181, 186, 188, 220
繼承(inheritance) · iv, 5, 8, 9, 10, 11,
12, 13, 14, 18, 37, 38, 57, 78, 97, 98,
100, 101, 108, 147, 149, 164, 166,
171, 172, 173, 174, 175, 182, 183,
184, 186, 187, 188, 189, 192, 193,
205, 206, 207, 209, 210, 218, 219

二十三劃

邏輯重建(logical reconstruction) · 3,
94

邏輯經驗論(logical empiricism) · 2, 3,
10, 13, 18, 46, 104, 106, 221, 223,
236, 243
邏輯實證論(logical positivism) · i, 2,
13, 16, 17, 20, 21, 98, 221
邏輯模型(logical model) · 10, 14, 20,
21, 23, 24, 29, 37, 39, 85, 86, 87, 88,
232, 241
驗證(confirmation) · 4, 8, 20, 29, 32,
46, 92, 133, 141, 142, 145, 150, 152,
166, 167, 183, 191, 219

二十五劃

觀察詞(observational terms) · 2, 13,
223, 225, 243

國家圖書館出版品預行編目資料

科學理論版本的結構與發展/ 陳瑞麟著. --初版--.
臺北市：臺大出版中心, 2004[民 93]

275 面；17x26 公分
附參考書目及索引

ISBN 957-01-6183-3 (平裝)

1. 科學 - 哲學 , 原理 - 歷史

301.9

93021275

統一編號 1009204933

科學理論版本的結構與發展

作 者	陳瑞麟
出版者	國立臺灣大學
發行人	陳維昭
發行所	國立臺灣大學出版中心 臺北市 10617 大安區羅斯福路四段一號 電話：(02) 2365-9286 傳真：(02) 2363-6905 Website: http://www.press.ntu.edu.tw E-mail: ntuprs@ntu.edu.tw
版(刷)次	2004 年 12 月第 1 版第 1 刷
定價	新臺幣 300 元

GPN: 1009204933

ISBN: 957-01-6183-3

ISBN:957-01-6183-3



GPN:1009204933

定價:新臺幣300元