

科學家探究問題的邏輯結構與機制運作

許育彰

國立臺灣師範大學 科學教育研究所

摘要：科學家探究問題的完整風貌宜包括兩個部分：(1)靜態的邏輯結構與(2)動態的機制運作，前者屬「科學方法論」討論的範圍，後者則屬「科學實踐」研究的範圍，兩者缺一不可。在「科學方法論」部分，本文詳細剖析了科學家為回答「因果性問題」而提出「論證」和「科學說明」的邏輯結構；在「科學實踐」部分，本文則嘗試以「同化機制」和「調適機制」來描述科學家在探究問題時的實踐活動。

關鍵詞：論證、科學說明、同化機制、調適機制、典範、常態時期、革命時期。

壹 前言

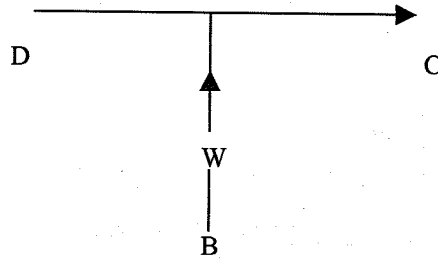
面對瞬息萬變的大千世界，人們常會發出各式各樣的疑問，諸如：為什麼杵潤之後便會下雨？為什麼裊裊炊煙總是往上升？為什麼天空的顏色是藍的？為什麼行星總是繞太陽運行？為什麼地球能夠懸在空中而不會墜落？...等等，這一連串的『為什麼』，在在顯示了人們對大自然的高度好奇，以及伴隨好奇而引發的一些疑惑。只要我們稍加留意，就不難發現，人類打從學會說話的那一刻起，就不斷地向自己或周遭的人提出一系列『為什麼』的問題，並企圖以打破沙鍋問到底的窮究精神來滿足他旺盛的求知慾。這種隸屬於人類本能的求知慾念愈是無法獲得滿足，則其竭盡心力想要找出答案的企圖就愈發高漲。由此可以看出，人類主動挖掘問題，繼而嘗試做出因果性解釋的內在驅力，在人類建構知識的過程中，著實起了極為關鍵的驅策作用。至於，科學家為回答問題而提出「論證」或「說明」的邏輯結構究竟為何？在面對問題時的心智反應，乃至其在解決問題時的機制運作又是怎樣？這些議題，都是本文關心與探討的旨趣所在，茲論述於后。

貳 論證與說明的邏輯結構

「論證」(argument)和「說明」(explanation)是人們為回答上述『為什麼』問題，而嘗試提出因果性解釋的一種探究活動。透過「論證」和「說明」，人們可以把他原本不太熟悉的事物轉換成他所熟悉的事物，藉此化解個體在認知方面的衝突和疑慮。此外，一個進步的「論證」和「說明」還能充當預測的角色，將尚未發現的事件預先納入某種經驗定律或科學理論的掌控中，充分發揮早期發現的預警作用，值得深入探討。以下，本文擬針對一般論證的形式和嚴格科學說明的邏輯結構做深入分析。

一、論證的邏輯結構

一九八二年，在一篇探討定性研究法的論文中，道格拉斯 (A. Douglas) 曾以圖爾敏 (S. Toulmin, 1958) 的論證架構為藍本，提出「D-W-C」的論證模式，如圖(一)所示。

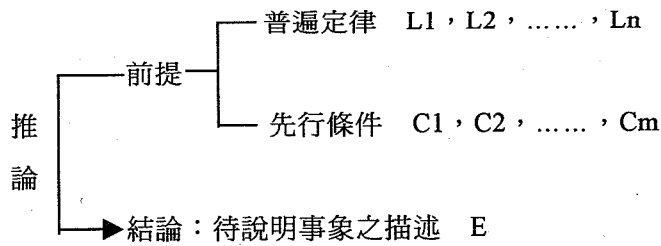


圖一 D-W-C 論證結構 (Douglas, 1982)

在這個模式中，D 表個體從外在現象中所蒐集到的數據或資料(Data)，W 為個體作推論時的佐證依據—「論據」(Warrant)，C 則表經由推論而得出的結論(Conclusion)。此外，道格拉斯進一步指出：「一個論證的有效與否，有很大的程度取決於論據背後的『支撐理論 B』(theory backing)。」話雖如此，人們用以支持(support) 論據的支撐理論卻會隨著人類歷史的演進而改變，在科學史中不乏這類的事例。例如：從古到今，人們在論證「為什麼地球能夠懸在空中而不會墜落？」這一問題時，不同的時代就有不同的支撐理論，當然，因此而提出的論據也各自不同。譬如，古時候的日本人就認為，地球是由三條漂浮在海面上的鯨魚所背負著的，理由相當簡單，因為在他們當時的認知世界中，鯨魚象徵著「大力士」足以托住地球；與此相比，古代巴比倫人的看法則顯得較為精緻和進步，他們以為地球就像一塊懸浮在「氣體海洋」上的木頭(自科文庫，民 69)。至於，這問題較具「科學性」(相對於現代科學而言)的論證結構，則似乎要到牛頓提出「萬有引力定律」之後才略具雛形，而這也是下節科學說明的討論重點。

二、科學說明的邏輯結構

有關「科學說明」(scientific explanation)的邏輯結構，在科哲領域中有甚多的討論，其中又以亨普爾(C. Hempel) 的說法最具代表性。基本而言，亨普爾認為：當我們欲對某一事象之所以發生做科學說明時，我們必須以普遍定律 L1、L2、L3 ...、Ln 和先行條件 C1、C2、C3 ...、Cm 為前提，再由前提出發，系統地推論出結論 E 來。換句話說，一個切當的科學說明必須具備圖(二)的邏輯結構(Hempel, 1965)。



圖二 亨普爾科學說明的邏輯結構

國內學者林正弘曾針對「切當」兩字做進一步論述。依據他的說法，一個「切當」的科學說明，至少必須具備下列四個條件（林正弘，1988）：

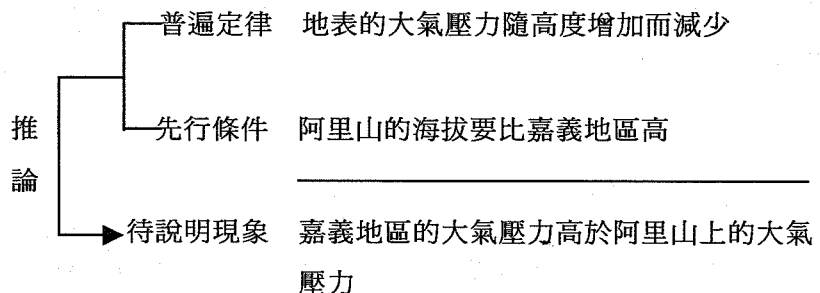
- (1)以普遍定律及先行條件為前提，必須能夠推出結論E來。
- (2)必須列出普遍定律（因為它是科學說明不可欠缺的項目）。
- (3)所列出的普遍定律必須得到高度的檢證。
- (4)先行條件必須為真。

個體唯有經由這種嚴苛的論證要求，才能成功地將待說明事象完全納入科學定律的掌控中，亦即做了「切當」的科學說明。

此外，由於構成普遍定律的語句有兩種不同形式，因此用以解釋事象的「科學說明」亦可分成兩種型態——「演繹說明」和「歸納說明」（Hempel, 1965），茲分述如下：

I. 演繹說明

「演繹說明」（deductive explanation）除了必須符合上述「科學說明模式」和「切當說明」外，它還具備兩項特徵：第一，普遍定律皆為全稱語句；第二，由前提到結論的推論是演繹推論。例如，如果我們要說明嘉義地區的大氣壓力比阿里山大，則可用圖(三)的演繹說明加以表示。

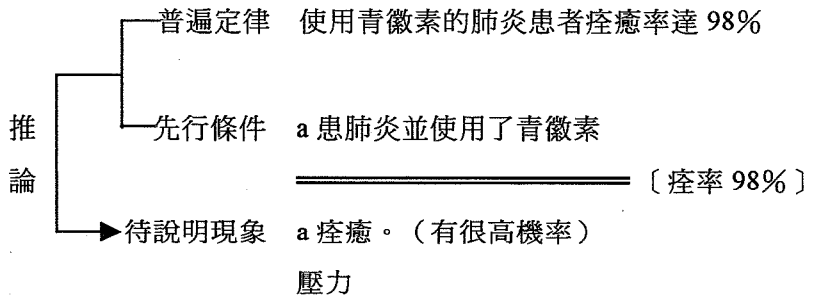


圖三 亨普爾演繹說明的例證

這種說明的最大特點是，結論一定含攝在前題的定律之下；並且，前提如果為真，則其結論也必定為真。

II. 歸納說明

「歸納說明」(inductive explanation) 它與演繹說明具有兩項明顯的差別：第一，普遍定律中含有統計語句，而不全是全稱語句；第二，銜接前提與結論間的涵蘊是屬機率涵蘊而非演繹涵蘊，故在某些場合下又稱做「統計說明」(statistical explanation)。這種說明的特點之一是，結論並不必然含攝在前題的定律之下。例如，某肺炎患者 a 在服用青黴素後迅速痊癒，他覺得相當驚奇特向醫師請教，得到的回應說明如圖(四)所示。



圖四 亨普爾歸納說明的例證

從圖(四)這位醫生的說明當中，我們可以明顯地看到普遍定律並不是全稱語句；它不是說所有接受青黴素的肺炎患者都會迅速痊癒，它只機率地說有 98% 的這類病患會迅速痊癒而已，換句話說，另有 2% 的肺炎患者是無法用青黴素治癒的。可見，由統計語句推論出的結論，不見得可以完全含攝在前提的定律之下；此時，定律只能給予結論極強力的支持，但非絕對的保證。

今天，不論是「演繹說明」也好，是「歸納說明」也罷，科學說明的最終目的旨在呈現一個清晰、富有邏輯關聯，而又能為我們所經驗到的世界。在此訴求下，科學說明至少必須滿足兩項基本要求，這才不致造成個體在認知上的迷失。其一是相關性的要求，指所引述之證據必須與其論證的對象發生關聯，亦即必須相關；其二是可試驗性要求，指科學說明的述句必須是經驗上能夠加以檢證或試驗的（何秀煌譯，民 76）。事實上，這兩項基本要求，同時也是判斷真、偽科學說明的準據，尤其是相關性這項要求。理由非常簡單，因為一個被倡議出來的說明如果能夠滿足相關性的要求，則它一定也能滿足可試驗性的要求；但是，反過來並不必然成立。例如，古代「天狗食日」的說明，固然與人們解釋日蝕現象的常識經驗頗為吻合，但是它卻跟人們所欲說明的日蝕現象不具任何關聯，因此必須加以剔除。可見，單憑「可試驗性」這項要求仍不足以構成科學說明

的全部要件。

綜合以上對「論證」和「科學說明」的結構分析，我們不難發現兩者不僅在內容組件上有一一對應的關係，就連論證或說明時所採行的推理形式也非常神似。譬如，兩者同樣都以盡可能蒐集到的資料或先行條件為素材，在某種「支撐理論」或「普遍定律」的含攝下，將前提中的素材推進到結論或待說明的事象上，藉此達到論證或說明的最終目的，兩者對應的關係可用表（一）加以表示。

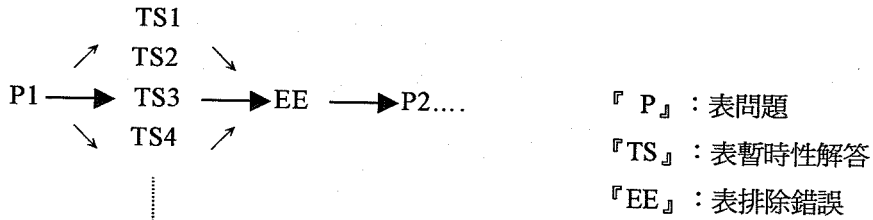
一般論證	科學說明
W-B	----- L1, L2,
D	----- C1, C2,
C	----- E

表一 論證與科學說明的對應關係

當然，科學家們所從事的探究活動，應該不限於一成不變、具有固定邏輯結構的靜態分析而已。換句話說，一個完整的科學探究活動，除了具備上述論證或科學說明的邏輯結構外，它同時也該包含許多不屬於邏輯層面的動態活動，諸如：面對問題時的心智反應，或實際解題時的機制運作等。所以，捨棄或偏袒任何一方的研究，都將無法全盤勾勒出科學探究這一活動的真實風貌，這是本文接下來想要討論「科學動力學」的主要原因。

參 科學動力學：同化與調適

「科學動力學」是本世紀繼邏輯經驗主義之後，科學哲學家們所關心的另一個新興學門，目的在於研究科學發展的歷程和動力。提起這一運動的先鋒人物，如奧裔英籍的卡爾·波普 (Karl Popper)和美國的托馬斯·孔恩(Thomas Kuhn) 更是這種趨勢下的傑出人物，兩者都反對邏輯經驗主義只對科學做靜態邏輯分析的觀點，主張科學不應只是歷史資料和觀察資料的堆棧，相對的，他倆同樣把科學發展看成是科學理論不斷推陳出新的革命過程，力圖從動態的歷史研究中去把握科學活動的本質。這當中，又以波普「不斷革命論」的科學進展模式最為激進，吾人可用圖（五）加以概括（趙敦華，1991）。



圖五 波普科學進展模式（趙敦華，1991）

這個模式告訴我們，科學的進展並非起於純粹的「觀察」，而是起於「問題」的發現。換句話說，波普認為：「當理論與觀察現象，抑或當理論與理論之間出現矛盾的當下，才是科學探究活動的起點。」（金吾倫，1994；趙敦華，1991）與此持相似的看法，孔恩也深深覺得：「在『前典範』或『危機』時期所呈現出來的問題，正是造成百家爭鳴，各家爭相提出解決之道的開端。」（Kuhn，1970）。由此可見，「問題」確實是激發科學探究活動的觸媒。儘管波普和孔恩兩人在這一點上已經取得某種共識，但是他倆在對科學家後續之探究活動的解釋上卻抱持不同的看法。就某種程度而言，孔恩認為科學知識的增長，在常態科學時期是隸屬於典範宰制下的一種「同化」(assimilation) 作用，屬量的增加；至於，質方面的劇變，則只發生在新舊典範交替的革命過程，是舊理論徹底翻新的一種「調適」(accommodation)作用。當然波普那種「不斷革命」的論調（較不強調和緩的同化作用），更是這種「調適」作用的典型代表。

此地談到的「同化」和「調適」，原是瑞士生物及認知心理學者皮亞傑(J. Piaget) 用來解釋個體智力成長的專門用語(Wadsworth，1971)。皮亞傑曾經論證指出：「個體智力成長的機制，跟生物機體適應外在環境的機制頗為近似。」（參見杜聲鋒,1989,P.21）因此，所謂的「同化機制」，其實就是個體將外在新的環境因素納入原有智力結構的一種消納歷程；相對的，「調適機制」則是個體為順應外在環境變動而調整智力結構的一種權宜措施。可以說，前者是以「不變應萬變」，而後者則為「以變應變」的變通做法。

皮亞傑如此巧妙的類比引用，無論從生物機體還是從認知個體的適應觀點來說，都是極為適切的做法，在此啓迪下，本文也嘗試透過科學史實中的某些事例，說明科學家在進行探究活動時同樣也存在著「同化」和「調適」的機制，而整體科學的發展，則更是遵循「不平衡→平衡→不平衡→平衡→ ...」循環遞迴的歷程，茲分析於下。

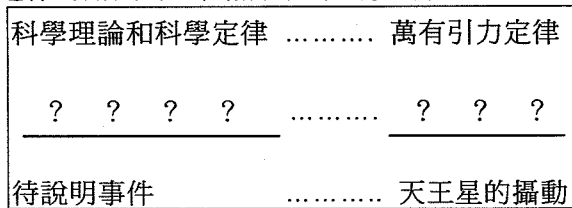
一、同化的探究機制

按照孔恩的說法，科學家從事的探究活動有絕大部分時間是在常態科學時期進行的，而常態科學的重要特徵之一就是由某個「典範」(paradigm)統領一切。在典範統治下，科學家的主要活動就是遵照典範的規定來解決「難題」(puzzles)，這當中縱使有違

反典範的異常現象出現，科學家通常也不會因此而產生「信任危機」；相反的，他們會設法用同化機制將此異常現象歸併到原典範的宰制範圍內，順利化解危機。科學史上海王星的發現，就是這種探究機制的最佳寫照。

西元 1781 年，人們發現：若依照牛頓萬有引力定律以及對其他已知行星引力的計算，天王星的運行顯然偏離了應有的軌道。當時，這種偏離的現象顯然構成了牛頓典範不能說明的異例。然而，在確信牛頓萬有引力定律不會出錯的前提下，不少天文學家猜測，在天王星的軌道外圍應該還存在一顆尚未被人發現的行星，使得天王星偏離了應有的軌道，這個猜測一直到 1846 年 9 月 23 日，才由德國柏林天文臺根據法國科學家列維葉(LeVerrier)的計算得到證實(林正弘, 1988)

海王星的發現，不但解釋了天王星偏離軌道的異常現象，它同時也顯示了「萬有引力定律」驚人的預測能力，因而再次肯定了牛頓典範的可靠性。可見，當觀察現象與理論不合時，問題可能不是出自理論，而是我們用以說明現象的初始條件仍有遺漏或瑕疵，只要我們把遺漏或瑕疵的部分補齊後，在原始理論的號召下，危機還是可以順利化解的，這種同化式的機制運作可用圖(六)加以表示(參考陸健體, 1994, P.69)。



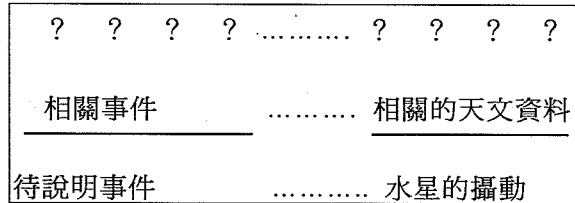
圖六 同化的探究機制(陸健體, 1994, P.69)

圖(六)是常態科學時期最為普遍和典型的探究活動，本質上，這是一種消納式的同化機制。但是，並非每一個異常現象都能在典範的庇護下得到解決；當愈來愈多的異常現象，抑或存在某個特大號的異常現象嚴重威脅到現行理論時，這份危機意識便會促使科學家轉而質疑現行典範的合理性，從而徹頭徹尾做一番檢討，而這正是引發科學革命的契機所在。

二、調適的探究機制

科學革命的起因，經常是因為科學界中有少部分人率先感到原有典範有愈來愈無以為繼的現象，漸漸地他對信守不渝的原有典範產生了「信任危機」，終於一發不可收拾，最後更釀成了革命的劇變。往往你會發現，當科學家們發現一個或者若干個令人困惑的現象，而現行典範又遲遲不能加以消納的時候，重新建構新典範的訴求便隨之高漲起來。科學史上繼解決天王星攝動問題之後，水星偏離軌道的異常現象，即為後續引發牛頓典範「改宗」(conversion)的最好事例。

在列維葉成功地解決了天王星的攝動問題之後，許多科學家爭相以列維葉的探究模式為藍本，試圖解開水星攝動的謎團，就連列維葉本人也因襲舊法，為水星的攝動現象設想了另一顆未被發現的行星，並提前為它命名為「Vulcan」（林正弘，1988），然而事與願違，後人卻始終沒能發現它的蹤影。水星運行軌道的攝動現象，一直要到愛因斯坦提出「廣義相對論」後才獲得解決，這種調適式的機制運作可用圖（七）加以表示（參考陸健體，1994，P.70）。



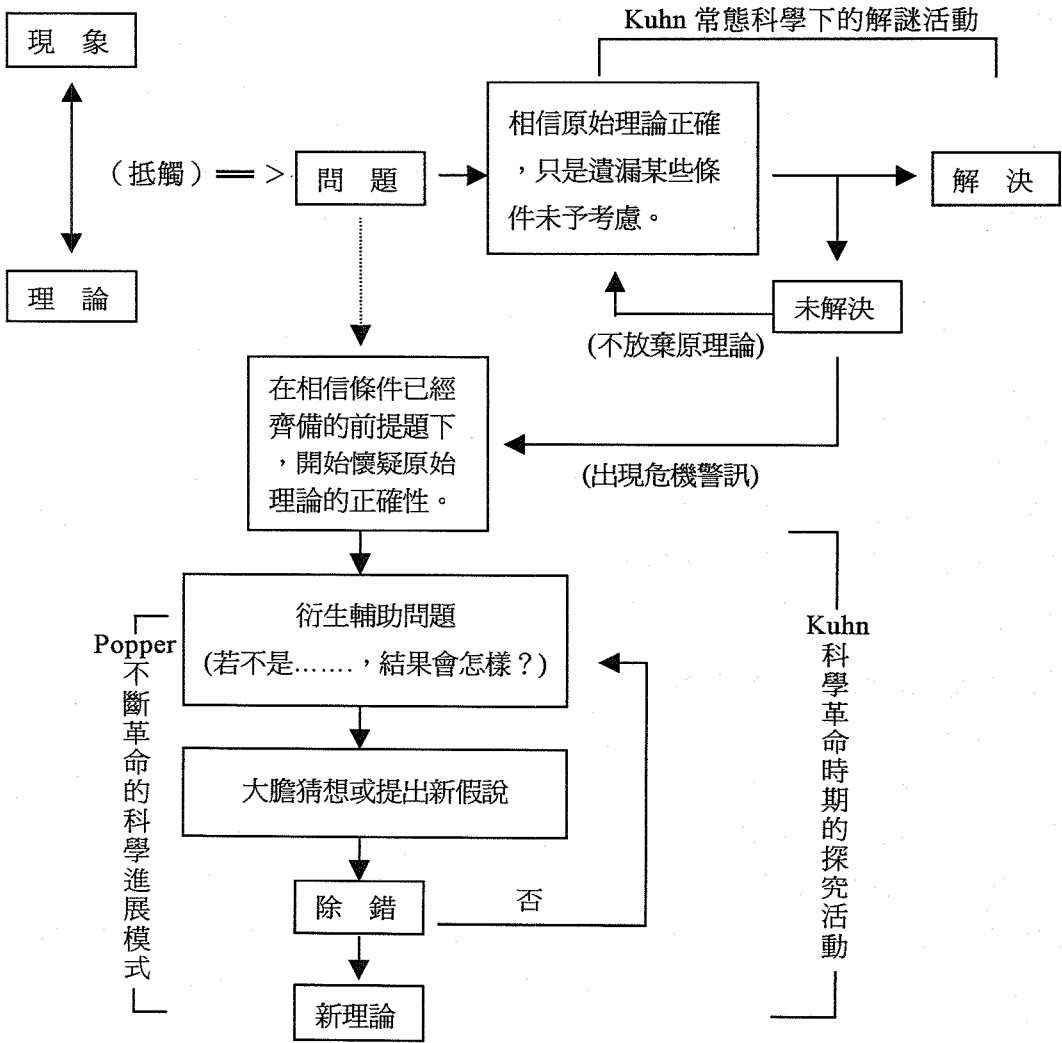
圖七 調適的探究機制(陸健體，1994，P.70)

圖（七）並不是原有典範的運用和推廣；相反的，它是對原有典範的大事改造，有時甚至是徹底的推翻。本質上，這是一種改宗式的調適機制。至於，常態科學時期的同化機制究竟如何與革命期間的調適機制取得聯繫？則是本文最後討論的重點。

肆 完整科學探究的圖像

總結前面的討論，我們可以清楚地瞭解到，科學說明的內涵其實就是「邏輯結構」的分析，而探究的精義則落在「實踐」活動上，前者（指邏輯結構分析）是科學探究活動的骨架，而後者（指科學實踐）則是科學探究活動的血肉，兩者缺一不可，相信唯有如此，我們才能就整個科學探究活動，擊劃出一幅完整的圖像。有關骨架部分，請參考前面的分析，這裡不再贅述，至於探究活動的實踐歷程，本文則提出圖（八）加以說明。

由圖（八）的流程來看，探究活動實乃肇始於理論與外在現象發生抵觸的那一霎那，亦即，是從問題浮現的那一時刻開始。然而，基於科學家對原始理論的信任有別，因而會產生兩種不同的探究流向。儘管如此，在例行性的探究活動中，絕大部分的科學家還是遵循孔恩式的探究流程，只有少部分批判性較強、較少受制於原始理論約束的科學家，才會在一開始時就採行波普式的探究流程。但無論如何，這兩種流程同樣都是科學探究活動的一環，我們絕不能因為孔恩式的探究流程含括較多的科學家，就斷然否定波普探究流程的可能性；何況，在某些問題的探究上也經常出現兩種流程交互使用的情形，由此也可看出科學家在解決問題時所展現活潑、動態的一面。如果說，波普式的探究流程是經由一系列激烈的質變完成，強調思維的調適運作；那麼，孔恩式的探究流程則傾向於主張科學探究總是先通過常態科學時期的數量積累（同化機制），然後再進到科學革命時期隸屬於非連續的、質的飛躍（調適機制）。固然，波普式的探究流程在大部分時



圖八 科學探究活動的實踐流程

候較具批判性，而孔恩式的探究流程則顯得較為和緩，但這都不改科學探究活動的整體運作，它們照樣都必須遵循「不平衡（問題）→平衡（問題獲得解決）→不平衡（新問題）→ ...」的適應機制。

伍 結語

站在大千世界的面前，科學家與常人最大的不同點是，科學家總是不滿於僅只知道「世界是什麼樣的？(What...?)」尤有甚者，他們還渴望能夠理解「世界為什麼是這樣？

(Why ...?)」從這個角度來看，科學家永遠就像一個好奇、愛發問的小孩，他們先是用盡各種難題困擾自己，然後再想盡辦法逐一克服，因此擺在科學家眼前的，永遠是一幅不可能迄及（因不斷有新的問題出現），卻又吸引他們奮力追求的遠景——「盡其所能地描繪自然，對自然做出更完滿的說明。」

由此可見，科學家在其從事探究活動的每一個時刻，都是在不斷地提出並解答問題的，而每當他們能夠解決或說明一個新現象時，我們的科學便又朝著征服自然、改造世界的目標前進了一大步。這當中，探究活動的本身，固然存有早期邏輯經驗主義者關於靜態邏輯結構的研究，但是在邏輯結構之外，事實上還存在著許多不屬於邏輯的動態活動。今天，不管科學家是處在孔恩常態科學的「同化」時期，抑或身繫革命時期的「調適」階段（波普更加強調），這些探究活動的內容都會決定性地推動和增強人類的說明能力，從而有利於我們在科學探究活動中的建構和深化。如果我們單方面的捨棄其中的任一部份，則在說明上勢必會遭遇無法克服的困難。因此，唯有進行多方面、多視角的研究，我們才能正確而全面地理解科學家探究問題的完整風貌。

參考文獻

- 自科文庫（民 69）《為什麼地球在空中不會掉下去？》 自然科學知識文庫 第 2 輯，P.76，北一出版社印行。
- 何秀煌譯（民 76）《科學的哲學》 三民書局印行，五版。
- 杜聲鋒（1989）《皮亞傑及其思想》 遠流出版公司，台灣二版。
- 林正弘（1988）《伽利略·波柏·科學說明》 大東出版社。
- 金吾倫（1994）《托馬斯·庫恩》 遠流出版公司，台灣初版。
- 陸健體（1994）《關於世界的問答——科學說明》 淑馨出版社。
- 趙敦華（1991）《卡爾·波普》，遠流出版社。
- Douglas, A.R.(1982). The Place of Qualitative Research in Science Education. J.R.S.T. 19(4),P.277-292.
- Hempel, C.G.(1965). Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science. New York: Free Press.
- Kuhn, T.S.(1970). The Structure of Scientific Revolutions. The University of Chicago Press,Ltd.,London.
- Toulmin, S.(1958). The Use of Argument. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wadsworth, B.J.(1971). Piaget's theory of cognitive development. David Mckay Company, INC. New York.