

循諾貝爾獎的足跡反溯人類對原子的探索

- 兼論 Kuhn 之科學革命觀

羅豪章

國立高雄師範大學 科學教育研究所

前言

從古迄今，人類對於自然未知世界的探索，由直覺的感官觀察開始，到有系統的科學研究活動，絲毫未曾間斷過。在好奇心的驅使下，人們已經嘗試解開了許多對於自然世界的"謎"；在儀器的不斷進步下，人類屢次突破生理上的極限，向極端浩瀚與渺小的未知國度前進。於是，科學的發展與知識的成長也在這一連串的探索的歷程中逐漸形成。

諾貝爾獎 (Nobel Prize) - 由因為發明炸藥而成為鉅富的瑞典化學家阿爾弗列特·諾貝爾 (Alfred B. Nobel, 1833-1896) 死後，家屬依其遺囑所創立的獎 - 在科學的研究領域中，它可以說是科學社群對於一個科學研究活動的認同與肯定；對鎮日鑽研於研究中的物理學家而言，獲頒諾貝爾獎應該是研究生涯中的最大殊榮。故筆者認為：若是我們循著諾貝爾獎得獎者的研究足跡，應該可以尋覓出某些特定領域中，相關之科學的發展與知識成長的脈絡。

從歷史的史實觀點切入，進而分析科學發展歷程的研究中，孔恩 (Thomas S. Kuhn, 1922-1996)，可說是相當具有代表性的人物。雖然他的經典之作 - 《科學革命的結構》

- 在公開後，遭致許多批評與質疑的聲音，但是其異於維也納學圈的科學哲學觀點，著實為二十世紀上半個世紀的科學史哲研究，帶來了極大的衝擊與創新。為了捍衛自己的理論，並且為該書中所遭受的困境尋求解套，孔恩在後續的研究與科學哲學家們的互動中，不斷地修改想法和論點的過程，是可以被理解的。本文在介紹原子理論發展的同時，也希望嘗試能否在人類對原子探索的歷史洪流中，找到孔恩透過科學史與科學哲學相互結合的分析模式中，所獲得寶貴理論的影子呢？

壹、二十世紀前的原子觀

原子 (atom) 一詞起源於希臘文中的 atomos，是「不可分割者」的意思。人類對於物質的原子觀，應該可以溯源自十八世紀前德默克利圖 (Democritus) 與魯克雷修斯 (Lucretius) 所產生的原子概念開始，一直到了道爾吞 (John Dalton, 1766-1844) 提出了原子 (Atomicity) 的觀念後，人們開始對原子有了初步的認識。道爾吞於 1808 年所提出的「原子論」認為元素由微小、不可分割、不可毀滅的粒子所組成，此微小粒子即為原子；同一種元素的每一原子重量相同，而不同元素的重量總是不同；原子和原子組成化

合物中的「複合原子」-即分子，其組合比數通常是固定的；不同元素的原子能以一種以上比數組合；如果兩種元素只能組成一種已知化合物，則此化合物一定各含有此二元素之一個原子，這些便是當時所謂的「簡易通則」。

於是，十九世紀的原子科學便以上述道爾吞的原子論觀點為理論基礎，發展了原子量、分子量、原子序、元素週期表 的相關研究成果，也為物理與化學的基礎理論奠下重要的根基。

貳、諾貝爾獎榮耀的第一頁 - 1901~1905 年

十九世紀物理學領域自從法拉第於 1836 年發現稀薄氣體的放電過程中，會伴隨著彩色的輝光開始，科學家便進行著有關真空放電及陰極射線的實驗，這股對於陰極射線的本質探索持續至十九世紀的 90 年代初期，產生了兩大學說-以太振動說及粒子說。當時位居德國維爾茲坦堡大學校長的倫琴 (Wilhelm Konrad Rontgen, 1845-1923)，對於陰極射線的研究自然不遺餘力，1895 年他意外地在實驗室中進行陰極射線實驗時，觀察到具有強穿透力的不知名放射線，由於當時對此放射線的性質無所知悉，故稱其為「x 射線」。這個重要的發現也為倫琴在諾貝爾獎始創便拔得頭籌，揭開諾貝爾物理學獎的序幕，成為第一位的諾貝爾物理學獎得主 (1901)。同時，x 射線的發現揭開後續許多有關原子探索的新契機。

由於倫琴的發現，觸發了法國物理學家

貝克勒爾 (H. Becquerel) 對 x 射線的研究，致使他從鈾鹽中發現了放射線，隨後居里夫婦 (P. Curie & M. Curie)，也為此而發現放射線元素鐳。在 1903 年，貝克勒爾和居里夫婦一同獲頒諾貝爾獎的殊榮。1905 年的諾貝爾物理學獎則落在德籍科學家雷納德 (Philipp E. A. Lenard, 1862-1947) 的手上，他也是致力於陰極射線的研究，1892 以自製的裝置 "雷納德窗口" 從事相關研究，並證實陰極射線是由帶負電的粒子所組成。不過，在此要特別強調的是：科學發展至此，人們尚不知帶負電的粒子 (即現今的電子) 為何物，其實早在十九世紀中期，一些科學家便對這種帶有負電的荷電質點產生想法，甚至荷蘭科學家洛倫茲 (Hendrik Antoon Lorentz, 1853-1928) 也在 1892 年在其經典金屬電子論的偉大著作「電子學說」中，明白指出光是原子中的電子運動所造成的，並且利用他的電子論在 1896 年解釋了塞曼效應，因而兩人共登 1902 年的諾貝爾物理學獎寶座。

話說這一波十九世紀末、二十世紀初的研究，倫琴與貝克勒爾的經驗是值得我們特別注意的，因為從文獻記載中，他們的研究是源自於 "意外發現" 的，也就是他們是在進行一項實驗的過程中，卻意外地觀察到非預料的現象，而觸發其研究的新動機。在科學實驗中，"意外發現" 的意涵究竟為何？如果實驗是檢證假設的過程，那實驗應該是去發現 "意料中" 的現象，然而他們卻是在 "意料之外" 的部分獲得成就與榮耀。當代美國物理學家費曼 (Richard P. Feynman, 1918-1988) 便強調科學的本質是來自於「存疑」和「不確

定性」，觀測、數據才是判斷某個想法是否包含真理的終極大法官。所以，對於科學的實驗而言，嚴謹細心的科學態度，以及對未知世界探索的科學精神，遠比其表面所呈現的科學知識來的有價值與意義。若是從這個角度切入，我們不難發現倫琴與貝克勒爾的成就絕非偶然，而是在科學態度和科學精神的引領之下所得到的，這種例子在往後的數十年原子科學探索之旅中，時有所聞。

參、原子新視野 -1906~1915 年

回頭來看，x 射線的發現對於原子的認識有什麼貢獻呢？英國物理學家 J. J. 湯木生 (J. J. Thomson) 於 1897 年在卡文迪西 (Cavendish) 實驗室中，利用陰極射線管作為工具，證實電子的存在。在其《論陰極射線》一文中曾這樣描述道：

陰極射線的載荷子與電解的氫離子比起來， m/e 值小的多了，這可能是 m 小，也有可能是 e 大，或兩者兼有之。

在上述中的載荷子，J. J. 湯木生在 1899 年便採用斯坦尼 (G. T. Stoney, 1826-1911) 在 1891 年對帶負電的最小粒子所提議的「電子」一詞，這是人類所發現的第一個基本粒子。

依據 J. J. 湯木生實驗證據顯示：電子比原子小了上千倍，電子應屬於原子的一個組成份子。在 J. J. 湯木生的眼中，原子是由正電荷所形成的膠狀體所構成，電子則只是鑲嵌於其中宛如布丁中的葡萄乾，故人們又稱其為「葡萄乾布丁模型」。於是原子不可分割的概念隨之被打倒，顛覆了道爾吞原子的觀

點。1906 年，J. J. 湯木生便因研究氣體內電子的傳導研究獲頒諾貝爾物理學獎。

然而，這種原子的模型到了 J. J. 湯木生的學生拉塞福 (Ernest Rutherford, 1871~1937) -1908 年因證實 α 粒子性質即為帶電的氦原子核而獲頒諾貝爾化學獎 - 在 1909 年指導蓋革 (H. Geiger) 和馬斯登 (E. Marsden) 進行 α 粒子的散射實驗之後，1911 年依據其 α 粒子大角度的散射實驗結果，臆測 α 粒子必定是受到了極大的斥力才會產生如此大角度的散射，故推論帶正電的粒子是集中於原子中的某一個很小的區域，並依據實驗預估這個區域的尺度約略為原子直徑的萬分之一。於是，他提出了原子是一個具有非常小的核之原子模型結構，而大部分的金原子質量以及正電荷都集中於這個原子核，建立類似太陽行星系的有核原子模型，駁斥了 J. J. 湯木生的原子模型。

隨後，在 1914 年拉塞福經由實驗證實 1907 年 J. J. 湯木生所發現的陽極射線事實上就是氫的原子核，並稱其為「質子」。原子發展史至此，人們對氫原子的認知是由具質子的原子核以及核外的電子所組成。

肆、顛覆傳統的量子理論 -1916~1925 年

1918 年因發展量子理論的卓越貢獻，獲頒諾貝爾物理學獎的德國科學家普朗克 (Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858-1947)，早在 1900 年 12 月 14 日所發表的論文中，首度引用量子的概念以解決傳統古典物理在解釋黑體輻射時的窘境，為二十世紀

物理學的量子理論打下基礎。隨後，美籍的德國科學家愛因斯坦（Albert Einstein, 1879-1955）也於 1905 年，依據光電效應與古典理論的衝突，適時引進光量子的觀點，並運用量子的概念於固體比熱的解釋上，得到相當成功的結論。無疑地，量子理論的出現，為近代科學的發展歷程，解決了許多從十九世紀以來懸而未決的問題，也為二十世紀的科學展開全新的一頁。

丹麥的科學家 - 波爾（Niels Henrik David Bohr, 1885-1962）- 被後人譽為量子理論主要的奠基人之一，同時也是哥本哈根學派的領袖，他的一生可說是為原子的探索而進行的奮鬥史。他利用劃世紀的量子理論，建立起赫赫有名的波爾原子模型；1913 年，年僅 27 歲的他，提出一篇有關氫原子研究的論文，開啟了現代原子物理世紀之門；1922 年，因為他在原子結構與輻射上的卓越貢獻，獲頒諾貝爾物理學獎；1936 年，提出了原子核的「液滴模型」，並與惠勒（William Morton Wheeler, 1865-1937）建立了核裂變理論。

說到波爾的原子理論，基本上是融合了普朗克、愛因斯坦以及他的老師拉塞福三者的想法，將量子理論的概念加入拉塞福的原子理論模型之中，而提出了以下兩條假設：

- (一) 原子中的電子在庫侖力的作用下，在某些許可的軌道上運動
- (二) 當電子在這些許可的軌道間躍遷時，就會發出相應頻率的光波

基於這兩個假設所建立的原子模型理論，成功地解決了經典理論在拉塞福原子模型所顯露出的原子穩定性問題，建構了一個

真正經得起理論及實驗雙向考驗的原子模型。

更值得我們注意的是，波爾並未就此暫停其研究的腳步，他將原先對氫原子的研究結合巴耳末（Johann Jakob Balmer, 1825-1898）氫光譜可見光部分所得的波長經驗公式，以及斯塔克（Johannes Stark, 1874-1957）對原子動力學的觀點，清晰地描述價電子在其軌道中躍遷所產生的輻射，成功地將價電子軌道的角動量和原子能量量子化，甚至預測了當時尚未觀察到的紫外區和遠紅外區之光譜的存在，這使得原子結構穩定性與原子光譜間的關係明朗化，並且讓人們對於原子中的價電子有了進一步的認識。

伍、原子核別有洞天 - 中子的發現 - 1926~1935

從 J. J. 湯木生的「葡萄乾布丁模型」、拉塞福的有核原子模型一直到波爾的原子理論模型，原子可被解構成更小成分結構的觀點在科學實驗室中已成事實，科學家的研究方向很明顯地紛紛轉移至原子內部結構的探索。然而對於原子核的瞭解仍僅止於正電荷的集中區域，但是對於原子核中究竟有多少電荷？與核外的電子間存在何種關係？除了正電荷之外，原子核內是否仍存在其他的物質或粒子？這一連串的問題始終尚待解決。

在文獻記載中最早提出原子核仍有其內部結構的科學家為居禮夫人，即 1903 年因發現放射線元素鐳而與貝克勒爾一同獲頒諾貝爾物理學獎、又於 1911 年獲得諾貝爾化學獎

的瑪麗居禮 (Marie Sklodowska Curie, 1867-1934)。她在 1913 年布魯塞爾國際會議中，基於放射性物質既可放射出 α 射線，又可放出 β 射線的事實，提出了原子核是由帶正電的粒子與帶負電的電子所組成的想法，由於這種 α 、 β 衰變顯然是僅存在於原子核之中，故得到了許多科學家的認同。隨著在 1914 年拉塞福證實質子的存在，科學界便興起以「質子 - 電子」(p-e) 模型來描繪原子核的結構，基於原子不帶電的觀點，我們可以預測氦原子核中有四個帶正電的質子、兩個帶負電的電子，核外則有兩個帶負電的電子。

然而這種「質子 - 電子」模型漸漸又受到許多科學家的質疑，主要原因有二：第一個是科學家們在考慮原子核的穩定性時，非常懷疑同樣帶正電的質子聚集於一個小區域時，可觀的庫侖靜電斥力應會造成原子核內部結構的不穩定；第二個是基於量子力學的興起，泡立 (Wolfgang Pauli, 1900-1958) - 1955 年獲得諾貝爾物理學獎 - 於 1924 年提出「核自旋」的概念，利用原子核內的粒子數可以預測原子總自旋數，並經由實驗證實無誤，但這個觀點卻造成「質子 - 電子」模型的矛盾。以氦原子為例，其總自旋為 1，然而依據「質子 - 電子」模型所述：核內應含有 14 個質子以及 7 個電子，粒子總數 21 為奇數，以泡立核自旋理論顯示其總自旋不可能為零或整數，結果與事實相左。

上述的質疑與矛盾最後是由查克 (James Chadwick, 1891-1974) 於 1932 年發現了中子後得到解答。「中子」的觀點是來自於拉

塞福於 1920 年在貝克講座所提出的，當時拉塞福認為應該存在著質量與質子相仿的不帶電粒子，到了 1921 年美國化學家哈金斯 (William Darper Harkins, 1873-1951) 才正式將這個尚未被實驗發現，僅止於想像的粒子稱為「中子」。一直到 1930 年國物理學家博思 (Wahher Wihelm Georg Bothe, 1891-1951) 和貝克爾 (H. Becker) 以 α 粒子撞擊金屬鈹時發現了一種穿透力強的放射線，並將其誤判為 γ 射線。之後，經過了約里奧-居里夫婦 (F. Joliot-Curie, 1890-1958 & Irene Joliot-Curie, 1897-1956) 的實驗證實博思的判斷為誤，並於 1932 年由查克克發現了「中子」，為原子核物理開啟一扇大門，並為查克克自己拿下 1935 年的諾貝爾物理學獎。

人類對於原子的探索活動到了這裡，才真正對原子建構出一個較完整的藍圖，也由於對於原子核內部的興趣，引發一連串如慢中子、人工放射及核蛻變等重要的研究，醞釀了日後的原子核物理，也為核能理論與應用找到出路。同時，更因為研究技術和儀器的不斷改良，使得二十世紀中期以後對於「基本粒子」的研究持續發燒，不斷找尋到新的基本粒子 (如： π 、 μ 、 j/ψ 、 z 、 w 、 τ 、 ν) 之存在，建立了許多相關的理論，當然也造就了許多的諾貝爾獎得主。

陸、孔恩的科學革命觀

二十世紀初，維也納學圈興起一股以嚴謹的邏輯檢證標準檢視科學的方法，這種不重視實際科學歷史，而致力於發展一套邏輯與語意的分析工具，以作為規範科學家的行

為、評判科學工作真偽的做法，似乎將科學哲學一步步地帶離了科學本身，而這股風氣卻也引領著二十世紀英美科學哲學前半世紀的發展。直至二十世紀中葉，沉寂已久的科學史加入了研究行列，讓科學哲學家由歷史的角度，重新去思考科學的進展及其興衰歷程。孔恩，便是此一時期的代表性人物之一。

孔恩嘗試以常態科學、危機、革命三部曲詮釋科學傳統生命的過程，他認為這種三部曲的微妙互動關係，不僅可以忠實反映出西方科學史中許多傳統的沿革與變遷，也最有助於科學知識的成長。基於孔恩的這個論點，科學社群應該遵循著此一發展模式去發展科學的事業，延續科學的生命，增長科學的知識。那我們是否能在前述的原子物理發展過程中，尋獲這種三部曲發展模式的蹤跡？

依據孔恩的科學發展模式，當科學處在常態科學時期，科學社群會在典範的規範下，進行著所謂解謎的科學活動，其目標在於穩定地擴張科學知識的精度及廣度，是一個具有高度累積性的活動。所謂的「典範」，是一個成熟的科學社群在某一段時間內，所共同採納之研究方法、問題領域以及標準答案的源頭活水（Kuhn,1962）。當科學研究進展到一個瓶頸的時候，最明顯的特徵便是「異例」的出現（典範未能合理地解釋或解決問題所造成之異常現象），進而產生了科學危機（舊典範理論逐漸崩潰，新典範理論紛紛出籠，形成百家爭鳴的情景），一但新的理論若是成熟發展到足以消納舊有理論所無

法處理的問題時，科學革命於是乎發生了（新的理論取代了舊有的理論，這也意味著新的常態時期來臨了）。誠如孔恩在其《科學革命的結構》一書所述，異例是出現於常態時期典範未能消納的現象，危機是新理論出現的必要先決條件，而事實則是決定一個陳述為真（或為假）的唯一判準。

反觀二十世紀原子物理的發展過程，向上承接了道爾吞的原子學說理論，從證實電子存在進而確立了原子中的次級結構開始，隨後相關的放射線研究、電子荷質比測定、

粒子散射實驗、中子的發現、量子力學理論的加入，這一連串的科學研究活動，讓人們對原子結構的探測，由外而內地持續展開。在這個過程中，雖然有許多的理論相繼出現、被推翻，但似乎很難從其中清楚地勾勒出一個如同孔恩所描述的常態科學、危機、革命三部曲之過程模式，畢竟這些科學家們的研究大多是延續前面科學家的工作，佐以新的技術和實驗設計，逐步地描繪出原子的輪廓。

誠如上述，科學家們從視原子為組成物質的最基本不可分割粒子，到抽絲剝繭般地逐一解構原子；由均勻散佈的原子模型想法，到具有中心核的原子模型觀點；從連續性經典理論的描述，到非連續性量子理論的詮釋，他們在原子物理的研究上似乎有了全新的世界觀，對於原子的觀點和認知也已經做了一百八十度的轉變，人們不再視原子為物質的最小組成單位，而是積極地去探索原子內部的結構，並且相信原子內部必另有其不為人知的秩序存在。然而，這種轉變在筆

者看來是漸進的、是累積性的，並不如孔恩在《科學革命的結構》中，所描述科學革命必經之典範轉換（paradigm shift）的改宗過程（conversion），即格式塔（gestalt）式之信念轉換，反而比較像是孔恩在後來為《科學革命的結構》所面臨困難所作的修正中，傾向以達爾文演化論式去了解科學社群的演化、物種化、與科學革命的觀點（傅大為，1998）。

不可共量性（incommensurability），是孔恩在《科學革命的結構》中另一個值得注意的面相。孔恩認為：科學社群在新、舊典範下，會戴著不同的有色眼鏡進行科學活動，也就是兩群在不同世界中執業的科學家從同一點注視同一方向時，他們會看到不同的東西。若是由這個角度去看原子理論的發展，個人倒是蠻贊同孔恩的說法，以十九世紀道爾吞的原子學說以及二十世紀原子具有次級結構（可以再分割）的觀點為例，若以現今的科學知識而言，前者理論的誤謬已是不容置疑的，然而對於兩個不同時期的科學工作者而言，處於不同的時空、測量技術和社群文化之下，我們實在很難直覺地以現在的標準，去衡量這兩者理論之優劣。或許，這正符合了孔恩對於新、舊典範之間所存在不可共量性的看法。只是，如同筆者前述一般，這兩個時期間的典範（理論）轉換是否如孔恩所主張的激進革命方式進行，個人則採較保守之態度。

人類對於原子物理知識的進展，究竟是革命？抑是演化？若是從孔恩 1962 年提出

《科學革命的結構》後，一直到 1996 年去世的整個研究歷程來看，在其科學革命觀點似乎逐漸由激進革命轉向為柔性演化的趨勢來看，給了我們更大的思考空間去回答這個問題；若是站在科學知識具有暫時性的基礎來考量，或許迄今科學家對原子的研究仍在孔恩所謂的常態科學時期，未來是否有可能出現新的異例，乃至於引起科學的危機，爆發科學的革命，我們實在很難妄下斷言！

參考書目

- 1.馬文蔚、唐玄之、周永平主編(1999)：物理學發展史上的里程碑。新竹：凡異出版社。
- 2.曾煥華譯(1989)：從諾貝爾獎談 20 世紀物理學。台北：銀禾文化事業有限公司。
- 3.陳國成審(1993)：原子的奧秘。台北：銀禾文化事業有限公司。
- 4.郭奕玲、沈慧君(1996)：物理通史。新竹：凡異出版社。
- 5.傅大為(1998)：「孔恩一生」的歷史與社會脈絡 -- 評吳以義著《庫恩》一書。台灣社會學研究第二期，頁 201-214。
- 6.Jacob Louis Eisberg (1972). Fundamentals of Modern Physics. New York, N. Y.
- 7.Kuhn (1962). The Structure of Scientific Revolutions. Chicago.
- 8.Richard P. Feynman (1998). The Meaning of it all : Thoughts of a Citizen-Science. California. U.S.A.