

二十一世紀評論

為甚麼現代科學出現於西方？

陳方正

一 引 論

何以在近代中國科學落後於西方？這一問題自本世紀初以來，就已經引起廣泛注意。從50年代開始，李約瑟陸續出版《中國科技史》，其後並直接介入有關討論，可說是大家對它興趣始終不衰的一個原因^①。但最主要的原因，恐怕還是出於對中國如何能在科學和其他方面趕上西方的思考吧。

我們在這裏要討論的，是「何以現代科學出現於西方？」我們認為，這不但和上述問題密切相關，而且兩者不可分割。換而言之，以中國為中心來討論其科學落後的原因是不足夠的；只有先徹底了解西方科學發展歷程，然後將之與中國作比較，才可能對問題有深入了解。作為一個粗淺的初步嘗試，本文有兩個目標：為西方科學的整體發展勾劃一個輪廓，以及提出一些看法，希望藉此引起大家對這比較工作的重視。

當然，西方科學發展史是一個非常闊廣的領域，不但已經有大量學者做過許多專門研究；同時，對科學發展的模式和原因，也曾有多種觀點和激烈爭論。例如：現代科學之出現到底是突變抑或漸進；文藝復興對它有何影響；手工藝作坊和神秘性研究例如占星學、煉丹術、數占術等等又是否對它有重要影響，都曾經成為論爭點^②。在這裏我們不可能討論這眾多紛紜的意見，而只能簡單陳述我們的基本假設和態度，以作為本文開端。

首先，經過杜岩 (Pierre Duhem)、哈斯堅 (Charles H. Haskins) 以及過去四十年間許多繼起者的努力，歐洲中古下半段 (約十一至十五世紀) 對西方科學乃至文化發展的重要性已不容置疑。因此十七世紀現代科學的根源最少要移到文藝復興之前三百年，後者即使對它有影響，也只不過是眾多因素之一；它無論是漸進抑或「革命」，都是有大量相關發展作為先導的。其次，我們不否定社

我們在這裏要討論的，是「何以現代科學出現於西方？」我們認為，以中國為中心來討論其科學落後的原因是不足夠的；只有先徹底了解西方科學發展歷程，然後將之與中國作比較，才可能對問題有深入了解。

會、經濟因素以及占星、煉丹之類活動可能對它有間接影響，但認為科學的內在發展仍然最重要。也就是說，科學發展有相當的自足性和獨立性——最少到十七世紀仍然是如此。當然，必須承認，某些組織，例如大學、教會和學會，以及鐘錶和透鏡等技術發展，的確對科學發展有直接和強大影響。

最後，在科學這一十分闊廣的領域之內，我們要採取一個「正統」態度，即認定現代科學的關鍵是經典力學和天文學、數學等所謂「精確科學」，並且認為可以從後者的發展來看現代科學的出現。這有兩個理由。首先，在時序上十七世紀出現的經典力學是現代科學的先鋒和突破點：如所周知，現代化學和現代生物學要分別到十八和十九世紀才出現。其次，現代科學是具有完整（但並非完全緊密或不可變易）內在結構的體系，而經典力學（和本世紀出現的量子力學）則是它的基礎——這就是何以光學、磁學、氣體研究、博物學等等的發展雖然都較早，但卻都不能成為現代科學起點的原因。

二 在巨人的肩膀上

西方科學的成長，是極其漫長和複雜的過程，因此，要了解它就必須看整體，不能割裂。這樣做自不免粗枝大葉，但卻可避開以偏概全的陷阱。以下我們就分別從中古—近代以及古代這兩個時期來綜述西方科學的發展。

甲 牛頓的傳承

經典力學以《自然哲學的數學原理》(1687)為標誌。然而，這一鉅著並非憑空創造出來，牛頓最少承受了三方面的科學傳統：他的運動三定律是根源於伽利略在《兩種新科學》(1638)中有關慣性、下墜體、等加速運動、地動等問題的實驗研究與論述；萬有引力定律是根源於伽利略之能打破「天體運動法則與地上動態現象有基本差異」這一思想的框限，它的嚴格證驗則有賴刻卜勒在1609-1619年間發表的行星運動三定律；至於他的數學發現（主要是微積分學）則淵源更廣：創立解析幾何學的笛卡爾，以漸近觀念來研究曲線斜率的費馬（P. Fermat），以及首先提出積分觀念和方法的卡華里亞利（B. Cavalieri）就都對他有直接影響。就上一輩科學家而言，刻卜勒之所以能夠發現行星軌道是橢圓而非圓形，是由於得到了第谷（Tycho Brahe）的精密天文觀測數據；而首倡「日心說」的哥白尼則是他們二人和伽利略的前驅。在數學方面，也不難看到，笛卡爾等人之能夠結合幾何圖形與計算方法並非偶然，而是十六世紀前期卡丹（J. Cardan）、泰德利亞（N. Tartaglia）、費拉里（L. Ferrari）等意大利學者推動代數學發展的結果。

哥白尼、卡丹、費拉里都是文藝復興時代的人。中國知識份子似乎有一種印象，認為西方現代科學起源於文藝復興期間的突飛猛進，在此之前其程度則和中國相同，甚至還有所不及。李約瑟提出中國科學進展緩慢但連續，西方則

中國知識份子似乎有一種印象，認為西方現代科學起源於文藝復興期間的突飛猛進，在此之前其程度則和中國相同，甚至還有所不及。李約瑟可以說是這種看法的開端。

是跳躍、不連續的，其超過中國只在近代，可以說是這種看法的開端。其實，自十二世紀開始，歐洲科學已經迅速從所謂黑暗時期恢復過來。這個被稱為「早期文藝復興」(約1100-1350)的發展雖然在1350-1450年間因黑死病侵襲而暫趨沉寂，但其實對十五世紀的科學非常之重要，可以說是後者的基礎。

一個明顯的例子就是伽利略的運動學研究。這可以上溯到牛津大學默頓學院 (Merton College) 裏面以布拉華丁 (T. Bradwardine) 為首的一批數學家以及巴黎大學的柯勒斯姆 (N. Oresme) 等在十四世紀中葉 (約1325-1360) 的工作。他們當時已經開始利用圖解來描繪函數和推斷其相關性質，並且證明了「默頓法則」：等加速運動所行經的距離等於以其平均速度作等速運動所行經的距離。此外，十四世紀初的布理丹 (J. Buridan) 提出了作為動因的「衝量」(impetus) 觀念，布拉華丁則試圖以數學形式將力、抗阻和速度三者聯結，形成與亞里斯多德學說不同的新「動力法則」。這些工作的影響一直延續到十六、十七世紀^③。

自十二世紀開始，歐洲科學已經迅速從所謂黑暗時期恢復過來。這個被稱為「早期文藝復興」的發展對十五世紀的科學非常之重要，可以說是後者的基礎。我們推測，這是由於軍事、生產、貿易和航行的實際需要。

伽利略另一重要貢獻是首次用可控實驗(而不單單是觀測)求得了量化的物理規律。這一新發展是前所未有的，它的淵源比較複雜。我們僅能大致推測，大約從十二世紀開始，由於軍事、生產、貿易和航行的實際需要，歐洲對基於反覆嘗試和研究，即用實驗方法進行的各種技術改進發生了熱烈興趣。例如，柏爾格利納斯 (P. Peregrinus) 的《磁論》(1269) 包含了對磁極、磁針、磁力和地磁的仔細實驗研究；在同一世紀，透鏡(作為眼鏡用)的製造及其性質的研究已經開始。更重要的是，發石機和大砲的製造、改進，對力學研究是一大刺激。我們現在知道，伽利略的動力學實驗主要是在帕都亞 (Padua) 大學完成，而把他請去帕都亞的，則是威尼斯城邦的彈道學專家季道波道 (Guidobaldo del Monte) 子爵。因此，從技術改良生出的實驗精神與科學研究相結合，從而形成新科學方法，那是極有可能的。在力學上首先完成這個整合的，正是伽利略^④。

至於數學方面，十二至十四世紀也是一個極之重要的時期。布拉華丁和柯

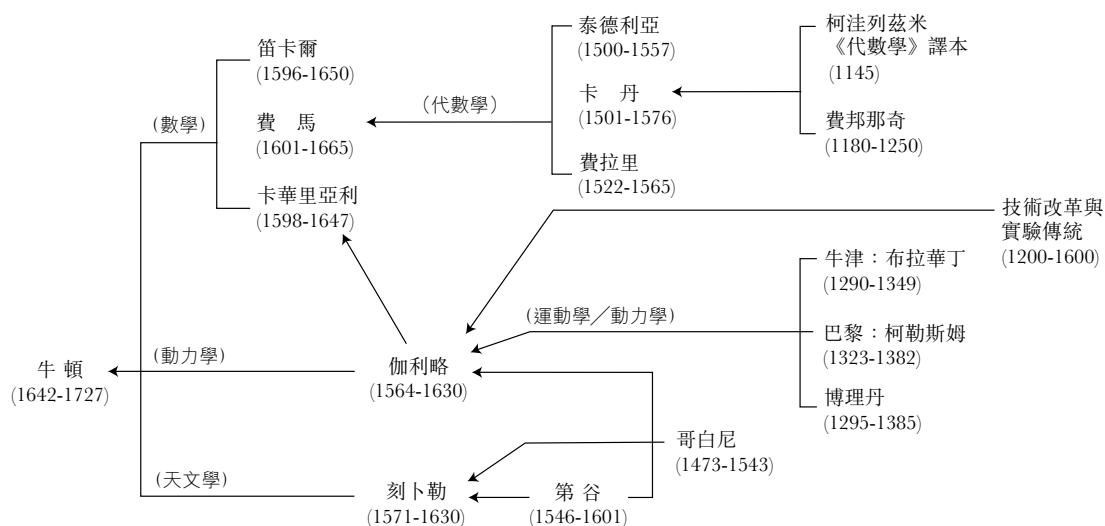


圖1 牛頓的學術傳承關係

勒姆斯的工作對解析幾何的出現可能有，但不一定有直接影響。但毫無疑問，代數學在歐洲的萌芽以九世紀阿剌伯學者柯洼列茲米 (al-Khowarizmi) 的《代數學》在1145年譯成拉丁文，以及意大利學者費邦那奇 (Fibonacci，原名Leonardo of Pisa) 在1202年出版代數和計算法論著《算盤書》(*Liber abaci*) 為開端。除了代數之外，同樣重要的是古代希臘幾何學的重現，那和哥白尼的天文學一樣，都淵源於十二世紀的一個翻譯運動，而那也就是早期文藝復興的起點。

所以，牛頓繼承了一個最少有五百年歷史的強大科學傳統(圖1)。他說自己是「站在巨人的肩膀上，所以望得更遠」，那是非常之確切的。

乙 哥白尼的傳承

我們往往以「日心說」來概括哥白尼的科學貢獻。其實，他的工作遠遠超過提出一種假說。他的《天體運行論》(1543) 是從新思想出發，經過龐大繁複計算，建立一個新的數理天文學體系。然而這個體系的結構和方法卻不新，而是以托勒密的《大匯編》為範本的。所以要明白哥白尼，不能不涉及《大匯編》；而要充分明白後者，又必須從歐洲古代典籍的失傳和重現談起。

在大約第五世紀歐洲由於蠻族入侵而淪入黑暗時代；其後東羅馬帝國的查士丁尼大帝於529年因宗教原因關閉柏拉圖在雅典創辦的「學園」(Academy)，許多希臘學者因此帶了典籍逃到敘利亞和波斯。那裏由於亞歷山大大帝在公元前四世紀的東征，早已經「希臘化」了，因此得以容新移殖的希臘高等文化紮根；後來東羅馬帝國的聶斯脫利教派(Nestorians) 也被迫東移波斯，希臘文化力量遂越發壯大。伊斯蘭教興起後，從沙漠出來的阿剌伯人迅速征服中東、整個地中海南岸、西西里島和西班牙大部分；也是為了宗教，他們焚毀了亞歷山大里亞的圖書館，希臘古代典籍因而大半在歐洲失傳。然而，他們本身並沒有高等文化，所以很快就對遺留在中東的希臘文明發生濃厚興趣。從第九世紀開始，巴格達的教士更以驚人熱誠大量翻譯和研究希臘典籍，從而保存了歐洲古代文化，並且也發展了自己的哲學、數學、天文學^⑥。

經過了五、六百年黑暗時期之後，歐洲文明的重生大約在十一世紀中葉開始。這可以說是歐洲在多方面振奮起來，擴展勢力的一個轉捩點。在政治上，這表現於教會與世俗君主激烈抗爭；諾曼人相繼征服英國、西班牙北部和西西里三地；以及十字軍東征。在社會上，這表現於商業和長途貿易迅速增長，城市大量湧現。在文化上，這表現於古代法學研究和學術翻譯運動興起，大學創立，以及哥德式教堂建築出現。西歐的軍事和貿易擴張使得許多伊斯蘭地區，特別是西班牙的多勒多(Toledo) 以及西西里的巴勒摩(Palermo)，連同其圖書、學者落入其控制，又大大增加了它與拜占庭帝國以及伊斯蘭世界的文化交流。所謂「翻譯運動」便是將在歐洲已經失傳，但仍然保留在後兩個地區的大量古代希臘著作，以及在伊斯蘭傳統之下產生的新學術著作(主要是科學和哲學)，從希臘文、阿剌伯文或者敘利亞文翻譯成西歐通行的拉丁文^⑥。

十一世紀中葉開始，西歐的軍事和貿易擴張使得許多伊斯蘭地區，連同其圖書、學者落入其控制，大大增加了它與拜占庭帝國以及伊斯蘭世界的文化交流。

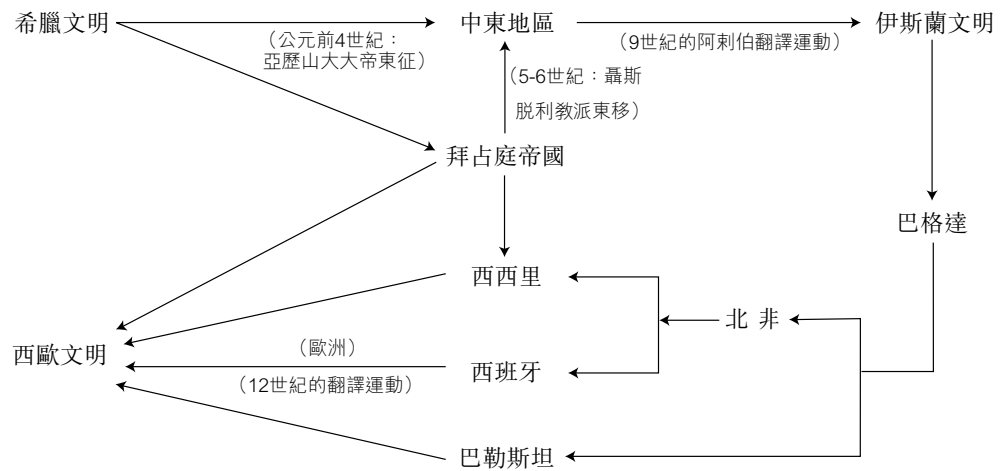


圖2 古希臘典籍流傳經歷示意圖

具體地說，翻譯運動是從十二世紀初期英國的阿德拉 (Adelard of Bath) 開始的。他一共留下了14部從阿剌伯文翻譯出來的天文和數學著作，其中最重要的是歐幾里德的《幾何原本》(1142)。隨着亞德拉，翻譯古代哲理典籍迅速成為強大潮流，而對運動貢獻最大的，則無疑是意大利的吉拉德 (Gerard of Cremona)。他從大約二十歲開始就到多勒多住下，並學會阿剌伯文，然後花了三、四十年功夫(約1140-87)譯出七、八十種天文學、數學、哲學和醫學典籍，其中包括《幾何原本》、《代數學》、《大匯編》以及亞里斯多德的《物理學》和《論天》等等。這大量古籍的翻譯和研習，奠定了歐洲中古的學術體系，教堂和修道院學校亦因此在十二至十三世紀之間發展成新的高等教育和研究機構：巴黎、牛津和其他許多大學就是在這情況下相繼出現的⑦。從希臘文明到西歐文明這歷時1,500年的曲折傳遞過程大體上可以從圖2看出梗概來。

翻譯運動是從十二世紀初期英國的阿德拉開始的。而對運動貢獻最大的，則無疑是意大利的吉拉德。這大量古籍的翻譯和研習，奠定了歐洲中古的學術體系，教堂和修道院學校亦因此在十二至十三世紀之間發展成新的高等教育和研究機構。

在重現於歐洲的典籍中最具震撼性的，無疑就是《大匯編》。它今日的英譯本正文共六百餘頁，近四十萬字，包括近200個圖解，60頁數表，以及50頁恆星位置和亮度表。它從基本假設和原理出發，利用幾何學和球面三角學來詳細計算日、月和五大行星的運行，亦即其經緯度的時間函數，然後將之與歷史紀錄或實測數據比較。這是個龐大、精巧、高度整合的系統，充滿了方程式和緊湊的推理，在模式和精神上已經有近代數理科學專著的味道了⑧。這部鉅著的作者托勒密 (Ptolemy) 是公元100-165年間一位博學的天文學和數學家，他整理當時已積聚數百年的數理天文學成績以及自己的研究結果，編成了《數學匯編》(Mathematical Syntaxis)。829-830年間，它首先在巴格達從敘利亞譯本翻成阿剌伯文，稱為Kitab al-mijisti，《大匯編》(Almagest)之名即由之演變而來。

在十二至十五世紀之間，它曾先後有過3個拉丁文譯本，並且激發了多種相關天文學著作，其中最有名的是十三世紀的佚名作品《行星理論》以及波也巴赫 (G. Peurbach) 的《新行星理論》(1454)。後者就是哥白尼在克拉考 (Cracow)

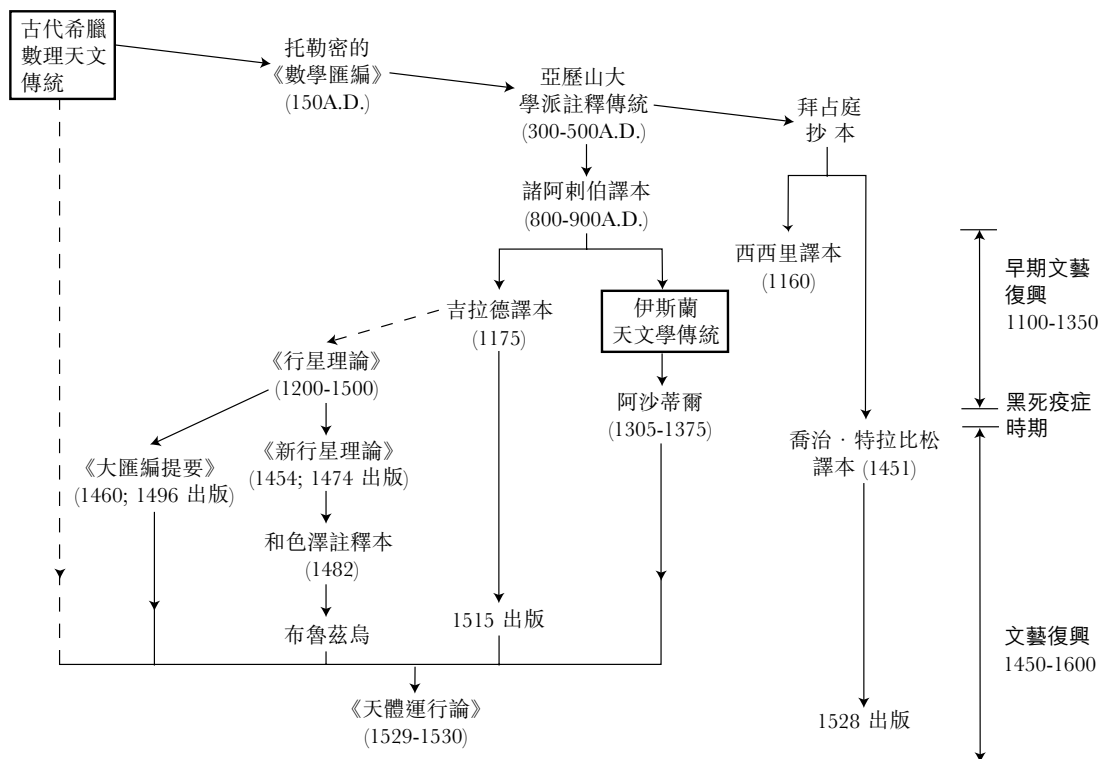


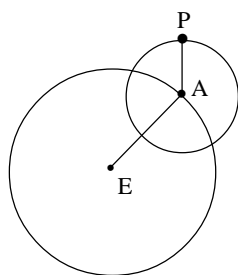
圖3 哥白尼的學術傳承關係

大學受業於阿爾拔 (Albert of Brudzewo) 時所用的課本。哥白尼「日心說」的基本觀念最早是在1500年的手稿本《短論》中提出來的，但其中並無嚴謹計算。其後他經過三十年努力，並且深受到波也巴赫和其學生拉哲蒙坦那 (Johannes Regiomontanus) 合編的《大匯編提要》(1496出版) 以及1515年初次印行的《大匯編》拉丁文全譯本的方法和規模影響，才在1529-1532年間將原來的觀念擴充為一部嚴謹的數理天文著作，這就是《天體運行論》。其實哥白尼的革命性地動思想，也並非完全是創見。根據《短論》自述，其源頭可以追溯到希臘古代天文學理論；而他有關於地球運動的天文數理模型，似乎也受到十四世紀伊斯蘭天文學家阿沙蒂爾 (ibn al-Shatir) 的啟發^⑨。因此，哥白尼本人也是站在巨人肩膀上的：他的學術淵源不但上溯托勒密，並且牽涉伊斯蘭和古希臘天文學傳統(圖3)。

丙 傳承與革命

到底《天體運行論》和《大匯編》有甚麼不同呢？《大匯編》承受了兩個希臘天文學的基本假定：第一，地是球體，球心就是宇宙的固定中心，日、月、行星和恆星等天體都圍繞它旋轉；第二，天體基本上以固定角速度循圓形軌道(因為這是最完美的形狀)運轉，就算表面上並不如此，軌道也必然是由不同層次的圓(即本輪)組合而成(圖4)。整部《大匯編》的目標，就是為每一顆天體確定所有

在重現於歐洲的典籍中最具震撼性的，無疑就是《大匯編》。在十二至十五世紀之間，它曾先後有過3個拉丁文譯本，並且激發了多種相關天文學著作。整部《大匯編》的目標，就是為每一顆天體確定所有的本輪(即其半徑和轉速)，以使其推算的運行能與觀測相符。



E是固定的宇宙中心，即地心或日心。原則上，A以固定角速度 ω_1 循圓形軌道繞E運行；行星P又以另一固定角速度 ω_2 循圓形軌道繞A運行。P相對於A的軌道就是本輪(epicycle)。EA、AP以及 ω_1 、 ω_2 都是由觀測現象來決定的可變參數。實際上，為了遷就觀測所得的行星位置，托勒密作了許多額外假定，例如地球略為偏離圓心E，本輪上可以再加本輪，等等。

圖4 簡單化的本輪系統示意圖

的本輪(即其半徑和轉速)，以使其推算的運行能與觀測相符。

哥白尼在《天體運行論》之中，以日取代了地球作為宇宙的固定中心，也就是改變了第一個基本假定。由於這較接近事實(但也並非完全正確)，所以簡化了整個系統，使得所有行星軌道的大小都自然地固定下來，而不再需要隨意選擇；更重要的，則是為行星運動的特殊現象，即外行星有留駐(station)和逆行(retrograde)而內行星沒有，找到了自然和合理解釋。另一方面，他卻仍然牢守第二個假定，即本輪系統：這一直要到將近百年之後才由刻卜勒推翻。所以單單就計算的繁簡或者與觀測的吻合程度這些技術問題來看，哥白尼比之托勒密並無進步。他真正的貢獻，是把天文學的目標從單純「遷就」數據，轉變為「合理地」，也就是更全面和自然地，解釋現象。

當然，到了牛頓的時代，整個希臘天文學的精神，即是從美妙而自明的基本假設出發，然後通過數學來預測或解釋現象，也連帶被拋棄了。科學的新目標是要找到一個能同時解釋各種現象的基本理論，它不應當單為遷就個別現象而作枝節假設，也不能忽視任何由基本理論得出來的後果。這個改變自然是巨大，可以稱之為革命性的。然而，也不可以忘記，像在所有革命中一樣，有些非常之基本的因子還是保留下來了：即科學是從某些假設或理論出發，通過精密計算和嚴格推理，然後得到可以和觀測比較的結果。從希臘古代天文學開始的這一智性活動的基本模式並沒有改變；改變了的，只是對一個完善理論提出更高、更深刻的要求而已。因此，從托勒密到哥白尼，再到牛頓，既可說是革命亦可說是進步。在科學發展中這二者其實是難以清楚分割的。

到了牛頓的時代，科學的新目標是要找到一個能同時解釋各種現象的基本理論，它不應當單為遷就個別現象而作枝節假設，也不能忽視任何由基本理論得出來的後果。這個改變自然是巨大，可以稱之為革命性的。

三 古代科學文明

《大匯編》是西方古代科學傳統的結晶，但這個傳統到底是怎麼一回事呢？要了解這個傳統，必須先注意兩點：第一，它的源頭不是希臘，而是埃及和巴比倫，其高峰不在雅典，而在亞歷山大里亞。第二，它起源極早，是在四千年之前。因此，這古代傳統是極之悠久和豐富的，我們在這裏，只能夠就其發展脈絡，稍為論述而已。

甲 遠古文明的傳統

追溯西方科學的源頭，有一點是意想不到的，即是證據相當充分和準確^①。例如埃及留下了多項寫在紙草紙上的原始數學文獻，其中最早的是莫斯科手卷 (Moscow papyrus) 和林德手卷 (Rhind papyrus)，年代分別是1890B.C.和1650B.C.，相當於夏商之交的二里頭文化時期。這兩個手卷各長6米，上面紀錄了數十至上百道例題，包括四則、分數、比例、簡單幾何形體的面積和體積計算等等。令人驚訝的是，手卷所用的圓周率相當值是 $3\frac{1}{6}$ ，已準到0.8%；它提出了斜率觀念，和「圓面積與周界之比等於其內接正方形面積與周界之比」那樣抽象的規律，又正確給出了截錐體 (frustum) 相當複雜的體積公式。

至於巴比倫數學史料就更豐富了，它主要是漢謨拉比皇朝時期 (約1800-1600B.C.) 遺留下來的數千塊陶泥版，包括數表和算題兩部分。巴比倫的六十進制往往被目為愚笨的標誌，但其實他們已經發展出先進的位置記數 (包括小數) 法和相關四則和開方運算程序。在這基礎上他們展示的運算能力和發展程度十分驚人，下面是幾個比較凸出的例子：通過高效率的反覆代入開平方法，得到 $\sqrt{2} = 1.414222$ (誤差 6×10^{-6}) 和 $\sqrt{3} = 1.75$ (誤差1%)；高度發展的代數系統，包括多元一次和一元二次方程通解；利用數表和內插值法解三次以及超越方程；對畢氏定理及其他幾何定理的了解；所用圓周率相當值是 $3\frac{1}{8}$ ，準到0.5%。在天文學方面巴比倫也在遠古 (1600-1800B.C.) 就遺留了有關月球和金星出沒以及新月出現的詳細記載；其後自700B.C.開始有關日、月和行星的紀錄和研究大量增加，在300B.C.至公元前後更達到極之精密和準確的程度。巴比倫天文學所用的方法以代數為主，幾乎可以說純粹是利用多項式內插法來推測天體現象。

埃及和巴比倫都是農業文明發源地，都有大規模建造工程和宗教祭祀儀式，所以為了實際需要而發展出先進測量和計算技術，並注意到高深數學和天文方法，那是很自然的。值得注意的是，這兩個文明中的數學雖然很早就發展到相當高水平，其後卻沒有繼續進步，似乎碰到了不能逾越的內在限制。

埃及和巴比倫都是農業文明發源地，都有大規模建造工程和宗教祭祀儀式，所以為了實際需要而發展出先進測量和計算技術，並注意到高深數學和天文方法。但值得注意的是，這兩個文明中的數學雖然很早就發展到相當高水平，其後卻沒有繼續進步，似乎碰到了不能逾越的內在限制。

乙 精確科學的萌芽

從目前的證據看來，古代科學從實用技術轉變為學術探討，從運作程式上升到嚴格論證和推理，大約是公元前六世紀末在希臘開始的^②。當時在小亞細亞西岸的希臘殖民地先後出現了泰勒斯 (Thales) 和畢達哥拉斯 (Pythagoras) 兩位學者，由於他們所開的風氣，特別是組織嚴密的畢達哥拉斯學派的發展，在其後200年間 (600-400B.C.) 希臘科學以驚人速度朝追求理論性和精確的方向發展。例如幾何學的嚴格推理方法，所謂幾何三大難題的討論，正方形對角線與一邊之比為無理數的證明等發現；乃至地為圓球，月光是陽光的反射，日月蝕是由於

陽光受阻形成，天體軌道是圓形等觀念的發現，都在這時期出現。除此之外，像德謨克利達斯 (Democritus)、巴門尼底斯 (Parmenides) 和齊諾 (Zeno) 等對世界本質和變化的探究，也是同一時期的事。泰勒斯和畢達哥拉斯都曾到埃及和巴比倫長期遊歷，並且在神廟中向祭司問學，所以，毫無疑問，他們與這兩個古老文明都有密切學術淵源。然而，他們的抽象思維和嚴謹推理方法卻是原創而毫無先例的。這其間的變化到底如何發生，至今還是一個謎。

由於畢達哥拉斯學派的影響，思想深刻敏銳的貴族青年柏拉圖對數學產生巨大熱情，並於387B.C.在雅典城外創辦學園，把當時第一流的學者吸引到雅典。他將世界劃分為理型與現象的哲學，也成為一種科學理念與方法，即在紛擾的萬象背後有簡明永恆的自然法則存在。這一哲學以及學園門上「不識幾何學者不得入此門」的格言，成為整個希臘乃至西方文化發展的決定性因素。學園最出色的兩位學生，一是首先解決無理數比值問題和利用本輪系統描述天體運行的尤多索斯 (Eudoxus)；更著名的則是亞里斯多德：如所周知，他是注重現象本身的哲學家和百科全書式的實證科學家^②。在今日看來，他在科學上的影響似乎以錯誤觀念為主，而且，由於其權威性，成了中古思想發展最大的桎梏。然而，他與柏拉圖的貢獻是互補的，沒有他的實驗精神以及對地上現象，特別是對運動的研究，近代西方科學的起點可能就大不一樣了。

泰勒斯和畢達哥拉斯都曾到埃及和巴比倫長期遊歷，並且在神廟中向祭司問學，所以，他們與這兩個古老文明都有密切學術淵源。然而，他們的抽象思維和嚴謹推理方法卻是原創而毫無先例的。這其間的變化到底如何發生，至今還是一個謎。

丙 輝煌的頂峰時期

公元前四世紀是雅典的黃金時代；從第三世紀開始，希臘文化的中心南移到埃及的亞歷山大里亞，而經過前此三百年孕育的希臘科學，也在其後二百年間達到輝煌的頂峰。亞歷山大里亞之崛起，除了亞里斯多德的學生亞歷山大大帝的影響之外，更直接的原因則是雅典在政治上的衰落，以及埃及托勒密皇朝同樣醉心學術文化，因而建立由皇室支持的學宮 (Museum)。它發揮了和雅典學園同樣的作用，只是更為持久。我們現在想到的古代最卓越的科學家，幾乎都和早期 (300-100B.C.) 學宮有密切關係，而且都有大量著作流傳，充分顯示他們思想的縝密以及成績之驚人。他們包括《幾何原本》和《光學》的作者歐幾里德；留下了有關浮體、重心、圓、螺線、球體 (包括球體積公式的嚴格證明)、圓柱體、圓錐體、橢圓體、拋物線面積等十幾部著作的亞基米德；以其精深的七卷本《圓錐曲線》著名的亞波隆尼亞斯 (Appolonius)；以簡單觀測和幾乎無懈可擊的推理來論證和撰寫《日月的大小與距離》的亞里斯它喀斯 (Aristarchus)；以實測方法準確推斷地球周界 (誤差只是2%) 的伊拉托斯尼斯 (Eratosthenes)；首先有系統地計算三角函數、編製星表、發現地軸旋進 (precession) 周期為2,600年，並且相當準確地求得月距和地球半徑比例 (誤差13%) 的天文學家赫巴喀斯 (Hipparchus)；自然，還有公元第二世紀的集大成者托勒密；除了《大匯編》之外，他還留下了《光學》、《地理學》以及占星學著作《四部書》。

亞歷山大里亞科學在公元第一世紀之後漸漸失去原創動力，這一般被歸咎於羅馬帝國強大實用主義性格的不利影響；但另一個原因可能是經過四百年的發展，它的學風已經定型，而傳統成績之輝煌亦適足以窒礙新思想、新方法出現。無論如何，從第三世紀開始，羅馬世界本身也在變化，西方古代科學長達兩千年的發展，至此步入結束階段，等待十二世紀的重生。

四 科學文明興起的討論

回顧西方科學在過去近四千年的發展，有一點非常之清楚：那就是它的過程和背景極為複雜，絕對不是憑簡單觀察就可以解釋的。在今日，科學對社會的重要性和影響絕不下於資本主義或民主政治；然而，大家知道後兩者需要詳細研究，卻往往認為科學的發展或停滯可以歸之於幾個簡單因素，那豈不是十分矛盾嗎？這也許是由於科學性質特殊，而且只是在過去二百年間才對社會發生重大影響，所以它的發展還未曾受知識份子重視吧？

無論如何，正如開頭已說明，本文並非要提出一套科學發展理論，而只是要為它勾勒一個輪廓，並作幾點觀察，以作為進一步研究的起點而已。

甲 悠久的歷史

縱觀西方精確科學的發展，我們首先會感到震驚的，就是它之悠久。我們最早的數書《九章算術》時期不會超過漢代，它比埃及、巴比倫的數學文獻晚了1,500年左右，而在發展程度上只不過是大體相若而已：《九章算術》所用的圓周率仍然是極粗略的3，而高次方程的解還未出現。中國古代文獻中有關天文的零片段，例如甲骨文中所出現的星座名稱，最早不過是晚商，即1400B.C.以後；而具有實測數據的最早著作如《周髀算經》則是西漢成書的，那比諸巴比倫的泥版記錄也同樣晚了1,500年。

當然，中國可能有些早期科學典籍失傳，例如戰國時期的《石申天文》和《天文星占》就往往被提到，因此上述差距只是粗略估計。但它的誤差不可能太大，因為第一，最近國內的大量出土文獻並沒有這方面的重要新發現；況且，焚書以社會和政治論述為主，科學所受影響應當較少。其次，在現存典籍中，並沒有散佚科學傳統的痕迹：除了像《墨子》那些片段之外，我們找不到許多古代有關科學或者科學家的記載。這比之於希臘早期(650-450B.C.)發展雖然缺乏原始文獻，但卻有後代詳細記載描述，是全然不同的。

這1,500年的起點差距是中國和西方科學發展第一個大差異。為甚麼會有這差異？答案也許在於，目前已知的最早中國文字是大約1400B.C.以後出現的甲骨文，它比出現於3000B.C.左右的埃及象形文字和蘇末楔形文字恰恰晚了1,500年。文字發展較遲，也許是原因之一吧。

西方科學在過去近四千年的發展過程和背景極為複雜，絕對不是憑簡單觀察就可以解釋的。在今日，科學對社會的重要性和影響絕不下於資本主義或民主政治；然而，大家知道後兩者需要詳細研究，卻往往認為科學的發展或停滯可以歸之於幾個簡單因素，那豈不是十分矛盾嗎？

乙 科學的突變

西方科學發展第二個特點是它同時具有延續性與突變性，而且兩者之間顯示出巨大張力。

西方第一次科學突變應當就是在公元前六至七世紀間埃及—巴比倫的「運算型」科學變為希臘的「推理型」科學。在這轉變中以前的運算方法以及天文知識並沒有被放棄（例如巴比倫的六十進制和位置記數法仍然使用），但科學卻有了新的目標和方法：即不再問「如何」而問「為甚麼」，不再滿足於數值答案，而要通過推理來了解空間結構和天體現象。它可以說是幾何學宇宙觀的革命。然而，在亞歷山大學宮時期巴比倫的計算傳統重新發生重要影響，《大匯編》正好作為算術與幾何之間張力的表徵：它的目標（詳細預測天體位置）是算術的，基本假設是幾何的（軌道必然由圓構成），而方法（主要是球面三角學）則兩者兼而有之。最根本的是，它建立了一個從基本假設開始，通過運算以得到預測，再與觀測比較的這麼一個「描述自然世界」或「解釋世界」的基本模式。

中國和西方科學發展的第二個大差異，就是中國科學從來沒有經歷過一次突變或革命：它始終停留在「運算型」階段。《九章算術》和秦九韶《數書九章》相比，其繁簡自然有天淵之別，但體裁、問題性質、運思方式，則仍是一脈相承。也就是說，《數書九章》雖然繁複靈巧得多，但其境界與方法並沒有突破。當然，《周髀算經》的確已顯示出科學推理精神，它似乎表現了和傳統的決裂。可惜的是，它並未能繼續發展，最多只能算是一次夭折革命^③。

西方科學的第二次突變，自然就是十七世紀現代科學的出現。在數學上，這個變化的精神是代數出現，並與幾何結合為解析幾何，由是打開解析學之門；在天文學和物理學上，這個變化表現於對自然規律的普遍性（即不分天上和地下）與機械性（即排除任何神秘性）的認識；以及這些規律之不能先驗地推知，而需要通過觀察和實驗去找尋。也就是說，希臘科學中那些美妙的幾何線條和方法雖然重要，但卻不能涵蓋科學的全體。反諷的是，在他之前的刻卜勒證明了行星軌道並非圓形，卻終身相信它們的大小是由幾何學決定的；而到本世紀，幾何的魅力仍未減退：愛因斯坦和其他大物理學家，也還都在更深的層次找尋物理世界的幾何構造。

但對中國傳統科學來說，真正的問題是：何以在春秋時期或者漢代沒有發生第一次科學突變，因為正是第一次突變使得西方科學在方法、層次、格局上都遠遠超越中國。到第二次科學突變來臨的前夕，雙方科學傳統和水平已根本無可比較了。從這角度來說，問為甚麼中國近代科學落後於西方，是意義不大的。

丙 多文明之間的轉移

西方科學發展的另一個特點是它的複雜與多變。事實上，我們在這裏所泛稱的「西方」，是一個籠統的大口袋，它裝下了許多不同時代、不同地域但相互

對中國傳統科學來說，真正的問題是：何以在春秋時期或者漢代沒有發生第一次科學突變，因為正是第一次突變使得西方科學在方法、層次、格局上都遠遠超越中國。到第二次科學突變來臨的前夕，雙方科學傳統和水平已根本無可比較了。從這角度來說，問為甚麼中國近代科學落後於西方，是意義不大的。

影響的文化或文明：埃及、巴比倫、希臘、亞歷山大里亞、拜占庭、巴格達、西西里、西班牙、意大利、法國、英國、德國、波蘭等等，科學發展的軌跡則在其間移動，並不永久停留——雖然經過長久時間之後又往往會回到原來的區域：例如兩河流域、埃及、西西里島都曾經兩度成為發展中心。這種沒有明顯規律的移動和變化反映的，很可能是：科學需要特殊的社會、環境、文化、人才結合，而這是稀有和不穩定的，因此科學中心要經常轉移，「找尋」最適合的發展之地。假如這一猜想並非全無道理，那麼它也可以說明科學在同一農業文明之中的發展問題：這些文明的共同點是幅員寬廣、時間連續性強、地區性差異小，因此科學難以通過轉移來尋求最佳的生存點，其新發展遂受到窒礙。這也許可以為在埃及、巴比倫、中國這些古代文明本身以內何以從未發生過科學革命，以及為甚麼中國在魏晉南北朝和南宋這兩個混亂時期科學反而蓬勃發展提供解釋吧。

丁 科學傳統的形成

最後，我們還要指出，在西方，科學一方面是個人活動，另一方面卻又有很強的組織性。它之所以能在同一文明或文化內形成傳統和長期連續發展，委實與組織有關。在埃及—巴比倫階段，科學是在神廟的祭司間流傳的；在希臘時代它與畢達哥拉斯學派、柏拉圖學園以及亞歷山大里亞學宮有密切關係。這些組織對科學、哲學乃至西方文化傳統的形成，顯然具有重要促進作用。至於中古的大學，以及十七世紀的學會，其重要性就更不必說了。

這些組織基本上都是由學者為了授業而建立的——當然神廟和學宮不在此例，但學宮有類於現代的研究院，雖由國家資助，但仍然以學者為主體。中國不乏相類學術組織，例如戰國時期的稷下學宮或者宋明時代的書院，但以科學為主的則絕無僅有。在中國，有關數學或天文學的學習和研究，大都和國家考試或者祭祀、曆法等儀禮功能分不開；而著名數學家、天文學家，則歷來似乎很少能有組織地傳授和發揚其學術。其所以會如此，可能是由於儒學傳統太強，亦可能是由於國家壟斷了活動空間——或者兩者兼而有之吧？

這裏應當指出，在西方，宗教和科學並不單純是對立，其關係是十分微妙的。我們可以舉出最少四個例子來說明這關係：即埃及—巴比倫的神廟，具有神秘宗教性質的畢達哥拉斯學派，伊斯蘭教宗在巴格達所建立名為「智慧之家」(Bait al-hikma)的科學研究所，以及中古時期從教會學校演變而來的大學。在所有這些例子之中，宗教對科學都起了極大促進作用。這一方面是由於它能提供獨立於世俗政治力量以外的資源和活動空間；另一方面，由於西方宗教本身對超越於俗世之上的境界有嚮往與追求，它對尋求自然規律的科學家也提供了精神力量。事實上，大部分中世紀科學家亦是教士，甚至有不少是主教。伽利略與教會的衝突雖然非常之激烈，但十七世紀大部分科學家還是虔誠信徒，而且堅信他們的工作能夠體現以及表揚造物主智慧，所以是有宗教意義的。

在西方，宗教對科學起了極大促進作用。這一方面是由於它能提供獨立於世俗政治力量以外的資源和活動空間；另一方面，由於西方宗教本身對超越於俗世之上的境界有嚮往與追求，它對尋求自然規律的科學家也提供了精神力量。事實上，大部分中世紀科學家亦是教士，甚至有不少是主教。

五 結 語

對於為甚麼現代科學出現於西方，我們大體可以看到兩類原因。第一類是關乎起始狀態的，即是其起源早，並且在文化成型的關鍵時刻形成了傳統。第二類則關乎發展過程：科學的自然發展似乎有相當的隨機性，因為它所需要的因素結合在甚麼情況或地域出現難以確定；因此對科學成長最有利的，可能是多元、不齊純、多種文明並存或相繼出現的環境，而並非穩定或者井然有序的環境。科學之所以能在西方長期蓬勃發展，或許就是因為歐洲、地中海沿岸以及兩河流域，提供了這樣一個地理和文化環境。

當然，我們講的只是精確科學，它能否就涵蓋科學的全體？例如中醫的針灸和經絡學說並沒有實證科學基礎，然而至今卻也仍然有重要地位，未曾被西方醫學淘汰。那麼中國科學將來是否可以循與前此不同的途徑（例如現象學的途徑）而另行發揚光大呢？這種可能性自然無法排除，因為科學發展的模式沒有道理不可以變易——甚至到底甚麼是「現代科學」，恐怕也難以預先設定。不過，未來發展形態即使變了，可能也是大大出人意表。舉個例子，分子生物學中現在大量湧現的基因譜 (genome) 是沒有個別生物學家所能全面掌握或記憶的。在今後10年間，人類本身的基因譜行將完成解碼，資訊爆炸亦更將變本加厲。屆時所謂「生物科學」不會是個別科學家的智能活動，而將是許多生物學者和電腦資料庫、程式軟件庫這人與機器集合體才能「了解」或研究的事物。而同樣情況，在大氣、海洋、地球科學也都會出現。這自然可以算是從解析法走向現象學的轉向，但卻不能視為單純的替代，而應當說是兩者在更高層次的結合。

畢竟，我們在這裏談的，只是現代科學在歷史上出現的過程，而並非其未來發展的道路。我們要記得，即使在西方，科學在十八世紀以前也還是少數人的事情，而且對社會並無直接影響。但現在情況已經完全改觀，科學已經成為所有國家都極之關切，要以公共資源大力發展的事物。在未來的世界中，科學將如何發展，那自然是大多數人真正關心的問題。然而我們的論述並不能簡單地移用於未來。我們只能期望，明白了科學在過去曲折而弔詭的發展道路，能幫助我們消除觀念蔽障，對隱藏在迷霧中的未來，看得更小心和更遠。

參考資料

Harold Berman, *Law and Revolution* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1983) (《法律與革命》，北京大百科全書出版社，1993)。

Carl B. Boyer, *A History of Mathematics* (New York: Wiley, 1968)。

E.J. Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, trans. C. Dikshoorn (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1986); *Archimedes*, trans. C. Dikshoorn (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1987)。

- A. Rupert Hall, *The Revolution in Science 1500-1750* (London: Longman, 1983).
Charles H. Haskins, *Studies in the History of Mediaeval Science* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1924); *The Renaissance of the Twelfth Century* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1927).
Sir Thomas Heath, *Aristarchus of Samos, the Ancient Copernicus* (Oxford: Clarendon Press, 1913); *A History of Greek Mathematics*, 2 vols. (Oxford: Clarendon Press, 1921).
Alexandre Koyré, *The Astronomical Revolution*, trans. R.E.W. Maddison (London: Methuen, 1973).
David C. Lindberg, *The Beginnings of Western Science* (Chicago: University of Chicago Press, 1992).
G.E.R. Lloyd, *Early Greek Science: Thales to Aristotle* (New York: W.W. Norton, 1970); *Greek Science After Aristotle* (New York: W.W. Norton, 1973).
Otto Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity* (New York: Dover Publications, 1969).
Olaf Pedersen, *A Survey of the Almagest* (Odense: Odense Universitetsforlag, 1974).
Ptolemy, *Ptolemy's Almagest*, trans. G.J. Toomer (New York: Springer-Verlag, 1984).
George Sarton, *A History of Science*, 2 vols. (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1959 & 1966).
Hugh Thurston, *Early Astronomy* (New York: Springer-Verlag, 1994).
Lynn White, Jr., *Medieval Religion and Technology* (Berkeley: University of California Press, 1978).

註釋

- ① 有關這一問題的歷史和討論，見本欄范岱年文。
- ② 見Hall 1983, 1-38。
- ③ Lindberg 1992, 290-307。
- ④ White 1978, chap. 5；關於伽利略的實驗運動學，見Hall 1983, chap. 4。
- ⑤ Lindberg 1992, chap. 8。
- ⑥ 對於近代「西方文明」的形成，Berman 1983有很詳細的論述。
- ⑦ 翻譯運動的權威研究是Haskins 1924；對歐洲中古學術傳統的形成及早期文藝復興的論述見Haskins 1927；Lindberg 1992, chaps. 9-10的概述也可參考。
- ⑧ 見Toomer 1984的英譯本；Pedersen 1974是對*Almagest*最詳確的入門介紹。
- ⑨ 對哥白尼的研究主要見Koyré 1973, pt. I及Hall 1983, chap. 2。
- ⑩ 以下資料見Neugebauer 1969, chaps. 2, 4, 5；Boyer 1968, chaps. 2-3。
- ⑪ 本節資料見Lindberg 1992；Lloyd 1970 & 1973；Sarton 1959 & 1966；Heath 1913 & 1921。
- ⑫ 關於精確科學思想出現整體過程的討論，最深入和精確的是Dijksterhuis 1986。
- ⑬ 陳方正：〈從體與用看中國古代科學〉，《二十一世紀》（香港中文大學·中國文化研究所），1997年4月號，頁88-93。