

[8667 words; 10693 including footnotes]

地心論面臨挑戰

陳天機*、彭金滿**、王永雄**

2006-8-14

*香港中文大學大學通識教育部。

**香港中文大學物理系。

天其運乎？地其處乎？日月其爭於所乎？
孰主張是？孰維綱是？孰居無事推而行是？
意者其有機緘而不得已邪？意者其運轉而不能自止邪？ ——《莊子·天運》¹

1. 導言

和暖的太陽每天從東邊出，向西邊落；冬天寒冷，夏日炎熱。先祖歸納出晝夜、四季的規律，在一萬多年前發展出農耕技術，創建了多元化的社會。他們也發明了神話；後來的學者卻提出疑問，尋求理性的解釋。

自我優越感相信是初民的護身符，但可惜也是探求大自然真理的絆腳石。從遠古開始直到中古時代，全世界絕大多數主流學者的宇宙觀必然包括「地心論」：靜止的大地位在宇宙正中，享受運行諸星的拱衛。在歐洲，古希臘哲人已經知道大地大致上是球形的，「地心論」也等於「地球中心論」。

經過 16-18 世紀的爭辯後，地心論終於式微，學者放棄夜郎自大的心理，為自然科學奠定「求真」的根基；世人通常歸功於哥白尼²的「日心論」。

筆者分析 16 世紀後半期已問世的三套太陽系理論，³提出前人或已講過、但仍有待普遍接受的一些意見：

- a. 哥白尼並非日心論的始創人，而且他自己提出的理論從未成為太陽系學說的主流。
- b. 大體理論所探討的是物理模型，有異於追求數值逼近的細節理論，可以分別處理。
- c. 就大體理論而言，布拉赫⁴的「行星繞日、日繞地球」第谷理論與哥白尼的日心論兩者的大體理論，其實只是同一現象採取不同方式的描述，都無法證明所選擇的原點是「靜止不動」的宇宙的中心。

¹ 莊周(約前 369-約前 286)，戰國時代道家哲學家。《莊子》一書現存 33 篇，分〈內篇〉、〈外篇〉、〈雜篇〉；〈天運〉載在〈外篇〉。「運」：運行；「處」：靜止；「意者」：是否；「邪」：古「耶」字。

² Nicolaus Copernicus (1473-1543)，波蘭天主教修士(canon)，業餘天文學家。Swrdlow and Neugebauer 有透關的傳記(pp 3-32)。關於哥白尼和其他重要學者的傳記亦請參閱 O'Connor and Robertson。

³ 「筆者」這名詞代表本文的所有作者；三套理論見第 2 節。

d. 托勒密⁵的地心論構思所容許的唯一物理模型正是第谷／哥白尼模型。

2. 地心論與日心論的沿革

2.1 亞里士多德⁶

古希臘哲學家亞里士多德的《論天(On the Heavens)》綜合了遠古兩河流域、埃及和希臘的傳統。他認為「真」的必然是「美」的，而形狀之至美莫如圓形和球體。大地雖充滿缺陷，仍是球體；它位在宇宙的正中，而且靜止不動。在地球之外共有 56 層透明晶體形成的同心球殼，都由最外的球殼直接、間接帶動，運轉不息。所有恆星都附在每天繞地一周的球殼：「天穹(firmament)」。在天穹之內，每顆運動的天體：月亮、太陽和水、金、火、木、土五大行星，都需要好幾個球殼來控制。運動的天體都幾乎在黃道（太陽在天穹上投影的路線）平面上繞地球運行。（見圖 2-1）。

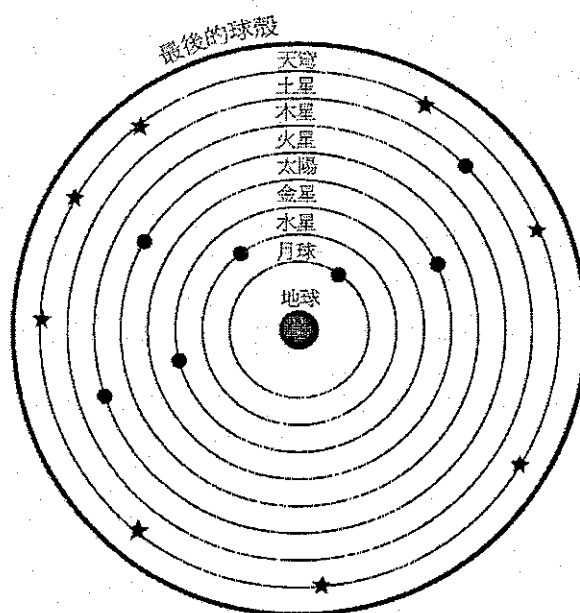


圖 2-1. 亞里士多德理論示意

2.2 托勒密的周轉圓理論

亞里士多德的理論整齊有序，但與肉眼觀測頗有出入；學者因而提出修改，由托勒密約在紀元 140 年集其大成，寫成巨帙。希臘文原本早已流失；幸有阿拉伯文譯本《大書(Almagest)》，後來多次被重譯成歐洲文字。⁷

⁴ Tycho Brahe (1546-1601)，丹麥天文學家。

⁵ Claudius Ptolemy of Alexandria (~85-165 年)，古羅馬希臘裔天文學家。

⁶ Aristotle (前 384-前 322)；見 Evans, pp. 305-311。

經過神學哲學家托馬斯·阿奎那的提倡，⁸中世紀天主教會接受亞里士多德的哲學理論作為經院哲學的骨幹；托勒密的理論的主要部分也被視為不易的真理。這理論總共流行了約一千四百年。值得注意的是，《大書》講述軌道的部分並沒有直接採用晶體球殼；科學哲學家庫恩甚至懷疑，托勒密究竟是否相信這概念。⁹

我們且從亞里士多德的理論出發，逐步引入觀察到的主要問題，和《大書》採取的解答策略，如下：

- 問題 1.** 觀察所得的太陽運行速度並不均勻。
對策 1. 偏心點 (Eccentric, 見圖 2-2 a) (阿波羅尼奧斯/喜帕恰斯¹⁰)
 太陽 S 在圓形的軌道 (「均輪 (Deferent)」) C_3 上繞地球行走，但地球不在圓心 O ，卻在偏心點 E 。線段 EO 遠短於均輪的半徑。(筆者按：「站在一旁」的地球已不在「宇宙正中」了。)
- 問題 2.** 行星顯出逆行運動 (retrograde motion)，有時改變運行方向。
對策 2. 周轉圓 (Epicyle, 也譯作「本輪」，見圖 2-2 b)。(阿波羅尼奧斯)
 行星 P_i 在圓形的軌道 (「周轉圓」) c_i 上繞著神秘中心 O_i 旋轉； O_i 更繞著 O 在均輪 C_i 上旋轉。¹¹ (筆者按：行星 P_i 的軌道雖是圓形軌道的組合，但已不是至美至善的單一正圓形。¹²我們也許應該可以發問：看不見的神秘周轉圓心是否真實？晶體球殼理論能夠容納周轉圓嗎？)
- 問題 3.** 觀察到的行星速度並不均勻。
對策 3. 均衡點 (Equant, 見圖 2-2 c)。(托勒密)
 均輪 C_i 內部除了偏心點 E 、圓心 O 外，更有均衡點 Q_i ，三點都在同一直線上，(通常 $EO = OQ_i$)。線段 Q_iO_i 以等角速度繞著 Q_i 旋轉。¹³ (筆者按：地球因此不能直接控制太陽和行星的運動。)
- 問題 4.** 上述理論與肉眼天文觀察仍有出入。
 (筆者按：天體運行問題因此變成了應用數學上的近似 (approximation) 問題。)¹⁴
- 對策 4a.** 高層次的周轉圓。每個周轉圓裏面，除了圓心之外，可以擁有自己的偏心點和均衡點，帶動更上一個層次的周轉圓。¹⁵
- 對策 4b.** 每個均衡點的位置可以不受同一層次的圓心和偏心點位置的限制，而且也可以作 (相對於圓心的) 運動。

⁷這書在第 9 世紀有兩套阿拉伯文譯本，在 12 世紀，阿拉伯文譯本被重譯成西班牙文，又從西班牙文再譯成拉丁文；後來也出現了直接譯自阿拉伯文的拉丁文本。15 世紀又有希臘文和拉丁文的新譯本。

⁸ St. Thomas Aquinas (約 1225-1274 年)，意大利神學哲學家。

⁹ Kuhn, p. 79

¹⁰ Apollonius of Perga (約前 262-前 190)，古希臘幾何學家，Hipparchus of Nicaea (約前 190—約前 120)，古希臘天文學家。

¹¹ 下標 i 是行星的標籤。通常 (P_i, O_i) 有相同的繞向；在天穹上自西向東移動，太陽也不例外。

¹² Evans, pp. 210-216。托勒密在《大書 IX》中也講過，阿波羅尼奧斯證明日速異象可以用「偏心點」或「加上周轉圓」兩種構思之一來表達；托勒密採用了較為簡明的偏心點構思。

¹³ 換句話說，線段 Q_iO_i 在每小時 (t) 內掃過同一大小的角度 a_i 。

¹⁴ 在中世紀，伊斯蘭、歐洲學者屢作下文 4a, 4b 所述的修改。

¹⁵ 以地球為偏心點的均輪可以叫做「第 0 層」的周轉圓 (c^0)。從 $k=1$ 起， c^k 裏的偏心點 (繞著 c^{k-1} 的圓心) 在 c^{k-1} 上運行；運行的速度由 c^{k-1} 的均衡點控制。

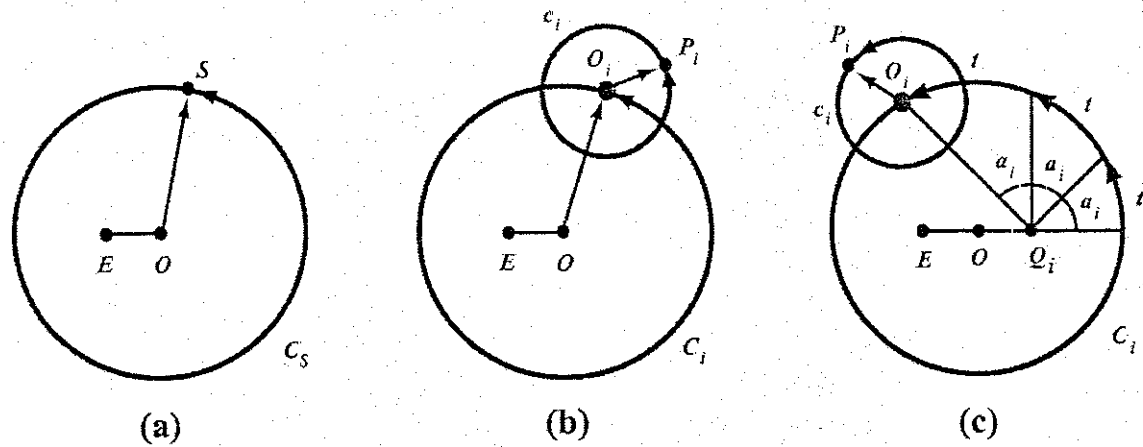


圖 2-2. 托勒密的地球中心理論。(a) 偏心率 E ，(b) 周轉圓 c_i ，(c) 均衡點 Q_i 。

2.3. 日心論

2.3.1. 上古的先驅

古希臘的畢達哥拉斯學派¹⁶相信地球繞著一團看不見的火焰運行。早在紀元前 250 年左右，古希臘天文學家阿里斯塔克斯已提出過地球繞日的假說，¹⁷但可惜現存的主要敘述只是阿基米德的書《數沙者》中的寥寥幾句：¹⁸

但阿里斯塔克斯出了一本書，在書裏用了一些假設，他的假設是，恆星和太陽不動，地球在圓周上繞著太陽旋轉，太陽在軌道中央，

上文甚至沒有指出其他行星是否也繞日運行。

根據羅馬帝國初期希臘傳記家普盧塔克的記載，阿里斯塔克斯也接受了赫拉克里德的自轉理論。¹⁹赫拉克里德是已知最早提出地球自轉說的人。

遠古印度學者雅住那華奇雅說「太陽用一條線牽著這些世界：大地、眾行星和大氣」。²⁰紀元 499 年，印度數學家亞里亞巴拉塔用詩篇形式宣稱地球與行星都以橢圓軌道繞日運行，比西歐早了一千多年！²¹但可惜他的天才構思後繼無人，只是

¹⁶ Pythagoras (古希臘數學家，前 582-前 507)建立的崇拜數學神秘主義學派。

¹⁷ Aristarchus of Samos (約前 310—約前 230 年)，古希臘天文學家。

¹⁸ Archimedes (古希臘科學家，約前 287—約前 212 年，比阿里斯塔克斯年輕約 23 年)：The Sand-Reckoner。

¹⁹ 赫拉克里德 (Heraclides of Pontus 前 387—前 312 年)；普盧塔克(Plutarch, 約 46—約 120 年)。

²⁰ Yajnavalkya (約前第 9-8 世紀)：Shatapatha Brahmana 書中也說，地球到太陽的距離，是太陽直徑的 108 倍；最新數值：107.6 倍，誤差只有 0.4%。見 <http://en.wikipedia.org/wiki/Heliocentrism>

²¹ Aryabharata (476-550)，是多能的數學家、天文學家，尤以“0”的發明見稱。他在 499 年以詩篇形式寫出巨作 Aryabhatiya。見 O'Connor and Robertson, "Aryabhata I"條。

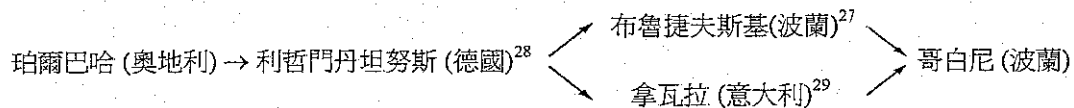
曇花一現。但他的詩篇被譯成阿拉伯文（8世紀），又從阿拉伯文重譯成拉丁文（13世紀），很可能影響了後來的哥白尼。

2.3.2. 中古歐洲的師承線索

西羅馬帝國滅亡(476年)後，歐洲學術陷入低潮。幸好阿拉伯學者保存了部分古希臘傳統，消化、發揚了東南亞傳入的學術發明，²²更開闢了獨特的新領域。²³從12世紀開始，阿拉伯書籍的翻譯策動了歐洲的文藝復興。

14世紀西歐學者開始質疑當時的主流理論。法國主教奧瑞斯默指出，只從相對運動的觀察不能決定絕對運動的模式，而且亞里士多德所說的現象：「地球靜止，天穹繞地旋轉」，其實是由於地球本身的自轉。²⁴德國樞機主教庫沙更宣稱地球繞著太陽旋轉(1440)；²⁵這是日心論在中古的重現。兩位主教多才多藝，都以敢言見稱，也都沒有受到教會的任何制裁。

庫沙曾與天文學家珀爾巴哈交談(1448)；²⁶珀爾巴哈不信日心論，但認為太陽控制著晶體球殼上行星的運行。他開始了經歷四「代」的國際師承傳統：



利哲門丹坦努斯繼續先師的遺志，闡釋托勒密名作，完成風靡一時的《大書概論》(1462)。³⁰克拉科夫(Cracow)大學天文學在北歐頗負盛名，教授布魯捷夫斯基是利哲門丹坦努斯的門徒，拿瓦拉也自認是利哲門丹坦努斯的門徒；哥白尼在克拉科夫大學讀過天文學，在波倫亞(Bologna)當過拿瓦拉的天文助手，也公開承認《大書概論》對自己的影響。

2.3.3. 哥白尼的日心論

在1512年，哥白尼分發了手抄的匿名小冊子《小釋》³¹，提倡太陽中心、地球繞日的理論。在哥白尼去世的一年(1543)，經過唯一門徒雷提寇斯的奔走支持

²²例如：從印度傳入“0”和十進記數法；從中國傳入造紙術、印刷術、煉金術和火炮技術。

²³例如：代數。

²⁴ Nicholas of Oresme (1323-1382) 是法國國王查理五世(1364-1380 在位)的顧問。他也發明了用座標表達表格資訊，這雛型的解析幾何比笛卡兒(1596-1650)早了200年。亦見本文第5節。

²⁵ Nicholas of Cusa (1401-1464)，德國樞機主教，原名 Nikolaus Krebs von Kues。

²⁶ Georg von Peurbach (1423-1461，亦稱 Purbach)，奧地利維也納大學天文學教授。

²⁷ Adalbert Brudzewski (1445-1497)，克拉科夫大學天文學教授，利哲門丹坦努斯的門徒。

²⁸ Johann Müller von Königsberg (1436-1476)，以出生地的拉丁名 Regiomontanus (國王之山) 見稱。

²⁹ Dominico Maria Navarra da Ferrara (1454-1504)，波倫亞大學天文學教授。

³⁰ 拉丁文 *Epytoma in almagesti Ptolemei*，英譯名 *Epitome of the Almagest*。

³¹ 拉丁文 *Commentariolus*，英譯名 *The Little Commentary*。

後，力作《天球旋轉論》終於出版了。³²據說哥白尼在草稿裏也提起阿里斯塔克斯，在出版前卻把這一節刪掉了。³³但即使哥白尼從來沒有聽過阿里斯塔克斯，也應該讀過樞機主教庫沙的日心論；他肯定知道：自己不是日心論的創始人。

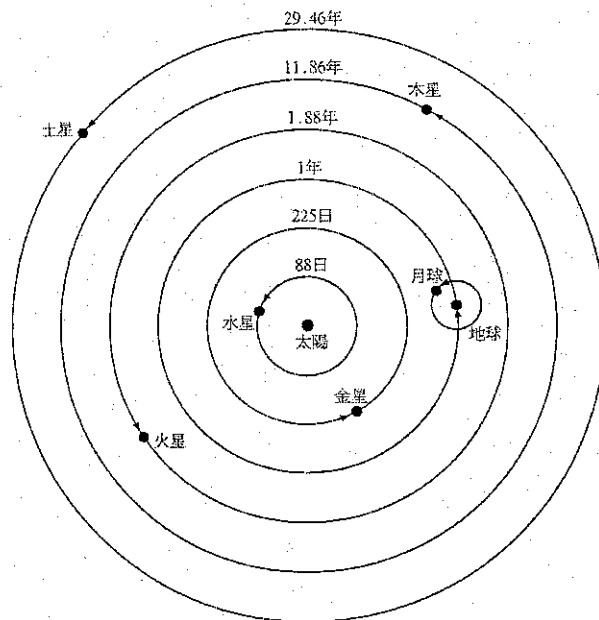


圖 2-3. 哥白尼的大體理論（大小不按比例）

2.4. 布拉赫的「行星繞日、日繞地球」理論

丹麥貴族第谷·布拉赫出生在哥白尼去世後三年。他發現了一顆超新星，一顆彗星，記錄了有史以來最精確的行星數據，無疑是最偉大的肉眼天文觀測學家。布拉赫在 1588 年出版《論一些新現象》，³⁴認為五大行星繞著太陽運轉，而太陽卻繞著地球運轉。這學說現在通稱為「第谷理論 (the Tychonic System)」；圖 2-4 顯示大體模型。

第谷理論比哥白尼和托勒密的理論都準確得多，也不觸犯宗教信條，出現後很快就成為當世宇宙觀的主流。它與托勒密的周轉圓理論最重要的不同是，所有行星周轉圓所繞的是一個共同中心；這中心毫不神秘，正是實質的太陽。

³² 拉丁文 *De Revolutionibus orbium coelestium*，英譯名 *On the Revolution of Celestial Spheres*。雷提寇斯 (Georg Joachim Rheticus) 是新教徒、Wittenberg 大學數學和天文學教授。他極力推薦《天球旋轉論》文稿，在德國新教區找到出版的渠道，並校對了印本；但書中竟然完全沒有他的名字。

³³ Leonidas Petrakis, "Ancient Greeks and modern science: Who discovered the heliocentric system?" *The National Herald* (New York), May 22-23, 2004, 亦見

<http://www.demokritos.org/Aristarchus%20and%20Copernicus-Petrakis.htm>；但也有人抱有異見：見 O. Gingerich, "Did Copernicus owe a debt to Aristarchus?", *J Hist Astronom* 16 (1) (1985), pp. 37-42

³⁴ *De mundi aetheri ei recentioribus phaenomenis*, 英譯名 *Some New Phenomena*。

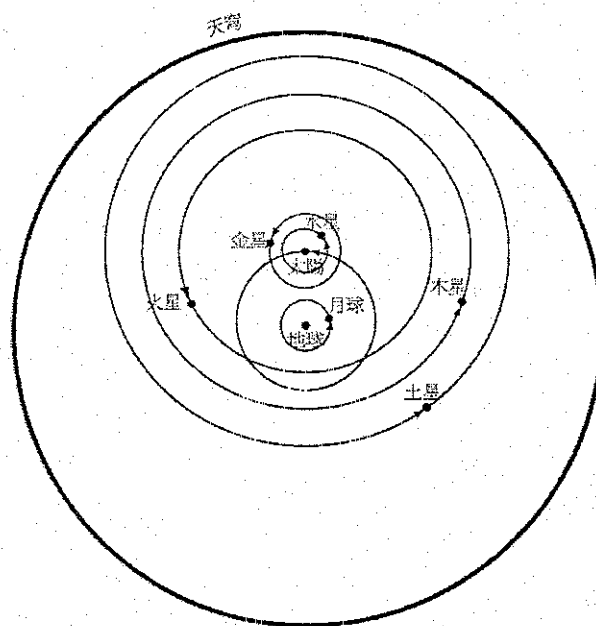


圖 2-4. 布拉赫「第谷理論」的大體模型。〔大小不按比例〕

2.5. 大體與細節

古代太陽系理論通常可以分成兩個層次：大體理論和細節理論。大體理論強調構思，不重細節，易作比較；細節理論目的卻在趨近觀察數據的精確度，所強調的往往是應用數學；它們枝葉太多，反而把「森林」掩蔽了。而且一套理論裏面的細節往往可以「張冠李戴」，用另外一套理論的細節取代。

三套太陽系大體理論摘要

- 托勒密（地心論）：太陽在圓形的均輪上環繞地球，每年一周；五大行星各在不同的周轉圓上環繞自己的神秘中心；神秘中心各在自己的均輪上繞地球旋轉（水星、金星的周轉圓心與太陽共線；火星、木星、土星的神秘中心環繞均輪，周期都是一年）。理論在實際上並沒有採用晶體球殼。（見圖 3-1）
- 哥白尼（日心論）：六大行星（包括地球）各以圓形軌道環繞太陽。（見圖 2-3）每條圓形軌道附在自己的旋轉晶體球殼上。³⁵
- 布拉赫（地心論）：太陽在圓形的均輪上繞地球，每年一周；五大行星各以周轉圓環繞太陽，地球約在均輪中心。理論不用晶體球殼。（見圖 2-4）

3. 托勒密理論與布拉赫理論的融合

³⁵ 見 Kuhn, p 206 ; Hall, p 64

3.1. 巧合？

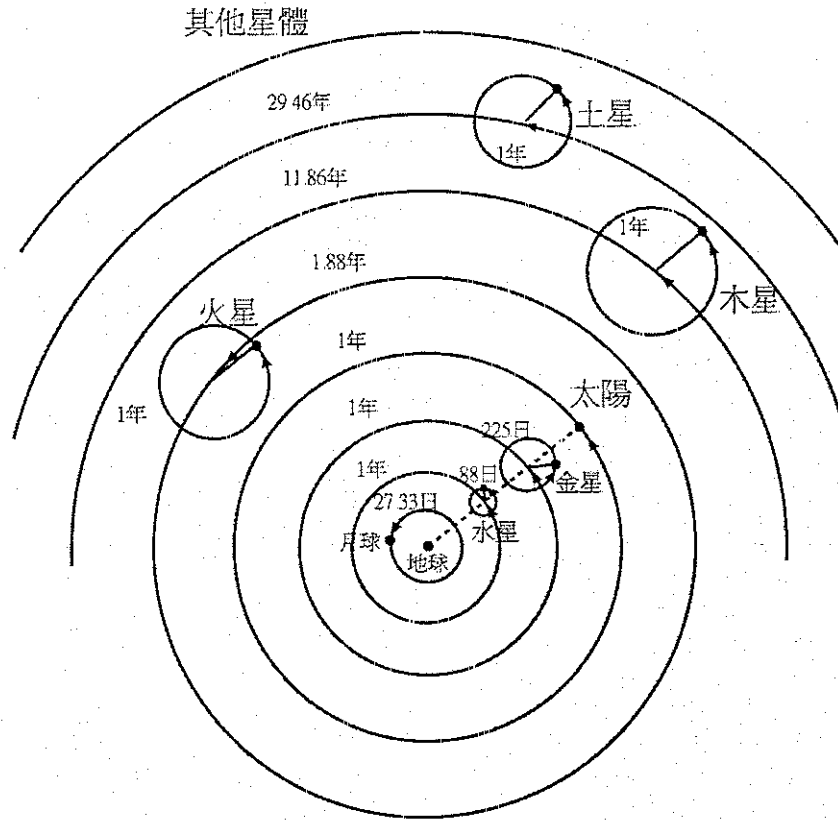


圖 3-1. 托勒密的大體太陽系構思。(仿照赫楚；大小不按比例)

圖 3-1 仿照美國科學史家赫楚教授繪製的托勒密大體構思。³⁶赫楚指出，這圖擁有一些現代教科書罕載的訊息：

- a. 水星、金星的周轉圓心與太陽都在同一軸線上，均輪周期與太陽看齊（都恰是一年）。
- b. 火星、木星、土星的周轉圓周期竟然也剛好都是一年，而且在周轉圓上的角速度竟然同步一致。更耐人尋味的是：從這三個周轉圓心到達自己行星的三個線段，竟然都不期而合地、與串聯「地球、水星、金星、太陽」的神秘軸線平行。

難怪珀爾巴哈說太陽控制著行星的運行了！

3.2. 奇妙的互易定理

³⁶ 見 Hatch, 'Simplified Ptolemaic Scheme' 條。本文不擬討論繞地旋轉的月球。

赫楚言外之意，呼之欲出；在同一篇文獻裏另外一條裏，他終於顯示了在英國科學史家霍爾詮釋下，利哲門丹坦努斯遠在 1462 年的啓示。³⁷且讓我們先用初級平面幾何證明一條看似不可思議、實則奇為簡單的「均輪一周轉圓互易定理」：

定理：（利哲門丹坦努斯，1462〈大書概論·XII〉）：在一個由「一個均輪、一個周轉圓」組成的托勒密行星系統裏，如均輪與周轉圓（在意念上）互易，則行星運動完全不變。

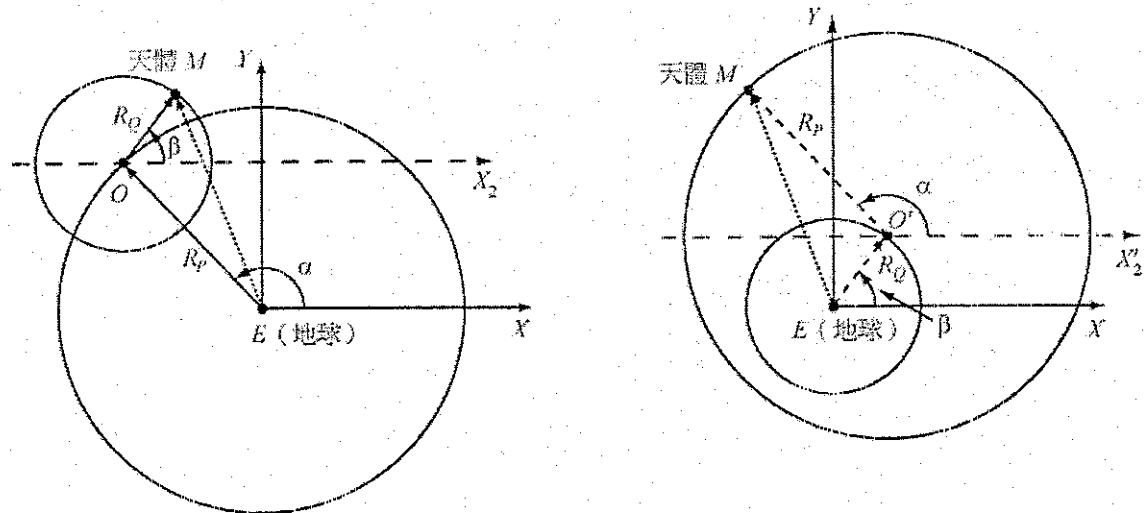


圖 3-2：(a) 系統 $S(P,Q)$ ；(b) 系統 $S(Q,P)$

定義： $S(P,Q)$ 代表均輪半徑為 R_P 、周轉圓半徑為 R_Q 的簡單周轉圓（即均輪圓心、偏心及均衡點為同一點）系統〔圖 3-2 (a)〕。

證明： 比較 $S(P,Q)$ 與 $S(Q,P)$ 兩個周轉圓系統〔圖 3-2 (a, b)〕。在某開始時間 t_0 ，假設 $\alpha(t_0) = \beta(t_0) = 0$ ；則在任何時間 t ：

圖 3-2(a) 表示 $\overline{EM} = \overline{EO} + \overline{OM}$ ，而圖 3-2(b) 表示 $\overline{EM'} = \overline{EO'} + \overline{O'M'}$ 。

由於 $\overline{EO} = \overline{O'M'}$ 和 $\overline{OM} = \overline{EO'}$ ，所以 $\overline{EM} = \overline{O'M'} + \overline{EO'} = \overline{EO'} + \overline{O'M'} = \overline{EM'}$ 。

換句話說， $S(P,Q)$ 與 $S(Q,P)$ 描述相同的行星運動。Q. E. D.

這正是向量代數裏「加法交換律」的運用。我們也可以用利用全等三角形，證明 $EM = EM'$ ， $\angle EMX = \angle M'EX$ 。其實我們還可以加入偏心點、均衡點，經過擴充的定理仍然有效，在此不贅。

³⁷ Hatch, "Ptolemaic and Copernican equivalence" 條，引用了 A. Rupert Hall, *The Scientific Revolution, 1500-1800; the Formation of the Modern Scientific Attitude* (Boston: Beacon 1957), Appendix B. 下文部分反映了霍爾著作的新版本 (Hall, 1983)。

總而言之，在左圖的 M 和在右圖的 M' ，描繪出的兩條相對於地球(E, E')的軌道竟然都是完全相同的。我們光靠觀察出來的行星動向，無法判斷均輪、周轉圓的設計細節。

採用這個定理作轉換後，火、木、土三顆行星的均輪周期都可以變成一年，而且它們的周轉圓心都與水星、金星、太陽看齊，同在一條直線上！

3.3. 周期與軌道的大小

現在太陽和五大行星的均輪周期都完全相等，周轉圓心共一直線；這現象相信並非巧合，而是由於均輪的「雷同」；不如索性讓它們共用同一個均輪，把周轉圓心間的距離都變成 0 罷。這做法與實際觀察並無任何衝突，因為上面講過，均輪本身並不是物理概念，從來沒有人觀測它們的大小。

我們只需要接納下面的原理：

兩條圓形均輪如周期相等，則半徑相等。

循著這些線索發展下去，³⁸托勒密的大體太陽系構思立即轉化而成布拉赫的（大體）模型（圖 2-4）。

3.4. 托勒密、布拉赫大體理論的等價性

為什麼托勒密沒有發展出第谷模型呢？眾行星均輪的大小，向來是一個謎。他可能不知道行星軌道周期假若相同（例如「一年」）大小應該大致相同；這看法相當於後來開普勒在 1619 年發表的第三定律。

既然均輪與周轉圓可以互易，周轉圓理論倘無別的實質支持，便只能當作是應用數學的構思，而不是物理學的模式。幸虧第谷大體模型的周轉圓都以實質的太陽做圓心；這是托勒密大體理論裏所包含的構思中，唯一的實質地心論物理模型。

4. 細節、準確度與選擇

4.1. 托勒密理論

上面講過，大體上托勒密構思的唯一物理版本就是第谷模型。在細節上，第谷模型迎合他自己天文台所取得的觀測數據，比托勒密的構思遠為精確，在此不贅。

4.2. 哥白尼理論

³⁸ 我們將改變均輪半徑時，所涉及的周轉圓半徑也應該按比例改變。

4.2.1. 大體理論

哥白尼的大體理論具有簡潔之美(圖 2-3)；但是在這層次，理論大致上只不過是一千八百年前阿里斯塔克斯假說、或五十年前庫沙理論的翻版。哥白尼也重新提出了阿里斯塔克斯早已接受、而奧瑞斯默重新提出的地球自轉觀點；但他仍然篤信亞里士多德的重疊晶體球殼概念。哥白尼熟讀「師祖」的《大書概論》，必然明白「互易定理」和所帶出的「行星繞日、日繞地球」物理模型(圖 2-4)。美國天文史家斯威德魯(Noel M. Swerdlow)認為，哥白尼不能接受相交的太陽與火星軌道，因為這會代表所屬的晶體球殼互相侵犯；他只好選擇等價而毫無衝突的「太陽中心」模型了。³⁹

托勒密將每顆行星的軌道分別處理，哥白尼卻將五大行星與地球統一看待。他也計算出五大行星與太陽的距離；這些距離本身並不準確，但若以地球離太陽的距離為單位表示出來，誤差只有 4%。

哥白尼輕易地解決了行星逆行的問題。地球和眾行星各循軌道運行，從地球看來，外行星 P_i 或在觀察者之左，或在觀察者之右；左、右交替之際便產了逆行的錯覺(圖 4-1)。哥白尼指出這明徹的看法，委實功不可沒。

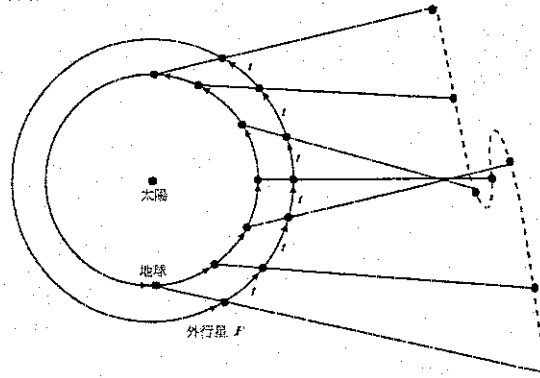


圖 4-1. 哥白尼理論輕易地解決了外行星逆行問題。

4.2.2. 哥白尼的細節理論

問題不是他曾否，而是他在何時、何地、以何種形式學到馬拉蓋理論。

---Swerdlow and Neugebauer。⁴⁰

³⁹ Hall, pp 63-65 見 Noel Swerdlow, 'The Commentariolus of Copernicus' in *Symposium on Copernicus: Proc Amer Phil. Soc*, 117, 471-477 (1973), 亦見 Swerdlow and Neugebauer, Vol 1, pp 56-58 (插圖在 Vol. 2, Chapter 1, Figs 8-10, pp. 570-572)。

⁴⁰ "The question therefore is not whether, but when, where, and in what form he learned of Marāgha theory", p. 47. 亦見 Toby E. Huff, *The Rise of Early Modern Science: Islam, China and the West*, 2nd Ed. (Cambridge: Cambridge University Press 2003), p. 55 (書中註 35 所指 Swerdlow and Neugebauer 原文出處有誤。)

周轉圓、偏心點與均衡點

筆者過去聽說古天文學家大都對周轉圓不滿；文獻反而顯示，哥白尼去世後五十年內，大多數天文學家並沒有取締周轉圓、甚至沒有減低周轉圓的數目。

托勒密所採用的偏心點將地球偏離了宇宙中心，均衡點更將把控制行星和太陽運動的機制遠離地球。中古阿拉伯天文學家都是地心論的信徒；他們認為這些缺陷都比周轉圓更加難以接受。1253年，蒙古旭烈兀⁴¹率大軍西征，建立伊兒汗國，在裏海南岸之西的首都馬拉蓋（Marāgha）興築宏偉完備的天文台（1259），建立著名的天文學派。天文學家沙替⁴²通常也被當做學派傳人；他指出均衡點可以用周轉圓取代，可是同時均輪會稍為變形，不再是正圓。

反對均衡點概念的人當然不限於地球中心論者。哥白尼斷然認定均勻運動是天文學上至要的公理 (axiom)，均衡點既然偏離均輪中心，周轉圓心繞著均衡點的「等角速度」運動，在均輪圓周上表現的速度並不均勻，因此哥白尼武斷地認為均衡點肯定)是錯誤的。⁴³哥白尼套用了沙替的方法來矯正這「錯誤」，但沒有承認沙替的貢獻；⁴⁴他用周轉圓取代了托勒密使用的所有均衡點，但仍然假設均輪保持著正圓的形狀。這樣他增加了周轉圓的數目，但同時也降低了模型的準確度。哥白尼計算火星、木星和土星的運行時也大量採用了別人的天文數據，只有 27 項是由自己觀察得來的。⁴⁵

地球繞日的構思

認為哥白尼理論比托勒密理論「簡單」的人根本沒有讀過《天球旋轉論》第三篇。

----- Swerdlow and Neugebauer, p 127

哥白尼細節理論的複雜情況比起托勒密理論有過之而無不及；重要的一例是在《天球旋轉論》第三篇，地球環繞太陽的描述。在托勒密細節理論中，太陽直接環

⁴¹ 英文名 Hulagu (1217–1265)，成吉思汗第四子拖雷的第五子，奉長兄元憲宗蒙哥之命率萬餘眾西征，滅伊斯蘭教亦思馬恩派木刺夷（刺客派(Assassins)）和黑衣大食（伊斯蘭教阿拔斯王朝）。1264年，四兄元世祖忽必烈冊封旭烈兀為伊兒汗。

⁴² Ibn al-Shatir (1304–1375年)，敘利亞天文學家。

⁴³ 見 Evans, p. 419。從今天的眼光來看，用 B 來代替可憎的 A，即使答案完全相同，只是自欺欺人的掩眼法；因為我們隨時也可以倒轉過來，用 A 來代替可愛的 B。而且「加添周轉圓」等於在物理天體上加添了一層模糊的面紗。後來備受歡迎的開普勒第二定律，所描述的正是行星在軌道上不均勻的運動。

⁴⁴ 根據 Swerdlow and Neugebauer, pp. 41–48，伊斯蘭天文學家的著作傳入了意大利 Padua 大學。哥白尼曾在意大利 Bologna 做過天文學家拿瓦拉的助手，後來又在 Padua 大學進修醫學。Padua、Bologna 和他住過的 Ferrara 都在意大利東北部。

⁴⁵ Evans, p. 421；江曉原：〈第谷〉，見席澤宗，第 8–34 頁（關於引用的天文數據見第 23 頁）。

繞偏心的地球。哥白尼卻認為環繞太陽 S 的是神秘的動點 O ，以周轉圓環繞 O 的是第二神秘動點 O_E ；地球 E 環繞著這第二神秘動點 O_E 運行。(圖 4-2)⁴⁶

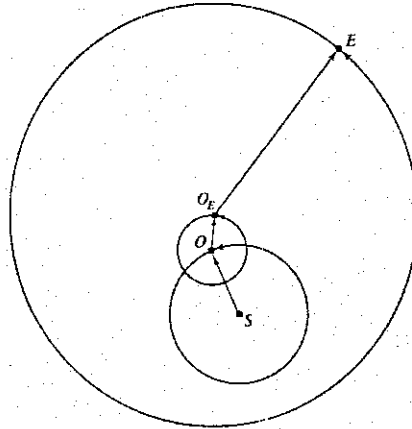


圖 4-2. 哥白尼細節理論的複雜性可見於地球繞日的模型。(大小不按比例)

庫恩的評論

在二十世紀中葉，美國科學哲學家庫恩說：⁴⁷

〔哥白尼的〕整套理論臃腫不亞於托勒密理論。兩者都採用不止三十個圓；簡潔程度不相伯仲。兩者的準確度也軒輊難分。當哥白尼加了足夠的圓圈後，他臃腫的日心系統產生的答案像托勒密理論一樣準確，但並沒有產生更準確的答案。哥白尼並沒有〔如他自己所宣稱〕解決了行星的問題。

庫恩講得太過委婉；其實托勒密的細節理論採用了 34 個周轉圓，哥白尼細節理論起碼要加多 7 個周轉圓來解釋行星運動，而精確度反而倒退了。甚至哥白尼所標榜的，只是自己（大體）理論的美，而不是實用性。⁴⁸

4.3. 第谷理論

第谷太陽系細節理論的準確度遠勝托勒密和哥白尼的兩套理論：⁴⁹

就理論推算出來的天體位置與實測結果之間的吻合精度而言，第谷體系至少比哥白尼體系提高了一個數量級。例如，第谷給出的太陽運動表誤差不超過 $20''$ ，而此前的各種太陽運動表，包括哥白尼的在內，誤差都有 $15-20'$ 之多。⁵⁰

⁴⁶ Kuhn, p. 169.

⁴⁷ Thomas Samuel Kuhn (1922-1996) 見 Kuhn, pp 168-169.

⁴⁸ Kuhn, p. 171.

⁴⁹ 江曉原：〈第谷〉，見席澤宗，第 18-19 頁。

⁵⁰ 這就是說，第谷的數據比前人的至少要準確 $(60 \times 15 \div 20) = 45$ 倍。

這細節理論也不簡單：它不用托勒密的均衡點；除了太陽和月亮之外，五大行星都採用周轉圓：每顆行星 P_i 依周轉圓繞著神秘中心 O_i ， O_i 繞著太陽（圖 2.4）。⁵¹

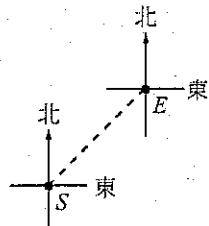
布拉赫是最後一位主張「地心論」的重要天文學家，也是實事求是的偉大學者；就當年的科技水平和已知的數據而言，他的理論的確無懈可擊。他揚棄了亞里士多德的多層晶體球殼，認為晶體球殼不能解釋彗星在行星軌道間的穿插、不能容許太陽、火星（在第谷模型中）軌道的交錯、而且我們應該看出光學折射的現象。

他認為哥白尼理論雖然不符觀測，但仍有可取——它對行星逆行運動提供了簡單的解釋；所用的周轉圓半徑較小；並且取締了均衡點這個屢遭非議的概念。布拉赫說他自己年輕時也考慮過，但終於揚棄了日心論；只有視差法可以在日心論與和地心論之間決定取捨：假如地球繞太陽以一年的週期運行，春天與秋天觀察到恆星在天穹上的位置應該有異。但他觀察不到任何視差，因此他認為地球除自轉外是靜止的。事實上是因為恆星太遠，肉眼觀測過於粗略。用視差法量度恆星距離需要比肉眼觀測起碼準確一百倍的天文儀器；在二百多年後(1838年)貝塞爾才成功觀測出第一次恆星視差。⁵²

5. 座標的選擇和變換

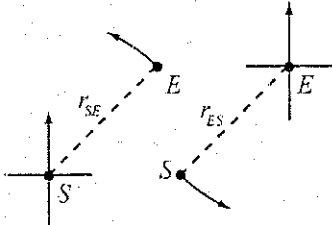
哥白尼相信他的日心模型顯示出地球繞日旋轉，太陽是整個宇宙的不動中心。其實他並沒有證明太陽是靜止不動的，也沒有能力證明太陽是否整個宇宙的中心。本節指出，他的模型甚至沒有證明地球繞日旋轉。

我們描述現象時往往採取某種觀點，和與觀點相容、而未必明白寫出的假想座標系統。座標系統的選擇只是描繪的手段，毫不影響被描繪的自然現象。當然，不同的選擇往往有利於特殊的要求，自有其存在的價值。下列 $\{ak\}$, $\{bk\}$ 都描述同一現象： (E, S, V) 代表地球、太陽、金星

<p>a1. 在某一時間 t，E 位於 S 的東北。</p>	<p>b1. 在同一時間 t，S 位於 E 的西南（即：E 位於 S 的東北）。</p>	
---	---	---

⁵¹ Evans, p. 423; Robert A Hatch, "Early geo-heliocentric models, tychoinic-style planetary models and variations," <http://web.clas.ufl.edu/users/rhatch/pages/03-Sci-Rev/SCI-REV-Home/resource-ref-read/chief-systems/08-01YCHO6-WSYS.html>.

⁵² Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846 年)，德國天文學家和數學家。肉眼觀察只可分別出 1' 的差別，而最近太陽系的恆星視差已小於 1" (貝塞爾所觀測的 Cygni 61 視差只有 0.3")，難怪布拉赫看不出恆星有任何視差了。

<p>a2 同 a1；而且 E 以半徑 $= r_{SE}$ 的反時針圓形軌道環繞 S。</p>	<p>b2 同 b1；而且 S 以半徑 $= r_{ES} = r_{SE}$ 的反時針圓形軌道環繞 E。</p>	
<p>a3 同 a2；而且同時 V 在 S 的西北，以半徑 $= r_{SV}$ 的反時針圓形軌道環繞 S。</p>	<p>b3 同 b2；而且同時 V 在 S 的西北，以半徑 $= r_{SV}$ 的反時針圓形軌道環繞 S。</p>	<p>見圖 5-1。</p>
<p>a4. 5 顆行星都繞日旋轉；地球也繞日旋轉。（哥白尼大體模型）</p>	<p>b4. 5 顆行星都繞日旋轉；太陽繞地球旋轉。（第谷大體模型）</p>	<p>大致上跟圖 5-1 相同，但圖 5-1 只顯示了金星。</p>

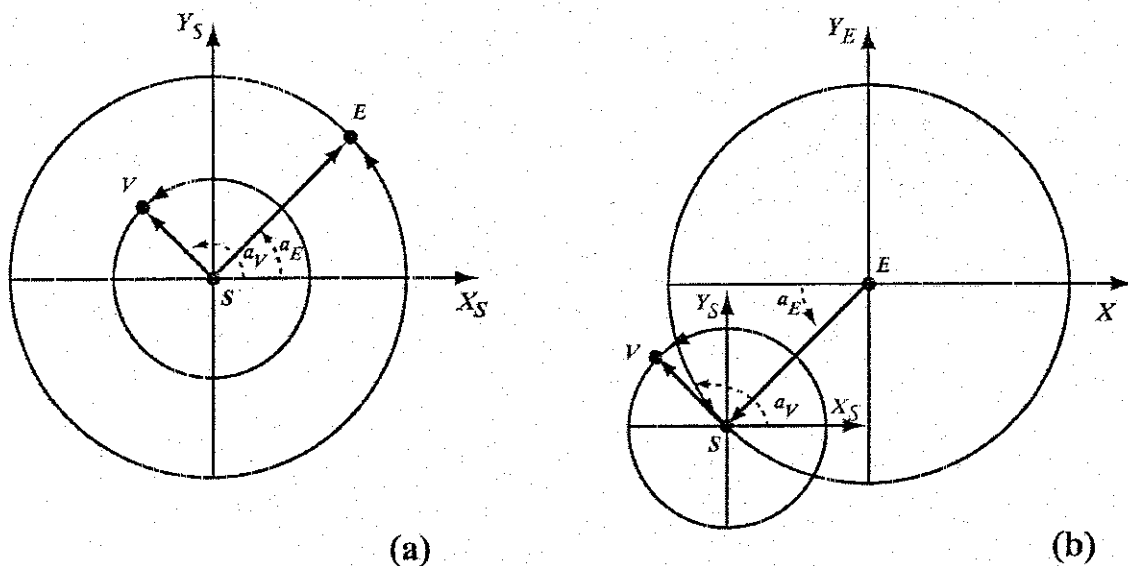


圖 5-1. (a) 座標原點在太陽的球心 S ，地球 E 和金星 V 繞太陽旋轉；(b) 座標原點在地球的球心 E ，金星 V 繞著太陽 S 旋轉，而太陽則繞地球旋轉。

假如我們從哥白尼的大體理論出發，以地球為新原點作座標變換，周轉圖自然冒現，但眾周轉圖的中心正是實質的太陽；⁵³這結果相當於第谷大體模型。反過來說，哥白尼信徒也可以從精確的第谷模型開始，以太陽為新原點的作座標變換，而取得同樣精確的「太陽中心、第谷細節模型」。哥白尼的大體模型與第谷大體模型只是同一現象模型用不同的（動態）座標系統的表示；兩者之間根本毫無衝突，無須爭執；而且座標變換並沒有改變太陽系，並不能把新原點神奇地靜止下來。

⁵³整個天穹也隨著太陽旋轉。而且我們必須拋棄亞里士多德的晶體球殼論，因為它並不容許相交的軌道。

天文學家霍伊爾說：⁵⁴

兩幅圖畫〔地球中心論與太陽中心論〕間的關係只不過是區區的座標變換，任何兩樣觀察宇宙的方式，若彼此關係由於座標變換，則從物理學眼光來看是完全相等的。我們今天不能在物理學意義上認哥白尼理論為「正確」，托勒密理論為「錯誤」。

當然在座標變換之前，最好先將托勒密的構思依照第 3.4 節，變成第谷物理模型。

8. 結論與前瞻

筆者寫作本文的動機在矯正在一些非專門寫作裏出現的主觀、過度簡化、甚至錯誤的敘述。

哥白尼在天文史上的地位，與「同姓的」哥倫布在航海史上的地位有點相近：兩位都不是世人所誤傳的、最早的發現者，但他們的工作都引起了廣泛的注意，直接、間接將世界文明推離封閉、自滿的中古時代，邁向新的將來。

16 世紀中葉到末期，是新太陽系理論的播種時代。哥白尼的日心論，布拉赫的肉眼觀測數據，都是種子；地心論固然受到挑戰，但還沒有沒落；在 1601 之前，天文學界的主流理論，顯然是布拉赫的地心論第谷模型。

筆者整理出一些來龍去脈、蛛絲馬跡，綜合多方前人意見，指出托勒密的地球中心構思其實只是未定型的「行星繞日、日繞地球」第谷模型；而後者與哥白尼的太陽中心模型在大體上不同之處，只在（動態）座標原點的選擇。在細節上兩項理論確有懸殊，但只關係到觀測的精確性和所採用的應用數學技巧。

在歷史上摧毀「地球是宇宙的不動中心」自大社會心理的，絕對不是臃腫、欠準的哥白尼理論，而是比第谷模型更精確、更清晰、劃時代的開普勒橢圓軌道理論，和以質量、引力為準則的經典力學，筆者將另撰文討論。⁵⁵

利用座標變換的技術，任何地心論可以有對應的日心論，甚至「海王星中心」理論；重要的一點是：原點的選擇根本無法令它停止運動。太陽系的中心並非太陽的中心；「宇宙不動的中心」不但不在太陽系，而且這名詞可能毫無意義。當真取代自大的地心論的，不應該說是日心論，而是科學探討者的「虛心」客觀態度。

參考書目

⁵⁴ Sir Fred Hoyle (1915-2001, 英國天文學家), *Nicolaus Copernicus* (London: Heinemann Educational Books Ltd 1973), p 87; 亦見 <http://en.wikipedia.org/wiki/Heliocentrism>

⁵⁵ 陳天機、王永雄、彭金滿：〈太陽系理論的突破〉，將在本刊登載。

James Evans, *The History and Practice of Ancient Astronomy* (New York: Oxford University Press 1998).

A. Rupert Hall, *The Revolution in Science 1500-1750* (London: Longman 1983).

Robert A. Hatch, *History of Science Study Guide* (Web Version), <http://web.clas.ufl.edu/users/rhatch/HIS-SCI-STUDY-GUIDE/> (Gainesville: University of Florida 1999)

Thomas S. Kuhn, *The Copernican Revolution: Planetary Astronomy in the Development of Western Thought* (Cambridge, Mass: Harvard University Press 1957). 中譯本：托馬斯·庫恩（著），吳國盛等（譯）：《哥白尼革命——西方思想發展中的行星天文學》（北京：北京大學出版社，2003）。

John J. O'Connor and Edmund F. Robertson, *The MacTutor History of Mathematics Archive*, (2005), <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/history/index.html>.

N. M. Swerdlow and O. Neugebauer, *Mathematical Astronomy in Copernicus's De Revolutionibus* (Parts 1 and 2) (New York: Springer-Verlag 1984).

席澤宗（主編）：《世界著名科學家傳記：天文學家 I》（北京：科學出版社，1990）。

