

古時候的人仰望星空，包含太陽與月球，遙遠的恆星亦是日復一日地東升西落，彷彿地球是宇宙的中心。然而，在群星之中卻有五個行星不只是運行速度和恆星有著明顯差異，軌跡更是飄忽不定。這一期的天文展品導覽將帶著大家回到科學革命的時代，看克卜勒如何理解並預測行星的動向。

從地心到日心宇宙的千年難題

在古人眼中太陽與月球的運動相當規律，讓不少人相信眾星是繞著地球在運轉著，但那些在群星間遊走的行星卻不如日月般規律，除了運行速度忽快忽慢，不時還會發生倒退走的「逆行現象」。對此，古希臘天文學家阿波羅尼斯與喜帕恰斯提出了偏心圓體系和多個圓周構成的本輪—均輪體系來解釋行星運動看似不規則之處。

西元2世紀的天文學家托勒密結合兩種體系的特

點，在當時不僅能夠有效預測行星的動向，也符合時人相信地球位在宇宙中心附近的想法，托勒密體系就這樣在西方世界流行了千年之久。

不過到了15世紀，波蘭天文學家哥白尼認為托勒密的系統太過於人為，與自然簡單性背道而馳。既然以地球為中心並不能讓行星以完美的圓形軌道運轉，那麼該以誰為中心呢？

哥白尼發現若將參考點改以太陽為中心，則複雜的行星運動仍可以獲得解釋，且這套日心體系也

行星的運動規律 克卜勒定律

文/ 王彥翔



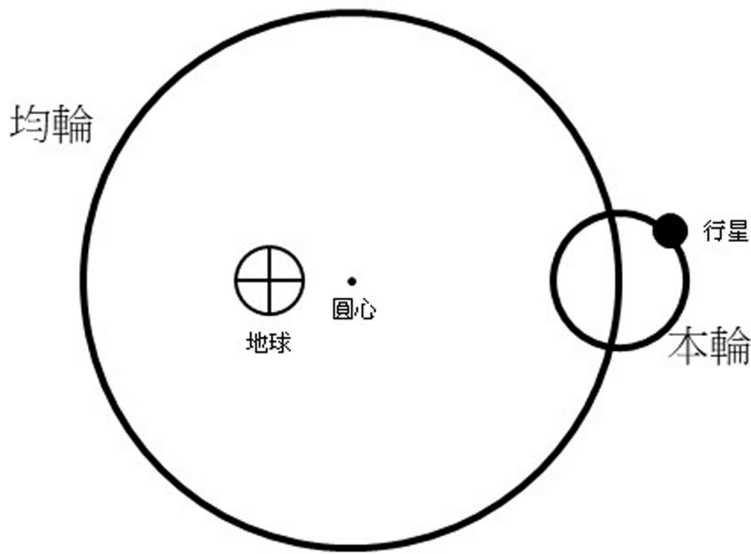


圖1. 托勒密的體系融合了偏心圓與本輪—均輪的特點，有效預測了行星的運動。

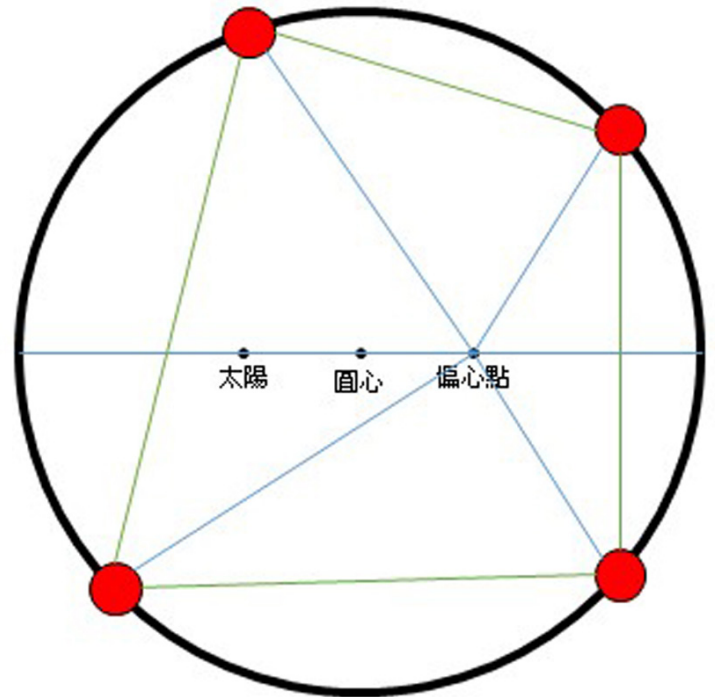


圖2. 克卜勒的「暫代性假說」利用四個時間點火星的赤經度，不斷反覆假設、驗證的過程找出火星的軌道與太陽的位置。

符合他所追求的自然簡單性。然而，在哥白尼追求的自然且擁有完美圓形軌道體系中，並無法解釋行星運行速度忽快忽慢的問題，甚至哥白尼自己也不確定太陽是否就位在所有行星軌道的幾何圓心上。

克卜勒的偏心圓軌道

為了解答哥白尼留下的未解之謎，出身於現今德國的天文學家克卜勒利用丹麥天文學家第谷的觀測數據進行歸納。在克卜勒創造新體系的過程中，他接受了托勒密體系的偏心圓概念，將太陽與假想的偏心點放在行星軌道中。接著，他利用四個時間點觀測到火星的位置，並假設火星相對偏心點為等角速率移動後，找出偏心點的位置，之後再驗證各點的位置在幾何上是否能讓正圓軌道成立。

克卜勒就這樣反覆利用觀測資料、假設及驗證合理性，重複計算超過70次，終於找到偏心點、軌道圓心與太陽之間距離最適當的比例，他將這個結果稱為「暫代性假說」。

克卜勒的「暫代性假說」揭露了行星的軌道並不是相對圓心做等速圓周運動；而在同樣的時間

內，行星在遠日點行經的弧長比近日點短。這讓克卜勒開始思考造成行星運動的原因，若不是行星內在的驅動力隨著離中心越遠而減弱，便是驅動行星的外在力量隨著離中心越遠而衰減。

這條距離規則成為克卜勒理論體系的核心之一，隨著理論發展成熟，克卜勒相信太陽就是行星運轉的力量來源，讓天文學不再只是數學與幾何，而讓物理成為理解天文的方式。克卜勒將同樣的方法也用在推測地球的軌道要素，發現地球與火星等行星一樣都不是繞著圓心做等速圓周運動，確定了地球在宇宙中的地位和其他行星無異。

克卜勒的行星運動定律

雖然「暫代性假說」在天球赤經度預測上有高準確度，但赤緯度預測卻出現很大的偏差。這讓克卜勒認真思考行星的軌道形狀是否為正圓形？在那個以完美的正圓幾何建構宇宙觀的年代，克卜勒的疑問無疑是在理解行星運動上的重大突破。於是，他又反覆地將圓形軌道修正為卵形，重複計算軌道是否符合觀測數據。最後，他發現火星的軌道既不是圓形，也不是卵形，而是橢圓形！而太陽所在的

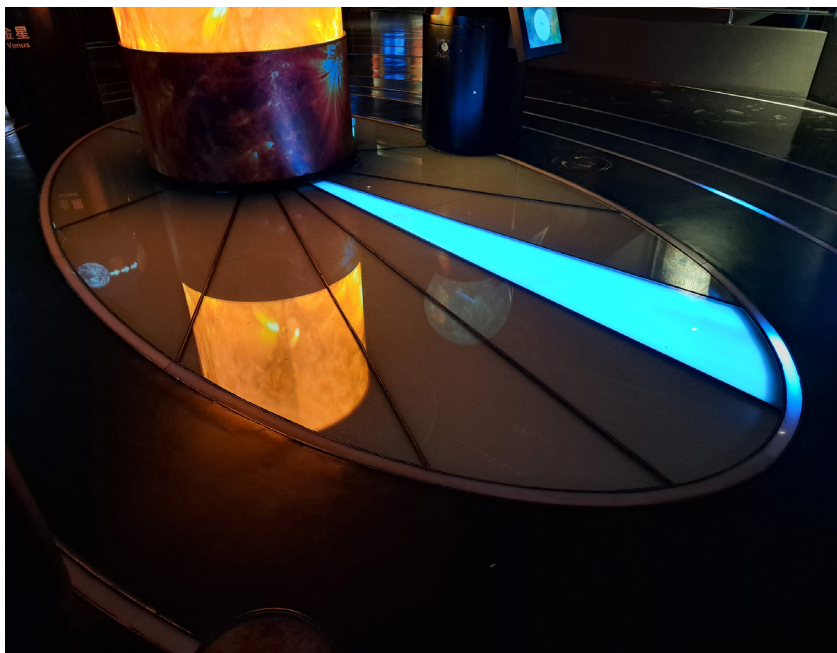


圖3. 展示場的地面光軌模擬了各個行星在軌道上的運行狀況，從現場可見行星的繞日公轉軌道都是橢圓形；行星與太陽連線在任何相同長度時間內，掃過的扇形面積都相同。

位置就在橢圓形的兩個偏心的焦點之一，這也就是今日我們所知的克卜勒行星第一運動定律。

雖然橢圓形軌道成為日後人們所稱的行星第一運動定律，但第二運動定律概念的發現其實早於第一運動定律，也就是克卜勒先前在「暫代性假說」得出的距離規則。軌道形狀確立之後，人們發現「行星與太陽連線在任何相同長度時間內，掃過的扇形面積都相同」，這就是現今對於行星第二運動定律的描述，同時也是距離規則的另一種詮釋方式。

克卜勒將他針對火星運行十年的觀測資料，以及運行體系建構的過程寫成了《新天文學》一書，並在1609年正式出版，這本書也成為理解行星第一、二運動定律的源頭。

在《新天文學》出版的十年後，克卜勒又再出版了《世界的和諧》。在《世界的和諧》中克卜勒大量使用音樂知識來理解不同行星運動之間是否具有關聯性。終於，他發現行星繞日公轉週期的平方和軌道半長軸的立方成正比的關係。這也就是行星第三運動定律所闡述的核心概念：距離太陽愈遠的行星，繞行速度愈慢、週期愈長。

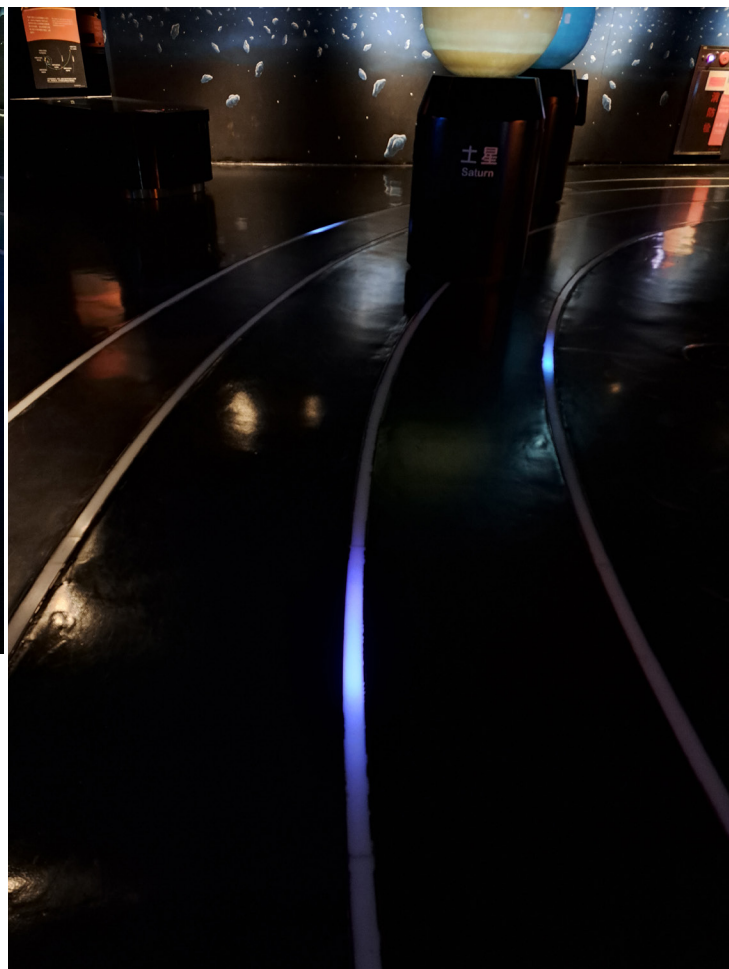


圖4. 從光軌的移動速度可以知道距離太陽愈遠的行星，繞行速度愈慢與週期無關。

在《世界的和諧》出版68年後，牛頓在《自然哲學的數學原理》一書中提出萬有引力理論以及運動三定律，進一步支持並解釋了克卜勒所揭露的行星運行現象的成因，天文學就此不再是專由數學與幾何掌控規則的世界。

克卜勒的行星運動定律大大撼動了當時社會認為軌道都是完美圓形的概念，同時也讓物理進入了天文學，讓行星的運動成為可以被解釋的自然現象，無怪乎曾有論者讚譽克卜勒是史上第一位天文物理學家。克卜勒為天文學留下了開創性的見解之外，他在推論、分析與驗證模型與現實的過程或許更是值得後人學習的精神所在。

王彥翔：臺北市立天文科學教育館