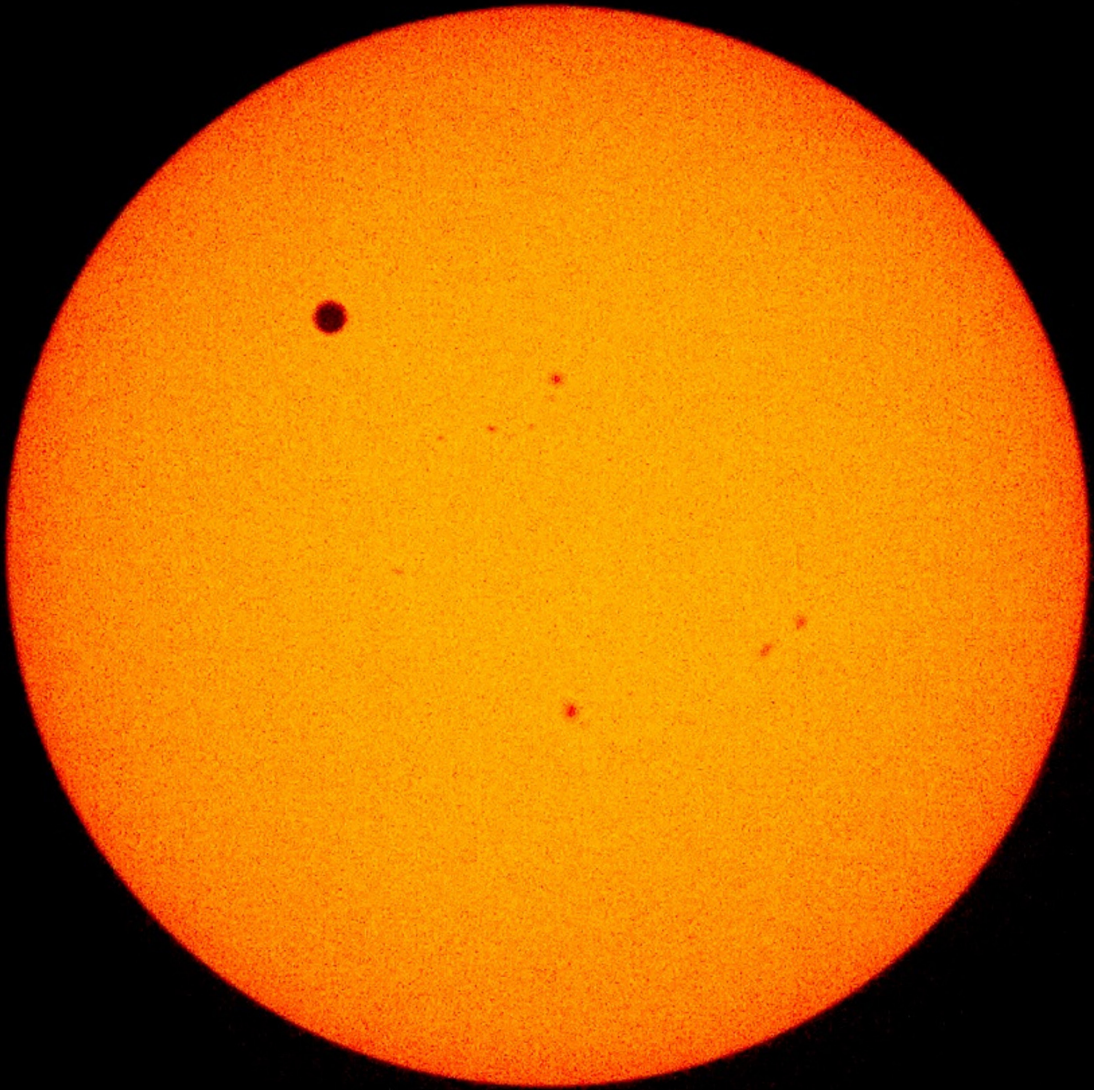


在很長一段時間裡，人類一直在尋找一件看似基本、卻極其關鍵的答案：太陽到底距離地球有多遠？十七世紀以後，隨著太陽系結構逐漸被釐清，人類看似已經接近答案，卻也更清楚地意識到這個問題的棘手之處。棘手在於，地球到太陽的距離極為遙遠，根本無法直接量測，而任何試圖透過幾何方法推算的嘗試，都必須依賴極小的角度測量，使得微小的觀測誤差被放大成巨大的距離差異。

文／黃雋恆、段皓元

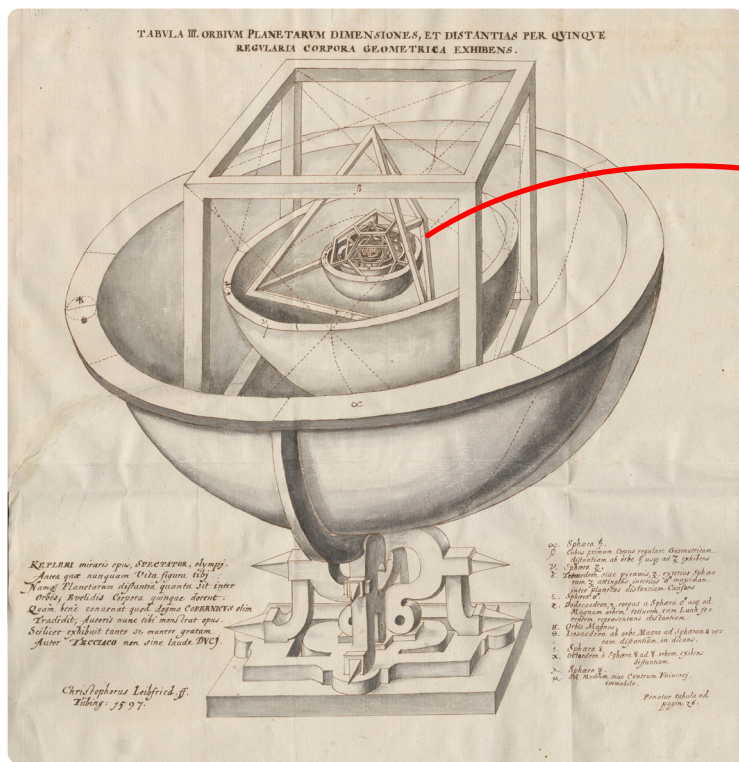


金星凌日影像。金星通過太陽盤面時，會在太陽表面形成可清楚辨識的黑色圓點。十八世紀天文學家正是利用這種天象，透過跨地域觀測與幾何方法，首次量測地球與太陽之間的距離。影像來源：NASA Earth Observatory

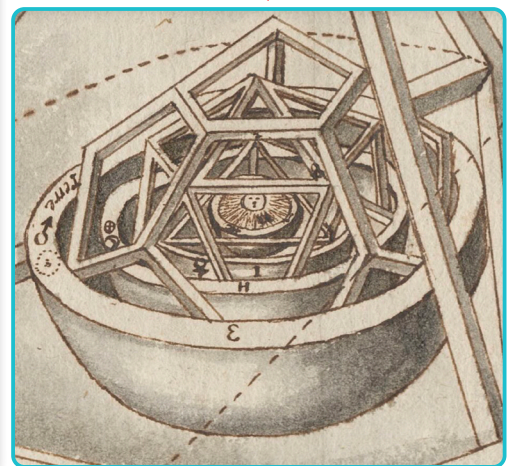
與此同時，克卜勒（Johannes Kepler）的行星運動定律揭示了行星繞太陽運行的數學規律，使行星之間距離的相對比例得以精確計算。於是，若把地球繞太陽的軌道半徑定為1，金星則約為0.72，火星約為1.52，一張比例正確的太陽系結構，終於浮現在人類眼前，如圖1。然而，這些比例所描繪的，只是行星軌道彼此之間如何排列，卻依然沒有回答那個最初、也是最根本的問題：地球到底離太陽有多遠？

一方面，除了人類本來的好奇心想知道太陽究竟離地球有多遠之外，這個距離一旦被量出來，行星之間的實際間距、太陽系的真實大小，乃至後續對恆星與銀河距離的測量，也都將隨之擁有明確的尺度基礎。正因如此，地球到太陽的距離不只是一個單一的天文數字，而是一把能把整個宇宙結構放到真實尺寸上的關鍵鑰匙。這個距離，後來被稱為天文單位（astronomical unit，記為au），也成了天文距離量測的第一塊基石。

圖 1



中央放大圖



這張出自克卜勒（Johannes Kepler）1596年著作《宇宙的奧秘》的經典插圖，具象化了他如何透過數學規律將太陽系的結構從混亂轉為秩序。他在16世紀末嘗試以嵌套的球殼與幾何體模型，證明行星軌道之間並非隨機排列，而是存在著嚴謹的幾何比例，也因此「行星距離相對比例得以被精確計算」。在此模型中，每一層軌道的間距都對應著行星間的數值關係，例如若以地球為1，金星約為0.72、火星約為1.52，使一張比例正確的太陽系藍圖終於浮現在世人眼前。然而，這張幾何架構雖然清晰地描繪了行星軌道彼此之間如何排列，卻仍只說明了行星間的相對位置，無法界定這套結構的絕對尺度，讓「地球到底離太陽有多遠」這個最根本的距離謎題，依然隱藏在這些精緻的數學規律之後。

這幅模型圖由外向內展示了當時已知的六大行星軌道，並透過五種正多面體填充其中的間隙。最外層的巨大球殼代表土星軌道，其內嵌套著一個正六面體（立方體），緊貼其內的球殼則是木星軌道；接著依序是嵌套在木星與火星軌道間的正四面體、火星與地球間的正十二面體、地球與金星間的正二十面體，以及最核心包覆著水星軌道的正八面體。克卜勒正是以此幾何構造，試圖解釋各行星軌道間距的比例規律，將當時人類所能觀測到的宇宙納入一個和諧的數學框架中。圖片來源：維基百科

哈雷的巧思： 利用金星凌日量測地球與太陽的距離

在極少數、可事先預測的特定日子裡，人們會注意到一個奇特的現象。如果你用安全的太陽濾光設備觀測太陽，會看到太陽圓盤上出現一顆非常小的黑點，緩慢地從一側走向另一側。那並不是太陽黑子，而是金星本身遮住太陽所形成的「剪影」。當金星剛好運行到地球與太陽之間，從地球視角看去它會通過太陽盤面，這個現象叫做「金星凌日」。

金星凌日稀有到什麼程度？它的出現有一個很特別的節奏：通常會成對出現，兩次相隔約8年，之後便要再等上一百年以上，才會迎來下一次。最近一次成對出現的金星凌日，發生在2004年與2012年，下一次則要等到二十二世紀。正因為發生間隔極長，這樣的天象在每個時代都只會被極少數人親眼見到。

十八世紀初，天文學家愛德蒙·哈雷（Edmond Halley），如圖2，提出了一個利用金星凌日來測量地球與太陽距離的方法。他正是那位成功預言哈雷彗星回歸的天文學家。哈雷的構想其實並不複雜：如果地球上相距遙遠的兩個地點同時觀測金星凌日，兩地所看到的金星在太陽盤面上走過的路徑，會出現細微差異，

如圖3。這並不是因為金星改變了軌道，而是觀測者所處位置不同，導致視角不同。就像把手指伸到眼前，交替閉上一隻眼，手指相對背景的位置會左右移動一樣，這種因觀測位置不同而產生的視角差異，稱為「視差」。

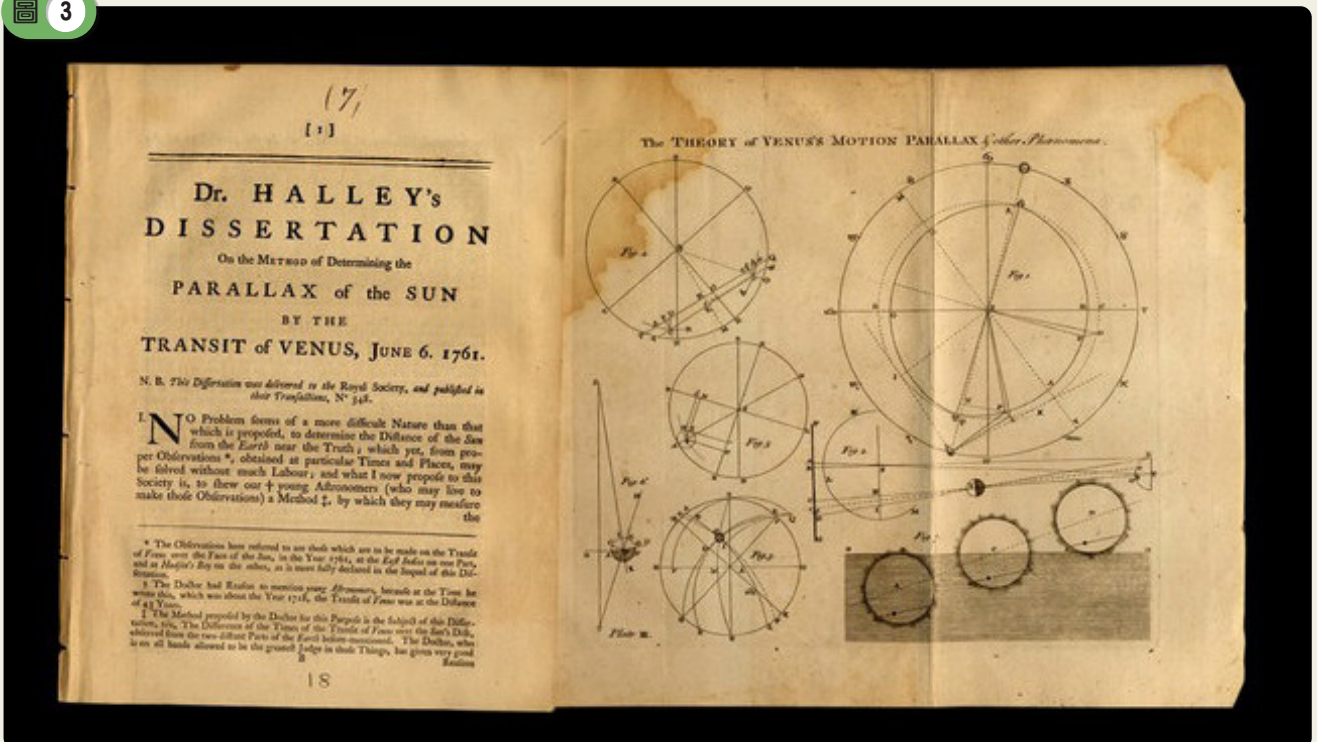
圖 2

EDMUND HALLEY LL.D.
GEOM. PROF. SAVIL. & R. S. SECRET.



愛德蒙·哈雷（Edmond Halley, 1656—1742）肖像。哈雷於十八世紀初提出利用金星凌日觀測來量測地球與太陽距離的方法。雖然他本人未能等到實際觀測的時刻，但該方法於1761年與1769年金星凌日觀測中被實際運用。圖片來源：維基百科

圖 3



愛德蒙·哈雷於1716年提出利用金星凌日觀測測量太陽視差的方法。本圖為其原始論文中的示意圖，說明不同地點觀測金星凌日時所產生的路徑差異，並據此推算地球與太陽之間的距離。圖中展示了來自不同觀測位置的幾何關係，構成哈雷提出之金星凌日測距方法的核心概念。影像來源：維基百科

金星凌日提供了這樣的可能性。金星通過太陽盤面並非瞬間完成，而是持續好幾個小時。從金星第一次接觸太陽邊緣、完全進入太陽盤面，到最後從另一側離開，整個過程都對應到清楚而可辨識的時間點。由於不同地點的觀測者看到的金星路徑略有差異，金星穿越太陽盤面的總時間也會略有不同。相較於直接測量極小的角度，精確記錄這些關

鍵時刻通常更容易做到可靠，只要有穩定的時鐘與清楚的觀測紀錄，就能有效降低誤差。這種方法之所以可行，關鍵不在於金星本身，而在於它是在太陽盤面前移動；太陽提供了一個巨大、穩定且邊緣清楚的背景，使這些進入與離開的時刻能被不同地點的觀測者一致辨認，並直接加以比較，如圖4。

圖 4



由於金星凌日過程通常持續好幾個小時，且有巨大、邊緣清楚的太陽盤面做為對照背景，適合進行精確的觀測記錄。攝影：吳昆臻

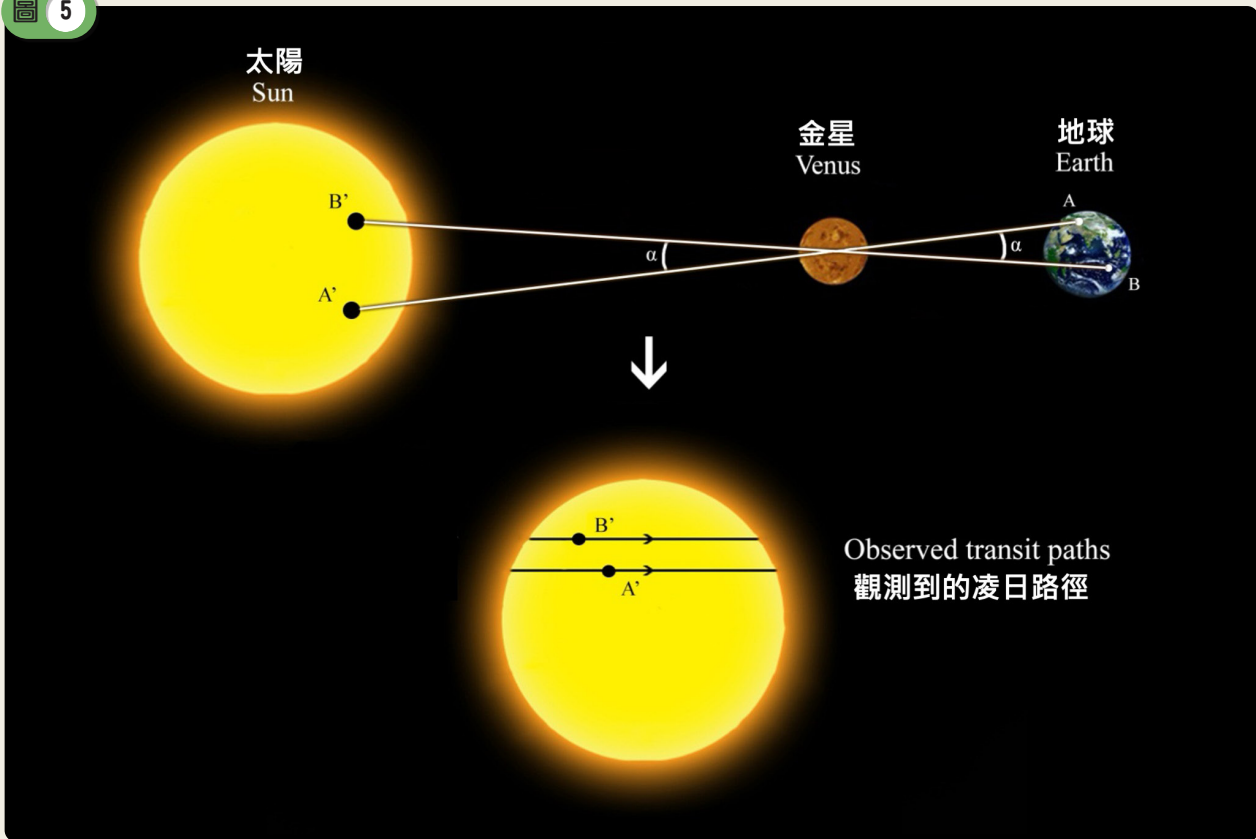
假設地球上兩個相距遙遠的觀測地點A與B，它們之間的距離是已知的。當兩地同時觀測金星凌日，由於觀測位置不同，看到的金星在太陽盤面上走過的路徑長短會略有差異。這種路徑差異雖然極其微小，但會反映在金星通過太陽盤面所需時間的長短上。有的觀測者會看到金星在盤面上停留得久一些，有的則較短。這些時間差，正是視角差在時間上的表現。因此，觀測者不需要測量金星在太陽表面偏移了多少角秒，只要比較不同地點所記錄的時間差，再結合地球上兩個觀測地點之間的實際距離，就能推算出對應的視差，進而反推出地球與金星之間的距離，如圖5。

需要強調的是，這套方法真正量到的，並不是地球到太陽的距離，而是地球到金星的距離。幸好，這

並不構成障礙，因為行星軌道之間的距離比例早已由克卜勒定律確立。以天文單位表示，地球繞太陽的軌道半長軸定為1，而金星約為0.72。當金星凌日發生時，金星正位在地球與太陽之間，因此地球到金星的距離約為1減去0.72，也就是0.28個天文單位。只要能將觀測中量到的地金距離對應到這個比例，地球到太陽的距離便能直接換算出來。

哈雷提出方法時，下一次金星凌日還要等好幾十年，他自己知道等不到。所以他留下了近乎遺囑式的呼籲，希望後世務必把握1761年與1769年這兩次金星凌日。結果這個呼籲真的改變了歷史。各國天文學家出發，遠赴全球各地架設望遠鏡，這幾乎是人類史上最早的大型國際科學協作之一。

圖 5



利用金星凌日測量地日距離的幾何原理示意圖。圖中右側的A與B代表地球上相距遙遠的兩個觀測地點。由於觀測者位置不同，兩地看向金星與太陽的視線方向略有差異，形成一個非常小的夾角 α ，稱為視差角。當金星通過太陽盤面時，這種視角差異不會表現為「金星位置的跳動」，而是表現為金星在太陽盤面上走過不同的路徑位置，分別標示為A'與B'。因此，從不同地點觀測，金星凌日的路徑在太陽盤面上會呈現出彼此平行、但略為錯開的軌跡。實際觀測中，天文學家並不直接測量這些微小的角度差，而是記錄金星從進入太陽邊緣到離開太陽邊緣所需的時間。由於路徑長短不同，金星穿越太陽盤面的總時間也會略有差異。這些時間差，正是視差在時間上的表現。只要結合地球上觀測點之間已知的距離，以及不同地點量測到的凌日時間差，就可以推算出地球與金星之間的距離。再利用行星軌道比例（例如金星與地球軌道半徑的已知比例），便能進一步換算出地球與太陽之間的距離。

當觀測遇上戰爭與天候： 一位觀測者的遭遇

當然，故事不會只停留在科學的浪漫之中。現實世界有戰爭、有極端氣候，也有各種難以預料的意外。十八世紀中葉，法國天文學家勒讓蒂（Guillaume Le Gentil），便成了這段金星凌日歷史中最令人唏噓的人物之一，如圖6。為了觀測1761年的金星凌日，他遠赴印度，卻恰逢戰爭爆發，最終只能滯留在海上，眼睜睜錯過觀測時刻。既然已經身在異鄉，他選擇留下來，等待八年後的下一次機會。然而，1769年真正迎來金星凌日時，壞天氣再次粉碎了他的努力，長年的準備在雲雨中化為烏有。更戲劇性的是，他返國途中一再延誤，離開法國長達十餘年。等到終於回到家鄉時，才發現財產、職位與家庭早已不復存在。勒讓蒂的經歷，常被用來提醒後人：科學史不只是一連串的成功紀錄，也是一段段與現實世界搏鬥的過程。

那最終有沒有成功呢？

有的。雖然許多觀測點因天候、戰爭或技術限制而未能取得理想資料，但來自世界各地的觀測結果仍然累積到足以進行分析的程度，使天文學家得

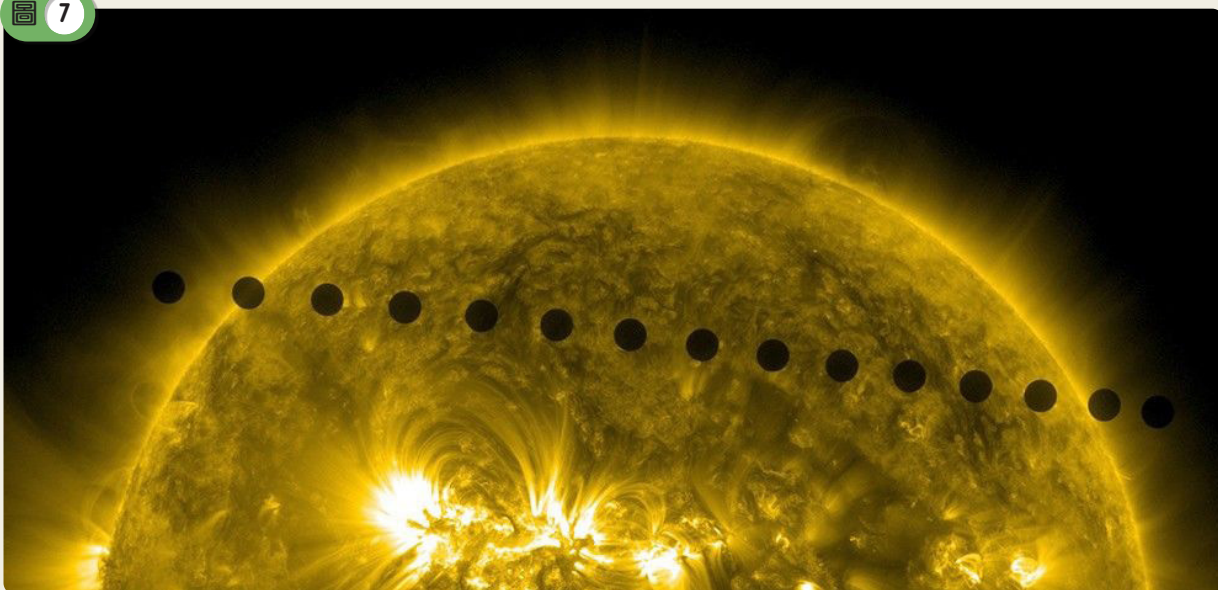
以首次對地球與太陽之間的距離做出量化估算，其精度以十八世紀的觀測條件而言已相當可觀。金星凌日讓天文學家第一次量出地日距離，並為太陽系建立起一個實際的距離尺度。從此，行星軌道之間的相對比例得以轉換為實際距離，而這一步，也成為後續各種天文距離測量方法得以發展的基礎，如圖7。

黃雋恒：淡江大學物理學系 學生
段皓元：臺北市立天文科學教育館



圖 6 紀堯姆·勒讓蒂（Guillaume Le Gentil），十八世紀法國天文學家、法國科學院院士。曾嘗試自印度觀測1761年與1769年的金星凌日，以實踐哈雷提出的地日距離測量計畫，但因戰爭與天候因素未能成功。1935年，國際天文學聯合會將一座月球隕石坑命名為勒讓蒂環形山（Le Gentil）。圖片來源：維基百科

圖 7



金星凌日影像合成圖：同一次凌日過程中，金星在不同時間點的位置被疊合在同一張太陽影像上，呈現其穿越太陽盤面的路徑，並以多個波段呈現太陽大氣結構。此類凌日觀測曾被用來推算地球與太陽之間的距離。圖片來源：NASA/Solar Dynamics Observatory