



### 3 歷史悠久的行星芭蕾舞： 太陽系的起源

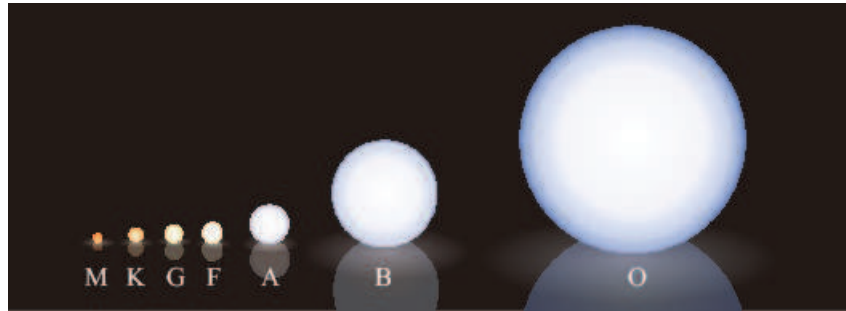
文／葉永烜

太陽系如何形成？這是一段很複雜的過程。從近日對系外行星系統的觀察和研究，我們知道行星系統的形成是很普遍的現象，但每個行星系統都有自己的特點，而我們的太陽系可能更與眾不同。經過天文學家多年的努力，對其主要的形成過程已經大略瞭解。

#### 孕育行星的搖籃：從分子雲到吸積盤

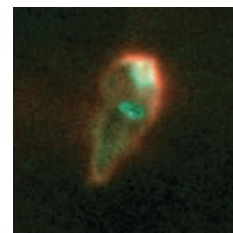
在銀河系的旋臂存在一團團的分子雲，分子雲內可以找到更緻密的高密度區，其中已經有些高質量的 O/B 型恆星發射出極強烈的 X 光和紫外線輻射，把它們周遭的氣體吹走。圍繞著這些 O/B 型恆星，有些低質量的恆星胚胎也在生成中。

這些低質量的恆星胚胎有個蝌蚪狀的構造，尾巴指向中間 O/B 型恆星的相反方向，這是這些原恆星產生的恆星風與 O/B 型恆星的輻射和高速流作用引發的結果。如果再細看，可以辨認出一個扁盤狀結構和一對噴流。這些扁盤中含有氣體和塵埃粒子，行星便是從中生成。



▲圖 1 恆星可依光譜進行分類：藍色 O 型、藍白色 B 型、白色 A 型、黃白色 F 型、黃色 G 型、橘色 K 型、紅色 M 型。O/B 型恆星的溫度、亮度較高，通常位於活躍的恆星形成區，如螺旋星系的旋臂。(Credits: Rursus)

ALMA 無線電波陣列<sup>1</sup>的極高解析度觀察帶來更多重要的訊息。至今最令人驚奇的便是看到「HL Tauri 原恆星」的吸積盤中有幾圈空隙，顯示這是行星積生的區間。然而，這些天文觀察結果來自不同的天體和系統，代表不同時間尺度的現象。因此還需要在實驗室中對隕石、從月球和其他星體採集到的表面物質標本等進行化學分析、數值模擬和太空探測，才能建構出一個太陽系來源的初步理論模型。



▲圖 2 位在獵戶座分子雲中的原行星盤<sup>2</sup>

## 超新星爆炸促使原行星產生？

首先，太陽極可能是在一個大小夠大、並容納至少 1~2 個 O/B 型恆星的星團中形成。O/B 型恆星的壽命很短，約莫經過 1,000~

1. 詳情請參〈IV-4 宇宙收音機：無線電望遠鏡〉篇。

2. Credits: NASA/ESA/J. Bally (University of Colorado, Boulder, CO)/H. Throop (Southwest Research Institute, Boulder, CO)/C. R. O'Dell (Vanderbilt University, Nashville, TN)

2,000 萬年便到了演化的盡頭，瞬間發生能量極大的超新星大爆炸。爆炸時產生的壓力波會擠壓到旁邊的分子雲，促使它們重力塌縮，成為原行星。

天文學家在最原始的隕石標本中發現其中一項證據：有些小粒塊的成分中存在超量的鎂 26 ( $^{26}\text{Mg}$ )<sup>3</sup>，而這些鎂元素應該就是來自超新星爆炸所產生的鋁 26 ( $^{26}\text{Al}$ )。由於鋁 26 衰變為鎂 26 的時間大約只有 75 萬年，所以在這段時間內形成的行星胚胎，內部都會受到強烈的輻射加熱而熔化；而在數百萬年後才生成的行星胚胎則不會受到鋁 26 衰變的影響。

### 旋轉！吸積！逐漸成形的盤狀結構

由於分子雲本身在旋轉，在遵守角動量守恆<sup>4</sup>的情況下，旋轉軸的垂直方向會形成一個扁盤。它的成分以氫 ( $\text{H}_2$ ) 為主，氦 ( $\text{He}$ ) 為次要，其他則是少數的重元素。這意味著原恆星被一個由氣體和塵埃粒子所組成的**吸積盤**（或稱為**太陽星雲**）所包圍。在分子雲的重力塌縮尚未告一段落時，還會有更多物質繼續進入吸積盤，經過黏滯作用向吸積盤的內、外部擴散。

這段吸積過程除了傳輸質量之外，也會傳輸能量和角動量。向內注入的物質，除了一部分被原恆星吸收外，還有一部分會因為受到電磁作用影響，沿著恆星自轉軸的方向高速噴出，形成**兩極噴流** (bipolar outflow)。靠近原恆星周邊區域的溫度可高達 2,000 K，在此高溫條件下凝結的固態粒子亦會因為電磁作用而四散到太陽星雲外圍。

3. 標準的鎂元素原子量約為 24，此處是鎂的同位素，原子量約為 26。

4. 角動量守恆：角動量是物體轉動時具有的一種物理量，在系統受到的合力矩為零時，系統的角動量會維持定值，旋轉半徑愈大則轉動的角速度愈小；反之，旋轉半徑愈小則轉速愈快。

從觀察結果可以得知，當分子雲的物質耗盡後，兩極噴流亦會停止。而在這個階段，圍繞恆星的吸積盤因為恆星風和強烈的光蒸發效應<sup>5</sup>亦漸漸散逸。陪伴著原恆星的塵埃粒子盤所產生的紅外線輻射，通常在 300 萬~500 萬年內便會消失。當大量氣體尚存在太陽星雲中時，木星和土星這兩個巨型氣體行星必須形成。因為有幾個關鍵步驟還未明瞭，理論模型尚未確定整個過程如何發生。但基本上，我們可以有以下幾個假設和重要階段的劃分。

#### (1) 最小質量太陽星雲模型：

此模型主張整個太陽星雲的質量，剛好相應於用以建構行星系統的物質。一開始，原始太陽的太陽星雲（包括氫、氦和塵埃粒子等物質）有約 0.5 倍的太陽質量。當行星開始形成，太陽星雲表面的溫度 ( $T$ ) 分布主要由太陽輻射能量的輸入多寡決定，如以  $R$  表示相對日心的距離（以天文單位為單位），則  $T$  與  $R$  之間的關係為

$$T = T_0 R^{-b}$$

其中  $T_0 = 300$  (K) 是  $R = 1$  (au)、 $b = 0.5$  時的溫度。

#### (2) 固態粒子凝結和沉澱作用的過程：

在垂直太陽星雲盤面方向的溫度梯度，取決於塵埃及氣體的不透明度及輻射能量的傳輸，愈往內部，溫度愈高。在太陽星雲盤面上、下溫度較低的區域，物質可以從氣態凝固為固態，而物質所在位置的溫度條件會決定其礦物成分。這些半徑小於毫米的微小固態粒子受到太陽的重力作用，逐漸向扁盤中心下沉。這種沉澱作用使得太陽星雲發展出雙層結構，在固態粒子形成的薄盤上、下都蓋上一層氣體分子組成的厚盤。

5. 光蒸發效應：太陽星盤中的氣體被高能量的光或其他電磁輻射剝離的過程。

### (3)小石塊吸積作用：

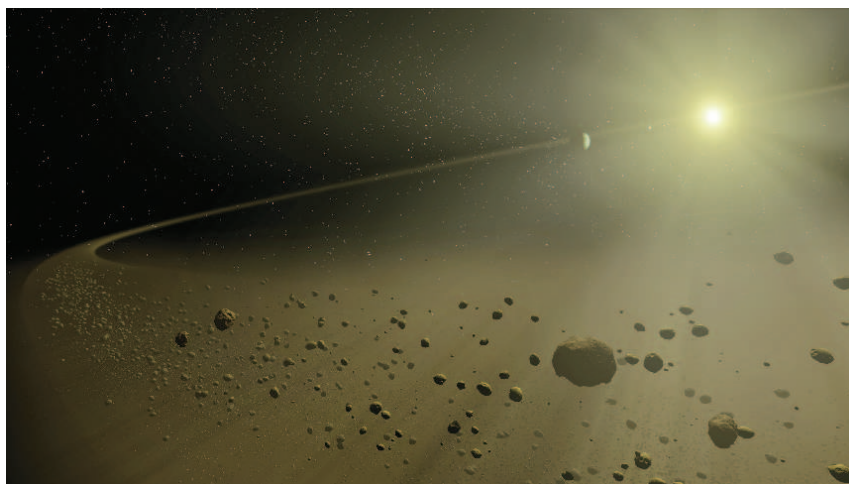
這些微粒都在克卜勒軌道<sup>6</sup>繞著原始太陽運行，相鄰的粒子之間相對速度非常小，所以互相碰撞後可以利用化學力連結在一起，慢慢增大。但從在實驗室或太空站中的實驗可以得知，當粒子長到毫米大的時候，互相碰撞後便會反彈而不能連結在一起。也就是說，當太陽星雲中的物體繼續增大，會遇到一個瓶頸。

經過多年的研究，最近有個理論帶來新的突破，指出由於壓力梯度的影響，太陽星雲的氣體繞著中心太陽旋轉的速度會比克卜勒速度<sup>7</sup>慢。因此固態粒子盤面和氣體的相對運動會有**雙束流不穩定性**，繼而產生湍流和漩渦。這種現象在理論模型發展初期早有論述，但因電腦計算機的快速進步，非常複雜、精細的數值模擬到了今日都變成可行。

針對太陽星雲中固態粒子扁盤和氣體的「雙束流不穩定性」的研究，發現漩渦中可以產生高密度區，使得其中的塵埃粒子可以透過重力不穩定性塌縮，變成幾十公里至幾百公里大的個體。如果這個理論正確，代表太陽星雲中固態物體的生成並不是經過一連串的低速碰撞，從毫米大小，漸漸從公分、公尺、公里，增長到幾十公里或更大的微星體，而是一下子從毫米大小跳躍到幾十公里至幾百公里的範圍！這種機制現在稱為**小石塊吸積作用**。

6. 克卜勒軌道：以太陽為焦點的橢圓形軌道。

7. 克卜勒速度：星體環繞太陽運行的軌道速度。



▲圖 3 原行星吸積石塊想像圖 (Credits: NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC))

#### (4)類地行星的形成：

這些第一代的微星體繼續碰撞。因為它們具有質量，所以碰撞後可以藉由重力吸引連結彼此。模型計算指出，太陽系內部（小行星帶之內的區域）在一億年左右的時間尺度，便可產生幾十個直徑約 1,000 公里大小的個體。它們再繼續互相碰撞，結果便成為今日餘存的類地行星：水星、金星、地球和火星。

這個過程估計長達 2 億~3 億年。在此期間，由於各個原行星的重力彈射作用<sup>8</sup>，未成為行星的微星體或碎片都會在離心率很大的軌道上運行。當它們和原行星碰撞，會釋放出巨大能量，在原行星上產生半徑數百公里~數千公里的隕石坑，甚至導致行星崩裂。水星之所以有不成比例大的鐵核，可能就是因為巨型碰撞事件把它本來的外殼轟掉了。

8. 重力彈射作用：利用行星或其他天體的相對運動和重力改變本身的運行軌道和速度。

原行星在積生形成階段，很可能也各有一個扁盤構造圍繞。相互傳輸的角動量決定了原行星的自轉軸方向和自轉週期。簡單的理論模型指出：原行星本來的自轉軸應該都和太陽的自轉軸方向相似。所以為什麼金星會跟其他行星的自轉方向相反？為什麼火星的自轉軸和黃道面有很大的傾角？地球—月球系統的緣起又是什麼？這些問題的解答可能都來自它們與其他偏離軌道的物體發生碰撞之歷史。

#### (5)雪線：

在太陽星雲中壓力極低的環境，水分子可於溫度降至 150 K 時凝結成冰。水冰粒子開始出現的與日距離稱為**雪線**，約 4 天文單位。雪線以內的區域，水分子只能以氣態存在，容易被原始太陽的恆星風和輻射掃除，不能成為行星的建材。但在雪線之外，水分子就可以凝結為水冰，成為組成微星體的重要材料。太陽星雲的物質分布也與各類小行星的化學成分相呼應，在主小行星帶外邊（距離太陽約 3.2 天文單位）的物體通常含有較多的水分。

#### (6)小行星帶：

在火星軌道和木星軌道之間（在雪線內側），存在數量非常多的小天體。其中最大的是半徑 473 公里的穀神星 (Ceres)；小的則只有數公尺大，甚至更小。這些小天體的總質量僅是月球質量的 4%。

小行星代表太陽系最原始的物質，它們現在的軌道運動通常非常穩定。但如果它們的公轉週期和木星的公轉週期成簡單整數比（比如 3：1、2：1、4：3……）的關係時，則會在幾百萬年～幾千萬年的時間尺度內產生很大的離心率，由此可以跨進火星和地球的軌道之間，變成所謂的**近地小行星**，具備和地球碰撞的機率。若小行星進入地球大氣層後未被完全燒毀，墜落地面的碎塊便是隕石。直徑 100 公尺以上的近地小行星若碰撞地球，釋放的能量將足以消滅一座城市。據信



6,500 萬年前的恐龍滅絕事件便是由一個約 10 公里大小的近地小行星和地球碰撞所引發。

#### (7)木星和土星的形成：

木星和土星的成分主要是以氫、氦為主，核心由石質及水冰構成。假如這兩個氣體行星的核心質量均為地球質量的 10 倍，則木星的氣體質量為固態物質的 30 倍，而土星則為 8.5 倍。雖然有水冰作為建材的一部分，但對於這兩個巨大行星來說這些建材還不夠，因此木星和土星必須在分子雲塌縮後的 300 萬～500 萬年內形成，否則便不再有大量氣體供其吸收。

現在用以解釋木星和土星形成過程的其中一個模型便是經過「小石塊吸積作用」快速形成第一代的微星體。這些半徑只有 100～300 公里的物體，重力遠遠不夠把它們吸積的氣體保留下來，直到有個質量約為 10 倍地球質量的原行星出現，其表面重力足以抓牢吸積的氣體，不再讓氣體逃逸。隨著吸積的氣體愈來愈多，便形成現今所見的木星和土星。

#### (8)天王星和海王星的形成：

天王星和海王星的大氣層都很厚，但其質量遠遠不如木星或土星。相對來說，天王星和海王星的氫、氦，質量只有內部固態物質（石質和水冰）的 10%。關於這兩個行星，有一種說法是它們的形成時間比木星和土星晚很多，所以不能把太陽星雲中的氣體盡量吸積過來。

這兩個行星形成的詳細過程還不清楚，但有人推測可能是木星和土星形成後，土星軌道外的區域布滿了數公里到火星大小的冰質個體，這些物體經由互相碰撞，產生了質量更大的原始天王星和原始海王星。這兩個原行星的重力彈射作用把本來離心率很小的微星體克卜勒軌道，逐漸轉變成可以跨越其他行星的軌道。



當相互進行的重力彈射作用把微星體和冰質個體的軌道範圍推入土星和木星的軌道區域，有一部分微星體和冰質個體會被這兩個巨大行星捕捉；另一部分則被相應的重力彈射作用加速，並增加其角動量。如果它們再次被天王星和海王星捕獲，就會造成天王星和海王星的軌道在吸積過程中向外擴大，木星和土星的軌道則向內收縮，直到太陽星雲外圍的固態物質被耗盡才停止。至於剩餘的微星體和冰質個體，便是我們現在所知的**海王星外天體**。

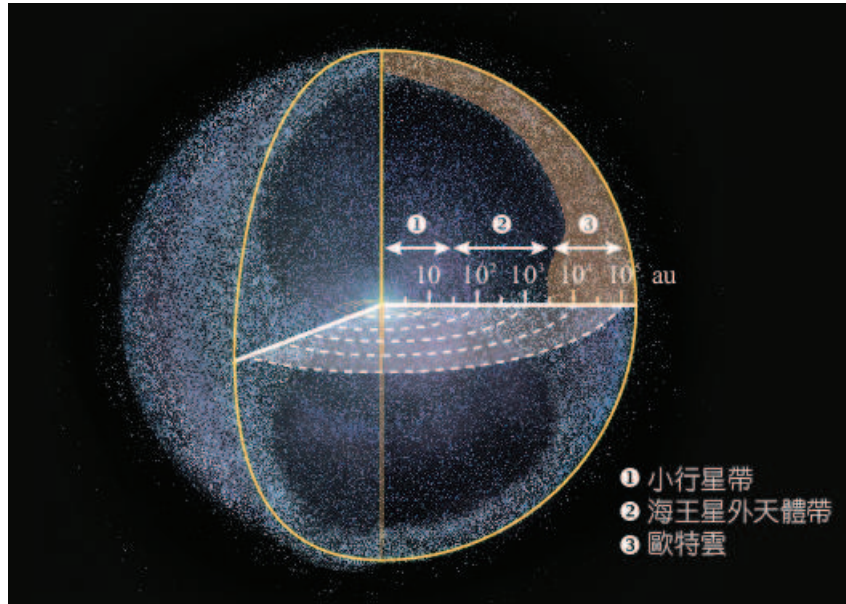
#### (9)海王星外天體帶和歐特（彗星）雲：

天王星和海王星的形成，可以說是太陽系結構中最後，但也影響極為深遠的一環。留存於兩者吸積帶中的物體稱為海王星外天體，軌道範圍主要位在距離太陽 30~50 天文單位處。當海王星的軌道外移時，可以把外圍的物體攬入能與它共振的軌道位置，冥王星便是最著名的例子。和冥王星一樣公轉週期與海王星公轉週期存在比例 2:3 關係的天體，數目也很多。

此外，還有不少海王星外天體有其他的共振關係，使它們的軌道運動非常穩定。但也有些非共振個體因為受到海王星的重力影響，偶然間被彈射到太陽系內部。當它們進入雪線之內的軌道區域，表面的水冰便會昇華、擴散，夾雜著塵埃粒子構成一個氣團，這些不速之客便是**彗星**<sup>9</sup>。

由於它們的動力學來源之故，這些彗星的軌道傾角通常都在 20° 之內，克卜勒週期不會超過數十年，通稱為「短週期彗星」。在外行星吸積區的星體，也有不少被彈射到太陽系的極外圍，成為半徑逾幾萬天文單位，呈球殼狀的**歐特雲**。當鄰近的恆星穿越歐特雲時，有些物體的軌道因為受到重力擾動，使其近日點可以進入內太陽系。當到達

9.詳情請參〈I-2 太陽系的冰雪奇緣：彗星〉篇。



▲圖 4 太陽系的大型架構中有三個小物體系統，即在火星及木星軌道之間的小行星帶、在 30~50 天文單位之間的海王星外天體帶，以及在幾萬天文單位之遙的歐特雲。(Reference: Space Facts/L. Moreau)

雪線附近的距離，因為表層溫度增加，貯藏其中的水冰或其他揮發性更高的物質便會昇華成氣團，並產生塵埃雲，反射太陽光而被偵察到，這便是新彗星的來源。