

3



第三章 太陽系及其變化

3-1 認識太陽系

3-2 行星的運動

3-3 揭開行星的神秘面紗

3-4 太陽系的演化

人類生長在這有晝夜交替、季節變換的地球。眼觀日、月、行星規律地運轉著，人們如何發現行星運行所遵守的規則？如何進一步飛向太空，一窺這些天體的真面貌？又如何回溯太陽系的形成，並預測其未來的演化呢？

圖 3-1 太陽系九大行星實際大小之比較。由左下至右上分別為：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星。

3-1 認識太陽系

古人觀天，並記錄星點移動，起先僅發現日、月、星辰「繞著地球規律運行」。接著由各星點視運動的軌跡，進一步區別出數顆行星，相對於遙遠恆星而移動，這些行星包括了金、木、水、火、土五顆。從地表望去，行星的視運動與太陽和月球在天空中的移動軌跡相近，也就是都在黃道與白道附近的帶狀區域。日、月、行星到底如何運動呢？科學家分析行星的運動，逐步揭開了行星運轉的神秘面紗。

大約三百多年前，伽立略用自製的望遠鏡觀察到金星有盈虧的變化，正如月球一般，因而推測行星只會反射太陽光，和會自行發光的太陽不同。伽立略也發現木星有四顆衛星，繞行在木星赤道上方，這個現象推翻了所有的星體都必須繞著地球旋轉的想法。

長期觀察各行星的運動，發現水星與金星只在凌晨或黃昏時出現，在地面觀測到最大仰角分別為 28 度與 47 度，表示它們比地球更接近太陽。另一方面，火星、木星與土星不但在凌晨或黃昏時可見，即使在深夜亦可見其蹤跡，這表示它們的軌道在地球之外，距離太陽比較遠。

以遙遠的恆星為背景，我們發現地球之外的行星在由西向東運行時，有時會停駐不動（稱此現象為留），然後再由東向西逆行的現象（圖 3-2）。十六世紀時，第谷針對逆行現象最明顯的火星進行長達二十年精細的觀查，所累積的資料經後期

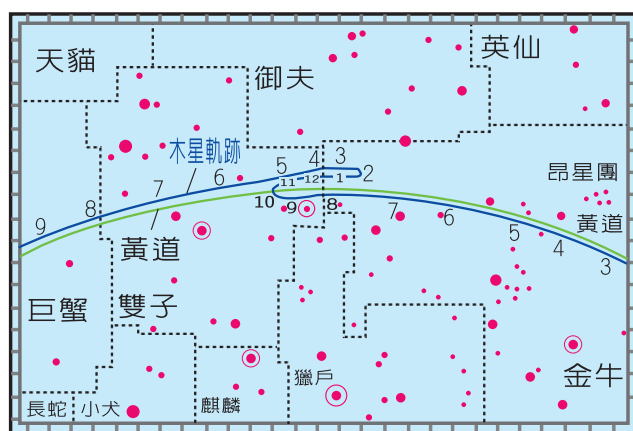


圖 3-2 西元 1977~1978 年間，木星的軌跡。

與他一起觀測的克卜勒（Johannes Kepler）縝密計算，即使是微小的差距也不輕易忽略，終於推導出行星運動定律。克卜勒認為行星繞日運行的軌跡是離心率很小的橢圓，太陽位在其中一個焦點。這個突破性的發現，徹

底打破了天體運行必須是完美圓形的想法，也推翻了盛行千餘年，且已發展到十分冗雜的本輪均輪說。克卜勒的研究結果簡潔地解釋了行星的逆行現象（圖 3-3）。

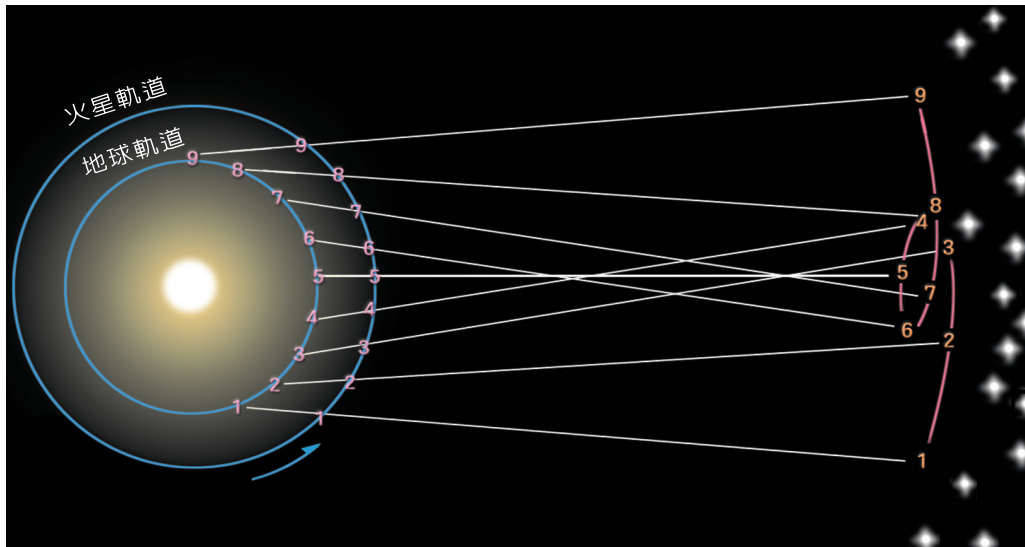


圖 3-3 火星的逆行現象。

3-2 行星的運動

雖然克卜勒找出了行星運動的規則，但卻不明瞭行星如此運動的原因。隨著牛頓統整了克卜勒的行星運動定律，接著伽立略對落體的研究及慣性定律，還有惠更斯（Christian Huygens）對圓周運動的研究成果，最後歸納出萬有引力定律。此定律說明行星受到太陽的引力作用，因為太陽的質量很大，可以產生夠大的引力，使行星規律地繞日運行。受到太陽引力影響而環繞其運行的星體，都是太陽系的成員。

太陽系有多大呢？直到二、三百年前，人們還認為土星是太陽系最遠的行星。西元 1781 年，赫歇爾（William Herschel）偶然發現了天王星，隨後發現天王星的運動與萬有引力定律所預測的位置不同，因而推測可能是受其軌道外緣其他行星的影響。西元 1846 年，根據亞當斯（John C. Adams）與勒威耶（Urbain J. J. Leverrier）的理論預測而觀測到視亮度約為 9 等的海王星。之後觀察海王星發現其亦有不規則的運動，而推測第九

類行星的存在。終於在西元 1930 年，湯保（Clyde Tombaugh）觀測到冥王星的蹤影。

現今，我們知道繞太陽運行的行星，由內而外依序為：水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星及冥王星（圖 3-4）。

有關九大行星的軌道資料，見附錄表 3.1。

太陽系最遠的冥王星，距日大約六十億公里（40 天文單位）。

太陽系內 99.8% 以上的質量集中在太陽，而行星、衛星等成員所加起來的質量，尚不及太陽系總質量的 0.2%。可見，太陽系的質量分布非常不均勻，各行星間十分空曠。這個現象強化了行星繞日運轉的理論根據。

由太陽系九大行星的公轉資料發現行星公轉方向均是由西向東，只有冥王星的公轉軌道傾角明顯比其他行星大。觀察九大行星的自轉特徵（圖 3-5），發現除了金星與天王星外，其餘六顆行星的自轉若由太陽系北極俯視，均為反時針方向，且自轉軸與黃道面大約呈垂直。金星的自轉方向為順時針，而天王星的自轉軸則幾乎在黃道面上。



圖 3-4 繞太陽運行的九大行星。

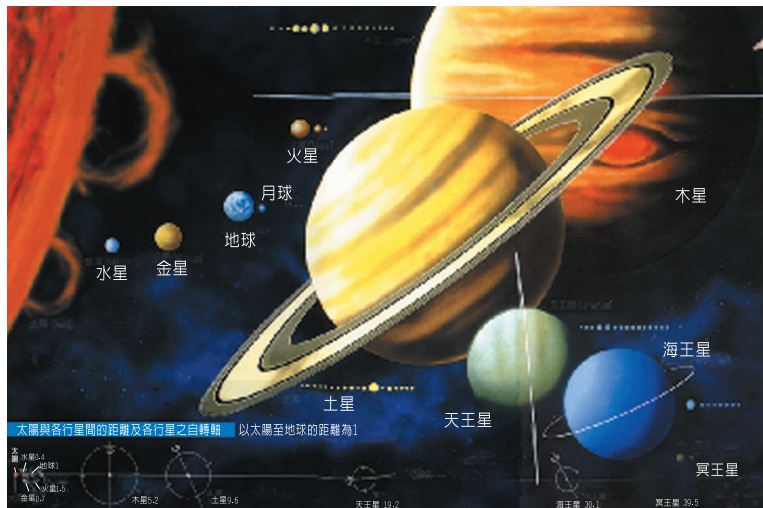


圖 3-5 八顆行星的軌道傾角。

地球、太陽及行星間的相對位置稱為**行星組態**（圖 3-6）。從地球看去，當行星與太陽的方向相同時，稱為**合**。如水星凌日就是發生在水星合日時。行星與太陽之間的夾角稱為**距角**，軌道在地球之內的行星與太陽會有一個最大的夾角，稱為**大距**，

我們可利用行星大距時，用簡單的數學方法估計行星與太陽的距離。而行星與太陽的方向相反，稱為**衝**，只有地球之外的行星才會發生。行星在衝的位置，會在半夜高懸在天空。而軌道在地球之外的行星當與太陽夾 90 度角時，稱為**方照**。

某行星兩個相同組態的時間間距稱為**會合週期**，這是行星公轉加上地球公轉的結果。若以遙遠的恆星為參考，行星回到相同位置的時間間距，則稱為**恆星週期**，這才是行星真正的軌道週期。如木星的恆星週期約為 12 年，在黃道上大約每年移動一個星座的角度，所以稱木星為**歲星**。表(一)列出各行星的會合週期與恆星週期，可以看出對於距日遠的行星而言，影響會合週期的主要因素是地球本身的公轉。

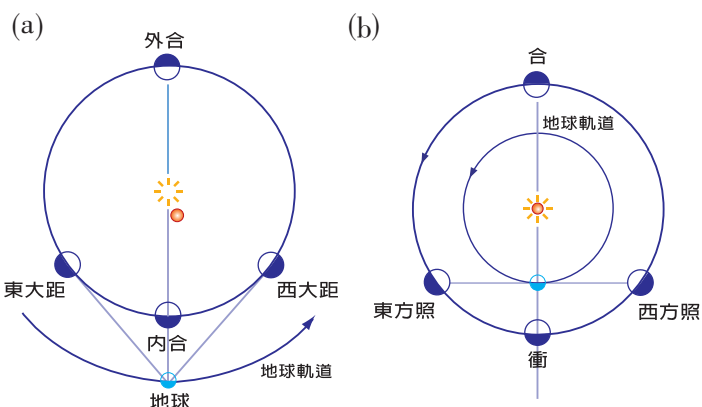


圖 3-6 (a)為地內行星在大距及合時的位置，
(b)為地外行星運行至方照、衝及合的情形。

表(一)：各行星的會合週期與恆星週期。

行 星	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
會合週期	116 天	584 天	—	780 天	399 天	378 天	370 天	368 天	367 天
恆星週期	88 天	225 天	365 天	1.9 年	11.9 年	29.5 年	34.0 年	164.8 年	248.5 年

3-3

揭開行星的神祕面紗

西元 1957 年，前蘇聯發射了第一顆人造衛星史普尼克號，帶領人類躍登太空時代，開展了一系列的太空探測任務。緊接著，美國更在西元 1969 年發射載人太空船，完成人類首次登陸月球的狀舉。（圖 3-7）。其後陸續發展出的人造衛星、太空船、太空站、太空望遠鏡等太陽系的另類成員，則讓人們得以一窺各行星的真面貌。表(二)為歷年來著名的太空探測任務。



圖 3-7 太空人在一崩落的月岩旁，當時為月球的白晝，但是因為沒有大氣層，天空仍是漆黑一片。

表(二) 歷年來著名的太空探測計劃。

年(AD)	1957	1959	1961	1962	1969	1971	1973	1975
太空船	俄：史普尼克一號	俄：探月者號	俄：伏斯托克一號	美：水星號	美：阿波羅十一號	美：水手號	美：先鋒十一號	美：海盜一、二號
目標	---	月球	太空首航	太空航行	載人登月	火星	木、土	火星
年(AD)	1976	1977	1989	1989	1990	1998	1999	2001
太空船	俄：金星九、十號	美：航海家一、二號	美：麥哲倫號	美：伽立略號	美：哈伯望遠鏡	美：拓荒者號	美：星塵號	近地號
目標	金星	類木行星	金星	木星	太空望遠	登陸火星	彗星	小行星

自 1970 年代起，科學家開始探測各行星及其衛星的地表特徵、大氣成分等性質。至今發現除了水星與金星以外，太陽系其他的行星都有衛星環繞其周圍。整體來說，行星分為兩大類：一是類似地球、以重的固體元素為主的較小型行星，稱為類地行星；另一是類似木星、以輕的氣體元素為主的巨型行星，稱為類木行星。類地行星無光環、衛星數稀少，只有三顆衛星：火星兩顆、地球一顆；類木行星的衛星數多，且均有光環。而冥王星則不屬於這兩類行星。各行星詳細的資料見附錄表 3.2。

3-3.1 類地行星

水星（圖 3-8）為距日最近者，公轉一週只需要 88 天，而自轉一週卻需 59 天，故水星上的一天十分漫長。水星表面沒有水及大氣，所以晝夜溫差大，且布滿了隕石坑。

金星（圖 3-9）公轉一週約需 224 天，而自轉係由東向西，旋轉一週需 243 天，故其上的一天比一年還長。金星表面有一層濃厚的大氣，其中 96% 的大氣為二氧化碳，大氣壓約為地球氣壓的九十倍，所以溫室效應顯著。

地球與其衛星月球的景觀差別很大。月球因為少了大氣層的保護，其表面布滿了隕石坑（圖 3-10），並且晝夜溫差大。地球則因表面覆蓋了廣大的水域及適量的大氣，故有較穩定的氣溫，而孕育了無數生命。地球的磁場侷限了由太空進入地球的帶電粒子，這些粒子被磁場加速而放出輻射，形成了著名的范艾倫輻射帶（圖 3-11）。若帶電粒子沿著磁力線進入地球兩極，則會與大氣分子作用而產生極光。



圖 3-8 滿布隕石坑的水星。

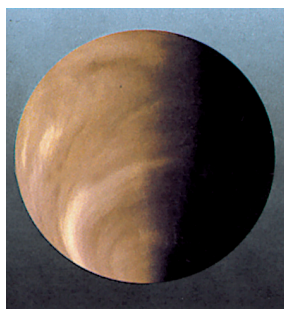


圖 3-9 濃雲密布的金星。



圖 3-10 地球從滿布隕石坑的月面升起。

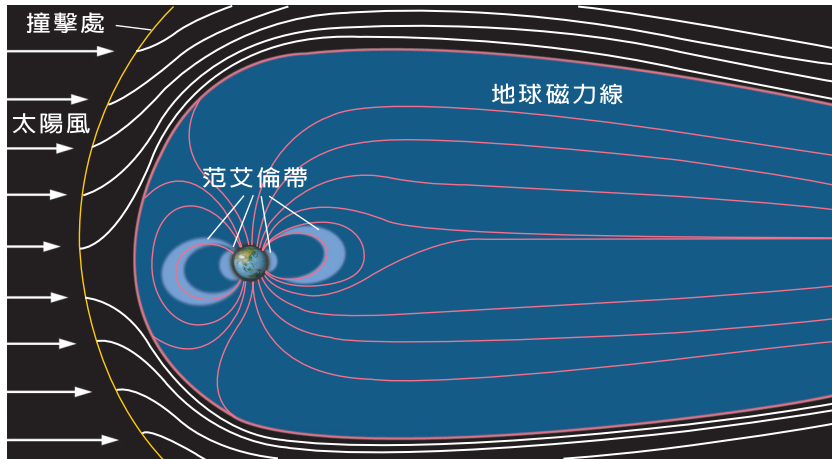


圖 3-11 范艾倫輻射帶。太陽風使地球磁力線扭曲，部份帶電粒子被地磁加速而發出輻射，形成輻射帶。

火星（圖 3-12）處於類地行星的最外緣，直徑約為地球的一半，公轉一週約需兩年，自轉週期為一天，且自轉軸傾角 25 度，有與地球類似的四季變化。火星有稀薄的大氣，大氣壓約為地球的百分之一，其中二氧化碳含量占 95%，透過大氣仍隱約可見其泛紅的地表。經太空探測船取得的土壤，發現其中富含氧化鐵。因其距離太陽已遠，最低溫接近二氧化碳的凝固點（ -78°C ），故在兩極處形成二氧化碳冰帽，成為著名的特徵。火星有兩顆形狀不規則的小衛星（圖 3-13），表面均留有明顯的隕石坑洞。

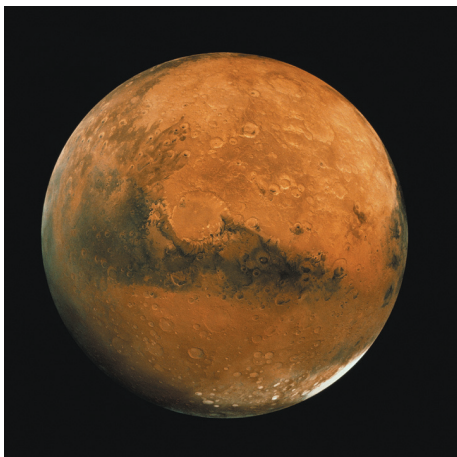


圖 3-12 火紅色的火星。



圖 3-13 火衛福布斯的表面。

3-3.2 類木行星

類木行星在體型上較類地行星大，其大氣厚度與自轉也都較類地行星來得大而快。

木星（圖 3-14）是太陽系中最大的行星，體積為地球的 1000 倍，但自轉一圈只需十小時，其周圍有強烈的磁場。快速的自轉使木星表面形成平行於赤道、橙白相間的帶狀雲。木星南半球尚有一存在數百年之久的大紅斑，為大氣中的高壓氣旋。木衛埃歐目前已有火山活動。

土星（圖 3-15）是太陽系第二大的行星，主要由氫、氦、氫、甲烷等低密度氣體組成，使其成為太陽系中唯一密度低於水的行星。其外圍的光環係由數千多個寬窄不同的小環所組成，推測是土星形成之際，一顆原始衛星的原料或殘骸。土星著名的衛星泰坦的大氣成份類似地球的原始大氣，其表面可能有液態的乙烷海洋，角色相當於地球上的水，有三態變化。

天王星（圖 3-16）及**海王星**（圖 3-17）體積大、密度低、大氣層極厚、自轉速度快，其表面顏色均偏藍，是因其大氣中含量豐富的甲烷會吸收紅黃光而反射藍綠光。海王星的大氣中曾有一著名的大黑斑，為大氣運動產生的暫時現象。



圖 3-14 木星及其四大衛星，由左至右分別為：卡利斯多、歐羅巴、加尼美德、埃歐。



圖 3-15 土星及其衛星，右上角為土衛六泰坦，左下角的是土衛二。

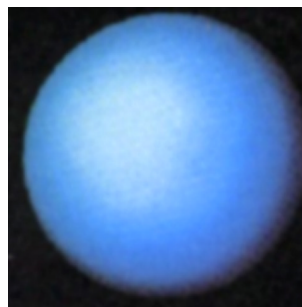


圖 3-16 天王星。

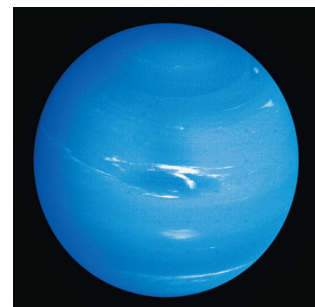


圖 3-17 海王星。

3-3.3 冥王星、小行星及彗星

遙遠的冥王星（圖 3-18）及其衛星卡龍，因目前尚未有太空船飛近，故只能見其模糊的身影，對其表面性質仍所知有限。

西元 1801 年發現了第一顆直徑約數十公里的小行星後，至今在火星與木星軌道之間的小行星帶觀測到約數萬顆小行星（圖 3-19）。小行星的形狀不規則，表面有隕石坑散布，有些甚至有衛星環繞其運行。部份軌道深入地球軌道內的小行星，有撞擊地球的潛在威脅。

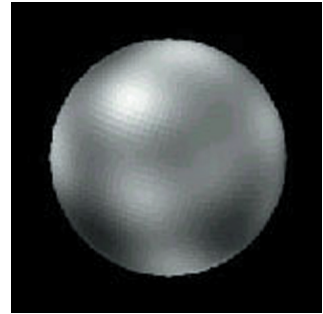


圖 3-18 冥王星

一些散布在地球附近的隕星體，受到地球引力進入大氣層，若在高層大氣燒毀殆盡，即成為流星

（圖 3-20）；若其質量夠大而未燒毀殆盡，落到地面就成為隕石。落地的隕石會因衝擊力大小不同，在星球表面留下大小不等的隕石坑。隕石不易變質，故保存了原始太陽系物質的原貌，所以研究隕石可以得到太陽系生成之初的訊息。

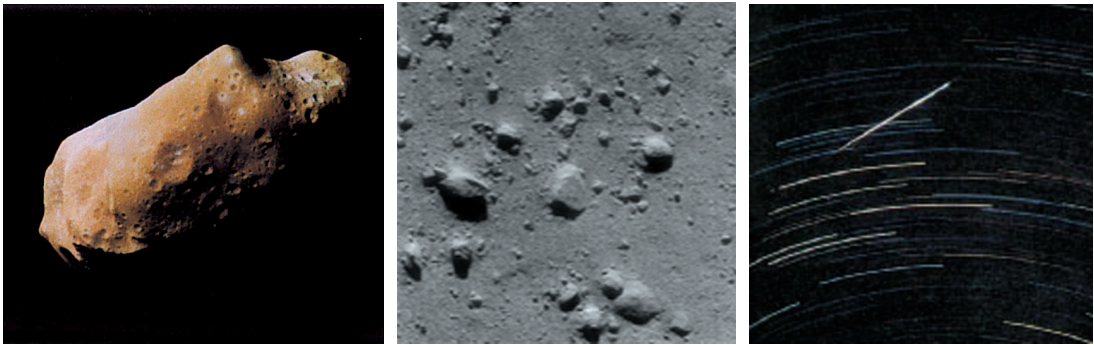


圖 3-19 (a)小行星伊達。(b)小行星表面。

圖 3-20 一閃即逝的流星。

彗星是另一類受太陽引力束縛的星體，俗稱掃把星，像是沾了灰塵、岩屑的髒雪球，直徑約數十公里。因為彗星反射陽光的面積很小，通常只有在接近太陽時，我們才觀察得到。有些彗星經過太陽系內部後，就不再回來。和行星軌道相較，週期彗星的軌道均為離心率較大的橢圓，且傾角分布範圍甚大，在黃道面的上下四方繞日運行。

彗星的結構分為**彗核**、**彗髮**及**彗尾**（圖 3-21）。**彗核**結構鬆散，接近太陽時，受高熱而伸展出直徑約數萬公里的**彗髮**，又因太陽風及陽光輻射而伸展出長達數百萬公里的**彗尾**（圖 3-22）。彗星通過太陽附近時，會殘留一些物質在軌道上。彗核因此隨著回歸次數增加而逐漸縮小。如果彗星軌道



圖 3-21 彗星。透過稀薄的彗尾可以看到背景的星光。

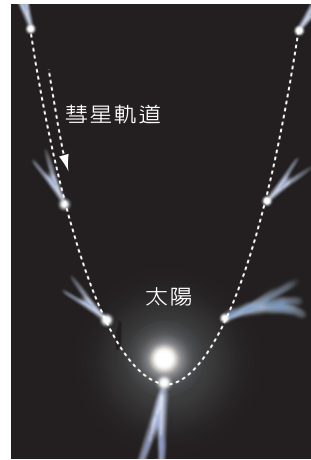


圖 3-22 彗星接近太陽時，彗尾的方向永遠背離太陽。

與地球軌道有交集，當地球通過一些殘渣較密的區域，細微的碎屑便受地球吸引而飛進大氣層。大部分的碎屑在高層大氣燒盡，燃燒的瞬間，地球暗面的人便可看見壯觀的**流星雨**。因為彗星質量很小，很容易受到大行星的吸引而繞其運行，形成短週期彗星，甚至可能會撞上行星而燒毀（圖 3-23）。

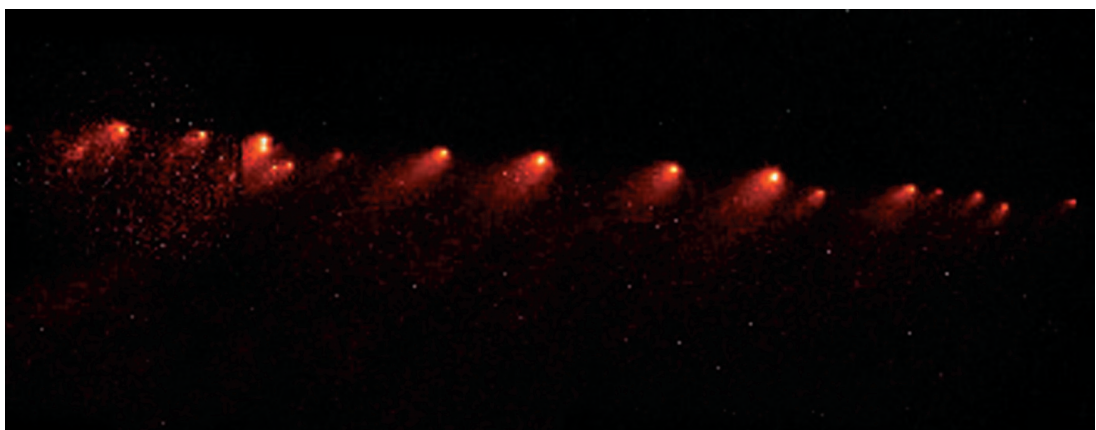


圖 3-23 休梅克－李維 9 號彗星在接近木星時被扯碎，各碎塊逐一撞上木星後燒毀。

3-4 太陽系形成

恆星與恆星之間的廣大空間裡，其實並不是完全真空的，而存在了各式各樣的氣體與灰塵，這些物質因為本身的萬有引力而向內收縮。隨著雲氣收縮，溫度與壓力也跟著上升，要是膨脹的壓力阻擋了內縮的萬有引力，雲氣就不再繼續收縮。但若這團雲氣包含的物質夠多，萬有引力夠大，或者是雲氣受到外來的擾動，例如旁邊發生了星球爆炸等，雲氣就會持續快速塌縮。如此塌縮的雲氣就是恆星和行星的起源。

大約 46 億年前，太陽系就是這樣形成的。在塌縮的雲氣裡，物質不斷掉往中心，因此中心的密度、壓力與溫度越來越高，當中心溫度升高到數百萬度時，便能夠引發核融合反應，將氫氣融合成氦氣，所釋放出來的能量提供氣體膨脹的壓力，收縮停止，一顆恆星於焉誕生！中心以外的雲氣，由於旋轉的關係，會在收縮的過程中形成扁平結構，環繞在中心恆星周圍，在這個環星盤裡，溫度不夠高到進行核反應，其中的塵埃顆粒會彼此吸附在一起，漸漸形成一顆顆的行星，以及圍繞著行星運行的衛星。靠近太陽的行星與衛星，由熔點高的物

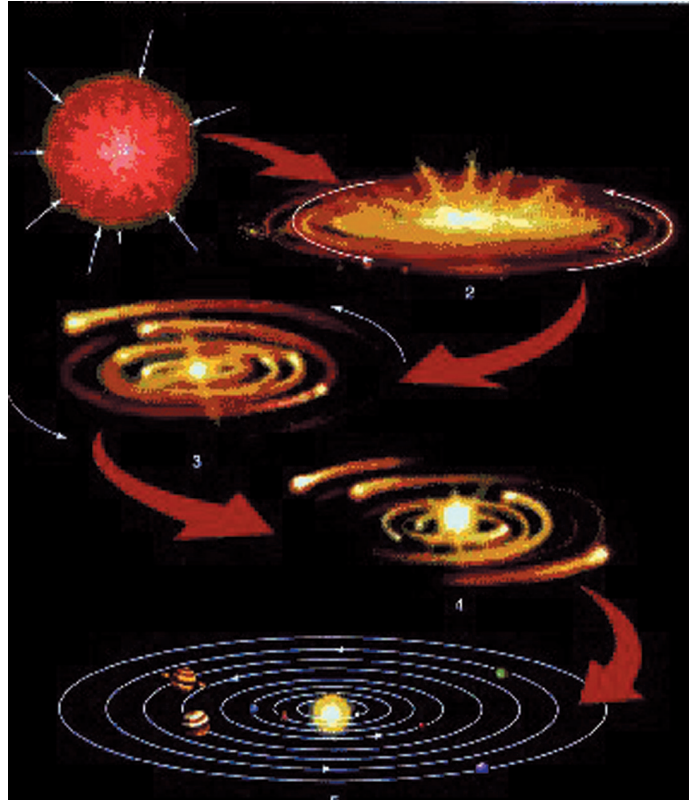


圖 3-24 太陽與行星源於一團旋轉而收縮的雲氣。雲氣的中央收縮形成高溫的恆星，周圍則形成環星盤。環星盤裡的灰塵彼此凝聚，成為個別行星，在原來環星盤的平面上繞行太陽。

質組成，構成了類地行星。地球因為與太陽距離適中，保有大量液態水，適量的大氣層，加上穩定的圓形軌道等得天獨厚的條件，孕育了生命。至於遠離太陽的天體，由於溫度低，能夠保有大量低熔點物質（例如冰），同時氣體運動速度低，因此即使是氫、氦等較輕的元素也能被行星的萬有引力攫獲，這些宇宙中最豐富的元素因此造就了巨大的類木行星。

各個行星在形成後，依照原來環星盤的運動趨勢，在幾乎同樣的平面上，以同樣的方向、近乎圓形的軌道公轉，同時也多保持相同的自轉方向。製造太陽及行星以後，雲氣裡剩餘下來的物質，仍不斷轟擊剛形成的行星及衛星，尤其對於早期行星演化，例如地球大氣、海洋，甚至生命的出現，具有重要影響，在沒有大氣保護的水星、月球以及一些衛星上，布滿了這些撞擊事件所造成的隕石坑，地球由於有大氣保護，加上板塊運動、氣候侵蝕等因素使得早期的撞擊記錄已被湮滅。隨著太陽系演化，這些剩餘物質逐漸被拋離太陽系，撞擊事件大為減少，但是時至今日太空裡仍然殘存一些小天體，它們的主要成分是冰塊（彗星）與岩石（小行星），大小從幾百公里到小於一公釐，越大型者數量越少。

原來在天王星、海王星處剩餘的冰塊物質，受到大行星擾動，被拋到太陽系外圍，但有些仍受到太陽引力束縛，遊走於星際太空。有時這些小型冰體受到外來力量的干擾（例如太陽鄰近恆星、雲氣的萬有引力），便有可能進入太陽系內部。有的隨即離開太陽系，不再復返，但也有部份從此繞著太陽運轉，成為週期彗星。由於這些彗星可能來自四面八方，所以它們的軌道呈狹長的橢圓形，並且軌道面凌亂，與行星的軌道不同。當彗星靠近太陽時，太陽風將彗星表面昇華、游離的物質推向背離太陽的方向，形成壯觀的彗尾。

因此，太陽、行星、衛星、彗星、小行星、流星等等太陽系成員，其實都是同一時期、由同一團雲氣所產生的。目前科學家已經在數十顆恆星周圍發現行星，有可能絕大部份的恆星周圍都有行星存在，有些甚至也有足夠的條件孕育生命，研究這些行星系統能夠幫助我們了解自己的起源與演化。

作 業

1. (1)利用天球坐標的概念，在天空中找出北極星後，試著判斷赤道面的位置。(2)觀察太陽和月球的視運動軌跡，並使用星座盤、天文年鑑或上網查出當日行星位置，在天空中辨識黃道十二宮及明亮行星，據此判斷黃道面的位置。(3)黃道面與赤道面的夾角是否大約為 23.5 度？
2. 水星與金星又稱為晨星及昏星。在日出前或日落後，長期觀察水星與金星，發現觀測到的大距為 28 度與 47 度。已知地球離太陽 1AU，試依此分別估計水星、金星與太陽的距離。
3. 查閱附錄二行星資料，完成以下問題：(1)請就水星的質量，求出水分子所受水星引力；(2)水分子從水星散失的逃脫速度是多少？(3)利用水星表面溫度資料，計算水分子在此溫度下的動能；(4)由(1)~(3)的結果，解釋水星為何沒有水存在？
4. 列表歸納比較比較類地行星與類木行星在距離、溫度、構造、體積、成分、衛星數、行星環等各項特徵的差別。

附錄：

表 3.1 太陽、行星、及月球的基本資料表一：自轉與公轉軌道常數。(表中，符號 \oplus 表示地球；而標記R者，表示該行星自轉方向係由東向西。)

星 體	平均距離(天文單位)	公轉週期(太陽年)	軌道傾角(度)	離心率	質量 $\oplus = 1$	自轉週期(地球日)	赤道與軌道夾角(度)	最大光度(視星等)
太 陽	—	—	—	—	332946	27.28	7.15	-26.7
水 星	0.38	0.24	7.01	0.21	0.06	58.65	0.00	-2.4
金 星	0.72	0.61	3.40	0.01	0.82	243.01R	178.00	-4.7
太 陽	1.00	1.00	0.00	0.02	1.00	1.00	23.44	—
火 星	1.52	1.88	1.85	0.09	0.11	1.03	25.19	-3.0
木 星	5.20	11.86	1.30	0.05	317.83	0.41	3.08	-2.8
土 星	9.54	29.46	2.49	0.06	95.16	0.43	26.7	-0.5
天王星	19.22	84.02	0.77	0.05	14.54	0.75R	97.9	+5.3
海王星	30.11	164.77	1.77	0.01	17.15	0.80	29.6	+7.8
冥王星	39.54	247.80	17.15	0.25	0.002	6.39R	122.5	+13.6
月 球	—	—	—	—	0.012	27.32	6.67	-12

表 3.2 太陽、九大行星、及月球基本資表二：表面特徵。

星 體	赤道半徑		質量 $\oplus = 1$	密度(g/cc)	扁率	反射率	表面溫度(·k)
	公里	$\oplus = 1$					
太 陽	696000	109.13	332946	1.44	—	—	600
水 星	2439	0.38	0.03	5.42	0.00	0.12	100~700
金 星	6052	0.95	0.82	5.25	0.00	0.59	726
地 球	6378	1.00	1.00	5.52	0.0034	0.39	310~260
火 星	3394	0.53	0.11	3.94	0.0052	0.15	240~190
木 星	71398	11.19	317.83	1.31	0.0648	0.44	120
土 星	60330	9.41	95.16	0.70	0.1076	0.46	88
天王星	25559	4.01	14.54	1.29	0.023	0.56	59
海王星	24764	3.88	17.15	1.64	0.017	0.51	48
冥王星	1150	0.18	0.002	2.03	?	0.5	37
月 球	1738	0.27	0.012	3.34	—	—	—