

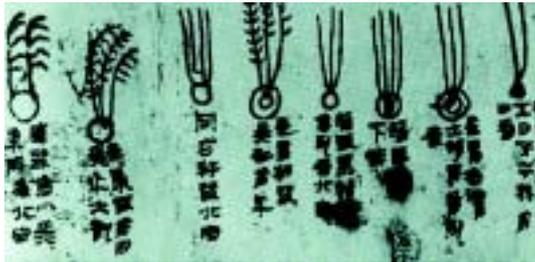
是時候了 於是幻變
遊走幽形的火焰
迷途彗星 是詛咒
威懾整個宇宙

拜倫

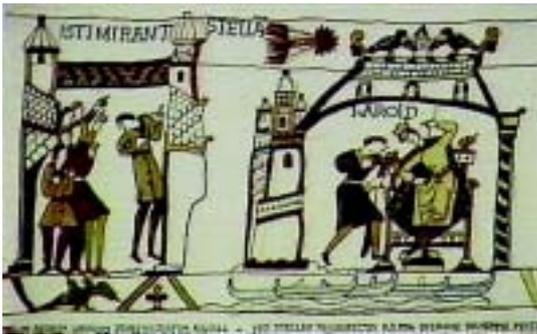
這幾個月夜空可見三顆彗星，是有史以來的奇景。歷史上對於彗星來去無法預測的特性，加上絢爛的外觀，賦予其神秘與不兆之聯想。中國先民稱突然出現的星體為「客星」，包括了今日所知的超新星、新星與彗星皆屬此類天上的不速之客，尤其彗星以其多變的外觀(圖一)，讓人望之生畏。不僅在中、外歷史政治舞臺扮演了重要角色(圖二、圖三)，直到近代，仍成為社會運動的喻徵(圖四)。

二、彗星的起源

彗星是太陽系製造太陽、行星與衛星後剩下的小型天體。46億年前太空中一團濃密雲氣因本身重力收縮，在中央的部份溫度達到了數百萬度，足以引發熱核反應而形成恆星。另一方面由於雲氣自轉，使得收縮後在赤道面上形成環星盤。恆星形成後，其恆星風與輻射很快將鄰近的物質(尤其是易揮發的物質)消散殆盡，



圖一：長沙馬王堆出土的西漢帛畫，顯示變化多端的彗星外觀。



圖二：先民認為 1066 年哈雷彗星的出現預兆了哈洛德王朝 (King Harold) 的滅亡



圖三：1857 年出現的彗星被描述成世界的毀滅者 (繪圖者不詳)

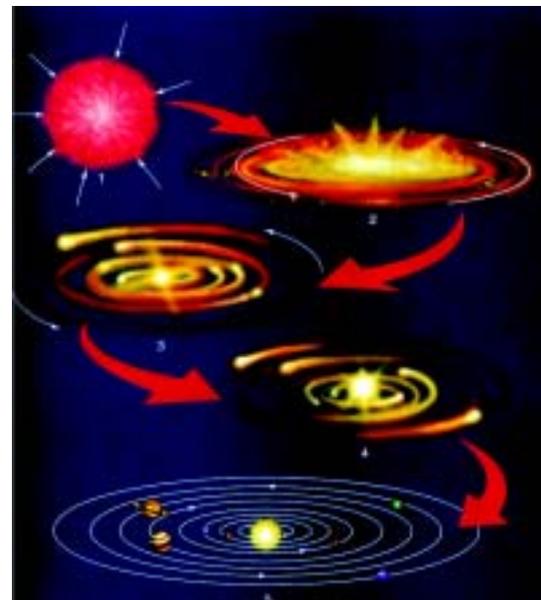


圖四：Thomas Nast 所繪 "The Comet of Chinese Labor" (1870)，以彗星象徵入侵的廉價華人勞工

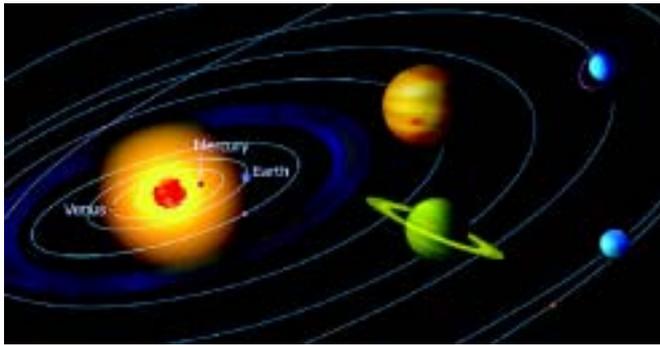
惟有環星盤中的物質比較有機會得以吸積凝聚，逐漸形成行星核心。這些行星胚胎在環星盤中運行時，靠本身萬有引力吸聚雲氣而成為日後的行星 (見圖五)

在此原始太陽雲氣盤面上，離中央恆星愈近則溫度愈高。太陽系中的行星便是循著此規律：離太陽近的水星、金星有金屬及氧化物 (熔點高) 構成的核心；到了地球附近則在核心之外包覆了厚重的一層矽化物，其熔點 (凝固點) 比核心的物質低，因此在雲氣冷卻的過程中要比核心冷得晚，故而包在外層。在土星以外的區域溫度就更低了，以致熔點非常低的冰 (水、甲烷、氨) 也可以存活。也由於溫度低，氣體的逃脫速度慢，因此即使是氫、氦等輕的元素也能被核心的重力攔獲，這些宇宙中最豐富的元素因此造就了巨大的外行星 (圖六)。

環星盤外圍由於密度低，時至今日這些彗星 (冰體) 與小行星 (岩石體) 等小型天體仍無法凝聚成為行星，所散佈的帶狀分佈稱為「古



圖五：太陽系形成的吸積模型。旋轉的雲氣中央先收縮，溫度升高，同時在赤道上方形形成環星盤，最後中央星體引燃核反應，成為恆星。環星盤中星際微塵互相凝聚，沈向環星盤中間，彼此持續吸聚長成如小行星般大小，最後成為行星核心。如果核心夠大還可以吸積周圍的氣體成為巨大行星。



圖六：離太陽距離遠比較容易形成巨大行星。太陽系靠外圍的四個行星（木星、土星、天王星與海王星）比裡面的四個行星（水星、金星、地球、火星）大得多。

柏帶」(Kuiper belt)。目前已經在古柏帶，也就是海王星軌道以外的區域，發現將近一千個天體，其中最近發現的「賽德娜」(Sedna) 其大小已經與冥王星不相上下(表一)。事實上冥王星在很多方面比較像是古柏帶中的小型天體，而不是行星(圖七)。

天體名稱	Sedna 賽德娜	Pluto 冥王星
大小	小於 1770 km	約 2300 km
距離太陽	86 AU	~30-50 AU
軌道週期	10,000 年	248 年
平均溫度	-240°C	~-180°C

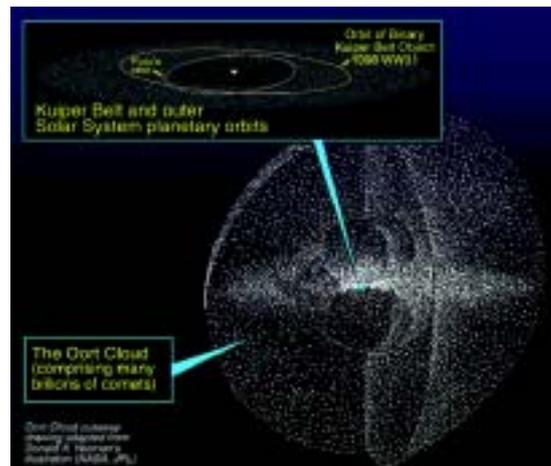
表一：賽德娜與冥王星之比較



圖七：最近發現的古柏帶天體，其大小比冥王星略小。

在天王星、海王星形成後，環星盤中的小型天體(可能多以冰體居多)受到大行星的重力擾動而被凌亂拋出太陽系。這些多半拋出後不再復返，但部分受到太陽引力牽引，仍圍繞在

太陽系上下四方的歐特雲(Oort cloud)中。圖八為古德帶與歐特雲區域的示意圖。歐特雲其實不是雲，而只是理論推測太陽系四周，彗星分佈所在的球狀區域。不像古柏帶目前已經證實存在，我們現在仍沒有發現歐特雲中的天體，因為它們實在太遙遠，加上體積小(反射面積小)，因此反光極其微弱，以目前最靈敏的望遠鏡都無法探測到。一般猜測歐特雲可能包含了一兆個大小約一公里、形狀不規則、由冰體組成的彗星核，雖然數量多但整個加起來也只有十個地球左右的質量。



圖八：古柏帶為海王星軌道以外，彗星分佈的區域，為行星軌道黃道面的延伸，這些彗星是行星形成後的殘留小天體。早期被拋射出去的彗星則可能分佈在上下四方的球狀區域中，稱為歐特雲。

太陽系靠外圍的古柏帶與歐特雲兩個區域當中的彗星，若是受到擾動，有些可能被拋離太陽系，有些則闖進太陽系內圍，成為我們看到的彗星。古柏帶中的彗星容易受到大行星的干擾，而進入太陽系內圍時，多半仍分佈在太陽系平面附近，成為短週期彗星。至於歐特雲中的彗星則可能在太陽繞著銀河系運動時，受到周遭其他恆星，或是銀河盤面中巨大分子雲的干擾。這些受到擾動的彗星便成為長週期彗

星，以凌亂的軌道繞行太陽。

所以說彗星其實不是外太空來的異客。而是和太陽、地球以及各行星同時生成，但在早年被送出了家園，遊走在冰冷的歐特雲中（溫度只有約4K），只有極少部份得以在日後返鄉探望一番。結果太陽系中的成員個個滄海桑田，個個都有隨著歲月演化的故事，卻只有小小離家的彗星純樸依舊，仍然保有當初形成太陽系的原始物質。研究這些小型天體，藉以追溯太陽系形成與早期演化歷史，成為未來幾年行星科學的重要課題。

二、彗星的命名

習慣上彗星通常以發現者命名，但隨著大型觀測計畫加入搜尋工作，發現新彗星的數量與時俱增，對於彗星的命名也愈發複雜，「國際天文學會聯合總會」（International Astronomical Union, IAU）目前達成共識的作法，是一旦確認發現了新的小型天體，國際上首先以該發現宣布的年代與月份編號。例如 C/2002 C1 也稱為 Comet Ikeya-Zhang（中文稱為「池谷張彗星」），是在2002年發現的，其中第一個字母 "C" 代表「彗星」，如果是小行星則用 "A"；"D" 則表示消失了的彗星；"P" 則代表週期彗星。斜線之後為年份，之後的字母代表當年的月份，以 "A" 表示一月上半月，"B" 表示一月下半月，依此類推。月份之後的數字則代表該半個月之內發現的彗星編號，例如 C1 為二月上半所發現的第一顆彗星，以如幾年前壯觀的海爾-波普彗星為例，其名稱為 Comet Hale-Bopp=C/1995 O1。對於回歸（進入太陽系內圍）一次以上的彗星，在名字之前予以編號，例如 1P/Halley 為哈雷彗星，2P/Encke 則為恩克彗星。

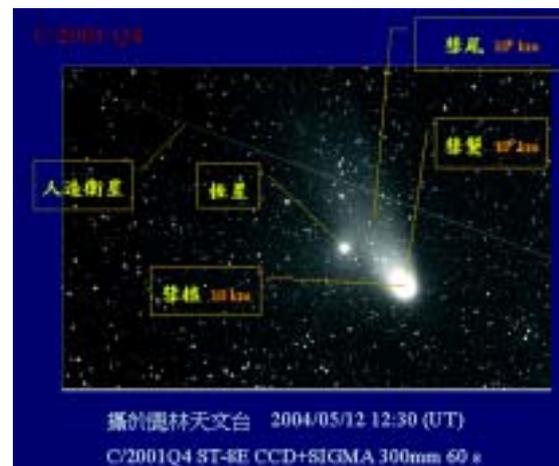
1P/Halley 以及 2P/Encke 是以計算出這些彗星週期的人為名。近代觀測設備發達，有的彗星由人造衛星發現，因此以之命名，像是 IRAS-Araki-Alcock 彗星。一旦算出了彗星軌

道，也可以加上羅馬數字表示當年走到近日點的順序，例如1977年的知名 West 彗星便稱作「1977 IX West」，是當年第九個到太陽附近的，目前知道它不是週期彗星。

目前在夜空中的三顆明亮彗星，C/2001 Q4 (NEAT)、C/2002 T7 (LINEAR)，以及 C/2004 F4 (Bradfield)，除了 C/2004 F4 由紐西蘭彗星專家，目前住在澳洲的 William Bradfield 發現以外（這是他發現的第18顆彗星！），其他兩顆皆由有系統的小型天體觀測計畫發現。其中 NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking) 為 NASA/JPL 的計畫，LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research) 則為林肯國家實驗室與美國空軍的計畫，目的都在搜尋近地小行星並計算出它們軌道，以監測可能與地球相撞的小行星，發現小行星或彗星算是副產品。有關這三顆彗星與行星的軌道動畫，可參考 http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/lib/koehn_threecomets_2004.gif

三、彗星的外觀與結構

彗星的結構分為頭部與尾部，而頭部又可細分為彗核及彗髮。隨著離太陽的遠近，彗星時而「見頭不見尾」的種種變幻，是其吸引人的



圖九：C/2001 Q4 的影像。彗星的頭部與尾巴延展的影像與一般圓點狀恆星明顯不同。穿過圖中的明亮細線為曝光期間通過視野的人造衛星。

主要原因。圖九為 5 月中旬在鹿林天文台所拍攝 C/2001 Q4 的影像。

彗核 (nucleus)

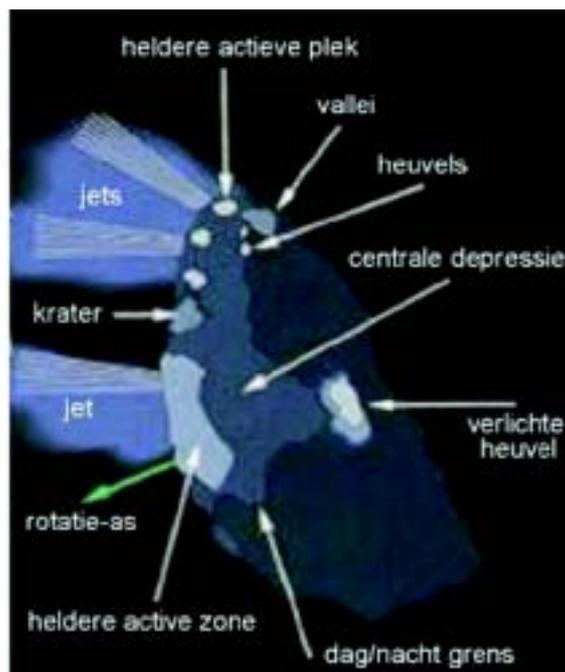
彗星的核心是彗星真正固體的部份，也在遠離太陽遠時(大於5天文單位)唯一存在的部份。彗核形狀不規則，大小通常約數公里到數十公里，例如形似花生的哈雷彗星核大小為8.2x8.4x16公里，含有 $10^{12}\sim 10^{15}$ 公斤的物質。這樣的大小使得地面上的觀測一般無法分辨出彗核。偶而的例外像是1983年5月11日IRAS-Araki-Alcock彗星離地球只有0.031天文單位，約是月球與地球距離的12倍。這麼近的距離得以從地面發射雷達，測量反射的結果顯示其核心直徑約一公里。

哈雷彗星1986年回歸提供了直接近距離研究彗核的大好機會，包括美、日、俄、歐洲等國相繼發射太空船前往迎接，就近研究彗核。圖十為歐洲「喬陶」(Giotto)衛星飛臨彗核所拍攝的照片，可明顯看到噴流現象。1950年代惠普(Fred L. Whipple)提出彗核模型，現在

一般形容為「骯髒的雪球」(dirty snowball)，也就是冰(水、甲烷、氨)與塵粒(如隕石般的矽化物、金屬)的混合，也就是「掉在地上的刨冰」目前的觀測證據支持這個模型。彗核有層薄的表殼，使得在每次經過太陽時只昇華一部份，但也有足夠的氣體造成彗星的種種現象。構成彗核的物質反射率非常低(如哈雷彗星約為0.027)，為太陽系中最黑的物質。當彗核接近太陽而受熱，內部氣體會「破殼而出」(圖十一之一、之二)。彗核逐漸遠離太陽後活動減弱，但因為熱能傳進彗核內部需要時間，有時



圖十一之一：彗核內部受熱後氣體挾帶塵埃衝破表殼噴發而出。



圖十：哈雷彗星核心的(左)影像與(右)標示圖。彗核的左方可看到明亮的噴流。



圖十一之二：彗核接近太陽時所蒸發的氣體與塵埃將彗核包覆住。此示意圖取自 www.wallpaper.net.au/wallpaper_space1.php

彗星距離太陽數天文單位時仍有爆發或噴流現象。有些彗星因為經過多次陽光洗禮，內部物質逐漸不均勻減少，有些科學家認為其低密度的核心可能如海綿般含有空洞結構。

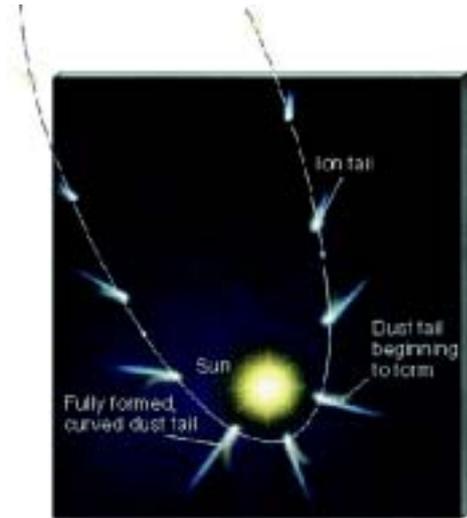
彗髮(coma)

包覆在彗核外的球形塵氣稱做「彗髮」，直徑約數萬到數十萬公里，含有豐富種類的氣體與塵埃。當彗星接近太陽時，冰凍的物質開始昇華，氣體分子逐漸分解、游離，而離開彗核，塵埃則因為黏滯、碰撞也同時跟著向外運動。彗星接近太陽時，我們看到的膨鬆影像就是明亮的彗髮，而無法看到彗核。

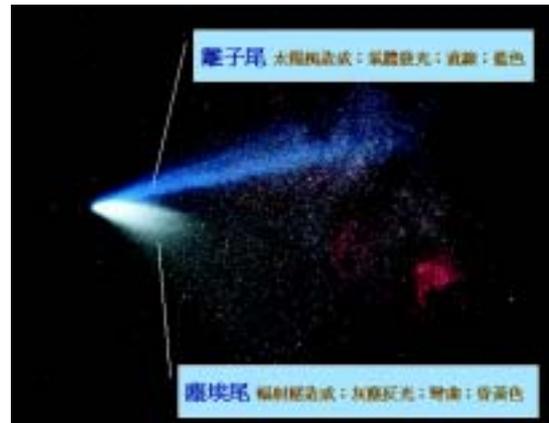
彗尾(tail)

這是彗星最吸引人的部份了，來自太陽的輻射與物質把彗髮物質推向背離太陽的方向（圖十二），長約千萬公里，甚至達一億公里多，也就是中國人其為「掃帚星」的由來。

彗尾分成離子尾及塵埃尾兩種，各有不同的成分及形成原因（圖十三）。離子尾形狀狹長，由游離分子組成，主要的成分是 CO^+ ，發出偏藍的光線。太陽風的物質為游離氫（也就是質子與電子），在地球軌道附近，密度約為每立方公尺百萬到千萬個粒子，時速約 500km/s。這些噴發出來的物質挾帶著太陽的磁場，在靠近彗星時速度減緩，而遠離後又加快，使得磁力線及陷在其中的離子包覆在彗核的外圍而



圖十二：彗尾的形成與來自太陽的噴發物質與輻射有關，所以彗尾只有在接近太陽時才產生，且方向永遠背向太陽



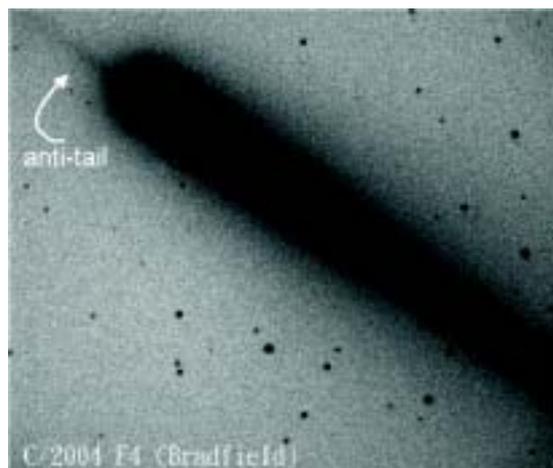
圖十三：彗星的尾巴，一般而言狹長而直的是離子尾，瀰散而彎曲的是塵埃尾。

在太陽風下風的地方（也就是背向太陽的方向）形成離子尾，長達 10^7 - 10^8 公里。因此雖然說離子的確被太陽風吹往背向太陽的方向，離子尾卻可以說是附著在彗核附近、屬於彗星結構的一部份。而在彗星運動的過程中，磁場方向的改變常常會造成離子尾的分叉、斷裂、再生。

塵埃尾由塵埃顆粒反射陽光而形成。和離子尾比起來，塵埃尾比較瀰散而且形狀彎曲，長約 10^6 - 10^7 公里。這些噴發出來的塵埃，受到太陽向外的輻射光壓，減弱了來自太陽的萬有引力。由於塵埃顆粒愈小，所受向外力量愈大，因此不同大小、成分的塵埃便因受力不同而分佈成塵埃尾，常呈扇形，反射陽光而造成

灰黃的顏色。

因為彗尾實際上乃背向太陽而非背向地球，故有時因為投影關係，從地球上會看到指向太陽的尾巴。另外就是彗核表殼當然有可能在向著太陽的一面破裂，形成噴流，我們便看到真正的逆日的尾巴了（圖十四）。



圖十四：鹿林天文台一公尺望遠鏡所拍攝的 C/2004 F4 彗星，可看到有逆向的彗尾（林忠義攝；LOT+PI 1300B R-band 10 s, 2004-05-04）

包暈 (halo)

圍繞在整個彗星之外，還有龐大的氫原子雲氣，這部份我們肉眼看不到，但受了陽光的激發後，利用人造衛星在紫外光的影像則清楚

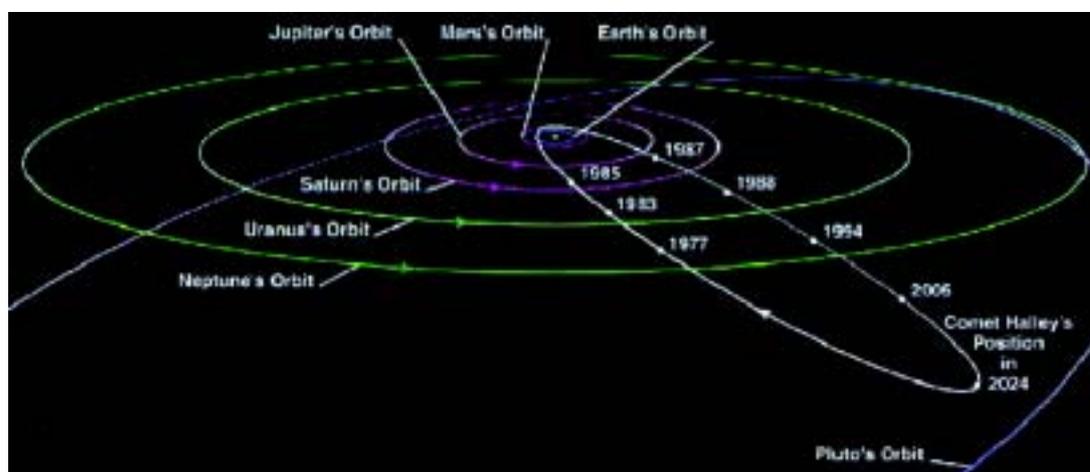
地顯示其存在，雖然極其稀薄但可綿延千萬公里，比太陽還大！

四、彗星的運動

週期彗星繞著太陽運轉，其軌道沒有一定的狹長程度，也沒有固定運動方向，圖十五為哈雷彗星的軌道示意圖。這和行星很不一樣；各行星繞行太陽公轉軌道面，幾乎都在黃道面附近(參見圖十五)，只有冥王星例外，傾斜達 17 度，現在知道冥王星並不屬於行星家族，也就不足為奇了。行星公轉遵循一樣的方向，也就是從北向南看，為逆時鐘旋轉方向。事實上，太陽的自轉以及絕大多數的行星自轉也差不多是這個方向。無論公轉或自轉的這個方向，就是當年形成太陽系的那團雲氣旋轉的方向，行星(與衛星)在環星盤上形成後，仍延續原來的運動方向。有關彗星、行星軌道運動以及彗尾形成的動畫，可參見

http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/comets/comet_model_interactive.html&edu=high

彗星在太空中運動速度很快。以地球繞太陽來說，平均速度為每秒 30 公里，也就是約 10 秒鐘就跨越台灣南北了。彗星的軌道為狹長橢圓，距離太陽遠時受到太陽引力小，在軌道上運動速度慢(否則就甩出去了!)，這就是刻



圖十五：彗星的軌道狹長，且軌道面與繞太陽運動的方向凌亂，與行星軌道很不一樣。圖示為哈雷彗星軌道。

卜勒的行星運動定律。當彗星接近太陽時，速度也差不多每秒數十公里，這樣的高速對於太陽系內圍的天體，尤其是地球當然極具威脅性。

彗星由於質量小，其軌道容易受到其他天體的引力干擾，再加上彗星本身的噴流現象有如火箭推進器，造成彗星不易長期保持穩定的公轉與自轉(包括快慢與方向)。例如比對中國史書記錄，發現過去兩千年來哈雷彗星的噴流固定造成每次回歸約延遲4天，表示其自轉軸方向沒有太大改變。但是另外一顆彗星 Swift-Turtle，其噴流的程度與哈雷彗星相當，但是其運動卻似乎沒有改變。一般認為 Swift-Turtle 的彗核可能是哈雷彗星的10倍大，因此比較不受火箭效應的影響。

當彗星接近太陽時，所蒸發的物質受到陽光的激發使得彗星很快變亮，但本身物質也逐漸消耗，粗略估計短週期彗星每世紀變暗約兩個星等(約六倍多)。新彗星由於含塵埃的比例比較高，因此增亮的程度不如富含氣體的週期彗星。彗星在軌道上遺留了冰塵殘渣，當地球運行經過這些區域，殘渣進入大氣層便形成流星雨現象。週期性彗星的殘渣有固定軌道，地球也在每年差不多時間穿越殘渣堆中，造成季節性流星雨。

五、研究彗星的太空任務

目前我們對於太陽系中體積比較大的成員，有比較多的認識。九個行星中除了最小的冥王星以外，以及一些比較大的衛星，都已經有太空船或登陸、或飛臨，就近研究。即使是冥王星，目前已有「新視界」(New Horizons；圖十六)任務，預計2006年發射，於2015年左右拜訪冥王星及其衛星，然後航向太陽系外圍，順便飛越某顆古柏帶天體，所以 "New Horizons" 任務也稱為 "Pluto-Kuiper Belt Mission"。如前所述，其實冥王星便屬於古柏帶中的天體，因此「新視界」是專門觀察太陽系

外圍的冰冷小天體的太空任務。如此一來，人類算是在太陽系中大型天體中全部巡禮走了一遭。新視野太空船順便探訪古柏帶天體的構想雖然良好，但由於目前冥王星位置投影在銀河系中心附近，恆星密度高，截至目前為止沒有在這些區域系統性搜尋，因此也就沒有已知的古柏帶天體。換句話說「新視野」任務尚未有飛臨古柏帶天體的目標。國際上一些研究群正積極試圖搜尋太空船航線附近的古柏帶天體，作為「新視界」的可能目標。台灣天文界也將於今年下半年利用夏威夷 CFHT 望遠鏡，加入搜尋行列。



圖十六：“New Horizons”太空船將飛往冥王星，探究太陽系外圍的冰冷世界。

<http://pluto.jhuapl.edu/mission.htm>

未來數年有幾項與彗星相關，而令人興奮的太空任務，不僅有助於我們瞭解彗星的成分、結構，動力演化等，同時在技術上也讓人驚心動魄。首先是「星塵計畫」(Stardust，圖十七)。該太空船於1999年2月7日發射，已經於2004年1月與「衛爾德二號彗星」(Comet Wild 2)做100-148公里的近距離接觸，穿過彗髮並收集樣本，然後將這些太陽系原始物質帶回地球實驗室分析，預計於2006年1月返抵地球。中央研究院地球所李太楓院士的研究群便參與分析星塵樣本同位素的研究。有關「星塵計畫」可參閱網站 <http://stardust.jpl.nasa.gov/>。

「痛擊彗星」(Deep Impact)更是深具挑戰性的任務。人類有史以來第一次將不再只是遭受彗星、小行星，或是流星體撞擊，而將「打回去！」太空船將攜帶以銅為主要成分(因為彗星不含銅元素)的「彈頭」探測器，於2005年



圖十七：星塵號太空船穿越彗星的想像圖。

7月4日飛抵「譚波一號」彗星 (Comet Tempel 1)，探測器被拋出後，將自己搜尋、鎖定，然後撞向彗星（圖十八），預期將轟出個大小如足球場、7-15層樓深的人造隕石坑，把彗核表面之下的物質掀起，藉以研究彗星的成分與結構。母船將探測器拋出後，持續觀察整個撞擊

過程，將在第一時間收集影像以及光度、光譜等資料，傳回地球。太空與地面上各望遠鏡屆時自然也將監測該彗星，我國鹿林天文台、墾丁天文台也屬於此全球觀測網。撞擊發生時，最佳觀測地點在夏威夷，台灣屆時為白天，但由於熱傳導到彗星內部可能造成噴流或其他現象延遲發生，若然我國便居於有利的西太平洋地理位置，有機會觀測到重要現象。有關「痛擊彗星」任務訊息，可參見 <http://deepimpact.jpl.nasa.gov/>

「羅賽達」（Rosetta）任務更讓人嘆為觀止。「羅賽達石碑」（Rosetta Stone）原為埃及出土，刻有古代包括象形文字在內的石碑，為人類文明象徵之一。羅賽達太空船將登陸彗星，實地探訪太陽系與生命之源，因而得名。「羅賽達」為歐洲太空局繼「喬陶」之後的第二個「追星族」任務！羅賽達將登陸的彗星有個饒舌的名字，稱為 67P/Churyumov-Gerasimenko，這裡暫且稱呼它為「闕季雙氏彗星」，乃於1969年由 Klim Churyumov 在 Svetlana Gerasimenko 所拍攝另一顆彗星的照片上，意外發現此新彗星。闕季彗星軌道週期 6.6 年，大小只有約 3-5 公里。羅賽達太空船已經於 2004 年 3 月成功發射，在前往闕季彗星途中，將於

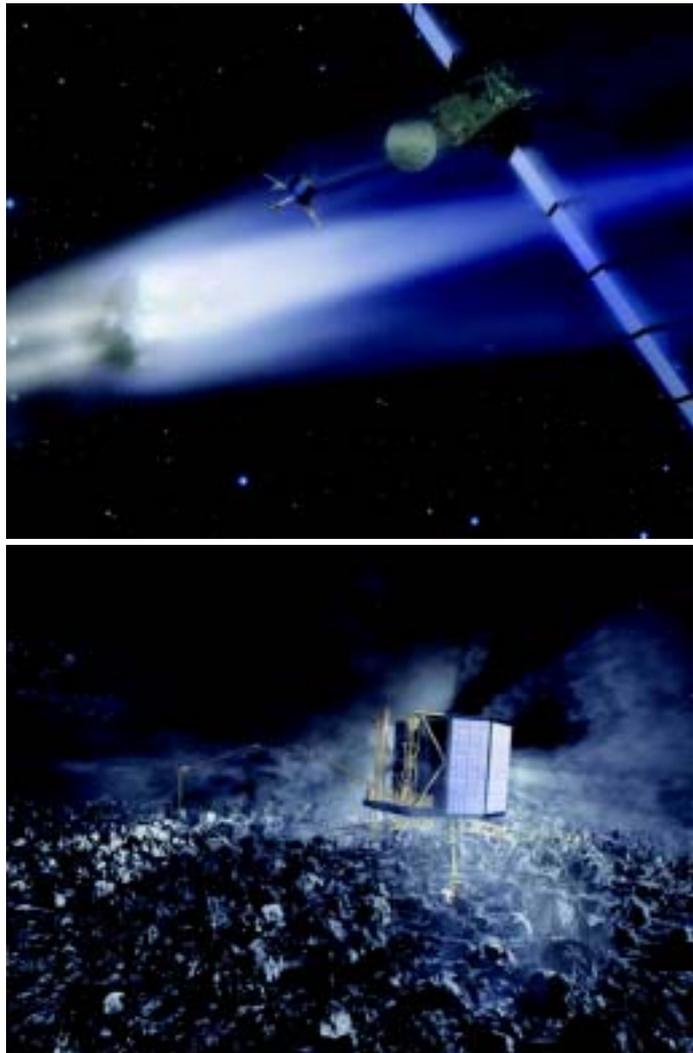


圖十八：「痛擊彗星」任務的示意圖。太空船釋放出的探測器，將採殉身方式撞向「譚波一號」彗星，藉以其成分與結構。

2005年3月與地球相遇；接著在2007年7月與火星相逢，然後在2007年11月與2009年11月再次與地球兩次遭遇，被重力甩出加速。航行途中還將與兩顆小行星近距離接觸，堪稱「社交豐富」的太空任務，終於預計在2014年8月抵達屆時離太陽4.5天文單位的彗星，與之共同飛行，以貼身距離觀察逐漸接近太陽時，彗尾的變化情形（圖十九）。屆時將釋放名為「菲雷」（Philae）的小艇，直接登陸彗星表面。Philae為尼羅河中小島，在當地發現的石塔發現刻有古埃及文字，有助於科學家解讀羅賽達石碑上，有關古埃及文明之謎。作為羅賽達太空任務的斥候先鋒，自是十分貼切的名字。歐洲太空局的網站可以找到有關羅賽達任務的資訊，<http://www.esa.int>。或是參考 www.plasma.kth.se/Rosetta/

總結來說，現在的我們不再恐懼於彗星的來去無蹤，反倒追逐它們，期待欣賞大自然上演的美麗曲目。除了地面觀測，甚至追到太空，追到彗星表面，進行徹底研究。以上這些任務無疑在未來幾年，將使我們對這些小天體有長足認識，而進一步瞭解太陽系以及地球生命的起源。

緣於這幾個月彗星熱潮，編輯先生請我寫一篇有關彗星的文章，我原有些猶豫，因為一九九六年十月號「物理雙月刊」我已經寫了一篇自認相當詳盡的文章。但考量該文可能太技術性，故參考該文內容，加入新的內容後完成本文。好在少部分抄襲自己的東西，應該不算大惡。除了文中提供的網頁參考資料以外，物



圖十九：羅賽達太空船已於2004年3月2日發射升空，開始追逐彗星的任務。

理雙月刊的彗星一文可參考以下連結，有比較深入的介紹

http://www.astro.ncu.edu.tw/contents/faculty/wp_chen/wp_chen/essay/comets.pdf

作者：現任教於國立中央大學天文所及物理系