

失而復返的太陽系成員----彗星

陳文屏 中央大學天文所及物理系

(本篇文章原發表於「物理雙月刊」十八卷五期，1996.10，
版權屬物理雙月刊所有)

最近幾個月全世界吹起一陣彗星的熱潮，先是今年春天的時候百武彗星高傲地與群星爭輝，提供了抬頭觀看夜空的人無比的心靈饗宴。明年差不多同時間預計將有一顆更大的彗星接近地球，提供或許更美麗的景觀，屆時勢必重掀一股風潮，筆者因此忍不住當老師的習慣，把目前天文學家知道的有關彗星的種種面貌整理一番，內容著重在稍微深入的科學知識，以期讀者在觀賞天象之時除了讚嘆外在美之餘，也能欣賞一些奧妙的內在美。

彗星是最引人注意的天象之一，即使不附照片大家也都知道彗星長什麼樣彗星美麗而多變的面貌尤其賦予其神秘的色彩，歷史上一直以為彗星是地球空氣中的某種現象，直到 1577 年 Tycho Brahe 在觀測了他發現的彗星從不同的角度看沒有視差現象後，才證實了它們比月亮遠，不是地球上的東西。無法預知的到來與變化添加了人們對其的敬畏，也讓彗星在政治歷史的舞臺也扮演了一些角色。本文跳開這些典故趣談，而將冰冷地陳述到目前為止科學家對這種冰冷天體的瞭解，一方面把各方文獻作一整理，一方面希望與彗星有關的豐富物理與化學的現象能激發一些相關的研究興趣。

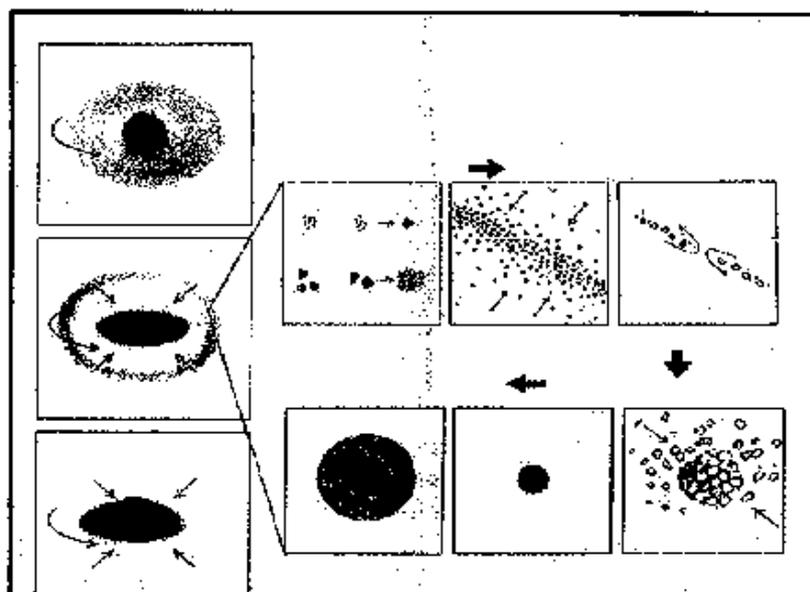
一、彗星的起源

一般相信彗星和太陽的年齡相當。形成太陽的一團雲氣因本身的重力收縮，在中央的部份溫度達到了數百萬度使足以引發熱核反應，而形成一顆恆星。另一方面由於雲氣的自持使得收縮後含在垂直於自轉軸的方向 在星球的赤道面上形成一個環星盤。星球形成後的物質噴失（恆星風）加上輻射的光與熱很快地將鄰近的物質（尤其是易揮發的物質）消散殆盡，惟有環星盤中的物質比較有機會存活，得以吸積黏聚逐漸形成行星的核心。這些行星的胚胎之後靠自己的重力吸積軌道周圍的雲氣而成為日後的行星（見圖一）

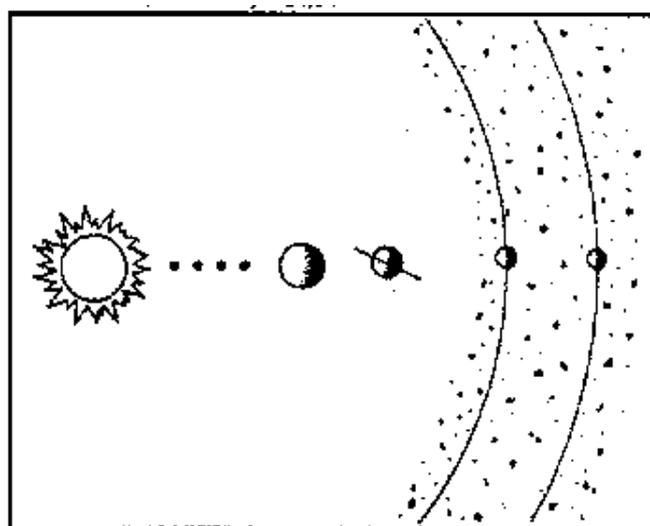
在這個原始太陽雲氣的盤面上，離中央愈近則溫度愈高，太陽系中由內到外諸行星便是循著此規律而有系統性的結構。靠中央的水星、金星有金屬及氧化物（熔點高）構成的核心；到了地球附近則在核心之外包覆了厚重的一層矽化物，其熔點（凝固點）比核心的物質低，因此在太陽雲氣冷卻的過程中要比核心冷得晚故而包在外層。在土星以外的區域溫度就更低了，以致熔點非常低的冰（水、

甲烷、氨)也可以存活(圖二)。值得一提的是由於溫度低，氣體的逃脫速度也低，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。

圖一：太陽系形成的吸積模型。左邊由上而下，旋轉的雲氣中央先收縮，然後在赤道上方形形成一個扁的環星盤。吸積繼續進行，最後中央星體引燃核反應成為一顆恆星。右邊的圖自左上順時鐘方向說明行星形成的過程：星際微塵首先互相黏集，沈向環星盤的中間，彼此繼續吸聚長成如小行星般大小，最後成為行星的困住核心。如果核心夠大還可以吸積周圍的氣體成為行星。



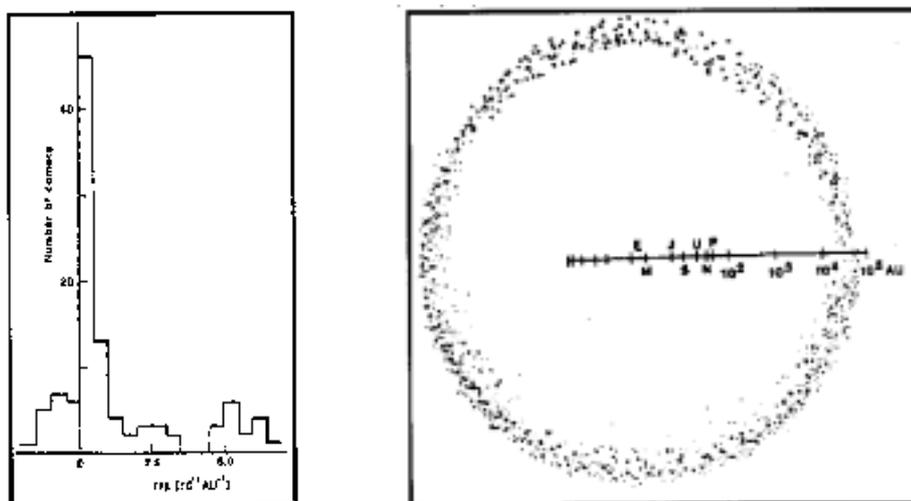
圖二：天王星與海王星之間有通合的物理條件形成彗星。小的點代表彗核，在形成以後受了外行星的受力干擾被拋離向外至歐特雲或向內而有可能成為短週期的彗星(圖取自 Chapman & Brandt, 由 F. Reddy 繪製)。



在天王星、海王星形成以後剩下的冰塊物質受到了來自木星等大行星的重力擾動被拋出太陽系，而圍繞在太陽系之外的歐特雲（Oort cloud）中。在1950年荷蘭的Jan Oort分析了19顆彗星軌道半長軸的倒數（ $1/a$ ）的分佈，發現其中10個 $0 < 1/a < 0.00005 \text{ au}^{-1}$ （ au ，astronomical unit，是地球與太陽的平均距離，約一億五千萬公里，或 $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ ），因此他假設有一個大小約為 $100,000 \text{ au}$ 的雲氣。圖三給出包含了比較多樣本的 $1/a$ 分佈，可以看出仍然有明顯的趨勢。由於這個假設能夠成功地解釋長週期彗星的來源，現在一般相信歐特雲可能真的存在，但大小可能只有 $50,000 \text{ au}$ ，包含了 10^{12} 個大小約一公里、形狀不規則、由冰體組成的彗星核，雖然數量多但是整個歐特雲包含的物質只有十個地球左右的質量（田四）。至於這些彗核如何進入太陽系，原來的說法是它們遊走在太陽系外圍，如果恰巧有星球經過（太陽和所有銀河系的星球都在運動，有的繞著銀河中心轉，有的有個別的運動）造成了重力擾動，便有可能進入太陽系的內圍。有的擦身而過，以雙曲線軌道又離開太陽系，有部份則被太陽的引力擄獲。因為是從外面進來的，這些彗星的軌道呈狹長的橢圓形，並且軌道面凌亂（來自四面八方；見圖五），而不像諸行星由於在環星盤中挺生，因此軌道都近乎圓形、大致在一個面上、並且公轉的方向都相同。現在一般相信銀河中的巨大分子雲，尤其是銀河盤面本身的重力也是提供擾動的來源。

圖三：長週期彗星的半長軸倒數（ $1/a$ ）分佈。（Marsden, B. G. 1978, *Astro. J.*, 83, 64）
（左）

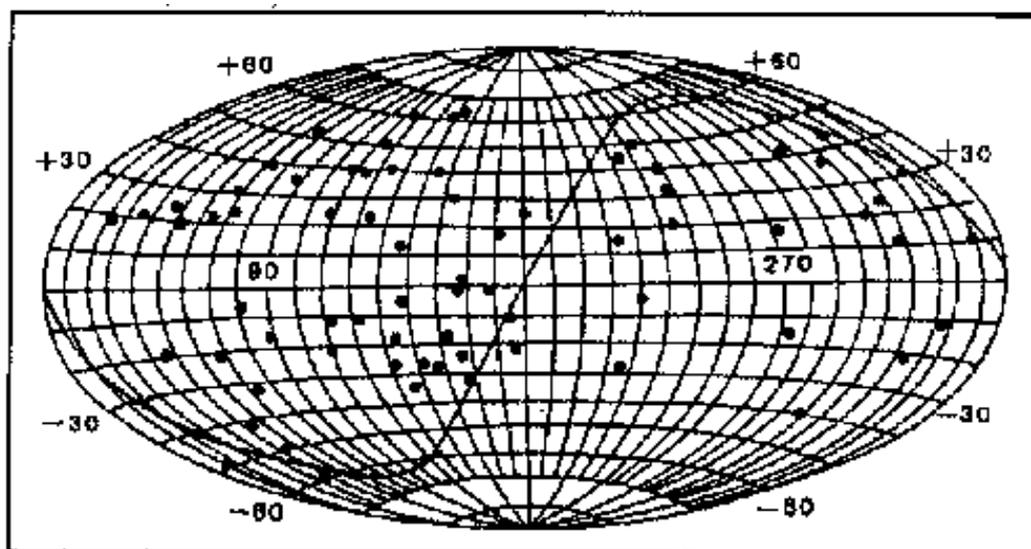
圖四：歐特雲與太陽系大小的示意圖。（右）



由此觀點來看彗星其實不是外太空來的異客。而是和太陽系中的太陽、行星諸成員同胎生成的，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 4 K ），只有極少部份得以在日後返鄉探望一番。結果是在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，卻只有少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，提供了觀賞之餘的科學利用價值。

圖五：半長軸長於數萬 au(只來太陽系一次)彗星的近日點分佈(Tyror, J.G. 1957, Mon. Not. R. Ast. Sec, 117,370)



二、彗星的命名

彗星通常以發現者名之，例如今年初熱門的「百武彗星」(Comet Hyakutake)。為避免幾乎同時發現時命名的困擾(常常發生)，乃規定最多只能有三位獨立發現者列名。在發現新彗星方面業餘天文學家有非常傑出的貢獻，所需要的是(雙筒)望遠鏡、對星場的熟悉、耐心加運氣。職業天文學家雖然有大型望遠鏡，但因為視野小且通常有特定的目標，只有在例如巡天觀測等時機才有機會發現彗星。彗星另外還有編號。例如百武彗星的正式編號為 C1996B2 其中字首的 C 表示彗星 comet (若確知是週期軌道則改用「P」periodical)，1996 是發現的年份，B2 則表示是一月的下半個月發現的(以半月為單位依字母排列，其中 I 不用)第二顆。平均來說一年大約會發現十顆左右的彗星，有的是新發現，有的後來才知道是曾經來過的週期彗星。大概每年平均有一顆肉眼能看到的明亮彗星。有的彗星是以計算出其週期的人為名，包括了有名的哈雷(Halley)彗星及 Encke 彗星；也有的是人造衛星發現的，像是 IRAS-Araki-Alcock 彗星。一旦算出了它們的軌道，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。

三、彗星的分類

目前能定出軌道參數的彗星超過七百五十個，依照週期的長短能夠明顯地分

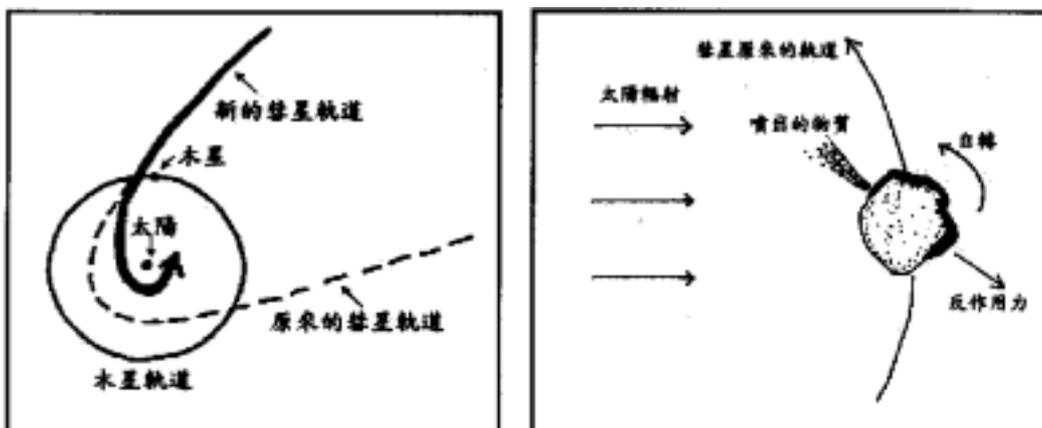
出兩種類別：

- 1.長週期（一百年到一百萬年）彗星，這種大約有六百個，近日點在 1 au 左右。這類彗星的特點是它們的軌道狹長、軌道面傾角雜亂，而且公轉方向可能是順時鐘或反時鐘。
- 2.短週期（短於兩百年）彗星的遠日點約在 5--6au（即木星附近），平均離心率 $e = 0.56$ ，軌道大多順行，亦即和整個太陽系相同由北向南看是反時鐘方向運動。它們的軌道面接近黃道面，平均不超過 30° ，有名的 Encke 彗星是目前已知週期最短的，只有 3.29 年。另外還有 Tempel 2 及 Giacobini-Zinner 彗星，週期分別是 5.29 與 6.59 年。

前面說過長週期的彗星來自歐特雲。至於短週期彗星的來源曾經有很長一段時間天文學家認為是原來長週期的彗星受到木星的擾動而改變軌道（圖六）；現在一般相信它們也可以和歐特雲中的彗星一樣，都來自太陽系邊緣以外的區域，時至今日那區域仍不斷把冰體一方面向外拋，補充歐特雲中的彗星核，另一方面則向內拋產生短週期的彗星，這個區域稱做 Kuiper cloud，因為它的分佈是在黃道面上，而不像 Oort cloud 般是球形，因此也稱做 Kuiper belt，離太陽約 30--100au。計算彗星的軌道是一件困難的事情，尤其是新發現的彗星，主要是因為由太陽（即地球）附近監測到的一小段曲線很難判斷整個軌道是雙曲線、拋物線、或怎麼樣的橢圓。加上受到其他天體的重力影響或自己噴發物質造成類似火箭的反作用效應（圖七）都會使得彗星改變軌道。更增加計算上的困難。

圖六：長週期彗星受木星重力擾動而成為短週期的示意圖。（左）

圖七：除了受太陽系其他天體的重力擾動以外，彗星本身噴出的物質形成的反作用力也會改變其軌道。（右）



四、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，是其吸引人的主要原因。

4.1 頭部

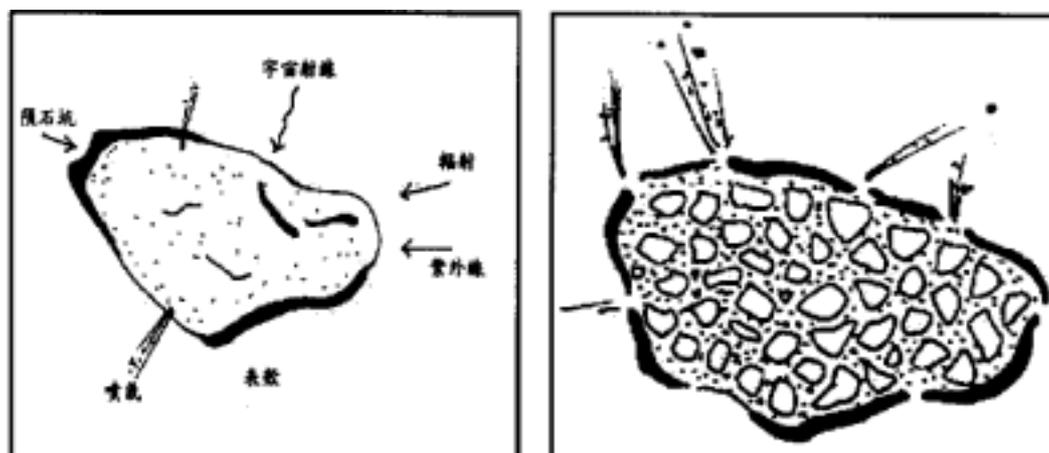
4.1.1 彗核 (nucleus)

彗星的核心是彗星真正固體的部份，也是離太陽遠時（大於 5 天文單位）唯一存在的部份。彗核的大小只有約十公里（例如形似花生的哈雷彗星核大小為 2X8.4X16 公里），形狀不規則，含有？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 0.03au，約是月球與地球距離的 12 倍。這麼近的距離提供了研究它的大好機會，從地面發射雷達經其反射的結果顯示其核心直徑約一公里。今年三月 JPL 的科學家也發射雷達研究百武彗星，發現其核心大小約 1--3 公里。並且有一公分左右大顆粒的塵埃（一般星際塵只有微米 micron 大小）。

1950 年代 Fred L. Whipple 提出一個彗核的模型，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（固體）。這個目前一般為人所接受的模型中，彗核有一層薄的表殼，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），大概是太陽系中最黑的東西了。當彗星漸漸遠離太陽時，其活動也逐漸減弱，但因為熱能是慢慢地傳進彗核內部，有時在離太陽幾個天文單位時仍會有爆發或噴流的現象。有些彗星因為經過多次陽光的洗禮，內部物質逐漸不均勻地減少，有些科學家認為其低密度的核心可能如圖九所示含有空洞。

圖八：彗核的示意圖，大小約幾公里，表面除了受陽光照射還有與環境活躍的交互作用，彗核內部受熱後，壓力使得氣體衝破表殼，連帶著塵粒噴出。（左）

圖九：彗核的一種模型，週期彗星多次靠近太陽，內部逐漸形成空洞。（右）



4.1.2 彗髮 (coma)

包在彗核外的球形塵氣稱做「彗髮」；直徑約數萬到數十萬公里。目前在彗星上發現的氣體種類非常豐富，如下表：

原子：H, C, O, S, Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu

分子：CH, CN, CO, C₂, CS, NH, N₂, OH, S₂, H₂O, HCH, HCN, HCO, NH₂, C₃, OCS, H₂CO, H₂CS, NH₃, NH₄, CH₃OH, CH₃CN, (H₂CO)_n

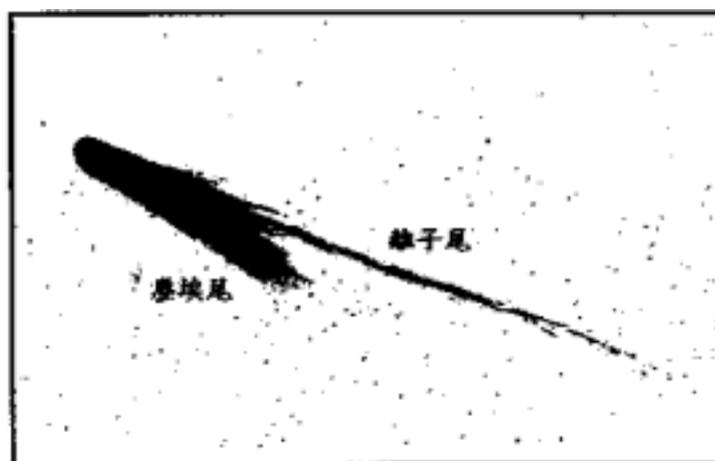
離子：H⁺, C⁺, N₂⁺, Ca⁺, CH⁺, CN⁺, CO⁺, N₂⁺, OH⁺, H₂O⁺, H₂S⁺, CO₂⁺, H₃O⁺, H₃S⁺, CH₃OH₂⁺

至於固體的塵埃部份則包含了只有氫、碳、氮、氧原子的塵粒（稱做 CHON 顆粒）以及一般的矽化物，有如地球上的沙泥。當彗星接近太陽時，冰凍的物質開始昇華，氣體分子（水、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、氨）逐漸分解、游離，以約 1 km/s 的速度離開彗核，塵埃則因為黏滯、碰撞也同時跟著向外運動。

4.2 彗尾 (tail)

這是彗星最吸引人的部份了，來自太陽的力量把彗星表面昇華、游離的物質推向背離太陽的方向，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。彗尾分成兩種：離子尾及塵埃尾，各有不同的成分及形成的原因（圖十）。

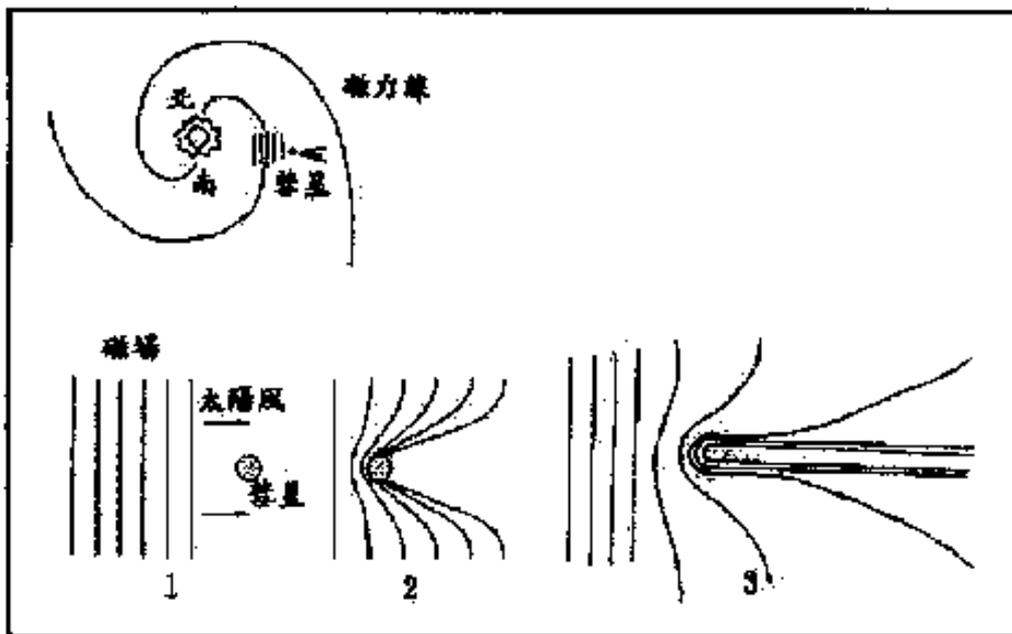
圖十：彗星的尾巴，一般而言狹長而直的是離子尾，瀾散而彎曲的是塵埃尾。



4.2.1 離子尾 (又稱做第一類 type I)

形狀狹長，由游離分子組成，主要的成分是 CO^+ ，這個一氧化碳的離子吸收了紫外光以後在 4200 埃附近輻射，造成離子尾偏藍的顏色。離子尾與太陽表面噴散出來的物質（稱做太陽風）有關。在地球軌道附近，太陽風的物質為游離氫（也就是質子與電子），密度約為每立方公尺百萬到千萬個粒子，時速約 500 km/s。事實上在 1951 年時，L. Biermann 是因為觀察了彗星的離子尾才判斷太陽不斷在噴發游離物質。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（圖十一）。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。

圖十一：（上）太陽磁場因自轉大致呈螺旋狀分佈；（下）太陽風及磁場與彗星交互作用，磁場繞著彗星彎曲，離子順著磁力線運動在「下風」處形成離子尾。



4.2.2 塵埃尾（第二類 typell）

和離子尾比起來，塵埃尾比較瀰散而且形狀彎曲。當彗星接近太陽時；冰開始昇華，釋放出的氣體挾帶著塵埃一齊向外噴放。這些塵埃顆粒反射陽光形成了塵埃尾，長約 10^6 — 10^7 公里。這裡我們可以作一個小計算（有些學物理的人堅持要看到一些公式）看看彗星噴出來的塵埃受到了怎樣的力。一個半徑為 a 距離太陽 r 的塵埃受到了兩種力：重力及光壓。重力的大小為

$$F_g = (GM / r^2)(4\pi a^3 \rho / 3)$$

此處 M 是太陽的質量， G 是重力場常數，而 ρ 是塵埃的物質密度。至於輻射力的大小則是 $F_r = (L / (4\pi r^2))(\sigma / c)$

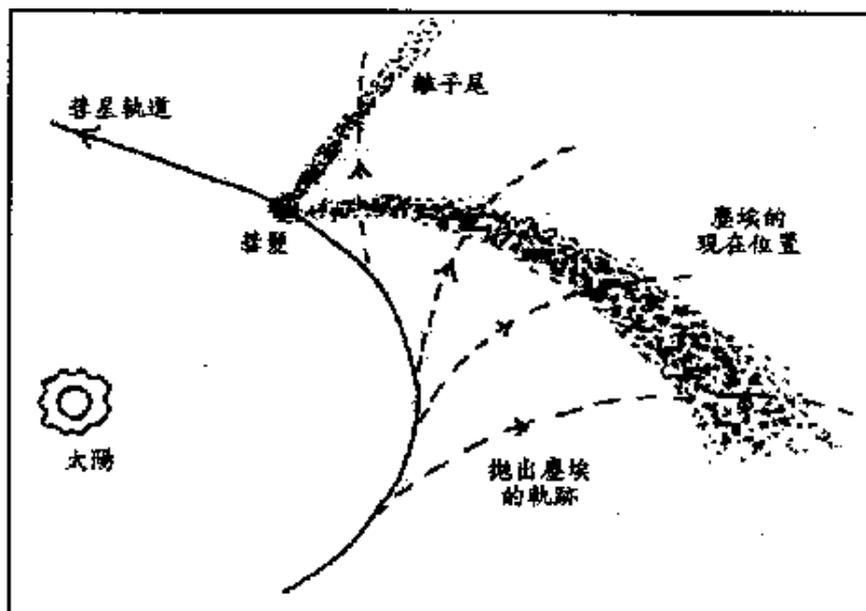
在這裡 L 是太陽每秒放出的能量，等號左邊的第一項因此是在 r 處的能量通量（單位面積上每秒通過的能量）， σ 是塵埃顆粒受到輻射的截面積（ $= \pi a^2$ ）。這兩個力的比

$$(F_g / F_r) = (16\pi cGM / 3L)(\rho a)$$

與太陽的距離無關（因為兩者都和距離平方成反比），但是卻和塵埃的性質有關；對一定成分的塵埃（ ρ 一樣）愈大的顆粒這個比值愈大。假設 $\rho = 2.5\text{g/cm}^3$ ，當 a 等於一個臨界值時， $F_r = F_g$ ， $a = a_{\text{crit}} = 3L / 16 cGM$ 2000 埃。這種顆粒因為浮力為零維持等速直線運動，而較小的顆粒則受到向外的浮力被拋散出去，太陽系剛形成時剩下的小顆粒塵埃也是這樣被拋出去的。至於大於 a_{crit} 的顆粒則受到向內（比原來小）的重力，仍然還是與距離平方成反比，速度若是大於逃脫速度的便同樣被甩出去，否則就繞著太陽（和彗星一樣）做凱卜勒運動。換句話說塵埃尾是因為不同大小成分的顆粒受力不同而形成的分佈（常是扇形），然後反射陽光而造成灰黃的顏色（圖十二）

值得提醒的是彗星的尾巴是背向太陽而不是背向地球，有時候因為投影的關係，從地球上會看到指向太陽的尾巴。另外就是彗核表面層殼當然有可能在向著太陽的一面破裂，形成那個方向的噴流，我們便看到真正的逆日的尾巴了。

圖十二：彗星塵埃尾形狀示意圖



4.3 包暈 (halo)

彗星還有一部份是我們肉眼看不到的，那就是圍繞在頭部之外的氫原子雲氣，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！

五、相關的其他天體、天象

雖然無法確實證實歐特雲或 Kuiper belt 的存在，但是有愈來愈多的證據顯示那個區域的確是有天體的，而且可能還不少。1992 年八月首先發現了 1992 QB1，當時離太陽 40-50au，亮度是最亮的星的 10^{-10} 倍；七個月之後又發現了另一顆差不多相同距離、亮度的 1993 FW。之後又相繼找到了一些類似的天體，這些都是在冥王星以外，屬於 Kuiper belt 中的天體——冥王星的軌道大約是 30au。而如果它們的反射率像彗核一般，其大小則得在 200 公里左右才能有那樣的亮度。換句話說它們的大小達到冥王星的十分之一。事實上早在 1977 年就已經發現的 2060 Chiron 就是一個奇異的天體，其直徑約 200-370 公里，軌道從土星以內一直延伸到天王星以外，原來以為它是一顆小行星（成分是堅硬的石塊），但在 1988 年卻突然變亮而且生出了尾巴，表明了是一顆彗星。長久以來天文學家都認為冥王星是個異數，因為行星中裡面的四個（水、金、地、火）和外面的四個（木、土、天王、海王）有系統性截然不同的不同，但是以距離而言在外行星中卻冒出個冥王星與眾不同，例如其質量只有地球的千分之七，完全不能和其他巨大的外行星同日而語。基於以上種種最近的研究目前天文學家認為冥王星及其衛星 Charon 可能應該歸類成 Kuiper belt 中的天體比較恰當，也就是說它們可能只是比較大的彗星核。

當接近太陽時，蒸發的物質受到陽光的激發使得彗星很快的變亮，但同時本身的物質也逐漸消耗，粗略估計每一次靠近太陽得損失約 0.1-1% 的物質，短週期的彗星因此每一世紀會變暗約兩個星等（約六倍多）。新的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。彗星因此在軌道上遺留了一些冰塵殘渣，當地球運行經過這些殘渣進入大氣層便形成了流星雨的現象。週期性彗星的殘渣留在一定的位置，地球也在每年差不多的時間進入這些殘渣堆中，造成幾個季節性的流星雨。

如果依照前面所說的雲氣學說來解釋太陽及行星系統的形成，初期地球所在位置的溫度應該不至於讓像現在這麼多的水存在，因此有一種說法是地球的大氣與海洋或許便來自於初期彗星的撞擊的結果。大家對前年 SL-9 彗星撞木星事件的應該記憶猶新，事實上每行星一般堅硬的碎渣（流星；經過大氣還剩了的掉到地面便稱做隕石）有的是像彗星一樣比較纖弱的塵埃，前幾個月在非洲查德北方的發現了鏈狀隕石坑提醒我們會發生在木星的也有機會發生在地球，能在六億五千萬年前讓恐龍滅絕的也有可能再次發生。檢視長週期彗星的入射軌道截至目

前為止未發現拋物線的軌道，表示我們發現的都還是太陽系自己（歐特雲裡）的彗星，而不是來自星際太空。這些億萬年來遊走於冰冷外圍的彗星免於太陽輻射及太陽風的侵蝕（雖然歐特雲外層的彗星還是受到星際輻射、宇宙高能粒子、超新星爆炸的影響），得以孕育豐富的化學成分，尤其是複雜的分子，不禁讓我們想到它們是否提供了生命的起源。知名的英國天文學家 Fred Hoyle 及 N.C. Wickramasinghe 甚至主張一些地球上的疫病可能也和不斷落入大氣的彗星碎渣有關，以解釋快速變化的菌種以及為何有時某種流行病（例如流行性感冒）會幾乎同時在世界上不同的角落爆發。想法大膽而獨特，惟至目前缺乏確鑿的證據。

通古斯地方的爆炸事件

一九〇八年六月卅日早上十點四十分左右，一道比太陽還亮的藍白火球劃過天空，按著一聲巨大的爆炸驚醒了俄國西伯利亞中部通古斯地方（Tunguska）的馴鹿的牧人及農人。爆炸的威力相當於一千多萬噸的黃色炸藥，連一千公里外也聽得到，其產生的震波繞了地球兩圈。荒漠的交通不便加上戰爭，直到一九二七年以後才開始有探究這個事件的活動。巨大的爆炸夷平了約兩千平方公里的森林，而方圓 15—30 公里燒焦的樹木以爆炸的中心點成輻射狀倒毀，但是中央卻沒有撞擊的坑洞，只有一個沼澤。目擊者說除了看到火球、聽到爆炸以外，事後還感受到似地震般的震動以及足以將人吹倒的熱風。當時歐洲西部的地震儀的確記錄到了來自爆炸的地震波。科學家相繼提出了各種解釋，例如故障的外星飛行物、撞向地球的反物質或超級迷你黑洞等等。這些也許或多或少都有一些學理上的依據，但是也都必須要求我們接受一些較複雜而不必要的假設。一項比較簡單的可能解釋走一個重約十萬—一百萬噸的彗星以每小時十萬公里的速度衝向地球。由於彗星是出冰塊及灰塵組成的，彗星在還沒到達地面之前便被分解了，產生了火球及震波卻沒有留下坑洞。有些科學家卻判斷彗星的物質甚至根本無法那麼深入大氣，但是最近的理論認為彗核中有可能有一個更小的堅硬的核心，足以造成類似的事件。

六、有關彗星的研究

有關彗星的觀測有兩種，一種是搜尋，一種是對找到的彗星進行研究。研究彗星的價值有三方面，第一是前面說的，因為彗星是在太陽系形成之初與太陽、行星等同時形成，之後遊走於冷暗的太陽系外圍免於太陽的輻射、噴出的物質的影響，而又因為質量低，重力不致造成本身的變化（行星多近球形，而小行星同樣因為質量小，形狀不規則，且沒有表面活動），因此現在的彗核和小行星可能年有約百萬噸物質從外太空落入大氣中，有的是像小是太陽系中最接近形成時狀態的物體，也因此科學家企圖藉由對它們的研究探討早年太陽系的情形。其次是

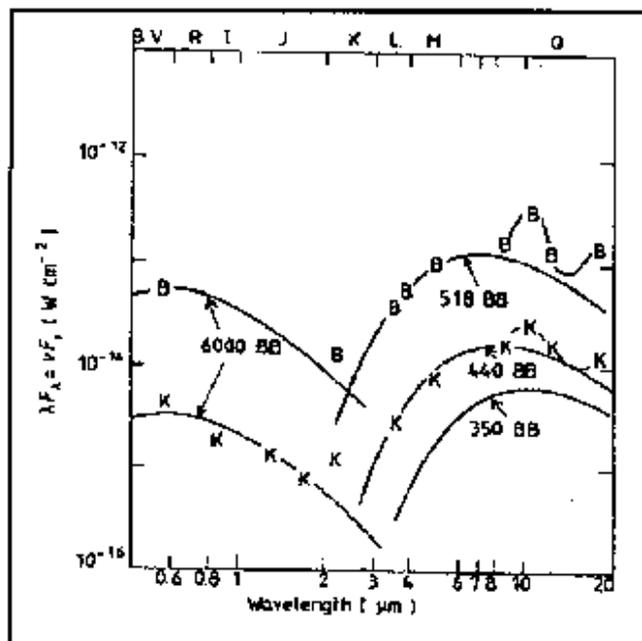
藉由彗星（尾巴）探測太陽風的性質，例如取得 CO^+ 譜線的影像便可以追蹤出當地磁場的結構。除了當工具讓我們研究其他現象以外，彗星本身因為有豐富而多變的物理與化學過程，也是非常令人感興趣的研究對象，例如有些分子甚至是事先在彗星上發現後才在實驗室中指認出來的。

所有標準的天文觀測技術都可以用在彗星的研究上，例如測量在不同波段的光度，圖十三繪出 Bennett（1970II）及 Kohoutek（1973XII）彗星同樣在距日約 0.65 au 時的連續能譜分佈，除了在短波長的部份兩者皆有太陽的反射能譜（6000 K 的黑體輻射）以外，塵埃也有自己的熱輻射。對一個一個半徑為 a ，距離太陽為 r 的球形黑體而言，我們可以計算出它接收到的能量與溫度為 T 時發射的能量，當達到熱平衡時。發射的能量等於吸收的能量（因為是黑體我們不管塵粒在不同波長的發射或吸收效率），我們便得到了在 r 處的溫度 T ，這也就是為什麼在不同距離的行星有各自由近而遠愈來愈低的溫度。如果顆粒旋轉得慢（吸收面積只有 a^2 ）這個溫度大約是 $T = 280/\sqrt{r}$ ，此處 r 的單位是 au。所以在 0.65 au 處黑體的平衡溫度應該是 350 K。但我們看到兩個彗星分別達到不一樣的溫度，顯示不一樣的成分與物理過程。例如快速自轉會造成吸收面積變大，但發射面積還是一樣 $4a^2$ ，所以溫度會比較高；另外顆粒大小若是比波長小很多，其輻射效率會變小也會造成溫度比以上估計的高等等，都說明有時候簡單的物理與計算就能讓我們得到很多資訊。

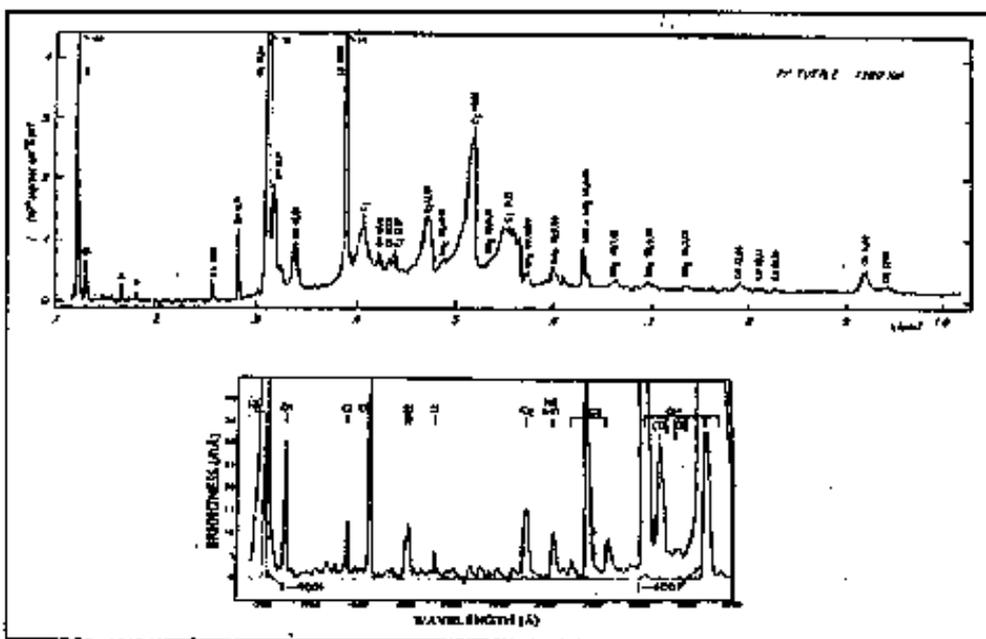
彗星尤其有豐富的光譜特性（圖十四），我們除了可以探測它本身的成分。也可以藉以研究周遭的物理環境（溫度、密度等），尤其它們在短時間內便運行到太陽系不同的位置，更提供了難得的工具。由於有這些重要的科學價值，有關彗星的研究近年來非常活躍，十年前哈雷彗星來的前後幾年相繼有多個人造衛星飛往不同的彗星就近研究，更是大大地增加了我們的瞭解。如前所述太陽系中的小天體之間的分野已經逐漸模糊，有些天文學家懷疑彗核中央有如小行星一般堅硬的核心。今年二月美國 NASA 發射了一枚衛星 NEAR（Near-Earth Asteroid Rendezvous）準備在 1999 年的二月與很靠近地球編號 433Eros 的小行星會合，繞著它進行一年的研究。人類試圖揭開從遠在天邊到近在眼前的各種宇宙的奧秘，讓近代天文物理的研究充滿了刺激及挑戰。

後記：原來準備附加一些 Hale-Bopp 彗星的資料，但囿於篇幅而省略，讀者應該可以輕易地在網路上找到。這篇文章很早就起草了，原來以為不難寫，但是翻看文獻時，才發現傳統的教科書記載的有些已經不合時宜；尤其是近來人造衛星對彗星的研究更是有一些突破的進展。藉著 1997 年春季 Hale-Bopp 的來訪提供了一個刺激，督促自己總得在它來之前寫完吧！希望大家讀了這篇文章以後的收穫能和我寫它一樣多。

圖十三：彗星的連續能譜分佈，橫軸是波長，以微米為單位，縱軸是能通量，單位是平方公分的瓦特數。標注 B 及 K 分別是 Bennett 及 Kohoutek 彗星的資料。觀測時都離太陽約 0.65 au，可以看到在短波長兩者皆有太陽的反射能譜（6000K 的黑體輻射）。黑體塵埃在 0.65 au 的平衡是溫度應該是 350 K，但兩個彗星分別達到不一樣的溫度，顯示不一樣的成分與物理過程。在 10 微米附近的突出是矽化物發射譜帶（取自 Ney, E.P. 1974, Icarus, 23, 551）。



圖十四：彗星的在可見光（由 S. Larson 拍攝）及紫外（Weaver et al. 1981, Astro. Phys., 251, 809）波段的光譜。



參考文獻

1. Beaty, J.K., & Chaikin, A. ed. , The New Solar System, 3rd ed. 1990, (Cambridge Univ. Press)
2. Chapman, R.D. & Brandt, J. C. , The Comet Book: A Guide for the Return of Hallay's Comet, 1984, (Jones and Bartlett Pub)
3. Huebner, W.F. ed. , Physics and Chemistry of Comets, 1990, (Springer-Verlag)
4. Maran, S. P. , Astronomy and Astrophysics Encyclopedia, 1992, (Van Nostrand Reinhold)
5. Parker, S.P., Pasachoff, J.M, ed. , McGraw-Hill Encyclopedia of Astronomy, 1993, (McGraw-Hill)
6. Swamy, K.S.K. , Physics of Comets, 1996, 2nded. (World Scientific)