

彗星的起源

何耀坤

臺南市私立光華女中

彗星在什麼時候，在那裏，怎樣形成的，這是研究彗星的最終目的。這不僅是彗星本體的問題，和太陽的歷史及星際空間及其他天體又有密切關係。研究這問題有兩個方法，一為根據天體力學，二為根據彗星的分子和塵粒等物理性質。關於彗星的起源，現在有兩種學說，一為太陽系內起源說，二為星際起源說。本人曾在本刊第82期「彗星與相關天體」介紹了太陽系內起源說，這是現在一般人較易接受的看法。彗星若是在太陽系內的天體，為何一般行星軌道略為圓形，只有彗星軌道特別呈很扁平的橢圓，而大部分彗星呈拋物線軌道呢？彗星到底從那裏來的呢？三十五年前荷蘭天文學家歐爾特（J. H. Oort）發表了彗星有貯藏庫，所謂「奧爾特彗星雲」，在離太陽約兩萬天文單位地方有許多彗星慢慢公轉。那麼奧爾特彗星雲中的彗星從那裏來的呢？

根據最近二十年來相繼發表的研究報告顯示，彗星出生地點似非太陽系內，而是從星際空間，而暫時貯藏於奧爾特彗星雲內。若這是事實的話，彗星是運輸太陽系外物質來，那麼我們能把握彗星就能直接把握星際物質。所以關於彗星的起源無論在太陽系內或在太陽系外，彗星是掌握有高度秘密的天體。我們應把握這次哈雷彗星回歸的好機會，注意觀測其動向，以貢獻彗星天文學之發展，這是愛好自然關心宇宙科學的人共同的願望。

一、彗星從那裏來？

彗星是接近太陽時才能看到的天體，大多自太陽約離3至4天文單位（AU）內是彗星觀測範圍，唯一例外是1980 b彗星從日心距離5 AU外被觀測出來。所以只根據觀測而決定軌道後再延至過去，無法知道彗星從那裏來。須考慮行星對彗星的攝動，將軌道延溯過去，以這種計算算出了原初軌道，而根據原初軌道才能追溯彗星的來源。例如

1980 b 彗星自 1980 年二月至 1981 年一月，共以 24 組觀測結果，由日本的長谷川，中野，戴下等三人計算如下：設 a 為軌道半長徑（圖 1）。

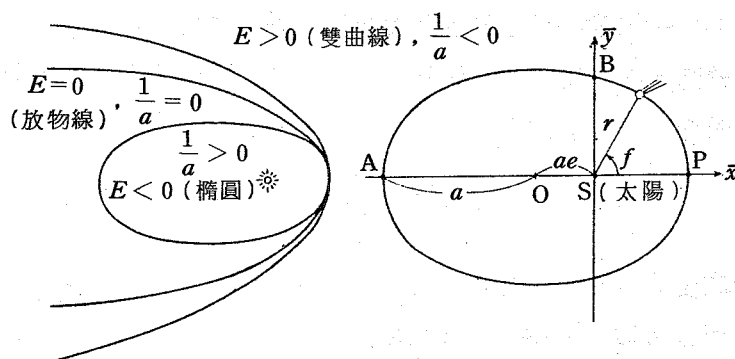


圖 1 彗星的軌道（右邊是橢圓軌道）

$$\frac{1}{a} = -0.0016192 \pm 0.0000499 \text{ AU}^{-1}$$

上式的士表示誤差範圍，那麼為何不寫 a 而寫 $1/a$ 之值呢？因 $1/a$ 值和彗星的力學能量相關。於圖 1 右邊橢圓軌道， ae 為橢圓中心（O）和太陽（S）間距離。 e 是橢圓的扁平量，稱軌道離心率。某彗星有無被太陽捕獲，看下式可知。

$$E = -\frac{GM_{\odot}}{2a}$$

$M_{\odot}$ 為太陽質量， G 為萬有引力常數， E 為總能量， a 為軌道半長徑。所以總能量實際上可用 $1/a$ 代表，在使用上較方便。例如 $1/a > 0$ 是橢圓軌道， $1/a < 0$ 是雙曲線軌道，該彗星會飛出太陽系外。長週期彗星的 a 值都很大，所以 $1/a$ 值接近 0。該彗星是否屬於太陽系，應視沒有行星攝動影響的遠方時的 $1/a$ 值而定。若以觀測決定離太陽遠方的彗星軌道時，要把被行星攝動影響修正才能得出原初軌道。表 1 是歐爾特計算的

表 1 彗星原初軌道 $1/a$ 的分布情形

$1/a \text{ (AU}^{-1}\text{)}$	$a \text{ (AU)}$	$n \text{ (個)}$
$< .00005$	> 20000	10
$.00005 - .00010$	20000 - 10000	4
10	15	1
15	20	1
20	25	1
25	50	1
50	75	1
$> .00075$	< 1333	0

十九個彗星原初軌道 $1/a$ 的分布。從表 1 可知 a 值集中於一萬 AU 以上，尤其是最初的十個之 a 平均值為 11 萬 AU，其中有兩個彗星的 $1/a$ 為負數（雙曲線軌道）。因此歐爾特認為從太陽約 10 ~ 20 萬 AU 地方有巨大的彗星雲。因為彗星雲中的各個彗星在行星範圍外側運行長橢圓，而在軌道上的遠日點附近過其大部分時間。根據 1980 b 彗星軌道，求算其原初軌道時 $1/a$ 值如下。

$$\frac{1}{a} = -0.0000761 \pm 0.0000499 \text{ AU}^{-1}$$

其原始軌道成雙曲線， $1/a$ 之誤差是因為行星的攝動。所以可假定 1980 b 彗星是從太陽系外沿雙曲線軌道靠近太陽，但是根據美國 B. Marsden 的觀測而所求的該彗星的接觸軌道，加算攝動後其原始軌道變為橢圓，這可證明該彗星稍有受太陽的牽制。圖 2 是 Marsden, Sekanina 和 Everhart 等計算了二百個彗星的 $1/a$ 值。從圖 2 可看出 $1/a$ 值於 0 和 5×10^{-5} 間特別高（若 $1/a$ 值換算為 a 值就等於 2 萬 AU），是重要事實。軌道半長軸（ a ）在 2 萬 AU 以上的彗星特多，因為週期為 $a^{3/2}$ ，凡 a 值愈大的彗星少到太陽附近來，這些彗星群稱歐爾特彗星雲。圖 2 中 $1/a$ 為負數的彗星有 20 個，這是從太陽系外侵入的。

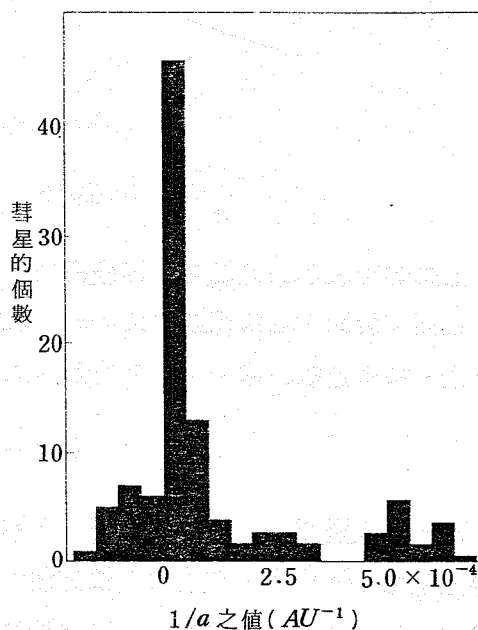


圖 2 $1/a$ 值的頻度分布

二、歐爾特彗星雲 (Oort Cloud of Comets)

自從 1940 年在丹麥哥本哈根大學的天文學家們積極計算彗星的原初軌道，後來荷蘭的歐爾特博士根據彗星的原初軌道的 $1/a$ 之分布情形，於 1950 年發表了著名論文「太陽系內的彗星雲之構造及其起源的假說」，恰和美國惠波 (Whipple) 發表「彗星核的新模型」是同年。現在有關彗星研究都以這兩位天文學家的看法為基礎，所以 1950 年對彗星研究而言，是革新的一年。歐爾特的主要論點包括下列四項：①根據彗星軌道要

索統計，長週期彗星的軌道半長徑集中於某範圍內。②這彗星集中區（一般稱歐爾特彗星雲）的力學穩定性高，在太陽系年齡內不太容易受恒星或行星的攝動影響而分散。③歐爾特彗星雲中的彗星偶而受恒星之攝動，將彗星送到地球軌道附近。④歐爾特彗星雲是在太陽系早期，於行星形成區內形成的小天體放出來的。

歐爾特假說中有兩個論點現在還未被完全的接納，他認為彗星雲的形成可能在火星和木星軌道間的小行星帶。彗星和小行星是同一起源，因為受到行星和恒星多次攝動，有些被踢出進入太陽系內部，其中大部分逃至星際空間，一部分則集中成彗星雲。但是由冰構成的彗星和由岩石構成的小行星似乎不可能同一來源，而且小行星帶附近有強的太陽引力，只以木星攝動，彗星不易被踢出太陽系外。



圖3 歐爾特博士

三、從太陽系遺失的彗星

在太陽系內到底有多少彗星呢？每年被發現的彗星平均有 14 個，大多是長週期彗星。長週期彗星的平均週期為一百萬年，因為 $a = 10^4 \text{ AU}$ 之彗星週期為一百萬年。在一百萬年間有一次機會能到太陽附近來，按照機率推算在太陽系內的彗星總數最少有 400 ~ 500 萬個，加上可視範圍外的彗星數，根據歐爾特估計可能有 1000 億個。接近太陽 5 至 10 AU 距離內來的彗星會受行星的引力攝動，尤其是木星和土星。根據詳細計算， $1/a$ 所受的變化是 $1/1500 \text{ AU}^{-1}$ ，會正值或負值都有可能，主要由彗星和木星或土星的位置而定。那麼有什麼情形呢？我們先注意下式的關係。

$$\text{未來的 } \frac{1}{a} = \text{原初的 } \frac{1}{a} + \delta \left(\frac{1}{a} \right)$$

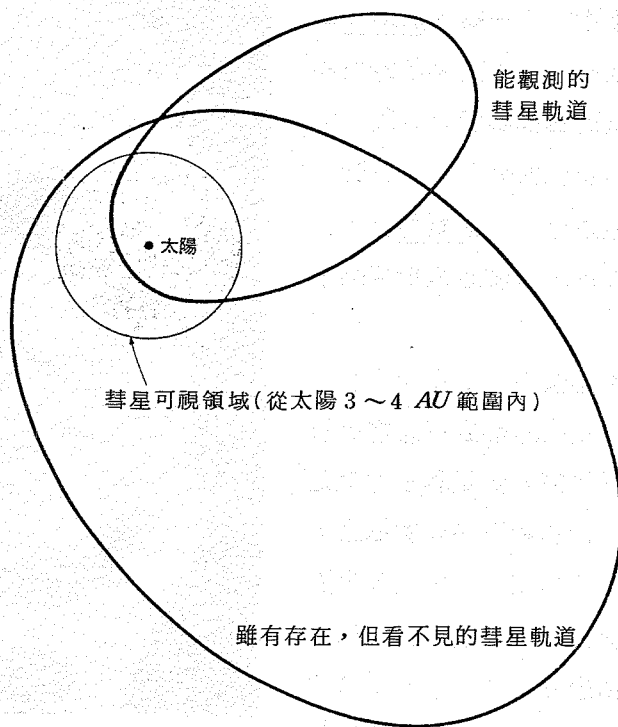


圖 4 能觀測的彗星和不能觀測的彗星。(沒進入太陽 3 ~ 4 AU 範圍內的彗星，無法觀測)

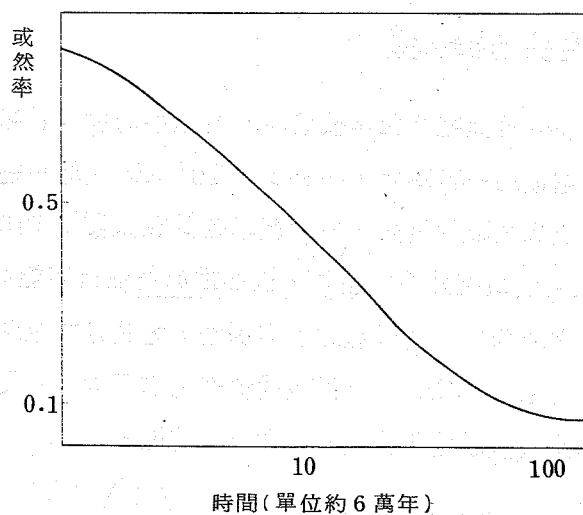


圖 5 從太陽系遺失的彗星

$\delta(1/a)$ 是受行星的攝動， $1/a$ 的原初之值是 20000 分之 1，假設 $\delta(1/a)$ 為正數， $1/a$ 的未來值也是正數，那麼未來軌道是橢圓的。如果 $\delta(1/a)$ 為負數時， $1/a$ 的未來值為負數，其未來軌道為雙曲線，彗星就從太陽系逃逸，如此可能有若干彗星會從太陽系消失。根據日本京都大學的藪下信和英國牛津大學的Hamasurie等計算，彗星於六百萬年間會從太陽系消失 90% (圖5)。太陽系年齡約 46 億年，若彗星和太陽系同時生成的話，彗星老早已消失無存，所以不能假設彗星自古一直保持如今的軌道。那麼可假定如下兩點：① 彗星先在太陽系外生成，然後受太陽捕獲。② 彗星在太陽系內生成後貯藏於安全地方，奧爾特讚同②的看法。無論如何，彗星並非太陽系的永久成員是明顯的事實。

四、彗星的貯藏庫和來源

對彗星軌道有引力影響的行星是木星和土星，因為這兩行星的質量較大，所以彗星軌道遠離這兩個大行星時不會受其攝動。根據詳細計算，近日點距離 18 AU 以上的軌道完全不受行星影響，其外側即是彗星的安全貯藏庫。這貯藏庫無法觀測，因為離太陽太遠，不反射太陽光。我們能觀測的彗星必有適當的引導機構，奧爾特假定通過太陽附近的恒星 (圖6)。我們所看的恒星在很遠地方，似常在一定位置，事實上恒星每秒以十公里速度無規則移動著。若能調查太陽附近有多少恒星，就能計算通過太陽附近的次數。據調查，在太陽為中心的 8 萬 AU 的太空裏，每一百萬年就有一個恒星會接近來而引起彗星貯藏庫的攪亂。假設用這觀點來說明可視彗星的個數，需要有一千億個彗星。奧爾特算出的彗星個數是根據假設，非觀測結果。要檢證奧爾特的假設的技術，是屬於現代科技的最尖端問題。奧爾特假設根據現在的觀點，有下列三點疑問。

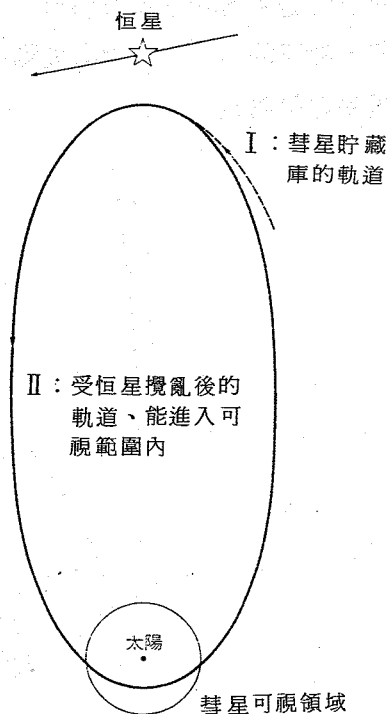


圖6 彗星貯藏庫 (近日點距離 18 AU 以上的軌道，不受行星攝動)

(1) 假如奧爾特說是對的，那麼 $1/a$ 之值比 $5 \times 10^{-4} AU^{-1}$ 大的彗星之數，比其他的多3至4倍。若假設彗星在600至900萬年前從太陽系外侵入的，就很容易說明 $1/a$ 之分布情形。

(2) 太陽對附近的星星非靜止，正向某方向運動著，稱太陽漂流。許多彗星的近日點方向和太陽漂流方向一致，這是從十九世紀末已知的事實。如果奧爾特假設對的話，不可能有此事。但是假定彗星從太陽系外侵入來的，就容易說明。

(3) 假設彗星在太陽系內形成，必需大量的原始物質，如 10^{11} (彗星個數) $\times 10^{17 \sim 18}$ (彗星一個的質量) = $10^{28 \sim 29}$ 公克。但必須考慮下列二件事：①彗星物質由碳(C)，氧(O)，氮(N)構成，但在宇宙間最多的是氫(H)，彗星的主成分並非氫。在宇宙間的C, N, O元素量只有H的1%以下，所以形成 10^{28} 公克的彗星，最少需要 10^{30} 公克的原始物質，這質量和木星質量相同。②現在被認為有奧爾特彗星雲地方，氣體密度太低，不能形成彗星。形成彗星的地方可能是木星、土星或天王星附近，將彗星誘導到奧爾特彗星雲的是木星和土星的引力。根據計算，能進入奧爾特彗星雲的只有全體彗星中的1%而已，剩下的彗星都被踢出太陽系外(圖7)，其原始物質必需量要 10^{32} 公克，這以現在太陽系起源說無法說明。

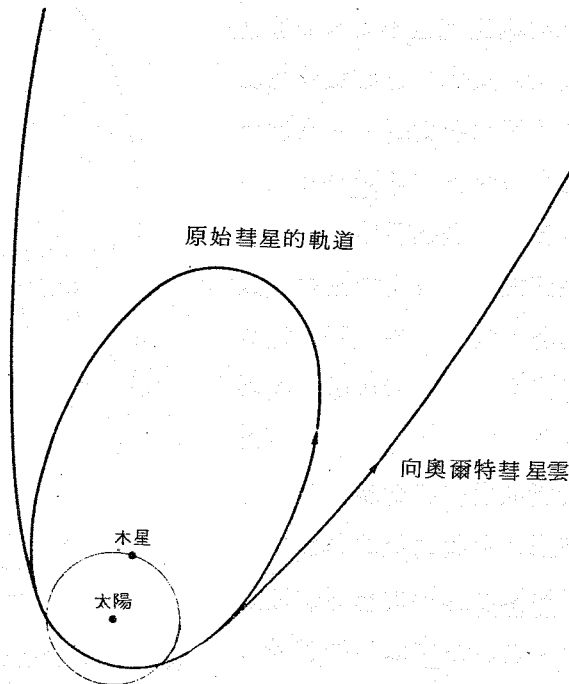


圖7 原始彗星和奧爾特彗星雲

此外應考慮在銀河漂浮的巨大分子雲，這是具有 10 萬至 100 萬太陽質量的巨大物質，主要由 H_2 形成，約有 3000 個巨大分子雲，平均在三億年一次接近太陽系。因這巨大分子雲的引力，彗星會從太陽系被奪取相當多的數目。現在我們能觀測到的彗星，可能是最近剛進入太陽系內。我們不能否定奧爾特彗星雲裏有許多彗星的事實，但是彗星在原始太陽系內約 46 億年前生成的看法，有些值得檢討。

彗星到底在太陽系內生成的，或是在太陽系外生成的問題，由這次的哈雷彗星探查計劃，尤其是歐洲宇宙研究所發送的 Giotto 探測船的主要任務是為了解決這問題。

五、短週期彗星的形成

長週期彗星由於行星的引力，大多被踢出太陽系外，剩下的彗星之中有很多演變成爲短週期軌道。彗星受太陽系捕獲後，或從奧爾特星雲被引出後，假設有 N 週次，那麼那些彗星的平均週期 P 在理論上如下式：

$$P = 58000 (2/N\pi)^{3/4} \text{ 年}$$

另一方面 $1/a$ 的平均值爲

$$(\overline{1/a}) = (1/1500) \cdot (N\pi/2)^{1/2} \text{ AU}^{-1}$$

設 $N = 1000$ ，那麼 $P = 230$ 年，此後如何變成 50 年或 100 年週期，這問題現在未

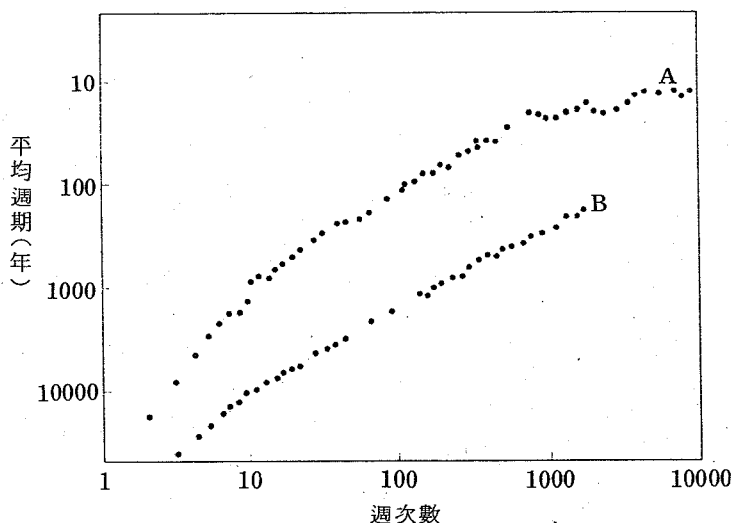


圖 8 長週期彗星轉爲短週期彗星

有適當的說明。新彗星和中週期彗星的明亮度之差為1.6等級，可知彗星在每一週次其等級有0.002之變化。圖8的A是起初具有行星軌道面附近的軌道面彗星群，B是黃道夾角在 0° 至 180° 間的彗星的全部統計。

關於彗星的起源問題，以太陽系演化和星際雲研究為背景，以力學研究（軌道和演化）為基礎。在物理研究方面以彗星頭部的氣體和塵粒為基礎，檢討彗星核組成和構造。彗星起源問題應以力學和物理觀測雙方面綜合，現在關於彗星研究方面，這雙方面的配合還未盡理想，是將來對彗星研究的重要課題。

主要參考書

1. 長谷川一郎：天體軌道論。
2. 中村及山本共著：彗星。
3. 藪下信：彗星。
4. 藪下信：彗星と星間物質。
5. J. H. Oort : The Structure of the Cloud of Comets Surrounding the Solar System and Hypothesis concerning its Origin: Bull Astron. Inst. Netherlands.