

文/ 賴彥霖

探索太陽系與 生命起源

彗星探測任務

羅賽塔任務 (Rosetta)。圖片來源：ESA

「秋七月，有星孛入於北斗。」——《春秋》魯文公十四年。早在西元前613年，古書春秋就有關於彗星的紀錄。彗星在天空中拖著長長的尾巴，隨著太陽與群星東升西落，如此天文奇景，在古代時常有人把它當作厄運的象徵，然而，隨著科學的演進，人們對彗星的理解逐漸加深，瞭解到彗星也如同恆星、行星和衛星一樣，都是太陽系的一份子。十六世紀時，哈雷彗星的觀測也幫助人類驗證了牛頓的天體動力學。惠普爾教授於1950年提出的「髒雪球模型」奠定對彗星理解的基礎。接著於1980年代開始的一系列彗星探測任務，讓我們得以一窺彗星的神秘面紗。

彗星的來源與結構

彗星是太陽系中較為特殊的天體，根據來源位置的不同，可以大致分為週期大於200年的長週期彗星與週期小於200年短週期彗星，長週期彗星來自於太陽系外圍的歐特雲 (Oort cloud)，短週期彗星來自海王星外的古柏帶 (Kuiper belt)；這些小天體可能會因為附近行星或較大天體的引力攝動而改變軌道並進入內太陽系。

圖1為地球上見到海爾-波普彗星 (Hale-Bopp)，彗星的結構可以簡單分成由彗核、彗髮與彗尾。惠普爾 (F. L. Whipple) 教授 (圖2) 在1950年提出髒雪球 (Dirty snow ball) 模型：彗星的核心，彗核，來自太陽系的外圍，就像是一個髒雪球一樣，主要由水冰和塵埃所組成，當彗星靠近太陽時，溫度升高，這些水冰就開始昇華成氣體並帶著塵埃離開彗核表面，形成彗髮。彗星噴出的塵埃會受到太陽光壓影響，形成彎曲的塵埃尾。而彗核噴出的

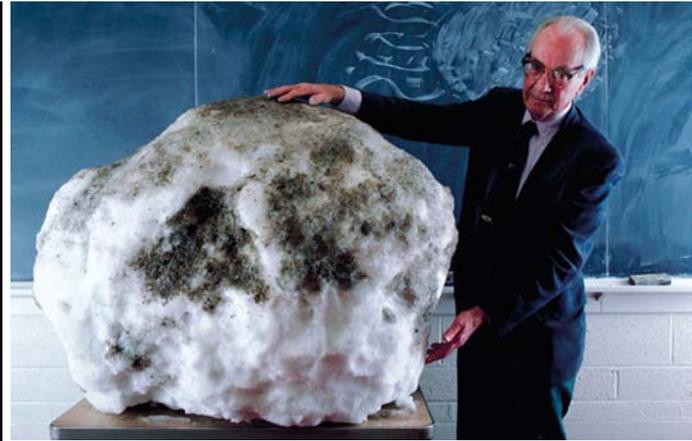


圖2. 惠普爾 (F. L. Whipple) 教授與彗星髒雪球模型。
圖片來源：DAVID DARLING

圖1. 海爾-波普彗星 (Hale-Bopp)。圖片來源：NASA

大量氣體與太陽風交互作用，形成反太陽方向的離子尾。

彗星任務的重要性

彗星被視為太陽系的「時間膠囊」，因彗星源自於外太陽系，在遠離太陽的地方，較不容易受到太陽高能粒子和太陽風的侵蝕，因此能保有太陽系剛形成時的古老樣貌。這使得彗星成為研究太陽系早期歷史的重要對象。此外，彗星上帶有另一個古老生命的必要元素——水和有機物。科學家認為，彗星可能在地球形成初期就將這些生命必需的元素帶到了地球上。在彗星撞擊地球的過程中，水和有機物可能隨之進入地球環境，為地球上的生命起源提供了必要的材料。

當彗星從遙遠的外太陽系進入內太陽系，使得我們有機會一窺其內部結構和組成，但由於彗星噴發大量的氣體與塵埃，阻擋了我們從地球上對彗核的觀測，唯一的辦法便是派遣太空船接近彗星才能獲得彗星的詳細觀測資料，因此彗星任務具有極高的重要性。然而，當太空船接近彗星時，彗星周圍的小塵埃顆粒非常容易損害太空船上的儀器。這些塵埃顆粒以極高的速度運動，一旦撞擊太空船，可能會造成嚴重的損壞。此外，由於彗星在內太陽系的移動速度很快，要追上彗星也非常不容易，因此

探測彗星是一項艱鉅的任務。

喬托任務與哈雷艦隊

自太空競賽以來，蘇聯發射人類第一顆人造衛星，美國實現了人類登陸月球，歐洲太空總署(ESA)則以探測彗星為志向，開始計劃人類第一個以彗星探測為目的的任務——喬托任務(圖3)。此任務也是歐洲太空總署主導的第一個飛離地球引力圈的任務。喬托任務的主要目標是對哈雷彗星進行近距離觀測，這是一項前所未有的挑戰。當時對於彗星環境還不是非常了解，加上彗髮中有大量的塵埃粒子，無法利用地面望遠鏡觀測去了解內部情況。為了成功完成這項任務，其他國家和組織也參與了對哈雷彗星的觀測，組成了所謂的「哈雷艦隊」。(圖4) 這些任務包括：

1. 蘇聯的維加1號 (Vega-1) 和維加2號 (Vega-2)：這兩個探測器在1986年飛掠哈雷彗星之前，還成功探測了金星。

2. 日本的先鋒號 (Sakigake) 和彗星號 (Suisei)：其中先鋒號還是日本首個行星探測任務，彗星號也成功拍攝了哈雷彗星彗髮的紫外線波段影像。

3. 美國的國際彗星探測器 (ICE)：最初是

ISEE-3衛星，後來重新命名並用於彗星探測。

最終，喬托探測器成功地以596公里的距離飛掠哈雷彗星並拍攝了人類第一張彗核的影像（圖5），並獲得了大量寶貴的數據。以下是一些關鍵發現：

1. 彗核的組成主要包括水冰（80%）、一氧化碳（10%）、二氧化碳（2.5%）、甲烷、氨與碳氫化合物。
2. 彗核表面非常暗，如同木炭一樣，且覆蓋著一層沙塵。
3. 彗核形狀不規則，表面崎嶇不平。
4. 彗核是多孔材質，密度僅有0.3克每立方公分。



圖3. 喬托號與哈雷彗星。圖片來源：ESA

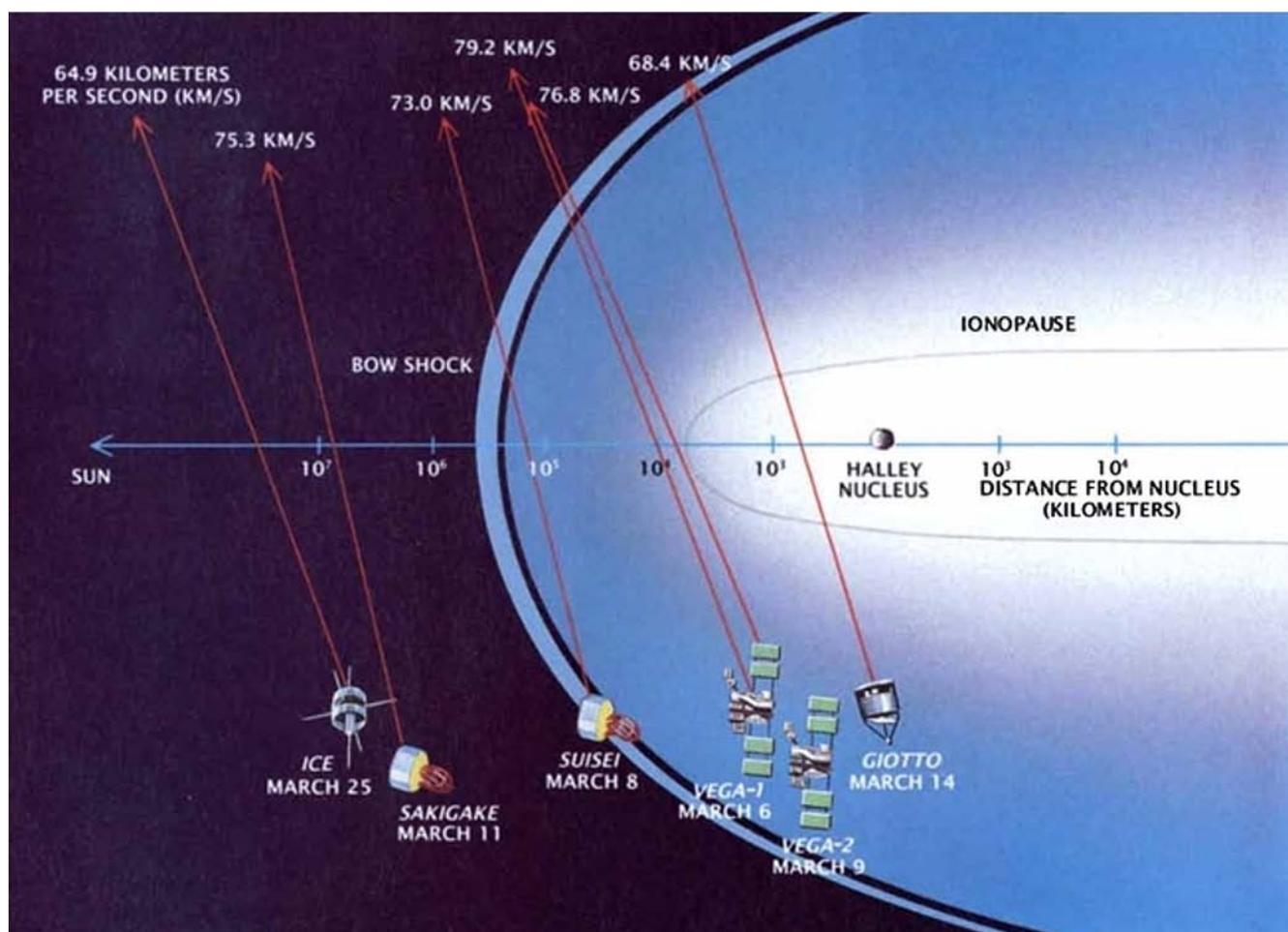


圖4.哈雷艦隊飛掠哈雷彗星。圖片來源：ESA

5. 彗星的灰塵噴流每秒產生約3,000公斤的揮發物。
6. 大部分的灰塵都非常小，如煙霧般的粒子（小於0.04克）。

喬托任務及哈雷艦隊不僅成功地完成了人類首次彗星探測，揭開彗星的神秘面紗，並激勵了後續的彗星探測任務，這次任務也為人類彗星探測開啓了一個新的篇章。

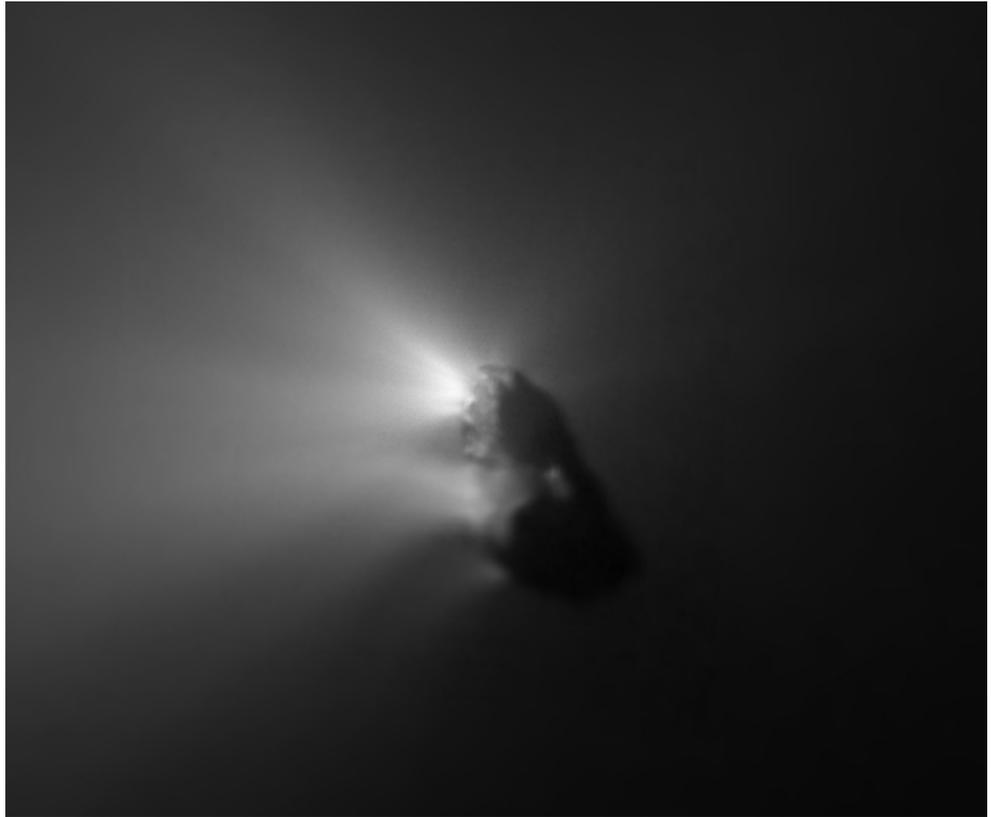


圖5. 哈雷彗星之彗核與塵埃噴流。圖片來源：ESA

深空一號與星塵任務

深空一號（Deep Space 1）是美國太空總署的儀器測試與驗證任務，也是第一艘採用離子推進引擎的太空船。這次任務的主要目標是測試和驗證新技術，以便應用在未來的深空探測任務中。深空一號成功地在1998年發射，並在1999年成功飛掠了布瑞爾小行星（9969 Braille），隨後於2001年成功飛掠了波略利彗星（19P/Borrelly），這兩次飛掠提供了寶貴的數據和圖像，並證明了離子推進引擎的實用性和效率。

星塵任務（Stardust）是美國太空總署的另一項重要任務，旨在收集維爾特2號彗星（81P/Wild 2）的塵埃樣本，並將樣本送回地球。這是人類歷史上第一個成功帶回彗星樣本的無人太空任務。星塵任務於1999年發射，並在2004年以低速（6.5公里/秒）成功飛掠維爾特2號彗星，利用氣凝膠

材質內的小孔來收集的彗星塵埃樣本（圖6）。這些樣本於2006年安全返回地球後，透過對樣本的分析，發現了許多複雜的有機化合物。

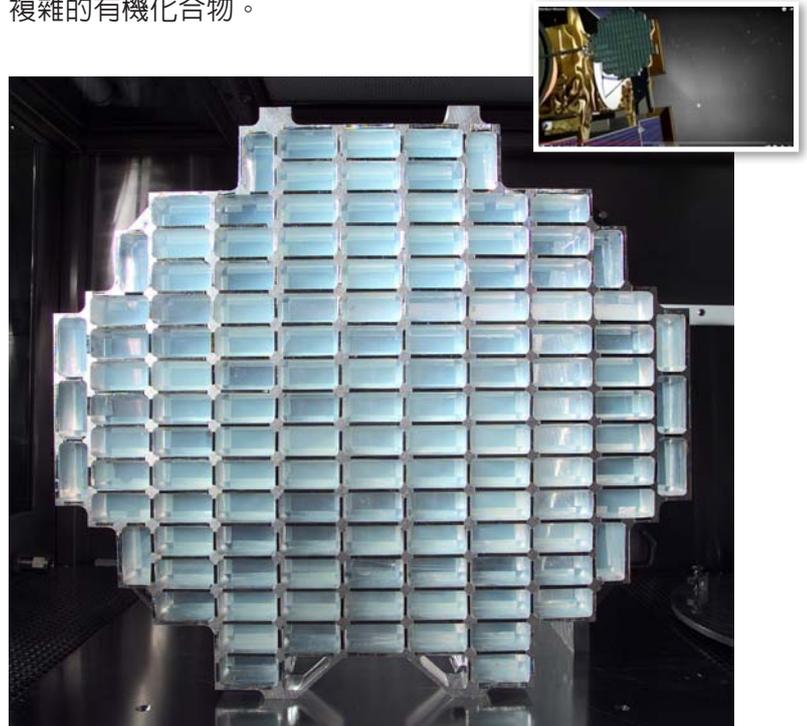


圖6. 星塵號的塵埃收集器，淺藍色部分為搜集塵埃之氣凝膠。圖片來源：NASA

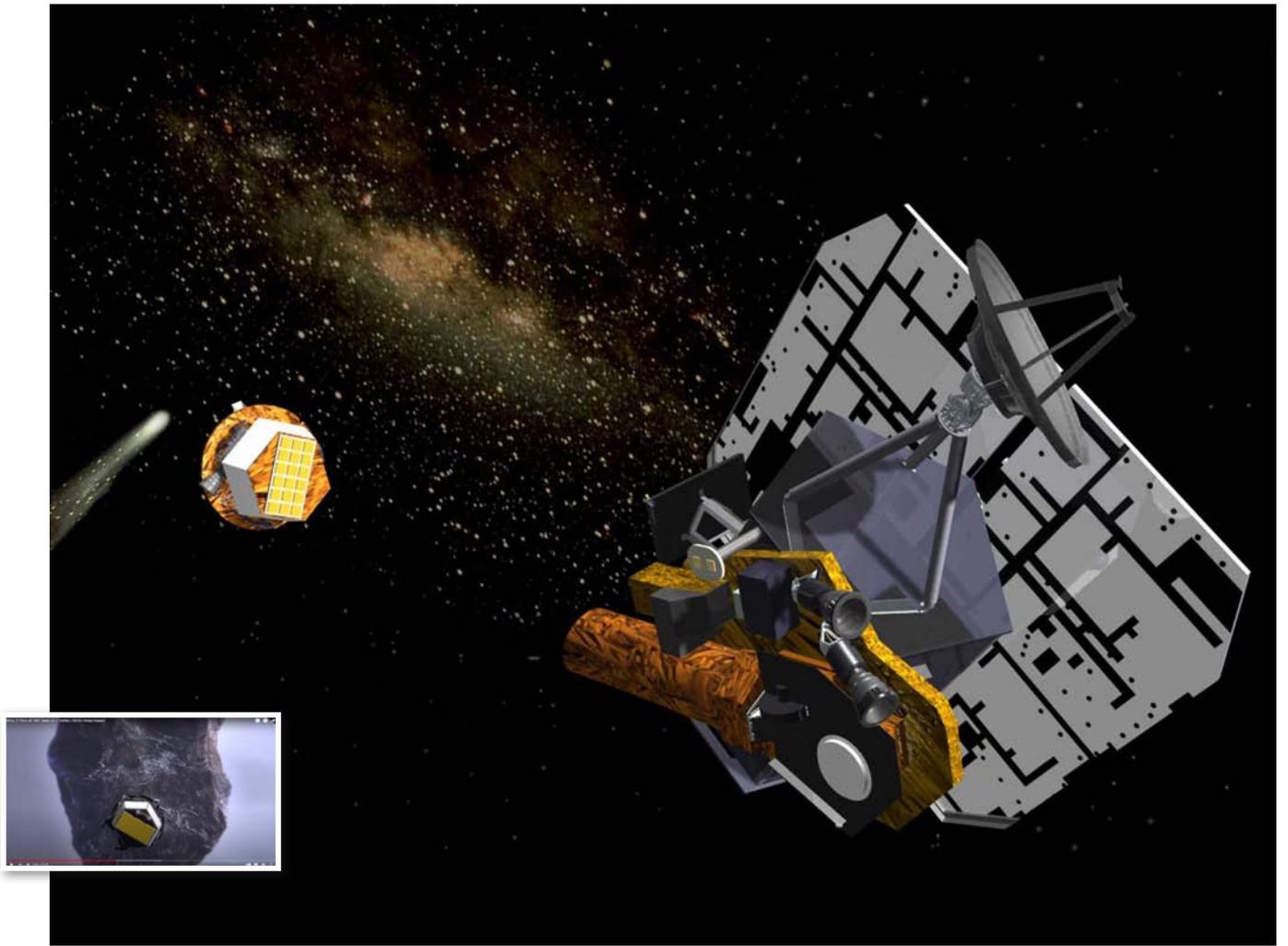


圖7. 深度撞擊號。圖片來源：NASA

深度撞擊任務

美國太空總署的深度撞擊任務（Deep Impact）（圖7）的主要目標是研究彗星的內部結構和組成。太空船在接近彗星時釋放出一個重達372公斤的撞擊器，並以每秒10公里的速度撞擊坦普爾1號彗星（9P/Tempel 1）。這次撞擊激起了大量的閃光和塵埃（圖8），這些物質的噴發為科學家提供了獨特的數據。在碰撞時，深度撞擊任務的母船和地面上的望遠鏡同步觀測了這一壯觀的事件，並對噴出的塵埃和氣體進行了詳細分析。這些觀測幫助科學家了解彗星的內部結構、物質組成及其形成過程。此次撞擊任務揭示了彗星坦普爾1號的表面下隱藏著豐富的揮發性物質和有機化合物。接著，在延長任務中，太空船還飛掠探查了哈特雷2號彗星（103P/Hartley 2）彗星。

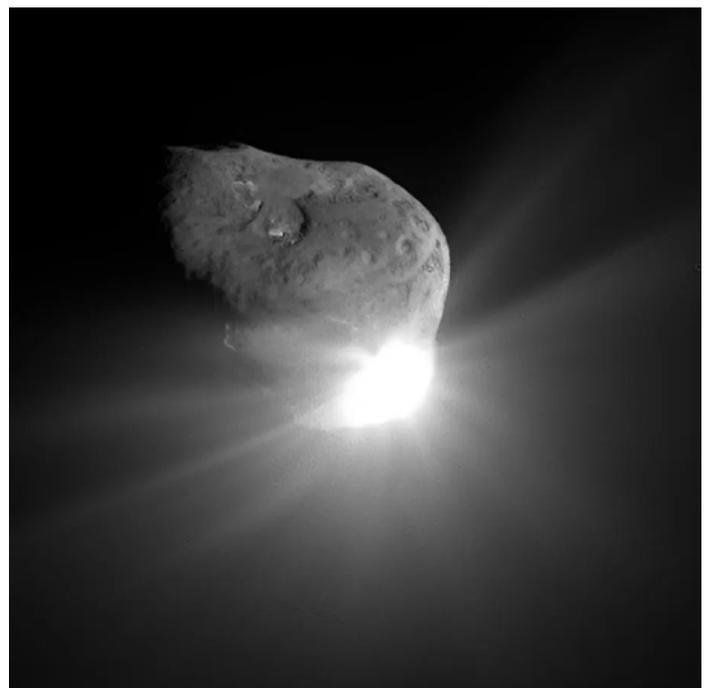


圖8. 深度撞擊號的撞擊器與坦普爾1號彗星撞擊，產生的強烈的爆炸與亮光。圖片來源：NASA



圖10. 羅賽塔太空船與登陸器菲萊。
圖片來源：ESA

羅賽塔任務

自喬托任務成功後，歐洲太空總署希望能夠再次重返彗星，於是啟動了羅賽塔（Rosetta）任務。該任務的命名源自埃及發現的羅賽塔石碑（圖9），羅賽塔石碑的發現使人類在轉譯古埃及文方面取得了重大突破。命名為羅賽塔任務（圖10），期許此

任務能夠像羅賽塔石碑一樣，成為了解太陽系生命誕生的關鍵。但這次的任務不再是快速地飛掠彗星，而是要太空船繞著彗星進行長時間的觀測，並將登陸器菲萊（Philae）投放到彗星表面進行研究，這使得這次任務困難重重。

羅賽塔太空船於2004年發射，為了追上彗星的速度，經歷了三次地球和一次火星的引力助

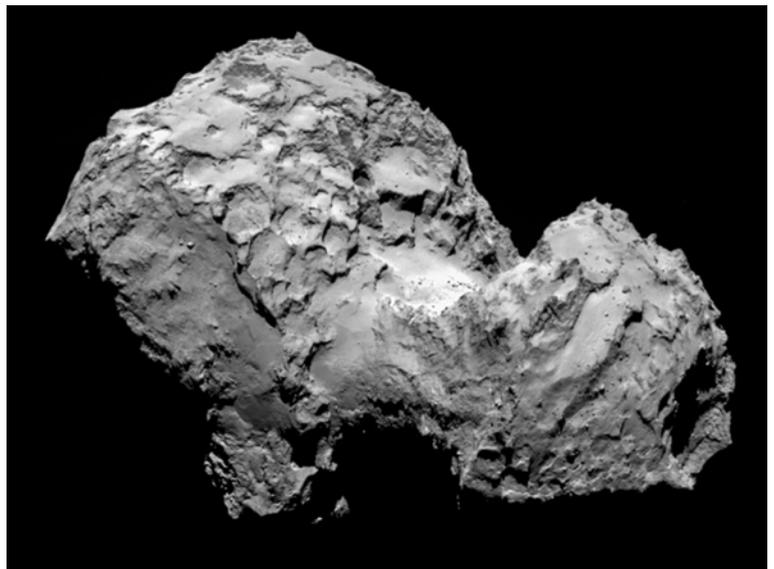
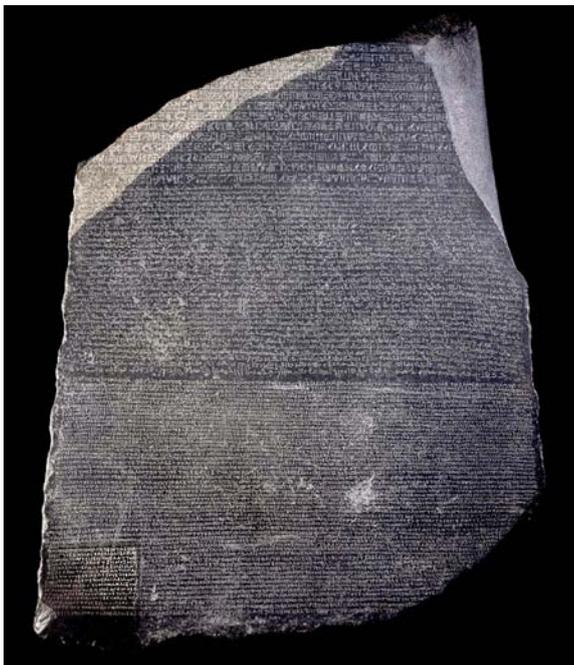


圖11. 67P彗星的彗核。來源：ESA

圖9. 羅賽塔石碑。圖片來源：筆者攝於大英博物館

推，終於在十年後的2014年8月，與楚留莫夫-格拉希門克彗星（67P/Churyumov-Gerasimenko）會合（圖11）。羅賽塔太空船投下登陸器菲萊後，持續對彗星進行探查，並隨著彗星在2015年8月13日通過近日點，這是人類第一次能以這麼近的距離且長時間來觀測和研究彗星上的各種變化，羅賽塔任務帶來了許多令人興奮的發現：

- 彗核表面特徵：彗核表面覆蓋了一層沙，並有著許多大大小小的坑洞（圖11），這些坑洞源自於內部掏空崩塌而非隕石撞擊。

- 塵埃噴流與爆發：光學攝影機觀測到了彗星表面頻繁的塵埃噴流和突然的爆發現象（圖12），顯示了彗星活動的劇烈性。

- 地表變化與山崩：藉由比較彗星經過近日點前後的影像，發現表面發生的山崩與地表型態改變（圖13），這些源自於彗核上揮發物噴發的劇烈活動。

- 彗星氣體產生率：太空船上的質譜儀測量了彗核釋放的各種氣體，幫助科學家了解彗星在接近

與遠離太陽時的活躍程度。在距太陽三個天文單位以外以產生一氧化碳和二氧化碳為主，但越接近太陽水氣的產生率逐漸上升，是因為水冰的昇華溫度高於一氧化碳和二氧化碳。

- 蛋白質胺基酸：在彗星噴發的氣體中發現了胺基酸等有機分子，這些分子是生命的基本構件，顯示了彗星可能為地球帶來生命的關聯性。

- 氘氫比例：質譜儀同時也測量了彗星水中的氘氫比例，發現地球海洋與67P彗星的比例不同，表示較彗星67P的水和地球水的起源，可能來自不同的地方。

- 彗核演化與質量傳輸：67P彗星特殊形狀的彗核可能由兩個不同的小天體低速碰撞組成演變而來，在經過風化與堆積之後變成現在的形狀，這些研究可以讓我們更進一步了解彗星的起源和長期演化。

羅賽塔任務不僅深化了我們對彗星的認識，也為了解太陽系的生命起源提供了關鍵線索。最後在2016年9月，羅賽塔太空船以軟著陸降落於67P彗星上結束了長達2年的研究。

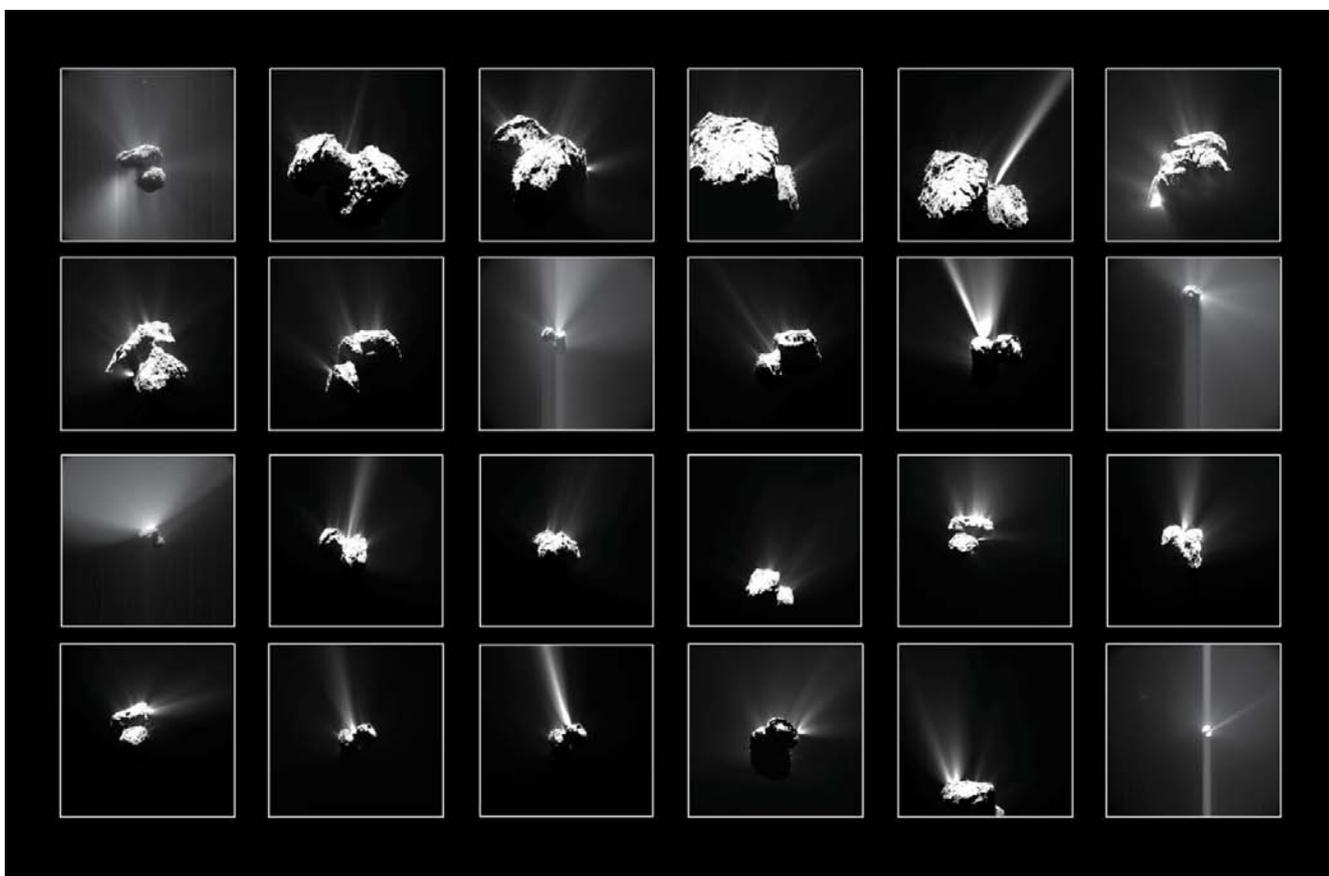


圖12. 67P彗星的塵埃噴流爆發。圖片來源：Vincent et al. 2016

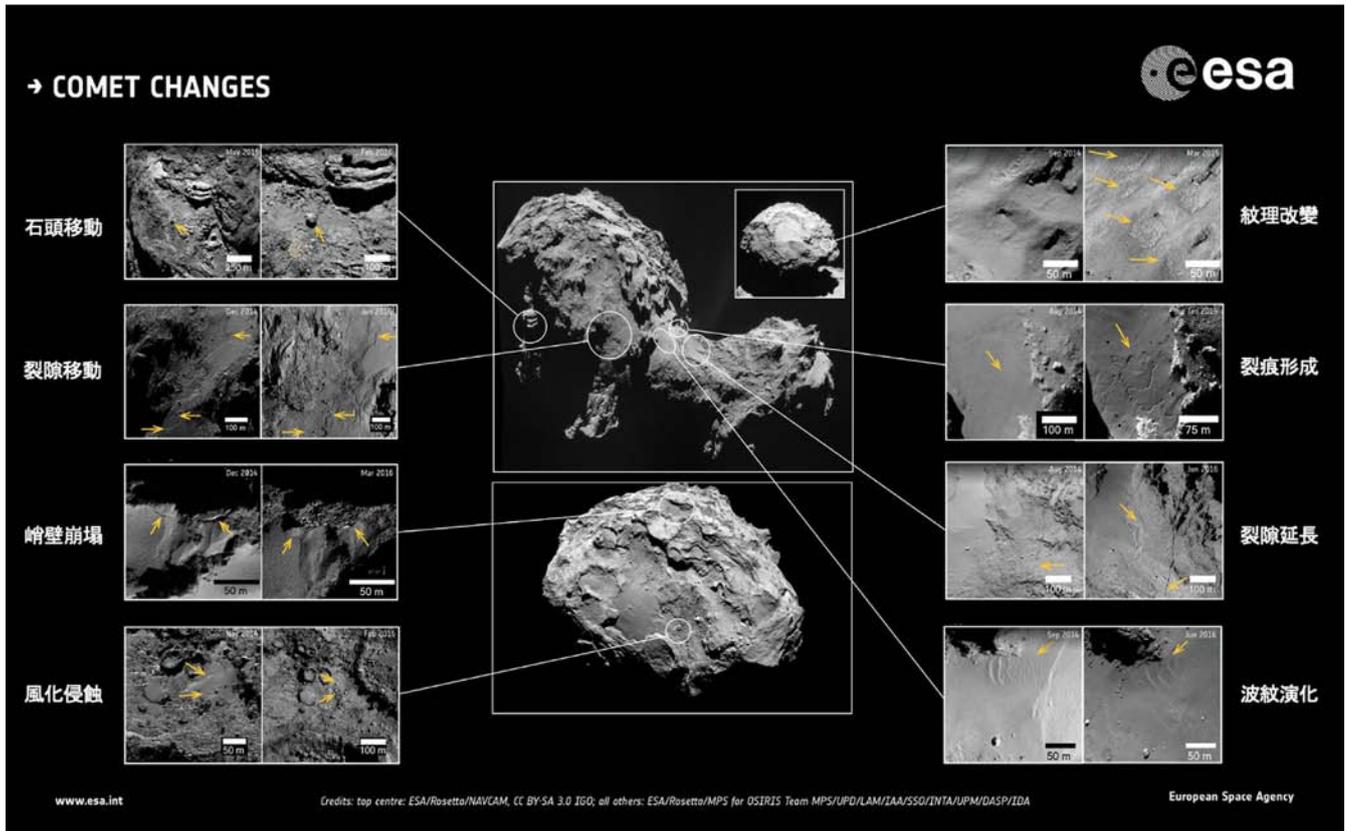


圖13. 67P彗星的表面變化。圖片來源：ESA

未來的彗星任務：彗星攔截者

隨著這些彗星任務的研究與分析，讓人類對彗星與太陽系誕生更為了解，但仍有許多謎團尚待我們一一去探索。歐洲太空總署正規劃一項新的彗星探測任務，稱為彗星攔截者任務（Comet Interceptor）。與以往主要針對短週期彗星的探測不同，這次的探測目標將是長週期彗星。長週期彗星來自太陽系的外圍歐特雲，這些彗星上的物質可能比短週期彗星更為原始，未經太陽的頻繁加熱和風化，保存了更多古老太陽系的資訊。根據計劃，太空船將首先發射到地球附近的軌道待命，隨時準

備啟動任務。當新的長週期彗星被發現並進入內太陽系時，太空船便會立即前往探測目標。這樣的設計使得任務具備了靈活性和快速反應能力，彗星攔截者任務目的在於提供關於長週期彗星的第一手數據，從而填補現有科學知識的空白。科學家們期望通過這次任務，能夠獲得更多關於彗星組成、結構以及動力學的資料，進一步理解太陽系的形成和演化過程。將推動我們對太陽系早期歷史的認識，並有助於解開更多關於生命起源的謎團。就讓我們拭目以待，期待這次任務帶來更多驚人的發現吧！

賴彥霖：中央大學天文所博士後研究

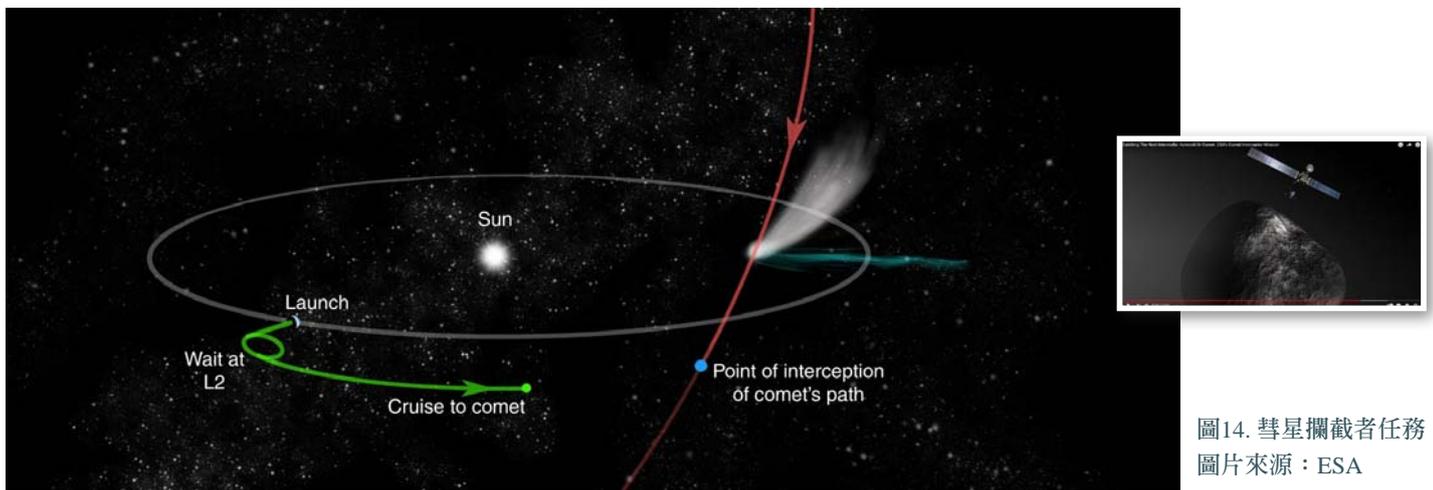


圖14. 彗星攔截者任務。圖片來源：ESA