

道別卡西尼號

承先啟後丈量太陽系

卡西尼號將在今年9月墜入土星大氣層焚毀，
完成最後任務之後，除了帶給我們土星系統的第一手資料，
也將啟發人類繼續探索太空。

撰文／葉永烜



卡西尼號太空船從2004年進入土星系統，至今已13年。今年，卡西尼號的燃料所剩無幾，不能再像以前一樣大幅改變軌道，美國航太總署（NASA）因此執行「華麗大結局」（The Grand Finale）任務，在這最後一段旅程中，卡西尼號的繞行軌道會進入土星大氣層和土星環內側，經過最接近土星的位置總共22次（參見30頁圖），一次又一次進行實地測量，希

葉永烜

中央大學天文研究所教授兼太空科學研究所教授，曾參與卡西尼號探測土星的提案，並促成美國航太總署（NASA）與歐洲太空總署（ESA）合作。興趣是油畫，特別偏愛椅子、窗景為畫作主題。



望能解答幾個基本問題，例如土星的內部構造和非常對稱的磁場來源。

自從我們提出卡西尼計畫開始，35年轉瞬即逝，當年遙不可及的目標，現在不僅近在咫尺，甚至還「擦鼻」而過，卡西尼號很多重要發現讓科學家更了解土星及其衛星，例如土衛六（Titan）的局部甲烷海、土衛二（Enceladus）的地底熱泉及土星磁層的帶電粒子加速作用。現在回想，這項極為複雜的計畫，費盡了多少人的心血和努力才有今日的成就，或許我們一開始的工作是最簡單且容易的。

然而，我們如果要了解是什麼因素驅動了這樣充滿雄心的探索計畫，可能要從兩位18、19世紀的德國人說起。洪堡德（Alexander Von Humboldt）與謝里曼

(Heinrich Schliemann) 是我非常景仰的人。洪堡德是博物學家，年輕時遊歷南美洲，把這塊陌生大陸的地理人文介紹給歐洲科學家，也引起達爾文對生態學的興趣。謝里曼是白手起家的商人，他對荷馬史詩中的木馬屠城記很有興趣，壯年後投入所有財富和精力發掘特洛伊古城，改變西方人對古代史的認識。這兩個例子說明，好奇心是人類本性，有好奇心才能不怕失敗發掘新知，勇闖前所未見、人跡罕至之處，成為社會和科學發展的動力。所以歐美國家資助基礎科學研究不遺餘力，希望激發潛在的好奇心，使科技更進步。因此，先進國家積極發展天文學和行星探測計畫以拓展人類知識疆界，例如卡西尼計畫及其他太空任務，特別是前往外太陽系的一連串計畫。

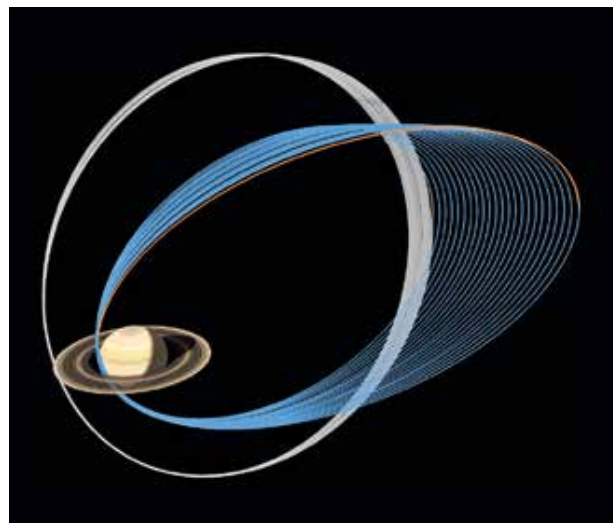
外太陽系探索序曲

1972年12月，當NASA阿波羅17號的太空人還在月球執行任務時，先鋒10號也航向木星（緊接著是先鋒11號），並在1979年9月1日飛掠土星。那天我在NASA艾密斯研究中心與加州大學聖地牙哥分校的博士菲烈斯（Walker Fillius），一同等待高能粒子實驗儀器的資料傳回；這是我與土星首次相遇，好像和太空船一起到人類未涉足之地，這種感覺實在難忘。

先鋒10號和11號是NASA原名偉大旅程（The Grand Tour）的外太陽系探測計畫前奏曲。1980~1990年，木星、土星、天王星、海王星和冥王星在軌道上的位置恰好可讓太空船依序飛掠，是近距離觀測的最佳機會。該計畫後來更名為航海家（Voyager），兩艘太空船在1977年相繼發射。

當航海家任務尚在規劃時，科學家經地面望遠鏡觀察發現，土衛六有很厚的大氣層。根據光譜分析，大氣主要成份除甲烷外，可能還有氮氣或其他氣體。航海家1號因此改道經過土衛六，失去「行星全壘打」的機會。直到2015年新視野號（New Horizons）傳回影像，我們才一窺冥王星的廬山真面目。

航海家1號在1980年11月穿越土星系統，並飛掠土



墜毀軌跡：在今年展開華麗大結局（The Grand Finale）任務前，卡西尼號已先探測土星環20次（灰色）。4月26日開始進行22次貼近土星大氣的探測（藍色），9月15日結束最後一次探測（橘色）後將墜入土星大氣。

衛六這顆土星衛星中的「巨人」，證實氮氣在其大氣中所佔比率最高，雖然表面溫度只有-180°C，但表面氣壓是地球的1.6倍。科學家也發現，大氣之所以呈現橙黃色且不透明，是其中佔2~3%的甲烷經光化學反應生成乙烷（C₂H₆）和碳氫化合物，累積在大氣或掉落表面所致。奇妙的是，根據物理化學分析，甲烷和乙烷在表面是以液態存在，如果土衛六形成後乙烷和碳氫化合物便不斷生成，那不透明的大氣下可能有一片深達1~2公里的海洋。這樣的環境加上以氮氣為主的大氣，十分類似原始地球，是探究生命起源的絕佳地點，對當時科學家來說，土衛六是一個充滿謎團的新世界！

卡西尼前進土星

完成了行星探測計畫的首要任務：投石問路、飛掠探查，接著就是長期繞行該行星，仔細測量各區域和不同時間尺度的變化。因此在兩艘航海家號發射之前三年，NASA已和德國航太研究中心（DLR）討論繞行木星的伽利略（Galileo）任務，希望長期觀測木星大氣層和磁

重點提要

■ 2017年，卡西尼號燃料用盡，美國航太總署（NASA）展開「華麗大結局」（The Grand Finale）任務，卡西尼號會近距離觀測土星環與大氣，並於9月15日墜入土星大氣層焚毀。

■ 不論是早期的先鋒號、航海家號或是現在的伽利略號與卡西尼號，這一連串太空探索任務都源自人類的好奇心，讓我們不斷開拓知識的疆界。
■ 在卡西尼號之後，人類將承繼其精

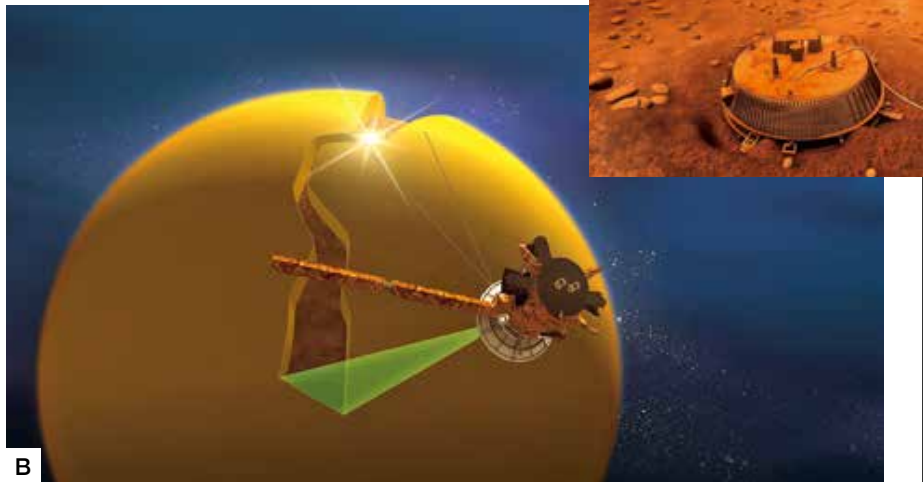
神，繼續探索在生命起源問題上扮演關鍵角色的木衛二、土衛二及土衛六。並且可能前往探測天王星及海王星，嘗試完成人類丈量太陽系的最後一哩路。

探測土衛六

惠更斯探測器：

歐洲航太總署 (ESA) 的惠更斯計畫是由卡西尼號攜帶土衛六大氣探測器，在2004年12月23日釋放，2005年1月14日此探測器以速度每秒六公里進入土衛六大氣，然後投放降落傘減速。降落過程中，照相儀不停記錄，降落地點附近的土衛六地貌一覽無遺，到達表面 (示意圖 A) 時還拍攝到非常寶貴的冰塊。ESA 總結十項惠更斯探測器的成果：

1. 人類探測器首次進入土衛六大氣，並成功降落。
2. 測量到時速 430 公里的超快緯向風系統。
3. 對大氣中甲烷 (CH₄) 的來源和光化學反應，進行定量分析。
4. 證實大氣主要成份的氮，是由氮經反應而來。
5. 氫同位素氫40的存在代表土衛六地質活動活躍。
6. 發現大氣的霧霾層厚達80公里，遠超過先前估計。
7. 透過氣膠分析儀發現，氣膠粒子加熱後釋出氨及氰化氫 (HCN) 氣體。
8. 降落地點過往可能是河床或湖沼，現已乾涸。
9. 偵測土衛六大氣中的無線電波，可探查地下海洋。
10. 照相儀偵測到風成沙丘。



土衛六雷達實驗：

卡西尼號的雷達安裝在通訊用的碟形天線中。雷達發射的無線電波波長為 2.18 公分，不會被土衛六大氣吸收，可以穿透霧霾層抵達表面。接收反射訊號就可辨識地層結構 (示意圖 B)，雷達的主要目標是用來探測土衛六表面的甲烷/乙烷海洋。

根據觀測，土衛六北極有局部海洋和湖沼，在南極則相當罕見，可能是因為季節變化；科學家也發現某些海洋深度達 100 多公尺 (比台灣海峽還深!)。雷達影像的另一項重要發現，是土衛六表面有風沙和水文作用，就如同地球表面，但最大的差別在於土衛六是由甲烷 (而不是水) 驅動天氣和地質作用。真是一個奇妙的地方！

層及其各類衛星，所以下一步自然該是土星任務。但 1980 年代初期，由於太空計畫經費超支和種種技術問題，NASA 的行星探測計畫好像洩了氣的皮球，所有新計畫強調簡單和省錢。

在此背景下，我在 1982 年初的一場會議上偶然拾起 NASA 艾密斯研究中心的一本宣傳書，書中介紹土衛六的大氣探測器和雷達實驗。該中心曾研發金星 (先鋒金星號任務) 和木星 (伽利略任務) 的大氣探測器，因而對土衛六大氣有興趣；土衛六雷達發射的無線電波則可穿越不透明的大氣層，對地表進行勘察。這兩個想法具科學價值又大膽，但只能對土衛六進行一次短暫近地測量，而且只對某些研究領域有貢獻，所以不算是完整計畫。但這提醒我們，雷達實驗和大氣探測器對土衛六的研究很重要。因此當年歐洲航太總署 (ESA) 在徵求太

空任務提案時，我們便提出土衛六探測器計畫，也促成 ESA 與 NASA 再次合作。當卡西尼-惠更斯任務最終成行後，這兩個想法也分別成為最有特色、成果豐碩的科學儀器——惠更斯探測器與卡西尼號上的雷達實驗 (參見上方〈探測土衛六〉)。

卡西尼-惠更斯號在 2004 年 7 月 1 日抵達土星，同年 12 月 23 日投放 ESA 的惠更斯探測器進入土衛六大氣，過程中有兩個多小時可針對大氣構造和化學成份進行測量。卡西尼號繼續繞行土星，並近距離 (距表面僅 1000 公里) 對土衛六進行雷達、質譜儀和其他觀測。由於原定四年的任務相當順利，成果很豐碩，卡西尼號的任務不斷增加、服役時間不斷延長，首先是 2008~2010 年的春分任務，目標是研究太陽光直射土星赤道時土星環和大氣的變化，最後是 2010~2017 年的夏至任務，監

一步將是兩項用於尋找生命蹤跡的衛星探測計畫：繞行木星的木衛二快艇號（Europa clipper），以及飛掠土衛二及土衛六的海洋世界計畫（Ocean Worlds）。這兩項計畫也將採用比卡西尼號的離子及中性粒子質譜儀靈敏度更高的儀器，希望測量出木衛二或土衛二的大氣及噴流中測量出來的稀少大質量有機分子和同位素（甚至微生物）。海洋世界計畫尚需NASA定奪，但木衛二快艇號預定在2022年發射。另外，ESA也預計於同年發射木星冰凍衛星探險者號（JUICE），繞行木衛三（Ganymede）。未來十年，木星系統將會很熱鬧。

太陽系是最好的實驗室

過去亦有針對外太陽系行星探測的提議，最成熟的是1982年的土星大氣探測器，另外是天王星軌道探測器。本來緊接著卡西尼計畫的應該是土星大氣探測器任務，但因為木衛二和土衛二在生命起源上扮演關鍵角色而擱置一旁。從此例可以看到，長期規劃對科學發展固然必要，但也常被重要發現打亂腳步，反而引領我們轉往新方向。目前科學家已提出各種有趣想法，可做為發展新一代木衛二和土衛二地下海洋，以及土衛六大氣和甲烷海的探測計畫基礎，說不定將有數代科學家會把一生精力放在這裡，就像謝里曼挖掘特洛伊遺蹟。

深空探測目的是開拓人類的知識疆界，就像洪堡德短短五年的南美洲之旅，帶給地理學和生物學翻天覆地的改變。假如有機會，我們應該積極爭取國際大型合作計畫，例如天王星和海王星的軌道探測器以及大氣探測器，UNO（Uranus & Neptune Orbiters）計畫。

天王星很特別，其自轉軸與黃道面傾角是98°，一說是天王星形成後被另一顆大小類似地球的天體撞擊，把本來與黃道面幾乎垂直的自轉軸撞歪，其衛星也可能是碰撞後才形成。海王星更有趣，最大的衛星海衛一（Triton）的繞行方向與海王星自轉方向相反，說明它不是與行星一同形成，可能是一顆從海王星軌道外捕獲的天體。航海家2號在1989年飛掠海王星時，發現海衛一有由氮氣組成的稀薄大氣，表面分佈氮冰與甲烷，還有氣體和塵埃從表面噴出。海衛一可能是太陽系生成時

留下的行星胚胎，值得在UNO計畫中近距離飛掠，或者利用軌道探測器對海衛一仔細研究。

搜尋系外行星和地外生命是當前天文學進展最快的領域之一，從此觀點來看，太陽系其實是最好的實驗室，因此需要盡快完成所有行星和衛星的探測工作，尤其是關於天王星和海王星如何從太陽系內側移動到外側，這是太陽系演化過程中特別重要的軌道遷移現象。

要等到UNO計畫真正執行，人類才真正完成太陽系勘察。如果可以聯合各國太空機構參與，肯定更有意義。

這件事有多容易（或有多難）？文章開頭我舉了洪堡德與謝里曼的例子，可見科學探索是西方文化重要的一環，或許因而被認為一切發展都是按部就班。事實上，卡西尼計畫1997年成功發射前也曾歷經一波三折，當時NASA及ESA雖然已決定合作，但仍需通過美國政府年度預算的核定。今年3月甫過世的美國夏威夷大學教授歐文（Toby Owen）曾說，當年他花很多時間拜會國

會議員，遊說他們支持卡西尼計畫。有一次他等待議員時看到一位女士，以為她也在推動一個國際合作的科學計畫，一問之下才知她只是來談一件嬰兒用品的投資。歐文恍然大悟，要從下而上讓政府支持教育和基礎科學有多麼不容易。

我們常抱怨政府對科技發展沒有遠見，但我們也可能做得不夠。山不來，便到山那邊，歐文最後辦到了。我們必須走出學術象牙塔向大眾和政府解釋，為何天文學和粒子物理學（或是跑到海王星）等基礎研究，是對將來及下一代的寶貴投資。我們該爭取的不只是科技創新，建立寬廣的人生視野和科學家精神同等重要。■

本文作者參與今年7月於中央大學舉行的一個天文及科學會議後，得知與會同學琉球中學陳士智的感想：「謝謝您，讓我參加天文座談會，雖然沒有全程聽完，這次的經驗讓我知道英文、數學都很重要。」而受啟發，更體認到發展基礎科學、推廣教育及國際合作對年青一代的重要性。

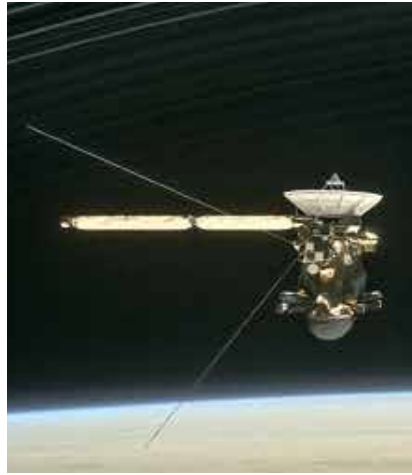
延伸閱讀

訂戶專享 《科學人》雜誌知識庫中英對照版

〈土衛二地底熱泉藏生命？〉，《科學人》2017年2月號。

〈貌似地球的衛星〉，《科學人》2010年4月號。

〈卡西尼前奏曲〉，《科學人》2004年7月號。



緬懷身影：此幅示意圖中，卡西尼號於墜落前，在土星及土星環間穿梭，傳回許多重要發現。

