

登陸月球

1969

50

2019

週年

特別報導



月球上的花園

多個國家宣示10年內登陸月球，哪裡會是人類立足月球的前進基地？

撰文／葉永烜

《月球上的花園》(Garden on the Moon)是一本相當有趣的科幻小說，作者是法國小說家布勒(Pierre Boulle)。內容描述在二次大戰時，日本和納粹德國是軸心國，有些日本科學家參加了設立在德國佩內明德(Peenemünde)秘密火箭基地的研究團隊，其中一位是金島博士(Dr. Kanashima)。戰爭結束後，美國和蘇聯爭先把基地中的德國火箭專家收編到各自的火箭計畫，金島博士則回到日本。這些昔日夥伴從合作者變為競爭者，紛紛投入剛展開的太空競賽。書中有個人物名叫史坦，其實是隱喻德國火箭專家馮布朗(Wernher Von Braun)到了美國，拚命發展登陸月球計畫，力求實現

他早年的夢想：比他當年在佩內明德的同事、後來在蘇聯太空機構服務的競爭對手早一步把太空人送上月球，並安全返回地球。

正當美國和蘇聯爭分奪秒，看誰先發射登月火箭時，不料半路殺出一個程咬金，他們卻聽到消息：金島博士搶先抵達月球。他採用的是神風特攻隊有去無回的自殺任務方式，所以也成為第一個在月球上喪生的人。故事尾聲時，金島博士用月塵堆成一座花園，唸了一首詩，沉思宇宙的奇妙，臨終時刻，在塵土上寫下他是第一位登上月球的人。

上月球找水

這本書於1964年出版，美國阿波羅計畫尚在籌劃中，蘇聯相應的月球計畫聲勢也很浩大。到底美蘇的太空競賽誰能勝出，還是未知數，所以當時讀起來很有臨場感。但為什麼要在阿波羅11號登陸月球50週年的今時，講述這個虛構的故事？因為今天的月球研究再度充斥競爭的氛圍，只是主要的參與國不再只是歐美和日本，還有中國和印度，他們可說是現代版的程咬金，不用想也知道彼此正在較勁。

重點提要

- 月球缺少水資源，但月球南北極的隕石坑底部可能蘊藏水冰，是兵家必爭之地。
- 今日，歐美與日本不再是太空任務的佼佼者，中國與印度想搶先在月球南極著陸。
- 然而，美國把月球當成前進火星的測試平台，並積極發展新一代太空探測裝置——立方衛星。歐洲太空總署則期望利用獨特的摺疊工藝，來組建月球基地。



葉永煇

中央大學天文研究所教授、太空科學研究所教授、中央研究院院士，專長為行星科學與太陽系演化。他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。本文部份資料來自作者的專題報告和公開講座：台灣物理學會2019年會「到深空探測之窄路」、「展望」系列2018秋季「近水樓台先得月」、印度聖沙勿略學院阿默達巴德分校「Ice skating on the Moon」、台灣大學昆蟲系「月球上的花園」。特此感謝交流機會。

從1959年蘇聯的月球二號（Luna 2）首次著陸月球，到2013年中國的嫦娥三號，所有探測器的著陸地點都在月球面向地球的一面（近地面），而且都坐落在月球低緯度或接近赤道的區域（參見本頁圖）。通訊和導航技術之故，如何在月球背面（遠地面）著陸並進行探測，向來認為是難度很高的技術挑戰。直到嫦娥四號配備了一枚通訊衛星鵲橋號做為中繼站（參見50頁左上圖），在今年1月順利著陸於月球背面南極的馮卡門隕石坑，才突破這個技術瓶頸。如果今年7月印度的月船二號（Chandrayaan-2）成功抵達月球正面的南極，這兩個亞洲文明古國即將在月球上又成為鄰居！

為什麼這兩個國家對月球極區感興趣？最主要原因便是生命所需的水。早在1960年代，便有科學家猜測月球極區一些隕石坑的底部，太陽光照射不到，表面溫度又很低，一旦水分子掉落其中便會凝結成水冰。經過幾十億年，這些隕石坑底部說不定會積聚成極為可觀的水冰庫，能夠維持密閉的生態圈，容許太空人在附近生活並工作，甚至可以從事農耕！當時只是用紙筆計算出來的模

進駐極區：1959年迄今，美國、蘇聯、中國、印度在月球正面和背面成功著陸的地點。中國的嫦娥四號降落在月球背面南極的馮卡門隕石坑，印度的月船二號預計在今年著陸月球正面的南極。

型和數字，後來獲得美國航太總署（NASA）重視，設計一連串太空任務，以尋找水冰為重要目的（參見51頁〈覓水行舟〉）。

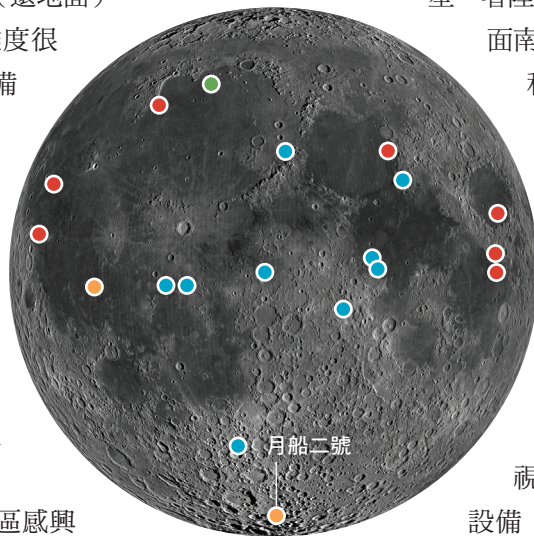
這個重要的科學問題在最近得到解答。印度在2008年發射月船一號繞行月球，酬載中有由NASA提供的月球礦物紅外光譜儀（Moon Mineralogy Mapper, M3），勘查月球表面岩石的組成。他們仔細分析測量資料，去年8月宣佈令人振奮的結果：在月球南北極的幾個隕石坑底部測得水冰的紅外光譜（參見50頁下圖）。當這則國際新聞刊出，不用說NASA，印度更是舉國歡騰，認為月船一號一箭定江山，這是國家的光榮，所以極為期待第二個月球計畫月船二號。一如嫦娥四號，月船二號也是複雜的任務，有三個主要部件——軌道衛星、著陸艇和探測車，著陸地點是在月球正面南極，所以不需要中繼衛星傳送訊號和科學資料。這是歐美日本等太空科技先進國家未曾嘗試的壯舉，預祝他們成功！

探月小先鋒

美國現在把太空探測的重心放在火星，準備在不久的將來（2035年左右）把太空人送到火星。在他們的時程表中，把月球視為測試平台來發展一些大型載具和設備；NASA可說是把月球當做前往火星之路的橋頭堡。同時NASA也正在推動新一波太空科技革命，把部份任務交付給體積小且造價便宜的立方衛星（CubeSat）。

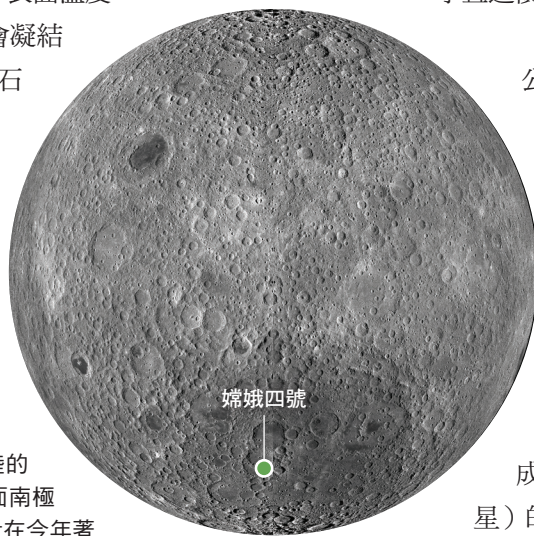
立方衛星的最小單位（1U）只有10公分×10公分×10公分之大，重量為兩、三公斤，可視需求組裝成2U、3U、甚至6U或12U。這個概念受到學界和太空業界極度重視，例如新加坡和盧森堡一馬當先，產官學界三方合作開發立方衛星技術，做為另一新興產業和商務的支柱。有了這個基礎，甚至可以建立國際合作，成為太空探測（例如前往小行星或金星）的先鋒。

美國的立方衛星技術則已經相當成

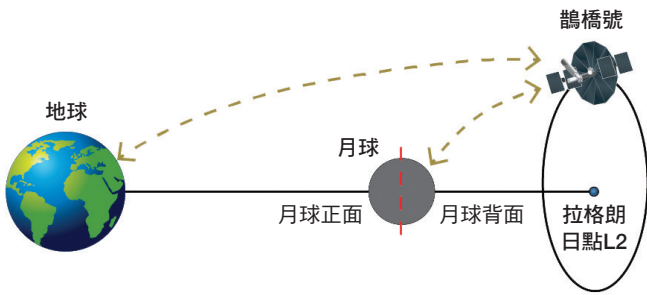


月球正面

- 美國
- 蘇聯
- 中國
- 印度



月球背面



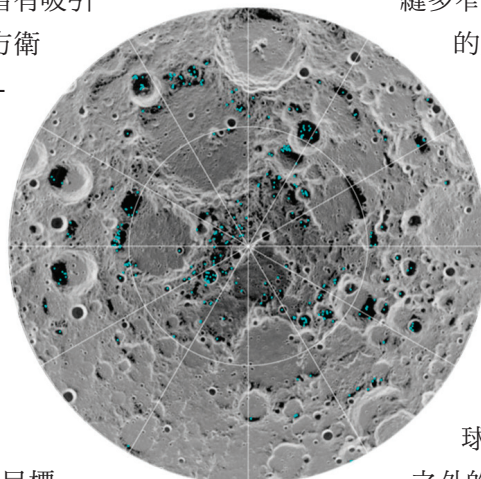
突破瓶頸：在月球後方L2點運行的鵲橋號中繼衛星，可讓嫦娥四號著陸器和玉兔二號探測車與地球通訊。

熟，一個絕佳的例子便是最近在火星著陸的「洞察號」(InSight)，成功利用兩枚立方衛星做為與地球聯繫的中繼站。他們的下一步是，在2020年6月由太空發射系統(Space Launch System)把獵戶座(Orion)太空船帶到月球，轉一個彎再返回地球。這次飛行任務不載人，卻帶了13枚立方衛星，預計在經過月球的時候，把其中幾枚立方衛星送入繞月軌道。

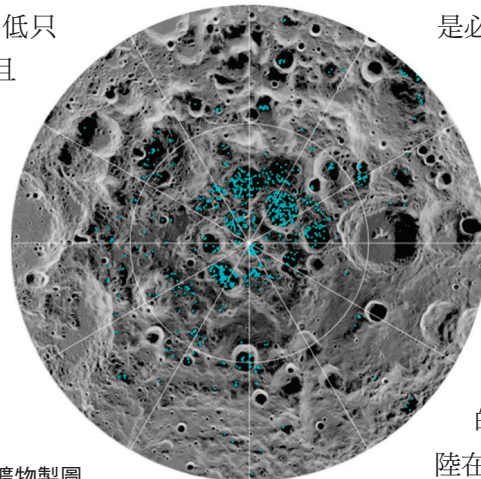
這些精心挑選出來的立方衛星皆有吸引人的科學目標，其中一枚6U的立方衛星稱為月球極區氫製圖儀(LunaH-Map)，科學酬載便是微型化的中子偵測器；另一項計畫叫做月球手電筒(Lunar Flashlight)，由6U立方衛星搭載紅外光譜儀和雷射系統，在經過月球極區隕石坑暗處的目標區域時，使用雷射照射地面，用紅外光譜儀偵測是否有水冰覆蓋在上。

除了找尋水資源這個共同科學目標，這兩枚立方衛星的另一特點在於，運行軌道可以非常貼近月球表面，高度最低只有三至五公里，可以得到更精準且詳細的資料。此外，也用立方衛星測試了新技術，日本宇宙航空研究開發機構(JAXA)研發的小型著陸器名叫「待客之心」(Omotenashi)，它從太空艙著陸月球前，會先使用反向推進器減速，再啟動氣囊保護登陸器，確保

找到水！印度月船一號的紅外光譜儀月球礦物製圖儀M3測量的水冰(藍色)分佈圖。



月球北極



月球南極

與月面碰撞時不會受到損傷，測試目的在於研發小型月球(和其他星球)著陸系統。靈活性以及創新，加上造價低廉且研製快速，都是立方衛星的優點。

立方衛星尺寸雖小，卻應用了奈米科技、機器人、人工智慧和仿生工程。以「待客之心」為例，便需要微推進器、精密儀器包裝和介面設計，才能讓僅0.7公斤的著陸器安全著陸在月球表面。如何把體積相當大的氣囊「塞入」小小的著陸器裡，更是一種藝術！這種最尖端的太空科技是大家並不陌生的一種技藝：摺紙工藝。利用容量有限的載具把太陽能板和微波天線等超大型結構送上太空，一種方法是把平面結構逐步摺疊成極為密實的一團，到了太空軌道位置再展開使用。

摺疊新世界

一些昆蟲天生便有摺疊本領。蘇黎士瑞士聯邦理工學院和美國普渡大學的合作團隊正在研究蠶蛾的翅膀怎麼伸縮自如，並應用在設計生醫工具和太空平台。而不管裂縫多窄都可以任我行的蟑螂，也是仿生工程的熱門研究對象。不難想像，有些國家的太空機構正在摸索如何利用機器蟑螂組成的無線感測網路去勘查月球上的水冰。

印度科學家奮力研發由火柴盒大小的晶片構成的無線感測網路，試圖放置在隕石坑周邊來定位水冰地點。這是一件很重要的事，太空人(或機器人)無法在月球表面的太空環境長期逗留，在太空站之外的工程或研究，目標必須非常明確，但水冰可能只集中在局部區域，預先勘查便是必要的。

如果登月任務一切順利，在10年內月球南極可能會出現第一個永久的科學觀測站，可讓太空人短暫居停，再逐步擴建成較有規模的月球基地雛型。月球南極是比較理想的地區，除了豐富的水資源外，還有多達180天連續不斷的陽光照射，方便科學工作進行。中國的嫦娥四號和印度的月船二號分別著陸在月球背面和正面的南極，可說是人類立足月球的前哨站。亞洲的中印兩國在太空

覓水行舟

月球表面其實相當乾燥，可說是滴水全無，這和月球起源有關。最受學界接受的月球起源理論是，當原始地球形成幾十萬年後，和一顆火星大小的「流浪」行星相撞，撞擊能量非常巨大，致使這顆行星完全粉碎，而地球一部份爆裂成無數碎片，構成繞行地球的環系統。這些物質一開始溫度很高，可能使地球表層的水份和有機物升溫而揮發。環系統的固態粒子互相碰撞、生成微小天體，在很短的時間內，便產生一個表面覆蓋熾熱熔漿的原始月球。因此，月球整體缺少水份，這與擁有大量地下水和地底下藏冰的火星很不一樣。根據一些估計，要把一公升的水從地球帶上月球，費用可達一萬美元，由此可知，水資源的開發決定了將來能否在月球建立太空站和殖民地。

美國航太總署（NASA）派遣一連串太空任務找尋水，包括月球探勘者號（Lunar Prospector）和月球勘查軌道號（Lunar Reconnaissance Orbiter，上圖）。主要的實驗儀器是中子偵測器，應用的科學原理和核反應有關。月球表面每分每秒都受到宇宙射線撞擊，當月球表面的物質和這些高能粒子作用，會產生基本粒子例如中子飛出，這些中子和月球表面的粒子發生彈性或非彈性碰撞，轉移它們本來的能量，因此慢了下來，其能量轉移的多寡與粒子的質量有關。

太空船上的中子偵測器可以測量並記錄部份路徑向上的



中子。中子一旦和質量相同的氫原子碰撞，則會形成最有效的能量轉移，含有越多氫原子的月球表面，偵測到中子的能量會越少，也就是說慢中子的通量會比快中子高。假設氫原子最有可能和氧原子結合成水分子，所以慢中子通量比較多的區域，也可能含有較多的水分子，亦即藏有水冰。NASA月球任務的中子偵測器，在月球南北極找到可能有水冰分佈的地方，但可能也有其他解釋。再者，中子偵測器的角解析度很低，實驗數據只能呈現非常粗略的圖像，不足以指明哪個隕石坑底部含有比較多的氫原子，無法百分之百做為水分子存在的證據，所以月球是否有水一直存在疑慮，無法定論。

領域崛起，美國大張旗鼓，歐洲並沒有閒著。

歐洲太空總署（ESA）規劃月球基地，也有獨特的一套做法。ESA最近公開徵召基地架構的構想藍圖，得到第一名的是以摺紙方式做為建築物的基本設計，原因是這種型態利於利用3D列印的模版製造，又容易拼裝連接成更大規模的月球城市。在這些模型剖面圖中，還可看到幾層樓高的花園，當然在那裡傳播花粉的一定是模仿蜜蜂的微型機器人，說不定也有機器蟑螂，因為蟑螂總是無所不在。

現在大家常擔憂未來的人工智慧世界，機器人會佔去大部份傳統工作，人類必須開發新的工作和新的舞台。但有什麼地方會比月球（和火星）更稀奇古怪、尚待開發？太空時代來臨，在短短60年內便讓人類社會

發生了改變，這段期間很多科幻小說般的點子，因為奈米科技、電腦和腦科學的進展，現在都得以實現。而這些新科技又觸發更多想像力，形成無止境的浪潮。這個過程又讓我們深深體會，縱使看似平凡的昆蟲，其中也有玄妙的知識，可讓我們更大步跨向宇宙深空；一張普通的紙經過摺疊，縮成小到不能再小的一團，卻代表無限的空間。

美國華人作家劉宇昆（Ken Liu）所寫的科幻小說《摺紙動物園》，其中一章描述一位平凡的母親用摺紙工藝向兒子表達無限的愛意和思念。這告訴我們不能為了追求夢想而不擇手段，忘記自我、忘記行善之道——原來這才是我們航向月球、火星以及宇宙深空的軟實力、硬道理。SA