



歐羅巴探險記

**它不過是一顆冰凍衛星，
卻成為尋找外星生命的必訪之地。**

撰文／歐尼斯（Stephen Ornes）
翻譯／連育德

我們知道歐羅巴（又稱木衛二）的存在已經超過4個世紀，但在漫漫歷史中，這顆木星的第四大衛星，大多數時候只是望遠鏡中的一個小光點，常伴著身為太陽系最大行星的木星，引人無限想像。然而，過去幾十年，天文學家透過望遠鏡仔細觀察，加上6艘在附近探測的太空船，大家對它有了新的認識。歐羅巴，一點也不像月球。

基於這些原因，對外星地質物理學感興趣的行星科學家來說，歐羅巴充滿了魅力。它既擁有海洋又飽含能量，還蘊藏建構有機分子的關鍵元素，在在顯示這裡可能與眾不同。或是在海洋深處，抑或是簇擁在地底湖泊或在冰凍的地表噴口下，這顆明亮而碩大的衛星，可能孕育著生命。

「我們認為那裡到處是海洋。」任職於加州帕

沙第納市（Pasadena）的美國太空總署（NASA）噴射推進實驗室（Jet Propulsion Laboratory）的行星科學家帕帕拉多（Bob Pappalardo）說：「地球上就有水的地方，基本上就有生命。歐羅巴也有可能嗎？」

20多年來，帕帕拉多一直走在前端，推動派遣飛行器到歐羅巴，如今夢想即將成真：美國太空總署計畫今年發射歐羅巴快艇號（Europa Clipper），將是該署有史以來最大的行星飛行器。這項任務斥資50億美元，預訂在2030年抵達木星，將投入4年時間分析歐羅巴，判斷它的環境是否具有孕育生命的條件。歐洲太空總署（European Space Agency）去年發射的木星冰月探測器（JUICE），將在歐羅巴快艇號抵達2年後加入，執行類似任務，不僅要尋找歐羅巴的適居條件，其他神秘的木星衛星也是其目標。



本刊取得美國麻省理工學院Technology Review
期刊圖文授權
Technology Review,
Published by MIT.
TECHNOLOGY REVIEW
internet URL: www.
technologyreview.com

MIT
Technology
Review

↑ 美國太空總署計畫在10月發射歐羅巴快艇號（隔頁），研究這顆木星第四大衛星（上圖），這裡是太陽系中最有希望找到外星生命的地方之一。



外星生命是否存在，都無法從這2項任務得到答案。「除非運氣真的很好，否則應該沒辦法判斷是否有生命，不過可以知道環境是否具有那些條件。」任職於約翰霍普金斯大學（Johns Hopkins）應用物理實驗室（Applied Physics Laboratory）、在歐羅巴快艇號攝影團隊擔任共同主持人的普羅克特（Louise Prockter）說。

這些太空飛行器能做的是，鎖定化學、物理與地理等適居特徵，探測某處是否適合生命出現與生存，這是我們最接近找到答案的一次。

若能確實在歐羅巴發現這些跡象，將是一大福音，原因不是因為人類可能到那裡定居——歐羅巴的地表環境過於嚴峻寒冷，又有輻射，不適合脆弱的人體——而是證實未來有進一步探索的必要，進而登陸歐羅巴尋找外星生命。若能在歐羅巴找到任何生命體，將可強有力地證明生命可以從別的途徑出現。也就是說，地球上的生命並非特例；我們在地球附近有鄰居（即使它們很有可能只是微生物），因此宇宙其他地方也很可能有生命。

「既然我們到得了的地方可能有生命、有廣大海洋，就非去不可。」使用聲學等創新技術觀測大型水體的麻省理工學院海洋工程中心（Center for Ocean Engineering）主任馬克里斯（Nicholas Makris）說。他曾經主持一支科學團隊，提議將太空飛行器登陸歐羅巴，並使用聲波探索冰層底下的環境；他至今仍舊懷有這個心願。「必須要找出答案，每個人都想知道。」他說：「沒有人不想知道。」

從靜態星點到動態衛星

早在歐羅巴成為今年的宇宙勝地之前，它便扮演著重大的角色，顛覆了我們對太陽系的理解。發現它的契機便是如此。1610年1月的某天晚上，義大

利天文學家伽利略（Galileo Galilei）拿著自己巧思設計的望遠鏡，把焦點鎖定在由氣體組成的木星，注意到它的側面有3個小亮點。

伽利略以為是錯覺，覺得它們應該是遙遠的恆星，只是看起來很近罷了。但隔夜，他又看到同樣3個小星星，不過這次是在木星的另一側。進一步觀察，他還發現另一個亮點，同樣在木星附近徘徊，就是不會消失。1610年3月，伽利略發表題名為《星際信使》（Sidereus Nuncius）的短篇著作，提及他所發現繞行木星的4個星體，就跟水星與金星繞著太陽運行一樣（天文學家目前仍然將木星與它的衛星視為一個迷你太陽系）。伽利略按照編號將它們命為1號、2號、3號等，並稱它們為「美第奇行星」（Medicean planet），不過現在大家都稱「伽利略衛星」。他率先其他科學家，第一手觀察到有小型星體繞行地球或太陽以外的星體，強力證實當時仍備受爭議的論點，亦即行星繞著太陽運行，而非相反。

這4顆木星衛星的命名權，最終落在德國天文學家馬利烏斯（Simon Marius）手中，他聲稱（但無法證實）比伽利略更早幾週發現這些衛星。1614年，在克卜勒（Johannes Kepler）的建議下，馬利烏斯提議將這些衛星分別命名為埃奧（Io；木衛一）、卡利斯托（Callisto；木衛四）、歐羅巴、蓋尼米德（Ganymede；木衛三），靈感來自於古神話中宙斯（羅馬名是Jupiter，亦即木星的英文）的愛人。儘管這些名字過了200年才普及，但絕對比第一版好很多。試想，如果當初伽利略取的命名方式流傳了下來，新聞現在寫的可能會是「二號快艇」，讀起來遜色不少。

木星的衛星還不只這4顆。截至2023年12月，天文學家正式證實另外91顆衛星的的存在，而且還可能有更多。前4顆衛星呈球形，循著穩定而簡單

「地球上水的地方，基本上就有生命。歐羅巴也有可能嗎？」



↑ 在加州美國太空總署噴射推進實驗室裡，工程與技術人員安裝歐羅巴快艇號的反動輪。

的軌道，反觀近年發現的衛星則是五花八門，有些成群以不規則路徑或反方向運行，有些是行經的小行星，有些是星體碰撞下的產物。由於繞行木星的星體太多，除非有重大的科學價值，國際天文學協會（International Astronomical Union）已經不再命名木星衛星。

我們對歐羅巴的認識愈多，它就愈令人神往。有長達幾世紀的時間，它只不過是一個從木星一側運行到另一側的亮點，但到了20世紀初，天文學家已能合理估算歐羅巴的直徑與質量，發現它的體積略小於水星或月球，但大於冥王星。天文學家亦研究從歐羅巴表面反射的光線，發現它出乎意料地明亮。倘若歐羅巴取代夜空中的月球，它的體積雖然小一點，卻有5倍的亮度。

1950年代，科學家看著明亮的遙遠星體，不再只把它們視為宇宙的奇特現象，而是真實的世界，每個都有獨特的起源故事，於是開始研究這些星體的成分與形成背景。在1952年出版《行星》（The Planets）一書的尤里（Harold Urey）指出，外太陽系蘊含了

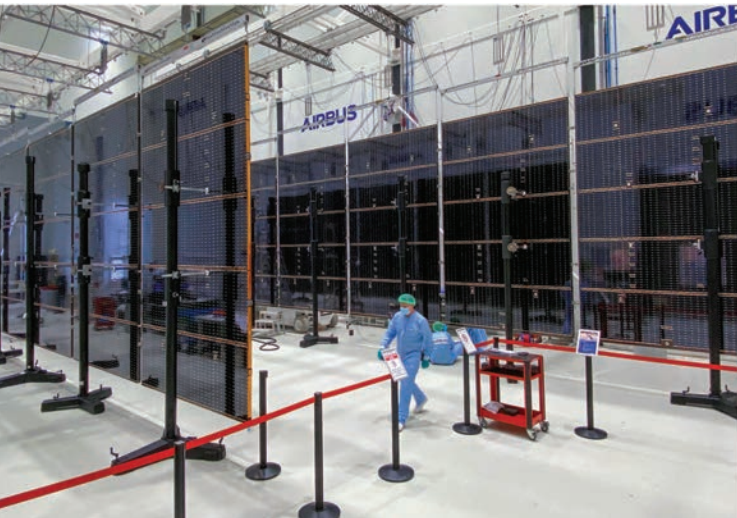
在1980年發表的一篇報告中，科學家說歐羅巴外觀彷彿「破碎的蛋殼」，還把它比喻成被氈頭筆弄髒的白色撞球。

豐沛水冰，因為這裡的星體在遠離太陽的地方形成，低溫條件無法讓冰蒸發。到了1960年代，天文學家與天文物理學家根據紅外線光譜的初期測量，發現歐羅巴的反射率極佳，推測確實有冰層存在，但這點不易證明。

天文學家李奇威（Stephen Ridgway）任職於位在亞利桑那州土桑市（Tucson）的美國國家科學基金會（National Science Foundation）國家光學紅外線天文研究實驗室（NOIRLab），他在1970年代初第一次聽到外太陽系可能存在冰冷衛星。當時的他還是一名研究生，在一場會議認識博士後研究員皮爾切（Carl Pilcher），李奇威還記得對方當時問道，「它們又冰冷，反射率又高，所以我們覺得應該有冰，但那是水嗎？是二氧化碳冰嗎？還是另一種形式的冰或混合物？」

事後證實，工匠派物理學家的李奇威，有能力回答這些問題。他利用年代久遠的數學技巧，設計出一種創新儀器，用於捕捉遙遠光源的光譜，在亞利桑那州基特峰天文台（Kitt Peak Observatory）的望遠鏡進行夜間觀測時會搭配使用。每個元素與分子都會吸收和發射獨特的能量波長；對天文學家來說，這些光譜彷彿指紋，能夠看出天體的成分。皮爾切建議他用這個儀器觀察歐羅巴。

兩人原本以為，要從木星衛星取得可用的光譜，需要一週時間。「結果我1、2個晚上就得到了。」李奇威回憶道。他將數據分享給皮爾切，後者又將數據拿到指導教授麥科德（Tom McCord）看。他們的研究結果在1972年發表於《科學》期刊，指出歐羅巴地表至少有一半、甚



↑ 工程人員所面臨的難題，很多都跟能量有關，因為歐羅巴的日照只有地球的五分之一。為此，快艇號搭載了龐大的太陽能板，完全展開時長達30公尺。

至可能全數被水冰包覆。他們也證實，另外兩個體積比歐羅巴更大的衛星如蓋尼米德與卡利斯托，地表也覆蓋冰層。

一年後，在1972年3月發射的先鋒10號（Pioneer 10）飛行器，近距離行經歐羅巴，拍到一張照片。畫面雖然模糊，但留下許多討論空間，因此先鋒11號在1973年發射後，先行經歐羅巴，才照原訂計畫飛往土星與外太陽系。

但一直要到1979年，航海家2號（Voyager 2）飛行器在7月9日飛越歐羅巴後，它才開始成為各界焦點。航海家1號亦曾行經歐羅巴附近，但航海家2號回傳的照片更好，可看出平滑而明亮的地表，縱橫交錯著狹長條紋與低矮山脊，很可能是裂縫或懸崖。美國太空總署在1980年發表一篇說明這項觀察的報告，指出歐羅巴外觀彷彿「破碎的蛋殼」，還把它比喻成被氈頭筆弄髒的白色撞球。1983年，《自然》（Nature）期刊的一篇論文指出，這些特徵顯示歐羅巴有液態水，也會定期表層再造，有如天然的洗冰車（Zamboni），加深了各界對歐羅巴的興趣。

1989年，伽利略號發射升空，旨在研究木星大氣與歐羅巴等衛星的成分，卻遇到考驗：它的主

天線打不開，導致傳回地球的資料嚴重受限。但伽利略號在1995年抵達木星系後，傳回的資訊進一步凸顯出歐羅巴的驚人特徵，至今持續讓科學家振奮不已。「我們瞥見許多有意思的現象。」普羅克特說。

舉例來說，伽利略號的磁強計顯示，歐羅巴的磁場變化劇烈。冰是一種不良導體，而液態鹽水的傳導性佳，歐羅巴出現磁場震盪，顯示表層下方有東西在移動。這些數據符合專家推論，亦即：遍布歐羅巴的海洋受到木星與其他衛星的影響，被潮汐力又推、又拉、又加熱。數據也吻合更早前之的理論預估，也就是冰冷衛星的表層附近存在液態水。「我們很確定那裡有海洋。」普羅克特說：「但也有可能存在我們不了解的奇特現象。」她說，只有再去一次才能百分之百確定。

伽利略號的其他影像也證實了望遠鏡的長年觀測結果：儘管歐羅巴的年代久遠，但外表卻很年輕。它的形成時間可能跟木星與太陽系其他星體一樣，約莫在45億年前，但表層歷史（以最古老的隕石坑測算）不到1億年。「這對人類來說是很長的時間，」普羅克特說：「但從地質學的角度來看，等於是昨天才出生，表層非常年輕。」從歐羅巴的裂縫與縫隙可知，表層的巨大冰板或碰撞、或分裂、或擠壓、或重新凍結。

科學家觀察歐羅巴愈久，發現的謎題愈多，例如無所不在、經常成對出現的灰暗山脊，有如抽象派大師波洛克（Jackson Pollock）的畫作，噴濺在歐羅巴表面。對此，科學家不斷想找出背後的理論。或許，這些山脊是冰火山、冰間歇泉或表層裂縫的產物，因為液態水從地下水池升起、凍結，在噴口再度關閉時崩解。又或許，跟地球板塊構造的隱沒作用（Subduction）一樣，有塊龐大冰板沒入另一塊冰板下方而裂解。「我已經數不清有多少推測那些地貌的模型，但我們真的不知道形成的原理，」普羅克特說：「其中一個原因是，地質學是地球的地質學，但歐羅巴又跟地球不同。」

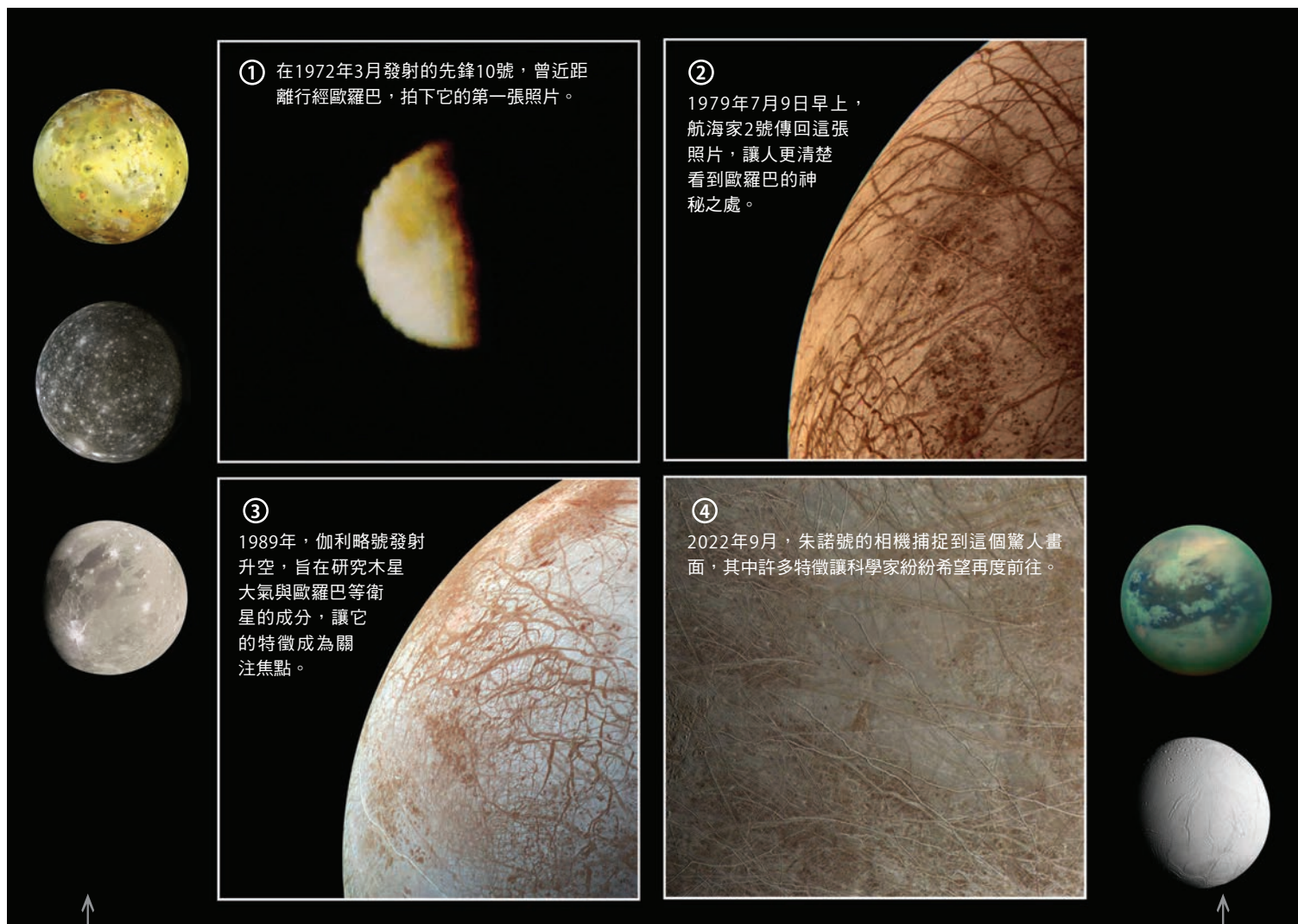
目前正在探索木星的朱諾號（Juno）飛行器，

相機在2022年9月拍到一張特別受到關注的畫面，其中許多特徵讓科學家紛紛想進一步觀察。畫面顯示歐羅巴始終面向木星的那一面，陽光普照。歐羅巴表層覆蓋著裂縫、條紋與山脊，地下海洋的水可能升起，又或者受到輻射的表層物質可能下沉。畫面也顯示「混沌地形」（Chaos Terrain），也就是地形異常雜亂，顯示有大塊冰層裂開、移動、重新凍結，進一步支持地質活動類似地球板塊構造的論點。

然而，朱諾號飛越歐羅巴才短短2個小時，大家還是不知道這些特徵的形成原因，也無法證實是否有

地下海洋。對行星科學家和天文物理學家來說，快艇號有助於補資訊不足之處，也能將我們與歐羅巴的關係推向全新領域。

先前幾次的探索任務都做到了一點，那就是讓大家更加有心推動前往歐羅巴的計畫。過去20年來，相關計畫出現戲劇化的轉變。科學家原本希望發射軌道飛行器與登陸器，而美國太空總署與歐洲太空總署也聯手合作，準備發射多艘太空飛行器。這些計畫都無疾而終，但美國在2011年發表《十年調查》（Decadal Survey）報告，針對



左：1614年，德國天文學家馬利烏斯提議將4個新發現的木星衛星命名為埃歐（上）、卡利斯托（中）、蓋尼米德（Ganymede）與歐羅巴（隔頁），靈感來自於宙斯的愛人。天文學家後續又發現91顆衛星，可能還有更多。

右：太陽系還有其他可能的適居地點，包括土星的 泰坦（上）與 恩塞拉達斯衛星。恩塞拉達斯的地表蘊藏液態水，冰冷的間歇泉會噴向太空。泰坦的地表富含有機分子，地殼下亦可能存在液態水海洋。



未來10年的太空探索訂下重點工作，連帶使得美國太空總署在2013年核准發射軌道飛行器的計畫。到了2015年，美國太空總署選定飛行器的搭載設備；另一方面，歐洲太空總署亦自行推動任務，但目標範圍更大，旨在研究木星的冰冷衛星。

「歐羅巴因為航海家號而徹底改變，從天空中的一個亮點變成地質世界，又因伽利略號而變成海洋世界。」在噴射推進實驗室主持一支歐羅巴快艇號團隊的地質物理學布蘭妮（Diana Blaney）說；該團隊負責使用測繪成像光譜儀，找出歐羅巴表面的分子。「希望快艇號能發現歐羅巴是個適合生命居住的世界。」她說。

近距離接觸

長久以來，研究人員不斷尋找太陽系的適居跡象，登陸器與探測車已在火星找到液態水與有機分子的證據，前者早已消失，後者通常是呈鏈狀或環狀的碳分子。生物有機體的組成部分（包括核酸和蛋白質）都含有碳基分子；正因如此，科學家發現有機分子時大感興奮。有機分子的存在，代表可能形成生命的前驅分子。

但光是這樣還不夠，外星物種還必須找到存活與成長的方法。這裡距離太陽太遠，有機體可能無法進行光合作用，因此必須借重化學能，如生存於海底黑煙囪（Black Smoker）與深海熱泉附近、以礦物質與甲烷為養分的嗜極微生物。

美國太空總署戈達太空飛行中心（Goddard Space Flight Center）的行星地質物理學家奎柯（Lynnae Quick）說，歐羅巴是否可能存在生命，關鍵在於它的地質物理。事實上，她認為兩者缺一不可。歐羅巴似乎蘊藏了生命的必要成分，但它等

於只是擁有了食材的廚房，這些成分並不會自行互相作用，有賴其他力量介入。歐羅巴必須受熱而移動擠壓，才能將海底礦物質和海水混合，以及和從冰層表面滲透而下的經照射分子混合。「必須要有一股力量來攪動，我覺得正是地質物理過程。」奎柯說。她求學時研究外星世界的冰火山作用，因而被太空總署網羅加入快艇號計畫。她尤其感興趣的是，冰層表面下有機會發現幾處溫暖鹹水，可能蘊藏生命。

「歐羅巴是我最愛的太陽系星體。」奎柯坦誠，但指出其他海洋世界也可能存在生命跡象。恩塞拉達斯（Enceladus）即是一例，這顆小型的土星衛星跟歐羅巴一樣，表面是冰層，底下是一片海洋。根據2005年卡西尼號（Cassini）任務傳回的畫面，恩塞拉達斯南極的間歇泉將海水與有機分子噴向太空，注入最外圈的土星環。

然而，歐羅巴的體積比恩塞拉達斯更大，地表也更有可能是覆蓋著冰板，移動方式類似地球板塊，有助於混合生命成分。身為木衛衛星、也是太陽星最大衛星的蓋尼米德，同樣可能有液態海洋，但夾在兩個冰層之間；海水與礦物質少了介面，就比較不可能有生命。其他可能存在生命的地方包括泰坦（Titan），亦即土星的最大衛星，表面冰層下亦可能潛藏液態海洋。太空總署預計在2028年啟動蜻蜓號（Dragonfly）任務，前往探索泰坦，由奎柯擔任主持人。

為了尋找適居的跡象與訊號，快艇號將使用9項主要設備，負責拍攝表面照片、尋找水柱，使用透地雷達測量冰層與尋找地下海洋、精準測量磁場等。

快艇號的行經路徑將接近歐羅巴，探測它的稀薄大氣；如果在那裡找到氣體，還會使用質譜法判別氣體分子。因為隕石衝撞會把表面塵埃打到大氣，科學家會使用另一項設備分析塵埃。幸運的話，科學家能夠判斷出塵埃的出處，可能來自地底的封閉海洋或結

木星的輻射有可能干擾每一次測量，將有意義的訊號變成數位雜訊，就像電視螢幕雜訊一樣。



↑ 2023年4月，歐洲太空總署發射木星冰月探測器，前往探索木星幾個蘊藏海洋的衛星。2032年7月，它將兩度飛越歐羅巴，距離地表400公里。

冰湖泊，也可能來自天上，就是鄰近的衛星埃歐發生劇烈火山爆發，導致煙塵飄過來。不管是哪種情況，行星地質學家都有興趣知道，但如果塵埃含有有機分子，又來自地下，就有助於證明那裡有生命存在。

歐洲太空總署的木星冰月探測器計畫也搭載類似設備，歐美2支科學團隊定期會面，計畫如何在未來聯手研究數據，相關數據將於5、6年後開始出爐。「這對行星地質學界是一大福音。」任教於義大利特倫托大學（University of Trento）、主持木星冰月探測器計畫雷達工具團隊的電信工程專家布朗佐（Lorenzo Bruzzone）說。他長年參與相關計畫，推動近距離探測歐羅巴與其他木星衛星。

布朗佐說，木星冰月探測器計畫還會前往其他含有海洋的伽利略衛星，因此能夠與快艇號整合數據，更全面了解所有海洋世界的地質過程與潛在適居條件。「我們可以分析地下地質的差異，深入了解木星系的演變。」他說，例如為何有3顆是冰冷的衛星，埃歐卻彷彿火山地獄。

為了確保儀器抵達後運作無虞，這兩項任務的工程與設計人員克服一連串考驗，許多都跟能量有關。歐羅巴的日照只有地球的五分之一，因此快艇號搭載了龐大的太陽能板，完全展開時長達30公尺。先前的歐羅巴任務曾提議使用核電池，但礙於成本高昂，最終遭到放棄。

此外，木星的磁場強度是地球的1萬倍以上，加速在它周圍的高能粒子，形成強烈的輻射環境，有可能干擾每一次測量，將有意義的訊號變成數位雜訊（就像電視螢幕雜訊），也可能損壞設備。

為了降低輻射破壞速度，快艇號在2030年抵達時，並不會繞行歐羅巴，而是要花4年時間飛越約50次，時而接近、時而遠離具有破壞力的輻射場，離歐羅巴表面最近的距離只有16哩。快艇號的取名來自於19世紀的帆船，但也適合形容這段旅程的靈活性。快艇號將一次又一次飛越歐羅巴，其他時間拉長了與木星的距離，因此能夠傳送數據回地球。

首批數據讓科學界等了幾十年，說是幾百年也不為過。有些人在幾十年前為歐羅巴探測任務打下基礎，如今已經離世。麻省理工學院的馬克里斯說，科學界當年開始討論如何前往歐羅巴時，提出並大力推動相關任務的行星地質學家兼美國太空總署顧問葛里利（Ron Greeley）曾對他說，太空旅行需要幾個世代的時間。「他說這個過程好比打造大教堂。」普羅克特說，等到快艇號傳來數據時，她已經快70歲了。「等於我的職場生涯都圍繞在快艇號。」普羅克特說。現年39歲的奎柯，是這支科學團隊中最年輕的成員之一。

許多參與快艇號計畫的科學家如帕帕拉多、普羅克特與奎柯，已經在規劃如何利用研究成果，推動未來探索其他世界的計畫。但現階段而言，最有希望還是歐羅巴。

帕帕拉多想到可能在歐羅巴找到剛好適合生命生存的地帶，不禁興奮起來。「說不定會發現有個像綠洲的地方，用熱像儀測到高溫或溫暖的地點。」他說。

帕帕拉多說，他希望快艇號最終能找到足夠證據，讓科學界有一天願意發射登陸器到歐羅巴。透過這次任務的觀察結果，科學家也可能知道能在何處登陸：「要是我們找到覺得有必要前往的地方，我們會取出一些地表之下的成分、用顯微鏡觀察，並放進質譜儀，而下一步，就是尋找生命的跡象。」■

歐尼斯是科普作家，居住在田納西州納什維爾。

Copyright©2024, Technology Review.
All Rights Reserved.