

文/ 賴彥霖

水是生命形成的最重要的元素之一，科學家們不遺餘力地在太陽系中尋找生命存在的可能性，歐洲太空總署的木星冰月探測器Jupiter Icy Moons Explorer (Juice) 的首要目標便是探查木星三顆被冰雪覆蓋的冰質衛星，分別是木衛二歐羅巴、木衛三甘尼米德和木衛四卡利斯多，在冰層之下可能存在著液態水，也就是有地下海洋的存在。木星冰月探測器已經在今年（2023年）4月14日於法屬圭亞那的發射站成功發射，預計將於2031年抵達木星系統進行探測。

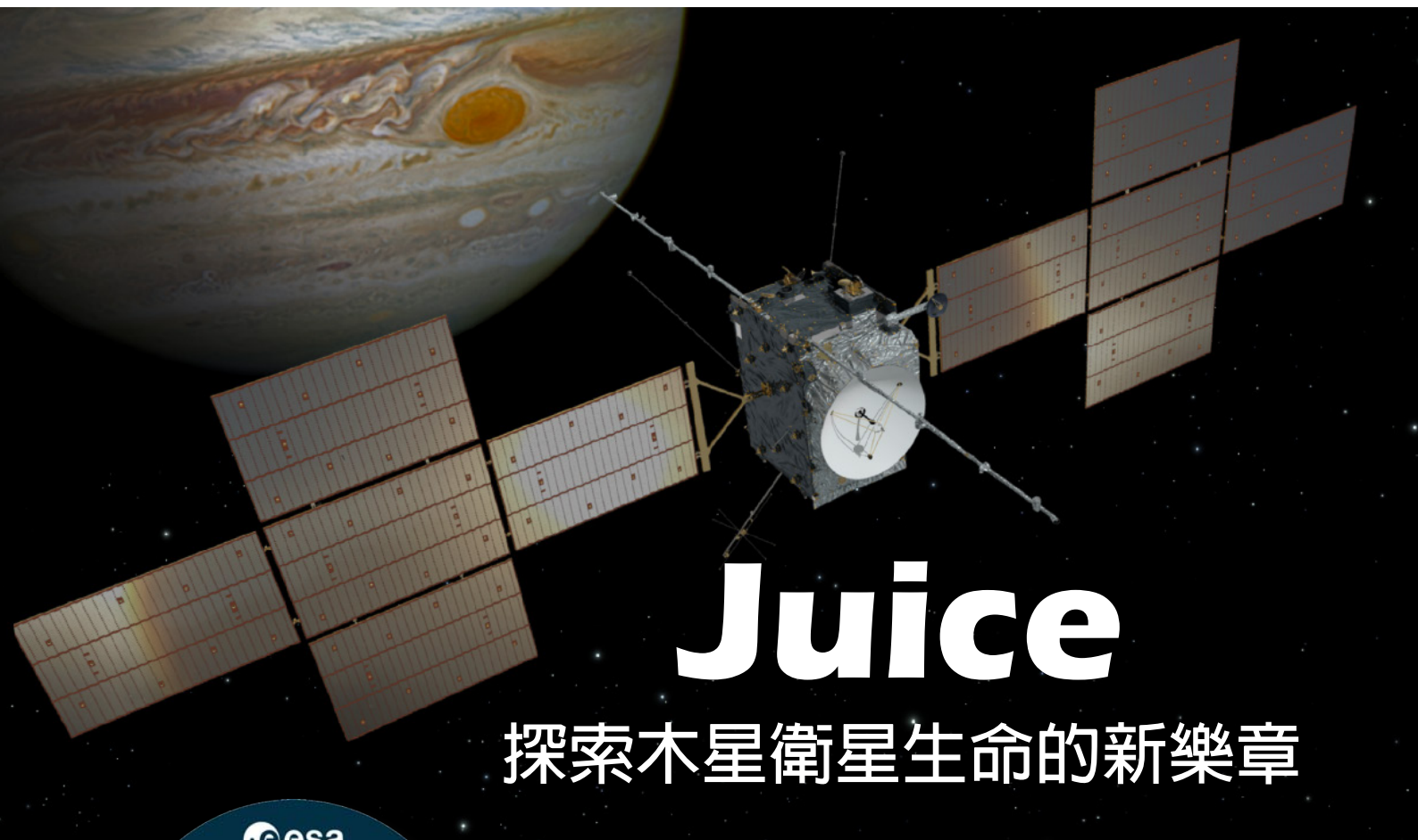


圖1. 木星冰月探測器。圖片來源：ESA

4顆衛星，4個世界

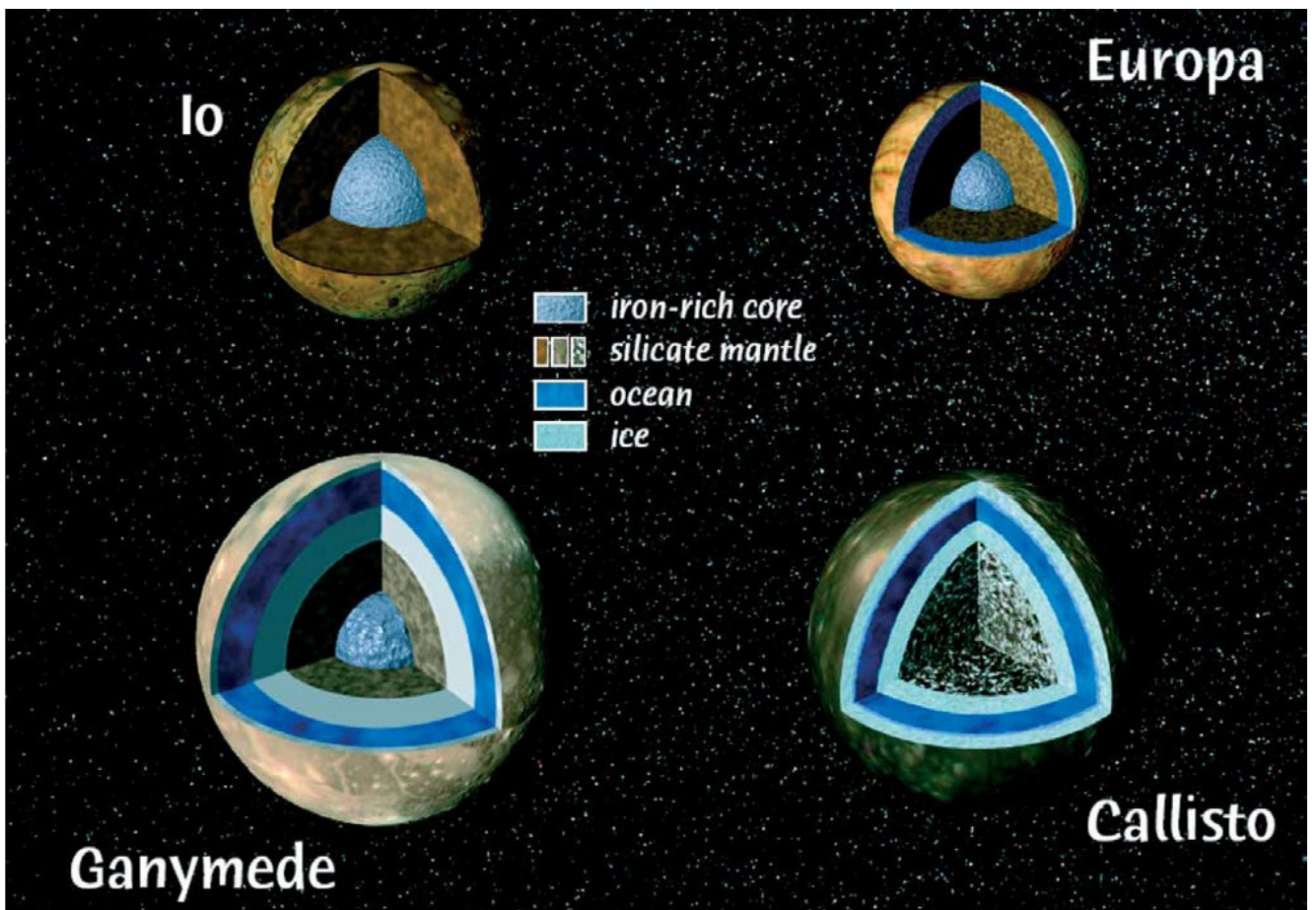
太陽系中最大行星——木星，擁有超過九十顆以上的衛星，也是目前太陽系中擁有衛星數量第二多的行星，在這眾多的衛星中最大的4顆衛星，由義大利天文學家伽利略在1610年所發現，因此又稱之為伽利略衛星（圖2）。其繞行木星的軌道由近到遠分別是埃歐、歐羅巴、甘尼米德和卡利斯多，有著1:2:4:8的軌道共振週期，及非常不同的表面特徵，但根據近年來的理



論模型研究，除了埃歐有地下岩漿帶以外，其餘3顆皆有可能存在地下海洋，圖3為伽利略衛星的內部構造理論模型示意圖，這些地下海洋大大增加了原始生命存在的可能性，木星冰月探測器任務正是以此為目標而前往。

圖2. 木星與伽利略衛星，由上而下分別是：木衛一埃歐、木衛二歐羅巴、木衛三甘尼米德和木衛四卡利斯多。圖片來源：NASA

圖3. 伽利略衛星的內部構造理論模型。圖片來源：Stoin and Tobie (2004)



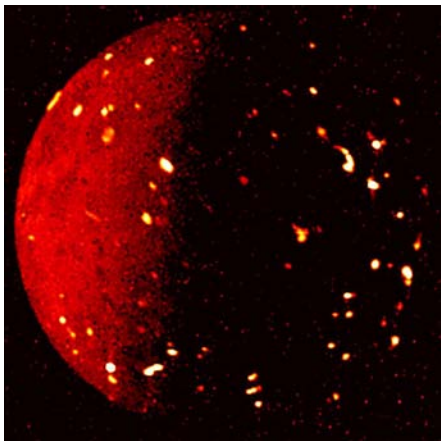


圖4. 朱諾號拍攝到埃歐表面上的火山高溫亮點。圖片來源：NASA

木衛一埃歐是其中離木星最近的伽利略衛星，有著全太陽系中最活躍的火山活動，表面上覆蓋著黃褐色的火山噴發物，由於埃歐的日夜溫度變化，這些由火山噴發出來堆積於地表的硫化物，在日間昇華到大氣中，並在夜晚凝固於表面，埃歐的大氣主要是由這些火山所噴出的氣體所組成。埃歐火山所噴出來的大量物質，影響了整個木星的磁層，這些物質經過電子撞擊或是光解離之後主要產生了例如硫離子、氧離子、氫離子和電子之類的帶電粒子，這些帶電粒子在木星的磁層裡面經過加速後成為高能量的粒子，充滿了整個木星磁層，並有機會撞擊其他衛星表面，與其他衛星產生交互作用。

雖然木星冰月探測器目前並沒有安排飛越埃歐的計畫，但埃歐對木星磁層與其他衛星的影響是不可忽視的。圖4是朱諾號太空船用紅外線相機拍攝的埃歐地表照片，照片上的亮點表示溫度較高的位置，也是埃歐上的火山口，顯示了非常劇烈的火山活動。

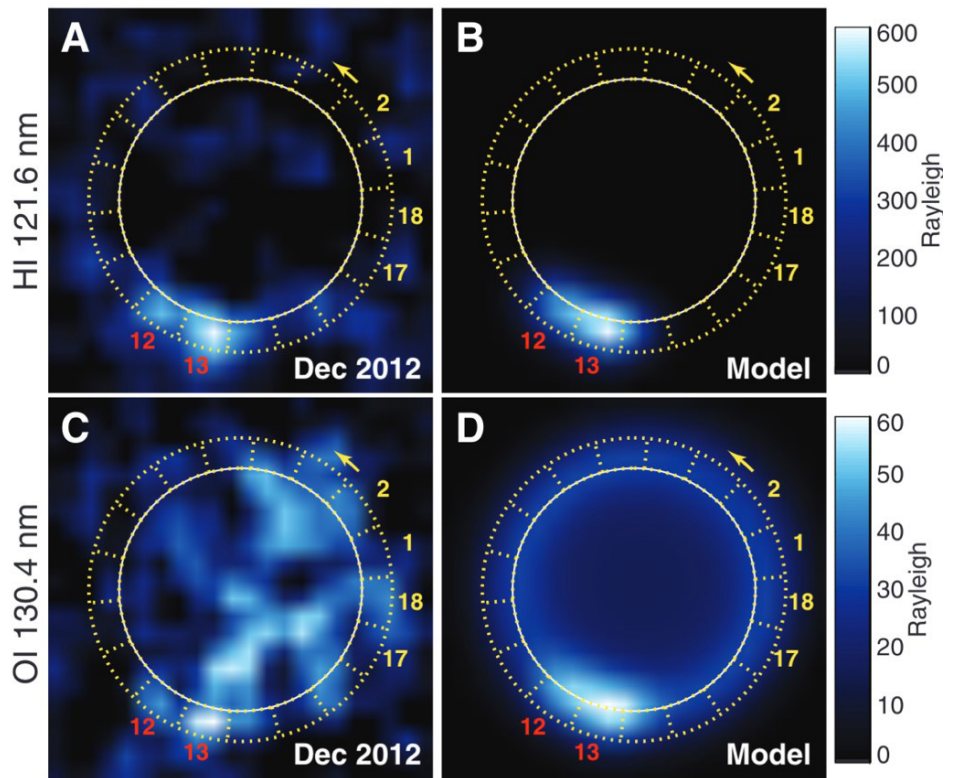


圖5. 哈伯望遠鏡在2014年12月觀測到歐羅巴上的間歇性氣體噴流，並與右方的模型比較。圖片來源：Roth et al. (2014)

木衛二歐羅巴表面覆蓋了約數十到數百公里厚的冰層，表面並沒有很大的高低起伏，也幾乎沒有什麼隕石坑，表示地形較為年輕，圖2照片中表面的細紋是因反照率的差異而形成，同時也是地表上些微高低差，表面冰層因受到木星的潮汐力作用而產生的冰層裂隙。另一個有趣的發現是，科學家利用哈伯太空望遠鏡在2012年觀測到歐羅巴上間歇性的水氣噴流，或稱之為冰火山，如圖5，類似的現象其實在土星的衛星土衛二上也有發現，但土衛二的南極是一個持續性的噴流，而歐羅巴上卻是間歇性的氣體噴流。

哈伯望遠鏡並不是直接觀測到水氣，而是觀測到水分子分解後的激發態氧原子，這項重大的

發現讓我們更加相信歐羅巴地下海洋的存在，這些水氣噴流可能與地下海洋連結，見圖6，要直接探測在冰層下數十公里的地下海洋成分並不容易，但這些海洋中的物質有可能會隨著噴流而到衛星表面，讓我們能在噴流中或是附近地表找到地下海洋中的物質，一窺地下海洋的奧秘。

木星最大的衛星是木衛三甘尼米德，同時也是太陽系中最大的衛星，其半徑約有2,600公里，大小甚至比水星和冥王星還大。其表面主要由一半水冰和一半岩石組成，大致分為兩個區域，較亮、較年輕的山脈區域和較暗、較古老並布滿條紋的地形，因此科學家認為甘尼米德地表有受到板塊運動的影響。

甘尼米德也有一層稀薄的大

氣，與歐羅巴類似，大氣中主要的成分是氧氣，都來自於木星高能粒子打擊到表面的濺射物。甘尼米德最特別的地方是它具有自己的磁矩，換句話說，甘尼米德具有來自本身的磁場，因此會產生條狀極光帶，圖7中顯示了甘尼米德的極光帶。近年來科學家利用哈伯望遠鏡的紫外光波段觀測，經由理論模型的計算，當木星磁場變化與甘尼米德本身磁場作用，會造成極光帶的搖擺，但若有地下鹹水海洋的存在，會讓極光帶搖擺的幅度下降，從6度減少到2度，進而推論在甘尼米德地表下150公里處，很可能有個深度約100公里的地下海洋存在。

伽利略衛星中離木星最遠的是木衛四卡利斯多，其表面物質主要由岩石和水冰組成，不像其他伽利略衛星一樣有火山、冰火山或是活躍的板塊運動。卡利斯多表面地形年齡非常古老，布滿了非常大量隕石坑，且隕石坑數量已經接近飽和，根據先前伽利略太空船的觀測資料，科學家們推測地下海洋存在於離地表250公里的深處，但近年研究顯示其海洋存在的位置可能比預期的還要深或是不存在，卡利斯多也有著稀薄的大氣，其主要成分為二氧化碳和氧氣。

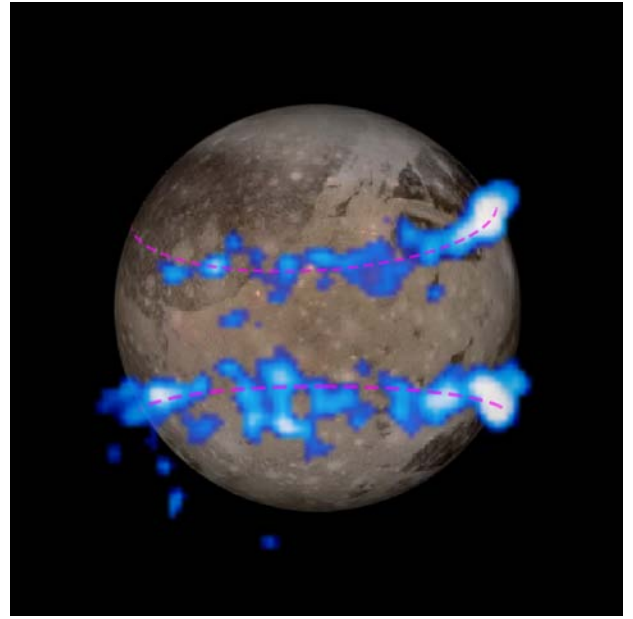


圖7. 哈伯望遠鏡觀測到甘尼米德上的極光帶。圖片來源：NASA

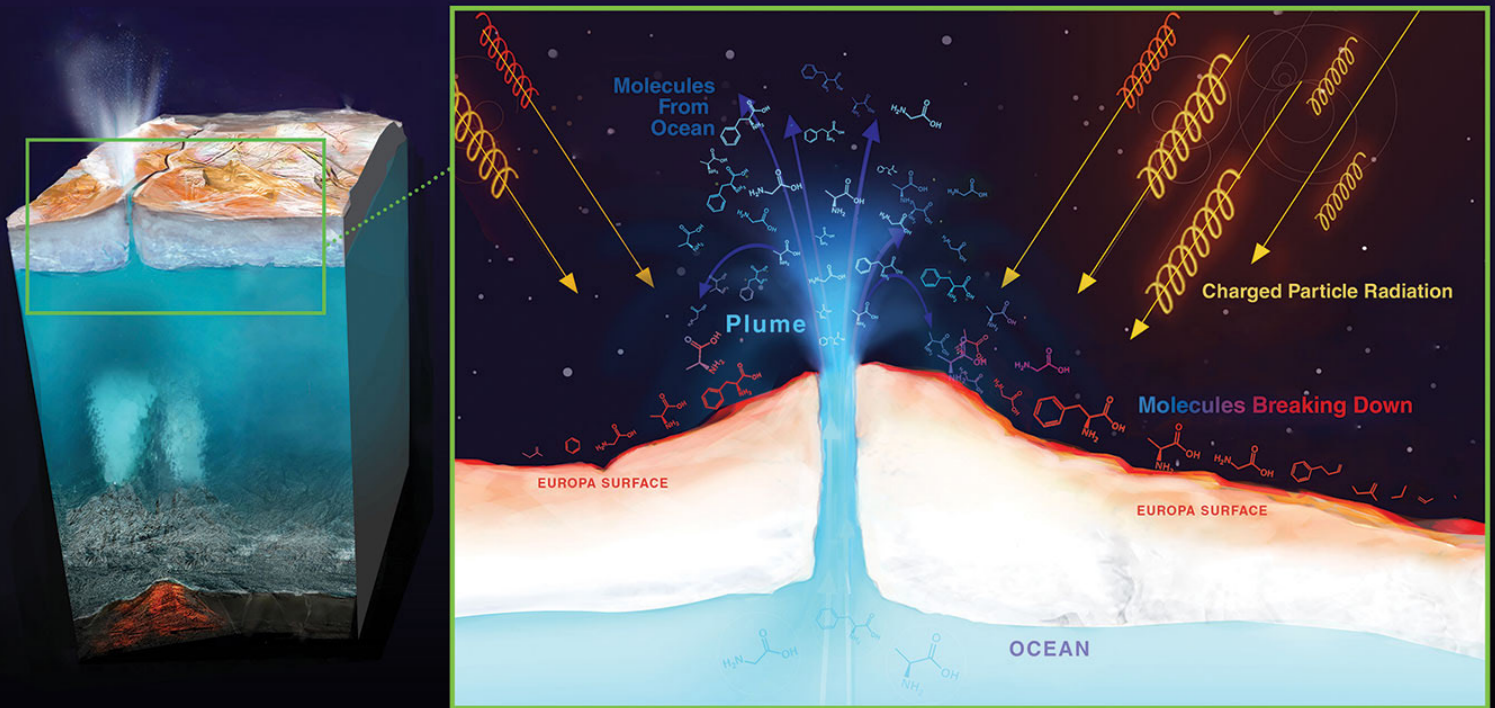


圖6. 歐羅巴地下海洋與水氣噴流的連結。地下海洋中的物質經噴流而散落在歐羅巴表面，再經過高能粒子輻射後形成現今歐羅巴地表物質。圖片來源：NASA

木星冰月探測器上的科學儀器

木星的冰月探測器搭載了11個主要的科學儀器，專門用來觀測木星的周圍環境以及木星的衛星。以下是每個儀器的簡單介紹和功能：

可見光學照相機 (JANUS)：這座高精度光學照相機，主要用於拍攝可見光範疇的影像，提供我們對木星和其衛星清晰的影像。

可見光與紅外線光譜儀 (MAJIS)：測量衛星表面溫度，並對紅外波段進行測量。

紫外光攝譜儀 (UVS)：測量紫外光波段下的頻譜，提供紫外輻射的重要數據。

亞毫米波儀器 (SWI)：測量亞毫米波段下的頻譜，根據不同分子在特定機制下釋放的固定波長，我們可以從中推測附近環境的狀況。

雷達聲納 (RIME)：一種利用雷達波來探測地表下科學資料的裝置，至多可以探測到地表以下9公里深度的冰層。

行星電波干涉與都卜勒儀器 (PRIDE)：量測木星及其衛星的重力場變化。

雷射高度計 (GALA)：利用雷射來測量木星衛星表面的地形和高度分布。

重力電波實驗儀器 (3GM)：主要功能是觀測環境的重力場，以確定是否存在地下海洋，並提供太空船軌道修正的數據。

磁力計 (J-MAG)：測量太空船周圍環境的磁場大小和方向。

粒子環境測量儀器 (PEP)：收集氣體分子，並分析氣體之成分和濃度，使我們對木星及其衛星環境有更深入的認識。

無線電與電漿波儀器 (RPWI)：測量無線電波和木星的電漿環境，對我們了解木星的磁層至關重要。

JUICE'S SCIENCE INSTRUMENTS

Juice will carry ten state-of-the-art instruments, including the most powerful remote sensing, geophysical and in situ payloads ever flown to the outer Solar System. Nine of the instruments are led by European partners, and one by NASA. Juice also includes an experiment called PRIDE, which will perform precise measurements using radio telescopes on Earth.

● In situ instruments ● Remote sensing instruments ● Geophysical instruments ● Experiment

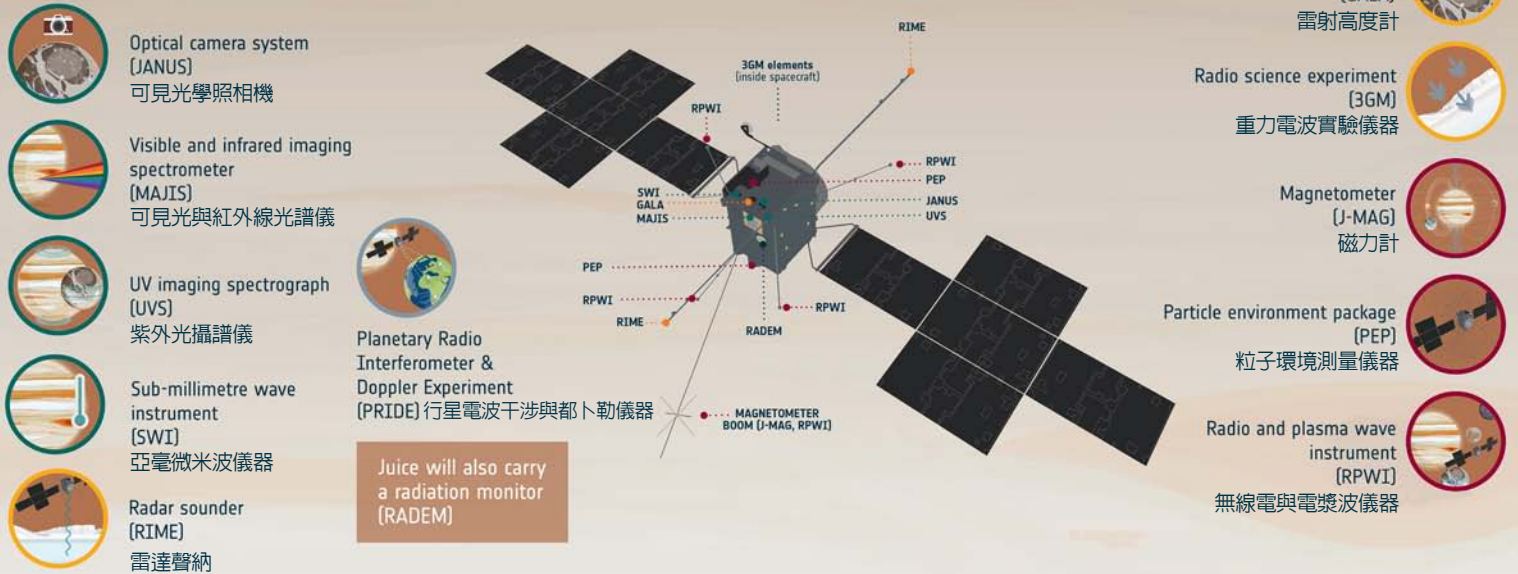


圖8. 木星冰月探測器上的主要科學儀器。圖片來源：ESA

JUICE MISSION MILESTONES

The main Juice mission milestones are listed below. Dates are approximate and more information will be provided via ESA's website (esa.int) and social media channels (Twitter: @ESA_JUICE) once details are confirmed.



圖9. 木星冰月探測器的時間表。圖片來源：ESA

木星冰月任務 時程與未來

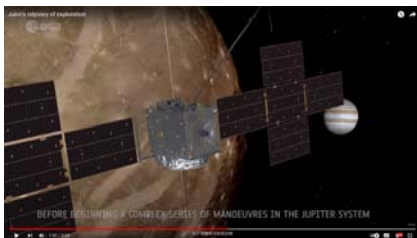
木星冰月探測器任務是歐洲太空總署未來10年最主要的太空探索計畫，本次飛往木星旅程需耗時8年，太空船於今年發射後，探測器還需要依靠兩次地球和一次金星的重力助推，預計於2031年抵達木星系統。之後的任務至

少需要兩年半的時間來觀察木星及其冰質衛星，並且將飛越木星的冰質衛星35次。在2034年，太空船將進入繞行木衛三甘尼米德的軌道，並進行離地表500公里的近距離觀測，以研究甘尼米德的稀薄大氣並搜集其他科學資訊。同時，美國太空總署的歐羅巴快船（Europa Clipper）也計畫於2030年抵達木衛二歐羅巴進行觀測。

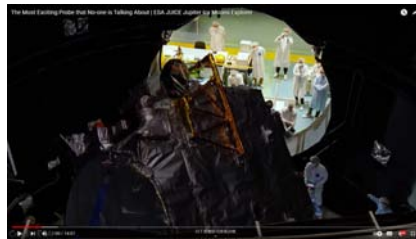
探索木星的冰質衛星，不僅只是為了尋找可能存在的生命，由於冰質衛星提供了豐富的水資源，因此被視為人類繼火星之後的潛在登陸目標。這兩個具有里程碑意義的太空任務，將提供我們深入了解木星系統及其衛星的寶貴的機會，就讓我們拭目以待吧！

賴彥霖：中央大學天文研究所
博士後研究員

YouTube相關影片：



Juice's odyssey of exploration
<https://www.youtube.com/watch?v=Eq8ZQO9h3D8>



The Most Exciting Probe that No-one is Talking About | ESA JUICE Jupiter Icy Moons Explorer
<https://www.youtube.com/watch?v=HDWb2rK72kk>



Juice launch to Jupiter
<https://www.youtube.com/watch?v=MvHcGmQPcsI>