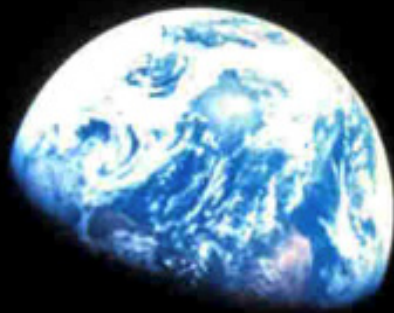


月平面升起的地球，被陽光照亮的第三顆行星，1986年阿波羅8號自太空中回望著人類的故鄉，這裡有著陽光、空氣、水，獨特的環境和條件，加上一個不簡單的開始，在地球上那藍色海洋啟動了生命的序章。



# We are hunting for water 宇宙中的水

水以氣態、液態與固態存在在地球中的71%，打從生命誕生之際，水就在地球上許久，水之於生活就跟呼吸一樣地自然，但地球上的水，是打來的呢？

常說生命的三要素，陽光、空氣、水，要有能量的來源、取得能量的媒介，還要有能夠穩定能量轉換化學反應的環境：水，在地球上的第一把交椅非它莫屬。水號稱萬用溶劑，能夠溶解許多不同物質，且表面張力形成一層膜，保護水中的物質。其分子成角型結構，所具有的氫鍵讓水不容易改變型態，平時取用以液態形式最為常見。而液態存在的溫度範圍廣，適合用來調節溫度，若要改變型態得要外加能量幫忙，好比是水要沸騰就得加熱，要結凍得放入冰箱的冷凍庫。結冰後的水反而體積大密度小，而能浮在水面，使得冰下的世界可以保持攝氏四度C，讓生命在寒冷環境保有發展的機會。

水的化學式H<sub>2</sub>O，有氫有氧組成簡單的形式，這兩個元素在太陽系常見嗎？從宇宙中因大霹靂產生最基本的元素氫開始，恆星作為一個天然的原子製造工廠，藉著核融合反應將氫轉變成複雜的原子（直到鐵）。太陽的元素豐富度（圖2）顯示以氫

跟氦為最大宗，再來為氧和碳，元素數量夠多又容易形成。

水若要以液態形式存在，不要被汽化也不要結凍，得要離熱源不多不少恰恰好的位置。行星的平衡溫度與恆星距離平方根成正比，離暖爐越近越熱，離得越遠越冷。八大行星距離太陽一字排開，平衡溫度跟實際溫度相比之下，略有落差，且個體間亦有差異，原來是還需考慮大氣層的保溫效果和大氣壓力才是實際溫度。水星距離太陽太近溫度太高；而地球的姐妹金星，則是因大氣層佔多數的溫室氣體跟莫大的大氣壓力，不利於液態水的存在。火星大氣以95%二氧化碳為主，亦有少量0.03%的水，然而在稀薄大氣環境之下，液態水不易存留，常以水蒸氣或結冰形式出現。地球大小與質量而有的重力環境，剛好地抓得住液態水，有好的環境有好的開始。這些特殊的條件梳理出適合居住區域（適居區）的樣貌，也是系外行星尋找超級地球的重點，一個能夠讓液態穩定存在的環境範圍。

然而水是一開始就在地球上嗎？還是從太陽

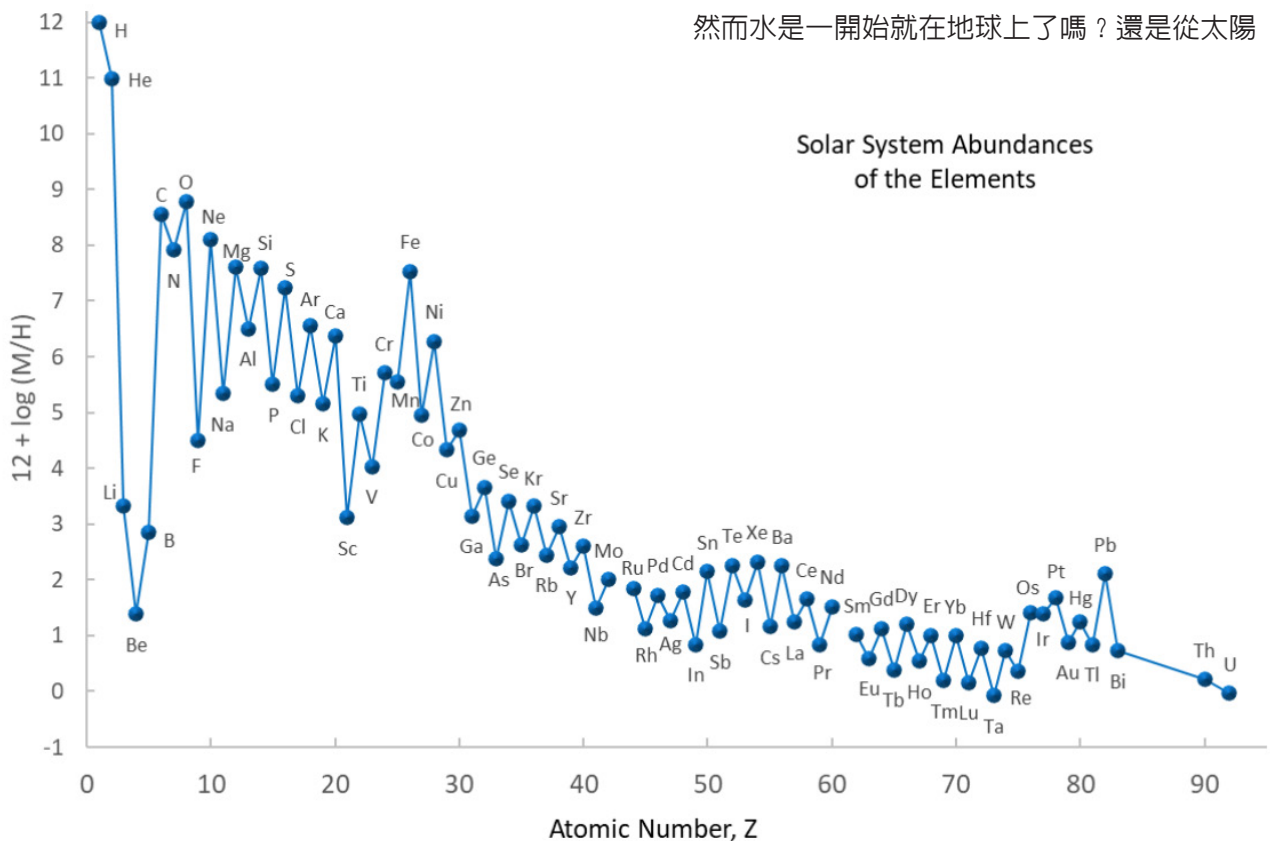


圖2. 太陽的元素豐富度。 圖片來源：<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019arXiv191200844L/abstract>

系其他地方被運過來的呢？根據恆星與行星形成理論，從星雲到原恆星，恆星點燃核融合反應成主序星後，周圍原行星盤上的氣體與塵埃依舊繞著恆星旋轉，塵埃與水冰也因重力吸引彼此抓（撞）在一起，逐漸形成行星系統。地球初生之際，環境溫度炙熱，原始大氣層也尚未形成，沒有大氣層的保護，水蒸氣更容易溢散到太空中。然而現今地球上的水，到底從何而來？

地質學角度的推測，地球上的水可能是早期地函內的水在地球冷卻時慢慢釋出。行星的形成基於太陽的誕生，因此地球的地質時間尺度應該要與太陽系的年齡相當。自從發現了放射性元素地質定年法有了突破性的進展，地球上的古老岩石拿來用地質定年技術測定，除了估計地質年齡之外，還可以更細節知道地函與地殼變化，像是在橄欖石內部發現含有比現在海洋地殼的玄武岩更高比例的鎂與鐵，表示地球形成初期的溫度極高，地殼處於不穩定的高溫環境。而冷卻的時間點，則是在鋯石沙粒中發現，是地球上最古老（約四十四億四千萬年）的岩石，其身上的微小氣泡還留有當時的大氣組成，科學家分析其中氧同位素，發現地球表面在當時就有液態水，地球冷卻用了兩億年從融熔狀態降到攝氏100度C以下。

一個沒有大氣沒有風化作用的環境，表面物質可以保留原始樣貌，像是阿波羅計畫從月亮上帶回的岩石，線索就藏在這些未風化的月岩裡。月亮上的岩石也發現了含水的證據，顯然這些在太陽系形成初期水早已存在，當地球冷卻到沸點之下，液態水就此形成。這些岩石樣本不僅提供太陽系誕生與地球形成初期水存在的證據，輔以其他礦物質的成分比例，也進一步解密了月球的誕生。

若水是太空運來的，小行星與彗星這兩大類能移動的天體為首要可能目標，特別是他們皆從雪線（snow line）之外寒冷冰凍的環境飛來。現在太陽系的雪線約落在小行星帶，距離太陽2.7AU的地方。科學家們分析研究各種類型太陽系小天體，推測近地小行星是從小行星帶遷移而來，因此地球實則在小行星流彈中求生存。偶爾會有意外闖入掉落到地表的隕石，像球粒隕石就保有在太陽系形成之初，尚未發展行星時的古老訊息，裡頭的礦物質表示太陽系早期階段溫度極高，不利於物質凝結。特別讓人感興趣的是它還帶了有機物與數種氨基酸，且重水（ $D_2O$ ，D為氘是氧的同位素）比例接近地球的重水比，這或許就是地球生命的源頭也說不定。羅賽塔計畫歷經十年，飛向以冰與塵埃所組成的髒雪球，與彗星直接接

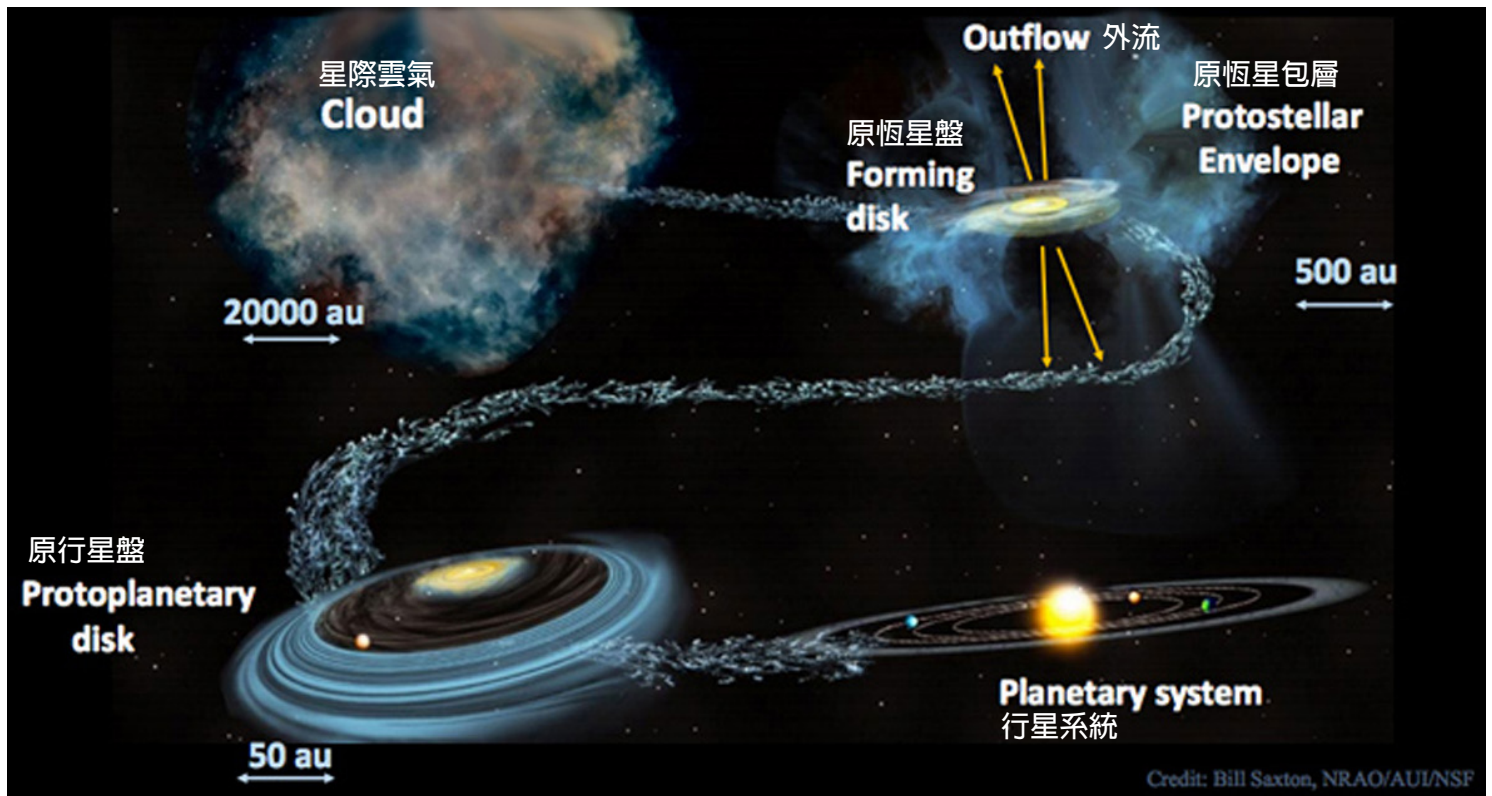


圖3. 行星形成模型。 圖片來源：astrobiology



觸，然而從67P/Churyumov–Gerasimenko彗星的樣本得知彗星上的重水比地球海洋重水多了三倍以上，因此地球海洋的水是否為彗星帶來，還留下了許多問號。

除了地球之外，太陽系還有哪裡有水呢？近年太空探索的當紅炸子雞，屬火星最廣為人知，至今火星探測任務接力地協助科學家探索火星環境。從土壤岩石的分析得知火星過去的地質歷史與大氣演化，而許多對火星地貌的特徵，可看出火星曾經有大量的液態水。雖現今火星環境對液態水穩定存



圖4：墜落於墨西哥的Allende碳質球粒隕石，年齡約為45億年，內有許多球狀小顆粒且多孔結構，並含有大量的水和有機物。右側為1立方公分的比例尺。由Matteo Chinellato 提供。圖片來源：rocketstem

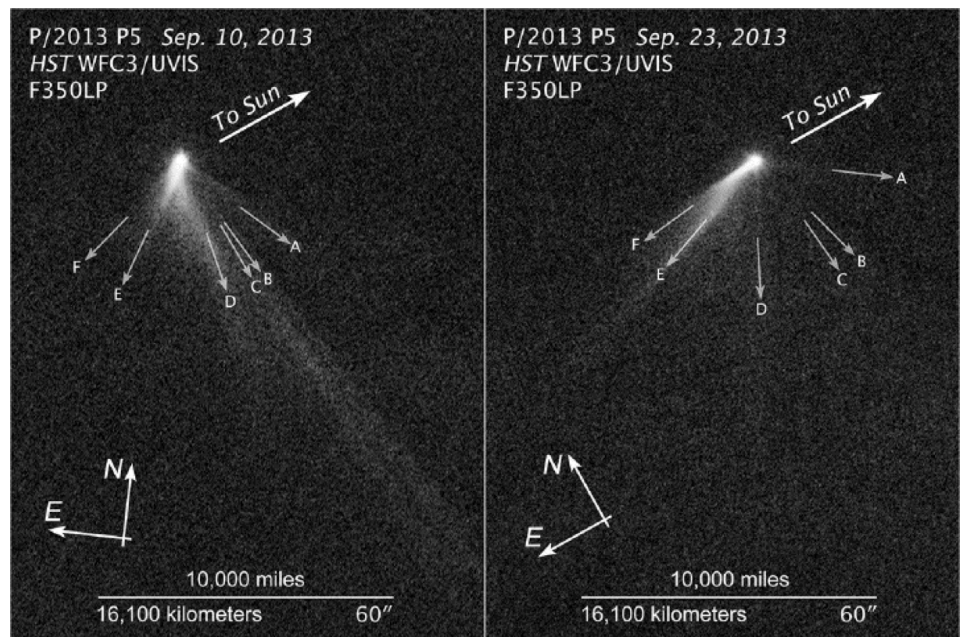


圖5. 公轉軌道於小行星帶外側的活躍小行星 P/2013 P5 在2013年9月時的觀測，因含有揮發性物質，有如彗星般彗髮彗尾的樣貌（編號A-F）（David Jewitt et al. 2015）。

© The SAO/NASA Astrophysics Data System

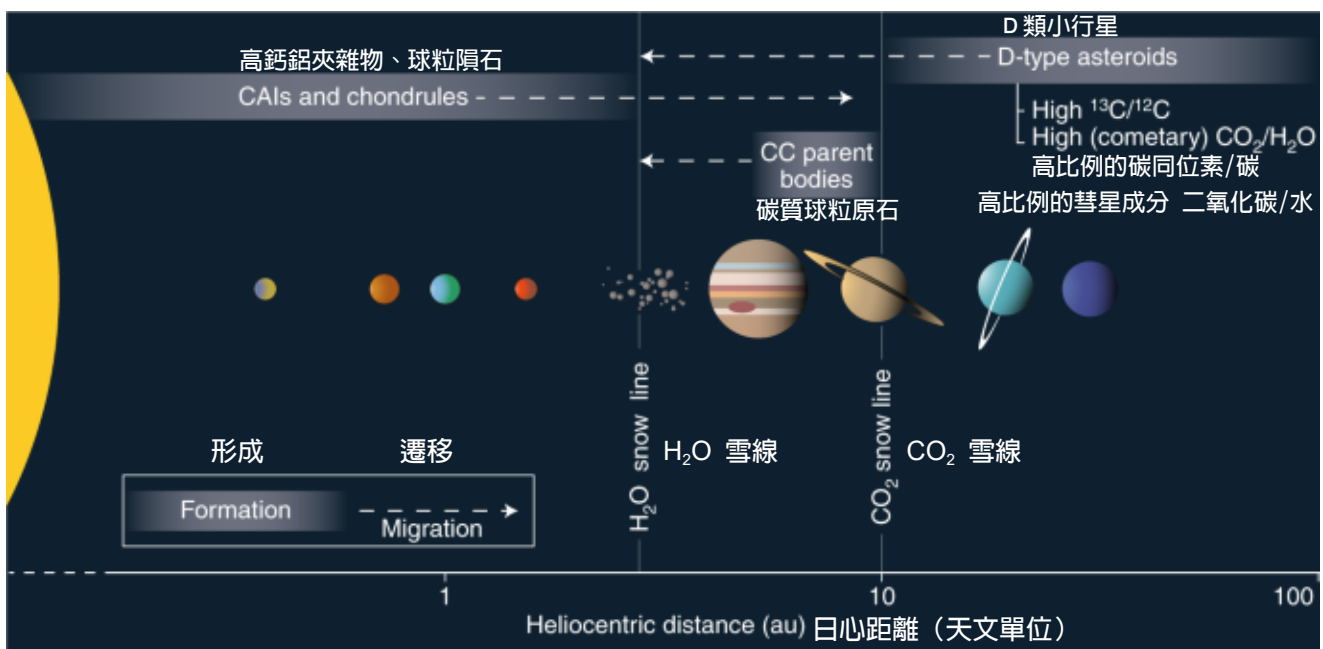


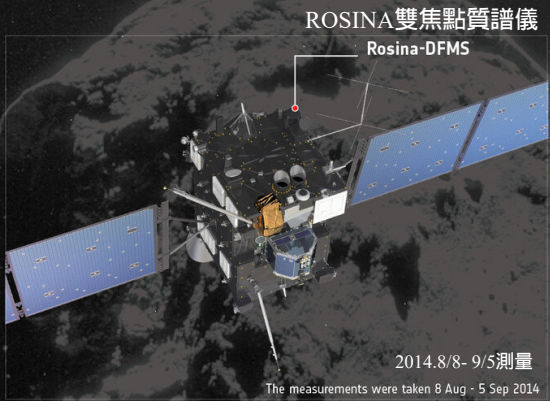
圖6. 現今太陽系水的雪線位置落在小行星帶。太陽系形成初期的各種早期物質形成區域，經過遷移至小行星帶。

圖片來源：Springer Nature



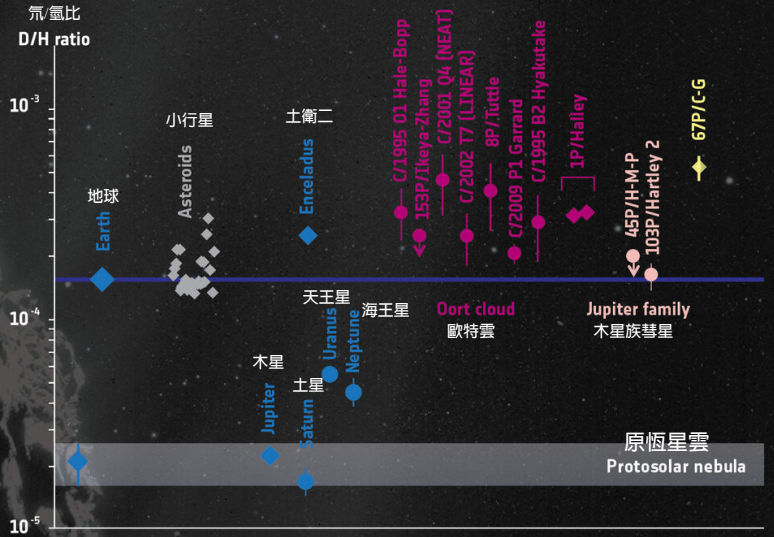
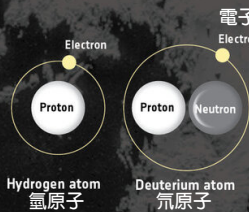
Rosetta's ROSINA instrument finds Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko's water vapour to have a significantly different composition to Earth's oceans.

羅賽塔號的ROSINA質譜儀發現彗星67P/Churyumov-Gerasimenko的水蒸氣與地球海洋的成分明顯不同



水中的氘氫比例為關鍵，以判斷太陽系物質原生位置，與地球上的海洋是由小行星及彗星貢獻可能性。

The ratio of deuterium to hydrogen in water is a key diagnostic to determining where in the Solar System an object originated and in what proportion asteroids and comets may have contributed to Earth's oceans



D/H ratio for different Solar System objects, grouped by colour as planets and moons (blue), chondritic meteorites from the Asteroid Belt (grey), comets originating from the Oort cloud (purple) and Jupiter family comets (pink). Comet 67P/C-G, a Jupiter family comet, is highlighted in yellow. ◆ = data obtained in situ ● = data obtained by astronomical methods

太陽系成員們的氘氫比，藍色為太陽系行星及衛星，灰色為小行星，紫色為從歐特雲來的彗星，粉色為木星族的彗星，黃色為67P。方塊表示資料來源為就地樣本取得，圓形表示資料由天文科學方法獲得。

www.esa.int

Spacecraft: ESA/ATG medialab; Comet: ESA/Rosetta/NAVCAM; Data: Altwegg et al. 2014 and references therein.

European Space Agency

圖7. 羅賽塔計畫測量67P彗星水蒸氣中氘氫比。圖表為太陽系成員們的氘氫比，顯示67P彗星的重水比與地球海洋明顯不同。© ESA

在的條件不如地球，但近年密集地探索與了解，對於未來人類移民火星所需要的民生物資或是燃料使用，依然具有可看性的展望。

木衛二Europa的地面觀測已知其表面主要成份為水冰，自從有了哈伯太空望遠鏡的觀測、航海家飛掠和伽利略號的近距離量測，知曉其地貌不僅有固態水冰的交錯裂紋，還有水汽羽狀噴發，科學家對於木衛二具有海洋可謂信心大增。木衛二的體積比月球略小，其豐富的含水量卻是地球海洋的兩倍；而在量測木衛二的磁場發現，其水具有明顯的導電現象，稱呼為鹹水海洋更加精確。加上環繞於木星的軌道上所獲得的潮汐力，加熱海底下的岩層溫度，讓木衛二的地貌活動更加活躍。

航海家經過土衛二時發現，其具有年輕地表特徵，多數光滑的地表，表示土衛二的地質活躍能時常更新。近年在卡西尼號近距離多次飛掠探訪，這些發現變得更立體，分析了許多特徵年輕的地質景

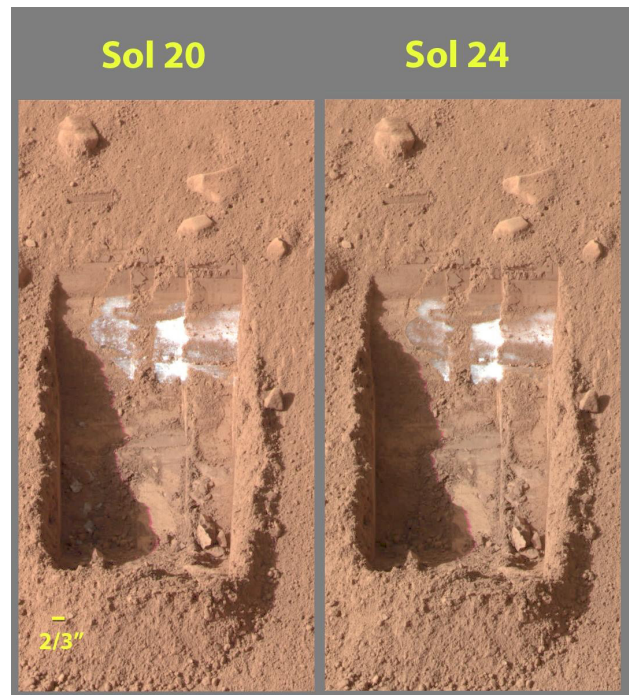


圖8. 鳳凰號登陸火星後確認水冰可短暫存在於火星地表，因水冰在四天後蒸發，表示環境不利於液態水常態穩定存在。© NASA



觀，與整體土衛二的物理環境，發現冰殼下隱藏著鹹水海洋，其間歇噴泉的羽狀物質混合著有機化合物與水冰，給了科學家新的證據：以每秒400公尺從冰火山噴向太空的水冰粒子，其實是形成土星E環的補給站。因帶有全球性的地下海洋、其物質和潮汐效應提供的內部熱源，土衛二成為具有高度發展生命潛力的未來明星。

第一顆發現具有濃密大氣層的衛星：土衛六泰坦（Titan），從地面觀測加上數個近距離的太空探測任務（如先鋒11、航海家1號與2號），更進一步地了解土衛六的物理環境及大氣層成分，發現甲烷、氮與有機分子的蹤影。2005年惠更斯號從卡西尼號分離、藉著降落傘歷經兩個多小時登陸土衛六，記錄了大氣垂直的資料，也收集了許多地貌的影像。從照片中得知其登陸地點附近散落著鵝卵石的平原，顯示該處地貌有流體物理作用的證據，隨後的探查也證實了土衛六上有著甲烷湖泊。卡西尼號數次飛掠土衛六和惠更斯號在地表協同搭檔，幫助科學家更具體地了解土衛六泰坦的環境。

卡西尼惠更斯號在為期13年觀測土星、土星環、土星的衛星，以及惠更斯號登陸土衛六泰坦，不僅讓我們對土星大開眼界，還帶來

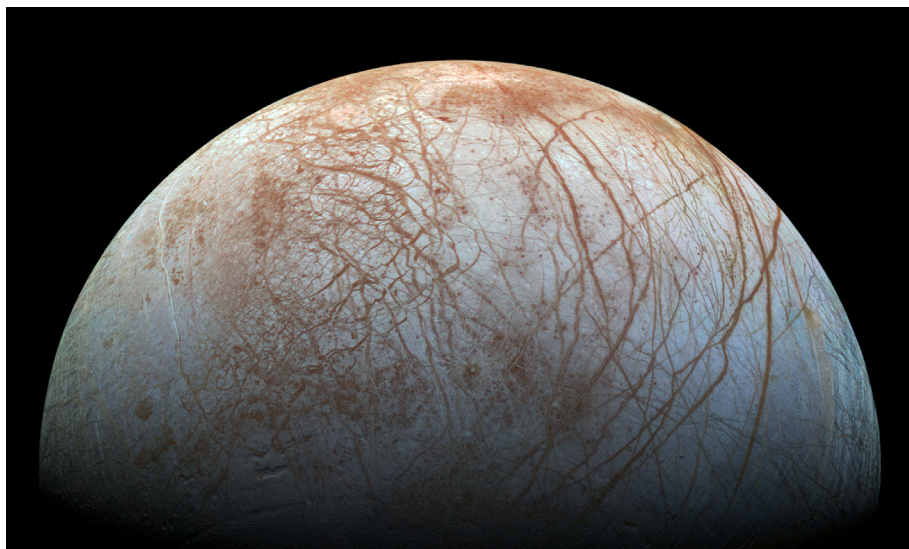


圖9. 木衛二Europa的地貌有著綜橫交錯的裂谷與山脊，顯示了木衛二表面地質的驚人多樣性。左右兩側成藍白色為含有含水量豐沛的極區。© NASA

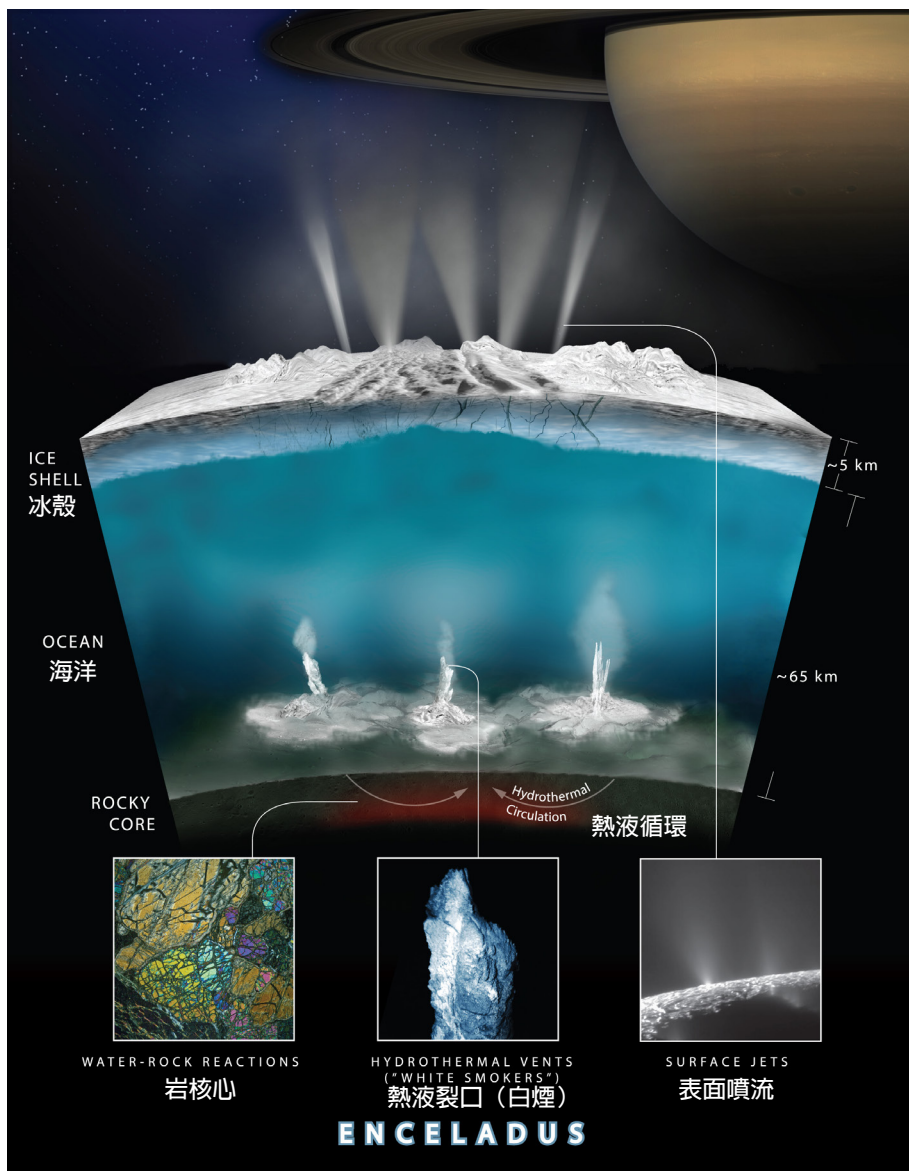


圖10. 藝術家筆下圖解土衛二Enceladus地層剖面圖，土衛二表面冰殼之下有著全球性海洋。© NASA

了許多驚奇的發現。卡西尼號在燃料用盡後，估計會漂泊環繞在土星四周，為避免有任何風險，導致卡西尼號上屬於地球的物質，改寫這些衛星發展生命的潛力，2017年9月，卡西尼號衝向土星大氣層焚毀，為探索土星華麗的最終章謝幕。

尋找水的任務，不僅是在太陽系本圈，近年系外行星尋找水的主題也有了新的進展。2019年9月天文學家發現了一顆不僅有大氣層，當中還含有水蒸氣、雲氣的超級地球K2-18b (Benneke et al. 2019)。位在獅子座繞著M-type 棕矮星的系外行星K2-18b，是目前找到的系外行星中，物理環境如水、溫度、地殼岩石跟地球特徵最相似的一顆。K2-18b離恆星的距離所獲得的日照與地球接收太陽的能量相似，直徑比地球大了2.6倍，其密度約為地球的一半。倘若環境有液態水，目前的觀測顯示水比例少則0.01%，多則可有50%，是否有全球性海洋覆蓋其地表，仍待未來的觀測資料做進一步確認。

從地球到太陽系甚至宇宙，我們四處探險並發展在嚴苛環境生存的方法，從尋常的身體感知藉著新科技，例如各種類型的飛行器（如翅膀）、分析儀器（如腦）、相機（如眼）、機器手臂（如手）、探測車（如腳）等等，不斷推陳出新地發展的太空科技，幫助我們在浩瀚的宇宙裡探索，尋找解開生命之謎的關鍵、尋找作為飛行器燃料的資源、尋找在地球以外讓我們生存能自給自足的物資，天文學家此時此刻化身為尋找水的獵人，we are hunting for water.

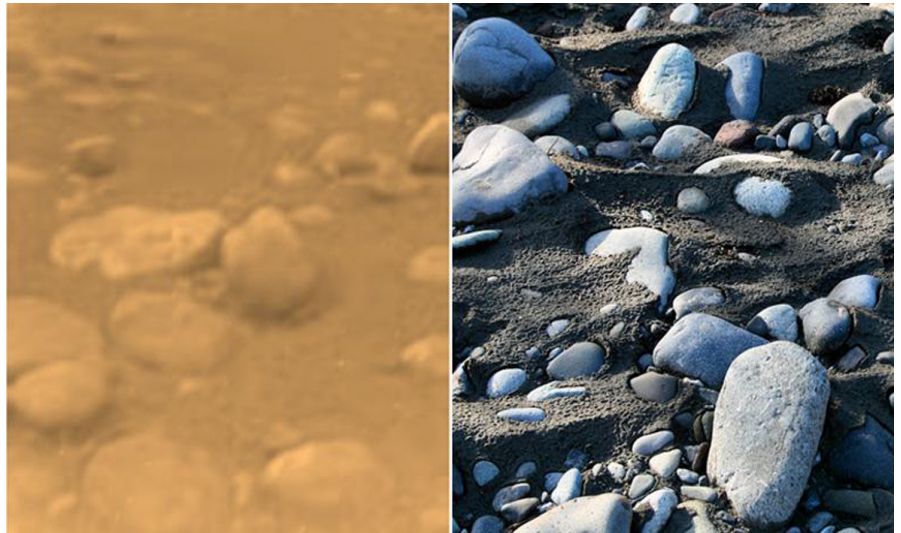


圖11. 惠更斯號登陸土衛六時拍攝泰坦 (Titan) 地貌的第一張風景 (左)，與地球河川中的石頭 (右)。© NASA

參考資料：

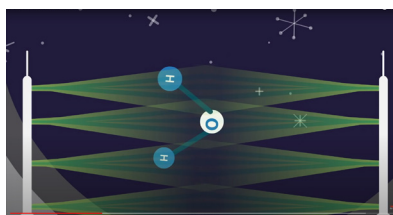
<https://solarsystem.nasa.gov/>

[https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Rosetta/](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta/)

改寫地球史的25種石頭故事 (八旗文化)

潘康嫻：國立中央大學天文研究所 博士候選人

YouTube相關影片：



地球上的水哪裡來？

<https://www.youtube.com/watch?v=RwtO04EXgUE>



羅賽塔號的彗星研究

<https://www.youtube.com/watch?v=5Z3zJcgfbcAwatch?v=RwtO04EXgUE>



# MOONS: ACTIVE WORLDS

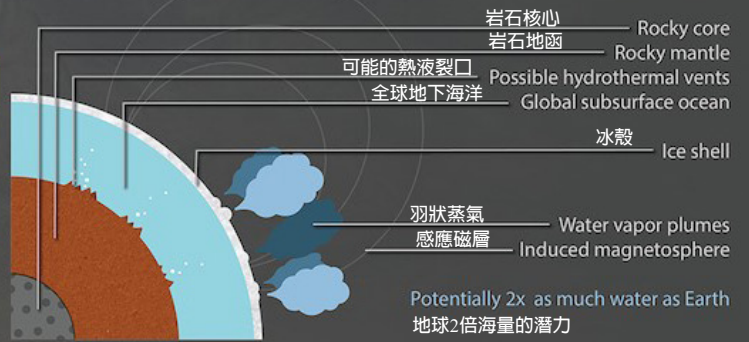
## Io

1132 mi (1822 km) radius 半徑1822公里



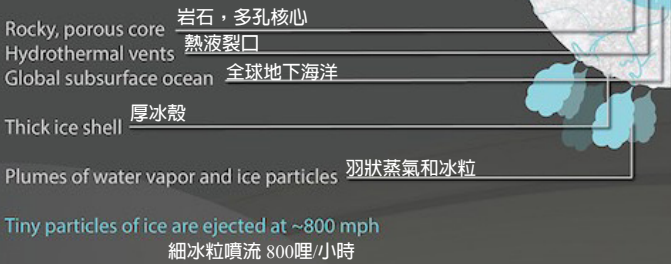
## Europa

半徑1561公里 970 mi (1561 km) radius



## Enceladus

157 mi (252 km) radius 半徑252公里



## Titan

半徑2575公里 1600 mi (2575 km) radius

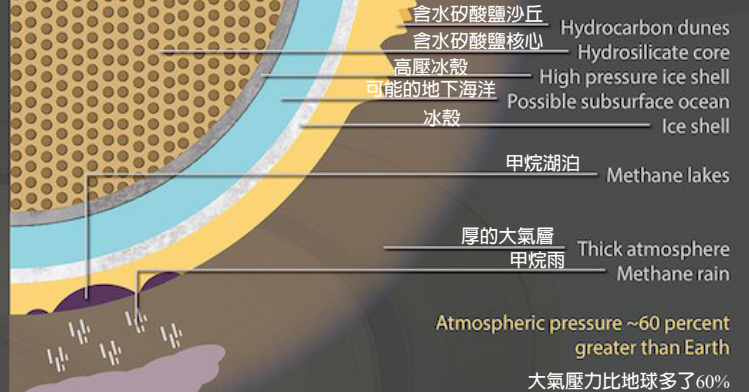


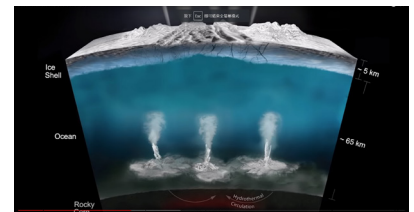
圖12. 地質活躍的衛星地質剖面圖。木衛一Io為多火山的環境、木衛二Europa冰殼下的大量鹹水海洋、土衛二Enceladus羽狀水蒸氣與高速冰粒噴流、土衛六Titan是擁有液態甲烷的星球。© NASA



ESA 新聞：羅賽塔號探索生命的起源  
<https://www.youtube.com/watch?v=tzKldathYhI>



你需要知道太陽系中的海洋世界  
[https://www.youtube.com/watch?v=\\_9AYw2EQm8s](https://www.youtube.com/watch?v=_9AYw2EQm8s)



海洋世界：尋找生命  
<https://www.youtube.com/watch?v=086N-X1Bd2o>