

尋找其他的海洋世界

陳文屏（中央大學天文所）

如果用一個字代表地球，那絕對非「水」莫屬，無論地表、大氣、甚至地下土壤，到處都是水；水是滋養生命的要素，地球生命從海洋發源，而有水的外星世界就有生命的可能。到底水是什麼東西，對於生活與生命有何影響，太陽系中除了地球，其他天體是否也有水存在而能讓生命發展呢？



水的重要性

人類生命三要素是陽光、空氣、水。其中陽光是能量來源，在地球上植物行光合作用，吸收光能而產生葡萄糖儲存起來。空氣中的氧氣則將我們吃進的食物「燃燒」，但是如果有替代能源或其他取得能源的方式時，陽光與空氣並非無可取代，海洋深處即使終年不見天日，有些生物能利用海底熱泉取得能量，另有些厭氧生物在有氧的環境下反而無法生存。

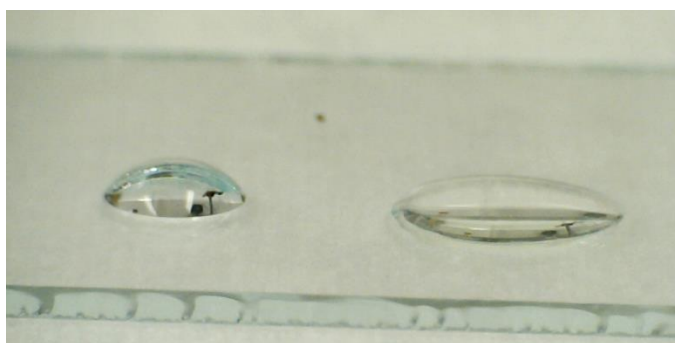
只有水才是地球生物的關鍵要素。我們的生命活動仰賴液態化學反應，這比固態反應快，比氣態反應穩定。例如糖融化在水裡，很快變成糖水，但如果在冰窖中把糖和冰塊放在一起，反應則會慢得多；而如果把兩者氣化，則不易受侷限，讓反應進行。生物以細胞膜等方式限制了液體的空間，讓反應順利進行。基於固態或氣態的生命型態並非不可能，例如機器人廣義來說也有生老病死，就是使用電能而以晶片形式互動。但整體而言，液態化學是地球生物的基石，在宇宙其他地方依此方式發展出生命的機率應該也高些。

水擁有很多特殊的性質。一般物質在固體狀態都比較緊密，但是水結成冰以後反而密度變低，而能夠浮在水面。這使得冬天氣溫降到冰點以下，冰膨脹而造成水管破裂，是寒帶區域生活上很煩惱的事情，但在原始環境中，即使氣溫遠低於冰點，在冰層以下仍可能存在液態水，而維持生命活動。

物質都有液態，只是溫度與氣壓條件不同。生命所需的液態物質不一定非水不可，但是水還有很多特點，成為生命所需的首選。首先水由宇宙中主要元素氫、氧組成，含量豐富而穩定，太空中水分子不虞匱乏。作為溶劑的液體促進傳遞養分、排除廢物的生命活動

的功能。對於生命來說，好的溶劑應該具備寬廣的液態溫度範圍，同時有良好調節環境溫度的能力。表一比較水、阿摩尼亞與甲醇（也就是工業酒精）的一些性質。可以看出，在常溫下雖然甲醇具有較大的液態溫度範圍，但是水的熱容量（升高攝氏 1 度所需要的能量）與汽化熱（轉變成氣態所需的能量）大得多，更能夠緩衝環境溫度的變化，整體而言水具有較優越的性質。

水的其他優點包括其為已知液體中具最強的表面張力，平常看到水滴在桌上形成拱型，酒精就比較不明顯。這個性質使得在細胞出現以前，有機化合物依賴水的表面張力得以聚集、彼此反應，並與其他物質分界。水也是絕佳溶劑，容易攜帶分子，又有良好抗紫外輻射的能力，這都讓水成為生命發展的優勢物質。地球生命最先就是在海洋中形成，也是為什麼在別的天體尋找可能生命的第一步就是找水。對於適合人類太空旅行，地面水不但提供民生所需，水也可以分解出氫與氧，以供燃料與呼吸。



（左）水的表面張力比（右）酒精來得大

<http://errantscience.com/wp-content/uploads/Drops.png>

溶劑	水 (H_2O)	阿摩尼亞 (NH_3)	甲醇 (CH_3OH)
液態溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	0 ~ 100	-78 ~ -33	-94 ~ +65
溫度範圍 ($^{\circ}\text{C}$)	100	45	159
比熱 ($\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$)	4.2	4.7	2.1
汽化熱 (kJ/kg)	2257	1369	1100

地球的海洋

恆星溫度高，自然沒有液態水，而行星或衛星要有液態水，就不能離恆星太遠（結冰）或太近（蒸發）。地球距離太陽距離恰當，加上有足夠大氣壓，地表因此能維持液態水。

我們對於一望無際的汪洋並不陌生，但對於地球海洋的成因至今仍然未解。地表有 71 % 的面積被海洋覆蓋，而因海水散射陽光，造成從太空觀看地球呈現藍色。地球整體海水的體積約是 1.4×10^{18} 立方公尺。海水密度比純水稍微高一點（依鹽度而異，約每立方公尺 1030 公斤），所以海水的總質量（ 1.4×10^{21} 公斤）占了整個地球總質量（ 6×10^{24} 公斤）約

1/4400，這比太陽系任何其他天體都多得多。地球大量的海水從何而來呢？

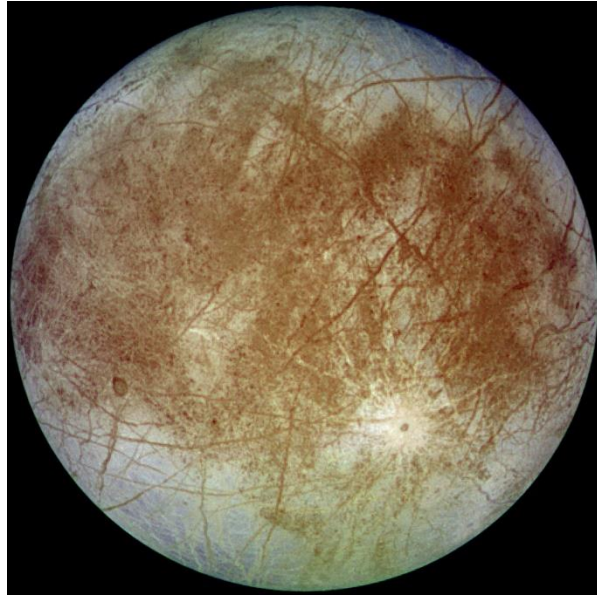
彗星長年距離太陽遙遠，富含冰體（水冰、阿摩尼亞冰、甲烷冰），因此之前認為地球形成之初，受到大量彗星撞擊，帶來充分的水冰，雖然火星、月球等也同樣遭受撞擊，但因為它們引力太小，又缺乏大氣壓力，這些水冰汽化後很快消散。火星早年曾經有大量流水，但現在表面已經沒有液態水。近年來發現某些軌道位於火星與木星之間的小行星，原以為該是絕對乾燥的小行星，某些居然會噴發出水汽，而地球海水的同位素（重水，具有中子的氘原子核）比例與彗星不相符，反而可能近似於這些小行星。地球的水哪裡來的，目前還是熱門的研究課題，可以確定的是絕大多數來自太空，造就了地球獨一無二、生氣盎然的世界。

太陽系其他的海洋世界

到目前為止，還沒有在其他天體發現類似地球這種水汪汪的世界，不是太熱、太冷，就是沒有足夠大氣維持液態水。金星有厚重的大氣層（地球表面的 92 倍），主要成分是二氧化碳（97%），水汽含量只有 0.002%。由於劇烈的溫室效應，金星地表溫度高達攝氏 462 度，即使彗星或小行星撞擊帶進了水，也都游離而散失了，表面當然也就不會有海洋存在。

火星有稀薄的大氣（地球表面的 0.6%），主要成分也是二氧化碳（96%）。火星可能在 40 億年前失去了磁場，因此大氣受到太陽風直接影響，每小時損耗 400 公斤的大氣。有很多證據顯示火星表面早年存在大量流水，然而以目前這樣的氣壓，液態水無法長期在表面存在。據估計跟數十億年前相比，已經減少了 87% 的水，目前剩下的水冰凍在兩極或是地下，極少量在表面以泥水型態存在。

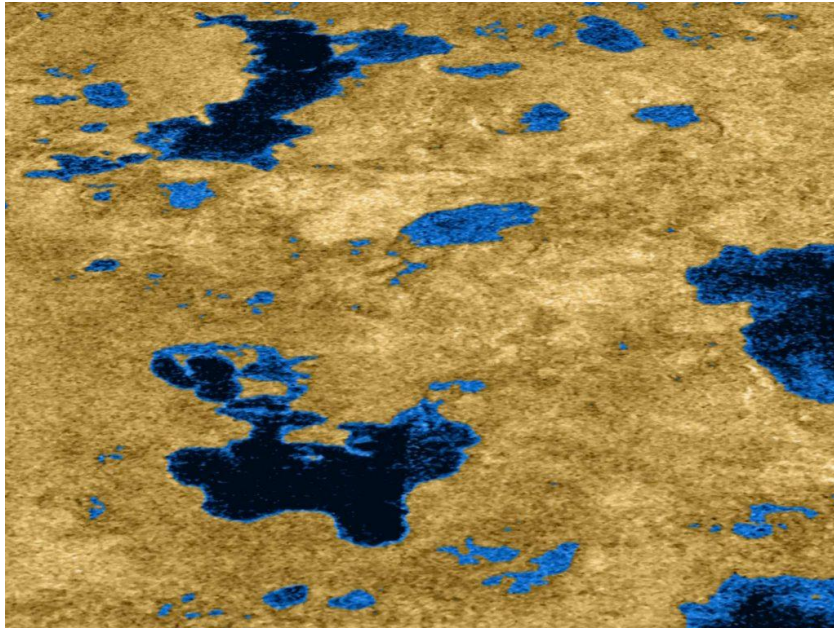
海洋還可能存在於巨型行星的衛星、矮行星，甚至於彗星表面。巨型行星擁有眾多衛星具有岩石表面，可以撐托海洋，即使溫度低於冰點，但在覆蓋表面的冰層之下，仍可能有海洋存在。最讓人興奮的應屬木衛二（Europa，歐羅巴），它受到木星強大的潮汐力加熱，據判斷在約 20 公里的冰層之下可能有龐大的海洋，哈柏太空望遠鏡就曾經觀測到木衛二噴發出水汽。相對於地球直徑約 1 萬 3000 公里，木衛二的直徑只有約 1/4（3100 公里），但海水總體積甚至可能超過地球海水的 2 倍。美國航太總署（NASA）原先規劃在 2020 年代發射輕巧快速的太空船在軌道上繞行研究木衛二，但是國會難得的建議擴大規模，加入登陸的任務，雖然使困難度大增，但一般人免不了開始想像可以鑿破冰層，一探可能迷人的海中世界。人類已經在太陽系走透透，到目前尚未在地球以外見過「風吹草低見牛羊」的光景，要是能「臥冰求鯉」可是大事一件。



NASA 將發射太空船探索木衛二冰層下可能存在的海洋 (NASA)

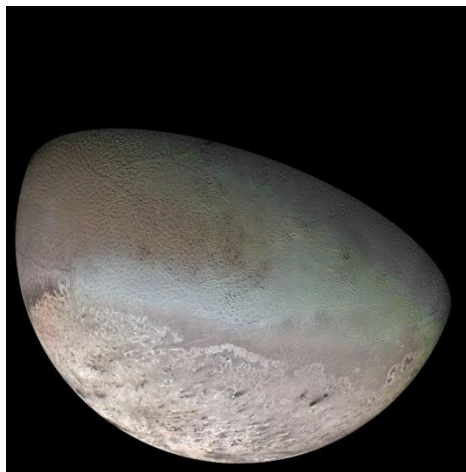
另個可能有海洋的天體是木衛三 (**Ganymede**，甘尼米德)，它是太陽系當中最大的衛星 (直徑 **5268** 公里)，沒有大氣層，卻有磁場。近來研究認為木衛三內部可能有水與冰交錯的結構。木衛四 (**Callisto**，卡利斯多) 是木星第二大衛星，直徑與水星相當，但是密度低，所以質量只有水星三分之一。研究顯示地殼之下的冰層可能厚達 **100** 公里，下面可能有將近深達 **200** 公里的海洋。木衛一 (**Io**，埃歐) 是太陽系中地質活動最活躍的天體，擁有超過 **400** 座活火山，整體含水量很少，但其表層之下可能也有厚達 **50** 公里的岩漿海，溫度達攝氏 **1200** 度。

土星的大型衛星也讓人矚目。土衛六 (**Titan**，泰坦) 擁有厚重的大氣，是地球的 **1.5** 倍，成分幾乎都是氮氣 (**95~98%**)。表面有甲烷構成的湖泊，據信可能在地表之下 **50** 公里就有海洋，而且這個地下海洋含鹽量可能很高，另外混雜了液態阿摩尼亞。最近甚至偵測到類似大峽谷的地形，或許是表面曾經有流水的結果。有了大氣與海洋兩個因素，有些科學家認為土衛六擁有複雜的有機化學，與早期地球相仿，適合生物發展。甚至有理論認為泰坦表面由甲烷構成的湖泊中可能有生物，它們吸入氫分子 (而非氧分子)，以乙炔代謝 (而非葡萄糖)，然後呼出甲烷 (而非二氧化碳)。所有地球生物以水為溶劑，而土衛六上面如果的生物，則說不定利用甲烷或乙烷為溶劑，近年也發展出能夠做為甲烷化學反應的細胞膜可能材質。有關土衛六是否有生命存在的研究仍方興未艾。



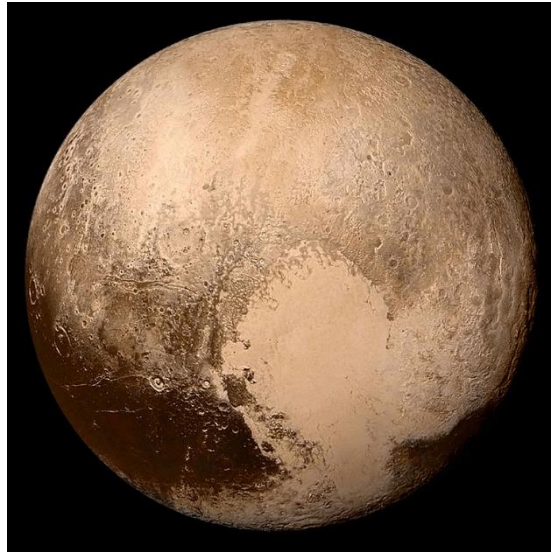
卡西尼太空船飛越泰坦時利用雷達偵測到表面由甲烷構成的湖泊（NASA）

在距離太陽更遙遠的地方，海衛一（**Triton**，特里同）是顆大衛星（直徑 **700** 公里），由於公轉軌道與海王星自轉方向相反，一般認為這顆衛星可能曾經是古柏帶（**Kuiper belt**）當中的矮行星。海衛一的表面滿是固態氮，偶而會噴發出氮氣噴泉，地層以下可能有豐富的水冰，可能占了整個天體質量達 **35%**。雖然陽光微弱，海衛一內部可能有足夠的放射性元素提供熱能來維持大規模的地下海洋，有如木衛二的情形。



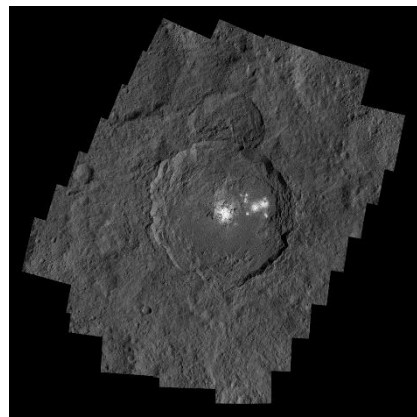
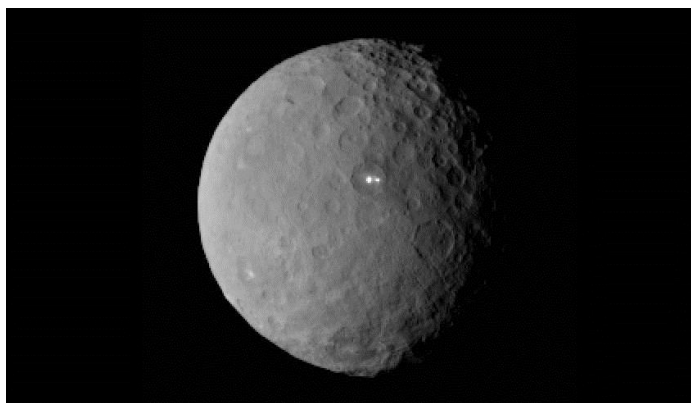
航海家 2 號於 1989 年經過海衛一時所拍攝的照片。

再往太空深處，曾經是太陽系第九顆行星的冥王星（**Pluto**），現歸類於矮行星，表面滿是冰山、固態氮與固態甲烷，雖然溫度非常低，但有活躍的地質活動，能源或許來自內部放射性元素所產生的熱能，地下也可能因此有厚達超過 **100** 公里的液態水。



表面滿是冰山、固態氮與固態甲烷的冥王星（NASA）

同樣是矮行星，穀神星（Ceres）曾經是個海洋世界。當「曙光號」飛掠時拍攝的影像發現白色亮點，曾經讓人迷惑。現在知道成分是碳酸鈉（ Na_2CO_3 ），但是來源仍然成謎。最新的研究發現穀神星早年溫度比較高，可能有豐富的水，有如以上談到木星與土星的衛星，而這些碳酸鈉或許就是殘存的證據，直到現在穀神星在冰層之下仍然可能有液態水構成的海洋。



「曙光號」飛過穀神星時，拍攝到表面白色亮點，
目前已知成分為碳酸鈉，但成因仍成謎。（NASA）

除了偶爾發現噴出水汽，有哪些方法探測被地表覆蓋的海洋呢？即使我們以為已經相當瞭解的地球，近來的研究顯示地地涵當中的岩石總含水量甚至可能超過地面的海洋。以木衛二來說，早在 1979 年航海家號太空船飛越木星時，就發現其表面異常光滑，但從規律的條紋判斷是水冰浮在流體（液態水）上方，有如地球板塊運動般，而產生裂隙。在 1990 年代前往探測的加利略號（Galileo mission）發現其磁場每隔 5 個半小時就反轉方向，這是木星自轉時，其磁場在木衛二附近受到影響，科學家據以判斷木衛二內部含有導體物質，帶鹽分的海水正符合此性質，能夠產生感應電流，進而產生反向磁場，抵銷掉部分木星原來的磁場。至於冥王星，其表面大型的隕坑盆地 *Sputnik Planitia* 達 1300 公里長，

但雖然這區域少了質量，冥王星的質心卻沒有偏向另一邊，這個「重力異常」顯示地底有大量物質，再加上表面的裂隙，也吻合地下水的理論。

出了太陽系，很多其他恆星周圍繞行了行星，我們無法觀測是否有海洋，但若行星軌道恰巧有時候運行到恆星與我們之間，藉由星光穿過行星大氣被吸收的情形，與沒有擋到的光譜差別，可以推測該系外行星大氣當中是否有水汽，而要是該行星距離母恆星距離恰當，質量也恰當，就可以推論是否有固態表面，以及是否可能有海洋存在。

喝水、聽海，在地球上多麼稀疏平常。科學家則一貫求知，要探天外之水，太空之海，而這些探索才正要開始。

參考資料：

1. NASA, Ocean Worlds, <https://www.nasa.gov/specials/ocean-worlds/>。
2. Mark D. K., NASA's Europa Lander May Drill to Find Pristine Samples on Icy Moon, Space.com, 2016/12/26.