



尋找外星生命

本圖由ET電影海報影像重製

< 之二 >

太陽系與系外行星的探索

文/ 辜品高

什麼是生命？

外星生物總是讓人們有無限的遐想。無數的科幻小說和電影，例如火星人, Star Trek, ET, 異形, Contact, X檔案, ID4, 阿凡達…等等，道盡了人類對未知太空生命的好奇、期待、或甚至恐懼。可惜在現實生活中，科學家透過多次的太空任務，目前並沒有發現在地球以外的星球上有任何生命的證據。地球真的是宇宙中唯一有生命存在的星球嗎？近年來數百顆太陽系以外的行星(簡稱系外行星--exoplanet)的發現，使得天文生物學(astrobiolgy)一下成為時尚的名詞。天文生物學是一門跨越許多領域的新興學科，涉及了很多在科學界中各式各樣還不確定的假說和謎團，仍尚待更多的研究去解開生物學和天文學的種種密碼。

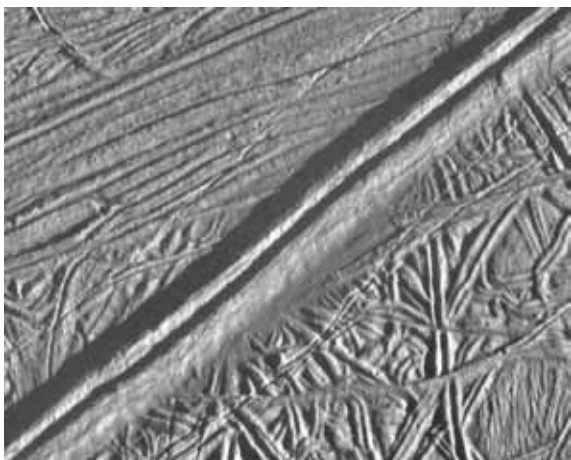
天文生物學的目的，不僅僅是尋找外星生命，最重要的是探討在不同的環境下，生命是怎樣開始，然後是如何演化的。如果只根據目前人類對地球生物的了解，生命可能由許多有機分子所組成，但是究竟多簡單的有機分子可視為生命，這是一個生物學上困難的問題。讀者們可能有著自己不同的看法。在此我們將一群有機分子，能夠互相協調來執行成長、繁殖、以及演化步驟的集體，定義為生命。就這個簡單的定義來說，生命的形成可能始於簡單的有機分子，在液體溶劑中相互接觸產生某些化學反應，然後能夠成長和繁殖。成長和繁衍是需要供給能量的。我們或許可歸結一個結論，那就是生命的存在可能離不開下列三個要素：碳、溶劑、和能量。在地球上主要的溶劑是水，主要的能量來自太陽輻射。如果我們假設在宇宙中，生命都起碼需要具備此三要素，那麼科學家的使命就是一方面在地球上尋找各種可能的原始生物，另一方面則是透過太空船和望遠鏡，從太陽系和遙遠的宇宙中去尋找跟這三要素有關的線索。身為天文學家的我，將透過這篇短文的描述，帶領著讀者離開我們的地球，去探訪天文學家認為可能孕育生命的星球。

太陽系後院的威尼斯？

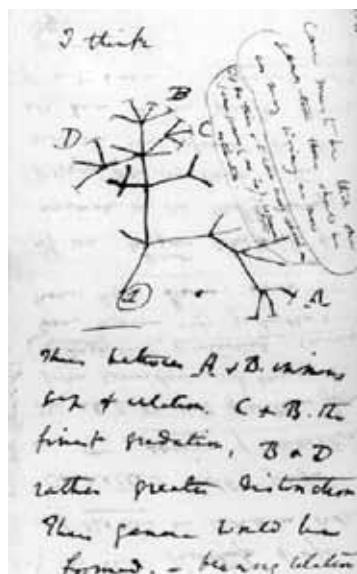
在地球和火星的軌道外，圍繞著一圈小行星帶。在小行星帶以外的太陽系，我們可以稱之為太陽系的後院，因為太陽輻射微弱而非常寒冷，大多數的星球含有不少的冰。如果有其他的熱能存在，冰就可能熔化成水而成為溶劑，生命或許能找到一條出路誕生出來。在我們太陽系的冰冷後院裏，真的有所謂外星「威尼斯」嗎？

木星因為距太陽遙遠，溫度太低，它的許多衛星表面的冰層估計是相當的厚。這些所謂的「冰衛星」中，歐羅巴(Europa)是相當特別的。航海家號(Voyager)和伽利略號(Galileo)太空船拍攝的照片顯示，歐羅巴表面的冰層有一條條破裂的痕跡，交織成一整片複雜交錯的冰脊或冰溝的奇異景象。而且不像其他衛星，表面極少隕石坑。這些地貌顯示表面冰層底下有些地熱活動，不斷地將地面下的冰或許可能是水往上冒出來，造成表面冰層的移動、擴張、擠壓、或破碎，甚至斷斷續續重新鋪上新的冰層，掩蓋本來的隕石坑。除了表面破裂的冰層，伽利略號太空船偵測到歐羅巴四周有異常的磁場。這磁場可能是由於當木星的磁場掃過歐羅巴冰層下面能導電的海洋時，所產生的感應磁場。這是歐羅巴擁有地下海洋的間接證據。

許多的天文學家推測歐羅巴地下海洋是存在



伽利略號太空船拍攝的歐羅巴空照圖，所包含的區域面積為14km X 17km。照片除了顯示複雜網狀的破裂冰層構造，最顯著的是從左下到右上的雙山脊地形，暗示冰層底下有能量往上湧出，造成冰層的位移和山脊。圖片來源：NASA



達爾文的「生命樹」(tree of life)手稿。即使達爾文對微生物毫無所知，他相信生命演化是彼此相關的，有如樹根、樹幹、和樹枝的連結關係，好像是一個大家族的族譜。目前生物學家利用核糖體RNA將地球已知的生物關係連成一顆生命之樹。接近生命樹的根部被視為靠近所有生命的共同祖先。「喜愛高溫的極端生物」被認為靠近生命樹的根部，它們並不以陽光做為生命的能源。

的，主要的原因是歐羅巴的軌道受到其他衛星重力的微擾成橢圓形。於是歐羅巴受到木星潮汐作用的影響不停的變形而內部生熱，於是把冰給熔化了。我們知道，即使在地球海洋的深處，在地殼相互擠壓的山脊帶，都有釋放地熱的溫泉。某些微生物稱為「喜愛高溫的極端生物」(hyperthermophile)，能夠在那攝氏100多度的海底溫泉下繁衍。信不信由你，根據核糖體RNA的結構分析，這些「愛高溫的極端生物」可能是所有生物的共同祖先的近親。這些帶著地底礦物的海底溫泉，顯然是「喜愛高溫的極端生物」賴以為生的能量來源。著名的英國科幻小說家克拉克(Arthur Clarke)早在1982年就已經在他的小說中描述歐羅巴星冰層下海洋的奇景，包括類似在地球的海底噴泉。剛才所提到的許多太空船觀測結果，都顯示克拉克的奇想可能並不荒誕。歐羅巴儼然成為在太陽系內，天文學家眼中研究外星生物的最佳自然實驗室。當伽利略號太空船在2003年用盡自己的燃料，為了配合科學聯盟國際委員會(International Council of Scientific Unions)的太空保育規定，美國太空總署決定最後將太空船駛入木星的大氣來結束太空任務，以避免伽利略號未來可能碰撞到歐羅巴的可能性，對其可能的生態環境造成任何干擾或改變。

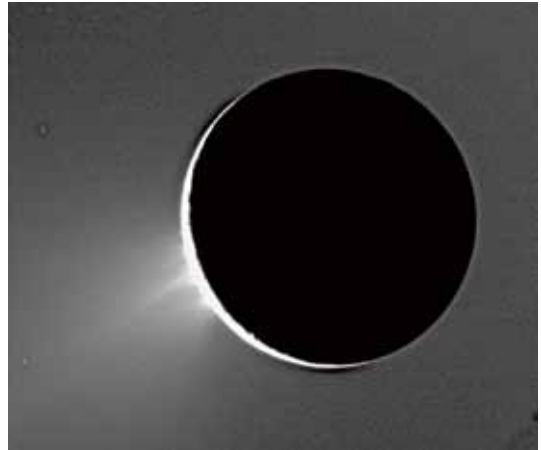
理論估計歐羅巴冰層可能有數公里到幾十公里厚。如果科學家想要派遣一艘太空船，實際登陸歐羅巴去鑽探地下是否有海洋或甚至於生物，以現在的鑽探科技可能相當難以執行。另一個困難是科學家必須確認我們的太空船在是完全「無菌」的狀

態，或是能在登陸前自我殺菌。一方面確保我們發現的生物不是地球帶去的，另一方面保證我們的太空船不會污染歐羅巴星而違反太空保育規定。最著名的例子莫過於在地球南極冰原底下大概5公里處，對於伏斯透克湖(Lake Vostok)的探勘。在地質學上，伏斯透克湖可能被冰封達一千四百萬年之久，於是被懷疑有著本身獨立的生態系統。鑽探計劃因技術上有污染此冰下湖的疑慮而告中斷。但是伏斯透克湖原本是用雷達遙測穿透冰層發現的。人們或許在未來的太空任務，可應用同樣的高空雷達探測方法，以了解歐羅巴地下冰層的厚度和海洋的位置為首要，再評估後續可行的登陸計劃。

歐羅巴可能不是太陽系後院唯一的水世界。讓我們隨著卡西尼(Cassini)號太空船前往離太陽更遠的土星。卡西尼號太空船發現土星的一個小型冰衛星叫做恩撒拉德斯(Enceladus)，正噴發出大量的冰泉、阿摩尼亞(NH₃)、以及有機分子。恩撒拉德斯噴出的物質之多，甚至在著名的土星環外，形成另外編號為E的環。這顆活躍衛星的內部可能受到土星潮汐力的拉扯作用而生熱，或許冰層底下有液態水，於是乎可能孕育出利用潮汐能量而成長繁衍的生命。

生物在外星沼澤區？

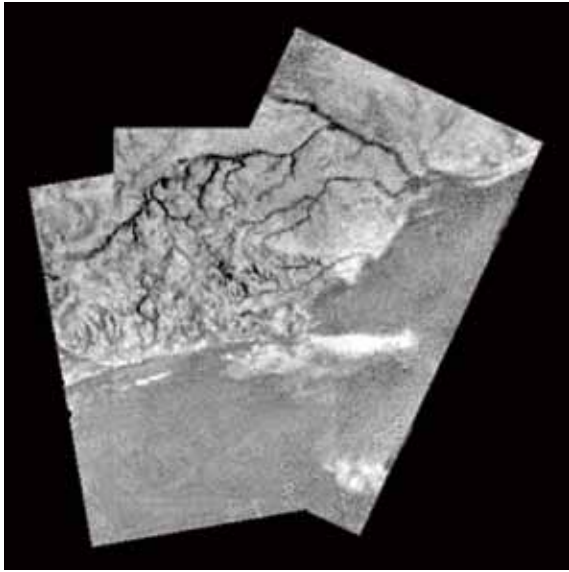
泰坦(Titan)是土星最大的一顆衛星，它甚至比最靠近太陽的行星水星還大一些。因為距離太陽遙遠，大氣受太陽輻射蒸發的效能就降低了，所以泰坦這個衛星中的巨人，以不容小覷的重力抓住濃厚的大氣，而成為太陽系中，唯一擁有濃厚大氣的衛星，其地表的大氣壓力竟然比地球表面還高出約0.5倍。早在西元1944年，荷蘭出生的美國天文學家古柏(Gerard Kuiper)就用望遠鏡發現其大氣含有甲烷(CH₄)。後來透過航海家(Voyager)一號和二號太空船近距離的觀測，發現泰坦被橙色的霧氣蓋住而無法窺其地貌，但卻也分析出其大氣的組成結構。像地球的大氣一樣，主要成份是氮氣，但最大的不同是泰坦的大氣包含著許多由碳和氫所組成的化合物；譬如說除了剛才提到的甲烷，也包含了乙烷(C₂H₆)、乙炔(C₂H₂)、丙烷(C₃H₈)、以及更長條的有機分子鏈。這些有機分子主要是由甲烷分子受到外來的太陽輻射分解並且透過分子間相互化學反應而產生的。這些有機分子在高空大氣形成濃霧，所以呈現出橙色的外貌。我們知道在地球上沼澤地帶的所謂沼氣，大部分的成份就為甲烷。西元1952



卡西尼號太空船所拍攝到的恩撒拉德斯衛星的巨大噴泉。圖片來源：NASA

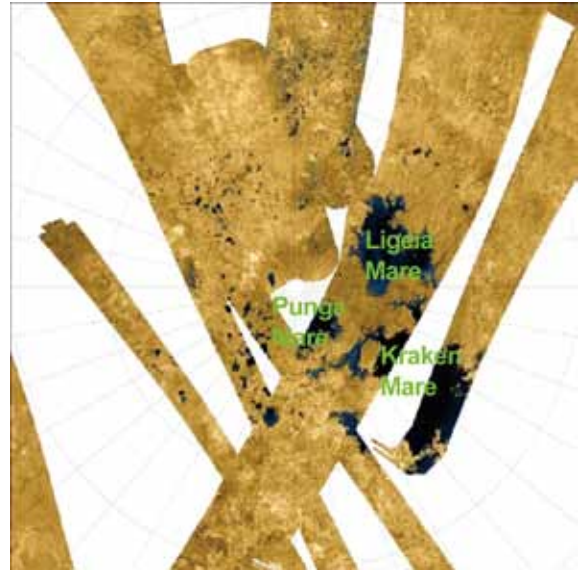
年芝加哥大學的米勒(Stanley Miller)和尤瑞(Harold Urey, 1934年諾貝爾化學獎得主)進行一項瘋狂的實驗。他們在實驗瓶中裝入H₂O, CH₄, NH₃, H₂等氣體來模擬地球早期的大氣，再加以電擊模擬閃電，最後他們可以製造出構成蛋白質的數種胺基酸。他們實驗模擬的原始地球大氣和海洋環境的結果上了紐約時報的頭版，之後被人們廣泛稱為孕育生命的「原生湯」(primordial soup)。雖然後來許多地質上的證據似乎顯示地球早期大氣並沒有那麼大量的甲烷。但頻繁的火山爆發仍可能還是釋放一些碳水化合物，這些分子可能成為製造生命的部分原料。此外，地球早期缺氧的大氣，可能靠一些厭氧的微生物排出的溫室氣體甲烷而保溫，即使當時的太陽輻射只有目前的八成。綜觀這些有關甲烷對生態圈的影響，儘管溫度很低，泰坦一直被視為研究在生命剛要孕育出來前，大氣可能經歷的化學變化過程的活教材。

泰坦是一個天寒地凍的世界，其表面溫度大約為攝氏零下180度，液態水是不可能存在的。但因為甲烷和乙烷是可能以液態的方式存在，成為孕育生命的溶劑，或是原生湯。於是乎天文學家對泰坦地表上存在有甲烷乙烷構成的海或湖，一直具有高度的期盼，是否有生命存在於冰冷的泰坦「沼澤地」呢？自2004年以來，由歐美共同合作的卡西尼-惠更斯(Cassini-Huygens)太空船計劃利用雷達以及其他儀器，執行穿透濃厚大氣的觀測，甚至將惠更斯探測器



由卡西尼號太空船釋放的惠更斯號探測器，利用降落傘降落到泰坦星時，在空中所拍攝到的地形圖。照片中顯示類似河川與其上流小溪的整個河域地貌。圖片來源：NASA

投入泰坦大氣中做實地探勘，發現在其赤道附近有由有機粒子組成的沙丘，表示當地氣候乾燥，但也觀測到一些經由河流切割出來的河道地形，甚至在高緯度發現有湖型的地貌(譬如說克拉肯海—Kraken Mare，它可能和裏海差不多大)。這有可能是大氣中的甲烷和乙烷凝結成液態而下雨到地面上，在低窪的地區匯流成較大的湖。就在去年，泰坦正值春分季節，卡西尼太空船觀測到在其原本乾旱的赤道附近，當甲烷雲飄過之後，地面隨即變得比較灰暗。科學家揣測可能是甲烷雨降下來而弄濕地面的結果，這解釋符合泰坦赤道區在春分季節是雨季的理論。或許在泰坦的世界裏，沒有極性的液態甲烷和乙烷所造成的海或湖，可以像有極性的水擔任溶劑的角色，促進某些有機化學的過程，孕育出外星生物？這正是目前太空生物學研究的課題之一。譬如說，卡西尼號太空船發現大氣中缺乏一種稱之為乙炔(C_2H_2)的氣體，這項結果似乎支持在甲烷液體中能夠存在的一種特別有機生命的一個學說；這種生命必須「吃」乙炔來謀生，於是造成乙炔的異常缺乏。聽起來是否讓人覺得不可思議？當然，天文學家必須要有更多的太空計劃去確認大膽的想法。或許將來人類可以複製惠根斯計劃，將探測器投入泰坦的其中一個湖中來探測生命。歐美太空單位以及甚至私人企業(<http://online.itp.ucsb.edu/lecture/nott/>)也



卡西尼太空船所拍攝泰坦北極的雷達空照圖，並將不同的地貌人工著色，再加上經緯座標線。科學家揣測藍色和黑色的區域可能是甲烷和乙烷湖。除了許多小湖，照片還顯示存在三個明顯的大海(mare)。棕色區域可能是陸地，而白色的部分是雷達沒有照到的區域。圖片來源：NASA。動畫版本可以在NASA網站找到。

已經研究如何利用熱氣球飄浮在泰坦大氣中做大規模的實地觀測。或許未來人類可以從泰坦星的研究，對於生命如何產生的謎題，有更進一步或是完全不同的領悟。

系外地球

自從1995年發現第一顆系外行星環繞類似太陽的恆星以來，到目前為止已經發現超過500個系外行星(請參閱<http://exoplanet.eu>或<http://exoplanets.org>)。發現的行星數量正快速的增加中。大多數的系外行星因為比母恆星暗淡許多，無法靠直接觀測發現的，而是由其母恆星呈現週期性的光譜或光度變化間接推測出來的。簡單的說，當一個行星繞著恆星做週期性的公轉，此恆星相對的也受行星微小的重力做小幅度的晃動，因此恆星光的頻率(亦即光譜)對地球的觀測者而言，會隨著軌道週期變高和變低，這是利用所謂母恆星發出光的都卜勒效應來推測系外行星的存在。另一種特別情況是發生在行星軌道和地球上的觀測者視線恰巧幾乎在一直線上，每當行星環繞到母恆星的前方時(也就是天文界所說的凌日現象)，會擋住母恆星少許的星光，觀測者便發現

母恆星的光度有規律的變暗現象，以此推測行星的存在。都卜勒效應加上凌日的觀測方法，可以估算出行星的質量和大小，那麼天文學家就可以利用這些資訊去計算行星內部的組成份子；譬如說是氫和氮氣多一點兒(低密度)，還是水和冰佔的比例多一些(中密度)，或是岩石和鐵是主要成份(高密度)。

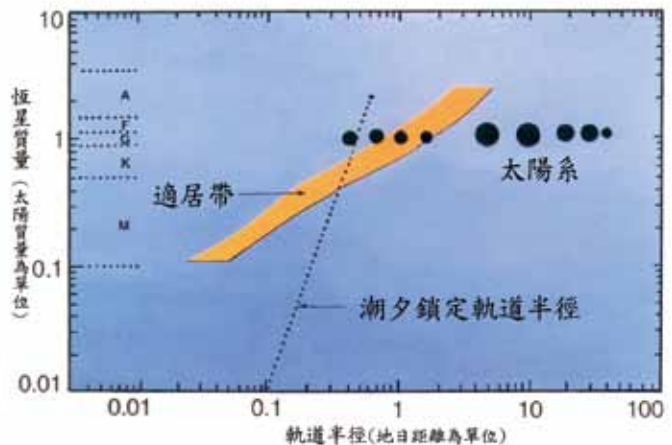
太陽顯然並不是唯一帶有行星的恆星，這個結果掀起了一股研究外星生物的新風潮。不過這些系外行星距離我們地球相當遙遠，利用太空船去造訪來尋找生命的證據實在是遙不可及，所以我們不可能去研究類似像歐羅巴或是泰坦的極端世界。天文學家比較有興趣的，則是是否有其它類似地球的行星。西元1993年，賓州州立大學的凱斯汀(James Kasting)教授首先提出「適居帶」(habitable zone)的概念。適居帶的基本定義為，給予足夠合理的大氣，液態水可以在類似地球行星表面存在的軌道帶。很顯然的，這個軌道帶的寬度對於尋找系外地球的機率相當重要。如果太窄，系外地球剛好落在適居帶的機會就會很低，這會讓許多對外星高等文明充滿憧憬的人們大感失望。

根據凱斯汀的計算，目前太陽系的適居帶可能位於0.95-1.7倍的地球軌道半徑左右。在他的計算中，恆星輻射、溫室效應、以及地殼活動決定了適居帶的軌道位置和寬度。金星距太陽約0.7倍的地日距離，就算有海洋，也因為太陽輻射過強，早就完全被蒸發掉，其中必須注意蒸發過程的水蒸氣是加強溫室效應的超級幫兇，加上大量水氣進入大氣上層，來自太陽的紫外線快速分解水蒸氣分子，使得金星的海洋蒸發得更快，目前金星沒有海洋的事實是毫無疑問地吻合凱斯汀的計算。相反的，如果我們試著想像把地球軌道慢慢變大，地球平均溫度便會逐漸降低，此時溫室效應反成為保持適居環境的保護機制；溫度雖然下降接近冰點，液態水的減少反倒減緩大氣中二氧化碳融入岩石中的過程，另一方面地殼活動仍繼續釋放出二氧化碳，於是乎溫室效應因二氧化碳氣體的增加而加強，保護地球免於進入冰凍世界。一直要等到地球離太陽約1.7倍的原本地球軌道的距離，大部分的二氧化碳氣體也因太冷而凝固，溫室效應大減，地球離開了適居帶。目前的金星因為沒有水，二氧化碳無法融於岩石內，成為大氣的主要成份，也使得金星成為溫室效應下的炙熱煉獄(表面溫度約攝氏462度)。筆

者必須提醒讀者，我們在此所談到是大自然本身所運行的長時間(約幾百萬年)的碳平衡，這和人類現代文明大量使用石油或煤，造成短時間(約幾十年)大氣碳失衡所導致的全球暖化是不同的。

火星總是帶給人們對外星生物強烈的憧憬。聰明的讀者可能發現火星是落在凱斯汀的適居帶之內(見下圖)，但是怎麼火星上面沒有海洋呢？難道凱斯汀的計算有問題嗎？關鍵在於火星的質量大約只有地球的十分之一，嚴格來說大家喜歡談論的火星並不類似地球。火星經過數十億年後，地熱幾乎消散於太空中，所以沒有能量做地殼運動而釋放岩石中的二氧化碳，因此沒有足夠的溫室效應維持溫度在冰點之上。當然火星較小的重力也使它的大氣容易受太陽輻射而逃逸。但是火星表面確實有許多沖積扇和峽谷等與水有關的地貌，暗示過去火星表面應該有大量的液態水。或許過去的火星有較濃厚的大氣吧，目前這在學界還是一個謎。

我們知道，恆星有著不同的質量並且緩慢地在演化著。適居帶的軌道位置和寬度會隨著恆星的輻射強度而變化，因此也會隨著恆星的質量和年齡而變化。所以就尋找地球以外的生命來說，天文學家目前可以積極去做的，就是尋找在其他恆星適居帶的，類似地球質量的行星。目前發現的系外行星，大多是質量較大的類似木星的行星。但隨著都卜勒探測的精度提升，天文學家慢慢發現容易受類地行



根據凱斯汀的模式，環繞在不同質量恆星的適居帶。太陽系的八大行星以及冥王星標示於圖中以做對照。紅矮星，在圖中標記為M型的恆星，其適居帶在理論的潮汐鎖定軌道半徑內，所以可能在數十億年之後，已經將適居帶的類地行星潮汐鎖定。圖片來源：凱斯汀教授(James Kasting)

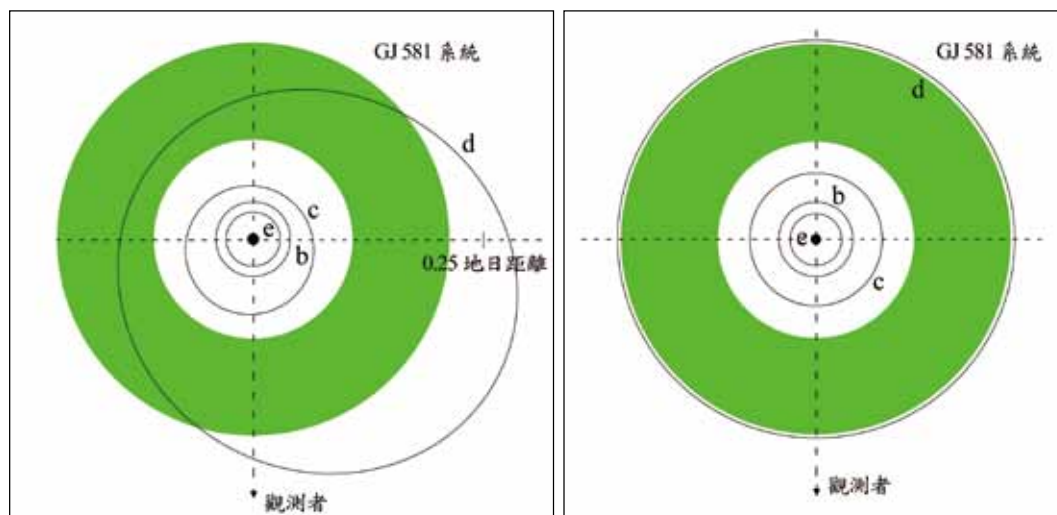
星晃動的嬌小型恆星，那就是紅矮星。紅矮星質量約為太陽質量的一半以下，其輻射熱相對也弱了許多，所以適居帶也比較靠近此類的恆星，但它們在太陽系附近的數量遠比類似太陽這樣的恆星多得多。溫室效應氣體(二氧化碳、水氣)在紅矮星扮演的角色更為複雜。不像我們的太陽主要輻射出可見光，紅矮星主要的輻射為紅外線，所以溫室效應氣體在行星大氣上空就可以吸收紅矮星的光，造成少量的光到達地表。因此對紅矮星的行星而言，溫室氣體可以同時造成「溫室」和「反溫室」的效果。

2009年由麥耶(Michel Mayor, 2005年邵義夫天文學獎得主之一)的研究團隊發現紅矮星葛利斯581(Gliese 581)的四個行星中，一顆編號d，質量大約大於7倍地球質量的行星，以橢圓軌道環繞著母恆星。其中部分軌道離其母恆星遠一點而離開了適居帶，部分行星軌道則落在適居帶內，所以行星d不停的在適居帶內外穿梭。2010年由伏哥特(Steven Vogt)帶領的團隊則假設所有行星都在圓形軌道，計算出不同的結果；同一個恆星有多達6個行星，其中編號g的行星質量直逼地球質量(>3.1倍地球質量)，其軌道完全在適居帶之內。不管如何，這兩種不同的軌道計算結果都指向葛利斯581的一個行星可能有海洋。

當然，由凱斯汀簡單計算出的適居帶並不是一套萬能的公式。葛利斯581是一顆較「平靜」的紅矮星。有許多我們所知的紅矮星是非常活躍的，通常表面有許多閃爍和很大的恆星黑子發

生。這些活動隨著恆星的年老而逐漸下降，但悲觀主義者可能認為葛利斯581過去相當活躍，所以我們不能排除這些恆星活動過去對581d或g行星的可能生態圈造成傷害，甚至有學者擔心大部分的行星大氣會因強烈的恆星活動而蒸發或被恆星風侵蝕掉。此外，因為紅矮星的適居帶太靠近母恆星，行星像581g可能被潮汐鎖定，使得一半的行星總是面對太陽，而另一半總是背對著太陽。聽起來永晝和永夜的地方可能會過熱或過冷，或許液態水無法存在行星的每一處。但是我們都知道大氣環流可以舒緩溫度的差異，使得葛利斯581d或g的適居環境沒有那麼惡劣。筆者在此強調，適居帶包含許多其他複雜的因素：大氣的成份和透明度、雲霧的存在，地表反射日光的情形等，或許讀者還會想到地磁的存在抵禦恆星風、自轉軸的偏向影響季節、水怎麼來的、行星若在雙星、多星系統、或星團內所受的影響等其他物理因素。本文所講的適居帶，恐怕只是考慮凱斯汀教授簡單的說法，真正發生的情況可能異常複雜。

去年的三月，一個以克卜勒命名的太空望遠鏡順利地發射升空。克卜勒太空望遠鏡能偵測萬分之一的恆星光度變化，所以其主要任務之一，是使用凌日的方法尋找在適居帶的系外地球候選者。然後天文學家再使用更精確的都卜勒量測儀器針對這些可能的系外地球做確認，最後找出真正在適居帶的系外地球。或許讀者聽起來過程有些複雜，但非凡的發現，總是需要極小心的求證。因為所尋找的訊號極小，達到觀測所需要的「精度」成為是否能發現系外地球的關鍵。



葛利斯581紅矮星的兩種可能的行星系統，第一個是麥耶團隊計算出來的，第二個是伏哥特團隊的計算結果。綠色區域為該恆星的適居帶，因為葛利斯581星輻射強度大約是太陽的十分之一，適居帶位於0.11-0.21倍的地日距離。



當然，找出適居帶的系外地球並不代表那個星球有生命。未來的望遠鏡，譬如說下一代哈柏太空望遠鏡：詹姆士韋伯太空望遠鏡(英文簡稱為JWST)，將有能力在系外地球的凌日過程中，偵測被其大氣分子所吸收母恆星的光，得知行星大氣是否包含水、二氧化碳，或臭氣等所謂生命訊息(biomarkers)的光譜特徵。根據目前地質、大氣，和生物學的認知，當能行光合作用的藍綠藻在地球早期大量出現之後，氧氣成為地球大氣的重要成份，含有大量氧的大氣與太陽的紫外線反應，造成能抵禦對生命有威脅性的紫外線的臭氧層，所以發現臭氣可視為在一個星球，生物行光合作用的一個可能指標。這種因生命活動而造成大氣成分變化而使生命得以更進一步繁衍的現象稱為蓋亞(Gaia)假說，其概念首先由英國科學家勒夫洛克(James Lovelock)在1970年代所提出。說不定我們之後可以傳送無線電波望遠鏡(譬如說利用SETI—search for extraterrestrial intelligence和加州大學柏克萊分校共同計畫下的艾倫望遠鏡陣列—Allen Telescope Array)的聯絡訊號給這些大氣有生命訊息的系外地球，或是專門接收可能由這些系外地球傳出的電子通訊電波，期盼我們或我們的子孫能攔截到高等外星生命他們自己的通訊內容，或是甚至收到外星人的正式回覆！

結語

筆者在撰寫這篇短文的時候，正值冬末春初之際，暖暖的陽光從書房的窗戶外灑落下來。窗外面對的是新店溪，飛鳥不時的來回穿梭飛舞著。我家的貓咪懶洋洋地躺在一邊享受假日下午的悠閒，窗外的河濱公園則是充滿著慢跑、騎著自行車、或是溜狗的人們。臺北陽明山的花季正要開鑼呢。在這樣充滿生命活力的悠然景象中，我的腦袋正妄想著生命的起源和外星生物。老實說，筆者並不是一位演化生物學家，但是從研究天文的經驗，深感宇宙中到處充滿了許多的未知、傳奇、和驚喜：從大霹靂宇宙的誕生、黑暗物質和能量的宇宙成份、星系中心的超大質量黑洞、超巨大的 γ 射線爆炸、恆星形成區域的混沌分子雲、一直到系外行星的發現等等。宇宙毫無疑問像一個千面人，不停的呈現多樣的面貌，筆者深信大自然的生命也是多樣性的。雖然本文主要以地球的觀點去談論外星生命，有可能



天文生物學家吳爾芙西蒙(Felisa Wolfe-Simon)在莫諾湖實驗，讓一種靠砷為生的微生物成長。圖片來源：NASA

太陽系冰衛星或是系外地球的世界和地球的生態情況大相逕庭。在加州有一個莫諾湖(Lake Mono)，湖水含有高濃度的砷。歷史上，砷常被用做謀殺的毒藥。去年美國太空總署公佈，在莫諾湖實驗發現一種以砷取代磷而生存的細菌。磷是組成生物DNA和RNA的重要元素，而砷具有和磷相似的化學性質。是否能由此大膽推測，如果在一個缺乏碳的環境中，和碳化學性質類似的砷，或許能取代碳成為生命起源的基石？試想著在泰坦上的假想生物可能倚賴乙炔為生，誰說生命的起源一定要遵循我們已知的模式而走。在19世紀的末期，著名的物理學家凱文(Lord Kelvin，絕對溫度是以他的姓為單位)認為當時人類對物理學的了解有如萬里晴空般的清楚，一些異常的實驗結果恐怕只是天邊的幾片微小「烏雲」，很快就會煙消雲散。結果這些「烏雲」在20世紀快速地遮蔽了整個所謂的晴空；相對論和量子力學之後造成物理學破天荒的革命。或許同樣的情況會發生在天文生物學上；相似的概念「影子生態圈」(Shadow biosphere)已經被提了出來。「影子」二字在此暗指著非典型或看似少數的異常生命形式，等同當初凱文所說在物理界的微小「烏雲」。生物學家告訴我們，微生物是地球上所有物種的多數，而我們恐怕只對其中的1%有所了解。人類在自認為可以主宰大自然甚至能複製哺乳動物(比如說桃莉羊)的同時，應該敞開心胸，揚棄陳見，才有機會漸漸了解事情的全貌。這個的世界有太多的未知，當我們下次舉頭觀星的時候，請保持一顆謙卑的心，一起去思考宇宙中生命存在的各種可能性和多樣性。

辜品高，中央研究院天文所助研究員