

圖一：地球、星際空間、與有機分子。

(圖片來源：R. Ruitkamp in “Astrochemistry – Organic molecules in the Universe” by P. Ehrenfreund & S.B. Charnley, 2000, Annual Review of Astronomy and Astrophysics)

< 之一 >

尋找宇宙中 與生命相關的元素及有機分子

文/ 呂聖元

就在今年(2011)三月，美國國家航空暨太空總署 (NASA) 的一名科學家胡佛 (Richard Hoover)，在《宇宙學期刊》(Journal of Cosmology) 中宣稱他從太空墜落於地球的隕石上發現一種從未在地球上看過的細菌化石。據稱，當他以高倍顯微鏡觀察某些蘊含水和各式有機物的碳質球粒隕石 (carbonaceous chondrite) 碎片之內部時，發現到一種像蚯蚓般的微小細菌生物的形態，他認為這些是在地球上未曾被發現的細菌。因此將這些細菌稱為「原始化石」(indigenous fossils)，並大膽推測這些細菌可能原本是生存在外星球！

「發現存在於外星球的生命?!」胡佛的研究成果當下引起了 NASA 的否認，當然也引發了很大的爭議。其實，這樣的研究相當具話題性，也不斷地引起爭議。

有些讀者可能有印象，在1996年一組也是屬於 NASA 的研究團隊就曾經提出，在編號為ALH84001隕石中發現了微型化石結構，是地球之外生命曾經存在的證據。這個ALH84001隕石感信是由於小行星的撞擊，從火星表面脫落，在太空漂泊長達千萬年後降落在地球的南極洲。當時 NASA 對此項研究成果的發表相當慎重，時任美國總統之柯林頓先生還在白宮召開記者會，顯示這個研究成果的重要性與影響。之後科學家所爭議之處，與此次類似，關鍵在於這些隕石上所發現的所謂化石結構或有機物質，是否必定由生命現象所產生，或者透過某些自然界無機的物理化學過程也可以形成。

生命存在的間接證據 有機分子

撇開這些爭議不談，瞭解宇宙中的生命及其起源，是人們長久以往所追求的。這個渴望攸關著包括人類的生物在地球上如何孕育？在浩瀚的天際中，又或有著和人類相似的生命體？人們因此透過了各種方法來探索這個問題的答案。為了尋找地球以外的生命，從途徑與對象來說，可以透過採集樣本或是遠距間接觀測來取得生命跡象的直接證據或是生命存在的間接蹤跡。當然，對於地球以外的對象，除了少數情形以外，大抵都是得透過遙測來推斷。《尋找外星智慧生物計畫》（Search for Extra-Terrestrial Intelligence）主要便是期待能夠收到，或是攔截到外星有智慧之生物在星際空間通訊的信號。這可以算是透過遙測來直接偵測地球之外生命存在的例子。許多 NASA 的太空計畫，好比是登陸於火星的數個探測器，如果能拍攝到外星生物的影子，甚至是直接捕捉到外星生物，那就更成為地球外存在生命跡象的直接證據了。當然，目前種種的嘗試都仍還沒有發現任何不論有無智慧之外星生命存在的證據。

在間接尋找生命蹤跡的方面，什麼樣的天體與跡象是科學家研究的對象呢？從地球的角度或經驗來看，構成生命的六大元素包含了碳、氫、氮、氧、磷、與硫。這些元素進而組成了各種有機分子。舉例來說，各式的氨基酸（amino acid）或由其組成的蛋白質、亦或是核酸與以其為單位而組成，在生物所需蛋白質合成過程中所必須之核糖核酸（RNA）與去氧核糖核酸（DNA），都不脫由以上這六大元素所構成。從宇宙的角度來看，這樣的情形並不令人意外。宇宙中含量最豐富的元素是氫、氦，其次便是透過恆星內部核融合而產生的碳、氮、氧等等元素。碳的原子構造，使得它的化學性質在分子形成時能夠產生多重鍵結，提供了合成分子的多樣性，因此在有機化學中扮演了極重要的角色。

尋找與生命相關的元素及其組成的有機分子，自然是尋找宇宙中生命蹤跡的手段之一。有機分子在宇宙中是如何地形成或分布呢？研究人員又是如何觀測這些物質呢？就如同任何分子一般，有機分子內部的原子可以做小幅度的振動。而分子處於氣態時，本身更可以在空間中自由轉動。分子振動或轉動的快慢對應到分子本身所擁有能量的多寡。每一種分子因為結構的不同而具備其特有的能量狀態階梯（稱之為「能階」）。也就是說，每一種分子只能存在於它特有的振動或轉動能量系列中，與在其間做類似上下階梯般的跳躍。分子振動或轉動的快慢或其所處的能階，可以透過和其他分子及粒子碰撞，或經由吸收或放射光線（電磁波）而改變。當分子吸收或放射光線時，所觀測的電磁波就會呈現吸收或放射的光譜。因為不同分子具備其不同的能階，因而會對應到特有的光譜。這些分子吸收或放射譜線，就好比人類的「指紋」一般，研究人員依此可以利用這些特定的「指紋」來認定並研究分子的存在與其所處的物理環境。

宇宙中發現的有機分子

1930年代起，天文學家首先在恆星之可見光波段的吸收光譜中發現一些雙原子分子（如 CH、CN）存在的證據。然而針對星際空間中的氣體而言，一般咸信每立方公分的氣體內大約僅含數百個氫分子，這相當於是地球表面大氣密度之10的負19次方，也就是10,000,000,000,000,000分之一。如果這樣的數字不足以提供一個具體的概念，您或許可以想像將僅僅1c.c.（1立方公分，或半個手指節體積）的空氣，稀釋到等同涵蓋整個台北盆地從地面至三十公里的高空內之巨大空間中。在這樣稀薄的密度下，很難想像分子能夠有足夠的機會相互碰撞並產生化學反應。因此人們並不期待再星際介質（interstellar medium）中能夠再發現更多種類的分子。

然而，濫觴於1970年代的毫米波天文學，帶來了出人意表的結果。透過當時新興發展的無線電波技術，天文學家在星際介質中一次又一次偵

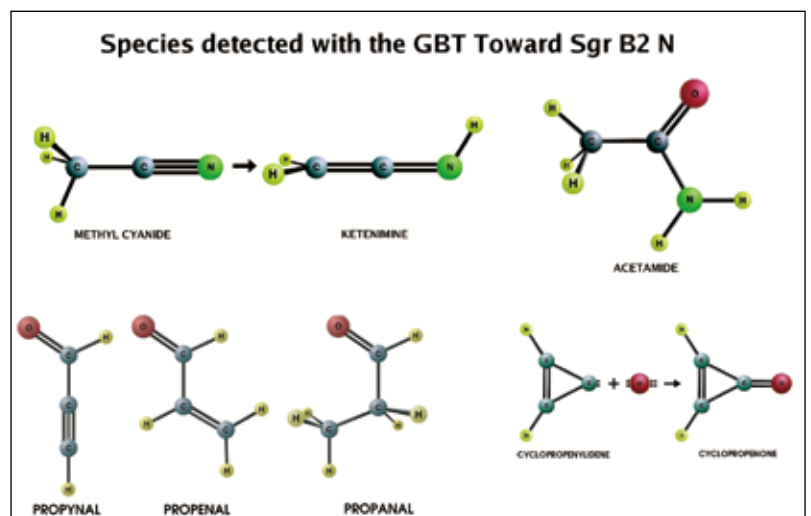
組成原子數	分子式
2 (雙原子分子)	H ₂ , CH, CH ⁺ , NH, OH, OH ⁺ , HF, C ₂ , CN, CN ⁺ , CO, CO ⁺ , N ₂ ⁺ , SiH, NO, CF ⁺ , HS, HS ⁺ , HCl, SiC, SiN, CP, CS, SiO, PN, AlF, NS, SO, SO ⁺ , NaCl, SiS, AlCl, S ₂ , FeO, KCl
3	H ₃ ⁺ , CH ₂ , NH ₂ , H ₂ O, H ₂ O ⁺ , C ₂ H, HCN, HNC, HCO, HCO ⁺ , HN ₂ ⁺ , HOC ⁺ , HNO, H ₂ S, H ₂ S ⁺ , C ₃ , C ₂ O, CO ₂ , CO ₂ ⁺ , N ₃ , N ₂ O, HCS ⁺ , NaCN, MgCN, MgNC, c-SiC ₂ , AlNC, SiCN, SiNC, C ₂ S, OCS, SO ₂
4	CH ₃ , H ₃ O ⁺ , C ₂ H ₂ , H ₂ CN, HCNH ⁺ , H ₂ CO, c-C ₃ H, l-C ₃ H, HCCN, HNCO, HNCO ⁻ , HOCO ⁺ , H ₂ CS, C ₃ N, C ₃ O, HNCS, SiC ₃ , C ₃ S
5	CH ₄ , NH ₄ ⁺ , CH ₂ NH, H ₃ CO ⁺ , CH ₃ OH, SiH ₄ , c-C ₃ H ₂ , H ₂ CCC, CH ₂ CN, H ₂ CCO, NH ₂ CN, HCOOH, C ₄ H, C ₄ H ⁻ , HC ₃ N, HCCNC, HNCCC, C ₅ , SiC ₄
6	C ₂ H ₄ , CH ₃ CN, CH ₃ NC, NH ₂ CHO, CH ₃ SH, H ₂ CCCC, HCCCCH, H ₂ C ₃ N ⁺ , c-H ₂ C ₃ O, HC ₂ CHO, C ₅ H, HC ₄ H, C ₅ N
7	CH ₃ NH ₂ , CH ₃ CCH, c-C ₂ H ₄ O, CH ₃ CHO, CH ₂ CHCN, C ₆ H, C ₆ H ⁻ , HC ₅ N
8	CH ₃ CH ₃ , C ₃ H ₄ O, CH ₂ OHCHO, CH ₃ COOH, HCOOCH ₃ , CH ₂ CCHCN, CH ₃ C ₃ N, C ₆ H ₂ , HCCCCCH, C ₇ H
9	C ₂ H ₅ OH, CH ₃ OCH ₃ , CH ₃ CH ₂ CN, CH ₃ CONH ₂ , CH ₃ C ₄ H, C ₈ H, C ₈ H ⁻ , HC ₇ N
10	CH ₃ CH ₂ CHO, CH ₃ COCH ₃ , HOCH ₂ CH ₂ OH, NH ₂ CH ₂ COOH
11	CH ₃ C ₆ H, HC ₉ N
12	C ₆ H ₆
13	HC ₁₁ N

表一：星際與環星介質的分子種類

測到了新的譜線。透過與實驗室的測量或量子力學的計算數據比對，天文學家證實了這些譜線來自於各式各樣的分子。這些分子伴隨著宇宙中最主要、最豐富的成份—氫，共同以氣體形式存在於星際空間中所謂分子雲 (molecular cloud) 內。

迄今，針對星際介質與拱星介質 (circumstellar medium) 的天文觀測已經發現了至少 115 種不同的分子！這還不包括了由同位素原子所組成的不同分子 (例如 ¹²CO、¹³CO、C¹⁸O)。從表一列出之目前所發現的分子種類可以看出，他們包含了由兩個原子所組成的雙原子分子，到由十多個原子所組成的長鏈或複雜結構的分子。表一中有一些分子是地球上的環境無法自然合成或存在的，但也不乏一些日常生活就會接觸到，耳熟能詳的化學物質，好比是一氧化碳 (CO) 與二氧化碳 (CO₂)。這其中更包括了各種的有機分子，簡單的例如甲烷 (CH₄)、甲醇 (CH₃OH)、乙醇 (或酒精, C₂H₅OH)、乙醚 (CH₃OCH₃)、乙酸 (或醋酸, CH₃COOH) 等等；也多有組的同分異構物 (同樣的原子組成之結構不同的分子)。例如乙酸 (CH₃COOH) 與甲酸甲酯 (HCOOCH₃) 即是一組同分異構物。

從分子組成的複雜度來看，當酸類，醇類，酯類，甚至醣類分子都已經在星際空間中被偵測到時，



圖二：透過美國國家電波天文台(NRAO) 位於西維吉尼亞州之 Green Bank Telescope (GBT) 在星際空間分子雲中所偵測到的多種複雜有機分子與分子結構圖。

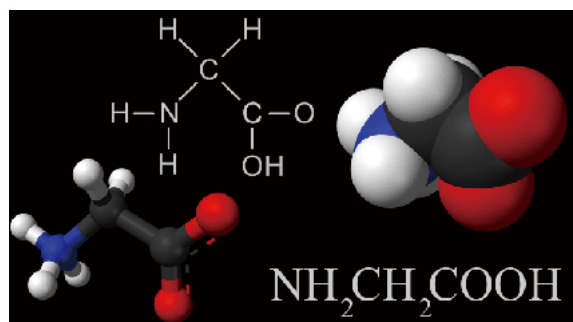
(圖片來源：<http://www.cv.nrao.edu/~aremijan/PRIMOS/>)

許多研究人員戮力進一步找尋的目標便是組成蛋白質的各式氨基酸，好比膠原蛋白中所富含的甘氨酸（glycine），又或是組成核酸之嘧啶（pyrimidines）與嘌呤（purine）等等可能與生命更有相關性的分子物質。

要成功地偵測這一類的分子相對是困難許多。首先，結構比較複雜的分子，它們的振動或轉動的模式也相對地變複雜變多，分子譜線的數量隨之增加，單一譜線吸收或放射的強度則相對減弱。其次，由於它們較為複雜的化學結構，相對而言可能也比較不容易合成，因此我們並不期待這類分子的含量會很多。這兩項因素使得分子譜線的強度變得微弱而難以偵測。

儘管如此，自1970年代末期，也就是無線電/毫米波天文學一開始蓬勃發展後，研究人員便不斷地嘗試在星際空間中尋覓氨基酸的蹤跡。迄今近四十年後，的確有一些正面的偵測結果，不過仍然需要更進一步的觀測來證實。隨著現代觀測儀器與技術的進步，許多研究人員自2000年代也開始對於嘧啶或嘌呤進行初步的探索，雖然目前仍沒有明確的結果，可以想見的是未來一定會有更多的嘗試。

儘管在星際空間中尋找蛋白質或是核酸成份的努力尚未成功，先前直接針對隕石採樣的研究，其實已經發現了這些來自太陽系本身的天外訪客內部包含了豐富的有機成份，其中甚



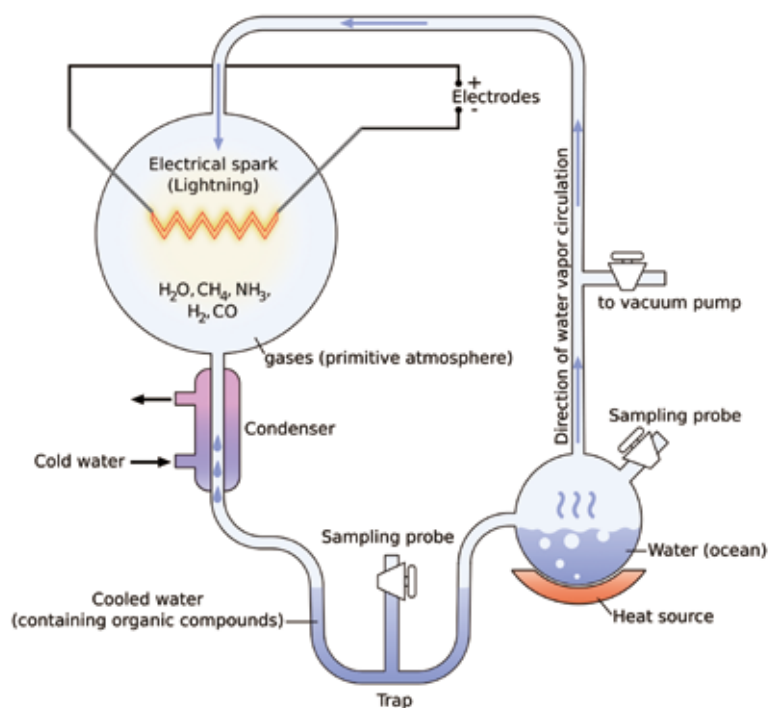
圖三：甘氨酸(Glycine)是二十種組成生命體蛋白質之氨基酸中組成構造最簡單的氨基酸分子。(圖片來源：<http://www.windows2universe.org/> 及 Ben Mills)

至包括了多種氨基酸的存在。也就是說，許多結構複雜的有機分子，已經確實在地球之外存在了。因此，比較重要的問題其實是它們何時並且如何形成的。因為這些分子形成的條件，可能攸關著與生命相關之化學過程在廣大宇宙中發生的普遍性。

由無機至有機 米勒-尤瑞實驗

早在1950年代，芝加哥大學的史坦利·米勒（Stanley Miller）與哈羅德·尤瑞（Harold Urey）為了探討亞歷山大·歐帕林（Alexander Oparin）的學說，檢驗早期地球的環境是否得以讓無機物質自然合成為有機化合物，而進行了著名被稱為原生湯（Primordial Soup）的《米勒-尤瑞實驗》（Miller-Urey experiment）。

他們將氫氣，水、甲烷、氨以及一氧化碳注入密室的燒瓶迴路內。其中一個燒瓶盛著沸騰的液態



圖四：米勒-尤瑞實驗（Miller-Urey experiment）之儀器設置的示意圖。

(圖片來源：Wikipedia，<http://en.wikipedia.org/wiki/>)



水用來模擬早期地球的海洋，另有一燒瓶則以電極通電以模擬閃電。透過反覆循環的過程，他們發現多種的有機化合物，包含了以甘胺酸為大宗等氨基酸分子從原有的簡單分子成份中被合成製造出來。儘管實驗中所假設的條件，如早期地球為貧氧環境（oxygen poor）等因子的不確定性，讓此實驗持續存在著爭議與挑戰，這個研究生命起源的經典實驗，成功地為複雜之有機分子的合成，提供了一個可能的管道。

在星際空間中，由氫分子所組成的分子雲乃是如同太陽般的恆星與伴隨其外之行星系統所孕育之處。分子雲中的物理與化學環境即代表著恆星與行星系統形成的初始條件。因為如此，星際介質，或是更明確地說，以氫分子為主要成份的分子雲成為先前所提及為了尋找與生命相關之有機分子的主要研究觀測對象。

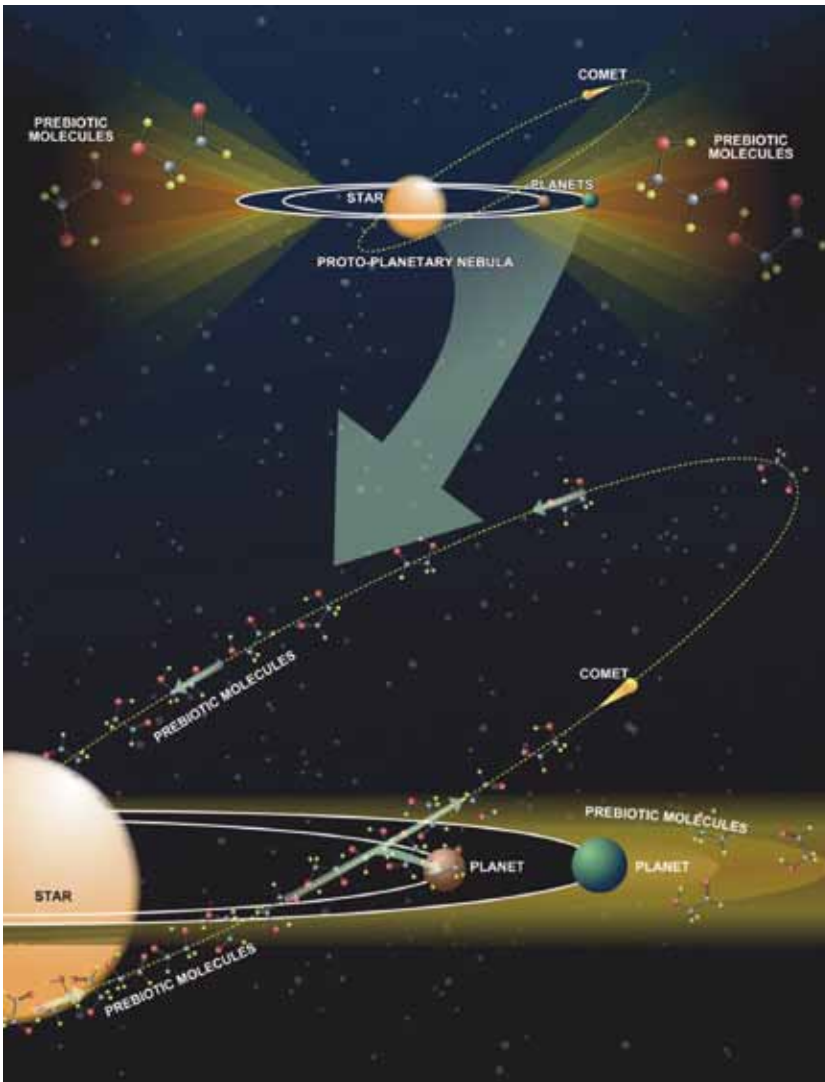
在分子雲中，大自然是透過何種過程，達到類似《米勒-尤瑞實驗》的效果，將無機物質轉化為有機物質，進而製造出如酸類、醣類、或甚至氨基酸分子呢？如同先前所提到，星際空間中氣體的密度相當稀薄，因此不同於一般地球上所面臨的情況，多個反應物（好比原子、分子，或是離子、電子，甚至光子）能夠同時遭遇、碰撞並進行化學反應的機會相當微小。因此，在稀薄的星際介質或分子雲中氣態化學反應的特性便是僅考慮以兩個反應物為中心的二體反應為主。但是，即使盡可能應用完備的化學反應式網絡與採用最新的化學反應係數，採用僅僅考慮純氣態反應的化學模型來嘗試模擬分子雲的化學組成時，科學家面臨了很大的困境—某些分子，好比是複雜的有機分子，在分子雲中的含量無法得到滿意的解釋。

其實，分子雲除了分子氣體外，還有所謂的星際塵埃（interstellar dust）。這些大小約為數百至上千奈米的塵埃粒子，本身主要大概是碳化物或是矽化物。碳原子或者是矽原子在恆星內部由核融合產生後，在恆星演化後期的階段，便經由恆星風或是超新星爆炸，而得以從恆星的內部被釋放到星際空

間，並在冷卻的過程中結合成為較大的塵埃粒子。從穿透星際塵埃之背景星光的可見光與紅外線光譜中，可以證實塵埃主要為碳，矽成份。但更加有趣的是，在這些光譜中經常能夠同時看到許多分子所造成的吸收譜線。這些由原子間鍵結振動所造成的分子振動譜線，顯示了分子位於固態塵埃表面的冰層（ice mantle）中。塵埃表面除了具備吸附分子的能力，更重要的是其能幫助或催化特定化學反應的進行。某些原本很難在稀薄氣態中互相遭遇的反應物，透過這種催化表面的存在而能夠有機會在表面接觸，或者是反應物能夠透過催化表面，吸收或釋放出化學反應時相關的熱（能）量，而使得反應得以完成。研究人員相信，這種星際塵埃表面的催化功能，得以讓分子雲中產生許多原本無法經由純氣態反應合成的複雜之有機分子。

一旦與生命相關的有機分子能夠在星際雲氣中合成，它們是否能夠繼續在之後類似早期太陽系的雲氣中存活呢？針對彗星的天文觀測與研究顯示，彗星中的確蘊藏了各種複雜的有機分子物質。較新的例子中，好比 NASA 的星塵號（Stardust）太空船在威德二號（Wild 2）彗星的彗尾氣體採樣中所發現的微量甘胺酸。目前，我們並不能確定這些分子是否在先前的星際雲氣中便已經合成，進而存在於彗星中，還是它們在早期的太陽系雲氣中才產生。同時，這些有機分子能夠經由隕石或彗星帶到如同早期地球的行星上嗎？還是會受到來自像太陽之中心恆星的高能量輻射，亦或是受到太陽風中的帶電粒子作用而被破壞？如果他們能夠留存於行星的表面，又是否能進一步促成生命現象的產生呢？我們對這種問題都還沒有肯定的瞭解與答案，但如果這一連串問題的答案是肯定的，那麼是否意味著生命的種子在宇宙的各處已經被撒下？星際間有機分子的存在，的確給人無限想像與探索的空間。

除了不斷探索有機分子在宇宙中的存在，人們也同時戮力於尋找水的蹤跡。一般認為生命的發展，除了必備的分子要素外，還需要孕育生命不可或缺的環境要件-水。透過液態水，生命所需



圖五：星際空間之有機分子可能存在於早期太陽系星雲與彗星中的示意圖。
(圖片來源：NRAO/AUI 及 Bill Saxton，<http://images.nrao.edu/Miscellaneous/Astrochemistry/>)

之養分以及訊息才得以流動及傳遞。因此，許多對太陽系內行星或衛星的太空船探測，都在嘗試偵測或證實水（或者是冰）以及海洋存在的證據。在太陽系外行星的探索中所經常用到之“適居區”(Habitable Zone)的概念，也是根據水是否能在行星表面存在，不會因為太接近其“太陽”而被蒸發殆盡，或太遠於“太陽”而完全結凍來訂定。

然而，當我們嘗試在外太空中尋找生命的蹤影時，或許必須謹記著我們所探索的方法與對象，都僅僅是根據在地球上所得到與累積經驗與認知。事實上，我們對地球上生命形態本身的認知其實也仍然是極為有限的。相較於人類所擅於存在的環境，大自然有種種或被稱之為嗜極端菌(extremophile)的生物，它們可以在

或者甚至是需要各種人類不可承受之極熱、極冷、極酸，極鹼、等等“極端”環境中生長繁殖。去年(2010)底由 NASA 所發表的一項研究成果，或許更代表著人們對生命的認知需要改寫。由 NASA 天文生物學研究所(Astrobiology Institute)的吳爾芙西蒙博士(Felisa Wolfe-Simon)與美國地質調查局(U.S. Geological Survey)組成的研究團隊採集了美國加州東部莫諾湖(Mono Lake)底部的沈積物中的微生物，並在培養的過程中，成功地以砷(arsenic)取代磷(phosphorus)進行培養。過去的經驗告訴我們，砷對生物來說是劇毒物質。因此這一個新發現，似乎代表著構成生命的六大要素之一竟可被別的元素取代。如果這個研究成果得到進一步的證實，那我們對於生命與其要素的定義，必將重新改寫！

尋找地球與其所孕育之生命的根源，是驅動著天文研究的重要動力之一。尋找宇宙之中與生命相關之有機分子的存在與分布，只是解開這一個大謎團中的一小步。展望未來，我們或許可以樂觀地期待橫跨天文，地質，生物，化學等等領域的研究，能夠慢慢將從地球上與從太空中得到的一絲絲線索將之串聯起來，從而勾勒出我們的“根”。

呂聖元:中研院天文所助研究員