

地球生命的起源

撰文／瑞卡杜（Alonso Ricardo）、索斯達克（Jack W. Szostak） 翻譯／林雅玲

科學家持續的研究有了最新進展，或許可解開地球上第一個生命體是如何從一團無生命物質中誕生的。

地球上所有活細胞（包括最簡單的細菌）都充滿精巧的分子裝置，足以讓任何一位奈米科學家嫉妒。當這些分子機器在細胞裡晃動、旋轉或游移，它們可以切斷、連結並複製遺傳分子；運送養份或者將之轉換成能量；建構與修補細胞膜；傳遞動力、化學或電訊號。這份功能清單可以一直列下去，而且隨時都有新發現。

大約在37億年前，第一個生命從無生命物質中誕生了，不過實際上我們很難想像，細胞內的裝置（大部份是以蛋白質為基礎的催化劑酵素）是如何自然形成的。固然美國芝加哥大學的米勒（Stanley L. Miller）和游理（Harold C. Urey）早在1950年代的研究證實，在適當的條件下，簡單的化學分子能輕易形成蛋白質的組裝單位（胺基酸）；但要形成蛋白質或酵素，卻是另一回事。

細胞製造蛋白質的過程牽涉多種酵素，它們將DNA雙螺旋拉開來擷取基因裡的資訊，轉換成製造蛋白質的藍圖RNA，並將其轉譯成最終產物。因此，要解釋生命如何開始，便遭遇了嚴重的矛盾：生命的起

始似乎是利用蛋白質（以及儲存在DNA裡的資訊）來製造蛋白質。

然而，如果第一個生命體完全不需要蛋白質，這個矛盾也就消失了。近期的研究成果指出，類似DNA（或其近親RNA）的遺傳分子可以自動形成。而且這些分子可以折疊成各種形狀，並做為原始的催化劑，它們也許不需要蛋白質就能自我複製（繁殖）。最早的生命形式可能是脂肪酸構成的簡單膜狀物（這種結構能自然形成），裡面包覆著水與這些能自我複製的遺傳物質。這些遺傳物質可能攜帶了性狀的編碼，並能代代相傳，就像現今所有生物的DNA一樣。接著，可能是偶然出現在複製過程的隨機突變推動了演化，讓這些早期細胞能適應環境、彼此競爭，最終轉變為我們所知的生命形式。

對科學界來說，第一個生命體的真實面貌以及生命起源的環境，或許永不可考。但是研究至少可以幫助我們了解可能的情形，最終的挑戰則是建構可以繁殖與演化的人工生命體。重新創造生命將會幫助我們了解生命可能是如何開始、生命存在其他星球的可能性，以及生命究竟是什麼。

重點提要

- 研究人員發現了遺傳分子RNA如何從地球早期的化學物質自行合成而來。
- 攜帶了類似RNA分子的原始細胞能自動組裝、繁殖與演化，因此成就了生命起源。這個假設已獲得其他研究的支持。
- 科學家目前希望能在實驗室創造完全自我複製的人工生命體，就是要藉由生命的第二次啟動，來了解最初的生命可能如何開始。



第一種遺傳分子

總該有個起點

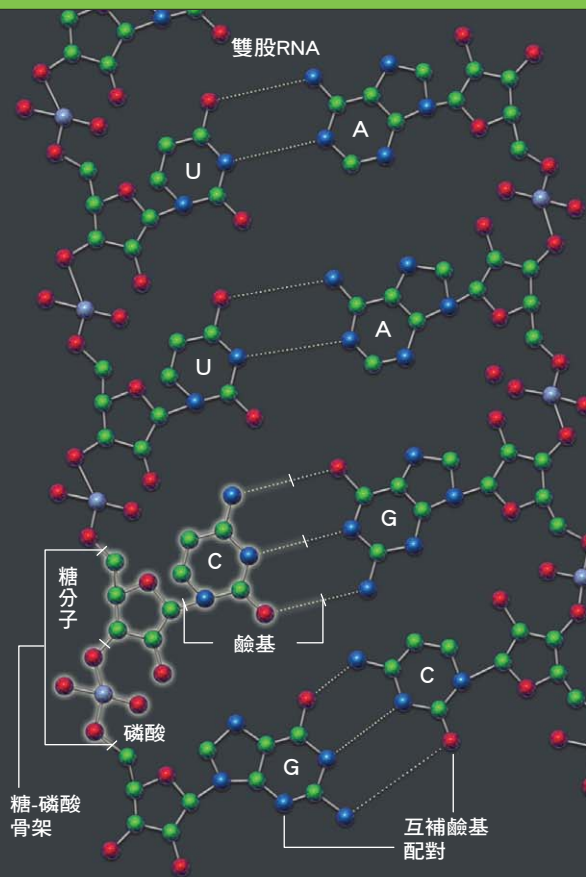
圍繞著生命起源最困難也最有趣的謎團之一，就是遺傳物質究竟如何從早期地球的簡單分子產生。從現代細胞裡RNA扮演的角色來看，它似乎比DNA還早出現。現代細胞製造蛋白質時，會先將基因從DNA轉錄成RNA，然後利用RNA做為藍圖來製造蛋白質。後面這個步驟可能先單獨存在，之後，DNA因化學性質更穩定，可做為更持久的儲存形式，才脫穎而出。

研究人員會認為RNA比DNA早出現，還有另一個理由：在現代細胞裡，RNA型的酵素（核糖酶）也扮演著關鍵角色。把RNA轉譯成蛋白質的裝置是由RNA與蛋白質組合而成的複合體，其中的催化工作由RNA負責執行。看來我們每一個細胞的核糖體都攜帶了原始RNA世界的「活化石」證據。

因此，很多研究把重點放在了解RNA可能出現的方式。DNA與RNA這兩種遺傳分子，是由名為核苷酸的小單位組合而成的聚合物（由較小分子組成的長鏈）。而核苷酸由三個不同成份組成：一個糖分子、一個磷酸分子與一個鹼基。鹼基有四種，組成了聚合物所攜帶的遺傳密碼。DNA核苷酸裡的鹼基可能是腺嘌呤、鳥嘌呤、胞嘧啶或胸腺嘧啶，分別以A、G、C或T來表示。在RNA密碼裡，尿嘧啶（U）取代了T（參見右上方〈第一種遺傳分子〉）。鹼基是富含氮原子的化合物，彼此之間根據簡單的法則結合：也就是A與U（或T）配對，而G與C配對。這種鹼基配對形成DNA扭曲階梯（就是耳熟能詳的雙螺旋）的各階，這樣的專屬配對關係對於準確複製遺傳資訊非常重要，細胞也因此才能繁殖。同時，磷酸與糖分子則形成每一單股DNA或RNA的骨架。

經由一連串的步骤，鹼基能由氰化物、乙炔與水自動形成，這些簡單分子必定存在地球初始的化合物中；而糖分子也很容

地球上第一種能複製與演化的「生命體」，可能將遺傳訊息存放在類似RNA（與DNA近似）的分子中。DNA與RNA都是核苷酸（右圖左下灰色量邊者）組成的長鏈，所以主要的問題是第一個核苷酸如何從較簡單的化學物質中產生。核苷酸由鹼基、磷酸與糖分子這三種成份組成，它們都能自動形成，但無法輕易以正確的方式結合（右圖中）。然而最近的研究顯示，至少有兩種型式的RNA核苷酸（含有C與U鹼基的核苷酸）可以經由不同的途徑形成（最右圖）。（在現代生命體中，RNA有A、C、G、U四種鹼基，這也是遺傳的密碼。）



生命是什麼？

科學家一直努力想定義「生命」，並希望這定義足以包含尚未發現的生命型式。以下是幾個較知名的定義：

1. 物理學家薛丁格（Erwin Schrödinger）建議將生命系統的特質定義為「可以對抗大自然失序（熵）的傾向而進行自我組裝」。
2. 化學家喬伊斯（Gerald Joyce）的「工作假說」（被美國航空暨太空總署所採用）定義生命是「能自我維持且進行達爾文式演化的化學系統」。
3. 由波蘭生物學家考澤涅夫斯基（Bernard Korzeniewski）提出的「模控定義」：生命是一個擁有自我回饋機制的網絡。

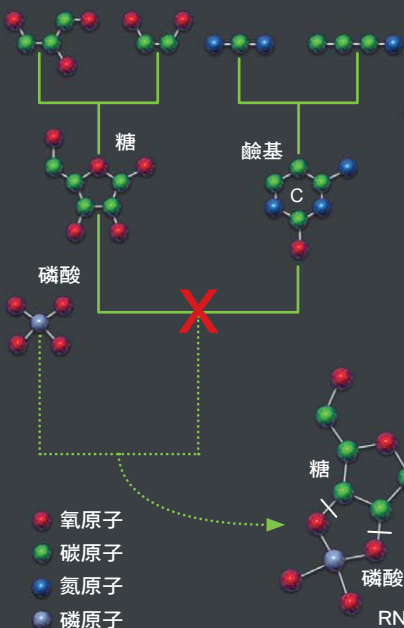
易從簡單的起始物形成。100多年前人們就已經知道，加熱含甲醛的鹼性溶液可以獲得多種糖分子，而甲醛也存在於年輕的星球。然而，問題是如何得到「正確」的糖以製造核苷酸，例如RNA所需的核糖。核糖與另外三種相近的糖分子，都可由兩種較簡單、分別含有兩個和三個碳原子的糖分子結合而成。然而，核糖容易形成並不能解釋為何它在地球上含量豐富，因為核糖很不穩定，甚至在微鹼性溶液裡也很快就分解。在過去，這些觀察結果使得很多研究人員認為，第一個出現的遺傳分子不可能含有核糖；但是，我們當中的瑞卡杜和其他研究人員已經發現能讓核糖穩定存在的方法。

核苷酸的磷酸部份是另一個有趣的難題。磷是磷酸分子的關鍵元素，它在地殼的含量豐富，但是主要存在難溶於水的礦

組合失敗的核苷酸

化學家一直無法找出鹼基、磷酸與核糖（RNA的糖成份）自然結合以產生RNA核苷酸的路徑。

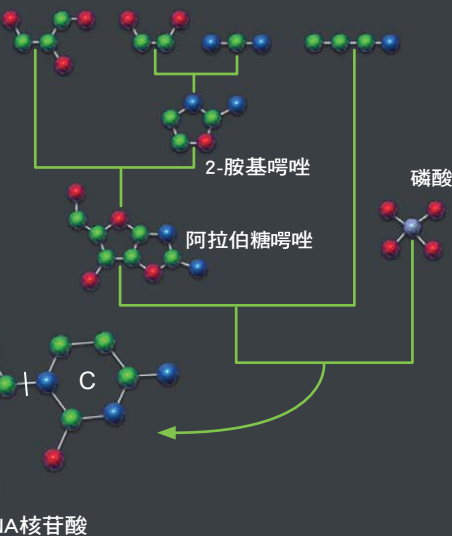
第一個活細胞出現前存在的化學物



新的合成路徑

在磷酸存在的狀況下，製造鹼基與核糖的原始材料會先形成2-胺基嘔唑，這是包含部份糖分子與部份鹼基（C或U）的分子。進一步反應會生成完整的核糖鹼基，接著變成完整的核苷酸。這個反應也會產生「錯誤」的原始分子結合物，但是經過紫外光曝曬後，只有「正確」型式（核苷酸）才能存留。

第一個活細胞出現前存在的化學物



物中，而目前認定第一個生命卻是在水中誕生的，所以現在也不清楚磷酸如何進入生命起源以前的化學混合液。高溫的火山口能將含有磷酸的礦物轉化成可溶解的磷酸，但是釋放的量不多（以現今火山釋放量來估計）。磷化合物的另一個完全不同的可能來源是磷鐵鎳礦（schreibersite），這通常可在某些隕石裡找到。

2005年，亞利桑那大學的帕賽克（Matthew Pasek）與勞瑞塔（Dante Laurretta）發現，水裡的磷鐵鎳礦被侵蝕後會釋放其內含的磷成份。這個路徑似乎有希望，因為它釋放磷而非磷酸，磷在水中比較穩定，也較能和其他有機（含碳）化合物作用。

怎麼組裝小零件？

我們對於鹼基、糖與磷酸的形成途徑有

了最基本的輪廓，下一步就是正確接起這些成份。不過幾十年來，這也是讓「生命起源化學」領域嚐到最多挫敗的步驟。只是單純地把三種成份與水混合並不會自動形成核苷酸，主要是因為每一個連接反應都會釋放一個水分子，而這在水溶液裡通常不會自動發生。要形成這種化學鍵必須有能量來源，例如添加可幫助反應的高能化合物，早期地球也許有很多這種化合物，然而在實驗室裡使用這些分子，即使是最好的結果，仍無法有效引發反應，大部份的實驗都完全失敗。

這個領域最大的驚喜在今年春天出現，英國曼徹斯特大學的蘇瑟蘭（John Sutherland）與同事宣告，他們找到一個可能的核苷酸形成途徑，同時能避開核糖不穩定的困擾。這群有創意的化學家捨棄了將鹼基、糖與磷酸連接在一起，以製造核苷酸的傳統方法。他們使用了相同的簡單起始材料，包括氰化物、乙炔以及甲醛的衍生物，但他們並非分別形成鹼基與核糖後再嘗試讓它們結合，而是將所有的起始材料與磷混合。經過複雜的反應過程，而且磷在其中數個步驟做為關鍵催化劑，生成了一個名為2-胺基嘔唑（2-aminooxazole）的小分子，可以視為部份糖分子與部份鹼基的結合（參見左上方〈第一種遺傳分子〉）。

這個穩定的小分子有個重要的性質：高揮發性。或許在早期地球的一個池塘裡，同時存在少量的2-胺基嘔唑與其他化學物。一旦水蒸發了，2-胺基嘔唑也會跟著揮發而純化並且濃縮在另一處，在那兒它

▼今年5月，英國曼徹斯特大學的蘇瑟蘭與同事證實，核苷酸能經由化學反應自動形成，同時也解決了生命起源化學領域長久以來的問題。下圖是蘇瑟蘭（左二）與實驗室成員的合影。



「先有RNA」理論之外的方案

先有胜肽核酸：胜肽核酸(PNA)中的鹼基是接在蛋白質骨架上。因為PNA比RNA簡單，化學性質也較穩定，有些研究人員相信它可能是地球上第一種生命型式所運用的遺傳聚合物。

先有代謝：因為很難解釋RNA如何從無生命物質產生，所以有些研究人員提出，生命一開始是個代謝能量的催化劑網絡。

胚種說：因為地球形成與第一個生命型式出現「只」相距幾億年，所以有些科學家認為最早的生命體可能來自其他星球。

會累積成原料儲存，等待進一步的化學反應，以形成完整的糖與鹼基結合型式。

這個反應鏈裡另一個重要且令人滿意的部份，是前幾個步驟的某些副產物可以推動後面的步驟。這個優美的反應並不產生絕對「正確」的核苷酸：某些例子中，糖與鹼基不是以適當的空間角度結合。但神奇的是，暴露在紫外光照射下（模擬早期地球照射淺水池塘的強烈太陽紫外光）會破壞「不正確」的核苷酸，只留下「正確」的核苷酸，最終的結果也就是只留下胸腺嘧啶與尿嘧啶。當然，我們還需要形成腺嘌呤和鳥嘌呤的方式，這在目前仍然是個挑戰，但對於解釋早期地球如何形成RNA之類的複雜分子，蘇瑟蘭團隊的研究成果是重要的一步。

溫暖的黏土環境

一旦有了核苷酸，形成RNA分子只剩最後一步——「聚合」：一個核苷酸的糖分子與另一個核苷酸的磷酸分子之間形成化學鍵，使核苷酸得以串成一條長鏈。這種化學鍵在水中也不會自動形成，因此需要外加能量。研究人員在具化學活性型式的核苷酸溶液中加入多種化學物，能製造出2~40個核苷酸長的短鏈RNA。1990年代晚期，美國壬色列工學院的費里斯(Jim Ferris)與同事指出，黏土礦物有助於該反應，而產生大約50個核苷酸長的短鏈(現今的典型基因則長達數千到數百萬個核苷酸)。礦物具有會和核苷酸結合的特性，能讓活性分子互相靠近，因此有助於分子之間形成鏈結(參見右上方〈生命形成之路〉)。

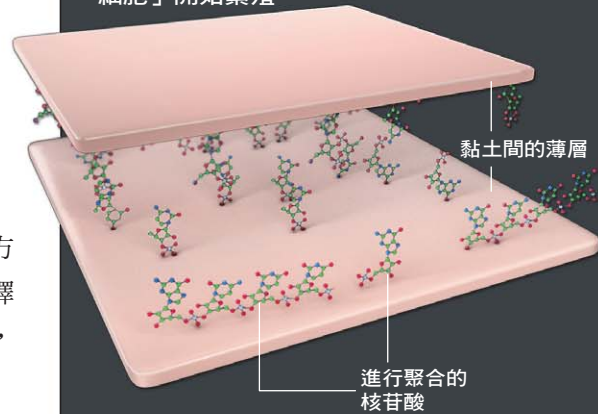
這個發現更加強了部份研究人員的推測：生命可能起始於礦物的表面，或許是在溫泉形成的池塘底部、富含黏土的泥濘當中。

不過，了解第一個遺傳聚合物如何出現，還是無法解決生命開始的謎團。要「活著」，生命體必須能進一步複製，這

從分子到生命體

生命形成之路

化學反應創造出第一種遺傳組裝單位與其他有機分子後，地球物理的運作帶領它們到新環境並且讓它們的濃度提高。這些化學物質組合成更複雜的分子，最終形成原始細胞。大約37億年前，地球物理可能也推動這些「原型細胞」開始繁殖。



RNA繁殖的場所

在核苷酸形成的水中，它們幾乎沒有機會結合成儲存遺傳訊息的長鏈。但是在適當的條件下，例如分子黏著力讓它們在黏土薄層靠得夠近(上圖)，核苷酸就可能結合成類似現代RNA的單股。

個步驟包括複製遺傳資訊；在現代細胞裡，主要是由蛋白質構成的酵素負責執行這個複製功能。

但是以適當核苷酸序列組成的遺傳聚合物會折疊成複雜形狀，並能催化化學反應，就像現今的酵素。因此在最早的生命體裡，RNA似乎有可能主導自身的複製。這個想法促成了分別在我們實驗室以及麻省理工學院巴特爾實驗室所進行的幾個實驗，我們並成功「演化」出新的核糖酶。

我們從數兆個隨機組成的RNA序列開始，接著選擇其中具催化性質的分子加以複製。在每次的複製過程中，某些新RNA會產生突變，變成更有效率的催化劑，我們純化出這些分子並再次進行複製。藉由定向演化，我們製造了能催化其他短鏈RNA複製的核糖酶，不過它們還是無法複製自己來產生子代RNA。

最近，「RNA自我複製」理論得到斯克

關於作者

瑞卡杜(左)出生於哥倫比亞共和國卡利市，目前是美國哈佛大學霍華休斯醫學研究中心的副研究員。他一直對生命起源有著濃厚興趣，目前正在研究能自我複製的化學系統。索斯達克(右)是哈佛醫學院與麻州綜合醫院的遺傳學教授，他致力於在實驗室構築生命的結構，以驗證關於生物運作的知識。



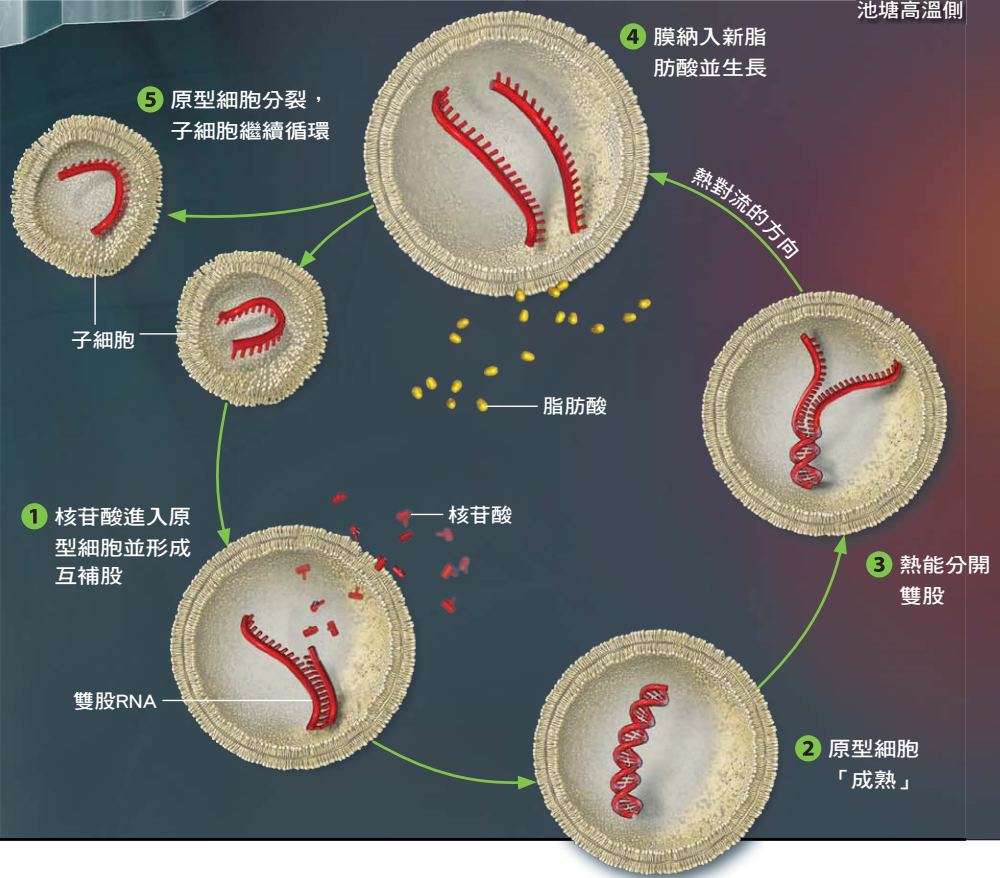
池塘低溫側

池塘高溫側

受到幫助的繁殖

新形成的聚合物一旦從黏土釋出，可能會被吞進充滿水的囊泡（由脂肪酸自動形成的膜包覆而成）。這些原型細胞可能需要某些外來助力，才能複製遺傳物質並開始繁殖。其中一個可能的情形（右圖），原型細胞在池塘裡冰冷與溫暖的兩側來來回回，所以可能會在一側部份結凍（早期地球大部份地區都是寒冷的），而在另一側因火山的熱能而解凍。

在冰冷的那一側，單股RNA做為模板①，核苷酸以A、U配對及C、G配對而形成新的雙螺旋②。在溫暖的那一側，熱能會讓雙股分開③。膜可能也會逐漸生長④，直到原型細胞分裂為「子細胞」⑤。接著便可以再次開始循環。



里普斯研究院的林肯（Tracey Lincoln）與喬伊斯（Gerald Joyce）的驗證，他們演化出兩種能互相複製的RNA核糖酶，方法是將兩股較短的RNA鏈結合在一起。遺憾的是，實驗的成功有賴事先存在的RNA片段，而它們又長又複雜，不可能自動形成並累積。不過，這些研究提醒我們RNA具有原始催化能力，可催化自身的複製。

還有更簡單的方法嗎？我們與其他研究人員正在探索不藉助催化劑就能複製遺傳分子的化學方法。我們最近的實驗，是從單股DNA模板為起點（選DNA是因為它比較便宜且方便操作，但要用RNA也可以）。我們將DNA模板與單獨的核苷酸加入溶液混合，看看核苷酸是否會藉由互補的鹼基配對（A與T、C與G結合）而與模板結合，並聚合而形成完整的雙股。這將是完成複製的第一步驟：一旦雙股形成，兩股分開後便可以成為模板再進行互補

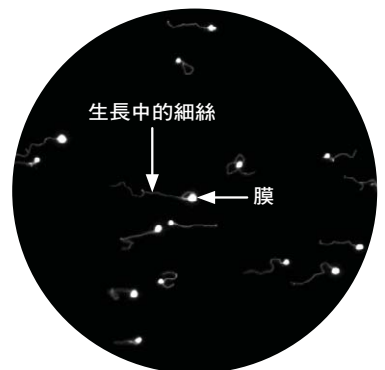
股的複製。若利用一般的DNA或RNA，這個反應太慢，但稍微改變糖分子的化學結構（將一個羥基改變成含氮與氧的胺基）便可讓聚合的速度快上數百倍，使得互補股可以在數小時內形成，而不是好幾個星期後。新聚合物表現得就像典型的RNA一樣，只是它擁有氮磷鍵結而不是一般的氧磷鍵結。

形成生命的囊袋

如果先假設有一天，對於生命起源的化學知識空缺將會補上答案，我們可以開始考量分子如何互動，以組裝成第一個類細胞結構或「原型細胞」。

包覆現代細胞的膜主要由雙層脂質組成，其中的油性分子包括磷脂質與膽固醇等。膜讓細胞的組件可以聚在一起，也形成控制大分子進出的屏障。精巧的蛋白質包埋在膜裡，扮演將分子送進或送出的守

脂質膜是由溶解在水裡的脂肪酸自動組合而成，一開始膜呈球形，但在吸收新脂肪酸後長出細絲（如下圖顯微影像）。它們之後會變成粗管狀，接著分裂成很多小球。第一個原型細胞可能就是用這個方法進行分裂。



FROM "COUPLED GROWTH AND DIVISION OF MODEL PROTOCELL MEMBRANES," BY TING-F. ZHU AND JACK W. SZOSTAK, IN JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, VOL. 131, NO. 15, APRIL 22, 2009

現代細胞出現的旅程

生命開始出現以後，不同生命型式之間的競爭促使它們演化成更複雜的生命體。我們可能永遠無法知道早期演化的真正細節，但是這裡提出一些主要事件的可能過程，說明第一個原型細胞如何演變成以DNA為主的細胞（例如細菌）。

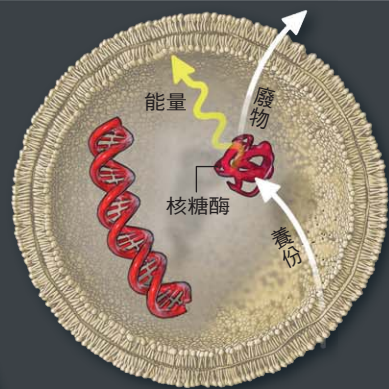
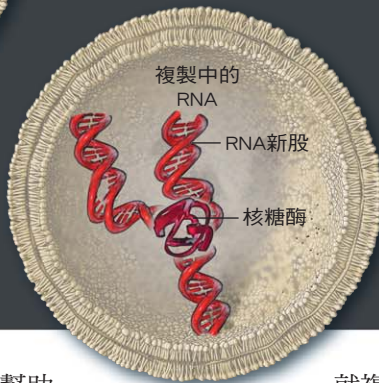


1 演化開始▲

第一個原型細胞只是個含有水與RNA的囊泡，需要外來刺激（如冷與熱的循環）才能繁殖。但是它很快就獲得新性狀。

2 RNA催化劑▼

核糖酶由RNA分子折疊而成，與蛋白質構成的酵素相似，它出現並負責某些加速繁殖與加強原型細胞膜的任务。因此，原型細胞開始可以自我繁殖。



3 代謝開始▲

其他核糖酶催化代謝，讓原型細胞可以利用環境養份進行一系列化學反應。

門員角色，還有其他蛋白質幫助

建構與修補膜。然而缺少蛋白質設備的原型細胞，究竟如何執行這些任務？

原始的膜可能是由較簡單的分子構成，例如脂肪酸，它也是複雜的磷脂質的成份之一。1970年代晚期的研究指出，膜確實能由簡單的脂肪酸自動組成，但是一般認為這些膜也構成難以克服的障壁，使得核苷酸與其他結構複雜的養份難以進入細胞。這個概念暗示，細胞必須先發展出代謝反應，以便自己能合成核苷酸。然而我們實驗室的研究顯示，只要核苷酸與膜都是較簡單、較「原始」的型式（相較於現代的核苷酸與膜），如同核苷酸一般大的分子事實上可以輕易穿越膜。

這個發現啟發我們設計一個簡單的實驗，來模擬原型細胞利用環境中的材料複製本身遺傳資訊的能力。我們製備脂肪酸構成的膜囊泡，裡頭含有短鏈單股DNA；如同之前的實驗，DNA在這裡主要做為複製新股的模板。下一步，我們讓這些囊泡和具有化學活性形式的核苷酸接觸。這些核苷酸會自動穿越膜，而且進入這個原型細胞後就排列在DNA模板上，然後彼此作用產生一條互補股。這個實驗結果證實，第一個含有RNA（或其他相似物）與少部份其他材料的原型細胞，可以不需要酵素

就複製自己的遺傳物質。

讓生命分裂

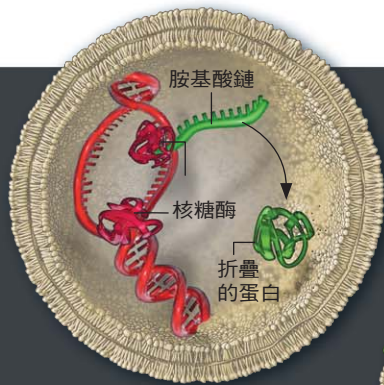
原型細胞要開始繁殖，它們必須能夠生長、複製遺傳物質並分裂成兩個相同的「子細胞」。實驗顯示，原始囊泡至少可能以兩種不同的方式生長。蘇黎士瑞士聯邦理工學院的路西（Pier Luigi Luisi）與同事在1990年代進行的研究發現，在含有囊泡的水中加入新的脂肪酸，這些膜會納入這些脂肪酸而增加膜的表面積。隨著水和其他溶解物質慢慢進入膜內，細胞體積也增加了。

我們實驗室之前的博士班學生程愛倫，以原型細胞間競爭的觀點來探索這個問題。含有RNA或相似物的原型細胞脹大，是因為水企圖進入細胞，以平衡膜內外濃度不同所造成的滲透壓。這個脹大囊泡的膜因此處在壓力下，張力讓膜開始生長，因為新分子的加入可以減輕膜的張力，降低整個系統的能量。事實上，脹大囊泡還會從鄰近鬆弛的囊泡偷取脂肪酸，造成後者皺縮。

過去幾年來，我們實驗室的另一個博士班學生朱昕以原型細胞被餵給脂肪酸後的生長情形為研究主題。我們意外發現，一開始球形囊泡並非單純變大，而是先長

出現吧！生命

研究生命起源的科學家希望能從完全人工的材料，建構能自我複製的生命體，最大的挑戰是找出能自動複製的遺傳分子。為了這個難以捉摸的特性，作者與同事正在設計並合成化學修飾的RNA與DNA。正常的RNA可能不是解決之道，因為除非這RNA鏈非常短，不然它的雙股並不容易分開來進行複製。

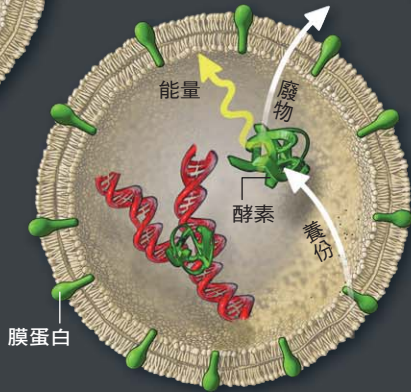


4 蛋白質出現▲

複雜的RNA催化劑系統開始將RNA密碼（基因）轉譯成胺基酸鏈（蛋白質）。後來證實，蛋白質是更有效率的催化劑，並且可以執行多樣任務。

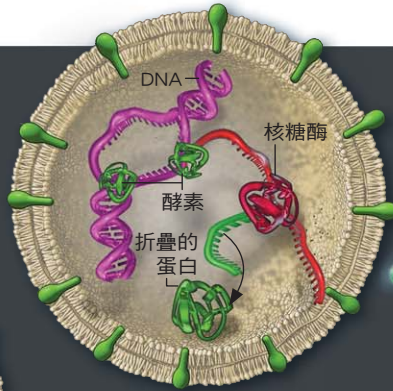
5 蛋白質接管▼

蛋白質接管細胞裡各式各樣的工作。以蛋白質為基礎的催化劑（酵素）逐漸取代大部份核糖酶。



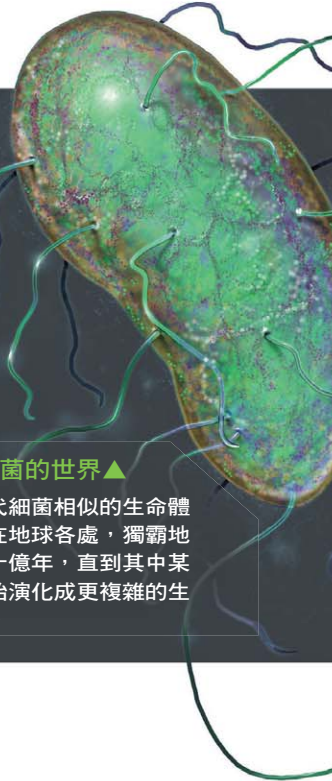
6 DNA的誕生▲

其他酵素開始製造DNA，由於DNA優越的穩定性，它負責原始遺傳分子的工作。此時RNA主要的工作是做為DNA與蛋白質間的橋樑。



7 細菌的世界▲

與現代細菌相似的生命體生存在地球各處，獨霸地球數十億年，直到其中某些開始演化成更複雜的生命體。



出一條細絲，大約過了半個小時，這個突出的細絲變得又長又粗，整個起始囊泡逐漸轉變成細管。這個結構相當脆弱，受到輕微搖晃（就像池塘水面被風激起漣漪那樣）就會斷裂成許多較小的球形「子原型細胞」，接著子細胞繼續長大，重複整個循環（參見51頁右下图）。

如果提供正確的組裝材料，形成原型細胞似乎沒那麼難：膜與遺傳聚合物各自自動組成，然後依兩者形成的時間順序不同，可以有不同的方式加以結合，例如情況之一，是膜在已成形的聚合物周遭生成，便可將聚合物包覆其中。這些充滿水與RNA的膜泡也會生長、吸收新分子、彼此競爭養份，也會分裂。但是要成為真正的生命，它們還需要繁殖與演化，尤其是它們得讓雙股RNA分開，讓兩條單股都可以做為形成新雙股的模板，然後才能傳給子細胞。

原型細胞或許無法自行啟動這些程序，但是它所需要的幫助也只是一點點。舉例來說，想像在早期地球的某個火山地區，鄰近的地表都非常寒冷（那時，到達地球的太陽能量只有現在的70%）。那裡可能有很多冰冷的小池塘，有些或許還覆蓋著冰塊，但是因為熾熱岩石的關係而讓池水保持液態。溫度的差異會導致水的對流，

以致當水裡的原型細胞流過熱岩石附近時，會突然遭遇高溫，但是當熱水與大量冷水混合，原型細胞又會迅速冷卻。突然升溫會造成雙股螺旋打開變成單股；一旦回到低溫區域，因為有單股遺傳物質做為模板，便能形成新的雙螺旋，也就是原先雙股螺旋的複製品（參見50頁〈生命形成之路〉）。

只要環境促使原型細胞開始繁殖，演化也就隨之啟動。特別是如果RNA序列在某個時間點發生突變，產生能加速RNA複製的核糖酶，也就增加了競爭優勢。最終核糖酶不需要外在幫助就能啟動複製RNA。

之後攜帶RNA的原型細胞如何演化，就比較容易想像了（參見上方〈現代細胞出現的旅程〉）。新的核糖酶讓細胞可以利用含量豐富的較簡單起始材料自行合成養份，就可能產生出代謝反應。接著，生命體可能把蛋白質加入它們的化學百寶箱。

由於蛋白質的多才多藝，因此在後來接替了RNA幫助遺傳物質複製與代謝的功能。之後，生命體可能「學會」製造DNA，因而獲得穩定的遺傳資訊儲存工具。至此，RNA世界就轉化為DNA世界，我們熟悉的生命也就正式誕生。

SA

林雅玲 清華大學生命科學研究所畢業，現於中央研究院國際研究生學程就讀博士班。

延伸閱讀

〈生命始於礦石〉，《科學人》2002年1月試刊紀念版

〈創新分子，創造生命〉，《科學人》2009年3月號

Synthesizing Life. Jack Szostak, David P. Bartel and P. Luigi Luisi in *Nature*, Vol. 409, pages 387–390; January 2001.

Genesis: The Scientific Quest for Life's Origins. Robert M. Hazen. Joseph Henry, 2005.

The RNA World. Edited by Raymond F. Gesteland, Thomas R. Cech and John F. Atkins. Third edition. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2006.

A Simpler Origin for Life. Robert Shapiro in *Scientific American*, Vol. 296, No. 6, pages 46–53; June 2007.

想了解更多生命起源嗎？請參觀美國科學博物館的多媒體計畫：「探索生命起源」的網頁：<http://exploringorigins.org>