[研究成果報導]

外星生命先驅？— 新生恆星周邊的有機化學

台灣大學物理所/中研院天文所　許世穎
中研院天文所　Dipen Sahu（沙德培）　呂聖元

宇宙中的複雜有機分子

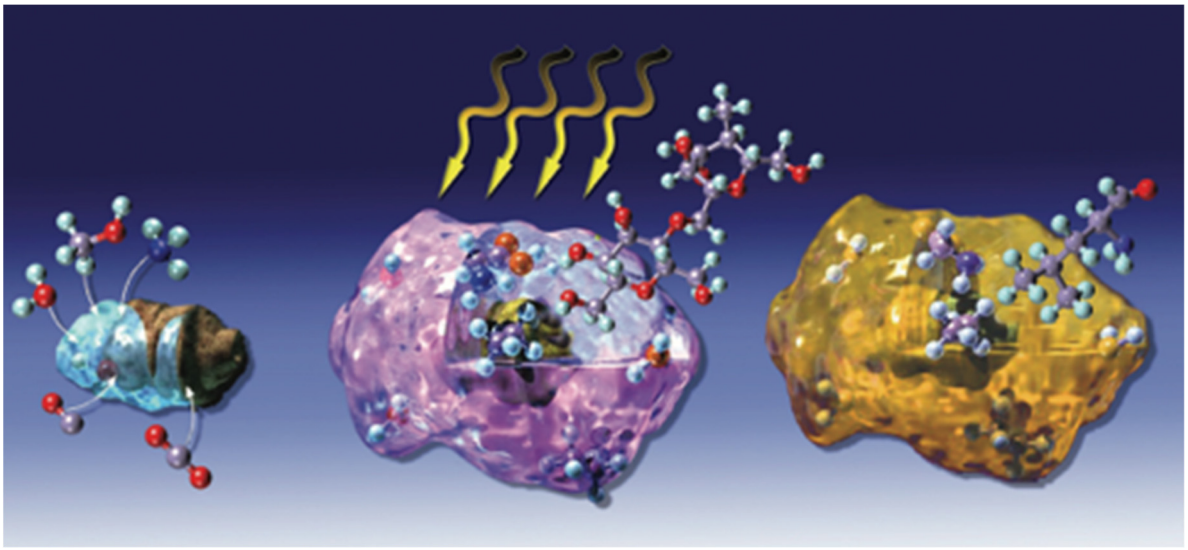
人們對於宇宙總是充滿了想像，其中一個極爲令人好奇的就是「地球上面的生命究竟如何誕生？」到底是地球早期的原始環境就足以從無到有出現生命？還是地球上最初生命的其實仰賴來自外太空要素的幫忙？這一切都還沒有確切的答案，但數十年來對於太空的探索提供了我們許多的線索。科學家們已在彗星上、隕石上、小行星上找到了許多有機分子包括胺基酸的存在[1]。有機分子是地球上生命的重要單位，探索星際中蘊含的複雜有機分子或許能讓我們更靠近生命起源的眞相。

一般大眾對宇宙的想像往往是無盡的空間中，除了氫與氦以外什麼都沒有。然而事實上，宇宙中存在著非常多的化學分子！不同的化學分子有著不同的性質，能反映出不同的物理環境。在形成恆星的星際雲氣中就存在著複雜有機分子(complex organic molecules)。要特別一提的是，在天文中「複雜」並不那麼複雜，只要 6 個原子以上組成的分子就被認爲複雜分子。如甲醇(CH_3OH)、乙醛(CH_3CHO)等在地球上構造相對簡單的分子，在天文學家的眼裡其實都是複雜的分子。

分子本身的運動包含了震動、轉動等內部運動。因爲這些運動，氣態的分子得以離散光譜的形式吸收或放出能量。這些離散光譜就像是分子的指紋一樣，可以告訴我們哪邊存在這些分子，甚至更進一步告訴我們溫度、豐度等資訊。這些光譜可以藉由無線電波望遠鏡進行觀測。舉例而



圖一　星際間的分子可以藉由高靈敏度的 ALMA 進行觀測。（圖片來源：ESO/C. Malin）



圖二　複雜有機分子在星際塵埃表面之化學過程之示意圖。（左）一開始星際塵埃上會形成冰層，增生附著上去的分子會反應形成較為簡單的分子，如 H_2O、CO_2、CO、CH_3OH、NH_3 等。（中）累積一定冰層後，因紫外光線照射而分解的分子自由基作用進而形成「第一代」有機分子。（右）星際雲氣與塵埃逐漸因重力而聚集，溫度也跟著升高。最後冰層上的有機分子會昇華。藉由氣態化學反應生成更為複雜的「第二代」有機分子。（示意圖圖片來源：Stéphane Le-Saint, Université de Nice-Sophia Antipo）

言，位於智利的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array，簡稱 ALMA），以及所屬的阿塔卡瑪密集陣列（Atacama Compact Array，簡稱 ACA）就可稱爲當今地球上最先進的無線電毫米波望遠鏡。

熱微核化學

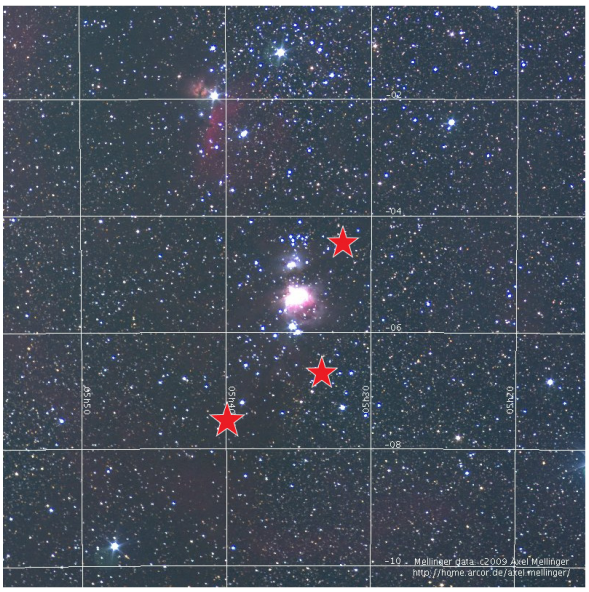
2004 年，天文學家 C. Ceccarelli 在低質量（與太陽誕生初期相仿）原恆星體 IRAS 16293-2422 中發現了密集分布(100 AU)、相對溫度高(100 K)、而且高豐度的飽和複雜有機分子。這個特徵因與高質量恆星形成區域中所發現的熱核(hot core)類似，而被命名爲熱微核(hot corino)[2]。

星際物質當中存在的微米級大小的塵埃，而其中密度較高的區域則是複雜有機分子的溫室。目前的熱微核化學模型將原恆星的演化分成了三個階段：冷階段(cold phase)、加熱階段(warm-up phase)、以及熱微核階段(hot corino phase)。「冷階段」的溫度大約在 10 K，一些星際雲氣中簡單的原子與分子會增生在塵埃表面的冰層，並經由表面化學生成如甲醇(CH_3OH)、甲醛(H_2CO)等初級的複雜分子。隨著雲氣與塵埃因重力而逐漸崩塌聚集、溫度也漸漸上升，進入了「加熱階段」，在冷階段因光裂解作用所產生的分子自由基會彼此作用生成「第一代」有機分子。最後當溫度達到 100 K 時則進入「熱微核階段」，被冰封的分子會昇華爲氣態，並經由氣態化學反應生成更爲複雜的「第二代」有機分子。經由這樣三階段的變化，會漸漸出現一個接近 100 K、100 AU、具有高豐度飽和複雜有機分子的熱微核[1]。

自 2004 年第一顆熱微核被發現以來經過了 10 數年，只有不到 20 顆的熱微核被發現。愈多的熱微核樣本有助於我們了解恆星形成時期的化學、物理性質、以及對未來可能行星系統化學成分的影響。接下來分享兩則本團隊近日的研究成果。

在獵戶座星雲中發現新的熱微核

在一項以研究低質量恆星早期形成過程的計劃「ALMASOP (ALMA Survey of Orion PGCCs)」裡，本團隊參與的跨國研究團隊利用 ALMA 以及所屬的 ACA 在 1.3 毫米的波段觀測了獵戶座分子雲團(Orion Molecular Cloud Complex)中，正

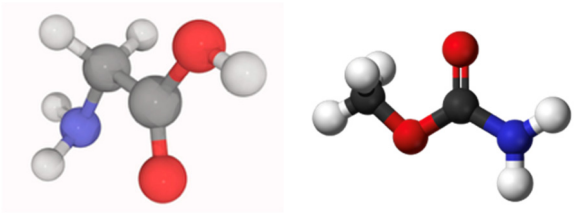


圖三　獵戶座分子雲是著名的恆星形成區域。紅色星星示意其中三顆我們所標定之熱維核的位置。（圖像資料來源：Mellinger Optical Survey in SkyView）

處於恆星形成早期階段的 72 個區域。在數個研究目標中，其中一項即爲本文所提的化學性質[3]。

我們首先分析了 ACA 的觀測資料。雖然 ACA 的空間解析度較 ALMA 的差，但也因此包含了較完整的範圍，能給予我們更大範圍、更爲全面的化學資料。我們先是在這 72 個區域中標定了 48 個原恆星核(protostellar core)，在其中四顆原恆星核中發現密集分布、溫度高、豐度高的甲醇。因此標定這 4 顆原恆星核都具有熱微核。有別於以往的熱微核標定研究，我們並不是觀測已知的初期恆星體(Young Stellar Object)進行標定，而是先找出星際間密度大、溫度低等有可能蘊藏初期恆星體的區域進行觀測，而後依據化學性質標定。這種類似普查的方法能幫助我們理解有多少比例的初期恆星體可能擁有熱微核。

在我們的這次觀測當中不只找到了甲醇，也偵測到了乙醛(CH_3CHO)、甲酸甲脂($HCOOCH_3$)、乙醇(C_2H_5OH)、甲醯胺(NH_2CHO)等更爲複雜的有機分子。其中特別有趣的是甲醯胺的存在。過去的研究顯示，甲醯胺或許是生命誕生的關鍵分子，它是具備了生命體內最基本的元素：碳、氮、氧的最簡單分子，因此人們對於



圖四　左：甘胺酸(Glycine, NH_2CH_2COOH)；右：胺基甲酸甲酯(Methyl carbamate, $NH_2CO_2CH_3$)互為同分異構物，組成原子相同，但鍵結方式不同。（圖片來源：（左）Science Photo Library Art；（右）維基百科）

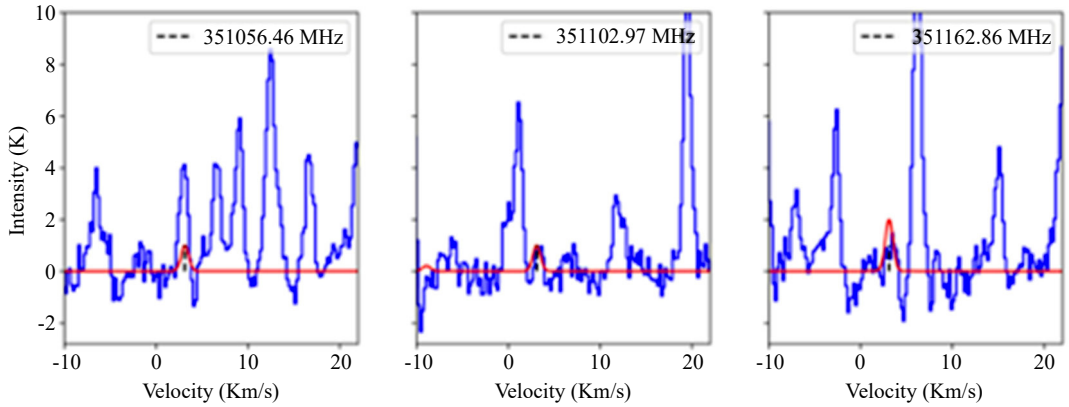
甲醯胺在宇宙中的生成與反應有著高度的興趣。未來使用更高解析度的資料有助於發現更多的分子，也有機會標定其他具有熱微核的原恆星核。

除了標定熱微核、研究其中的有機分子如何形成、彼此之間的關聯、反映出什麼樣的物理環境以外，關於這個研究還有一個很重要的問題：「恆星形成是否一定會經歷熱微核的階段？」如果是，那爲何目前發現的熱微核仍爲數不多？如果不是，那是什麼樣的物理環境才會產生這個充滿複雜有機分子的天體？從我們初步分析 ALMA 資料的結果來看，我們發現了更多原恆星核有熱微核的特徵。會不會其實熱微核並不是那麼地稀有，只是受限於我們的儀器而無法被發現？期待未來的研究能找到答案。

胺基酸的分身探索--胺基甲酸甲酯

蛋白質是生命的其中一個要素，而蛋白質由長序列的胺基酸所構成。「甘胺酸」是最簡單的胺基酸。至今仍然沒有直接在星際物質中偵測到甘胺酸。不過有部分理論模型顯示，甘胺酸的同分異構物：「胺基甲酸甲酯(Methyl carbamate)」比起甘胺酸在星際間可能更爲穩定。因此本團隊選擇針對胺基甲酸甲酯進行研究，除建構化學模型推估其生成效率以外，也在已知的熱微核中嘗試找尋[4]。

在前文所述的熱微核化學模型下，我們建構了胺基甲酸甲酯生成的反應（反應式爲：$CH_3O + NH_2CO \rightarrow H_2NCO_2CH_3$），並計算出對氫分子的相對豐度約爲 10^{-10}。接著我們試著從 ALMA 對兩個位於本銀河系中的熱微核天體 NGC1333



圖五　藍色光譜為熱微核 IRAS 16293-2422 B 的觀測結果，紅色光譜則為胺基甲酸甲酯的模擬光譜。藉由模擬結果我們可以推估其豐度、溫度等物理性質。（圖片來源：[4]）

IRAS 4A2 以及 IRAS 16293-2422 B 的觀測資料中尋找胺基甲酸甲酯的蹤跡。我們發現了胺基甲酸甲酯可能存在的柱密度上限約爲 10^{15} cm^{-2}，轉換回對氫分子的相對豐度後約爲 10^{-9}，與理論上的預測大致相符。這是首次有關胺基甲酸甲酯的柱密度上限觀測估計值，說明了胺基甲酸甲酯在星際環境下形成的可能，這項發現能進一步幫助我們理解甘胺酸等原始生命分子的形成。

總結與結語

在對獵戶座新生低質量恆星形成區域的觀測當中，我們標定了 4 顆「熱微核」，他們具有豐富、密集、且高溫的飽和複雜有機分子。針對這些分子如何形成、彼此之間的關聯、反映出什麼樣的物理環境，都還需要更進一步的研究。

我們也建構了胺基甲酸甲酯的相關化學模型，搭配熱微核 IRAS 16293-2422 B 的觀測數據，得到了與模型理論推測一致的豐度上限。胺基甲酸甲酯與同樣爲支鏈分子的甘胺酸（最簡單的胺基酸）互爲同分異構物，這或許可以給我們在尋找星際間胺基酸一些指引。

即便恆星是我們所能看到最多、最清楚的天體，直至今日，我們對其誕生機制仍存在著許多疑問。我們試著找尋恆星形成與生命誕生的關聯，得力於高靈敏度如 ALMA 的望遠鏡，星際間有機分子的探索不斷地有新的發現。我們未來也會持續的研究、找尋分子之間的關係，希望能爲解開宇宙生命起源的謎題做出貢獻！

參考文獻

[1] E. Herbst and E. F. van Dishoeck, "*Complex Organic Interstellar Molecules*", Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2009. **47**: 427-80

[2] C. Ceccarelli, "*The Hot Corinos of Solar Type Protostars*", Star Formation in the Interstellar Medium: In Honor of David Hollenbach, Chris McKee and Frank Shu, ASP Conference Proceedings, **323**, 2004, p.195

[3] S.-Y. Hsu, S.-Y. Liu and T. Liu *et al.*, "ALMA Survey of Orion Planck Galactic Cold Clumps (ALMASOP). I. Detection of New Hot Corinos with the ACA", The Astrophysical Journal, **898**: 107 (36pp), 2020.

[4] D. Sahu, S.-Y. Liu and A. Das *et al.*, "Constraints of the Formation and Abundances of Methyl Carbamate, a Glycine Isomer,in Hot Corinos", The Astrophysical Journal, **899**: 65 (13pp), 2020.