

# 中文總結

被萬有引力所束縛的，由兩個或更多恆星所組成的恆星系統在宇宙中普遍存在。這些恆星系統誠如光變等特徵，使得它們在古文化中被賦與重要地位。它們同時也是當今學術研究的課題。並且，我們對這些恆星系統的瞭解正循著望遠鏡效能的提升而增長。我們發現這些恆星系統是許多有趣現象的成因，例如超新星與行星狀星雲，以及雙黑洞合併。在科幻小說與科幻片中，恆星系統引發著我們對這些系統中行星的性質，以及一天當中有多次日出的光景的想像。最近的觀測任務，如Kepler mission，證實了行星可存在於這些具有複數恆星的系統。如何形成穩定的複數恆星系統引發了我們的好奇。某些早期的理論提出單一恆星可能牽引另一恆星進入其軌道，進而形成雙星系統。然而，這些理論存在嚴肅的問題，例如需要大量的恆星互相極為近鄰；該機制並需要有三個恆星的參與。了解恆星們是如何形成的有助解答這些關於複數恆星系統形成的問題。

基於觀測與模型，恆星形成過程的輪廓可如下簡述。在適當情形下，帶有轉動的分子雲中的氣體與塵埃可經由塌縮，形成被包覆於氣體核與分子雲中的原恆星。這些仍被包覆的原恆星驅動著窄而強勁的噴流，可微顯進行中的恆星形成。圍繞恆星旋轉並墜向恆星的物質被預期終將在恆星形成過程的早期形成一個扁平狀轉盤。而行星與彗星則終在該轉盤中形成。恆星周圍的氣體核物質在原恆星成長與演化的過程中逐漸耗失於恆星的吸積，或被噴流驅散。當所有圍繞的物質耗散之後，留存下來的便僅有年輕的恆星以及若有形成的行星系統。觀測顯示無論在尚被包覆的階段到成為裸露年輕恆星的階段，複數恆星的系統皆為普遍。這指向了大多數恆星皆以複數恆星系統形式形成的事實，使得上述恆星形成的圖像需被修正。

形成複數個恆星的現象掀起了無數針對這些系統的疑問。本論文針對如下關於複數原恆星系統形成以及演化的問題

1. 原恆星盤何時形成，以及它們如何影響原恆星系統？
2. 恆星系統內的恆星是否同時形成？
3. 哪些變因促使或阻礙了複數恆星系統的形成？
4. 單一恆星或是複數恆星系統內的恆星是否具有物理或化學上結構的差異。

第一個問題是有趣的，因為原恆星盤並不僅僅能形成行星與彗星，並可在恆星形成過程的早期對形成複數恆星扮演特定地位。接下來的兩個問題則針對複數恆星形成的機制。破碎化，一個將恆星形成雲氣核拆散的過程，廣泛地被認為是形成複數恆星的主要機制。然而，哪些變因主導了破碎化並使得最終形成複數個恆星，以及這些變因如何影響演化過程，尚未被分明。第四的問題的目的是為了了解若單一及複數恆星是經由多重或是其它的程序而形成，則這些恆星的結構是否會有所不同。以探討這些問題為目標的，對於星際分子與塵埃輻射的觀測，結合了物理與化學模型，來描述被觀測原恆星的結構。塵埃的輻射顯跡了原恆星的位置，並可幫助推定原恆星的演化狀

態。分子則作為對觀測的原恆星其動力學，溫度與密度結構，以及化學分佈的重要顯跡物。化學為了解宇宙中發生中的過程有力的工具之一。

## 論文概要

本論文的第一章提供了對當今對於單一與複數恆星形成的了解的詳細描述。本工作呈現了以地面及太空望遠鏡進行的，由毫米波到近紅外光波段的觀測。位於智利阿塔卡瑪沙漠中Chajnantor高原的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, 縮寫作ALMA)被用來對原恆星系統在百天文單位尺度(一天文單位為地球到太陽的距離)的化學與物理結構進行觀測。鄰近ALMA的單天線電波望遠鏡，阿塔卡瑪開拓者實驗(Atacama Pathfinder Experiment, 縮寫作APEX)則用以探測原恆星周千天文單位尺度的雲氣核。本工作並利用了文獻中的光學影像，以及赫雪爾太空望遠鏡(Herschel Space Observatory)以及史匹哲太空望遠鏡的數據。

第二章探討原恆星盤何時形成的問題，鑒此觀測了一個名為VLA 1623-2417的，極為年輕且尚被包覆的原恆星。VLA 1623-2417為一個位於蛇夫座 $\rho$ 中心的三原恆星系統，距地約為391光年。這三個原恆星展現了截然不同的特徵，極可能因為它們處於不同的演化階段。塵埃與分子輻射展露了環繞其中名為VLA 1623-2417 A的成員的扁平原恆星盤。藉由簡易模型來研究以 $C^{18}O$ 顯跡的動力學指出了塵埃輻射與分子譜線的確顯跡了一個半徑約為150天文單位的轉盤，為土星軌道半長軸的五倍大。由於VLA 1623-2417 A為一個極為年輕且尚被包覆的原恆星，發現圍繞於該原恆星的轉盤證實了這些結構形成於恆星形成過程中的早期。

據第二章所述，轉盤可在恆星形成過程中的早期形成，因此必定以某種形式影響著原恆星的演化。第三章藉由研究環繞於VLA 1623-2417 A轉盤周圍的物質來探討這個課題。據此目的，我們研究了那些通常發現於原恆星周圍氣體雲核中的低溫物質的分子。因 $DCO^+$ 分子通常形成於低於絕對溫標20度的環境中，它被用來顯跡位於VLA 1623-2417 A的寒冷物質。結合觀測與簡易化學模型可幫助了解 $DCO^+$ 輻射。被觀測到的 $DCO^+$ 輻射所發出的位置，比由球對稱密度與溫度結構，亦即原恆星均向地加熱圍繞它的物質的情況下所做的預期，還更接近恆星。相對地，在延著轉盤盤面的方向， $DCO^+$ 輻射在更靠近恆星的位置被測得；而在延著噴流的方向則無此現象。這個現象起因於原恆星盤遮擋了由原恆星所發出的輻射，使得溫度沿原恆星盤內緣至外降低。這明示了原恆星盤的存在對周圍物質的溫度分佈與化學結構具有顯著的影響。

第四章利用可顯跡形成原恆星的氣體雲核中，寒冷與溫暖的物質的各種分子，來對尚被包覆的原恆星的物理暨化學結構做更多的探究。名為IRAS 16293-2422及VLA 1623-2417的兩個複原恆星系統則為探究的目標。這兩個原恆星系統皆位於蛇夫座 $\rho$ 之中，且尚被它們的原生氣體雲核所包覆。相較於在第二章及第三章中探討的，相對昏暗的三原恆星系統VLA 1623-2417 A，IRAS 16293-2422為一光度極高的原恆星雙星系統。對應於第二章中提及VLA 1623-2417 A中被發現轉盤，IRAS 16293-2422展露了巨大且扁平的，半徑約為200天文單位的類似轉盤結構。在這兩個原恆星系統中的其它原恆星則尚未被確認具有類似轉盤的結構。某些在低於絕對溫標20度的環境中形成的分子，如 $DCO^+$ ， $N_2H^+$ ，及 $N_2D^+$ ，作為低溫區域的特徵，可顯跡低溫的氣體。如 $c-C_3H_2$ 及 $C_2H$ 等分子則可作為溫度介於絕對溫標50至100度的溫暖環境，或是受到中心恆星紫外輻射照射的區域，不錯的顯跡物。在這兩個系統中，由於原恆星盤的存在，低溫特徵的分子皆在較為靠近恆星處被測得。在VLA 1623-2417中並未測得 $N_2H^+$ 及 $N_2D^+$ 。最有可能的解釋為原恆星的低光度，以及原恆星盤的遮擋使得物質溫度低於絕對溫標10度。這與第三章中的結果吻合。溫暖特徵分子 $c-C_3H_2$ 在兩個系統中皆追蹤了噴流腔壁，與該分子顯現於溫暖或受紫外線照射的環境的特性吻合。 $c-C_3H_2$ 與 $C_2H$ 傾向追蹤同樣的區域。這在VLA 1623-2417為真，在IRAS 16293-

2422則否。有趣的是，多重性似乎並未對這兩個系統的化學結構帶來顯著影像，然而尚待進一步的研究。

第五章檢視了是否複數恆星系統中的恆星為同時生成的問題。為解答這個問題研究了尚在被包覆階段的原恆星，而非更後期的原恆星演化階段。這是由於尚被包覆的原恆星仍具備完整形成過程的狀態，而更晚期的原恆星則已受到演化過程可觀地影響。然而，這亦存在一個問題。在尚被包覆的階段，幾乎沒有任何的方法能精確推定原恆星的年齡。原恆星的演化階段，或稱它的年齡，可由原恆星的量度隨波長的分佈來推定(spectral energy distribution, 縮寫作SED)。在尚被包覆的階段，因原恆星形成處的塵埃包層，原恆星輻射多集中於長波長。當包層隨原恆星的演化耗失，原恆星輻射的量度分佈則漸漸偏移到較短的波長。並且，亮度分佈的峰在點燃氫核反應後將移入可見光波段。據此，一個原恆星相對較於同系統內生成的其它原恆星的演化階段差別，可用來推論是否系統內的原恆星是在同一時間生成。利用文獻中的光學影像以及赫雪爾太空望遠鏡的數據，我建立了在距地約750光年的英仙座分子雲中所有以被辨認出的原恆星系統的 SEDs。受限於赫雪爾太空望遠鏡的角分辨率，在複數原恆星系統中，僅有在個別原恆星皆相距超過1600天文單位以上時，我們才能解析個別原恆星的SED。原恆星相對於視線的方向亦影響它的SED。延著原恆星噴流的方向觀測原恆星將使得原恆星看起來比實際年齡稍大，因為在該方向缺乏能被探測得的包層。據此，為了辨別原恆星系統內的原恆星是否為同時形成，原恆星的朝向，物理結構，與SED需同時接受考量。本研究的結果發現有三分之一的複數原恆星系統，其中的原恆星並非同時生成。換句話說，某些但並非所有的雲氣何在形成首一二個原恆星後，仍持續地形成新的原恆星。這對關於複數恆星系統形成的理論與模型提供了重要的資訊，並衍生出了因何變因使得某些系統持續地形成原恆星的問題。

第六章檢視了可能影響恆星系統形成的變因：溫度。模型若引入原恆星對周圍氣體與塵埃的加熱顯示當一個原恆星形成之後，這些被加熱的氣體與塵埃其分佈在一般情形無法更加破碎化。然而第五章的結果顯示有其它的變因亦影響破碎化的過程以及複數恆星的形成。為了探討溫度與破碎化呈度是否具有相關性，我們研究了在1000天文單位尺度的氣體與塵埃。APEX單天線望遠鏡被用來觀測可用來測量溫度的分子，例如  $\text{DCO}^+$  與  $\text{H}_2\text{CO}$ ，以及可用來探測受恆星輻射照射區域的分子如  $\text{c-C}_3\text{H}_2$  與  $\text{C}_2\text{H}$ 。在某些選擇於英仙座分子雲中的單一與複數原恆星系統，我們觀測了這些分子。兼具這兩類系統容許我們比較單一與複數原恆星系統中的狀態，有助於解答溫度是否為複數恆星系統形成的重要因子。由觀測的分子導出的溫度測量顯示系統為單一或複數恆星與溫度並無顯著關聯。事實上，觀測發現的唯一差異是複數恆星系統比起單一恆星系桶具備了更大的冷氣體庫。這些發現顯示質量與密度而非溫度，對破碎化以及隨之而來的複數原恆星形成，扮演重要角色。模型與理論需隨觀測做修正，使得利用它們所做的預測能對觀測提出指引。

## 結論

本論文貢獻數項有用的結果來解答關於複數恆星系統形成的謎題，茲簡要總結於下。大的原恆星盤可能在恆星形成過程中的早期便已形成，並且可能影響原恆星的物理與化學結構。這對恆星形成具普適地重要性，因其改變了我們對原恆星演化過程的圖像。並且，原恆星盤以及物理與化學結構這兩項因子皆可影響破碎化過程，故可影響複數恆星的生成。在一個複數恆星系統中，並非所有的原恆星皆同時生成。這表示在某些系統中，分子雲核具備更適於破碎化的條件。然而，這些條件與溫度並不相關，而更相關於質量與密度。雖然本論文的結果促成對複數恆星系統的形成的進一步了解，更多的研究仍是必要的。例如，其它的分子雲是否具類似於對於英仙座分子雲的觀測結果是個有趣的課題。由於複數恆星系統為恆星形成過程最普遍的終產品，我們亦必須修正現有對恆星形成過程的了解來引入複數恆星的形成。