

銀河系星團低質量成員的動力演化

國立中央大學天文所與物理系

陳文屏、姜博識、湯士昀

一、恆星與行星形成

恆星誕生於重力塌縮的星際雲氣，在中央產生恆星，而旋轉越來越快的雲氣因為角動量而形成盤狀，其中的塵埃凝聚而逐漸成為行星。考慮一團等溫 T 、均勻密度 ρ 的雲氣，當雲氣的質量超過臨界值

$$M_{Jeans} \propto T^{3/2} / \rho^{1/2} \quad (1)$$

雲氣的熱壓力便不足以抗衡自身重力，而開始塌縮，這裡「金氏不穩定」(Jeans instability [1]) 雖然只考慮理想情況，例如沒有考慮磁場、雲氣旋轉，亂流等，也沒有外在環境的壓力，但仍具物理意義，並與我們直覺相符，也就是雲氣越濃密，或溫度越低，臨界質量越小，就越容易塌縮。太空中的分子雲核 (molecular cloud core)，密度高 (每 cc 超過數萬個分子)、溫度低 (10-15 K，相當於攝氏零下 260 幾度)，有利於塌縮條件，是個別恆星誕生之處。

雲氣當中分子彼此碰撞，受到激發後躍遷到高能階，要是密度不高，在沒受到碰撞前便自行躍遷至低能階而放出光子。由於密度低，這些光子會被另一個分子吸收的機會低，光子於是從系統散逸，雲氣溫度下降。這使得雲氣越收縮，密度越高 (收縮的重力增加) 造成碰撞越頻繁，冷卻越快 (熱壓力減小)，以致雲氣幾乎以自由落體的方式塌縮。這與一般密閉理想氣體體積減小，溫度與壓力會升高不同。

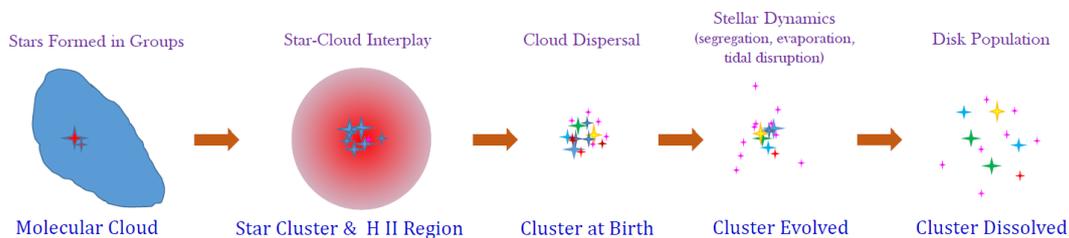
密度低的情況光子散失，雲氣溫度幾乎不變或下降，在 (1) 式中，收縮造成密度增加，所以 $M_{Jeans} \propto 1/\rho^{1/2}$ 這個臨界值變小。某些雲團超越臨界值而塌縮，局部密度增加，溫度下降，又超過當地的 M_{Jeans} ，其結果就是團塊持續分裂 (fragmentation)，最終形成星團 (star cluster)。銀河系中的恆星可能絕大多數都在星團環境中誕生。

雲氣持續收縮，最終密度達到光子不再透出，開始絕熱過程，由溫度與密度的關係可以得到 $M_{Jeans} \propto \rho^{1/2}$ ，亦即臨界質量隨密度而增加，雲氣不再分裂。個別雲核隨著收縮溫度上升，達到數百萬度時，質子快速運動，因為量子穿隧效應而引發核融合反應，釋放能量，提供氣體快速運動，產生熱壓力梯度抵擋內縮的重力，一顆恆星於焉誕生。太陽花了數千萬年收縮，之後引發中心氫原子核反應，到目前已經發光發熱了約 50 億年。依照恆星演化理論，與觀測太陽的參數比對，太陽中央的氫含量仍足以維持 50 億到 70 億年。

就在恆星形成的同時期，環星盤當中的塵埃靠著黏滯力聚集而逐漸變大，當大小達約 1~10 公里，這些微行星 (planetesimal) 得以靠重力吸引周遭物質繼續變大。很多微行星因為碰撞而解體，但少數長成如月球般大小的原行星 (protoplanet)，持續吸積軌道上的物質而成為行星。靠近太陽 (差不多 4 AU) 的區域，揮發性分子例如水、甲烷無法存在，因此微行星由高熔點的物質，像是金屬或岩石組成。雲氣中這些物質含量少，所以最終形成的水星、金星、地球與火星體積都不大。在雪線 (介於火星與木星之間) 以外，距離太陽較遠的區域，有足夠的冰體吸積，同時微行星的重力得以抓住雲氣當中含量最多，低溫的氫氣與氦氣，而造就了木星、土星、天王星與海王星等巨型行星。目前在數千個恆星周圍發現了系外行星 (exoplanet)，除了太陽系以外，提供了行星形成理論的依據，例如巨型行星誕生之初可能經歷了軌道變遷。無論如何，行星是恆星形成的副產品，銀河系當中行星的數量應該比恆星來得多。

二、星團的形成與瓦解

銀河系源於巨大雲氣，有些星團在銀河系誕生的時候便已形成，分佈在銀河系上下四方，成員星年齡偏老，動力演化已經穩定，呈現球狀外觀，稱為球狀星團 (**globular cluster**)，包含了數十萬顆到百萬顆成員。隨後巨大雲氣收縮成扁盤狀，集中於銀盤的雲氣產生一代代恆星。恆星死亡時將核反應產物釋放回星際太空，因此每代恆星包含更多的複雜元素。銀盤當中形成的星團絕大多數從分子雲誕生後便瓦解，少數仍重力束縛成為我們看到的星團 [2,3]。這種星團受到環境很大影響，分子雲原本便呈現片狀、絲狀，所誕生的星團自然形狀不規則。這些疏散星團 (**open cluster**) 當中的成員星彼此重力吸引互繞，逐漸鬆弛，質量大者沈澱到中央區域，而質量小者則分布在較大的空間，是所謂的「質量分層」(**mass segregation**) 效應。其中質量最小者最可能獲得動量，超過系統的逃脫速度而被拋離，造成「恆星蒸發」(**stellar evaporation**)。結果就是星團質量流失，重力束縛越來越小，星團逐漸鬆散，加上周遭巨型分子雲或其他星團產生的潮汐力拉扯等影響，星團最後瓦解，原來的成員星成為銀盤當中的場星。星團動力演化如圖一所示。



圖一：星團從星雲中誕生、演化之示意圖。自左而右顯示星球成群在分子雲中形成，受到塵埃遮擋，星球只在紅外或更長波段能觀測到、接著恆星的紫外輻射游離了周圍的氫氣；之後輻射與恆星風造成雲氣消散，能在可見光觀察到星團；星團成員彼此引力牽引，加上外在干擾，星團逐漸鬆散、變形，最後瓦解成為銀河系的場星。

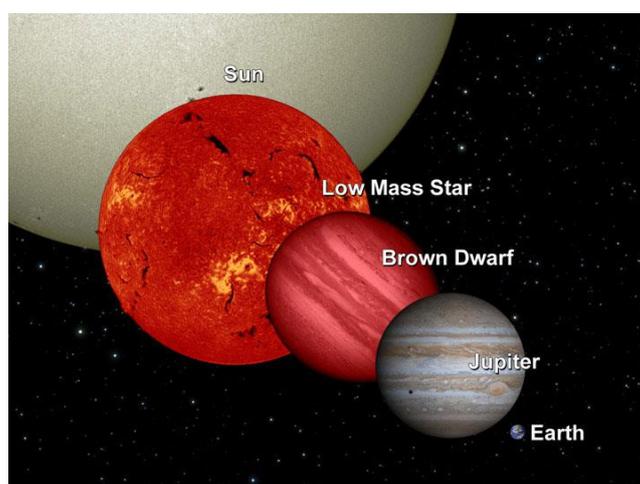
三、恆星、行星、棕矮星

只有質量超過大約太陽百分之八 ($0.08 M_{\odot}$) 的天體，中央溫度可以達到 500 萬度，以致氫原子核可以進行熱融合反應，持續穩定以氫核反應提供能量，這些稱為「主序星」(**main sequence star**)，是一般恆星的「正常」狀態。

但是雲氣收縮溫度達到 100 萬度的時候 (質量約 $0.013 M_{\odot}$ 的天體)，氫的同位素氘便能進行融合 ${}^2D(p, \gamma) {}^3He$ ，放出能量。而差不多 300 萬度 (約 $0.065 M_{\odot}$) 則可以進行鋰融合 ${}^7Li(p, \alpha) {}^4He$ [4]。氘或鋰含量少，其核反應只是天體短暫的能量來源。太陽在成為主序星之前也曾進行這些核反應。由於木星的質量約為太陽千分之一，以上也常以木星質量 M_J 來表示，也就是恆星質量下限約為 $80 M_J$ ，質量在 $13 \sim 80 M_J$ 之間的天體沒有氫核反應，但能進行短暫氘或鋰核反應，這些稱為「棕矮星」(**brown dwarf**)。至於質量低於 $13 M_J$ 者從來沒有發生任何核反應，則稱為「行星質量天體」(**planet-mass object**)，或者就稱「行星」(不必要繞行恆星)。表一比較這些天體部分性質的差異。天文學家以光譜型態來表示天體的表面溫度，從熱到冷，恆星的光譜型態為 O、B、A、F、G、K 及 M。棕矮星對應的型態為部分 M, L 及 T，表面溫度最冷不到 1000 K；到了 Y 型態甚至只有數百 K。目前發現最冷的 Y 型態星體只有 250 K [5]，跟木星、土星的溫度相當。T 型態的天體由於光譜當中有明顯甲烷吸收，也稱為「甲烷(棕)矮星」。棕矮星一般體積與木星相當，但質量大得多 (見圖二)。

表一：恆星、棕矮星與行星的性質比較

恆星	$\mathcal{M}/M_{\odot} > 0.08$, 核心氫融合 光譜型態 O, B, A, F, G, K, M
棕矮星	$0.065 > \mathcal{M}/M_{\odot} > 0.013$, 核心氘融合 $0.080 > \mathcal{M}/M_{\odot} > 0.065$, 核心鋰融合 光譜型態 M6.5–9, L, T 中央電子簡併態 $10 \text{ g cm}^{-3} < \rho_c < 10^3 \text{ g cm}^{-3}$; $T_c < 3 \times 10^6 \text{ K}$
行星質量天體	$\mathcal{M}/M_{\odot} < 0.013$, 沒有任何核融合 光譜型態 Y 或更冷

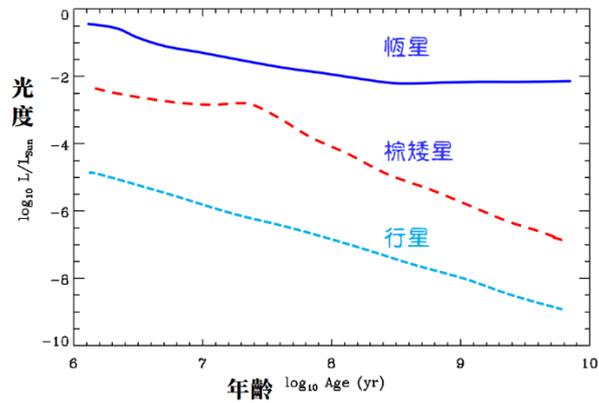


圖二：棕矮星大小與其他種天體之比較。圖片來源：維基
https://en.wikipedia.org/wiki/Brown_dwarf#/media/File:BrownDwarfComparison-pia12462.jpg

四、辨認棕矮星

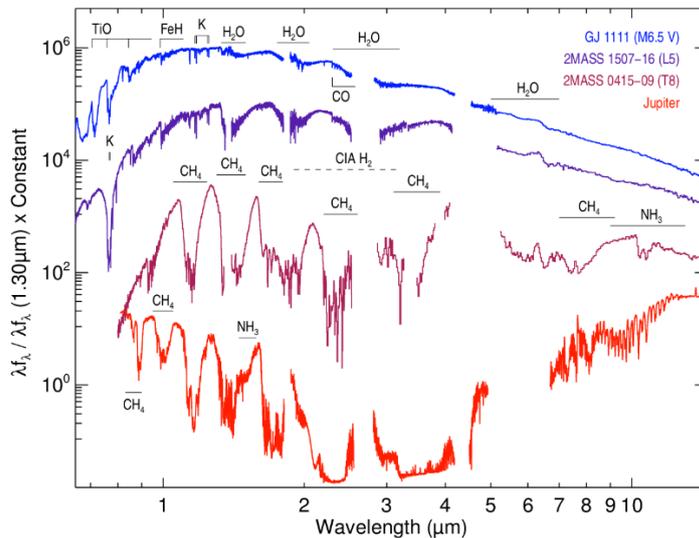
雲氣收縮時光度下降，直到點燃氫核反應，整個主序時期光度則幾乎維持不變；棕矮星有短暫核反應以致光度不變，然後就持續冷卻（光譜型態一直改變），行星則光度一直下降。無論棕矮星或行星都在年輕時，光度最明亮，也最容易偵測。不同種類天體的光度演化請參見圖三。

目前已知上千顆棕矮星絕大部分在太陽方圓十幾光年之內，它們都是已經老化的場星。我們參與國際合作，這幾年的研究課題著重在（1）偵測最年輕的棕矮星與行星，以及（2）探討這些低質量天體受到星團動力演化的影響。首要任務就是指認出哪些是棕矮星，這很具挑戰性，因為年輕的棕矮星必須在恆星形成區搜尋，然而離我們最近的這些區域也在數百光年之外，這些天體非常黯淡，辨識極困難。

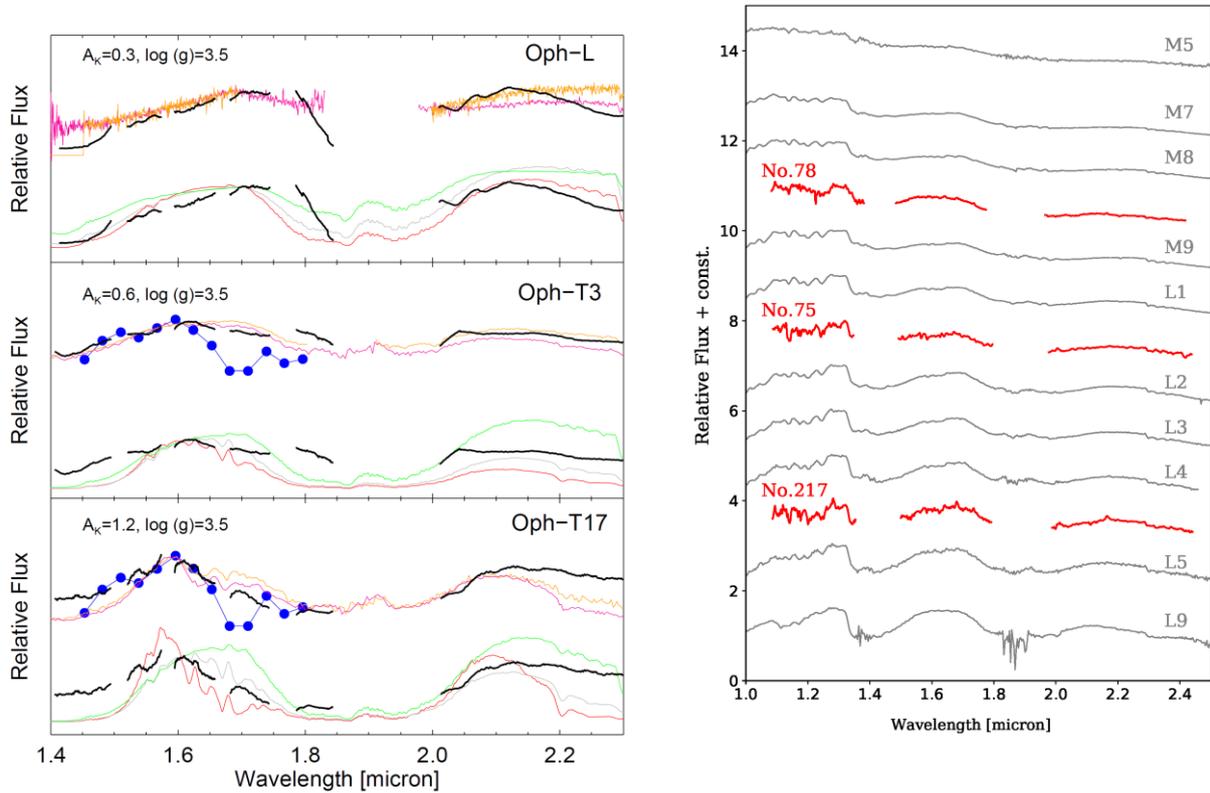


圖三：不同種類天體的光度演化。恆星從雲氣中塌縮，光度首先下降，一旦核心點燃氫熱核反應，光度維持穩定，成為主序星。棕矮星會進行短暫氫或鋰的核反應，結束後光度逐漸變暗。行星沒有任何核反應，形成後持續冷卻而光度下降。

恆星光譜除了吸收線，整個連續譜形近似黑體，但是到了 M 型態就已經有明顯、寬闊的分子譜帶，更低溫的大氣，輻射不再近似黑體，而有豐富的甲烷、水、氨等分子吸收（見圖四）。基於這個特性，我們利用特殊濾鏡，針對在 $1.4 \mu\text{m}$ 的水吸收或是 $1.6 \mu\text{m}$ 的甲烷吸收[6]，比對吸收帶的波段 (on line) 與沒有吸收波段 (off line) 的影像，有效辨識這些低溫天體，最後取得紅外波段光譜確認。由於天體非常黯淡，我們利用四米級的望遠鏡(CFHT) 取得影像，而光譜觀測則必需至少八米級 (Subaru、Gemini、VLT) 的望遠鏡。圖五展示了我們在蛇夫座恆星形成區（距離約 420 光年）發現的棕矮星，這些年齡約百萬年，是目前發現最年輕的 L 與 T 型棕矮星。圖五另外展示了后髮座星團（8 億年，距離 280 光年）發現的棕矮星，之前知道最冷的成員光譜型態為 M9，而我們最新的研究延伸到了 L4，發現了這個近鄰星團最冷的成員星。類似這樣的星團，由於能夠年齡確定，成為棕矮星冷卻模型的重要定標依據。

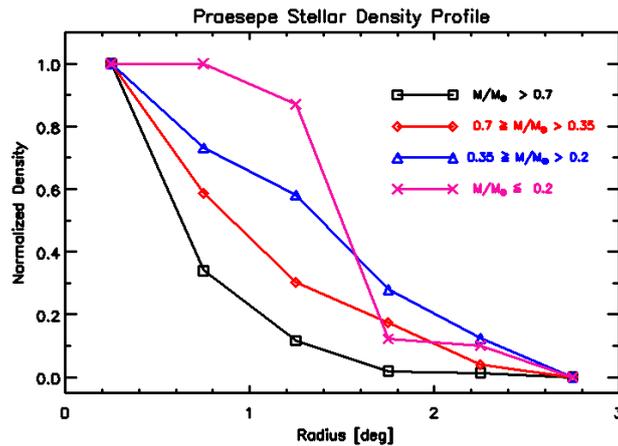


圖四：M、L、T 天體的可見光到紅外光譜範例，可以看出溫度越低，有越明顯的分子（例如甲烷、水、氨）吸收。最下方為木星光譜。光譜中斷處沒有數據，是因為受到地球大氣吸收的影響。[7]



圖五：(左) 蛇夫座分子雲當中三顆棕矮星的近紅外波段光譜。黑色線段是目標星的光譜，彩色線條與符號則是不同光譜型態，用來比對的樣本光譜 [8]。(右) 后髮座星團當中三顆棕矮星成員 (紅色線段)，黑色曲線是用來比對的樣本光譜 [9]。

星團成員星具有相同的空間分布與運動特性，我們依此辨認出星團成員，進而推導星體質量的機率分布，並比對棕矮星與恆星的統計特性。圖六以鬼宿星團 (Praesepe, 距離 580 光年) 為例，其成員星的密度分布顯示質量相對大者，越往中央集中，表示這個中年星團 (757 Myr) 的動力演化已經產生明顯的質量分層效應。特別是樣本中最小質量的成員 (約太陽 0.2 倍) 在星團靠外圍數量大為減少，表示它們已經從系統逃逸，這是星團正在瓦解的具體證據。



圖六：鬼宿星團的成員密度分布。橫軸為離星團中心的半徑，縱軸則是成員密度，以最內的值歸一化。不同曲線代表不同恆星質量範圍，其中最小者已近乎棕矮星範圍 [10]。

參考文獻

- [1] J. H. Jeans, *The Stability of a Spherical Nebula*. Phil. Trans. R. Soc. A. 199: 1–53 (1902). doi:10.1098/rsta.1902.0012.
- [2] Charles J. Lada, and Elizabeth A. Lada, *Embedded Clusters in Molecular Clouds*, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 41, 57–115 (2003). doi: 10.1146/annurev.astro.41.011802.094844
- [3] Charles J. Lada, *The physics and modes of star cluster formation: observations*, Phil. Trans. R. Soc. A 368, 713–731 (2010). doi: 10.1098/rsta.2009.0264
- [4] G. Chabrier, I. Baraffe, F. Allard, and P. Hauschildt, *Deuterium Burning in Substellar Objects*, Astrophys. J Lett. 542, L119-L122 (2000). doi: 10.1086/312941
- [5] K. L. Luhman, and T. L. Esplin, *The Spectral Energy Distribution of the Coldest Known Brown Dwarf*, Astron. J., 152, 78 (2016). doi: 10.3847/0004-6256/152/3/78
- [6] P. S. Chiang, W. P. Chen, A. Loić, M. Liu, E. A. Magnier, *Searching for T Dwarfs in the Rho Oph Dark Cloud L1688*, Mon. Not. R. Astron. Soc., 448, 522 (2015). doi: 10.1093/mnras/stu2701
- [7] A. J. Burgasser, *The Brown Dwarf-Exoplanet Connection*, arXiv0903.1309 (2009)
- [8] P. S. Chiang & W. P. Chen, *Discovery of Young Methane Dwarfs in the Rho Ophiuchi L1688 Dark Cloud*, Astrophys. J. Lett., 811, L16 (2015). doi:10.1088/2041-8205/811/2/L16
- [9] S. Y. Tang, W. P. Chen, P. S. Chiang, J. Jose, G. J., Herczeg, and B. Goldman, *Characterization of Stellar and Substellar Members in the Coma Berenices Star Cluster*, Astrophys. J. (2018) in submission
- [10] P. F. Wang, W. P. Chen, et al. *Characterization of the Praesepe Star Cluster by Photometry and Proper Motions with 2MASS, PPMXL, and Pan-STARRS*, Astrophys. J., 784, 57 (2014). doi: 10.1088/0004-637X/784/1/57