

SỰ HÌNH THÀNH CỦA NHỮNG NGÔI SAO LẠNH NHẤT TRONG VŨ TRỤ

Đặng Đức Cường

Khoa Vật lý - Vật lý Kỹ thuật, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh

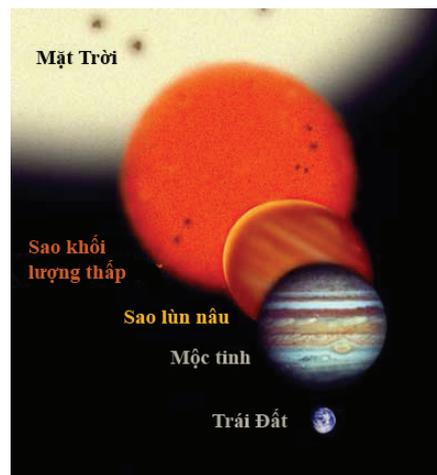
Sao lùn nâu (Brown dwarfs) là những ngôi sao lạnh nhất trong vũ trụ, có khối lượng từ 13 đến 75 lần khối lượng Mộc tinh. Những sao lùn nâu (SLN) lạnh nhất có nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ cơ thể con người, tức là dưới 300 K. Mặc dù đến nay hàng nghìn SLN đã được phát hiện, với mật độ tương đương các ngôi sao kiểu Mặt trời, nhưng cơ chế hình thành của chúng vẫn chưa được biết rõ.

Sao lùn nâu

Để hiểu SLN là gì, chúng ta cần hiểu sự khác biệt giữa ngôi sao và hành tinh. Một ngôi sao thông thường (chẳng hạn Mặt trời) chiếu sáng được là nhờ các phản ứng hạt nhân nhiệt hạch, tổng hợp hydrogen thành helium theo phản ứng $p+p \rightarrow d+e^++\nu_e$ trong lõi của nó và tỏa ra một lượng lớn năng lượng. Khi đó nhiệt độ lõi của ngôi sao phải đạt ít nhất khoảng 3 triệu K, hay khối lượng của ngôi sao phải tối thiểu cỡ $75 M_J^1$. Còn đối với các hành tinh, chúng hình thành từ các hạt bụi nhỏ còn sót lại trong quá trình ngôi sao hình thành và hành tinh có khối lượng lớn nhất cũng chỉ cỡ $13 M_J$. Do vậy các hành tinh không bao giờ đủ nặng hoặc đủ nóng để thực hiện bất kỳ phản ứng hạt nhân nhiệt hạch nào trong lõi của chúng. Nên chúng chiếu sáng thông qua việc phản chiếu các ánh sáng từ nơi khác truyền đến nó.

Trong thời gian dài hơn ba thập kỷ trong quá khứ, SLN đã được xem như là “mối liên kết còn thiếu” giữa ngôi sao và hành tinh. Quá trình “săn tìm” SLN kéo dài từ năm 1963 khi Kumar tiên đoán sự tồn tại của SLN về mặt lý thuyết [1], cho đến năm 1995 khi các SLN đầu tiên được phát hiện [2, 3].

Đến nay, SLN được biết đến như là các vật thể có khối lượng nằm trong khoảng từ $13 M_J$ đến $75 M_J$ (hoặc từ



Hình 1. Kích thước SLN so với các sao thông thường và hành tinh.

(Nguồn: Gemini Observatory)

$0,013 M_{\odot}$ đến $0,075 M_{\odot}^2$). Với khối lượng này, chúng nằm giữa các ngôi sao thông thường và các hành tinh, tạo nên sự kết nối liên tục từ ngôi sao có khối lượng nhỏ nhất đến hành tinh có khối lượng lớn nhất.

Với số lượng cỡ hàng nghìn SLN đã được khám phá, trong đó SLN lạnh nhất được biết cho đến nay có nhiệt độ khoảng 250 K [4], tức là thậm chí nó còn lạnh hơn nhiệt độ cơ thể con người, do đó SLN thật sự là những ngôi sao lạnh nhất trong vũ trụ. Nhưng một câu hỏi lớn trong nghiên cứu SLN được các nhà khoa học rất quan tâm, đó là “*Quá trình hình thành SLN diễn ra như thế nào?*”, thì vẫn

chưa được giải đáp.

Để tìm hiểu cơ chế hình thành của SLN, chúng ta cần biết cơ chế hình thành của các ngôi sao thông thường để nắm rõ những căn cứ cho việc đề xuất kịch bản hình thành SLN.

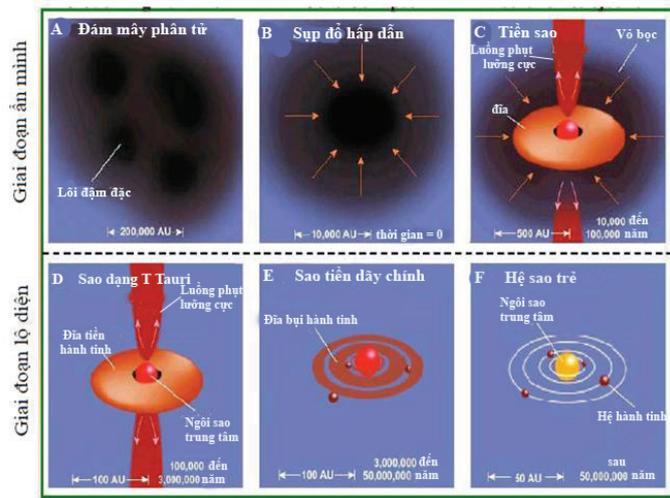
Sự hình thành của ngôi sao thông thường

Sự hình thành của một ngôi sao thông thường (chẳng hạn Mặt trời) có thể được miêu tả tóm tắt trong hình 2. Sự hình thành sao diễn ra trong môi trường mẹ là đám mây tối hay đám mây phân tử, là môi trường gồm các phân tử khí và các hạt bụi nhỏ. Quá trình tự co rút dưới chính lực hấp dẫn của các vật chất trong đám mây phân tử dẫn đến đám mây bị phân mảnh thành nhiều đám khí và bụi đậm đặc, gọi là *lõi tiền sao* (pre-stellar core) (hình 2A). Mật độ vật chất trong các lõi tiền sao có thể tăng lên gấp nghìn lần so với mật độ vật chất trung bình trong đám mây phân tử. Khi lõi tiền sao nào đạt đến khối lượng thỏa mãn *khối lượng tối thiểu Jeans* [5] thì nó sẽ tự co rút dưới chính lực hấp dẫn của vật chất trong lõi tiền sao, để tạo thành vật thể *tiền sao* (proto-star) ở trung tâm và bị bao bọc bởi một lớp vỏ khí và bụi dày đặc, khởi đầu cho quá trình hình thành sao (hình 2B).

Sự tự co rút hấp dẫn này giúp bồi đắp trực tiếp vật chất từ lớp vỏ khí và bụi lên vật thể tiền sao trung tâm và cũng giúp hình thành một đĩa bồi đắp (accretion disk) xung quanh tiền sao. Một khi đĩa bồi đắp được hình thành,

¹ $M_J = 1,8986 \times 10^{27}$ kg: Khối lượng sao Mộc.

² $M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30}$ kg: Khối lượng Mặt trời.



Hình 2. Quá trình hình thành một ngôi sao thông thường khối lượng thấp [6].

hầu hết vật chất được bồi đắp lên tiền sao trung tâm từ lớp vỏ khí và bụi được thực hiện gián tiếp thông qua đĩa bồi đắp này. Quá trình co rút hấp dẫn này cũng làm cho vật thể tiền sao quay càng lúc càng nhanh, do đó nó có nhu cầu giải phóng bớt vật chất và động lượng (momentum) quay ra ngoài thông qua *luồng phụt lưỡng cực phân tử khí* (*bipolar molecular outflow*), để tiền sao có thể đạt trạng thái thăng bằng. Sự tiến hóa của vật thể tiền sao kéo dài qua bốn giai đoạn: Gồm các giai đoạn đầu như tiền sao giai đoạn 0 (hình 2B), tiền sao giai đoạn I (hình 2C) ($c\tau \leq 0,1$ triệu năm tuổi), và các giai đoạn cuối như tiền sao giai đoạn II (hình 2D), tiền sao giai đoạn III (hình 2E) ($c\tau$ 0,1-6 triệu năm tuổi). Cuối giai đoạn III, vật thể tiền sao trở thành một ngôi sao thực thụ và có các hành tinh chuyển động xung quanh (hình 2F) giống như hệ Mặt trời của chúng ta.

Các giả thuyết về sự hình thành của SLN

Như đã nêu ở trên, quá trình hình thành của một ngôi sao thông thường bắt đầu khi lõi tiền sao trong đám mây phân tử tự co rút dưới chính lực hấp dẫn của nó. Để quá trình co rút này xảy ra, lõi tiền sao phải có khối lượng tối thiểu $\sim 1 M_{\odot}$ (khối lượng tối thiểu Jeans). Nhưng đối với SLN,

khối lượng của chúng ($0,013-0,075 M_{\odot}$) quá nhỏ so với khối lượng tối thiểu Jeans, cho nên các nhà nghiên cứu không biết liệu rằng các lõi tiền sao của sao thông thường được không, hay là SLN sẽ hình thành theo cơ chế đặc biệt nào khác. Do đó nhiều giả thuyết về cơ chế hình thành của SLN đã được đề xuất, trong đó có hai mô hình chính:

(1) *SLN hình thành giống như sao khối lượng thấp* (tức là giống như ngôi sao thông thường). Nói SLN hình thành giống như sao khối lượng thấp có nghĩa là các lõi tiền SLN đậm đặc có thể tự co rút dưới tác dụng của lực hấp dẫn của chính các lõi này. Sau đó, các tiền SLN cũng sẽ trải qua các giai đoạn tiến hóa giống như các sao khối lượng thấp. Nhưng để một lõi tiền SLN có thể tự co rút hấp dẫn được, thì nó phải thỏa mãn điều kiện điều kiện khối lượng tới hạn Jeans được áp dụng cho các sao khối lượng thấp) trong môi trường đám mây phân tử có những tác động đặc biệt [7-9].

(2) *Mô hình đẩy ra sớm của các phôi tiền sao*. Mô hình lý thuyết này giải thích sự hình thành SLN sau khi

nó bị đẩy ra từ một hệ gồm nhiều phôi tiền sao. Hệ gồm nhiều phôi tiền sao có thể được hình thành bởi một lõi tiền sao bố mẹ đang co rút hấp dẫn và tạo ra nhiều phôi tiền sao bên trong lõi bố mẹ ban đầu. Các phôi tiền sao trong cùng một hệ này có thể tương tác động lực học lẫn nhau, dẫn đến một phôi tiền sao có khối lượng nhỏ nhất trong hệ bị đẩy ra ngoài. Phôi tiền sao bị đẩy ra khỏi kén khí và bụi, nên nó không thể bồi đắp thêm vật chất và nó có thể trở thành sao khối lượng rất thấp, hoặc SLN, hoặc vật thể khối lượng hành tinh [10].

Các quan sát kiểm chứng về sự hình thành của SLN

Trong bối cảnh có nhiều giả thuyết được đưa ra để giải thích nguồn gốc SLN, thì có một câu hỏi then chốt cần được giải đáp là: *Mô hình nào là mô hình có thể tạo ra phần lớn các SLN như đã quan sát?*

Để giải đáp câu hỏi ở trên, nhiều quan sát về SLN đã được tiến hành, trong đó bao gồm các nghiên cứu thống kê những thuộc tính vật lý của SLN, và cũng có các nghiên cứu về quá trình vật lý diễn ra khi SLN đang hình thành. Tất cả các quan sát kiểm chứng này đều quy về cùng một kết luận: Phần lớn SLN rất có khả năng được hình thành theo cơ chế tương tự như của sao thông thường.

Các quan sát thống kê những thuộc tính vật lý của SLN

Những thuộc tính vật lý của SLN như hàm khối lượng ban đầu (diễn tả số lượng SLN tương ứng với từng khối lượng), đĩa bồi đắp, sự phân bố SLN trong không gian... được nghiên cứu mang tính chất thống kê [11, 12]. Kết quả cho thấy các thuộc tính này của SLN tạo nên một mối liên hệ liên tục với các thuộc tính của sao khối lượng thấp. Do đó chúng ủng hộ giả thuyết SLN có chung nguồn gốc với sao thông thường.

Các quan sát về quá trình vật lý xảy ra ở SLN

Bên cạnh những quan sát mang tính chất thống kê các thuộc tính vật lý của SLN, các quan sát khác lại đi sâu nghiên cứu bản chất vật lý của các hiện tượng xảy ra trong khi SLN đang hình thành để tìm hiểu nguồn gốc của loại sao này. Các hiện tượng vật lý đó gồm:

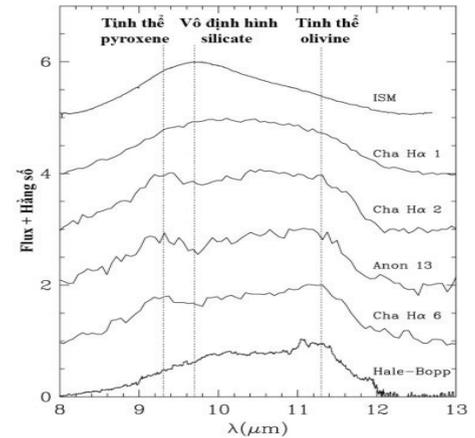
Hiện tượng phóng luồng phụt lưỡng cực phân tử khí CO: Trong quá trình hình thành của các sao khối lượng thấp, hiện tượng phóng luồng phụt lưỡng cực phân tử khí CO là hiện tượng rất đặc trưng và phổ biến, nó xuất hiện ngay ở giai đoạn 0 và kéo dài sự hoạt động đến cuối giai đoạn II (xem hình 2). Ta có thể hiểu hiện tượng phóng luồng phụt lưỡng cực phân tử khí như sau: Môi trường vật chất ở khu vực lân cận tiền sao trung tâm bị làm nóng bởi các bức xạ sao và chúng hoạt động như plasma. Một số vật chất plasma này được từ trường sao gia tốc, chuyển động ra xa ở hai cực của tiền sao trung tâm, tạo thành tia vật chất (*jet*)/gió (*wind*). Tia vật chất/gió này sẽ quét vào môi trường vật chất yên tĩnh bên ngoài tiền sao (môi trường vật chất của đám mây phân tử) tạo nên các sốc ở hai cực. Các sốc này cuốn theo vật chất và tạo thành luồng phụt lưỡng cực khí. Vật chất môi trường đám mây phân tử bị tia vật chất/gió cuốn đi, bị kích thích và được xác định tốt nhất bởi các phát xạ phân tử CO có sẵn trong môi trường. Vì vậy, chúng ta có thể nghiên cứu hiện tượng phóng luồng phụt lưỡng cực thông qua việc quan sát phổ phát xạ CO của môi trường có luồng phụt đi qua. Do đó mới có tên gọi hiện tượng phóng luồng phụt lưỡng cực phân tử khí CO.

Đối với SLN, hiện nay chỉ mới phát hiện luồng phụt phân tử khí CO ở 2 vật thể giai đoạn II [13, 14], 2 vật thể giai đoạn 0 [15, 16] và 1 ứng cử viên giai đoạn 0/I [17] (do chưa xác nhận khối lượng cuối cùng của vật thể này có nằm trong khoảng khối lượng của

SLN hay không). Các quan sát này đã ủng hộ mạnh mẽ rằng SLN và sao thông thường hình thành theo cùng một cơ chế. Tuy nhiên số lượng các luồng phụt phân tử khí CO được phát hiện ở SLN quá ít, cho nên cần thiết phải có thêm nhiều phát hiện mới để xác nhận rằng quá trình vật lý này cũng phổ biến ở SLN.

Tia vật chất (*jet*): Là phương tiện bắt nguồn từ vật thể sao trung tâm và đang điều khiển hiện tượng phóng luồng phụt lưỡng cực phân tử khí CO. Đã có một số nghiên cứu trong những năm gần đây phát hiện tia vật chất đang điều khiển luồng phụt lưỡng cực phân tử khí CO ở SLN [18-22]. Những quan sát tia vật chất này được thực hiện thông qua việc phát hiện các vạch phát xạ O I ở bước sóng 6300 Å và 6363 Å, S II ở bước sóng 6716 Å và 6731 Å, N II ở bước sóng 6583 Å được hình thành trong các sốc ở hai cực luồng phụt. Và gần đây, các phát xạ nhiệt từ tia vật chất ở bước sóng cm cũng đã được phát hiện lần đầu tiên [23, 24], nhưng các quan sát này vẫn chưa phân giải được hình dạng của tia vật chất dọc theo trục luồng phụt. Tuy vậy, những nghiên cứu về tia vật chất này cũng giúp ủng hộ mô hình SLN hình thành theo cùng cách thức như sao khối lượng thấp.

Sự kết tinh của vật chất trong đĩa và đo bán kính đĩa: Đối với các SLN ở cuối giai đoạn II, bên trong đĩa tiền hành tinh (1-6 triệu năm tuổi) của chúng, quá trình bụi (quá trình hạt nhỏ phát triển và kết tụ lại) bắt đầu xảy ra. Quá trình bụi này được phát hiện thông qua các đặc tính silicate và đặc tính kết tinh trong phổ phân bố năng lượng (hình 3). Đỉnh phổ phát xạ silicate và tinh thể kết tinh mở rộng hơn so với môi trường vật chất của đám mây phân tử. Các hạt bụi kết tụ này đang tiến hóa đến kích thước cỡ mm trong một số đĩa SLN mới được quan sát gần đây [25-27]. Đây sẽ là những vật liệu thô cho sự hình thành hành tinh xung quanh SLN, giống như các hành tinh hình thành quanh



Hình 3. Phổ phân bố năng lượng của một số đĩa quanh SLN và sao khối lượng thấp từ [28, 29]. Để so sánh, trên hình có kết hợp phổ của môi trường vật chất giữa các vì sao (ISM: interstellar medium) giàu silicate và phổ của sao chổi Hale-Bopp giàu tinh thể [11].

Mặt trời của chúng ta. Điều này ủng hộ giả thuyết SLN hình thành giống sao thông thường.

Nhóm nghiên cứu [27] cũng lần đầu tiên đo được trực tiếp bán kính của 3 đĩa tiền hành tinh xung quanh SLN và sao khối lượng rất thấp trong vùng hình thành sao Taurus, với giá trị bán kính của chúng > 66 AU. Điều này đã chứng tỏ rằng “mô hình đẩy ra sớm của các phôi tiền sao” cũng có thể xảy ra, nhưng không thể là mô hình tạo ra phần lớn SLN như đã quan sát, bởi vì SLN được tạo ra trong các nghiên cứu mô phỏng theo mô hình này có bán kính đĩa tối đa cỡ 40 AU [30, 31], do đĩa của SLN bị cắt xén bớt khi bị đẩy ra khỏi hệ và không thể bồi đắp thêm vật chất để tăng kích thước đĩa.

Các tiền SLN ở những giai đoạn tiến hóa đầu tiên: Các nghiên cứu thống kê thuộc tính vật lý của SLN (như đã nêu ở trên) ủng hộ mạnh mẽ giả thuyết SLN và sao khối lượng thấp có chung nguồn gốc. Như vậy, SLN cũng sẽ phải trải qua tất cả các giai đoạn tiến hóa giống như của sao thông thường. Cho đến nay, các quan sát chỉ mới xác thực được có 2 tiền SLN giai đoạn 0 [15, 16], 2 tiền SLN

giai đoạn I [32] và một lõi tiền SLN (lõi khí và bụi đậm đặc) [33] do chúng có khối lượng ước tính ở cuối quá trình hình thành nằm trong khoảng khối lượng của SLN. Những vật thể tiền SLN hiếm hoi này cũng ủng hộ tính đúng đắn của giả thuyết về cơ chế hình thành của SLN theo cùng cách thức như của sao thông thường.

Một điều cần lưu ý ở đây là trong kết quả của Dang Duc, Phan Bao, Dao Van [32], lần đầu tiên nhóm nghiên cứu đã xác thực sự tồn tại của hai tiền SLN giai đoạn I, tên là [GKH94] 41 và IRAS 04191+1523B trong vùng hình thành sao Taurus. Cho đến nay, chưa có luồng phụt phân tử khí CO nào được quan sát ở SLN giai đoạn I. Hai vật thể này, do đó, sẽ là những nguồn lý tưởng cho việc nghiên cứu tiếp theo nhằm hoàn thiện hiểu biết của chúng ta về hiện tượng phóng luồng phụt phân tử khí CO ở tất cả các giai đoạn (0, I và II) của sự hình thành SLN.

Kết luận

Các kết quả nghiên cứu về nguồn gốc hình thành SLN đã cung cấp những bằng chứng thực nghiệm ủng hộ giả thuyết rằng quá trình hình thành của một SLN diễn ra như phiên bản thu nhỏ so với quá trình này ở một sao thông thường khối lượng lớn hơn, và chúng đều trải qua tất cả các giai đoạn tiến hóa giống nhau trong quá trình hình thành. Tuy vậy, “phiên bản thu nhỏ” của sự hình thành SLN (so với sự hình thành của sao thông thường) diễn ra cụ thể như thế nào thì vẫn cần thêm những nghiên cứu mới để làm sáng tỏ, đặc biệt là các hiện tượng vật lý ở các giai đoạn đầu tiên khi SLN bắt đầu hình thành như lõi tiền SLN, tiền sao giai đoạn 0, I.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] S.S. Kumar (1963), “The structure of stars of very low mass”, *The Astrophysical Journal*, **137**, pp.1121-1125.
 [2] R. Rebolo, O.M.R. Zapatero, E.L. Martín (1995), “Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster”, *Nature*, **377**, pp.129-131.
 [3] T. Nakajima, B.R. Oppenheimer, S.R. Kulkarni, D.A. Golimowski, K. Matthews, S.T. Durrance (1995), “Discovery of a cool brown dwarf”,

Nature, **378**, pp.463-465.

[4] K.L. Luhman (2014), “Discovery of a ~250 K brown dwarf at 2 pc from the Sun”, *The Astrophysical Journal Letters*, **786**, article id: L18, 6 pp.

[5] J.H. Jeans (1902), “The stability of a spherical nebula”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **199**, pp.1-53.

[6] T. Greene (2001), “Protostars”, *American Scientist*, **89**, p.316.

[7] P. Padoan, Å. Nordlund (2002), “The stellar initial mass function from turbulent fragmentation”, *The Astrophysical Journal*, **576**, pp.870-879.

[8] P. Padoan, Å. Nordlund (2004), “The “mysterious” origin of brown dwarfs”, *The Astrophysical Journal*, **617**, pp.559-564.

[9] I.A. Bonnell, P. Clark, M.R. Bate (2008), “Gravitational fragmentation and the formation of brown dwarfs in stellar clusters”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **389**, pp.1556-1562.

[10] B. Reipurth, C. Clarke (2001), “The formation of brown dwarfs as ejected stellar embryos”, *The Astronomical Journal*, **122**, pp.432-439.

[11] K.L. Luhman, V. Joergens, C. Lada, J. Muzerolle, I. Pascucci, R. White (2007), *The formation of brown dwarfs: Observations*, in Protostars and Planets V, eds. B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil, University of Arizona Press, Tucson, USA, pp.443-457.

[12] K.L. Luhman (2012), “The formation and early evolution of low-mass stars and brown dwarfs”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **50**, pp.65-106.

[13] N. Phan-Bao, B. Riaz, C.F. Lee, Y.W. Tang, P.T.P. Ho, E.L. Martín, J. Lim, N. Ohashi, H. Shang (2008), “First confirmed detection of a bipolar molecular outflow from a young brown dwarf”, *The Astrophysical Journal*, **689**, L141-L144.

[14] N. Phan-Bao, C.F. Lee, P.T.P. Ho, C. Dang-Duc, D. Li (2014), “Characterization of molecular outflows in the substellar domain”, *The Astrophysical Journal*, **795**, 70-76.

[15] C.W. Lee, M.-R. Kim, G. Kim, M. Saito, P.C. Myers, Y. Kuroki (2013), “Early star-forming processes in dense molecular cloud L328; identification of L328-IRS as a proto-brown dwarf”, *The Astrophysical Journal*, **777**, pp.50-64.

[16] A. Palau, L.A. Zapata, L.F. Rodríguez, H. Bouy, D. Barrado, M. Morales-Calderón, P.C. Myers, N. Chapman, C. Juárez, D. Li (2014), “IC 348-SMM2E: a Class 0 proto-brown dwarf candidate forming as a scaled-down version of low-mass stars”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **444**, pp.833-845.

[17] T.L. Bourke, A. Crapsi, P.C. Myers, N.J. Evans II, D.J. Wilner, T.L. Huard, J.K. Jørgensen, C.H. Young (2005), “Discovery of a low-mass bipolar molecular outflow from L1014-IRS with the Submillimeter Array”, *The Astrophysical Journal*, **633**, L129-L132.

[18] E.T. Whelan, T.P. Ray, F. Bacciotti, A. Natta, L. Testi, S. Randich (2005), “A resolved outflow of matter from a brown dwarf”, *Nature*, **435**, pp.652-654.

[19] E.T. Whelan, T.P. Ray, F. Comeron, F. Bacciotti, P.J. Kavanagh (2012), “Spatially resolved observations of the bipolar optical outflow from the brown dwarf 2MASS J12073347-3932540”, *The Astrophysical Journal*, **761**, article id: 120, 13 pp.

[20] V. Joergens, A. Pohl, A. Sicilia-Aguilar, Th. Henning (2012), “The bipolar outflow and disk of the brown dwarf ISO 217”, *Astronomy & Astrophysics*, **543**, article id: A151, 11 pp.

[21] V. Joergens, G. Herczeg, Y. Liu, I. Pascucci, E. Whelan, J. Alcalá, K. Biazzo, G. Costigan, M. Gully-Santiago, Th. Henning, A. Natta, E. Rigliaco, M.V. Rodríguez-Ledesma, A. Sicilia-Aguilar, J. Tottle, S. Wolf (2013), “Disks, accretion and outflows of brown dwarfs”, *Astronomische Nachrichten*, **334**, pp.159-163.

[22] B. Riaz, M. Thompson, E.T. Whelan, N. Lodieu (2015), “Very low-luminosity Class I/flat outflow sources in σ Orionis”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **446**, pp.2550-2559.

[23] O. Morata, A. Palau, R.F. González, I.de Gregorio-Monsalvo, A. Ribas, M. Perger, H. Bouy, D. Barrado, C. Eiroa, A. Bayo, N. Huéramo, M. Morales-Calderón, L.F. Rodríguez (2015), “First detection of thermal radiojets in a sample of proto-brown dwarf candidates”, *The Astrophysical Journal*, **807**, article id: 55, 15 pp.

[24] L.F. Rodríguez, L.A. Zapata, A. Palau (2017), “JVLA observations of young brown dwarfs”, *The Astronomical Journal*, **153**, article id: 209, 10 pp.

[25] L. Ricci, L. Testi, A. Natta, A. Scholz, I.de Gregorio-Monsalvo (2012), “ALMA observations of p-Oph 102: Grain growth and molecular gas in the disk around a young brown dwarf”, *The Astrophysical Journal*, **761**, article id: L20, 5 pp.

[26] L. Ricci, A. Isella, J.M. Carpenter, L. Testi (2013), “CARMA interferometric observations of 2MASS J044427+2512: The first spatially resolved observations of thermal emission of a brown dwarf disk”, *The Astrophysical Journal*, **764**, article id: L27, 5 pp.

[27] L. Ricci, L. Testi, A. Natta, A. Scholz, I.de Gregorio-Monsalvo, A. Isella (2014), “Brown dwarf disks with ALMA”, *The Astrophysical Journal*, **791**, article id: 20, 11 pp.

[28] E. Furlan, N. Calvet, P. D’Alessio, L. Hartmann, W.J. Forrest, D.M. Watson, K.L. Luhman, K.I. Uchida, J.D. Green, B. Sargent, J. Najita, G.C. Sloan, L.D. Keller, T.L. Herter (2005), “Spitzer IRS spectra of young stars near the hydrogen-burning mass limit”, *The Astrophysical Journal*, **621**, L129-L132.

[29] D. Apai, I. Pascucci, J. Bouwman, A. Natta, T. Henning, C.P. Dullemond (2005), “The onset of planet formation in brown dwarf disks”, *Science*, **310**, pp.834-836.

[30] M.R. Bate (2009), “Stellar, brown dwarf and multiple star properties from hydrodynamical simulations of star cluster formation”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **392**, pp.590-616.

[31] M.R. Bate (2012), “Stellar, brown dwarf and multiple star properties from a radiation hydrodynamical simulation of star cluster formation”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **419**, pp.3115-3146.

[32] C. Dang Duc, N. Phan Bao, D.T. Dao Van (2016), “Two confirmed class I very low-mass objects in Taurus”, *Astronomy & Astrophysics*, **588**, article id: L2, 4 pp.

[33] Ph. André, D. Ward Thompson, J. Greaves (2012), “Interferometric identification of a pre-brown dwarf”, *Science*, **337**, pp.69-72.