

Develando el misterio de la formación de las estrellas dobles cercanas

Leonardo **Di G. Sigalotti**
Fidel **Cruz**

Se ha observado que la mayoría de las estrellas se encuentran en pequeños grupos de dos, tres o más estrellas, conocidos con el nombre de sistemas estelares dobles o múltiples. De esta población estelar, las estrellas dobles (o binarias) representan más del 80 %, muchas de ellas con separaciones orbitales menores al centenar de unidades astronómicas (ua; $1 \text{ ua} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$) (Horch *et al.*, 2020). Este enorme porcentaje de estrellas dobles ha llevado al consenso entre los astrónomos de que, tanto la formación estelar como la formación de los sistemas binarios y múltiples, son procesos concurrentes en nuestra galaxia. El término “estrellas binarias” para referirse en astronomía a las estrellas dobles fue introducido por el astrónomo germano-británico William Herschel en 1802.

El descubrimiento de la primera estrella doble se le atribuye al monje italiano Benedetto Castelli en enero de 1617 y se trata de la estrella binaria Mizar. Desde entonces, el catálogo de este tipo de astros se ha ido incrementando hasta alcanzar las más de 130,000 estrellas dobles catalogadas actualmente. De acuerdo con el método empleado para descubrirlas, las estrellas binarias admiten varias clasificaciones. Sin embargo, es posible que la clasificación más ampliamente conocida es aquella que agrupa a

las estrellas dobles en tres grandes categorías: (a) binarias visuales, (b) binarias espectroscópicas y (c) binarias eclipsantes o fotométricas. Las estrellas dobles visuales son aquellas observables a simple vista o por medios ópticos, es decir, mediante telescopios ópticos o detectores electrónicos, ya que sus componentes se encuentran separadas por grandes distancias que oscilan entre los cientos y miles de ua. En contraste, las binarias espectroscópicas poseen componentes muy cercanas entre sí, lo que hace que solo se detecten por la variación de sus líneas de absorción en los espectros del sistema, mientras que las eclipsantes o fotométricas son estrellas dobles cuyo plano orbital coincide aproximadamente con la línea de observación, cada estrella interponiéndose periódicamente entre la otra componente y el observador, lo que hace que este último observe eclipses que pueden ser totales o parciales. Gracias a las técnicas modernas de observación y visualización puede ocurrir que algunas estrellas dobles pertenezcan a los dos o incluso a los tres grupos. Son de especial interés, en el marco de la Teoría de la Formación Estelar, las llamadas estrellas dobles cercanas (o cerradas), con separaciones orbitales menores que 100 ua. Observaciones recientes muestran que un número importante de sistemas estelares binarios se encuentran precisamente en esta categoría (Horsch *et al.*, 2020).

Observaciones de estrellas binarias en sus etapas tempranas de formación, usando el Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA, el mayor radiotelescopio del mundo) (Tobin *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2019), están demostrando que muy posiblemente las separaciones orbitales de algunas decenas de ua observadas en muchos sistemas estelares binarios son consecuencia directa de sus procesos de formación (Kratter *et al.*, 2010). Estos nuevos resultados observacionales están develando por primera vez que las estrellas dobles cerradas se originan cuando el disco de gas y polvo que se forma alrededor de una protoestrella naciente, se fragmenta para dar origen a otra protoestrella en órbita

alrededor de la primera. El medio interestelar está compuesto por 99 % de gas, formado principalmente por hidrógeno molecular (H_2 , $\sim 80\%$) y helio (He , $\sim 20\%$), mientras el polvo constituye solo el 1 % en masa y está formado por granos diminutos (~ 0.0001 mm de diámetro) de carbono y silicatos en su mayoría. En realidad, el polvo interestelar no es muy diferente del humo normal al que estamos acostumbrados. La plausibilidad de que las inestabilidades gravitacionales se amplifiquen de manera no lineal e induzcan la fragmentación de un disco protoestelar ha sido estudiada abundantemente mediante modelos numéricos (Kratter y Lodato, 2016; Matsumoto *et al.*, 2019).

DANDO FORMA A LA TEORÍA DE LA FORMACIÓN ESTELAR

Existen suficientes evidencias observacionales para creer que más de la mitad de las estrellas observables con masas similares a la masa del Sol se encuentran en sistemas binarios o múltiples (Reipurth *et al.*, 2014; Horsch *et al.*, 2020), y que el origen de dichos sistemas es una consecuencia directa de los procesos de formación. De acuerdo con esta visión, la teoría de la formación estelar más actualizada indica que existen dos caminos que pueden operar de forma simultánea para explicar la formación de sistemas binarios y múltiples: la fragmentación a gran escala durante el colapso gravitacional de núcleos preestelares (es decir, de pequeñas condensaciones de gas turbulento y polvo en la estructura de las nubes de gas molecular, donde se origina el proceso de formación estelar), que puede conducir a la formación de estrellas dobles visuales con separaciones orbitales de cientos a miles de ua, y la fragmentación a menor escala de los discos protoestelares alrededor de cada componente binaria para dar origen a otra protoestrella (secundaria), en órbita alrededor de la primaria, a distancias menores que ~ 100 ua (Adams *et al.*, 1989; Sigalotti *et al.*, 2018). La Figura 1 muestra esquemáticamente el proceso de formación de una estrella doble cerrada a partir de la fragmentación de un disco con estructura espiral que acompaña a una protoestrella primaria, formada previamente

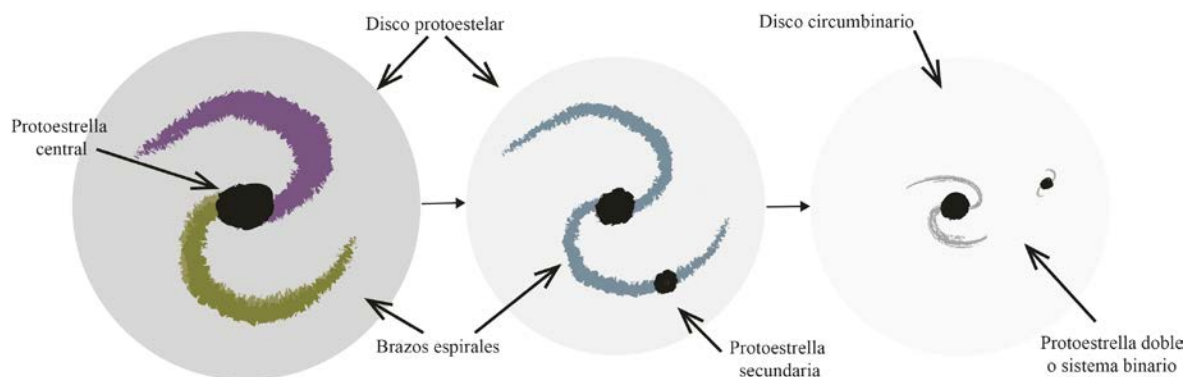


Figura 1. Esquema que muestra la formación de una estrella doble cerrada durante su fase embrionaria. Fuente: elaboración propia.

como resultado de la fragmentación a gran escala de un núcleo preestelar.

Simulaciones numéricas recientes del colapso gravitacional de núcleos de gas preestelar indican que los discos protoestelares son una consecuencia natural del colapso y la fragmentación gravitacional (Sigalotti *et al.*, 2018). Al fragmentarse el disco en otra protoestrella, el sistema binario naciente evoluciona acreciendo masa del disco circumbinario. Durante esta fase, los modelos teóricos sugieren que el gas con momento angular alto acrece preferencialmente sobre la secundaria, que es la componente menos masiva. Al momento de la fragmentación, parte de la rotación del disco alrededor de la primaria se convierte en momento angular orbital de la secundaria. Este efecto combinado con la acreción continua de material externo hace que la secundaria orbite durante sus fases iniciales con un momento angular mayor que la primaria (Matsumoto *et al.*, 2019).

Observaciones del sistema protoestelar triple L1448 IRS3B, con la ayuda de ALMA, han proporcionado por primera vez evidencia directa de la formación de dos protoestrellas, IRS3B-b e IRS3B-c, a partir de la fragmentación del disco circunestelar asociado a la protoestrella central IRS3B-a, las cuales se encuentran a distancias de la primaria de 61 ua y 183 ua, respectivamente (Tobin *et al.*, 2016). Evidencias más recientes han sido proporcionadas por observaciones de la protoestrella doble [BHB2007] 11 en el núcleo Barnard 59 tomadas con ALMA (Alves *et al.*, 2019). En este caso, las componentes

del sistema protobinario se encuentran separadas por una distancia de ~ 28 ua y se presume que la protobinaria se haya formado a partir de la fragmentación de un disco circunestelar de radio ~ 90 ua. El contenido de polvo del disco circumbinario alrededor del sistema doble se estimó en ~ 260 veces la masa de la Tierra, por lo que se sugiere que pudiese formar planetas rocosos en su evolución posterior (Liu y Ormel, 2018). La mejor descripción disponible hasta ahora de un sistema binario en formación ha surgido de la observación con ALMA de la protobinaria SVS 13, donde cada componente presenta un disco de gas y polvo a su alrededor y que, además, se encuentra en fase de formación de un disco circumbinario con una estructura espiral muy bien definida (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2022). La separación orbital entre las dos componentes se estimó en alrededor de 90 ua. Los autores de estas observaciones pudieron también estudiar la composición química del gas, del polvo y del material ionizado, identificando alrededor de 30 moléculas diferentes, entre ellas 13 moléculas orgánicas precursoras de la vida. Esto indica que cuando comience la gestación de planetas alrededor de estos dos soles, los componentes básicos de la vida estarán presentes allí. Sin embargo, los modelos de formación planetaria, que sugieren que los planetas se forman por agregación de partículas de polvo y hielo en los discos protoplanetarios alrededor de estrellas nacientes, consideran por lo más estrellas

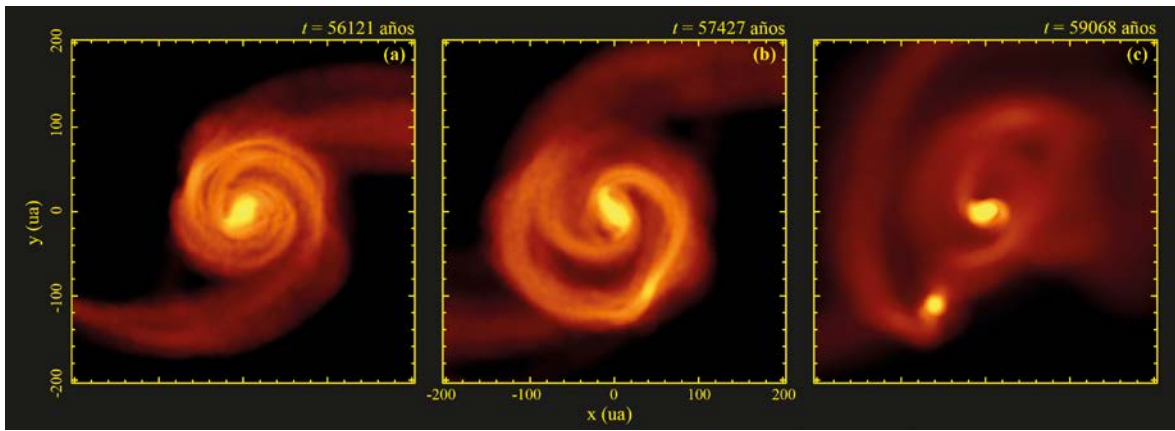


Figura 2. Imágenes obtenidas a partir de la simulación numérica del colapso gravitacional de un núcleo preestelar que muestra la estructura de un disco protoestelar después de la fragmentación a gran escala del núcleo: (a) estructura espiral del disco alrededor de una protoestrella primaria, (b) fragmentación del disco y (c) formación de un sistema binario cerrado con separación de 89 ua. En la parte superior derecha de cada recuadro se indica el tiempo de formación en años. Fuente: elaboración propia.

solitarias, como el Sol. Por lo tanto, actualmente se desconoce cómo sería la formación planetaria en torno a estrellas dobles donde las fuerzas de marea, debidas a la interacción gravitatoria entre ellas, pueden jugar un papel fundamental.

ESTRUCTURA ESPIRAL DE LOS DISCOS PROTOESTELARES

Las nuevas observaciones muestran que la formación de discos circunestelares durante las fases tempranas del proceso de formación estelar es un ingrediente necesario para poder explicar la formación de estrellas dobles cerradas. Durante el proceso de acreción, el disco aumenta su masa y eventualmente se vuelve inestable con respecto a la formación de brazos espirales, los cuales operan distribuyendo momento angular hacia afuera y haciendo que más material caiga sobre la protoestrella central. Eventualmente, el disco adquiere suficiente masa y se vuelve gravitacionalmente inestable, fragmentándose en una o más protoestrellas a distancias menores que 100 ua de la protoestrella primaria. Con base en esta observación se cree que diferentes distancias entre las estrellas observables en sistemas dobles y múltiples son el resultado de diferentes mecanismos de formación. A medida que nuevas evidencias observacionales apunten a la fragmentación

de los discos protoestelares como el mecanismo responsable de la producción de estrellas jóvenes dobles y múltiples cerradas, podremos entonces aprender algo más sobre cómo en realidad este proceso contribuye a la población de estrellas múltiples.

Observaciones de alta resolución angular con ALMA del objeto protoestelar HH 111 VLA 1 muestran de manera contundente la presencia de un par de brazos espirales en el disco protoestelar alrededor de HH 111 VLA 1 (Lee *et al.*, 2020). Los brazos espirales lucen simétricos y se extienden desde la protoestrella central hasta el borde externo del disco, de manera muy similar a la estructura espiral observada en muchas simulaciones (Figura 2). A medida que el disco incrementa su masa por acreción del material externo, este se vuelve gravitacionalmente inestable con respecto a la formación de brazos espirales, los cuales a su vez pueden fragmentarse debido a la amplificación no lineal de inestabilidades gravitacionales.

En la Figura 2 se muestra una secuencia de imágenes obtenidas a partir de la simulación numérica del colapso gravitacional de un núcleo preestelar, donde se puede apreciar la evolución de un disco protoestelar con estructura espiral muy similar a la observada alrededor de HH 111 VLA 1 y la fragmentación de este para dar origen a una protoestrella doble cerrada. Los brazos espirales en el panel de la izquierda lucen bastante simétricos y la fragmentación del disco ocurre en el extremo de un brazo



© Javier Anzures Torres. Serie "Bajo la sombra del tiempo", óleo/tela, 140 x 150 cm, 2009.



© Javier Anzures Torres. Serie "Bajo la sombra del tiempo", Aurora, óleo/tela, 140 x 150 cm, 1994.

espiral. En el escenario de la formación estelar, los brazos espirales aparecen en las fases iniciales de formación y persisten hasta que la acreción de material sobre el disco disminuye cuando más de la mitad del material en la envoltura externa ha ya acrecido (Hall *et al.*, 2019). Por lo tanto, es de esperarse que la estructura espiral del disco desaparezca por completo cuando el proceso de acreción se detiene.

A LA BÚSQUEDA DE MÁS PROTOESTRELLAS OBSERVABLES

La formación de estrellas dobles cerradas ha generado un intenso debate en torno a los posibles mecanismos de formación. Por ejemplo, antes de

la puesta en operación de ALMA, se propuso que un mecanismo posible consistía en la captura de una estrella por el campo gravitatorio de otra en regiones de alta densidad estelar, como es el caso de los cúmulos de estrellas, dando así lugar a una estrella binaria estable. Si bien no es imposible que algunas estrellas dobles puedan formarse mediante este mecanismo, por otro lado es cierto que dicho evento es en realidad poco probable, ya que se requieren al menos tres estrellas, donde una escapa del sistema y las otras dos permanecen ligadas gravitacionalmente. Además, el principio de conservación de la energía descarta que un solo cuerpo gravitante capture a otro. Dada la abundancia de estrellas dobles observables, un evento poco probable no puede ser el mecanismo principal de formación.

Con la ayuda del arreglo de los radiotelescopios ALMA se han podido realizar observaciones de sistemas protoestelares e, incluso, observar detalles inherentes a los discos circunestelares como, por ejemplo, la estructura espiral de los mismos. Si bien existe un consenso casi unánime en la comunidad astronómica en cuanto a que la fragmentación dinámica de los discos protoestelares constituye el mecanismo dominante de formación, se espera, con la ayuda de ALMA, incrementar el número de descubrimientos de sistemas protoestelares que puedan finalmente corroborar la validez del estado actual de la teoría de la formación estelar. Estas nuevas observaciones no solo aportarán luz sobre la naturaleza de las protoestrellas y de su entorno, sino que también proporcionarán parámetros útiles para refinar los modelos que darán forma a la teoría de la formación estelar.

R E F E R E N C I A S

- Adams FC, Ruden SP and Shu FH (1989). Eccentric gravitational instabilities in nearby Keplerian disks. *The Astrophysical Journal* 347:959-976. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511564772.028>.
- Alves FO, Caselli P, Girart JM, Segura-Cox D, Franco GAP, Schmiedecke A and Zhao B (2019). Gas flow and accretion via spiral streamers and circumstellar disks in a young binary protostar. *Science* 366(6461):90-93. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaw3491>.



Díaz-Rodríguez AK, Anglada G, Blázquez-Calero G, Osorio *et al.* (2022). The physical properties of the SVS 13 protobinary system: Two circumstellar disks and a spiraling circumbinary disk in the making. *The Astrophysical Journal* 930:91. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac3b50>.

Hall C, Dong R, Rice K, Harries TJ *et al.* (2019). The temporal requirements of directly observing self-gravitating spiral waves in protoplanetary disks with ALMA. *The Astrophysical Journal* 871:228. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aafac2>.

Horch EP, van Belle GT, Davidson JW, Willmarth D *et al.* (2020). Observations of binary stars with the differential speckle survey instrument. IX. Observations of known and suspected binaries, and a partial survey of Be stars. *The Astronomical Journal* 159(5):233. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab87a6>.

Kratter KM, Matzner CD, Krumholz MR and Klein RI (2010). On the role of disks in the formation of stellar systems: a numerical parameter study of rapid accretion. *The Astrophysical Journal* 708:1585-1597. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/708/2/1585>.

Kratter KM and Lodato G (2016). Gravitational instabilities in circumstellar disks. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 54:271-311. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081915-023307>.

Lee C-F, Li Z-Y and Turner NJ (2020). Spiral structures in an embedded protostellar disk driven by envelope accretion. *Nature Astronomy* 4:142-146. <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0905-x>.

Liu B and Ormel CW (2018). Catching drifting pebbles. I. Enhanced pebble accretion efficiencies for eccentric planets. *Astronomy and Astrophysics* 615:A138. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732307>.

Matsumoto T, Saigo K and Takakuwa S (2019). Structure of a protobinary system: An asymmetric circumbinary disk and spiral arms. *The Astrophysical Journal* 871(1): 36. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf6ab>.

Reipurth B, Clarke CJ, Boss AP, Coodwin SP *et al.* (2014). Multiplicity in early stellar evolution. En Beuther H, Klessen RS, Dullemond CP y Henning T (Eds.), *Protostar and Planets VI* (pp. 267-290). University of Arizona Press: Tucson. https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch012.

Sigalotti LDiG, Cruz F, Gabbasov R, Klapp J and Ramírez-Velasquez J (2018). From large-scale to disk fragmentation into close binary stars. *The Astrophysical Journal* 857:40. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab619>.

Tobin JJ, Kratter KM, Persson MV, Looney LW *et al.* (2016). A triple protostar system formed via fragmentation of a gravitationally unstable disk. *Nature* 538:483-486. <https://doi.org/10.1038/nature20094>.

Leonardo Di G. Sigalotti
Profesor e investigador
Departamento de Ciencias Básicas
Universidad Autónoma Metropolitana
Azacapatzalco (UAM-A)
leonardo.sigalotti@gmail.com

Fidel Cruz
Profesor e investigador
Departamento de Ciencias Básicas
Universidad Autónoma Metropolitana
Azacapatzalco (UAM-A)