

Resumen en español

Estrellas múltiples, es decir dos o más estrellas que forman parte de un sistema gravitacionalmente unido, son comunes en el universo. Características como variaciones en su luminosidad, les han dado significado cultural a estos sistemas estelares en distintas civilizaciones antiguas. También han sido objeto de estudio por parte de la academia; y con el desarrollo del telescopio, el conocimiento sobre estos cuerpos celestes aumentó de manera significativa. La expansión de la capacidad para observar el universo demostró que las estrellas múltiples son la causa de varios fenómenos interesantes; por ejemplo, algunos tipos de supernovas, nebulosas planetarias y fusión de agujeros negros binarios. Las estrellas múltiples han alimentado nuestra imaginación, tanto en forma escrita como visual. Se ha imaginado como serían los planetas alrededor de este tipo de estrellas, y la experiencia de ver múltiples amaneceres y atardeceres. Observaciones recientes, como las de la Misión Kepler, han demostrado que pueden existir planetas alrededor de estrellas múltiples. La pregunta de cómo estos sistemas son formados proviene de la curiosidad e interés por descubrir que produce sistemas de estrellas múltiples estables. Algunas teorías propusieron que una estrella capturaría a otra en su órbita, y así se formaría un sistema binario. Pero esta idea presenta serios problemas, como la necesidad de cortas distancias entre un gran número de estrellas, e involucraría una tercera estrella. El entender cómo las estrellas se forman y evolucionan puede ayudar a resolver el problema de la formación de estrellas múltiples.

Basado en observaciones y modelos, el proceso de formación de estrellas se puede describir brevemente de la siguiente forma: nubes densas de gas y polvo que rotan pueden, bajo las condiciones apropiadas, colapsar para empezar a formar estrellas en el centro de las nubes. Estas protoestrellas producen chorros y flujos bipolares, lo cual constituye evidencia del proceso de su formación. La rotación y acreción de material alrededor de la estrella eventualmente forma una estructura achatada y giratoria, también llamada disco, la cual se forma en algún momento durante las etapas tempranas de formación. El disco es el lugar donde eventualmente se formarán planetas y cometas. Con el crecimiento y evolución de la protoestrella, el material del núcleo protoestelar se reduce debido a la acreción y los flujos bipolares que dispersan el material de la nube. Al final, una estrella y sistema de planetas, si alguno se formó, persisten. Observaciones de protoestrellas en todas las etapas de formación demuestran que las estrellas múltiples son comunes. Esto indica que la mayoría de estrellas nacen como sistemas estelares múltiples, y que la teoría de formación de estrellas debe ser revisada. El hecho que las estrellas múltiples nacen genera numerosas preguntas. Por ello, esta tesis propone examinar varias preguntas relativas a la formación y evolución de protoestrellas múltiples, a saber:

1. ¿Cuándo se forman los discos y cuál es su impacto en los sistemas protoestelares?

2. ¿Se forman al mismo tiempo todas las estrellas en un sistema múltiple?
3. ¿Qué factores intensifican o dificultan la formación de protoestrellas múltiples?
4. ¿Cómo están estructuradas, en términos químicos y físicos, las estrellas en sistemas múltiples e individuales?

La primera pregunta es interesante ya que los discos no solamente son el sitio donde se forman los planetas y cometas, sino que también juegan un papel en la acreción de material a la protoestrella. Las dos siguientes preguntas tratan el mecanismo de formación de estrellas múltiples. Se considera que la fragmentación, el proceso por el cual el material del núcleo protoestelar se fracciona, es el proceso para formar sistemas estelares múltiples. Pero aún no se comprende bien cuáles factores inciden y cuándo ocurre la fragmentación, y cómo puede afectar la evolución de la protoestrella múltiple. La cuarta pregunta busca entender las diferencias en la estructura de estrellas múltiples e individuales, y si estas diferencias son producto de la formación o de otro proceso.

Con el objetivo de contestar estas preguntas, observaciones de la emisión de moléculas y polvo son combinadas con modelos físicos y químicos para describir la estructura de las protoestrellas observadas. La emisión del polvo traza la ubicación de la protoestrella, y puede ayudar a conocer la etapa de formación de la misma. Las moléculas son importantes ya que trazan la cinemática de la protoestrella, al igual que funcionan como termómetros, medidores de densidad y describen la estructura química de estos sistemas. La química sirve como una herramienta para comprender el funcionamiento del universo.

Esta tesis

El primer capítulo de esta tesis da una detallada introducción del conocimiento actual sobre la formación de estrellas, tanto de estrellas individuales como múltiples. Por ello, las observaciones aquí descritas abarcan longitudes de onda desde lo milimétrico hasta cercano a infrarrojo. El Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) es un interferómetro de radio ubicado en el llano de Chajnantor, desierto de Atacama, Chile, el cual se utiliza para observar la estructura química y física de protoestrellas múltiples a escalas de 100 unidades astronómicas (una unidad astronómica es la distancia entre el Sol y la Tierra). El Atacama Pathfinder EXperiment (APEX), ubicado cerca de ALMA, es un radio telescopio de una antena y fue utilizado para observar los núcleos protoestelares (1000 unidades astronómicas). Mapas fotométricos obtenidos con el Observatorio Espacial Herschel y el Telescopio Espacial Spitzer también son utilizados en esta tesis.

El segundo capítulo trata acerca de cuándo se forman los discos. Con este propósito se estudió VLA 1623-2417, un sistema protoestelar muy joven. VLA 1623-2417 es un sistema triple protoestelar ubicado en el centro de ρ Ophiuchus (distancia = 391 años luz). Las tres protoestrellas muestran diferentes características, probablemente producto de estar en distintas etapas de evolución. Una de las protoestrellas, VLA 1623-2417 A, presenta una estructura achatada similar a un disco en emisión de polvo y molecular $C^{18}O$. La cinemática de esta estructura es examinada con un modelo físico, el cual indica que es un disco giratorio con un radio de 150 unidades astronómicas, cinco veces el radio de la órbita de Neptuno. Ya que VLA 1623-2417 A es una protoestrella

muy joven, los resultados son evidencia de que los discos giratorios pueden formarse en las etapas tempranas de formación estelar.

El tercer capítulo busca entender el impacto de los discos giratorios en las etapas tempranas de la formación de estrellas. Para ello, se estudia el material que rodea el disco giratorio de VLA 1623-2417 A mediante moléculas típicamente asociadas con material frío en los núcleos protoestelares. La molécula DCO^+ traza el material frío de VLA 1623-2417 A, ya que esta molécula se forma principalmente a temperaturas de 20 Kelvin o menos. Las observaciones de la emisión de DCO^+ son analizadas con un modelo químico simple. La posición de la emisión de DCO^+ se encuentra más cerca a la fuente protoestelar de lo esperado, esto basado en la estructura esféricamente simétrica de densidad y temperatura; es decir, la estructura como si la protoestrella estuviese calentando el material del núcleo de igual manera en toda dirección. En contraste, la emisión de DCO^+ se encuentra cerca de VLA 1623-2417^a, a lo largo del plano del disco giratorio, pero no en dirección del flujo bipolar. Esto indica que la presencia de un disco giratorio produce un impacto significativo en el material que lo rodea, alterando tanto su temperatura como su estructura química.

La estructura físico-química de protoestrellas jóvenes es estudiada más a fondo en el cuarto capítulo, usando moléculas que trazan las regiones frías y cálidas de los núcleos protoestelares. Dos sistemas muy jóvenes de estrellas múltiples son examinados, IRAS 16293-2422 y VLA 1623-2417, ambos ubicados en ρ Ophiuchus. IRAS 16293-2422 es un sistema binario muy brillante; mientras que VLA 1623-2417 es un sistema triple menos brillante y fue estudiado en los capítulos dos y tres de esta tesis. VLA 1623-2417 A tiene un disco giratorio (capítulo 2), mientras que IRAS 16293-2422 A presenta una estructura achatada similar a un disco con un radio de 200 unidades astronómicas. Las otras protoestrellas en los respectivos sistemas no presentan un disco ni estructura achatada. El gas frío es trazado por las moléculas DCO^+ , N_2H^+ y N_2D^+ , las cuales se forman a temperaturas bajo 20 Kelvin, y de esta manera caracterizan las regiones frías. Las moléculas $c\text{-C}_3\text{H}_2$ y $c\text{-C}_2\text{H}$ son adecuadas para ambientes cálidos con temperaturas entre 50 y 100 Kelvin o irradiados por rayos ultravioleta por la protoestrella central. Las moléculas frías se encuentran más cerca de las fuentes protoestelares en cada sistema, debido a la presencia del disco, pero no en otras direcciones como la del flujo bipolar. Alrededor de VLA 1623-2417, las moléculas N_2H^+ y N_2D^+ no son detectadas. La causa de ello es el bajo brillo de la protoestrella y las temperaturas bajas del gas (por debajo de 10 Kelvin) causadas por la sombra que genera el disco en el material. Esto concuerda con los resultados del tercer capítulo. La molécula $c\text{-C}_3\text{H}_2$ traza la cavidad del flujo bipolar en ambos sistemas, consistente con la presencia de esta molécula en ambientes cálidos e irradiados con rayos ultravioleta. Las moléculas $c\text{-C}_3\text{H}_2$ y C_2H tienden a residir en el mismo ambiente. Mientras que esto es observado en VLA 1623-2417, no lo es en IRAS 16293-2422. Es interesante resaltar que el hecho que estos sistemas son múltiples no parece tener un impacto significativo en la estructura química; sin embargo, se requiere investigación adicional para corroborar este resultado.

El quinto capítulo examina la pregunta de si todas las estrellas en un sistema estelar múltiple se forman al mismo tiempo. Para responder esta pregunta, protoestrellas jóvenes, en lugar de protoestrellas en etapas tardías de evolución, son estudiadas. Esto porque las protoestrellas jóvenes tienen las condiciones de formación casi intactas, mientras que las protoestrellas en etapas tardías han cambiado considerablemente debido al proceso de formación. No obstante, el usar protoestrellas jóvenes presenta

un problema. Determinar las edades de protoestrellas jóvenes con certeza es casi imposible. Por otro lado, la etapa evolucionaria de una protoestrella, su edad en cierto sentido, es determinada por la distribución de su brillo con respecto a la longitud de onda, también llamado la distribución de energía espectral (DEE). Durante la etapa más temprana, el brillo de la protoestrella está concentrada en longitudes milimétricas de onda debido al núcleo de polvo en el cual la protoestrella es formada. Con la evolución de la protoestrella, el gas y el polvo del núcleo protoestelar se dispersa y el brillo de la protoestrella progresivamente se mueve hacia longitudes de onda en el infrarrojo, y cuando la estrella inicia fusión nuclear, su brillo se concentra en el espectro visible. En consecuencia, la etapa evolucionaria de una protoestrella relativa a las otras fuentes de un sistema protoestelar múltiple es utilizada para determinar si todas las protoestrellas en un sistema fueron formadas al mismo tiempo o en diferentes épocas. Las DEE para todas las protoestrellas identificadas en la nube molecular Perseo (distancia = 750 años luz) son construidas utilizando datos encontrados en la literatura y mapas fotométricos del observatorio espacial Herschel. La orientación de la protoestrella con respecto a la línea de vista del observador puede impactar la DEE, ya que una protoestrella vista a lo largo del flujo bipolar aparenta ser más desarrollada de lo que realmente es, ya que no se detectaría el polvo del núcleo protoestelar. Entonces, para determinar si las fuentes de un sistema protoestelar múltiple se forman simultáneamente o no, la orientación de la fuente, su estructura física y la DEE son consideradas en conjunto. Los resultados de este estudio encuentran que, en un tercio de sistemas múltiples, los componentes de estos sistemas no son formados simultáneamente. En otras palabras, algunos núcleos protoestelares continúan formando protoestrellas, aun luego de que una o dos se han formado. Esto constituye una pieza de información importante para la teoría y los modelos de formación de estrellas múltiples, y al mismo tiempo conduce a la pregunta de cuáles factores causan que algunos sistemas protoestelares múltiples continúen formando protoestrellas.

El capítulo sexto examina uno de los posibles factores que pueden influenciar la formación de estrellas múltiples: la temperatura. Modelos que incluyen el calentamiento del gas y polvo por la estrella central sugieren que cuando una protoestrella se ha formado, el gas y polvo caliente generalmente no se fragmenta. Sin embargo, los resultados del quinto capítulo sugieren que hay otros factores involucrados en la fragmentación y formación de estrellas múltiples. Para abordar el tema de si hay o no una relación entre temperatura y fragmentación, el gas y polvo a escalas de 1000 unidades astronómicas es investigado. El radiotelescopio APEX es utilizado para observar moléculas que funcionan como termómetros; por ejemplo, DCO^+ y H_2CO , al igual que moléculas que trazan regiones irradiadas por la protoestrella, como $c\text{-C}_3\text{H}_2$ y C_2H . Estas moléculas son observadas hacia una muestra seleccionada de sistemas protoestelares en la nube molecular Perseo. La muestra incluye tanto sistemas múltiples como individuales, lo cual permite comparar las condiciones en ambos tipos de sistemas y ayuda a determinar si la temperatura es un elemento clave en la formación de estrellas. Las temperaturas obtenidas mediante la comparación de las moléculas observadas demuestran que no hay una clara relación entre temperatura y la multiplicidad de estrellas. Estos resultados sugieren que la masa y la densidad juegan un papel importante en la fragmentación, y consecuentemente, en la formación de sistemas protoestelares múltiples.

Conclusiones

Los resultados de esta tesis contribuyen con información importante al campo de la formación de estrellas múltiples, y son brevemente resumidos a continuación. Discos con radios de 100 o más unidades astronómicas pueden formarse en las etapas tempranas de formación estelar, y pueden impactar la estructura físico-química de las protoestrellas. Esto es esencial para la formación de estrellas en general, ya que cambia la teoría del proceso de evolución protoestelar. Además, los discos y la estructura físico-química pueden impactar la formación de estrellas múltiples, ya que proveen los ingredientes para la fragmentación. No todas las fuentes en un sistema múltiple protoestelar se forman simultáneamente. Esto indica que, en algunos casos, las condiciones del núcleo protoestelar son apropiadas para continuar fragmentándose. Sin embargo, la temperatura no parece ser un factor significativo para la fragmentación, pero la masa y densidad sí lo son.

Los resultados de esta tesis aportan un paso adelante en la comprensión de formación de estrellas múltiples, pero es necesario continuar investigando. Por ejemplo, sería interesante estudiar si los resultados encontrados en la nube molecular Perseo también podrían aplicarse a otras regiones de formación de estrellas. Nuestra comprensión del proceso de formación de estrellas necesita ser revisada para incluir la formación de estrellas múltiples, ya que son el producto más común. Los modelos y la teoría deben ser ajustados de acuerdo a lo que muestran las observaciones, y las predicciones de estos modelos pueden proveer la dirección para nuestras observaciones.