

Este artículo aparecerá publicado en el Anuario del Real Observatorio de Madrid para el año 2017.

Discos circunestelares: la cuna de los planetas

Tomás Alonso Albi

*Observatorio Astronómico Nacional
Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento*

Abstract

From our own perspective the Universe is so big and old that we cannot realize most of the interconnected processes that led to the formation of the Earth. These events are still taking place all over the galaxy, but until recently we did not have the right tools to disentangle them. This paper is a summary of our current understanding of the star formation process, with special attention to the first direct observations of circumstellar disks in which planets are born.

Introducción

A principios del siglo XX Ernest Rutherford descubrió que los átomos radiactivos de algunos elementos muy pesados son inestables y se transmutan en otros elementos químicos, de manera que tras un cierto tiempo, que llamó vida media, la mitad de los átomos radiactivos presentes cuando se formó una roca se han transformado en otro elemento más estable. Inmediatamente Bertram Boltwood utilizó este descubrimiento como herramienta para datar las rocas más antiguas que pudo encontrar en la Tierra. Para ello se sirvió de la desintegración del uranio-235 y 238 en plomo, un proceso que tiene una vida media enorme (700 millones de años para el ^{235}U y 4500 para el ^{238}U), publicando en 1907 el primer trabajo en el que se demuestra que existen rocas de más de 2000 millones de años de edad. Posteriormente estos trabajos se extendieron a más muestras (incluyendo meteoritos) que permitieron establecer una edad definitiva para

nuestro planeta, coincidente con la del resto de cuerpos de nuestro Sistema Solar¹.

Así es como sabemos que el origen del Sistema Solar se remonta, sorprendentemente, a unos 4600 millones de años en el pasado. Ante tal magnitud es natural que uno de los grandes objetivos de la astrofísica moderna sea explicar el origen del Sol y los planetas. Al igual que sucede en otros campos de la astrofísica desgranar este proceso equivale a resolver un complicado puzzle en el que intervienen muchos fenómenos diversos. Cada astro o fuente ha seguido una evolución particular dependiendo de las propiedades a menudo cambiantes de su entorno, de manera que cuando la observamos es como si en una película viéramos sólo un fotograma aleatorio y difuminado e intentáramos a partir de él deducir todo el argumento. Es evidente que resulta preciso estudiar muchas fuentes en distintas fases evolutivas para obtener conclusiones válidas sobre cada una en particular, que luego puedan extrapolarse y generalizarse a todas las estrellas. Es un reto complicado que sólo ha sido posible asumir tras el desarrollo de nuevas generaciones de telescopios cada vez más potentes, que nos han permitido observar con mayor detalle las regiones de formación estelar. Las estrellas y planetas no se pueden crear en un laboratorio, así que en la astronomía todo cuanto podemos hacer es observarlas.

Cuando miramos el cielo nocturno lejos de una ciudad podemos contar a ojo varios miles de estrellas. Todas se formaron hace entre decenas y miles de millones de años a partir del colapso gravitatorio de gigantescas nubes compuestas de gas (principalmente hidrógeno y helio) y algo de polvo (1 % en masa). Las estrellas suelen formarse en grupos de decenas o cientos que se mantienen inicialmente unidas por la gravedad. Según nacen, las partículas que emiten las estrellas (electrones y protones principalmente, que en la Tierra generan las famosas auroras) forman un intenso viento que tiende a arrastrar el gas y dispersar la nube. De hecho, el 90 % de la masa contenida en las nubes es dispersada y no forma nuevas estrellas, y esta gran pérdida de masa impide que las nuevas estrellas puedan mantenerse unidas con su mutua gravedad por mucho tiempo. Las estrellas tienden a separarse lentamente mientras la nube progenitora se dispersa completamente, de manera que el resultado final de esta película de más de 100 millones de años es lo que observamos: muchas estrellas aisladas en el cielo. Pero incluso a simple vista aún podemos retroceder en el tiempo y observar algunas regiones de formación estelar, principalmente durante el verano. La Vía Láctea se aprecia como una débil banda que recorre el cielo, formada por un gran número de estrellas muy débiles como para apreciarlas a simple vista. Sobre ella se localizan estas nubes de gas y polvo, algunas de ellas visibles al ojo como pequeñas condensaciones que brillan débilmente

¹Un pequeño resumen de las rocas más antiguas encontradas en diferentes partes del mundo puede encontrarse, en inglés, en la dirección <http://pubs.usgs.gov/gip/geotime/age.html>.

gracias a las estrellas jóvenes que se han formado en ella y la iluminan. Su luz es roja porque el gas emite en la línea de recombinación del hidrógeno (el elemento más abundante) ionizado, principalmente $H\alpha$, una transición cuya energía corresponde a este color. La coloración azulada se debe habitualmente, en cambio, a la reflexión de la luz de estrellas jóvenes en el polvo interestelar, lo que suele observarse claramente en los cúmulos estelares. Sin embargo, la mayoría de las nubes de gas y polvo son opacas y oscuras, y destacan sobre la Vía Láctea como regiones llamativamente vacías de estrellas.

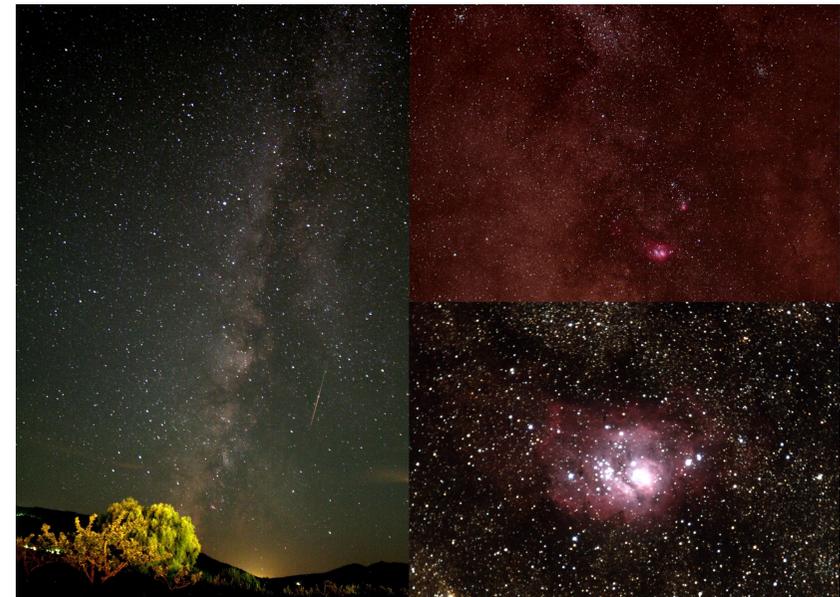


Figura 1: A la izquierda se presenta una fotografía de la Vía Láctea durante el mes de agosto (se aprecia una estrella fugaz de las Perseidas). En la parte inferior, junto al árbol, se observa una pequeña nube rojiza sobre la Vía Láctea. La imagen superior derecha presenta una ampliación de esta región similar a la que se obtendría con unos prismáticos. Se observan dos nebulosas en su parte inferior, y varios cúmulos estelares cerca del borde superior. La imagen inferior derecha muestra una ampliación de la nube rojiza más brillante, conocida como la nebulosa de la Laguna o M 8, y situada a unos 5000 años luz de distancia. En ella el gas está formando estrellas, y en su centro se aprecia un cúmulo estelar joven (Cortesía del autor).

De las nubes moleculares a las protoestrellas

Las nubes moleculares gigantes tienen tamaños típicos de 100 años luz, y masas de decenas de miles de veces la masa del Sol. A pesar de ocupar sólo el 1% del espacio interestelar dentro de las galaxias, estas nubes contienen la mitad de su masa de gas (sin considerar estrellas ni planetas), así que a gran escala son los objetos más densos. Aún así son muy difusos, con densidades típicas de 10^3 moléculas por centímetro cúbico, parecidas al vacío que se puede conseguir en los mejores laboratorios terrestres.

Estas nubes se encuentran en un estado de equilibrio en el que los movimientos aleatorios de las moléculas, que tienden a dispersar la nube, se ven compensados por la atracción gravitatoria del gas, que tiende a concentrarlo. Este equilibrio es un tanto precario, pues hay varios efectos que contribuyen al movimiento del gas compitiendo simultáneamente. Uno de ellos es la temperatura, consecuencia de la inyección de energía por radiación desde el medio interestelar circundante. La temperatura típica en las nubes moleculares es extremadamente fría (250° bajo cero), así que estos movimientos térmicos son pequeños. Otro factor son los campos magnéticos generados por las partículas cargadas eléctricamente (electrones y átomos ionizados) del medio interestelar, partículas que también son consecuencia de la radiación y el viento de otras estrellas. Los valores habituales son de $10 \mu\text{G}$, extremadamente bajos también, pero el efecto que tiene sobre las partículas cargadas del interior de la nube contribuye a sustentarla frente al colapso gravitatorio. Esta inyección de energía es el origen de las diferencias en la distribución de la temperatura y densidad en las diferentes poblaciones de partículas y moléculas dentro de la nube, las cuales tienden a sumarse con el tiempo a medida que su movimiento se vuelve, puntualmente, más rápido, caótico, y turbulento.

Las turbulencias, si no son muy grandes, tienden a mantener la nube estable a gran escala al estimular el movimiento aleatorio del gas. Pero también pueden retroalimentarse y generar ondas de choque que comprimen el gas y alteran su distribución puntualmente, generando regiones más densas donde la gravedad es mayor. Estamos hablando de fuerzas muy débiles actuando a lo largo de una nube enorme, de manera que este proceso lleva miles de años y aún hoy es difícil de entender o modelizar por ordenador. Si en una zona de la nube la masa (y por tanto la gravedad) supera un valor crítico el colapso gravitatorio para formar estrellas es inevitable. Cuando se hace un formalismo simplificado que no incluye el efecto de la turbulencia la masa crítica se denomina masa de Jeans (James Jeans, 1902). Su resultado para una nube de hidrógeno atómico² es $M_J \sim 10^{-8} \sqrt{T^3/\rho}$, donde T es la temperatura del gas (K), ρ la densidad (kg m^{-3}), y M_J la masa de Jeans resultante en masas solares.

²La derivación clásica de la masa de Jeans puede consultarse, en inglés, en la dirección <http://burro.astr.cwru.edu/Academics/Astr221/LifeCycle/jeans.html>

El colapso gravitatorio de la nube es inicialmente isoterma, y en estas condiciones la masa de Jeans disminuye a medida que aumenta la densidad. En consecuencia, el colapso de la nube viene seguido de una fragmentación sucesiva de la misma en núcleos que colapsan individualmente. Según el tamaño de la nube y su turbulencia se puede formar un cúmulo con centenares de estrellas parecidas al Sol, o sólo unas decenas de mayor masa. En el segundo caso la fragmentación suele alcanzar hasta el nivel de los núcleos, y en vez de objetos individuales se forman sistemas dobles con dos estrellas orbitando una alrededor de la otra, o incluso algunos sistemas múltiples. La formación estelar es, por tanto, un proceso local dentro de la nube un tanto aleatorio o estocástico, si bien algunas propiedades de las estrellas recién formadas están ligadas a las propiedades de la nube original, al menos cuando se hace un estudio estadístico.

Cada uno de los núcleos menores en colapso se denominan núcleos preestelares, y consisten en un núcleo denso rodeado de una envoltura. Debido a la creciente opacidad a partir de cierto punto la energía gravitatoria liberada por la contracción del núcleo no puede escapar en forma de radiación, de manera que la contracción ya no es isoterma, sino que conlleva un incremento progresivo de la temperatura del núcleo. El núcleo se contrae lentamente reduciendo su tamaño e incrementando su temperatura, y este cambio se traslada a la envoltura. La evolución de estas condiciones físicas conlleva también una evolución química, dado que los cambios de temperatura, densidad e intensidad del campo de radiación favorecen la formación de unas moléculas y la destrucción de otras. Aunque poco abundantes en masa en relación con el gas, los granos de polvo juegan un papel muy relevante en la química al interactuar con el gas, atrapándolo en el manto de hielo de los granos y sirviendo de refugio para generar nuevos productos en las reacciones químicas, los cuales luego pueden liberarse cuando el manto de hielo de los granos se evapora en fases posteriores de evolución del núcleo. Por tanto, el estudio de la química en estas regiones permite deducir tanto las condiciones físicas a las que está sometido el gas como las propiedades de los granos de polvo, y es una herramienta fundamental para comprender la evolución de estos objetos.

El aumento de densidad y temperatura del núcleo termina por disociar los átomos de las moléculas, principalmente hidrógeno (H_2), en núcleos individuales de hidrógeno atómico (H). La disociación aumenta el número de partículas y por ello reduce la energía transportada por cada una. Se puede entender como una forma de enfriamiento del gas que permite que la gravedad se imponga brevemente al movimiento aleatorio de las partículas. Al vencer la gravedad el núcleo se contrae, lo que a su vez aumenta la temperatura y energía de las partículas, y cuyo número, al ser ahora algo mayor, genera una mayor presión térmica que equilibra la gravedad y devuelve la situación de semi-equilibrio. Cuando todas las moléculas están disociadas en el núcleo preestelar éste pasa a denominarse protoestrella.



Figura 2: Las fotografías de campo amplio y muy larga exposición, como ésta de la región de Sagitario y el Escorpión, muestran el complejo intrincado de nebulosas, tanto brillantes como oscuras, en el que la distribución o morfología del gas parece retorcerse bajo los efectos de la turbulencia. Las estrellas se forman a escalas espaciales mucho menores, donde el efecto de la turbulencia es aún más caótico. La nebulosa de la Laguna aparece a la izquierda, en el centro las nebulosas oscuras de la Serpiente y la Pipa, y a la derecha el complejo de ρ Ophiuchi (Cortesía de Stéphane Guisard, ESO).

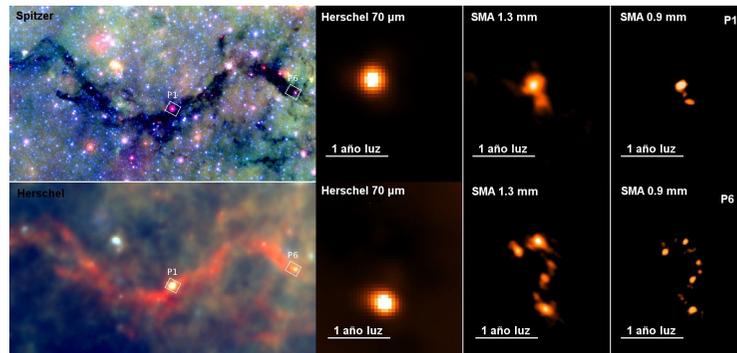


Figura 3: La imagen de la nebulosa de la Serpiente en el infrarrojo cercano (Spitzer) es sensible al polvo más caliente que la nebulosa, que aparece oscura. En el infrarrojo lejano (Herschel) el polvo frío de la nebulosa aparece brillando. Las regiones P1 y P6 observadas en longitudes de onda más largas con el interferómetro SMA (los dos paneles de la derecha) muestran la presencia de núcleos preestelares en colapso, invisibles en el infrarrojo (Cortesía de ESO y CfA).

De las protoestrellas a las estrellas

Existe un principio en física llamado conservación del momento angular, como consecuencia del cual la velocidad de giro aumenta cuando el radio disminuye, igual que un patinador gira más rápido cuando junta los brazos al cuerpo. El gas de la envoltura cae al núcleo aumentando su velocidad de giro, y como consecuencia de ello se distribuye formando un disco circunestelar con una forma peculiar llamada disco “acampanado”, o *flared* en su acepción inglesa. Visto de perfil, la altura del disco aumenta según nos alejamos del núcleo, parecido a lo que ocurre cuando giramos rápido con una cuchara el líquido contenido en el interior de un vaso. La forma tan peculiar de este disco sólo es posible en las fases iniciales de formación de una protoestrella, cuando la envoltura es masiva y el ritmo de caída de masa al interior es alto. Las partículas del disco interactúan y colisionan entre sí, de manera que unas ganan momento angular y se desplazan hacia el exterior del disco, y otras lo pierden y caen al interior. El disco no sólo permite el flujo o acreción de masa desde la envoltura a la protoestrella, sino que al mismo tiempo libera el exceso de momento angular generado por este proceso, llevando este exceso de energía de rotación a la región exterior del disco, la cual queda más ensanchada. En nuestro Sistema Solar el 99,8% de la masa se encuentra en el Sol, pero el 98% del momento angular lo han retenido los planetas que se formaron en el disco.

La acreción de masa hacia la protoestrella a través de la región interna del disco circunestelar genera un espectacular fenómeno llamado flujos bipolares. La mayor parte del material que cae a la protoestrella lo hace en forma de partículas ionizadas que son expulsadas violentamente en dirección perpendicular al disco a lo largo de las líneas del campo magnético de la protoestrella. Los flujos bipolares alcanzan velocidades de cientos de km/s y pueden expulsar el material a varios años luz de distancia, convirtiéndolos a menudo en las mayores evidencias de formación estelar en una nube molecular. Esta eyección de material libera el exceso de momento angular en torno a la protoestrella y permite que ésta acrete más masa sin que su velocidad de rotación aumente hasta terminar por destruirla.

Recordemos que la protoestrella tiende a contraerse a medida que aumenta su masa y gravedad, y esta contracción lleva consigo un calentamiento que aumenta la presión interna del núcleo y lo equilibra con la gravedad. La protoestrella atraviesa por tanto sucesivas etapas de equilibrio dentro de un proceso general de contracción en el que su tamaño se reduce y su temperatura aumenta. Eventualmente la temperatura del núcleo interno alcanza un valor de un millón de grados, suficiente para la fusión del deuterio en helio-3. Esta reacción libera mucha energía, de manera que la presión térmica vence a la gravedad y las capas externas de la

protoestrella se expanden de tamaño hasta alcanzar una nueva situación de equilibrio con la gravedad. La reacción nuclear del deuterio, previa a la del hidrógeno y mucho menos energética que ésta, actúa como un termostato que permite que la protoestrella siga acretando más material y entre en una nueva fase de contracción.

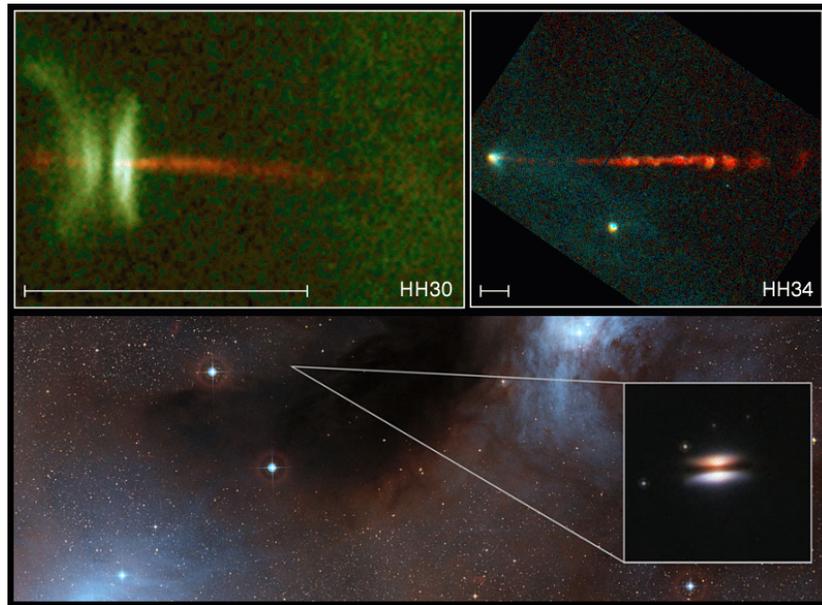


Figura 4: Arriba: imágenes de diversos objetos Herbig-Haro (HH), que surgen del choque del material expulsado en los flujos bipolares con el gas de la nube principal. La fuente del chorro de HH 30 muestra claramente el disco acampanado, opaco y casi de perfil. Abajo: disco apodado “platillo volante” en torno a la protoestrella 2MASS J16281370-2431391, situada a 400 años luz en el complejo de ρ Ophiuchi. Las imágenes proceden del telescopio espacial Hubble. El polvo presente en el disco impide la visión directa de la protoestrella (Cortesía de NASA/ESA/STScI y ESO).

Durante la fase de eyección de flujos bipolares la envoltura es progresivamente dispersada, en parte porque se agota el material presente en ella (sin cuya caída los flujos bipolares cesan), y en parte por la erosión provocada por los propios flujos bipolares de la protoestrella o de otras vecinas. La acreción se frena, el exceso de momento angular también, y el disco circunestelar pasa a una fase más estable con un perfil plano y fino. La protoestrella, por su parte, prosigue con su contracción, pues aunque no haya un ritmo alto de acreción de masa el deuterio, escaso frente al

hidrógeno, tiende a consumirse. A medida que las reacciones de fusión del deuterio disminuyen en su intensidad, la presión térmica del núcleo no puede sostener a la protoestrella frente a la gravedad. Aunque los detalles dependen mucho de la masa de la protoestrella, el resultado final es que la contracción de la protoestrella es tal que la temperatura del núcleo alcanza valores suficientemente altos (más de 20 millones de grados) como para generar reacciones nucleares de fusión del hidrógeno en helio. En este momento es cuando empezamos a llamar a estos objetos verdaderas estrellas, con una temperatura superficial suficientemente alta como para mostrar una emisión intensa en el espectro visible. Esto significa que se hacen visibles al ojo, aunque sólo las podemos observar con telescopios ópticos si la envoltura ha sido suficientemente dispersada.



Figura 5: Detalle de una región de la nebulosa de Carina. En la parte superior derecha se aprecian claramente los flujos bipolares de dos protoestrellas. Las estrellas recién formadas dispersan el gas y dejan al descubierto penachos o pilares que corresponden a regiones densas y opacas que están siendo erosionadas por la radiación. Seguramente están formando estrellas, aunque aún no hayan alcanzado la fase de eyección de flujos bipolares. En esta imagen tomada en el óptico las protoestrellas no son directamente visibles y se encuentran en el interior de la nube de gas y polvo (Cortesía de NASA/ESA/STScI).

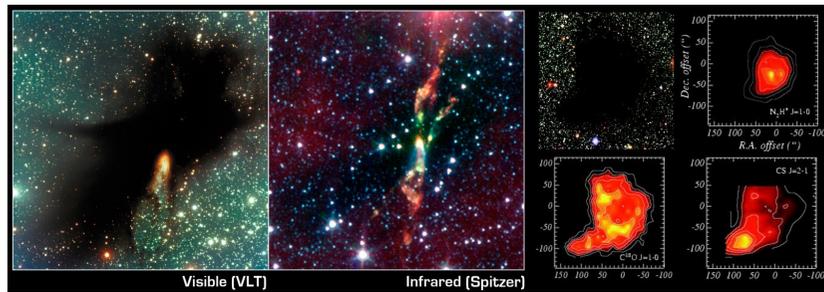


Figura 6: Izquierda: imagen de los flujos bipolares de una protoestrella en el interior de la pequeña nube oscura BHR 71. En luz visible es posible ver uno de los flujos, pero el otro está oculto tras la nube y requiere de observaciones en longitudes de onda más largas como el infrarrojo para observarlo (con telescopios espaciales). Derecha: imagen de la nebulosa oscura Barnard 68, en la que aún no existe formación estelar. Las observaciones en longitudes de onda muy largas (radio) de las transiciones rotacionales de CO, CS, y N_2H^+ permiten estudiar las perturbaciones en la distribución y la dinámica del gas (Cortesía de NASA/JPL-Caltech/CfA, y Lada & Bergin 2002).

Este proceso puede durar decenas de millones de años (o sólo unos pocos millones para estrellas varias veces más masivas que el Sol, cuya evolución es más rápida), y como hemos visto acontece en los núcleos que se forman en el interior de la nube molecular. Al ser objetos muy fríos emiten radiación de baja energía (ondas de radio), y al ser densos se encuentran inmersos en zonas opacas de la nube. En consecuencia, normalmente sólo es posible observarlos en sus fases iniciales mediante la técnica de la radioastronomía milimétrica. Con esta técnica es posible atravesar el obstáculo que supone el gas y el polvo de la nube para observar cómo se forman las estrellas en el interior, de una manera parecida a cuando nos conectamos a una red inalámbrica a pesar de que el router pueda estar en otra habitación. El precio a pagar por observar en estas longitudes de onda es una limitación en la resolución o detalle de las observaciones en comparación con el espectro visible, aunque el desarrollo de la tecnología ha permitido construir recientemente en Chile el interferómetro ALMA, que acapara todas las virtudes deseables por un astrónomo para sus observaciones. A medida que la nube se dispersa las protoestrellas quedan al descubierto y pueden ser observadas directamente con telescopios infrarrojos e incluso ópticos, como el telescopio espacial Hubble u otros situados en tierra. Las observaciones en el infrarrojo medio y lejano deben hacerse con telescopios espaciales como Spitzer y Herschel porque la atmósfera terrestre bloquea el infrarrojo.

De los discos circunestelares a los planetas

Como hemos visto, los discos circunestelares son estructuras de una importancia crucial en el proceso de formación estelar, pues liberan a la protoestrella del exceso de momento angular y permiten que ésta acrete masa de forma estable. La evolución del disco depende de las propiedades físicas de la protoestrella (masa y su ritmo de acreción, temperatura, tamaño e intensidad de la radiación que emite), del ritmo de caída de material desde la envoltura, y también de la posible presencia de otras protoestrellas cercanas (o incluso supernovas) que puedan afectar, con su contribución al campo de radiación, a los procesos físicos que tienen lugar en el disco. Dado que todos estos factores son a su vez variables en el tiempo y el espacio, es fácil imaginar que no existen dos objetos iguales, y la evolución del disco atraviesa fases muy diversas y extremas que hacen muy complicado su estudio detallado. Por otro lado, en el disco se dan múltiples fenómenos que afectan a las propiedades del polvo y el gas y que dependen de las anteriores, de manera que el propio disco se transforma con el tiempo física y químicamente. A pesar de esta complejidad hay un denominador común: casi todos (o quizá todos) los discos acaban formando planetas, como si ello fuera un destino inevitable. Al igual que sucede con el proceso de contracción en una región de la nube para formar núcleos preestelares, o con el proceso de contracción de la protoestrella, los discos circunestelares son estructuras ligadas que inevitablemente interactúan y se equilibran continuamente con su entorno, de manera que, a pesar de su propia evolución interna, las propiedades finales de los planetas que se forman en él deben depender fuertemente de esta conexión.

Inicialmente el disco circunestelar tiene mucha más masa de gas que de polvo, en una proporción de 100 a 1. El disco tiene un tamaño típico de varios cientos de Unidades Astronómicas (ua)³, y una masa en torno a 0,1 masas solares. La temperatura en el exterior es de pocas decenas de Kelvin a lo sumo (unos 250 grados Celsius bajo cero⁴), y de miles de grados en torno a la protoestrella. La radiación ultravioleta de la protoestrella central calienta la región interna y produce la fotodisociación de las moléculas del gas, de manera que en esta región el gas queda en forma atómica. Si hay alguna protoestrella vecina muy masiva (recordemos que la mayoría de las estrellas se forman en cúmulos y permanecen juntas los primeros millones de años) ésta también contribuirá a calentar el disco y mantener una capa superficial de fotodisociación más fina en regiones algo más alejadas. Las regiones más internas pueden calentarse hasta varios miles de grados, suficiente como para el que hidrógeno se ionice, poblando la

³La Unidad Astronómica está definida como la distancia media Tierra-Sol, equivalente a unos 150 millones de km.

⁴Recordar que en la escala Celsius que usamos habitualmente para la temperatura, el 0 absoluto, o 0 K, corresponde a -273 C o 273 grados bajo cero.

región de electrones libres. El viento de la estrella, consistente en protones y electrones acelerados, presiona el interior del disco y tiende a dispersar el gas de las capas más superficiales, el cual puede arrastrar también las partículas de polvo más ligeras menores que una micra. Este proceso de dispersión tiende a destruir el disco en una escala de tiempo de unos 10 millones de años, similar tanto a la escala de formación de la estrella propiamente dicha como al periodo en que todas permanecen juntas en el cúmulo. En las estrellas de alta masa la dispersión del disco es más rápida debido a que la protoestrella emite más radiación ultravioleta, y el proceso se complica en la región interna porque la frecuencia en que se dan sistemas dobles es mucho mayor en estrellas de alta masa.

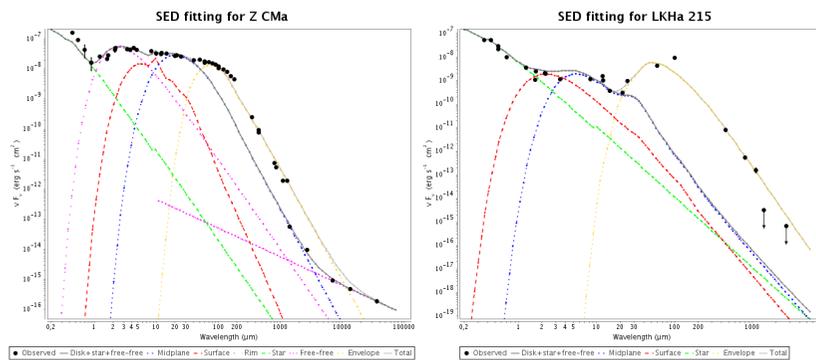


Figura 7: Ajuste completo de la distribución espectral de energía desde el ultravioleta a longitudes de onda centimétricas mediante la combinación de modelos para la estrella, la emisión del polvo debida al disco y la envoltura, y emisión libre-libre del viento de la estrella. Izquierda: Z CMa es una estrella de alta masa muy joven, con un disco y envoltura muy masivas y compactas. Derecha: LkHa 215 es una protoestrella más evolucionada cuyo disco y envoltura han sido en gran medida dispersadas (Cortesía de Alonso-Albi et al. 2009).

En las fases iniciales las interacciones entre las protoestrellas pueden por tanto originar pérdidas súbitas de masa en el disco circunestelar y la envoltura, o intercambios de material entre ellas. Si bien esto no es lo habitual, es un posible origen para los planetas huérfanos que se han encontrado flotando libremente en el espacio, sin orbitar estrella alguna.

La región interior más caliente y densa es el medio adecuado para la combinación de los granos de polvo con el gas atómico, dando lugar a cadenas de carbono llamadas PAHs y otras moléculas complejas esenciales para la vida. Fuera del plano medio del disco la radiación puede destruir las cadenas menos complejas. En el exterior del disco el plano medio no está expuesto a una radiación ultravioleta intensa, de manera que las moléculas

pueden reaccionar entre sí y generar nuevos productos químicos. Como se mencionó antes los granos de polvo pueden atrapar el gas y servir de base para generar nuevos productos en el manto de hielo de los granos.

Además de los efectos del campo de radiación tenemos del efectos dinámicos por el propio movimiento del material del disco. El plano medio del disco es más denso y está más protegido de la radiación. Los choques entre las partículas del gas provocan la caída de parte del gas y el polvo más fino hacia el interior del disco, el cual es calentado y expulsado (empujado de nuevo por la radiación hacia las capas superficiales del disco o expulsado en los flujos bipolares) o acretado por la protoestrella.

Los granos de polvo de mayor tamaño no pueden ser arrastrados por el gas, y se desacoplan de él desde el punto de vista dinámico. Estos granos se forman por procesos de coagulación que son consecuencia de colisiones de baja velocidad entre granos de polvo de menor tamaño (menor que la micra) y formas irregulares, que se unen unos con otros por fuerzas eléctricas entre las partículas cargadas presentes en el manto de hielo. Al coagular, los granos más gruesos sedimentan hacia el plano medio, que progresivamente se ve enriquecido en granos cada vez mayores en relación con las capas más superficiales del disco, en donde los granos son más finos. Eventualmente el plano medio del disco se ve poblado de granos con diferentes distribuciones de tamaños, de manera que los más pequeños son arrastrados por el gas radialmente (ya sea al interior por movimientos de acreción, o hacia el exterior por la radiación de la protoestrella, especialmente en los discos menos densos). Los granos mayores se ven afectados de manera diferente por la radiación y pueden migrar radialmente también, aunque en menor medida y hacia el interior.

Esta situación da lugar a movimientos turbulentos y la formación de vórtices o torbellinos en el que el movimiento del gas y el polvo se vuelve caótico. Los detalles, una vez más, resultan muy difíciles de comprender, en buena medida porque las observaciones actuales de mayor resolución sólo han empezado a mostrarnos esta realidad con la estructura espiral a gran escala (el vórtice principal) que se origina en esta fase de evolución del disco. La turbulencia incrementa la posibilidad de colisiones entre los granos de polvo, lo que convierte el doble proceso de coagulación para generar granos mayores (colisiones lentas) y la destrucción de granos entre sí (colisiones violentas) en procesos paralelos cada vez más numerosos. Las colisiones destructivas generan muchos granos de tamaño menor, con los cuales las posibilidades de coagulación en otros granos aumentan. Si a esto sumamos el efecto de la gravedad en el disco, cada vez más importante a medida que los granos alcanzan tamaños de varios metros y se convierten en planetesimales, todo este conjunto de procesos da lugar a vórtices secundarios, algunos de los cuales crecen lo suficiente como para acabar siendo estables por su propia gravedad. Tenemos entonces el embrión de lo que será un planeta.

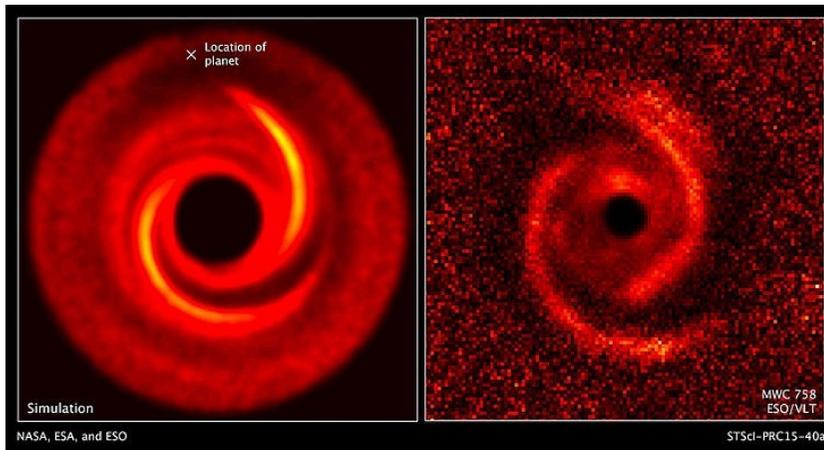


Figura 8: La imagen derecha muestra el disco circunestelar en torno a MWC 758 observado por el VLT en 2015. A la izquierda aparece una simulación con la posición de un hipotético planeta no visible que podría ser el origen de la estructura espiral (Cortesía de NASA/ESA/ESO).

Estos embriones entran en una fase de crecimiento acelerado oligárquico, de manera que cuanto mayores son, más rápido crecen y devoran a los pequeños núcleos o vórtices menores. La gravedad y la resistencia de estos núcleos a las colisiones, incluso las catastróficas, hace el resto. Una gran colisión primigenia en la Tierra es el origen probable de la Luna, pero la mayor parte de los restos de la colisión se quedaron en la Tierra. Los planetas que se forman en el exterior pueden tener una mayor reserva de gas en el disco a su disposición, la cual al ser acretada por el embrión da lugar a planetas gigantes compuestos principalmente de gas, como Júpiter.

Hay muchos detalles en todo este proceso que son desconocidos. Por ejemplo, no se sabe si los planetas provocan vórtices y la estructura espiral, o si es al revés. Otra cuestión es el crecimiento de los granos desde el centímetro hasta el nivel del kilómetro, a partir del cual el crecimiento está dominado por la gravedad. Según los modelos el crecimiento debería ser muy rápido, o de lo contrario los granos precipitarían hacia la protoestrella en escalas de tiempo breves. Tampoco está claro cómo intervienen los fenómenos de resonancias gravitatorias entre planetas en formación, los cuales pueden distribuir el material del disco en forma de anillos de mayor o menor densidad y aportarían una solución al problema anterior. Resolver esto requiere de observaciones de altísima resolución, que incluso con el interferómetro ALMA aún no serán posibles en los próximos años.

Otra de las cuestiones que sí se está abordando ahora es la evolución química de los discos. En las primeras fases de evolución el disco puede ser

muy denso y opaco, de manera que la radiación de la estrella apenas llega más allá de las regiones interiores del disco. La temperatura puede ser muy baja en casi todo el disco, suficiente como para congelar parte del gas libre y atraparlo en el manto de hielo de los granos de polvo. Si así ocurre, las observaciones con radiotelescopios de las transiciones rotacionales de estas moléculas no mostrarán emisión alguna de esa molécula. Cada molécula tiene una temperatura o punto diferente por debajo del cual “desaparece” en los granos⁵, y también hay que tener en cuenta que pueden reaccionar entre sí, de manera que unas y otras se combinan bajo la acción de la radiación que viene del exterior. Cuando el disco evoluciona y se dispersa, se vuelve más transparente a la radiación de la protoestrella, y este punto o radio de congelación se aleja de la estrella, de manera que el manto de hielo se evapora en las regiones internas del disco y el gas que quedó atrapado se libera de nuevo y lo podemos detectar. La formación de los planetas ocurre en paralelo con estos procesos, si bien el enriquecimiento en materiales volátiles tiene lugar al final, cuando éstos se liberan de los granos.

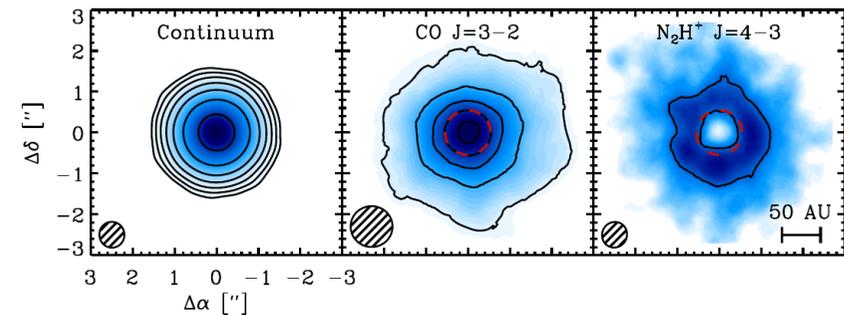


Figura 9: Observaciones con ALMA del disco circunestelar en torno a TW Hya. Los paneles muestran la emisión del continuo debida al polvo, la emisión de la transición rotacional 3-2 de CO, y la emisión de la transición rotacional 4-3 de N_2H^+ . El CO es muy abundante y tiende a reaccionar y hacer desaparecer el N_2H^+ , pero en regiones suficientemente alejadas y frías del disco el CO se congela en los granos y el N_2H^+ puede detectarse (Cortesía de C. Qi et al. 2013).

En consecuencia, la composición química de los planetas puede ser diferente según la distancia a la que se formaron del Sol. En las regiones interiores a la órbita de Marte abunda el agua, cuyo punto de congelación se da en el vacío a temperaturas de 100 K. Para el CO esto sucede en torno a los 20 K (dependiendo de la estructura del manto de hielo de los granos),

⁵Este punto se denomina línea de nieve o “snowline” en inglés, y corresponde habitualmente a un radio o distancia concreta a la protoestrella, dado que la temperatura sigue un perfil decreciente con la distancia a la fuente generadora de energía.

de manera que los planetas que se formaron en regiones interiores a esta línea, como Júpiter y Saturno, tienen más CO que los planetas externos Urano y Neptuno. El agua, como sabemos, es un ingrediente básico para las reacciones químicas precursoras de la vida, y su origen y llegada a la Tierra otra de las cuestiones fundamentales. En el artículo de Asunción Fuente (2012) se dan más detalles sobre cómo llegó el agua a la Tierra.

Una vez el disco queda dispersado la pérdida de masa que se origina puede dar lugar a migraciones en las órbitas finales de los planetas gigantes. Si la pérdida de masa es muy alta y repentina es posible que las órbitas se vuelvan muy inestables. Si esto sucede una de las posibles consecuencias es que los planetas gigantes caigan hacia el interior y acaben orbitando muy cerca de su estrella (más adelante veremos ejemplos de este tipo de sistemas). Otra opción es que los planetas gigantes bloqueen la formación del resto y tras estas grandes migraciones todo lo que quede sea un disco formado casi exclusivamente de asteroides, con quizá algún objeto como la Tierra. Son los llamados discos de escombros o “debris disks” en inglés. Estas migraciones también podrían dar lugar a planetas huérfanos.

Los resultados del análisis de meteoritos y otros cuerpos de nuestro Sistema Solar, así como las observaciones de las órbitas de cuerpos del cinturón de Kuiper, sugieren que el Sol se formó en el seno de un cúmulo de tamaño moderado, formado por cientos de estrellas de baja masa en general. Las interacciones en los primeros millones de años no debieron ser muy grandes y esto permitió la formación de planetas tanto terrestres como gaseosos. Sin embargo, la presencia de isótopos radiactivos de baja vida media como ^{26}Al o ^{30}Fe sugieren que el Sistema Solar se vió enriquecido por los residuos de una supernova, así que sabemos que había estrellas masivas relativamente cerca, si bien ninguna estuvo nunca lo suficientemente cerca como para hacer peligrar la integridad del disco circunestelar. Tras la dispersión del disco tuvo lugar la época de gran bombardeo, en la que numerosos asteroides que no llegaron a formar planetas (en buena medida del cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter, pero también del cinturón de Kuiper más exterior, de donde vienen los cometas) colisionaron con los planetas. Esto lo sabemos del estudio de las rocas lunares y las estimaciones sobre la edad de los cráteres en su superficie y en la de Marte. Hay regiones en ambos cuerpos que muestran pocos cráteres relativamente, lo que significa que son más recientes y hubo impactos grandes incluso 1000 millones de años tras la formación del Sistema Solar, los cuales borraron las huellas de las colisiones anteriores. La dispersión del disco pudo provocar un ligero reajuste de las órbitas de los planetas gigantes en los primeros 1000 millones de años. Aunque se cree que el reajuste fue muy ligero, este proceso sería suficiente para lanzar multitud de cuerpos de ambos cinturones hacia el interior del Sistema Solar, y extender así la duración de esta época de gran bombardeo.

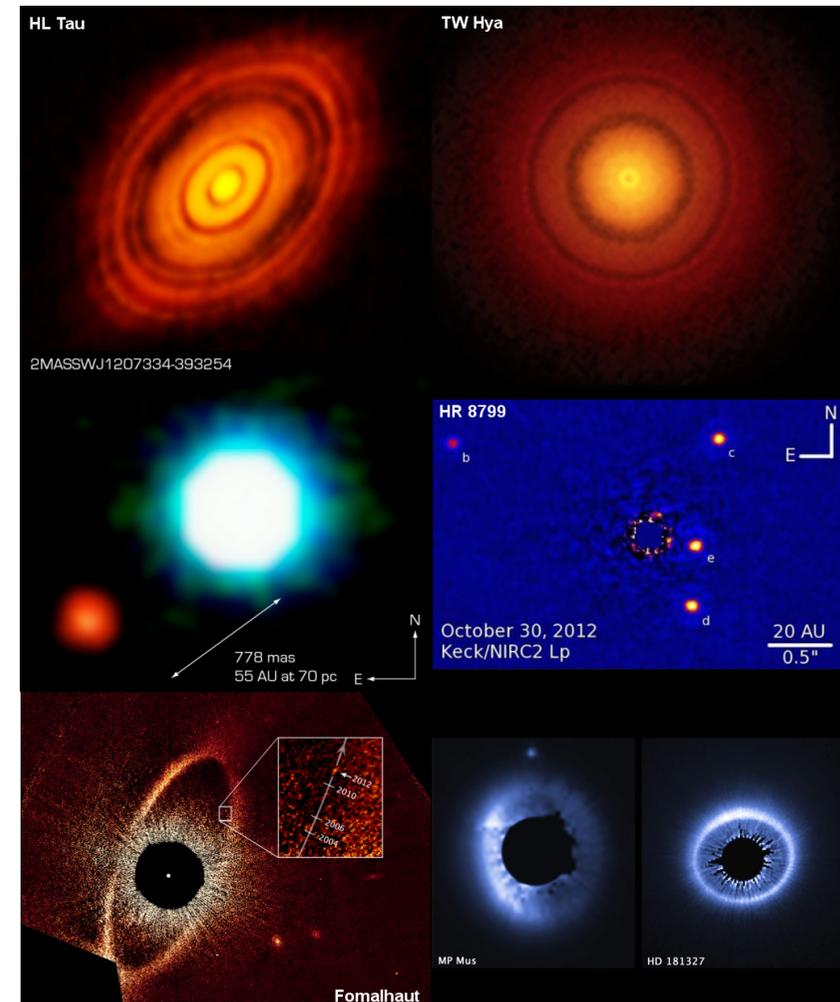


Figura 10: Detecciones de discos circunestelares y planetas. La primera fila muestra las observaciones mediante ALMA de los discos de HL Tau y TW Hya, que muestran anillos oscuros provocados por la presencia de planetas aún en formación, que barren el polvo. La segunda fila muestra la primera detección de un planeta de forma directa (Chauvin et al., 2004) en 2M1207b, y los cuatro planetas en torno a HR 8799. Los planetas son un millón de veces más débiles que la estrella, cuyo brillo ha sido apantallado. La tercera fila muestra discos de escombros, con un planeta en el caso de Fomalhaut (Cortesía de NASA, ESA, y <http://www.circumstellardisks.org/>).

A la caza de planetas extrasolares

Tras varios intentos y falsos positivos la primera detección confirmada de un planeta extrasolar⁶ la obtuvieron en 1995 Michel Mayor y Didier Queloz, quienes hallaron un planeta parecido a Júpiter alrededor de 51 Pegasi. Este hito marcó una auténtica carrera por detectar planetas y el perfeccionamiento de muchas técnicas para este propósito. De todas ellas hay dos que se han mostrado especialmente exitosas: las variaciones de velocidad radial (con las que Mayor y Queloz hicieron su descubrimiento), y la fotometría durante el tránsito de un planeta por delante de su estrella.

A medida que un planeta masivo orbita alrededor de su estrella la propia estrella se mueve ligeramente al ser afectada por la influencia gravitatoria del planeta. En otras palabras, ambos cuerpos giran alrededor de un centro de masas común, el cual está muy cerca de la estrella al contener ésta la mayoría de la masa. En nuestro Sistema Solar este centro común está físicamente a un radio solar de la superficie del Sol, de manera que el Sol describe una pequeña circunferencia durante los 11 años que tarda Júpiter en orbitarlo. El resto de planetas añaden movimientos circulares de menor amplitud y diferente periodo que se superponen al generado por Júpiter.

El método de medir variaciones de velocidad radial de la estrella consiste en medir los cambios en la velocidad relativa entre la estrella y el Sol. A medida que la estrella se mueve en un círculo hay momentos en que se acerca a nosotros un poco y otros en los que se aleja. La velocidad se mide a partir de las líneas del espectro de la estrella, que muestran un pequeño desplazamiento en frecuencia debido a este movimiento. Es un método indicado sólo cuando el plano en que orbita el planeta alrededor de su estrella está alineado o casi alineado con nuestra línea visual, pues de lo contrario la estrella no tendría componente alguna de movimiento en nuestra línea visual, y este método no permitiría detectar los planetas.

El método de la fotometría de tránsitos consiste en monitorizar el brillo de la estrella y esperar a que el planeta pase por delante en nuestra línea visual. El planeta tapaná parte de la estrella, que se hará por unas horas o días ligerísimamente más débil. Estas variaciones, al igual que ocurre con el método de la velocidad radial, serán periódicas, pero a diferencia del otro método no afectará a las líneas del espectro de la estrella. Esto permite distinguir los planetas de otros efectos físicos ligados a la posible variabilidad o pulsación de la propia estrella. Además de una gran precisión en las medidas, el método de la fotometría requiere también que la alineación del plano de la órbita del planeta con nuestra línea visual sea casi perfecta. Esto significa que la mayoría de los planetas no se pueden detectar con este método, pero si la monitorización se aplica a muchos miles de estrellas cada noche se pueden encontrar muchos.

⁶A partir de ahora se utilizará preferentemente el término planeta para referirse, siempre, a planetas descubiertos fuera de nuestro Sistema Solar.

Ambos métodos permiten en la actualidad detectar planetas tan pequeños como la Tierra. El método de la velocidad radial es más flexible con el requerimiento de la alineación del plano orbital del planeta, pero obtener espectros de un gran número de estrellas durante el tiempo necesario como para revelar la presencia de planetas y confirmarlos (meses o años por cada estrella) conlleva un gran esfuerzo de observación y reducción de datos. Dado que la fotometría o brillo es más fácil de medir y se puede hacer con todas las estrellas de un campo a la vez, es un método mucho más eficiente con el que se han descubierto la mayoría de los planetas. Pero lograr detectar planetas como la Tierra requiere una precisión en la medida del brillo que sólo es posible conseguir desde el espacio, dado que las perturbaciones en la atmósfera y las variaciones de temperatura en la superficie limitan la precisión y estabilidad de las medidas, tanto a la hora de repetirlas para confirmar un descubrimiento como para profundizar en esos datos y deducir de ellos los parámetros físicos del planeta. Además, dado que un tránsito dura muy poco tiempo, estas medidas deben realizarse de forma continuada y homogénea durante meses y años. Por este motivo el método de los tránsitos ha reportado hasta ahora muchos planetas con un periodo de traslación corto (muy cercanos a su estrella), y con un tamaño relativamente grande como el gigante Júpiter en nuestro Sistema Solar. Se los llama habitualmente “Júpiter caliente” (o “hot Jupiter” en inglés). En cambio, el método de la velocidad radial es más sensible a planetas gigantes situados lejos de su estrella.

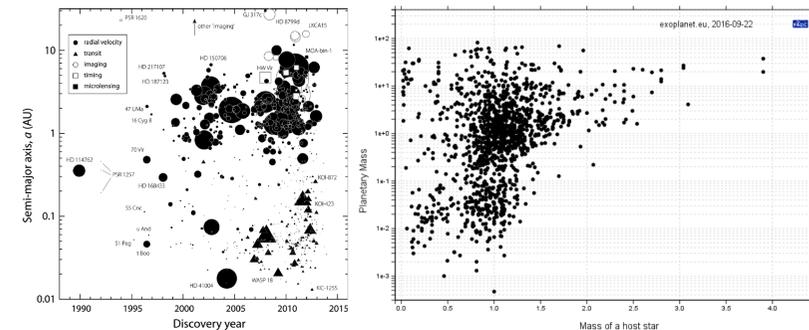


Figura 11: Izquierda: aunque se han desarrollado muchos métodos para detectar planetas, el 97% se han descubierto mediante fotometría de tránsitos y medidas de velocidad radial. Derecha: masa de los 3500 planetas descubiertos hasta ahora en función de la masa de la estrella que orbitan. Los planetas pequeños como la Tierra sólo se han descubierto hasta ahora en torno a estrellas de baja masa (Corteza de M. Perryman y la web <http://exoplanets.eu>).

Para hallar más planetas y de un tamaño menor se optó por misiones espaciales para monitorizar el brillo de las estrellas. La misión Corot de la

agencia espacial francesa detectó varias decenas de planetas entre 2007 y 2012. El más parecido a la Tierra es Corot-7b, de unas 7 masas terrestres y un tamaño un 60% mayor que la Tierra. Está a una distancia de sólo 6 radios solares de su estrella, por lo que su temperatura superficial debe superar los 2000 grados en el lado que mira a su estrella, y -200 donde siempre es de noche. La misión Kepler de la NASA midió el brillo de 150 000 estrellas en un pequeño campo de la constelación del Cisne cada 30 minutos entre 2009 y 2012. El resultado fue más de 2300 planetas (y otros 5000 con detección no confirmada), incluyendo 20 planetas parecidos a la Tierra en la zona de habitabilidad y unos 400 sistemas múltiples, 20 de ellos con 5 planetas o más. Tras unos problemas técnicos la misión se extendió en 2014 y se han observado nuevos campos. Kepler 452b es el hallazgo más significativo, un planeta algo mayor que la Tierra cuyo año dura 385 días. Con estos resultados se estima que en la Vía Láctea hay 20 000 millones de planetas como la Tierra en la zona de habitabilidad.

Planetas rocosos en la zona de habitabilidad

El gran objetivo de muchos grupos es detectar planetas como la Tierra en la llamada zona de habitabilidad, un rango de distancia del planeta a su estrella tal que la temperatura superficial del planeta sea adecuada para la existencia de agua líquida en la superficie, y, por tanto, alguna forma de vida. Esto puede ocurrir en planetas muy cercanos a su estrella si la estrella es más pequeña y menos luminosa que el Sol, o bien en planetas más lejanos si la estrella es más luminosa. El primer caso es el más favorable para combinar las diversas técnicas e instrumentos de detección, con el objetivo de hacer el descubrimiento, confirmarlo, y por último hacer observaciones detalladas para deducir la masa, tamaño, órbita del planeta, e incluso composición de la atmósfera. Estudiar la composición de la atmósfera (o, al menos, detectar agua u oxígeno) ya es posible técnicamente en los planetas gigantes y calientes, pero para lograrlo en planetas como la Tierra se requieren instrumentos que aún no están disponibles. De los tres planetas presentes en la zona de habitabilidad en nuestro Sistema Solar la Tierra es el único que posee agua líquida en su superficie de forma estable, algo que sólo la composición atmosférica puede delatar. La temperatura superficial en Venus es demasiado caliente, y la de Marte demasiado fría, en ambos casos por su evolución geológica, no por su distancia al Sol.

La misión Gaia de la Agencia Espacial Europea (ESA) tiene como objetivo medir con gran precisión la posición en el cielo de un gran número de estrellas repetidamente, lo que permitirá medir sus movimientos propios debidos al movimiento relativo respecto al Sol, y también revelar la presencia de planetas en torno a ellas como perturbaciones periódicas de ese movimiento medio relativo. Este método de detección astrométrica es diferente de los dos principales métodos descritos anteriormente, y

hasta ahora no había sido posible utilizarlo con la suficiente precisión. Las estimaciones sobre el número de planetas extrasolares que Gaia descubrirá son inciertas, pero es posible que supere los 20 000, casi diez veces más que todos los hallados hasta ahora. La mayoría de ellos serán planetas similares a Júpiter, de gran masa y muy alejados de su estrella, los cuales producen un desplazamiento mayor en la posición de la estrella. Este método astrométrico o de medida directa de la posición de la estrella es sensible al mismo tipo de planetas que el método de la velocidad radial, pero en este caso se mide el movimiento en el plano del cielo, no en la línea visual. Por tanto, permitirá encontrar muchos planetas en estrellas en los que los métodos anteriores no son efectivos. Los primeros datos de Gaia se publicaron en septiembre de 2016, y la misión se extenderá por 5 años.

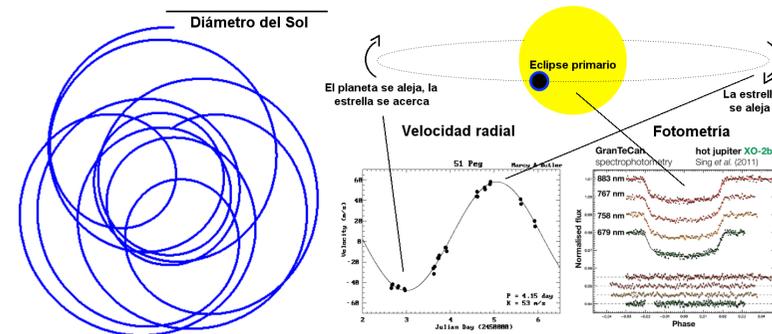


Figura 12: Izquierda: movimiento del centro del Sol debido a la influencia gravitatoria de los planetas del Sistema Solar, suponiendo una visión frontal. La línea superior muestra el diámetro del Sol a escala. Derecha: en un sistema visto (casi) de perfil el planeta puede eclipsar a su estrella, y como éste no brilla la estrella aparece algo más débil. Además, la estrella se mueve alrededor del centro de masas común (en sentido contrario a como la hace el planeta) y al medir la velocidad se obtiene una curva sinusoidal. Gaia será efectivo en sistemas que muestren ambas orientaciones.

La misión CHEOPS de la ESA será lanzada a finales del 2017 como sucesora de Corot. Al igual que ésta el objetivo es medir con la máxima precisión posible la variación del brillo de las estrellas según transitan planetas en la línea visual con la Tierra. Observará planetas ya detectados para dar un valor preciso de su tamaño, si bien se espera que detecte otros nuevos más pequeños en esos mismos sistemas. La precisión de CHEOPS estará cerca de detectar planetas como la Tierra en torno a estrellas como el Sol, es decir, planetas pequeños y bastante alejados de su estrella que hasta ahora no se han podido detectar. Para lograr este hito habrá que esperar a la misión PLATO, programada para 2024 y actualmente en fase de diseño.

Ambas misiones pretenden estudiar regiones mucho más amplias del cielo que Kepler, pero sin llegar a observar estrellas muy débiles, en las cuales los estudios posteriores más detallados desde Tierra son más difíciles.

Por su parte, la Agencia Espacial de Estados Unidos (NASA) lanzará también a finales de 2017 la misión TESS, sucesora de Kepler. Se centrará en hallar planetas en torno a estrellas de tipo espectral tardío (más frías y débiles que el Sol), para lo cual observará en campos mucho más amplios que Kepler. Se espera que descubra varios miles de planetas nuevos, como Kepler, de los cuales podría haber algunos objetos como la Tierra en la zona de habitabilidad. La NASA, con la colaboración con la ESA, pondrá en órbita a finales de 2018 el telescopio espacial James Webb (JWST), sucesor del Hubble. Se trata de un telescopio con un espejo primario casi tres veces mayor que el Hubble, especialmente equipado para el infrarrojo. Si esta misión tiene éxito el JWST está llamado a revolucionar muchas áreas de la astrofísica, entre ellas el estudio de las atmósferas de planetas.

Estas misiones tienen dos aportaciones fundamentales que hacer en las investigaciones sobre los planetas extrasolares. En primer lugar, detectar la presencia de moléculas en esas atmósferas cuando el planeta transita por delante de su estrella requiere que la estrella sea brillante para que su luz, al atravesar la atmósfera del planeta y luego continuar su viaje hacia nosotros, se vea suficientemente absorbida por las moléculas de esa atmósfera como para dejar un rastro detectable desde la Tierra. Para los planetas llamados “hot Jupiter” (Júpiter caliente) esto es factible, pero para otros planetas que orbiten más alejados, o estrellas más frías (es decir, planetas como la Tierra en la zona de habitabilidad), la tecnología actual no permite estudiar las atmósferas. Para que esto sea posible con las generaciones futuras de telescopios el primer paso es encontrar este tipo de planetas con telescopios espaciales. En segundo lugar, los planetas extrasolares descubiertos hasta ahora tienen un sesgo evidente en el sentido de que se detectan principalmente planetas muy masivos y cercanos a su estrella. Se han encontrado muchos de ellos, pero se espera que haya muchos más planetas parecidos a la Tierra o Júpiter (tanto terrestres como gigantes gaseosos, pero en ambos casos alejados de su estrella). Las misiones anteriores contribuirán a establecer una muestra mucho menos sesgada que la actual, lo que ayudará a comprender mejor el proceso de formación de planetas y concluir si estos planetas calientes tan cercanos a sus estrellas son estadísticamente significativos, o son más bien la excepción.

Las investigaciones actuales con telescopios terrestres de 10 metros de diámetro se centran en combinar la información sobre la exosfera y atmósfera de los planetas obtenidas mediante la espectroscopía con las medidas de densidad y temperatura media de otros métodos, a fin de obtener una visión general de cómo debe ser el planeta. Se espera que con la próxima generación de telescopios (principalmente el JWST y posteriormente los telescopios ópticos gigantes de 30 metros) sea posible

estudiar con detalle esas atmósferas y obtener las primeras conclusiones sobre el clima que se da en ellos, por ejemplo en planetas como la Tierra que orbitan alrededor de estrellas frías en la zona de habitabilidad. Con los telescopios de 30 metros será posible obtener espectros con suficiente relación señal/ruido en un tiempo corto, lo que permitirá obtener variaciones en la composición de la atmósfera según el planeta va atravesando el disco de su estrella en la línea visual (o cuando pasa por el otro lado de la estrella y se produce el eclipse secundario). Cuando este tipo de estudios esté lo suficientemente desarrollado se espera poder estudiar la composición de la atmósfera en tres dimensiones, las variaciones estacionales, vientos, y la física particular que se da en estas atmósferas. Esto será muy interesante dado lo diferente que son muchos de estos planetas a los que tenemos en el Sistema Solar. Es posible que se desarrolle entonces una rama ligada a los “exoclimas”.

La aportación de telescopios de pequeño tamaño

A medida que se descubren estrellas con planetas a su alrededor surge el problema de cómo monitorizar eficiente y continuamente el gran número de estas estrellas esparcidas en áreas extensas del cielo, con el objetivo de buscar otros planetas más alejados de su estrella. A menudo los astrónomos se interesan por los instrumentos más punteros y los telescopios más potentes, con los cuales se puede ya estudiar las atmósferas de planetas, pero no es eficiente ni necesario buscar con ellos más planetas. Los telescopios profesionales de tamaño menor (2 a 4 metros) tampoco son, en general, especialmente eficientes, y su mantenimiento bastante caro. Por este motivo en los últimos años han surgido observatorios más pequeños que utilizan telescopios y cámaras comerciales, habituales en el equipo de muchos aficionados, para explorar áreas extensas y monitorizar muchos objetos cada noche. Los adelantos tecnológicos y de software permiten actualmente hacer trabajos de interés astronómico con equipos semi-profesionales, siempre que el trabajo lo haga una persona experimentada y meticulosa. Con las cámaras y telescopios comerciales actuales es posible acercarse a la precisión fotométrica del telescopio espacial Hubble y obtener curvas de luz en las que se detectan planetas cuando transitan delante de su estrella (con la posibilidad de deducir a partir de ellos su tamaño y cómo es la órbita del planeta). También es relativamente sencillo obtener diagramas H-R⁷ con todas las estrellas de un cúmulo (derivando a partir de ahí la distancia y edad de sus estrellas), e incluso detectar en el óptico el disco circunestelar en torno a β Pictoris. Todo esto sería impensable hace apenas 20 años. Además, la operación de estos equipos

⁷El diagrama Hertzsprung-Russell o H-R consiste en mostrar la relación entre las luminosidades de las estrellas y sus temperaturas efectivas o superficiales. Las estrellas aparecen entonces en distintas zonas del gráfico según su situación evolutiva.

es relativamente muy barata y eficiente, y con ellos no sólo se pueden buscar nuevos planetas, también se puede al mismo tiempo detectar nuevas supernovas, estudiar estrellas variables, o monitorizar el entorno de la Tierra ante posibles amenazas de colisión con asteroides cercanos⁸. Los telescopios en el espacio tienen la ventaja de evitar las perturbaciones de la atmósfera terrestre y el filtrado de muchos rangos de longitudes de onda. Esto es especialmente problemático tanto a la hora de descubrir planetas pequeños como la Tierra (lo que requiere de medidas de extrema precisión), como para estudiar las atmósferas de los planetas, pues antes es necesario sustraer de los espectros la contaminación de la atmósfera terrestre. Para lo segundo el JWST será clave, pues su situación fuera de la atmósfera permitirá realizar estudios muy precisos de las atmósferas de planetas extrasolares, pero para descubrir planetas pequeños desde el espacio no son necesarios telescopios tan grandes. Por este motivo también existe el programa CubeSat, el equivalente de bajo coste para hacer observaciones con pequeños telescopios desde el espacio. Las perspectivas futuras de este tipo de instrumentos son difíciles de anticipar, pero lo más probable que su papel en la astronomía acabe siendo muy importante en pocos años.

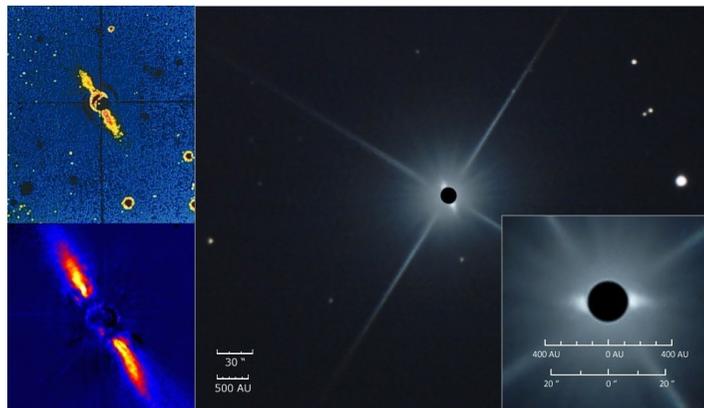


Figura 13: El disco circunestelar en torno a la estrella β Pictoris fue el primer disco encontrado. La imagen superior izquierda muestra el descubrimiento original por el telescopio infrarrojo IRAS, en 1983. En 1996 un telescopio de 4 metros de ESO obtuvo la imagen inferior izquierda en el infrarrojo cercano. La imagen de la derecha muestra el disco detectado por el aficionado Rolf Olsen en 2011⁹, utilizando un telescopio de apenas 25 cm de abertura y una cámara de consumo moderna (Cortesía de IRAS, ESO, y Rolf W. Olsen).

⁸Cabe destacar los proyectos HATNet y SuperWASP, que han detectado docenas de planetas cada uno, y otros como TRAPPIST, MEarth, XO, TrES, o el reciente NGST.

⁹Más información en la página <http://www.rolfolsenastronomy.com/Astrophotography/Beta-Pictoris/>.

La formación estelar vista en conjunto

Ahora sabemos que las estrellas se forman a partir del colapso gravitatorio de gigantescas nubes de gas y polvo localizadas a lo largo de los brazos espirales de nuestra galaxia. También hemos visto que los planetas se forman en un disco circunestelar que se alimenta de la envoltura que rodea a la protoestrella, y que a su vez provee de gas a la propia protoestrella durante su formación. Nuestro Sol se encuentra en el borde exterior de uno de estos brazos espirales, así que desde aquí somos testigos de cómo se forman nuevos sistemas solares. Por primera vez tenemos la tecnología adecuada para detectar planetas como la Tierra en torno a otras estrellas cercanas y estudiar sus atmósferas. También podemos estudiar las regiones densas y opacas de las nebulosas donde se forman las protoestrellas. En algunos casos se encuentran perturbaciones en la distribución y dinámica del gas, lo que podría en un futuro dar lugar a un proceso de colapso, y en otros sí se descubren núcleos preestelares en plena fase de contracción.

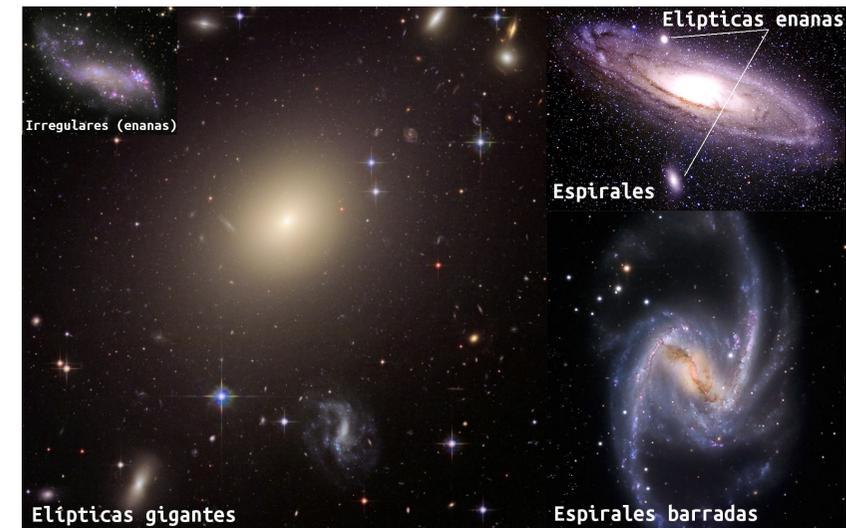


Figura 14: La mayoría de las galaxias son espirales (normales como la galaxia de Andrómeda o barradas), seguidas de las elípticas (gigantes o enanas) y por último las irregulares, que también son pequeñas. Las galaxias enanas suelen orbitar otras mayores. La formación estelar se da en los brazos de las galaxias espirales y en algunas irregulares. Lo delata el color azulado de las estrellas jóvenes muy calientes, frente al color rojo cuando predominan las estrellas evolucionadas en galaxias elípticas con poca formación estelar, o en el bulbo o núcleo de las espirales (Cortesía de NASA/ESA/STScI).

Sin embargo, a menudo no somos conscientes del complejo mecanismo en equilibrio autoregulado que funciona a escala global en nuestra galaxia y permite que el gas se recicle continuamente para formar nuevas estrellas y planetas. En primer lugar, la evolución de las estrellas devuelve casi toda la masa que contienen al medio interestelar circundante. Cuando las estrellas se aproximan a este momento final se producen ciertos desequilibrios que dan como resultado la expulsión de masa desde las capas exteriores de la estrella, hasta el punto de que la pérdida de masa supera el 70%. Los desequilibrios continúan hasta que sobreviene una violenta explosión de las capas exteriores, que da origen a una nebulosa planetaria en el caso de estrellas como el Sol, o un resto de supernova para estrellas que, en su origen, superaban las 8 masas solares. Tras varios miles de años el material expulsado acaba formando parte del medio interestelar difuso, enriqueciéndolo de elementos pesados que se formaron en el núcleo de la estrella hasta el final de su vida (elementos como el hierro y otros átomos de menor masa), o en la explosión de supernova (los elementos más pesados que el hierro y los radiactivos). Todos estos elementos son esenciales en la formación de planetas rocosos como la Tierra, con un núcleo de hierro y níquel, y elementos radiactivos que contribuyen a mantener el calor interno.

La formación estelar contribuye por tanto a la evolución química del medio interestelar, si bien esta evolución es muy lenta. Como vimos al principio, la mayor parte del hidrógeno de la nube molecular no llega a formar parte de las estrellas, y es también dispersado. Además, la galaxia también puede acretar hidrógeno del medio intergaláctico, el cual compensa la cantidad de hidrógeno que se transforma en elementos más pesados. En definitiva, la inmensa mayoría de la masa del medio interestelar se mantiene en forma de hidrógeno atómico y molecular.



Figura 15: Izquierda: aspecto aproximado de nuestra galaxia vista desde fuera y de frente. El círculo blanco marca la posición del Sol, justo sobre el sub-brazo de Orión. Derecha: otra representación artística de la Vía Láctea, en perspectiva, con la posición de algunas nebulosas mencionadas anteriormente y la dirección observada con el telescopio espacial Kepler (Cortesía de NASA y Jon Lomberg).

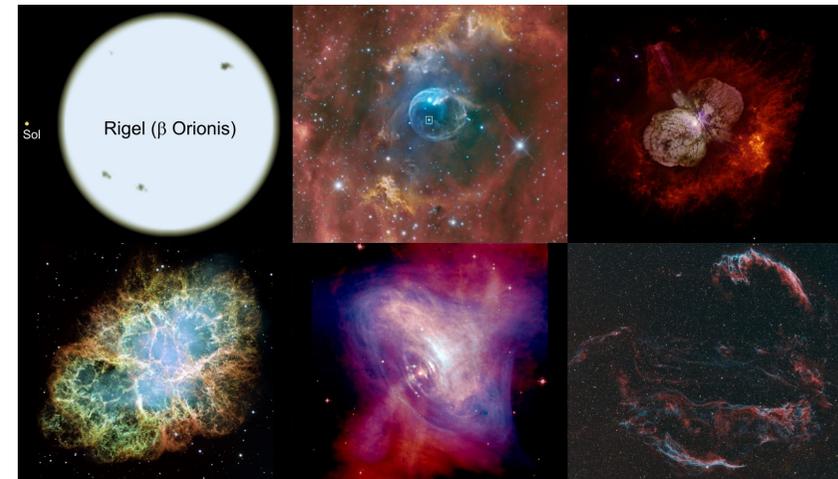


Figura 16: Fases en la evolución de una estrella de alta masa precursora de una supernova. De izquierda a derecha y arriba a abajo: Rigel, 20 veces más masiva que el Sol; la evolución es tan rápida que en las primeras fases de inestabilidad la estrella aún está cerca de regiones de formación estelar; eta Carinae como prototipo de estrella inestable muy próxima a explotar como supernova; la nebulosa del Cangrejo es el resto de la explosión registrada en el año 1054; en el centro queda un púlsar como residuo (eta Carinae es tan masiva que el residuo podría ser un agujero negro), que muestra un disco y eyección de material; tras miles de años el resto se dispersa (Cortesía de NASA/ESA/STScI).



Figura 17: Las nebulosas planetarias (nombradas así por W. Herschel, desafortunadamente, pues no guardan relación con los planetas) son el residuo de la evolución de estrellas similares al Sol. En el centro queda un objeto llamado enana blanca. Las imágenes muestran de izquierda a derecha las nebulosas de la Hormiga, Ojo de Gato, y la Hélice. El material devuelto por estas nebulosas y los restos de supernovas se reutilizan para la formación de la siguiente generación de estrellas (Cortesía de NASA/ESA/STScI).

Los brazos espirales de la galaxia, al rotar alrededor del centro, barren este material difuso resultado del residuo de la formación y evolución de generaciones pasadas de estrellas. En este proceso el frente de los brazos espirales comprime el gas y polvo disperso, acumulándolo en esos frentes. De este modo el gas vuelve a formar nuevas nebulosas y de ellas más estrellas y planetas. Nuestra galaxia mantendrá la formación estelar hasta que colisione con la vecina Galaxia de Andrómeda, dentro de unos cinco mil millones de años. Esta colisión (García-Burillo, Anuario 2016) originará un violento brote de formación estelar como el observado en las galaxias con núcleo activo lejanas, y tras ella la mayoría del gas se consumirá. La Vía Láctea acabará como una galaxia elíptica sin apenas formación estelar.

Referencias

Las siguientes referencias pueden encontrarse en las páginas web del astro-ph¹⁰, ADS abstracts¹¹, y el Anuario del Observatorio Astronómico¹².

- Bertram B. Boltwood, “The Ultimate Disintegration Products of the Radio-active Elements. Part II. The disintegration products of uranium”, *American Journal of Science*, 4, 23, págs 77-88 (1907).
- James H. Jeans, “The Stability of a Spherical Nebula”, *Philosophical Transactions of the Royal Society, series A*, 199, págs 1-53 (1902).
- Ke Wang et al., “Hierarchical fragmentation and differential star formation in the Galactic Snake”, *MNRAS* 439, 3275 (2004, arXiv 1401.4157).
- Charles J. Lada, Edwin A. Bergin, “The Dynamical State of Barnard 68”, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 34, 1157 (2002, astro-ph/0211507).
- C. Qi et al, “Imaging of the CO snow line in a solar nebula analog”, arXiv 1307.7439 (2013).
- Asunción Fuente, “El agua en el Universo”, *Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid*, 2012.
- G. Chauvin et al, “A giant planet candidate near a young brown dwarf”, *Astronomy and Astrophysics* 425, L29 (2004, astro-ph/0409323).
- Michel Mayor & Didier Queloz, “A Jupiter-mass companion to a solar-type star”, *Nature* 378, 355 - 359 (1995).
- Michael A. C. Perryman, “Resource Letter Exo-1: Exoplanets”, *American Journal of Physics* 82, 552 (2014).
- Santiago García-Burillo, “¿Cual es el destino de la Vía Láctea?”, *Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid*, 2016.

¹⁰<http://arxiv.org/find/astro-ph>

¹¹http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html

¹²<http://astronomia.ign.es/anuario-astronomico>