

Estrellas binarias

Juan Echevarría Román

Para quien, como los seres humanos, vive en un planeta que gira alrededor de una estrella, resulta difícil imaginar que existan sistemas en que dos estrellas giran una alrededor de otra. Gracias a estudios astronómicos, en este artículo podemos imaginar cómo son y conocer sus características.

La estrella doble o *binaria* que se muestra en la ilustración (Figura 1), se localiza en la constelación del Cisne, visible en el verano. Su nombre árabe, *al-Minhar al-Dajajah* o “pico de gallina”, se deformó erróneamente en *ab ireo* y finalmente tomó su nombre actual *Albireo*. Su estrella más brillante o *primaria*, que es de tercera magnitud, se ve de un color amarillo dorado muy intenso, mientras que la estrella *secundaria*, de quinta magnitud, contrasta por su notable color azul zafiro.

El sistema se encuentra a una distancia de 384 años luz de nosotros, es decir, alrededor de 3 mil 600 billones de kilómetros. Las dos estrellas, aunque muy separadas en el espacio, están a una distancia una de otra de alrededor de mil 800 veces la distancia de la Tierra al Sol, y forman un sistema gravitacionalmente unido, ya que las dos estrellas giran una alrededor de otra aproximadamente cada 75 mil años.

La existencia de este tipo de estrellas dobles ha despertado la imaginación humana, acostumbrada a la presencia diaria de una estrella solitaria que es nuestro Sol. La cita de Camille Flammarion reproducida en la siguiente página, tomada de su libro *Astronomía para las damas*, se acopla bien con el caso de Albireo, ya que este sistema doble puede verse, de manera espectacular, aun con pequeños telescopios. La imaginación, así capturada, contrasta con los datos astronómicos

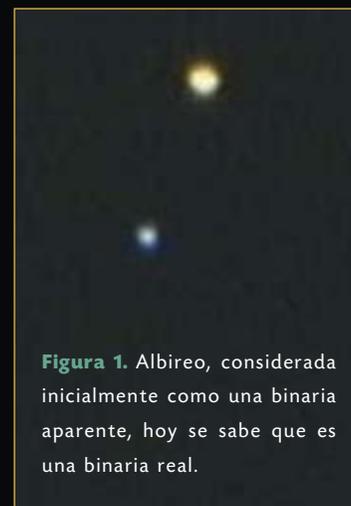
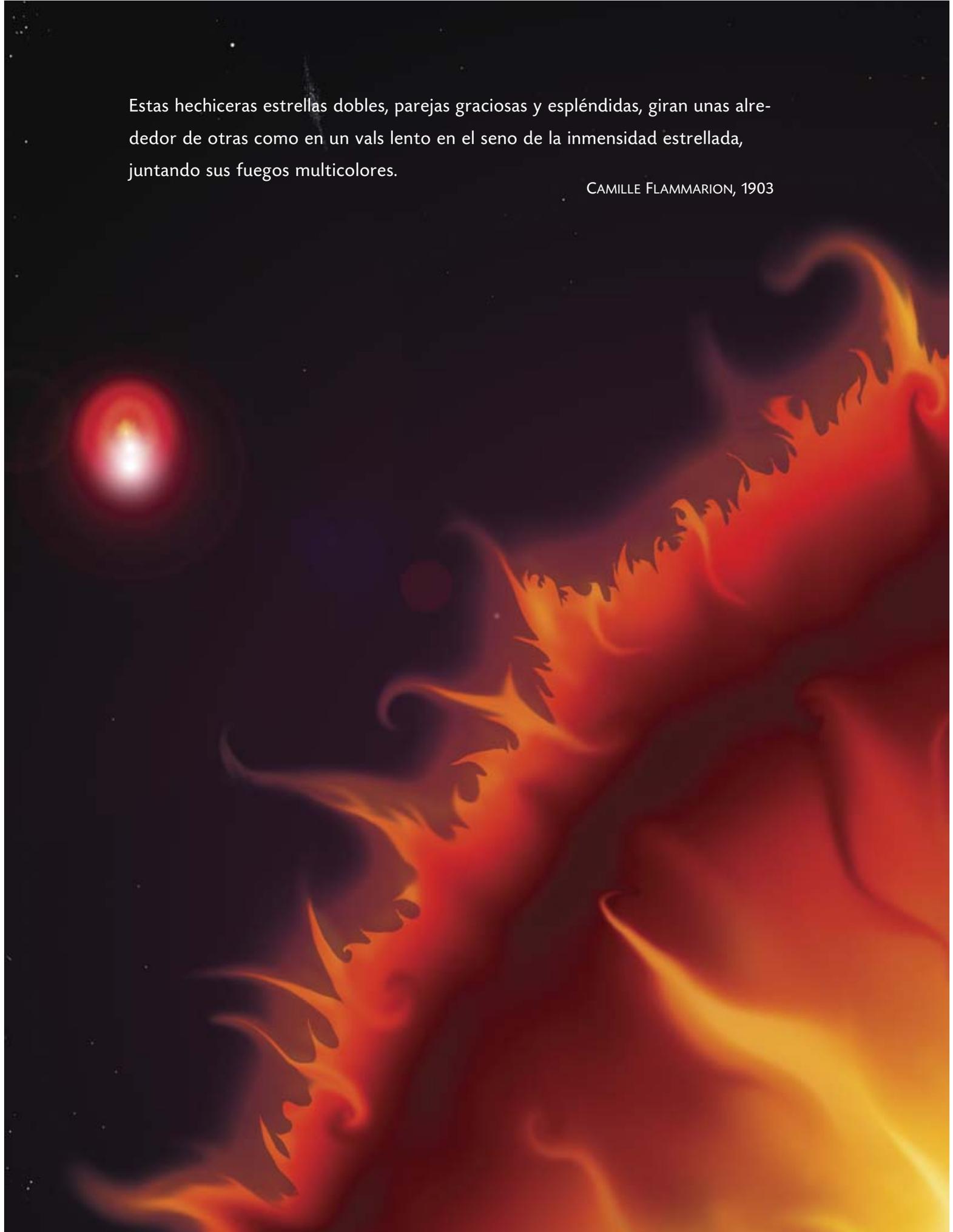


Figura 1. Albireo, considerada inicialmente como una binaria aparente, hoy se sabe que es una binaria real.

Estas hechiceras estrellas dobles, parejas graciosas y espléndidas, giran unas alrededor de otras como en un vals lento en el seno de la inmensidad estrellada, juntando sus fuegos multicolores.

CAMILLE FLAMMARION, 1903



que hemos presentado, parte del conocimiento moderno que nos proporciona la astrofísica.

El estudio de las estrellas binarias se enmarca dentro de los campos de la *astronomía estelar* y la *astronomía dinámica*. Podríamos decir, de manera general, que estas disciplinas son fundamentales para entender la constitución misma de las estrellas; la distribución de sus masas y tamaños en términos de la temperatura en su superficie; su formación como objetos luminosos, así como la evolución que sigue cada estrella a lo largo de su vida, entre otros.

En particular, las masas de las estrellas sólo pueden conocerse de manera directa en las estrellas binarias, gracias a la tercera Ley de Kepler, que nos dice básicamente que el cuadrado del periodo orbital es proporcional al cubo de la separación entre ellas. La constante de proporcionalidad que aparece en la ecuación de Kepler está relacionada directamente con las masas del sistema binario.

Las estimaciones de la frecuencia de estrellas binarias entre la población estelar, es decir el porcentaje de estrellas dobles respecto a estrellas solitarias, llegan a valores muy altos. Dependiendo del tipo de binarias conocidas (que veremos más adelante), el número puede llegar a cerca del 80 por ciento. Por estas razones, el estudio de los sistemas binarios tiene particular importancia en la astronomía.

Para poder describir apropiadamente a estos sistemas dobles, se ha separado aquí su descripción en dos clases fundamentalmente diferentes: las *binarias separadas* y las *binarias interactivas*. La diferencia física entre ellas es que en el primer grupo las componentes de la binaria están dominadas por la fuerza de sus masas, que hace que ambas estrellas giren una alrededor de la otra, pero encontrándose ambas a una distancia suficientemente grande como para que no exista otro tipo de interacción física importante.

En cambio, en el segundo grupo, las dos estrellas se encuentran tan cerca que, además de

las fuerzas de atracción gravitacionales, existe un intercambio de materia entre ellas, y adicionalmente hay una interacción debida a su radiación luminosa, que afecta su comportamiento. Este hecho altera la evolución estelar de estos astros, lo que vuelve interesante la comparación entre la evolución de las estrellas solitarias y de sistemas interactivos.

Pero antes de entrar en este tema, es conveniente describir otra clasificación más fenomenológica que, aunque en cierto sentido menos física, proviene de una distinción observacional muy importante. En esta clasificación se dividen los sistemas dobles en *binarias aparentes*, *visuales*, *astrométricas*, *espectroscópicas*, *espectrales*, *fotométricas eclipsantes* e *interferométricas*.

Binarias aparentes

Las binarias aparentes son estrellas dobles visuales, es decir, estrellas que en el cielo se ven muy cercanas entre sí (a unos cuantos minutos de arco),* pero que no se encuentran a la misma distancia. Su cercanía es tan sólo un efecto de proyección. En otras palabras, estas dos estrellas no giran una alrededor de la otra. Un ejemplo es la pareja ζ y 35 Leonis, que tienen una separación aparente de cinco minutos de arco. Sin embargo, la primera se encuentra a una distancia de 100 años luz de la Tierra, mientras que la segunda está a 260 años luz.

Binarias visuales

Las binarias visuales, parejas de estrellas que, como las dobles aparentes, se ven muy cercanas, no sólo se encuentran a la misma distancia, sino que están “amarradas” por la fuerza de gravitación entre ellas; es decir, ambas estrellas giran alrededor de una centro de masa común.

Sus movimientos mutuos orbitales son observables al telescopio, y los periodos de una órbita completa van desde cerca de un año hasta miles de años. Un ejemplo de estas binarias es el sistema 61 Cygni. Tiene una separación aparente de alrededor de 6 minutos de arco, y un movimiento propio muy grande, de cerca de cinco segundos de arco por año. Estas estrellas son de las más cercanas al Sol: están a una distancia de 11.4 años luz. En la gráfica (Figura 2) se muestra una imagen compuesta de dos épocas: 1916 y 1951, que ilustran el cambio de posición de la binaria. En la parte derecha se muestra un diagrama

* La bóveda celeste forma un arco de 180 grados en cada hemisferio.

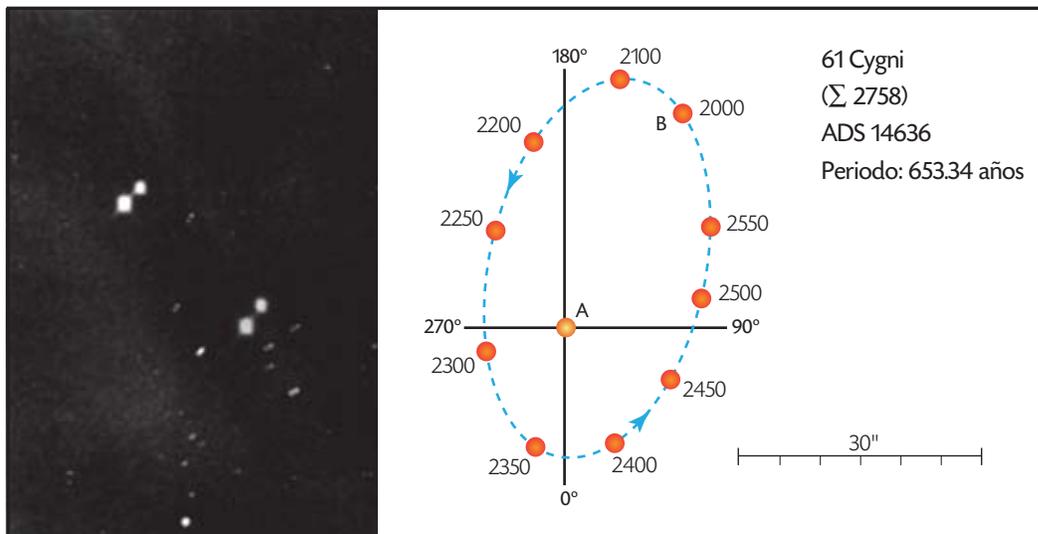


Figura 2. A la izquierda se muestra una imagen doble de la binaria en dos épocas: 1916 y 1951. El diagrama de la derecha muestra a la estrella B en distintas épocas con respecto a la estrella A, que está en el centro.

típico de las posiciones relativas de las dos estrellas. Como ejemplo se muestra la posición de la estrella B respecto a la estrella A, tomando como referencia el año 2000 y la proyección de su posición hasta el año 2550. El periodo orbital de esta binaria es de 653.34 años.

Binarias astrométricas

Éste es el caso de binarias que, vistas al telescopio, parecen ser una sola estrella, pero cuya naturaleza doble se puede inferir debido a que su movimiento oscilatorio en el cielo revela que la estrella visible está acompañada por un cuerpo que no puede verse. Ambos cuerpos giran alrededor de un centro de masa común. Un ejemplo de estos sistemas es Sirio, la estrella más brillante del cielo, a una distancia de 8.6 años luz (Figura 3).

Binarias espectroscópicas

Si un sistema binario no se puede resolver de manera óptica al observarlo en el telescopio, su naturaleza binaria se puede mostrar en su espectro. En estos casos se observa de forma clara la superposición de dos espectros distintos, cuyas líneas espectrales oscilan periódicamente en longitud de onda. En otras palabras, dos sistemas de líneas espectrales varían en velocidad radial con la misma periodicidad, y su movimiento está fuera de fase por medio periodo.

En algunos casos una de las dos estrellas es muy débil con respecto a la otra, y su espectro no se observa. A estos sistemas se les conoce como *binarias espectroscópicas de una sola línea*. La binariedad se infiere por el movimiento periódico en velocidad radial de la estrella visible.

Cuando las dos estrellas tienen luminosidades similares, ambos espectros son visibles; a estos sistemas se les conoce como *binarias espectroscópicas de doble línea*. El siguiente recuadro (Figura 4) ilustra un caso; la combinación del espectro de una estrella caliente con el de una estrella fría.

El movimiento de velocidad radial de ambas estrellas tiene el mismo periodo, pero mientras una estrella se mueve hacia la derecha, la otra lo hace a la izquierda, y viceversa. La amplitud de este movimiento radial depende de la masa de cada estrella. Cuanto más masiva, menor será su amplitud. Este movimiento de velocidad radial se debe al efecto Doppler de la luz, similar al efecto Doppler del sonido. Se debe a una contracción o expansión de la longitud de onda del sonido (asociada con su tono o timbre). Un ejemplo típico es el sonido de una sirena de ambulancia:

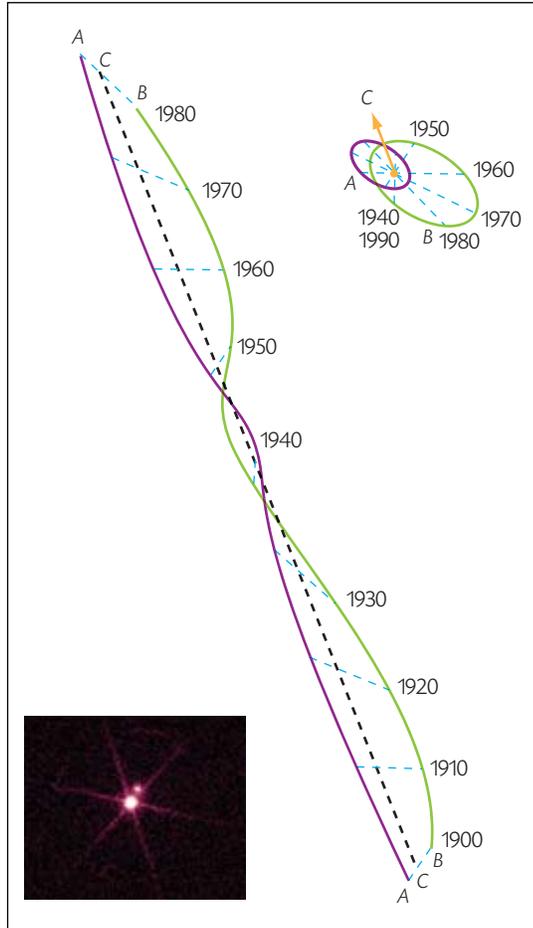


Figura 3. La componente B de Sirius se detectó por las oscilaciones de la estrella primaria, aunque más tarde, con telescopios más grandes, se distinguió el brillo de la débil compañera en contraposición con la fuerte intensidad de la estrella principal. El diagrama muestra la forma de las oscilaciones, que permiten calcular los parámetros orbitales de la binaria. En la parte izquierda del diagrama se muestra el movimiento propio de Sirius, de 1.3 segundos de arco por año, que muestra oscilaciones periódicas con un ciclo de cerca de 50 años. En la parte derecha se muestra al sistema binario desde el marco de referencia del centro de giro, o *centro de masa*, de ambas estrellas.

Espectro binario

Normalmente cada estrella tiene un espectro único (tipo espectral). Por ejemplo, una estrella caliente tiene un espectro rico en líneas de hidrógeno



Una estrella fría tiene líneas más anchas de elementos metálicos



En un sistema binario el objeto muestra el espectro combinado de ambas estrellas



Figura 4. Los espectros de una estrella caliente, una fría y la combinación de ambas.

cuando ésta se acerca hacia nosotros, percibimos un sonido agudo, mientras que al alejarse percibimos que su sonido se vuelve más grave. En la luz de las estrellas también notamos un cambio en su longitud de onda. Al alejarse la estrella de nosotros, sus líneas espectrales se “corren” hacia el rojo, mientras que media vuelta orbital después observamos un corrimiento hacia el azul.

Binarias espectrales

Se trata de sistemas no resueltos, como el de las *binarias espectroscópicas*; pero en este caso los rasgos espectrales de ambas componentes, aunque visibles, no muestran variaciones de velocidad radial. Los dos diferentes espectros se ven claramente sobrepuestos. Se infiere que se trata de un sistema binario que produce un espectro compuesto, pero cuya inclinación de su órbita con respecto a nosotros es muy pequeña, cercana a cero. Podemos visualizar este caso si pensamos que estamos viendo a la binaria desde arriba del plano orbital.

Binarias fotométricas eclipsantes

Si el plano de rotación de un sistema binario es cercano al plano del observador (es decir, casi perpendicular al plano del cielo), entonces cada una de las estrellas puede eclipsar la luz de la otra estrella periódicamente. A estos sistemas se les llama *binarias fotométricas eclipsantes*. Se conocen varios miles de sistemas eclipsantes; en general son también binarias espec-

troscópicas que muestran el espectro de una o de las dos componentes. Las binarias eclipsantes se detectan fundamentalmente por la variación periódica de su brillo.

Si graficamos su *curva de luz* como función del tiempo, vemos que en general ésta exhibe dos mínimos de distinta profundidad cada uno debido al eclipse de la otra estrella. Al eclipse más profundo se le conoce como *eclipse primario*, y ocurre cuando la estrella más caliente pasa atrás de la más fría. Al otro eclipse se le llama *secundario*, y ocurre cuando la estrella más fría pasa atrás de la más caliente.

En la figura 5 mostramos el caso de una binaria fotométrica eclipsante, recientemente descubierta y observada fotométricamente en el telescopio de 1.5 metros en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, en Baja California. Se observa solamente el eclipse primario, ya que la estrella secundaria es muy débil. Esta binaria eclipsante tiene un periodo de tan sólo 6.5 horas. Se trata de una variable cataclísmica recientemente descubierta. La magnitud visual de este objeto es de alrededor de magnitud 13, y la profundidad de los eclipses es de alrededor de 1.4 magnitudes. Los puntos acumulados al fondo de la gráfica corresponden a la estrella de comparación, observada en las mismas imágenes con el filtro V o visual del sistema fotométrico de Johnson.

Otro tipo de binarias son aquellas que se detectan por medios fotométricos cuando ocurren ocultaciones de estrellas por la Luna. Durante algunos de estos eclipses se observa que el brillo de la estrella disminuye en dos etapas, que corresponde a cuando la Luna oculta a cada una de las componentes de la

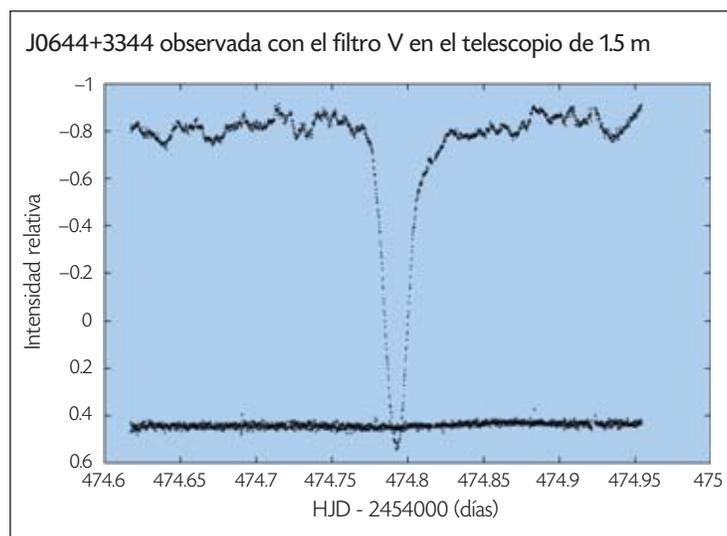


Figura 5. Una binaria fotométrica eclipsante, con un periodo de 6.5 horas.

binaria. Poco antes de cada ocultación se produce un patrón ondulatorio en el brillo estelar debido a un fenómeno de difracción. De la amplitud de este patrón se puede obtener información sobre el radio estelar de la componente eclipsada.

Estas observaciones no son fáciles de obtener, ya que la resolución temporal de la fotometría debe de ser de alrededor de un milisegundo. El número de estrellas dobles descubiertas por este fenómeno de ocultaciones lunares es pequeño, ya que la Luna recorre solamente una franja limitada en la bóveda celeste. Además, sólo se pueden detectar aquellas binarias cuyas componentes tengan un ángulo de posición que esté situado a lo largo del movimiento lunar aparente.

Binarias interferométricas

Usando la técnica de interferometría se han detectado un grupo de estrellas dobles cuya resolución angular es muy pequeña; dicho de otra manera, son estrellas que al telescopio están separadas aproximadamente por un segundo arco o menos, y que no se pueden distinguir visualmente.

Este método de interferometría utiliza la propiedad ondulatoria de la luz y hace uso del fenómeno de difracción. La resolución angular de un telescopio es proporcional a su diámetro; en otras palabras, cuanto más grande es el telescopio mayor es su capacidad de distinguir detalles más finos o, en el caso de las estrellas dobles, de separarlas visualmente. Sin embargo, debido al fenómeno de interferencia o difracción, si combináramos la luz de dos telescopios, digamos por ejemplo dos telescopios de 8 centímetros de diámetro, separados entre ellos por una distancia de 300 centímetros, obtendríamos la resolución equivalente de un telescopio de 3 metros.

Como ejemplo de una binaria interferométrica se ilustra el caso de Mizar, una de las estrellas más notables en la constelación de la

Osa Mayor. Mizar tiene una compañera cercana, Alcor, con la que forma una binaria visual marginal. Ambas estrellas tienen un movimiento propio similar, lo que apunta hacia un sistema ligado gravitacionalmente, pero están a una distancia de tres años luz una de la otra. Mizar es también una estrella doble: Mizar A y B, cuyas componentes están separadas por 14 segundos de arco. A su vez ambas estrellas son binarias espectroscópicas.

Recientemente, utilizando el interferómetro óptico NPOI del Observatorio Naval de Washington, se han podido distinguir las componentes de Mizar A, que tiene un periodo orbital de 20.5 días. Apreciamos en el diagrama (Figura 6) no sólo a las dos componentes, sino también el movimiento orbital de una estrella con respecto a la otra. La imagen de la izquierda (Figura 6a) muestra un esquema de las posiciones relativas de la secundaria con respecto a la primaria en seis épocas espacia-

das de manera irregular que abarcan un poco más de un mes de diferencia. Esto implica que el sistema ha dado ya más de una vuelta durante las observaciones comprendidas. A la derecha (Figura 6b) se muestran los contornos de los interferogramas para las seis épocas marcadas en la figura. La resolución de las imágenes es de 3 milisegundos de arco.

Binarias separadas e interactivas

Pasemos ahora a la descripción de las binarias en los términos que mencionamos al principio: *binarias separadas* (no *interactivas*) y *binarias interactivas*. Esta simple división en dos clases se puede explicar de manera muy sencilla. Si el radio de las dos componentes es muy pequeño comparado con la separación entre las dos estrellas, la binaria es separada. En caso contrario, es interactiva, y puede ser una *binaria semi-separada* o *binaria en contacto*. La diferencia fundamental entre ellas depende de un simple hecho; si se produce o no un intercambio de materia entre una estrella y otra. Para entender mejor los términos binaria separada, semi-separada y en contacto, es conveniente explicar el concepto de *lóbulos de Roche*.

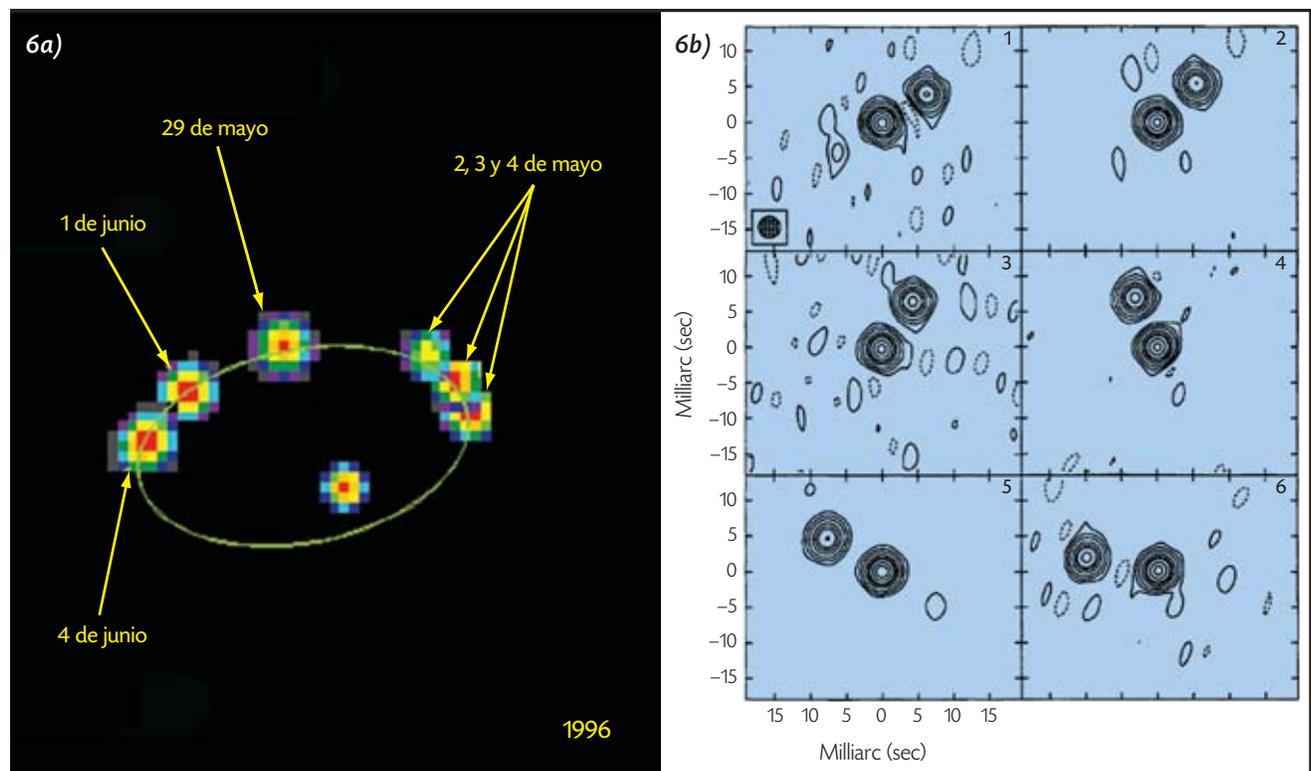


Figura 6. Esquema de la binaria doble interferométrica Mizar A. A la derecha se muestran los contornos de la interferometría en las mismas épocas que las que muestra el diagrama.

Lóbulos de Roche

La teníamos siempre encima, a la Luna, desmesurada; en plenilunio –noches claras como de día, pero con una luz color manteca– parecía que iba a aplastarnos; en novilunio rodaba por el cielo como un paraguas negro llevado por el viento, y en cuarto creciente se acercaba con los cuernos tan bajos que parecía a punto de ensartar la cresta de un promontorio y quedarse allí anclada... Las mareas, cuando la Luna estaba más baja, subían que no había quien las sujetara... desde lo alto se llegaba justo a tocarla extendiendo los brazos, de pie... me agarraba con una mano, después con la otra, e inmediatamente sentía que escalera y barca se me escapaban y el movimiento de la Luna me arrancaba a la atracción terrestre...

ITALO CALVINO, *Las cosmicómicas*

Basado en los efectos de marea sobre dos cuerpos, Italo Calvino nos cuenta, de manera humorística, sobre la supuesta situación en que la Luna, estando en una extraña época, muy cerca de la Tierra, tocaba casi su superficie. De tal modo que la gente, durante la marea alta, podía subirse en lo más alto del mástil de un barco y pasar de un cuerpo a otro para recoger alimentos.

Este efecto de marea extremo ilustra el concepto de transferencia de materia en dos cuerpos muy cercanos; en este caso el hombre pasando de la Tierra a la Luna y de regreso. Este *lugar de paso* entre un cuerpo y otro se conoce en la física como *punto interior de Lagrange*.

Es el mismo punto que se aprecia en la Figura 7, donde la materia escapa de la estrella roja y entra en la esfera principal de influencia de la estrella compacta, que está rodeada de material en forma de un disco delgado. La materia escapada choca con el disco formando un punto caliente, que en la ilustración se ve como una zona compacta a la orilla del disco. El material del disco parece alcanzar a la estrella primaria, formando la región luminosa que se aprecia en tono blanco azulado. La estrella rojiza se aparece deformada y su superficie llena lo que se conoce como *lóbulo de Roche*.

Estas superficies de Roche están definidas matemáticamente en un espacio tridimensional donde, tomando en cuenta la fuerza centrífuga de las estrellas que giran una alrededor de otra, existe un balance de fuerzas gravita-

cionales, de tal modo que el material en su superficie es susceptible de escapar o ser capturado por la otra estrella. El tamaño relativo de los lóbulos de Roche en la binaria depende exclusivamente del cociente de sus masas.

En el caso que se ilustra, sólo la estrella secundaria llena su lóbulo de Roche. La estrella primaria es una enana blanca, muy compacta, con un diámetro similar al de la Tierra. En este caso, el lóbulo de Roche de esta estrella primaria está muy lejos de ser llenado. Es a este tipo de sistemas dobles, en los que una de las estrellas llena su lóbulo de Roche y la otra no, al que llamamos *binaria semi-separada*.

Cuando las dos estrellas llenan su lóbulo de Roche, tenemos el caso de una *binaria en contacto*. Este caso puede darse, por ejemplo, cuando la binaria consta de dos estrellas de la misma masa y están lo suficientemente cerca como para que sus radios estelares alcancen sus superficies de Roche. También puede darse

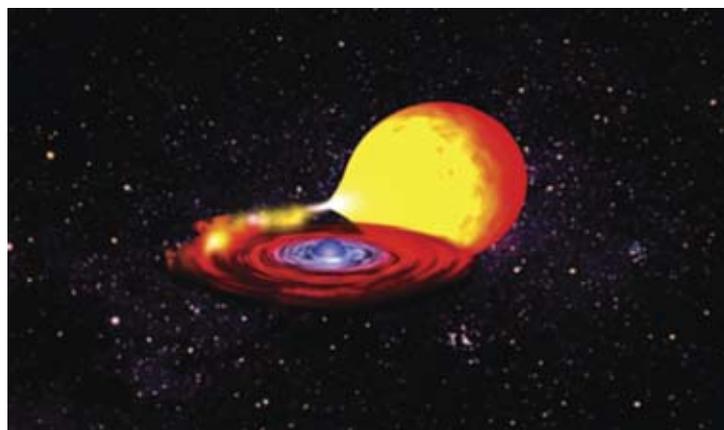


Figura 7. Representación artística de una nova enana.

El efecto de marea extremo ilustra el concepto de transferencia de materia en dos cuerpos muy cercanos; este *lugar de paso* entre un cuerpo y otro se conoce en la física como *punto interior de Lagrange*.



Zona del Trapecio de Orión. Telescopio espacial Hubble. Izquierda: Visible - WFPC2; Derecha: Infrarrojo - NICMOS. Nasa y K. Luhman (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics).

el caso de que la binaria tenga masas distintas, pero que ambas tengan el tamaño necesario para estar en contacto. Obviamente, si ninguna de las dos estrellas llena su lóbulo de Roche, entonces tenemos una *binaria separada*. El ejemplo que se ha mostrado en la figura es el de una nova enana o binaria cataclísmica.

Esta clasificación de binarias en semi-separadas, en contacto y separadas es importante, ya que físicamente podemos distinguir aquellas cuya influencia mutua es exclusivamente gravitacional o dinámica, de aquellas otras en las que además hay una influencia por la transferencia de materia, lo que hace que la evolución de ambas estrellas se vea constantemente modificada por el cambio en sus masas.

Las binarias separadas forman un grupo numeroso. Por un lado comprenden a todas las *binarias visuales y astrométricas*, a las *binarias espectrales*, a las *espectroscópicas y fotométricas* de largo periodo y a las binarias interferométricas.

Un ejemplo en el que se observan binarias separadas de distintos tipos es el conocido

Trapecio de Orión. Este pequeño cúmulo de estrellas contiene algunas de las estrellas más masivas que se conocen. La estrella A es una *binaria espectroscópica y fotométrica eclipsante*, que tiene una tercera componente interferométrica. La estrella B es también una *binaria espectroscópica y eclipsante*. Tiene además varias componentes visuales e interferométricas. La estrella C es binaria interferométrica. La estrella D es aparentemente una estrella solitaria, aunque hay alguna evidencia de que también es binaria interferométrica. Recientemente, en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, en Baja California, se ha detectado a la componente E como una binaria espectroscópica con un periodo de cerca de 10 días. Sus componentes parecen estar todavía en una etapa de formación estelar.

Existen muchos tipos de binarias semi-separadas y binarias en contacto. Uno de ellos son las binarias cataclísmicas, que consisten de una enana blanca y una enana roja. Esta última llena su lóbulo de Roche y por lo tanto transfiere materia a la estrella primaria. El material forma un disco, debido a la rotación muy rápida de estas binarias. A este disco se le conoce como *disco de acreción*. Otros casos de estrellas en semi-contacto o en contacto son, por ejemplo, las binarias de tipo W Ursa Majoris. Se trata de binarias tan cercanas que sus superficies se están tocando, y la evolución de sus atmósferas ha sido tal que se han ido mezclando hasta formar una envoltente común.

Otro ejemplo son los sistemas dobles de tipo Algol, cuya curva de luz representa a los sistemas separados. Este tipo de binarias ha sufrido en el pasado episodios de semi-contacto, y por ello la componente menos masiva es la más evolucionada. Este efecto se conoce como la “paradoja de Algol” (el hecho de que las estrellas más masivas evolucionan más rápido que las menos masivas es un resultado fundamental del estudio de la evolución estelar).

Otro ejemplo de binarias semi-separadas son las estrellas de tipo W Ser, que están en una etapa muy rápida de transferencia de materia. Su característica principal es la presencia de una nube de materia alrededor de la estrella ganadora. Un objeto perteneciente a esta clase es β Lira, cuyas curvas de luz son representativas de las variaciones elipsoidales de estrellas semi-separadas muy cercanas.

Las estrellas simbióticas son otro pequeño grupo de estrellas interactivas. Se les conoce así porque su espectro compuesto muestra dos objetos muy distintos. Por un lado se observa un espectro de líneas de emisión muy intenso, y por otro el de una estrella roja gigante. Estos objetos tienen episodios de intercambio de materia, como es el caso de la nova recurrente RS Ophiuchi. Otro ejemplo más es el de las estrellas RS Canum Venaticorum, que están compuestas por una estrella del tipo solar y una compañera menos masiva que está muy

cerca de llenar su lóbulo de Roche, lo que provoca que los efectos de marea sean tan fuertes que la estrella trata de sincronizar su velocidad de rotación con el de translación. Al incrementar su velocidad de giro, su atmósfera se expande o provoca una actividad poco usual.

Finalmente, mencionamos aquí a las binarias de rayos X. En estas estrellas la primaria puede ser una estrella de neutrones, e incluso un candidato a hoyo negro. La estrella compañera puede ser una estrella masiva que domina la luz del sistema y que transfiere gran cantidad de materia, provocando que la energía total tenga su intensidad más fuerte en la región electromagnética de los rayos X.

Tomografía estelar

Un análisis interesante de mencionar en detalle, es el de la tomografía Doppler y de Roche en estrellas interactivas de muy corto periodo orbital.

Este análisis se basa en la obtención de espectros a lo largo de distintas fases de la rota-



ción de la binaria. La información de las líneas espectrales, ya sea en emisión o en absorción, nos puede dar información de las velocidades de las componentes involucradas, y permitirnos reconstruir visualmente al sistema.

El proceso tiene su origen en la tomografía médica, en la que un detector de ultrasonido le da vueltas al cuerpo humano para ver sus detalles internos. La idea es simple; tomar fotografías de un cuerpo dándole una vuelta completa y reconstruir una imagen tridimensional, a partir de una serie de imágenes de dos dimensiones. La resonancia magnética funciona con un principio similar. En el caso de las estrellas binarias no podemos darle la vuelta al sistema físicamente, pero sí podemos tomar fotografías mientras éste da la vuelta.

Tomografía Doppler

Veamos el caso de la tomografía Doppler de un disco de acreción alrededor de una variable cataclísmica.

La tomografía Doppler consiste en interpretar las variaciones del perfil de las líneas de emisión del disco de acreción en función de la fase orbital. La clave para entender este proceso puede verse con un ejemplo trivial: una sola fuente puntual de emisión moviéndose alrededor de la estrella primaria que se mueve en el plano orbital se vería con un movimiento sinusoidal como el que se mencionó en el caso de las velocidades radiales de las binarias espectroscópicas.

Dicha senoide puede asociarse con un vector de velocidad que depende de la fase y la amplitud. El núcleo de la tomografía es el trabajar con cualquier número de senoideas, aun cuando se traslapen y se mezclen unas con otras.

Para entender esto último es conveniente pensar en la formación de perfiles como una proyección matemática en el sentido de integrar en una dimensión un espacio tridimensional para producir un espacio bidimensional.

La Figura 8 muestra una representación pictórica de este proceso, para dos ángulos de proyección. Esta imagen artificial ha sido creada con una mancha que, puede verse, se proyecta en diferentes partes del perfil de la línea en diferentes fases. Una serie de perfiles de línea a diferentes fases orbitales no es más que un conjunto de proyecciones de la imagen a diferentes ángulos.

Apuntando hacia atrás, a lo largo de las direcciones de proyección, nos lleva a la posición de la mancha. Esto es, en esencia, cómo la información del perfil de la línea se puede usar para reconstruir la imagen del sistema. La inversión de estas proyecciones para reconstruir la imagen es lo que se conoce como tomografía. Debe aclararse que en este caso se reconstruye un espacio de velocidades y no un espacio geométrico. Por lo tanto la imagen debe analizarse con cuidado para no confundirla como una imagen espacial.

Veamos ahora el caso de las variables cataclísmicas como un ejemplo donde se puede usar la tomografía Doppler. Sobre la base del modelo clásico de variables cataclísmicas, se puede predecir con cierta precisión el lugar de las distintas componentes en el espacio de velocidades, como por ejemplo: la estrella donadora, el punto caliente, el disco, la emisión y absorción de la secundaria, y la absorción en la primaria, entre otras.

La Figura 9 muestra la reconstrucción del disco de acreción de la nova enana U Geminorum, que es el prototipo de las novae enanas en las variables cataclísmicas. La estrella donadora

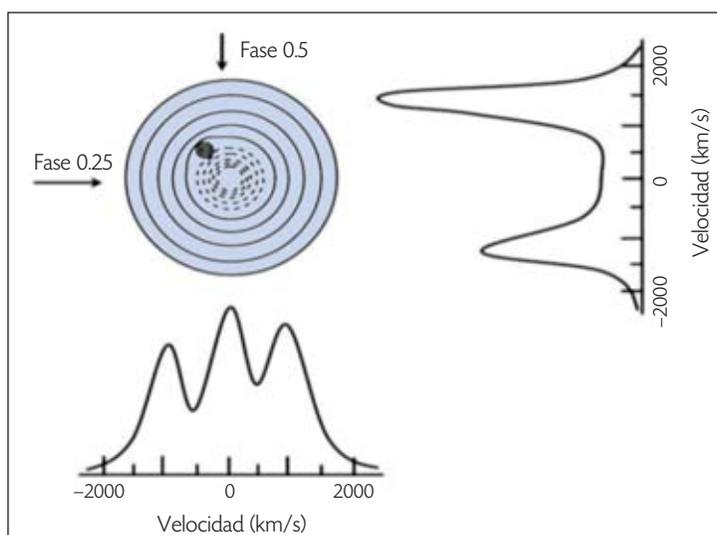


Figura 8. Esquema de la proyección de la línea de emisión en un disco, en diferentes fases.

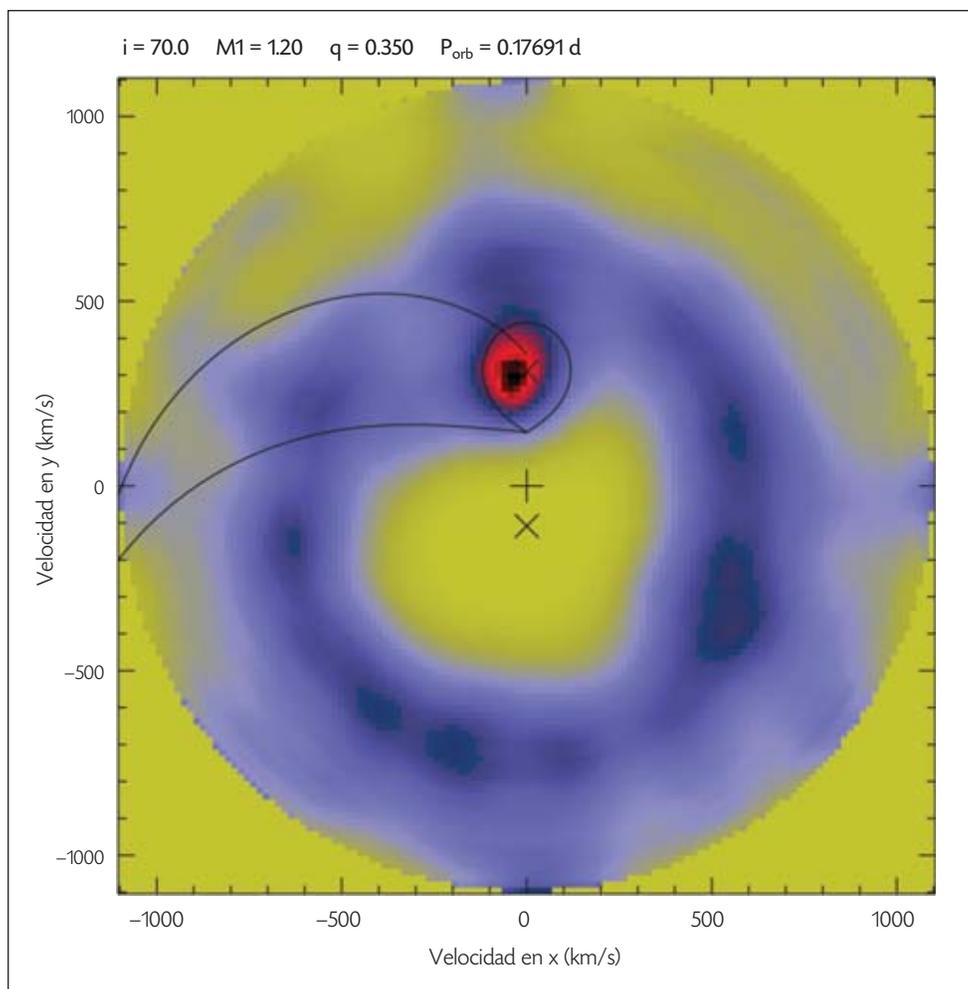


Figura 9. Tomografía Doppler de la nova enana U Geminorum.

co-rota con la binaria debido a las fuerzas de marea, por lo que aparece con la misma forma en coordenadas de velocidad, y de posición, aunque girada 90 grados debido a la relación entre velocidad y posición de un cuerpo sólido. El disco, que definitivamente no está rotando al mismo tiempo que la binaria, se muestra de adentro hacia fuera o invertido, de manera que las zonas internas del disco, que giran a alta velocidad, se ven aquí en la parte externa, mientras que la zona externa del disco, que está girando a baja velocidad se muestra hacia el centro del diagrama.

La velocidad de la parte interna del disco, que en la imagen se ve en las zonas exteriores, está limitada por la zona de frontera entre el disco y la enana blanca, mientras que las zonas de baja velocidad interna están limitadas por la velocidad de la secundaria, y se ven aquí bordeando al cuerpo sólido que representa a la estrella donadora.

El material se puede eyectar bajo dos condiciones distintas. Por un lado, en la ausencia de un disco de acreción, la trayectoria del chorro de gas, que parte del punto interior de Lagrange, puede seguir la velocidad real del gas, o *trayectoria balística*. Esta trayectoria se muestra en la línea punteada inferior. Éste podría ser el caso de las variables cataclísmicas en las que la estrella primaria tiene un campo magnético muy fuerte que inhibe la formación de un disco. Por otro lado, si el material acreta interactúa con el disco de acreción ya formado, entonces la velocidad puede llegar rápidamente a ser una velocidad kepleriana. Este caso se muestra en la línea punteada superior, que aparenta salir cerca del centro de

masa de la secundaria. En este caso se espera que la trayectoria intercepte al punto caliente.

Tomografía Doppler de la nova enana U Geminorum

Esta imagen es la reconstrucción del disco de acreción en la línea de emisión alfa del hidrógeno, tomada de 28 espectros obtenidos con el telescopio de 2.1 metros y el espectrógrafo Echelle del Observatorio Astronómico Nacional. La tomografía mostrada está en el espacio de velocidades, por lo que el disco de acreción, que se ve de color azul, está de adentro para afuera en el sentido geométrico.

Las zonas de baja velocidad, en realidad son las partes externas del disco, mientras que las de alta velocidad son las que se encuentran cercanas a la enana blanca, que se halla en el origen (X). El centro de masa de la binaria está marcado con el signo +. El óvalo mostrado arriba representa el lóbulo de Roche de la estrella secundaria. La mancha rojinegra es en realidad el punto caliente que está saliendo por el punto interior de Lagrange, y que está chocando directamente con el disco de acreción, que está tan extendido que también llega a este punto interior de Lagrange.

Las dos líneas que parten de la estrella secundaria representan la trayectoria del material que, como se explicó anteriormente, sale bajo dos condiciones físicas diferentes. La línea superior está construida bajo la suposición de que la materia que está ahora principalmente

en el campo gravitacional de la primaria se mueve en órbita kepleriana, de la misma manera en la que se mueven, por ejemplo, los planetas alrededor del Sol. La línea inferior representa la trayectoria balística de un cuerpo que cae bajo la influencia de la masa de la enana blanca.

Bibliografía

- Milone, Eugene F., Denis A. Leahy y David W. Hobill (editores) (2008), "Short-period binary stars: observations, analyses, and results", *Astrophysics and space science library series*, vol. 352, XVIII, 270 p.
- Wikipedia, "Binary stars", http://en.wikipedia.org/wiki/Binary_star
- Echevarría, J. (1987), *Estrellas binarias interactivas*, México, Fondo de Cultura Económica (La ciencia para todos).
- Warner, B. (1995), *Cataclysmic variable stars*, Cambridge University Press.
- Hellier, C. (2001), *Cataclysmic variable stars: how and why they vary*, Springer-Verlag, 210 pp.

Juan Echevarría Román se interesó en la astronomía desde los 13 años. Trabajó como divulgador de la astronomía en el Planetario Luis Enrique Erro y en la Sociedad Astronómica de México. Obtuvo la licenciatura en física en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y se doctoró en la Universidad de Sussex, Inglaterra. Actualmente es investigador titular de tiempo completo en el Instituto de Astronomía de la UNAM, y ejerce docencia en la Facultad de Ciencias y en los posgrados de astronomía y ciencias físicas de la misma universidad. Ha publicado numerosos trabajos en revistas especializadas, la mayoría de ellos sobre estrellas binarias interactivas. Es miembro de la *Royal Astronomical Society*, de la Academia Mexicana de Ciencias, e investigador nacional. jer@astroscu.unam.mx

