

Reimpresión de un artículo publicado en la edición de 2000 del Anuario del Observatorio Astronómico publicado anualmente por el Instituto Geográfico Nacional de España.

EVOLUCION ESTELAR TARDIA Y NACIMIENTO DE LAS NEBULOSAS PLANETARIAS

Valentín Bujarrabal Fernández

Observatorio Astronómico Nacional (IGN)

Apartado 1143. E-28800 Alcalá de Henares

Abstract

The evolution from red giant star toward blue dwarf is, besides supernova explosions, the most spectacular phase in the life of stars. In only one or two thousand years, the very extended, cool giant star becomes tiny and very hot. At the same time, the circumstellar envelope around the red giant, that is cold and spherical, evolves into a planetary nebula, very excited and showing a clear axial symmetry.

Las estrellas gigantes rojas

Según creemos los astrónomos, en la vida de las estrellas hay una fase muy estable, que se llama la 'secuencia principal' (debido a que en cierta representación gráfica de los principales parámetros observacionales, llamada diagrama de Hertzsprung-Russell, estas estrellas ocupan una región alargada). La mayor parte de las estrellas visibles, incluido el Sol, pasan aproximadamente el 90% de su vida en esta fase. Durante ese tiempo, la estrella brilla porque en su interior, o núcleo estelar, tienen lugar reacciones nucleares muy parecidas a las que hacen explotar una bomba de hidrógeno, pero a una escala incomparablemente mayor. Estas reacciones consisten en que el hidrógeno, el elemento químico más abundante en el Universo, se convierte en helio, desprendiendo mucha energía.

Durante su estancia en la secuencia principal, el estado de la estrella cambia poco, con sólo un ligero aumento de su luminosidad durante toda la fase. El Sol se encuentra ahora en la secuencia principal, en la que aún estará unos miles de millones de años. Se trata de la edad adulta estelar.

Pero el hidrógeno se termina agotando en el núcleo estelar, y entonces la estrella empieza a sufrir importantes cambios. La 'quemada' de hidrógeno se traslada a capas exteriores. Mientras, el interior se hace rico en helio, que a su vez también puede originar reacciones nucleares para crear sobre todo núcleos de carbono. Por razones un poco largas de explicar aquí, las

capas exteriores, incluyendo la atmósfera que es la parte que se ve, se expanden entonces fuertemente. Al mismo tiempo que aumenta el radio, la temperatura superficial disminuye. Así, la estrella se convierte en una gigante roja. Es roja porque su temperatura es relativamente baja para una estrella, 2000 ó 3000 grados, temperatura a la que los cuerpos en general emiten luz roja e infrarroja. (Sabemos que la luz son ondas que se propagan desde un emisor, los colores de la luz se corresponden con la longitud de estas ondas; la luz azul tiene ondas relativamente cortas, las más largas son las de la luz roja y, aún más, infrarroja. El color y la longitud de onda de la luz que los cuerpos emiten, no que reflejan, depende de su temperatura; los más calientes emiten luz más azulada, los que están por ejemplo a temperaturas de las que llamamos normales sólo emiten luz infrarroja, que no es visible.) La estrella se vuelve más y más fría, pero ocupa un grandísimo espacio. Cuando nuestro Sol llegue a esta fase, ocupará un volumen hasta mil millones de veces mayor que el que ocupa ahora. Su radio será unas mil veces mayor que el actual, tan grande que alcanzará la órbita de la Tierra, que quedará calcinada y engullida por la desproporcionada estrella gigante (pero, dada nuestra escala de tiempos, no tenemos que preocuparnos mucho por esta perspectiva.)

Es de notar que durante esta fase de gigante roja las estrellas pulsan. Es decir, su radio varía fuertemente, con periodos de pulsación de aproximadamente un año. Este proceso origina la variabilidad estelar llamada de largo periodo. Entre este tipo de estrellas se incluyen por ejemplo las variables de tipo Mira, que los astrónomos aficionados conocen bien y observan con gran eficacia. Las estrellas de tipo Mira siguen un ciclo durante el cual tanto su temperatura superficial como su radio cambian en aproximadamente un 20 ó 30 %.

Curiosamente, la masa de la estrella durante esta fase de gran tamaño tiende a disminuir. Esto se debe a que la estrella expulsa material al exterior. Este proceso era de esperar, pues en la superficie estelar la atracción gravitatoria es, debido al gran radio del objeto, relativamente débil. Es decir, las últimas capas estelares se encuentran apenas sujetas por la gravedad y una pequeña perturbación, quizás originada por la oscilación antes mencionada, puede fácilmente lanzarlas al espacio exterior. Aquí también hay que citar el efecto de la gran luminosidad de estas estrellas, pues al aumentar el radio también aumenta el total de energía radiada; esta intensa radiación produce un efecto llamado 'presión de radiación' que tiende a empujar hacia afuera las capas externas. Las gigantes rojas pierden masa a razón de hasta 0,0001 ó 0,00001 veces su masa total por año. Esta tasa puede parecer pequeña, pero, para los tiempos de vida de las estrellas, es muy grande. Además la pérdida de masa se acelera con el tiempo, al final la estrella termina eyectando una buena parte de su masa en sólo unos miles de años.

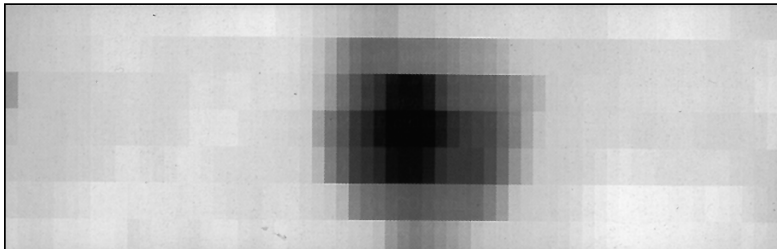
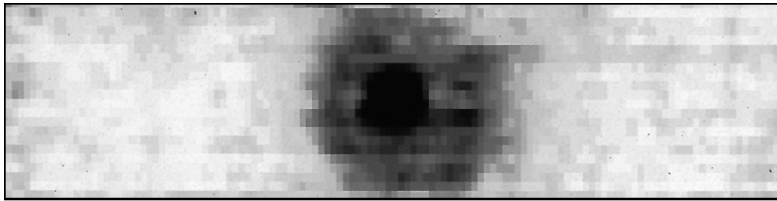


Figura 1: Imágenes de la envoltura alrededor de una gigante roja con nombre de catálogo Y CVn, obtenidas en el infrarrojo lejano por el telescopio espacial ISO. La imagen inferior, que tiene menor resolución angular, se obtuvo a una longitud de onda mayor por lo que muestra la emisión del material más frío.

Envolturas alrededor de gigantes rojas

La masa expulsada por la gigante roja va lentamente formando una extensa capa alrededor de la estrella. Esta capa se caracteriza por su dinámica expansiva, pues el material expulsado no encuentra prácticamente nada en su camino que pueda frenarlo y se va adentrando en el espacio interestelar. Sabemos que las envolturas se expanden muy deprisa, a nuestra escala, a velocidades de unos 10 kilómetros **por segundo** (pero estas velocidades no son grandes para los astrónomos, por ejemplo, la Tierra se mueve en su órbita alrededor del Sol a unos treinta kilómetros por segundo y los meteoritos entran en nuestra atmósfera también a velocidades de ese estilo). A veces se detecta la envoltura circunestelar hasta distancias comparables a las que separan a las estrellas entre sí (es decir del orden de un parsec, que es igual 31 billones de kilómetros e igual, para los que estén acostumbrados a la notación matemática, a $3,1 \cdot 10^{18}$ cm); aunque habitualmente no se observan tamaños tan grandes.

En las envolturas llega a almacenarse una masa enorme, como ya hemos visto, una buena parte de la masa original de la estrella. Sin embargo, el

gas circunestelar es muy difuso, debido al enorme volumen que ocupa. La densidad de la envoltura es, incluso en la zona interna, muy pequeña comparada con las densidades que encontramos en la Tierra o en una estrella: miles de millones de veces menor que la típica en la atmósfera terrestre. Y esta densidad tiende a disminuir según nos alejamos de la superficie estelar. La temperatura de la envoltura también tiende a disminuir con la distancia, como es lógico, con temperaturas por debajo de 0°C en la mayor parte de su extensión.

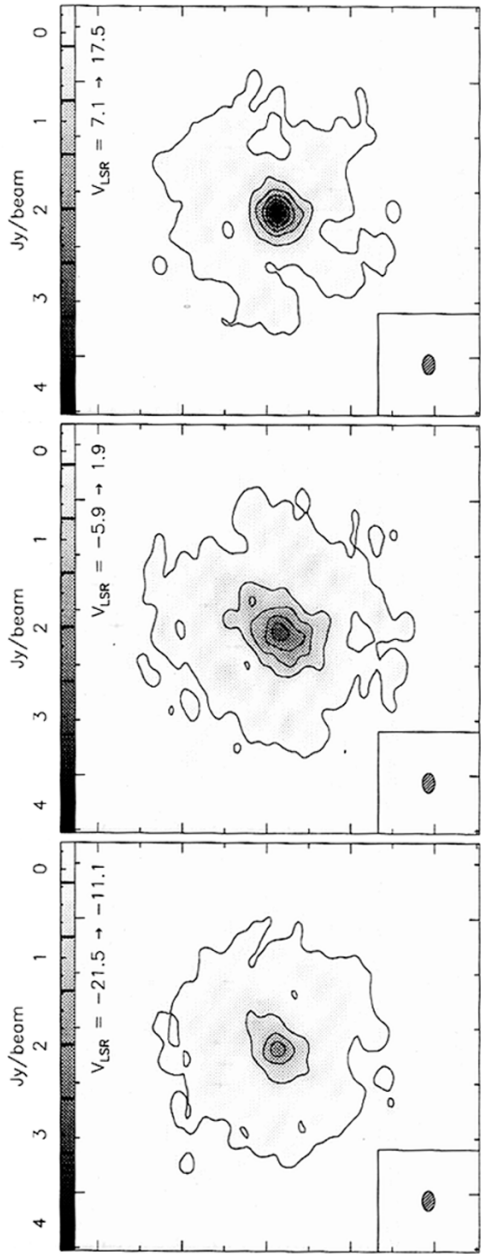
Por último citaré que estas envolturas alrededor de las gigantes rojas suelen presentar una forma esférica. Esto se debe a que la eyección de masa es prácticamente isótropa, es decir, depende muy poco de la dirección en que tiene lugar.

Ejemplos de observación de envolturas alrededor de gigantes rojas se pueden ver en las figuras 1 y 2. Como las envolturas son frías sólo se puede detectar su emisión en el infrarrojo o en ondas aún más largas. (Ya hemos citado que la luz visible sólo es emitida por objetos bastante calientes.) La emisión de las envolturas en el infrarrojo lejano puede estudiarse e incluso cartografiarse, según se ha hecho gracias en particular al telescopio espacial ISO de la Agencia Espacial Europea, ver un ejemplo en la figura 1. Es de notar que la emisión en este caso detectada no proviene del gas, sino de una pequeña fracción de la masa que se ha solidificado formando granos de polvo, que son muy eficaces emitiendo en amplios rangos de longitudes de onda. También se pueden 'ver' las envolturas cartografiando su emisión en líneas espectrales. (Las 'líneas espectrales' son una forma de luz característica de la emisión y absorción de los diferentes átomos y moléculas, que aparece sobre todo cuando estos se encuentran en forma de gas.) Un ejemplo es la imagen de la emisión de la molécula CO, obtenida por un grupo de científicos entre los que se encuentran miembros del Observatorio Astronómico Nacional, que mostramos en la figura 2. En este caso, naturalmente, la componente emisora sí es gaseosa.

Hay otras formas de estudiar las envolturas. Por ejemplo estudiando la absorción de la luz estelar por la envoltura; también se puede buscar la luz reflejada por ésta gracias a medidas de su polarización o con observaciones de alta resolución obtenidas con telescopios puestos en órbita. (Una conocida propiedad de la luz reflejada es su polarización en un ángulo perpendicular a la dirección de la radiación incidente; esta propiedad la utilizan los filtros polarizadores habituales en fotografía, que

Figura 1: Imagen de la emisión de la molécula CO alrededor de la gigante roja CIT-6, obtenida con los radiotelescopios del Instituto de Radio Astronomía Milimétrica, IRAM. Cada una de las tres imágenes identifica la emisión de gas que se mueve con respecto a nosotros con tres velocidades diferentes. CO es el mejor trazador de la distribución de masa en las envolturas alrededor de gigantes rojas.

CIT 6 CO (1 → 0)



sirven para mejorar fotos de paisajes eliminando la calima de las imágenes, pues ésta no es sino luz reflejada por partículas de la atmósfera.) Sólo así se puede separar la luz reflejada por la envoltura de la 'contaminación' por luz estelar directa, pues la estrella es tan brillante que literalmente cegaría en otro caso los detectores.

Naturalmente, estos modos observacionales son los que se utilizan para determinar las propiedades de las envolturas que hemos venido viendo, tras un análisis teórico de los resultados.

Formación de nebulosas planetarias

La estrella mantiene su aspecto exterior durante casi todo este proceso de pérdida de masa, hasta que se expulsan prácticamente por completo las capas exteriores al núcleo. (Recordemos que el núcleo es la región donde tienen lugar las reacciones de producción de energía.) Entonces, tras disminuir muy considerablemente la tasa de pérdida de masa, se inicia la evolución de estrella gigante roja a enana azul rodeada de una nebulosa planetaria. Éste es el último paso antes de que la estrella se convierta en enana blanca; la reserva de combustible nuclear en las enanas blancas está prácticamente agotada, su brillo irá desde entonces decayendo lentamente, hasta dejar de ser propiamente una estrella.

La evolución estelar entre el estado de estrella gigante roja y de enana azul rodeada de una nebulosa planetaria consiste por lo tanto en que, expulsadas las capas exteriores al núcleo, éste queda al descubierto súbitamente. Esta fase de la vida de las estrellas es, dejando a parte las explosiones de supernova, aquella en la que que mayores y más espectaculares cambios se producen. En tan sólo 1000 ó 2000 años, la gigante roja, muy extensa pero fría (como hemos visto), se convierte en una enana azul, caliente (con temperatura mayor que unos 50000 grados) y compacta (con un radio de nuevo comparable al que tiene ahora el Sol). Por otro lado, la envoltura circunestelar que rodeaba la gigante roja también evoluciona durante esta transición. Pasa de ser una capa oscura y difícil de ver con telescopios ópticos, a ser una brillante nebulosa planetaria.

A pesar de su nombre, las nebulosas planetarias no tienen nada que ver con los planetas. Se llaman así porque a su descubridor, W. Herschel, la pequeña imagen verdosa que presentan cuando se ven con telescopio le recordó la imagen de los planetas exteriores. Las nebulosas planetarias son regiones difusas de gas y polvo que rodean las enanas blancas o azules. Son relativamente calientes, debido a la radiación de la caliente estrella central, con temperaturas en la nebulosa de unos miles de grados, y brillantes, debido a reflexión de la luz estelar y a la emisión de ciertas líneas espectrales excitadas por la alta temperatura de la nebulosa y por la radiación estelar. Debido a que al terminar la fase de gigante roja también termina la eyección copiosa de masa estelar, la nebulosa planetaria se va

paulatinamente separando de la estrella central, pues el hueco que deja la envoltura en su expansión no es rellenado por nuevo material. Esto, al menos al principio, facilita su observación, pues las capas extensas con una gran región central vacía son más fácilmente separables a la vista de la estrella central.

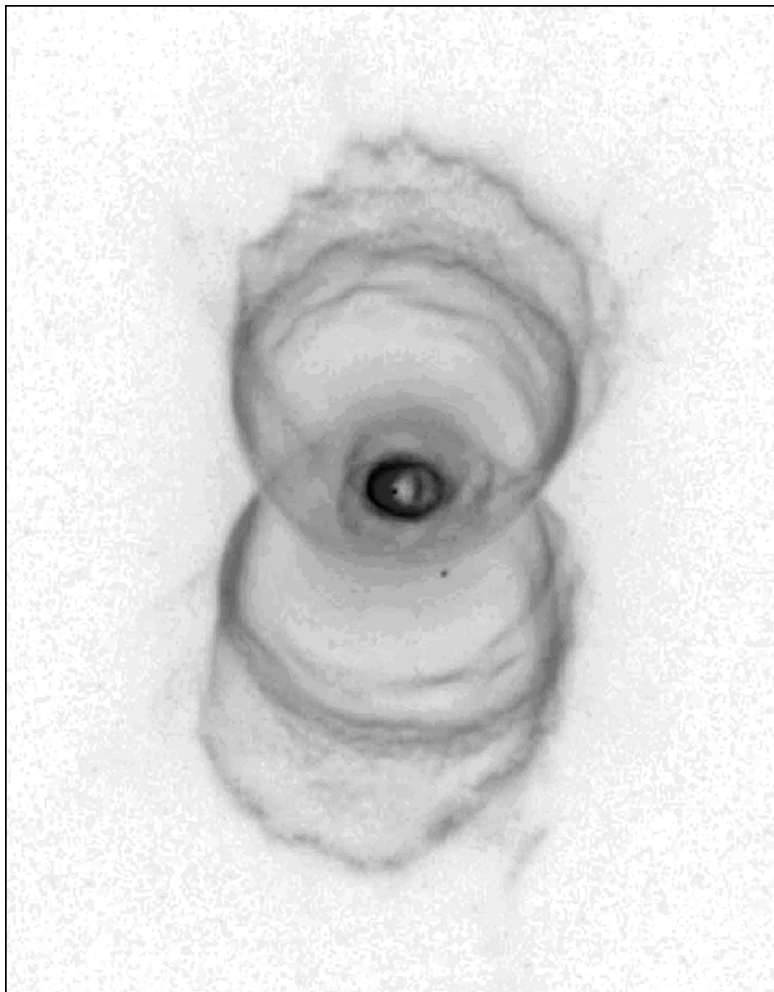


Figura 3: Observaciones de alta resolución de la nebulosa planetaria MyCn18, obtenida por el telescopio espacial Hubble. Esta imagen es en realidad una composición de diferentes observaciones, para mejor mostrar las variadas componentes nebulares.

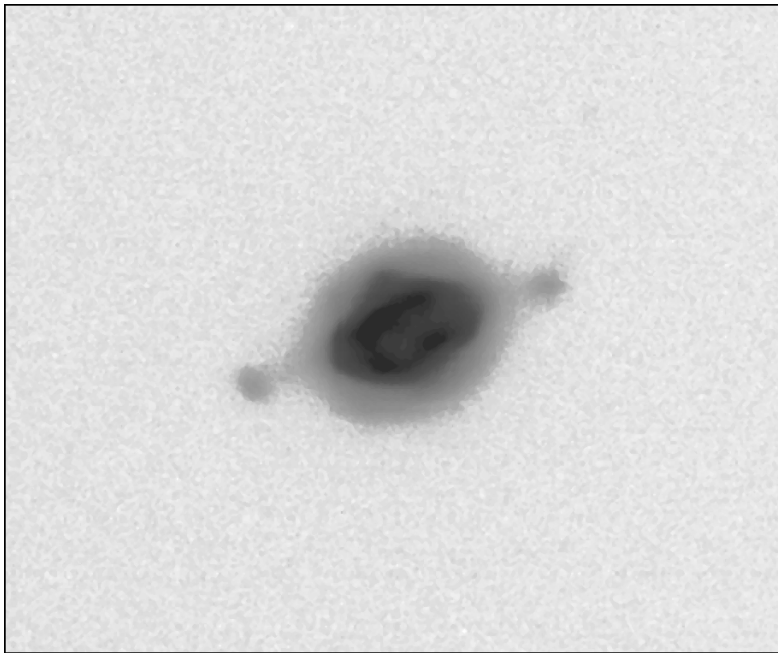


Figura 4: Imagen de la nebulosa planetaria NGC7009, obtenida con el telescopio del Observatorio Astronómico Nacional en Calar Alto, Almería. Se aprecian las aglomeraciones de material a lo largo del eje de simetría.

Por otro lado, las nebulosas planetarias no presentan la simetría esférica que caracteriza las envolturas de gigante roja. Muy al contrario, las planetarias suelen tener formas claramente alargadas o achatadas. Muchas presentan una forma que recuerda la de un reloj de arena. Las hay también que son completamente deformes. Casi siempre las nebulosas planetarias parecen tener una clara simetría a lo largo de un eje. La figura 3 es un ejemplo de estas formas, se trata de la nebulosa MyCn18 (este es su nombre de catálogo), observada con el telescopio espacial Hubble, de la NASA. Algunas, como la famosa Nebulosa de la Hélice (ver portada de este Anuario), tienen una imagen redonda, pero se sabe por análisis del movimiento de sus componentes que la nebulosa no es esférica sino que tiene en realidad forma de anillo visto de frente. A menudo las nebulosas planetarias presentan también condensaciones que se escapan, en la dirección del eje de simetría de la nebulosa, a velocidades claramente mayores que las observadas en envolturas. Un ejemplo de estas formaciones la podemos ver en la figura 4, donde reproducimos una imagen de la nebulosa NGC7009, toma-

da con el telescopio del Observatorio Astronómico Nacional en Calar Alto (Almería).

Este cambio de forma en un tiempo tan corto necesita de la puesta en escena de grandísimas cantidades de energía. Basta recordar, para hacerse una idea, que la masa total de la envoltura es comparable a la del Sol y que el desplazamiento necesario para deformar la nebulosa es sólo algo menor que 1 parsec, la distancia típica entre estrellas.

En las últimas etapas de su vida, estando ya la estrella en el estado de enana blanca, la nebulosa planetaria se separa enormemente de la estrella central. Esto, unido a la progresiva disminución de la energía radiada por la estrella, hace que en el final de su vida la nebulosa planetaria se vaya convirtiendo en un monstruo inerte, extensísimo y difícil de detectar, que se va difuminando a grandes distancias de la estrella.

Nebulosas protoplanetarias

Los objetos intermedios en la evolución desde envoltura de gigante roja a nebulosa planetaria se llaman nebulosas protoplanetarias o proto nebulosas planetarias. Este nombre, como para las planetarias, no es muy afortunado, pues no se refiere en absoluto a las nebulosas de cuya condensación van a nacer los planetas, sino a objetos que se están convirtiendo en nebulosa planetarias.

Como hemos visto la formación de nebulosas planetarias es un proceso extraordinariamente rápido a escalas de tiempo estelares. Los mil años que tarda en producirse la evolución hasta nebulosa planetaria son muy poco comparado con los miles de millones de años que la estrella ha vivido hasta entonces. Desde su punto de vista, todo esto ocurre en un instante de tremenda crisis. Por esta causa, hay muy pocos objetos intermedios, que hemos llamado nebulosas protoplanetarias. Por otro lado, debido a la fuerte evolución que la nebulosa experimenta, tanto desde el punto de vista de su estado de excitación como de su forma, las características de estas protoplanetarias son extraordinariamente variadas. Podemos decir que todas las nebulosas protoplanetarias que conocemos son objetos raros, con propiedades sorprendentes, con imágenes siempre inesperadas.

Debido a que hay tan pocas, el estudio de las protoplanetarias es muy reciente, tiene apenas veinte años. Estas nebulosas se caracterizan por ser intermedias entre las envolturas alrededor de gigantes rojas y las nebulosas planetarias. Las propiedades que se derivan de observaciones, como las antes citadas (emisión de granos de polvo o de moléculas, o reflexión), están sistemáticamente entre las de los objetos más jóvenes y las de los más viejos. También las estrellas centrales tienen las propiedades que se esperan en los objetos en transición entre gigantes rojas y enanas azules. No son ni tan grandes y frías como aquellas ni tan pequeñas y calientes como éstas.

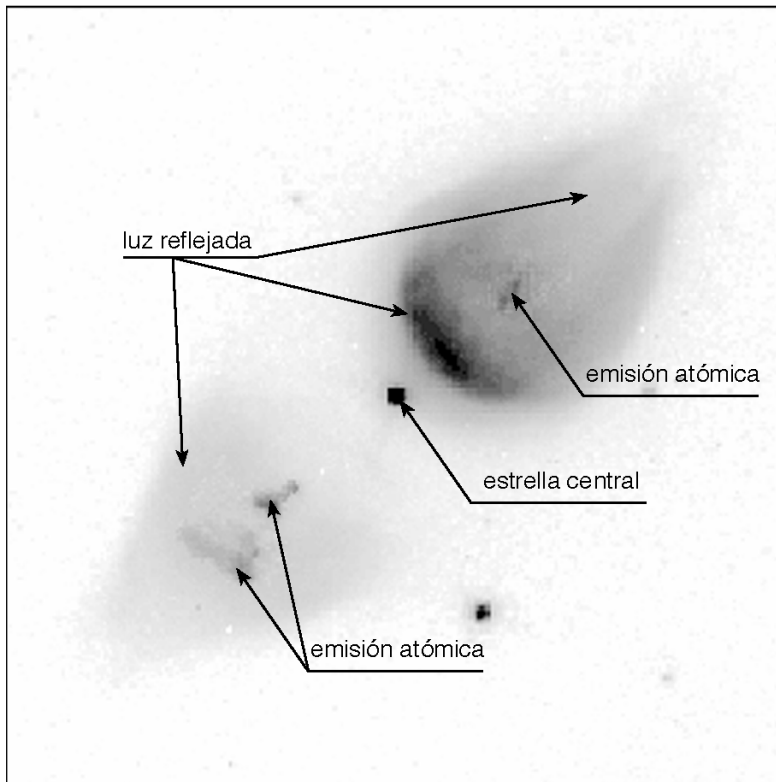


Figura 5: La nebulosa protoplanetaria M1-92, observada en emisión espectral de átomos y luz reflejada por el telescopio espacial Hubble. Se aprecian tanto la distribución general de materia como las zonas calientes que se alinean en el centro de los lóbulos.

La característica más llamativa de las nebulosas protoplanetarias es su forma, que presenta en general una descarada simetría axial, a veces incluso más pronunciada que en las planetarias. Ejemplos de esta espectacular geometría se ven en las figuras 5 y 6. En ellas vemos dos imágenes obtenidas con el telescopio espacial Hubble por astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional (en colaboración con grupos extranjeros). La figura 5 es de una nebulosa llamada M1-92, vista con filtros que seleccionan rayas espectrales atómicas. Lo que vemos en esta figura es tanto luz emitida por capas centrales y reflejada por la nebulosa extensa (la parte difusa en la figura) como emisión local de ciertos átomos (los máximos que se aprecian en el centro de los lóbulos, a lo largo del eje de simetría de la nebulosa). La detección de este tipo de emisión local denota la presencia

de zonas muy calientes a lo largo del eje de la nebulosa. En la figura 6 vemos una imagen similar, pero del objeto Hen401; en este caso toda la emisión proviene de una parte central muy compacta y la vemos sólo tras ser reflejada por las capas externas. La reflexión se produce, como en el caso de las envolturas alrededor de gigantes rojas, por diminutos granos de polvo que se mezclan con las partículas de gas.

La razón de esta forma que se aprecia en las imágenes es que la nebulosa se compone de dos lóbulos (casi) huecos, que se extienden a lo largo de un eje de simetría, y de una zona central muy opaca, en forma de anillo muy prieto sobre la estrella. Este anillo sólo deja pasar la luz estelar en los dos sentidos opuestos de la dirección del eje, que es perpendicular al plano que define el anillo. De esta manera, la estrella sólo ilumina las paredes interiores de los dos lóbulos: esto es lo que vemos con nuestros telescopios. Un esquema de la forma de las proto nebulosas planetarias se muestra en la figura 7. En ella se representan las dos regiones alargadas y huecas y el anillo; también podemos ver las eyecciones de materia que aún tienen lugar y que siguen el eje de simetría de la nebulosa. En el mismo centro de la nebulosa vemos la estrella, ahora mucho más pequeña que la gigante roja, en camino de convertirse en enana azul.

Hemos hablado de la forma de la nebulosa M1-92, que parece como dos globos que estemos inflando en direcciones opuestas, y la de Hen401, tubular. Las hemos representado esquemáticamente en la figura 7. Estas formas, sobre todo si las comparamos con las esféricas propias de las envolturas alrededor de gigantes rojas (de las que proceden), sugieren que algo ha abierto por dos extremos opuestos la capa de gas y polvo que rodeaba la estrella. Se cree que lo que abre estos huecos es el flujo de material que aún persiste en la fase protoplanetaria, flujo que ya no es isótropo, pues ahora no tiene lugar con igual intensidad en todas direcciones sino que se produce principalmente en la dirección del eje de simetría de la nebulosa (figura 7; este flujo axial de materia presenta a veces zonas calientes que nos permiten detectarlo, tal como vimos en la figura 5). En un momento dado, el flujo de la estrella (que ya no es una gigante roja) entra en colisión con el resto de la envoltura, emitida mucho antes por la gigante. Esta envoltura, como hemos visto, es muy pesada pero lenta, mientras que el nuevo flujo es más ligero y muy rápido. Como éste se eyecta en la dirección de un eje, al chocar con la envoltura esférica en sus polos termina por horadarla por allí.

Naturalmente, la cosa es más complicada de lo que podría parecer por la descripción anterior. Al entrar en colisión ambos vientos en las zonas polares se generan 'ondas de choque'. Éstas son como las olas que la proa de un barco forma cuando avanza a toda velocidad. Las ondas de choque aceleran el gas en las zonas polares de la envoltura que eyectó la gigante, que terminan saliendo disparadas. Así se forman los agujeros de los que hablábamos. La extensión de los mismos a lo largo del eje de simetría que

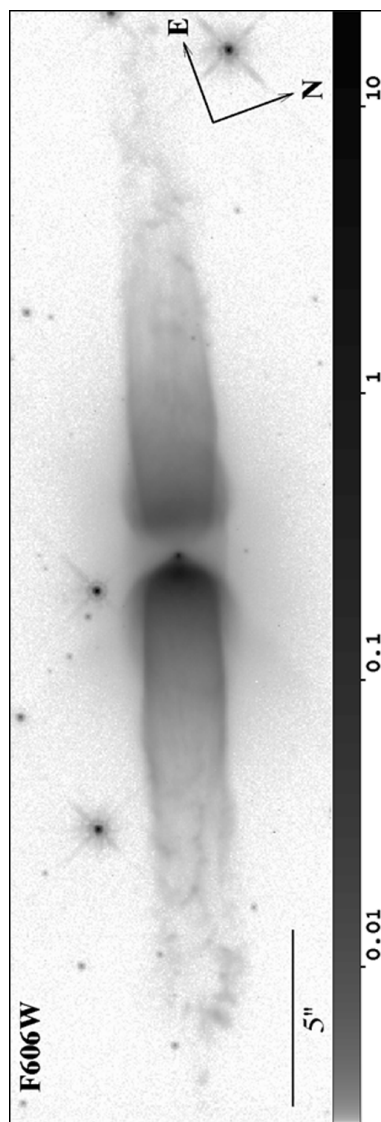


Figura 6: Imagen de la nebulosa protoplanetaria Hen401, obtenida por el telescopio espacial Hubble. En esta imagen se aprecia particularmente la distribución de materia nebular en dos estructuras cilíndricas. Se indican en la figura la escala de la extensión angular del objeto en segundos de arco y la orientación (este y norte).

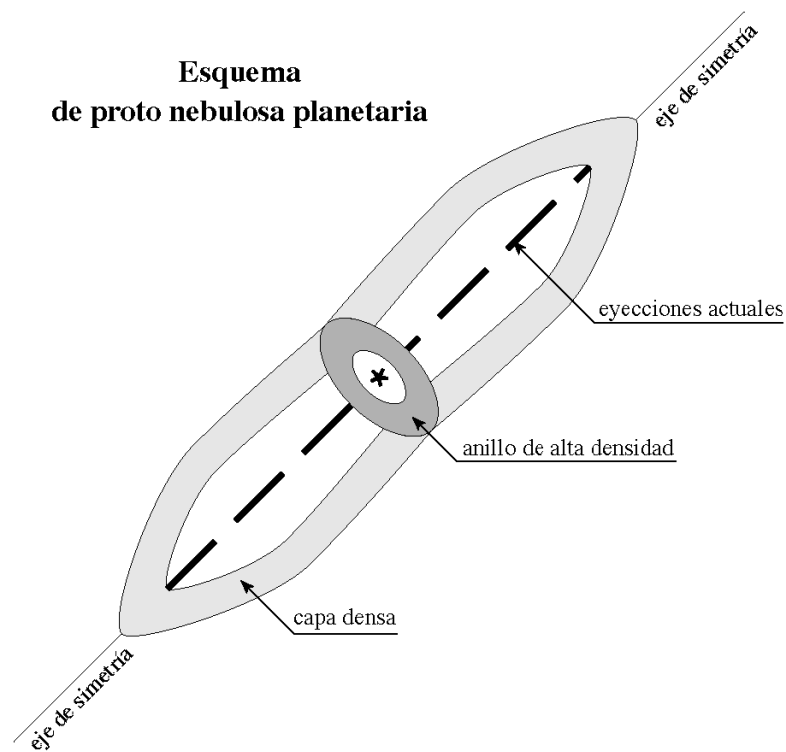


Figura 7: Esquema de la estructura de una nebulosa protoplanetaria. Obsérvense sus diferentes componentes: los extensos lóbulos huecos, el anillo interno denso y la estrella central. También se representan las eyecciones de la estrella en su fase proto planetaria, que siguen la dirección de un eje.

definen las eyecciones de la protoplanetaria es lo que genera las estructuras de doble globo (M1-92) o tubular (Hen401) que observamos en las protoplanetarias y que, se cree, termina conformando las nebulosas planetarias.

El que los lóbulos de la protoplanetaria se hinchen o no depende del carácter isoterma o adiabático de las ondas de choque. Al pasar las ondas de choque por un gas, lo comprimen y por lo tanto lo calientan. Los choques son adiabáticos cuando el calor que se genera de esta manera en el gas no puede ser cedido al exterior (en nuestro caso, esto ocurre cuando la radiación de energía no es importante comparada con las energías cinéticas en juego). Entonces, el gas sobrecalentado toma mucha presión y tiende a expandirse, más o menos como se hincha un globo aerostático

cuando se le inyecta aire caliente. Así se generan, explicado simplemente, estructuras infladas. Cuando, en el caso contrario, el gas que se calienta con los choques se enfría a continuación rápidamente hasta más o menos la temperatura que tenía antes, las ondas de choque se limitan a empujar en el sentido del eje las regiones polares de la envoltura de la gigante roja, que no sufre inflación ninguna. Estos choques se llaman isotermos. El gas denso, empujado hacia afuera por el viento que está siendo ahora eyectado por la estrella, va quedando a la orilla del camino que sigue esta segunda eyección. Es un fenómeno parecido a lo que hacen los vehículos que quitan la nieve de las carreteras. Así se explican formas alargadas como la que se ve en Hen401.

Así son y así viven las estrellas viejas (o, mejor dicho, así lo creemos nosotros). Después de este último sobresalto que es la formación de la nebulosa planetaria, las estrellas irán lentamente entrando en decadencia. Pero no se puede negar que ha sido espectacular.