

NEBULOSAS PLANETARIAS UNA MIRADA NUEVA SOBRE UNOS OBJETOS VIEJOS

Rafael Bachiller

Observatorio Astronómico Nacional (OAN)

Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Reimpresión de un artículo publicado en la edición de 2000 del Anuario del Observatorio Astronómico publicado anualmente por el Instituto Geográfico Nacional de España. ISBN 84-7819-

Abstract

Planetary nebulae, perhaps the most beautiful objects in the Galaxy, have long been believed to consist of fluorescent masses of ionized gas. Recent observations (carried out in part by OAN astronomers) show, however, that many planetaries also contain massive envelopes of neutral invisible matter. Such neutral envelopes provide an important link between the nebulae and the red giant stellar progenitors. The interplay of violent bipolar jets with these neutral envelopes is what determines the nearly infinite variety of shapes and symmetrical structures which make of planetary nebulae enigmatic and astonishing objects.

Bellas, grandes y luminosas

Entre los objetos más bellos de la Galaxia, las nebulosas planetarias nos sorprenden por la casi infinita variedad de formas, estructuras y colores. Algunas parecen muy simples (redondeadas o elípticas) pero otras presentan complejas estructuras con un alto grado de simetría axial, o una simetría puntual sumamente intrincada.

Aunque de tamaño variable, las nebulosas planetarias pueden llegar a tener dimensiones angulares (aparentes) muy considerables. Por ejemplo, la nebulosa Hélice (NGC7293, la nebulosa que figura en la portada de este Anuario) tiene un tamaño en el cielo igual al de la Luna llena. Dado que se encuentra a tan sólo unos 680 años-luz de la Tierra -la Hélice es una de las planetarias más próximas conocidas-, su diámetro lineal resulta ser de unos 3 años luz aproximadamente, es decir unas 3.000 veces más grande que el Sistema Solar. Otras nebulosas aparecen algo menores en el cielo por encontrarse más lejos de la Tierra (p. ej. la nebulosa de la Lira), y las más lejanas tienen un aspecto similar al de una estrella.

Las nebulosas planetarias no pueden ser observadas a simple vista. Pero, sin embargo, éstas son las nebulosas intrínsecamente más luminosas de la Galaxia. Las planetarias brillan en todo el espectro electromagnético, desde

los rayos X hasta las ondas de radio. Analizando sus emisiones en cada rango de frecuencias, el astrónomo puede estudiar tanto la composición química, como las condiciones físicas que imperan en las diferentes regiones de la nebulosa.

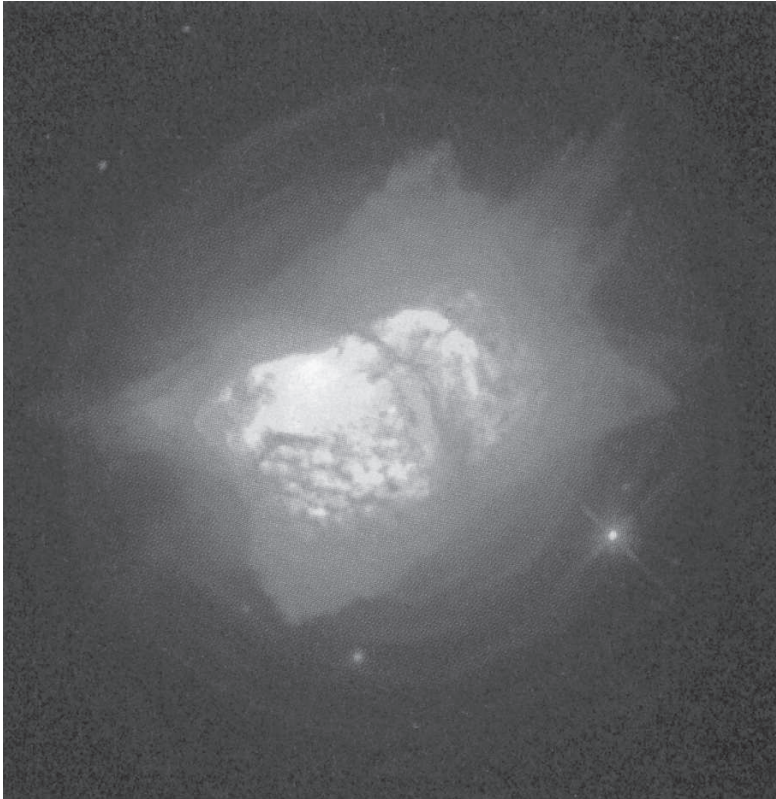


Figura 1: La nebulosa planetaria joven NGC7027, en la constelación del Cisne, está rodeada aún por una espesa envoltura de gas molecular mezclado con polvo. La composición química del gas en esta envoltura está fuertemente afectada por los intensos rayos ultravioletas y X emitidos por la estrella central. Por estas razones, esta envoltura es una reserva de moléculas de las más importantes de la Galaxia, un laboratorio único en el que estudiar diferentes procesos de fotoquímica. Esta imagen, obtenida con el telescopio espacial Hubble, muestra la presencia de varias capas concéntricas que corresponden a diferentes épocas de eyección de la estrella precursora.

La oportunidad que nos brindan las nebulosas planetarias para estudiarlas en todo el espectro, junto con sus altas luminosidades intrínsecas y los grandes tamaños de algunas de ellas, han hecho que estos objetos hayan sido los mejor estudiados de la Galaxia durante mucho tiempo. De hecho, hace tan sólo unos pocos años, parecía que las nebulosas planetarias eran unos objetos tan bien conocidos que no reservaban ya ninguna sorpresa a sus estudiosos. Sin embargo, como veremos en este artículo, la espectroscopía de microondas ha permitido durante los últimos años realizar descubrimientos de gran relevancia para la comprensión de la estructura de las planetarias.

Más de 200 años de estudios

El estudio de las nebulosas planetarias comenzó hace más de dos siglos, en cuanto el telescopio llegó al grado de perfeccionamiento suficiente que posibilitaba su observación. El término “nebulosa planetaria” fue acuñado por el gran astrónomo británico de origen alemán William Herschel en 1785, en su exhaustivo catálogo de nebulosas. Tal término le fue sugerido a Herschel por la similitud de las imágenes redondeadas de algunas planetarias con las imágenes de los planetas. Pero Herschel ya adelantó que estos objetos no tenían mucho que ver con los planetas, y pensó que se trataba de masas de gas que podían formar estrellas.

En 1866, el también británico William Huggins, uno de los primeros espectroscopistas, descubrió que muchas nebulosas presentaban líneas espectrales de emisión. Dos de esas líneas no correspondían a ningún elemento de los conocidos, y las atribuyó a un elemento nuevo: el “nebulio”. Sería Ira S. Bowen quien, trabajando en CalTech en 1927, descubriría que esas dos líneas eran debidas al átomo de oxígeno doblemente ionizado ($O^{++} = OIII$), una variedad que es muy inestable en la Tierra. Muy pronto se constató que las líneas espectrales emitidas por las nebulosas planetarias presentan un perfil característico, con dos picos de emisión, cuyos detalles sólo pueden explicarse suponiendo que la nebulosa planetaria es una masa hueca de gas en expansión. Por lo tanto, contrariamente a lo que pensó Herschel, estos objetos no pueden ser nubes colapsando para formar estrellas nuevas.

El astrónomo soviético Iosif S. Shklovsky se apercibió de la similitud existente entre las estrellas que se encontraban en el centro de algunas planetarias con las estrellas más viejas conocidas: las enanas blancas. Shklovsky sería quien, en 1956, emitiría la hipótesis, ampliamente corroborada hoy en día, de que las nebulosas planetarias están formadas por las capas más externas de estrellas gigantes rojas, capas que han sido eyectadas por dichas estrellas al final de sus vidas antes de convertirse en enanas blancas. Las estrellas muy masivas mueren formando una supernova y las muy poco masivas no son capaces de formar una planetaria convencional. Las

nebulosas planetarias señalan, por tanto, el ocaso de las estrellas de masa intermedia, es decir de las estrellas de unas pocas masas solares.

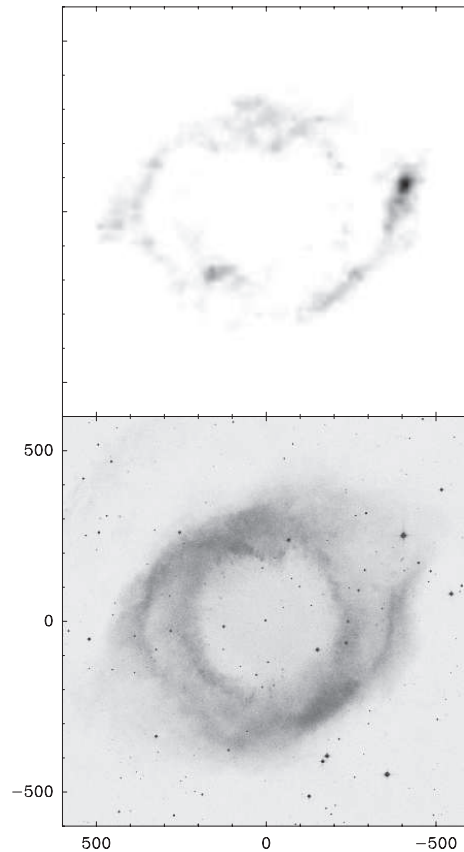


Figura 2: Dos imágenes de la nebulosa de la Hélice que revelan diferentes regiones de esta nebulosa planetaria. *Arriba*: mapa de la emisión del monóxido de carbono (CO) obtenido con el radiotelescopio de CalTech en Mauna Kea (Hawái). Esta imagen revela la región neutra en la que abundan las moléculas (Young y colab.). El asterisco en el centro señala la posición de la estrella central que eye-ctó la nebulosa. *Abajo*: imagen óptica tomada con un filtro rojo. En esta imagen se distinguen también bastantes estrellas de campo. A la escala de esta imagen, nuestro Sistema Solar con todos sus planetas ocuparía una región bastante menor que la imagen de cualquiera de estas estrellas.

Explosiones estelares

La luminosidad de las estrellas tiene su origen en los procesos de fusión nuclear que suceden en su interior. Por ejemplo, el Sol va transformando poco a poco todo el hidrógeno de su interior en helio. Después, los átomos de helio podrán combinarse de tres en tres para formar carbono, o de cuatro en cuatro para formar oxígeno. En cada uno de esos procesos de fusión se libera la energía que hace brillar a la estrella. La detección de los neutrinos también liberados en estos procesos ha confirmado de manera fehaciente la importancia de esos procesos nucleares en el interior solar.

El Sol agotará su hidrógeno dentro de unos 5000 millones de años. Para que la fusión del helio llegue a tener lugar es preciso que la temperatura en el interior estelar alcance más de doscientos millones de grados. Este aumento de temperatura se logrará mediante la contracción del núcleo. Una contracción que va necesariamente acompañada, para preservar el equilibrio global de la estrella, de la expansión y enfriamiento de sus capas más externas. Se formará así una estrella gigante roja. Estas estrellas se describen en el artículo del Dr. Bujarrabal en este mismo Anuario. Recordaremos aquí simplemente que las capas externas de las gigantes rojas son regiones relativamente frías y suficientemente densas como para que los átomos puedan enlazarse para formar moléculas, y las moléculas agregarse en macromoléculas y pequeñas partículas de material sólido (granos de polvo). Se conoce un gran número de estrellas que ya han llegado a esta fase de gigante roja, por ejemplo las estrellas Arturo, Betelgeuse y Antares, que se encuentran entre las más brillantes a simple vista.

La combustión del helio es mucho más rápida que la del hidrógeno: en el Sol esta fase apenas durará unas decenas de millones de años. Una vez agotado el helio, el carbono y el oxígeno pueden formar toda una panoplia de elementos más pesados (magnesio, aluminio, silicio, fósforo, azufre, etc), pero estos fenómenos de fusión, que van precedidos por las contracciones indispensables que elevan la temperatura del núcleo estelar, son cada vez más rápidos. Se llegará así al agotamiento de toda forma de combustible nuclear. En ese momento, la estrella ha pasado por fases de grandes desequilibrios en los que ha realizado enormes reajustes dinámicos en su estructura. Resultado de todos esos reajustes es la capa (o capas) de gas en expansión que es eyectada violentamente por la estrella agonizante: la nebulosa planetaria.

Esta es la imagen clásica de las nebulosas planetarias, es decir la imagen que se tenía de estos objetos entre los años 1950 y 1980: unas capas de gas cuyo centro de expansión es la posición en la que se encuentra el residuo estelar. Ese residuo incandescente debe calentar, dissociar e ionizar el gas nebuloso, haciéndolo brillar en todo el espectro. El gas, que se encuentra sumamente enrarecido e ionizado (es decir compuesto de iones y electrones

libres, lo que se denomina un “plasma”), puede brillar en el óptico por mecanismos de fluorescencia similares a los que tienen lugar en los tubos llamados “fluorescentes”.

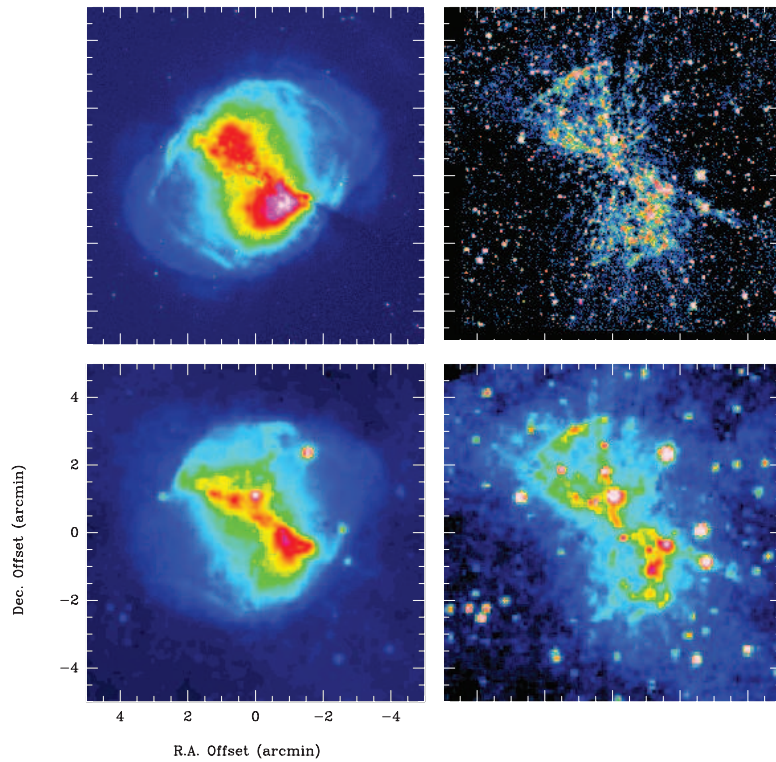


Figura 3: La nebulosa de Las Pesas (“Dumbbell” en inglés) vista en diferentes longitudes de onda. *Arriba izda*: imagen en una línea óptica del oxígeno doblemente ionizado ([OIII]) (tomada por A. Manchado y colaboradores) *Arriba dcha*: emisión en el infrarrojo próximo del hidrógeno molecular (Kastner y colab.) *Abajo izda*: imagen tomada con ayuda del telescopio espacial infrarrojo (ISO) en una línea del neón doblemente ionizado (Bachiller y colab.) *Abajo dcha*: imagen ISO en una línea rotacional pura del hidrógeno molecular (Bachiller y colab.)

Los iones de los diferentes elementos (hidrógeno, helio y -en mucha menor medida- carbono, oxígeno, etc) pueden capturar algunos de los electrones que se encuentran libres en el plasma. En ese proceso se producen las líneas espectrales llamadas de “recombinación”. Analizando

éstas y otras líneas espectrales, se concluye que el plasma se encuentra a una temperatura de unos 10.000 grados. Es decir, una temperatura demasiado alta como para que pudiese, en principio, sobrevivir cualquier tipo de materia molecular o neutra.

¡ Un poco neutras !

Durante la década de los 80 se pusieron en marcha varios grandes radiotelescopios de ondas milimétricas. El del IRAM en Pico Veleta (cerca de Granada), con una antena parabólica de 30 m de diámetro, se convirtió rápidamente en uno de los más potentes del mundo. La espectroscopía de ondas milimétricas permite la detección de moléculas que sólo pueden sobrevivir en regiones relativamente frías, es decir a temperaturas entre unos grados Kelvin¹ y un millar. De entre estas moléculas, la del monóxido de carbono (CO) es la más fácil de detectar. La molécula de hidrógeno (H₂) es mucho más abundante, pero indetectable en ondas milimétricas (una consecuencia de estar formada por dos átomos idénticos). Naturalmente en las condiciones predominantes en las nebulosas planetarias no se esperaba poder encontrar ninguna molécula, pues tanto las altas temperaturas medidas a partir de los espectros ópticos como el intenso flujo ultravioleta de la estrella central deberían disociar (romper) cualquier molécula que pudiese aparecer en ese medio. No se esperaba por tanto que esa nueva instrumentación radio, concebida para estudiar el gas más frío de las galaxias, pudiese tener repercusión en el estudio de las nebulosas planetarias.

La naturaleza, sin embargo, es una reserva inagotable de nuevas y asombrosas sorpresas. Una serie de observaciones con esos radiotelescopios de ondas milimétricas permitieron constatar que, a pesar de lo hostil del medio predominante, en las nebulosas planetarias hay una cantidad muy apreciable de moléculas que consiguen sobrevivir. Esas moléculas deben estar en grandes masas de gas frío y neutro que, por algún mecanismo, consiguen apantallarse de la radiación ionizante (y disociante) que llega desde la enana blanca que sigue brillando intensamente en el centro de la nebulosa.

La presencia de material neutro en las nebulosas planetarias no es una mera curiosidad, sino que tiene serias implicaciones en el estudio de la evolución estelar tardía. Nexo de unión entre la nebulosa planetaria que ahora observamos y la envoltura de su precursora gigante roja, en ese material neutro ha quedado escrita la historia de la evolución última de la estrella. Una muestra del interés de las observaciones de dicha componente molecular la ofrece la figura 4. Dado que la nebulosa planetaria se expande con una velocidad de decenas de kilómetros por segundo², se

¹Los grados Kelvin se miden con respecto al cero absoluto de temperatura, que corresponde a -273 grados Celsius

²1 km/s = 3600 km/h

va haciendo más y más grande según va pasando el tiempo. Es decir, el tamaño de una nebulosa es una medida de la edad de la misma. En la figura 4 se representa, para una serie de nebulosas planetarias, la razón de la masa de gas molecular a la de gas ionizado (M_m/M_i) en función del tamaño de la nebulosa (es decir de su edad). Es posible ver como la razón (M_m/M_i) decrece según la nebulosa crece y evoluciona. Este resultado muestra de manera patente cómo la nebulosa se va ionizando progresivamente, y constituye una de las pruebas observacionales más concluyentes de que las nebulosas planetarias se forman a partir de las envolturas moleculares de estrellas gigantes rojas. Este gráfico ilustra como las nebulosas planetarias ionizadas van formándose progresivamente a expensas de las envolturas neutras circunestelares en expansión, según la radiación estelar va disociando e ionizando el gas.

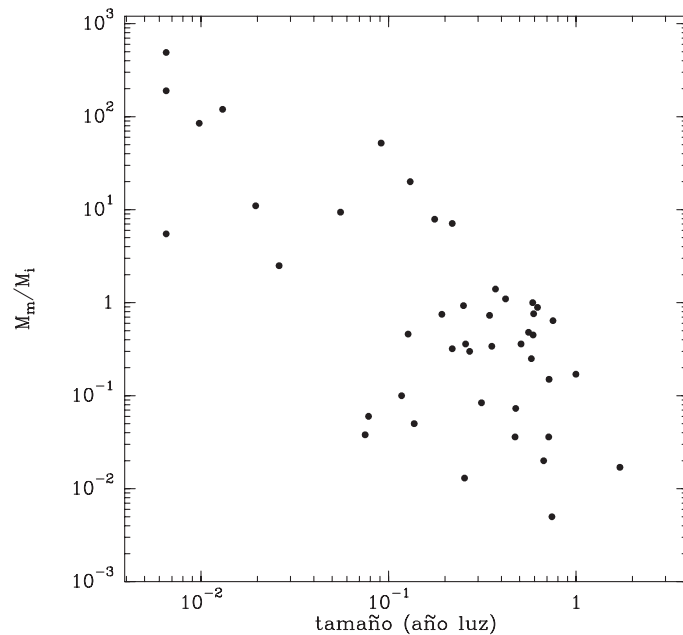


Figura 4: La razón de la masa molecular a la masa ionizada (M_m/M_i) en función del tamaño (que es una medida de la edad) para una serie de nebulosas planetarias (Huggins, Bachiller, Cox y Forveille). Esta gráfica demuestra que en una nebulosa planetaria la nebulosa ionizada va creándose a expensas de una masa de gas molecular (eyectada en la fase de gigante roja) según la envoltura va expandiéndose y es sometida a la radiación disociante e ionizante emitida por la estrella central.

Las observaciones del monóxido de carbono también han demostrado que el gas de las nebulosas planetarias no está distribuido de una manera uniforme, sino que se encuentran aglomeraciones gaseosas discretas repartidas de manera más o menos irregular. Estas aglomeraciones tienen densidades muy altas respecto del medio circundante y son capaces de apantallar la radiación de la estrella central. En el interior de dichas condensaciones de gas, bien preservado de los rayos ultravioleta que romperían los enlaces moleculares, se dan las condiciones necesarias para la conservación de las moléculas.

Moléculas desde el espacio

El monóxido de carbono presente en las planetarias debería estar acompañado por hidrógeno molecular en abundancia. Por ejemplo, en las nubes moleculares interestelares el H_2 es unas diez mil veces más abundante que el CO. El Telescopio Espacial Infrarrojo (ISO) ha permitido muy recientemente detectar esas moléculas de hidrógeno. Con esas observaciones es posible estimar la temperatura y la masa de la zona emisora. Se ha confirmado así uno de los resultados ya adelantados con las observaciones de CO desde tierra: en algunas nebulosas planetarias, la masa del gas molecular puede ser mucho más importante que la masa de gas ionizado. Resulta paradójico pensar que en ciertas nebulosas muy espectaculares en imágenes ópticas (por ejemplo la nebulosa de la Lira) el gas que vemos brillar en esas longitudes de onda visibles es un pequeño porcentaje de su contenido gaseoso total. Pero así es: en dichas nebulosas el gas observado ópticamente es un mero detalle (la punta del iceberg) pues la mayor reserva de masa subyace en forma de gas neutro (molecular o atómico) que es invisible en luz óptica y sólo detectable mediante observaciones radio o infrarrojas.

El telescopio espacial ISO también ha permitido medir la emisión continua de las planetarias en el infrarrojo. Dicha emisión continua es originada por las partículas de polvo que se encuentran mezcladas con el gas. El polvo se formó en la atmósfera de la estrella gigante roja por procesos de condensación de las moléculas que abundaban en esa región. Sin duda, los granos de polvo pueden sobrevivir en las regiones apantalladas de las nebulosas planetarias en las que también se mantienen asociadas las moléculas. Por ejemplo, en la nebulosa NGC6543 una banda muy ancha de emisión centrada en torno a 30 micras de longitud de onda (ver Figura 5) es debida a masas de polvo a una temperatura próxima a 100 grados Kelvin.

Otras nebulosas presentan unas bandas de emisión en el infrarrojo que se atribuyen a hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA, o PAH en inglés), unas macromoléculas que pueden llegar a tener centenares de átomos y que son similares a las de los alquitranes. Aunque el análisis de los datos ISO no está aún finalizado, parece ser que estas bandas de PAHs son mucho

más intensas en las nebulosas jóvenes (como NGC7027) que en las más evolucionadas y masivas (como NGC7293, la Hélice), indicando que la radiación estelar también destruye estos complejos macromoleculares de manera eficaz.

NGC 6543: Emisión IR observada por ISO

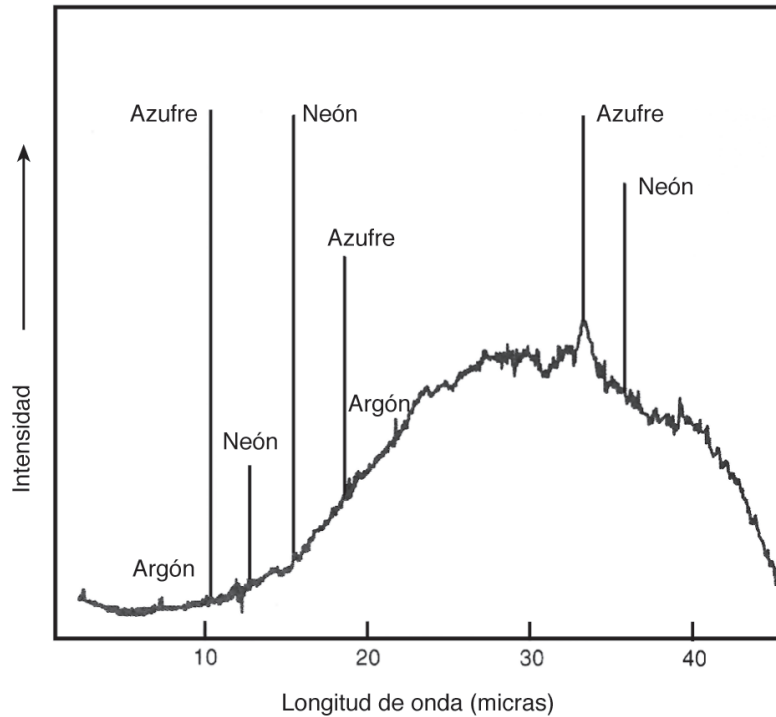


Figura 5: El espectro infrarrojo de la nebulosa planetaria NGC6543, en la constelación del Dragón, medido por el telescopio espacial infrarrojo ISO. Dicho espectro está compuesto por una emisión muy ancha (*continuo*) a la que se superponen emisiones estrechas (*líneas espectrales*). El *continuo* es debido a la emisión del material sólido de la nebulosa (granos de polvo), mientras que las *líneas espectrales* son debidas a diferentes metales en diversos estados de ionización.

Formas caprichosas

El análisis de la radiación molecular procedente de las nebulosas planetarias también permite estudiar cómo se mueve el gas nebuloso,

dejando así al descubierto todos los detalles del movimiento de expansión. Durante muchos años el modelo teórico que ha explicado la expansión de las nebulosas planetarias ha sido el llamado “modelo de los vientos en interacción”, un modelo ideado por el astrónomo canadiense Sun Kwok trabajando con colaboradores norteamericanos.

La envoltura de una estrella gigante roja se forma mediante un viento estelar relativamente lento (a unas decenas de kilómetros por segundo) que sopla durante un millón de años y que acaba por eyectar toda la atmósfera de la estrella. La hipótesis de Kwok y colaboradores es que, una vez que el núcleo estelar caliente queda al descubierto, se forma un segundo viento mucho más rápido (a velocidades de miles de kilómetros por segundo) y tenue que el primero. Este segundo viento alcanza y barre el material eyectado en la fase de gigante roja. La interacción de estos dos vientos sería el fenómeno que forma la nebulosa planetaria. Este modelo es capaz de explicar ciertas observaciones de nebulosas en los rangos ultravioleta y X, pero no explica otras observaciones recientes, como la alta simetría axial o puntual que se distingue en muchas planetarias.

En efecto, en el modelo de los vientos interactivos ambos vientos son esencialmente isótropos, es decir soplan por igual en todas las direcciones, mientras que observaciones recientes con el telescopio espacial Hubble están demostrando que hay un fenómeno dinámico muy importante en las nebulosas planetarias que no es tenido en cuenta por dicho modelo. La inmensa mayoría de las planetarias parecen dar lugar, en algún momento de su vida, a unos chorros de gas que fluyen a velocidades mucho mayores que la de la envoltura de la gigante roja. Dichos chorros o “jets” parecen ser *bipolares* en la mayor parte de los casos, es decir los chorros se eyectan por pares, con cada miembro del par propagándose sobre la misma dirección, pero en sentidos opuestos.

Los chorros bipolares son tan energéticos que tienen una influencia decisiva en el comportamiento dinámico de la envoltura circunestelar. Como expone el Dr. Bujarrabal en su artículo, dichos chorros son particularmente importantes en las primeras fases de la formación de la nebulosa planetaria (en la etapa llamada “protoplanetaria”). Los chorros son capaces de determinar la forma de la nebulosa planetaria que se está formando, y son propicios para la formación de las estructuras altamente simétricas que se observan a menudo en las planetarias. En muchos casos las observaciones demuestran que los chorros no son un flujo continuo y estacionario de gas a alta velocidad, parece más bien que las eyecciones de gas se producen de una manera bastante explosiva e intermitente. Entre explosiones sucesivas la dirección de eyección puede variar en el espacio y pueden observarse diferentes pares de chorros que se alejan de la estrella central llevando direcciones muy dispares. No obstante, la bipolaridad de cada explosión permite que se generen esas simetrías múltiples que hacen de las nebulosas planetarias unos objetos tan singulares.

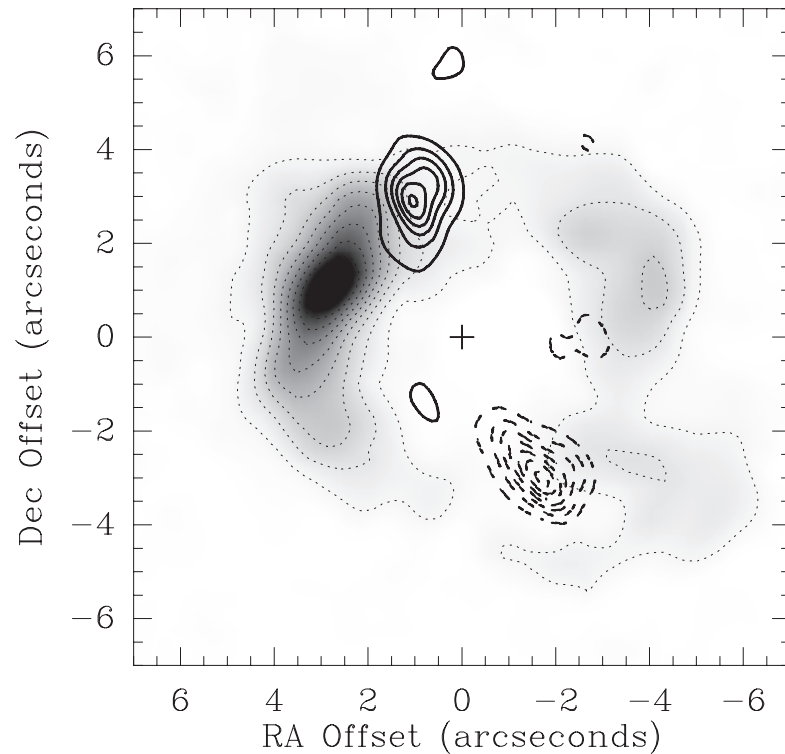


Figura 6: Mapas del gas molecular en la nebulosa planetaria compacta BD+303639. La emisión del hidrógeno molecular (H_2) está representada en niveles de grises y la del monóxido de carbono (CO) con contornos. El CO está concentrado en dos condensaciones que se mueven a gran velocidad alejándose de la estrella central (“proyectiles moleculares”). Estos proyectiles demuestran la importancia de chorros bipolares de gas en esta nebulosa, una planetaria que era considerada hasta la fecha un prototipo de formación por el mecanismo de los vientos interactivos (Bachiller y colab.)

La radioastronomía milimétrica ha proporcionado una prueba concluyente de la importancia de los chorros bipolares en nebulosas planetarias. Con la ayuda del interferómetro de ondas milimétricas del IRAM en Plateau de Bure (en plenos Alpes franceses) es posible obtener imágenes muy detalladas de las regiones neutras en que residen las moléculas dentro de las planetarias. Las imágenes (en las líneas espectrales del monóxido de carbono) que se han obtenido hasta la fecha muestran que en muchos casos esas zonas están horadadas con cavidades en forma de canal, como

las cavidades que dejarían unos chorros de gas que se propagasen a gran velocidad.

En otros casos el monóxido de carbono se ha destruido en casi toda la envoltura y sólo se detecta algo precisamente sobre los chorros de alta velocidad. Este es el caso de la nebulosa BD+303639. Durante mucho tiempo ésta fue considerada un paradigma de nebulosa formada por el mecanismo de los vientos interactivos. En la mayor parte de las imágenes parecía relativamente esférica y la cavidad central es una fuente intensa de rayos X, como predice el citado modelo. En la figura 6 puede compararse una imagen infrarroja de la envoltura (obtenida en una línea del H_2 con el telescopio CFHT en Mauna Kea, Hawaii) con la distribución de CO. El CO se encuentra en un par de condensaciones de alta velocidad, cada una de las cuales conteniendo una masa varias veces más alta que la de Júpiter. Dichas condensaciones deben estar formadas por un chorro bipolar subyacente. En el caso de BD+303639, la estrella central ya ha destruido casi todo el CO de la envoltura que se formó en la fase de gigante roja, pero la propagación de los chorros ha dado lugar a la compresión del gas en la parte delantera de los mismos. El CO ha podido sobrevivir en esas zonas densas, o ha podido ser formado en esas zonas tan comprimidas por el paso de las ondas de choque generadas por el impacto del chorro supersónico. Los proyectiles de CO a alta velocidad se corresponden con una especie de desgarramientos en la envoltura, indicando que los chorros están perforando la capa cuasi-esférica que se formó durante la fase de gigante roja.

Resulta paradójico que los chorros bipolares sean tan sobresalientes precisamente en BD+303639, la nebulosa que durante mucho tiempo fue considerada el prototipo de formación por el mecanismo de los vientos interactivos. Dado que los chorros son importantes incluso en esta planetaria, es muy razonable pensar que son un fenómeno determinante en la mayoría de ellas.

Vemos como el modelo de los vientos en interacción está dejando lugar, paulatinamente, a una visión de las nebulosas planetarias en que los chorros juegan un papel claramente dominante. El contraste de densidades y velocidades entre los chorros y la envoltura parece poder determinar la forma y la dinámica de las nebulosas planetarias. Mediante simulaciones de ordenador es posible reproducir, en gran medida, tanto la variada panoplia de formas observadas como el comportamiento cinemático del gas. Pero también hay detalles que no se comprenden del todo. Por ejemplo, cómo las ondas de choque, que deberían destruir todas las moléculas a su paso, llegan a preservar una parte importante de las mismas, o cuál es el mecanismo por el que los chorros son eyectados o aquél por el que llegan a cambiar su dirección de eyección.

Aunque la detección de moléculas en las nebulosas planetarias haya proporcionado una ayuda tan sorprendente como potente para nuestro conocimiento de las mismas, es evidente que el estudio de estas nebulosas

tampoco ha finalizado aquí. Muchos astrónomos observacionales continúan tomando imágenes de nebulosas planetarias en todos los observatorios del mundo, y muchos teóricos introducen mayores complejidades en los modelos para hacerlos más realistas. Dichas observaciones y modelos irán desvelando más y más detalles de esos procesos impresionantes que, a la manera de fuegos de artificio de astronómica escala, señalan el fin irreversible de la vida de una estrella.

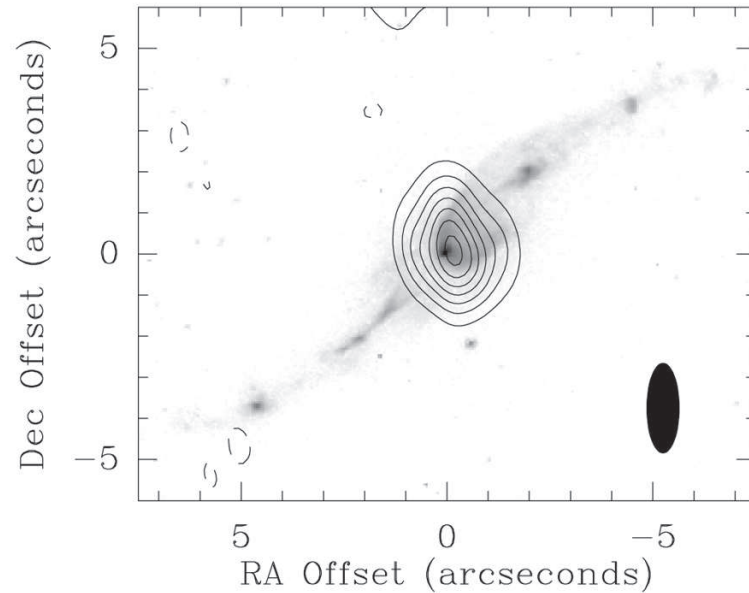


Figura 7: imagen tomada por el telescopio espacial Hubble de la nebulosa planetaria He3-1475. En esta planetaria se observa el papel preponderante que desempeñan los chorros bipolares de gas eyectados por la estrella central. Dichos chorros parecen variar de dirección en el tiempo produciendo esa forma de “S” tan característica. La envoltura molecular, trazada aquí por los contornos de emisión del monóxido de carbono (CO) es comprimida y horadada por esos chorros. La interacción entre estos *jets* tan colimados y la envoltura densa y neutra es lo que determinará en gran medida la forma y el comportamiento dinámico de la nebulosa planetaria.

Agradecimientos

Muchos de los resultados mencionados en este artículo son fruto de una dilatada, estimulante y fructífera colaboración del autor con los Drs. Huggins, Cox y Forveille y, más recientemente, con el Dr. Josselin, colaboración que tiene como objetivo el estudio del gas neutro en las nebulosas planetarias. El autor también agradece a la DGEIC por su contribución a la financiación necesaria para llevar a cabo estas investigaciones y al editor de este volumen, el Dr. Planesas, por la oportunidad brindada para escribir este artículo, por sus comentarios sobre el manuscrito, y por su labor ejemplar confeccionando cada año este *Anuario* tan sumamente útil e instructivo para todo astrónomo profesional o aficionado.