

---

# Estudio Cinemático del Gas Eyectado en Nebulosas Planetarias

## Kinematic Study of Gas Ejected in Planetary Nebulae

Isidro Ramírez Ballinas <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Física, ESFM-IPN, México D.F., México

Recibido: 7/9/2011; revisado: 12/12/2011; aceptado: 5/1/2012.

---

### Resumen

En el presente trabajo se realiza un análisis cinemático del gas expulsado por tres nebulosas planetarias. El método utilizado fue la medición del desplazamiento Doppler que tiene el gas envolvente sobre la estrella central. Los iones estudiados en este trabajo son el de Cloro, Argón y Oxígeno. El resultado obtenido es que los componentes con un mayor grado de ionización se encuentran más cerca de la estrella central y se desplazan a una velocidad inferior que los componentes que registraron un menor grado de ionización, los cuales se encontraron en capas más lejanas a la estrella central.

**Palabras Claves:** Espectroscopía, Desplazamiento Doppler.

### Abstract

In the present work, a kinematic analysis of the expelled gas by three planetary nebulae. The main method was the measurement of the displacement Doppler related to surrounding gas over the central star. The main ions studied in this work are Chlorine, Argon and Oxygen. The outcome is that the high ionization ions are founded near to the central star and their speed are smaller than the obtained for the ions with low ionization, these ions were founded at the farther layers respect to the central star.

**Keywords:** Spectroscopy, Displacement Doppler.

---

## 1. Introducción

La evolución de las estrellas de baja masa e intermedia (entre 1 y 8 masas solares), ha sido estudiado por muchos años, pero aun no es comprendida totalmente. Sin embargo, se ha podido establecer una estructura básica que pueda describir los eventos principales de la evolución estelar. De todas las etapas de la evolución, la que nos concierne es la final, en la que la estrella pierde grandes cantidades de masa y expulsa la mayor parte de su envoltura. Durante esta etapa, conocida como la Rama Asintótica de las Gigantes (o mejor conocida por sus siglas en inglés AGB Asymptotic Giant Branch) la estrella experimenta una serie de oscilaciones térmicas, en la cual, el material procesado

en el interior de la estrella se mezcla con el material de las capas superficiales. Al final de esta etapa, no queda más que un núcleo degenerado de carbono-oxígeno, rodeado de una envoltura muy extendida de baja densidad. En ese momento, la pérdida de masa disminuye en varios órdenes de magnitud y consecuentemente la temperatura estelar empieza a incrementar. Esta etapa se le llama post-AGB.

Durante esta nueva etapa la estrella se volverá lo suficientemente caliente al grado de que pueda fotoionizar la capa de material que fue expulsado durante la etapa de AGB, provocando que esta región se vuelva observable como una nebulosa planetaria. Aunque cabe mencionar que no todas las estrellas de baja masa necesariamente llegan a la fase de Nebulosas Planetarias (de ahora en adelante utilizaremos la expresión NP para

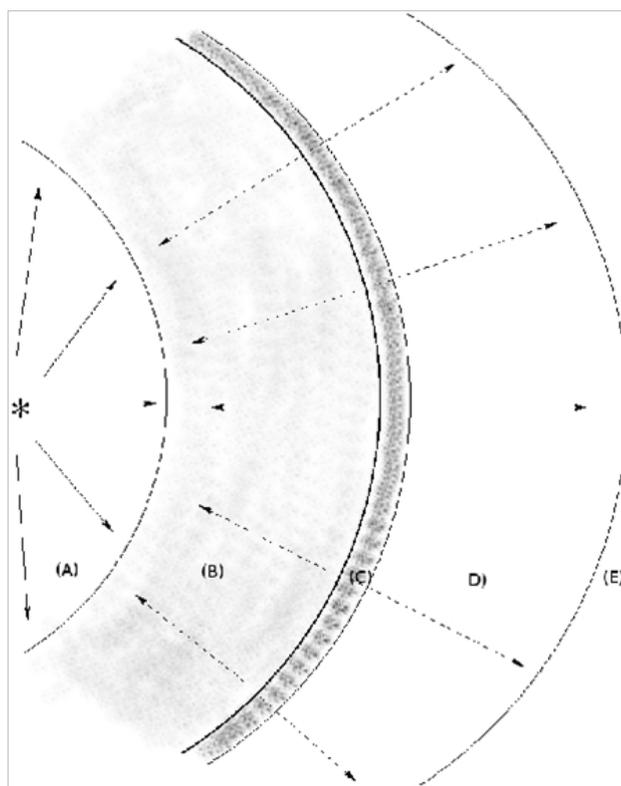


Figura 1. Representación de las distintas regiones que conforman una nebulosa planetaria. A) Viento estelar sin chocar, emitido durante la etapa post-AGB. B) Viento estelar chocado C) Zona de emisión de rayos X. D) Gas nebular chocado, emitido durante la etapa AGB. E) Gas nebular sin chocar.

denotar a este tipo de objetos), ya que la capa expulsada durante la etapa AGB se dispersará por el medio circunestelar mucho antes de que la estrella central esté lo suficientemente caliente como para emitir fotones con la energía de excitación mínima para estimular la capa de gas expulsada. Eventualmente todos los procesos nucleares cesarán en el interior de la estrella, el material nebular se disolverá en el medio circunestelar y la estrella central se convertirá en una enana blanca.

## 2. Observaciones Espectroscópicas

Todas las observaciones fueron obtenidas durante los períodos del 26-27 de mayo y del 2-4 de agosto de 2004 en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, Baja California, México, con el espectrógrafo Echelle REOSC acoplado al telescopio de 2.1 m. Éste es un espectrógrafo cuya dispersión es de  $7.93 \text{ \AA/mm}$  y  $9.51 \text{ \AA/mm}$  a  $5303 \text{ \AA}$  y  $6374 \text{ \AA}$  respectivamente. Para las observaciones de los objetos NGC 6543 y NGC 7009 se utilizó una máscara de  $2'' \times 26''$ , para NGC 7027 fue de  $3.3'' \times 26''$  mientras que para las observaciones para BD +30 3639 fue de  $3.3'' \times 13$ . Para la ob-

servación de las estrellas estándares se utilizó una rendija cuyo ancho era de  $11''$ . La rendija se orientó de tal modo que se pudieran cubrir varias regiones de interés dentro de cada objeto (ver Fig. 2). Para remover la contaminación a segundo orden para la línea de Fe X 6374, se usó un filtro GG395. El detector fue un CCD SITE con un arreglo de  $1024 \times 1024$  pixeles. Dentro de la ganancia utilizada, la lectura del ruido del CCD fue de aproximadamente 9 electrones. La configuración del espectrógrafo fue de tal modo que la emisión de la línea  $H\alpha$  no fuera detectada por el CCD, sin embargo, parte de la luz dispersada por esta línea inevitablemente contaminó el orden adyacente que contiene a Fe X 6374.

## 3. Reducción de Datos

Los datos se redujeron con el programa MIDAS. El paso inicial consistió en la limpieza de los espectros de las NP de los rayos cósmicos, para llevarlo a cabo se promediaron las imágenes de cada nebulosa. Los bias se obtuvieron en cada noche de observación, las cuales se utilizaron para construir una imagen de corrección cero y que posteriormente se usó para ser sustraída de cada

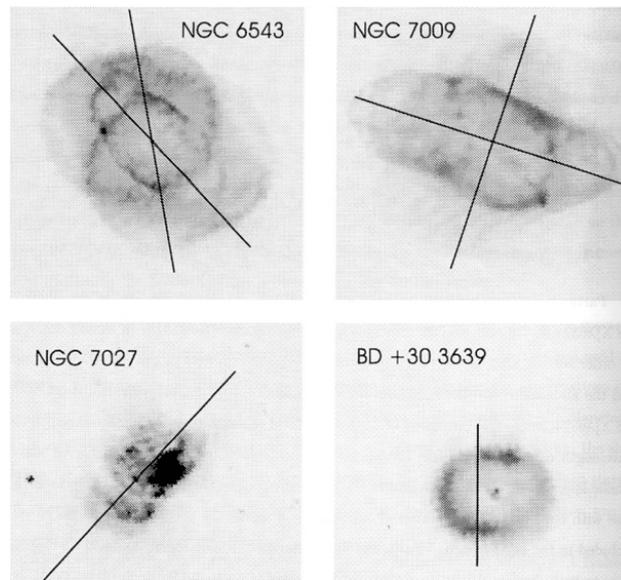


Figura 2. Imágenes HST de los cuatro objetos estudiados en este trabajo. En esta imagen se sobreponen las posiciones de la rendija en cada una de nuestras observaciones.

una de las exposiciones, es decir, las imágenes de la nebulosa, estrellas estándares y lámparas de calibración.

Las observaciones de las estrellas estándares se usaron para trazar las posiciones y las formas de cada orden. Para las NP, se cambiaron estas definiciones de apertura para las posiciones apropiadas dentro de la rendija sin cambiar la forma de las aperturas. Cuando se extrajeron los espectros de las estrellas estándares, se sustrajo el fondo entre los órdenes resultante de la luz dispersada. Este paso se omitió para aquellos espectros en donde la dispersión de luz era despreciable. La emisión del campo plano no pudo ser sustraída debido a que el detector obtiene una mejor calidad en la región espectral del rojo, pero no así en la región azul, por lo tanto no hubo forma de generar un campo plano decente, aunque esto no resulta ser un problema mayor para nuestros propósitos. Para realizar la calibración de longitud de onda, se obtuvieron espectros de una lámpara de Torio-Argón; el rebineo adecuado para la calibración de las imágenes fue de 0.01 Å/pixel.

**Tabla 1.** Relación de las Observaciones

Fecha	Objeto	Inclinación	Exposiciones
26 mayo 04	NGC 6543	10°	7 x 900s
27 mayo 04	NGC 6543	43°	11 x 900s
30 mayo 04	BD 30 3639	0°	5 x 900s
2 agosto 04	NGC 7027	138°	5 x 900s
3 agosto 04	NGC 7009	72°	12 x 900s
4 agosto 04	NGC 7009	162°	11 x 900s

#### 4. Descomposición de los Órdenes de un Echelograma

El estudio del comportamiento cinemático de las nebulosas, en particular la expansión de las burbujas que rodean a cada uno de nuestros objetos, comenzó a partir desde el mismo punto de la observación de éstos, en la que se obtuvieron las imágenes que constaron de 32 órdenes cada uno, a lo largo de ellos se midió el rango espectral visible y cada orden es un segmento del espectro que mide alrededor de 150 Å trayendo como consecuencia un traslape de información entre órdenes adyacentes. Pero antes que nada, es necesario mencionar cuál es la información contenida en cada uno de los espectros.

La orientación utilizada por la rendija se ilustra en la Figura 2. Como se puede apreciar en ese conjunto de

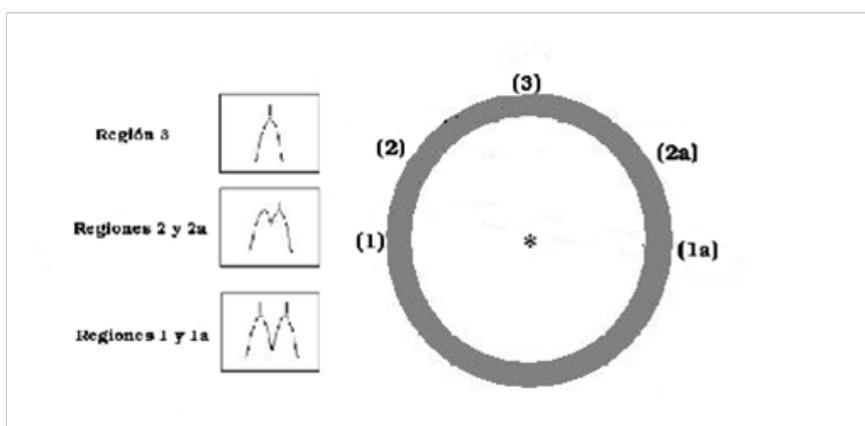


Figura 3. En este diagrama observamos el tipo de perfil que se obtiene dependiendo de la región de la nebulosa que estemos observando.

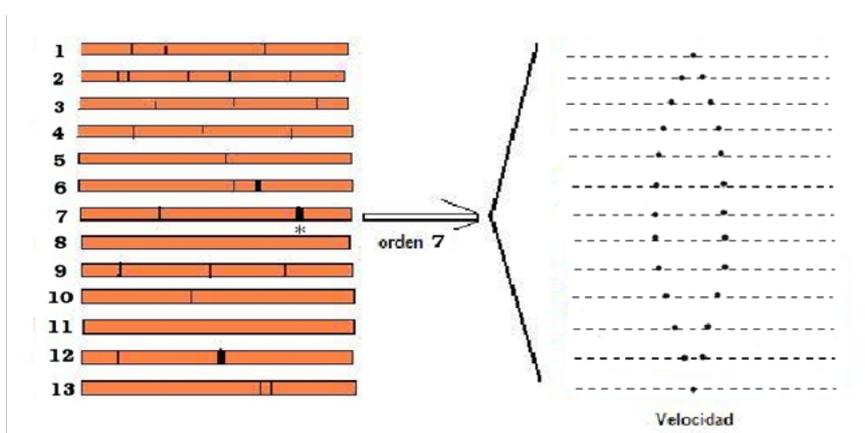


Figura 4. Del lado izquierdo tenemos la representación de los órdenes espectrales, mientras que del lado derecho observamos el rebanado del orden 7 realizado alrededor de la línea que se observa más oscura en el mismo orden. Esta representación es tan sólo un ejemplo y no representa a las líneas de emisión reales.

imágenes, se tienen algunos casos en los que la orientación de la rendija incluye a la estrella central (cuyas líneas espectrales tuvieron que ser movidas) y ambos lados de la burbuja en expansión, de tal manera que la información contenida en cada orden de los espectros puede verse en la fig. 3. En este caso consideramos dos situaciones, en la primera y más sencilla analizamos el caso de una nebulosa que se expande en forma esférica y el caso de otra que se aproxima más a lo que ocurre en nuestros espectros, que se expande en forma de elipsoide.

Si quisiéramos analizar por ejemplo el orden 7 de la Figura 4 que pertenece a alguno de nuestros espectros, en la que podríamos reconocer las regiones de la burbuja que se acercan hacia nosotros con velocidad  $v \cos(i)$  y las que se alejan de la misma manera, donde  $i$  es el ángulo que hay entre el segmento de la cáscara que se expande y la línea de visión (figura 3).

Al analizar las imágenes de las nebulosas proyecta-

das en el plano del cielo, podemos apreciar que conforme nos alejamos del centro de la estrella, los lados de la burbuja en expansión se alejan respectivamente con una velocidad de proyección cada vez menor dada por la expresión  $v \cos(i)$  lo que nos permite observar en los espectros que sus líneas de emisión están más cercanas, hasta llegar al extremo de la rendija en donde observamos una sola línea, lo que equivale a observar a la nebulosa de manera tangencial.

Con el método anteriormente expuesto, se pudieron extraer las rebanadas de cada orden y así pudimos trabajar con líneas de emisión como Cl III 5517, 5537; Ar IV 4711;  $H\gamma$  4340; O II 4367 y O III 4363.

También es necesario mencionar que este proceso no solamente se realizó con los espectros de la nebulosa sino también con los espectros de comparación. Con las imágenes obtenidas se realizó la conversión de longitud de onda a velocidad, ya que este parámetro nos proporciona mayor información para la determinación de la

cinemática de las nebulosas. En el programa diseñado se utilizó un paso de 10 km/s por pixel. Gracias a esto, se pudieron medir las líneas de los espectros de comparación y, de este modo, corregir los desajustes de sus mediciones. La lámpara de Torio-Argón no tiene desplazamiento Doppler y por lo tanto se deben observar con velocidad cero con respecto al sistema de referencia del observatorio.

Una vez corregidos los espectros se obtuvieron imágenes rebanadas con el fin de analizar el comportamiento cinemático de las líneas de Cl III 5517, 5537; Ar IV 4711; H $\gamma$  4340; O II 4367 y O III 4363, el resultado obtenido se observa en las figuras 5 a la 8. En estas figuras observamos la distribución espacial, las cuales tienen una separación de 2''rebanada y la velocidad de desplazamiento de las líneas que corresponde a la región de la nebulosa donde fue emitida. También observamos claramente en estas imágenes el perfil doble en los espectros correspondientes a NGC 6543 y NGC 7009 que corresponde a la emisión de la línea a ambos lados de la cáscara en expansión de cada objeto. Por lo que respecta a NGC 7027, no pudimos apreciar este perfil doble y la posible explicación es que necesitamos una mayor resolución espectral para poder apreciar este efecto, ya que si vemos en la fig. 1 podemos notar que la expansión de la burbuja en este objeto es un tanto más complicada que la que se aprecia en NGC 6543 y NGC 7009, lo que no nos permite apreciar adecuadamente los perfiles de sus líneas. Por último, en el caso de BD +30 3639 tampoco pudimos apreciar en detalle los perfiles correspondientes en sus espectros ya que en este objeto la temperatura de su estrella central es muy baja ( $T^*=30000$  K [3]), por lo tanto, esta estrella no emite fotones con la energía necesaria para excitar a la nebulosa.

## 5. Distribución de las Líneas de Emisión

Para analizar la distribución espacial de las líneas de emisión, se realizaron diagramas Posición-Velocidad que muestran la distribución espacial de las líneas de Cl III 5517, 5537; Ar IV 4711; H $\gamma$  4340; O II 4367 y O III 4363 para NGC 6543 y NGC 7009 (véase las Figuras 5-8).

Estos diagramas muestran que la línea de ArIV 4711 está formada en el interior de donde se forma la línea de ClIII 5517, 5537 y a la vez, la velocidad de este último es más pequeña, mientras que la línea de OII 4367, se forma en una región más cercana a la estrella central que es donde se forma la línea de OIII 4363 y por último la línea que se genera en la región más externa de la

nebulosa es la correspondiente a H $\gamma$  4340. Es necesario mencionar que se observó el mismo comportamiento tanto en NGC 6543 como NGC 7009. Por otro lado, se tiene establecido que de acuerdo a la distribución espacial, tanto las líneas de OIII 4363 como la de OII 4367 se deberían formar en la misma región de la nebulosa ya que OII 4367 es una línea de recombinación y requiere del ión O $_{++}$  para formarse, por otro lado para formar la línea de OIII 4363 se requiere de la excitación colisional del mismo ión, entonces ambas emisiones deberían generarse en la misma cáscara de la nebulosa.

Mientras que nuestras observaciones revelan que la distribución espacial y de velocidades de las líneas, desde la región más interna de la nebulosa a la más externa, se generaron las líneas de ArIV 4711, OII 4367, ClIII 5517, 5537, OIII 4363 y H $\gamma$  4340 respectivamente. Este resultado, con excepción de la emisión de la línea de O II 4367, nos dice que cuanto menor sea el grado de ionización de la componente del gas del ión emisor se encontrará en una región más lejana de la estrella central. Este resultado se ajusta al modelo propuesto por Wilson [2], en el que después de observar diferencias en velocidades de expansión entre los componentes de NP, propuso que las velocidades más grandes se encuentran en los iones de más baja excitación mientras que las velocidades más bajas están asociadas a los iones de más alta excitación.

Pero hasta el momento no hemos podido explicar lo que ocurrió con la línea de OII 4367, ya que de acuerdo a lo anterior el ión que emite esta línea debería estar en una región más externa a la correspondiente a OIII, sin embargo se observa en una región más interna. Una posible explicación es que el modelo propuesto en el párrafo anterior se utiliza para analizar el comportamiento de líneas prohibidas como lo son ArIV 4711, ClIII 5517,5537, OIII 4363, mientras que OII 4367 es una línea permitida.

De tal manera que la emisión de la línea de O II 4367 no puede ser explicada mediante un simple proceso de recombinación y por lo tanto se requiere de un mecanismo adicional que sea capaz de predecir la emisión de esta línea en una región interna a la que se emite la línea de O III 4363. Este mecanismo ausente podría conducir a una mejor interpretación de los datos, aunque esto requiere un trabajo adicional que lo podemos desarrollar en una futura investigación.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio sencillo para entender el comportamiento de las líneas de emisión en

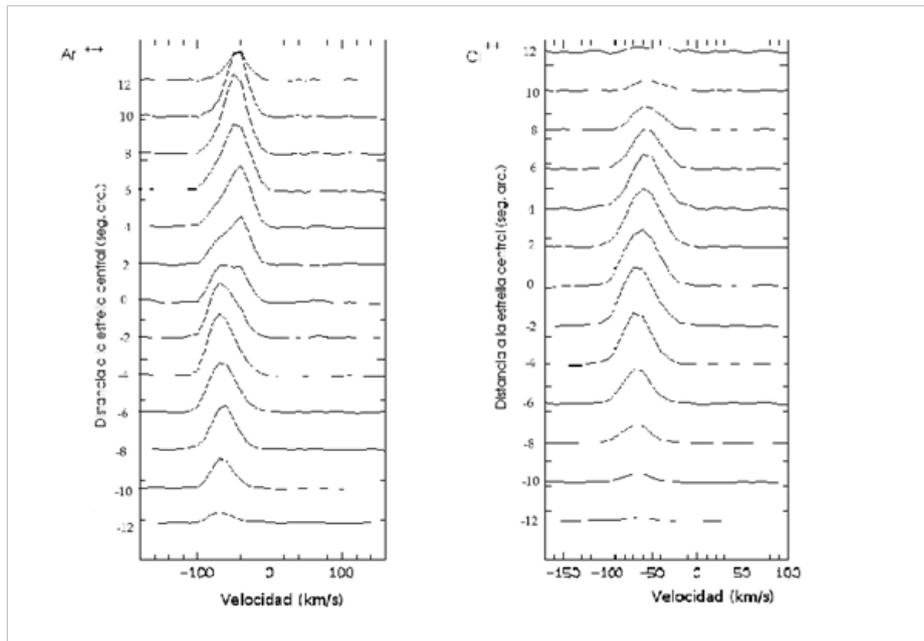


Figura 5. Análisis espectral de las líneas de Ar IV 4711 (Argón 3 veces ionizado, en la longitud de onda de 4711 angstroms) y Cl III 5517 (Cloro 2 veces ionizado en la longitud de onda de 5517 angstroms), encontradas para NGC 6543. La velocidad cero es con respecto al sistema de referencia del observatorio. Los máximos de las intensidades de las líneas corresponden a las emisiones a ambos lados de la burbuja en expansión, tal como se explicó en la sección 4 del presente trabajo.

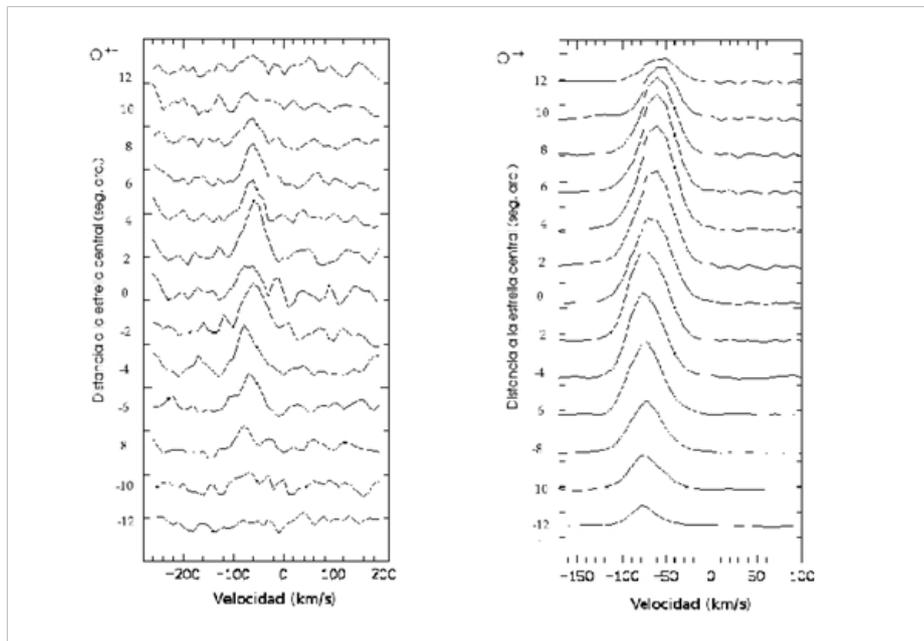


Figura 6. Análisis espectral de las líneas de O II 4367 (Oxígeno una vez ionizado a la longitud de onda de 4367 angstroms) y O III 4363 (Oxígeno dos veces ionizado a la longitud de onda de 4367 angstroms) encontradas para NGC 6543. La explicación para la formación de las líneas espectrales es similar a la expuesta en la figura anterior.

nebulosas planetarias. De acuerdo al grado de ionización de los átomos que componen al gas expulsado en

Nebulosa Planetaria, podemos entender la velocidad de alejamiento de la fuente emisora de fotones, que en es-

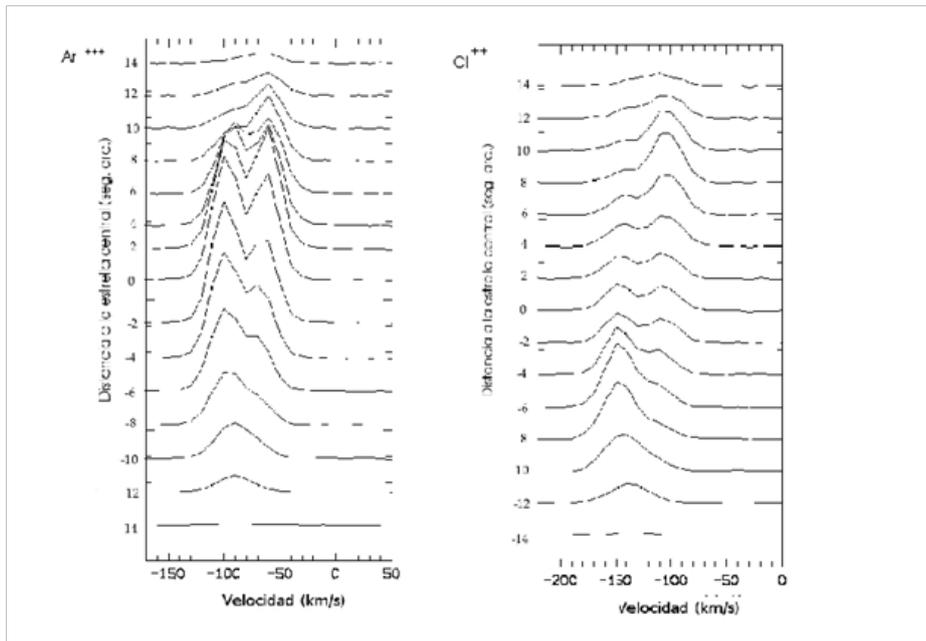


Figura 7. Análisis espectral de las líneas de Ar IV 4711 (Argón 3 veces ionizado, en la longitud de onda de 4711 angstroms) y Cl III 5517 (Cloro 2 veces ionizado en la longitud de onda de 5517 angstroms), encontradas para NGC 7009.

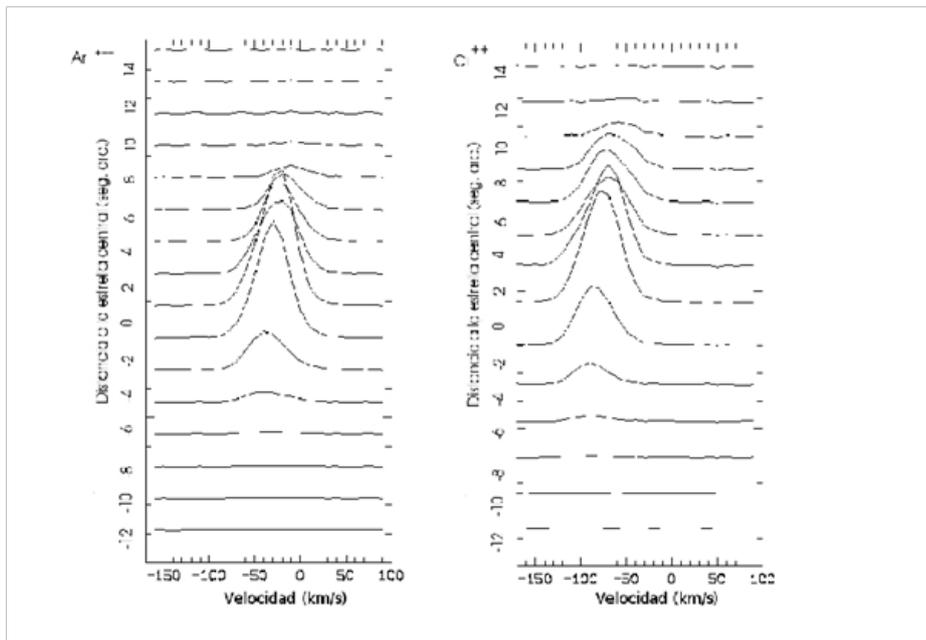


Figura 8. Análisis espectral de las líneas de OII 4367 (Oxígeno una vez ionizado a la longitud de onda de 4367 angstroms) y OIII 4363 (Oxígeno dos veces ionizado a la longitud de onda de 4367 angstroms) encontradas para NGC 7027. Para este objeto no encontramos el doble perfil de las líneas, tal y como se observa para los otros dos objetos y esto nos sugiere que a este objeto se le debe observar con una mejor resolución espectral.

te caso representa a la estrella central. Para el caso del Argón 3 veces ionizado (Ar IV) se encuentra en una ca-

pa de gas más interna que la correspondiente a un gas que se encuentre a un menor grado de ionización, como lo puede ser el Oxígeno 2 veces ionizado (OIII).

La estimación cuantitativa de las velocidades de desplazamiento Doppler del gas respecto a la estrella central y determinación de la distribución espacial se realizará en un trabajo posterior. Por último, no podemos combinar este estudio cinemático para el caso de líneas prohibidas y permitidas, ya que su distribución no va de acuerdo a los modelos propuestos, que explican por qué los grados de ionización de los gases van de mayor a menor conforme nos alejamos de la estrella central.

### **Agradecimientos**

Agradezco al Dr. Leonid Georgiev Dimitrova del IA-UNAM, por la asesoría proporcionada sobre el manejo del programa MIDAS, por su paciencia en el apoyo en la calibración espectral.

### **Referencias**

- [1] A. Acker, F. Ochsenbein & B. Steholm, Catalogue of Galactic Planetary Nebulae (Starsbourg-ESO), 1992.
- [2] O. C. Wilson, Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific, 6, 20, 1950.
- [3] J. H. Kastner, N. Soker, S. D. Vrtilik & R. Dgani, Astrophysical Journal, 545, L47, 2000.
- [4] R. Weaver, R. McCray, J. Castor, P. Shapiro & R. Moore, Astrophysical Journal, 218, 377, 1977.
- [5] M. Perinotto & P. Benvenuti, Astronomy & Astrophysics, 101, 88, 1981.
- [6] L. Georgiev, M. Richer, A. Arrieta & S. A. Zhekov, Astrophysical Journal, 639, 185, 2006.
- [7] W. J. Schuster & L. Parrao, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, 37 187, 2001.
- [8] L. Spitzer, Physics of Fully Ionized Gases, New York: Interscience 2<sup>nd</sup> edition, 1962.
- [9] N. C. Sterling, H. L. Dinerstein, C. W. Bowers & S. Redfield, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 206, 2005.