

# ESPECTROSCOPÍA DE LA NEBULOSA DE ORIÓN M42

ALEJANDRO RICO LEÓN

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
BOGOTÁ, D.C.  
2005

# CONTENIDO

<b>RESUM EN</b>	<b>6</b>
<b>INTRO DUCCIÓN.</b>	<b>7</b>
<b>OBJETIVOS.</b>	<b>10</b>
1. OBJETIVO GENERAL	10
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
<b>1. REGIONES H II, NEBULOSAS DIFUSAS.</b>	<b>11</b>
<b>2. FORMACIÓ N DEL ESPECTRO EN LAS NEBULOSAS.</b>	<b>17</b>
<b>3. NEBULOSA DE ORIÓ N M42 (NGC1976)</b>	<b>23</b>
<b>4. EXPERIMENTACIÓ N - PROCEDIMIENTO.</b>	<b>25</b>
4.1 TOMA DE ESPECTROS DE LA NEBULOSA DE ORIÓ N M42.	26
4.2 TOMA DE ESPECTROS DE LÁMPARAS PARA CALIBRACIÓ N	27
4.3 PROCESAMIENTO DE FOTOGRAFÍAS DE ESPECTROS.	29
4.4 OBTENCIÓ N DE PERFILES DEL ESPECTRO EN IRIS.	33
4.5 PROCESO DE CALIBRACIÓ N DE ESPECTROS.	36
4.6 IDENTIFICACIÓ N DE LÍNEAS DE EMISIÓ N.	40
4.7 ECUACIÓ N PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURAS.	43
4.8 PERFILES PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES.	47
4.9 CÁLCULO DE INTENSIDADES.	49
4.10 CALCULO DE LA DENSIDAD NUM ÉRICA DE ELECTRONES.	51
4.11 DECREMENTO DE BALMER.	51
<b>5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.</b>	<b>53</b>
5.1 PROCESAMIENTO DE FOTOGRAFÍAS DE ESPECTROS.	53
5.2 PROCESO DE CALIBRACIÓ N.	55
5.3 ESPECTROS CALIBRADOS.	57

5.4 ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES EN M42.	68
5.5 INTENSIDADES DE LAS LÍNEAS DE EMISIÓN.	70
5.6 TEMPERATURA.	74
5.7 DENSIDAD DE ELECTRONES LIBRES.	76
5.8 DECREMENTO DE BALMER.	77
<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>80</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>83</b>

## LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

TABLA 1. ESPECTRO 25 DE ENERO.	33
TABLA 2. ESPECTRO 8 DE FEBRERO.	33
TABLA 3. FRANJAS PARA TOMA DE PERFILES Y L_ADD EN IRIS.	35
TABLA 4. RELACIÓN ENTRE LONGITUD DE ONDA Y PÍXEL.	57
TABLA 5. LÍNEAS DE EMISIÓN IDENTIFICADAS EN LA M42.	69
TABLA 6. INTENSIDADES DE LAS LÍNEAS PROHIBIDAS DE OXIGENO Y NITRÓGENO.	71
TABLA 7. INTENSIDADES DE LAS LÍNEAS DE HIDROGENO DE LA SERIE DE BALMER.	71
TABLA 8. TEMPERATURAS EN LA NEBULOSA M42.	74
TABLA 9. DENSIDAD DE ELECTRONES LIBRES, $N_e$ .	76
TABLA 10. DECREMENTO DE BALMER PARA LÍNEAS DE HIDRÓGENO.	78
TABLA 11. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL POLVO.	79
FIGURA 1. FOTOGRAFÍA DEL ESPECTRO DE LA M42. 8 DE FEBRERO. REGIÓN VERDE.	31
FIGURA 2. PERFIL DE LA FIGURA 1.	31
FIGURA 3. PERFIL PARA NIVEL DE RUIDO UNIFORME.	32
FIGURA 4. FOTOGRAFÍA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 25 DE ENERO.	53
FIGURA 5. FOTOGRAFÍA PROCESADA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 25 DE ENERO.	54
FIGURA 6. FOTOGRAFÍA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 8 DE FEBRERO.	55
FIGURA 7. FOTOGRAFÍA PROCESADA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 8 DE FEBRERO.	55
FIGURA 8. FOTOGRAFÍA PROCESADA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 8 DE FEBRERO.	56
FIGURA 9. ESPECTRO DE LA LÁMPARA DE HIDRÓGENO TOMADA EL 8 DE FEBRERO.	56
FIGURA 10. ESPECTRO CALIBRADO DE LA M42, MUESTRA DEL 25 ENERO.	60

FIGURA 11 . ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA DEL CONTINUO .	61
FIGURA 12 . ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA 185-205.	62
FIGURA 13 . ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA 250-270.	63
FIGURA 14 . ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA 340-360.	64
FIGURA 15 . ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA 400-420.	65
FIGURA 16 . ESPECTRO M42.	66

## RESUMEN

En este proyecto se realizó la obtención y posterior estudio del espectro de emisión de la Nebulosa de Orión M42, tomado con el sistema integrado de telescopio, espectrógrafo y cámara fotográfica con su respectivo software. Para el procesamiento de las fotografías tomadas del espectro se usaron programas que permitieron limpiar las imágenes para obtener muestras más claras de las líneas emitidas en el espectro de M42, y lograr visualizar los elementos que están emitiendo radiación por medio de procesos como recombinación de electrones o colisiones.

Haciendo uso de los espectros obtenidos y de las intensidades de ciertas líneas de emisión que en ellos aparecen, se realizó la estimación de condiciones internas de la nebulosa tales como temperatura, densidad y composición química.

## INTRODUCCIÓN.

El estudio de los espectros de los variados objetos celestes tales como estrellas y nebulosas, puede revelarnos información importante acerca de sus condiciones físicas, químicas y dinámicas, las cuales debido a las grandes distancias a las que la gran mayoría de estos objetos se encuentran serían difíciles de captar por otro método. De esta forma la espectroscopia es una herramienta valiosa en el campo de la astronomía si se pretende conocer mejor el funcionamiento y las condiciones de aquellos objetos que llaman nuestra atención.

Haciendo uso de tecnologías más modernas es ahora posible captar mejor el espectro de los objetos celestes, para de esta manera ampliar la información concerniente a dichos objetos y caracterizarlos, por ejemplo según sus espectros, ya sea por ser un espectro de absorción o uno de emisión.

Haciendo mención aun caso en particular y que es el tema central de este proyecto, encontramos a las nebulosas, que son a grandes rasgos una nube de gas que rodea una o varias estrellas generalmente de tipo O y B que actúan como fuente de iluminación de la nube. Existen nebulosas que presentan un espectro de absorción y otras un espectro de emisión, y se les conoce como nebulosas de reflexión y de emisión ó difusas respectivamente. Las nebulosas de reflexión muestran en su

espectro las líneas de absorción de la estrella cercana, mientras que las de emisión exhiben líneas brillantes de emisión debido a los procesos de recombinación de electrones que ocurren en los átomos que componen la nube gaseosa. Además, las nebulosas de reflexión tienen una apariencia azul debido a que dispersan mejor la longitud de onda corta, distinto de las nebulosas de emisión que son decididamente rojas.

Existen también las nebulosas planetarias, las cuales son un cascarón de gas producido por estrellas que están muriendo; su espectro es generalmente una mezcla entre lo emitido por el gas y por la estrella central. La manera como se forma el espectro de las nebulosas planetarias es similar al de las nebulosas de emisión, pero las planetarias tienen un rango mucho más grande de ionización y excitación, y presentan en su espectro líneas de Helio doblemente ionizado, las cuales nunca serán exhibidas por el espectro de una nebulosa difusa.

Una nebulosa que llama la atención a los observadores por su luminosidad y grandeza es la Nebulosa de Orión; es una nebulosa de emisión y es de fácil observación sin la necesidad del uso de instrumentos de largo alcance. La Nebulosa de Orión se puede observar claramente en las primeras horas de la noche durante los primeros meses del año.



Por esta serie de razones se decidió llevar a cabo este proyecto de experimentación, para poder estudiar el espectro de emisión de una de las nebulosas más conocidas.

# OBJETIVOS.

## *1. OBJETIVO GENERAL.*

1. Observar y analizar el espectro de la Nebulosa de Orión M42.
2. Estudiar propiedades físicas de la nebulosa que se puedan deducir de su espectro.

## *2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS*

1. Obtener espectros de emisión calibrados de la nebulosa M42.
2. Identificar los elementos químicos que componen la nebulosa M42 y el grado de ionización que estos elementos poseen, haciendo uso de las líneas espectrales de emisión de la nebulosa.
3. Medir las intensidades de las líneas de emisión encontradas en el espectro de la nebulosa M42.
4. Comparar entre sí varias líneas de emisión, calcular los cocientes de intensidades, para poder estimar temperaturas y densidades.

## 1. REGIONES H II, NEBULOSAS DIFUSAS.

Las regiones HII o regiones difusas reciben este nombre debido a que están compuestas en su mayor parte por plasma de hidrógeno ionizado, elemento más abundante en estas regiones, y electrones libres. Los átomos presentes en la nube interestelar son ionizados por la gran parte de radiación ultravioleta producida por las estrellas cercanas, estrellas muy calientes, generalmente de tipo O y en ocasiones de tipo B.

Estas estrellas emiten una cantidad considerable de radiación ultravioleta con longitudes de onda menores que  $912 \text{ \AA}$ , longitud conocida como límite de Lyman; para poder producir esa radiación las estrellas deben tener una temperatura alrededor de los  $40000 \text{ K}$  o  $45000 \text{ K}$  que es la temperatura típica de las estrellas clasificadas como O6 y O5 según la secuencia espectral.

Fotones con esta longitud de onda tienen una energía de  $13.6 \text{ eV}$ , suficiente para ionizar el hidrógeno presente en la nube junto con los demás elementos como Oxígeno, Azufre, Nitrógeno, Helio, Hierro, etc. que se ionizan con menos energía. Los fotones ionizantes también imprimen energía en la nube gaseosa en forma de energía cinética en los electrones liberados por ionización, lo que contribuye a la energía térmica de la nebulosa. El balance entre la energía impresa por

fotoionización y otros procesos de enfriamiento conlleva que las nebulosas tengan un rango de temperaturas de 7000 K a 25000 K, aunque para el caso de las nebulosas difusas la temperatura es de alrededor de 10000 K.

Cerca de la estrella, todo el hidrógeno puede estar ionizado; pero más lejos la radiación disminuye (por distancia y por absorción); con ella disminuye la rata de ionización, de manera que se alcanza una distancia luego de la cual la nube se torna neutra, y se dice al ocurrir esto que la nebulosa esta en su límite de fotoionización (*photoionization bounded*) (Emerson, 1996), que es el caso general, y que puede ser confirmado si se observan líneas de emisión de OI y SII en el espectro de la nebulosa. Bajo esta condición Bengt Stromgren teorizó en 1939 que se vería la nebulosa como una burbuja esférica; dando origen al termino Radio de *Stromgren*, que depende del flujo ultravioleta y de la densidad del gas; como muestra la *ecuación 1*, siendo  $N_{pi}$  la densidad de fotones fotoionizantes,  $N_{TOT}$  la densidad numérica total de partículas del elemento con que se trabaje, y  $T_K$  la temperatura cinética de la nebulosa (Emerson, 1996).

$$r_s = 2.7 * 10^{-12} \left( \frac{N_{pi}}{N_{TOT}^2} \right)^{\frac{1}{5}} T_K^{0.27} \text{ pars ecs}$$

**Ecuación 1**

Incluso se habla de la *Esfera de Stromgren* , aunque debido a la usual distribución no uniforme y no homogénea del gas, las nebulosas se encuentran fuera de la nombrada simetría (Kaler, 1989).

La luz emitida por la nebulosa debido a la recombinación del gas se encuentra ya en la franja del espectro visible, lo que nos permite visualizarla generalmente bajo una combinación de color rojo producido por el hidrógeno y verde producido por el oxígeno doblemente ionizado, que en el espectro visible de la nebulosa son las líneas de emisión más intensas. Un factor que acentúa el color rojizo en las nebulosas es la presencia de polvo en el medio; esto es debido a que el polvo absorbe la radiación de luz azul que emite la nebulosa, si se encuentra entre nosotros y la nube; pero si el polvo se encuentra mezclado con el gas, afecta el proceso de formación de las líneas. Este polvo consta generalmente de finos granos, desde una diez-milésima a una milésima de milímetro, de carbón o de silicio y oxígeno en forma de silicatos.

La característica de emisión de luz y la excitación de la nebulosa por estrellas brillantes hace que se les conozca también como *Nebulosas Difusas de emisión*.

Las nebulosas difusas de emisión son de muy baja densidad, aproximadamente de  $10^9 - 10^{12} \text{ m}^{-3}$  (Kitchin, 1995), condición que les

permite presentar en su espectro líneas que bajo otras condiciones físicas no se logran observar, como por ejemplo en los laboratorios. Estas líneas se conocen como líneas prohibidas, ya que la transición entre niveles de energía en el átomo está restringida por reglas de selección para transiciones relacionadas con el acople L - S, como lo son que L debe cambiar en 0 ó en  $\pm 1$ , J sólo puede cambiar en 0 ó  $\pm 1$ , S en 0, y también debe cambiar la paridad.

Los estados excitados en los que se ubican los electrones para realizar este tipo de transiciones son conocidos como estados meta-estables, los cuales tienen una probabilidad de transición del orden de  $0.02s^{-1}$ , mucho menor que la probabilidad para las transiciones permitidas que es del orden de  $10^9s^{-1}$ . Estas líneas prohibidas son de las líneas más intensas por que se presenta en estos niveles meta-estables una gran acumulación de electrones, ya que el tiempo promedio entre colisiones que es el mecanismo de de-excitación es muy bajo debido a la baja densidad del gas; en especial las líneas más intensas son las que presenta el oxígeno doblemente ionizado en la región verde del espectro.

El factor de baja densidad en las nebulosas difusas, y su gran masa, no permiten que sean aplicadas aproximaciones para cálculos de temperaturas, densidades y de número de electrones, como lo es el Equilibrio Termodinámico Local (Kitchin, 1995), que se utiliza para

atmósferas estelares y otros objetos celestes, en donde se asume que las propiedades del material son caracterizadas por una sola temperatura, y las propiedades del campo de radiación también son caracterizados por una sola temperatura, aunque diferente.

Sin esta aproximación relaciones como las de Boltzman, Saha y Maxwell son inaplicables para encontrar las poblaciones relativas de los diferentes estados excitados de los átomos, los niveles de ionización y el balance entre estos dos, ya que en bajas densidades los iones y átomos permanecen la mayor parte del tiempo en el estado base y deben ser excitados por algún proceso antes de que puedan producir una línea de emisión (Emerson, 1996). Así que para obtener información sobre características físicas en la nebulosa es importante el espectro y especialmente la presencia en el de las líneas prohibidas de elementos como el Oxígeno, Nitrógeno y Azufre, de cuyas intensidades se puede obtener la información deseada, usando ecuaciones que provienen del equilibrio estadístico.

Tal es el caso de tres líneas prohibidas de Oxígeno y tres de Nitrógeno que están en la región visible y se usan para calcular las temperaturas en la nebulosa, esto debido a que estas líneas no se producen por recombinación, sino por colisiones con electrones libres especialmente, y como es el caso, por que las tasas relativas de excitación por

colisiones de niveles con diferentes potenciales de excitación son fuertemente dependientes de la temperatura (Emerson, 1996).



## 2. FORMACIÓN DEL ESPECTRO EN LAS NEBULOSAS.

El espectro de las regiones HII o nebulosas difusas es un espectro de emisión, lo que las diferencia de las nebulosas de absorción; en las regiones HII la nube de gas no está separada de la fuente de radiación lo que conlleva a que el espectro que observamos de las nebulosas esté sobrepuesto al espectro continuo de las estrellas que irradian la nube gaseosa, haciendo que estas nebulosas sean transparentes en el continuo, por lo menos en el visible y hasta el límite de Lyman de  $912 \text{ \AA}$ .

La emisión continua es producida por los procesos *free-bound*, *free-free* y procesos de producción de dos fotones. La emisión continua producida por el proceso *free-bound* que es conocido como recombinación, aparece como el espectro de Balmer que domina la parte visible del espectro debido a la recombinación hasta el nivel  $n=2$  del hidrógeno, y como el de Lyman que domina la parte ultravioleta por debajo de los  $3600 \text{ \AA}$ , debido a la recombinación hasta el estado base del hidrógeno.

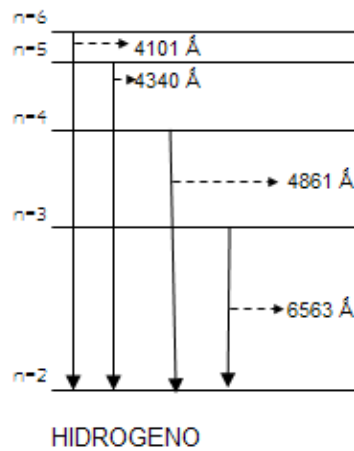
El proceso de emisión de dos fotones involucra transiciones del nivel  $n=2, l=0$  del hidrógeno hacia el estado base  $n=1, l=0$ ; esta transición es prohibida para un sólo fotón, por que no se conserva el momento angular, pero sí es permitida si se emiten dos fotones. Como la energía puede ser repartida de cualquier manera entre los dos fotones, el

espectro es continuo en todas las longitudes de onda por encima de la longitud de onda Lyman- $\alpha$  (912 Å).

Lo esencial de las nebulosas gaseosas son las líneas de emisión, las cuales se dividen en líneas por recombinación y en líneas de excitación por colisiones, esta diferenciación depende de la forma en la que se produjo la excitación del átomo.

Las líneas por recombinación se producen cuando un electrón libre y un ion se recombinan dando como resultado un átomo en un estado excitado, y posteriormente se presenta el decaimiento de ese estado excitado, pasando por los estados intermedios hasta llegar al estado base, o como se mencionó anteriormente, hasta el estado  $n=2$  para tener el espectro de Balmer. Este proceso se denomina decaimiento en cascada o de fluorescencia. La tasa de ocurrencia del proceso de recombinación es baja debido a la baja densidad en la nebulosa, lo que conlleva que sean detectadas solamente las líneas producidas por los elementos más abundantes en la nebulosa, tal como el hidrógeno que está en su mayoría ionizado, haciendo que sus líneas sean muy brillantes.

La *gráfica a* muestra los niveles para el hidrógeno y las líneas emitidas al realizar el proceso de cascada decayendo en la serie de Balmer, en la región visible del espectro de la nebulosa.



**Gráfica a**

Para el caso de recombinación del hidrogeno existe una relación entre sus líneas de emisión, esta relación es la razón entre las intensidades de las líneas de la serie de Balmer, y se le conoce como el *Decremento de Balmer*. Esta razón entre intensidades es invariante respecto a la temperatura y a la densidad (Emerson, 1996). Pero al observar las nebulosas, por ejemplo, el valor de esas razones cambia debido a la presencia de polvo en el espacio, haciendo que el valor de  $I(H\alpha)/I(H\beta)$  aumente.

Los valores para el decremento de Balmer son estimados partiendo de ecuaciones de equilibrio estadístico en donde se supone un balance en el número de recombinaciones entre dos niveles en el átomo junto con la rata de recombinación por unidad de volumen y unidad de tiempo, en

la cual aparece una dependencia en la temperatura. De esa ecuación de equilibrio estadístico se obtienen valores que son usados para predecir las intensidades de las líneas por recombinación. El valor estimado para  $I(H\alpha)/I(H\beta)$  a una temperatura de 10000 K es 2.87, y 0.466 para  $I(H\gamma)/I(H\beta)$ .

El segundo proceso capaz de colocar un átomo o un ion en uno de sus estados excitados, partiendo del estado base, para que posteriormente decaiga y produzca una línea de emisión, es el de las colisiones con otras partículas, generalmente con los electrones libres. Los electrones en un gas a temperatura  $T$  tienen una energía cinética promedio proporcional a  $kT$ , siendo  $k$  la constante de Boltzman, y la tasa de excitación por colisiones para partículas cargadas, existiendo una densidad de electrones  $N_e$ , es proporcional a  $N_e/T^{1/2}\exp(-E_{ij}/kT)$ , en donde  $E_{ij}$  es la energía de excitación por encima del estado base. Las nebulosas difusas o regiones HII tienen una temperatura típica de  $10^4$  K que puede hacer que un átomo dé el paso al primer estado excitado luego de una colisión, por que para lograr la excitación a niveles más altos es necesaria una temperatura de  $10^6$  K porque los iones presentes en estas nebulosas poseen valores muy altos para  $E_{ij}$ .

La energía necesaria para alcanzar los estados meta-estables de donde se producen las transiciones prohibidas no es muy alta, de modo que la excitación por medio de colisiones se puede lograr fácilmente, lo que

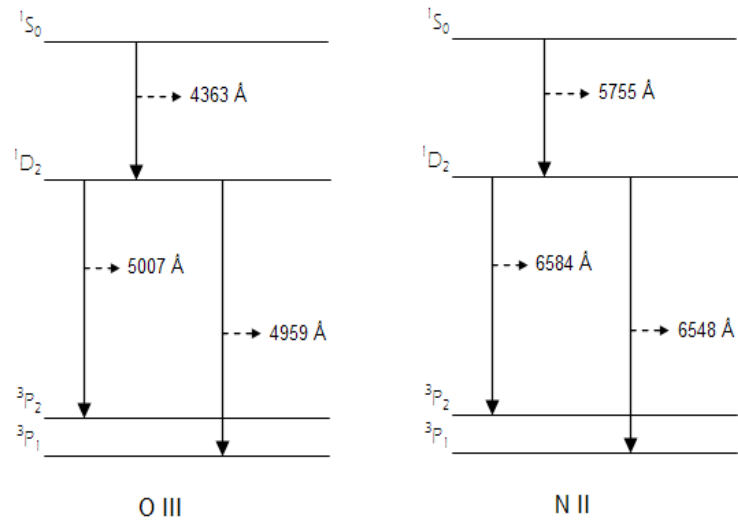
conlleva que el decaimiento prohibido emita longitudes de onda en la región visible del espectro (Emerson, 1996), según la relación existente entre energía y longitud de onda  $E \sim 1/\lambda$ .

El ejemplo más amplio para el caso descrito anteriormente y del cual ya se ha hecho mención en el texto, es el de las líneas prohibidas que emiten el oxígeno doblemente ionizado (OIII) y el nitrógeno ionizado una sola vez (NII). Estos elementos tienen la configuración  $^1S$  como el segundo estado excitado con una energía de 5.4eV,  $^1D$  como su primer estado excitado con una energía de 2.7eV y  $^3P$  como el estado base; las transiciones que mayor importancia tienen, como para el caso de este proyecto, son las que ocurren de  $^1S_0$  a  $^1D_2$  y de  $^1D_2$  a  $^3P$ , donde por la estructura fina se divide  $^3P$  en  $^3P_2$ ,  $^3P_1$ ,  $^3P_0$ .

Estas son en su totalidad transiciones prohibidas porque no hay un cambio en la configuración como lo indican las reglas de selección para transiciones, también violan la regla  $\Delta S=0$ , y además la transición  $^1S_0$  a  $^1D_2$  rompe con la regla  $\Delta J=\pm 1$  haciendo que sea ésta una transición que produce una línea mucho más débil que las otras líneas, dado que  $\Delta J=2$  haciendo que su intensidad sea muy baja en el espectro y por tal motivo mas difícil de detectar.

La *gráfica b* muestra las transiciones nombradas para OIII y NII con las consecuentes longitudes de onda emitidas, líneas que pueden ser

observadas en la región visible del espectro, y que son útiles para el cálculo de temperatura. Las líneas prohibidas son encerradas ente paréntesis cuadrados para diferenciarlas de las permitidas : [O III] y [N II].



Gráfica b

### 3. NEBULOSA DE ORIÓN M42 (NGC 1976)

La nebulosa M42 está ubicada en la constelación de Orión, más específicamente en la región conocida como la Espada de este cazador, a una distancia de 1500 años luz. Su declinación es de  $-05^{\circ}27'$ , una ascensión directa de  $05^{\text{h}}35.4^{\text{m}}$  y una magnitud visual de 4; es una de las nebulosas más luminosas que puede ser vista sin la necesidad de instrumentos de observación de largo alcance. La nebulosa de Orión fue descubierta por Nicholas-Claude Fabri de Peiresc en 1610, y registrada en el catálogo Messier con el número M42 el 4 de Marzo de 1769.

Esta nebulosa es iluminada por un grupo de estrellas conocido como el Trapecio, que son estrellas de tipo O y especialmente por  $\theta^1$  Ori que es una O6, y de donde proviene toda la radiación que excita la nube de gas y polvo. En esta nebulosa también ocurre el nacimiento de estrellas, debido a que por gravedad el polvo y el gas se contraen en piezas más pequeñas y densas.

La constitución gaseosa de la nebulosa fue descubierta en 1865 con la ayuda de la espectroscopia por William Huggins. Como se mencionó anteriormente el estudio del espectro para las nebulosas difusas de emisión y regiones HII, como lo es la M42, es de gran importancia para conocer y obtener información sobre las condiciones en la nebulosa, tales como densidad, número de electrones libres, y temperatura.

La coloración que observamos de la M42 proviene de la combinación de colores producida por las líneas de emisión más intensas que posee el espectro de la nube, estas son la línea H alfa en la parte roja del espectro, y las líneas prohibidas de oxígeno doblemente ionizado con longitud de onda 4959 Å y 5007 Å en la parte verde del espectro.



## 4. EXPERIMENTACIÓN – PROCEDIMIENTO.

La experimentación para este proyecto consistió en obtener el espectro de emisión visible de la nebulosa M42, para ser analizado con la ayuda de programas de computador, y obtener de esta manera información sobre las características físicas presentes en la nebulosa como lo son temperaturas, densidades, número de electrones en el plasma y composición química, es decir los materiales que esta nube de gas y polvo posee.

Para este experimento se utilizó el telescopio de la Universidad de los Andes, integrado con un espectrógrafo que posee una rejilla de 600 líneas/mm para la descomposición de la luz recibida de la nebulosa, y una cámara CCD (*charge-coupled device*) que convierte la luz recibida en un flujo de electrones que junto con el programa de computador la convierte en una fotografía con magnitudes exactas y así captura el espectro visible otorgado por el espectrógrafo (Kaler, 1989).

Los programas de computador utilizados para el procesamiento de los espectros son PICTOR VIEW, el cual recibe las imágenes de la cámara CCD y permite aplicar filtros para minimizar el ruido de las fotos. Otro programa es IRIS, con el que se continúa el procesamiento de los espectros y con funciones que permiten limpiar la foto proveniente de PICTOR VIEW al sustraer ruido causado por dispersión de luz en la

atmósfera y la ciudad, y por el calentamiento de píxeles en la cámara; pero el Iris es especialmente importante para extraer el perfil de cada espectro, es decir, la gráfica de intensidad contra longitud de onda. Luego para la realización de cálculos y gráficas se utilizó Excel de Microsoft Office.

#### ***4.1 TOMA DE ESPECTROS DE LA NEBULOSA DE ORIÓN M42.***

Las primeras fotografías del espectro de la M42 se tomaron el día 25 de enero de 2005 en las horas de la noche cuando la nebulosa se encontraba al oriente de la ciudad. Con el sistema integrado de telescopio, espectrógrafo y cámara, se varía la posición de la rejilla del espectrógrafo girando la perilla calibrada en grados, para obtener las distintas regiones del espectro visible. Las posiciones para esta toma fueron:

POSICIÓN EN GRADOS	REGIÓN DEL ESPECTRO
10°	AZUL
12°	VERDE
15° – 16°	ROJO

El tiempo de exposición para las fotografías fue de 10 minutos para la región azul y 5 minutos para la región verde y roja. Esta diferencia en

los tiempos de exposición fue debido a que la muestra de 5 minutos en la región azul no permitió observar de manera significativa líneas del espectro de emisión.

La segunda toma de fotografías se realizó el día 8 de Febrero de 2005, con la intención de fotografiar todas las regiones del espectro de emisión visible y obtener el espectro total presentado por la nebulosa. Las posiciones de la rejilla del espectrógrafo para esta muestra fueron las siguientes:

POSICIÓN EN GRADOS	REGIÓN DEL ESPECTRO
12°	VERDE
12° - 13°	VERDE - AMARILLO
14°	NARANJA
15° - 16°	ROJO

El tiempo de exposición para esta segunda sesión de fotografías fue de 5 minutos, para poder procesar las muestras bajo las mismas condiciones de recepción de luz.

#### ***4.2 TOMA DE ESPECTROS DE LÁMPARAS PARA CALIBRACIÓN***

La toma de los espectros de calibración consistió en fotografiar lámparas de Hidrogeno, Helio, y Neón, con la rejilla en la misma posición en la que se fotografió la nebulosa; para evitar una mínima variación en la posición de la rejilla, hay que tomar el espectro de calibración inmediatamente antes o después de tomar el espectro de la región de interés. Con las longitudes de onda conocidas del espectro de calibración, saber a qué longitud de onda corresponde cada píxel del espectro, y así tener una fuente de identificación de líneas espectrales vistas en las respectivas regiones del espectro de la nebulosa.

Conociendo de antemano qué líneas de emisión se obtienen de las lámparas para cada posición de la rejilla, como en el caso de la lámpara de Hidrógeno en donde se ve para la posición de rejilla de  $12^\circ$  las líneas  $H\beta$  y  $H\gamma$ , y conociendo estas longitudes de onda y su ubicación en la fotografía se puede comenzar a identificar las líneas de emisión fotografiadas en el espectro de la nebulosa.

Las lámparas usadas para identificar líneas en las distintas regiones fueron:

REGIÓN DEL ESPECTRO	LÁMPARA
AZUL	HIDROGENO
VERDE	HIDROGENO
NARANJA	HELIO Y NEON

ROJO	HIDROGENO Y NEON
------	------------------

El tiempo de exposición para la toma de estos espectros es mucho menor que el aplicado a la nebulosa, son del orden de milisegundos, esto para evitar saturar los píxeles en la fotografía, y poder realizar posteriormente la identificación de líneas.

Para el caso de las regiones naranja y rojo del espectro se utilizaron dos lámparas para poder tener más líneas conocidas de referencia, ya que al tomar el espectro rojo del hidrógeno sólo se observa la línea  $H\alpha$  que no es suficiente para realizar la calibración.

#### ***4.3 PROCESAMIENTO DE FOTOGRAFÍAS DE ESPECTROS.***

Como se mencionó anteriormente, el procesamiento de estas imágenes se realizó en los programas PICTOR VIEW e IRIS.

Inicialmente en el programa PICTOR VIEW que recibe las fotos provenientes de la cámara CCD se procesaron todos los espectros tomados en las dos sesiones con la función MEDIAN FILTER, utilizando un valor de 0.5 para este filtro, (este filtro compara cada píxel con sus alrededores; si es demasiado diferente al promedio de los vecinos, cambia el valor original del píxel por el valor promedio de los vecinos), que resta de los “píxeles calientes” un valor que se puede considerar

como ruido y limpia la imagen haciendo mas suave el fondo; así se obtiene una mejor distinción de las líneas espectrales.

El valor de 0.5 para el filtro fue escogido luego de probar distintos valores y obtener diferentes respuestas en la fotografía, al aumentar el valor se puede llegar a eliminar información importante, como algunas líneas muy débiles.

Posteriormente la foto es trasladada al programa Iris para continuar con la limpieza; en este caso se selecciona la opción SLICE del menú VIEW, la cual permite ver o extraer el perfil de cualquier parte de la fotografía, generando una gráfica de intensidad contra píxeles en la que se pueden ver el ruido y las líneas del espectro de emisión de la M42 como picos con distintas intensidades y áreas. La *figura 1* y la *figura 2* representan lo descrito anteriormente.

La *figura 1* es la fotografía del espectro de la M42 en la región verde donde se pueden ver las líneas de  $H\alpha$  y dos líneas prohibidas de O III; la *figura 2* es el perfil obtenido al hacer SLICE arriba de la franja continua, cubriendo las tres líneas de emisión, y se observan los tres picos más prominentes que representan las tres líneas de emisión.

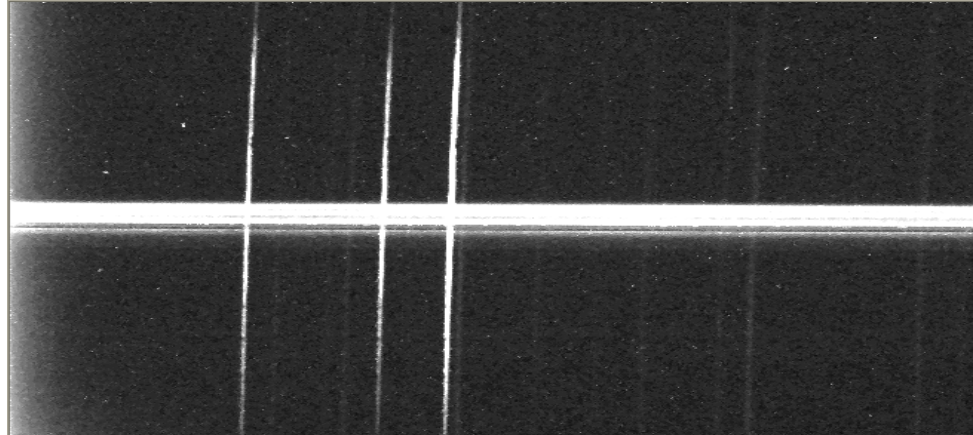


Figura 1. FOTOGRAFÍA DEL ESPECTRO DE LA M42. 8 DE FEBRERO. REGIÓN VERDE.

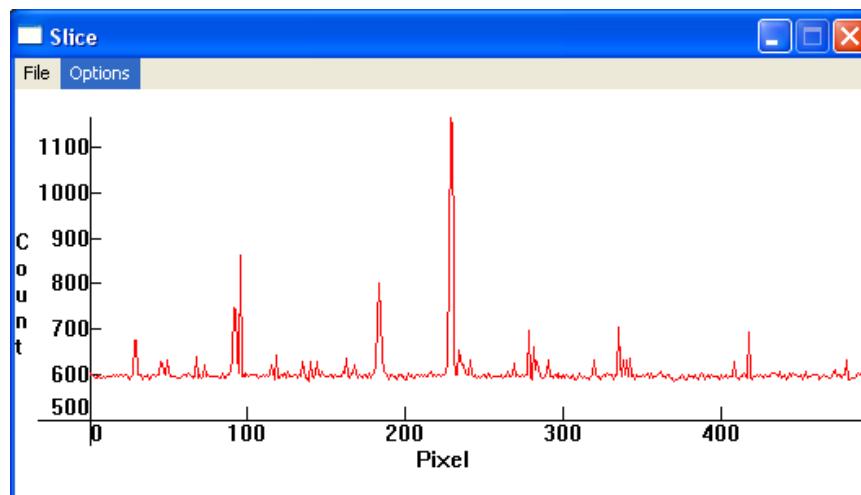
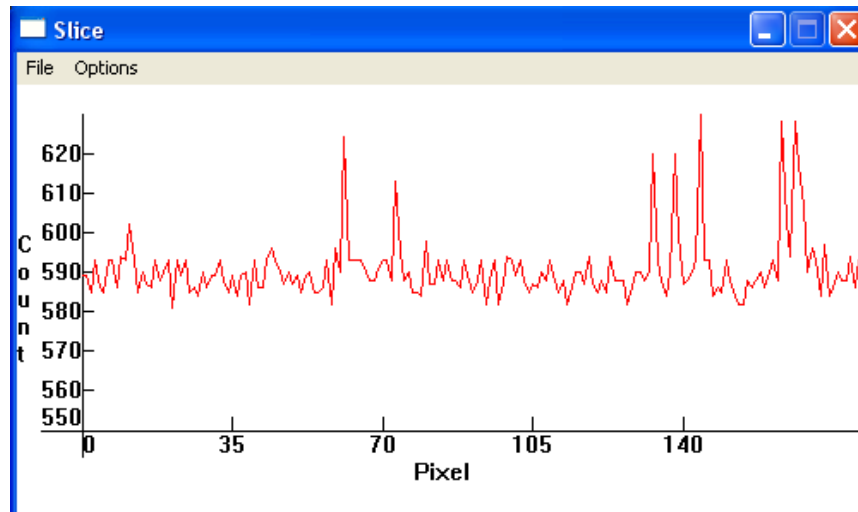


Figura 2. PERFIL DE LA FIGURA 1.

Usando la función SLICE, se realiza un corte en una región de la fotografía en donde no se encuentren líneas espectrales, si no solamente lo considerado como ruido, esto con el fin de obtener una gráfica en donde se pueda estimar el nivel de ruido uniforme en la foto

que queda luego de usar MEDIAN FILTER 0.5. La *figura 3* es un ejemplo de un perfil para estimar el ruido uniforme.



**Figura 3. PERFIL PARA NIVEL DE RUIDO UNIFORME.**

Después de estimar ese nivel de ruido para cada foto luego de observar varios perfiles, se selecciona PROCESSING de la barra de herramientas de IRIS y usando la función SUBSTRACT se introduce ese valor estimado, con lo cual se resta a toda la fotografía ese nivel de intensidad, dejando la imagen aun mas limpia para los análisis que se realizarán posteriormente.

Los valores obtenidos para ruido de estos cortes con SLICE fueron:

REGIÓN DEL ESPECTRO	RUIDO
AZUL	3900
VERDE	6700



ROJO	4570
------	------

Tabla 1. ESPECTRO 25 DE ENERO.

REGIÓN DEL ESPECTRO	RUIDO
VERDE	7025
VERDE - AMARILLO	7070
NARANJA	7040
ROJO	7100

Tabla 2. ESPECTRO 8 DE FEBRERO.

#### ***4.4 OBTENCIÓN DE PERFILES DEL ESPECTRO EN IRIS.***

La obtención de estos perfiles consistió en utilizar una función de la barra de herramientas de IRIS en la que se escriben comandos para la manipulación de las imágenes, en este caso para extraer perfiles sin hacer uso de la función SLICE.

El proceso a seguir para obtener un perfil es tomar la fotografía del espectro de la nebulosa M42 y ver si las líneas están en una posición totalmente vertical; si no lo están se ubica la posición (x,y) del centro de la foto, ya que IRIS muestra la posición de los píxeles en el cuadrante positivo del plano x-y , y usando la función ROTATE se colocan estas coordenadas para rotar la foto los grados que sean necesarios para

dejar las líneas verticales. Ahora con el fin de utilizar más de la información contenida en la imagen (para acentuar la intensidad y percepción de las líneas que se puedan encontrar en el espectro de emisión) se escoge un rango de la coordenada vertical (Y) de la fotografía y se usa el comando 'l\_add Y1 Y2' para sumar los respectivos renglones, donde Y1 y Y2 son los límites que indican el ancho de la franja; seguido a esto se escribe el comando l\_plot para generar la gráfica de intensidad contra píxel. Estos comandos incluyen todo lo largo de la foto en el eje X, como no ocurre al usar la función SLICE que sólo grafica los píxeles que fueron barridos manualmente.

Estos cortes horizontales se realizaron en distintos rangos de Y sobre la fotografía, que se interpretan como cortes del espectro en distintas regiones de la nebulosa. Para el espectro tomado el 25 de enero se realizó este proceso solamente para la franja central luminosa de la fotografía, que tiene un espectro continuo y corresponde con la zona en la cual están ubicadas las estrellas; como éstas muestran un espectro continuo, se produce esa franja de luz a lo largo de la fotografía, como se ve en la *figura 1*.

En el espectro del 8 de febrero se realizaron perfiles de 5 regiones, uno es el realizado en la región del continuo y los otros cuatro se dividen en dos arriba del continuo y dos por debajo; esto con el fin de estudiar el espectro de emisión en el continuo, y en 4 regiones alejadas de él, es

decir alejadas de las estrellas que excitan la nebulosa, con el fin de observar posteriormente posibles variaciones en las condiciones físicas de la nebulosa dependiendo de la distancia a las estrellas centrales.

El complemento para calibrar las longitudes de onda del espectro de la nebulosa es realizar el proceso de obtención de perfiles en los espectros de las lámparas de calibración en las mismas regiones y franjas en las que se realizaron dichos perfiles para la nebulosa.

El punto de rotación para las fotos fue  $x=384$ ,  $y=300$ . Los cortes horizontales se realizaron de esta manera:

<b>L_add</b>	<b>Y1</b>	<b>Y2</b>	<b>FRANJA</b>
<b>25 DE ENERO</b>	320	360	CONTINUO
<b>8 DE FEBRERO</b>	185	205	ABAJO DEL CONTINUO
	250	270	ABAJO DEL CONTINUO
	290	320	CONTINUO
	340	360	ARRIBA DEL CONTINUO
	400	420	ARRIBA DEL CONTINUO

**Tabla 3. FRANJAS PARA TOMA DE PERFILES Y L\_add EN IRIS.**

#### ***4.5 PROCESO DE CALIBRACIÓN DE ESPECTROS.***

Este punto de la experimentación se realizó con el objetivo de obtener gráficas de intensidad contra longitud de onda, del espectro de la nebulosa, para poder comenzar a interpretar y observar lo que se puede obtener de la espectroscopia de la nebulosa M42.

Inicialmente luego del proceso de obtención de cortes y gráficas usando I\_plot en IRIS, se tienen gráficas de intensidad contra píxel, como se mencionó en la parte anterior; ahora estas gráficas proporcionadas por IRIS son llevadas a EXCEL como archivos de tipo .dat, para graficarlas nuevamente en este programa y aprovechar las funciones que posee el graficador de EXCEL.

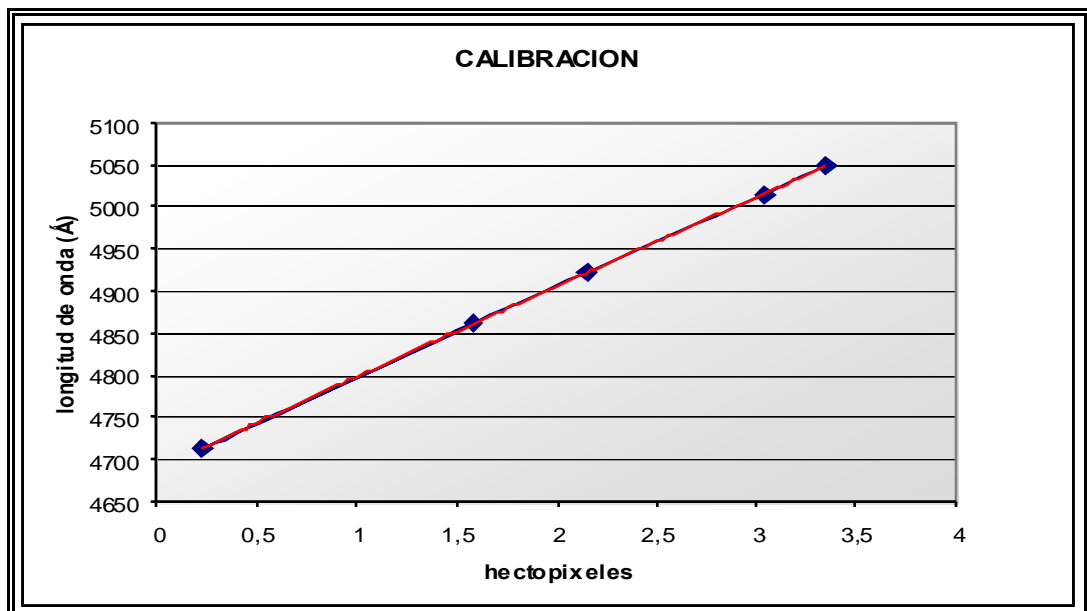
Para el proceso de calibración, se toma uno por uno los perfiles de los espectros de las lámparas de calibración de las distintas regiones. Como en estas gráficas las líneas espectrales se observan como picos con cierta área, se debe encontrar la posición en píxeles del punto en el tope de la curva del pico; esto se logra variando la escala de la gráfica tanto en el eje X como en el eje Y para obtener un valor más exacto.

Luego de obtener esos valores en píxeles de los topes de las curvas para cada región del espectro, en una hoja de cálculo se asocia a cada valor de píxel la longitud de onda de la línea previamente conocida por las referencias, *tabla 4*, y se hace una regresión cuadrática para generar una gráfica de longitud de onda contra píxel, que nos sirve para obtener, usando las funciones del graficador de Excel, la ecuación de la curva que es un polinomio de grado dos. Esta escogencia de la forma cuadrática es con el objetivo de obtener una mejor precisión para posteriores cálculos que se realizarán sobre las gráficas de los espectros de la nebulosa.

Luego de obtener la ecuación de la curva, el paso siguiente consiste en pasar a Excel el archivo .dat que se tiene del perfil en IRIS, del espectro de la nebulosa en el mismo rango de la coordenada Y aplicar la ecuación en la columna de píxeles, para obtener así una columna con las longitudes de onda asociadas a esos píxeles. Con esto ya se puede generar una gráfica de intensidad contra longitud de onda y decir que se tiene las distintas regiones del espectro calibradas para un posterior análisis de dichas gráficas.

La siguiente es una muestra del proceso de calibración realizado para la región verde, usando las fotos tomadas el 8 de febrero y usando las lámparas de Helio e Hidrógeno; la *gráfica c* muestra la regresión de longitud de onda contra hectopíxel, (el hectopíxel es el valor de píxel dividido por 100; y se usaron con el fin de obtener más cifras decimales

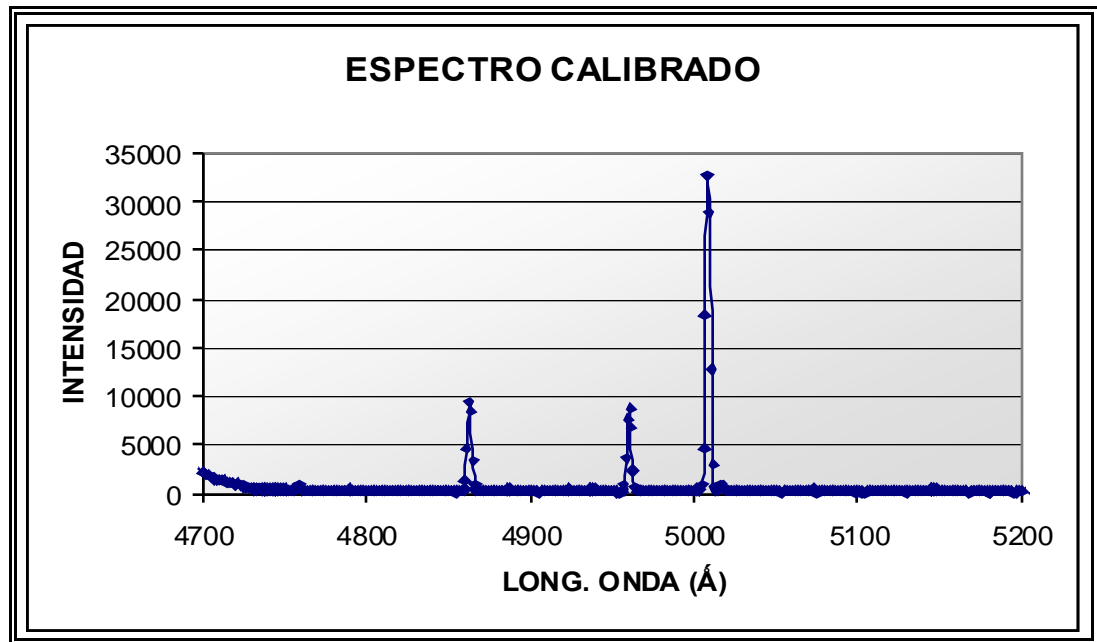
en la ecuación de calibración), donde la línea roja es la curva que mejor se ajusta y dando como resultado la *ecuación 2*, que es un polinomio de grado 2. Esta ecuación es la utilizada para obtener los valores de longitud de onda asociados a todos los píxeles en el perfil del espectro, y lograr de esta manera la *gráfica d* que muestra el perfil de la nebulosa en intensidad contra longitud de onda de la región verde del espectro visible.



Gráfica c

$$y = -0.8789 * X^2 + 110.28 * X + 4688.6 \text{ \AA}$$

Ecuación 2



Gráfica d

La calibración debe realizarse para cada región del espectro, como ya se mencionó, y para cada perfil horizontal de la *tabla 3* realizado en cada foto.

Para las regiones roja y naranja del espectro se realiza el mismo proceso, pero combinando los picos encontrados en las graficas de las fotos de las dos lámparas (Hidrógeno y Neón), para generar la gráfica de longitud de onda contra píxel que proporciona la ecuación.

Como base para la identificación de algunos picos en los perfiles de las lámparas, se utilizó una base de datos del National Institute of Standards and Technology, a la que me referiré como NIST, en donde previamente se identifica una línea o pico conocido de los espectros de las lámparas, como por ejemplo  $H\alpha$  6563 Å y se busca en la base las líneas de emisión que se encuentren en la misma región para el elemento deseado, que en este caso fue Neón, y así se completa la base para realizar la calibración de la región roja del espectro.

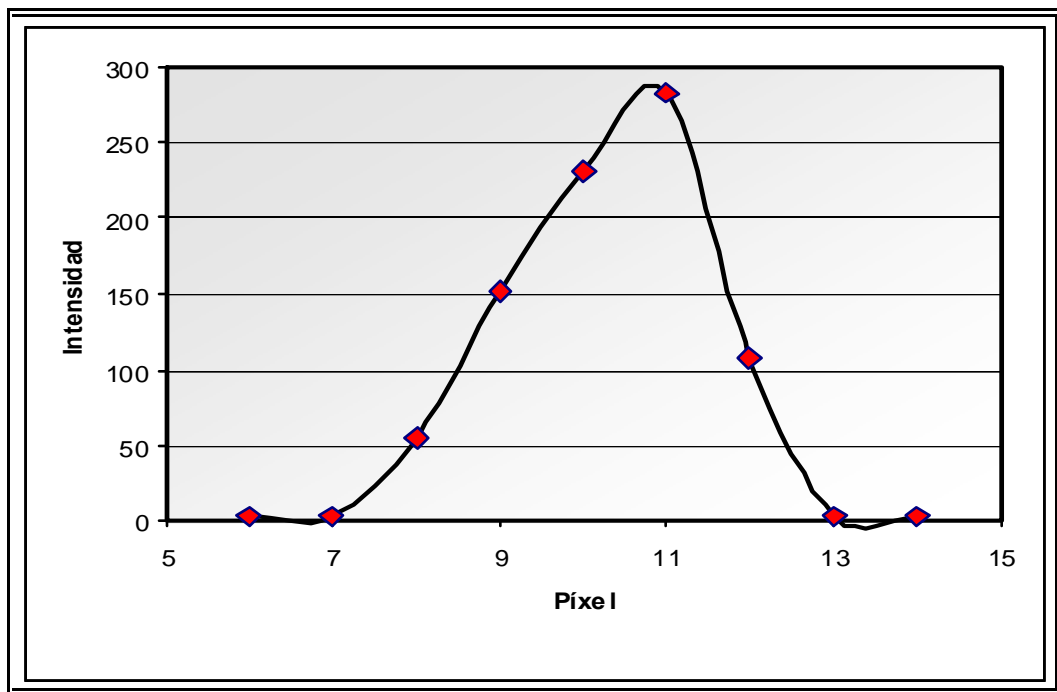
#### ***4.6 IDENTIFICACIÓN DE LÍNEAS DE EMISIÓN.***

Este paso consistió en identificar las líneas de emisión que aparecen en el espectro de la nebulosa, con el fin de saber qué elementos están presentes en la nube gaseosa. Para este objetivo se necesitan las graficas del espectro calibrado y la base de datos que ofrece NIST.

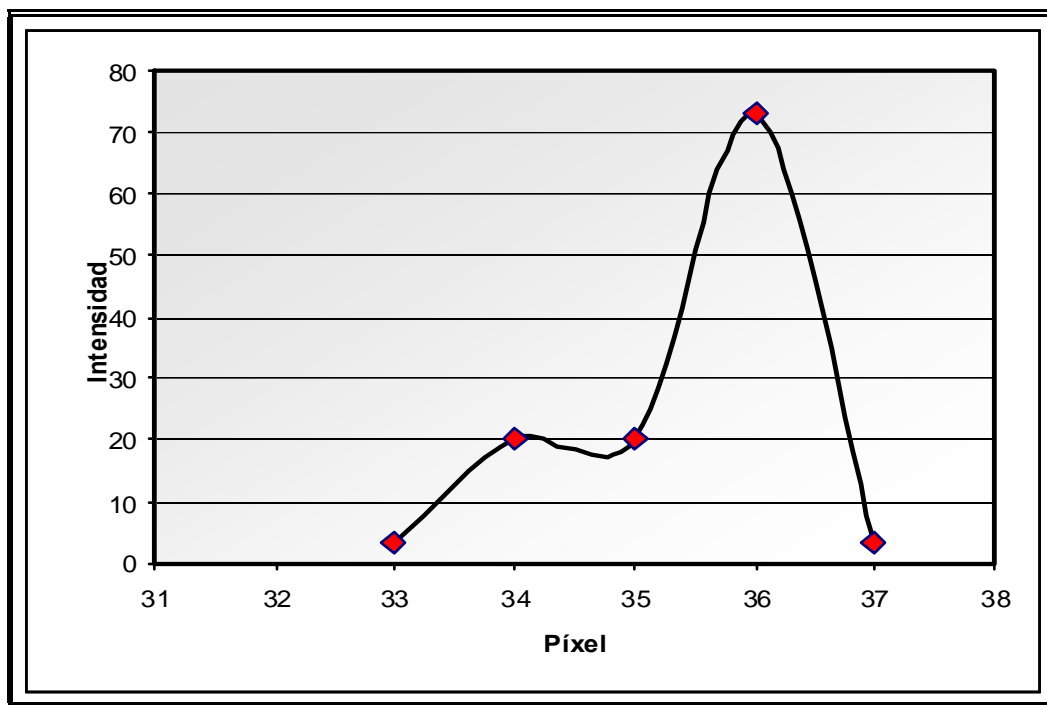
Tomando las gráficas de intensidad contra longitud de onda que ya se tienen del espectro de la nebulosa, se debe empezar por distinguir cuáles son posibles picos que representan líneas de emisión, y cuáles son ruido; para esto se debió mirar qué picos se repiten en las gráficas de una misma región del espectro. También al observar algunas de las líneas ya conocidas como por ejemplo las del hidrogeno, se pudo ver



que los picos de ruido o por píxeles calientes no vienen dados por una serie de puntos que generan una curva suave, ver *grafica e*, sino que son puntos aislados con una intensidad mayor, *grafica f*.



Gráfica e



Gráfica f

Seguido a este proceso de elección de líneas de emisión, se busca en la gráfica cuál es la longitud de onda que posee el tope de la curva, es decir la longitud de onda del píxel mas intenso en la curva o pico, de las que se catalogaron como posibles líneas de emisión. Para esto es que se realizó el proceso de calibración, con el fin de poder encontrar qué elemento está emitiendo fotones y con qué grado de ionización.

Ahora al tener el valor de longitud de onda del pico seleccionado, se realizó la búsqueda en NIST de todos los posibles elementos que emitan esa longitud de onda al realizar la transición entre sus niveles energéticos; para esta búsqueda se dio un rango de  $\pm 3 \text{ \AA}$  sobre la longitud de onda, con el fin de cubrir el error sistemático en la

calibración, y a la vez permite que no sean incluidos demasiados elementos en la lista de búsqueda.

Al obtener la lista de posibles elementos proporcionada por NIST luego de la búsqueda, se deben descartar gran cantidad de elementos químicos que no se encuentran en las nebulosas difusas; esto se hace bajo una previa revisión de la literatura, las referencias sobre las nebulosas difusas, y espectros calibrados tomados de las referencias. Las componentes de estas regiones son principalmente Oxígeno, Hidrógeno, Hierro, Azufre, Cloro, Carbono, Nitrógeno, Helio y Neón. Finalmente se escoge el elemento químico, y luego de repetir el proceso para cada pico, quedan los elementos que están produciendo las líneas de emisión que se observan en las fotografías del espectro de la M42.

#### ***4.7 ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURAS.***

Como se mencionó anteriormente, encontrar las temperaturas en las nebulosas difusas, como la M42, es posible mediante el análisis de su espectro. Para esto son de gran importancia las líneas prohibidas que en él se encuentran, y la intensidad que estas líneas muestran.

La relación existente entre la intensidad de las líneas y la temperatura viene dada por las siguientes ecuaciones <sup>1</sup>:

1. Usando la intensidad de las líneas de [NII]:

$$\frac{I_{6548} + I_{6585}}{I_{5755}} = \left[ \frac{8.5}{1 + \frac{0.0029Ne}{T^{0.5}}} \right] * 10^{10800/T} \quad \text{Ecuación 3}$$

2. Usando la intensidad de las líneas de [OIII]:

$$\frac{I_{4959} + I_{5007}}{I_{4363}} = \left[ \frac{7.15}{1 + \frac{0.00028Ne}{T^{0.5}}} \right] * 10^{14300/T} \quad \text{Ecuación 4}$$

Se puede ahora hacer una combinación de las ecuaciones 3 y 4 con el fin de eliminar el número de electrones, que es desconocido inicialmente.

---

<sup>1</sup> Recuperado el 15 de marzo en <http://mais-ccd-spectroscopy.com/Planetary%20Nebula.htm>

El proceso de combinación para obtener una ecuación que dependa sólo de las intensidades consiste en hacer:

- Para simplificar las posteriores ecuaciones se utilizan las siguientes abreviaciones :

$$\beta = \left[ \frac{I_{4959} + I_{5007}}{I_{4363}} \right]$$

$$\gamma = \left[ \frac{I_{6584} + I_{6585}}{I_{5755}} \right]$$

- a. Despejar  $N_e$  de ambas ecuaciones e igualar:

$$N_e = \left[ \frac{\left( \frac{8.5}{\gamma} \right) * 10^{10800/T} - 1}{0.0029} \right] * T^{0.5}$$

$$N_e = \left[ \frac{\left( \frac{7.15}{\beta} \right) * 10^{14300/T} - 1}{0.00028} \right] * T^{0.5}$$

$$\left[ \frac{\left( \frac{8.5}{\gamma} \right) * 10^{10800/T} - 1}{0.0029} \right] * T^{0.5} = \left[ \frac{\left( \frac{7.15}{\beta} \right) * 10^{14300/T} - 1}{0.00028} \right] * T^{0.5}$$

**Ecuación 5**

b. Ordenar la ecuación 5 para reagrupar términos :

$$\frac{0.00028}{0.0029} \left[ \left( \frac{8.5}{\gamma} \right) * 10^{10800/T} - 1 \right] = \left( \frac{7.15}{\beta} \right) * 10^{14300/T} - 1$$

$$0.096 \left( \frac{8.5}{\gamma} \right) * 10^{10800/T} - 0.096 + 1 = \left( \frac{7.15}{\beta} \right) * 10^{14300/T}$$

$$\beta * 0.096 * \left( \frac{8.5}{\gamma} \right) * 10^{10800/T} + 0.096 * \beta + \beta = 7.15 * 10^{14300/T}$$

$$\beta * 0.82 * 10^{10800/T} + 0.096 * \beta * \gamma + \gamma * \beta = 7.15 * 10^{14300/T} * \gamma$$

$$\beta * 0.82 * 10^{10800/T} + 0.9 * \beta * \gamma = 7.15 * 10^{14300/T} * \gamma$$

**Ecuación 6**

c. Para obtener finalmente la ecuación deseada al ordenar la ecuación 6:

$$\gamma * \beta * 0.9 = 7.15 * 10^{14300/T} * \gamma - 0.82 * 10^{10800/T} * \beta$$

**Ecuación 7**

La *ecuación 7* es la que permite, como se mencionó anteriormente, encontrar las temperaturas en la nebulosa, esto mediante un proceso iterativo, ya que no se puede hacer un despeje de la incógnita T; ese proceso se realizó en una hoja de cálculo de Excel, luego de obtener las intensidades de las líneas requeridas para este fin.

#### ***4.8 PERFILES PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES.***

Como parte de los objetivos del proyecto, esta calcular las intensidades de las líneas de emisión que presente el espectro de la M42, que puedan ser útiles para obtener información sobre las condiciones físicas de la nebulosa.

Luego de la previa revisión bibliográfica se encontró que se puede obtener información sobre la nebulosa utilizando generalmente razones de intensidades de líneas de emisión producidas por elementos como el Hidrógeno y de las líneas prohibidas del Oxígeno y Nitrógeno.

Para encontrar las intensidades de las líneas de interés no se puede usar las gráficas de intensidad contra píxel o contra longitud de onda que se obtuvieron en la parte 3.4 de la experimentación. Esto es debido a que al obtener los perfiles del espectro usando la función `I_add` de Iris, la intensidad que allí se muestra esta multiplicada por un factor que coloca la línea más intensa en un valor máximo de 32767 en el eje de intensidad de la grafica obtenida del `I_plot`, y varía la intensidad real captada por la cámara.

Por esta razón la forma de obtener las intensidades de la líneas consistió en tomar la fotografía en IRIS con los filtros aplicados y sacar perfiles de estas líneas por separado usando la función `SLICE` y `I_plot`, los perfiles se sacaron para las 5 regiones de interés que se manejaron en el espectro del 8 de febrero, para obtener los valores de intensidad dependiendo de la cercanía a la fuente de radiación.

La intensidad de las líneas de Hidrógeno no fue calculada en la región donde se encuentra el continuo, esto se debe a que en esta región es donde están las estrellas que iluminan la nube y por consiguiente en esta franja se presentan también las líneas de absorción de Hidrógeno por parte de la estrellas, ante lo cual la cámara CCD tiene que captar más fotones para rellenar inicialmente la franja hueca que deja la línea de absorción, y luego sí seguir captando fotones para generar la línea de emisión del Hidrógeno presente en el gas, lo que hace variar la



intensidad que genera la línea de emisión de hidrógeno producida solamente por el gas.

Estos perfiles provenientes de hacer I\_plot se guardan como archivos .dat para ser llevados y graficados en Excel y hacer un mejor análisis posteriormente.

#### ***4.9 CÁLCULO DE INTENSIDADES.***

Usando las gráficas generadas en Excel, primero se identificó la intensidad que poseía el ruido aún restante en el perfil sacado de la fotografía. Con este valor promedio ya identificado lo que se hizo fue tomar cada punto sobre la curva que representa la línea de emisión y obtener su valor de intensidad, al que se le restó el valor promedio de ruido restante.

Estos valores resultantes se sumaron para obtener la intensidad total que se capta de la línea de emisión, y repitiendo este proceso para todos los perfiles que se sacaron, se obtuvieron las intensidades de las líneas de Hidrógeno ( $H\alpha$ ,  $H\beta$  y  $H\gamma$ ), que son útiles para el cálculo del decremento de Balmer, de las líneas prohibidas de O III (4959 Å y 5007

Å), y las de N II (6548 Å y 6585 Å) que se utilizan para la ecuación de temperaturas.

Adicionalmente a las intensidades ya calculadas de las líneas de [O III] y [N II], es necesario encontrar las intensidades de dos líneas más para poder completar las variables que necesita la ecuación de temperatura. Estas líneas son 4363 Å del [O III] y 5755 Å del [N II], y pero que no son visibles en nuestras fotografías. Por referencias se encontró que estas líneas son muy débiles comparadas con los pares de líneas de [O III] y [N II] ya mencionados, y también más débiles que otras líneas del espectro. Como solución a este problema que impedía hacer uso de la ecuación de temperatura, se decidió dar un valor máximo que fuese una cota superior para la intensidad de las dos líneas. Entonces para obtener esa cota se sacó un perfil, con SLICE y I\_plot, de la parte del espectro donde se deberían haber visto estas líneas, específicamente se realizaron en la parte verde a la derecha de la línea H $\gamma$ , para la línea de [O III], y en la parte naranja a la izquierda de la línea de Helio, para la línea de [N II].

Los perfiles se sacaron en las cinco regiones de interés, con el fin de conseguir el valor de la cota superior que se necesitaba para estas líneas, para hacer uso de la ecuación de temperatura y continuar trabajando en los objetivos del proyecto.

#### ***4.10 CALCULO DE LA DENSIDAD NUMÉRICA DE ELECTRONES.***

Encontrar la densidad de electrones presentes en la nebulosa fue posible luego de haber realizado el proceso iterativo con la *ecuación 7* para encontrar los valores de temperatura presentes en la nebulosa.

Teniendo un valor de temperatura, este se reemplaza en la *ecuación 3* o *ecuación 4*, que relacionan intensidades con temperaturas y densidad de electrones, y se despeja de allí la variable  $N_e$ . Los valores aproximados para este  $N_e$  son del orden de  $10^{10} \text{ m}^{-3}$ .

#### ***4.11 DECREMENTO DE BALMER.***

Como ya se mencionó al inicio del texto, el *Decremento de Balmer* consiste en la razón de intensidades de las líneas espectrales de la serie de Balmer del hidrógeno, y que el valor observado de estas razones puede variar del valor teórico debido a la presencia de polvo.

Las intensidades de las líneas de emisión del hidrógeno fueron calculadas según la sección 3.9 del proceso de experimentación; con los valores obtenidos se calcularon las razones de intensidades entre  $H\alpha$  y  $H\beta$ , y entre  $H\beta$  y  $H\gamma$ . Los valores estimados para estas razones son 2.87 y 0.466 respectivamente (capítulo 2) y son utilizados junto con los valores experimentales para encontrar el coeficiente de absorción del

polvo o profundidad óptica del polvo  $\tau_D$ , a la longitud de onda requerida, y que es aproximadamente proporcional al inverso de la longitud de onda.

En el caso de la razón entre  $H\alpha$  y  $H\beta$ , el coeficiente de absorción para  $H\beta$  es  $\tau_D(H\beta)$  y para  $H\alpha$  es  $\tau_D(H\alpha) = 0.65\tau_D(H\beta)$ . De modo que la ecuación que relaciona todos estos términos para polvo que se encuentre entre nosotros y la nube pasa de ser <sup>2</sup>:

$$\frac{I(H\alpha)}{I(H\beta)} = \left[ \frac{I(H\alpha)}{I(H\beta)} \right]_0 \frac{e^{-\tau_D(H\alpha)}}{e^{-\tau_D(H\beta)}}$$

Siendo el sufijo cero el que indica el valor teórico, a ser finalmente:

$$\frac{I(H\alpha)}{I(H\beta)} = \left[ \frac{I(H\alpha)}{I(H\beta)} \right]_0 e^{0.35\tau_D(H\beta)}$$

**Ecuación 8**

De la *ecuación 8* se obtuvo el valor para  $\tau_D(H\beta)$ , y usando este valor se obtiene  $\tau_D(H\alpha)$ .

---

<sup>2</sup> Emerson, D. (1996) Interpreting Astronomical Spectra. p.212.

## 5. RESULTADOS y ANÁLISIS.

### *5.1 PROCESAMIENTO DE FOTOGRAFÍAS DE ESPECTROS.*

Siguiendo el procedimiento descrito en la parte de experimentación, que hace mención al procesamiento de las fotografías de los espectros, es como se logra obtener una mejor nitidez en las fotografías y hacer más visibles, claras y limpias las líneas de emisión que se captan de la nebulosa.

La *figura 4* es de la parte azul del espectro visible, donde podemos observar una línea vertical hacia el centro de la foto que sobresale por su intensidad a pesar de la cantidad de ruido que esta fotografía presenta, también se alcanza a distinguir tenuemente una línea hacia la izquierda de esta línea central, pero que se ve disminuida por el ruido presente.

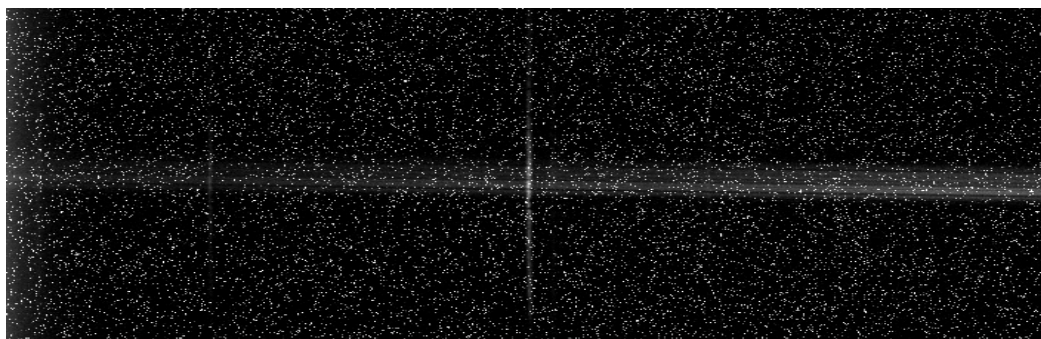


Figura 4. FOTOGRAFÍA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 25 DE ENERO.

El resultado de la aplicación de MEDIAN FILTER y de restar el valor de ruido uniforme de la *tabla 1* a la *figura 4* como se expuso en la experimentación, es la *figura 5*. Donde se distinguen más claramente las dos líneas de emisión captadas de M42, la franja del continuo y se pueden ver líneas más tenues que en la *figura 4* no eran distinguibles.

Las líneas más intensas que se logran percibir en la *figura 5* son de Hidrógeno, la primera de izquierda a derecha es H  $\zeta$  (3889 Å), luego viene H  $\epsilon$  (3970 Å), y la línea vertical central (la más luminosa) es H  $\delta$  (4101 Å).

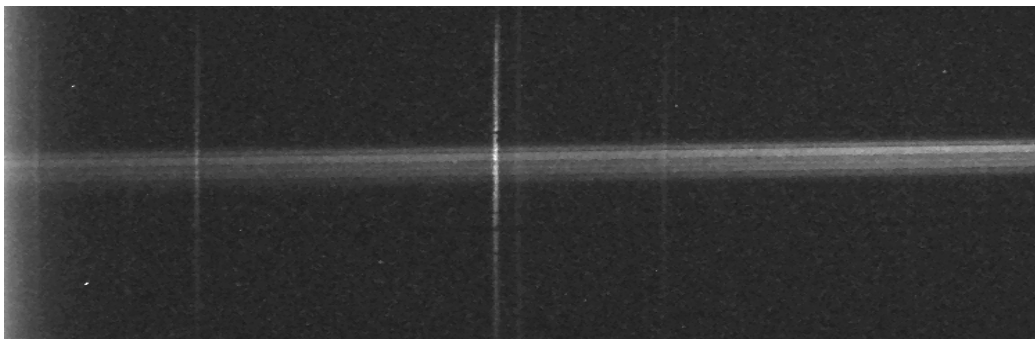


Figura 5. FOTOGRAFÍA PROCESADA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 25 DE ENERO.

La *figura 6* y la *figura 7* forman otro resultado del procesamiento de fotografías, estas son de la parte roja del espectro de M42. Aunque en la foto original se observan claramente las líneas de emisión y la franja del continuo, es igualmente necesario aplicar el MEDIAN FILTER y restar el

ruido uniforme según la *tabla 1*, para dejar todas las fotografías en una misma condición y acentuar las líneas para realizar posteriores cálculos tales como la calibración y el cálculo de intensidades.

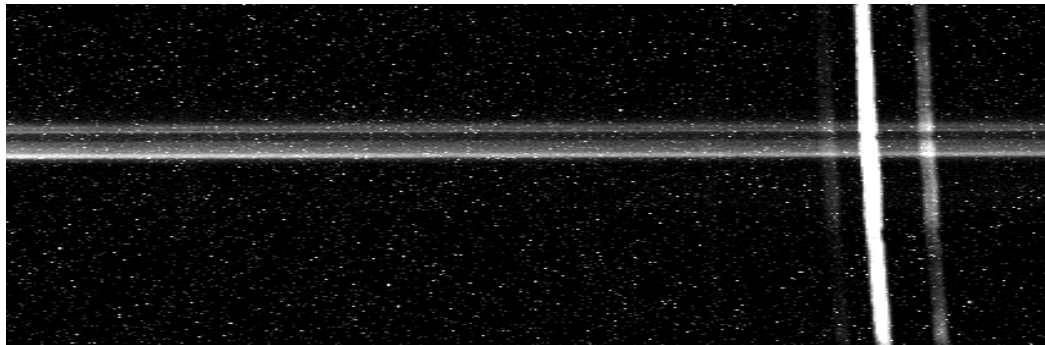


Figura 6. FOTOGRAFÍA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 8 DE FEBRERO.

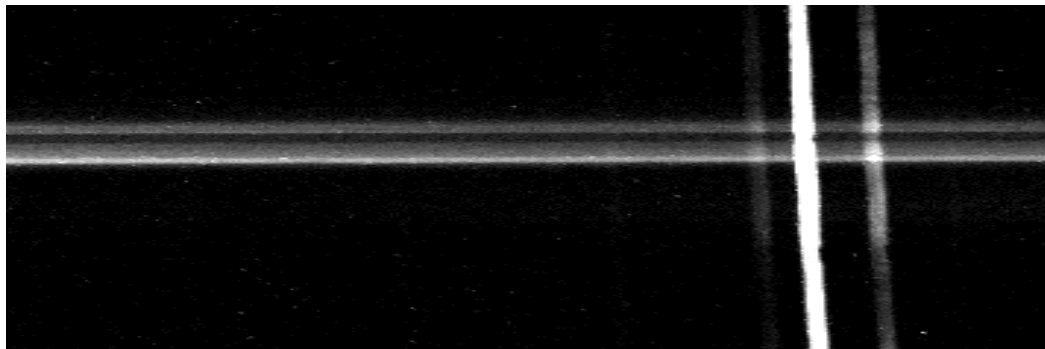


Figura 7. FOTOGRAFÍA PROCESADA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 8 DE FEBRERO.

## ***5.2 PROCESO DE CALIBRACIÓN.***

La *figura 8* muestra la región verde del espectro visible captado de M42; las dos líneas de emisión que se observan en esta foto ya procesada fueron identificadas luego del proceso de calibración descrito en la sección 4.3, pero usando la *figura 9*.

La foto de la *figura 9* fue tomada justo después de fotografiar la nebulosa en la misma posición de la rejilla del espectroscopio que era de 11 grados, de esta foto se identifican las líneas  $H\beta$  y  $H\gamma$ , siendo  $H\beta$  la de mayor intensidad. La relación que se usa para la calibración entre píxel y longitud de onda se muestra en la *tabla 4*, y con esta se puede obtener posteriormente la ecuación de calibración correspondiente a esta parte del espectro en a la franja del continuo de las estrellas.

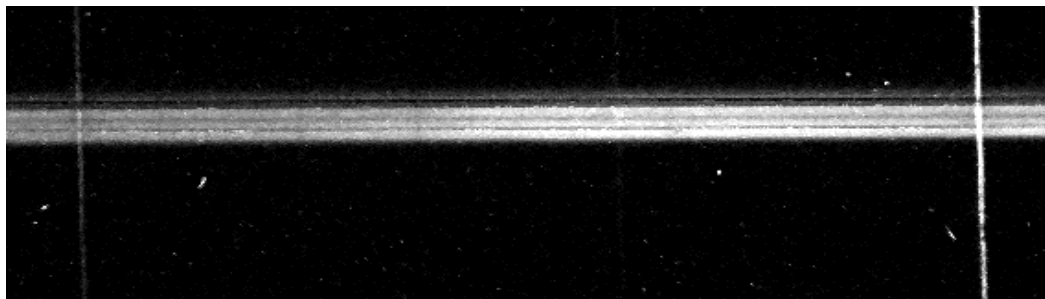


Figura 8. FOTOGRAFÍA PROCESADA DE LA NEBULOSA M42 TOMADA EL 8 DE FEBRERO.

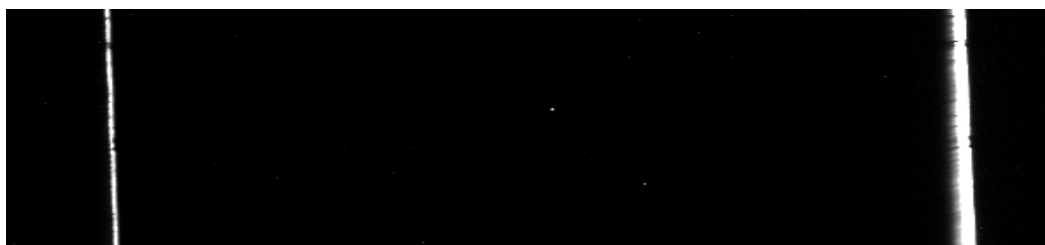


Figura 9. ESPECTRO DE LA LÁMPARA DE HIDRÓGENO TOMADA EL 8 DE FEBRERO.

LÍNEA	PÍXEL	HECTOPÍXEL	LONGITUD DE ONDA(Å)
-------	-------	------------	---------------------



H $\gamma$	177.4	1.774	4340.49
H $\beta$	666.85	6.6685	4861.36

Tabla 4. RELACIÓN ENTRE LONGITUD DE ONDA Y PÍXEL.

$$y = 1.0642 * X + 4151.7 \text{ \AA}$$

### 5.3 ESPECTROS CALIBRADOS.

Luego de seguir los pasos mencionados en el proceso de calibración para la obtención de las graficas de intensidad contra longitud de onda, descritos en la sección 4.5, se pudo obtener el espectro total calibrado de la nebulosa M42, para las muestras del 25 de enero y 8 de febrero.

Tomando cada región del espectro ya calibrada, *grafica d*, lo que se hizo fue unir esos espectros individuales para formar el total y tener una mejor perspectiva del espectro que se capta de M42 para compararlo con los espectros que de ella se tienen en las referencias bibliográficas, y poder analizarlo mejor.

Un aspecto importante para la obtención de los espectros totales, es que se debieron eliminar de cada espectro individual ciertas longitudes de onda que se encontraban al comienzo de ese espectro individual, ya

que en esa parte, extrema izquierda del espectro, siempre se ubicaba un alto nivel de ruido que no era posible eliminar sin que se perdiera información valiosa en el resto de la fotografía.

Este fenómeno se puede observar mejor en la *figura 1*, y en el espectro total del 25 de enero, *figura 10*, en la región azul comenzando en los 3850 Å donde se nota la curva que se forma en ese sector debido a este fenómeno, pero que no se eliminó para la formación de este espectro total ya que se alcanza a distinguir en esa parte una línea de emisión del Hidrógeno (3889 Å).

A continuación se muestran los espectros totales obtenidos en este trabajo, cabe mencionar que en el espectro final del 25 de enero hace falta la región naranja, que no fue fotografiada, y en los espectros de la muestra del 8 de febrero falta la región azul del espectro.

El espectro final del 25 de febrero es de la franja del continuo, por tal motivo este no se encuentra justo en cero intensidad, si no un poco más arriba, ya que en la franja del continuo se encuentra una mayor intensidad debido a la presencia de las estrellas y esto hace que la intensidad en esa franja no sea cero. Entre los 3880 Å y los 4300 Å está la región azul, y como se puede observar, *figura 10*, se encuentra elevada con respecto al resto de las regiones en el espectro, esto es debido a que esta región fue fotografiada con un tiempo de exposición

mayor, haciendo que la intensidad e los píxeles aumente y no sea pareja al resto de las fotografías.

La *figura 11* muestra también el espectro sacado de la franja del continuo, pero de la muestra del 8 de febrero, de nuevo se observa que los puntos de la curva no están en cero de intensidad o muy cercanos al cero, y esto es por el mismo fenómeno causado por el continuo de emisión producido por las estrellas que iluminan la nube, contrario a los espectros sacados de las otras 4 franjas en donde los puntos están sobre el cero de intensidad o con valores muy bajos.

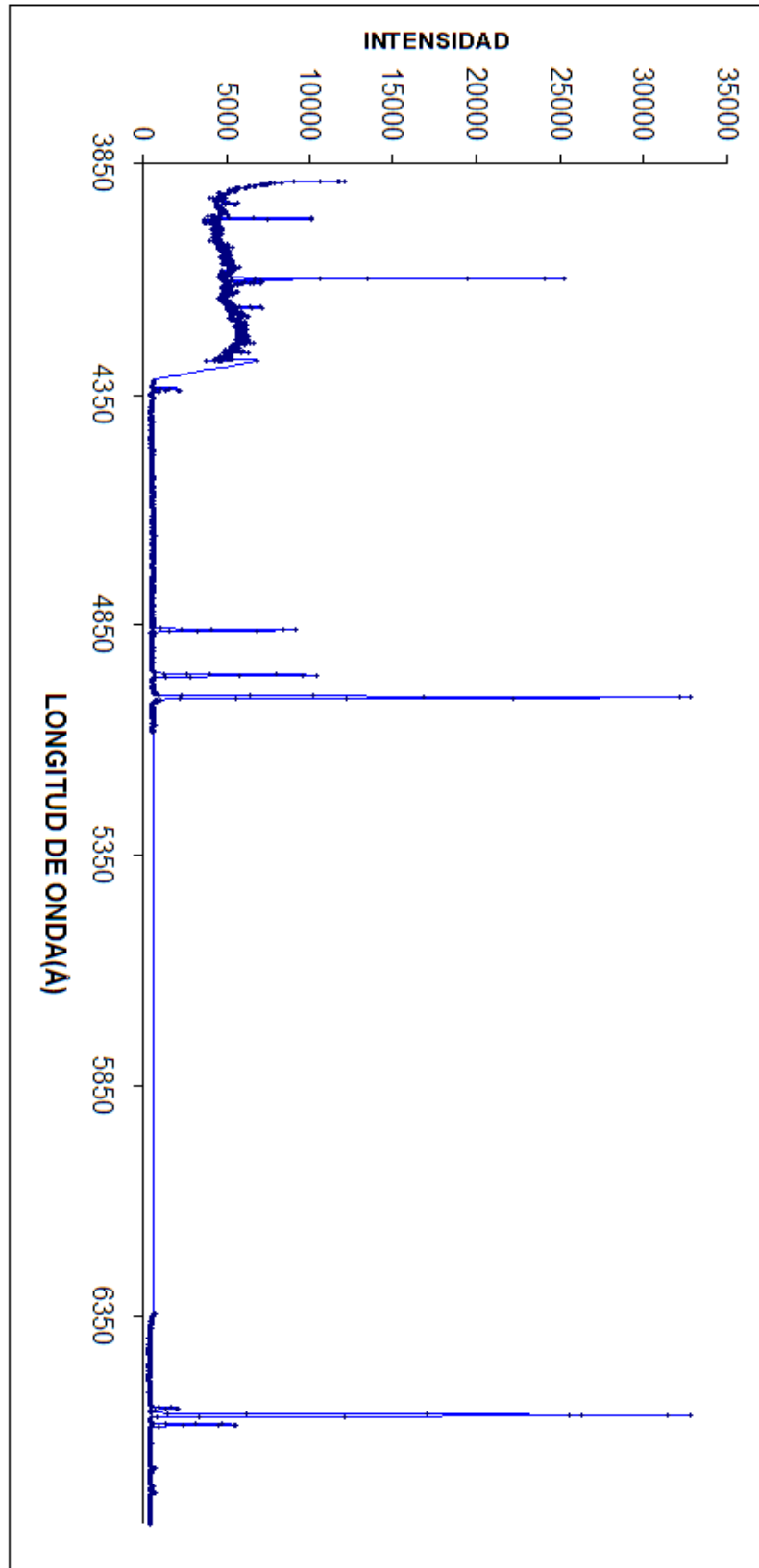


Figura 10. ESPECTRO CALIBRADO DE LA M42, MUESTRA DEL 25 ENERO.

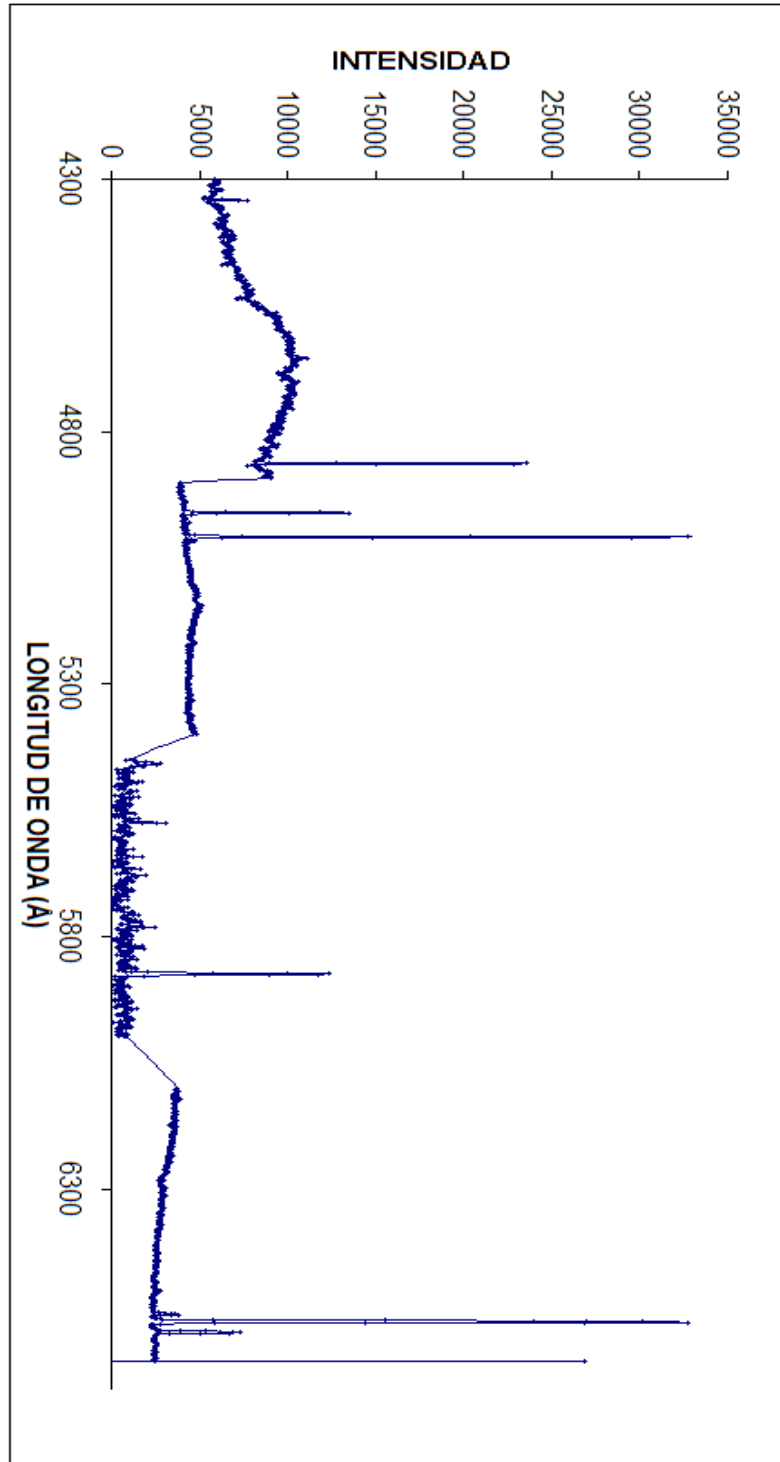


Figura 11. ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA DEL CONTINUO .

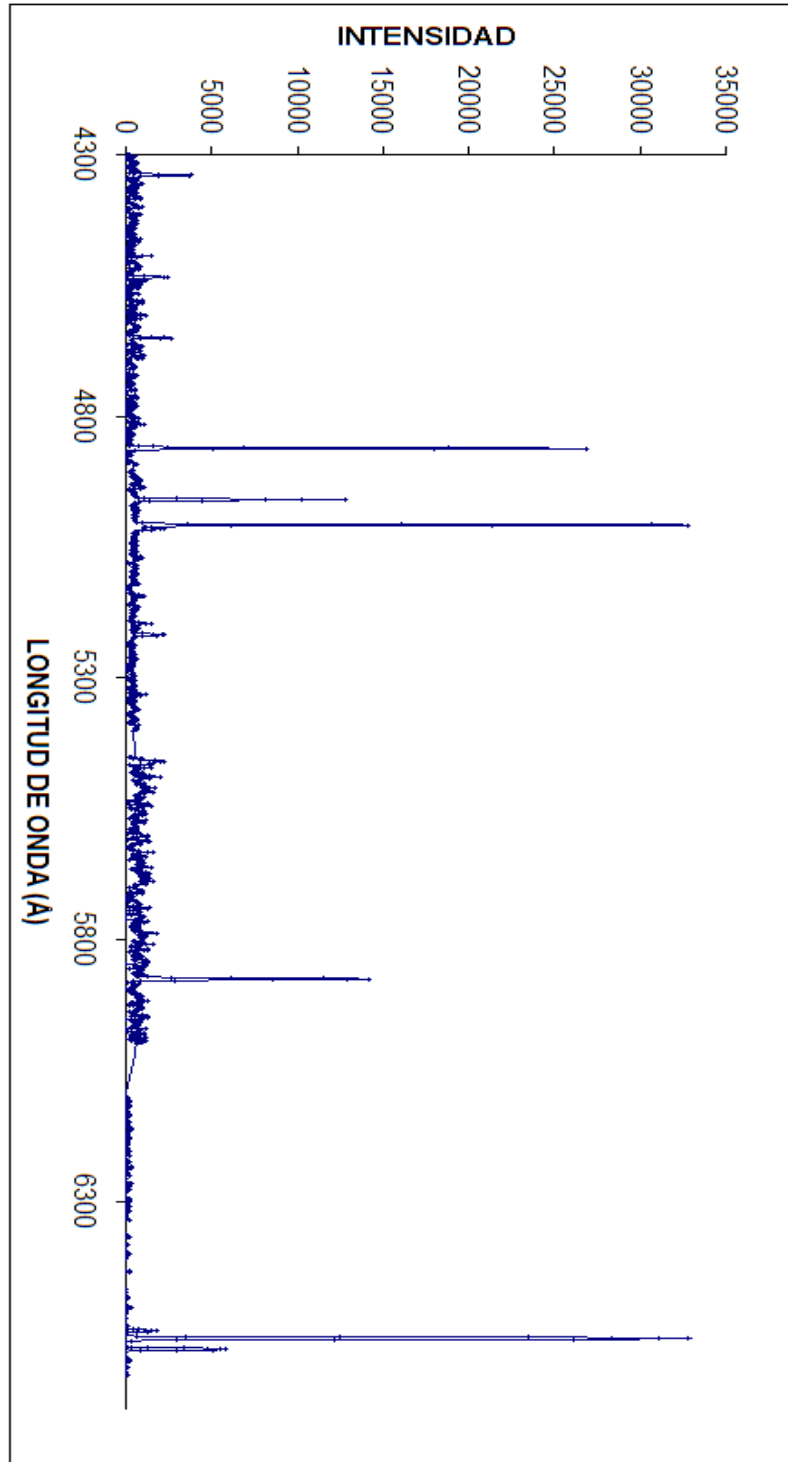


Figura 12. ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA 185-205.

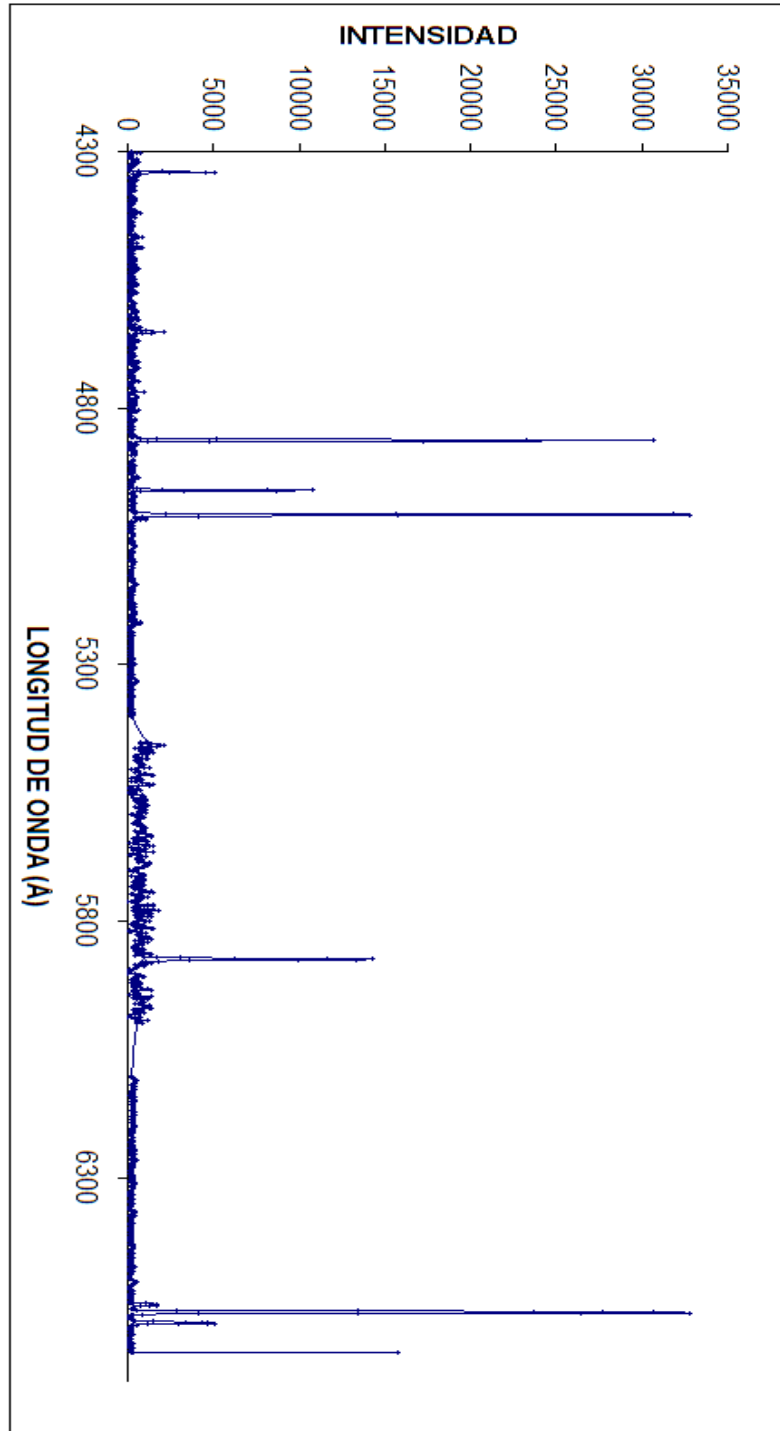


Figura 13. ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA 250-270.

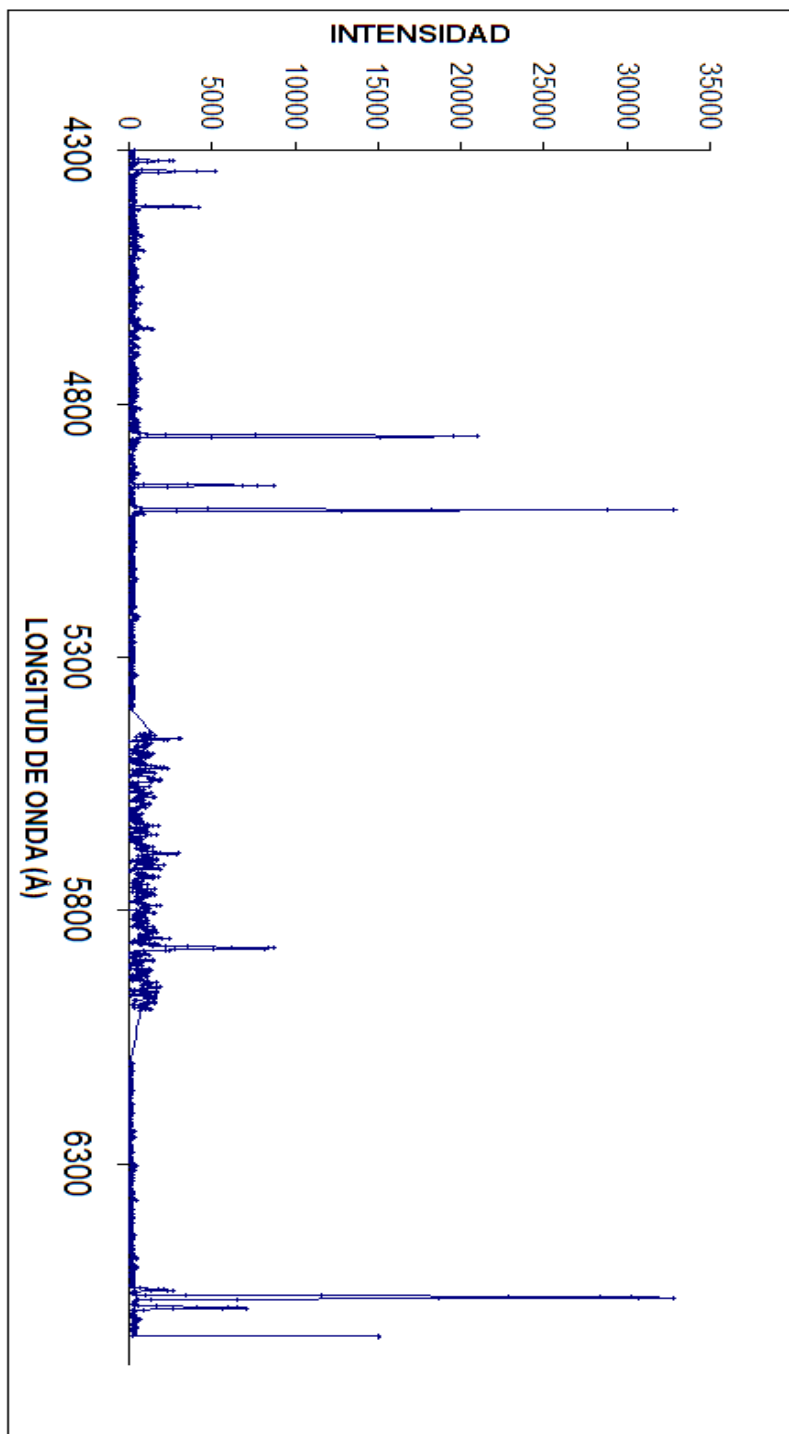


Figura 14. ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA 340-360.



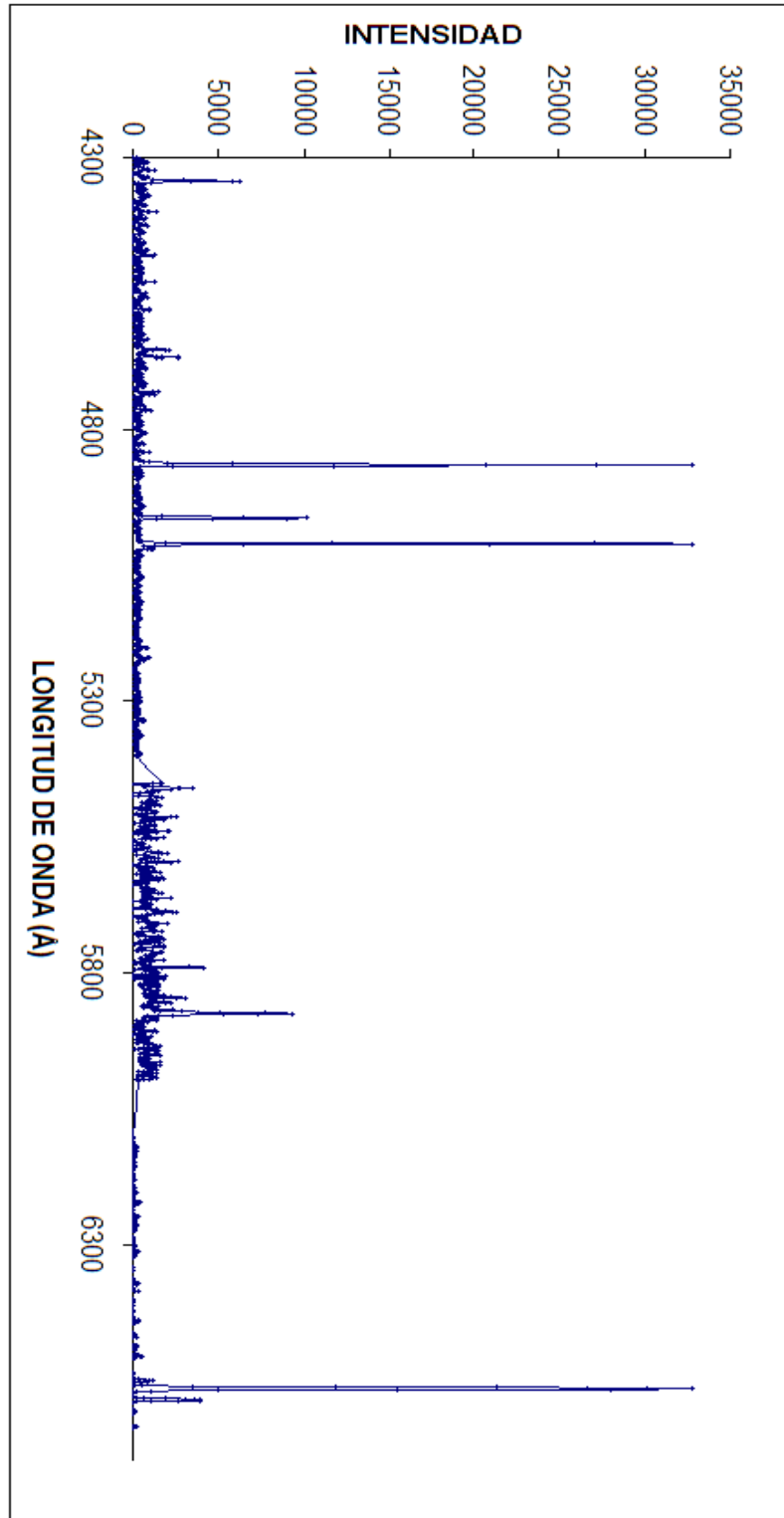


Figura 15. ESPECTRO CALIBRADO M42, MUESTRA DEL 8 FEBRERO. FRANJA 400-420.

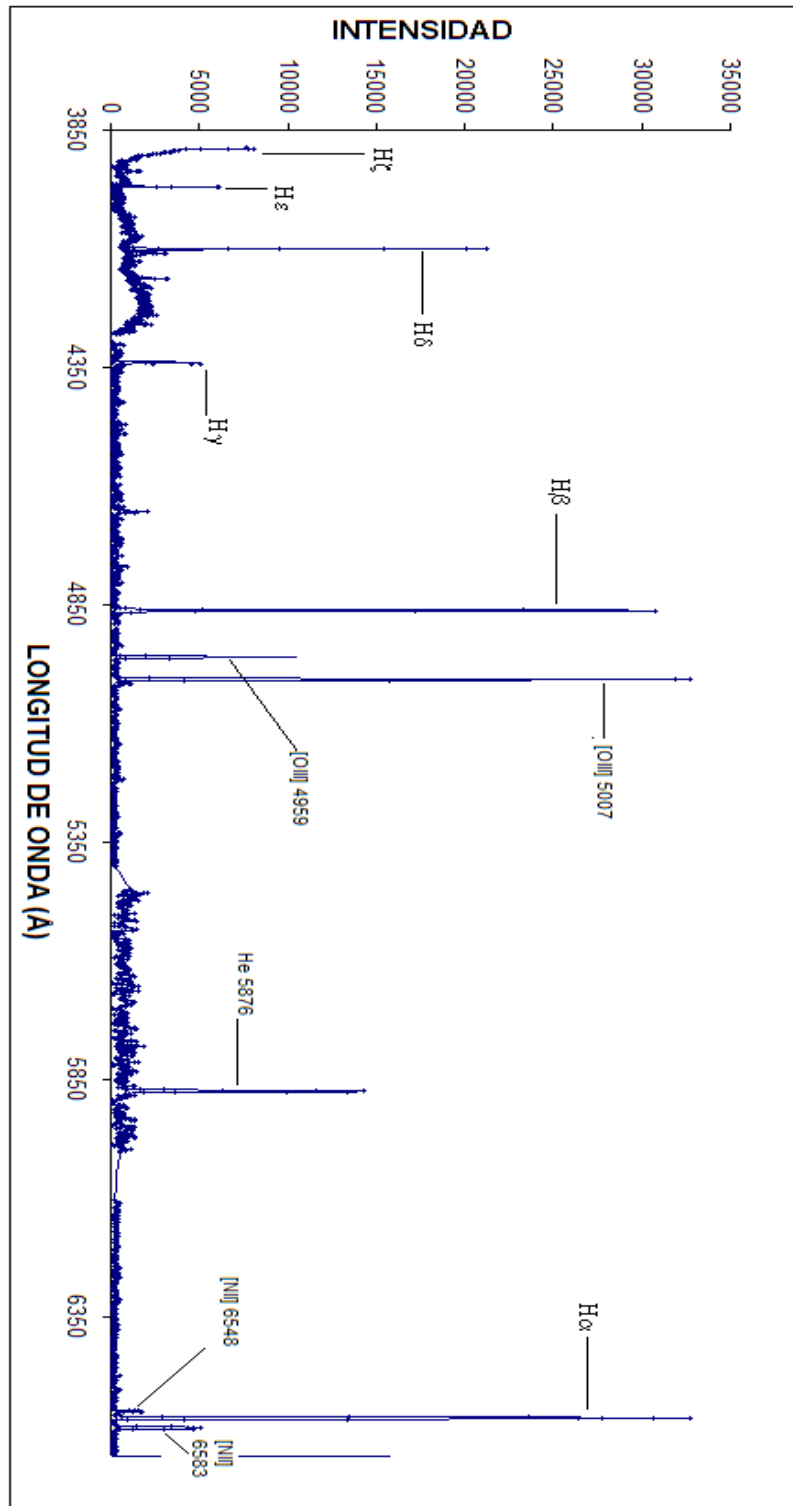


Figura 16. ESPECTRO M42.

La *figura 16* es un espectro que combina la muestra del 8 de febrero, con la región azul del espectro de la muestra del 25 de enero, esto con el fin de dar un ejemplo del espectro total visible junto con la señalización de algunas líneas de emisión identificadas. La intensidad de los píxeles de la región azul fue disminuida en 4000 para emparejarla con el resto de los puntos y mostrar una curva más suave.

Debido a que estos espectros totales son la unión de los espectros individuales calibrados por regiones, algunas líneas de emisión muestran valores de intensidades que no guardan la proporción esperada o dictada para las líneas de emisión; por ejemplo la intensidad de  $H\beta$  es parecida a la de  $[O III] 5007 \text{ \AA}$ , o la intensidad de  $H\delta$  mucho mayor que la de  $H\gamma$ . Lo primero ocurre por que la línea  $H\beta$  fue procesada en la fotografía de 12 grados y la de  $[O III]$  en la de 12-13 grados, y dado que para obtener el perfil y la calibración por regiones del espectro, se uso la función `I_add` la cual multiplicaba la intensidad más alta por un factor desconocido, el resultado es que la intensidad de  $H\beta$  es la más alta para su espectro individual y  $[O III]$  hace lo mismo en su región individual, con lo cual se produce el efecto descrito. Para el caso de  $H\delta$  y  $H\gamma$  la diferencia es debida al tiempo de exposición para la fotografía de la región del espectro en donde aparece la línea  $H\delta$ .

#### 5.4 ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES EN M42.

La *tabla 5* muestra la lista de elementos químicos que fueron identificados al obtener la longitud de onda de los picos - líneas presentes en los espectros calibrados de M42 (sección 5.3), que previamente fueron clasificadas como líneas de emisión siguiendo los pasos experimentales descritos en la sección 4.6.

ELEMENTO	LONGITUD DE ONDA (Å)		ERROR %
	EXPERIMENTAL	NIST	
H	3889,01	3889,04	0,0077
[S II]	3937,07	3935,69	0,035
H	3970,01	3970,07	0,0015
H	4101,01	4101,76	0,0182
[Fe III]	4163,67	4164,7	0,0247
H	4341,8	4340,39	0,0324
H	4861,28	4861,36	0,0016
[O III]	4958,79	4958,91	0,0024
[O III]	5007,47	5006,84	0,0125
[N I]	5200,7	5199,83	0,0167
[Cl III]	5516,34	5517,66	0,029
[O I]	5577,6	5577,34	0,0046
He	5875,78	5875,96	0,003
[O I]	6302,63	6300,3	0,0369
[N II]	6548,74	6548,05	0,0105

H	6563,85	6562,85	0,0152
[N II]	6584,54	6583,45	0,0165
[S II]	6679,3	6681,8	0,0375

**Tabla 5. LÍNEAS DE EMISIÓN IDENTIFICADAS EN LAM42.**

El error que aparece en la *tabla 5* fue calculado usando la siguiente ecuación:

$$Error = \left| \frac{ValorNIST - ValorExperimental}{ValorNIST} \right| * 100\%$$

**Ecuación 8.**

Estos valores de error experimental se pueden considerar como pequeños, lo que nos indica que se realizó un buen proceso de calibración, y también se puede asegurar que los picos que se consideraron como líneas de emisión son en realidad líneas emitidas por los elementos químicos que componen la nube gaseosa.

Los elementos encontrados son los más comunes en las nebulosas difusas de emisión, y se observa que los picos identificados en este proceso coinciden con aquellos que aparecen en los espectros que se tienen para este tipo de nebulosas en las referencias bibliográficas.

Se encontraron en los espectros calibrados las principales líneas de emisión provenientes del Hidrógeno que pertenecen a la parte visible del espectro, desde  $H\alpha$  (6563 Å) hasta  $H\zeta$  (3889 Å), indicándonos que es el elemento mas abundante en la nube. También se identificaron líneas prohibidas de Oxígeno, de Nitrógeno, Cloro, Hierro y Azufre, las cuales son importantes para poder identificar a la nebulosa M42 como una nebulosa de baja densidad, tal como se mencionó en el capítulo 1 sobre regiones H II, por que de no ser así estas líneas no se presentarían.

### ***5.5 INTENSIDADES DE LAS LÍNEAS DE EMISIÓN.***

Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 4.9 se calcularon las intensidades de las líneas que pueden ser consideradas como las más importantes del espectro visible por la información que pueden brindar, la *tabla 6* y la *tabla 7* muestran los resultados obtenidos en los diferentes rangos de Y de las fotografías que a la vez representan diferentes regiones de la nebulosa.

LÍNEA	LONGITUD DE ONDA(Å)	INTENSIDAD			
		250-270	CONTINUO	340-360	400-420
[O III]	4959	4341	6048	4661,6	2857,3
[O III]	5007	13659	20049,5	13926,5	9498,5
[N II]	6548	1211	1883,5	1512,5	484,5
[N II]	6583	4599	5171	5083	2121,3
LÍNEAS NO VISTAS		COTA SUPERIOR			
[N II]	5755	432,5	602	406	213,5
[O III]	4363	174,5	310	154,7	109

Tabla 6. INTENSIDADES DE LAS LÍNEAS PROHIBIDAS DE OXIGENO Y NITRÓGENO.

LÍNEA	LONGITUD DE ONDA(Å)	INTENSIDAD		
		250-270	340-360	400-420
H $\alpha$	6563	25780	27087	20531,7
H $\beta$	4861	3160,3	3106,6	2573
H $\gamma$	4340	616	746	496

Tabla 7. INTENSIDADES DE LAS LÍNEAS DE HIDROGENO DE LA SERIE DE BALMER.

Se puede ver de las *tablas 6 Y 7* que la intensidad de la línea de Hidrógeno H alfa es mayor que cualquier otra línea, aunque sólo se calculó para esas franjas de la *tabla 7*, en las fotografías es evidente tal superioridad en la intensidad. Con esto se explica la coloración rojiza de las nebulosas de emisión y de la M42, también que el elemento más

abundante es el hidrógeno y que hay mayor ocurrencia del proceso de recombinación del nivel 3 al nivel 2 para producir la línea  $H\alpha$  de la serie de Balmer.

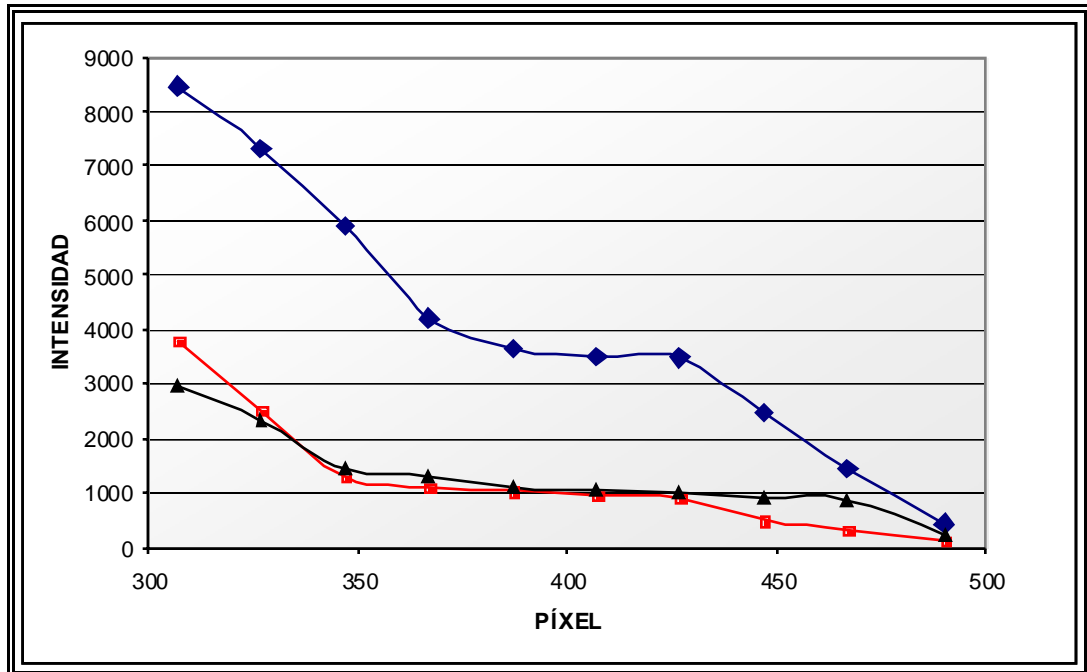
La segunda línea más intensa es la de [O III] 5007 Å, la cual suma una coloración verdosa a la nebulosa tal como se mencionó en el capítulo 1. Se hace visible de esta forma que hacer la transición por medio de colisiones de la configuración  $^3P_2$  a  $^1D_2$  es más factible, lo que ocasiona que un mayor número de electrones se acomoden en ese nivel meta-estable, generando así una línea de emisión mucho más intensa.

Respecto a las líneas de Oxígeno y Nitrógeno no captadas en las fotografías, y al respectivo proceso de estimación de la cota superior para la intensidad de estas descrito en la sección 4.9, se puede ver que la intensidad de la línea de Oxígeno es menor que la de Nitrógeno en todas las franjas, tal como se pudo estimar en los espectros que se tenían como referencia en la bibliografía, ya que se necesita menos energía para colocar un electrón en  $^1S_0$  del Nitrógeno. También las intensidades de estas dos líneas son mucho menores en todas las franjas que las intensidades de las demás líneas de los respectivos materiales, esto confirma la teoría en lo que respecta a que la intensidad de estas líneas es menor debido a que realizar la transición entre las configuraciones respectivas ( $^1S_0$  a  $^1D_2$ ) es más débil por que  $\Delta J = 2$  y la restricción para transiciones es  $\Delta J = 0, \pm 1$ .



Como se puede notar de las imágenes de los espectros y de las tablas de intensidad, la intensidad de las líneas de emisión disminuye a medida que crece la distancia desde el centro luminoso de la nebulosa; la *gráfica h* muestra como varía la intensidad percibida del píxel más intenso para tres líneas de emisión captadas en la fotografía de la región verde del espectro el 8 de febrero. Sacando perfiles con la función SLICE de IRIS, partiendo desde la franja del continuo hasta el extremo superior, en distintos puntos sobre la coordenada Y, se obtuvo la *gráfica h*; estos perfiles cubren las tres líneas de emisión (H beta, [O III] 4959Å Y [O III] 5007Å) y muestran cómo disminuye su altura - intensidad a medida que se alejan de la franja del continuo.

Esta variación en la intensidad de las líneas de emisión se debe a que a medida que crece la distancia con respecto al centro luminoso, la cantidad de fotones capaces de ionizar los átomos presentes decrece debido a que gran parte de la producción de fotones provenientes de las estrellas ya han sido consumidos, mermando así la cantidad de recombinaciones y también de colisiones con electrones libres al alejarse de la fuente.



Gráfica h. VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD AL APARTARSE DE LA FUENTE LUMINOSA.

Nota: la curva azul representa la variación de la línea [O III] 5007Å, la curva roja es para [O III] 4959Å y la negra para Hβ.

## 5.6 TEMPERATURA.

Haciendo uso de la *ecuación 7* y de las intensidades encontradas en la *tabla 6* se realizaron cálculos, según lo descrito en la sección 4.7, para estimar la temperatura de la M42.

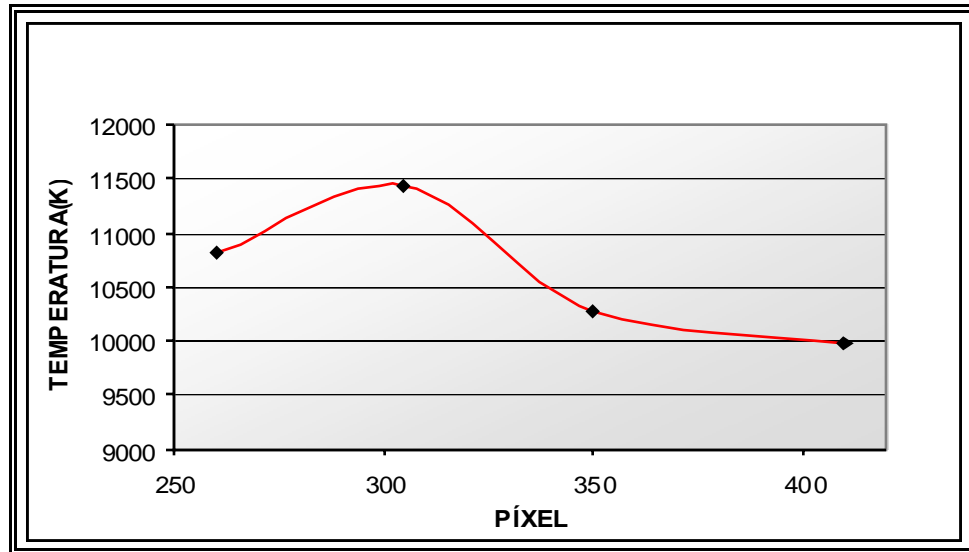
FRANJA	250-270	CONTINUO	340-360	400-420
TEMPERATURA (K)	10812	11425	10273	9977

Tabla 8. TEMPERATURAS EN LA NEBULOSA M42.

Se observa de la tabla anterior que al alejarse del centro luminoso, es decir de las estrellas que emiten la radiación, disminuye la temperatura de la nube de gas, y que en la región donde se encuentran las estrellas la temperatura es más alta, *gráfica g*.

Estos valores de temperatura que se observan de la *tabla 8*, son valores que deben ser considerados como valores máximos de temperatura que podría tener la M42, esto es debido a que las intensidades de las líneas no fotografiadas de Oxígeno y de Nitrógeno, que son utilizadas para los cálculos de temperatura, están acotadas por un valor máximo de intensidad, *tabla 6*, ya que una disminución en las intensidades de estas dos líneas para resolver la *ecuación 7*, ocasiona una reducción en el valor de la temperatura.

Se puede estimar al observar estos resultados que la temperatura promedio encontrada para la nebulosa de Orión M42 es de 10622 K la cual está en el rango expuesto en la teoría para la temperatura en las nebulosas difusas o regiones HII que poseen estrellas de tipo O como fuente de radiación, que es alrededor de los 10000K.



Gráfica g. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA M42.

### 5.7 DENSIDAD DE ELECTRONES LIBRES.

Para encontrar la densidad numérica de electrones libres en la nebulosa se siguió el procedimiento descrito en la sección 4.9. La *tabla 9* muestra los resultados obtenidos al tomar los valores de temperatura obtenidos en la *tabla 8* y usarlos en las ecuaciones 3 y 4, junto con la respectiva razón entre intensidades de las líneas de Oxígeno ó de Nitrógeno.

FRANJA		250-270	CONTINUO	340-360	400-420
DENSIDAD DE ELECTRONES ( $\times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ )	ECUACIÓN 4	1.89	1.97	1.69	2.53
	ECUACIÓN 3	1.91	1.99	1.71	2.55

Tabla 9. DENSIDAD DE ELECTRONES LIBRES,  $N_e$ .

Como se observa de la *tabla 9* la densidad electrónica obtenida para la nebulosa M42 es del orden de  $10^{11} \text{ m}^{-3}$ , este valor concuerda con las predicciones teóricas de  $10^9 - 10^{12} \text{ m}^{-3}$  que se estiman para este  $N_e$  en las nebulosas difusas de emisión de baja densidad que posean una temperatura alrededor de los 10000K.

### ***5.8 DECREMENTO DE BALMER.***

Usando los valores de intensidad calculados para las líneas de emisión del Hidrógeno, *tabla 7*, se calculó el decremento de Balmer, es decir la razón entre las intensidades de las líneas de emisión para la serie de Balmer del Hidrógeno, según lo descrito en la sección 4.11

Como muestra la *tabla 10*, los valores calculados para el decremento de Balmer difieren de los valores expuestos en el capítulo 2 y en la sección 4.11. Esta diferencia de valores en el decremento de Balmer es debida a la presencia de polvo en el medio interestelar, el cual absorbe en mayor proporción la luz azul emitida por la nebulosa que la luz roja, con lo cual se captan intensidades diferentes a las que realmente emite la nebulosa, en este caso la M42.

Bajo esta condición lo que ocurre es que el valor de  $I(H\alpha)/I(H\beta)$  es mayor que el estimado teóricamente bajo condiciones similares de temperatura

y densidad electrónica, y el valor de  $I(H\gamma)/I(H\beta)$  es menor, esto debido a que la intensidad de  $H\gamma$  también la captamos disminuida por el polvo interestelar dada su mayor cercanía a la región azul del espectro.

RAZÓN LÍNEAS DE BALMER	FRANJA		
	250-270	340-360	400-420
$\frac{I(H\alpha)}{I(H\beta)}$	8,16	8,72	7,98
$\frac{I(H\gamma)}{I(H\beta)}$	0,19	0,24	0,19

Tabla 10. DECREMENTO DE BALMER PARA LÍNEAS DE HIDRÓGENO.

Se puede notar de la *tabla 10* que las intensidades de las líneas de Hidrógeno disminuyen en forma consistente al alejarse de la fuente luminosa, es decir que no se presenta una disminución mayor en la intensidad de la línea  $H\beta$  que en la línea  $H\alpha$  o  $H\gamma$ , y esto se nota al ver que la razón entre intensidades no cambia radicalmente para las distintas franjas, sino que conservan un valor promedio.

Haciendo uso de la ecuación 8 se calcularon los valores para el coeficiente de absorción del polvo presente entre nosotros y la nebulosa M42. Según muestra la *tabla 11*, los valores del coeficiente de absorción del polvo son similares en las distintas franjas, así para  $H\beta$  son en promedio 6.04, y para  $H\alpha$  son en promedio 3.93.

Esto nos indica que el coeficiente de absorción de polvo no depende de las intensidades o de la temperatura en las diferentes regiones de la nebulosa, sino de la longitud de onda.

Observando el promedio de los coeficientes de absorción, se nota claramente que la absorción de la longitud de onda de  $H\beta$  por parte del polvo interestelar, es mayor que la absorción de  $H\alpha$ , con lo que se confirma que la intensidad captada de la línea  $H\beta$  es menor que la emitida realmente, haciendo que la línea  $H\alpha$  sea aún mas predominante y la nebulosa M42 exhiba la coloración rojiza que captamos en la tierra.

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL POLVO	FRANJA		
	250-270	340-360	400-420
$\tau_D(H\beta)$	5,99	6,19	5,93
$\tau_D(H\alpha)$	3,89	4,02	3,86

Tabla 11. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DEL POLVO.

## CONCLUSIONES.

- Es importante realizar un buen procesamiento de las fotografías obtenidas por la cámara CCD, es decir encontrar un valor justo para MEDIAN FILTER que pueda limpiar una foto sin llegar a borrar información de líneas de emisión, promediar un nivel de ruido uniforme capaz de suavizar las intensidades de los píxeles en la foto para finalmente obtener una buena serie de datos para la experimentación.
- El proceso de calibración debe ser lo más preciso posible, es útil para este fin obtener una buena ecuación de calibración con mayor precisión haciendo uso por ejemplo de los hectopíxeles y de espectros de lámparas con varias líneas de emisión, esto para no incurrir en errores al instante de intentar identificar las líneas de emisión y obtener espectros bien calibrados.
- A pesar de las inconsistencias que se pueden generar entre intensidades de algunas líneas de emisión al hacer uso de la función `I_add` por regiones del espectro separadas y luego unir las para la obtención un espectro total, los espectros totales obtenidos muestran las líneas de emisión más importantes para una nebulosas difusas de emisión o regiones HII, tales como las de Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno.



- Haciendo uso de los espectros calibrados se identificaron los elementos que principalmente constituyen una región HII, además con la presencia en éstos de líneas de emisión prohibidas, se confirma la característica de baja densidad de la nebulosa M42.
- La intensidad de las líneas de emisión disminuye al incrementar la distancia desde el centro luminoso, debido al agotamiento de fotones capaces de ionizar los átomos y la consecuente reducción de recombinaciones y colisiones.
- La cota superior estimada para las dos líneas de emisión no captadas, y utilizada para el cálculo de temperatura, permitió encontrar un valor máximo promedio para la temperatura en la nebulosa M42, valor que está acorde con el estimado para el tipo de nebulosas con estrellas de tipo O como fuente de radiación.
- El promedio calculado para la densidad electrónica de la nebulosa M42 está en el margen estimado para las nebulosas difusas de emisión. De donde se puede concluir que la intensidad real de las líneas no observadas de oxígeno y nitrógeno, es muy parecida a las estimadas en la cota superior de la *tabla 6*, así se puede decir que las líneas se encuentran cerca del límite de observabilidad.

- La presencia de polvo interestelar influye en la percepción que se tiene de la nebulosa; éste afecta la coloración de la nube y la intensidad captada de las líneas de emisión. Esto se hace visible en el decremento de Balmer calculado para M42, donde los valores estimados bajo condiciones similares de temperatura varían, dando paso a la profundidad óptica del polvo.

## BIBLIOGRAFÍA.

*Base de datos del National Institute of Standards and Technology.*

Recuperado el 15 de marzo de 2005, en  
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/contents.html>.

Bradley, C. , Dale, O. (1996). *An introduction to modern astrophysics*.  
Addison-Wesley Publishing.

Chemical composition and physical properties of nebulae. (s.f.).

Recuperado el 26 de enero de 2005, de  
<http://www.space.com/reference/brit/nebulae/structure.html>

Emerson, D. (1996). *Interpreting astronomical spectra* . Baffins Lana,  
Chichester, West Sussex, England.: John Wiley & Sons Ltd.

*Emission Nebulae : The final frontier*.(s.f.). Recuperado el 7 de mayo de  
2005, de  
<http://www.shawnee.cc.il.us/craigb/ast111/papers/dustinwareing/>.

Goldberg, L. , Aller, L.H. (1943). *Atoms, Stars and nebulae*. Philadelphia,  
USA. : Blakinston Coompany.

Kauffmann, W.J. , Freedman, R. A. (1999). *Universe*. New York, USA. :  
W.H. Freedman & company.

Kaler, J.B. (1989). *Stars and their spectra : An introduction to the spectral sequence*. Cambridge, UK.:Cambridge University Press.

Kitchin, C.R. (1995). *Optical astronomical spectroscopy*. Bristol , UK .  
Philadelphia ,USA. : Institute of Physics Publishing.

Mais observatory: CCD Spectroscopy. Planetary nebulae.(s.f).  
Recuperado el 20 de febrero de 2005, de <http://mais-ccd-spectroscopy.com/Planetary%20Nebula.htm>