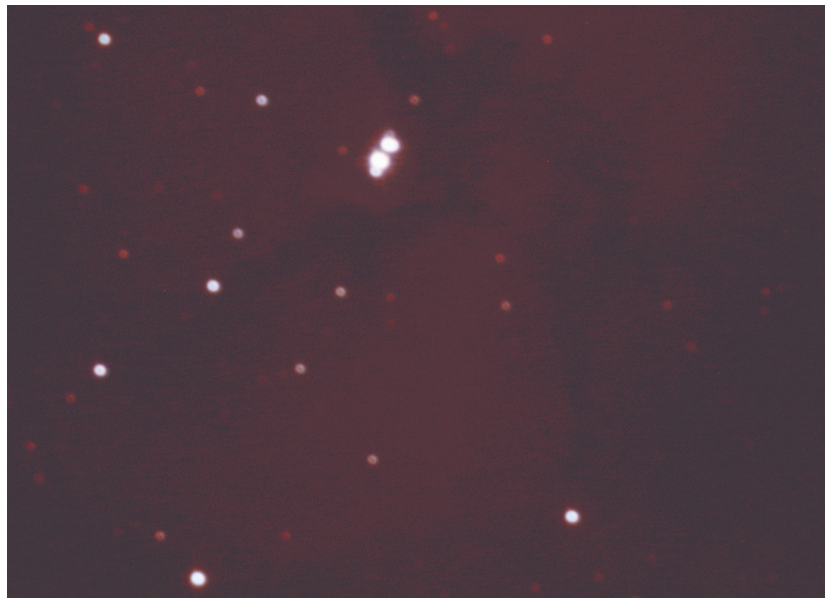




UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMÍA

Cálculo de Masa Ionizante en una Región HII,
La Nebulosa de Emisión de M20



Integrantes:
Pablo Castellanos
Daniel Rivas
Felipe Serrano

Profesor:
Simón Casassus

15 de diciembre, 2006

1 Introducción

El sector de M20 en el que nos centramos para este trabajo corresponde a una nebulosa de emisión, una región HII que contiene principalmente hidrógeno ionizado por alguna estrella muy masiva y energética en su interior. En el caso particular de esta región, se aprecia un cúmulo estelar con 3 estrellas brillantes ubicadas relativamente en el centro de la nebulosa misma, que, por ser las más brillantes en el rango visible probablemente sean las responsables de la ionización, quizás una sola de ellas o más. Sin embargo como planteábamos al principio este es sólo un sector de la nebulosa M20, pues esta nebulosa contiene diversos tipos de objetos interesantes, ya que, además de la nombrada nebulosa de emisión y el cúmulo estelar que se haya en su interior, también se aprecia alrededor una nebulosa de reflexión, que es particularmente importante hacia el norte, esta nebulosa de reflexión tiene un marcado color azul, por contraste con el sector de emisividad que es de un color rojo intenso, esta diferencia de color será explicada más adelante. Por último, uno de los objetos más distintivos de esta nebulosa en particular es la nebulosa oscura que se encuentra frente a la nebulosa, que fue catalogada por Barnard como B85 y que es la razón de que esta nebulosa sea también conocida como “Trífida”, ya que esta nebulosa oscura cruza frente a la nebulosa de emisión en la forma de filamentos que la recorren de parte a parte, dividiéndola en 3 lóbulos principales, pero en un análisis más fino se ve que estos filamentos se dividen varias veces, se cortan, y generan muchas más regiones de emisividad aisladas por la nebulosa oscura, esta región también es fundamentalmente hidrógeno y polvo, donde pueden estar formándose nuevas estrellas.

En la figura 1¹ los lóbulos numerados del 1 al 3 corresponden a los que históricamente dieron el nombre de trífida a la nebulosa, se decidió agregar el lóbulo menor como el número 4. En el recuadro amarillo se marca la nebulosa de reflexión que está asociada principalmente a la brillante estrella que se ubica en su centro, esta zona es de reflexión y no de emisión como el resto de la nebulosa ya que las estrellas que se formaron en esta zona ya pasaron la mayor parte de su etapa de formación y acapararon parte del hidrógeno que se encontraba en esta zona de la nebulosa original, y sus vientos ya disiparon casi todo lo que restaba, dejando fundamentalmente polvo que es el que muestra la iluminación de color azul ya que la luz que recibe es reflejada en su mayor parte, no absorbida por las partículas que la conforman, por lo que su espectro es un reflejo de la estrella central que por su color azul debe ser una estrella bastante caliente, aunque no lo suficiente para ionizar la nube. En cambio en el sector rojo de la nebulosa se produce ionización pues tenemos estrellas aún más jóvenes formándose, claramente las más brillantes en el lóbulo 2 respecto a las cuales la nebulosa es simétrica lo que las hace las más claras candidatas a responsables de la ionización de la nube, este sector de la nebulosa aún conserva la mayor parte del hidrógeno debido a que las estrellas todavía no han tenido tiempo de dispersar el sobrante con sus restos, además en esta etapa de su for-

¹Obtenida en [4]

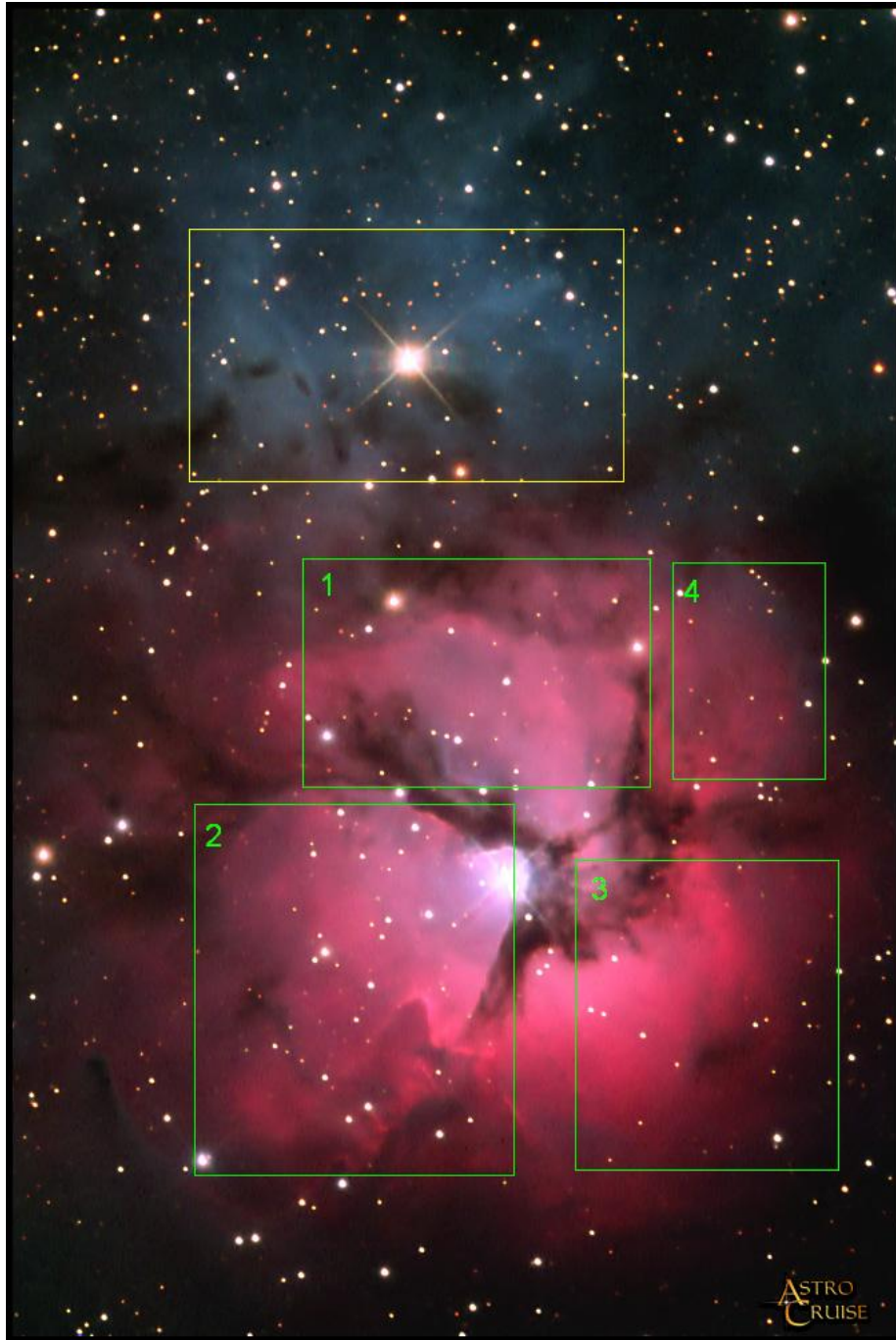


Figura 1: M20 Nebulosa Trifida

mación las estrellas tienden a ser un poco más calientes de lo que serán, pero lo fundamental en la ionización es la masa de las estrellas, que debe ser superior a la normal para producir este fenómeno, donde los átomos de hidrógeno reciben la energía suficiente para ser ionizados y luego, cuando pueden reunirse los núcleos con los electrones, los átomos se recombinan emitiendo el espectro de líneas característico del hidrógeno, donde la más importante en el rango visible es la línea de H_α que se encuentra ubicada en la parte roja del espectro, de ahí que el color característico de esta nebulosa sea el rojo. En el lóbulo 3, la nebulosa oscura describe un arco en lo que podemos considerar como la parte más ancha de B85, a pesar de que se logra apreciar la nebulosa de emisión a través de los filamentos de la nebulosa oscura.

En cuanto a las características cuantitativas de M20, sus coordenadas son, ascensión recta 18h 2,6m y declinación es de $-23^\circ 02'$, se encuentra ubicada en la constelación de Sagitario lo que indica que está orientada muy cercana al centro galáctico, en el mismo plano de la galaxia. Respecto a su distancia no hay datos muy certeros, sin embargo muchas de las fuentes que consultamos coinciden en darle un promedio de 5200 ly , aunque haciendo notar que su distancia ha sido estimada en valores que van desde 2000 ly hasta 9000 ly . Además presenta una dificultad en la estimación de su magnitud que es típica de las nebulosas, pues se debe establecer un límite en el tamaño de la nebulosa y extraer de ella las estrellas y zonas oscuras para obtener el brillo sólo de la nebulosa, que en este caso se dificulta aún más por lo irregular de B85, y por el hecho de poseer estrellas muy brillantes en su centro. La magnitud visual se estima entre 9 y 6,8, según la base de datos de Simbad² la magnitud en el filtro B (azul) es de 6,75 y en el filtro V (más o menos al centro del rango visible del espectro) es de 6,3, esta tendencia creciente hacia mayores longitudes de onda es tal como se esperaba pues el color principal de la nebulosa es el rojo y su emisión es muy fuerte en H_α , que se encuentra en el sector rojo del espectro. Por último su tamaño angular es de $28'$, lo que nos dará que el diámetro real de la nebulosa es variable según la estimación de distancia que se utilice, desde 16,28 ly , para una distancia de 2000 ly , hasta 73,3 ly para una distancia de 9000 ly .

2 Objetivos

El fin principal de este trabajo es el cálculo de la masa ionizante (que corresponde a una o más estrellas). Para esto necesitamos medir el flujo de la nebulosa en H_α , ya que, la mayor parte de la emisión de la nube se produce en esa frecuencia. Debido a la imprecisión de los datos conocidos de M20, un cálculo preciso de la masa va a ser imposible, por lo que nos esforzaremos en encontrar cotas para la masa.

²<http://simbad.u-strasbg.fr/sim-fid.pl>

3 Calibración

El telescopio GOTO³ digitaliza las imágenes en formato fit que, al ser analizadas con PDL, nos permite calcular flujos en cuentas, sin embargo, no se conoce en principio la relación que existe entre cuentas y magnitudes físicas. Para encontrar esta relación debemos partir de flujos ya tabulados, para finalmente encontrar el valor de estas cuentas.

En nuestro caso se calibrará con la estrella ζ Gru, pero antes habrá que relacionar su magnitud con su flujo comparando con el flujo conocido de Vega (en el azul, $F_{Vega} = 4300 Jy$).

Se sabe que la temperatura de ζ Gru es $T = 4900 K$. Con esto podemos determinar su curva de flujo (ver Figura 2), aproximada a un cuerpo negro, gracias a la ley de Planck:

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

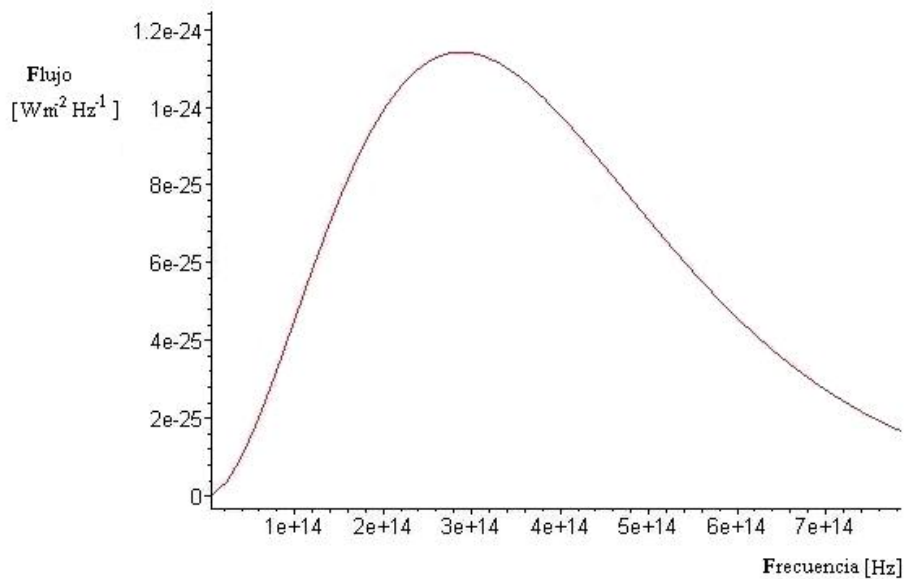


Figura 2: Curva de flujo

Para ajustar la curva a las observaciones, necesitamos un punto conocido de ella. En Simbad encontramos que la magnitud en el azul de ζ Gru es $m = 5,1$ y ocupando la siguiente relación $m = -2,5 \cdot \log_{10}(F_*/F_{Vega})$, obtendremos el

³<http://www.das.uchile.cl/goto.htm>

flujo de ζ Gru en el azul. De aquí se obtiene que $F_{\star} = 3,92 \cdot 10^{-25} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ es el flujo de ζ Gru en el azul.

Sabemos que se tiene la ecuación $F_{\star}(\nu) = aI(\nu)$, siendo a el factor de ajuste de la curva. Evaluando I en el azul podemos despejar a con el valor de F_{\star} recién encontrado. Como $\nu_{\text{azul}} = 0.6315789 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$, entonces $a = 5.123697 \cdot 10^{-17}$.

Usando el valor recién calculado podemos inferir el valor del flujo en H_{α} para ζ gru, obteniendo un valor de $F_{H_{\alpha}} = 0.8310539879 \cdot 10^{-24} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$. Con PDL sumamos las cuentas captadas por el telescopio por unidad de tiempo en la imagen obtenida de ζ gru con el filtro para H_{α} , cuyo valor resulta ser de $F_c = 128477 \text{ cuentas}$. Finalmente, como suponemos una relación lineal entre las cuentas y el flujo, podemos calcular el factor de conversión de cuentas a flujo:

$$\alpha = 0.6468483857 \cdot 10^{-29} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$$

4 Cálculo de Flujo

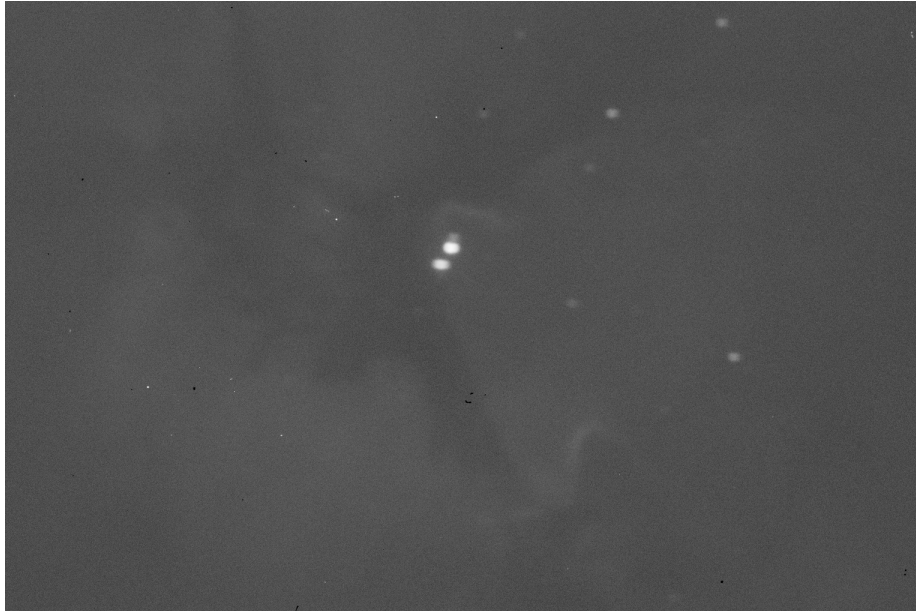


Figura 3: Imagen M20 con telescopio GOTO

Para evitar que en la suma de las cuentas de la nebulosa (Figura 3) aparezcan excesos debido a la presencia de estrellas en el campo, seleccionamos las 10 estrellas más brillantes y para cada una calculamos su flujo, el que luego eliminamos de la suma total de la imagen. Sin embargo, de haber dejado esto así

hubiésemos tenido defectos en lugar de excesos, por lo que calculamos el flujo promedio de la nube alrededor de cada estrella y con este valor “rellenamos” el espacio dejado por esta. La otra complicación que surge en la medición del flujo de M20 es la nebulosa oscura que la atraviesa, aunque en este caso, debido a lo irregular de esta última y a que no tenemos herramientas para calcular la absorción, decidimos no tratar de solucionar este problema, aunque debemos considerar que el valor real del flujo de la nebulosa será mayor que el que calculamos. Finalmente el valor que obtuvimos luego de estas consideraciones es de:

$$F = 2010880 \text{ cuentas}$$

5 Calculo masa

Teniendo algunos datos conocidos de la nebulosa, como su diámetro angular, $2\theta = 28'$, y su distancia, $d = 5,4 \text{ ly}$, podemos utilizar la siguiente ecuación

$$F_{H_\alpha} = \pi\theta^2 \cdot \frac{\alpha_{H_\alpha}}{4\pi} n_e n_p h\nu R$$

Podemos considerar que la estrella ionizante es muy masiva, ionizando toda la nube. En esta aproximación el número de electrones recombinados por unidad de volumen (n_e) es similar al de protones recombinados por unidad de volumen (n_p). En esta ecuación $R = \theta d$ (con d la distancia a la nebulosa), $\alpha_{H_\alpha} = 3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ es una constante y ν es la frecuencia en H_α . Obtuvimos $n_e n_p = 2,072253840 \cdot 10^{-5} \approx n_e^2$, reemplazando su valor en la siguiente ecuación $N = V n^2 \alpha_2$, con V igual al volumen de la nebulosa, que aproximamos a una esfera cuyo radio es el mencionado anteriormente, $\alpha_2 = 2,6 \cdot 10^{-21} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ es otra constante, y N es el número de fotones en H_α emitidos por unidad de tiempo en la nebulosa. De aquí obtenemos $N = 1,814778319 \cdot 10^{27}$, y como cada fotón tiene una energía de $h\nu$ tenemos que la luminosidad total de la nebulosa será:

$$L = N h\nu$$

Luego, $L = 54853961,61$ y con este valor estamos a un paso de finalizar el cálculo de masa, pues, como la estrella ionizante debe ser joven por los motivos enunciados en la introducción, esta se encuentra en la secuencia principal y debe por consiguiente cumplir la relación masa-luminosidad,

$$\frac{L}{L_{\star}} = \left(\frac{M}{M_{\star}} \right)^3$$

Finalmente, esta última ecuación obtenemos el valor de la masa

$$M_{\star} = 5,341154809 \cdot 10^{-7} M_{\star}$$

6 Análisis

Claramente este resultado no corresponde al real, ya que este valor es muy pequeño. Creemos que el error proviene de la calibración en parte. La imagen de la estrella de calibración fue tomada mucho tiempo después donde el clima y el cielo ya había cambiado bastante. Por otro lado la imagen de nuestra nebulosa no la incluía entera y además había una nube de polvo que disminuía el flujo total que nos llegaba. Estos últimos factores llevan a un error que no es precisable con nuestros conocimientos actuales.

Veamos una pequeña estimación de lo que podría haber sido nuestro resultado. Según lo visto en clases, sabemos que como mínimo se necesita una estrella del tipo B5 para ionizar una nebulosa. En este caso, si asumimos que son 3 estrellas de este tipo, tendríamos una masa de alrededor de $15 M_{\odot}$ y cada una a una temperatura de $15000 K^4$. Por otro lado, de acuerdo a [1], se sabe que las estrellas más grandes de esta nebulosa son del tipo O5 o O6. Si consideramos que las 3 estrellas que ionizan esta nebulosa son del tipo O5 tendríamos una cota superior para la masa de $150 M_{\odot}$. Tomando un promedio obtenemos alrededor de $80 M_{\odot}$.

Para que nuestro cálculo hubiese dado de ese orden, es necesario multiplicar nuestra luminosidad por un factor cercano a $5 \cdot 10^{25}$. A modo de prueba hicimos esto y obtuvimos una masa de $85,9 M_{\odot}$. Como en la introducción vimos que hay un gran error respecto a la distancia, podemos notar que éste repercute fuertemente sobre el valor de la masa ionizante. Si hacemos la misma corrección, pero ahora usamos como distancia $9000 ly$, la masa crece a $123,9 M_{\odot}$ y si disminuimos la distancia a $2000 ly$, la masa disminuye a $45,5 M_{\odot}$. Entonces, debido al error de la distancia podemos ver que la masa tiene un mínimo de error del orden de $40 M_{\odot}$. Notar que este error crece si la masa ionizante calculada es mayor y disminuye si es menor.

7 Conclusiones

A pesar de no haber obtenido un buen resultado con nuestro cálculo principal, pudimos sacar algunas conclusiones. Primero, vemos que el telescopio logró una muy buena fotografía de M20 donde intentamos medir el flujo. Creemos que en el futuro, si se hacen las mediciones con más cuidado, es decir, la foto de calibración sacada la misma noche que M20 y una captura completa de esta última, se podría llegar a mejores resultados. Por otro lado, debido al error que existe en la distancia de esta nebulosa los resultados que se obtienen están sujetos a un error no despreciable, que además crece con el valor de M . Luego, esta nebulosa no es un buen objeto si se quiere hacer un trabajo que requiera un modelamiento simplificado de la realidad, porque sino, no se obtendrán buenos resultados. Por último, para mejorar este trabajo es necesario tener mejores herramientas para poder medir el flujo, es decir para poder calcular la absorción,

⁴Obtenido en [5]

las estrellas contenidas en la nebulosa y cualquier otro problema que puede aparecer en la imagen.

Bibliografía

- [1] <http://www.seds.org/messier/m/m020.html>
- [2] http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/photometry_luminosity.html
- [3] <http://zebu.uoregon.edu/~soper/Stars/tr1.html>
- [4] <http://www.astrocruise.com/m20.htm>
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Main_sequence