

Estimaciones de densidades y temperaturas electrónicas a partir de dos cocientes de líneas en el rango óptico

D.C. Merlo¹ & M.M. Moyano^{1,2}

¹ Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

² Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina

Contacto / dmerlo@unc.edu.ar

Resumen / Tanto las densidades como las temperaturas electrónicas juegan un rol muy importante en las condiciones físicas que caracterizan principalmente a los objetos nebulares. Para su determinación, generalmente se obtiene la densidad electrónica N_e a partir de un valor prefijado de la temperatura electrónica T_e . En este trabajo utilizamos cálculos teóricos precisos de los cocientes de líneas [N I]5200/5198 y [S II]6717/6731 para estimar, simultáneamente, N_e y T_e . Este procedimiento mostró ser autoconsistente para $1.25 \leq \log(N_e) \leq 4.0$ y $0.5 \leq T_e \times 10^{-4} \text{ K} \leq 2.0$, intervalos donde ambos cocientes muestran sensibilidad en estas variables. Finalmente, lo aplicamos en objetos que disponen de valores medidos de ambos cocientes de líneas, sugiriendo para los mismos nuevas estimaciones de N_e y T_e .

Abstract / Both electronic densities and temperatures play a very important role in the physical conditions which mainly characterize nebular objects. For its determination, the electronic density N_e is generally obtained from a predetermined value of the electronic temperature T_e . In this work, precise theoretical calculations of the intensity ratios [N I]5200/5198 and [S II]6717/6731 have been used in order to estimate N_e and T_e simultaneously. This procedure proved to be self-consistent for $1.25 \leq \log(N_e) \leq 4.0$ and $0.5 \leq T_e \times 10^{-4} \text{ K} \leq 2.0$, intervals where both ratios show sensitivity in these variables. Finally, we applied it to objects with measured or estimated values of both intensity ratios, and new values of N_e and T_e were suggested.

Keywords / atomic data — atomic processes — ISM: lines and bands

1. Introducción

Seaton & Osterbrock (1957) establecieron que es posible determinar densidades electrónicas en nebulosas planetarias (NPs) a partir del cociente de líneas $R = I(^2D_{3/2} \rightarrow ^4S) / I(^2D_{5/2} \rightarrow ^4S)$ en el estado $2p^3[O II]$, dado su sensibilidad al parámetro de densidad $x = 10^{-2} N_e / T_e^{1/2}$. Luego Seaton (1966) estimó N_e en NPs a partir del cociente [O II]3729/3726. Asimismo, Weedman (1968) sugiere utilizar otros dobletes sensibles a N_e tal como el cociente [S II]6717/6731 y, a partir de valores de probabilidades de transición propuestos por Czyzak & Krueger (1963), estableció expresiones analíticas en función de x . Posteriormente, Saraph & Seaton (1970) realizaron un estudio detallado de emisividades utilizando valores actualizados de datos atómicos en los iones $2p^3$ ([O II]6717/6731) y $3p^3$ ([S II]; [Cl III]; [Ar IV]; [K V]), presentando tablas con valores de R para $T_e = 10^4 \text{ K}$. Finalmente, con el objetivo de estimar N_e y T_e en nebulosas gaseosas y envolturas estelares a partir de cocientes de líneas, Czyzak et al. (1986) realizaron cálculos mecánico-cuánticos de funciones de onda atómicas, presentando gráficos de los siguientes cocientes de líneas:

- [N I] 5200/5198 vs. $\log N_e$ (ver Fig. 1a);
- N II $\log(I(2140+2144)/I(6548+6584))$ vs. $\log(I(5755)/I(6548+6584))$;
- N III 1752.2/1749.7; 1754.0/1749.7 y 1748.7/1752.2 (UV);
- N IV 1486/1483 (UV);
- O III $\log(I(1660+1666)/I(4959+5007))$ vs. $\log(I(4363)/I(4959+5007))$;
- O III $\log(I(2321+2332)/I(1660+1666))$ (UV);

- Ne IV $\log(I(4724+4725)/I(2422+2425))$ vs. T_e ;
- Si III $I(1892)/I(1884)$ vs. $\log(N_e)$;
- [S II] $I(6717)/I(6731^*)$ vs. T_e (ver Fig. 1b);
- [S II] aur/neb $\log(I(4068+4076)/I(6717+6731^*))$ vs. $\log(I(6717+6731^*))$.

Los gráficos a, c, d, e, f y h están presentados en función de $\log N_e$, parametrizados en T_e ; en cambio, los gráficos b, e y j son biparamétricos tanto en T_e como en $\log(N_e)$; mientras que los gráficos g e i están en función de T_e , parametrizados en $\log(N_e)$.

2. Motivación

En general, los trabajos consultados determinan N_e asumiendo valores prefijados de T_e . Por ejemplo, Annibali et al. (2010) estiman densidades electrónicas a partir de los cocientes [S II] 6717/6731 obtenidos de una muestra de 38 galaxias, con el objetivo de establecer consistencias en sus condiciones físicas para el estudio de los mecanismos de *shock* en el gas ionizado, asumiendo un valor de $T_e=10000 \text{ K}$. Por ello, teniendo en cuenta el comportamiento de [N I] 5200/5198 con la densidad electrónica (ver Fig. 1a) y de [S II] 6717/6731 con la temperatura electrónica (ver Fig. 1b), nos planteamos la posibilidad de poder determinar unívocamente ambas variables físicas a partir de estos cocientes de líneas.

*Estos autores identifican con el valor 6730 Å a la línea en 6730.81 Å. Por razones de homogeneidad, le asignamos el valor 6731 Å en cada uno de los aportes tomados de ellos.

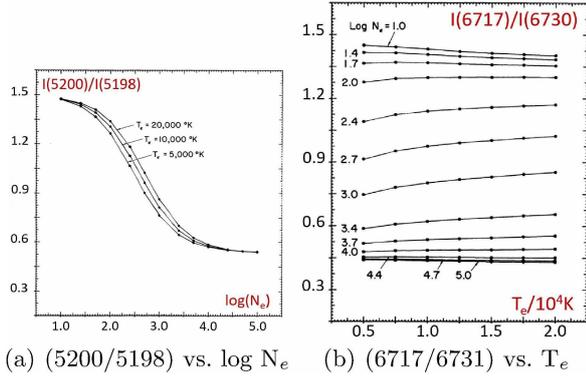


Figura 1: Cocientes de líneas: de [N I] en función de $\log N_e$ para $T_e = 5000$ K, 10000 K y 20000 K (a), y de [S II] en función de T_e para $1 \leq \log N_e \leq 5$ (b). Figuras adaptadas de Czyzak et al. (1986) y reproducidas con permiso de la AAS.

3. Método

De aquí en adelante se denotará $R \equiv [S II]6717/6731$ y $R' \equiv [N I]5200/5198$. Como hipótesis de trabajo se supuso que las líneas de emisión se forman en las mismas condiciones físicas de T_e y N_e . Si bien se trabajó principalmente en el rango $T_e \in [0.5, 2.0] 10^4$ K y $\log N_e \in [1.0, 5.0]$, era de esperar que estos intervalos se vieran restringidos al momento de obtener valores unívocos de R y R' , de acuerdo al comportamiento que muestran las Figs. 1a y b, en particular el de R con la T_e para altas densidades electrónicas.

Primeramente, se digitalizaron los gráficos de las Figs. 1a y b mediante el programa SpecScan v1.3 **, construyéndose una tabla de 7×13 valores. Luego, se procedió a realizar ajustes para obtener aproximaciones analíticas. En este sentido, se propusieron varias expresiones y relaciones funcionales 2D y 3D, incluso partiendo de expresiones aproximadas dadas por Weedman (1968) y Menzel et al. (1941). En un primer momento, se obtuvieron ajustes $R=R(T_e, \log N_e)$ y $R'=R'(T_e, \log N_e)$, pero como lo muestran las Figs. 2a y b, existen intervalos de rápida variación en $\log N_e$ que afectaron a la precisión del método, con errores relativos hasta del 30%.

Se decidió, por lo tanto, aplicar un método interpolatorio a partir de los valores originales de Czyzak et al. (1986). Para ello se elaboró un código, cuyo diagrama de flujo se muestra en la Fig. 3. Básicamente, se parte de un valor de R' y se determina el rango de valores de $\log N_e$ que le corresponde (ver Figs. 1a y b), y a partir de ellos se realiza un barrido bidimensional en el rango de T_e para determinar los valores que determinen mejor el otro valor de entrada R , minimizando diferencias.

4. Análisis

Como test de control de este método se utilizaron los 7×13 pares (R, R') obtenidos de Czyzak et al. (1986) (ver Sección 3) y se verificaron que el procedimiento reprodujera los correspondientes valores de T_e y $\log N_e$

**SpecScan, 2002, C. Efstathiou, Univ. de Atenas, Grecia.

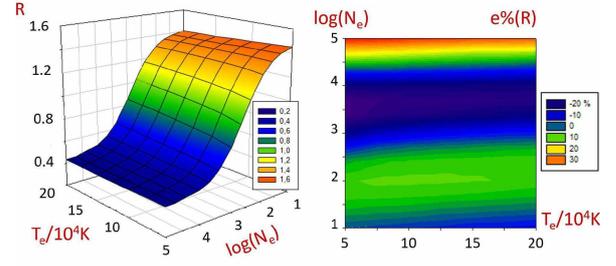


Figura 2: Gráficos del comportamiento funcional del mejor ajuste 3D de $R=R(T_e, \log N_e)$ (a), que errores relativos de hasta el 30% (b). Un comportamiento similar presenta el ajuste 3D de R' y sus errores relativos.

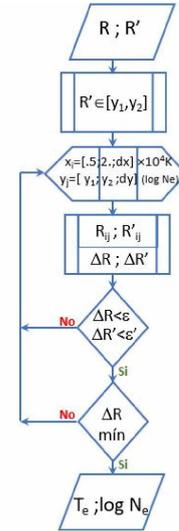
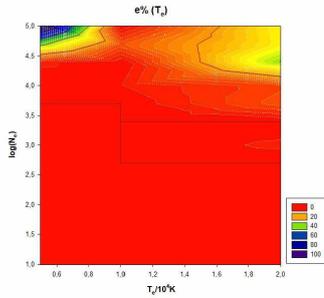


Figura 3: Diagrama de flujo del método.

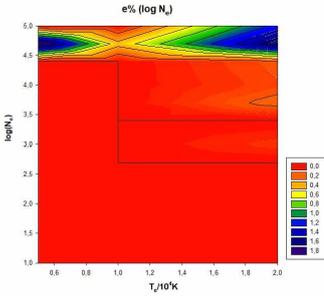
del mismo. Para ello se adoptaron los pasos $\delta=10^{-6}$ en $\log N_e$, para poder circunscribir la búsqueda en el menor intervalo posible en las cotas y_1 e y_2 del subdominio de trabajo, $\Delta x=1$ K y $\Delta y=10^{-3}$ dex, para el barrido interpolatorio 2D, con una tolerancia relativa de $\epsilon_R = 10^{-3}$ y $\epsilon_{R'} = 10^{-4}$, porque según las Figs. 1a y b, las fluctuaciones con órdenes de magnitud menores no producirían variaciones significativas. Por ello se adoptó una solución de compromiso para establecer el máximo rango bidimensional posible de aplicación del método, resultando errores relativos menores al 1% en el rango $1.25 \leq \log N_e \leq 4.0$ y $0.5 \leq T_e \times 10^{-4} \text{ K} \leq 2.0$, donde los cocientes de líneas muestran sensibilidad a estas condiciones físicas, lo que establece un rango de aplicación de $0.45 < R < 1.425$, como lo muestra la Fig. 1b. Las Figs. 4 muestran los errores relativos obtenidos.

Objeto	Tipo	R	R'	T_e [10^4 K]	$\log N_e$ [N_e]=[cm^{-3}]	T_e (MM) [10^4 K]	$\log N_e$ (MM) [N_e]=[cm^{-3}]
NGC 7009	NP	0.56	0.82	1.00	3.602	1.994	3.091
NGC 6302	NP	0.49	0.79	1.64	3.857	2.000	3.161
NGC 6741	NP	0.545	0.615	1.20	3.663	1.296	3.694
NGC 6572	NP	0.49	0.73	0.98	4.0	1.994	3.091
IC 418	NP	0.44	0.61	1.40	3.929	1.977	3.812
IC 5117	NP	0.43	0.56	1.18	4.531	1.759	4.344
NGC 7027	NP	0.445	0.54	1.10	4.477	0.830	4.998
Orión	NP	0.551	0.594	1.00	3.949	0.752	3.765
NGC 1947	Gx	1.32	1.25	1.00	1.978	0.748	2.057

Tabla 1: Resultados obtenidos de la aplicación de este método. Ref.: NP (nebulosa planetaria); Gx (galaxia)



(a) $\epsilon \%_{T_e}(T_e/10^4\text{K}, \log N_e)$



(b) $\epsilon \%_{\log N_e}(T_e/10^4\text{K}, \log N_e)$

Figura 4: Valores de los errores relativos en el proceso de reobtención de T_e (a) y de $\log N_e$ (b), para diferentes valores de $(T_e, \log N_e)$ en el análisis de autoconsistencia del método. Los trazos continuos negros representan los límites indicados en la referencia.

5. Resultados

En la Tabla 1 se muestran resultados preliminares de la aplicación de este método. Allí se indican, en **negrita**, los valores extraídos de Czyzak et al. (1986), que corresponden a varias fuentes citadas allí, y de Esteban et al. (2004) para Orión; en **azul**, las T_e y N_e obtenidas por este método, y en **rojo**, los valores fuera del rango de mayor precisión adoptado.

6. Conclusiones y perspectivas

El procedimiento determina en forma rápida los valores de T_e y N_e para cada valor de R y R' dados. El

mismo demostró ser autoconsistente en un rango menor de densidades electrónicas debido a la poca sensibilidad que muestra el cociente R con la T_e , siendo aplicable el mismo en el intervalo $0.45 < R < 1.425$. Se obtuvieron nuevas estimaciones de T_e y $\log N_e$ en 8 NPs y una galaxia, a partir de valores de R y R' , a diferencia del trabajo de Czyzak et al. (1986) en el que inferen estos últimos a partir de valores deducidos de diagramas de diagnósticos.

Actualmente se está elaborando una base de cocientes R y R' , tomados tanto de la NED *** como de trabajos recientes, donde con suficiente resolución espectral se logra separar adecuadamente los dobletes y por lo tanto se determinan con suficiente precisión los correspondientes cocientes en fuentes extragalácticas, tales como las mediciones del cociente $[S\ II]6717/6731$ en galaxias activas e inactivas realizadas por Davies et al. (2020).

Finalmente, y como se mencionó en la Sección 3, este método supone que las líneas se forman en las mismas condiciones físicas. Al respecto, se está analizando modificaciones al código que permitan salvar esta limitación. Para ello, resulta de interés la revisión realizada por Kewley et al. (2019) acerca de la distribución de temperaturas y densidades electrónicas en regiones H II y sus implicancias en la determinación de N_e .

Agradecimientos: Los autores agradecen al/a la referee anónimo/a, cuyas sugerencias mejoraron la presentación de este trabajo.

Referencias

- Annibali F., et al., 2010, A&A, 519, A40
 Czyzak S.J., Keyes C.D., Aller L.H., 1986, ApJS, 61, 159
 Czyzak S.J., Krueger T.K., 1963, MNRAS, 126, 177
 Davies R., et al., 2020, MNRAS, 498, 4150
 Esteban C., et al., 2004, MNRAS, 355, 229
 Kewley L.J., et al., 2019, ApJ, 880, 16
 Menzel D.H., Aller L.H., Hebb M.H., 1941, ApJ, 93, 230
 Saraph H.E., Seaton M.J., 1970, MNRAS, 148, 367
 Seaton M.J., 1966, MNRAS, 132, 113
 Seaton M.J., Osterbrock D.E., 1957, ApJ, 125, 66
 Weedman D.W., 1968, PASP, 80, 314

***NASA/IPAC Extragalactic Database.