

CALCULO DE POBLACIONES Y LINEAS DEL HE I EN LA CROMOSFERA SOLAR

H. MOLNAR y J.M. FONTENLA

RESUMEN:

Se está desarrollando un programa de computación para poblaciones de los niveles del He I fuera de equilibrio termodinámico, para diversas condiciones de densidad, temperatura y geometría. Estas poblaciones se emplearán en el cálculo de las líneas de He I para obtener modelos aplicables a cromósfera, protuberancias y flares solares.

Motivación:

Gran parte de las líneas de absorción de Fraunhofer del espectro solar son calculables en LTE, o sea que es posible calcular sus perfiles por medio de cálculos relativamente simples dado un modelo unidimensional de la atmósfera solar y algunos parámetros atómicos.

La condición de LTE deja de ser utilizable para ciertas líneas intensas que se forman en capas superiores de cromósfera, como ser por ejemplo H α , H y K del Ca II, los dobletes del magnesio y del sodio, y en especial cuando se trata de reproducir el espectro de emisión en el limbo y líneas afectadas por las diversas manifestaciones de la actividad solar, especialmente por las fulguraciones.

Dado que en el grupo solar de San Miguel gran parte del análisis espectroscópico se refiere a fulguraciones y en parte también al estudio de la cromósfera, se vió la necesidad de transitar todas las etapas de la preparación de un programa de cálculo que nos permita obtener perfiles de líneas en emisión, y en general de líneas cuya formación se produce en condiciones alejadas del LTE.

Introducción

La solución completa y autoconsistente del problema se esquematiza en la Fig. 1.

Varios métodos numéricos han sido ideados para resolver el problema de este modo. Sin embargo las dificultades

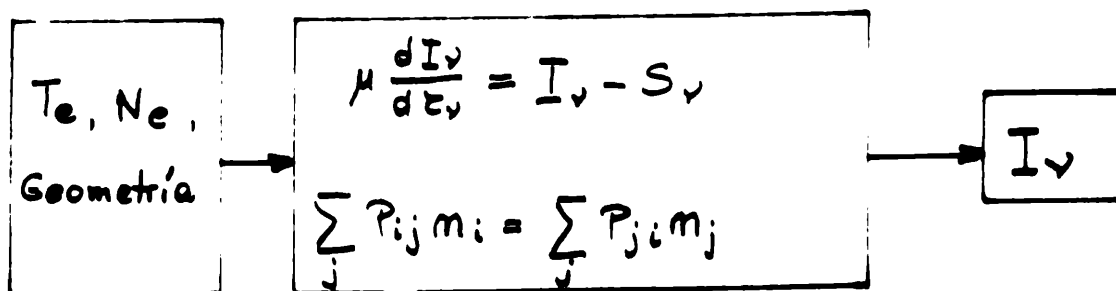


Fig. 1

des de cómputo son enormes si se trata de átomos de más de dos niveles.

Hemos decidido, por lo tanto, atacar el problema en una primera aproximación utilizando un espectro continuo conocido, como dato, resolviendo con él las ecuaciones de equilibrio estadístico (ver Fig. 2). Esta aproximación puede ser aplicable a líneas ópticamente finas.

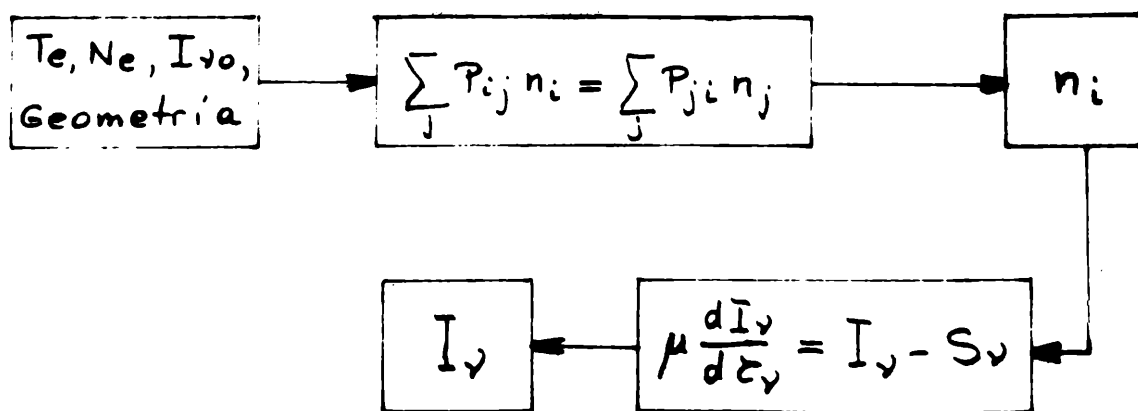


Fig. 2

Informaremos aquí sobre el cálculo de los coeficientes $P_{ij} = C_{ij} + R_{ij}$ y sobre algunos primeros valores de poblaciones para los niveles tripletes del átomo de He I.

Atomo de He

Como muestra la Fig. 3 los niveles tripletes del He I forman un bloque relativamente independiente ya que están conectados al nivel fundamental a través de transiciones prohibidas y su única conexión importante con el resto de los niveles ocurre a través del continuo.

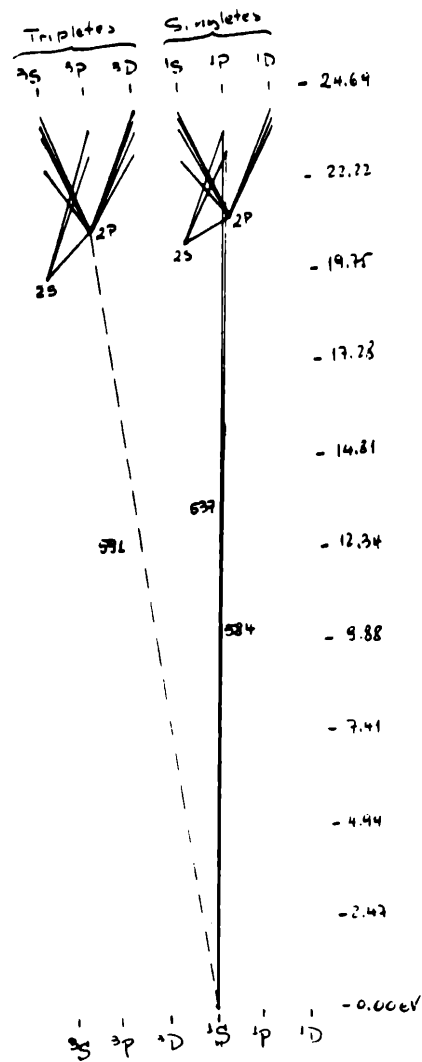


Fig. 3

La Fig. 4 muestra en detalle los niveles y transiciones dipolares triplete hasta el nivel $n=4$. Son 9 niveles ligados y 17 transiciones entre ellos.

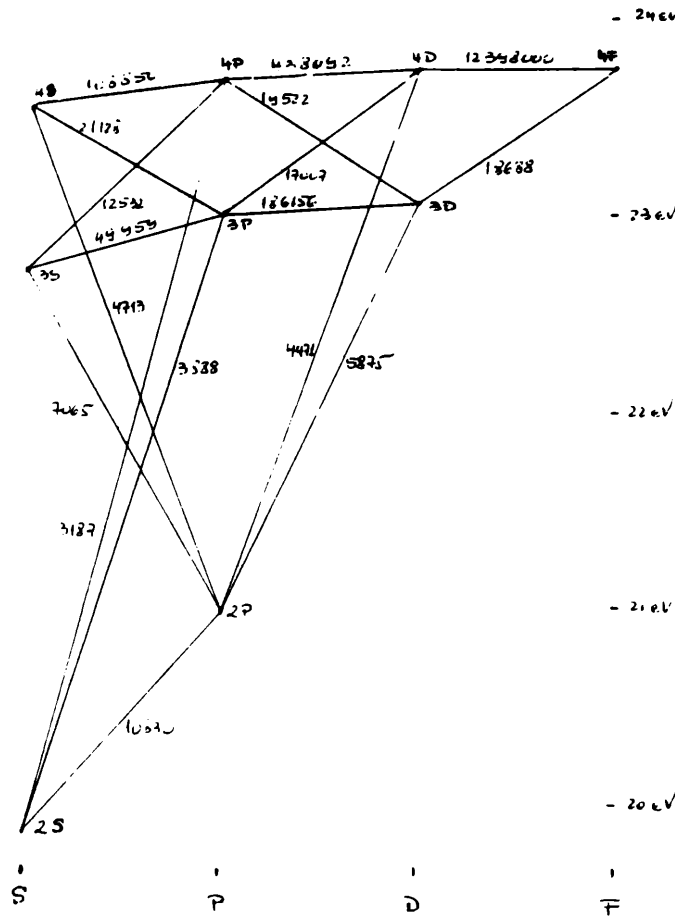


Fig. 4

Los cálculos

Pasamos a detallar las expresiones utilizadas para calcular los coeficientes colisionales y radiativos de las ecuaciones de equilibrio estadístico. Fig. 5 y 6.

TRANSICIONES ENTRE
ESTADOS LIGADOS

$$\text{Excitación Colisional: } \left\{ \begin{array}{l} C_{ij} = N_e \int_{E_0}^{\infty} Q_{ij}(E) n_e f(E) dE \\ C_{ij} \approx \bar{Q}_{ij} \bar{n} \cdot N_e = 17.0 \cdot 10^{-4} \frac{f}{T^{1/2} E_0} 10^{-5040 E_0/T} \cdot N_e \cdot P \end{array} \right.$$

$$\text{Desexcitación Colisional: } C_{ji} = C_{ij} \frac{g_i}{g_j} \exp(E_0/kT)$$

$$\text{Excitación Radiativa: } R_{ij} = \frac{g_j}{g_i} \frac{1}{hc} \lambda^3 A_{ji} \bar{I}_\nu$$

$$\text{Desexcitación Radiativa: } R_{ji} = A_{ji} \left(1 + \frac{1}{2hc} \lambda^3 \bar{I}_\nu \right)$$

$$\bar{I}_\nu = \frac{1}{4\pi} \int \int I_\nu \chi_\nu d\nu d\omega$$

χ_ν perfil de emisión inducida

Fig. 5

TRANSICIONES AL CONTINUO

Ionización
Colisional: $C_{jk} = N_e \int_{E_0}^{\infty} Q_{jk}(E) n_e f(E) dE$

$$C_{jk} \approx \bar{Q}_{jk} \cdot \bar{v} \cdot N_e = 1.77 \cdot 10^{-14} \frac{1}{E_0^2} 10^{-5000 E_0 / T}$$

(kT < E₀)

Recombinación
por choque triple: $C_j = C_{jk} \frac{g_j}{g_0 g_{II}} \cdot \frac{N_e l_i^3}{(2\pi m k T)^{3/2}} \exp(E_0 / kT)$

Ionización
Radiativa: $R_{jk} = 4\pi \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{a_{\nu} J_{\nu}}{h\nu} d\nu$ en $a_{\nu} = a_{\nu_0} \left(\frac{\nu_0}{\nu}\right)^m$

Recombinación Radiativa:

$$R_{kj} = \frac{4\pi}{c^2} \left(\frac{h^2}{2\pi m k T}\right)^{3/2} N_e \frac{g_j}{g_{II}} \int_{\nu_0}^{\infty} \nu^2 a_{\nu} e^{-h(\nu-\nu_0)/kT} \left(1 + \frac{J_{\nu} c^2}{2h\nu^3}\right) d\nu$$

$$J_{\nu} = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} I_{\nu} d\omega$$

Fig. 6

Estos coeficientes han sido calculados para las 17 transiciones entre estados ligados y el continuo para 10 valores de temperatura entre 5000°K y 100.000°K y tres factores de dilución del espectro continuo, cuyo rango es de 3A-18.000 A. Son utilizables para cualquier densidad electrónica, ya que los coeficientes son directamente proporcionales a ella.

Los resultados de los coeficientes colisionales coinciden muy satisfactoriamente con los publicados por Benson y Kulander (1972) para 6000°K y 25000°K, salvo para dos transiciones de f muy bajo, lo cual era de esperar de acuerdo a la validez de las fórmulas semiempíricas utilizadas.

Para $W=1$ y $T_e = 10.000^\circ\text{K}$, los coeficientes radiativos dominan sobre los colisionales para $\text{He} = 10^{10}$. Para $10^{10} < \text{Ne} < 10^{12}$ algunas transiciones muestran alguna contribución colisional.

POBLACIONES PARA LOS NIVELES TRIPLETE DEL HE I

$$T_e = 10.000^\circ\text{K} \quad \text{Ne} = 10^{11} \text{ cm}^{-3} \quad W = 1.0$$

Nivel	g_i	n_i/n_k (Boltzman)	n_i/n_k (calc.)	b_i
2 S	3	0.809-07	0.132-05	16.3
2 P	9	0.114-06	0.394-06	3.45
3 S	3	0.280-08	0.433-08	1.55
3 P	9	0.601-08	0.622-08	1.03
3 D	15	0.928-08	0.106-07	1.14
4 S	3	0.101-08	0.179-08	1.77
4 P	9	0.267-08	0.194-08	0.73
4 D	15	0.430-08	0.211-08	0.49
4 F	21	0.601-08	0.411-08	0.68

Fig. 7

La figura 7 muestra las poblaciones calculadas para un conjunto de datos comparadas con las calculadas con la fórmula de Saha-Boltzman.