

Capítulo 6

Espectros estelares. Clasificación espectral

6.1. Clasificación espectral

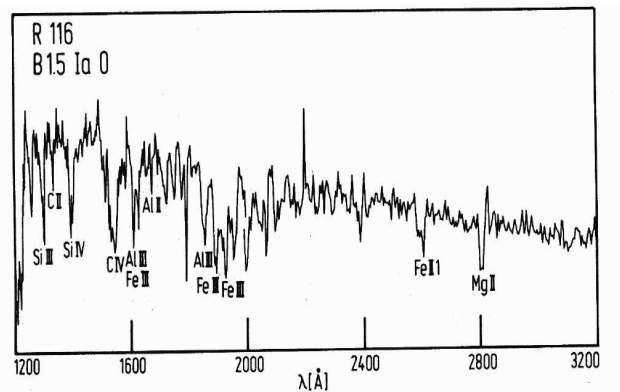


Figura 6.1: Espectro estelar

Espectro estelar: continuo + líneas superpuestas de absorción.

Presencia e intensidad de las líneas \rightarrow clasificación de los espectros estelares: *Tipos Espectrales*.

- Los tipos espectrales (Secuencia de Harvard) son:

O B A F G K M

- Paralelamente al tipo espectral M también tipos S , C (R , N)
- Líneas de la serie de Balmer no son suficientes (Boltzmann + Saha) \rightarrow líneas metálicas + bandas moleculares

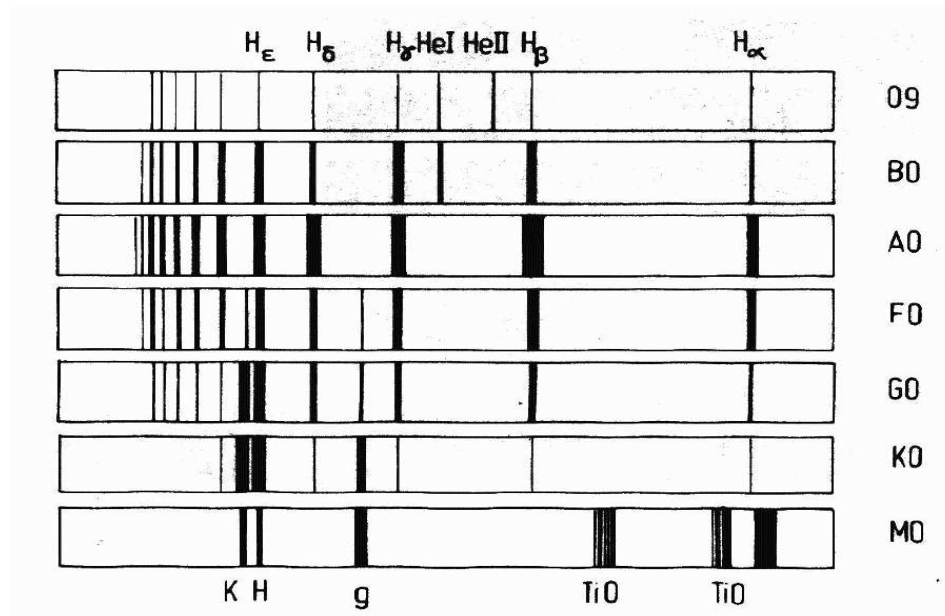


Figura 6.2: Representación esquemática de la clasificación espectral

- Secuencia de Harvard es una clasificación unidimensional. ($= f(T)$)
- Tipos espectrales tienen subtipos numerados del 0 al 9.
- Inicialmente se pensó que representaban una secuencia evolutiva:
 - Líneas de He , H : estrellas OB, “primeros tipos espectrales”
 - Bandas moleculares intensas: estrellas M,C, últimos tipos espectrales.
- Clasificación responde en realidad a un hecho fenomenológico: temperatura estelar decreciente.
- Recientemente, se han agregado los tipos L y T (enanas marrones)

Características de los tipos espectrales:

- Tipo *O*: Líneas de *HeII*, *OII*, *CIII*, *NIII*, *SiIV*. Son las estrellas más calientes. Ejemplo: XX Pup.
- Tipo *B*: Espectro dominado por líneas de *HeI*. Líneas de *HeII* desaparecen. Se hacen más intensas las líneas de *HI* y las de elementos una vez ionizados (*CII*, *SiII*, *MgII*). Ejemplo: α Leo (Regulus).
- Tipo *A*: Líneas de hidrógeno dominan con un máximo en el subtipo *A0*. *MgII* y *SII* son intensas. *CaII* se hace progresivamente más intenso. Ejemplo: α Lyrae (Vega), α CMa (Sirio).
- Tipo *F*: Líneas metálicas se hacen más intensas (átomos neutros e iones tales como *CaII*). Las líneas de hidrógeno se hacen más débiles. Ejemplo: α CMi (Procyon).
- Tipo *G*: Estrellas de tipo solar. La línea de resonancia de *CaI* y ciertas líneas de *FeI* son muy intensas. *CaII* es siempre muy intenso. La banda *G* (espectro del radical *CH*) aparece. Ejemplo: 51 Peg, α Cen A.
- Tipo *K*: Las líneas de resonancia de *CaII* alcanzan su máximo. *HI* se vuelve débil. Aparecen otras bandas moleculares (*CN*.....). Ejemplo: α Boo (Arturo)
- Tipo *M*: El espectro está dominado por bandas moleculares, en particular *TiO*. Las líneas de elementos neutros (*CaI*) permanecen intensas.

Paralelamente al tipo espectral M aparecen:

- Estrellas de carbono (tipo *C*, subdividida en tipos *R* y *N*): bandas moleculares muy intensas de *C₂*, *CN*, *CO*, *CH*. *TiO* ausente. Ejemplo: XX Ceti (Mira).
- Estrellas de tipo *S*: Las bandas moleculares dominantes son *ZrO*, *LaO*, *YO*. Ejemplo: R Gem

6.2. Clasificación bidimensional (MK)

Clasificación de Harvard unidimensional: relaciona tipo espectral con la temperatura.

Empíricamente: *intensidad de las líneas varían con la luminosidad*:

– Líneas son más anchas o estrechas dependiendo de la luminosidad de las estrellas (Hertzsprung, 1905): estrellas más luminosas presentan líneas más estrechas para un tipo espectral dado.

Explicación plausible: líneas se ensanchan debido a colisiones con H y e^- (proporcional a la densidad).

– La densidad superficial en las estrellas más luminosas es más baja - atmósfera más extensa o radio mayor significa una menor densidad-.

Clasificación en clases de luminosidad:

- Supergigantes: I (IaO, Ia, Iab, Ib)
 - Gigantes: III
 - Subgigantes: IV
 - Enanas: V (secuencia principal: Vega: A0 V; Sol: G2 V)
- Con interferometría: diámetro angular de más de 100 estrellas:
 - Estrellas gigantes (Clase III): $R \approx 10R_{\odot}$
 - Estrellas supergigantes (Clase I): $R \approx 100 - 1000R_{\odot}$.

Clasificación con dos parámetros: T_{eff} , L .

6.3. Diagrama Hertzsprung-Russell (HR)

Diagrama que establece la relación entre la luminosidad y temperatura efectiva de las estrellas de los distintos tipos espectrales y clases de luminosidad.

– Existen distintas formas equivalentes de representar este diagrama: (L, T) , (Magnitud absoluta, índice de color), etc.

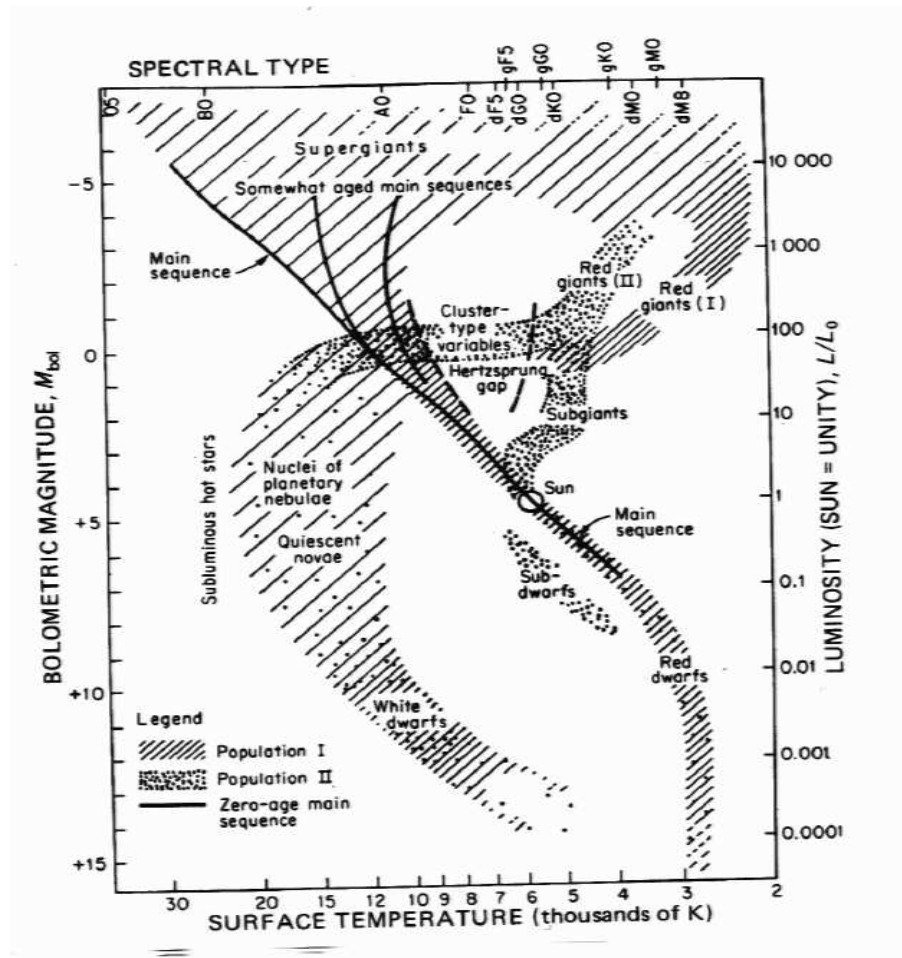


Figura 6.3: Diagrama H-R

6.4. Cuestiones y ejercicios

- Una estrella de tipo espectral A5 V localizada a una distancia de 1 kpc tiene una magnitud aparente $m_v = 22$. Calcular la extinción en la banda K de Johnson, su magnitud aparente y el flujo en dicha banda. Estimar además el índice de color aparente J-K.

Respuesta:

$$m_v - M_v = 5 \log r - 5 + A_v$$

Una estrella de tipo espectral A5 V tiene $M_v = 2$. Por tanto $A_v = 10 \text{ mag}$ y utilizando una curva de extinción normal $A_K = 1 \text{ mag}$.

El índice de color intrínseco es $V - K = 0,36$, por tanto $M_K = 1,64$ y con la expresión del módulo de distancia:

$$m_K - M_K = 5 \log r - 5 + A_K$$

obtenemos $m_K = 12,64$ y de aquí $F_K = 5,54 \cdot 10^{-29} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} = 5,54 \text{ mJy}$

La extinción en J es $A_J = 0,25 A_v = 2,5 \text{ mag}$. El índice de color intrínseco es $V - J = 0,27$ y $M_J = 1,73$. Con estos valores obtenemos $m_J = 14,23$ y por tanto $(J - K)_{\text{obs}} = 1,59$. El intrínseco es 0.09.

De otra forma:

$$E(J - K) = A_J - A_K = (J - K)_{\text{obs}} - (J - K)_0$$

Y:

$$(J - K)_{\text{obs}} = (A_J - A_K) + (J - K)_0 = 1,59$$

- Una estrella doble cuyas componentes tienen tipos espectrales AO y FO de la secuencia principal sufren una extinción en V de 3 magnitudes y están localizadas a una distancia de 100 pc . a) ¿Podrías estimar su magnitud aparente en V? b) ¿Podrías estimar el valor de la masa y temperatura efectiva de cada componente de la binaria suponiendo que ambas son del mismo tipo espectral, que su magnitud aparente es la deducida anteriormente, y que la distancia y extinción son de nuevo iguales al apartado anterior?

Respuesta:

a)

$$M_V(A0V) = 0,7 \rightarrow m = M + 5 \log r - 5 + A_V = 8,7$$

$$M_V(F0V) = 2,6 \rightarrow m = M + 5 \log r - 5 + A_V = 10,6$$

en general:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{S_1}{S_2}$$

y $F_V(m = 0) = 3,81 \cdot 10^{-23} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.

\Rightarrow

$S_V(A0V) = 1,26 \cdot 10^{-26}$ y $S_V(F0V) = 2,19 \cdot 10^{-27}$. luego $S(\text{bin}) = 1,48 \cdot 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.

Y:

$$m = -2,5 \log \frac{S}{S_0} = 8,53$$

b)

$$m - m_{\text{bin}} = -2,5 \log \frac{S}{S_{\text{bin}}} = -2,5 \log \frac{1}{2} \rightarrow m = 9,28$$

$$m - M = 5 \log r - 5 + A_V \rightarrow M_V = 1,28 \approx A2V$$

$$M \approx 2 - 3 M_{\odot} \quad T \approx 9000 K$$

3. NGC 7129/FIRS2 es una fuente pre-secuencia principal sumergida en una nube molecular y sólo detectable en el infrarrojo lejano y milimétricas. La región se encuentra a una distancia de 1 Kpc . Los flujos medidos por IRAS y el telescopio JCMT son $S(25\mu m) = 5,4 Jy$; $S(60) = 91,2 Jy$; $S(100) = 195,2 Jy$; $S(800) = 5,82 Jy$; $S(1100) = 2,18 Jy$; $S(1300) = 1,49 Jy$; $S(2000) = 0,39 Jy$. Calcular: 1. La luminosidad total de la fuente. 2. Temperatura efectiva. 3. Masa suponiendo que fuese un objeto en la secuencia principal. 3. Temperaturas de color [25-60] y [60-100]. ¿Podrías dar una explicación simple de su variación?

Respuesta:

a) La luminosidad viene dada por:

$$L_t = 4\pi d^2 S_t$$

donde S_t es el flujo total integrado y se obtiene a partir de los densidades de flujo observadas. Con los datos de *FIRS2* obtenemos $S_t = 1,4 \cdot 10^{11} W m^{-2} = 1,4 \cdot 10^{-8} ergs^{-1} cm^{-2}$ y de aquí con $d = 1000 pc$ se obtiene:

$$L_t = 430 L_\odot$$

($L_\odot = 3,9 \cdot 10^{33} ergs^{-1}$). Para $\lambda < 25\mu m$ y $\lambda > 2mm$ se han considerado los flujos despreciables.

b) La T_e es la que corresponde a la temperatura de cuerpo negro con el mismo flujo total, $F = \sigma T_e^4$. Es decir:

$$L_t = 4\pi d^2 S_t = 4\pi r^2 F = 4\pi r^2 \sigma T_e^4$$

con r el radio estelar y $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-5} ergs^{-1} cm^{-2} grad^{-4}$. Para poder estimar T_e debemos conocer el radio de la fuente. Hacemos la hipótesis que *FIRS2* corresponde a una estrella de la secuencia principal. Una estrella con $430 L_\odot$ corresponde a un tipo espectral $B6 - B7$. Por tanto $T_e \approx 14000 K$.

c) $M \approx 5 M_\odot$

d) La temperatura de color la hallamos con:

$$\frac{S_\nu(1)}{S_\nu(2)} = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^3 e^{\frac{hc}{kT} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}$$

obteniéndose: $T_{25-60} \approx 62K$ y $T_{60-100} \approx 42K$. La diferencia de temperaturas se debe a que las distintas λ muestrean distintas temperaturas de polvo. En realizada hay que hacer un ajuste teniendo en cuenta todas las frecuencias y una emisividad para el polvo.

4. Calcular el índice de color $U - B$ de dos cuerpos negros de 6000 K y 4000 K respectivamente, tomando como referencia de flujos (F_λ) para cada banda los valores para una estrella de magnitud cero dados en la tabla 5.1. Comparar los resultados de los índices de color con los de estrellas de la secuencia principal que tengan como temperaturas efectivas 6000 K y 4000 K. Explicar concisamente la posible causa de las diferencias.

Respuesta:

Tabla 5.1 da el valor del flujo en las bandas U y B para una estrella de magnitud cero. Los índices de color para los cuerpos negros del enunciado deben considerar estos puntos ceros.

- Banda U :

$$U - U_o = -2,5 \log \frac{S_U}{S_{U_o}}$$

Tabla 5.1: $U_o = 0,0 mag \rightarrow S_{U_o} = 4,35 \times 10^{-12} W cm^{-2} \mu m^{-1}$

- B : Se procede análogamente
- El índice de color $U - B$ es:

$$U - B = -2,5 \log \frac{S_U}{S_B} + 2,5 \log \frac{S_{U_o}}{S_{B_o}}$$

- Los valores S_U y S_B corresponden a los dados por la función de Planck. Por tanto:

$$U - B = -2,5 \log \left[\left(\frac{\lambda_B}{\lambda_A} \right)^5 \frac{e^{hc/\lambda_B kT} - 1}{e^{hc/\lambda_U kT} - 1} \right] + 2,5 \log \frac{S_{Uo}}{S_{Bo}}$$

$$\mathbf{T = 6000\ K} \rightarrow U - B = -0,34\ mag$$

$$\mathbf{T = 4000\ K} \rightarrow U - B = 0,26\ mag$$

Estrella con $T_e = 6000\ K$ ($\sim G2V$) tiene $(U - B)_o \approx 0,12\ mag$. Estrella con $T_e = 4000\ K$ ($\sim M1V$) tiene $(U - B)_o \approx 1,20\ mag$.

Las diferencias entre los valores de los cuerpos negros y de las estelares con esa temperatura efectiva se pueden atribuir a: i) salto de Balmer muy notable (produce un enrojecimiento de los índices de color U-B) en las estrellas $A0V$ (estrella de referencia en la calibración de flujos) y no tanto para una estrella $G2V$; produce un acentuamiento de la diferencia; ii) en el caso de la estrella $M1V$ las bandas moleculares son muy importantes y absorben una gran cantidad de energía en relación a la distribución de cuerpo negro. Se acentúan mucho las diferencias incluso comparándolas a la calibración estandar.

5. Sirio es una estrella doble cuyas componentes tienen el mismo color. Sirio A tiene un tipo espectral $A1V$ ($T \approx 10^4$), magnitud aparente $m_V = -1.6$ y magnitud bolométrica es 0.8 . La magnitud aparente de Sirio B es $m_V = 7.1$. a) Calcular el radio de ambas componentes en radios solares. b) Zona del diagrama HR donde está Sirio B. c) Densidad media de Sirio B, suponiendo que su masa es igual a la del Sol ($\rho_\odot = 1,6g/cm^3$). d) Paralaje (π) y distancia de Sirio A suponiendo que su magnitud absoluta es $M_V = 1.3$. ($M_\odot^{bol} = 4.8$, $T_\odot = 6000\ K$).

RESPUESTA:

a):

$$M_A^{bol} - M_\odot^{bol} = -2,5 \log(L_A/L_\odot)$$

$$\log \frac{L_A}{L_\odot} = (0,8 - 4,8)/(-2,5)$$

$$\frac{L_A}{L_\odot} = 10^{1,6}$$

$$\frac{L_A}{L_\odot} = \left(\frac{R_A}{R_\odot} \right)^2 \left(\frac{T_A}{T_\odot} \right)^4$$

$$R_A = 2,2 R_\odot$$

Ambas componentes de Sirio tienen el mismo color \Rightarrow misma temperatura:

$$m_A - m_B = -2,5 \log \frac{S_A}{S_B}$$

Al estar ambas a la misma distancia y como $L = 4\pi d^2 S$ y $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$, queda:

$$-8,7 = -2,5 \log \frac{S_A}{S_B} = -2,5 \log \left(\frac{R_A}{R_B} \right)^2$$

$$\frac{R_A}{R_B} = 54,95 \rightarrow R_B = 0,039 R_\odot$$

b): Es una enana blanca.

c):

$$\frac{\rho_B}{\rho_\odot} = \left(\frac{R_\odot}{R_B}\right)^3 \rightarrow \rho_B = 3,5 \text{ Kg/cm}^3$$

d):

$$m - M = 5 \log d - 5 = -5 \log \pi - 5$$

Sustituyendo:

$$d = 2,63 \text{ pc}; \quad \pi = 0,38$$

6. Dos estrellas 1 y 2 tienen el mismo tipo espectral siendo sus magnitudes aparentes en el visible $m_1 = 15$ y $m_2 = 18$. La distancia a la estrella 2 es dos veces mayor que a estrella 1. i) Calcular la diferencia de extinción que sufren ambas estrellas en la banda K, expresada en magnitudes. ii) Suponiendo que la distancia a la estrella 2 es de 1 kpc y que el tipo espectral de ambas es $F0V$, calcular el exceso de color $V - K$ de la estrella 1. iii) Calcular la temperatura de color $V - K$ observada de ambas estrellas (2.25 puntos).

i)

$$m_1 - M = 5 \log r_1 - 5 + A_1$$

igual para la estrella 2. Restando resulta:

$$A_V(2) - A_V(1) = 4,5 \text{ mag} \rightarrow A_K(2) - A_K(1) = 0,45 \text{ mag}$$

ii) $M_V = 2,6$ $V - K = 0,79$. Aplicando la formula del módulo de distancia se obtiene: $A_V(2) = 5,4 \rightarrow A_V(1) = 0,9$. El exceso de color es $E(V - K) = A_V - A_K = 0,9 - 0,09 = 0,81$

iii) Aplicando los modulos de distancia a cada estrella, se obtiene $m_K(1) = 13,41$ y $m_K(2) = 12,35$. De aqui se calcula la T_c .

6.5. Anexo: Distribución energética de tipos espectrales

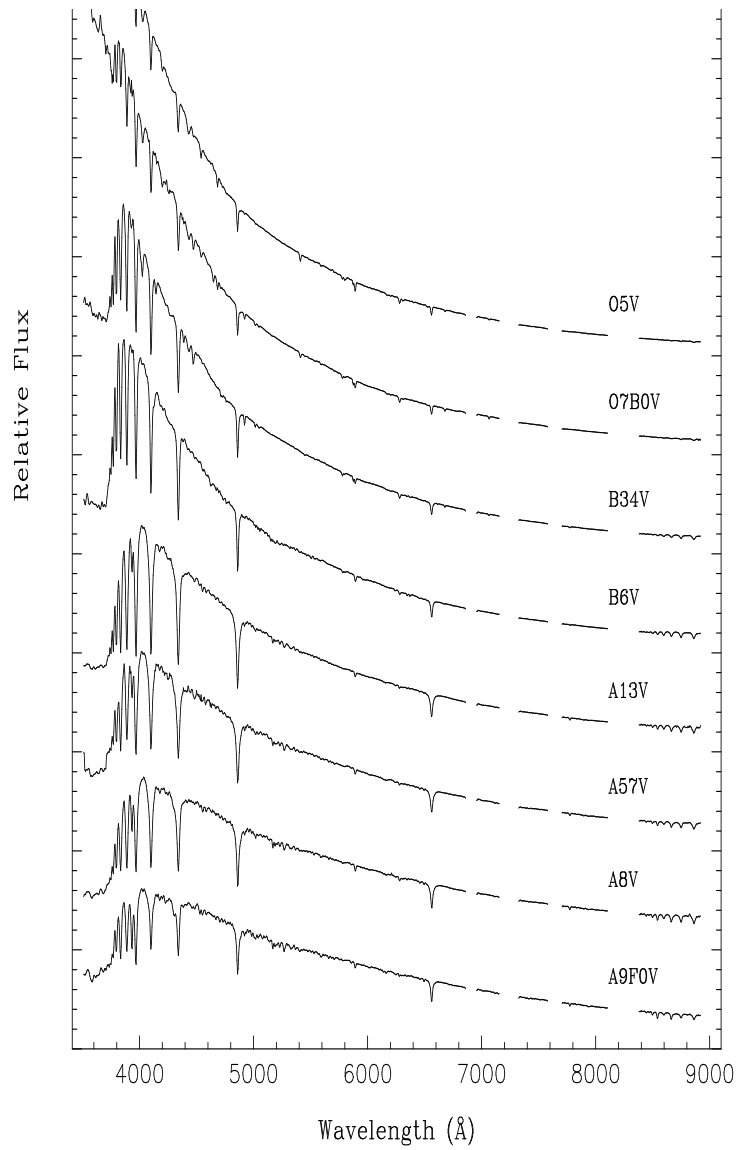


Figura 6.4: Tipos espectrales: Distribución energética

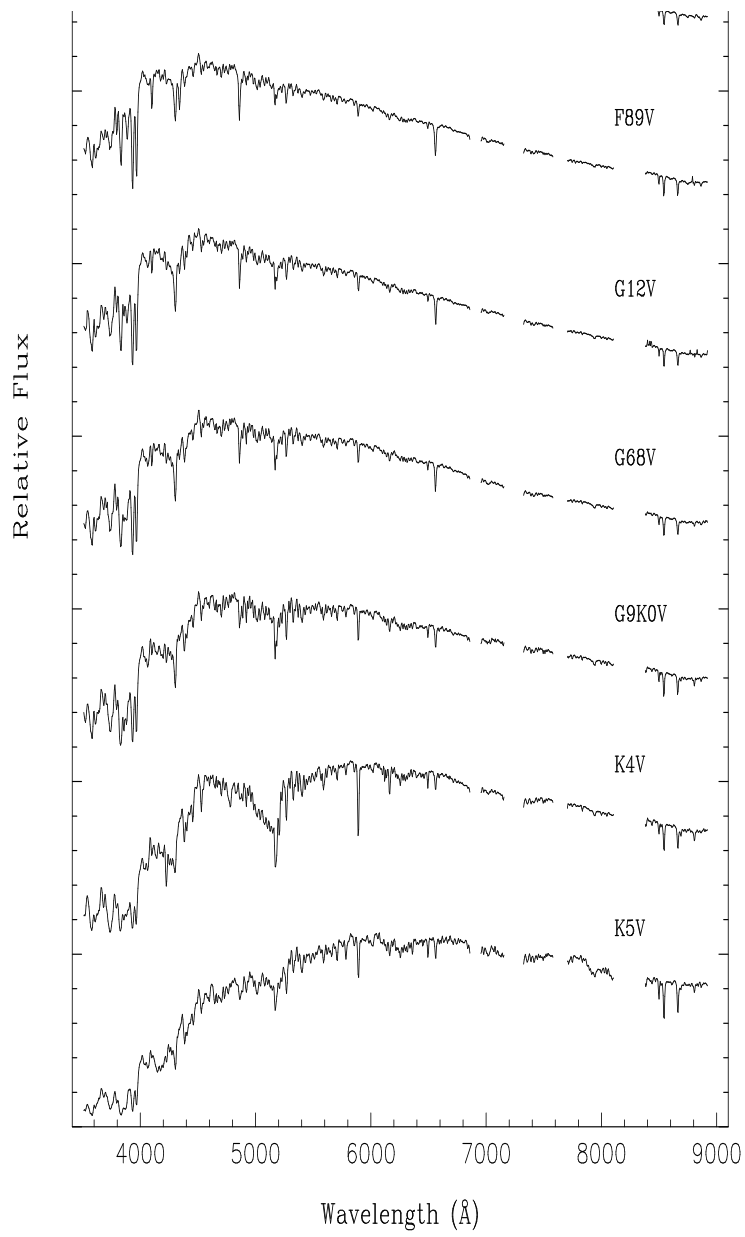


Figura 6.5: Tipos espectrales: Distribución energética

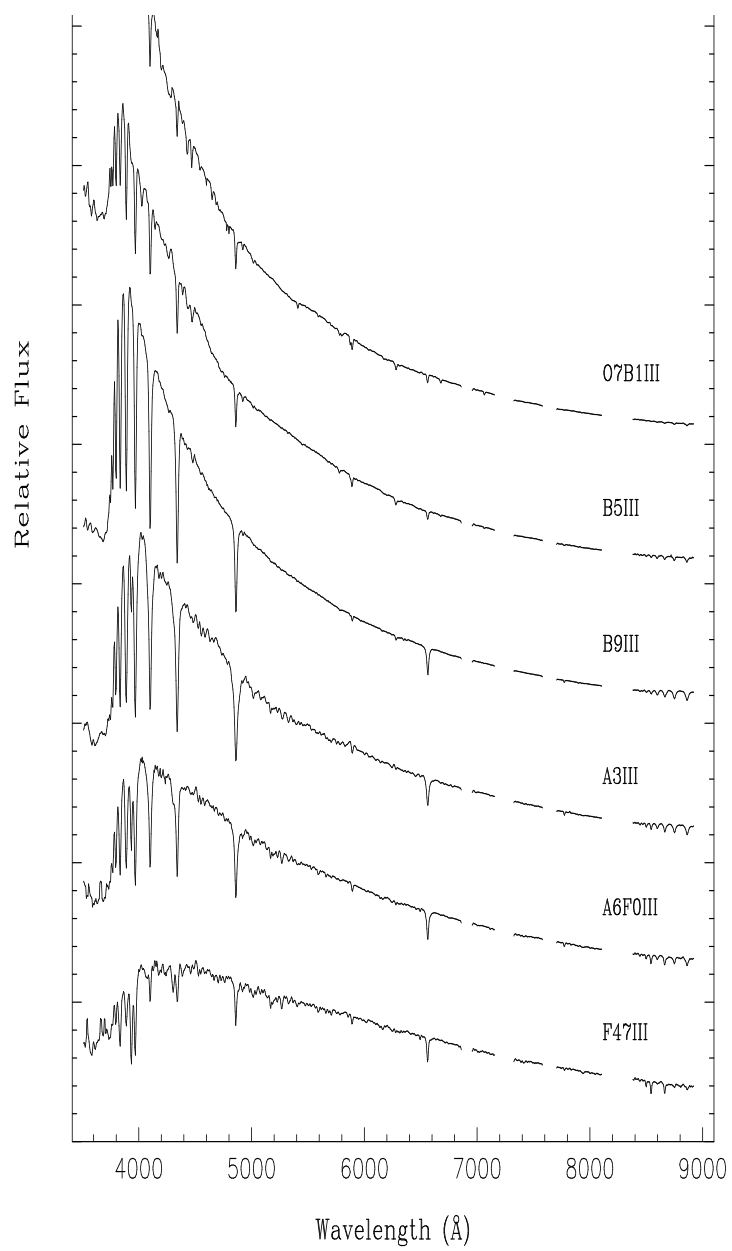


Figura 6.6: Tipos espectrales: Distribución energética

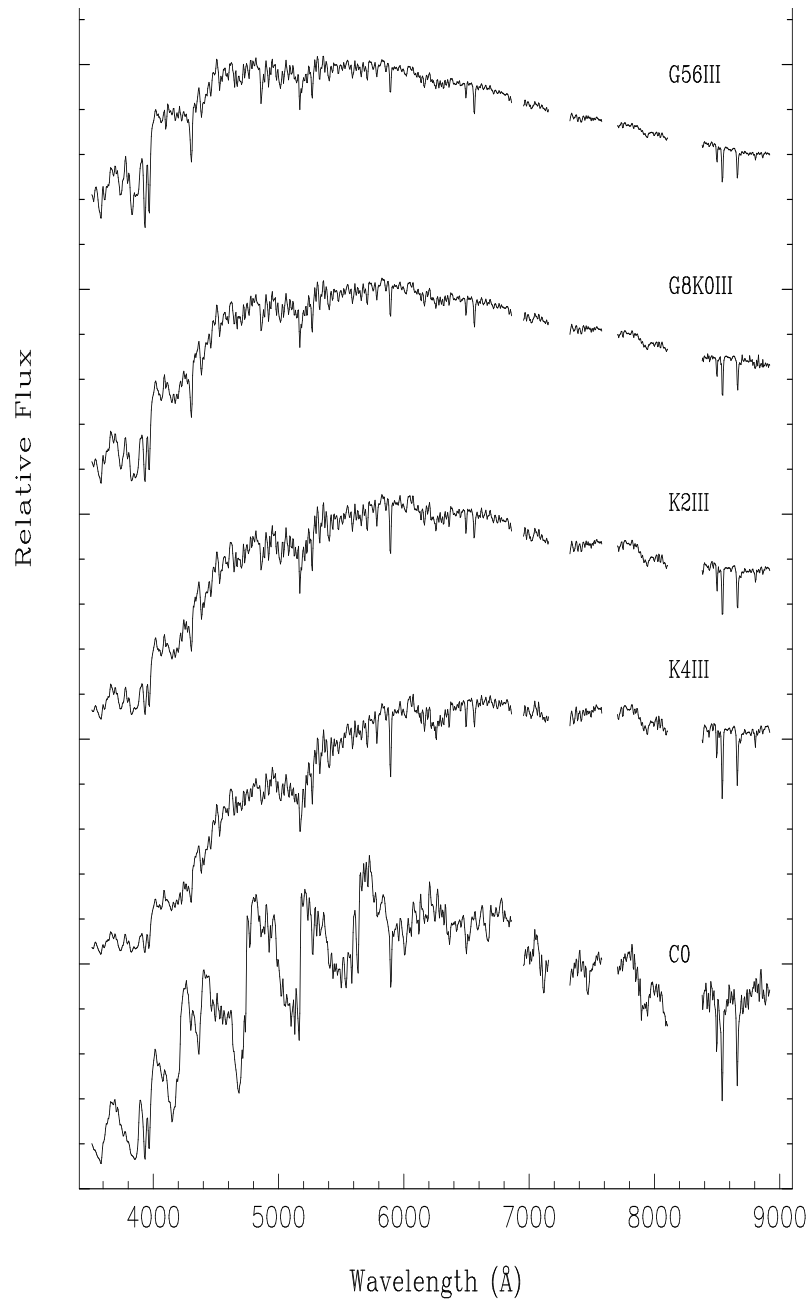


Figura 6.7: Tipos espectrales: Distribución energética

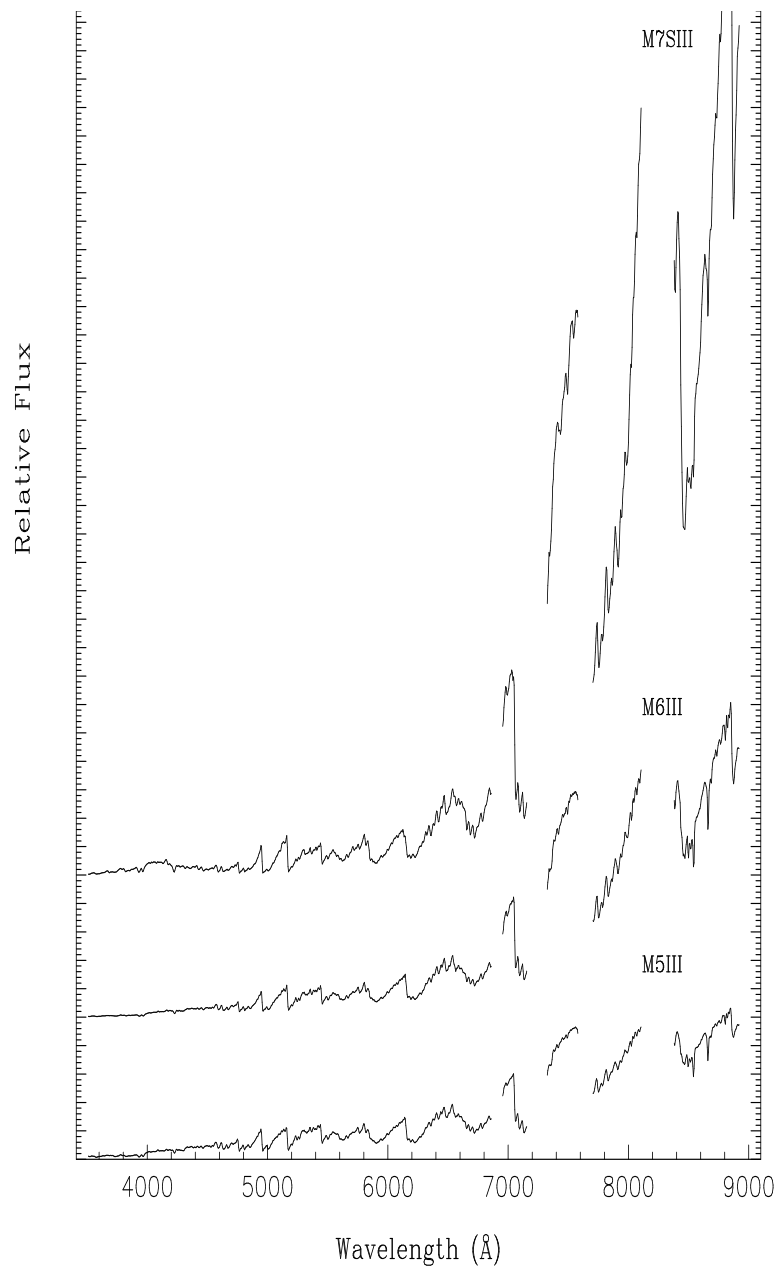


Figura 6.8: Tipos espectrales: Distribución energética

6.6. Anexo: Valores de parámetros estelares según tipos espectrales y clases de luminosidad

Parameters for stars of various spectral types. Columns give: spectral type; absolute visual magnitude, M_V ; color index, $B - V$; bolometric correction, B.C.; bolometric magnitude, M_{bol} ; effective surface temperature, T_{eff} ; mass, radius, and luminosity in solar units; and average density in g/cm^3 .

Sp	M_V	$B - V$	B.C.	M_{bol}	T_{eff}	$\log \frac{M}{M_\odot}$	$\log \frac{R}{R_\odot}$	$\log \frac{L}{L_\odot}$	$\log \bar{\rho}$
<i>Main sequence (V):</i>									
O5	-5.8	-0.35	-4.0	-10	40,000	1.6	1.25	5.7	-2.0
B0	-4.1	-0.31	-2.8	-6.8	28,000	1.25	0.87	4.3	-1.2
B5	-1.1	-0.16	-1.5	-2.6	15,500	0.81	0.58	2.9	-0.78
A0	0.7	0.0	-0.4	0.1	9,900	0.51	0.40	1.9	-0.55
A5	2.0	0.13	-0.12	1.7	8,500	0.32	0.24	1.3	-0.26
F0	2.6	0.27	-0.06	2.6	7,400	0.23	0.13	0.8	-0.01
F5	3.4	0.42	0.0	3.4	6,580	0.11	0.08	0.4	0.03
G0	4.4	0.58	-0.03	4.3	6,030	0.04	0.02	0.1	0.13
G5	5.1	0.70	-0.07	5.0	5,520	-0.03	-0.03	-0.1	0.20
K0	5.9	0.89	-0.19	5.8	4,900	-0.11	-0.07	-0.4	0.25
K5	7.3	1.18	-0.60	6.7	4,130	-0.16	-0.13	-0.8	0.38
M0	9.0	1.45	-1.19	7.8	3,480	-0.33	-0.20	-1.2	0.4
M5	11.8	1.63	-2.3	9.6	2,800	-0.67	-0.5	-2.1	1.0
M8	16	1.8			2,400	-1.0	-0.9	-3.1	1.8
<i>Giants (III):</i>									
G0	1.1	0.65	-0.03	1.1	5,600	0.4	0.8	1.5	-1.8
G5	0.7	0.85	-0.2	0.5	5,000	0.5	1.0	1.7	-2.4
K0	0.5	1.07	-0.5	0.2	4,500	0.6	1.2	1.9	-2.9
K5	-0.2	1.41	-0.9	-1.0	3,800	0.7	1.4	2.3	-3.4
M0	-0.4	1.60	-1.6	-1.8	3,200	0.8		2.6	-4.0
M5	-0.8	1.85	-2.8	-3				3.0	
<i>Supergiants (I):</i>									
B0	-6.4	-0.25	-3	-9	30,000	1.7	1.3	5.4	-2.1
A0	-6.2	0.0	-0.5	-7	12,000	1.2	1.6	4.3	-3.5
F0	-6	0.25	-0.1	-6	7,000	1.1	1.8	3.9	-4.2
G0	-6	0.70	-0.1	-5.2	5,700	1.0	2.0	3.8	-4.9
G5	-6	1.06	-0.3	-5.2	4,850	1.1	2.1	3.8	-5.2
K0	-5	1.39	-0.7	-5.4	4,100	1.1	2.3	3.9	-5.7
K5	-5	1.70	-1.2	-6	3,500	1.2	2.6	4.2	-6.4
M0	-5	1.94	-1.9	-7		1.2	2.7	4.5	-6.7
M5		2.14	-3.2						

SOURCE: Adapted from C. W. Allen, *Astrophysical Quantities*, 3rd ed. (London: The Athlone Press, 1973).