

## 4.2. El átomo de hidrógeno

- $H$  elemento más abundante en el Universo  
→ Domina las propiedades físicas del material estelar
- Niveles energéticos del  $e^-$  en  $H$  o en un ión hidrogenoide:

$$E_n = -Z^2 \frac{m_e e^4}{2n^2 \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2} = -\frac{Z^2 R}{n^2} \quad (4.1)$$

- $Z$  = número atómico
- $R = m_e e^4 / 2 \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 = 1,0974 \times 10^5 \text{ cm}^{-1} = 13,96 \text{ eV}$  (constante de Rydberg)

- $E_n < 0$ : Energías de ligadura del electrón (estados ligados).

- $n \rightarrow \infty, E_n \rightarrow 0$
- $n = 1$  estado fundamental (más fuertemente ligado, nivel más bajo)

$$E_1 = 2,18 \times 10^{-11} Z^2 \text{ erg} = 13,6 Z^2 \text{ eV}$$

- Para  $H$  ( $Z = 1$ ):  $E_1 = 13,6 \text{ eV}$  (energía de ionización)

- $E > 0$ : Estados de energía libre.  $e^-$  se mueven libremente en el campo electromagnético de los protones. Estados libres son parte de la estructura de energía del  $H$ . No están cuantizados; cualquier valor de la energía es posible. Se forma un continuo de energía.

### 4.2.1. Transiciones ligado-ligado (b-b)

- Energía ( $\nu$ ,  $\lambda$ ) correspondiente a la transición entre dos niveles ligados:

$$h\nu = |E_m - E_n| \quad ; \quad \frac{1}{\lambda(cm)} = 1,096 \times 10^5 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (4.2)$$

- **Series:** espectro de  $H$  se clasifica con arreglo a la transiciones desde el mismo nivel  $n$  (el más bajo). Una *serie* corresponde a todas las transiciones que se dan desde el nivel  $n$  a todos los niveles  $m$  de mayor energía.

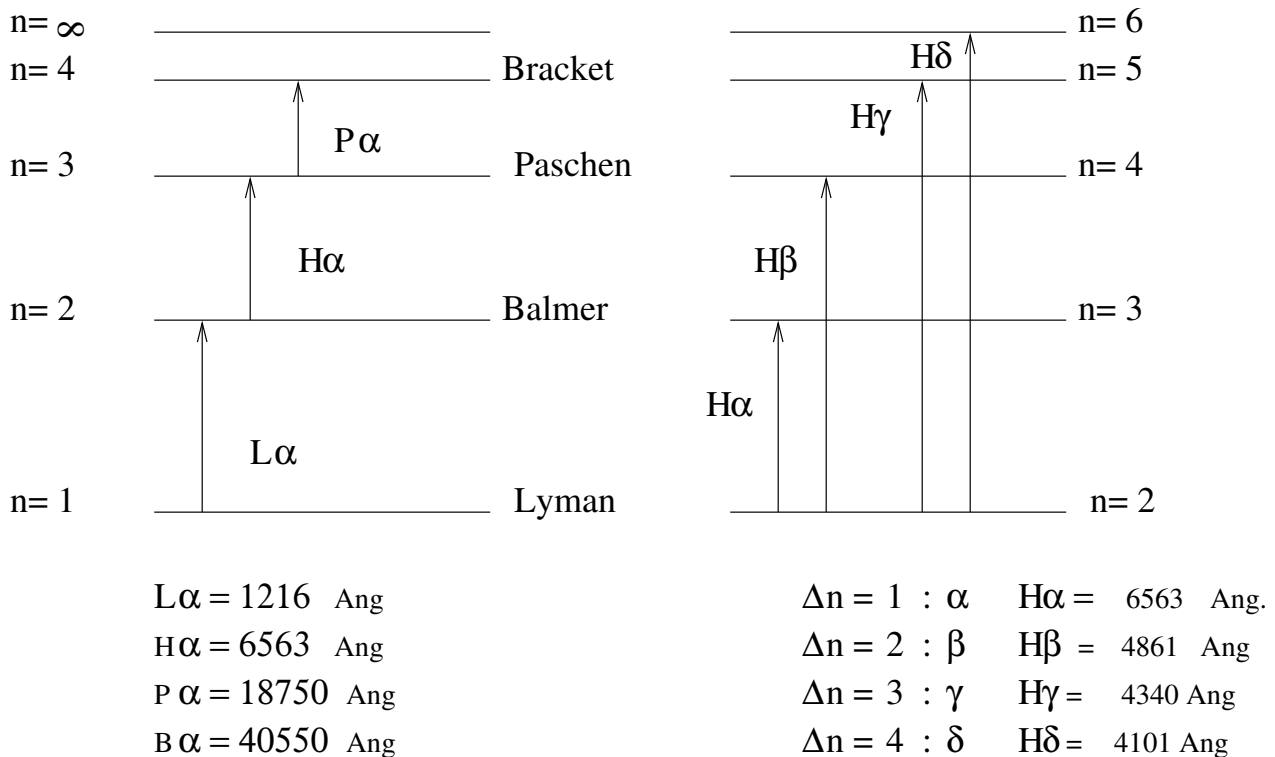


Figura 4.1: Nomenclatura de las series (izquierda) y líneas de la serie de Balmer (derecha) de  $H$

### 4.2.2. Transiciones ligado-libre (b-f)

- *Transición b-f*: Se producen entre un nivel ligado ( $n$ ) y el continuo ( $n = \infty$ )
  - Son absorciones o emisiones en un rango amplio de longitudes de onda, comenzando empezando en la correspondiente a la energía de ionización correspondiente al nivel  $n$ .

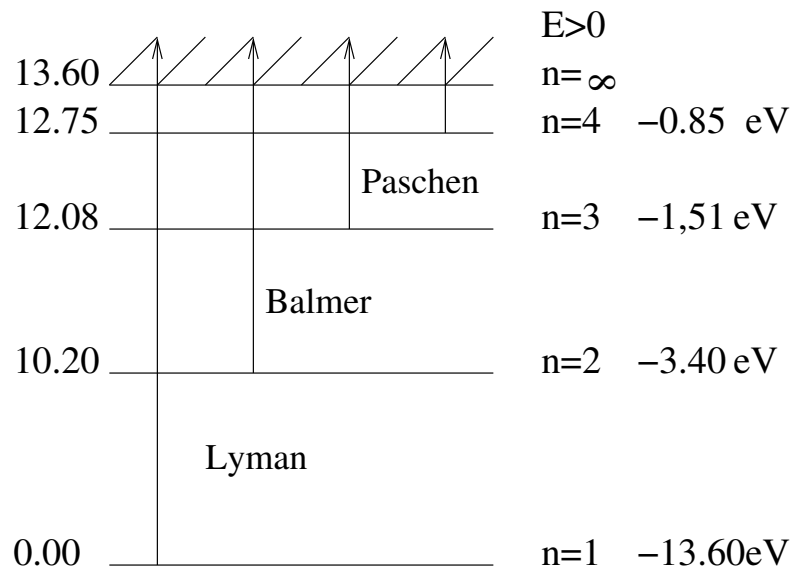


Figura 4.2: Esquema simple de los niveles de energía de  $H$ . Se muestra el número cuántico  $n$ , la energía de ligadura (derecha) y el potencial de excitación (izquierda), ambos en  $eV$ . para los cuatro primeros valores de  $n$

Cuadro 4.1: Límites de ionización de las primeras series de  $H$

$n$	$\lambda$ (Å)	Nombre
1	912	Lyman
2	3647	Balmer
3	8208	Paschen
4	14588	Brackett
5	22790	Pfund

- *Fotoionización: absorción ligado - libre* (produce una opacidad continua):
- *Captura: emisión libre - ligado* (produce una emisión continua de fotones):

\*\* Por ejemplo, serie de Balmer:  $n = 2$ ,  $\lambda = 3647 \text{ \AA}$ , energía de ionización  $\mathcal{X}_2 = 3,4 \text{ eV}$

- Fotoionización: opacidad continua para fotones con  $\lambda < 3647 \text{ \AA}$ .
- Captura: transición del continuo a  $n = 2 \rightarrow$  emisión continua de fotones con  $\lambda < 3647 \text{ \AA}$ .
- Ambos procesos dan lugar al continuo y a la discontinuidad de Balmer, muy importantes en el espectro de muchas estrellas.

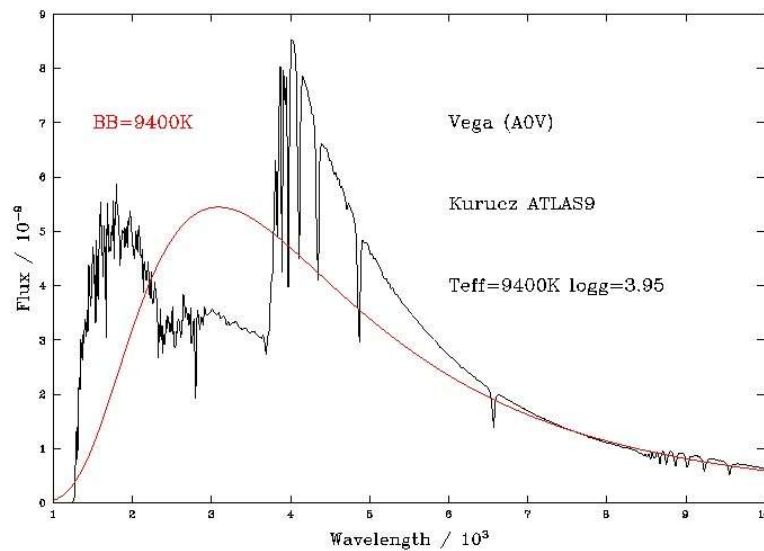


Figura 4.3: Líneas y discontinuidad de Balmer en espectros estelares

### 4.2.3. Transiciones libre-libre (b-f)

- Son transiciones entre estados del continuo.
  - Estados libres no cuantizados
  - Se origina la radiación *bremsstrahlung* (opacidad libre-libre).
- *Escenarios astrofísicos relevantes:*
  - Interiores estelares:  $H$  completamente ionizado;  $\alpha_{ff}$  principal contribuyente a la opacidad.
  - Regiones  $HII$  y nebulosas planetarios (PN): *bremsstrahlung* muy notable en l.d.o. de radio en estas regiones.
- *Nota:*  $E_{ion}(H) = 13.6 \text{ eV} \Leftrightarrow \lambda = 912 \text{ \AA} \Leftrightarrow T_* \sim 30000 \text{ K}$ 
  - Estrellas que producen fotoionización:  $B3$ ,  $T_* \sim 30000 \text{ K}$ ,  $M \sim M_{\odot}$ ,  $L \sim 2 \times 10^3 L_{\odot}$

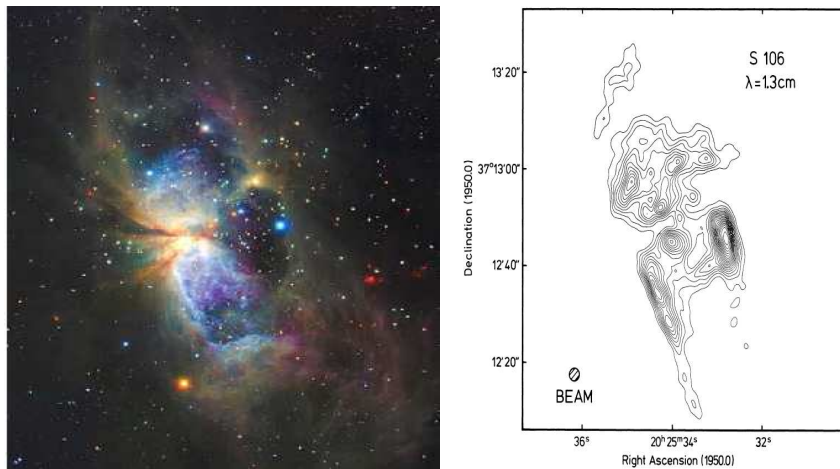


Figura 4.4: La región HII S106 en el infrarrojo cercano (izquierda) y en 6 cm (derecha)

#### 4.2.4. Estructura fina

- Estructura fina: interacción spin-orbita ( $l - s$ ):
  - spin del electrón interacciona con el momento angular orbital del átomo.
  - $n$ :  $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$  ( $S, P, D$ )  $\rightarrow j = l \pm \frac{1}{2}$ .
  - Estados, nomenclatura y peso estadístico:

$$\begin{aligned} S(l=0) \quad j &= \frac{1}{2} \\ P(l=1) \quad j &= \frac{1}{2}, \frac{3}{2} \\ D(l=2) \quad j &= \frac{3}{2}, \frac{5}{2} \\ n^{2s+1}l_j \\ g_n &= 2n^2 \end{aligned}$$

- Diferencia de energía entre los distintos estados debido a la interacción spin-orbita:

$$\Delta E_{n,j} = \frac{\alpha^2 R Z^4}{n^3} \left( \frac{3}{4n} - \frac{1}{j + \frac{1}{2}} \right) \quad (4.3)$$

$$\alpha = \text{cte. de estructura fina} = e^2 / \left( \frac{h}{2\pi} c \right) \approx 137^{-1}.$$

• Ejemplo: Nivel  $2p$

#  $n = 2 \rightarrow l = 1, j = 1/2$  ;  $\Delta E = -5,66 \times 10^5 \text{ eV}$

#  $n = 2 \rightarrow l = 1, j = 3/2$  ;  $\Delta E = -1,1 \times 10^5 \text{ eV}$

– Nivel  $2p$  se desdobra en 2 con  $\Delta E \sim 4,5 \times 10^5 \text{ eV}$

# Línea  $H\alpha$  ( $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ ):  $E_2 - E_3 = 1,3 \text{ eV}$

– Estructura fina:  $\Delta\lambda \sim 10^{-5} \lambda_{H\alpha} \sim 0,06 \text{ \AA}$

# Resolución de un espectrógrafo:  $R = \lambda/\Delta\lambda$

– En el caso de  $H\alpha$ :  $R \sim 100,000 (\sim v = 2,7 \text{ km/s})$

# Espectrógrafos de alta resolución (!! ensanchamiento de líneas !!)

# Líneas del doblete de NaI:  $\Delta\lambda = 6 \text{ \AA}$

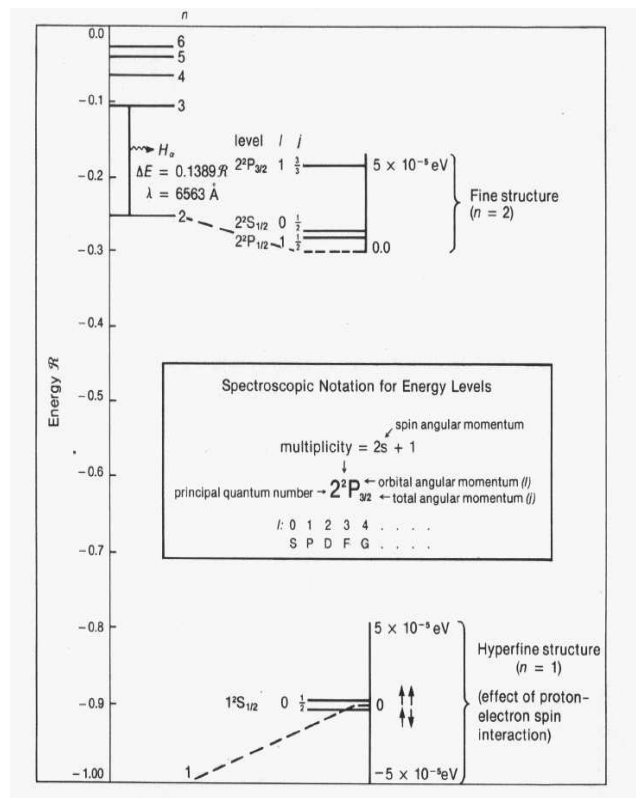


Figura 4.5: Niveles de energía del átomo de hidrógeno. Arriba a la derecha se muestra la estructura fina para el nivel  $n=2$ . El desplazamiento Lamb entre los estados  $2^2S_{1/2}$  y  $2^2P_{1/2}$  corresponde a  $\Delta E = 4.4 \times 10^{-6} \text{ eV}$ . Abajo se muestra la estructura hiperfina del estado  $n=1$ ; la diferencia de energía entre ambos estados es  $\Delta E = 5.8 \times 10^{-6} \text{ eV}$ . El fotón emitido en una transición entre ambos estados corresponde a  $\lambda = 21.11 \text{ cm}$

### 4.2.5. Estructura hiperfina

- Estructura hiperfina: interacción spin – spin:
  - spin del electrón y del protón interaccionan.
- # Nivel  $1^2s_{\frac{1}{2}}$  de  $H$  se desdobra en 2 niveles con separación:

$$\Delta E \sim 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda \approx 21 \text{ cm}$$

- Transición entre ambos niveles es “altamente prohibida”: electrón cambia spin.
- Probabilidad muy pequeña: vida media del nivel  $\tau \approx 10^7$  años.
- *Escenario astrofísicos:*
  - $H$  en el medio interestelar (baja densidad ) de la Galaxia (y en otras galaxias externas) muy abundante
  - Transición  $\lambda = 21 \text{ cm}$  ( $\nu = 1420 \text{ MHz}$ ) fácilmente observable. Traza la distribución de  $H$  en la Galaxia).

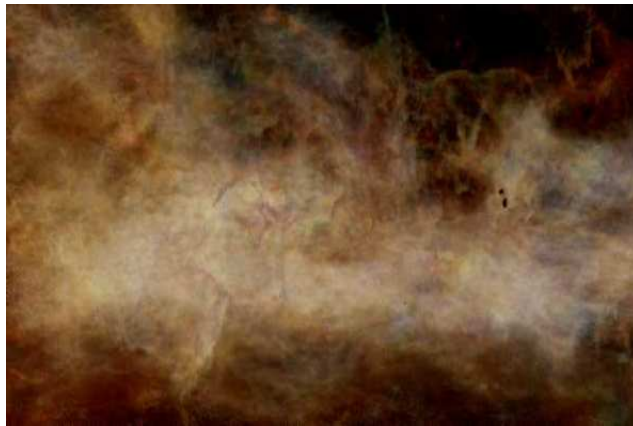


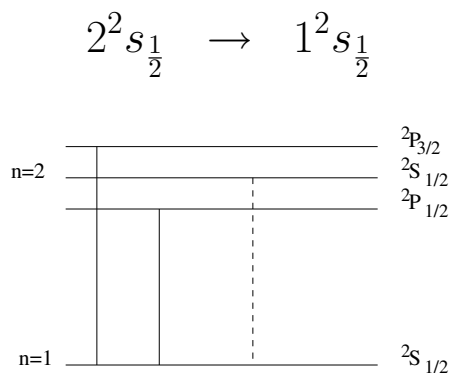
Figura 4.6: Emisión de 21 cm ( $HI$ ) en el plano galáctico



### 4.2.6. Estados metaestables

• Física del medio interestelar muy influenciada por transiciones que no siguen las reglas de selección. Por ejemplo, transiciones en las que los  $e^-$  cambian la orientación del spin: *transiciones prohibidas (muy baja probabilidad)*.

# Ejemplo:



– No cambia  $l$ ,  $\Delta l = 0$

– Fotón emitido se lleva una unidad de momento angular.

$\Rightarrow e^-$  tiene que cambiar (“flip”) su spin para que el momento angular orbital se conserve.

– Es una transición de muy baja probabilidad: razón  $\sim 10 \text{ s}^{-1}$  (transiciones permitidas  $10^8 \text{ s}^{-1}$ ).

–  $H$  permanece durante un tiempo muy largo en el estado  $2^2s_{\frac{1}{2}}$  antes de caer espontáneamente al estado fundamental

- *Escenarios astrofísicos:*

#  $\rho$  estelares muy altas:  $H(2^2s_{1/2})$  colisiona muchas veces antes de que experimente un decaimiento espontáneo al nivel fundamental. La energía de excitación se puede transferir a la partícula colisionante produciendo una des-excitación colisional (inverso: excitación colisional).

# En el medio interestelar las colisiones son poco frecuentes y puede ocurrir la transición (proceso más probable es emisión de dos fotones)

*Estados metaestables:* Los niveles energéticos con probabilidades de transición muy bajas (importantes en medios de baja densidad).

- *Nomenclatura de átomos e iones en Astrofísica*

- Atomo neutro: I (ejemplo HI, CaI)
- Una vez ionizado: II (ejemplo HII, CaII)
- Dos veces ionizados: III (ejemplo OIII)
- .....