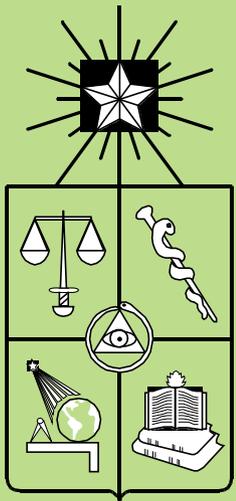
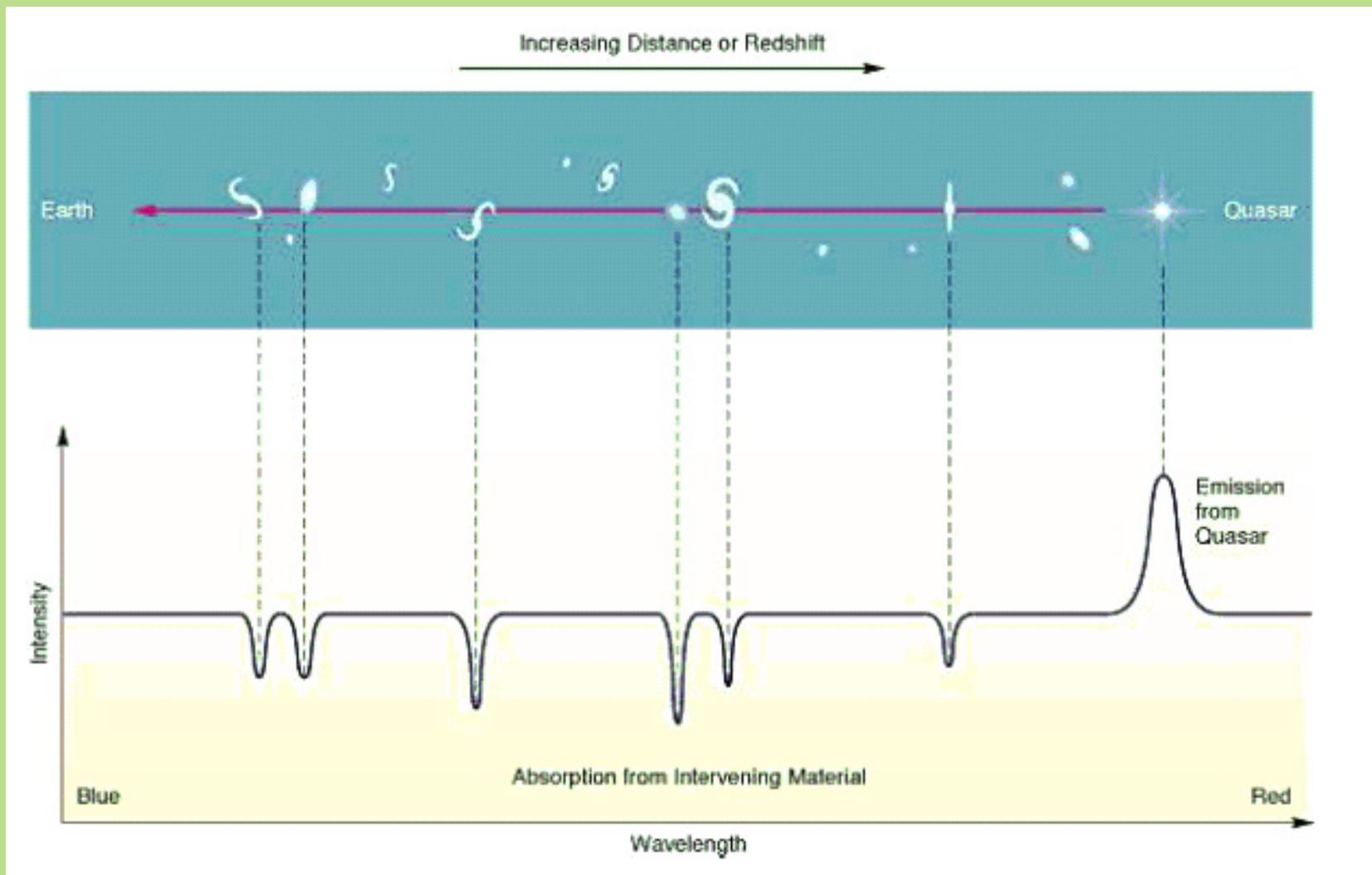


El Medio Intergaláctico



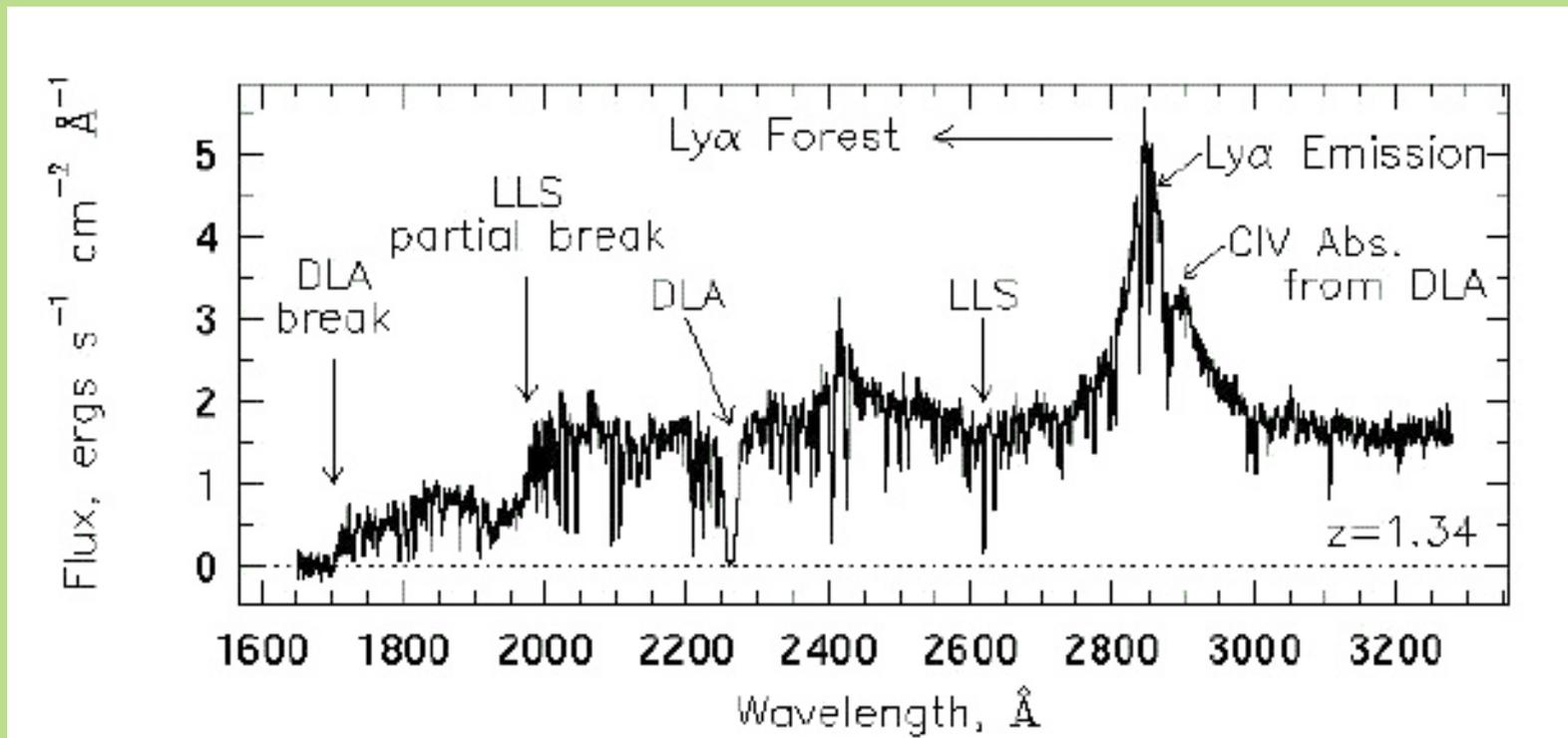
Sebastian Lopez
Departamento de Astronomía
Universidad de Chile



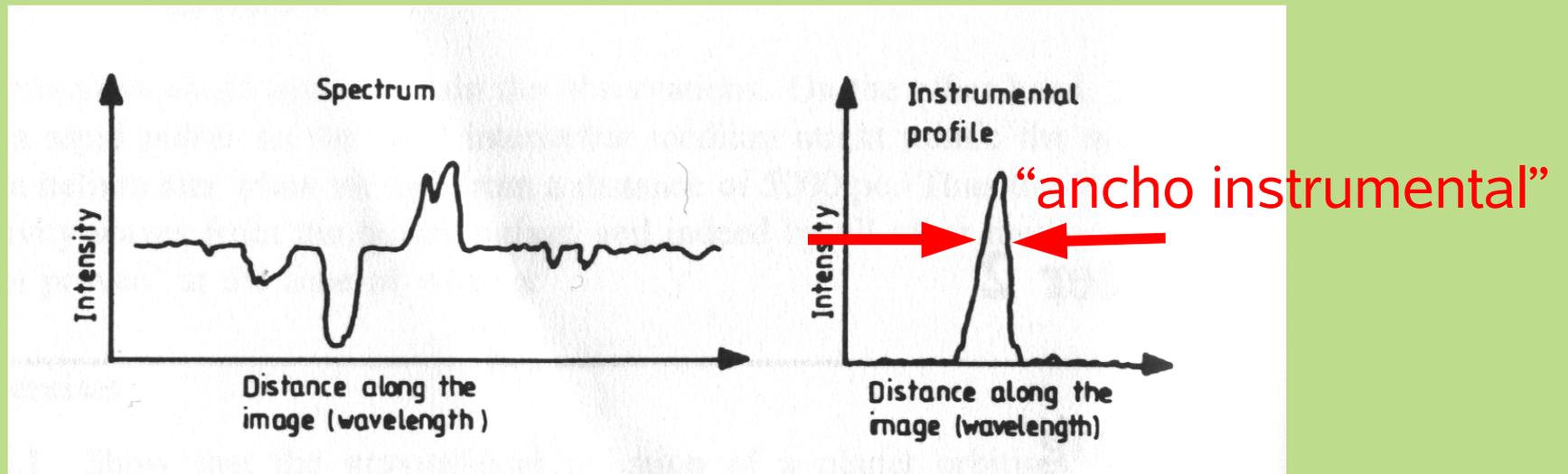


$$\lambda_{\text{obs}} / \lambda_0 = 1+z$$

- ◆ Dos tipos básicos de absorción:
 - ◆ Líneas de absorción debido a transiciones “bound-bound”
 - ◆ “Cortes” de ionización



◆ Resolución espectral y ancho instrumental



◆ Resolución espectral y ancho instrumental

$$O(\lambda) = \int_0^{\infty} T(\lambda') I(\lambda - \lambda') d\lambda'$$

$$O = T * I$$

Transformada de Fourier

$$F(O) = F(T * I) = F(I) \times F(T)$$

Señal “verdadera”

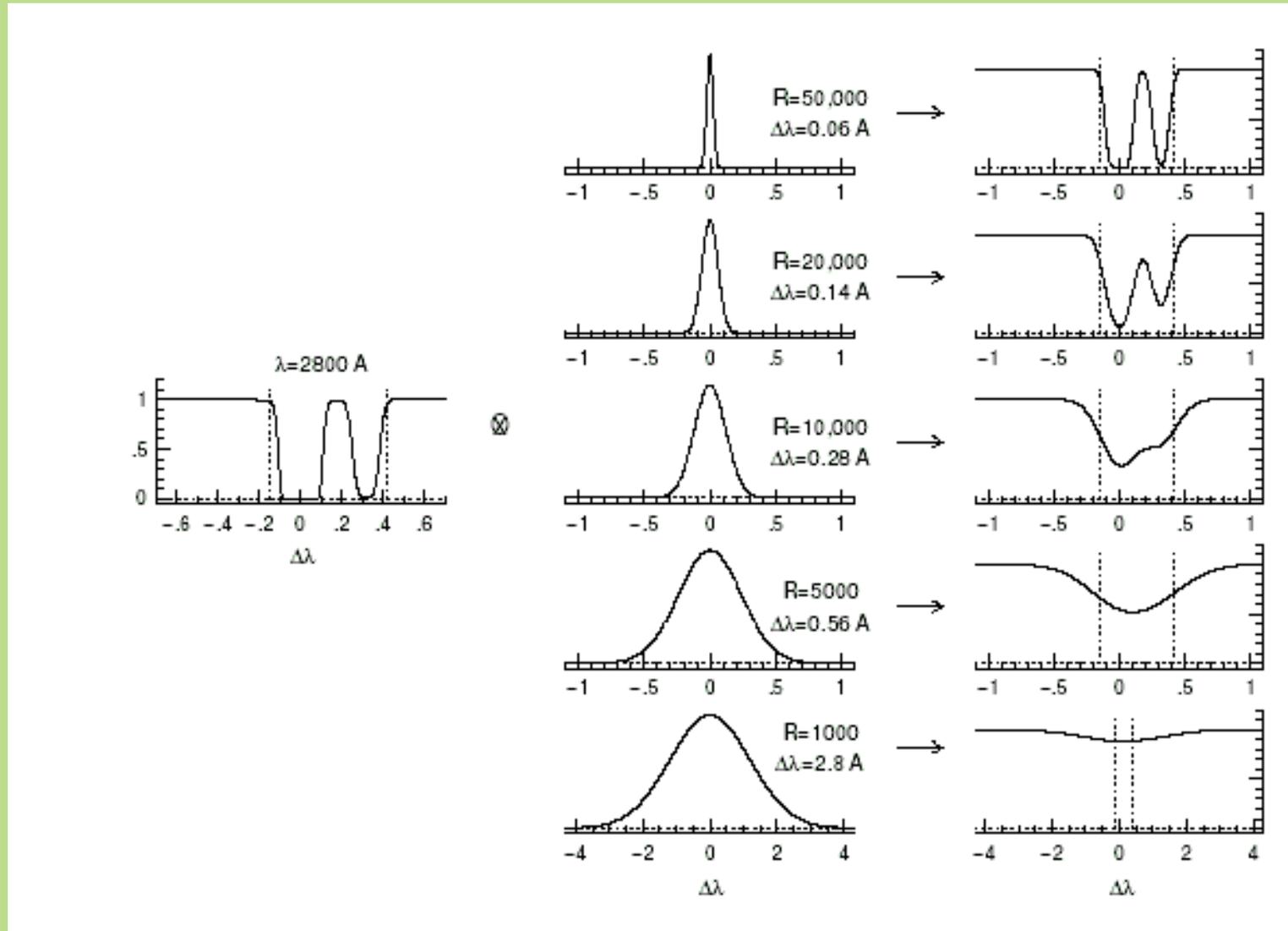
$$T = F^{-1} [F(O) / F(I)]$$

◆ Resolución espectral y ancho instrumental

$$R \equiv \frac{\lambda}{\Delta \lambda}$$

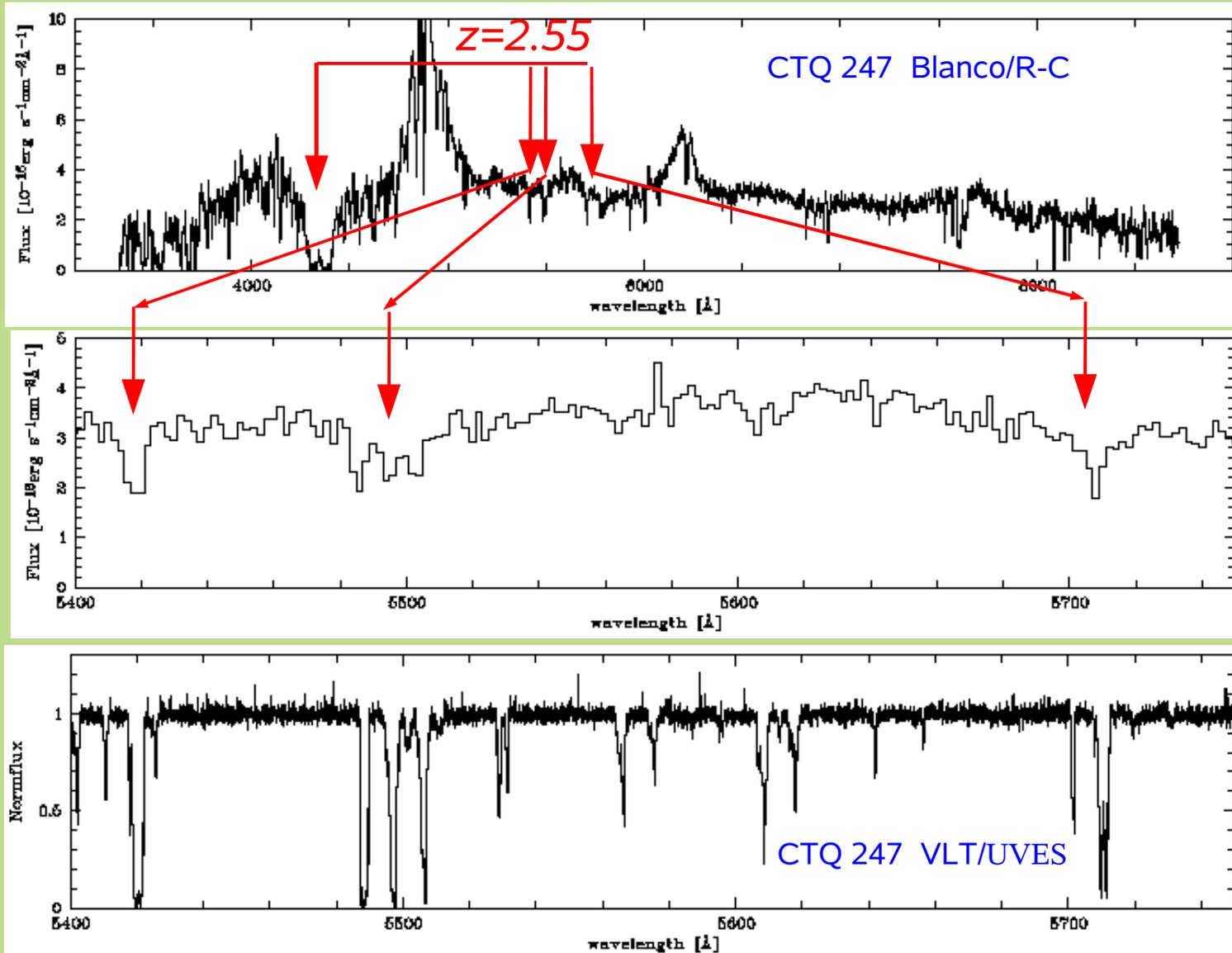
$$\frac{\lambda}{\Delta \lambda} = \frac{c}{\Delta \nu}$$

◆ Resolución espectral y ancho instrumental



$$\frac{S}{N} = \infty!$$

◆ Resolución espectral y ancho instrumental

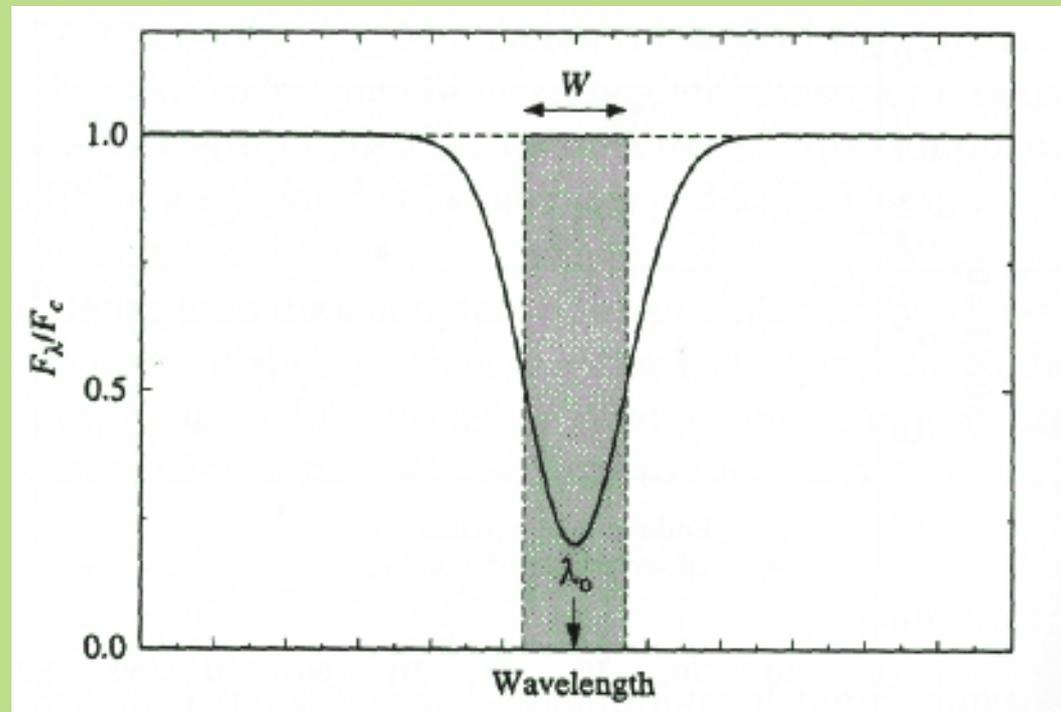


$$\frac{\lambda}{\Delta \lambda} = 800$$

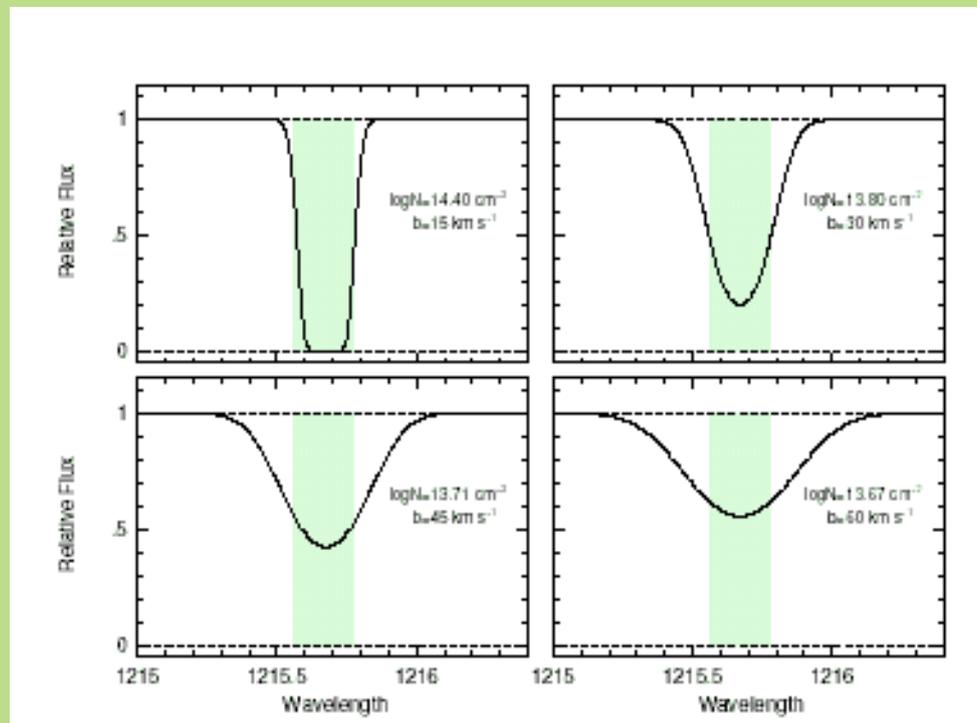
$$\frac{\lambda}{\Delta \lambda} = 45000$$

- ◆ Líneas de absorción. Ancho equivalente, W

$$W(\lambda_0) = \int \left(\frac{F_c - F_\lambda}{F_c} \right) d\lambda$$



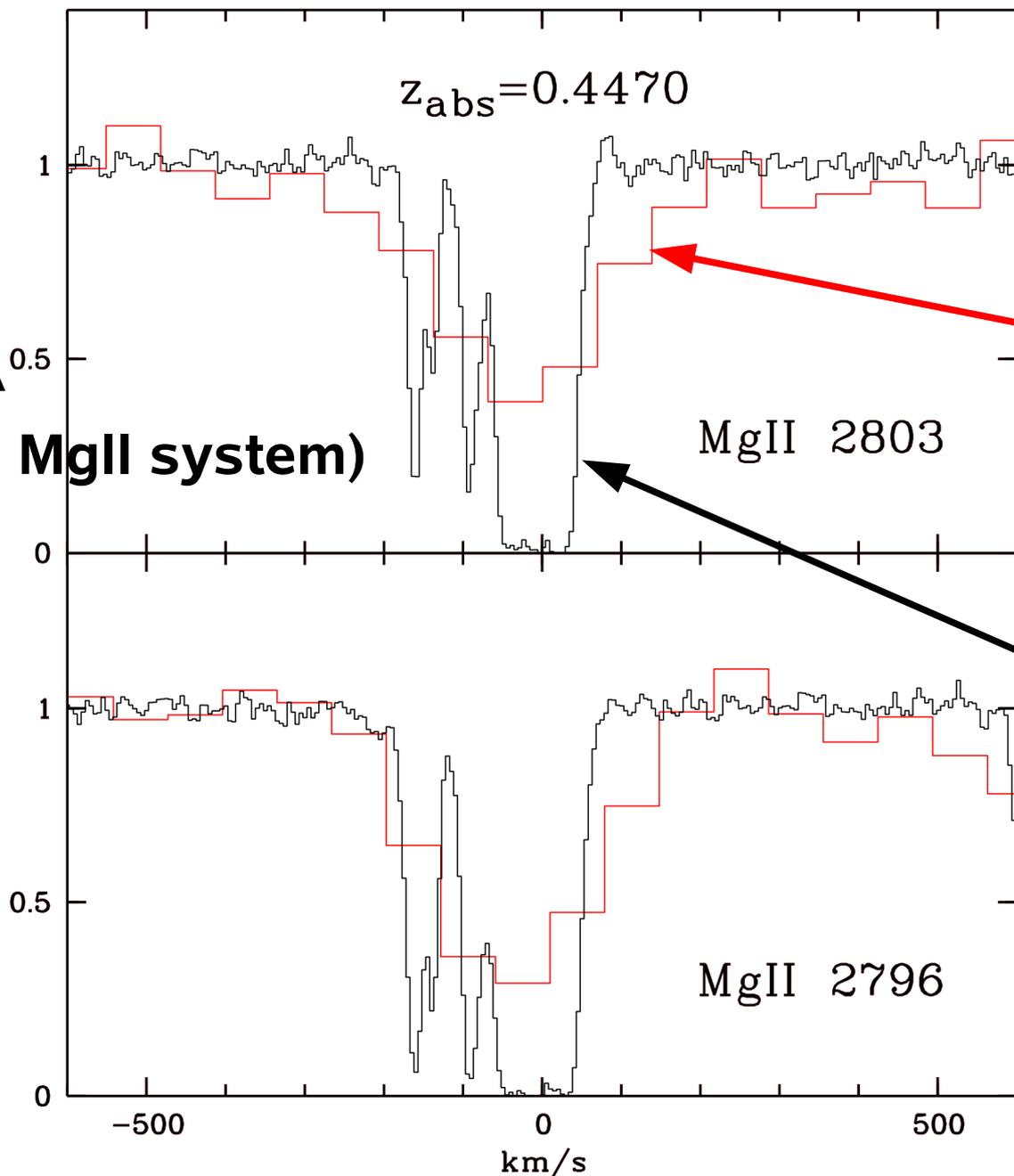
- ◆ Líneas de absorción. Ancho equivalente, W
 - ◆ Cantidad positiva
 - ◆ Unidades de longitud de onda (\AA)
 - ◆ **No depende de resolución espectral.**
 - ◆ $W_0 = W_\lambda / (1+z)$



$$W = 0.21 \text{\AA}$$

QSO 231509.34+001026.2

$W_0 = 1.8 \text{ \AA}$
("strong" MgII system)



SDSS
R=2000
FWHM=150 km/s

Magellan/MIKE
R=25000
FWHM=12 km/s

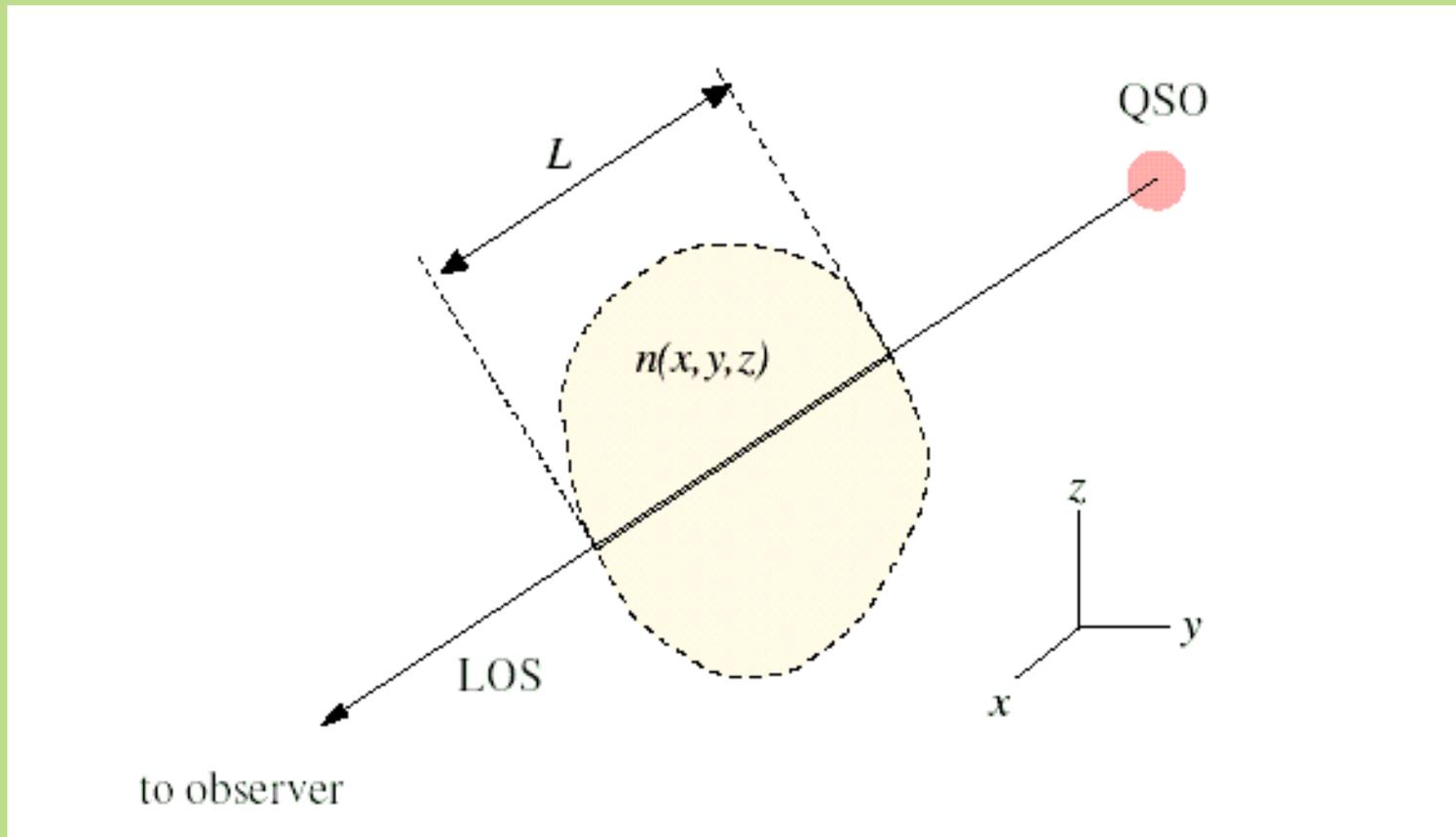
- ◆ Líneas de absorción. Ancho equivalente, W
- ◆ Profundidad óptica

$$\frac{F_{\lambda}}{F_c} = \exp(-\tau)$$

$$W(\lambda_0) = \int [1 - \exp(-\tau(\lambda))] d\lambda$$

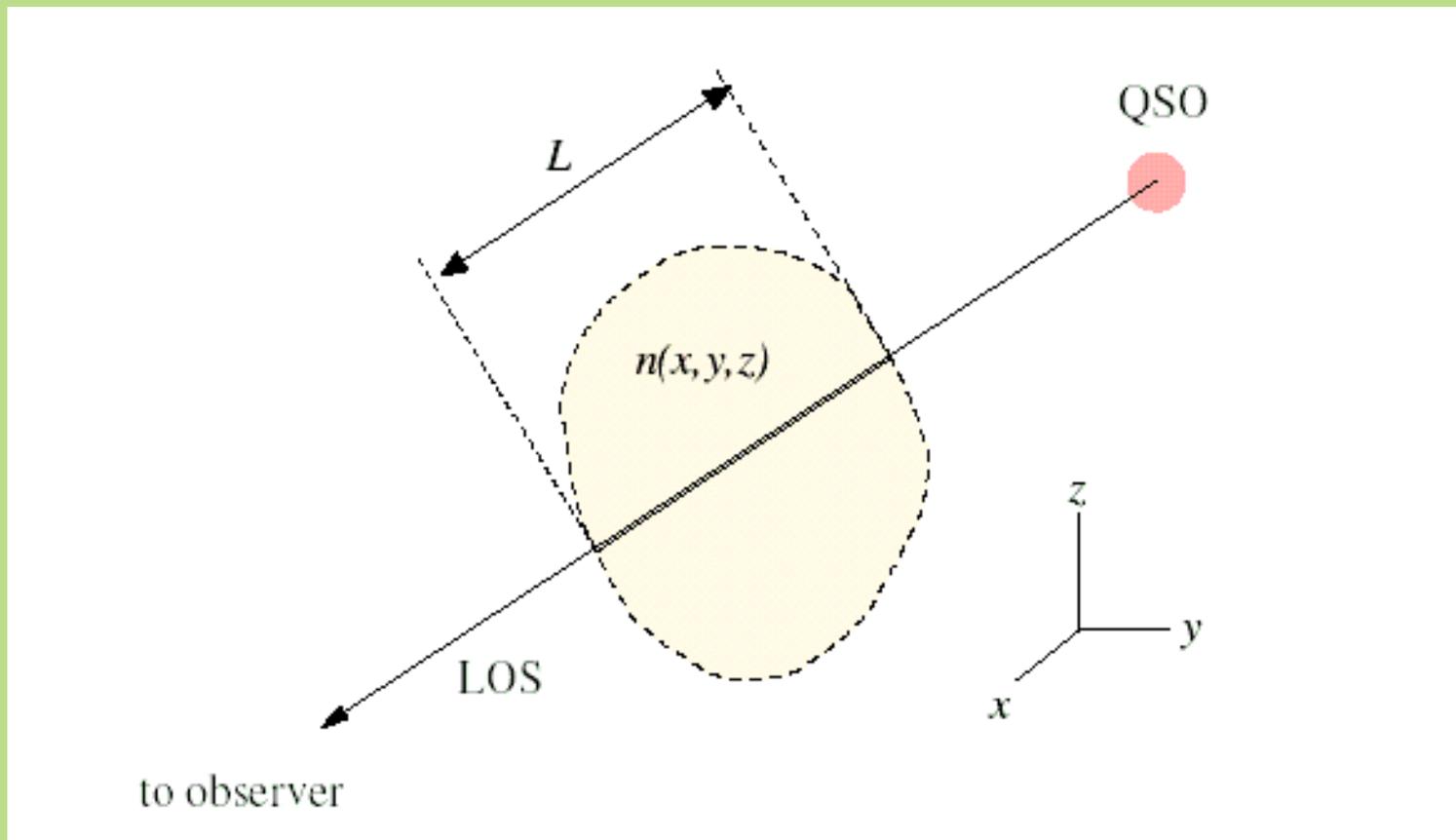
- ◆ Transferencia radiativa
 - ◆ Formación de líneas de absorción

$$\tau(\lambda) = \int n(l)\sigma(\lambda) dl = N\sigma(\lambda)$$



- ◆ Densidad de columna, N
 - ◆ Unidades de cm^{-2}
 - ◆ Obtenible del perfil de absorción (n desconocida)

$$N = \int_0^L n(l) dl$$



◆ Profundidad óptica τ

$$dI_{\lambda} = -\kappa_{\lambda} \rho I_{\lambda} dx$$

$$\tau_{\lambda} = \int_0^L \kappa_{\lambda} \rho dx$$

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} d\tau_{\lambda}$$

I: intensidad, kappa=coeficiente de absorción (cm^2g^{-1}),
rho: densidad (g cm^{-3})

◆ Profundidad óptica τ

$$dI_{\lambda} = -l_{\lambda} \rho I_{\lambda} dx$$

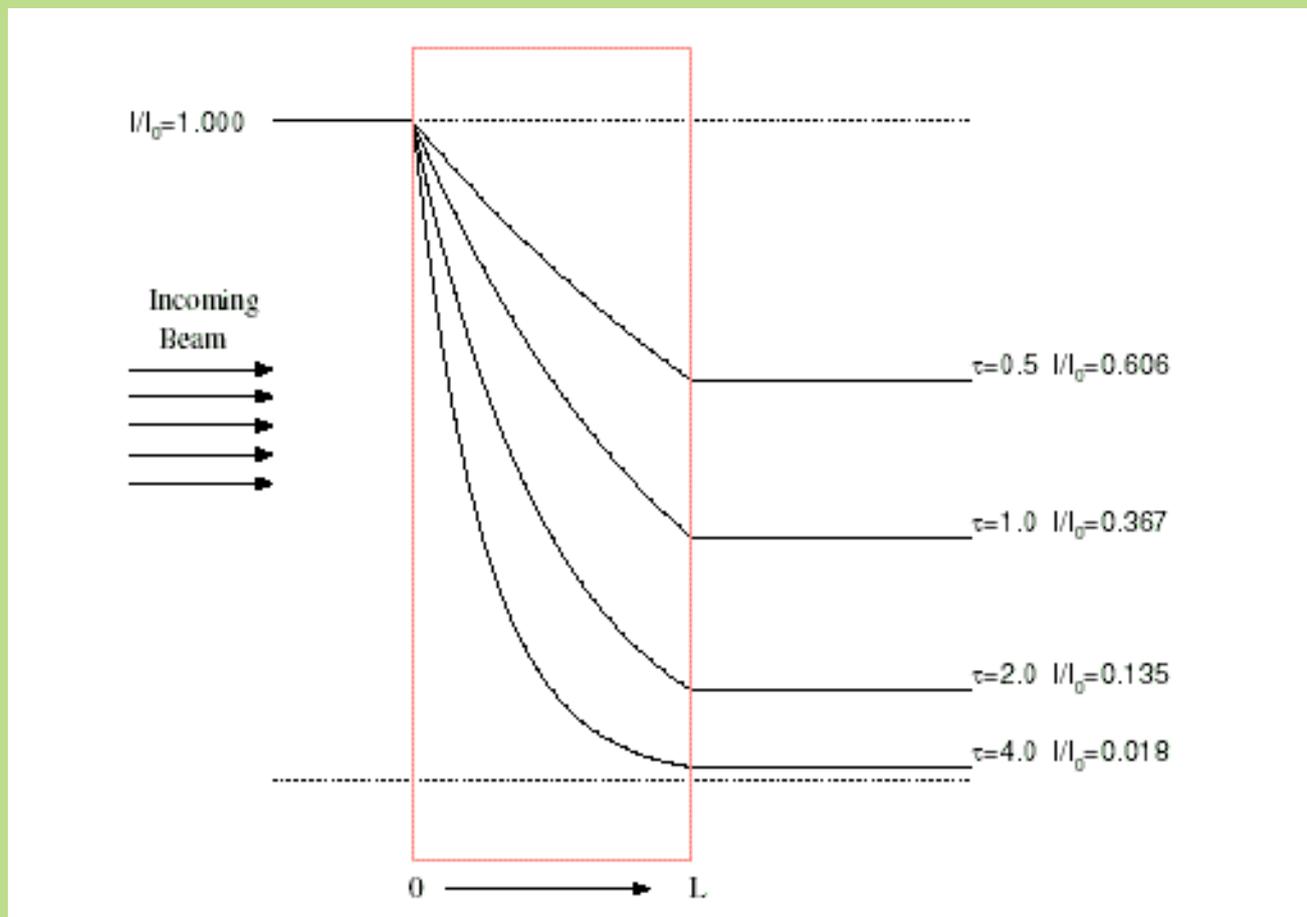
$$\tau_{\lambda} = \int_0^L l_{\lambda} \rho dx$$

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} d\tau_{\lambda}$$

l_{λ} =coeficiente de absorción “bound-bound”

◆ Profundidad óptica τ

$$I_{\lambda} = I_{\lambda}^0 \exp[-\tau_{\lambda}]$$



- ◆ Ancho natural de la línea de absorción
- ◆ Nos interesa una expresión para $l_{\lambda}\rho$
- ◆ “Se puede demostrar” (ver Churchill Cap. 5) que tanto clásica como cuánticamente el perfil natural sigue una forma Lorentziana:

$$l_{\lambda}\rho = N \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{\Gamma/2}{(\Delta w)^2 + (\Gamma^2/2)^2}$$

$$\Delta w = w_0 - w$$

$$w = 2\pi c/\lambda$$

- ◆ Ancho natural de la línea de absorción
 - ◆ Coeficiente de absorción (línea) por átomo

$$l_{\lambda} \rho = N \sigma(\lambda)$$

$$\int_0^{\infty} \sigma(\lambda) d\lambda = \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{\lambda^2}{c} f$$

Energía por segundo por átomo por estereoradián absorbida por una transición “bound-bound”

- ◆ Ancho natural de la línea de absorción
- ◆ Damping constant

$$\Gamma = \Gamma_u + \Gamma_l$$

$$\Delta E_u = \frac{h}{2\pi\Gamma_u} = 2h \sum_{l < u} A_{ul}$$

$$\Delta E_l = \frac{h}{2\pi\Gamma_l} = 4h^2 \sum_{l < u} \lambda_{lu}^3 \frac{g_l}{g_u} B_{lu}$$

$$(\Delta E \Delta t = h/2\pi)$$

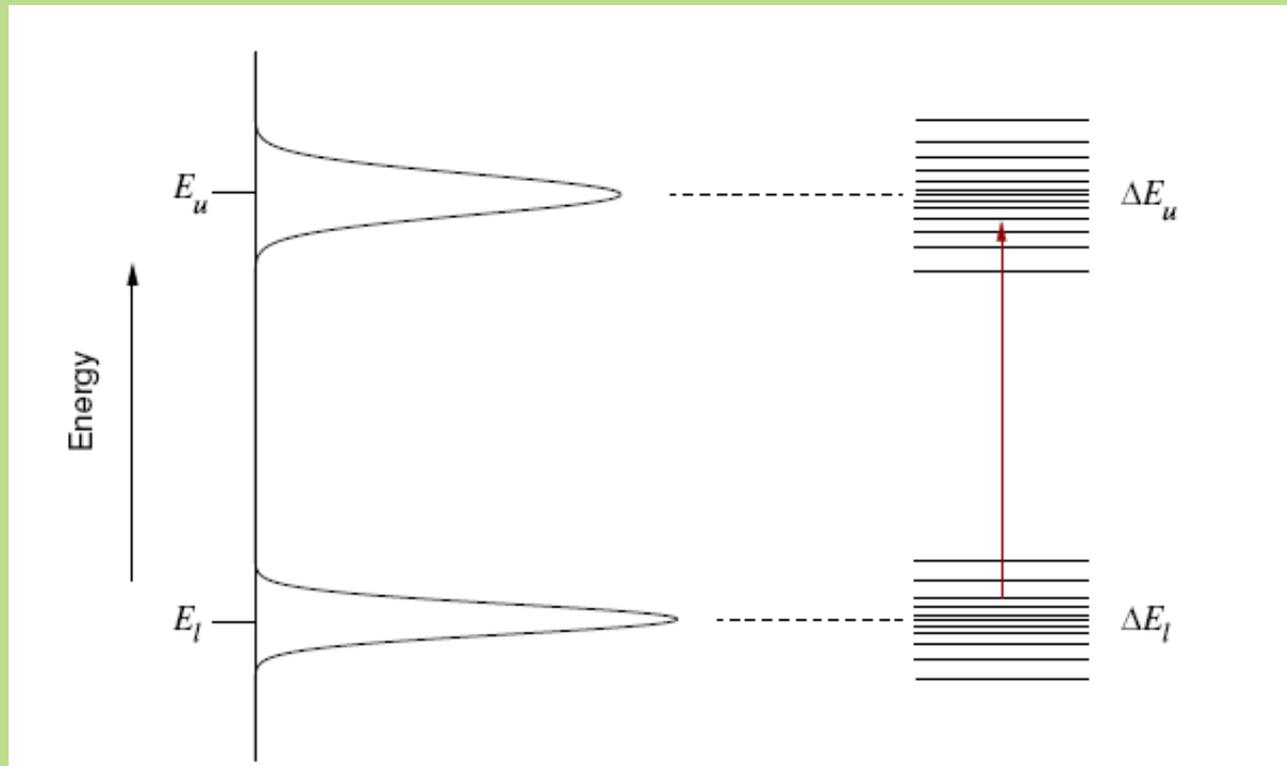
B: Coeficiente de Einstein (l --> u, absorción bound-bound)

- ◆ Ancho natural de la línea de absorción
- ◆ Oscillator Strength f : el resultado de la integral para el coeficiente de absorción (energía “removida” del haz de luz) debe igualar la probabilidad de la transición por la energía:

$$\int_0^{\infty} \sigma(\lambda) d\lambda = \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{\lambda^2}{c} f = \frac{hc}{\lambda} \frac{\lambda^2}{c} B_{lu}$$

$$f = \frac{m_e c}{\pi e^2} \frac{hc}{\lambda} B_{lu}$$

- ◆ Ancho natural de la línea de absorción
- ◆ Oscillator Strength f : el resultado de la integral para el coeficiente de absorción (energía “removida” del haz de luz) debe igualar la probabilidad de la transición por la energía:



- ◆ En resumen, una transición atómica estará caracterizada por las 3 constantes: longitud de onda, oscillator strength y damping constant

Table 5.1: Atomic Constants for Selected Transitions

Ion/Tran	λ [Å]	f	Γ [10^8 s^{-1}]
Ly α	1215.670	0.41640	6.265
Ly β	1025.722	0.07912	1.897
OVI λ 1032	1031.927	0.13290	4.163
OVI λ 1038	1037.616	0.06609	4.095
NV λ 1239	1238.821	0.15700	3.411
NV λ 1243	1242.804	0.07823	3.378
SiIV λ 1394	1393.755	0.52800	9.200
SiIV λ 1403	1402.770	0.26200	9.030
CIV λ 1548	1548.195	0.19080	2.654
CIV λ 1551	1550.770	0.09522	2.641
MgII λ 2796	2796.352	0.6123	2.612
MgII λ 2803	2803.531	0.3054	2.592

- ◆ **Ensanchamiento termal**
 - ◆ Un ensamble de átomos tienen una distribución de velocidades a lo largo de la línea de visión que introduce desplazamientos Doppler diferenciales, y por lo tanto ensancha la línea.
 - ◆ Para un átomo se tiene

$$\lambda'_0 = \lambda_0 (1 + v/c)$$

◆ Ensanchamiento termal

- ◆ Si la distribución de velocidades de los iones se describe por una distribución de probabilidad gaussiana:

$$f(v_{rad}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}v_o} \exp \left[- \left(\frac{v_{rad}}{v_o} \right)^2 \right] dv_{rad},$$

$$b = \sqrt{2} \sigma$$

Parámetro Doppler

- ◆ Ensanchamiento termal
 - ◆ Para un gas a temperatura T , y sin turbulencia) se tiene que:

$$b = \left(\frac{2kT}{\mu m_p} \right)^{1/2} = 0.129 \left(\frac{T}{\mu} \right)^{1/2} \text{ km s}^{-1}$$

◆ Perfil de Voigt

- ◆ El perfil observado reflejará los efectos combinados del ensanchamiento Doppler y el natural
- ◆ La convolución del perfil de Lorentz (cross section por ion) con la distribución de velocidades da un llamado perfil de Voigt.

$$\begin{aligned}\sigma(\lambda) &= \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{f \lambda_0^2}{c} \int_{-\infty}^{\infty} P(v) \phi(\lambda, v) dv \\ &= \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{f \lambda_0^2}{c} \frac{1}{\sqrt{\pi} b} \frac{\gamma_i}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp[-(v/b)^2]}{(\lambda - \lambda_0(1 + v/c))^2 + \gamma_i^2} dv\end{aligned}$$

- ◆ Perfil de Voigt
 - ◆ Cerca del centro de la línea, el perfil es dominado por la distribución gaussiana (Doppler core).
 - ◆ La componente “Lorentziana” domina las alas del perfil

- ◆ Perfil de Voigt
 - ◆ Con las siguientes definiciones:

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_0 \frac{b}{c}$$

$$\lambda_0 \frac{v}{c} = \Delta\lambda_0 y$$

$$a = \gamma_i / \Delta\lambda_0$$

$$x = \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_0}$$

◆ Perfil de Voigt

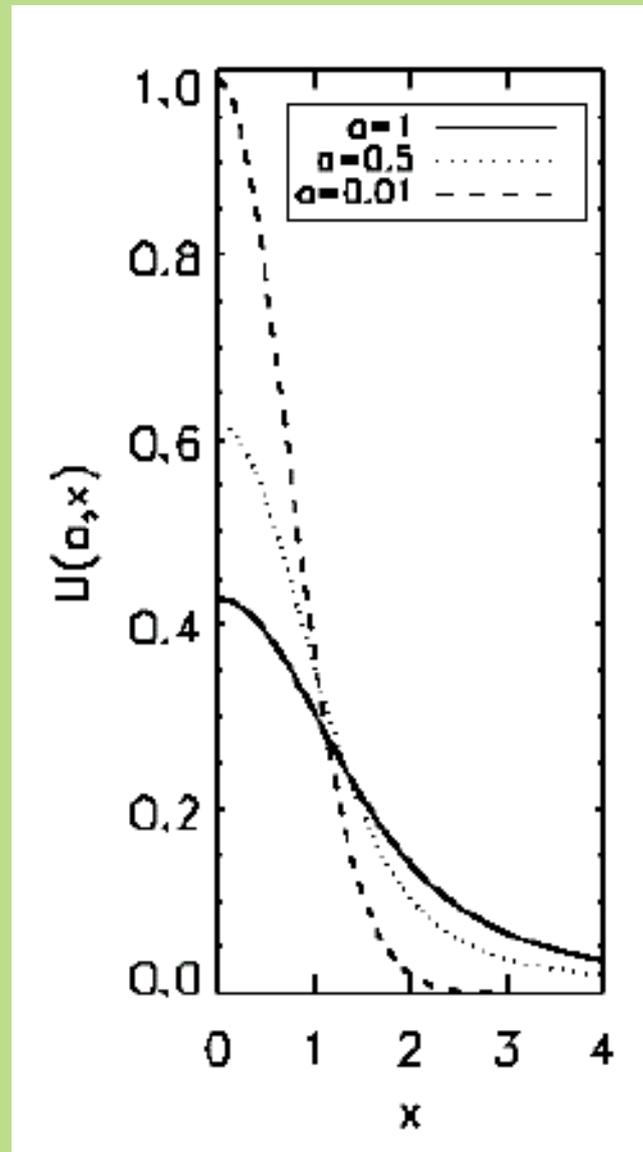
- ◆ Se obtiene el coeficiente de absorción en términos de la función de Voigt normalizada:

$$\sigma(\lambda) = \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{f \lambda_0}{b} U(a, x)$$

$$U(a, x) = \frac{a}{\pi^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-y^2)}{(x-y)^2 + a^2} dy.$$

◆ Perfil de Voigt

- ◆ Se obtiene el coeficiente de absorción en términos de la función de Voigt normalizada:



◆ Curva de crecimiento

- ◆ Ahora podemos hacer la conexión con el ancho equivalente

$$W(\lambda_0) = \int [1 - \exp(-\tau(\lambda))] d\lambda$$

$$\tau(\lambda) = \int n(l)\sigma(\lambda) dl = N\sigma(\lambda)$$

$$N = \int n(l) dl$$

$$W(\lambda_0) = \frac{\lambda_0 b}{c} \int \{1 - \exp[-\tau_0 U(a, x)]\} dx$$

- ◆ Curva de crecimiento
 - ◆ Se definió la profundidad óptica al centro de la línea como

$$\tau_0 = \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{f \lambda_0}{b} N$$

Tau depende de b y N, y la relación con W define la **curva de crecimiento**

◆ Curva de crecimiento

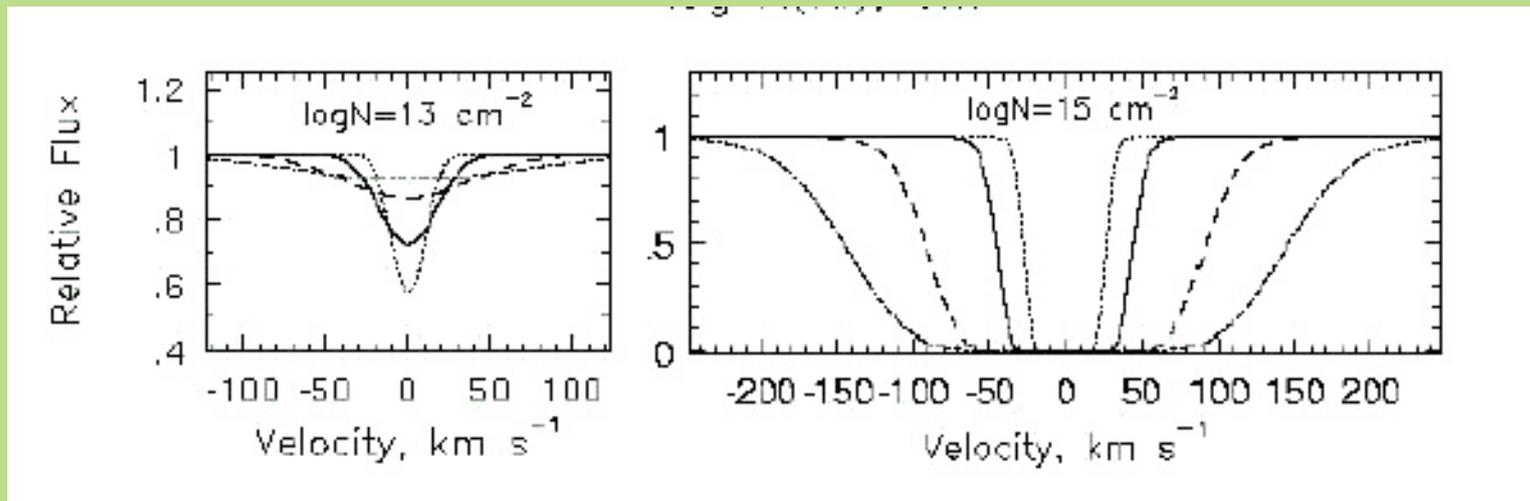
◆ Tres regímenes:

- ◆ Línea no saturada (profundidad óptica pequeña)
- ◆ Línea saturada (no se transmiten fotones en la línea)
- ◆ Línea extremadamente saturada

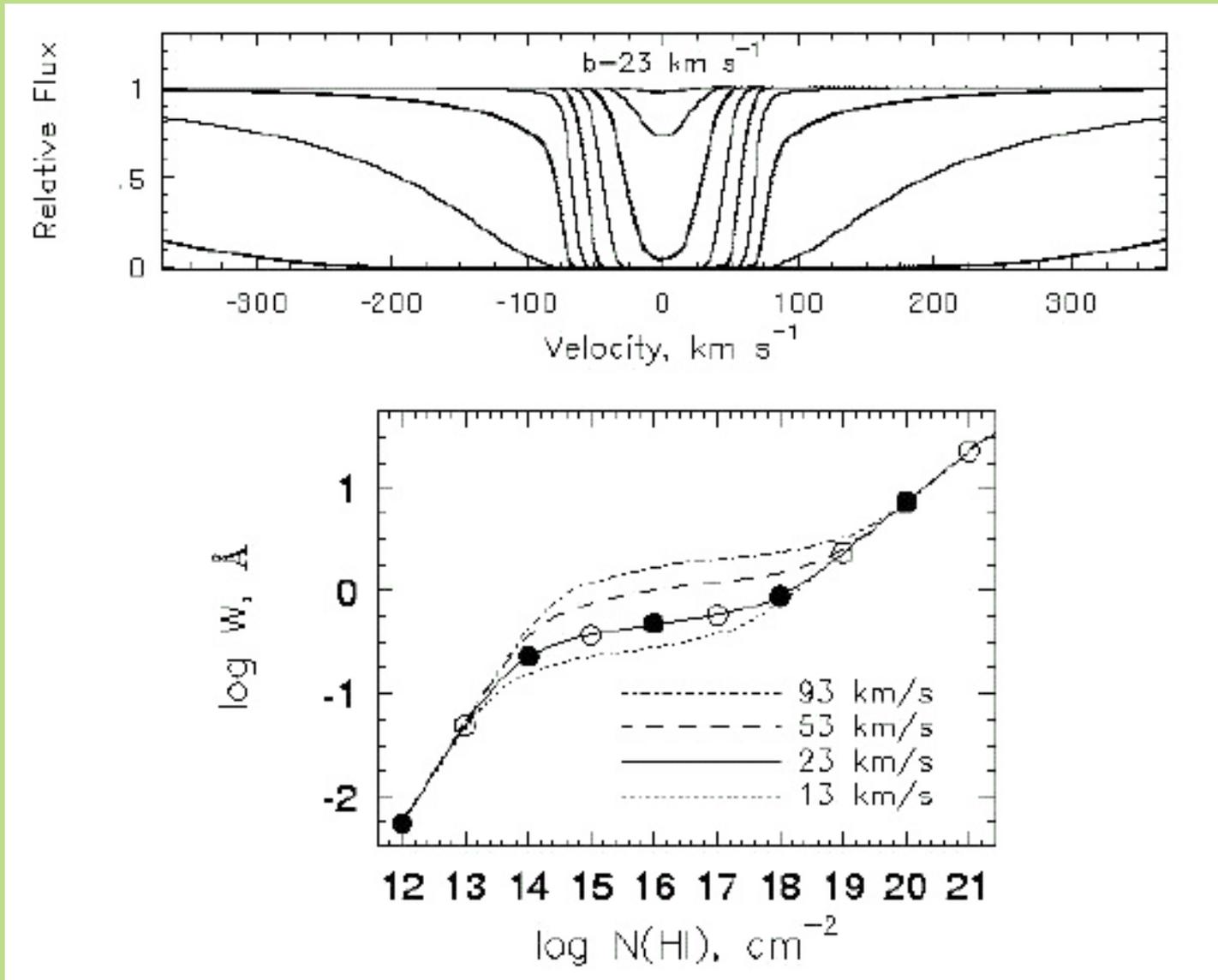
$$W(\lambda_0) \propto \tau_0$$

$$W \propto \sqrt{\log \tau_0}$$

$$W(\lambda_0) \propto \tau_0^{1/2}$$



◆ Curva de crecimiento



◆ Curva de crecimiento

