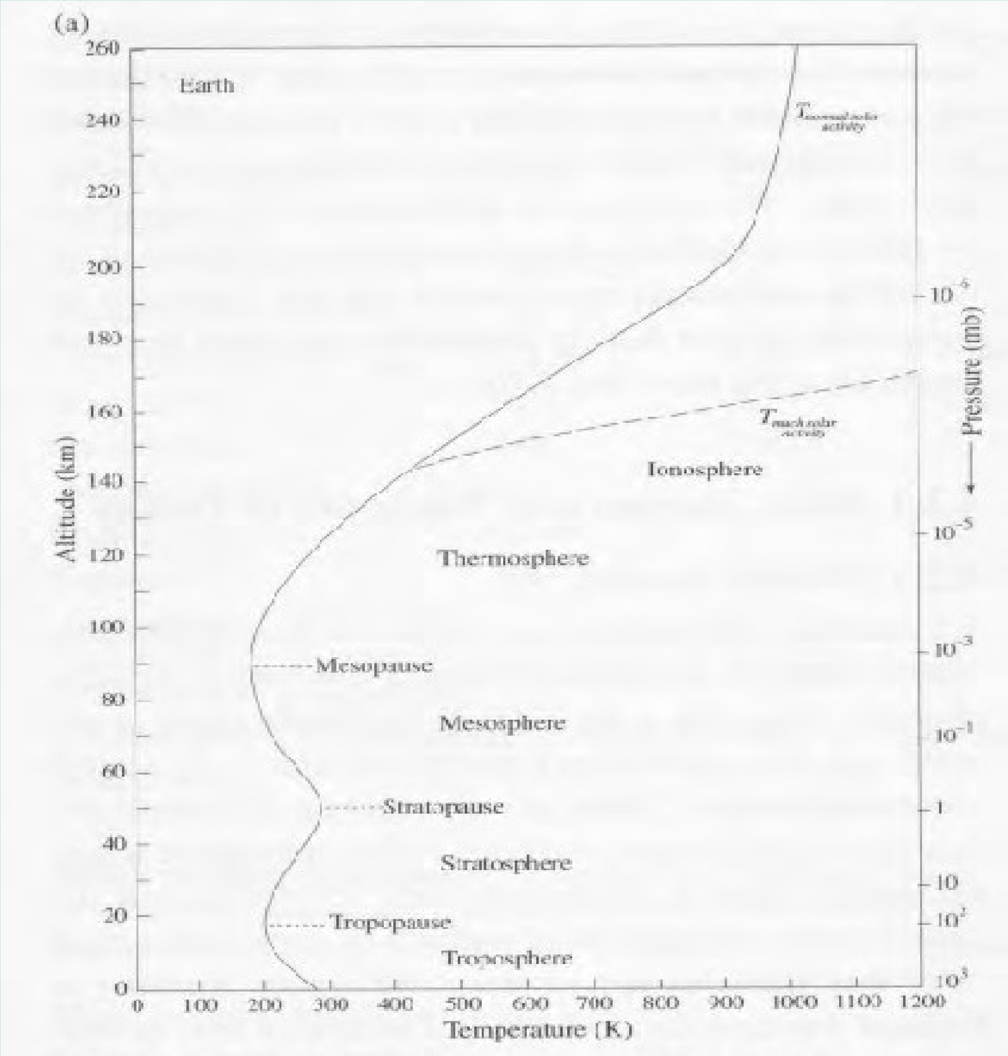
Astrofísica del Sistema Solar

Atmósferas planetarias
(2da. Parte)

UNLP
2do. Semestre 2016

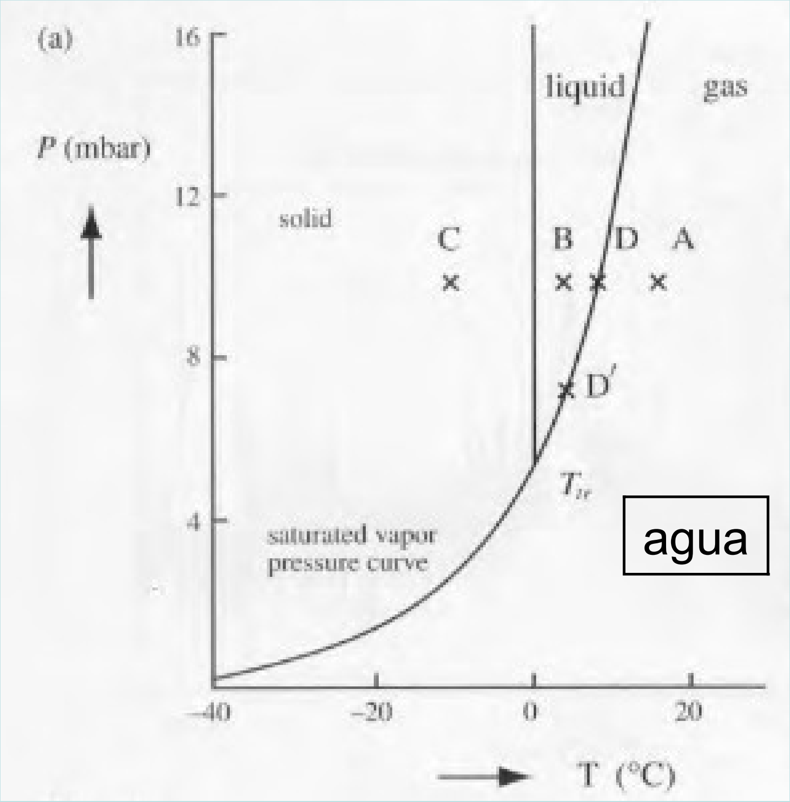
Perfil de temperatura:



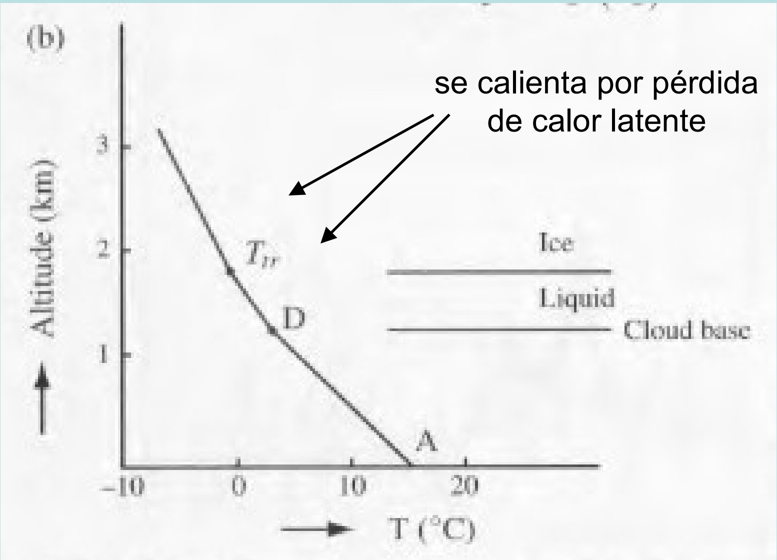
Tierra

Nubes:

Se dice que una atmósfera esta **saturada** cuando el contenido de vapor de un gas es máximo a una cierta presión. Si se agrega vapor se condensan gotas. En condiciones de equilibrio, una atmósfera a cierta temperatura no puede contener más vapor que el indicado por su curva de saturación.



T_{tr} es el "punto triple" donde coexisten hielo, líquido y gas.



Aire ascendiendo adiabáticamente en la tropósfera de la Tierra

Estructura:

• En primera aproximación las atmósferas están en equilibrio hidroestático con un gradiente de presión:

$$\frac{dp}{dr} = -\left(\frac{GM}{r^2}\right) mN = -g(r)\rho$$

Siendo la ley de los gases ideales:

$$p = NkT = \rho RT \quad R = k/m$$

donde k la cte. De Boltzmann y R la cte. del gas apropiada para la composición de la atmósfera.

Estructura:

- Entonces, el equilibrio hidroestático es:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{GMm}{kT}\frac{dr}{r^2} \approx -\frac{gm}{kT}dz = -\frac{dz}{H}$$

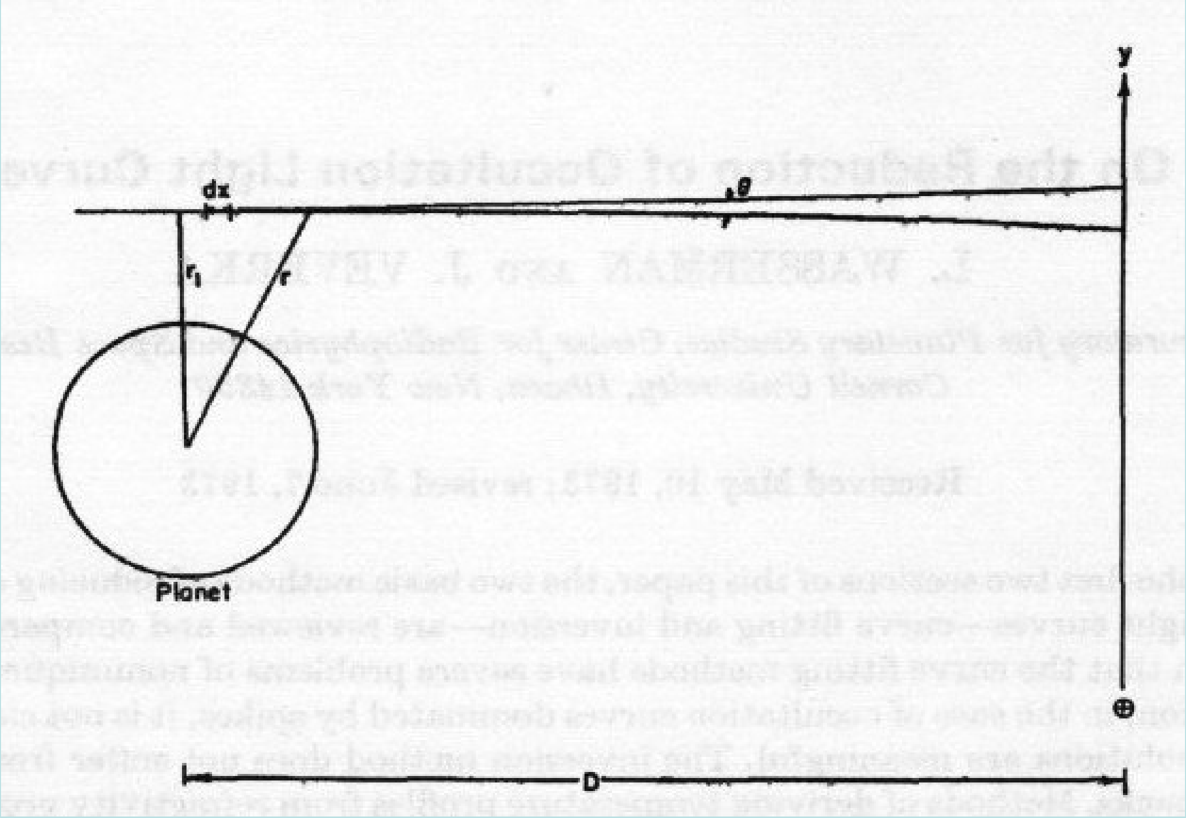
donde z es la altura sobre la superficie y H es la escala de altura para la presión.

- En el caso general, la distribución de densidad es:

$$\begin{aligned}\frac{dN}{N} &= -\frac{dT}{T} - \frac{GMm}{kT}\frac{dr}{r^2} \approx -\frac{dT}{T} - \frac{dz}{H} \\ &= -\left(\frac{1}{T}\frac{dT}{dz} + \frac{mg}{kT}\right)dz = -\frac{dz}{H^*}\end{aligned}$$

Estructura:

En una ocultación la luz de la estrella se ve afectada por refracción diferencial en la atmósfera, no por extinción (Wasserman & Veverka, 1973):



Planteo analítico:

El ángulo que se desvia un rayo de luz, $\theta(r_1)$, es:

$$\theta(r_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \right) dx$$

Y la curva de luz observada viene dado por el cociente entre el brillo estelar sin ocultar y su valor para diferentes instantes $\varphi = \varphi(t)$:

$$\frac{\phi_s}{\phi} - 1 = D \frac{d\theta}{dr}$$

Hay dos métodos posibles para obtener información de la estructura de la atmósfera.

Método I: Ajuste

Se asume un perfil atmosférico (n = n – 1, en función de r) obteniendo una curva sintética para la ocultación, la cual se modifica hasta lograr el mejor ajuste. En ausencia de ruido y para una atmósfera isoterma con altura de escala:

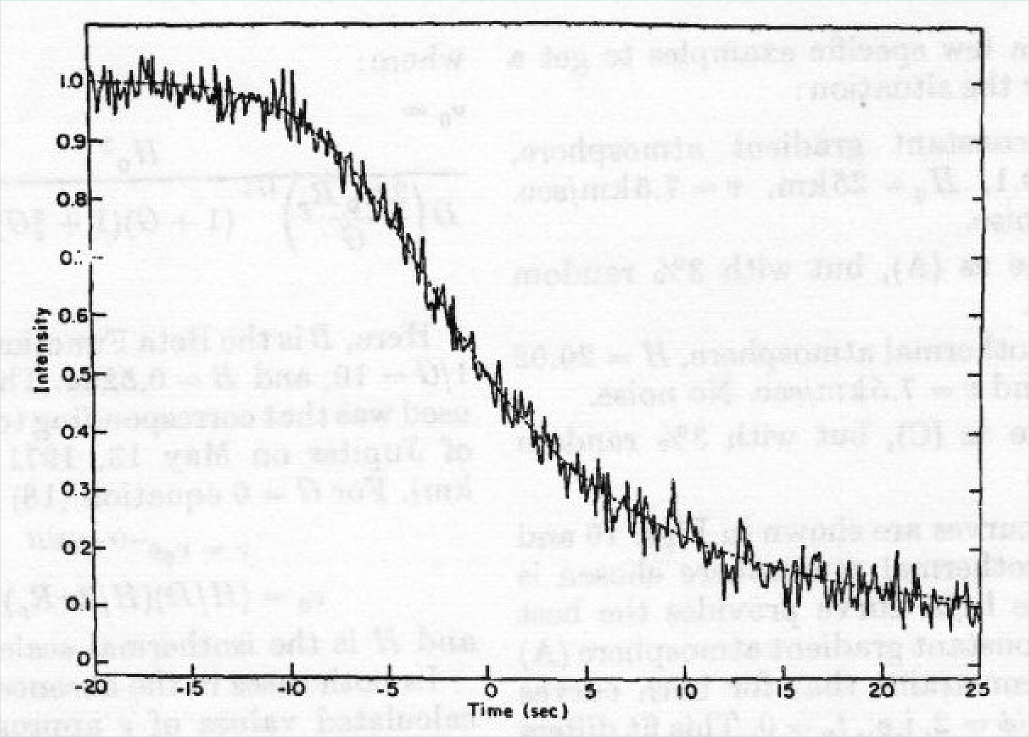
$$H = \frac{CT}{\mu g},$$

Donde C es la cte. Universal para gases, T la temperatura, g la aceleración de la gravedad, y m el peso molecular medio de la atmósfera. Entonces, la curva de luz de la ocultación viene dada por:

$$\frac{v(t-t_0)}{H} = \left(\frac{\phi_s}{\phi} - 2\right) + \ln\left(\frac{\phi_s}{\phi} - 1\right),$$

donde v es la velocidad del observador respecto del limbo del planeta.

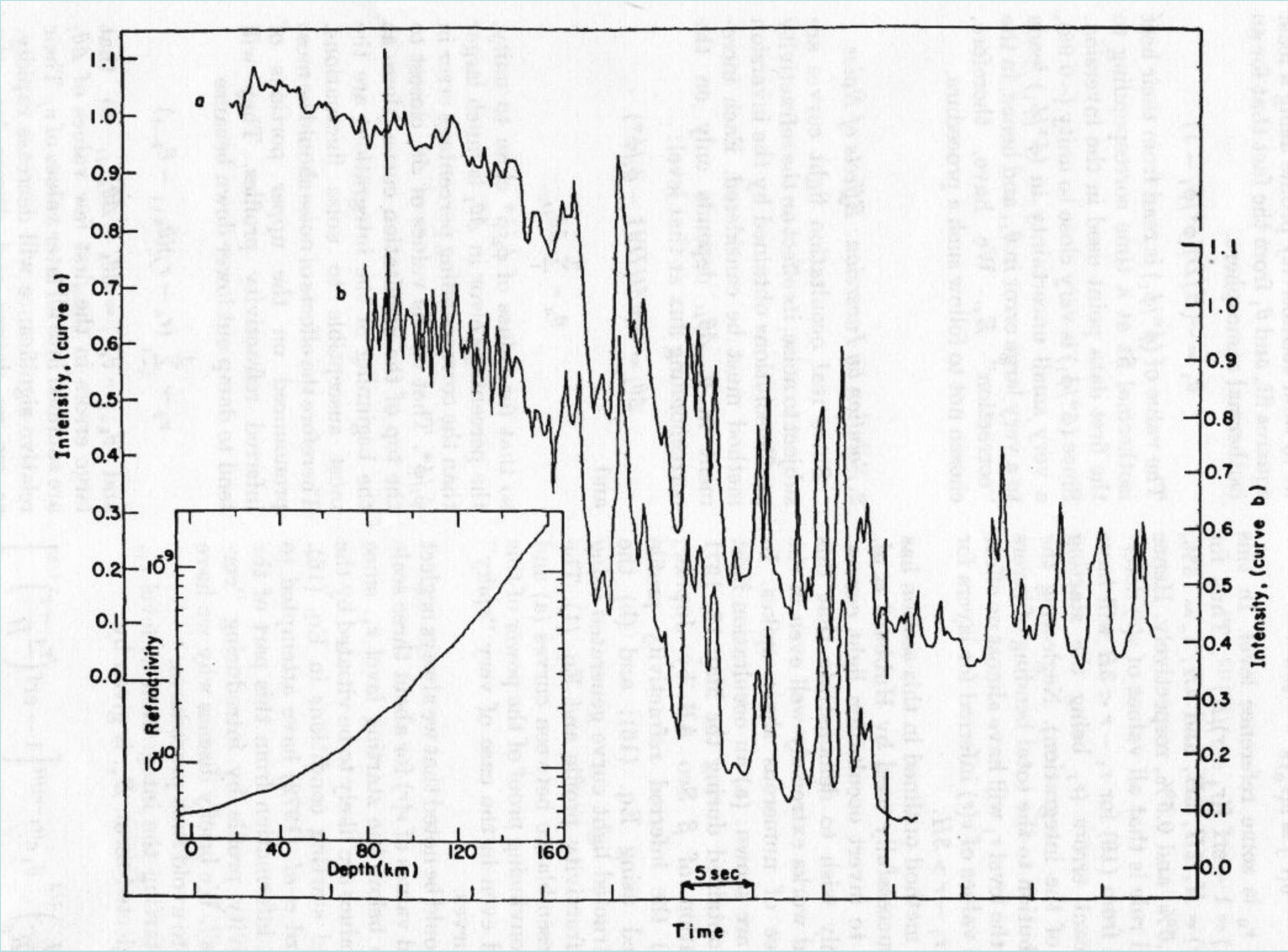
Método I: Ajuste



$t_0 = t\ (\varphi_s / 2)$

Obtener un buen ajuste no implica necesariamente que la atmósfera sea isoterma

Método II: Inversión



Pueden existir en la atmósfera variaciones de densidad

Método II: Inversión

El ángulo que se desvia un rayo de luz en una atmósfera con simetría esférica es:

$$\theta(r_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \right) dx$$

pero podemos escribir que:

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dr} = \frac{d}{dr}(\ln n),$$

de la figura inicial tenemos que:

$$x^2 = r^2 - r_1^2,$$

$$dx = \frac{r\,dr}{(r^2 - r_1^2)^{1/2}},$$

Método II: Inversión

Entonces la expresión para θ (r_1) se puede escribir:

$$\theta(r_1) = 2\int_{r_1}^{+\infty} \frac{r\frac{d}{dr}(\ln n)dr}{(r^2 - r_1^2)^{1/2}},$$

El objetivo es invertir esta ecuación integral para obtener n = n(r).
La expresión que se obtiene para la inversión es:

$$\nu(r) = n(r) - 1 = \frac{1}{\pi(2R_p)^{1/2}} \int_{\infty}^{r} \frac{\theta(r')dr'}{(r'-r)^{1/2}}$$

Para evaluar esta expresión es necesario determinar $\theta(r)$ a partir de la curva de luz dada por $\varphi(r)$.

Método II: Inversión

De la geometría de la ocultación se obtiene:

$$\frac{\phi_s}{\phi} - 1 = D\frac{\Delta\theta}{\Delta r},$$

$$\Delta r + D\Delta\theta = -v\Delta t.$$

Ecuaciones que permiten resolver para ambos incrementos:

$$\begin{aligned} \Delta r &= -v\Delta t\frac{\phi}{\phi_s}, \\ \Delta\theta &= -(1 - \frac{\phi}{\phi_s})\frac{v\Delta t}{D}. \end{aligned}$$

Método II: Inversión

Asumiendo como valores iniciales que:

$$\left(\frac{\phi}{\phi_s}\right)_0 \simeq 1,$$

$$\Delta\theta_0 \simeq 0.$$

considerando una atmósfera en capas, podemos calcular θ y r :

$$\begin{aligned} \theta_j &= \textstyle\sum_{i=0}^{j} \Delta\theta_i, \\ r_j &= \textstyle\sum_{i=0}^{j} \Delta r_i. \end{aligned}$$

donde:

$$r_1 > r_2 > r_3 > ... > r_N,$$

$$|\theta_1| < |\theta_2| < |\theta_3| < ... < |\theta_N|.$$

Método II: Inversión

Como la expresión para $\nu(r)$ no se puede integrar desde infinito, la aproximamos con:

$$\nu(r) \simeq \frac{1}{\pi(2R_p)^{1/2}} \int_{r_1}^{r} \frac{\theta(r')dr'}{(r'-r)^{1/2}}$$

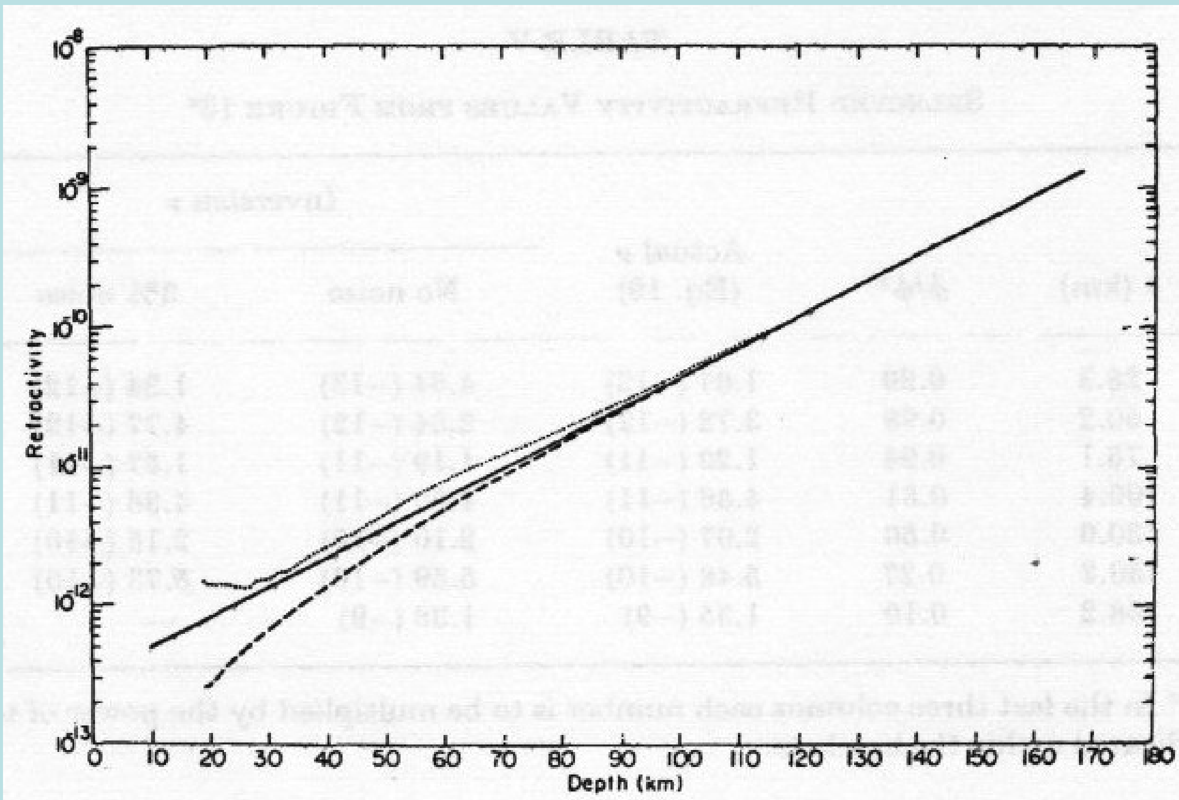
Donde r_1 es el valor donde la desviación es cero. Para integrar es necesario hacerlo por partes:

$$du = \frac{dr'}{(r'-r)^{1/2}},$$

$$w = \theta(r').$$

$$\nu(r) \simeq \frac{-2(r_1-r)^{1/2}\theta(r_1)}{\pi(2R_p)^{1/2}} - \frac{1}{\pi(2R_p)^{1/2}} \int_{r_1}^{r} 2(r'-r)^{1/2} d\theta$$

Perfil de refractividad:



Perfil de temperatura:

Para encontrar el perfil de temperatura a partir del perfil de refractividad debemos encontrar primero los valores de densidad, realizar una equivalencia con los valores a presión y temperatura standard (STP), y considerar la composición de la atmósfera:

$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{\nu_s}\nu(r),$$

$$\rho_s = \mu m_H L,$$

$$\nu_s = \sum f_k \nu_s^k,$$

$$\nu_s^k = A^k\left(1 + \frac{B^k}{\lambda^2}\right),$$

Donde μ es el peso molecular medio, m_H es la masa del átomo de hidrógeno, L la cte. de Loschmidt, f_k la fracción de una cierta especie en la atmósfera, ν_s^k la refractividad de la especie k, y A y B ctes. de dispersión.

Perfil de temperatura:

Para encontrar el perfil de temperatura a partir del perfil de densidad utilizamos la ley de los gaes ideales y la ecuación de equlibrio hidrostático.

Se divide la atmósfera en N capas planas y paralelas numeradas hacia abajo desde 1 hasta N. Asumimos un valor para P_1 (pequeño pero aún arbitrario) y como conocemos los valores de densidad tenemos que:

$$
\begin{aligned}
<\rho_i> &= \tfrac{(\rho_i+\rho_{i+1})}{2}, \\
\Delta P_i &= -<\rho_i> g\Delta r, \\
P_{i+1} &= \textstyle\sum_{j=1}^{i} \Delta P_j + P_1, \\
T_{i+1} &= \tfrac{\mu m_H P_{i+1}}{k\rho_{i+1}}.
\end{aligned}
$$

Perfil de temperatura:

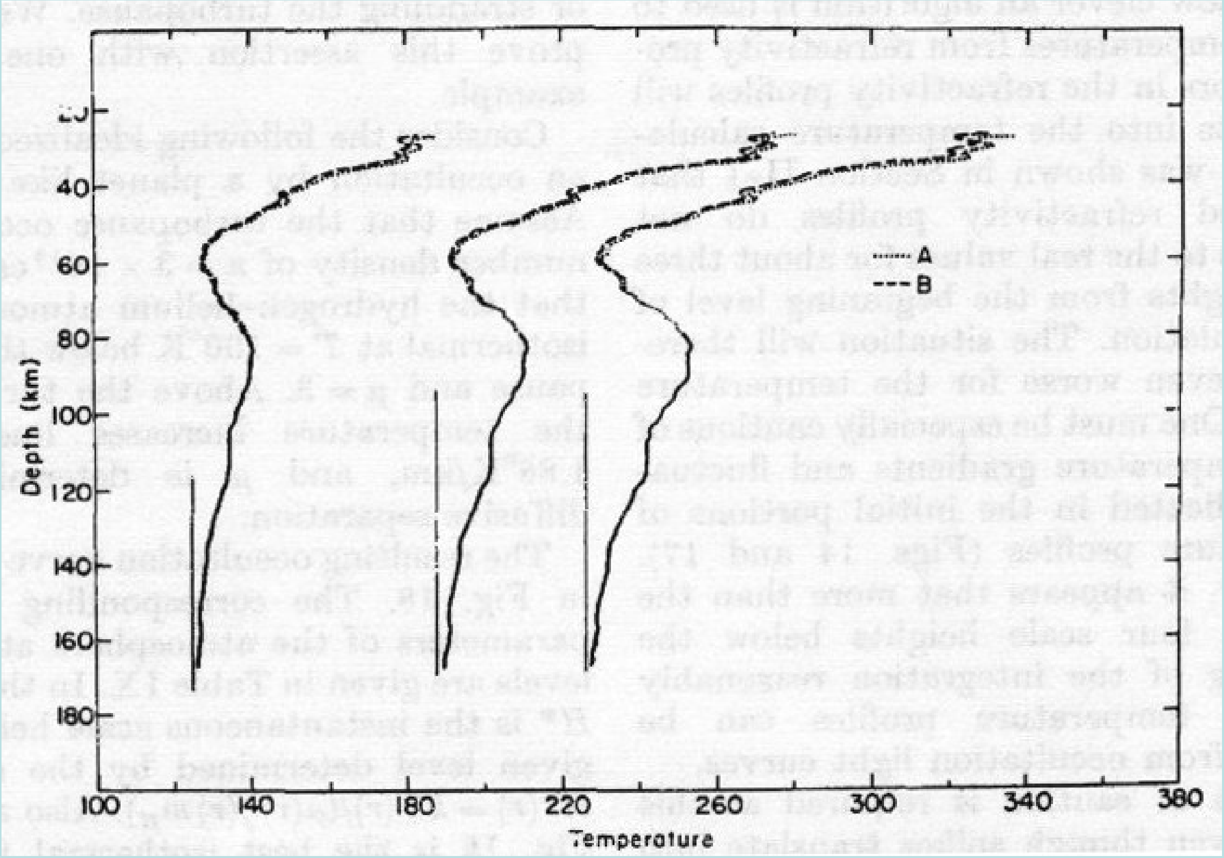


Imagen de Cassini
Anillos de Saturno
y limbo

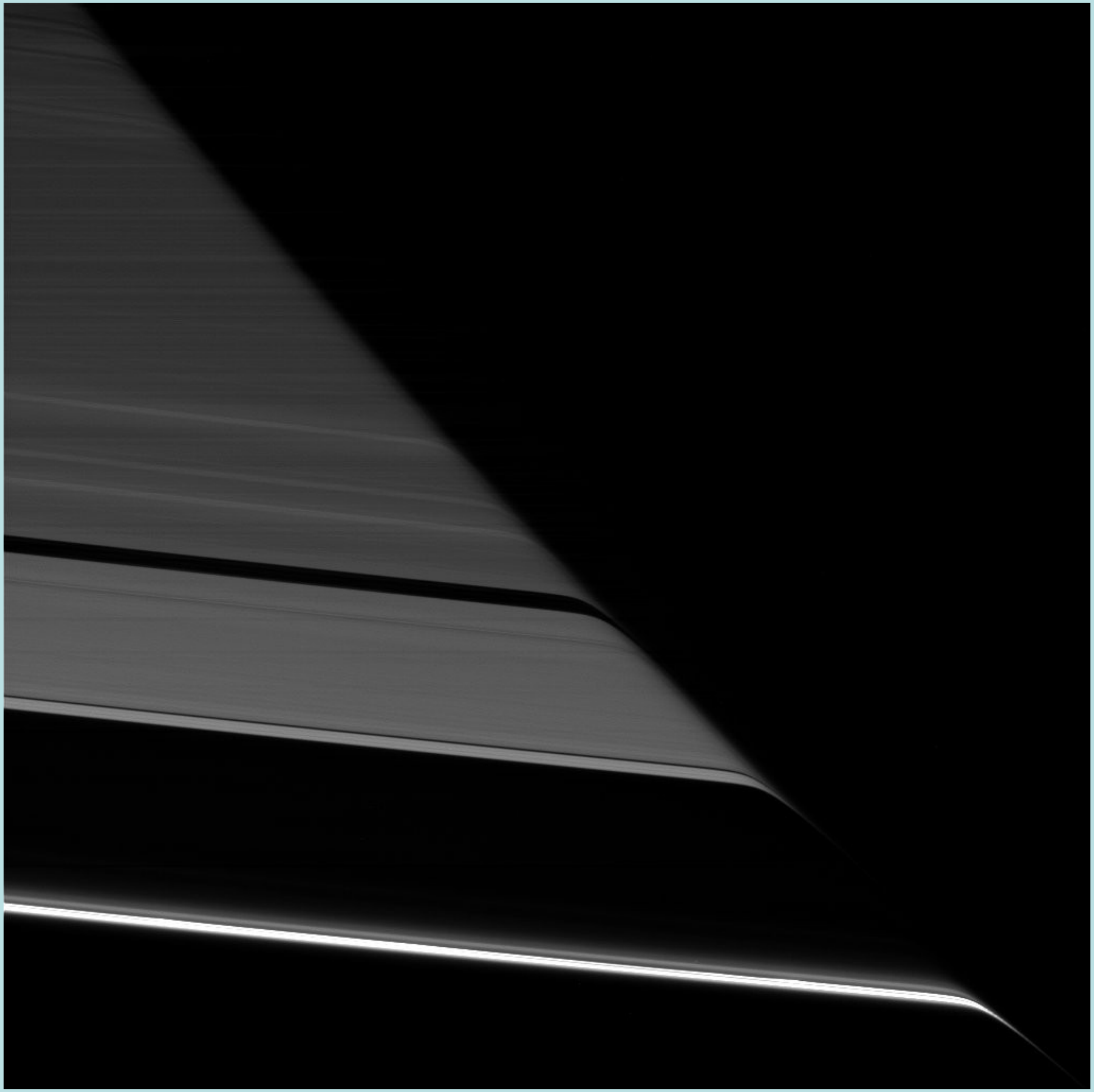


Imagen de Cassini
Anillos de Saturno
y limbo