

9: El Sol

Características Generales

Ecuación de Estado

Transporte de Energía

Estructura Interna

Fotósfera

Fuente de Energía

Modelo de Sol

Características Generales

- Cecilia Payne-Gaposchkin fue la primera en hacer un análisis detallado del espectro del Sol
 - Encontró: constitución de Sol 75% H + 24% He + 1% resto
 - Muy diferente a la composición de la Tierra
- Sol es una estrella, la más cercana
 - Podemos estudiar su superficie con mucho detalle.
 - No podemos ver el interior, pero utilizando **modelos** y observaciones de la superficie podemos entender su interior.
- Por tercera ley de Kepler y dado G obtenemos su **masa**

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{Sol}} r^3$$

Cont.

¿Como medimos la **Luminosidad** del Sol?

Medimos la energía que incide sobre la Tierra por m² y seg.

Consideremos un detector de área a ,
y D la distancia al Sol (1UA en metros),
entonces,

$$E_{Tierra} = \left(\frac{a}{4\pi D^2} \right) L_{Sol}$$

Temperatura en la Tierra

La cantidad de energía por unidad de tiempo recibida del Sol es:

$$\left(\frac{a_{Tierra}}{4\pi D^2} \right) L_{Sol}$$

$$D=1\text{UA}$$

$$a=\text{área del disco terrestre}=\pi R_{Tierra}^2$$

Por otro lado, la luminosidad de un cuerpo negro,

$$L_{Tierra} = \sigma 4\pi R_{Tierra}^2 T_{Tierra}^4$$

$$L_{Sol} = \sigma 4\pi R_{Sol}^2 T_{Sol}^4$$

Sol

La energía absorbida por la Tierra del Sol (que es cerca de un 60% de la recibida) es balanceada por la luminosidad de la Tierra

$$\sigma 4\pi R_{Sol}^2 T_{Sol}^4 \left(\frac{\pi R_{Tierra}^2}{\pi D_{Sol}^2 4} \right) 0.6 = \sigma 4\pi R_{Tierra}^2 T_{Tierra}^4$$

$$T_{Tierra} = \sqrt[4]{0.6} \sqrt{\frac{R_{Sol}}{2D}} T_{Sol} \approx 250^\circ K = -23^\circ C$$

muy frío, ¿qué pasa? efecto invernadero

Características del Sol

Masa	$1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ ($3.33 \times 10^5 M_{\oplus}$)
Radio visible	$6.96 \times 10^5 \text{ km}$ ($109 R_{\oplus}$)
Densidad Media	1410 kg m^{-3}
Luminosidad (tasa de emision de energia)	$3.9 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$
Temperatura superficial	5800°K
Temperatura central	$15,500,000^{\circ}\text{K}$
Periodo de Rotacion en el ecuador	25 dias

Ecuación de Estado

Por su temperatura, el Sol debe ser gaseoso.

- **Gas Perfecto (gas ideal)**, gas en donde la fuerza entre los átomos es despreciable,
 - solo movimientos térmicos.
 - Partículas sin volumen
 - Choques elásticos con muros del recipiente.
- Se puede escribir una relación muy simple entre presión, temperatura y densidad del gas.

$$PV = NRT, R = \text{constante}, \text{Densidad} \propto N/V$$

Podemos calcular cualquiera de las tres cantidades
dadas las otras dos

Estructura del Sol

¿A qué nos referimos con estructura del Sol?

Especificar la presión, temperatura y densidad como función del radio

Suponemos que el Sol está en equilibrio

¿Qué significa esto?

Primero: El Sol está en equilibrio hidrostático, es decir, que en cada punto al interior del Sol hay equilibrio de fuerzas.

- ¿Qué fuerzas?
 - Gravedad, que trata de contraer la materia
 - Presión, generada por energía que emerge del centro.
- El simple hecho de que el Sol es estable, necesariamente implica que hay una fuente de energía en el centro.

Segundo: Hay equilibrio térmico, es decir, la cantidad de energía que fluye hacia un punto y desde un punto es igual $\Rightarrow$ temperatura en un cierto punto se mantiene constante.

Transporte de Energía

- **Conducción:**

- Energía se transporta a través del material por interacciones entre átomos.
- Hay materiales mejores que otros para este tipo de transporte.
- Ejemplo: propagación de calor por el mango metálico de una tetera

- **Convección:**

- Grandes masas de gas que circulan transportando energía.
- Ejemplo: agua hirviendo que transporta energía desde la base de la tetera.

- **Radiación:**

- Radiación, en particular electromagnética (fotones).
- Ejemplo: Cuerpo Negro

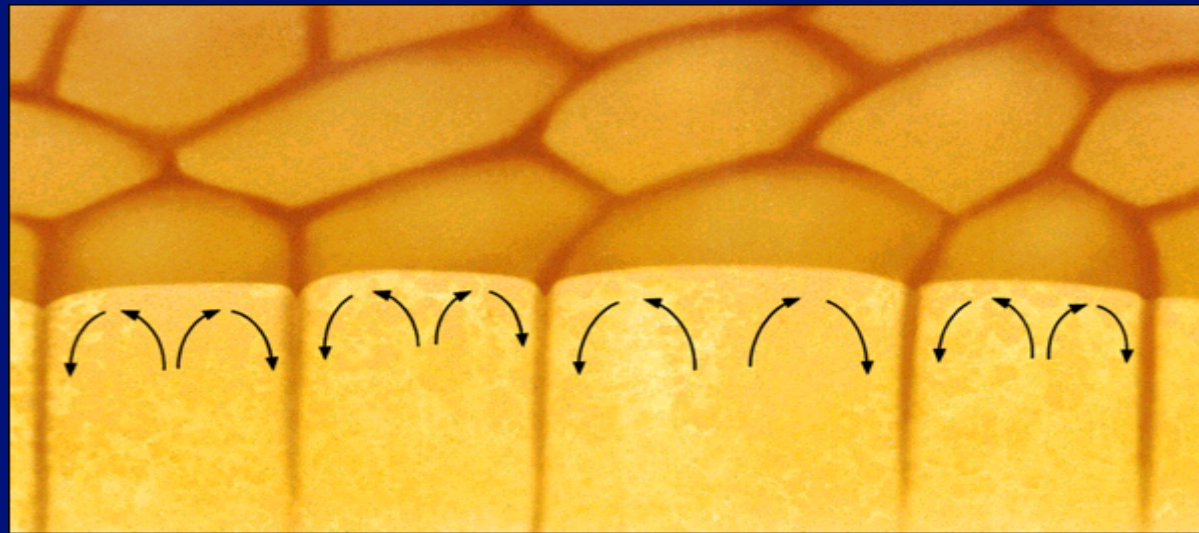
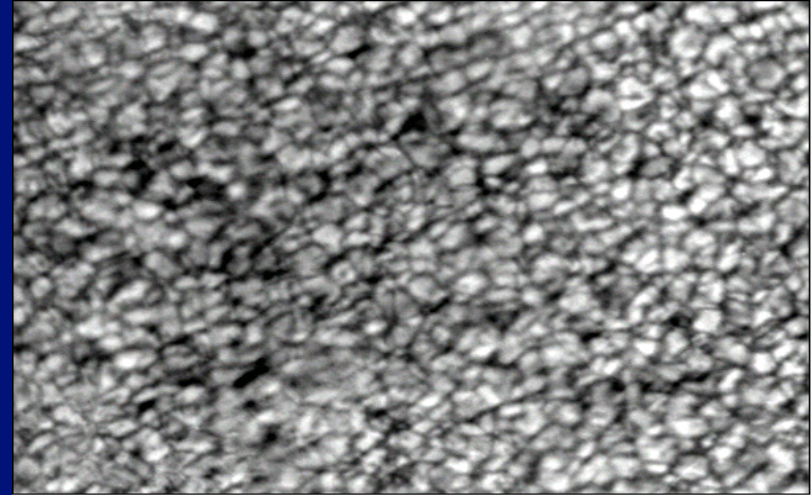
Convección

Convección en la fotosfera del Sol

Granulación

Transporte de calor

Gas caliente sube produciendo
gránulos brillantes



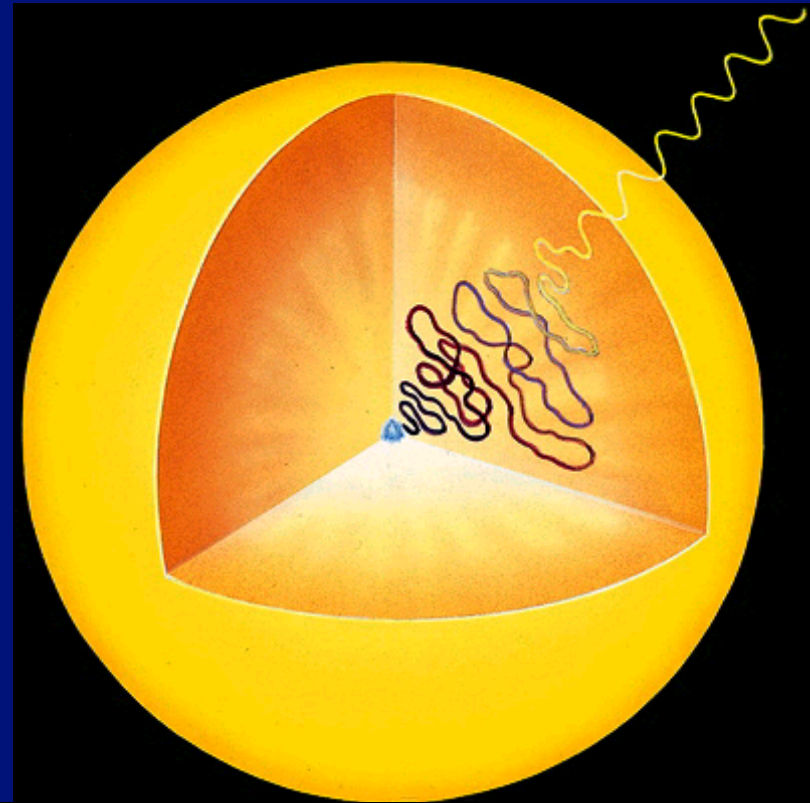
Radiación

Fotones dejando el Sol

Propagación de fotones desde el centro del Sol en su camino hacia la fotosfera

En su camino, los fotones pierden energía al ionizar el gas.

La presión de radiación provee el soporte a la gravedad y mantiene el equilibrio.



Notar que la presión de radiación calienta el gas que su vez provee la presión que mantiene el equilibrio hidrostático

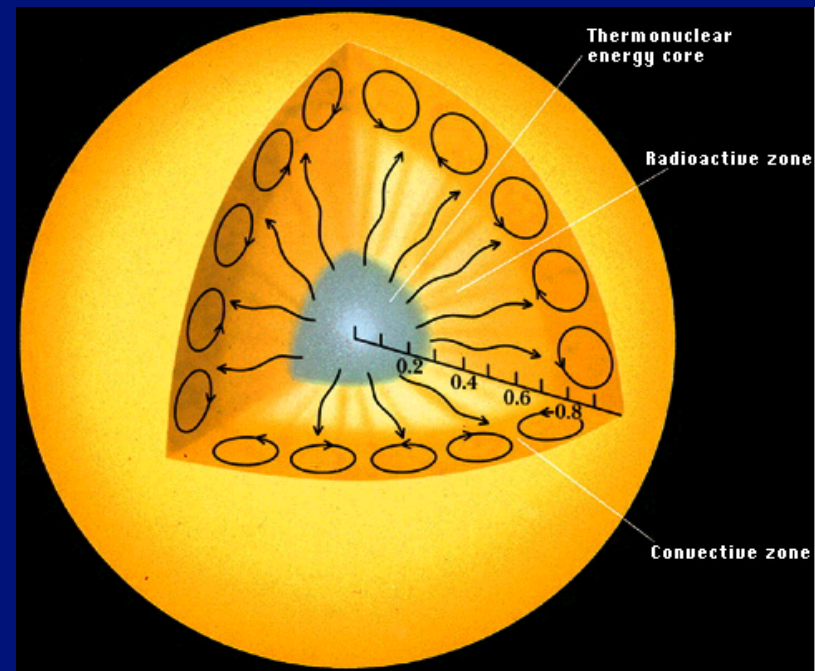
Fotosfera



- Esfera de luz
- 400 km. de ancho
- Densidad $\approx 0.01\%$ de la del aire en nuestra atmósfera.
- Espectro de Cuerpo Negro
 - Temperatura $\approx 5,800$ °K
- Superficie granular (convección)
 - centro del gránulo es 100° más caliente que su borde.
 - Tamaño ≈ 1000 km.
- **Oscurecimiento del Limbo.**
 - En el centro vemos capas más internas, más calientes.
 - En los bordes vemos capas más frías.

Estructura Interna del Sol

- Reacciones termonucleares ocurren en el centro del Sol, hasta un radio $0.25 R$
- Energía del centro se transporta por radiación hasta una distancia de $0.8 R$.
 - ¿Por qué no vemos la radiación del centro, rayos X?
 - Explicación, profundidad óptica
 - La misma cantidad de energía hay en cada capa. Sin embargo, la superficie de la capa aumenta $\Rightarrow$ Cuerpo Negro, temperatura $\Rightarrow$ disminuye.
- Convección es la forma de transporte de energía en las zonas más externas, $0.8 - 1.0 R$



¿Cual es la fuente de energía?

¿Será el colapso gravitacional el que provee toda la energía?

- El Sol se contrae por gravedad, el interior se calienta generando radiación (cuerpo negro).
- Kelvin calculó que la energía gravitacional disponible duraría solo por algunas decenas de millones de años.
- Sin embargo, sabemos que el Sol ha permanecido en equilibrio hidrostático por mucho más tiempo, miles de millones de años.

¿Qué nos queda? Energía Termonuclear

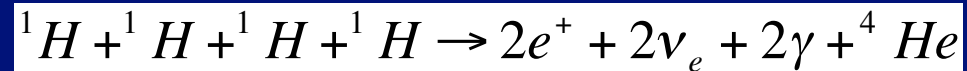
- ¿Qué pasa con material a $15,500,000\text{ }^{\circ}\text{K}$ y a 150 veces la densidad del agua?
- Moléculas ni átomos normales sobreviven, sólo núcleos de H y He y e^{-} libres.
- **Altas energías $\Rightarrow$ fusión** (dos partículas chocan y se fusionan en una)

FUSIÓN TERMONUCLEAR

Vencer la Barera de Coulomb

Cadena Protón - Protón

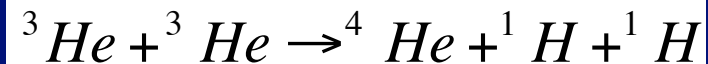
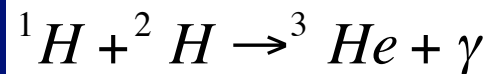
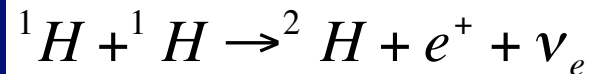
Fusión de 4 núcleos de Hidrógeno para generar un núcleo de Helio



— e^+ : positrón, ν_e : neutrino electrón, γ : fotón en rayos X

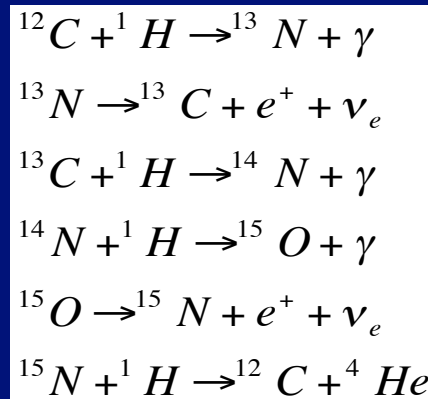
Es muy poco probable que tengamos colisiones de 4 1H

Hay pasos intermedios, llamada cadena protón - protón



Cadena CNO

Muy importante a temperaturas un poco mayor que la del centro del Sol, i.e. en estrellas más masivas.



El resultado neto; 4 protones se fusionan para formar un átomo de Helio.

(Notar que ${}^{12}\text{C}$ es regenerado al final)

Balance de Energía

$$E=mc^2$$

- Einstein $\Rightarrow$
- La masa del ^4He es $3.97m_p$, es decir, hay una diferencia de $0.03m_p$ respecto a 2 protones y 2 neutrones libres
 - Energía liberada en cada fusión es $E=0.03m_p c^2$
- Calculemos la tasa a la que el Sol usa su energía

La luminosidad del Sol es 3.9×10^{26} Joules por segundo

$$3.9 \times 10^{26} = mc^2 = m(3 \times 10^8)^2 \Rightarrow m = 4 \times 10^9 \text{ kg cada segundo}$$

¿Cuanto hidrógeno es esto? $\frac{3.97}{0.03} 4 \times 10^9 = 5.3 \times 10^{11} \text{ kg}$

¿Cuanto tiempo de combustible tiene?

>Si el Sol consume todo su H, hay combustible por 90×10^9 años.

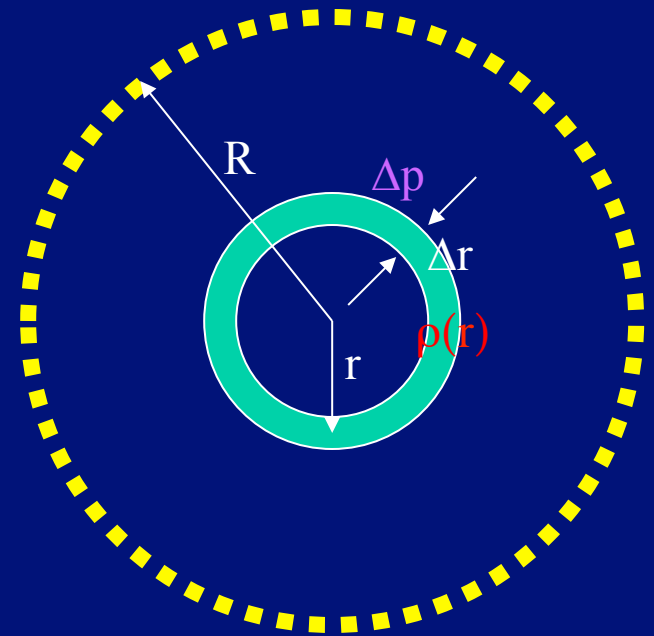
>Pero como se quema H solo en el centro $\Rightarrow 5 \times 10^9$ años.

Tarea

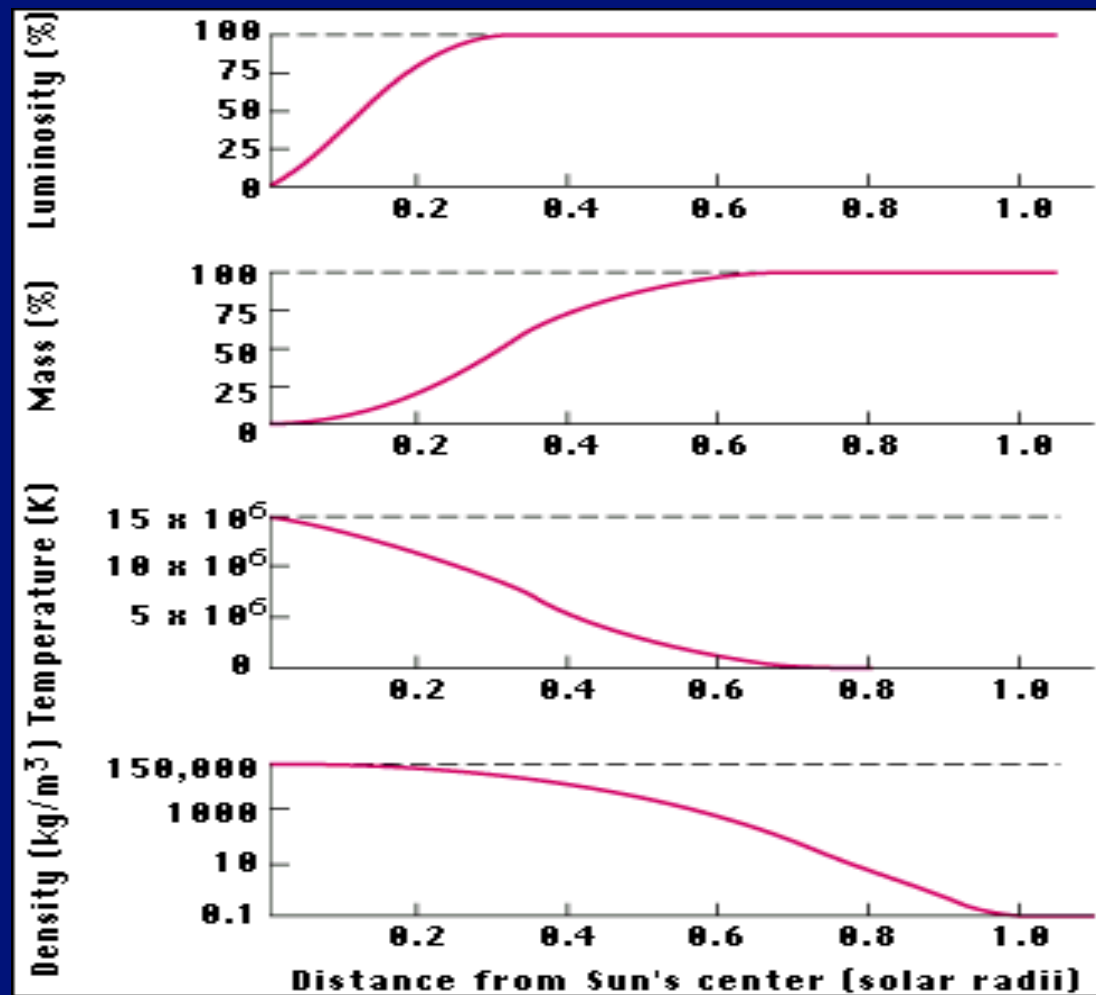
Ecuaciones de Estructura

- (1) Equilibrio Hidrostático
- (2) Conservación de Masa
- (3) Equilibrio Térmico
- (4) Transporte de Energía

+ Ecuación de Estado,
Opacidad, Emisividad
+ Condiciones de Borde

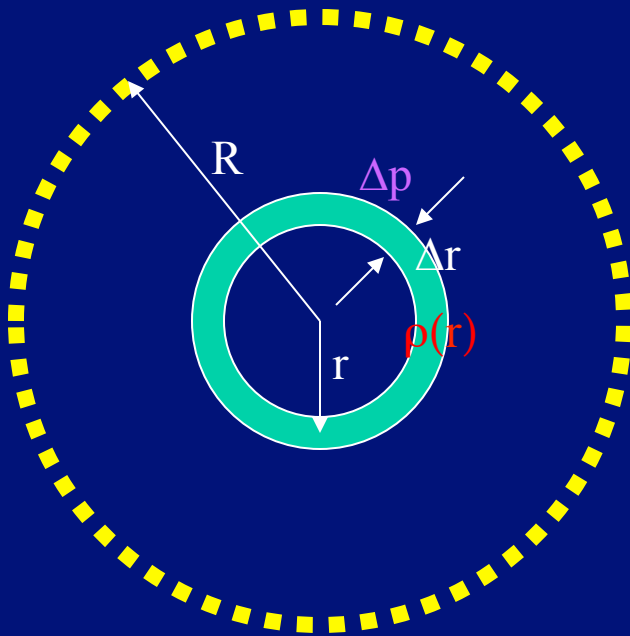


Modelo del Sol



Ecuaciones de Estructura

(1) Equilibrio Hidrostático



$$\Delta P 4\pi r^2 = \frac{GM(r)m_{capa}}{r^2}$$

$$\text{con } M(r) = M(< r)$$

$$\text{pero, } m_{capa} = 4\pi r^2 \Delta r \rho(r)$$

$$\Rightarrow \Delta P = \frac{GM(r)}{r^2} \rho(r) \Delta r$$

(2) Conservación de Masa

$$\Delta M(r) = 4\pi r^2 \rho(r) \Delta r$$

(3) Equilibrio Térmico

Designamos potencia liberada por gramo de material, en reacciones nucleares, por

$$\varepsilon = \varepsilon(\rho, T, \mu), \quad [J/s \cdot gr]$$

μ , *Composicion quimica*

$\Rightarrow \varepsilon \rho$ *Razon de produccion de energia por volumen*

Luminosidad L ,

$$\Delta L = 4\pi r^2 \rho \varepsilon \Delta r \quad \Rightarrow \quad L = \text{Suma}(\Delta L) \quad 0 \rightarrow R$$

(4) Transporte de Energía

$$\Delta T = -\frac{3\kappa\rho L}{4acT^3 4\pi r^2} \Delta r, \quad \text{Radiacion, } \kappa \text{ absorcion}$$

$$\Delta T = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{P} \Delta P, \quad \text{Conveccion}$$

Ecuación de Estado, Opacidad, Emisividad

Adicionalmente, necesitamos

Ecuacion de Estado $P = P(\rho, T, \mu), \quad (P = nkT)$

Opacidad, $\kappa = \kappa(\rho, T, \mu)$

Emisividad, $\varepsilon = \varepsilon(\rho, T, \mu)$

Condiciones de Borde

$$\text{En } r = 0 \quad M(r) = 0 \quad L(r) = 0$$

$$\text{En } r = R \quad T = 0 \quad P = 0$$