



Transporte Radiativo y Profundidad Óptica



Apuntes universitarios detallados:
La interacción cuántica entre la
luz y la materia estelar.

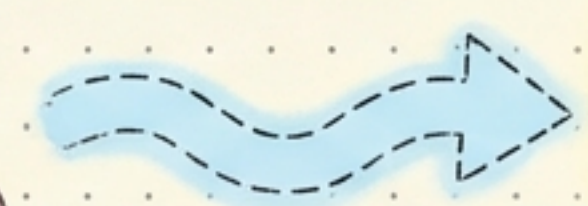
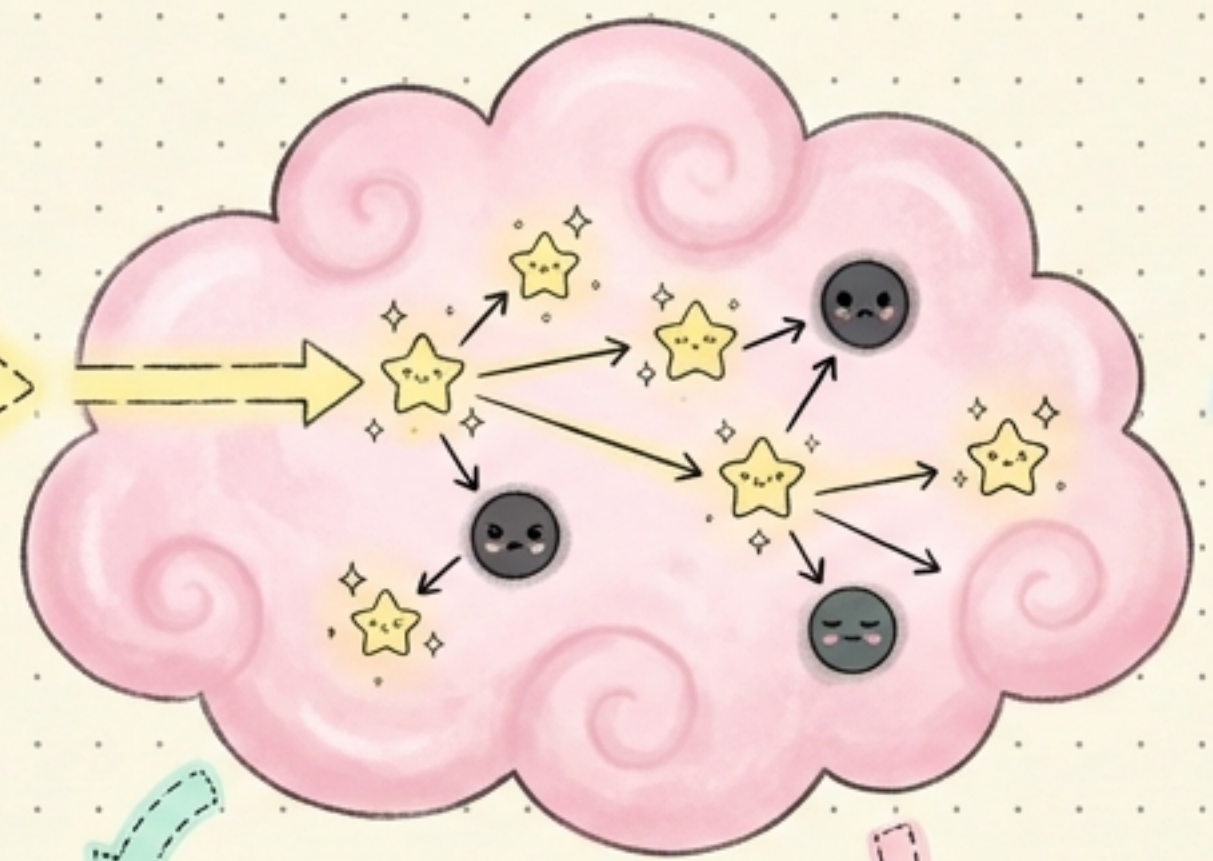


Medio Estelar



$$I_v$$

(Intensidad Específica Incidente)



$$I_v + dI$$

(Intensidad Modificada)



El Escenario: Un campo de radiación entra en un medio (nebulosa, atmósfera estelar).

El Conflicto: Al atravesarlo, el medio le quita energía (absorción) o le suma nueva energía (emisión).

El Resultado: La luz sale modificada por un factor dI .

$$dI = -\alpha \cdot I \cdot ds$$

Paso 1: ds es la distancia recorrida. ¡Se mide en metros o centímetros!

Paso 2: Para que la ecuación tenga sentido dimensional, el producto $\alpha \cdot ds$ debe ser adimensional.

Paso 3: Por lo tanto, α debe medirse en 1/distancia (ej. cm^{-1}).

Numéricamente, α (Coeficiente de Absorción) indica la probabilidad estadística de que un fotón sea absorbido en un rango de distancia. ¡A mayor α , más opaco es el medio!

El Camino Libre Medio ($L = 1/\alpha$)

La distancia estadística promedio que viaja un fotón antes de chocar y ser absorbido.

Aire Limpio

$$L = \frac{1}{\alpha}$$



α pequeño \rightarrow L grande.

La luz viaja kilómetros sin chocar.
(Medio transparente).

Día con Smog



α grande \rightarrow L chico.

La luz choca casi de inmediato.
(Medio opaco).

$$\alpha = n \cdot \sigma$$

n (Densidad de Partículas): Número de partículas por unidad de volumen.
(¡Más partículas = más obstáculos!)

σ (Superficie Eficaz de Absorción): Área transversal efectiva de interacción.

¡Ojo cuántico! σ no es solo el área geométrica de una esfera (πr^2), sino el área efectiva de interacción electromagnética cuántica entre la luz y la partícula.

Matriz de Nomenclatura: ¡Cuidado con las Densidades!




Coeficiente de Absorción (α)

- Fórmula: $\alpha = n \cdot \sigma$
- Densidad usada: n
(Partículas / Volumen)
- Unidades finales: 1 / distancia

Opacidad (κ)

- Fórmula: $\alpha = \kappa \cdot \rho$
- Densidad usada: ρ
(Masa / Volumen)
- Unidades finales: área / masa

Diferentes libros (y papers) usan distintas convenciones.
¡Elige una y sé matemáticamente consistente!


$$\frac{dI}{ds} = -\alpha I + j$$

El Gradiente.
Cómo cambia la intensidad de la luz a medida que avanza por el espacio.

El Decaimiento.
Lo que el medio absorbe (proporcional a la opacidad y a la luz incidente).

La Inyección.
Lo que el medio emite por sí mismo (Coeficiente de emisión).

La intensidad final es una batalla constante entre la luz que se pierde y la luz nueva que nace. ¿Quién gana? Depende del medio.

Escenario 1: Emisión Pura ($\alpha = 0$)

Condición: El medio no absorbe nada. La ecuación pierde su término negativo.

$$dI = j \cdot ds$$

Integración:

$$I(s) = I(s_0) + \int_{s_0}^s j(s') ds'$$

La intensidad total observada es la luz inicial más la suma de todos los pequeños "pedacitos" de luz (j) que cada capa del medio agregó a lo largo del viaje.

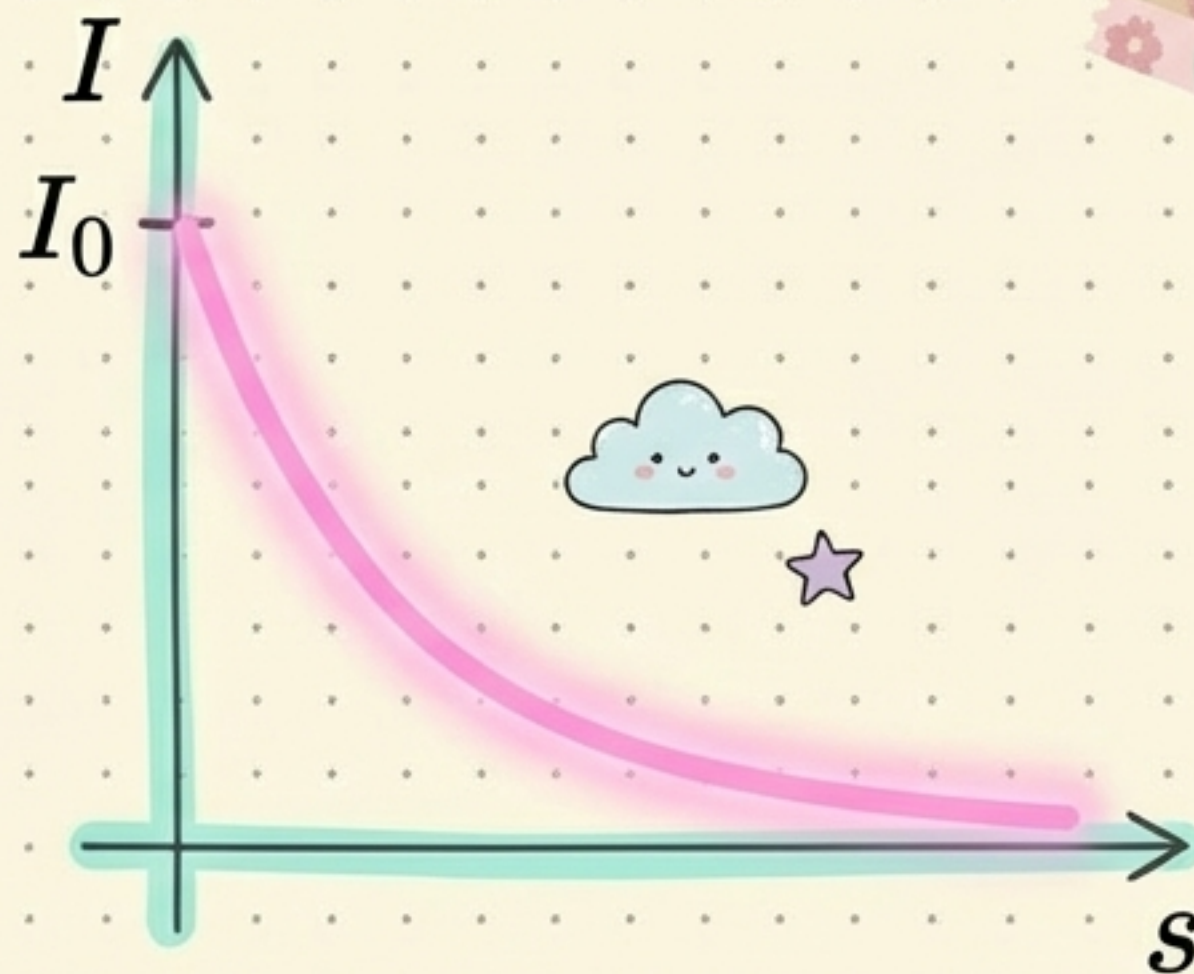
Escenario 2: Absorción Pura ($j = 0$)

$$\frac{dI}{I} = -\alpha \cdot ds$$

$$\int \frac{1}{I} dI = - \int \alpha \cdot ds$$

Solución:

$$I(s) = I_0 \cdot e^{-\alpha s}$$



¡Atenuación Exponencial! A medida que la luz penetra el medio, su intensidad decae dramáticamente.

La Métrica Definitiva: Profundidad Óptica (τ)

El Problema:
Decir "una nube mide 8 km" no nos dice nada sobre su opacidad real si no sabemos su densidad.

¡Soy universal, no necesito metros ni centímetros!

La Solución:
 τ normaliza la opacidad. Es un número absolutamente adimensional.

Diferencial:

$$d\tau = \alpha \cdot ds$$

Integral:

$$\tau = \int \alpha \cdot ds$$

¿Qué significa τ físicamente?



Si α es constante: $\tau = \alpha \cdot \Delta s$

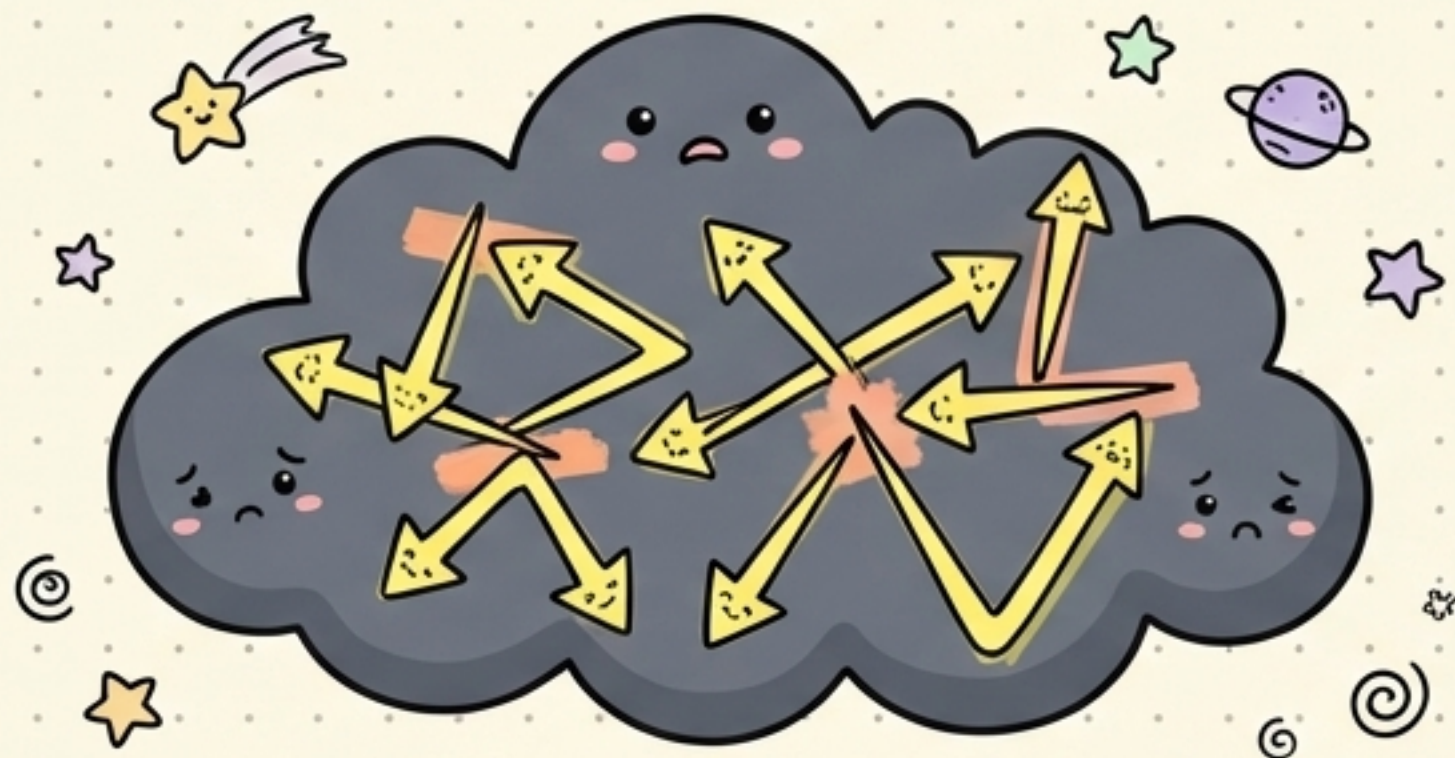
Como $L = 1/\alpha$, entonces...

$$\tau = \frac{\Delta s}{L}$$

Físicamente, τ es simplemente cuántos Caminos Libres Medios caben en la distancia total. Es una métrica estadística de probabilidad: ¿qué tan probable es que el fotón sobreviva el viaje?

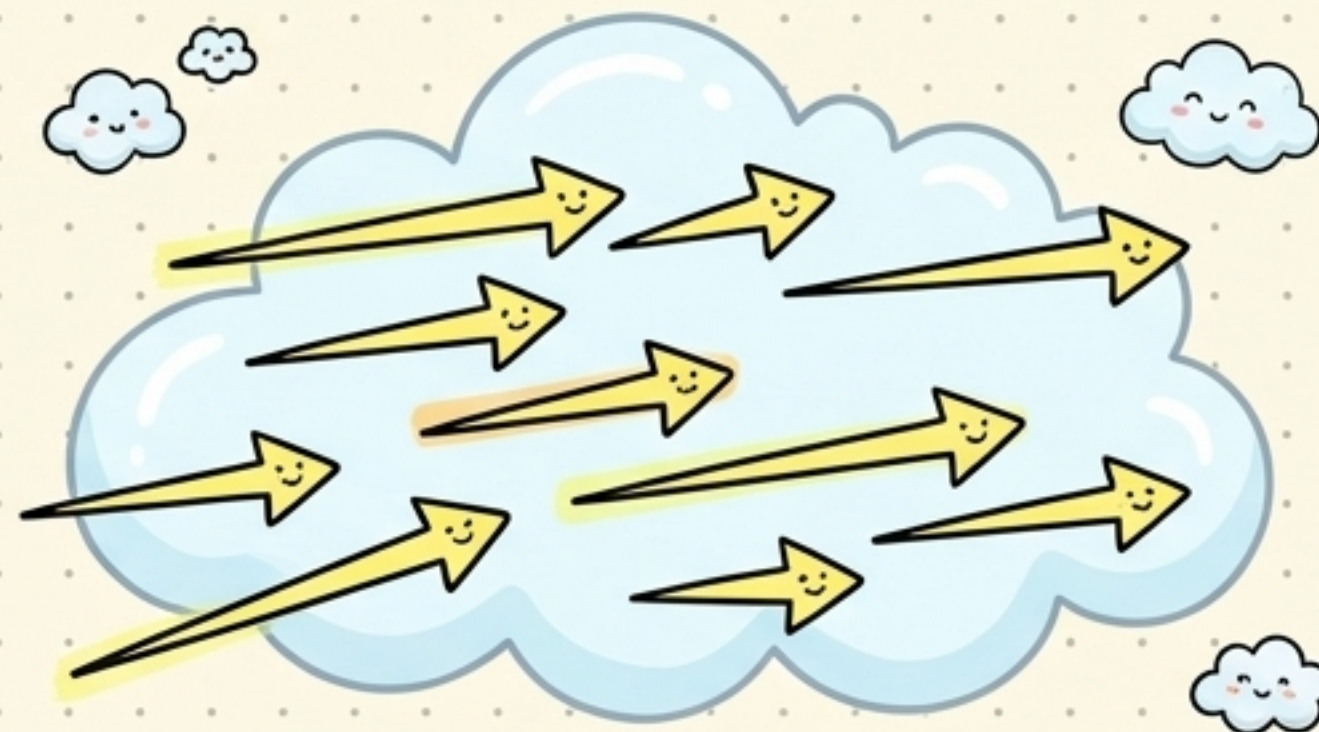
Clasificación de Medios según τ

Ópticamente Grueso ($\tau \gg 1$)



La distancia es mucho mayor al camino libre medio. Alta probabilidad de absorción.
(Ej: El interior de una estrella, o el aire en infrarrojo medio).

Ópticamente Delgado ($\tau \ll 1$)



La distancia es menor al camino libre medio. Los fotones escapan casi ilesos.
(Ej: El aire de una habitación en luz visible).

La Función Fuente (S)

Los procesos de emisión y absorción no son aislados; están íntimamente relacionados.



$$S = \frac{j}{\alpha}$$

¡Prepárate para la próxima clase!

Si el medio está en equilibrio termodinámico local (como un Cuerpo Negro perfecto), esta función S se convierte exactamente en la Función de Planck.

La RTE Reescrita con Elegancia

$$\frac{dI}{ds} = -\alpha I + j$$

$$\frac{dI}{\alpha ds} = -I + \frac{j}{\alpha}$$

(Dividimos todo por α)

(Aplicamos $d\tau = \alpha ds$ y $S = j/\alpha$)

$$\frac{dI}{d\tau} = -I + S$$

El cambio de intensidad respecto a la profundidad óptica es simplemente la tensión entre la luz que se pierde ($-I$) y la fuente interna del medio (S).

Resumen Estelar: Cheat Sheet



I_ν

Intensidad Específica
(Luz en viaje)

α

Absorción ($n \setminus \sigma$)
[Unidad: 1/cm]

L

Unensción
(Energía inyerta)

j

Emisión
(Energía inyectada)

L

Camino Libre
Medio ($1/\alpha$)

τ

Profundidad Óptica
($\setminus \text{int } \setminus \alpha$)
[Adimensional]

S

Función Fuente
(j/α)