

# Deconstruyendo la Luz ✨

Apuntes de Astrofísica: Campos Radiativos, Flujo y Presión



# Fundamentos: El Espectro de la Luz

## Frecuencia

- **Concepto:** Densidad de Flujo en Frecuencia ( $F_\nu$ )
- **Unidades:**  $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$
- **Uso:** Ideal cuando estudiamos la luz como ondas oscilantes.

¡Cuidado! No son iguales, pero representan la misma energía. Para pasar de una a otra usamos:

$$F_\lambda = \frac{c}{\lambda^2} F_\nu$$

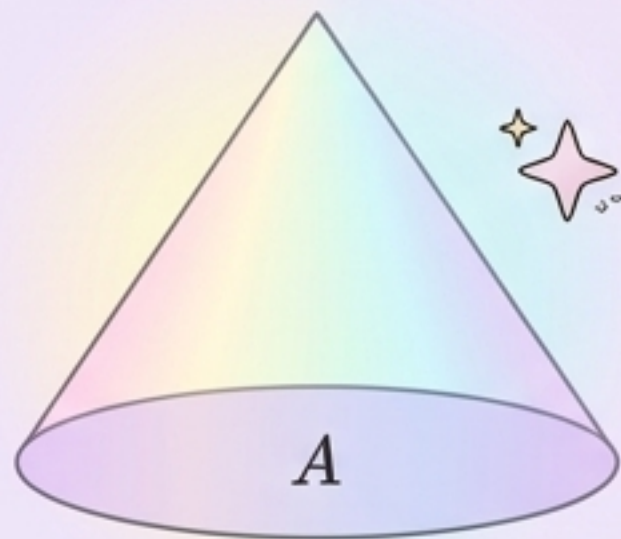
## Longitud de Onda

- **Concepto:** Densidad de Flujo en Longitud de Onda ( $F_\lambda$ )
- **Unidades:**  $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$
- **Uso:** Ideal cuando medimos luz con prismas o redes de difracción.

# Flujo vs. Intensidad Específica ✿

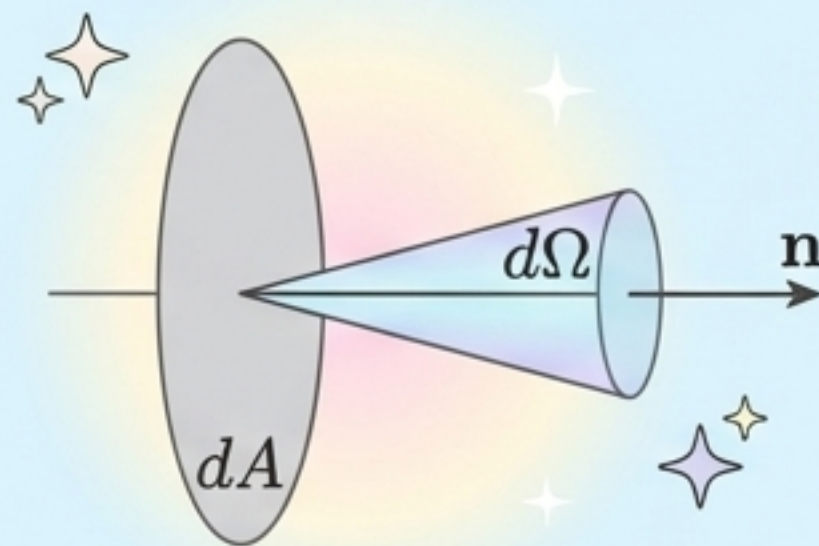
## Flujo ( $F_v$ )

- **Definición:** Es “todo lo que pasa” por un área. Es la suma o integral de todos los rayos.
- **Dependencia:** ¡Depende de la distancia! Decrece con el cuadrado de la distancia ( $1/r^2$ ).



## Intensidad Específica ( $I_v$ )

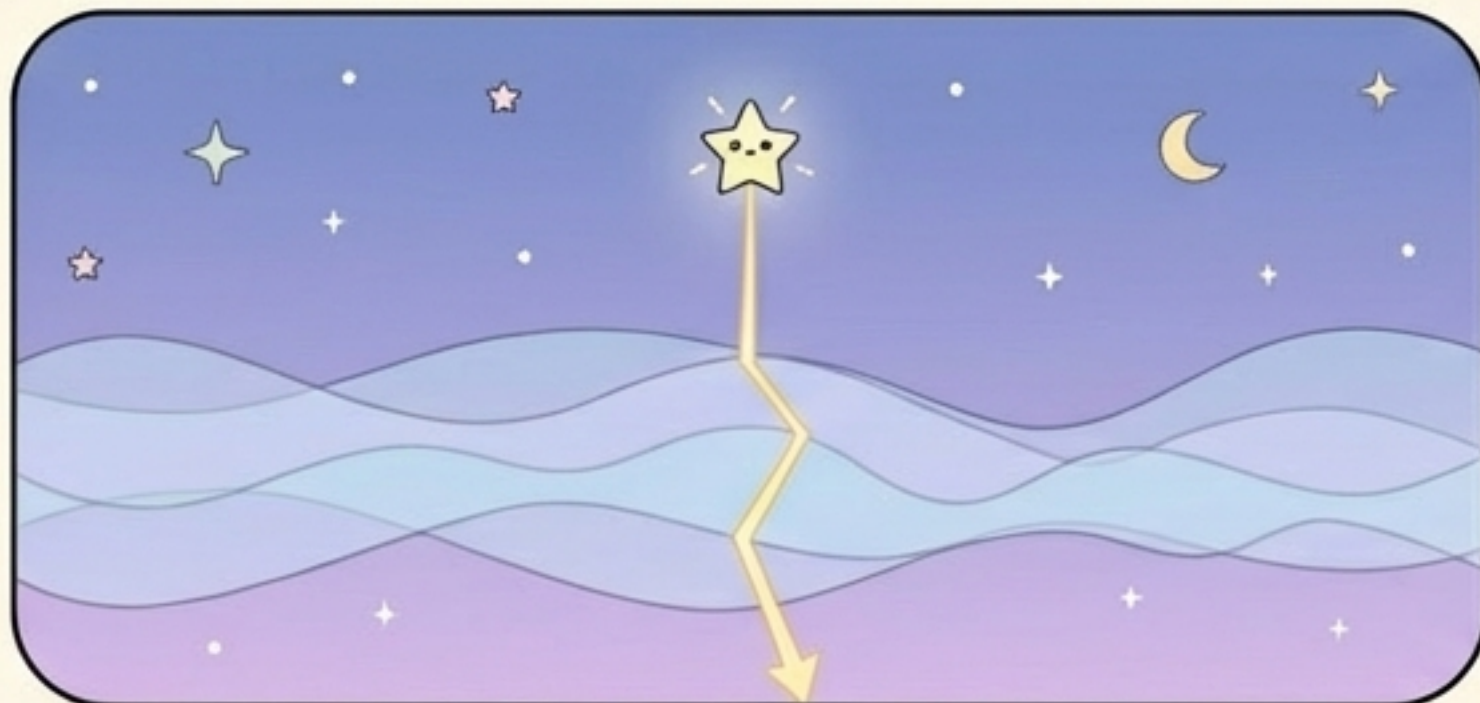
- **Definición:** Es “un solo rayito” viajando en una dirección específica dentro de un ángulo sólido diferencial ( $d\Omega$ ).
- **Dependencia:** Es independiente de la distancia. No se diluye con el espacio.



El Flujo es la suma de todas las Intensidades Específicas que logran atravesar nuestra superficie. ✨

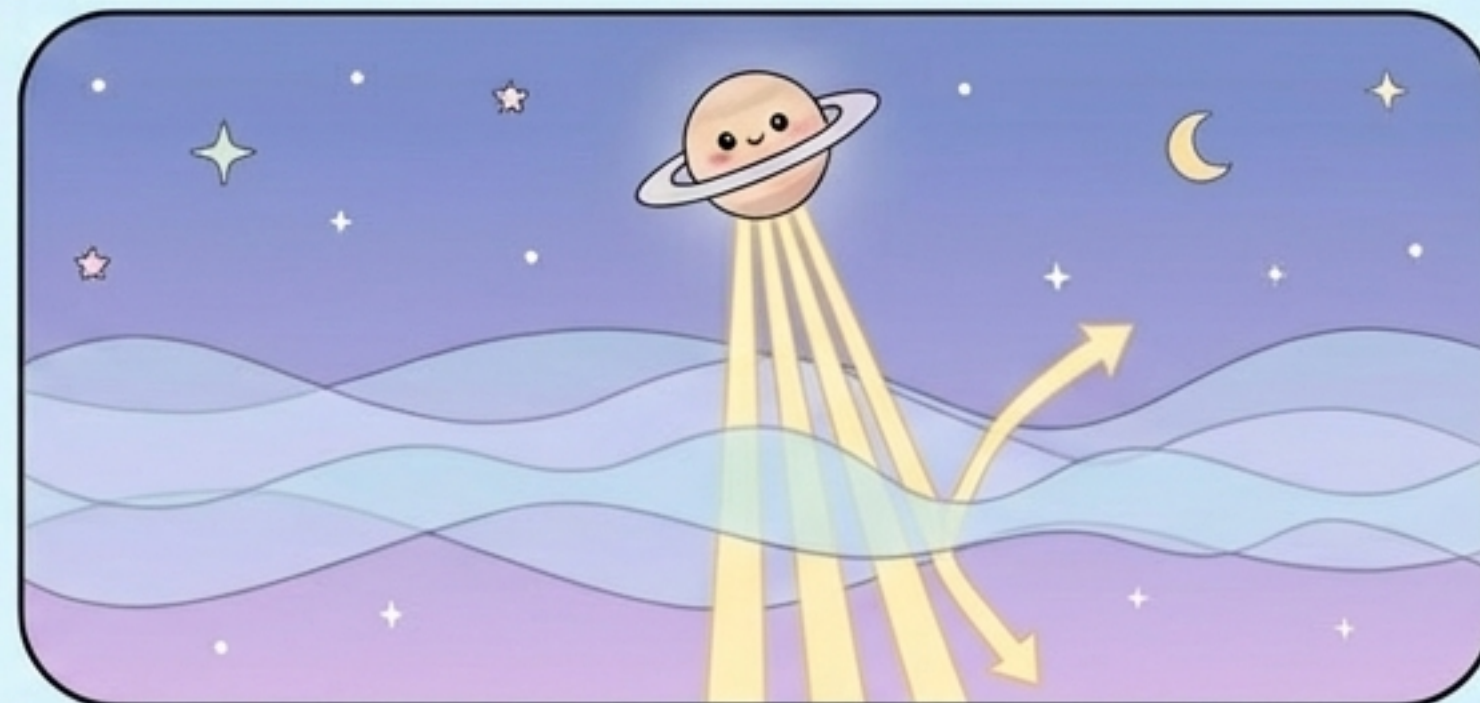
# ¿Por qué Titilan las Estrellas (y los planetas no)? 🤔🔭

## Las Estrellas ✨



- **Física:** Son fuentes puntuales lejanas. Su ángulo sólido es prácticamente cero ( $d\Omega \approx 0$ ).
- **Efecto:** Nos llega un solo rayo. Cuando la atmósfera terrestre refracta ese rayo, la luz "salta" de lugar. ¡Eso es el titilar!

## Los Planetas 🪐

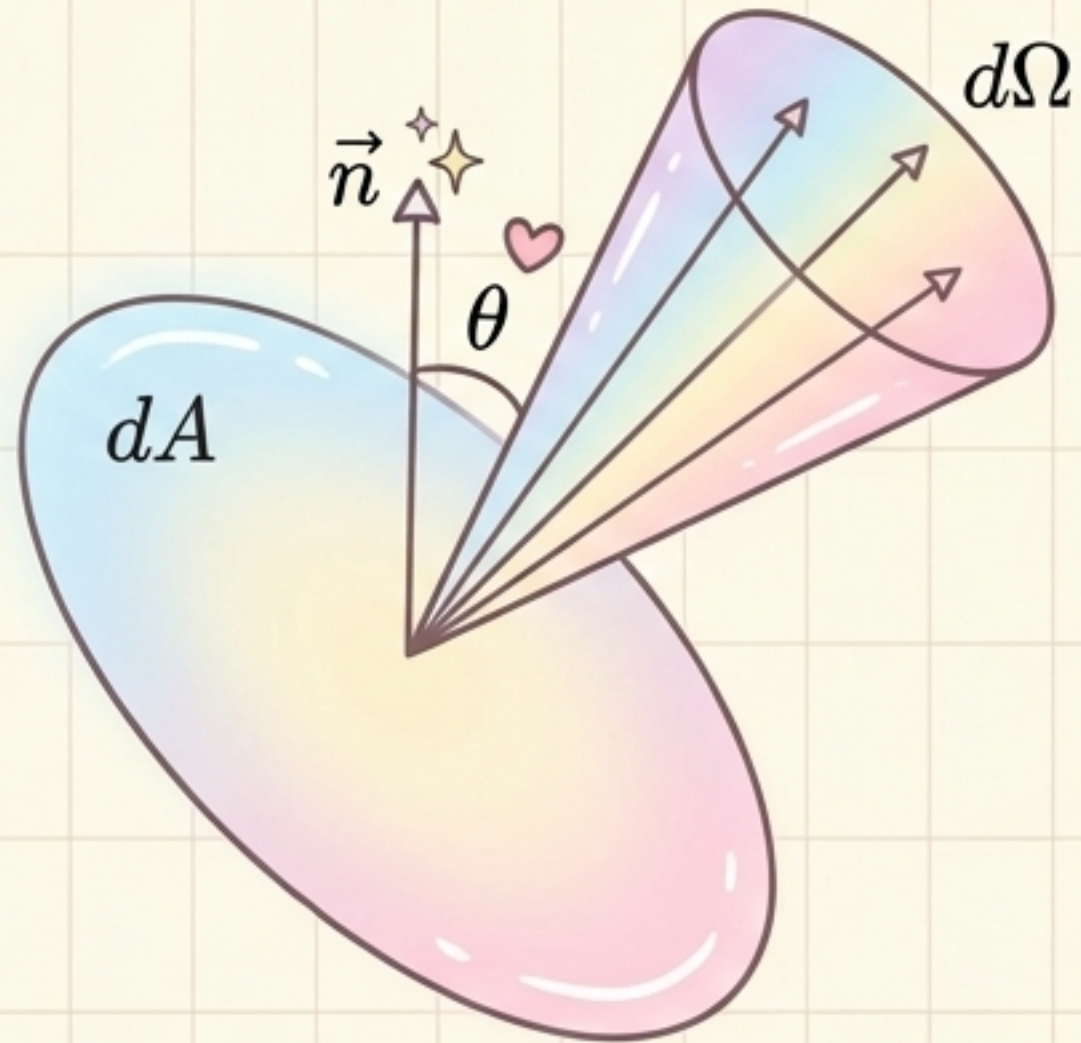


- **Física:** Tienen un tamaño físico medible. Su ángulo sólido es mayor a cero ( $d\Omega > 0$ ).
- **Efecto:** Emiten múltiples rayos. Si la atmósfera desvía uno, otro cercano compensa el vacío. ¡Su luz es estable!

El tamaño angular lo cambia todo en la propagación de la luz.

# El Efecto Proyección: La Geometría de la Luz 📐🎀

- La radiación casi nunca nos llega perfectamente de frente. Cuando la luz llega de lado, el área efectiva que captura la energía se encoge.
- La Transformación Matemática:
  - $dA \rightarrow dA \cos(\theta)$
  - $\theta$  es el ángulo entre la radiación y la línea normal (perpendicular) a la superficie.



## Nota del Profesor ❄️

¡Por esto hace frío en invierno! Aunque el Sol emite la misma energía, en invierno está más bajo en el horizonte. El ángulo de incidencia  $\theta$  crece, el factor  $\cos(\theta)$  disminuye, y el flujo neto sobre el suelo es mucho menor.

# Promedios Estelares: Intensidad Media ( $J_\nu$ )

$$J_\nu = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} I_\nu d\Omega$$

Sumamos en todas las direcciones de la esfera.

Normalizamos dividiendo por el área de una esfera unitaria.

Ponderado por el ángulo sólido.

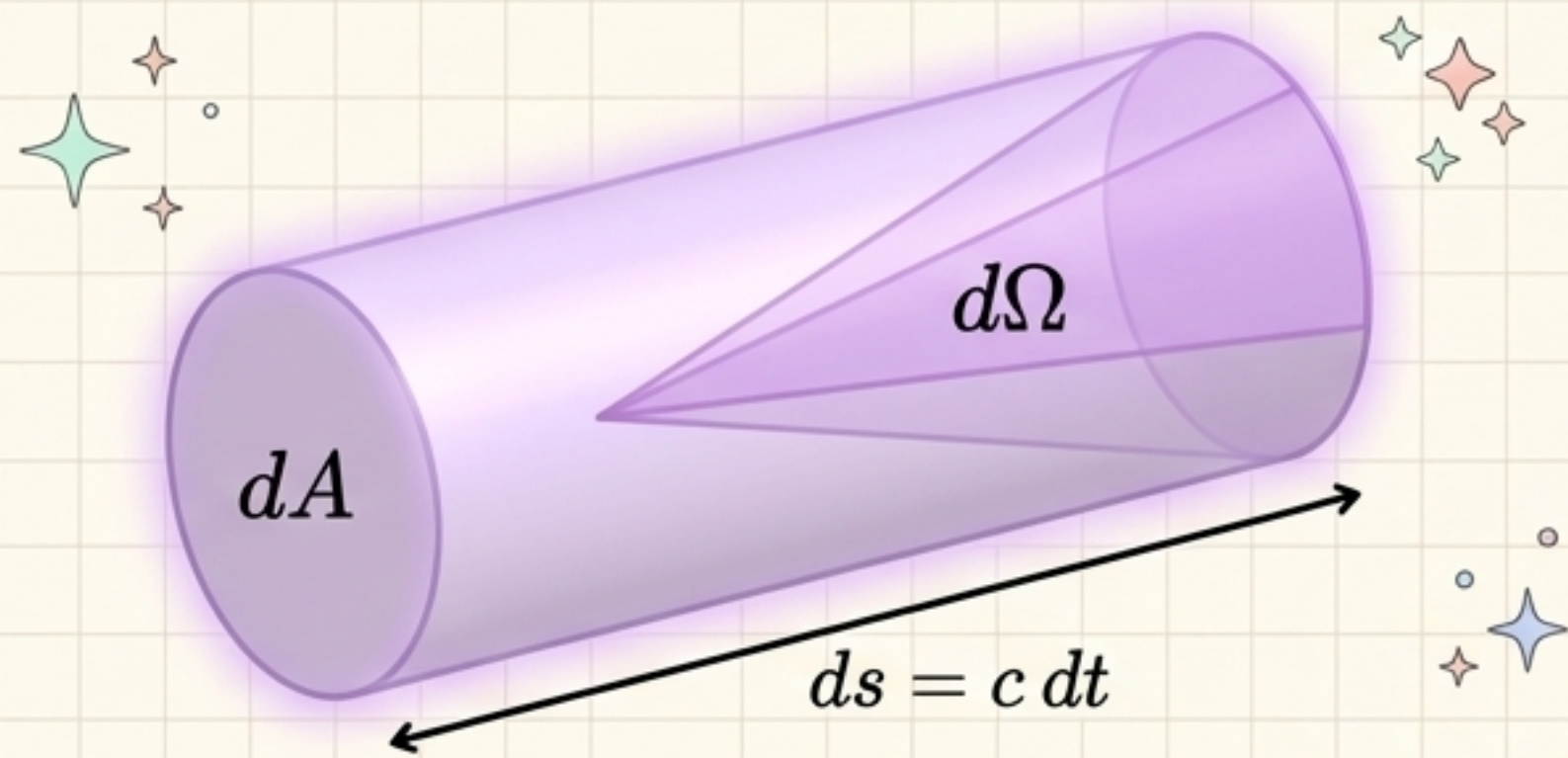
## ✨ Radiación Isotrópica ✨

¿Qué pasa si el campo radiativo emite exactamente igual en todas las direcciones (Isotrópico)?

Entonces  $I_\nu$  no depende del ángulo y sale de la integral.

✨ Resultado Mágico:  $J_\nu = I_\nu$  ✨

# Acumulando Luz: Densidad de Energía Radiativa ( $u_\nu$ )




El Cilindro Diferencial:

- Para saber cuánta energía hay acumulada, imaginamos un volumen.
- La luz viaja a velocidad  $c$ . En un tiempo  $dt$ , forma un cilindro de largo  $ds = c \cdot dt$ .

## La Ecuación

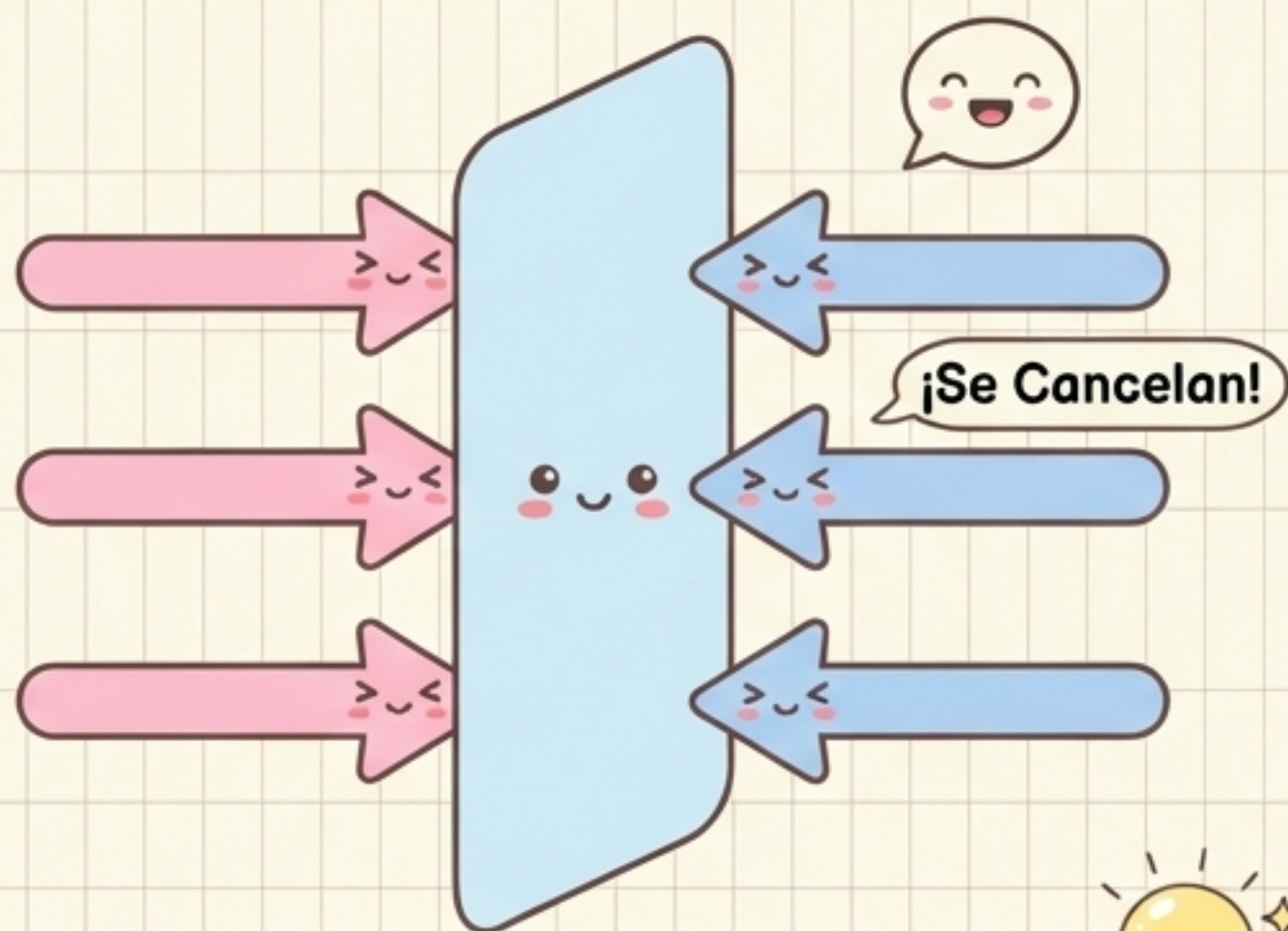
La densidad de energía vincula el volumen con la intensidad específica.  
Al integrar sobre todos los ángulos obtenemos la energía total:

$$u_\nu = \frac{4\pi}{c} J_\nu$$

 ¡No te asustes con las integrales! Mira cómo todo se simplifica: la cantidad de energía almacenada ( $u_\nu$ ) es solo una constante proporcional al promedio de la luz que pasa por ahí ( $J_\nu$ )

# La Paradoja Isotrópica: ¡Cero Neto!

El Enigma: Un campo isotrópico perfecto tiene luz rebotando con gran intensidad en todas direcciones. Pero, ¿cuánto flujo neto de energía transporta a través de una superficie?



Para hallar el Flujo, integramos:

$$\begin{aligned} F_{\nu} &= I_{\nu} \int_{\text{de } 0}^{\text{de } 0 \text{ a } 2\pi} d\phi \int_{\text{de } 0}^{\text{de } 0 \text{ a } \pi} \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \\ &= 2\pi I_{\nu} \int_{\text{de } 0}^{\text{de } 0 \text{ a } \pi} \frac{1}{2} \sin(2\theta) d\theta \\ &= \pi I_{\nu} \left[ -\frac{1}{2} \cos(2\theta) \right] (\text{de } 0 \text{ a } \pi) \\ &= \pi I_{\nu} \left[ -\frac{1}{2} (1 - 1) \right] = 0 \end{aligned}$$

La integral de  $\cos(\theta)\sin(\theta)$  evaluada de 0 a  $\pi$  es exactamente cero.

## La Física (El Aha Moment)

- ¡La energía que entra por un lado es idéntica a la que sale por el otro! Los vectores se cancelan perfectamente.
- Es como el salón de clases al sonar la campana: la tasa de alumnos que sale es igual a la que entra. ¡El flujo neto de personas es cero!

# La Luz También Empuja: Momentum y Presión

## El Fotón

La luz no tiene masa,  
¡pero sí momentum!

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

## Flujo de Momentum

La cantidad de momentum  
que cruza un área por  
unidad de tiempo.

$$dp_{\nu}' = \frac{I_{\nu}}{c} \cos \theta d\Omega \hat{s}$$

## Presión de Radiación ( $P_{\nu}$ )

Momentum por unidad de  
tiempo = Fuerza. Y Fuerza  
por unidad de Área = ¡Presión!

$$P_{\nu} = \frac{1}{c} \int I_{\nu} \cos^2(\theta) d\Omega$$

## El Doble Coseno ( $\cos^2\theta$ ): ¿Por qué al cuadrado?

- Un  $\cos(\theta)$  reduce el área efectiva proyectada.
- El otro  $\cos(\theta)$  extrae solo la componente de la fuerza ortogonal a la superficie (la luz paralela no empuja).

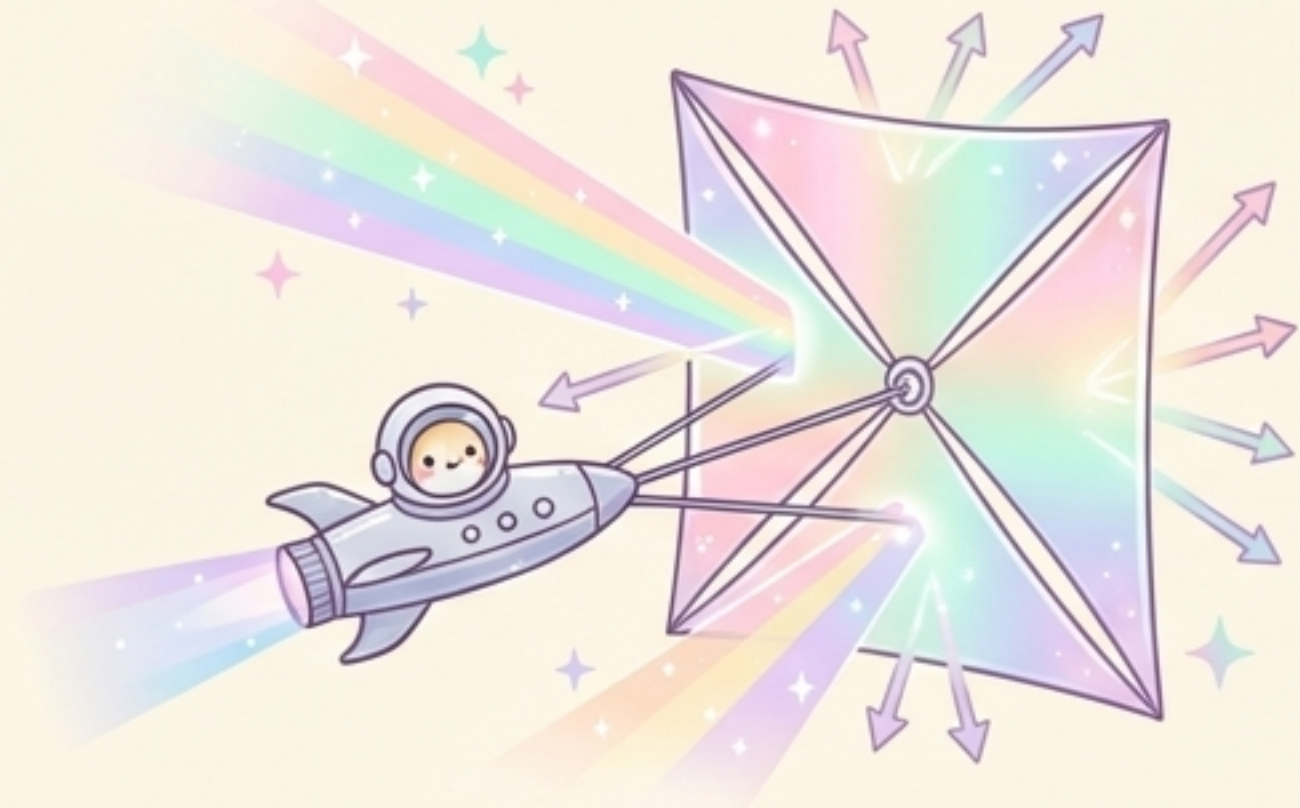
# Aplicaciones C3smicas: La Luz que Empuja 🌠💖

## Las Colas de los Cometas 🌠



- ¿Sabías que la cola de un cometa no apunta hacia donde vino?
- La Presi3n de Radiaci3n del Sol empuja el gas liberado. ¡Por eso la cola siempre apunta en direcci3n contraria al Sol, sin importar en qu3 direcci3n viaje el cometa!

## Velas Solares 🚢💫



- Navegaci3n espacial sin combustible.
- Se despliegan s3banas reflectantes en el espacio. La luz rebota en ellas, transfiriendo el doble de su momentum e impulsando la nave, igual que el viento empuja un kitesurf.

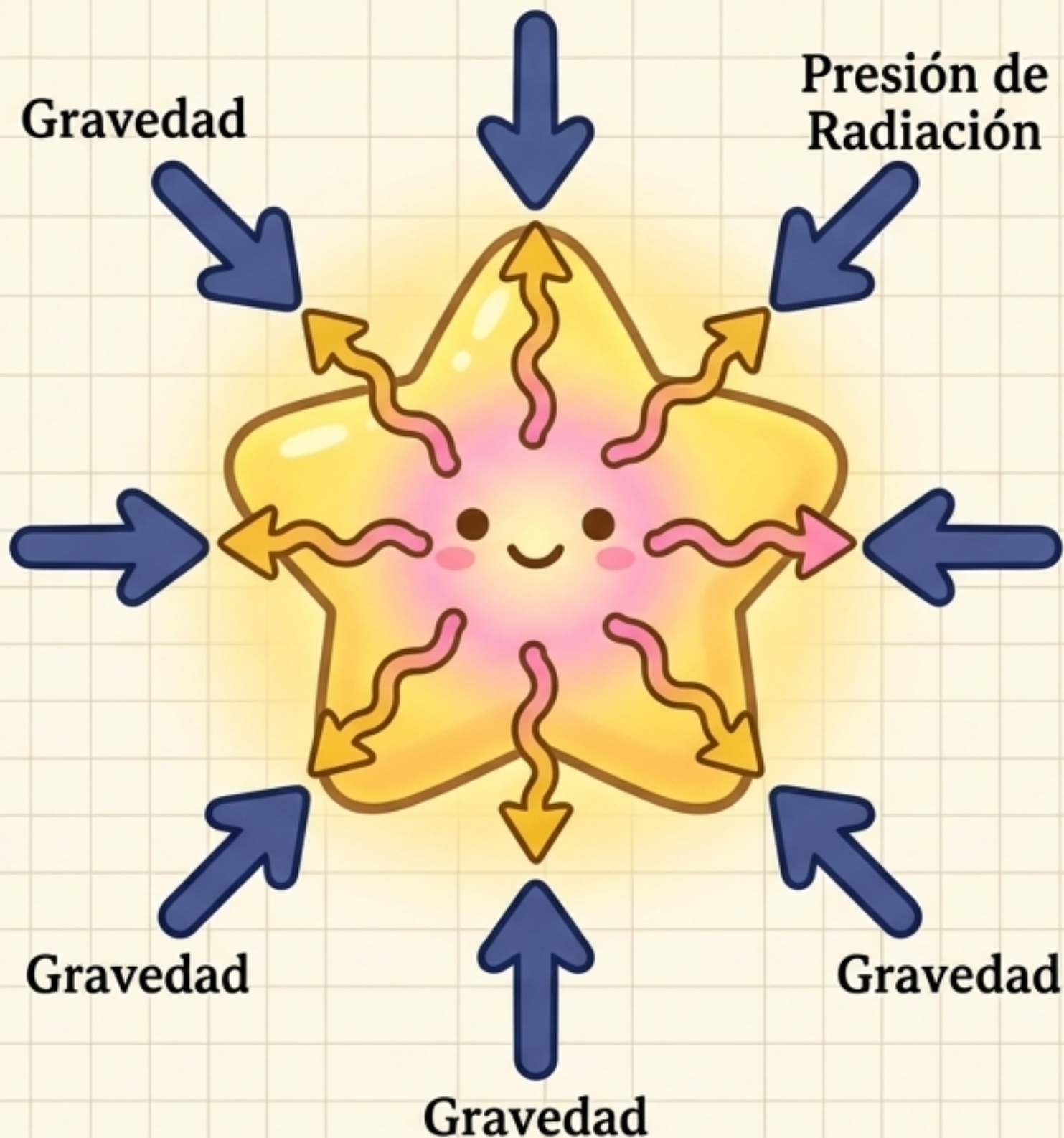
# El Corazón de una Estrella: Equilibrio Perfecto

## El Conflicto:

¿Por qué las estrellas no colapsan bajo su gigantesca gravedad?

## El Falso Héroe:

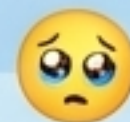
Pensarías que es la presión del gas ideal. ¡Falso! La presión del gas jamás podría ganarle a una gravedad tan colosal.



## El Verdadero Héroe: El Horno Nuclear 🔥

En el núcleo, a más de 15 millones de grados, se fusiona el hidrógeno.

Esta inmensa energía libera una abrumadora Presión de Radiación. Es la luz empujando hacia afuera lo que verdaderamente sostiene a la estrella.



Cuando el hidrógeno se agota, esta presión colapsa... y la estrella muere, convirtiéndose en una Gigante Roja.

# Síntesis Magistral: Los Momentos de la Luz ✨📖

Toda la complejidad del transporte radiativo se puede resumir en la elegancia de una sola operación matemática: los Momentos de orden  $n$  de la Intensidad Específica ( $I_\nu \cos^n \theta$ ).

{ Orden 0 ( $n=0 \rightarrow \cos^0 \theta = 1$ ): }

**Intensidad Media ( $J_\nu$ )**  
Relacionada a la Densidad de Energía ( $u_\nu$ ).

{ Orden 1 ( $n=1 \rightarrow \cos^1 \theta$ ): }

**Flujo Radiativo ( $F_\nu$ )**  
Nos da el Transporte de Energía.

{ Orden 2 ( $n=2 \rightarrow \cos^2 \theta$ ): }

**Presión de Radiación ( $P_\nu$ )**  
Nos da el Transporte de Momentum.

La física no es un montón de ecuaciones aisladas,  
es una sola historia contada desde diferentes  
perspectivas. ¡Tú puedes dominarla!