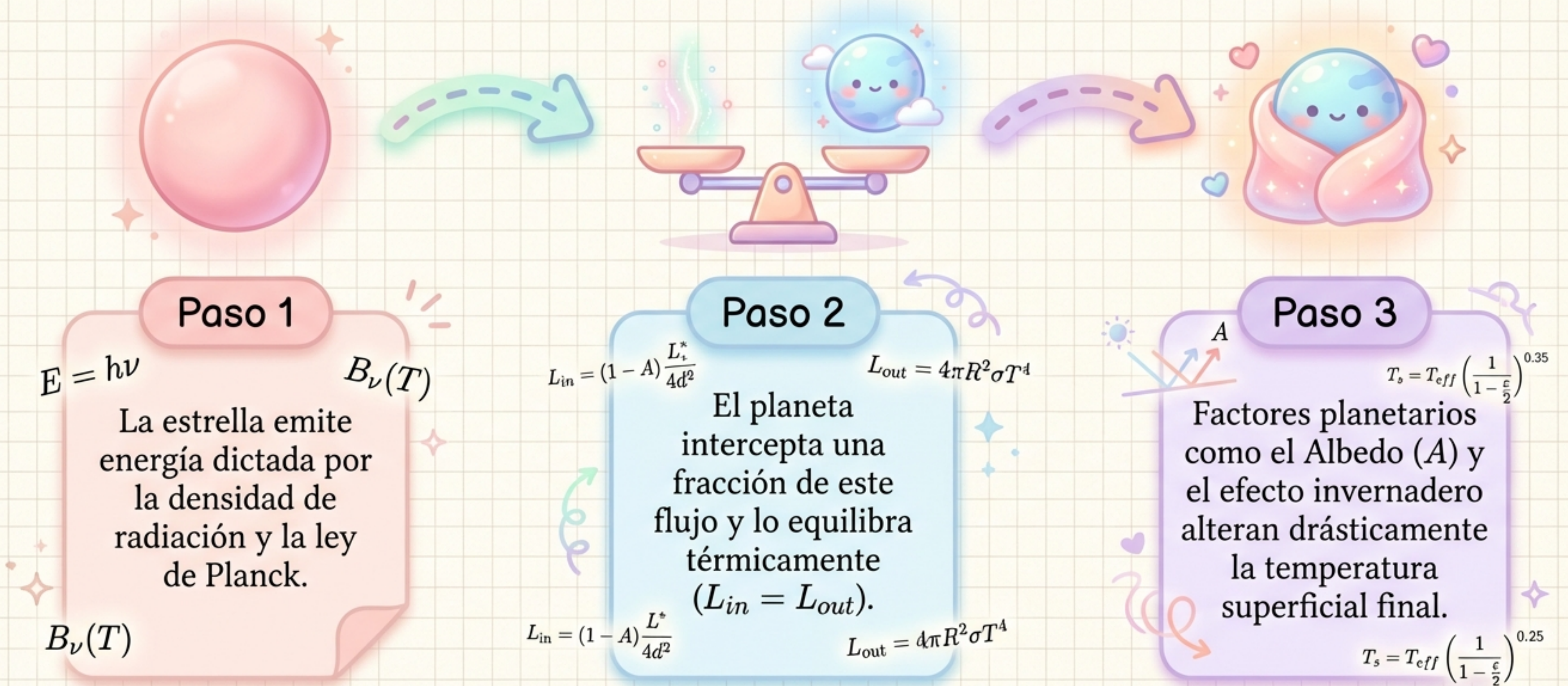




Equilibrio Térmico Planetario

Un viaje radiativo desde la termodinámica estelar hasta el efecto invernadero

El ciclo de la energía a nivel planetario



Fundamentos de la radiación isotrópica

Para entender la emisión estelar, partimos de la densidad de energía (u) y su relación con la temperatura absoluta (T). En condiciones de isotropía ($I_\nu = J_\nu$), integramos la función de Planck:

$$\text{Ecuación principal: } u = \frac{4\pi}{c} \int B_\nu(T) d\nu = \frac{4\pi}{c} B(T) = aT^4$$

Derivación: Esto nos revela que $B(T) = \frac{ac}{4\pi} T^4$.



La Ley de Stefan-Boltzmann define el flujo térmico

El flujo emergente (F) de nuestra fuente isotrópica nos permite identificar la constante universal de transferencia radiativa:



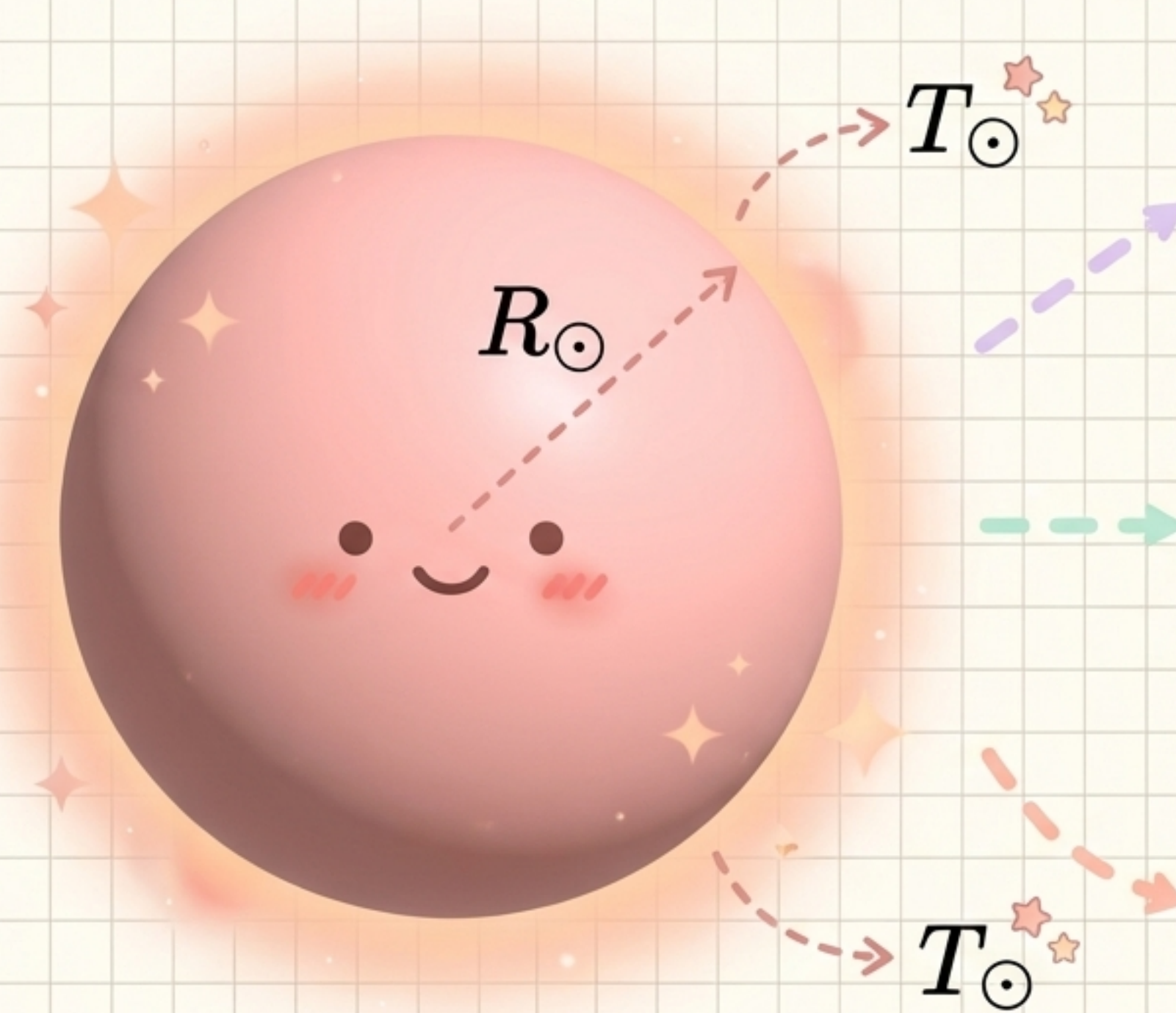
$$F = \sigma T^4$$

Constantes Universales:

$$\sigma = \frac{ac}{4} = 5.67051 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$a = 7.5646 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-3} \text{ K}^{-4}$$

Calculando la luminosidad total de la estrella (L_{\odot})



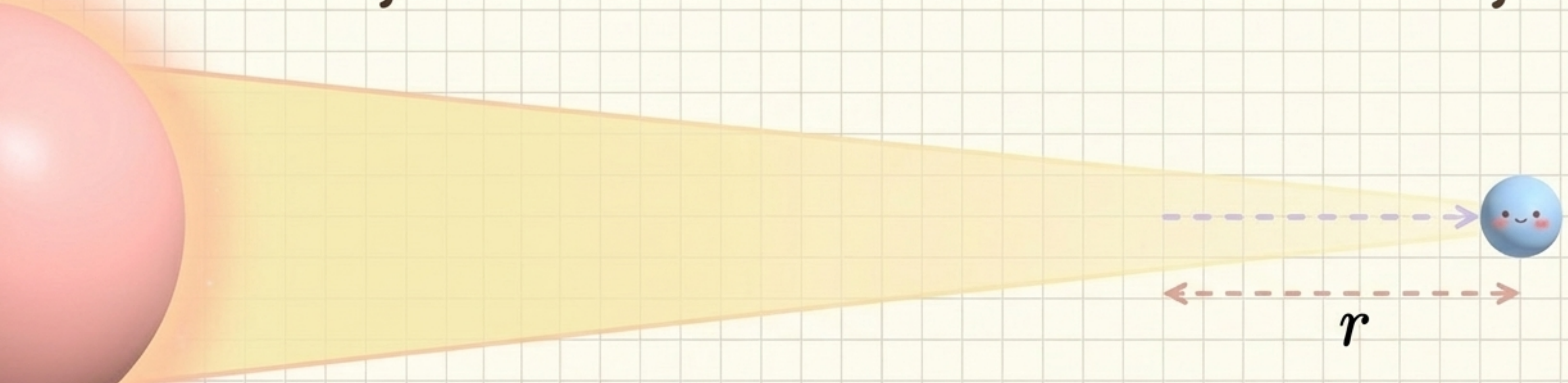
La energía total que la estrella lanza al espacio cada segundo es el producto de su área superficial y su flujo radiativo.

Área de una esfera: $4\pi R_{\odot}^2$
Flujo (Stefan-Boltzmann): σT_{\odot}^4

Luminosidad Estelar:

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

El viaje a través del vacío: Dilución del flujo



A medida que la energía viaja, se esparce sobre un área cada vez mayor. El flujo recibido (F_{rec}) a una distancia r obedece la ley de la inversa del cuadrado:

$$\text{Flujo Recibido: } F_{rec} = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2}$$

Ecuación expandida:

$$F_{rec} = \sigma T_{\odot}^4 \left(\frac{R_{\odot}}{r} \right)^2$$

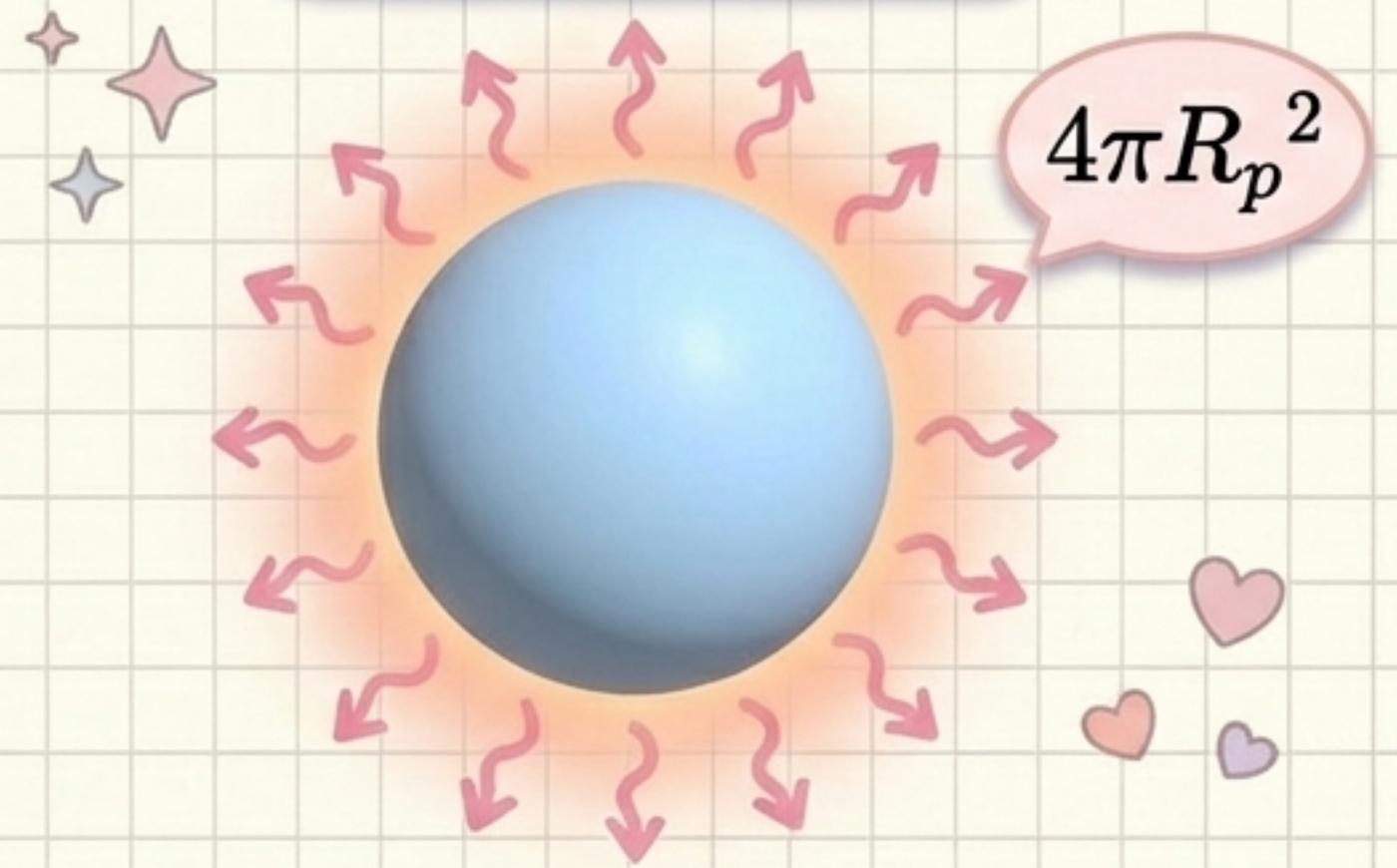
La geometría del planeta: Absorción transversal vs. Emisión esférica

Absorción (L_{in})



Absorción (L_{in}): El planeta intercepta la luz estelar únicamente a través de su silueta transversal (un disco plano).

Emisión (L_{out})



Emisión (L_{out}): El planeta irradia su propio calor hacia el espacio desde la totalidad de su superficie tridimensional.

El principio de conservación de la energía ($L_{in} = L_{out}$)

Al igualar la energía entrante con la saliente, encontramos la temperatura de equilibrio (T_p) base del planeta, asumiendo condiciones ideales:

$$L_{in} = F_{rec} \cdot \pi R_p^2$$



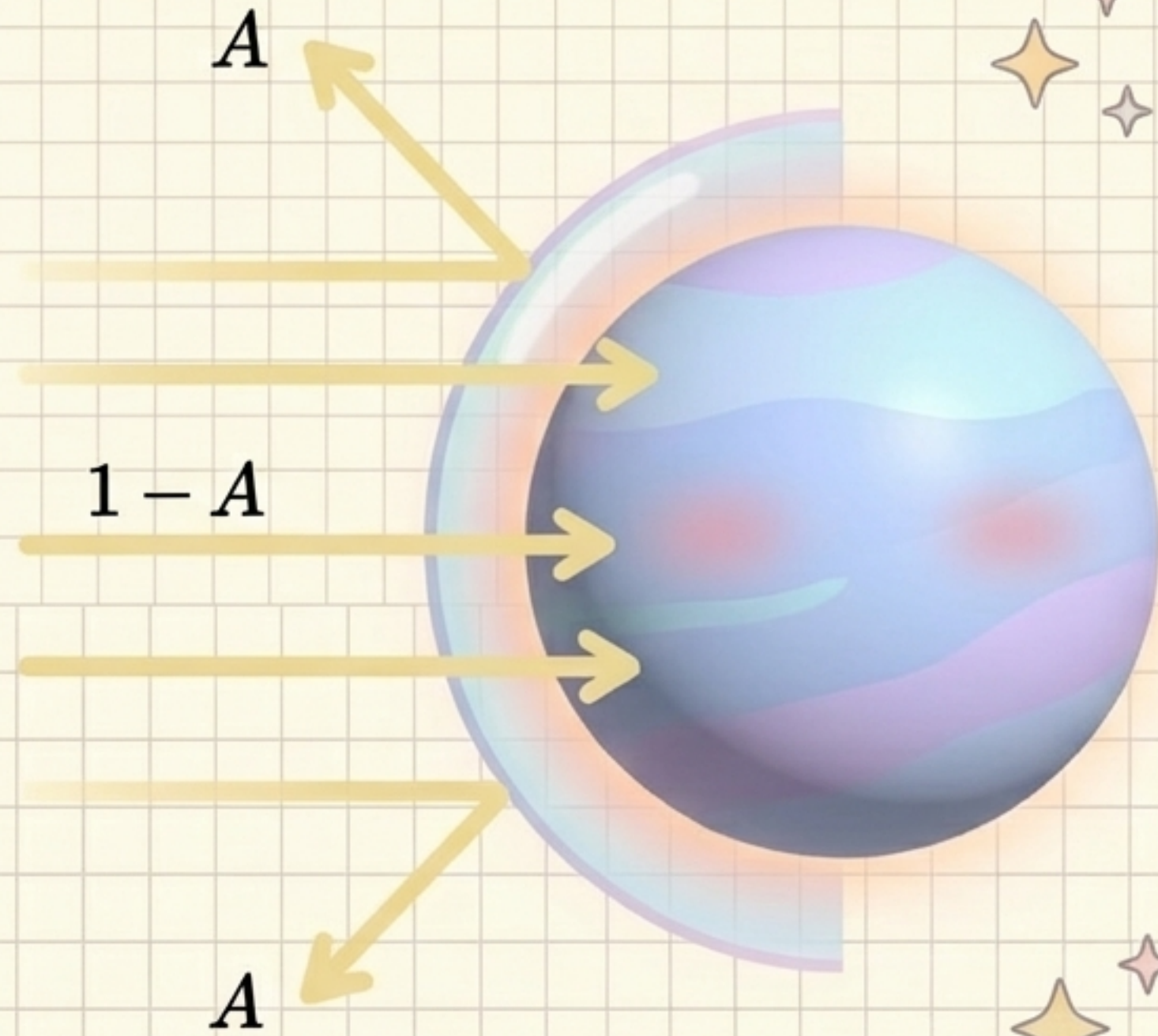
$$L_{out} = \sigma T_p^4 \cdot 4\pi R_p^2$$



$$\cancel{\sigma T_{\odot}^4} \left(\frac{R_{\odot}}{r} \right)^2 \cdot \cancel{\pi R_p^2} = \cancel{\sigma T_p^4} \cdot \cancel{4\pi R_p^2}$$

$$\text{Temperatura Resultante: } T_p = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{R_{\odot}}{r} \right)^{\frac{1}{2}} T_{\odot}$$

Primera variable moduladora: El factor de Albedo (A)



Los planetas no absorben toda la luz. El Albedo (A) representa la fracción de radiación incidente que es inmediatamente reflejada por nubes, hielo o la superficie.

La luminosidad de entrada se reduce: L_{in} multiplicada por $(1 - A)$.

Nueva Temperatura de Equilibrio:

$$T_p = (1 - A)^{1/4} \cdot \left(\frac{R_{\odot}}{2r}\right)^{1/2} \cdot T_{\odot}$$

Segunda variable moduladora: Redistribución térmica (n)



La energía absorbida en el lado diurno no se queda allí. Un factor n describe cómo los vientos y océanos redistribuyen el calor hacia la cara oscura del planeta.

La emisión total (L_{out}) se divide entre las dos caras:

$$L_{\text{out}} = n\sigma T_p^4 \cdot 4\pi R_p^2 + (\sigma T_p'^4 \cdot 4\pi R_p^2) \cdot (1 - n)$$

Análisis Comparativo: El caso paradójico de la Tierra

Las matemáticas puras predicen que la Tierra, con su Albedo de 0.3, debería ser una bola de hielo inhabitable. Existe una brecha crítica entre el modelo térmico y nuestra realidad.

Cuerpo Negro Ideal



Albedo: 0

Output Teórico: 278 K

Resultado Final: ~ 5°C

Modelo con Albedo Real



Albedo: 0.3

Output Teórico: 254 K

Resultado Final: ~ -19°C

Realidad Observada



Atmósfera: Presente

Impacto Invernadero: Activo

Resultado Final: ~ 15°C

La pieza faltante: El efecto invernadero



La discrepancia entre los -19°C teóricos y los 15°C observados se atribuye directamente a nuestra atmósfera.

Aunque la Tierra obedece el equilibrio de $L_{in} = L_{out}$ desde el exterior del sistema, internamente, los gases de efecto invernadero actúan como una manta radiativa.

Atrapan la emisión infrarroja, elevando drásticamente la temperatura superficial observable más allá de la temperatura efectiva de 254 K teórica.

Conclusiones de nuestro modelo termodinámico



El destino térmico se escribe en la estrella:
La *luminosidad* y la *distancia* dictan la energía disponible a través de la ley de *Stefan-Boltzmann*.



La geometría importa: El equilibrio radiativo nace de la diferencia entre absorber luz como un disco 2D y emitir calor como una esfera 3D.



La atmósfera es vida: Sin la modulación del Albedo y la retención térmica del efecto invernadero, las matemáticas puras de radiación dejarían a la Tierra completamente congelada.

