

Sistemas Estelares 2023

Material Interestelar - clase 1

Prof. Claudia Scóccola

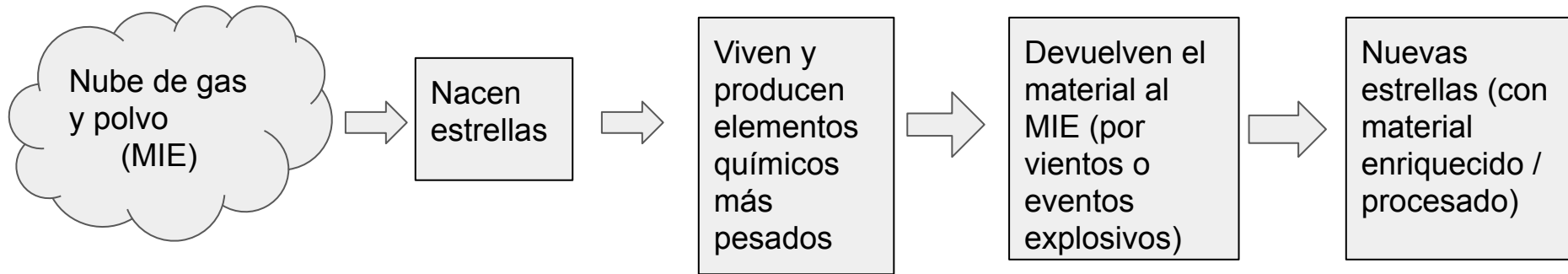
Región de formación estelar [JWT](#)



Importancia del estudio del material interestelar

El material interestelar es **crucial** para la formación y evolución de las estrellas.

La evolución de las estrellas es un **proceso cíclico**:



Importancia de estudiar el medio interestelar

- ❖ Rol en evolución estelar
- ❖ Describe la estructura, dinámica y evolución de nuestra galaxia (y otras)
- ❖ Impacto sobre las observaciones (extinción)
- ❖ Ambiente complejo donde se puede testear teorías y modelos astrofísicos:

➤ Dinámica del MIE:

- Movimientos turbulentos del gas
- Shocks
- Campos magnéticos galácticos

Magnetohidrodinámica

- Teorías para el transporte radiativo
- Termodinámica
- Mecánica cuántica

Testeable con los e- libres, iones, átomos, moléculas y polvo que forman el MIE.

➤ Química

Producción y destrucción de granos de polvo y moléculas complejas

Algunos aspectos del MIE se estudian en Astronomía Estelar:

- Generalidades, descripción del MIE
- Descripción de los efectos observables del MIE sobre la radiación estelar
- Efectos sobre magnitudes y colores
- Definición de exceso de color y su vinculación con la extinción interestelar
- Propiedades de los diagramas de dos colores
- Líneas de enrojecimiento y constante de absorción selectiva, R_V

Contenido del MIE

❖ Gas enrarecido

- $\sim 0.025 M_{\text{sun}}/\text{pc}^3$
- 60% H, 30% He

[Números
para
comparar](#)

❖ Partículas de polvo

- $\sim 0.002 M_{\text{sun}}/\text{pc}^3$

❖ Campos magnéticos

- $H \sim 10^{-6}$ Gauss

❖ Electrones, protones y otras partículas

- Rayos cósmicos, veloc relativistas

Veremos cómo se detecta y cómo se miden sus propiedades.

Lo aquí detallado es válido para la Vía Láctea pero las propiedades básicas sirven para otras galaxias, con la salvedad de que las proporciones variarán según el tipo de galaxia, metalicidad, etc.



Credit: NASA

<https://www.nasa.gov/content/nasa-reveals-mysteries-of-interstellar-space>

Polvo interestelar

❖ Composición:

- Silicatos (arena)
- Grafito (compuestos de carbono)

❖ Origen

- Atmósferas de estrellas K, M (eyectados por presión de radiación, o en evento de nebulosa planetaria)

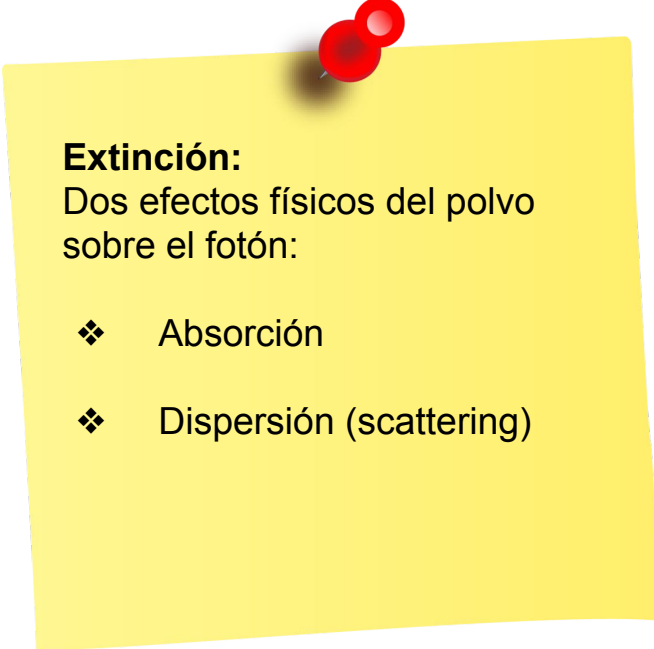
❖ Efectos observables

➤ Efectos sobre la luz estelar

- Extinción: atenuación de la luz estelar
- Enrojecimiento: la atenuación es mayor para λ más corta (colores más rojos que los intrínsecos)
- Polarización: atenuación preferencial de la luz estelar con vector eléctrico **E** en un determinado plano.

➤ Observación directa

- Luz reflejada: nebulosas de reflexión
- Emisión infrarroja: emisión térmica del polvo



Extinción:

Dos efectos físicos del polvo sobre el fotón:

- ❖ Absorción
- ❖ Dispersión (scattering)

Absorción:

La energía del fotón es absorbida por el grano de polvo, aumentando su temperatura ($T \sim 10\text{K}$)
Luego el grano de polvo re-emite el exceso de energía a longitudes de onda mucho mayores ($\lambda \sim 330 \mu\text{m}$) y en cualquier dirección.

Dispersión:

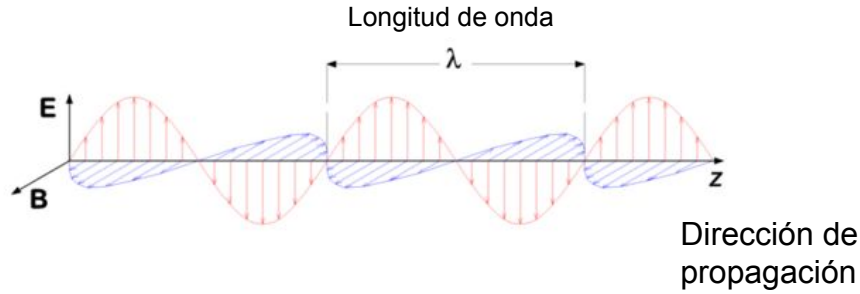
El fotón es dispersado sin cambiar la λ , pero en una dirección que no llega al observador.

Los granos de polvo son absorbedores eficientes de fotones con $\lambda \lesssim a$ (donde a es el tamaño del grano)

- ❖ UV se extingue muy eficientemente, ya que hay muchos granos con $a \gtrsim 100 \text{ nm}$ (1000 Å)
- ❖ IR lejano poco extinguido (pocos granos con $a \gtrsim 10 \mu\text{m}$)

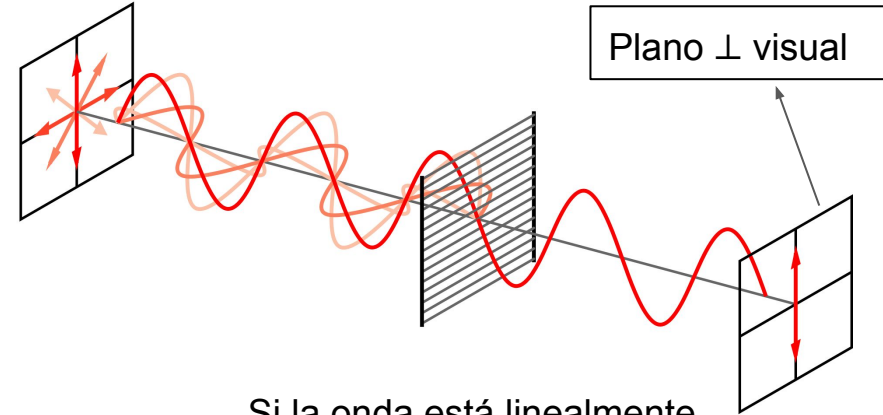
La cantidad de extinción depende de la densidad de polvo a lo largo de la línea de la visual.

Polarización



Las estrellas emiten luz no polarizada (es decir, en cada instante, el plano de polarización es distinto y varía aleatoriamente)

Pero existen mecanismos de polarización de la luz!

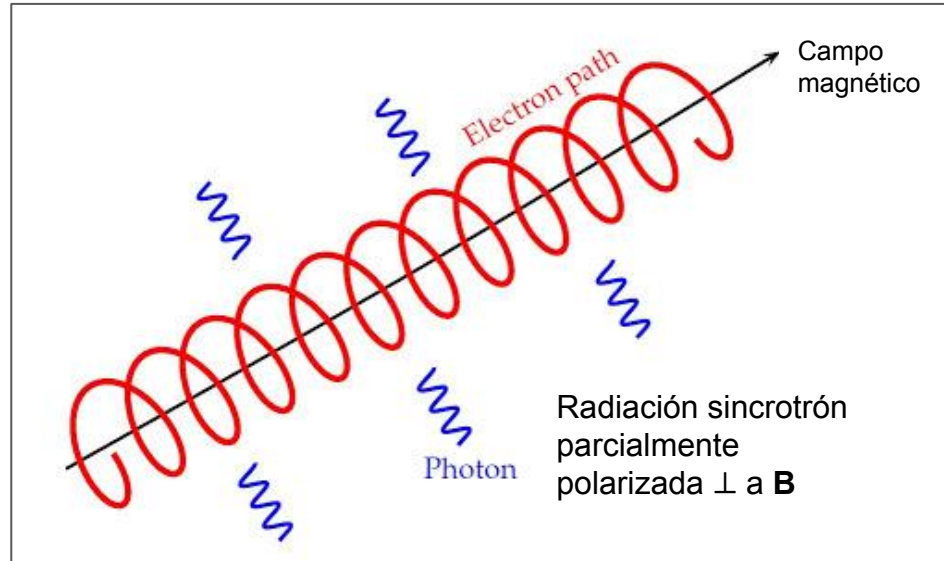


Si la onda está linealmente polarizada, el campo **E** vibra en un plano (plano de polarización)
La inclinación es la ***dirección de polarización***.

Espectro de radiación no térmico: pulsars, RSN, jets en AGNs...

Algunos objetos celestes emiten radiación **no térmica**.

[Ver más](#)



El electrón **se acelera** en presencia del campo magnético.

Emite radiación sincrotrón parcialmente polarizada \perp a \mathbf{B}

Las fuentes térmicas emiten luz natural (no polarizada)

Las estrellas son fuentes térmicas: emiten luz no polarizada (a excepción de estrellas con envolturas gigantes, binarias)

Los discos de acreción también son fuentes térmicas.

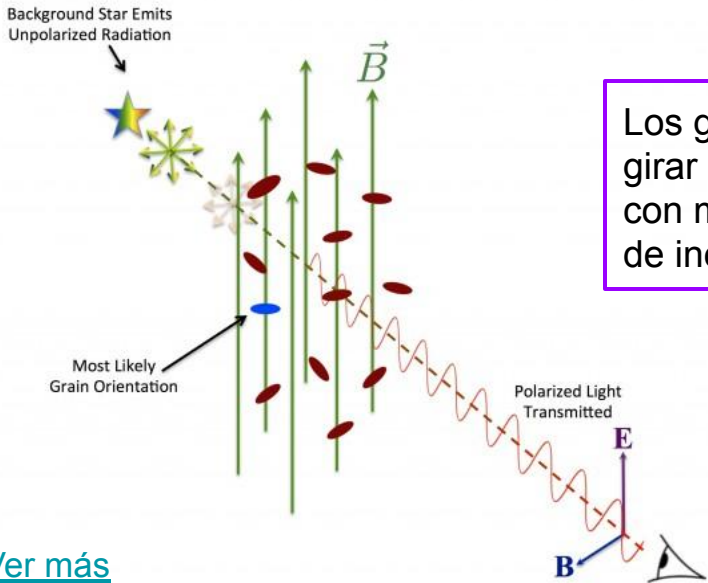
En muchas estrellas se observa polarización lineal $\sim 0.1\%$ a $\sim 5\%$

Además, **P correlaciona con A_V** , por lo tanto existe un mecanismo externo (relacionado con la extinción) que polariza la luz.

Polarización por Transmisión y Reflexión (efecto Davis-Greenstein)

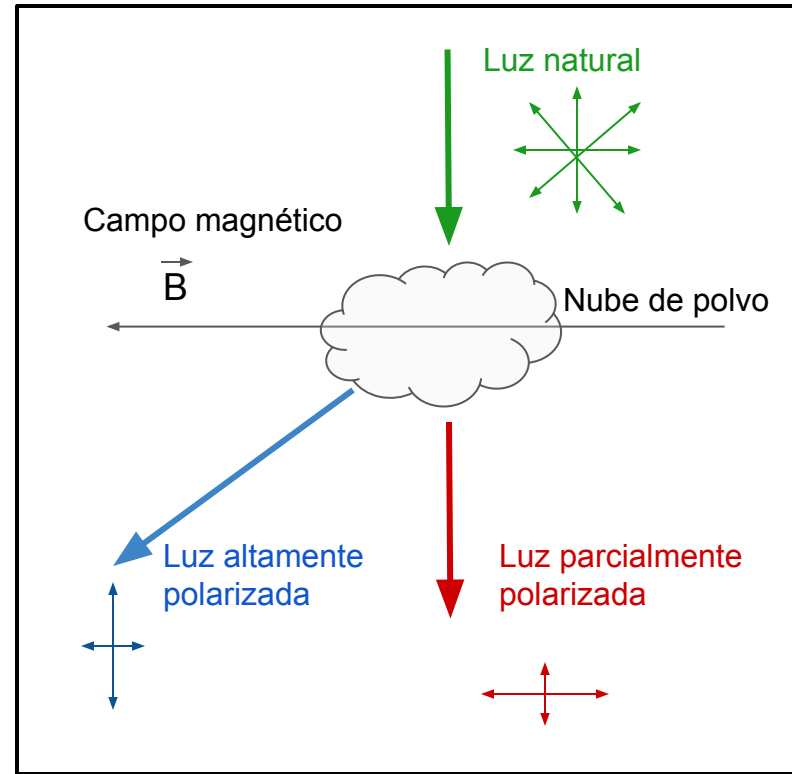
Granos de polvo alargados en rotación alrededor del eje menor

Spin del grano $\square \parallel \mathbf{B}$ (se alinea con el campo magnético)



Los granos tienden a girar alrededor del eje con mayor momento de inercia.

[Ver más](#)



Luz transmitida: parcialmente polarizada ($\mathbf{P} \parallel \mathbf{B}$)

Luz dispersada: parcialmente polarizada ($\mathbf{P} \perp \mathbf{B}$) (\mathbf{P} grande)

Cómo se describe la polarización?

Parámetros de Stokes

La luz parcialmente polarizada se puede descomponer en:

Luz no polarizada: e

+

Onda plana completamente polarizada: E

$$E_{\text{total}} = E + e$$

Para luz linealmente polarizada, los parámetros de Stokes relevantes son:

$$Q = I_x - I_y$$

$$U = I_u - I_v$$

“ E ” oscila en el plano orientado según el ángulo θ

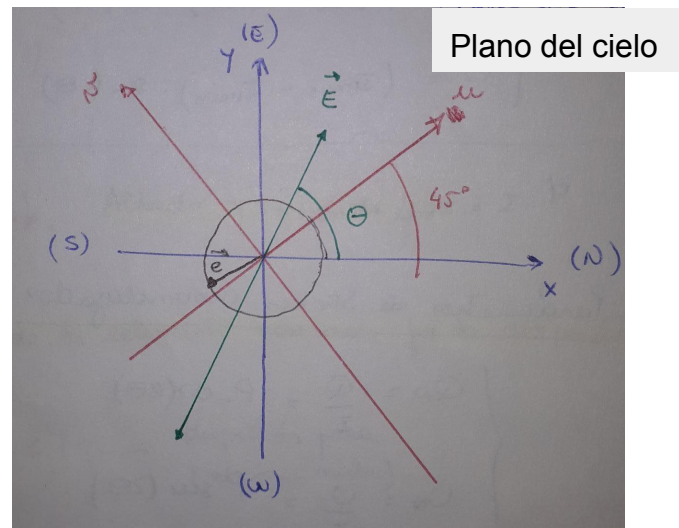
“ e ” oscila en un plano que va cambiando aleatoriamente

$$\text{Intensidad máxima: } I_{\text{max}} = E^2 + e^2$$

$$\text{Intensidad mínima: } I_{\text{min}} = e^2$$

Índice o grado de polarización:

$$P = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) / (I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$$



Según la def. de los parámetros de Stokes:

$$\begin{cases} Q = (E_x^2 + E_y^2) - (E_u^2 + E_v^2) \\ U = (E_u^2 + E_v^2) - (E_{10}^2 + E_{01}^2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_x = E \cos \theta \\ E_y = E \operatorname{sen} \theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_u = E \cos(\theta - \pi/4) \\ E_v = E \operatorname{sen}(\theta - \pi/4) \end{cases}$$

$$Q = E^2 \cos^2 \theta + E^2 - E^2 \operatorname{sen}^2 \theta - E^2 = E^2 (\cos^2 \theta - \operatorname{sen}^2 \theta) = E^2 \cos(2\theta)$$

$$U = E^2 \cos^2(\theta - \pi/4) + E^2 - E^2 \operatorname{sen}^2(\theta - \pi/4) - E^2 = E^2 \cos(2(\theta - \pi/4)) = E^2 \cos(2\theta - \pi/2)$$

$$\cos(2\theta) \overset{=0}{\cos(\pi/2)} + \operatorname{sen} 2\theta \overset{=1}{\operatorname{sen}(\pi/2)}$$

$$U = E^2 \operatorname{sen}(2\theta)$$

donde:

$$e_x^2 = e_y^2 = e_u^2 = e_v^2 = e_{10}^2 = e_{01}^2 = e^2 =$$

$$= I_{\min}$$

como $I_{\max} - I_{\min} = E^2$

$$\Rightarrow \begin{cases} Q = (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \cos(2\theta) = P \cdot I \cdot \cos(2\theta) \\ U = (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \sin(2\theta) = P \cdot I \cdot \sin(2\theta) \end{cases}$$

d $I = I_{\max} + I_{\min}$

Parámetros de Stokes normalizados:

$$\begin{cases} Q_N = \frac{Q}{I} = P \cdot \cos(2\theta) \\ U_N = \frac{U}{I} = P \cdot \sin(2\theta) \end{cases} \quad \left(\begin{array}{l} \text{Aunque en geral} \\ \text{los subíndices no} \\ \text{se ponen.} \end{array} \right)$$

Notar que la polariz. tiene una direcc. pero no un sentido.

Ley de Serkowski: Cómo varía la polarización producida por el polvo interestelar en función de λ

$$P_{\lambda} = P_{\max} \exp \left[-K \ln^2 \left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda} \right) \right]$$

$\lambda_{\max} \sim 0.5 - 0.6 \mu\text{m}$ (500 - 600 nm) máxima polarización

λ_{\max} depende de R_V , por lo tanto, varía de una dirección a otra.

$K \sim 1.15$, aunque en realidad tiene una dependencia con λ_{\max} :

$$K = c_1 \lambda_{\max} + c_2$$

Con $c_1 = 1.66$ y $c_2 = 0.01$ [μm]

Dispersión (scattering)

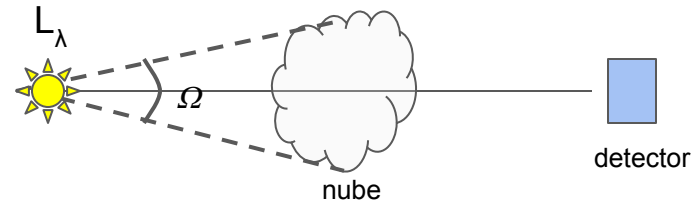
Albedo y función de fase

Albedo (γ_λ): fracción de la extinción causada por la dispersión.

Dispersión nula
(todo absorción)

$$0 \leq \gamma_\lambda \leq 1$$

Dispersión pura
(absorción nula)



$L_\lambda \rightarrow$ luminosidad emitida por la \star entre $[\lambda, \lambda + d\lambda]$

y $\Omega \ll 4\pi \rightarrow$ áng sólido subtendido por la nube.

\rightarrow LUMINOSIDAD INTERCEPTADA POR LA NUBE ES $L_\lambda \cdot \left(\frac{\Omega}{4\pi}\right)$

\rightarrow Luminosidad dispersada (transmitida): $L_\lambda \left(\frac{\Omega}{4\pi}\right) \times 10^{-0.4 A_\lambda}$

$$M_{obs} - M_{red} = A_\lambda \rightarrow \log\left(\frac{L_{obs}}{L_{em}}\right) = A_\lambda \cdot 0.4 \rightarrow \frac{L_{obs}}{L_{em}} = 10^{-0.4 A_\lambda}$$

$$-2.5 \log L_{obs} + 2.5 \log L_{em} = A_\lambda$$

$$\log\left(\frac{L_{obs}}{L_{em}}\right) = -0.4 A_\lambda$$

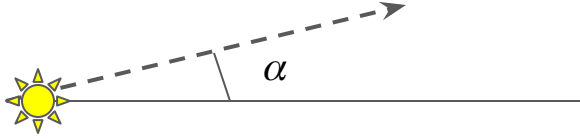
$$L_{obs} = L_{em} 10^{-0.4 A_\lambda}$$

$$\text{Luminosidad extinguida} : L_2 \left(\frac{\Omega}{4\pi} \right) \cdot \left[1 - 10^{-0.4 A_2} \right]$$

$$\text{Luminosidad dispersada} : \tau_2 L_2 \left(\frac{\Omega}{4\pi} \right) \left[1 - 10^{-0.4 A_2} \right]$$

$$\text{Luminosidad absorbida} : (1 - \tau_2) \cdot L_2 \left(\frac{\Omega}{4\pi} \right) \cdot \left[1 - 10^{-0.4 A_2} \right]$$

Función de fase: $\Phi(\alpha)$: La dispersión no es isótropa, sino que se produce (en gral) en ángulos pequeños.



α : ángulo de dispersión

La distribución de direcciones de scattering se caracteriza con la función de fase:

$$\Phi(\alpha) = \frac{\gamma}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \alpha)^{3/2}}$$

$g \equiv g_\lambda$ Parámetro de asimetría

$$\gamma g_\lambda = \int_{4\pi} \Phi(\alpha) \cos(\alpha) d\Omega = \langle \cos \alpha \rangle$$

$$-1 \leq g_\lambda \leq 1$$

$g_\lambda = 0$: dispersión isótropa

$g_\lambda \rightarrow 0$ para $\lambda \rightarrow \infty$

Emisión térmica del polvo interestelar

$$T \sim 10 \text{ K} \rightarrow \lambda_{\text{max}} = C/T \sim 0.29 \text{ cm K} / 10\text{K} \sim 300 \mu\text{m}$$

Emite en IR lejano \rightarrow no es observable desde la superficie terrestre

1983 \rightarrow IRAS: 12 - 25 - 60 - 100 μm

250.000 fuentes puntuales: en sistema solar, Vía Láctea y otras galaxias

Emisión difusa

Década de 1990: DIRBE (COBE) emisión IR de la V.L. : $< 10\%$ estrellas, $\sim 90\%$ polvo

Emisión difusa del polvo es significativa en 12 μm y 25 μm

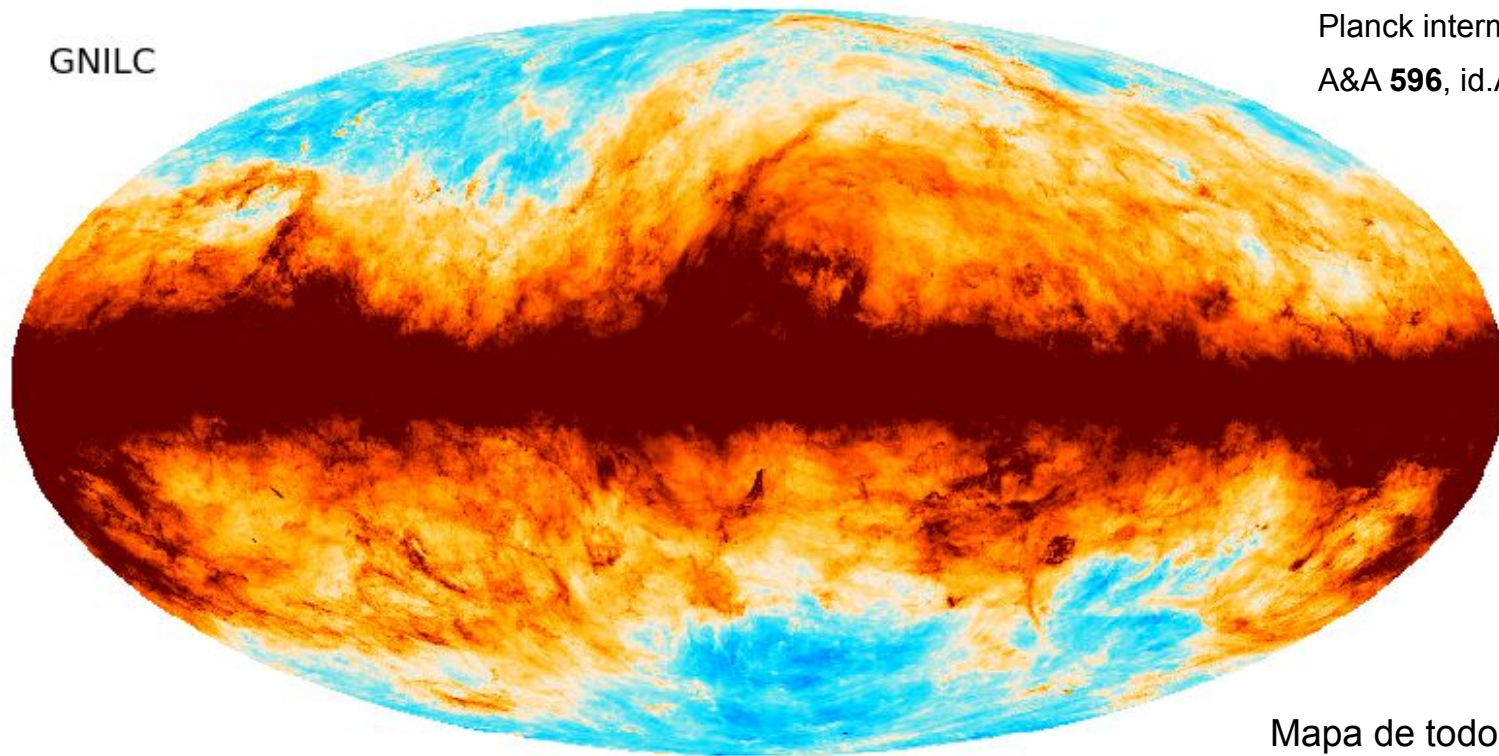
Existen granos muy chicos (≤ 100 átomos) además de los granos típicos, de tamaño $a \sim 0.1 \mu\text{m}$ ($\geq 10^4$ átomos) que absorben y dispersan en el B.

Los granos ultra chicos se calientan hasta $\leq 1000\text{K}$ con un sólo fotón UV y reemiten en el IR cercano ($\lambda \geq 3 \mu\text{m}$)

También hay granos con $N \sim 50$ átomos: pueden ser PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons - compuestos orgánicos), fragmentos de hojas de grafito + algunos otros átomos.

GNILC

Planck intermediate results. XLVIII
A&A **596**, id.A109 (2016)



$\text{MJy} \cdot \text{sr}^{-1}$

Mapa de todo el cielo del polvo
término galáctico: modelo de
polvo término a 353 GHz (P13)
Planck 2013.

Filminas adicionales

Contenido del MIE

❖ Gas enrarecido

- $\sim 0.025 M_{\text{sun}}/\text{pc}^3$
- 60% H, 30% He

❖ Partículas de polvo

- $\sim 0.002 M_{\text{sun}}/\text{pc}^3$

❖ Campos magnéticos

- $H \sim 10^{-6}$ Gauss

$$1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ T}$$

T (tesla) [SI]

❖ Electrones, protones y otras partículas

- Rayos cósmicos, veloc relativistas

Densidad estelar en la galaxia

En la vecindad solar: $0.059 M_{\text{sun}}/\text{pc}^3$

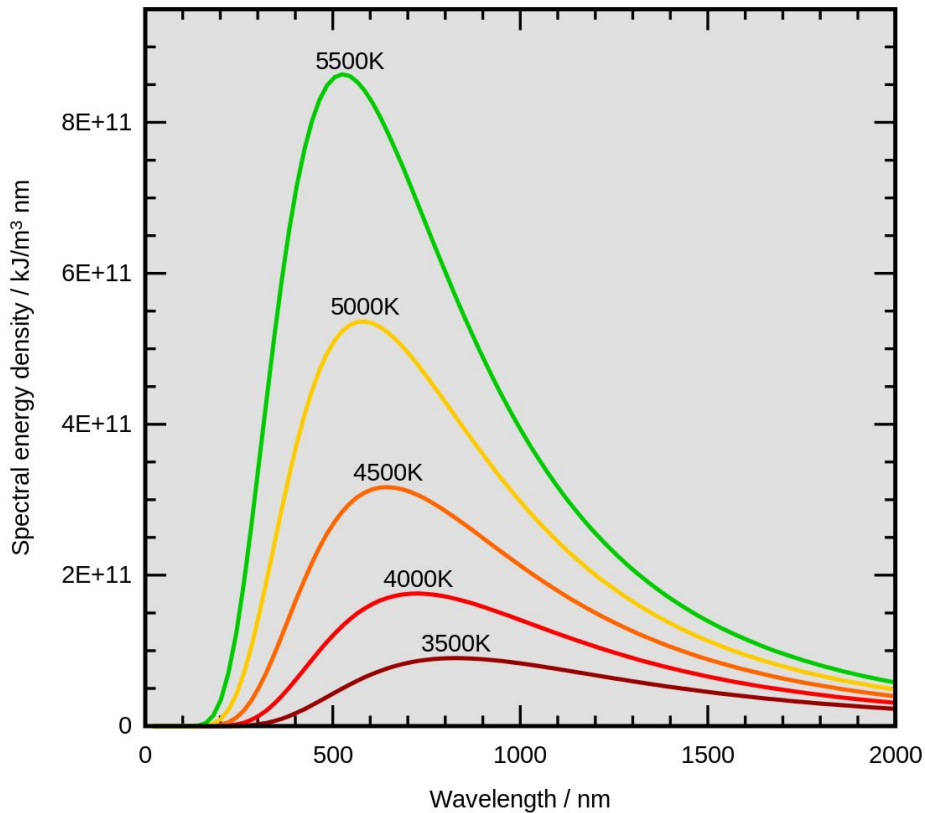
La densidad varía en distintos puntos del espacio, decreciendo rápidamente en la dirección fuera del plano galáctico.

Las regiones de mayor densidad de estrellas en la Galaxia están en el núcleo de la misma y el interior de los cúmulos globulares.

Densidad típica de cúmulo globular: $70 M_{\text{Sun}}/\text{pc}^3$.

En la vecindad solar, la densidad de masa estelar debe ser mayor que $0.08 M_{\text{Sun}}/\text{pc}^3$ para evitar la disrupción por efectos de marea.

Radiación térmica (lo que emite un cuerpo negro a temperatura T)

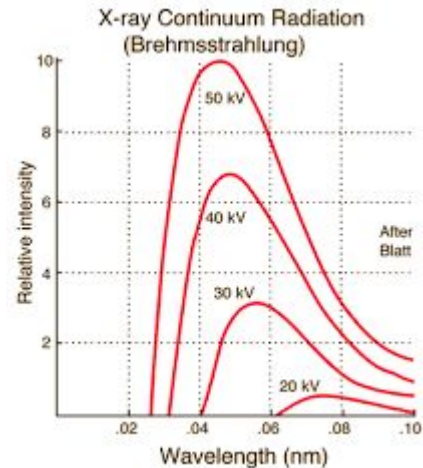


Distribución espectral de energía de cuerpo negro

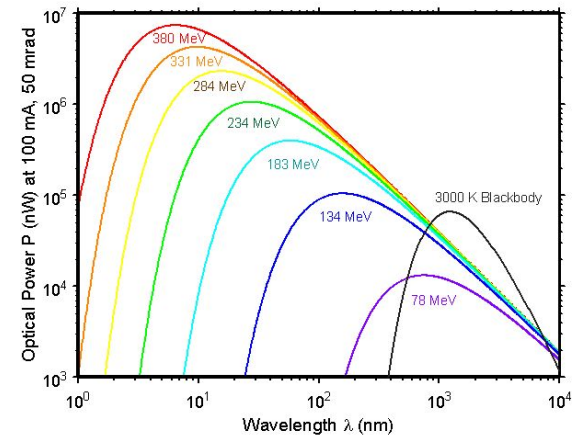
Radiación no-térmica (la radiación emitida por el proceso en cuestión no se debe a la temperatura del objeto)

Ejemplos:

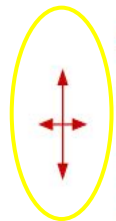
Bremsstrahlung



Sincrotrón



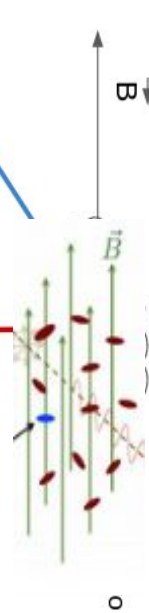
[Volver](#)



Luz parcialmente polarizada



Luz altamente polarizada



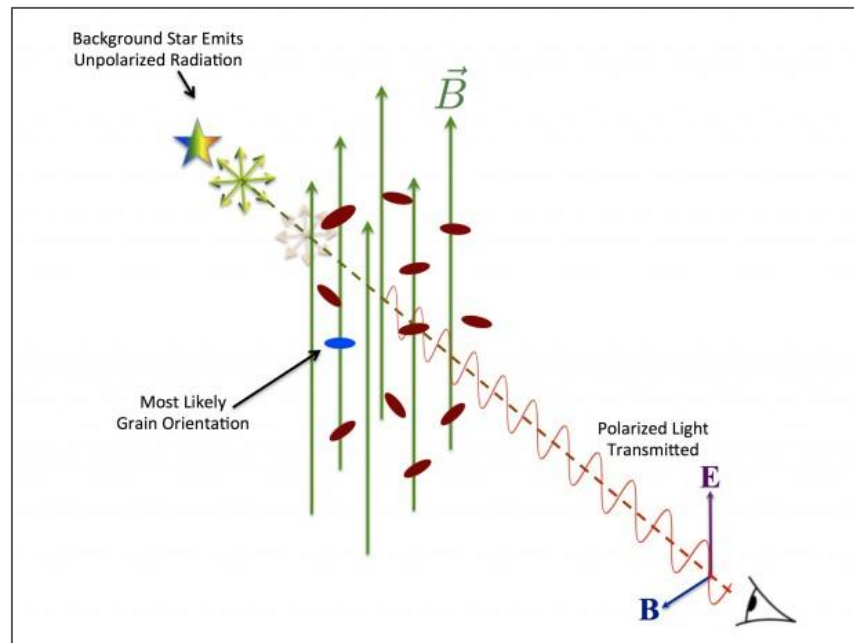
Campo magnético



Luz natural

Efecto Davis-Greenstein

Luz transmitida: el grano de polvo produce una extinción superior en la dirección del eje mayor del grano, produciendo polarización neta.



In § 5.1 detailed calculations for a small prolate spheroidal grain show that it weakens a beam of light so polarized that its electric vector is parallel to the long axis of the grain more than light polarized at right angles, in the ratio σ_A/σ_T . The values obtained for this