

# Sistemas Estelares 2024

Material Interestelar  
1a. clase  
Prof. Gabriel Ferrero

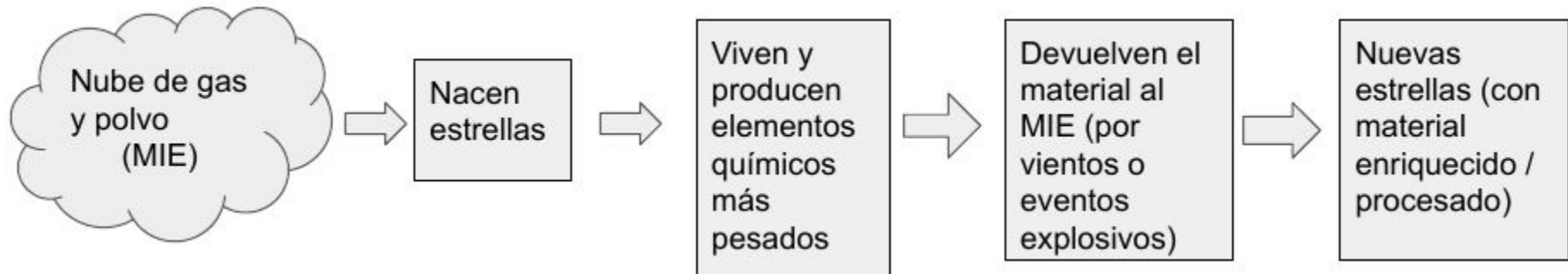
Diapositivas editadas a partir de las elaboradas por la Prof. Claudia Scoccola



[Región de formación estelar NGC 3324 en la Nebulosa de Carina.](#) NASA  
Webb Telescope Team. NASA, ESA, CSA & STScI

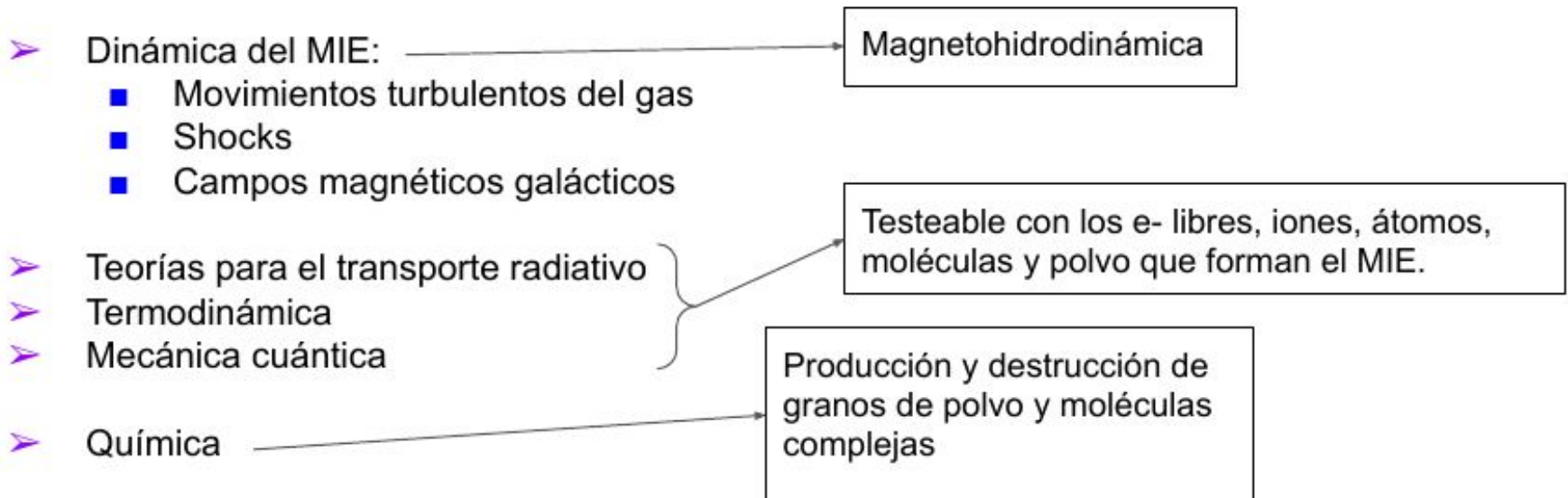
# Importancia del estudio del material interestelar

El material interestelar es **crucial** para la formación y evolución de las estrellas. La evolución de las estrellas es un **proceso cíclico**:



# Importancia del estudio del material 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:



## 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 Medio Interestelar

## ◆ 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

## ◆ Electrones, protones y otras partículas

- Rayos cósmicos, veloc relativistas

Válido para la Vía Láctea, pero sirve para otras galaxias, con la salvedad que las proporciones variarán según el tipo de galaxia, metalicidad, etc.

Densidad estelar en la vecindad solar:  $0.059 M_{\text{sol}}/\text{pc}^3$

Densidad estelar típica de un cúmulo globular:  $70 M_{\text{sol}}/\text{pc}^3$

# 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  $\lambda$  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

# Polvo interestelar

## 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  $\lambda$ , pero en una dirección que no llega al observador.

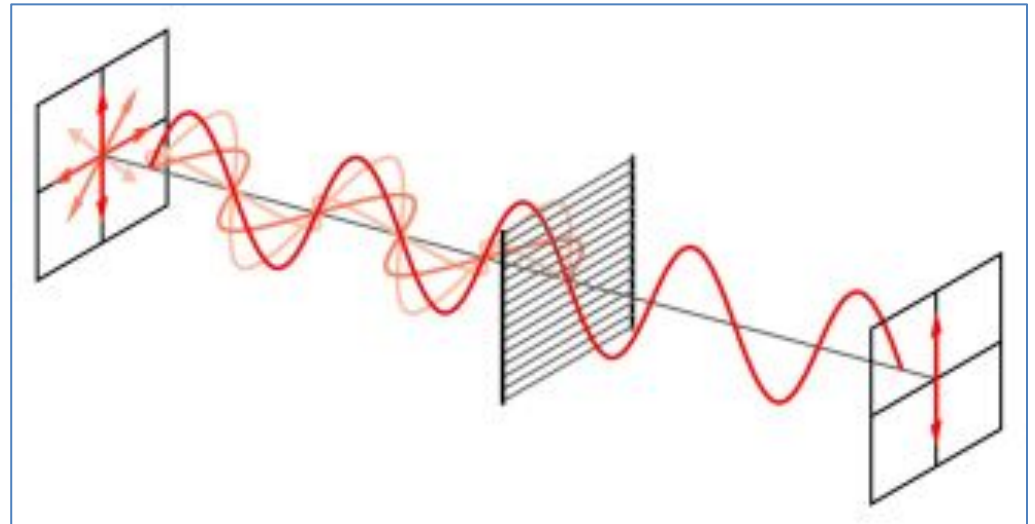
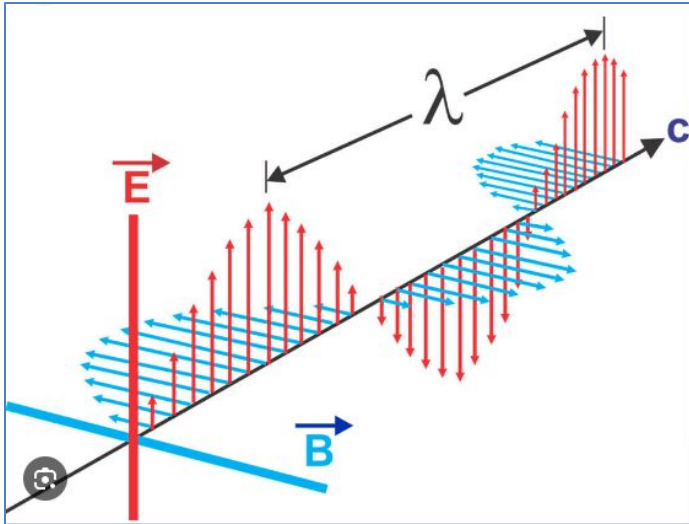
Los granos de polvo son absorbedores eficientes de fotones con  $\lambda \lesssim a$  (donde  $a$  es el tamaño del grano)

- ❖ 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



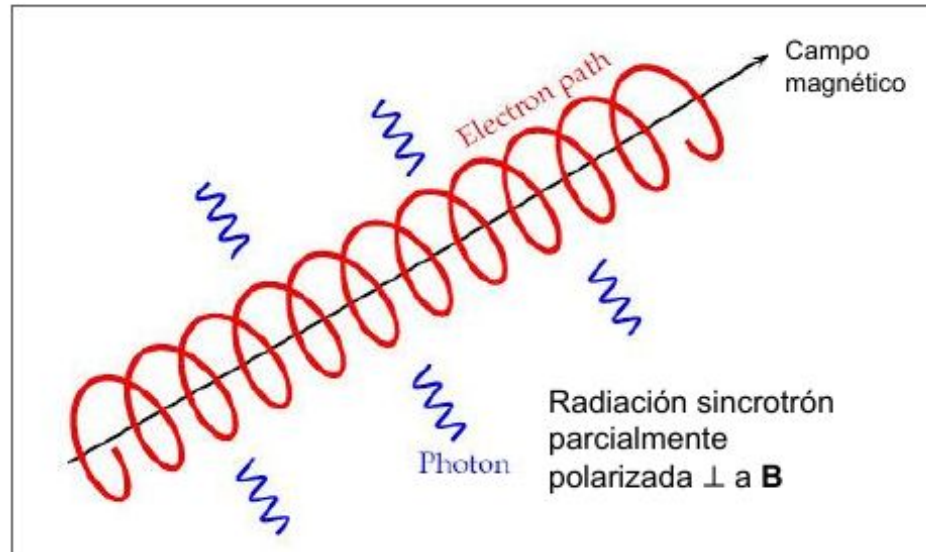
- Si la onda está linealmente polarizada, el campo eléctrico  $E$  oscila en un plano, llamado plano de polarización. La **dirección de polarización** se indica mediante un ángulo llamado inclinación.
- Las estrellas emiten luz no-polarizada (es decir que en cada instante el plano de polarización es distinto y varía aleatoriamente).
- Existen mecanismos capaces de polarizar la luz.

# 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 **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  $\sim 5\%$

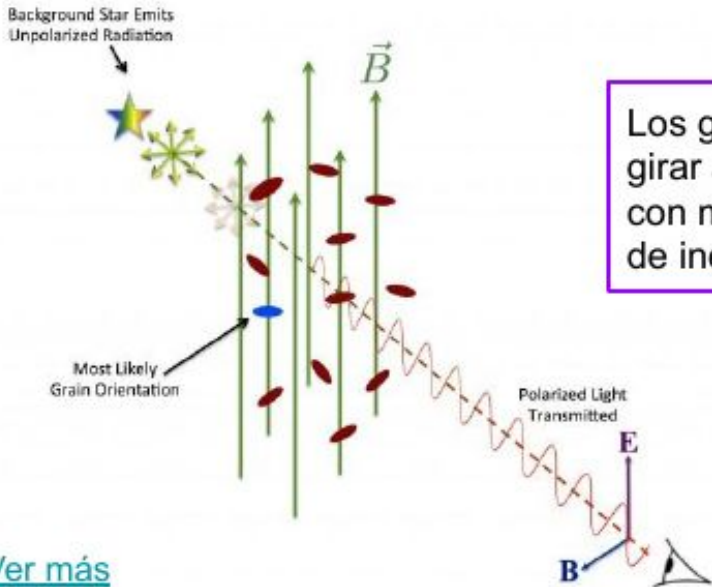
Además, **P correlaciona con  $A_V$** , por lo tanto existe un mecanismo externo (relacionado con la extinción) que polariza la luz.

# Polarización

## Polarización por Transmisión y Reflexión (efecto Davis-Greenstein)

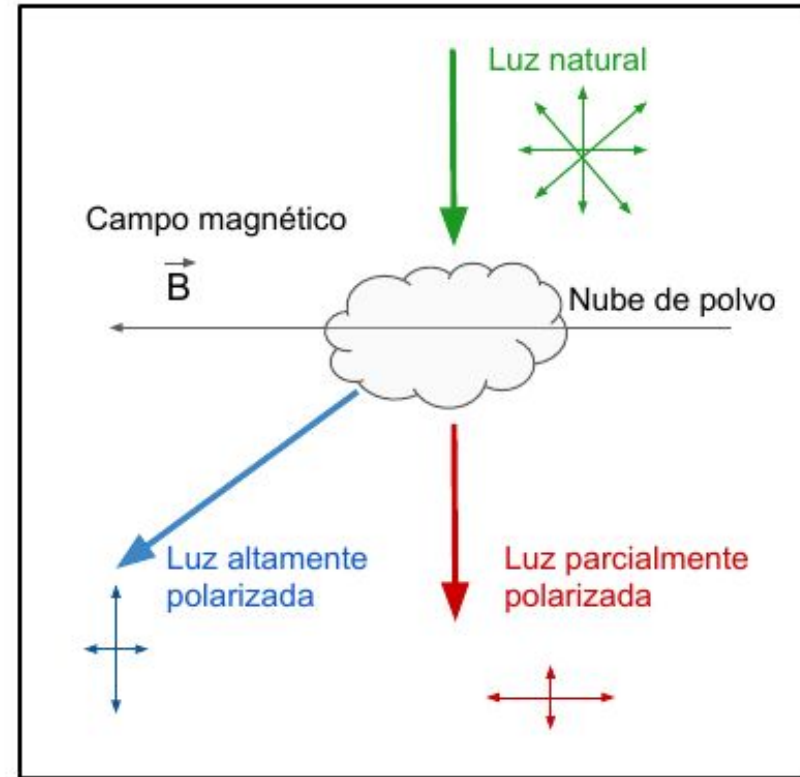
Granos de polvo alargados en rotación alrededor del eje menor

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.

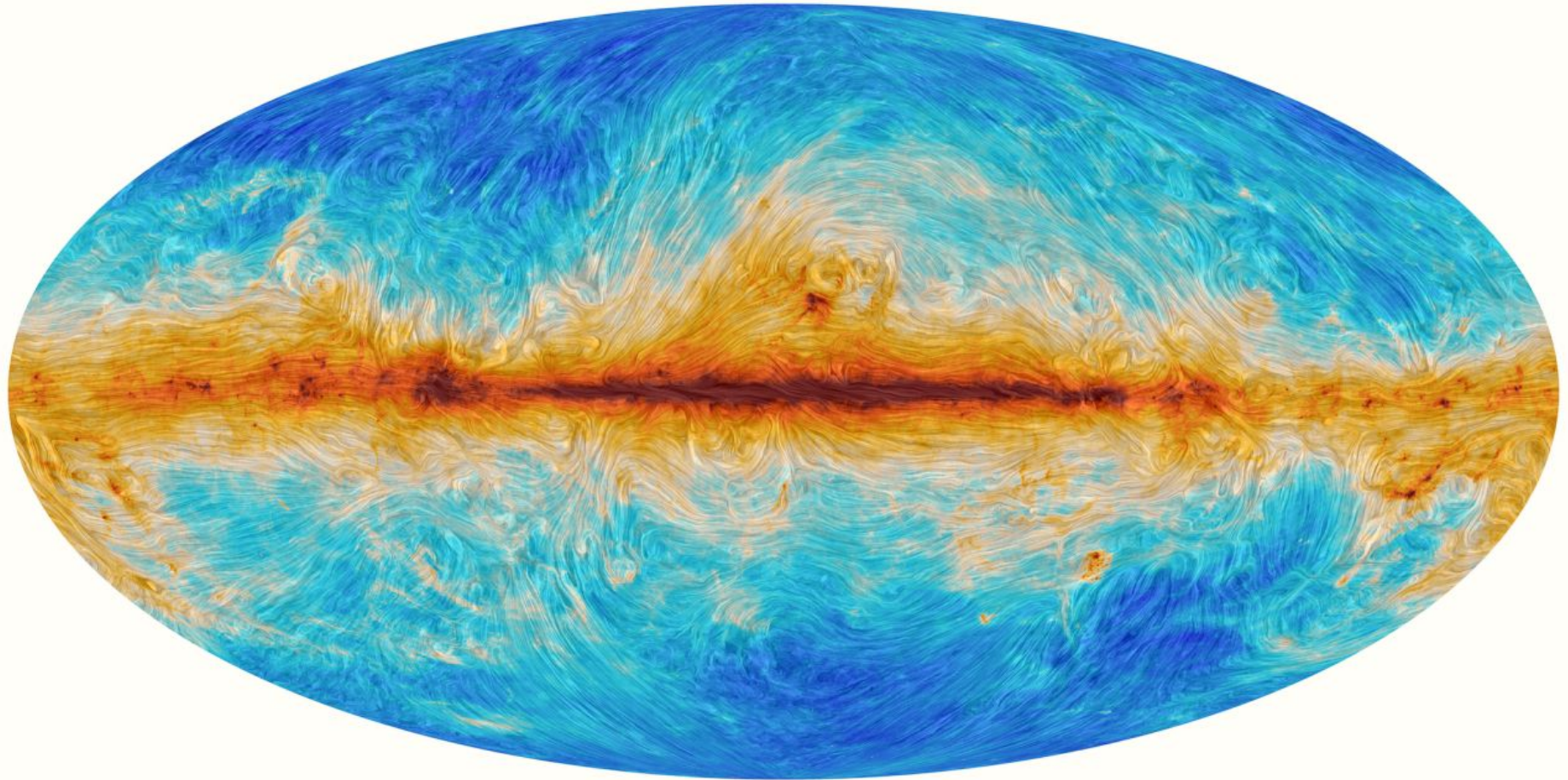
[Ver más](#)



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

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

# Polarización



Mapa del campo magnético de la Galaxia a partir de emisión polarizada del polvo en la banda submilimétrica (353 GHz), producido por el satélite Planck. El color representa la intensidad total de la emisión del polvo. ESA and the Planck Collaboration.

# Polarización

Cómo se describe la polarización?

## Parámetros de Stokes

La luz parcialmente polarizada se puede descomponer en:

Luz no polarizada:  $e$

+

Onda plana completamente polarizada:  $E$

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

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

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

Índice o grado de polarización:

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

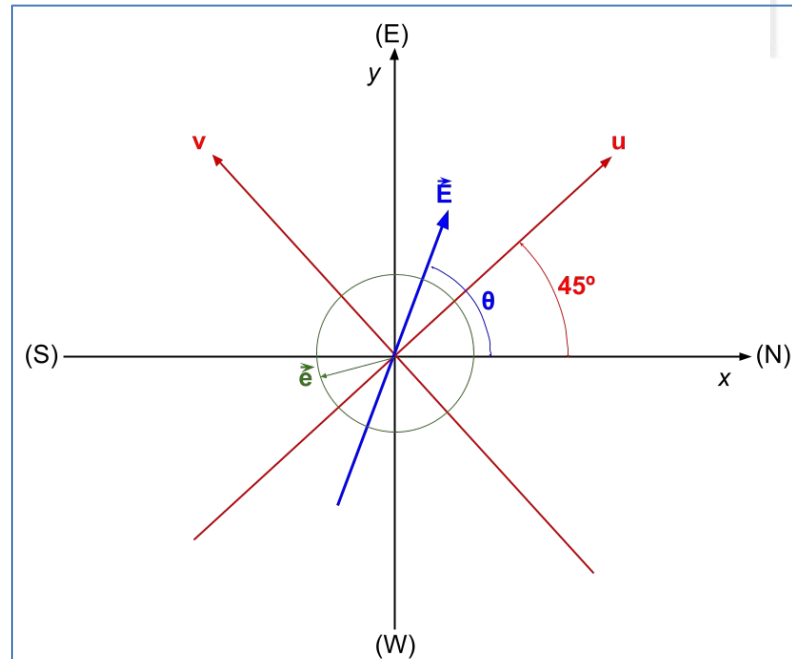
Para luz linealmente polarizada, los parámetros de Stokes relevantes son:

$$Q = I_x - I_y$$

$$U = I_u - I_v$$

“ $E$ ” oscila en el plano orientado según el ángulo  $\theta$

“ $e$ ” oscila en un plano que va cambiando aleatoriamente



plano del cielo

# Polarización

De acuerdo a la definición de los parámetros de Stokes:

$$Q = (E_x^2 + e_x^2) - (E_y^2 + e_y^2)$$

$$U = (E_u^2 + e_u^2) - (E_v^2 + e_v^2)$$

pero como  $e$  tiene las mismas componentes en todas las direcciones,

$$e_x^2 = e_y^2 = e_u^2 = e_v^2 = e^2 = I_{min}$$

Por otra parte

$$E_x = E \cos \theta \quad (1)$$

$$E_y = E \sen \theta \quad (2)$$

Y como los ejes  $(u, v)$  están girados  $45^\circ$  respecto a  $(x, y)$

$$E_u = E \cos \left( \theta - \frac{\pi}{4} \right)$$

$$E_v = E \sen \left( \theta - \frac{\pi}{4} \right)$$

Y reemplazando estas expresiones en (1) y (2)

$$Q = E^2 \cos^2 \theta + e^2 - E^2 \sen^2 \theta - e^2 = E^2 (\cos^2 \theta - \sen^2 \theta) = E^2 \cos (2\theta)$$

$$\begin{aligned} U &= E^2 \cos^2 (\theta - \pi/4) + e^2 - E^2 \sen^2 (\theta - \pi/4) - e^2 = E^2 \cos [2 (\theta - \pi/4)] = \\ &= E^2 \cos (2\theta - \pi/2) = E^2 \sen (2\theta) \end{aligned}$$

# Polarización

Por otro lado, como

$$I_{max} - I_{min} = E^2,$$

si llamamos

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

entonces, por la definición de polarización  $P$ , será  $P = E^2/I$  y la ec. (3) nos queda

$$Q = (I_{max} - I_{min}) \cos(2\theta) = PI \cos(2\theta)$$

y análogamente

$$U = (I_{max} - I_{min}) \sin(2\theta) = PI \sin(2\theta)$$

Dado que usualmente se miden intensidades relativas, resulta más cómodo trabajar con los **parámetros de Stokes normalizados**  $Q_N$  y  $U_N$ :

$$Q_N = \frac{Q}{I} = P \cos(2\theta)$$

$$U_N = \frac{U}{I} = P \sin(2\theta)$$

Pero se debe prestar atención, ya que los subíndices  $N$  suelen omitirse. Adicionalmente debe recordarse que, aunque se suele denominar a  $P$  como el "vector de polarización", en realidad no es un vector, puesto que tiene una dirección (dada por el ángulo  $\theta$ ) pero no tiene un sentido definido.

# Polarización

**Ley de Serkowski:** Cómo varía la polarización producida por el polvo interestelar en función de  $\lambda$

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

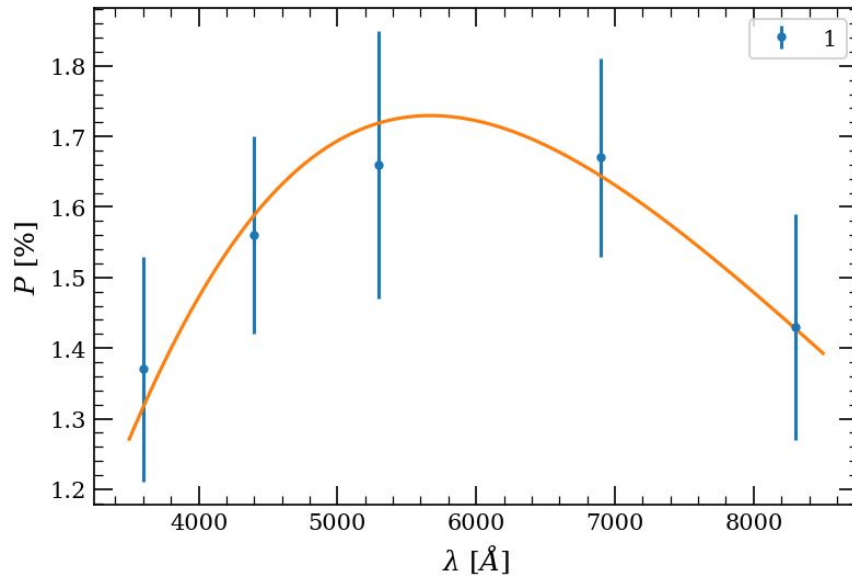
$\lambda_{\max} \sim 0.5 - 0.6 \mu\text{m}$  (500 - 600 nm) máxima polarización

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

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

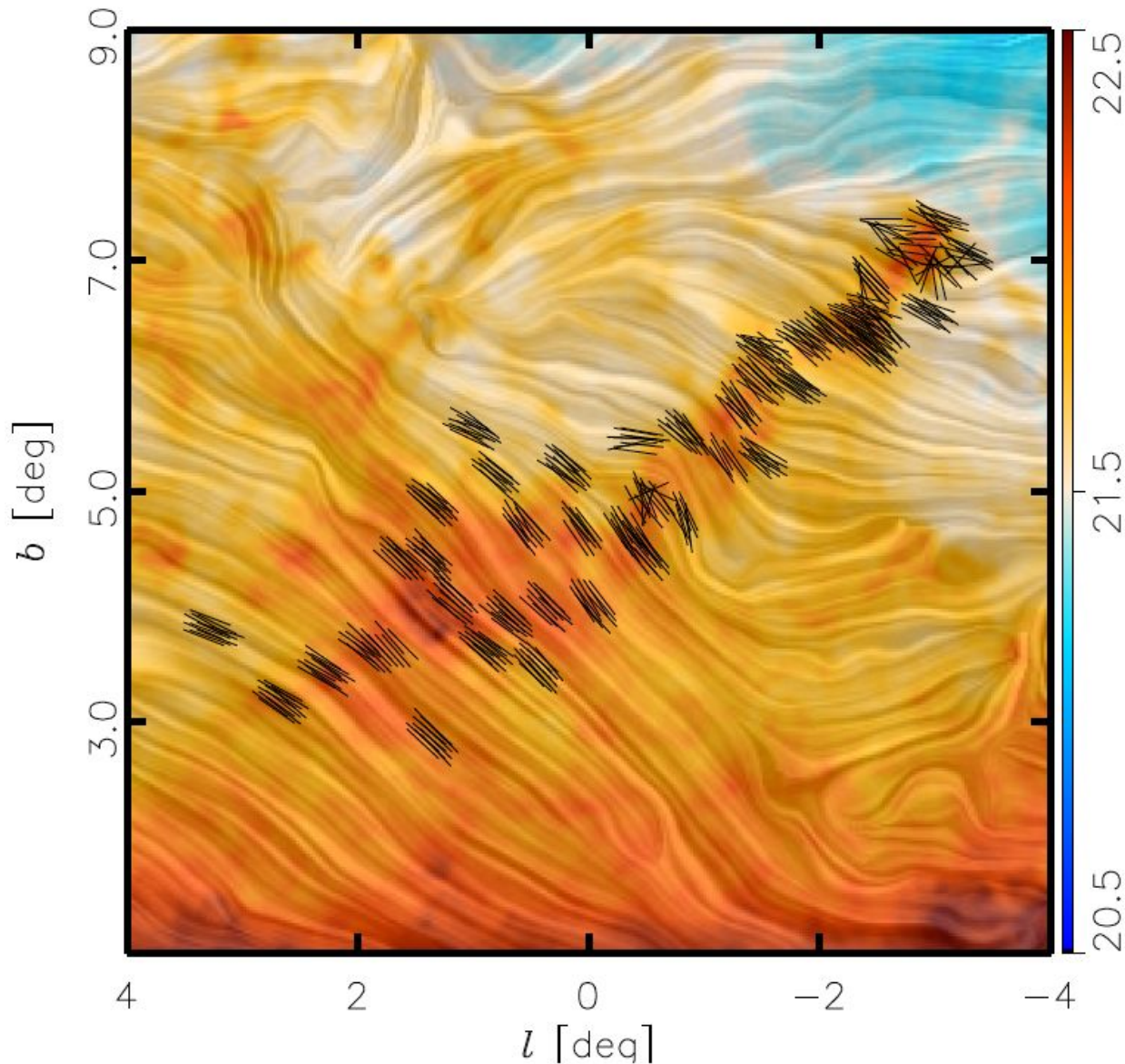
$$K = c_1 \lambda_{\max} + c_2$$

Con  $c_1 = 1.66$  y  $c_2 = 0.01 \mu\text{m}$





# Polarización



Morfología del campo magnético hacia la Nebulosa de la Pipa (Ofiuco) a partir de emisión polarizada del polvo en la banda submilimétrica (353 GHz) y extinción en las bandas visible y NIR. Obtenido usando observaciones del satélite Planck.

# Polarización

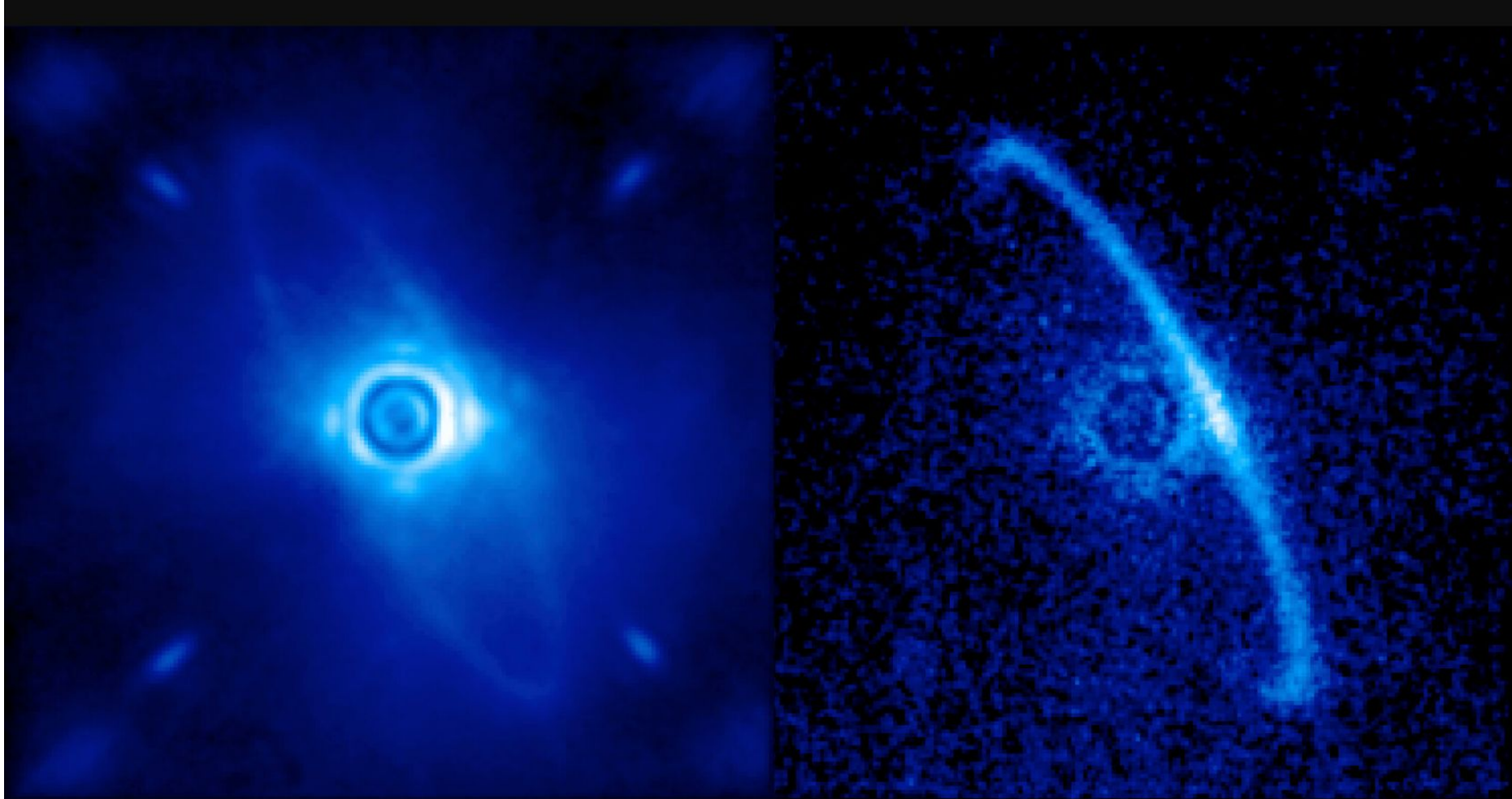


Imagen de la primera luz del instrumento GPI en Gemini Sur. Luz de la estrella HR4796A, dispersada por un disco de polvo. Izquierda: luz infrarroja normal en banda H (1.9-2.1 micrones). Derecha: luz polarizada en la misma banda. Marshall Perrin, STScI.

## Dispersión (scattering)

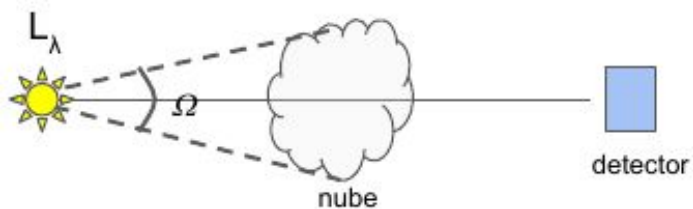
## Albedo y función de fase

**Albedo** ( $\gamma_\lambda$ ): fracción de la extinción causada por la dispersión.

Dispersión nula  
(todo absorción)

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

Dispersión pura  
(absorción nula)



Si  $L_\lambda$  es la luminosidad emitida por la estrella en el rango  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$  y  $\Omega \ll 4\pi$  el ángulo sólido subtendido por la nube, la **luminosidad interceptada por la nube** es

$$L_\lambda \left( \frac{\Omega}{4\pi} \right)$$

Y como definimos la absorción en  $\lambda$  como

$$A_\lambda = m_{obs} - m_{emitida} = -2.5 (\log L_{obs} - \log L_{emi})$$

entonces  $\log (L_{obs}/L_{emi}) = -0.4A_\lambda$  y  $(L_{obs}/L_{emi}) = 10^{-0.4A_\lambda}$  de donde  $L_{obs} = L_{emi} \times 10^{-0.4A_\lambda}$ . Por lo tanto la **luminosidad observada** (transmitida por la nube) resulta ser

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

# Dispersión (*scattering*)

Tenemos entonces:

**Luminosidad extinguida:**

$$L_{\lambda} \left( \frac{\Omega}{4\pi} \right) \left[ 1 - 10^{-0.4A_{\lambda}} \right]$$

**Luminosidad dispersada:**

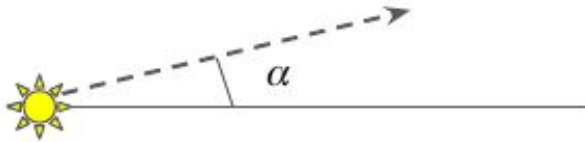
$$\gamma_{\lambda} L_{\lambda} \left( \frac{\Omega}{4\pi} \right) \left[ 1 - 10^{-0.4A_{\lambda}} \right]$$

**Luminosidad absorbida:**

$$(1 - \gamma_{\lambda}) L_{\lambda} \left( \frac{\Omega}{4\pi} \right) \left[ 1 - 10^{-0.4A_{\lambda}} \right]$$

# Dispersión (*scattering*)

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



$\alpha$ : ángulo de dispersión

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

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

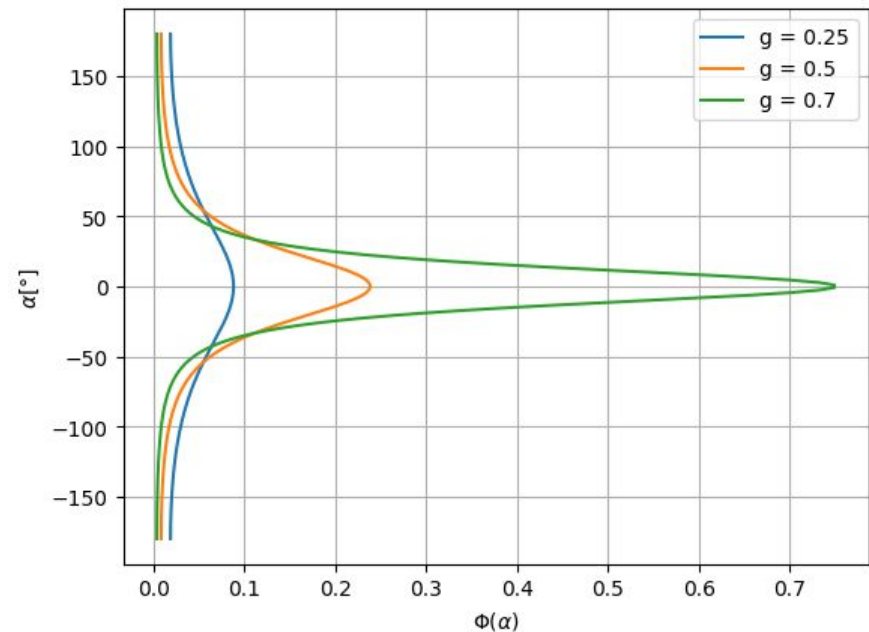
$g \equiv g_\lambda$       Parámetro de asimetría

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

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

$g_\lambda = 0$  : 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  $\mu\text{m}$

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  $\mu\text{m}$  y 25  $\mu\text{m}$

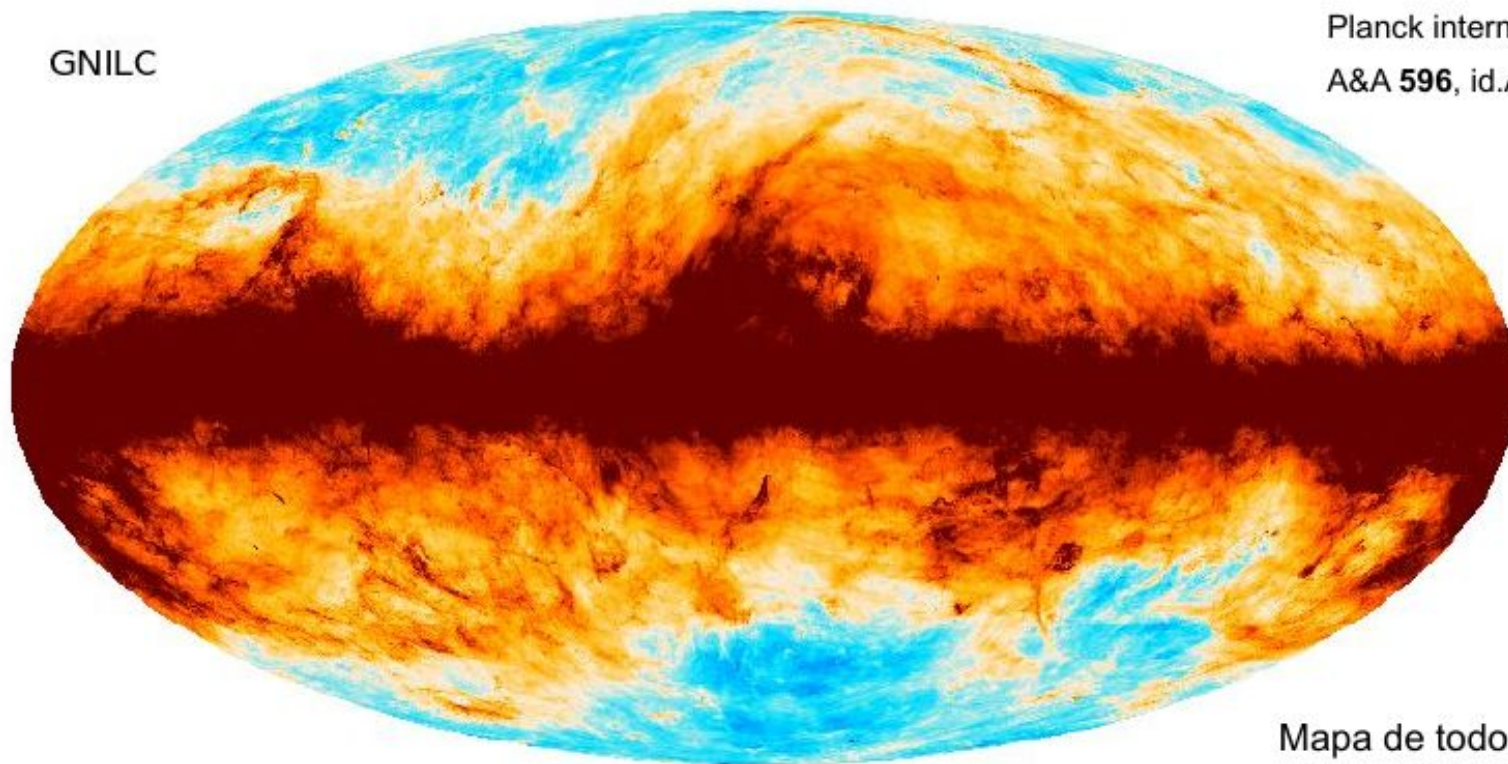
Existen granos muy chicos ( $\leq 100$  átomos) además de los granos típicos, de tamaño  $\sim 0.1 \mu\text{m}$  ( $\geq 10^4$  átomos) que absorben y dispersan en el B.

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)



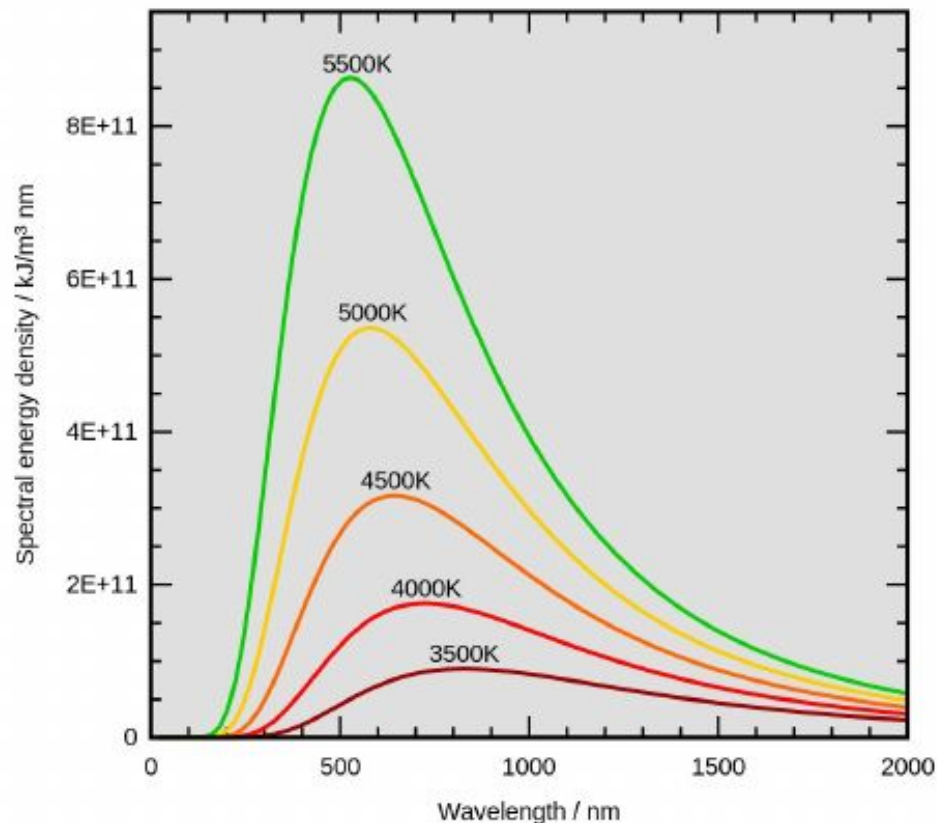
$\text{Mjy} \cdot \text{sr}^{-1}$

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





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

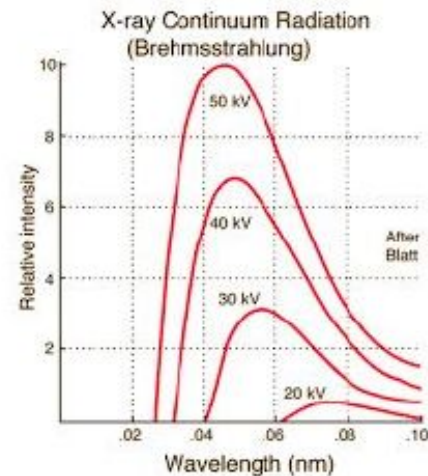


**Distribución espectral de energía de cuerpo negro**

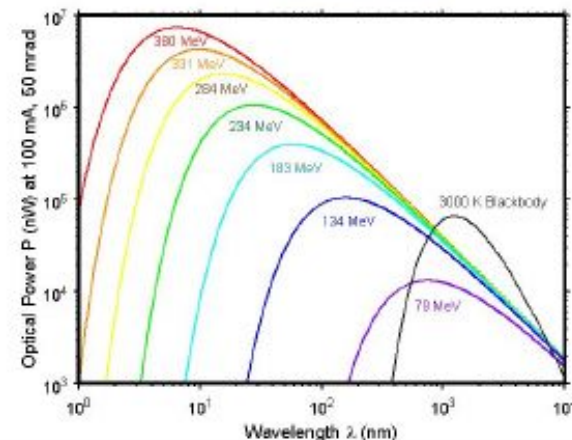
**Radiación no-térmica** (la radiación emitida por el proceso en cuestión no se debe a la temperatura del objeto)

**Ejemplos:**

**Bremsstrahlung**

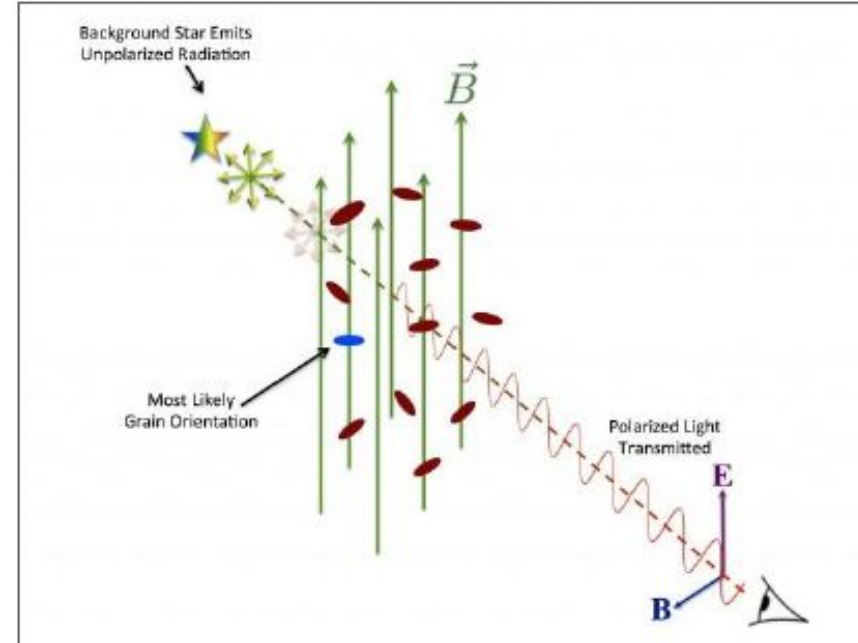
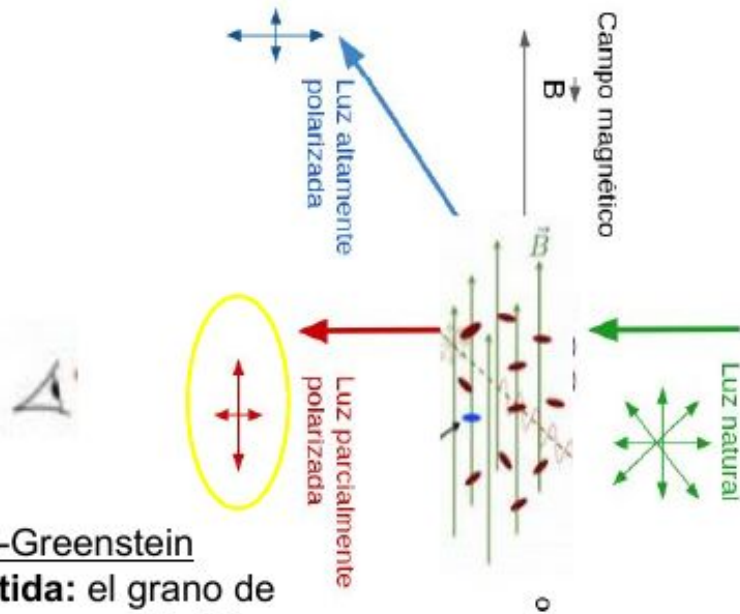


**Sincrotrón**



[Volver](#)

[Volver](#)



### 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  $\sigma_A/\sigma_T$ . The values obtained for this

<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1951ApJ...114..206D>