Sistemas Estelares

curso 2016

Medio interestelar

Imágenes y gráficos de apoyo a las clases

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Profesor Asociado: Dr. Sergio A. Cellone

Esto no es un apunte de clases

Temario

1. Introducción
2. Polvo interestelar
   - Extinción
   - Polarización
   - Dispersión
   - Reflexión
   - Emisión
3. Gas interestelar
   - Emisión
   - Hidrógeno neutro (HI)
   - Gas muy caliente
   - Gas neutro y molecular
   - Relación gas–polvo
   - Ecuación de enriquecimiento químico del MIE

Medio interestelar

1. Introducción
2. Polvo interestelar
   - Extinción
   - Polarización
   - Dispersión
   - Reflexión
   - Emisión
3. Gas interestelar
   - Emisión
   - Hidrógeno neutro (HI)
   - Gas muy caliente
   - Gas neutro y molecular
   - Relación gas–polvo
   - Ecuación de enriquecimiento químico del MIE

Material interestelar

http://apod.nasa.gov/apod/ap090929.html

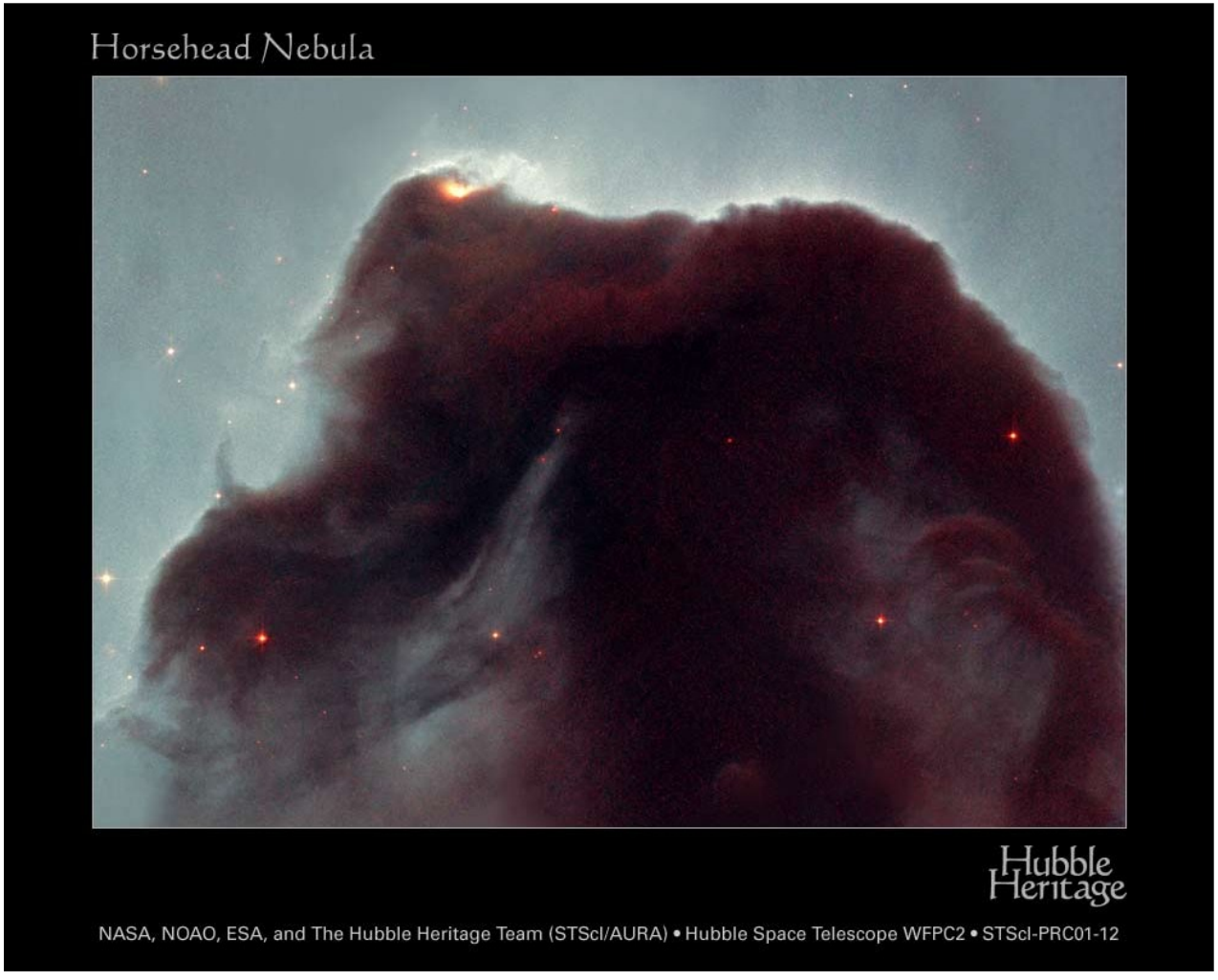
Medio interestelar

1. Introducción
2. Polvo interestelar
   - Extinción
   - Polarización
   - Dispersión
   - Reflexión
   - Emisión
3. Gas interestelar
   - Emisión
   - Hidrógeno neutro (HI)
   - Gas muy caliente
   - Gas neutro y molecular
   - Relación gas–polvo
   - Ecuación de enriquecimiento químico del MIE

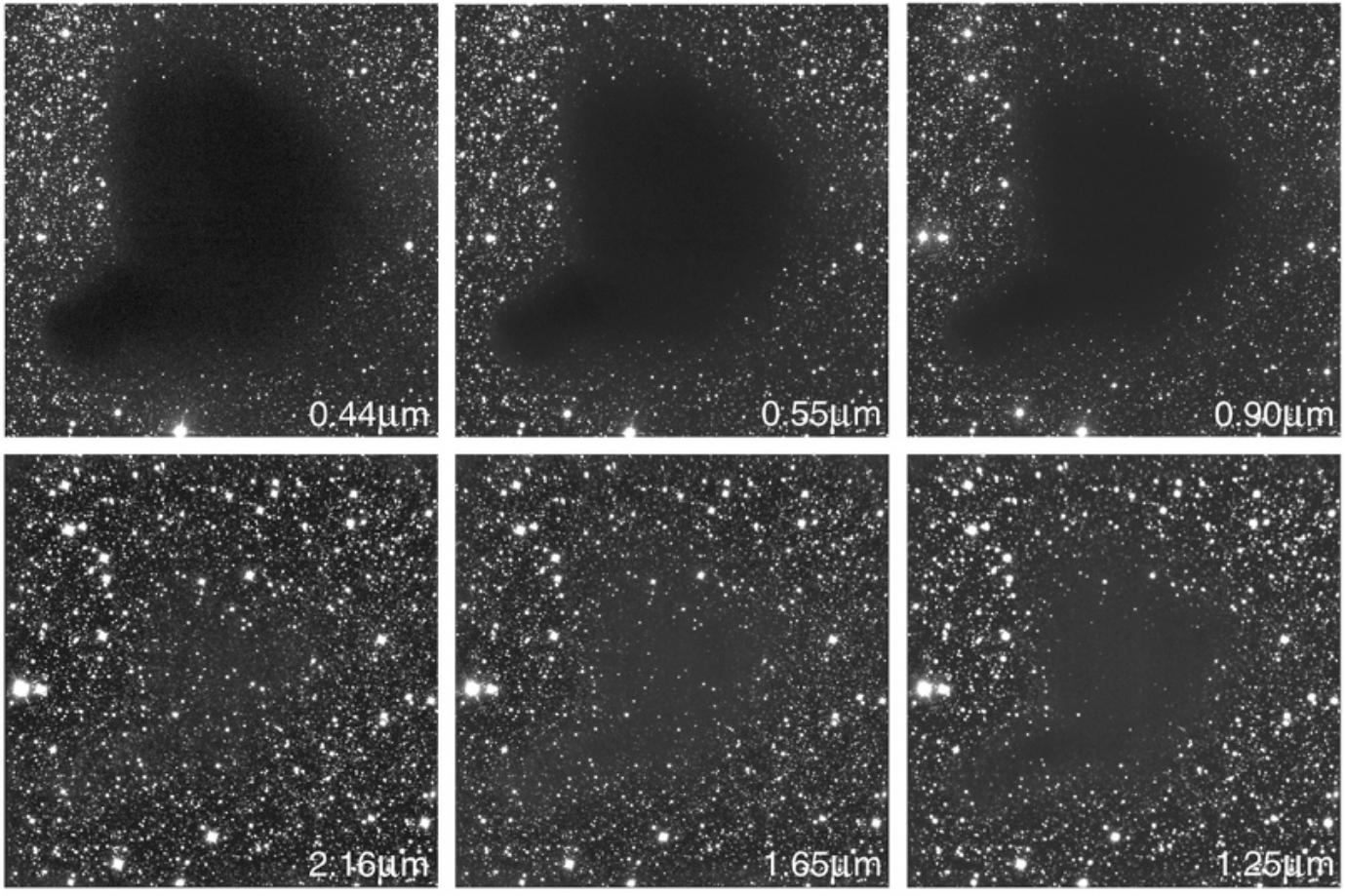
Nebulosas oscuras

(ver http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap090522.html)

Nebulosas oscuras



Nebulosas oscuras



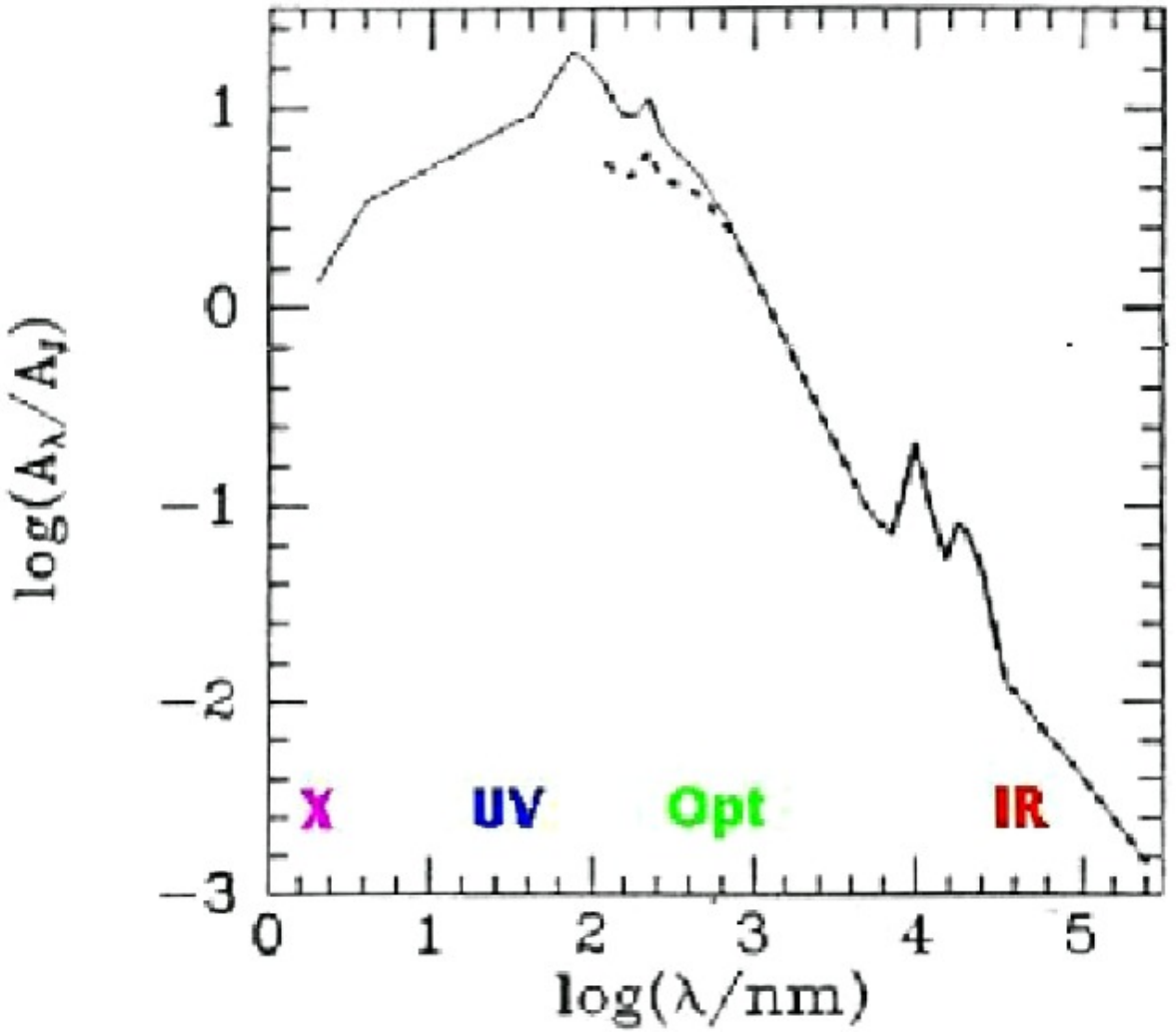
The Dark Cloud B68 at Different Wavelengths (NTT + SOFI)

ESO PR Photo 29b/99 (2 July 1999)

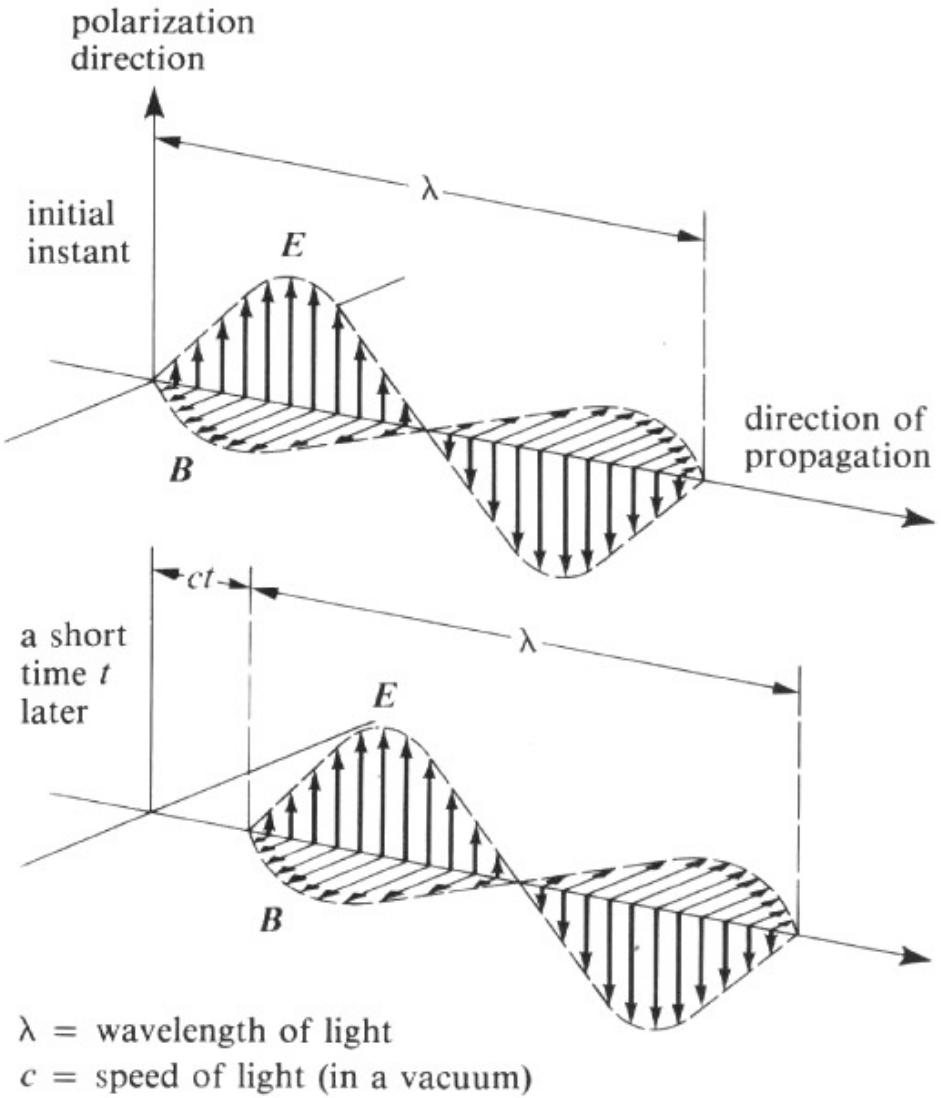
© European Southern Observatory

Barnard 68
óptico →
IR cercano

Curva media de extinción en la VL



Onda plana


polarization direction
λ
initial instant
E
B
direction of propagation
ct
a short time t later
λ
E
B
λ = wavelength of light
c = speed of light (in a vacuum)

Ejemplos en fotografía

Ejemplos en fotografía

Ejemplos en fotografía

Without Polarizer

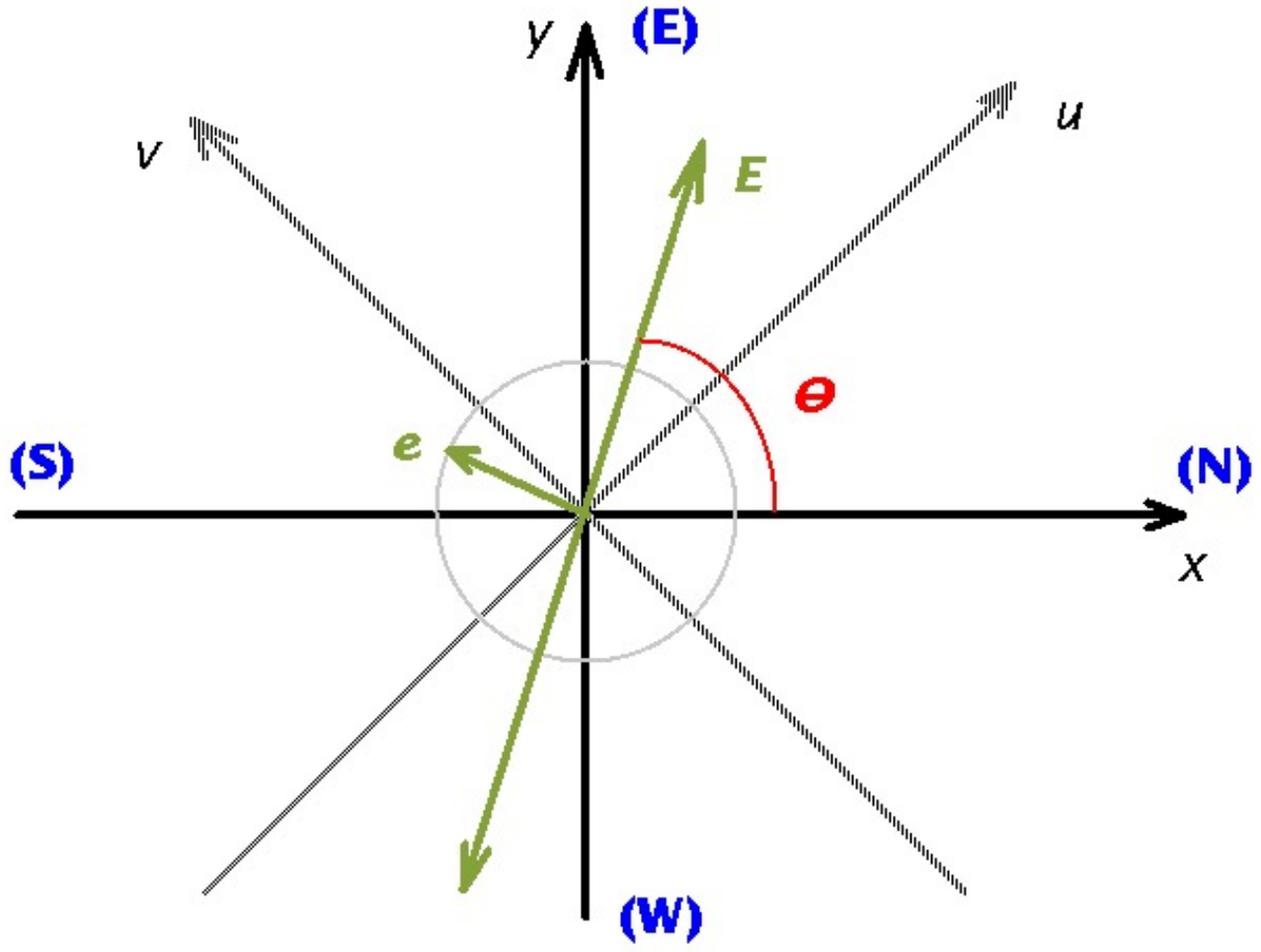
With Polarizer

Ejemplos en fotografía

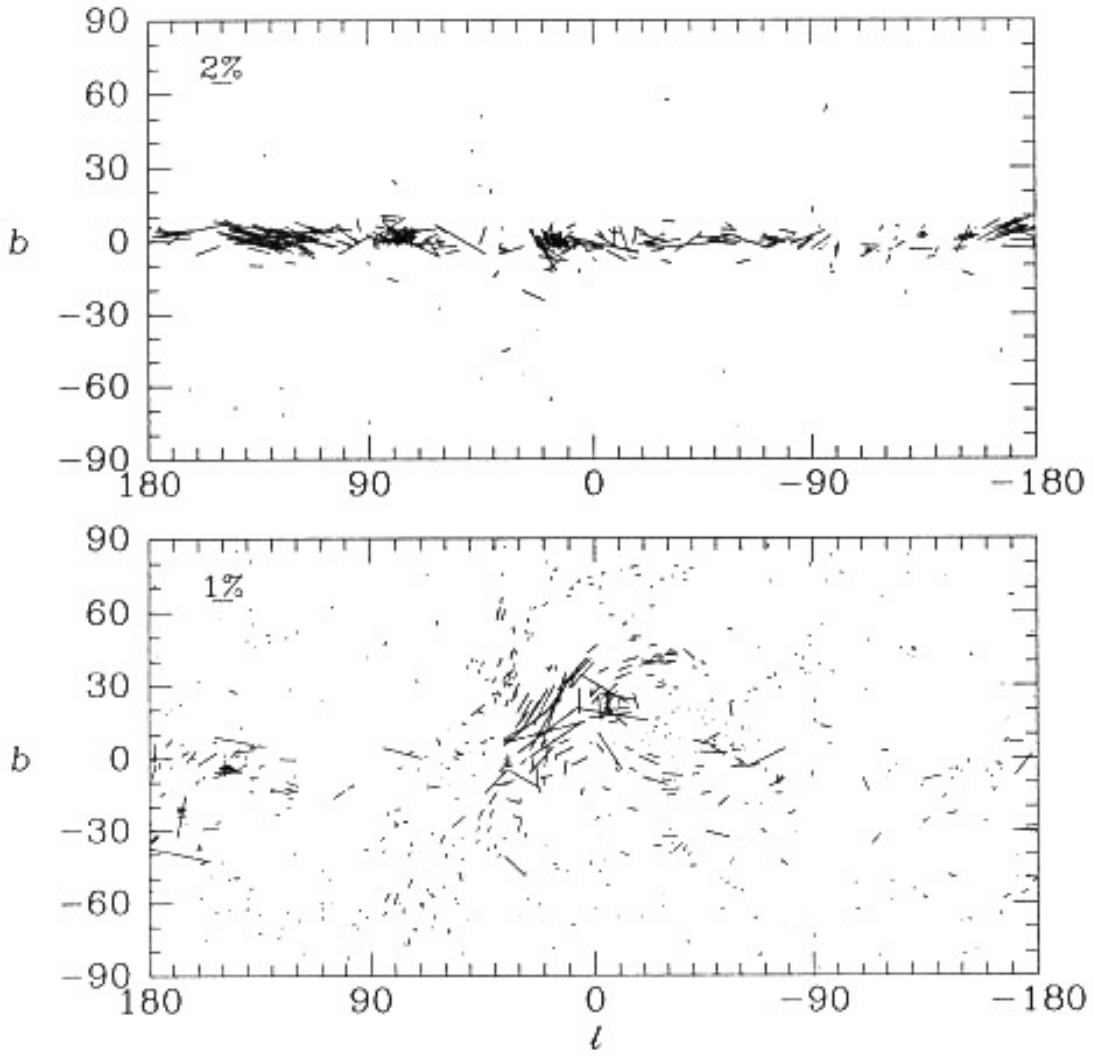
Without polarizing filter

With polarizing filter

Parámetros de Stokes



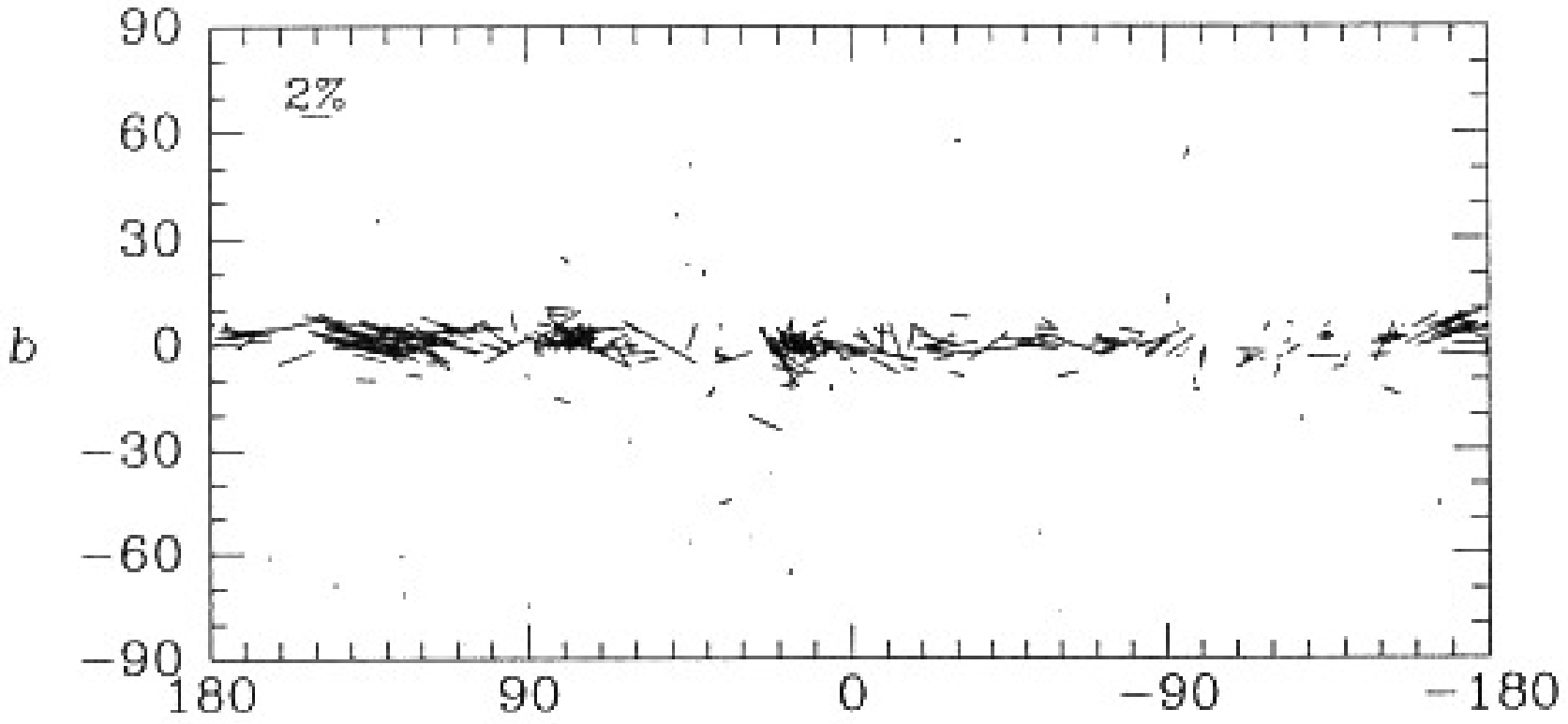
Distribución de P en la Vía Láctea



$1\,\text{kpc} < d < 1.5\,\text{kpc}$

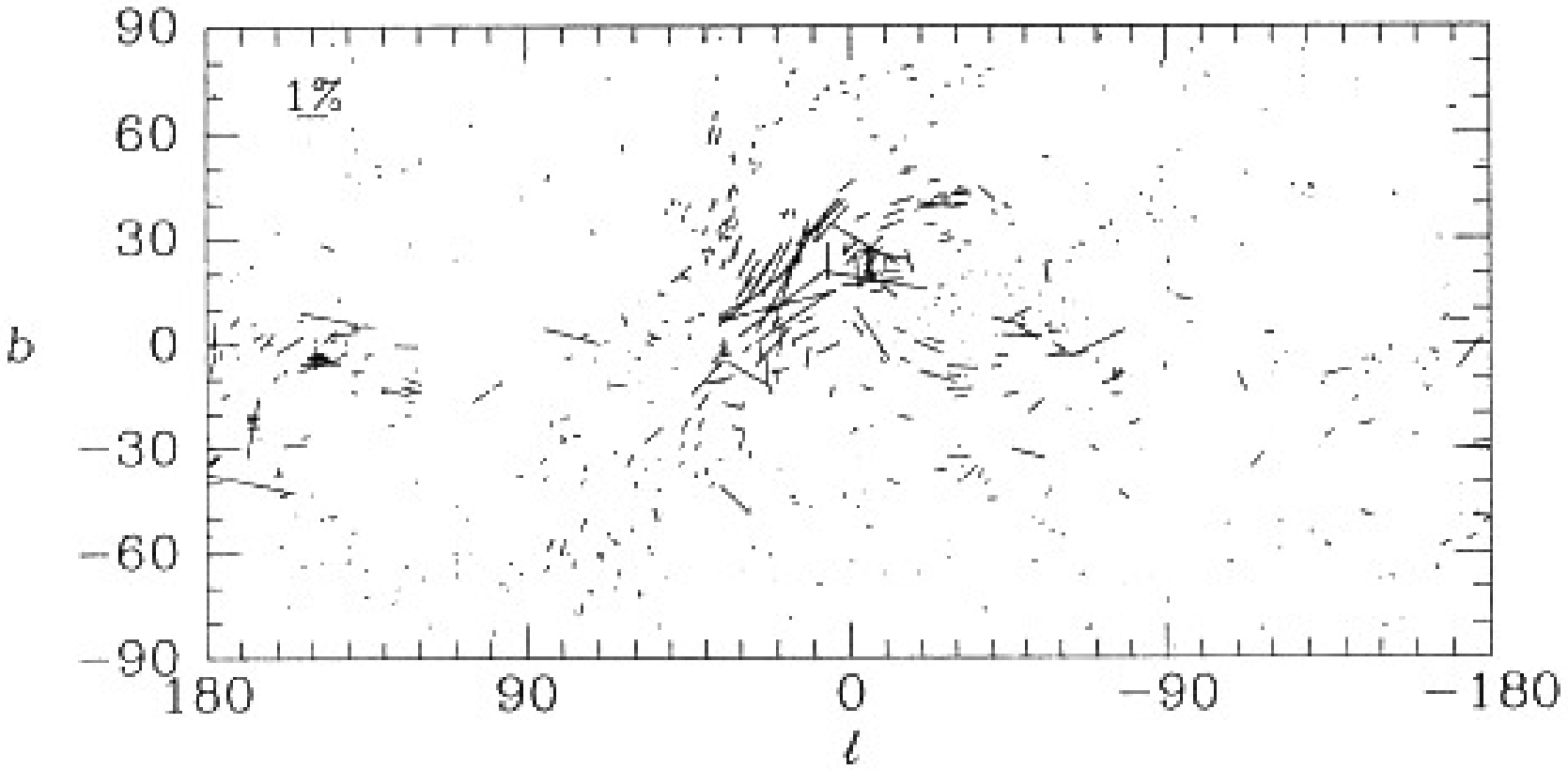
$100\,\text{pc} < d < 200\,\text{pc}$

Distribución de P en la Vía Láctea



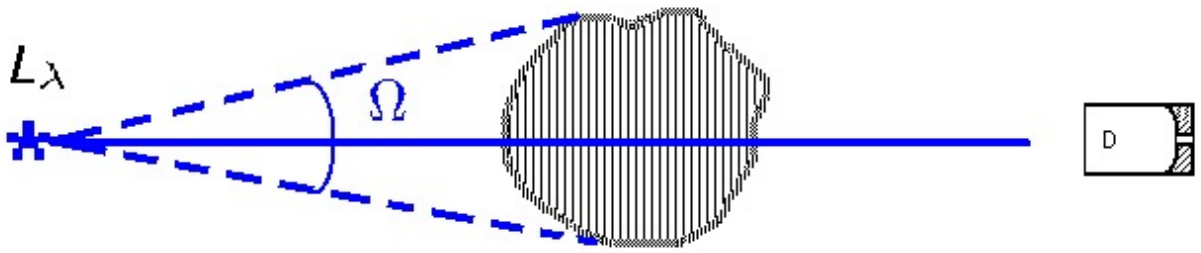
$1\,\text{kpc} < d < 1.5\,\text{kpc}$

Distribución de P en la Vía Láctea



$100\,\mathrm{pc} < d < 200\,\mathrm{pc}$

Albedo



- Luminosidad interceptada por la nube: $L_\lambda \left(\frac{\Omega}{4\pi}\right)$
  - Luminosidad observada (transmitida): $L_\lambda \left(\frac{\Omega}{4\pi}\right) \times 10^{-0.4\,A_\lambda}$
  - Luminosidad extinguida: $L_\lambda \left(\frac{\Omega}{4\pi}\right)\left[1 - 10^{-0.4\,A_\lambda}\right]$
    - Luminosidad dispersada: $\gamma_\lambda\, L_\lambda \left(\frac{\Omega}{4\pi}\right)\left[1 - 10^{-0.4\,A_\lambda}\right]$
    - Luminosidad absorbida: $(1 - \gamma_\lambda)\, L_\lambda \left(\frac{\Omega}{4\pi}\right)\left[1 - 10^{-0.4\,A_\lambda}\right]$

Función de fase

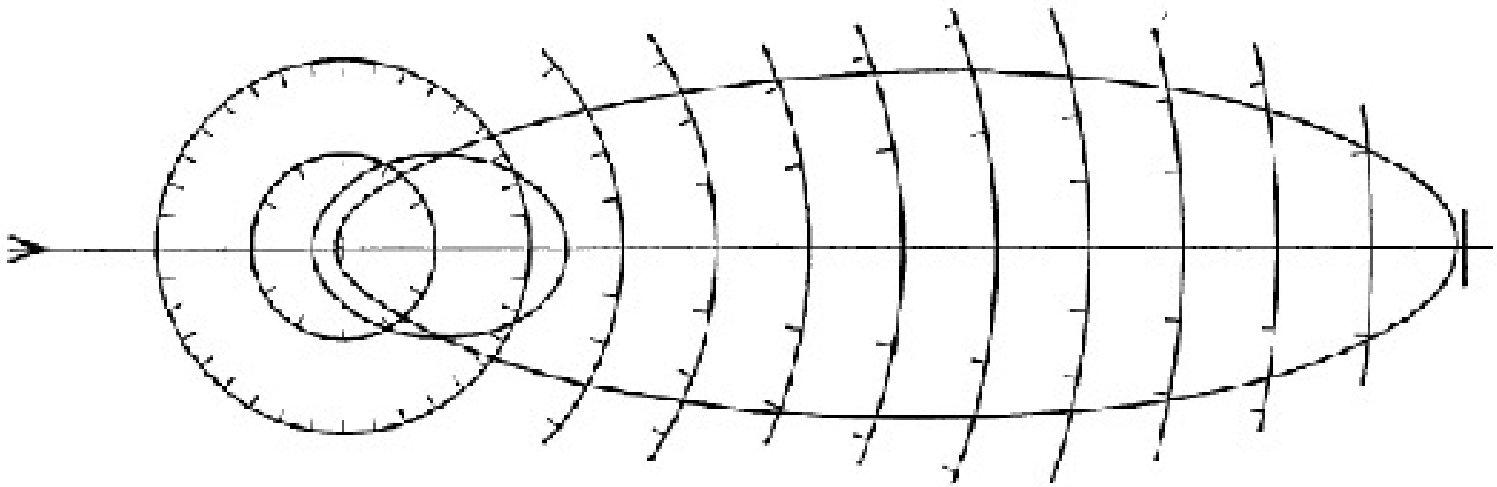


FIG. 3. Polar diagram of the phase function of equation (2), for $\gamma = \pi$. The more elongated curve is for $g = +\frac{3}{4}$; the other, for $g = +\frac{1}{4}$. The radiation is incident on the particle from the left, as shown by the arrow.

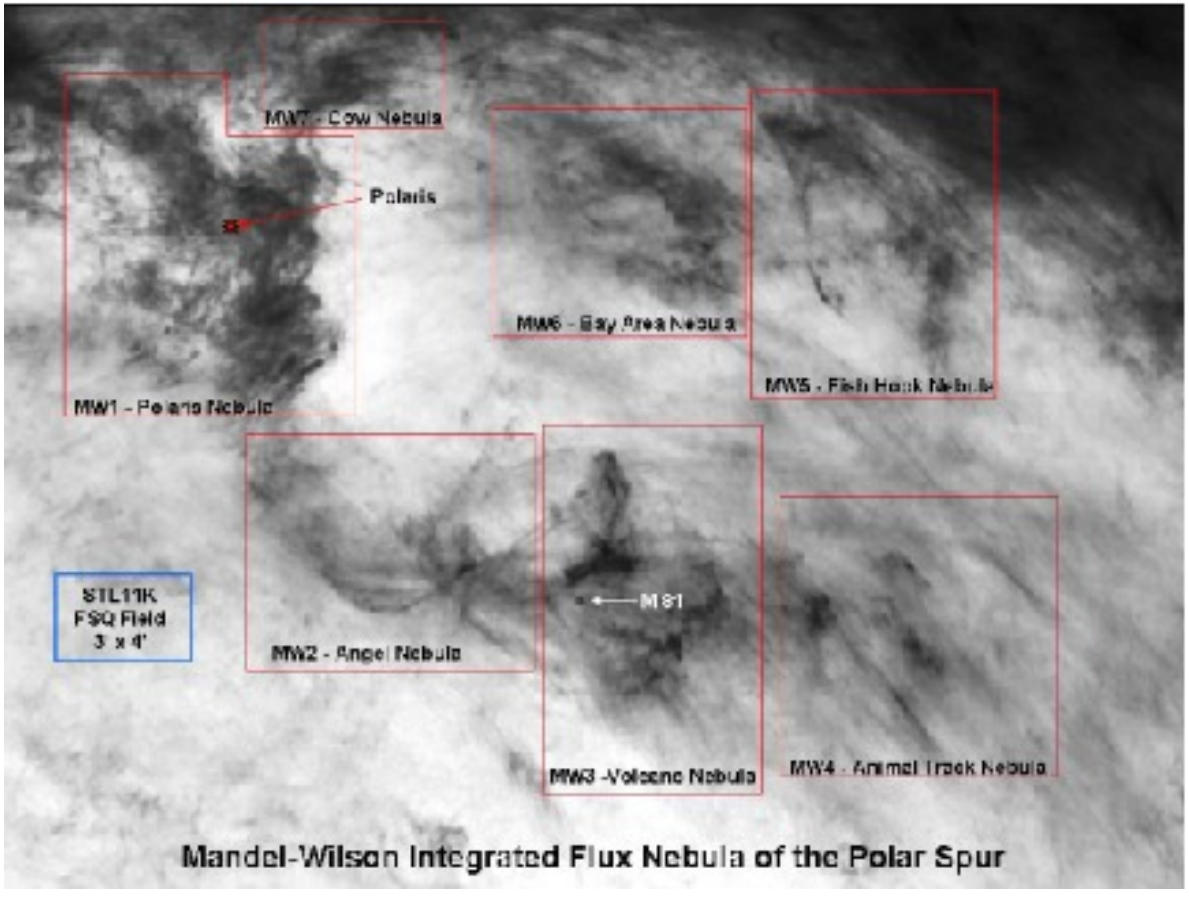
Nebulosas de reflexión

Las Pléyades

(Marco Lorenzi)

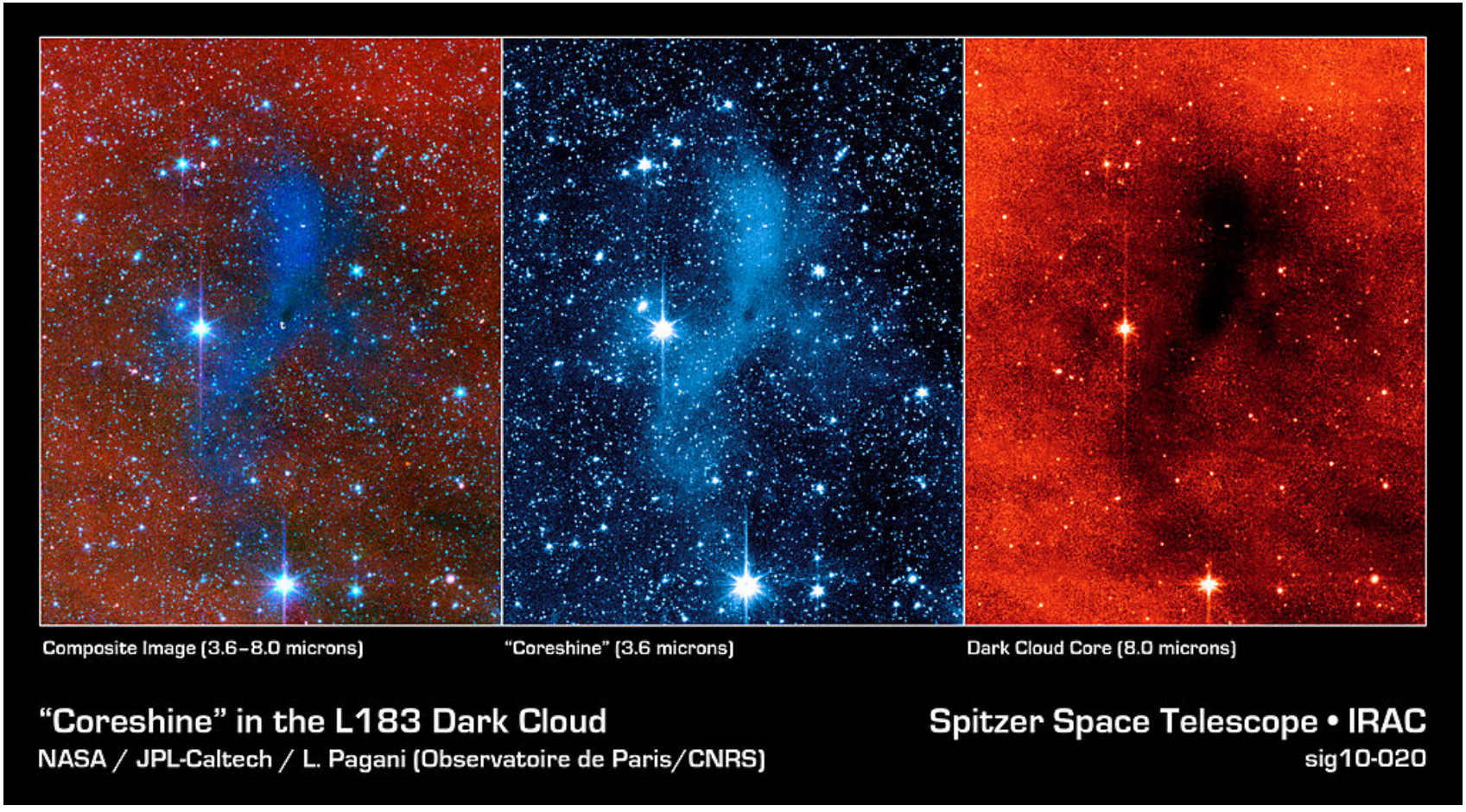
(http://www.glitteringlights.com/)

Nebulosas de “flujo integrado”



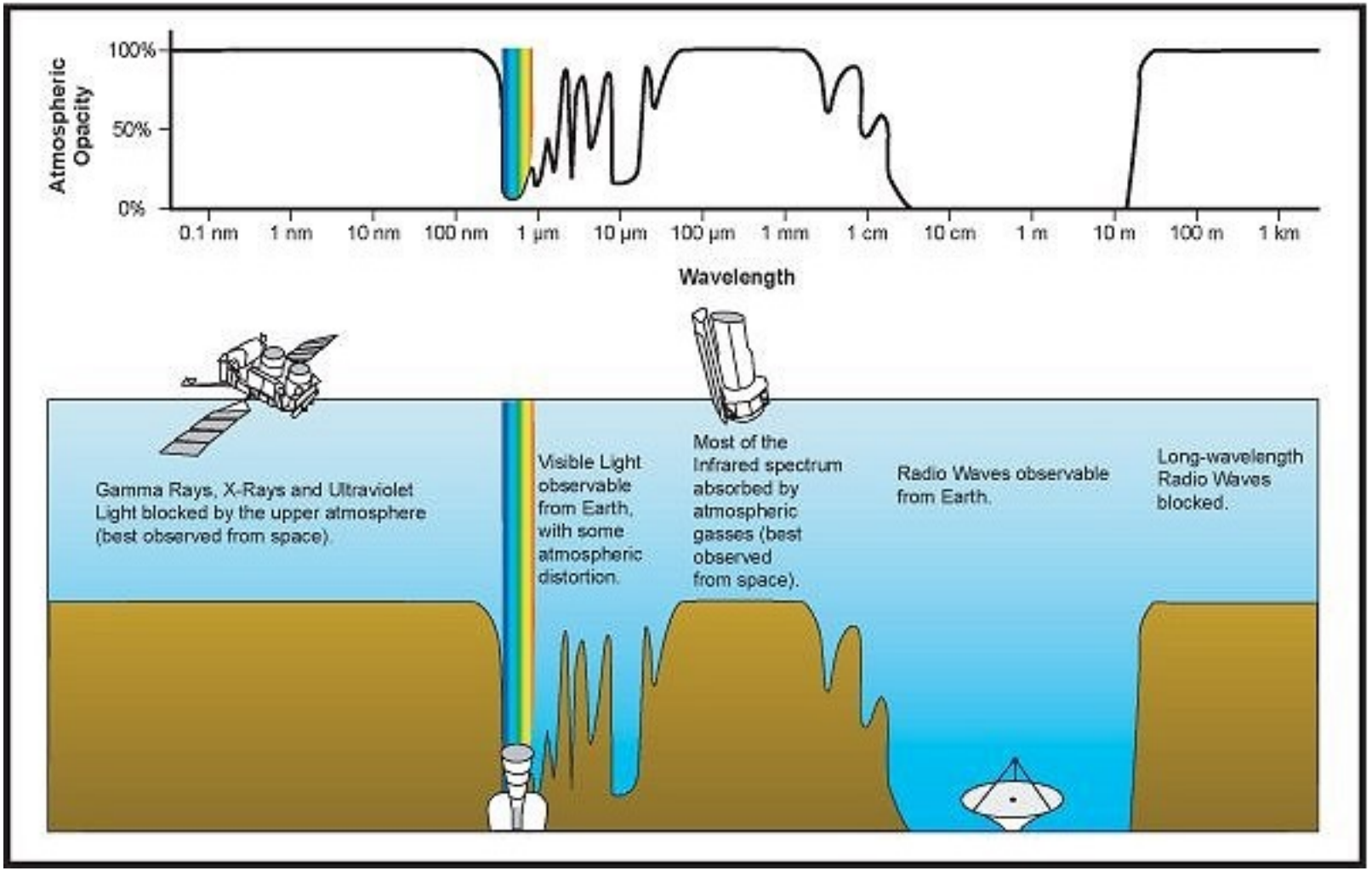
Mapa (negativo) del “Espolón Polar”.
Polvo iluminado por la luz integrada del disco de la Galaxia.

Absorción - reflexión del polvo en el IR



Reflexión por partículas de tamaño $\sim 1\,\mu$m

Ventanas de transmisión atmosférica



Emisión térmica del polvo

Spitzer Space Telescope
3.6 – 160 μm

Medio interestelar

1. Introducción
2. Polvo interestelar
   - Extinción
   - Polarización
   - Dispersión
   - Reflexión
   - Emisión
3. Gas interestelar
   - Emisión
   - Hidrógeno neutro (HI)
   - Gas muy caliente
   - Gas neutro y molecular
   - Relación gas–polvo
   - Ecuación de enriquecimiento químico del MIE

Nebulosas de emisión

RCW38 (VLT, ESO)

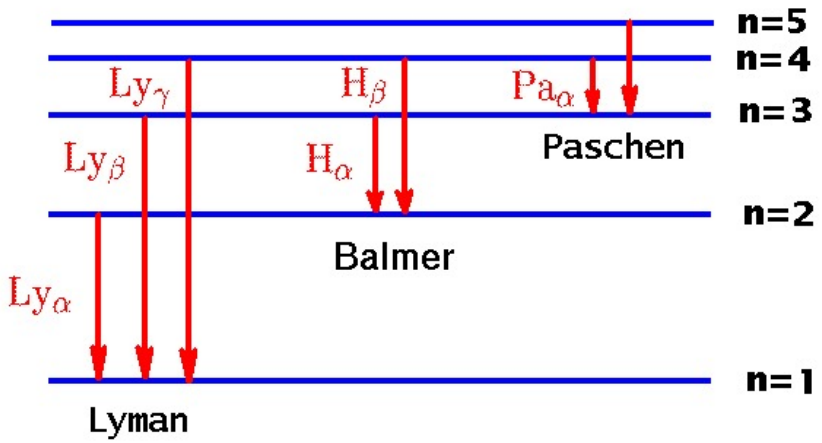
Nebulosas de emisión

Nebulosa de Orión
Cámara HAWK-I (VLT-ESO), Infrarrojo cercano

Detección y estudio del gas interestelar

Fenómeno	Objeto/emisor	Región espectral
Líneas de emisión atómica	reg. HII	óptico
Emisión libre-libre (continuo) gas caliente	RSN	radio - óptico
Líneas de absorción	espectros estelares	óptico
Emisión gas neutro	HI	radio
Emisión gas molecular	CO, etc.	mm - radio
Emisión térmica gas muy caliente	plasma	EUV - X
Absorción	gas frío (O, Fe)	X

Regiones HII



Nº de iones permanece constante $\Rightarrow$
para cada ionización $\rightarrow$
recombinación al nivel $n = 1$.

Serie de Lyman	λ
Ly_α	121.6 nm
Ly_β	102.6 nm
Ly_γ	97.3 nm
(límite)	91.2 nm

Regiones HII

⋆ ionizante	$N_\star$	R_S
O5 V	$3 \times 10^{49}\ s^{-1}$	6.2×10^{19} cm (20.1 pc)
B0 V	$4 \times 10^{46}\ s^{-1}$	6.8×10^{18} cm (2.2 pc)
G2 V	$1 \times 10^{39}\ s^{-1}$	2.0×10^{16} cm (6.5×10^{-3} pc)

Líneas prohibidas más importantes:

$$\begin{aligned} [\text{O III}]: &\quad \lambda = 4959 - 5007\ \text{Å} \\ [\text{O II}]: &\quad \lambda = 3726 - 3729\ \text{Å} \\ [\text{Ne III}]: &\quad \lambda = 3868 - 3967\ \text{Å} \\ [\text{S II}]: &\quad \lambda = 4068 - 4076\ \text{Å} \end{aligned}$$

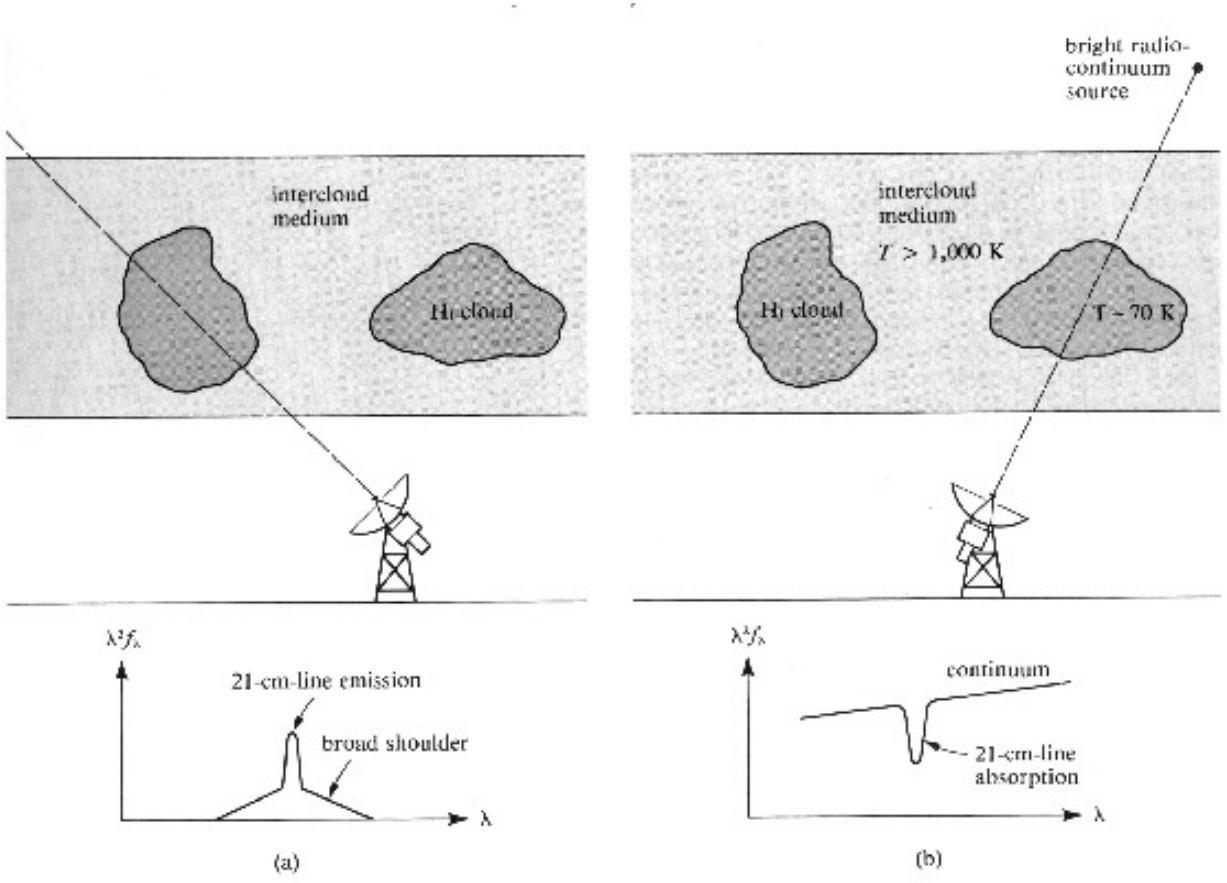
Regiones HII

⋆ ionizante	$N_\star$	R_S
O5 V	$3 \times 10^{49}\ s^{-1}$	6.2×10^{19} cm (20.1 pc)
B0 V	$4 \times 10^{46}\ s^{-1}$	6.8×10^{18} cm (2.2 pc)
G2 V	$1 \times 10^{39}\ s^{-1}$	2.0×10^{16} cm (6.5×10^{-3} pc)

Líneas prohibidas más importantes:

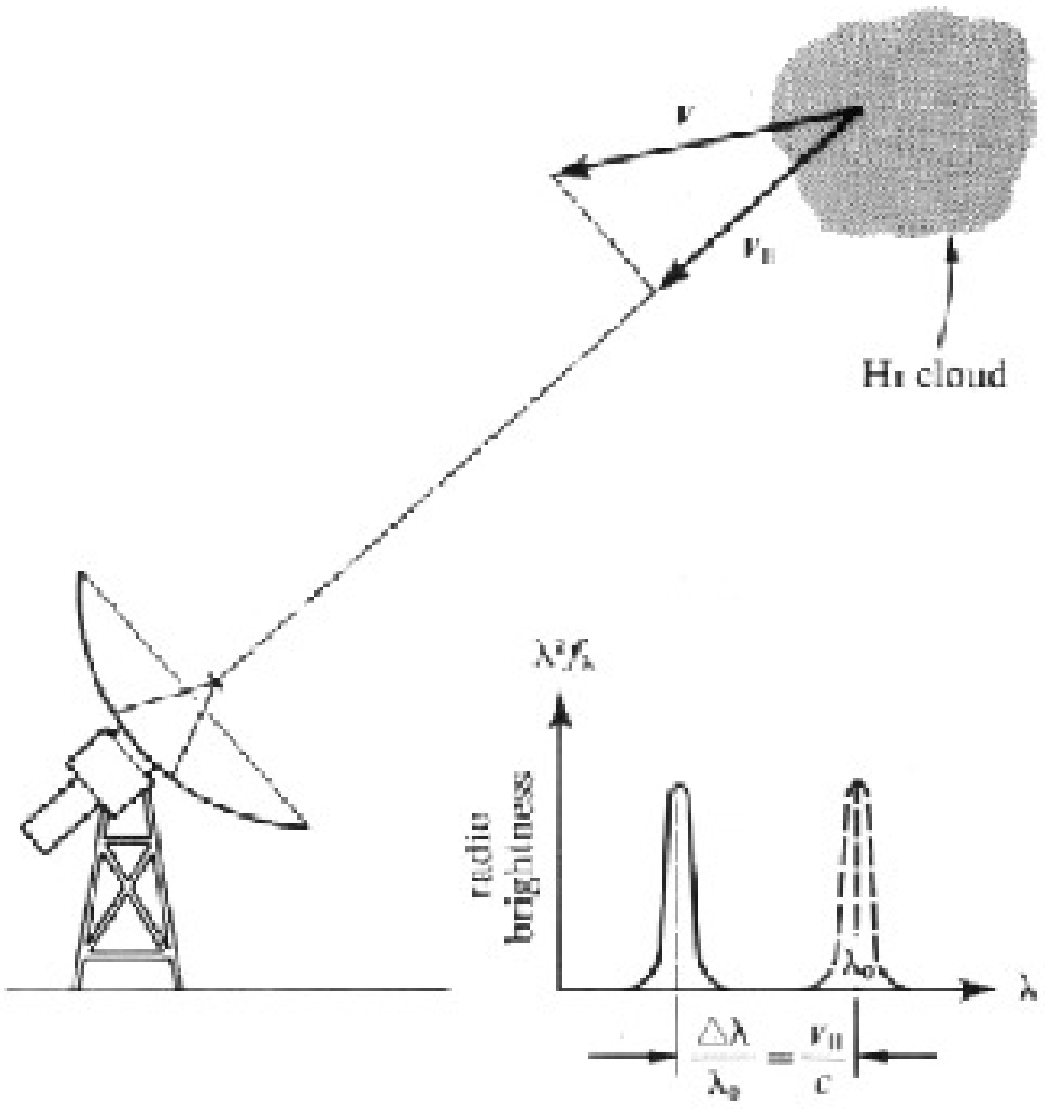
$$\begin{aligned} [\text{OIII}]: &\quad \lambda = 4959 - 5007\ \text{Å} \\ [\text{OII}]: &\quad \lambda = 3726 - 3729\ \text{Å} \\ [\text{NeIII}]: &\quad \lambda = 3868 - 3967\ \text{Å} \\ [\text{SII}]: &\quad \lambda = 4068 - 4076\ \text{Å} \end{aligned}$$

Observación del HI

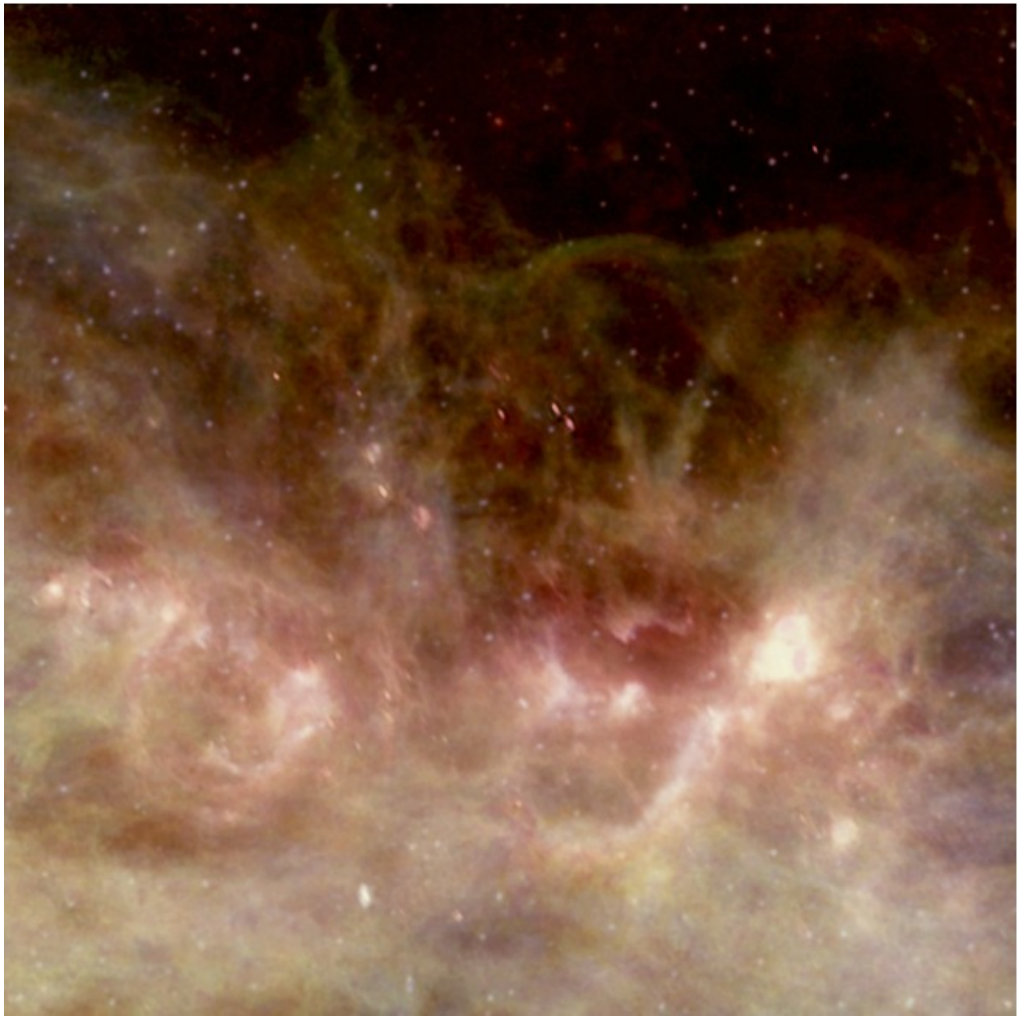


La línea de 21 cm puede detectarse en absorción o en emisión.

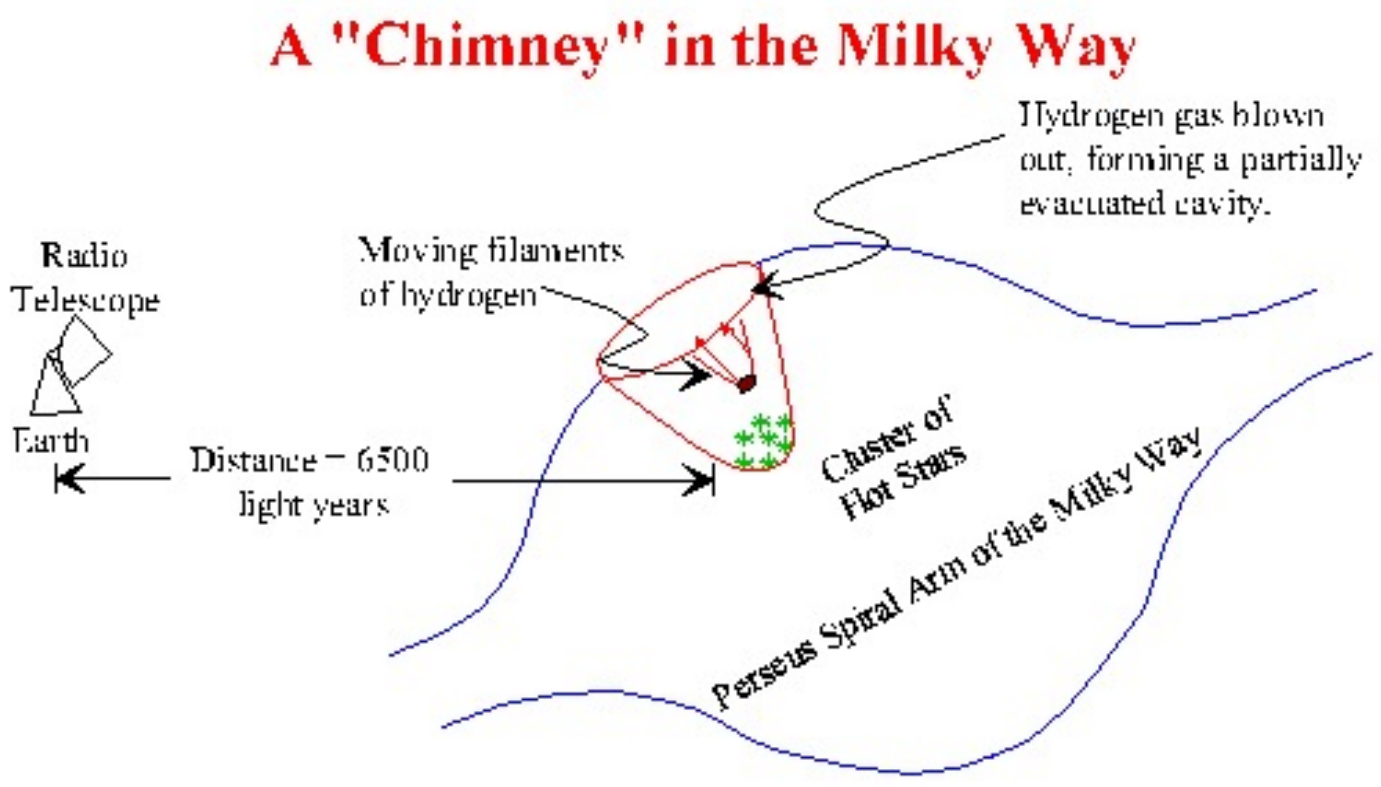
Observación del HI



“Chimeneas” y “gusanos” en la Vía Láctea



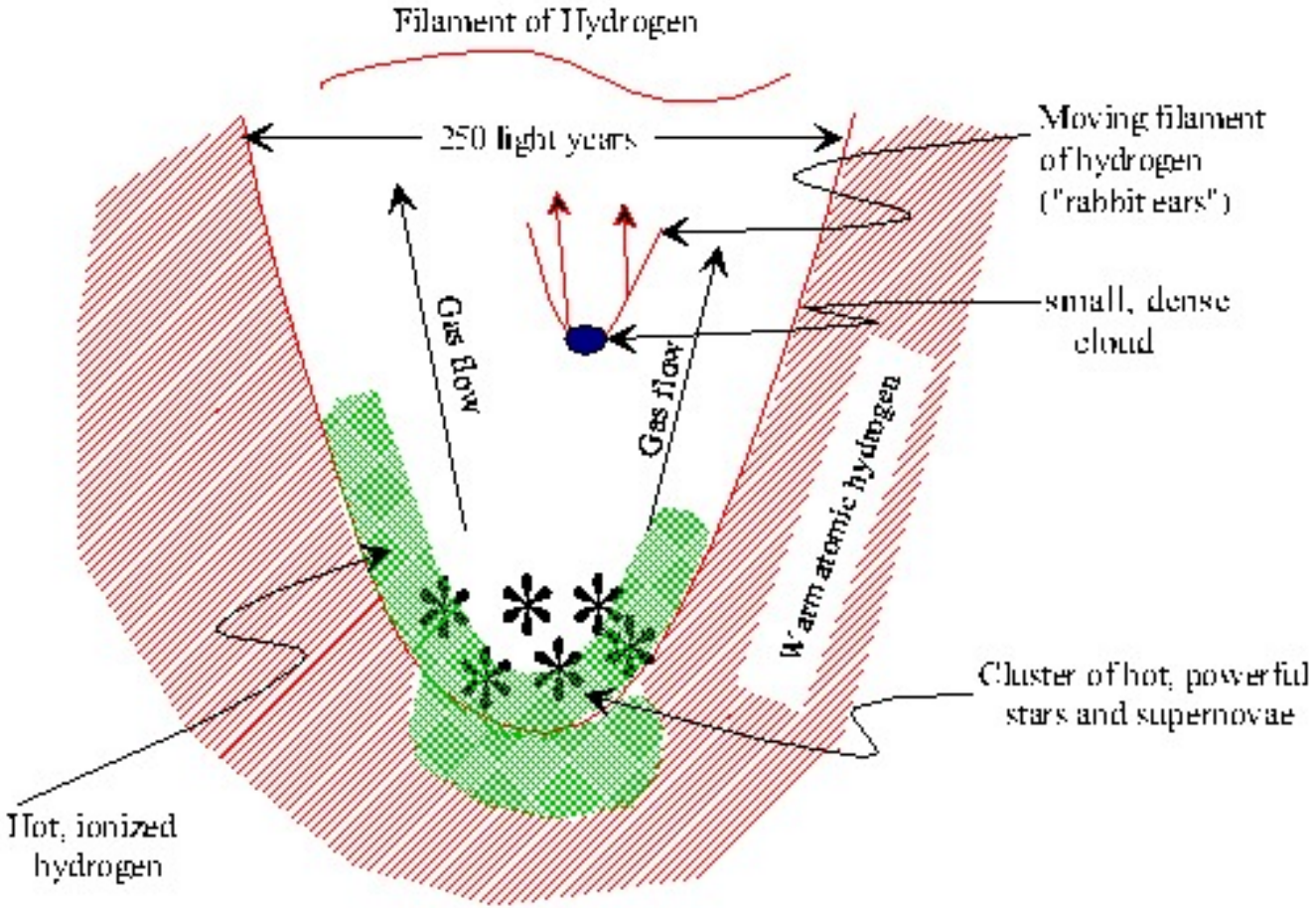
“Chimeneas” y “gusanos” en la Vía Láctea



Canadian Galactic Plane Survey,
`http://www.ras.ucalgary.ca/CGPS/`

Gas muy caliente

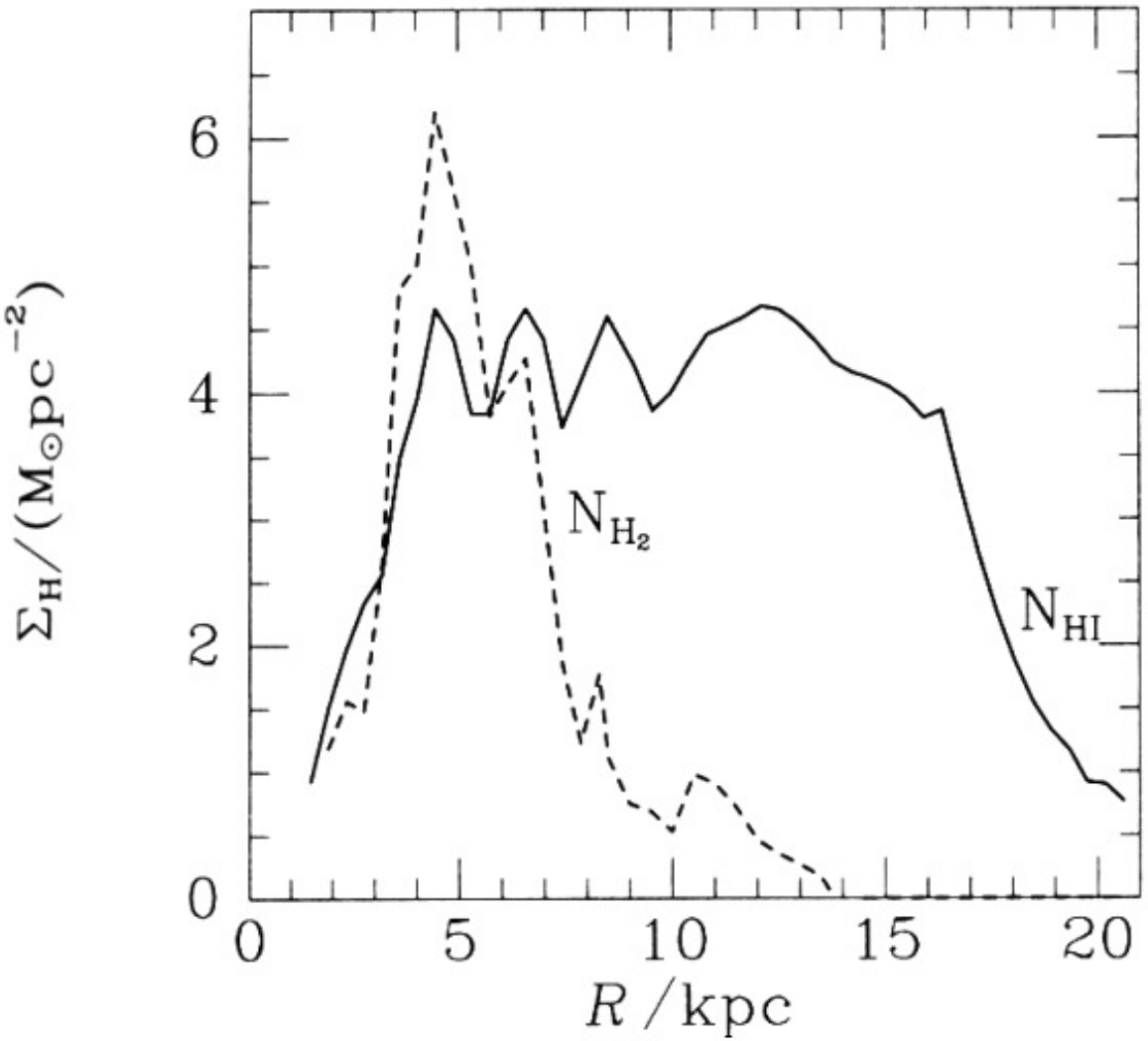
“Chimeneas” y “gusanos” en la Vía Láctea



“Chimeneas” y “gusanos” en la Vía Láctea

Nube de gas en forma de “hongo” elevándose unos 300 pc sobre el disco de la Vía Láctea. Posiblemente originada por la colisión de una nube de alta velocidad.

Distribución radial



Relación observacional entre gas y polvo

N_H: densidad columnar de hidrógeno (H + H_2) (Güver & Özel 2009):

$$N_H = (2.21 \pm 0.09) \times 10^{25}\, A_V\, \mathrm{m}^{-2}$$

$R \simeq R_\odot \quad \rightarrow \quad n_H \simeq 1\ \mathrm{cm}^{-3} = 10^6\ \mathrm{m}^{-3}$ (típico)

$\therefore$ Integrando sobre una visual de longitud d:

$$N_H = 3.3 \times 10^{25} \left(\frac{d}{\mathrm{kpc}}\right) \mathrm{m}^{-2}$$

$$A_V \simeq 1.5 \left(\frac{d}{\mathrm{kpc}}\right)\ [\mathrm{mag}].$$

Relación observacional entre gas y polvo

N_H: densidad columnar de hidrógeno (H + H_2) (Güver & Özel 2009):

$$N_H = (2.21 \pm 0.09) \times 10^{25}\, A_V\, \mathrm{m}^{-2}$$

$R \simeq R_\odot \quad \rightarrow \quad n_H \simeq 1\ \mathrm{cm}^{-3} = 10^6\ \mathrm{m}^{-3}$ (típico)

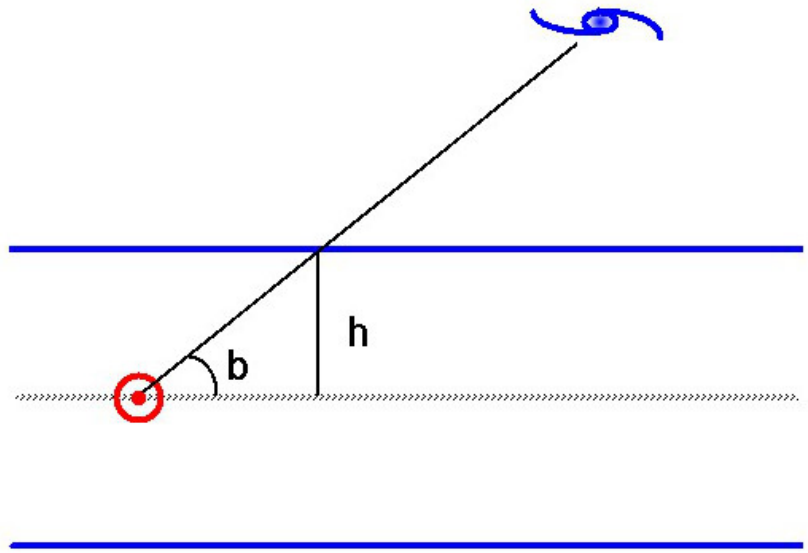
$\therefore$ Integrando sobre una visual de longitud d:

$$N_H = 3.3 \times 10^{25} \left(\frac{d}{\mathrm{kpc}}\right) \mathrm{m}^{-2}$$

$$A_V \simeq 1.5 \left(\frac{d}{\mathrm{kpc}}\right)\ [\mathrm{mag}].$$

Línea visual fuera del disco de la VL

Modelo de Hubble:
$A_V = \kappa \ \mathrm{cosec}(b)$

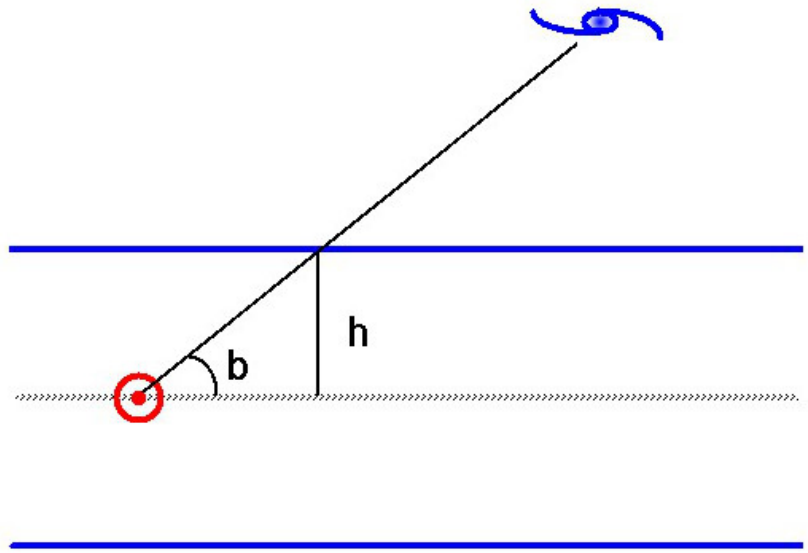


$$m = M - 5 + 5\,\log(d) + A_V \quad \rightarrow \quad \log(d) = \frac{m - M + 5 - A_V}{5}.$$

$$\begin{aligned} \log N_{(m)} &= 3\,\log(d) + C_1 \\ &= \tfrac{3}{5}(m - A_V - M) + C_2 \\ &= 0.6(m - A_V) + C_3 \\ &= 0.6\,(m - \kappa\ \mathrm{cosec}(b)) + C \end{aligned}$$

Línea visual fuera del disco de la VL

Modelo de Hubble:
$A_V = \kappa \ \mathrm{cosec}(b)$

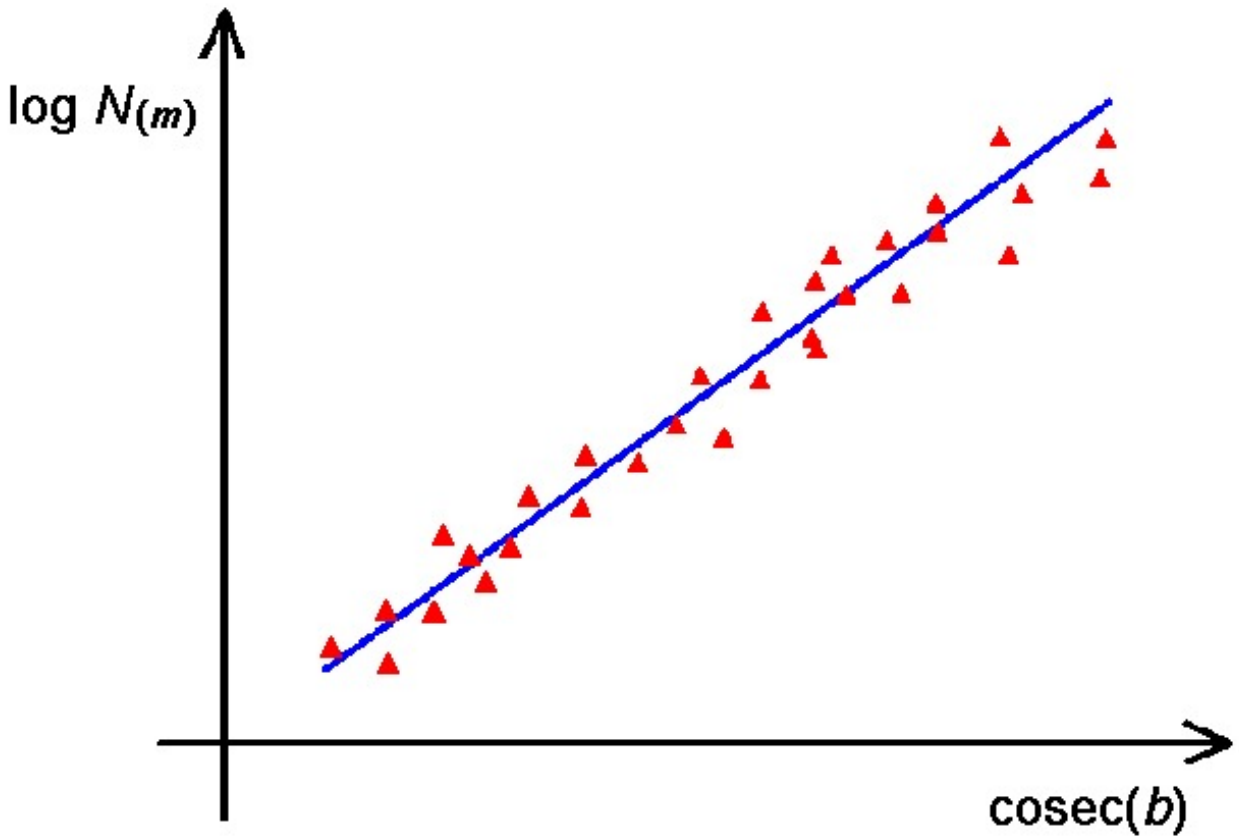


$$m = M - 5 + 5 \log(d) + A_V \quad \rightarrow \quad \log(d) = \frac{m - M + 5 - A_V}{5}.$$

$$\begin{aligned} \log N_{(m)} &= 3 \log(d) + C_1 \\ &= \tfrac{3}{5}(m - A_V - M) + C_2 \\ &= 0.6(m - A_V) + C_3 \\ &= 0.6\,(m - \kappa \ \mathrm{cosec}(b)) + C \end{aligned}$$

Línea visual fuera del disco de la VL

$$\log N_{(m)} = 0.6\,(m - \kappa\ \mathrm{cosec}(b)) + C$$



Modelo de "caja cerrada"

Hipótesis:

- no entra ni sale material (conservación de la masa)
- inicialmente **todo gas**, sin elementos pesados ($Z(0) = 0$)
- las estrellas masivas devuelven inmediatamente gas enriquecido al MIE
- turbulencia $\rightarrow$ mezcla inmediata del gas.

Modelo de “caja cerrada”

Hipótesis:

- no entra ni sale material (conservación de la masa)
- inicialmente **todo gas**, sin elementos pesados ($Z(0) = 0$)
- las estrellas masivas devuelven inmediatamente gas enriquecido al MIE
- turbulencia $\rightarrow$ mezcla inmediata del gas.

Modelo de “caja cerrada”

Hipótesis:

- no entra ni sale material (conservación de la masa)
- inicialmente **todo gas**, sin elementos pesados ($Z(0) = 0$)
- las estrellas masivas devuelven inmediatamente gas enriquecido al MIE
- turbulencia $\rightarrow$ mezcla inmediata del gas.

Modelo de "caja cerrada"

Hipótesis:

- no entra ni sale material (conservación de la masa)
- inicialmente **todo gas**, sin elementos pesados ($Z(0) = 0$)
- las estrellas masivas devuelven inmediatamente gas enriquecido al MIE
- turbulencia $\rightarrow$ mezcla inmediata del gas.

Modelo de "caja cerrada"

Definiciones:

$\mathcal{M}_g$: masa total del gas

$\mathcal{M}_p$: masa de gas en elementos pesados

$\mathcal{M}_s$: masa en estrellas

Masa:

$$M(t) = M = M_g(t) + M_s(t)$$

Metalicidad del gas:

$$Z = \frac{\mathcal{M}_p}{\mathcal{M}_g} \qquad \text{(Recordar } Z_\odot \simeq 0.02\text{)}$$

Modelo de "caja cerrada"

Definiciones:

$\mathcal{M}_g$: masa total del gas

$\mathcal{M}_p$: masa de gas en elementos pesados

$\mathcal{M}_s$: masa en estrellas

Masa:

$$\mathcal{M}(t) = \mathcal{M} = \mathcal{M}_g(t) + \mathcal{M}_s(t)$$

Metalicidad del gas:

$$Z = \frac{\mathcal{M}_p}{\mathcal{M}_g} \qquad \text{(Recordar } Z_\odot \simeq 0.02\text{)}$$

Modelo de "caja cerrada"

Definiciones:

$\mathcal{M}_g$: masa total del gas

$\mathcal{M}_p$: masa de gas en elementos pesados

$\mathcal{M}_s$: masa en estrellas

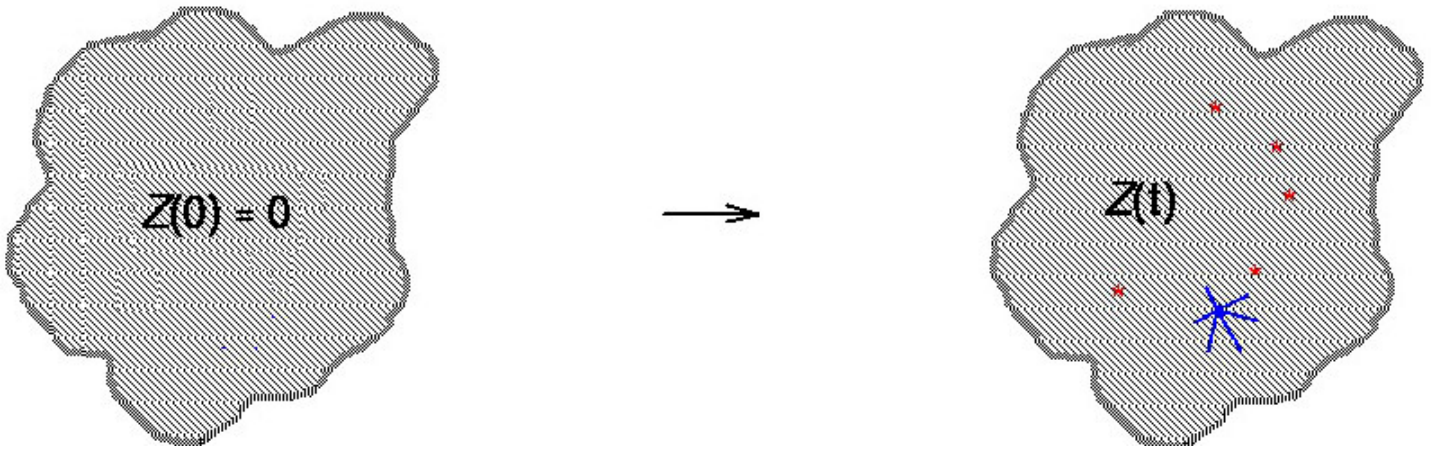
Masa:

$$\mathcal{M}(t) = \mathcal{M} = \mathcal{M}_g(t) + \mathcal{M}_s(t)$$

Metalicidad del gas:

$$Z = \frac{\mathcal{M}_p}{\mathcal{M}_g} \qquad \text{(Recordar } Z_\odot \simeq 0.02\text{)}$$

Modelo de "caja cerrada"



$t = 0$

$M_g(0)$

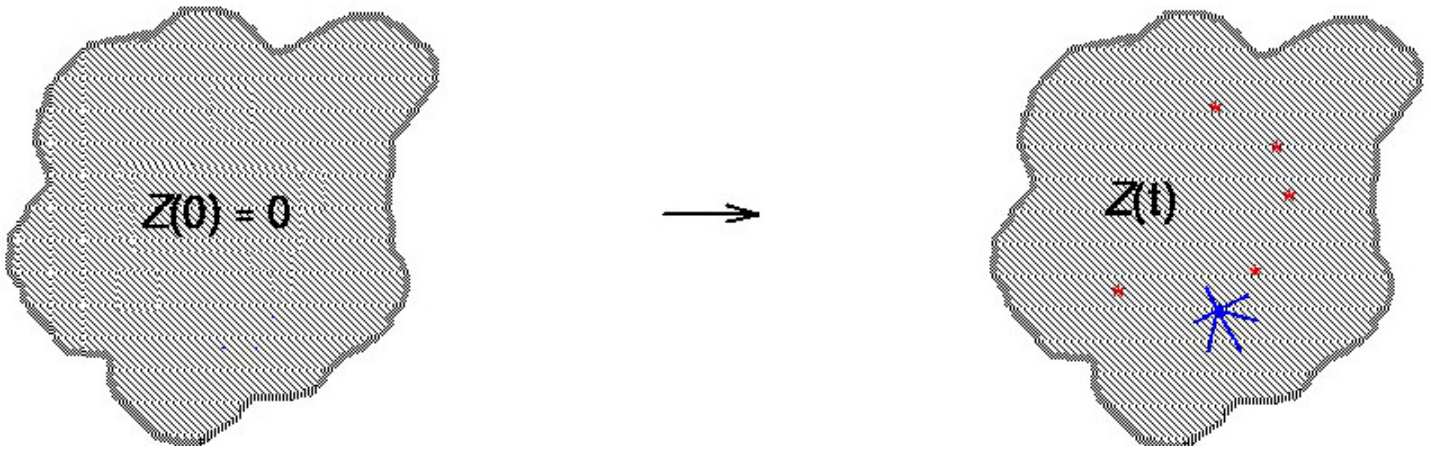
$M_s(0) = 0$

t

$M_g(t) < M_g(0)$

$M_s(t) = M_g(0) - M_g(t)$

Modelo de "caja cerrada"



Cada generación de estrellas (evento de formación estelar):

$\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{s} = -\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}$: queda encerrado en estrellas de baja masa.

$p\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{s} = -p\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}$: masa de elem. pesados formados que vuelve al MIE.

p: "*yield*"

Ecuaci'on de enriquecimiento qu'imico del MIE

Modelo de "caja cerrada"

$$\begin{aligned} \mathrm{d}M_\mathrm{p} &= -p\,\mathrm{d}M_\mathrm{g} - Z\,\mathrm{d}M_\mathrm{s} \\ &= (Z-p)\,\mathrm{d}M_\mathrm{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{d}Z &= \mathrm{d}\left(\frac{M_\mathrm{p}}{M_\mathrm{g}}\right) \\ &= \frac{\mathrm{d}M_\mathrm{p}}{M_\mathrm{g}} - \frac{M_\mathrm{p}}{M_\mathrm{g}^2}\,\mathrm{d}M_\mathrm{g} \\ &= \frac{1}{M_\mathrm{g}}\left(\mathrm{d}M_\mathrm{p} - \frac{M_\mathrm{p}}{M_\mathrm{g}}\,\mathrm{d}M_\mathrm{g}\right) \end{aligned}$$

$$\mathrm{d}Z = \frac{1}{M_\mathrm{g}}\left(\mathrm{d}M_\mathrm{p} - Z\,\mathrm{d}M_\mathrm{g}\right)$$

$$\mathrm{d}Z = \frac{1}{M_\mathrm{g}}\left[(Z-p)\,\mathrm{d}M_\mathrm{g} - Z\,\mathrm{d}M_\mathrm{g}\right]$$

Modelo de "caja cerrada"

$$\begin{aligned} \mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p} &= -p\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} - Z\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{s} \\ &= (Z-p)\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{d}Z &= \mathrm{d}\left(\frac{\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\right) \\ &= \frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}} - \frac{\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}^2}\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} \\ &= \frac{1}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\left(\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p} - \frac{\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}\right) \end{aligned}$$

$$\mathrm{d}Z = \frac{1}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\left(\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p} - Z\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}\right)$$

$$\mathrm{d}Z = \frac{1}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\left[(Z-p)\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} - Z\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}\right]$$

Modelo de "caja cerrada"

$$\begin{aligned} \mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p} &= -p\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} - Z\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{s} \\ &= (Z-p)\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{d}Z &= \mathrm{d}\left(\frac{\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\right) \\ &= \frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}} - \frac{\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}^2}\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} \\ &= \frac{1}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\left(\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p} - \frac{\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}\right) \end{aligned}$$

$$\mathrm{d}Z = \frac{1}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\left(\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p} - Z\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}\right)$$

$$\mathrm{d}Z = \frac{1}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\left[(Z-p)\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} - Z\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}\right]$$

Modelo de "caja cerrada"

$$\begin{aligned} \mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p} &= -p\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} - Z\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{s} \\ &= (Z-p)\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{d}Z &= \mathrm{d}\left(\frac{\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\right) \\ &= \frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}} - \frac{\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}^2}\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} \\ &= \frac{1}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\left(\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p} - \frac{\mathcal{M}_\mathrm{p}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}\right) \end{aligned}$$

$$\mathrm{d}Z = \frac{1}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\left(\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{p} - Z\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}\right)$$

$$\mathrm{d}Z = \frac{1}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\left[(Z-p)\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g} - Z\,\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}\right]$$

Modelo de "caja cerrada"

$$\mathrm{d}Z = -p\,\frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}$$

El cambio en Z es proporcional a la variación relativa en $\mathcal{M}_\mathrm{g}$

Modelo de "caja cerrada"

$$
\begin{aligned}
Z(t) &= \int_0^t \frac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t \\
&= \int_0^t -\frac{p}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t \\
&= -p\int_{\mathcal{M}_\mathrm{g}(0)}^{\mathcal{M}_\mathrm{g}(t)}\frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}} \\
&= -p\left[\ln\left(\mathcal{M}_\mathrm{g}(t)\right) - \ln\left(\mathcal{M}_\mathrm{g}(0)\right)\right] \\
&= -p\,\ln\left[\frac{\mathcal{M}_\mathrm{g}(t)}{\mathcal{M}_\mathrm{g}(0)}\right]
\end{aligned}
$$

$$
\mathcal{M}_\mathrm{g}(t) = \mathcal{M}_\mathrm{g}(0)\,\exp\left(-\frac{Z(t)}{p}\right)
$$

Modelo de "caja cerrada"

$$
\begin{aligned}
Z(t) &= \int_0^t \frac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t \\
&= \int_0^t -\frac{p}{\mathcal{M}_\mathrm{g}}\frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t \\
&= -p\int_{\mathcal{M}_\mathrm{g}(0)}^{\mathcal{M}_\mathrm{g}(t)}\frac{\mathrm{d}\mathcal{M}_\mathrm{g}}{\mathcal{M}_\mathrm{g}} \\
&= -p\left[\ln\left(\mathcal{M}_\mathrm{g}(t)\right) - \ln\left(\mathcal{M}_\mathrm{g}(0)\right)\right] \\
&= -p\,\ln\left[\frac{\mathcal{M}_\mathrm{g}(t)}{\mathcal{M}_\mathrm{g}(0)}\right]
\end{aligned}
$$

$$
\mathcal{M}_\mathrm{g}(t) = \mathcal{M}_\mathrm{g}(0)\,\exp\left(-\frac{Z(t)}{p}\right)
$$

Modelo de "caja cerrada"

$$M_s[< Z(t)] = M_s(t) = M_g(0) - M_g(t) = M_g(0)\left[1 - \exp\left(-\frac{Z(t)}{p}\right)\right]$$

$$\frac{M_s[< \alpha Z(t)]}{M_s[< Z(t)]} = \frac{M_g(0)\left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha Z(t)}{p}\right)\right]}{M_g(0)\left[1 - \exp\left(-\frac{Z(t)}{p}\right)\right]} = \frac{1 - x^\alpha}{1 - x},$$

$$x = \exp\left(-\frac{Z(t)}{p}\right) = \frac{M_g(t)}{M_g(0)}$$

Modelo de "caja cerrada"

$$M_s[< Z(t)] = M_s(t) = M_g(0) - M_g(t) = M_g(0)\left[1 - \exp\left(-\frac{Z(t)}{p}\right)\right]$$

$$\frac{M_s[< \alpha Z(t)]}{M_s[< Z(t)]} = \frac{M_g(0)\left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha Z(t)}{p}\right)\right]}{M_g(0)\left[1 - \exp\left(-\frac{Z(t)}{p}\right)\right]} = \frac{1 - x^\alpha}{1 - x},$$

$$x = \exp\left(-\frac{Z(t)}{p}\right) = \frac{M_g(t)}{M_g(0)}$$

Modelo de "caja cerrada"

Estimación razonable en la vecindad solar: $x \sim 0.1$
Tomando $\alpha = \frac{1}{3}$:

$$\frac{\mathcal{M}_s[< \frac{1}{3}Z]}{\mathcal{M}_s[< Z]} = \frac{1 - 0.1^{\frac{1}{3}}}{1 - 0.1} = 0.6 (\equiv 60\,\%)$$

Valor observado:

$Z < \frac{1}{3} Z_\odot \quad (\sim 2\,\%)$

Modelo de "caja cerrada"

Estimación razonable en la vecindad solar: $x \sim 0.1$
Tomando $\alpha = \frac{1}{3}$:

$$\frac{\mathcal{M}_s[< \frac{1}{3}Z]}{\mathcal{M}_s[< Z]} = \frac{1 - 0.1^{\frac{1}{3}}}{1 - 0.1} = 0.6 (\equiv 60\,\%)$$

Valor observado:

$Z < \frac{1}{3} Z_\odot \quad (\sim 2\,\%)$