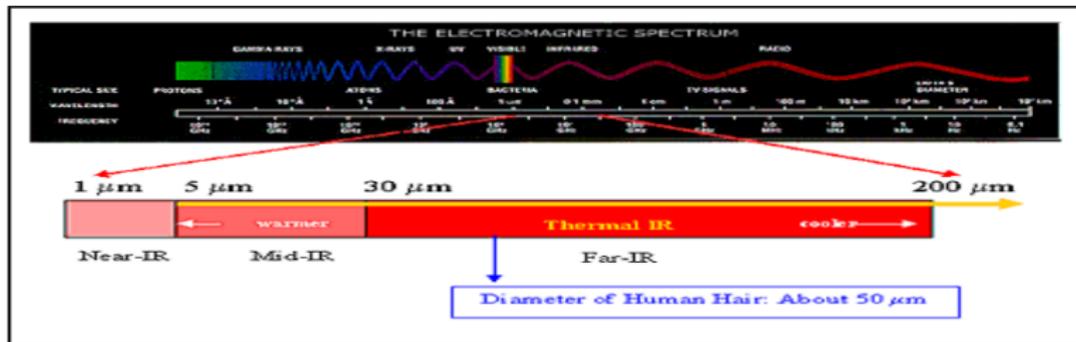


# Polvo interestelar

- **Hasta ahora:**  
propiedades físicas de las **fases gaseosas** del MIE: WIM, HIM, WNM, CNM, RHII y nubes moleculares.
- **Ahora:**  
componente de **estado sólido**: los granos de polvo interestelar.

# Polvo interestelar

## INFRARROJO

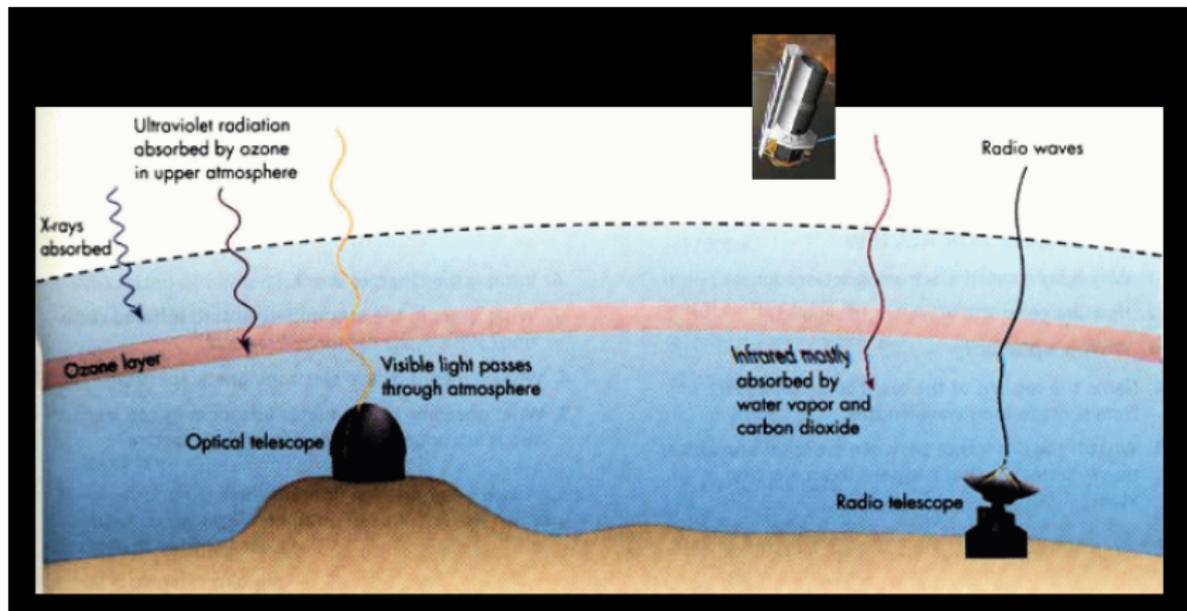


Se divide la zona del IR en 3 rangos:

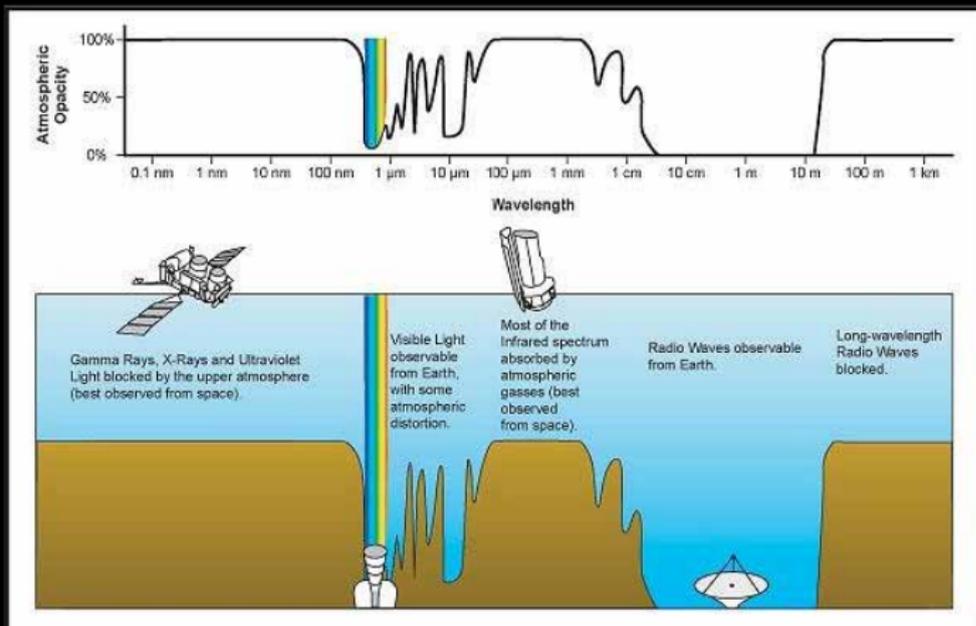
- Infrarrojo cercano - NIR: 1 - 5  $\mu\text{m}$
- Infrarrojo medio - Mid-IR: 5 - 30  $\mu\text{m}$
- Infrarrojo lejano - FIR: 30 - > 200  $\mu\text{m}$

$$\lambda_{\text{pico}} \sim 3000 \left( \frac{5}{5+\beta} \right) \frac{1}{T_d} \mu\text{m}$$

La emisión IR es mayormente absorbida por nuestra atmósfera.



# Infrared astronomical observations



## Observaciones en el IR

- Atenuación debida a bandas moleculares de absorción: H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, y en menor medida O<sub>3</sub> (ozono), CO, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>
- de 30 a 700  $\mu\text{m}$  no se observa desde tierra
- de 1 a 30  $\mu\text{m}$ : observable desde tierra en ciertas ventanas: J (1.25  $\mu\text{m}$ ), H (1.60  $\mu\text{m}$ ), K (2.2  $\mu\text{m}$ ), L (3.6  $\mu\text{m}$ ), M (5  $\mu\text{m}$ ), N (10  $\mu\text{m}$ ) y Q (21  $\mu\text{m}$ ). (GEMINI)

¿Por qué queremos observar en el IR?

**Porque el espacio está lleno de polvo, que emite en el IR**

Polvo: solo el 1 % de la masa del MIE pero su estudio es importante porque **su rol es fundamental en la dinámica y evolución del MIE:**

- Absorbe, dispersa, polariza y reemite la radiación
- Formación de moléculas
- Formación estelar y de planetas
- Calentamiento del gas por efecto fotoeléctrico
- Proteje el gas molecular
- Responsable de la deficiencia en las abundancia de los gases

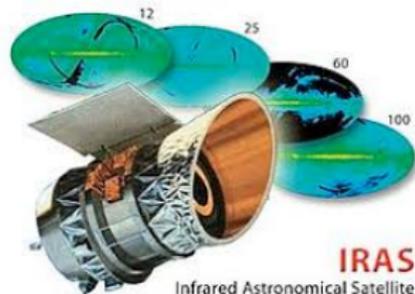
Dust is not only the principle molecule builder, it might also be thought of as one of the principal ingredients of planetary formation, and life.



# Instrumentos para observar en el IR: IRAS

## IRAS: Infrared Astronomical Satellite

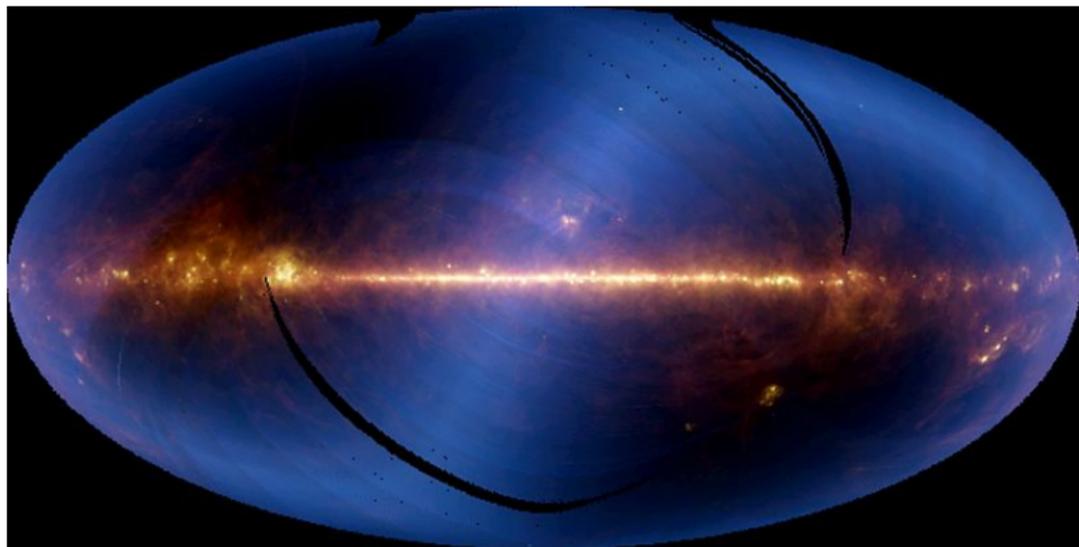
- Bandas: 12, 25, 60 y 100  $\mu\text{m}$
- Activo: 1983 (11 meses)
- Diámetro: 57 cm
- Cobertura: todo el cielo
- Resolución angular:  
2-6 arcmin (HiREs: 1 arcmin)
- Imágenes y catálogos de fuentes puntuales: 350000 fuentes!
- El primer observatorio espacial dedicado a realizar un relevamiento completo del cielo en el rango de longitudes de onda infrarrojas



**IRAS**  
Infrared Astronomical Satellite

<https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/iras.html>

# IRAS

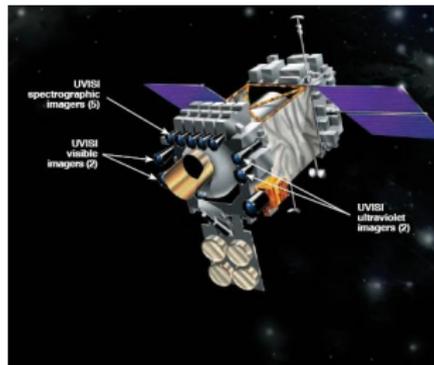


La banda brillante horizontal es el plano de la galaxia, el CG está en el medio. Imagen a tres colores: Azul=  $12 \mu\text{m}$ , verde=  $60 \mu\text{m}$  y rojo=  $100 \mu\text{m}$ . Imagen a los 6 meses de operación.

# Instrumentos para observar en el IR: MSX

MSX: Midcourse Space Experiment  
Diseñado para  
operaciones militares (detección de  
misiles), adaptado para astronomía

- Bandas:
  - A ( $8.28 \mu\text{m}$ )
  - C ( $12.13 \mu\text{m}$ )
  - D ( $14.65 \mu\text{m}$ )
  - E ( $21.3 \mu\text{m}$ )
- Activo: 1996-1997
- Cobertura:  $0 < l < 360, b < 5$
- Resolución angular: 18.3 arcsec
- Imágenes y catálogos de fuentes puntuales



# MSX

## Dusty Environs of Eta Carinae



<https://apod.nasa.gov/apod/ap021010.html>  
the astronomy picture of the day of 10/10/2002

## Instrumentos para observar en el IR: WISE

WISE: Wide-field Infrared Survey Explorer

- 3.4, 4.6, 12, and 22 microns
- Resolución angular: 6 - 12 arcsec
- Mas sensible y mayor resolución que MSX (mejor tecnología y optimizado para ciencia desde el inicio).
- Cobertura: 120 % del cielo
- Activo: 2009-2011  
Fue reactivado en 2013:NeoWISE (asteroides y planetas)
- Imágenes y catálogos



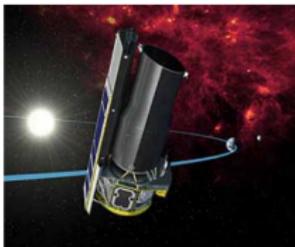
The WISE Catalog of Galactic HII Regions:

<http://astro.phys.wvu.edu/wise/>

# Instrumentos para observar en el IR: Spitzer

## Spitzer Space Telescope

- 2003 - 2020
- Diámetro: 85 cm
- 3 - 180  $\mu\text{m}$
- Instrumentos:
  - Infrared Array Camera (IRAC), bandas centradas en 3.6, 4.5, 5.8 y 8.0  $\mu\text{m}$
  - Infrared Spectrograph (IRS), espectrógrafo de baja y moderada resolución, cubriendo de 5.2 a 38  $\mu\text{m}$
  - Multiband Imaging Photometer (MIPS), bandas centradas en 24, 70, and 160  $\mu\text{m}$



# Spitzer



Star Formation and Dust in the Galactic Plane

NASA / JPL/Caltech / S. Carey (SSC)

Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS

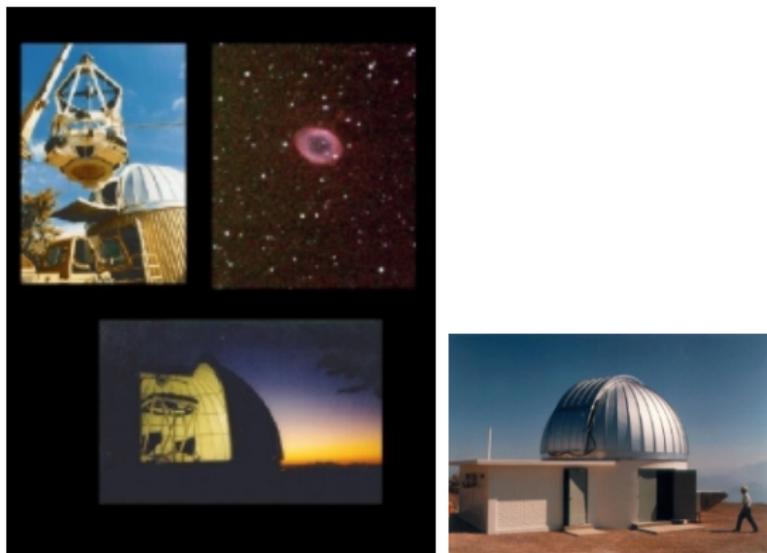
sep2006-20a

## Instrumentos: 2MASS

### 2MASS: Two Micron All Sky Survey

- 1997-2001
- - J-band ( $1.235 \mu\text{m}$ )
- - H-band ( $1.662 \mu\text{m}$ )
- - Ks-band ( $2.159 \mu\text{m}$ )
- todo el cielo
- Resolución  $\sim 2$  arcsec
- 1.3-m telescopes at Mt. Hopkins (USA) and CTIO (Chile)
- Productos:
  - Point Source Catalog (PSC): más de 500 millones de estrellas y galaxias
  - Extended Source Catalog (XSC): 1.6 millones de galaxias
  - Large Galaxy Atlas (LGA)  $\sim 600$  galaxias cercanas y cúmulos globulares
  - All-Sky Quicklook and Atlas images: imágenes de TODO el cielo

## 2MASS



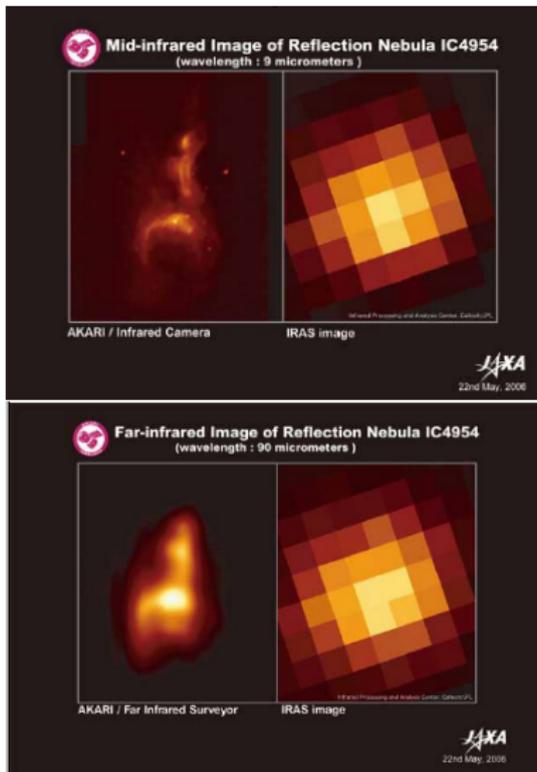
Arriba izq: the Northern 2MASS Telescope. Arriba derecha: imagen a 3 colores de la nebulosa planetaria M57 (primera noche de operación!). Abajo: cúpula del telescopio del norte. Al costado: telescopio del sur: cerro Tololo

## Instrumentos: AKARI



- 1.8-180  $\mu\text{m}$
- lanzado en 2006 (terminó en 2011)
- todo el cielo
- diámetro: 68.5 cm
- Instrumentos:
  - Infrared Camera (IRC): 9 bandas entre 1.8 - 26  $\mu\text{m}$
  - Far-Infrared Survey (FIS): 4 bandas entre 50 - 180  $\mu\text{m}$
- Imágenes y catálogos (millones de fuentes catalogas en Mid-IR y FIR)
- más bandas y mejor resolución que IRAS (arcsec contra arcmin)

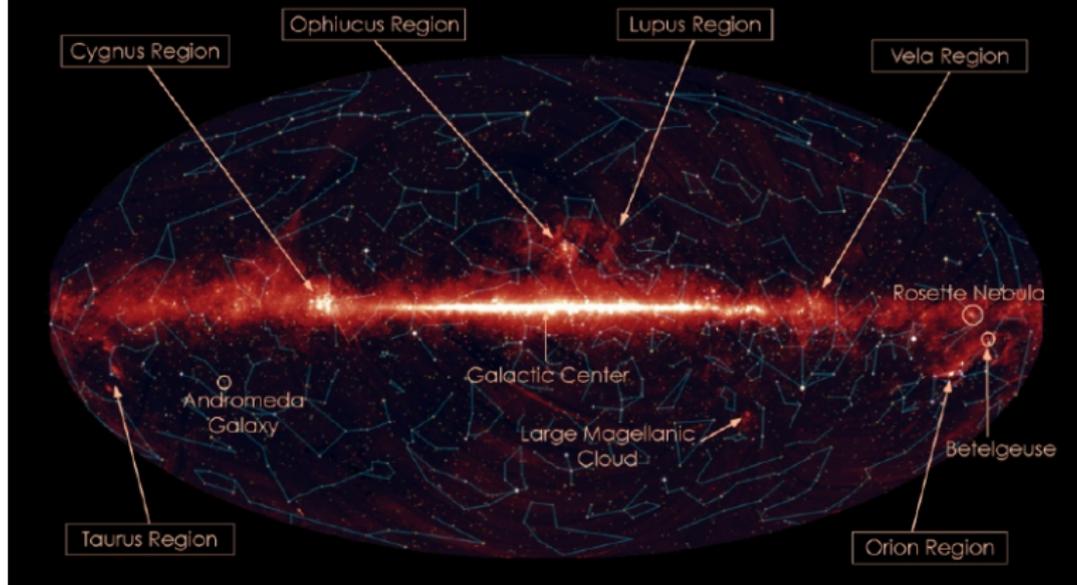
# AKARI



# AKARI

## AKARI All-Sky survey at 9 $\mu\text{m}$

- Emission from the photospheres of stars dominates the 9  $\mu\text{m}$  catalogue: the galactic disc and nuclear bulge are clearly visible at this wavelength



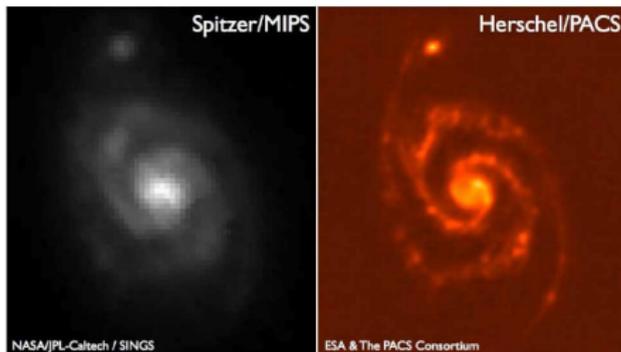
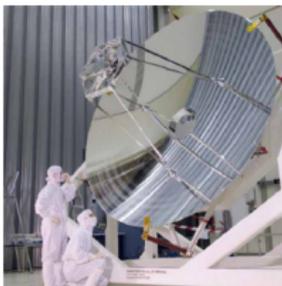
## Instrumentos: Herschel

### Herschel Space Observatory: FIR

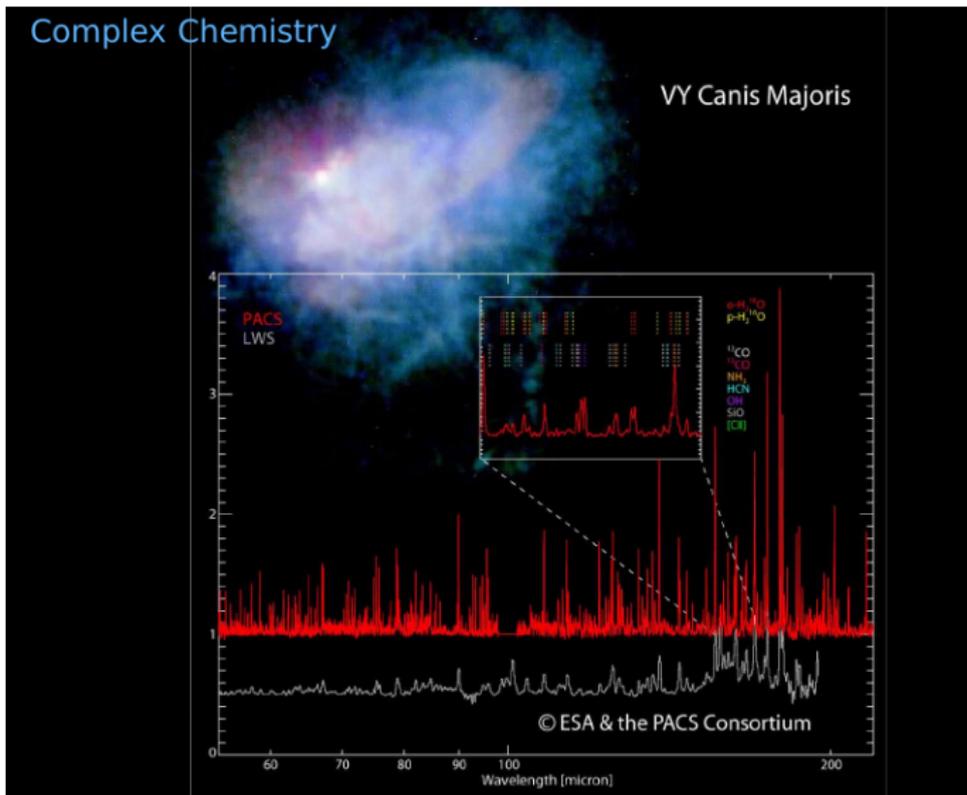
- 14 May 2009 - 29 April 2013
- 55 - 671  $\mu\text{m}$
- Instrumentos:
  - Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS):  
Imágenes a 70, 100 y 160  $\mu\text{m}$ .  
Spectroscopy: 55-210  $\mu\text{m}$ , R=1000-5000
  - Spectral and Photometric Imaging Receiver (SPIRE)  
Imaging: 250, 350, 500  $\mu\text{m}$ .  
Spectrometer: 194-671  $\mu\text{m}$ , R=20-1000
  - Heterodyne Instrument for the Far Infrared (HIFI) 1.9-0.49 THz (157 - 625  $\mu\text{m}$ ); R=1e6-1e7
- Catálogo de fuentes puntuales  
(<https://irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Gator/nph-scan?submit=Selectprojshort=HERSCHEL>)

# Herschel

Espejo de 3.5 m!! el más grande lanzado al espacio (hasta la llegada del James Webb): sensibilidad y resolución

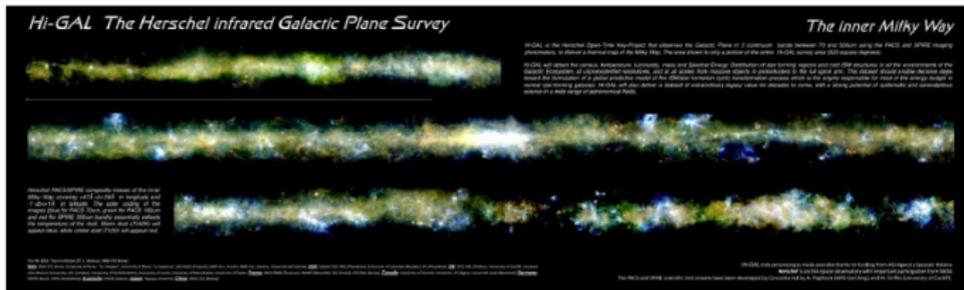


# Herschel



# Herschel

## HiGAL: Map of the Galactic Plane



- **Bandas observadas:** 70, 160, 250, 350 y 500  $\mu\text{m}$
- **Cobertura:**  $\pm 1^\circ$  en latitud galáctica, a lo largo de todo el plano galáctico ( $360^\circ$  en longitud).
- **Objetivo:** estudiar la formación estelar, el contenido de polvo frío, las nubes moleculares y la estructura del medio

# Instrumentos: SOFIA

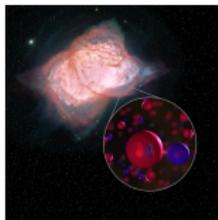
## Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA)

- Boeing 747SP (vuela a una altura de 11 a 13 kilómetros )
- telescopio reflector de 2.5 m
- 0.35 - 655  $\mu\text{m}$
- 25 May 2010 - sept 2022 (?)



# SOFIA

**Figura:** Scientists on the airborne observatory SOFIA detected the first type of molecule that ever formed in the universe. They found the combination of helium and hydrogen, called helium hydride (hidruro de helio,  $\text{HeH}^+$ ), in a planetary nebula near the constellation Cygnus. This discovery confirms a key part of our basic understanding of the early universe and how it evolved over billions of years into the complex chemistry of today.



<https://www.sofia.usra.edu/multimedia/science-results-archive/first-astrophysical-detection-very-special-molecule>  
<https://youtu.be/rRVpyiXvV9g>

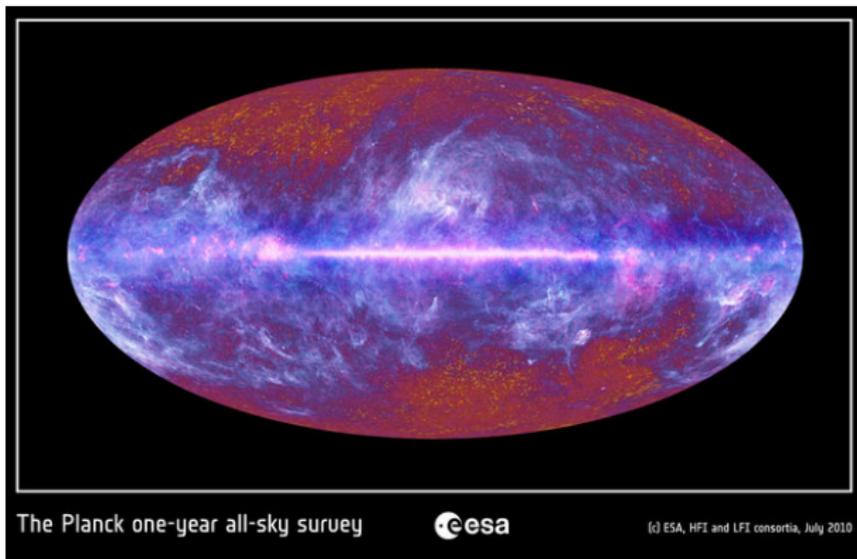
## Instrumentos: PLANCK

- FIR
- Objetivo: mejorar los datos de COBE (Cosmic Background Explorer) y WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe): resolución: 3 veces mejor, sensibilidad: 10 veces mejor, mayor cobertura en longitud de onda
- Opera en 9 frecuencias: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 y 857 GHz (350  $\mu\text{m}$  - 1 cm)
- Resolución espacial: 32.3, 27, 13.2, 9.7, 7.3, 5, 4.9, 4.8, 4.6 arcmin
- todo el cielo



# PLANCK

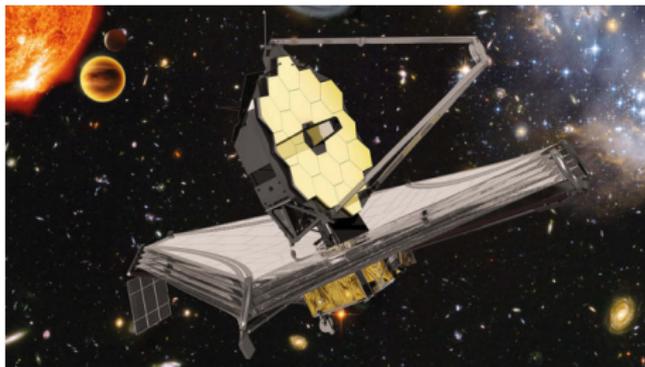
Planck desvela el mapa más completo del Universo



El fondo moteado de la imagen presenta la 'radiación cósmica de fondo en microondas' (CRMB), la luz más antigua del Cosmos.

# The James Webb Space Telescope

The James Webb Space Telescope: 31 de octubre de 2021

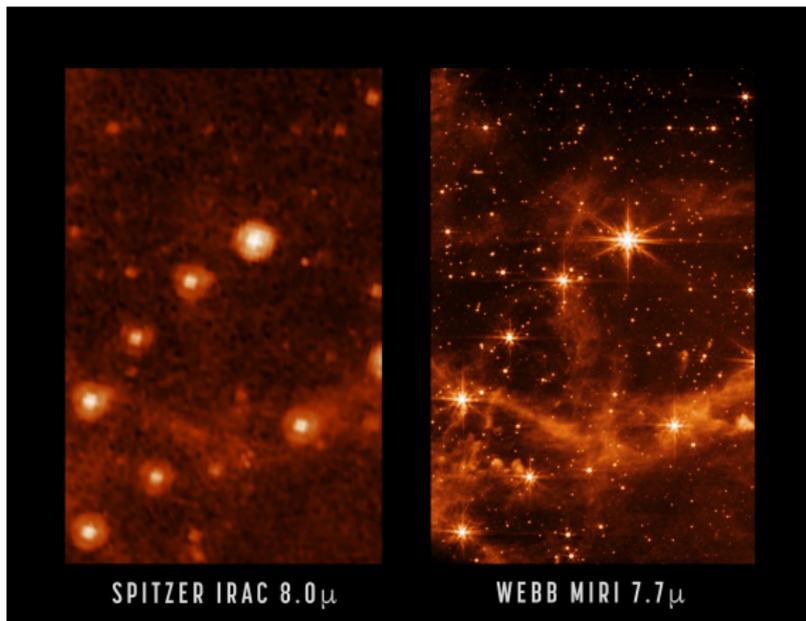


Muy grande: 6.5 m! espejo primario con un area 7 veces más grande que el Hubble → sensibilidad!!!  
Combina imágenes de excelente calidad, con un gran campo de vista y con una baja emisión de fondo.

:-)



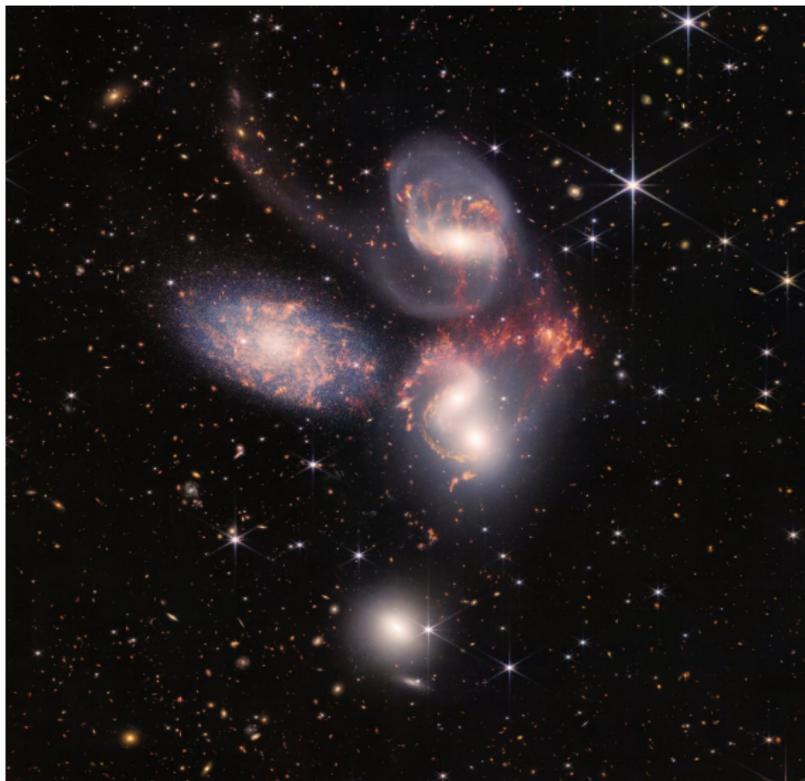
## James Webb Telescope



Webb's image, taken by its MIRI instrument, features light from "polycyclic aromatic hydrocarbons." These molecules of carbon hydrogen help us better understand the gas that exists between stars.

# James Webb Telescope: Quinteto de Stephan

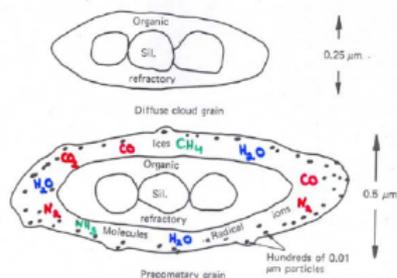
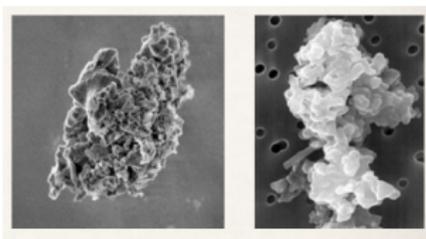
Grupo de galaxias compacto



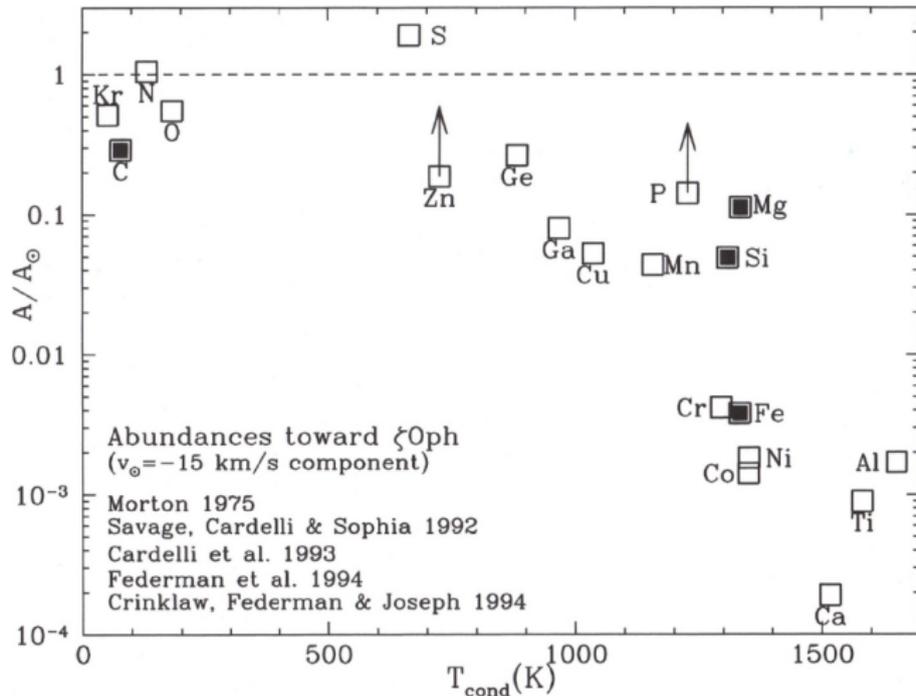
# Estructura de los granos

Los granos de polvo están compuestos por:

- núcleos de elementos refractarios: principalmente silicatos (compuestos con Si, O, Mg, Fe y Al) , carbono amorfo y grafitos, que condensan a  $T_C \sim 1000$  K (resistentes a altas temp.)
- Las especies gaseosas se condensan en los granos dentro de nubes frías y densas y forman los mantos de hielo ("ice mantles"). Se forma un manto de hielo de elementos volátiles ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ...) condensados en sus superficies.  $T_C \sim 100$  K.



# Depletion



Draine §23: C, Mg, Si, Fe, - major grain constituents  
- depleted in gas phase

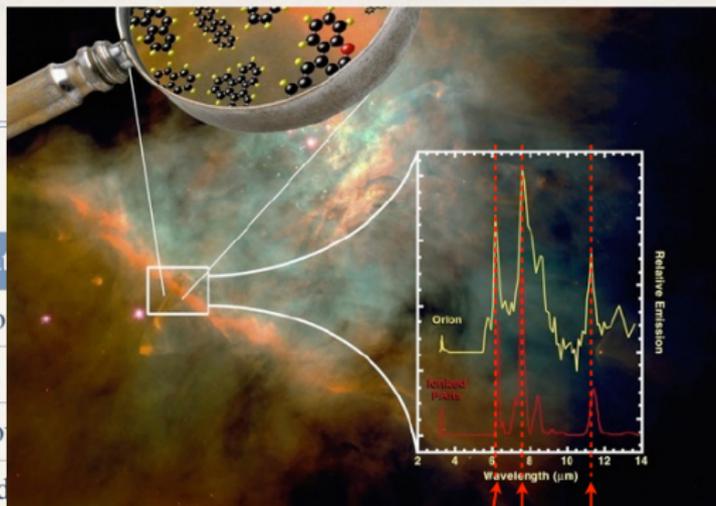
- Observacionalmente, se ha determinado que el polvo no se forma en el MIE, sino que se origina principalmente en los vientos estelares fríos de la rama asintótica gigante (AGB), estrellas gigantes rojas y nebulosas planetarias.
- En estos ambientes, se dan las condiciones necesarias de densidad ( $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ) y temperatura (1000 - 2000 K) para que los elementos pesados condensen y sean luego inyectados al MIE a través del viento estelar.
- **Diferentes tipos de vientos forman distintos tipos de polvo**

Component	Region of formation	Spectral signature
Silicates	O-rich giants, novae	9.7 and 18 $\mu\text{m}$ bands
Graphite ( $a < 200 \text{ \AA}$ )	C-rich giants	2175 $\text{\AA}$ bump
Amorphous carbon	C-rich giants, novae	Absorption at 7.6 $\mu\text{m}$
SiC	C-rich giants and novae	Emission at 11.4 $\mu\text{m}$
MgS	C-rich giants and planetary nebulae	Emission at 30 $\mu\text{m}$
PAHs	C-rich planetary nebulae	Emission at 3.3, 6.2, 7.7, 11.3 $\mu\text{m}$
Ice mantles	Molecular clouds	Absorption at 3.1, 4.6, 6.0, 6.85 $\mu\text{m}$
Refractory organic mantles	ISM	Absorption at 3.4 et 6.0 $\mu\text{m}$

# Summary

## Dust composition

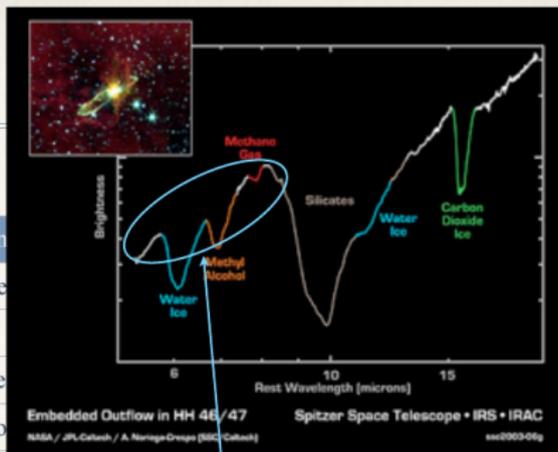
Component	Region of formation	
Silicates	O-rich giants, no	
Graphite ( $a < 200 \text{ \AA}$ )	C-rich giants	
Amorphous carbon	C-rich giants, no	
SiC	C-rich giants and	
MgS	C-rich giants and planetary nebulae	Emission at $30 \text{ \mu m}$
PAHs	C-rich planetary nebulae	Emission at $3.3, 6.2, 7.7, 11.3 \text{ \mu m}$
Ice mantles	Molecular clouds	Absorption at $3.1, 4.6, 6.0, 6.85 \text{ \mu m}$
Refractory organic mantles	ISM	Absorption at $3.4$ et $6.0 \text{ \mu m}$



# Summary

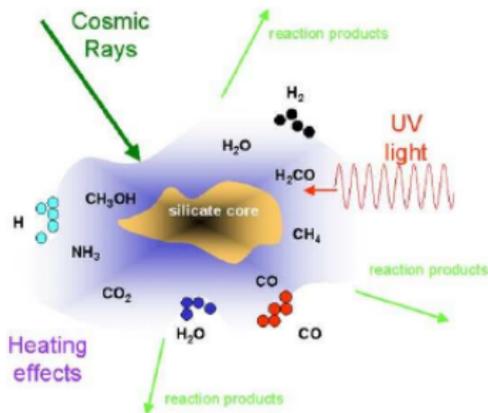
## Dust composition

Component	Region of formation	
Silicates	O-rich giants, novae	
Graphite ( $a < 200 \text{ \AA}$ )	C-rich giants	
Amorphous carbon	C-rich giants, novae	
SiC	C-rich giants and novae	
MgS	C-rich giants and planetary nebulae	Emission at $30 \mu\text{m}$
PAHs	C-rich planetary nebulae	Emission at $3.3, 6.2, 7.7, 11.3 \mu\text{m}$
Ice mantles	Molecular clouds	Absorption at $3.1, 4.6, 6.0, 6.85 \mu\text{m}$
Refractory organic mantles	ISM	Absorption at $3.4$ et $6.0 \mu\text{m}$



las moléculas congeladas sobre granos (HO, CO, etc.) absorben en bandas en el IR.

- A medida que el viento avanza  $\rightarrow$  la densidad decrece  $\rightarrow$  la condensación se detiene y nuevos granos son expulsados al MIE por presión de radiación.
- Una vez en el MIE: muchos procesos hacen que crezcan o se destruyan: acreción con átomos, iones o moléculas, colisiones grano-grano que puede llevar a la formación de granos más grandes o a la evaporación, foto-erosión por radiación UV, destrucción por frentes de choque.



# Polvo interestelar

Granos de polvo: tamaños desde nanómetros a micrómetros, bien mezclados con el gas.

La presencia de granos de polvo en el MIE se evidencia de dos maneras:

## 1. Interacción con la radiación:

- Extinción: absorción y dispersión de la luz estelar
- Reflexión (nebulosas de reflexión)
- Polarización

## 2. Emisión de los granos: La energía absorbida por los granos eleva su temperatura, y reemiten en el IR.

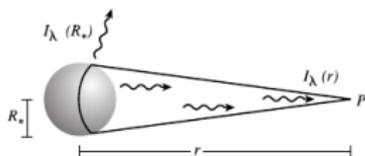
- Emisión térmica del continuo:
  - + en el MIR-FIR por granos en equilibrio radiativo
  - + en el NIR-MIR: por pequeños granos que no están en eq. térmico (se calientan estocásticamente)

## Extinción = absorción + dispersión

- Es una de las manifestaciones más evidentes: nubes oscuras y enrojecimiento.
- Depende de la forma, composición y distribución de los granos, y de  $\lambda$

Ecuación de transporte considerando SOLO absorción:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda,0} e^{-\tau_{\lambda}}$$



$$m_{\text{obs},\lambda} = m_{0,\lambda} + A_{\lambda}$$

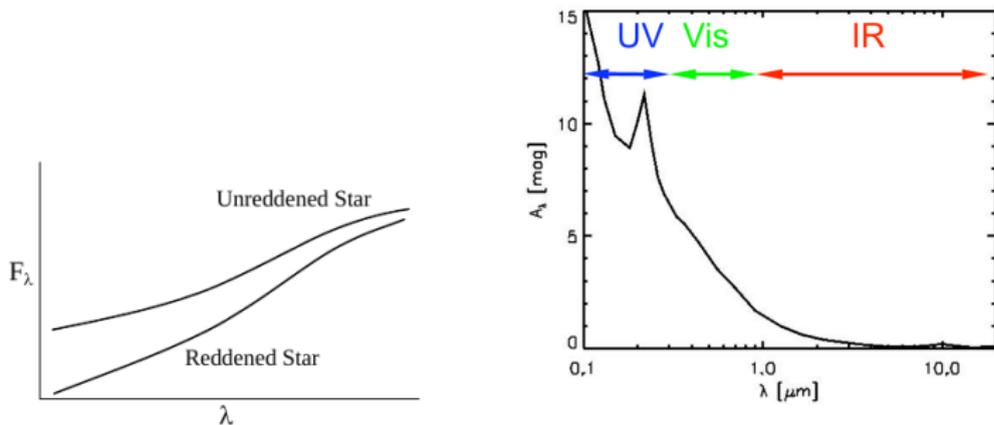
$$\Rightarrow A_{\lambda} = m_{\text{obs}} - m_0 = -2.5 \log \left( \frac{I_{\text{obs}}}{I_0} \right)$$

$$A_{\lambda} = -2.5 \log(e^{-\tau_{\text{ext}}(\lambda)}) = \underbrace{2.5 \log(e)}_{=1.086} \times \tau_{\text{ext}}(\lambda)$$

$$A_{\lambda} = 1.086 \tau_{\text{ext}}(\lambda)$$

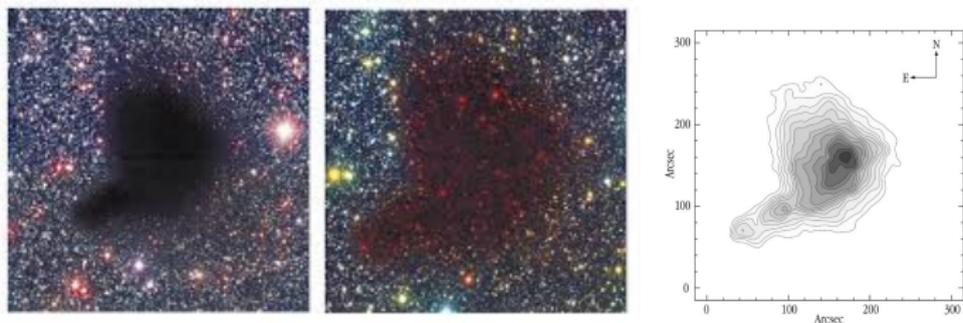
## Curva de extinción interestelar

Muestra cómo el polvo absorbe y dispersa la luz según la longitud de onda



- Se obtiene **empíricamente** de comparar espectros de dos estrellas iguales en TE y luminosidad, una afectada por absorción y otra no (similar LOS)
- El azul tiene más extinción que el rojo: enrojecimiento
- Depende de la LOS (line of sight)

## Nube oscura B68



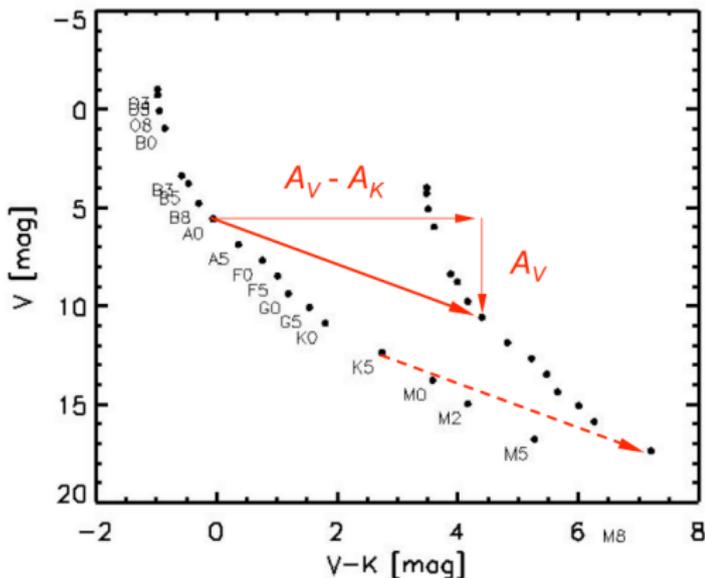
Izq.: visible and NIR: B (blue), V (green) y I (red). Nube opaca con algunas pocas estrellas enrojecidas en los bordes.

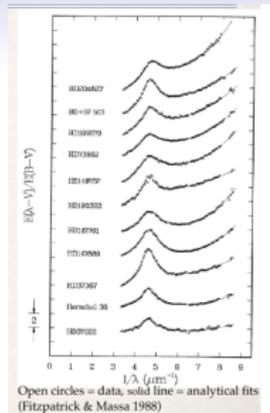
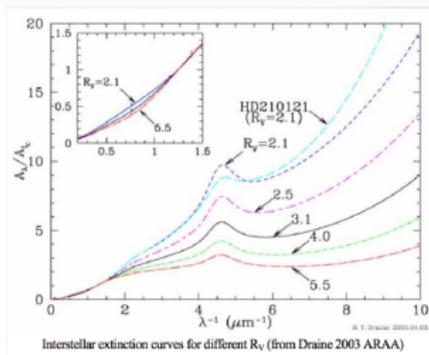
Centro: NIR: J (blue), H (green), K (red). La extinción es mucho menor que en el visible y se ven las estrellas, especialmente en la banda K.

Derecha: mapa de extinción obtenida a partir de fotometría de las estrellas. Contorno externo:  $A_V = 4$  mag, en el centro,  $A_V = 35$  mag.

## Vector de enrojecimiento

- Cluster at 100 pc
  - $A_V = 5$  mag.
  - $A_K = 0.54$  mag.
  - $A_V - A_K = 4.46$





- Las observaciones muestran que la ley de extinción puede caracterizarse por un parámetro libre:  $R_V$ .  
Se define:  $R_V = \frac{A_V}{E(B-V)}$ .
- el valor de  $R_V$  depende de la composición y tamaños de los granos, o sea, del MIE que atraviesa la LOS  
Observacionalmente  $R_V$  entre 2 y 6 pero se adopta:  
 $R_V = 3,1$  para el MIE difuso  
 $R_V = 5$  para nubes densas (moleculares)
- $R_V$  es una medida de la pendiente de la curva, para  $R_V \rightarrow \infty$  la curva se hace plana: para toda  $\lambda$  la ext es =

La curva tiene saltos de emisión o absorción debido a componentes de los granos.

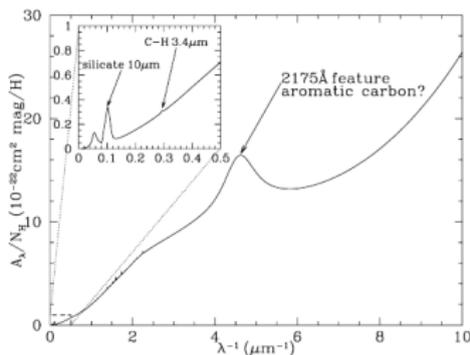
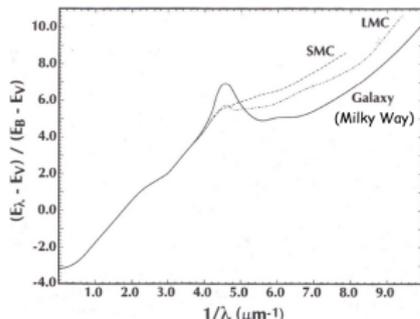


Figure 21.1 Extinction versus inverse wavelength  $\lambda^{-1}$  on a typical sightline in the local diffuse ISM. The inset shows the extinction at  $\lambda > 2 \mu\text{m}$ .



- + El 'bump' en el UV a  $2175 \text{ \AA}$  es el más intenso. Aún los modelos no pueden reproducir bien las observaciones. Se atribuye a partículas ricas en Carbono. Tiene una fuerte dependencia con la metalicidad: débil en LMC (metalicidad 50 % la solar), ausente en SMC (metalicidad 10 % la solar)-
- + en Mid-IR: dos más intensas, debido a silicatos

# Extinción y densidad de columna de HI

- La absorción  $A_V$  en una dada dirección está estrechamente relacionada con la densidad de columna total del HI en esa dirección (relación gas-polvo!)
- Observaciones de la línea de absorción del HI Ly $\alpha$  y de las bandas Lyman-Werner del H $_2$  en el UV, muestran que, en promedio (e.g. Rachford et al. 2002):

$$N(\text{H})/E(\text{B-V}) = 5,8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}.$$

- Para nubes difusas,  $R=3.1 \implies$

$$N(\text{H}) = 1.9 \times 10^{21} A_V \text{ cm}^{-2}$$

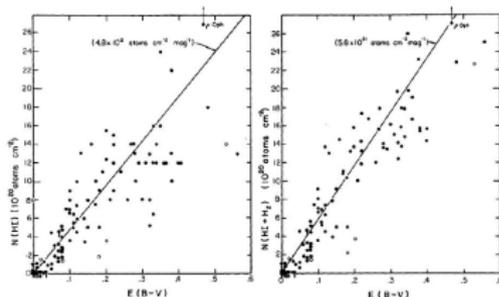


Figure 2 Correlations between gas column densities and interstellar reddening for 100 stars from the Copernicus atomic and molecular hydrogen survey (Savage et al. 1977, Bohlin, Savage & Drake 1978): (a) shows the atomic hydrogen column density,  $N(\text{HI})$ , versus  $E(\text{B-V})$ , (b) shows the total hydrogen column density,  $N(\text{HI} + \text{H}_2) = N(\text{HI}) + 2N(\text{H}_2)$ , versus  $E(\text{B-V})$ . Be stars are denoted with the open symbols. The solid line in (a) gives the average atomic hydrogen to  $E(\text{B-V})$  ratio  $4.8 \times 10^{21}$  atoms  $\text{cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}$ . In (b) the solid line gives the average total hydrogen to  $E(\text{B-V})$  ratio of  $5.8 \times 10^{21}$  atoms  $\text{cm}^{-2} \text{ mag}^{-1}$ . The point for  $\rho$  Oph in (a) and (b) should be moved upward by about a factor of 2.7.

## Extinción interestelar

- $Q_{ext}$ : eficiencia de extinción, puede dividirse en dos términos:

$$Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{sca}$$

- $Q_{abs}$  = eficiencia de absorción (fracción de radiación absorbida)

- $Q_{sca}$  = eficiencia de dispersión (fracción de radiación dispersada)

- se define albedo como:  $W = \frac{Q_{sca}}{Q_{ext}}$   
→ un grano que sólo dispersa tendrá  $W = 1$  y uno que sólo absorbe  $W = 0$ .
- Para partículas 'icy':  $Q_{sca} \gg Q_{abs}$  en el óptico y el UV, PERO  $Q_{abs} \neq 0$  → aún los granos más dispersores absorben algo de la radiación incidente y elevan su temperatura → emiten al menos algo de emisión térmica, sobretodo en el IR

## Emisión del polvo interestelar

- Los granos de polvo, además de afectar la radiación, emiten. Ley de Kirchoff: los cuerpos que son buenos absorbentes también son buenos radiadores
- En general la temperatura de equilibrio de los granos es de 30-50 K  $\rightarrow$  radían predominantemente en el FIR, a  $\lambda = 50 - 100\mu\text{m}$
- **Los granos NO emiten como cuerpos negros** pero radían como cuerpos negros modificados, con una fuerte dependencia de la emisividad con  $\lambda$ . Son ineficientes emitiendo a largas longitudes de onda, con una eficiencia de emisión:  
$$Q_{em} \propto \lambda^{-\beta}, \beta = 1 - 2$$
Para describir la emisión de los granos de polvo de manera más realista, se suele usar un modelo de emisión modificada.  
$$I(\lambda) = B(\lambda, T) \lambda^{-\beta}$$

## Calentamiento y enfriamiento de granos

- Los granos pueden ser calentados por:
  - **Absorción de un fotón de la radiación estelar**
  - Colisión con átomos, electrones, rayos cósmicos u otros granos de polvo
  - Absorción de energía generada por reacciones químicas en su superficie (e.g. formación de H<sub>2</sub>)

El calentamiento radiativo domina dada la alta densidad de energía de la radiación estelar ( $\sim 0,5 \text{ eV cm}^{-3}$ ) y la alta opacidad del grano a la luz estelar.

- Una vez calentados, se enfrían:
  - **Emitiendo un fotón (Planck modificada)**
  - Colisión con átomos fríos o moléculas
  - Eyección (sublimación) de átomos o moléculas de su superficie

Bajo las condiciones del MIE, el enfriamiento radiativo es el dominante.

## Granos grandes en equilibrio térmico

- Consideremos a los granos como esferas de radio  $a$ .  
La potencia **absorbida** por el grano es:

$$W_{abs} = \pi a^2 \int \frac{L_\nu}{4\pi d^2} Q_{abs}(\nu) d\nu$$

$Q_{abs}(\lambda)$  es el coeficiente de absorción del granito

$\frac{L_\nu}{4\pi d^2}$  es el flujo por unidad de frecuencia de una estrella a una distancia  $d$

$\pi a^2$ : sección eficaz geométrica del granito

- La potencia **radiada** por el grano es:

$$W_{rad} = 4\pi a^2 \int Q_{em}(\nu) \pi B_\nu(T_d) d\nu$$

$Q_{em}(\nu)$  es el coeficiente de emisión del granito (la "emisividad")

$4\pi a^2$  es la superficie del granito

$Q_{em}(\nu)B_\nu(T_d)$  es la Planckiana para una temperatura  $T_d$  modificada por el coef de emisión

## Equilibrio térmico

- $W_{abs} = W_{rad} \implies$

$$\pi a^2 \int \frac{L_\nu}{4\pi d^2} Q_{abs}(\nu) d\nu = 4\pi a^2 \int Q_{em}(\nu) \pi B_\nu(T_d) d\nu$$

- La absorción se produce mayormente en el UV
- La emisión se produce en el IR
- Definimos valores medios para las eficiencias de absorción y emisión:  $\langle Q_{UV} \rangle$  y  $\langle Q_{IR} \rangle$
- La ec. de eq. térmico queda:

$$\frac{L_*}{4\pi d^2} \langle Q_{UV} \rangle \approx 4 \langle Q_{IR} \rangle \sigma T_d^4$$

donde  $\sigma$  es la cte de Stefan-Boltzmann  
 $\implies$  si conozco  $Q_\nu$  puedo obtener  $T_d$

## Temperatura del polvo

Entonces:

$$T_d = \left( \frac{\langle Q_{UV} \rangle}{\langle Q_{IR} \rangle} \right)^{1/4} \left( \frac{L_*}{16\pi\sigma d^2} \right)^{1/4}$$

como era de esperar, la temperatura del grano es más baja cuanto más lejos esté de la estrella.

- En el FIR,  $a \ll \lambda \rightarrow Q_{FIR} \propto \lambda^{-\beta}$   
 $\beta$  es un índice que depende de la composición del grano.  
 $\beta = 2$  para materiales refractarios como los metales y el grafito,  $\beta = 1$  para absorbentes débiles como el carbono amorfo, y  $\beta = 1,5$  para silicatos.
- El polvo absorbe mucho en el UV y en el visible  
 $\rightarrow Q_{UV} \sim 1$ , es una buena aprox. para los granos grandes que tienen tamaños similares a la  $\lambda$  en el UV.

## Temperatura del polvo

$T_d$  depende de la ubicación del grano en la Galaxia, del ISRF (Interstellar radiation field) :

- Cerca (0.5 pc) de una estrella con  $T_{eff} = 40000$  K (O6),  $T_d = 650$  K.
- Granos en el MIE difuso,  $T_d = 18,8$  K (grafitos) y  $T_d = 15,4$  K (silicatos)
- Adentro de nubes densas su valor baja mucho,  $T_d \sim 10$  K.

## Temperatura del polvo

La longitud de onda para la cual el espectro tiene su pico está dado por (análogo a la ley de Wien)

$$\lambda_{pico} \sim 3000 \left( \frac{5}{5+\beta} \right) \frac{1}{T_d} \mu\text{m}$$

$$\text{para } \beta \text{ entre 1 y 2} \longrightarrow \lambda_{pico} \sim 2300 / T_d \mu\text{m}$$

- nubes sin fuente de calentamiento interna:  $T_d \leq 10 \text{ K}$   
 $\longrightarrow \lambda_{pico} \geq 200 \mu\text{m}$
- en las capas externas de la nube, polvo más tibio,  $T_d \sim 23 \text{ K}$   
 $\longrightarrow \lambda_{pico} \sim 100 \mu\text{m}$

El polvo más frío emite en las longitudes de onda más largas.

## Temperatura de color del polvo

- Se obtiene a partir de la densidad de flujo estimada en dos o mas (SED)  $\lambda$  distintas.

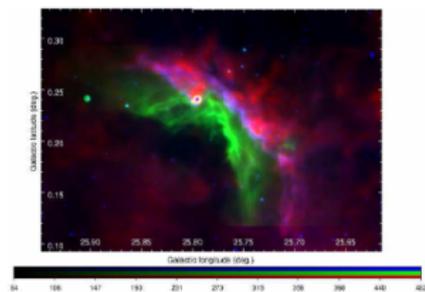
Tenemos  $N$  granos de radio  $a$

$$F_{\lambda} = N \left( \frac{\pi a^2}{d^2} \right) Q_{\lambda} B_{\lambda}(T_d) \quad \text{y} \quad B_{\lambda}(T_d) = \frac{2hc^2/\lambda^5}{e^{(hc/\lambda k T_d)} - 1}$$

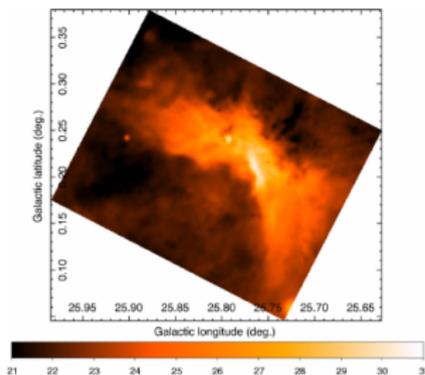
$$\frac{F_{\lambda_1}}{F_{\lambda_2}} = \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{3+\beta} \left( \frac{e^{(hc/\lambda_2 k T_d)} - 1}{e^{(hc/\lambda_1 k T_d)} - 1} \right)$$

- Los flujos se obtienen de las imágenes a dos o mas frecuencias (igual resolución angular, hay que medir el mismo área en las imágenes)
- Suele usarse 60 y 100  $\mu\text{m}$  de IRAS ó datos de Herschel.
- A partir de las dos imágenes se puede obtener una imagen de la distribución de  $T_d$

# Un ejemplo: Región HII G25

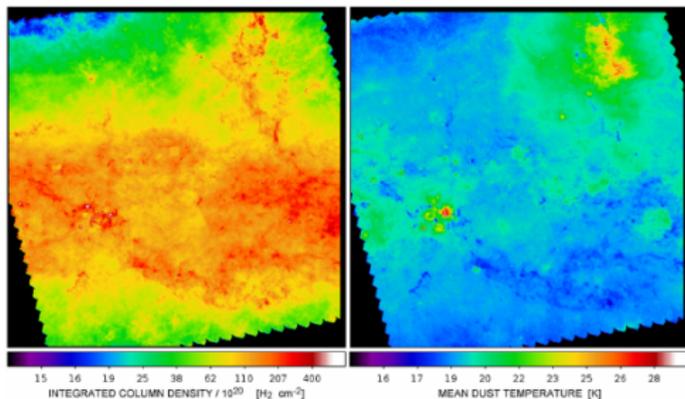


**Figure 5.** RGB image of G25.8700+0.1350 and surroundings. Red: Emission at 250  $\mu\text{m}$  (*Herschel*). Green: Emission at 24  $\mu\text{m}$  (*Spitzer*). Blue: Emission at 8  $\mu\text{m}$  (*Spitzer*).



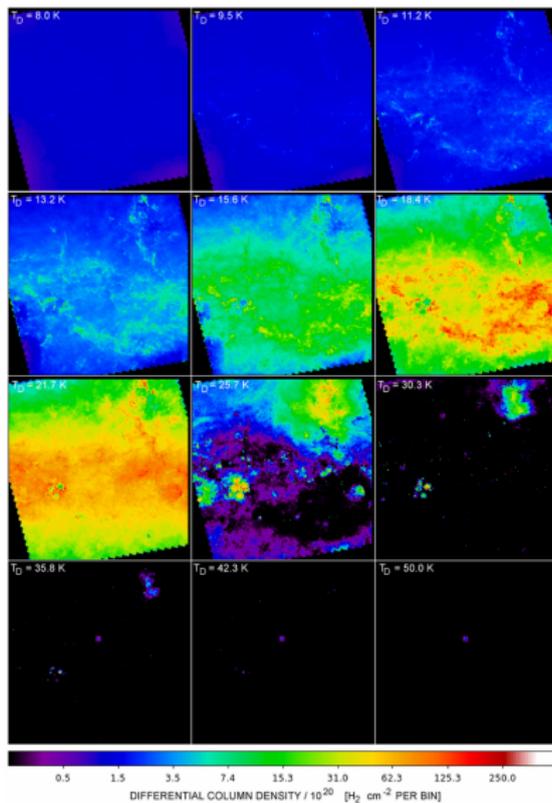
**Figure 6.** Colour temperature map based on emission at 70 and 160  $\mu\text{m}$ . Colour bar units are expressed in kelvin.

- Marsh+ 2017 (MNRAS 471): Multitemperature mapping of dust structures throughout the Galactic Plane using the PPMAP tool with Herschel Hi-GAL data
- Usaron datos de Herschel para obtener mapas de temperaturas y de densidad de columna de  $H_2$  del plano galáctico



**Figure 3.** Maps of integrated column density and mean dust temperature for the  $\ell \simeq 17^\circ$  Hi-GAL tile, derived from the PPMAP image cube shown in Fig. 1. The peak column density is  $5.3 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ , although the display scale is truncated at  $8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  to improve the visibility of low-level features.

Hicieron cubos de densidad de columna diferenciada por  $T_D$ !



**Figure 1.** Maps of differential column density, generated by PPMAP, for the  $2.4' \times 2.4'$  field of the H-GAL tile centred on Galactic longitude  $l \approx 17'$ . The field contains the Eagle Nebula (M16), located in the upper right-hand quadrant. The corresponding dust temperature is specified at the top left of each panel – it represents the midpoint of a finite temperature interval or 'bin' as defined in the text.

## Granos de polvo pequeños

- Granos muy pequeños: compuestos por menos de 100 átomos  
→ su calentamiento debido a la absorción de fotones UV depende del tiempo → NO están en equilibrio térmico.
- La energía necesaria para calentar un objeto (sólido, líquido, gas) una cantidad  $\Delta T$ :  $E = C_V \Delta T$ ,  $C_V = 3Nk$  (capacidad calorífica)
- El aumento en la temperatura de un grano compuesto por  $N$  átomos, debido al impacto de un fotón con energía  $h\nu$  es:  
$$\Delta T \sim \frac{h\nu}{3Nk}$$
  
⇒ los granos más grandes elevan poco su temperatura  
⇒ en el caso de los granos pequeños, la energía impartida por el fotón puede ser mayor que la capacidad calorífica interna del grano de absorber la energía y el aumento instantáneo de temperatura es MUY grande, del orden de 1000 K

## Granos de polvo pequeños

- Cuanto más chico es el grano, más rápido se enfría → pasa muy poco tiempo con temperatura alta
- Se calienta bruscamente y se enfría muy rápido. El tiempo de enfriamiento es mucho menor que el tiempo entre dos absorciones, el polvo nunca llega al equilibrio con el campo de radiación → se dice que están calentados 'estocásticamente'
- Granos grandes, temp menores (30-50 K): FIR  
Granos pequeños: mayor temperatura (500-1000 K):  
NIR-Mid-IR

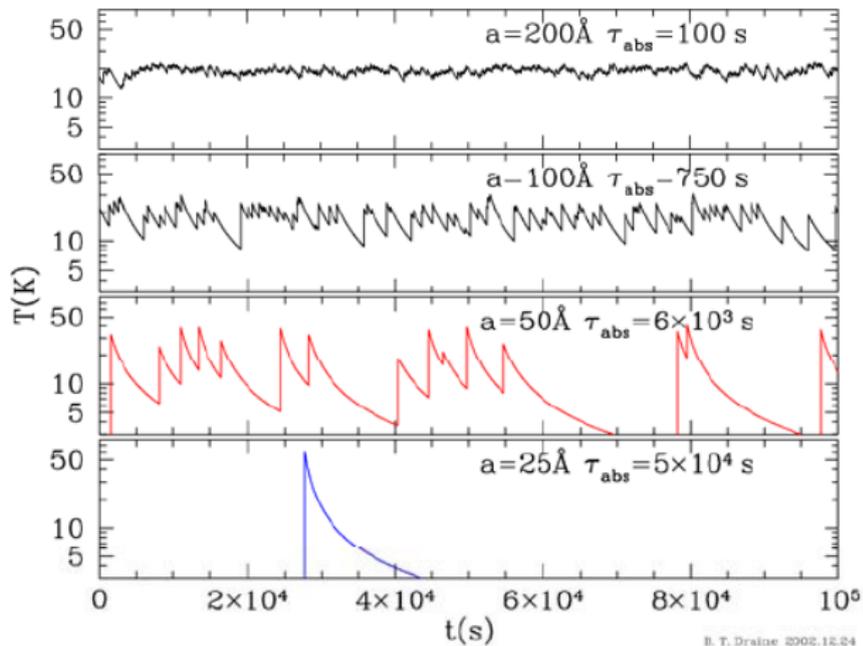
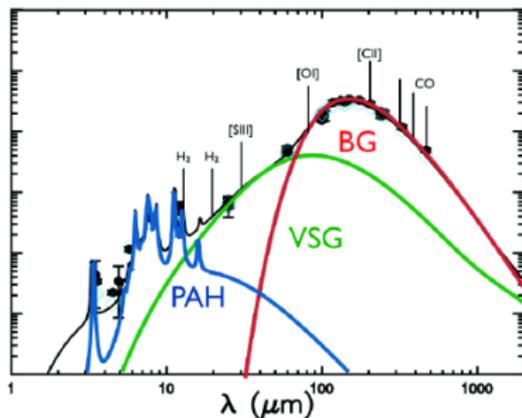


Figure 13: A day in the life of 4 carbonaceous grains, heated by the local interstellar radiation field.  $\tau_{\text{abs}}$  is the mean time between photon absorptions (Draine & Li 2001).

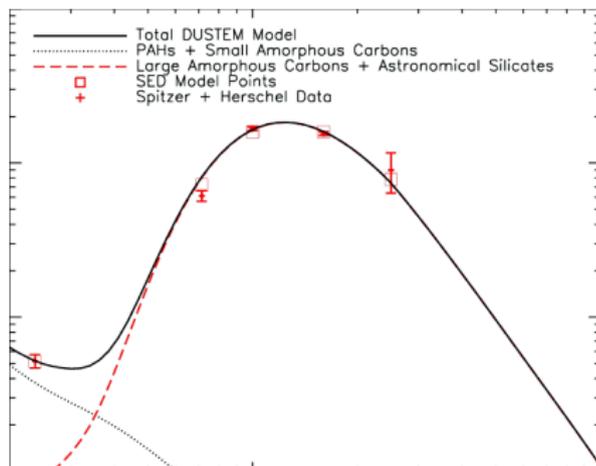
Un modelo simplificado para la emisión infrarroja incluye las siguientes componentes :

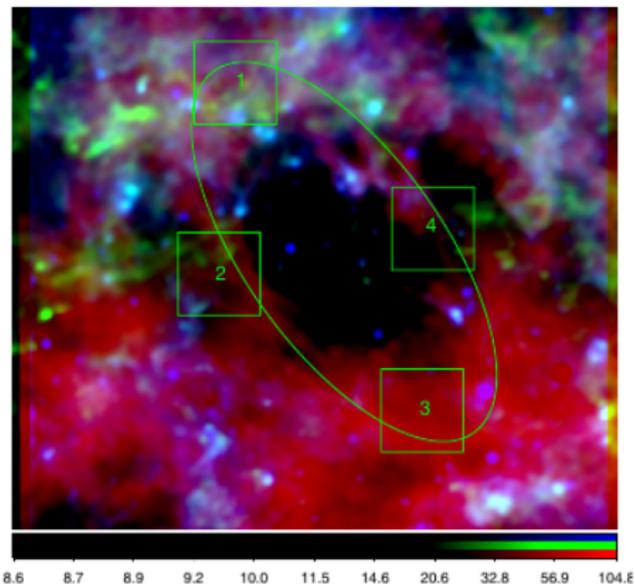
- Granos grandes (BG) (  $100 \text{ \AA}$  ) en equilibrio con el campo de radiación, que dominan la emisión en el infrarrojo lejano ( $\lambda > 100 \mu\text{m}$ )
- Granos muy pequeños (VSG) ( $20 - 30 \text{ \AA}$ ) fuera del equilibrio y calentados en forma estocástica, con emisión intensa entre  $30$  y  $80 \mu\text{m}$
- Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), responsables de la emisión en el infrarrojo cercano y medio.



# SEDs

- Cuando se tienen imágenes de varias bandas del IR, se estiman los flujos y se obtiene la distribución espectral de energías: SED
- Ajustando modelos sobre polvo (composición, distribución, ISRF, tamaño, masa, temperatura, etc) se obtienen los parámetros de la región.

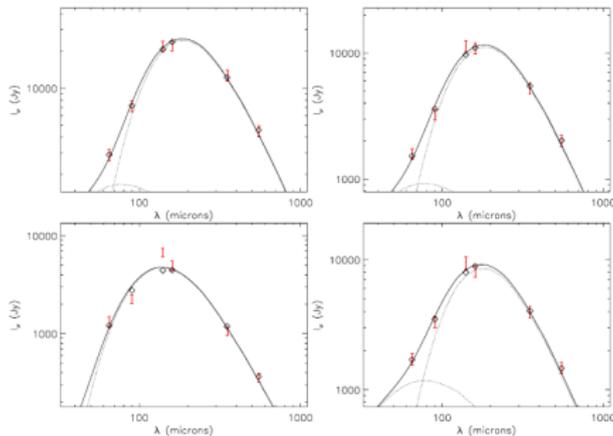




**Fig. 8.** Colour-composite image of the area of GS 118+01–44. Blue shows the emission at  $12\ \mu\text{m}$  (W3 WISE band), green represents the emission at  $550\ \mu\text{m}$  (*Planck*), and red shows the mean brightness temperature of the CGPS H I emission distribution between the velocities  $-41.9$  and  $-47.6\ \text{km s}^{-1}$ . The ellipse superimposed is that fitted for the CGPS H I data and the square regions delimit the zones where the fluxes have been calculated.

**Table 2.** Flux densities estimated for regions 1, 2, 3, and 4.

Region	$(l, b)$	Fluxes (Jy)					
		65 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	140 $\mu\text{m}$	160 $\mu\text{m}$	350 $\mu\text{m}$	550 $\mu\text{m}$
1	(119:0, 3:5)	2890	7192	22 013	22 350	12 739	4474
2	(119:2, 1:2)	1584	3283	11 358	10 838	5253	2020
3	(116:7, -0:5)	1340	2263	6715	4973	1073	358
4	(116:6, 1:7)	1733	3339	9553	8161	3967	1480



**Fig. 10.** SED of regions number 1 (upper left panel), 2 (upper right panel), 3 (lower left panel), and 4 (lower right panel). Diamonds indicate DUSTEM model prediction and fit. The red error bars denote photometric measurements at 65  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$ , 140  $\mu\text{m}$ , 160  $\mu\text{m}$  (AKARI), 350  $\mu\text{m}$ , and 550  $\mu\text{m}$  (Planck). The solid line shows the VSG+BG model, the dotted line at longer wavelength indicates the BGs, and the dotted line at shorter wavelength indicates the VSGs models.

**Table 3.** Parameters derived from the SEDs.

Region	smC (K)	laC (K)	Si (K)	ISRF	D_M ( $M_{\odot}$ )
1	20.0	18.9	13.7	0.44	$3.0 \times 10^3$
2	20.3	19.1	13.8	0.47	$1.3 \times 10^3$
3	27.5	26.0	18.3	2.56	$1.3 \times 10^2$
4	20.9	19.8	14.2	0.56	$8.8 \times 10^2$

## Masa del polvo

- Asumiendo que la nube es  $\tau \ll 1$  en el FIR, la densidad de flujo a una distancia  $d$  de la nube está dada por:

$$F_\lambda = N \left( \frac{\pi a^2}{d^2} \right) Q_\lambda B_\lambda(T_d)$$

- El volumen del polvo en la nube está dado por  $V = N v$ , donde  $v = \frac{4}{3} \pi a^3$  es el volumen del granito.
- Reemplazando en la eq. de  $F_\lambda$  para eliminar N:

$$V = \left( \frac{F_\lambda d^2}{\pi a^2 Q_\lambda B_\lambda(T_d)} \right) v$$

- si los granitos tienen una densidad  $n_d$ :

$$M_d = V n_d = \left( \frac{4 a n_d F_\lambda d^2}{3 Q_\lambda B_\lambda(T_d)} \right)$$

$$k_\nu : \text{coeficiente de absorción: } k_\nu = \frac{3 Q_\lambda}{4 a n_d}$$

$$\Rightarrow M_d = \frac{F_\lambda d^2}{B_\lambda(T_d)} \frac{1}{k_\nu}$$

## Resumen

- El polvo es un componente FUNDAMENTAL del MIE.
- Distintas bandas dan información de distintos tipos de granos y condiciones físicas del MIE.
- Estudiarlo en todas las bandas del IR posible es fundamental para entender su composición y su distribución.
- A partir de las observaciones en el IR es posible inferir flujos y de allí, temperatura y masa del polvo.