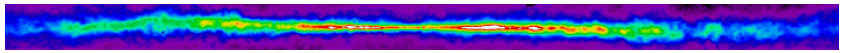
ASTROFÍSICA DEL MEDIO INTERESTELAR

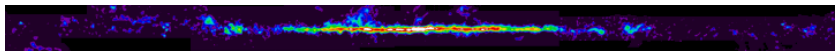
Óptico

IR

HI 21 cm



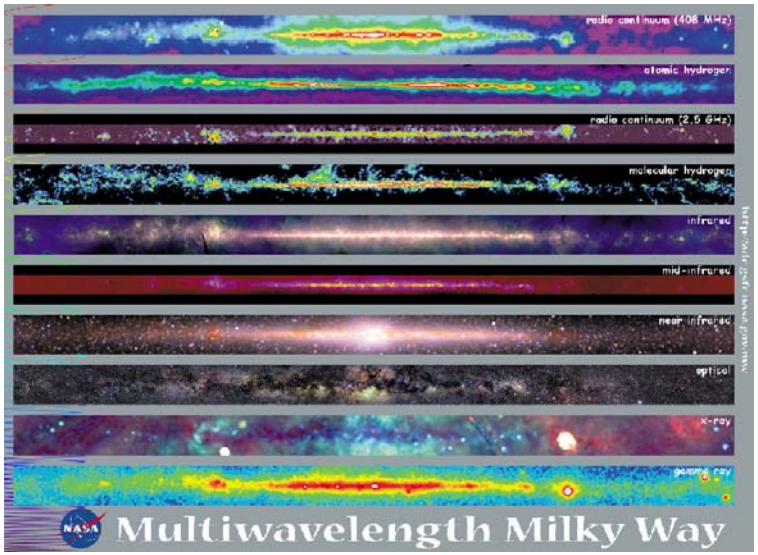
CO 2.6 mm



Jaime Zamorano -- Universidad Complutense de Madrid -- Curso 2001-2002

Imagen multifrecuencia de la Vía Láctea

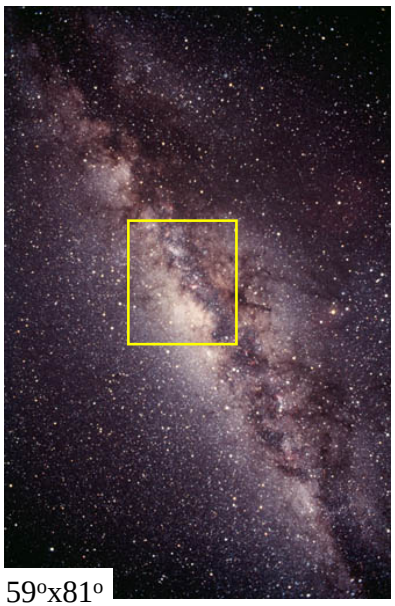
http://adc.gsfc.nasa.gov/mw



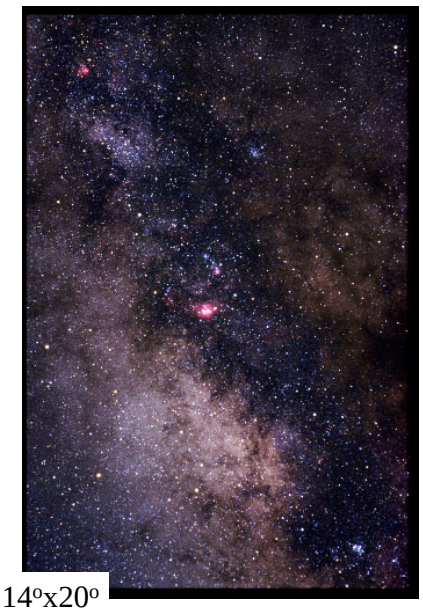
El Medio Interestelar. Introducción

- MI ⇔ evolución química de las galaxias.
- ¿Cómo sabemos que existe MI?
  - Nubes oscuras en la Vía Láctea.
    - (plano galáctico -20º< b < +25º)
    - nebulosas oscuras (Herschel, Barnard 1919)
  - Extinción en el plano de galaxias espirales.
  - Líneas de absorción estacionarias.
  - Polvo y gas correlacionados.
  - Otros.

Nubes oscuras en la Vía Láctea (1)

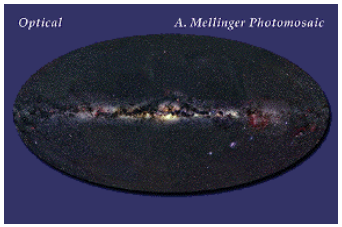


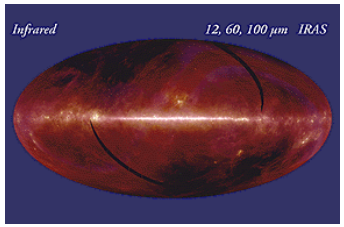
59ºx81º



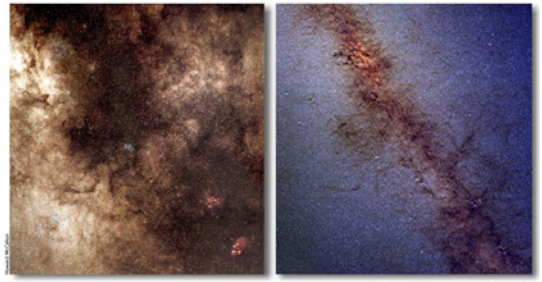
14ºx20º

Nubes oscuras en la Vía Láctea (2)





The Galactic Center



Visible Light

Near Infrared/2MASS

Extinción en el plano de las galaxias espirales

NGC 891 (visible)

NGC 891 (IR próximo)

Líneas de absorción estacionarias

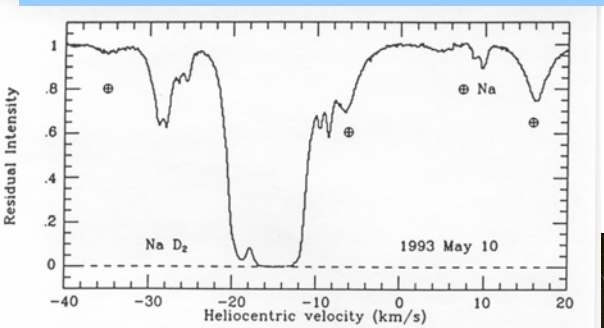
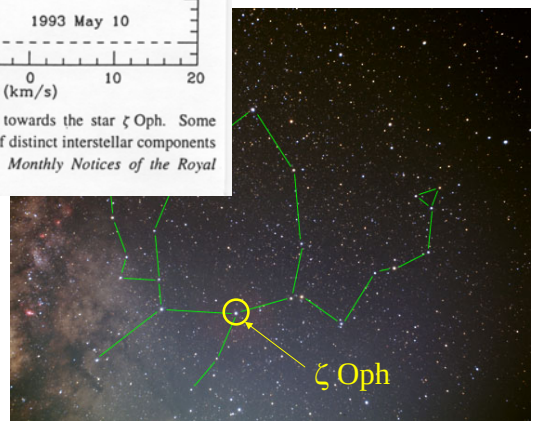


Figure 2.5. The interstellar sodium D_2 line observed towards the star ζ Oph. Some telluric lines are indicated by the symbol ⊕. A number of distinct interstellar components are clearly evident. (From Barlow M J *et al* 1995 *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **272** 333.)



Polvo y gas correlacionados (1)

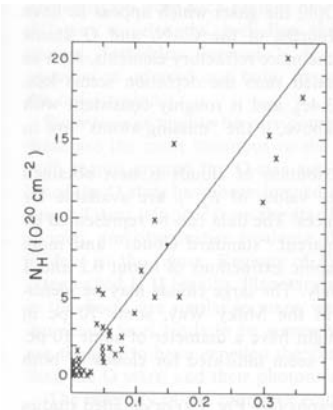
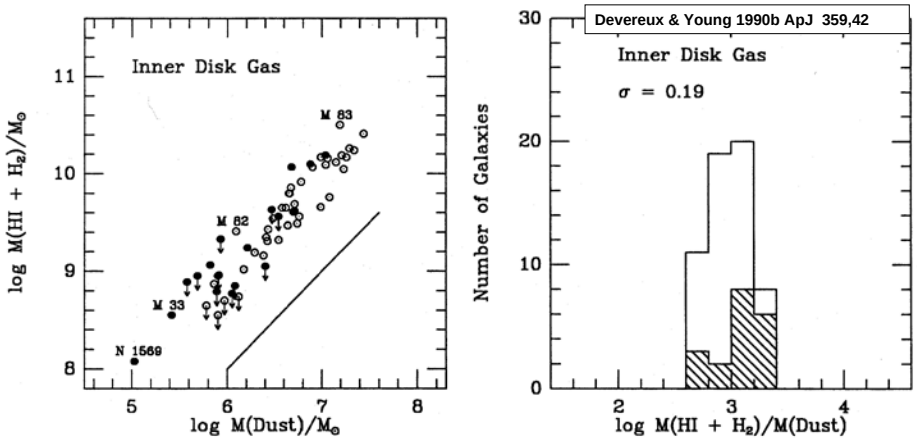


Figure 1.1 Correlation of N_H with E_{B-V}. The column density of H atoms per cm^2 in the line of sight to various stars is plotted against the color excess E_{B-V}, which measures the total amount of dust in each line of sight. Each plotted point, taken from ref. [32] of Chapter 3, represents a sum of N(H I) found from $L\alpha$ absorption and $2N(H_2)$ from the H_2 molecular lines; N(H II), the column density of ionized H, is ignored.

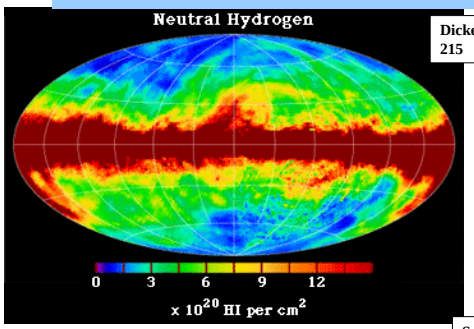
Polvo y gas correlacionados (2)



Correlation between gas masses in the inner disk and warm dust masses derived from *IRAS* 60 -100 *μ*m fluxes
open circles: galaxies for which the molecular gas constitutes > 50% of the gas mass.
filled circles: spirals for which atomic gas constitutes > 50% of the gas mass.
solid line: gas/dust = 100.

IRAS no detecta polvo más frío que el que emite en λ>100 μm. En nuestra galaxia, gas/polvo ~ 100.
Eso quiere decir que el 80-90% del polvo en las espirales como la nuestra está más frío que T~30K

Polvo y gas correlacionados (3)



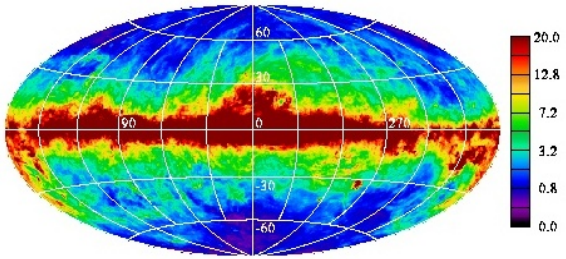
Dickey and Lockman 1990, ARAA, 28, 215

Map of the column density of Galactic neutral hydrogen.

Schlegel, Finkbeiner, & Davis 1997, Astrophysical Journal, 500, 525

Map of the IRAS 100 μm intensity in units of MJy sr^{-1}.

The intensities can be scaled to total hydrogen column density by multiplying by 1.44 x 10^{20} H cm^{-2} (MJy sr^{-1})$^{-1}$.



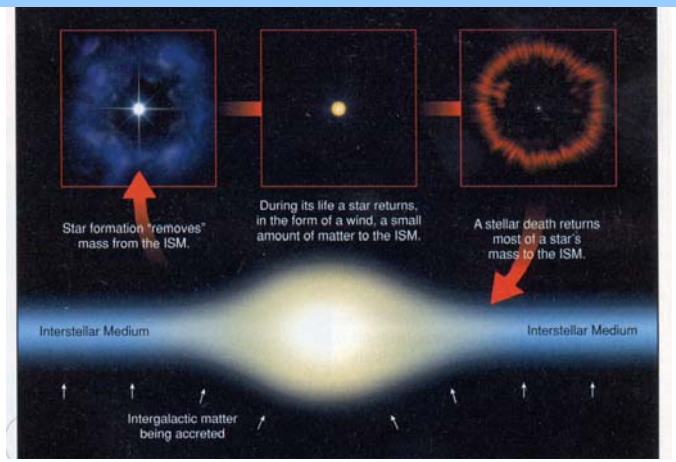
Efectos observables del MI

- **Extinción continua (absorción + difusión)**
  granos de polvo (silicatos, grafitos, hielo etc)
- **Polarización**
- Emisión del gas:
  - HI 21cm,
  - líneas de recombinación del H,
  - líneas moleculares.
- **Absorción del gas:**
  - moléculas H_2,OH,CO,^{12}OH,^{12}CH,^{13}CH,CN, ...
  - átomos HI, DI, CI, NI, OI, LiI, NaI, KI, CaI, FeI,...
  - iones CII, NII, SiII, SiIII, FeII,FeIII, ...
- **Emisión térmica del polvo en el IR**

Visión de conjunto del MI (1)

- **Distancia muy grande entre estrellas:**
  - Diámetro / distancia = humano / Tierra
- **MI lo que queda tras la formación estelar.**
- **Formación estelar es un proceso recurrente:**
  - Las estrellas sueltan Energía al MI
    - Radiación estelar
    - Energía mecánica
  - Las estrellas depositan Masa en el MI
    - Estrellas azules y calientes (Rigel) envían gas caliente al MI (v ~ 1000 km/s ; 1 $M_\odot/10^5$año)
    - Gigantes rojas y frías (Betelgeuse) también al mismo ritmo y menor velocidad (v ~ 15 km/s).
    - En las explosiones de supernova la mayor parte del material es expulsado.

Visión de conjunto del MI (2)



•El gas eyectado por esos procesos se mezcla gradualmente con el resto del MI y se incorpora en las siguientes generaciones estrellas.

•El acrecimiento de gas externo a la Galaxia proporciona gas al MI.

•El material devuelto al MI por las supernovas y gigantes rojas tiene su composición alterada respecto a la del gas original.

Visión de conjunto del MI (3)

- **Síntesis de elementos pesados:**
  - Abundancia de elementos pesados relativa al H es mayor en estrellas nuevas.
  - Por cada 10^4 átomos de H:
    - 850 de He ; 3.5 de *C* ; 6.5 de *O* ; 0.5 de Fe etc
  - Los elementos más pesados que el He (metales) forman parte del MI al haber sido añadidos por generaciones anteriores de estrellas.
- **MI y estrellas coexisten y evolucionan conjuntamente.**
- **Sistema dinámico:**
  - Gravitación es un tercer componente vital de esta simbiosis: Distribución de masa en la Galaxia como resultado de la influencia gravitacional.

Visión de conjunto del MI (4)

- **La Galaxia es un sistema interconectado por retroalimentación:**
  - **Su evolución regida por los mecanismos que operan en ella.**
- **Este sistema es estable:**
  - **Sus propiedades medias (globales) varían muy lentamente con el tiempo.**
  - **La estabilidad de este sistema con sus complicados mecanismos se demuestra observando galaxias espirales similares a la nuestra que han evolucionado de forma independiente.**
- **Diferencias considerables a pequeña escala.**
  - **(esto es lo que la hace que su estudio sea tan interesante)**

NGC 1672

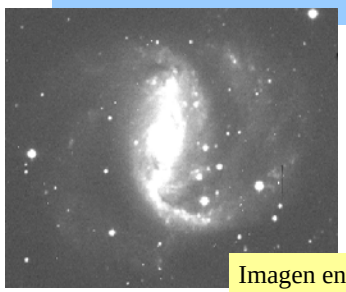


Imagen en banda V

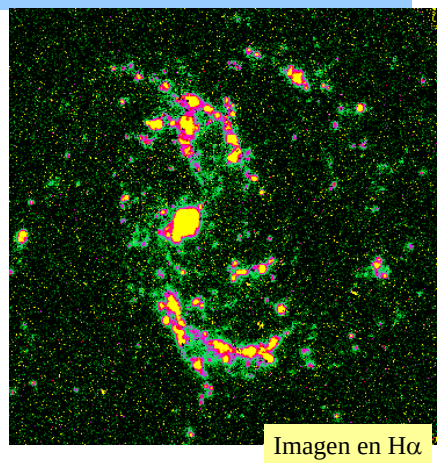
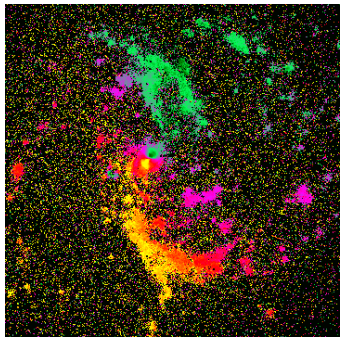


Imagen en Hα



Mapa de velocidades

http://zebu.uoregon.edu/fp2.html

Otros ejemplos de galaxias espirales

Composición del MI G A S(1)

- **COMPOSICION:**
  - **H (60%) + He (30%) + trazas de metales en abundancia solar aprox.**

  m(He) = 4 x m(H) → masa total (H+He) = 90% →
  → abundancias relativas en número: H(~80%), He(~10%)

- **DENSIDAD: 0.025 $M_\odot/pc^3$ (1.85 x 10^{-24} g/cm^3)**

  n= 1 partícula / cm^3 (10^{-2}-10^6) (estrellas en Galaxia ρ_*=0.125 $M_\odot/pc^3$)

- **ESTADO: molecular (50%) y atómico (50%) (neutro e ionizado)**

COMPARACIÓN:	átomos/cm^3
Vacío en laboratorio terrestre:	10^4
Densidad de la atmósfera terrestre:	3 x 10^{19}
Densidad de una roca en la tierra:	3 x 10^{22}

Composición del MI G A S(2)

Constituye 99% en masa del MI

Determinación de densidad del gas interestelar: *(back of the envelope)*

Masa	(curva de rotación)	Mtot ~ 1.4 x 10^{11} $M_\odot$
Diámetro	(medidas de HI y CO)	D ~ 40 kpc
Escala de altura	(mapas de HI)	h ~ 140 pc
Volumen del disco de la Galaxia		V = 2 x 10^{67} cm^3
Densidad de estrellas en la Galaxia		$\rho_* \approx$ 1.4 x 10^{-23} g/cm^3
Relación masa de gas y de estrellas		Mgas / M_* ~ 0.2
	Densidad del gas	$\rho_{gas} \approx$ 2.8 x 10^{-24} g/cm^3

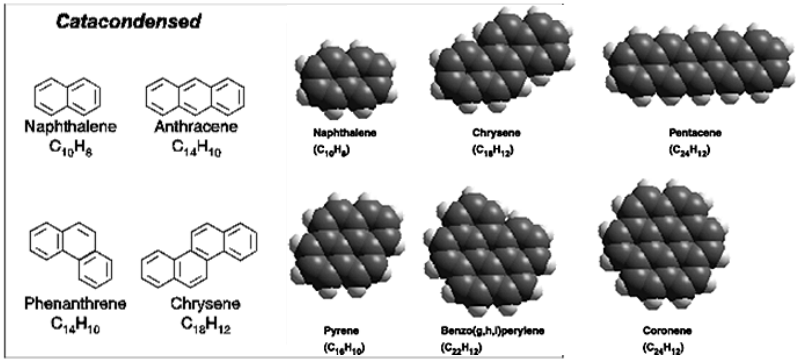
Composición del MI P O L V O (1)

- **Polvo interestelar:**
  - Pequeñas partículas sólidas:
    - Desde moléculas demasiado grandes para tener nombre hasta pequeñas rocas.
  - Diferentes formas y tamaños. 100 millones átomos / grano.
  - Comprende la mayor parte de elementos más pesados que el He.

- **COMPOSICION:**
  - C puro, grafito u hollín y
  - Silicatos de Fe y Mg parecidos a las olivinas terrestres y Hielos.
  - Se deduce de los elementos que faltan en el MI frío y por su efecto de extinción de la radiación.
  - C en estructuras grandes, planas y circulares como el **coreneno:** PAH (Polycyclic Aromathic Hydrocarbons).
  - Esferas de C como el C_{60} llamados **furelenos**.

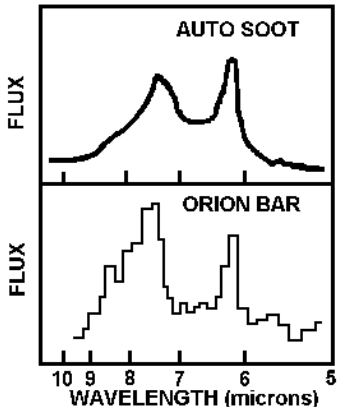
- **ORIGEN:**
  - En las capas externas de las Gigantes Rojas que son tan frías como para permitir la condensación de partículas sólidas a partir del gas igual que el hollín de una vela.
  - La presión de radiación se encarga de enviar este material, mezclado con el gas, al MI.
  - Así es como las Gigantes Rojas devuelven parte de su material al MI.

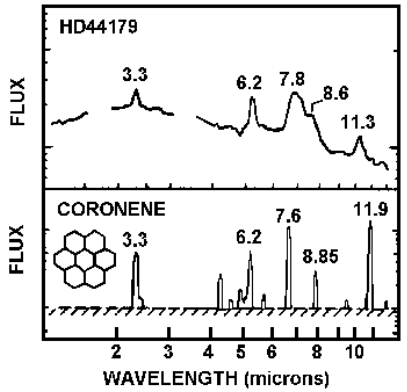
POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS (PAHs)



- Los Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos son comunes en el carbón y en los humos del escape de los automóviles y pueden ser el tipo de moléculas orgánicas más comunes del universo.
- PAHs son moléculas planas de carbono e hidrógeno
- En forma de hexágonos de manera que su esqueleto parece rejilla de gallinero. Son carcinógenos. Aparecen en los meteoritos.
- PAHs son responsables de las bandas interestelares difusas.

POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS PAHs (2)

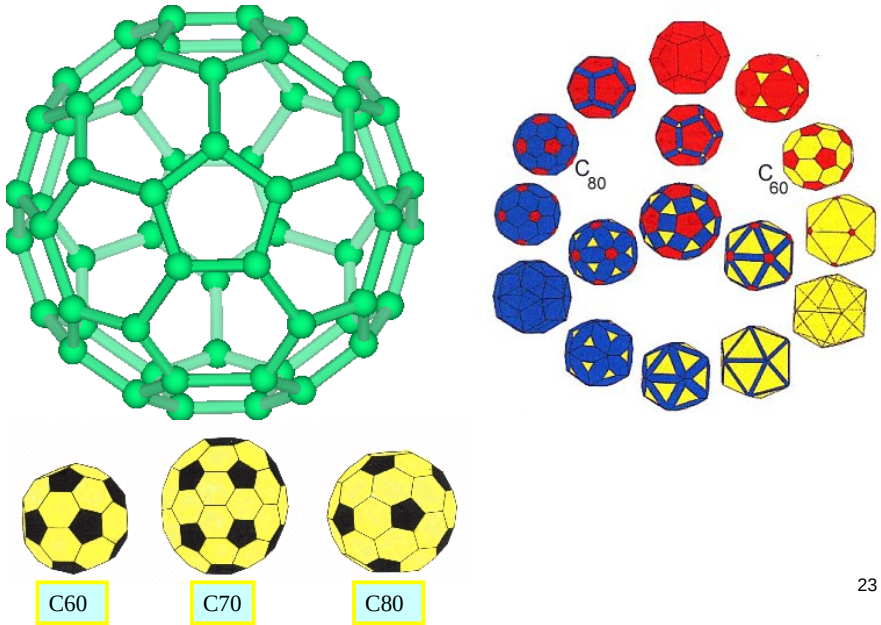




Espectro IR del hollín del escape de un diesel frente al de la nebulosa de Orión.

Espectro IR de una gigante roja frente al espectro del coreneno obtenido en laboratorio.

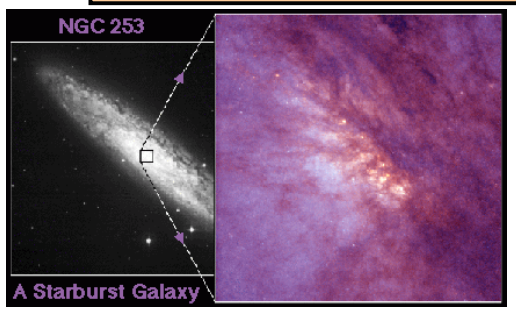
FURELENO (fullerene)

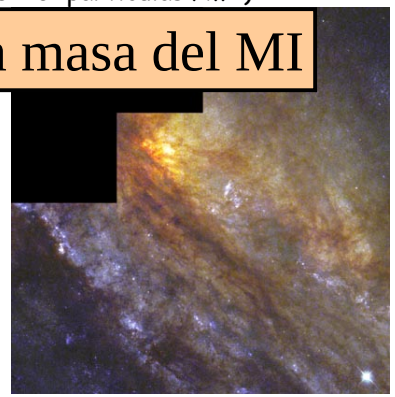


Composición del MI P O L V O (2)

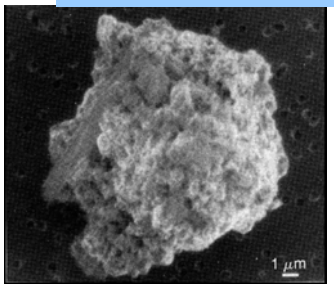
- **DISTRIBUCIÓN:**
  - **Gas y polvo se encuentran mezclados en el MI:**
    - Donde se encuentra alta densidad de gas, también la hay de polvo.
- **DENSIDAD: 0.002 $M_\odot/pc^3$** → ρ_{polvo}/ρ_{gas} ~ 0.01
  - (polvo: 1 partículas /10^6 m^3 ; gas: 10^6 partículas /m^3)

Constituye ~1% en masa del MI



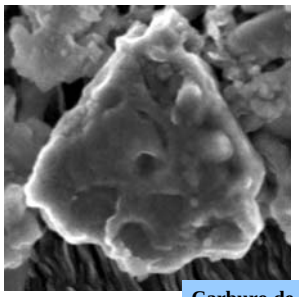


Composición del MI P O L V O (3)

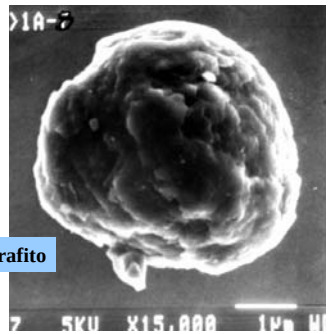


Grano de polvo interestelar capturado en la alta atmósfera

http://stardust.wustl.edu/

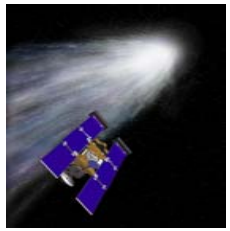


Carburo de Silicio

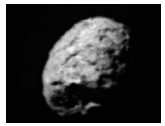


Grafito

Composición del MI P O L V O (4a)



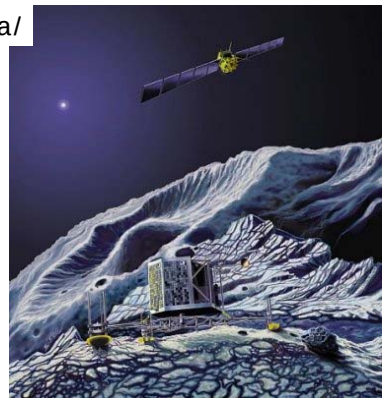
Particle Tracks in Aerogel



Cometa Wild 2

Composición del MI P O L V O (4b)

http://www.esa.int/SPECIALS/Rosetta/



Rosetta's main objective is to rendezvous with Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko (in 2014). It will study the nucleus of the comet and its environment in great detail for a period of nearly two years, and land a probe on its surface

Composición del MI Rayos Cósmicos

- **COMPOSICIÓN:**
  - 84% núcleos de H (protones)
  - 14% núcleos de He (partículas alfa)
  - 1% otros núcleos
  - 1% electrones y positrones.
- **ENERGÍA:**
  - 10^9 eV/partícula de media
  - Espectro de 10^6 a 10^{20} eV
- **DENSIDAD DE ENERGÍA: 1 eV/cm^3**
  - Flujo para todo el espectro: ~10^4 partículas / m^2 / s
  - 1 partícula / 10^3 m^3.
  - 1 eV = 1.6 x 10^{-12} erg → 1.6 x 10^{-12} erg / (3 x 10^{10} cm/s)^2 → 1.8 x 10^{-33} g/cm^3

Composición del MI Campos Magnéticos

- **Campos Magnéticos muy débiles:**
  - ~10^{-6} gauss ⇔ 0.2 eV/cm^3
  - Son suficientemente intensos como para confinar los rayos cósmicos y producir radiación sincrotrón.

Composición del MI Radiación Estelar

- **Muy variable de una zona a otra.**
- Valor medio: 0.5 eV/cm^3

Fases del Medio Interestelar

- **Las estrellas se encuentran muy separadas entre sí.**
  → MI muy frío: sólo un poco por encima del cero absoluto.
- **Densidad media** (Vía Láctea): n ~ 1 átomo de H / cm^3
- **La temperatura y densidad son muy variables de un lugar a otro.**
  → $5 < T < 10^6$ K
  → $0.001 < N < 10^4$ átomos / cm^3
- **MI es fundamentalmente gaseoso**
  - Estudio basado en la medida de líneas espectrales en emisión u absorción.
  - Análisis espectroscópico → T, N, abundancias y distribución del gas.
- **Existen diferentes fases del MI que se caracterizan por valores particulares de T y N.**

Fases del MI (2)

Nubes frías atómicas

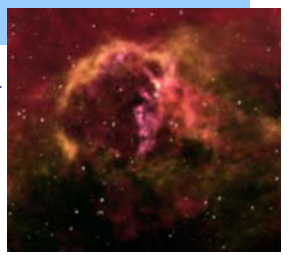
Densidad	10 - 20 átomos /cm^3
Temperatura	~ 50 K
Tamaño	~30 años-luz
Masa	~10^3 $M_\odot$
Distancia entre ellas	~500 años-luz
Composición	HI

- **Se distribuye en filamentos u hojas más o menos densos**
- **Ocupa una pequeña fracción del MI.**
- **Se observa en absorción.**
- **Estado intermedio del ciclo estrella – gas – estrella.**

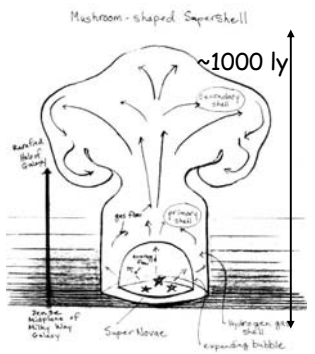
Fases del MI (3)

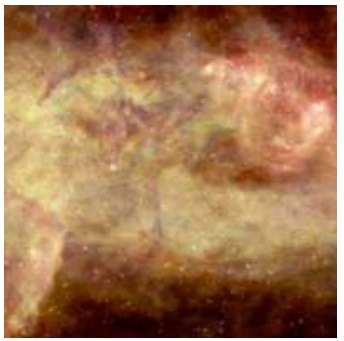
Nubes frías atómicas

GSH138-01-094:
An Expanding Shell.



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





Mushroom-shaped Cloud: Galactic Worm 123.4-1.5

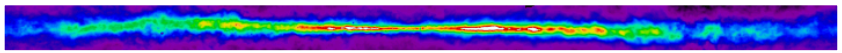
Siluetas de nubes frías atómicas en el brazo espiral de Perseo vistas en contraste con el HI más caliente que se encuentra detrás.

Fases del MI (4)

Gas atómico caliente (*warm*)

Densidad	0.1 átomos /cm^3
Temperatura	~ 5000 K
Composición	HI

- **Lo que se observa en las exploraciones de HI en emisión.**
- **Llena el plano galáctico.**



HI caliente + frío

- HI ~50% del volumen del MI
- HI ~50% de la masa del MI.
- Se puede observar:
  - Línea de HI 21 cm (absorción y emisión) → mapas
  - Absorción de CaII en el espectro de estrellas brillantes.
  - Emisión de CII en 158 μm.
  - Radiación de los granos de polvo en IR lejano (T~20K), calentados por radiación estelar.

Fases del MI (5)

HI caliente + frío

- **Imagen ingenua de estas dos fases del MI:**
  Nubes frías y densas rodeadas de un medio más caliente y tenue.

La existencia de nubes incluidas en un medio difuso es una consecuencia de los fenómenos de enfriamiento y calentamiento en el MI.

- **Calentamiento** (absorción de fotones por los átomos) proporcional al número de átomos.
- **Enfriamiento** (intercambio de energía por colisiones) proporcional al cuadrado del número de átomos.

- Las presiones ($\propto$ T y N) son similares en las dos componentes → sistema estable.

- Dos soluciones estables para la densidad del MI:
  - Nubes de pequeña Temperatura y gran Densidad.
  - Nubes de pequeña Densidad y gran Temperatura.

Estado global del MI depende de este balance detallado

Fases del MI (6)

Gas Coronal

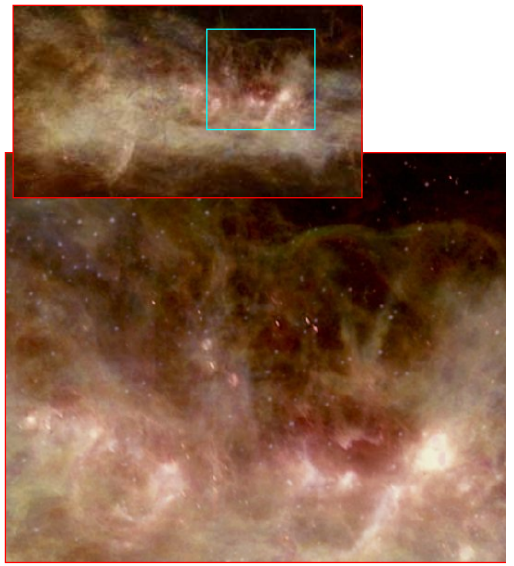
Densidad	0.001 átomos /cm^3
Temperatura	~ 10^6 K
Origen	Explosiones de SN: destruyen polvo, lo atomizan, lo calientan e ionizan
Composición	H y otros
Estado	átomos ionizados
Masa	~ 5% fracción mínima del MI
Volumen	~50% del volumen del MI

- Nombre proviene de su similitud con la corona solar.
- Se detecta con satélites de rayos-X.
- Se extiende fuera del disco como fuentes con gas retornando.
- Aparece formando burbujas.

- **Estructura del MI parecida a una esponja:**
  Zonas densas y frías llena de agujeros de gas coronal de baja densidad y altísima temperatura.

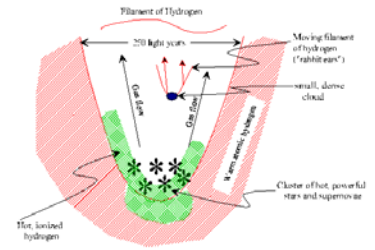
Estas tres fases en balance de presión

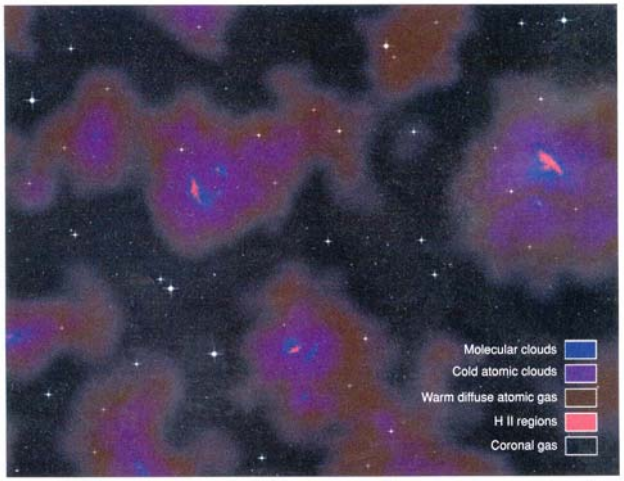
Fases del MI (7)



Possible "Chimney" in the W4 star forming region

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





El volumen del MI está dominado por gas atómico difuso y caliente enredado con bolsas de gas muy caliente e ionizado muy esparcido. Moteando el MI aparecen nubes más densas que ocupan poco espacio pero suponen el grueso de la masa del MI.

Fases del MI (9)

Nubes Moleculares

¡NO en balance de presión !

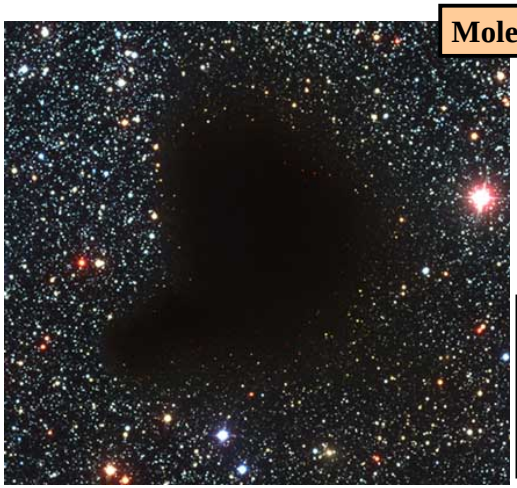
Tamaño	50 – 100 años-luz
Densidad	10^3 - 10^4 moléculas de H_2 /cm^3
Composición	moléculas
Volumen	~1% del MI (diminuta fracción)
Masa por nube	hasta 10^6 $M_\odot$
Masa total	~50% de la masa del MI

- **Densidades enormes:**
  Polvo y gas mezclados bloquean el paso de la radiación estelar.
- **Hidrógeno en forma molecular H_2 principalmente.**
  Difícilmente observable → las nubes moleculares se cartografían en CO (línea de 3 mm, por ejemplo).
- **Nubes moleculares autogravitando:**
  Movimientos aleatorios de las moléculas, que tienden a deshacer la nube, compensados por la atracción gravitatoria.

Fases del MI (10)

Nubes Moleculares

Molecular Cloud Barnard 68



Three-colour composite: blue (B), green-yellow (V) and near-infrared (I).

FORS1 & ISAAC (6.8'x6.8')
(VLT 8.2-m Telescope, ANTU)

www.eso.org/outreach/press-rel/pr-1999/phot-20-99.html

Selected Interstellar Molecules

Symbol	Molecule	Symbol	Molecule
H_2	molecular hydrogen	H_2S	hydrogen sulfide
C_2	diatomic carbon	N_2O	nitrous oxide
CN	cyanogen	H_2CO	formaldehyde
CO	carbon monoxide	C_2H_2	acetylene
NO	nitric oxide	NH_3	ammonia
OH	hydroxyl	HCO_2H	formic acid
NaCl	sodium chloride	CH_4	methane
HCN	hydrogen cyanide	CH_3OH	methyl alcohol
H_2O	water	CH_3CH_2OH	ethyl alcohol

Fases del MI (12)

Regiones HII

¡NO en balance de presión !

Temperatura	~10^4 K
Densidad	$10^2 – 10^4$ /cm^3
Composición	HII y otros
Volumen	fracción despreciable del MI
Masa total	varios 10^6 $M_\odot$: fracción despreciable de la masa del MI

- **Nubes de hidrógeno ionizado rodeando a estrellas jóvenes y calientes.**
- **Asociadas a nubes moleculares densas y frías.**
- **No se encuentran en balance de presión sino expandiéndose:**
  - Al cabo de unos millones de años el gas se dispersa en el MI.
  - Proceso de formación estelar es muy ineficiente → desperdicio.
- **Regiones HII claves para entender el proceso de formación estelar.**
  - Procesos no observables en visible pero sí en IR, mm y submm donde emiten el polvo y gas frío y la absorción por polvo es débil.

Procesos fuera del equilibrio (1)

MI no se encuentra ni de lejos en equilibrio dinámico, ni físico, ni químico: diferentes partes se encuentran a T y N muy distintas.

- **Causas fundamentales de esta falta de equilibrio:**
  - Las fuentes de energía están muy localizadas.
  - La E de las estrellas produce unas condiciones muy especiales en su vecindad.
  - La inyección de Energía en el MI es pequeña en relación a su Volumen → Temperatura media baja.
- **El gas no se encuentra en ningún sitio cerca del equilibrio termodinámico:**
  - Relación entre calor y movimiento de átomos y moléculas → → mayor velocidad en zonas a mayor T:
  - Mvtos. suficientemente altos → liberación de moléculas → materia gaseosa
  - Mayor temperatura → se deshacen las moléculas → gas atómico
  - Todavía mayor temperatura → el gas se ioniza

Procesos fuera del equilibrio (2)

Atmósfera terrestre: **PARADOJA**

El aire es molecular, fundamentalmente compuesto de O_2 y N_2 ya que su T es suficientemente baja.

Medio interestelar:

El MI difuso, frío y de baja densidad es mucho más frío que nuestra atmósfera.

PERO: ¡ H atómico en gran parte !
¡ Otros elementos (Na, Ca, C, ...) ionizados en general !

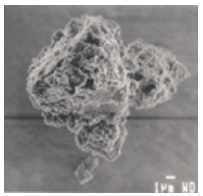
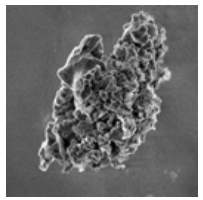
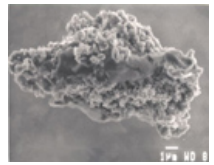
- **Los fotones son paquetes muy energéticos, pero la densidad de la radiación estelar es pequeña.**
  - Fotones tienen energía suficiente para destruir las moléculas que encuentren a su paso, pero
  - El número total de fotones es suficientemente bajo para que , en promedio, el MI sea frío.

Atmósfera terrestre bañada por radiación solar

- **La estructura química compleja y el estado peculiar del MI debido a:**
  - Densidad de energía media (energía/cm^3) correspondiente a una baja T.
  - Alta energía por fotón.

Química en las nubes moleculares

- **Las moléculas de las nubes densas están apantalladas de radiación estelar por el polvo.**
- **La formación de moléculas es un proceso difícil.**
  - Para que dos átomos de H formen una molécula deben perder energía y encontrarse suficientemente cerca. Esto es difícil en una nube interestelar donde la densidad es baja.
- **Los granos de polvo actúan de catalizadores.**

El ecosistema estelar (1)

·Ciclo estrellas – MI.

·Una nube grande y fría colapsa bajo su propia gravedad en el disco de la Galaxia.

·La contracción provoca el calentamiento de la nube.

·Como resultado el colapso se para hasta que se libere energía por radiación en las líneas del CO y otras moléculas (1).

·Finalmente el colapso resulta en formación de estrellas.

(1) INGREDIENTES
- El CO procede del C y O sintetizado en las estrellas y se forma gracias a la ionización por rayos cósmicos y no se destruye gracias al apantallamiento por el polvo.
- Los rayos cósmicos proceden de las supernovas.
- El polvo de las gigantes rojas.

El ecosistema estelar (2)

·Mitad del MI en forma de nubes moleculares.

·En solo un millón de años todas las nubes moleculares colapsarían para producir estrellas. PERO ...

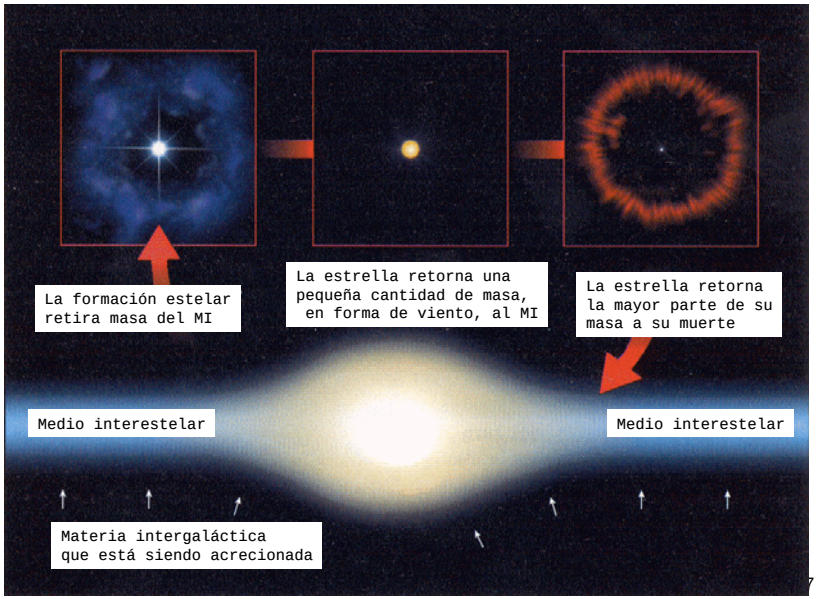
·Las estrellas recién formadas deshacen las nubes moleculares en las que se formaron y las dispersan hacia un medio menos denso.

·Las explosiones de SN soplan gas incluso fuera del disco de la Galaxia, dejando grandes burbujas vacías.

·(Un ritmo muy alto de SN habría dejado la Galaxia sin gas. La pérdida de masa de las gigantes rojas asegura que sólo las estrellas muy masivas acaban como supernovas).

·Las estrellan nacen en el MI y cuando mueren retornan parte de su masa enriquecida por los procesos de nucleosíntesis del interior de las estrellas.

• ~20% de la masa que forma estrellas se recicla de esta forma: *la cantidad de gas interestelar de la Galaxia decrece lentamente.*

·Parte del gas se recupera con el acrecimiento de gas externo a nuestra Galaxia.

El ecosistema estelar (3)