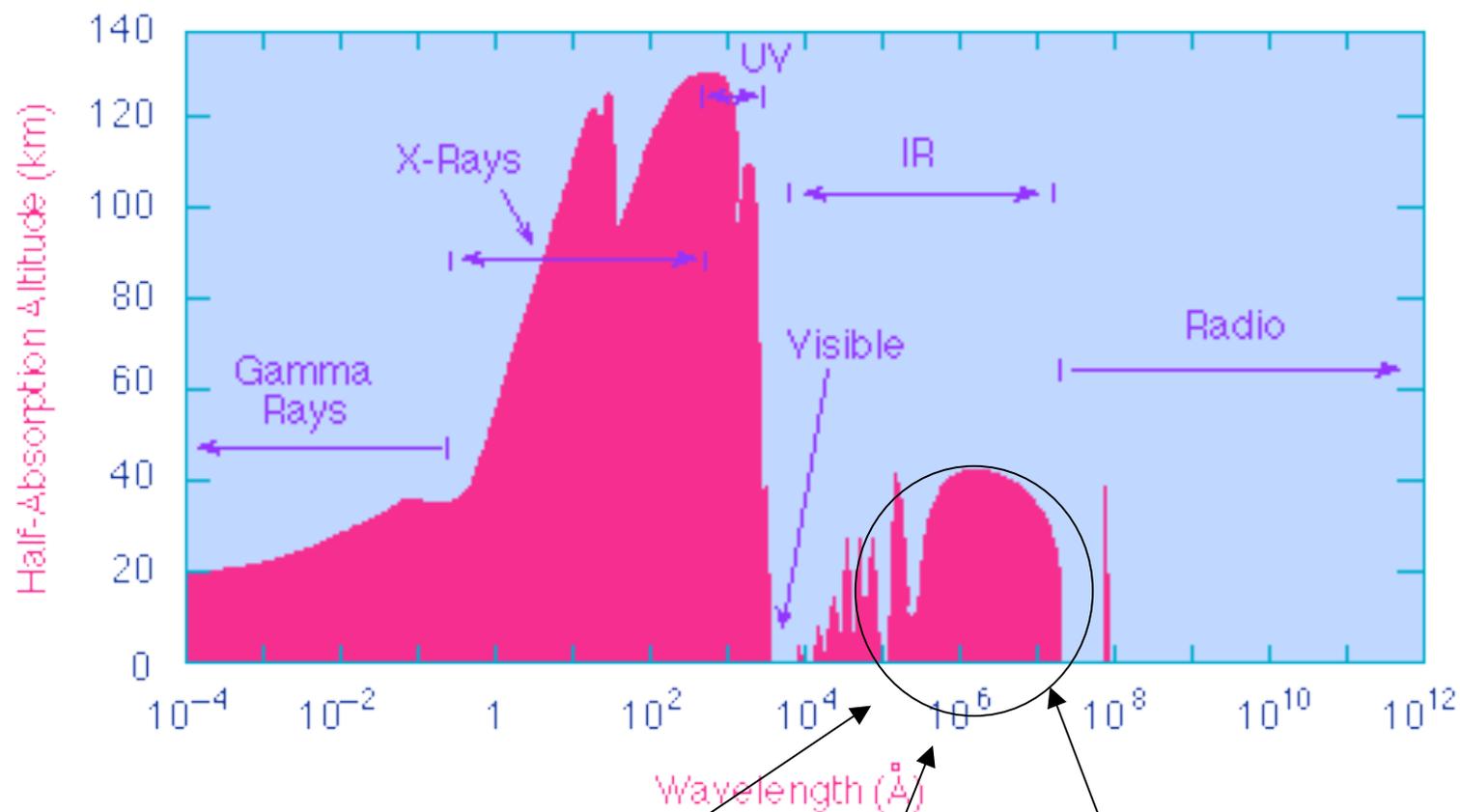


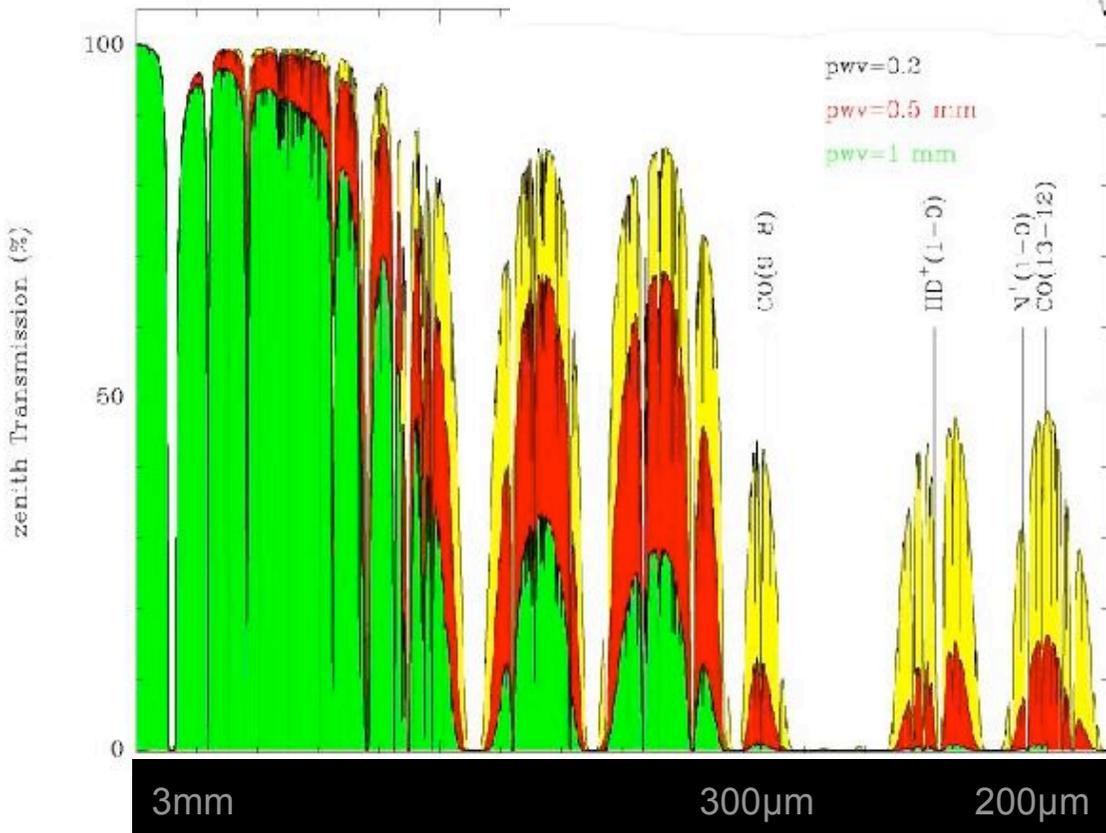
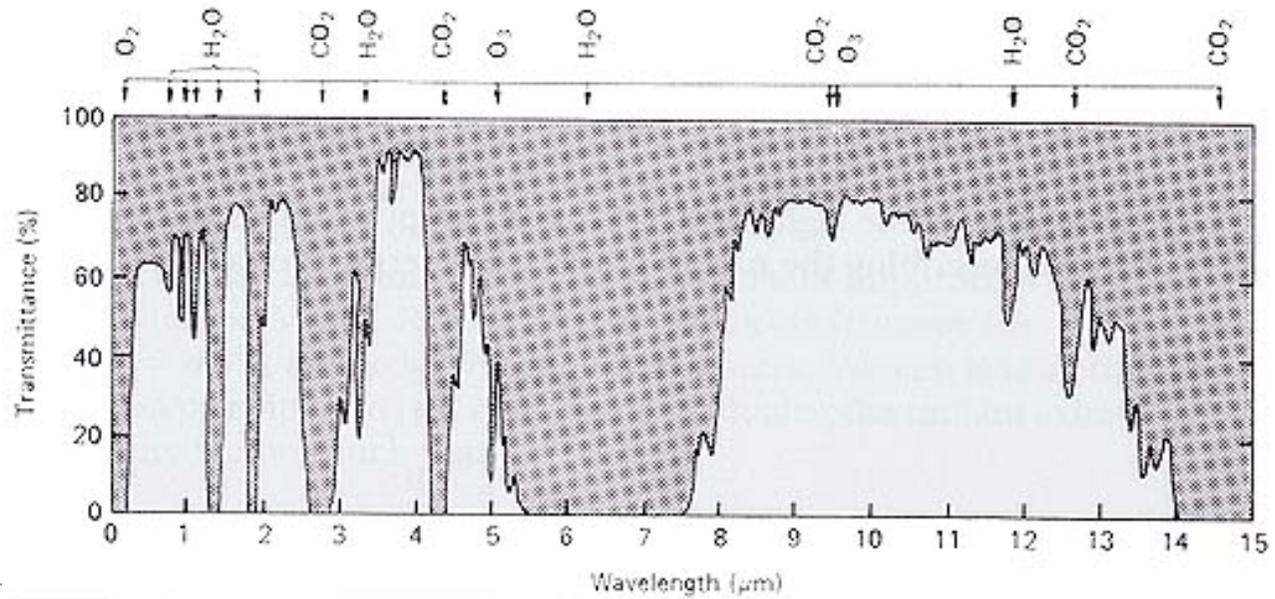
Radioastronomía milimétrica y infrarrojo: Historia y tecnología



10 μm 100 μm 1 mm

10-50 μm: IR mediano
50-200 μm: IR lejano
200 μm-1mm: submm
>1mm: mm

Atmósfera es un problema



Entre 15 y 200 μm transmisión de la atmósfera nula

En el resto de las bandas, observaciones de sitios altos (poco agua) posibles.

Alternativas: Satélites
Globos
Aviones

Tecnología en breve

IR mediano y lejano:

Telescopios y receptores are similar a instrumentos ópticos

Submm y mm:

Tecnología parecida a radio, pero hay ciertas diferencia:

- **Problema:** No existen amplificadores de bajo ruido a estas frecuencias.
Solución: Se convierte frecuencia primero a frecuencias más bajos (radio centimétrica) y después se amplifica con tecnología radio.
- Superficie de la antena reflectora tiene que ser mucho más lisa que en radio, mejor que $1/10 \lambda$
 - Mejor que $100 \mu\text{m}$ para observar a 1mm
 - → Difícil de hacer antenas muy grandes

Que se puede ver en IR-mm?

Medio interestelar denso

- Polvo interestelar emite emisión continua
- Gas molecular emite líneas

Procesos:

- Nacimiento de estrellas
- Formación estelar, en particular en brotes
- Pasado del universo

Globos, cohetes y aviones

Empezando en los años 1960, empezaron observaciones con globos (hasta 40 km) y cohetes

1966: Barrido del cielo a $100\ \mu\text{m}$ con un globo realizado por el Goddard Space Institute (EEUU). Se detectaron 120 fuentes

1974-1995: Avión Kuiper Airborne Observatory

- Operado por la NASA
- Estuvo en marcha durante más de 20 años
- Altura máxima: 15km



Kuiper Airborne Observatory

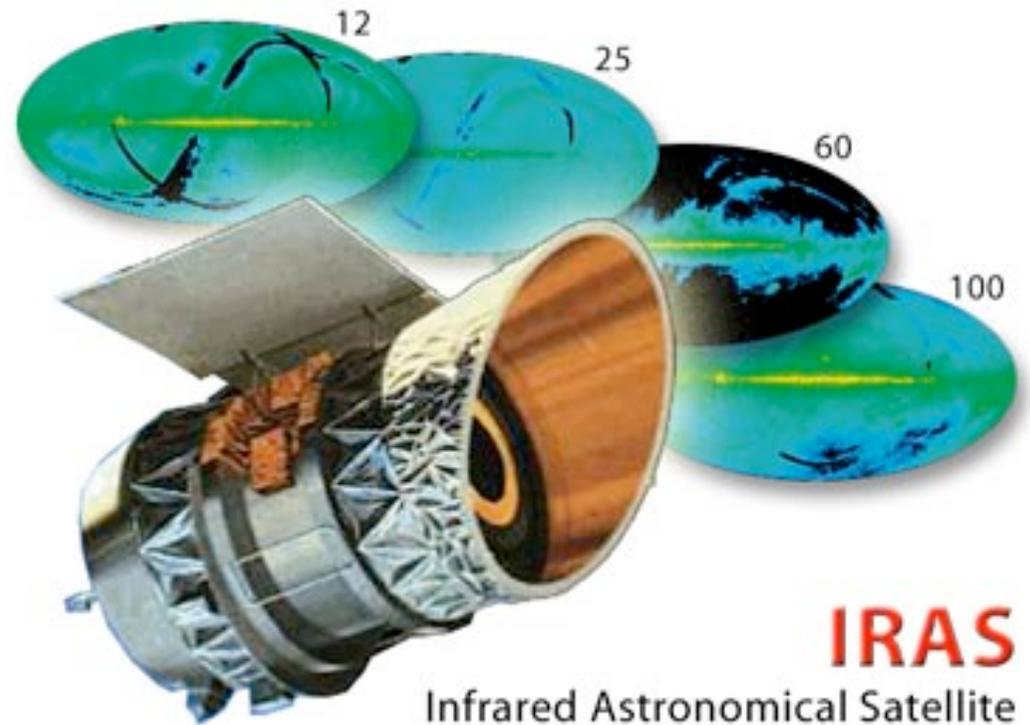


SOFIA - Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy

- Proyecto de NASA y DLR (Alemania)
- Telescopio de 2.5m en Boing
- Instalación de telescopio en marcha. Terminación previsto dentro de 2 años (siempre dentro de 2 años...)
- Rango de observación: $0.3\mu\text{m}$ - 1.6mm
- Exactitud de puntería: 1 seg. de arco

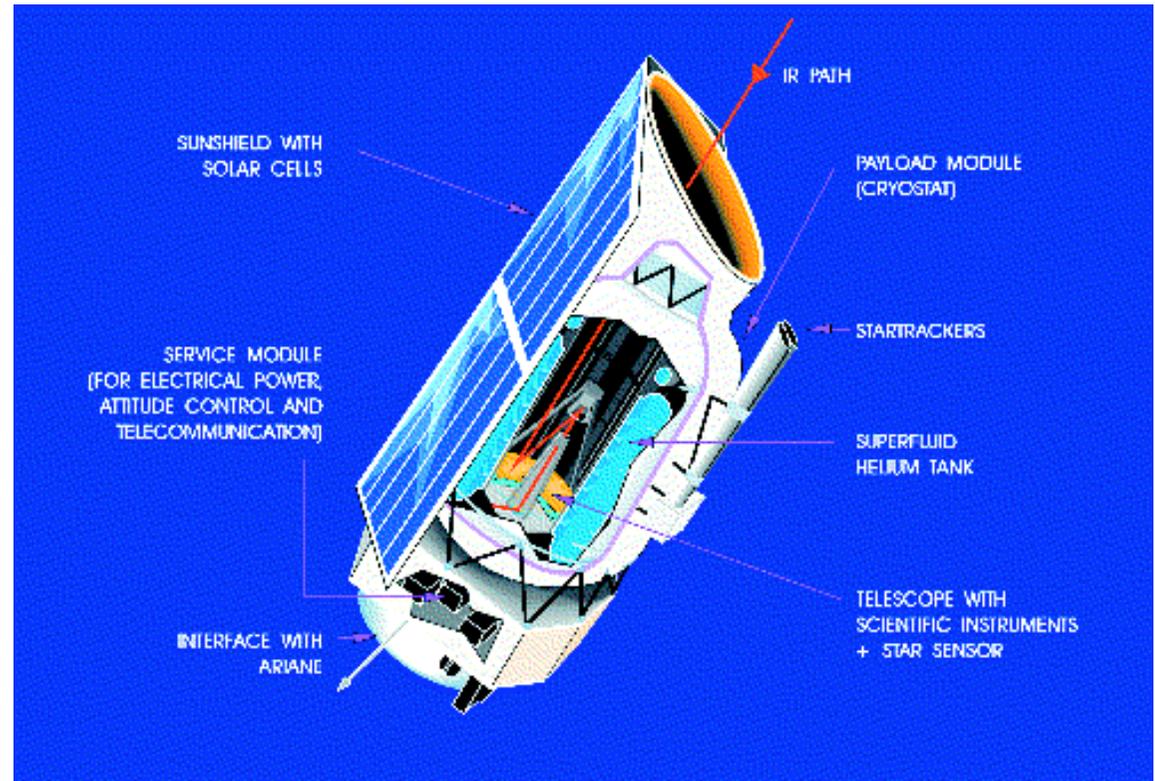
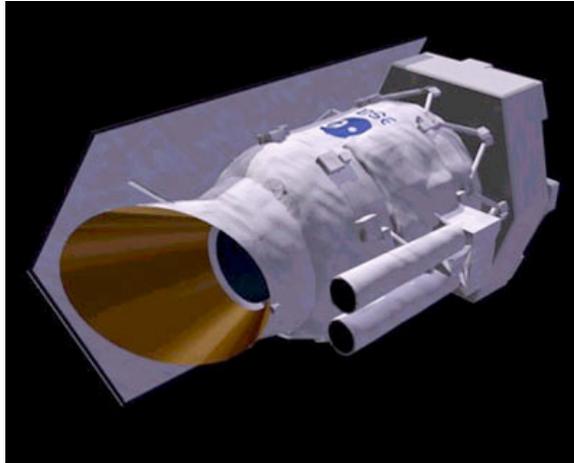


Satélites en IR



- 1983: IRAS (Infra-red Astronomical Satellite)
 - Proyecto de NASA, Países Bajos y UK
 - Primer satélite en IR lejano
 - Hizo un barrido de 96% del cielo en 12, 25, 60 y 100 μm
 - Detectó unos 25000 galaxias
- Principales logros:
 - Descubrimiento de una clase de galaxias nuevas: Galaxias (ultra)luminosas en el infrarrojo
 - Exceso de emisión a 12 y 25 μm y \rightarrow cambio en modelo estandar de polvo (necesidad de granos pequeños)

Satélites en IR



1995: ISO (Infrared Space Observatory)

- Proyecto Europeo (ESA)
- Hizo observaciones dedicadas entre 2 y 200 μm
- Tenía instrumentos de espectroscopía y fotometría

Principales logros (ya no tan espectaculares como de IRAS):

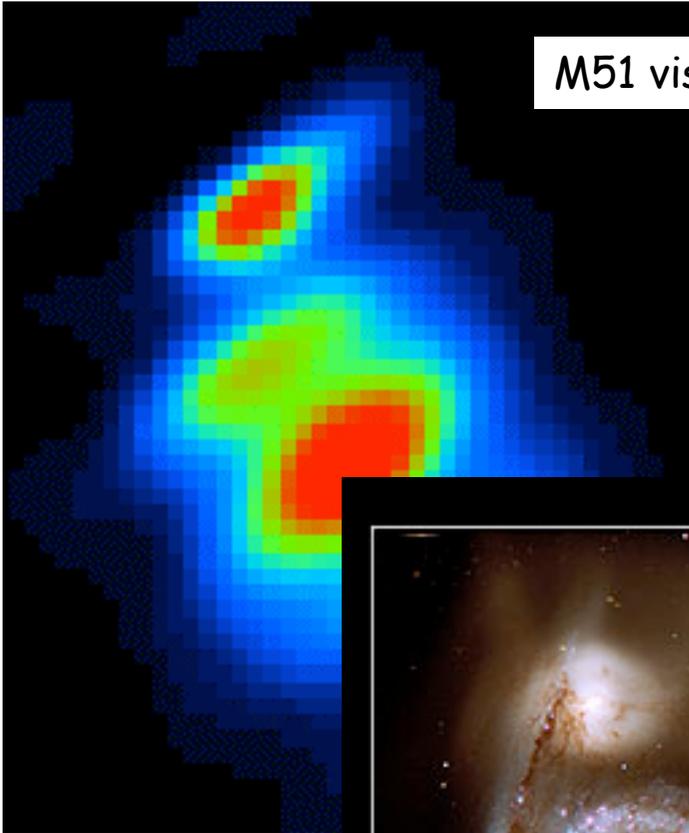
- Estudio de IR mediano para indicador de formación
- Aclaró fuente de energía de ULIRGs vía espectroscopía
- Galaxias activas: Apoyo para el modelo unificado



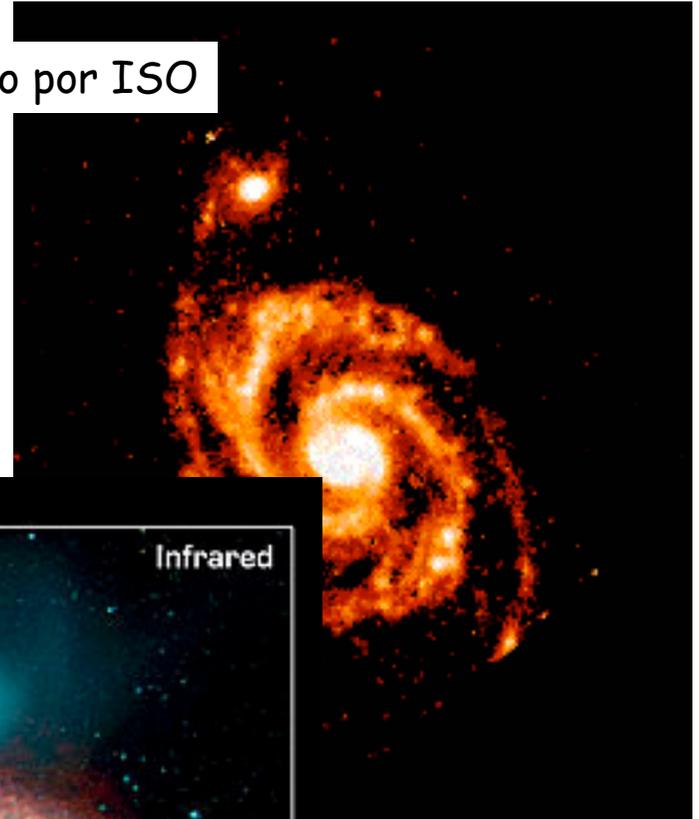
Desde 2003: Spitzer

- Proyecto de la NASA
- Parecido a ISO:
- Hizo observaciones dedicadas entre 3 y 160 μm
- Tenía instrumentos de espectroscopia y fotometría
- Pero mayor sensibilidad y resolución

M51 visto por IRAS



M51 visto por ISO



Visible



Infrared

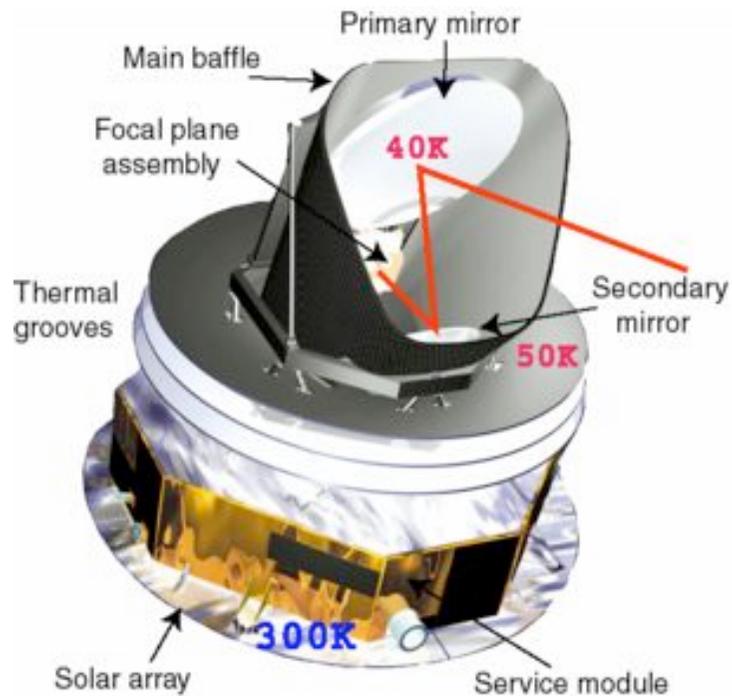
Spiral Galaxy M51 ("Whirlpool Galaxy")

NASA / JPL-Caltech / R. Kennicutt (Univ. of Arizona)

Spitzer Space Telescope • IRAC

ssc2004-19a

M51 visto por Spitzer

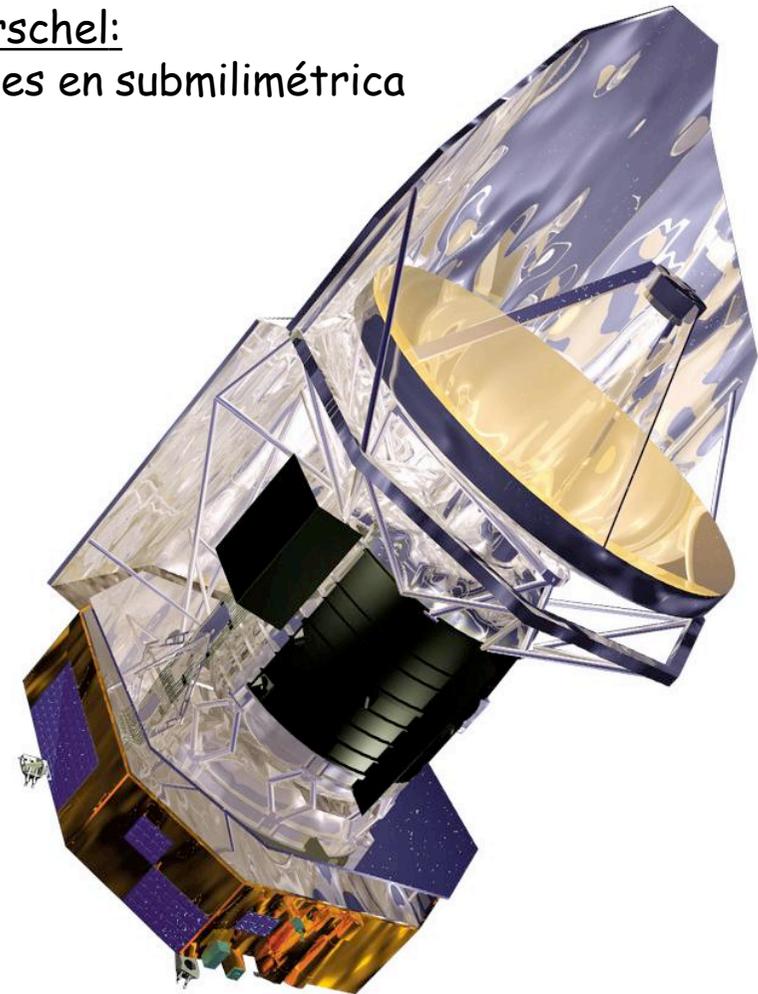


Satelites Planck y Herschel (ESA) Lanzamiento en Mayo 2009

Satélite Herschel: Observaciones en submilimétrica

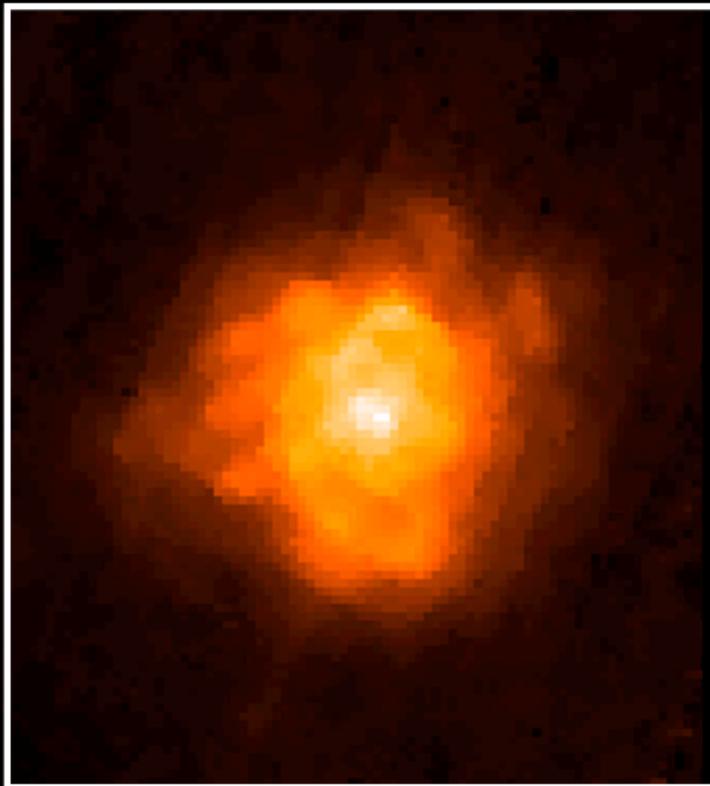
Satélite Planck:

- Barrido de todo el cielo con resolución de 5 arcmin.
- Fin principal: Mapear el fonde de microondas
- Resultados adicionales:
 - Catálogo de unos ~20000 galaxias en
 - Banda (sub)milimétrica
 - Mapeo de galaxias cercanas y Vía Láctea



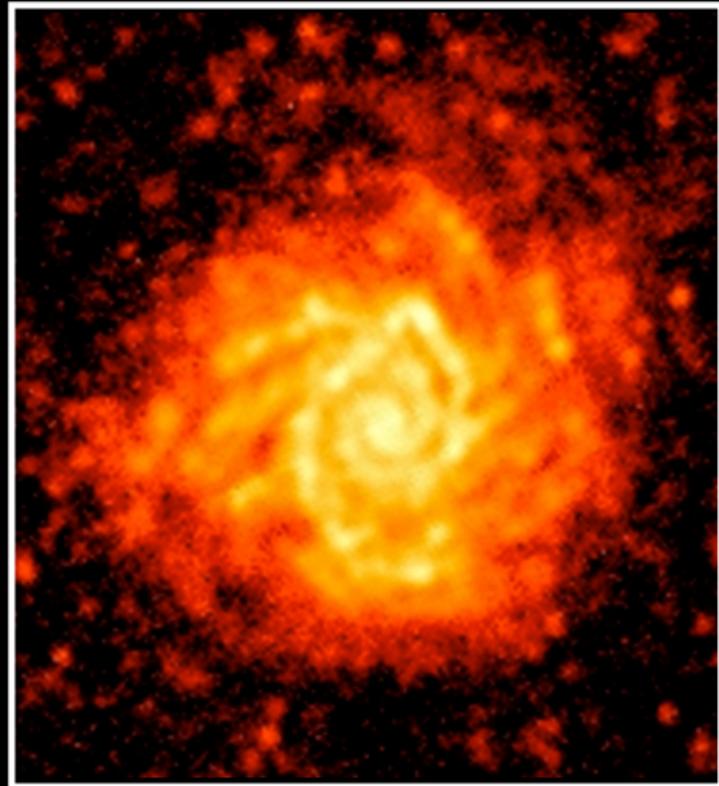
Imágenes de la emisión de polvo con Herschel

M74 *Spitzer* 160 μm



NASA / *Spitzer* SINGS

M74 SPIRE 250 μm



ESA and the SPIRE Consortium

Telescopios milimétricos

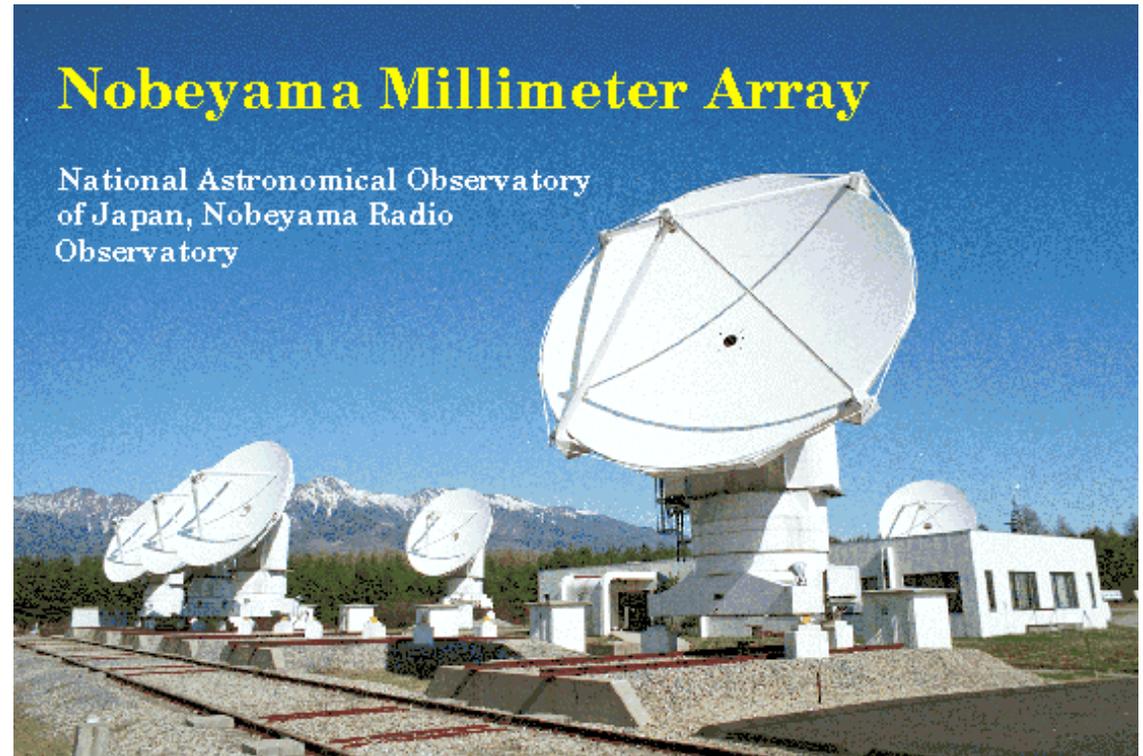


- IRAM (Instituto de Radioastronomía milimétrica)
- Organismo Alemán-francés-español fundado en 1979
- Dos instrumentos:
 - Antena de 30m en Sierra Nevada:
 - Interferómetro Plateau de Bure en los Alpes Frances
 - Observan entre 1 y 3mm



Antenas de Nobeyama

- Antena de 45m en Nobeyama (Japón)
- Interferómetro con 6 antenas a 10m
- Precisión de superficie solo permite observaciones para longitudes de onda superiores a 2mm



Large millimeter telescope (LMT)



Montaña (4600m) donde se está construyendo LMT



- Radiotelescopio milimétrico (entre 0.8 y 4mm) de 50m de diametro
- Casi terminado
- Proyecto conjunto entre México (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica) y EEUU (University of Massachusetts)
- Sitio: cerca de Puebla al sur de Mexico City

Antenas más pequeñas

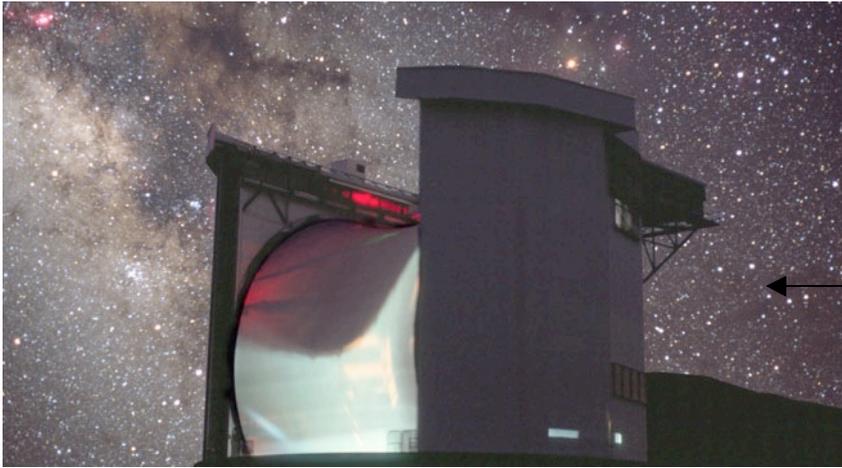
Five College Radio Astronomy Observatory (Massachusetts, EEUU)

- Antena de 14m, a nivel del mar
- Desde 1976
- Observaciones para λ por encima de 2mm

Kitt Peak Telescopio de 12m (EEUU)

- A punto de cerrar hace varios años
- Operado ahora por la Universidad de Arizona





Mauna Kea (Hawaii) a 4092m

James Clerk Maxwell Telescope:

- Diámetro de 15m (más grande del mundo para submm)
- Rango de longitudes de onda 300 - 1200 μ m

Caltech Submillimeter Observatory:

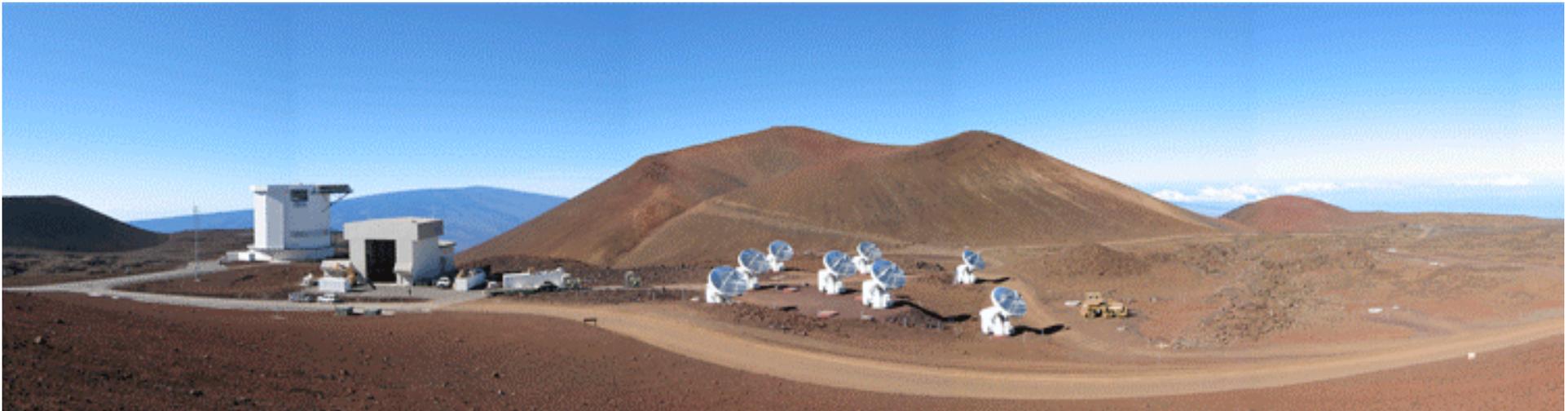
- Diámetro de 10m



Telescopios
submilimétricos

Submillimeter Array

- En Hawaii, Mauna Kea
- Proyecto de Smithsonian Astrophysics Observatory (EEUU) y Academia Sinica Institute of Astronomy & Astrophysics (Taiwan)
- En marcha desde hace 2004
- Observaciones desde 0.3 hasta 1.7mm
- Consiste de 8 antenas de 6m diámetro
- Primer interferómetro submilimétrico



Futúro: Atacama Large Millimeter Array (ALMA) en el desierto de Atacama en Chile (a 5000m de altura)



- Proyecto conjunto entre EEUU, ESO, Japón
- Consistirá de 64 antenas de 12m de diametro



Instrumentación en el (sub)mm

Se distinguen (similar a espectroscopía y fotometría en el visible):

1. Receptores de línea: Primera detección de CO (molécula observable más abundante) en 1970
2. Bolómetros:
 - Miden radiación total en ancho rango de λ \rightarrow gran sensibilidad
 - Más usado: mide diferencia de resistencia con temperatura
 - Desde 1992 usado en IRAM 30m (a 1.2mm)
 - Desde 1997: SCUBA (0.3-0.9mm) en el James Clark Maxwell Telescope.
 - Desde ~ 2004: Laboca (0.8mm) en Apex (CHILE)

Peculiaridades de las observaciones en (sub)mm

- El fondo (tierra, atmósfera) emite también, por eso hace falta hacer observaciones diferenciales (como en radio, infrarrojo):
señal = observación en la fuente+cielo - observación en cielo sin fuente
- Sensibilidad necesaria para bolómetros:
 - Fuentes más débiles detectables: mK
 - Fondo: 300K
 - Se detecta señal un factor $< 10^5$ más débil que el fondo
- Detectores de un pixel han sido usuales hasta hace poco
 - Mapas no se pueden hacer de una única exposición, sino punto por punto (necesita mucho tiempo...)
 - Hace falta saber muy bien, adonde apunta el telescopio → buena puntería, modelos de puntería tienen que tomar en cuenta, p.e. distorsión gravitacional de la antena a cambiar de elevación y debido, p.e. a viento.

Importancia y principales logros de este rango de λ

Formación estelar

- Descubrimiento de una nueva clase de galaxias (luminosas en IR)
- Este rango es imprescindible para estimar la formación estelar total en galaxias
- Es importante para entender el comienzo de la formación de una estrella

Polvo interestelar

- La emisión de polvo nos permite entender su distribución y sus propiedades \rightarrow necesario para apreciar el contenido del universo, también la parte oculta por el polvo

Gas molecular

- Propiedades (temperatura, densidad...) y distribución del gas molecular indicando zonas potenciales de formación estelar

Gas molecular: Historia

1930s: Moléculas detectadas en emisión (en visible) en atmósferas de estrellas tardías (atmósferas frías) y cometas

1941: Detección de CN en absorción, más tarde CH⁺ y CH

→ Moléculas simples existen en el medio interestelar

1963: Detección de CH en absorción en radio (centimétrico) → Comienzo de espectroscopía molecular en radio

1968: Detección de NH₃ y H₂O → moléculas con más de dos átomos existen!

1970: Detección de CO → Comienzo de espectroscopía molecular en radio milimétrico

1975: Primera detección de gas molecular extragaláctico

Hoy: Se han detectado más de 100 moléculas

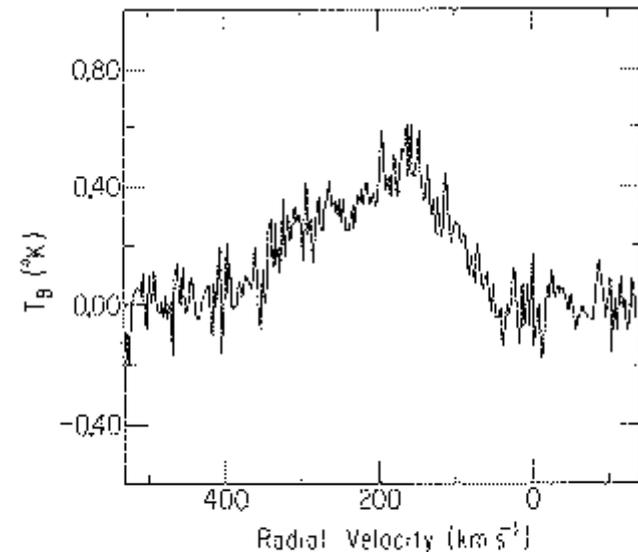
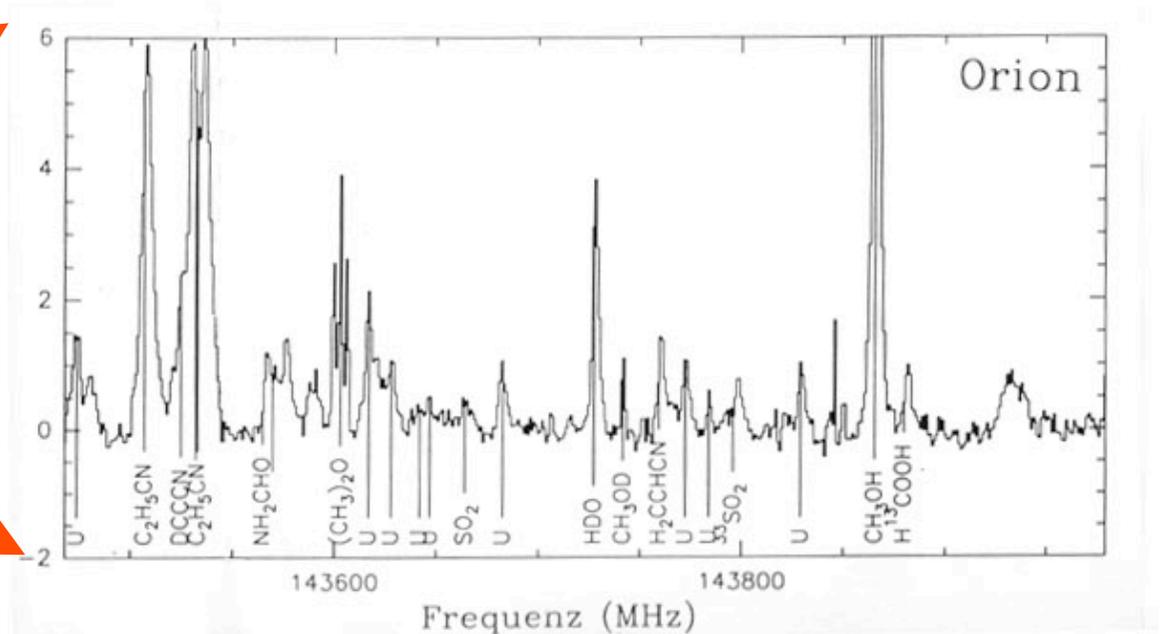
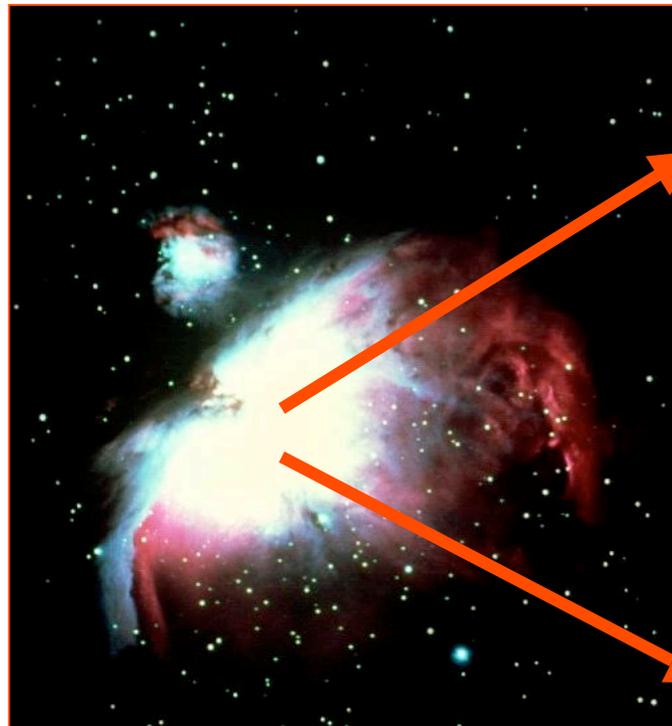


FIG. 1.—CO emission spectrum in the direction of the assumed nucleus of M82: 0451^m44^s, 69°55'03" (1950.0) (Burbridge *et al.* 1964). The velocity resolution is 2.6 km s⁻¹.

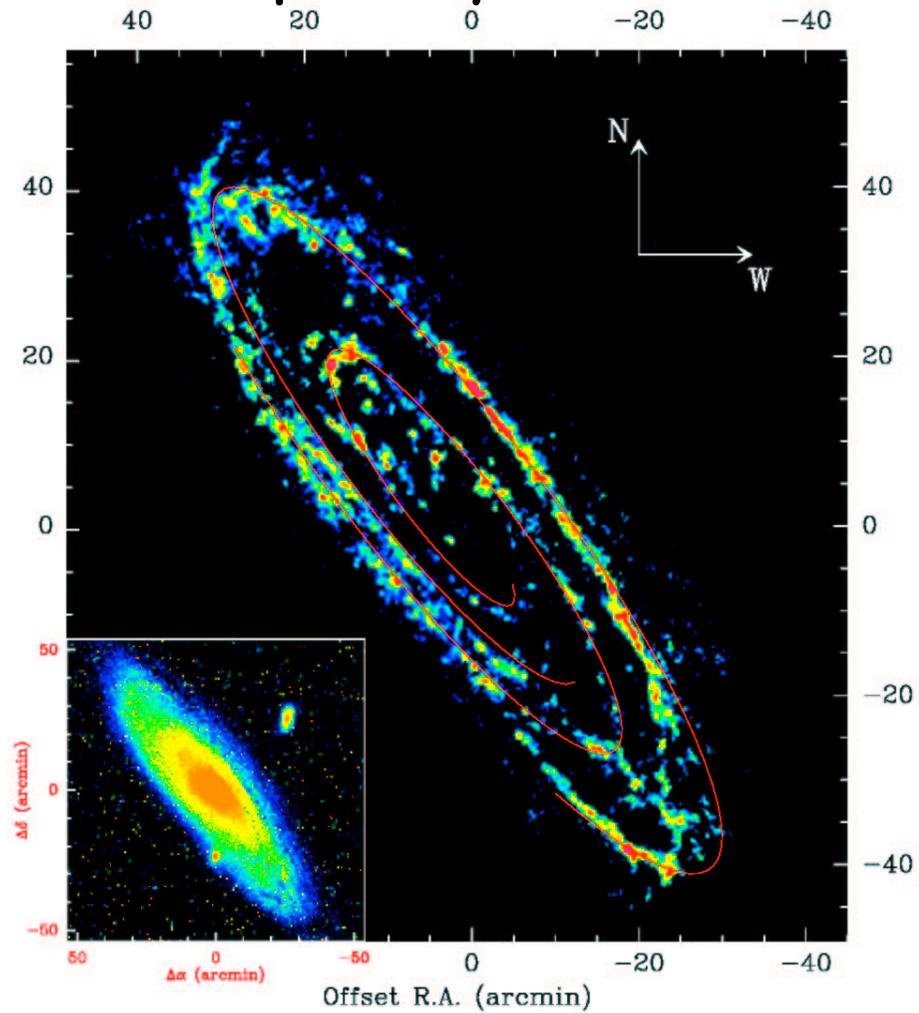
CO(1-0) in M82 (Rickard et al. 1975)

Ejemplo: Moléculas en en la nube de formación estelar de Orion



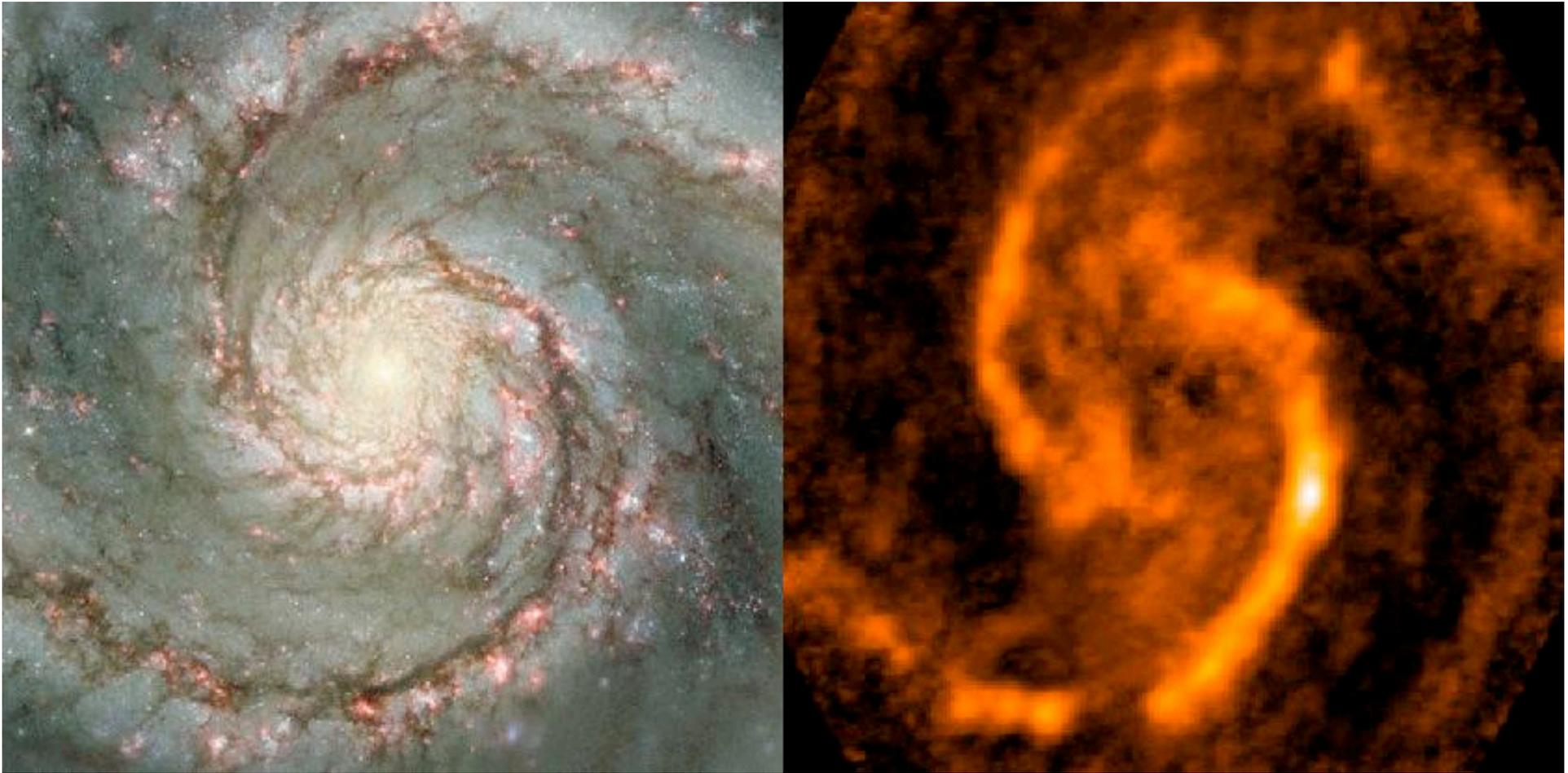
Muchas lineas no identificadas
(Mauersberger et al. (Pico Veleta))

La galáxia de Andrómeda en la luz óptica y a 3mm



Guelin et al. (Telescopio Pico Veleta)

CO sigue los brazos espirales, destacando zonas de formación estelar

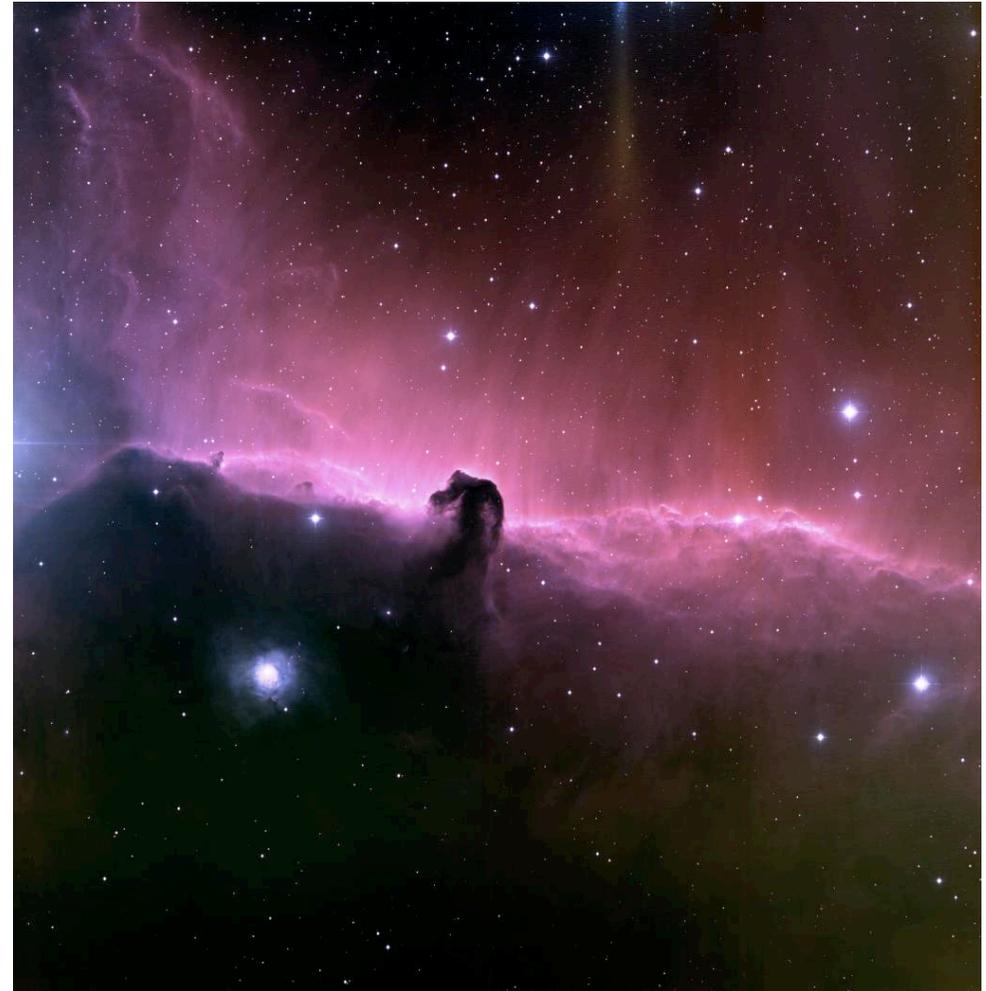


M51 en óptico

y en CO

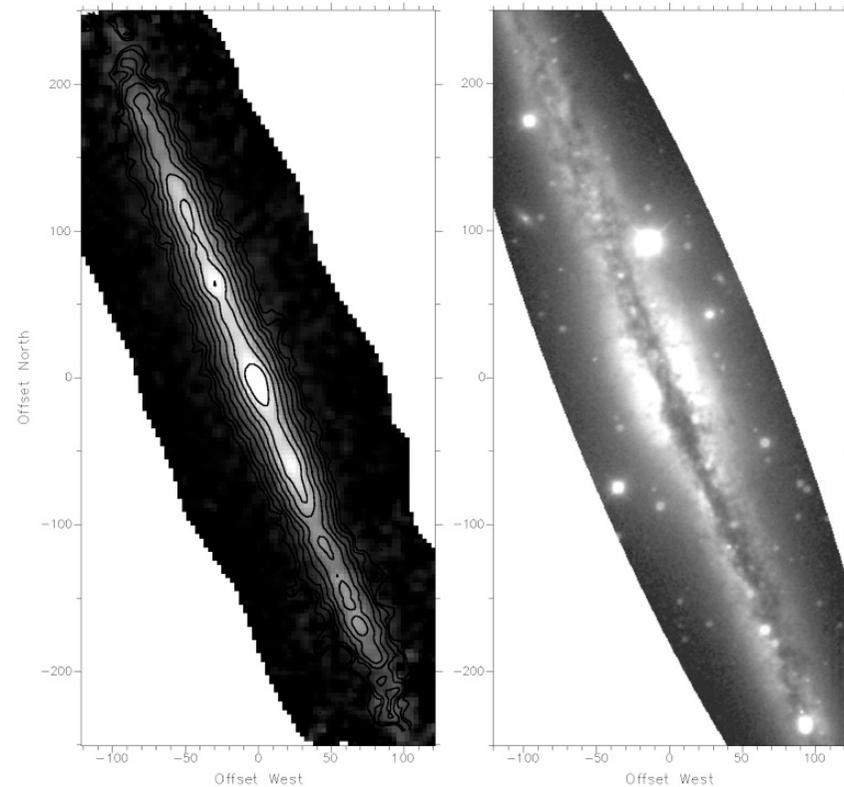
Polvo interestelar en galaxia

- Se conocía desde hace muy tiempo existencia de zonas oscuras, nubes oscuras, franjas oscuras en galaxias.
- 1934 Hubble se da cuenta que existe "zona vacía" (zone of avoidance) cerca del plano galáctico con menos galaxias → permite determinar altura por encima del disco del polvo interestelar en nuestra Galaxia.



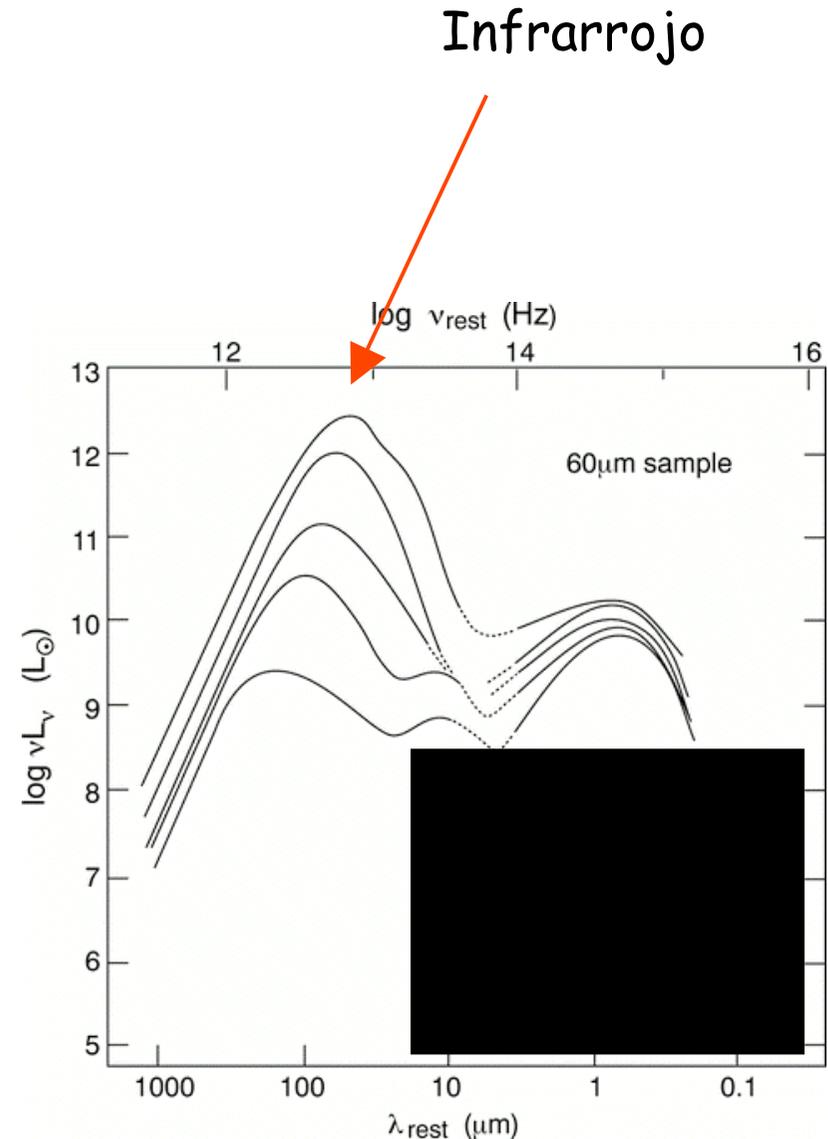
Polvo interestelar en galaxias

- La imagen ha cambiado mucho desde que vemos emisión y no solamente extinción
- Antes: polvo molestaba
- Ahora: interesa sus propiedades, su distribución



Galaxias luminosas y ultraluminosas en infrarrojo

- Caso extremo de brote de formación estelar (FE)
- Descubierta por el satélite IRAS
- Luminosas: $L_{\text{IR}} > 10^{11} L_{\text{sol}}$
- Ultraluminosas: $L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\text{sol}}$
- (en comparación: Nuestra galaxia: $L_{\text{IR}} \sim 3 \cdot 10^9 L_{\text{sol}}$)
- Características:
 - Alta "eficiencias de la FE" (alta tasa de FE/masa de gas)
 - Mucho polvo \rightarrow mucha emisión en el IR
 - Relativamente abundantes en el universo cercano



Galaxias con brote de formación estelar

Definición: Brote de formación estelar ("starburst"):

Tasa de FE tan alta que solo puede durar poco tiempo (\ll edad del universo
13 000 millones de años)

- Tiempo típico: 10-100 millones años
- Aumento de tasa de FE: 10-1000 veces sobre épocas tranquilas
- Muchas veces concentrado en los centro de las galaxias
- Se produce gran número de supernovas \rightarrow gran producción de energía

Preguntas abiertas:

- Que provoca esta fase?
- La viven todas las galaxias de vez en cuando?
- La formación de estrellas es igual que en una galaxia "normal"

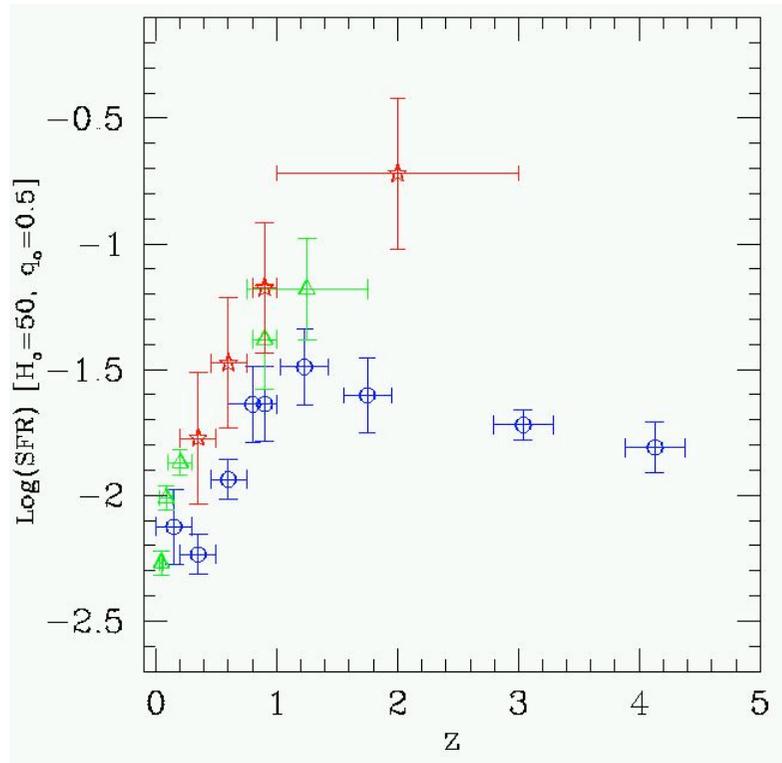
Observando el universo temprano en (sub)mm

Importancia de polvo para la cosmología

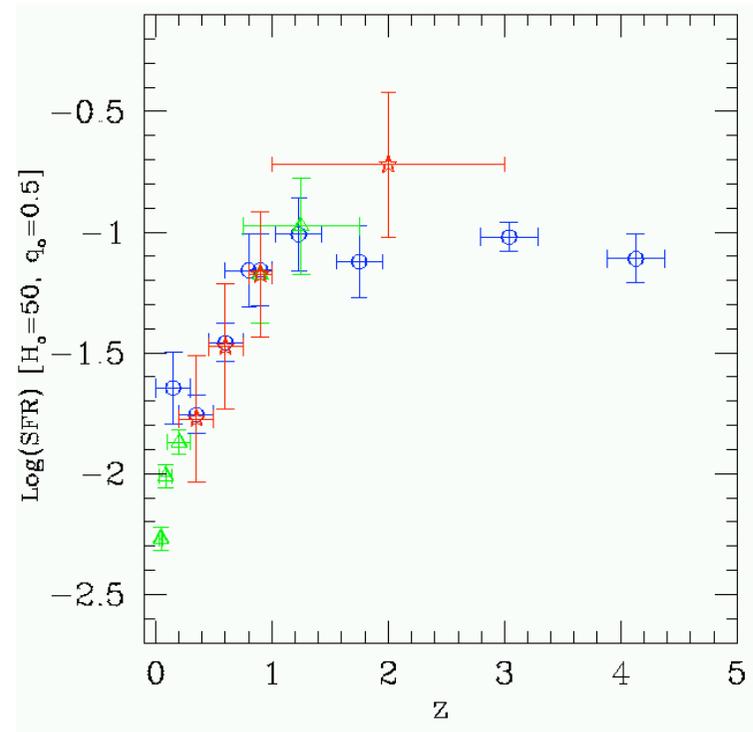
- Absorbe la luz de galaxias lejanas y distorsiona la visión del universo, debido al:
 - Polvo en discos y halos galácticos, manifestándose en
 - Polvo en sistemas "Lyman α " (comprobado con la falta de Cr)
 - Enrojecimiento de cuásares
- La extinción debe tenerse en cuenta para determinar la tasa de formación estelar en el universo lejano.
- La emisión del polvo es una forma de determinar
 - La tasa de formación estelar en el universo lejano
 - La presencia de galaxias en el universo lejano

FORMACIÓN ESTELAR EN EL PASADO

Sin corregir la extinción



Después de corregir la extinción

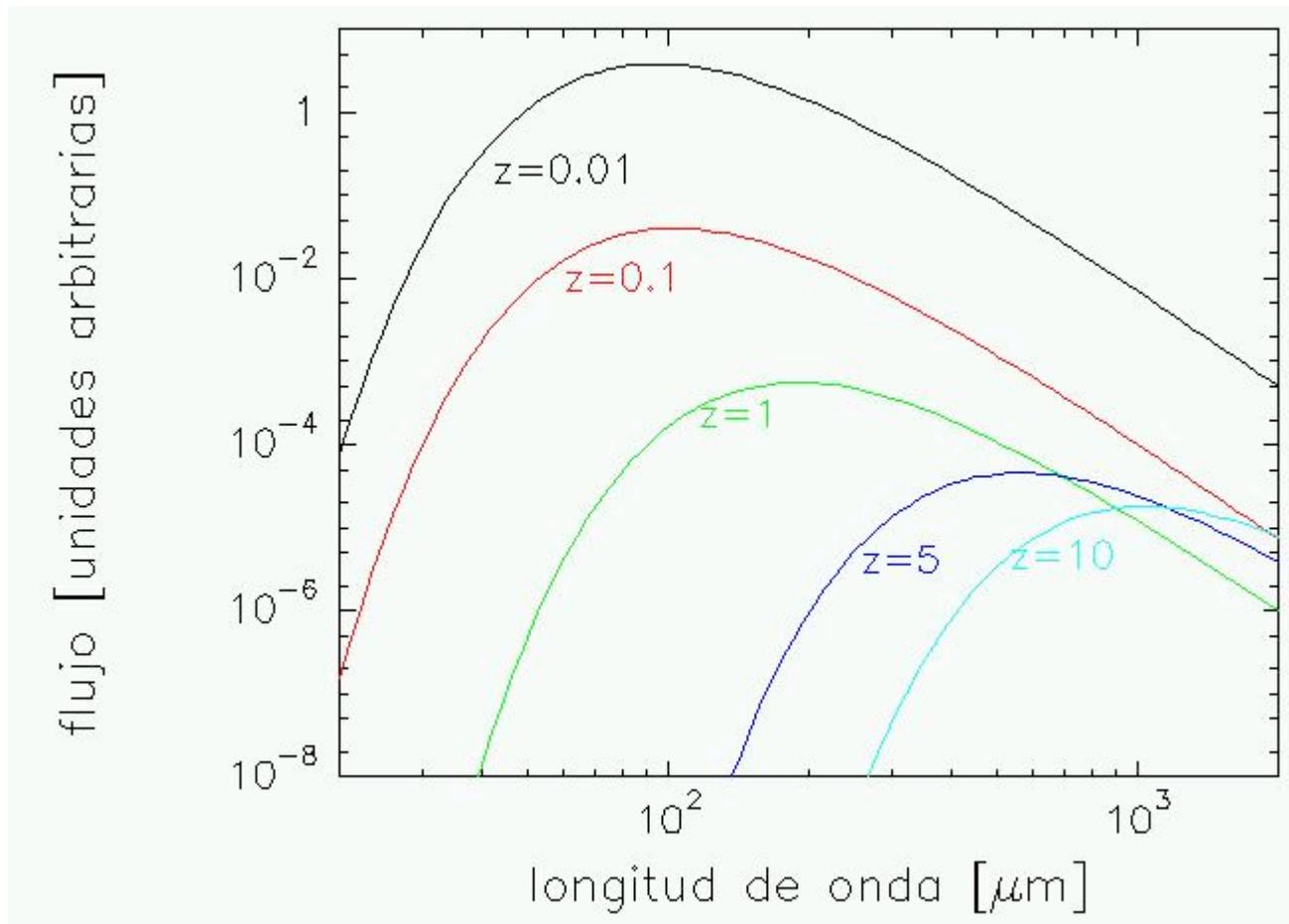


- ★ Infrarrojo mediano/lejano
- H α
- △ UV

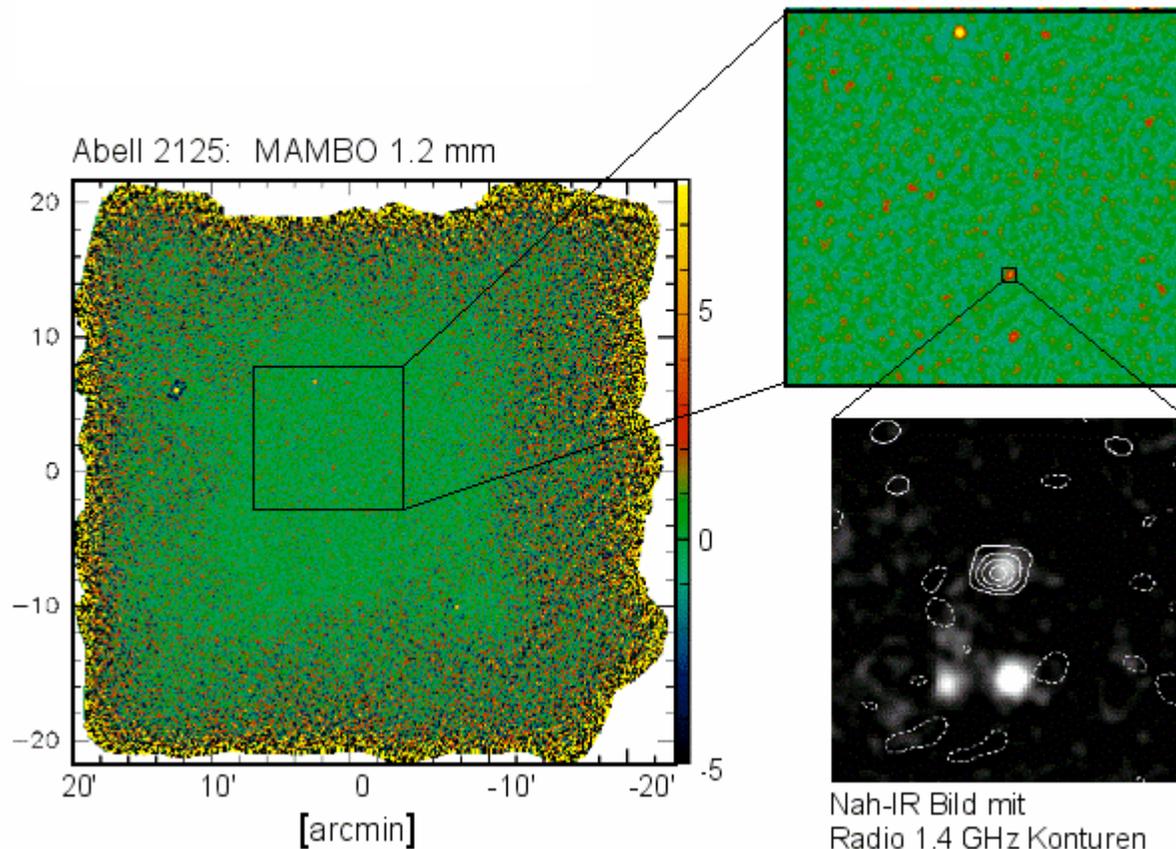
(Calzetti 2000)

La emisión de polvo es un buen indicador para el estudio de la formación estelar en el pasado, porque la emisión (sub)milimétrica :

1. no sufre extinción, y
2. apenas sufre disminución



Buscando galaxias en el universo lejano



Mapeando el cielo
A 1.2mm con el
telescopio de
IRAM de 30m

Motivación:

Como eran las galaxias en el pasado?

Como eran las galaxias gigantes (elípticas en cúmulos) que vemos hoy en el pasado?

Problemas:

- Para determinar la distancia hace falta espectroscopia óptica
- La identificación óptica es difícil
 - Mala resolución de los bolómetros (sub)mm (10-15seg. arco)
 - Objetos son débiles en el óptico

Solución: Observaciones interferométricas en radio, ventajas

- Buena resolución
- Buena correlación entre la emisión de polvo y radio (en caso de varias fuentes en el haz, se puede escoger la correspondiente a la emisión de polvo)

Hacer espectroscopia en estas posiciones con los telescopios más grandes, incluso si no hay objeto visible.... → típicamente son objetos lejanos

Observaciones en CO → masa del gas

→ Grandes cantidades de gas, posibilitando un gran brote de formación estelar

Pregunta abierta: ¿Que objetos son hoy día? Posiblemente elípticas

Observaciones de polvo y CO en cuásares distantes

SDSS J1148+5251 , $z=6.4$

- Los objetos más distantes observadas son cuásares
- El cuasar más distante es a $z=6$ (luz emitido en un momento cuando el universo tenía <30% de la edad actual)
- Algunos de estos objetos están detectados en CO y en emisión de polvo \rightarrow ya existían metales en el universo temprano \rightarrow la formación estelar empezó pronto

