

Overview ISM phases in Milky Way

phase	n (cm ⁻³)	T (K)	f_V
coronal (HIM)	~ 0.004	$> 10^{5.5}$	$\sim 0.5?$
warm, neutral (WNM)	~ 0.6	~ 5000	~ 0.4
warm, ionized (WIM)	~ 0.2	~ 8000	~ 0.1
cold, neutral (CNM)	~ 30	~ 100	~ 0.01
molecular clouds	$\sim 10^{3-6}$	$\sim 10-50$	~ 0.0001
HII regions	$\sim 1-10^5$	$\sim 10^4$	very small

- Herschel (1785): zonas con falta de estrellas
- El gas molecular interestelar fue descubierto en 1940, por la detección de bandas de absorción de transiciones electrónicas en CH (cianógeno), CH^+ y CN (cianuro), superpuestas a espectros de estrellas brillantes. En el óptico.
- A fines de la década de 1960: primeras detecciones en radio (cm y mm): OH, CO, NH_3 y H_2CO
- 1970: El satélite Copernicus detecta bandas de H_2 y HD en absorción en el UV. FUSE (1999) detectó H_2 difuso en casi todas las direcciones.
- En la década del 70 las observaciones IR detectaron H_2 en emisión de líneas prohibidas de transiciones rotacionales-vibracionales
- Nuevas tecnologías: se conocen cientos de moléculas!

Very incomplete list of known interstellar molecules

H ₂	HD	H ₃ ⁺	H ₂ D ⁺		
CH	CH ⁺	C ₂	CH ₂	C ₂ H	C ₃
CH ₃	C ₂ H ₂	C ₃ H(lin)	c-C ₃ H	CH ₄	C ₄
c-C ₃ H ₂	H ₃ CCC(lin)		C ₄ H	C ₅	C ₂ H ₄
H ₂ C ₄ (lin)	HC ₄ H	CH ₃ C ₂ H	C ₆ H	HC ₆ H	H ₂ C ₆
C ₇ H	CH ₃ C ₄ H	C ₈ H	C ₆ H ₆		
OH	CO	CO ⁺	H ₂ O	HCO	HCO ⁺
HOC ⁺	C ₂ O	CO ₂	H ₃ O ⁺	HOCO ⁺	H ₂ CO
C ₃ O	CH ₂ CO	HCOOH	H ₂ COH ⁺	CH ₃ OH	CH ₂ CHO
CH ₂ CHOH		CH ₂ CHCHO		HC ₂ CHO	C ₅ O
CH ₃ OCHO	CH ₂ OHCHO	CH ₃ COOH		CH ₃ OCH ₃	CH ₃ CHO
CH ₃ CH ₂ CHO					c-C ₂ H ₄ O
(CH ₃) ₂ CO		HOCH ₂ CH ₂ OH			CH ₃ CH ₂ OH
NH	CN	N ₂	NH ₂	C ₂ H ₅ OCH ₃	(CH ₂ OH) ₂ CO
N ₂ H ⁺	NH ₃	HCNH ⁺	H ₂ CN	HCN	HNC
CH ₂ CN	CH ₂ NH	HC ₂ CN	HC ₂ NC	HCCN	C ₃ N
CH ₃ CN	CH ₃ NC	HC ₃ NH ⁺	HC ₄ N	NH ₂ CN	C ₃ NH
CH ₂ CHCN		HC ₅ N	CH ₃ C ₃ N	C ₅ N	CH ₃ NH ₂
NO	HNO	N ₂ O	HNCO	CH ₃ CH ₂ CN	HC ₇ N
SH	CS	SO	SO ⁺	NH ₂ CHO	CH ₃ C ₅ N
SiC	SiN	SiO	SiS	NS	HC ₉ N
AlCl	KCl	HF	AlF	SiH	HC ₁₁ N
H ₂ S	C ₂ S	SO ₂	OCS	HCl	
SiCN	SiNC	NaCN	MgCN	CP	NaCl
H ₂ CS	HNCS	C ₃ S	c-SiC ₃	HCS ⁺	PN
CH ₃ SH	C ₅ S	FeO		MgNC	c-SiC ₂
				SiH ₄	AlNC
					SiC ₄

Moléculas simples (diatómicas) a muy raras, de 15 átomos (HC₁₃N). La mayor parte son orgánicas (tienen C). La estructura de la mayoría es lineal.

- La formación de moléculas en el MIE es posible cuando la densidad es elevada: colisión entre átomos frecuente.
- Se necesita de polvo que proteja a las moléculas de ser disociadas por radiación UV.

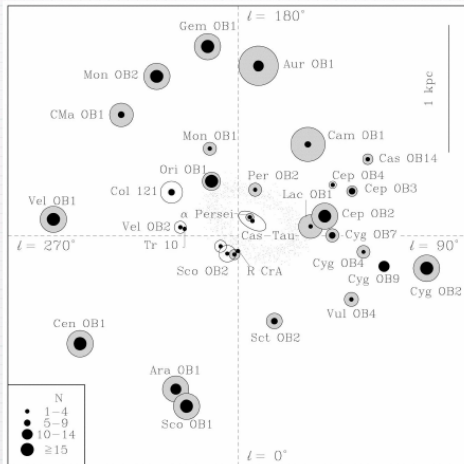
⇒ Alta densidad y polvo

⇒ regiones más densas y frías del MIE:

NUBES MOLECULARES

- Contienen mayoritariamente H_2 , con trazas de otras moléculas.
- Su estudio es muy importante: es donde se forman las estrellas. Condiciones iniciales de la formación estelar.

OB Associations and GMCs within 1.5 kpc of the Sun



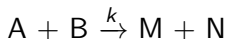
- $N = \#$ stars with $M_V > -5$

De Zeeuw et al. 1999

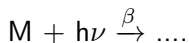
¿Cómo se forman las moléculas?

- H_2 es la más abundante pero su formación en la fase gaseosa es muy poco probable.
- Cómo es posible tener tantas especies moleculares si la formación de H_2 no es nada evidente?

Reacciones bimoleculares



A, B: átomos, moléculas, iones



M: moléc., N: moléculas, átomo, fotón

k : tasa de la reacción, $[k] = \text{cm}^3 \text{s}^{-1} \sim \sigma(\text{cm}^2) v(\text{cm s}^{-1})$

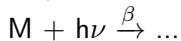
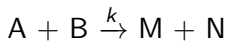
β : tasa de fotodisociación, $[\beta] = (\text{molec}) \text{s}^{-1}$

valor típico: $\beta \sim 10^{-10} \text{s}^{-1}$: tiempo de vida de la molécula

en el MIE difuso: $\frac{1}{\beta} \sim 300 \text{ años!}$

$n(A)$: densidad de moléc A, $[n(A)] = (\text{molec}) \text{cm}^{-3}$

Reacciones bimoleculares



tasa de formación de M: $k n(A) n(B)$ $[\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}]$

tasa de destrucción de M: $\beta n(M)$ $[\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}]$

$\implies$ Abundancia de M:

$$\frac{dn(M)}{dt} = \text{formación} - \text{destrucción} = k n(A) n(B) - \beta n(M)$$

$$\text{en equilibrio: } \frac{dn(M)}{dt} = 0 \implies n(M) = \frac{kn(A)n(B)}{\beta}$$

$k = k(T)?$, $\beta?$

salen de cálculos cuánticos o experimentos sofisticados de laboratorio

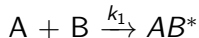
El problema de la química interestelar es:

- * bajas densidades
- * bajas temperaturas

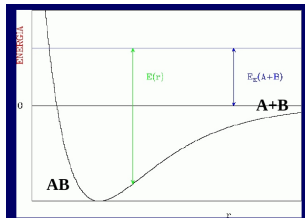
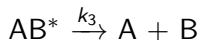
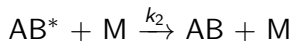
En las reacciones químicas, cuando dos átomos o moléculas se encuentran, pueden formar un complejo intermedio que necesita perder energía rápidamente para que la reacción sea efectiva. En la Tierra, esa energía puede disiparse con la ayuda de un tercer cuerpo o un catalizador. Pero en el espacio, donde las densidades son muy bajas, casi nunca hay un tercer cuerpo disponible. Por eso, muchas reacciones solo pueden avanzar si la energía se disipa de otra forma, como por emisión de radiación o gracias a la ayuda de superficies de granos de polvo, que actúan como catalizadores naturales. $A + B \xrightarrow{k_1} AB^*$

Formación de moléculas

Consideremos la reacción:

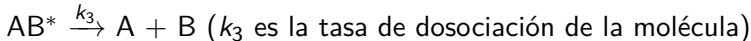
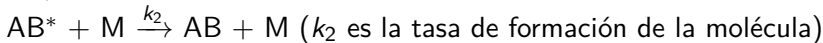
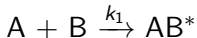


Puede suceder que AB^* interactúe con un tercer cuerpo (catalizador) para eliminar el exceso de energía producido en la formación del complejo activado. Sin embargo, también AB^* podría disociarse en las partículas iniciales A y B:



Formación de moléculas

Entonces tenemos:



$$\frac{dn(AB)}{dt} = n(AB^*) n(M) k_2$$

$$\frac{dn(AB^*)}{dt} = n(A) n(B) k_1 - n(AB^*) n(M) k_2 - n(AB^*) k_3$$

suponiendo que el complejo activo llega a un equilibrio

$$\begin{aligned} \frac{dn(AB^*)}{dt} &= 0 \\ \implies n(AB^*) &= \frac{n(A) n(B) k_1}{k_3 + k_2 n(M)} \end{aligned}$$

$$\implies \frac{dn(AB)}{dt} = \frac{k_1 k_2 n(A) n(B) n(M)}{k_3 + k_2 n(M)}$$

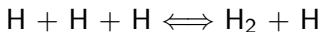
Si A, B y M son especies neutras con:

$$k_1 \sim 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}, \quad k_2 \sim 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad \text{PERO} \quad k_3 \sim 10^{11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\longrightarrow dn(AB)/dt \sim 10^{-32} n(A) n(B) n(M) \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$dn(AB)/dt \sim 10^{-32} n(A) n(B) n(M) \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

- El mejor caso en el MIE ocurre cuando $A=B=M=H$



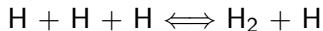
- Para otras moléculas el caso óptimo es cuando:

$A = H, M = H, B = C, N, O$, o sea, $n(B) \sim 10^{-4} n(H)$
entonces:

$$\frac{dn(BH)}{dt} \sim 10^{-36} n^3(H) \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Formación de moléculas

Ejemplo: consideremos una nube ATOMICA sin granos de polvo y sin campo de radiación. Para $t=0$ la densidad de H es n y la de H_2 es cero. Si H_2 se forma así:



con $k \sim 10^{-32} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

$$\longrightarrow \frac{dn(H_2)(t)}{dt} = kn^3(H)(t)$$

Fracción de gas molecular:

$$f(t) = \frac{2n(H_2)(t)}{n(H)(t) + 2n(H_2)(t)} = \frac{2n(H_2)(t)}{n} \text{ y } df(t)/dt = kn^2(1 - f(t)^3)$$

$$f(t_0)=0.5$$

$n(\text{cm}^{-3})$	...	10^5	10^{10}	10^{12}	10^{15}	10^{16}	10^{18}
t_0 (years)	...	$6 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^4$	6	$6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-10}$
					(600 s)	(6s)	(0.0006s)

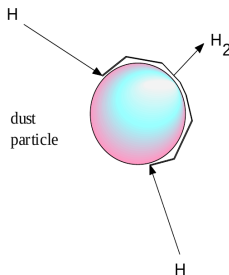
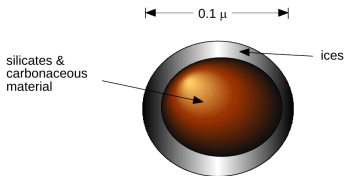
→ Las reacciones entre 3 cuerpos son sólo eficientes para densidades superiores a 10^{10} cm^{-3}

Formación de moléculas

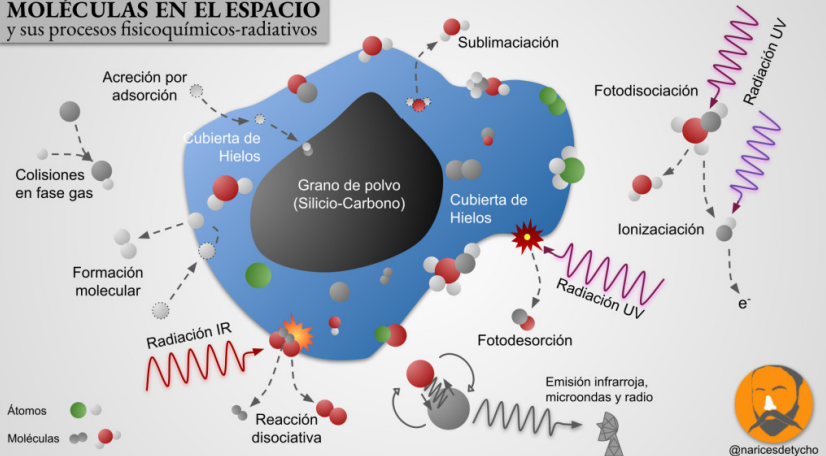


pero detectamos moléculas, en particular H_2 así que tiene que haber alguna otra manera.

Granos de polvo interestelar:



MOLÉCULAS EN EL ESPACIO y sus procesos fisicoquímicos-radiativos



Formación de moléculas

Una vez que tenemos H_2 , cómo se forman las otras moléculas?

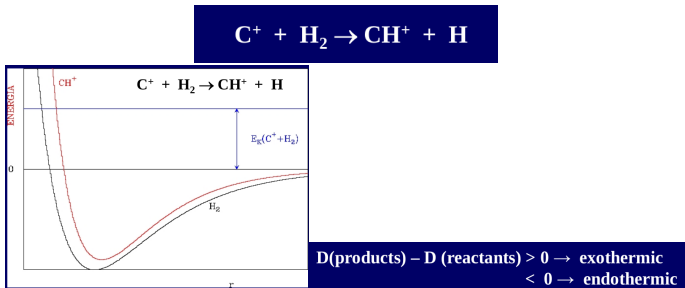


La asociación radiativa es un proceso en el cual dos moléculas se unen para formar una molécula mediante la emisión de radiación electromagnética

Es posible en el MIE? es suficientemente rápida como para ser eficiente : NO, en las nubes moleculares frías, la asociación radiativa no es eficiente porque la energía disponible a bajas temperaturas no es suficiente para superar la barrera de activación de la reacción y formar moléculas

Las reacciones van a ocurrir si son exotérmicas, debido a la baja temperatura del MIE

Consideremos por ejemplo:



Energía de disociación del $H_2 = 4.48 \text{ eV}$

Energía de disociación del $CH^+ = 4.09 \text{ eV}$

→ la reacción se dará si AGREGAMOS 0.39 eV al sistema, es ENDOTERMICA y tiene poca chance de ocurrir ya que necesita $T = E/k = 4000 \text{ K}$

Sin embargo, la reacción:



puede ocurrir, ya que $D(\text{H}_2) = 4.48 \text{ eV}$ y $D(\text{OH}^+) = 5.1 \text{ eV} \rightarrow$ es exotérmica por 0.62 eV .

k fue medido en laboratorio y es bastante rápida, $k \sim 1.6 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

Pero cómo formamos O^+ en una nube donde no llega la radiación UV?

Dado que el potencial de ionización del H y del O son similares, el proceso :



es eficiente.

El intercambio de carga es un proceso químico que implica el traslado de un electrón entre dos especies, de modo que una de ellas pierde un electrón y la otra lo gana

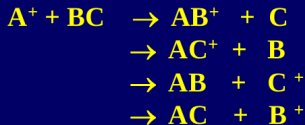
ERIC HERBST AND WILLIAM KLEMPERER

TABLE 4
CHARGE-TRANSFER REACTIONS

Reaction	$k(10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1})$
57. $\text{H}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{H} \dots\dots\dots$	1.9
58. $\text{H}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{H} \dots\dots\dots$	1.0 1.2
59. $\text{H}^+ + \text{OH} \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H} \dots\dots\dots$	1.0
60. $\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{H} \dots\dots\dots$	1.0 8.2
61. $\text{H}^+ + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_3^+ + \text{H} \dots\dots\dots$	1.0 5.2
62. $\text{H}^+ + \text{H}_2\text{CO} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}^+ + \text{H} \dots\dots\dots$	1.0
63. $\text{C}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{C} \dots\dots\dots$	1.0 0.85
64. $\text{C} + \text{O}_2^+ \rightarrow \text{C}^+ + \text{O}_2 \dots\dots\dots$	1.0

Values in red have been measured
in the laboratory

Las reacciones ion-neutro ocurren cuando un ion choca con una molécula neutra y forman nuevas especies. Son importantes en el medio interestelar porque pueden ocurrir incluso a muy bajas temperaturas, ya que no necesitan superar una barrera de energía. En estas reacciones, la energía cinética del ion se transfiere a la molécula, lo que puede provocar una ruptura de enlaces y una redistribución de la energía interna. Esto puede llevar a la formación de especies nuevas y a veces más complejas, como moléculas orgánicas.



Son todas las reacciones ion-neutro suficientemente rápidas?

Some typical ion-neutral reactions

Reaction	$k(10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1})$
4. $\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^+ + \text{H}$	2.1
5. $\text{CO}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}$	2.0
6. $\text{N}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{HN}_2^+ + \text{H}$	1.7
7. $\text{He}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{products}$	$< 10^{-4}$
8. $\text{O}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H}$	2.0
9. $\text{N}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{NH}^+ + \text{H}$	0.7
10. $\text{OH}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH}_2^+ + \text{H}$	1.5
11. $\text{NH}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{NH}_2^+ + \text{H}$	0.6
12. $\text{OH}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH}_3^+ + \text{H}$	1.4
13. $\text{NH}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{NH}_3^+ + \text{H}$	0.23
14. $\text{NH}_3^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{H}$	$< 5 \times 10^{-4}$
15. $\text{CH}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_2^+ + \text{H}$	10^{-2}
16. $\text{CH}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3^+ + \text{H}$	10^{-2}
17. $\text{HCN}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CN}^+ + \text{H}$	2.0
18. $\text{He}^+ + \text{CO} \rightarrow \text{C}^+ + \text{O} + \text{He}$	2.0
19. $\text{He}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}^+ + \text{N} + \text{He}$	0.72
20. $\quad \quad \quad \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{He}$	0.48
21. $\text{He}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}^+ + \text{O} + \text{He}$	0.62
22. $\quad \quad \quad \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{He}$	0.38
23. $\text{He}^+ + \text{CN} \rightarrow \text{C}^+ + \text{N} + \text{He}$	2.0
24. $\text{H}_3^+ + \text{O} \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H}_2$	2.0
25. $\text{H}_3^+ + \text{C} \rightarrow \text{CH}^+ + \text{H}_2$	2.0
26. $\text{H}_3^+ + \text{CO} \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{H}_2$	1.4
27. $\text{H}_3^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{HN}_2^+ + \text{H}_2$	1.5
28. $\text{H}_3^+ + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2$	2.0
29. $\text{H}_3^+ + \text{CN} \rightarrow \text{HCN}^+ + \text{H}_2$	2.0
30. $\text{H}_3^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2$	3.0
31. $\text{H}_3^+ + \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCO}_2^+ + \text{H}_2$	1.9
32. $\text{H}_3^+ + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{H}_2$	3.6
33. $\text{H}_3^+ + \text{HCN} \rightarrow \text{H}_2\text{CN}^+ + \text{H}_2$	2.0
34. $\text{H}_3^+ + \text{H}_2\text{CO} \rightarrow \text{H}_3\text{CO}^+ + \text{H}_2$	2.0
35. $\text{HCO}^+ + \text{OH} \rightarrow \text{HCO}_2^+ + \text{H}$	1.0
36. $\text{HCO}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{CO}$	0.5

Los iones juegan un rol fundamental en la química de las nubes moleculares

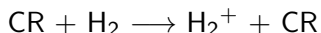
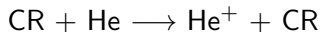
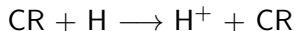
Formación de moléculas

Entonces, cuáles son los procesos clave en la química del medio interestelar?

- 1 H_2 se forma en la superficie de los granos de polvo
- 2 Necesitamos iones atómicos o moleculares

Pero, cómo se ionizan las moléculas dentro de las nubes moleculares?

con rayos cósmicos!



H_3^+ es una molécula importante para la formación de otras moléculas.

Formación de moléculas: resumen

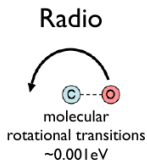
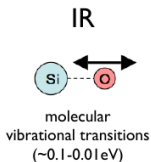
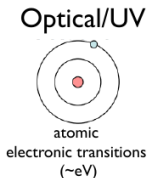
- La química en el MIE es MUY distinta a la terrestre. Reacciones en fase gaseosa y no líquida y densidades muuuuuy bajas (menores al vacío más perfecto) → no tienen lugar las reacciones que necesitan el encuentro simultáneo de 3 o más partículas de gas
- A la vez, la T es tan baja que las reacciones endotérmicas son generalmente irrelevantes
- Mecanismo fundamental de formación: reacciones en las que una de las partículas está cargada: **reacciones ion-molécula**. Iones: pequeña cantidad por la acción de los rayos cósmicos. Carga de los iones: fuerza atractiva en la nube de electrones de las moléculas. Este mecanismo puede explicar la formación de la mayoría de las moléculas observadas.
- La molécula más abundante: H_2 no se puede formar así. Se forma mediante reacciones en la superficie de los granos de polvo (catalizadores).

Transiciones moleculares

- **Molécula:** sistema mucho más complejo que un átomo aislado.
Aproximación de *Born-Oppenheimer* : trata de forma separada los movimientos de los núcleos y de los electrones.

Tres tipos de transiciones:

- **Electrónicas:** cambios en la distribución de la nube de electrones
- **Vibracionales:** los núcleos vibran respecto a su posición de equilibrio.
- **Rotacionales:** rotación de la molécula como un todo.



Transiciones moleculares

En la aproximación de Born-Oppenheimer se puede hacer un cálculo del orden de magnitud de las energías involucradas en cada transición.

Llamamos a al tamaño molecular típico ($a \sim 1\text{\AA}$) y M a la masa molecular típica ($M \sim 10m_p$) y m la masa del electrón.

- **Transiciones electrónicas:** Ppio. de incertidumbre:

$\Delta p \Delta x \sim p a \sim \hbar \implies p \sim \hbar/a \implies$ su energía es $E = p^2/2m$
 $\implies$ la separación de los niveles de energía electrónicos será del orden de:

$$E_{el} \sim \frac{\hbar^2}{2ma^2}$$

Para los valores típicos considerados:

$$E_{el} \sim 1,2 \times 10^{-11} \text{ erg} = 7.5 \text{ eV} \implies \nu_{el} = 1,8 \times 10^{15} \text{ Hz} \\ \implies \lambda = 1700\text{\AA}: \textbf{UV}$$

- **Transiciones vibracionales:** El potencial internuclear tiene un mínimo para una dada separación entre núcleos. Podemos approx. la vibración de un núcleo en torno a esa posición de eq. como la de un oscilador armónico con frecuencia angular ω y amplitud $\xi < a$. la energía será $E_{vib} \sim \frac{1}{2} M \omega^2 \xi^2$, donde $\omega \sim \left(\frac{\hbar^2}{m M a^4} \right)^{1/2}$.

Tomando valores típicos:

$$E_{vib} \sim 8,9 \times 10^{-14} \text{ erg} = 0.06 \text{ eV} \implies \nu_{el} = 1,3 \times 10^{13} \text{ Hz} \\ \implies \lambda = 23 \mu\text{m}: \text{ INFRARROJO}$$

Se ven en emisión y en absorción si la emisión de fondo es intensa en IR.

Transiciones moleculares

- **Transiciones rotacionales:** El momento angular de la molécula está cuantizado y debe ser múltiplo de $\hbar$:

$$L = I\omega \sim \hbar \quad (I: \text{momento de inercia} = M a^2).$$

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 = L^2 / 2 I \quad \text{Tomando valores típicos:}$$

$$E_{rot} \sim 6,5 \times 10^{-16} \text{ erg} = 4 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

$$\Rightarrow \nu_{rot} = 9,8 \times 10^{10} \text{ Hz} \Rightarrow \lambda = 3,1 \text{ mm: } \mathbf{RADIO}$$

- la regla de selección para las transiciones es $\Delta J = \pm 1$
- la probabilidad de emisión espontánea:

$$A_{ul} = \frac{64\pi^4}{3hc^3} \nu^3 |\mu_{ul}|^2, \quad \mu_{ul} \text{ es el momento dipolar eléctrico correspondiente a esa transición (ul)}$$

$$|\mu_{ul}|^2 = \mu^2 \frac{J+1}{2J+3}, \quad \mu \text{ es momento dipolar eléctrico permanente de la molécula.}$$

$$\Rightarrow A_{J+1 \rightarrow J} = 1,165 \times 10^{-11} \mu^2 \nu^3 \frac{J+1}{2J+3}$$

$$A \text{ en } s^{-1}, \quad \nu \text{ en GHz y } \mu \text{ en debye.}$$

Notar que va como ν^3 : aumenta mucho al subir el nivel de energía

En la aprox. de Born-Oppenheimer, estas energías son aditivas, la energía total de la molécula será:

$$E = E_{el} + E_{vib} + E_{rot}$$

Si la nube tiene una temperatura cinética $T_k \Rightarrow$ la energía disponible para excitar una transición es $k T_k$.

Las temperaturas características de las transiciones son:

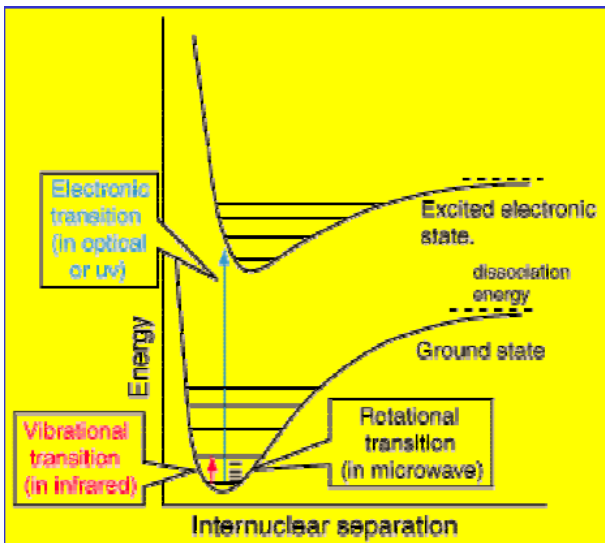
$$T_{el} = E_{el}/k \sim 9 \times 10^4 \text{ K}$$

$$T_{vib} = E_{vib}/k \sim 600 \text{ K}$$

$$T_{rot} = E_{rot}/k \sim 5 \text{ K}$$

Nube molecular: $T_k \sim 10 \text{ K} \Rightarrow$ sólo se excitan las transiciones rotacionales.

Energía de disociación de H₂: 4.7 eV



Orion hot core spectrum

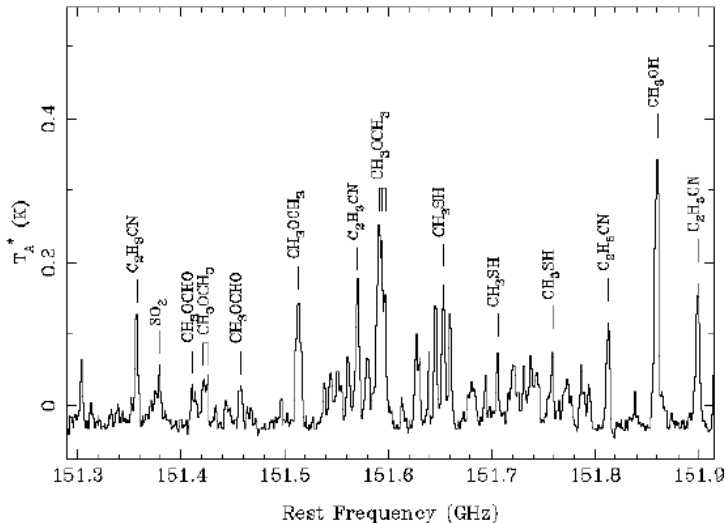
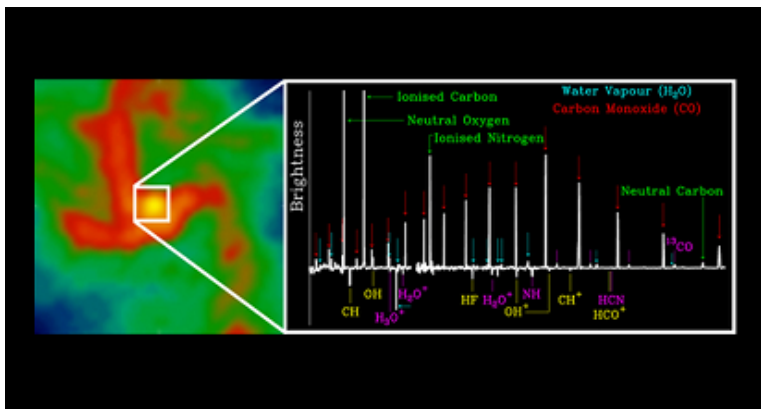
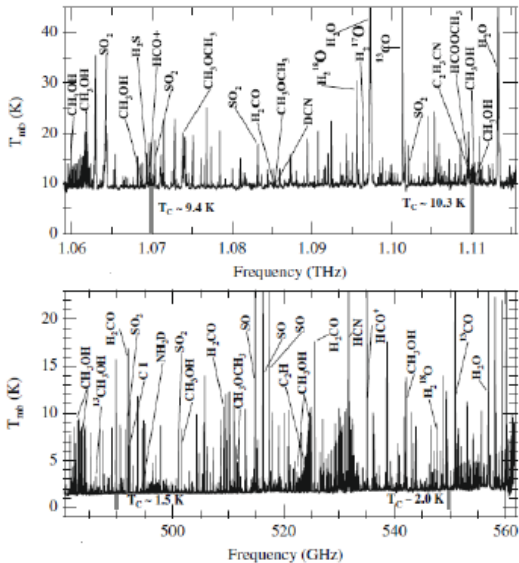


Imagen del centro galáctico en el continuo de radio y espectro tomado por Herschel en FIR. Algunas de estas líneas no habían sido detectadas antes de Herschel.



Temperatura estimada: 1000 K. Choques del gas orbitando o cayendo hacia el agujero negro supermasivo del centro de la galaxia.

Espectro de un núcleo caliente (hot core)



Herschel HIFI spectra of Orion KL [Bergin et al. 2010, A&A, 521, L20]

Hidrógeno molecular H_2

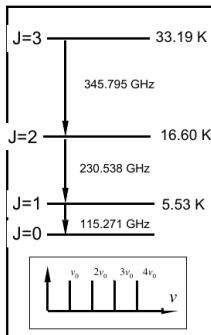
- Es la molécula más abundante. Las transiciones electrónicas en el UV lejano fueron detectadas por muchos satélites. Su abundancia es tan grande que aún en las nubes difusas sus líneas son tan intensas que están dominadas por las alas de amortiguamiento. Están en la parte amortiguada de la curva de crecimiento $\rightarrow$ se puede estimar su densidad de columna
- Molécula homonuclear $\rightarrow$ no tiene momento dipolar permanente $\rightarrow$ no pueden emitir emisión por líneas puramente rotacionales.
 $\Rightarrow$ Sólo se observa en las zonas de elevada temperatura, zonas afectadas por choques. Estas condiciones sólo se dan en zonas muy reducidas y las condiciones de alta temperatura no son representativas de las condiciones generales de las nubes moleculares interestelares.

- Todo lo que conocemos viene de observaciones de especies "trazadoras".
La más importante: CO, en la transición rotacional J:1-0,
 $\lambda = 2,6 \text{ mm}$, $\nu = 115 \text{ GHz}$.
- Las condiciones favorables para la formación de CO y de H_2 coinciden y la población de los niveles rotacionales del CO está gobernada por colisiones con las moléculas de H_2 $\longrightarrow$
se estima la cantidad de H_2 a partir de la observación de CO.

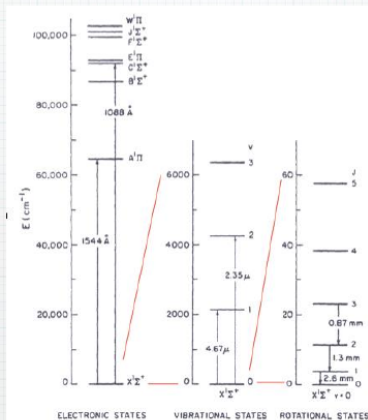
La molécula de CO

Es la más utilizada para el estudio de nubes moleculares porque:

- Es la molécula más abundante después del H_2 ($[H_2/CO] \sim 5,6 \times 10^3$) y presenta transiciones rotacionales fácilmente excitables.
- Es resistente. Su energía de disociación es de unos 11.2 eV.
- Su densidad crítica es baja: permite que el gas emita en esa línea incluso en condiciones de baja densidad
- La energía cinética disponible en las colisiones es suficiente



Energy levels of CO



Primer nivel rotacional: 4.8×10^{-4} eV

Primer nivel vibracional: 0.27 eV

Primer nivel electrónico: 8.1 eV

La molécula de CO

- Su momento dipolar eléctrico es pequeño $\rightarrow$ el coeficiente de emisión espontánea es pequeño, $A_{J \rightarrow J-1}$.
Para $J=1-0$, $A_{10} = 6,78 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$
 $\Rightarrow$ Los niveles se pueblan por colisiones con moléculas de H_2
 $\Rightarrow T_{\text{exc}} = T_k$ (la línea estará termalizada)
- La molécula tiene variantes isotópicas con transiciones observables, generalmente con $\tau \ll 1 \rightarrow$ sirven para obtener parámetros físicos de las nubes.

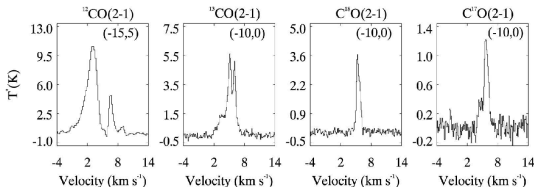


Figura: Perfiles observados hacia la fuente IRAS 18140-0440

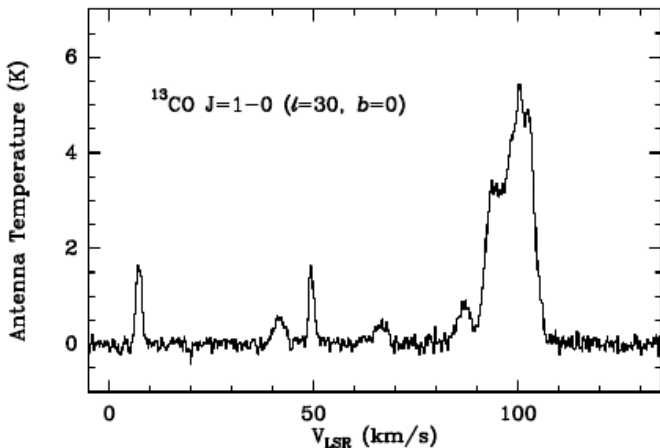


Figure 5.12: A spectrum of the $J=1-0$ rotational line of ^{13}CO toward Galactic longitude $\ell = 30^\circ$ and Galactic latitude $b = 0^\circ$. This spectrum shows a number of discrete velocity features produced by molecular clouds along this line of sight. These data were obtained with the 14-m telescope of the Five College Radio Observatory and were provided by Mark Heyer.

Perfiles observados

Vemos 3 perfiles, de la misma región, en Taurus-Ariaga:

- La línea $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ tiene la apariencia de estar saturada (chata y ancha), señal de que es ópticamente gruesa. Los fotones que emiten cerca de la frecuencia central son absorbidos y re-emitidos a otras frecuencias (Doppler). Estamos viendo emisión que viene sólo de una capa de la nube.
- Las otras dos líneas son ópticamente delgadas. Menor amplitud y con un pico marcado. En este caso TODAS las moléculas contribuyen a la línea y la intensidad integrada dará la densidad de columna.

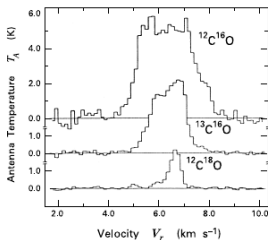


Figure 6.1 Intensity profiles of the $J = 1 \rightarrow 0$ line in three CO isotopes, observed toward

- H_2 no es observable en nubes densas y frías $\rightarrow$ los relevamientos en general se hacen en moléculas trazadoras, como el CO
- La mayoría de los relevamientos son en ^{12}CO : $J = 1 - 0$ a 2.6 mm
- Ventajas: es la segunda molécula más abundante y tiene momento dipolar pequeño $\rightarrow$ fácilmente excitable aún en gas de baja densidad.
- Desventaja: ópticamente grueso $\rightarrow$ difícil obtener densidades de columna.

Relevamientos con disco simple

Molecular Clouds in the Milky Way

Mark Heyer and T.M. Dame (2015)

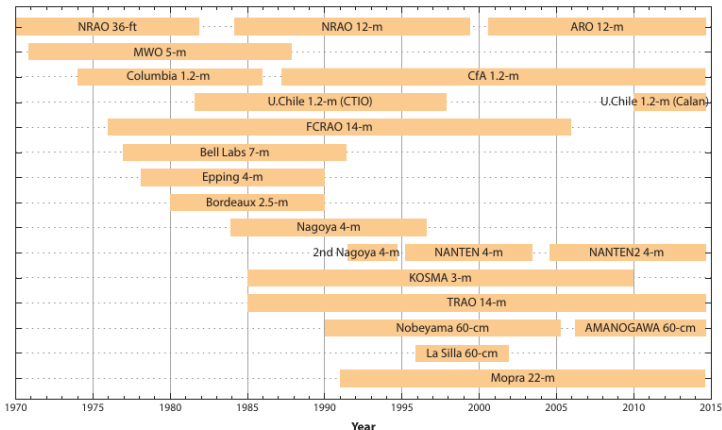


Figure 1

A summary of single-dish telescopes that have conducted large carbon monoxide surveys of the Milky Way. These are sorted top to bottom by the year of their first observations, with the exception that twin telescopes located in opposite hemispheres are grouped together. Changes of a telescope's location, institution, aperture, or operating frequency are marked by breaks in the horizontal lines.

Relevamientos de CO

Milky Way Molecular Line Surveys

Survey	GRS	UMSB	Columbia/CTA	Bell Labs
Dates	1998-2005	1981-1984	since 1980	1978-1992
Line(s)	13CO (CS)	12CO	12CO	13CO
Sensitivity (K)	0.4 (0.2)	0.4	0.18	0.1
Vel. resolution (km s ⁻¹)	0.2	1.0	0.65	0.68
l extent (degrees)	18 to 55.7	8 to 90	10 to 70	-5 to 117
b extent (degrees)	-1 to 1	-1.05 to 1.05	-6 to 6	-1 to 1
Vel. extent (km s ⁻¹)	-5 to 135	-100 to 200	-140 to 140	-250 to 250
Resolution	46"	45"	450"	103"
Sampling (arcsec)	22	180	225-450	180
#Spectra	1,993,522	40,551	54,000	73,000
Total survey region (sq. degrees)	75.4	172.2	660	244

Relevamientos de CO

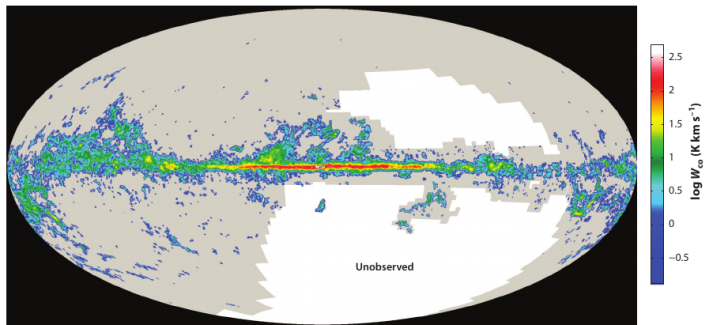
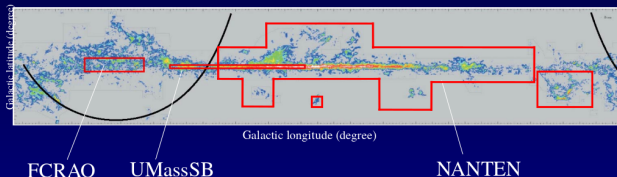


Figure 3

An image of $^{12}\text{CO } J=1-0$ emission constructed from the recent Center for Astrophysics campaign to examine the high-latitude sky and the composite surveys of Dame et al. (2001) and Mizuno & Fukui (2004).

Algunos relevamientos

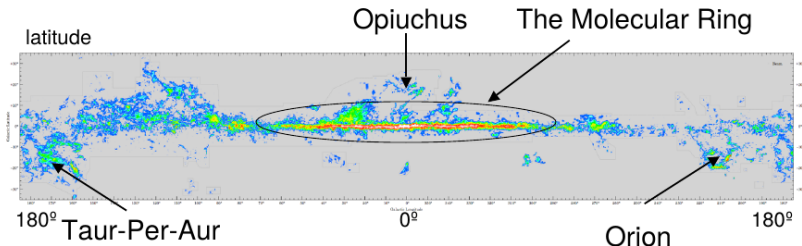
CO Galactic plane surveys



<u>name</u>	<u>diameter</u>	<u>beam</u>	<u>grid</u>	<u>covered area</u>	<u>longitude range</u>
Columbia	1.2m	8.7'	8-15'	$ b < 10-25^\circ$	(complete)
Mass.-S.B.	14m	45"	3-6'	$ b < 1^\circ$	(inner Galaxy, ^{13}CO)
FCRAO	14m	45"	50"	$ b < 4^\circ$	(outer Galaxy)
NANTEN	4m	2.6'	4-8'	$ b < 10-25^\circ$	$(220^\circ < l < 60^\circ)$

Resolución angular $\rightarrow$ los relevamientos sirven para estudiar las estructuras moleculares más grandes

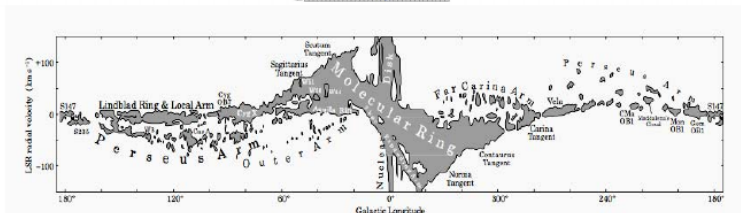
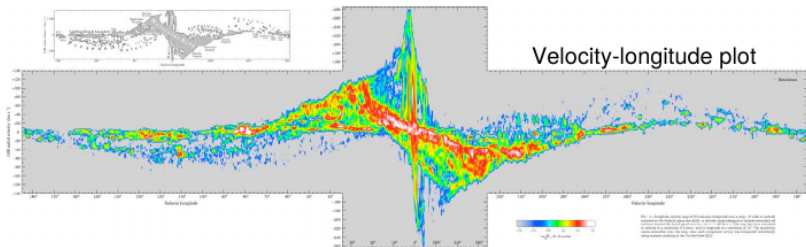
Distribution of CO Clouds



“The Milky Way in Molecular Clouds: A New Complete CO Survey”
Dame, Hartmann and Thaddeus, ApJ 547 792 2001

CO has a vertical extent $\pm 45\text{-}75$ pc over much of the disk,
similar to OB associations, and flares out to $\pm 100\text{-}200$ pc.

Kinematics of CO Clouds



Dame et al. ApJ 547 792 2001

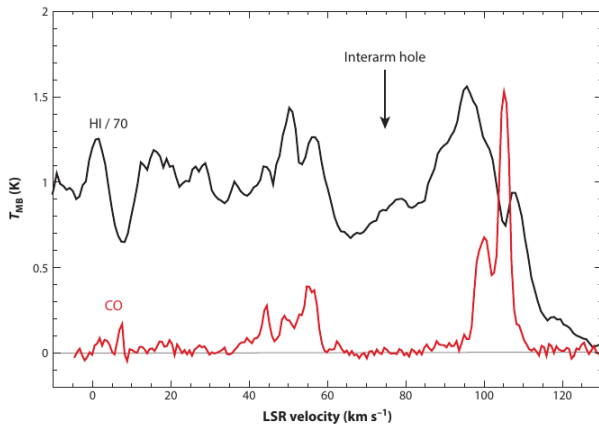


Figure 4

$^{13}\text{CO } J = 1-0$ and 21-cm spectra with comparable angular resolutions (~ 1 arcmin) toward a prominent interarm region in the inner Galaxy (Shane 1972, Dame et al. 1986, Sato et al. 2014) at $l = 25^\circ$, $b = 0^\circ$. ^{13}CO is from the Galactic Ring Survey (Jackson et al. 2006) and HI from the Very Large Array Galactic Plane Survey (Stil et al. 2006). Abbreviation: LSR, local standard of rest.

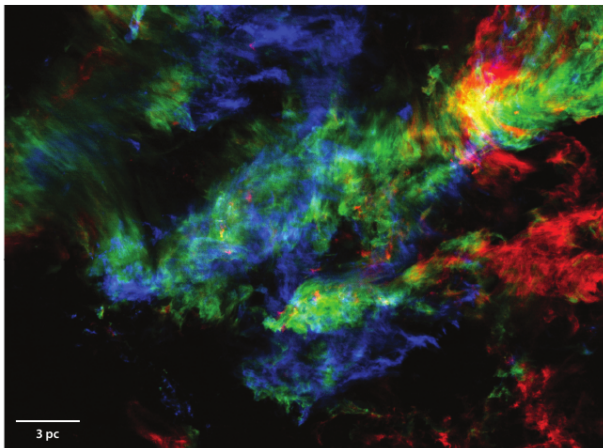


Figure 10

An image of $^{12}\text{CO } J = 1-0$ emission from the Taurus molecular cloud integrated over v_{LSR} intervals $0-5 \text{ km s}^{-1}$ (*blue*), $5-7.5 \text{ km s}^{-1}$ (*green*), and $7.5-12 \text{ km s}^{-1}$ (*red*), illustrating the intricate surface brightness distribution and complex velocity field of the Taurus cloud. The data are from Narayanan et al. (2008). Adapted from figure 12 of Goldsmith et al. (2008) and reproduced with permission from AAS.

LLAMA: Long Latin American Millimeter Array

Observatorio binacional: Argentina y Brasil.

En la puna salteña se está instalando una antena paraboloide de 12 metros de diámetro que permitirá mejorar la calidad de las investigaciones en el área de la radioastronomía.



Band	Frequency range (GHz)	Type
1	31.3– 45	SSB
2	67 – 90	SSB
3	84 –116	2SB
4	125 –163	2SB
5	163 –211	2SB
6	211 –275	2SB
7	275 –373	2SB
8	385 –500	2SB
9	602 –720	DSB
10	787 –950	DSB

Alto Chorrillos (Salta)



El disco está armado



En este momento :- (

