

# La spettroscopia molecolare: Lo studio del mezzo interstellare

S.Poppi (Osservatorio Astronomico di Cagliari-INAf)



La spettroscopia molecolare è uno strumento per studiare il mezzo interstellare. Permette di conoscerne:

- Composizione
- Temperatura
- Densità



Il mezzo interstellare è costituito principalmente da polveri e gas.

Gli elementi che costituiscono il gas:

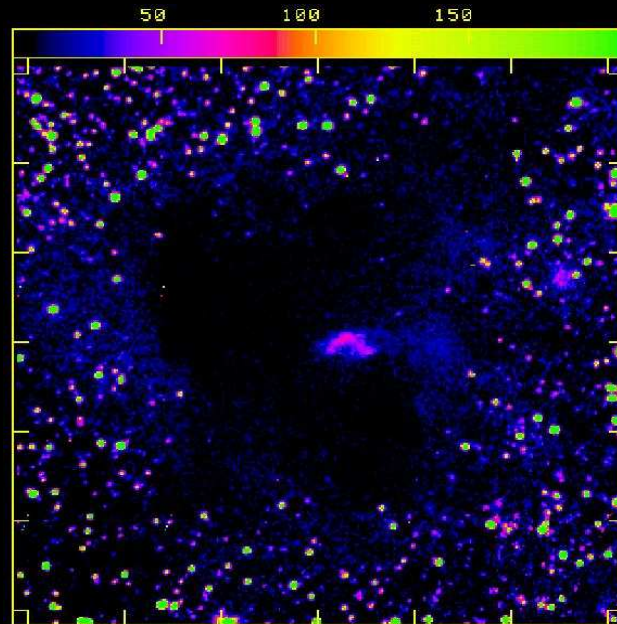
- Idrogeno (H) - 75%
- Elio (He) - 24 %
- Polveri 1 %



Densità  $\approx 1$  atomo /  $\text{cm}^3$



## Nubi Molecolari



Densità  $\approx 10^6$  atomi/  $\text{cm}^3$

Temperatura  $\approx 50$  K

L'ambiente agevola la formazione di molecole e impedisce la loro dissociazione.



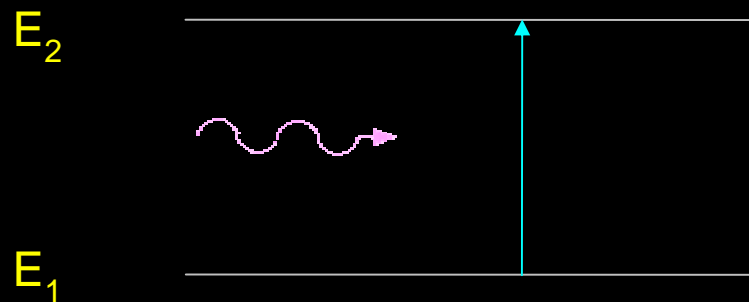
<i>Molecola</i>	<i>Denominazione usuale (all'occorrenza)</i>	<i>Data della scoperta</i>	<i>Lunghezza d'onda della riga (valori arrotondati)</i>
CH		1937	visibile: banda: 430 nm etc.
CN	cianogeno	1940	visibile: banda: 387,5 nm etc.
CH <sup>+</sup>		1941	visibile: banda: 423,2 nm etc.
OH	ossidril	1963	radio: 18 cm
NH <sup>+</sup>	ammoniaca	1968	radio: 1,3 cm
H <sub>2</sub> O	acqua	1968	radio: 1,4 cm
H <sub>2</sub> CO	formaldeide	1969	radio: 6,2 cm
CO	ossido di carbonio	1970	radio: 2,6 mm
HCN	cianuro di idrogeno	1970	radio: 3,4 mm
HC <sub>3</sub> N	cianoacetilene	1970	radio: 3,3 cm
H <sub>2</sub>	idrogeno	1970	ultravioletto: 101,3-110,8 nm
CH <sub>3</sub> OH	alcol metilico	1970	radio: 36 cm
HCO <sub>2</sub> H	acido formico	1970	radio: 18 cm
HCO <sup>+</sup>	ione	1970	radio: 3,4 mm
HCONH <sub>2</sub>		1971	radio: 6,5 cm
CS	monosolfuro di carbonio	1971	radio: 2,0 mm
SiO	monossido di silicio	1971	radio: 2,3 mm
OCS	solfuro di carbonile	1971	radio: 2,7 mm
CH <sub>3</sub> CN	metilcianuro	1971	radio: 2,7 mm
HNCO	acido isocianico	1971	radio: 3,4 mm
CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	metilacetilene	1971	radio: 3,5 mm
CH <sub>3</sub> CHO	acetaldeide	1971	radio: 28 cm
H <sub>2</sub> CS	tioformaldeide	1971	radio: 9,5 cm
HNC	isocianuro di idrogeno	1971	radio: 3,3 mm
H <sub>2</sub> S	idrogeno solforato	1972	radio: 1,8 mm
H <sub>2</sub> CNH		1972	radio: 5,7 cm
SO	monossido di zolfo	1973	radio: 3,0 mm
N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>		1974	radio: 3,2 mm
C <sub>2</sub> H	etimile	1974	radio: 3,4 mm
CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	metilammina	1974	radio: 3,5;4,1 mm
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	etere dimetile	1974	radio: 9,6 mm
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	alcol etilico	1974	radio: 2,9;3,5 mm
SO <sub>2</sub>		1975	radio: 3,6 mm
SiS	solfuro di silicio	1975	radio: 2,8;3,3 mm
H <sub>2</sub> CCHCN	acrilonitrina	1975	radio: 22 cm
HCOOCH <sub>3</sub>	formiato di metile	1975	radio: 18 cm
NS	solfito d azoto	1975	radio: 2,6 mm
NH <sub>2</sub> CN	cianamide	1975	radio: 3,7 mm
HC <sub>3</sub> N	cianodiacetilene	1976	radio: 3,0 mm
HCO	formile	1976	radio: 3,5 mm
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	acetilene	1976	infrarosso: 2,4 μm
HC <sub>3</sub> N		1977	radio: 3,0 cm
C <sub>4</sub> N		1977	radio: 3,4 mm
H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O	chetene	1977	radio: 3,0 mm
HNO	nitrosile	1977	radio: 3,7 mm
CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN	cianuro d'etile	1977	radio: 2,6 a 3,4 mm
CH <sub>4</sub>	metano	1977	radio: 3,9 mm
HC <sub>5</sub> N		1978	radio: 3,0 cm

Da J. C. Pecker: Capire l'Astronomia, Hoepli, Milano, 1985



L'interazione tra radiazione e materia segue le leggi della meccanica quantistica

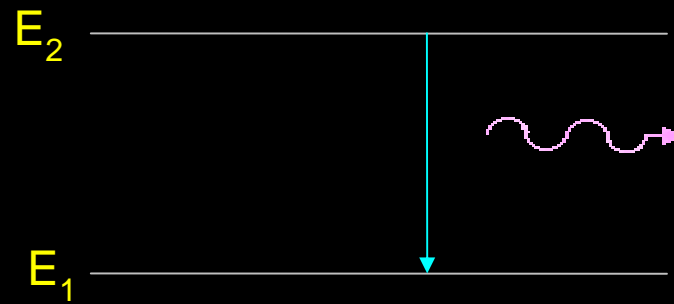
### Assorbimento



$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$



## Emissione

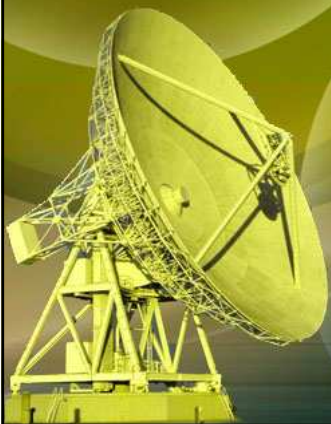
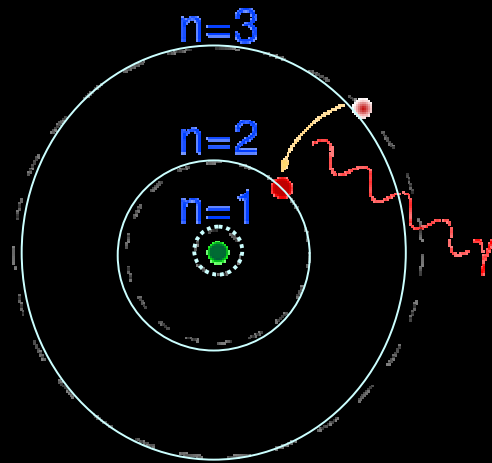


$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$



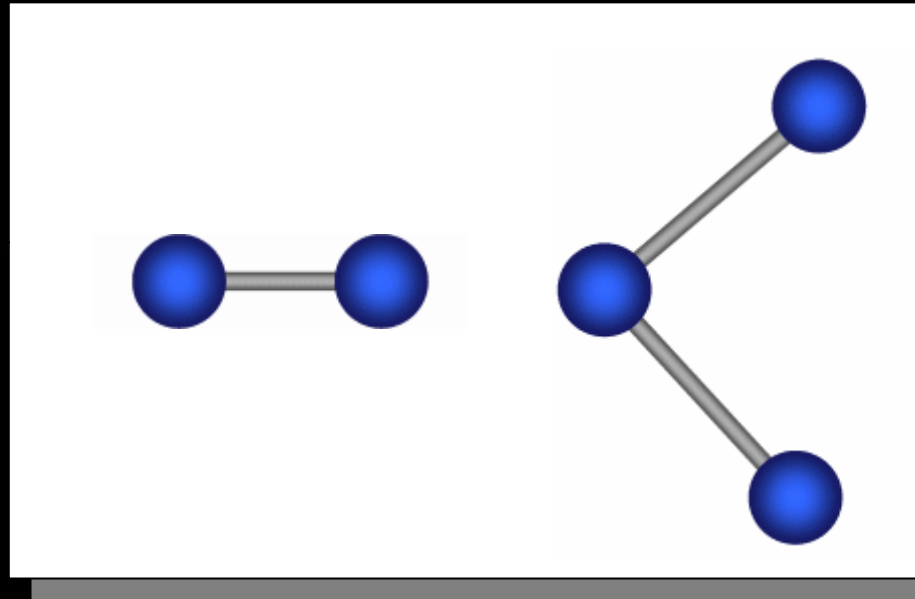
## Transizioni Elettroniche

Sono generalmente osservate nella regione visibile e UV dello spettro EM





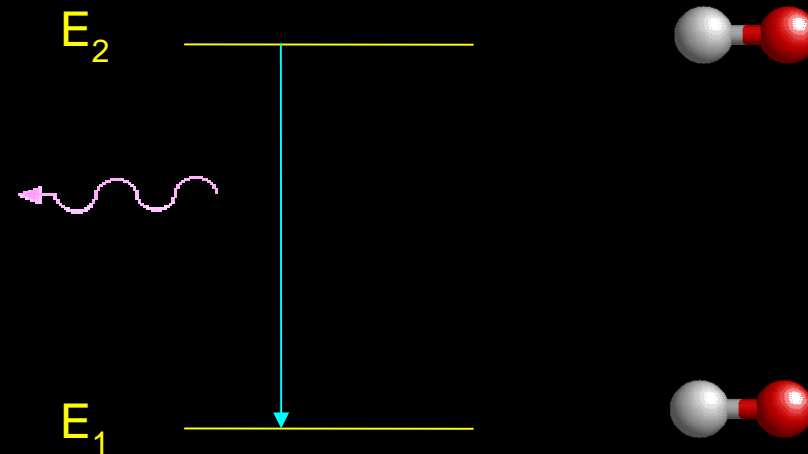
## Transizioni Vibrazionali



Sono transizioni osservabili nell'Infrarosso.



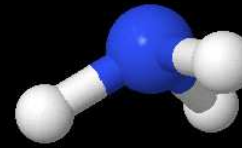
## Transizioni Rotazionali



$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

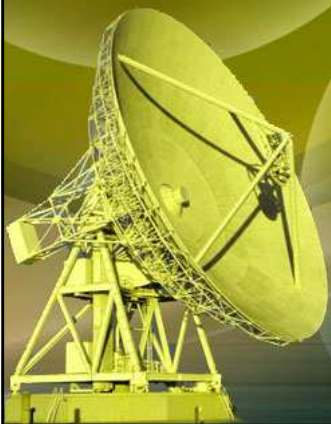


## Ammoniaca (NH<sub>3</sub>)

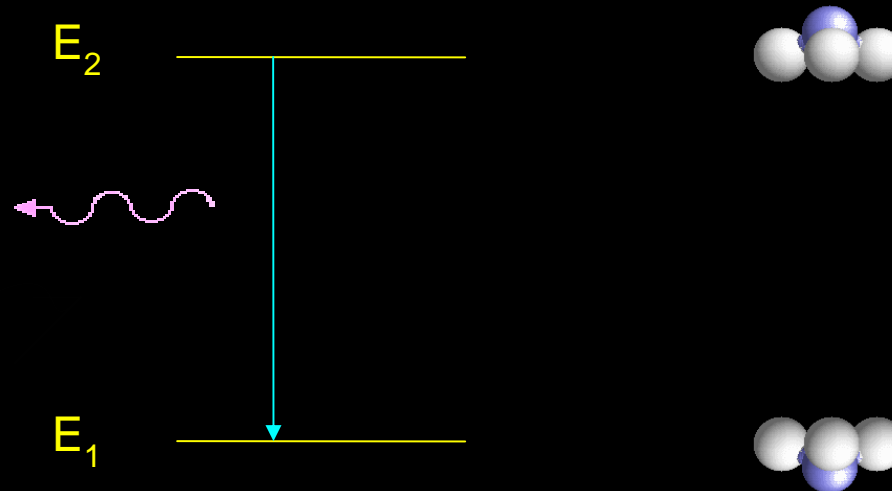


E' costituita da 4 atomi: 3 di Idrogeno (H), ed uno di Azoto (N) disposti a formare una struttura piramidale.

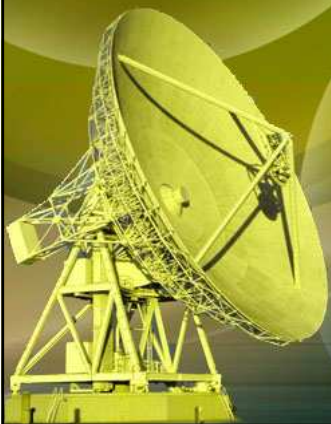
Si forma in Nubi Molecolari fredde (T=50 K) con densità di oltre  $10^6$  atomi di idrogeno /cm<sup>3</sup>



## Transizione di roto-inversione



$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = 23694,495 \text{ MHz} (1,1)$$



# Gli Spettri

Sono una rappresentazione dell'intensità in della funzione della frequenza



## Larghezza di riga

Le righe spettrali risultano allargate per l'effetto doppler dovute al moto termico delle particelle (molecole o atomi) che costituiscono il gas

$$\Delta \nu = \nu_0 \sqrt{\frac{kT}{mc^2}}$$

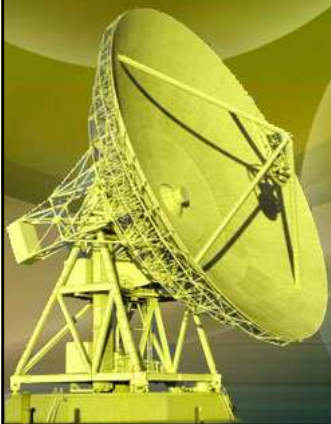


## Posizione di riga

Se una molecola, alla velocità  $v$  relativa all'osservatore, emette radiazione alla frequenza  $\nu_E$ , l'osservatore osserverà la transizione alla frequenza  $\nu_O$ :

$$\nu_O = \nu_E \left( 1 - \frac{v}{c} \right)$$

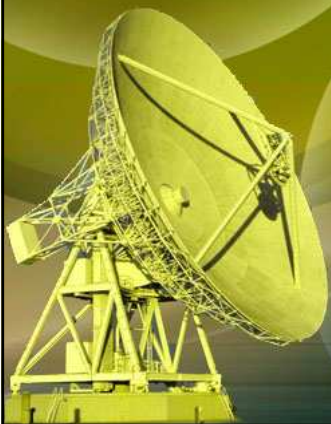
E' pertanto molto importante conoscere tale velocità, per ottimizzare il *setup* degli strumenti riceventi.



## Come calcolare la frequenza osservativa

Le velocità in gioco sono:

- Velocità peculiare dell'oggetto
- Velocità di rotazione terrestre ( $\sim 0.5$  Km/s)
- Velocità di rivoluzione ( $\sim 30$  Km/s)
- Velocità peculiare del Sistema Solare





Viene definito un sistema al quale riferire le varie velocità

## Local Standard of Rest (LSR)

E' un punto dello spazio che ha velocità pari alla media delle stelle vicine al Sole



## Le abbondanze molecolari

Si calcola la densità di colonna, che indica il numero di molecole per  $\text{cm}^2$ , lungo la linea di vista

$$N = \int_0^{s'} n ds \quad [\text{cm}^{-2}]$$

La radiazione viene emessa e riassorbita dalla nube

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\kappa_\nu I_\nu + \epsilon_\nu$$

assorbimento + emissione



# Assorbimento ed emissione

Coefficiente di Einstein di emissione spontanea

Profilo di riga

$$\epsilon_\nu = \frac{h\nu_0}{4\pi} n_2 A_{21} \phi(\nu)$$
$$\kappa_\nu = \frac{c^2}{8\pi} \frac{A_{21}}{\nu_0^2} n_1 \frac{g_2}{g_1} \left(1 - e^{-\frac{h\nu_0}{kT_{ex}}}\right) \phi(\nu);$$

Coefficiente di assorbimento

Temperatura di eccitazione: rappresenta la distribuzione di popolazione dei vari livelli



## Densità di colonna

Integrando il coefficiente di assorbimento lungo la linea di vista si ottiene l'opacità della transizione

$$\tau = \frac{c^2}{8\pi} \frac{g_2}{g_1} \frac{N_1}{\nu_0^2} A_{21} \left(1 - e^{-\frac{h\nu_0}{kT_{ex}}}\right) \phi(\nu)$$



$$N_1 = \frac{8\pi}{c^2} \frac{g_1}{g_2} \frac{\nu_0^2}{A_{21}} \frac{1}{1 - e^{-\frac{h\nu_0}{kT_{ex}}}} \int \tau_\nu d\nu$$



Domande?

