

Distribuzione Galattica del Mezzo Interstellare

Fasi interstellari: evidenze osservative

Lezione ISM 2
G. Vladilo

Astronomia Osservativa C, ISM 2, Vladilo (2011)

1

Distribuzione del gas interstellare nella Galassia

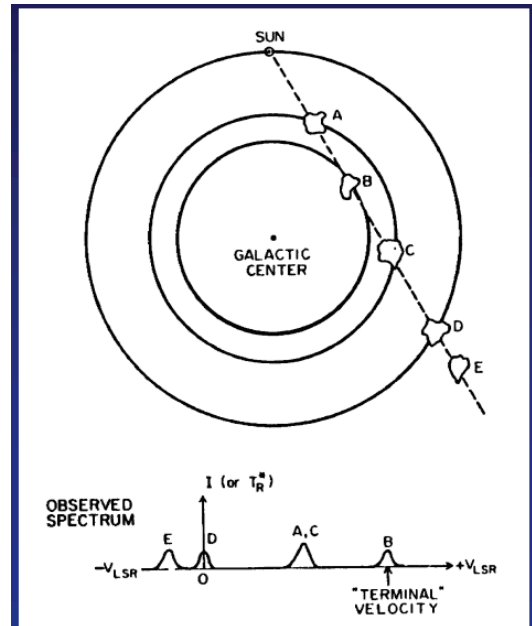
- **Storicamente**
 - 1951-metà anni '60: si riteneva che HI fosse rappresentativo di tutto il gas interstellare, con proprietà che variano in maniera graduale
 - Dopo la metà degli anni '60: enfasi sulla struttura a piccola scala e su variazioni di T e n_{H}
 - Dagli anni '70 in poi si è capito che la distribuzione di HI non è rappresentativa di quella di altre componenti dell'ISM
- **Consideriamo brevemente la distribuzione del gas**
 - Nel piano Galattico
 - Nell'alone della Galassia
 - Attorno alla Galassia

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

2

Distribuzione della materia interstellare nel piano Galattico: il gas neutro

- Distribuzione di HI ricostruita dall'analisi cinematica dei profili di emissione della riga a 21 cm
- Ricostruzione basata su un modello cinematico di rotazione differenziale della Galassia
 - Si assume che le nubi a una distanza galattocentrica R si muovano in orbite circolari con velocità angolare $\omega(R)$
 - La funzione $\omega(R)$ è monotonicamente decrescente ed è stimata mediante vincoli osservativi
- Dimostrata esistenza bracci spirali
 - Ricostruzione approssimata in quanto le assunzioni di cui sopra non sono esatte



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

3

Distribuzione della materia interstellare nel piano Galattico: le regioni HII

- Distanze di regioni HII
 - Si misurano le distanze delle stelle ionizzanti con metodi fotometrici
Distanze molto più accurate di quelle cinematiche
- Le regioni HII si trovano principalmente lungo i bracci spirali

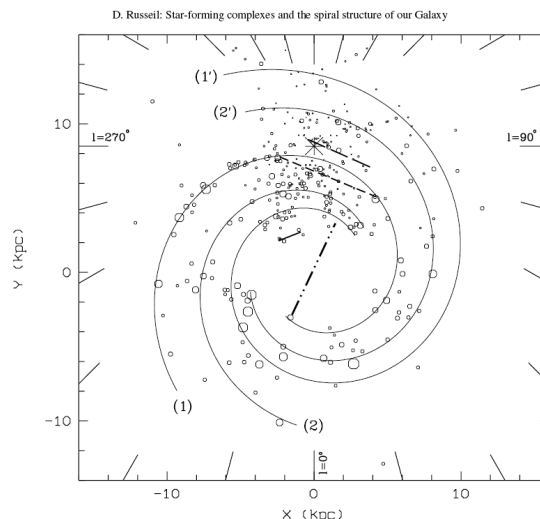
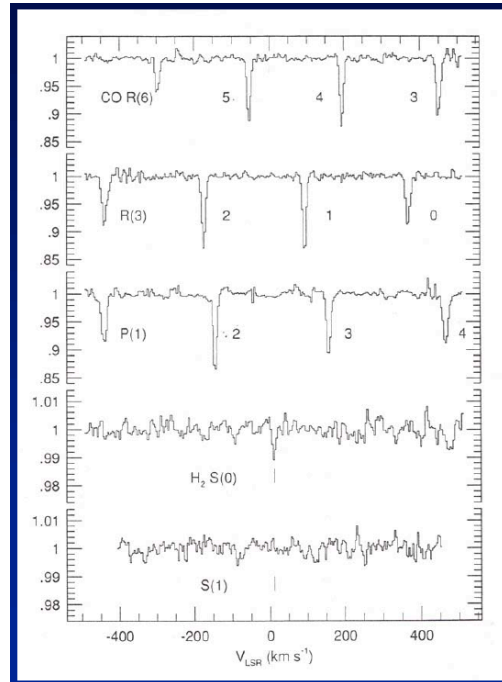


Fig. 5. The adopted four-arm model. The symbol size is proportional to the excitation parameter. The Sun position is given by the large star symbol. All the complexes are plotted. 1: Sagittarius-Carina arm, 2: Scutum-Crux arm, 1': Norma-Cygnus arm and 2': Perseus arm. We have also sketched the local arm feature (long dashed line), the bar orientation and length (dashed-dot-dot line) from Englmaier & Gerhard (1999), the expected departure from a logarithmic spiral arm observed for the Sagittarius-Carina arm (short dashed line) and finally a feature certainly linked to the three-kpc arm (solid line)

4

Distribuzione del gas molecolare: il CO come tracciante di H₂

- Per stimare la massa delle nubi molecolari
 - Si richiede una relazione tra la intensità integrata di CO, I_{CO} , e la densità colonnare $N(\text{H}_2)$
- Vari metodi hanno permesso calibrare tale relazione nel disco Galattico
 - $I_{\text{CO}}/N(\text{H}_2) \sim 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ km}^{-1} \text{ s}$
- In figura: raro esempio di misura diretta in una singola visuale
 - $\text{CO}/\text{H}_2 = 2.7 \times 10^{-4}$
Lacy et al. 1994



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

5

Principali risultati delle surveys di nubi molecolari

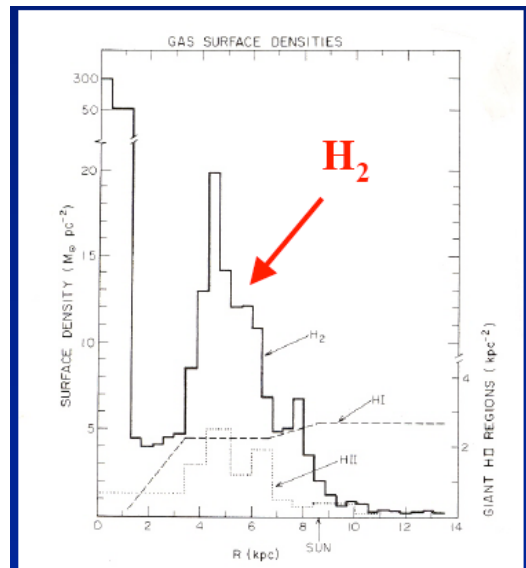
- Nubi molecolari giganti (GMCs)
 - Circa il 90% della massa di H₂ in 5000 complessi con dimensioni $> 20 \text{ pc}$ e $M > 10^5 M_{\text{sun}}$
 - Circa il 50% della massa di H₂ in 1000 complessi con dimensioni $> 50 \text{ pc}$ e $M > 10^6 M_{\text{sun}}$
- Distribuzione spaziale
 - Circa il 90% della massa di H₂ si trova entro distanze Galattocentriche $R < R_{\text{sun}}$
 - Le nubi molecolari giganti sono spesso associate ad ammassi stellari aperti (associazioni OB)

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

6

Distribuzione del gas molecolare nella Galassia

- **Distribuzione radiale**
 - Anello molecolare tra 4 e 8 kpc
“molecular ring”
- **Spessore a FWHM**
 - 80 pc a $R=3$ kpc
 - 150-300 pc a $R=10-12$ kpc

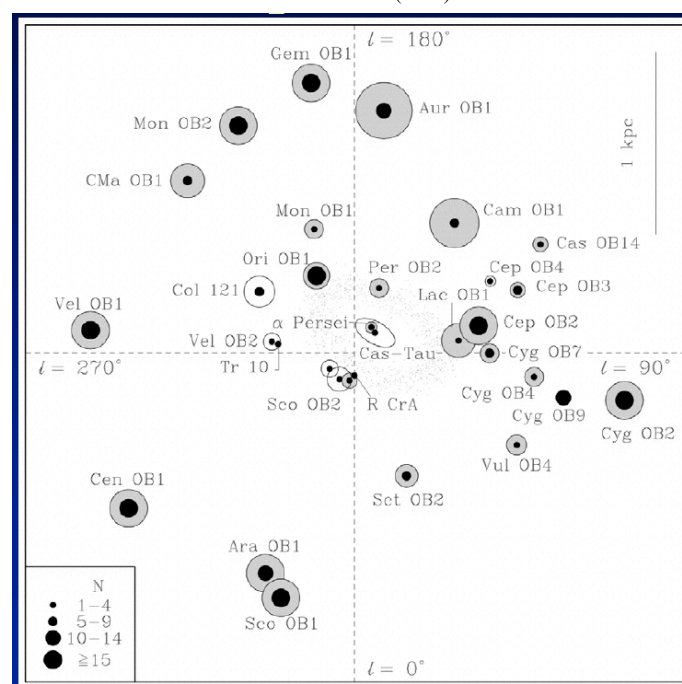


Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

7

Nubi molecolari giganti e associazioni OB entro 1.5 kpc dal Sole

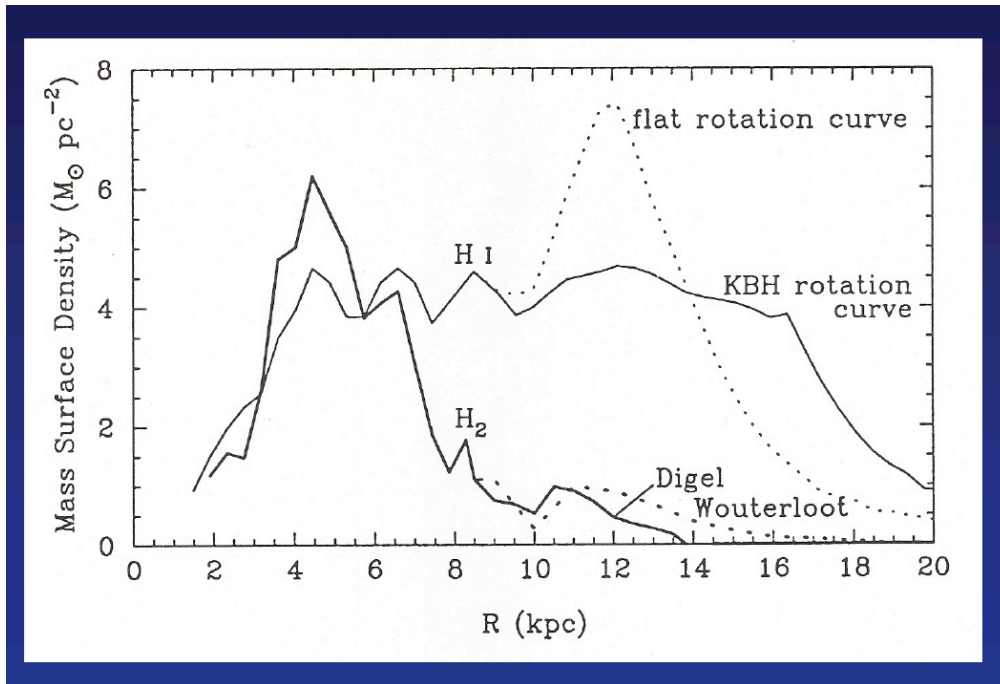
De Zeeuw et al. (1999)



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

8

Distribuzione radiale nella Galassia: gas atomico e molecolare



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

9

La materia interstellare fuori dal piano Galattico

- Esistenza di gas coronale nell'alone predetta da Spitzer (1956)
 - Sulla base della necessità di un meccanismo di confinamento delle nubi fredde a grandi distanze dal piano galattico
 - Esistenza confermata molti anni dopo da misure di emissione X e da righe in assorbimento di speci atomiche in alto stato di ionizzazione

ON A POSSIBLE INTERSTELLAR GALACTIC CORONA*

LYMAN SPITZER, JR.
Princeton University Observatory
Received March 24, 1956

ABSTRACT

The physical conditions in a possible interstellar galactic corona are analyzed. Pressure equilibrium between such a rarefied, high-temperature gas and normal interstellar clouds would account for the existence of such clouds far from the galactic plane and would facilitate the equilibrium of spiral arms in the presence of strong magnetic fields. Observations of radio noise also suggest such a corona.

At a temperature of 10^6 degrees K, the electron density in the corona would be $5 \times 10^{-4}/\text{cm}^3$; the extension perpendicular to the galactic plane, 8000 pc; the total number of electrons in a column perpendicular to the galactic plane, about $2 \times 10^{19}/\text{cm}^2$; the total mass, about $10^8 M_\odot$. The mean free path would be 4 pc, but the radius of gyration even in a field of 10^{-18} gauss would be a small fraction of this. Such a corona is apparently not observable optically except by absorption measures shortward of 2000 Å.

Radiative cooling at 10^6 degrees would dissipate the assumed thermal energy in about 10^9 years. Cooling by conduction can apparently be ignored, especially since a chaotic magnetic field of only 10^{-18} gauss will sharply reduce the thermal conductivity. At 3×10^6 degrees, near the maximum value consistent with confinement by the Galaxy's gravitational field, radiative cooling is unimportant, and a corona at this temperature might be primeval. The energy source needed at the lower temperatures may be provided by material ejected at high speed from stars or possibly by compressional waves produced by the observed moving clouds. Condensation of cool matter from the corona may perhaps account for the formation of new spiral arms as the old ones dissipate.

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

10

Stratificazione del gas caldo/coronale nell'alone Galattico

- C IV, Si IV, N V

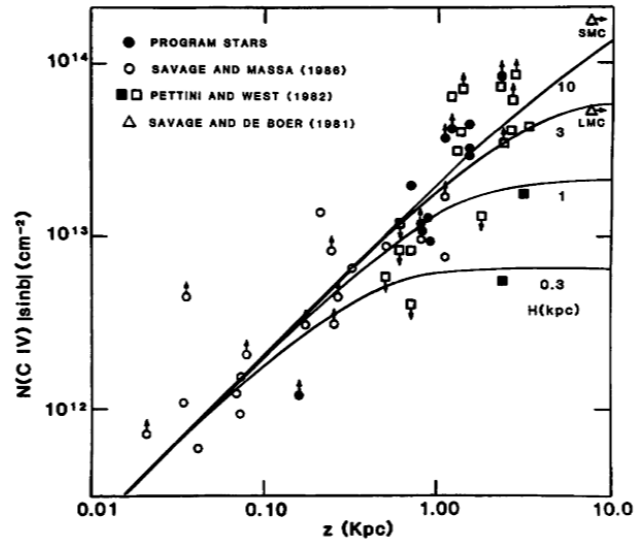
- Indicatori di gas molto caldo

If the density distribution of C IV away from the plane is a simple exponential,

$$n_{\text{C IV}}(z) = n_{\text{C IV}}(0) \exp(-|z|/H), \quad (1)$$

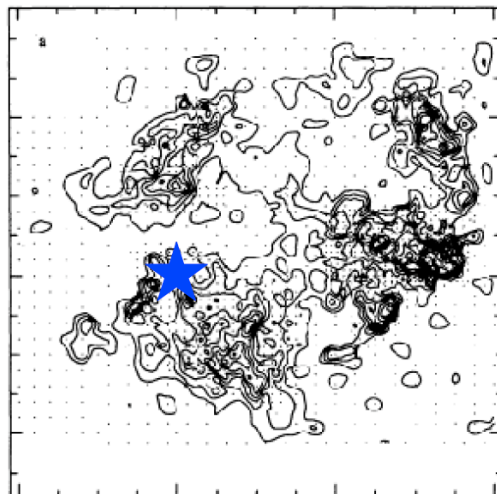
with $n_{\text{C IV}}(0) = 7.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-3}$ and scale height H , then the data in Figure 1 should follow one of the solid curves.

- Altezza di scala del CIV
 $H > 3 \text{ kpc}$



Nubi molecolari ad alta latitudine Galattica

- Scoperte nelle righe di emissione di CO
 - Magnani et al. (1985)
- Viste da IRAS come “cirri” a $100 \mu\text{m}$
 - Estinzioni $A_V \sim 1 - 2 \text{ mag}$
- Simili alle “translucent clouds”
- Esempio
 - Nube molecolare nella direzione di HD210121
 - Mappe CO e righe di assorbimento
 $n_{\text{H}} \sim 1000 \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 15\text{-}30 \text{ K}$



Nubi ad alta velocità

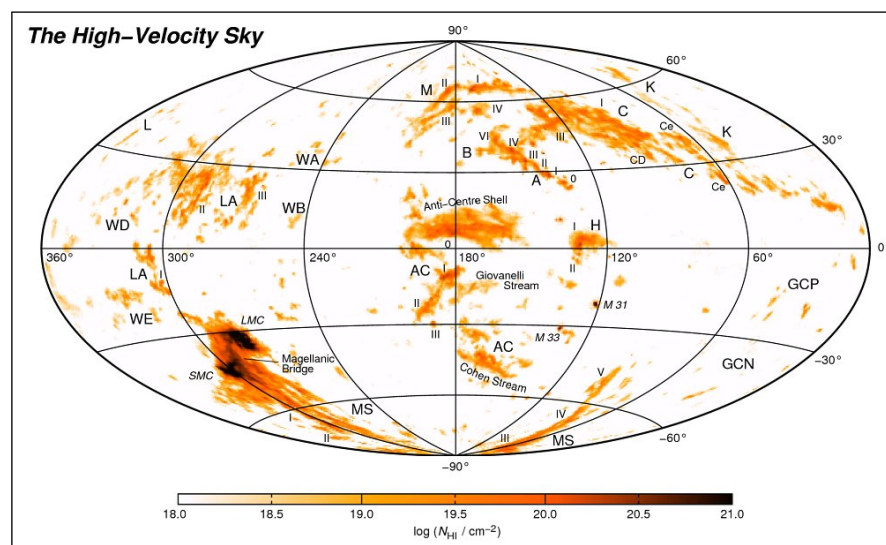
- Scoperte nella banda radio
 - Coprono aree molto vaste del cielo
- Definizione:
 - gas emittente a 21 cm con velocità anomale rispetto a quelle della curva di rotazione Galattica
- Se $\Delta V \leq 80$ km/s
 - Intermediate velocity clouds (IVCs)
- Se $\Delta V > 80$ km/s
 - High velocity clouds (HVCs)
- Alcune sono organizzate in strutture molto ampie
 - Esempio: Magellanic Stream

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

13

Nubi ad alta velocità

- Diverse ipotesi per la loro origine
 - Gas (1) di origine extragalattica; (2) strappato dalle Nubi di Magellano (3) espulso dalla Galassia
- Generalmente povero di metalli



Tobias Westmeier, CSIRO Australia Telescope National Facility
Based on the Leiden/Argentine/Bonn Survey (Kalberla et al. 2005, A&A 440, 775)
and the Milky Way model of P. Kalberla (Kalberla et al. 2007, A&A, in press).



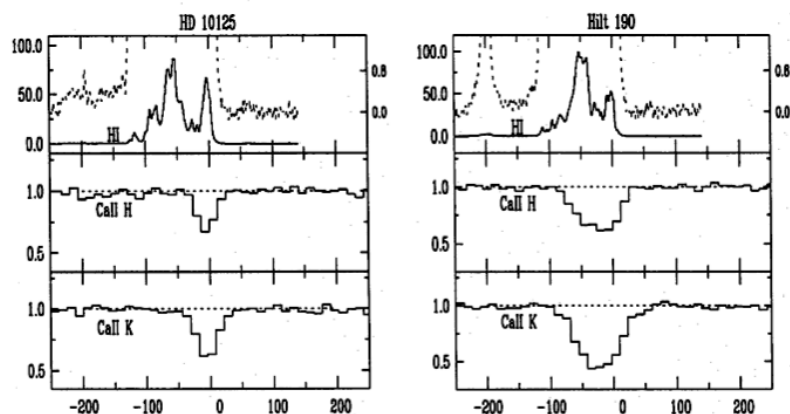
Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

14

Stima delle distanze di nubi ad alta velocità nell'alone della Galassia

- **Confronto tra l'emissione a 21 cm e gli assorbimenti nel visibile**
 - Gli assorbimenti si misurano in stelle giacenti a diverse distanze lungo una stessa direzione di alta latitudine Galattica
 - Le distanze delle stelle che non mostrano nubi ad alta velocità rappresentano un limite inferiore alla distanza delle nubi

Esempio: Centurion et al. (1994)

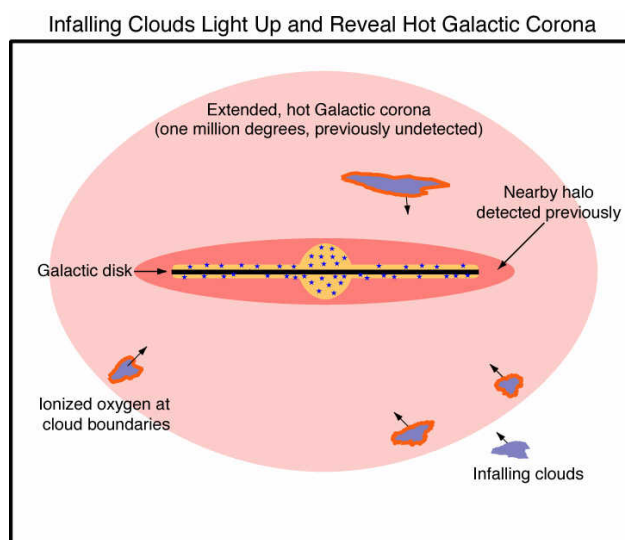


Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

15

Gas coronale

- **Quadro d'insieme della distribuzione del gas coronale**
 - Successivo al rivelamento di OVI da parte di FUSE



This illustration shows clouds falling onto our galaxy, the Milky Way. These clouds "light up" in ionized oxygen when they encounter the hot, extended corona of gas that surrounds the Milky Way.

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

16

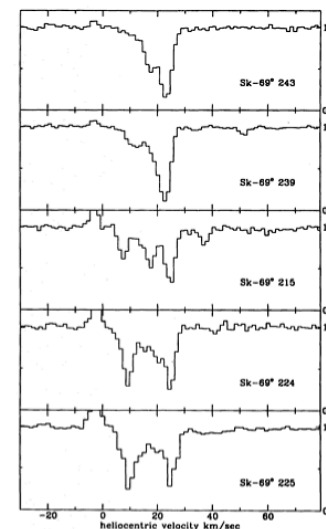
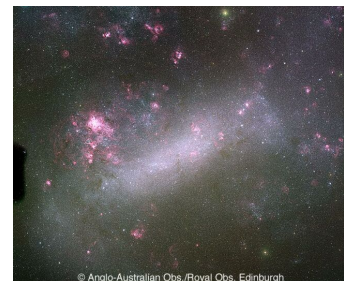
Distribuzione della materia interstellare su piccola scala

- **Omogeneità/disomogeneità del mezzo interstellare**
 - Diversi tipo di osservazioni dimostrano che il mezzo interstellare è fortemente disomogeneo
 - Risultato di processi di turbolenza
 - Descrizione teorica molto complessa

Vediamo un esempio di tecnica osservativa atta a rilevare la disomogeneità del gas interstellare

Disomogeneità del gas interstellare Confronto di spettri interstellari di stelle angularmente vicine

- **Campi stellari affollati**
 - Ammassi stellari, galassie vicine
- **Esempio**
 - Studio effettuato usando come stelle di fondo supergiganti brillanti delle Nubi di Magellano
 - Le stelle si trovano a distanze angolari di pochi arcominuti
 - Le nubi interstellari di bassa velocità LSR si trovano a meno di 100 pc
 - La forte variabilità dell'intensità degli assorbimenti indica pertanto l'esistenza di disomogeneità delle nubi su scale inferiori a 0.2 pc
 - Esempio da Molaro et al. (1993)
- **Esiste evidenza osservativa per disomogeneità anche su scale minori a 0.1 pc**



Risoluzione delle surveys di CO

- Per la riga di CO a 2.6 mm
 - Su cui torneremo nella lezione sulle righe molecolari
- Risoluzione spaziale
 - Per telescopi diffraction-limited
 - A 100 pc risolve 0.026 pc
 - A 1 kpc risolve 0.26 pc
 - A 10 kpc risolve 2.6 pc

$$\theta_{beam} = \frac{\lambda}{aperture} = 2.6 \times 10^{-4} \text{ rad} \left(\frac{10\text{m}}{aperture} \right)$$

↑
0.9 arcmin

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

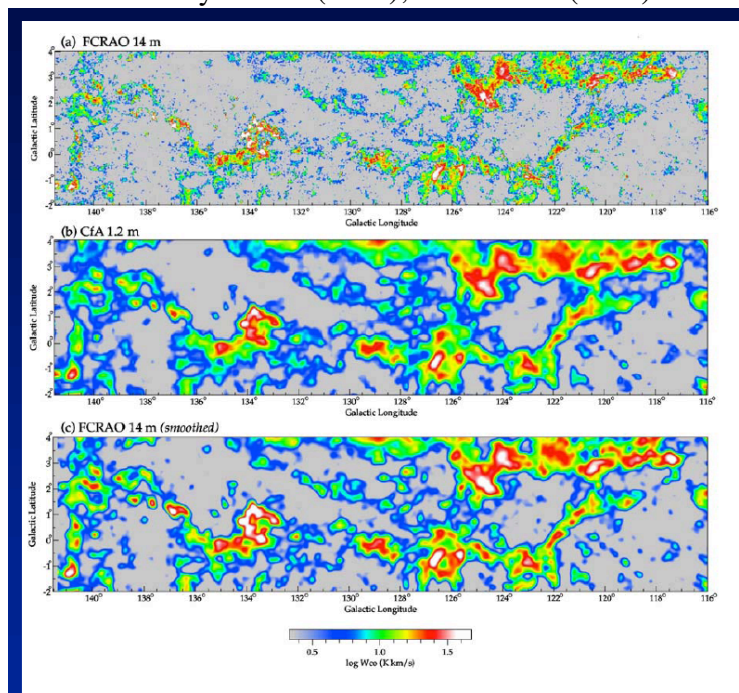
19

Confronto tra due surveys di CO

ottenute con diversa risoluzione spaziale

FCRAO (14m) vs CfA (1.2m)

Heyer et al. (1998); Dame et al. (2000)



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

20

Riassunto

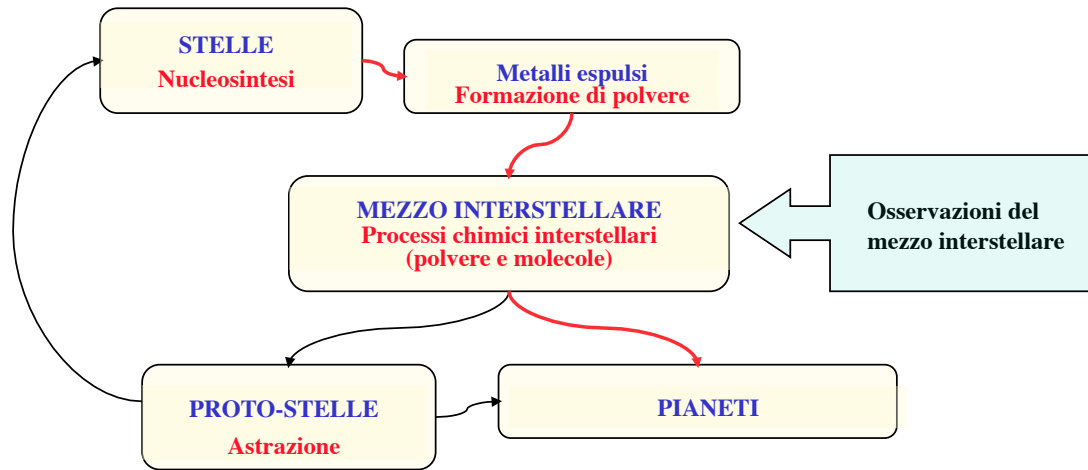
Distribuzione spaziale della materia interstellare

- **Su piccola scala**
 - Altamente disomogenea
- **Su scala Galattica**
 - Gas freddo
 - Concentrato nel piano galattico
 - Altezza di scala del gas neutro ~250 pc
 - Concentrato nei bracci spirali (assieme alle regioni HII)
 - Gas caldo
 - Dominante nell'alone galattico
 - Nelle regioni tra i bracci spirali (ma non le regioni HII)
- **Nubi ad alta velocità**
 - Collezioni di strutture aventi diverse origini

Mezzo Interstellare ed evoluzione Galattica

- **Il mezzo interstellare gioca un ruolo importante nell'evoluzione galattica**
 - È la regione dove hanno luogo i processi fisici innescati dall'emissione di energia da parte delle stelle ('feedback')
 - Domina il volume di una galassia
- **Ciclo stelle/mezzo interstellare**
 - L'ISM
 - raccoglie i prodotti della nucleosintesi stellare
 - riceve l'energia emessa dalle stelle ('feedback')
 - Fotoni ionizzanti, venti stellari, esplosioni di supernovae
 - Le stelle si formano a partire dal collasso di gas interstellare arricchito dai prodotti delle precedenti generazioni stellari

Il ciclo Stelle/Mezzo interstellare



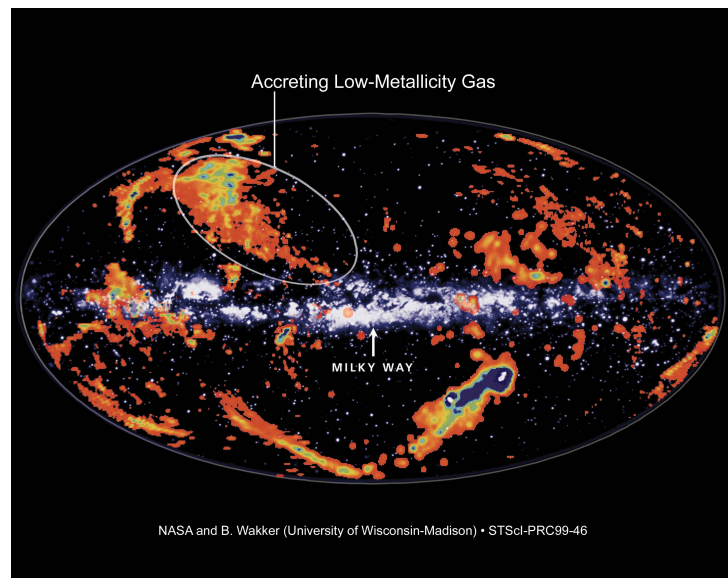
Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

23

Circolazione del gas su grande scala ed evoluzione Galattica

- Anche la circolazione di gas gioca un ruolo importante nell'evoluzione Galattica
 - Flussi radiali
 - Fontane galattiche
 - Caduta di gas ('infall')

L'*infall* di gas povero di metalli è un importante ingrediente dei modelli di evoluzione chimica della Via Lattea



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

24

Importanza relativa del Mezzo Interstellare in diverse epoche dell'evoluzione galattica

- L'ISM costituisce una parte non trascurabile della massa barionica di una galassia
 - Al tempo attuale

Nella Via Lattea il mezzo rappresenta $\approx 10\text{-}20\%$ della massa totale

La frazione in massa del mezzo interstellare cresce con il tipo di Hubble della galassia

In galassie ellittiche la frazione è trascurabile

Galassie irregolari sono ricche di gas
 - In epoche remote il mezzo interstellare giocava un ruolo più importante su scala Galattica

In qualsiasi tipo di galassia la frazione interstellare della massa totale si avvicina al $\approx 100\%$ all'epoca della formazione delle prime generazioni di stelle

Classificazione delle regioni interstellari sulla base dello stato fisico dell'idrogeno

- L'idrogeno è l'elemento di gran lunga più abbondante
 - Abbondanze interstellari simili a quelle solari
 - $H > 90\%$ degli atomi
- Regioni interstellari caratterizzate dallo stato dell'idrogeno
 - Idrogeno atomico ionizzato (H^+ o HII)
 - Idrogeno atomico neutro (H^0 o HI)
 - Idrogeno molecolare (H_2)
- Spesso tali regioni sono dominate da un solo stato dell'idrogeno
 - HII oppure HI oppure H_2
- Transizioni tra le diverse regioni sono sottili
 - $HII \rightarrow HI \rightarrow H_2$

Regioni HII

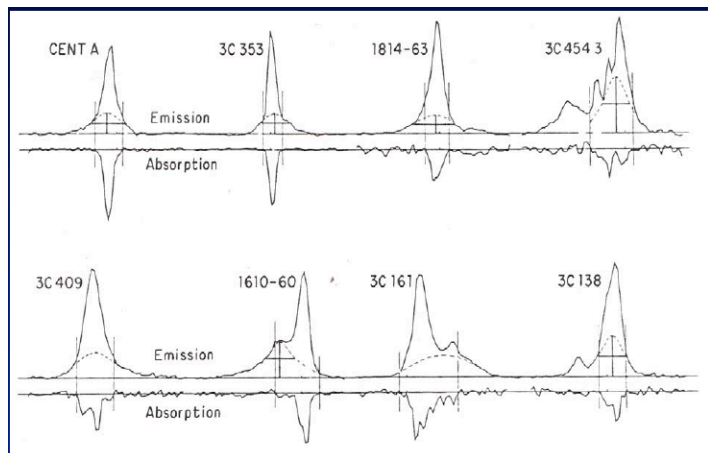
Valori tipici dei parametri fisici, ricavati da diversi tipi di diagnostici osservativi
(vedere libro di Spitzer per maggiori dettagli)

- **Gas HII diffuso (“warm ionized” gas)**
 - $T \sim 8 \times 10^3 \text{ K}$
 - $n \sim 0.03 \text{ cm}^{-3}$
 - Caldo, tenue, diffuso
 - Evidenziato dall’emissione diffusa di $H\alpha$
- **Gas coronale (“hot ionized” gas)**
 - $T \sim 5 \times 10^5 \text{ K}$
 - $n \sim 0.006 \text{ cm}^{-3}$
 - Molto caldo, tenue, diffuso
 - Evidenziato dalle specie di alta ionizzazione e dall’emissione X

Regioni HI

Valori tipici dei parametri fisici

- **“Cool neutral” gas**
 - $T \sim 100 \text{ K}$
 - $n \sim 25 \text{ cm}^{-3}$
- **“Warm neutral” gas**
 - $T \sim 8000 \text{ K}$
 - $n \sim 0.25 \text{ cm}^{-3}$



Regioni H₂

Valori tipici dei parametri fisici

- Nubi molecolari diffuse (“cold molecular” gas)
 - $T \sim 40 \dots 80$ K
 - $n \sim 100 \text{ cm}^{-3}$
- Nubi molecolari scure e dense
 - Siti di formazione stellare
 - $T \sim 10 \dots 50$ K
 - $n \sim 10^4 \dots 10^6 \text{ cm}^{-3}$

Valori tipici di pressione termica nel gas diffuso

	n [cm^{-3}]	T [K]	$P/k=(n+ne)T$ [K cm^{-3}]
Cold neutral	≈ 25	≈ 100	$\approx 2.5 \times 10^3$
Warm neutral	≈ 0.25	$\approx 8 \times 10^3$	$\approx 2 \times 10^3$
Warm ionized	≈ 0.03	$\approx 8 \times 10^3$	$\approx 2.4 \times 10^3$
Hot ionized	$\approx 6 \times 10^{-3}$	$\approx 5 \times 10^5$	$\approx 3 \times 10^3$

Valori tipici di pressione termica nel gas diffuso

- Il gas interstellare diffuso è, in prima approssimazione, in equilibrio di pressione
 - Questo risultato osservativo può essere così interpretato:
 - I gradienti di pressione tendono a ridursi come conseguenza dei moti del gas, che possono avvenire fino a velocità del suono
 - I gradienti di temperatura sono più lenti a ridursi: fasi con temperature molto diverse possono coesistere in equilibrio di pressione
- I valori tipici di pressione possono essere molto più alti nelle regioni HII e nelle nubi molecolari più dense
 - Le regioni HII sono energizzate dai fotoni stellari
 - Le nubi molecolari più dense sono autogravitanti