

Distribuzione Galattica e modelli globali del Mezzo Interstellare

Lezione ISM 3
G. Vladilo

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

1

Distribuzione del gas interstellare nella Galassia

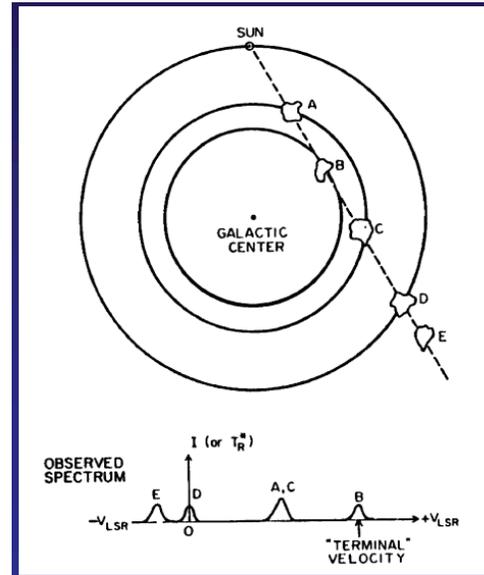
- **Storicamente**
 - 1951-metà anni '60: si riteneva che HI fosse rappresentativo di tutto il gas interstellare, con proprietà che variano in maniera graduale
 - Dopo la metà degli anni '60: enfasi sulla struttura a piccola scala e su variazioni di T e n_{H}
 - Dagli anni '70 in poi si è capito che 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

D. Russell: Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy

143

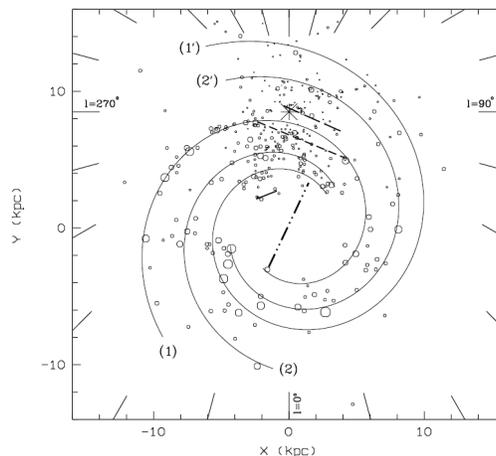
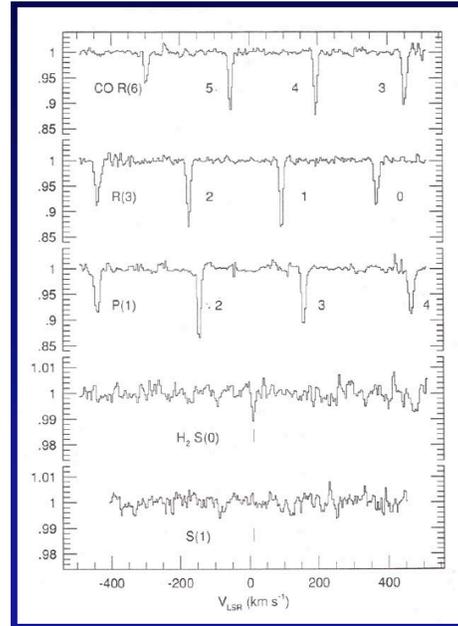


Fig. 5. The adopted four-arm model. The symbol size is proportional to the excitation parameter. The Sun position is given by the large star symbol. All the complexes are plotted. 1: Sagittarius-Carina arm, 2: Scutum-Crux arm, 1': Norma-Cygnus arm and 2': Perseus arm. We have also sketched the local 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

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

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

↑
0.9 arcmin

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

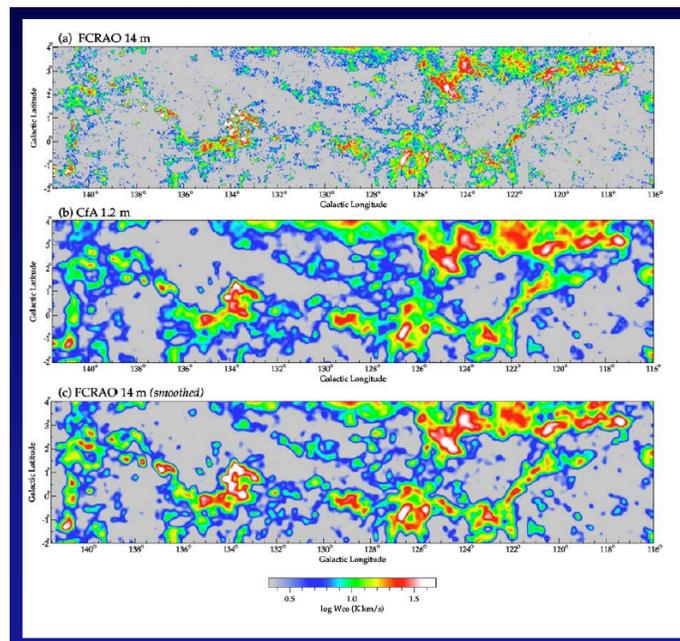
6

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)

7

Principali risultati delle surveys di nubi molecolari

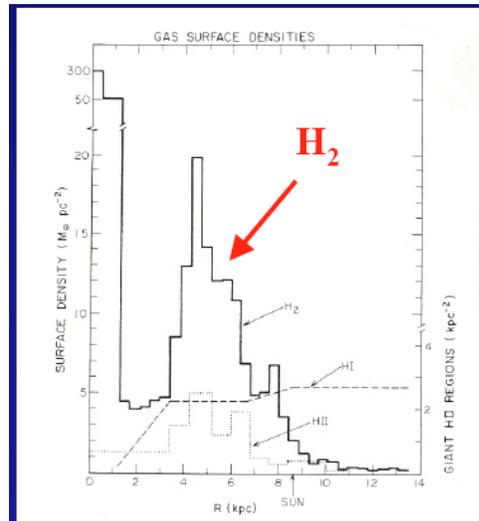
- **Nubi molecolari giganti (GMCs)**
 - Circa il 90% della massa di H_2 in 5000 complessi con dimensioni > 20 pc e $M > 10^5 M_{\text{sun}}$
 - Circa il 50% della massa di H_2 in 1000 complessi con dimensioni > 50 pc e $M > 10^6 M_{\text{sun}}$
- **Distribuzione spaziale**
 - Circa il 90% della massa di H_2 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)

8

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

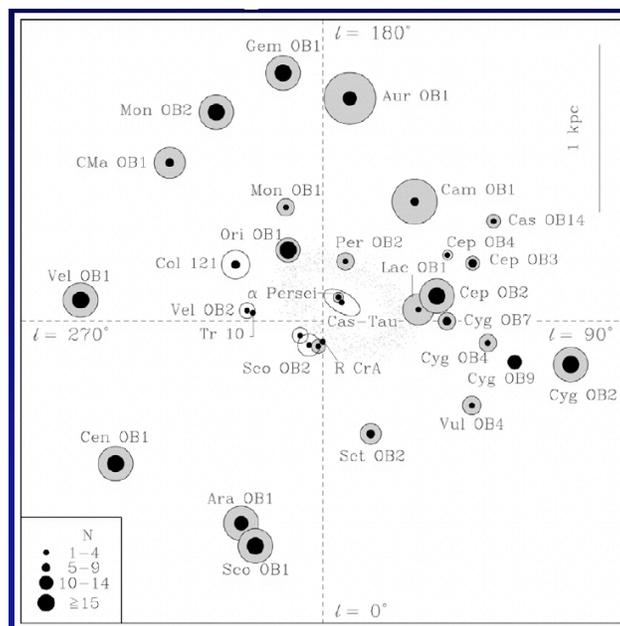


Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

9

Nubi molecolari giganti e associazioni OB entro 1.5 kpc dal Sole

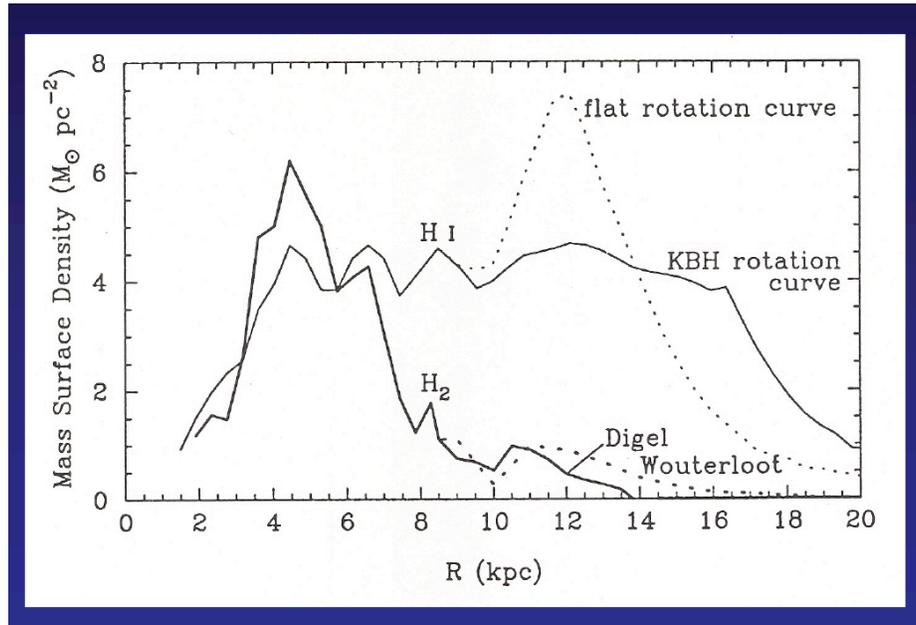
De Zeeuw et al. (1999)



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

10

Distribuzione radiale nella Galassia: gas atomico e molecolare



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

11

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 spici 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 $10^6 M_{\odot}$. The mean free path would be 4 pc, but the radius of gyration even in a field of 10^{-16} 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^{-16} 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)

12

Stratificazione del gas caldo/coronale nell'alone Galattico

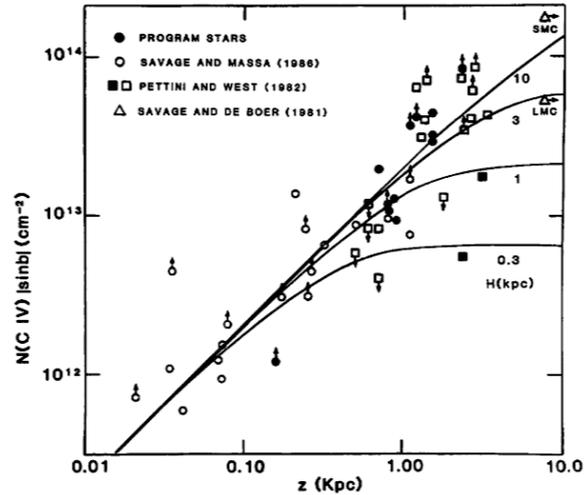
- C IV, Si IV, N V
 - Indicatori di gas molto caldo

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
 - $H > 3 \text{ kpc}$

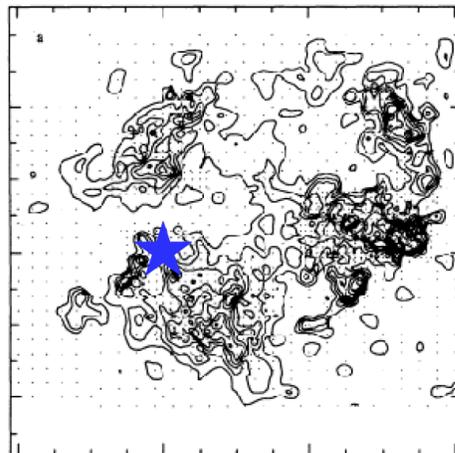


Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

13

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
 - $n_{\text{H}} \sim 1000 \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 15\text{-}30 \text{ K}$



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

14

Nubi ad alta velocità

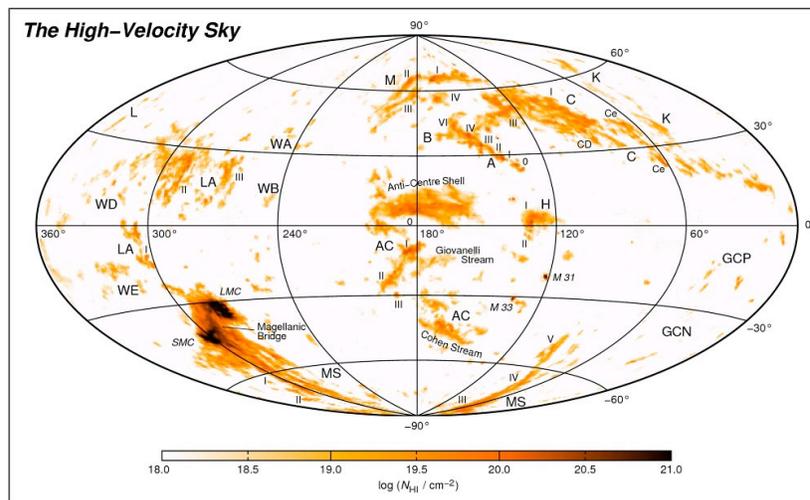
- Scoperte nella banda radio
 - Coprono aree molto vaste del cielo
- Definizione:
 - gas emittente a 21 cm con velocità anomale rispetto a quelle della curva di rotazione Galattica
- Se $\Delta V \leq 80$ km/s
 - Intermediate velocity clouds (IVCs)
- Se $\Delta V > 80$ km/s
 - High velocity clouds (HVCs)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

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

15

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).



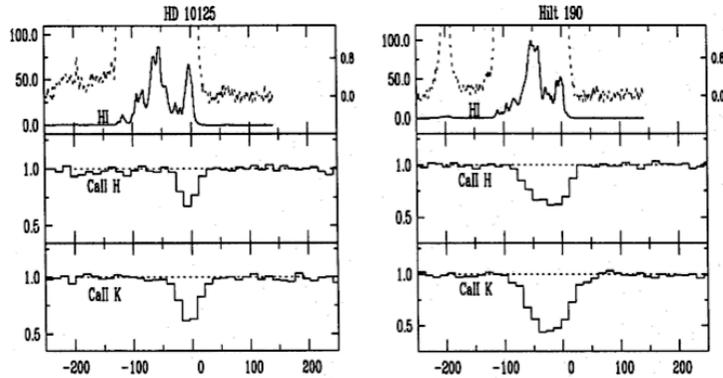
Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

16

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)

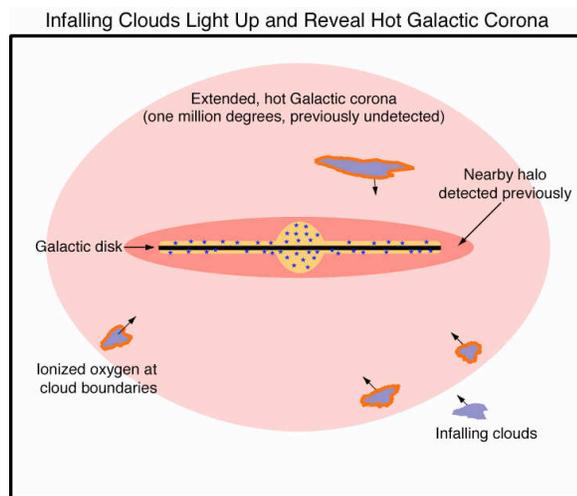


Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

17

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)

18

Riassunto

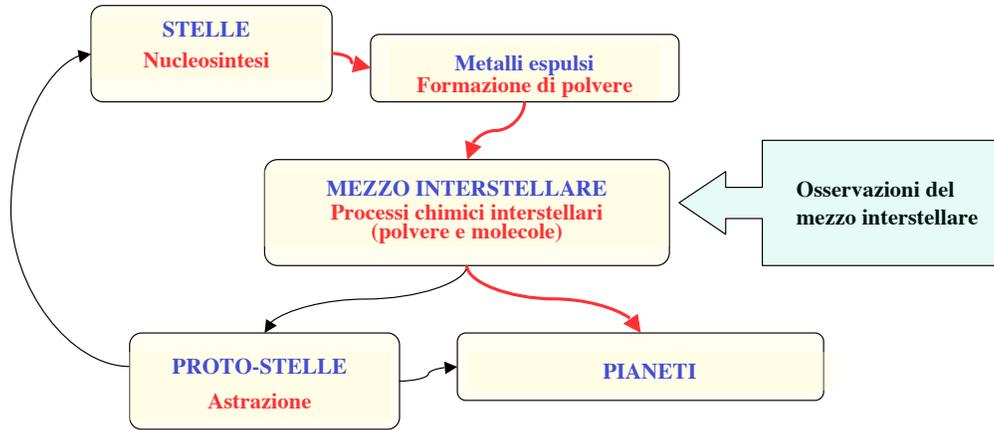
Distribuzione spaziale della materia interstellare

- **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



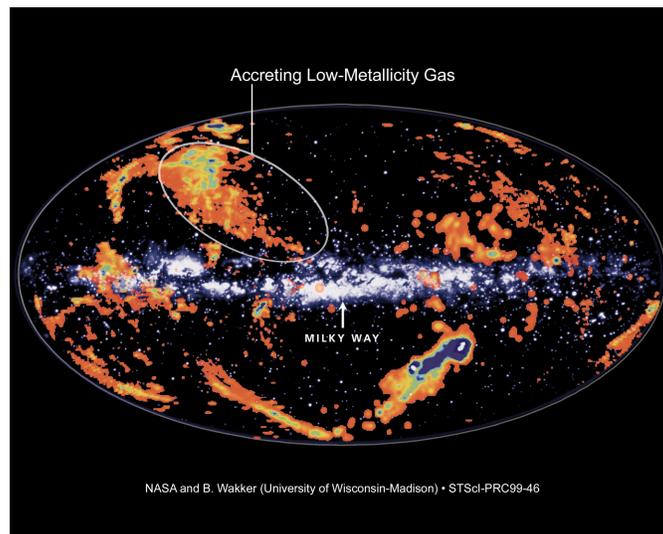
Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

21

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



NASA and B. Wakker (University of Wisconsin-Madison) • STScI-PRC99-46

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

22

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 $\approx 10-20\%$ 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

Modelli del mezzo interstellare diffuso

- **Come fanno a coesistere i diversi tipi di gas interstellare la cui esistenza è dimostrata dalle osservazioni?**
 - Per rispondere a questa domanda accenniamo ai modelli dello stato fisico del mezzo diffuso
- **I modelli dello stato fisico si ottengono tenendo in conto dei processi di riscaldamento e raffreddamento del mezzo interstellare**
 - A tal scopo andiamo ad introdurre la funzione di riscaldamento, Γ , e la funzione di raffreddamento, Λ
 - L'input di energia termica per unità di volume e di tempo, $\Gamma - \Lambda$, deve uguagliare l'aumento di energia termica più il lavoro fatto dal gas

Funzione di riscaldamento

Γ : energia cinetica acquisita dal gas per unità di volume e unità di tempo [$\text{erg cm}^{-3} \text{s}^{-1}$]

Può essere stazionaria o variabile con il tempo

A seconda di quali siano i processi di riscaldamento dominanti

I processi microscopici solitamente stazionari

I processi macroscopici tipicamente impulsivi

Funzione di raffreddamento

A : energia ceduta dal gas per unità di volume e unità di tempo [$\text{erg cm}^{-3} \text{s}^{-1}$]

Funzione della temperatura, struttura di ionizzazione, densità e composizione chimica del gas

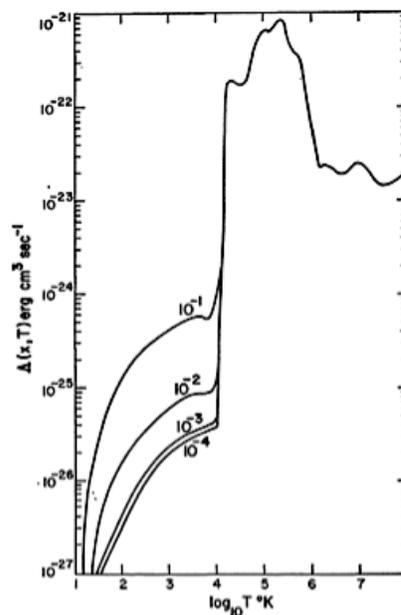
Nel gas parzialmente ionizzato l'efficienza aumenta con il grado di ionizzazione

L'efficienza aumenta con la metallicità

Il raffreddamento non è efficiente a temperature "coronali"

Il gas totalmente ionizzato si raffredda molto lentamente

Quando il gas coronale viene creato, può continuare ad esistere per lungo tempo senza nuove sorgenti di riscaldamento



Modello a due fasi

- **Bilancio tra processi di riscaldamento e raffreddamento**

- Considerando solo processi di riscaldamento stazionari

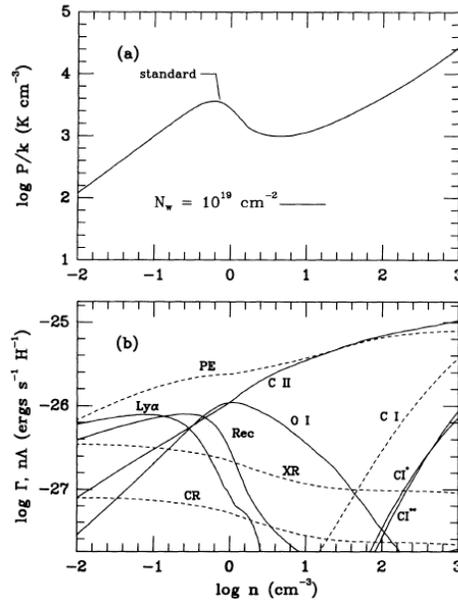
- **Equilibrio termico**

- Si cerca T tale che

$$\Gamma = \Lambda$$

- **Per una pressione $P/k \sim 3000 \text{ K cm}^{-3}$ si ottengono**

- due soluzioni stabili
 - Cold neutral gas, $T \sim 50 \text{ K}$
 - Warm neutral gas, $T \sim 8000 \text{ K}$
- una soluzione instabile
 - $T \sim 1000 \text{ K}$



Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

27

Modello a due fasi

- **Importanza storica**

- Spiega perchè distinte regioni del mezzo interstellare diffuso possono coesistere in equilibrio di pressione
 - Field, Goldsmith & Habing (1969)

- **Limitazioni**

- Non include gas a temperature $> 10^4 \text{ K}$
 - Sappiamo però che esiste
 - Righe OVI, emissione soft X, ...
- Il modello non tiene in conto degli effetti idrodinamici delle esplosioni delle supernove
 - Tali effetti distruggono rapidamente il mezzo interstellare a due fasi
- Necessità di un modello a 3 fasi

Astronomia Osservativa C, ISM 3, Vladilo (2011)

28

Modello di McKee & Ostriker (1977)
 gas nel disco Galattico
 non si considera la componente molecolare

Rivisitazione del modello
 a 3 fasi: Cox (2005)

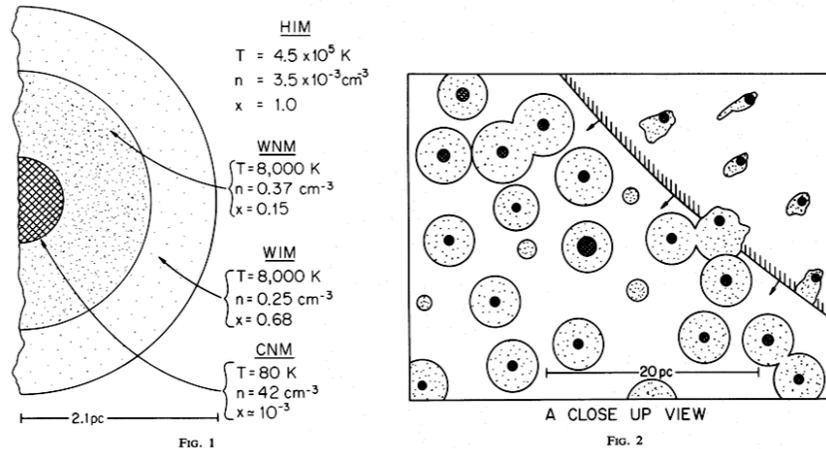


FIG. 1.—Cross section of a characteristic small cloud. The crosshatched region shows the cold core, which gives the usual optical absorption lines. Next is the warm neutral medium (WNM) with ionization produced by soft X-ray background. The outer layer (WIM) is gas largely ionized by stellar UV background. Typical values of hydrogen density n , temperature T , and ionization $x = n_e/n$ are shown for each component, except that a higher than average value of the soft X-ray flux has been assumed in order to produce a significant amount of WNM at this pressure.

FIG. 2.—Small-scale structure of the interstellar medium. A cross section of a representative region $30 \text{ pc} \times 40 \text{ pc}$ in extent is shown, with the area of the features being approximately proportional to their filling factors. A supernova blast wave is expanding into the region from the upper right. The radius of the neutral cores of the clouds (represented by crosshatching) ranges from about 0.4 to 1 pc in this small region; all the clouds with cores have warm envelopes (dotted regions) of radius $a_w \sim 2.1 \text{ pc}$. A few clouds are too small to have cores. The envelopes of clouds inside the SNR are compressed and distorted.

Modello di fontana Galattica
 Norman & Ikeuchi (1989)

- Interazione tra il disco e l'alone della Galassia

