

LA TRANSIZIONE H - H₂ NELLE GALASSIE

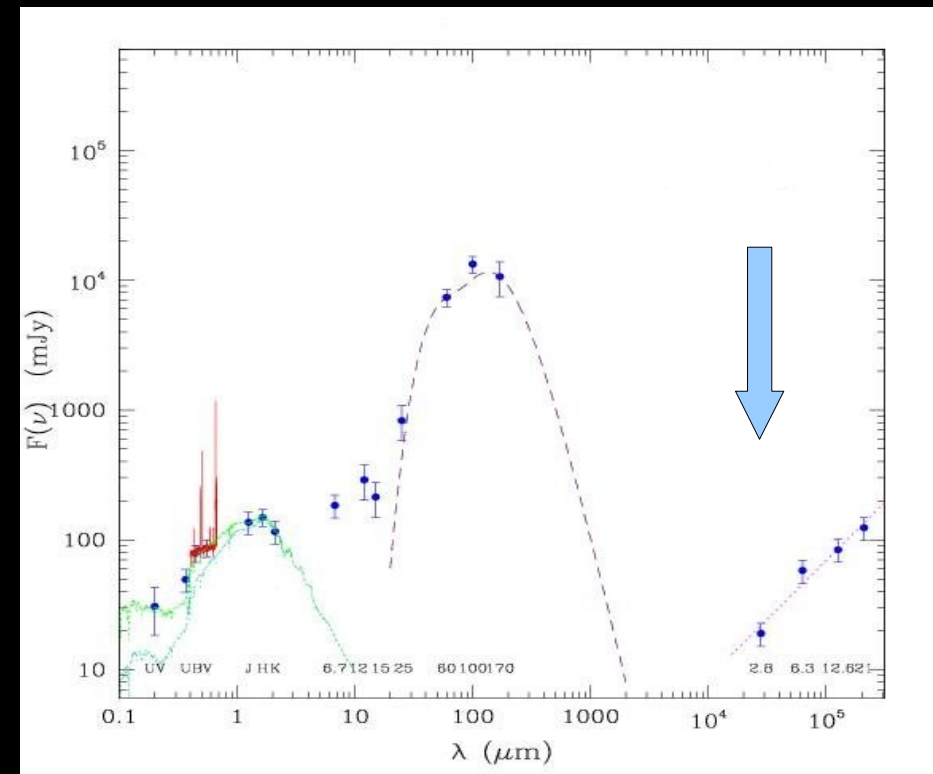
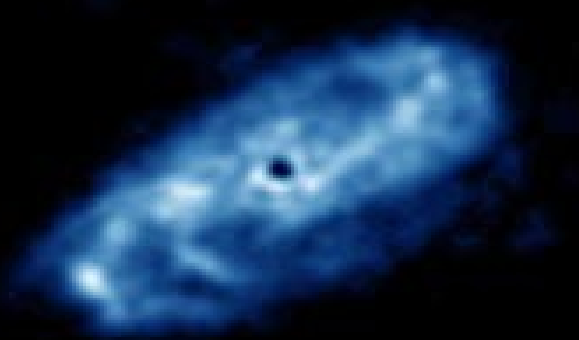
Astronomia Extragalattica
Michele Fumagalli
A.A. 2007/2008

Le galassie a spirale sono costituite da molteplici componenti.

La principale componente dell'IGM è l'idrogeno neutro che costituisce circa il 10% della massa totale delle galassie.

NGC4536 VLA--21cm Risoluzione: 15"

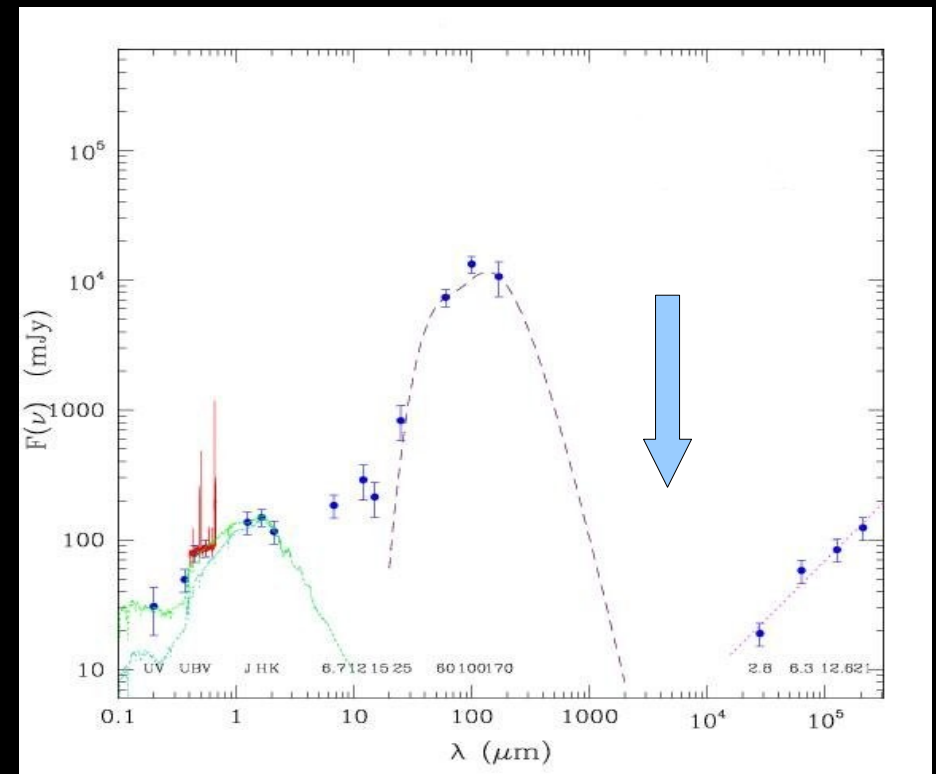
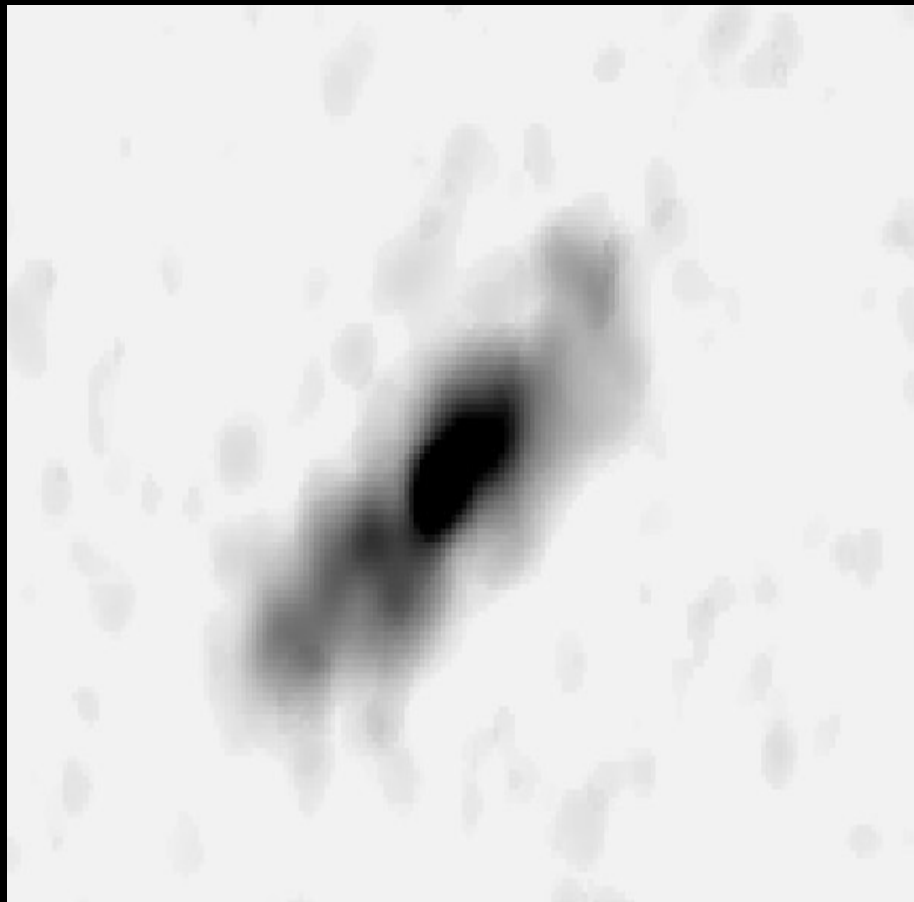
Emissione dovuta alla variazione di spin
elettrone—protone



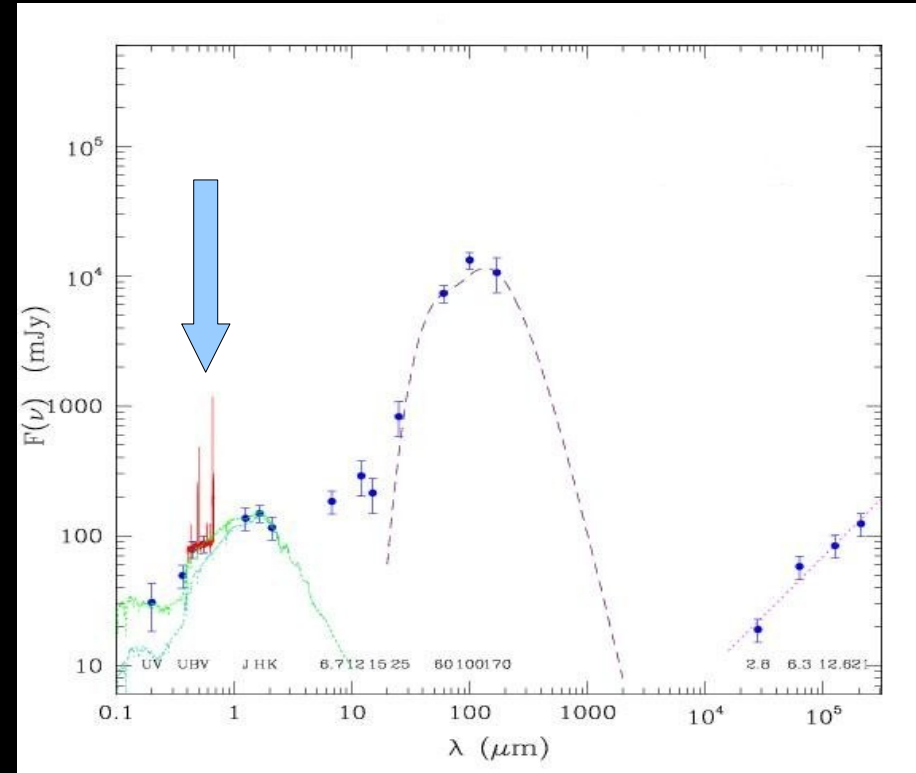
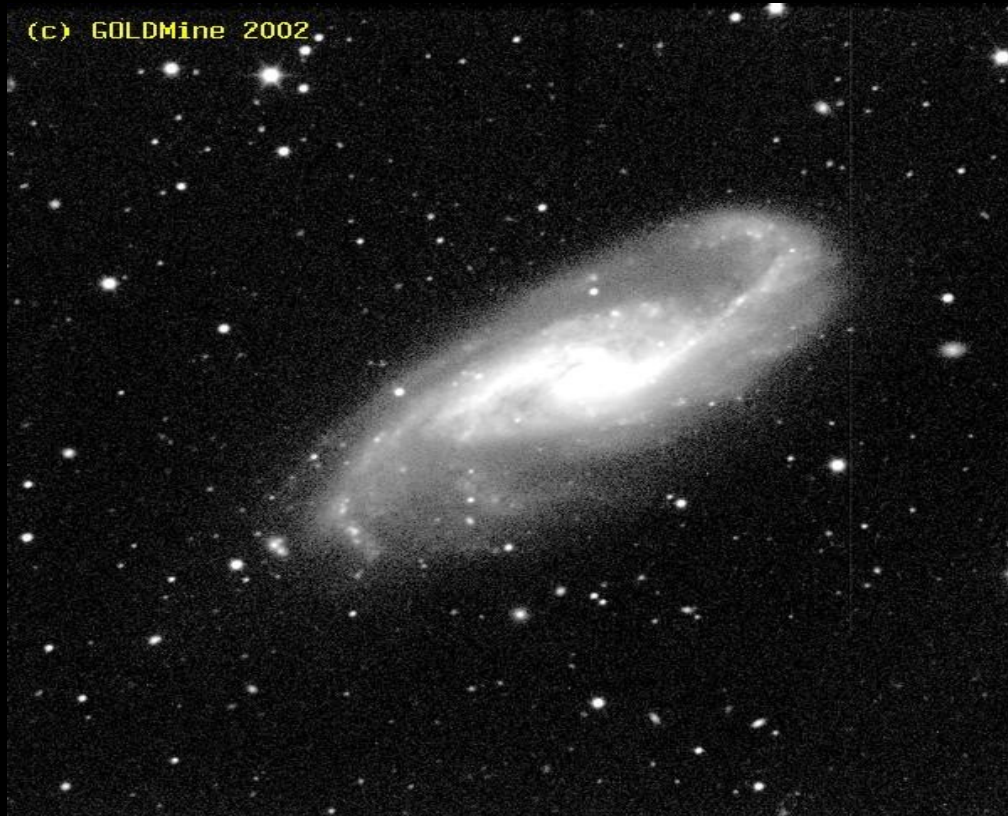
La componente molecolare H_2 costituisce circa il 10% delle riserve di gas totale.

NGC4536 BIMA - 2 mm
Risoluzione: 15"

Emissione dovuta alla
transizione molecolare
 $CO(J=1-0)$



La componente stellare, unita alla componente oscura
costituisce la componente di massa predominante.

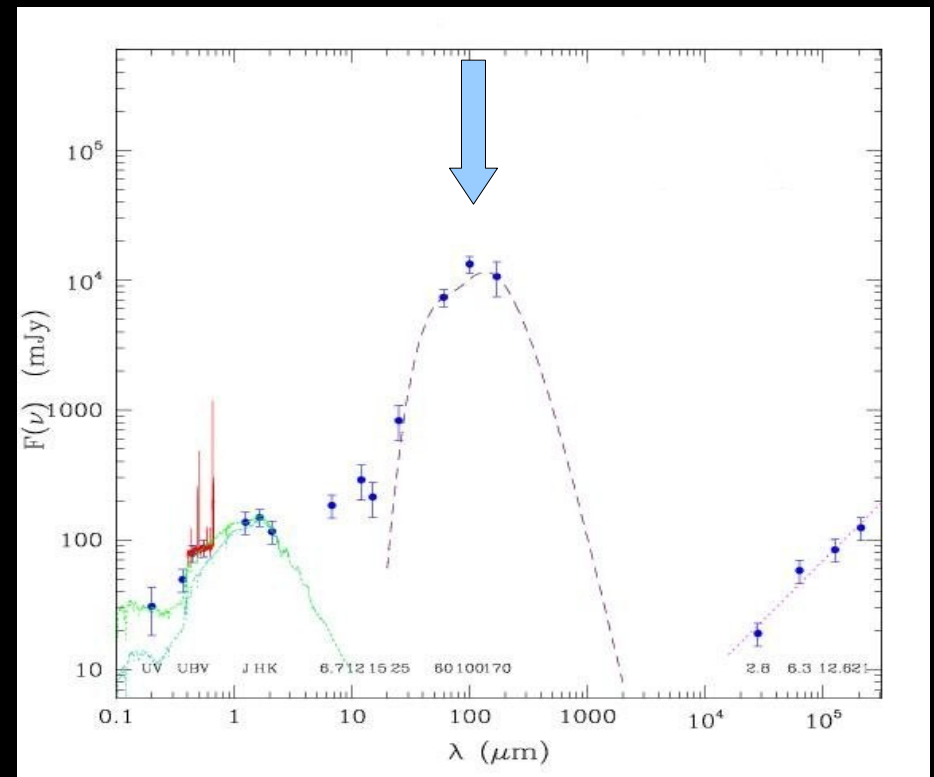


NGC4536 V band

Le polveri di diversa forma e composizione si originano dai metalli processati dalle stelle

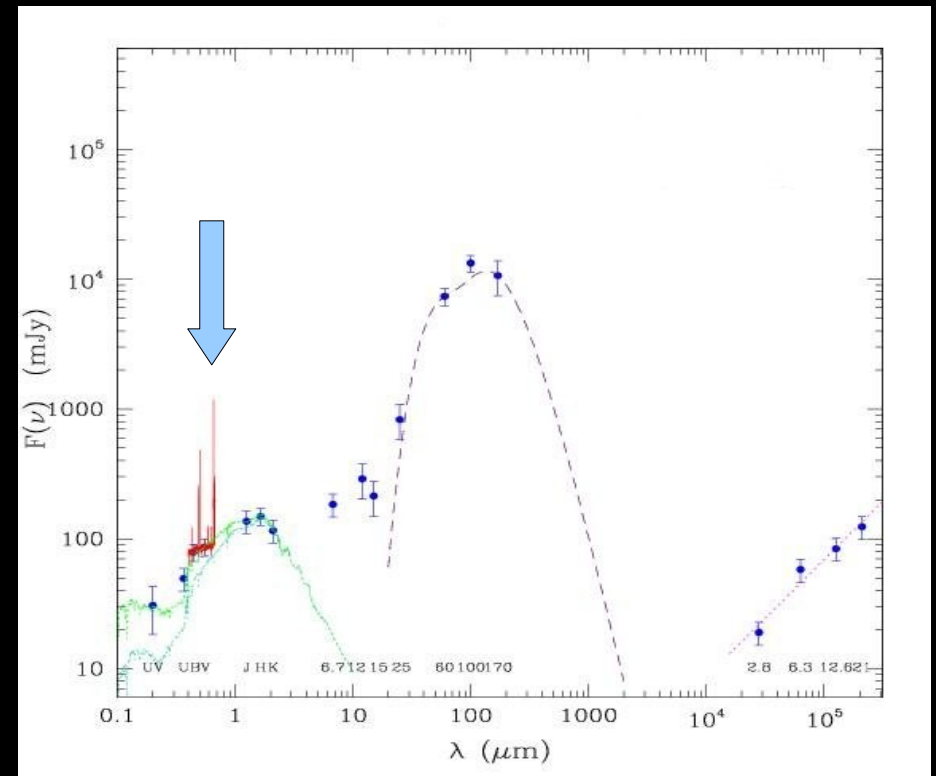
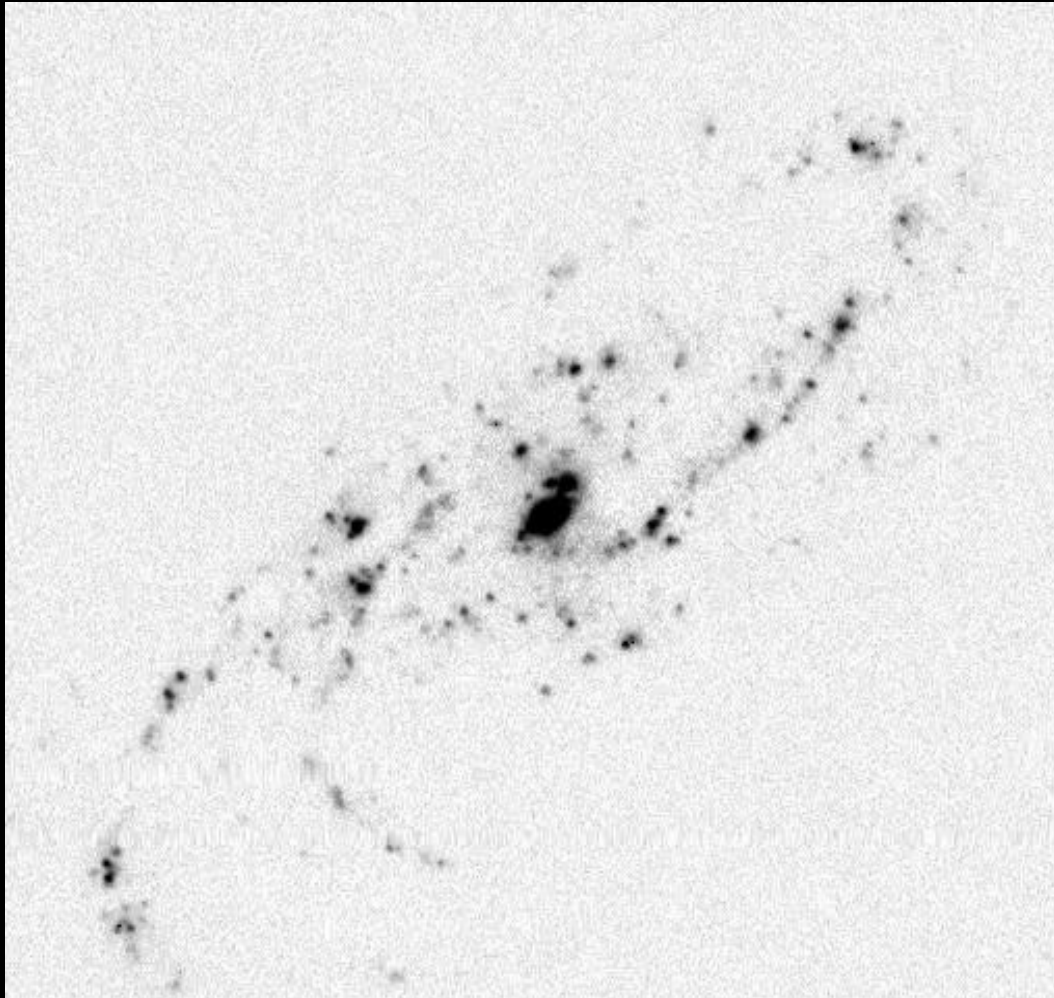
NGC4536 MIPS - 70 μm Risoluzione: 5.3"

Emissione dovuta alle polveri che riemettono in FIR la radiazione assorbita in UV

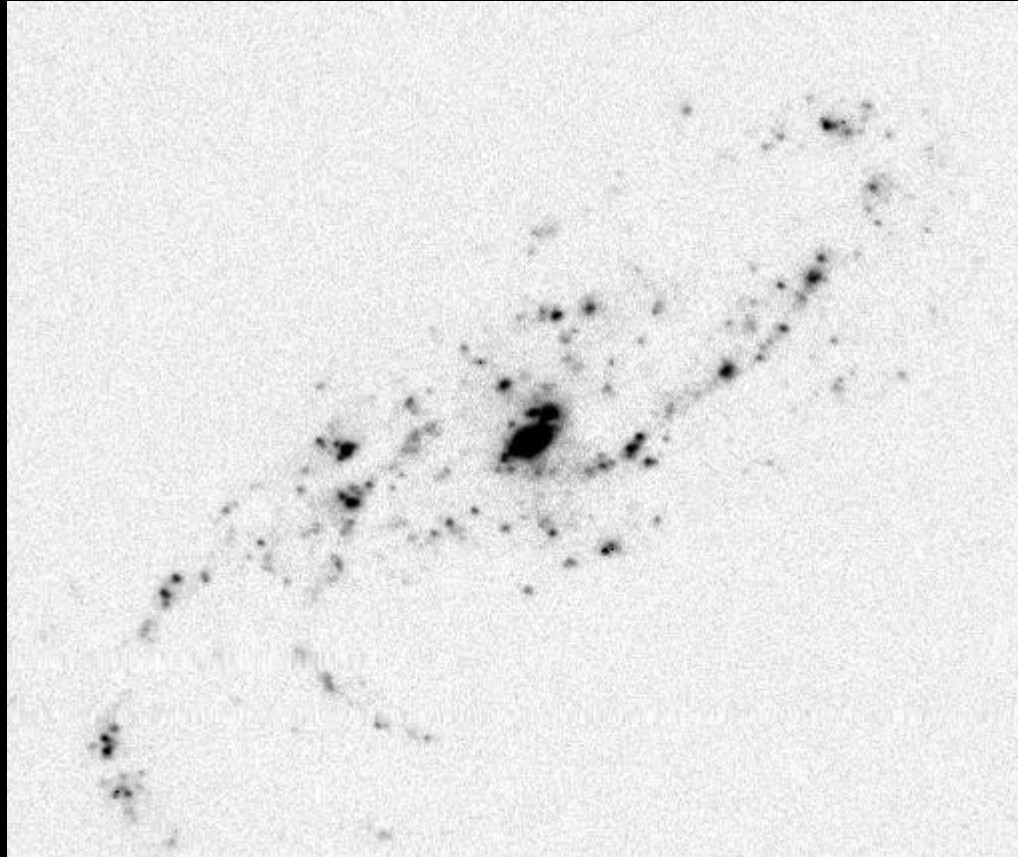


La corrente attivita' di formazione stellare puo' essere studiata mediante traccianti della luminosita' di stelle giovani (tipo O, B e A)

NGC4536 H α – Filter 6600Å



La corrente attivita' di formazione stellare puo' essere studiata mediante traccianti della luminosita' di stelle giovani (tipo O, B e A)



Transizione dovuta alle ricombinazioni Balmer dell'idrogeno ionizzato dai fotoni energetici di stelle O, B

$$M > 8M_{\odot} \quad t < 4 \cdot 10^6 \text{ yrs}$$

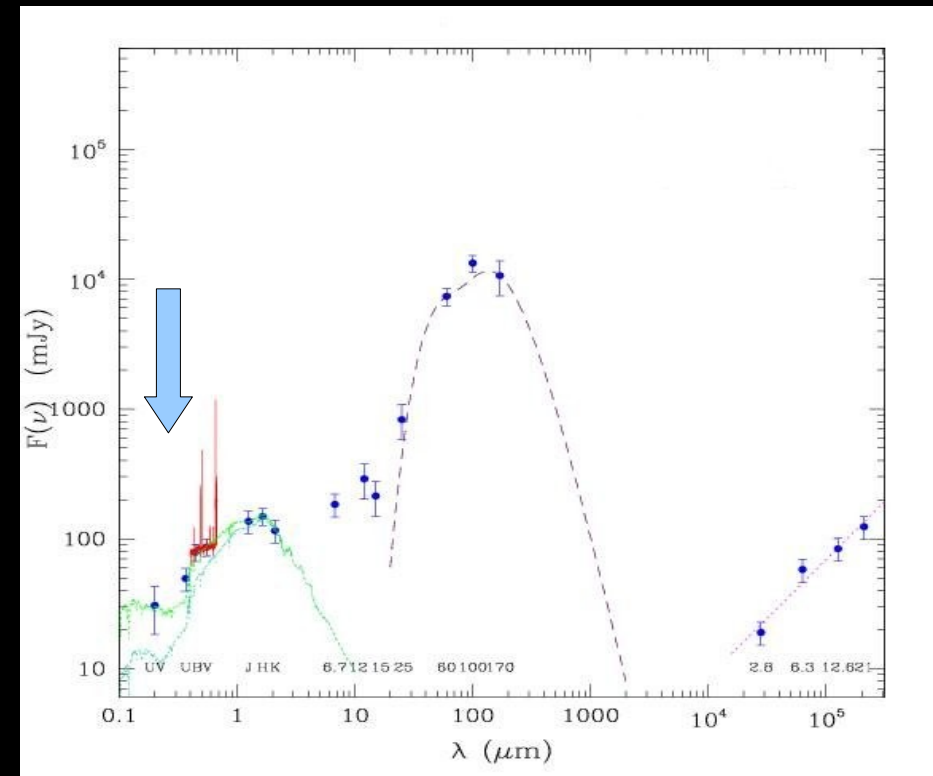
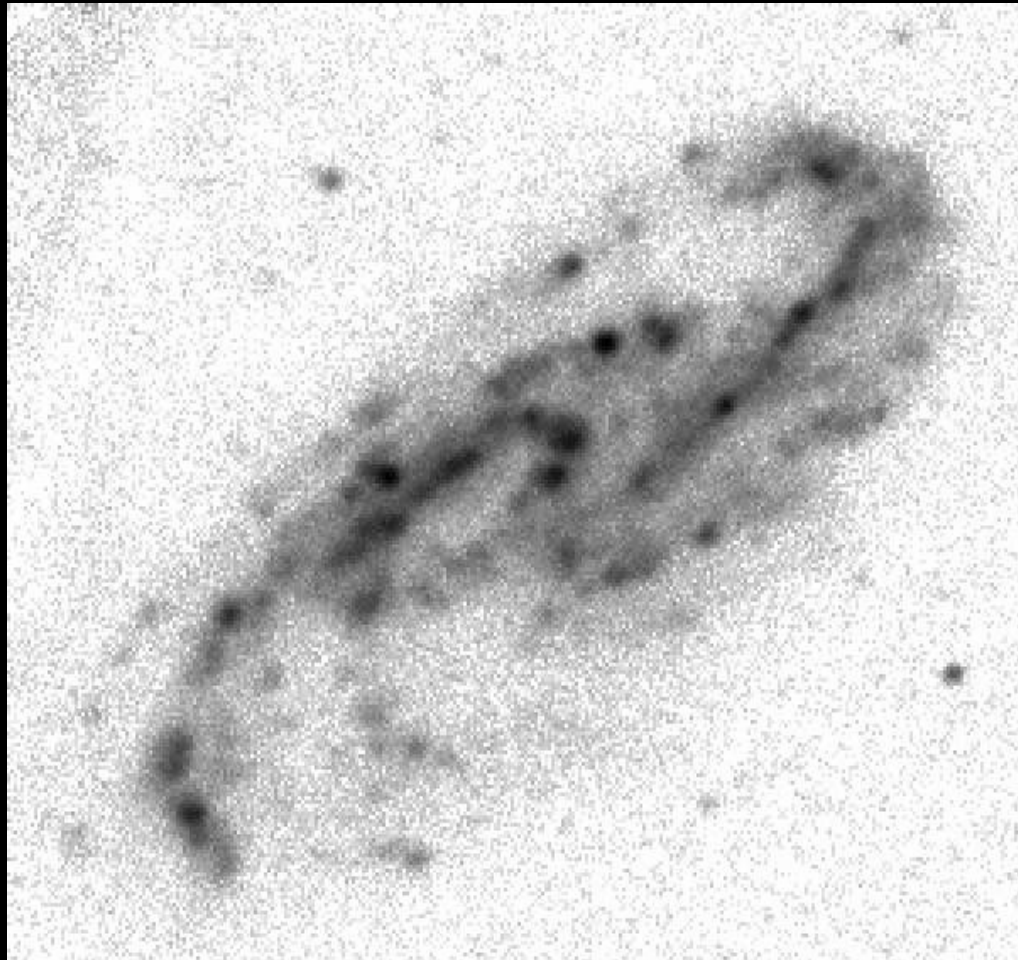
La luminosità $H\alpha$ è convertita in SFR con la relazione calibrata da Kennicutt (1998)

NGC4536 $H\alpha$ – Filter 6600Å

$$SFR(M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) = \frac{L(H_{\alpha})}{1.26 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}}$$

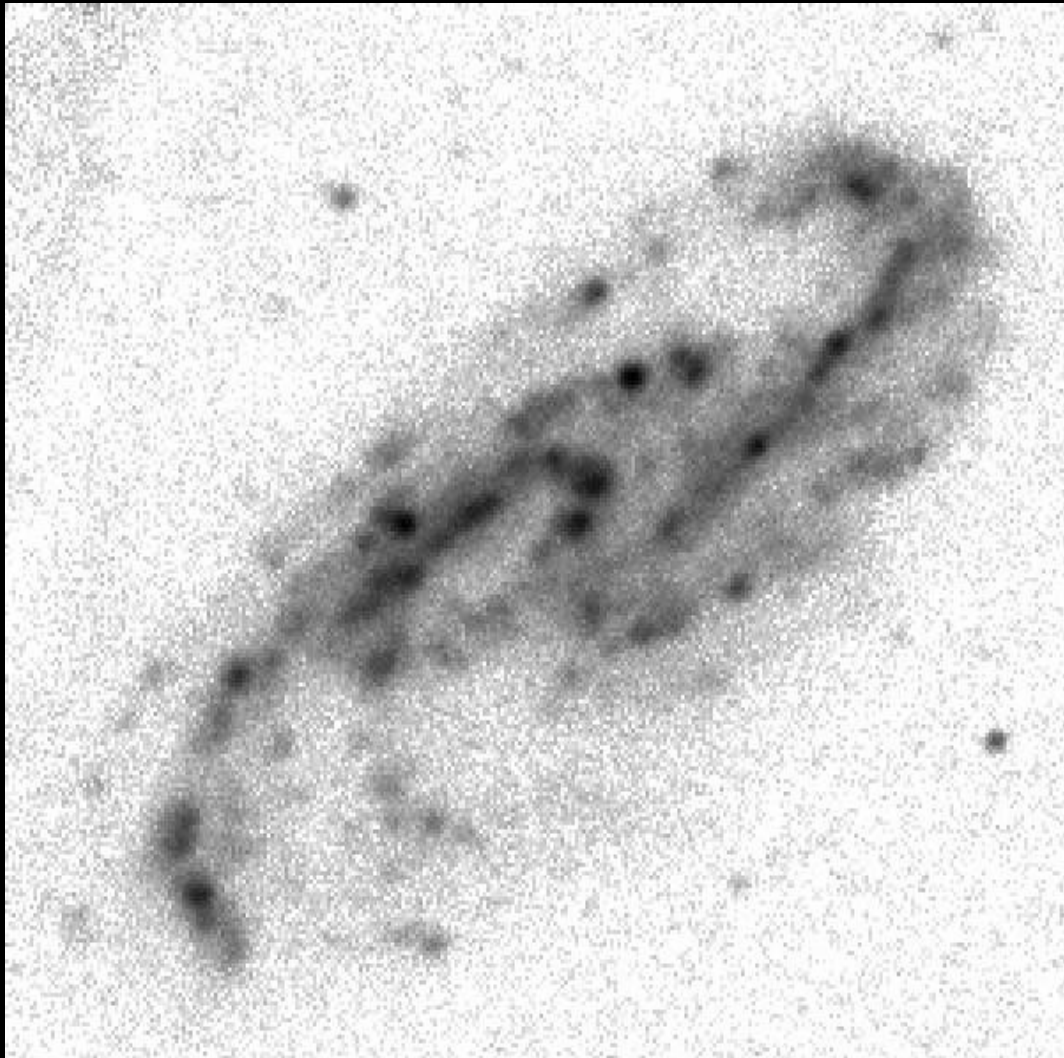
La radiazione UV è fortemente assorbita dall'atmosfera. Occorre una misurata da satellite: GALEX (<http://www.galex.caltech.edu/>)

NGC4536 – NUV (2267Å)



La radiazione UV è fortemente assorbita dall'atmosfera. Occorre una misurata da satellite: GALEX (<http://www.galex.caltech.edu/>)

NGC4536 – NUV (2267Å)



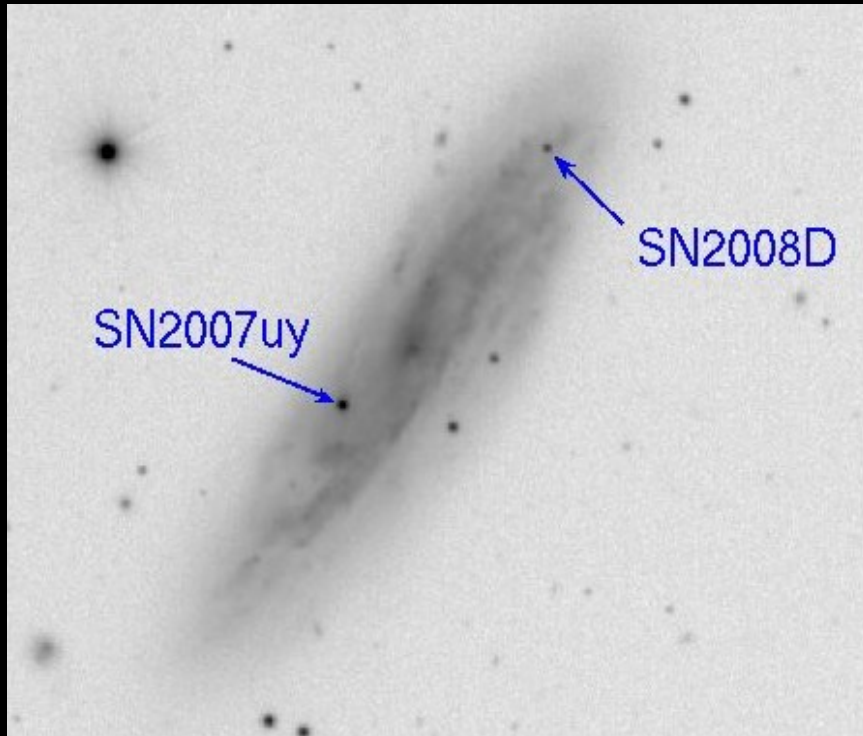
Emissione dei fotoni UV da parte di stelle A, meno calde e meno massive

$$M \simeq 2 - 5M_{\odot}$$

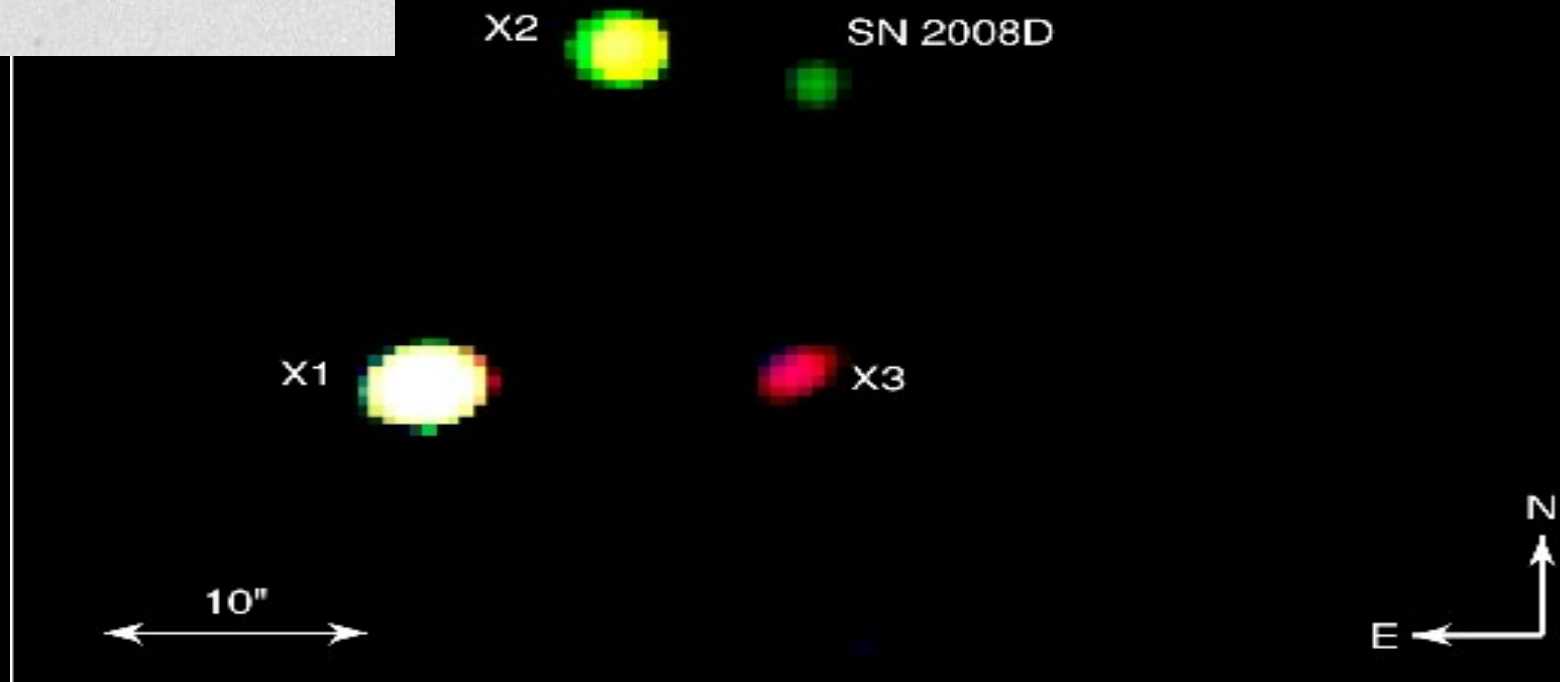
$$t \simeq 3 \cdot 10^8 yrs$$

La luminosità UV è indicatore di SFR, ma ci sono problemi legati all'assorbimento

Altri traccianti della SFR derivano da FIR, radio continuo e attività di super novae
NGC2770 ha ospitato diversi eventi di SN 2008D, 2007uy, 1999eh



Osservazioni in X di 2008D - Chandra



La formazione stellare avviene nelle GMC dove i valori di densità (10^3 part/cm^3) e temperatura ($T \sim 50 \text{ K}$) sono tali da garantire l'instaurarsi dell'instabilità di Jeans per 10-100 masse solari

Le GMC si possono formare

- 1) Da gas atomico attraverso dei processi di instabilità del gas o eventi di shock (Blitz&Shu, 1980; Engargiola, 2003)
- 2) Dalla coalescenza di nubi molecolari già presenti nelle galassie

Solitamente le regioni centrali delle galassie sono popolate da H_2 mentre le regioni esterne da HI: quale componente è più attiva e quindi influisce sulla SFR?

SFR e HI

Gli studi pionieristici di Kennicutt (1989, 1998) mostrano che su un ampio range di luminosità la SFR globale misurata da H α segue la legge di Schmitd (1959)

$$\Sigma_{\text{SFR}} = A \Sigma_{\text{gas}}^N$$

che può essere interpretata come il rapporto tra la densità di gas e un tempo di instabilità gravitazionale o tempo dinamico

$$\rho_{\text{SFR}} \propto \frac{\rho_{\text{gas}}}{(G \rho_{\text{gas}})^{-0.5}} \propto \rho_{\text{gas}}^{1.5}$$

$$\Sigma_{\text{SFR}} \propto \frac{\Sigma_{\text{gas}}}{\tau_{\text{dyn}}} \propto \Sigma_{\text{gas}} \Omega_{\text{gas}}$$

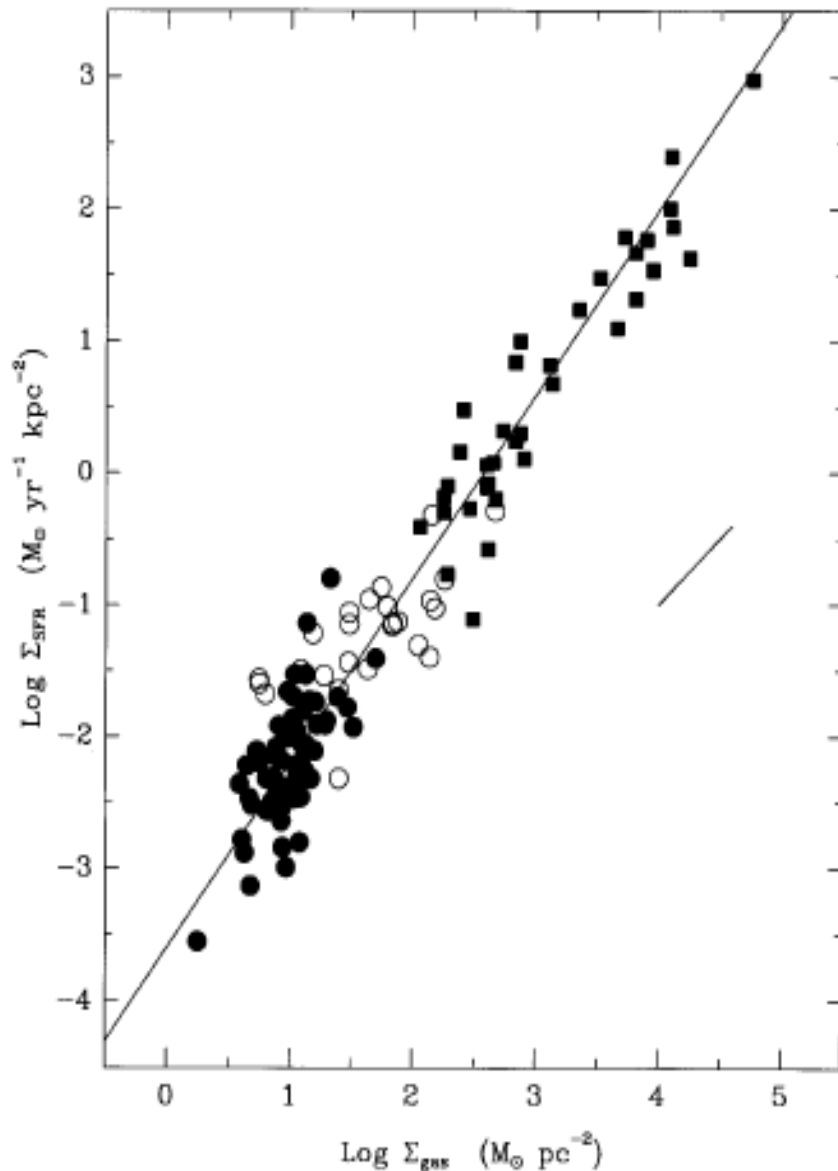


FIG. 6.—Composite star formation law for the normal disk (*filled circles*) and starburst (*squares*) samples. Open circles show the SFRs and gas densities for the centers of the normal disk galaxies. The line is a least-squares fit with index $N = 1.40$. The short, diagonal line shows the effect of changing the scaling radius by a factor of 2.

Kennicutt trova una relazione

$$\Sigma_{\text{SFR}} = (2.5 \pm 0.7)$$

$$\times 10^{-4} \left(\frac{\Sigma_{\text{gas}}}{1 M_{\odot} \text{ pc}^{-2}} \right)^{1.4 \pm 0.15} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ kpc}^{-2}$$

e correlazione SFR con HI, non con CO:

- Il gas atomico influenza la SFR
- La SFR fotoionizza il gas molecolare e rende abbondante HI
- Il fattore di conversione CO/H₂ è mal stimato e le misure di CO non sono sensibili alle basse column density

SFR e H_2

Successivi studi mostrano invece una migliore correlazione SFR e densità di idrogeno molecolare.

Wong&Blitz (2002) con la BIMA CO Survey trovano

$$\Sigma_{\text{SFR}} = 0.13 \Sigma_{\text{H}_2}^{1.4}$$

Murgia et al. (2002) correlano SFR con Σ_{H_2} ($n=1.3$) da misure del RC

$$\text{Heyer et al. (2004) trovano } \Sigma_{\text{SFR}} \sim \Sigma_{\text{H}_2}^{1.36} \text{ e } \Sigma_{\text{SFR}} \sim \Sigma_{\text{htot}}^{3.3}$$

Sembra quindi che H_2 abbia un ruolo importante nella formazione delle GMCs

Come si origina l'idrogeno molecolare a partire dall'idrogeno neutro, sintetizzato cosmologicamente?

Elmegreen (1993) deriva un modello teorico in cui l'efficienza di conversione $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$ dipende dalla pressione e dal campo di radiazione presente nell'ISM

Un aumento della pressione infatti favorisce una formazione di idrogeno molecolare sia nella componente diffusa che a nube
Accrescimenti di massa o sovradensità nei bracci a spirale favoriscono questo processo

Viceversa un campo di radiazione UV è in grado di fotodissociare molto rapidamente l'idrogeno molecolare

Tenendo conto dell'effetto schermo reciproco e autoindotto, vale una relazione di equilibrio dinamico:

$$f_{\text{mol}} = \text{N}(\text{H}_2) / \text{N}(\text{HI}) \sim P^{2.2} j^{-1.1}$$

Blitz&Rosolowsky (2004,2006) assumono che la componente dominante è data dal termine di pressione dinamico, che internamente ad un disco isoterma di gas e stelle è

$$P_{\text{ext}} = (2G)^{0.5} \Sigma_g v_g \left[\rho_*^{0.5} + \left(\frac{\pi}{4} \rho_g \right)^{0.5} \right]$$

Trascurando il II termine (autogravitazione del gas) ed assumendo per un disco di stelle autogravitante

$$\Sigma_* = 2\sqrt{2}\rho_* h_*$$

si deriva, infine:

$$P_{\text{ext}} = 0.84(G\Sigma_*)^{0.5} \Sigma_g \frac{v_g}{(h_*)^{0.5}}$$

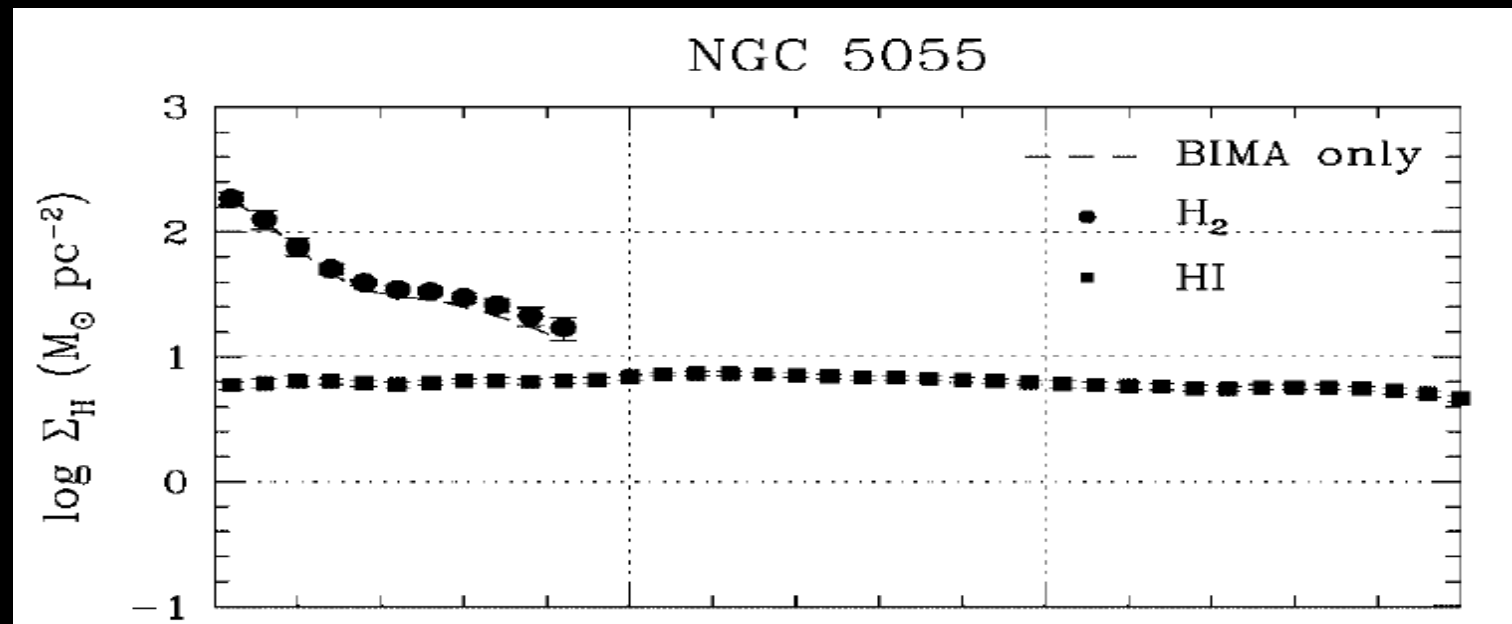
Assumendo lo spessore del disco h_* e la velocità del gas $v_g = 8 \text{ km s}^{-1}$ (compatibile con la velocità derivabile dalle costanti di Oort ad 1kpc) costanti, si deriva

per la frazione molecolare :

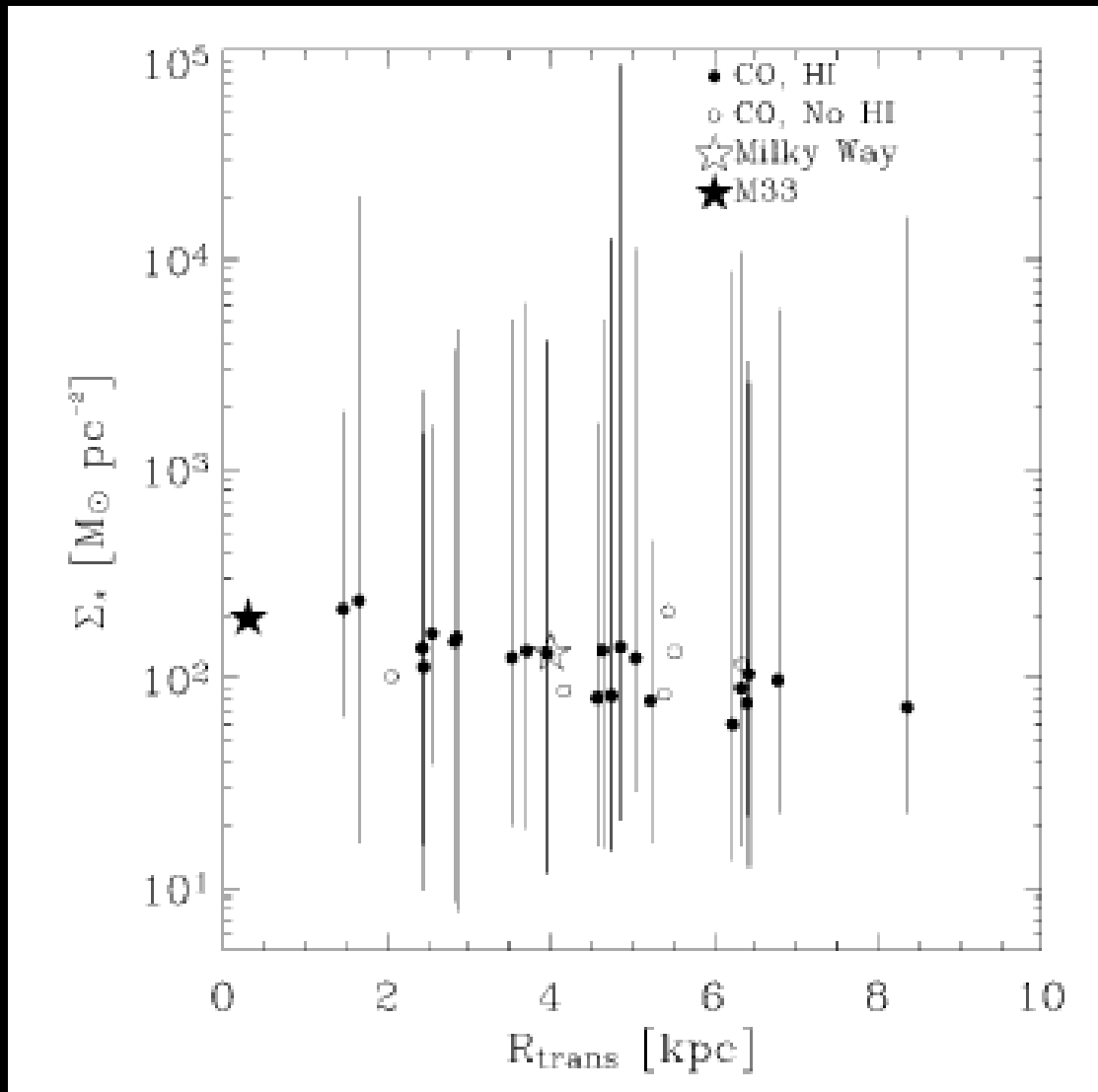
$$N(\text{H}_2)/N(\text{H I}) = f[P_{\text{ext}}(\Sigma_g, \Sigma_*)]$$

Una verifica sperimentale di questa dipendenza deriva dal fatto che la variazione della column density in HI è trascurabile rispetto a quella di H_2

e della componente stellare; inoltre rapidamente $N(\text{HI}) \sim 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$



Allora il raggio di transizione a cui $N(\text{H}_2)=N(\text{HI})$ dipende solamente da un valore di densità stellare $\Sigma_{*,t}$ atteso costante



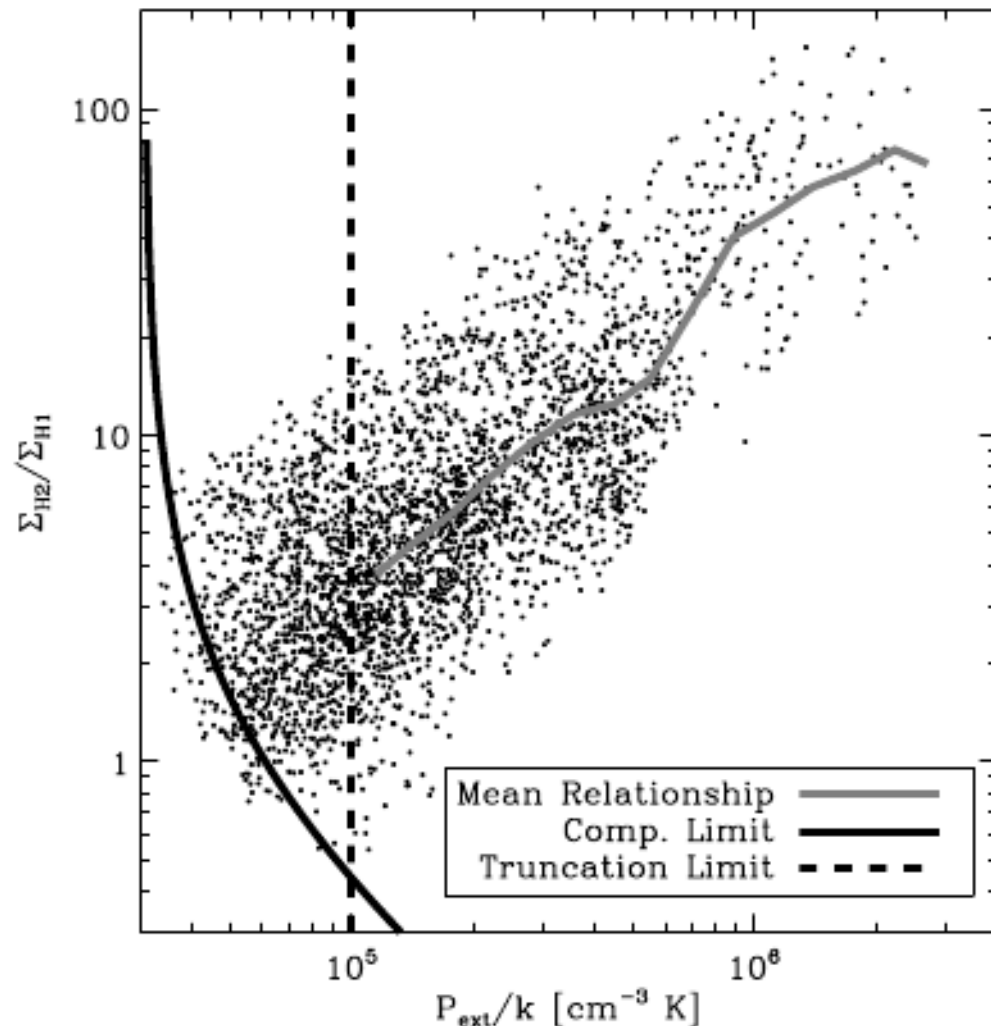
Si deriva
sperimentalmente un
valore di

$$\Sigma_{*,t} = 120 \pm 10 M_{\text{sun}}$$

con una dispersione
entro il 40%

Questo risultato mostra
una conferma della
previsione teorica e
della validità delle
semplificazioni
introdotte

L'esistenza di una relazione che lega la frazione molecolare alla pressione può anche essere studiata spazialmente pixel a pixel (massimizzando l'informazione nell'elemento di risoluzione)



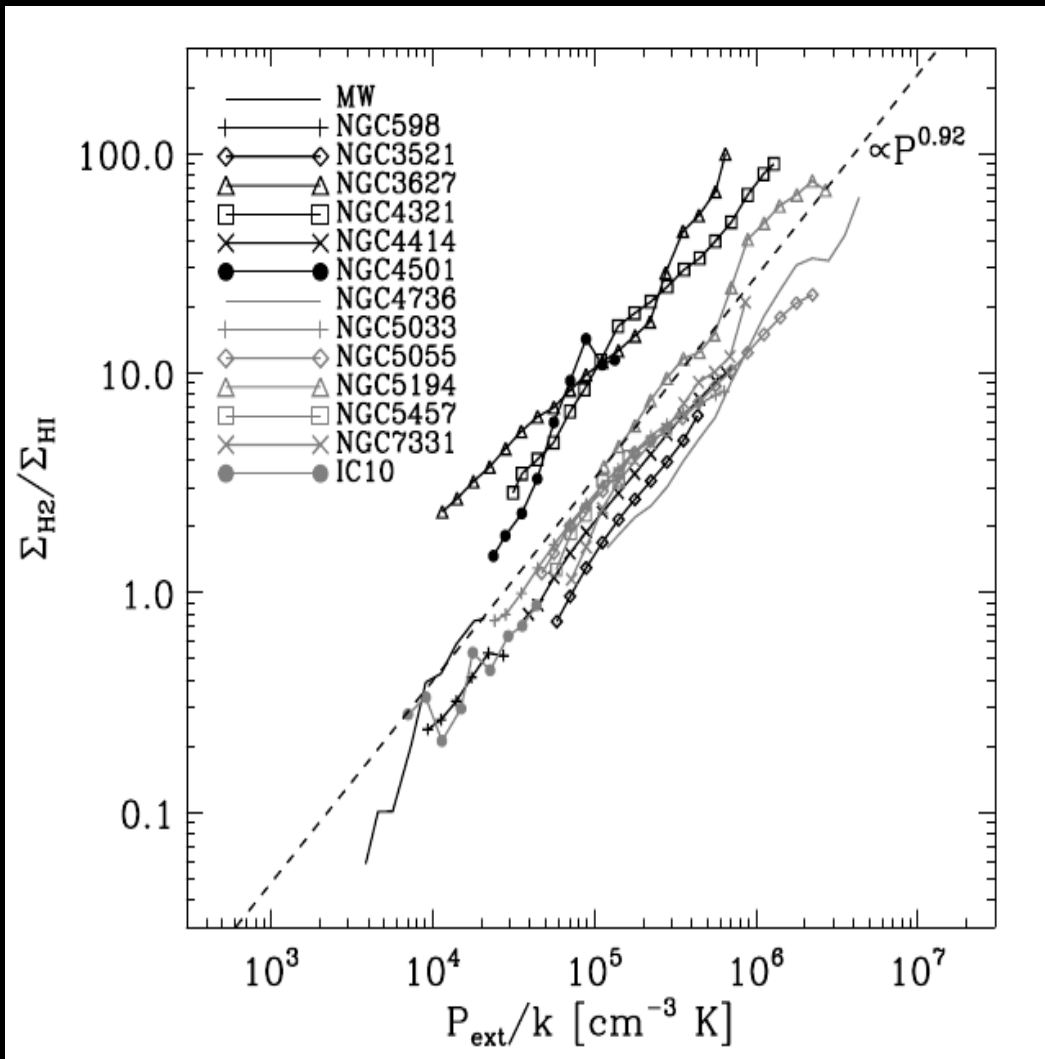
Definendo

$$R_{\text{mol}} \equiv \Sigma(\text{H}_2)/\Sigma(\text{H I}) = f(P_{\text{ext}})$$

si deriva una
correlazione

$$R_{\text{mol}} = \left[\frac{P_{\text{ext}}/k}{(3.5 \pm 0.6) \times 10^4} \right]^{0.92 \pm 0.07}$$

Mediando R_{mol} in bin di P_{dex} si vede che il campione si divide in due parti. Le galassie nella parte alta sono quelle deficienti per ram pressure o tidal processes, e possono essere rimosse per calcolare una relazione valida per galassie imperturbate



Corretta per le non deficienti:

$$R_{\text{mol}} = \left[\frac{P_{\text{ext}}/k}{(4.3 \pm 0.6) \times 10^4} \right]^{0.92 \pm 0.10}$$

Nota: Pressione = Densità

Avendo assunto un valore di pressione dinamico $P = \rho v^2$ e una velocità costante per il gas, a questo livello pressione e densità sono indistinguibili

Al di là del risultato:

Aver modellizzato la transizione idrogeno atomico/molecolare in funzione della sola pressione ed in ultima analisi della densità stellare permette :

Supponendo che la SF sia più attiva in regioni di idrogeno molecolare diffuso, è possibile derivare una modellizzazione su scala globale della star formation, che però ha anche una interpretazione fisica chiara

Poiché la velocità del gas e quindi la pressione idrodinamica sono quantità note dalle simulazione, si può avere una ricetta valida per la SF in ambito simulativo

Molecole di CS e HCN sono usate per tracciare stati molecolari più densi e quindi maggiormente legati alla star formation.

Sfruttando la correlazione esistente tra la luminosità CO e la luminosità HCN

$$L_{\text{HCN}} = 1.6 \times 10^{-5} L_{\text{CO}}^{1.38}$$

Blitz & Rosolowsky derivano una nuova relazione per descrivere la SFR

Assumendo che

$$\Sigma_{\text{SFR}} = \epsilon \Sigma_{\text{H}_2}(\text{HCN})$$

e passando al CO

$$\Sigma_{\text{SFR}} = \epsilon \Sigma_{\text{H}_2}(\text{CO}) \left[\frac{\Sigma_{\text{H}_2}(\text{HCN})}{\Sigma_{\text{H}_2}(\text{CO})} \right]$$

da cui

$$\Sigma_{\text{SFR}} = \epsilon \Sigma_g f_{\text{mol}} \left[\frac{\Sigma_{\text{H}_2}(\text{HCN})}{\Sigma_{\text{H}_2}(\text{CO})} \right]$$

dove

$$f_{\text{mol}} = \Sigma_{\text{H}_2} / \Sigma_g = R_{\text{mol}} / (R_{\text{mol}} + 1)$$

è

$$R_{\text{mol}} = \Sigma_{\text{H}_2} / \Sigma_{\text{H I}}$$

Sfruttando la definizione

$$R_{\text{mol}} = \left(\frac{P_{\text{ext}}}{P_0} \right)^\alpha$$

si ricava infine

$$f_{\text{mol}} = \frac{R_{\text{mol}}}{(R_{\text{mol}} + 1)} = \left[1 + \left(\frac{P_{\text{ext}}}{P_0} \right)^{-\alpha} \right]^{-1}$$

dove il valore di P_0 è definito in termini della pressione esterna nell'ISM, dove la frazione molecolare è pari all'unità.

L'ultima informazione che si può introdurre è il legame

$$\frac{\Sigma_{\text{H}_2}(\text{HCN})}{\Sigma_{\text{H}_2}(\text{CO})} = 3.2 \frac{I(\text{HCN})}{I(\text{CO})}$$

Questa nuova legge per la star formation tiene conto in maniera più dettagliata dei fattori che influiscono nel processo di formazione stellare

Inoltre è possibile derivare due valori asintotici

Se $P_0 > P_{\text{ext}}$ cioè se il raggio di transizione è interno e quindi la densità di HI è predominante su quella della componente molecolare

$$\Sigma_{\text{SFR}} = 0.1 \epsilon \Sigma_g \left(\frac{P_{\text{ext}}}{P_0} \right)^{0.92} M_{\odot} \text{ pc}^{-2} \text{ Gyr}^{-1}$$

Se invece $P_0 < P_{\text{ext}}$ cioè se il raggio di transizione è esterno, si ricava asintoticamente la relazione di Schmidt, dove però

$$\Sigma_{\text{SFR}} \sim \Sigma_{\text{H}_2}$$

Confronto con le osservazioni:

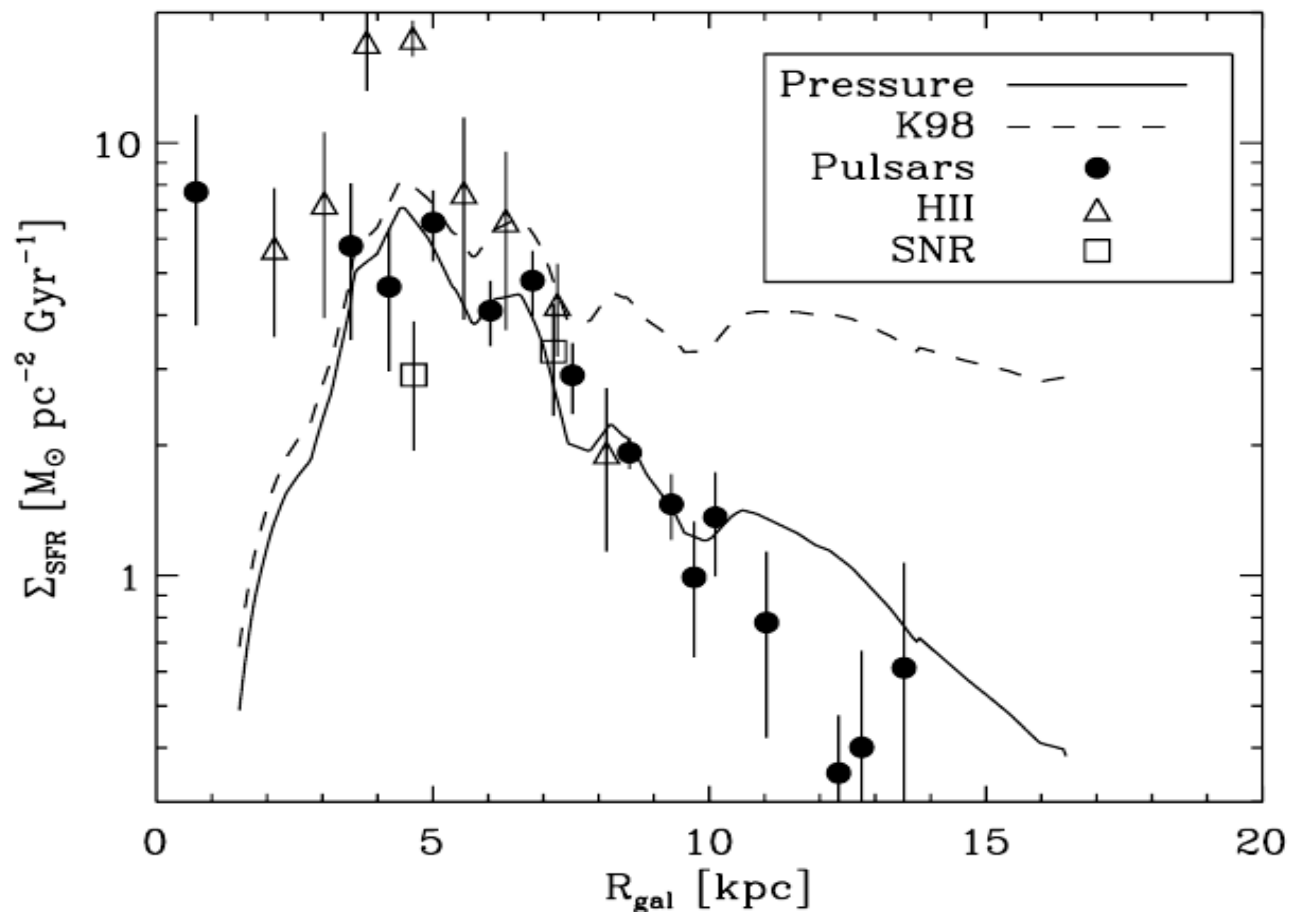


FIG. 5.—SFR as a function of galactocentric radius (R_{gal}) for the Milky Way. The figure compares the results for the pressure-based star formation prescription in the present work (*solid line*) to that of K98 (*dashed line*) and the measured values. *Triangles*: H II regions (Guesten & Mezger 1982). *Circles*: Pulsars (Lyne et al. 1985). *Squares*: supernova remnants (Guibert et al. 1978). The pressure formulation predicts not only the shape of the curve for the observed SFR, but for most of the points, the amplitude as well.

Confronto con le osservazioni:

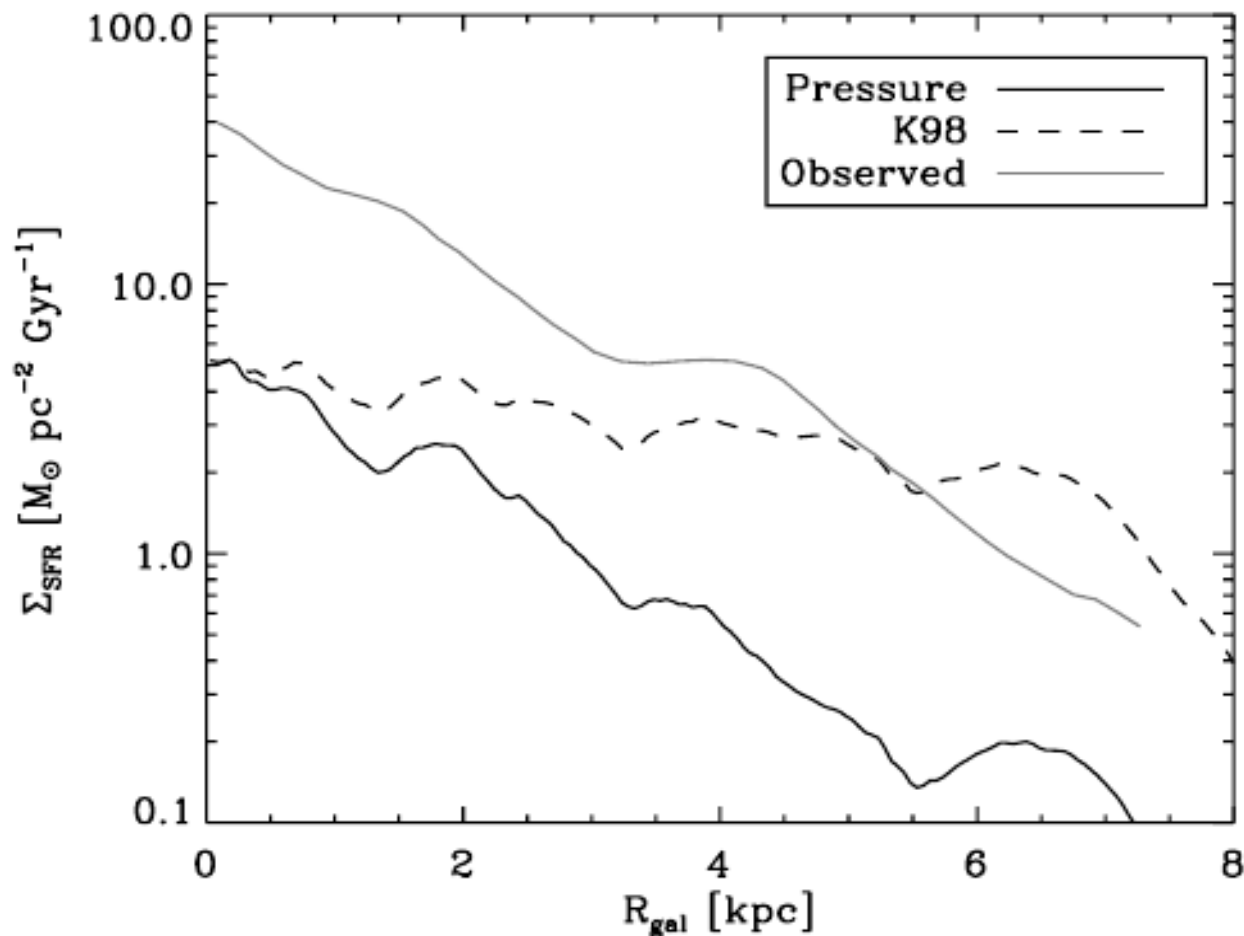
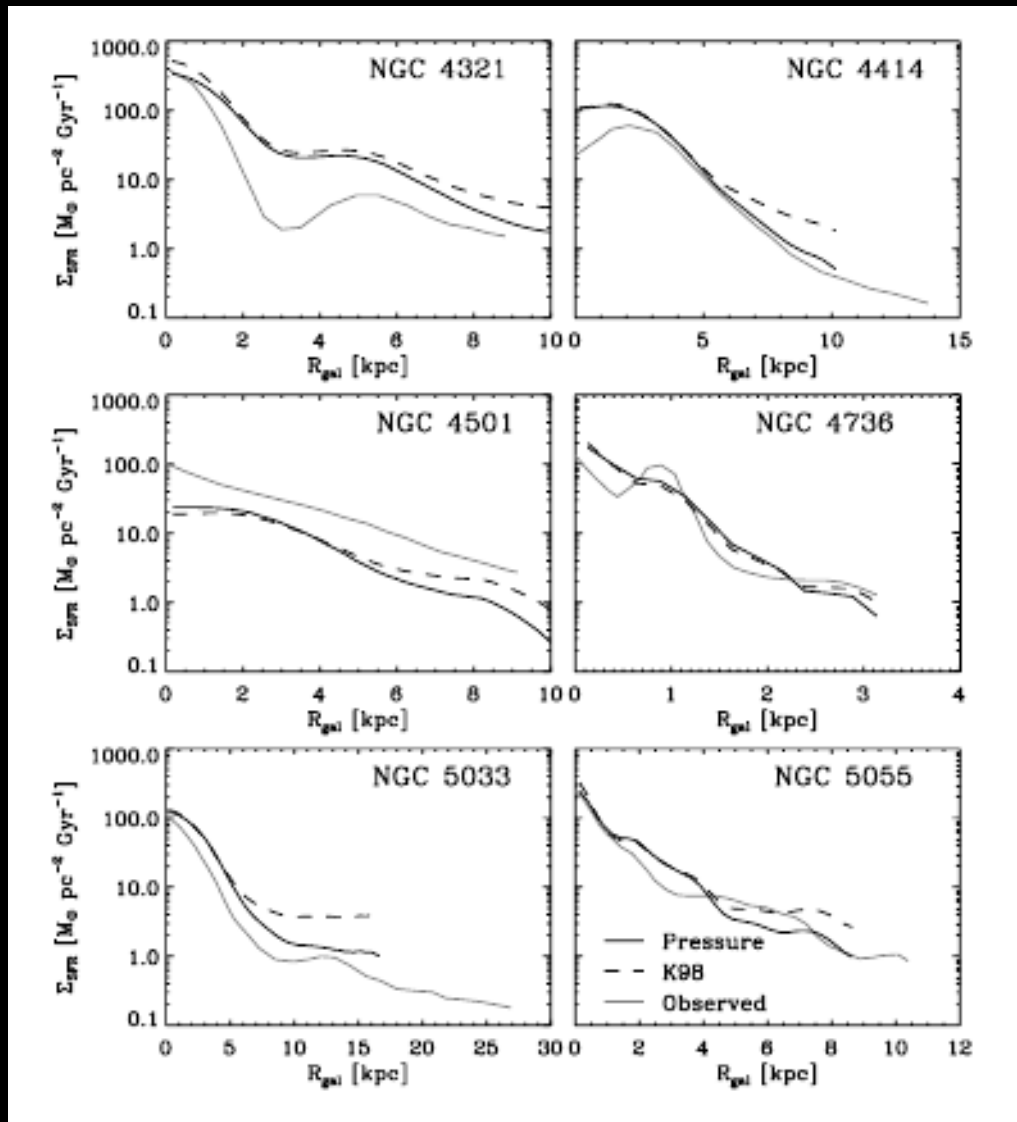


FIG. 6.—SFR as a function of galactocentric radius (R_{gal}) for NGC 598 (M33). The figure compares the results for the pressure-based star formation prescription in the present work (*solid line*) to that of K98 (*dashed line*) and the measured values (*gray line*; Heyer et al. 2004). The pressure formulation predicts the shape of the observed curve, although the results are offset by a constant factor of 7, implying the star formation efficiency of molecular gas in M33 is dramatically higher than in comparable systems.

Confronto con le osservazioni:



Per galassie ad alto contenuto molecolare, si vede come l'andamento osservato è comunque ben descritto dal modello di Kennicutt che considera la componente totale del gas.

Il nuovo modello derivato offre comunque il migliore accordo

SFR e H_2 vs SFR e HI

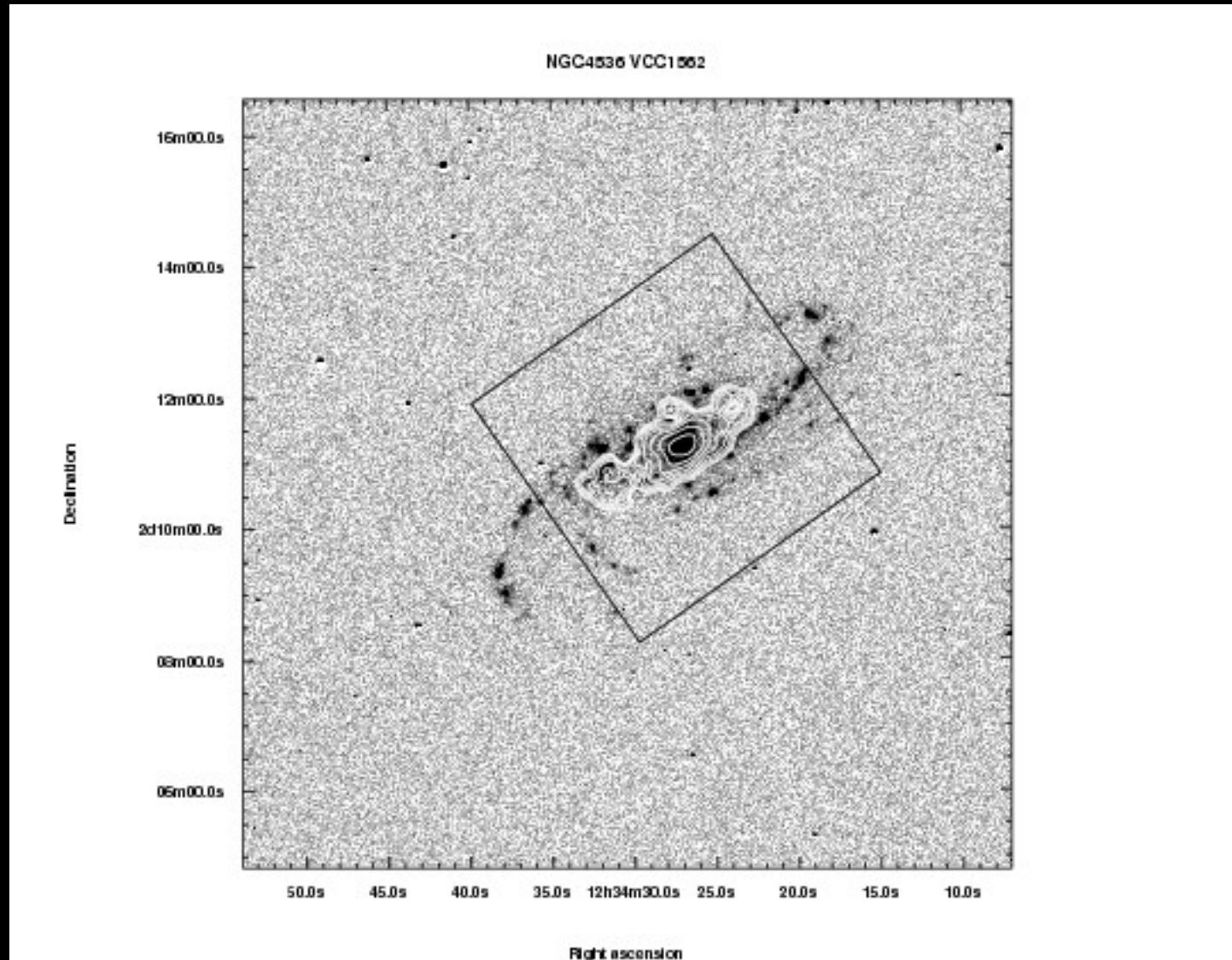
Alla luce dell'analisi di Blitz&Rosowlosky sembra che sia l'idrogeno molecolare il miglior tracciante della SFR

Il dibattito è però ancora aperto.

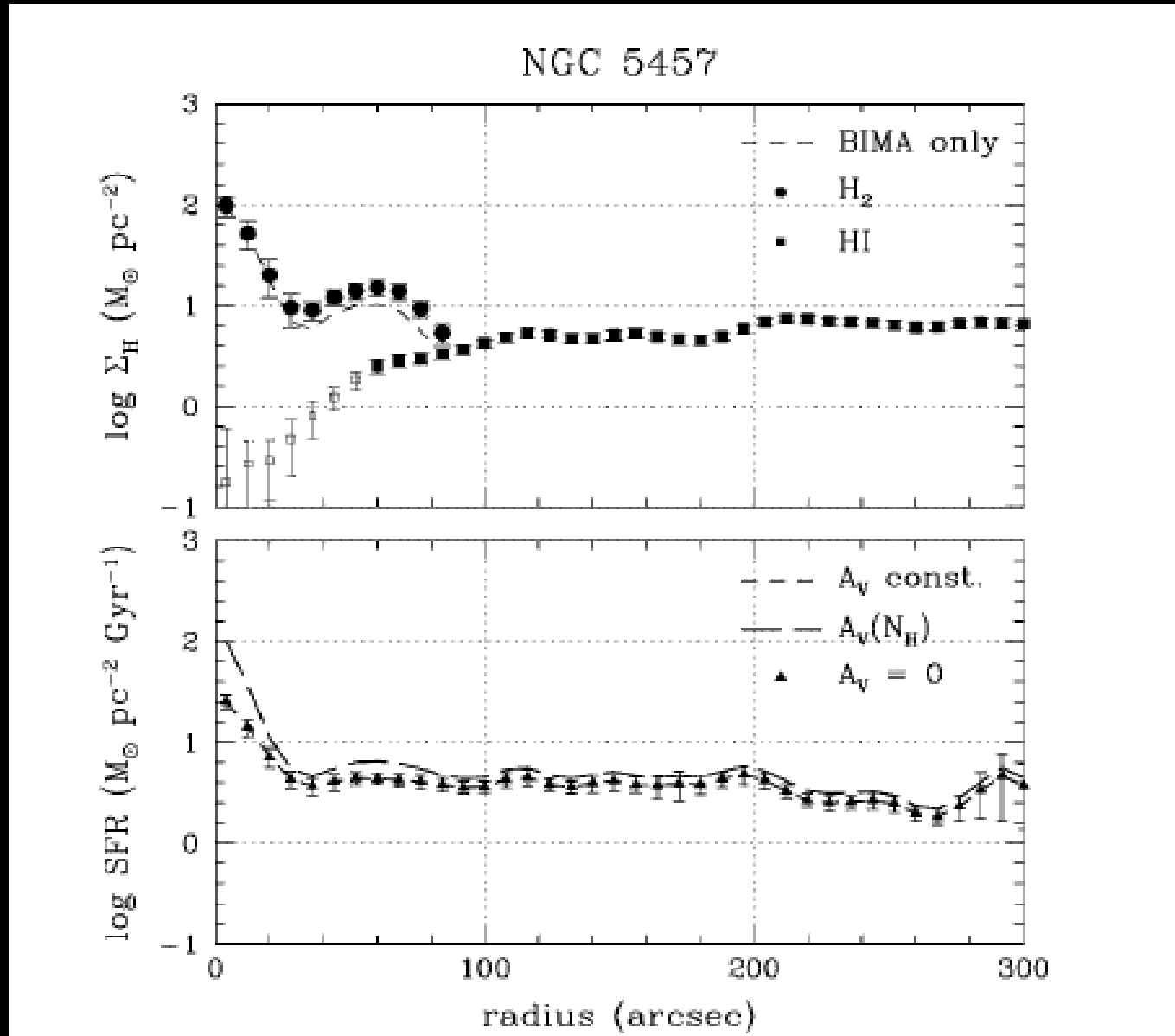
Le GMCs si possono formare sia da regioni di idrogeno neutro che molecolare, e lo stato dominante del mezzo gassoso è dominato dalla pressione ma anche da perturbazioni locali come eventi di supernovae e onde di densità

Quindi soprattutto su scale locali la fisica delle formazione di GMCs è complessa e non necessariamente attribuibile a solo idrogeno molecolare.

Su piccola scala si vedono HII regions che non sono annesse a regioni di alta densità molecolare... giustificabile in termini di fotoionizzazione?



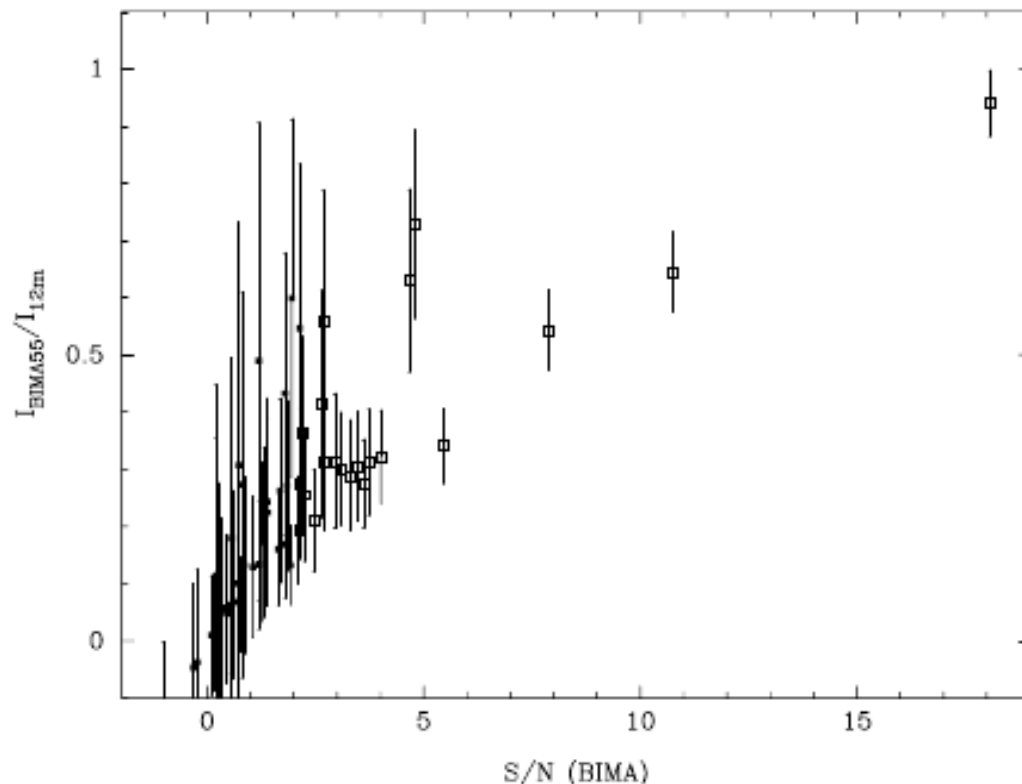
Inoltre anche in Wong&Blitz sono visibili galassie in cui la SFR non “segue” sempre radialmente il profilo CO



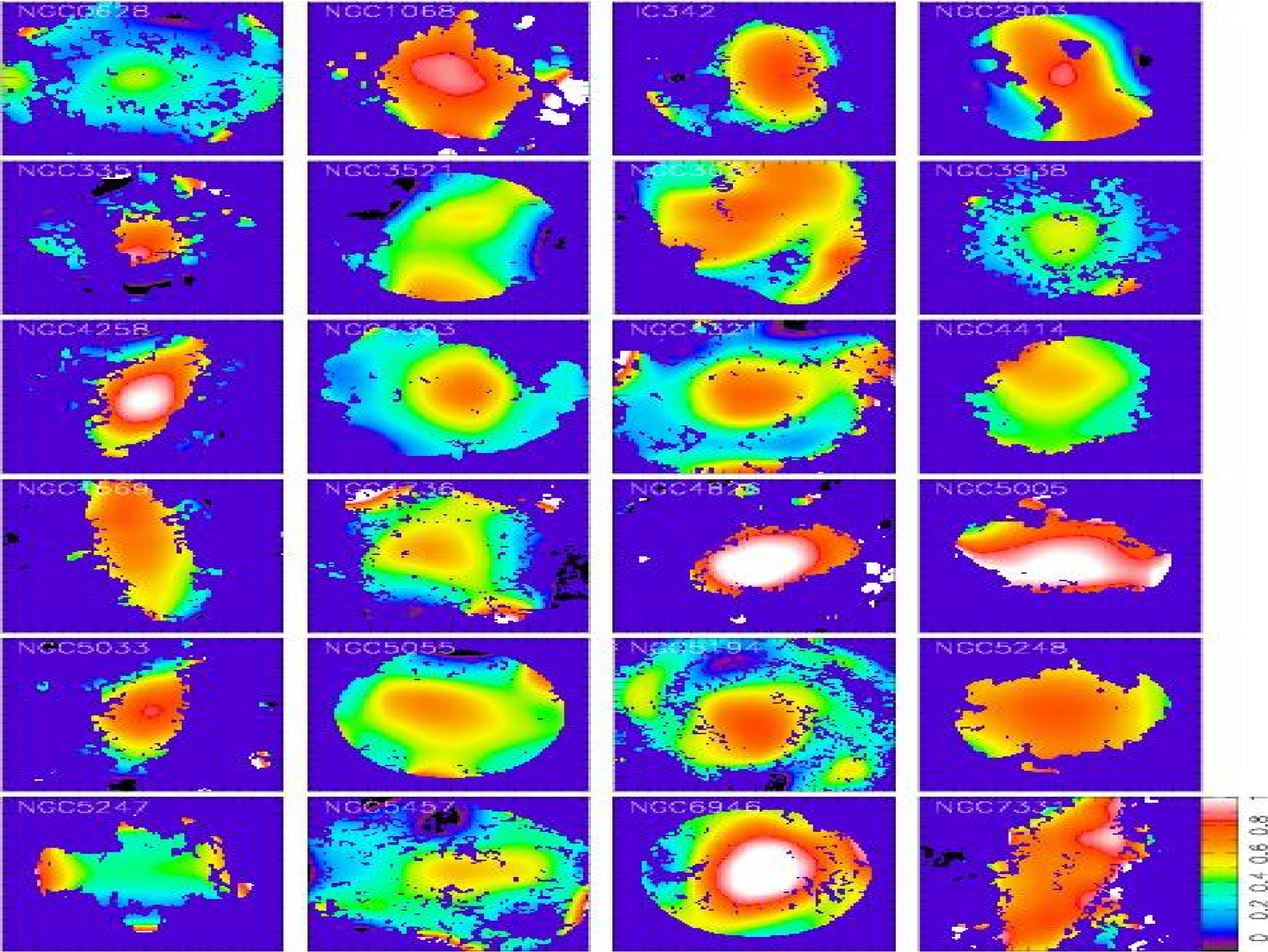
Inoltre la BIMA CO survey sfrutta misure interferometriche e soggette a perdita di flusso su regioni estese.

Esiste una minima distanza tra gli elementi di un interferometro $S_{\min}$ tale per cui il flusso è attenuato su scale maggiori di $\lambda/S_{\min}$

Per gli oggetti integrati con single dish la ricostruzione del flusso è accurata, mentre lo è molto per gli oggetti con flux recovery simulata

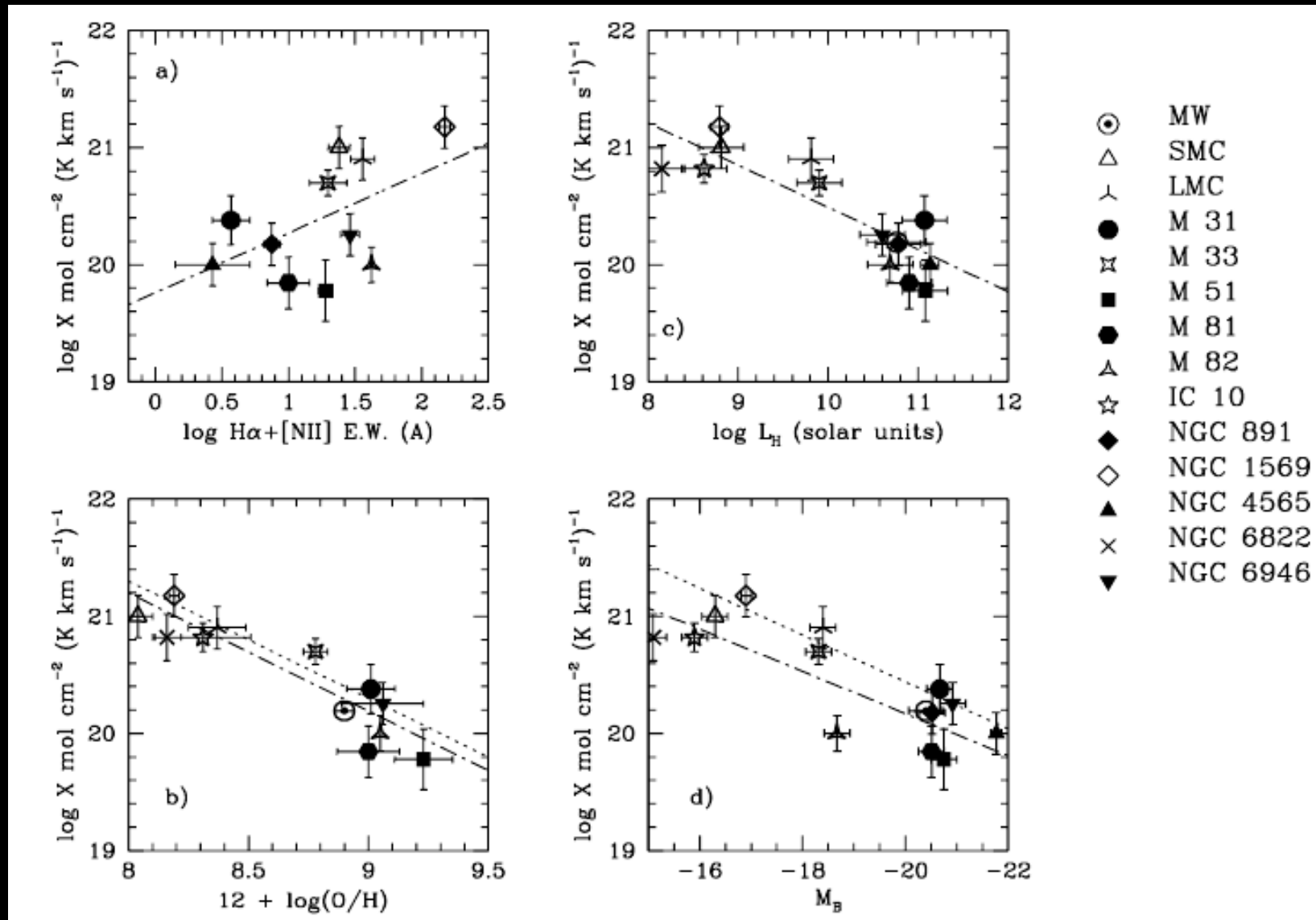


Rapporto intensità
interferometro vs single
dish in funzione del S/N



APPENDICE A: La conversione CO-H₂

Il fattore di conversione X è molto sensibile alla metallicità e alla presenza di un campo di radiazione. Esistono alcune relazioni empiriche che legano il fattore di conversione ad osservabili



Esistono anche previsioni teoriche che assumono diversi modelli di nubi molecolari e stimano un fattore di conversione in funzione della temperatura, opacità e densità

Table 1. X-Factor Values for Different Model Clump Types

Type of Clump ^a	k_A	ϵ	X_f ($10^{20} H_2 \cdot \text{cm}^{-2} / \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)					
			$T_K = 10 \text{ K}$			$T_K = 20 \text{ K}$		
			$\bar{n}^b = 2 \times 10^2$	2×10^3	2×10^4	$\bar{n}^b = 2 \times 10^2$	2×10^3	2×10^4
$\tau \gg 1^c$	1	0	3.5	11	35	1.4	4.4	14
$\tau \ll 1$	1	1	0.12	0.12	0.12	0.16	0.16	0.16
Hard S.	1.7	0.14	1.3	3.4	9.1	0.59	1.6	4.3
Gaussian S.	1.6	0.36	0.70	1.5	3.1	0.44	0.91	1.9
Sq. Lor. S.	1.5	0.57	0.36	0.58	0.95	0.28	0.47	0.76
G. F. (side-on)	1.5	0.25	0.93	2.2	5.2	0.51	1.2	2.8
G. F. (end-on) ^d	1.6	0.36	1.3	2.8	5.8	0.82	1.7	3.6

^aThese are the types of model clumps as described in Section 3: Completely Optically Thick, Optically Thin, Hard Sphere, Gaussian Sphere, Squared Lorentzian Sphere, Gaussian Filament (side-on and end-on).

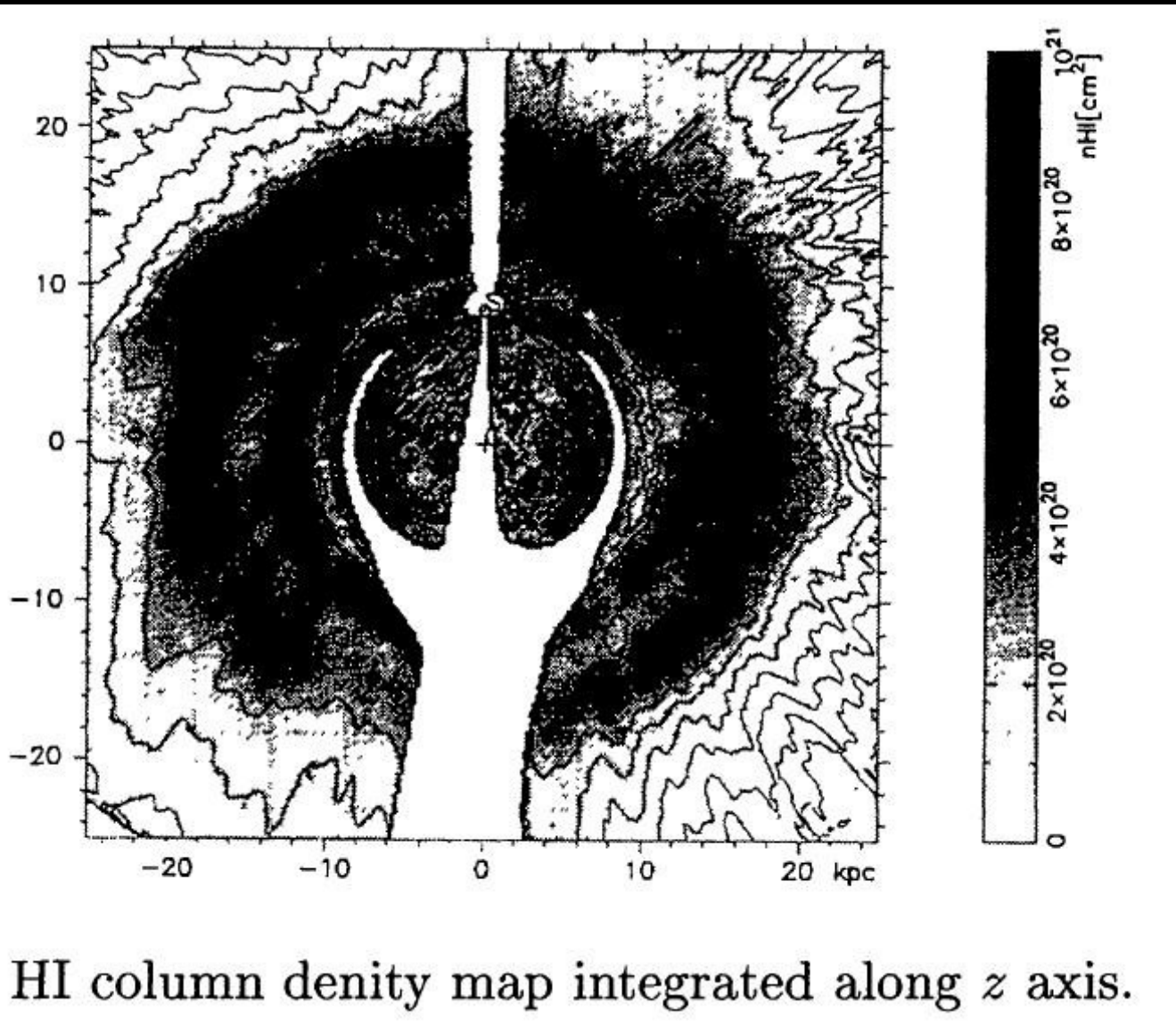
^bClump average density as defined in Section 3 and in the appendices in units of H_2 molecules $\cdot \text{cm}^{-3}$.

^cFor simplicity, a spherical geometry is adopted for computing X_f .

^dAssuming a length-to-diameter ratio of 3.4.

APPENDICE B: La Milky Way

La mappa CO ed HI della nostra galassia può essere ottenuta con altissima risoluzione. Inoltre si può studiare accuratamente il fattore di conversione CO H_2 , analizzando la sua variazione in funzione del campo di radiazione e della metallicità



Nakanishi, H.;
Sofue, 2002

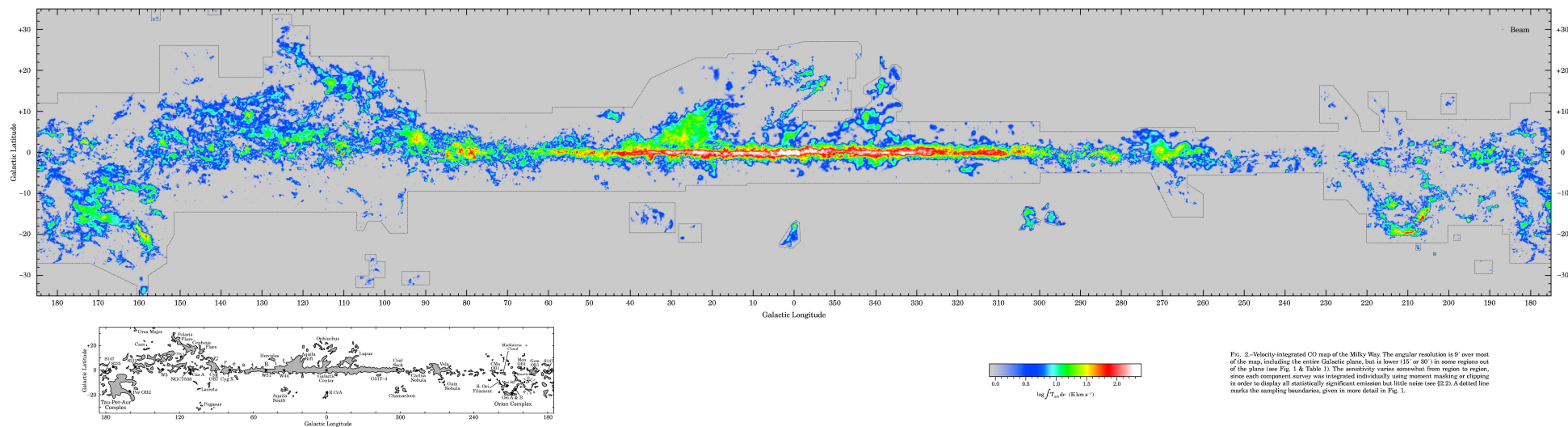
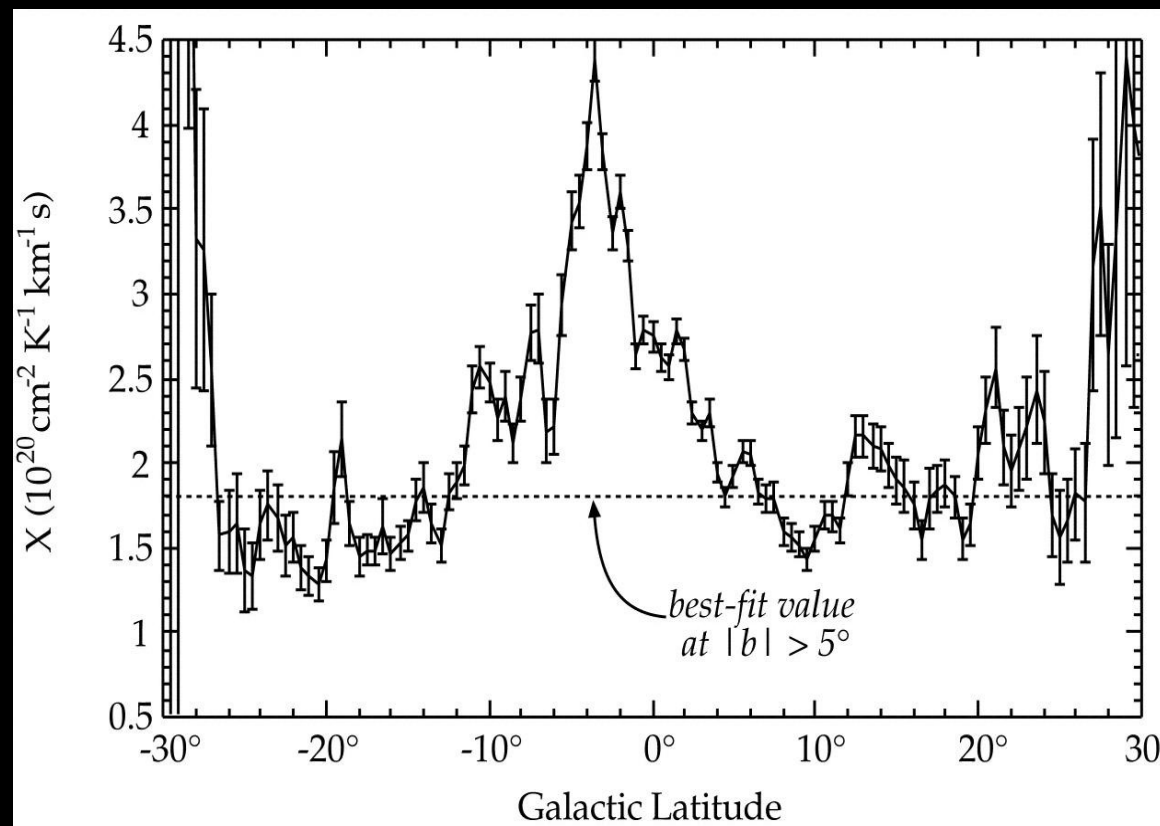
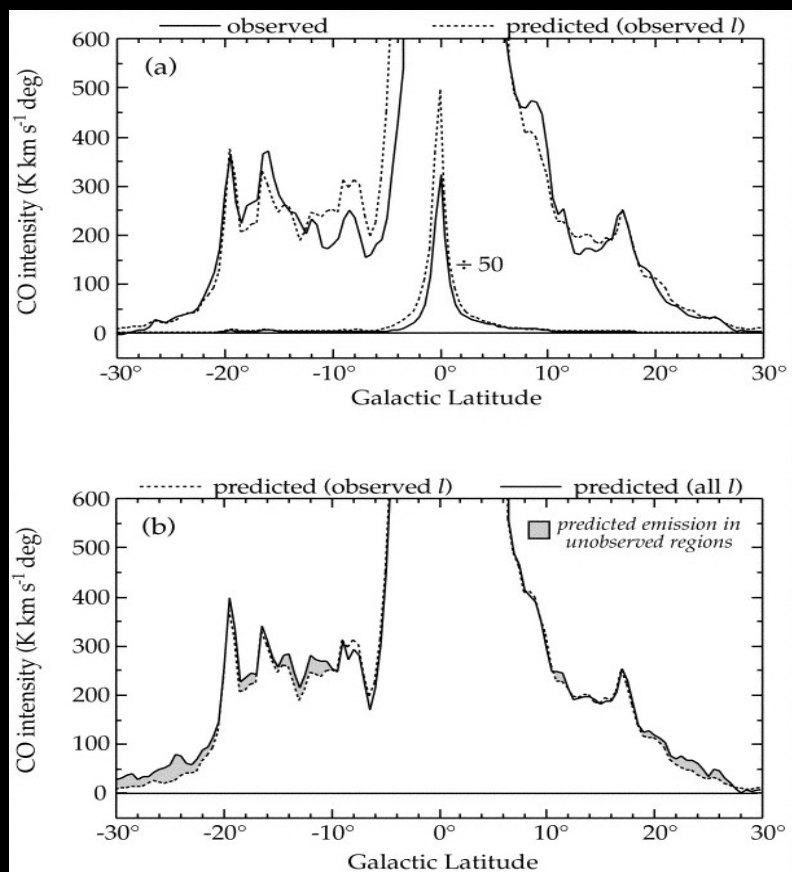


FIG. 2.—Velocity-integrated CO map of the Milky Way. The angular resolution is 9' over most of the map, including the entire Galactic plane, but is lower (15' or 30') in some regions out of the plane (see Fig. 1 & Table 1). The sensitivity varies somewhat from region to region, since each component survey was integrated individually using moment masking or clipping in order to display all statistically significant emission but little noise (see §2.3). A dotted line marks the sampling boundaries, given in more detail in Fig. 1.



Dame et al., 2001