

近傍渦巻銀河星間ガス HI ガス—H₂ ガス相転移

田中 亜矢子, 中西 裕之

鹿児島大学大学院 理工学研究科 物理・宇宙専攻

概要

近傍渦巻銀河 10 天体について、観測データから直接求めた分子比（それは、全ガス密度に対する H₂ ガス密度の比） f_{mol} と Elmegreen (1993)[3] で提唱された ISM 相転移論を基にしたモデルで計算した f_{mol} とを radial distribution で比較した結果を報告する。Elmegreen (1993) によると f_{mol} は星間圧力 P 、UV 放射量 U 、金属量 Z に大きく依存することが知られている。しかし、これら依存 parameter の導出方法が先行研究で異なる上に、依存 parameter すべてを観測データから求めた研究は今まで行われていなかった。そこで必要な観測データ 5 つ (¹²CO ($J=1-0$) 輝線、HI 輝線、H α 輝線、K_s-band、金属量) すべてが揃った 10 天体に対して観測と理論モデルを比較するとともに、依存 parameter の決定も行った。その結果 f_{mol} がより良く合うためには、(1) 星間圧力は星密度を考慮する、(2) X_{CO} は 1 つの銀河中で一定値にすると良いことがわかった。さらに両者を合わせるには UV 放射量を調節するほうが良いことがわかった。

1 導入

1.1 背景

銀河の主な構成要素の一つとされる星間ガスは組成比の 70% が水素である。星形成率とも関係がある水素ガスを知ることは銀河を知る上で有効な手段であると言える。

以降 HI ガスと H₂ ガスの分布を分かりやすく示すために、 f_{mol} (HI ガス+H₂ ガス密度に対する水素分子ガス密度の比) を次のように定義して使用する。

$$f_{\text{mol}} = \frac{\Sigma_{\text{H}_2}}{\Sigma_{\text{H}_2} + \Sigma_{\text{HI}}} = \frac{\Sigma_{\text{H}_2}}{\Sigma_{\text{tot}}} \quad (1)$$

先行研究から f_{mol} の特徴として、(1) 銀河の半径増加に伴い、値が急激に減少すること [5]、(2) f_{mol} の値が銀河の環境変数 (星間圧力 P 、UV 放射量 U 、金属量 Z) に依存すること [3] が分かっている。

しかし大きく 2 つの問題点がある。(1) f_{mol} の値を決める parameter の導出方法が定まっていない (特に星間圧力とガス密度の関係と CO-to-H₂ conversion factor X_{CO}) (2) f_{mol} の値を左右する parameter はすべて観測データから求めることができるが、全観測データを用いて f_{mol} を研究した前例はない。

2 データの取得

今回の研究では 1 つの銀河に対して ¹²CO ($J=1-0$) 輝線、HI 輝線、K_s-band、H α 輝線、金属量データの 5 つすべてが揃っている必要がある。これらのデータは主にアーカイブから集め、それぞれ野辺山 45m 電波望遠鏡の「NRO CO Atlas」と BIMA、VLA

の「THINGS」、「2MASS」、「SINGS」と Hoopes (2001)[4] から取得した。金属量のデータは Zaritsky (1994)[11] と Moustakas (2010)[6] の論文から値を引用した。その結果 10 天体分の近傍渦巻銀河のデータを集めることができた。使用した銀河の詳細は表 1 に示す。

3 方法

3.1 2 つの f_{mol} を得る

まず ¹²CO ($J=1-0$) 輝線、HI 輝線データから H₂ ガス密度 Σ_{H_2} 、HI ガス密度 Σ_{HI} をそれぞれ求め、観測データから直接求めた f_{mol} を得た。

次に、¹²CO ($J=1-0$) 輝線、HI 輝線、K_s-band、H α 輝線、金属量データ 5 つから f_{mol} に依存する parameter P (Σ_{H_2} 、 Σ_{HI} 、 Σ_{star})、 U 、 Z を得た。そして理論的な f_{mol} を求めるために Elmegreen (1993)[3] の ISM 相転移論を基にした理論モデルプログラムで計算した。

3.2 比較事項 I

まず問題の 1 つである依存 parameter の決定を行いたい。1 つ目は星間圧力とガス密度の関係について、先行研究より 3 通り考えられる、 $P \propto \Sigma_{\text{tot}}$ [5]、 $P \propto \Sigma_{\text{tot}}^2$ [3][7]、 $P \propto \sqrt{\Sigma_{\text{star}} \Sigma_{\text{tot}}}$ [2]。2 つ目は CO-to-H₂ conversion factor X_{CO} について、先行研究より大きく 2 通り考えられる、 $1.0-3.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} (\text{K km s}^{-1})^{-1}$ 、金属量に依存するもの [1][8]。

4 結果と議論

4.1 結果 I - 依存 parameter の決定

4.1.1 星間圧力とガス密度の関係

NGC628 と NGC5457 において得られた結果を図 1 に示す。図の 1 つ 1 つは銀河中心からの距離 (横軸)、 f_{mol} (縦軸) を表す。点は観測データから直接求めた f_{mol} 、線は理論モデルから求めた f_{mol} 。左列が $P \propto \Sigma_{\text{tot}}$ 、中央が $P \propto \Sigma_{\text{tot}}^2$ 、右列が $P \propto \sqrt{\Sigma_{\text{star}}}\Sigma_{\text{tot}}$ を表す。 f_{mol} を radial distribution で比較すると、星間圧力は $P \propto \sqrt{\Sigma_{\text{star}}}\Sigma_{\text{tot}}$ つまり星密度を考慮すると観測的な f_{mol} と理論的な f_{mol} がよく合うことがわかった。他の天体についても同様の傾向が見られた。

4.1.2 CO-to-H₂ conversion factor X_{CO}

X_{CO} の比較は目視での確認が難しかったため、両者の残差をとった。得られた結果は図 2 に示す。図中の数字 4 は Arimoto (1996) の式で金属量を銀河半径に依存させた X_{CO} 、5 と 6 は Arimoto (1996)[1] と Narayanan (2012)[8] の式をそれぞれ使い、金属量を各銀河での平均値をとった X_{CO} 。この図から X_{CO} は 1 つの天体内で一定値をとることがよいと分かった。しかし残差が小さな値をとるときの X_{CO} は銀河によって異なった。そこで Schmidt Law を考慮し、 $X_{\text{CO}} = 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} (\text{K km s}^{-1})^{-1}$ を採用した。

4.2 議論 I

前述したように依存 parameter の決定はできたが、これだけでは両者の f_{mol} は完全には一致しなかった。そこでより一致させるために UV 放射量を調節する factor γ を導入し、 f_{mol} 両者の誤差が最小になるところで scaling した。 γ と UV 放射量の関係は、

$$U_{\text{corrected}} = \gamma U_{\text{original}} \quad (0.1 \leq \gamma \leq 1.5) \quad (2)$$

4.3 結果 II - γ の導入

NGC2903、3184、4254、5194 について scaling factor γ を導入した結果を図 3 に示す。観測的 f_{mol} と理論的 f_{mol} がきれいに一致し他の 6 天体でも同様の結果が得られている。

4.4 議論 II

ここで大きな疑問として、「UV 放射量を調節する factor γ を導入する物理的な意味は何か」が挙げられる。我々は γ は H α データの diffuse component を取り出すための diffuse fraction f_{DIG} ではないかと考えている。図 4(a) は銀河半径に対して各天体の γ をプロットした図である。図中の緑線は Thilker

(2005)[10] で M33 について f_{DIG} を求めたものである。今回解析した 10 天体中 6 天体が同じような傾向を示していることが図からわかる。

図 4 (b) は、銀河ごとに f_{DIG} を求めた Thilker(2002)[9] と解析天体が一致した 4 天体について、Thilker (2002)[9] で求めた f_{DIG} (縦軸)、本研究で求めた γ (横軸) をプロットした図である。相関があるように見える。

5 結論

観測的 f_{mol} と理論的 f_{mol} がより良く合うためには、(1) 星間圧力は星密度を考慮する、(2) X_{CO} は 1 つの銀河中で一定値にする ($X_{\text{CO}} = 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} (\text{K km s}^{-1})^{-1}$) と良いことがわかった。さらに両者を合わせるには UV 放射量を調節するほうが良く、調節するための factor γ は H α データの diffuse component のみを取り出すための f_{DIG} である可能性が高い。

参考文献

- [1] Arimoto, N., Sofue, Y., & Tsujimoto, T. 1996, PASJ, 48, 275
- [2] Blitz, L., Rosolowsky, E. 2004, ApJ, 612, L29
- [3] Elmegreen, B. G. 1993, ApJ, 411, 170
- [4] Hoopes, C. G., Walterbos, R. A. M., & Bothun, G. D. 2001, ApJ, 559, 878
- [5] Honma, M., Sofue, Y., & Arimoto, N. 1995, A&A, 304, 1
- [6] Moustakas, J., Kennicutt, R. C. Jr., Tremontt C. A. 2010, ApJS, 190, 233
- [7] Nakanishi, H., Kuno, N., & Sofue, Y. 2006, ApJ, 651, 804
- [8] Narayanan, D., Krumholz, M. R., Ostriker, E. C., & Hernquist, L. 2012, MNRAS, 421, 3127
- [9] Thilker, D. A., Walterbos, R. A. M., Braun, R., & Hoopes, C. G. 2001, AJ, 124, 3118
- [10] Thilker, D. A., Hoopes, C. G., & Bianchi, L. 2005, ApJ, 619, L67
- [11] Zaritsky, D., Kennicutt, R. C. Jr., Huchra., J. P. 1994, ApJ, 420, 87

表 1 properties of sample galaxies

Name	R.A. (J=2000.0)	Decl. (J=2000.0)	M_type (RC3)	V_{sys} [km s ⁻¹]	D [Mpc]	P.A. [deg]	i [deg]
NGC628	01 ^h 36 ^m 41. ^s 7	+15°46'59."0	SA(s)c	657	7.3	25	24
NGC2903	09 ^h 32 ^m 10. ^s 11	+21°30'03."0	SAB(rs)bc	549	6.3	25	67
NGC3184	10 ^h 18 ^m 16. ^s 98	+41°25'27."8	SAB(rs)cd	594	8.7	6	21
NGC3521	11 ^h 05 ^m 48. ^s 88	-00°02'15."04	SAB(rs)bc	792	7.2	161	63
NGC4254	12 ^h 18 ^m 49. ^s 61	+14°24'59."6	SA(s)c	2386	16.1	66	42
NGC5055	13 ^h 15 ^m 49. ^s 36	+42°01'45."57	SA(rs)bc	503	7.2	98	61
NGC5194	13 ^h 29 ^m 52. ^s 7	+47°11'42."60	SA(s)bc	465	7.7	-4	20
NGC5236	13 ^h 37 ^m 00. ^s 48	-29°51'56."48	SAB(s)c	514	4.5	45	24
NGC5457	14 ^h 03 ^m 12. ^s 48	+54°20'55."3	SAB(rs)cd	255	7.2	42	18
NGC6946	20 ^h 34 ^m 52. ^s 34	+60°09'14."21	SAB(rs)cd	60	5.5	242	40

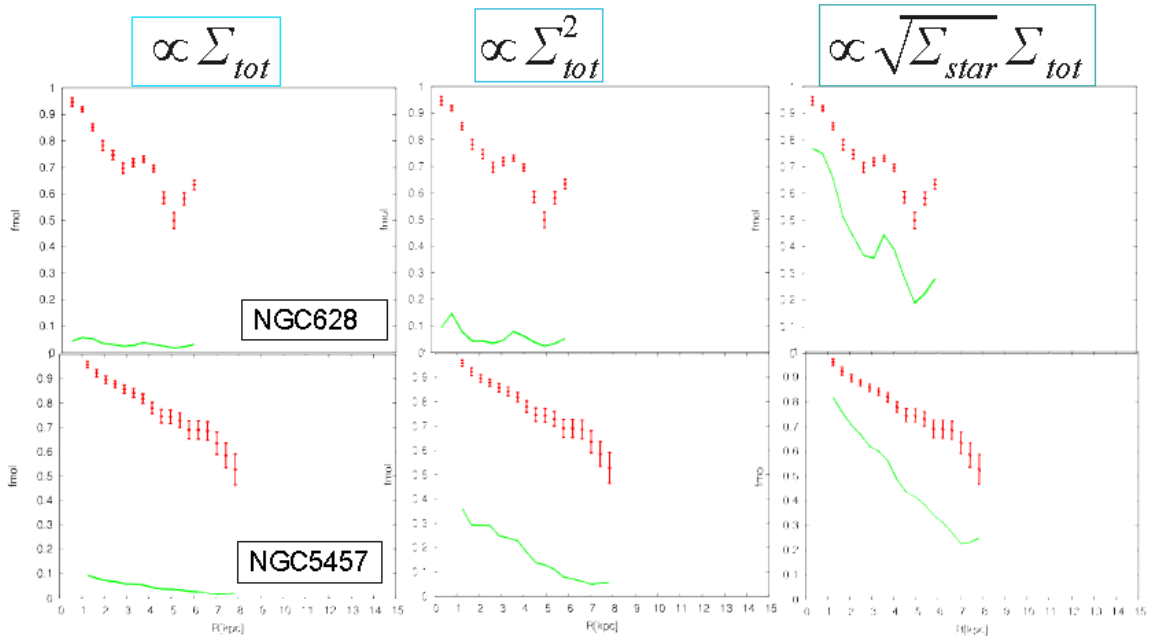


図 1 NGC628 (上段) と NGC5457 (下段) において、星間圧力とガス密度の関係を比較した図。

Z	X _{co} (Eguation)	NGC number									
		628	2903	3184	3521	4254	5055	5194	5236	5457	6946
		Mous	Zari	Mous	Mous	Mous	Mous	Mous	Zari	Zari	Mous
1	1e+20	0.245	0.0721	0.0416	0.112	0.0744	0.0492	0.745	0.736	0.568	0.163
2	2e+20	0.280	0.0889	0.0581	0.158	0.105	0.0555	0.753	0.773	0.673	0.157
3	3e+20	0.286	0.258	0.0689	0.178	0.110	0.0627	0.172	0.180	0.285	0.134
4	Arimoto	0.294	0.273	0.0554	0.202	0.107	0.0535	0.203	0.229	0.299	0.160
5	Arimoto	0.284	0.243	0.0547	0.174	0.102	0.0539	0.190	0.222	0.268	0.156
6	Narayanan	0.281	0.238	0.0695	0.172	0.102	0.0547	0.304	0.228	0.270	0.167

図 2 観測的 f_{mol} と理論的 f_{mol} で残差をとった図。

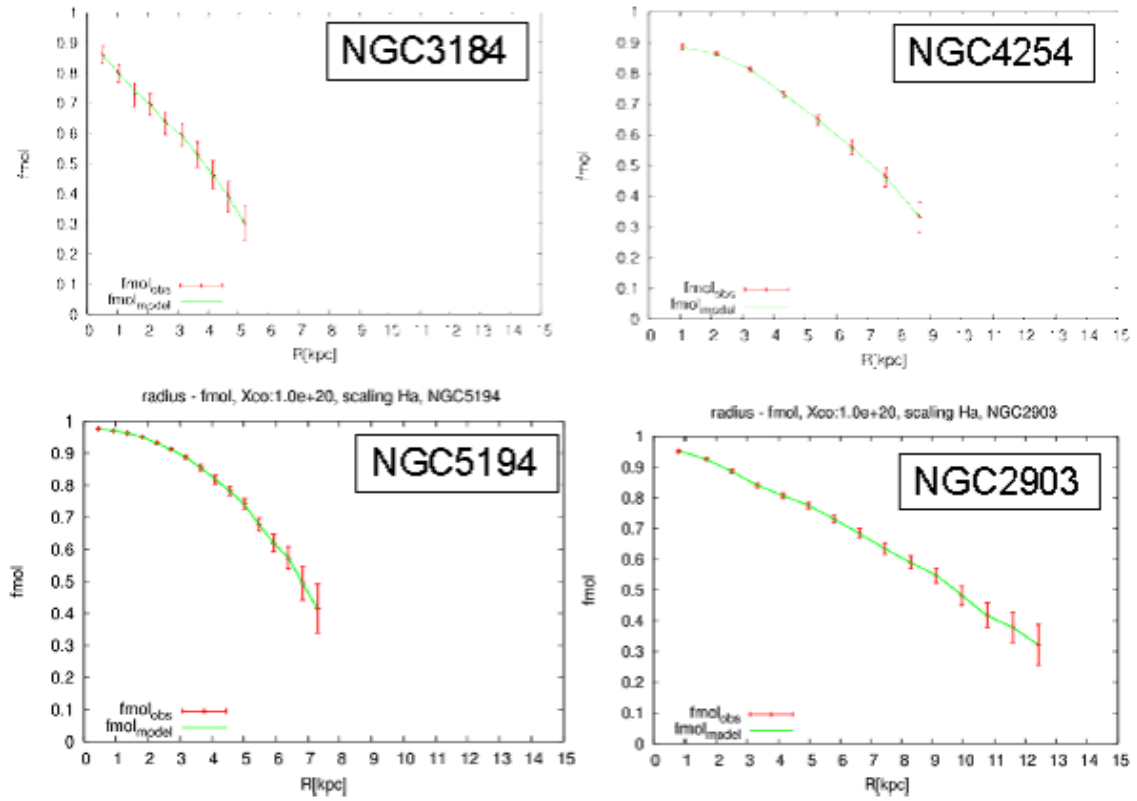


図 3 4 天体における γ を導入したときの観測的な f_{mol} (点) と理論的な f_{mol} (線)

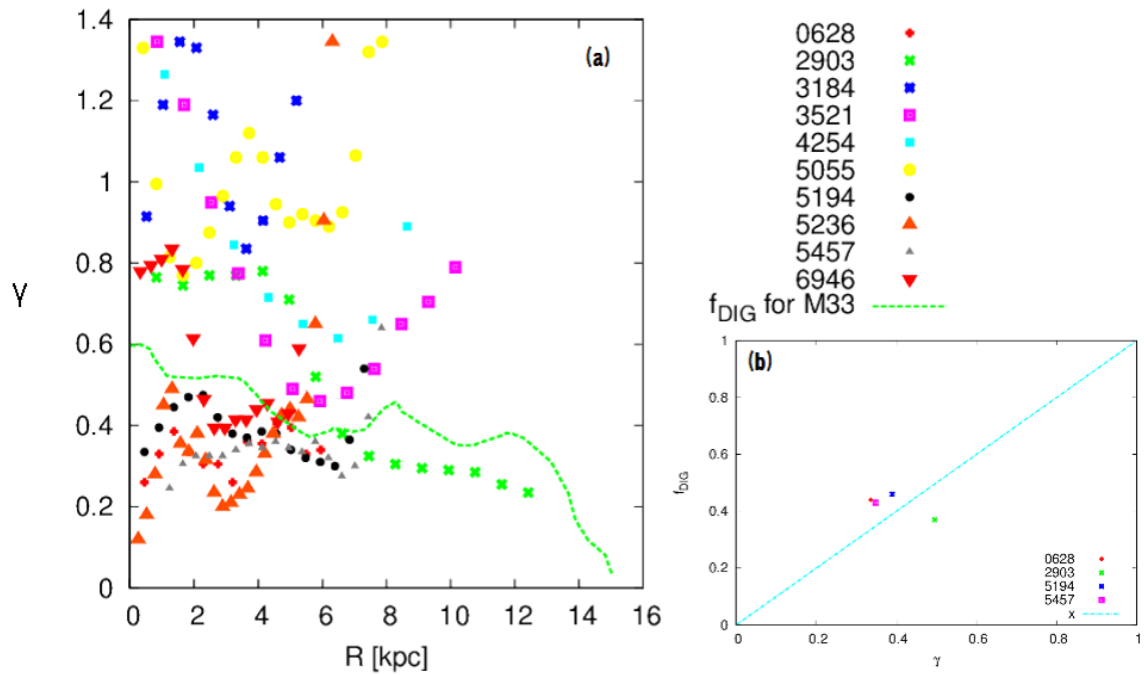


図 4 (a) γ の radial distribution と M33 の f_{DIG} Thilker (2005)[10]、(b) 本研究で求めた γ と Thilker (2002)[9] で求められた f_{DIG} の相関図