

分子雲の分布について

福 長 正 考*

一酸化炭素分子 (CO) は観測の容易な分子の中では星間空間中に最も豊富に存在するため銀河構造を調べる手段としてこれまで多くの観測がされてきたが、この2・3年系外銀河についても報告が出始めている。CO 分子輝線の発光には水素分子 (H₂) が関わっているため CO の強度を知ることによって H₂ 分子の存在量を見積ることができる。これには様々の仮定が必要なため人によって、[H₂ の柱密度, N_{H_2} (cm⁻²)]/[CO の積分強度, I_{CO} (K km s⁻¹)] の値は 1 桁も異なった値が出ているが、中央値は 2-4 × 10²⁰ 程度である。色々な意見の中で中央値が正しいとは必ずしも言うことはできないが現在のところは妥当なものと考えられる。

この様にして得られる H₂ の分布の様子は中性水素 (HI) の分布とは非常に異なっている。またこれまで考えられていたより多量の星間物質が存在することも明らかになってきた。図 1 にいくつかの代表例を示す。多くの銀河で HI は広い範囲で一様なのに対し、H₂ はある一定の半径に集中している。例えば M 51 は中心の 1 kpc 以内が最も多く外では急激に減少している。NGC 7331

では中心で弱く 4 kpc 付近に集中している。銀河系では 5~6 kpc 付近と中心付近で多く、M 51 と NGC 7331 を 2 つ合わせた様な形になっている。(他に散在して見える銀河、全くない銀河がある。) しかも、分子の分布は星の光が見える範囲内に限定されている。この様な HI と H₂ 分子の分布の違いはどこから来るのであろうか。又銀河ごとに H₂ の分布が異なるのはどの様に説明されるのだろうか。

この違いを解決する糸口は各銀河の特徴と H₂ の分布の様子を比べてみることである。ここでは考えられる例として、1) 銀河の形態、2) 恒星系の密度波、3) 銀河の重力場との関連で考えてみる。CO 又は H₂ 分子の分布のしかたを、A 型 (リング状, NGC 7331), B 型 (中心集中, M 51), C 型 (中心集中+リング状, 銀河系) と名付けておく。

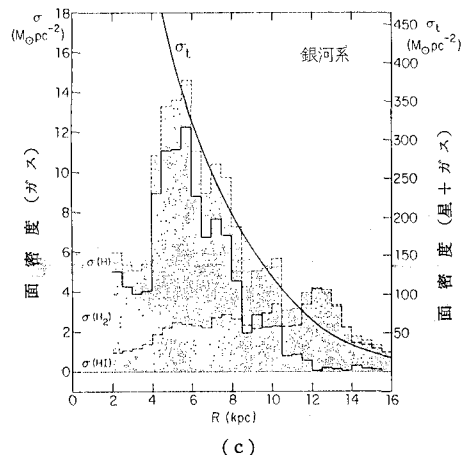
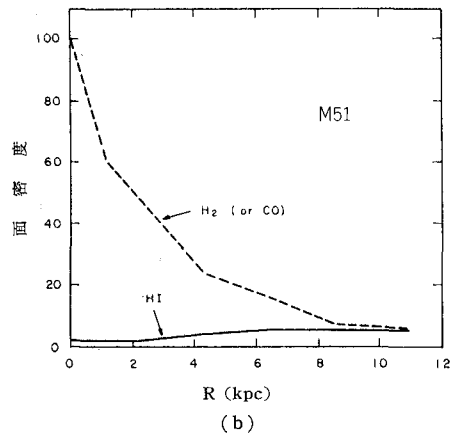
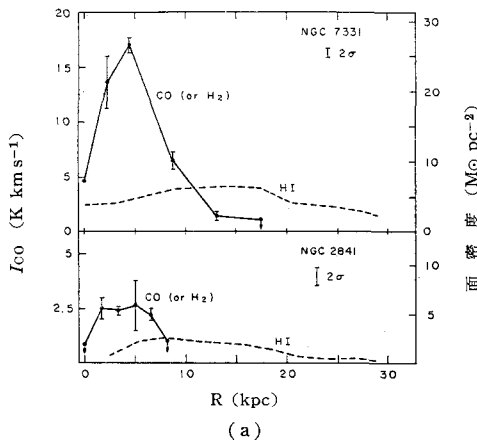


図 1 H₂ と HI の分布の比較
積分強度 (I_{CO} K km s⁻¹) は面輝度に対応する。M 51 の面密度は H₂ の中心の密度を 100 としたものの。

- a) ヤングとスコヴィル (1982)
Ap. J. L. 260 L41
- b) スコヴィルとヤング (1983)
Ap. J. 265, 148
- c) ゴードンとバートン (1976)
Ap. J. 208, 346

* 東北大理 Masataka Fukunaga: On the Radial Distribution of Molecular Clouds in Galaxies

1. 銀河の形態との関係

渦状銀河は腕の巻きつきの程度によって、きつい順に Sa, Sb, Sc, Sd と分類されるが、ヤングとスコヴィル (1982) はこれまでに観測されている 10 個程の渦状銀河の CO の強度分布と銀河の形態を比較して、Sb 銀河は A 型の分布をする一方、Sc, Sd 銀河は B 型の分布になっていることに気が付いた。一般に Sa, Sb の早期型から Sc, Sd の晩期型になるに従ってガスの量が多くなるのが HI の観測から知られている。彼らは形態によって分布のしかたが異なるのは星形成による星間ガスの消耗によるものとした。中心部で外側 (円盤部, 渦状腕の存在する部分) に比べ星形成が遅やかであれば、過去に星形成が活発で現在ガスの少ない早期型銀河では中心にガスが少なく、リング構造 (A 型) をするが、星形成によるガスの消費が少なかった晩期型銀河では中心にガスが残っていて B 型の分布となる。

このような考え方の場合、B 型の銀河にはガスが豊富で一方 A 型の銀河にはガスは少なくないといけな。また中間の密度と分布の型 (中心から外までほぼ一様) をした銀河がないといけな。ところが M 101 は Sc で B 型の分布をしているが、 H_2 の量は円盤部で NGC 7331 の数分の 1 程度しかない。また中間型の分布の銀河はまだない。また、C 型の分布をする銀河はこの考え方からは説明できない。この様に分布の違いを星形成と結びつけるには、単純な形では困難であり、星形成に影響する種々の効果を検討する必要があるだろう。

2. 密度波理論

星の系には渦状の密度波が存在し、ある一定の角速度で回転している。この密度波により星間ガスの流れは、星の密度極大の付近に衝撃波を形成する。衝撃波中では星間ガスの密度は非常に高くなり、何らかの不安定性が現われ、主に H_2 分子から成る分子雲が形成される。CO はこの分子雲中に含まれ、また分子雲は光で銀河を見た場合、暗黒の吸収帯として現われる。分子雲内ではある時間の後、星が形成され、若い OB 型星の周囲のガスは電離され HII 領域として見える。銀河の渦構造がはっきり見えるのは星の密度波そのものよりも、この衝撃波で生れた OB 型星や HII 領域があるためである。さて分子雲はいつまでも持続できるのではなく、HII 領域や OB 型星の寿命の際の超新星爆発によって吹飛ばされ雲散霧消する。パッシュュ達は分子雲の寿命を数千万年と見積っている。密度波理論からこのような枠組が考えられている。系外銀河の CO 観測が始められたのはこの密度波のトレーサーとして考えられているのが一つの理由になっている。しかしこれまでの報告では CO 分子輝線が HII 領域や OB 型星と同じ様に渦状構造をしているかどうか未だ確認されていない。M 31 はごく近くにあ

る銀河なので精密な観測ができるが全領域を観測するのは不可能に近く現在のところ一部の観測があるだけである。それによると吸収帯との関連はあるように思える。

分子雲が銀河衝撃波で形成されるとして分子雲の半径方向の分布を説明しようとするとその寿命が何によって左右されるかが問題となる。分子雲の存在できる範囲は寿命で決まるある範囲にだけ存在し得るため、ある半径での分子雲 (又は H_2) の平均密度は、星間物質の運動をほぼ円運動とすると、

$$\begin{aligned} & (\text{星間物質の平均密度}) \times \frac{(\text{分子雲の存在する弧長})}{(\text{円周の長さ})} \\ & = (\text{星間物質の平均密度 } \bar{N}) \\ & \quad \times \frac{(\text{分子雲の寿命 } T_0)}{(\text{衝撃波に出会う周期 } T_s)} \end{aligned}$$

となるためである。分子雲が存在できるかどうかはその場の平均密度で決まるなら、分子雲の密度は \bar{N} で決まる。 \bar{N} が半径によらないなら分子雲 (又は H_2) の密度も半径によらないであろう。 \bar{N} が半径で変化すると他の成分との共存の形態で違うようであろうが、一般に他の成分 (HI など) の密度が高くなれば分子雲の密度も高くなるであろう。

分子雲の寿命が他の要素によらず一定なら T_0/T_s は密度波の存在できる範囲で中心に向かって大きくなる。銀河回転の角速度を Ω , 密度波の回転角速度を一定で Ω_p とすると、分子雲の密度 N_0 は、密度波の腕が 2 本の場合、

$$N_0 = \bar{N} \cdot T_0 / T_s = \pi \bar{N} T_0 / (\Omega - \Omega_p) \quad (1)$$

で Ω は半径 r とともに減少するからである。但し、ある半径より内側になると $T_0 > T_s$ となり、この場合は全ての水素が分子となっているので、分子雲 (又は H_2) の密度は平均密度そのもの \bar{N} と一致する。銀河系の場合では、 Ω は 10 kpc と 5 kpc でそれぞれ 25 及び 45 $\text{km s}^{-1} \text{kpc}^{-1}$ なので $\Omega_p = 13 \text{ km s}^{-1} \text{kpc}^{-1}$, $T_0 = 4 \times 10^7$ 年とすると、 T_0 は T_s より短かく $N_0(5 \text{ kpc})/N_0(10 \text{ kpc}) = 2.5$ となる。この値は観測とよく一致している。但し、中心付近の分子雲は、リンドブラッド・レゾナンスより内側にあり、従来の密度波理論では説明できない。M 51 の場合、回転速度は 1 kpc から十数 kpc までほぼ一定で 200 km s^{-1} である。 Ω_p の値は不明だが、例えば銀河系と同じとすると 2.5 kpc より内側では $T_0 > T_s$ となる。2.5 kpc より内側でも図 1 で見られる様に増加しつづけるには、ア) 分子雲の寿命が 4×10^7 年より短かい、イ) 2.5 kpc より内側でガスの総量 \bar{N} が増加している、などが考えられる。ア) の場合、観測される様に H_2 分子が HI に比べ圧倒的に多いことを説明できない ($T_0 = 4 \times 10^7$ 年でも図 1 の両者の密度比は説明が困難)。イ) の場合は星間物質の分布について別の説明が必要なことを暗示している。

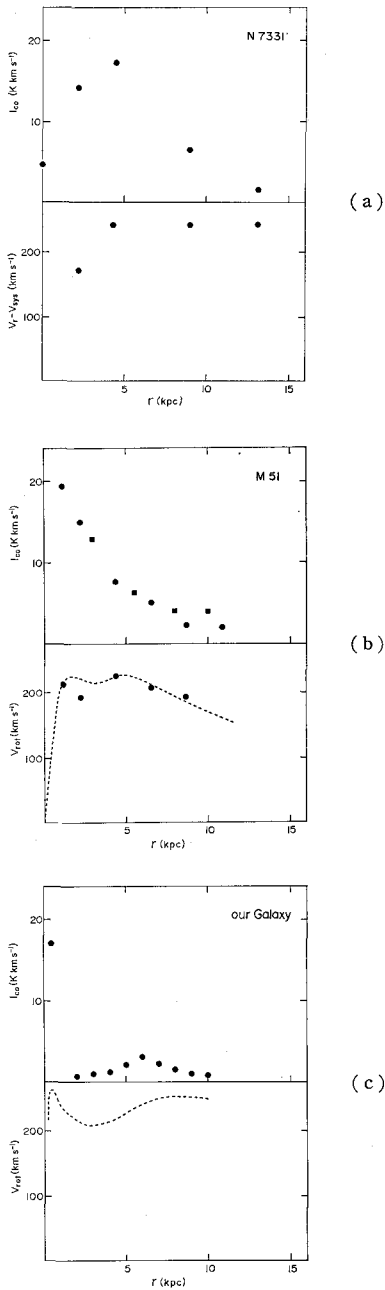


図 2 CO 輝線強度と銀河回転

3. 銀河重力場

ここで分子雲の分布を説明するもう一つの機構について述べる。分子雲の分布が銀河の中の運動の結果ならば銀河回転そのものと何らかの関係がありそうである。そこで先にあげた銀河の CO の強度分布をもう一度銀河回転曲線と伴に図 2 に示す。図 2 によると NGC 7331 と銀河系のリング構造は剛体的な回転から差動回転に遷移する部分にピークを持つように見える。中心部で強い輝

線があるのは剛体回転部分が小さい場合のようである。前者の分布は回転する粘性流体の振舞とよく似ている。遠心力と重力がほぼつりあって円運動している流体は粘性によって角運動量を失なって中心に向かって徐々に落下するが、回転に剛体的な部分が中心付近にあると(その部分では粘性による偶力が零なので)、それ以上落下せず、剛体回転部と差動回転部の遷移領域に流体はたまる。星間物質の粘性によって A 型の CO 分布が説明できるなら B 型はどうだろうか。B 型の場合、CO は銀河回転の遷移領域に集中しているが、望遠鏡の分解能が悪いために中心にピークに持っているとするかどうか。このように見ると C 型の分布が見られる銀河には回転の遷移領域が 2 カ所あることになるが、銀河系はまさにそれである。この考え方を支持すると考えられる銀河が NGC 4321 である。(図 3)。H α による視線速度の観測によると、銀河回転は銀河系のものと似た形をしている。一方 CO の強度は中心とその隣ではほぼ同じである。もし分解能が悪ければ CO は B 型の分布になるだろうし、分解能が良ければ C 型の分布をしているだろう。HII 領域は分子雲と相関を持った分布をしているが、アンダーソンたち (1983) の観測によると典型的な C 型の分布をしており、外側のピークは銀河回転の遷移領域とほぼ一致している。

そこで粘性を持った星間ガスの銀河重力場内での振舞を詳しく調べてみる。粘性係数 η は、密度を ρ 、音速を c 、平均自由行程を l とすると

$$\eta \approx \rho c l \tag{2}$$

となる。星間ガスの原子、分子、イオンの分子粘性は平均自由行程が小さいため銀河規模の運動では無視でき

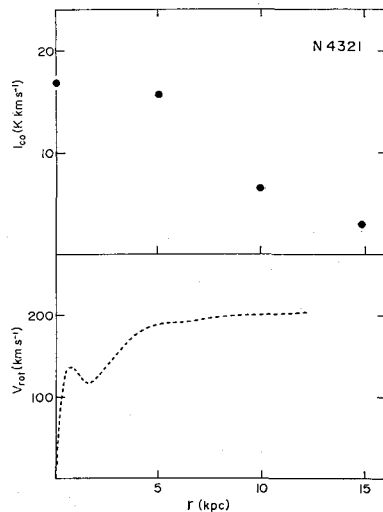


図 3 NGC 4321 の CO 輝線強度と銀河回転
 ヤングとスコヴィル (1982)
 Ap. J. 258 467

る。星間雲は 10 km s^{-1} 程度のランダムな運動をしているが、これを一種の乱流とみてイッケ (1979) は粘性を伴った星間ガスの振舞を調べた。乱流粘性では (2) 式中 c は実際の音速度、 l は星間ガス層の厚み程度とされている。図 4 はイッケの結果である。座標は無次元化されているが、図で $R=1$ を 6 kpc 程度、銀河回転の最大速度を 255 km s^{-1} とすると、図の回転曲線は銀河系のもの $3\sim 13 \text{ kpc}$ 付近ではよく一致する。 c を 10 km s^{-1} とすると銀河の時間尺度 (~ 100 億年) で図の様な星間ガスの分布となる。顕著なピークは $R=1$ 付近ではなく中心付近に現われて銀河系の $5\sim 6 \text{ kpc}$ の分子雲ピークとは一致しない。

さて乱流という概念の中には通常一様性が含まれているが実際には、星間ガスは密度が水素原子にして 10^{-8} 個 cm^{-3} から $10^{3\sim 4} \text{ cm}^{-3}$ までの非常に多様な状態のガスで成り立っており、このような中では単純な乱流像を描くのは困難がある。そこで再び分子粘性を考えるが今度は実際の原子分子ではなく、分子雲を 1 コの分子と見なした場合を考える。分子雲内の水素密度は他の星間物質の密度に比べ $10^3\sim 10^6$ 倍高く、星間空間を真空中と同様に運動し、また、図 1 で見られるように存在量も他の星間物質に比べ大きいので分子雲の振舞が星間ガスの振舞に大きく作用すると考えられるからである。

分子雲間の平均自由行程は 1 kpc 前後である。一方ランダムな運動をする分子雲は、同じ角運動量で円運動をする仮想粒子のまわりに楕円軌道を描いている。仮想粒子から見ると楕円軌道の長短半径程度の自由行程しか持っていないことになる。ランダム速度の銀河半径方向成分を c_r とし楕円軌道の角振動数を κ とすると、銀河半径方向の軌道の振幅は c_r/κ 程度である。 $c_r=10 \text{ km s}^{-1}$

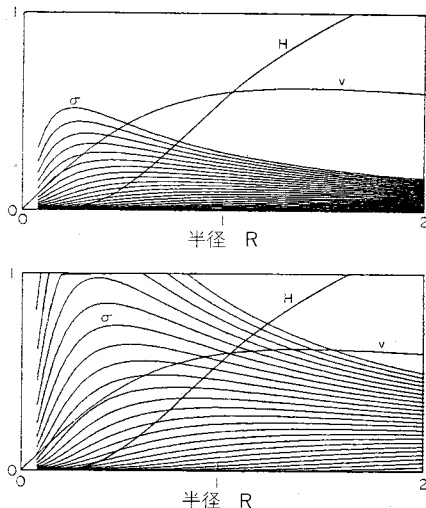


図 4 乱流粘性の場合のガスの運動
 σ (面密度), V (円回転の速度) を無次元で表わしてある。

とし、 κ に太陽近傍の値を入れると $c_r/\kappa \approx 0.3 \text{ kpc}$ となり平均自由行程より短かい。このような場合、銀河半径方向の有効な平均自由行程 l_e は

$$l_e \sim c_r/\kappa$$

となる。又有効な音速も変更を受け、(平均自由行程) = (ランダム速度) \times (衝突時間間隔 t_D) の関係より、 $l_e/t_D \approx c_r/\kappa t_D$ となる。粘性係数は

$$\eta \approx \rho c_l^2/\kappa^2 t_D \quad (3)$$

となる。

この粘性係数の特徴は (t_D が密度に反比例するため) 密度に依存することである。この性質と、回転方向の運動方程式 (軸対称を仮定)

$$\rho \frac{dh}{dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\eta r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_{\text{rot}}}{r} \right) \right] \quad (4)$$

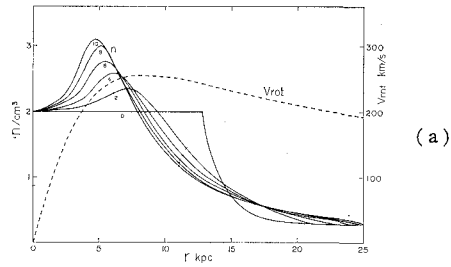
(h は単位質量当りの角運動量、 r は銀河半径、 V_{rot} は銀河回転速度) から次の結論が導かれる。すなわち「ある密度分布で粘性による偶力が零となる。」そのような分布は

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{rot}} &= \text{一定なら, } \rho \propto r^{-1.5}; \\ V_{\text{rot}} &\propto r^{-0.5} \text{ (ケプラー回転) なら, } \rho \propto r^{-1.75} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

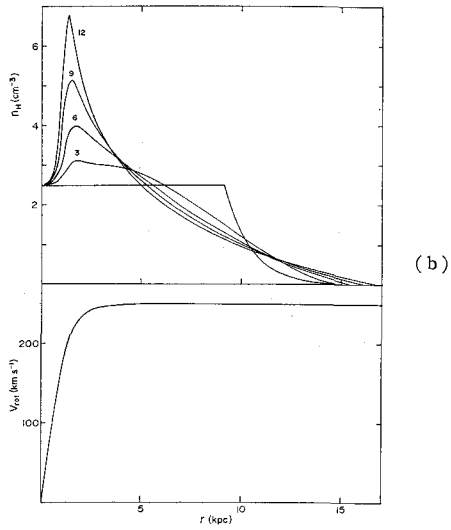
である。密度勾配が (5) 式で表わされるより小さいと角運動量を失ない、中心に向かって落下する。密度勾配がこれよりきついと、角運動量を得て外に向かって流れだす。

図 5 は分子雲を 1 個の“分子”とみなした粘性ガスの運動を、 $t=0$ である半径内で一様として、その後の運動を追ったものである。この中で分子雲の質量は $3 \times 10^5 M_\odot$ 、半径 40 pc、ランダム速度を 10 km s^{-1} とし、衝突時間 t_D には重力遭遇の緩和時間を使ってある。図中の n_H は分子雲に含まれる水素を星間空間中にならした密度で、星間物質中の水素密度 n がある臨界密度 n_0 を越えるとその越えた部分 n_H が $3 \times 10^5 M_\odot$ の分子雲になると仮定してある。また分子雲の“ガス”の粘性による力は他の星間物質にも (質量交換などを通じて) 働くと仮定してある。また図 5 (a) の回転曲線はイッケ (1979) と同じものを使ってある。又図 5 (c) の回転曲線は銀河系の回転曲線と同じ特徴をしている。

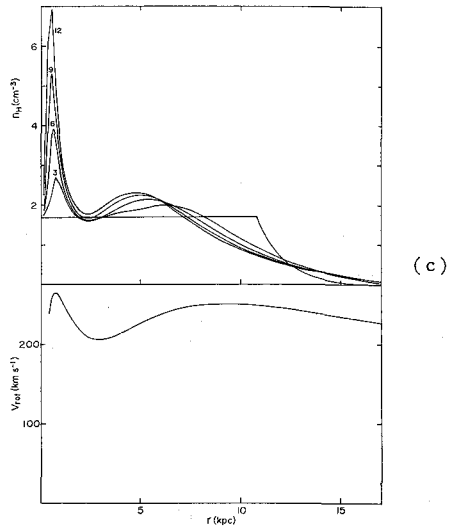
計算結果である図 5 と図 2 の観測結果を比べてみる。図 5 (a) の密度極大の位置と回転曲線の関係は NGC 7331 の両者の関係をよく再現している。図 5 (a) の回転曲線は銀河系の回転曲線と $3\sim 13 \text{ kpc}$ ではほぼ一致するが、この場合のガス分布のピークは $5\sim 6 \text{ kpc}$ 付近に現われ、銀河系のいわゆる 5 kpc 分子雲リングの位置と一致する。また図 5 (c) の結果は、図 2 (c) の観測とよく一致している。M 51 の場合望遠鏡の分解能の関係で、銀河中心方向のビームの中に分子雲分布のピークが含まれていると考えると大きな矛盾はない。



(a)



(b)

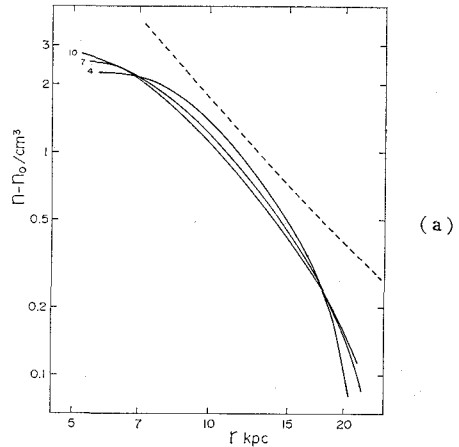


(c)

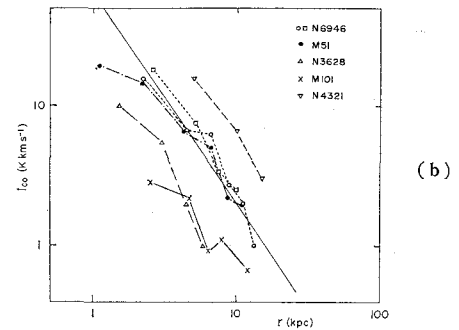
図 5 粘性分子雲ガスの運動

図中の数字は 10^9 年単位の年齢. 図 6 (a) も同じ.

こうして、初めに分類した CO 輝線の分布の分類は、様々な銀河回転の中での粘性分子雲“ガス”の振舞で説明できそうである。A型の分布は、中心付近の剛体的銀河回転が望遠鏡で分解されている場合、B型は剛体回転部が分解されていない場合、C型は、回転曲線に2箇所



(a)



(b)

図 6

(a) 粘性分子雲ガスの運動. 破線は粘性による偶力が零になる分布を示す.

(b) CO の強度分布. 実線は粘性による偶力が零になる分布.

NGC 6946 ヤングとスコヴィル (1982),
Ap. J. 258 467

M 101 ソロモンら (1983),
Ap. J. L. 266 L103

NGC 3628 タコニとヤング (1981),
Extragalactic Molecules, Proc.
NRAO, Nov. 2~4, 1981, ed. L.
Blitz と M. Kutner, p. 57

極大がある場合に特徴的な分布ということになる。

さて、M51 の CO 分布と図 5 (b) のピークの外のガスの分布が似ていることに注意して欲しい。(5)式のところで粘性偶力が零になる密度分布があると書いたが、ピークの外側では、ガスの分布はしだいに偶力が零になる分布に近づいている。図 6 (a) は図 5 (a) のモデルについてその様子を示したもので、破線が偶力が零の分布である。では実際の銀河はどうであろうか。図 6 (b) には銀河回転の速度が一定と思われる銀河について CO の強度を記入したものである。銀河毎に CO の存在する範囲や強度はかなり異なるが、全て共通の巾を持った巾分布をしているように思える。図中の実線は (5) 式の偶力が零になる分布 ($\propto r^{-1.5}$) である。CO の

強度に関係するのは H_2 分子 (又は分子雲) の面密度であり、一方 (5) 式は体積密度であるが、分子雲の層の厚みが一定であるなど、面密度 \propto 体積密度、の関係があれば、分子雲から成る“ガス”流体の粘性によって CO 強度の銀河半径方向の分布は、ピークの位置のみでなく、ピークの外側の分布も含めて説明可能である。

このように分子雲を1個の分子とみなした粘性ガス流体の振舞で観測される CO の分布が説明できることを示したが、いくつかの問題点がある。“分子”とみなすためには少なくとも t_D 以上に安定でないといけない。先に使ったパラメーターでは $t_D \sim 10^8/n_H$ 年である。 n_H が小さいと現在与えられている分子雲の寿命より長くなる。分子雲系の粘性が星間ガスの運動の中で一定の役割をするには、分子雲の全質量が他の星間物質の全質量に比べ大きくないといけないが、初めに書いたように、CO から見積る H_2 分子の量は1桁もの不確定さを持っており、低い見積りだと広い領域で分子が優勢とは言えなくなる。

以上 $CO(H_2)$ 分子の銀河分布 (図2) に対するいくつかの解釈を説明してきたが、理論的研究は始まったばかりと言って良く、これから様々な角度から説明が与えられるだろう。一つはここで主に説明した力学的方面からの解釈があるし、他には重元素 (C, N, O 等) の化学進

化からの解釈もあるだろう。一方観測の方も、ようやく10個程の銀河で分布が明らかになっているに過ぎない。これらの銀河も分解能が十分でなく、例えば密度波や銀河回転との関連もまだ十分に明らかになっていない。野辺山の45m電波望遠鏡はM51などでは渦状腕を分解できCOがそれにそっているかどうか検証されるであろう。又A, B, C型で分類した銀河毎のCOの分布の違いがどのような機構によるかを検証するには2.3.の説明にあるように特に銀河回転を含めた観測が重要になって来るだろう。

お知らせ

日本学術会議会員選挙について

8月号でお知らせしたように日本学術会議第13期会員選挙の選挙期日は12月19日(投票の締切日)ですが有権者の住所の異動については本年9月24日(必着)までに中央選挙管理会(港区六本木7-22-34)に届出をするよう通達がありました。有権者となるための手続き、異動の届出等詳しく知りたい方は天文学会まで問合わせ下さい。

わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価380円(〒70) '83-10月号・9月5日発売!

10月号のおもな内容

- ★45cm反射赤道儀を自宅に据え付けて、仕事に活用している岩崎賀都彰さん《サイエンス・ペインター》の望遠鏡と製作風景を紹介します。
- ★秋になると空が澄んできて……秋の星雲・星団観測ガイド第1号はアンドロメダ大星雲、ペルセウス座の二重星団。まずは見やすいものから……です。
- ★毎回大好評で、テスト希望が殺到するレンズテスト・リポート《パートIII》は広角28% F2.8を西条善弘さんが取りあげます。
- ★10月の観測ガイドは、夜明けの東の空にキラキラと輝いている金星です。担当は藤井旭さん。
- ★ほかに、マイコン教室、彗星ガイド、星物語など満載!

天体 観測星表

7.0等までの恒星表、掩蔽される星の星表、星雲・星団の表

2000年までの太陽・惑星の視位置や物理表…を掲載。

諸数値はすべて2000年分点。掩蔽される星の表は

7等星まで、SAO星表との引合せもできます。

コンピューターからの直接製版で非常に正確な、

観測人必備のテーブルブック。

中野主一・太田原明 編 / 定価3800円・好評発売中

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

マイコンが解く天体の謎

マイコン(FM-7/8)を使って、
天体現象をディスプレイに映し出します。
そして、プログラムの作成から実行するところまで、
懇切丁寧に天体の謎を解明して行きます。

中野主一著 / 定価1600円(〒250)好評5版出来

誠文堂新光社

〒101 東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京7-6294 電話03(292)1221