



# 銀河における分子ガスの大局的分布と運動

久野成夫

〈国立天文台野辺山宇宙電波観測所 〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山〉

e-mail: kuno@nro.nao.ac.jp

近年、星形成と密接な関係にある分子ガスが、銀河においてどのように分布し運動しているのかを知るために、大口径電波望遠鏡による系外銀河の分子ガスの観測が行われるようになってきました。野辺山宇宙電波観測所 45 m 電波望遠鏡によって得られた最近の成果を中心に、銀河における大局的な分子ガスの分布と運動に関する研究を紹介します。

## 1. はじめに

銀河というのは、星だけではなく光では見えない星間ガス、星間塵等によって形成されています。そして、星間ガスから星が生まれ、逆に星が死ぬときに再び宇宙空間にガスを戻すというサイクルが繰り返され、銀河は進化していきます。したがって、星形成というのは銀河進化の最も基本となる過程であり、そのメカニズムを理解することが天文学における大きな課題の一つです。そのために、我々の銀河の中にある星形成領域の電波を用いた観測が行われ、星間ガスの中でも密度の高い領域では分子ガスの塊である分子雲が存在し、そこから星が生まれてくることがわかってきました。その一方で、銀河スケールでみた場合、爆発的な星形成を起こしているものや特定の領域（例えば、渦状構造の渦状腕や中心部）に星形成領域が集まっているものが存在することは、より大きなスケールで星形成を調べる必要性を感じさせます。そのためには、星形成の材料となる分子ガスが、銀河の中でどのように分布し運動しているのかを知ることが重要です。

我々の最も近くにある銀河は当然のことながら、我々がいる銀河系です。しかし、我々はその中にいるため、銀河系の全体像を直接見ることはでき

ません。そこで、我々の銀河系外に無数に存在する銀河を観測しようということになります。しかし、系外銀河からの電波は非常に弱く、また、その構造を分解するためには高分解能の望遠鏡が必要です。野辺山宇宙電波観測所 45 m 鏡の様な大口径望遠鏡がつくられる前は、ごく近傍の限られた銀河以外は、その構造を分解できませんでした。分解能という点で言えば、電波干渉計を用いれば、非常に高分解能の観測が可能となりますが、現在使われている電波干渉計ですと、細かい構造を分解するには適している一方、広がった構造は観測にかからないという弱点があるため、銀河全体のガスの分布を調べるといような観測にはむいていません。このような観測には、世界的には野辺山 45 m 鏡とドイツ・フランスが共同で作った IRAM 30 m 鏡の 2 台の大口径単一鏡が威力を発揮しています。

## 2. 分子輝線で見た銀河

分子ガスのなかで最も豊富なのは水素分子ですが、水素分子は電波の波長では輝線をもたないため、電波の観測ではその次に豊富な一酸化炭素 (CO) が最も良く使われます。分子ガスの量は CO 輝線の強度から見積もられ、また、観測される周波数から視線方向のガスの速度が得られます。

大口径望遠鏡の登場、受信機の高感度化によ

て、銀河の中でも特に分子ガスが豊富な渦巻銀河の観測が行われるようになりました。とは云っても、遠方にある銀河全体のCOを観測するのはとても大変です。かつて野辺山45m鏡で渦巻銀河M51の768点のCOを観測するのに5年ほど費やしました。現在にいたるまでも、渦状腕を識別できるほどの高分解能で銀河全体のCOをマッピングしたのは、3,4個にすぎません。ここでは野辺山(NRO)45m鏡で得られた結果を中心に紹介します。

## 2. 1 分子ガスの渦状構造

銀河の構造で最も我々の目を引くのがきれいな渦状構造です。渦状構造はOB型星の様な大質量星やHII領域が集まっていることが多く、それらによって引き立てられています。この渦状構造の形成機構として最も有力なのが、密度波理論です。密度波理論というのは、星やガスは常に渦状構造の同じ部分にいながら円運動するわけではなく、渦状構造は密度波であり、それを構成する星やガスは次々に入れ替わりながら渦状のパターンを形成しているという考えです。そして、ガスの密度も渦状腕で高くなりそこから星が生まれてくるために、渦状腕が明るく見えるというものです。

では実際の銀河での分子ガスの分布はどうなっているのでしょうか？ これまで観測されてきたほとんどの渦巻銀河では、分子ガスも渦状腕に集中していることが示されています。例として、最も良く観測されているM51の結果を紹介します。この銀河は距離が9.6 Mpcと比較的近傍にあり、銀河面と天球面との傾きが $20^\circ$ と小さいため、非常にきれいな渦状構造をほぼ真上からみることができます。表紙および図1はNRO45m鏡で得たCO輝線の積分強度図です<sup>1)</sup>。分子ガスも光で見えるのと同様に渦状構造をしていることがわかり、分子ガスの渦状腕はダストレーンとよく対応しています。また、渦状腕とその間のコントラストは古い星の分布を反映する近赤外でみた場合より大きく、ガスの方が衝撃波あるいは分子雲の衝突によって星よ

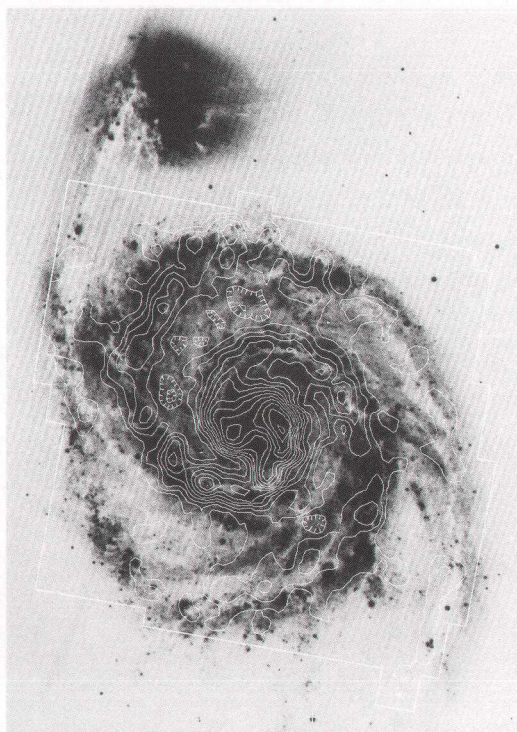


図1. 光学写真(白黒反転)に重ねたM51のCO積分強度図<sup>1)</sup>。白い枠が観測した範囲。

りも渦状腕への集中度が高くなるという密度波理論で予想された姿と良く合っています。

分子ガスの渦状腕をみると、スムーズにつながっているわけではなく、いくつかのピークがみられます。これらのピークは干渉計の観測によって見つかった質量が太陽の $10^7$ - $10^8$ 倍もある巨大分子雲複合体に対応していると思われます。巨大分子雲複合体の形成機構として考えられているのがガスの重力不安定性です。銀河円盤上でガスの面密度がある臨界値を超えると小さな密度のゆらぎが成長し巨大分子雲複合体のような大きな構造が形成されるというものです。実際、M51のガスの面密度と重力不安定性を起こす臨界値とを比較してみると、渦状腕では臨界値を超えているのに対し、腕の間では超えていませんでした<sup>2)</sup>。渦巻銀河の星形成領域も大局的にはこの巨大分子雲複合体と同じ様な



スケールで固まっていることが多く、また、半径方向のガスの分布を重力不安定性の臨界値と比較すると、多くの銀河で、ガスの面密度が臨界値を超えている領域に HII 領域が存在することから、最近ではこの巨大分子雲複合体のような大規模な構造が星形成の母体となっているのではないかと考えられています<sup>3), 4)</sup>。しかし、巨大分子雲複合体の内部でどのように星が形成されるのかというのは、まだ明らかになっておらず、今後の研究課題として残されています。

## 2. 2 隠れていた渦状構造

分子ガスのマッピングによって意外な姿が現われることもあります。NGC 5055 がその例です。NGC 5055 は代表的な flocculent (綿毛のような) タイプの銀河です (図 2 c)。渦巻銀河は、先にあげた M 51 に代表される grand design と呼ばれるきれいな二本腕をもつものと短い切れぎれの幾つもの渦状腕をもつ flocculent タイプと呼ばれるものに分けられ、それぞれの渦状構造は異なるメカニズムによって形成されていると考えられています。すなわち、grand design タイプの渦状構造は前節で述べたように、密度波によるものであるのに対し、flocculent タイプは密度波をもたないかあったとしても非常に弱いもので、その短い渦状腕は、つぎの

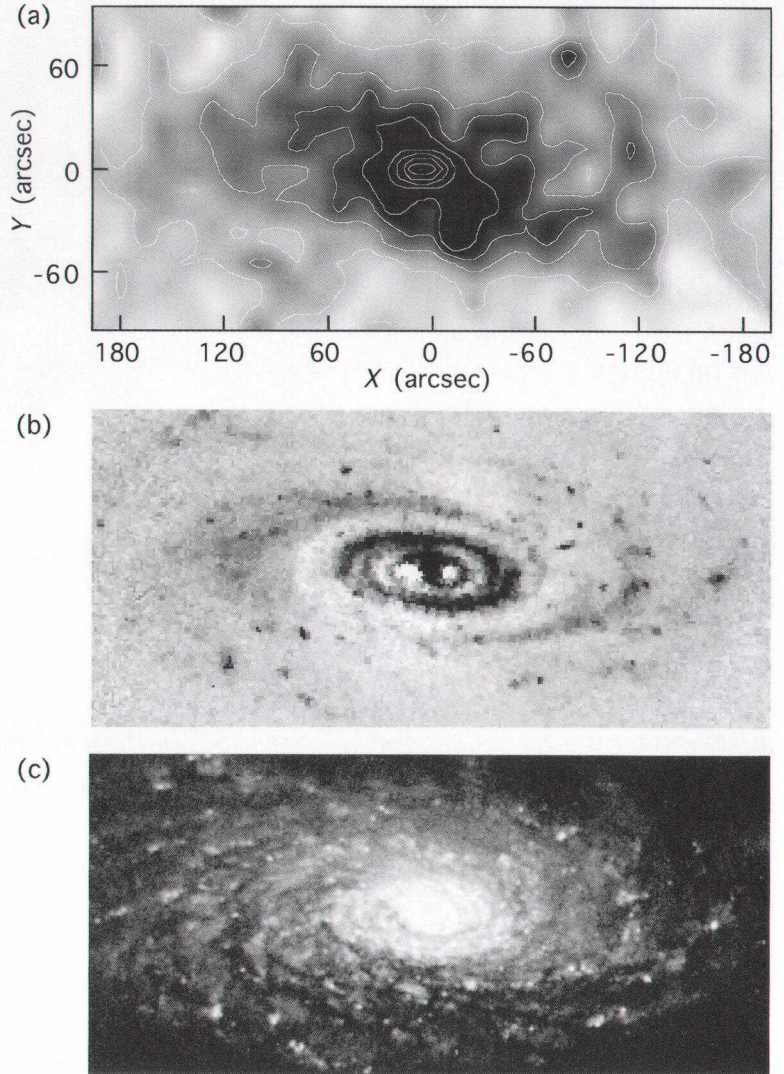


図 2. NGC 5055 の (a) CO 積分強度図、(b) K バンドのイメージ (ただし、軸対称成分を引いてある。)<sup>6)</sup>、(c) 光学写真。

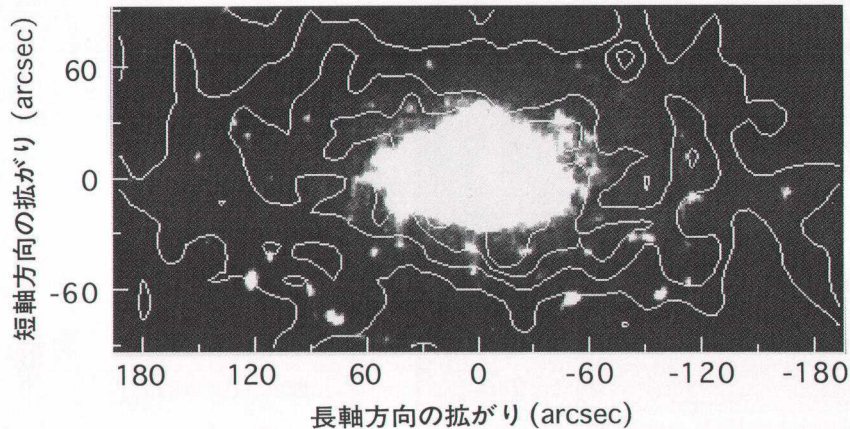


図3. NGC 5055 の CO 積分強度図 (コントア) を  $H\alpha$  イメージ<sup>7)</sup> に重ねた。

ようなメカニズムで形成されていると考えられています。まず銀河円盤で星形成が起こると電離ガスの膨張や超新星爆発によってそこから周りのガスが圧縮され星形成が連続的に引き起こされます。一般に渦巻銀河の回転速度は中心から離れるとほぼ一定となるので、内側ほど早く巻いてしまい、引き伸ばされた星形成領域が短い渦状腕のように見えます。

図2 a は NRO 45 m 鏡で得られた NGC 5055 の CO 積分強度図です<sup>5)</sup>。NGC 5055 の分子ガスの分布は意外なことに M 51 などの grand design タイプの銀河と同様に 2 本腕の渦状構造をもつことが明らかになりました。銀河の重力場を決定する古い星の分布も 2 本腕の渦状構造をもつことから弱い密度波が存在することが確認されており (図2 b)<sup>6)</sup>、分子ガスも密度波によって集められたと考えられます。古い星の渦状構造は軸対称な成分を差し引かないとはっきり見えてこないほど淡いものですが、分子ガスの渦状構造はそれよりはっきりしています。これは密度波をもつと考えられている M 51 と同じ傾向です。星形成の材料となる分子ガスが渦状腕に集められているということは、当然、星形成も渦状腕上で盛んになっていることが期待され

ます。実際、星形成の指標となる水素の再結合線の観測結果と比較すると、大きな HII 領域は 2 本の渦状腕に集中していることが確かめられます (図3)。

なぜ光で見ると短い多数の渦状腕に見えるのかは、まだ明らかではありませんが、これらの結果は、これまで考えられてきた以上に多くの渦巻銀河に密度波が存在し、そこでの星形成に寄与しているのではないかということを示唆します。また、渦状構造を分類する場合、これまでのように光による分類だけでなく、銀河における質量分布をより忠実に反映すると思われる近赤外、あるいはよりコントラストが大きく見えるガスの分布を用いる必要があることを示しています。

### 2. 3 棒状構造

銀河の構造で渦状構造とならんで我々の目を引くのが棒状構造です。棒状構造は爆発的星形成など銀河の中心部での活動性を支えるガスの供給機構としても注目されます。棒状構造も渦状構造と同様にパターンと考えられています。棒状構造をパターンとしたときのそこでの分子ガスのふるまいは数値シミュレーションによって詳しく研究されてきましたが、観測から実際の銀河でのガスの分布

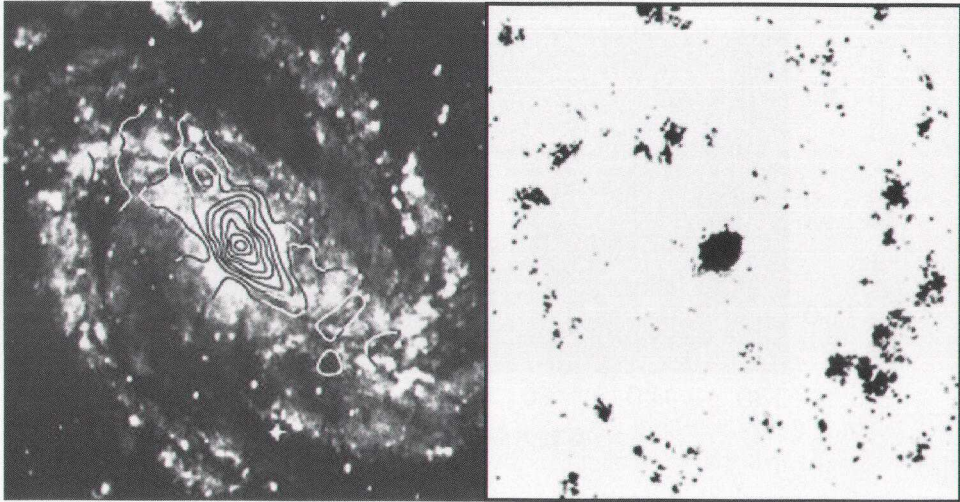


図4. 左) 光学写真に重ねたM83のCO積分強度図(コントア)<sup>8)</sup>. 右) M83の紫外線のイメージ<sup>10)</sup>.

と運動が得られるようになり、その比較が行われるようになってきました。

NRO 45 m 鏡によって得られた、棒渦巻銀河の一つ、M83でのCO積分強度図を図4に示します<sup>8)</sup>。特徴として、棒状構造の両側で棒状構造の長軸からずれた細長い構造があります。また、棒状構造の端と渦状腕の継ぎ目にガスが集中しているのがわかります。これらの特徴は、他の棒渦巻銀河でも見られるもので、数値シミュレーションでも良く再現できます。数値シミュレーションによると、棒状重力場をガスが横切る際にその長軸よりやや下流側で衝撃波が発生し、ガスは急激に速度を変え棒状構造に沿った運動をします。このため、その部分では棒状構造に沿って細長く面密度の高い構造ができます。このときに分子雲は非弾性衝突によってエネルギーを失い中心方向へと落ちると考えられます。また、棒状構造では衝撃波が起きたときガスが外向きに運動するのに対し、渦状腕では渦状腕に沿って内向きに運動するため、棒状構造と渦状構造の境にガスがたまることも示されます<sup>9)</sup>。

この分子ガスの分布を星形成の活発度の指標となる水素の再結合線や紫外線と比較すると、興味

深いことがわかります。水素の再結合線や紫外線は中心や渦状腕にくらべ棒状構造では分子ガスほど強くありません(図4)。これは、棒状構造では分子ガスは多量に存在するにもかかわらず、星形成は渦状腕や中心ほど活発ではないということです<sup>11)</sup>。その原因として棒状構造での急激な速度変化や潮汐力が考えられますが、いまのところまだ明らかではありません。

我々の銀河が渦巻銀河に属するというはかなり以前から知られていましたが、最近ではさらに棒状構造を持つのではないかと考えられるようになってきています。その証拠の一つは、系外にある棒渦巻銀河の分子ガスの観測から得られています。一般的に渦巻銀河の半径方向の分子ガスの分布は中心から遠ざかるにつれ面密度が単調に減少していくか、中心以外でピークをもつリング状の分布がみられます。ところが我々の銀河の半径方向の分子ガスの分布を見ると、中心のピークの他に5 kpc リングと呼ばれるピークが見られます(図5)。なぜこのように二つのピークがあるのかは最近まで謎でした。しかし、上で述べたような棒渦巻銀河でのガス分布を考えると、我々の銀河での

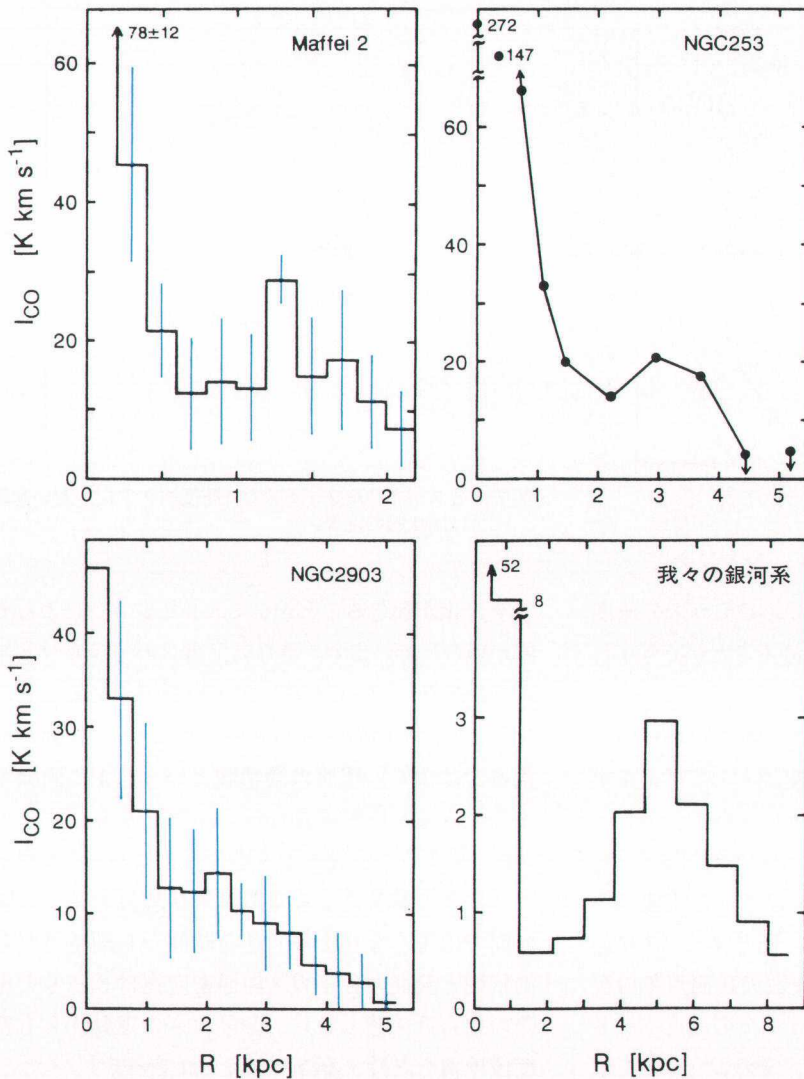


図5. 棒渦巻き銀河 (Maffei 2, NGC 253, NGC 2903) と我々の銀河のCO積分強度の半径方向の分布<sup>12)</sup>. 横軸は半径, 縦軸はCO積分強度.

分布とよく似た分布になることが予想されます. すなわち, 中心に強いピークをもち, 棒状構造の端に相当する半径に二つ目のピークが現われます. 実際, いくつかの棒渦巻銀河の分子ガスの半径方向の分布を調べると, 中心と棒状構造の端に相当する半径にピークがあることが確かめられました (図5)<sup>12)</sup>. この結果は, 我々の銀河も棒状構造をもつことを示唆するものであり, その長さも二つ目のピークのある半径程度ではないかと推測されます.

## 2. 4 銀河面上での分子ガスの運動

銀河面上でどのように分子ガスが運動しているのか (すなわち, ガスの速度ベクトルや軌道) を知ることは非常に困難です. なぜなら, 私たちが観測から知りうるのはガスの視線速度, つまり私たちに對するガスの速度しかわからないためです. そのため, 理論的には1970-80年代に銀河内各点でのガスの速度ベクトルの変化や軌道のようなすが詳細に研究されましたが, 観測的にはよくわからなかったと云ってよいでしょう. しかし, 45 m 鏡で得た

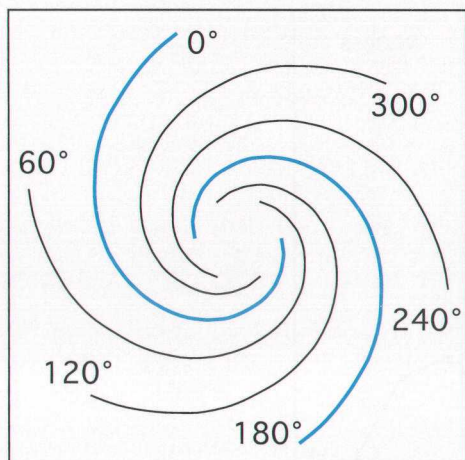


図6. スパイラルフェイズの定義.

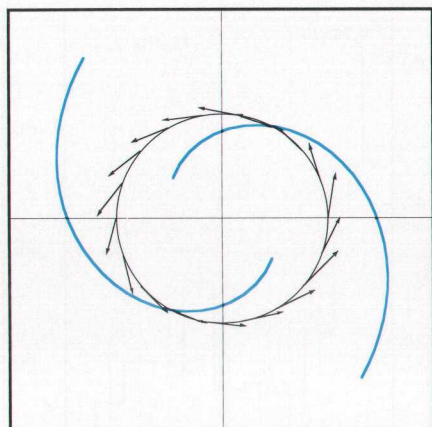


図7. 各スパイラルフェイズでの速度ベクトル. 太い青線は渦状腕の位置.

M 51 の CO のデータを用いることで、ガスの速度ベクトルと回転軌道を初めて求めることができました<sup>13)</sup>。

銀河円盤上で中心からの距離と渦状腕からの方位角（スパイラルフェイズ）を座標として考えます（図6）。限られた半径内では同じスパイラルフェイズでは同じように渦状重力場からの影響を受け、大きさと円軌道とのなす角で定義された速度ベクトルは同じであると仮定すると、同じフェイズにあり銀河面上の異なる位置角の複数の観測点での視線速度からそのスパイラルフェイズでの速度ベクトルの大きさと方向が決まります。そのようにして求めた速度ベクトルが図7です。この結果から、密度波理論で予想されたように分子ガスの運動が腕間では外向きの運動であるのが渦状腕で急激に内向きの運動に変わっているのが明らかです。これは、渦状腕で衝撃波が発生すると渦状腕に垂直方向の速度が急激に減少し、渦状腕に沿った速度が増加しガスが渦状腕に沿った運動をするという予想からくるものです。最近では、分子ガスの大部分が分子雲として存在することから、連続流体として扱うよりも粒子として扱う場合が多いのですが、その場合でも分子雲どうしの衝突によって同様な

速度変化が起きることがシミュレーションによって確かめられています。さらに、各スパイラルフェイズでの速度ベクトルを用いて、軌道を求めることができます。その結果は図8の示すように、（絶対静止系ではなく）銀河の渦状腕といっしょに回転する系でみると楕円運動に近い軌道となります。ガスがこのような運動をする場合、各スパイラルフェイズにガスが滞在する時間は渦状腕ほど長く、腕の間では短くなります。滞在時間から期待される渦状腕と腕間の分子ガスの面密度比は3-5と実際の比に近い値となり、分子ガスの運動からも密度波理論を支持する結果が得られています。

現在のところ、このような解析はM 51でしか行われていませんが、今後多くの銀河について同様の解析を行うことで、渦状重力場とガスの運動、渦状腕と腕の間の面密度比の関係などをより定量的に調べることができるかもしれません。

### 3. おわりに

実は、今でもその全体像が分子輝線によって観測されている銀河はまだ数えるほどしかありません。これは電波の弱い系外銀河の高分解能な観測をするためには膨大な観測時間が必要となるため

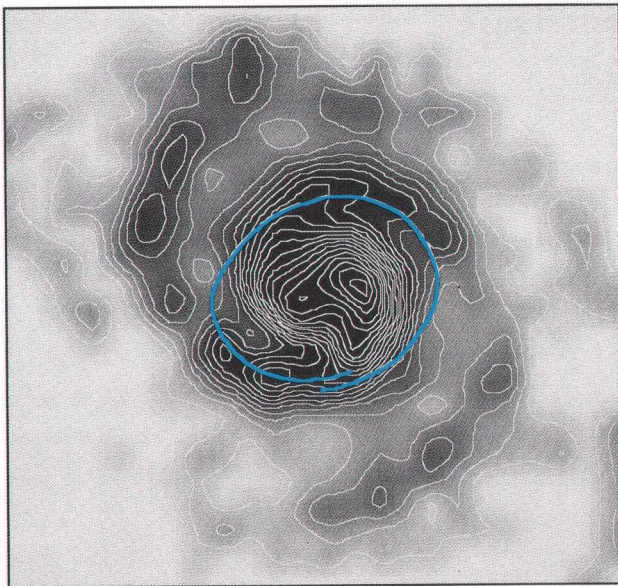


図8. 速度ベクトルから求めた分子ガスの軌道(太い青線). パターンの角速度で回転する系からみた場合. ガスは半時計回りに回転する.

です。一般に電波写真を単一鏡で得る場合、天体上に、ある間隔で観測点を取り、その各点での電波強度をもとに地図の等高線のように等強度線を描いていきます。従って、分解能が上がるとそれだけ観測点も増えることになり、より多くの観測時間が必要となります。数年前までは、一つの受信機では1点ずつしか観測できませんでしたが、野辺山宇宙電波観測所ではマッピング観測の効率を上げるために複数の点を同時に観測できるマルチビーム受信機を開発し、現在は4点を同時に観測できます。さらに25ビームのマルチビーム受信機を開発中であり、この装置が稼働するようになると、観測効率が飛躍的に向上し、M 51のような銀河のCOのマッピングが1日余で行なえるようになります。この装置を使って、たくさんの銀河のマッピングによるサーベイ観測を行なうことによって、渦状構造や棒状構造といった大規模な構造が銀河における星形成、進化にどのような影響を与える

のかといった問題を系統的に調べることができるようになると期待されます。また、強度が非常に小さいためこれまでほとんど不可能だったCO以外の分子輝線によるマッピング観測も可能となります。COだけですと分子ガスの量はある程度見積もることができそうですが、その体積密度や温度といった物理状態まではわかりません。その他の分子輝線も観測することによって、銀河のタイプや個々の銀河の中の場所によって分子ガスの物理状態にどのような差がみられるか、またその違いが星形成とどのように関係するのかが明らかにされていくことでしょう。

### 参考文献

- 1) Nakai N., et al., 1994, PASJ 46, 527
- 2) Kuno N., et al., 1995, PASJ 47, 745
- 3) Elmegreen D.M., et al., 1994, ApJ 425, 57
- 4) Kennicutt R.C., 1989, ApJ 344, 685
- 5) Kuno N., et al., 1997, PASJ 49, 275
- 6) Thornley M., 1996, ApJ 469, L45
- 7) Hodge P.W., Kennicutt R.C., 1983, AJ 88, 296
- 8) Handa T., et al., 1990, PASJ 42, 1
- 9) Kenney J.D.P., Lord S.D., 1991, ApJ 381, 118
- 10) Bohlin R.C., et al., 1983, ApJ 274, L53
- 11) Handa T., et al., 1991, in IAU Symp. 146, Dynamics of Galaxies and Their Molecular Cloud Distributions, ed. Combes F., Casoli F., p156
- 12) Nakai N., 1992, PASJ 44, L27
- 13) Kuno N., Nakai N., 1997, PASJ 49, 279

### Large-Scale Distribution and Kinematics of Molecular Gas in Galaxies

Nario KUNO

Nobeyama Radio Observatory

Abstract: In the past few years mapping observations of external galaxies with large radio telescopes to study the large-scale distribution and kinematics of molecular gas in galaxies have been undertaken. Recent results in this field, and specially the observations with the Nobeyama 45-m telescope, are reviewed in this article.