

NMA による近傍銀河の CO 観測

石 附 澄 夫*・半 田 利 弘*・石 黒 正 人**・川 辺 良 平**
 森 田 耕 一 郎**・濤 崎 智 佳***・兼 古 昇****

はじめに

銀河という系に起こる天体現象は、銀河系内で観測される個々の現象を単に寄せ集めれば説明できるというものではない。例えば、銀河における星生成の問題では、スターバーストという銀河のある広い範囲で一斉に起こる星生成が問題になり、渦状腕・バーといった銀河規模の構造の影響や銀河相互作用・銀河の衝突による合体・環境効果といった銀河の外部からの影響が、興味を呼ぶ研究対象となってくる。こういった研究のためには、銀河内構造や銀河外部からの作用の応答として、銀河内部の分子ガスの分布、運動がどうなっているかを観測する必要がある。過去の単一鏡や、米国の 3 素子ミリ波干渉計による観測によっても系外銀河の分子ガスの分布、運動に関して良い成果が得られてきたが、野辺山ミリ波干渉計 (NMA) は、5 素子というアンテナ数の多さを生かし、高感度、高角分解能、高スペクトル分解能を駆使し、この分野で大きな成果をあげてきた。以下に、野辺山ミリ波干渉計によって得られた近傍銀河の CO 観測の結果を紹介する。

I. 銀河中心部での分子ガスの分布構造と星生成

銀河中心部で星生成が活発な現象が数多くある。この現象においての問題点の一つは、星生成の活発な中心領域に星の原料となる星間分子ガスがどのように供給されているかということである。この問題を究明するために、分子ガスが中心部に多量に存在する近傍の銀河 IC 342¹⁾、NGC 6946^{2),3)}、Maffei 2⁴⁾ の中心領域の CO ($J=1 \rightarrow 0$) 輝線の高分解能観測が行われた。

このうち、IC 342 については、アンテナ 4 配列 (40 基線) 分の観測が行われた。最大基線長は、287 メートルで、角分解能 2.4×2.3 (HPBW) が得られた。この分解能は、3.9 Mpc の距離で、45 pc \times 44 pc に相当する。得られた CO 積分強度のマップは、グラビア写真 4-① に擬似カラーで掲げた。CO 輝線は、南北 $50''$ に長く伸びて分布しており、銀河中心の北側では東にずれたリッジとして、南側では西にずれたリッジとして、それぞれ

分布している。この銀河の渦状腕が通常の銀河のように trailing arm であると仮定すると、銀河回転の CO 輝線のリッジは leading sides にあることになる。CO 視線速度場のマップを作ってみると (グラビア写真 4-③)、リッジにあるガスは、銀河回転から外れた運動をしており、動径方向の速度成分の存在を示唆する (この動径速度成分が向心成分か遠心成分かは判断できない。CO 視線速度場は、どちらの解釈とも矛盾しない)。

2 本の CO 輝線のリッジ構造は、中心部で弧状に曲がっており、CO 輝線の弱い中心の「穴」をとり囲むリングのようになっている。このリングの直径は $6''$ ほど (3.9 Mpc の距離で 110 pc に相当) である。CO 視線速度は、リングにあるガスが円回転運動していることを示唆する。CO リング状構造は、Turner and Ho (1983)⁵⁾ が VLA によって観測したセンチメートル連続波のリング状分布にぴったり重なっており、ここが IC 342 の銀河中心部における活発な星生成の現場であることを示している。ガスが非円運動しているリッジ構造のスムーズな延長線上に活発な星生成領域があることは、リッジ構造が星生成領域へのガスの供給において重要な役割を果たしていることを示すものである。

観測された CO リッジの形態・視線速度・CO 輝度温度・速度幅と、棒渦巻銀河でのガスの運動のシミュレーションの結果とを考え合わせると、分子ガスリッジは、バー状重力場によって誘起された銀河衝撃波であり、そこで運動エネルギーが散逸されてガスが中心に向かって落ち込んで行くというシナリオが補強される。そして、この落ち込んだガスが溜ってリングが形成され、活発な星生成の現場となっているのだと考えられる。

IC 342 のような CO 輝線の長く伸びた分布は、NGC 6946 にも見つかった (グラビア写真 4-④)。IC 342 と同様に、CO 輝線は長く伸びた構造の leading sides に集中してリッジ状に分布しており、リッジにあるガスは、銀河回転から外れた運動をしていることが CO 視線速度場のマップからわかる。NGC 6946 の場合、この非回転運動は銀河中心向きである。IC 342 では、銀河中心付近では分子ガスはリングを形成していたが、NGC 6946 では、大量 [$M(\text{H}_2) = 2 \times 10^8 M_\odot$] の分子ガスを含む直径 300 pc の塊を形成している。注目すべきことは、この塊でも、IC 342 のリングと同様に、円運動を示唆する CO 視線速度場を示していることである。円運動しているこ

* 東大理 Sumio Ishizuki, Toshihiro Handa, ** 国立天文台 Masato Ishiguro, Ryohei Kawabe, Koh-Ichiro Morita, *** 東北大理 Tomoka Tosaki, **** 北大理 Noboru Kaneko: CO Observations of Nearby Galaxies with the NMA

とから、この分子ガスの塊は、分子ガスディスクであることが示唆される。

NGC 6946 は、ガスのリッジ状分布、速度場の点で、IC 342 と共通の特徴を持っており、バー状重力場によって誘起された銀河衝撃波で運動エネルギーが散逸されてガスが中心に向かって落ち込んで行くというシナリオは、NGC 6946 でも成り立っていると思われる。落ち込んだガスが、リングかディスクのどちらを形成しているかという点で異なっているが、そこでは円運動を示唆する速度場が観測され、これ以上ガスが中心へ向かってダイナミカルに落ちてはいないことを示している。

Maffei 2 の中心部の分子ガスの構造は、IC 342 や、NGC 6946 とはやや異なる。分子ガスは、 $1000 \text{ pc} \times 200 \text{ pc}$ の大きさのバー状に分布しているが、バーの南の端は、北西へと向かって弧状に曲がっている（グラビア写真 4-⑤）。速度ごとに分けたスペクトルチャンネルマップには、この弧状の構造は、直径 500 pc のリングとして現われている。このリングを切断する直線に沿った位置-速度図を作ってみると、リングが $\sim 60 \text{ km s}^{-1}$ の速度で膨張しており、 3×10^6 年にわたる膨張運動によるものであると推測される。この膨張運動のエネルギーは $2 \times 10^{54} \text{ ergs}$ である。分子ガスバーの南半分は、膨張ガスリングによって分子ガスが掃き集められた形状をしており、Maffei 2 の中心のガスの分布、運動に対して膨張ガスリングが大きな役割を果たしていることを示唆している。銀河中心部でのガスダイナミクスは、近年注目を集めている観測的・理論的問題であるが、この Maffei 2 における観測結果は、爆発的星生成に続く大規模なガス膨張がこの問題において無視してはいけない過程であることを示している。

IC 342 では、 ^{13}CO ($J=1 \rightarrow 0$) 輝線も野辺山ミリ波干渉計によって観測された⁶⁾。 ^{13}CO の分布（グラビア写真 4-②）にみられるそれぞれの塊に含まれる分子ガスの量は $(1-4) \times 10^7 M_{\odot}$ と評価され、M51 の渦状腕にある Giant Molecular Association (GMAs) の形成が銀河中心部のバーでも起こっていることを示す。

II. 渦状腕

渦状腕は、銀河中心部から外側へ向かって連なって展開している。渦状腕の始まる場所は、銀河中心領域との接点であり、渦状腕によるストリーミングモーションによって銀河外周部から輸送されるガスの行き場を考える上で、興味深い観測対象である。野辺山ミリ波干渉計による観測の結果、渦状腕の始まる場所に分子ガスの塊が形成されることがわかった。

Virgo Cluster 中で最も大きな渦状銀河である NGC 4321 では、CO 輝線の分布は、大きな3つの塊からなっ

ており、H α 線で見える半径 $\sim 1 \text{ kpc}$ のリングの位置と一致している（図 1）。中心領域のガスの総量 $1 \times 10^9 M_{\odot}$ は、ほとんどが H α リングに集中している。CO の顕著な北東の塊と南西の塊は、渦状腕の根元に位置しており、ここからさらに渦状腕に沿って外側に CO の分布が伸びていることがわかる。CO 速度場は回転運動からずれた速度成分の存在をはっきりと示しており、渦状腕を巻き込みアームであるとするこの非回転運動は中心方向へ落ちていく向きである。その streaming motion によって落ちてきたガスが inner Lindblad resonances (ILRs) にリング状にたまり、活発な星生成を起こしていると考えられる。

M 51 は、伴銀河 (NGO 5195) を伴い、グランドデザイン渦状腕を持った銀河で、ほぼフェイスオン（傾き 20° ）であるため、渦状腕の研究の格好の対象である。CO 輝線は、銀河円盤部の渦状腕に付随するダストレーンに沿って分布している⁷⁾。野辺山ミリ波干渉計による観測で、渦状腕の始まるのところで、分子ガスの集中した塊が2つ、中心の北西、東西に観測された（表紙写真）。ここでは streaming motion を示す CO 視線速度場が得られた²⁾。この状況は、前述の NGC 4321 と同じである。興味深いのは、この2つの塊に橋をかけるような構造（バー構造）があることである。CO 視線速度場は、銀河回転から予想される速度場から外れており、バー構造のところではガスの楕円運動を示唆する。これは、非軸対称重力場による影響を受けている速度場が観測されている点で、IC 342 や NGC 6946 と共通である。

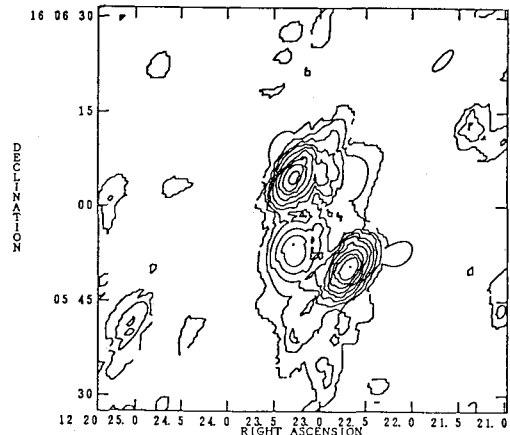
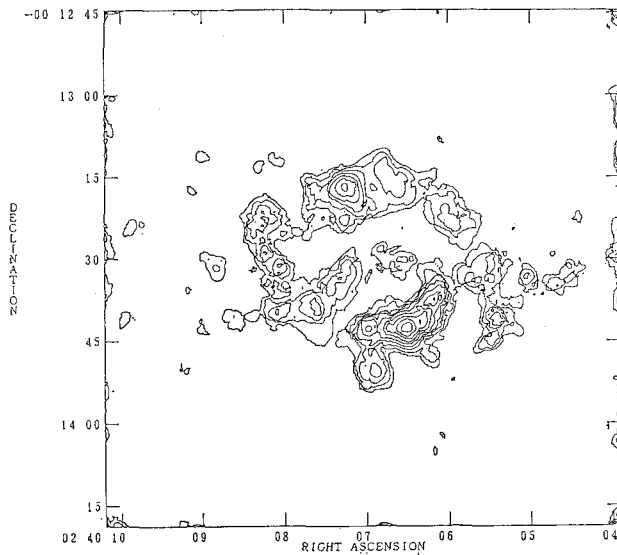


図 1 NGC 4321 中心部の CO 積分強度図。分解能は $5'' \times 7''$ (20 Mpc の距離で $500 \text{ pc} \times 700 \text{ pc}$)。

III. セイファート銀河

セイファート銀河 NGC 1068 には中心核活動のほか、広範囲にわたって爆発的星生成 (starburst) 現象が観測される。兼古らは野辺山 45 m 鏡による観測⁸⁾に引続



◀ 図 2 NGC 1068 中心部の CO 積分強度図. 分解能は $5'' \times 4''$ (18 Mpc の距離で $440 \text{ pc} \times 350 \text{ pc}$).

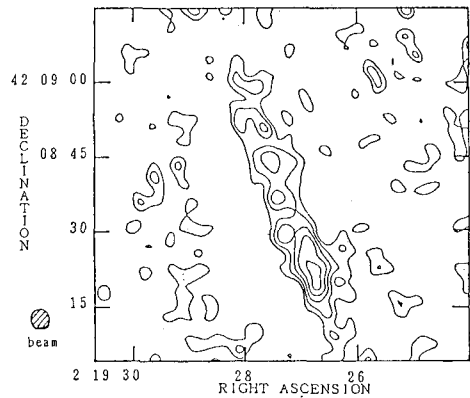


図 3 NGC 891 銀河円盤部の CO 積分強度図. 分解能は $4.5''$ (9.5 Mpc の距離で 200 pc).

き, この銀河の CO 観測を野辺山ミリ波アレイ (NMA) を使用して行った. これにより, 角分解能は $17''$ (野辺山 45 m 鏡) が $5'' \times 4''$ (NMA) へと飛躍的に向上し, NGC 1068 内の CO 分子ガス雲をはっきりと描き出すことができた.

得られた CO 積分強度マップを図 2 に示す. CO 分子ガスは一様に分布しているのではなく, いくつかの大きな塊 (CO complexes) となっているのが見られる. 最も顕著な CO の塊は, 中心核 (R.A.[1950]= $2^{\text{h}}40^{\text{m}}07^{\text{s}}$, Dec[1950]= $-0^{\circ}13'31''$) から約 $15''$ 南西に位置し, CO マップに内部領域の U バンドイメージを重ねると, 南西の巨大な電離水素領域に付随したダスト領域に一致していることがわかる. 同様に, 北から西へ伸びる弧状の塊は, 北西の電離水素領域の外側のダスト領域上に位置している. 電離水素領域はその内部の若い星々からの紫外線で作られたものである. CO 分子ガスが電離水素領域に付随したダスト領域内に観測されるという結論は, starburst 現象のみならず, 中心核活動の起源を究明する上でも, 重要な意味を持つ.

IV. 円盤銀河での分子ガスの垂直分布

銀河のディスクとハローの相互作用を研究する上で, 銀河ディスクの物質の垂直分布を調べることは興味をひくことである. とくに, 分子ガスは, 銀河円盤に多量にある星間物質であり, 星生成と密接な関連があるから, その垂直分布を知ることは重要である. しかし, これまで, 系外銀河で分子ガスの垂直分布を知る試みはされていない. そこで, 半田ら⁹⁾は, 近傍 (距離 9.5 Mpc) のエッジオン銀河 (傾き 88° 以上) NGC 891 の CO ($J=1 \rightarrow 0$) 輝線観測を行い, 分解能 $4.5''$ (200 pc に相当)

を達成した.

観測された CO リッジ (図 3) は銀河を真横からみた姿で, 視野中心は野辺山 45 m 鏡で最も CO ($J=1 \rightarrow 0$) 輝線が強く観測されたところ (銀河中心からリッジに沿って北へ $90''$) である. この銀河が完全にエッジオンである (傾き 90°) と仮定すると, 分子ガスの垂直分布の厚さは FWHM で 230 pc 以下であることがわかる. あるいは, もし, 分子ガスの垂直分布の厚さが我々の銀河の半径 5 kpc での値 80 pc と同じであると仮定すると, 銀河の傾きは 88° 以上であることがわかる. 分子ガスの垂直分布の厚さ, 230 pc 以下は, 光学像から求めたダストレーンの厚さ (FWHM に換算して 390 pc) に比べて小さく, 分子ガスディスクの方がダストディスクよりも幾何学的に薄いことが結論づけられる.

おわりに

系外銀河は遠方にあるため, 信号は微弱である. また, 分子ガスの分布を知るためには, 銀河系内天体に比べて, とくに, 高い角分解能が必要である. さらに, 銀河天文学において重要なガスダイナミクスに関する情報を得るために分子輝線をスペクトル分解することが求められる. これらの理由から, 系外銀河の観測においては, 天体からの信号をたくさん集めることが必要不可欠である (注. アンテナ間の距離を大きくすればそれだけ高い角分解能のマップが得られるわけではなく, 十分な S/N 比が必要である). 野辺山ミリ波干渉計は, 5 素子というアンテナの多さ (他のアメリカのミリ波干渉計は今のところ 3 素子) を生かして成果を挙げてきた. 高い角分

解能によってこれまで見られなかった構造が見つかったし、速度場が得られていなかった銀河で鮮明なCO速度場を得ることができた。今後、ここに挙げたような、少数の近傍の銀河で得られた情報を、もっと遠くの数多くの銀河で得ることが求められる。銀河天文学を進める上で、もっと多素子のミリ波干渉計を建設することが大きな力になることは疑いなく、近い将来において強い要請となるであろう。

参考文献

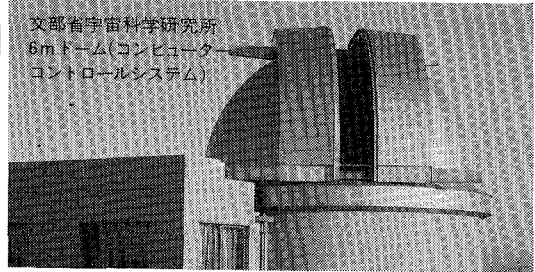
- 1) Ishizuki, S. et al. *Nature*, **344**, 224 (1990)
- 2) Kawabe, R. et al. *IAU 146*, in press (1990)
- 3) Ishizuki, S. et al. *Ap. J.*, **355**, 436 (1990)
- 4) Ishiguro, M. et al. *Ap. J.*, **344**, 763 (1989)
- 5) Turner, J. L. & Ho, P. T. P. *Ap. J. (Letters)*, **268**, L79 (1983)
- 6) Ishizuki, S. et al. *IAU 146*, in press (1990)
- 7) Nakai, N. et al. *IAU 146*, in press (1990)
- 8) 兼古 昇 天文月報8月号, p. 205 (1989)
- 9) Handa, T. et al. *IAU 144*, in press (1990)

☆

ASTRO Observatory Domes

天文台の建設は青少年の
未来の心をはぐくみます

文部省宇宙科学研究所
6mドーム(コンピュータ
コントロールシステム)



◆主な天体観測ドーム納入先◆

文部省宇宙科学研究所／東京大学教養学部／宮崎大学教育学部／東京学芸大学／埼玉大学／福島大学／川崎市青少年科学館／杉並区立科学教育センター／駿台学園一心荘(北軽井沢)／防衛大学校／東海大学宇宙情報センター(熊本)／栃木県こども総合科学館／日原文学台(島根)／自然科学館星の家(新潟)等の他全国に数多くの実績があります。

アストロ光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321

C-CCDの世界

冷却CCDテレビカメラ

今、天体観測は、フィルムから
CCDカメラの時代へ移っています。
フィルムの長時間露光と同等以上の画質
と解像度が短時間で実現できます。

「馬頭星雲」60cm F4.7 ニュートン直焦点 C3640 使用露光90秒(館山天文台にて)

超高感度冷却CCDカメラシステムは、SITカメラや高感度フィルムを大幅に上回る感度と100万画素の高解像度により、宇宙の彼方からの極微弱な光を高画質で鮮明に映し出し、高速で画像改善やデータ処理・解析を行います。

超高感度

冷却CCDカメラシステム

浜松ホトニクス株式会社

システム営業部 〒430 浜松市砂山町325-6
☎(0534)52-2141(代表) ファックス(0534)52-2139

