

銀河中心領域の分子ガスの分布と運動

石 附 澄 夫

〈東北大学理学部 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

銀河中心の周りの約1キロパーセク以内の領域は、多くの銀河、とくに、棒状銀河においては、星間分子ガスが集中していることが多い。銀河の棒状構造による重力場は、星間ガスを中心領域に集めるメカニズムの候補として有力であり、銀河中心領域の星間ガスの分布および運動をどう支配するかは、たいへん興味のある問題である。国立天文台野辺山のミリ波干渉計によって、近傍の渦状銀河の中心領域の一酸化炭素分子輝線 ($J=1\rightarrow 0$) の高分解能観測をしたところ、星間分子ガスが、二つのピーク構造や稜線状構造といった特徴的な構造を形成していることが、観測された。本稿では、これらの星間分子ガスの構造が銀河の棒状構造によってどう形成されたかについて述べ、さらに、銀河中心領域で爆発的星生成を起こしている銀河（スターバースト銀河）に特徴的な構造について述べる。

1. CO ($J=1\rightarrow 0$) 分子輝線

1975年に、M 82とNGC 253で、系外銀河では初めての一酸化炭素分子輝線、CO ($J=1\rightarrow 0$) (静止系での周波数115.271204 GHz) が、Rickardら¹⁾によって検出されて以来、CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線は、系外銀河天文学において、星生成の原料である冷たい分子ガス (温度10-40 K) のプローブとして、観測されてきた。星間分子雲は、その成分のほとんどは水素分子 (H_2) とヘリウム原子 (He) であるが、どちらも回転遷移の電気双極子モーメントを持たないために電波領域で観測される輝線を持たない。そのために、星間分子雲中での水素分子に対する個数存在比が際だって大きい (0.8×10^{-4}) ために重元素を含んだ分子の中ではミリ波帯で最も強く観測される一酸化炭素分子 (CO) が、

冷たい星間分子ガスの重要なプローブとして観測されてきたのである。

一酸化炭素分子の回転遷移の下から2番目の準位 ($J=1$) から基底準位 ($J=0$) への遷移によって放射される電波がCO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線である。 $J=1$ のレベルが温度に換算して $E/k_B=5.5\text{K}$ と低いために冷たい星間分子雲でも励起されうる。また、電気双極子モーメントが0.11 Debye と小さいために放射場との熱的結合の強さを示すアインシュタインのA係数が小さいので、 10^3cm^{-1} という星間分子雲としては低い密度でも水素分子との衝突によって励起されうる (光学的に厚い通常分子雲の場合はそれよりも1桁以上低い密度でも励起される)。これが、CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線が冷たくて比較的密度の低い星間分子ガスのプローブとなる理由である。

1980年代には、FCRAO (Five College Radio Astronomy Observatory) や NRAO (National Radio Astronomy Observatory) Kitt Peak など

Sumio Ishizuki: Distribution and Dynamics of Interstellar Molecular Gas in Nuclear Region of Galaxies

の米国の直径 10 メートルクラスのミリ波望遠鏡による観測的研究が行われた。分解能が1分角程度であったために、星間分子ガスの銀河全体の性質、あるいは、分子ガスの動径分布に注目したものが多(例えば、文献2)。銀河の分子ガスの分布構造が CO ($J=1\rightarrow 0$) の観測から詳細に知られるようになったのは、野辺山 45 メートル鏡、IRAM (Institut de Radio Astronomie Millimétrique) 30 メートル鏡といった大口径のミリ波望遠鏡や、ミリ波干渉計による高角分解能観測が行われるようになった 1980 年代半ば以降のことである。

電波によるスペクトル線観測の大きなメリットのひとつに、スペクトル線のドップラーシフトからスペクトル線を放射している物質の視線速度を知ることができることがある。1980 年代半ば以降になると、大口径のミリ波望遠鏡やミリ波干渉計による高角分解能観測によって、銀河の特徴的な構造(棒状構造、渦状腕など)での速度構造を解明するための重要な情報が得られるようになった。

た。

2. 分子ガスの棒状構造

その中で重要な発見は、Lo *et al.*³⁾による渦状銀河 IC 342 の分子ガスの棒状構造の発見である。IC 342 は、見かけ上はほとんど星の棒状構造が見られないが、中心領域に、長さ 1 分角(銀河の距離 1.8 Mpc で 500 パーセク)、幅 10 秒角程の分子ガスの棒状構造が見つかり、その中で分子ガスが非円回転運動をしていることがわかったのである。野辺山ミリ波干渉計を使った Ishizuki *et al.*⁴⁾によるさらに高分解能の観測によると、分子ガスは、渦状腕が巻き込みであると仮定して決められた銀河回転の下流の向きに位置のずれた 2 本の細い稜線状に分布し、さらに、中心の周りには、直径 6 秒角の円環状の構造を形成していた(図 1)。さらに、稜線状構造のところでは分子ガスが構造に平行な非円回転運動をしていることを示す CO ($J=1\rightarrow 0$) の速度場が、円環状構造のところでは非円回転運動が小さいことを示す CO ($J=$

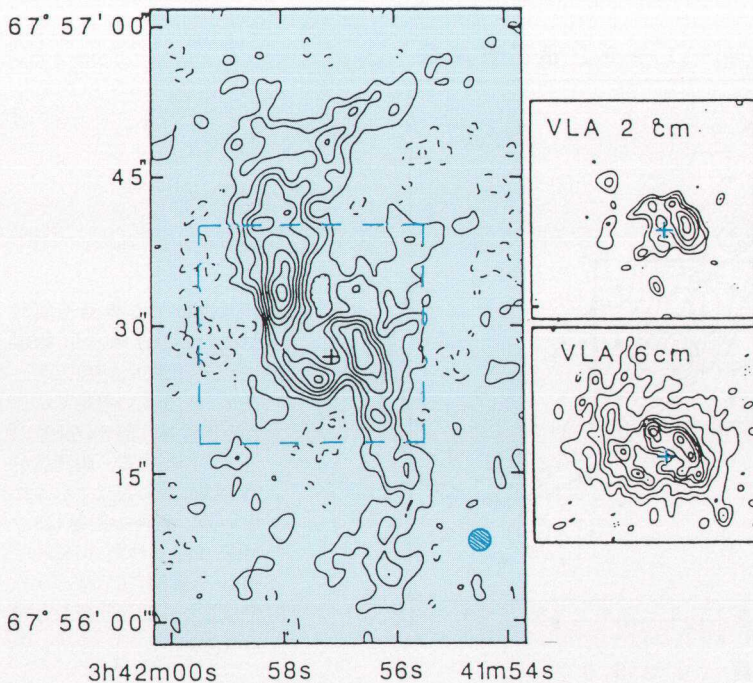


図 1 野辺山ミリ波干渉計による渦状銀河 IC 342 の CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線の高分解能マップ(左、文献 4 より)、および、VLA による電波連続波のマップ(右上下、文献 5 より)。電波連続波のマップの枠は、CO マップの破線の枠で示した。十字は、銀河中心の位置。銀河の距離は 1.8 Mpc で、1 秒角が 9 pc に相当。CO マップの分解能 ($2''.3$) はハッチで示した。銀河回転の方向は半時計回り。

1→0)の速度場が、それぞれ観測された。これは、棒状重力場によってガスの楕円運動が誘起されて衝撃波（2本の細い稜線状構造）が生じ、そこでガスが中心領域へ向かって落ち込み、その落ち込みが止まるところに分子ガスの円環状構造ができたと解釈される。さらに重要な点は、分子ガスの円環状構造⁵⁾がセンチメートル波の円環状構造とぴったり一致していることである。これは、衝撃波によるガスの流れが止まって分子ガスがたまったところで、活発な星生成が起きていることを示す。

3. 棒状銀河での分子ガスの構造 —ダークレーン+CO twin peaks

IC 342 は、星の棒状分布構造が顕著に見えるいわゆる棒状銀河ではない。では、典型的な棒状銀河での、ガスの振る舞いはどうであろうか。Handa *et al.*⁶⁾は、野辺山 45 m 鏡を使って、棒状銀河 M 83 (NGC 5236) の CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線を観測し、銀河回転の下流の側にあつて銀河の棒状構造に沿って存在する平行なダストレーンに付随

している分子ガスの構造を見いだした(図2)。これは、IC 342 の分子ガスの棒状構造に付随した衝撃波と同じものであると考えられる。また、Kenney *et al.*⁷⁾は、カルテクのミリ波干渉計を使って棒状銀河 M 101 (NGC 5457), NGC 3351, NGC 6951 (うち後者二つは後述するホットスポット銀河⁸⁾)を観測し、棒状構造に沿って存在する直線状のダストレーンが中心領域の電離水素領域の環状構造と交わる一対の場所に、分子ガスのピークが存在する事を見だし、‘CO twin peaks’と呼んだ(図3)。これは、IC 342 の分子ガスの円環状構造に相当する。これらの観測から示唆されることは、銀河回転の下流方向にずれたところに、ダストレーンのような銀河の棒状構造と平行な星間物質の直線状分布構造があり、その内端に活発な星生成をともなった分子ガスの構造(棒状銀河の‘CO twin peaks’, IC 342 の分子ガスの円環状構造)があるということが、棒状銀河の中心領域で一般的にいえるということである。

この構造は、いったいどのようにしてできるのだろうか。棒状銀河の中での質点の軌道によって

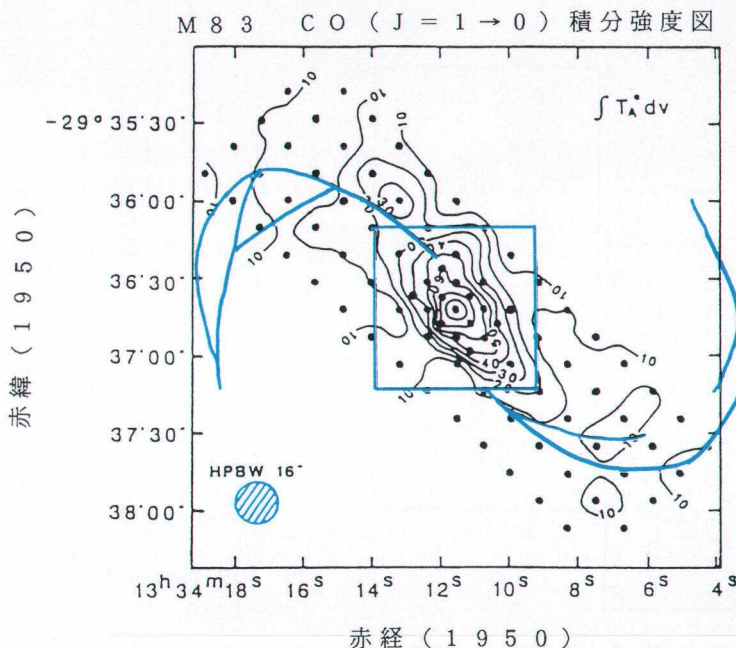


図2 45m鏡による棒渦巻銀河 M83の CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線マップ(文献6より)。ダークレーンを太い実線で示した。内枠は、図8(左図)の外枠に相当する。観測点が格子状に並んだ点で示されている。銀河の距離は3.7 Mpcで、1秒角が18pcに相当。分解能(16")はハッチで示した。銀河回転の方向は時計回り。

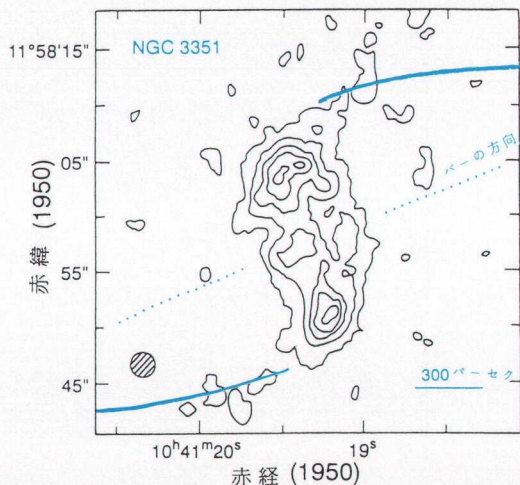


図3 カリフォルニア工科大学のミリ波干渉計による棒渦巻銀河 NGC 3351 の CO ($J=1 \rightarrow 0$) 輝線マップ(文献7より). ダークレーンを太い実線で示した. 銀河の距離は10 Mpc で, 1 秒角が50pc に相当. 分解能 ($2''.3$) はハッチで示した. 銀河回転の方向は反時計回り.

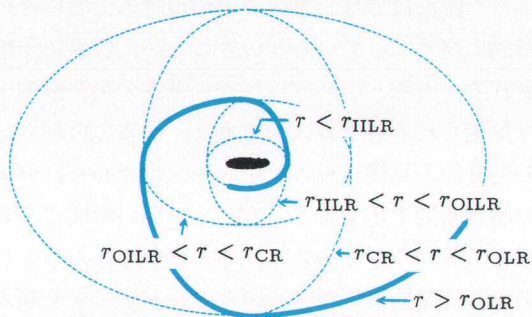


図4 棒状銀河中の閉軌道の概念図(文献9より). 等ポテンシャル面の長軸の方向は, 図の水平方向である. OLR (=outer Lindblad resonance), CR (=corotation resonance), OILR (=outer inner Lindblad resonance), IILR (=inner inner Lindblad resonance) の内外で, 軌道の長軸の向きが変化する. 文献9によると, 銀河回転の方向は時計回りとする太線で示した部分で星間ガスの面密度が高くなる.

説明してみよう(文献9および, その引用文献を参照). 回転する楕円状の重力場の中で, その回転座標系に乗って, 質点の運動を考えてみる. 質点の受ける力は, 重力場による力(銀河をかたちづくる物質[おもに星]の集団からの引力)と, 座標系の回転による慣性力(コリオリ力と遠心力)である. 一般に, 軌道は閉じない(一周したときにもとの点に戻らない)が, ある条件を満たす軌道は閉じた軌道(一周したときにもとの点に戻る)になる. 星間ガス雲の軌道考えた場合, 星と違って非弾性衝突すると考えられるので, 自分自身と交わる軌道は実現せず, 同じ理由で, 閉じていない軌道も実現しない. 実際, 流体のシミュレーションをしてみると, 楕円状の閉軌道のみが実現していることがわかる. そこで, 質点の楕円状の閉軌道のみを考えてみると, その長半径の方向は, レゾナンス半径の内外で, 垂直に変化する(図4). Corotation resonance (CR) と outer inner Lindblad resonance (OILR) との間では, 楕円状の軌

道の長軸は銀河の棒状構造に平行である(この軌道の族を x_1 族という). 銀河の棒状構造に平行な星間物質の直線状分布構造(棒状銀河のダストレーン, IC 342 の分子ガスの稜線状構造)は, この種の軌道に従うガス雲からなる構造であると解釈される. また, OILR の内側では, 軌道の長軸は銀河の棒状構造に垂直(x_2 族の軌道)である. 棒状銀河の'CO twin peaks', IC 342 の分子ガスの円環状構造は, この種の軌道に従うガス雲からなる構造であると解釈される⁷⁾.

4. スターバースト銀河での分子ガスの構造—コンパクトな分子ガス分布

渦状銀河の中には, マルカリアン銀河のように, 中心が青くて顕著に明るいものがある. こういった銀河核のうち, 光学輝線から知ることのできる星間電離ガスの励起状態が HII 領域的であるものは, 生まれたばかりの大質量星がその電離光の源であり, 爆発的に星生成が起こっているという意味で, スターバースト銀河核と呼ばれる. こう

いった銀河核では、星生成率が現時点において一時的に高くなっているということが、容易に予想される。実際、CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線の電波観測から見積られる分子ガスの質量と、水素の再結合線の強度から見積られる星生成率との比から、ガスの消費時間を求めると、 10^8 年と、短い時間で消費されてしまう。そのため、なんらかのメカニズムによって星間ガスが中心のスターバーストを起こしている領域に供給されているはずで、そのメカニズムを調べることは、重要な問題である。

そこで、筆者は、野辺山ミリ波干渉計を用いて、スターバースト銀河の中心領域のCO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線の高分解能マッピング観測をおこなった。さらに、スターバースト銀河ではないものの、中心核をいくつかの分離した明るい領域が取り巻いているホットスポット銀河と呼ばれるもの^{8,10)}があり、ガスの供給メカニズムに関して重要な手がかりとなるので、複数のホットスポット銀河の中心領域のCO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線の高分解能マッピング観測もおこなった。その結果、以下に述べるように、スターバースト銀河には、分子ガスの分布に、特徴的なものがあることが分かった。

図5は、スターバースト銀河NGC 2782 (距離34 Mpc, $H_0=75 \text{ km s}^{-1}$ を仮定) の、CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線の強度を等高線で示したマップである。ふたつのピークが見え、それぞれの輝線強度は、

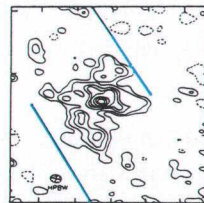
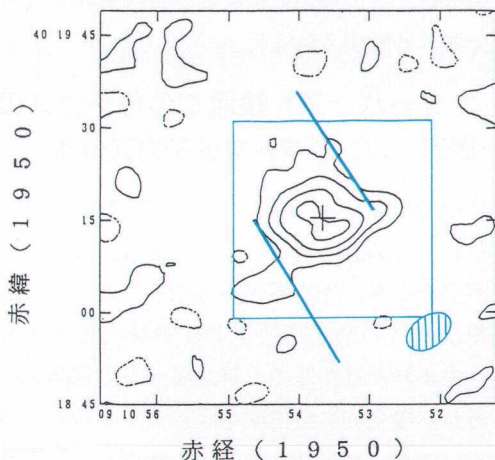


図5 左図は野辺山ミリ波干渉計による銀河NGC 2782のCO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線マップ。ダークレーンを太い実線で示した。銀河の距離は34 Mpcで、1秒角が160pcに相当。分解能($8''.0 \times 5''.2$)はハッチで示した。銀河回転の方向は時計回り。左図の内枠は、右図のVLAマップ(波長6cm, 文献11より)の外枠に相当する。

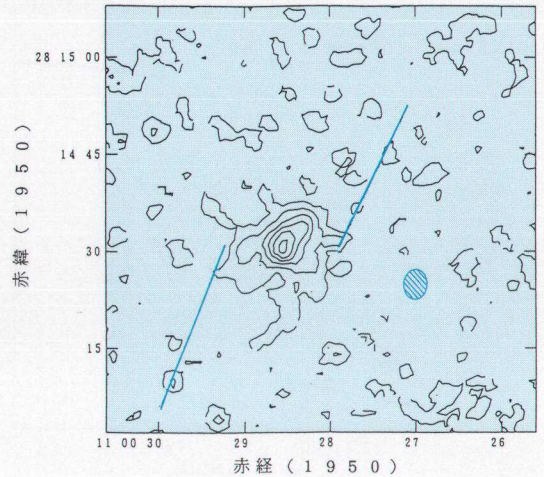


図6 野辺山ミリ波干渉計による棒渦巻銀河NGC 3504のCO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線マップ。ダークレーンを太い実線で示した。銀河の距離は20 Mpcで、1秒角が100pcに相当。分解能($4''.7 \times 3''.7$)はハッチで示した。銀河回転の方向は時計回り。

$10^9 M_{\odot}$ の分子ガスの量に相当する。二つのピークがともに南東から北西の方向に伸びて見えるのは、合成ビーム(分解能に相当する)がその方向に伸びているからである。しかし、南西側のピークは、そのビームの伸びよりも有意に北西の方向に伸びていて(ここでは示していないが、視線速度 $2660 \pm 20 \text{ km s}^{-1}$ の図を見るとこのことはもっとはっきりする)、稜線状構造となっており、図中

実線で示したダークレーンのうちの一本の端につながっている。図5右に示した波長6cmの電波源のピーク¹¹⁾は、二つのCOピークに一致している。

一方、スターバースト銀河 NGC 3504 (距離 20 Mpc) の、CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線の強度の等高線マップを図6に示した。この銀河では、分子ガスは、ダークレーンから離れた中心のコンパクトな領域に集中している。CO 輝線強度は $2 \times 10^9 M_{\odot}$ の分子ガスの量に相当する。電波源¹²⁾や $H\alpha$ ⁷⁾は、この分

子ガスの集中したコンパクトな領域に集中している。

いま挙げた二つの銀河は、星生成率が高く、 $H\alpha$ 線の強度¹³⁾から求めると、NGC 2782 の中心の 800 pc の領域で $5 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 、NGC 3504 の中心の 400 pc の領域で $3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ である。この高い星生成率が、スターバースト銀河である理由である。これらの銀河で特徴的なことは、どちらも、分子ガスが、棒状構造に付随したダークレーンの内端よりもずっと内側のコンパクトな領域に存在していることである。これは、一対のダークレーンの内端に分子ガスの'twin peaks'が存在する Kenney *et al.*⁷⁾の観測したホットスポット銀河2個を含む3つの銀河や、筆者が観測したホットスポット銀河 NGC 5383 (図7) と様相が異なる。これから、ガスが中心付近のコンパクトな領域に供給されているか、それともダークレーンの内端で留まっている twin peaks を作っているかの違いが、スターバースト銀河とホットスポット銀河とを分けている動力学的な要因であることが、強く示唆される。

このように、一対のダークレーンの内端より半径の小さいところに分子ガスが分布した銀河は、他にも見つかった。一つは、M 83、もう一つは、NGC 1530 である (ただし、この二つの銀河は、NGC 2782 や NGC 3504 のような、星生成率が著しく高いスターバースト銀河ではない)。

Handa *et al.*¹⁴⁾は、M 83 の中心の約1分角の視野の CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線の観測を、野辺山ミリ波

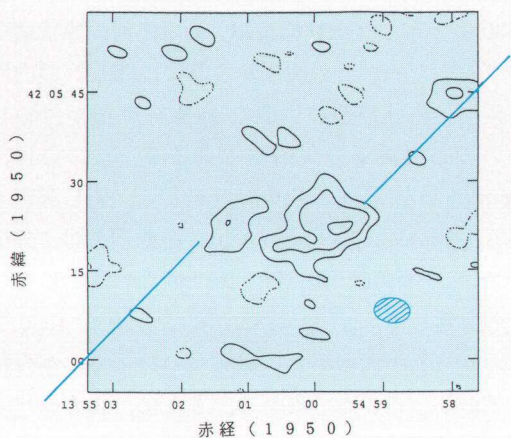


図7 野辺山ミリ波干渉計による棒渦巻銀河 NGC 5383 の CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線マップ。ダークレーンを太い実線で示した。銀河の距離は 31 Mpc で、1 秒角が 150 pc に相当。分解能 ($5''.9 \times 4''.3$) はハッチで示した。銀河回転の方向は時計回り。

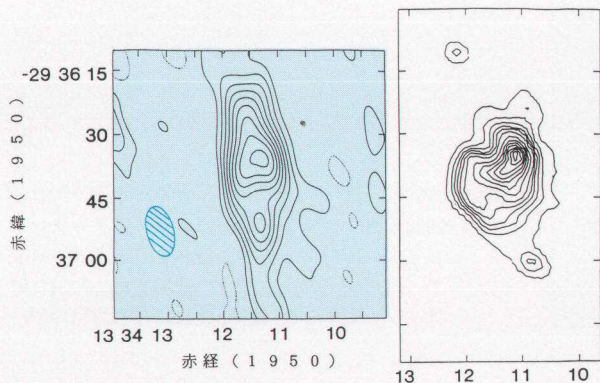


図8 左図は野辺山ミリ波干渉計による銀河 M83 の CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線マップ (文献14より)。外枠は、図2の内枠に相当する。銀河の距離は 3.7 Mpc で、1 秒角が 18 pc に相当。分解能 ($12''.2 \times 6''.2$) はハッチで示した。銀河回転の方向は時計回り。右図は VLA マップ (波長 6 cm, 文献15より、赤経軸は左図と共通)。

干渉計を用いて行った。図2に示したこの視野は、この銀河の棒状構造に付随したダークレーンの内端の部分が1分角の視野内にぎりぎり入って来るようなものである。この観測の結果、そのダークレーンの内端を結ぶように、分子ガスが南北に長く伸びて分布していることが見いだされた(図8)。以下、この構造を、Handa *et al.*⁶⁾が見いだした星のバーに付随している分子ガスバーと区別して、内側の分子ガスバーと呼ぶ。CO輝線のドップラーシフトから視線速度を求めてみると、その速度場は、内側の分子ガスバーに平行な非円回転運動を示している。電波連続波¹⁵⁾は、内側の分子ガスバーの中心付近に集中しており、その構造は、東西に2つのピークからなっていて、内側の分子ガスバーに垂直な方向に並んでいる。いまあげた特徴は、IC 342の分子ガスバーと共通点がある。それは、どちらも、バーに平行な非円回転運動を示す速度場を持ち、バーに垂直な構造をした星生成領域を持っている点である。

ホットスポット銀河 NGC 1530 では、銀河の棒状構造に付随したダークレーンが直線部の内端で内側に屈曲しており、その屈曲部に CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線が分布していて2本の稜線状構造を形成している(図9)。北側の稜線状構造は $V_{LSR}=2300-$

2410 kms^{-1} 、南側の稜線状構造は $V_{LSR}=2490-2570 \text{ kms}^{-1}$ と別々の視線速度を持っており、独立の構造であることが分かる。

これらの構造を、前節と同様に、ダークレーンには、CR (=Corotation resonance) と OILR (=outer inner Lindblad resonance) との間の銀河の棒状構造に平行な x_1 族の軌道が付随しているとして、棒状銀河での閉軌道によって説明してみよう。

まず、NGC 2782の南西側のピークから伸びた稜線状構造、M 83の内側の分子ガスバー、NGC 1530の2本の稜線状構造は、その銀河の棒状構造やダークレーンとの関係からして、OILRの内側の銀河の棒状構造に垂直な x_2 族の軌道が付随していると考えるのが適当であろう。この点は、Kenney *et al.*⁷⁾の‘CO twin peaks’と、同じ解釈である。しかし、‘CO twin peaks’の銀河では、分子ガスが x_2 族の軌道の遠心点にガスが集中していたのに対して、NGC 2782、M 83、NGC 1530では、もっと半径の小さい領域まで分子ガスが分布しており、この点で異なる。さらに、スターバースト銀河 NGC 3504では、分子ガスはさらに半径の小さな領域に集中しており、銀河の棒状構造に垂直な稜線状構造のような、 x_2 族の軌道を示唆す

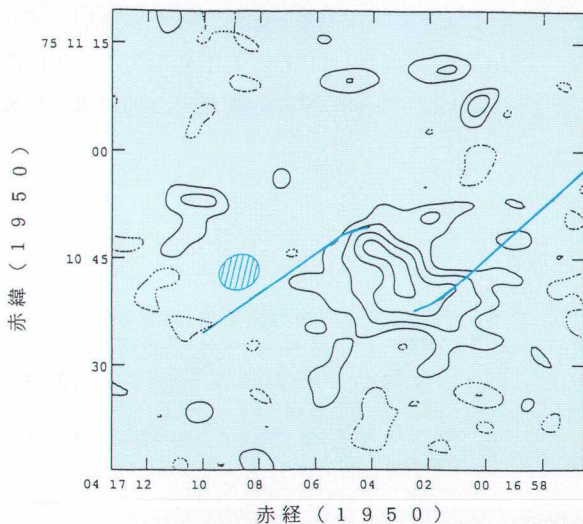


図9 野辺山ミリ波干渉計による棒渦巻銀河 NGC 1530の CO ($J=1\rightarrow 0$) 輝線マップ。ダークレーンを太い実線で示した。銀河の距離は35 Mpcで、1秒角が170pcに相当。分解能($5''.7\times 4''.8$)はハッチで示した。銀河回転の方向は時計回り。

る構造はない。そこで, Kenney *et al.*⁷⁾の‘CO twin peaks’にはないメカニズムを考える必要がある。

その一つとして可能性のあるのは, IILR (inner inner Lindblad resonance) の内側での銀河の棒状構造に平行な x_1 族の軌道の作用である。Athanasoula¹⁶⁾の数値実験によると, 銀河の棒状構造に平行に生ずる衝撃波構造 (あるいはダークレーン) は, OILR の外側から内側に向かって, 楕円状の軌道の長半径の向きが, x_1 族的なもの (棒状構造に平行) から x_2 族的なもの (棒状構造に垂直) なものへと, 連続的に変化することによって生ずる軌道の密度構造であるという。では, この考えを, IILR の付近に適用してみたらどうだろうか。IILR の外側から内側に向かって, 楕円状の軌道の長半径の向きが, x_2 族的なもの (棒状構造に垂直) から x_1 族的なもの (棒状構造に平行) ものへと連続的に変化することによって, 軌道の密度構造が生ずるということになり, その構造は, NGC 2782, NGC 1530 の稜線状構造や, M 83 の内側の分子ガスバーの構造になるであろう。

IILR は, 一對のダークレーンの内端より半径の小さい部分での分子ガスの構造を説明するだけでなく, スターバーストに関して重要な寄与をしている可能性がある。すなわち, NGC 2782 では, 電波源のピークで示された星生成領域は, 二つの CO ピークに一致していて, その方向は, 南西側のピークから北西に伸びた稜線状構造の方向と平行ではなく, 角度をなしている。また, NGC 3504 の分子ガスの構造は, 銀河の棒状構造に平行な方向に伸びている。さらに, M 83 は, その星生成率は典型的なスターバースト銀河ほどではないが, 銀河中心の周囲の星形成領域に限って言えば, [C II] ($158 \mu\text{m}$)/CO ($J=1\rightarrow 0$) 比が銀河系内の OB 型星形成領域での値に等しいこと¹⁷⁾, スターバーストウィンドを示す紫外域での吸収線¹⁸⁾, 強い紫外線連続光¹⁸⁾, X 線^{19), 20)}から, 爆発的星生成を起こしているといえる。電波連続波のマップから知られるその星形成領域の構造は, 内側の分子ガスバ

ーに垂直であった。

このような観測事実が, IILR 内でのスターバーストのトリガーを裏付けるものであるとしたら, その物理的メカニズムはなんであろうか。それは, まだ不明であるが, 典型的な回転曲線を考えて場合, IILR の内側は, 剛体回転の領域になる。すると, Kenney²¹⁾が述べたように, 潮汐力が分子雲をはぎ取る効果が小さくなり, 星生成が妨げられないという効果があるのかも知れない。

5. 終わりに

以上に述べたような銀河の中心の数キロパーセクの領域の星間物質の振舞いに関する研究は, まだ歴史の浅い分野である。その主な理由の一つは, こういった構造を分解して観測するためにはミリ波干渉計が不可欠であり, それによる系統的な観測が, つい最近まで不可能であったからである。

今回述べた観測結果から提出される課題は, IILR の周りでのガスの分布・運動の問題と, スターバーストのトリガーの問題である。

IILR のある棒状重力場の中でのガスの動力学のシミュレーション研究の数はあまり多くない。はたして, IILR が, 一對のダークレーンの内端より半径の小さいところにある稜線状構造や NGC 3504 のようなコンパクトの分子ガスの集中をつくり出すのか, 興味をもたれる。とくに, ‘CO twin peaks’を持つ銀河と, 一對のダークレーンの内端より半径の小さいところにガスの落ち込んだ銀河との違いの原因が, IILR の存否なのか, それとも, 構造の進化 (たとえば, twin peaks のところにあったガスが力学的エネルギーを失ってもっと半径の小さい領域に落ち込む) なのか, 決着をつける必要がある。とくに, 自己重力の効果^{22), 23)}が, 構造形成に本質的な役割を果たしているかは, 興味を引く問題であろう。

スターバーストのトリガーに関していえば, これまでは, シミュレーションの中で, 星生成は, 分子ガスと分子ガスの衝突によって起こるとい

仮定のもとに、行われていた。しかし、最近、銀河円盤²⁴⁾や銀河中心領域の周りの分子ガス円盤²¹⁾で、自己重力円盤のジーンズ不安定性による星生成によって星生成のトリガーを示唆する観測結果がでてきた。果してどちらが正しいのか。これらの星生成のモードが、COの分布と星生成領域の分布が異なったり(IC 342)、IILRにスターバーストが付随しているという観測結果をうまく説明するものであるかは、スターバーストのトリガーに関する問題を解明する上で、手がかりとなるであろう。

レゾナンスは、銀河のパターン速度と、回転曲線から決まる。この二つのうち、回転曲線は、銀河の質量分布を反映したものであるから、銀河の質量分布(とくに、中心への質量の集中度)と、分子ガスの分布やスターバースト現象との間に、レゾナンスを介して力学的な関係があるかも知れない。また、パターン速度がどのようなメカニズムで決まるかという問題は、まだ手つかずの状態であり、銀河の構造を決める重要な要因であるから、解明が待たれる。

参 考 文 献

- 1) Rickard, L. J. *et al.* 1975, *Astrophys. J. Letters*, **199**, L75.
- 2) Young, J. S. 1990, *The Interstellar Medium in Galaxies*, eds. Thronson, H. A. Jr. and Shull, M., Kluwer Academic Publishers (Dordrecht), p. 67.
- 3) Lo, K. Y. *et al.* 1984, *Astrophys. J. Letters*, **282**, L59.
- 4) Ishizuki, S. *et al.* 1990, *Nature*, **344**, 244.
- 5) Turner, J. L. and Ho, P. T. P. 1983, *Astrophys. J. Letters*, **268**, L79.
- 6) Handa, T. *et al.* 1990, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **42**, 1.
- 7) Kenney, J. D. P., *et al.* 1992, *Astrophys. J. Letters*, **395**, L79.
- 8) Sérsic, J. L. 1973, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **85**, 103.
- 9) Combes, F. 1985, *Galactic and Extragalactic Star Formation*, eds. Pudritz, R. E. and Fich, M. (Kluwer: Dordrecht) p. 475.
- 10) Kennicutt, R. C., Jr., Keel, W. C., and Blaha, C. A. 1989, *Astron. J.*, **97**, 1022.
- 11) Wilson, A. S., and Willis, A. G. 1980, *Astrophys. J.*, **240**, 429.
- 12) Condon, J. J. *et al.* 1990, *Astrophys. J. Suppl.*, **73**, 359.
- 13) Balzano V. A. 1983, *Astrophys. J.*, **268**, 602.
- 14) Handa, T., Ishizuki, S., and Kawabe, R. 1993 in *IAU Colloquium No. 140, Astronomy with Millimeter and Submillimeter Wave Interferometry*.
- 15) Cowan, J. J. & Branch, D. 1985, *Astrophys. J.*, **293**, 400.
- 16) Athanassoula, E. 1992b, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **259**, 345.
- 17) Stacey, G. J. *et al.* 1991, *Astrophys. J.*, **373**, 444.
- 18) Bohlin, R. C. *et al.* 1983, *Astrophys. J. Letters*, **274**, L53.
- 19) Trinchieri, G., Fabbiano, G., and Paulumbo, G. G. C. 1985, *Astrophys. J.*, **290**, 96.
- 20) Ohashi, T. *et al.* 1990, *Astrophys. J.*, **365**, 180.
- 21) Kenney, J. D. P. 1993 in *IAU Colloquium No. 140, Astronomy with Millimeter and Submillimeter Wave Interferometry*.
- 22) Fukunaga, M. and Tosa, M. 1991, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **43**, 469.
- 23) Wada, K., and Habe, A. 1992, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **258**, 82.
- 24) Kennicutt, R. C., Jr. 1989, *Astrophys. J.*, **344**, 685.