

ミリ波干渉計で見た渦状銀河中心

坂本 和

〈国立天文台野辺山 長野県南佐久郡南牧村〉

〈Present address: Caltech, Radio Astronomy, 105-24, Pasadena, CA 91125, USA〉

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

国立天文台の野辺山ミリ波干渉計を使って行われてきた、近傍渦状銀河中心領域の一酸化炭素分子ガス観測から、最近の成果を紹介します。

1. はじめに

銀河の分子ガスを観測することの大きな理由の一つは、分子ガスが銀河の中で生まれる星の直接の材料であることにあります。銀河の中でどこにどれだけ星が生まれるかを何が決定するか、という問題は銀河の進化を考える上でも欠かせない重要なポイントですが、分子ガスの観測はこの設問への答えを秘めていると思われます。実際、星が分子ガスから生まれることを考えれば、上の問いに対する解答の出発点は、銀河の中で分子ガスがどこにどれだけ存在するかを調べることにあるのは明らかです。分子ガスの銀河内の分布は、銀河のポテンシャル中を運動するガスのダイナミクスによって、大筋が決まります。系外銀河の観測は、銀河系の観測では得ることが困難な、銀河を「上から」見た姿を通して詳細なガスの分布とダイナミクスを教えてくださいただけでなく、複数の銀河を観測することによって、現象の一般性を統計的に議論することも可能にします。

このように考えると、ミリ波分子輝線で系外銀河を観測することは、大変重要だと思えるわけですが、そこで現実的に最も問題になるのは、分解能と感度です。電波は波長が長い分だけ回折限界で決まる分解能が低く、世界最大のミリ波望遠鏡である野辺山 45 m 鏡を使っても分解能は 15 秒角程度にしかなりません。これでは、系外銀河内部の詳細な構造を調べるにはやや不足です。そこで、

ミリ波干渉計を使って、開口合成によって高い分解能を得ることが必要になります。ところが、ミリ波分子輝線で最も明るい CO (一酸化炭素) 輝線を使っても、現在のミリ波干渉計 (以下「干渉計」と略します) で数秒角の分解能のデータが容易に得られるのは、ふつう銀河内で最も輝線強度の強い銀河中心領域に限られてしまいます。けれども、幸運なことに、銀河中心領域には、しばしば、スターバースト (爆発的星形成) と呼ばれる活発な星形成現象が観測されます。さらに、後で説明する Lindblad 共鳴などのガスダイナミクス上で興味深い領域も銀河中心付近にあります。したがって、銀河におけるガスダイナミクスと星形成の関係を調べるためには、近傍銀河中心領域の干渉計による観測は、良い出発点と言えるでしょう。

2. サーベイ観測

このような近傍系外銀河中心領域の分子ガス高分解能観測は、80 年代に相次いで稼働しだした四台のミリ波干渉計 (Caltech, Berkeley-Illinois-Maryland, 野辺山, IRAM) で可能となりました。ところで干渉計では、感度の制約のため、光で見える銀河ならどれでも観測できるというわけではありません。最も確実な観測対象の選び方は、口径 10 m クラスの単一鏡による低分解能 (約 1 分角) の観測もとに、輝線強度の強い天体を選ぶというものです。ところが、ここにも問題があります。単一鏡によるまとまった銀河サーベイが無かったのです。このた



め90年代前半までは、近傍系外銀河の干渉計観測を系統的に行なうことは困難でした。また、世界中の干渉計観測者の興味の対象が、当時発見されたばかりの遠赤外で非常に明るいIRAS銀河や、衝突合体銀河などの特異な銀河に集中したこともあり、近傍銀河中心を分子ガス輝線で見た「普通の」姿は、これまで明らかになっているとは言えない状況でした。

こういった状況を打開すべく、数年前から、近傍の「普通の」銀河、つまり特異性をもとに選んだのではない銀河の観測が、野辺山ミリ波干渉計を使って集中的に進められてきました。都合の良いことに、一昨年、単一鏡によるこれまでで最も大規模な300個の系外銀河のCOサーベイ観測結果が、FCRAO（五大学連合電波天文台）から発表されました¹⁾。このため、FCRAOサーベイの結果をもとに、CO輝線が観測可能なほど明るいという以外にはバイアスをかけずにサンプルを構成することも可能になりました。

これまでに進めてきたサーベイの結果をまとめたのが図1です。図の銀河は全て次の条件を満たしています。

- (1) FCRAO サーベイで、10 K(Ta*) km/s を超える CO 輝線の積分強度が観測されており、
 - (2) 赤緯が+5度以上で、
 - (3) 傾きが70度以下であり、
 - (4) 銀河衝突等でひどく乱されていない。
- (1)と(2)の条件は野辺山ミリ波干渉計で容易

銀河の中心でのCO(1-0)

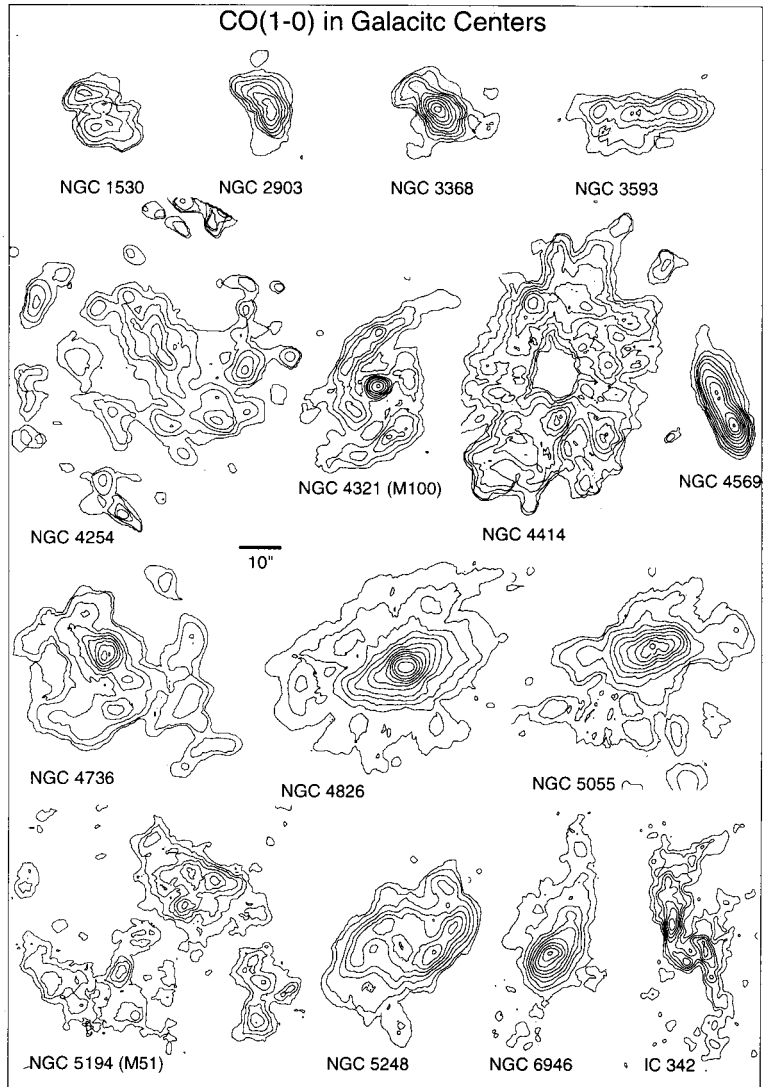


図1 近傍渦状銀河の中心領域で得られたCO(1-0)輝線の積分強度図。全て国立天文台野辺山ミリ波干渉計を用いた観測。NGC 1530, 2903は石附澄夫氏の観測、NGC 4321はSakamoto et al. 1995²⁾、NGC 4414はSakamoto 1996³⁾、NGC 5194はKohno et al. 1996⁴⁾、NGC 6946とIC342はIshizuki et al. 1990a⁵⁾、1990b⁶⁾からそれぞれ引用。

に高分解能観測ができることを意味し、(3)と(4)は通常の状態の銀河のガスダイナミクスを「上から」観測できることを意味します。(1)-(4)の条件を満たす銀河は全て渦状銀河で20個ほどありますが、そのうち15個が載せてあります。あと数個の銀河が未観測で残っているとはいえ、図1は「普通の」渦状銀河中心をCO輝線で見た姿を現在のところ最もよく表したものであるといえるでしょう。

観測された銀河は、距離約20 Mpc以下(おとめ座銀河団まで)で、遠赤外光度が 10^{10} 太陽光度程度の、我々の銀河と同程度のスケールという

意味でも普通の渦状銀河です*。しかしながら、この観測結果から、分子ガス輝線で見た銀河中心の姿が、驚くほど多様であることが見てとれます。これらの姿は、どのようなガスダイナミクスを表し、星形成とどのように関連しているのでしょうか。次に二つの例を挙げて、その点を詳しく見てみます。

3. バーのある銀河中心

ガスダイナミクスのシミュレーションから、銀

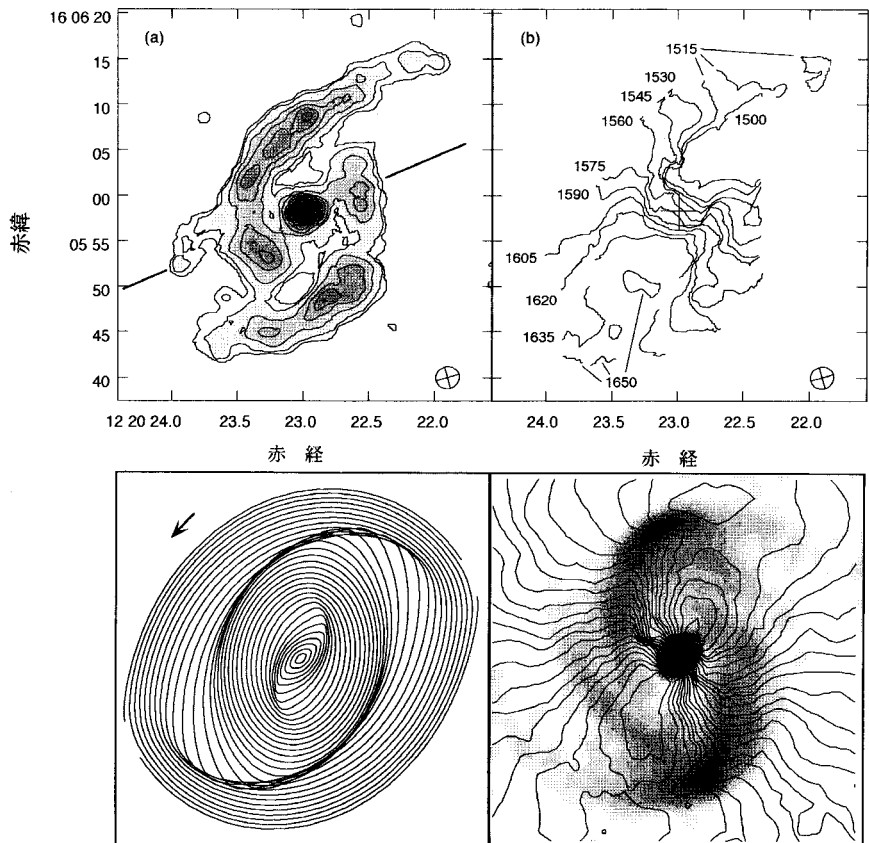


図2 渦状銀河 NGC 4321 (M 100)中心部の観測結果とモデル。(a) CO(1-0)輝線の積分強度。(b) CO輝線から求めた視線速度場。(c) バーポテンシャル中のガス軌道のモデル。(d) 数値シミュレーションから得られたガスの分布(グレースケール)と速度場(コントア)。比較のため、バーの向き(図aに太線で示した)と銀河面の傾きはモデルを観測と合わせてある。

河が星のバー(2回対称の棒状分布)を持つ場合、そのポテンシャル中を運動するガスは特徴的なダイナミクスを示すことが知られています。観測された銀河の中で、最も良くその特徴を示しているのは弱いバーを持つ NGC 4321 (M100)でしょう。図2 a, bに示したように、NGC 4321では、銀河中心のすぐ近くから二本の分子ガスアームが伸び*、アームに対応する位置で速度場が円運動から顕著にずれています²⁾。

* アマチュア観測者になじみの深い、メシエカタログ銀河を8つ含んでいます。

* 一昨年、光学系補修後のハッブル宇宙望遠鏡がとらえた最初のイメージがこのM100の中心です。COで光って見えるガスのスパイラルが暗い影(ダストレーン)として見えています。



レゾナンス付近でのガス軌道

このガス構造の成因を Inner Lindblad Resonance (ILR) 付近でのガス軌道の性質によるものとして説明したのが、図 2 (c)です。ILR は粒子軌道自身の固有振動とバーによる摂動との共鳴ですが、共鳴現象の一般的性質として共鳴の前後 (ILR 半径の内外) で振動の位相が π だけ変化します。このことは、バーポテンシャル中の長円軌道の軸の向きが、ILR 半径の内と外で、バーに垂直から平行へと変化することを意味します。さらに、粒子がガス雲であるという性質を近似的に粘性で取り入れると、軸の向きの変化は共鳴半径付近で連続的に起こることになり、軌道が包絡線のように密集した領域が生じます。北海道大学の和田桂一さんの、この damped orbit モデル⁷⁾に基づいて解析的に計算したガス軌道の図(c)は、軌道の密な領域が観測されたガスの 2 本腕に良く対応しています。

さらに、同様の条件でガスの自己重力を入れた数値シミュレーションを比較したのが図(d)です。自己重力不安定を起こしたガスが急速に銀河中心に落ち込むため、観測と同様のガスのピークが銀河中心に生じています (これについては和田さんの書かれた解説⁸⁾もご覧ください)。また、ILR アーム付近の速度場に注目すると、ここでも観測と一致する局所的な速度場の歪みが見られます。全体として、観測されたガス分布と速度場は、軌道の密集で生じた ILR スパイラル+ガスの自己重力不安定で生じた銀河中心のコアということできそうです。

星形成についてはどうでしょうか。NGC 4321 の中心付近には、ホットスポットと呼ばれる、非常に明るい HII 領域が点在しています。これは一種の局所的なスターバーストですが、その分布は CO で見えるガスの分布とほぼ対応しており、ガスの分布が星形成の分布を決めていると言えそうです。

NGC 4321 と同様な、ILR に対応すると思われるガスの構造は、スケールや形の詳細は異なりますが、図 1 の他の銀河 (NGC 1530, 4254, IC 342 など) で

も見えています。これらの銀河のガスダイナミクスの相違点を決めている要因を探ることは、今後の重要な展開です。

また、NGC 4321 に関して興味深い未解決の問題として、この銀河が入れ子状の二つのバーを持つように見えるということがあります。このような構造は、他にもいくつかの銀河で観測されていますが、複数のバーを持つ銀河のガスダイナミクスも興味深い研究テーマです。さらに、ガス量の推定はミリ波分子輝線の観測で常に問題になる箇所ですが、自己重力がガスの分布を決める際に重要な役割を果たす点を利用して、自己重力不安定の臨界質量をもとに、ガス分布から力学的にガス質量が推定できる可能性があります。この点に関する研究は、現在進んでいるところです。

4. バーのない銀河中心

銀河がバーを持たない場合のガスダイナミクスはどうなるのでしょうか。観測されたサンプルの中で、バーや顕著なスパイラルアームといった、ガスの運動を乱す要素が最も少ない銀河の例が NGC 4414 です。表紙の図で分かるように、干渉計で観測されたガスの分布は軸対称に近く、速度場も円運動的です⁹⁾。NGC 4414 はこれまで CO の高分解能観測が行われた中で、力学的な乱れが最も少ない、静かなガスディスクを持っている銀河といえます。

GMA の形成と破壊

しかし、詳しく見るとガスディスクは完全に一様ではなく、その中にいくつかのガスの塊を持っています。このような大きさ数百パーセク、 10^7 太陽質量程度の分子ガス塊は、これまで M 51 など数個の銀河のスパイラルアーム上で見いだされ、GMA (Giant Molecular Association) と呼ばれています。アーム上でしか見つかっていなかったため、その形成にはスパイラルアームの存在が本質的な役割を果たすと考えられてきました。しかし、NGC 4414 ではアーム上ではなくディスク中に初めて GMA が見つかりました。この GMA はどのようにしてできたのでし

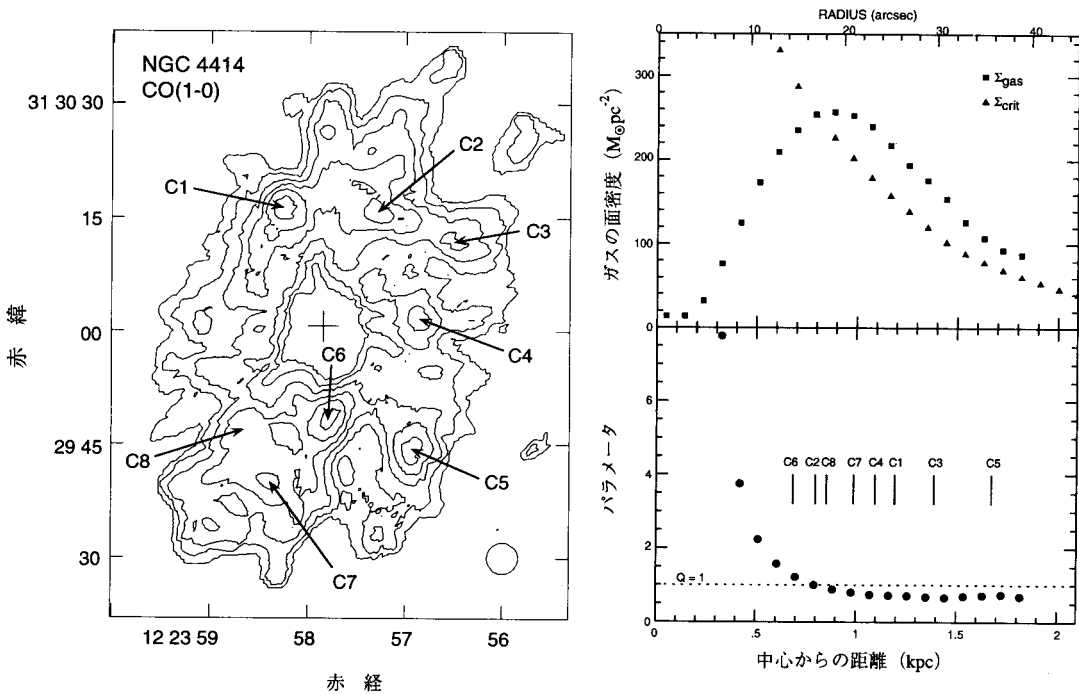


図3 (a) 渦状銀河 NGC 4414 の中心部の CO(1-0)積分強度。矢印はガスディスク中に同定された GMA (Giant Molecular Association) を示す。(b) ガスディスクの自己重力安定性の評価。上段は観測されたガスの面密度 (■) と自己重力不安定の臨界面密度 (▲) を示す。下段はガスディスクの自己重力安定性パラメータ (Q 値 = 臨界面密度 / ガス面密度) の動径分布。それぞれの GMA の位置も示されている。GMA の存在する領域でディスクがわずかに不安定 ($Q \leq 1$) になっていることが分かる。

ようか。

このことを調べたのが、図3です。回転ガスディスクの自己重力安定性は、ガスの面密度と速度分散、ディスクの回転曲線から、Toomre の Q パラメータを算出することによって判定できます。必要な3つの量は全て干渉計の観測から推定できましたから、 Q パラメータの動径分布を計算することができます。図3に示したように、ちょうど GMA の点存在する領域で、ディスクがわずかに不安定になっています。不安定になったディスクは、分裂していくつかのガス塊が生じるはずですが、最も不安定の成長の速いモードの質量を計算してみると、実際に観測された GMA の質量と一致しました。したがって、NGC 4414 のディスク中の GMA は、スパイラルアームの作用によらずに、銀河ガスディスク

の自己重力不安定で生じたものと考えられます。

では、なぜ、NGC 4414 のディスクは完全に分裂してしまわずに、いまだにディスク状の形態を保っていられるのでしょうか。何かいったん形成された GMA を破壊し、ガスディスクを安定化するようなメカニズムがあるはずですが、 $H\alpha$ の撮像と比較すると、GMA には $H\alpha$ のスポットが対応していることが分かります。つまり GMA 内では大質量星形成が起こっているのです。 $H\alpha$ 光度から大質量星形成率を推定し、電離、星風、超新星爆発などで周囲の星間物質に供給されるエネルギーを見積もると、 10^7 年程度で GMA を壊すだけの量があることが分かりました。さらに、個々の GMA 内部の速度分散を測定してみると、実際に2つの



GMA が、自己重力で束縛できないほど速度分散が大きい、すなわち現在散逸しつつあることが見つけられました。GMA の破壊の現場を捉えた観測はこれが初めてですが、上の考察から、破壊の原因は GMA 内部での星形成だと思われます。

自律的なガスディスク

いままでの話をまとめると次のようになります。「NGC 4414 の擾乱の小さなガスディスク中では、自己重力不安定によって GMA が生じ、GMA 内部では大質量星を含む星形成が起こる。その結果、GMA 内部のガスの速度分散が増大し、GMA は散逸してしまう。ガスの速度分散上昇と、星形成によるガスの消費によって、ディスクは自己重力的に安定な方向へと引き戻される。」安定になったガスディスク中では GMA が生まれず、星形成も活発化しないため、時間と共に再び速度分散が低下し、ガスは再び不安定になるでしょう。とすると、このようなフィードバックによって、ガスディスクは安定と不安定の境界付近に保たれるはずですが。実際に NGC 4414 では、中心のガスの穴の領域を除いて、Q パラメータが臨界状態 ($Q = 1$) 付近の一定値に保たれています。(穴の領域では、何らかの原因でフィードバックが効かず過去に星形成が暴走したのかもしれませんが。)

自己重力不安定と星形成とのフィードバックによって銀河のガスディスクの状態と星形成とが自律的にコントロールされるという考え方は、例えば Kennicutt の単一鏡のデータを用いた解析⁹⁾などで、何度か示唆されてきました。今回、干渉計の高分解能データを使うことによって、GMA の形成と散逸というフィードバックの内容に一步迫ることができました。このフィードバック仮説が正しいとすれば、銀河におけるグローバルな星形成のコントロール要因をガスダイナミクスの観点から理解できるという、大変興味深い結果になると考えられます。

NGC 4414 ほどではありませんが、顕著なバーのない比較的静かなガスディスクを持った銀河は他

にもあります。GMA らしきガス塊はそれらの銀河でも見えていますので、Q パラメータを用いた同様の解析を進めているところです。また、もちろん、バーやスパイラルアームのある銀河、例えば NGC 4254 などにも明らかに GMA が見えています。多数の銀河での GMA の形成、性質、星形成史の比較などもできたら面白いでしょう。

5. そのほかにも……

干渉計による系外銀河中心の CO サーベイ観測から分かってきたことは、これだけではありません。たとえば図 1 では、半数の銀河で CO の積分強度が銀河中心にピークを持っています。この割合は、大半の研究者の予想よりも高かったはずですが。しかも、これも大方の予想に反して、CO が銀河中心数百パーセクにピークを持つかどうかは、可視光で見た銀河の形態分類でのバーの有無とは相関していません。このような傾向は、多数の銀河の観測が揃って初めて見えてきたものです。

この CO ガスの中心集中に関連して興味深いことの一つに、活動銀河中心核 (AGN) があります。AGN は銀河中心に落ち込んだ星間ガスのブラックホールへの降着がエネルギー源であるとされていますが、ガスの中心集中が多数見られるにも関わらず、AGN をもつ渦状銀河の典型であるセイファート銀河は、図 1 の銀河中には一つもありません。低い光度の AGN を持つとされる銀河はいくつかあるのですが、必ずしも銀河中心に CO のピークを伴っているものばかりではありません。現在の分解能で観測可能な 100 パーセクスケールまでのガスダイナミクスは、AGN の発現に関係しないのでしょうか。より多数のサンプルと、高感度高分解能の観測が必要です。

6. 今後の展望

最後に、近傍銀河観測の残された課題と今後の展望について触れます。今回紹介したサーベイは、CO の明るい銀河の中心数キロパーセクの領域を、



数秒角の分解能で20個足らず観測するものでした。残された課題としては、当然の事ながら、COの暗い銀河まで観測してサンプル数を大幅に増やしたり、銀河の外側に観測を広げたり、空間・速度分解能を大幅に向上することが考えられます。これによって、銀河の分子ガスのより一般的で詳細な描像を得て、統計的な議論を行うことが可能になるでしょう。また、銀河の星形成をコントロールする要因として、ガスダイナミクスの他にはガスの物理状態が有力な候補として考えられます。そこで、COの輝線一本だけでは分からない星間ガスの物理量を知るために、¹²CO以外の暗い輝線を観測したり、観測可能な波長帯を広げて複数の遷移を観測することも必要です。現在のミリ波干渉計の性能は、これらの課題を大規模に展開するには少々力不足の感は否めません。それでも、広視野、高感度、高分解能、広帯域、多輝線といったそれぞれの方向に着実な努力が続けられています。

銀河は天文観測の行われるほぼ全ての波長で見えますから、ミリ波以外の観測との比較も大切です。星形成とガスダイナミクスに限って言えば、銀河内での星形成率の分布と、重力ポテンシャルの正確な形状を知ることが、ガスの観測と組み合わせるために必要です。これには可視・赤外域での観測が有効です。今回は紹介できませんでしたが、COで観測された銀河の可視、赤外での観測も、各波長の研究者の協力を得て進められてきました。

現在、国立天文台では、野辺山観測所を中心として、超広帯域相関器の開発や野辺山45m-10m結合干渉計化計画などの、現在の野辺山ミリ波干渉計の能力を大幅に向上させる計画が進行中です。さらに、LMSA(大型ミリ波サブミリ波干渉計)という観測性能の飛躍的に向上する次世代干渉計の

計画も進められています^{10), 11)}。これら電波の計画に加えて、すばる望遠鏡、IRIS衛星などの揃う21世紀はじめに、我々の銀河の理解がどのように展開していくか大いに楽しみです。

図1のためにデータを提供して下さった石附澄夫氏、河野孝太郎氏、および野辺山観測所でミリ波干渉計を支えているメンバーに感謝します。M100の結果は奥村幸子、峰崎岳夫、小林行泰、和田桂一の各氏との共同研究によるものです。

参考文献

- 1) Young, J. et al. 1995, ApJS, 98, 219
- 2) Sakamoto, K. et al. 1995, AJ, 110, 2075
- 3) Sakamoto, K. 1996, ApJ, 471, 173
- 4) Kohno, K. et al. 1996, ApJ, 461, L29
- 5) Ishizuki, S. et al. 1990a, ApJ, 355, 436
- 6) Ishizuki, S. et al. 1990b, Nature, 344, 224
- 7) Wada, K. 1994, PASJ, 46, 165
- 8) 和田桂一 1993, 天文月報, 86, 469
- 9) Kennicutt, R. C. 1989, ApJ, 344, 685
- 10) 中井直正, 石黒正人 1993, 天文月報, 86, 517
- 11) 川辺良平 1994, 天文月報, 87, 488

Molecular Gas in Galactic Centers observed with the Nobeyama Millimeter Array

Kazushi SAKAMOTO

NRO/Caltech

Abstract: Nobeyama Millimeter Array has been used to observe molecular gas in the central regions of a sample of nearby spiral galaxies. The sample consists of some 20 northern, CO bright, face-on galaxies free from strong external perturbations. After introducing an overview of the survey, we discuss gas dynamics in galactic centers and its relation to star formation, taking NGC 4321(M 100) and NGC 4414 as an example for barred and non-barred galaxies, respectively. The article is concluded with future prospects of molecular gas observations toward nearby galaxies.