

銀河中心領域の高密度分子ガスと星形成

河野 孝太郎

〈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: kotaro@nro.nao.ac.jp

高密度分子ガスは、星形成の直接的母体であり、系内天体・系外天体問わず、星形成を理解する上で不可欠な構成要素です。高密度分子ガスをトレースする分子輝線は、一般に大変微弱であり、観測は容易ではありません。しかし、近年、ミリ波観測装置の性能向上に伴い、系外銀河においても、高密度分子ガスの分布を非常に高い空間分解能でイメージングすることが可能になってきました。その結果、高密度分子ガス分布の多様性や、星形成との関連が明らかになってきました。

1. はじめに

銀河における星形成は、激しく活動的なものから非常に穏やかなものまで、幅広いバリエーションが観測されています。この違いは、いったい、何がコントロールしているのでしょうか？この問いかけが、本稿のスタートラインです。改めて繰り返すまでもなく、星形成は、銀河における構造形成や物質循環と直接結びつく、極めて基本的かつ重要なプロセスです。まず現在の宇宙において、いろいろな銀河における星形成の物理を理解することは、現在から過去へ遡って銀河形成史をひもとく上でも不可欠のステップであろうと思われれます。

1.1 星形成効率の違い

さて、よく知られているように、星は、水素分子ガスの塊、「分子雲」から作られます。したがって、「星形成の活発さの違い」を説明する最も単純なシナリオとしてまず考えられるのは、「星形成の材料＝分子ガスの量が、銀河により様々に異なっている」というものです。これは、要するに「分子ガスの量が多いほど、作られる星の量も多い」という単純な仮定（シュミット則）が土台になっています。実際、いろいろな銀河において、一酸化炭素分子（CO）輝線によりトレースされる分子ガス

量を求め、これを遠赤外線線でトレースされる星形成率（単位時間あたりに生まれる星の量、どれだけ活発に星が形成されているかを表す指標となる。後に出てくる星形成率とは異なることに注意）と比較すると、両者はおおむね相関することが確かめられています。ただし、このような相関は、主として空間分解能の低い、小口径の電波望遠鏡や赤外線天文衛星 IRAS により得られたデータに基づいているという点に注意しなければなりません。つまり、局所的に星形成が活発な領域、あるいはその逆に不活発な領域があっても、その周囲と平均化されて見えなくなる可能性があります。そして事実、いろいろな銀河における CO 分子輝線を高い空間分解能で観測してみると、単純なシュミット則的描像では説明できないケースも報告されるようになってきました。

図1は、そういった例の1つです。図1に登場する銀河のうちのいくつかは、その中心数100パーセク領域に同じような量の分子ガスを持っているにもかかわらず、そこでの星形成率は2桁にわたり散らばっています。つまり、これらの銀河では、「分子ガスの量が異なるために形成される星の量も異なっている」のではなくて、「単位質量あたりのガスから生まれる星の量」いわゆる「星形成効率」が異なっている、ということになります。

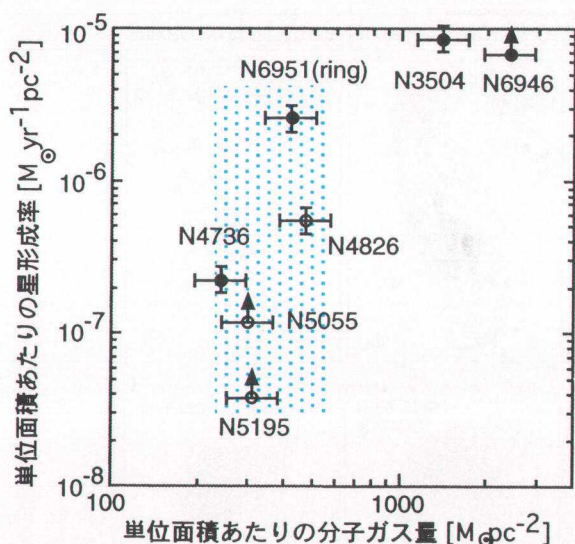


図1 CO(1-0) 輝線強度から求めた、単位面積あたりの水素分子ガス量と、 $H\alpha$ 輝線強度から求めた、単位面積あたりの星形成率の比較²⁾。COは野辺山ミリ波干渉計(○)や45 m鏡(●)での観測。NGC 4736, NGC 4826, NGC 5055, NGC 5195, NGC 6951という5天体の中心付近における分子ガス面密度は、ファクター2程度の範囲に入っています。にもかかわらず、それらの星形成率をみると、およそ2桁にわたり散らばっていることがわかります。

このような「星形成効率の違い」は、1つの銀河の中でもみることができます。たとえば、多くの銀河でみられる非軸対称ポテンシャル(バー構造)の中では、しばしば多量の分子ガスがバー構造のへり(上流側)に沿ってリッジ状に集中しています。ところが、そのようなバー構造中の分子ガス・リッジには、顕著な大質量星形成領域が付随していない(すなわち星形成効率が低い)という状況が往々にして見られます³⁾。このような「星形成効率の、銀河ごとの違い・場所ごとの違い」とは、いったい何に起因するものなのでしょう。

1.2 「量より質」!?

同じ「量」の分子ガスでも、星形成効率が違うということは、何らかの「質的な差異」があることを意味します。その候補として、私たち

は「分子ガスの密度」、中でも個数密度が 10^4 cm^{-3} を超えるような「高密度分子ガス」に着目しています。というのも、天の川銀河におけるさまざまな観測の結果から、星は分子雲の中でも特に密度の高い「分子雲コア」と呼ばれる領域で生まれている、ということが明らかになってきているからです。この観点に基づき、私たちは、野辺山ミリ波干渉計や野辺山45 m鏡を用い、いろいろな銀河において、高密度分子ガスのみを選択的にトレースする分子輝線、具体的には、シアン化水素分子(HCN)輝線の観測を行っています。よく知られているように、水素分子そのものは電気双極子モーメントを持たず、冷たい分子雲中では輝線を放射しません。そこで、水素分子と衝突して励起される他の分子、たとえばCO分子の回転遷移輝線などをトレーサーとして、間接的に水素分子の量を調べることになります。CO(1-0)輝線は、個数密度が数 100 cm^{-3} という低密度分子ガス雲中でも容易に励起されるため、低密度ガスから高密度ガスまで含めた「全ての分子ガス」の量をトレースすると考えられています。一方、HCN分子は、CO分子と比較して双極子モーメントが大きく、HCN(1-0)輝線の励起に必要な臨界個数密度は、CO(1-0)輝線の臨界個数密度より(光学的厚みによる効果を考慮してもなお)100倍以上高くなります。したがって、HCN(1-0)輝線とCO(1-0)輝線の強度比をとることにより、「分子ガス全体の中に占める、高密度分子ガスの割合」という、示強性の情報を得ることができます。HCN分子の、水素分子に対する存在比率は、銀河中心領域/大質量星形成領域/暗黒星雲いずれにおいても顕著な違いがない、という点も、他の高密度分子ガストレーサー(HCO⁺輝線、CS輝線等)にはない利点です。

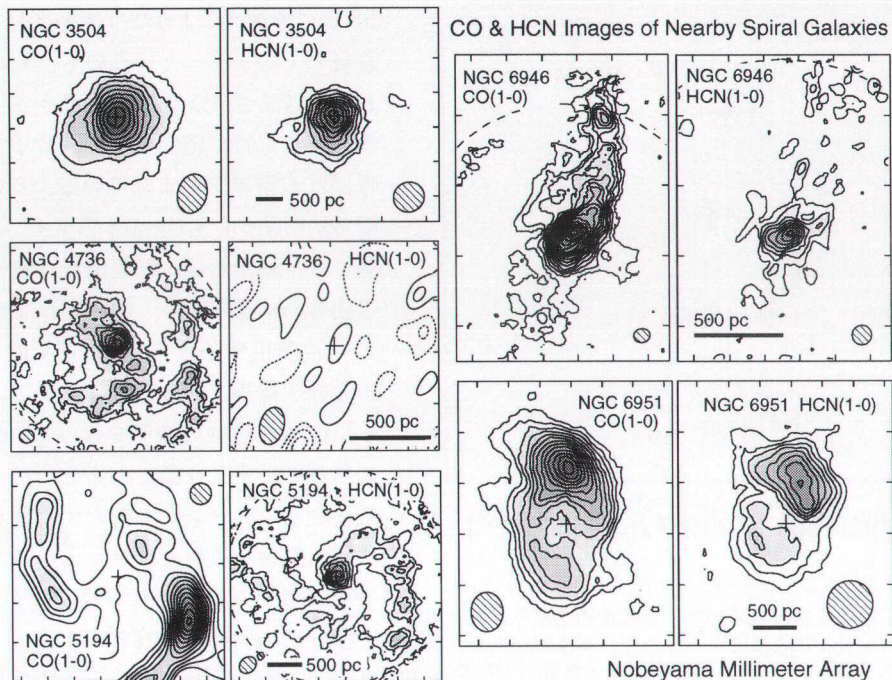
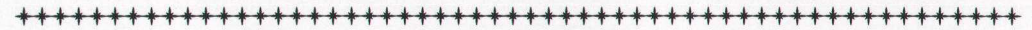


図2 CO(1-0)輝線およびHCN(1-0)輝線でみた、いろいろな銀河の中心領域^{2), 4), 5), 6), 7), 8), 9)}。銀河中心の位置を+で、また、それぞれの観測の合成ビームを楕円で示してあります。破線で描かれた円はその観測の視野。HCN輝線で描き出される高密度分子ガスの分布は、CO輝線で眺めてきた分子ガスの分布とはまた違った多様性を見せています。

2. 銀河中心領域における 高密度分子ガス分布

野辺山ミリ波干渉計により得られた、いろいろな銀河におけるHCN輝線の分布を、CO輝線の分布と共に図2に示します。まず第一に、高密度分子ガスの分布は、これまで私達がCO輝線で眺めてきた分子ガスの分布とはまた違ったバラエティを示していることに驚かされます。CO輝線とHCN輝線の分布は、比較的似ているものもあれば、明らかに異なった形態を示すものもあります。中でもNGC 4736は極端です。この銀河では、CO輝線は中心集中しているのに、HCN輝線でみると何も見えません。十分な積分時間をかけて行った「深い」観測であるにもかかわらず、です。これは何を意味しているのでしょうか。

2.1 HCN輝線と星形成領域の空間的対応

まずは、高密度分子ガス分布と、星形成領域との空間的対応について見てみましょう。NGC 6951は、直径およそ1キロパーセクほどの、リング状に広がったスターバースト（爆発的星形成）領域を持ち、そのような対応関係が非常にくっきりと捕らえられていました。図3(a)および(b)を比較すると、HCN輝線のピークは、CO輝線のそれと比較して、銀河回転の下流側へシフトしており、しかもそれがH α 輝線でトレースされる星形成領域とよく対応していることが分かります。HCN/CO輝線強度比の空間分布、図3(c)を見ると、100パーセク程度の空間スケールで、輝線強度比すなわち「分子ガス中に含まれる高密度ガスの割合」が変化していることがわかります。そして、強度比

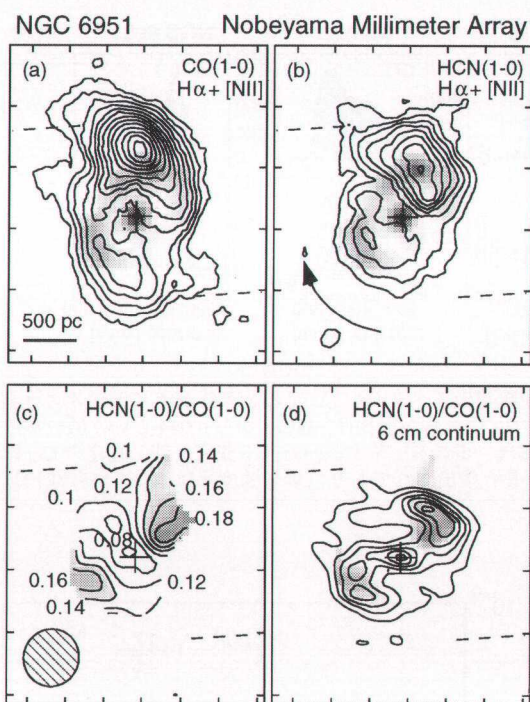


図3 直径およそ1キロパーセクに広がった、リング状のスターバースト領域を持つ渦状銀河、NGC 6951の中心部における、CO輝線、HCN輝線、HCN/CO輝線強度比と星形成トレーサー（ $H\alpha$ および波長6cm連続波）の比較⁸⁾。HCN輝線分布は、CO輝線よりも星形成領域によく対応していることがわかります。なお、中心(+印)はAGNであり、そこでの $H\alpha$ や6cm連続波は星形成起源ではありません。

が上昇しているところは、波長6cmの連続波（大質量星形成領域をトレース）とまさに一致しており（図3(d)）、「星形成の直接的母体である高密度分子ガスの割合が高くなっている領域で爆発的星形成が起きている」ことがわかります。このような高密度分子ガスと星形成領域の空間的一致は、スターバースト銀河NGC 3504やNGC 6946、また、NGC 5194の渦状腕領域においても確認することができました。

一方、「CO輝線でみると、これらスターバースト銀河同様、多量の分子ガスが中心領域へ集められているように見えるものの、HCN輝線はほとんど見えない銀河」NGC 4736はどうでしょうか。こ

の天体の可視光域でのスペクトルを調べ、星形成の履歴を探ってみると、その中心数100パーセク以内には「過去に激しいスターバーストを起こしていたが、現在は星形成がほとんど停止してしまっている領域（ポスト・スターバースト領域）」の存在が確認されます¹⁰⁾。つまり、今度は「高密度分子ガスが欠乏している領域と星形成が不活発な領域との空間的対応」です。NGC 4736の中心にたまっていた分子ガスは、量こそスターバースト銀河とあまり差がないものの、その実体は星を生み出せない「低密度分子ガス」ばかりであり、肝心の(?)「高密度分子ガス」がスッカランだった、というわけです。

2.2 HCN/CO輝線強度比と星形成効率

もう少し定量的に見てみましょう。すなわち、「分子ガスの中に、どれだけ高密度分子ガスが含まれているか」を表す指標として、HCN輝線とCO輝線の強度比を調べてみます。NGC 3504やNGC 6946、またNGC 6951のスターバースト領域では、HCN/CO輝線強度比は0.12から0.18という値でした。これは、天の川の銀河面に分布する分子雲でのHCN/CO輝線強度比、0.01から0.02という値¹¹⁾より桁で高く、また、天の川銀河の中心領域（ここは星形成があまり活発でないと考えられています）における強度比、0.08¹²⁾よりもなお2倍程度高いことがわかります。さらに、文献も調べてみると、代表的なスターバースト銀河、M82やNGC 253の中心数100パーセク領域では、輝線強度比は0.2から0.3という、さらに高い値を示すことがわかりました。

一方、ポスト・スターバースト銀河、すなわち、星形成が不活発な天体の方はどうでしょう。図1のマップを調べると、NGC 4736の中心では、輝線強度比が0.04以下となっていました。これは、スターバースト銀河で観測される輝線強度比の1/3から1/7と小さく、ガスの密度は、むしろ銀河円盤領域にある分子雲に似ていることがわかります。

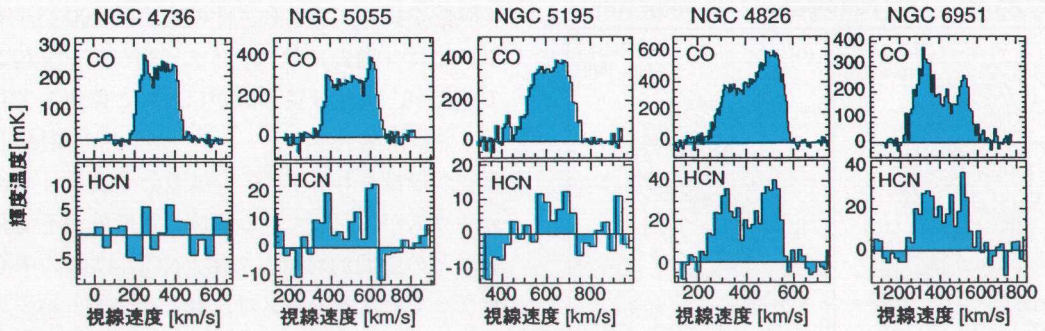


図4 野辺山45m鏡により得られた、CO(1-0)およびHCN(1-0)輝線のスペクトル²⁾。左の3天体がポスト・スターバースト銀河で、HCN輝線はほとんど検出できません。HCN/CO輝線強度比は、0.018から0.044という低いものでした。一方、比較サンプルとして観測した右2つの天体は、ポスト・スターバースト銀河と同じ程度のCO輝線強度を示しているにもかかわらず、HCN輝線がはっきりと検出されており（輝線強度比は0.066から0.13）、たいへん対照的です。

このような小さい輝線強度比は、45 m鏡を使った観測でも、独立に確認することができました（図4）。

さて、これを、星形成の指標と比較してみましょう。HCN/CO輝線強度比と対比させるべき量は、星形成率を分子ガス量（すなわちCO輝線強度）で規格化したもの、すなわち「星形成効率」です。図5をごらんください。両者はきれいに相関していることがわかります。この図はちょっと出来過ぎのような気しますが、ともあれ高密度分子ガスは、定量的にも、星形成効率を決める重要な要素であることが強く示唆されます。これまでも、星形成効率とHCN/CO輝線強度比の関係を示した仕事はありましたが¹³⁾、一方でそれと矛盾する結果も少なからず発表されており^{14), 15), 16)}、HCN輝線と星形成の関係については極めて混沌とした状況でした。しかし、私たちは、「高い空間分解能でHCN輝線の分布を調べたこと」および「星形成が不活発な天体をも選んで、深い観測を行ったこと」により、この問題に決着をつけるための方向性を示すことができたと考えています。いずれにせよ、今後、さらなるデータの拡充（COやHCN輝線はもちろん、H α とH β 輝線の撮像、S/N

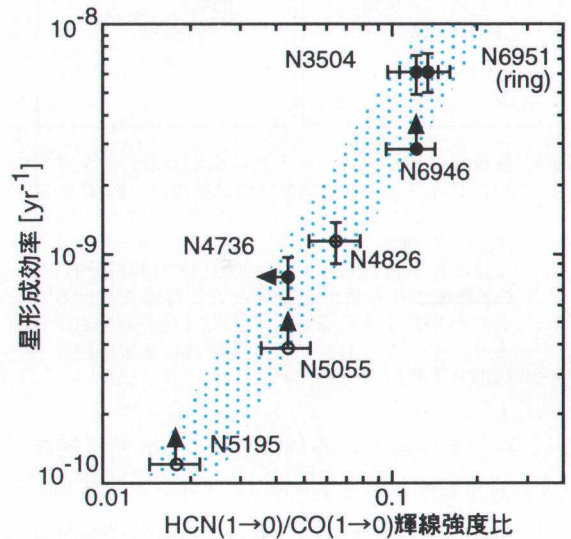


図5 HCN/CO輝線強度比（分子ガス中に含まれる、高密度分子ガスの割合の指標）と、星形成効率（単位質量あたりの分子ガスから作られる星の量）との相関²⁾。高密度分子ガスをより多く含む分子ガスの方が、より高い星形成効率を示しています。

のよい電波連続波のマップなど、信頼性の高い星形成のデータも)が望まれます。

もちろん、まだよくわからないところも少なくありません。たとえば、図2に示したNGC 5194(セイファート銀河)の中心ではHCN輝線が異様に明るく、HCN/CO輝線強度比は0.5にも達しています⁹⁾。このような例は他の活動銀河でも観測されています⁷⁾。これは、図5の相関とはどう結びつくのでしょうか。活動銀河核をとりまく高密度分子ガスは、「活動銀河の統一モデル」に登場する「掩蔽トラス」や、そこでの爆発的星形成(活動銀河核とスターバーストの共存)といった刺激的な話題とつながる可能性があり、さらに研究を進めているところです。

3. 高密度分子ガスの作り方

それでは、高密度分子ガスは、いかにして形成されるのでしょうか。

銀河中心から半径数100パーセク領域において、分子ガスの振る舞いに大きな影響を与え得る要因としては、「非軸対称ポテンシャル中におけるガス軌道の共鳴」、また「分子ガス自身の重力不安定性」といったものがあります。軌道共鳴領域では、異なるガスの軌道が互いに交差し、分子ガス雲どうしが激しく衝突すると予想されています。そのような激しい衝突が、低密度ガスを圧縮して高密度分子ガス雲をつくる、という可能性があります。一方、後者は、「自己重力的になったガス円盤においてジーンズ不安定性が成長し、そこで高密度分子ガスが作られていく」、というアイデアです。こちらの方は、先程とは逆に、分子ガスを静かにしておくほど高密度ガス形成が進むシナリオといことになります。

空間的に広がった星形成領域を持つNGC 6951は、実は、この問題を考える上でも、格好の教室でした。図3中、点線で示されている2本の線は、バー構造の中に走るダストレーンの位置を示しています。実は、この「ダストレーン、およびダスト

レーンにつながるCO輝線の2つのピーク」は、バー構造中における軌道共鳴がつくる典型的な構造と考えられます¹⁷⁾。しかし、そのような領域には、顕著なHCN輝線はみられず、輝線強度比の有意な上昇もないことから、「運動が余りに激しすぎる領域では、高密度分子ガスは作られていない」という可能性が示唆されます¹⁸⁾。

一方、高いHCN/CO輝線強度比が観測されたNGC 3504やNGC 6946の中心領域では、ガスの運動は比較的整った円運動であるため、Qパラメーターと呼ばれる量を評価して、そこでの重力不安定性を調べることができます。すると、これらの領域は「不安定性が成長できる環境」にあることがわかりました。また、HCN/CO輝線強度比が小さかったNGC 4736で同様の解析を行ったところ、今度はスターバースト領域とは逆に、分子ガスは重力的に安定だったのです。というわけで、どうやら、高密度分子ガスは「分子ガスを静かにしておく」と、重力不安定性により形成されていくものようです。

たいへん興味深いことに、IRASで多数発見された超高光度赤外線銀河での分子ガス分布や運動を、ミリ波干渉計により高い空間分解能で調べてみると、その中心部には、「比較的整った回転運動を示す円盤状の構造」が、普遍的に存在することがわかってきています¹⁹⁾。超高光度赤外線銀河は、ほぼ全て「衝突・合体など激しい相互作用を行っている銀河」であり、そこでの星形成も、しばしば「分子ガス雲どうしの激しい衝突」がトリガーとして考えられています。しかし、実は渦状銀河のスターバースト領域同様、「整然と回転するガス円盤において、重力不安定性の成長により高密度分子ガスが作られ、それが激しい星形成を引き起こしている」のかもしれませんが、超高光度赤外線銀河の分子ガス円盤が本当に重力的不安定性を起こしているかどうか、なお意見が分かれており、今後の追求が必要ですが、いずれにせよ、星形成の普遍的なメカニズムを突き止める上で、

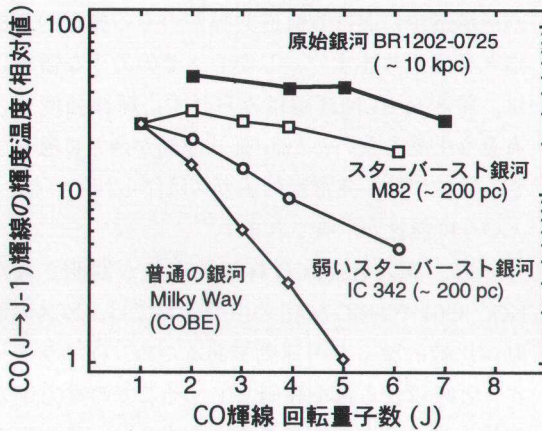


図6 原始銀河 BR1202-0725 で観測されたいろいろな CO 輝線の強さと、他の銀河との比較²³⁾。スターバースト銀河、M82 の中心領域では、エネルギー準位の高い CO 輝線まで励起されており、そこでは高密度分子ガスが卓越しています。一方、星形成の活発さが弱くなるにつれ、高励起の CO 輝線は弱くなります。ここで注目してほしい点は、「BR1202-0725 における CO 輝線の励起が、M82 の中心におけるそれとよく似ている」ということです。つまり、驚くべきことに、BR1202-0725 では、M82 のスターバースト領域（数 100 パーセント程度の領域）と同じ性質の分子ガス（すなわち、高密度分子ガス）が、銀河全体のスケールに広がっている可能性があります。

興味深いポイントだと思われます。

4. 高密度分子ガスの形成と スターバーストの進化

さて、このように「高密度分子ガスの形成」においては重力不安定性が重要な役割を果たし得ることがわかりました。もしこれが本当であるとすれば、いろいろな銀河の中心領域で観測される「HCN/CO 輝線強度比の違い」や「重力不安定性の違い」は、「スターバーストの進化」という時間軸に沿って統一的に説明できる可能性があります。まず、若いスターバーストでは、重力不安定性が成長し、高密度ガスが豊富に供給されるため、高い輝線強度比が観測されると考えられます。NGC 253 などは、まさにこのような時期でしょう。ところが、スターバーストが進化するにつれて、分子ガスは消費され、また超新星爆発などにより速度分散は上昇していきます。これは重力不安定性の成長を妨げる方向であり²⁰⁾、やがて高密度分子ガスの供給は止まるでしょう。すると、高密度分子ガスは消費される一方になり、ついに輝線強度比は減少しはじめます。天の川銀河の中心領域における輝線強度比は、スターバーストとポスト・スターバーストの中間的な値であり、しかも分子ガ

スは重力的に安定であることが知られています²¹⁾。ひょっとすると、天の川銀河は、高密度ガスの供給が停止して高密度ガスを減らし始めたばかりの時期にいるのかもしれませんが。そして、NGC 4736 や NGC 5195 など、輝線強度比が非常に小さくなっているポスト・スターバースト銀河たちは、残っていた高密度ガスを最後まで食いついてしまった、なれの果てなのでしょう。また逆に、「多量の分子ガスをもっていながら HCN/CO 輝線強度比が低く、しかし重力的に不安定である」というような分子ガス構造を持つ銀河がもし見つければ、それはひょっとしたら、今まさに高密度分子ガスの生産を開始し、これから爆発的星形成を始めようとウズウズしている「プレ・スターバースト銀河」かもしれません。

5. おわりに：

原始銀河の高密度分子ガスへ

最後に、究極のスターバースト状態にあると予想されている、銀河の祖先、いわゆる「原始銀河」における高密度分子ガスの話題を紹介させていただきます。

遠方天体になると、微弱な HCN 輝線等の観測はいよいよ厳しく、観測例自体がまだ多くありま

せん。しかし、かわりに赤方偏移した高励起の CO 輝線 (CO 1-0 輝線よりも高密度のガスをトレースします) をミリ波帯で観測し、分子ガスの密度の情報を得ることができます。たとえば、野辺山ミリ波干渉計が CO(5-4) 輝線の検出にはじめて成功した原始銀河候補天体 BR1202-0725²²⁾ において、いろいろな遷移の CO 輝線強度を調べ、これを他の近傍銀河での CO 輝線強度と比較してみると、非常に興味深いことがわかります。「BR1202-0725 で観測された CO 輝線の励起状態」は、「スターバースト銀河 M82 の中心数 100 パーセク以内にある分子ガス」の状況と、そっくりなのです (図 6)。ここで議論している BR1202-0725 の分子ガスは、10 キロパーセク、あるいはそれ以上というスケールであることに注意して下さい。M82 の中心領域に詰まっているような高密度分子ガスが、なんと銀河全体いっばいに分布し、壮大なスケールで一斉に爆発的星形成を起こしている・・・ひよっとすると、私たちは、そんな強烈な情景を目撃しているのかもしれない。

ただし、残念ながら、既存の干渉計は、原始銀河の内部構造まで分解するにはまだまだ非力です。現在、国立天文台が中心に推進している大形ミリ波サブミリ波干渉計 (LMSA) 計画や、その発展形である「ワールド・アレイ構想」を一日でも早く実現すべく、今まで以上に奮起したいと思います。

最後に、ここで紹介した研究を進めるにあたり、日頃様々な形でお世話になっている川辺良平、Baltasar Vila-Vilaro、阪本成一、坂本 和、濤崎智佳、太田耕司の各氏、そして、観測装置の運用および性能向上へ不断の努力を続けている観測所の皆さんに心より感謝します。

参考文献

- 1) Young J.S., et al., 1986, ApJ, 304, 443
- 2) Kohno K., 1998, PhD Thesis (Univ. of Tokyo)
- 3) Handa et al., 1990, PASJ, 42, 1
- 4) Ishizuki S., 1999, in AGN/Normal Galaxy Connection, eds. Kinney A., et al., (Elsevier, Amsterdam) in press
- 5) Sakamoto K., et al., 1999, ApJ, submitted
- 6) Tosaki T., 1995, PhD Thesis (Tohoku Univ.)
- 7) Kohno K., et al., 1999, in AGN/Normal Galaxy Connection, eds. Kinney A., et al., (Elsevier, Amsterdam) in press
- 8) Kohno K., et al., 1999, ApJ, 511, in press
- 9) Kohno K., et al., 1996, ApJ, 461, L29
- 10) Taniguchi Y., et al., 1996, ApJ, 467, 215
- 11) Helfer T., Blitz L., 1997, ApJ, 478, 233
- 12) Jackson J.M., et al., 1996, ApJ, 456, L91
- 13) Solomon P.M., et al., 1992, ApJ, 387, L55
- 14) Downes D., et al., 1992, A&A, 262, 424
- 15) Aalto S., et al., 1995, A&A, 300, 369
- 16) Helfer T., Blitz L., 1997, ApJ, 478, 162
- 17) Kenney J.D.P., et al., 1992, ApJ, 395, L79
- 18) Reynaud D., Downes D., 1997, A&A, 319, 737
- 19) Downes D., et al., 1998, ApJ, 507, 615
- 20) Sakamoto K., 1996, ApJ, 471, 173
- 21) Oka T., et al., 1998, ApJ, 493, 730
- 22) Ohta K., et al., 1996, Nature, 382, 426
- 23) Kawabe R., et al., 1999, in Highly Redshifted Radio Lines, eds. Carilli C., et al., (ASP, San Francisco) in press

Dense Molecular Gas and Star Formation in Galaxies

KOHNO Kotaro

National Astronomical Observatory, Nobeyama Radio Observatory

Abstract: Recent developments of millimeter-wave arrays and telescopes enable us to make high spatial resolution observations of dense molecular material in nearby galaxies. A wide variety of dense molecular gas distributions and an intimate link between dense molecular gas traced with HCN emission and massive star formation in galaxies are reported.