

氏 名 松 下 聡 樹

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第456号

学位授与の日付 平成12年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Millimeter-wave Interferometric Study of Nearby

Starburst Galaxies

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 小 林 行 泰

教 授 川 邊 良 平

助 教 授 大 石 雅 壽

教 授 中 井 直 正 (国立天文台)

教 授 牧 島 一 夫 (東京大学)

論文内容の要旨

宇宙にある無数の銀河は数十億～数千億個もの星々から構成されており、これらの星全ては分子ガスから作られる。従って様々な銀河で見られる星形成活動性、さらには銀河の進化は分子ガスと密接に関係していると考えられ、分子ガスの物理状態や様子を知ることはこれらの研究にとって非常に重要なことである。

これまで分子ガスの物理状態を知るトレーサーとしては主に HCN(1-0)/¹²CO(1-0) 輝線強度比が使われてきた。これは全分子ガスの量 (\approx ¹²CO(1-0)) に対する高密度分子ガス (\approx HCN(1-0)) の割合を示し、活発な星形成を行っている領域(スターバースト領域)ほど高密度分子ガスの割合が卓越しており (Solomon et al. 1992, ApJ, 387, L55)、この高密度分子ガスは分子ガスの重力不安定性で生じる事が分かっている (河野 1997, 東京大学博士論文) しかし、このような観測から得られるのは密度の情報のみであり、温度に関する情報は得る事はできない。

そのような中、私は温度情報を得られるトレーサーとして HCN(1-0)/¹³CO(1-0) 輝線強度比を見つけた。optically thick な高密度分子ガストレーサーの HCN(1-0) と、温度の上昇とともに optically thin となり輝線強度が弱くなる ¹³CO(1-0) とを組み合わせることで、高温 ($T_k > 100$ K) かつ高密度 ($n(\text{H}_2) \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$) の分子ガスのトレーサーとなる (HCN/¹³CO 比の値が1を超えるとこのような高温・高密度分子ガスをトレースする)。これを利用して、野辺山45m鏡で様々な銀河の HCN/¹³CO 比の観測を行ったところ IRAS 12 μm - 25 μm カラー ($\log(F_{12\mu\text{m}}/F_{25\mu\text{m}})$) と良い相関が得られることが分かった。この IRAS 12 μm - 25 μm カラーは 100 K 前後の熱いダストの存在を示すトレーサーであるので、このような熱いダストと高温・高密度分子ガスは密接に関係していることが示された。一方、IRAS 12 μm - 60 μm 及び IRAS 12 μm - 100 μm と HCN/¹³CO 比の相関は悪く、高温の分子ガスと低温のダストは物理的に関係していない事が示された。系内天体を見てみると、上記のような高い HCN/¹³CO 比を示す領域は、双曲分子流や超新星残骸の周囲のような衝撃波面に付随する分子ガスに見られる。エネルギーや影響を与える範囲等を考慮すると、超新星爆発がもっとも分子ガスの加熱に寄与していることが明らかになった。

典型的なスターバースト銀河と考えられている M82 の中心数百 pc 領域の分子ガスの様子を野辺山ミリ波干渉計観測で詳細に見てみると、ディスク面から垂直方向へ伸びる spur 状の分子ガスが銀河面のあちこちに見え、さらに内部には活発な星形成によって生じた expanding molecular superbubble の存在が確認された。この superbubble の中心には 2.2 μm の第2ピークがあり、それを構成する星団がスターバーストを起こしたと思われ、実際星の構成を計算してみると、superbubble を形成できる程度の超新星爆発を起こしたと推定された。またX線のピークもこの superbubble 内にあり、最近の観測では中質量の(大質量星からできるブラックホールよりは重く、銀河中心に見られるブラックホールよりは軽い)ブラックホールの証拠が見つかっており (Matsumoto & Tsuru 1999, PASJ, 51, 321)、これに関してもこの星団内での星同士の衝突によりその質量程度のものは作れることが示唆された。また分子ガスの物理状態や様子、ミリ波の連続波の情報より、superbubble の中心では今後の星形成が止まるとともに、周囲では分子ガスが superbubble の膨張により圧縮され星形成が活発になっている様子が示唆された。一方 M82 の分子ガスの全体的な物理状態を見てみると、星形成効率は高く、分子ガスも高い温度を持つが、高密度分子ガスの量は全分子ガス量と比較すると非常に少なく、ポスト・スターバーストに匹敵する少なさである事が分かった。これは M82 が

スターバースト期間の末期でポスト・スターバースト期間に差しかわかろうとしている銀河であることを示唆している。

もう一つの典型的なスターバースト銀河 NGC 253 を詳細に観測すると、高密度分子ガスの量は豊富で星形成効率は高いが、分子ガスの温度・スターバースト領域の広がりには小さかった。スターバースト銀河 NGC 3504 は NGC 253 と M82 の中間の分子ガス物理状態を示した。一方、ポスト・スターバースト銀河 NGC 4736 は全く異なる分子ガスの物理状態である低温・低密度の様子を示した。明らかに、スターバースト銀河とポスト・スターバースト銀河の分子ガスの物理状態は大きく異なり、またスターバースト銀河の中でも大きな広がりを持つことが明らかになった。また、これらの銀河の 110 GHz 連続波の研究より、この周波数の連続波は自由-自由放射で占められており、従って可視光域にある H α とは異なり、ダストによる吸収を受けない星形成効率の推定ができることを示した。

他の波長の観測より、スターバーストの時間スケールは NGC 253 が若く、M82 は晩期、ポスト・スターバースト銀河はスターバーストが終了した銀河であることが示唆されている。このことを元にして分子ガスの物理状態の進化を考えると、まず重力不安定性により高密度分子ガスが形成され大量の星が作られる。大質量星が爆発することにより、周囲の分子ガスが加熱される。星を大量に作るにつれ高密度分子ガスを消費し、密度が下がる。しかしその時点ではまだ大量の大質量星があるので、分子ガスの温度は下がらない。高密度分子ガスがなくなり、大質量星が爆発し尽くすと、分子ガスの温度が下がる。このように分子ガスの密度の上昇下降と温度の上昇下降はずれていることが示された。このように、分子ガスは星を生むが、周囲の星形成活動性の環境によって物理状態や様子が左右され、その後の星形成活動性を左右することが明らかになった。この事は、分子ガスの物理状態や様子と星形成活動性がお互いに影響しあって銀河が進化して行く事を良く示す証拠であろう。

論文の審査結果の要旨

本論文は、銀河のスターバースト現象に注目して行われた、ミリ波帯における観測的研究についてまとめたものである。観測は野辺山ミリ波干渉計および4.5 mミリ波望遠鏡を用いて行われ、申請者本人の取得した豊富なデータに基づいた研究が展開されている。分子ガスの物理状態を調べることで、スターバースト現象についての理解を深め、さらには一般的なスターバーストの進化についても明らかにしようとする意欲的なものであり、個別の銀河に対する詳細な観測と、一般的な議論を展開するための多数のサンプルに対する観測がバランス良く行われている。

以下本研究で得られた成果について概観する。

1) 高温高密度トレーサーとしての HCN(1-0)/¹³CO(1-0)の提案

申請者は初めに、銀河観測に適した高温($T > 100\text{K}$)高密度($n(\text{H}_2) \sim 10^5/\text{cm}^3$)の分子ガスのトレーサーとして HCN(1-0)/¹³CO(1-0)を提案する。これはすでに高密度トレーサーとして用いられていた HCN/¹²CO を応用発展させたもので、高温分子ガスのトレーサーとして申請者が始めて提案したものである。M51のミリ波干渉計を用いた観測で、中心核近傍に HCN/¹³CO 比の特に高い領域が見いだされ、ここでの活発な星生成活動が明らかになったことがきっかけとなっている。LVG(Large Velocity Gradient)を仮定したモデル計算により、M51の観測で見られるような HCN(1-0)/¹³CO(1-0)が1を越える分子ガスは、温度としては100 K以上であり水素分子密度が $10^5/\text{cm}^3$ という高温高密度の領域であることを示した。一方10個の系外銀河について得られた HCN(1-0)/¹³CO(1-0)値と銀河の暖かいダストの指標となる IRAS による $12\ \mu\text{m}$ と $25\ \mu\text{m}$ のフラックス強度比とが、良い相関を示すことを見出し、HCN(1-0)/¹³CO(1-0)トレーサーとしての有効性を実証している。続いて申請者は、系内天体の観測結果を検討し、これらスターバースト現象に関連した高温高密度のガスは超新星残骸周囲の衝撃波面に付随する分子ガスであることを示した。

2) 近傍スターバースト銀河の高密度分子線観測

M82 および NGC253 などの近傍のスターバースト銀河について、高密度分子ガスに注目した分子線観測をミリ波干渉計を用いて行った。M82では、ディスク面から垂直方向に伸びる spur 状の分子ガスが見られること、活発な星生成によって生じると思われる expanding molecular superbubble の存在が確認された。110GHz 連続波を新たに星生成効率のトレーサーとして用いることにより、中心部で高密度分子ガスが消費し尽くされ、この銀河がスターバーストとしては末期段階にあることを示した。

一方、NGC253では高密度ガスが中心部に集中し、星生成効率も高いことから、スターバーストとしては初期段階にあることが示された。これらの結果は高密度ガスを観測することによって、銀河毎に異なった様相を有効に探查できること、新たに提案された110GHz 連続波による観測が星生成効率を推定できることを示したものである。

3) スターバーストと銀河進化についての考察

高温ガスを示す HCN/¹²CO、星生成効率を示す 110GHz 連続波、高温高密度指標としての HCN/¹³CO などの振舞いを統合的に考察した。これらは、超新星による分子雲の加熱からはじまり、分子ガスの散逸、周辺へのスターバーストの伝搬など、全体的なスターバースト進化現象とこれらいくつかの指標を統一的に理解しようとするものであり、分子ガス

のアウトフローによる停止あるいはこれに付随した外縁部での圧縮による新たなスターバーストなどの現象を含んだものである。

以上の研究成果は新しい観測と新しい考え方に基づいて、銀河進化を考える上で最も重要な現象の一つであるスターバースト現象を解明しようとするものであり、天文学に貢献する多くの新しい知見が含まれており、研究成果として高く評価できる。今後の研究の発展を期待させるものがある。