

論文内容の要旨

論文題目

Variation of Molecular Cloud Properties across the Spiral Arm in the Nearby Spiral Galaxy IC 342

(近傍銀河 IC342 の渦状腕における分子雲の性質変化)

氏名 廣田晶彦

密度波が引き起こす銀河衝撃波は、渦巻き銀河の大質量形成領域の分布の形成に大きな役割を果たしていると考えられている。銀河衝撃波が渦状腕中で星間ガスを掃き集め、重力不安定性や小ガス雲同士の衝突合体等のメカニズムによって巨大分子雲 (GMC) を形成し、大質量星形成を引き起こす、というものが広く受け入れられている理論的予想である。この予想は **grand-design spirals** に見られる分子ガス、大質量星形成領域の分布を良く説明する。しかしながら、星間ガスの圧縮、GMC の生成、大質量星形成のトリガー、といった各過程の詳細は未だ不明であり、観測的な検証が進んでいるとは言い難い。これらに答えるためには、系外銀河の渦状腕内部の構造を分解でき、大質量星形成の母体である GMC を同定できるスケール(数十 pc)での高分解能観測が必須となる。

しかしながら、観測装置の制約から、これまでそのような研究を実際に行った例は皆無である。M31、M33 といったごく近傍の銀河であれば、GMC スケールの分解能を達成することは可能であるが、それらの銀河は強い密度波を有していないために、密度波を研究する上で適した天体であるとはいえない。

IC 342 は強い密度波を有し、かつ **face-on** に近く、豊富な分子ガス量 (3×10^9 太陽質量) を持つ銀河としては最も近傍に位置する銀河の一つである(距離 3.3 Mpc)。しかしながら、銀河面の背後に位置する、といったハンデからこれまで円盤部の観測が遅れてきた。本論は、この IC 342 に対して野辺山 4.5 m 宇宙電波望遠鏡、野辺山宇宙電波干渉計 (NMA) といった観測装置を用いて、これまで明らかにされていない GMC スケールの密度波作用を明らかにすることを目的とするものである。ガス量の豊富な銀河における密度波の作用を、ほぼ **face-on** に GMC スケールで俯瞰できる点でこの研究はユニークなものである。

IC 342 において、実際に銀河衝撃波による分子ガス雲の圧縮が行われていることを検証するために、4.5 m 鏡を用いた $^{13}\text{CO}(1-0)$ 輝線による広域マッピング観測を行った。観測領域は銀河中心部、棒状構造部、渦状腕を含む約 $5\text{kpc} \times 5\text{kpc}$ の領域である。H α 画像及び、同じく 4.5 m 鏡によって観測された $^{12}\text{CO}(1-0)$ 輝線観測のデータとの比較を行った結果、 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 輝線の分布は $^{12}\text{CO}(1-0)$ よりも H α のそれとよく一致すること、また、輝線強度比 ($R_{1312} = I(^{13}\text{CO}(1-0))/I(^{12}\text{CO}(1-0))$) は銀河内で一定ではなく、構造に応じて変化を見せることが明らかになった。

R_{1312} は銀河中心部で ~ 0.11 と比較的一様に低い値をとる一方で、半径 50 秒より外側の円盤部では $0.1 \sim 0.2$ の範囲でばらつきを見せる。円盤部での平均の R_{1312} は ~ 0.14 である。中心部における低い R_{1312} は、スターバースト領域と共存する、高温で希薄な分子ガス成分の寄与によるものと考えられる。このことは、Spitzer 衛星搭載の MIPS camera によって撮像された $70\mu\text{m}$ 、 $160\mu\text{m}$ の画像から推定されたダスト温度(modified black body function を仮定)の分布からも間接的に正当化でき得る。ダスト温度は、銀河円盤部では比較的一様で、22K 程度と分子ガス雲の典型的な温度をしめす一方で、中心部に向かって 30K 以上に上昇する傾向を見せ、またその動径方向の変化は R_{1312} のそれとよい相関を見せる。

銀河衝撃波による密度変化の兆候を探すために、円盤部の両輝線の分布をより詳しく調べたところ、

棒状構造終端部、および北東部の渦状腕に位置する巨大分子雲集合体(GMA、質量 $\sim 10^7$ 太陽質量)において、上流側により希薄なガスをトレースする ^{12}CO (1-0)輝線のピーク、下流側により高密度のガスをトレースする ^{13}CO (1-0)のピークがそれぞれ存在するといった位置関係が見られた。これは、密度波圧縮の予想と非常によく合致するものである。そこで、両構造(棒状構造終端部、北東部GMA)をトレースする方位角方向の、各トレーサーのプロファイルを作ったところ、上流に ^{12}CO (1-0)、下流に R_{1312} 、 $\text{H}\alpha$ のピークが位置する、といった関係が確認された。円盤部のガス温度($\sim 20\text{K}$)では、 R_{1312} は密度のトレーサとなることをふまえると、密度波の作用によって掃き集められた希薄な分子雲が腕を通過することによって、高密度の分子雲を形成を行っているとして解釈することができる。IC 342においては、少なくとも2カ所で密度波圧縮の兆候が見られていると結論付けられる。

以上の結果を踏まえた上で、NMA (Nobeyama Millimeter Array)を用いた北東部渦状腕の高分解能観測が行われた。この観測の目的は、GMCを同定できる分解能($\sim 50\text{pc}$)で渦状腕内部を分解することにより、果たして本当にGMCの性質変化が起きているのか、またその変化がどのようなものであるのかを探ることにある。観測輝線は ^{12}CO 、 ^{13}CO 輝線であり、観測領域はIC 342北東部に位置するGMAを含んだ $1.5\text{kpc} \times 1\text{kpc}$ の領域をカバーする。より定量的な議論を行うために、NMAデータと45m鏡データとのフーリエ空間上での結合が行われた。これによって、干渉計の弱点である低い空間周波数成分を落としてしまうmissing fluxの問題は克服されている。

得られた ^{12}CO 輝線の積分強度図は、GMAの中心部ではガス分布が幅 600pc 以上にわたって広がっているのに対し、その南部ではGMCが幅が 100pc 程度の細いリッジ状に分布していることを示す。また、 $\text{H}\alpha$ 、中間赤外の星形成トレーサとの比較を行ったところ、北部GMAでは星形成の兆候が見られないのに対して、南部のGMC群では活発な星形成活動が行われていることが明らかになった。また、 ^{13}CO ^{13}CO (1-0)輝線との比較を行うと、GMA中心部は低い R_{1312} (~ 0.06)を示す一方で、南部GMCは比較的高い値(0.2-0.3、天の川銀河GMCの中心部程度)を示すことがわかる。これらの特徴は、両構造が異なる進化段階にあることを推察させるものである。

より詳細な議論のために、 ^{12}CO (1-0)輝線の3次元データより、GMCが同定された。同定されたGMCは質量($0.4\text{-}3.5 \times 10^6$ 太陽質量)、線幅、サイズともに天の川銀河GMCと同程度である。また、最大ファクター4程度の分散を伴うものの、天の川銀河GMCに見られるLarson則に従う。星形成の有無によってGMCを二群に分け、その基本的な性質を比べたところ、星形成の付随したGMCはより質量が大きく、また重力ポテンシャルエネルギーが内部運動エネルギーよりも大きい、重力的に束縛された状態にあることが明らかになった。また、サイズ-線幅関係の比較は、星形成の付随しないGMCの方がより大きな線幅を持つ、すなわち内部乱流が大きいことを示す。星形成領域の付随したGMCの方がより下流側に位置することから、渦状腕を通過することで、GMCの性質は実際に変化する、ということが明らかになった。重力的束縛の度合いが線幅と相関係数0.7程度の相関を持つことから、内部乱流の散逸の度合いが、雲の進化を決定していると推察される。

GMC形成のメカニズムは、得られた観測結果を満たすものでなくてはならない。いくつかのメカニズムが考えられる中で、最もよく条件を満たすものは腕間部の分子雲が渦状腕前部の軌道集積、重力相互作用によって、集積合体をおこなうことで、巨大分子雲を形成する(Kwan & Valdes 1983, Tomisaka 1986, 1987等)というrandom coagulation modelである。これは、下流側に重いGMCが存在する、という条件と成長に必要なタイムスケール(腕を交差する時間よりも短い必要がある)をよく満たす。また、分子雲同士は非弾性的な衝突を行い、内部運動エネルギーを散逸させるため(Tomisaka 1987)、下流側でより小さな線幅を持ち、重力的に束縛された状態にあるという要請もみだす。

高分解能観測によって、星形成の付随した雲、していない雲を同定したことで、星形成の開始条件についての示唆も得られる。重力的な束縛の度合い(virial parameter)と雲内部の星形成率の関係を調べた結果、virial parameter < 1 の領域で星形成率は成長することが見いだされた。このことは、乱流の散逸がGMC内の星形成の確率をコントロールすることを示唆する。

本研究は、系外銀河における密度波の作用に、初めてGMCスケールでアプローチを行い、GMCの成長過程を最も少ない空間的不定性によって同定することに成功したものである。