

論文の内容の要旨

論文題目

Dense Molecular Gas and Star Formation in the Central Regions of Nearby Barred Starburst Galaxies

(近傍のスターバースト現象を伴った棒渦巻き銀河の中心領域における高密度分子ガスと星形成)

芝塚要公

我々の銀河系の分子雲の観測は、星は分子雲の希薄なエンベロープ領域ではなく、中心の高密度コアから形成される事を示している。この事は高密度分子ガスが星形成の直接的母胎であり、星形成活動において重要な役割を果たしていると考えられる。つまり活発な星形成活動であるスターバースト現象を理解するためには高密度分子ガスの観測は不可欠である。しかし一方、高密度分子ガスの指標として代表的な HCN 輝線の輝度はとても弱いため (CO 輝線の約 0.1 倍)、観測例はまだ少ない。数少ない観測も単一鏡をつかった低い分解能 (\sim a few kpc scale) が幾どを占め銀河全体を平均した研究にとどまっている。干渉計による数百 pc の観測例も数天体存在するが、高密度分子ガスと星形成領域の分布を空間的に分解し、「銀河の中心領域において、いつどこでどのように高密度分子ガスと星が形成されるのか?」を複数天体について議論している研究は未だ行なわれていない。

このような状況を踏まえ、本研究は、「近傍のスターバースト現象を伴った棒渦巻き銀河において、巨大分子雲数個分の空間スケール (数十から数百 pc) で、分子ガスの分布、運動、および物理状態を調べ、星の材料たる高密度ガスがどこでどのように生成されるか? そしてその高密度ガス生成と星形成の間の関係について調べる」を目的として行なわれた。観測には野辺山ミリ波干渉計を用いた。サンプルは近傍のスターバースト現象を伴った棒渦巻き銀河の 7 天体 (NGC 1097, NGC 3627, NGC 4527, NGC 6946, NGC 6951, IC 342, Maffei 2) であり、HCN 輝線で高密度分子ガス、CO 輝線で分子ガス全体の分布と力学を調べ、そして 3 mm 連続波を用いて星形成領域の分布とその星形成率を評価した。その分解能は 2 秒から 6 秒である。このサーベイは分解能、感度、そしてサンプル数において、現在もっとも最良の干渉計サーベイである。

まず最初に分子ガス全体をトレースする CO 輝線の分布が、すべてのサンプルにおいて offset ridge 構造 (offset した 2 本の腕状の構造) をもつ事が分かった。この分布は棒渦巻き銀河において一般的な構造で

ある。BARによる非対称ポテンシャル構造により中心領域の分子ガスの軌道が歪められたため、軌道が集中する領域が生み出され、そしてガスが集積が起きたものだと考えられている。

次に観測された HCN 輝線と 3 mm 連続波の分布を比較した結果、数十から数百 pc スケールにおいて、「HCN 輝線は大質量星形成領域 (3 mm 連続波によってトレースされる) と一般的に良い空間的相関がある事」を複数の銀河において初めて確認した。この事は、HCN 輝線がこの空間スケールにおいて高密度分子ガスのよい指標である事を示している。そしてその一方、一般的にガスの量をトレースすると考えられている CO 輝線の分布は、星形成領域と一致する事が少なかった。この事は、星形成において、分子ガスの量だけではなく、HCN 輝線がトレースする高密度分子ガスの存在、つまり分子ガスの物理状態が重要な役割を果たしていることを示唆している。

さらに我々は HCN/CO 輝線積分強度比 (以下 $R_{\text{HCN/CO}}$) を求め、その空間的变化と分子ガスの分布の比較を行なった。 $R_{\text{HCN/CO}}$ は分子ガス全体に含まれる高密度分子ガスの割合を示唆している。IC 342 を除くすべてのサンプルにおいて、 $R_{\text{HCN/CO}}$ の分布が、offset ridge では弱く (もしくは検出されない程弱い)、 $R_{\text{HCN/CO}}$ のピークが offset ridge の下流側にある事を我々は明らかにした (図 1 を参照)。offset ridge と $R_{\text{HCN/CO}}$ peak の位置のずれは、offset ridge の分子ガスが重力不安定性によって高密度ガスに成長するに足る距離であった。つまり、offset ridge に集積され下流に流れていくガス雲の内部で重力不安定性が成長し、その結果下流域で高密度分子ガスが生成され、このような offset のある分布が形成されたと考えられる。そのタイムスケールは、約 1×10^6 年であった。一方 offset が見られない IC 342 であるが、銀河の回転速度が他の天体に比べ桁近く速いため、重力不安定性が育った段階で、その位置が下流領域を越えてしまい、他の銀河でみられた位置的相関が IC 342 では成り立たないのだと考えられる。つまり IC 342 を含めサンプルの高密度分子ガスは重力的不安定性によって生成されていると考えられる。

生成された高密度分子ガスと星形成活動の関係を調べるために、我々は高密度分子ガスの割合と、星形成効率 (単位分子ガス質量あたりの星形成率) を比較し、その結果、空間的 (数十から数百 pc) な相関を複数の銀河で見出す事に成功した (図 2)。特に Maffei 2 では 60 pc スケールでの定量的な相関を示しており、これらの結果はこの $R_{\text{HCN/CO}}$ -SFE の相関が空間スケールにかかわらず存在している事を示唆している。そして、「これら BAR 銀河におけるスターバースト活動において、その燃料である高密度分子ガスの生成システムが重要な働きをしている」事を巨大分子雲数個サイズのスケールで初めて確認し示す事に成功した。

これらの結果をもとに、我々は「BAR 銀河における高密度分子ガスの生成および星形成」について次のようなシナリオを提唱する。

1. BAR ポテンシャルによってガスの軌道が歪められた結果、軌道集中領域が形成される。軌道集中領域には分子ガスが集積し、offset ridge を形成する。
2. 集積の際のショックや軌道集中による軌道間の強い潮汐力によってかき乱されている offset ridge 領域の分子雲では、その強い乱流のため分子ガスの自己重力が成長する事ができず、高密度分子ガスは形成されない。
3. しかし一方、offset ridge の下流領域ではショックもなく、潮汐力も弱いため、重力不安定性が十分成長し、高密度分子ガスが生成される。これが offset ridge の下流側において高密度分子ガスの割合が上昇している理由である。
4. 高密度分子ガスの割合の上昇とともに、星形成効率も上昇し、活発な星形成領域が offset ridge の下流領域に形成される。

我々は本サーベイ観測から、「重力不安定性による高密度分子ガスの生成とその高密度分子ガスからの星形成」という一連の過程がBAR 銀河における一般的な描像である事を示すことに初めて成功した。

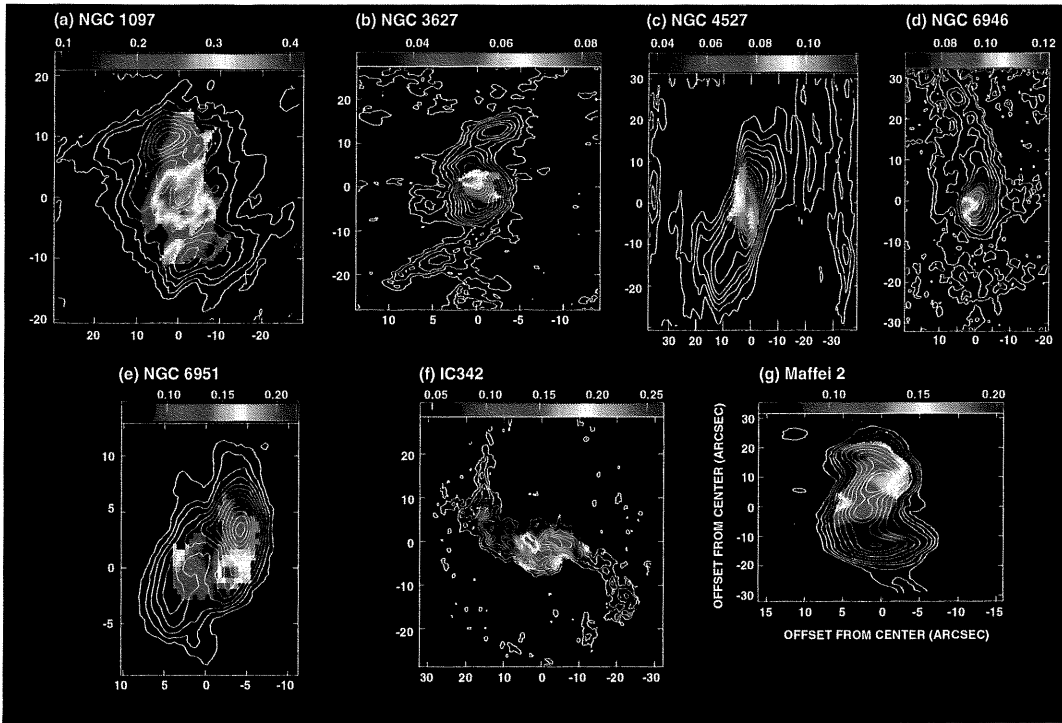


図 1: 図 2: 野辺山ミリ波干渉計により得られた、7つのスターバースト銀河の中心領域における CO 輝線 (コントア) の分布と $R_{\text{HCN}/\text{CO}}$ (カラスケール) の分布。CO 輝線は分子ガス全体の量、そして $R_{\text{HCN}/\text{CO}}$ は分子ガス全体に含まれる高密度分子ガスの割合を示唆している。 $R_{\text{HCN}/\text{CO}}$ の分布は offset ridge の下流側にピークを向かえている (IC 342 を除く)。ガス集積の場である offset ridge と高密度分子ガスの分布の offset は、集積されたガスが高密度分子ガスに生成するに必要な時間であると我々は結論付けた。実際、offset ridge の分子ガスが高密度分子ガスに成長するに必要なタイムスケールは、この offset のタイムスケールと一致している。

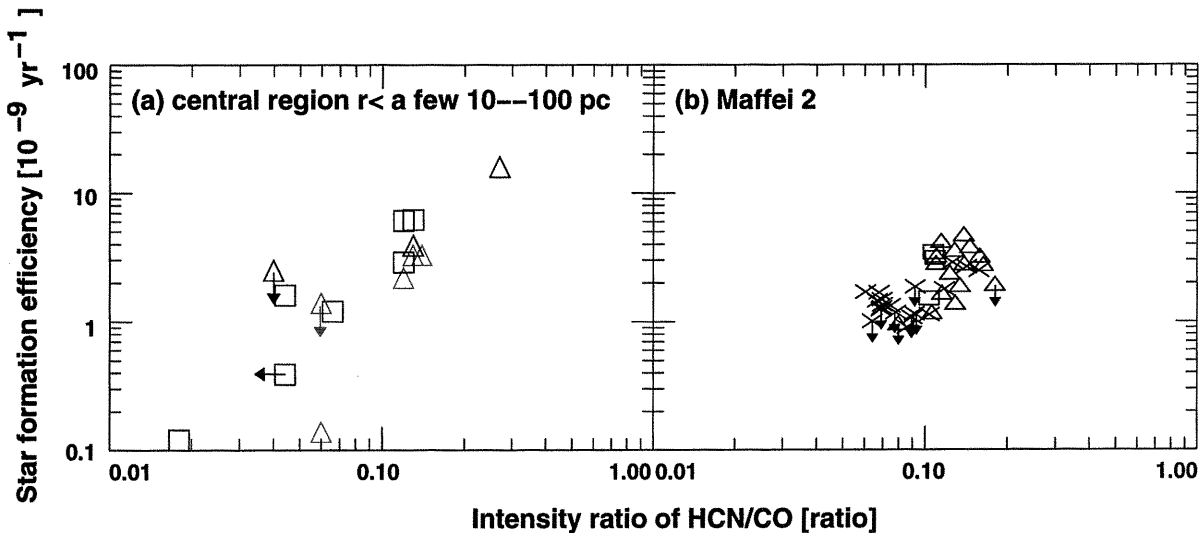


図 2: 図 1: 分子ガス全体に占める高密度分子ガスの割合 ($R_{\text{HCN}/\text{CO}}$) と星形成効率の相関。(a) 銀河中心の数十から数百 pc スケールにおける相関。 Δ と \square はそれぞれ星形成効率を 3 mm 連続波と $\text{H}\alpha$ で求めている。赤いプロットは我々の結果である。(b) Maffei 2 の中心領域における 60 pc スケールでの空間的な相関。この図は $R_{\text{HCN}/\text{CO}}$ -SFE の相関が空間スケールにかかわらず存在している事を示唆している。また系外銀河における本相関の空間分布を定量的に示したのは本論文が初めてである。