

論文内容の要旨

論文題目 Dense Gas Property and Star Formation
in the Nearby Barred Spiral Galaxy M 83
(近傍の棒渦巻銀河 M 83 における高密度ガスの性質と星形成)

氏名 村岡 和幸

銀河における星形成の「則」を支配する物理は何なのか。これは現代天文学に残された問題の一つであり、銀河進化を解明する上でも欠かせない。よく知られた星形成則としては、1959年に Schmidt により提唱され、長年にわたって今なお重要な研究課題となっている「シュミット則」がある。これは、星形成の材料となる分子ガスの総量と星形成率の間にはべき乗の関係が成り立っているというものだ。しかし、分子ガスには希薄な成分から星形成に直結した高密度の成分まで、様々な密度構造が存在する。従って、それらの区別をしない「分子ガスの総量」は星形成の詳細な物理を説明する上で不十分である。

星が誕生する際には、分子ガスが収縮し高密度化しているという状態を必ず経ている。従って、分子ガスの密度に着目して星形成活動との関係を探るのが自然な考え方だろう。中でも、全分子ガス量に対する高密度ガスの存在割合 (dense gas fraction) というパラメータが最近注目を集めている。ここでは高密度ガスを、水素分子の個数密度が 10^4 cm^{-3} を超えるようなガスとする。

2004年、Gao & Solomon は dense gas fraction の良い指標である HCN(J=1-0)/CO(J=1-0)輝線強度比と星形成効率 (単位ガス質量あたりの星形成率) の間に強い相関があることを示した (図1参照)。これは、同じ量の分子ガスがあった場合、そこで発生する星形成率を支配するのは、どれだけ多くの高密度ガスが存在しているか (=dense gas fraction) であることを意味する。

ただし、この結果は渦巻銀河や高光度赤外線銀河の中心領域のみ、若しくは銀河全体を積分したものであることに注意する必要がある。しかも、各データの空間分解能は $30''$ 以上 (多くの銀河について 1kpc より大きなスケール) と、決して良くはない。即ち、分子雲複合体 (GMA) のスケール (~数 100pc) や巨大分子雲 (GMC) のスケール (~数 10pc) でも同様の関係が成立するかは不明である。更に、銀河の中心領域と円盤領域とで同じ星形成則が成立しているのかも不明である。従って、dense gas fraction と星形成効率の相関についての研究を、(1) 高い空間分解能 (最低でも GMA スケール) においても、同様の相関が見られるかを調べる。(2) 銀河の円盤領域でも、同様の相関が見られるかを調べる。

という具合に拡張していく必要がある。

とはいえ、HCN(J=1-0)輝線は強度が弱く、近傍銀河でも円盤領域の広範囲のマッピングは難しい。今のままでは、特に(2)の課題を解決するのが難しい状況にある。

そこで本研究では CO(J=3-2)輝線を新たな高密度ガスのトレースとして用い、銀河の円盤領域において dense gas fraction と星形成効率の相関を調べることを試みた。CO(J=3-2)輝線は HCN(J=1-0)輝線と同様に密度が 10^4 cm^{-3} の高密度ガスをトレースするので、CO(J=3-2)/CO(J=1-0)輝線強度比は dense gas fraction の良い指標になると考えられる。また、CO(J=3-2)輝線は (物理状態にもよるが) CO(J=1-0)輝線と同程度の強度を持つので、円盤領域での輝線検出も容易である。

本博士論文では、近傍の棒渦巻銀河 M83 (距離 4.5Mpc) をサンプルとし、その中心から円盤領域にわたって dense gas fraction と星形成効率の相関を調べた。dense gas fraction の指標としては、 $\text{HCN}(J=1-0)/\text{CO}(J=1-0)$ 比と $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比を用いた。また、星形成率は減光補正を施した $\text{H}\alpha$ 輝線の光度から計算し、分子ガスの面密度は $\text{CO}(J=1-0)$ 輝線強度から計算した。両者の比が星形成効率となる。

まず、野辺山ミリ波干渉計 (NMA) を用いた $\text{CO}(J=1-0)$ 輝線、 $\text{HCN}(J=1-0)$ 輝線、および 95 GHz 電波連続波の観測を M83 の中心領域に対して実行した。その目的は、M83 中心のスターバースト領域において dense gas fraction (HCN/CO 比) と星形成効率の相関が 160 pc 程度の空間分解能で見られるかどうか探ることと、dense gas fraction と星形成効率の関係からスターバーストの性質に制限を加えることである。

観測の結果、dense gas fraction と星形成効率のマップはよく一致していたが、そのピーク位置には僅かなずれが存在していることがわかった。円盤から中心に向かう分子ガスの流れを考えたとき、dense gas fraction マップのピークは上流側、星形成効率マップのピークは下流側に位置していた。これは、高密度ガスが形成された後に星が生まれるという、星形成の流れを明瞭に捉えたものである (図 2)。また、図 1 にあるものと同様に横軸に HCN/CO 比、縦軸に星形成効率をとったプロットを作成した (図 3)。右上がりの相関に加えて、 HCN/CO 比が高いのに星形成効率が低いという点も散見された。これは、正に図 2 で見られた両者のピークのずれを反映したものである。これを元に、 HCN/CO 比-星形成効率プロット上での星形成 (スターバースト) 発現の流れを見出すとともに、スターバースト領域 (~300pc) を空間分解した上で、そこでの dense gas fraction と星形成効率の相関を初めて示した。

次に、M83 の中心から円盤領域に対してアタカマサブミリ波望遠鏡 (ASTE) を用いた $\text{CO}(J=3-2)$ 輝線観測を実行した。その目的は、M83 の中心から円盤領域にわたって $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比の空間変化を調べ、それが $\text{HCN}(J=1-0)/\text{CO}(J=1-0)$ と同様に dense gas fraction を反映しているかを調べること、および $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比が星形成効率と相関しているか調べることである。ここでは、 $\text{CO}(J=1-0)$ は既に野辺山 45m 電波望遠鏡で取得されていたデータを用いた。各データの空間分解能は、480 pc ほどである。

観測の結果、 $\text{CO}(J=3-2)$ 輝線は強度が強く、円盤領域でも明瞭に検出された。そして、銀河円盤まで含めた $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比の変化をとらえることに初めて成功した。比は銀河中心で 1 前後と高く、円盤領域では平均 0.6 程度にまで下がった。しかし、銀河回転に対して上流側で比が低く、下流側で高いという局所的な傾向も見られた。更に、M83 の各領域 (中心、棒状構造、渦巻腕など) について、横軸に $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比、縦軸に星形成効率をとったプロットを作成した。 HCN/CO 比の場合と同様に右上がりの相関が見られたが、各点のばらつきは大きく、また相関は直線的ではなく、 CO 比が高いところで星形成効率に超過が見られた (図 4)。

なぜこのような傾向が見られたのかを明らかにするため、理論計算を用いて、輝線強度比と分子ガスの物理状態 (温度、密度) がどのような関係にあるかを調べた。 $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比は確かにガス密度に対する依存性を持つ (即ち、dense gas fraction を反映する) が、その一方でガス温度に対する依存性も無視できないことがわかった (温度が高いと輝線比が上がる)。 HCN/CO 比は温度依存性がほとんどないため、図 4 のプロットにおける大きなばらつきは、ガス温度の違いで説明できることがわかった。また、 $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比は 1 近くになるとガス密度との関係が崩れ、一定以上ガス密度が上がっても (つまり dense gas fraction が上がっても) 輝線比は変化しなくなることもわかった。 CO 比が 1 付近のところで見られる星形成効率の超過は、このような性質が背景にある可能性が高い。

このように、 $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比単体では、dense gas fraction の指標としては些か精度を欠くことがわかった。そこで、その見積もり精度を上げるために、もう一つの輝線を適用した。それは $\text{CO}(J=1-0)$ の同位体である $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線である。これを加えることで、 $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比と $^{13}\text{CO}(J=1-0)/\text{CO}(J=1-0)$ 比という二つの輝線強度比を得ることができ、 $\text{CO}(J=3-2)/\text{CO}(J=1-0)$ 比の温度と密度の依存性を切り分けることに成功した。これを利用して分子ガス密度を求め、それを横

軸に、星形成効率を縦軸にとったプロットを作成した (図5の黒い四角)。点数こそ少ないものの、右上がりの明瞭な相関が見られる。更に驚くべきことに、NMA 観測から得られた HCN/CO 比をガス密度に変換して同じプロットを描くと (図5の赤い菱形)、両者はほぼ同じ相関に乗ることがわかった。これは、空間分解能が異なっても (150 pc と 480 pc)、また銀河中心から円盤まで場所が違っていても、ガス密度 (即ち dense gas fraction) と星形成効率の関係は変わらないことを意味する。即ち、分子ガス密度が星形成の強さ (星形成効率) をコントロールするという物理が M83 内部において普遍的なものであることを初めて明らかにした。

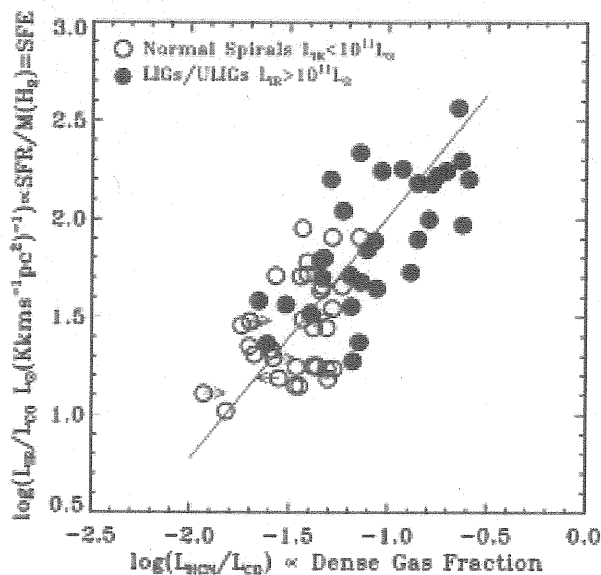


図1: Gao & Solomon (2004)によって示された、HCN/CO1 輝線強度比と星形成効率の相関。一桁以上にわたって相関が成立している。これは、星形成効率が dense gas fraction に依存している、という両者の関係を示したものである。

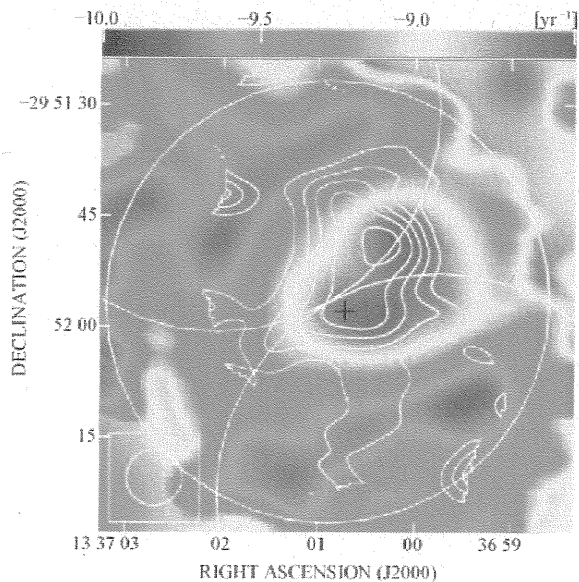


図2: M 83 中心において、HCN/CO 輝線強度比のマップ (白の等高線) に、星形成効率のマップ (擬似カラー) を重ねたもの。両者の分布は大まかに一致しているが、僅かな位置ずれが見られる。

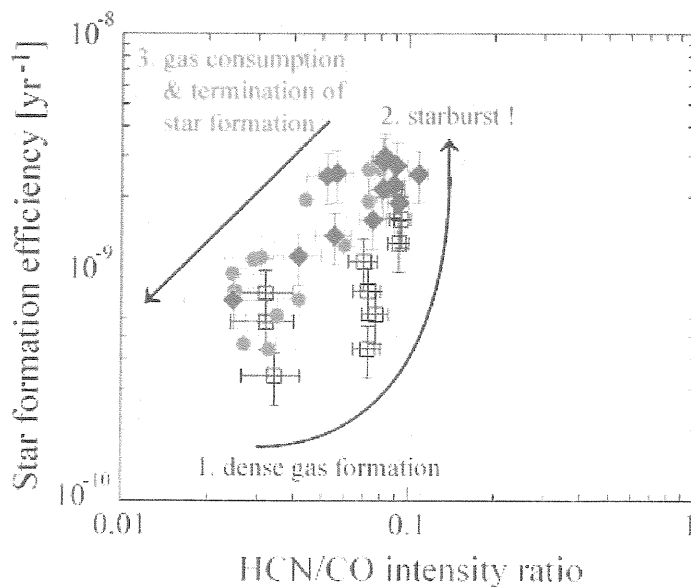


図3: M 83 中心において、HCN/CO 輝線強度比と星形成効率の関係をプロットしたもの。M83 の中心核 (赤や緑の点に対応) は、非常に明瞭な正の相関を見せている。一方、中心から北側に離れた場所 (黒の点: ちょうど図2で位置ずれが見られる場所に対応) では、HCN/CO 比が高いのに星形成効率は低くなっている。これは、星形成直前に高密度ガスが形成されつつある段階を反映したものであると考えられる。

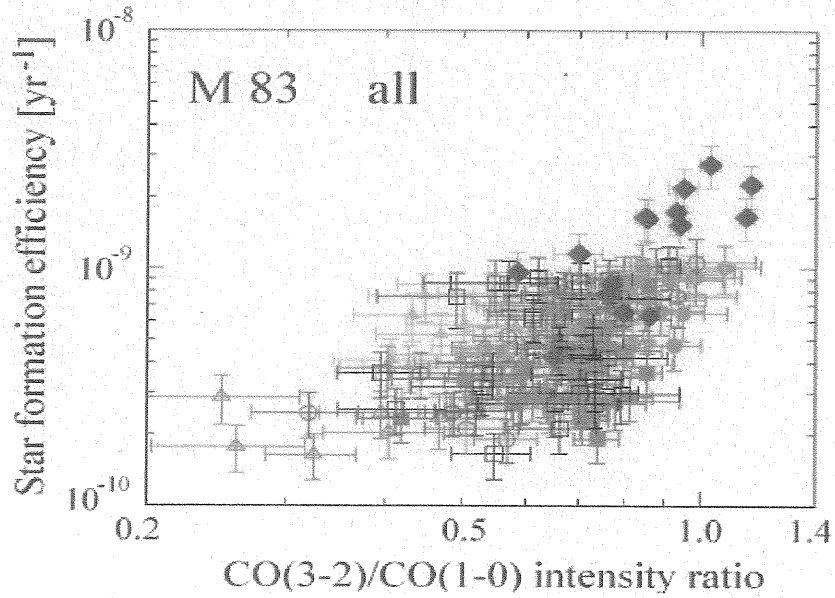


図4 : M 83 の中心から円盤領域にかけての、CO(J=3-2)/CO(J=1-0)輝線強度比と星形成効率の関係をプロットしたもの。全体的には正の相関があるように見えるが、その関係は直線的ではない。また、プロット点のばらつきが HCN/CO 比と星形成効率の相関に比べて大きい。CO(J=3-2)/CO(J=1-0)比は、HCN/CO 比に比べてガス密度に対する輝線比の飽和が早く、更にガス温度に対する依存性が大きいいため、明瞭な直線は見られない。

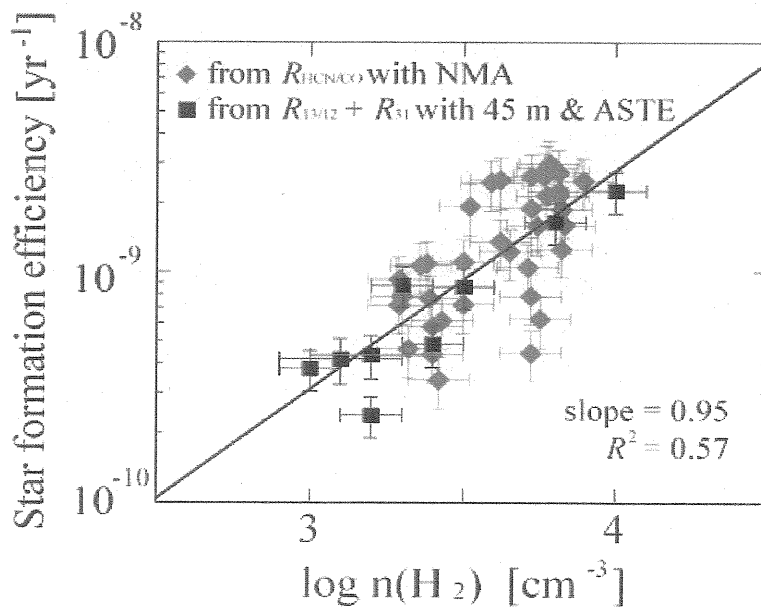


図5 : M 83 の中心や disk など様々な場所において、分子ガス密度 (dense gas fraction を反映) と星形成効率の関係をプロットしたもの。黒い点は、野辺山 45m 鏡や ASTE による観測から得た CO(J=3-2)/CO(J=1-0)比と ¹³CO(J=1-0)/CO(J=1-0)比の値から密度を推定したもの。赤い点は、NMA 観測で得た HCN/CO 比の値から分子ガス密度を推定したものをあらわす。興味深いことに、両者では観測領域や空間分解能がそれぞれ異なっているにも関わらず、ガス密度と星形成効率の相関はほぼ同じ直線に乗ることがわかった。