

論文内容の要旨

Effect of Low-Metallicity on Molecular-Cloud Chemical Composition: the Case of Local Dwarf Galaxies

(近傍矮小銀河で探る星間分子雲の化学組成への低重元素量の影響)

氏名 西村 優里

宇宙誕生から現在に至るまでの銀河形成や星形成の歴史を解明することは、天文学・宇宙物理学の中心課題のひとつである。その研究において鍵となるのは、恒星で合成された重元素（水素とヘリウムより重い元素）の増加である。初期宇宙は、現在の銀河系（天の川銀河）と比べ重元素量の少ない環境にあり、そこでの物質も絶対量が違うのみならず、組成の点で大きく異なっていたと考えられる。したがって、その特徴的な物質的環境を明らかにし、星形成に与える効果を検証することは、宇宙における星形成史の探求において極めて重要な意義がある。しかし、初期の（遠方にある）銀河での詳細な物質観測は、観測感度の制約で現実的には難しい。こういった状況下で、近傍にありながら重元素量の少ない矮小銀河は、この問題に取り組むための「実験室」としてこれまでも多くの知見をもたらしてきた。矮小銀河は、数十億個以下の恒星からなる小規模な銀河であるが、天の川銀河の近傍（局部銀河群）では、様々な形態の銀河の中で最も数の多い銀河である。低重元素量という特徴のある矮小銀河を調べることは、初期宇宙における銀河のみならず、それぞれに多種多様な特徴を持った銀河においても、星間物質と星形成活動を理解する上で大きな手がかりになる。

今日の電波観測では、分子雲の化学組成は、それ自体への興味とともに、物理状態を調べるための有用なツールとして、銀河系内の分子雲や近傍の活動銀河の観測によく用いられている。たとえば、炭素鎖分子の存在量は、時間の経過に従って系統的に減少するため、分子雲の年齢診断に用いられる。また、重水素化物は分子雲の温度の指標に、ケイ素や硫黄を含んだ分子は衝撃波領域のトレーサーに活用されている。一方、矮小銀河の分子輝線の観測は、電波の領域で通常最も明るい CO 分子の輝線に限られており、その他の分子についてはまとまった観測研究がほとんどなされていない。これは、矮小銀河では一般に分子輝線の強度が弱く、観測が難しいと考えられていたためである。このような状況の中、幸い、近年の観測感度の飛躍的向上により微弱な輝線の観測も可能になってきた。そこで本研究では、矮小銀河でも様々な分子輝線の検出に挑むことが可能であると考え、化学組成を調べる研究に取り組んだ。

化学組成の調査には、大口径電波望遠鏡を用い、大マゼラン雲 (Large Magellanic Cloud: LMC)、IC10、NGC6822 の 3 つ矮小銀河をターゲットに、3 mm 帯スペクトル線サーベイ観測（ラインサーベイ）を行った。観測はそれぞれ、オーストラリアの Mopra 22 m 望遠鏡で約 450 時間、野辺山 45 m 望遠鏡で 55 時間、スペインの IRAM 30 m 望遠鏡で 29 時間行った。これらの 3 つの銀河はいずれも天の川銀河の $1/3 - 1/2$ の重元素量で、さらに N/O 比で 1 桁小さいように（表 1）、特に窒素の存在量が少なくなっている。非常に興味深いことに、このラインサーベイにより、3 つの矮

小銀河のスペクトル強度パターンが極めて似通っていることが見出された。

LMC の観測には、星形成活動性の異なる 7 つの分子雲を観測ターゲットに選んだ。観測の結果、全ての分子雲で ^{12}CO , ^{13}CO に加え、CCH, HCN, HCO^+ , HNC, CS, SO を検出することができた。一方、 CH_3OH (メタノール) はいずれの分子雲でも検出されなかった。驚くべきことに、星形成活動性が異なるにもかかわらず、7 つの分子雲のスペクトル強度パターンは互いに類似していた。図 1(a) は、観測した 7 つを代表する N44C のスペクトルである。

続く IC10, NGC6822 の観測で得られたスペクトルが、それぞれ図 1(b), 1(c) である。IC10 では LMC と同様の分子種を検出 (^{12}CO 以外はこの銀河で初検出)、さらに NGC6822 では ^{12}CO , ^{13}CO , CCH, HCN, HCO^+ , CS を検出できた。NGC6822 では、輝線強度の弱さのため HNC, SO は未検出であるが、検出できた分子から判断すると、やはり IC10 と NGC6822 のスペクトルパターンも、LMC の 7 つの分子雲と類似のものであった。後で詳しく言及するように、IC10 でも NGC6822 でも、LMC と同様に CH_3OH が検出されなかったことは注目に値する。このようにして、重元素量の少ない矮小銀河における分子雲の化学組成を捉えることができた。

上述の矮小銀河の化学組成を特徴づけるため、天の川銀河や M51 のような重元素量の多い渦巻銀河の化学組成との比較を行った。図 1(d) には、比較のために M51 のスペクトルを示した。天の川銀河については、系外銀河と同じ空間サイズ (分子雲サイズ) の観測データがないため、天の川銀河内にある 3 つの希薄な分子雲 (CB17, CB24, CB228; Turner, 1995; Turner et al., 1997; 2000) の観測データの平均を取ることで、仮想的なスペクトルを作成した。その結果、以下のように、重元素量の少ない矮小銀河の化学組成の特徴を見出すことができた。

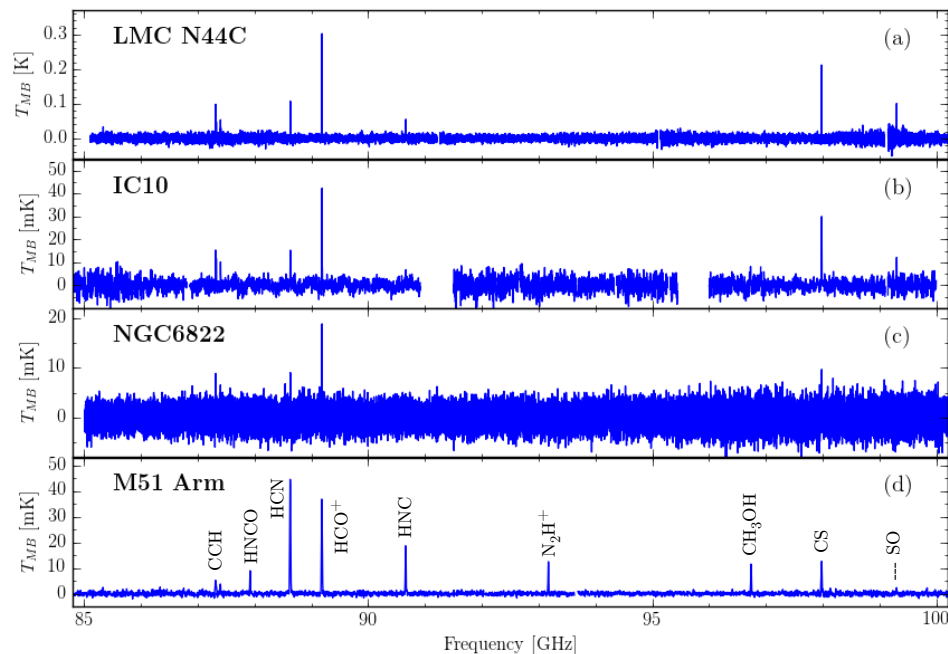


図 1 それぞれ (a) LMC, (b) IC10, (c) NGC6822, (d) M51 で観測されたスペクトル。参考のため、重元素量の多い渦巻銀河 M51 の渦状腕で観測されたスペクトル (Watanabe et al. 2014) も示す。

図 1 からも見取れるように、矮小銀河では窒素を含む分子 (HCN, HNC, N_2H^+ , HNCO) が少なくなっている。実際、 HCN/HCO^+ , HNC/HCO^+ 比は、M51 や天の川銀河と比べて少ない (表 1)。また、 N_2H^+ , HNCO は、M51 では比較的強い強度で検出されている一方、矮小銀河ではいずれの銀河でも検出されていない (図 1)。こうした窒素を含む分子の少なさは、矮小銀河で N/O 比が $1/2 - 1/7$ 程度と低いこと (表 1) を反映していると考えられる。活動銀河核では、衝撃波による加熱の影響で、特徴的に高い HCN/HCO^+ 比を示すと言われている (e.g., Aladro et al., 2015) が、本研究で観測した矮小銀河は、そのような加熱の影響を受けた領域ではない。そのため、 HCN/HCO^+ 比は、窒素の元素存在比の低さを直接反映していると考えられる。

もう 1 つの特徴は、矮小銀河では CCH が多く、 CH_3OH が少ないことである。これは窒素を含む分子のように元素の存在比では説明できない。実際、矮小銀河の C/O 比は渦巻銀河より低いのに対し、 CCH/HCO^+ 比は高い (表 1)。CCH は材料となる炭素イオン C^+ の多い光解離領域で豊富に存在するが、低重元素量環境では紫外線を遮る星間塵が

少ないため、この領域が分子雲の辺縁部に大きく広がり、それを反映して CCH が増加すると考えられる。CH₃OH が少ないことはこのような光解離領域の拡大を裏付ける。CH₃OH は星間塵上で CO の水素化により生成される。低重元素量環境ではそもそも星間塵が少ない上、光解離領域では温度が上がり、CO の星間塵への吸着が妨げられるため、CH₃OH は一層生成されにくくなる。CCH の増加、および CH₃OH の減少はともに、低重元素量環境での強い紫外線輻射場の広がりを反映していると言える。

表 1 各銀河における元素存在比と分子の柱密度比

		NGC6822	IC10	LMC	天の川銀河	M51
重元素量	Z/Z_{\odot}	1/3	1/3	1/2	~ 1	1
酸素の存在比	$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	8.1	8.2	8.4	8.7	8.7
元素存在比	N/O	0.039	0.04	0.036	0.12	~ 0.25
	C/O	0.50	0.30	0.33	0.60	~ 0.6
分子の柱密度比	$N[\text{HCN}]/N[\text{HCO}^+]$	$1.2^{+0.6}_{-0.7}$	$2.5^{+1.3}_{-1.4}$	$3.4^{+1.3}_{-1.8}$	$8.0^{+2.9}_{-4.6}$	$8.4^{+4.0}_{-4.6}$
	$N[\text{HNC}]/N[\text{HCO}^+]$	< 0.3	$0.4^{+0.2}_{-0.2}$	$0.8^{+0.3}_{-0.3}$	$3.4^{+1.3}_{-1.2}$	$1.6^{+0.6}_{-0.6}$
	$N[\text{CCH}]/N[\text{HCO}^+]$	$16.7^{+6.9}_{-5.3}$	$17.5^{+7.6}_{-5.8}$	$13.9^{+7.2}_{-5.3}$	$5.3^{+3.9}_{-2.4}$	$9.1^{+3.8}_{-2.9}$

Notes: 元素存在比は、NGC6822: Esteban et al. (2014), IC10: Magrini & Gonçalves (2009); Bolatto et al. (2000); Lequeux et al. (1979), LMC と天の川銀河: Dufour et al. (1982), M51: Bresolin et al. (2004); Garnett et al. (2004) に基づく。分子の柱密度比は、H₂ 密度を $3 \times 10^3 - 1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 、ガスの運動温度を 10 – 50 K と仮定した上で、非局所熱力学平衡計算 RADEX (van der Tak et al., 2007) を用いて求めた。天の川銀河は、Turner (1995), Turner et al. (1997, 2000) による CB17, CB24, CB228 の観測、M51 は、Watanabe et al. (2014) による P1 の観測をもとに、上記の条件のもとで柱密度を計算した。比の誤差範囲は、仮定した H₂ 密度と温度の範囲により付けられている。

このように、重元素量の少ない矮小銀河では、化学組成の特徴として、元素存在比を反映して窒素を含む分子が減少すること、強い紫外線輻射場の広がりにより CCH が増加し CH₃OH が減少することがわかった。

これらの矮小銀河の観測では、空間分解能はおよそ分子雲スケール (数十 pc の大きさ) である。これらの観測から得られたもうひとつの重要な知見は、こうした分子雲スケールの観測では、その領域固有の局所的な星形成活動の影響がスペクトルパターンには反映されなくなることである。これを検証するため、野辺山 45 m 望遠鏡を用いて、銀河系内の W3(OH) をターゲットに、9.0 pc × 9.0 pc の 3 mm 帯マッピング観測を行った。その結果、9.0 pc 四方平均のスペクトルは、ホットコアのスペクトルと比べて、コア付近に存在する分子種 (CH₃OH, HC₃N, CH₃CCH) は輝線強度が弱くなるが、全体的に希薄ではあるものの広い領域に渡って存在する分子種 (CCH) は、輝線強度が相対的に強くなるという 2 つの特徴が見られた。また、分子雲のどの領域が平均スペクトルにどう寄与するかを調べるため、¹³CO の積分強度で領域を 5 つに分け、それぞれの領域のスペクトルを作ったところ、高密度のホットコアそのものよりも、比較的密度の低い領域と思われる周囲に広がった領域が、9.0 pc 四方平均のスペクトルと似た特徴を示すことがわかった。

さらに、このような広がった領域の物理状態はどのようなものか考察するため、化学モデル計算によるスペクトルパターンとの比較を行った。モデル計算では、密度、温度、星間減光、宇宙線イオン化率、硫黄の存在量、経過時間の 6 つをパラメータとし、計 216 通りのスペクトルパターンを検討した。これにより、密度が $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 以下、温度が 10 – 20 K、星間減光が 4 等以上、宇宙線イオン化率が 10^{-17} s^{-1} 、硫黄の水素に対する存在比が 8×10^{-8} 、経過時間が 10^5 年の条件で、観測スペクトルを最もよく再現することがわかった。これは全体を平均して観たとき、分子雲は比較的低温・低密度で、適度に光が遮られた環境にありながら、化学的には比較的若い状態を維持していることを意味する。

以上のように、矮小銀河の化学組成の観測的研究を通じ、重元素量の少ない環境で特徴的な化学組成を見出すことができた。また、そのような分子雲スケールの観測では、得られるスペクトルは分子雲全体を平均した化学組成になるため、局所的な星形成活動の影響を受けず、その銀河固有の性質を調べられることもわかった。銀河系内の分子雲の広領域マッピング観測や、化学モデル計算との比較により、こうした分子雲全体を平均したスペクトルは、分子雲コアではなく、その周囲に広がっている低密度の領域の化学組成を反映していることも確かめられた。これらの知見は、近傍の系外銀河の化学組成研究にはもちろん、今後の研究の進展が期待される遠方の銀河の化学診断にも活用できると期待している。